结核感染控制

结核病预防实践手册　2024年　第二版

UCSF
University of California
San Francisco
加利福尼亚大学
旧金山分校

CURRY
INTERNATIONAL
TUBERCULOSIS
CENTER
柯里国际结核病中心
（CITC）

结核感染控制

结核病预防实践手册 | 2024 年

第二版

UCSF
University of California
San Francisco
加利福尼亚大学
旧金山分校

CURRY
INTERNATIONAL
TUBERCULOSIS
CENTER
柯里国际结核病中心
（CITC）

柯里国际结核病中心（CITC）是美国加利福尼亚大学旧金山分校的一个项目，由美国疾病预防控制中心（CDC）资助。本教育材料的编写工作通过合作协议 U52PS910247 获得资助。本出版物表达的观点不一定反映美国卫生与公共服务部的官方政策，所提及的商品名称、商业行为或机构也不代表美国政府予以认可。

封面图片说明：N95 防护口罩图片仅作为样例使用，并不表示 CITC 对特定制造商的防护口罩品牌或型号的认可。图片来源：CITC。

允许出于非营利性教育用途以及图书馆复制和发行。

推荐引用格式：

柯里国际结核病中心（Curry International Tuberculosis Center），2024 年：《结核感染控制：结核病预防实践手册》（*Tuberculosis Infection Control: A Practical Manual for Preventing TB*）[具体页码]。

本出版物可在柯里国际结核病中心网站获取：
https://www.currytbcenter.ucsf.edu/products/view/tuberculosis-infection-control-practical-manual-preventing-tb

欢迎对本出版物提出反馈和意见，请发送电子邮件至：
CurryTBCenter@ucsf.edu。

设计：Edi Berton 设计工作室

中文版序言一

结核病感染控制是结核病防控乃至公共卫生领域的重大课题，更是守护医护人员安全与患者健康的重要防线。近年，我们在应对呼吸道传播疾病的战役中，越来越意识到感染控制的重要性。但遗憾的是，国内在结核病领域长期以来缺乏兼具科学性、系统性、实操性的工作手册，使得许多医疗机构在落实感染控制措施时面临“知其重而难为”的困境。值此之际，我们怀着使命将《结核感染控制：结核病预防实践手册》（第二版）译介给中国的读者，以期填补这一关键空白。

本手册原著由柯里国际结核病中心（CITC）汇集全球顶尖专家智慧编纂而成，其价值不仅在于理论的权威性，更在于对实践痛点的精准回应。手册以三级干预措施为核心框架，从行政控制的流程优化，到环境控制的工程革新（如通风系统设计、紫外线杀菌技术应用），再到个人防护装备的科学使用，层层递进地构建起结核感染预防和控制的立体屏障。尤为可贵的是，手册用图文并茂、直观易懂的形式，将复杂的技术原理转化为可操作的解决方案，为相关领域的专业人员提供了“看得懂、用得上”的指南。

本手册的翻译工作，是我们对中国结核病感染控制迫切需求的积极响应。我们力求在忠于原著科学严谨性的基础上，使表述更贴合中文语境，让前沿的感染控制策略真正服务于中国的医疗卫生机构和社区照护场所。

在此，谨向柯里国际结核病中心及所有原著作者致以深切谢忱！感谢贵团队以开放之心支持本手册的翻译工作，令这份凝结国际智慧的宝贵经验得以惠及中国实践者。感谢终止结核传播工作组（ETTi）在本手册中国化过程中给予的积极支持和指导。感谢刘宇红教授、成君教授领衔的翻译团队，用严谨务实的工作态度将这一部巨著在中国独特的医疗语境中精准落地。我们期待这本手册能成为引玉之砖，推动国内感染控制标准与实践水平的持续提升。

李首都医科大学附属北京胸科医院 副院长
（WHO 结核病研究和培训合作中心）
2025 年 7 月

中文版序言二

作为《结核感染控制：结核病预防实践手册（第二版）》的英文版原著者，柯里国际结核病中心（CITC）谨向首都医科大学附属北京胸科医院致以诚挚的祝贺和衷心的感谢，感谢其伙伴精神与远见卓识，牵头组织了本手册中文版的翻译工作。

结核病仍然是全球健康的重大威胁。每年，全球新增结核病例超过一千万例。在医疗机构实施有效的感染控制对于保护医务人员和患者免受结核传播至关重要。本手册英文版第二版于 2024 年发布，它结合科学证据与实用解决方案，旨在降低医疗机构内的结核病传播风险。手册的优势在于提供了清晰、可操作的指南和策略，并能够适应不同环境和条件。我们鼓励本手册的使用者根据当地需求和资源情况对这些策略进行合理的调整和应用。

除首都医科大学附属北京胸科医院外，CITC 还要感谢“终结结核传播工作组”（ETTi）在整个手册本地化过程中提供的专业指导。CITC 同时也对翻译团队的高效和敬业精神表示赞赏，确保了此中文版手册的及时交付和文本的准确性。

我们期望本手册能够为提升中国医疗机构的感染控制能力提供帮助。我们热忱欢迎与中国合作伙伴的协作，并赞赏他们致力于通过共享专业知识和创新解决方案，共同推进消除结核病的目标。

英文原著编者

Lisa Chen, MD
首席研究员 / 医学主任
柯里国际结核病中心
加州大学旧金山分校
肺病与危重症医学科 教授

Paul Arthur Jensen, PhD, PE, CIH
环境 / 机械工程师
Final Approach 公司联合创始人兼独立顾问
美国疾病控制与预防中心（退休）

柯里国际结核病中心
加州大学旧金山分校

2025 年 7 月

中文版序言三

作为“终结结核传播—推动经空气传播疾病感染防控工作组”（ETTi）的主席，我荣幸地祝贺《结核感染控制：结核病预防实践手册（第二版）》中文版的问世。这一里程碑不仅标志着全球重要的感染控制知识的成功本地化，也体现了 ETTi 在加强结核感染控制、阻断结核病传播方面坚定不移的承诺。

我们首先要感谢原著者柯里国际结核病中心（CITC）在开发这一重要手册方面所做的开创性工作。该手册着重强调将科学性、严谨性与工作实践相结合，只有当知识和指南可获得、可调整、可应用时，我们才能更有效地保护医护人员和我们的社区。

我们还要向首都医科大学附属北京胸科医院致以深切的谢意，感谢其富有远见的领导力以及对本次翻译项目的大力支持。特别要感谢以 ETTi 核心工作组成员刘宇红教授和成君教授为核心的翻译团队，他们的专业性确保了本手册能在中国独特的医疗环境中得到精准传递。

最后，致中国的感染控制实践者们：愿本手册赋能您们将感染控制理论转化为日常工作的实践，希望手册的循证框架落实在您们实际工作的每一步，让我们更接近这样一个世界：在那里，没有医务工作者在救治病患时染病；在那里，每一个社区都能自由呼吸健康的空气。

Dr. Grigory Volchenkov

主席

终止结核病伙伴组织

终结结核传播—推动经空气传播疾病感染防控工作组（ETTi）

2025 年 7 月

翻译单位

首都医科大学附属北京胸科医院

中国疾控中心结核病防治临床中心

世界卫生组织结核病研究和培训合作中心

译者团队

主审

李　亮（首都医科大学附属北京胸科医院、中国疾控中心结核病防治临床中心）

主译

刘宇红（首都医科大学附属北京胸科医院、中国疾控中心结核病防治临床中心）

成　君（中国疾控中心结核病预防控制中心）

译者（按姓氏笔画排序）

付雷雯（首都医科大学附属北京胸科医院、中国疾控中心结核病防治临床中心）

孙玙贤（首都医科大学附属北京胸科医院、中国疾控中心结核病防治临床中心）

李志丽（首都医科大学附属北京胸科医院、中国疾控中心结核病防治临床中心）

杨　星（云南省疾病预防控制中心）

陈　卉（中国疾控中心结核病预防控制中心）

张立杰（首都医科大学附属北京胸科医院、中国疾控中心结核病防治临床中心）

张灿有（中国疾控中心结核病预防控制中心）

夏　岚（四川省疾病预防控制中心）

舒　薇（首都医科大学附属北京胸科医院、中国疾控中心结核病防治临床中心）

秘书

张立杰（首都医科大学附属北京胸科医院、中国疾控中心结核病防治临床中心）

目 录

致谢 …… vi

引言 …… x

缩略语 …… xiii

1. 行政控制 …… 1.1

概述 …… 1.2

指定结核感染预防与控制负责人 …… 1.4

开展机构结核感染预防与控制相关风险评估 …… 1.5

制定结核感染预防与控制计划 …… 1.7

工作人员基线结核病筛查和评估 …… 1.9

工作人员培训和教育 …… 1.9

患者、服务对象和访客教育 …… 1.10

设置适当的呼吸卫生标识并支持落实呼吸卫生措施 …… 1.10

落实分诊和经空气传播防护规程 …… 1.11

确保设备的适当清洁 …… 1.11

与临床和实验室服务部门协作 …… 1.12

与当地卫生部门合作 …… 1.13

参考资源 …… 1.14

参考文献 …… 1.17

2. 环境控制 ····· 2.1

概述：环境控制 ····· 2.3

第 1 部分：通风

利用通风系统降低结核传播风险 ····· 2.6

- 气流流速和每小时换气次数（ACH）
- 室内空气清除
- 利用定向气流减少结核传播
- 在人员密集场所运用定向气流和稀释通风
- 检查定向气流和气流模式

机械通风 ····· 2.15

- 负压：经空气传播感染隔离房间（AIIRs）
- 正压：防护环境
- 局部通风方法：采集亭、隔离帐篷和通风罩
- 暖通空调（HVAC）系统

  HVAC 系统的配置形式

  HVAC 系统的组件

  - 空气过滤器
  - 改用更高效率的滤芯

  HVAC 系统的检查

  现有 HVAC 系统的优化

  新建 HVAC 系统的设计
- 案例研究：HVAC 系统

自然通风 ····· 2.43

- 风力驱动、浮力驱动和混合模式的自然通风
- 风扇在自然通风中的应用
- 案例研究：自然通风和排风扇
- 在装有 HVAC 系统的房间内使用风扇

室内空气净化器（RACs） ····· 2.50

- 洁净空气输送比率（CADR）
- RAC 的布置和使用注意事项
- RAC 的选择
- RAC 滤芯的例行维护
- 案例研究：室内空气净化器（RAC）

关于通风的附录 ····· 2.58

- A. 室内空气清除时间计算工作表：示例
- B. 经空气传播感染隔离房间（AIIR）压力监测清单
- C. 最低效率报告值（MERV）参数
- D. HVAC 系统信息汇总表：示例
- E. 医疗卫生机构各区域通风的推荐

参考资源 ····· 2.66

参考文献 ····· 2.67

第 2 部分：紫外线 C 波段（UVC）

概述 ····· 2.67

利用 UVC 技术降低结核传播风险 ····· 2.69

- 什么是 UVC？如何应用?
- UVC_{254} 的有效性
- UVC_{254} 暴露、安全性和维护注意事项

UVC 的应用 ····· 2.77

- 上层空间 UVC
- HVAC 系统中的空气照射（管道内 UVC）
- 室内空气净化器（RACs）中的空气照射
- 直接照射（全屋照射）

关于 UVC 的附录 ····· 2.90

- A. 上层空间 UVC_{254} 剂量计算工作表和装置选择
- B. UVC_{254} 暴露剂量计算
- C. 选择上层空间 UVC_{254} 装置：典型场景
- D. UVC_{254} 成本考虑因素
- E. 管道内 UVC_{254} 剂量计算

参考资源 ····· 2.103

参考文献 ····· 2.105

3. 个人防护装备 ····· 3.1

概述 ····· 3.2

为什么需要佩戴防护口罩? ····· 3.2

谁应当佩戴防护口罩? ····· 3.3

医务人员应当在哪些场所佩戴防护口罩? ····· 3.4

哪些防护口罩最适合防护结核分枝杆菌? ····· 3.4

- N95 防护口罩属于过滤式防护面罩呼吸器的一种
- 弹性半面罩呼吸器
- 动力送风过滤式呼吸器

什么是适合性测试？何时应进行这项测试? ····· 3.9

如何判断防护口罩是否已获得 CDC/NIOSH 认证? ····· 3.10

参考资源 ····· 3.13

参考文献 ····· 3.14

4. 经空气传播感染隔离房间 …… 4.1

什么是经空气传播感染隔离房间（AIIR）? …… 4.2

AIIRs 的行政控制措施 …… 4.3

AIIRs 的环境控制措施 …… 4.3

- 建筑设计要求
- 合适的气流流速和负压值确定
- 气流模式和空气混合
- 排风管道系统和排风口
- AIIR 的缓冲间和卫生间设置要求
- AIIR 的环境控制情况监测

将现有房间升级改造为 AIIR …… 4.17

- 调整 HVAC 系统
- 增设室内空气净化器
- 案例研究：配备专用卫生间的 AIIR
- 案例研究：AIIR 第 1 部分
- 案例研究：AIIR 第 2 部分

参考资源 …… 4.28

参考文献 …… 4.29

5. 诊所 …… 5.1

引言 …… 5.2

诊所的行政控制措施 …… 5.3

- 诊所的结核感染预防与控制计划
- 机构的结核病风险评估和分级
- 结核病筛查方案

诊所的环境控制措施 …… 5.8

- 机构环境控制措施描述

基于结核病风险的诊所环境控制措施 …… 5.9

- 高风险操作的环境控制措施

诊所的呼吸防护措施 …… 5.13

附录 …… 5.15

- A. 美国疾病预防控制中心医务人员个人基线结核病风险评估表

参考资源 …… 5.16

参考文献 …… 5.19

6. 流浪人员收容所 6.1

背景和需求概述 6.2

为什么结核病在流浪人员收容所是一个突出问题 6.4

降低流浪人员收容所内的结核传播风险 6.5

- 行政控制措施
- 环境控制措施
- 呼吸防护

参考资源 6.13

参考文献 6.15

致谢

衷心感谢以下人员为本项目所作出的宝贵贡献和指导：

第二版撰稿人

Heidi Behm, RN, MPH
结核病控制官员 / 护理顾问
结核病项目
俄勒冈州卫生局
俄勒冈州波特兰

Robert Belknap, MD
丹佛都会区结核病项目主任
丹佛卫生和医院管理局
科罗拉多大学感染病学科副教授
科罗拉多州丹佛

Gary Blackwelder, BArch（已退休）
建筑师
全球艾滋病和结核病司
美国疾病预防控制中心
佐治亚州亚特兰大

Karen Brudney, MD
美国疾病预防控制中心前结核病高级专家顾问（2013–2019）
纽约州纽约

Kevin Fennelly, MD, MPH, ATSF
高级研究临床医生
肺科
院内研究司
国家心肺血液研究所 (NHLBI)
美国国立卫生研究院 (NIH)
马里兰州贝塞斯达
免责声明：这些观点和建议仅代表个人意见，不代表美国国立卫生研究院或其他组织机构的官方政策或建议。

Lauren Lambert, MPH
流行病学家
监测、流行病学和疫情调查处
监测组
结核病控制司
美国疾病预防控制中心
佐治亚州亚特兰大

Stephen Martin, Jr., PhD, PE
美国公共卫生署上校
高级研究工程师
现场研究处
呼吸健康司
美国国家职业安全卫生研究所
美国疾病预防控制中心
西弗吉尼亚州摩根敦

Isabel Milagros Ochoa Delgado, MPH
建筑师，城市规划师
卫生服务管理研究所（MINSA）基础设施和设备部主任
秘鲁

Michelle Pearson, MD（已退休）
医学流行病学家
全球艾滋病和结核病司
美国疾病预防控制中心
佐治亚州亚特兰大

Carrie Tudor, PhD, MPH, RN
SMART4TB 项目副主任
研究助理
约翰霍普金斯大学护理学院
马里兰州巴尔的摩

Richard Vincent, MSc, BSArch
主管
医学部
普通内科学科
西奈山伊坎医学院
纽约州纽约

编辑

Paul Arthur Jensen, PhD, PE, CIH
环境 / 机械工程师
Final Approach 公司联合创始人兼独立顾问
美国疾病预防控制中心（退休）
佛罗里达州波特奥兰治

Jensen 博士已在美国政府部门工作 43 年，其中 33 年任职于美国疾病预防控制中心，担任空气传播感染预防与控制和实验室生物安全负责人。Jensen 博士曾担任美国疾病预防控制中心工作组主席，主持制定了《医疗卫生机构预防结核分枝杆菌传播指南》（Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-Care Facilities）（2005 年），并参与制定了《世界卫生组织结核感染预防与控制指南》（WHO Guidelines on Tuberculosis Infection Prevention and Control）（2019 年更新版）。Jensen 博士现任“终结结核传播倡议行动”（End TB Transmission Initiative，隶属于“终结结核病伙伴关系”）秘书处成员，并担任照明工程学会、国际电工委员会、美国暖通空调工程师学会和美国工业卫生协会指南委员会的主题专家。

Lisa Chen, MD
首席研究员 / 医学主任
柯里国际结核病中心
加利福尼亚大学旧金山分校肺科和重症医学科教授
加利福尼亚州旧金山

项目经理

Kelly Musoke, MPH
副主任
柯里国际结核病中心
加利福尼亚大学旧金山分校
加利福尼亚州旧金山

特别感谢：
柯里国际结核病中心的
Kay Wallis, MPH *和* **Amelia Alonis**
对本手册进行审阅和文字编辑。

平面设计

Edi Berton Design

同行评议专家

Lana Kay Dov, RN, MSN
结核病护理顾问
传染病流行病学办公室
疾病控制与健康统计司
华盛顿州卫生厅
华盛顿州肖尔莱恩

Susannah Graves, MD, MPH
结核病预防控制主任
旧金山公共卫生厅
加利福尼亚州旧金山

Irina Grigorov, RN, BSN
临床护理主管
穆鲁诺玛县卫生厅
俄勒冈州波特兰

Julie Higashi, MD, PhD
结核病控制项目主任
洛杉矶县公共卫生厅
加利福尼亚州洛杉矶

Abir "Abby" Hussein, MD, MPH
感染预防与控制副医学主任
过敏和感染病学科临床助理教授
华盛顿大学医学中心
华盛顿州西雅图

Stephen B. Martin, Jr., PhD, PE
美国公共卫生署上校
高级研究工程师
现场研究处
呼吸健康司
美国国家职业安全卫生研究所
美国疾病预防控制中心
西弗吉尼亚州摩根敦

Kenneth Mead, PhD, PE
工程和物理危害处处长
现场研究与工程司
美国国家职业安全卫生研究所
美国疾病预防控制中心
俄亥俄州辛辛那提

Edward Nardell, MD
医学教授
布里格姆妇女医院
全球卫生公平司
哈佛公共卫生学院
环境卫生系；以及免疫学和传染病系
马萨诸塞州波士顿

Masahiro Narita, MD
结核病控制官员
西雅图金县公共卫生厅
肺科、重症医学和睡眠医学科教授
华盛顿大学
华盛顿州西雅图

Cynthia Nancy O'Connor, MBA, BSN, RN, CIC
感染预防和员工健康系统主任
卡尤加医疗系统
纽约州伊萨卡

Nicholas Pavelchak
工业卫生和干预服务主任（已退休）
纽约州卫生厅
纽约州奥尔巴尼

Shameer Poonja, MPH
公共卫生顾问 / 项目官员
现场服务处
结核病控制司
美国疾病预防控制中心
佐治亚州亚特兰大

Trista Reglein, RN, BSN, CIC
门诊部主任
感染控制护士
德克萨斯传染病中心
德克萨斯州圣安东尼奥

Grigory Volchenkov, MD
弗拉基米尔地区结核病控制中心
终结结核传播倡议行动 (ETTi)
俄罗斯弗拉基米尔

Kristen Wendorf, MD, MS
公共卫生医务官
结核病控制处
加利福尼亚州公共卫生厅
加利福尼亚州里士满

Christine Wu, MD, MPH
副卫生官
传染病科主任
索拉诺县公共卫生和医疗服务部
加利福尼亚州费尔菲尔德

衷心感谢参与上一版《结核感染控制：结核病预防实践手册》的编写、编辑、研究和审阅工作的所有人员。第二版编辑团队对这些人员所作出的宝贵贡献深表感谢。

以下机构为本手册所采纳的原始素材的编写作出了重要贡献：

- 阿拉米达县公共卫生厅
- 波士顿公共卫生委员会
- Broad Street Solutions，圣地亚哥
- 加利福尼亚州卫生服务部
- 加利福尼亚州卫生规划与发展办公室
- 圣马特奥县总医院心肺科
- Catholic Healthcare West
- 美国疾病预防控制中心
- 康特拉科斯塔地区医疗中心
- 橄榄观景 – 加州大学洛杉矶分校医疗中心急诊医学系
- 洛杉矶县公共卫生服务局结核病控制司
- 弗雷斯诺县公共服务系统
- 哈佛医学院、剑桥医院和马萨诸塞州公共卫生厅，波士顿
- 洛杉矶流浪人员医疗服务处
- 俄勒冈州波特兰住房管理局
- 医学质量研究所
- 柯里国际结核病中心机构咨询服务
- 凯撒医疗集团，沃尔纳特克里克
- 密苏里州卫生厅疫苗可预防疾病与结核病消除科，密苏里州杰斐逊市
- Oldham Engineering，加州伯克利
- 俄勒冈州卫生司
- 帕洛阿尔托医疗基金会
- 奥斯丁 / 特拉维斯县卫生厅
- 萨克拉门托县公共卫生与公共服务部健康促进与教育处
- 圣迭戈县卫生与公共服务部
- 旧金山公共卫生厅
- 圣华金县公共卫生服务处
- 圣马特奥县总医院
- 加州大学伯克利分校公共卫生学院
- 泰德 · 雅各布斯工程集团，加州奥克兰
- 德克萨斯州卫生厅
- Bromeen 集团
- Cotton 集团
- 救世军贝尔庇护所，加州贝尔

引言

《结核感染控制：结核病预防实践手册》（第二版，2024 年）是柯里国际结核病中心（CITC）出版的专业指南。作为一部感染预防与控制（简称 IPC）原则的实用指南，本手册在临床医务人员、行政管理人员以及工程技术顾问之间搭建了技术沟通的桥梁，帮助他们共同致力于降低医疗卫生机构和社区照护场所中的结核传播风险。

本手册第二版共设六章：

1. **行政控制**
2. **环境控制：第 1 部分 – 通风；第 2 部分 – 紫外线 C 波段**
3. **个人防护装备**
4. **经空气传播感染隔离房间**
5. **诊所**
6. **流浪人员收容所**

本版内容增加了更为详尽的技术要求说明，帮助非工程技术背景的读者更好地理解技术性内容。同时还提供了结核感染预防与控制的实用指导和具体案例。本次修订版按照感染预防与控制的三级干预措施对章节进行了重新编排，这三级措施包括：行政控制措施、环境控制措施和个人防护装备。本版本还大幅扩充了有关通风原理和干预措施的内容，并新增了专门介绍紫外线 C 波段（UVC）照射杀菌技术的章节。此外，第一版中关于诊所和流浪人员收容所等场所的实用性内容在本版本中得到更新。

本手册 2024 年版本的编写和审校工作获得了多方专家的支持，包括 13 位撰稿专家和 16 位审稿专家。这些专家分别来自公共卫生、学术界、政府机构和工业工程等不同领域。

本手册第一版由 CITC 于 2007 年发布，整合了该中心此前的五份技术文献。这些文献分别就以下场所的结核感染预防与控制提供了专门指导：诊所、痰标本采集区、隔离房间、急诊科以及流浪人员收容所。

本手册的目标用户包括：

- 各级公共卫生部门的结核病防治和感染控制项目管理人员
- 社区医疗卫生机构、公共卫生诊所和流浪人员收容所的负责人和管理人员
- 公共卫生与社区医疗卫生服务工作人员
- 负责设计医疗卫生机构或收容所的建筑师、工程师及其他人员
- 在医疗卫生机构或收容所工作或提供服务的其他相关人员

本手册可作为美国疾病预防控制中心（CDC）现有入门级材料（例如《结核病核心课程》第 6 章“结核感染控制”）的补充。

结核病简介

结核病在人与人之间经空气传播，主要传染源是肺部、喉部或呼吸道患有活动性结核病的患者。当结核病患者咳嗽、打喷嚏、说话或呼吸时，结核杆菌（也称为结核分枝杆菌或结核病原体）可通过微小的飞沫（飞沫核 *）在空气中传播。其他人吸入空气中的结核杆菌后可能会被感染。在开始了解结核病及其传播时，首先需要明确区分两种不同的状态：非活动性（或“潜伏性”）结核感染和活动性结核病。

- 非活动性、或潜伏性结核感染（latent TB infection，LTBI）是指人体已被结核杆菌感染，但菌量未达到导致发病的程度。此时，感染者的免疫系统能够控制住感染，因此不会感到不适或出现症状。关键的一点是，**结核潜伏感染者不会将结核杆菌传播给他人。**
- 活动性结核病则是指结核杆菌在人体内大量增殖并导致发病，患者会出现与受累器官（最常见为肺部）相关的症状。**活动性结核病患者可将结核杆菌传播给他人。**

通过规范治疗，不仅可以治愈活动性结核病，还能防止结核潜伏感染发展为活动性结核病。

获取更多结核病相关知识

本手册重点介绍如何降低医疗卫生机构和社区照护场所中的结核病传播风险，而不过多涉及结核感染和结核病的基础知识。读者可访问美国疾病预防控制中心的“结核病”专题网站获取更多结核病相关信息。

美国疾病预防控制中心的结核病相关资料按照目标读者分为三类：

- **面向公众：**提供结核病基本知识概述，包括症状体征、危险因素、传播方式、预防措施、检测方法和治疗方案等。同时提供知识要点和其他教育资源。
- **面向医务人员：**提供结核潜伏感染、活动性结核病、耐药结核病、结核病检测和诊断、诊疗指南等临床概要信息，并提供TB 101、自学材料和核心课程资料的链接。
- **面向公共卫生专业人员：**提供结核病病例报告、美国疾病预防控制中心通知和指南、结核病实验室检测与工具包，以及结核病防治项目等信息。

* 飞沫核指含有结核杆菌、直径为1–5 μm的空气颗粒，可在空气中悬浮数小时；在本手册中也称为“空气传播性感染性颗粒”。

相关重要机构

有多个机构负责制定、研究和/或监管感染控制原则和工程技术标准。在本手册中提到的主要机构包括：

美国国家标准学会（American National Standards Institute，ANSI）：一家民间非营利机构，主要负责监管美国各类自愿性统一标准的制定，这些标准涉及产品、服务、规程、体系建设和人员管理等多个领域。

美国暖通空调工程师学会（American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Inc.，ASHRAE）：专业性学会，致力于推进暖通空调领域的发展，特别是供暖、通风、空调和制冷系统的设计与施工方面。

家用电器制造商协会（Association of Home Appliance Manufacturers，AHAM）：家用电器行业的领导和倡导组织，负责为公共政策制定、标准建立和商业决策提供信息与指导。

美国疾病预防控制中心（Centers for Disease Control and Prevention，CDC）：美国联邦公共卫生机构，隶属于美国卫生与公众服务部。该机构通过在美国本土和全球范围内控制与预防疾病、伤害和残疾，致力于保障公共卫生与安全。

医疗设施指南学会（Facility Guidelines Institute，FGI）：独立的非营利机构，致力于为医院、诊所以及居住型医疗、护理和支持机构的规划、设计和建设制定指导方针。

美国国家职业安全卫生研究所（National Institute for Occupational Safety and Health，NIOSH）：隶属于美国疾病预防控制中心的联邦研究机构，负责就预防工作相关伤害和疾病开展研究并提出建议。

美国职业安全卫生管理局（Occupational Safety and Health Administration，OSHA）：隶属于美国劳工部的联邦机构，负责确保劳动者获得安全和有益健康的工作条件。该机构通过以下方式实现这一目标：制定和执行标准；提供并支持培训、宣传教育和技术援助等工作。此外，该机构还负责确保各州OSHA项目的有效性至少达到联邦OSHA的水准。

缩略语

组织机构

ACGIH	美国政府工业卫生师协会
AHAM	美国家用电器制造商协会
AIA	美国建筑师学会
ANSI	美国国家标准学会
ASHRAE	美国暖通空调工程师学会
Cal/OSHA	加利福尼亚州职业安全与健康管理局
CDC	美国疾病预防控制中心
CIE	国际照明委员会
CITC	柯里国际结核病中心
EPA	美国环境保护局
FDA	美国食品药品监督管理局
FGI	医疗设施指南研究所
HUD	美国住房与城市发展部
IES	照明工程学会
ISO	国际标准化组织
NIOSH	美国国家职业安全卫生研究所
NTCA	美国国家结核病联盟
OSHA	美国职业安全与健康管理局
TBCTA	结核病技术援助联盟
USAID	美国国际开发署
WHO	世界卫生组织

术语

ACH	每小时换气次数
AIIR	经空气传播感染隔离房间
APF	指定防护系数
BMS	建筑管理系统
BSC	生物安全柜
CADR	洁净空气输出比率
CAPR	可控式空气净化呼吸器
CFM	立方英尺/分钟
CFR	美国联邦法规
dBA	分贝（A计权）
DOT	直接面视下督导服药
DST	药物敏感性试验
FFR	过滤式防护面罩呼吸器
FPM	英尺/分钟
GUV	紫外线杀菌
HCP	医务人员
HE	高效
HEPA	高效空气微粒过滤器
HMIS	流浪人员管理信息系统
HVAC	供暖、通风与空调（暖通空调）系统
IGRA	γ干扰素释放试验
IPC	感染预防与控制
μJ/cm^2	微焦耳/平方厘米
LED	发光二极管
LEED	能源与环境设计先锋认证
LEV	局部排风通风
LTBI	结核分枝杆菌潜伏感染
MDR	耐多药
MERV	最低效率报告值
M^3/hr	立方米/小时
MMWR	《发病率和死亡率周报》
m/sec	米/秒
M. tuberculosis	结核分枝杆菌
mW	制造商标称UVC$_{254}$输出功率
Pa	帕斯卡
PAPR	动力送风过滤式呼吸器
PPD	纯蛋白衍生物
PPE	个人防护装备
QFT-G	结核分枝杆菌特异性γ干扰素检测
RAC	室内空气净化器
REL	推荐接触限值
TB COE	结核病示范中心
TLV®	阈限值
TST	结核菌素皮肤试验
TWA	时间加权平均值
UR	上层空间
UV	紫外线
UVC	紫外线C波段
UVGI	紫外线照射杀菌
VAV	变风量系统
μW/cm^2	微瓦/平方厘米
"w.g.	英寸水柱

UCSF
University of California
San Francisco

CURRY
INTERNATIONAL
TUBERCULOSIS
CENTER

1

行政控制

概述……1.2
指定结核感染预防与控制负责人……1.4
开展机构结核感染预防与控制相关风险评估……1.5
制定结核感染预防与控制计划……1.7
工作人员基线结核病筛查和评估……1.9
工作人员培训和教育……1.9
患者、服务对象和访客教育……1.10
设置适当的呼吸卫生标识并支持落实呼吸卫生措施……1.10
落实分诊和经空气传播防护规程……1.11
确保设备的适当清洁……1.11
与临床和实验室服务部门协作……1.12
与当地卫生部门合作……1.13
参考资源……1.14
参考文献……1.17

概述

在空气传播性感染的预防与控制领域，需全面落实工作方针，通过实施多种干预措施预防疾病的传播。

医疗卫生机构和人员密集场所实施感染预防与控制措施的目的，是预防或最大限度地减少传染性疾病患者体内的微生物经空气传播给其他患者、服务对象、访客或工作人员。人体一旦感染经空气传播的微生物，可能会发展为多种疾病，包括结核病（TB）、新冠肺炎、麻疹、水痘、普通感冒和流感等。本手册重点关注经空气传播的结核分枝杆菌（*M. tuberculosis*），并使用“结核感染预防与控制”（TB IPC）这一专业术语。

这些感染预防与控制措施适用于多种场所，例如医疗卫生机构的门诊部（主要接诊因发热、咳嗽、呕吐或腹泻等急性症状前来就医的患者）、急诊科（负责处理各类急症情况）和住院部（收治已确诊具有上述症状或其他健康问题的患者）。此外，其他人员密集场所，包括流浪人员收容所、长期照护机构（例如专业护理机构和寄宿照护机构）以及惩教机构等，也都存在空气传播性微生物扩散的风险。近年来，随着人们对微生物及其传播特性认识的不断深入，尽管预防和减少这些微生物传播的措施变得越来越复杂，但其效果也越来越显著。

为了便于理解和具体实施，感染预防与控制措施被划分为不同类别的干预控制措施。

美国疾病预防控制中心（CDC）将这些措施划分为以下三大类[1]：

- **行政控制措施**
- **环境控制措施**
- **个人防护装备**（防护面罩/口罩和外科/医用口罩等）

在结核感染预防与控制工作中，行政控制措施是指通过制定和实施机构政策、工作规程、开展教育培训和加强监督管理等方式，来减少或防范机构内结核暴露和传播的各项干预措施。

行政控制措施包括：

- 在机构内指定专人负责结核感染预防与控制工作
- 开展机构结核感染预防与控制相关风险评估
- 制定书面的结核感染预防与控制计划
- 根据结核暴露风险，对员工和志愿者进行基线和定期的结核病筛查与评估
- 对患者、服务对象和访客开展教育
- 在机构内设置适当的标识，并全面落实呼吸卫生措施
- 运用流行病学原则实施分诊和经空气传播防护规程
  - 制定针对所有疑似和传染性结核病患者的隔离启动和解除标准
  - 确保在患者、访客和工作人员之间落实安全、可行的分隔措施
- 确保对设备进行妥善清洁和灭菌或消毒
- 与临床和实验室服务部门协作
  - 确保能够获得结核病快速分子检测服务
  - 基于药物敏感试验（DST）结果，及时启动有效治疗
- 与当地卫生部门保持密切合作，确保报告所有结核病病例并采取适当管理措施

改编自美国疾病预防控制中心2005年《医疗卫生机构结核分枝杆菌传播预防指南》。[1]

指定结核感染预防与控制负责人

行政控制措施虽然是最重要且最经济的措施，但在实际工作中往往也是最难以切实落实的措施。要使这些措施取得成效，医疗卫生机构必须为专门指定的感染预防与控制项目负责人提供充分支持，包括赋予其必要的管理权限，配备相应的经费预算和人力资源，使其能够有效管理感染预防与控制项目（如果将感染预防与控制工作笼统地视为“人人有责”，最终往往会导致“无人负责”的局面）。需要支持和权限的具体活动包括：开展机构层面或个人层面的结核病风险评估，落实和执行结核感染控制政策，并确保按照相关规定对医务人员和其他工作人员进行筛查、培训和教育。

- 当由全职医务人员（例如护士）担任这一职务时，医疗卫生机构必须根据机构规模的大小，相应免除其部分或全部的临床工作任务，以确保其能够投入充足的时间开展结核感染预防与控制工作。在规模较小的诊所，可能只需要一名专职人员就能够胜任感染预防与控制工作，但在大型医院，则可能需要配备多名专职人员。

- 理想情况下，负责结核感染预防与控制工作的人员应当具备临床工作经验，这样才能够深入理解结核传播的特点和传染性，但这一要求并非总是能够得到满足。如果不得不任命一位没有临床工作背景的人员负责结核感染预防与控制工作，则必须对其进行系统的基础培训（包括经空气传播的机制）；同时，该人员还必须熟悉本机构服务区域内结核感染高危人群的相关情况。感染预防与控制负责人应能够识别容易发展为结核病的脆弱人群，包括儿童以及各类免疫功能低下者（如 HIV 感染者或癌症患者）。此外还要注意，某些药物也会影响患者的免疫系统功能，如类固醇类药物、化疗药物和免疫抑制剂（如英夫利昔单抗）等。最理想的安排是由经过正式认证的感染预防专家来全面负责结核病项目，或者由这类专家为感染预防与控制项目负责人提供专业指导和培训。

- 除了指定感染预防与控制项目负责人外，那些服务大量人群的机构（如医院和门诊部）还可成立多学科感染预防与控制委员会，汇集相关关键岗位的工作人员。在大型机构或医院中，该委员会应包括来自设施管理部门、设施维护部门、微生物实验室、职业卫生部门、工程部门以及多个临床学科（包括内科、护理、外科和儿科）的代表，共同为相关政策和规程的制定提供建议并协助具体落实。要使感染预防与控制项目切实发挥效果，关键在于促使所有工作人员、服务对象和访客都能遵守经空气传播感染预防与控制的各项程序和政策。

开展机构结核感染预防与控制相关风险评估

一旦确定了专门负责结核感染预防与控制工作的人员（在大型医院可能是多名人员），这些负责人必须确保开展机构相关风险评估。通过持续进行风险评估，有助于发现感染预防与控制项目中哪些环节可能需要调整或加强。

- 每年至少审查一次机构结核感染预防与控制相关风险评估工作（如果条件允许的话）。[1]
- 下列情况下，可能需要进行额外的风险评估：
  - 执行建设或翻新工程时
  - 设立新的患者服务区域时
  - 出现季节性的患者流量增加和呼吸道病例增多时
  - 采用新的结核病诊断和治疗方案时
  - 出现人员短缺现象时
  - 怀疑机构内发生结核传播时
- 风险评估过程涉及：最新的社区结核病发病率数据；近期机构场所使用情况的详细信息（包括患者、服务对象、访客和工作人员在机构内的流动）；以及在特定区域内对特定人员采取环境控制和个人呼吸防护措施的最新要求。

持续进行风险评估，有助于发现感染预防控制项目中需调整或加强的环节。

在机构感染预防与控制的监督和评价工作中，全年例行性的风险评估是一个重要组成部分。这项工作应当包括以下具体内容：

- 评估机构内不同时段的患者流量，特别关注患者聚集区域
- 定期检查机构内结核病门诊的各项控制措施，重点检查其场所位置和门诊时间安排（如，该门诊是否与艾滋病门诊或肿瘤科门诊过于靠近，是否可能出现候诊患者密集的情况？）
- 定期检查针对各项高风险操作采取的控制措施，例如痰液诱导（这项操作必须在负压房间进行）；对于非诱导痰液采集，则必须安排在通风良好的区域进行，且必须远离其他所有患者

美国疾病预防控制中心在 2005 年《医疗卫生机构结核分枝杆菌传播预防指南》附录 B 中为医疗卫生机构和非传统医疗场所提供了**结核病风险评估工作表**（详见该指南的完整文件）。[1]

按照该工作表的要求，开展全面的机构风险评估时应收集和分析以下关键信息，用于制定和完善感染预防与控制政策和具体实践：

1. 当地结核病发病率数据
2. 针对机构内不同功能区域进行的风险评估结果（例如住院部、门诊部和非医疗场所等）
3. 面向工作人员和志愿者制定的筛查、检测和随访程序*
4. 结核感染预防与控制计划
5. 结核感染预防与控制计划的实施情况
6. 结核相关标本的实验室处理规程
7. 环境控制措施
8. 呼吸防护方案
9. 机构结核病风险的定期重新评估

* 2005年美国疾病预防控制中心工作表中的内容未能反映2019年更新的医务人员筛查重要指南。如需了解最新要求，请参考2019年《发病率和死亡率周报》（MMWR）刊载的《美国医务人员结核病筛查、检测和治疗：美国国家结核病控制联合会和美国疾病预防控制中心的建议》。详细信息见本文件“参考资源”部分。

注：2019年美国国家结核病控制联合会和美国疾病预防控制中心（NTCA/CDC）联合发布的这份文件虽然更新了有关医务人员筛查策略的建议（包括检测、治疗和教育等方面），但该文件特别强调，关于“继续开展机构风险评估工作以指导感染控制政策和程序制定”这一要求仍然沿用2005年美国疾病预防控制中心指南的规定。

机构风险评估工作应由熟悉本机构具体情况的工作人员和医务人员负责完成，或在其协助下进行。这些人员对机构内的人员流动情况和各类功能性问题都有深入了解，例如：在某些时段可能出现的患者聚集、窗户开启困难，暖通空调（HVAC）系统、紫外线 C 波段（UVC）杀菌装置和室内空气净化器存在的各类问题等。

- 风险评估的所有详细内容都应记录在**机构结核感染预防与控制风险评估报告**中，并提交给感染预防与控制委员会审查。
- 结核感染预防与控制风险评估报告中应明确说明以下内容：本次审查的具体日期、参与执行审查工作的感染预防与控制人员姓名，以及对该场所当前传播风险水平的评估结果（分为高、中、低三个等级）。
- 风险评估内容应包括：对现有感染预防与控制计划的有效性和落实程度进行评价，同时提出相应的改进建议。
- 所有报告都应存放在便于工作人员和监管机构人员查阅的位置，可以采用纸质文档或电子文件的形式。

制定结核感染预防与控制计划

完成风险评估后，应制定新的结核感染预防与控制计划或更新现有计划，以解决已发现的问题。在制定过程中，应征求感染预防与控制委员会、机构工作人员和管理层的意见，以确保获得充分的人力支持和经费保障。计划中应明确指出需要采取哪些整改措施，以及由谁负责落实这些措施。

- 建议将计划分为短期、中期和长期三类，并评估每项整改建议所涉及的成本。
- 如果需要进行基础设施改造（如：新建设施以缓解人员密集状况，或改进 HVAC 系统），则应安排工程技术人员参与制定结核感染预防与控制计划中的相关内容。

结核感染预防与控制计划通常应涵盖以下内容：

基本信息

- 结核感染预防与控制负责人和机构管理人员的联系方式
- 场所位置和基本情况
- 所开展的具体服务项目
- 最新的结核病流行病学数据（包括：机构内部数据、当地数据、所服务社区中结核病高危人群和工作人员的相关数据）

行政控制措施

- 指定结核感染预防与控制工作的责任人
- 制定年度结核感染预防与控制风险评估计划 / 操作规程
- 制定员工培训和教育计划
- 制定面向患者、服务对象和访客的教育计划
- 开展工作人员结核病筛查和评估
- 设置呼吸卫生标识并支持落实呼吸卫生措施
- 根据实际需要制定分诊和经空气传播防护规程
- 制定医疗设备清洁规程和相关政策
- 制定与当地卫生部门进行沟通与合作的具体规程和政策
- 制定与临床和实验室服务部门进行沟通与合作的具体规程和政策

环境控制措施

- 制定环境控制设施的评估和维护计划
  - 机械通风和自然通风
  - 上层空间 UVC（也称为紫外线照射杀菌 [UVGI] 或紫外线杀菌 [GUV]，包括空气混合）
  - 室内空气净化器（或其他各类空气净化设备）

个人防护装备

- 为高风险工作人员制定个人呼吸防护方案（包括防护口罩的使用）
  - 培训和教育
  - 医学适用性评估
  - N95 防护口罩的适合性测试
  - 动力送风过滤式呼吸器（PAPR）或受控空气净化呼吸器（CAPR）
  - 充足供应
- 配备外科 / 医用口罩（主要用于源头控制，供可能患有结核病或确诊结核病的患者、服务对象和访客使用）；某些感染预防与控制计划将此项列入“行政控制措施”
  - 教育
  - 充足供应

可持续的结核感染预防与控制实施计划和运行机制

- 明确所需人力资源，并与公共卫生项目建立适当的工作联系
- 保障感染预防与控制项目所需的经费来源
- 建立持续质量改进机制，涵盖：计划实施 –> 监督和评价 –> 修订计划 –> 落实修订内容
- 有关制定结核实施计划的具体指导，请参见本文件“参考资源”部分

网上可以查找到多种结核感染预防与控制计划的示例和模板。本文件“参考资源”部分提供了两个不同类型示例的链接：

- 综合医院版本：内布拉斯加大学医学中心的方案
- 两个简化版本示例：见结核病技术援助联盟（TBCTA）、美国疾病预防控制中心、美国国际开发署联合编写的指南——《实施世界卫生组织关于医疗机构、人员密集场所和家庭中结核感染控制的政策：在国家、机构和社区层面规划、实施和扩大结核感染控制活动的框架》（2009 年）第 111–114 页

工作人员基线结核病筛查和评估

所有医务人员在就职前和发生任何暴露后都必须接受结核**感染和结核病的筛查**，这一点至关重要。基线评估包括：结核分枝杆菌感染检测（采用 γ 干扰素释放试验 [IGRA] 或结核菌素皮肤试验 [TST]）、个人风险评估和结核病症状评估。除某些职业风险高的群体或存在持续传播风险的场所外，美国已不再建议对医务人员进行年度结核病筛查。[2] 关于 2019 年医务人员筛查指南的更详细信息，请参见第 5 章“诊所”的“结核病筛查方案”一节。

医疗卫生机构必须建立并维护员工筛查结果登记簿，并采取适当措施保障个人健康信息（电子版或纸质版）的安全性。

工作人员培训和教育

教育是结核感染预防与控制行政管理措施中的关键要素。所有在机构内例行工作的医务人员和其他工作人员，无论是临床、实验室、维护、保洁、膳食、办公室还是其他岗位的人员（包括志愿者），都应接受关于结核感染预防与控制的年度培训和教育。[2]

教育内容应简明扼要 — 少而精，并涵盖以下主题：

- 结核杆菌及其如何导致结核潜伏感染（LTBI）和结核病，包括明确说明感染与发病的区别（参见“参考资源”部分提供的美国疾病预防控制中心英文和西班牙文资源链接）
- 结核病的经空气传播途径（例如，通过咳嗽、打喷嚏、说话等）
- 结核病与其他病原体（如新冠病毒或流感病毒）在传染性方面的比较
- 结核病的体征和症状
- 人员密集或环境因素对传播的影响
- 环境控制措施在安全防护方面的基本作用原理
- 如何以及何时使用适当的呼吸防护装备

有必要向工作人员说明结核感染和结核病治疗的可及性和有效性，同时还应向他们提供有关疗程更短、安全性更好的结核感染治疗方案的信息。

在大型医疗机构中，建议根据工作类别分别对工作人员进行教育，以便开展开放式对话，使其能够自由提问（因为有些人可能在临床人员或医生在场时不太愿意提问）。

美国疾病预防控制中心提供了基础结核病在线培训模块（“面向医务工作者的 TB 101”）；也可访问美国疾病预防控制中心示范中心获取更多资料。详见“参考资源”部分。

患者、服务对象和访客教育

应为患者、服务对象和访客准备简明易懂的教育材料，并确保这些材料适合本场所的特点。可以采用多种形式：使用当地语言制作的标识或宣传册、在候诊区播放的视频，或由工作人员开展个人或团体教育课程。

- 美国疾病预防控制中心网站提供了面向患者和公众的结核病教育材料（见“参考资源”部分）。

设置适当的呼吸卫生标识并支持落实呼吸卫生措施

标识是对患者、服务对象、访客和工作人员进行教育和认知强化的重要工具。

- 医疗卫生机构的所有候诊区都应张贴使用当地语言制作的简明海报，可从美国疾病预防控制中心等多个网站获取不同语言版本的咳嗽礼仪海报（这些海报通过图画展示正确做法：频繁咳嗽时佩戴口罩，或在咳嗽时用手肘而非手掌遮挡）（见“参考资源”部分）。

在人员密集的高风险区域，**呼吸卫生措施**应包括：向患者、服务对象和访客提供纸巾或医用口罩，用于遮掩口鼻，直到排除结核病诊断为止。工作人员在接触疑似或确诊结核病患者时，应佩戴 N95 防护口罩或更高防护级别的防护口罩（如动力送风过滤式呼吸器），以预防感染。[1]

- 行政控制措施中应明确规定：建立规范的口罩采购和分发程序，并指定专人负责库存管理，确保在库存不足时及时补充订购。
- 在结核病门诊或艾滋病门诊等特定临床区域，经过培训的工作人员应向患者详细讲解结核传播的风险和良好呼吸卫生的重要性，包括在家中应采取的感染预防与控制措施。

落实分诊和经空气传播防护规程

为了最大限度地减少医疗卫生机构内的结核传播风险，必须建立并严格执行针对疑似或确诊结核病患者的**有效管理规程**。

- **落实分诊和空气传播防护规程**，及时识别疑似或确诊结核病患者，并将其与其他人员分隔开。[1] 具体而言，医疗卫生机构应当在入口处对所有患者进行临床评估，重点识别咳嗽患者。一旦发现此类患者，应当立即将其与其他患者分开安置。如果发现患者存在结核病或其他传染性呼吸道疾病的危险因素，则应当在严格执行空气传播防护措施的同时，优先安排其接受医学评估和诊断检查。需要特别强调的是，医务人员（包括医生）应当基于其对相关危险因素、症状、社区发病率等方面的了解，对结核病保持较高的警惕性。
- 尽快对疑似传染性结核病患者进行隔离。在医疗卫生机构中，如果需要收治疑似传染性结核病患者，而负压隔离病房又处于紧缺状态，则需要床位调配服务部门或其他相关部门予以协调配合。对于那些当前占用负压隔离病房、但既无结核病也无其他空气传播感染的住院患者，应当及时安排转出。
- 要求所有参与疑似结核病患者诊疗工作的医务人员必须佩戴 N95 防护口罩或更高防护级别的防护面罩，直至确认患者已不具传染性。关于医疗卫生机构何时可以解除隔离的具体建议，因涉及范围较广且各州或地方的规定不一，本手册不作详细讨论。如需了解州 / 地方结核病项目的联系方式，以及美国国家结核病控制联合会（NTCA）2024 年发布的最新结核隔离建议，请参见“参考资源”部分。[3]
- 指导医务人员向患者家属详细说明两方面内容：一是结核病在医院内的传播风险，二是当患者在仍具传染性时需要出院的情况下，家中应当采取哪些具体防护措施。在与患者及其家属沟通的整个过程中，医务人员应当格外注意避免患者遭受污名化，特别要防范来自其家庭或所在社区的歧视。

确保设备的适当清洁

在行政控制措施中，必须制定并落实两类规程：一是设备（如内窥镜、支气管镜）的**清洁和灭菌或消毒**规程，二是痰杯等潜在污染物品的**安全处置**规程。[1,4]

- 这些规程必须形成规范的书面文件，并确保所有相关工作人员能够方便地查阅。
- 应当明确指定专人负责执行这些规程，同时建立常规监督机制，确保执行情况得到及时记录，相关记录保存完整且便于查阅。

与临床和实验室服务部门协作

及时做出诊断并尽早启动适当的治疗是减少结核传播最有效的手段之一。因此，结核感染预防与控制方面的行政管理职责必须包括与临床和实验室人员的协调配合。

结核感染预防与控制方面的行政管理工作的具体示例包括但不限于[1]：

- **确保实验室能够及时开展各项推荐的标本处理和检测工作，并将检测结果及时报告给开具医嘱的临床医生和感染控制团队。**
- 配备快速诊断设备或确保能够及时获得快速诊断服务，具体包括：
  - 将结核分枝杆菌快速分子检测和药物敏感试验纳入常规结核病诊断流程
  - 快速药物敏感试验至少应包括利福平耐药性检测，在理想情况下还应包括涵盖异烟肼和氟喹诺酮类药物的其他分子检测。
- 建立实验室用品库存定期监测制度，确保所有必需用品储备充足，一旦发现库存不足应立即补充订购。
- 确保配备开展有效管理疑似或确诊结核病患者所需的各类必要用品，包括充足的诊断用品和标本采集材料（如痰杯等）。
- 支持各项医疗服务的有效协调，以确保患者能够及时、快速地获得结核病治疗服务。例如，针对艾滋病病毒感染者和其他结核感染高风险人群，应建立完善的治疗转介联系机制，或为他们提供结核病和其他相关疾病的综合诊疗服务。

由于结核病的诊断主要依赖痰液检查，因此感染预防与控制方面的行政控制工作必须全面涵盖**痰液采集和处理**的各个环节（对于非痰液标本也应给予同等程度的重视）。具体要求包括：

- 规定痰液采集必须在 AIIR 内进行，并且 / 或者在通风良好的负压痰液采集亭内进行（如果医疗卫生机构不具备上述条件，则应安排在户外采集痰液）。
- 重视对痰液处理时间的监测。具体而言，应对痰液容器从采集完成、送达实验室、直至完成处理过程的全过程进行系统跟踪和记录。
- 对于需要在家中采集痰液并自行送检的患者或服务对象，行政控制措施应包括以下两个方面：通过详细指导确保他们掌握在家中正确采集痰液的具体方法；设置清晰的指引标识，并向患者和服务对象提供书面说明，明确告知他们应将痰液标本送到机构内的何处。
- 在小型医疗卫生机构中，可指定结核病专科护士或实验室技术人员专门负责上述工作。但结核感染预防与控制管理人员必须确保做到两点：一是这些工作任务都得到明确分工，二是所有任务都能得到切实完成。

与当地卫生部门合作

医疗卫生机构应当与当地卫生部门密切合作，共同制定符合卫生部门政策要求的行政控制措施。这些政策涉及多个方面：疑似或确诊结核病患者的管理（包括制定针对出现结核病症状者的分诊方案，必要时考虑转诊安排）、向卫生部门报告病例、开展机构结核病风险评估、进行医务人员筛查，以及制定相关教育政策和确定重点工作。[1]

及时、持续地向当地卫生部门通报结核病诊断情况，具体要求包括：

- 对于临床单位，需要报告的内容包括：涂片检查或核酸扩增检测（如 Xpert® MTB/RIF，通常称为 Xpert 或 Gene-Xpert）或其他的结核病快速检测的阳性结果。此外，病理检查和培养的阳性结果也必须报告（注意：对于病理活检标本，通常不会进行上述快速检测，但其阳性结果仍然必须报告）。
  - 通常由医疗卫生机构的实验室负责完成向卫生部门的报告工作。但作为感染预防与控制行政控制措施的一部分，还必须做到以下两点：明确指定专人负责向卫生部门报告；根据不同地区的结核病发病情况，确定合理的病例报告工作监督频率：在结核病高发社区应每月监督一次，而发病率较低社区可每季度监督一次。
  - 由于不同地区的病例报告规定可能存在差异，因此，感染预防与控制指南的内容应充分体现当地的具体要求。
- 开展常规监督工作具有重要意义：一方面有助于及时发现机构内结核病发病情况的变化，从而识别是否存在院内传播（即在医疗机构内发生的传播）；另一方面也有助于发现社区内结核病发病率是否出现上升。此外，通过调查意外出现的阳性检测结果，可能会发现导致院内传播的原因，例如：感染预防与控制措施或操作程序存在漏洞，或者实验室设备出现故障。

虽然上述干预措施是按不同类别分别介绍的，但需要特别强调的是：这些措施之间存在着重要的相互关联和交叠。因此，应将全部干预措施视为一整套综合、协调的感染预防与控制策略。

参考资源

一般性参考资源

- 多种语言的“咳嗽时遮掩口鼻”宣教标识 – 美国疾病预防控制中心 (CDC)
  https://www.cdc.gov/flu/prevent/actions-prevent-flu.htm
- 各州和地方法规汇编 – 美国职业安全卫生管理局
  https://www.osha.gov/html/RAmap.html
- 各州、主要城市和地区结核病项目联系方式 – 美国国家结核病控制联合会 (NTCA)
  https://www.tbcontrollers.org/community/statecityterritory/
- 结核病数据和统计资料 – 美国疾病预防控制中心
  https://www.cdc.gov/tb/statistics/default.htm
- 感染预防与控制专业人员工作指南和技术资源 – 感染控制和流行病学专业人员协会（APIC）塞拉分会
  https://community.apic.org/sierra/resources/overview
- 感染预防与控制专业资源库 – 医疗机构评审联合委员会（The Joint Commission）
  https://www.jointcommission.org/resources/patient-safety-topics/infection-prevention-and-control/
- 结核病专业培训、教育和医疗咨询 – 美国疾病预防控制中心支持的结核病示范中心
  https://www.cdc.gov/tb-programs/php/about/tb-coe.html

面向医务人员和患者/公众的结核病教育资料（美国疾病预防控制中心）

- 结核杆菌及其如何导致结核感染和结核病的详细说明，包括对感染与发病区别的解释（英文、乌克兰文和西班牙文）
  https://www.cdc.gov/tb/communication-resources/tuberculosis-fact-sheet.html
- 面向医务工作者的结核病基础知识培训（TB 101）在线课程模块
  https://www.cdc.gov/tb/webcourses/tb101/
- 面向患者和公众的结核病健康教育材料
  https://www.cdc.gov/tb/communication-resources/index.html

医疗卫生机构结核病风险评估和分级

- 结核病风险评估工作综合性技术指导文件 – 美国疾病预防控制中心《医疗卫生机构结核分枝杆菌传播预防指南》，2005 年
  https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/rr5417a1.htm
  - 适用于医疗卫生机构和非传统医疗场所的结核病风险评估工作表（附录 B）
    https://www.cdc.gov/tb-healthcare-settings/hcp/facility-risk-assessment/
  - 根据美国疾病预防控制中心 / 美国国家结核病控制联合会 2019 年发布的结核病筛查、检测和治疗建议，美国职业与环境医学学会与美国国家结核病控制联合会在 2020 年配套文件附录 1 中对 2005 年指南附录 B 作出的更新说明
    http://links.lww.com/JOM/A780

结核病筛查、评估、传染性和隔离管理

- 综合性技术资源：医疗卫生机构结核病防控专题网页 – 美国疾病预防控制中心
  https://www.cdc.gov/tb-healthcare-settings/index.html
- 在结核感染预防控制概述框架下对传染性原理、结核病的发现和诊断以及终止经空气传播隔离条件的简明阐述 – 见美国疾病预防控制中心《结核病核心课程：临床医生必备知识》第 7 版，2021 年，第 6 章“结核感染控制”
  https://www.cdc.gov/tb/hcp/education/core-curriculum-on-tuberculosis-continuing-education.html
- 医务人员结核病筛查和检测 – 美国疾病预防控制中心
  https://www.cdc.gov/tb-healthcare-settings/hcp/screening-testing/index.html
- 《美国医务人员结核病筛查、检测和治疗：美国国家结核病控制联合会和美国疾病预防控制中心的建议》，2019 年
  https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/68/wr/pdfs/mm6819a3-H.pdf
  - 配套实施指导文件：《美国医务人员结核病筛查、检测和治疗：美国职业与环境医学学会和美国国家结核病控制联合会关于落实 2019 年 < 发病率和死亡率周报 > 建议的联合工作组技术报告》，美国职业与环境医学学会，2020 年 7 月
    https://acoem.org/acoem/media/PDF-Library/Publications/Tuberculosis_Screening,_Testing,_and_Treatment.pdf

- 在结核感染预防与控制指南框架下，对结核病患者传染性评估方法和结核菌素皮肤试验应用的基础性综述 – 美国疾病预防控制中心《医疗卫生机构结核分枝杆菌传播预防指南，2005 年
https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/rr5417a1.htm
- 结核病患者隔离管理政策最新指南 – 美国国家结核病控制联合会
https://academic.oup.com/cid/advance-article/doi/10.1093/cid/ciae199/7649400

制定可持续的结核感染预防与控制实施计划和运行机制

- 《评估循证癌症筛查干预措施实施准备情况现场指南》（美国疾病预防控制中心结直肠癌控制项目），第 4 阶段“制定实施方案”
https://www.cdc.gov/colorectal-cancer-control/php/field-guide/phase-4.html
- 项目可持续性评估工具和临床可持续性评估工具（圣路易斯华盛顿大学）
https://www.sustaintool.org/
- 综合医院版本的示例模板：内布拉斯加大学医学中心的方案
https://www.unmc.edu/ehs/safety/TB_Exposure_Plan.pdf
- 两个简化版本示例：见结核病技术援助联盟（TBCTA）、美国疾病预防控制中心、美国国际开发署联合编写的指南——《实施世界卫生组织关于医疗机构、人员密集场所和家庭中结核感染控制的政策：在国家、机构和社区层面规划、实施和扩大结核感染控制活动的框架》（2009 年）第 111–114 页
https://stoptb.org/wg/tb_hiv/assets/documents/tbicimplementationframework1288971813.pdf

参考文献

1. Jensen PA, Lambert LA, Iademarco MF, Ridzon R; CDC. Guidelines for preventing the transmission of Mycobacterium tuberculosis in health-care settings, 2005. MMWR Recomm Rep. 2005;54(RR-17):1-141. https://www.cdc.gov/mmwr/pdf/rr/rr5417.pdf
2. Sosa LE, Njie GJ, Lobato MN, et al. Tuberculosis screening, testing, and treatment of U.S. health care personnel: recommendations from the National Tuberculosis Controllers Association and CDC, 2019. MMWR 2019;68:439–443. doi: http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm6819a3
3. Shah M, Dansky Z, Nathavitharana R, et al. NTCA guidelines for respiratory isolation and restrictions to reduce transmission of pulmonary tuberculosis in community settings. *Clin Infect Dis.* Published online April 18, 2024. https://doi.org/10.1093/cid/ciae199
4. Rutala WA, Weber DJ; Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee. Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities. Centers for Disease Control and Prevention; 2019. https://www.cdc.gov/infection-control/media/pdfs/Guideline-Disinfection-H.pdf

UCSF
University of California
San Francisco

CURRY
INTERNATIONAL
TUBERCULOSIS
CENTER

2

环境控制

概述 …… 2.3

第1部分 通风

利用通风系统降低结核传播风险 …… 2.6

- 气流流速和每小时换气次数（ACH）
- 室内空气清除
- 利用定向气流减少结核传播
- 在人员密集场所运用定向气流和稀释通风
- 检查定向气流和气流模式

机械通风 …… 2.15

- 负压：经空气传播感染隔离房间（AIIRs）
- 正压：防护环境
- 局部通风方法：采集亭、帐篷和通风罩
- 暖通空调（HVAC）系统
  - HVAC 系统的配置形式
  - HVAC 系统的组件
    - 空气过滤器
    - 改用更高效率的滤芯
  - HVAC 系统的检查
  - 现有 HVAC 系统的优化
  - 新建 HVAC 系统的设计
- 案例研究：HVAC 系统

自然通风 …… 2.43

- 风力驱动、浮力驱动和混合模式的自然通风
- 风扇在自然通风中的应用
- 案例研究：自然通风和排风扇
- 在装有 HVAC 系统的房间内使用风扇

室内空气净化器(RACs) …… 2.50

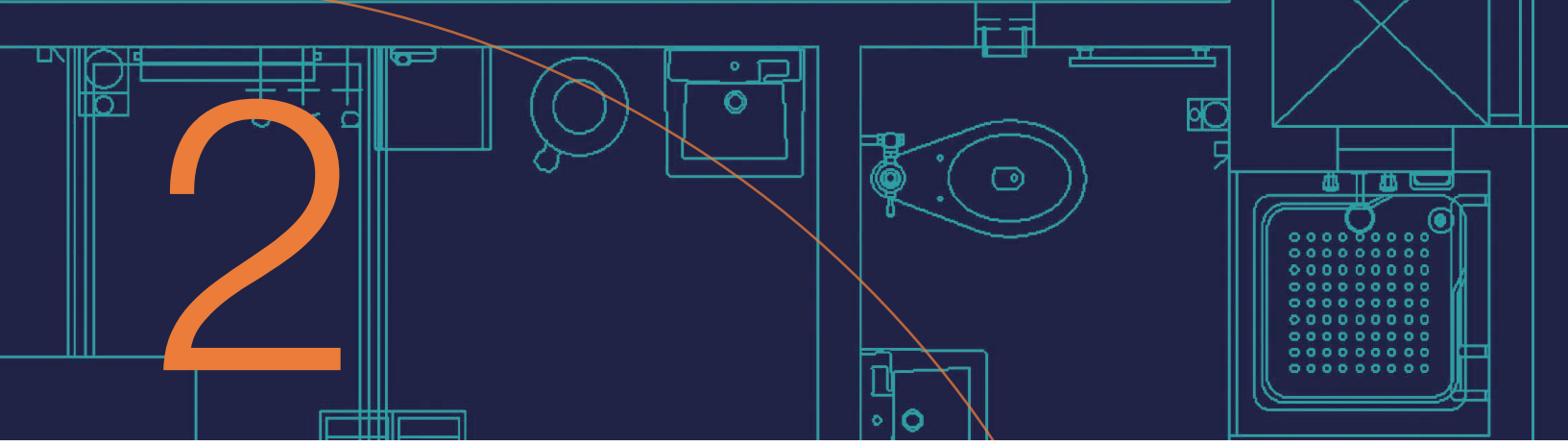
- 洁净空气输出比率（CADR）
- RAC 的布置和使用注意事项
- RAC 的选择
- RAC 滤芯的例行维护
- 案例研究：室内空气净化器 (RAC)

关于通风的附录 …… 2.58

- A. 室内空气清除时间计算工作表：示例
- B. 经空气传播感染隔离房间（AIIR）压力监测清单
- C. 最低效率报告值（MERV）参数
- D. HVAC 系统信息汇总表：示例
- E. 医疗卫生机构各区域通风的推荐

参考资源 …… 2.66

参考文献 …… 2.67



2

第2部分 紫外线C波段（UVC）

利用UVC技术降低结核传播风险 …… 2.69

- 什么是 UVC（UVGI）？如何应用？
- UVC_{254} 的有效性
- UVC_{254} 暴露、安全性和维护注意事项

UVC的应用 …… 2.77

- 上层空间 UVC
- HVAC 系统中的空气照射（管道内 UVC）
- 室内空气净化器（RACs）中的空气照射
- 直接照射（全屋照射）

关于UVC的附录 …… 2.90

- A. 上层空间 UVC_{254} 剂量计算工作表和装置选择
- B. UVC_{254} 暴露剂量计算
- C. 选择上层空间 UVC_{254} 装置：典型场景
- D. UVC_{254} 成本考虑
- E. 管道内 UVC_{254} 剂量计算

参考资源……2.103

参考文献……2.105

概述：环境控制

本手册中，“环境控制”特指利用工程技术和建筑设计来预防传染病传播的各项措施，重点是降低经空气传播疾病的传播风险。

由于经费限制和其他各种制约因素，公共卫生诊所、社区卫生诊所和流浪人员收容所等医疗卫生机构往往不得不使用一些原本并非按照医疗用途进行设计的场所。即使在医院和大型医疗卫生机构内部，某些区域也可能由其他功能区域改建而来。这就带来一个突出的问题：如果某个场所既有的通风系统原本是针对“办公”或“居住”用途设计的，那么这些系统往往缺乏充分的防护措施来预防结核分枝杆菌或其他经空气传播微生物的传播。在最糟糕的情况下，这些场所的通风系统可能无法正常运转，而有些场所甚至完全没有配备通风系统。

继基本的行政控制措施之后，环境控制措施构成了结核感染预防与控制的第二道防线。

医疗卫生机构面临的另一个重要风险是经空气传播疾病感染预防与控制所需的环境控制措施存在缺陷。当出现这种缺陷时，疑似或确诊结核病患者有时会被安置在环境控制措施不达标的经空气传播感染隔离房间（airborne infection isolation rooms，AIIRs）内，此类房间如果存在设计缺陷和 / 或运行不当的问题，就可能使医务人员、来访者和其他患者面临结核感染和发病的风险。本章将讲述在医疗卫生机构整体层面和 AIIR 水平上如何设计、实施和维护环境控制措施。

继基本的行政控制措施之后，环境控制措施构成了结核感染预防与控制的第二道防线。要确保环境控制措施能够正常运作并得到妥善维护，必须首先落实有效的行政控制措施。环境控制措施的主要作用在于预防传播并降低空气中感染性颗粒物（特别是含有结核分枝杆菌的飞沫核）的浓度。本章分为两个部分，系统阐述环境控制措施及其在预防结核分枝杆菌传播方面的具体应用：第 1 部分介绍通风系统，第 2 部分介绍紫外线 C 波段（UVC）。

结核感染预防与控制的环境控制措施包括：

通风		紫外线C波段（UVC）

机械通风和自然通风
机械通风：暖通空调（heating，ventilating，air-conditional，HVAC）系统
• 稀释通风
• 单向通风
• 单次通风（新风系统）
• 循环式通风
  • 无空气过滤
  • 空气过滤：分为低效、中效和高效三类；高效空气微粒过滤（high efficiency particulate air，HEPA）
  • 管道内UVC（紫外线杀菌照射）
混合通风
自然通风
	室内空气净化器（Room air cleaners，RACs）
	• HEPA过滤
	• 最低效率报告值（minimum efficiency reporting value，MERV）11-14级过滤
	• UVC
		• 上层空间UVC
		• 全屋UVC
		• 管道内UVC
		• 带UVC的RACs

什么是“调试”？

所有涉及建造或改造机构环境控制系统的项目都必须进行调试。调试工作（无论是针对建筑物还是具体的系统 [如 HVAC、UVC、RACs] ）是一个系统的过程，而不是单个的具体任务。按照美国暖通空调工程师学会 (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers，ASHRAE) 的定义，调试指的是比照一系列程序、方法和文件的要求，来验证建筑物是否能够按照预期目标正常“运行”。[1]

调试过程的主要阶段

1. **设计前阶段：**明确界定建筑物业主/运营方的需求、具体要求和预期目标。
2. **设计阶段：**确保设计方案能够满足业主/运营方的需求、具体要求和预期目标。这一阶段不仅需要设计人员参与，还必须有业主/运营方和同行共同参与设计评审并提出意见。
3. **施工阶段：**确保施工严格按照施工设计图纸的要求执行。

4. **使用和运行阶段：**确保最终完工的项目满足业主/运营方的需求、具体要求和预期目标，同时确保工作人员和管理人员具备运行该项目所需的专业技能和/或资金保障。
   - 在这一阶段，承包商应当向业主/运营方提供运行和维护手册，并对工作人员开展必要的培训。无论后续的运行和维护工作是外包给专业机构还是由业主/运营方自行负责，都必须确保将所有的维护和运行相关信息完整移交给具体负责人员。
   - 在施工阶段结束时或使用和运行阶段开始时，必须进行**性能测试**，并在设备和/或场所投入使用后定期复测。这种又被称为**最终验收测试**的程序，旨在验证设备在各种工况下都能满足设计要求。例如，需要验证HAVC系统在过滤器洁净和负载（脏污）两种状态下是否都能达到设计规定的送风量要求。

提示

> 对于小型项目（如安装RAC或对通风系统进行局部改造），可以由熟悉相关技术的专业人员负责监督整个调试过程。

> 对于大型项目，则通常需要由独立的**调试机构代表**、专业工程师或注册工业卫生师（必须熟悉项目所需开展的各项活动）来“见证”最终验收测试。调试机构代表能够确保整个调试过程得到充分和正确的执行。

第1部分

通风

利用通风系统降低结核传播风险

什么是通风？为什么需要通风？

通风是指建筑物内部的空气流动以及室内空气与室外空气的交换过程。在理想情况下，这一过程应以可控的方式进行。通风系统主要分为两大类：

- **机械通风：**通常指利用机械设备在建筑物内进行空气循环，可能同时进行供暖和 / 或制冷。这类系统可引入也可不引入室外新风。
- **自然通风：**主要依靠空气的自然流动（通过门窗、通风管道 / 通道以及建筑物的设计等）引入室外空气。在这一过程中，可使用风扇来辅助空气的流动和分布（这种情况称为混合通风）。

通风系统主要发挥三个作用：

- 稀释和 / 或清除空气中的感染性气溶胶
- 阻止和 / 或防止感染性颗粒物向医疗卫生机构内其他区域扩散
- 营造舒适的室内环境（包括温度、相对湿度、低噪音，且无令人不适的风）

通风系统如何降低结核传播风险

通风系统主要通过稀释、清除和控制来降低经空气传播疾病的传播风险。

稀释（全面）通风：当洁净的室外空气通过自然或机械方式进入室内，并与现有空气充分混合时，能够降低室内细小的感染性颗粒物的浓度。例如，打开门窗让清洁的室外空气进入，可稀释室内难闻的气味、降低二氧化碳（Carbon dioxide，CO_2）浓度，并减少各类空气污染物。通过稀释作用，可降低房间内人员吸入感染性颗粒物的可能性。[1]

清除和控制：通风系统除具有稀释作用外，还可通过特定措施将含有感染性颗粒物的空气安全地引导到远离医疗卫生机构内人员的区域（控制措施），从而帮助预防空气传播。

感染性颗粒物的清除可通过以下方式实现：

- 将可能受污染的室内空气排放到室外安全区域（如：远离人员活动、通风系统进气口和建筑物任何开口的区域），同时使用室外新风进行替换；
- 采用过滤或照射杀菌的方式捕获或灭活含结核分枝杆菌的感染性颗粒物，然后将经过处理的洁净空气回流到医疗卫生机构内；
- 同时采用上述两种方法。

在所有配置了通风系统的空间中，空气都处于持续的进入（引入）和离开（排出）的过程中。新引入的空气进入空间后，会在一定程度上与该空间内既有的空气发生混合。当空气混合充分时，可稀释空间内的各类空气污染物（包括气态污染物、异味和感染性颗粒物）。

- 空气混合的程度越充分，对感染性颗粒物的稀释效果就越好。
- 房间内的气流模式越合理，对感染性颗粒物的清除效果就越好。

通风系统的设计必须同时考虑并权衡这两个特性。

气流流速和每小时换气次数（Air changes per hour，ACH）

- **机械气流流速**（也称为体积气流率，以立方英尺 / 分钟 [(cubic feet per minute，CFM] 或立方米 / 小时 [m^3/hr] 表示）是指单位时间内流经某个截面的空气体积。就特定房间或空间而言，这一指标可表示通过百叶窗、散流器、门缝以及空间围护结构上各类开口进出该空间的空气总量。[2]
- **洁净空气输出比率**（Clean air delivery rate，CADR，以 CFM 或 m^3/hr 表示）是指单位时间内输送的“洁净空气”的体积。在本手册中，洁净空气指的是室外空气与经处理的空气（指已去除颗粒物和 / 或已灭活其中微生物的空气）的总和。这里所说的空气处理方式可包括过滤和 / 或 UVC 杀菌。[3,4]
- **每小时换气次数（ACH）**或换气率是 CADR 和室内空气混合效率的函数（即由这两个因素决定）。具体而言，ACH 是指在单位时间（1 小时）内引入某个房间或空间的洁净空气量（或从该房间或空间排出的既有空气量）与该空间容积的比值。在理想情况下，如果房间或空间内的空气能够完全混合，则 ACH 数值表示该空间内的空气在一小时内被洁净空气完全替换的次数。[2,5]

目前许多医疗卫生机构的实际情况是：室内空气往往仅经过十分有限的净化就被循环使用，且完全不引入室外空气（ACH 接近零）或仅引入极少量或不固定比例的室外空气（ACH 极低）。为了改善这种情况，一些医疗卫生机构增加了环境控制措施来净化循环空气，包括使用特殊过滤器或采用 UVC 杀菌（也被称为紫外线照射杀菌（Ultraviolet Germicidal Irradiation，UVGI）。为评估这些控制措施的效果，可采用相对等效换气率（**等效换气次数，equivalent air changes per hour, eACH**）的概念，以便与严格意义上的 ACH 进行对比。[6,7] 注意：如果

ACH 室外空气为零，该空间可能无法满足控制 CO_2 和其他环境污染物所需的最低通风要求。

- 可通过以下四种方法产生 ACH（这些方法可以组合使用，但前提是空间内的空气能够完全混合）：
    - $ACH_{室外空气}$：洁净室外空气流入空间所产生的换气次数。
    - $eACH_{洁净}$：循环使用经过滤或UVC杀菌后的洁净空气所产生的等效换气次数。需注意，如果过滤或杀菌效率低于100%，则返回空间的空气不可能完全洁净。
    - $eACH_{RAC}$：经RAC处理后的洁净空气返回空间所产生的等效换气次数。需注意，如果净化装置的过滤或杀菌效率低于100%，则返回空间的空气不可能完全洁净。
    - $eACH_{上层空间UVC}$：循环使用经上层空间UVC杀菌处理后的洁净空气所产生的等效换气次数。
    - 当联合采用多种方法时，总等效换气次数（$eACH_{总}$）的计算公式为：

$$eACH_{总} = ACH_{室外空气} + eACH_{洁净} + eACH_{RAC} + eACH_{上层空间\ UVC}$$

室内空气清除

室内空气清除（%）指的是在特定时间段内空间中的感染性颗粒物被清除的百分比。这一指标可用两种方式表示：一是一小时内清除的感染性颗粒物的百分比，二是在特定 ACH 条件下达到规定清除率所需的时间。

- 假设房间或空间内的空气完全混合，且**没有新的感染性颗粒物产生**，达到 6ACH 时，一小时后将清除 99.75% 的感染性颗粒物（见表 1）。如果提高到 12ACH，则一小时后的清除率可达到 99.999%。
- 同样的，在空气完全混合且**无新的感染性颗粒物产生**的条件下，达到 6ACH 时，需要 46 分钟才能清除 99% 的感染性颗粒物，需要 69 分钟才能清除 99.9% 的感染性颗粒物。如果提高到 12ACH，则分别只需要 23 分钟和 35 分钟就能达到这两个清除率（见表 2）。
- 在现实情况下，大多数房间内的空气混合效果都无法达到理想状态，因此表 1 和表 2 中列出的颗粒清除效果和所需时间仅代表最佳理想情况。

注：将ACH提高到12以上时，额外获得的收益将呈递减趋势。对于大多数空间而言，这样做会带来成本的显著增加，但效益提升却很有限（见表1）。但痰液采集亭等小型空间可能例外，在这类空间中，以相对合理的成本实现ACH或eACH大于12，从而获得额外的清除和/或灭活效果是可行的。

表1：**每小时换气次数（ACH）与感染性颗粒物清除的关系：**在没有患者 / 服务对象 / 工作程序产生感染性颗粒物且空气“完全”混合的情况下，下表展示了不同 ACH 条件下一小时后剩余和被清除的感染性颗粒物的百分比。[8]

ACH	剩余 (%)	清除 (%)
1	36.8	63.2
2	13.5	86.5
4	1.8	98.2
6	0.25	99.75
9	0.01	99.99
12	0.001	99.999
18	0.000002	99.999998
24	0.000000004	99.999999996

来源：P.A. Jensen

表2：**每小时换气次数（ACH）与清除时间的关系：**假设空气“完全”混合，不同 ACH 条件下达到清除 99% 和 99.9% 感染性颗粒物所需的时间见下表。[5]

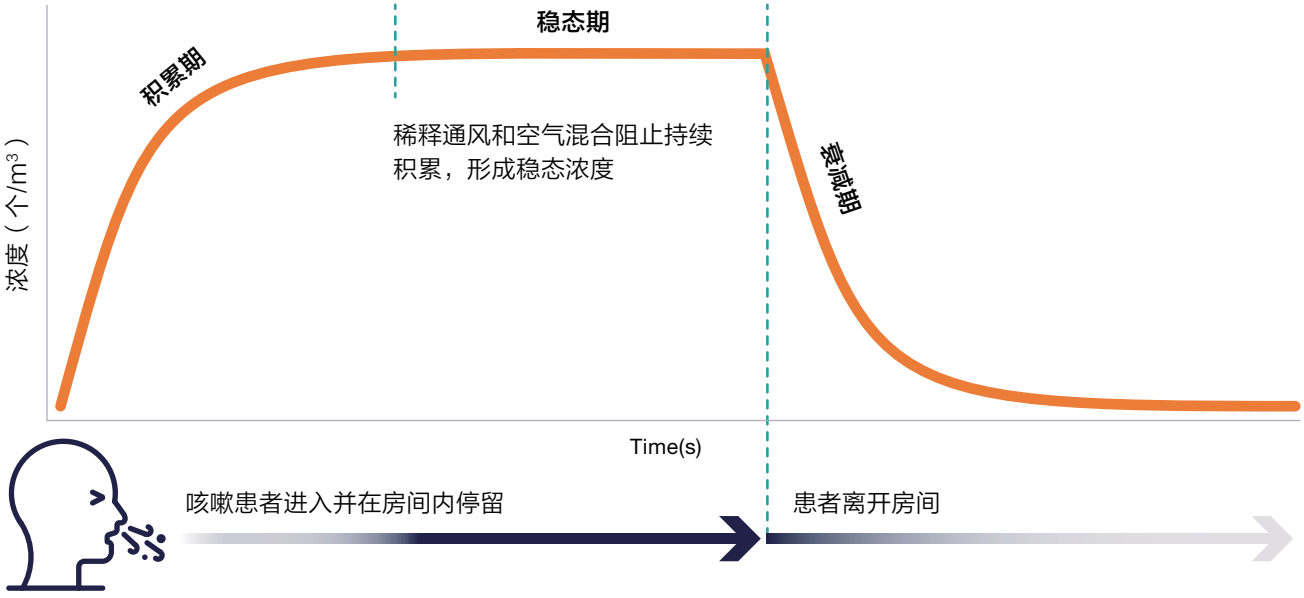
	达到相应清除效率所需的分钟数*	
ACH	99%	99.9%
2	138	207
4	69	104
6	46	69
12	23	35
15	18	28
20	14	21
50	6	8
400	<1	1

* 指将空气中污染物浓度降低99%和99.9%所需的分钟数

来源：美国疾病预防控制中心《医疗卫生机构结核分枝杆菌传播预防指南》，2005年[5]

注：如果房间内持续产生感染性颗粒物（如：存在未经治疗的、正在咳嗽的肺结核患者），即使设计良好的通风系统能够稀释和降低感染性颗粒物的浓度，但房间内的感染性颗粒物的数量最终将在产生量和清除量之间达到稳定状态（见图 1）。在传染源未被移除的情况下，房间内的感染性颗粒物数量不会降至零。提高 ACH 可以降低房间内感染性颗粒物的稳态浓度。与没有传染源时的感染性颗粒物衰减情况类似，将 ACH 提高到 12 以上所带来的收益将呈递减趋势。只有当产生感染性颗粒物的患者离开房间后，持续的空气交换才能完全清除房间内的感染性颗粒物。如图 1 中的浓度衰减曲线所示。[8]

图1：**感染性颗粒物的产生和清除：**在完全混合的稀释通风条件下感染性颗粒物稳态浓度示意图，以及传染源移除后的清除（衰减）曲线。



来源：P.A. Jensen/CITC

有关如何计算ACH和室内空气清除时间的详细分步说明，请参见附录A“室内空气清除时间计算工作表”。

利用定向气流减少结核传播

什么是定向气流?

通风系统除了基本的通风换气功能外，还有助于降低室内特定区域感染性颗粒物的浓度。通过确定洁净空气进入空间的位置，以及可能受污染的空气的排出位置，可根据定向气流的特点来合理安排人员位置和活动区域，从而优化通风系统的防护效果。

基本布局原则

- 需保护其免于结核暴露的人员应当靠近清洁空气引入处
- 可能具有传染性的人员应当靠近空气排出处

在某些指南和建议中，定向气流也称为“气流流向”。

定向气流如何降低结核传播风险

定向气流原理既适用于机械通风系统，也适用于自然通风系统。

单向气流（水平方向）：如果应用得当，科学、合理地利用定向气流可以保护工作人员免受未被识别的结核病患者的感染。[5] 例如，在接诊过程中，合理利用水平定向气流可以降低结核从患者 / 服务对象传播给工作人员的可能性。

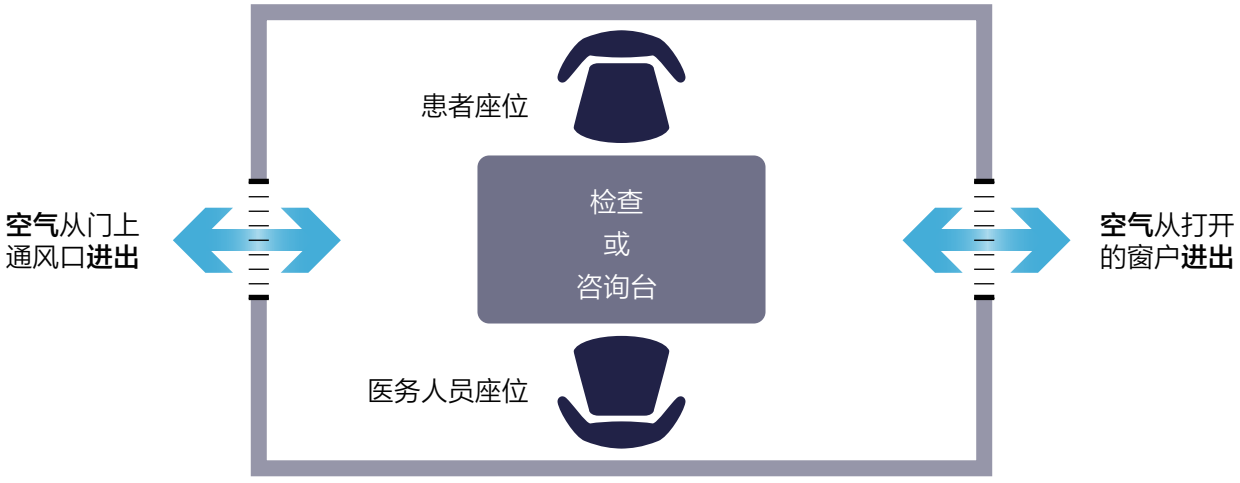
- 如果气流方向始终保持不变（如，房间安装了性能可靠的、仅排风的窗式排风扇），工作人员应当坐在室外（清洁）空气引入处附近，患者 / 服务对象则应当坐在排风口附近，布局参见图 2A。

图2A：**单向气流房间布局：**使用仅排风窗式排风扇的单向气流房间布局示例（结核检查室或诊室）

改编自美国疾病预防控制中心《结核病核心课程：临床医生必备知识》第6章“结核感染控制”，2021年[9]

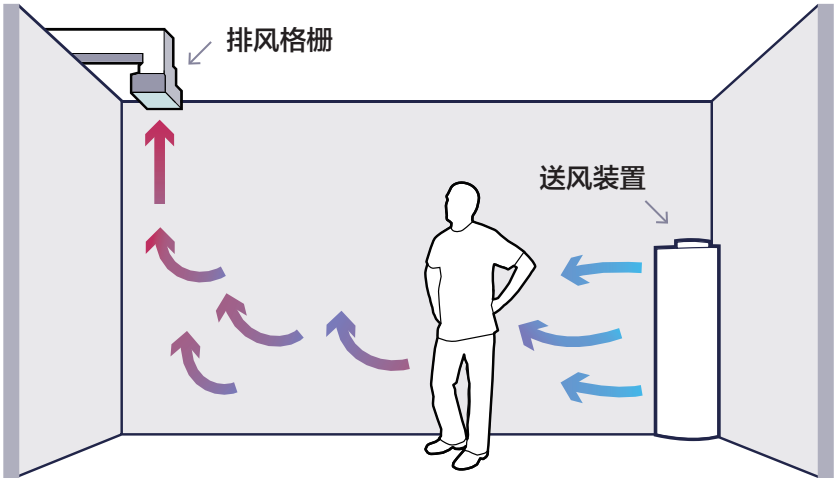
在气流方向可能不太稳定的自然通风房间内（如图 2B 所示），应将桌子旋转 90 度，这样无论气流从哪个方向流动，都能保持医务人员与患者之间有适当的气流方向。注意：当仅排风的窗式排风扇的功率相对较弱而室外主导风较强时，单向气流可能无法达到预期效果，此时可能更适合采用图 2B 所示的布局方式。

图2B：**变向气流房间布局：**适用于气流方向可能不固定的房间布局示例，通常用于自然通风房间（结核检查室或诊室）



置换通风（垂直方向）：这是一种垂直的单向空气分配系统，通过在地面附近设置送风散流器，以低速引入经过处理的“洁净”冷空气，同时通过设置在人员活动区域上方（通常位于天花板处）的排风口将空气排出（见图 3）。房间内的人员和设备会使空气升温，温度升高的空气会向上运动（这种现象称为“浮力作用”），使温度较低的清洁空气始终积聚在地面附近。随着空气逐渐升温，结核病患者产生的感染性颗粒物会被形成的热羽流携带上升，并从天花板处或其附近的排风口排出室外。如需了解置换通风方案的详细信息，请参见 2016 年《Price 工程指南：置换通风》（Price Engineering Guide Displacement Ventilation）。[10]

图3：**置换通风房间示例**

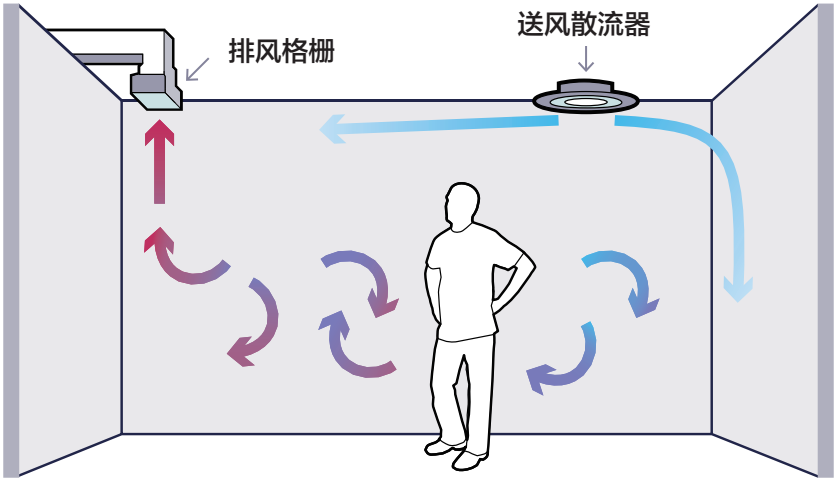


在人员密集场所运用定向气流和稀释通风

在病房或候诊区等可能聚集较多人员的房间内，任何一个人都可能成为结核病传染源，从而感染室内其他人。此时，为保护空间内某一特定区域而设置的气流流向通常不太重要。但也存在例外情况，例如：在人员密集场所附近设有固定的工作人员或医务人员区域（如接待台或护士工作站）时，最理想的做法是让洁净空气从工作人员 / 医务人员区域流向患者或服务对象聚集的区域。

- 通过通风达到稀释目的时，要向空间内提供经过充分混合的洁净空气以降低感染性颗粒物的浓度，并将这些空气均匀地输送到空间各处。这种方法可有效降低所有在场人员面临的平均传播风险，其防护效果不会因潜在传染源位置的不同而受到影响（具体布局见图 4）。
- 另一种达到人员密集场所稀释目的的解决方案是：在配备了良好空气混合系统的空间内安装上层空间 UVC 装置进行空气消毒。[7,11] 详细信息请参见“环境控制：UVC“中的“上层空间 UVC”章节。
- 对于那些无法确定潜在感染性颗粒物具体来源的人员密集场所，还可采用置换通风方法，即在整个空间的地面附近持续供应温度较低的洁净空气。

图4：**稀释通风示例。**请注意图中圆形百叶送风散流器与天花板排风格栅之间需要保持一定的距离



在检查定向气流和气流模式

人们往往可以通过体表感觉或“气味”来判断空间内是否存在气流。在通风良好的空间内，可能存在轻微的气流；但是，这种气流不止取决于散流器（即送风口）的设计，不能将其作为判断通风系统有效性的依据。如果空间内通风不足，人们会感觉到空气闷热和不新鲜，而且异味会长时间滞留。

机构通风状况评估核查清单

- ☐ 检查所有有人使用的房间是否都有自然通风或机械通风系统（必须同时有送风和排风）。在需要定向气流的场所，应验证气流是否按预期方向流动（如，气流应从送风口穿越房间流向排风口，或从走廊流入房间）。还需注意：空气可能会通过打开的门或门上的百叶窗格流向相邻空间。
- ☐ 检查窗户、门、通风口、风管等是否便于开启和保持开启状态；检查所有送风散流器和排风格栅（排风口）是否处于开启状态，气流是否畅通无阻。注意：同时采用自然通风（即向室外开启门窗）时，大多数机械通风系统将无法正常发挥作用。
- ☐ 检查房间所有区域的空气混合情况，并确定各处的气流运动方向。推荐采用的检查方法是使用专门用于检查气流的无刺激性“发烟管”或“烟/雾发生器”。出于安全考虑，醋酸发烟管可能比硫酸发烟管更适合。[12] 此外，还可以采用一些经济实惠的方法来观察气流移动情况，如使用薄纸条或线香（可能需要同时点燃两支才能产生足够的可见烟雾）。

接下一页

机构通风状况评估核查清单

接上一页

☐ 检查程序的大致步骤如下：

1. 按照制造商的使用说明激活发烟管（或将两支线香并在一起点燃，待其开始燃烧后，吹灭火焰，用一只手掌罩住烟雾，使其自然冷却，直至烟雾达到中性浮力状态）。
2. 观察烟雾的流动方向。需要在空间的不同区域重复进行测试（包括关闭的房门下方的门缝处），并记录观察结果。

   观察烟雾消散的速度。这是一项主观性的测试，可能需要一定的实践经验才能较好掌握。虽然这种方法不能得出确切的定量结果，但可用于定性比较不同房间的通风情况。例如，在某个房间内烟雾可能在 1 分钟内就消散，而在另一个房间可能需要 10 分钟才能消散。应针对医疗卫生机构内的各种常见使用情形重复进行烟雾测试。例如，某些房间可能在白天保持门开启而在夜间关闭，则应在这两种情况下都进行测试。如果观察发现烟雾在大约 5 分钟的时间内没有明显移动或消散，应请环境工程师协助进行专业技术评估并考虑采取改进措施。

有关检查气流的其他方法（如烟雾测试、纸条测试、压差计的使用等），参见第 4 章“经空气传播感染隔离房间”的“监测 AIIR 环境控制情况”一节。

机械通风

机械通风系统利用机械设备在房间或场所内实现空气稀释、污染空气清除和气流模式控制。这类系统包括建筑物的暖通空调（heating, ventilation, and air-conditioning, HVAC）系统，有时还包括专为某个房间或工作站设计的特殊通风系统。医疗卫生机构应配备拥有通风专业知识（最好是医院、医疗卫生机构、实验室和 / 或防护环境所需的通风专业知识）的工程师或其他专业技术人员。如果机构缺乏此类专业人员，应聘请具有医疗卫生机构通风工程经验的外部顾问来解决设计、安装或维护方面的问题。通风系统的设计必须满足相关要求。

- 机械通风系统可采用定向气流设计方案，向场所内的特定区域供应洁净空气（如，使洁净空气以单向气流方式流向工作人员所在位置，同时在潜在传染源附近设置污染空气清除装置）。
- 机械系统也可采用垂直置换通风方案，即在地面附近引入冷空气，同时在天花板附近排出升温后的空气，将这种方式作为清除经空气传播感染性颗粒物的主要手段。对某些场所，特别是大型的人员密集场所，置换通风方案在清除经空气传播感染性颗粒物方面可能比稀释通风更加有效，而且能够更加等效地降低场所内所有人员的暴露风险。

本节将详细介绍机械通风系统在感染控制领域的两类应用：

- 负压和正压系统
- HVAC 系统

如需了解更多的机械通风原理和具体实施方法，可参考以下文件：

- 关于结核感染预防与控制的总体指导原则以及负压或正压系统具体应用的详细要求：参见美国疾病预防控制中心 2005 年发布的《医疗卫生机构结核分枝杆菌传播预防指南》（Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-Care Settings）。[5]
- 关于经空气传播感染隔离房间（AIIRs）：参见美国疾病预防控制中心 2019 年更新的《医疗卫生机构环境感染控制指南》（Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities），其中收录了美国疾病预防控制中心和医疗卫生感染控制实践咨询委员会（HICPAC）提供的专业建议。[13]
- 医疗设施指南学会（Facilities Guideline Institute）编制的医院和门诊机构，以及居住、护理和辅助支持类机构的建筑设计和建造技术规范。[14,15,16]

气流差和压差

为更好地理解机械通风的策略及其系统，需要首先理解气流差和压差这两个概念：

- **气流差**（以 CFM 或 m^3/hr 为单位）指的是送入房间的总气流流速与从房间排出的总气流流速之间的差值。当差值为负值时，如果房间 / 空间的密封性良好，没有过多开口或漏风点，则该房间 / 空间相对于周围空间会形成负压。反之，当差值为正值时，如果房间 / 空间的密封性良好，没有过多开口或漏风点，则该房间 / 空间相对于周围空间会形成正压。
- **压差**（以英寸水柱（"wg）或帕斯卡（Pa）为单位）指的是房间 / 空间内部压力与房间 / 空间外部压力之间的差值。当内部压力低于外部压力时，该房间 / 空间相对于周围空间处于负压状态。当内部压力高于外部压力时，该房间 / 空间相对于周围空间处于正压状态。

通过使用专用设备（如负压实验室通风罩或痰液采集亭）或机构的 HVAC 系统，可机械性地调节送风风速和排风风速，从而相对于周围环境创建所需的负压或正压空间。空气流动由压差驱动，即空气始终从压力较高的空间流向压力较低的空间。

负压如何降低结核传播风险

负压是通过设置（或平衡）通风系统来实现的，具体方法是：利用机械通风系统使从房间排出的空气量大于送入的空气量，直到压差超过 0.01"wg（2.5Pa）。这种状态会造成通风不平衡（称为气流差），使该房间相对于包括走廊在内的周围区域形成负压。如果房间的密封性足够好，它会通过不断从外部吸入空气来补偿这种气流差。

- 在房间内产生的感染性颗粒物会被限制在房间内，这是通过从门底缝隙或墙壁、天花板、地板的开口处持续吸入空气来实现的。因此，当负压房间按照设计要求使用时，感染性颗粒物不会扩散到走廊或医疗卫生机构的其他区域。

负压是通过HVAC系统造成房间排出的空气量大于送入房间的空气量形成的。

通过从门底缝隙或墙壁、天花板、地板的开口处持续吸入空气来实现将感染性颗粒物限制在房间内。

最常见的负压实例是住宅浴室。浴室常只安装排风扇，而没有送风装置。在医疗卫生机构中，负压最常见的应用是用于创建 AIIRs 或在生物安全柜中创建局部负压区域。

应按照感染预防与控制计划对室内压力状态进行监测。即使 AIIRs 配备了电子压力监测装置，美国疾病预防控制中心仍然建议，在 AIIRs 投入使用前利用发烟管或其他可视化方法验证其负压状态。此外，当房间内收治有疑似或确诊结核病患者时，应每天进行压力状态检查。可使用附录 B 中的《经空气传播感染隔离房间压力监测核查清单》作为记录检查结果的模板。如需了解更多的气流检查方法（如烟雾测试、纸条测试、压差计的使用等），请参见第 4 章“经空气传播感染隔离房间”的“监测 AIIR 环境控制情况”一节。

负压：经空气传播感染隔离房间（AIIRs）

经空气传播感染隔离房间（AIIRs）利用稀释通风原理降低室内经空气传播的感染性颗粒物浓度，同时采用机械控制方法防止房间内的污染空气流向共用走廊或其他相邻室内空间。如前节所述，这是通过使从房间排出的空气量大于送入的空气量，从而相对于相邻空间形成负压差来实现的。这类房间有时被称为“负压”房间。

美国疾病预防控制中心于 2005 年给出的相关建议：[5]

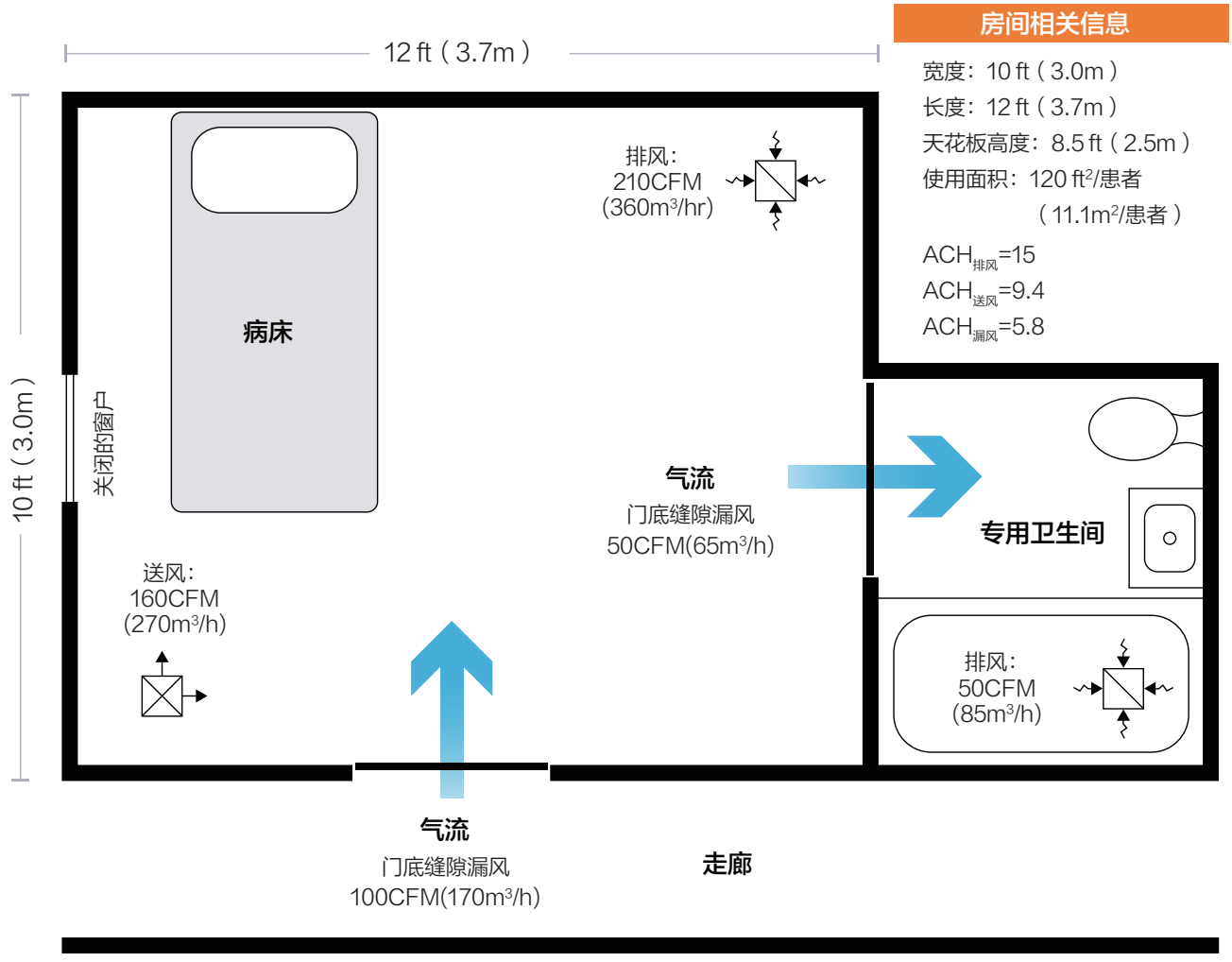
- 为稀释空气中的结核分枝杆菌或其他微生物，AIIRs 的通风应至少达到 **12ACH**。
- 为控制空气中的结核分枝杆菌或其他微生物，**AIIRs 相对于周围区域的压差不得低于 0.01"wg（2.5Pa）**，以确保空气的持续流入。考虑到 HVAC 系统气流流速可能出现小幅波动，AIIRs 通常将最小压差设定为 0.05"wg（12.5Pa），以确保持续维持负压效果。
- 为维持相对于周围区域的负压差，**排出的气流流速必须比送风至少高出 10% 或 100 CFM（170 m^3/hr）以上（取两者中较大值）**，这被称之气流差。
- 不得在 AIIRs 中使用常用于调节不同温度“分区”的变风量（Variable air volume，VAV）系统。VAV 系统的主要功能是根据房间温度调节气流流速，可能无法持续稳定地满足污染物控制的要求。

注意：某些机构采用了高达 0.1"wg（25Pa）的压差；然而，维持这种高压差较为困难，需要更强大的通风设备、更坚固的风管系统、以及房间的严密密封。

更多有关 AIIRs 的详细信息，包括将现有房间升级或改造为 AIIRs 时需要考虑的各项因素，请参见第 4 章“经空气传播感染隔离房间”。

AIIR 示例见图 5。

图5：**用于收治结核病患者的AIIR通风方案示例**



来源：改编自美国疾病预防控制中心《核心课程》第6章[9]

- 图中 AIIR 的机械排风气流流速为 210 CFM，高于 HVAC 系统 160 CFM 的送风气流流速。卫生间的机械排风气流流速为 50 CFM。总气流差达到 100 CFM，符合疾病预防控制中心的推荐。此外，15ACH 超过了疾病预防控制中心对于 AIIR 的推荐。假设该 AIIR 除门底缝隙外没有其他较大开口通向周围区域，该房间内的压力将比走廊和相邻区域至少低 0.01"wg（2.5Pa）。
- 由于压差的作用，额外的空气会从压力较高的走廊通过门底缝隙流入房间（100 CFM）。这种持续向内的气流可以防止房间内患者产生的感染性颗粒物通过走廊扩散到医疗卫生机构内的其他区域。
- 需注意的是，洁净空气送风口与排风格栅之间应保持一定距离，以免洁净空气“短路”，即防止洁净空气在未能与房间内的空气充分混合并稀释感染性颗粒物浓度之前就被直接排出。

- 排风格栅设置在靠近患者（潜在的感染性颗粒物产生源）处。排出的空气必须释放到室外，且应远离其他窗户或建筑物的进气口，也要远离人员可能在室外聚集的区域。

AIIR的漏风和密封

要使 AIIR 达到至少 0.01"wg（2.5Pa）的压差，需要设置适当的气流差。所需的气流差大小取决于房间的漏风面积和气流差。如果房间密封不良，就无法维持设计要求的压差，可能导致含有感染性颗粒物的污染空气流入相邻空间。人们可能常以为漏风只会出现在门底缝隙处，但实际上房间还存在多个可能的漏风位置，包括窗户和门的周边缝隙、墙面电气插座或其他管线的穿墙孔洞、吊顶空间，以及墙壁、天花板或地板上的其他开口。

- 为使房间达到尽可能好的气密性，防止空气通过裂缝和其他缝隙被吸入，并维持所需的负压水平，通常需要对房间进行专门的密封处理。
- 如果漏风导致进入房间的空气量超过了维持负压所需的气流差，这些过量的空气就会从门底缝隙和其他开口流出房间。这种情况下，即使机械系统设计为负压状态，房间实际上也会处于正压状态。
- 如果建筑物的外围护结构（包括所有与室外相接的构件：外墙、地基、屋顶、窗户和门）未经密封处理，外部风就会影响房间的压力。
- 吊顶空间（即采用 2ft × 2ft 或 2ft × 4ft 板材构建的夹层天花板空间）是空气渗透的重要通道，可能需要很大的气流差才能维持足够的压差。[13–15] 医疗设施指南学会（The Facility Guidelines Institute，FGI）建议 AIIRs 的天花板应采用无接缝的实心结构，以构建有效的压力屏障（更多技术细节参见参考文献）。[14–16]

随着门底缝隙变窄，空气通过缝隙进入房间的流速会增加，压差也会增加。

- 根据经验，门底缝隙处的气流流速应当保持在至少 100fpm（0.5m/sec）。

每当房门被打开时，门口处的气流方向都是不确定的。尽管气流差会使进入房间的总气流量大于流出量，但门开口较大时会导致空气在门口处产生自由流动：一部分空气流入房间，另一部分空气则会流出房间。为减少人员进出房间时这种空气自由流动带来的负面影响，负压空间可设置前室作为缓冲区域。[17]

气流差越大，房间密封性越好，对感染性颗粒物的控制效果就越佳。

正压：防护环境

某些区域（如：邻近人员密集病房的护士工作站）需要特别加强防护。这种防护可以通过创建正压环境来实现，具体做法是：**相对于相邻区域，向需要保护的空间输送更多的洁净空气**。这种设置有助于防止相邻区域可能存在的污染空气流入受保护区域。

- 创建防护环境时，空气交换率建议为 12ACH，压差同样建议为 >0.01"wg（2.5Pa）；但空气是从房间向外流动。这种设置有时被称为“正压”。
- 为使房间相对于周围区域形成可靠的正压，送入房间的气流流速必须比排出的气流流速至少高 10% 或 100 CFM（170 m^3/hr）（取两者中较大值）。
- 防护环境的设计和维护原理与 AIIRs 基本相似，但存在一个根本性的区别：在防护环境中，驱动气流和形成压差的动力来自于送入的洁净空气量大于排出或回收的空气量，从而在房间内形成正压。手术室、骨髓移植病房和烧伤病房是需要设置这种防护环境的其他典型场所。

在特殊情况下，可能需要在相邻空间分别设置正压区域和负压区域，或设计同时具有 AIIR 和防护环境的组合式房间。例如，当需要收治免疫功能严重低下且处于传染期的经空气传播疾病患者时，就需要采用这种特殊的护理单元。

局部通风方法：采集亭、帐篷和通风罩

局部通风是一种专门的通风方法，其目的是在经空气传播污染物（如感染性飞沫核或其他感染性颗粒物）扩散到普通环境之前，将其及时收集和 / 或清除。

- **封闭式装置具有双重作用：既可以将气溶胶的产生限制在特定区域内，又能清除已经产生的气溶胶感染性颗粒物。**
- 最常用的局部通风装置包括痰液采集亭、隔离帐篷、封闭式通风罩和生物安全柜（Biological Safety Cabinets，BSCs）。
- 用于痰液采集 / 诱导或传染性患者隔离等的封闭式采集亭和隔离帐篷有多种不同的设计方案可供选择。
- 外部排风式通风罩通常效率不高，除非其具有较高的捕获速度且放置在非常靠近气溶胶产生点的位置。如果考虑在痰液诱导等气溶胶产生高风险操作中使用通风罩（但通常不建议用于此类用途），必须谨慎，应请环境工程师或承包商进行充分评估。
- 通风橱和 BSCs 主要用于临床实验室、微生物实验室和研究型实验室。本手册不会深入讨论这两种技术，如需了解相关内容，请参见美国疾病预防控制中心合作编写的参考资料《抗酸杆菌涂片镜检专用通风橱手册》（Ventilated Workstation Manual for AFB Smear Microscopy）（Angra，2011）。[18]

痰液采集亭

痰液采集亭是一种功能类似于微型 AIIR 的封闭装置。产生气溶胶的操作在采集亭内进行（患者在采集亭内，医务人员在采集亭外）。参见图 6。

- 通常情况下，痰液采集亭应当设置在符合 AIIR 通风要求的房间内。推荐采取这种设置的目的是：当排风系统中的 HEPA 过滤器和 / 或 UVC 装置不能正常工作时，可以保护医务人员的安全。
- 痰液采集亭内的压力必须低于周围区域，以防止污染物扩散到房间内。
- 通常情况下，痰液采集亭运行时应达到 20–24ACH 或更高，压差至少达到 0.1"wg（25Pa）。
- 某些采集亭配备了 HEPA 过滤器，可将过滤后的空气回送到同一房间或排出至室外；其他采集亭则直接将所有空气排出至室外，但排放口位置必须远离人群、开启的窗户和通风系统的进气口。

图6：

痰液采集亭

（设在AIIR内）

来源：柯里国际结核病中心 / 旧金山公共卫生署结核病预防控制诊所

隔离帐篷

“帐篷”有多种不同的配置形式。图 7 展示的是一种可以同时容纳患者及其所需全部医疗设备的帐篷。

- 没有 AIIRs 时，隔离帐篷可以用作临时隔离设施。
- 可在常压房间中的帐篷内创建负压环境，以降低传染源对医务人员的传播风险。
- 也可将带有负压环境的帐篷设置在正压环境（帐篷外部空间）中，实现负压隔离和防护环境的组合功能。
- 帐篷必须同时满足以下两项基本要求：一是确保气流持续向帐篷内流动，二是至少达到 12ACH，且压差至少达到 0.01"wg（2.5Pa）。
- 如果 HEPA 过滤器得到适当维护和检测，过滤后的空气可循环使用；否则，必须将空气安全地排出至室外。

图7：

隔离帐篷示例

来源：加利福尼亚大学旧金山分校 / Barbara Ries

暖通空调（HVAC）系统

尚未安装 HVAC 系统（集中通风系统）的医疗卫生机构可通过增设该系统来改善空气循环并降低结核传播风险，已安装的医疗卫生机构应进行必要的改进，确保系统配备了所需的全部组件并符合相关要求。在所有情况下，都必须制定并严格执行环境控制措施，以防止污染物扩散。

本节将详细介绍 HVAC 系统以及评估和改进系统的具体方法。这些内容对负责机构机械系统运行维护的人员、以及考虑为新建或现有建筑设计 HVAC 系统的人员都具有参考价值：。

机械通风系统介绍

HVAC 系统（也称为强制通风系统）是一种在建筑物内部循环空气的机械通风系统。该系统通过同时提供室外新风和经过处理的洁净空气（经过滤和 / 或 UVC 消毒）来稀释空气，从而帮助预防结核传播。[19]

然而，由于这种系统在整个建筑物内循环空气，如果使用不当，可能在无意中将含有结核分枝杆菌的颗粒物从结核病患者所在的房间输送到建筑物的其他区域。有文献报道过相关案例：某些人员虽然从未与传染性患者共处同一房间，但由于**共用同一个通风系统而感染了结核**。[20]

利用机械通风系统加强结核感染预防与控制

HVAC系统可通过以下四种途径帮助阻断结核传播路径：

- 向室内引入室外空气，以稀释和置换室内空气。
- 利用过滤器去除循环空气中的感染性颗粒物。
- 利用 UVC 灯对循环空气进行消毒处理。
- 通过系统设计来维持 AIIR 和防护环境所需的压差。

这些功能既可以在设计新系统时纳入，也可以添加到部分现有系统中。

HVAC系统的配置形式

HVAC 系统可采用多种不同的配置形式。通风机组可以安装在设备间、屋顶、阁楼、地下室、墙体设备柜内，或者直接悬挂在室内天花板上。尽管配置形式不同，但系统的基本组件通常相似，往往包括以下部分或全部组件：

- 用于去除室外空气中颗粒物的过滤装置
- 用于去除循环空气中颗粒物的过滤装置
- 安装在管道中用于灭活微生物的 UVC 灯

- 用于驱动空气流动的风机
- 加热部件
- 制冷和 / 或除湿部件

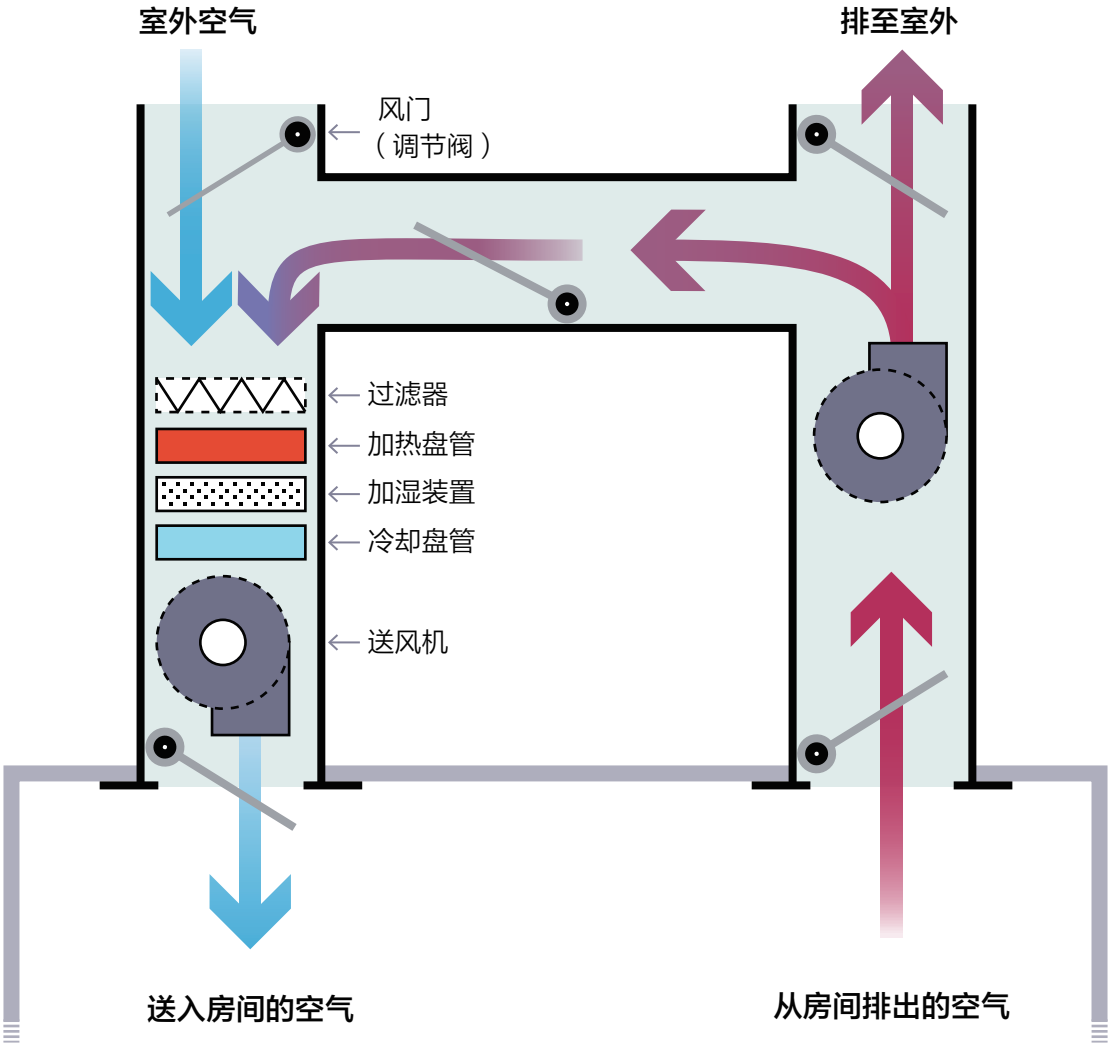
这些组件既可以集成在同一个机组内，也可以分别安装在不同的部分。系统还可能包括其他部件，例如：

- 恒温器和控制装置
- 用于输送和收集空气的风管、散流器和 / 或回风格栅

循环式 HVAC 系统配置示例见图 8。

有关 HVAC 工程原理的详细介绍，请参见 Price Industries 的《工程师暖通空调手册》(2011)。[21]

图 8：**循环式HVAC系统示例（引入一定量的室外空气）**



循环式HVAC系统

某些建筑物采用的 HVAC 系统会将全部回风循环使用，即 100% 使用循环的室内空气，完全不引入室外空气。

在 100% 循环式 HVAC 系统中，向房间输送空气的目的是提供通风和 / 或供暖或调节温度。送入的空气与室内空气混合后被抽回（即回风）到 HVAC 系统，经过过滤和 / 或 UVC 消毒以及加热和 / 或制冷处理后，被再次送回房间。

即使在使用循环式 HVAC 系统的建筑物中，部分房间也需要采用排风而非回风方式。最典型的是卫生间、淋浴间、机构的厨房等，通常会设置独立的排风扇，将空气直接排出至室外。此时需特别注意：要防止排出的空气通过附近门窗缝隙、天花板、墙体等漏风点或室外新风口重新进入建筑物。

从结核病预防控制的角度来看，最理想的 HVAC 系统是不循环使用室内空气的系统，即 100% 采用室外空气（单次通风）的系统。在这种系统中，所有送入房间的空气均来自室外，这些空气经过过滤和加热 / 制冷后，送入 AIIR。而室内所有可能携带污染物的空气则直接排出至建筑物外。

然而，单次通风的 HVAC 系统在小型医疗机构中并不常见，因为持续将室外空气调节至舒适的温度和相对湿度会产生较高的费用。例如，当室外温度为 40 华氏度（℉）、室内温度为 70 ℉时，循环使用 70 ℉的室内空气比将 40 ℉的室外空气加热至 70° F 更为经济。为确保室内环境舒适并防止霉菌滋生，室内相对湿度应保持在 40%–60% 的范围内。

大多数商用 HVAC 系统（如办公建筑使用的系统）采用的是介于全循环和全新风之间的方案。这些系统循环使用大部分（但不是全部）回风，其中室外新风量通常占总送风量的 10%–30%。如果未经适当处理，循环使用空气可能会增加感染风险。许多大型 HVAC 系统还配备了能量回收装置。详细信息请参见 ASHRAE 关于新型冠状病毒肺炎的建议 [22] 以及《ASHRAE 手册：暖通空调系统和设备》（2020 年）。[23]

送风与排风

通风系统通过散流器和格栅来输送和排出空气。在大多数医疗卫生机构中，散流器和格栅通常安装在天花板或墙面上。

- 送风口采用**散流器**，排风口（或回风口）采用**格栅**或百叶风口。
- 送风口或排风口与风管连接的部位称为接管段。接管段的尺寸要根据设计的气流流速和空气流速来选择。

- 送风口或排风口的类型或样式是指其在室内可见的表面结构形式。例如，多数送风散流器采用百叶片式结构，而多数排风格栅采用多孔金属板式结构。

向室内输送空气称为送风。从室内抽出空气则根据其去向分为回风或排风两种：

- **回风**是指空气返回 HVAC 机组被循环使用，回风最高可达 100%。
- **排风**是指空气直接排出至室外，不再循环使用，排风最高可达 100%。

特定的通风率在清除空气污染物方面的实际效果，主要取决于空气混合的充分程度，而空气混合的效果主要由空气进出房间的方式和位置决定。空气混合不良会导致气流滞留、温度分层和气流短路等现象，会降低稀释通风的效果，必须避免。

- **气流滞**留指的是房间某些区域接收不到清洁送风。这种情况可能出现在完全没有通风的房间，或者散流器设计、安装存在缺陷的房间。在气流滞留的区域，人们会感到气闷。这些区域内的感染性颗粒物难以扩散，浓度会持续保持在高水平。
- **温度分层**指的是室内从下至上形成温度梯度。如果房间设计不当，如送风散流器安装在天花板上或天花板附近，供暖季节送入的温暖洁净空气可能会滞留在房间上部，无法与下层空间的空气充分混合。这样既无法达到稀释的目的，也无法使人员活动区域得到有效升温。
- **气流短路指**的是洁净空气还未与室内空气充分混合即被排出，这种情况常见于排风格栅紧邻送风口的布置。对一个房间来说，不仅需要充足的洁净空气供应，这些空气还必须与室内现有空气充分混合。

通过适当选择和布置送风散流器与排风格栅的位置，可帮助避免气流滞留、温度分层和气流短路问题。

如需了解更多 HVAC 系统原理和混合通风的工程技术细节，请参见 Price Industries 的《工程师暖通空调手册》(2011)。[21,24]

HVAC系统的组件

散流器和格栅

送风散流器提供经过温度调节的空气以保证舒适度（温度和相对湿度），同时提供室外新风和 / 或经净化的循环空气，以降低空气中的 CO_2、异味、化学气体和感染性颗粒物浓度。洁净送风也能降低室内感染性颗粒物的浓度。

- 举例说明：某流浪人员收容所的 HVAC 系统为两个独立的宿舍房间供暖。每个宿舍的天花板上安装了 3 个小型送风散流器，将空气引向人员所在区域，确保两个房间的所有人员都能获得供暖。走廊上安装了一个大型格栅，将空气回送至 HVAC 系统。在这栋建筑中，空气的总体流向是从宿舍到走廊，然后回到 HVAC 系统。其中 90% 的空气循环回送至宿舍，10% 由室外新风替代。利用设计得当的散流器，可以实现宿舍内空气的充分混合。

散流器的类型选择和安装位置会影响送风在空间内的流动和混合程度，这直接关系到能否覆盖所有区域、避免气流滞留、以及冷热空气能否充分混合和分布，避免产生不利的温度分层。散流器的设计可决定进风方向并影响进风速度。

排风格栅相对于送风散流器的位置也十分重要。如前所述，如果送风口与排风格栅距离过近，室内空气无法达到预期的混合和稀释效果，就会出现气流短路。因此，天花板上的排风格栅通常应远离送风散流器。

HVAC 专业人员可以协助选择合适的送风散流器与排风格栅，并确定其正确的安装位置。

图 9A 显示了送风散流器和排风格栅的理想安装位置（但实际很少采用）。需要注意的是，这种布置类似于工业“洁净室”，在大多数医疗卫生机构中通常难以实现。图 9B 显示了散流器和格栅的另一种布置方式，是一种取代理想布置方式的折衷方案，在许多手术室和少数 AIIRs 中采用。

图9A：

HVAC系统设计示例：空气从一侧墙流向对侧墙（效率最高的设计方案）

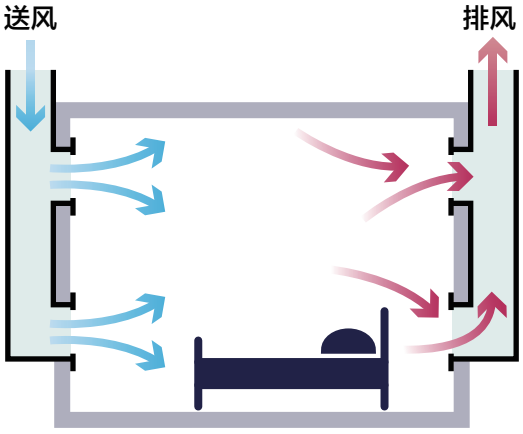
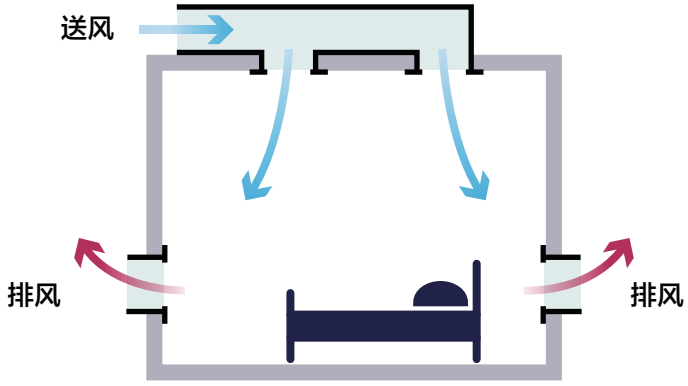


图9B：

HVAC系统设计示例：从天花板送风，通过墙面低处排风



来源：图9A和9B改编自美国疾病预防控制中心《医疗卫生机构结核分枝杆菌传播预防指南》（2005）[5]

图 10A 展示了另一种合理的散流器和格栅布置方案。在这种布置中，气流首先从散流器出发，沿天花板流动，然后沿墙面向下流动，进而在人员活动区域内混合。排风口设在走廊，因此气流模式（即空气混合）是适宜的。这种 HVAC 系统布置可用于营造防护环境。

图10A：

室内送风与走廊排风：

天花板安装百叶送风散流器，排风格栅设在室外

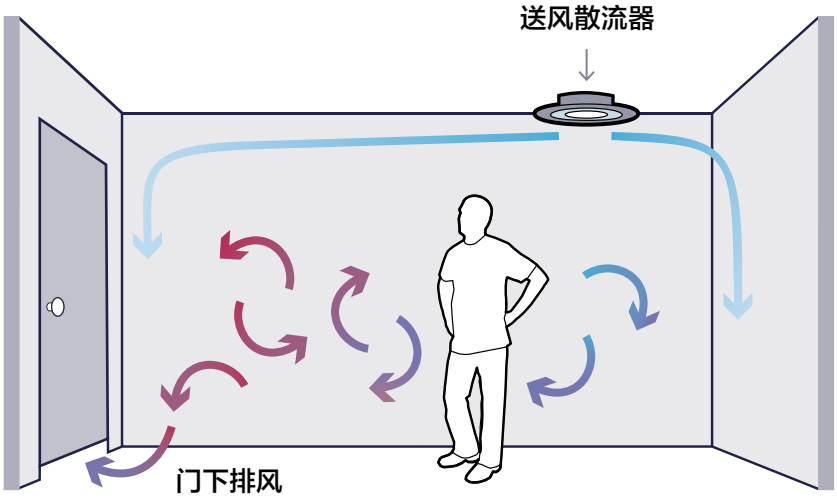


图 10B 展示了送风散流器与排风格栅距离过近导致的气流短路问题。当一部分送风在未充分混合就被快速排出时，会出现气流短路，这会降低空气稀释和混合的效果。

- 当送风口和排风口都设在天花板上时，使用供暖系统时气流短路现象可能会加剧，因为温暖的空气会上升（浮力作用）。通过适当混合使温暖的送风向下流动，可以减少气流短路。

图10B：

气流短路：天花板上的百叶送风散流器与附近的排风格栅（二者距离过近）

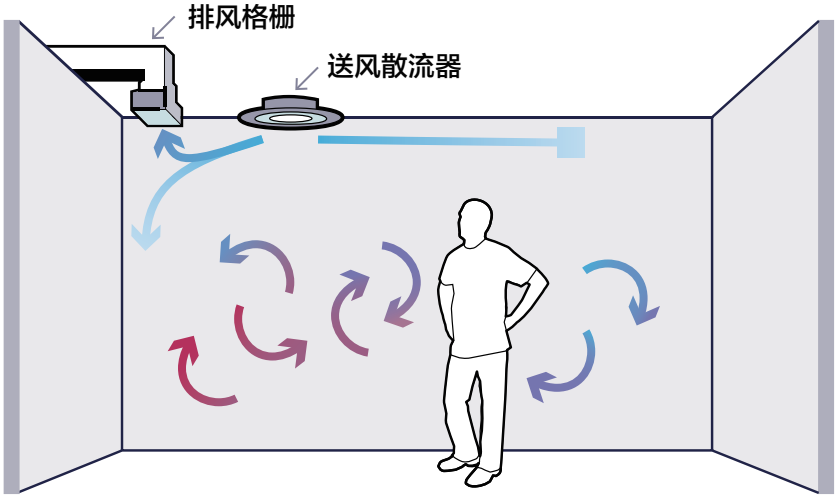
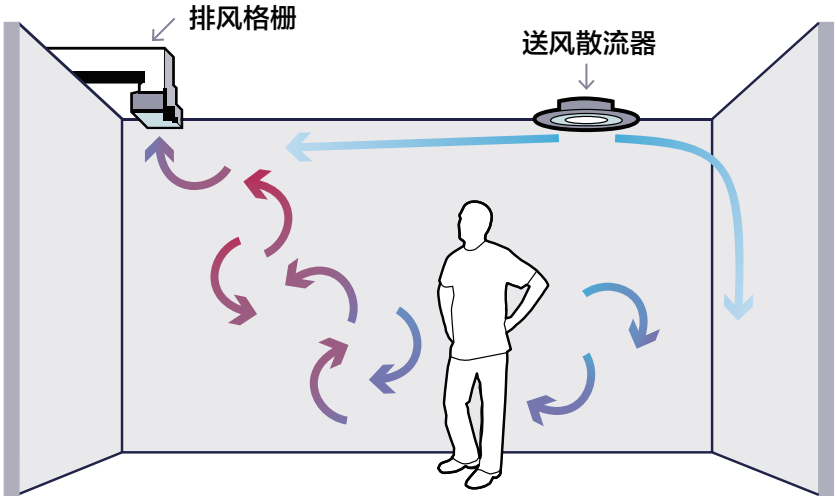


图 10C 展示了当送风散流器和排风格栅都必须安装在天花板上时的最佳折衷方案。此外，由于室内人员的存在会使空气升温，从而产生垂直气流。因此，散流器的设计不仅要考虑房间的几何形状，还要考虑房间内的设备、活动和人员情况。

图10C：

同一房间内送风与排风分开布置：天花板上安装百叶送风散流器时，排风格栅尽可能远离送风散流器



有关不同类型送风散流器和排风格栅的图示，请参见“新建 HVAC 系统的设计”一节中的“空气分配”部分和图 11。

室外新风口

HVAC 系统通过设置在屋顶或外墙上的**室外新风口**引入室外空气。新风口可以是风管开口形式，也可以是机组的组成部分，通常都配备可调节风阀。这种风阀装置可根据需要调节进入机组的室外空气量。

对于现有的全循环式 HVAC 系统，应当在条件允许的情况下加以改造，增设室外新风口。这项改造工作应由机构工程师或机械承包商专业人员来完成。

随着空气持续引入，鸟羽、花粉、霉菌和灰尘等污物会逐渐在新风口周围积聚。使新风口的具体位置容易被找到。通常采用金属丝网和低效过滤器（最低效率报告值 [minimum emission reporting value，MERV] 1–7）来截留这些污物。需要特别注意的是，过滤器按安装方式可分为“松装式”和“密装式”两种。松装式过滤器不仅效率较低，其周边也往往存在明显的漏气现象。密装式过滤器采用氯丁橡胶或合成橡胶垫圈将过滤器与 HVAC 系统紧密接合，可有效防止颗粒物从过滤器周边泄漏。

在可行的情况下，应始终保持室外新风口完全打开，并定期进行清洁维护，以最大限度地保证室外新风的引入量。

空气过滤器

空气过滤器的作用是净化空气。在保证过滤器与 HVAC 系统之间密封良好的前提下，根据对流经空气中颗粒物的去除效率来确定其等级。美国暖通空调工程师学会制定的 MERV 标准将空气过滤器分为 1 至 16 级，级数越高，过滤效率越高。通常情况下，过滤效率越高，过滤器在密封安装后的阻力（压降）也越大。物理型过滤器（也称非静电型过滤器）纯粹依靠物理过滤作用来去除空气中的颗粒物。这类过滤器随着污物积聚，压降会逐渐增大，最终可能导致系统的实际气流流速降低。[25]

静电型过滤器则是利用“永久电荷”来提高其过滤效率。随着电荷的逐渐损失或被屏蔽，过滤器的实际效率会相应降低。在相同标称过滤效率下，静电型过滤器的压降通常低于物理型过滤器。但是，随着静电荷的逐渐消散和 / 或被空气中的颗粒物屏蔽，静电型过滤器的压降和实际过滤效率都会降低。因此，根据所使用过滤器类型的不同，压降值可能并不是判断过滤器实际过滤效率或确定更换时机的最可靠指标。除美国暖通空调工程师学会外，包括国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）在内的多家行业组织或标准化机构也都制定了各自的过滤器评级系统，这些评级标准可能会出现在相关技术规范中。

- 附录 C 中的最低效率报告值对照表列出了 3 种不同粒径（0.3–1.0 μm、1.0–3.0 μm 和 3.0–10.0 μm）颗粒物的过滤效率。
- HEPA 过滤器是一种专用的高效过滤器，按照美国能源部的标准，其对 0.3 μm 颗粒物的去除效率可达 99.97%。HEPA 过滤器采用独立于 MERV 之外的专门评级系统。

结核病患者呼出的感染性颗粒物（飞沫核）具有较大的粒径分布范围，这些飞沫核可能包含一个或多个结核分枝杆菌。只有**粒径为 1–5 μm 的感染性颗粒物**能抵达肺部深处并感染易感宿主，系统应重点针对这一粒径的颗粒物进行过滤。

滤芯是循环空气系统和 RAC 的标准组成部件。通风系统可以配置单个或多个滤芯，当使用多个滤芯时，这种组合被称为过滤器组。

应选用哪类滤芯?

对于许多循环空气系统来说，最适合采用的是褶式滤芯，这种滤芯因其过滤材料在框内呈褶皱状而得名。相比之下，初效滤芯通常是平面结构。

表 3 对比了三种不同等级的滤芯：

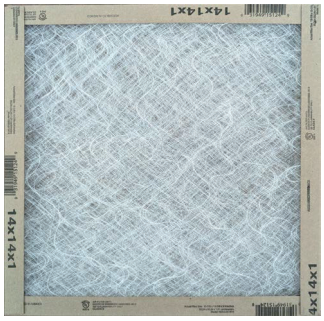
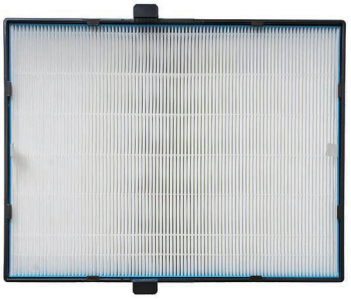
- **粗效 / 初效滤芯（MERV 4）：**普通初效滤芯几乎无法去除含结核分枝杆菌的感染性颗粒物（注：MERV 1–7 级滤芯的等级评定仅测试粒径为 3.0–10 μm 的颗粒物的过滤效率）。
- **褶式滤芯（MERV 13）：**褶式滤芯可去除 85% 以上含结核分枝杆菌的感染性颗粒物。褶式滤芯最常见的是“盒式 / 框式”结构。相比褶式滤芯，“袋式”滤芯往往具有相似（或更大）的过滤表面积，性能也相近。
- **HEPA 滤芯：**HEPA 滤芯可去除几乎所有含结核分枝杆菌的感染性颗粒物。需要注意的是，HEPA 滤芯是一种密褶式专用设备，不适用于大多数标准 HVAC 系统。

五金店通常备有适合大多数小型 HVAC 系统使用的粗效 / 初效滤芯（MERV 1–4）和褶式滤芯（MERV 5–13）。

褶式滤芯比初效滤芯价格略高，而且会造成更大的气流阻力，可能导致通风降低。

更多关于医疗卫生机构 HVAC 系统使用滤芯的工程技术细节，请参见 Price Industries 的《工程师暖通空调手册》（2011）。[21,26,27]

表3： **部分通风滤芯及其过滤效率示例**

粗效/初效滤芯	褶式滤芯	HEPA滤芯
MERV 4	**MERV 13**	**HEPA**
		
粒径范围 / **过滤效率** 0.3-1.0 μm 未评估 1.0-3.0 μm 未评估 3.0-10.0 μm <20%	**粒径范围** / **过滤效率** 0.3-1.0 μm ≥50% 1.0-3.0 μm ≥85% 3.0-10.0 μm <90%	**粒径范围** / **过滤效率** 0.3 μm ≥99.97%
MERV 4滤芯无法去除含结核分枝杆菌的微小感染性颗粒物，只能去除部分花粉、霉菌和绒毛等体积较大的可见颗粒物。这种滤芯在安装后的初始阻力很小。 通常每月或每季度更换一次，其设计目的是延长那些更昂贵、更高效滤芯的使用寿命。	MERV 13滤芯可去除至少85%含结核分枝杆菌的微小感染性颗粒物。N95防护口罩的滤芯在去除小颗粒方面的效率比MERV 13滤芯更高。这种滤芯在安装后的初始阻力中等。 通常每季度、每半年或每年更换一次，其设计目的是延长那些十分昂贵的HEPA滤芯的使用寿命。	HEPA滤芯可去除几乎所有含结核分枝杆菌的微小感染性颗粒物。N100防护口罩的滤芯具有同等的过滤效率。这种滤芯在安装后的初始阻力很大。更换时间通常根据阻力（滤芯的压降）和系统气流流速的综合情况来确定。
参考资料： ASHRAE 52.2-2017[25]	**参考资料：** ASHRAE 52.2-2017[25]	**参考资料：** 《ASHRAE手册：暖通空调系统和设备》第29章[28] 以及 IEST RP-CC 001.7[29]

来源：CITC, Adobe/Sakuramos, Adobe/Vchaulup

滤芯的更换周期

如果没有安装压力表来测量滤芯两侧的压降，就**必须制定滤芯更换时间表。此外，应每月对滤芯进行目视检查**，一旦发现气流减小或达到制造商规定的更换时间（以两者中较早者为准），应及时更换滤芯。[30]

必须在滤芯造成气流阻塞或使气流流速降至最低可接受值之前及时更换，这一点至关重要。如表 3 所示，系统中通常会串联安装两个或三个滤芯。在这种组合配置中，粗效 / 初效滤芯可以帮助延长褶式滤芯的使用寿命，而褶式滤芯可以帮助延长更高级别 MERV 滤芯或 HEPA 滤芯的使用寿命。**通常情况下，粗效 / 初效滤**

芯应每月或每季度更换一次。在有粗效 / 初效滤芯保护的情况下，褶式滤芯可每季度或每年更换一次。如果同时有粗效 / 初效滤芯和褶式滤芯的保护，且压降维持在可接受范围内，HEPA 滤芯可能几年才需要更换一次。过滤器组积满污物所需的时间主要取决于两个因素：

- 空气中颗粒物的含量（室内空气中的灰尘含量越高，滤芯积满污物的速度就越快）；
- 通风系统的运行频率（通风系统使用得越频繁，滤芯变脏的速度就越快）。

风**机需要消耗能量来推动或抽吸空气流经滤芯，**这是因为滤芯会对气流形成阻碍。随着时间推移，灰尘的不断积累会使这种阻碍逐渐增大，风机能够通过滤芯输送的气流量可能会逐渐减少。气流量的减少会带来两个问题：一是感染性颗粒物的去除效率下降，二是返回室内用于稀释的洁净空气量会减少。

压降和过滤器压力表

过滤器对气流造成的相对阻碍程度称为**压降或阻力**，其测量单位为英寸水柱（"wg）。

在过滤器组的前后两侧安装压力表可以显示压降，这是监测过滤器污物积聚状况和判断更换时机的最有效方法。

一套完整的过滤器压力表装置由以下三个部分组成：

- 压力表
- 风管内部、位于过滤器前后两侧的两个测量口
- 用于连接的铜质或橡胶材质导管

在实际应用中，通常使用导管将每个测量口与压力表或压力计连接起来。压力表显示的读数反映了过滤器前端（上游）和后端（下游）之间的压差值。

新安装过滤器后测得的压降称为**初始压降**。对于褶式滤芯而言，这个数值通常约为 0.25"wg（62Pa）。随着过滤器逐渐积聚污物，压降值会不断增大。当压降值比初始值增加约 0.20–0.45"wg（50–110Pa）时，通常就需要更换滤芯了。这个触发更换的压降值称为**更换压降**。对于 HEPA 滤芯来说，其初始压降约为 1"wg（250Pa）。在确定具体的更换压降标准时，必须严格遵循过滤器、HVAC 系统和 RAC 制造商的技术说明。这一点极其重要，因为系统的实际气流量通常会随着压降的增加而逐渐减小。[30]

某些 HVAC 系统（以及大多数 RACs）中的过滤器组并未配备过滤器压力表，许多小型通风系统的结构设计也不便于安装压力表。例如，大多数住宅用循环式 HVAC 系统就没有安装过滤器压力表的适合位置。根据实践经验，如果系统采用的是过滤器组而不是单个过滤器，应当考虑安装过滤器压力表。在这种情况下，建议请机构工程师或机械承包商协助进行系统评估和压力表安装。

改用更高效率的滤芯

在某些情况下，**可以通过将现有滤芯更换为效率更高的滤芯来实现对现有 HVAC 系统的低成本改进**。在考虑进行这种改进时，需要考虑以下几个问题：

- 更高效率滤芯可能产生的额外气流阻力；
- 新滤芯在清洁状态和积污状态下给风机 / 电机组合带来的额外负荷；
- 可能导致风机 / 电机组合使用寿命缩短；
- 由于更频繁更换滤芯而增加的成本；
- 房间或场所的气流流速和 ACH 下降。

如果机构的风险评估结果表明确实需要采用更高效率的滤芯，建议先咨询机构工程师，以确保现有系统能够支持更高效率滤芯的安装和使用。

- 标准的住宅建筑和小型办公室通常采用循环系统，一般配备 MERV-5 级滤芯（厚度为 1'' 或 4''）。
- **切勿**将 MERV-5 级滤芯直接更换为 MERV-13 级滤芯（MERV-13 级滤芯通常用于预防新型冠状病毒传播，同时也是获得能源与环境设计领导力（Leadership in Energy and environmental Design，LEED®）认证所必需的级别）。最佳的改进方案是采用渐进方式，即逐步提高过滤效率（MERV 等级），直到观察到明显的气流流速降低为止。
  - 可以用一种简单的定性测试方法检查气流是否降低：在几个房间的送风散流器上分别贴上一张薄面巾纸条，对比使用更高效率滤芯时与使用原有 MERV-5 滤芯时纸条的摆动情况。
  - 一旦观察到气流发生变化，应意识到这种变化是在滤芯处于全新清洁状态下发生的（这并不反映滤芯在整个使用寿命期间的性能）。在这种情况下，应选用比出现气流明显降低时所用滤芯低两个 MERV 等级的滤芯。
- 关于何时以及如何更换滤芯，应严格遵循制造商的建议。在更换滤芯之前，应先观察送风格栅上的面巾纸条的状态。
  - 在更换滤芯之后，需要检查以下情况：面巾纸条的摆动幅度是否减小？面巾纸条的伸展长度是否发生变化？
    - 如果**观察到**了上述任一种变化，应首先查看该滤芯制造商是否生产有同等 MERV 级别但具有较低阻力（即滤芯压降较低）的其他型号滤芯。如果制造商没有提供这样的替代产品，应改用 MERV 等级较低的其他滤芯。
    - 如果**没有观察到**上述任何变化，则需要进一步观察和判断：气流是否出现面巾纸条所示的明显增加的现象？如是，则可继续使用这一 MERV 等级的滤芯。
- 注：**即使具有相同 MERV 等级，不同品牌和型号的滤芯之间的阻力（即**

压降）也可能存在差异。因此，在考虑更换为其他制造商生产的滤芯时，必须严格按照上述操作步骤进行检查和判断。

- 在选择滤芯时，关键目标是确保滤芯在积满污物（即变脏）的状态下仍能维持足够的气流量，而不是仅考虑其在全新清洁状态下的性能表现。为了达到这一目标，更换滤芯的频率可能需要比制造商建议的更高。
- 可能出乎意料的是，较厚的滤芯组件（如厚度为 4"）由于具有更大的过滤表面积，与相同 MERV 等级的标准 1" 厚滤芯相比，其产生的气流阻力反而更小。某些 HVAC 系统可以通过技术改造来支持安装 4" 厚的滤芯。在进行这种改造后，同样需要按照前述操作步骤仔细检查气流量的变化情况。

恒温器

在住宅建筑或小型诊所等场所使用的小型 HVAC 系统中，恒温器通常安装在回风格栅附近的墙面上。而在大型 HVAC 系统中，则通常会在整个系统覆盖范围内设置由温度和相对湿度传感器组成的监测网络，并采用计算机化的 HVAC 控制系统（建筑管理系统 [Building management system，BMS]）来控制系统服务区域内的温度和湿度。

小型 HVAC 系统可使用多种不同类型的恒温器，从最基本的型号一直到具备多种功能的可编程装置均有。大多数恒温器的设计都包含三个基本组件：

- 控制开关：使恒温器能够控制设备的运行状态（控制开启 / 关闭，以及风机是持续运行还是随供暖制冷循环运行）；
- 温度计：用于测量并显示室内温度，大多还能显示相对湿度；
- 可调节设定装置：允许用户输入预期室内温度值，很多型号还可以设定所需的相对湿度值。

价格较高的恒温器具有更多高级功能，允许用户按不同区域对风机、供暖和空调的运行参数进行编程设置，还可以为工作日和周末分别设定不同的温度值。

小型 HVAC 系统采用的最基本型恒温器是一种三档开关式装置，会根据室内温度的变化自动调节运行状态。这三个档位分别是**关闭（OFF）**、**开启（ON）**和**自动（AUTO）**：

- 当恒温器设定在**关闭（OFF）**档位时，无论房间多热或多冷，暖通空调设备都不会启动运行。
- 当恒温器设定在**自动（AUTO）**档位时，一旦恒温器检测到的室内温度低于供暖设定值或高于制冷设定值，恒温器会自动启动风机和相应的供暖或制冷部件。
- 当恒温器设定在**开启（ON）**档位时，风机会持续不间断地运行；同时，当恒温器检测到的室内温度低于供暖设定值或高于制冷设定值时，恒温器会自动启动相应的供暖或制冷部件。将恒温器设定在开启（ON）档位具有以下优势：

- 持续的送风可以通过输送“洁净空气”（一部分经过过滤和 / 或照射，一部分可能来自室外空气）产生稀释作用；
- 持续的气流可以形成更理想的气流模式和混合效果，这对上层空间 UVC 系统的有效运行是必不可少的。

就结核病预防和控制而言，建议对 HVAC 系统实施集中控制管理。

HVAC系统的检查

为提升结核病预防控制效果和室内空气质量，需要定期检查机构内所有的通风系统。在 AIIR 内部、HVAC 系统内部以及 AIIR 排风口处检查时（考虑到空气过滤系统可能运行不正常）应佩戴 N95 防护口罩。应指定一名工作人员作为机构的通风系统监测人员，并遵循经感染预防与控制专业人员批准的个人防护标准操作规程。

- 制定并维护一份建筑物内所有 HVAC 系统的基本信息清单，这是一个有用的感染预防与控制工具。该清单应当包含以下信息：HVAC 系统的位置、该系统服务的房间（包括每个房间的具体用途）、恒温器的位置，以及过滤器的数量和尺寸。该核查清单的示例请参见附录 D《暖通空调系统信息汇总表》。

如果无法获得工程图纸，可能需要请机构工程师或承包商对 HVAC 系统进行“溯源”，以查明所有管道的走向并记录 HVAC 系统的详细信息。要完成这项工作，机构工程师或承包商需要一份机构的大致平面图，用于绘制和标注 HVAC 系统的布局图。AIIRs 的排风管道应特别注意并明确标识。

标识

维护人员和承包商经常需要重新布设管道以安装新设备、更换过滤器或执行可能需要关闭排风机的其他维护工作。为保障这些工作人员的安全，应在排风管道、风机和过滤器外壳上贴附永久性的清晰标识，标注“注意 – 结核污染空气”或“结核污染空气 – 关闭风机或进行维护前请联系感染控制协调员”，或其他类似的警示语。设置的这些标识之间应最多间隔 20ft（6.1m），且在所有穿越楼板和墙体的部位都要设置。在风机和过滤器上还应设置额外的标识，写明感染控制协调员的联系电话，以及该排风机或过滤器所服务的 AIIRs 房间号。[5]

检查HVAC机组

检查机组的运行状态时，应注意以下几个方面：

- 机组是否安装了合适的过滤器？过滤器是否处于清洁状态？在循环式 HVAC 系统中，效率最低的过滤器通常安装在回风管道的回风格栅处（需要拆下格栅才能检查和更换这些过滤器）。而在较大型的系统中，通常是在 HVAC 机组的前端直接设置过滤器组。

- 检查 HVAC 机组上或其附近是否设有室外空气进风口。如果有，则需要检查风阀是否处于完全开启状态，同时检查进气格栅和管道是否清洁。虽然并非在所有情况下都必须将风阀完全开启，但保持风阀完全开启可以最大限度地引入室外空气，从而减少对循环空气过滤 / 消毒系统的依赖。
  - **注**：“完全开启”并不意味着使用 100% 的室外空气。在较大型 HVAC 系统中，如果设有室外空气进风口，该进风口通常位于建筑物的屋顶或外墙上。而在小型系统（即单个房间的 HVAC 系统）中，风阀通常位于机组的背部。如果系统没有设置风阀，则表明该系统采用 100% 循环方式运行，即空气全部返回到 HVAC 机组所服务的区域。

检查AIIRs

- 通过恒温器或建筑管理系统的控制界面启动风机，观察所有送风散流器和回风格栅处的气流情况，以检查每个 HVAC 系统是否正常工作。具体检查方法是：在每个出风口处使用面巾纸条或产生可见烟 / 雾来检查气流的方向和“强度”。
  - 在送风散流器处，面巾纸条或烟 / 雾会被气流吹离散流器并进入房间内部。
  - 在排风口或回风格栅处，面巾纸条或烟 / 雾会被气流吸入格栅并离开房间。需要特别注意的是，如果散流器变脏或发生堵塞，可能会影响气流流速和气流模式。
- 美国疾病预防控制中心（2005 年）指出：“在患者入住前，应使用发烟管或其他目视检查方法验证所有房间的负压状态；在收治疑似或确诊结核病患者期间，必须每天进行这项检查。”[5] 最初制定这一政策的原因是由于当时的物理和电子压力监测设备性能表现不够理想。

在检查门缝处的气流状况时：

  - 对于 AIIR，面巾纸条或烟 / 雾应被吸入房间内部。
  - 对于防护环境房间，面巾纸条或烟 / 雾应被推出是溢出房间。
  - 如果面巾纸条或烟 / 雾的移动方向与上述要求不符，必须查明原因，在解决问题后才能将该房间用作 AIIR。
  - 可使用附录 B《经空气传播感染隔离房间压力监测核查清单》中提供的模板记录检查结果。

  注：通常情况下，机构工程师或经过专门培训的工作人员应每月使用微压计（一种用于测量压力的手持式工具）来验证 AIIR 电子压力监测装置的准确性。
- 检查恒温器是否具有“FAN ON”（风机开启）或类似的设置功能，以确保风机能够持续运行。
- 检查 HVAC 系统是否为所有正在使用的房间提供了通风。
- 检查正在使用的房间内所有区域的空气混合情况，并准确判定各处的气流方向。

    - 使用线香进行检查是一种经济可靠的方法，可直观地观察气流的流动情况。此外，发烟管或简单的烟雾发生器也是可选用的工具。
- 检查所有送风散流器和回风格栅是否保持清洁状态。
- 检查所有浴室和淋浴间的排风扇是否正常运行。

更多有关 AIIRs 评估工作的指导可参见 Int-Hout（2015）发表的综述文章。[31]

更多关于气流检查方法（如使用烟雾或面巾纸条进行测试、使用压力计等）的详细信息请参见第 4 章“经空气传播感染隔离房间”的“监测 AIIR 环境控制情况”一节。

现有HVAC系统的优化

- 在保证足够气流流速和 ACH 的前提下，尽可能使用最高 MERV 等级的过滤器。
- 尽可能提高排出气流的流速。
- 通过调节室外空气风阀，尽可能增加室外空气的引入量，并通过过滤和 / 或 UVC 杀菌进行空气处理。
- 选用具备风机持续运行功能的恒温器和 BMS。
- 建筑物内有人员活动时，保持 HVAC 系统持续运行。
- 为未安装压力表的 HVAC 机组安装压力表，用于监测过滤器的积尘情况。
- 房间中未安装通风系统、或通风系统发生故障或因其他原因无法运行时，如房间中有人员活动，应采用自然通风。
- 考虑使用管道内 UVC，作为空气过滤和室外空气稀释的补充措施（详细内容请参见第 2 章“环境控制”第 2 部分“紫外线 C 波段（UVC）”）。

现有HVAC系统的例行维护

- 按照标准操作规程定期检查过滤器，并在需要时及时更换（更多有关详细信息请参见“空气过滤器”一节）。
    - 确保过滤器正确安装在过滤器导轨内，不得将其强行塞入安装位置。
    - 每次安装新过滤器组时，应在过滤器框架上清晰标注更换日期，和 / 或在过滤器外壳外部贴上标识标签（便于无需打开过滤器外壳即能查看过滤器更换信息）。追踪记录过滤器的平均使用寿命，有助于制定合理的维护计划。
- 每月对送风散流器、回风格栅和管道内 UVC 灯管进行清洁。
- 应每年对通风机组和恒温器进行检查，确保恒温器按照设计要求正常运行。

如果系统中使用了管道内 UVC：

- 定期检查灯管是否正常工作（最好使用经过校准的 UVC 检测仪进行监测）
- 每月对灯管进行清洁
- 每年至少更换一次灯管，或按照制造商推荐的频率更换
- 按照政府法规或制造商的建议处置废旧灯管（类似于处置荧光灯管）
- 记录所有例行维护活动和临时性维护事件以及具体日期

新建HVAC系统的设计

在为新建或改造的机构设计机械系统时，建筑师、工程师和其他专业技术人员应考虑以下建议：

通风率

- 应根据房间的具体用途以及房间使用人员的结核病风险程度提供充足的气流流速，使总换气次数达到每小时 6–12 次（对于非医务人员、患者和服务对象使用的房间，2ACH 可能已经足够）。需要特别说明的是，ASHRAE1,32 和 CDC（2019 年）[13] 对 ACH 的定义是 CARD 除以房间容积。ACH 这一指标用于衡量特定空间内的空气在一小时内被洁净空气完全置换的次数。
- 过滤器在使用过程中会逐渐积聚污物而导致气流流速降低，设计人员在选择风机时必须考虑到这一点，需确保即使在过滤器完全积满污物的情况下，风机仍然能够提供目标范围内的气流流速。
- 稀释通风是一种行之有效的防止结核传播的环境控制措施。在安装新的通风系统时，提升通风能力通常是值得做出的投资，因为与整个安装工程的设计和施工总成本相比，提升通风能力所需的额外成本并不高。
- 如果 HVAC 系统将用于 AIIR 或防护环境，在设计时还需考虑其他一些因素（详见“负压：经空气传播感染隔离房间”和“正压：防护环境”部分，或参见第 4 章“经空气传播感染隔离房间”）。

送风：对于室外空气的最低要求

- 如果使用循环式系统，供风中必须包含一定比例的室外空气，这个固定的最低比例通常被称为最低室外空气设定值。
  - **CDC 在 2005 年的指南中指出，流浪人员收容所内的室外空气最低供应率应达到 25CFM/ 人。**[5]
  - **ASHRAE**（标准 170–2021）**建议，AIIRs 和急诊的 ACH 应达到 12 次，其中室外空气至少占 2 次，同时要求将全部室内空气排至室外。**在这种 100% 排风的情况下，送风必须采用以下两种方式进行：1）部分使用来自机构其他区域的循环空气和 / 或经消毒（过滤或 UVC 杀菌）的空气；或 2）完全使用室外空气。[1]
  - 附录 E 列出了医疗卫生机构内各类场所的 ACH 要求和通风的其他相关建议。

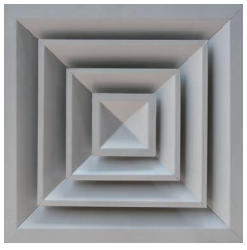
单次通风系统或可变循环系统

- 在结核病预防与控制工作中可考虑使用单次通风系统。这一系统将所有空气直接排出至室外，不会循环使用任何空气。
- 如果这一系统的运行成本过高，可考虑采用另一种方案：安装一个能够根据需要调节室外空气与循环空气混合比例的循环式通风系统。这一系统能够根据室外温度自动调节需要循环使用的回风量。例如，当室外温度适宜时（如 65 ℉，即 18℃），系统会持续不断地引入室外空气来提供所谓的“免费制冷”，这种运行方式实际上相当于一个单次通风系统（所有空气都直接排出至室外）。

空气分配

- 在可能的情况下，应在每个房间内分别设置送风和排风位置，而不是在单个位置集中收集多个房间的排风。这种分散式设计可以减少感染性颗粒物随气流被带到其他区域的可能性。
  - 应将回风格栅设置在与送风散流器相同的房间内，且两者之间的距离尽可能远，确保送风与室内空气充分混合。
- 在选择 HVAC 系统的送风散流器和排风格栅时，需确保它们能够实现良好的空气混合。充足的送风量和排风量、良好的空气混合可显著降低结核传播的风险，因为这些措施能有效稀释和清除感染性颗粒物。应根据房间的特点和散流器在房间内的具体安装位置，选择尺寸和气流扩散方式等均合适的散流器。
  - 如果系统使用天花板散流器，为增强空气混合效果，应选用百叶面型或条缝型散流器，不要用多孔面型散流器。多孔型设计更适合用作排风格栅。具体散流器类型请参见图 11 和图 12。

图11： **部分通风滤芯及其过滤效率示例**

四向百叶送风散流器	圆形百叶送风散流器	条缝型散流器	双层百叶型送风散流器
			

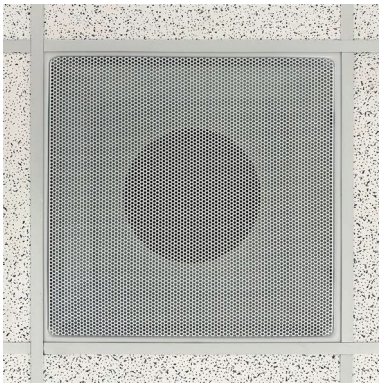
来源：Adobe/AliaksandroBS, Adobe/Evannovostro, Adobe/29612992, Adobe/Grispb

- 如使用侧墙送风散流器，应选用双层百叶型散流器。这种散流器具有两组导向叶片：前组叶片呈垂直布置，后组叶片呈水平布置。通过调节这些百叶片可使每个房间内形成均匀的气流模式。

HVAC系统中的管道内UVC

- 可在 HVAC 系统中使用管道内（或回风管道内）UVC，用于对群体活动场所排出的空气循环使用前的消毒处理后。更多有关管道内 UVC 的详细内容请参见第 2 章“环境控制”第 2 部分“紫外线 C 波段（UVC）”中的“暖通空调系统内的空气照射（管道内 UVC）”一节。

图12：
排风格栅（多孔型）



来源：CITC

优点	缺点
> 可全年 24 小时持续发挥效用 > 可精确控制和调节，运行效果可预测 > 有助于预防包括结核病在内的各种经空气传播疾病的传播 > 有助于控制室内温度、相对湿度、异味和各类空气污染物	> 从规划、安装到运行和维护的全过程需要投入较高成本 > 如设计不当或安装不规范，可能会出现气流干扰和 / 或噪音问题 > 与其他所有环境控制措施一样，需要进行定期维护

HVAC系统

丹尼过去 4 年间一直在市中心经营一家名为“欢迎您”的流浪人员收容所，

这家收容所由一座教堂的地下室改建而成。从工作第一天起，丹尼就发现大部分时间里收容所内的空气都比较闷。

案例研究

最近，公共卫生部门发布通知，提醒各收容所注意：社区无家可归人群中的结核病病例数出现上升趋势。该收容所在接收服务对象时会对其进行结核病症状筛查。这则通知促使丹尼着手改善环境控制措施，这也是他自上任第一天就一直在考虑的事情。他决定先从检查通风系统着手。

丹尼没有邀请专业维护公司，仅使用线香、螺丝刀和卷尺这些简单工具，花了几个小时就完成了以下评估和改进工作：

- 收容所现有的强制通风型 HVAC 系统由四个主要部件构成：1 台暖风炉（安装在管理员储物间内）、1 个回风格栅（安装在储物间外墙上）、6 个送风散流器（安装在地下室天花板上），以及 1 个恒温器。
- 回风格栅和管道内都积满了灰尘。丹尼把格栅拆下来，用吸尘器将里面的灰尘彻底清理干净。
- 他打开过滤器检修口进行检查，发现安装的是一个平板式初效过滤器（MERV-3 等级）。这个过滤器不仅积满了灰尘，而且在过滤器导轨中的安装方式也不正确。丹尼测量了这个初效过滤器的尺寸（20"×25"’ ×1"），随后将其丢弃。他从附近的五金店购买了三个相同尺寸的褶式过滤器（MERV-11 等级），每个花费 15 美元。他在其中一个过滤器上标注了更换日期，将其正确安装在暖风炉中，另外两个留作备用。
- 恒温器具有可调节的温度设置功能和 3 个风机设置档位：关闭（OFF）、风机自动（FAN AUTO）和风机开启（FAN ON）。当时恒温器设置在“自动”档位，这意味着只有当室温低于 68° F 时风机才会启动。丹尼将控制档位调至“风机开启”，风机立即开始运行。随着时间推移，通风效果得到明显改善（更多空气进入房间），各处外表面的积尘也有所减少。
- 由于暖风炉没有室外空气进风口，而且因为设备不靠近外墙，没有可行的方法来连接室外空气进风口。为引入自然通风，丹尼决定在建筑物有人使用期间至少保持两扇窗户部分开启。
- 丹尼利用线香观察评估气流流动情况。此外，他注意到，即使更换了更高效率的过滤器，贴在送风散流器上的面巾纸条的摆动程度仍与之前一样。他很高兴地看到整个收容所内都能观察到明显的气流流动，同时他还验证了每个散流器和格栅处的气流方向。

问题：丹尼应当采取哪些步骤来确保HVAC系统得到例行维护？

应将年度维护预算和例行检查纳入感染预防与控制计划中（参见第1章“行政控制”）。

自然通风

自然通风是指室外空气通过窗户、门、屋顶无动力风帽、垂直通风管道和天窗等开口自然流入和排出建筑物的过程。自然通风由自然力推动空气流入或排出建筑物而形成，自然力可以是风力（产生水平方向的气流），也可以是室内外空气密度差产生的浮力（暖空气上升产生垂直方向的气流）。

虽然某些医疗卫生机构可以采用自然通风，但在许多需要控制经空气传播感染性颗粒物的场所，这种通风方式并不适用。对于没有机械通风系统的建筑物，可利用自然通风为建筑物内所有有人员活动的房间引入室外空气。然而，在极端炎热或寒冷的气候条件下，这种方式往往不切实际。

注：自然通风方法可能不适合某些场所，如需要严格控制气流流速和压差的AIIR。只有在符合当地和行业法规要求的情况下，医疗卫生机构才能采用自然通风。

风力驱动、浮力驱动和混合模式的自然通风

风力驱动的自然通风有时也被称为水平自然通风，因为风的流动方向通常是水平的。要优化风力驱动自然通风的效果，需要实现良好的空气对流。为此，需要在房间的对向两端设置开口，使空气能够自由流经整个房间或空间。但并非简单开窗就能实现，对向两端的开口面积都应约为房间面积的 10%。理想情况下，建筑物的朝向应垂直于当地的主导风向。

除了风速和风向外，最小开口面积是决定最大换气量的关键因素。

图13：**风力驱动的通风**

来源：Adobe/Fokke Baarssen

浮力驱动的自然通风有时也被称为垂直自然通风或温度驱动的自然通风。当房间或空间通过垂直竖井（或通风管道）与室外相通，且房间内的空气温度高于室外空气温度时，室内空气就会通过这些竖井或管道向室外流动。此外，人员和设备产生的热量会进一步促进空气的垂直向上流动。

图14：**浮力驱动的通风**

来源：Adobe/James

混合通风是指将自然通风与某种形式的机械通风系统结合使用的通风方式。由于单纯依靠风力驱动的自然通风在风力极小或无风时几乎没有效果，因此，需要采用机械通风方式来确保最低换气次数。在这种情况下，可以使用设计合理的全排风式或稀释式机械通风系统来补充自然通风，还须确保房间内能够实现良好的空气混合或空气流动。

图15：**无动力风帽**

来源：Shutterstock

没有配备中央供暖和 / 或空调系统的诊所或流浪人员收容所，通常会在特定区域安装**排风扇**来改善通风。两种最常见的排风式机械通风设备是浴室排风扇和厨房灶具上方的抽油烟机。这些排风设备将室内空气直接排出到室外，从而增加通风量。同时，新鲜空气（也称为补风）会通过建筑物的各种缝隙自然渗入室内。排风扇系统类型多种多样，可以是简单的墙装螺旋桨式风扇，也可以是由天花板格栅、风扇和管道组成的整套系统，都可将空气通过外墙或屋顶输送到室外。随着时间推移，所有类型的风扇都会不可避免地积聚灰尘和绒毛，这些积聚物会降低风扇的运行效率，导致排风量逐渐减少。因此，通风系统需要定期清洁。

“无动力风帽”（也称为旋流式通风器）的工作原理是通过管道顶部球形部件的旋转运动产生吸力，从而将风能转化为排风动力，将房间内的空气排出室外。即使在无风的情况下，只要房间内的温度高于室外温度，空气也会借助温差在垂直通道中自然向上流动而排出室外。参见图。[15]

整体而言，自然通风的设计方案有多种形式，其设计可以非常简单也可以非常复杂。若要进一步了解自然通风的实际应用，请参考世界卫生组织 2009 年发布的文件《医疗卫生机构感染控制中的自然通风》。[33]

风扇在自然通风中的应用

螺旋桨式风扇

螺旋桨式风扇是一种经济实惠的装置，**可促进室内空气的流动和混合**。但是，除非将风扇密封安装、且能直接从窗户或其他开口处抽取空气并推入室内，否则这类风扇能够提供的空气交换十分有限。因此，这类风扇通常仅用作自然通风和机械通风系统的辅助设备，帮助形成所需的气流模式、促进空气混合。

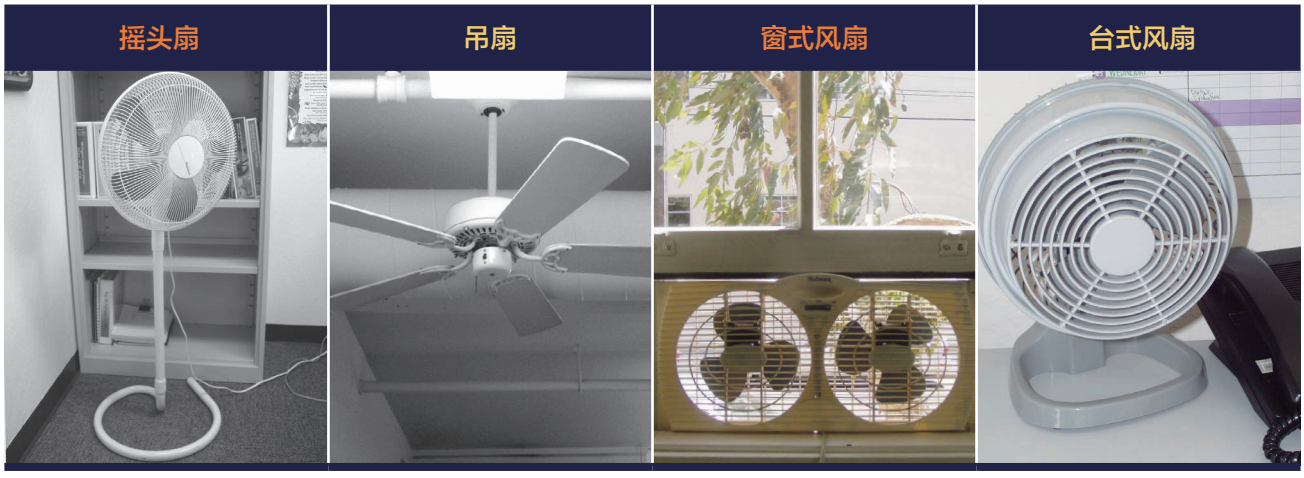
螺旋桨式风扇的类型

吊扇是安装在天花板上的螺旋桨式风扇，其功能是产生垂直方向的空气流动。这种风扇可以使整个房间的空气循环流动，但不能清除或灭活空气中的微生物。从空气混合效果来看，与单纯的水平方向空气流动相比，垂直方向的空气流动通常能够达到更好的混合效果。**壁扇和摇头扇**则可以同时促成水平和垂直两个方向的空气流动。**固定式螺旋桨风扇**主要促成室内水平方向的气流，其空气混合效果不如吊扇和摇头扇。

螺旋桨式风扇可分为以下几种类型：

- 落地式固定风扇
- 天花板吊扇
- 窗式风扇
- 可放置在桌面或其他平面上的小型风扇

图16： **螺旋桨式风扇的类型**



来源: CITC

自然通风的注意事项

如前所述，利用穿堂风产生水平气流的自然通风方式在某些场所可能效果良好。一个房间如果有良好的空气对流（开启的窗户和 / 或门且配合使用混流风扇，良好的空气混合、稀释和排出），与那些虽然使用了混流风扇但只在单侧设有开口且空气进出交换有限的房间（良好的空气混合，中等的空气稀释和排出）相比，其结核传播风险会更低。结核传播风险最高的是那些只在单侧有窗户、且未使用风扇和 / 或没有机械通风的密闭房间（空气混合、稀释和排出均很差）。

在依赖于自然通风（无论是否使用风扇）时，需要考虑以下几点：

- **自然通风的效果往往难以预测**，在气候非常寒冷或非常炎热的地区并不适用。这种情况下，应考虑安装 HVAC 系统。参见“暖通空调系统”部分。
- 定期检查门、窗和天窗是否易于开启，确保所有纱窗或格栅没有被阻塞。在所有有人员活动的房间（尤其是没有 HVAC 系统的房间），**应尽可能保持这些开口处于开启状态**，以便引入室外空气。
- 为那些在室内因通风而感到不适的人员提供毯子，便于继续保持通风。
- 如果风扇产生令人不适的噪音或气流，以至于无法在室内有人驻留时开启风扇，应首先寻找能够维持通风的简单解决方案：
  - 清洁风扇叶片
  - 调整气流的方向和 / 或速度
  - 更换为噪音更小的设备
- 如果加强通风适合某场所及其使用方式，**可考虑在该场所无人员驻留时加强通风**。例如，许多场所（如流浪人员收容所）并非整天开放，在非开放时段可在开启门窗的同时将风扇调至高速运行，对空间进行通风换气。
- 如果既无法采用自然通风，也无法安装 HVAC 系统，可考虑使用室内空气净化器或上层空间 UVC 装置，为每个房间单独提供洁净空气。参见“上层空间 UVC”和“室内空气净化器”部分。

送风扇和排风扇

- 可以在窗户或其他开口处安装送风扇，以增加进入机构的气流量。在选择风扇时，应根据制造商标称的气流流速来选择合适尺寸的产品，以达到所需的 ACH。窗户纱网或其他遮挡物会使实际气流流速低于制造商标称值，在选择风扇时需考虑到这一点。
- 在可能的情况下，应将房间内的风扇放置在能够增强自然通风水平气流的位置。
  - **工作人员的工位应靠近室外空气来源的位置。**
  - 吹 / 推动空气比吸 / 抽取空气更容易且更高效（如向蜡烛吹气比在蜡烛附近吸气更容易使蜡烛火焰熄灭）。因此，**相比排风扇而言，合理布置的送风扇往往能更高效地将室外空气引入室内，以进行空气交换。**

- 选择排风扇的位置时，应考虑使气流从清洁区域流向污染区域。排风扇的选择标准与送风扇相同。

混流风扇

- **安装吊扇或壁扇加强空气混合。**
- 可以使用简单的发烟试验来验证空气混合的效果，以确保房间所有区域都有适当的气流流动。从技术角度来说，适当的空气混合所需的气流流速应至少为 20ft/min（0.1m/sec），在发烟试验中表现为 >4in/sec 的缓慢飘移速度。
- 在室内有人员驻留时应尽可能保持风扇持续运行。

自然通风和排风扇的例行维护

- 检查所有窗户、门（包括门上的格栅）和其他开口，确保其保持清洁，且没有家具、窗帘、设备或其他物品阻碍气流。
- **每月对排风扇出风口和风扇进行一次清洁。**使用湿布或吸尘器清除风扇和格栅上积累的灰尘和绒毛。不要在室内有患者或服务对象时执行清洁工作。
- 自然通风的效果并非一成不变。**需要在不同季节、不同时段和不同环境条件下检查自然通风的适宜性，**这可帮助管理人员明确在气流不足或环境条件不适合采用自然通风时是否需要增加机械通风设施作为补充。
- **记录**所有例行维护活动和执行日期，并妥善保存这些记录。

自然通风和风扇的优缺点

优点	缺点
> 只需打开门、窗户和天窗，就能轻松实现自然通风。但需要注意的是，并非所有现代建筑都适合采用自然通风。 > 将室外空气引入室内空间不仅可以降低结核传播的风险，还可以改善整体室内空气质量，减少室内的污染物和异味。 > 排风扇费用不高。 > 在进行建筑设计时即考虑到自然通风的需求，容易实现良好的自然通风效果。	> 受风况和其他微环境因素的影响，自然通风往往难以控制，其效果不易预测。例如，室内人员可能会关闭门窗，室外风向也可能会改变。 > 室外空气被直接引入室内，没有经过过滤器或其他空气净化装置的处理，可能会带入交通尾气和噪音、雨水、灰尘、异味、花粉和昆虫等。 > 长期开启门窗会对安全性、舒适度（包括温度和湿度）和隐私产生不利影响，这些问题在夜间和冬季尤为明显。 > 对原本已有 HVAC 系统的建筑，很难进行改造来确保足够的自然通风。 > 如果已经安装了有效的 HVAC 系统，开启窗户不仅会影响房间内的压力，如果处理不当还可能损坏 HVAC 系统和建筑物本身。

自然通风和排风扇

琳恩是“欢迎之家”流浪人员收容所的负责人，该收容所每晚接待约 100 名流浪人员。

收容所为一座仓库改造而成，天花板很高。其内部被划分为男宿舍区和女宿舍区，每个区域都配有淋浴间和卫生间，另外还设有一个小型办公区。

案例研究

城市流浪人员中结核病发病率较高，琳恩为结核传播问题感到担忧。她所在的机构尚未对服务对象开展结核病筛查。由于采用先到先服务的接待方式，收容所每晚接待的服务对象往往不同，这可能会增加结核传播的风险。虽然该机构至今未曾发生过结核病暴发，但琳恩深知这种情况随时可能发生。

这座建筑没有安装 HVAC 系统，只在每个淋浴间和卫生间配备了排风扇。

检查通风情况

在为服务对象、工作人员和志愿者增加结核病筛查后，琳恩着手改善建筑物内的通风状况。她首先检查了现有的通风设施。

她用线香进行测试，发现在门口和打开的窗户附近，空气混合较好，因为烟雾散得很快。但在远离门窗的角落区域，空气几乎不流动，有些地方甚至完全停滞。

为了解夜间的情况，琳恩关闭所有门窗后再次进行了测试，发现整个机构内的空气流动都很缓慢，有些区域甚至完全停滞。

琳恩随后检查了淋浴间和卫生间的两个排风扇，发现两个风扇上都沉积了大量绒毛和灰尘。她启动风扇，用一张纸片测试每个格栅的吸力。在男卫生间，纸片被吸附在格栅上，但在女卫生间却完全没有吸力，而且听不见风扇运转的声音。

通过这些简单的检查，琳恩对建筑物内的通风状况有了清晰的认识：

- **白天门窗开启时，除了房间的角落区域外，空气流动情况良好。**
- **夜间门窗关闭后，空气流动变得很缓慢，有些区域甚至完全停滞。**
- **两个排风扇都需要清洁。**
- **女卫生间的排风扇不工作。**

问题：琳恩如何在预算有限的情况下改善这种状况？

她用吸尘器彻底清洁了两个排风扇的格栅。清洁后，男卫生间格栅处的气流立即有了明显加强，但女卫生间的风扇仍然无法工作。

接下一页

案例研究

接上一页

改进措施

琳恩采取的第一个举措是确保所有窗户顶部都留有微小开口，包括门上方的窗户。她注意到后墙角落附近有两个封闭的窗户，她想到，如果在这两个窗户上各安装一个排风扇，无论门窗是否开启，都能在每个风扇附近的死角区域形成气流；这样，空气就会从她新开的固定开口处被吸入。琳恩计划在有了额外资金后购买并安装几台吊扇，以加强室内空气的混合。

琳恩采取的第一个举措是确保所有窗户顶部都留有微小开口

她测量了窗户开口的尺寸和房间的容积，在当地五金店购买了穿墙式风扇，安装在每个窗户上以提高 ACH。市面上常见的厨房和浴室用风扇有不同的尺寸和气流流速规格（50–200 CFM）。相关职业培训项目的工作人员帮助将这些风扇安装在窗户上，以此作为其培训练习。琳恩进行了检查，并确认窗式风扇将空气排向了建筑物的后方。

趁施工人员在场，琳恩请他们检查了女卫生间的排风扇。他们发现问题的原因在于一处接线松动，并进行了修补。

改进效果

琳恩在当晚用线香进行了复测，启动风扇并关门后，整个机构内的空气流动都有了显著改善。但是，有些服务对象反映有轻微穿堂风，琳恩给他们提供了额外的毯子。

第二天早上，她在门窗开启的情况下又进行了一次测试，很高兴地发现就连角落区域的气流情况也令人满意。

琳恩对自己的成果感到自豪，于是她拟定并张贴了一份简明的规章制度，总结了她在环境控制方面采取的措施：

- **白天保持门窗开启。**
- **始终开启所有风扇（包括卫生间排风扇和穿墙式排风扇）。**
- **每月第一天清洁所有风扇。**

次月，琳恩在当地流浪人员收容所负责人联席会议上与同行分享了她的经验和规章制度。与会者一致认为，虽然“欢迎之家”仍有可能发生结核传播，但风险已经得到降低。此外，增加室外空气的引入也改善了工作人员和服务对象所处的室内环境。

问题：

还可以采取哪些措施来预防流浪人员收容所内的结核传播？

更多建议请参见第1章“行政控制”和第6章“流浪人员收容所”。

在装有HVAC系统的房间内使用风扇

螺旋桨式风扇可与某些HVAC系统配合使用：

- 在使用上层空间 UVC 装置时，空气混合（空气在房间下部人员驻留区和上层空间之间来回流动）至关重要。螺旋桨式风扇和通风散流器可以提高这种装置的使用效果。

良好的空气混合是稀释通风策略中的重要环节。螺旋桨式风扇有助于减少空气滞留、温度分层和气流短路现象。

如果将风扇安装在墙体开口处或其附近，也可用来促进房间内外的空气流动，但应咨询机构工程师，以确定这种布置是否会影响现有机械通风系统的性能。例如，如果有人打开窗户，将温暖的空气引入已开启空调的空间，可能会出现以下三种情况：

- 在送风处或其附近会出现冷凝水，这不仅会导致水滴滴落到室内，还会使天花板变得潮湿，为霉菌生长创造适宜环境。
- 由于设计空调系统时并未考虑要降低额外引入室内的室外温暖空气所带来的热负荷，因此，系统需要运行更长时间才能达到设定温度，可能会持续运转，造成空调系统可能无法维持所需的温度和湿度水平。
- 空调系统的使用寿命会缩短。

不应在 AIIRs 内保持门窗开启（这会破坏所需的压力平衡）。

室内空气净化器（RACs）

RACs 是一种方便易用的设备，可为各类场所**提供洁净空气**、改善室内空气质量。这类设备的安装和维护无需大量工程知识，特别**适合那些机械通风不足或完全没有机械通风、且改造资金有限的场所。**

配备了滤芯的 RACs 有多种尺寸和配置方案，但大都包含以下几个主要部件：

- 主滤芯：用于去除空气中的小颗粒物
- 初效滤芯：用于去除较大颗粒物，从而延长高效滤芯的使用寿命
- 风扇：让空气流经滤芯，并将过滤后的空气重新送回室内
- 控制系统：包括开关、定时器和风扇速度（气流流速）调节装置等

最常见的是便携、独立式的设备，还有吊顶式和壁挂式可供选择。便携式的优势在于使用更加灵活，安装和维护也更加方便。固定式则不易被人为损坏和盗窃，基本不会妨碍室内通行，也不会被随意移动到效果不佳的位置。在选择 RAC 时，主要考察其能输送多少“洁净”空气，这个指标通常以立方英尺 / 分钟（CFM）或立方米 / 小时（m^3/hr）为单位。

合格的 RAC 应具备以下几个关键性能特征：

- **必需的洁净空气输出比率**（Clean air delivery rate，CADR），要能为特定房间或场所提供足够的 ACH
- 运行噪音低，即使在最高气流流速时也低于 55 分贝（A）
- 能与标准美式 110–120V 电源插座或电路配套使用
- 可根据场所条件选择便携式（落地式或台式）或固定式（壁挂式或吊顶式）
- 能形成合适的气流模式和 / 或与现有 HVAC 系统协同工作，以确保室内空气充分混合且不会产生空气对流

如需了解更多有关使用 RAC 的详细信息，请参见参考文献 3、4 和 5。

RAC滤芯

配备滤芯的 RAC 既能提供洁净空气来稀释感染性颗粒物，又能去除感染性颗粒物和其他的经空气传播颗粒物。**HEPA 滤芯**能够去除 99.97% 的粒径为 0.3 μm 的颗粒物（能够去除结核相关粒径范围内的几乎所有感染性颗粒物），许多 RAC 都采用这种滤芯。但是，由于需要较大功率的风扇才能使空气通过 HEPA 滤芯，可能会产生明显噪音。而其他效率较低的滤芯（**如 MERV–13 或更高级别**的滤芯），可有更高的气流流速，从而达到或超过采用 HEPA 滤芯的 RAC 的 CADR 值。含结核分枝杆菌的感染性颗粒物明显比用于测试 HEPA 滤芯的颗粒物大，因此使用“准 HEPA”滤芯（如 MERV–13 或更高级别）的 RAC 即可去除大部分含结核分枝杆菌的颗粒物，适合在医疗卫生机构使用。更多详细信息请参见 ASHRAE 的 52.2–2017 号标准。[25]

用于去除或灭活感染性颗粒物的其他技术有：

- UVC
- 静电集尘板
- 离子发生器

洁净空气输出比率（CADR）

CADR 是指空气净化设备或装置（包括 RACs）向房间或空间输送清洁空气或已灭菌空气的速率，以 CFM 或 m^3/hr 为单位。

对于**配备滤芯的 RAC，其 CADR 约等于实际气流流速（CFM 或 m^3/hr）与滤芯对目标粒径颗粒物的过滤效率的乘积，**这时假设滤芯周围没有泄漏。

- 对于配备 UVC 的 RAC，其 CADR 约等于实际气流流速（CFM 或 m^3/hr）与空气在一次通过 RAC 时 UVC 对特定微生物的灭活效率的乘积。如果测试的是结核分枝杆菌以外的微生物，必须确保所选用的微生物对 UVC 的敏感性至少与结核分枝杆菌相当。如果 RAC 除配有用于保持 UVC 灯管清洁的粗效滤芯外还配备了其他滤芯，则 CADR 取决于 UVC 灭活和滤芯过滤的综合作用。

- 在选择 RAC（对于颗粒物的 CADR 值不超过 450 CFM 和 / 或对于微生物的 CADR 值不超过 600 CFM）时，应查看美国家用电器制造商协 会（Association of Home Appliance Manufacturer，AHAM） 的 Verifide® 认证证书 * 或其他独立测试认证证书（参见“选择室内空气净化器的步骤”一节提供的证书样例）。美国环境保护署（Environmental Protection Agency，EPA）也提供了小型 RACs 的指南。[34]
- 大型 RACs（对于颗粒物的 CADR 值超过 450 CFM 和 / 或对于微生物的 CADR 值超过 600 CFM)没有经过任何美国国家标准学会(American National Standards Institute，ANSI）/AHAM 标 准 的 测 试， 没 有 AHAM Verifide® 认证证书（只需有独立测试认证证书）。
- AHAM 的测试包含针对花粉（5–11 μm）、灰尘（0.5–3.0 μm）和烟草烟雾（0.10–1.0 μm）的测试；HEPA 滤芯是用 0.3 μm 的颗粒物进行测试（注意含结核分枝杆菌的感染性颗粒物粒径为 1–5 μm）。当用于结核感染控制的目的时，通常应查看烟草烟雾或灰尘的测试结果。

小型RACs

小 型 RACs 可 提 供 10–450 CFM（17–765 m^3/hr)的“洁净空气”,大多配有两档或三档风速(气流流速）调节，但没有其他控制功能。小型 RACs 适用于独立办公室和诊室，以及其他较小的区域。

这类 RACs 重量较轻，便于挪动，可以放置在桌面或其他平面上。可在五金店和类似的零售店购买。

小型 RACs 可使用 MERV–13 或更高效率的滤芯，包括 HEPA 滤芯。

- 在选择 RAC 时，应重点关注的**关键性能参数是 CADR 值，**而不是所使用的滤芯等级。

图17：
室内空气净化器（低气流流速）

来源：CITC

大型RACs

大型 RACs 可提供 450–1000 CFM（765–1700 m^3/hr）的洁净空气，适用于可能有较多人员驻留的较大房间，如装有电视的公共休息厅或医疗卫生机构候诊室。**这类 RACs 通常未经 AHAM 认证，应查看独立测试报告。**

这类 RACs 通常配有轮子，便于在不同房间之间移动。与小型 RACs 一样，大型 RACs 也配有两档或三档风速（气流流速）调节，而且通常有一个指示灯，用于提示更换滤芯。

可选配置包括用于防止擅自调节的控制装置锁定盖和内置的 UVC 灯管。由于 RAC 配备适当滤芯后能去除结核相关粒径范围内的大部分感染性颗粒物，因此 UVC 能带来的额外效益很小。

某些大型 RACs 能将全部或部分空气排到室外，使房间达到 AIIR 所需的负压要求。

大型 RACS 可从专业医疗设备供应商和工业设备供应商购买。

图18：
室内空气净化器（高气流流速）

来源：AeroMed/B. Palmer

RAC的布置和使用注意事项

- 对于通风不足或完全没有通风、且经常有患者或服务对象驻留的所有房间，如果这些房间没有可保持开启状态的窗户或门，应配备便携式 RACs。
- **小型 RACs 应放置在离地面一定高度且靠近工作人员的位置，其产生的洁净空气能够直接送达工作人员呼吸带，使工作人员获得保护。**应将配备 HEPA 滤芯的 RAC 的功能首先视为提供洁净空气，其次才是清除室内污染空气。
- 在人员密集房间内应均匀布置这些装置，确保房间内所有区域都能有空气流动。
- **选择 RAC 时应以其在低速或接近低速运转时的 CADR 值作为依据。**配备 HEPA 滤芯的 RACs 在高速运转时会产生较大噪音。因此，在小房间内进行患者 / 服务对象访谈时，工作人员往往会将设备调至低速或中速档位运行。但是，风速（气流流速）较低时，由于 RAC 不能提供与高风速（气流流速）时同样多的净化空气，空气稀释效果会降低。
- 在室内有患者或服务对象时，应保持 RACs 持续运行，且在他们离开房间后继续运行约 1 小时。

RAC的选择

- 对于大多数的一般性使用场所，应选择 CADR 值至少达到 6ACH 的 RACs。
  - ASHRAE 建议，诊室的 ACH 最低应达到 6 次，而医疗卫生机构的某些特定区域（包括急诊科候诊室、可产生或形成气溶胶的医疗操作室，以及 AIIR）则应达到 12 次。考虑到无稳定住所人群的结核病发病率较高，因此，人员密集房间应按照医院候诊室的标准来配置，而访谈室则应按照诊室的标准来配置。
  - 如果现有 HVAC 系统已经能够提供部分必要的 ACH，可通过增设 RAC 来提高空间的总换气次数（如，HVAC 系统提供 6ACH+RAC 提供 6ACH=12ACH）。这种做法虽然可行，但更好的解决方案是对 HVAC 系统进行升级改造。
- **注**：设备标注的 CADR 值通常是在滤芯处于全新清洁状态时测得的数值。随着滤芯逐渐积聚灰尘，气流流速会下降，导致实际的 CADR 值降低。
  - 为了补偿这种性能下降造成的影响，应在所需 CADR 值的基础上增加 50% 作为安全系数。虽然购买一台 CADR 值更大的 RAC 会增加费用，但这部分额外成本与设备的总成本相比通常并不显著。
- 选择 RAC 时，应以其 AHAM Verifide® 认证证书或其他独立机构提供的 CADR 验证结果作为依据。需要特别注意的是，设备标注的 CADR 值是在 RAC 处于最高气流流速（如果该设备具有气流流速调节功能的话）时测得的数值。
  - 对于那些未经验证的 RAC，其实际性能可能达不到制造商标注的 CADR 值，一般不建议选用这类设备。

选择RAC的步骤：

（参见表 4“根据房间容积和 CADR 值选择 RAC”）

1. 测量房间尺寸，计算房间容积（长度 × 宽度 × 天花板高度）。例如，对于一个宽 10ft、长 10ft、天花板高 8ft 的房间，其容积为 800ft^3（相当于 22.7m^3）。
2. 根据房间大小确定所需的 CADR 值。医疗卫生机构的一般性使用房间至少需要 6ACH。要达到这一换气率所需的 CADR 值（以 CFM 或 m^3/hr 为单位）可按以下方法计算：
   - （房间容积 × 6ACH）÷（60min/hr）= 气流流速（CFM）；或（房间容积 × 6ACH）= 气流流速（m^3/hr）
   - 考虑到滤芯会逐渐积聚灰尘，在计算得出的所需 CADR 值基础上还需增加一个安全系数。表 4 中“含 50% 安全系数的最低 CADR 值”一栏列出了纳入 50% 安全系数计算后的推荐 CADR 值。
     - 举例说明：假设房间容积为 800ft^3，要达到 6ACH 并考虑 50% 的安全系数，应选择 CADR 值至少为 120 CFM（204 m^3/hr）的 RAC。

表4：**根据房间容积和CADR值选择RAC**

房间容积	6ACH所需CADR值	含50%安全系数的最低CADR值
800 ft³ (22.7 m³)	80 CFM (136 m³/h)	120 CFM (204 m³/h)
1,000 ft³ (28.3 m³)	100 CFM (70 m³/h)	150 CFM (255 m³/h)
1,500 ft³ (42.5 m³)	150 CFM (255 m³/h)	225 CFM (382 m³/h)
2,000 ft³ (56.6 m³)	200 CFM (340 m³/h)	300 CFM (510 m³/h)
4,000 ft³ (113 m³)	400 CFM (680 m³/h)	600 CFM (1,020 m³/h)
8,000 ft³ (227 m³)	800 CFM (1,360 m³/h)	1,200 CFM (2,040 m³/h)

3. 选择 RACs 时，应选择具有 AHAM Verifide® 认证证书或经独立机构验证过 CADR 值的产品。
   - **注意**：有 CADR 标称值的设备，其实际效率可能与宣传不符，可能需要重新计算以确定所需的 ACH。在阅读产品标签时要特别仔细，**不要**直接采用制造商或 AHAM Verifide® 认证证书给出的适用“房间大小”信息，因为这些信息是按照天花板高度为 8ft（2.4m）的标准条件计算的（具体样例见下面）。
   - 如果产品标注了针对烟草烟雾、灰尘和花粉的 CADR 测试值，在选择用于结核感染控制的 RAC 时，应**采用烟草烟雾或灰尘的 CADR 值，**因为针对烟草烟雾和灰尘进行测试时采用的粒径范围覆盖了含结核分枝杆菌的感染性颗粒物粒径范围。
   - 图 19 展示了 AHAM Verifide® 认证证书标签的示例。

   根据 AHAM 网站的说明，认证证书上标注的适用房间大小（ft²）均是**按照天花板高度为 8ft 这一标准条件来计算的。**
   - 如果要安装 RAC 的房间的天花板高度恰好为 8ft，可以直接采用认证证书上的平方英尺值进行比较。
   - 如果房间尺寸与此不同，则需将认证证书上给出的RAC适用面积（ft²）乘以8ft高度，**计算出 AHAM 采用的标准参考容积**（如：房间容积为 360ft² × 8ft = 2880ft³）。该 RAC 标注的 CADR 值即适用于具有这一标准参考容积的房间。

图19：
AHAM Verifide® 认证证书标签示例

来源：AHAM Verifide®

   - 假设目标房间的总容积为长 18ftx 宽 15ftx 高 10ft = 2700ft³，要达到 6ACH，需要约 300 CFM 的 CADR 值。若增加 50% 的安全系数，则所需 CADR 值应达到 450 CFM。如果一台 RAC 的 CADR 值为 240 CFM（针对烟草烟雾），使用两台这样的设备即可满足房间的换气需求；另一种方案是选择一台 CADR 性能更高的其他型号 RAC。

注：大多数RACs都有一个控制开关，可以将气流流速从固定的最小值（低速档）调节到最大值（高速档）。高速运行会产生较大噪音，工作人员往往会将设备调至低速档运行。因此，如果制造商提供了低速档的CADR值，建议根据较低气流流速设置时的CADR值来选择RAC（例如，对于一台具有低/中/高三档的设备，其标称CADR值在三个档位下可能分别为 100/150/200 CFM [170/255/340 m^3/hr]）。实际上，许多设备只标注了在最高气流流速设置下达到的CADR值。

RAC滤芯的例行维护

- **医疗卫生机构应指定一名工作人员负责室内 RACs 的日常管理。**管理员必须知晓 RAC 的基本运行原理，包括如何有效布局和维护；还应制定书面计划，明确更换初效滤芯和主滤芯的具体安排。

维护工作主要包括按照固定的时间间隔更换初效滤芯和主滤芯。制造商的说明书详细说明了更换操作步骤。**一般情况下，初效滤芯应每 3–6 个月更换一次，主滤芯应每 1–2 年更换一次。**具体的更换时间间隔主要取决于两个因素：一是设备的使用频率，二是室内空气的含尘量。

RACs 的优缺点

优点	缺点
> 购置后可立即投入使用	> 实际使用效果难以把控。如果控制面板容易触及，患者、服务对象或工作人员可能会擅自调低风速或关闭设备、随意改变设备的安装位置或断开电源、在设备顶部堆放书籍或其他物品导致正常气流受影响，甚至为了降低噪音而把设备放到床下
> 可根据各个房间的具体需求分别配置	> 运行时会产生气流和噪音
> 在规划、安装和维护方面所需的费用相对较低	> 不能引入室外新风
> 可根据需要调节气流流速	> 不能去除空气中的异味
> 可根据需要灵活调整位置	> 随着滤芯捕获空气中的颗粒物，设备的 CADR 和气流流速会下降
> 能够清除室内空气中的其他颗粒物，包括灰尘和致敏物质	
> 评估其性能时无需使用昂贵的检测仪器	

室内空气净化器（RAC）

凯瑟琳是一家城区流浪人员收容所的管理员，工作内容之一是每周与约 6 名新服务对象面谈。她的办公室既没有通风设施，也没有可以开向室外的窗户。由于服务对象未经过医学筛查，加之办公室缺乏通风，她担心发生结核传播。诊所管理人员划拨了 150 美元用于购置一台 RAC，在凯瑟琳确定所需规格后即可购置。

案例研究

凯瑟琳希望选购一台能够实现至少 6ACH 的设备。她用卷尺测量了办公室的尺寸，按照以下步骤计算了所需的 HEPA 滤芯的气流情况：

房间容积 = 长度 × 宽度 × 高度
= 8ft × 10ft × 9.5ft
= **760ft^3**

实现 6 ACH 所需的气流流速 = 房间容积 x 6 ACH
= 760ft^3 x 6 ACH
= 4,560ft^3/hr ÷ 60min/hr
= **76 CFM**

考虑到设备的实际 CADR 可能低于标称值，凯瑟琳在计算时增加了 50% 的安全系数，由此得出所需的最低气流流速为 114 CFM：

76 CFM x 1.5 = 114 CFM

大多数设备都可调节风速。在高速运行时，设备会产生较大的噪音。凯瑟琳计划在面谈过程中将设备调至低速运行，因此，她决定选购一台在低速运行时 CADR 值至少能达到 114 CFM 的 RAC（前提是该 CADR 值是在低风速档位下测得的）。

凯瑟琳是否应争取实现6ACH或者更高的通风？为什么？

如果可能的话，应争取实现6ACH以上的通风，因为随着滤芯逐渐积聚灰尘（变脏），设备的实际CADR会降低。

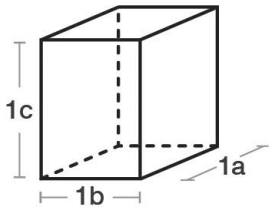
关于通风的 **附录A：**

室内空气清除时间计算工作表

说明：如需了解如何使用压力计（例如Vaneometer™），请参阅第4章“经空气传播感染隔离房间”的“监测AIIR环境控制情况”一节。

房间或隔间编号： _____

第一步：计算房间容积



1a. = 房间长度（l）

1b. = 房间宽度（w）

1c. = 房间高度（h）

1d. = 1a x 1b x 1c = 容积

1a. _____ ft (m)

1b. _____ ft (m)

1c. _____ ft (m)

1d. _____ ft^3 (m^3)

第二步：计算每小时换气次数 (ACH)

2a. 测量排风格栅的高度（h）和宽度（w）

2b. 计算面积（**2b**），方法是用高度乘以宽度 (**2b**)

2b = h x w

2c. 将in^2换算为ft^2：**2b**除以144in2/ft^2

将cm^2换算为m^2：**2b**除以1,000cm^2/m^2

2d. 使用压力计（例如Vaneometer™）或电子风速仪在（排风格栅正面的）多个点测量平均气流流速

2e. 计算排出气流流速：排风格栅面积（**2c**）乘以平均流速（**2d**）

2e = 2c x 2d

2f. 将CFM（ft^3/min）换算为ft^3/hr：2e乘以60min/hr

将m^3/sec换算为m^3/hr：**2e**乘以3,600sec/hr

2g. 计算每小时换气次数（ACH）：排风气流流速（**2f**）除以房间容积（**1d**）

2g = 2f ÷ 1d

2a. h = _____ in (cm)

w = _____ in (cm)

2b. _____ in^2 (cm^2)

2c. _____ ft^2 (m^2)

2d. _____ ft/min (m/sec)

2e. _____ CFM (m^3/sec)

2f. _____ ft^3/hr (m^3/hr)

2g. _____ ACH

第三步：计算室内空气清除时间（99%或99.9%）

3a. 查找未校正的清除时间

使用下页的表A-1（即2005年CDC指南的表1），沿第一列向下找到与上面**2g**行上ACH值相对应的数值。

- 去除效率 >99% 可被接受；理想情况下应采用第三列中的数值（去除效率 99.9%）。
- 记录这个值（分钟数）。假设房间内空气实现完全混合，该值就是在对疑似或确诊传染性结核病患者进行痰诱导、且该患者离开痰诱导区域（房间、隔间或棚罩）后，工作人员或其他患者进入该区域之前应当等待的时间。

3a. _____ min

3b. 为房间/隔间选择适当的混合系数（Mixing Factor，MF） 实际情况下很少能达到完全的室内空气混合，因此 3a 行的数值必须乘以一个混合系数，这个系数的范围从 1（表示完全混合）到 10（表示混合不良）。1 代表完全混合，2 代表混合良好，3 代表混合一般；大多数医疗卫生机构的混合系数在 1 到 2 之间。可以通过烟雾可视化试验和 / 或观察送风口或排风格栅的位置来帮助估算混合系数。	**3b. MF =** _____
3c. 计算校正后的室内空气清除时间：3a × 3b 这是考虑到空气混合不完全的情况下，在对疑似或确诊传染性结核病患者进行痰诱导、且该患者离开痰诱导区域（房间、隔间或棚罩）后，工作人员或其他患者进入该区域之前应当等待的时间。	**3c.** _____ min

表A-1：**不同每小时换气次数（ACH）下空气污染物去除效率达到99%和99.9%所需的时间 ***

ACH	99%	99.9%
	达到去除效率所需的分钟数 †	
2	138	207
4	69	104
6	46	69
12	23	35
15	18	28
20	14	21
50	6	8
400	<1	1

* 本表可用于估算在患者离开该区域后或产生气溶胶的操作完成后，清除空气中的结核分枝杆菌所需的时间。

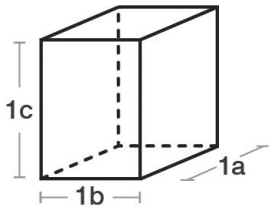
† 将空气中的污染物浓度降低99%或99.9%所需的分钟数。

关于通风的 **附录A：**

室内空气清除时间计算工作表：示例

房间或隔间编号： _____

第一步：计算房间容积



1a. = 房间长度（l）

1b. = 房间宽度（w）

1c. = 房间高度（h）

1d. = 1a x 1b x 1c = 容积

1a. 12 ft (m)

1b. 15 ft (m)

1c. 9 ft (m)

1d. 1,620 ft^3 (m^3)

第二步：计算每小时换气次数 (ACH)

2a. 测量排风格栅的高度（h）和宽度（w）

2b. 计算面积（**2b**），用高度乘以宽度 (**2b**)

2b = h x w = 20ft x 20ft= 400ft2

2c. 将in^2换算为ft^2：**2b**除以144in^2/ft^2

2c = 400in^2 ÷ 144in^2/ft^2 = 2.78ft^2

2d. 使用压力计（例如Vaneometer™）或电子风速仪在多个点测量平均气流速度。平均流速 = **2d**

2e. 计算排出气流流速：排风格栅面积（**2c**）乘以平均流速（**2d**））

2e = 2c x 2d = 2.78ft^2 x 36ft/min = 100 CFM

2f. 将CFM（ft^3/min）换算为ft^3/hr：**2e**乘以60min/hr

2f = 2e x 60min/hr = 100 CFM x 60min/hr = 6,000ft^3/hr

2g. 计算每小时换气次数（ACH）：排出气流流速（**2f**）除以房间容积（**1d**）

2g = 2f ÷ 1d = 6,000ft^3/hr ÷ 1,620ft^3 = 3.7 ACH

2a. h = 20 in (cm)

w = 20 in (cm)

2b. 400 in^2 (cm^2)

2c. 2.78 ft^2 (m^2)

2d. 36 ft/min (m/sec)

2e. 100 CFM (m^3/sec)

2f. 6,000 ft^3/hr (m^3/hr)

2g. 3.7 ACH

第三步：计算室内空气清除时间（99%或99.9%）

3a. 查找未校正的清除时间

将 3.7 ACH 向上取整为 4 ACH。查看表 A–1，在第三列（99.9%）中找到与第 **2c** 行上的 ACH 值相对应的数值。

3a. ~104 min

3b. 考虑到该房间空气混合良好，选择混合系数 (MF) 2

3b. MF = 2

3c. 计算校正后的室内空气清除时间：3a × 3b

这是考虑到空气混合不完全的情况下，在对疑似或确诊传染性结核病患者进行痰诱导、且该患者离开痰诱导区域（房间、隔间或棚罩）后，工作人员或其他患者进入该区域之前应当等待的时间。

3c. 208 min

关于通风的 **附录B：**

经空气传播感染隔离房间（AIIR）压力监测清单

房间或隔间编号： _____

监测仪器制造商和型号： _____

本清单应每年填写一次，且应每月更新，用于记录每个房间的压力监测结果。

应当**每月***通过实测验证负压状态，以确认监测仪器的准确性。

本清单填写完成后，应将副本存档于科室的规章制度文件夹中。

监测仪器设置

正常运行时的压力读数（关门时监测仪器显示值）：_____"wg (Pa)

触发报警的压差值：_____"wg (Pa)

延迟时间：_____秒

远程报警装置安装位置：_____

年度监测检查项目

检查内容	完成日期	确认签字
按照制造商要求完成监测仪器校准		
通过发烟管测试验证负压状态 （此项测试应当每月*重复一次，并在下方签字确认）		
验证报警功能（通过保持房门开启或封堵排风格栅）		
报警延迟时间：_____秒		
触发报警时的压力读数：_____"wg(Pa)		
向楼层所有工作人员演示监测仪器的使用方法和功能		

每月*负压检查记录

签名_____月/年_____	签名_____月/年_____	签名_____月/年_____
签名_____月/年_____	签名_____月/年_____	签名_____月/年_____
签名_____月/年_____	签名_____月/年_____	签名_____月/年_____
签名_____月/年_____	签名_____月/年_____	签名_____月/年_____

* 当AIIR用于收治疑似或确诊的肺结核或喉结核患者时，应在患者入住前和患者住院期间每天使用发烟管或其他可视化方法验证负压状态。

关于通风的 **附录C：**

最低效率报告值（MERV）参数

改编自ASHRAE第52.2–2017号标准的表12–1 [25]

标准52.2 界定的 最低效率报告值（MERV）	不同粒径范围（μm）下的综合平均粒子去除效率（%）*		
	机械通风下的最低ACH	循环使用空气	最低过滤效率
1	不适用	不适用	E3 < 20
2	不适用	不适用	E3 < 20
3	不适用	不适用	E3 < 20
4	不适用	不适用	E3 < 20
5	不适用	不适用	20 ≤ E3
6	不适用	不适用	35 ≤ E3
7	不适用	不适用	50 ≤ E3
8	不适用	20 ≤ E2	70 ≤ E3
9	不适用	35 ≤ E2	75 ≤ E3
10	不适用	50 ≤ E2	80 ≤ E3
11	20 ≤ E1	65 ≤ E2	85 ≤ E3
12	35 ≤ E1	80 ≤ E2	90 ≤ E3
13	50 ≤ E1	85 ≤ E2	90 ≤ E3
14	75 ≤ E1	90 ≤ E2	95 ≤ E3
15	85 ≤ E1	90 ≤ E2	95 ≤ E3
16	95 ≤ E1	90 ≤ E2	95 ≤ E3

* E1 = 0.3-1.0 μm, E2 = 1.0-3.0 μm, and E3 = 3.0-10.0 μm

关于通风的 **附录D：**

HVAC系统信息汇总表：示例

本表格旨在为建筑物内所有HVAC系统创建一份便于查阅的汇总信息，示例后还附有一份空白模板。

HVAC设备汇总表

设备安装位置	HVAC系统服务区域	恒温器安装位置	过滤器（编号、规格、MERV等级）
男宿舍的阁楼	男宿舍和女宿舍	男宿舍大房间	(1) 20" x 25" x 1", MERV-5

过滤器安装在男宿舍大房间的回风格栅后方。
备用滤芯存放在清洁用品间内。
可通过男宿舍天花板上的检修口检修设备。

厨房内的清洁用品间	厨房、会议室、餐厅以及女卫生间	餐厅	(1) 19" x 20" x 1", MERV-7

过滤器直接安装在设备上，拆下四颗固定螺丝即可进行更换。
备用滤芯存放在清洁用品间内。

主任办公室的屋顶	办公区域、女宿舍、男宿舍小房间以及男卫生间	女宿舍	(1) 22" x 22" x 1", MERV-9

过滤器位于屋顶HVAC设备旁边，更换时需使用存放在设备间的专用梯子登上屋顶。备用滤芯存放在清洁用品间内。

SAMPLE

关于通风的 **附录D：**

HVAC系统信息汇总表：模板

HVAC设备汇总表			
设备安装位置	HVAC系统服务区域	恒温器安装位置	过滤器（编号、规格、MERV等级）

关于通风的 **附录E：**

医疗卫生机构各区域通风的推荐

依据：ASHRAE 170–2021标准[1]

医疗卫生机构的场所	机械通风下的最低ACH	室外新风下的最低ACH	相对于相邻区域的空气流动	空气是否直接排出至室外	空气是否再循环	最低过滤效率
AIIR的缓冲间	10	**NR**	In/Out	Yes	No	MERV-8
AIIR	12	2	In	Yes	No	MERV-14
解剖室	12	2	In	Yes	No	MERV-8
支气管镜检查室	12	2	In	Yes	No	MERV-14
急诊科和放射科候诊区	12	2	In	Yes	**NR**	MERV-8
手术室	20	4	Out	**NR**	No	MERV-16

NR=无需求

参考资源

一般性的感染预防与控制

美国疾病预防控制中心（CDC）出版物

- 《医疗卫生机构结核分枝杆菌传播预防指南》（Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-Care Settings）(2005)
  https://www.cdc.gov/mmwr/pdf/rr/rr5417.pdf
- 《医疗卫生机构感染控制实施要点》（Infection Control in Health-Care Settings Fact Sheet）(2016)
  https://www.cdc.gov/tb-healthcare-settings/hcp/infection-control/index.html
- 《结核病核心课程：临床医生必备知识》第 6 章“结核感染控制”（Chapter 6: Tuberculosis Infection Control. In Core Curriculum on Tuberculosis: What the Clinician Should Know）（2021 年第七版）
  https://www.cdc.gov/tb/hcp/education/core-curriculum-on-tuberculosis-continuing-education.html

世界卫生组织出版物

- 《世界卫生组织结核病综合指南：模块 1 预防 – 感染预防控制》（WHO Consolidated Guidelines on Tuberculosis: Module 1: Prevention – Infection Prevention and Control）（2022 年版）
  https://www.who.int/publications/i/item/9789240055889
- 《世界卫生组织结核病操作手册：模块 1 预防 – 结核感染预防控制》（WHO Operational Handbook on Tuberculosis. Module 1: Prevention – Tuberculosis Infection Prevention and Control）（2023 年版）
  https://www.who.int/publications/i/item/9789240078154

美国职业安全与健康管理局（OSHA）

- 建议本指南的读者查阅其所在地的相关法规要求，并咨询当地 OSHA 办事处
  https://www.osha.gov/contactus/bystate

美国国家标准学会/美国暖通空调工程师学会/照明工程学会（ANSI/ASHRAE/IES）

- 《建筑物和系统调试流程》- ANSI/ASHRAE/IES 标准 202-2018 的补充文件（2020 年版）（Commissioning Process for Buildings and Systems. ANSI/ASHRAE/IES Addendum a to ANSI/ASHRAE/IES Standard 202-2018）(2020)
  https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/202_2018_a_20200630.pdf

参考文献

概述

1. ASHRAE. ANSI/ASHRAE/IES Standard 202-2018, Commissioning Process for Buildings and Systems. ASHRAE; 2020. https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/202_2018_a_20200630.pdf

第1部分：通风

1. ASHRAE. *ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2017, Ventilation of Health Care Facilities.* ASHRAE; 2021. https://store.accuristech.com/ashrae/standards/ashrae-170-2017?gateway_code=ashrae&product_id=1999079
2. ASHRAE. *ANSI/ASHRAE 62.2-2022, Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings.* ASHRAE; 2022. https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/62_2_2022_k_20230727.pdf
3. Association of Home Appliance Manufacturers. *ANSI/AHAM AC-1-2006, Method for Measuring Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners.* Association of Home Appliance Manufacturers; 2006. https://webstore.ansi.org/standards/aham/ansiahamac2006
4. Association of Home Appliance Manufacturers. *ANSI/AHAM AC-5-2022, Method for Assessing the Reduction Rate of Key Bioaerosols by Portable Air Cleaners Using an Aerobiology Test Chamber.* Association of Home Appliance Manufacturers; 2022. https://webstore.ansi.org/standards/aham/ansiahamac2022
5. Jensen PA, Lambert LA, Iademarco MF, Ridzon R; CDC. Guidelines for preventing the transmission of Mycobacterium tuberculosis in health-care settings, 2005. *MMWR Recomm Rep.* 2005;54(RR-17):1-141. https://www.cdc.gov/mmwr/pdf/rr/rr5417.pdf
6. ASHRAE. Chapter 17. Ultraviolet Lamp Systems. In: *2020 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment.* ASHRAE; 2020. https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/description-2020-ashrae-handbook-hvac-systems-and-equipment
7. ASHRAE. Chapter 62. Ultraviolet Air and Surface Treatment. In: *2023 ASHRAE Handbook—HVAC Applications.* ASHRAE; 2023. https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/description-2023-ashrae-handbook-hvac-applications
8. Mutchler JE. Chapter 39: Principles of Ventilation. In: *The Industrial Environment, Its Evaluation & Control.* National Institute for Occupational Safety and Health, Center for Disease Control; 1973. https://www.cdc.gov/niosh/docs/74-117/
9. Centers for Disease Control and Prevention. Chapter 6: Tuberculosis Infection Control. In: *Core Curriculum on Tuberculosis: What the Clinician Should Know.* 7th ed. Centers for Disease Control and Prevention; 2021. https://www.cdc.gov/tb/hcp/education/core-curriculum-on-tuberculosis.html
10. *Engineering Guide Displacement Ventilation.* Price Industries; 2016. https://www.priceindustries.com/content/uploads/assets/literature/engineering-guides/displacement-ventilation-engineering-guide.pdf
11. GPC 37. *Guidelines for the Application of Upper-Air (Upper Room) Ultraviolet Germicidal (UV-C) Devices to Control the Transmission of Airborne Pathogens.* ASHRAE; 2023. https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/project-committee-interim-meetings
12. Jensen PA, Hayden II CS, Burroughs GE, Hughes RT. Assessment of the health hazard associated with the use of smoke tubes in healthcare facilities. *Appl Occup Environ Hyg*. 1998;13(3):172-176. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1047322X.1998.10390058
13. Sehulster LM, Chinn RYW, Arduino MJ, et al; Centers for Disease Control and Prevention. *Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities. Recommendations from CDC and the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee (HICPAC).* American Society for Healthcare Engineering/American Hospital Association; 2019. https://www.cdc.gov/infection-control/media/pdfs/Guideline-Environmental-H.pdf
14. Facility Guidelines Institute. *Guidelines for Design and Construction of Hospitals.* Facility Guidelines Institute; 2022. https://shop.fgiguidelines.org/products/15
15. Facility Guidelines Institute. *Guidelines for Design and Construction of Outpatient Facilities.* Facility Guidelines Institute; 2022. https://shop.fgiguidelines.org/products/17
16. Facility Guidelines Institute. *Guidelines for Design and Construction of Residential Health, Care, and Support Facilities.* Facility Guidelines Institute; 2022. https://shop.fgiguidelines.org/products/19
17. Hayden II CS, Johnston OE, Hughes RT, Jensen PA. Air volume migration from negative pressure isolation rooms during entry/exit. *Appl Occup Environ Hyg*. 1998;13(7):518-527. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1047322X.1998.10390100

18. Angra P, Ridderhof J, Timperi R, Fernandes P. *Ventilated Workstation Manual for AFB Smear Microscopy.* Centers for Disease Control and Prevention; 2011. https://www.aphl.org/programs/global_health/Documents/GH_2011July_VentilatedWorkstationGuidance.pdf

19. Menzies D, Fanning A, Yuan L, FitzGerald JM. Hospital ventilation and risk for tuberculous infection in Canadian health care workers. Canadian Collaborative Group in Nosocomial Transmission of TB. *Ann Intern Med.* 2000;133(10):779-789. doi:10.7326/0003-4819-133-10-200011210-00010

20. Pearson ML, Jereb JA, Frieden TR, et al. Nosocomial transmission of multidrug-resistant Mycobacterium tuberculosis. A risk to patients and health care workers. *Ann Intern Med.* 1992;117(3):191-196. doi:10.7326/0003-4819-117-3-191

21. Price Industries. Chapter 1. Fundamentals of HVAC. In: *Engineer's HVAC Handbook: A Comprehensive Guide to HVAC Fundamentals.* Price Industries; 2011. https://info.priceindustries.com/hubfs/Engineers%20Handbook%20Chapters/Chapters%20with%20Quizzes/Handbook_Chapter1_BasicsofHVAC.pdf

22. Dieckmann J, Erbe D, Fisher J, et al; ASHRAE TC 5.5. *Practical Guidance for Epidemic Operation of Energy Recovery Ventilation Systems.* ASHRAE; 2020. https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/covid-19/practical-guidance-for-epidemic-operation-of-ervs.pdf

23. ASHRAE. Chapter 26. Air-to-Air Energy Recovery Equipment. In: *2020 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment.* ASHRAE; 2020. https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/table-of-contents-2020-ashrae-handbook-hvac-systems-and-equipment

24. Price Industries. Chapter 9. Introduction to Mixing Ventilation. In: *Engineer's HVAC Handbook: A Comprehensive Guide to HVAC Fundamentals.* Price Industries; 2011. https://info.priceindustries.com/hubfs/Engineers%20Handbook%20Chapters/Chapters%20with%20Quizzes/Handbook_Chapter9_MixingVentilation.pdf

25. ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2017, *Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size.* ASHRAE; 2017. https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/COVID-19/52_2_2017_COVID-19_20200401.pdf

26. Price Industries. Chapter 20. Introduction to Healthcare HVAC. In: *Engineer's HVAC Handbook: A Comprehensive Guide to HVAC Fundamentals.* Price Industries; 2011. https://info.priceindustries.com/hubfs/Engineers%20Handbook%20Chapters/Chapters%20with%20Quizzes/Handbook_Chapter20_Healthcare.pdf

27. Price Industries. Chapter 21. Applications of Healthcare HVAC. In: *Engineer's HVAC Handbook: A Comprehensive Guide to HVAC Fundamentals.* Price Industries; 2011. https://info.priceindustries.com/hubfs/Engineers%20Handbook%20Chapters/Chapters%20with%20Quizzes/Handbook_Chapter21_AppsHealthcare.pdf

28. ASHRAE. Chapter 29. Air Cleaners for Particulate Contaminants. In: *2020 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment.* ASHRAE; 2020. https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/table-of-contents-2020-ashrae-handbook-hvac-systems-and-equipment

29. Institute of Environmental Sciences and Technology. *IEST RP-CC001.7 Contamination Control Division Recommended Practice 001.7: HEPA and ULPA Filters.* Institute of Environmental Sciences and Technology; 2002. https://www.techstreet.com/standards/iest-rp-cc001-7?product_id=2504630

30. National Air Filtration Association. *Recommended Practices for Filtration for Airborne Infectious Containment Rooms in Health Care Facilities.* National Air Filtration Association; 2023. https://www.nafahq.org/assets/pdf/2016+Airborne+Infections+Containment+Rooms+in+Health+Care+Facilities+Secured/

31. Int-Hout D. Basics of Well-Mixed Room Air Distribution. *ASHRAE Journal.* Published online July 2015:12-19. https://www.krueger-hvac.com/files/white%20papers/article_basics_of_ad.pdf

32. ASHRAE. ANSI/ASHRAE 61.2-2022, *Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality.* ASHRAE; 2022. https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/62_1_2022_x_20221108.pdf

33. Atkinson J, Chartier Y, Pessoa-Silva CL, et al, eds. *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings.* World Health Organization; 2009. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23762969/

34. *Guide to Air Cleaners in the Home: Portable Air Cleaners, Furnace and HVAC Filters.* 2nd ed. U.S. Environmental Protection Agency; 2018. https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-07/documents/guide_to_air_cleaners_in_the_home_2nd_edition.pdf

第2部分

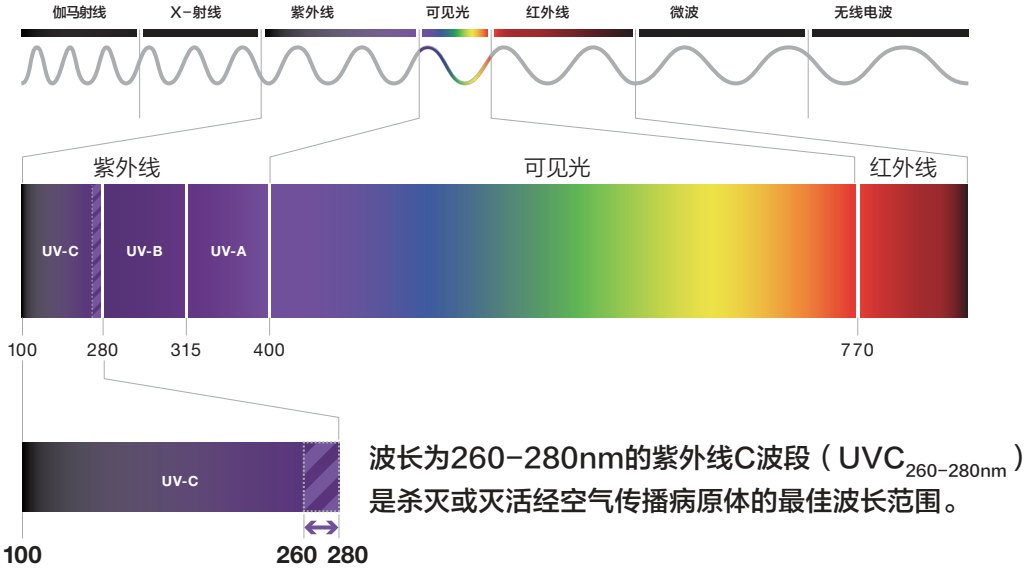
紫外线C波段（UVC）

利用UVC技术降低结核传播风险

什么是UVC？如何应用？

在电磁波谱中，波长介于100–400纳米（nm）的区域被称为“紫外线”（UV）。人眼无法看见这一波段的辐照（见图1），可见光谱波长范围约为400–700nm。按照国际照明委员会（the International Commission on Illumination, CIE）的分类，紫外线区域可以划分为三个子区域：UVA（315–400nm）、UVB（280–315nm）和UVC（100–280nm），其划分并非基于光生物学或光化学原理。在实际应用中，经常使用“紫外线照射杀菌”（Ultraviolet Germicidal Irradiation，UVGI）、“紫外线杀菌”（Germicidal Ultraviolet，GUV）和“紫外线C波段”（UVC）这些术语来描述利用紫外线能量杀灭或灭活微生物的技术。本手册中，我们在一般性讨论时使用UVC这一说法，而在特别指代波长为254nm（属于紫外线C波段的子区域）的紫外线及使用该波长的装置时使用“UVC_{254}”这一专门术语。UVC可降低结核分枝杆菌、新型冠状病毒以及其他经空气传播病原体的传播风险。[1,2,3,4,5]

图1：**最佳杀菌效果的紫外线波段范围**



来源：改编自《什么是蓝光？》（What is Blue Light?）(Eyesafe®)

杀菌波长范围：波长为 260–280nm 的 UVC（$UVC_{260–280}$）被认为是杀灭或灭活大多数细菌、病毒和真菌的最佳波长范围，其作用机制是破坏脱氧核糖核酸（DNA）、核糖核酸（RNA）和 / 或蛋白质。波长为 200–260nm 的 UVC 也具有杀菌作用，但其效果不如 $UVC_{260–280}$（但由于波长减小，其安全性可能会更好）。[6]

用于灭活结核分枝杆菌所需的 UVC 剂量对于大多数病毒和其他细菌病原体通常都有很好的杀灭效果。真菌孢子对 UV 的抗性较强，但它们不会在人与人之间传播。[7,8]

UVC的光源

传统上，低压汞（Hg）灯一直是 UVC 装置中常用的高效杀菌光源。这些灯管主要发射 254nm 波长的 UVC（UVC_{254}），能有效地杀灭或灭活目标微生物。其他 UVC 光源包括氪 – 氯（主要波长为 222nm）、脉冲氙（220–750nm）和特定波长的发光二极管（light-emitting diodes（LEDs），主要波长为 260–280nm）。有研究表明，产生 405nm 蓝光的 LEDs（虽然不在 UVC 范围内）也可能对某些（但不是全部）目标微生物具有灭活作用。总体而言，相比其他技术，UV-LEDs 的 UVC 输出效率相对较低。[9]

本章将重点介绍如何使用 UVC_{254} 光源进行空气消毒。

关于日光的说明：

早期医学教科书中经常提到日光能够有效杀灭结核分枝杆菌，但这种说法具有误导性。太阳发出的光线中确实包含具有杀菌作用的 UVC，但这些 UVC 在到达地面之前已经被地球大气层过滤掉了大部分。因此，在地面上，日光中的 UVC 含量不足以在合理时间内有效杀灭结核分枝杆菌。户外空间之所以有助于降低结核传播风险，主要原因不是日光对空气的消毒作用，而是由于自然通风范围广阔，能够大大增强对病原体的稀释作用。[10]

利用UVC_{254} 降低空气传播风险

UVC_{254} 可用于对空气、水和物体表面进行消毒，但这些应用都存在其局限性，需要根据具体情况、场所特点和目标病原体来调整应用方案。本章将重点介绍 UVC_{254} 在空气消毒、特别是结核病防控方面的具体应用，但是所涉及的基本原理同样适用于其他经空气传播的病原体。

UVC_{254} 在对抗结核病和其他经空气传播病原体方面的应用主要包括[1]：

- **在房间上层未被占用的空间内进行辐照（上层空间 UVC_{254}）**
- 在 HVAC 系统内进行空气辐照（**管道内 UVC_{254}**）
- 在 RAC 中进行空气辐照
- 对**整个房间或空间**进行直接辐照

在结核病环境控制方面，UVC_{254}的主要应用包括：

上层空间UVC_{254}（详见“上层空间UVC”一节）[1,11]

- 上层空间 UVC_{254} 是在室内人员驻留时使用的一种空气消毒方式。具体做法是将 UVC_{254} 装置安装在墙壁高处或悬挂在天花板上，并调整位置，避免对室内人员造成不安全暴露。通过通风系统和 / 或辅助风扇将经过辐照的空气与房间下层空间（呼吸区域）的空气进行混合，可减少 12 经空气传播微生物的含量。
- 上层空间 UVC_{254} 是通风换气不足的人员密集场所、医疗卫生机构、公共场所等环境中的有效环境控制措施，尤其适用于易感人群可能长时间接触未被发现的传染性结核病患者的场所，如流浪人员收容所、急诊科候诊区、宗教场所和监狱日间活动室。

管道内UVC_{254}（详见“HVAC系统内的空气辐照（管道内UVC）”一节）[1]

- 管道内 UVC_{254} 是指在回风管道或排风管道内安装 UVC_{254} 灯管，用于杀灭气流中可能存在的结核分枝杆菌。在使用空气循环系统时，可以在冷却盘管前后安装 UVC_{254}，作为空气循环系统的补充性环境控制措施。但不建议将管道内 UVC_{254} 用作 AIIR 排风空气净化的替代方案。对于 AIIR 的排风，应直接排出至室外或采用 HEPA 过滤。

UVC_{254} 的有效性

通过加强以下因素，可增强UVC_{254}的效果[13]：

- **辐照强度：**指单位面积的辐射通量，通常以微瓦 / 平方厘米（μW/cm^2）表示。简单来说，辐照强度可以理解为 UVC_{254} 灯管的照射强度。
- **病原体暴露时间：**指含有病原体的感染性颗粒物在高辐照强度区域驻留的时间长度。暴露时间取决于含感染性颗粒物的空气流经灯管或消毒（照射）区域的速度。
- **UVC_{254} 剂量：**是辐照强度（μW/cm^2）与暴露时间（秒）的乘积，以微焦耳 / 平方厘米（μJ/cm^2）为单位。UVC_{254} 的有效性和安全性标准均是基于剂量来确定的。

- **UVC_{254} 装置的输出功率：**这取决于 UVC_{254} 的功率（注意：UVC_{254} 实际功率可能只是标称灯管功率的一小部分）、灯管状态和装置状态。灯管照射强度会随着使用时间增加和灰尘积累而降低。UVC_{254} 装置的结构设计也会影响其 UVC_{254} 的实际输出功率。
- **感染性颗粒物与 UVC_{254} 灯管或装置的距离：**这取决于 UVC_{254} 灯管的安装位置和数量。在使用上层空间 UVC_{254} 时，需要室内空气充分混合，使感染性颗粒物能够进入消毒区域，才能有效灭活病原体。

以下因素会降低UVC_{254} 的效果[13]：

- **空气湿度高：**当空气相对湿度超过 70% 时，需要增加 UVC_{254} 剂量。在这种湿度条件下，通常需要将 UVC 剂量升高三分之二，以补偿持续高湿度对杀菌效果的影响。
- **环境温度低：**当环境温度低于 60 ℉（15℃）时，需要提高 UVC_{254} 剂量。

早在 20 世纪 30 年代末，部分学校已利用 UVC_{254} 控制麻疹流行，由此人们认识到 UVC_{254} 在室内空气消毒和降低疾病传播方面的作用。此后，人们对 UVC_{254} 在预防结核传播方面的有效性和安全性有了更深入的认识。世界卫生组织对现有科学证据进行了系统性回顾，这些证据为 2019 年指南建议在医疗卫生机构中使用上层空间 UVC_{254} 来降低结核传播风险提供了依据。更多相关证据和建议的细节可参见《世界卫生组织结核感染预防与控制指南（2019 年更新版）》。详见“参考资源”部分。

UVC_{254}暴露、安全性和维护注意事项

确保辐照水平安全

为达到感染控制的目的而使用 UVC_{254} 时，安全性是一个关键考虑因素。人员可能会直接或间接暴露于 UVC_{254} 照射，如在灯管开启时清洁装置，或发生 UVC_{254} 从天花板上的 UV 反射表面反射到人员驻留区域的意外情况时。过度暴露于 UVC_{254} 会对眼睛（如光角膜炎）和皮肤（如红斑）造成暂时性（但可逆）的损害。6 因此，合理的设计、安装以及完善的安全和维护规程对于最大限度降低过度暴露风险至关重要。

在 UVC_{254} 设备的设计中应考虑以下安全特性：

- 在上层空间、管道内、全屋和 RACs 等 UVC_{254} 系统中配备电源切断开关。当打开可能导致直接暴露于 UVC_{254} 灯管的挡板、门或检修口时，该开关可自动关闭 UVC_{254} 系统。
- 对 RACs 采用全封闭式 UVC_{254} 灯管设计，将过度暴露的可能性降至最低。
- 在上层空间 UVC_{254} 装置中配备动作感应器，当探测到有物体移动至超过地面一定高度时，UVC_{254} 装置可自动关闭。

为确保 UVC_{254} 的有效性和安全性（尤其是在使用上层空间 UVC_{254} 时），**需在以下时间点测量和记录 UVC_{254} 辐照强度：安装后、维护后、年度例行检查时，以及在收到任何与 UVC_{254} 相关的投诉时。**

- 这些测量工作应由具备相应资质的专业人员来完成，如职业卫生师、辐射防护师、具有资质的工程师、或经过专门培训的 UV 测量专业人员。在进行 UVC_{254} 测量之前，必须确保相关人员接受过专门培训并具备相应能力。关于不同专业领域应当具备的能力要求，可参考 ANSI/IES RP-44-21《推荐实践：紫外线照射杀菌》（Recommended Practice: Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI)）以及 ASHRAE GPC-37《用于控制经空气传播病原体的上层空间紫外线 C 波段（UVC）装置应用指南》（Guidelines for the Application of Upper-air (Upper Room) Ultraviolet Germicidal (UVC) Devices to Control the Transmission of Airborne Pathogens）（2024 年）中。详见“参考资源”部分。[14,15]

UVC_{254} 辐照计

辐照强度 * 是用一种专用仪器来测量的，这种仪器称为辐照计。[16]

测量的目的是确认以下两个方面：

1. **有效性：**检查 UVC_{254} 光源（灯管）是否正常工作。为此，需根据灯管制造商提供的技术规格，将辐照计校准至可测量特定的 UVC 波长（如 UVC_{254}）。
2. **安全性：**在使用上层空间 UVC_{254} 时，需检查人员驻留区域的有效辐照强度水平是否处于安全范围内。

辐照计需要具备较宽的测量范围（0.1–2,000 μW/cm^2），因为在实际应用中需要进行两类测量：一是测量较低的辐照强度值（用于评估人员驻留区域是否处于安全水平），二是测量较高的辐照强度值（用于检查装置的工作性能）。要获得准确的辐照强度，选择合适的辐照计和探头至关重要。根据具体情况，可能需要使用两台不同的辐照计才能准确完成这两类测量。[14]

* 每个波长的实际辐照强度称为光谱辐照强度。在每个波长下，（用于光生物活性的）总辐照强度可能会有所不同，且与实际测得的有效辐照强度也不完全相同（有一个例外：在270nm波长处，总辐照强度与有效辐照强度的数值是相同的）。目前市面上的大多数（但不是全部）辐照计都被设定为显示总辐照强度，而不是有效辐照强度。要在每个波长下将有效辐照强度和光谱辐照强度进行换算，需要使用特定的转换系数。具体到UVC_{254}，将测得的总辐照强度乘以2即可得到有效辐照强度。

选择UVC辐照计

在选购辐照计时，可通过查询制造商网站或咨询其技术代表来获取帮助。

应对照所使用的 UVC 光源查看制造商提供的技术规格，确认辐照计是否具备以下特性：

波长范围：对于标准 UVC_{254} 低压汞灯，应选择能够测量 220–280nm 波长的 UVC、且在 254nm 处具有峰值响应的辐照计。

- 如需测量 UVC_{254} 低压汞灯以外的光源，应选择专门针对所用光源的峰值输出波长进行过校准的辐照计。
- 如需测量波长不同的多类 UVC 装置，建议选购支持测量多个波长的辐照计（而不是购买多个专用于单一波长的辐照计）。

辐照强度测量范围：对于标准 UVC_{254} 低压汞灯，应选择能够测量有效辐照强度 * 的辐射计，其推荐测量范围至少应涵盖 0.1–2,000 μW/cm^2。

- 如果使用的是高输出、无挡板的 UVC 装置，可能需要选择量程上限更高的辐照计。
- 如果测量 254nm 以外的波长，可能需要根据灯管的峰值输出来调整测量范围（这种情况下建议查看制造商提供的技术规格，或直接与制造商联系咨询）。

准确度：在技术规格中可能标示为“测量不确定度”。辐照计应满足以下两项准确度（测量不确定度）要求：

- UV 辐照强度测量范围 >1–2000 μW/cm^2 时，其准确度应为读数值 ±10%（**注意**：这里指的是读数值 ±10%，而不是辐照计量程上限 ±10%），以此来评估辐照强度和确认光源 / 灯管的性能。
- UV 辐照强度测量范围为 0.05–1 μW/cm^2 时，其准确度应为读数值 ±0.05 μW/cm^2，以此来评估人员暴露的安全水平。

有些辐照计可同时满足上述两项准确度要求，但也有一些只能满足其中一项要求，此时需要另外购置一台辐照计来满足另一项要求。信誉良好的制造商通常会公开这些技术指标信息；如果在其网站上未能找到这些信息，建议直接联系制造商代表咨询。

校准说明：应按照制造商提供的建议对辐照计进行校准。如果制造商未提供具体建议，则建议每年校准一次。

视场（Field of View，FOV）锥：视场锥是辐照计的一个必要配件，在进行所有安全性测量时都必须使用。视场锥的角度应为 ±40 度（总计 80 度），且必须兼容所选用的辐照计型号。17 如果在产品技术规格中未列出相关信息，请联系制造商代表以确定兼容的视场锥。

注：市面上用于测量 UV 的辐照计和其他仪器（比色卡或胶片）在质量上存在很大差异。很多产品都无法测量适宜的辐照强度范围，或者达不到准确度要求，无法用于准确评估 UVC 的安全性和工作性能。

一台高质量辐照计的价格通常在 2000–3000 美元之间。

* 安全性和工作性能标准中规定的剂量测量值都是基于有效辐照强度来计算的。大多数UVC_{254}辐照计测量的是总辐照强度，因此在使用时需要将测得的总辐照强度结果乘以2（这是转换为有效辐照强度时使用的转换系数）。

什么水平的UVC_{254}是安全的?

安全性取决于个人的暴露剂量（mJ/cm^2），包括两个因素：一是到达人体的照射强度（即辐照强度，$\mu W/cm^2$），二是暴露持续时间（秒）。目前有两套标准，其具体要求略有不同：

推荐暴露限值（Recommended exposure limit，REL）：美国疾病预防控制中心 / 国家职业安全卫生研究所（CDC/NIOSH）于 1973 年发布了 UVC_{254} 紫外线能量的推荐暴露限值：

- 在八小时工作时间内，对于眼部和皮肤暴露，UVC_{254} 的 REL 均为 $6mJ/cm^2$。[18]

阈限值（Teshold limit value，TLV®）:美国政府工业卫生师协会（ACGIH）在 2022 年更新了紫外线照射的 TLV 标准，按波长分别规定了眼部暴露和皮肤暴露的限值：[19]

- 对于 UVC_{254}，眼睛暴露的 TLV 维持在 6 mJ/cm^2 不变，而皮肤暴露的 TLV 调整为 10 mJ/cm^2（目前大多数 UVC 顾问都建议采用这个更新后的标准）。

如需了解如何计算 UVC_{254} 暴露剂量以确保安全水平，请参见附录 B“UVC_{254} 暴露剂量计算”。

UVC_{254} 安全教育和标识[1]

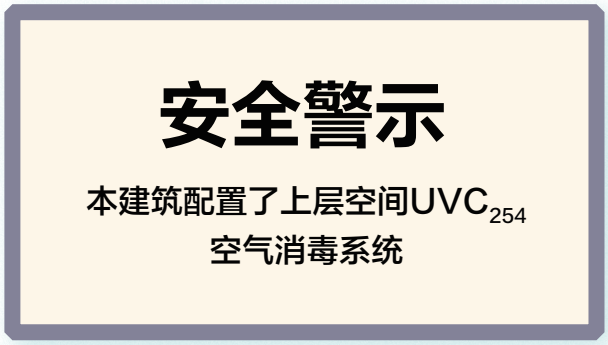
工作人员和服务对象可能会担心 UVC_{254} 对健康造成危害。为消除这些顾虑，应就上层空间 UVC_{254} 的用途、益处和风险提供简明易懂的教育。

- 机构工作人员应接受当地政府要求的相关教育和培训，内容包括 UVC_{254} 的安全使用方法、UVC_{254} 可能造成的危害，以及个人防护装备（Personal protective equipment，PPE）的使用方法。
- 可在房间墙上张贴 UVC_{254} 基本知识海报，供所有人员（包括工作人员和服务对象）参阅。
- 制定针对具体场所的书面规程，内容涵盖 UVC_{254} 装置的测试、清洁、维护、维修和更换等，并对相关工作人员进行专门培训。
- 灯管的开关应便于相关工作人员操作，但不应设置在服务对象容易触及的位置（避免服务对象关闭 UVC_{254} 装置）。可考虑使用带锁开关，或将开关设置在仅工作人员可进入的区域。

应采取预防措施，提醒和保护在安装 UVC_{254} 房间内活动的人员。

应在 UVC_{254} 装置上以及其他需要设置警示的位置（例如上层储物区）张贴警示标识，这些标识应使用适用于场所内所有人员的各种语言。根据所使用的 UVC_{254} 系统类型，标识的内容应包括以下内容（或类似内容）：

示例：**张贴在人员活动区域适当高度处的教育性标识**



示例：**张贴在安全防护区域附近的安全警示标识**

例行维护

每个机构都应指定一名工作人员作为 UVC 装置的内部监督员。这名人员必须接受有关 UVC 运行原理和安全要求方面的专门培训，负责灯管的清洁、维护和更换等工作，同时还包括以下由工程部门定期进行的维护工作：

- 每隔 3 个月（根据当地环境条件可能更频繁）检测 UVC 的有效性并对 UVC 灯管和装置进行清洁，确保灯管没有烧坏或破损。正常工作的灯管会发出紫蓝色光（**注意**：这种发光现象并不能说明灯管的杀菌效果，其杀菌效果只有使用校准后的辐照计测量才能确认）。
- 清洁灯管时，必须先将其关闭。可采用蘸有 70% 以上酒精的无绒布进行擦拭。
- 应检查每个 UVC 装置的辐照水平是否达到灯管制造商规定的标准。大多数制造商都会提供一个最低辐照强度 *（$\mu W/cm^2$）参考值，这是在距离 UVC 装置 3ft（0.91m）的中心线上测得的。应每年更换一次灯管或按照制造商的建议进行（如果测得的辐照强度低于制造商建议的最低水平，则应更早更换）。使用过的灯管应按照灯管制造商的建议以及相关要求回收处理。产品维护说明文件中应包含一份专门的书面规程，说明如何正确处理破损的灯管。相关资料请参见“参考资源”部分。
- 执行维护工作时使用的护目镜不需要特别的防 UV 功能，任何透明的玻璃或塑料眼罩都能有效阻挡 UVC。

应保存所有的维护和监测工作记录，包括辐照计读数、具体日期，以及根据需要采取的补救措施。这些记录有助于确定灯管的平均使用寿命。由于灯管长期储存可能导致辐照强度降低，因此，应在计划更换时间临近时再购买新灯管。[14,15]

* 大多数制造商提供的辐照强度值是基于有效辐照强度。而大多数 UVC_{254} 辐照计测量的是总辐照强度，因此在使用时需要将测得的总辐照强度结果乘以 2（这是转换为有效辐照强度时使用的转换系数）。

成本考虑

在 UVC_{254} 系统的整个使用期内，长期运行和维护的费用通常占据大部分成本（见图 2）。经验表明，上层空间 UVC 系统的年均运行和维护成本约为初始购置成本的 10%–20%。这意味着机构需要在年度预算中专门增加一项运行和维护费用的预算。有关成本考虑的详细分析，请参见附录 D“UVC_{254} 成本考虑”。

图2：**UVC_{254}系统全生命周期的预计成本：**

UVC的应用

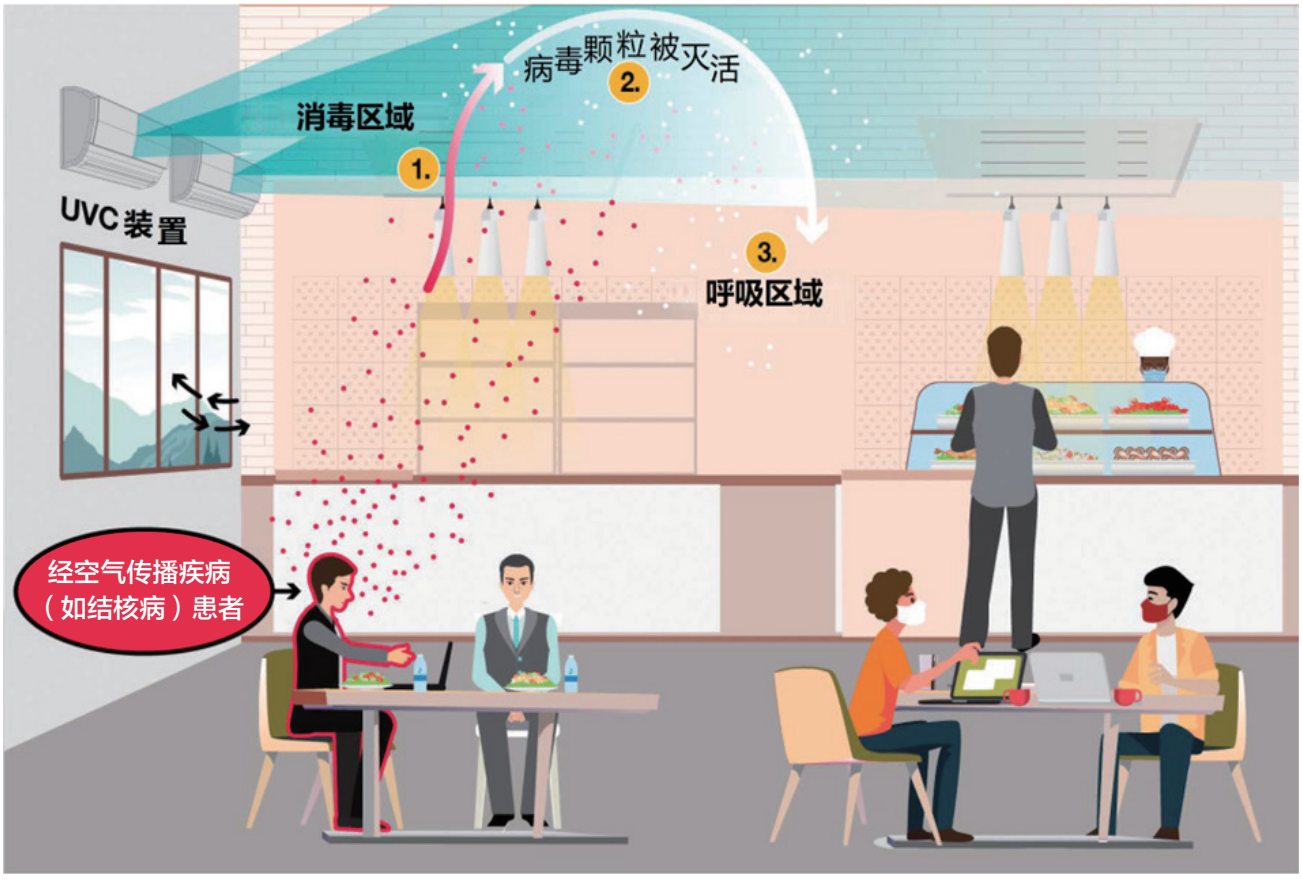
上层空间UVC

上层空间 UVC 指的是在室内创建一个位于室内人员上方的 UVC 消毒区，通过灭活空气中的传染性病原体来降低疾病传播风险（见图 3），经空气传播病原体经过这个消毒区时会被杀灭或灭活。在一些高风险区域，尤其是那些可能存在未被发现的传染病病例的场所，可以考虑使用上层空间 UVC 作为通风措施的补充。这类场所包括急诊科、候诊区、AIIRs、隔离区、人员密集场所和流浪人员收容所等。

在人员密集场所，虽然 HVAC 系统可以减少经空气传播病原体的数量、降低暴露风险，但不一定能完全将其消除。增加通风量虽然有助于更快地降低这些颗粒物的浓度，但安装和运行额外的通风设备可能会产生较高成本。此外，如果通风系统的设计或安装不当，还可能会产生令人不适的噪音和气流。在这种情况下，可以考虑采用上层空间 UVC 作为通风的补充措施。这种方式的优点是可以根据需要逐个房间安装，而不会影响建筑物现有的通风系统。

- 上层空间 UVC 能够达到的消毒效果取决于多个因素，包括 UVC 剂量、房间形状、室内空气混合、以及其他因素。[20]
- 研究表明，当上层空间 UVC 系统正确安装时，其消毒效果可以达到每小时 24 次换气（eACH）的水平。[21]

图3：**上层空间UVC_{254}的工作机理**



来源：改编自美国疾病预防控制中心《上层空间紫外线照射杀菌》（Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI)）

室内人员可能会排出经空气传播的病原体（例如结核分枝杆菌）。

1. 在HVAC系统、风扇和/或开启的窗户产生的气流作用下，这些传染性病原体会被输送到UVC灯管形成的消毒区域。
2. 当空气中的传染性病原体接受到足够剂量的UVC照射后会被灭活。虽然这些颗粒物仍然存在于空气中，但已失去传染性。
3. 最理想的气流模式是：使空气持续向上流动并被消毒，然后回流至人员呼吸区域。

- 为使上层空间 UVC_{254} 系统发挥最佳消毒效果，呼吸区域的空气必须先流经消毒区域（上层空间），然后再回到呼吸区域。注意：根据 ASHRAE 的定义，呼吸区域是指“在人员驻留空间内、距地面 3–72in（0.08–1.8m）、且与墙壁或固定空调设备的距离达到 2ft（0.6m）以上的区域”[22]
- 病原体在消毒区域内必须满足以下两个条件之一才能被有效灭活：要么在单次通过消毒区域时就接受到足够剂量的照射；要么经过多次循环照射，接受到足够累积剂量的 UVC 照射。
- 在设计上层空间 UVC 系统时，一个关键要素是确保“空气混合”效果良好。这意味着系统要能将可能含有病原体的空气向上输送到消毒区域，同时将经过处理的洁净空气输送回呼吸区域。为了达到这一目的，可能需要在现有通风系统的基础上增设吊顶式或壁式风扇，或者采用不同类型的送风散流器。如采用后一种方案，最好在建筑物内有人员驻留时保持通风系统风扇持续运转（即采用恒定风量设置），以确保空气能够充分混合。
- 理想情况下，为了既能获得最佳消毒效果，又能保障人员安全，上层空间的 UVC 辐照应当均匀分布。

判断房间是否适合安装上层空间 UVC_{254}

要采用上层空间 UVC，房间必须达到以下标准：

- 天花板高度至少要达到 8ft（2.4m）。
  - **注**：对于市面上的部分 UVC 装置，制造商推荐的天花板最低高度为 8.5–9ft（2.6–2.7m）。
- UVC_{254} 装置的安装高度必须至少距地面 7ft（2.1m）。[14,23] 许多制造商的安装说明书中建议的安装高度至少为距地面 7.5ft（2.3m），其目的是防止人员直视灯管或碰触到装置。
- 在流浪人员收容所和宿舍等人员密集场所，如果使用双层床，必须同时满足两个条件：一是房间天花板要足够高，二是 UVC_{254} 装置的安装高度要高于上铺床位，并确保坐在上铺的人员不会过度暴露。
  - 如果天花板高度过低（导致灯管安装高度也很低），坐在上铺的人员可能会无意间过度暴露于上层空间中直接照射和反射的 UVC_{254} 辐照中。
- 在天花板较高（>3m 或 10ft）且上层空间结构很少的房间内，UVC_{254} 装置可以安装在距地面 7ft（2.1m）以上的位置，且可采用开放式设计（具体参见“选择上层空间 UVC 装置”一节），前提是必须确保 UVC_{254} 的暴露量不超过规定的 TLV。[14,23]
- 建议安装混流风扇或选用适当的通风散流器，以加强空气从人员驻留区域流向上层空间，并从上层空间流向人员驻留区域。在建筑物内有人员驻留时，应保持室内风扇或 HVAC 系统风扇持续运转。

注：在评估房间是否适合安装上层空间UVC时，除上述基本条件外，还需要考虑上层空间的建筑构造细节、设备管线布置以及其他工程设施的位置，因为这些因素都可能影响UVC的覆盖效果。此外，可能需要对天花板和墙面重新进行粉刷，以减少反射、提高UVC_{254}的使用安全性。同时还要注意，UVC可能会对植物造成损害，使塑料材料发生老化，导致木材或墙纸褪色，这种影响在房间上部区域（例如高架搁板上的植物）尤为明显。

即使是那些已经达到每小时换气次数（ACH）标准或洁净空气输出比率（CADR）建议值的房间，安装上层空间 UVC 仍然可以作为一项有效的补充措施，有助于进一步降低经空气传播疾病的传播风险。不过，是否采用这一措施需要根据场所的实际情况来综合评估和决定。

上层空间UVC_{254}安装的准备

要建立一个有效的上层空间 UVC_{254} 系统，需要具备专业的技术知识和设备。系统的设计、安装和测试工作必须由具备资质的 UVC 承包商在 UVC 装置制造商技术代表的密切配合下完成。

- 要求出示美国环境保护署（Environmental Protection Agency，EPA）的注册证明文件和生产许可（参见“参考资源”部分）、以及已完成的 UVC 安装项目的清单。[24]
- 在选择技术顾问或承包商时，应询问并了解他们既往的 UVC 安装经验，并要确认他们是否熟悉 CDC/NIOSH）和 ASHRAE 制定的上层空间 UVC_{254} 技术指南。
- 申请到成功安装装置的类似建筑或空间进行现场参观，这不仅可以实地考察现有的安装情况，还可以与其他用户交流探讨上层空间 UVC_{254} 的相关经验。
- 询问承包商是否可以签订涉及 UVC_{254} 安装完成后的监测、维护和灯管更换等服务的合同（一些机构的管理人员在签订初始采购协议时就谈妥了长达 5 年的服务期）。维护工作通常包括灯管、反射器和挡板的清洁。在更换部件时必须使用相同型号的配件。此外，UVC_{254} 灯管必须能够发射 UVC_{254} 且不产生臭氧。
- 应在安装合同中明确规定：安装完成后必须由独立的第三方进行辐照水平检测，以验证 UVC 系统是否满足预定的安全性和工作性能指标要求；只有在完成这项最终验收测试后，才能认为安装工作完成。
- 要求提供一份最终验收测试的书面报告。

安装方案与注意事项

通常需要基于每个场所的具体情况量身定制设计方案。

所需的 UVC_{254} 剂量：要确定能够有效杀灭结核分枝杆菌所需的 UVC_{254} 剂量，可采用两种计算方法：一种是基于房间的**体积**（高度 × 宽度 × 长度），另一种是基于房间的**面积**（宽度 × 长度，这种方法适用于天花板有效高度不超过 10ft [3m] 的情况）。

- 满足上层空间 UVC_{254} 的最低剂量标准还能杀灭大多数经空气传播的细菌和病毒病原体（如新型冠状病毒、流感病毒及其他病原体 [但也有例外，如真菌和某些腺病毒] ）。[7, 8]
- 如需了解如何计算特定房间或空间所需的 UVC_{254} 剂量，请参阅附录 A“上层空间 UVC_{254} 剂量计算工作表和装置选择”。

上层空间 UVC_{254} 的房间 / 空间剂量标准 [20,21,25]

- 按照体积计算时，剂量标准为 0.34mW/ft^3（12mW/m^3）
- 按照面积计算时，剂量标准为 0.0033mW/ft^2（0.035mW/m^2）；此方法仅适用于天花板有效高度不超过 10ft（3m）的情况

- **注**：上述 UVC_{254} 剂量标准主要用于评估系统能否有效灭活结核分枝杆菌，同时还需要采用另一套专门的暴露剂量标准来保障室内人员的安全。具体内容请参见“什么水平的 UVC_{254} 是安全的？”一节。

UVC_{254} 装置的布置和数量：在安装布局 UVC_{254} 装置时，应确保上层空间的辐照分布相对均匀、连续且覆盖完全。

- 要达到目标有效剂量所需的 UVC_{254} 装置数量取决于多个因素：房间大小（以 ft3 或 m^3 计算的体积，或以 ft2 或 m^2 计算的面积）、房间形状，以及装置的 UVC_{254} 输出功率。
- 关于如何根据房间大小来计算所需 UVC_{254} 装置的数量和输出功率，请参阅“选择上层空间 UVC_{254} 装置”部分和附录 C“选择上层空间 UVC_{254} 装置：典型场景”中的工作表和具体示例。
- **UVC_{254} 对于气流模式的要求：**应增加混流风扇（吊顶式或壁式）或选用合适的通风散流器，确保形成从呼吸区域到消毒区域、再返回呼吸区域的良好室内气流模式（即室内空气充分混合）。在场所内有人员驻留时，应保持通风风扇持续运转。理想的做法是在不同情况下进行测试：人员密集时（人体产生的热量可能会加强空气的垂直流动）、无人时（没有人员活动带来的气流影响）、HVAC 系统开启和关闭时（评估是否有 HVAC 系统产生的额外气流）。
- 检查气流模式最简便的方法是使用“发烟管”来观察空气流动情况。目标是要在房间的多个位置都能观察到烟雾向上流入消毒区域，然后回流到呼吸区域。关键在于观察烟雾的流动方向，而不是流动速度。

- 在典型的 HVAC 系统中，空气的进出口通常都靠近天花板。某些系统采用置换通风方式，即空气从地面附近进入，从天花板附近流出，或者反之。如果室内空气从天花板附近流出并被循环到建筑物的其他区域，上层空间 UVC_{254} 装置可在空气被循环利用之前对其进行消毒。HVAC 系统形成的气流模式以及是否采用循环空气（相对于直接将空气排到室外）都会影响 UVC 的设计规划。
- 室内气流模式还会受到温度的影响（热空气会上升）。采暖或制冷系统的运行、以及室内多人驻留时产生的体温，都会影响空气的流动。
- 如果发现在混流风扇或 HVAC 系统关闭后室内空气流动不充分，应对 HVAC 系统风扇进行设置，确保在室内有人员驻留时保持风扇持续运行。
- 如需了解更多信息，请参阅第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“暖通空调系统”一节。

为保证安装UVC_{254}装置的房间内人员的安全，应在何处进行辐照水平的测量？[15,26]

由于每个房间 / 场所的具体情况并不相同，因此必须对室内人员可能暴露于上层空间 UVC_{254} 辐照时的活动位置进行评估。他们是否始终保持站立状态？是否一直坐着？还是在空间内不断移动？

- UVC_{254} 装置安装后：
  - 在确认人员驻留区域的辐照强度读数低于 NIOSH 推荐 REL 或 ACGIH 的 UVC_{254} TLV 标准之前，安装工作并未完成，不得开启 UVC_{254} 灯管。
  - 使用校准后的辐照计在距每个 UVC_{254} 灯管 3ft（0.91m）处，或在上层空间内装置对面墙上的“参照点”进行辐照强度测量，以验证 UVC_{254} 辐照强度是否符合制造商规定的技术指标。
- 通常应使用根据目标波长校准的辐照计在以下几个高度上进行辐照强度测量：**站高 71 in（1.8m）、坐高 51 in（1.3m）**，以及根据场所特点和使用方式确定的其他离地高度。[14,27] 除了常规的站高和坐高外，还需要根据具体场所情况考虑以下测量位置：
  - 流浪人员收容所宿舍内床位的睡姿和坐姿高度，尤其要注意上铺床位
  - 候诊室儿童游戏区的地面高度
- 可以根据特定工作场所的标准化指南（人体测量学指南）确定具体的“眼部高度”测量位置，以评估室内人员眼部可能受到的暴露。

- 如果房间内安装了多个 UVC_{254} 装置，应进行额外的测量以检测可能存在的辐照“热点”。这些热点可能由两个独立 UVC_{254} 装置的辐照区域重叠造成，也可能由 UV 从金属设备或反光涂料等反光表面反射造成。
- 某些天花板涂料会将大量辐射反射到下方的人员驻留区域，而另一些涂料则会吸收 UVC。如果仪表读数显示人员驻留区域的辐照水平过高，可能需要在天花板上使用非反光涂料。应将这项费用纳入安装预算之中。
  - 建议使用含有二氧化钛的涂料来减少表面反射。需要说明的是，影响 UV 反射的是涂料的成分，而不是颜色（无论是浅色还是深色）。
- 如果在任何位置测得的辐照水平都过高，应关闭导致高辐照水平的装置，并重新测量。要解决这个问题，可能需要调整、重新布置或更换 UVC_{254} 装置，和 / 或在天花板和墙面上施用非反光涂料。

辐照强度测量仅是评估室内人员安全风险的第一步。理想的做法是根据两个因素来估算剂量：一是辐照水平，二是人员在不同活动状态下的暴露时间（包括人员处于坐姿时间、站立时间、以及面向或背向光源的时间等）。这些估算非常重要，原因在于：工作人员可能在短时间内暴露于很高水平的辐照，随后在 8 小时工作之外的时间暴露于低水平的辐照，其累积剂量仍然可能保持在 UVC_{254} REL 和 TLV 的安全范围内。

- **时间 – 活动评估：**这种形式化分析方法会追踪记录室内人员在 UVC_{254} 环境中的实际活动和移动情况，从而更全面地评估 UVC_{254} 的暴露风险。可采用多种方法进行时间 – 活动评估，其中一种可接受的方法是：让在房间内停留时间最长的人员记录一个班次普通工作期间的活动日志，同时进行与这些活动相对应的辐照强度测量，以便计算暴露剂量。对于那些处于高风险环境中的工作人员、住院患者和服务对象，尤其是预计会发生长时间暴露时，建议进行时间 – 活动评估。
  - 附录 B“UVC_{254} 暴露剂量计算”中的示例 2 记录了一名护士在 8 小时工作期间的活动情况，并计算了总暴露剂量。这个示例同时说明：只要在 8 小时整个时段内的平均暴露剂量保持在安全限值范围内，少数时段出现较高的辐照强度仍然是可接受的。
- 另一种替代方法是让室内人员佩戴 UVC_{254} 剂量计，并记录活动日志。这种方法的具体说明可参见 First（2005）发表的论文。

时间加权平均（Time-weighted average，TWA）暴露：有一种简化方法，将 8 小时内 UVC_{254} 的眼部阈限值剂量（$6 mJ/cm^2$）等效换算为**整个 8 小时内的平均辐照强度水平（$0.21 \mu W/cm^2$）**。如果 UVC_{254} 暴露仅持续 4 小时，且在其他时间内没有 UVC_{254} 暴露，则平均辐照强度水平应为 $0.42 \mu W/cm^2$，这就是时间加权平均（TWA）辐照强度。

- 使用 TWA 值可以为评估 UVC 环境下的安全性提供一种简单实用的方法，尤其适用于人员暴露时间较短的场所。
- **重要说明：**TWA 数值并不代表场所内任何位置的“最大辐照强度限值”。

下面以候诊室为例说明如何应用 TWA 方法，假设来访者在室内停留时间通常不超过 8 小时。

- 如果来访者主要采用坐姿，则应在坐姿眼部高度处进行测量。如果在坐姿眼部高度（1.3m 或 51in）处测得的辐照强度不超过 0.21 μW/cm^2，则即使在该位置连续坐 8 小时，其暴露量也不会超过 TLV_{254} 的 1TLV。
- 如果在房间内的各个位置（包括站立位置、坐姿位置等）进行测量后发现所有测量结果都不超过 0.21 μW/cm^2，则人员即使在房间内不同位置停留 8 小时，其暴露量也不会超过 TLV_{254} 。
- 重要说明：根据房间的实际使用情况，即使在某些位置测得的辐照强度偶尔超过 0.21 μW/cm^2，这种情况仍然可以接受，因为其暴露量仍然能够低于 TLV_{254}。在很多时候，室内人员会在辐照强度不同的区域之间移动（有些区域高于 0.21 μW/cm^2，有些区域则低于这个数值），使得其 TWA 暴露量保持在 TLV_{254} 以下。
  - 在这种情况下，一个实用经验是：如果在人员驻留区域内眼部高度处测得的辐照强度 * 不超过 0.4 μW/cm^2，则通常不会超过 TLV_{254}。

关于如何计算上层空间 UVC_{254} 的暴露剂量，可参见附录 B“UVC_{254} 暴露剂量计算”中的示例。

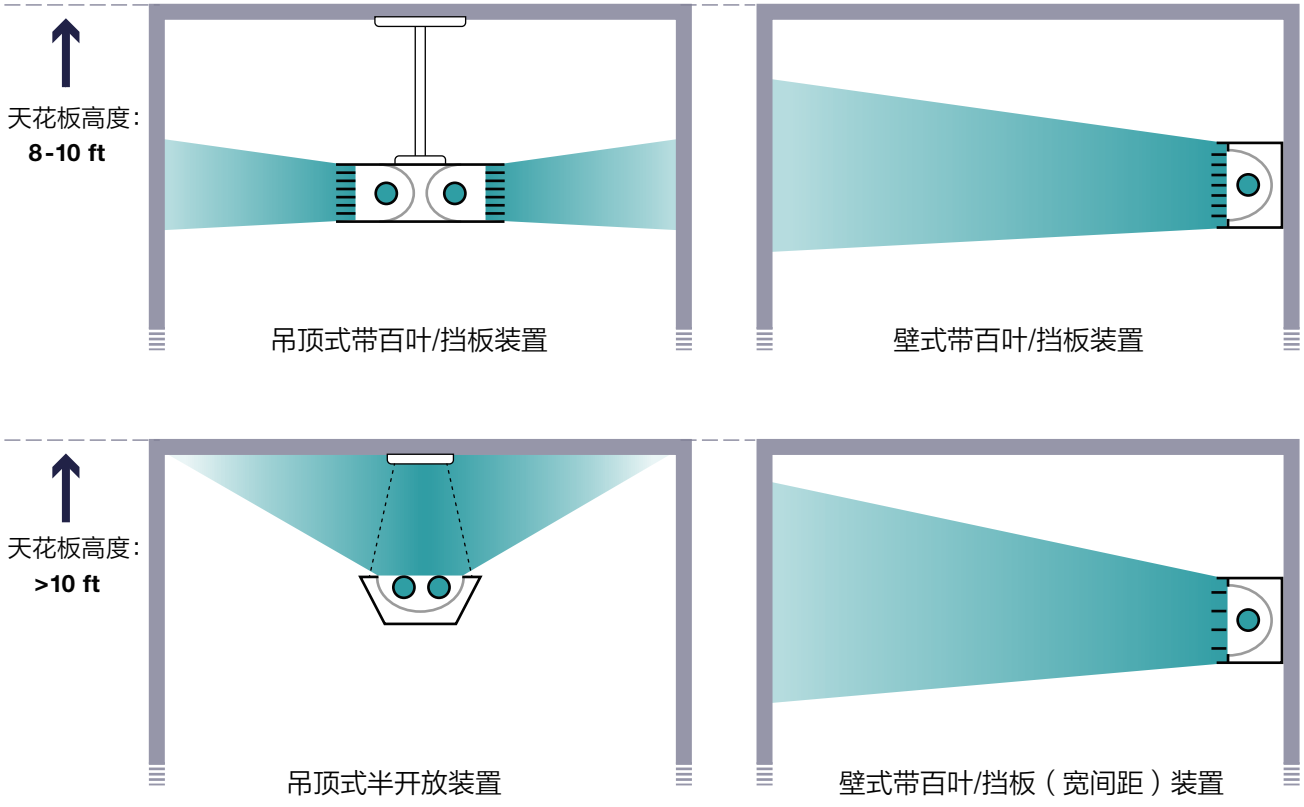
* 大多数 UVC_{254} 辐射计测量的是总辐照强度。因此，在将测量结果与 0.4 μW/cm^2 这一标准限值进行比较时，需要将总辐照强度测量值乘以 2（这是转换为有效辐照强度的系数）。

选择上层空间UVC装置

对于天花板较低（8–10ft 或 2.4–3m）的房间，需要使用带百叶或挡板的 UVC 装置，以防止散射光导致室内人员受到过度暴露（参见图 4）。在天花板较高（≥ 10ft 或 3m）的房间，可以使用挡板间距较大的 UVC 装置或开放式 UVC 装置。

如果天花板高度低于 8ft（2.4m），则在室内有人员驻留时不得使用上层空间 UVC，因为在这种情况下无法确保安全。在规划上层空间 UVC 时，需要考虑房间的建筑特征和装修材料，这些因素都可能会阻挡、吸收或反射 UV 辐照。

图4：**上层空间UVC_{254}的工作机理**



附录 B“UVC_{254} 暴露剂量计算”中的工作表说明了如何计算**特定房间 / 场所消毒所需的最低 UVC_{254} 装置输出功率**。较大的房间 / 场所可能需要多个 UVC_{254} 装置。该工作表还包含了 3 个不同大小房间的示例，并从以下几个方面进行了分析：

1. 根据天花板高度（和建筑特征）判断是否适合使用上层空间 UVC_{254}；
2. 根据房间所需的 UVC_{254} 输出功率选择合适的灯具光强和装置数量（需考虑正常湿度和高湿度条件下的 UVC_{254} 剂量标准）；
3. 整个使用周期内涉及的成本对选择方案的影响。

上层空间UVC系统的优缺点

优点	缺点
• 与新安装 HVAC 系统相比，购置和运行成本较低，与室内空气净化器相比也具有一定的成本优势 • 可根据需要在单个房间内分别安装 • 对建筑结构和机械系统的影响较小 • 除了为混合空气所需的气流外，不会产生噪音或气流扰动	• 如果安装或维护不当，可能危及室内人员的健康安全 • 必须由专业技术人员进行安装和监测 • 每个场所的安装方案都需要根据场所具体情况量身定制 • 仅能处理结核分枝杆菌和经空气传播的病原体，无法去除灰尘等颗粒物，也不能引入室外新鲜空气 • 如果没有专用测量仪器，难以判断系统是否正常发挥作用 • 在高湿度环境下（相对湿度超过 70%）杀菌效果会降低 • 灯管发出的光线可能影响人员的睡眠质量 • 工作人员和服务对象可能担心受到辐照影响

HVAC系统中的空气照射（管道内UVC）

UVC_{254} 灯管在 HVAC 系统中已应用多年，主要用于减少或消除换热盘管、冷凝水盘和系统内其他表面上的生物膜，类似的系统也被用于对流经管道的空气进行消毒。由于系统表面能够全天候持续接受辐照，因此维持表面清洁所需的 UVC 剂量相对较低。但对流动空气进行消毒则需要更高的 UVC 剂量，而且空气在管道中流动的速度越快，灭活经空气传播的病原体所需的 UVC 剂量就越高。

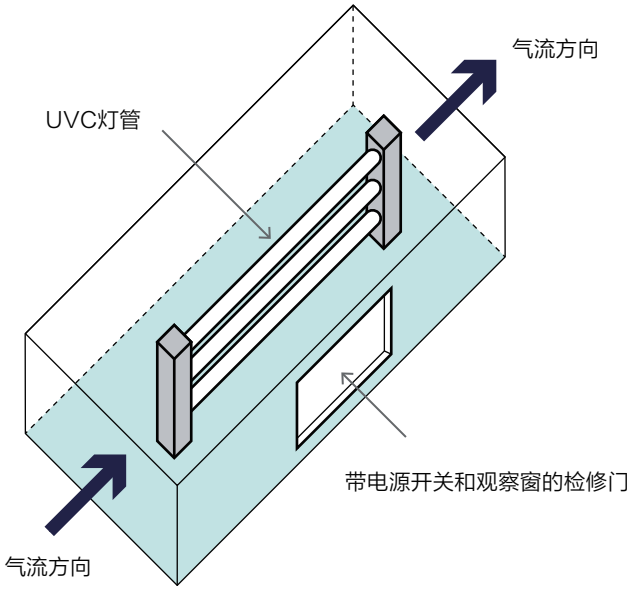
管道内 UVC 系统能够有效降低气流中活性结核分枝杆菌的浓度。就结核病控制而言，一个经过合理设计、安装和维护的 UVC_{254} 系统的效果几乎可以与使用 100% 室外空气的系统或 HEPA 过滤器相当。UVC_{254} 能够灭活敏感微生物，但无法稀释或去除室内空气中的其他污染物（如异味、二氧化碳等），也无法满足 2005 年版 CDC 指南中关于污染控制的要求。[1]

安装和监测

管道内 UVC 系统的设计和安装必须由具备经验的专业人员执行，如 UVC 灯具或装置制造商代表、HVAC 工程师、机械工程师或机电承包商。

- 为了消毒空气，应将 UVC_{254} 灯管沿气流方向平行安装（而用于对冷却盘管和集水盘表面进行消毒的管道内 UVC_{254} 灯管则应当垂直于气流方向安装）。灯管的数量和间距必须经过精确计算，以确保所有空气都能充分接受 UVC 照射，需要根据气流速度和管道尺寸进行详细的测量和计算。图 5 展示了一个安装示例。关于 UVC 剂量计算的具体方法示例可参见附录 E “管道内 UVC_{254} 剂量计算”。

图5：**管道内UVC_{254}系统示意图**



- 管道内的 UV 强度（辐照强度）应高于上层空间 UVC 系统的强度，因为灯管安装在管道内部，可有效降低室内人员暴露于 UV 的风险。所需的灯管辐照强度取决于管道内的气流速度和管道的横截面积。
  - 一般来说，在 8ft（2.4m）长的管道内，平均气流流速达到 500fpm（2.5 m/sec）时，典型的管道内 UVC^{254} 系统的平均辐照强度约为 1,000–10,000 μW/cm^2。
  - 由于 UVC 在温度低于 60 ℉（15℃）时效率会降低，当 UV 光源位于制冷装置下游或处于冷空气环境中时，需要增加额外的 UVC^{254} 灯管（光源）。这与荧光灯（采用类似的技术）在室内或室外低温环境下工作效率显著下降的现象相似。
  - 在部分实验室开展的研究表明，相对湿度超过 70% 时，UVC^{254} 的效率会降低。虽然具体机制尚未完全明确，但推测这是因为空气中的水分子以及病原体周围的水层会吸收 UVC^{254} 辐射（因此，需要将剂量增加三分之二来补偿这种影响）。[28,29,30]
- 可安装带玻璃观察窗的管道检修门（UVC 无法穿透普通玻璃或聚碳酸酯玻璃），以便清洁、检查和更换灯管。检修门应与灯管电源联锁，确保在打开检修门时灯管自动关闭（“电源开关”），可防止维护人员意外暴露于 UVC 辐照。应在观察窗附近张贴警示标识，提醒工作人员直接暴露于灯管辐照可能对皮肤和眼睛造成危害。任何在 UVC 发生装置附近工作的人员都必须穿戴个人防护装备（包括防护服和护目镜）。

- 灯管的强度会随时间逐渐衰减，监测和维护工作至关重要。
- 大多数灯管在管道内可以持续有效运行至少一年（许多 UVC 系统制造商提供的灯管使用寿命可达两年）。
- 灯管表面积聚的灰尘会导致 UVC_{254} 输出功率降低。

- 对于那些声称使用 UVC_{254} 进行空气消毒的室内独立式制热或制冷设备（如窗式、壁挂式或无管道设备），应保持谨慎。这些设备的 UVC 空气消毒效率可能较低，因为经空气传播的病原体在流经设备时接受的 UVC_{254} 辐照剂量有限（即经空气传播的病原体暴露于 UVC 的时间不够长，无法将其灭活）。

如前所述，每小时换气次数（ACH）和洁净空气输出比率（CADR，或称洁净气流流速（CAR））是用于量化环境控制措施潜在效益的两个参数。对于经过适当设计和维护的管道内 UVC 系统而言，可以假定其等效机械气流流速（equivalent mechanical airflow rate，eQ）约等于 CADR。要计算管道内 UVC 系统产生的等效 ACH，可采用第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的 ACH 计算公式以及附录 A“室内空气清除时间计算工作表”。管道内 UVC 系统在定向气流方面的局限性与管道内过滤系统相同。房间内的气流模式必须能够将呼吸区域的受污染空气送达通风系统的管道内 UVC 处。

上层空间UVC系统的优缺点

优点	缺点
• 与 HEPA 或其他过滤器不同，管道内 UVC 灯管不会对系统内的气流造成显著阻力。因此，管道内 UVC 系统能够灭活空气中的大多数感染性颗粒物，同时不会显著降低气流量。 • 与 100% 室外空气供应系统相比，管道内 UVC_{254} 系统在安装和运行方面的成本通常较低。	• UVC 灯管是一种高度专业化的设备，其技术要求远高于机械 HVAC 系统的大多数组件，因此必须由具备专业技术的人员进行安装和维护。 • 管道内 UVC_{254} 灯管比上层空间 UVC_{254} 系统使用的灯管输出功率更高，如果安全措施不到位、未能有效落实或不够完善，可能会给维护人员带来更大的健康风险。

室内空气净化器（RACs）中的空气照射

与配备过滤器的 RACs 类似，配备 UVC 的 RACs 可作为现有 HVAC 系统的补充。虽然 RACs 和 HVAC 系统的 UVC 计算方法和剂量要求相同，但由于病原体在经过 RAC 时与 UVC 接触的时间较短，因此 RAC 需要使用更高功率的 UVC 灯管才能达到杀灭病原体的效果。在选购配备 UVC 的 RAC 前，建议向经销商或制造商索取独立测试报告，以了解该设备在病原体去除和 / 或灭活方面的实际效果。

直接照射（全屋照射）

在美国，全屋 UVC 照射主要用于表面消毒。采用 UVC_{254}（低压汞蒸气灯）或 $UVC_{260-275}$（UV-LEDs）进行照射时，出于安全考虑，在照射过程中不得有人员在受直接照射的区域内停留。因此，这种方法通常仅在场所内无人时使用。[31]

- 表面消毒的效果受到两个因素的限制：一是含有目标病原体的材料本身的厚度和成分（如，病原体混在表面的痰液中）；二是 UVC_{254} 无法对阴影区域或不平整表面进行有效消毒。
- 近期，UVC_{222}（222nm）被宣传为一种可在室内有人时安全进行全屋照射的新方法。与 UVC_{254} 相比，UVC_{222} 不仅会被蛋白质性物质所吸收，其穿透力也更弱。然而，目前尚无任何流行病学研究或观察性研究验证 UVC_{222} 在这种应用中的实用性和安全性，专家们对其实用价值的看法也不一致。目前有多项相关研究正在进行中。

注：本手册仅探讨直接UVC照射在空气净化和表面消毒方面的应用，不探讨其他用途。

关于UVC的 **附录A：**

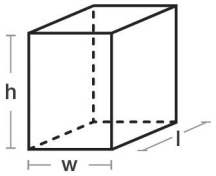
上层空间UVC_{254}剂量计算工作表和装置选择

UVC_{254} 剂量（按容积）计算工作表

房间名称、位置和用途： _____

第1步：测量房间尺寸

重要提示：
如果天花板高度低于8ft（2.4m），不得使用上层空间UVC_{254}。



- 如果发现任何建筑构件或实体障碍物的高度低于测得的“天花板”高度，则在判断是否适合使用上层空间UVC_{254}以及进行后续剂量计算时，应采用这些构件距地面的实际高度。
- 如果房间有吊顶，可考虑抬高或拆除吊顶，以便安全安装上层空间UVC_{254}。

房间高度（h）_____ft或m

房间宽度（w）_____ft或m

房间长度（l）_____ft或m

第2步：计算房间容积 (V)

容积（V）= (h) x (w) x (l)___ft^3或m^3

第3步：计算所需的房间UVC_{254}输出功率（mW）

UVC_{254}容积剂量标准：0.34 mW/ft^3或12 mW/m^3

(V) x UVC_{254}剂量标准 = 所需房间UVC_{254}输出功率(mW)

- 注：如果房间采用自然通风且相对湿度较高，可考虑将剂量标准提高至0.566 mW/ft^3（20 mW/m^3）。
- 请注意：上述剂量标准是灭活结核分枝杆菌所需的剂量。安装完成后，还必须验证室内人员的UVC_{254}暴露剂量是否符合安全限值要求。

房间容积（ft^3）× 0.34 mW/ft^3 = _____所需mW*

或

房间容积（m^3）× 12 mW/m^3= _____所需mW*

* 采用英制单位和公制单位进行计算时，由于单位换算和数值取整可能导致计算结果略有差异。

第4步：确定UVC_{254}装置的类型和数量

a. 根据天花板高度选择合适的装置类型。
b. 查阅制造商的测试数据，确定每个所选装置的UVC_{254}输出功率（mW）。
c. 用房间所需的UVC_{254}输出功率（见上述第3步）除以每个装置的制造商标称UVC_{254}输出功率（mW）（见第4步b），即可获得所需的UVC_{254}装置数量。

如果能获得所选UVC_{254}装置的完整光度测量数据，可使用UVC计算机辅助设计程序来估算所需的UVC_{254}容积剂量和装置数量。

根据地面至天花板的高度选择UVC_{254}装置类型（在相应选项前打✓）：

a.___天花板高度为8–10ft（2.3–3m）时，可选用**带百叶/挡板**的UVC_{254}装置

___天花板高度超过10ft（3m）时，可选用**开放式（或带百叶/挡板的）**UVC_{254}装置

b.___每个装置的输出功率（mW）

c.___所需总功率（mW）÷___每个装置的输出功率（mW）=___所需UVC_{254}装置数量

第5步：应安装适当的空气混合装置并验证其效果。

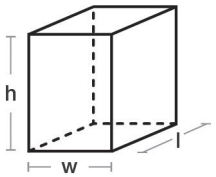
第6步：在设计和安装过程中必须考虑室内人员的安全暴露问题，并在安装完成后验证安全性。

UVC_{254} 剂量（按面积）计算工作表

房间名称、位置和用途： _____

第1步：测量房间尺寸

重要提示：
如果天花板高度低于8ft（2.4m），不得使用上层空间UVC_{254}。



- 如果发现任何建筑构件或实体障碍物的高度低于测得的“天花板”高度，则在判断是否适合使用上层空间UVC_{254}以及进行后续剂量计算时，应采用这些构件距地面的实际高度。
- 如果房间有吊顶，可考虑抬高或拆除吊顶，以便安全安装上层空间UVC_{254}。

房间高度（h）_____ft或m

房间宽度（w）_____ft或m

房间长度（l）_____ft或m

第2步：计算房间面积（A）

面积（A）=（w）x（l）___ft^2或m^2

第3步：计算所需的房间UVC_{254}输出功率（mW）

UVC_{254}面积剂量标准：0.0033 mW/ft^2或.035 mW/m^2

（A）x UVC_{254}剂量标准 = 所需房间UVC输出功率（mW）

- 注：如果房间采用自然通风且相对湿度较高，可考虑将剂量标准提高至最高0.058 mW/ft^2（.0054 mW/m^2）。
- 请注意：上述剂量标准是灭活结核分枝杆菌所需的剂量。安装完成后，还必须验证室内人员的UVC_{254}暴露剂量是否符合安全限值要求。

房间面积（ft^2）x 0.0033 mW/ft^2 = _____所需mW*

或

房间面积（m^2）x .035 mW/m^2 = _____所需mW*

* 采用英制单位和公制单位进行计算时，由于单位换算和数值取整可能导致计算结果略有差异。

第4步：确定UVC_{254}装置的类型和数量

a. 根据天花板高度选择合适的装置类型。
b. 查阅制造商的测试数据，确定每个所选装置的UVC_{254}输出功率（mW）。
c. 用房间所需的UVC_{254}输出功率（见上述第3步）除以每个装置的制造商标称UVC_{254}输出功率（mW）（见第4步b），即可获得所需的UVC_{254}装置数量。

如果能获得所选UVC_{254}装置的完整光度测量数据，可使用UVC计算机辅助设计程序来估算所需的UVC_{254}容积剂量和装置数量。

根据地面至天花板的高度选择UVC_{254}装置类型（在相应选项前打✓）：

a.___天花板高度为8–10ft（2.3–3m）时，可选用**带百叶/挡板**的UVC_{254}装置
___天花板高度超过10ft（3m）时，可选用**开放式（或带百叶/挡板的）**UVC_{254}装置
b.___每个装置的输出功率（mW）
c.___所需总功率（mW）÷__每个装置的输出功率（mW）=___所需UVC_{254}装置数量

第5步：应安装适当的空气混合装置并验证其效果。

第6步：在设计和安装过程中必须考虑室内人员的安全暴露问题，并在安装完成后验证安全性。

关于UVC的 **附录B：**

上层空间UVC_{254}剂量计算工作表和装置选择

测量单位

UVC辐照强度

单位面积接收的辐照能量通量

1 μW/cm²	=	0.001	mW/cm²
	=	0.01	W/m²
	=	10	mW/m²

UVC剂量

吸收的UVC辐照量，即辐照强度与暴露时间的乘积

1, 000 μJ/cm²	=	1	mJ/cm²
	=	10	J/m²
	=	10,000	mJ/m²

UVC输出功率

辐照能量通量

1W = 1J/sec

[瓦特（Watt, W）表示功率或辐照通量，定义为每秒传输1焦耳的能量；焦耳（J）是能量的计量单位]

阈限值 (TLV)

8小时工作班次内的最大允许UVC_{254}剂量[19]

- 眼部暴露限值：6 mJ/cm²
- 皮肤暴露限值：10 mJ/cm²

标准化/人体工程学眼部高度[15]

- 坐姿时眼部高度：51in（1.3m）
- 站姿时眼部高度：71in（1.8m）

UVC_{254}暴露剂量计算步骤

1. 使用经校准且正确安装了视场锥的辐照计，测量室内人员可能驻留位置处眼部高度的辐照强度，同时考虑人员的身体朝向：
   a. 在预期使用位置进行测量（如，在办公桌前或候诊室座椅上就坐时的位置，或在服务台前站立时的位置）。
   b. 检查房间内是否存在辐照强度异常高的区域（“热点”）。
   c. 记录所有测量数据，包括测量点距地面的高度和人员朝向。
   d. 确认所用辐照计测量的是有效辐照强度（经过安全性加权）还是总辐照强度（未加权）*。如果测量的是总辐照强度，则所有测量值都需乘以 2，以换算为 UVC_{254} 的有效辐照强度。

2. a. 确定在每个测量点的预期暴露时间（如果有多个测量点的话）。
   b. 将驻留时间从小时 / 分钟换算为秒。

3. a. 计算每个测量点的 UVC_{254} 剂量（将辐照强度与暴露时间（秒）相乘）。
   b. 将计算结果的单位换算为 mJ/cm^2。

4. 将所有测量点的UVC_{254}剂量估算值相加，得到累积UVC_{254}总剂量（参见示例1和示例2）。

5. 将累积UVC_{254}总剂量与TLV（每日最大暴露安全限值）进行比较。

   注：UVC_{254}的TLV代表人员在任意连续8小时内允许接受的最大暴露量，这适用于在不同房间暴露于UVC的情况，也适用于工作时间超过8小时/天的情况。

6. 虽然UVC_{254}的TLV保持不变，但TWA UVC_{254}允许的辐照强度会随暴露时间而改变。例如，如果人员暴露于UVC_{254}仅4个小时，TWA UVC_{254}剂量仍需保持在眼部暴露的阈限值6 mJ/cm^2以内，但TWA UVC_{254}允许的辐照强度可达0.42 $\mu W/cm^2$。如果人员在12小时工作班次中暴露于UVC_{254}，**在任意连续8小时时段内UVC_{254}剂量仍需保持在6 mJ/cm^2以内，而TWA UVC_{254}有效辐照强度不得超过0.21 $\mu W/cm^2$。**

更详细的讨论请参见“什么水平的UVC_{254}是安全的？”一节。

参考以下三个案例情景分析：

示例1： 计算上层空间UVC_{254}的暴露剂量。

示例2： UVC_{254}暴露剂量的时间–活动评估。

示例3： 基于8小时滚动周期的UVC_{254}暴露剂量的时间–活动评估。

*安全和性能标准假定剂量的测量结果是采用有效辐照强度计算的。大多数UVC_{254}辐射计测量的是总辐照强度，因此总辐照强度测量结果需要乘以2（这是转换为有效辐照强度时使用的转换系数）。

示例1：计算上层空间UVC_{254}的暴露剂量

计算一个诊所候诊室内的暴露剂量，该候诊室的座椅排成多排，所有座椅都朝向前方（朝东）。服务对象的平均等候时间为 0.5–1 小时。为确定暴露量是否低于 UVC_{254} TLV，选择 1 小时作为代表性时长来计算 UVC_{254} 暴露剂量。

第1步：	使用辐照计在坐姿眼部高度（51in/1.3m）测量辐照强度，所有朝前（东）的座椅排测得的数值均为0.2 μW/cm²。 由于辐照计测量的是总辐照强度，需将数值乘以2转换为有效辐照强度。	辐照强度 = 0.4 μW/cm²
第2步：	a. 预期暴露时间 = 1小时 b. 将时间换算为秒	暴露时间 = 1hr = 60min = 3600sec
第3步：	a. UVC_{254}剂量 = 辐照强度 × 时间（秒） b. 将单位换算为 mJ/cm²	UVC_{254} 剂量 = 辐照强度 × 时间 = 0.4 μW/cm² x 3600s = 1440 μW · s/cm² = 1440 μJ/cm² = 1.44 mJ/cm²
第4步：	服务对象的累积UVC_{254}剂量仍为1小时的剂量（服务对象在就诊后通常不会返回候诊室就座）。	累积UVC_{254}总剂量 = **1.44 mJ/cm²**
第5步：	将计算得到的累积UVC_{254}总剂量与UVC_{254} TLV每日最大暴露安全限值进行比较。	累积总剂量显著低于眼部（6 mJ/cm²）和皮肤（10 mJ/cm²）的最大允许UVC_{254}剂量。 计算TLV_{254} 的百分比： = (1.44 mJ/cm² ÷ 6.0 mJ/cm²) × 100% = **UVC_{254} TLV的24%**

示例2：时间–活动评估

一名护士记录了其在配备上层空间UVC_{254}装置的机构内完成8小时工作班次期间的时间和暴露情况，以评估其日常工作中的个人风险。她记录了各项工作活动及处于相应位置时眼部高度处的辐照强度测量值。

8小时工作班次期间在不同场所的活动记录及相应的辐照强度测量结果：

走廊：…… 0.5 μW/cm²，时长10分钟 ……（600s）
护士站：…… 0.05 μW/cm²，时长3小时 ……（10,800s）
病房：…… 0.10 μW/cm²，时长3小时 ……（10,800s）
档案区：…… 0.125 μW/cm²，时长1.5小时……（5,400s）
休息室：…… 0.15 μW/cm²，时长20分钟 ……（1,200s）

她在工作期间接受的UVC总剂量是多少？

第1步： 测量进行各项活动时所处位置眼部高度处的辐照强度。

辐照计测量的是总辐照强度（需将数值乘以2以转换为有效辐照强度）。

第2步：
a. 记录每个位置/每项活动的暴露时长。
b. 将时间换算为秒。

第3步：
a. UVC_{254}剂量 = 辐照强度 x 时间（秒）；计算工作班次期间的UVC_{254}剂量之和
b. 将单位换算为 mJ/cm^2

累积UVC_{254}剂量 = Σ（辐照强度 × 时间）

辐照强度 X 时间（s）= UVC_{254}剂量

走廊： ..... 1.0 μW/cm² x 600s = 600
护士站： .... 0.10 μW/cm² x 10,800s = 1,080
病房： ..... 0.20 μW/cm² x 10,800s = 2,160
档案区： ... 0.25 μW/cm² x 5,400s = 1,350
休息室： .... 0.30 μW/cm² x 1,200s = 360

总计 = 5,550 μJ/cm²

换算后 = 5.55 mJ/cm²

第4步： 计算该护士在8小时工作期间的累积UVC_{254}总剂量。

累积UVC_{254}总剂量 = **5.55 mJ/cm²**

第5步： 将计算得到的累积UVC_{254}总剂量与UVC_{254} TLV每日最大暴露安全限值进行比较。

累积总剂量显著低于眼部（6 mJ/cm²）和皮肤（10 mJ/cm²）的最大允许UVC_{254}剂量。

计算TLV_{254}的百分比：

= (5.55 mJ/cm² ÷ 6.0 mJ/cm²) × 100%

= **UVC_{254} TLV的93%**

示例3：基于8小时滚动周期的时间–活动评估*

布鲁先生的工作时间是上午 8:00 至晚上 8:00，下表显示了他每小时接受的平均 UVC_{254} 剂量。由于布鲁先生在 12 小时工作期间会在不同区域工作，因此他每小时接受的 UVC_{254} 剂量并不相同。

布鲁先生眼部接受的剂量是否超过了眼部 UVC_{254} TLV？（如果满足了眼部 6 mJ/cm^2 的标准，那么皮肤 10 mJ/cm^2 的标准也必然满足）

第1步： 创建一个包含以下四列的表格：

- **时间**
- **每小时UV_{C254}剂量** (mJ/cm^2)
- **累积UV_{C254}剂量** (mJ/cm^2)
- **8小时滚动周期累积UVC_{254}剂量** (mJ/cm^2)*

假设在工作开始前没有UVC_{254}暴露。

时间	每小时UVC_{254}剂量 (mJ/cm^2)	累积UVC_{254}剂量 (mJ/cm^2)	8小时滚动周期累积UVC_{254}剂量 (mJ/cm^2)
8:00	0.0	0.0	0.0
9:00	1.0	1.0	1.0
10:00	0.7	1.7	1.7
11:00	0.6	2.3	2.3
12:00	0.5	2.8	2.8
13:00	1.1	3.9	3.9
14:00	0.9	4.8	4.8
15:00	0.6	5.4	5.4
16:00	0.5	5.9	5.9
17:00	0.7	6.6	5.6
18:00	0.6	7.2	5.5
19:00	1.1	8.3	6.0
20:00	0.7	9.0	6.2

第2步： 在第一列填入“时间”数据，在第二列填入“每小时UVC_{254}剂量”数据。

表格第1和2列

第3步： 从8:00开始，依次计算每个小时的累积UVC_{254}剂量：将当前小时的UVC_{254}剂量与前一小时的累积UVC_{254}剂量相加。

注：8:00之前的UVC_{254}剂量为0.0 mJ/cm^2。

表格第3列

第4步： 从8:00开始，按以下方式计算：

- 计算1:00至8:00期间UVC_{254}剂量之和，将结果填入“8:00”行。
- 接着计算2:00至9:00期间UVC_{254}剂量之和，将结果填入“9:00”行。
- 然后计算3:00至10:00期间UVC_{254}剂量之和，将结果填入“10:00”行。
- 依此类推，直到20:00（12小时工作班次结束时）。

表格第4列

接下一页 >

* 美国政府工业卫生师协会（ACGIH）的物理危害委员会指出：眼部的阈限值是基于8小时滚动周期的平均暴露时间计算的。

< 接上一页

示例3：基于8小时滚动周期的时间–活动评估*

第 5 步： 检查“8 小时滚动周期累积 UVC_{254} 剂量”列，是否在任何时间点超过了 6 mJ/cm^2 的 TLV？

是的，在 20:00 时“8 小时滚动周期累积 UVC_{254} 剂量”超过了 6 mJ/cm^2 的 TLV。

第 6 步： 需要采取哪些措施?

时间	每小时UVC_{254}剂量 (mJ/cm^2)	累积UVC_{254}剂量 (mJ/cm^2)	8小时滚动周期累积UVC_{254}剂量 (mJ/cm^2)
8:00	0.0	0.0	0.0
9:00	1.0	1.0	1.0
10:00	0.7	1.7	1.7
11:00	0.6	2.3	2.3
12:00	0.5	2.8	2.8
13:00	1.1	3.9	3.9
14:00	0.9	4.8	4.8
15:00	0.6	5.4	5.4
16:00	0.5	5.9	5.9
17:00	0.7	6.6	5.6
18:00	0.6	7.2	5.5
19:00	1.1	8.3	6.0
20:00	0.7	9.0	6.2

B. 需要注意的是，在工作的前 8 小时内，如果增加任何额外的 UVC_{254} 暴露剂量，都可能导致超过 TLV。

C. 虽然在工作 9 小时后总累积剂量已超过 6 mJ/cm^2，但 8 小时滚动周期累积剂量尚未超过 TLV，此时实际上仍然符合 TLV 要求。

A. 由于在 12 小时工作班次的最后一小时超过了眼部 TLV 6 mJ/cm^2（8 小时累积值），应首先确认这些测量值是否反映了布鲁先生的日常 UVC_{254} 暴露情况。如果确实如此，则需要采取措施降低其每小时的暴露量。

关于UVC的 **附录C：**

选择上层空间UVC_{254}装置：典型场景

选择最适合且具成本效益的 UVC_{254} 装置来构建有效的上层空间 UVC_{254} 系统时，需要综合考虑三个关键因素：房间的形状和容积、可选用的装置类型、以及空间的使用方式。

以下 3 个示例将展示这些因素如何影响上层空间 UVC 的最终选型决策。

示例房间1：低天花板房间

1 天花板高度**不足，安装上层空间UVC_{254}装置并不安全**

高度(h)：7.5ft（2.3m）
宽度(w)：10 ft（3m）| 长度(l)：10 ft（3m）

示例房间2：标准办公室/诊室

1 天花板高度**足以安装上层空间UVC_{254}**

2 **计算房间容积(V)：**(V) = (h) x (w) x (l)

3 **计算所需的房间UVC_{254}输出功率（mW）：**
所需UVC_{254}剂量* =V（ft^3）×0.34 mW/ft^3 **或**
= V（m^3）× 12 mW/m^3

*采用英制单位和公制单位进行计算时，由于单位换算和数值取整可能导致计算结果略有差异。

高度(h)：8.5ft（2.6m）
宽度(w)：10 ft（3m）| 长度(l)：10 ft（3m）

房间容积(V) = 850 ft^3（23.4m^3）

所需UVC_{254}剂量 = 280–290 mW*

4 **确定UVC_{254}装置的类型和数量**

a. 由于天花板高度在8–10ft（2.4–3m）之间，必须选用**百叶型/挡板型UVC_{254}装置**（天花板高度不足以安全使用开放式装置）。

b. 某制造商提供6种不同输出功率的百叶型/挡板型UVC_{254}装置供选择。

c. 在选择装置时，需根据UVC_{254}输出功率确定所需的装置数量，使其能够提供匹配该房间大小的UVC_{254}消毒剂量。**在本例中，目标是达到280–290 mW的房间UVC_{254}总剂量。**

成本考虑：一台输出功率为400 mW的UVC_{254}装置的采购价格通常不会是一台200 mW装置价格的两倍。而且，这两种装置的灯管更换成本几乎相同。
因此，如果房间布局条件允许，从生命周期成本角度考虑（参见附录D：UVC_{254}成本考虑），选用一台400 mW的UVC_{254}装置比选用两台较小功率的装置更具成本效益。

制造商提供的百叶型/挡板型UVC_{254}装置规格（输出功率）：

200 mW .....（0.2 W）
400 mW .....（0.4 W）
600 mW .....（0.6 W）
800 mW .....（0.8 W）
1,000 mW.....（1.0 W）
1,200 mW.....（1.2 W）

安装一台400 mW的UVC_{254}装置或安装两台200 mW的UVC_{254}装置可满足所需的UVC_{254}消毒剂量要求。

如果该区域的结核病空气传播风险较低（即不太可能有传染性结核病患者出现），安装一台200 mW的UVC_{254}装置也可能足够。

5 应安装适当的空气混合装置并验证其效果。

6 在设计和安装过程中必须考虑室内人员的安全暴露问题，并在安装完成后验证安全性。

示例房间3：高天花板的大房间（顶部带有装饰性吸声板）

1 天花板高度**足以安装上层空间UVC$_{254}$**

a. 本例中，装饰性吸声板悬挂于天花板下方，其底部（最低点）距地面10 ft（3m）。

b. 在进行UVC$_{254}$相关计算和考虑时，应采用地面到吸声板底部的距离。

实际天花板高度：20 ft（6.1m）
吸声板底部高度：10 ft（3m）
宽度(w)：40 ft（12.2m）
长度(l)：50 ft（15.2m）

2 **计算房间容积(V)：** (V) = (h) x (w) x (l)

房间容积(V) = 20,000 ft^3（556m^3）

3 **计算所需的房间UVC$_{254}$输出功率（mW）：**

所需UVC$_{254}$剂量* =V（ft^3）×0.34 mW/ft^3 **或**

= V（m^3）× 12 mW/m^3

所需UVC$_{254}$剂量 = 6672–6800 mW

*采用英制单位和公制单位进行计算时，由于单位换算和数值取整可能导致计算结果略有差异。

4 **确定UVC$_{254}$装置的类型和数量**

在本例中，实际可用的天花板高度为10英尺(3m)，这些数值将用于计算剂量和选择UVC$_{254}$装置。

a. 由于有装饰性吸声板，应选用百叶型/挡板型UVC$_{254}$装置（如果没有吸声板，原本超过10英尺（3m）的天花板高度允许使用开放式或半开放式UVC$_{254}$装置）。

b. 某制造商提供6种不同输出功率的百叶型/挡板型UVC$_{254}$装置供选择。

c. 从成本效果角度考虑，应尽量减少装置数量。如果能在房间内产生相对均匀的UVC$_{254}$分布，则选用6台1.2 W的UVC$_{254}$装置是一个实用的方案。根据房间的几何形状，可能需要组合使用不同输出功率的装置。

如果房间上部空间没有或极少有遮挡物，可考虑使用开放式或半开放式 UVC$_{254}$ 装置。开放式 UVC$_{254}$ 装置的输出功率通常在 3 W 以上。在本例中，如果天花板上没有悬挂吸声板，安装 2 台或 3 台开放式 UVC$_{254}$ 装置就足够了。

要达到所需的房间UVC$_{254}$剂量（6,800 mW），不同输出功率装置所需的数量如下：

数量	装置UVC$_{254}$ 输出功率
34	200 mW (0.2 W)
17	400 mW (0.4 W)
11	600 mW (0.6 W)
9	800 mW (0.8 W)
7	1,000 mW (1.0 W)
6	1,200 mW (1.2 W)

5 应安装适当的空气混合装置并验证其效果。

6 在设计和安装过程中必须考虑室内人员的安全暴露问题，并在安装完成后验证安全性。

关于UVC的 **附录D：**

UVC_{254}成本考虑

在上层空间 UVC_{254} 系统的使用期内，主要支出是长期运行和维护的成本。在计算 UVC_{254} 装置的生命周期成本时（假设 UVC_{254} 装置的使用寿命为 15 年），通常需要考虑以下项目的成本：

初始成本	经常性成本
• 上层空间 UVC_{254} 装置 • 运输费、关税和税费 • 空气混合系统（散流器、风扇等） • 布局设计 • 安装（装置、风扇、电气等） • 验收测试（用于验证上层空间 UVC_{254} 的灭活效果和安全性） • UVC 辐照计	• 季度维护 • 年度维护 • 年度电力 • UVC_{254} 辐照计年度校准

根据实际经验，上层空间 UVC_{254} 系统的平均年度运行和维护成本通常占初始购置成本的 10%–20%，这意味着需要在年度预算中专门增设一项运行和维护的费用支出。

了解生命周期成本至关重要。请参见“UVC_{254} 暴露、安全性和维护注意事项”一节中的图 2“UVC_{254} 系统的预计生命周期成本”。下表展示了 3 种配置不同数量上层空间 UVC_{254} 装置时估算的生命周期成本：

1 台上层空间 UVC_{254} 装置	10 台上层空间 UVC_{254} 装置	50 台上层空间 UVC_{254} 装置
UVC_{254} 装置单价：.....**1,000 美元**（不含税费、运输等费用）	UVC_{254} 装置单价：.....**1,000 美元**（不含税费、运输等费用）	UVC_{254} 装置单价：.....**1,000 美元**（不含税费、运输等费用）
	生命周期总成本：.....**46,475 美元**（所有 UVC_{254} 装置）	生命周期总成本：.....**179,500 美元**（所有 UVC_{254} 装置）
生命周期总成本：.....**13,495 美元**（每台 UVC 装置）	生命周期总成本：.....**4,648 美元**（每台 UVC_{254} 装置）	生命周期总成本：.....**3,590 美元**（每台 UVC_{254} 装置）
年化生命周期成本及其占装置价格的比例：.....**900 美元，即 90%**	年化生命周期成本及其占装置价格的比例：.....**310 美元，即 31%**（每台 UVC 装置）	年化生命周期成本及其占装置价格的比例：.....**239 美元，即 24%**（每台 UVC 装置）

如上所示，随着所安装的上层空间 UVC_{254} 装置数量的增加，每台装置的年化生命周期成本会逐步降低。

更多关于上层空间 UVC_{254} 系统生命周期成本的详细信息，请参见由“遏制结核病伙伴关系”（Stop TB Partnership）的终止结核病传播行动（End TB Transmission initiative, ETTi）编制的技术信息表《使用上层空间紫外线杀菌系统对室内空气进行消毒》（Disinfecting room air with upper-room (UR) germicidal UV (GUV) systems）。详见“参考资源”部分

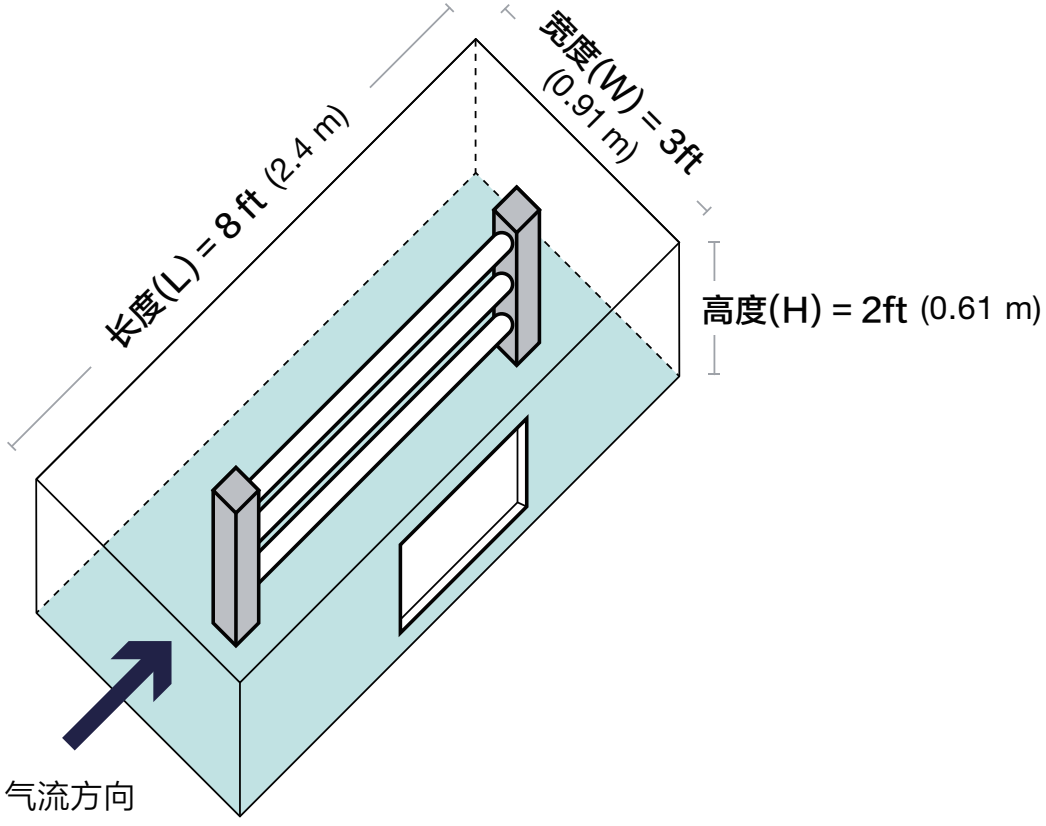
关于UVC的 **附录E：**

管道内UVC_{254}剂量计算

在设计新的管道内 UVC_{254} 系统或将其安装到现有 HVAC 系统中时，所需的 UVC_{254} 剂量取决于两个因素：管道内的平均 UVC_{254} 辐照强度（由灯管的输出功率决定）和空气在系统内的暴露时间（由气流流速决定）。管道内的灯管无需使用挡板，其 UVC_{254} 输出功率可接近灯管额定输出功率的 100%，能够达到很高的效率。

由于技术要求的复杂性，所有管道内 UVC_{254} 系统的安装都必须经过具备资质的专业人员评审，以确认 UVC_{254} 剂量能够达到消毒的要求。

管道内UVC_{254}灯管布置示意图：



第1步： 确定HVAC系统的技术规格参数，计算管道内预期气流流速。	1. 气流量 (Q) = 3,000 cfm（5,100m^3/hr），该数值来自制造商规格说明和测试与平衡（Testing & Balancing，T&B）报告。 2. 管道横截面积 (A) = 高度 × 宽度 = 2ft × 3ft = 6ft2（0.56m^2） 3. 气流流速 (V) = 气流量/管道横截面积 = 3,000 cfm/6ft^2 （相当于5,100m^3/hr/0.56m^2/3,600sec/hr） = 500ft/min（2.5m/sec）
第2步： 确定可安装UVC的管道长度（需确认制造商是否对安装长度有具体建议）。	如果制造商没有具体要求，大型HVAC系统通常需要至少8ft（2.4m）的管道长度来安装管道内UVC系统，而住宅型系统只需要2–4ft的安装长度。
第3步： 根据管道内UVC_{254}灯管的长度计算空气暴露时间。	8ft长度(L)内的暴露时间(t) = 长度/气流流速 = 8ft/500ft/min* × 60sec/min （或2.4m/2.5m/sec） [换算为米和秒] = 0.95s
第4步： 验证是否达到管道内UVC所要求的最低平均辐照强度。	**管道内UVC的最低平均辐照强度要求：1,000–10,000 μW/cm^2**（参考依据：ASHRAE 2019年版标准，第62章*） 注：当管道内平均辐照强度为10,000 μW/cm^2 时，经空气传播病原体接受的平均UVC_{254}剂量计算如下： 剂量（μJ/cm^2）= 10,000 μW/cm^2 * 0.95s = 960 μW*s/cm^2 = 960 μJ/cm^2

* Riley 等人 [1976 年] 的研究估计，使 90% 的结核分枝杆菌失活所需的 UVC_{254} 剂量为 576 μJ/cm^2，而 Kowalski [2006 年] 的研究估计该剂量为 1,080 μJ/cm^2。根据上述示例中的 UVC_{254} 剂量计算，通过暖通空调系统的空气中约 90% 的结核分枝杆菌应当能够在单次通过系统时被灭活。

参考资源

第 2 部分：紫外线 C 波段（UVC）

美国国家标准学会/照明工程学会 (ANSI/IES)

- ANSI/IES RP-44-21：《推荐实践：紫外线照射杀菌》(Recommended Practice: Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI))
  https://store.ies.org/product/rp-44-21-recommended-practice-ultraviolet-germicidal-irradiation-uvgi/?v=7516fd43adaa
  专业角色预期能力清单

美国暖通空调工程师学会 (ASHRAE)

- ASHRAE 防疫工作组《过滤和消毒指南》(Filtration and Disinfection Guidance)
  https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/covid-19/ashrae-filtration_disinfection-c19-guidance.pdf
- ASHRAE 2020 年手册《暖通空调系统与设备》第 17 章“紫外线灯系统”(HVAC Systems and Equipment: Chapter 17, Ultraviolet Lamp Systems)
  https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/covid-19/i-p_s20_ch17.pdf
- ASHRAE 2019 年手册《暖通空调应用》第 62 章“紫外线空气与表面处理”(HVAC Applications: Chapter 62, Ultraviolet Air and Surface Treatment)
  https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/covid-19/i-p_a19_ch62_uvairandsurfacetreatment.pdf
- ASHRAE《关于传染性气溶胶的立场声明》(Positions on Infectious Aerosols)
  www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd_infectiousaerosols_2020.pdf
- ASHRAE GPC-37：《用于控制空气传播病原体的上层空间紫外线 C 波段装置应用指南》(Guidelines for the Application of Upper-air (Upper Room) Ultraviolet Germicidal (UVC) Devices to Control the Transmission of Airborne Pathogens)(2024 年)

美国疾病预防控制中心 (CDC)

- 《上层空间紫外线照射杀菌》(Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI))
  https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/ventilation/uvgi.html

美国环境保护署 (EPA)

- 《含汞节能灯和其他含汞灯具的回收和处置》(Recycling and Disposal of CFLs and Other Bulbs that Contain Mercury)
  https://www.epa.gov/mercury/recycling-and-disposal-cfls-and-other-bulbs-contain-mercury
- 《破损节能灯的清理：当节能灯或其他含汞灯具破损时的建议》(Cleaning Up a Broken CFL: Recommendations for When a CFL or Other Mercury-Containing Bulb Breaks)
  https://www.epa.gov/mercury/cleaning-broken-cfl
- 《合规建议：关于声称可杀灭或有效对抗病毒和细菌的紫外线灯的 EPA 法规》(Compliance Advisory: EPA Regulations About UV Lights that Claim to Kill or Be Effective Against Viruses and Bacteria)
  https://www.epa.gov/compliance/compliance-advisory-epa-regulations-about-uv-lights-claim-kill-or-be-effective-against

终结结核传播伙伴关系的终结结核传播倡议行动 (Stop TB Partnership's End TB Transmission Initiative (ETTi))

- 技术信息表:《使用上层空间紫外线杀菌系统对室内空气进行消毒》(Disinfecting Room Air with Upper-room (UR) Germicidal UV (GUV) Systems)
  https://www.stoptb.org/file/10924/download

世界卫生组织 (WHO)

- 世界卫生组织《结核感染预防控制指南：2019 年更新版》(Guidelines on Tuberculosis Infection Prevention and Control: 2019 Update)
  https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/311259/9789241550512-eng.pdf

参考文献

第2部分：紫外线C波段（UVC）

1. Jensen PA, Lambert LA, lademarco MF, Ridzon R; CDC. Guidelines for preventing the transmission of Mycobacterium tuberculosis in health-care settings, 2005. *MMWR Recomm Rep.* 2005;54(RR-17):1-141. https://www.cdc.gov/mmwr/pdf/rr/rr5417.pdf
2. Biasin M, Bianco A, Pareschi G, et al. UV-C irradiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2 replication. *Sci Rep.* 2021;11(1):6260. doi:10.1038/s41598-021-85425-w. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33737536/
3. Fella P, Rivera P, Hale M, Squires K, Sepkowitz K. Dramatic decrease in tuberculin skin test conversion rate among employees at a hospital in New York City. *Am J Infect Control.* 1995;23(6):352-356. doi:10.1016/0196-6553(95)90265-1. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8821110/
4. Riley RL, Knight M, Middlebrook G. Ultraviolet susceptibility of BCG and virulent tubercle bacilli. *Am Rev Respir Dis.* 1976;113(4):413-418. doi:10.1164/arrd.1976.113.4.413. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/817628/#:~:text=Virulent%20tubercle%20bacilli%20and%20bacille,tuberculosis
5. Storm N, McKay LGA, Downs SN, et al. Rapid and complete inactivation of SARS-CoV-2 by ultraviolet-C irradiation. *Sci Rep.* 2020;10(1):22421. doi:10.1038/s41598-020-79600-8. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33380727/
6. Sliney DH, Stuck BE. A need to revise human exposure limits for ultraviolet UV-C radiation†. *Photochem Photobiol.* 2021;97(3):485-492. doi:10.1111/php.13402. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33590879/
7. Malayeri AH, Mohseni M, Cairns B, Bolton JR. Fluence (UV dose) required to achieve incremental log inactivation of bacteria, protozoa, viruses and algae. *IUVA News.* 2016;18:4-6. https://www.iuva.org/resources/Resource%20Documents/Malayeri-Fluence%20Required%20to%20Achieve%20Incremental%20Log%20Inactivation%20of%20Bacteria,%20Protozoa,%20Viruses%20and%20Algae.pdf
8. Kowalski W. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook: UVGI for Air and Surface Disinfection.* Springer Science & Business Media; 2010. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9
9. Bergman R, Brenner D, Buonanno M, et al. Air disinfection with germicidal ultraviolet: for this pandemic and the next. *Photochem Photobiol.* 2021;97(3):464-465. doi:10.1111/php.13424. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34008197/
10. United States Environmental Protection Agency. *UV Radiation.* United States Environmental Protection Agency; 2010. https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/uvradiation.pdf
11. Coker I, Nardell E, Fourie PB, et al. *Guidelines for the utilisation of ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) technology in controlling transmission of tuberculosis in health care facilities in South Africa.* South African Centre for Essential Community Services; National Tuberculosis Research Programme, Medical Research Council; 1999. https://www.researchgate.net/publication/267198093_Guidelines_for_the_Utilisation_of_Ultraviolet_Germicidal_Irradiation_UVGI_Technology_in_Controlling_Transmission_of_Tuberculosis_in_Health_Care_Facilities_in_South_Africa
12. Welbel SF, French AL, Bush P, DeGuzman D, Weinstein RA. Protecting health care workers from tuberculosis: a 10-year experience. *Am J Infect Control.* 2009;37(8):668-673. doi:10.1016/j.ajic.2009.01.004. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19403197/
13. Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. *Environmental Control for Tuberculosis: Basic Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation Guidelines for Healthcare Settings.* Centers for Disease Control and Prevention; 2009. https://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-105/pdfs/2009-105.pdf?id=10.26616/NIOSHPUB2009105
14. ASHRAE GPC 37. *Guidelines for the Application of Upper-Air (Upper Room) Ultraviolet Germicidal (UV-C) Devices to Control the Transmission of Airborne Pathogens.* ASHRAE. Forthcoming 2024. Available on request at: https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/project-committee-interim-meetings
15. ANSI/IES. *ANSI/IES RP-44-21, Recommended Practice: Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI).* Illuminating Engineering Society; 2021. https://webstore.ansi.org/standards/iesna/ansiiesrp4421
16. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. *2024 TLVs and BEIs: Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices.* ACGIH; 2024. https://www.techstreet.com/standards/threshold-limit-values-for-chemical-substances-and-physical-agents-biological-exposure-indices?product_id=2578984
17. Milonova S, Rudnick S, McDevitt J, Nardell E. Occupant UV exposure measurements for upper-room ultraviolet germicidal irradiation. *J Photochem Photobiol B.* 2016;159:88-92. doi:10.1016/j.jphotobiol.2016.03.009. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27038734/

18. Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. *Occupational Exposure to Ultraviolet Radiation.* Centers for Disease Control and Prevention; 1972. https://doi.org/10.26616/NIOSHPUB7311009

19. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. *2022 TLVs and BEIs: Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices.* ACGIH; 2022. https://www.techstreet.com/standards/2022-threshold-limit-values-tlvs-and-biological-exposure-indices-beis?gclid=Cj0KCQjwhqaVBhCxARIsAHK1tiOR-1cyuuPzkLBft9kxmY7QeE6zWPB0QnRaTHTJz577sc9wgL8CFRucaAj6sEALw_wcB&product_id=2242171#jumps

20. Jensen PA. Critical design parameters in design and efficacy of upper-room UVC_{254} luminaire systems: part I: cverview of major parameters and relationships†. *Photochem Photobiol.* 2021;97(3):532-541. doi:10.1111/php.13425. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33786838/

21. Mphaphlele M, Dharmadhikari AS, Jensen PA, et al. Institutional tuberculosis transmission. controlled trial of upper room ultraviolet air disinfection: a basis for new dosing guidelines. *Am J Respir Crit Care Med.* 2015;192(4):477-484. doi:10.1164/rccm.201501-0060OC. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4595666/

22. ASHRAE. ASHRAE Terminology. Published 2024. Accessed February 27, 2024. https://terminology.ashrae.org/

23. UL Standards and Engagement. *ANSI/CAN/UL 8802, Standard for Ultraviolet (UV) Germicidal Equipment and Systems.* UL Standards and Engagement; 2023. https://www.shopulstandards.com/ProductDetail.aspx?productId=UL8802_1_S_20231116

24. Unites States Environmental Protection Agency. *EPA Regulations About UV Lights that Claim to Kill or Be Effective Against Viruses and Bacteria.* United States Environmental Protection Agency; 2020. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/uvlight-complianceadvisory.pdf

25. Nardell EA. Air disinfection for airborne infection control with a focus on COVID-19: why germicidal UV is essential†. *Photochem Photobiol.* 2021;97(3):493-497. doi:10.1111/php.13421. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33759191/

26. First MW, Weker RA, Yasui S, Nardell EA. Monitoring human exposures to upper-room germicidal ultraviolet irradiation. *J Occup Environ Hyg.* 2005;2(5):285-292. doi:10.1080/15459620590952224. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15848970/

27. Chengalur SN, Bernard TE, Rodgers SH; Eastman Kodak Company. *Kodak's Ergonomic Design for People at Work.* Wiley; 2004. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9780470172469.fmatter

28. Riley RL, Kaufman JE. Effect of relative humidity on the inactivation of airborne Serratia marcescens by ultraviolet radiation. *Appl Microbiol.* 1972;23(6):1113-1120. doi:10.1128/am.23.6.1113-1120.197. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC380516/

29. Peccia J, Werth HM, Miller S, Hernandez M. Effects of relative humidity on the ultraviolet induced inactivation of airborne bacteria. *Aerosol Sci and Technol.* 2001;35(3):728-740. doi: 10.1080/02786820152546770. https://doi.org/10.1080/02786820152546770

30. Xu P, Kujundzic E, Peccia J, et al. Impact of environmental factors on efficacy of upper-room air ultraviolet germicidal irradiation for inactivating airborne mycobacteria. *Environ Sci Technol.* 2005;39(24):9656-9664. doi:10.1021/es0504892. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16475348/

31. Reed NG. The history of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection. *Public Health Rep.* 2010;125(1):15-27. doi:10.1177/003335491012500105. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2789813/

UCSF
University of California
San Francisco

CURRY
INTERNATIONAL
TUBERCULOSIS
CENTER

3

个人防护装备

概述……3.2

为什么需要佩戴防护口罩？……3.2

谁应当佩戴防护口罩？……3.3

医务人员应当在哪些场所佩戴防护口罩？……3.4

哪些防护口罩最适合防护结核分枝杆菌？……3.4

- N95防护口罩属于过滤式防护面罩呼吸器的一种
- 弹性半面罩呼吸器
- 动力送风过滤式呼吸器

什么是适合性测试？何时应进行这项测试？……3.9

如何判断防护口罩是否已获得CDC/NIOSH认证？……3.10

参考资源……3.13

参考文献……3.14

概述

本章主要介绍预防结核分枝杆菌空气传播时所需使用的个人防护装备 (PPE)，重点阐述其基本原理和应用。外科口罩 (surgical mask) (医用口罩 (procedure mask)) 传统上用于维持手术区域或环境的无菌状态，在医疗卫生机构中也用于防护经飞沫传播的疾病。然而，外科口罩对经空气传播的结核分枝杆菌只能起到极其有限的防护作用。实际上，外科口罩最适合传染性结核病患者佩戴，以减少其向室内空气中释放传染性气溶胶。要有效防护经空气传播的感染性颗粒物，医务人员需要佩戴密合性良好的防护口罩 (如图 1 所示的 N95 防护口罩)。虽然口罩常被视为感染预防与控制的标志性措施 (有时也可能引发污名化或政治争议)，但必须明确认识到：呼吸防护只是保护医务人员免受经空气传播结核分枝杆菌感染的综合预防与控制方案的要素之一。[1]

图1：
佩戴N95防护口罩的结核病诊疗医务人员

来源：CITC

为什么需要佩戴防护口罩?

结核病是第一个被证实经空气传播的疾病。近期研究还从结核病患者咳出和呼出的气溶胶中分离出了存活的结核分枝杆菌。

- 这些气溶胶中的大多数颗粒物直径小于 5 微米 (μm)，这些颗粒被吸入后能够沉积到肺部深处，从而导致感染并可能发展为结核病。
- 防护口罩能降低吸入感染性颗粒物的风险，从而降低医务人员面临的结核感染相关职业暴露风险。[2]

虽然并非所有结核病患者都具有传染性，但目前尚无准确方法判断哪些患者的传染性最强。研究发现，不同结核病患者产生的传染性气溶胶量可相差一千倍以上，这解释了为什么有些患者可能成为“超级传播者”，而有些患者则完全不具有传染性。然而，一个被广泛认可的观点在任何情况下都适用：尚未开始接受适当抗结核治疗的结核病患者传染性最强。[3]

谁应当佩戴防护口罩?

医务人员在为活动性结核病患者或传染性结核病患者提供医疗服务时应佩戴防护口罩。即使在经空气传播感染隔离房间（AIIR）内，也必须佩戴防护口罩，因为患者在呼吸和咳嗽时会在其周围产生高浓度的传染性气溶胶。但是，当 AIIR 的通风系统正常运行时，在病房外（如相邻走廊内）的医务人员则无需佩戴防护口罩。在急诊室或救护车等一线医疗场所工作的医务人员在评估和照护疑似结核病患者时应当佩戴防护口罩，这是因为在确诊结核病并启动适当治疗之前，结核传播的风险最高。在对播散性结核病患者实施可能产生气溶胶的操作（如使用骨锯）时，麻醉科、外科和病理科人员也应使用个人防护装备。实验室工作人员在生物安全柜外处理含结核分枝杆菌的标本时也应使用防护口罩。[4,5]

图2：
传染性结核病患者在机构内转移过程中佩戴外科口罩

来源：iStock.com/Sasirin Pamai

注：外科口罩（而非防护口罩）最适合传染性结核病患者在离开AIIR时使用（例如在前往放射科途中或在门诊就诊期间）。见图2。

- 研究表明，结核病患者佩戴外科口罩可使结核传播到豚鼠的风险降低 50% 以上。[6]
- 考虑到肺结核会增加患者的呼吸负荷，要求他们佩戴呼吸阻力大于外科口罩的防护口罩可能并不适宜。
- 在某些情况下（如在患者头部附近进行操作时），可能有必要要求结核病患者在 AIIR 内暂时佩戴外科口罩。然而，由于 AIIR 具有快速稀释通风的优势，通常不要求患者在 AIIR 内持续佩戴口罩。

医务人员应当在哪些场所佩戴防护口罩?

前文已经提到了一些需要佩戴防护口罩的场所。个人防护装备应与行政控制措施和环境控制措施配合使用，而不能**取代这两类控制措施**或当作这些控制措施的替代。例如，如果护理院内有人员出现症状且被认为是疑似结核病病例时，在将该患者转运至具有适当 AIIR 的其他机构之前，负责照护该患者的医务人员在病房内应佩戴防护口罩。此外，疑似结核病患者应佩戴外科口罩。

哪些防护口罩最适合防护结核分枝杆菌?

防护口罩主要分为四种类型[7]：

- 过滤式防护面罩呼吸器（FFR），包括 N95 防护口罩
- 动力送风过滤式呼吸器（PAPR）
- 弹性半面罩呼吸器
- 弹性全面罩呼吸器

本章将重点介绍 N95 防护口罩，并简要讨论动力送风过滤式呼吸器（PAPRs）在医务人员防护方面的应用。防护口罩在医疗卫生机构中的应用历史相对较短，最初是在 20 世纪 90 年代初期因多起耐多药结核病暴发而开始使用，目的是保护医务人员。

在美国，最常推荐用于防范结核病的是 N95 防护口罩。见图 3。

图 3： **N95防护口罩示例**

来源：美国疾病预防控制中心（CDC）和 jocic/Shutterstock.com

口罩上的字母“N”表示该防护口罩适用于防护非油性气溶胶，“95”表示其过滤材料对最易穿透的颗粒（0.3μm）的过滤效率至少达到 95%。见表 1。

注：“95%”**并不意味着**N95防护口罩实际能提供95%的防护效果；很多人对此都会有误解。正确佩戴合适的N95防护口罩预计可使佩戴者吸入的感染性颗粒物减少大约十倍，即吸入颗粒物可减少90%以上；换句话说，佩戴者吸入的气溶胶浓度不超过环境中浓度的10%。

表1：**美国国家职业安全卫生研究所（NIOSH）认证的过滤式防护面罩呼吸器的过滤等级和效率**

（也适用于弹性呼吸器过滤器）

N、R和P这些标识说明过滤器对油的抗性，具体说明如下：

过滤等级	说明
N95, N99, N100	至少过滤95%、99%、99.97%的空气颗粒物。不耐油。
R95, R99, R100	至少过滤95%、99%、99.97%的空气颗粒物。有限程度的耐油。
P95, P99, P100	至少过滤95%、99%、99.97%的空气颗粒物。强耐油。
HE (high efficiency) PAPR100-N, PAPR100-P	至少过滤99.97%的空气颗粒物。

来源：改编自CDC/NIOSH国家个人防护技术实验室（National Personal Protective Technology Laboratory）

虽然 N95 是美国最常用的过滤式防护面罩呼吸器，但相关领域人员还应大致了解其他国家使用和认证的类似防护口罩：

- 欧洲：FFP2；中国：KN95；澳大利亚和新西兰：P2；韩国：“韩国一类”（又称 KF94）；日本：DS2；巴西：PFF2。

这些防护口罩的过滤效率大多被认定为不低于 94%。虽然在新冠肺炎大流行早期，某些防护口罩（如 KN95）曾在紧急使用授权下获准在美国使用，但对于进口的、未经 CDC/NIOSH 认证的防护口罩，这一授权已于 2021 年 6 月 30 日撤销。

- 医务人员可以在 CDC/NIOSH 网站上查验其防护口罩的真伪。详见“参考资源”部分。

在新冠肺炎大流行期间，部分型号的 KN95 防护口罩实际防护效果未能达到其标称的水平，因此未获准在美国使用。医务人员或管理人员在选择合适的防护口罩时，应查阅当地的呼吸防护指南和公共卫生指南。

N95防护口罩属于过滤式防护面罩呼吸器的一种

所有类型的过滤式防护面罩呼吸器均为一次性防护口罩。虽然这类防护口罩也被称为“一次性防护口罩”，但根据 CDC/NIOSH 的防护口罩规定（《美国联邦法规汇编》第 42 篇第 84.2 条）[8]，同一佩戴者可以多次使用这类防护口罩。该规定明确指出了何时应停止使用：“一次性防护口罩是指在出现以下任一情况时应完全废弃的防护口罩：呼吸阻力过大、吸附材料耗尽，或因物理损坏而不再适合继续使用。”

- 防护口罩的实际防护效果取决于三个因素：过滤材料的过滤特性、与面部的密合程度，以及呼气阀（如果配备）的泄漏情况。
- 美国职业安全卫生管理局（OSHA）创造了“指定防护系数（APF）”这一术语，用于说明总的向内泄漏量（“向内泄漏”是指：室内空气中可能含有的感染性颗粒物在佩戴者吸气时可能会从防护口罩边缘处漏入，而未被防护口罩过滤）。OSHA 针对不同类型的防护口罩规定了不同的指定防护系数。需要注意的是，N95 防护口罩的指定防护系数与 N100 防护口罩相同。[9]

在新冠肺炎大流行期间，医务人员普遍采用的一种做法是在 N95 防护口罩外面再戴一个外科口罩，目的是防止 N95 防护口罩被污染。为应对 2003 年非典疫情，美国疾病预防控制中心 [10] 制定了临时指南，规定如果需要重复使用 N95 防护口罩，医务人员“可以考虑在防护口罩外面加戴一个不影响适合性和密合性的宽松遮挡物（例如外科口罩或面罩）”。此外，美国医学研究所在 2006 年发表的报告指出 [11]，当 N95 防护口罩使用者面临流感暴露风险时，可以“在高度面临流感暴露风险时采取措施以保护防护口罩的外表面免受污染（如在防护口罩外加戴医用口罩或可清洁的面罩，以防止其表面污染，但不会影响防护口罩的密合性）”，如图 4 所示。虽然支持这种做法的确定性数据尚不充分，但对大多数医务人员来说，这种做法可能不会有什么危害。需要特别注意的是，对于患有可能影响心肺储备功能的疾病的人员来说，他们通常可能无法耐受长时间佩戴防护口罩（无论是否再加戴一层口罩）所造成的额外呼吸负荷。

图 4：**结核病诊疗医务人员佩戴推荐的无呼气阀防护口罩并在其外面加戴外科口罩**

来源：CDC

将外科口罩**戴在**防护口罩**里面是一个危险的做法**（见图 5），因为这样会导致防护口罩与面部之间的密合性变差，使得佩戴者吸气时空气从防护口罩边缘处漏入。另一个危险做法是让传染性患者佩戴带呼气阀的防护口罩。虽然这样可能会让患者感觉更舒适，但如果不在带呼气阀的 N95 防护口罩外面再佩戴一个外科口罩，患者呼出的传染性气溶胶（如结核分枝杆菌、流感病毒和新冠病毒）就会从呼气阀处直接排出。

图 5：
切勿将外科口罩戴在防护口罩里面

来源：CITC

N95 防护口罩的外观与医疗卫生机构中常用的外科口罩相似，这在一定程度上提高了医务人员对防护口罩的接受程度。

- N95 防护口罩的主要局限性在于：由于这类防护口罩需要与面部紧密贴合，而且通过过滤材料吸气时呼吸阻力较大，很多医务人员感觉佩戴起来不如外科口罩舒适。这提供了一个重要提示：如果某个 N95 防护口罩佩戴时与外科口罩一样舒适，那么它很可能**没有提供足够的保护**。

弹性半面罩呼吸器

某些医务人员或医疗卫生机构可能希望使用非一次性过滤式防护面罩呼吸器或可重复使用的防护口罩，例如**弹性半面罩呼吸器**（见图 6）。[12] 这类防护口罩采用轻质柔性材料制成，材料是各种类型的类橡胶聚合物。

图6：
弹性半面罩呼吸器

来源：anmbph/Shutterstock.com

- 这类防护口罩通常配有两个可更换的滤芯，滤芯可以是 N95 型（过滤效率达到或超过 95%）或 P100 型（过滤效率超过 99.97%）。
- 这类防护口罩佩戴时可能更舒适，与面部的贴合性也更好，但仍需要进行适合性测试。
- 美国职业安全卫生管理局对于这类防护口罩（即便使用过滤效率更高的滤芯）的防护等级评定不高于 N95 防护口罩。
- 主要局限性在于其外观更像工业用品，且在佩戴时可能影响佩戴者与他人进行清晰的交流。
- 虽然弹性半面罩呼吸器的单价较高，但考虑到一次性 N95 防护口罩的使用频率有限，从成本效益角度考虑，弹性半面罩呼吸器可能更具优势。

弹性全面罩呼吸器通常用于工业场所（如密闭空间和粉尘 / 蒸气 / 烟雾浓度高的工作场所），能够提供相对略高的防护水平。但是，由于其成本高、会影响交流，且其外观可能会引起患者恐惧心理，因此不建议在医疗卫生机构内使用。[13]

动力送风过滤式呼吸器

动力送风过滤式呼吸器（PAPR；见图 7）头罩能够为经空气传播的疾病提供最佳防护效果，而且是某些人员在无法佩戴 N95 或其他防护口罩时的唯一选择。这类人员包括那些（由于留有胡须或特定面部特征等原因）无法使防护口罩与面部实现良好贴合的人员。医疗卫生机构可能需要遵守当地法规的要求，为进行高风险操作（如支气管镜检查等可能产生气溶胶的操作）且无法佩戴 N95 防护口罩和弹性呼吸器的人员配备动力送风过滤式呼吸器。

- 动力送风过滤式呼吸器的工作原理是：首先将空气抽入高效过滤器（HE 型、PAPR100-N 型或 PAPR100-P 型）进行过滤，然后将过滤后的清洁空气送入头罩内部面部上方区域（正是由于这个原理，佩戴时会比其他防护口罩感觉更凉爽）。
- 动力送风过滤式呼吸器还具有以下优点：能够同时为面部和眼部提供防护，而且透明面罩能让患者看到佩戴者的整个面部（这对需要通过读唇或其他非言语方式进行交流的患者来说十分重要）。
- 这类呼吸器的一个缺点是：头罩内的气流在一定程度上会掩盖外界声音，从而影响佩戴者与他人的口头交流。
- 这类呼吸器有两个局限性：需要定期对设备进行维护保养，而且必须确保电池组始终保持充足电量。
- 虽然不需要进行适合性测试，但需要就头罩式动力送风过滤式呼吸器的安全有效使用进行培训，包括如何正确清洁和消毒。

将电机和过滤器组件安装在背部腰带上的动力送风过滤式呼吸器型号可能会影响医务人员的活动（如可能会碰倒托盘或台面上的标本或物品）。使用“受控空气净化呼吸器”（CAPR）可以避免这个问题，这是一种将送风机和电机组件安装在头罩上的特殊动力送风过滤式呼吸器（见图 8）。受控空气净化呼吸器的一个缺点是：一次性头罩衬里和面罩有时难以正确安装和取下。宽松式或头罩式动力送风过滤式呼吸器的指定防护系数为 25（可减少 96% 的颗粒物吸入）。在医疗卫生机构中，医务人员使用动力送风过滤式呼吸器时通常会选择头罩式。

注：当头罩式动力送风过滤式呼吸器的电池电量耗尽后，其提供的防护效果接近于零（即完全失去防护作用）。

图 7：
动力送风过滤式呼吸器

来源：美国疾病预防控制中心和3M公司

图 8：
受控空气净化呼吸器（一种特殊动力送风过滤式呼吸器）

来源：美国疾病预防控制中心，由MaxAir公司提供

什么是适合性测试？何时应进行这项测试？

防护口罩的防护效果主要取决于防护口罩与面部之间的密合程度，如果存在空气泄漏，则会大大降低防护效果。因此，必须通过适合性测试来确保防护口罩能够与佩戴者的面部紧密贴合。这就像购买鞋子一样：几乎没有人会不试穿就直接购买鞋子。

- 适合性测试有两个作用：一是帮助确定哪种型号和尺寸的防护口罩最适合佩戴者，二是验证佩戴者能够正确佩戴防护口罩以实现良好的密合性。
- 此外，定期进行的适合性测试还可以作为一种实用的培训方式，与医务人员感染预防与控制培训和再培训相互配合。

图9：
定性适合性测试

来源：iStock.com/Pornpak Khunatorn

在确定适合性测试的频率时，需要考虑以下因素：

- 结核传播风险的高低（如，在结核病高患病率地区或高风险工作场所工作的医务人员可能需要每年进行一次适合性测试）
- 佩戴者面部特征是否发生变化
- 是否出现可能影响呼吸功能的疾病
- 防护口罩的物理特性是否发生变化（即使是同一型号也可能存在差异）
- 所使用的防护口罩型号或尺寸是否发生变化
- 当地或国家法规的具体规定

适合性测试（见图9）通过两种方法之一来进行：

- 定性测试：利用试剂刺激佩戴者的感官（包括味觉、嗅觉）或引起非自主咳嗽反应（使用刺激性烟雾）。
- 定量测试：使用专门仪器测量防护口罩外部与内部的气溶胶浓度比值，以验证防护口罩的密合程度。

CDC/NIOSH 的研究人员发现，使用苦味剂 Bitrex 进行的定性适合性测试与使用 TSI PortaCount® 及其 N95-Companion 装置进行的定量测试结果具有相似的可靠性。[14]

有关适合性测试的详细信息、防护口罩认证查验方法以及制造商使用说明等内容，请参见“参考资源”部分。

注：“密合性检查”（以前称为“适合性检查”）与防护口罩适合性测试是两个不同的概念。如果制造商未提供密合性检查的具体说明，则可参照 OSHA 描述的正压检查和负压检查方法。但是，密合性检查的实际效果存在争议。研究发现，通过密合性检查与通过防护口罩适合性测试之间并无明显的相关性。[15] 因此，重点应放在选择密合性良好的防护口罩并定期进行适合性测试上。详见表 2。

如何判断防护口罩是否已获得 CDC/NIOSH 认证?

参见表2和图10。

表2: **验证防护口罩是否已获得CDC/NIOSH认证的具体步骤**

第 1 步: 防护口罩的包装盒和/或说明书内是否包含图10所示信息的“认证标签”?

第 2 步: 防护口罩上的标识（印记）是否包含以下信息?

- 申请人 / 制造商的名称
- 防护口罩或其组件的商业名称及字母或数字标识
- 批号（针对滤芯和 N95 防护口罩而言）和 / 或序列号（针对弹性呼吸器或动力送风过滤式呼吸器而言）
- 大致的生产日期

第 3 步: 该防护口罩是否列在CDC/NIOSH网站的认证产品目录中? 详见“参考资源”部分。

如果对上述三个问题中的**任何一个**问题的回答为**“否”**，则**表明该防护口罩未获得 CDC/NIOSH 认证。**

如果对上述**所有**问题的回答均为**“是”**，则**该防护口罩可能已获得 CDC/NIOSH 认证。**但是，还必须对防护口罩进行适合性测试，才能确保其适用于佩戴者。

图10：**N95过滤式防护面罩呼吸器认证标签样例**
（同一型号的两种不同尺寸）

在呼吸器认证标签或产品说明书上需要查看的六个关键要素：

1. 美国卫生与公众服务部的官方印章
2. NIOSH的标志
3. 申请人/制造商的名称和地址
4. CDC/NIOSH对该防护口罩使用范围做出的限制或约束条件（如果有的话）
5. CDC/NIOSH分配的认证编号（以TC为前缀）
6. 批号（针对滤芯和N95防护口罩而言）和/或序列号（针对弹性呼吸器或动力送风过滤式呼吸器而言），可能标注在标签上、防护口罩上或包装盒上（本例中未显示）

有关CDC发布的“假冒防护口罩/冒用NIOSH认证”（Counterfeit Respirators/Misrepresentation of NIOSH Approval）的相关信息，请参见“参考资源”部分。

小结：

- 防护口罩必须始终与行政控制措施和环境控制措施配合使用。
  - 快速诊断肺结核并启动有效治疗是最重要的结核感染预防与控制措施（这也是行政控制措施的一个主要目标）。
  - 环境控制措施的作用是创造一个能有效减少传染性气溶胶的环境。
- 在大多数接诊活动性或传染性结核病患者的场所，N95 防护口罩是医务人员适用的个人防护装备。
- 由于防护口罩与面部不能良好密合而无法使用 N95 防护口罩或弹性呼吸器的人员，需要使用动力送风过滤式呼吸器才能获得适当防护。

参考资源

防护口罩真伪鉴别与使用说明（CDC/NIOSH）

- 经 NIOSH 认证的过滤式防护面罩呼吸器（NIOSH-Approved Particulate Filtering Facepiece Respirators）
  https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/disp_part/default.html
- 假冒防护口罩 / 冒用 NIOSH 认证（Counterfeit Respirators/ Misrepresentation of NIOSH Approval）
  https://www.cdc.gov/niosh/npptl/usernotices/counterfeitResp.html

适合性测试

- 《医疗卫生机构预防结核分枝杆菌传播指南》（Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-Care Settings），2005, MMWR 2005; 54 (No. RR-17)
  https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/rr5417a1.htm
- 《一般性指导原则》（General guidance）(OSHA)
  https://www.osha.gov/respiratory-protection/general
- 定量和定性适合性测试操作示范视频（英语和西班牙语）(OSHA)
  https://www.osha.gov/video/respiratory-protection/fit-testing
- 适合性测试常见问题解答 (CDC/NIOSH)
  https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/disp_part/respsource3fittest.html

参考文献

1. Fennelly KP, Martyny JW, Fulton KE, Orme IM, Cave DM, Heifets LB. Cough-generated aerosols of Mycobacterium tuberculosis: a new method to study infectiousness. *Am J Respir Crit Care Med.* 2004; 169(5):604-609. doi:10.1164/rccm.200308-1101OC. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14656754/
2. Fennelly KP. Particle sizes of infectious aerosols: implications for infection control. *Lancet Respir Med.* 2020;8(9):914-924. doi:10.1016/S2213-2600(20)30323-4. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32717211/
3. Loudon RG, Roberts RM. Droplet expulsion from the respiratory tract. *Am Rev Respir Dis.* 1967; 95(3):435-442. doi:10.1164/arrd.1967.95.3.435. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6018703/
4. Jensen PA, Lambert LA, Iademarco MF, Ridzon R; CDC. Guidelines for preventing the transmission of Mycobacterium tuberculosis in health-care settings, 2005. *MMWR Recomm Rep.* 2005;54(RR-17):1-141. https://www.cdc.gov/mmwr/pdf/rr/rr5417.pdf
5. *Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories.* 6th ed. Centers for Disease Control and Prevention; 2020. https://www.cdc.gov/labs/pdf/SF__19_308133-A_BMBL6_00-BOOK-WEB-final-3.pdf
6. Dharmadhikari AS, Mphahlele M, Stoltz A, et al. Surgical face masks worn by patients with multidrug-resistant tuberculosis: impact on infectivity of air on a hospital ward. *Am J Respir Crit Care Med.* 2012; 185(10):1104-1109. doi:10.1164/rccm.201107-1190OC. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22323300/
7. Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety & Health. Types of Respiratory Protection. Published September 3, 2021. Accessed August 25, 2023. https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/disp_part/respsourceTypes.html
8. Approval of Respiratory Protective Devices, Definitions. 42 CFR §84.2 (2020). https://www.ecfr.gov/current/title-42/section-84.2
9. Occupational Safety and Health Administration. *Assigned Protection Factors for the Revised Respiratory Protection Standard.* Occupational Safety and Health Administration; 2009. https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/3352-APF-respirators.pdf
10. Centers for Disease Control and Prevention. Update: Severe acute respiratory syndrome — United States, 2003. *MMWR*. 2003;52(16):357-360. https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm5218a2.htm#top
11. Institute of Medicine. *Reusability of Facemasks during an Influenza Pandemic: Facing the Flu.* The National Academies Press; 2006. https://doi.org/10.17226/11637
12. Chalikonda S, Waltenbaugh H, Angelilli S, et al. Implementation of an elastomeric mask program as a strategy to eliminate disposable N95 mask use and resterilization: results from a large academic medical center. *J Am Coll Surg.* 2020;231(3):333-338. doi:10.1016/j.jamcollsurg.2020.05.022
13. Hines SE, Brown C, Oliver M, et al. User acceptance of reusable respirators in health care. *Am J Infect Control.* 2019;47(6):648-655. doi:10.1016/j.ajic.2018.11.021
14. Coffey CC, Lawrence RB, Zhuang Z, Campbell DL, Jensen PA, Myers WR. Comparison of five methods for fit-testing N95 filtering-facepiece respirators. *Appl Occup Environ Hyg.* 2002;17(10):723-730. doi:10.1080/10473220290107002
15. Danyluk Q, Hon CY, Neudorf M, et al. Health care workers and respiratory protection: is the user seal check a surrogate for respirator fit-testing? *J Occup Environ Hyg.* 2011;8(5):267-270. doi:10.1080/15459624.2011.566016

UCSF
University of California
San Francisco

CURRY
INTERNATIONAL
TUBERCULOSIS
CENTER

4

经空气传播感染隔离房间

什么是经空气传播感染隔离房间（AIIR）？ ····· 4.2

AIIRs 的行政控制措施 ····· 4.3

AIIRs 的环境控制措施 ····· 4.3

- 建筑设计要求
- 确定合适的气流流速和负压值确定
- 气流模式和空气混合
- 排风管道系统和排风口
- AIIR 的缓冲间和卫生间设置要求
- AIIR 的环境控制情况监测

将现有房间升级改造为AIIR ····· 4.17

- 调整HVAC系统
- 增设室内空气净化器
- 案例研究：配备专用卫生间的AIIR
- 案例研究：AIIR 第1部分
- 案例研究：AIIR 第2部分

参考资源 ····· 4.28

参考文献 ····· 4.29

什么是经空气传播感染隔离房间（AIIR）?

AIIRs 采用稀释通风原理来降低室内感染性颗粒物的浓度。同时，通过机械阻隔方式防止受污染的空气从 AIIRs 扩散至共用走廊或其他相邻的室内空间。

为达到经空气传播感染隔离的效果，需要使排风量大于送风量，从而在病房与相邻空间之间形成负压差。这类房间也常被称为**“负压”房间**。

其基本原理和机械通风原理在第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中有详细介绍，具体包括：

- 对气流流速、洁净空气输送比率（CADR）、每小时换气次数（ACH）和室内自净时间（包含计算工作表）的描述和定义；详见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”和附录 A“室内空气清除时间（和 ACH）计算工作表”。
- 对气流和压差的描述；详见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中关于利用正负压降低结核传播的内容。
- 暖通空调系统的描述、配置及其组成部分（如送风和循环系统、送风散流器和排风格栅的布置）；详见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“HVAC 系统”章节。
- 采用负压控制和防止感染性颗粒物传播的基本原理概述，以及对 AIIRs 的简要描述（本章将详细介绍此主题）；详见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“机械通风”和“负压：经空气传播感染隔离房间（AIIRs）”一节。

结核感染预防与控制政策和干预措施通常分为三个层次：行政控制（或工作实践控制）最为重要，其次是环境控制，最后是呼吸防护。要建立有效的结核感染预防与控制方案，这三个组成部分缺一不可。本手册的相关章节对这三个部分分别进行了详细介绍。**本章重点介绍 AIIRs 的规划和管理。**

AIIRs 的行政控制措施

结核感染预防与控制的**行政控制措施**是一系列干预措施，旨在通过制定机构政策、规程、教育培训和监督管理等手段，来减少或防止机构内的结核传播和暴露。配备 AIIRs 的机构应制定全面清晰的感染防控计划，应包含以下内容：

- 医疗机构结核感染预防与控制（IPC）风险评估和感染预防与控制方案，应包含 AIIRs 的专项管理规程。AIIR 的结核感染预防与控制方案中应明确规定启动和终止隔离的标准和程序，并涵盖相关法律和伦理事宜。[1]
- 应制定 AIIR 的监测和评价方案，明确规定定期检查内容（如：确认负压功能是否正常）。
- 应为医务人员提供专门的培训和教育课程，使其掌握 AIIR 的正确使用方法和基本感染预防与控制原则。
- AIIR 必须设置规范的标识：当 AIIR 处于使用状态时，应在通向走廊的门上设置“经空气传播感染隔离”标识，在病房门和缓冲间门上设置“保持门窗关闭以维持负压状态”的警示标识。病房内可为患者设置“咳嗽礼仪”提示标识。
- 个人呼吸防护要求：所有医务人员在 AIIR 内为疑似或确诊结核病患者提供医疗服务时，必须佩戴 N95 防护口罩或防护等级更高的呼吸器（如动力送风过滤式呼吸器）。当病房空置后，进入病房的人员仍需佩戴防护口罩，直至达到所需的空气清除时间，即空气中至少 99% 的污染物被清除为止。有关每小时换气次数和空气清除时间的具体要求，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中“室内空气清除”一节的表 2。

有关行政控制措施的更多信息，请参见第 1 章“行政控制”。

AIIRs 的环境控制措施

AIIR 的设计或运行如果存在缺陷，可能会让医务人员、其他患者以及周边人员暴露于结核感染风险。这是因为感染性颗粒物可能无法被有效隔离，和 / 或病房内污染物浓度未达安全标准。在这种情况下，医务人员如果依赖这样的 AIIR，可能会产生虚假的安全感。

本节简要介绍如何评估和改进 AIIR 的设计和运行，包括将现有普通病房改造为 AIIR 的具体方案、AIIR 的监测要求，以及相关的环境控制措施指南和规范要求。

有关 AIIRs 机械通风原理的详细阐释，请参见“参考资源”部分。

建筑设计要求

从建筑设计角度来看，AIIR 必须满足单人病房的所有具体要求，其中包括配备专用卫生间（作为病房套间的组成部分）。虽然不强制要求设置缓冲间，但设计时可将其作为可选方案。

建筑设计要素还必须符合感染预防与控制建筑标准（美国暖通空调工程师学会 [ASHRAE] 170–2021[2]、医疗设施指南学会 [FGI] 2022a、FGI 2022b、FGI 2022c）[3,4,5] 和当地法规要求。例如：

- 病床周围的最小净空要求
- 最小房间面积要求
- 在病房入口处设置个人防护装备的存放区和废弃物处理区

AIIR 的位置： AIIR 的位置应尽量避开容易产生强气流的区域，例如电梯附近或通向室外的门附近，以免影响负压效果。

门： AIIR 的所有门都必须安装自动关闭装置。

专用卫生间： 理想情况下，AIIR 应配备患者专用独立卫浴，作为病房套间的组成部分。但在一些诊所的 AIIRs 中，由于患者不需要长期住院治疗，这一点可能无法实现。设置专用卫生间的主要优势在于患者无需离开病房，从而减少病房门的开关频率。如果 AIIR 包含专用卫生间，在计算每小时最低换气次数时，必须将专用卫生间的排风量（基于容积的气流率）也计算在内。

AIIR 的密封性：为了提高负压效果，除了门下必须预留规定的微小通气缝隙外，AIIR 的其他所有部分都必须进行严格的密封处理。有关 AIIR 密封性的具体要求，请参见“现有病房改造指南”一节和第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“负压：：经空气传播感染隔离房间（AIIRs）”一节。

新建医院的 AIIR 在机械设计方面必须至少满足当地的所有法规要求，同时还必须符合美国疾病预防控制中心发布的建议、ASHRAE 标准以及其他适用的规范、标准和法规。

合适的气流流速和负压值确定

根据美国疾病预防控制中心2005年[6]发布的建议，AIIRs 应满足以下要求：

- **每小时换气次数至少应达到 12 次**（包括 2 次新风换气），目的是稀释室内的结核分枝杆菌或其他经空气传播的微生物。
- **AIIR 相对于周围区域的最小压差应至少达到 0.01 “w.g.（2.5Pa），**这样才能确保空气始终从周围区域流向 AIIR 内，从而有效控制结核分枝杆菌或其他微生物的传播。

  注：在实际应用中，为了确保在 HVAC 系统气流流速出现小幅波动时仍能持续维持负压状态，**AIIR 通常将最小压差设定为 0.05 “w.g.（12.5Pa）。**
- 应始终保持相对于周围空间的负压（压差）状态。为了维持这种负压状态，排风量必须超过送风量，且二者之差至少应达到排风量的 10% 或 100 CFM（>170m^3/hr）（取二者中的较大值）。

不应在 AIIRs 中使用变风量（VAV）系统，因为变风量系统主要是根据室温变化来调节气流流速，其运行特性可能无法可靠地满足污染物控制的要求。

每小时换气次数（ACH）：当房间的送排风总量（取二者中的较大值）等于房间容积时，即完成一次换气。ACH 的计算公式为：每小时内送入或排出的空气量除以房间容积。通过计算 ACH 值：一是评估房间的实际通风性能是否符合现行标准、规范和建议；二是估算清除室内感染性气溶胶所需的时间。

- 有关 ACH 的具体计算步骤和室内空气清除时间的详细说明，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”附录 A“室内空气清除时间计算工作表”。
- 对于 AIIRs，**在计算 ACH 时应使用总排风量**，而不是送风量。总排风量包含两个部分：一是直接从 AIIR 排出的气流量，二是从专用卫生间排出的气流量（假定专用卫生间没有独立的送风系统）。如果 AIIR 配备了专用卫生间或缓冲间，这些空间的 ACH 需要与 AIIR 主体空间的换气次数分开独立计算。详细内容请参见“现有病房改造指南 – 案例研究：配备专用卫生间的 AIIR”一节。

维持负压状态：当排风量大于送风量、且病房密封良好（仅在门下留有通气缝隙）时，即可实现负压状态。

- 根据美国疾病预防控制中心和 ASHRAE 指南推荐，应维持最低 0.01“w.g.（约 2.5Pa）的负压差。但在实际应用中，如此小的压差可能不足以维持稳定的负压状态。如果存在其他外部因素（如电梯运行、门窗启闭等）导致的气流波动，负压状态可能无法持续稳定。因此，在实践中通常将**最小压差设定为 0.05“w.g.（12.5Pa）**。
- 在某些情况下，可能会采用高达 0.10“w.g.（25Pa）的压差。但是，这样的压差可能难以持续维持，而且需要配备更强大的通风设备、更坚固的通风管道系统，以及对房间进行更严密的密封处理。

电子压力监测仪：AIIR 可配备电子压力监测仪。具体而言：

- 在正确选择、安装和维护室内压力监测仪的情况下，该设备可提供连续定性 / 定量监测，确认房间边界负压状态，并连接本地或 HVAC 系统报警装置。
- 市面上有多种室内压力监测仪，具备不同的附加功能，例如：当负压失效时自动点亮“预警”指示灯；适用于正压房间；可通过远程控制系统调节风扇转速或风门开启程度，以维持和控制负压状态。
- 病房边界处的压差通常非常小，约千分之一英寸量级。例如，美国疾病预防控制中心 [6] 和 ASHRAE[2] 推荐的最小负压值仅为 0.01“w.g.。一些压差传感器无法达到此精度。因此，在选购室内压力监测仪前，需先确认该设备具备微压差的精准测量能力。
- 室内压力监测仪不可替代人工日常检查，仅作为辅助手段。有关人工检查的具体方法，请参见“如何进行负压日常人工检查：烟雾测试、纸巾法或简易叶轮风速计”部分。

气流模式和空气混合

AIIR 的 HVAC 系统设计须综合考量室内气流模式和空气混合效率。具体要求如下：

- **定向气流：**理想情况下，清洁送风应优先覆盖医护人员工作区（如手部操作区），而排风口则应当设置在靠近患者的位置。
- **风口布局要求：**送风口与排风口需保持最小间距（最好将排风口设置在患者附近或病床头部区域），以**避免出现**清洁空气**“短路”**现象（即清洁空气未经充分混合即被直接排出，导致未能稀释传染性颗粒物稀释）。
- **空气混合：**在选择送风扩散器以及确定送风口与排风口位置时必须特别谨慎，以确保室内空气的充分混合。需要特别注意的是，当气流流速超过 50ft/min（0.25m/sec）时，室内人员可能会感到不适。

有关更多详细内容，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“利用定向气流减少结核传播”、“送排风系统”以及“HVAC 系统的组件：扩散器和格栅”等内容。

排风管道系统和排风口

从 AIIRs 排出的空气很可能含有传染性气溶胶。因此，应将这些空气直接排放到建筑物外部，使其中的颗粒物能够被室外空气稀释。

排风管道

独立排风系统：

- 尽管美国疾病预防控制中心 2005 指南未强制要求，**但最佳实践应为 AIIR（包括专用卫生间和缓冲间）配置独立排风系统。**
- 部分地区建筑规范要求新建或改造的病房必须采用独立排风系统。由于大多数建筑法规不具有追溯效力，因此现有 AIIR 的排风通常可以与其他排风系统合并。ASHRAE 170–2021 标准允许将 AIIR 的排风（不包括卫生间排风）在经过 HEPA 过滤后与其他排出气流混合。[2] 需要注意的是，严禁卫生间排风再循环。

医疗卫生机构的工程部门工作人员应追踪 AIIR 排风管道走向。如果病房配备了专用卫生间和缓冲间，还应检查这些区域的排风管道。

- 应绘制一套“平面图”（或在现有设计图纸上做出标注），明确管道、过滤器及风机的位置与技术参数。
- 同时还应检查排风系统性能。需要整改的情况包括：管道接缝大量漏气、管道破损、风阀调节不当以及风机未定期维护等情况。

长期运行可能导致排风口及管道积聚灰尘，同时管道接头处的密封材料可能出现老化。上述两种情况都可能导致 AIIR 的排风量下降，从而无法维持所需的负压状态。

- 为解决这个问题，在设计 AIIR 的排风管道和风机系统时，设计风量需按满滤料阻力计算，并增加 10% 安全余量。

空气循环系统

- 如果 AIIR 的排风未经处理直接回送至无过滤功能的 HVAC 循环系统，则该房间禁止继续用于隔离用途，因为这样可能导致该系统所服务区域内的医务人员和患者暴露于空气中的结核分枝杆菌。
- **再循环系统的暴露风险主要取决于两个因素：新风混合比例，以及机械通风系统中过滤器的效率。**新风混合比例越高、过滤器效率越高，暴露风险就越低。医院 HVAC 系统因受更严格建筑规范约束且维护预算充足，通常比诊所具备更完善的过滤体系。

排风口

- 排风口必须经过合理布置和设计，以尽量减少排出的气流被人员吸入的可能性，无论这些人员是在建筑物外部还是内部。排出气流必须远离人员经常活动的区域（如人行道）或建筑物的开口部位（如窗户或新风口）。
- 为增强排风的稀释效果，排风口应采用垂直向上排放方式；排风口必须位于相邻屋面以上至少 10ft（3m）的高度；与公共区域、建筑物开口部位和 HVAC 系统进气口之间的距离必须至少保持 25ft（7.6m）。
- 当无法满足上述排放条件时，可通过在排风机进风侧安装 HEPA 滤芯来净化排风。但这并不是一个理想的选择，因为与直接向室外排风相比，这种方案会显著增加安装、维护和运行方面的成本。

管道和风机的标识

维护人员和承包商在安装新设备、更换滤芯或进行其他需要关闭排风机的维护操作时，经常需要重新布设管道。

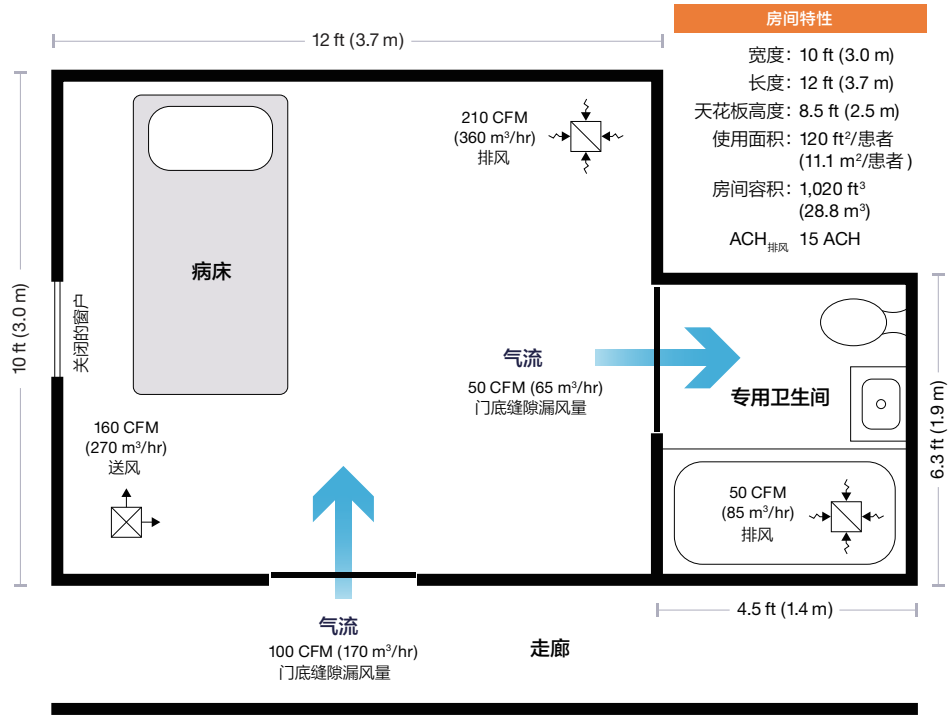
- 为保障工作人员的安全，**排风管道、风机和过滤器外壳上必须贴附永久性的清晰警示标识**，例如：标注“警告 – 结核污染空气”，或“结核污染空气 – 关闭风机或进行维护前请联系感染预防与控制协调员”，或其他类似的警示语。这些标识应当最多间隔 20ft（6.1m）设置一处，并且在所有穿越楼板和墙体的部位都要设置。在风机和过滤器上还应设置额外的标识，标明感染预防与控制协调员的联系电话，以及该排风机或过滤器所服务的 AIIRs 的房间号。[6]

AIIR 的缓冲间和卫生间设置要求

缓冲间不是 AIIR 的必备配置。图 1 展示了一个未设置缓冲间的 AIIR 示例（关于该示例中的气流和压差的详细说明，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“负压：经空气传播感染隔离房间（AIIRs）”一节）。在规划 AIIR 时，可以根据风险评估结果，考虑在病房与走廊之间增设缓冲间（如图 2 所示）。增设缓冲间具有双重作用：一方面可以阻隔传染性颗粒物外溢至公共区域，另一方面能为医务人员提供一个专门的区域用于更换衣物和穿脱个人防护装备。无论是否设置缓冲间，AIIR 都必须满足以下通风要求：[6]

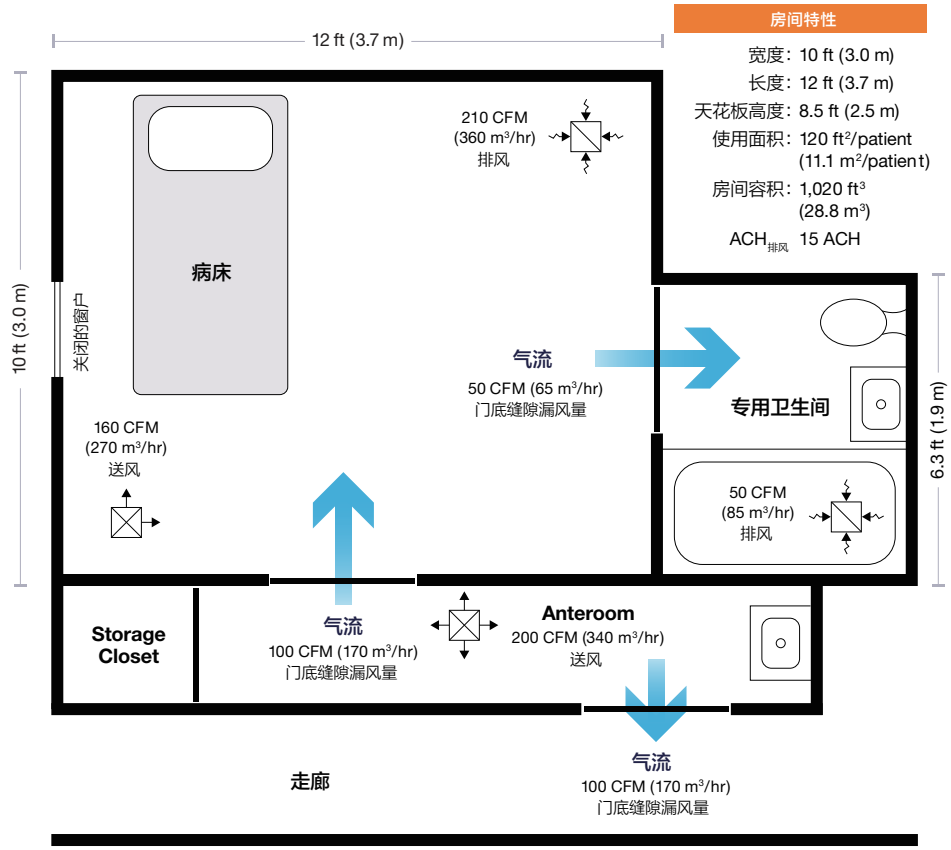
- 每小时换气次数达到至少 12 次（包括 2 次新风换气）
- 相对相邻区域（如走廊、缓冲间）的压差梯度大于等于 0.01“w.g.（2.5Pa），以确保气流单向流入 AIIR
- 排风量必须超过送风量，且二者之差（即气流差）必须大于等于排风量的 10% 或 100 CFM（170m^3/hr）（取二者中的较大值）

图1： 无缓冲间的AIIR



来源：改编自美国疾病预防控制中心《结核病核心课程》（Core Curriculum on Tuberculosis）第6章，2021年

图2： 有缓冲间的AIIR



来源：改编自美国疾病预防控制中心《结核病核心课程》（Core Curriculum on Tuberculosis）第6章，2021年

当 AIIR 的门开启时，压差会立即消失。如果有缓冲间，且缓冲间相对于走廊保持负压状态，则可维持整体防护效能。这是因为缓冲间在 AIIR 与其他区域之间起到了“气流缓冲带”的作用。

缓冲间相对于 AIIR 应保持正压状态，而相对于走廊则可以保持中性压、正压或负压状态。在“案例研究：配备专用卫生间的 AIIR”部分的图 11 中，展示了一个设有正压缓冲间（相对于 AIIR 和走廊均保持正压）的 AIIR 示例。由于发生火灾时烟气可能从走廊渗入，某些建筑法规和规范要求缓冲间相对于走廊必须保持中性压或正压状态，而不允许呈负压状态。但是，实现 " 双门差异压差 "（一端正压一端中性）的气流平衡是很困难的。此外，走廊的气压还会受到电梯运行和外门开启等外部因素干扰。

关于 AIIRs 缓冲间的其他设计要素，应遵循当地建筑法规的要求。例如，医疗设施指南学会（FGI）指南的要求包括：

- 为医务人员提供足够的空间以供穿脱个人防护装备
- 设置专门的储存区域，用于存放未使用的个人防护装备
- 配备污染个人防护装备的收集容器
- 安装洗手设施

专用卫生间与 AIIR、缓冲间（如果没有缓冲间则相对于走廊）保持递进式负压状态。换言之，不仅 AIIR 和专用卫生间的排风量之和必须大于送风量之和，而且 AIIR 本身的排风量也必须大于其送风量。这一点在“案例研究：配备专用卫生间的 AIIR”中有详细说明。

- 专用卫生间的排风通风系统必须符合当地要求。例如，ASHRAE 170–2021[2] 规定：卫生间每小时换气次数必须达到 10 次，必须保持负压状态，同时排风必须直接排到室外。通常情况下，只要卫生间相对于 AIIR 的气流差达到 50 CFM（85m^3/hr），就能满足负压要求。如果卫生间相对于 AIIR 保持负压状态，还能有效控制气味和湿度。

AIIR 的环境控制情况监测

AIIR 环境控制措施的失效曾导致多起医院结核病疫情暴发。因此，通过定期评估环境控制措施的效果，有助于发现并防范这类问题。[7]

AIIR 的监测包括：

- **测量气流流速并计算 ACH**
- **评估气流模式（即空气混合情况）**
- **验证负压状态**

通过定期评估环境控制措施的效果，有助于发现并防范问题。

应每年对 AIIR 进行一次全面评估（包括气流模式验证，气流流速测定、每小时换气次数和负压检测），使用过程中若发现异常情况则需随时评估；同时对电子压力监测仪进行校准，所有评估结果均应记录在案。

表 1 总结了负压与气流差的三种量化方法，并列出了每种方法对应的计量单位和测量设备。

表1：**负压和气流差的量化方法**

参数	测量单位	测量设备
压差	• 英寸水柱（"w.g.） • 帕斯卡（Pa）	压差计
门下气流速度	• 英尺/分钟（FPM） • 米/秒（m/s）	风速仪
气流差	• 立方英尺/分钟（CFM） • 立方米/小时（m^3/hr）	风量罩

除了上述定期评估外，工作人员还必须进行简单的日常检查并做好记录，以确保 AIIR 用于收治结核病疑似或确诊患者期间，负压系统正常运行并实现有效隔离。

医疗卫生机构的感染预防与控制方案中应明确规定 AIIR 的具体监测要求。本章后续部分将详细介绍这些监测方法。

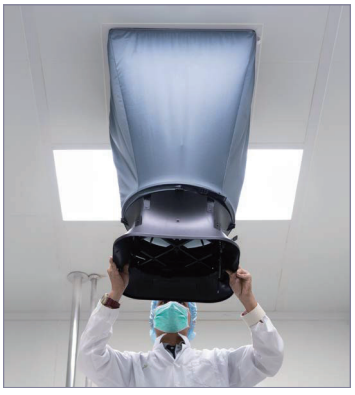
AIIR的气流流速测量和ACH计算

气流和ACH的年度测试要求：

应至少每年测量一次气流流速并计算ACH，以确保其数值与初始值的偏差不超过10%。

- 通常使用风量罩在排风口格栅和送风散流器测量房间内的气流量。风量罩是一种由罩体（有时也称为帐篷状罩体）、流速传感器和微处理器组成的测量设备（如图 3 所示）。进行测量时，需要将罩体完全覆盖住散流器或格栅，引导所有进出气流通过速度感应网格，微处理器随即计算并显示排风量或送风量。测量结果通常以 ft^3/min（CFM）或立方米 / 秒（m^3/sec）为单位。
- 标准风量罩的尺寸为 24" × 24"（61cm × 61cm）。当需要测量其他形状和尺寸的出风口时，可以将相应尺寸的罩体安装到仪器框架上。对于周围空间不足以使用风量罩的出风口，应直接在连接风管内测量气流流速。
- 如果测量结果显示房间的气流流速不足（即 ACH 低于 12 次），则应当对气流流速进行重新调节。有关如何调整现有房间气流流速的具体方法，请参见“现有房间升级改造为 AIIR”一节。
- 气流测量和计算工作必须由认证检测机构或具备 HVAC 专业仪器及资质的内部工程人员实施。[8]

图3：
风量罩



来源：Shutterstock

AIIR 内的气流模式（空气混合）评估

AIIR内的气流模式年度评估要求：

应使用烟雾/雾化发生装置验证房间内的气流模式是否符合感染预防与控制方案的规定。

- 通过烟雾 / 雾化示踪测试，应形成由门底缝隙向 AIIR 内部持续流入的气流模式。
- 气流整体应从清洁区域流向次清洁区（即按照以下顺序流动：走廊 > 医护人员工作区 > 患者区 > 排风口和 / 或卫生间排风口），且整个流道内不得出现可视的气流停滞区域。

AIIR的负压状态验证

新建或改造的 AIIR 在投入使用前，机械承包商必须按照工程师的要求调节气流量，以确保其按设计参数运作。但是，机械系统会随着时间的推移出现参数漂移。

AIIR 内的常规压力检测应当包括：

- **电子压力监测仪每年至少进行 1 次校准**（或按照制造商的要求；如果在使用过程中出现故障，则应增加校准次数）：校准工作应当由原厂技术人员、认证检测机构，或具备 HVAC 资质的内设工程团队执行。
- **定期检查电子压力监测仪：**必须由培训合格人员使用微压计验证读数和 / 或报警功能（建议每月 / 每季度检查一次，或在发现电子压力监测仪的读数与目视检查结果不符时进行检查）。需要注意的是，如果连接管路安装不当，电子压力监测仪和微压计都有可能显示错误的读数。
- **在使用期间必须每天进行负压验证，**并做好记录。记录内容应当包括固定式压力监测仪读数，以及烟雾 / 雾化测试或薄纸测试结果。

美国疾病预防控制中心 2005 年指南明确规定：“**在患者入住前**，应当使用发烟管或其他**目视检查**方法验证负压状态；在收治疑似或确诊结核病患者期间，**必须每天进行这项检查**。”[6]

最初制定这一政策声明的原因是由于当时的物理和电子压力监测设备性能表现不够理想。

正常运行的 HVAC 系统应在门底形成向内的气流（流速≥ 0.2m/sec）。可以在 AIIR 入口的底部门缝处使用烟雾 / 雾化测试、薄纸测试或简易风速计（如 VaneometerTM）进行日常检查，以确认负压状态是否正常。需要特别注意的是，大多数电子风速仪只能测量气流流速，无法显示气流方向。

有关如何使用这些方法进行日常负压状态监测的详细说明，请参见“负压日常目视检查规范：烟雾 / 雾化测试、薄纸测试及简易风速计使用”一节。

AIIR 监测记录

应当保存所有 AIIR 环境控制测试数据和测量结果。保存期限应满足属地监管要求。例如，加利福尼亚州职业安全卫生管理局 (Cal/OSHA) 要求至少保存五年。

第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”的附录 B“经空气传播感染隔离房间（AIIR）压力监测核查清单”提供了记录模板。

负压日常目视检查规范：烟雾/雾化测试、薄纸测试及简易风速计使用

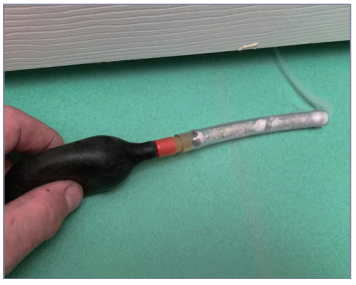
烟雾/雾化测试：

- 烟雾 / 雾化测试必须在房间关闭状态下于门外操作。进行测试前，需提前告知室内人员测试原理，避免其看到烟雾流入产生恐慌（如图 4 所示）。
- 如果没有市售烟雾 / 雾化设备，可以使用线香（建议双支并列使用，如图 5 所示）。但是，线香产生的烟雾可见度与可控性较差，且气味浓烈。

检查房间负压状态时，应将烟管 / 雾化器水平置于门底约 2in（5cm）处，轻轻挤压气囊（或按照装置使用说明操作雾化器）。

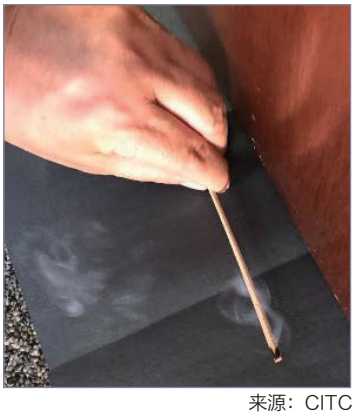
- 保持设备与门平行（而不是指向门），缓慢释放烟雾 / 雾气，避免喷射速度干扰自然气流。
- 如果房间处于负压状态，烟雾 / 雾气会从底部门缝流入房间（即从高压区流向低压区，如图 4 所示）。如果房间处于非负压状态，烟雾则会向外吹出（如图 5 所示）或停滞。
- 如果设有缓冲间，则应在缓冲间 – 走廊门和缓冲间 –AIIR 门都处于关闭状态时，在内门底部门缝处释放烟雾 / 雾气。
- 某些 AIIR 或区域除了普通人员通行门外，还设有轮床进出用的宽门。应对所有通向 AIIRs 的门进行烟雾 / 雾化测试。
- 要检查房间的排风情况，可以在排风格栅表面附近释放烟雾 / 雾气（如图 6 所示）。需要注意的是，这种方法只能确认是否存在排风，无法确认排风量是否达标。
- 如果房间内安装了配备 HEPA 滤芯或其他高效滤芯的室内空气净化器，在进行测试时应保证室内空气净化器处在运行状态。

图4：
在门缝处使用发烟管



来源：P. Jensen

图5：
在门缝处使用线香



来源：CITC

图6：
在排风格栅处使用发烟管

来源：P. Jensen

通常，门下气流速度达到 100ft/min（0.5m/sec），可确保足够的负压。由于 100ft/min 约等于 1.5ft/sec，以此速度（近似）水平移动的烟雾 / 雾气会在 2 秒内移动 3ft。进行目测评估时，可以释放烟雾 / 雾气，同时默念“一、一千，二、一千”（每次默念“一千”约需一秒钟，因此整个计数过程约持续两秒钟），观察烟雾 / 雾气在这两秒钟内移动的距离。如果烟雾 / 雾气在这段时间内至少移动了 3ft，则气流速度可能达标。

- 虽然这种目测方法可以大致判断气流是否充足或停滞 / 微弱，但使用简易旋叶式风速仪（例如 Vaneometer™）不仅能够测量速度，还能显示气流方向。详见“使用（旋叶式）风速仪测量”一节。

某些烟 / 雾可能对呼吸道有刺激，需避免直接吸入。设备每次释放的烟 / 雾极少，在释放点短距离外应无感知。

薄纸测试

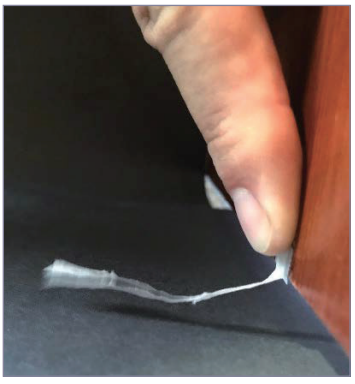
若无烟 / 雾发生设备，或者病房内有对烟 / 雾刺激敏感的患者，可以使用一条薄纸巾来判断房间相对于周围区域是处于负压、中性压还是正压状态。具体方法是：将一条窄且薄的纸巾平行放置在门底部与地面之间的缝隙处（如图 7 所示）。通过观察纸巾的移动方向可以判断气流的流向，而纸巾水平摆动的幅度则可以大致反映气流的强弱程度。

还有一种更为简单的薄纸测试方法可以直观地显示负压是否正常。具体操作步骤如下：在 AIIR 门处于关闭状态时，从走廊或缓冲间一侧将一小片纸巾放在门底缝隙处。如果空气按预期从走廊 / 缓冲间流向 AIIR，纸巾就会随气流迅速被吸入门下（如图 8 所示）。

图7：

纸巾条测试

在AIIR内的门下缝隙处放置薄纸条，以确认气流向内流动。



来源：CITC

图8：

从走廊/缓冲间侧进行纸巾测试

如果存在负压，放置在AIIR门外的小片纸巾会被气流吸入门下。

来源：CITC

使用（旋叶式）风速仪测量

简易风速仪可用于检测气流方向并测量气流速度。

- 关闭 AIIR 门，将风速仪放置在门内侧的地面上（如图 9 所示）。设备内的叶片会指明气流流向并可直接读取气流速度值。

注：所有验证负压状态的方法都应当至少重复执行三次，直至获得一致的结果。

使用风速仪测量非AIIR区域的气流流速和ACH

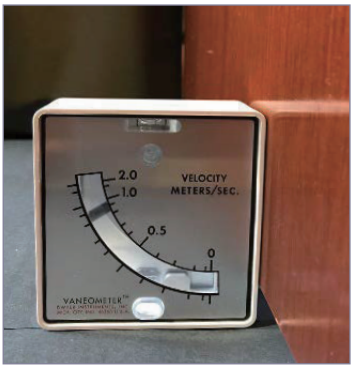
风速仪除了可用于 AIIR 内的检测外，还可用于测量诊所诊室或候诊室等其他场所的气流流速，从而计算气流量和 ACH。（具体测量方法和注意事项，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”和附录 A“室内空气清除时间计算工作表”。）

- 首先在房间正常使用条件下（包括：窗户和门的开关状态、风扇或 RAC 的使用情况、HVAC 系统的设定状态等）下确认**排风位置**。注意：实际的气流量和 ACH 计算需基于相同的环境条件。
- 测量所有排风口的尺寸以确定其面积。这些数据是计算 ACH 所必需的，需要记录在工作表中。如果房间存在多个排风口，则必须对所有排风口进行测量和计算。测算每个排风格栅的面积（见图 10A）。
- 将风速仪水平放置，使其与排风格栅平行（如图 10B 所示）。为确保测量结果具有代表性，需要先将格栅表面划分为若干个测量区域，然后在每个区域进行测量，最后计算所有测点的平均值，以确认气流速度在整个格栅表面的分布是否均匀。
  - 如果是通过开启的窗户或门进行排风，则可以将风速仪贴靠在窗框或门框上进行测量，即：将风速仪紧贴在门窗框的垂直或水平边缘，保持风速仪稳定不动。
  - 注：这些简单的旋叶式风速仪只能测量水平方向的气流速度，且测量范围仅限于 400ft/min（2m/sec）以内。如果排风口位于天花板上，则需要采用其他测量方法（如电子风速仪或风量罩）。
- 理想情况下，这些测量工作应由经过培训的设施工程师或 HVAC 专业人员执行。
- 气流流速和 ACH 的计算方法请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”和附录 A“室内空气清除时间计算工作表”。

图9：

风速仪

VaneometerTM 旋叶式风速仪显示气流从门下流入房间（从右向左），流速为0.85m/sec（170ft/min）。



来源：CITC

图10A：

测量排风格栅尺寸

来源：P. Jensen

图10B：

测量排风口处的气流速度

气流从房间内流向排风口（从右向左），设备显示的速度为140英尺/分钟（0.7米/秒）

来源：P. Jensen

将现有房间升级改造为 AIIR

本节介绍如何优化现有房间的通风特性，使其更适合用作AIIR。改造方法包括：

- **停用空气再循环系统：**第一步是确保房间内的污染空气不会直接循环到其他区域。从房间抽出的空气必须经过以下两种处理之一：直接排放到室外安全位置，或者经过 HEPA 滤芯或其他高效滤芯过滤。如果房间的排风目前连接到未配备 HEPA 滤芯或其他高效滤芯的循环空气系统，则应断开连接。
- **在现有回风系统中安装 HEPA 滤芯或其他高效滤芯：**理论上，可以考虑通过将现有滤芯更换为 HEPA 滤芯或其他高效滤芯来改造空气循环系统。然而，在那些未经专门设计的 HVAC 系统中安装这类滤芯通常是不可行的，因为 HEPA 滤芯或其他高效滤芯不仅体积通常大于普通过滤器，而且还需要更强大的风扇来克服气流阻力。有关各类滤芯的介绍，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“空气过滤器”一节。

升级或新建AIIR有两种基本方案：

- **首选方案是调整建筑物的 HVAC 系统，建立永久性的 AIIR。**
- **临时方案是加装带 HEPA 滤芯或其他高效滤芯的循环式 RAC，**用于补充甚至替代建筑物的 HVAC 系统。

房间密封措施：在对现有 AIIR 进行升级或将普通房间改造为 AIIR 时，需尽可能密封房间，减少空气渗入。原理是：在给定的排风量和送风量差值条件下，房间的密封性能越好，通过门底缝隙流入房间的气流量就越大，从而能够获得更好的负压效果。

具体的密封措施包括：

- 在房门的侧面和顶部安装密封条。
- 使用密封胶对窗玻璃与窗框之间的接缝进行密封处理。
- 在管线穿越天花板和墙壁的所有部位安装密封条，例如医疗设备的连接线路、照明装置的电线、水管和电气插座等的穿墙部位。
- 使用非多孔材料制成的天花板（如乙烯基材料面板或石膏板）替换原有的吸音天花板，并在天花板板材与支撑网格的连接处安装密封条和固定夹。最好采用整体式的石膏板或石膏天花板，而不是可拆卸式的天花板板材。
- 使用表面安装式灯具替换传统的嵌入式灯具。

有关 AIIR 的漏气问题和密封措施的详细讨论，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“负压：经空气传播感染隔离房间（AIIRs）”一节。

调整HVAC系统

如果房间目前尚未接入任何排风系统，则需要将其接入现有的排风系统，或安装新的排风系统。在开展这项工作之前，需要先联系建筑物设施部门，必要时聘请机械工程顾问来完成系统设计并对施工过程进行监督。

接入现有排风系统或安装新排风系统：如果附近有可接入的排风管道，则可以考虑在现有排风格栅处增设新的排风接口。否则，需要加装排风风扇和管道系统。

- 用于 AIIRs 的新排风管道以及新安装或现有的排风风扇，都必须参照新建 AIIRs 的要求粘贴相应的警示标签。

重新平衡现有的 HVAC 系统：为增加房间的排出气流流速和 / 或提升负压，需调整 HVAC 系统参数。同时可能还需要相应调整送入气流流速。气流的调节是通过调节风阀或其他控制装置来实现的。

调节风阀：风阀的作用类似于管道中控制流体流动的阀门，用于控制管道内的气流。风阀通常安装在天花板上方，调节需由专业人员进行。若要增加排出气流流速，需要加大通向房间的管道中风门的开度。风量平衡调试人员通常需要通过多次调试达成目标气流流速、压差及负压水平。

- 排出气流流速应能确保≥ 12 ACH。
- 送入气流流速应比排出气流流速低约 100 CFM（170m^3/hr）。但需满足：确保房间能获得至少每小时 2 次的新风换气，同时保持室内温湿度符合人员舒适要求。因此，根据实际情况可能需要增加或减少送风量。同样，根据房间的密封程度，可能需要增加排风量才能达到所需的压差（0.011 "w.g. 或 2.5Pa）。

大多数 AIIRs 并非采用独立的 HVAC 系统，多与建筑其他区域共用通风系统。因此，调整前后需检测相邻区域风量，避免对其他区域通风造成负面影响。

确保适当的空气混合和气流模式：在规划升级改造或装修工作时，需要评估房间内的空气混合效果和气流模式是否达到要求，从而评估室内空气的分布效果。初期评估及改造后验证时，通过烟雾可视化气流路径，识别死区或短路问题。

加装室内空气净化器（RAC）

当改造现有 HVAC 系统在经济性或时效性上不可行时，则可以考虑使用 RACs。RAC 是一种方便易用的设备，可以在多种场所中提供**“洁净”空气**。仅需基础工程知识即可完成安装维护。这些设备特别**适用于那些机械通风不足或完全没有机械通风、且改造预算有限的场所**。在 AIIRs 中使用 RACs 有两种方式：

- 增加房间 ACH（提供额外洁净空气）而不改变原有气压状态。
- 通过外排部分空气建立或增强房间负压。详见“案例研究 – AIIR：第 2 部分”。

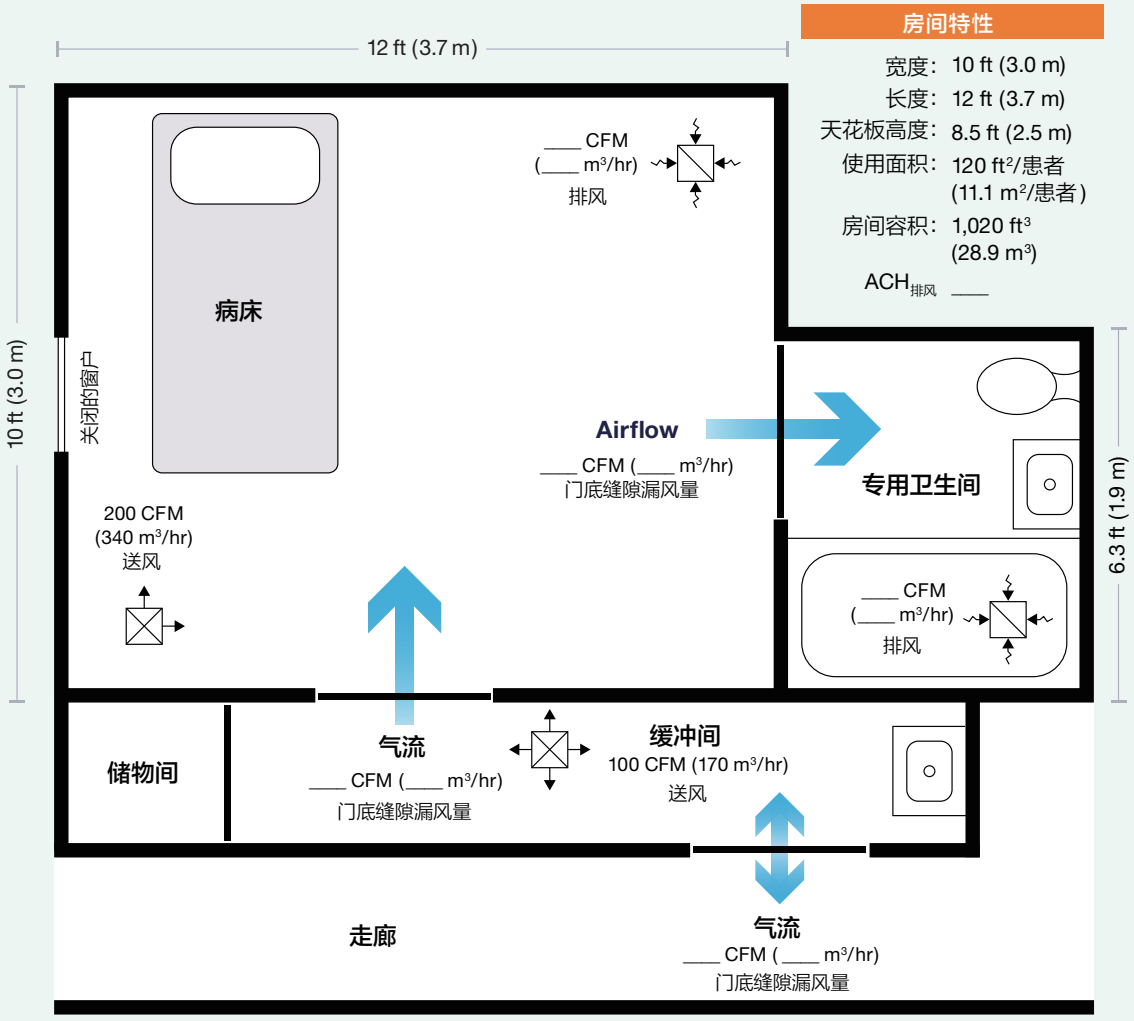
在选择 RAC 时，应以 CADR 作为主要参考指标，以确保满足通风策略的要求。CADR 是指空气净化设备（包括 RACs）向房间或空间输送经过净化的空气的流量。这个参数的测量单位可以是 ft^3/min（CFM）或立方米 / 小时（m^3/hr）。[9,10]

关于 RACs、CADR、根据房间大小选择合适的 RAC 的更多信息，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“室内空气净化器”一节。

案例研究

配备专用卫生间的AIIR

图 11. **配备缓冲间和专用卫生间的AIIR**



背景

本案例针对一个配备独立卫生间的AIIR进行排风系统改造安装。

参数

- AIIR 通过天花板上的送风散流器接收 200 CFM（340m^3/hr）的送风。
- 缓冲间通过其天花板上的送风散流器接收 100 CFM（170m^3/hr）的送风。
- AIIR（不含卫生间）的空间体积为 1020ft^3（10ft × 12ft × 8.5ft），即 28.9m^3（3.0m × 3.7m × 2.6m）。
- 卫生间的空间体积为 240ft^3（4.5ft × 6.3ft × 8.5ft），即 6.8m^3（1.4m × 1.9m × 2.5m）。卫生间所需的送风由 AIIR 提供。
- 假设没有其他空气进入 AIIR，则 ACH 送风为 12 次（[300 CFM × 60min/hr] ÷ 1,020ft^3）。
- 卫生间排风机目前故障，导致该区域无有效排风。

接下一页

接上一页

新增排风扇

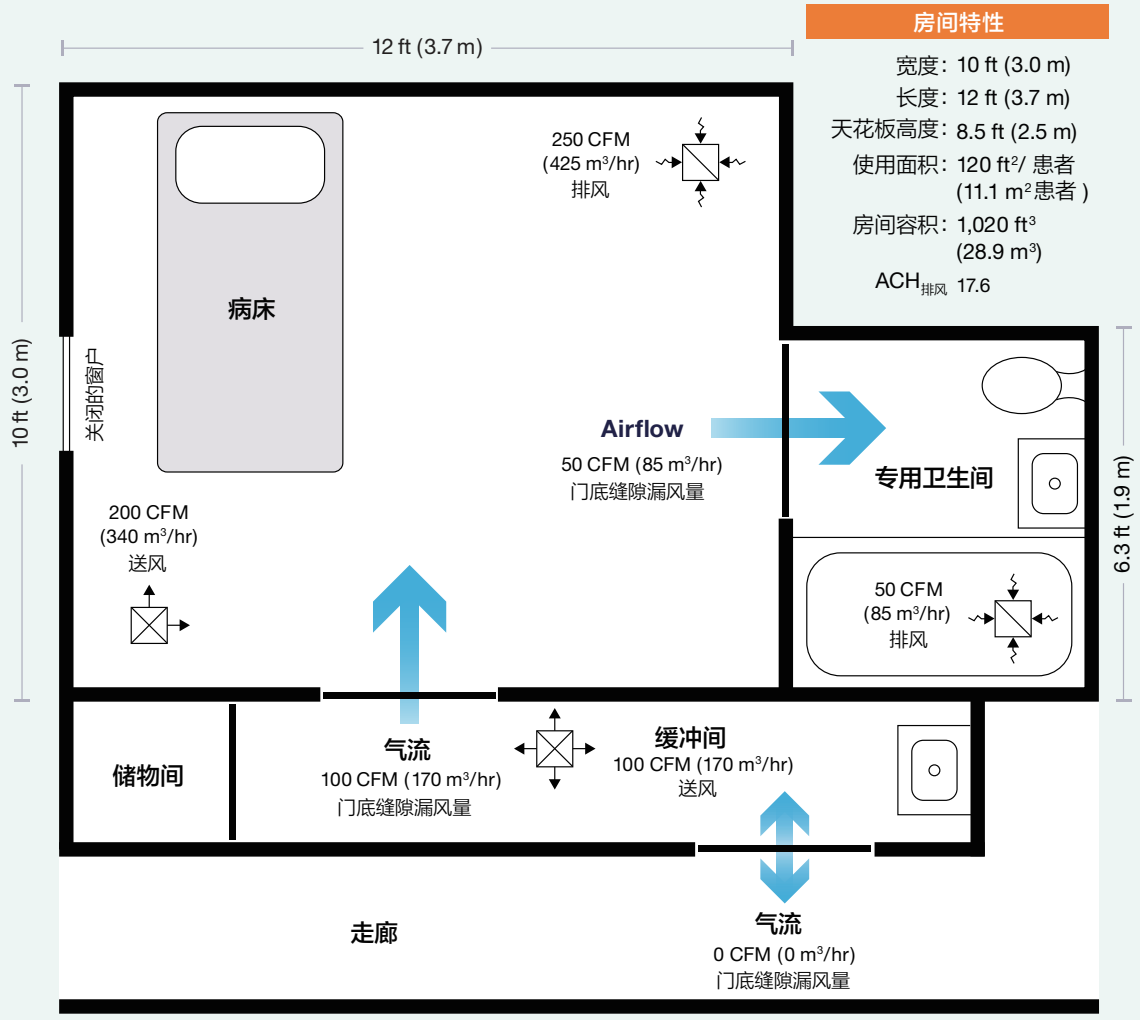
计划安装的新排风扇额定排风量为 300 CFM（510m^3/hr），将为整个 AIIR 单元（配备专用卫生间的 AIIR）提供排风。

> 当地法规规定卫生间的 ACH 不得低于 10 次；最低排风要求为 40 CFM（67m^3/hr）。

> 缓冲间通向走廊的门的四周均已安装气密性密封条，不会有空气从缓冲间泄漏到走廊。

问题：如何在AIIR和卫生间之间合理分配300 CFM（510m^3/hr）的总排风量?

图12：**配备缓冲间和独立卫生间的AIIR — 气流分配的最佳方案**



接下一页

案例研究

接上一页

- **说明：AIIR 内的总送风量与总排风量之间的气流差值应至少达到总送风量的 10%（即 300 CFM 的 10% 为 30 CFM），或至少达到 100 CFM（170m^3/hr）。**
- 根据最佳方案，AIIR 内实际形成的总气流差值为 100 CFM：
  - AIIR 的送风为 200 CFM
  - 从 AIIR 直接排出的排风为 250 CFM
  - 从卫生间排出的排风为 50 CFM
  - 总气流差值计算：（250 CFM + 50 CFM）− 200 CFM = 100 CFM
  - 100 CFM 的气流差通过从缓冲间流入 AIIR 的空气来补充。

选择依据

采用这种布局设计有两个优点：能在AIIR的门处形成100 CFM（170m^3/hr）的稳定气流差，同时保证经过房间的气流量保持平衡。

- 这个方案能确保 AIIR 内的排风始终大于送风，从而形成稳定的负压，并增强了朝向病床头部的气流。
- 符合特殊地区规范：直接从 AIIR 排出的风量（不包括卫生间的排风量）必须大于直接送入的风量。

计算过程

ACH_{AIIR} 等于进入房间的总气流量，同时也等于离开房间的总气流量。具体计算过程如下：

ACH_{AIIR} = (100 CFM 从缓冲间进入 + 200 CFM 从暖通空调系统送入) × 60min/hr ÷ 1,020ft^3

= 17.6 ACH_{AIIR}

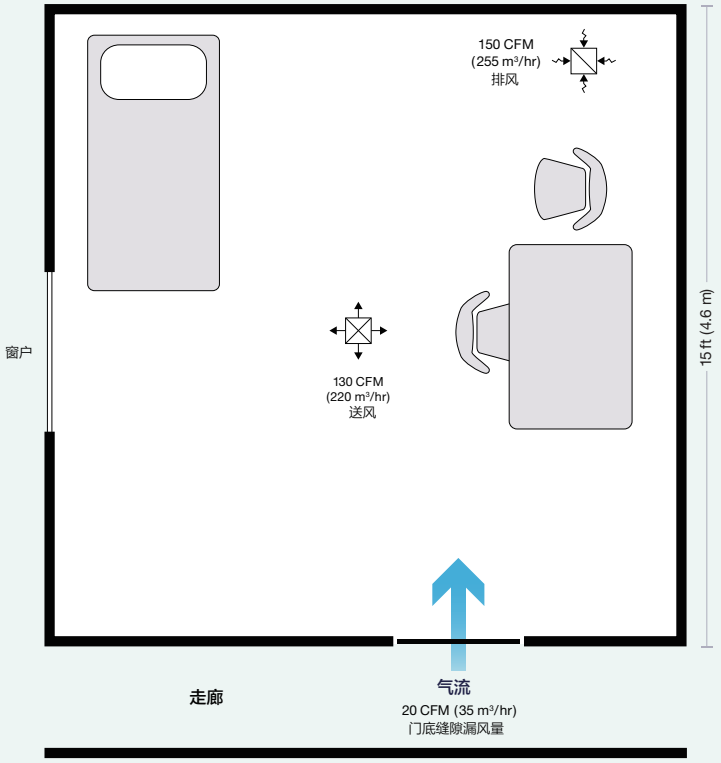
= (250 CFM 通过 AIIR 暖通空调系统排出 + 50 CFM 流向卫生间) * × 60min/hr ÷ 1,020ft^3

= 17.6 ACH_{AIIR}

注：该 AIIR 满足每小时至少换气 12 次的最低要求。[6]

AIIR：第1部分

图13：**为潜在和确诊结核病患者设置的诊疗室 — 原有HVAC系统设计方案**



背景

某结核病门诊的一名员工通过结核分枝杆菌特异性血液检测（γ 干扰素释放试验 [IGRA]）被诊断为结核潜伏感染。这名员工在缴费处工作，平时不接触患者。他在一年前入职时进行的基线 IGRA 检测结果为阴性。虽然他有糖尿病病史，但没有已知的结核病暴露史，也没有去过结核病高发地区旅行。这家结核病门诊设在一座较小的、单层的县级卫生机构办公建筑内。由于 IGRA 检测结果由阴性转为阳性，且找不到其他可能的暴露途径，这名员工怀疑自己是在工作场所感染的，因此向门诊主管珍妮特报告了这一情况。

评估

珍妮特对这一情况感到担忧，因为缴费处与用于隔离结核病患者的房间共用一条走廊。在确认该员工的主治医生未发现导致其 IGRA 检测结果转阳的其他潜在原因后，珍妮特怀疑可能是由于 AIIR 的环境控制措施失效导致了结核分枝杆菌的传播。

珍妮特用一张纸巾测试了 AIIR 的压力状态。测试结果显示，这个房间相对于走廊明显处于正压状态。她能感觉到从送风散流器吹出的气流。即使在清除了排风格栅上积累的大量灰尘后，空气仍然从 AIIR 流向走廊。当将纸巾贴在排风格栅上时，纸巾并未如预期那样被吸附在格栅表面。

县政府设施部门派出维护工程师辛西娅进行进一步调查。图 13 展示了该房间原有的 HVAC 系统设计方案。

接下一页

案例研究

接上一页

辛西娅回忆起约两年前她曾将这个房间改造成用于收治结核病患者的 AIIR。当时她对房间进行了密封处理，并在屋顶安装了一台小型专用排风扇。但现在检查时发现，这台风扇发出尖锐的噪声，且风扇电机表面温度很高。在更换了风扇和电机后，实测排风量达到了设计要求，即 150 CFM（250m^3/hr）。

测得房间的送风量（新风）为 130 CFM（220m^3/hr），比排风量少 20 CFM（35m^3/hr）。然而，一系列烟雾测试显示，此时房间处于中性压力状态而非负压状态，说明房间的实际漏气量超过了设计气流差的限值（15%）。这时辛西娅发现窗户并未完全关闭。在完全关闭窗户后，走廊里的空气开始流向 AIIR 内。

计算换气次数

这是一间正方形房间，边长为 15ft（4.6m），天花板高度为 8.5ft（2.6m）。ACH 的计算过程如下：

房间容积 = 15 ft x 15 ft x 8.5 ft
= **1,910 ft^3**

$$\mathbf{ACH_{AIIR}} \quad \frac{150\ \text{CFM} \times 60\ \text{min/hr}}{1910\ ft^3} = \mathbf{4.7}$$

珍妮特手下的工作人员每天对 AIIR 进行检测。他们发现：门下的气流流速逐渐降低，两周后房间相对于走廊变成了中性压力状态。这表明即使更换了排风扇，该 AIIR 仍不适合用作隔离用途，因为它无法持续保持相对于走廊的负压状态。

显然，必须采取进一步的改进措施。

问题： 应当采取哪些措施来确保AIIR持续保持负压状态？

答案请参见“案例研究 – AIIR：第2部分”。

AIIR：第2部分

计算所需的额外气流量

虽然门诊主管珍妮特希望使 AIIR 符合美国疾病预防控制中心的环境控制建议，但由于预算限制，无法安装新的 HVAC 系统。

工程师辛西娅建议采用一种经济可行的升级方案：增设一台配备 HEPA 滤芯的 RAC。这种设备不仅能提供额外的洁净空气，若将部分净化后的空气通过管道外排，还能进一步增强负压效果。

首先需要计算为达到要求的换气率而需要增加的气流量：

达到12ACH所需的气流量

$$\frac{1910\ ft^3 \times 12\ ACH}{60\ min/hr} = \mathbf{380\ CFM}$$

需要增加的气流量

= 380 CFM - 150 CFM

= **230 CFM**

选购和安装配备HEPA滤芯的RAC

需要选购一台能够提供至少 230 CFM（390m^3/hr）气流量、配备 HEPA 滤芯的 RAC。辛西娅联系了一家机械设备供应商，该供应商能够提供两种型号：较小的型号：额定气流量为 150–300 CFM（250–500m^3/hr）；较大的型号：额定气流量为 250–750 CFM（420–1,270m^3/hr）。这两种型号都配备多档风速调节开关，并可选配一个用于将部分或全部空气排至室外的接口。

珍妮特建议购买较小型号的 RAC 以节省成本。她认为，只要将其调至高速档，就能提供足够的额外气流。然而，辛西娅指出，这类设备在高速运转时噪声较大，使用者通常会将风速调低；而且，RACs 的实际气流往往低于制造商标称值。因此，辛西娅建议在计算时增加 50% 的安全系数，然后选择一台在低速或中速运转时就能达到所需气流的设备。较大型号的 RAC 在 HEPA 滤芯清洁的情况下有三档气流量设置：250、500 和 750 CFM（420、850 和 1270m^3/hr）。

室内空气净化器所需气流量计算 = 需要增加的气流量 + 安全系数

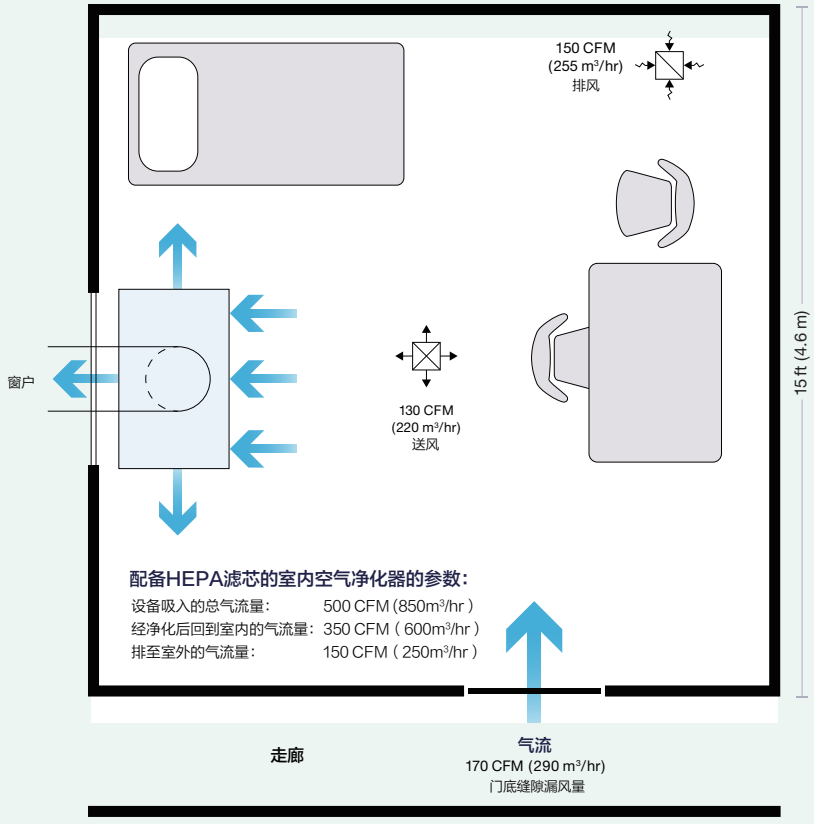
230 CFM + 50% = **345 CFM**

根据这一计算结果，他们选择了较大型号的 RAC。辛西娅用一块金属板替换了一块窗玻璃，并在金属板上开孔，用软管将 RAC 的出风口与开孔连接。她将设备的气流量调至约 500 CFM（850m^3/hr），并将其中约 150 CFM（250m^3/hr）的气流引导至室外排放。她将 RAC 放置在一个合适的位置，确保其排出的洁净空气能够与房间内的空气充分混合。具体布局参见图 14。

接下一页

接上一页

图14：**为潜在和确诊结核病患者设置的诊疗室 — 增设配备HEPA滤芯的RAC后**



在 HEPA 滤芯处于清洁状态时，ACH_{AIIR} 是 20（[房间排风 150 CFM +RAC 的 CADR500 CFM] x 60min/hr / 1910ft^3 = 20 ）。由于现有的排风系统性能较弱，而且随着空气污染物在 HEPA 滤芯的聚集，RAC 的气流流速会逐渐降低，因此在初始阶段设置较高的气流流速 /ACH 是一种合理的做法，这样可以确保 ACH_{AIIR} 始终保持在 12 以上。额外需要的空气（170 CFM [290m^3/hr]）将从走廊、通过门底缝隙流入。幸运的是，门底有 2in（50mm）高度的缝隙，从而避免了空气通过门底缝隙时产生“呼啸”声。

效果十分理想

改造后的房间相对于走廊明显处于负压状态，整体 ACH 得到显著提高，RAC 运行时的噪声水平也保持在可接受范围内。

珍妮特将 RAC 的维护工作纳入门诊的常规预算（包括按照制造商建议定期更换粗效滤芯和 HEPA 滤芯）。此外，她还更新了感染预防与控制方案，在其中增加了定期验证 RAC 性能的相关要求。

辛西娅最后的测量结果显示：RAC 从房间内吸入的总气流量约为 500 CFM（850m^3/hr），其中 150 CFM（250m^3/hr）排出至室外，其余 350 CFM（600m^3/hr）经过净化后重新流入室内。

接下一页

接上一页

问题：

这间AIIR应当多久验证一次负压状态?

室内有人驻留期间，应每天使用烟/雾进行验证；室内无人驻留期间，应每月验证一次。

应当多久验证一次气流流速?

每年至少验证一次，最好每半年验证一次。

哪些情况下应更换HEPA滤芯?

达到制造商建议的更换周期时，当气流流速降低到不可接受的水平时（如，房间仅能维持较弱的负压状态），或者当滤芯受损时，需要更换HEPA滤芯。

上层空间UVC是否可以替代RAC?

这个问题需要从两个方面来考虑：

可以替代：上层空间UVC在灭活空气中的结核分枝杆菌方面的效率不低于RAC，有时甚至更高。

不可替代：上层空间UVC不能提供或增强负压效果。

参考资源

美国疾病预防控制中心（CDC）

- 一般性指导，包括关于在结核病感染预防控制工作中使用负压的指导：
  《医疗卫生机构结核分枝杆菌传播预防指南》（Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-Care Settings），2005
  https://www.cdc.gov/mmwr/pdf/rr/rr5417.pdf
- AIIRs 相关指南：
  2019 年更新的《医疗卫生机构环境感染控制指南》（Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities），其中收录了美国疾病预防控制中心和医疗卫生感染控制实践咨询委员会（HICPAC）提供的专业建议
  https://www.cdc.gov/infection-control/media/pdfs/guideline-environmental-H.pdf

医疗设施指南学会（FGI）出版物：

- 《医院设计与建设指南》（Guidelines for Design and Construction of Hospitals）（2022 年版）
  https://shop.fgiguidelines.org/products/digital-2022-user-hospital
- 《门诊设施设计与建设指南》（Guidelines for Design and Construction of Outpatient Facilities）（2022 年版）
  https://shop.fgiguidelines.org/products/digital-2022-user-outpatient
- 《居住型医疗、护理和支持设施设计与建设指南》（Guidelines for Design and Construction of Residential Health, Care, and Support Facilities）（2022 年版）
  https://shop.fgiguidelines.org/products/digital-2022-user-residential

参考文献

1. Silva DS, Citro B, Volchenkov G, Gonzalez-Angulo L. Ethics and human rights considerations regarding involuntary isolation of people with TB. *Int J Tuberc Lung Dis.* 2020;24(5):15-20. doi:10.5588/ijtld.17.0879
2. ASHRAE. ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2021, *Ventilation of Health Care Facilities.* ASHRAE; 2021. https://store.accuristech.com/ashrae/standards/ashrae-170-2021?gateway_code=ashrae&product_id=2212971
3. Facility Guidelines Institute. *Guidelines for Design and Construction of Hospitals.* Facility Guidelines Institute; 2022. https://shop.fgiguidelines.org/products/15
4. Facility Guidelines Institute. *Guidelines for Design and Construction of Outpatient Facilities.* Facility Guidelines Institute; 2022. https://shop.fgiguidelines.org/products/17
5. Facility Guidelines Institute. *Guidelines for Design and Construction of Residential Health, Care, and Support Facilities.* Facility Guidelines Institute; 2022. https://shop.fgiguidelines.org/products/19
6. Jensen PA, Lambert LA, Iademarco MF, Ridzon R; CDC. Guidelines for preventing the transmission of Mycobacterium tuberculosis in health-care settings, 2005. *MMWR Recomm Rep.* 2005;54(RR-17):1-141. https://www.cdc.gov/mmwr/pdf/rr/rr5417.pdf
7. Pearson ML, Jereb JA, Frieden TR, et al. Nosocomial transmission of multidrug-resistant Mycobacterium tuberculosis. A risk to patients and health care workers. *Ann Intern Med.* 1992;117(3):191-196. doi:10.7326/0003-4819-117-3-191
8. ASHRAE. *ANSI/ASHRAE Standard 41.2-2018, Standard Methods for Air Velocity and Airflow Measurement.* ASHRAE; 2018. https://webstore.ansi.org/preview-pages/ASHRAE/preview_ANSI+ASHRAE+Standard+41.2-2018.pdf
9. Association of Home Appliance Manufacturers. *ANSI/AHAM AC-1-2006, Method for Measuring Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners.* Association of Home Appliance Manufacturers; 2006. https://webstore.ansi.org/preview-pages/AHAM/preview_ANSI+AHAM+AC-1-2006.pdf
10. Association of Home Appliance Manufacturers. ANSI/AHAM AC-5-2022, *Method for Assessing the Reduction Rate of Key Bioaerosols by Portable Air Cleaners Using an Aerobiology Test Chamber.* Association of Home Appliance Manufacturers; 2022. https://webstore.ansi.org/standards/aham/ansiahamac2022

UCSF
University of California
San Francisco

CURRY
INTERNATIONAL
TUBERCULOSIS
CENTER

5

诊所

引言……5.2

诊所的行政控制措施……5.3

- 诊所的结核感染预防与控制计划
- 机构的结核病风险评估和分级
- 结核病筛查方案

诊所的环境控制措施……5.8

- 机构环境控制措施描述

基于结核病风险的诊所环境控制措施……5.9

- 高风险操作的环境控制措施

诊所的呼吸防护措施…… 5.13

附录…… 5.15

- A. 美国疾病预防控制中心医务人员个人基线结核病风险评估表

参考资源…… 5.16

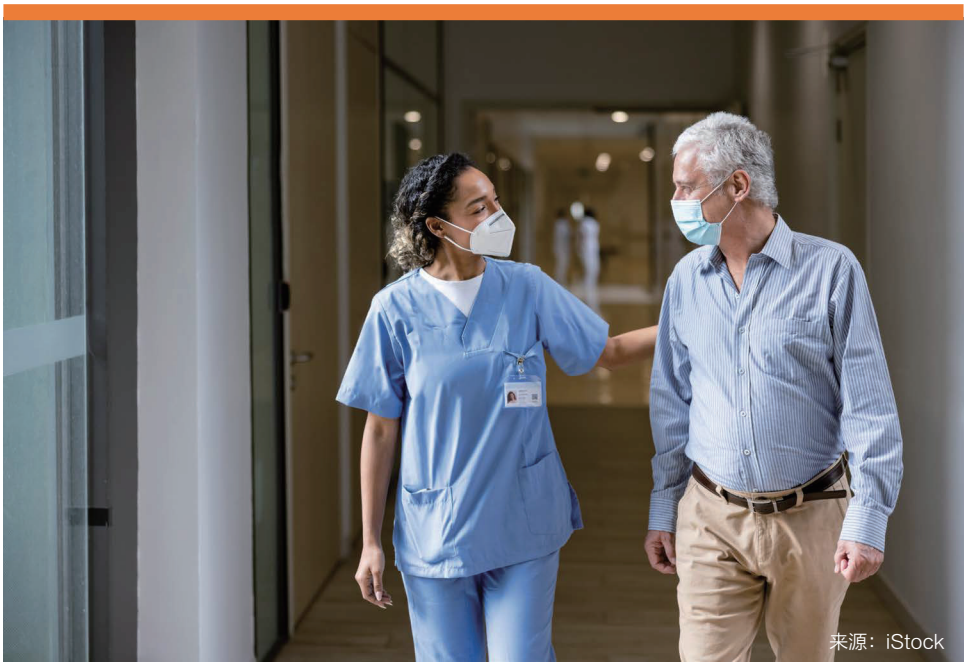
参考文献…… 5.19

引言

结核病高危人群在确诊和治疗前，通常会前往公共卫生诊所和社区诊所就医。这些诊所有可能成为结核病传播的高风险场所，其主要原因包括：结核病的高危人群在未确诊和未启动治疗时经常在这些场所就医；诊所的经费通常不足以支持进行场所改造或安装改进型通风系统；诊所工作团队中往往缺乏具备感染预防与控制、职业卫生或机械工程相关经验的专业人员。

本章将简要介绍诊所结核感染预防与控制工作。内容基于感染预防与控制的三级控制体系（即行政控制、环境控制和呼吸防护），本章将详细说明具体实践要点，并提供相关指南和工具的链接。

为降低结核暴露风险，诊所必须根据自身结核病的风险状况制定系统性的感染预防与控制计划，其内容必须包含相应的结核感染预防与控制措施。



来源：iStock

诊所的行政控制措施

在所有感染预防与控制措施中，**行政控制措施**的实施效果最为显著。作为感染预防与控制三级控制体系中的第一级，行政控制措施旨在降低人员暴露于传染性结核病患者和其他传染病患者的风险。虽然以下内容聚焦于结核感染预防与控制，但所讲述的预防控制原则同样适用于其他需要重点关注的经空气传播的传染性疾病。

医疗卫生机构的行政感染预防与控制规程应当契合该机构实际的结核病风险状况。**值得注意的是，对于美国境内的许多诊所而言，结核病风险可能较低，因此并非所有的结核感染预防与控制措施都适用**。

有关行政控制措施的详细信息，可参见第 1 章“行政控制”。

所有医疗卫生机构都应重点实施以下行政控制措施：

- 指定专人负责机构的感染预防与控制工作（包括结核感染预防与控制）
- 开展关于结核感染预防与控制的机构风险评估
- 根据机构的结核病风险水平和所提供的服务，制定相应的结核感染预防与控制计划
- 对员工进行基线结核病筛查和评估
- 对员工、患者、服务对象和访客开展感染预防与控制的培训和教育（涵盖结核感染预防与控制）
- 在机构内设置适当的标识并落实呼吸卫生措施（参见图 1）
- 执行分诊（“快速通道”）和经空气传播防护规程
- 确保对设备进行妥善清洁
- 与临床和实验室服务部门协作
- 与当地卫生部门合作以获取咨询和转诊服务，并了解和遵守相关监管要求

图1：

来源：改编自美国疾病预防控制中心“咳嗽时遮掩口鼻”（Cover Your Cough）标识

诊所的结核感染预防与控制计划

根据美国联邦或州职业安全与卫生管理局（OSHA）的结核病防控规定要求，相关单位必须制定书面结核感染预防与控制计划，并有效执行。

- 计划内容必须符合机构的实际情况，并可供员工随时查阅。
- 应每年评估一次结核感染预防与控制计划（作为整体感染预防与控制计划的组成部分）的有效性；在发生任何职业性结核感染后，也应进行此项评估。
- 每个机构还必须确保最终的感染预防与控制计划准确反映当前的结核病风险状况、临床实践和诊所的环境控制措施。

根据所提供的医疗服务类型，诊所的结核感染预防与控制计划应包含相关规程，以确保及时识别、隔离、评估和治疗可能患有结核病的人员。

由于各地区的法规要求不尽相同，**每个机构在最终确定其结核感染预防与控制计划前，都应查阅相关法规**。

- 参考州级和地方法规，并咨询当地 OSHA 办公室。具体联系方式可参见“参考资源”部分。

根据所提供的医疗服务类型，诊所的结核感染预防与控制计划应包含相关规程，以确保及时识别、隔离、评估和治疗可能患有结核病的人员。

- 如果诊所无法提供适当的结核病诊断检查和治疗服务，其感染预防与控制计划中必须包含以下内容：转诊政策和程序（包括结核病临床服务的联系方式）、向公共卫生部门报告结核病的有关要求，以及确保安全转运患者的适当医疗转诊流程。这些内容必须便于诊所工作人员随时查阅。
- 有关结核感染预防与控制计划的范例和模板，可参见第 1 章“行政控制”。

有关一般感染预防信息和感染预防与控制标准的网站链接，请参见“参考资源”部分。

机构的结核病风险评估和分级

评估机构内的结核分枝杆菌传播风险是制定感染预防与控制计划的第一步。

- **有关开展结核病风险评估的综合性参考资料**，可参见美国疾病预防控制中心 2005 年发布的《医疗卫生机构结核分枝杆菌传播预防指南》（Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health- Care Settings）。
  - **在机构年度感染预防与控制风险评估中纳入结核感染预防与控制风险评估**，有助于确定前一年是否出现过结核病防控方面的疏漏。

- 美国疾病预防控制中心 2005 年指南的附录 B 提供了一份适用于医疗卫生机构和非传统医疗卫生机构的**结核病风险评估工作表**。2019 年美国职业与环境医学学会和美国国家结核病联盟发布的配套实施指导文件的附录 1 对此作了更新说明。详见“参考资源”部分。
  - **机构的结核病风险**可分为**低风险、中等风险和潜在持续传播三个级别**。风险分级需要综合考虑机构内发生结核暴露的总体可能性，接触结核病患者的可能性、接触含结核分枝杆菌标本的可能性，以及过去一年中机构内是否出现过结核病人际传播的证据（表 1）。

表1: **机构结核病风险分级**

风险级别	说明
低风险	> 适用于预计不会接触结核病患者的场所。 > 在这类场所中不太可能暴露于结核分枝杆菌。
中等风险	> 在中等风险机构或场所，根据风险评估结果可以确定医务人员有可能接触结核病患者。 > “中等风险”也适用于医务人员或实验室人员因处理或收集临床标本而可能接触到含结核分枝杆菌标本的场所。
潜在持续传播	> 临时性分级，仅适用于在过去一年内出现人际结核病传播证据的场所。

来源：美国疾病预防控制中心《结核病核心课程：临床医生必备知识》第6章“结核感染控制”，2021年[1]

- 作为年度感染预防与控制计划审查工作的一项内容，机构必须对其风险级别进行再评估。这包括分析是否出现过导致结核病人际传播的员工结核暴露事件。如果出现过此类事件，需要审查可能导致结核暴露或传播的各种因素，并采取相应干预措施防止类似情况再次发生。
- 结核病风险评估还需要了解当地社区和 / 或州的结核病发病率情况。有关信息可参见“参考资源”部分，其中包含美国疾病预防控制中心每年更新的州 / 市级结核病发病率数据，以及美国国家结核病联盟（NTCA，2023 年前的全称是 National TB Controllers Association）提供的各州、大城市和地区结核病项目联系人名单。

结核病筛查方案

机构的感染预防与控制计划中应包含**员工结核病筛查方案**。根据美国疾病预防控制中心的定义，结核病筛查应当涵盖：个人结核病风险评估、症状评估、对没有既往结核感染或结核病记录的医务人员进行结核感染检测（使用 γ－干扰素释放试验 [IGRA] 或结核菌素皮肤试验），以及对结核检测结果阳性或出现结核病相关症状的医务人员开展进一步结核病检查。[2]

2005 年美国疾病预防控制中心指南 [3] 的 2019 年更新版 [2] 和 2020 年配套实施指导文件 [5] 对有关医务人员结核病筛查、检测和治疗的内容作出了重要修订。这些修订是基于一项系统综述的研究结果，该综述发现美国医务人员在基线检测和连续检测中的阳性率均较低。美国疾病预防控制中心的监测数据（1995–2007 年）也显示，美国医务人员的结核病发病率与普通人群相似。[4]

表 2 比较了 2005 年和 2019 年的建议：

表2：**结核病筛查、检测和治疗建议的更新要点**（改编自美国疾病预防控制中心《结核病核心课程：临床医生必备知识》第6章“结核感染控制”，2021年版）[1]

	2005年建议*	2019年建议： 主要变化**
筛查	• 建议对所有医务人员在入职 / 上岗前进行筛查 • 根据医疗卫生机构和场所的风险评估结果建议是否进行年度筛查	• 个人基线结核病风险评估（新增） • 除存在职业风险或持续暴露者，对其他大多数医务人员不再常规推荐进行年度筛查（新增）
暴露后检测	• 建议在发现暴露后对所有医务人员进行 IGRA 或结核菌素皮肤试验 • 如果首次检测结果为阴性，应在最后一次暴露后 8 至 10 周再次进行检测	• 无变化
结核检测阳性的处理	• 转诊以评估是否需要进行结核感染治疗 • 应根据美国疾病预防控制中心指南考虑进行结核感染治疗	• 强烈建议所有未治疗的结核感染医务人员接受治疗（新增重点建议） • 推荐采用短程方案（3–4 个月）而不是长程方案（6–9 个月），因为短程治疗更容易完成（新增）
结核病教育	• 建议所有医务人员每年接受教育 • 培训的深度和广度应根据工作职责和机构风险分级来确定	• 年度教育的内容应涵盖结核病风险因素、结核病体征和症状，以及结核感染预防与控制政策和程序（新增重点建议）

* 美国疾病预防控制中心2005年《医疗卫生机构结核分枝杆菌传播预防指南》（Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-Care Settings）[3]

** 该栏内容综合了2019年《美国医务人员结核病筛查、检测和治疗：美国国家结核病联盟和美国疾病预防控制中心的建议》（Tuberculosis Screening, Testing, and Treatment of U.S. Health Care Personnel: Recommendations from the National Tuberculosis Controllers Association and CDC）[2] 和2020年配套实施指导文件《美国医务人员结核病筛查、检测和治疗：美国职业与环境医学学会和美国国家结核病联盟关于落实2019年<发病率和死亡率周报>建议的联合工作组技术报告》（Tuberculosis Screening, Testing, and Treatment of US Health Care Personnel: ACOEM and NTCA Joint Task Force on Implementation of the 2019 MMWR Recommendations）的内容。[5]

医务人员结核病筛查指南的要点：

- 建议对所有医务人员在入职前进行基线筛查，但对大多数医务人员不再常规推荐进行年度筛查。
  - **如果基线检测进行的是结核菌素皮肤试验 (TST)，建议采用两步法。**两步法的目的是识别出那些很早前感染结核、但目前皮肤试验反应性已经减弱的人员。在基线检测阶段采用两步法，可避免将后续复查时出现的复强反应被错误的归类为新发感染。
  - **如果采用 IGRA，则无需进行两步法。**
  - 出现以下两种情况时，需要对医务人员进行重复筛查或检测：已确认发生结核暴露事件，或有证据显示场所内正在发生结核传播。
  - 对于结核病暴露风险较高的医务人员群体，可考虑开展连续筛查。这类高风险人员包括：肺科医生、呼吸治疗师、负责处理呼吸道标本的实验室工作人员等，特别是结核病高发地区的工作人员，或者其所在场所近期发生过或目前仍存在结核传播隐患的人员。但是，是否开展连续筛查的决定必须基于对当地结核病风险状况的具体分析。在做出这一决定前，强烈建议与当地结核病卫生部门进行充分磋商。[2]
  - 如果一名**低风险**且无症状的**人员检出阳性结果**，而该人员的个人风险评估结果显示其不太可能感染结核且疾病进展风险较低，则建议进行第二次检测（可选择进行 IGRA 或 TST）。有关结核病诊断检测（包括对低风险人群的检测）的更多信息，可参见 2017 年美国胸科学会、美国感染病学会和美国疾病预防控制中心联合发布的诊断指南。[6] 如果两次结核检测均呈阳性，则应认定检测结果已得到确认。如果**在结核暴露后出现新的阳性结果**，则无需重复检测，应直接开展进一步的临床评估。
- 作为国家消除结核病战略的一部分，鼓励更强调**对所有医务人员进行结核潜伏感染治疗**。目前已经有研究发现，医务人员对结核感染治疗的接受度和完成度参差不齐且普遍偏低。[7,8,9] 采用短程治疗方案有助于推进这一进程。
  - 有关结核感染短程治疗方案的详细信息，请参见美国疾病预防控制中心网站（链接见“参考资源”部分）。
  - 对于结核潜伏感染且未接受治疗的医务人员，必须每年进行症状评估并接受结核病相关教育。[5]

多种**个人结核病风险评估工具**可用于辅助和简化医务人员评估工作。其中一个样例见附录 A“美国疾病预防控制中心医务人员个人基线结核病风险评估表”。

- 有关医务人员结核病筛查和检测的更多信息，请访问美国疾病预防控制中心网站（链接见“参考资源”部分），其中涵盖以下具体内容：
  - 医务人员结核病筛查、检测和教育指南
  - 暴露后筛查和检测
  - 结核血液检测（IGRAs）
  - TST 和两步法检测
  - 个人结核病风险评估表

结核病评估、传染性和隔离

本手册不涉及如何评估临床可疑的活动性结核病病例以及如何基于传播风险决定启动或解除隔离的相关内容。关于结核病传播影响因素的进一步研究和分析、以及隔离指南的制定，相关机构正在进行中。有关结核病评估、传染性和隔离措施的更多信息，请参见“参考资源”部分。

各项目还应了解并遵守诊所所在地（包括州、地方和美国领地管辖区）的相关公共卫生法规要求。

诊所的环境控制措施

环境控制是结核病控制体系的第二级防护措施。可通过排出空气中含结核分枝杆菌的感染性颗粒物或采用杀菌灭活的方式降低结核病传播风险

有关具体环境控制措施的详细信息，请参见第 2 章“环境控制”和第 4 章“经空气传播感染隔离房间”。

机构环境控制措施描述

为了更好地了解和监测诊所已采取的感染预防与控制防护策略的实施情况，应定期开展现场巡查，确认环境控制系统是否正常运作。**需详细说明通风系统以及紫外线 C 波段照射杀菌装置（UVC，也称为紫外线照射杀菌装置 [UVGI]）或室内空气净化器 (RACs) 的使用情况。**该说明应作为机构感染预防与控制计划中环境控制部分的组成部分，同时也可作为诊所工作人员了解现有感染预防与控制措施的参考指南。

以下是环境控制系统详细说明的示例：

- 本诊所在以下接诊传染性结核病患者的区域采用单次通风系统（即空气不循环，送风 100% 来自室外，并且这些区域的所有空气均直接排至室外）：

房间位置：_____.

其他系统的示例如下：

  - 本诊所采用循环式中央供暖、制冷和空调 [HVAC] 系统，其中 ___% 的送风直接来自室外。

    注：如果同时采用 HVAC、RACs 和自然通风，则需分别说明每种系统的具体配置和使用方式。
  - 本诊所的中央通风系统采用过滤效率为 ___% 的过滤器（MERV _ 级滤芯）（相关参数说明请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”的附录 C，MERV 参数 ）。
- 诊所开放期间，恒温器风扇设置始终保持在“开启”状态，以确保空气的持续流动和过滤。

- 在以下房间 / 区域配备带有高效微粒空气过滤（HEPA）滤芯或其他高效滤芯的便携式 RACs：

  房间位置：_____.

- 在以下房间 / 区域配备带有 HEPA 滤芯或其他高效滤芯的固定式 RACs：

  房间位置：_____.

- 本诊所设有 AIIRs，用于隔离疑似或确诊的传染性结核病患者：

  房间位置：_____.

- 以下区域采用 UVC 作为通风和 RACs 的补充措施：

  房间位置：_____.

根据诊所的具体情况，可对上述环境控制措施进行调整和补充。

如果机构的风险评估结果或诊所内结核传播事件的调查结果表明需要**对环境控制措施进行大幅调整**，应咨询具有医疗卫生机构感染预防与控制专业经验的工程师或其他专业人员。某些情况下，可采用一些简单且经济有效的干预措施。更多详细信息和案例分析请参见第 2 章“环境控制”。

基于结核病风险的诊所环境控制措施

对于低风险诊所的环境控制建议见表 3，对于中等风险诊所或被列为可能存在持续传播的诊所的环境控制建议见表 4。

表3： **低风险诊所的环境控制措施**

区域	建议	说明
常规通风系统	• 通风系统最好采用 MERV 8 级别的滤芯（用于送风）或 MERV 13 级别的滤芯（用于循环空气）。如果无法实现，则应使用系统能够兼容且能保证最低气流流速的最高效率滤芯。[10,11,12,13] • 通常而言，每位室内人员的最低新风通风量应达到 15ft3/min（CFM）或每小时换气（ACH）2 次，取两者中的较大值。[14]	• MERV 13 级别滤芯能够去除 50% 以上的含结核分枝杆菌的感染性颗粒物。[15]
常规候诊区	• 应达到 12 ACH（包括 2 ACH 新风换气）。[3,13] • 必要时可使用配备 HEPA 滤芯或其他高效滤芯的 RACs 来提高有效 ACH。[3] • 可采用紫外线 C 波段（UVC）作为通风系统的补充措施。[3] • 空气应从清洁区域流向污染区域。[3]	• 在许多候诊区，可能会有尚未筛查或获得诊断的结核病患者。提高 ACH 可稀释潜在的感染性颗粒物浓度。 • 空气从工作人员区域（清洁区域）流向可能有结核病患者停留的区域（污染区域），有助于保障诊所工作人员的安全。
常规诊室或访谈室	• 建议至少达到 6 ACH（包括 2 ACH 新风换气）。[13] • 通风系统最好采用 MERV 8 级别的滤芯（用于送风）或 MERV [13] 级别的滤芯（用于循环空气）。如果无法实现，则应使用系统能够兼容且能保证最低气流流速的最高效率滤芯。[13] • 房间相对于相邻空间应保持中性压力或负压。[13]	
经空气传播感染隔离房间/诊室	• 低风险机构通常不需要设置。对于偶尔出现的疑似或确诊传染性结核病患者，可让其佩戴口罩，安置在配备 HEPA 滤芯或其他高效滤芯的 RACs 的密闭房间内，或引导其到指定的室外区域。	
痰液诱导	• 最好使用全封闭、有良好通风的痰液诱导亭。[3] • 如果没有痰液诱导亭，则用于痰液诱导的任何房间都必须满足针对 AIIR 的所有要求，包括：保持负压、至少 12 ACH，以及将空气直接排至室外或经 HEPA 过滤。[3] • 在使用痰液诱导亭或采集室期间，必须每天检查其负压状态。[3]	• 美国疾病预防控制中心的指南建议，为疑似或确诊结核病患者进行痰液诱导的场所应归类为中等风险级别。[3]

表4： **中等风险的诊所和可能存在持续传播诊所的环境控制措施**

区域	建议	说明
常规通风系统	• 通风系统最好采用 MERV 8 级别的滤芯（用于送风）或 MERV 13 级别的滤芯（用于循环空气）。如果无法实现，则应当使用系统能够兼容且能保证最低气流流速的最高效率滤芯。[10,11,12,13] • 通常而言，每位室内人员的最低新风通风量应达到 15ft3/min（CFM）或每小时换气（ACH）2 次，取两者中的较大值。[14]	• MERV 13 级别滤芯能够去除约 50% 以上的含结核分枝杆菌的感染性颗粒物。[15]
常规候诊区	• 建议至少达到 12 ACH（包括 2 ACH 新风换气）。[3,13] • 必要时可使用配备 HEPA 滤芯或其他高效滤芯的 RACs 来提高有效 ACH。[3] • 可采用紫外线 C 波段（UVC）作为通风系统的补充措施。[3] • 空气应从清洁区域流向污染区域。[3]	• 在许多候诊区，可能会有尚未筛查或获得诊断的结核病患者。提高 ACH 可稀释潜在的感染性颗粒物浓度。 • 空气从工作人员区域（清洁区域）流向可能有结核病患者停留的区域（污染区域）有助于保障诊所工作人员的安全。
中等风险候诊区（如放射科或肺科诊所的候诊区）	• 建议至少达到 12 ACH（包括 2 ACH 新风换气）。[13] • 必要时可使用配备 HEPA 滤芯或其他高效滤芯的 RACs 来提高有效 ACH。[3] • 可采用 UVC 作为通风系统的补充措施。[3] • 空气应从清洁区域流向污染区域。[3] • 房间应相对于相邻空间保持负压。[13] • 该区域的空气应直接排出，或者在回流前经过 HEPA 过滤。[3]	
常规诊室或访谈室	• 建议至少达到 6 ACH（包括 2 ACH 新风换气）。[13] • 通风系统最好采用 MERV 8 级别的滤芯（用于送风）或 MERV 13 级别的滤芯（用于循环空气）。如果无法实现，则应当使用系统能够兼容且能保证最低气流流速的最高效率滤芯。[13] • 房间相对于相邻空间应保持中性压力或负压。[13]	

表格接下一页 >

< 表格接上一页

区域	建议	说明
经空气传播感染隔离房间/诊室（AIIR）	• 建议中等风险诊所设置。 • 建议至少达到 12 ACH（包括 2 ACH 新风换气）。[13] • 空气应排至室外，或者在回流前经过 HEPA 过滤。[3] • 房间必须保持负压。[3] • 每月至少检查一次负压状态，在使用期间应每天检查一次。[3]	• 12 ACH 是美国疾病预防控制中心对新建或改造的 AIIRs 的最低通风要求。对于 1994 年之前建造的 AIIR，美国疾病预防控制中心允许 6 ACH，但建议“在可行的情况下”提高 到 12 ACH。注：6 ACH 可能无法满足当地监管要求。
痰液诱导	• 最好使用全封闭、有良好通风的痰液诱导亭。[3] • 如果没有痰液诱导亭，则用于痰液诱导的任何房间都必须满足针对 AIIR 的所有要求，包括：保持负压、12 ACH，以及将空气直接排至室外或经 HEPA 过滤。[3] • 在使用痰液诱导亭或采集室期间，必须每天检查其负压状态。[3]	• 美国疾病预防控制中心的指南建议，为疑似或确诊结核病患者进行痰液诱导的场所应归类为中等风险级别。[3]

高风险操作的环境控制措施

某些诊所可能开展痰液诱导或其他可能产生结核分枝杆菌气溶胶的咳嗽诱发操作，这些操作被视为高风险操作。在为疑似或确诊传染性结核病患者实施这些操作时，必须采取特殊防护措施以预防职业暴露。

诊所的感染预防与控制计划应明确规定：在为疑似或确诊传染性结核病患者实施高风险操作时，应采取哪些特殊防护措施来预防和有效减少职业暴露。表 5 列出了可采用的防护措施类型。诊所可以根据自身实际情况和技术条件，对表中所列的措施进行相应调整后将其纳入感染预防与控制计划之中。

表5: **为疑似或确诊传染性结核病患者实施高风险操作时的感染预防与控制措施**

高风险操作	感染预防与控制措施
痰液诱导或痰液采集 **气溶胶吸入治疗**	这些高风险操作必须在以下场所执行： > 带有局部排风通风的痰液诱导亭或诱导帐篷；或者 > 在12次ACH*的AIIR内进行，空气必须直接排至远离可开启的窗户、门和进风口的室外区域，否则排出的空气必须经过过滤；或者 > 如果没有诱导亭 / 帐篷和 AIIR，则在室外进行（仅限痰液采集）。
支气管镜检查、内窥镜检查 **呼吸道抽吸或插管**	> 在 12 ACH* 的 AIIR 内进行，空气必须直接排至远离可开启的窗户、门和进风口的室外区域，否则排出的空气必须经过 HEPA 或更高效率的过滤。
协助进行这些高风险操作的医务人员应佩戴N95或同等级别的防护口罩。	

* 对于1994年之前建造的设施，允许6ACH。

诊所的呼吸防护措施

个人防护装备的使用是结核病控制体系的第三级防护措施。自 2020 年新冠肺炎疫情暴发以来，人们对个人防护装备（包括 N95 防护口罩和外科 / 医学口罩）作为行政控制和环境控制措施辅助手段的作用有了更深入的认识。目前，大多数医疗卫生机构都已制定了针对经空气传播传染性疾病的呼吸防护装备使用规程。

有关使用个人防护装备进行结核病呼吸防护的更多详细信息，请参见第 3 章“个人防护装备”。

外科口罩：外科口罩旨在减少佩戴者呼出的感染性颗粒物的传播。应为疑似或确诊的传染性结核病患者提供外科口罩（在 AIIR 外使用），并向其讲授如何正确使用。

防护口罩：诊所工作人员应佩戴经美国国家职业安全卫生研究所认证的 N95 或同等级别的防护口罩，这类防护口罩旨在过滤佩戴者可吸入的感染性颗粒物。在以下情况下必须佩戴防护口罩：

- 在接触疑似或确诊结核病（或其他潜在经空气传播传染性疾病）患者时；
- 在进入曾有未佩戴口罩的疑似或确诊传染性结核病患者驻留过的房间（包括 AIIR）时，直至达到所需的空气清除时间，即空气中至少 99% 的污染物被清除为止。具体所需空气清除时间请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”的附录 A“室内空气清除时间计算工作表”。
- 在护送或陪同疑似或确诊传染性结核病患者前往其他区域进行检查时，或在密闭车辆内与之同行时，即使患者佩戴了外科口罩。

- 在执行高风险操作（如痰液诱导）时。

呼吸防护方案：如果机构的感染预防与控制计划要求使用防护口罩，则该机构必须制定一份包含书面标准操作规程的呼吸防护方案。该方案应涵盖以下内容：可用的防护口罩型号和尺寸、适合性测试规程、员工培训计划以及方案评估计划。

- 医务人员应进行适合性测试，以确定最适合佩戴者的防护口罩型号和尺寸。如果医务人员的面部特征发生明显变化（如体重大幅变化或面部毛发改变）、可能影响防护口罩密合性时，应重新进行测试。

有关制定呼吸防护方案计划的更多信息和指导，请参见“参考资源”部分列出的相关网站。

来源： iStock

附录A：

美国疾病预防控制中心医务人员：个人基线结核病风险评估表

医务人员

个人基线结核病风险评估表

医务人员如果存在以下任一情况（标记为“是”），则应被认为具有较高的结核病风险：

在结核病高发国家临时或永久居留达1个月或以上

除美国、加拿大、澳大利亚、新西兰以及北欧和西欧国家以外的所有国家。

是 ☐

否 ☐

或者

当前或预期免疫抑制情况

包括：人类免疫缺陷病毒（HIV）感染、已接受器官移植、接受肿瘤坏死因子-α拮抗剂（如英夫利昔单抗、依那西普等）治疗、长期使用糖皮质激素（剂量相当于泼尼松每天15毫克以上，持续时间达1个月以上），或使用其他免疫抑制药物

是 ☐

否 ☐

或者

自上一次结核检测后，曾与传染性结核病患者有过密切接触

是 ☐

否 ☐

个人风险评估信息可帮助解释结核病检测结果。（参见 Lewinsohn DM、Leonard MK、LoBue PA等人发表的《美国胸科学会/美国感染病学会/美国疾病预防控制中心临床实践指南：成人和儿童结核病诊断》(Official American Thoracic Society/Infectious Diseases Society of America/Centers for Disease Control and Prevention Clinical Practice Guidelines: Diagnosis of tuberculosis in adults and children. Clin Infec Dis 2017;64:111–5)）

本评估表改编自：加利福尼亚州卫生厅结核病控制处制定的风险评估表。

参考文献：Sosa LE, Njie GJ, Lobato MN, et al. Tuberculosis Screening, Testing, and Treatment of U.S. Health Care Personnel: Recommendations from the National Tuberculosis Controllers Association and CDC, 2019. MMWR Morb Mortal Wkly Rep 2019;68:439–43. https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/68/wr/mm6819a3.htm?s_cid=mm6819a3_w

TUBERCULOSIS TESTING + TREATMENT OF U.S. HEALTH CARE PERSONNEL

Centers for Disease Control and Prevention
National Center for HIV/AIDS, Viral Hepatitis, STD, and TB Prevention

https://www.cdc.gov/tb/topic/infectioncontrol/pdf/healthCareSettings-assessment.pdf

参考资源

行政控制措施

一般资源

- 多语种“咳嗽时遮掩口鼻”标识 – 美国疾病预防控制中心
  https://www.cdc.gov/flu/prevent/actions-prevent-flu.htm
- 州和地方法规 – 美国职业安全与卫生管理局 (OSHA) 各州办事处
  https://www.osha.gov/html/RAmap.html
- 州、大城市和地区结核病项目联系人名单 – 美国国家结核病联盟 (NTCA)
  https://www.tbcontrollers.org/community/statecityterritory/
- 结核病数据和统计资料 – 美国疾病预防控制中心
  https://www.cdc.gov/tb/statistics/default.htm
- 感染预防专业人员指南和资源 – 感染控制和流行病学专业人员协会 (APIC) 塞拉分会
  https://community.apic.org/sierra/resources/overview
- 感染预防与控制资源 – 联合委员会（The Joint Commission）
  https://www.jointcommission.org/resources/patient-safety-topics/infection-prevention-and-control/

结核病机构风险评估和分级

- 关于开展结核病风险评估的综合资源 – 美国疾病预防控制中心《医疗卫生机构结核分枝杆菌传播预防指南》(Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-Care Settings)，2005 年
  https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/rr5417a1.htm
  - 医疗卫生机构和非传统场所的结核病风险评估工作表（附录 B）
    https://www.cdc.gov/tb-healthcare-settings/hcp/facility-risk-assessment/index.html
    - 根据美国职业与环境医学学会与美国国家结核病联盟 2020 年配套文件附录 1 中提供的美国疾病预防控制中心 / 美国国家结核病联盟 2019 年发布的《结核病筛查、检测和治疗建议》，对 2005 年 CDC 指南附录 B 进行的更新说明
      https://links.lww.com/JOM/A780

结核病筛查、评估、传染性及隔离管理

- 概述：医疗卫生机构结核病专题页 – 美国疾病预防控制中心
  https://www.cdc.gov/tb-healthcare-settings/index.html
- 在结核病感染预防与控制概述中对传染性原理、结核病的检测和诊断以及解除经空气传播疾病的隔离原则简明阐述 – 美国疾病预防控制中心《结核病核心课程：临床医生必备知识》（Core Curriculum on Tuberculosis: What the Clinician Should Know）第 7 版（2021 年）第 6 章“结核感染控制”
  https://www.cdc.gov/tb/hcp/education/core-curriculum-on-tuberculosis-continuing-education.html
- 医务人员结核病筛查和检测 – 美国疾病预防控制中心
  https://www.cdc.gov/tb-healthcare-settings/hcp/screening-testing/
- 《美国医务人员结核病筛查、检测和治疗：美国国家结核病联盟和美国疾病预防控制中心的建议》（Tuberculosis Screening, Testing, and Treatment of U.S. Health Care Personnel: Recommendations from the National Tuberculosis Controllers Association and CDC），2019 年
  https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/68/wr/pdfs/mm6819a3-H.pdf
  - 配套实施文件：《美国医务人员结核病筛查、检测和治疗：美国职业与环境医学学会和 NTCA 关于落实 2019 年 < 发病率和死亡率周报 > 建议的联合工作组技术报告》（Tuberculosis Screening, Testing, and Treatment of US Health Care Personnel: ACOEM and NTCA Joint Task Force on Implementation of the 2019 MMWR Recommendations），2020 年 7 月
    https://acoem.org/acoem/media/PDF-Library/Publications/Tuberculosis_Screening,_Testing,_and_Treatment.pdf
- 《使用 γ– 干扰素释放试验检测结核分枝杆菌感染的更新指南 – 美国》（Updated Guidelines for Using Interferon Gamma Release Assays to Detect Mycobacterium tuberculosis Infection – United States）（2010 年）– 美国疾病预防控制中心
  https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/rr5905a1.htm
- 《关于根据 Cepheid Xpert MTB/RIF® 检测结果决定解除医疗卫生机构空气传播隔离的共识声明》（2016 年）– 美国国家结核病联盟和公共卫生实验室协会
  http://www.tbcontrollers.org/docs/resources/NTCA_APHL_GeneXpert_Consensus_Statement_Final.pdf
- 结核感染短程治疗方案 – 美国疾病预防控制中心《结核感染治疗方案》（Treatment Regimens for Latent TB Infection）
  https://www.cdc.gov/tb/topic/treatment/ltbi.htm

- 关于评估结核病患者传染性和使用结核菌素皮肤试验的基本综述（在结核感染预防与控制指南背景下）– 美国疾病预防控制中心《医疗卫生机构结核分枝杆菌传播预防指南》（Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health–Care Settings〕2005 年）。（关于使用 γ– 干扰素释放试验、常规诊断和治疗原则以及解除隔离的更新信息，请参见其他列出的资源。）
  https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/rr5417a1.htm
- 隔离政策指南更新 –NTCA
  https://academic.oup.com/cid/advance-article/doi/10.1093/cid/ciae199/7649400
- 结核病培训、教育和医疗咨询 – 美国疾病预防控制中心支持的结核病示范中心
  https://www.cdc.gov/tb-programs/php/about/tb-coe.html

呼吸防护

关于制定呼吸防护规划计划的相关资源

- 《工作场所呼吸防护：雇主指南》（Respiratory Protection in the Workplace: A Guide for Employers）（2021 年修订版）– 加利福尼亚州劳资关系厅，加利福尼亚州职业安全卫生管理局
  http://www.dir.ca.gov/dosh/dosh_publications/respiratory.pdf
- 呼吸防护电子工具 – 美国职业安全与卫生管理局
  http://www.osha.gov/SLTC/etools/respiratory/oshafiles/writtenprogram1.html

参考文献

1. Centers for Disease Control and Prevention. Chapter 6: Tuberculosis Infection Control. In: *Core Curriculum on Tuberculosis: What the Clinician Should Know*. 7th ed. Centers for Disease Control and Prevention; 2021. https://www.cdc.gov/tb/hcp/education/core-curriculum-on-tuberculosis.html
2. Sosa LE, Njie GJ, Lobato MN, et al. Tuberculosis screening, testing, and treatment of U.S. health care personnel: recommendations from the National Tuberculosis Controllers Association and CDC, 2019. *MMWR*. 2019;68:439–443. doi: http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm6819a3
3. Jensen PA, Lambert LA, Iademarco MF, Ridzon R; CDC. *Guidelines for preventing the transmission of Mycobacterium tuberculosis in health-care settings, 2005. MMWR* Recomm Rep. 2005;54(RR-17):1-141. https://www.cdc.gov/mmwr/pdf/rr/rr5417.pdf
4. Lambert LA, Pratt RH, Armstrong LR, Haddad MB. Tuberculosis among healthcare workers, United States, 1995–2007. *Infect Control Hosp Epidemiol*. 2012;33(11):1126-1131. doi:10.1086/668016
5. Thanassi W, Behrman AJ, Reves R, et al. Tuberculosis screening, testing, and treatment of US health care personnel: ACOEM and NTCA Joint Task Force on Implementation of the 2019 MMWR Recommendations. *J Occup Environ Med.* 2020;62(7):e355-e369. doi:10.1097/JOM.0000000000001904
6. Lewinsohn DM, Leonard MK, LoBue PA, et al. Official American Thoracic Society/Infectious Diseases Society of America/Centers for Disease Control and Prevention clinical practice guidelines: diagnosis of tuberculosis in adults and children. *Clin Infect Dis.* 2017;64(2):111-115. doi:10.1093/cid/ciw778
7. Camins BC, Bock N, Watkins DL, Blumberg HM. Acceptance of isoniazid preventive therapy by health care workers after tuberculin skin test conversion. *JAMA*. 1996;275(13):1013-1015. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8596233/
8. Swift MD, Molella RG, Vaughn AIS, et al. Determinants of latent tuberculosis treatment acceptance and completion in healthcare personnel. *Clin Infect Dis.* 2020;71(2):284-290. doi:10.1093/cid/ciz817
9. Bar-Meir M, Pariente G, Romem A, Wiener-Well Y. Identifying factors affecting latent tuberculosis treatment acceptance among healthcare workers: a retrospective analysis in a tertiary care centre. *BMJ Open.* 2021;11(9):e047444. doi:10.1136/bmjopen-2020-047444
10. Facility Guidelines Institute. *Guidelines for Design and Construction of Hospitals.* Facility Guidelines Institute; 2022. https://shop.fgiguidelines.org/products/15
11. Facility Guidelines Institute. *Guidelines for Design and Construction of Outpatient Facilities.* Facility Guidelines Institute; 2022. https://shop.fgiguidelines.org/products/17
12. Facility Guidelines Institute. *Guidelines for Design and Construction of Residential Health, Care, and Support Facilities.* Facility Guidelines Institute; 2022. https://shop.fgiguidelines.org/products/19
13. ASHRAE. *ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2017, Ventilation of Health Care Facilities.* ASHRAE; 2021. https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/standards-addenda/ansi-ashrae-ashe-standard-170-2017-ventilation-of-health-care-facilities
14. ASHRAE. *ANSI/ASHRAE 62.1-2022, Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality;* 2022. https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2
15. ASHRAE. *ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2017, Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size.* ASHRAE; 2017. https://store.accuristech.com/ashrae/standards/ashrae-52-2-2017?gateway_code=ashrae&product_id=1942059

UCSF
University of California
San Francisco

CURRY
INTERNATIONAL
TUBERCULOSIS
CENTER

6

流浪人员收容所

背景和需求概述……6.2

为什么结核病在流浪人员收容所是一个突出问题……6.4

降低流浪人员收容所内的结核传播风险……6.5

- 行政控制措施
- 环境控制措施
- 呼吸防护

参考资源…… 6.13

参考文献…… 6.15

背景和需求概述

流浪人员收容所在服务类型、服务对象和所使用的建筑设施等方面存在显著差异。

- 根据收容机构的服务性质，可将住宿类型分为以下几类：紧急收容住宿、过渡性收容住宿、快速再安置住宿和长期支持性住宿。
- 部分收容所仅为服务对象提供基本食宿，而另一些机构则在场所内提供多种服务，包括个案管理和药物依赖康复等服务。
- 部分收容所采用每日先到先得的方式安排住宿，每晚接待的都是不同的服务对象。还有一些收容所允许服务对象在机构内持续驻留最长 6 个月。
- 收容所使用的建筑设施差异很大：有改建的仓库或帐篷营地，可同时容纳 600 人住宿；也有独立的活动房屋，仅能容纳 4 人。各收容所在公共生活空间（如厨房、浴室、室内娱乐室）的配置和使用方式上也存在差异。
- 许多收容所专门服务成年男性。为女性、家庭或青少年提供服务的收容所数量相对较少。
- 各收容所的记录管理水平差异显著：有些完全没有建立记录系统，有些采用纸质记录，还有一些则使用电子信息管理系统。

正是由于存在上述差异，不同收容所面临的结核传播风险也各不相同。

2020 年新冠肺炎疫情暴发后，收容所等人员密集场所的感染预防与控制干预重新受到重视。这促使相关方加深了对这一问题的认识，并推动了国家指南的更新。[1]

在收容所内实施有效的感染预防与控制措施（尤其是针对结核病的措施）长期以来一直面临诸多挑战。1996 至 1998 年间，一位机械工程师对加利福尼亚州 19 家流浪人员收容所开展了现场评估。评估工作主要涵盖两个方面：一是评估通风系

统、过滤装置和紫外线设备（如果有的话）在降低结核传播风险方面的作用；二是通过与收容所管理人员和其他工作人员交流，了解他们对结核病控制措施的认知水平和实际操作能力。[2]

调查发现，流浪人员收容所在环境控制系统方面最常见的问题包括：

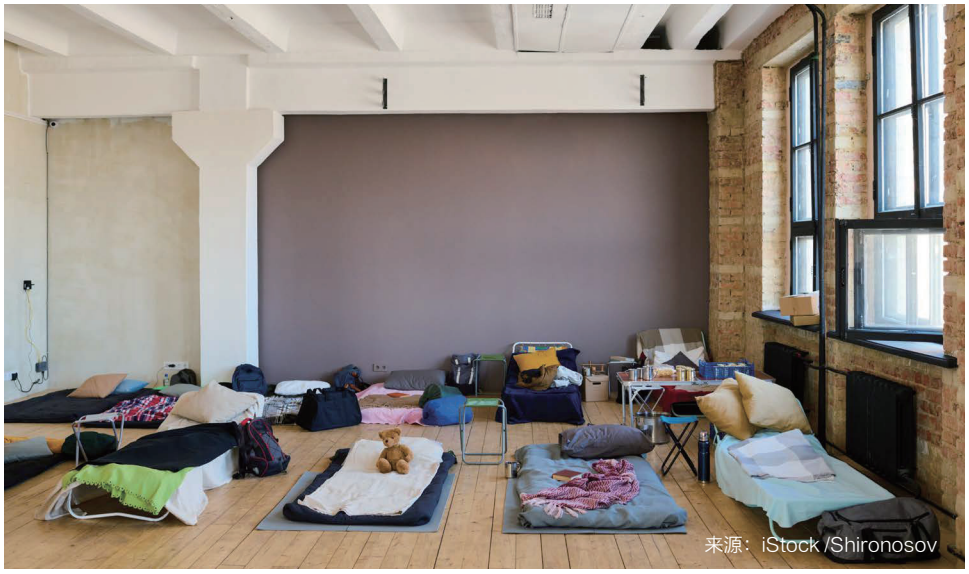
- 部分房间完全没有通风设施
- 通风设备已损坏
- 由于设备缺乏清洁维护等日常保养，导致暖通空调（HVAC）系统的运行效能低于设计能力
- HVAC 系统的空气过滤器数量不足或尺寸选择不当
- 紫外线 C 波段（UVC）照射杀菌灯（也称为紫外线照射杀菌（UVGI）灯）的设计和安装存在不当之处

调查还发现，以下因素阻碍了通风、过滤和UVC的有效使用：

- 收容所工作人员和管理人员对结核病及其传播途径缺乏认知
- 对通风、过滤和 UVC 在降低结核传播风险方面的作用缺乏认知
- 工作人员更替频繁且工作负荷过重
- 维护人员配备不足且维护预算有限
- 建筑物和机械 HVAC 系统年久失修
- 用于利用通风、过滤和 UVC 改善结核病控制的专项资金有限

每次评估完成后，相关机构都会收到一份书面报告，其中提出了降低收容所内结核传播风险的具体建议。这些建议包括可立即采取的零成本措施（如开启门窗通风），以及推荐对收容所通风设施进行的必要改造等措施。

本章将详细介绍收容所管理团队在结核病防控中面临的挑战，以及在这类场所降低结核传播风险的具体方法。


来源：iStock /Shironosov

为什么结核病在流浪人员收容所是一个突出问题

收容所内存在较高的结核传播风险。如果有服务对象患有传染性结核病，则可能使收容所工作人员和其他服务对象面临感染风险。收容所容易发生结核传播的原因如下：

- 流浪人员比一般人群更容易患结核病。
- 收容所的集体生活环境往往会增加结核传播的可能性（当存在结核病患者时）。

2022 年全美国报告的结核病病例中，约 4.8% 的患者在确诊前一年内曾经是流浪人员。[3] 过去二十年的数据显示，流浪人员的结核病发病率始终保持在非流浪人员结核病发病率的 10 倍以上。[4] 流浪人员相比一般人群而言更易患上结核病，这是因为他们存在多种结核病风险因素，[5] 包括：

- 与其他患有结核病的流浪人员接触
- 难以便利地获得现场医疗服务或医疗转诊服务
- 难以按要求进行医疗随访，也难以严格遵医嘱完成结核潜伏感染治疗
- 居所不固定（需要在不同收容所或其他临时住所之间频繁迁移）
- 存在物质滥用问题，尤其是注射毒品和酗酒问题
- 难以获得艾滋病相关教育和预防服务，这导致流浪人员群体中存在较多控制不良的 HIV 感染病例

结核和 HIV 合并感染人群的结核病病程发展更为迅速。由于流浪人员感染 HIV 的风险高于一般人群，一旦感染结核，其病情往往发展更快，并可能在被发现前就已传播给他人。而对流浪人员而言，解决基本生存需求（如获取食物、住所和确保人身安全）往往比预防结核和 HIV 更为紧迫。

收容所的环境特点使其易于发生结核传播。具体而言，这些场所普遍存在建筑物通风较差的问题，且服务对象被安置在拥挤的空间内，每晚需要在这种环境中驻留 8–12 小时。

促成结核传播的最主要因素是：大多数收容所未对服务对象开展结核病症状筛查。由于缺乏筛查，当服务对象出现结核病症状时：

- 无法获得医疗转诊和治疗；
- 不会与其他服务对象隔开，也不会被要求佩戴口罩以降低结核传播风险。

降低流浪人员收容所内的结核传播风险

尽管收容所内存在较高的结核传播风险，但通过采取适当措施可以显著降低这种风险。**所有收容所都应制定感染预防与控制计划**以防范结核传播。具体措施应从以下三个方面着手：

- 行政和工作实践控制措施
- 环境控制措施（包括通风、过滤和 UVC）
- 工作人员和服务对象正确使用呼吸防护装备

总体而言，行政控制措施和工作实践管控对预防结核病传播的效果最为显著，其次是通风、过滤和 UVC 的应用。在某些情况下，收容所工作人员使用防护口罩也很重要，例如：在转移疑似肺结核或喉结核患者时，或进入暂时安置此类服务对象的隔离房间时。当地结核病控制项目可以协助收容所评估其面临的风险，并制定相应的防控计划。

行政控制措施

收容所管理层和工作人员应采取以下控制措施：

- 在机构内指定一名健康事务专员，统筹结核病防控及其他健康相关活动。该专员的职责包括：订购和张贴教育宣传册和海报、组织结核病网络教学、开展或安排服务对象健康小组活动、参加社区结核病及其他健康事宜研讨会、分享卫生资源、为其他工作人员和服务对象提供健康咨询，并在必要时与卫生部门联系。
- 开展机构结核病风险评估。
  - 参见“参考资源”部分提供的美国疾病预防控制中心医疗卫生机构风险评估工作表样例。可根据实际情况进行修改和调整。

- 制定书面感染预防与控制计划，其中应明确规定服务对象筛查规程以及发现症状时的处理程序：
  - 应对所有进入收容所的服务对象系统开展结核病症状（及其他传染性呼吸系统疾病）筛查。同时向所有服务对象提供结核病症状相关信息，并告知他们在需要时如何获得医疗服务。
    - 在结核病高发地区，如果条件允许，建议在服务对象进入收容所时增加结核检测项目。理想情况下，应将筛查与预防性治疗项目相结合，确保发现的结核潜伏感染者能够完成预防性治疗。
  - 及时识别出现咳嗽（持续 3 周或更长时间）和一种或多种其他肺结核或喉结核症状的服务对象，这些症状包括：发热、寒战、盗汗、体重减轻、乏力、胸痛或咳血。若要进一步了解结核病体征和症状，见美国疾病预防控制中心的《结核病基本知识：体征和症状》（Basic TB Facts: Signs and Symptoms）。[6] 详见“参考资源”部分。
  - 在疑似结核病服务对象接受医学评估之前，应将其安置在单独房间内，使其与其他服务对象和工作人员隔开。
    - 考虑建立咳嗽记录系统，记录出现咳嗽症状（特别是夜间咳嗽）的服务对象及其床位。
  - 对出现一种或多种结核病症状的服务对象，应及时安排就医。医学评估应尽快进行，但有时可能需要等到第二天才能完成。应指导这些服务对象使用口罩遮掩口鼻以阻隔感染性颗粒物，并督导他们正确佩戴口罩。
  - 及时向公共卫生部门报告疑似或确诊的结核病病例。应确保工作人员能方便地查到最新的联系方式。
  - 在条件允许时，协助当地公共卫生部门为收容所服务对象提供结核潜伏感染和结核病诊疗服务；例如：提供就医交通协助和随访服务，为完成全程治疗的服务对象提供激励，以及协助服务对象配合公共卫生部门实施的直接面视下督导治疗（DOT），以确保服务对象按处方服用抗结核药物。
  - 如果开展结核病筛查或正式核查程序，应将服务对象的结核病核查记录纳入当地电子记录系统，例如住房与城市发展部流浪人员管理信息系统（如有）。记录系统应标记出未完成评估的病例。
  - 各州和地方关于收容所服务对象结核病筛查的指导方针可能存在差异，因此，应咨询当地结核病项目和 / 或公共卫生部门。相关结核病项目网站和联系方式见“参考资源”部分。
- 为服务对象提供随时可用的纸巾（或外科口罩），并指导他们在咳嗽和打喷嚏时遮掩口鼻。
- 通过张贴多语种标识和进行口头提醒，强化“咳嗽时遮掩口鼻”行为。相关多语种标识材料请参见“参考资源”部分。

- 尽可能增加相邻床位之间的距离，并采用头对脚而非头对头的排列方式。
- 应建立并维护访客记录和床位分布图（最好采用可搜索且可下载的电子格式）。这些记录对于卫生部门在收容所发生结核病暴发时开展接触者追踪或调查工作至关重要。
- 应对工作人员和服务对象开展结核病防控教育。相关培训材料样例和结核病基本知识，见“参考资源”部分。
- 建议对新入职员工和志愿者进行基线结核病筛查并记录筛查结果。美国疾病预防控制中心 2019 年发布的医务人员结核病筛查建议适用于收容所内设的诊所，也可供其他高风险人员密集场所参考。是否需要进行重复性结核病筛查或检测，应根据机构的风险评估结果和当地结核病患病率来确定。
  - 大多数情况下，尤其是在结核病患病率较低的地区，不推荐对工作人员进行年度结核病检查。
  - 关于医务人员结核病筛查的一般性建议和相关资源链接，请参见第 5 章“诊所”的“结核病筛查方案”一节。

注：对于正在接受活动性肺结核或喉结核评估的服务对象，或已确诊患有上述疾病的服务对象，流浪人员收容所不得收容，除非其主治医生明确宣布该服务对象不具有传染性。此规定不适用于结核潜伏感染者，即仅有结核检测（血液或皮肤试验）呈阳性、但无结核病症状、且当前无需进行结核病医学评估的服务对象。如需判定传染性风险，或需要协助安排替代住所或转诊至合适的医疗机构，请咨询当地公共卫生部门。

更多行政控制措施相关信息和资源链接，请参见“参考资源”部分，例如：

- 美国疾病预防控制中心《行政控制措施：流浪人员收容住宿机构结核病控制简明指南》（Administrative Controls: TB Control in Overnight Homeless Facilities Quick Reference Guide）
- 《收容所内结核病和其他空气传播疾病的预防：洛杉矶县各机构结核病及其他空气传播疾病预防与控制指南》（Preventing Tuberculosis and other Aerosol Transmittable Diseases in Shelters: A Guide for Preventing and Controlling TB and other Aerosol Transmissible Diseases in Los Angeles County Facilities）
- 简明工具包示例：《缅因州流浪人员收容所结核病预防与控制建议 – 工具包》（Tuberculosis Prevention and Control Recommendations for Homeless Shelters in Maine – Toolkit）

环境控制措施

这些措施可降低人员吸入含结核分枝杆菌空气的风险。有关这些措施的详细信息及其在预防结核传播方面的作用，请参见第 2 章“环境控制”。

- **通风**可向室内输送室外空气并将室内空气排至室外，借助稀释和清除作用降低结核传播风险。通风的方式包括自然通风（利用窗户、门、天窗和 / 或风扇）和机械通风（HVAC 或其他强制通风系统）。
- **循环空气过滤**可去除循环空气中的颗粒物。过滤等级有多种选择，HVAC 系统可配备一个或多个过滤器。在 HVAC 系统中使用合适的过滤器可进一步降低结核传播风险。
- **室内空气净化器 (RACs)** 可通过过滤或灭活空气中的结核分枝杆菌从而对 HVAC 系统形成有效补充。这类设备通常是独立运行的空气处理设备。
- **UVC 可通过电磁辐射有效杀灭或灭活空气中的结核分枝杆菌。**在结核病预防控制方面，UVC 装置主要有三种应用形式：管道内 UVC（在 HVAC 系统管道内安装 UVC 灯）、RAC 中的 UVC，以及上层空间 UVC（在房间上方安装 UVC 灯）。

应评估收容所现有环境控制系统的有效性，并根据需要进行改进。以下信息可帮助确定机构是否需要进行相关改进。

自然通风

对于未配备集中 HVAC 系统的房间，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的相关内容（包括“利用定向气流减少结核传播”、“自然通风”以及“风扇在自然通风中的应用”等章节），这些内容可以帮助您了解如何检查和改善自然通风、如何更有效地使用排风扇和独立风扇，以及自然通风和风扇相比其他通风方式的优缺点。

改善收容所自然通风的方法包括：

- 向所有有人员驻留的房间提供新鲜室外空气。
- 尽可能保持门、窗和天窗开启，并定期检查确保它们能够顺利开启。条件允许时，应使房间两侧墙面上的这些开口保持至少 10% 的开启度。
- 增设风扇以加强空气混合和定向气流。风扇的放置位置应确保能够观察到房间所有有人员驻留区域的气流运动，并尽可能保持风扇持续运转。但在某些情况下（如供暖季节），较明显的气流可能会令室内人员难以接受。
- 为不适应较大气流的服务对象提供额外的毯子，以便在室内有人员驻留期间仍能维持必要的通风。
- 如果在室内有人员驻留期间无法进行通风和使用风扇（由于噪音过大或造成令人难以接受的气流），则应在室内无人员驻留期间加强通风。例如，许多收容所在白天部分时段会关闭，可以利用这段时间开启门窗并让风扇高速运行，以便对宿舍进行充分换气。

自然通风的效果可能难以预测，且在寒冷气候地区可能不适用。如果是这样的情况，应考虑安装集中 HVAC 系统。

若要了解某流浪人员收容所主管如何改善其建筑物的自然通风，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“案例研究：自然通风和排风扇”。

集中HVAC系统

对于已安装集中 HVAC 系统的房间，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“暖通空调系统”一节。该节详细介绍了集中 HVAC 系统的各个组成部分、在控制结核传播方面的作用、需要检查哪些方面和如何改进，以及集中通风的优缺点。

如果正在考虑为新建或现有建筑物设计集中 HVAC 系统，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“现有 HVAC 系统的优化”和“新建 HVAC 系统的设计”。

改善收容所现有集中 HVAC 系统的方法包括：

- 在确保维持设计气流流速的前提下，使用更高效率的过滤器（如褶式滤芯）
- 设置室外空气进气口
- 将室外空气进气口调至完全开启位置
- 使用可编程温控器和 HVAC 系统联控方案，确保建筑在使用时段持续维持风机运转。
- 为未配备 HVAC 系统的有人员驻留房间提供自然通风；在 HVAC 系统发生故障或无法按设计要求运行时，为所有有人员驻留空间提供自然通风
- 在配备过滤器的 HVAC 系统中增设管道内 UVC 装置作为补充措施

此外，应定期检查每个 HVAC 系统及其服务的房间，并开展例行维护工作。若要改进集中HVAC系统，请参见第2章“环境控制：第1部分 – 通风”中的“HVAC系统的检查”一节，了解更多详细信息和具体检查内容。

要了解某流浪人员收容所主管如何运用这些理念并实施低成本通风改进措施，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“案例研究：HVAC 系统”。

HVAC系统空气过滤器

集中 HVAC 系统使用以下三种类型的过滤器：

- 初效过滤器（可去除大颗粒灰尘，但无法去除微小颗粒，如结核分枝杆菌）
- 褶式过滤器（美国暖通空调工程师学会 [ASHRAE] 最低效率报告值 [MERV] 标准：室外空气送风用 MERV 8，循环空气用 MERV 13）
- HEPA 过滤器或其他高效过滤器（仅限于专门设计的适配 HEPA 过滤器的 HVAC 系统）

褶式过滤器是最适用于许多循环空气系统（如流浪人员收容所使用的系统）的过滤器类型。五金店有适合大多数 HVAC 系统尺寸的现成褶式过滤器。这种过滤器比初效过滤器价格略高，且会产生更大的气流阻力，从而略微降低气流量。若要了解更多有关过滤器的信息，包括通风过滤器样例和过滤效率比较，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“空气过滤器”一节和表 3。

RAC空气过滤

配备 HEPA 滤芯或其他高效滤芯的 RACs 能够快速改善室内空气质量。这类设备特别适合那些 HVAC 系统不完善且缺乏升级改造资金的流浪人员收容所。

有关在收容所使用 RACs 的建议：

- 对于所有通风不足、且经常有服务对象进出的房间，配备带有 HEPA 滤芯或其他高效滤芯的便携式 RACs。
- 小型 RACs 应放置在离地面一定高度且靠近工作人员的位置，使其产生的“洁净空气”能够直接送达工作人员的呼吸位置。例如，如果洁净空气从设备前部排出，则理想放置位置是工作人员旁边的办公桌或文件柜上。在确定放置位置时，应首先将 RACs 视为洁净空气的供应装置，其清除室内污染空气的功能则是次要的考虑因素。
- 在人员密集的房间内应均匀布置这些装置，确保房间所有区域的空气均可有效流通。
- 在室内有服务对象驻留期间，应保持 RACs 持续运行，并在他们离开房间后还要继续运行大约 1 小时。

为确保 RACs 持续高效运行，应指定一名工作人员作为设备管理员，负责执行例行维护工作。该人员应了解 RACs 运行的基本原理，并制定滤芯更换计划。若要了解有关 RACs 的更多信息，包括如何选择合适的设备及其例行维护要求，请参见第 2 章“环境控制：第 1 部分 – 通风”中的“室内空气净化器（RACs）”一节。

UVC

收容所的 UVC 装置设计和安装工作必须由经验丰富的专业人员（如 UVC 装置制造商）完成。这类装置的安装和维护需要专业的知识和设备，可能需要投入大量资源。

对于同时服务于结核传播高风险区域和无风险区域的循环 HVAC 系统，管道内 UVC 是一个很好的选择。这种装置将 UVC 灯安装在空气管道内，其运行成本通常低于 100% 新风系统。当集中 HVAC 系统无法使用更高效率的过滤器时，管道内 UVC 尤其有用。但随着集中 HVAC 系统过滤效率的提高，管道内 UVC 的作用会相应降低。若要了解有关这类 UVC 装置的更多信息及其优缺点，请参见第 2 章“环境控制：第 2 部分 – 紫外线 C 波段（UVC）”中的“HVAC 系统中的空气照射（管道内 UVC）”一节。

上层空间 UVC 是一种专门技术，特别适合流浪人员收容所，但只能在特定房间使用。这种装置的 UVC 灯安装在墙壁上部或悬挂在天花板上（距地面至少 7ft 高），用于对上层空间的空气进行消毒。天花板高度低于 8ft 的房间不应安装 UVC 装置，以避免人员直视灯管（存在安全风险）或碰撞灯具。此外，在安装了上层空间 UVC 装置的房间内，除非天花板足够高且装置的安装位置与上铺使用者保持安全距离，否则不应使用双层床。

使用上层空间 UVC 时，必须执行下述例行检查：

- 应由专业人员使用配备适当 UVC 探测器的辐照计，检查潜在人员暴露区域的辐照水平。辐照水平必须低于美国疾病预防控制中心 / 国家职业安全卫生研究所（CDC/NIOSH）规定的推荐暴露限值（REL）。
- 如果发现任何位置的辐照水平过高，应立即关闭导致高辐照水平的灯具。可能需要在天花板和 / 或墙壁上涂抹非反光涂料以调整 UVC 装置的“光束”方向，和 / 或改变灯具位置或更换灯具以解决问题。
- 关闭灯管后检查灯管和装置，确保无灰尘和绒毛附着。
- 检查每个装置的辐照水平是否符合制造商推荐的标准。测量时可能需要使用防护服或特殊设备，以防止皮肤或眼睛过度暴露于 UVC 辐照。如果发现辐照水平低于制造商推荐的最低标准，应更换 UVC 灯管。

若要了解有关上层空间 UVC 的更多信息，包括如何判断房间是否适合安装、安装规划、例行维护要求，以及上层空间 UVC 的优缺点，请参见第 2 章“环境控制：第 2 部分 – 紫外线 C 波段（UVC）”中的“上层空间 UVC”一节。

呼吸防护

美国疾病预防控制中心 / 国家职业安全卫生研究所认证的防护口罩（如 N95）用于遮盖佩戴者（即医务人员）的口鼻。在结核病防控方面，防护口罩旨在将佩戴者吸入的含有结核分枝杆菌的感染性颗粒物减少至少 90%。

如第 3 章“个人防护装备”所述，美国疾病预防控制中心对于防护口罩有具体建议，美国职业安全卫生管理局（OSHA）也对工作人员使用防护口罩提出了相关要求。[7,8,9] 详见“参考资源”部分。

虽然收容所工作人员日常无需佩戴 N95 防护口罩，但需将其纳入机构呼吸道防护预案，以供工作人员在特定情况下使用。对于出现呼吸道症状的服务对象，应为其提供外科口罩。例如，如果收容所内有服务对象出现疾病症状且被认为可能患有结核病，在服务对象转往医疗机构进行评估之前，在其房间内近距离照护该服务对象的工作人员应佩戴 N95（或更高级别）防护口罩（如有）。同时应确保该服务对象佩戴外科口罩且遵守咳嗽礼仪规范。

若要了解更多信息，请咨询美国联邦职业安全卫生管理局或各州职业安全卫生管理局。详见“参考资源”部分。

来源：iStock

参考资源

行政控制措施

美国疾病预防控制中心（CDC）

- 医疗卫生机构风险评估工作表样例（可进行适应性改编）
  https://www.cdc.gov/tb-healthcare-settings/hcp/facility-risk-assessment/index.html
- 结核病体征和症状
  https://www.cdc.gov/tb/signs-symptoms/index.html
- “咳嗽时遮掩口鼻”标识
  英文版：https://www.cdc.gov/flu/pdf/protect/cdc_cough.pdf
  其他语言版本：https://www.health.state.mn.us/people/cyc/hcpposter.html

洛杉矶县公共卫生厅

- 《收容所内结核病和其他经空气传播疾病的预防：洛杉矶县各机构结核病及其他经空气传播疾病预防与控制指南》（Preventing Tuberculosis and other Aerosol Transmittable Diseases in Shelters: A Guide for Preventing and Controlling TB and other Aerosol Transmissible Diseases in Los Angeles County Facilities）
  http://ph.lacounty.gov/tb/docs/Shelterguidelines.pdf

缅因州卫生与公共服务厅卫生局

- 简明工具包示例:《缅因州流浪人员收容所结核病预防控制建议 – 工具包 》（Tuberculosis Prevention and Control Recommendations for Homeless Shelters in Maine – Toolkit）
  https://www.maine.gov/dhhs/mecdc/infectious-disease/epi/tuberculosis/documents/shelter-tool-kit.pdf#:~:text=If%20your%20shelter%20serves%20%E2%80%9Chigh%20risk%E2%80%9D%20guests%20%28See,special%20training%20in%20administering%20and%20reading%20skin%20tests

美国国家结核病联盟（NTCA）

- 关于收容所服务对象结核病筛查的州和地方指南
  https://www.tbcontrollers.org/community/statecityterritory/

防护口罩

美国职业安全卫生管理局（OSHA）

- 关于工作人员使用防护口罩的要求
  https://www.osha.gov/respiratory-protection/general#:~:text=General%20 Respiratory%20Protection%20Guidance%20for%20Employers%20 and%20Workers.,is%20needed%20for%20a%20respirator%20to%20 provide%20protection.
- 各州的方案
  https://www.osha.gov/stateplans

其他参考资源

美国疾病预防控制中心

- 结核病与流浪人员
  https://www.cdc.gov/tb/risk-factors/homelessness.html
- 《流浪人员服务场所及惩教和拘留机构新冠肺炎诊疗指南》（Guidance on Management of COVID-19 in Homeless Service Sites and in Correctional and Detention Facilities）
  https://archive.cdc.gov/#/results?q=https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/homeless-correctional-settings.html&start=0&rows=10&url=https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/homeless-correctional-settings.html

柯里国际结核病中心 / 加利福尼亚大学旧金山分校

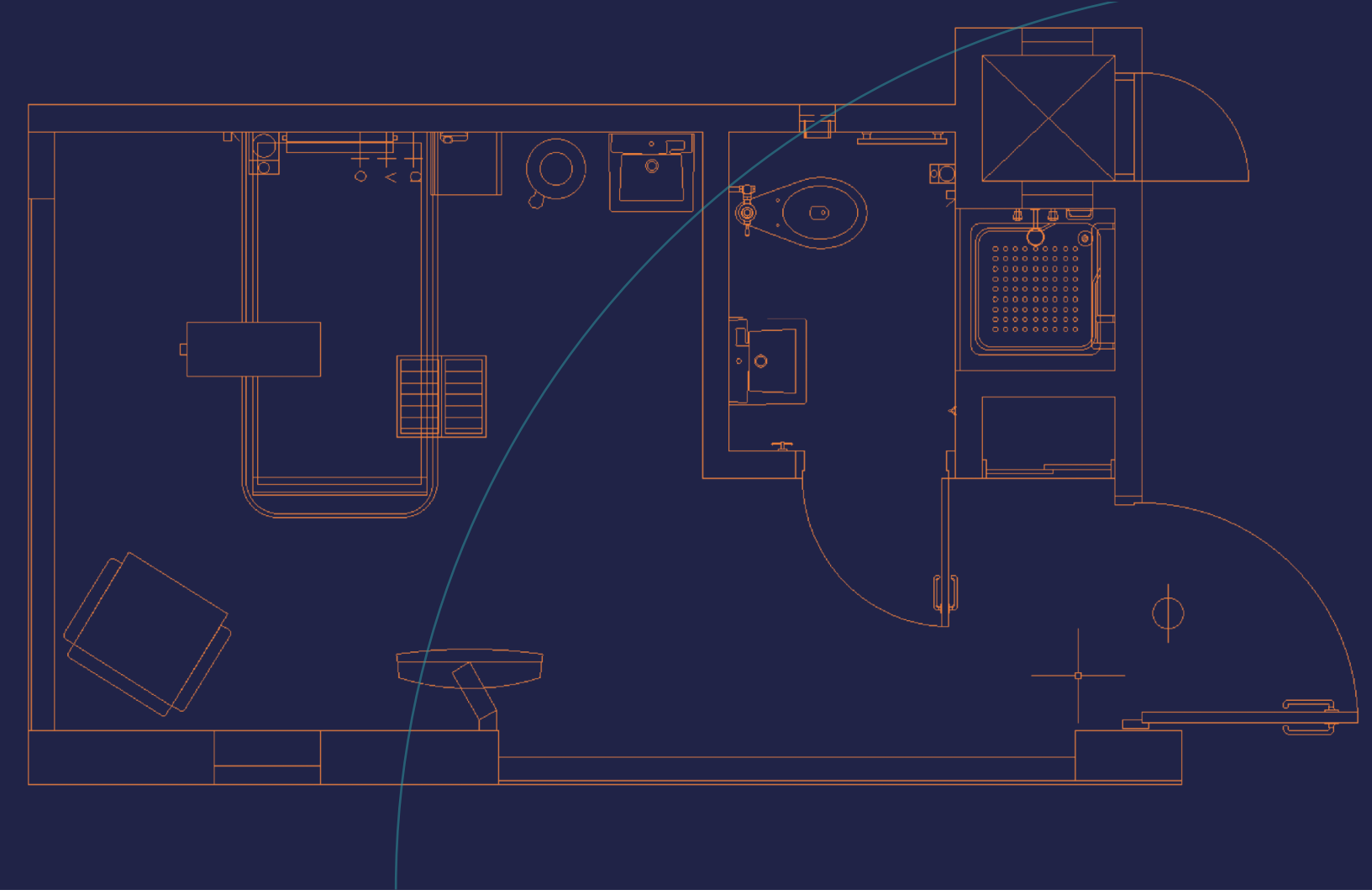
- 《流浪人员与结核病工具包》（材料、资源、演示文稿数据库）
  https://www.currytbcenter.ucsf.edu/products/view/homelessness-and-tb-toolkit
- 《收容所与结核病：工作人员必备知识》（Shelters and TB: What Staff Need to Know）第二版（视频配套指南）
  https://www.currytbcenter.ucsf.edu/sites/default/files/shelters_and_tb_viewers_guide.pdf

《公共卫生报告》（Public Health Reports）2023年文章

- 《美国流浪人员结核病诊断、治疗和预防：当前建议》（Diagnosis, Treatment, and Prevention of Tuberculosis Among People Experiencing Homelessness in the United States: Current Recommendations）
  https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/00333549221148173

参考文献

1. Centers for Disease Control and Prevention. Guidance on Management of COVID-19 in Homeless Service Sites and in Correctional and Detention Facilities. Published May 11, 2023. Accessed November 17, 2023. https://archive.cdc.gov/#/details?q=https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/homeless-correctional-settings.html&start=0&rows=10&url=https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/homeless-correctional-settings.html
2. Francis J. Curry National Tuberculosis Center, Institutional Consultation Services, and California Department of Health Services. *TB in Homeless Shelters: Reducing the Risk through Ventilation, Filters, and UV.* 2000.
3. Schildknecht KR, Pratt RH, Feng PI, Price SF, Self JL. Tuberculosis – United States, 2022. *MMWR.* 2023;72(12):297-303. Published 2023 Mar 24. doi:10.15585/mmwr.mm7212a1
4. Marks SM, Self JL, Venkatappa T, et al. Diagnosis, treatment, and prevention of tuberculosis among people experiencing homelessness in the United States: current recommendations [published online ahead of print, 2023 Jan 26]. *Public Health Rep.* 2023;333549221148173. doi:10.1177/00333549221148173
5. Haddad MB, Wilson TW, Ijaz K, Marks SM, Moore M. Tuberculosis and homelessness in the United States, 1994-2003. *JAMA*. 2005;293(22):2762-2766. doi:10.1001/jama.293.22.2762
6. Centers for Disease Control and Prevention. Basic TB Facts: Signs & Symptoms. Published February 14, 2023. Accessed November 17, 2023. https://www.cdc.gov/tb/signs-symptoms/index.html
7. Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety & Health. Types of Respiratory Protection. Published September 3, 2021. Accessed November 17, 2023. https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/disp_part/respsourceTypes.html
8. Jensen PA, Lambert LA, Iademarco MF, Ridzon R; CDC. Guidelines for preventing the transmission of Mycobacterium tuberculosis in health-care settings, 2005. *MMWR Recomm Rep*. 2005;54(RR-17):1-141. Accessed November 17, 2023. https://www.cdc.gov/mmwr/pdf/rr/rr5417.pdf
9. Occupational Safety and Health Administration. Respiratory Protection - General Guidance. Accessed November 17, 2023. https://www.osha.gov/respiratory-protection/general



UCSF
University of California
San Francisco
加利福尼亚大学
旧金山分校

CURRY
INTERNATIONAL
TUBERCULOSIS
CENTER
柯里国际结核病中心
（CITC）

www.currytbcenter.ucsf.edu

柯里国际结核病中心（CITC）是美国加利福尼亚大学旧金山分校的一个项目，由美国疾病预防控制中心（CDC）资助。