



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Coronavirus Disease 2019—Article

## 适应性贴附通风——负压呼吸性传染病隔离病房有效性的比较研究

张莹<sup>a,b</sup>, 韩欧<sup>a</sup>, 李安桂<sup>a,b,c,\*</sup>, 侯立安<sup>a,\*</sup>, Thomas Olofsson<sup>b</sup>, 张林华<sup>c</sup>, 雷文君<sup>c</sup>

<sup>a</sup> School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

<sup>b</sup> Department of Applied Physics and Electronics, Umeå University, Umeå SE 90187, Sweden

<sup>c</sup> School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 6 May 2020

Revised 24 August 2020

Accepted 14 September 2020

Available online 23 January 2021

#### 关键词

通风效率

换气率

COVID-19

贴附通风

气流组织

隔离病房

### 摘要

新型冠状病毒的传播给隔离病房的室内环境控制提出了挑战。科学的气流组织设计和运行管理是保证医护人员环境安全的关键。本文提出了适应性贴附通风在隔离病房的应用,并从污染物扩散、去除效率、热舒适性和运行费用等方面对这种送风方式进行了评估。适应性贴附通风将新鲜空气直接、较好地供应至医护人员工作区。与顶送风或侧壁上送风相比,在相同的污染物释放率和房间换气次数(ACH;  $10 \text{ h}^{-1}$ )条件下,适应性贴附通风的污染物平均浓度降低了15%~47%。理想的混合通风的污染物去除效率不能超过1.0。对于适应性贴附通风,污染物去除效率是换气次数的指数函数。与顶送风模式或侧壁上送风模式相比,适应性贴附通风可实现相似的热舒适水平[预测平均评价(PMV)为-0.1~0.4;吹风感为2.5%~6.7%],且以较低的换气次数和能耗获得相似去除污染物的性能。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

在传染病如新型冠状病毒肺炎(COVID-19,简称新冠肺炎)、中东呼吸综合征(MERS)或严重急性呼吸综合征(SARS)流行期间,患者与医护人员之间的传播风险大大增加。据报道,飞沫传播及密切接触是新冠肺炎病毒的主要传播途径[1]。此外,根据在密闭空间的临床观察,气溶胶扩散被认为是另一种重要的传播途径[2-3]。一项回顾性队列研究表明,空气传播可能在SARS病毒的传播中发挥了重要作用[4-5]。许多其他病毒,如鼻病毒、流感病毒和腺病毒都是通过空气传播的[6-7]。除了采取个人防护措施(即防护服、医用口罩、护目镜等)和清洁

消毒措施(即洗手、表面清洁和消毒)外,还应强调空气呼吸性传染病隔离病房的气流组织[4,8-9]。

呼吸性传染病隔离病房应该尽可能减小病房内医护人员的职业暴露,降低病房外其他人员接触病毒传播媒介的可能性。换气次数(ACH)和气流组织形式是降低医院建筑物中污染物浓度的重要因素[10-11]。换气次数通常用于衡量送风在整个房间内分布的速度[12]。许多研究表明,较低的换气次数会增加空气中交叉感染的风险[13-14]。在研究中,一般采用的换气次数范围是 $3 \sim 29.9 \text{ h}^{-1}$ [15-17]。根据不同国家的法规和世界卫生组织(WHO)的建议,换气次数的范围为 $6 \sim 15 \text{ h}^{-1}$ [12,18-23]。也有现场试验研究表明,新建的隔离病房并不都符合 $12 \text{ h}^{-1}$ 的换

\* Corresponding authors.

E-mail addresses: [liag@xauat.edu.cn](mailto:liag@xauat.edu.cn) (A. Li), [houlia678@hotmail.com](mailto:houlia678@hotmail.com) (L. Hou).

气次数，测试研究中心多达21% (3/14) 的隔离病房违反了对现有建筑换气次数  $6 \text{ h}^{-1}$  的最低要求[24]。使用较低的换气次数是为了节约运行用能[25–26]。换气次数的概念是将房间作为一个整体，描述其通风状况，并假设送风在整个空间中完全混合。然而，通风房间内空气的混合程度取决于室内气流组织形式。

建筑环境有许多不同的气流组织形式[27]。呼吸性传染病隔离病房气流组织的一般原则是实现并保持新鲜空气从清洁区域到非清洁区域的定向气流流动[28–29]，并将排气口尽可能设置在靠近污染源的位置[12]。建筑环境中的气流组织形式主要由送风口和排风口的位置决定，并与换气次数相关的雷诺数 ( $Re$ )、送风状况下的阿基米德数 ( $Ar$ ) [26]，以及其他潜在的混杂因素相关。在室内空气完全混合的条件下，基于混合通风，通常采用顶送风和侧壁上送风模式[15,17]。混合通风的概念最初是考虑房间内人员热舒适性提出的[26]，因此不能有效提升吸入空气质量[30–31]，尤其是室内有空气污染源的情况下，比如存在呼吸性传染源[32]。置换通风是利用室内热源产生的浮力实现的[33]。置换通风房间中的污染物组织取决于污染源的位置及其与热源的关系[27]。由于空气可直接、较好地供应到医护人员工作区，因此换气次数受到限制，以避免产生人体不适感。因此，课题组有机结合了混合通风、置换通风和冲击射流的优点，提出了贴附通风。送风射流的高动量可以通过墙壁维持，并且由撞击获得可接受的空气速度，以到达医护人员工作区。这一概念的背景机制是扩展康达效应 (Coanda-Li effect) [27,34]，是一种射

流在撞击后继续附着在凹凸表面复合体的趋势[35]。

本文根据呼吸性传染病隔离病房的要求，将贴附通风的概念扩展为一种工作区高度适应性形式。将贴附通风中射流撞击区扩展至医护人员工作区。在下面的讨论中，本文评估了适应性贴附通风的性能，并与两种传统送风模式 (顶送风和侧壁上送风) 进行了比较。同时，考虑了恒定的和瞬态的空气污染源。计算了不同气流组织形式下的去除效率和送风量的有效性和可行性。

## 2. 适应性贴附通风理论模型

适应性贴附通风是基于竖壁贴附通风的一种变工作区调控模式，气流结构如图1所示。适应性贴附通风表现为当靠近壁面的等温射流从送风口流出后，射流发生偏转，贴附墙壁表面向下流动，碰撞后转向的流动。撞击区是分离点和再贴附点 (再贴附点与滞止点重合) 之间的区域，其压力接近环境压力。在撞击区下游，静压增加并达到最大值。利用恢复的静压，射流克服壁面阻力进行水平移动。撞击地面后，描述射流运动特征的关键是确定虚拟原点[36]，其由扩展康达效应决定，该效应还决定了水平射流范围  $s_h$  和送风的轴心速度衰减  $v_{\max}/v_0$  ( $v_0$  是送风口的初始速度)。轴心速度衰减的最终结果是达到工作区的设计空气速度。关于虚拟原点和扩展康达效应的理论与实验研究可以在参考文献[35,37]中找到。

尽管送风射流在通风中起着主导作用，但仍有许多潜在的混杂因素，如污染源、热浮力、气流路径上的障碍

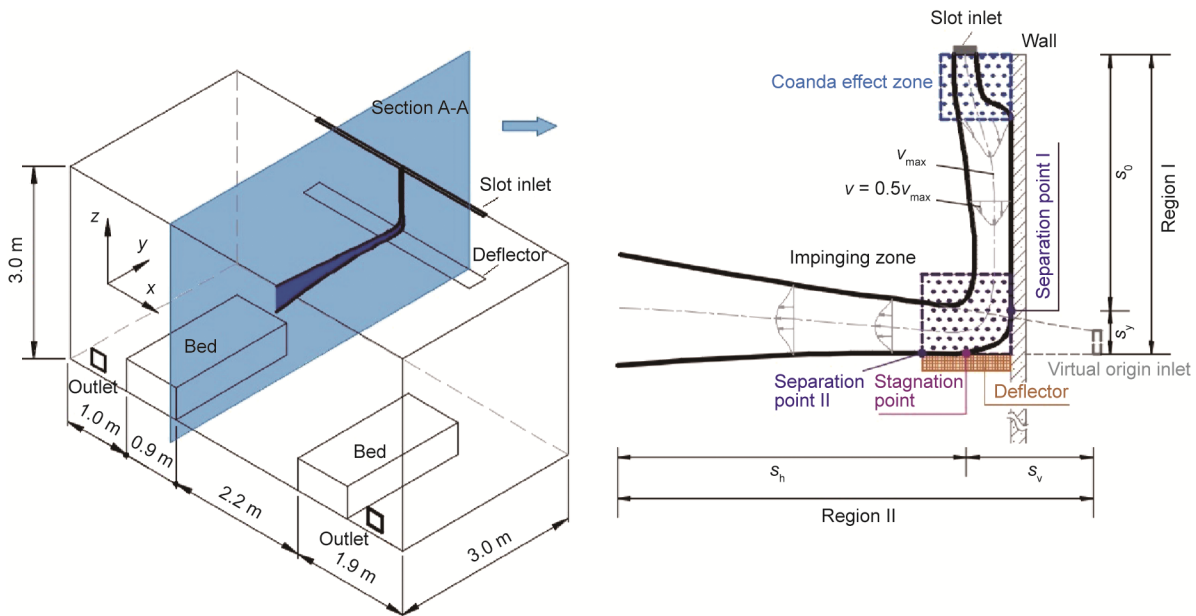


图1. 用于呼吸性传染病隔离病房的适应性贴附通风及其射流结构。Region I: 竖壁贴附区; Region II: 水平射流区。  $s_0$ : 竖壁贴附长度;  $s_y$ : 分离点I和滞止点之间的距离;  $s_v$ : 虚拟原点和滞止点之间的距离;  $s_h$ : 水平射流范围;  $v_{\max}$ : 轴心速度;  $v$ : 不同位置上的速度。

物等。因此，通过实验验证的计算流体力学（CFD）被用于研究适应性贴附通风在呼吸性传染病隔离病房中的应用。

### 3. 材料和方法

多年来室内环境研究领域的研究人员将计算流体力学（CFD）作为预测通风空间中空气运动的有效工具[38-39]。像“火神山”和“雷神山”（建于中国武汉）这样需要在短时间内快速建造的医院，使用现场实验方法通常难以解决设计问题。在这种情况下，计算流体力学可以通过已验证的数值模型，对隔离病房的气流组织进行科学的数值计算，并为室内空气污染控制提供有效的方法。

#### 3.1. 物理模型和通风气流组织模式

目前的研究采用了常见的双人病房，主要包括通风系统、污染源和床。病房的尺寸为  $6\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$ （长 $\times$ 宽 $\times$ 高）。排风口靠近地板处[23]，送风口在吊顶或侧壁上。病房通风系统的目的是形成一个干净的定向气流通道。我们强调送风位置，因为排风口处的汇流对空间流场的影响较送风口处要小得多。对于顶送风和侧壁上送风，分别有三个送风口，每个尺寸为  $0.32\text{ m} \times 0.12\text{ m}$ 。对于适应性贴附通风，送风口是一个  $3\text{ m} \times 0.05\text{ m}$  的条缝风口。对于三种气流组织模式，排风口均位于墙的下部，靠近污染源（即患者），每个排风口的尺寸为  $0.25\text{ m} \times 0.25\text{ m}$ 。通风口的详细布局见附录A中的图S1。

#### 3.2. 控制方程和湍流模型

病房内的气流是用质量、动量、能量和组分输运基本方程来描述的，这些方程可以在参考文献[40]中找到。

湍流模型是计算流体力学技术在室内环境领域成功应用的关键之一。根据前期研究结果[41]，数值计算采用剪切应力输运（SST） $k-\omega$  模型（ $k$ ：湍流动能， $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ； $\omega$ ：局部涡度， $\text{s}^{-1}$ ），且包含稳态和非稳态条件。由于室内建筑环境中的空气速度相对较慢，空气被认为是不可压缩的[42]，因此采用 Boussinesq 近似求解方程[43]。

#### 3.3. 边界条件和网格

在模拟中，墙、楼板和吊顶是非滑移壁面。排风口采用  $-10\text{ Pa}$  的压力出口。示踪气体（即污染物）被认为是从病房中病人的头部释放出来的[24,44]。根据文献，考虑隔离病房中医护人员所处环境的最不利条件，污染物稳定释放率为  $0.7\text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  [45-46]，非稳态释放率为每  $90\text{ s}$  释放  $1\text{次}$   $10\text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  [47-49]。如第1节所述，在隔离病房，一般采用

$6\sim 15\text{ h}^{-1}$  的换气次数。由于暖空气的浮力作用，冬季是最不利于通风的工况。因此，本文主要关注冬季条件。对不同边界条件下的21个典型工况进行了研究和比较，具体情况如附录A中的表S1所示。

计算域的几何形状是规则的，分别使用总数为10.0万、19.5万和39.2万的三种非结构化网格。高度为2 m处的无量纲空气速度、温度和工作区浓度随距送风口的无量纲水平距离而变化，如附录A中的图S2所示。在附录A中的表S2中定义了无量纲参数以便分析。结果表明，在这些条件下，19.5万网格可以用较少计算资源保证一定的计算精度。

#### 3.4. 实验验证

由于轴心速度衰减是整个流场的关键，本研究收集了团队前期竖壁贴附通风研究的实验数据[35,37,41,50]，美国供暖、制冷和空调工程师学会（ASHRAE）的半经验公式[26]，Topp等[51]、Yu等[52]，以及Rajaratnam [53]的研究结果，以验证本文采用的数值模型，如图2所示。这些描述贴附送风轴心速度的公式中的经验系数  $K$  对应相关实验中的送风口类型。将数值计算的无量纲结果与前期研究及文献数据进行比较：当送风与墙体温差为  $5\text{ }^\circ\text{C}$ （送暖风）时，误差范围为  $4.0\%\sim 9.3\%$ （参见参考文献[51]）。对于冷空气，送风和墙壁之间的温差为  $-4\text{ }^\circ\text{C}$ ，误差范围为  $0.2\%\sim 7.4\%$ （参见参考文献[52]）。这里选择参考文献[51-52]进行比较，因为它们使用了相同类型的送风口。数值计算结果与实验结果吻合较好，可以利用数值模型进行进一步分析。数值计算流型以及射流轴心速度和温度分布如附录A中的图S3和S4所示。

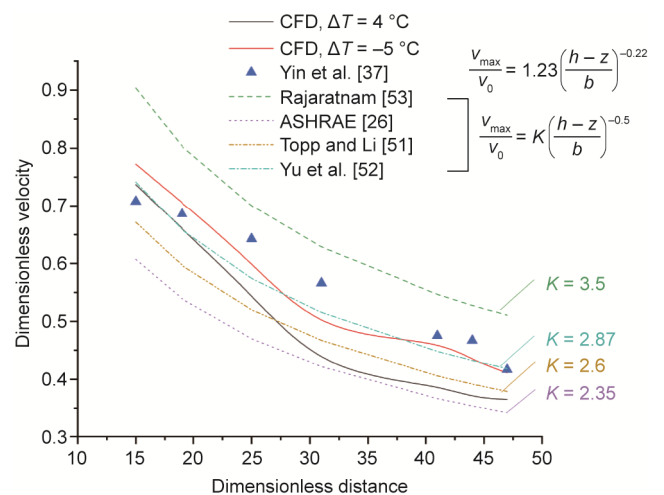


图2. 适应性贴附通风轴心速度衰减数值模型验证。 $\Delta T$ ：送风和墙壁之间的温差； $h$ ：条缝送风口和地板之间的距离； $z$ ：距地板不同的高度； $b$ ：条缝送风口宽度。

## 4. 结果和讨论

### 4.1. 污染物浓度分散

根据修正的 Wells-Riley 方程[54], 空气传播的污染应该保持在较低水平以降低感染风险。鉴于最不利的工作条件, 假设病人不断向环境中释放污染物。在相同的换气次数下, 适应性贴附通风工作区平均污染物浓度最低 (0.45%), 其次是顶送风模式 (0.95%), 如图3所示。原因可以根据横截面的速度来分析。Zhao 等[55]在混合 (侧壁上送风) 和置换通风房间中使用离散轨迹模型, 模拟空气运动与气溶胶粒子浓度和沉积, 发现混合通风的室内颗粒物浓度较低, 但沉积速率较大。Zhao 等[55]指出, 这一发现并不一定意味着混合通风将导致更好的室内空气质量, 因为沉积的颗粒可能会重新悬浮。

对于顶送风, 每个送风口下方都有一个向下的气流, 沿着侧壁的气流向上运动。污染源释放的污浊空气由送风气流流量卷吸沿墙壁和吊顶运动, 并转而与送风混合向下流动。污染物被稀释并扩散到整个病房, 最后通过排风口排出。这种模式会导致污染物在病房内反复循环, 从而增加医护人员的感染风险。Qian 等[17]进行了头部正上方散流器高速送冷风流动的可视化研究。结果显示, 尽管送风速度较高, 仍会强烈夹带周围的污染空气。在目前的研究中, 侧壁上送风模式的平均污染物浓度为 1.4% (注意, 适应性贴附通风的平均污染物浓度为 0.45%)。气流从侧壁上送风口流出沿着吊顶流动, 到达对面的墙壁时转而向下。由于冬季送风和室内空气之间的浮力, 气流不能有效地供应到工作区。顶送风和侧壁上送风是公共建筑中最常见的方式。但隔离病房比其他公共场所包括普通医院对空气质量的要求更严格。适应性贴附通风是对传统通风模式的改进, 结合了混合通风和置换通风的优点。此外, 适应性贴附通风侧重于直接、较好地医护人员工作区提供新鲜空气。结果发现, 气流首先附沿送风口相邻的垂直壁, 然后撞击导流板 (距离地面 2 m), 进而转向医护人员工作区。为了在冬天提供暖风, 可以通过调节导流板与墙的夹角来改变气流向上偏转的问题, 从而可以直接、较好地医护人员和患者供应新鲜空气。

呼吸道疾病经常导致反复咳嗽或打喷嚏。因此, 本文还考虑了可能会出现的一段时间内大量污染物的周期性释放。为了简化间歇性呼出污染物的情况, 研究采用周期性地释放示踪剂, 如图4 (a) 中的右 y 轴所示, 引起浓度分布的瞬态污染源随时间变化。为了评估室内气流组织的性能, 将排风口的浓度对时间积分, 如图4所示。适应性贴附通风的排风口浓度最高, 且对时间积分的累积浓度最

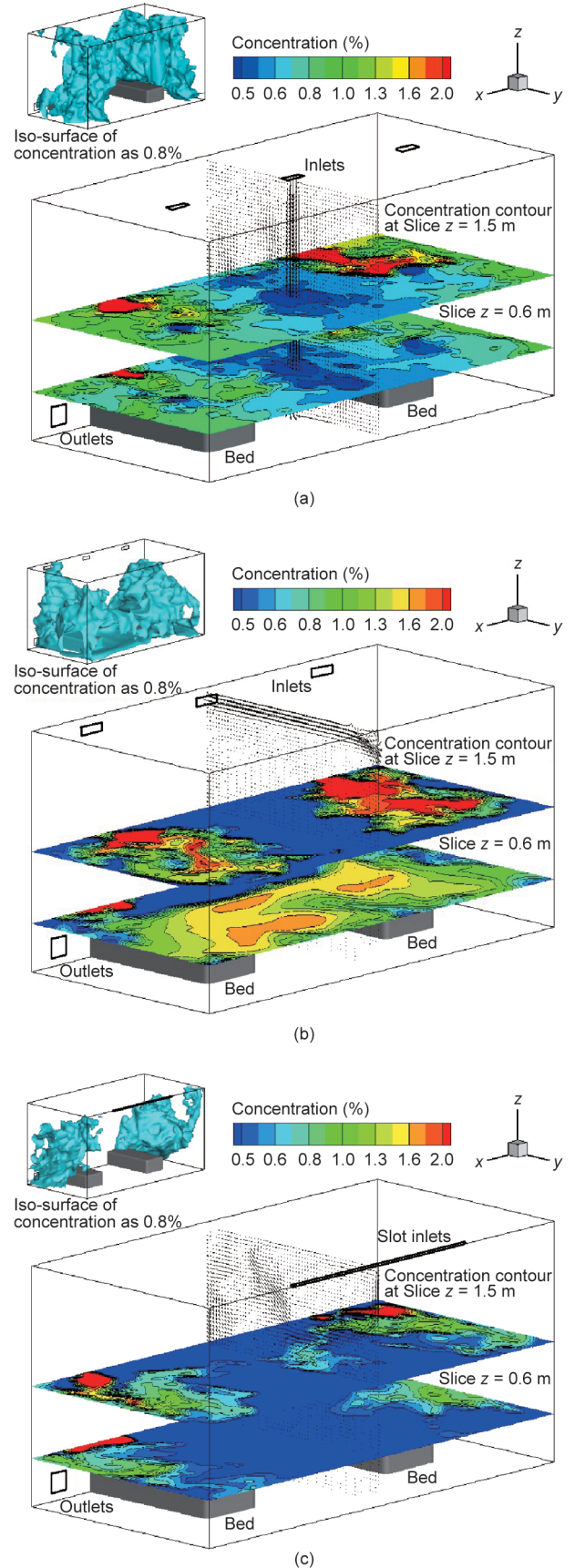


图3. 不同送风方式下, 具有相同换气次数的隔离病房中的污染物浓度分布。(a) 顶送风; (b) 侧壁上送风; (c) 适应性贴附通风。

大，其次是侧壁上送风。这是因为适应性贴附通风直接、较地向医护人员工作区提供空气，从而排出更多的污染物。混合通风排风口处的累积浓度取决于稀释时间。当释放频率高于稀释时间时，污染物会不断累积。参考文献[12,20,22]中提到了某些特定空气污染物去除效率所需的以分钟为单位的稀释时间，该指标可从美国政府工业卫生学家会议（American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH）出版的工业通风手册[56]中查到。该稀释时间用于计算污染源中断后的稀释通风时间。然而，该稀释时间应在考虑混合不完全度有效换气次数的基础上评价通风效果。混合不完全度的选择基于送风口和排风口的位置、工作过程、室内人员相对于污染源的典型位置等。但通常不会发生完全混合，混合不完全度可以高达10 [29,56]。

#### 4.2. 通风性能

建议将污染物去除效率（也称去除效率或通风效率）作为评估通风性能的指标[57-58]。对于相同的换气次数，无论是冬季还是夏季，适应性贴附通风的去除效率都是三种送风模式中最高。冬季，其去除效率为1.33，其次是吊顶送风（为1.04）；夏季，适应性贴附通风的去除效率为1.93，其次是侧壁上送风（为0.92），如附录A中的图S5所示。适应性贴附通风的去除效率是顶送风的1.3~2.5

倍。这是因为适应性贴附通风的气流通过撞击导流板进而转向目标区域，使得新鲜空气直接、较好地进入医护人员和病人所在区域。然而，对于完全混合通风，最大去除效率为1.0 [59]，这意味着污染物混合在整个房间的空气中，即医护人员工作区和排风口一样被污染。在这种情况下，供应的新鲜空气没有得到充分利用。Cheong等[15]的研究结果表明，在采用顶送风和较低位置的侧壁排风系统的呼吸性传染病隔离病房中，医护人员工作区的局部去除效率为0.91~1.12。当采样点位于1.4 m高度，送风口处于正下方时，去除效率超过1.0。在实际应用中，由于人们不喜欢面对直吹的气流，直接、较地向工作区送风的做法是不可接受的。

通过增加换气次数，适应性贴附通风的去除效率显著增加，而顶送风和侧壁上送风的去除效率保持在1.0左右，如图5所示[23,60]。Berlanga等[61]进行了4种混合通风模式组合实验，对于与本文具有非常相似的气流组织形式的顶送风和低侧壁排风，当换气次数从 $6 \text{ h}^{-1}$ 变化到 $12 \text{ h}^{-1}$ 时，去除效率为0.97~0.99。根据完全混合通风理论，尽管换气次数持续增加，但去除效率仍不能超过1.0。对于适应性贴附通风，换气次数和去除效率（ $E$ ）之间的关系可以通过指数函数拟合获得，如式（1）所示：

$$E = E_0 + A \cdot e^{R_0 \cdot \text{ACH}}$$

式中， $E_0$ 、 $A$ 和 $R_0$ 是拟合公式的系数； $E_0 = -0.96 \pm 1.71$ 、

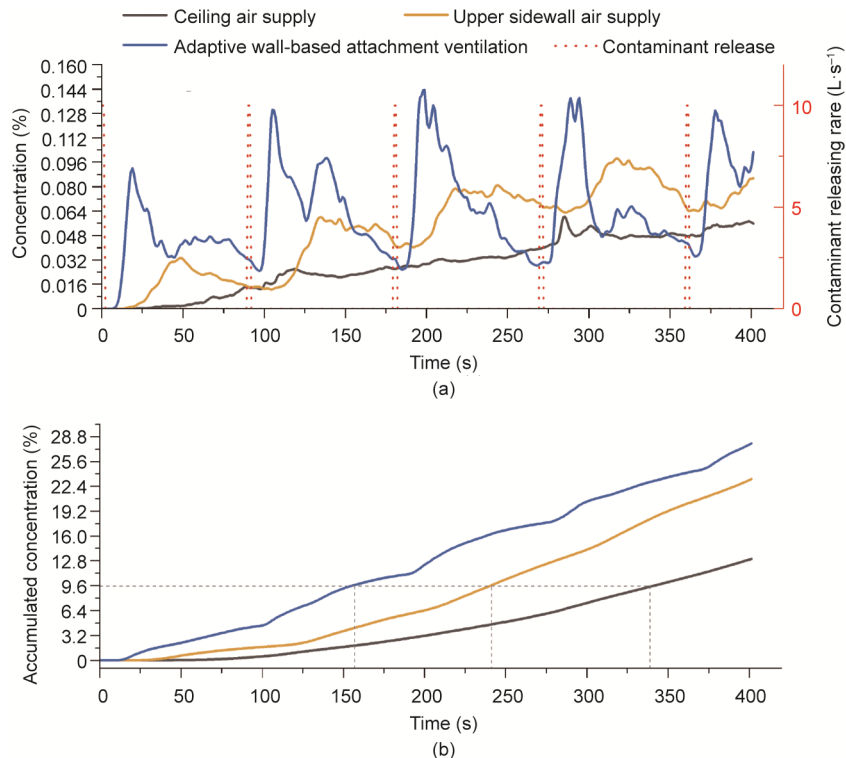


图4. 间歇性呼出污染物条件下排风口平均浓度。(a) 浓度与时间的关系；(b) 累积浓度与时间的关系。

$A = 0.51 \pm 0.65$ 、 $R_0 = 0.16 \pm 0.06$ 、 $R^2 = 0.98$ 。也有相关研究称,其他气流组织形式(如置换通风和地板送风)的去除效率随换气次数发生变化。Tian等[62]发现当换气次数为 $2.2 \sim 4.7 \text{ h}^{-1}$ 时,去除效率为 $1.10 \sim 1.49$ 。Mateus和Carvalho da Graça [63]测试了置换通风的去除效率,发现当换气次数为 $4.4 \text{ h}^{-1}$ 时,平均值为1.7。尽管这两项研究并不是针对呼吸性传染病隔离病房,但它们的气流组织的重点是将清洁空气输送到工作区。适应性贴附通风也有类似的原理。通过直接、较好地在工作区域提供新鲜空气,这些气流组织实现了更高的去除效率。然而,这些研究使用了有限的换气次数,因为置换通风和层式通风的送风口通常靠近地面或者正对着工作区。因此,增大换气次数可能导致较高的风速,在地面附近有更大吹风感的风险[64]。对于适应性贴附通风,在进入人员工作区前,空气速度通过撞击导流板而发生衰减。因此,可以用与混合通风所需风量一样大的换气次数来送风,但可获得更高的去除效率。

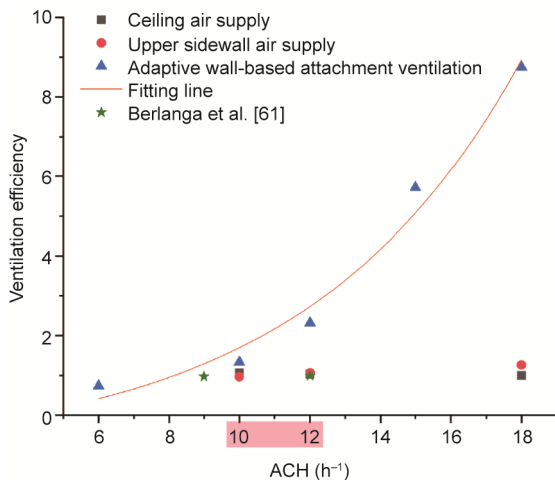


图5. 不同换气次数气流组织形式的去除效率。红色方框中的数值是推荐范围[23,60]。

#### 4.3. 负压的影响

为防止污染物从隔离病房泄漏,应保持病房内负压。在本研究中,使用 $-30 \sim 0 \text{ Pa}$ 的范围来确定负压如何影响隔离病房中的流场和通风。当排风口负压发生变化时,去除效率在 $1.31 \sim 1.48$ 之间变化。结果可以进行线性拟合,斜率为0,残差平方和为0.02,如附录A中的图S6所示。这一发现表明,实际上,排风口的负压对气流组织几乎没有任何影响。由于空气热压作用,在所研究的隔离病房内存在微弱的垂直压力梯度。由于送风口和排风口的边界条件,最大负压出现在排风口附近,而最小负压出现在送风口附近。

没有足够的科学依据证明,满足一定的压差极限能够

防止污染气体从呼吸性传染病隔离病房泄漏[65]。正如Xu和Zhou [66]指出的那样,内部的负压只能防止污染物的泄漏,与保护医护人员无关。在不同的国家和地区,通常要求的负压值亦不相同。根据美国的相关指南[12],呼吸性传染病隔离病房和走廊之间的压差至少应为 $2.5 \text{ Pa}$ 。在英国,该值为 $5 \text{ Pa}$  [18]。北欧国家要求压差必须为 $15 \text{ Pa}$  [20,22],而澳大利亚则建议更高的压差,为 $30 \text{ Pa}$  [29]。实际上,过小的压差不足以抵御多变的天气条件,尤其是当呼吸性传染病隔离病房的气密性不足时[65]。Li等[67]发现,在中国香港的SARS隔离病房中,38个受试房间中有97%符合 $-2.5 \text{ Pa}$ 的压差标准(所有受试房间的平均值为 $-7.7 \text{ Pa}$ )。Alevantis等[68]建议呼吸性传染病隔离病房的负压至少应为 $-7 \text{ Pa}$ ,以防止泄漏超过1%。考虑对于去除效率和压力分布的影响,不需要太大的排风负压。

#### 4.4. 热舒适性和经济性分析

为了评估房间内的热条件,数值计算还获得了环境参数和不同的热感觉指数,如附录A中的表S3所示。为了保持舒适的室内热环境,假设冬季的热负荷为 $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,夏季的冷负荷为 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;要求室内空气温度冬季为 $20 \sim 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,夏季为 $26 \sim 27 \text{ }^\circ\text{C}$  [23]。根据热量和质量平衡,对于换气次数为 $10 \text{ h}^{-1}$ 的顶送风模式,冬季送风温度为 $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ,夏季送风温度为 $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ,而对于换气次数为 $8.5 \text{ h}^{-1}$ 的适应性贴附通风,冬季送风温度为 $24.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,夏季送风温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

适应性贴附通风可以满足与顶送风方式效果相同的空气温度、风速[23,69]。采用热舒适指标、预测平均评价(PMV)和吹风感(DR)来评价热环境[70]。医护人员需经常站立,从事轻度活动(1.4 met),而病人是静坐(1 met) [60]。由于医护人员和患者的代谢率不同,他们的热舒适水平也不同。当使用适应性贴附通风时,冬季和夏季医护人员与患者的热舒适水平都在热舒适区间内( $-1, 1$ )。由于轻度活动,医护人员在冬季和夏季都感到稍微温暖,而患者的热舒适水平在冬季稍微偏凉,在夏季稍微偏暖。在冬季,采样相同换气次数,适应性贴附通风的PMV结果符合欧盟《建筑物的能源性能 第1部分:建筑物的通风》(Energy performance of buildings—ventilation for buildings—Part 1) EN-16798中的要求 [71]。这是因为适应性贴附通风中的扩展康达效应有利于维持抵抗浮力的向下的动量,从而有效地向工作区域提供空气。同样,夏季适应性贴附通风的吹风感(6.7%)略高于混合通风,但仍然满足EN-16798 [71]的要求。Berlanga等[61]发现,在不同的混合通风模式下,医护人员(PMV值为 $0.39 \sim$

0.72) 比患者 (PMV 值为 $-0.32 \sim -0.07$ ) 感觉更暖。在他们的研究中, 当换气次数增加时, 顶送风方式的 PMV 没有改变。Aganovic 等[72]建议在医护人员和患者之间使用空气幕进行工作区通风。在离污染源较近的位置, 对不同身体部位的吹风感进行评估, 发现其范围为 $0.9\% \sim 31.0\%$  [72]。

值得注意的是, 与顶送风方式相比, 适应性贴附通风以较低的换气次数获得了相同去除效率并实现了略佳的热环境。从系统配置的角度来看, 适应性贴附通风使用条缝而不是格栅或散流器送风。以某呼吸性传染病专科医院病房为例进行经济分析。该医院有 10 个确诊病例病区, 每个病区有 20 个呼吸性传染病隔离病房。每个病区内的空气处理系统均由一台空气处理装置和一套空气传输系统组成。由于两种气流组织模式的热负荷和冷负荷分别相同, 主要的运行能耗的差异来自送风系统的风机。对于换气次数为 $8.5 \text{ h}^{-1}$ 的适应性贴附通风, 风机容量是换气次数为 $10 \text{ h}^{-1}$ 的顶送风方式的 85%, 具体的经济分析比较见附录 A 中的表 S4。尽管所提出的适应性贴附通风系统增加了导流板的初始材料成本和人工成本, 但由于总风量的减少, 节省了风管材料成本, 并且由于减小了换气次数从而节省了运行电费。因此, 适应性贴附通风在经济、技术上是可行的, 并且相比其他气流组织方式更节能。

## 5. 结论

研究表明, 良好的通风情况可以大大减少呼吸道飞沫在空气中的悬浮时间。为了建立适合隔离病房的通风策略, 研究了适应性贴附通风在呼吸性传染病隔离病房的应用, 并与顶送风和侧壁上送风方式进行了比较, 考虑了污染源排放特性、负压和室外气候等因素。从污染物扩散、去除效率和热舒适性三个方面对不同气流组织形式进行了评价。由此可以得出结论, 与其他气流组织形式相比, 适应性贴附通风可以为医护人员和患者创造一个清洁舒适的区域且能耗更低。

(1) 适应性贴附通风可以为医护人员和患者所在的区域直接、较好地提供新鲜空气。在污染物连续释放的情况下, 适应性贴附通风以相同的换气次数 ( $10 \text{ h}^{-1}$ ), 在工作区的平均污染物浓度最低 (冬季为 $0.45\%$ , 夏季为 $0.29\%$ ), 其次是顶送风 (冬季为 $0.95\%$ , 夏季为 $1.91\%$ ) 和侧壁上送风 (冬季为 $1.4\%$ , 夏季为 $1.19\%$ )。与其他两种气流组织方式相比, 适应性贴附通风提供了有效的新风供应途径。当大量污染物间歇释放时, 污染物的浓度随时间变化, 在相同的持续时间内, 适应性贴附通风排出的污染物量最多。

(2) 获得了用于适应性贴附通风的换气次数与去除效率指数函数关联式。当换气次数增加时, 适应性贴附通风的去除效率显著增加, 而顶送风和侧壁上送风的去除效率保持在 1.0 左右。当换气次数为 $10 \text{ h}^{-1}$ , 适应性贴附通风的去除效率是顶送风的 1.3~2.5 倍。

(3) 负压的影响只出现在排风口附近的局部区域。负压对适应性贴附通风的气流组织几乎没有任何影响。因此, 在这种模式下, 隔离病房不需要大的负压。

(4) 在相同的供暖和制冷负荷下, 适应性贴附通风可以实现与顶送风相同的污染物去除效率和相当的热舒适性水平, 但换气次数减小了 15%。较小的换气次数也意味着在材料投资方面需要的风管面积较小、节省运行费用。使用此模式节省的风管面积比此模式要求导流板增加的面积大 12.6 倍。因此, 适应性贴附通风在技术、经济上均是可行的, 而且相比其他方案更节能。

## 致谢

本研究得到了科技部、中国工程院“新型冠状病毒感染的肺炎疫情环境风险防控研究”(2020YFC0842500、2020-ZD-15) 和国家重点研发计划(2017YFC0702800) 项目的支持。

## Compliance with ethics guidelines

Ying Zhang, Ou Han, Angui Li, Li'an Hou, Thomas Olofsson, Linhua Zhang, and Wenjun Lei declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.10.020>.

## References

- [1] Modes of transmission of virus causing COVID-19: implications for IPC precaution recommendations [Internet]. Geneva: WHO; 2020 Mar 29 [cited 2020 Aug 25]. Available from: <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations>.
- [2] Offord C. How COVID-19 is spread [Internet]. Wilmington: The Scientist; 2020 Feb 21 [cited 2020 Aug 25]. Available from: <https://www.the-scientist.com/news-opinion/how-covid-19-is-spread-67143>.
- [3] Report of the WHO-China joint mission on coronavirus disease 2019 (COVID19) [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2020 Feb 28 [cited 2020 Jul 2]. Available from: [https://www.who.int/publications/i/item/report-of-the-who-china-joint-mission-on-coronavirus-disease-2019-\(covid-19\)](https://www.who.int/publications/i/item/report-of-the-who-china-joint-mission-on-coronavirus-disease-2019-(covid-19)).

- [4] Liu Y, Ning Z, Chen Y, Guo M, Liu Y, Gali NK, et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. *Nature* 2020;582(7813):557–60.
- [5] Yu ITS, Qiu H, Tse LA, Wong TW. Severe acute respiratory syndrome beyond Amoy Gardens: completing the incomplete legacy. *Clin Infect Dis* 2014; 58: 683–6.
- [6] Wat D. The common cold: a review of the literature. *Eur J Intern Med* 2004;15 (2):79–88.
- [7] ASHRAE Technology Council. Position document on airborne infectious diseases [Internet]. Atlanta: ASHRAE Technology Council; c2014 [cited 2020 Feb 5]. Available from: <https://www.ashrae.org/File%20Library/About/Position%20Documents/Airborne-Infectious-Diseases.pdf>.
- [8] Somsen GA, van Rijn C, Kooij S, Bem RA, Bonn D. Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission. *Lancet Respir Med* 2020;8(7):658–9.
- [9] Stadnytskyi V, Bax CE, Bax A, Anfinrud P. The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission. *Proc Natl Acad Sci USA* 2020;117(22):11875–7.
- [10] Li Y, Huang X, Yu ITS, Wong TW, Qian H. Role of air distribution in SARS transmission during the largest nosocomial outbreak in Hong Kong. *Indoor Air* 2005;15(2):83–95.
- [11] Beggs CB, Kerr KG, Noakes CJ, Hathway EA, Sleigh PA. The ventilation of multiple-bed hospital wards: review and analysis. *Am J Infect Control* 2008;36 (4):250–9.
- [12] Jensen PA, Lambert LA, Iademarco MF, Ridzon R. Centers for Disease Control and Prevention. Guidelines for preventing the transmission of Mycobacterium tuberculosis in health-care settings. *MMWR Recomm Rep* 2005; 54(RR-17): 1–141.
- [13] Menzies D, Fanning A, Yuan L, FitzGerald JM. Hospital ventilation and risk for tuberculous infection in Canadian health care workers. *Ann Intern Med* 2000; 133(10):779–89.
- [14] Qian H, Li Y, Seto WH, Ching P, Ching WH, Sun HQ. Natural ventilation for reducing airborne infection in hospitals. *Build Environ* 2010;45(3):559–65.
- [15] Cheong KWD, Phua SY. Development of ventilation design strategy for effective removal of pollutant in the isolation room of a hospital. *Build Environ* 2006;41(9):1161–70.
- [16] Aganovic A, Cao G. Evaluation of airborne contaminant exposure in a single-bed isolation ward equipped with a protected occupied zone ventilation system. *Indoor Built Environ* 2019;28(8):1092–103.
- [17] Qian H, Li Y, Nielsen PV, Hyldgaard CE. Dispersion of exhalation pollutants in a two-bed hospital ward with a downward ventilation system. *Build Environ* 2008;43(3):344–54.
- [18] Department of Health. Heating and ventilation systems health technical memorandum 03–01: specialised ventilation for healthcare premises Part A—design and validation. Report. London: the Stationary Office; 2007.
- [19] Ziegler R, Just HM, Castell S, Diel R, Gastmeier P, Haas W, et al. Tuberculosis infection control-recommendations of the DZK. *Gesundheitswesen* 2012;74(6): 337–50. German.
- [20] National Institute of Public Health (Norway). [The isolation guide: use of isolation of patients to prevent the spread of infection in health institutions]. Oslo: Norwegian Institute of Public Health; 2004. Norwegian.
- [21] State Serum Institute (Denmark). [Advice and instructions on isolation and precautions for the care of patients with infectious diseases]. Copenhagen: Central Unit for Infectious Hygiene State Serum Institute; 2010. Danish.
- [22] Swedish Association for Hospital Hygiene (Sweden). [Swedish Association for Care Hygiene (SFVH): Building and care hygiene: care hygiene aspects in new and remodeling and renovation of care premises]. Stockholm: Swedish Association for Hospital Hygiene; 2010. Swedish.
- [23] Ministry of Housing and Urban–Rural Development of the People’s Republic of China; General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China. GB 50849–2014: Code for design of infectious disease hospital. Chinese standard. Beijing: Planning Press of China; 2014. Chinese.
- [24] Kokkonen A, Hyttinen M, Holopainen R, Salmi K, Pasanen P. Performance testing of engineering controls of airborne infection isolation rooms by tracer gas techniques. *Indoor Built Environ* 2014;23(7):994–1001.
- [25] Yu HC, Mui KW, Wong LT, Chu HS. Ventilation of general hospital wards for mitigating infection risks of three kinds of viruses including Middle East respiratory syndrome coronavirus. *Indoor Built Environ* 2017;26(4):514–27.
- [26] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE fundamentals handbook. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE); 2013.
- [27] Yang B, Melikov AK, Kabanshi A, Zhang C, Bauman FS, Cao G, et al. A review of advanced air distribution methods—theory, practice, limitations and solutions. *Energy Build* 2019;202:109359.
- [28] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China; Standardization Administration of China. GB/T 35428–2017: Requirements of environmental control for hospital negative pressure isolation ward. Chinese standard. Beijing: Standards Press of China; 2017. Chinese.
- [29] Victorian Advisory Committee on Infection Control. Guidelines for the classification and design of isolation rooms in health care facilities. Melbourne: Victorian Government, Department of Human Services; 2007. p. 13–35.
- [30] Fanger PO. Human requirements in future air-conditioned environments. *Int J Refrig* 2001;24(2):148–53. French.
- [31] Gao N, Niu J, Zhang H. Coupling CFD and human body thermoregulation model for the assessment of personalized ventilation. *HVAC R Res* 2006;12(3): 497–518.
- [32] Melikov AK. Advanced air distribution. *ASHRAE J* 2011;53(11):73–7.
- [33] Kosonen R, Melikov A, Mundt E, Mustakallio P, Nielsen PV. REHVA guidebook No. 23, displacement ventilation. Brussels: REHVA; 2017.
- [34] Li A. Attachment ventilation theory and air flow pattern. In: Li A, editor. Attachment ventilation theory and design. Beijing: China Architecture Publisher; 2020.
- [35] Li A. Extended Coanda effect and attachment ventilation. *Indoor Built Environ* 2019;28(4):437–42.
- [36] Cao G, Ruponen M, Kurnitski J. Experimental investigation of the velocity distribution of the attached plane jet after impingement with the corner in a high room. *Energy Build* 2010;42(6):935–44.
- [37] Yin H, Li A. Airflow characteristics by air curtain jets in full-scale room. *J Cent South Univ* 2012;19(3):675–81.
- [38] Nielsen PV. Prediction of air flow and comfort in air conditioned spaces. *ASHRAE Trans* 1975;81(Pt II):247–59.
- [39] Jones PJ, Whittle GE. Computational fluid dynamics for building air flow prediction—current status and capabilities. *Build Environ* 1992;27(3):321–38.
- [40] Niu J, Zhou D, Liang X, Liu T, Liu S. Numerical study on the aerodynamic pressure of a metro train running between two adjacent platforms. *Tunnelling Underground Space Technol* 2017;65:187–99.
- [41] Yin H, Li A. Study of attached air curtain ventilation within a full-scale enclosure: comparison of four turbulence models. *Indoor Built Environ* 2016;25 (6):962–75.
- [42] Dehne T, Lange P, Volkman A, Schmeling D, Konstantinov M, Bosbach J. Vertical ventilation concepts for future passenger cars. *Build Environ* 2018;129: 142–53.
- [43] Tao Y, Yang M, Qian B, Wu F, Wang T. Numerical and experimental study on ventilation panel models in a subway passenger compartment. *Engineering* 2019;5(2):329–36.
- [44] Ai Z, Mak CM, Gao N, Niu J. Tracer gas is a suitable surrogate of exhaled droplet nuclei for studying airborne transmission in the built environment. *Build Simul* 2020;13(3):489–96.
- [45] Melikov AK. Human body micro-environment: the benefits of controlling airflow interaction. *Build Environ* 2015;91:70–7.
- [46] Zhang Z, Kleinstreuer C, Donohue JF, Kim CS. Comparison of micro- and nano-size particle depositions in a human upper airway model. *J Aerosol Sci* 2005;36(2):211–33.
- [47] Tang JW, Nicolle AD, Klettner CA, Pantelic J, Wang L, Suhaimi AB, et al. Airflow dynamics of human jets: sneezing and breathing—potential sources of infectious aerosols. *PLoS ONE* 2013;8(4):e59970.
- [48] Hegland KW, Troche MS, Davenport PW. Cough expired volume and airflow rates during sequential induced cough. *Front Physiol* 2013;4:167.
- [49] Key AL, Holt K, Hamilton A, Smith JA, Earis JE. Objective cough frequency in idiopathic pulmonary fibrosis. *Cough* 2010;6(1):4.
- [50] Li A, Hou Y, Yang J. Attached ventilation based on a curved surface wall. *Build Simul* 2019;12(3):505–15.
- [51] Topp C, Nielsen PV, Davidson L. Room airflows with low Reynolds number effects. In: Proceedings of the 7th International Conference on Air Distribution in Rooms; 2000 Jul 9–12; Reading, UK. Aalborg: Aalborg University; 2000.
- [52] Yu H, Liao CM, Liang HM. Scale model study of airflow performance in a ceiling slot-ventilated enclosure: isothermal condition. *Build Environ* 2003;38 (11):1271–9.
- [53] Rajaratnam N. Turbulent jets. Amsterdam: Elsevier; 1976.
- [54] Rudnick SN, Milton DK. Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air* 2003;13(3):237–45.
- [55] Zhao B, Zhang Y, Li X, Yang X, Huang D. Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical



- method. *Build Environ* 2004;39(1):1–8.
- [56] American Conference of Governmental Industrial Hygienists. *Industrial ventilation: a manual of recommended practice*. 27th ed. Cincinnati: American Conference of Governmental Hygienists, Inc.; 2010.
- [57] Sun C, Zhai Z. The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission. *Sustainable Cities Soc* 2020;62:102390.
- [58] Villafruela JM, Castro F, José JFS, Saint-Martin J. Comparison of air change efficiency, contaminant removal effectiveness and infection risk as IAQ indices in isolation rooms. *Energy Build* 2013;57:210–9.
- [59] Breum NO. Ventilation efficiency in an occupied office with displacement ventilation—a laboratory study. *Environ Int* 1992;18(4):353–61.
- [60] Ministry of Housing and Urban–Rural Development of the People’s Republic of China; General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China. GB 51039–2014: Code for design of general hospital. Chinese standard. Beijing: Planning Press of China; 2014. Chinese.
- [61] Berlanga FA, Olmedo I, Ruiz de Adana M, Villafruela JM, San José JF, Castro F. Experimental assessment of different mixing air ventilation systems on ventilation performance and exposure to exhaled contaminants in hospital rooms. *Energy Build* 2018;177:207–19.
- [62] Tian X, Li B, Ma Y, Liu D, Li Y, Cheng Y. Experimental study of local thermal comfort and ventilation performance for mixing, displacement and stratum ventilation in an office. *Sustainable Cities Soc* 2019;50:101630.
- [63] Mateus NM, Carrilho da Graça G. Simulated and measured performance of displacement ventilation systems in large rooms. *Build Environ* 2017;114:470–82.
- [64] Yuan X, Chen Q, Glicksman LR. Performance evaluation and design guidelines for displacement ventilation. *ASHRAE Trans* 1999;105(1):298–309.
- [65] Hyttinen M, Rautio A, Pasanen P, Reponen T, Earnest GS, Streifel A, et al. Airborne infection isolation rooms—a review of experimental studies. *Indoor Built Environ* 2011;20(6):584–94.
- [66] Xu Z, Zhou B. Importance of negative pressure wards. In: Xu Z, Zhou B, editors. *Dynamic isolation technologies in negative pressure isolation wards*. Singapore: Springer Nature; 2017.
- [67] Li Y, Ching WH, Qian H, Yuen PL, Seto WH, Kwan JK, et al. An evaluation of the ventilation performance of new SARS isolation wards in nine hospitals in Hong Kong. *Indoor Built Environ* 2007;16(5):400–10.
- [68] Alevantis LE, Offermann FJ, Loiselle S, Macher JM. Pressure and ventilation requirements of hospital isolation rooms for tuberculosis (TB) patients: existing guidelines in the United States and a method for measuring room leakage. In: Maroni M, editor. *Ventilation and indoor air quality in hospitals*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 1996. p. 101–16.
- [69] Ministry of Housing and Urban–Rural Development of the People’s Republic of China; General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China. GB 50736–2012: Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings. Chinese standard. Beijing: Planning Press of China; 2012. Chinese.
- [70] BS EN ISO 7730:2005: Ergonomics of the thermal environment—analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. British standard. Geneva: International Standardisation Organisation; 2006.
- [71] EN 16798-1–2019: Energy performance of buildings—ventilation for buildings—Part 1: indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. European standard. Brussels: European Committee for Standardization; 2019.
- [72] Aganovic A, Steffensen M, Cao G. CFD study of the air distribution and occupant draught sensation in a patient ward equipped with protected zone ventilation. *Build Environ* 2019;162:106279.