



建筑工程设计阶段室内空气质量量化预评控

王海媚^{1,2,3}, 庄文宾^{1,2,3}, 熊建银⁴, 魏静雅^{1,2,3}, 许瑛^{1,3}, Charles J. Weschler^{1,3,5}, 张寅平^{1,2,3*}

1. 清华大学建筑环境研究所, 北京 100084

2. 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室, 广州 510640

3. 清华大学室内空气质量评价与控制北京市重点实验室, 北京 100084

4. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081

5. Environmental and Occupational Health Sciences Institute, Rutgers University, New Jersey 08854, USA

* 联系人, E-mail: zhangyp@tsinghua.edu.cn

2026-04-18 收稿, 2026-07-07 修回, 2026-07-08 接受, 2026-07-09 网络版发表

国家重点研发计划(2024YFC3810400, 2023YFC3806100)、国家自然科学基金(52378102)、亚热带建筑与城市科学全国重点实验室开放基金(2024KA02)和中国建筑绿色建造工程研究中心-健康人居建筑基金(CSECE-PT-013)资助

摘要 优良的室内空气质量是“好房子”的基本要求. 将室内空气质量控制前移至建筑工程设计阶段, 一方面, 可在给定室内环境条件下评估室内以甲醛、苯等为代表的挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)的释放速率及其浓度, 借此合理确定室内材料和物品的种类及用量; 另一方面, 评估以PM_{2.5}和PM₁₀为代表的大气污染物经建筑通风或渗透进入室内的速率, 据此确定新风过滤或空气净化负荷, 指导该类设备选型与低噪节能运行. 通过上述方法, 既可防室内空气污染于未然, 又可实现室内空气质量与投资效益的协同优化. 本文对近年来国内外相关研究包括作者研究团队的科研与实践进行了系统梳理, 内容包括: (1) 基于对室内空气污染物“从源到人”传递全过程的机理认知, 阐述了建筑工程中室内空气质量设计阶段量化预评控的理论框架; (2) 总结了室内材料VOCs的释放机理和模型、关键释放特性参数的快速测定方法及其温湿度影响机制; (3) 基于无量纲分析, 获得了普适的VOCs释放速率和释放量预测公式; (4) 介绍了空气净化设备的选型及适用面积计算方法, 以及节能的室内空气质量控制策略; (5) 根据疾病负担确定了室内应优先控制的目标污染物, 并基于净经济效益最大化确定其浓度阈值; (6) 介绍了上述研究在系列室内空气质量相关标准和工程中的应用. 总体而言, 上述研究从理论与工程应用两个层面, 为室内空气质量设计阶段量化预评控提供了系统性的技术支撑.

关键词 室内空气质量, 挥发性有机化合物, PM_{2.5}, 源头控制, 空气净化, 疾病负担

2025年, 我国十四届人大三次会议《政府工作报告》中明确提出将“安全、舒适、绿色、智慧”为特征的“好房子”作为我国住宅发展的重要方向. 室内空气质量(indoor air quality, IAQ)作为影响居住建筑安全性与健康性的关键因素, 其科学管控已成为“好房子”建设的重要基础. 研究表明, 人80%以上的时间在室内度过, 室内与室外空气污染每年导致全球700余万人过早死亡, 在我国造成的疾病负担亦十分显著^[1-6]. 尽管相

较于室外空气污染, 室内污染的控制成本和技术难度相对较低, 但长期以来未受到应有的重视.

我国室内空气污染呈现典型的“内源释放、外源输入”的叠加特征. 一方面, 随着城镇化进程加快及室内装修业的发展, 大量人造板材、涂料及其制品(如家具)被广泛使用, 其中一些会释放以甲醛、苯等致癌物为代表的挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs). 研究表明, 建筑装饰装修材料和家具是室内

引用格式: 王海媚, 庄文宾, 熊建银, 等. 建筑工程设计阶段室内空气质量量化预评控. 科学通报

Wang H, Zhuang W, Xiong J, et al. Quantitative pre-evaluation and control of indoor air quality in the building engineering design stage (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/CSB-2026-0527](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0527)

VOCs污染的主要来源,贡献率达90%以上,且其释放期长、衰减缓慢,是建筑工程室内空气质量设计阶段的主控目标^[7~11]. 另一方面,室外来源污染物(如PM_{2.5}、臭氧)通过建筑通风或渗透进入室内,有些还会与内源污染形成复杂的复合污染^[12]. 此外,人类活动(如烹饪、清洁及办公设备运行等)也会产生室内空气污染. 后两类污染源产生的室内空气污染呈现间歇性特征,其控制设备选型和运行优化策略需要在设计阶段确定,其实际运行优化则需要在使用阶段进行.

传统建筑工程室内空气质量在竣工时须通过基于国家强制标准《民用建筑工程室内环境污染控制标准》(GB 50325)的检测验收,如果发现室内空气质量不达标则需进行治理. 这种“事后控”的方式不仅耗时、耗资且耗力,而且难以从源头消除污染隐患,且易引发纠纷;在建筑使用阶段,室内空气质量通常参照国家推荐标准《室内空气质量标准》(GB/T 18883)进行评价,当检测结果未达标时,可能涉及建筑装饰装修材料、家具以及使用者行为等多方面原因,往往很难确定责任主体. 上述两种情况,都难以满足“好房子”对高品质空气质量的要求. 将室内空气质量控制前移至工程设计阶段或实际使用阶段之前,通过定量预测与源头干预实现室内空气质量“事前控”或“预评控”,是解决上述问题的最有效和最节约的路径.

室内空气质量的预评控需要对污染物“从源到人”的“释放-传递-暴露”全过程有定量认识,包括室内污染源特性、室内空气污染物浓度、人体暴露水平及其健康风险(图1)^[13]. 该污染物全过程传递和控制认知涉及工程科学(建筑技术科学、材料科学、环境科学)、暴露科学及医学科学等多个学科,也涉及材料、家具、暖通空调、家电和建筑多个行业,只有在对这一全过程实现贯通的定量认知基础上,通过跨行业协同控制,才能对不同控制策略(如材料选择、通风设计、空气净化及政策干预)的控制效果、控制成本和健康与经济效益进行量化认知,实现工程设计阶段室内空气质量的量化预评控.

1 室内空气质量预评控理论与方法

建筑中材料和物品VOCs评控始于1978年德国建立的蓝天使(Blue Angel)标识体系,在其标识的介绍中有这样一句话“One label says more than one thousand words”,意为“一个标识胜过千言万语”^[14]. 其后,欧洲多国和美国相继建立了室内材料和物品污染物标识体

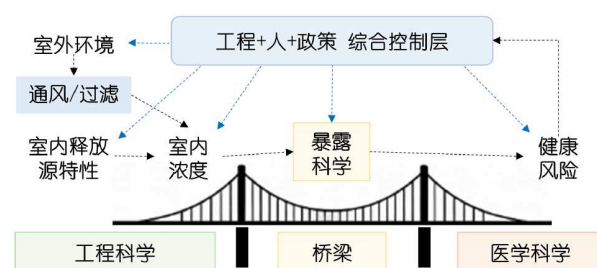


图1 (网络版彩色)室内空气污染物“从源到人”传递全过程及可控节点一览

Figure 1 (Color online) The “flow” of pollutants from source to humans and possible control points

系^[14~31]. 但上述方法存在共性局限:测定材料的目标污染物(如甲醛和苯)含量或其在环境舱中的特定环境条件下的浓度或释放率,不能表征实际使用环境中污染物的释放速率,因而难以用于建筑工程设计阶段室内空气质量量化预评控.

针对上述局限性和我国国情,作者团队开展了系统性研究. 图2给出了作者团队提出的工程设计阶段室内空气质量量化预评控(以下简称室内空气质量预评控)框架. 通过建立的VOCs释放机理模型或测定的材料VOCs释放特性参数,预测不同环境条件和工况下的室内目标污染物浓度. 当预测浓度超过标准或设定阈值时,可在设计阶段主动采取相应的控制措施,如材料种类替换或用量调整、通风策略优化或空气净化系统配置. 该方法实现了从“事后检测与治理”(即事后控)向“设计阶段预防控制”(即事前控)的转变,实现了防患于未然,显著降低了治理成本并规避了施工方和业主间可能的冲突. 下面对上述室内空气质量预评控的理论与方法进行介绍.

1.1 室内材料VOCs释放传质模型

最具代表性的室内材料VOCs释放传质模型是Little等人^[32]于1994年基于菲克扩散定律建立的(图3). 该模型假设如下: (1) 材料内目标VOCs的初始浓度 C_0 均匀分布; (2) 试验舱或室内初始浓度及入口浓度均为零; (3) 材料内VOCs传质过程为一维扩散; (4) 扩散系数 D 与分配系数 K 为常数; (5) 试验舱或室内空气充分混合; (6) 材料表面与空气之间始终处于瞬时平衡状态; (7) 对流传质系数 h_m 足够大,可认为对流传质阻力可以忽略. 基于质量守恒与传质基本原理,可建立相应的控制方程、初始条件及边界条件如下:



图2 (网络版彩色)室内源空气污染物量化预评控方法框架

Figure 2 (Color online) An approach framework in quantitative pre-evaluation and control of indoor origin air pollutants

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2}.$$

对于初始条件:

$$C_m = C_0, 0 \leq x \leq L, t = 0.$$

边界条件:

$$\frac{\partial C_m}{\partial x} = 0, x = 0, t > 0,$$

$$\frac{dC_a}{dt} = -\frac{A}{V} D \frac{\partial C_m}{\partial x} - NC_a, x = L,$$

$$C_m = KC_a, x = L,$$

式中, C_m 为材料内VOCs的浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; t 为时间, s; D 为扩散系数, m^2/s ; x 为一维坐标, m; C_a 为有限空间内VOCs的浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; A 为材料的释放面积, m^2 ; N 为换气次数, h^{-1} .

尽管Little提出的传质模型因其明确的物理意义而

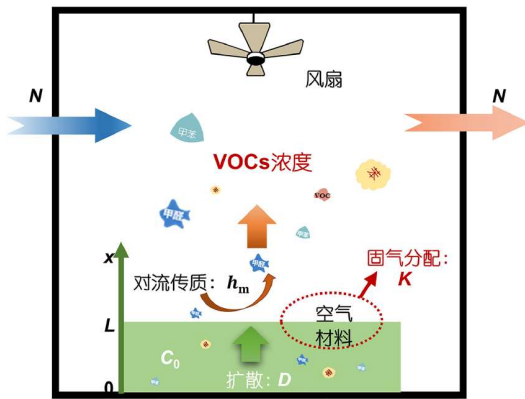


图3 (网络版彩色)材料在环境舱或室内空间中污染物传质过程示意图

Figure 3 (Color online) Schematic showing the mass transfer of emissions from a material slab in a chamber or room

具有较好的通用性, 但其忽略对流传质阻力的假设影响了模型精度, 尤其在释放初期阶段, 其预测结果与实验数据存在明显偏差. 为此, 研究者开展了多方面改进: (1) Yang等人^[33,34]及Huang和Haghighat^[35]在模型中引入了材料表面对流传质阻力, 其中前者采用数值方法求解, 后者则推导得到了有限空间内气相VOCs浓度的解析解; (2) Deng和Kim^[36]利用拉普拉斯变换方法获得了气相VOCs的完整解析解, 但该模型假设舱内及入口VOCs浓度均为零, 从而在一定程度上限制了其适用范围; (3) Xu和Zhang^[37]在综合考虑表面对流传质阻力及材料初始VOCs浓度影响的基础上, 推导出更具普适性的解析解, 可同时适用于通风和密闭工况, 并提高了预测值的精度. 针对实际室内环境中存在的多层材料体系, 后续研究者提出了双层及多层VOCs释放模型. Kumar和Little^[38]在忽略对流传质影响的条件下, 建立了双层材料VOCs释放模型, 并给出了相应的解析解, 但其在释放初期阶段的预测结果与实际情况存在较大偏差; Deng等人^[39]通过拉普拉斯变换方法, 在假定给定空间污染物初始浓度和进入空气污染物浓度均为0的条件下推导出了多层材料单面释放的完全解析解; Hu等人^[40]构建了双面释放的多层材料半解析模型, Wang和Zhang^[41]在模型中又加入了材料内部化学反应项, 得到了更为完善的多层材料VOCs释放模型, 尽管后两模型更为普适, 但由于涉及因素多, 且解的形式复杂, 后续研究者较少采用.

针对室内多污染源同时释放的复杂环境, 已有研究发展了多种数值与解析模型以描述其排放特性. Li和Niu^[42]构建了适用于多层材料及多源释放情形的数值模型; Deng等人^[43]基于传质机理推导了用于预测多

源VOCs释放与吸附过程的解析解;在此基础上,Wang等人^[44]结合Xu和Zhang^[37]的单源模型,建立了半解析多源释放模型,并进一步对其进行了扩展,发展出适用于动态环境条件下的多源释放模型^[45].

1.2 材料VOCs释放特性参数的测试方法

材料中VOCs的释放过程可通过三个释放特性参数表征,即材料初始浓度 C_0 、材料内部VOCs的扩散系数 D 以及气/固界面的分配系数 K ^[32].这些参数属于材料的固有物性,不受材料尺寸、承载率或换气率影响.其中, C_0 表示在实际环境条件下单位体积材料可释放的VOCs含量; K 用于描述材料/空气界面处两相VOCs浓度的平衡关系; D 反映VOCs在材料内部的扩散能力.研究人员提出了多种能够同时测定三个释放特性参数的方法.

Xiong等人^[46]提出了密闭舱C-history法(C表示浓度),该方法通过对密闭环境舱内逐时测量的VOCs浓度数据,结合推导模型(式(6)和式(8))进行线性拟合,从而获得三个释放特性参数.但该方法采用主动采样方式,需避免负压引入的误差,因此对环境舱体积要求较高.在此基础上,Huang等人^[47]提出了通风舱C-history法,结合通风段简化模型(式(7)和式(8))进行线性拟合,从而获得三个参数,该方法突破了密闭舱对舱体体积的限制,但其“先密闭后通风”的测试流程使总体实验时间有所增加.上述两种方法均需对线性拟合数据进行筛选,增加了参数求解的复杂性.为此,Wang等人^[48]及Zhang等人^[49]提出了改进的C-history法,在保持实验步骤与前述方法一致的基础上,利用密闭段或通风段的全部浓度数据,并结合气相浓度解析解,通过非线性拟合同时求得三个参数.

$$\ln\left(\frac{C_{\text{equ}} - C_a(t)}{C_{\text{equ}}}\right) = \text{SL} \cdot t + \text{INT}, \quad (6)$$

$$\ln\frac{C_a(t)}{C_{\text{equ}}} = \text{SL} \cdot t + \text{INT}, \quad (7)$$

$$C_{\text{equ}} = \frac{C_0}{K + V/V_m}, \quad (8)$$

式中,SL和INT为扩散系数 D 和分配系数 K 的函数; C_{equ} 为密闭环境舱内VOCs的平衡浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$.此外,Zhou等人^[50]提出了密闭/通风交替释放法,即将试验材料置于测试舱内,在密闭与通风状态之间交替切换.通过对多个密闭阶段的平衡浓度与各通风阶段释放的VOCs质量进行线性拟合,可获得 C_0 和 K .在此基础上,利用

物理模型对密闭阶段实验数据进行非线性拟合,可进一步确定 D .除此之外,多吸附平衡回归法^[51]和变承载率法^[52]也被提出用于测定人造板VOCs释放的三个释放特性参数,但这些方法的实验流程相对复杂.基于此,刘宁睿等人提出了双参数C-history法^[53],对实验过程进行了简化.该方法通过将材料置于环境舱中,在恒定流量的洁净空气条件下进行通风实验,并对舱内污染物浓度数据进行非线性拟合,从而获得释放特性参数(即 C_0/K 和 $KD^{0.5}/h_m$).该方法不仅涵盖了材料释放特性参数 C_0 、 D 、 K 的组合形式,还考虑了对流传质系数 h_m ,同时避免了非线性拟合过程中多解的问题.

对给定的建材和环境舱工况,双参数C-history法对应的解析解为^[53]

$$C_a(t) = \begin{cases} C_{a0}e^{-\frac{Q}{V}t} + \frac{h_m A}{V} \left(\frac{C_0}{K} - C_{a0} \right) \psi(t) \\ + \frac{h_m A}{V} C_{a0} \frac{Q}{V} \int_0^t e^{-\frac{Q}{V}(t-\tau)} \psi(\tau) d\tau \\ \text{若 } \alpha, \beta, \gamma \in R, \\ C_{a0}e^{-\frac{Q}{V}t} + \frac{h_m A}{V} \left(\frac{C_0}{K} - C_{a0} \right) \\ \times \int_0^t \left[e^{\alpha^2(t-\tau)} \text{erfc}(\alpha\sqrt{t-\tau}) \right] \frac{2a}{\pi} \Theta(\tau) d\tau \\ + \frac{h_m A}{V} C_{a0} \frac{Q}{V} \int_0^t e^{-\frac{Q}{V}(t-\tau)} \int_0^\tau \left[e^{\alpha^2(\tau-\lambda)} \text{erfc}(\alpha\sqrt{\tau-\lambda}) \right] \\ \times \frac{2a}{\pi} \Theta(\lambda) d\lambda d\tau \text{ 若 } \alpha, \beta, \gamma \text{ 存在虚数.} \end{cases} \quad (9)$$

式中, α, β, γ 为方程 $f(y) = y^3 + \frac{h_m}{K\sqrt{D}}y^2 + \frac{Q+h_m A}{V}y + \frac{h_m}{K\sqrt{D}}\frac{Q}{V} = 0$ 的根,

$$\psi(t) = \frac{e^{\alpha^2 t} \text{erfc}(\alpha\sqrt{t})}{(\beta-\alpha)(\gamma-\alpha)} + \frac{e^{\beta^2 t} \text{erfc}(\beta\sqrt{t})}{(\alpha-\beta)(\gamma-\beta)} + \frac{e^{\gamma^2 t} \text{erfc}(\gamma\sqrt{t})}{(\alpha-\gamma)(\beta-\gamma)},$$

$$\Theta(\tau) = \int_0^\infty \frac{\sqrt{x} e^{-x}}{(x+a^2-b^2)^2 + 4a^2b^2} dx.$$

1.3 温湿度对释放特性参数的影响

释放特性参数不仅取决于材料-VOC组合特性,还高度依赖于环境条件,尤其是温度和相对湿度.基于统计物理学,Huang等人^[54]推导了初始浓度 C_0 与温度之间的关系式.Zhang等人^[55]在综合考虑材料对VOCs的释放与吸附行为基础上,建立了分配系数 K 与温度的理论

关系。Deng等人^[56]则基于VOCs在材料内部的扩散过程,构建了扩散系数 D 与温度之间的关系模型。

$$\ln(C_0 T^{0.5}) = -\frac{A_1}{T} + A_2, \quad (10)$$

$$\ln(K T^{-0.5}) = -\frac{K_1}{T} + K_2, \quad (11)$$

$$\ln(D T^{-1.25}) = -\frac{D_1}{T} + D_2, \quad (12)$$

式中, A_1 、 A_2 、 D_1 、 D_2 、 K_1 、 K_2 为与温度无关的常数,并且只与材料的物理化学性质-VOC组合有关。

一旦确定上述六个常数,相关关系式即可用于预测不同温度条件下的释放特性参数。多种材料中VOCs释放特性参数的实验分析表明,相关性拟合结果与实测数据具有良好一致性^[54-60]。

除温度外,相对湿度(RH)在VOCs释放行为中亦起重要作用,但其对释放特性参数的影响较温度更为复杂。Huang^[61]通过对中密度纤维板(MDF)甲醛释放实验数据的分析,提出了 C_0 与RH之间的指数关系。Liang等人^[58]在不同相对湿度条件下测定了MDF中甲醛的三个释放特性参数,结果表明 C_0 与RH呈经验性正线性关系。相比之下,RH对分配系数 K 的影响尚未形成一致结论,且与具体材料-VOC组合密切相关。Xu和Zhang^[62]研究了甲苯在硅酸钙中的吸附行为,发现 K 值随RH增加而降低。Deng^[63]对地毯中五种VOCs的吸附特性进行研究,结果表明乙苯、十一烷和十二烷的 K 值随RH增加而降低,而苯甲醛和1,2-二氯苯的 K 值则在25%~50% RH范围内增加,在50%~80% RH范围内降低。此外,对于VOCs而言,相对湿度对扩散系数 D 的影响通常被忽略^[58,62-64]。

上述研究多基于单一变量(温度或相对湿度)进行分析,而在实际室内环境中,二者往往同时变化,因此有必要考虑其耦合作用对结果的影响。针对建筑材料VOCs释放问题,Xiong等人^[65]导出了如下公式:

$$C_0 = \frac{C_{01}}{T^{0.5}} \exp\left(C_{02} \cdot \text{RH} - \frac{C_{03}}{T}\right), \quad (13)$$

$$E = E_1 T^{0.75} \exp\left(E_2 \cdot \text{RH} - \frac{E_3}{T}\right), \quad (14)$$

其中, C_{01} 、 C_{02} 、 C_{03} 、 E_1 、 E_2 和 E_3 为正的常数,它们与温度和相对湿度无关; E 为VOCs的稳态释放速率。

式(13)和(14)反映了温度和相对湿度对VOCs的 C_0 和 E 的综合影响。当针对某一特定材料——VOC组合在三组及以上环境条件下测定 C_0 和 E 后,可通过非线性拟合确定六个参数。它们可预测不同温度和相对湿度下

的 C_0 和 E ,对工程应用有重要的指导意义。

1.4 测试准确性保障: 标准释放源

标准释放源,即具有独立已知释放速率的样本,可定量评估环境试验舱测试结果的综合误差(包括环境舱产生的误差、采用设备的误差、检测人员造成的误差以及测试仪器的误差),并评估建筑材料污染物释放特性参数测量的相对误差。作者团队研发出甲醛和苯的标准释放源(liquid-inner tube diffusion-film emission sample, LIFE)^[66],获得国家授权发明专利(ZL20101052-3348.0; 201010202563.0),被作为国家标准物质(证书号: 国制标物19921136号)。该标准释放源具有以下优点: (1) 在恒定条件下释放速率稳定; (2) 释放持续时间长(超过1000小时); (3) 无需加热或供气系统即可直接用于环境舱测试^[66-68]。

1.5 材料VOCs通用释放公式: 材料实测释放速率的外推和比对

在室内空气质量研究中,如何比对不同环境舱及测试条件下(环境舱体积、空气温度、换气率、材料承载率即材料表面积与试验箱体积之比)的材料释放速率,如何将特定实验条件下获得的释放数据外推至实际使用条件,一直是需要破解的关键技术难题。为此,Zhang和Xu^[69]采用无量纲分析方法,导出了预测不同环境和工况条件下VOCs释放速率的通用公式(式(15)和式(16))。他们发现,无量纲化后的VOCs释放率或浓度主要受两个关键参数控制: 一是传质Biot数与分配系数之比(Bi_m/K),反映材料内部扩散与表面对流传质之间的相对关系; 二是质量传递傅里叶数($Fo_m = Dt/L^2$),表征扩散过程的时间尺度效应; 在此基础上,Qian等人^[70]对其又做了拓展,并结合已有实验数据进行了系统验证; 进一步地,Xiong等人^[71]针对密闭试验舱条件,导出了材料VOCs释放速率公式,并通过实验证实了其精度可满足工程应用要求。

$$\dot{m}^* = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2u_n^2 \cdot \sin^2 u_n}{u_n^2 + u_n \cdot \sin u_n \cdot \cos u_n} \cdot e^{-u_n^2 Fo_m}, \quad (15)$$

$$u_n \cdot \tan u_n = Bi_m / K, n = 1, 2, \dots, \quad (16)$$

式中, u_n 为式(16)的正根。

上述基于无量纲分析的材料VOCs释放公式,为不同试验条件下释放数据的统一表征与跨场景(从实验条件到实际使用条件)预测提供了理论基础。

2 建筑设计阶段室内空气质量控制方法与优化

室内空气污染物由于来源特征及形成机制不同,其在建筑设计阶段对应的控制思路也存在明显差异:对于以甲醛、苯等为代表的内源VOCs,以源头控制为主,通过建立室内材料VOCs释放模型,在工程设计阶段进行污染物浓度预测,确定材料种类及其用量;对于PM_{2.5}、PM₁₀等外源颗粒物,则通过通风过滤与空气净化设备配置及运行策略的优化为主.本节重点讨论颗粒物控制相关的空气净化策略、设备优化及控制目标确定问题.

2.1 空气净化设备选型

在当前“好房子”建设背景下,如何在设计阶段或实际使用阶段之前合理配置室内空气质量控制设备,在保障空气质量达标的前提下实现能耗或成本的最优平衡,已成为实际应用中的关键问题.从实际使用需求出发,室内环境控制应优先保障空气质量达标,其次满足热舒适要求(温度与相对湿度处于合理区间),并在此基础上降低系统能耗与成本.

因此,在建筑设计阶段或实际使用之前,空气净化设备的选择不应仅依据额定净化效率或经验参数,而需要综合考虑室内空气质量目标、室外污染水平、建筑通风特性以及设备全生命周期运行表现.对于同一室内空气质量目标,多种不同空气处理方略(如空气净化器、新风系统及热回收新风系统等)在设备初投资、运行能耗和成本、滤网更换频率等方面会存在显著差异.因此,仅依据单一性能参数难以实现空气净化设备的合理配置.

基于工程应用需求,作者团队提出了一种面向实际项目的空气净化设备遴选方法^[72],其基本流程如下(图4):(1)明确项目基础条件,包括建筑空间尺寸、人员密度、通风方式(自然通风或机械通风)、渗风情况及室外空气质量与气象条件;(2)在满足室内空气质量与热舒适前提下,对不同空气处理方案(如空气净化器、无热回收新风系统及热回收新风系统)进行选型,确定设备洁净空气量(clean air delivery rate, CADR),并考虑过滤效率;(3)结合设备运行特性与滤网寿命参数(如累计净化量(cumulate clean mass, CCM)),评估滤网更换频率及维护成本;(4)综合空气净化设备的初始投资与运行费用,对不同方案进行对比分析,以能耗或成本

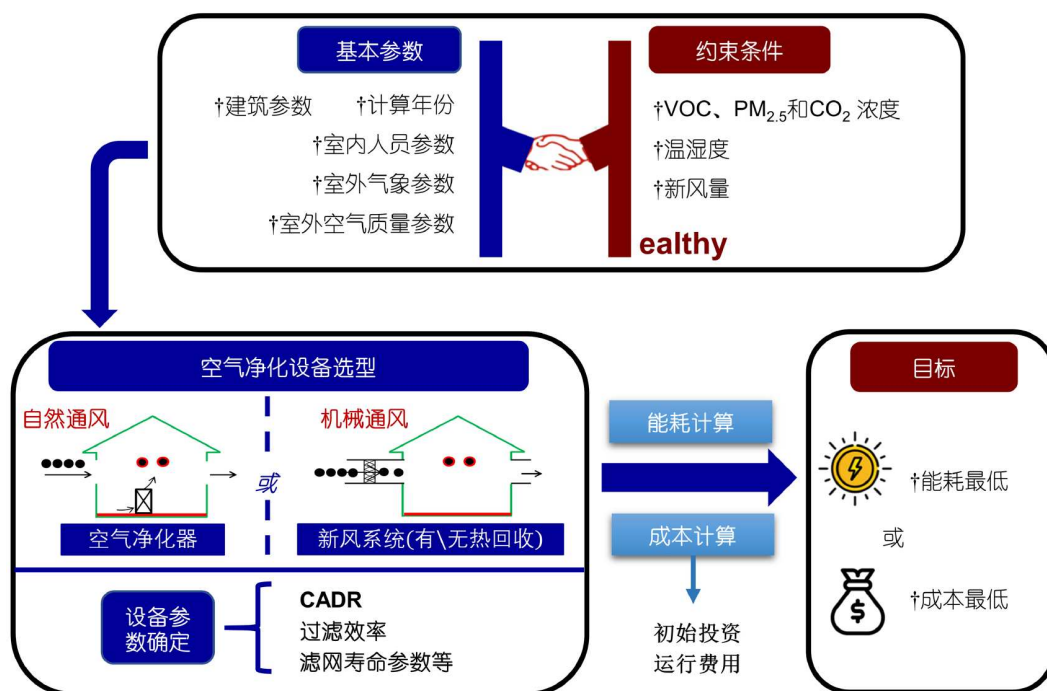


图4 (网络版彩色)空气净化设备选择原则

Figure 4 (Color online) Guidelines for selecting air purification equipment

最优为目标确定最终设备配置方案及运行策略。下面将分别给出空气净化器与新风系统的能耗及成本计算方法。

2.1.1 空气净化设备的能耗计算

对于空气净化器,随着运行时间延长及滤网积尘增加,其过滤阻力逐渐增大,导致风量下降,从而引起CADR衰减。作者团队假设空气净化器的额定CADR随滤网积尘量呈线性降低关系^[73],其运行电耗按式(17)~(19)计算:

$$W_{AP} = \sum \frac{w_{CADR} \cdot CADR_{AP}}{1 - M_{AP} / CCM} \Delta t, \quad (17)$$

$$M_{AP, total} = \sum CADR_{AP} \cdot C_{in, PM} \Delta t, \quad (18)$$

$$M_{AP} = M_{AP, total} - N_{AP} \cdot CCM, \quad (19)$$

式中, W_{AP} 为空气净化器的耗电量, kWh; w_{CADR} 为单位CADR的功耗, $W/(m^3 h^{-1})$; $CADR_{AP}$ 为空气净化器的洁净空气量CADR, m^3/h ; CCM为累积净化量, 即CADR衰减至初始值的50%时所对应的 $PM_{2.5}$ 累计去除质量, mg; M_{AP} 和 $M_{AP, total}$ 分别为滤网的积尘量和总积尘量, 当滤网积尘量达到CCM时需进行更换, mg; N_{AP} 为空气净化器滤网的更换次数(取自然数); $C_{in, PM}$ 为室内颗粒物浓度, mg/m^3 。

对于新风系统,随着滤网负荷增加,其阻力不断升高。为维持既定新风量,需要提高风机运行频率,从而增加系统能耗。作者团队假设新风系统滤网阻力与积尘量呈线性关系^[74],其电耗按式(20)~(22)计算:

$$W_{FA} = \sum w_{FA} G_{FA} (1 + M_{FA} / M_0) \Delta t, \quad (20)$$

$$M_{FA} = \sum \eta_m G_{FA} C_{out, PM} \Delta t, \quad (21)$$

$$M_{FA} = M_{FA, total} - N_{FA} \cdot M_0, \quad (22)$$

式中, W_{FA} 为新风系统的耗电量, kWh; w_{FA} 为单位新风量对应的功耗, $W/(m^3 h^{-1})$; G_{FA} 为新风量, m^3/h ; M_0 为滤网容尘量, 即阻力增长至初阻力两倍时的积尘量, mg; M_{FA} 和 $M_{FA, total}$ 分别为滤网积尘量和总积尘量, 当积尘量达到容尘量时需更换滤网, mg; η_m 为新风系统的一次过滤效率, 无量纲; N_{FA} 为新风系统滤网的更换次数(取自然数); $C_{out, PM}$ 为室外颗粒物浓度, mg/m^3 。

2.1.2 空气净化设备的成本计算

考虑到空气净化设备(如空气净化器和新风系统)在实际工程中的典型设计使用寿命通常约为10年,且相关空气净化设备经济性研究多采用10年作为评价周期^[75],因此,本文统一采用10年作为经济性评价周期。

房间总费用由初始投资和运行费用构成,按式(23)计算。其中,初始投资仅考虑空气净化设备购置成本,并按10年折旧处理^[75]。运行费用包括设备运行电费($OC_{AP/FA}$)、采暖空调能耗费用(OC_{AC})以及滤网更换费用($OC_{filter, AP/FA}$)。其中,空气净化器与新风系统的滤网更换成本分别按式(24)与式(25)计算。

$$\begin{aligned} Cost_{total} &= \frac{IC_{AP/FA}}{10} + OC_{total} \\ &= \frac{IC_{AP/FA}}{10} + OC_{AP/FA} + OC_{AC} + OC_{filter, AP/FA}, \end{aligned} \quad (23)$$

$$OC_{filter, AP} = \frac{M_{AP, total}}{CCM} \times UP_{filter, AP}, \quad (24)$$

$$OC_{filter, FA} = \frac{M_{FA, total}}{M_0} \times UP_{filter, FA}, \quad (25)$$

式中, $Cost_{total}$ 为房间总费用, 元; $IC_{AP/FA}$ 为空气净化器或新风系统的购置费用, 元; OC_{total} 为年运行总费用, 元; $UP_{filter, AP}$ 和 $UP_{filter, FA}$ 分别为空气净化器和新风系统的滤网更换单价, 元。

2.2 空气净化设备适用面积计算方法

在我国大气污染水平较高、雾霾天气频发的背景下,室外空气往往是室内颗粒物的主要来源。因此,空气净化设备适用面积的确定不宜简单套用国外标准,而应结合我国以外源污染为主的实际工况进行分析。

在完成设备选型后,为便于工程设计与产品应用中的快速匹配,有必要建立洁净空气量与房间面积之间的对应关系。作者团队基于稳态条件并忽略室内污染源影响,构建了简化计算方法,实现空气净化设备处理能力与适用空间范围的定量关联,从而为项目设计选型及产品应用提供直观、可操作的参考依据。

根据质量守恒定律,假设房间内颗粒物混合均匀,带空气净化设备的室内污染物传质模型如下:

$$V \frac{dC}{dt} = E + C_{out, PM} Q_p - CQ - kVC - CADR \cdot C, \quad (26)$$

式中, V 为房间体积, m^3 ; t 为时间, h; E 为室内颗粒物产生的源强度, mg/h ; Q 为自然通风换气量, m^3/h ; P_p 为颗粒物从室外进入室内的穿透系数, 颗粒物穿透系数的单位为无量纲; C 为颗粒物浓度, mg/m^3 ; k 为室内颗粒物的沉积率, h^{-1} ; $CADR$ 为空气净化设备去除颗粒物的洁净空气量, m^3/h 。

假设室内源强忽略不计,对稳态的情况式(26)等号左边项为0。将自然通风换气量 $Q(m^3/h)$ 表示为换气次数ACH(h^{-1})乘以房间体积 $V(m^3)$,并将体积 $V(m^3)$ 表示为高

度 $H(m)$ 乘以房间面积 $A(m^2)$, 式(26)可以写为

$$A = \frac{CADR \cdot C}{H[ACH(C_{out, PM} P_p - C) - kC]} = \lambda \cdot CADR, \quad (27)$$

计算出式(27)中的系数 λ 即可得出空气净化器的适用面积与洁净空气量CADR的关系式. 其中, 系数 λ 的倒数为房间每平方米所需洁净空气量, 消费者可以根据此参数和房间面积挑选洁净空气量合适的空气净化器. 为保证空气净化器能够在不利工况下达到所要求的净化效果, 建议系数 λ 取0.15, 对应的适用面积-洁净空气量关系式为

$$A = 0.15 \cdot CADR. \quad (28)$$

2.3 空气净化设备在不同地区的优化选择和运行

在完成空气净化设备类型确定及其适用面积匹配后, 实际工程应用中仍需进一步考虑区域差异对设备选型与运行策略的影响. 随着健康与低碳发展需求的不断提升, 室内环境营造正逐步向高效、节能与健康协同优化转变^[76]. 在此背景下, 我国不同城市在室外污染水平、气候条件、能源价格及居民健康风险等方面存在显著差异, 若仅依据统一参数进行设备配置, 难以实现效果与成本的最优平衡. 因此, 有必要在前述选型与能力匹配基础上, 结合区域特征对空气净化方案进行进一步优化.

针对上述问题, 作者团队提出一个经济效益比(coefficient of economic benefit, CEB)的综合评价指标, 如等式(29)所示:

$$CEB = \frac{EB}{CC} = \frac{HB + ESB}{CC}, \quad (29)$$

式中, EB为经济收益, 元/年; CC为经济代价, 元/年; HB为健康收益, 元/年; ESB为节能收益, 元/年.

基于该指标, 进一步构建了适用于不同室内环境的污染物综合净化模型^[77], 该模型可以为中国居民选择最佳的室内空气净化策略提供科学指导. 相关方法已在我国31个省会城市开展应用分析, 结果表明, 不同区域间空气净化策略的经济效益比差异可达3倍以上. 总体而言, 对于北京、天津等室外污染水平较高地区, 优先推荐采用带过滤的新风系统; 而在污染水平相对较低地区, 则可优先考虑空气净化器或结合自然通风的方式, 以降低系统投资与运行成本.

从设备优化角度看, 当前空气净化器对 $PM_{2.5}$ 的去除能力仍是健康收益(health benefits, HB)的主要来源,

而初始购置成本则是经济代价(control cost, CC)的关键构成. 因此, 在产品研发与选型过程中, 应在控制设备成本的同时, 提升对多种污染物的综合净化能力, 以实现整体效益的提升(以最大化EB).

此外, 上述分析主要针对一般室内空气净化设备配置与运行优化. 在实际工程应用中, 对于厨房等典型高污染场景, 由于烹饪活动会在短时间内产生较高浓度的颗粒物, 还需进一步考虑局部排风设备与空气净化设备间的协同作用. 此外, 油烟机与空气净化设备在高负荷运行时往往伴随较高噪声, 会直接影响用户接受度. 因此, 在满足室内空气质量与热舒适要求的前提下兼顾噪声控制, 可进一步提升系统整体性能. 针对该类典型使用空间, 基于上述模型对不同控制策略进行了多目标分析, 综合考虑健康效益、能耗及运行成本, 提出了适用于不同地区的优化运行方案. 相关结果表明, 通过合理配置油烟机与空气净化设备的运行方式, 可在降低污染暴露的同时提升经济性与使用舒适度, 从而为空气净化设备及厨房通风系统的选型与运行提供更具针对性的指导^[78].

2.4 室内空气质量标准目标污染物及其控制阈值

在室内空气质量控制中, 除确定相应的控制手段外, 还需明确“控制对象及控制水平”, 即优先控制哪些污染物以及其合理限值范围. 这一问题直接关系到控制策略的制定及其实施效果, 是实现量化设计与优化的关键基础.

如何科学确定室内空气质量(IAQ)控制的目标污染物及其限值, 已成为推进“好房子”建设的关键基础问题之一. 世界卫生组织(WHO)的空气质量指南是以健康标准为依据^[6,79]. 然而, 在实际工程应用中, 各国室内空气质量标准除考虑健康保护外, 还需兼顾经济成本可行性, 这使得优先控制的IAPs及其限值设定在不同国家之间存在差异. 正如Morawska等人^[4]所指出, 将室内空气质量标准转化为可实施的控制措施, 不仅能够改善公众健康, 还具有显著的经济收益.

现有研究为此提供了重要支撑. Liu等人^[6]基于疾病负担评价方法, 采用残疾调整生命年(DALYs)结合人群归因分数(population attributable fraction, PAF)模型, 在国家及省级尺度上系统评估了十种典型IAPs的健康影响, 并通过修正的人力资本法进一步量化其经济负担. 结果表明, 尽管2000~2017年我国相关污染物导致的DALYs呈下降趋势(由每10万人4620降至3700), 但其

经济负担仍高达2.88万亿元(约占GDP的3.45%)。基于DALYs贡献的比较分析,识别出优先控制污染物序列:PM_{2.5}、一氧化碳、氡、苯、二氧化氮、臭氧、二氧化硫、甲醛、甲苯及对二氯苯(图5),为“好房子”中优先控制污染物的确定提供了量化依据。

在此基础上,针对“控制到什么水平更合理”的问题, Yang等人^[79]提出了“最优控制浓度”(optimal control concentration, OCC)的概念,通过最大化净经济效益(net economic benefit, NEB, 即收益减去成本)来确定污染物的合理控制水平。以中国为例,研究表明,室内PM_{2.5}和甲醛的OCC分别约为15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[79]。在该控制水平下,室内空气污染(PM_{2.5}和甲醛)治理每年可带来约3600和4790亿元人民币的净经济收益(图6)。在PM_{2.5}浓度为15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (即OCC)时,其NEB显著高于以WHO指南为目标(5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)所对应的净经济结果(NEB为-3400亿元人民币),以及满足GB/T 18883-2022所带来的净经济收益(约800亿元人民币)。该方法为在保障健康前提下实现“经济可承受、工程可实施”的室内空气质量控制提供了关键支撑,是“好房子”从“达标”迈向“安全、绿色”的重要理论基础。

需要指出的是,对于一氧化碳、氡、臭氧等其他污染物,由于其来源特征、传输机制及控制方式与VOCs和PM_{2.5}存在较大差异,室内空气质量预评控尚未考虑,需要进一步研究。

3 工程应用与实践

室内空气质量预评控理论与方法在标准体系构建、评测设备、软件研发及工程实践中得到系统应用,



图5 (网络版彩色)2017年中国大陆前十种典型室内空气污染物所致的DALYs率(每10万人)

Figure 5 (Color online) DALY rates per 100000 attributable to ten targeted IAPs in Chinese mainland in 2017

并荣获2020年度北京市科学技术进步奖一等奖。

在建材、家具污染物测试方法和标准方面,相关模型与参数测定方法已被国内外标准采纳。Xu和Zhang^[37]提出的释放模型及其无量纲参数与关联关系,已被纳入ASTM D8141-17,用于指导VOCs及半挥发性有机化合物(semi-volatile organic compounds, SVOCs)释放特性参数的测试方法选择; Zhang等人^[55]关于分配系数K的温度相关性已被美国环境保护署(EPA)发布的软件工具(版本1.0, 2017)所采用; Wei等人^[66-68]提出的LIFE方法(如室内甲醛释放标准样),被美国国家标准技术研究院(NIST)采用; “C-history法”已成为国家标准《木家具中挥发性有机化合物释放速率检测 逐时浓度

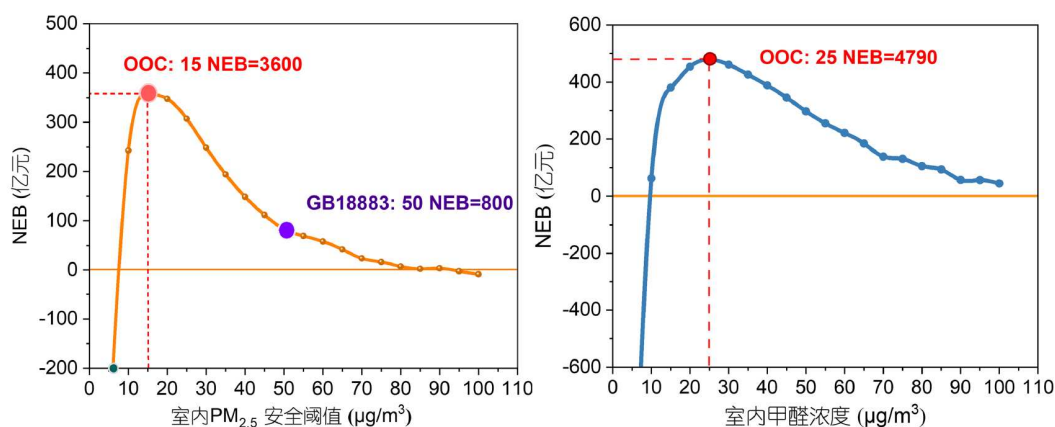


图6 (网络版彩色)不同室内空气污染物浓度控制阈值与NEB之间的关系^[79]

Figure 6 (Color online) Relationship of the NEB with the targeted IAP thresholds^[79]

法》(GB/T 38723-2020)和建材行业标准《木质复合板材污染物释放特性参数检测方法》(JC/T 2626-2021),成为我国建材与家具行业的重要检测手段。上述研究使材料污染物释放特性参数能够进一步服务于建筑工程设计阶段的污染物浓度预测与材料选型,从而实现由“材料单体达标”向“室内空气质量整体达标”的转变。

在上述理论基础上,作者团队进一步研发了室内空气质量预评控系列软件,集成了材料VOCs释放模型、释放特性参数数据库、室内污染物浓度预测模型、空气净化设备选型方法以及健康—能耗—成本综合优化方法,可实现:(1)建筑设计阶段室内污染物浓度预测;(2)不同材料及家具配置方案的空气质量影响评估;(3)通风、新风及空气净化设备的优化选型等。与传统“竣工后检测治理”的模式不同,该方法能够在建筑设计阶段提前识别潜在空气质量风险,并通过材料替换、通风优化及空气净化设备配置等手段进行预防性控制,实现室内空气质量“事前控”。相关成果已被纳入《健康建筑评价标准》(T/ASC 02-2016, 2016版与2021版)和《公共建筑室内空气质量控制设计标准》(JGJ/T 462-2019)等标准体系,为建筑工程室内空气质量设计评价提供了技术支撑。

上述成果被应用于载人空间站、国防舰船、国家

博物馆、北京大兴国际机场、冬奥速滑馆和字节跳动大楼等工程,并被十余家房地产企业采用,保障了这些工程在竣工验收和使用时室内空气质量100%达到标准或预设要求。依托《健康建筑评价标准》(T/ASC 02-2016, 2021版)及其配套软件,2017年以来获评健康建筑星级标识的建筑工程面积累计超过5500万平方米,遍及全国28个省级行政区。

4 结论与展望

室内空气质量设计阶段的量化预评控,是保障“好房子”室内空气质量的关键举措,也是防控室内空气污染最节约和治本的方法,可有效解决以往室内空气污染治理中防患于未然难、健康低碳兼顾难的问题。

室内空气质量预评控研究仍有若干关键问题值得进一步开展:(1)需识别新污染物(如半挥发性有机化合物, SVOCs)及其健康危害,其关乎亿万民众健康,但目前仍是室内空气质量预评控的盲点;(2)需推动现有全国统一标准向分区域、分人群、分场景的精细化标准体系发展。

此外,随着人民群众对室内空气质量要求的不断提高,新的问题也将不断出现。室内空气质量保障与改善研究不可能一劳永逸,而将始终是一项持续推进的重要工作。

参考文献

- 1 Shaddick G, Thomas M L, Mudu P, et al. Half the world's population are exposed to increasing air pollution. *npj Clim Atmos Sci*, 2020, 3: 23
- 2 Lewis A C, Jenkins D, Whitty C J M. Hidden harms of indoor air pollution — five steps to expose them. *Nature*, 2023, 614: 220–223
- 3 The Lancet. Clearing the air for a sustainable future. *Lancet*, 2023, 402: 159
- 4 Morawska L, Allen J, Bahnfleth W, et al. Mandating indoor air quality for public buildings. *Science*, 2024, 383: 1418–1420
- 5 World Health Organization. An estimated 12.6 million deaths each year are attributable to unhealthy environments. 2016-03-15
- 6 Liu N R, Liu W, Deng F R, et al. The burden of disease attributable to indoor air pollutants in China from 2000 to 2017. *Lancet Planet Health*, 2023, 7: e900–e911
- 7 Wolkoff P. Volatile organic compounds: sources, measurements, emissions, and the impact on indoor air quality. *Indoor Air*, 1995, 5: 35–49
- 8 Wolkoff P, Wilkins C K, Clausen P A, et al. Organic compounds in office environments - sensory irritation, odor, measurements and the role of reactive chemistry. *Indoor Air*, 2006, 16: 7–19
- 9 Yu C, Crump D. A review of the emission of VOCs from polymeric materials used in buildings. *Building Environ*, 1998, 33: 357–374
- 10 Lunderberg D M, Misztal P K, Liu Y, et al. High-resolution exposure assessment for volatile organic compounds in two California residences. *Environ Sci Technol*, 2021, 55: 6740–6751
- 11 You B, Zhou W, Li J, et al. A review of indoor gaseous organic compounds and human chemical exposure: insights from real-time measurements. *Environ Int*, 2022, 170: 107611
- 12 Liu C, Zhang Y. Relations between indoor and outdoor PM_{2.5} and constituent concentrations. *Front Environ Sci Eng*, 2019, 13: 5
- 13 Zhang Y, Xiong J, Mo J, et al. Understanding and controlling airborne organic compounds in the indoor environment: mass transfer analysis and applications. *Indoor Air*, 2016, 26: 39–60
- 14 Blue Angel. RAL-UZ 38: low-emission wood products and wood-based products. German Institute for Quality Assurance and Certification, 2002

- 15 RTS. M1 emission classification of building materials: protocol for chemical and sensory testing of building materials. Finland: Technical Research Centre VTT, 2004
- 16 Gemeinschaft Umweltfreundlicher Teppichboden. GUT product test, criteria and limit values. 2004
- 17 AgBB. A contribution to the construction products directive: health-related evaluation procedure for volatile organic compounds emissions (VOC and SVOC) from building products. 2008
- 18 ANSI/BIFMA. M7.1. Standard test method for determining VOC emissions from office furniture systems, components and seating. 2007
- 19 Nordic Ecolabelling Board. Swan labelling of furniture and fitments. Nordic Council of Ministers, 2009
- 20 Nordic Ecolabelling Board. Swan ecolabelling of floorings. Nordic Council of Ministers, 2009
- 21 Nordic Ecolabelling Board. Swan labelling of panels for the building, decorating and furniture industry. Nordic Council of Ministers, 2009
- 22 Nordic Ecolabelling Board. Ecolabelling of adhesives. Nordic Council of Ministers, 2009
- 23 Danish Society of Indoor Climate. The indoor climate label general labelling criteria. Danish Technological Institute, 2004
- 24 Natureplus. Controlling and assessing the environmental performance of building products by an international label of quality. Austrian Institute for Healthy and Ecological Buildings, 2007
- 25 Maupetit F, Ramalho O, Robine E, et al. A voluntary evaluation scheme of the environmental and health-based characteristics of building products in France. Harmonisation of indoor material emissions labelling systems in the EU, 2005
- 26 California Department of Public Health (CDPH). California Specification 01350. Standard method for the testing and evaluation of volatile organic chemical emissions from indoor sources using environmental chambers, Version 1.1. 2010
- 27 Greenguard Environmental Institute. Method for measuring chemical emissions from various sources using dynamic environmental chambers. Air Quality Sciences, 2007
- 28 SCS. EC10.2. Environmental certification program for indoor air quality performance. Environmental Claims Certification Division Scientific Certification Systems, 2007
- 29 CRI. Green label plus: carpet and adhesives. The Carpet and Rug Institute, 2007
- 30 Eco-mark Japan. Product category No. 130, furniture version1.3. Japan Environment Association, 2007
- 31 Korea Eco label. EL723. Criteria of recycled wood products. 2004
- 32 Little J C, Hodgson A T, Gadgil A J. Modeling emissions of volatile organic compounds from new carpets. *Atmos Environ*, 1994, 28: 227–234
- 33 Yang X, Chen Q, Zhang J S, et al. A mass transfer model for simulating VOC sorption on building materials. *Atmos Environ*, 2001, 35: 1291–1299
- 34 Yang X, Chen Q, Zhang J S, et al. Numerical simulation of VOC emissions from dry materials. *Building Environ*, 2001, 36: 1099–1107
- 35 Huang H, Haghighat F. Modelling of volatile organic compounds emission from dry building materials. *Building Environ*, 2002, 37: 1349–1360
- 36 Deng B, Kim C N. An analytical model for VOCs emission from dry building materials. *Atmos Environ*, 2004, 38: 1173–1180
- 37 Xu Y, Zhang Y. An improved mass transfer based model for analyzing VOC emissions from building materials. *Atmos Environ*, 2003, 37: 2497–2505
- 38 Kumar D, Little J C. Characterizing the source/sink behavior of double-layer building materials. *Atmos Environ*, 2003, 37: 5529–5537
- 39 Deng B, Tang S, Kim J T, et al. Numerical modeling of volatile organic compound emissions from multi-layer dry building materials. *Korean J Chem Eng*, 2010, 27: 1049–1055
- 40 Hu H P, Zhang Y P, Wang X K, et al. An analytical mass transfer model for predicting VOC emissions from multi-layered building materials with convective surfaces on both sides. *Int J Heat Mass Transfer*, 2007, 50: 2069–2077
- 41 Wang X K, Zhang Y P. General analytical mass transfer model for VOC emissions from multi-layer dry building materials with internal chemical reactions. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 222–228
- 42 Li F, Niu J. Control of volatile organic compounds indoors—Development of an integrated mass-transfer-based model and its application. *Atmos Environ*, 2007, 41: 2344–2354
- 43 Deng B Q, Yu B, Kim C N. An analytical solution for VOCs emission from multiple sources/sinks in buildings. *Sci Bull*, 2008, 53: 1100–1106
- 44 Wang H, Zheng J, Yang T, et al. Predicting the emission characteristics of VOCs in a simulated vehicle cabin environment based on small-scale chamber tests: parameter determination and validation. *Environ Int*, 2020, 142: 105817
- 45 Wang H, Guo D, Zhang W, et al. Observation, prediction, and risk assessment of volatile organic compounds in a vehicle cabin environment. *Cell Rep Phys Sci*, 2023, 4: 101375
- 46 Xiong J, Yao Y, Zhang Y. C-history method: rapid measurement of the initial emittable concentration, diffusion and partition coefficients for formaldehyde and VOCs in building materials. *Environ Sci Technol*, 2011, 45: 3584–3590
- 47 Huang Shaodan, Xiong Jianyin, Zhang Yinping. A rapid and accurate method, ventilated chamber C-history method, of measuring the emission characteristic parameters of formaldehyde/VOCs in building materials. *J Hazard Mater*, 2013, 261: 542–549
- 48 Wang H, Wang H, Xiong J, et al. A rapid and robust method to determine the key parameters of formaldehyde emissions from building and vehicle cabin materials: principle, multi-source application and exposure assessment. *J Hazard Mater*, 2022, 430: 128422

- 49 Zhang X, Cao J, Wei J, et al. Improved C-history method for rapidly and accurately measuring the characteristic parameters of formaldehyde/VOCs emitted from building materials. *Building Environ*, 2018, 143: 570–578
- 50 Zhou X, Liu Y, Liu J. Alternately airtight/ventilated emission method: a universal experimental method for determining the VOC emission characteristic parameters of building materials. *Building Environ*, 2018, 130: 179–189
- 51 Wang X, Zhang Y. A new method for determining the initial mobile formaldehyde concentrations, partition coefficients, and diffusion coefficients of dry building materials. *J Air Waste Manage Assoc*, 2009, 59: 819–825
- 52 Xiong J, Yan W, Zhang Y. Variable volume loading method: a convenient and rapid method for measuring the initial emittable concentration and partition coefficient of formaldehyde and other aldehydes in building materials. *Environ Sci Technol*, 2011, 45: 10111–10116
- 53 Liu N R. Principles and methods for pre evaluation and control of indoor air quality based on burden of disease (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2023 [刘宁睿. 基于疾病负担的室内空气质量预评控原理与方法. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2023]
- 54 Huang S, Xiong J, Zhang Y. Impact of temperature on the ratio of initial emittable concentration to total concentration for formaldehyde in building materials: theoretical correlation and validation. *Environ Sci Technol*, 2015, 49: 1537–1544
- 55 Zhang Y, Luo X, Wang X, et al. Influence of temperature on formaldehyde emission parameters of dry building materials. *Atmos Environ*, 2007, 41: 3203–3216
- 56 Deng Q, Yang X, Zhang J. Study on a new correlation between diffusion coefficient and temperature in porous building materials. *Atmos Environ*, 2009, 43: 2080–2083
- 57 Liu Y, Zhou X, Wang D, et al. A prediction model of VOC partition coefficient in porous building materials based on adsorption potential theory. *Building Environ*, 2015, 93: 221–233
- 58 Liang W, Lv M, Yang X. The effect of humidity on formaldehyde emission parameters of a medium-density fiberboard: experimental observations and correlations. *Building Environ*, 2016, 101: 110–115
- 59 Xiong J, Zhang Y. Impact of temperature on the initial emittable concentration of formaldehyde in building materials: experimental observation. *Indoor Air*, 2010, 20: 523–529
- 60 Wang Y, Wang H, Tan Y, et al. Measurement of the key parameters of VOC emissions from wooden furniture, and the impact of temperature. *Atmos Environ*, 2021, 259: 118510
- 61 Huang S D. Mechanism research of the temperature and relative humidity effects on the emission characteristic parameters (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2013 [黄少丹. 环境温湿度对建材VOC散发关键参数影响的机理研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2013]
- 62 Xu J, Zhang J S. An experimental study of relative humidity effect on VOCs' effective diffusion coefficient and partition coefficient in a porous medium. *Building Environ*, 2011, 46: 1785–1796
- 63 Deng Q Q. Modeling VOC sorption of building materials and its impact on indoor air quality (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2010 [邓琴琴. 建材吸附VOC特性及其对室内空气质量的影响研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2010]
- 64 Farajollahi Y, Chen Z, Haghighat F. An experimental study for examining the effects of environmental conditions on diffusion coefficient of VOCs in building materials. *CLEAN–Soil Air Water*, 2009, 37: 436–443
- 65 Xiong J, Zhang P, Huang S, et al. Comprehensive influence of environmental factors on the emission rate of formaldehyde and VOCs in building materials: correlation development and exposure assessment. *Environ Res*, 2016, 151: 734–741
- 66 Wei W, Zhang Y, Xiong J, et al. A standard reference for chamber testing of material VOC emissions: design principle and performance. *Atmos Environ*, 2012, 47: 381–388
- 67 Wei W, Howard-Reed C, Persily A, et al. Standard formaldehyde source for chamber testing of material emissions: model development, experimental evaluation, and impacts of environmental factors. *Environ Sci Technol*, 2013, 47: 7848–7854
- 68 Wei W, Xiong J, Zhao W, et al. A framework and experimental study of an improved VOC/formaldehyde emission reference for environmental chamber tests. *Atmos Environ*, 2014, 82: 327–334
- 69 Zhang Y, Xu Y. Characteristics and correlations of VOC emissions from building materials. *Int J Heat Mass Transfer*, 2003, 46: 4877–4883
- 70 Qian K, Zhang Y, Little J C, et al. Dimensionless correlations to predict VOC emissions from dry building materials. *Atmos Environ*, 2007, 41: 352–359
- 71 Xiong J, Zhang Y, Huang S. Characterisation of VOC and formaldehyde emission from building materials in a static environmental chamber: model development and application. *Indoor Built Environ*, 2011, 20: 217–225
- 72 Sun Z W. Research on the determination method of indoor air quality comprehensive control in residences (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2022 [孙之伟. 住宅建筑室内空气质量综合控制策略确定方法研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2022]
- 73 Zuraimi M S, Vuotari M, Nilsson G, et al. Impact of dust loading on long term portable air cleaner performance. *Building Environ*, 2017, 112: 261–269
- 74 Zhang X, Liu J, Liu X, et al. Performance optimization of airliner cabin air filters. *Building Environ*, 2021, 187: 107392

-
- 75 Liu Y, Zhou B, Wang J, et al. Health benefits and cost of using air purifiers to reduce exposure to ambient fine particulate pollution in China. [J Hazard Mater](#), 2021, 414: 125540
- 76 Zhang Y P. Call for innovative theory and technologies for healthy and low-carbon buildings. [Innovation Energy](#), 2024, 1: 100030
- 77 Zhuang W, Guo Y, Yang K, et al. Air purification equipment for classrooms in China: an overall indicator for selection based on health, energy consumption and cost. [Energy Buildings](#), 2025, 348: 116449
- 78 Zhuang W, Yang K, Wei J, et al. Optimization and operation of air purification strategies for open-kitchens and adjacent indoor spaces in Chinese urban dwellings. [Building Environ](#), 2026, 290: 114173
- 79 Yang K, Liu N, Weschler C J, et al. Maximizing the net economic benefits of regulating indoor air quality in China. [Sustain Cities Soc](#), 2024, 117: 105938

Summary for “建筑工程设计阶段室内空气质量量化预评控”

Quantitative pre-evaluation and control of indoor air quality in the building engineering design stage

Haimei Wang^{1,2,3}, Wenbin Zhuang^{1,2,3}, Jianyin Xiong⁴, Jingya Wei^{1,2,3}, Ying Xu^{1,3}, Charles J. Weschler^{1,3,5} & Yinping Zhang^{1,2,3*}

¹ Institute of Built Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

² State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science, Guangzhou 510640, China

³ Beijing Key Lab of Indoor Air Quality Evaluation and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China

⁴ School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

⁵ Environmental and Occupational Health Sciences Institute, Rutgers University, New Jersey 08854, USA

* Corresponding author, E-mail: zhangyp@tsinghua.edu.cn

Indoor air quality (IAQ) is a basic requirement for achieving “quality homes” and an essential indicator of healthy, sustainable, and low-carbon buildings. As people spend most of their time indoors, exposure to pollutants released from building materials, furnishings, occupant activities, and infiltrated outdoor air has become a major environmental health concern worldwide. Conventional IAQ management mainly relies on post-construction inspection and remediation after building completion, making pollution control costly and often ineffective because potential problems cannot be identified during the design process. Consequently, increasing attention has been directed toward quantitative pre-evaluation and control of IAQ at the building engineering design stage. Specifically, evaluating the emission rates and indoor concentrations of volatile organic compounds (VOCs), such as formaldehyde and benzene, under given environmental conditions provides a scientific basis for determining the selection and quantity of materials; in parallel, assessing the infiltration rate of outdoor pollutants, including PM_{2.5} and PM₁₀, through ventilation and air leakage supports the determination of required fresh air filtration or air purification loads, thereby guiding the selection of low-noise and energy-efficient air-cleaning systems. This approach facilitates proactive prevention of indoor air pollution while enabling coordinated optimization of indoor air quality and investment efficiency. This paper systematically reviews recent advances in quantitative pre-evaluation and control of IAQ, with particular emphasis on the research outcomes and practical experience of the authors’ team. Specifically, it (1) presents the theoretical framework for quantitative pre-evaluation and control of IAQ at the design stage based on a comprehensive understanding of pollutant transport from source to human exposure; (2) summarizes the emission mechanisms and models of VOCs from indoor materials, along with rapid methods for determining key parameters and their dependence on temperature and humidity; (3) develops generalized predictive correlations for VOC emission rates and cumulative emissions using dimensionless analysis; (4) introduces methods for air purification system selection and coverage estimation, together with energy-efficient IAQ control strategies; (5) identifies priority indoor pollutants based on disease burden and determines their concentration thresholds using net economic benefits; and (6) highlights the application of these approaches in IAQ-related standards and engineering practices. Overall, the studies reviewed here illustrate the development of a systematic framework for design-stage IAQ management that integrates pollutant emission characterization, concentration prediction, exposure assessment, and engineering decision-making, bridging theoretical development and engineering application. These advances provide a scientific foundation for future developments in health-oriented building design and life-cycle IAQ management and offer important technical support for the development of “quality homes”.

indoor air quality, volatile organic compounds, PM_{2.5}, source control, air purification, disease burden

doi: [10.1360/CSB-2026-0527](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0527)