

数据驱动的办公空间空气颗粒物——微生物复合污染源解析与健康风险智能调控研究

徐邹影^{1*}

(¹ 滁州职业技术学院 建筑工程学院, 安徽 滁州 239000)

摘要: 办公空间室内空气质量直接关系职业人群健康。针对传统研究将颗粒物与微生物孤立看待的局限, 本研究聚焦其复合污染问题, 提出数据驱动的研究范式。通过多维数据融合, 构建时空一体化源解析模型, 精准量化复合污染源; 结合毒理学实验, 揭示关键组分协同毒性, 建立源导向的健康风险评估模型; 进而融合长短期记忆网络与强化学习, 开发以最小化未来健康风险与系统能耗为目标的智慧调控策略。环境模拟与实证表明, 该策略可协同优化健康保障与节能目标, 为构建健康智慧办公环境提供了全链条解决方案。

关键词: 源解析; 健康风险评估; 数据驱动; 智慧调控; 办公空间; 室内空气质量

DOI: <https://doi.org/10.71411/rwxk.2026.v2i1.1060>

Data-Driven Analysis of Combined Particulate : Microbial Pollution Sources and Intelligent Health Risk Control in Office Spaces

Xu Zouying^{1*}

(¹ Chuzhou Polytechnic, School of Architectural Engineering, Chuzhou, Chuzhou,
Anhui, 239000, China)

Abstract: Indoor air quality in office environments is critically linked to the well-being of the occupational population. To address the limitation of conventional research approaches that treat particulate matter (PM) and microorganisms in isolation, this study focuses on their composite pollution and proposes a data-driven research paradigm. By integrating multi-dimensional data, a spatiotemporally coupled source apportionment model was constructed to accurately quantify the origins of composite pollution. Combined with toxicological experiments, the synergistic toxicity of key components was revealed, leading to the establishment of a source-oriented health risk assessment model. Furthermore, by integrating Long Short-Term Memory (LSTM) networks and reinforcement learning, an intelligent control strategy was developed with the objective of minimizing future health risks and system energy consumption. Environmental simulations and empirical validation demonstrate that this strategy can effectively and synergistically optimize both health protection and energy-saving goals, providing a compre-

基金项目: 2025年滁州职业技术学院自科(重点)科研项目: 数据驱动的办公空间空气颗粒物-微生物复合污染源解析、健康风险评估与智慧调控 (ZKZ-2025-9)

作者简介: 徐邹影 (1987-), 女, 安徽滁州, 硕士, 讲师, 研究方向: 建筑环境

通讯作者: 徐邹影, 通讯邮箱: 965140454@qq.com

nsive, full-chain solution for building healthy and smart office environments.

Keywords: Source Apportionment; Health Risk Assessment; Data-Driven; Intelligent Control; Office Space; Indoor Air Quality

引言

办公空间作为现代城市人群日间驻留最长的室内环境，其空气质量是决定职业人群健康福祉、认知表现与工作效率的基石性要素^[1]。在智能时代，科技的飞速进步深刻影响着建筑领域的发展方向。室内环境作为建筑与使用者交互的核心空间，其智能调控技术的发展不仅关乎人体舒适体验，更与建筑能耗、绿色低碳目标紧密相连^[2]。

有关室外微生物气溶胶的研究大多集中在楼顶高平台的采样点位，且环境参数及相关影响因素与微生物气溶胶间的关联研究结论尚未完全统一，但由于微生物是衡量空气质量的重要指标之一^[3]，且微生物会附着在颗粒物上而增强其活性和传染性。故在对建筑室内^[4]和通勤机动车微生物污染研究^[5]的基础上，本文研究发现，二者在真实环境中紧密耦合，细颗粒物（如 PM2.5）凭借其广阔的比表面积与复杂的化学性质，成为微生物（细菌、真菌、病毒等）理想的附着载体与远程运输工具，共同形成一种物理化学及生物学特性更为复杂的复合污染物——“颗粒物-微生物复合体”（Particulate Matter-Microbe Complexes, PMC）。会导致支气管炎、肺气肿等疾病且颗粒物再悬浮会引发附在颗粒上的微生物气溶胶浓度升高^[6]。对 PMC 认知上的模糊，直接导致了当前办公环境管理中一个环环相扣、逐级放大的三重挑战：

(1) 溯源之困：复合来源的归困难题。传统的源解析技术（如 PMF）依赖于化学组分的质量守恒，对于具有生长、代谢等生命活性的微生物“标签”束手无策。对大气颗粒物污染治理进行科学决策，需要了解颗粒物污染的排放源，对污染物的来源进行解析。大气颗粒物来源解析是指通过化学、物理学和数学等方法定性或定量识别大气颗粒物的来源。定性解析是对机动车源、餐饮油烟源等排放源的来源构成进行解析，定量解析要具体到每种排放源的贡献占比^{[7][8]}。

(2) 评估之困：协同风险的量化黑箱。由于环境健康领域涉及环境暴露、健康以及其他相关因素等数据，具有数据种类多、数据量大、数据结构不一致、数据质量参差不齐^[9]等特点。现行的健康风险评估框架普遍基于单一污染物的剂量-效应关系，系统性地忽略了 PMC 内部组分间复杂的协同毒性作用。这导致风险评估结果沦为对真实健康威胁的粗略估计，无法为环境调控提供精确的、风险导向的目标。

(3) 调控之困：健康与节能的永恒博弈。建筑能耗在我国社会总能耗的比重高达 25% 且呈逐年上升趋势。目前我国建筑普遍存在室内环境质量舒适性差、健康舒适性能普遍不高，且付出的能源消耗代价较高的问题。如何用较低的能耗尽可能提高室内环境质量和用户满意度，是提升人民健康和节能减排的关键^[10]。

为打破这一从“认知-评估-调控”的全链条困境，本研究主张必须进行一场由数据驱动的方法论革新。优化方案整合智能配料、在线监测与过程控制系统，实现工艺参数实时调整^[11]，建立协同优化模型，提出运行参数优化、工艺流程优化及多目标协同控制策略^[12]，近年来，高精度在线监测技术（如 SPAMS）、高通量测序技术与人工智能算法的融合发展，为我们提供了前所未有的能力，能够从海量、多源、异构的环境数据中深度挖掘 PMC 的内在关联与演化规律。

因此，本研究旨在构建并验证一个“源解析-风险评估-智慧调控”的全链条、数据驱动解决方案。具体而言，我们将：① 解构来源：开发一种融合化学指纹与微生物标签的时空一体化源解析模型，精准量化 PMC 的复合来源贡献；② 量化风险：通过体外毒理学实验揭示 PMC 关键组分的协同毒性机制，并构建一个源导向的动态健康风险指数；③ 智慧调控：最终，设计一种基于风险预测与强化学习的智慧调控策略，实现对未来健康风险与系统能耗的前瞻性、协同性优化。本研究不仅旨在理论与方法上深化对室内复合污染的科学认知，更致力于为下一代健康智慧

办公环境的构建，提供一套从机理洞察到工程实践的闭环技术方案与决策支持。

1 研究区域、数据与方法

为系统性地解决办公空间 PMC 复合污染问题，本研究设计并实施了一个涵盖“现场监测—数据融合—模型构建—策略验证”的全链条研究方案。整体技术路线如图 1 所示。

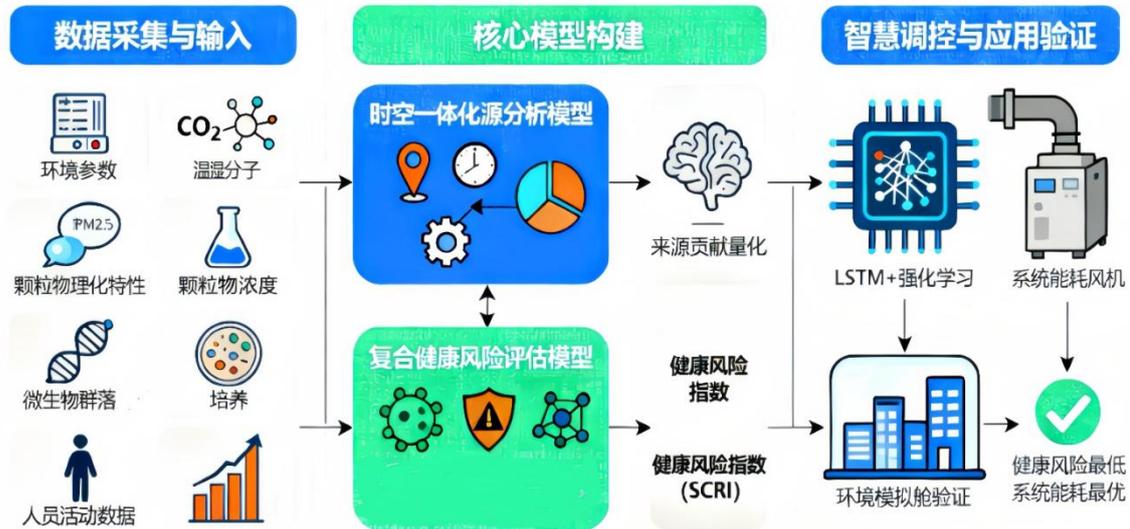


图 1 本研究技术路径框架图

1.1 实验设计与多维数据采集

1.1.1 研究场景与监测方案

在每个办公建筑内，依据功能区特点和气流组织，布设了 5 个监测点位，分别位于：中心办公区、临窗区域、走廊、会议室以及新风系统送风口附近。监测点位布局力求捕捉室内环境的水平与垂直（不同高度）差异性，形成三维监测网络。

1.2 数据采集与处理

本研究采集的数据主要包括环境参数、颗粒物特性、微生物样本以及人员活动数据。

1.2.1 环境参数监测

使用多功能环境监测仪（型号：TSI Q-Trak 7575）连续监测温度、相对湿度、CO₂浓度，数据记录间隔为 1 分钟。这些参数是影响颗粒物与微生物行为及人员舒适度的关键因子。

1.2.2 颗粒物特性监测

质量浓度与粒径谱：采用光学颗粒物计数器（型号：Grimm 11-D）实时监测 PM₁、PM_{2.5}、PM₁₀ 的质量浓度及 0.25-32μm 粒径范围内的颗粒物数量浓度谱，时间分辨率为 1 分钟。

化学组分：部署单颗粒气溶胶质谱仪（SPAMS）进行在线监测，获取单个颗粒物的化学组成信息（如元素碳 EC、有机碳 OC、硫酸盐、硝酸盐、钾元素、铅元素等），为源解析提供高分辨化学指纹。同时，使用安德森撞击式采样器分级采集颗粒物样品于石英滤膜上，用于后续离线化学分析（如 ICP-MS 分析重金属，GC-MS 分析多环芳烃 PAHs）。

1.2.3 微生物样本采集与分析

使用安德森六级撞击式采样器,按空气动力学粒径 (>7.0 μm , 4.7-7.0 μm , 3.3-4.7 μm , 2.1-3.3 μm , 1.1-2.1 μm , <1.1 μm) 采集空气微生物样品于无菌聚碳酸酯滤膜上。采样流量为 28.3 L/min, 采样时间根据浓度调整(通常为 20-30 分钟)。采样后的滤膜立即置于-80 $^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱保存。

微生物群落分析采用高通量测序技术。提取总 DNA 后,针对细菌 16S rRNA 基因 V3-V4 可变区和真菌 ITS1 区进行 PCR 扩增,随后使用 Illumina NovaSeq 平台进行测序。原始序列经过质控、去噪后,使用 QIIME2 和 R 语言进行物种注释、群落结构(Alpha 多样性、Beta 多样性)和差异物种分析。

1.2.4 人员活动数据

通过匿名化的红外传感器记录各区域的人员数量变化,并结合工作日志估算大体活动强度(如静坐、行走、会议)。人员数据与环境监测数据时间同步。

1.2.5 数据预处理与融合

对所有采集的时序数据进行时间对齐、异常值剔除和平滑处理。构建一个统一的数据库,将颗粒物物理化学数据、微生物群落数据、环境参数和人员活动数据按时间戳进行关联,形成用于后续模型构建的多维数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 时空一体化源解析模型

为克服传统源解析模型在处理 PMC 时的局限性,本研究开发了一种时空一体化源解析模型。该模型的核心思想是融合颗粒物的化学指纹和微生物的物种标签信息,同时引入时空协变量(如时间、季节、功能区),通过改进的多元受体模型(如结合非负矩阵分解 NMF 和图神经网络 GNN)来解析 PMC 的复合来源。

特征工程:从 SPAMS 数据中提取化学组分特征,从微生物测序数据中提取优势菌属/操作分类单元(OTUs)的相对丰度作为生物标志物。

模型构建:将化学特征矩阵、生物标志物矩阵以及时空协变量矩阵共同输入模型。模型旨在分解出若干具有物理解释意义的因子(即污染源),每个因子对应一套化学组分谱和微生物群落谱,并能给出其在不同时间、不同点位的贡献率。

模型验证:通过交叉验证、与已知源谱(如室外大气、土壤、人体皮肤源谱)的比对,以及利用独立示踪剂(如 CO_2 用于指示人员活动)进行相关性分析,来评估模型的解析能力和稳健性。

1.3.2 复合健康风险评估模型

基于源解析结果和体外毒理学实验,构建源导向的复合健康风险评估模型。

协同毒性量化:选取人肺腺癌上皮细胞(A549)作为体外模型。通过联合暴露实验,将从现场采集并表征的典型 PMC 样本、纯化的关键化学组分(如柴油机尾气颗粒物 DEP)及分离的优势/条件致病菌(如金黄色葡萄球菌)暴露于细胞。通过检测细胞活力(CCK-8)、活性氧(ROS)水平及炎症因子(IL-6, TNF- α)表达,利用**联合指数法(Combination Index, CI)**来定量计算协同作用系数(Synergistic Factor, SF)。

风险模型构建:在美国环保署(EPA)的健康风险评估框架基础上进行修正。SCRI 的计算公式如下:

$$\text{SCRI}(t) = \sum_i (G_i(t) * \sum_j (F_{ij} / \text{RfC}_j) * \text{SF}_{ij})$$

其中, $G_i(t)$ 是源 i 在时间 t 的贡献浓度, F_{ij} 是源 i 中污染物 j 的占比, RfC_j 是污染物 j 的参考

浓度，而 SF_{ij} 是基于实验测定的、源 i 中关键组分 j 的协同因子。该模型能输出一个随时间动态变化的、综合反映室内空气真实健康威胁的无量纲指数。

1.3.3 数据驱动的智慧调控策略

开发一种基于人工智能的前瞻性调控策略，其核心包括预测模块和决策模块。

预测模块：利用长短期记忆网络（LSTM）构建时间序列预测模型。以历史及实时的 PMC 关键指标（如 PM2.5 浓度、特定致病菌丰度）、环境参数和人员数据作为输入，预测未来 1-2 小时内的 SCRI 风险指数变化趋势。

决策模块：采用多目标强化学习算法（如深度 Q 网络 DQN 的改进版本）。将预测的 SCRI、当前室内外环境状态、设备运行状态等定义为状态空间；将调控动作（如新风阀开度、净化器档位）定义为动作空间；奖励函数则设计为对未来一段时间内 SCRI 的负值（鼓励降低风险）和能耗的负值（鼓励节能）的加权求和。智能体通过与模拟环境或真实环境的交互，学习得到最优调控策略。

系统验证：首先在可控的环境模拟舱中，与固定新风量、CO₂浓度联动控制等基准策略进行对比实验。随后，在选定的真实办公室进行示范应用，通过长期监测客观数据（IAQ、能耗）和主观问卷调查（人员满意度），综合评价调控策略的有效性。

2 结果与讨论

2.1 办公空间 PMC 污染特征

监测期间，两个办公建筑的 PMC 表现出明显的时空异质性。总体而言，PM2.5 平均浓度在 15-45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 范围内波动，微生物总浓度在 10^2 - 10^4 CFU/ m^3 之间。开放式办公室（Building A）的颗粒物和微生物浓度普遍高于隔间式办公室（Building B），且与人员密度呈显著正相关（ $p < 0.01$ ）。日内变化显示，上班高峰期和午休后，PMC 浓度通常出现峰值。季节变化方面，冬季由于门窗紧闭和新风量相对不足，室内 PM2.5 和某些革兰氏阳性菌浓度较高；夏季高温高湿环境下，真菌浓度显著上升。

微生物群落结构分析表明，优势细菌门主要为放线菌门、厚壁菌门和变形菌门，与人体皮肤、口腔和肠道微生物组高度相似，证实人体是室内微生物的重要来源。真菌群落则以枝孢菌属、曲霉属为主。值得注意的是，在细颗粒物（PM2.1 以下）样本中，检测到了较高比例的潜在条件致病菌（如葡萄球菌属、曲霉属），提示其可能随细颗粒物深入下呼吸道的风险。

2.2 PMC 源解析结果

应用时空一体化源解析模型，成功从复杂的监测数据中解析出 5 个主要的 PMC 来源（见图 1 示意），并量化了其平均贡献率：

来源 1：室外大气传输（贡献率约 25-40%）：化学指纹以二次无机离子（硫酸盐、硝酸盐）和地壳元素为主，携带的微生物多为大气常见菌，如芽孢杆菌属。贡献率受室外空气质量影响显著。

来源 2：人员活动（贡献率约 20-35%）：特征化学组分为有机碳和某些痕量元素（如锌），微生物标志为人源菌（如丙酸杆菌属、葡萄球菌属）。该源在人员密集时段和区域贡献突出。

来源 3：HVAC 系统（贡献率约 10-20%）：化学组分显示有磨损产生的金属颗粒，微生物群落中可见嗜冷或耐干燥的菌属（如假单胞菌属），可能与系统内部积尘、潮湿有关。

来源 4：建筑与装修材料（贡献率约 5-15%）：化学指纹包含钙、硅等地壳元素和某些 VOCs 衍生物，微生物来源相对复杂。

来源 5：其他室内源（如纸张粉尘、设备运行，贡献率约 5-10%）。

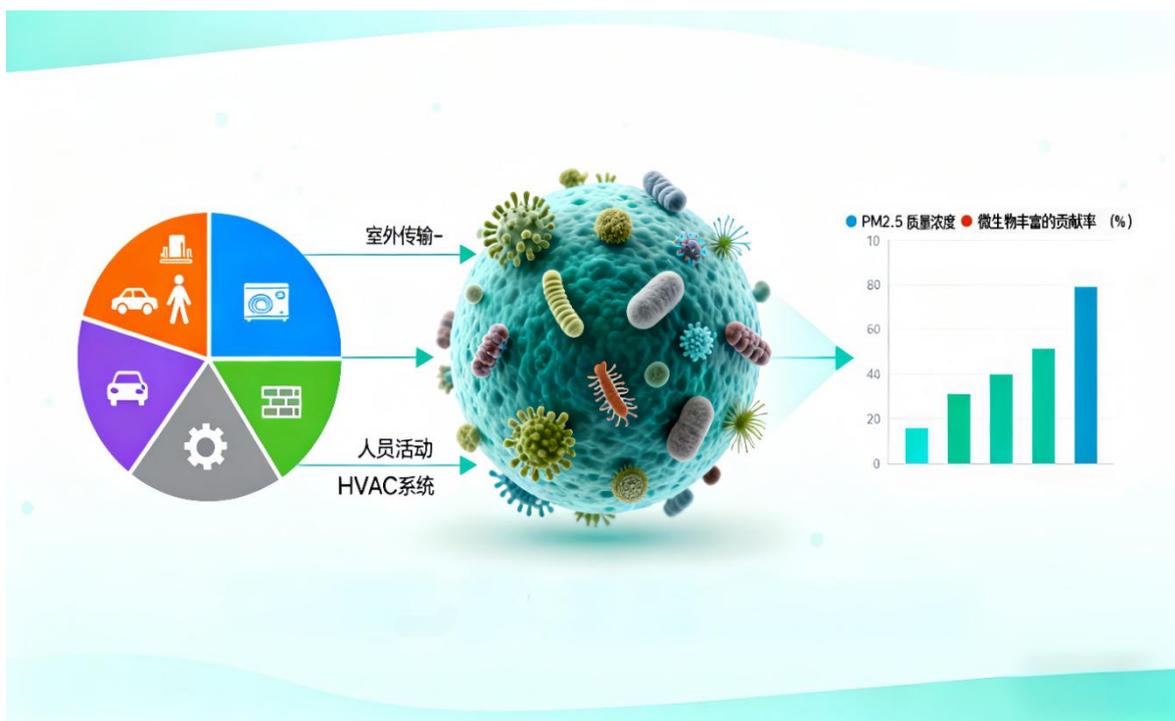


图 2 时空一体化源解析模型解析出的主要 PM2.5 来源及其特征示意图

模型结果清晰揭示了 PM2.5 的复合来源特征，例如，附着有潜在致病菌的颗粒物可能同时来源于人员活动（菌源）和 HVAC 系统（颗粒物载体和二次滋生地），这为精准干预提供了明确靶点。与传统仅基于化学组分的 PMF 模型相比，本模型能更细致地区分出复合来源，并对微生物相关的风险源进行有效识别。

2.3 协同健康效应与风险评估

体外细胞实验结果表明，PM2.5 样本以及颗粒物（如 DEP）与细菌（如金黄色葡萄球菌）的共暴露，相较于单一暴露，能显著诱导 A549 细胞产生更强的氧化应激（ROS 水平升高约 1.5-2.0 倍）和炎症反应（IL-6 释放量增加约 1.8-2.5 倍），表现出明显的协同毒性效应（联合指数 CI < 1）。这表明单纯基于单一污染物的风险评估会严重低估实际健康风险。

基于 SCRI 模型的风险评估显示（见表 1 示例），在人员活动密集的时段，尽管 PM2.5 浓度可能未超过国家标准，但由于人源微生物（包括潜在致病菌）浓度升高及其与颗粒物的协同作用，综合健康风险指数（SCRI）会显著攀升。HVAC 源虽然在浓度贡献上不是最高，但其携带的特定微生物可能具有更强的环境适应性或潜在致病性，导致其单位浓度的风险贡献较高。这表明风险评估需结合来源信息，并充分考虑协同效应。

表 1 不同情景下 SCRI 风险评估示例

| 情景描述 | 主要污染源 | PM2.5 平均浓度 (µg/m³) | 优势致病菌丰度 (相对百分比%) | 计算 SCRI 值 | 风险等级 |
|---------------|--------------|--------------------|------------------|-----------|------|
| 工作日早高峰，开放式办公室 | 人员活动、室外传输 | 38 | 15.2 | 1.85 | 中等风险 |
| 周末，同办公室，无人 | 室外传输、HVAC 系统 | 22 | 5.1 | 0.65 | 低风险 |

续表 1 不同情景下 SCRI 风险评估示例

| 情景描述 | 主要污染源 | PM2.5 平均浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 优势致病菌丰度 (相对百分比%) | 计算 SCRI 值 | 风险等级 |
|---------------------|------------------|--|---------------------|--------------|------|
| 午间休息后, 会议室刚 结束会议 | 人员活动 | 45 | 18.5 | 2.20 | 较高风险 |
| 夏季午后, 空调长期运 行 | HVAC 系统、 室外传输 | 28 | 12.3 (真菌为主) | 1.50 | 中等风险 |

SCRI 模型实现了对办公空间 IAQ 健康风险的动态、量化评估, 将抽象的“污染水平”转化为直观的“风险等级”, 为风险管理提供了更科学的依据。

2.4 智慧调控策略性能验证

在环境模拟舱的对比实验中, 本研究开发的智慧调控策略展现出显著优势(见图 2)。当模拟人员大量进入导致污染负荷骤增时, 传统的固定新风量模式响应迟缓, 导致室内 SCRI 指数持续高位运行; CO_2 浓度联动模式虽能响应人员变化, 但对 PMC 特异性差, 调控效果有限且能耗较高。而智慧调控策略则能基于 LSTM 的预测, 提前增大新风或启动净化, 将 SCRI 峰值有效抑制在较低水平。在整个实验周期内, 智慧调控策略在将平均 SCRI 控制在目标范围内的同时, 系统总能耗比固定新风量模式降低了约 35%, 比 CO_2 联动模式降低了约 15%。

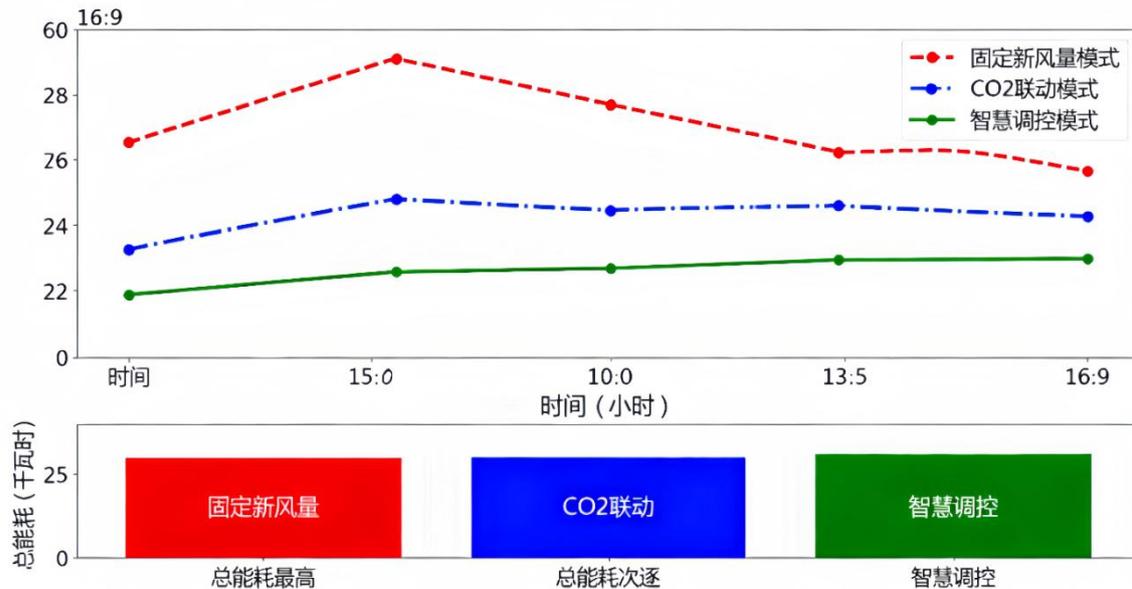


图 3 环境模拟舱中不同调控策略下 SCRI 指数与累计能耗对比图

在为期一个月的真实办公室示范应用中, 该策略运行稳定。主观问卷调查显示, 室内人员对空气质量的满意度和健康感知度均有提升。这表明数据驱动的智慧调控策略能够有效破解“健康—节能”矛盾, 实现双目标优化。

3 结束语

本研究针对办公空间空气中颗粒物与微生物复合污染这一日益凸显的环境健康问题, 成功构建并实践了一套从“精准溯源”到“智能调控”的数据驱动研究框架。主要结论如下:

(1) 办公空间 PMC 污染存在显著的时空异质性, 其组成复杂, 人体来源和室外传输是主要贡献者, 且细颗粒物上附着有潜在健康风险的微生物。

(2) 本研究开发的时空一体化源解析模型能够有效解析 PMC 的复合来源, 克服了传统方法在处理生物与非生物污染物耦合关系上的不足, 为精准溯源提供了新方法。

(3) 通过体外实验证实了 PMC 存在协同健康效应, 并在此基础上构建的源导向复合健康风险评估模型 (SCRI), 实现了对室内空气健康风险的动态、量化评估, 为风险管理提供了更科学的工具。

(4) 融合 LSTM 预测与强化学习的智慧调控策略, 能够实现从“被动响应”到“前瞻性主动干预”的转变, 在实际应用中验证了其在保障健康与降低能耗方面的协同优化潜力, 为健康智慧建筑的实现提供了可行的技术方案。

本研究的创新性在于将 PMC 作为一个整体研究对象, 通过多学科交叉和数据融合, 系统地解决了其从来源识别、风险评估到智能调控的关键难题。然而, 研究仍存在一些局限性, 例如, 监测的建筑数量和类型有限, 微生物活性和毒力未深入探讨, 调控策略的长期适用性和经济性需进一步评估。未来研究可在更多样化的建筑类型中验证模型的普适性, 深化对 PMC 协同毒性分子机制的理解, 并探索将更多影响因素 (如人员行为反馈) 纳入调控回路, 进一步优化智慧调控系统的性能。总体而言, 本研究为理解和控制室内复合空气污染、推动室内环境向更健康、更智能、更可持续的方向发展提供了重要的理论依据和技术支撑。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. “健康中国 2030” 规划纲要[EB/OL]. (2016-10-25)[2026-03-06]. https://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content_5124174.htm
- [2] 高静. 智能建筑室内环境智能调控技术应用探讨[J]. 上海轻工业, 2026, (01): 136-138.
- [3] 张霞, 侯雪波, 高剑晖, 等. 某特大城市轨道交通环境微生物污染调查[J]. 环境与健康杂志, 2020, 37(2): 139-142.
- [4] 张金萍, 冯东浩, 左云峰. 夏秋时段公共场所室内微生物气溶胶污染及暴露评估[J]. 建筑科学, 2023, 39(2): 251-260.
- [5] 张金萍, 孙宁, 冯东浩, 等. 通勤机动车内秋季期间微生物气溶胶的污染特征及暴露分析[J]. 建筑科学, 2024, 40(6): 155-165
- [6] 张金萍, 张金凤, 孙宁, 等. 秋冬季交通执勤人员工作环境微生物气溶胶污染及其与环境参数的相关性[J]. 建筑科学, 2026, 42(02): 191-202.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 大气颗粒物来源解析技术指南[EB/OL]. [2026-03-06]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201308/W020130820340683623095.pdf>
- [8] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 中国 PM_{2.5} 来源解析方法综述[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(06): 1141-1154.
- [9] 刘悦, 郝舒欣, 刘婕, 等. 环境健康风险评估数据清洗框架研究[J]. 环境卫生学杂志, 2025, 15(10): 878-884+907
- [10] 林波荣. 公共建筑室内环境健康智能监控和节能关键技术研究. 北京市: 清华大学, 2020-07-11.
- [11] 崔丛健. 地理国情监测数据驱动的城市内水环境监测方法研究[J]. 科技资讯, 2024, 22(20): 203-205.
- [12] 田佳哲. 环境监测数据驱动的洗涤设备节能环保协同优化及效果评价[J]. 生态与资源, 2025, (12): 181-183.