

体育场馆室内空气污染物智能控制策略研究

曹学莉*, 吴永林, 贺畅

六安职业技术学院 人文艺术学院, 安徽 六安 237158

DOI: 10.61369/TACS.2026020038

摘 要 : 室内体育场馆人员密集、污染源复杂, 空气质量问题突出。本文实测分析其颗粒物、化学污染物及微生物污染特征, 发现高强度运动与通风不足会致污染物浓度显著升高; 采用低挥发性材料、液体镁粉可减排, 构建的智能控制框架使达标率提升至 96.8%、能耗降低 28.7%, 为场馆空气质量管控提供支撑。

关 键 词 : 体育场馆; 室内空气污染物; 智能控制; 控制策略

Research on Intelligent Control Strategies for Indoor Air Pollutants in Sports Venues

Cao Xueli, Wu Yonglin, He Chang

School of Humanities and Arts, Lu'an Vocational Technical College, Lu'an, Anhui 237158

Abstract : Indoor sports venues have the characteristics of dense personnel and complex pollution sources, leading to prominent air quality problems. This paper conducts an on-site measurement and analysis of the characteristics of particulate matter, chemical pollutants, and microbial pollution in such venues. It is found that high-intensity sports activities and insufficient ventilation will cause a significant increase in pollutant concentrations. The use of low-volatile materials and liquid magnesium powder can reduce emissions. The constructed intelligent control framework increases the compliance rate to 96.8% and reduces energy consumption by 28.7%, which provides support for the air quality control of sports venues.

Keywords : sports venues; indoor air pollutants; intelligent control; control strategies

全民健身推动室内体育场馆快速发展。其空间大、人员与活动强度动态变化, 使室内污染物来源、分布及暴露风险更复杂。高强度运动时人体通气量为静息 10 - 20 倍, 污染物吸入量大幅增加。场馆空气质量直接关系运动体验、竞技表现与公众健康。

目前, 国内外学者已对体育场馆室内环境进行了一系列研究。付强等人分析了颗粒物污染特征^[1], Gokul T 等探讨了颗粒物的健康影响^[2], 美国环保署等机构对 VOCs 的控制提出了指导性意见。然而, 现有研究多集中于单一污染物的静态分析, 缺乏对多种污染物协同控制的动态研究, 特别是针对体育场馆特殊环境条件的系统性控制策略研究尚不充分。

现有研究虽关注通风与净化, 但多忽视实时数据驱动的智能响应与多策略协同, 难以实现污染物动态变化、人体健康、建筑运行及能效的多维度整合。

物联网与人工智能为体育场馆室内空气质量提供了新方向。本研究通过实地监测与实验, 量化污染物分布特征, 评估控制技术效果, 提出并验证了基于多传感器融合与 AI 预测的智能控制策略, 为打造健康、舒适、节能的场馆环境提供理论与技术支撑。

一、体育场馆室内污染物特性实验分析

197% 和 317%, 印证运动引起的颗粒物再悬浮是主要污染源。

表1 不同活动状态下颗粒物浓度监测结果

监测区域	活动状态	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	峰值持续时间 (min)
主运动区	高强度比赛	125.6 $\pm$ 18.3	287.4 $\pm$ 35.6	45.2 $\pm$ 6.7
主运动区	常规训练	88.7 $\pm$ 12.5	156.2 $\pm$ 24.1	25.8 $\pm$ 4.2
观众区	满座状态	96.3 $\pm$ 10.7	203.5 $\pm$ 28.9	35.6 $\pm$ 5.3
全馆	静息状态	42.3 $\pm$ 5.6	68.9 $\pm$ 8.4	—

(一) 颗粒物污染特征及运动影响

为准确掌握体育场馆颗粒物污染特征, 本研究在郑州市3个典型室内体育馆部署了高精度颗粒物传感器网络, 监测点覆盖主运动区、观众区、更衣室等关键区域, 监测时长达6个月。

现场测试表明, 体育场馆颗粒物浓度与人员活动强度显著正相关。篮球比赛等高强度运动时, 主运动区 PM_{2.5}、PM₁₀ 平均浓度分别为 125.6 $\pm$ 18.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、287.4 $\pm$ 35.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 较静息时段升高

项目信息:

2023年度安徽省高校人文社会科学重点研究项目“基于新能源技术打造零排放艺术展览空间设计的研究”(2024AH053299);

2023年度安徽省质量工程项目“曹学莉技能大师工作室”(2023jnds027)。

作者简介: 曹学莉, 女, 硕士, 中国艺术研究院访问学者, 六安职业技术学院人文艺术学院副教授, 研究方向: 环境设计学。

对镁粉这一特殊污染源开展专项测试。结果表明，传统镁粉使用后 5 分钟内，PM₁₀ 浓度由 85 μg/m³ 骤升至 1560 μg/m³，悬浮超 30 分钟。采用液体镁粉替代后，PM₁₀ 峰值仅 132 μg/m³，降幅 91.5%，悬浮时间缩短至 5 分钟内，且防滑性能与传统镁粉无显著差异。

（二）化学污染物分布规律

体育场馆内的化学污染物主要来源于建筑装饰材料、清洁剂及人体活动。本研究采用多参数 VOCs 传感器与甲醛特异性检测仪，对 6 家室内体育馆进行了季节性跟踪监测。

实验数据显示，场馆清洁时 TVOC 浓度可由 215 μg/m³ 升至 580 μg/m³，超标率 45.8%。对比测试表明，普通橡胶、PVC 地垫 TVOC 释放率为 48.7 - 52.3 μg/(m² · h)，绿色认证 TPU 地垫仅 8.5 μg/(m² · h)，降幅超 80%。

新建及新装修场馆甲醛污染突出。监测显示，夏季高温高湿时，复合木材设施甲醛平均浓度为 0.086 mg/m³，超标点位占比 32.5%。新装修半年内场馆，冬季甲醛浓度仍达 0.05 - 0.07 mg/m³，释放具有持续性。

二、室内空气质量评估、健康风险与国际标准对比

（一）健康风险评估模型优化及其在体育场馆的应用

基于体育场馆污染物监测数据和运动生理特性，本研究对传统健康风险评估模型进行了优化，特别考虑了运动呼吸速率变化对暴露剂量的影响。优化后的模型如下：

$$Dose(D) = \frac{C \times IR_{exercise} \times ET \times EF}{BW}$$

其中，IR_{exercise} 为运动状态下的吸入速率，通过实验测得中等强度运动时吸入速率约为静息状态的 3-5 倍，高强度运动时可达 6-8 倍。

应用该模型对体育馆使用者进行风险评估，结果显示：即使 PM_{2.5} 浓度符合国家标准（75 μg/m³），运动员在 2 小时高强度训练中的实际摄入剂量也达到 9.38 μg/(kg · h)，超过世界卫生组织推荐的安全阈值。这表明现行基于静息状态的标准不足以保护运动人群健康。

体育场馆内，易感人群因污染物摄入量高、解毒能力弱、基础疾病易被诱发等，健康风险更高。先进模型应整合年龄、行为及微气候差异，实现更精准、贴合实际的个性化暴露风险评估。

基于实验数据，我们建议体育场馆空气质量标准更具运动针对性：增设短期暴露限值，引入运动强度修正系数，构建基于健康影响、多污染物协同与场景感知的标准框架，以更好保障动态环境下人群健康。

三、空气质量控制技术实验验证与策略评估

（一）通风系统性能测试

为评估不同通风策略在体育场馆环境中的实际效果，本研究构建了 1:10 的体育馆缩尺模型，测试了机械通风、自然通风和混合通风三种模式的性能表现。

实验数据显示，在观众满座场景下（2.5 人 / 平方米），机械通风系统在换气次数 8 ACH 时，CO₂ 浓度可稳定在 1000 ppm 以下，PM_{2.5} 浓度控制在 35 μg/m³ 以内，但能耗高达 3.2 kW · h/小时。自然通风模式能耗仅为 0.2 kW · h/小时，但 CO₂ 浓度波动范围达 800-1800 ppm，无法保证稳定的室内环境质量。

混合通风系统通过智能控制实现了能效与性能的平衡。实验表明，该系统全年平均能耗为 1.5 kW · h/小时，空气质量达标率超过 92%。需求控制通风（DCV）系统表现更为优异，根据实时监测的 CO₂ 浓度动态调整新风量，能耗比传统定风量系统降低 21%-35%，同时 CO₂ 浓度控制在 850 ppm 以下。

表 3 不同通风系统性能测试结果

通风类型	CO ₂ 控制 (ppm)	PM _{2.5} 控制 (μg/m ³)	能耗 (kW · h/小时)	达标率 (%)
机械通风	≤ 1000	≤ 35	3.2	95.8
自然通风	800-1800	45-120	0.2	65.4
混合通风	≤ 900	≤ 40	1.5	92.3
需求控制通风	≤ 850	≤ 30	1.2	96.5

四、智能控制系统设计与实现

（一）系统架构设计

基于实验成果，本研究设计了场馆室内空气污染物智能控制系统，采用感知层、网络层、平台层、应用层四层架构。

感知层由多参数传感器网络组成，实时采集 PM_{2.5}、PM₁₀、CO₂、TVOC、甲醛、温湿度等参数。为保障数据准确性并集成自动校准算法，与专业设备数据相关系数达 0.93 - 0.97。

网络层采用 LoRaWAN 与以太网混合组网，通信成功率 99.2%；平台层基于云计算，实现数据存储、分析与可视化；应用层提供实时监控、智能控制及数据分析功能。

（二）智能决策算法

智能控制系统的核心在于决策算法的有效性。本研究对比测试了阈值控制、模糊逻辑和 AI 预测控制三种算法。

实验表明，传统阈值控制响应滞后、空气质量波动大。模糊逻辑控制兼顾多参数变化趋势，控制更平稳，使空气质量达标率达 89.5%，能耗较阈值控制降低 16.3%。

AI 预测控制算法基于 LSTM 网络构建，可结合场馆活动与实时数据预测 30 分钟空气质量并提前调控。测试显示，达标率达 96.8%，能耗降低 28.7%。在场馆活动开始前 15 分钟，可提前预判并避免污染物累积。



图 1 智能控制系统工作流程图

（三）系统性能验证

为验证智能控制系统的实际效果，在郑州市两个同类型体育馆进行了为期6个月的对比测试：一个部署了智能控制系统（实验组），另一个维持常规控制系统（对照组）。

测试结果表明，实验组馆在室内空气质量指标上显著优于对照组。具体而言，实验组 $PM_{2.5}$ 日均值为 $32.5 \mu g/m^3$ ，对照组为 $58.7 \mu g/m^3$ ；实验组 CO_2 浓度峰值控制在 $1150 ppm$ 以下，而对照组经常超过 $2000 ppm$ 。

在能效表现方面，实验组单位面积能耗为 $1.36 kW \cdot h/m^2/月$ ，较对照组的 $2.15 kW \cdot h/m^2/月$ 降低 36.7% 。设备维护方面，得益于智能系统的预测性维护功能，实验组设备故障次数减少 55% ，过滤器更换周期延长 42% ，年维护成本降低 38% 。

用户问卷调查显示，实验组场馆的用户满意度从 78.5% 提升至 94.2% ，特别是对空气清新度和舒适度的评价提升最为明显。

表4 系统性能对比测试结果

评估指标	实验组	对照组	提升幅度
$PM_{2.5}$ 日均值 ($\mu g/m^3$)	32.5	58.7	44.6%
CO_2 峰值浓度 (ppm)	≤ 1150	≥ 2000	42.5%
单位面积能耗 ($kW \cdot h/m^2/月$)	1.36	2.15	36.7%
设备故障次数 (次/年)	2.3	5.1	55.0%
用户满意度 (%)	94.2	78.5	15.7%

（四）系统鲁棒性与长期运行稳定性分析

本研究对系统开展 12 个月长期实测，评估传感器漂移校正、网络容错及设备故障自适应能力，验证实际场景可靠性。

传感器校准与维护：系统集成的自动校准算法能有效应对传感器长期使用导致的精度下降问题。数据显示，每3个月进行一次自动校准，可使 $PM_{2.5}$ 传感器的测量误差稳定在 $\pm 5\%$ 以内，而未经校准的对照组传感器误差在6个月内可扩大至 $\pm 15\%$ 以上。

故障处理机制： CO_2 传感器异常或通信中断时，系统自动启用邻近传感器与客流等信息的虚拟算法补偿数据，2 分钟内完成策略切换，保障环境控制连续稳定。

能耗与性能的长期平衡：经一整年不同季节及活动强度下的运行数据分析，智能控制系统在确保全年空气质量达标率超 95% 的前提下，相比传统最大负荷定时控制系统，年均节能率达 31.2% 。其中春秋过渡季节借助自然通风，节能率可超 50% 。

（五）与传统控制策略的深度对比与成本效益分析

本研究进一步将 AI 预测控制与另外两种策略进行了全生命周期成本效益分析，分析周期为5年。

初始投资：智能控制系统（包括传感器网络、边缘计算网关、控制服务器及软件）的初始投资比传统阈值控制系统高约 40% 。

运行能耗与维护成本：得益于优异的节能效果和预测性维护

功能，智能系统的年均运行能耗比阈值系统低 31.2% ，年均维护成本低 38% 。模糊控制系统的能耗和维护成本介于二者之间。

投资回收期：经测算，智能控制系统的额外初始投资，可通过能耗与维护费用节约，在 2.8 年内回收。以 5 年周期计算，其总拥有成本（TCO）已低于传统控制系统，且随使用年限增长，经济优势更为显著。

五、结论与展望

本研究通过现场实测与实验分析，探究体育场馆室内空气污染物分布特性及控制策略，完成智能控制系统的设计、部署与验证，结论如下：

1. 体育场馆室内空气质量面临特殊挑战：高强度运动使 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度分别激增 197% 、 317% ， CO_2 峰值超 $2000 ppm$ ；运动时污染物吸入量是静息的 4–8 倍，现行静态标准不足以保护运动人群健康。

2. 污染源控制是最经济有效的策略。低挥发性材料可将室内 VOCs 水平降低 $50\% \sim 80\%$ ，液体镁粉替代方案可使颗粒物浓度降低 91.5% ，且防滑性能无显著差异。

3. 智能通风系统可实现能效与空气质量的平衡。需求控制通风（DCV）相比传统定风量系统能耗降低 $21\% \sim 35\%$ ，同时能更精确地将 CO_2 浓度控制在更低水平（ $\leq 850 ppm$ ）。

4. 基于 AI 预测控制的智能系统能显著提升综合性能。该系统通过实时监测、预测分析与多设备协同，实现了 96.8% 的空气质量达标率，同时系统能耗降低 28.7% ，用户满意度提升 15.7% 。全生命周期成本分析证明其具有显著的经济性。

未来研究展望：

1. 开发更精准的暴露模型：未来研究应开发综合考虑身体活动强度、年龄差异及环境变异性的高精度动态暴露模型，为个性化风险评估和标准制定提供基础。

2. 探究长期健康影响：亟需开展纵向队列研究，探究运动员及长期锻炼者在反复接触体育场馆多种污染物情况下的长期健康影响（如呼吸功能、心血管代谢变化）。

3. 推动技术深度融合：下一步研究将聚焦于多模态数据融合（如结合可穿戴生理监测设备、计算机视觉客流分析）和个性化环境控制（如基于位置的个性化送风），实现更精准的环境感知与控制。

4. 拓展智能应用场景：探索5G、边缘计算和数字孪生技术在体育场馆环境管理中的深度应用，构建虚实映射、实时优化的智能管控新范式，进一步推动体育场馆室内环境控制的智能化、精准化与人性化。

参考文献

[1] 付强, 赵晶, 赵春子. 延吉市 $PM_{2.5}$ 时空分布特征及其与气象要素的相关性分析[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2019, 45(01): 90–94.

[2] Gokul T, Kumar K R, Prema P. A review of particulate matter pollution and its toxicity to fish[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2023, 270: 109646.