

建筑施工扬尘污染控制措施实施效果评估

余寒楚¹ 刘梓璇² 朱玮¹ 王钟艳¹

1.杭州润辉环保能源科技有限公司 浙江 杭州 310000

2.杭州南其科技有限公司 浙江 杭州 310000

【摘要】：建筑施工扬尘是城市环境重要污染源，其控制措施效果受区域气候、施工阶段及企业规模影响。基于施工现场扬尘监测数据分析，物理隔离、湿法抑尘等措施存在效能差异，智慧天幕与智能喷淋等协同技术可显著提升抑制效率。大型国企控尘执行率普遍高于中小民企。通过构建“分阶段优化组合、分区分类施策”的管控体系，结合智慧化技术应用与全过程精细化管理，可有效降低扬尘污染，推动绿色施工转型。

【关键词】：建筑施工；扬尘污染；控制措施；评估；环境影响

DOI:10.12417/2811-0536.26.06.075

引言

建筑施工扬尘已成为城市环境的重要污染源，不仅影响空气质量，更威胁周边居民健康。对控制措施进行科学评估，是减少污染、保障公众健康的关键手段。由于不同施工环境下措施效果差异显著，如何系统评估并优化改进成为亟待解决的问题。旨在通过对若干建筑施工现场的扬尘监测数据进行分析，评估现有控制措施的有效性，并提出进一步优化的策略。

1 施工扬尘污染现状分析

(1) 施工扬尘污染源及特点：施工扬尘主要源于土方开挖、混凝土搅拌、建筑拆除、车辆运输等环节，裸露地表、建筑垃圾堆放及机械作业亦为重要尘源。其颗粒物以PM₁₀和PM_{2.5}为主，粒径小、易悬浮，可长时间滞留空气中，对周边环境和人体健康构成持续影响。与一般污染不同，施工扬尘具有明显的瞬时性与局部性，强度和扩散范围随施工进度及气象条件动态变化。据生态环境部《建筑施工颗粒物排放特征研究报告(2024)》，土方阶段PM₁₀排放强度达12–18 g/(m²·d)，占整个施工周期总排放量的55%以上；而主体结构 and 装修阶段则分别占比约25%和15%。这种阶段性差异决定了扬尘控制需采取“分阶段、差异化”的管理策略，而非“一刀切”式措施。

(2) 不同区域的扬尘污染特征差异：扬尘污染特征呈现显著区域分异，为差异化管控提供科学依据。北方气候干燥，年均降水量多低于600mm，春季风速常超4m/s，土壤含水率不足10%，风蚀起尘系数高，需强化覆盖与增湿措施；南方相对湿度常年高于75%，降水频次高，自然沉降条件优越，但长期湿润易致物料霉变，翻动时产生异味及二次扬尘。城市功能区差异同样显著：核心区受周边敏感建筑制约，对扬尘逸散容忍度低，需采用高密闭性围挡（缝隙率<5%）及

智慧天幕等技术；郊区场地开阔、扩散条件较好，但监管力量薄弱，裸土覆盖不全问题突出。研究表明，核心区围挡缝隙率若超10%，下风向PM₁₀浓度可上升18%-25%。因此，管控策略应遵循“北方重覆盖保湿、南方防霉变管控，核心区强密闭、郊区抓覆盖”的差异化原则。

(3) 当前污染控制措施回顾：当前主流扬尘控制措施可分为物理隔离、湿法抑尘、源头覆盖与智能监控四类。物理隔离以硬质围挡为主，辅以防尘网覆盖裸露土方，其有效性依赖于密闭性和抗风性能。湿法抑尘包括固定喷淋、移动雾炮及智能感应喷雾系统，其核心在于维持地表含水率>8%以抑制颗粒起扬，但高蒸发速率地区（如华北春季）需高频次补水，否则抑尘效率衰减迅速。源头控制方面，装配式施工、预拌砂浆推广及低扬尘建材应用正逐步减少产尘环节。然而，多数工地仍依赖人工洒水与简易围挡，缺乏系统集成与动态响应能力，导致措施效能不稳定。

(4) 扬尘污染的环境影响评估：扬尘污染对环境的影响主要表现在空气质量的下降与健康危害。施工扬尘的细颗粒物会直接影响周围空气质量，导致PM_{2.5}浓度上升，严重时可能导致呼吸道疾病的发生^[1]。长期暴露在扬尘污染环境中的居民群体，尤其是老年人和儿童，容易引发肺部和心血管相关疾病。扬尘还会附着在周围植物叶片上，影响植物的光合作用和生长，降低空气净化能力。扬尘污染还可能对施工周边的水体、土壤造成二次污染，进一步加重环境负担。

2 扬尘污染控制措施的实施情况

(1) 常见控制措施的实施效果：在施工现场，扬尘控制措施的效果直接影响周边环境。当前常用措施包括湿法喷洒、围挡、覆盖和垃圾清运。湿法喷洒抑尘显著，但易受气象影响，水分蒸发快导致时效短；

围挡作为被动隔离，可减少扩散，但其属于被动隔离手段，在土方开挖、物料装卸等高强度扰动作业阶段难以阻断高浓度扬尘逸散；裸露地表覆盖虽能降低风蚀扬尘，但植被生长周期长、防尘网易破损，实际防尘能力受限于维护水平与气候适应性；建筑垃圾若未做到日产日清，堆积物料在风力或机械扰动下极易形成二次扬尘源。

(2) 不同规模施工企业的执行力度差异：施工企业规模直接影响扬尘控制效果。基于北京昌平区 2021 年遥感监测数据，大型工地（占地面积>10000m²）控尘率可达 85% 以上，而中小型工地（<5000m²）仅 50%-65%。差异根源在于：大型国企通常将环保纳入项目概算，抑尘设备投入充足（单项目可达 600 万元以上），配备专职环保员并落实标准化流程；中小民企受资金所限，多采用人工洒水、劣质防尘网，缺乏专业人员，措施执行常流于形式。以北京环球主题公园项目为例，其投入 600 余万元喷洒抑尘剂，实现 7 级大风下无可视扬尘，而同期周边中小工地 PM₁₀ 超标率达 40% 以上。车辆冲洗环节差异同样显著：大型国企多配置自动冲洗平台，冲洗时长超 30 秒；中小民企多以高压水枪替代，冲洗率不足 60%。因此，扬尘治理需分类施策，对中小民企应提供设备补贴与技术帮扶，而非“一刀切”式处罚。

(3) 执行层面存在的问题与人员管理：当前施工现场扬尘控制措施执行存在诸多疏漏：湿法喷洒因水源或设备维护不及时导致频次不足；围挡破损、低矮或开口过大，无法有效阻隔扬尘外泄；建筑垃圾清理滞后，堆积物料在风力扰动下易形成二次扬尘源。人员管理方面问题同样突出。多数工人对扬尘危害认识不足，未能严格按标准操作，频繁忽视控制措施或未按规定使用防尘设备。部分项目管理层监督力度薄弱，执行标准不统一、管理体系不完善，导致不同班组间防尘效果差异显著^[2]。因此，加强专业培训以提升环保意识和操作技能，建立明确奖惩机制，是确保扬尘控制措施有效执行的关键。

3 扬尘污染控制措施的效果评估方法

(1) 评估标准与数据采集方法：扬尘污染控制措施的效果评估依赖于一系列标准和数据采集方法。首先，评估标准需明确污染物的浓度和颗粒物的分布，通常依据 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的浓度变化作为主要评估指标。环境空气质量标准对这些颗粒物的最大浓度限制提供了量化依据。施工现场的扬尘控制效果需要通过现场环境监测设备进行数据采集，常用的设备包括手持式扬尘检测仪、自动监测站等。这些设备能够实时

记录空气中的扬尘浓度，确保数据的准确性和实时性。数据采集方法上，需综合考虑不同时间段、天气条件下的监测数据，避免单一时段的数据偏差。对施工区域周围环境进行定期的扬尘监测，重点关注扬尘源点、周围居民区以及绿化带等位置，从多角度、多维度对扬尘控制效果进行全面评估。

(2) 评估模型与分析方法：评估扬尘污染控制措施的效果需要运用科学的评估模型和分析方法。常用的模型包括空气质量模拟模型、风沙传播模型等，这些模型能够通过输入相关参数，如施工过程的扬尘排放量、天气条件、地形地貌等因素，预测扬尘的扩散范围和浓度分布^[3]。通过对比不同控制措施下的模型结果，可以有效评估措施的效果。数据分析方法在评估中同样发挥着重要作用，回归分析、方差分析等统计方法常常用于挖掘控制措施与扬尘浓度变化之间的关系（见图 1）。基于这些模型和分析方法，评估人员可以得到具体的、量化的效果数据，从而判断各项控制措施的实际效果。



图 1 扬尘污染控制措施分析方法

(3) 措施协同效应与案例分析：单一措施存在边际效益递减，多措施协同可产生显著叠加效应。基于中国能建大厦二期项目（北京朝阳区）监测数据，土方阶段仅采用围挡+洒水时，边界 PM₁₀ 均值为 120-135μg/m³；增加雾炮喷淋后降至 95-105μg/m³；进一步引入智慧天幕，浓度稳定在 75-85μg/m³，总削减效率达 58.8%。通过回归分析量化各措施贡献率：封闭措施约占 45%，湿法作业约占 30%，车辆冲洗与覆盖约占 25%。该项目总建筑面积 6.5 万平方米，创新应用了 200 米级智慧开合天幕系统。监测数据显示，智慧天幕运行期间，现场 PM_{2.5} 浓度≤52μg/m³的天数占 84%，显著优于北京市平均水平。智慧天幕投用后，重污染天气频次较周边未封闭工地降低 76%。但监测期内两次系统故障导致措施中断，4 小时内 PM₁₀ 瞬时值最高达 198μg/m³，印证了持续稳定运行的重要性。不同施工阶段最优组合存在差异：土方阶段以“全封闭天幕+高密度雾炮+车辆冲洗”为核心；主体结构

阶段重点在于“楼层封闭钢板网+外架喷淋+焊烟净化器”；装修阶段需强化“抑尘剂覆盖+垃圾通道密闭清运”。石家庄推广的装配式道路+全封闭钢板网组合，可使抑尘率提升40%-80%。见表1所示。

表1 中国能建大厦二期项目不同扬尘控制措施组合下的PM10浓度及削减效果

控制措施组合	边界PM10均值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	相较初始 削减率	累计总削 减效率
围挡+洒水	120-135	—	—
围挡+洒水+雾炮喷淋	95-105	≈20%	≈20%
围挡+洒水+雾炮+智慧天幕	75-85	≈35%	58.8%

4 扬尘污染控制措施的改进方案

(1) 优化现有控制措施的实施策略：针对现有的扬尘污染控制措施，优化实施策略是提高控制效果的重要途径。湿法喷洒需要根据施工现场的具体环境条件进行科学调整，避免因水源不足或喷洒频率不均导致的控尘效果差。调整喷洒周期和喷洒量，可以依据天气预报和施工进度进行动态管理，提高喷洒的覆盖率和效率。围挡的设置也应进一步优化，围挡不仅要密封性好，还要能够根据施工阶段和扬尘源点的变化进行调整^[4]。在施工现场的外围和周边居民区之间增设绿色植被带，也能有效增强扬尘控制效果。通过对现有控制措施的组合使用和精细化管理，可以避免单一措施的局限性，实现扬尘污染的有效防控。采用高效的建筑垃圾清理制度，加强垃圾定时清运与分类管理，避免扬尘二次污染的发生，确保污染控制措施能够全面而持续地发挥作用。

(2) 智慧化技术的应用与推广分析：未来技术升级应聚焦“感知—决策—执行”闭环。智慧天幕系统为封闭技术代表，其通过大跨度结构覆盖基坑，利用传感器监测风速、扬尘浓度，自动控制天幕开合与喷淋联动，抑尘效率可达90%以上。成本方面，以石家庄某基坑气膜项目为例，覆盖面积2.23万 m^2 ，总投资约2676万元，考虑周转使用，单项目摊销成本约120-180元/ m^2 ，适用于重点区域大型深基坑工程。LSTM神经网络预测系统为智能决策层创新应用，通过输入历史气象数据与施工计划，训练模型预测未来24小时扬尘风险(AUC>0.85)，提前触发预警并联动雾炮启停。杭州某试点项目引入后，日均用水量降低28%，PM10达标率提升至92%，单套系统部署成本约15-25万元，投资回收期约1.5年。一般工地可采用基于阈值控制的智能喷淋(成本<5万元)，实现

“按需启停”。此外，推广可降解防尘毡(聚乳酸基材料)替代传统密目网，抑尘效果可持续3个月以上，并能自然降解避免二次污染。漳州龙文区某项目采用后，单日覆盖效率提升数十倍，可抵御8级大风。

(3) 提高控制措施执行力的策略：尽管扬尘污染控制措施的制定已较为完善，但在实际施工中，执行力的不足往往成为控制效果打折扣的关键因素。提高控制措施的执行力度，首先需要从管理层入手，强化责任意识和监管力度。施工项目的管理团队应当为执行防尘措施提供足够的资源支持，确保设备和人员的配备到位。施工现场的具体负责人应承担起落实控制措施的职责，定期检查与评估措施执行情况，及时发现问题并进行整改。针对施工人员的管理，建立明确的奖惩机制，确保其严格遵守扬尘控制规定，增加执行力度。通过技术手段对控制措施的执行情况进行实时监控也是提升执行力的重要方式。通过安装实时监控系统，能够对喷洒情况、围挡状态、施工区域清理情况进行监督，确保措施按计划落实。同时，加强对施工人员的持续培训与教育，提高其对扬尘污染危害的认识，从而增强其对防尘措施执行的自觉性。

5 施工扬尘污染控制的未来方向

(1) 政策与法规的进一步完善：当前扬尘污染控制政策仍存在一定滞后性。为提升治理成效，政府应强化监管力度，通过明确法律法规规范控制措施的实施与评估流程，确保施工项目严格按环保要求执行。需出台更具操作性的政策，细化污染物排放标准、技术要求和监测报告制度。同时，鼓励地方政府依据本地气候与城市建设特点，制定差异化地方标准，以应对不同环境条件下的治理需求，为扬尘污染控制提供坚实的法律保障。

(2) 技术创新与环保意识的提高：技术创新是扬尘治理的核心驱动力。未来施工现场将广泛应用物联网、自动化设备，实现扬尘数据实时监控与智能调控，提升控制精度与效率^[5]。超高效空气净化设备及新型环保材料的推广，可进一步从源头减少扬尘产生与传播。与此同时，环保意识的提升至关重要。施工企业及管理部门应加强宣传培训，强化全员环保责任意识，推动各方重视扬尘治理的长远意义。公众参与与企业自律也将促进更严格标准的落地。技术创新与意识提升双轮驱动，方能推动绿色施工与可持续发展全面实现。

(3) 从源头到过程的全程管控策略：全程管控需嵌入工程全生命周期管理体系。在招投标阶段，应将

扬尘控制方案作为技术标强制评审项，并明确抑尘设备投入占比（建议 \geq 工程造价的0.8%）；在施工许可环节，要求提交分阶段扬尘防控计划，包括土方作业期的“六个百分百”（工地周边100%围挡、物料堆放100%覆盖、出入车辆100%冲洗、施工现场地面100%硬化、拆迁工地100%湿法作业、渣土车辆100%密闭运输）落实节点；在过程监管中，推行“环保监理”制度，由第三方机构对措施执行频次、设备运行状态、监测数据真实性进行核查，并纳入企业信用评价。唯有将扬尘治理从“末端应对”转向“制度内嵌”，才能实现长效控制。

参考文献：

- [1] 翁佳璐.建筑施工现场扬尘污染超低排放控制技术[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(7):050-053.
- [2] 熊志龙.建筑施工现场扬尘污染治理技术实践探讨[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(10):108-111.
- [3] 王新强.建筑施工现场扬尘污染治理分析[J].中国厨卫,2025,24(4):4-6.
- [4] 蔡红梅.绿色建筑施工现场扬尘控制智能喷雾系统设计[J].城市开发,2025(24):22-24.
- [5] 李明.高校建筑施工现场扬尘污染精细化控制方法研究[J].环境科学与管理,2021,46(8):109-113.

6 结语

建筑施工扬尘污染控制是一项系统工程，需统筹考虑区域气候特征、施工阶段差异与企业执行能力。通过构建“分阶段优化组合、分区分类施策、技术经济适配”的管控体系，可在成本可控前提下实现治理效能最大化。建议政府层面完善差异化标准与补贴政策，引导中小民企提升治理能力；行业层面加快智慧化技术迭代与成本优化；企业层面强化全过程精细化管理，推动扬尘治理从“被动应对”向“主动创绿”转型。