

城市街谷通风和污染物数值预测：文献综述与研究展望

白烨 赵光明 王凯旋 方荣 李浩昌

西安石油大学管道工程学院，陕西西安，710300；

摘要：随着我国经济的增长，环境污染与通风问题越来越严重，对人们的健康造成了不可逆的危害。因此，城市街谷通风和污染物数值预测十分重要。通过各种通风和污染物数值的预测模型，可以有效模拟街谷内的污染物分布情况。本文基于系统性文献综述方法，对城市街谷通风和污染物数值预测的现有主要成果、面临的挑战进行分析介绍，并对未来的发展方向提出展望与建议。

关键词：污染物数值预测；LSTM；街区通风

DOI：10.69979/3041-0673.25.10.065

前言

近年来，随着中国经济飞速增长，城镇化速度加快，高楼建筑逐渐代替低矮楼房，街道两侧高楼耸立，与狭长的街道形成“街道峡谷”建筑结构^[1]，而快速的发展自然而然的带来了污染物问题^[2-4]，街道作为城市中的局部微区域，是人们生活的主要场所之一，但由于峡谷的特殊结构，峡谷内气体不容易与外界交换^[5]，特别是随着汽车数量增加，我国空气污染状况已经从过去常规的烟尘型污染逐渐发展成为化石能源污染，持续上升的汽车尾气污染成为城市大气环境污染的重要来源^[6]。世界卫生组织 2021 年发布的《世界卫生组织全球空气质量指南》数据显示，每年有近 700 万人因空气污染过早死亡，空气污染已经成为威胁人类健康的重要因素^[7]。空气污染会引起呼吸系统、心血管系统疾病，长期暴露会导致慢性支气管炎、肺气肿甚至患上慢性阻塞性肺病（COPD），也可能出现动脉硬化、高血压、心肌梗死或中风等症状^[8]。由此可见，防止空气污染的进一步扩大，是保护人类长远持久发展的当务之急。

基于上述背景，本文将从综述性视角出发，系统分析城市街谷通风和污染物数值预测系统的主要研究成果，深入探讨对于空气污染数值预测系统发展面临的主

要困境，并进一步讨论城市街区通风和污染物数值预测系统的发展方向与前景。同时，通过对现有研究成果的总结与评述，提出具有针对性的政策建议，以期为相关领域的研究和实践提供参考。

1 城市街谷通风和污染物数值预测的总体描述

城市街谷通风和污染物数值预测是融合流体力学、环境科学、数据科学与城市规划的交叉领域，其核心是通过精细化建模揭示“风温污”耦合机制，为可持续城市设计提供科学依据^[9]。随着计算能力的提升与多源数据的融合，该领域正从静态分析转向动态实时预测，成为建设健康、韧性、低碳城市的重要技术支撑。

以“污染物数值预测”为关键词，通过知网数据库进行检索（检索日期为 2025 年 4 月 10 日），共检索出期刊文献 375 篇，硕博学位论文 207 篇，会议 33 篇，其中 391 篇文献发表在 2015 年后，占总量的 63.6%。从研究趋势分析，核心文献主要呈现以下特点：一是研究成果集中，2015-2019 年研究成果合计为 125 篇，从 2020 年开始出现逐年上升的趋势，2020 年至今为 266 篇。二是研究主题集中，大气污染物、污染物浓度与预测模型和方法是其主要研究内容。



图 1 各年份论文篇数

2 主要研究成果

2.1 高精度 CFD 模型与仿真技术的突破

在环境应急与污染防控领域,传统 CFD 方法存在计算效率瓶颈。邱益的研究通过融合 RANS 湍流模型与深度学习算法,构建了气态污染物迁移扩散的快速预测框架,为实时数值预报提供了创新解决方案^[10]。研究采用 RANS 方程作为基础物理模型,利用其可靠的湍流模拟能力生成高精度训练数据集。针对传统 CFD 耗时长的缺陷,创新性地引入 BP 神经网络构建代理模型,有效捕捉复杂地形下的污染物传输特征。

在城市微气候与空气污染治理领域,高精度湍流模拟对污染物扩散预测至关重要。陆谢贵的研究通过网格无关性分析确定数值模拟方案,采用 LES 大涡模拟模型探究污染源参数(释放高度、距离、浓度)、环境条件(建筑表面温度、入口湍动能、气体组分)对污染物扩散的影响规律^[11]。基于分析结论,陆谢贵建立了厦门宝璜湾片区精细化物理模型,通过附加应力源项法等效外围建筑群以提升计算效率,系统评估区域风场特征及污染物分布。研究结合“莫兰蒂”台风灾后实测数据验证模拟精度,并预测不同情景下污染物扩散路径与浓度梯度,为城市微气候安全评估及污染防控提供科学依据。

相比 RANS 模型,LES 在近地面强剪切流区的浓度预测精度提升 40%以上,特别在建筑物背风面分离区可准确捕捉浓度双峰分布特征。提出的“分域耦合”策略(核心区 LES+外围区域 RANS)使整体计算成本降低 65%,为城市尺度高精度模拟提供可行路径^[12]。

2.2 LSTM 模型在空气质量预测方面的发展

LSTM(长短期记忆网络)作为循环神经网络架构的

改进型变体,采用门控单元结构有效克服了传统 RNN 模型在时序建模中的梯度衰减缺陷,通过选择性记忆机制实现关键历史信息的长时间保留。在环境科学领域,本研究构建的空气质量预测框架依托该网络特性,融合 PM_{2.5}、NO₂ 等污染因子与温度、气压等气象参数构成多维动态时序参数集,通过深度学习方法构建特征变量与目标变量 AQI 之间的非线性映射关系。此模型借助门控单元对时间序列特征的动态筛选能力,解析大气污染物浓度随环境条件变化的演变机理,最终达成区域空气质量指数的多步预测目标^[13]。

姜智昊的研究设计了一种融合卷积神经网络与长短期记忆网络的混合架构(CNN-LSTM)^[14],此研究将输入变量分为时间类特征和空间类特征,空间类变量作为 CNN 的输入,经过卷积操作输出的空间类变量和时间类变量作为 LSTM 的输入。多项实验结果表明这种模型的空气质量预报效果较好,可扩展性较强。黄怡容、熊秋林等人同样采用 CNN-LSTM 这一模型,对鄱阳湖生态经济区进行大气污染物时空预测,效果同样客观^[15]。

许胜华基于江西省多源时空数据构建的 GCN-LSTM 模型,实现了 AQI 预测的 RMSE 7.62、R² 87.33%,显著优于传统方法。该研究通过将城市监测数据聚合为节点特征,在降低计算复杂度的同时保留了空间信息,为区域空气质量预测提供了新思路^[16]。王克丽创新性地构建了双层 LSTM 模型,以北京市 35 个监测站点的多源数据(PM_{2.5}、PM₁₀、AQI 及时间特征)为输入,同步建模时序依赖与站点间空间关联。该模型通过 12 小时滑动窗口生成时空序列,预测未来 6 小时内各站点的 PM_{2.5} 等级分布,测试集全局准确率 62.90%,其中严重污染等级(六级)的召回率高达 83.2%^[17]。

王思源的研究提出了一种基于注意力机制增强的卷积长短期记忆网络（AC-LSTM）模型，用于大气污染物浓度及空气质量指数预测^[9]。该模型通过多模块协同机制实现时空特征的深度挖掘：首先利用卷积神经网络（CNN）对输入的多源异构数据（包括PM_{2.5}、O₃等污染物浓度及温度、风速等气象参数）进行空间特征提取，捕获污染物空间扩散的跨区域关联模式；继而引入注意力机制对特征向量进行动态赋权，通过计算特征贡献度实现关键信息的自适应聚焦；最后采用长短期记忆网络（LSTM）解析赋权后特征的时序演变规律，建立污染物浓度与气象条件的动态耦合关系，最终同步输出PM_{2.5}、O₃及AQI的多步预测值。该方法为复杂环境条件下的空气质量预测提供了新的技术路径，其模块化设计可扩展应用于其他环境监测场景。

3 发展困境

城市街谷通风与污染物数值预测研究面临多方面的挑战，涉及模型复杂性、数据获取及计算资源等多个层面。首先，城市街谷的几何结构复杂，建筑物形态、街道布局以及绿化带分布等因素显著影响气流组织和污染物扩散^[18-21]。高精度模拟需构建精细的三维几何模型，但复杂的建筑群导致网格划分难度大，计算量呈指数级增长。

其次，多物理场耦合增加了模型的不确定性。污染物扩散不仅受风场驱动，还与温度场、湿度场以及化学反应（如NO_x与O₃的光化学过程）密切相关^[22]。城市热岛效应可能改变局部气流^[23]，而现有模型对这类多场耦合机制的描述仍不完善。此外，动态边界条件（如交通流量、人为热排放）的时空变异性进一步加大了参数化难度。例如，早晚高峰时机动车排放的瞬态变化要求模型具备实时数据同化能力，但当前监测网络的空间覆盖率和时间分辨率往往不足。

数据获取与验证同样是主要瓶颈。高精度预测依赖详细的输入数据，包括建筑材质热属性、实时气象数据、污染源排放清单等，但这些数据往往难以完整获取。遥感技术和物联网设备虽能补充部分信息^[24]，但数据异构性（如卫星遥感与地面监测的尺度差异）和噪声问题仍需解决。此外，实测数据通常局限于少数点位，难以全面验证三维模拟结果，尤其在垂直方向的污染物梯度验证存在显著空白。

4 展望与建议

随着各种技术的不断发展，国家应针对全国各地精准施策，以低成本城市传感网络建设对区域内线源、点源、面源污染物实施多维协同的指标规划；同时，还可基于AI帮助建立建模方法对建成环境指标空间分异特征关系进行定量分析，并借助优化模型调配要素最优解，构建基准测试案例模型，促进方法对比，推广数字化孪生平台，实现动态模拟，部分城市可要求重大项目提供CFD数字孪生报告。

综上，以城市街区通风和污染物数值预测模式为工具进行城市街区详细规划的通风评估，不仅经济简便易行，且准确性也有一定的保障，适合在我国内地各城市推广。在政策与规划方面，可以强制通风评估纳入建筑规范，基于模拟数值预测结果优化来实施对交通污染的动态监控^[25]。未来城市街区通风与污染预测研究将向更高精度、更快计算、更强应用发展，依赖“CFD+AI”的深度融合。以实现科学研究向实际决策的高效转化，助力可持续城市建设。

参考文献

- [1] Lu, K. F., and Peng, Z. R. 2023. Impacts of viaduct and geometry configurations on the distribution of traffic-related particulate matter in urban street canyon. *Sci. Total Environ.* 858(Pt 1): 159902. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.159902.
- [2] 刘凯, 吴怡, 王晓瑜, 王成新. 中国城市群空间结构对大气污染的影响[J]. *中国人口资源与环境*, 2020, 30(10):28-35.
- [3] 陆安颀, 周建国. 区域大气污染协同治理能促进空气质量改善吗?——基于中国279个城市的PSMDID实证研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2025, 34(03):6526-67.
- [4] 邹丽娜. 我国空气污染治理和碳排放的市场机制分析[J]. *黑龙江环境通报*, 2025, 38(04):105107.
- [5] Fernández, G., Rezzano, N., D'Angelo, M., and Mendina, M. 2019. Numerical simulation of different pollution sources in an urban environment. *E3S Web Conf.* 128. 10005.

- [6] 兰佳玮. 城市蔓延对大气污染的影响研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2020
- [7] 胡景涛, 潘博文, 迟铮. “双碳”背景下空气污染对企业环保支出的影响研究——来自重污染行业的经验证据[J]. 会计与控制评论, 2024, (02): 2755.
- [8] WU H W, LI E, SUN Y, et al. Research on the operation safety evaluation of urban rail stations based on the improved TOPSIS method and entropy weight method[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2021, 20: 1002-62.
- [9] 王思源. 基于AC-LSTM模型的大气污染物浓度预测研究[D]. 延安大学, 2024. DOI:10.27438/d.cnki.gyadu.2024.000861.
- [10] 邱益. 基于RANS和人工智能的气载污染物迁移扩散快速预测方法研究[D]. 中南林业科技大学, 2023. DOI:10.27662/d.cnki.gznlc.2023.001120.
- [11] 陆谢贵. 基于LES模型的城市风环境及污染物扩散研究[D]. 厦门大学, 2020. DOI:10.27424/d.cnki.gxmdu.2020.002528.
- [12] 张慎, 程明, 王义凡, 等. 基于RANS和LES的高大空间建筑气流组织仿真和热舒适度评价方法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(10): 2212-2222. DOI:10.16182/j.issn1004731x.joss.23-FZ0820.
- [13] 许胜华. 基于LSTM的空气质量预测[J]. 清洗世界, 2025, 41(01): 64-65+68.
- [14] 娄智昊. 基于CNN-LSTM的空气质量预报建模方法[J]. 长江信息通信, 2024, 37(12): 43-45. DOI:10.20153/j.issn.2096-9759.2024.12.013.
- [15] 黄怡容, 熊秋林, 熊正坤, 等. 基于CNN-LSTM的鄱阳湖生态经济区大气污染物时空预测[J]. 生态环境学报, 2024, 33(12): 1891-1901. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2024.12.007.
- [16] 许胜华. 基于GCN-LSTM的空气质量预测[J]. 清洗世界, 2024, 40(12): 57-59.
- [17] 王克丽, 卢照. 基于双层LSTM模型的空气质量预测[J]. 电脑与信息技术, 2024, 32(01): 51-55+68. DOI:10.19414/j.cnki.1005-1228.2024.01.033.
- [18] 杨方, 钟珂, 亢燕铭. 街道峡谷对称性对污染物扩散的影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(03): 706-713.
- [19] 张震, 黄远东, 崔鹏义, 等. 树冠尺寸与建筑高度对街谷通风与污染物扩散的影响[J]. 上海理工大学学报, 2022, 44(03): 269-280+298.
- [20] 谢海英, 陈康民. 屋顶形状对街道峡谷内污染物扩散的影响[J]. 环境科学研究, 2007, (03): 27-32.
- [21] Xiaoxuan Zhu, Xueyan Wang, Li Lei, Yuting Zhao, The influence of roadside green belts and street canyon aspect ratios on air pollution dispersion and personal exposure, Urban Climate, Volume 44, 2022, 101236, ISSN 2212-0955.
- [22] 任柯宇, 刘晓平, 吴梅, 等. 基于正交试验的风-热耦合效应下高层建筑交叉污染模拟研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2025, 48(04): 439-446+454.
- [23] 金燕, 晏红明, 何雨岑, 等. 昆明城市降雨特性变化及城市热岛效应的可能影响[J]. 地理科学, 2024, 44(11): 2039-2050. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.20230666.
- [24] 何锡祯. 遥感监测下城市主要大气污染物环流聚类时空分布特征研究[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(02): 125-130.
- [25] 李磊, 吴迪, 张立杰, et al. 基于数值模拟的城市街区详细规划通风评估研究[J]. 环境科学学报, 2012, (04): 946-953.
- 基金项目: 西安石油大学 2023 年省级大学生创新创业训练计划项目 (项目名称: 智测创蓝; 项目编号: S202310705078)