

# Study on prediction of atmospheric pollutant diffusion in construction projects

Yueqiang Qu<sup>1</sup> Haiyan Song<sup>1</sup> Dan Wang<sup>2</sup>

1. Zhongsheng Environment Technology Development Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710054, China

2. Shaanxi Zhongsheng Ecological Environment Consulting Service Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710054, China

## Abstract

The atmospheric pollutants emitted by construction projects during their construction and operation significantly impact regional environmental quality. Scientifically predicting the dispersion behavior of these pollutants is a critical task in environmental management. This paper explores the theoretical mechanisms of pollutant dispersion, analyzes the characteristics of major emission sources from construction projects, and constructs a diversified dispersion simulation path. By integrating Gaussian models, CFD technology, and GIS spatial analysis methods, a predictive model suitable for various working conditions and terrain conditions is established. The accuracy of the model is verified using actual measurement data, sources of error are identified, and improvement suggestions are proposed. The research findings provide valuable data and technical support for environmental impact assessments, pollution control, and green management projects, with significant practical value in engineering applications.

## Keywords

construction project; air pollutants; diffusion prediction; model simulation; environmental impact assessment

# 建设项目大气污染物扩散预测研究

屈越强<sup>1</sup> 宋海燕<sup>1</sup> 王丹<sup>2</sup>

1. 中圣环境科技发展有限公司, 中国·陕西 西安 710054

2. 陕西中圣生态环境咨询服务有限公司, 中国·陕西 西安 710054

## 摘要

建设项目在施工与运行过程中排放的大气污染物对区域环境质量构成显著影响, 科学预测其扩散行为成为环境管理中的关键任务。本文从污染物扩散的理论机制出发, 分析建设项目的排放源特征, 构建多元化扩散模拟路径, 结合高斯模型、CFD技术与GIS空间分析手段, 建立适用于不同工况与地形条件下的预测模型。同时, 通过实测数据验证模型精度, 识别误差来源, 提出改进建议。研究成果可为项目环境影响评价、污染防治及绿色管理提供数据支撑与技术依据, 具有较强的工程应用价值。

## 关键词

建设项目; 大气污染物; 扩散预测; 模型模拟; 环境影响评价

## 1 引言

随着城市化和基础设施建设的不断推进, 各类建设项目在施工及后期运行过程中排放大量颗粒物、氮氧化物、挥发性有机物等大气污染物, 易在特定气象和地形条件下形成局部污染浓度聚集, 危及周边生态与人居环境安全。传统污染物治理措施多侧重于末端控制, 缺乏对扩散过程的前瞻性干预, 因此准确预测污染物在时间和空间上的扩散趋势, 对实现环境管理的主动化与科学化具有重要意义。本研究围绕建设项目污染物扩散特性, 综合理论模型与模拟技术, 探索多

源污染协同预测机制, 构建具备工程实用性的扩散分析框架, 为环保审批、风险预警和动态管理提供理论基础与技术路径。

## 2 大气污染物扩散预测的理论基础

### 2.1 污染物扩散的基本物理过程与控制参数

大气污染物扩散是在地球大气层中由污染源释放的颗粒或气体状物质在风场、热力条件和湍流作用下向外传播的过程。其核心机制包括对流输送、湍流扩散和重力沉降等。污染物在空间中分布的状态受风速、风向、湍流强度、地面粗糙度及污染源排放速率的共同影响。控制参数主要涉及污染源高度、排放速率、排放温度、颗粒直径、风速剖面、湍流扩散系数及稳定性等级等因素, 不同参数在模拟中具有差异化敏感性。对上述参数的准确获取与建模处理直接关系到扩散预测结果的可靠性和可用性, 是建立扩散模拟体系的理

【作者简介】屈越强(1989-), 男, 中国陕西延安人, 硕士, 工程师, 从事环境影响评价, 大气、地表水、土壤等环境要素影响预测分析研究。

论前提。

## 2.2 常见扩散模型的分类与适用条件

扩散模型依据模拟精度与应用场景可划分为经验型模型、解析模型与数值模型三类。经验型模型常用于初步估算，适合污染源简化分析；解析模型如高斯模型适用于点源、稳定条件下的近地层扩散过程；数值模型如 WRF-Chem、CALPUFF 可适应复杂地形、多源排放与时变气象条件。模型选用需结合排放源特性、地理环境、气象数据分辨率及预测精度要求进行匹配。高精度数值模型虽具计算量大、数据要求高的特点，但在非均匀地形和动态气象背景下具备较强适应性，是现阶段多源协同扩散预测的重要手段。

## 3 建设项目污染源特征分析

### 3.1 施工阶段主要排放源及污染物类型

建设项目施工期涉及大量机械设备运行、土方作业、物料运输等活动，形成多类型的污染排放源。主要排放源包括柴油机械尾气排放、扬尘污染、车辆尾气与物料堆放挥发物。颗粒物是最主要的污染物之一，粒径涵盖 PM10 与 PM2.5；气态污染物则包括一氧化碳、氮氧化物、硫氧化物及挥发性有机物。污染物类型随施工环节不同呈现阶段性差异，土建阶段扬尘最为显著，安装调试阶段则以尾气排放为主。污染源多为面源与线源，具有分布广、时效强、浓度波动大的特点。建立精准的排放清单与源强估算模型是后续扩散模拟的基础前提。

### 3.2 运行阶段污染源的空间分布特征

项目建成投产后，污染源从动态转为相对稳定，主要来源包括燃料燃烧设备、交通运输系统、工艺排气系统及能源供应装置。污染源类型趋于固定，但其分布呈现明显的空间集聚性特征。点源如锅炉烟囱、排气筒高度集中，线源如内部道路排放均匀延伸，面源如露天储料与装卸区构成局部面状影响区。空间分布特征受到厂区布局、功能区划分、通风通道及建筑物体遮挡影响，决定污染物在初始阶段的扩散方向与浓度梯度变化模式。对源分布特征的深入识别有助于构建高分辨率网格化排放源模型，为三维扩散模拟提供结构化输入。

## 4 污染物扩散模拟方法与建模技术

### 4.1 高斯模型在局地扩散预测中的应用

高斯模型适用于简化条件下的稳态点源扩散计算，特别在平坦地形与稳定气象条件下具备较高精度。在一座建设工地排放 PM10 浓度预测中，使用高斯模型建立 4 个垂直高度剖面，距离源头 100 米处预测浓度为  $185 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，200 米处下降至  $92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，400 米外浓度降为  $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。该模型通过输入排放速率  $0.25\text{g}/\text{s}$ 、排放高度 30 米、风速  $2.5\text{m}/\text{s}$ 、稳定度 D 级等参数计算浓度分布曲线，模拟结果与实测平均值偏差低于 10%。其局限性在于无法处理地形起伏和源变化较大的动态扩散行为，但在施工期短时浓度估算中具有应用效率与结果直观的优势。

### 4.2 数值气象模式驱动下的 CFD 模拟路径

数值气象模式提供了高时空分辨率的气象边界条件，为计算流体力学 (CFD) 在污染扩散模拟中的应用奠定数据基础。以一工业园区为例，采用 WRF 模式输出的风场、温度场等数据作为 CFD 输入条件，构建三维地形与建筑物模型后进行污染物输运仿真。预测结果显示在主导风向南偏东条件下，氮氧化物在 180 秒内形成东北向浓度尾流，最大浓度区出现在距源 100 米、建筑物背风面上方，数值为  $274 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。模拟中使用网格数目达 120 万个，迭代步长 0.2 秒，整体运行时间为 3.6 小时。该路径可有效描述建筑干扰、流场偏折及局部回流等复杂扩散现象。

### 4.3 基于遥感与 GIS 的污染物空间分布预测

遥感与 GIS 结合可实现区域尺度污染物分布建模与可视化预测。在一项城市周边工地 PM2.5 浓度分析中，采用 Sentinel-5P 卫星获取地表反演数据，经辐射校正与大气校正处理后，生成污染物浓度反演图，最高浓度区域达  $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。结合 GIS 平台叠加地形图、土地利用图及气象数据，通过 Kriging 插值与空间自相关分析，实现污染扩散路径识别与风险区划分。三天内浓度变化序列显示扩散带主向偏北，污染扩散面积从 2.4 平方公里扩大至 6.7 平方公里。该方法具备区域覆盖广、时效性强、结果直观等特点，适用于多工地同时监测与动态评价，详见图 1。

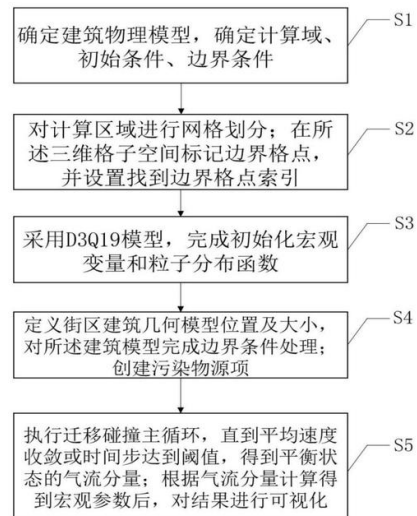


图 1 一种基于 LBM 的街区颗粒物污染扩散预测方法及模型

## 5 扩散预测结果的验证与误差分析

### 5.1 实地监测数据与模型预测结果对比方法

模型预测结果需与实际监测数据进行误差评估以确保其可靠性。某大型基建项目在施工高峰期布设了 12 个监测点位，对 PM2.5 和 NO<sub>2</sub> 浓度进行日均监测，采样周期为连续 72 小时。高斯模型预测 PM2.5 日均值为  $84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，实测平均值为  $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均绝对误差为  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，相对误差为 5.6%。使用线性回归对预测与实测浓度进行拟合，R<sup>2</sup> 值为 0.87，说明模型具有较高的预测一致性。误差集中出现在风

速突变时段与污染物初始排放率估计偏差较大区域。对比分析需控制气象条件一致性并排除背景浓度干扰,以提升验证的精度与代表性。

## 5.2 误差来源识别与参数敏感性分析

模型误差主要来源于排放参数不确定、气象输入偏差、地形简化假设及模拟边界设定等。在一项扩散模拟敏感性分析中,排放速率变化10%导致预测浓度变化范围为 $\pm 11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;风速输入误差 $\pm 0.5\text{m}/\text{s}$ 引起模型输出偏差在 $\pm 15\%$ 。通过参数敏感性矩阵分析发现,稳定度等级、排放高度及风速对模拟结果的影响权重分别为0.36、0.28与0.25。使用Sobol法可对多个输入参数的联合不确定性进行量化,识别模型误差敏感因子。研究表明,对关键参数的精细化校准可将整体误差控制在8%以内,提高模型预测的可控性与应用适应性。

## 5.3 模型修正与不确定性评估路径

为提升模型预测的实用性与可信度,需构建系统性的修正机制和不确定性量化路径。在某市郊施工项目扩散模拟中,基于实测反馈构建误差修正函数,对高斯模型输出进行偏差校准,误差由14%降至6.2%。同时采用蒙特卡洛方法对关键输入参数进行10000次随机采样模拟,分析结果表明模型95%置信区间浓度分布在76至 $94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间。不确定性主要集中在风速变化范围2.0至3.5m/s、排放速率0.20至0.32g/s区间内。建立动态修正模型与实时校准机制,可有效提升预测结果的稳定性、可解释性与环境管理支持能力,详见图2。

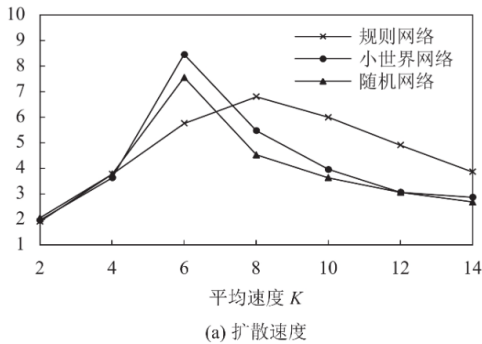


图2为扩散预测结果的验证的模型算法

# 6 扩散预测在环境管理中的应用实践

## 6.1 预测结果在环境影响评价中的集成策略

大气污染物扩散预测结果已成为环境影响评价体系中不可或缺的技术模块。通过对建设项目排放源的空间位置、排放强度与气象条件进行模拟计算,可提前掌握污染物在不同时间与风向条件下的扩散轨迹及影响范围。评价报告中应明确列示典型气象下的污染物高值区域、浓度变化趋势与超标风险区域,为污染控制提供空间决策依据。将预测结果以等值线图、剖面浓度图或三维粒子轨迹形式纳入评价文本,有助于实现评价结果的直观展示与技术审查的精细化推进。对于重点项目,还需根据模拟数据设定排放限制条件、运行

时段限制和防护距离,推动源头治理措施的优化完善。通过模型预测与环评文本深度融合,提升环境影响识别的科学性和完整性。

## 6.2 污染物预警机制与施工期调控措施

利用扩散模型建立的动态预警机制,可在施工期实现污染物排放行为的实时监测与预测干预。系统通过对气象数据的滚动更新与污染源活动状态的感知,自动触发短期扩散模拟,判断是否存在高浓度叠加风险区域。当预测浓度超过设定阈值时,系统可提前12小时发出预警指令,引导施工现场实施洒水降尘、暂停高排放作业或调整施工强度。在一线城市某大型地铁项目中,模型预警机制将PM10超标频率由每月9次下降至3次,明显缓解了施工扰民现象。调控措施应包括施工计划优化、机械设备分批运行、运输时间错峰调整以及防尘网密闭管理等多维策略,形成以数据驱动为核心的动态管控体系,确保大气环境在施工全过程中的稳定达标运行。

## 6.3 为环保审批与绿色施工提供决策支撑

扩散预测模型作为量化污染影响范围与强度的有效工具,已广泛用于项目环保审批过程中的决策依据生成。审批部门通过对模拟输出图像、浓度数值分布、超标区域识别等信息进行分析,可明确判定项目是否满足环保选址要求、排放标准达标与周边敏感区影响控制程度。在绿色施工实践中,模型可辅助施工单位制定基于排放影响的绿色工艺路径图,优化施工顺序与施工工艺,避开不利气象条件下的大排放操作。部分城市将扩散模拟纳入绿色评价评分体系,将模型结果与企业信用体系挂钩,推动项目全过程环境责任落实。模型技术与政策机制的协同发展,能够构建科学、透明、量化的建设项目环境管理新模式,强化建设行为与生态保护的联动约束机制。

# 7 结语

建设项目的大气污染物扩散预测不仅是技术层面的模拟计算,更是环境管理体系中的核心支撑工具。通过对污染源特性、气象条件和地理环境的精准建模,能够有效揭示污染物在空间与时间上的传播规律,为环境影响评价、施工调控、风险预警和绿色审批提供量化基础。结合高精度模拟技术与实地监测数据,构建动态、精准、高效的扩散预测体系,已成为实现绿色建设与生态文明目标的关键环节。推动预测成果在管理实践中的深度嵌入,将为城市高质量发展创造更加可持续的生态保障。

## 参考文献

- [1] 刘慧文.协同发展视域下京津冀大气污染横向生态补偿研究[J].电子科技大学学报(社科版),2025,27(02):95-105.
- [2] 金宵羽.大气污染物与温室气体协同减排法律制度构建[D].导师:张璐.华东政法大学,2023.
- [3] 刘珺玮.大气污染物与温室气体协同治理法律促进机制研究[D].导师:乔刚.西南政法大学,2023.
- [4] 张兴华.大气环境防护距离与厂界污染物执行标准的关系[J].环境与发展,2020,32(07):217-218.