

大气环境监测网络布局优化与污染溯源能力提升

王安帅¹, 陈磊^{2,3}, 姚秉琛¹, 金鹏辉^{2,3}, 张伟^{2,3*}

1. 天津港保税区环境监测站, 天津 300457

2. 天津佳华智创科技有限公司, 天津 300457

3. 罗克佳华科技股份有限公司, 北京 101149

DOI:10.61369/EAE.2025040002

摘要 : 针对当前大气污染治理中监测数据精度不足、污染源定位模糊等问题, 本文从技术价值、核心应用与优化策略三方面, 系统研究大气环境监测网络布局优化与污染溯源能力提升路径。通过分析监测网络对数据质量的提升作用及对污染溯源的技术支撑, 阐述基于地形地貌与浓度梯度的点位布设技术、多参数关联分析与扩散模型耦合的溯源方法, 提出不同功能区点位间距、高污染区域监测频次等优化参数, 以及数据时空校准、污染源贡献率解析的实施要点, 旨在为大气污染精准治理提供技术支撑。

关键词 : 大气环境; 监测网络; 布局优化; 污染溯源

Optimization of the Layout of the Atmospheric Environmental Monitoring Network and Enhancement of Pollution Source Tracing Capability

Wang Anshuai¹, Chen Lei^{2,3}, Yao Bingchen¹, Jin Penghui^{2,3}, Zhang Wei^{2,3*}

1. Tianjin Port Free Trade Zone Environmental Monitoring Station, Tianjin 300457

2. Tianjin RockKontrol Wisdom Innovation Technology Co., Ltd. Tianjin 300457

3. RockKontrol Technology Group Co., Ltd. Beijing 101149

Abstract : Addressing issues such as insufficient accuracy of monitoring data and ambiguous localization of pollution sources in current atmospheric pollution control efforts, this paper systematically explores the optimization of atmospheric environmental monitoring network layout and the enhancement of pollution source tracing capabilities from three perspectives: technological value, core applications, and optimization strategies. By analyzing the role of monitoring networks in improving data quality and providing technical support for pollution source tracing, the paper elaborates on point layout techniques based on topography and concentration gradients, as well as source tracing methods that couple multi-parameter correlation analysis with diffusion models. It proposes optimized parameters, including point spacing in different functional zones and monitoring frequencies in highly polluted areas, along with implementation essentials for spatiotemporal data calibration and analysis of pollution source contribution rates. The aim is to provide technical support for precise atmospheric pollution control.

Keywords : atmospheric environment; monitoring network; layout optimization; pollution source tracing

引言

在“双碳”战略与空气质量持续改善目标推动下, 大气污染治理已从“粗放管控”转向“精准溯源”。传统大气环境监测网络存在点位布设稀疏、空间覆盖不均、监测频次固定等问题, 无法满足精准治理需求。大气环境监测网络作为污染溯源的基础支撑, 其布局合理性直接决定数据质量, 而数据质量又影响污染溯源的准确性。因此, 研究监测网络布局优化方法, 提升污染溯源能力, 成为解决当前大气污染治理“靶向性”不足的关键, 对实现区域空气质量持续改善具有重要实践意义。

作者简介: 王安帅 (1983-), 男, 天津人, 汉族, 硕士研究生, 主要从事大气、水、土壤、噪声等生态环境监测。

一、大气环境监测网络布局优化与污染溯源的技术价值

(一) 监测数据质量提升价值

1. 空间分辨率与污染物浓度表征精度匹配

监测网络的空间分辨率由点位间距决定, 其与污染物浓度表征精度呈正相关。工业区因生产活动集中, 污染物排放强度大且空间分布差异显著, 若点位间距超过2km, 易遗漏局部高浓度区域, 导致浓度表征值低于实际值; 城区人口密集且污染源类型复杂(交通、餐饮、扬尘), 需1-1.5km的点位间距才能反映不同功能区块(商业区、居住区)的浓度差异^[1]; 郊区与农村地区污染源分散, 2-3km的点位间距可平衡监测成本与表征精度。

2. 时间序列数据连续性与动态变化捕捉效能

时间序列数据的连续性取决于监测频次, 直接影响重污染过程动态变化的捕捉能力。传统日均监测频次仅能获取单日浓度均值, 无法识别重污染峰值出现的具体时段(如早高峰交通污染、夜间工业偷排); 小时级监测可初步捕捉浓度变化趋势, 但面对突发性污染(如秸秆焚烧、化学品泄漏)仍存在滞后性; 当前主流的5分钟级监测可实时跟踪污染物浓度波动, 准确记录污染起始时间、峰值时刻与消退过程, 部分高污染风险区域已实现实时级(秒级)监测^[2]。

(二) 污染溯源技术支撑价值

1. 污染源识别的空间定位精度保障

监测网络的点位密度直接决定污染源空间定位精度。在化工园区周边, 若仅布设1个监测点, 仅能判断园区存在污染排放, 无法确定具体排放源位置; 当在园区周边1km范围内布设3-4个监测点, 通过各点位污染物浓度梯度(如主导风向下游点位浓度是上游的2-3倍), 可缩小污染源范围至500m以内; 若在园区内部按500m间距布设微型监测点, 结合浓度高值区分布, 可精准定位至具体生产装置。

2. 污染物迁移路径反演的数据源可靠性

污染物迁移路径反演需依赖多参数、高可靠性的监测数据。单一PM_{2.5}监测数据仅能反映颗粒物浓度变化, 无法判断其来源(燃煤、工业、扬尘); 而同步监测PM_{2.5}、SO₂、NO_x、VOCs等多参数, 通过各参数的相关性(如PM_{2.5}与SO₂相关系数达0.7以上, 表明燃煤贡献显著), 可初步判断污染物类型; 若监测数据存在缺失或误差(如仪器故障导致的单日数据中断), 会使迁移路径反演出现偏差, 如将原本向东南方向迁移的污染气团误判为向东北方向。因此, 优化后的监测网络需保证多参数数据完整率处于较高水平^[3]。

二、大气环境监测网络布局与污染溯源的核心技术应用

(一) 监测网络布局的技术实施路径

1. 基于地形地貌的监测点位布设技术

地形地貌通过影响气流运动, 改变污染物的空间分布, 需针

对性布设监测点位。山地地区需考虑山谷风环流: 白天谷风将山脚污染物吹向山顶, 需在迎风坡(山脚向上200-300m处)布设点位, 捕捉污染物上行过程; 夜间山风将山顶冷空气带向山脚, 需在背风坡(山腰处)布设点位, 避免点位处于气流死角。平原地区需结合城市风道: 监测点位应避开高层建筑遮挡的风道盲区, 沿风道方向(如城市主干道延伸方向)按均匀间距布设, 确保捕捉污染物随风道的迁移过程^[4]。

2. 污染物浓度梯度导向的点位密度配置

污染物浓度梯度反映污染源对周边环境的影响范围, 是配置点位密度的核心依据。以固定污染源(如燃煤电厂)为中心, 其浓度梯度可分为三个区域: 核心影响区(距离污染源1km以内), 浓度梯度大, 需按500m间距布设点位, 监测浓度快速下降过程; 次级影响区(1-3km), 浓度梯度中等, 按1km间距布设点位, 跟踪浓度缓慢变化; 外围影响区(3km以外), 浓度梯度小, 按2-3km间距布设点位, 监测污染扩散边界。

(二) 污染溯源的关键技术应用

1. 多参数监测数据关联分析技术

多参数监测数据的关联分析可实现污染源类型识别。通过计算不同参数间的相关系数, 判断污染物来源: 当PM_{2.5}与SO₂的相关系数>0.7, 且PM_{2.5}与NO_x的相关系数<0.4时, 表明PM_{2.5}主要来源于燃煤排放(如电厂、燃煤锅炉); 当PM_{2.5}与NO_x的相关系数>0.6, 且与VOCs的相关系数>0.5时, 表明PM_{2.5}主要来源于机动车尾气与工业VOCs排放(如化工、涂装行业); 当PM_{2.5}与PM₁₀的相关系数>0.8, 且与风速的相关系数<-0.4时, 表明PM_{2.5}主要来源于扬尘(如建筑施工、道路扬尘)。工业城市通过多参数关联分析, 发现冬季PM_{2.5}与SO₂相关系数较高, 确定燃煤为主要污染源, 据此制定的燃煤锅炉改造措施使冬季PM_{2.5}浓度显著下降。

2. 大气扩散模型与监测数据耦合应用

大气扩散模型是污染溯源的核心工具, 通过与监测数据耦合可提升溯源精度。常用的CALPUFF模型可模拟污染物在大气中的迁移扩散过程, 其核心浓度预测公式如式(1)所示, 该公式通过污染源排放强度、扩散参数与气象条件, 计算不同点位的污染物浓度预测值。将监测网络获取的实际浓度值与模型预测值对比, 调整扩散参数(σ_y为横向扩散参数, σ_z为垂直扩散参数), 使预测值与实际值的相对误差<10%, 此时模型可准确反演污染物迁移路径。化工园区发生VOCs泄漏时, 通过耦合监测数据与CALPUFF模型, 反演发现VOCs沿主导风向扩散, 在下游2.5km处形成浓度高值区, 结合该区域点位监测数据, 最终定位泄漏源为园区内某储罐。

$$C_{(x, y, z, t)} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (1)$$

式(1)中: C_(x, y, z, t)为t时刻(x, y, z)位置的污染物浓度(μg/m³); Q为污染源排放强度(μg/s); σ_y、σ_z分别为横向、垂直扩散参数(m); u为平均风速(m/s); H为污染源排放高度(m)。

三、大气环境监测网络布局与污染溯源的技术优化策略

（一）监测网络布局的参数优化设定

1. 不同功能区监测点位间距优化参数

不同功能区的污染源分布与排放强度差异，决定了监测点位间距的优化参数。工业区（含化工、钢铁、电厂）因污染源集中且排放强度大，点位间距需控制在500–1000m，确保覆盖所有主要污染源的影响范围；城市建成区（含商业区、居住区）污染源类型复杂且分布均匀，点位间距设为1000–1500m，平衡覆盖密度与监测成本；郊区（含农业区、乡镇）污染源分散且排放强度低，点位间距设为2000–3000m，避免资源浪费；生态保护区（如自然保护区、森林公园）作为背景对照区，点位间距设为5000m，仅需获取区域背景浓度数据。省会城市按此参数优化后，监测网络对建成区的覆盖率显著提升，污染物浓度空间表征精度大幅改善。

2. 高污染风险区域监测频次调节阈值

当前大气监测技术已实现从“固定频次”向“智能动态调节”的转型，依托物联网（IoT）实时数据传输与AI预警模型，监测调节需结合设备响应能力、污染扩散速率与区域污染源特征协同优化。现代微型监测站（如 β 射线法PM_{2.5}监测仪、光离子化VOCs监测仪）可稳定实现秒级数据采集与传输，无需依赖固定时间间隔阈值，而是通过多维度逻辑动态调整数据采样与分析模式：当监测点位实时浓度处于背景水平（如PM_{2.5} < 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）时，采用1分钟级数据整合输出，平衡数据量与存储效率；当浓度出现波动（如10秒内浓度变化率>10%）时，自动触发秒级采样模式，同步记录气象参数（风速、风向）变化，捕捉污染初始扩散过程；当监测网络中相邻3个及以上点位出现浓度梯度异常（如下游点位浓度较上游骤增2倍以上）时，系统自动将该区域所有监测设备纳入“协同监测模式”，统一采用毫秒级数据同步采集，为污染溯源提供高时间分辨率的扩散轨迹数据^[5]。

（二）污染溯源技术的实施要点

1. 监测数据时空匹配性校准步骤

监测数据的时空匹配性是污染溯源的前提，需按固定步骤校准。时间校准方面，所有监测设备需统一接入北斗时间同步系统，确保数据采集时间误差<1秒，每日凌晨2时自动校验设备时间，避免因时间偏差导致的时序数据错位；空间校准方面，采用GIS系统对监测点位坐标进行定位，精度控制在10m以内，每季度对点位进行实地核查，修正因设备迁移导致的坐标偏差；数据完整性校准方面，对缺失数据（如仪器故障导致的1小时数据空白）采用线性插值法补全，对异常数据（如超出正常浓度范围10倍的值）采用邻近3个点位的同期数据均值替换，确保数据完整率处于较高水平。

2. 污染源贡献率定量解析的技术参数设置

污染源贡献率定量解析需通过受体模型（如化学质量平衡模型CMB）实现，关键在于设置合理的技术参数。模型输入参数包括：物种数量需 ≥ 10 种（如PM_{2.5}中的OC、EC、SO₄²⁻、NO₃⁻、Ca²⁺等），确保覆盖主要污染源的特征物种；源谱库需匹配区域实际污染源类型，如包含燃煤、机动车、工业、扬尘4类核心源谱，且源谱更新周期 ≤ 2 年，避免因源谱过时导致的解析误差；解析误差控制参数设为：绝对误差<5%，相对误差<10%，当某污染源贡献率的解析误差超出该范围时，需重新筛选物种或更新源谱库。

四、结束语

大气环境监测网络布局优化与污染溯源能力提升是大气污染精准治理的核心技术支撑。通过提升监测网络的空间分辨率与时间连续性，可显著改善数据质量，为污染溯源提供可靠基础；基于地形地貌与浓度梯度的点位布设、多参数关联分析与扩散模型耦合的技术应用，可实现污染源的精准定位与类型识别，为区域空气质量持续改善提供了更强大的技术保障。

参考文献

- [1] 梁常德, 尹民, 胡清, 游勇, 黄芊蕙, 许盛彬. 人工智能技术在大气环境领域的应用 [J]. 环境工程, 2025, 43 (04): 98–109.
- [2] 李琪光, 张栩浩, 赵德龙, 张自雨, 金海娟. 低碳背景下环境监测与保护策略研究 [J]. 环境科学与管理, 2024, 49 (09): 123–128.
- [3] 王雅楠. 生态环境监测在大气污染治理中的运用浅析 [J]. 生态与资源, 2024, (07): 67–69.
- [4] 石美霞. 大气环境监测中大数据技术的应用实践探究 [J]. 环境与生活, 2024, (Z1): 91–93.
- [5] 王鹏. 在线监测技术在环保领域应用研究 [J]. 资源节约与环保, 2021, (09): 76–77.