

区域大气重污染过程动态监控与解析技术

张殿涛

河南速创环保科技有限公司, 中国·河南 郑州 450000

摘要: 论文聚焦区域大气重污染, 阐述其对人类健康、生态环境及社会经济的负面影响。深入剖析大气重污染过程的基本特征, 包括污染物浓度、时间与空间分布特性。详细介绍动态监控技术体系, 涵盖地面、卫星遥感及无人飞机监测技术; 解析技术体系涉及源解析、污染传输路径分析及气象—污染耦合分析技术。通过京津冀与长三角地区案例, 展示技术应用及提出防治建议。研究表明, 现有技术存在数据与模型精度等不足, 未来将朝多 AC 源数据融合、高精度模型及区域协同与国际合作方向发展, 以应对全球大气污染挑战, 助力改善大气环境。

关键词: 区域大气重污染; 动态监控与解析技术; 多源数据融合; 区域协同

Dynamic Monitoring and Analysis Technology for Regional Atmospheric Heavy Pollution Processes

Diantao Zhang

Henan Suchuang Environmental Protection Technology Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract: This paper focuses on regional heavy air pollution and elaborates on its negative impacts on human health, ecological environment, and socio-economic development. Thoroughly analyze the basic characteristics of atmospheric heavy pollution processes, including pollutant concentration, temporal and spatial distribution characteristics. Provide a detailed introduction to the dynamic monitoring technology system, covering ground, satellite remote sensing, and unmanned aerial vehicle monitoring technologies; the analytical technology system involves source analysis, pollution transmission path analysis, and meteorological pollution coupling analysis techniques. Through case studies in the Beijing Tianjin Hebei and Yangtze River Delta regions, demonstrate the application of technology and propose prevention and control suggestions. Research has shown that existing technologies have shortcomings in data and model accuracy. In the future, they will develop towards multi source data fusion, high-precision models, regional collaboration, and international cooperation to address global air pollution challenges and help improve the atmospheric environment.

Keywords: regional heavy air pollution; dynamic monitoring and analysis technology; multi source data fusion; regional synergy

0 前言

在全球工业化、城市化进程中, 大气污染已成为严峻的全球性环境问题。大气质量影响人类健康、生态稳定及社会经济可持续发展。随着人类活动加剧, 大量污染物排入大气, 大气重污染事件频发。其对人类健康威胁极大, 长期暴露易引发呼吸、心血管、免疫及生殖系统疾病, 北京等地区在重污染期间, 医院呼吸科就诊人数显著增加。对生态环境而言, 温室气体排放导致气候变化, 酸雨破坏植被与土壤, 影响生物多样性。在社会经济方面, 农业因大气污染导致农作物减产、品质下降, 工业设备被腐蚀、维护成本增加, 旅游业也受冲击。区域大气重污染过程动态监控与解析技术意义重大, 能实时掌握污染物浓度、分布及变化, 了解其来源、传输与转化, 为污染治理、经济规划、政策制定提供依据, 助力经济与环境协调发展。

1 区域大气重污染过程的基本特征

1.1 污染物质浓度特征

区域大气重污染时, $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 等主要污染物浓度显著升高。以 $PM_{2.5}$ 为例, 京津冀部分城市重污染时日

均浓度可达 $300\mu g/m^3$ 以上, 极端情况超 $500\mu g/m^3$ 。其浓度清晨和傍晚较高, 因清晨逆温致污染物积累, 傍晚交通与工业排放增多且扩散条件差。冬季 $PM_{2.5}$ 浓度最高, 取暖使煤炭等化石燃料燃烧排放大增, 且大气扩散条件差、逆温频繁。

SO_2 主要源于煤炭等含硫燃料燃烧, 如山西、内蒙古等地的工业排放。重污染时, 一些工业城市日均浓度超 $200\mu g/m^3$ 。其浓度与工业活动相关, 工作日高、周末低, 静稳天气下易积聚。 NO_x 源于机动车尾气、工业燃烧等。城市交通繁忙路段浓度高, 重污染时大城市中心区域小时浓度超 $500\mu g/m^3$ 。其浓度随交通流量变化, 早晚高峰高, 且高温富氧燃烧会增加生成量。

1.2 时间分布特征

大气重污染过程短则数天, 长可达数周。例如, 2013 年京津冀一次污染持续 16 天, 2017 年 12 月京津冀及周边重污染超 10 天。持续时长受气象和污染源排放影响, 静稳天气不利扩散, 若污染源未减排, 污染持续时间延长。冬季是大气重污染高发季, 取暖使煤炭等燃烧排放污染物, 且大气扩散条件差、逆温频繁, 如东北冬季供暖期污染频发。夏季因大气对流旺盛、降水冲刷, 污染事件少, 但高温高湿且

风力小的特殊天气下,南方城市可能因光化学反应产生臭氧引发污染。大气重污染时间分布影响深远,环境上,破坏生态平衡,影响植物生长、导致酸雨、损害生物多样性;人类活动方面,威胁居民健康,增加呼吸道、心血管疾病发病率,还影响交通、农业、旅游等,如重污染致交通能见度降低、农作物减产、旅游景点游客减少。

1.3 空间分布特征

区域大气重污染空间分布受多种因素影响。地理环境上,盆地、山谷等封闭地形不利污染物扩散,如四川盆地,2023年冬季多地长时间重污染;平原虽利于扩散,但人口密集、工业发达,不利气象条件下也易污染,如华北平原。城市布局方面,市中心人口密集、交通拥堵、建筑密集,污染物易积聚,如北京国贸、上海人民广场周边,早晚高峰污染突出;郊区污染较轻,但随城市扩张和产业转移,污染程度有上升趋势。工业分布是关键因素,工业集中区如河北唐山、邯郸等地,钢铁、焦化企业排放大量污染物,一些工业园区企业布局不合理、治理措施不足,空气质量长期较差。区域间大气污染相互传输也影响空间分布,京津冀地区存在明显区域传输,周边污染物可传输至北京加重污染,使污染治理难度增加。

2 区域大气重污染动态监控技术体系

2.1 地面监测技术

2.1.1 传统地面监测站点布局与原理

传统地面监测站点在区域大气重污染动态监控中十分关键。其布局兼顾城市不同功能区,如北京在王府井商业区、海淀区居民区等地均设站点,形成监测网络。站点密度依城市规模和人口密度规划,大城市每 10~15 平方公里设一站,中小城市则为每 20~30 平方公里设一站。

站点借助分光光度计、色谱仪等仪器监测污染物浓度。分光光度计依物质对光的吸收特性测二氧化硫浓度,如依朗伯-比尔定律,通过特定波长光吸收程度算二氧化硫浓度。色谱仪利用物质分配系数差异分离定量挥发性有机物。气象参数由风速仪、温湿度传感器等监测,为分析污染物扩散传输提供依据。例如,静稳天气污染物易积聚,大风利于扩散。数据采集自动化,按预设间隔采集,经有线(如光纤)或无线(如 GPRS)传输至数据中心,经处理生成报告图表。

2.1.2 新型地面监测设备与技术进展

在科技驱动下,新型地面监测设备极大地革新了环境监测模式。高灵敏度传感器成为提升监测精度的核心,像基于量子级联激光器的传感器,能够敏锐捕捉痕量污染物;纳米材料传感器,以碳纳米管传感器为代表,凭借对污染物独特的电学响应机制,实现高灵敏度与选择性检测。微型监测站则以小巧便携、低成本的优势,集成多类传感器与气象参数测量功能,借由模块化设计与低功耗广域网技术传输数据,方便用户实时获取污染信息。网格化监测系统依托密集部署的微型监测站网络,结合大数据与机器学习算法,实现对污染区域精准定位、污染源解析及污染扩散的实时监测与预警。

2.2 卫星遥感监测技术

卫星遥感基于电磁波与污染物相互作用监测大气污染。二氧化硫在紫外波段有吸收特征,卫星通过测量特定波长辐射强度变化反演其浓度。氮氧化物在可见光和近红外波段有吸收光谱,如二氧化氮在蓝光波段吸收强,卫星利用算法获取其浓度。卫星遥感优势显著,能大面积监测,地球静止轨道卫星可覆盖地球约三分之一区域,极轨卫星一天内多次观测全球,全面掌握污染分布和扩散趋势。还能长时间连续监测,分析污染时间变化趋势,如研究京津冀地区冬季污染加重规律。且不受地形和交通限制,可监测山区、海洋等难以到达区域。

2.3 无人机监测技术

2.3.1 无人机监测系统组成与工作流程

无人机监测系统由飞行器、传感器和数据传输设备组成。多旋翼无人机机动性强,适合城市局部监测;固定翼无人机续航长、速度快,用于大面积巡查。传感器包括检测气态污染物的气体传感器(如电化学传感器)和测量颗粒物浓度的颗粒物传感器(如光散射式传感器)。数据传输通过无线数传电台(适用于偏远地区)或 4G/5G 通信模块(高速实时传输)。工作流程为,先任务规划,依监测目标制定飞行路线;飞行中传感器实时采集数据;数据实时传输回地面中心,经处理生成图表,超标时预警。

2.3.2 无人机在复杂地形和特殊区域的监测应用

无人机在复杂地形和特殊区域监测优势明显。山区地形复杂,地面监测困难,无人机可穿越山谷、飞越山峰,获取高海拔区域数据,研究大气污染垂直分布。城市密集区,无人机低空贴近污染源监测,如陆家嘴金融区。工业园区内,无人机搭载传感器监测企业废气排放,发现违规行为。自然保护区中,无人机不干扰生态,监测大气污染对生态的影响,如长白山自然保护区。

3 区域大气重污染过程解析技术

3.1 源解析技术

3.1.1 受体模型解析法

在区域大气重污染源解析领域,受体模型解析法具有关键意义,其中化学质量平衡(CMB)模型与正定矩阵因子分解(PMF)模型应用普遍。CMB模型基于化学质量守恒原理,通过剖析污染源与受体样品的化学成分,确定污染源贡献率。实际操作时,需采集不同污染源样品构建源成分谱数据库,再与受体点样品比对计算。PMF模型借助多元统计手段,无需预设污染源成分谱,对受体样品污染物浓度矩阵进行分解,从而识别污染源因子并算出贡献率。

3.1.2 数值模拟解析法

在区域大气污染数值模拟解析领域,WRF-Chem、CAMx等模型占据关键地位。WRF-Chem作为气象与大气化学的在线耦合模式,整合气象模式与化学模式,基于大气动力学原理,通过对相关方程的求解,模拟污染物的运动、扩散及反应过程。其在模拟传输时,会考量气象因素及大气

湍流的影响;模拟转化时,则关注污染物间的化学反应。应用时需输入多类基础数据。CAMx 作为常用空气质量模拟模型,运用欧拉网格法,模拟三维空间中污染物的传输等过程,综合考虑多种污染源及大气化学过程,应用时也需输入对应信息,助力分析污染物浓度分布。

3.2 污染传输路径分析技术

在大气污染溯源研究中,后向轨迹模型与聚类分析方法发挥着重要作用。后向轨迹模型里,HYSPLIT 模型应用广泛,它依据拉格朗日粒子轨迹理论,借助数值天气预报获取的风速、风向等气象数据,反向追溯污染物的运动路径,从而明晰其传输方向、速度与扩散特点。

3.3 气象因素与污染的耦合分析

3.3.1 气象因素对大气重污染的影响机制

气象因素深刻影响大气污染物扩散、积累与化学反应。风速决定污染物扩散速度,风速大湍流强,污染物快速扩散,静风时污染物积聚。风向决定传输方向,不同风向使污染物影响不同区域。

温度影响大气稳定性与污染物垂直扩散,白天对流利于扩散,夜间逆温抑制扩散。湿度利于气态污染物溶解、颗粒物吸湿增长,增加二次污染物生成,提高 PM_{2.5} 浓度。

气压方面,高气压下沉运动不利扩散,易致污染积聚;低气压上升运动利于扩散。大气稳定度与温度层结相关,不稳定时对流强,污染物易扩散;稳定时扩散缓慢,冬季大气稳定度高,污染较重。

3.3.2 气象—污染耦合模型的构建与应用

构建气象—污染耦合模型,结合气象与污染扩散模型,考虑两者相互作用模拟重污染过程耦合时建立数据交互接口,气象模型实时传输气象数据给污染扩散模型,污染扩散模型反馈污染物浓度数据,实现动态耦合。结果显示高气压下风速小、稳定度高,污染物浓度升高出现重污染,为治理提供依据,可制定短期与长期措施改善大气环境。

4 技术应用案例分析

4.1 京津冀地区大气重污染案例

4.1.1 案例背景与污染概况

京津冀地区地处华北平原,战略地位重要。地势与经济发展致使污染物排放量大,大气污染突出。2023 年 11 月 15 日至 25 日,重污染事件持续 11 天,多地 PM_{2.5} 日均浓度超 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,远超国标。

4.1.2 动态监控与解析技术应用过程

在区域大气污染监测与解析工作中,多种技术手段协同发挥关键作用。地面监测站点实时收集污染物浓度及气象参数信息,为污染状况提供基础数据支撑。卫星遥感借助 MODIS 数据反演相关指标,能从宏观视角呈现污染的范围与强度。无人机可对复杂或难以触及区域进行精细监测,排查潜在污染源。源解析通过 CMB 模型,确定各类污染源对污染物的贡献率。

4.1.3 基于技术分析的污染防治建议

污染源管控上,淘汰老旧机动车,推广新能源汽车,优化交通管理以控机动车尾气;加强重污染行业监管,推动

技术改造,实施集中供热与清洁能源替代工业排放;调整能源结构,推广清洁能源,监管煤炭质量降低燃煤污染。区域协同治理要强化联防联控机制,统一监测、预警、应急响应,联合执法。气象条件利用方面,气象与环保部门合作,依据气象预报提前减排,合理利用人工增雨改善空气质量。

4.2 长三角地区大气重污染案例

4.2.1 案例背景与污染概况

长三角经济发达,大气污染呈复合型。2024 年 12 月 10 日至 18 日重污染事件持续 9 天,多城市 PM_{2.5} 日均浓度大幅升高,上海、南京等核心城市污染重,上海工业园区与南京主城区污染突出。

4.2.2 动态监控与解析技术应用过程

地面监测站点实时收集污染物及气象相关基础数据,为污染状况评估筑牢根基。卫星遥感借助 MODIS 数据,通过反演特定指标,能直观呈现区域污染态势。无人机可深入化工园区、建筑工地等重点区域,排查违规排放与扬尘隐患。源解析采用 CMB 模型,明确各类污染源对污染物的贡献占比。HYSPLIT 模型用于追溯污染物传输来源方向。WRF-Chem 模型则模拟气象条件对污染扩散与加重的影响,全方位助力区域大气污染防治工作。

4.2.3 基于技术分析的污染防治建议

产业结构调整要淘汰落后产能,扶持高新产业与服务业,加强园区管理。交通污染控制需发展公共交通,推广新能源汽车,加强尾气监管,优化交通管理。能源结构优化应降低煤炭比重,开发利用清洁能源。区域协同治理要完善联防联控机制,统一行动。环境监管方面,加强企业监管,治理面源污染,建立健全监测网络。

5 结语

论文深入研究区域大气重污染动态监控与解析技术,剖析多种监测技术,展示其在不同场景优势。解析技术方面,各类模型从源解析、传输路径分析到气象—污染耦合,为污染治理提供科学依据。通过京津冀与长三角案例,将技术应用于实际,提出针对性防治建议。然而研究存在不足,数据完整性、准确性待提升,模型精度与适用性有局限,区域协同与国际合作实施存在问题。未来,技术将向智能化、精细化、协同化发展,借助新兴技术创新应用,加强区域与国际合作,共同应对全球大气污染挑战,改善大气环境。

参考文献:

- [1] 李展.成都及周边城市一次区域性空气污染过程特征分析[J].环境科学与技术,2015,38(3):6.
- [2] 赵冬.无锡市大气重污染预报预警体系构架探讨[EB/OL].中国环境科学学会科学技术年会,2018.
- [3] 贾瑾.基于空气质量数据解析大气复合污染时空特征及过程序列[J].浙江大学,2014.
- [4] 殷思敏.镇江市典型区域大气特征污染物溯源监测分析[J].皮革制作与环保科技,2023,4(21):51-52.
- [5] Yanju Liu.北京4个功能区冬春大气重污染期间PM₁₀和PM_{2.5}化学污染特征及影响因素分析[J].环境工程技术学报,2021.