

长期稳定运行，并保证测试结果的可靠性和可比性。

### 3.3 原子荧光光谱法：针对性测定特定重金属元素

原子荧光光谱 (AFS) 是一种高灵敏、低干扰、易操作的痕量重金属元素检测技术，在环境水环境检测中占有重要地位。该方法利用原子在特定条件下的荧光强度，实现对目标元素含量的定量测定，具有独特的优势，可有效避免其它元素的干扰，实现痕量元素的精确测定<sup>[4]</sup>。采用原子荧光法和氢化物发生法相结合的方法，将目标重金属元素转化成挥发性氢化物，再引入原子化器中进行原子化，实现对目标重金属元素的高灵敏、高选择性检测，特别适用于饮用水和地表水中痕量砷和汞的检测。

在实际应用中，需要对样品前处理中目标元素的形态转化进行研究，以保证样品中各种形态的目标元素能够被有效地检测到。如水环境中总砷的测定，需先用硝酸-高氯酸溶法将有机砷转化成无机砷，再经预还原转化为三价砷，以保证氢化物发生的效率。在测定总汞时，需要用高锰酸钾-硫酸溶样系统破坏汞的有机组分，使其转化成二价汞，再经还原反应生成汞蒸气。在设备运行方面，需要对氢化物发生的条件进行优化，包括还原剂浓度、酸液浓度和温度等，以保证氢化物的稳定产生，通过合理调整灯电流，负电压，原子化高度等参数，增强荧光信号强度和稳定性。同时，应建立一套完善的质控体系，采用空白实验、平行样实验、加标回收实验等方法对测定结果进行验证，回收率控制在 90%-110%，平行样相对标准偏差 <5%。另外，应加强仪器的日常保养工作，定期对原子化器和反应管线等部件进行清洗，以防止残留污染对测定结果造成影响，保证仪器长时间稳定运行。

### 3.4 电化学分析法：现场快速检测与应急监测

电化学分析方法具有设备简单、操作简单、检测速度快等优点，是当前环境水体重金属污染现场快速检测和应急监测的核心技术。目前常用的电化学分析方法有溶出伏安法、离子选择性电极法等，其中溶出伏安法是利用预电解技术在工作电极表面富集重金属离子，再用反向扫描法对富集后的重金属进行溶出峰电流进行定量分析，从而实现重金属的原位快速检测。离子选择性电极法是利用特定离子选择性电极对重金属离子进行选择性响应，通过测定电池 EMF 值实现离子浓度的测定，该方法操作简单，响应迅速，适用

于现场实时监测。电化学分析方法不需要对样品进行预处理，具有体积小、重量轻、携带方便等特点，可在复杂环境下进行快速检测，为突发重金属污染事故应急处置提供数据支持。

在实际应用中，需要针对水体基质特性进行优化，以提高检测精度和抗干扰能力。对于复杂基体样品，可以通过添加支持电解质或掩蔽剂来减少共存离子对有机物的干扰，对于低浓度的样品，可以通过延长富集时间和优化电解工艺来提高灵敏度。在现场测试中，必须严格按照操作规程对仪器进行校准，并使用标准曲线法或标准添加法对仪器进行定量分析，以保证测试结果的可靠性。在此基础上，应研究温度、pH 等环境因素的影响，避免因温度和 pH 变化引起的检测误差。在紧急情况下，利用电化学分析方法可以快速确定污染范围和污染程度，为污染溯源和应急处置方案的制定提供依据，该方法可以作为常规监测的辅助手段，对大量样本进行快速筛查，提高监测效率。同时，加强对测试人员的操作培训，使他们对仪器操作、数据处理和质量控制有较高的认识，提高现场测试数据的准确度和科学性，为环境水体中重金属污染的预防和控制提供可靠的技术支持。

## 4 结语

综上所述，环境水质检测中的重金属检测关键技术探究，不仅可以拓展水环境微观认知边界，也可为实现流域精细化治理提供可量化的抓手。未来，可将化学信息转化为风险语言，使治理节律先于生态破坏，维持地球生命保障系统的稳定。在此基础上，结合新材料、新算法和新的毒理学指标，实现水环境中“痕量易辨、形态清晰、风险可控”的水环境可持续发展。

### 参考文献

- [1] 杨健,李雨峰,王正.重金属检测技术在水环境检测中的应用分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(24):65-67.
- [2] 高瑶,方瑾,陈韵.重金属检测技术在水环境检测中的应用分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(19):130-132.
- [3] 刘丹.水环境重金属污染现状及检测技术进展[J].清洗世界,2024,40(09):76-78.
- [4] 公诚,李路娟.水环境中重金属污染的现状及其检测技术探究[J].清洗世界,2024,40(09):115-117.

# Characteristics, Source Analysis and Control Strategies of County-level PM<sub>2.5</sub> Pollution

Lingling Jia

Funing Branch of Qinhuangdao Ecological Environment Bureau, Qinhuangdao, Hebei, 066300, China

## Abstract

With the in-depth implementation of the "Action Plan for Atmospheric Pollution Prevention" and the "Three-Year Action Plan to Win the Blue Sky Defence Battle", China's ambient air quality has improved year by year, and the concentration of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) has decreased significantly. However, the PM<sub>2.5</sub> concentration in many cities still far exceeds the secondary standard limit of GB3095-2012 "Ambient Air Quality Standard". At present, with the rapid development of China's economy, factors such as energy consumption, traffic flow, and agricultural product processing have affected the content and spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> to a certain extent. Accurately identifying the main sources of PM<sub>2.5</sub> from the source is of great theoretical and practical significance for developing prevention and control measures for fine particulate matter in Chinese cities.

## Keywords

County-level PM<sub>2.5</sub> pollution characteristics; source analysis; control strategies

## 县域大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征与源解析及防控对策

贾玲玲

秦皇岛市生态环境局抚宁分局, 中国·河北 秦皇岛 066300

## 摘要

随着《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》深入实施, 中国环境空气质量逐年改善, 细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 浓度下降明显, 但许多城市 PM<sub>2.5</sub> 浓度依然远超 GB3095-2012《环境空气质量标准》二级标准限值。目前, 随着中国经济的迅速发展, 中国的能源消耗、交通流量增加、农产品加工等因素对 PM<sub>2.5</sub> 的含量及其空间分布产生了一定的影响。针对中国城市大气细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 的时空分布特点, 从源头上准确识别 PM<sub>2.5</sub> 的主要来源, 对于发展中国城市大气细颗粒物的防治措施, 具有重大的理论与实践意义。

## 关键词

县域大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征; 源解析; 防控对策

## 1 引言

《中国生态环境状况公报》指出, 2025 年, 中国各县级市 (县) PM<sub>2.5</sub> 平均水平在 18-45 μg/m<sup>3</sup> 之间, 且在中西部、东部等区域, 县城平均 PM<sub>2.5</sub> 的年平均水平在 35 μg/m<sup>3</sup> 以上, 而一些产业集群区域的 PM<sub>2.5</sub> 年平均水平在 18-45 μg/m<sup>3</sup>。从季节上来看, 中国城市冬季供暖期间 PM<sub>2.5</sub> 的浓度比夏天高 1.8-2.3 倍, 尤其在北部, 其最高值经常超过 75 μg/m<sup>3</sup>。目前, 中国各县区 PM<sub>2.5</sub> 的排放源分别为: 工业源 (28%)、燃煤源 (22%)、汽车尾气 (18%)、扬尘 (15%) 和农田 (12%), 而工业源和燃煤源对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献比城区高 5% ~ 8%。中国不同区域 PM<sub>2.5</sub> 的时空分布特征呈现出较大的时空变化特征, 且不同区域 PM<sub>2.5</sub> 的排放源组成也

不同于城区, 迫切需要对其进行深入的研究。

## 2 县域 PM<sub>2.5</sub> 污染特征与源解析

### 2.1 时空分布特征与演变规律

中国不同区域的 PM<sub>2.5</sub> 在空间和时间上都具有明显的差异。根据抚宁区 2022 年度大气 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度平均值为 34.5 μg/m<sup>3</sup>, 超过 GB3095-2012《环境空气质量标准》中的二级限值, 因此, 本项目拟开展基于 PM<sub>2.5</sub> 污染的城市大气污染防治研究。从时空上分析, 大气 PM<sub>2.5</sub> 的含量具有明显的 "U 型" 特征: 一月和七月分别为 68.2 μg/m<sup>3</sup>、7 月份分别为 21.3 μg/m<sup>3</sup> 和 3.2 倍。这一季节变化与供暖期间煤炭消费量的上升和恶劣的天气状况有很大关系。从日变化来看, 大气中污染物的含量表现为 "双峰", 早晨 8 ~ 10 时为最高值, 晚上 19 ~ 21 时为最大值, 与城市道路上的早晚高峰期和居民生活污水的排放时间相一致。从区域内 28 个站点来看, 城市和工业园周围的污染水平显著大于乡村, 最

【作者简介】贾玲玲 (1981-), 女, 中国河北秦皇岛人, 本科, 助理工程师, 从事环保研究。

高相差  $15.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。尤其是在冬季的静稳态气候背景下，大气污染物浓度的时空分异更加明显，体现了局地污染源的空间异质性。从5年来的变化趋势来看，中国大气重污染的平均天数为12~15天，而中国的空气质量逐年降低，因此，中国的大气污染防治工作仍然面临着严峻的挑战<sup>[1]</sup>。

## 2.2 化学组成特征与来源贡献

大气细颗粒物的组成成分研究表明，大气细颗粒物具有较强的污染源特性。本项目拟以抚宁区为研究对象，通过对其四个季度的取样和监测，确定其组成成分为：有机碳、单质碳、硫酸盐、硝酸盐和铵盐等。二次无机离子（硫酸盐、硝酸盐和铵盐）含量较高，为42.3%，说明二次化学转化对PM<sub>2.5</sub>生成有很大影响。有机、单质碳共占28.7%，OC/EC比例介于3.5-4.2，表明大气中有较强的二次有机气溶胶形成。其中，壳源的含量约为12.5%，剩下的都是未知的成分。采用正定矩阵分解（PMF）的来源分析结果表明：中国燃煤排放的贡献为26.4%，且大部分发生在冬季供暖期间；其中，汽车排放物所占的比重最大，占21.8%；其中，流程类污染物所占比重为18.3%，且与区域内建材和冶金企业分布关系密切；粉尘排放对大气污染的贡献率为15.2%，且季节变化较为显著；其中，生物燃料和其他能源占18.3%。尤其是在春季秸秆焚烧高峰时段，生物质燃烧对大气环境的贡献可以在较短时间内提升到35%，并对大气环境产生显著的影响<sup>[2]</sup>。

## 2.3 传输影响与区域协同

不同地区输送对不同地区PM<sub>2.5</sub>污染的贡献是不可忽视的。通过HYSPLIT反向路径模式及PSCF方法，发现抚宁区PM<sub>2.5</sub>的区域输送对PM<sub>2.5</sub>的污染具有重要的作用。2023—2024年，中国PM<sub>2.5</sub>浓度大于 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时，其中72.5%为区域性输送。中国大气污染物的传播途径以京津冀核心区、内蒙古—山西为主，并以西南途径为主，在特殊的天气背景下，局地污染可增加 $35-50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。基于密度加权曲线（CWT）的研究表明，抚宁区（京津冀南部和山东西北）可能是PM<sub>2.5</sub>污染的一个重要来源。同时，海陆风场等局部天气过程对污染物的累积与传播也起着关键的影响，尤其是春夏季，由于海陆风循环引起的污染物在近海的来回输送，形成了“先降后升”的特殊格局。

# 3 县域PM<sub>2.5</sub>污染综合防控对策

## 3.1 优化能源结构与工业布局

在农村地区开展PM<sub>2.5</sub>污染控制的基本途径是通过合理的能源结构和产业布局来实现。从能源结构的转变来看，要认真贯彻GB13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》，在农村地区推广以洁净燃料为主的燃煤锅炉。例如，河北省抚宁区到2025年，将取消28个/h及35个/h以内的燃煤锅炉，对15个生物质锅炉进行升级，预期可节约56000t的燃煤，降低42tPM<sub>2.5</sub>的直接排放量。在执行时，需要对锅炉型号、蒸吨数、燃烧模式、污染控制设施等进行详尽记录，并根据

“一炉一策”的原理，制订出相应的备选办法。

在有集中供暖的地区，应以分区能量站点模式为主，而新建的分散天然气管网，其整体能量利用效率要大于80%；在边远地区，要全面推行与之相匹配的高效烟气净化装置，保证污染物的污染物浓度不超过 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 。在产业空间布局上，要按照《环境空气质量模型技术支持服务系统（NAQPMS）》中的模式，对县级以上区域进行合理的区域划分。以抚宁区西北产业集群为研究对象，在该区设置12个小型大气污染监测站点，并对其进行了大气环境污染状况的研究，确定了该区冬季主要风下行方向5km以内为高影响区。在此基础上，我们将对新进入的项目实施严格的环境控制，禁止新建高污染的钢铁和水泥等工业企业，并在计划期限内对已建成的企业进行环保提升。在具体操作上，以塑料、家具等为代表的特殊行业集群，推广“共性工厂”，将分散的喷涂、干燥等工序集成至共用的RTO储热炉，预期可实现VOCs减排65%以上，二次有机颗粒物减排3.2个百分点左右。

对重点行业进行了深度整治，按照《工业炉窑大气污染综合治理方案》的规定，对全县范围内的建材和铸造行业进行了全面改造。以抚宁区8个生产水泥产品的企业为例，要求其粉碎和筛分部分建立封闭的生产车间，并在粉尘料箱顶部加装一台脉冲布袋除尘器，该除尘器的过滤速度小于0.8米/分钟，除尘效率大于99.5%。并在厂区外围安装不小于1.5倍堆放材料高度的防风墙，并结合喷雾式喷雾装置将其控制在 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 以内。本项目拟通过构建企业环境保护评价等级体系，对达标企业实行“限流”政策，到2025年，将17个企业实现“限流”减排目标，力争将全县范围内的PM<sub>2.5</sub>浓度由现在的28%降低到22%。在农田污染源控制上，通过卫星遥感辨识和实地验证，构建秸秆燃烧火点精确定位体系。在夏收和秋收季节，利用30台安装在各乡镇的高分辨率摄像机，配合无人机巡逻，对农作物进行了全覆盖监测。结合田间试验和田间试验，研究了不同类型的秸秆破碎机理，提出了一种新型的秸秆破碎方法<sup>[3]</sup>。

## 3.2 强化移动源与面源治理

农村地区PM<sub>2.5</sub>防治工作中，流动和非点源的控制是关键。针对汽车排气污染问题，需要构建“检验—维护—监督”闭环系统。按照GB18285-2018《汽油车污染物排放限值及测量方法》以及GB3847-2018《柴油车污染物排放限值及测量方法》，在全县范围内对所有柴油车进行常规路检和路检，主要针对不透光烟度进行监测，其不透光烟度控制指标控制在1.50米<sup>-1</sup>以内。以抚宁区为案例，在102国道和261省道等交通干线上设置了固定的监控站点，并安装了尾气监控设备，预计到2025年，将对全市的柴油货车进行12,000台次的检查，并对不合格的机动车发出了整改通知书。在使用的挖掘机、装载机等设备上，必须设置实时定位设备，实现对其工作时段和工作范围的电子栅栏进行管控。