

# 大气颗粒物源解析技术在北方生态安全屏障大气污染防治中的应用

刘孟媛

包头市生态安全屏障研究中心 内蒙古 包头 014060

**摘要：**大气颗粒物源解析技术通过化学质量平衡法、正定矩阵分解法等受体模型，结合二重源解析与PMF-CMB复合模型，精准识别北方生态安全屏障区域燃煤、工业工艺、扬尘及二次源等污染类型。该技术构建了覆盖“城市-工业-农牧-背景”的四维监测网络，明确各污染源贡献率，支撑燃煤锅炉淘汰、扬尘管控及生物质燃烧治理等精准措施，有效改善区域空气质量。

**关键词：**大气颗粒物源解析技术；北方生态安全屏障；大气污染精准防治；应用

**引言：**北方生态安全屏障区域面临燃煤、工业排放及沙尘等多重污染压力，大气颗粒物污染呈现季节性、空间差异性特征，跨区域传输加剧治理难度。大气颗粒物源解析技术通过定量识别燃煤源、工业源、二次生成颗粒物及自然源的贡献率，为精准治污提供科学依据。其与受体模型、化学组分分析及大数据监测的结合，助力构建差异化防控策略，成为破解复合型污染、推动区域空气质量持续改善的关键技术支撑。

## 1 内蒙古大气颗粒物污染特征与成因分析

### 1.1 污染现状与时空分布

(1) 2020-2025年，内蒙古PM<sub>2.5</sub>浓度呈稳步下降趋势，计划到2025年较2020年下降7.1%，乌海市及周边地区降幅达12.6%；PM<sub>10</sub>浓度同步改善，乌海市及周边地区目标下降10.5%。全区优良天数比率将提升至90.7%以上，重度及以上污染天数比率控制在0.5%以内。(2) 季节性差异显著，冬季燃煤供暖导致污染突出，包头、呼和浩特冬季PM<sub>2.5</sub>浓度分别达 $58.6\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $55.7\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ；春季受沙尘影响，乌海、巴彦淖尔PM<sub>10</sub>浓度最高可达 $141.4\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $118.6\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。(3) 空间分布不均，呼包鄂城市群工业集中，PM<sub>2.5</sub>与PM<sub>10</sub>浓度显著偏高，且与AQI相关性极强；农牧区以沙尘和生物质燃烧污染为主，浓度整体较低，东部兴安盟等区域因扩散条件好，污染程度最低。

### 1.2 主要污染源类型

(1) 一次源中，燃煤占比突出，工业锅炉与民用散煤冬季排放激增；钢铁、化工等工业工艺污染集中在工业区；道路与建筑扬尘在干燥季节加剧污染；秸秆焚烧和牧区燃煤构成生物质燃烧主要来源。(2) 二次源以硫酸盐、硝酸盐和二次有机碳为主，呼包地区可溶性盐排

放占比达一半，乌海市硫酸盐含量较高，其生成与工业排放的前体物反应密切，对PM<sub>2.5</sub>贡献率显著。(3) 自然源中，沙尘天气对PM<sub>10</sub>短期贡献巨大，强风天气可使局部地区PM<sub>10</sub>浓度快速升至严重污染水平。

### 1.3 污染成因的复杂性

(1) 能源结构高度依赖煤炭，占比超70%，清洁能源转型滞后，工业与供暖领域燃煤消费持续带来污染物排放压力。(2) 温带大陆性气候导致干旱少雨，冬季静稳天气和逆温现象频发，阻碍污染物扩散，夏季相对湿度与污染物浓度呈负相关。(3) 跨区域传输影响显著，华北污染团可波及内蒙古东部，同时内蒙古中西部沙尘也会向外扩散，形成区域污染协同效应。

## 2 大气颗粒物源解析技术体系构建

### 2.1 源解析技术方法选择

(1) 受体模型是核心技术手段，化学质量平衡法(CMB)适用于污染源类型明确、成分谱完整的区域，通过建立化学组分质量平衡方程计算各源贡献占比，在污染源相对简单的工业集中区应用广泛；正定矩阵分解法(PMF)无需预先知晓源成分谱，可通过矩阵分解自动识别污染源类型，更适合污染源复杂的城市区域，能有效解析未知或新型污染源。(2) 新型技术进一步提升解析精度，二重源解析技术通过特殊算法区分一次扬尘(如道路、建筑扬尘)与二次生成颗粒物(如硫酸盐、硝酸盐)，解决传统方法中扬尘源与二次源混淆问题；PMF-CMB复合模型结合两种方法优势，先通过PMF识别污染源类型，再用CMB精准计算各源贡献值，在呼和浩特、包头等复合型污染区域应用效果显著。(3) 技术对比显示，CMB适用性强但依赖完整成分谱，数据需求较高，精度受成分谱匹配度影响；PMF无需预设源谱，数

据需求相对灵活，但对样本量要求高；二重源解析技术在扬尘与二次源区分上精度突出，却需更多化学组分数据支撑；PMF-CMB复合模型精度最高，不过计算过程复杂，对技术人员要求高<sup>[1]</sup>。

## 2.2 数据采集与模型构建

(1) 采样点位设计遵循“全覆盖、差异化”原则，在城市核心区（如呼和浩特新城区）、重点工业区（如包头钢铁工业园区）、典型农牧区（如锡林郭勒盟牧区）各设置3-5个采样点，同时在内蒙古东部大兴安岭区域设置1-2个背景站，形成“城市-工业-农牧-背景”四维监测网络，确保数据覆盖不同污染场景。(2) 化学组分分析聚焦关键指标，水溶性离子重点检测 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 等二次污染前体物；无机元素分析涵盖Fe、Mn、Pb等特征元素（如Fe可作为钢铁行业标识）；碳组分(OC/EC)检测用于区分生物质燃烧(OC/EC比值高)与化石燃料燃烧源，通过全方位组分分析为模型提供基础数据。(3) 模型输入关键在于本地源成分谱库建设，针对内蒙古特色污染源，采集燃煤源（工业锅炉、民用散煤）、机动车尾气（柴油车、汽油车）、扬尘（道路、建筑、土壤扬尘）等12类主要污染源样品，建立包含200余项化学组分的本地源成分谱库，提升模型解析准确性。(4) 模拟验证采用多模型结合方式，将源解析结果与后向轨迹模型(HYSPLIT)结合，通过分析气流轨迹判断华北污染团对内蒙古东部的传输路径，同时验证本地源与外来源贡献占比，如发现春季内蒙古中西部PM<sub>10</sub>解析结果与沙尘传输轨迹高度吻合，进一步确认自然源贡献。

## 2.3 内蒙古源解析关键发现

(1) 呼和浩特市PM<sub>2.5</sub>源解析结果显示，燃煤源占比最高(35%)，主要来自冬季供暖与工业燃煤；机动车尾气占比25%，随着汽车保有量增长逐年上升；扬尘源占20%，集中在春秋干燥季节；二次源占15%，以硫酸盐、硝酸盐为主，重污染天占比可升至25%。(2) 鄂尔多斯市达拉特旗案例呈现显著季节性差异，冬季因牧民取暖与秸秆燃烧，生物质燃烧源贡献率达40%，成为首要污染源；春季受沙尘暴影响，扬尘源占主导（贡献率超50%），其中土壤扬尘与建筑扬尘各占一半；夏季则以工业源（化工、电力）为主，占比30%。(3) 二次源贡献在重污染期间大幅提升，全区范围内重污染天硫酸盐、硝酸盐占PM<sub>2.5</sub>总量超50%，如2024年1月包头重污染过程中，硫酸盐占比28%、硝酸盐占比25%，主要源于工业排放的SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>与大气中NH<sub>3</sub>反应生成，凸显二次污染防治的重要性。

## 3 大气颗粒物源解析技术在北方生态安全屏障大气污染精准防治中的应用

### 3.1 工业源防控

(1) 依托源解析技术明确钢铁、电力行业为工业颗粒物主要排放源后，两行业全面推进超低排放改造，构建脱硫、脱硝、除尘协同控制体系。钢铁行业通过优化烧结机脱硫工艺，采用活性炭脱硫脱硝一体化技术，使烧结工序颗粒物排放浓度稳定控制在10mg/m<sup>3</sup>以下；电力行业则大规模应用超低排放煤粉锅炉，配套高效电袋复合除尘器与选择性催化还原脱硝装置，现役煤电机组超低排放改造完成率达98%以上，单厂年颗粒物排放量平均削减300吨以上。(2) 以包头市某钢铁企业为例，源解析结果显示其无组织排放（原料堆场扬尘、车间逸散等）对周边区域PM<sub>10</sub>贡献率达28%。企业据此精准定位12处关键无组织排放点，实施封闭料场建设、车间负压收集系统安装、运输皮带密闭改造等措施，改造后颗粒物无组织排放量下降40%，周边监测点位PM<sub>10</sub>浓度月均值降低15μg/m<sup>3</sup>，污染扩散范围缩小2平方公里<sup>[2]</sup>。

### 3.2 燃煤源治理

(1) 针对源解析识别的民用散煤污染问题，内蒙古在冬季供暖期重点推进民用散煤替代工程，根据不同区域资源禀赋推广“煤改电”“煤改气”及洁净煤技术。在电网覆盖完善的城镇周边区域，实施“煤改电”改造，配套推广空气源热泵、电采暖炉等设备，2024年完成改造户数12万户，减少散煤消耗8万吨；在天然气供应便利的地区，推进“煤改气”项目，惠及农户5万户；在偏远农牧区，推广固硫型煤、洁净无烟煤等洁净煤产品，建立洁净煤配送中心80个，确保洁净煤覆盖率达90%以上。(2) 结合源解析中工业燃煤锅炉高污染贡献结论，呼和浩特市制定工业燃煤锅炉淘汰计划，2024年重点针对10蒸吨以下低效高耗燃煤锅炉实施关停，全年完成120台燃煤锅炉淘汰任务，替代为天然气锅炉、电锅炉或并入集中供热管网，年减少燃煤消耗15万吨，削减颗粒物排放量2000吨，市区PM<sub>2.5</sub>浓度因工业燃煤锅炉淘汰实现月均下降3μg/m<sup>3</sup>。

### 3.3 扬尘源控制

(1) 源解析数据显示道路扬尘对城市PM<sub>10</sub>贡献率超20%，各地加快提升道路扬尘治理水平。全区主要城市将机械化清扫率从70%提升至85%，配置洗扫车、洒水车、雾炮车等专业设备，实行“一扫两洗三洒”作业模式；在城市外环道路、工业园区周边道路等扬尘高发路段，推广使用环保抑尘剂，通过形成固化膜抑制扬尘扩散，抑尘效果可持续7-10天，路段周边PM<sub>10</sub>浓度平均降

低20%。（2）针对建筑工地扬尘污染，严格执行“六必须、六不准”管理标准（必须湿法作业、必须设置围挡、必须硬化道路等，不准车辆带泥上路、不准高空抛洒建筑垃圾等），同时在建筑面积5000平方米以上的建筑工地安装TSP在线监测系统，实时监控颗粒物浓度，超标时自动触发预警并联动喷淋降尘设备。2024年全区建筑工地扬尘投诉量较上年下降35%，施工区域周边PM<sub>10</sub>浓度达标率提升至88%<sup>[3]</sup>。

### 3.4 生物质燃烧源管理

（1）源解析发现秸秆露天焚烧是春季生物质燃烧污染主因，内蒙古大力推广秸秆综合利用技术，构建“饲料化、能源化、基料化”多元化利用体系。在畜牧业主产区，推广秸秆青贮、黄贮技术，2024年秸秆饲料化利用量达1200万吨，占秸秆总产量的30%；在工业园区周边，建设秸秆生物质能发电项目，年消耗秸秆80万吨，替代标准煤40万吨，减少颗粒物排放1.2万吨；同时建立秸秆禁烧网格化监管体系，配备无人机巡查，露天焚烧火点数量较上年下降45%。（2）针对牧区散煤燃烧污染，结合源解析中牧区燃煤对PM<sub>2.5</sub>的贡献特征，研发推广高效低排放生物质炉具与洁净煤炉具，炉具热效率从传统炉具的30%提升至65%以上，颗粒物排放量降低50%。2024年在锡林郭勒盟、呼伦贝尔市等牧区推广新型炉具5万台，覆盖牧民家庭8万户，年减少原煤直接燃烧6万吨，牧区冬季PM<sub>2.5</sub>浓度平均下降4μg/m<sup>3</sup>。

### 3.5 区域联防联控机制

（1）基于源解析揭示的跨区域污染传输特征，内蒙古联合山西、河北、陕西、甘肃五省区建立大气污染协同治理平台，实现污染源数据、环境监测数据、气象数据共享，共同制定区域重点行业排放标准与污染防治方案。针对区域内钢铁、火电、焦化等重点行业，实施统

一的超低排放改造要求；在沙尘高发季节，开展五省区联合沙尘预警与应急处置，同步实施扬尘源管控措施，2024年区域内沙尘天气影响时长较上年缩短20%。（2）建立基于源解析的重污染天气应急响应机制，根据源解析识别的不同污染类型（燃煤型、扬尘型、传输型）与污染源贡献占比，制定差异化预警分级标准与应急减排清单。当预测出现重污染天气时，按照污染成因启动相应级别应急响应，如燃煤型污染重点落实工业企业限产、民用散煤管控措施，扬尘型污染强化建筑工地停工、道路禁行管理，传输型污染则与周边省份同步实施区域减排。2024年全区重污染天气应急响应期间，PM<sub>2.5</sub>浓度平均削减率达25%，重污染天气持续时间较上年缩短30%<sup>[4]</sup>。

### 结束语

大气颗粒物源解析技术作为北方生态安全屏障大气污染防治的核心工具，通过精准量化污染源贡献，推动了燃煤替代、工业超低排放改造及扬尘管控等差异化措施落地。未来需持续完善源成分谱库、强化多技术协同与跨区域数据共享，进一步提升重污染天气预警和二次污染防控能力，为筑牢我国北方生态安全屏障提供更坚实的科技支撑。

### 参考文献

- [1]刘刚,王慧.城市大气颗粒物污染来源解析技术及应用[J].环境科学研究,2023,36(8):156-157.
- [2]张华,李明.基于受体模型的城市大气颗粒物污染来源解析与控制对策[J].中国环境科学,2022,42(11):53-54.
- [3]陈强,赵亮.城市大气颗粒物污染特征、来源及控制策略综述[J].环境工程学报,2021,15(9):89-91.
- [4]马红妍,丁志成.“双碳”时代大气污染区域联防联控治理对策探讨[J].清洗世界,2024,40(8):94-96.