

大气 PM_{2.5} 组分来源解析与健康风险评估

李喜鹏

河南晟豫环保科技有限公司 河南 郑州 450001

【摘要】：PM_{2.5} 作为大气细颗粒物，粒径小、比表面积大，易吸附重金属、有机物、硫酸盐等有毒组分，不仅引发雾霾、光化学烟雾等大气污染问题，还能通过呼吸道侵入人体循环系统，诱发呼吸系统、心血管系统等多种疾病。当前我国大气污染防治进入精细化阶段，厘清 PM_{2.5} 组分特征、溯源污染源、量化健康风险，是破解区域大气污染治理难题、保障公众健康的核心前提，对完善大气环境管控体系具有重要现实意义。

【关键词】：PM_{2.5}；来源解析；健康风险评估

DOI:10.12417/2811-0528.26.11.072

引言

大气 PM_{2.5} 污染已成为全球关注的环境与公共卫生热点，其组分复杂、来源多元，受区域产业结构、气象条件、地形地貌等多重因素影响，时空差异显著。现有研究虽在组分检测、源解析等领域取得进展，但不同区域污染特征差异化明显，精准量化污染贡献与健康风险仍存在短板。本文聚焦大气 PM_{2.5} 污染问题，系统开展组分检测、时空分布分析、污染源解析及健康风险评估，针对性提出防控防护对策，为区域大气治理与公众健康保障提供科学支撑

1 PM_{2.5} 组分检测方法

1.1 常规理化指标精准检测技术

该方法是 PM_{2.5} 组分分析的基础手段，核心涵盖质量浓度测定与常规离子、碳组分检测。质量浓度多采用重量法，通过恒重滤膜采样、恒温恒湿称重，精准测算单位体积空气 PM_{2.5} 质量，数据准确度高，是国标推荐方法；水溶性离子检测以离子色谱法为主，可快速分离氟离子、硫酸根、铵根等阴阳离子，检出限低、重复性好，适配大批量样品分析。碳组分检测采用热光反射法，区分有机碳与元素碳，明确二次碳气溶胶生成潜力，同步实现定性与定量分析，整套技术流程成熟，能满足常规监测与科研需求，可全面捕捉 PM_{2.5} 基础理化组分信息。

1.2 痕量有毒组分精密分析技术

针对 PM_{2.5} 中重金属、持久性有机物等痕量有毒组分，需依托高精度仪器开展检测。重金属检测常用电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS），灵敏度高、抗干扰能力强，可同步检测铅、镉、汞、砷等十几种痕量金属元素，精准把控有毒金属含量；有机有毒组分采用气相色谱-质谱联用技术（GC-MS），分离提纯多环芳烃、邻苯二甲酸酯等有害有机物，实现未知组分定性与定量。部分应急筛查、现场快速检测场景，搭配 X 射线荧光光谱法（XRF），无需破坏样品结构即可实现快速初筛，大

幅提升检测效率。多种技术联用形成互补体系，既能全面覆盖常规污染组分，又能深挖超痕量级剧毒污染物，全方位支撑 PM_{2.5} 组分精细化解析与污染溯源研判，为大气污染防治、环境风险管控提供硬核数据支撑。

2 PM_{2.5} 浓度与化学组分时空分布特征

2.1 时间维度动态变化特征

PM_{2.5} 浓度与组分呈现明显的季节与日内节律，季节差异尤为突出。秋冬季受静稳天气、燃煤供暖、秸秆焚烧等影响，大气扩散条件差，PM_{2.5} 浓度居高不下，硫酸盐、硝酸盐、元素碳占比显著提升，重污染天气频发；春夏季降水充沛、大气对流旺盛，污染物扩散稀释快，浓度大幅下降，二次有机气溶胶占比有所上升。日内分布呈双峰特征，早晚交通高峰时段，机动车尾气排放叠加逆温层，浓度出现峰值，午后光照充足、湍流旺盛，浓度降至低谷。这种时间节律既受气象条件驱动，也与人为排放周期高度契合，组分占比随季节排放结构变化同步调整。

2.2 空间区域差异化分布特征

我国 PM_{2.5} 浓度与组分空间分布不均，呈现明显的区域集聚性。北方工业密集区、京津冀及周边、汾渭平原等区域，燃煤、工业排放、扬尘污染突出，PM_{2.5} 浓度偏高，重金属、硫酸盐、地壳元素占比大；南方沿海及林区，工业排放少、植被覆盖率高，浓度偏低，有机碳、生物气溶胶占比更高。城市内部差异显著，工业区、交通干道周边污染物富集，组分中机动车尾气、工业排放标志物占比高；郊区、绿地浓度偏低，组分更贴近自然背景。区域传输进一步加剧空间差异，北方污染气团南下会带动周边区域组分特征趋同，形成区域性污染格局。

2.3 不同功能区组分分布特征

城市不同功能区因人为排放结构差异，PM_{2.5} 组分特征截然不同。工业区受钢铁、化工、燃煤发电影响，颗粒物中重金

属、硫酸盐、氟化物等工业排放组分占比突出，污染毒性较强；交通商务区机动车尾气排放密集，硝酸盐、有机碳、黑碳占比高，二次气溶胶生成潜力大；居住区排放源相对单一，组分以餐饮油烟、扬尘、周边传输污染物为主，浓度适中、组分相对均衡；郊区农田区则以扬尘、秸秆焚烧、农业氨排放为主，铵根离子、有机碳占比较高，地壳元素含量突出。功能区差异特征直观反映排放源布局对PM_{2.5}组分的调控作用，为靶向治污提供空间依据。

3 PM_{2.5} 污染源解析与贡献量化

3.1 受体模型源解析技术应用

受体模型是当前PM_{2.5}源解析的核心技术，无需掌握污染源排放清单，直接通过受体点组分数据反推来源，适用性极强。主流技术包括正定矩阵因子分解模型（PMF）与化学质量平衡模型（CMB），PMF模型无需预设源成分谱，通过数据矩阵分解，自动识别污染源类型并量化贡献，操作灵活、误差可控，适配复杂污染场景；CMB模型基于源谱与受体组分匹配，精准测算各污染源贡献率，结果直观可靠。两种模型常联用互补，结合组分监测数据，可识别燃煤、机动车、工业、扬尘、生物质燃烧等核心污染源，明确各类源对PM_{2.5}的贡献占比，解析精度满足精细化管控需求。

3.2 源清单与扩散模型耦合解析

该方法通过构建污染源排放清单，结合大气扩散模型，实现污染源贡献定量核算。首先梳理区域内工业、交通、民用、农业等各类排放源活动水平，测算污染物排放量，建立高分辨率排放清单；再耦合WRF-CMAQ等扩散模型，模拟污染物在大气中的传输、扩散、转化过程，区分本地排放与区域传输贡献。该方法能精准定位重点排放行业与区域，量化不同时段、不同气象条件下各污染源的贡献差异，兼顾空间传输与时间动态变化，弥补受体模型无法区分本地与外源的短板，尤其适用于区域性复合污染解析，为跨区域联防联控提供数据支撑。

3.3 多元技术融合精细化源解析

针对复合型大气污染特征，单一源解析技术存在局限，多元技术融合成为主流趋势。将受体模型、扩散模型与轨迹分析、同位素溯源技术联用，结合后向轨迹模型（HYSPLIT）判断污染气团来源方向，识别外源输入通道；通过碳同位素、重金属同位素溯源，精准区分化石燃料与生物质燃烧、自然源与人为源贡献。同时整合高时间分辨率在线监测数据，捕捉污染过程中组分动态变化，实现重污染时段污染源快速溯源。融合技术兼顾宏观区域传输与微观组分特征，大幅提升源解析精度，可细化至细分行业贡献，为“一源一策”精准治污提供科学依据，适配当前大气污染精细化管控需求。

4 PM_{2.5} 健康风险评估

4.1 暴露剂量与人群暴露特征评估

健康风险评估的首要环节是精准量化人群PM_{2.5}暴露剂量，结合暴露场景、时间、人群特征构建评估体系。通过监测不同区域、不同时段PM_{2.5}浓度与有毒组分含量，测算呼吸暴露量，区分室外环境、室内环境、交通微环境等不同场景的暴露差异。重点关注老人、儿童、孕妇、慢性病患者等敏感人群，其呼吸频率、身体机能特殊，暴露风险远高于普通人群。结合人群活动轨迹，量化日均暴露剂量，分析城乡、年龄、职业人群的暴露差异，明确高暴露区域与高风险人群，为差异化防护提供靶向目标，同时结合暴露时长累积效应，评估长期与短期暴露的剂量差异，全面刻画人群暴露风险水平。

4.2 有毒组分非致癌健康风险评估

PM_{2.5}中重金属、水溶性离子等组分易引发非致癌健康风险，通过危害商值（HQ）与危害指数（HI）定量评估。针对铅、砷、铵根等有毒组分，测算其单位暴露剂量的危害程度，单一组分危害商值反映独立风险，多种组分叠加危害指数反映综合风险。评估过程兼顾经呼吸道吸入的生物有效性，结合组分在颗粒物中的赋存形态，修正风险系数，排除惰性组分干扰。研究表明，长期暴露于高浓度PM_{2.5}中，非致癌风险主要体现在肺功能损伤、心血管负担加重、免疫力下降等，儿童与老人更易出现咳嗽、哮喘、高血压等症状。通过分级评估风险等级，识别关键风险组分，为健康风险管控提供核心靶点。

4.3 有毒组分致癌健康风险评估

致癌健康风险聚焦PM_{2.5}中苯并芘、镉、汞等致癌组分，采用终生超额致癌风险（ILCR）模型评估，量化长期暴露引发癌症的概率。以国标限值与国际健康标准为基准，测算不同暴露水平下的致癌风险值，区分低、中、高风险等级，明确风险阈值。致癌组分具有累积效应，即使低浓度长期暴露，也会提升肺癌、呼吸道癌症发病风险，工业密集区、交通拥堵区致癌风险显著偏高。评估过程需考虑组分协同作用，多种致癌组分共存会加剧风险效应，同时结合区域人群暴露年限、吸烟史等混杂因素，修正评估结果，提升精准度，为制定健康防护标准、防控致癌风险提供科学支撑。

5 污染防控与健康防护对策

5.1 污染源源头管控与减排对策

源头管控是PM_{2.5}污染治理的核心，需聚焦重点污染源实施靶向减排。针对工业源，推进钢铁、化工、火电行业超低排放改造，淘汰落后产能，推广清洁能源替代燃煤，严控挥发性有机物与粉尘排放；针对移动源，优化机动车结构，推广新能源汽车，加强老旧车辆淘汰与尾气检测，管控非道路移动机械

污染;针对面源,规范扬尘管控,实施工地围挡、道路洒水、物料密闭,严控秸秆焚烧与散煤燃烧。同时建立污染源动态管控清单,依托在线监测平台实时监控,结合源解析结果,对高贡献源实施重点减排,推动区域联防联控,统筹本地减排与区域传输管控,从源头削减 PM2.5 排放总量。

5.2 大气环境质量精细化管控对策

精细化管控依托监测与预警体系,实现污染全过程精准调控。完善 PM2.5 组分在线监测网络,实时捕捉浓度与组分动态变化,建立重污染天气预警体系,根据污染等级启动分级响应,实施工业限产、机动车限行、扬尘管控等应急措施。优化区域产业布局与能源结构,推动产业绿色转型,增加清洁能源供给,提升大气污染物扩散能力。针对不同季节污染特征,实施差异化管控,秋冬季重点防控燃煤与静稳污染,春夏季重点管控二次气溶胶生成。同时依托大数据分析、气象数值模拟与 AI 智能研判技术,精准预测污染发展趋势,实现提前防控、科学调度、靶向治理,细化基层监管责任,压实企业主体责任,联动开展跨区域联防联控,避免污染累积扩散,持续改善区域大气环境质量。

参考文献:

- [1] 陈龙辉.基于空气采样管法的大气 PM2.5 浓度监测应用研究[J].皮革制作与环保科技,2026,7(02):163-165.
- [2] 田甜,周变红,袁逸凡,等.关中城市群大气 PM2.5 中重金属元素污染物来源解析、人群暴露水平及其健康风险评估[J].生态毒理学报,2026,21(01):430-446.
- [3] 崔倩,王彦恒,武明阳,等.我国 10 个城市大气 PM2.5 中 As 污染特征及健康风险评估[J].内蒙古气象,2025,(03):55-61.
- [4] 彭家美,于瑞莲,胡恭任,等.APCS-MLR 结合 PMF 模型解析大气 PM2.5 中重金属元素来源及健康风险[J].环境科学,2025,46(11):7371-7384.
- [5] 刘紫娟.基于生物可给性城市大气 PM2.5 载带多环芳烃和溴阻燃剂的健康风险研究[D].河北大学,2024.
- [6] 赵雪琰.基于微量元素与碳质组分 $\Delta 14C$ 的全年观测结果对天津市大气 PM2.5 的来源研究[D].天津大学,2022.

5.3 公众健康分级防护对策

公众健康防护需结合污染等级与人群差异,构建分级防护体系。发布 PM2.5 浓度与健康风险预警,明确不同污染等级的防护建议,重污染天气引导敏感人群减少室外活动,避免户外锻炼。普及健康防护知识,推广佩戴合规防护口罩,改善室内通风与空气净化,降低室内暴露风险。针对老人、儿童、慢性病患者等敏感人群,制定专属防护方案,加强健康监测与就医引导。建立环境与健康联动机制,医疗机构提前做好呼吸道、心血管疾病接诊准备,降低污染期发病风险。同时引导公众践行绿色生活方式,减少私家车出行、节约能源,形成全民共治、全民防护的良好格局,降低 PM2.5 健康损害。

6 结语

大气 PM2.5 组分来源解析与健康风险评估是环境治理与公共卫生领域的重要课题,其核心价值在于实现污染溯源、风险量化与精准防控的闭环衔接。通过完善检测技术、厘清时空特征、精准解析来源、科学评估风险,既能为大气污染精细化治理提供技术支撑,又能为公众健康防护提供科学指引。未来需持续深化多技术融合、跨区域协作,兼顾环境治理与健康保障,推动大气环境质量持续改善,筑牢公众健康防线,实现生态环境保护与人类健康发展的协同共赢。