

PM_{2.5}源解析方法讨论

范颖¹, 付春芳², 廖升琿¹, 景春菊¹

¹重庆市南川区生态环境监测站, 重庆

²广东省韶关市生态环境监测站, 广东 韶关

收稿日期: 2026年3月18日; 录用日期: 2026年4月19日; 发布日期: 2026年4月29日

摘要

大气细颗粒物(PM_{2.5})对环境、气候及人类健康危害显著, 中国虽通过治理降低其浓度但整体水平仍需改善, 2023年《空气质量持续改善行动计划》明确2025年削减目标, 源解析是污染防控的科学基础, 本文通过梳理当前应用最广泛的PM_{2.5}源解析方法, 为不同区域PM_{2.5}的研究分析提供参考。源解析以受体模型为核心, PMF应用最广、PCA适合作预处理、CMB适合固定源区域、Unmix适配短期数据、HYSPLIT追踪传输路径, 多模型联用可提升解析可靠性。当前研究存在组分分析精度不足、二次源解析能力弱及区域协同缺失等局限, 未来需推动技术融合、构建多模型一体化框架并统一源谱标准, 为PM_{2.5}污染联防联控提供更精准支撑。

关键词

PM_{2.5}, 源解析, 受体模型

PM_{2.5} Source Apportionment Method Discussion

Ying Fan¹, Chunfang Fu², Shenghui Liao¹, Chunju Jing¹

¹Chongqing Nanchuan District Ecological Environment Monitoring Station, Chongqing

²Guangdong Shaoguan Ecological Environment Monitoring Station, Shaoguan Guangdong

Received: March 18, 2026; accepted: April 19, 2026; published: April 29, 2026

Abstract

Atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) poses significant hazards to the environment, climate, and human health. Although China has reduced its concentration through governance efforts, the overall level still requires improvement. The 2023 "Action Plan for Continuous Improvement of Air Quality" has set clear reduction targets for 2025. Source apportionment serves as the scientific

文章引用: 范颖, 付春芳, 廖升琿, 景春菊. PM_{2.5}源解析方法讨论[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(4): 682-690.

DOI: 10.12677/aep.2026.164068

foundation for pollution prevention and control. This paper provides a reference for the research and analysis of PM_{2.5} in different regions by reviewing the most widely used PM_{2.5} source apportionment methods. Source apportionment centers around receptor models, with PMF being the most widely applied, PCA suitable for preprocessing, CMB appropriate for stationary source areas, Unmix adaptable to short-term data, and HYSPLIT tracking transmission paths. The combined use of multiple models can enhance the reliability of apportionment. Current research faces limitations such as insufficient precision in component analysis, weak secondary source apportionment capabilities, and a lack of regional collaboration. In the future, it is necessary to promote technological integration, construct a multi-model integrated framework, and unify source spectral standards to provide more precise support for joint prevention and control of PM_{2.5} pollution.

Keywords

PM_{2.5}, Source Apportionment, Receptor Mode

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气颗粒物污染,特别是细颗粒物(PM_{2.5},即空气动力学直径小于等于2.5微米的颗粒物)污染,已成为全球性的环境与健康议题。PM_{2.5}因其粒径小、比表面积大、易吸附有毒有害物质、在大气中停留时间长、传输距离远等特点,对大气能见度、气候变化、生态系统显著影响[1][2],更对人类健康构成严重威胁,与呼吸系统疾病、心血管疾病乃至过早死亡风险的增加密切相关[1][2]。尤其是在快速工业化和城市化的国家与地区,PM_{2.5}浓度常处于较高水平,引发了严重的空气质量和公共健康危机[3]。

鉴于PM_{2.5}问题的复杂性和严重性,国内外学者围绕其来源、组成、时空分布、健康效应、经济影响以及控制策略等开展了大量研究。美国是最早开展PM_{2.5}研究的国家之一,1969年基于当时新兴的大气化学监测技术,创新性地开展PM_{2.5}的来源解析和健康研究[4]-[7],此后,还通过卫星监测和地面观测结合的方法,对PM_{2.5}浓度及其时空分布进行了深入研究[8]。

中国作为世界上最大的发展中国家,经历了快速的经济增长,同时也面临着严峻的PM_{2.5}污染挑战[9][10]。近年来,虽然中国政府采取了一系列大气污染防治措施,PM_{2.5}浓度有所下降,但整体水平仍不容乐观,尤其是在特定区域和季节,重污染事件时有发生[11][12]。《空气质量持续改善行动计划》,即第三个“大气十条”,规划设定了到2025年的具体目标,全国地级以上城市PM_{2.5}浓度下降10%,重度及以上污染天数比率控制在1%以内。意味着PM_{2.5}的削减进入了攻坚克难时期。中国在PM_{2.5}的研究方面虽然起步较晚,但通过大量学者的共同努力,近年来也取得了显著进展[13][14]。这些研究不仅深化了对PM_{2.5}污染规律的科学认识,也为制定有效的空气质量管理政策提供了重要依据。其中,准确可靠的分析方法是开展PM_{2.5}研究的基础,包括化学成分的精确测定、来源的有效解析以及浓度的精准预测。同时,深入探究PM_{2.5}的健康危害机制、评估其造成的社会经济负担、明晰不同来源的贡献及其时空演变特征,对于理解污染现状、评估控制成效和指明未来研究方向至关重要。

本文重点关注PM_{2.5}源解析方法研究现状。通过对现有文献的归纳、比较与评述,总结当前研究的主要成果和存在的不足,并在此基础上探讨未来可能的研究方向,以期为PM_{2.5}污染防治研究和管理实践提供参考。本文将严格依据提供的文献信息进行综述,力求展现该领域的研究脉络和前沿动态。

2. 源解析方法

识别 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源并量化来源贡献率能够辅助制定污染防控措施。目前常用的源解析方法主要包括基于受体模型的方法和基于排放清单的方法,其中受体模型因其直接利用环境监测数据、无需详细的排放源信息而得到广泛应用。受体模型法主要包括主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)、正定矩阵因子分解法(Positive Matrix Factorization, PMF)、化学质量平衡模型法(Chemical Mass Balance, CMB)、Unmix 模型等[15]。近年来,研究者们通过多学科融合,气象领域后向轨迹模型(HYSPLIT)也成为大气污染源解析分析方法之一。

2.1. 受体模型

2.1.1. 正定矩阵因子分解法(Positive Matrix Factorization, PMF)

正定矩阵因子分解(Positive Matrix Factorization, PMF)通过解析大气样品化学组分的浓度变化规律,反推污染物来源及贡献,是当前大气 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析中应用最广泛的工具之一。其核心价值在于无需预设污染源谱,可直接基于观测数据识别实际存在的污染来源,可以应用于不同地理、污染背景下的源解析。

传统 PMF 模型通过 $\text{PM}_{2.5}$ 中的常规化学组分(如离子、元素、OC/EC 等)进行源解析。Rogger 等人[16]在沙特阿拉伯 Rabigh 应用 PMF 识别出土壤尘、工业粉尘、化石燃料燃烧、机动车排放和海盐气溶胶等 5 个主要来源。Schauer 等人[17]在韩国西山利用 PMF 识别出 8 个来源,包括二次无机气溶胶(SIA)、汽车尾气、工业、燃煤、生物质燃烧/焚烧、燃油、土壤和老化海盐,并分析了高污染事件期间各来源贡献的变化。Shen 等人[18]利用 PMF 识别出钢铁厂、二次硫酸盐和硝酸盐、汽车尾气、石化厂和焚烧炉等来源。Onyango 等人[19]在乌干达姆巴拉拉利用 PMF 识别出交通相关、生物质和二次气溶胶、工业和冶金、重油和燃料燃烧、细土壤和盐气溶胶等 6 个主要来源。

为解决传统方法中“源谱混合”“有机来源区分不足”等问题,研究者通过优化输入数据与模型参数提升精度。Wang 等人[20]的研究比较了基于 1 小时、4 小时和 6 小时平均化学组分数据的 PMF 分析结果,发现使用高时间分辨率(1 小时)的数据能够获得更稳定、混合更少的源谱,尤其对于以痕量物种为标志物的来源分辨率更高。这表明提升时间分辨率有助于捕捉源活动的动态变化,从而提高源解析的稳健性。Li 等人[21]在上海的研究中,将大量的有机分子示踪物纳入 PMF 模型(MM-PMF),成功解析出 11 个来源,包括 3 个二次源和 8 个一次源。与仅依赖主要组分的传统 PMF 相比,MM-PMF 能够更好地区分以有机物为主的来源,避免了传统方法中这些来源贡献被错误分配到其他来源而导致的偏差。

为提高分析的精确性,研究者们采用多种受体模型对比分析的方式进行 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析。彭家美等人[22]应用 APCS-MLR(绝对主成分回归)结合 PMF 模型解析大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属元素来源,发现机动车源、工业源和燃煤源对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率更高,在两个模型的对比分析中,燃煤源贡献率都达到了 20%~40%。Zhang 等人[11]在中国北方城市的研究中,采用了混合环境受体模型(HERM),结合了 PMF 和化学质量平衡(CMB)模型的优点,对 $\text{PM}_{2.5}$ 来源进行了分析,并探讨了二次气溶胶的形成机制。

2.1.2. 主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)

主成分分析法通过对大量原始数据进行降维,将多个指标综合成能代表大部分信息的几个综合指标,即主成分,这些主成分之间不存在线性相关性,但是能反映大气污染的主要特征[23]。陈冬素[24]等人收集了 2015~2022 年湖南省主要城市空气质量指数与气象因子数据,应用 PCA 方法分析了两者之间的关系,结果表明,多个气象因子组合共同影响湖南省的空气质量。王冰[25]等人通过 PCA 主成分分析法提取了扬州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属和类金属元素的 3 个主成分,并推断其来源主要为化石燃料燃烧源、工业源和扬尘源。赵敏娟[26]等人运用相同的方法分析苏州市工业园区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属来源主要是冶炼、镀铬等工业源,燃煤源以及交通源,高新区大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 金属来源主要为金属冶炼、燃煤源以及电镀工业源。

金利山[27]等人通过 PCA 主成分分析法筛选对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度影响较大的气象因子, 再通过灰色关联度分析筛选关联度较高的污染物因子, 结合季节因子与人为因子, 共同作为变量建立浓度预测模型。

从以上引用可以看出, PCA 主成分分析法用于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的金属源解析, 以及气象因子对大气环境质量的影响。更多研究者选择建立联合模型, 通过 PCA 主成分分析法筛选主要影响因子, 再将筛选出的因子作为变量输入预测模型。如栗治杰[28]等人通过 PCA 主成分分析法对 6 种污染物因子和 3 种气象因子进行筛选, 得到 3 个主成分, 再将主成分输入 LSTM 和 Attention 模型, 对未来的空气质量指数 (AQI) 进行预测, 经过对比验证, 这种基于 PCA-LSTM-Attention 的预测模型能够高效、精确预测 AQI。

2.1.3. 化学质量平衡模型法(Chemical Mass Balance, CMB)

CMB 模型是大气颗粒物源解析中常用的受体模型之一, 其核心原理是通过建立“源-受体”之间的化学组分关系, 定量计算不同污染源对受体点大气颗粒物的贡献比例[29]。吴丹[30]等人通过分析沈阳市土壤风沙尘、城市扬尘等源样品成分及 $PM_{2.5}$ 成分, 建立 CMB 质量平衡关系, 通过模拟计算可得沈阳市各源对 $PM_{2.5}$ 的贡献值和分担率。结果为贡献值排名前三的分别是煤烟尘、机动车尾气尘和城市扬尘, 其中煤烟尘的分担率最高, 这与沈阳市作为重工业城市燃煤量很大的现实相吻合。王晓军[31]等运用 CMB 质量平衡模型建立烟台市污染源与 $PM_{2.5}$ 成分的关系, 分析得出烟台市内 $PM_{2.5}$ 源具有空间差异性, 为大气污染管理精准施策提供依据。

2.1.4. Unmix 模型

Unmix 模型无需预先知晓污染源成分谱, 基于样品污染物浓度数据, 通过算法求解多元线性方程, 确定污染源数量、成分谱及各源贡献比例[32]。Unmix 模型在大气污染方面的分析多见于国外, 目前国内多用于土壤和多环芳烃的源解析。Murari V [33]等人使用该模型对印度恒河中部平原 PM_{10} 进行源解析, 发现地壳悬浮物是主要源, 贡献率在 57%~63%。更多研究者在使用多种模型进行源解析时发现, Unmix 模型解析出的源数量相对较少。例如, Jain [34]等通过对比分析 Unmix, PCA/APCS 和 PMF 模型对印度德里的 $PM_{2.5}$ 来源, 发现三个模型解析出的源分别为 4 个、5 个和 7 个。之所以出现这个现象, 在于 Unmix 模型的算法原理不同, Unmix 模型对数据质量敏感, 会忽视特征不明显的污染物信息, 对异常值影响的降低方法较粗糙, 难以细化区分度低的源。同时, Unmix 模型是直接分析样品的浓度数据, 没有对数据的不确定值进行逐点加权, 这也导致源数量偏少。

2.1.5. 后向轨迹模型(HYSPLIT)

HYSPLIT 后向轨迹模型由美国国家海洋和大气管理局和澳大利亚气象局联合开发, 是基于气象场模拟, 通过三维气团运动轨迹计算, 追溯污染物传输路径与潜在源区。结合扩散模型, 量化不同源区贡献, 解析远距离输送及本地排放对受体点污染的影响[35]。王嘉敏[36]等人用 HYSPLIT 后向轨迹模型解析出呼和浩特市和乌海市冬季 $PM_{2.5}$ 传输均受阿拉善盟和蒙古国南部的气流影响, 乌海市还受到来自新疆北部地区的气流影响。进一步使用 PSCF 和 CWT 进行潜在源区及权重分析, 发现冬季呼和浩特市 $PM_{2.5}$ 受到本地源的影响更大, 乌海市潜在源区相比夏季范围更广。梁祝[37]等人用该模型研究宝鸡市灰霾期间 $PM_{2.5}$ 的传输特征, 发现观测期间, 宝鸡市主要受本地气团影响较大, PSCF 和 CWT 分析结果显示贡献值最高的也为本地, 其次是位于宝鸡东北部的咸阳、东部的西安秦岭、宝鸡南部及东北部的四川地区。符传博[38]等人分析研究海口市大气传输特征得知, 位于海口市北部的广东是主要污染物贡献源。赵腾[39]等人分析南京市北郊 $PM_{2.5}$ 的来源得知, 位于南京西北方向的信阳市和安徽省东部地区对其影响较大。

以上引用是不同研究者利用 HYSPLIT 后向轨迹模型分析的不同地区大气污染潜在源。尽管研究区域不同, 但研究结果依然有共性逻辑。通过模型对轨迹结果的解读, 必须结合大尺度的气象环流系统, 不同地区在特定的季节受到典型气流的影响, 如南京位于东亚季风区, 冬季受蒙古-西伯利亚高压控制,

盛行来自内陆的西北风，因此更容易受到西北方向污染源的影响。解读 PSCF 和 CWT 模型分析结果时，要对照受体点上游的污染清单，避免因气流轨迹指向无污染源区域的现实矛盾。呼和浩特属于典型北方城市，冬季以燃煤为主。经分析呼和浩特冬季 PM_{2.5} 以二次无机污染源为主[36]，这与其受本地源影响更大结果相符，在它西北方气流经过的包头、鄂尔多斯、巴彦淖尔也是典型的燃煤城市，进一步加强了 PM_{2.5} 的成分特征。

2.2. 差异性讨论

以上模型各自具备独特优势和局限性，见表 1。大气污染源复杂多样，受自然排放、人为活动以及区域传输等多种因素的交互影响，单一模型难以全面覆盖和准确解析所有污染源。使用多模型能有效提高解析结果的精确性。一方面，不同模型从不同角度对大气污染来源进行解析，相互补充印证，可大幅提高解析结果的准确性和可靠性。如通过 PMF 初步识别污染源类型和贡献，再借助 CMB 对化学成分进行细致分析，结合 PCA 的主成分提取和 Unmix 模型对混合源的处理，能更全面深入地了解大气污染来源。另一方面，多模型综合分析可提升解析结果的稳定性，减少单一模型因假设条件、数据局限性等因素导致的结果偏差，为大气污染防治决策提供更坚实可靠的科学依据。

Table 1. Characteristics and applications of various receptor models
表 1. 各受体模型特点及应用

模型名称	定性/定量	优点	缺点	典型应用场景	联用
正定矩阵因子分解法 (PMF)	定量	无需源谱数据；基于“因子非负性”约束，结果物理意义明确；可处理数据缺失和异常值；可同时解析多种物质	对数据量要求高，短期小样本数据容易失真；需结合经验判断污染源；计算复杂度高	识别城市 PM _{2.5} /PM ₁₀ 的主要来源，并量化各源贡献比；	与 HYSPLIT 联用：PMF 识别污染源类型与贡献后，HYSPLIT 追踪对应污染源的气团传输路径；与 PCA 联用：先用 PCA 对数据进行降维，筛选核心污染组分，再输入 PMF 减少计算量，提升结果稳定性
主成分分析法 (PCA)	定性	原理简单、计算效率高；可直观展示变量间的相关性	主成分可能包含多种污染源，意义模糊；无“非负性约束”，可能出现负的载荷或得分，与实际污染贡献矛盾；对异常值敏感，单次高浓度污染事件会显著干扰主成分结果	适用于污染源位置的区域，快速判断是否存在工业源、交通源、扬尘源等类型；污染变量相关性，可判断是否存在二次转化；大区域污染格局分析，识别主导污染类型	PCA 常作为大气分析的预处理步骤，筛选核心污染组分，减少后续源解析模型的输入变量，降低计算复杂度，常与 PMF/Unmix 联用；与聚类分析(如 K-means)联用，将降维后的主成分得分进行聚类，按污染特征划分区域类型；与时间序列分析(如 Mann-Kendall)联用，分析主成分得分的长期变化趋势。
化学质量平衡模型法 (CMB)	定量	基于质量守恒，原理直观，结果可解释性强，适合污染源明确、源谱易获取的场景；计算复杂度低，不需要复杂参数调试，结果稳定性高	高度依赖先验源谱数据；难以处理二次污染源，因二次源无明确源谱；对受体数据精度要求高，否则无法满足质量平衡；要求某组分来自一种源，实际中多源共享组分，易导致误差	固定源主导区域的源解析；本地污染源贡献量化；污染源管控效果评估	与源谱实测技术联用，提升解析精度；与 PMF 联用，先用 CMB 的已知源谱验证 PMF 的因子识别结果；与大气扩散模型(如 AERMOD)联用，用 AERMOD 模拟污染源的扩散浓度，与 CMB 的解析贡献对比，验证模型合理性

续表

Unmix 模型	定量	对数据量要求较低, 仅需 30~50 个数据样本, 适合短期监测数据; 可自动确定“因子数量”, 减少主观判断; 在处理数据缺失方面优于 PCA, 可处理部分组分缺失的样本	对数据正态性要求较高; 进行复杂源解析时, 因子的拆分能力弱于 PMF, 容易将 2 中源合并为 1 个因子; 特征物种不明确时, 因子识别难度大; 无权重设置功能, 无法区分“高浓度组分”和“低浓度组分”的重要性	中小城市短期污染解析; 应急污染事件快速溯源; 单一污染源影响评估, 如用 Unmix 量化机动车源对周边村庄的 PM _{2.5} 贡献	与 HYSPLIT 联用, 先用 Unmix 识别本地源和外来源的贡献后, HYSPLIT 追踪外来源的气团路径; 与化学分析技术联用, 如用 ICP-MS 精确测定 PM _{2.5} 中的痕量元素, 作为 Unmix 的输入变量, 提升污染源识别精度; 与 PCA 联用, PCA 先筛选出 2~3 个核心主成分, Unmix 基于这些主成分进一步拆分污染源, 平衡数据量与解析精度
后向 轨迹模型 (HYSPLIT)	定性	操作简单, 能输出可视化轨迹图, 直观展示传输路径; 输入数据易获取, 适用范围广; 可结合气象参数分析传输过程中污染演变; 支持多高度轨迹模拟, 可区分“近地面传输”和“高空传输”	仅能分析“气团来源”, 无法识别“污染源类型”; 无法量化传输贡献; 结果依赖气象数据精度; 不考虑化学反应, 仅反映物理传输过程	区域污染传输分析, 在重污染天气中, 判断 PM _{2.5} 是本地积累还是来自外地传输; 特殊天气污染路径识别, 如沙尘天气, 模拟沙尘气团的后向轨迹, 判断其来自蒙古高原还是西北沙漠; 监测站污染轨迹来源分类, 区分本地轨迹、区域轨迹还是远距离轨迹	与聚类分析联用, 对大量后向轨迹聚类, 得到 3~5 类典型轨迹, 分析每类估计对应的污染浓度均值; 与浓度权重轨迹(CWT)模型联用, 计算受体点不同来源区域的浓度权重贡献, 弥补 HYSPLIT 无法定量的缺陷

2.3. 机器学习技术在源解析中的创新应用

机器学习通过构建数据驱动模型, 自动学习污染源与受体污染物间的复杂非线性关系, 实现污染源的快速识别、定量解析及动态预测, 已成为大气污染源解析领域的核心技术支撑。图 1 为机器学习应用于大气污染分析的流程[40]。

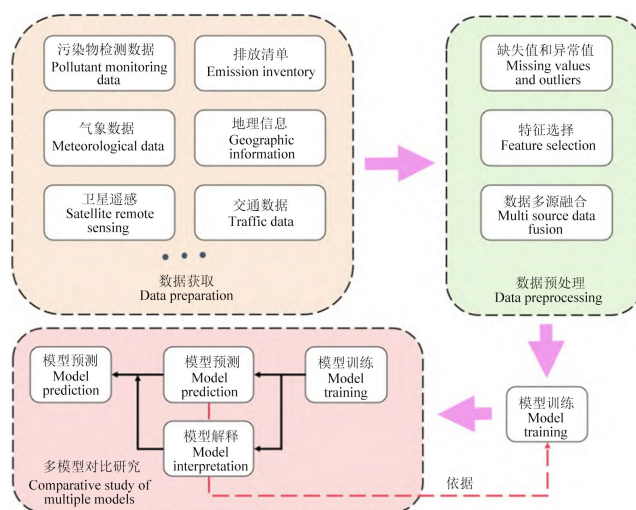


Figure 1. Schematic diagram of machine learning process

图 1. 机器学习流程示意图

机器学习相较于传统的数值分析方法有显著优势，主要表现在强大的数据挖掘能力，融合多元数据类型，挖掘数据内在规律，从而更精准的对大气污染进行源解析和预测。机器学习方法与传统数值分析方法的对比如表 2。

Table 2. Comparison between machine learning analysis and traditional numerical analysis methods

表 2. 机器学习分析与传统数值分析方法对比

对比维度	机器学习	传统数值分析方法
数据维度	支持高维分子级数据	适合中低维常规组分数据
关系表征	擅长非线性过程	基于线性假设，简单直观
解析效率	分钟级实时响应，适配应急管理	数天至数周，适合长期研究
可解释性	黑箱特性，物理意义模糊	原理清晰，可解释性强
泛化能力	区域特异性强	泛化能力强，跨区域适配快
技术门槛	算法/算力门槛高	操作简单，基层易推广

3. 结论

本文系统梳理了当前 PM_{2.5} 源解析方法的研究现状，具体结论如下：

1) PM_{2.5} 源解析方法：当前 PM_{2.5} 源解析以受体模型为主导，不同模型的“优势 - 局限”决定了其场景适配性，而多模型联用已成为提升解析精度的核心路径。正定矩阵因子分解法(PMF)因“无需预设源谱、可处理异常值”，成为应用最广泛的定量工具，尤其在高时间分辨率数据支撑下，可有效减少源谱混合；主成分分析法(PCA)擅长数据降维与定性识别，但因无“非负性约束”，需作为预处理步骤与 PMF/Unmix 联用；化学质量平衡模型(CMB)基于质量守恒，在固定源主导区域的贡献量化中表现优异，但高度依赖先验源谱，难以解析二次源；Unmix 模型适合短期小样本数据的快速溯源，但因因子拆分能力弱于 PMF，易合并相似源；后向轨迹模型(HYSPLIT)可直观追踪污染传输路径，但需与浓度权重轨迹(CWT)等模型联用才能实现定量，且无法识别污染源类型。实践表明，单一模型难以覆盖“本地源 - 外来源 - 二次源”的复杂贡献，而“PMF + CMB + HYSPLIT”“PCA + PMF”等联用模式，可通过“定性识别 - 定量验证 - 传输追踪”的互补，大幅提升解析结果的可靠性。

2) 机器学习的大力发展为大气污染源解析提供更强大的分析技术支撑，相比传统分析方法，虽然有显著优势，但其算法核心需要强大的算力，很多分析部门往往不具备相关能力。

3) 当前研究局限与未来展望。模型对二次源解析能力不足，CMB、Unmix 等模型难以量化二次 SIA 的源前体物贡献，PMF 对二次源与一次源的区分仍依赖有机示踪物输入；区域协同解析缺失，现有研究多聚焦单一城市，对跨区域传输与本地源的耦合机制分析不足。

未来研究可从两方面突破：一是多模型深度耦合：构建“PMF/CMB(源定量)+HYSPLIT/CWT(传输分析)+化学反应模型(二次源机制)”的一体化框架，解决二次源解析难题；二是区域协同与标准统一：开展跨区域的对比研究，建立统一的源谱数据库与模型验证标准，为区域污染联防联控提供更精准的科学依据。

参考文献

- [1] 刘劲松. 大气颗粒物 PM_{2.5} 中多环芳烃的分析方法及大气气溶胶和污染源中多环芳烃污染现状研究[Z]. 浙江省环境监测中心, 2025.
- [2] Miller, L. and Xu, X. (2018) Ambient PM_{2.5} Human Health Effects—Findings in China and Research Directions.

- Atmosphere*, **9**, Article No. 424. <https://doi.org/10.3390/atmos9110424>
- [3] Han, M., Yang, F. and Sun, H. (2021) A Bibliometric and Visualized Analysis of Research Progress and Frontiers on Health Effects Caused by PM_{2.5}. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 30595-30612. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14086-z>
- [4] 孙丽娟, 马可婧, 彭仙娥, 等. PM_{2.5} 中重金属元素分析方法研究及在实际中的应用[J]. 甘肃科技, 2020(13): 64-67.
- [5] 何俊. PM_{2.5} 中不同源有机示踪物同步分析方法的开发及应用[Z]. 浙江省, 宁波诺丁汉大学, 2016-05-01.
- [6] Marchetti, S., Hassan, S.K., Shetaya, W.H., El-Mekawy, A., Mohamed, E.F., Mohammed, A.M.F., *et al.* (2019) Seasonal Variation in the Biological Effects of PM_{2.5} from Greater Cairo. *International Journal of Molecular Sciences*, **20**, Article No. 4970. <https://doi.org/10.3390/ijms20204970>
- [7] Nayebare, S.R., Aburizaiza, O.S., Khwaja, H.A., Siddique, A., Hussain, M.M., Zeb, J., *et al.* (2016) Chemical Characterization and Source Apportionment of PM_{2.5} in Rabigh, Saudi Arabia. *Aerosol and Air Quality Research*, **16**, 3114-3129. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.11.0658>
- [8] Won, S.R., Lee, K., Song, M., Kim, C., Jang, K. and Lee, J.Y. (2024) Characteristic of PM_{2.5} Concentration and Source Apportionment during Winter in Seosan, Korea. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, **18**, Article No. 22. <https://doi.org/10.1007/s44273-024-00044-x>
- [9] Xie, Y., Dai, H., Dong, H., Hanaoka, T. and Masui, T. (2016) Economic Impacts from PM_{2.5} Pollution-Related Health Effects in China: A Provincial-Level Analysis. *Environmental Science & Technology*, **50**, 4836-4843. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05576>
- [10] Yang, Y. and Christakos, G. (2015) Spatiotemporal Characterization of Ambient PM_{2.5} Concentrations in Shandong Province (China). *Environmental Science & Technology*, **49**, 13431-13438. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03614>
- [11] Zhang, Y., Tian, J., Wang, Q., Qi, L., Manousakas, M.I., Han, Y., *et al.* (2023) High-Time-Resolution Chemical Composition and Source Apportionment of PM_{2.5} in Northern Chinese Cities: Implications for Policy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **23**, 9455-9471. <https://doi.org/10.5194/acp-23-9455-2023>
- [12] Tan, S., Xie, D., Chen, F., Ni, C., Shao, J., Wang, S., *et al.* (2022) Spatiotemporal Characteristics of Air Pollution in Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration (CCUA) in Southwest, China: 2015-2021. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4173942>
- [13] 张延君, 郑玫, 蔡靖, 等. PM_{2.5} 源解析方法的比较与评述[J]. 科学通报, 2015, 60(2): 109-121.
- [14] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 中国 PM_{2.5} 来源解析方法综述[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(6): 1141-1154.
- [15] 黎海涛, 朱心宇, 施加春. 基于正定矩阵因子分解模型的污染源解析研究进展及应用前景[J]. 环境污染与防治, 2025, 47(1): 121-129.
- [16] Rogge, W.F., Hildemann, L.M., Mazurek, M.A., Cass, G.R. and Simoneit, B.R.T. (1993) Sources of Fine Organic Aerosol. 2. Noncatalyst and Catalyst-Equipped Automobiles and Heavy-Duty Diesel Trucks. *Environmental Science & Technology*, **27**, 636-651. <https://doi.org/10.1021/es00041a007>
- [17] Schauer, J.J., Kleeman, M.J., Cass, G.R. and Simoneit, B.R.T. (2002) Measurement of Emissions from Air Pollution Sources. 5. C₁-C₃₂ Organic Compounds from Gasoline-Powered Motor Vehicles. *Environmental Science & Technology*, **36**, 1169-1180. <https://doi.org/10.1021/es0108077>
- [18] Shen, H., Cheng, P., Yuan, C., Yang, Z., Hung, C. and Ie, I. (2020) Chemical Characteristics, Spatiotemporal Distribution, and Source Apportionment of PM_{2.5} Surrounding Industrial Complexes in Southern Kaohsiung. *Aerosol and Air Quality Research*, **20**, 557-575. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.01.0007>
- [19] Onyango, S., North, C.M., Ellaithy, H.A., Tumwesigye, P., Kang, C., Matthaios, V., *et al.* (2024) Ambient PM_{2.5} Temporal Variation and Source Apportionment in Mbarara, Uganda. *Aerosol and Air Quality Research*, **24**, Article ID: 230203. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230203>
- [20] Wang, Q., Qiao, L., Zhou, M., Zhu, S., Griffith, S., Li, L., *et al.* (2018) Source Apportionment of PM_{2.5} Using Hourly Measurements of Elemental Tracers and Major Constituents in an Urban Environment: Investigation of Time-Resolution Influence. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **123**, 5284-5300. <https://doi.org/10.1029/2017jd027877>
- [21] Li, R., Wang, Q., He, X., Zhu, S., Zhang, K., Duan, Y., *et al.* (2020) Source Apportionment of PM_{2.5} in Shanghai Based on Hourly Organic Molecular Markers and Other Source Tracers. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 12047-12061. <https://doi.org/10.5194/acp-20-12047-2020>
- [22] 彭家美, 于瑞莲, 胡恭任, 等. APCS-MLR 结合 PMF 模型解析大气 PM_{2.5} 中重金属元素来源及健康风险[J]. 环境科学, 2025, 46(11): 7371-7384.
- [23] 周闯, 张琦锦, 郭映映, 等. 主成分分析法在合肥市空气质量评估中的应用[J]. 大气与环境光学学报, 2024, 19(4): 479-488.
- [24] 陈冬素, 李巧媛, 阎丽, 等. 影响湖南省空气质量指数的主要气象因子分析[J]. 湖南师范大学自然科学学报,

- 2024, 47(5): 76-85.
- [25] 王冰, 周乐, 魏玉军, 等. 2017-2022 年扬州市大气 PM_{2.5} 中金属和类金属元素污染特征及健康风险评估[J]. 环境监控与预警, 2025, 17(1): 22-28.
- [26] 赵敏娴, 刘强, 王瑛, 等. 2020-2022 年苏州市大气 PM_{2.5} 中金属污染特征及健康风险[J]. 环境卫生学杂志, 2024, 14(12): 981-986+1029.
- [27] 金利山, 刘芳. 基于机器学习的呼和浩特 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度预测与分析[J]. 环境科技, 2024, 37(6): 45-50.
- [28] 栗治杰, 贾东水. 基于时空规律的 PCA-LSTM-Attention 空气质量预测研究[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(11): 172-177.
- [29] 代冉, 谷超, 徐涛, 等. 伊犁河谷城市群夏季不同粒径大气颗粒物组分特征及来源解析[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(3): 909-920.
- [30] 吴丹, 张立平, 夏广锋, 等. 沈阳市大气中 PM_{2.5} 来源解析研究[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(1): 18-22.
- [31] 王晓军, 陈倩, 董韶妮, 等. 烟台市 PM_{2.5} 空间分布特征与来源解析[J]. 中国环境监测, 2020, 36(4): 53-60.
- [32] 蔡昂祖, 张海霞, 王小剑, 等. Unmix 模型污染源解析研究进展及应用前景[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 747-756.
- [33] Murari, V., Singh, N., Ranjan, R., Singh, R.S. and Banerjee, T. (2020) Source Apportionment and Health Risk Assessment of Airborne Particulates over Central Indo-Gangetic Plain. *Chemosphere*, **257**, Article ID: 127145. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127145>
- [34] Jain, S., Sharma, S.K., Choudhary, N., Masiwal, R., Saxena, M., Sharma, A., et al. (2017) Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM_{2.5} Using PCA/APCS, UNMIX, and PMF at an Urban Site of Delhi, India. *Environmental Science and Pollution Research*, **24**, 14637-14656. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8925-5>
- [35] 李颜君, 安兴琴, 范广洲. 北京地区大气颗粒物输送路径及潜在源分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(3): 915-927.
- [36] 王嘉敏, 杨文柱, 焦燕, 等. 内蒙古沿黄流域城市群 PM_{2.5} 区域输送及源解析[J]. 中国环境科学, 2025, 45(10): 5338-5356.
- [37] 梁祝, 李龙, 张辉, 等. 基于后向轨迹模型的宝鸡市典型灰霾期间 PM_{2.5} 来源分布及传输特征[J]. 绿色科技, 2021, 23(16): 19-22+53.
- [38] 符传博, 丹利, 唐家翔, 等. 基于轨迹模式分析海口市大气污染的输送及潜在源区[J]. 环境科学学报, 2020, 40(1): 36-42.
- [39] 赵腾, 孙明洋, 盖鑫磊. 南京北郊冬季 PM_{2.5} 中重金属的形态、来源及健康风险[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(10): 1257-1266.
- [40] 裴飞扬, 王建成, 孟醉, 等. 机器学习在大气污染预测与溯源方面的应用进展[J]. 环境化学, 2025, 44(12): 4617-4632.