

东亚地区黑碳气溶胶源解析技术的应用

姜坦廷

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年10月6日; 录用日期: 2025年10月31日; 发布日期: 2025年11月10日

摘要

黑碳气溶胶作为大气颗粒物中的重要组分, 对区域空气质量、人体健康以及全球气候变化均具有显著影响。东亚地区作为全球重要的黑碳排放区, 其源解析研究对于制定有效的污染减排策略和进行气候效应评估具有重要意义。本文介绍了目前广泛应用于东亚地区的黑碳源解析技术, 包括但不限于基于放射性碳同位素 ^{14}C 的化石燃料与生物质燃烧源识别方法, 以及结合光学特性、分子标志物和受体模型的多技术联用策略。总结了处于东亚地区城市的源解析技术研究应用实例, 总结了最新研究结论。重点关注源成分谱建立、技术成本、时空分辨率以及模型不确定性等方面面临的挑战。最后, 对未来东亚地区黑碳源解析研究的发展方向进行展望, 包括构建区域协同观测网络与标准化源谱体系, 发展多维融合解析框架, 强化源解析结果的政策转化应用。建议通过多技术、多模型和多区域的协同研究, 更加精准和系统地进行黑碳源解析, 为黑碳区域协同治理和气候变化应对提供科学支持。

关键词

黑碳, 源解析技术, 东亚地区

Application of Black Carbon Aerosol Source Apportionment Techniques in East Asia

Tanting Jiang

College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: October 6, 2025; accepted: October 31, 2025; published: November 10, 2025

Abstract

As an important component of atmospheric particulate matter, Black Carbon (BC) aerosols exert significant impacts on regional air quality, human health, and global climate change. East Asia, as one of the major BC emission regions worldwide, has become a key area for source apportionment research, which provides critical scientific support for developing effective emission reduction

strategies and assessing climate effects. This paper reviews the main BC source apportionment techniques currently applied in East Asia, including the radiocarbon ^{14}C -based method for distinguishing fossil fuel and biomass burning sources, as well as integrated multi-approach strategies combining optical properties, molecular markers, and receptor models. Representative studies conducted in East Asian cities are summarized, highlighting recent progress and key findings. Particular attention is given to challenges related to source profile establishment, analytical cost, spatiotemporal resolution, and model uncertainty. Finally, future research directions are proposed, emphasizing the establishment of a regional collaborative observation network and standardized source profiles, the development of multidimensional data-fusion frameworks, and the enhancement of policy-oriented applications of source apportionment results. It is recommended to conduct more accurate and systematic analysis of black carbon sources apportionment collaborative research involving multiple technologies, models, and regions, so as to provide scientific support for the coordinated governance of black carbon regions and the response to climate change.

Keywords

Black Carbon, Source Apportionment Techniques, East Asia

Copyright © 2025 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

黑碳(BC)是含碳物质不完全燃烧产生的一种具有强烈吸光性的碳质气溶胶,不仅是细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的关键组分,对人体健康构成严重威胁[1],还是仅次于二氧化碳的气候变暖驱动因子[2]。东亚地区人口密集、工业发达、生物质燃烧频繁,是全球黑碳的重要排放源区。该地区黑碳的来源复杂多样,既包括化石燃料(如燃煤、柴油车排放),也包括生物质燃烧(如秸秆焚烧、家用生物质炉灶)。不同来源的黑碳在其物理化学特性、环境行为和气候效应上存在显著差异。因此,准确解析东亚地区黑碳的来源贡献,是制定有效减排政策和评估气候效应的科学参考。

近年来,黑碳源解析方法不断发展,相关技术在东亚地区得到了广泛应用。本文旨在系统梳理广泛应用的黑碳源解析技术的原理,明确不同技术的适用场景与技术优势,总结东亚不同城市的应用成果,深入剖析当前研究面临的技术挑战与未来发展方向,为该领域的深入研究提供参考。通过多技术融合与区域协同观测,可进一步提升黑碳源解析的精准性与系统性,为区域环境治理和全球气候变化应对提供有力支持。

2. 黑碳源解析主要技术方法

2.1. 放射性碳同位素(^{14}C)技术

放射性碳同位素技术是区分化石源与生物质源最直接、最可靠的方法。由于化石燃料形成于远古地质年代,其 ^{14}C 已衰变殆尽,而生物质中的 ^{14}C 含量与现代大气基本一致。通过测量大气样品中黑碳组分的 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值,可以精确计算出化石源与生物质源的贡献比例[3]。此方法已在全球范围内得到广泛应用。但 ^{14}C 技术也存在一些局限性,由于测试费用昂贵、样品前处理复杂,难以进行大样本量和高时间分辨率的常规监测。另外,样品的采集和处理过程中可能受到污染,影响测量结果的准确性。虽存在不足,但 ^{14}C 技术在高精度源解析研究中仍具有不可替代的地位,尤其在验证其他源解析方法的准确性方面发

挥着重要作用。在对环境污染的研究中也将 ^{14}C 技术用于雪冰、沉积物和土壤中 BC 的源解析[4]-[6]。

2.2. 光学特性法

黑碳的光吸收特性对其来源和老化过程非常敏感。吸收指数(AAE)是表征气溶胶光吸收波长依赖性的核心参数,被广泛用于区分黑碳与来自生物质燃烧的棕碳(BrC)。

一般而言,化石燃料燃烧产生的黑碳 AAE 值接近 1,而生物质燃烧产生的气溶胶因含有大量棕碳,其 AAE 值通常大于 1 [7]。通过在线监测仪器获取不同波长下的吸收系数,可以间接估算两类来源的相对贡献。光学特性法具有实时监测的优势,能够提供高时间分辨率的黑碳来源信息,但其结果受到大气中其他吸光物质的显著影响。另一方面,不同地区污染源的 AAE 值可能存在差异,直接借用其他地区的参数可能导致解析误差。基于此,在使用光学特性法时,需要结合本地化源谱数据或同位素法,以提高解析结果的可靠性。

2.3. 分子标志物法

分子标志物法通过测定与特定燃烧过程相关的有机化合物来示踪黑碳来源。左旋葡聚糖是纤维素燃烧的特征性标志物被广泛用于示踪生物质燃烧[8],可用于示踪生物质燃烧产生的黑碳。进一步而言,苯多羧酸(BPCAs)作为黑碳在高温氧化后生成的特定分子标志物,其异构体的比值可用于评估燃烧产物的老化程度和来源类型,能反映黑碳在大气中的演变情况,区分木材燃烧与煤炭燃烧等,为解析复杂燃烧源提供了新的维度[9]。多环芳烃也可用于源识别,但其在不同燃烧源中存在交叉,需结合其他方法使用。所以分子标志物法能够提供具体的来源信息,但其应用受到标志物稳定性和大气老化过程的限制。不同燃烧条件下标志物的排放因子存在差异,需要建立本地化的标志物数据库来提高解析精度。

2.4. 受体模型

受体模型是大气颗粒物源解析的常用工具,其优势是无需依赖完整的排放清单,可直接通过城市监测站、区域背景站点等环境受体点的样品化学组成,去反推不同污染源的贡献比例。在黑碳源解析研究中,应用最广泛的受体模型主要包括正定矩阵因子分解模型(PMF)和化学质量平衡模型(CMB)。受体模型通过分析环境受体点和污染源样品的化学成分谱,定量计算各污染源的贡献率。将黑碳浓度与左旋葡聚糖、金属元素、离子等示踪物一同输入模型,可以有效解析出燃煤、机动车、生物质燃料等对黑碳的贡献[10]。受体模型具有较好的适用性和灵活性,但 PMF 的因子数选择依赖研究者经验判断,不同因子数设定可能导致污染源识别结果差异;CMB 的解析精度则高度依赖源谱的准确性,若源谱与实际污染源的化学组成偏差较大,会直接影响贡献计算结果。且不同来源之间存在共线性问题,可能导致解析结果存在一定的不确定性。因此,在使用受体模型时,也需结合其他技术方法进行验证来提高结果的可靠性。

2.5. 形态特征分析

形态特征分析是通过扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)等电子显微镜技术,直接从微观尺度观察和统计大气颗粒物的形貌、粒径、表面结构及混合状态,从而追溯其来源的方法。不同燃烧过程和工艺条件产生的黑碳颗粒在微观形态上具有显著差异。对于生物质燃烧产生的黑碳多呈链状或絮状团聚结构,由大量纳米级的基本碳球组成;而高温、富氧条件下充分燃烧产生的黑碳则更倾向于形成密实的近球形颗粒[11]。SEM 与 TEM 常与能谱仪(EDS)联用以获取单颗粒的元素组成,辅助判断其来源。

3. 源解析技术在东亚地区的应用

东亚地区内中国、朝鲜半岛、韩国、日本、蒙古等地区均有黑碳气溶胶相关研究,受多种排放源与

季风系统影响, 黑碳浓度和来源表现出复杂的时空分布特征。近年来, 各地区纷纷应用源解析模型和观测技术, 揭示黑碳的来源结构、传输通道及其气候效应, 为区域减排政策提供科学支持。

3.1. 中国城市黑碳气溶胶研究

华北地区是中国黑碳排放量较高的区域之一, 排放基数大导致了黑碳对中国区域气候、空气质量及人体健康的影响显著, 因此该区域黑碳源解析研究需求强烈。各子区域排放特征呈现出“总量规模大、区域差异显著、源类结构多元”的鲜明特点, 这与不同区域内的能源消费模式、经济发展阶段及地理环境紧密关联。黑碳排放源与源解析重点存在明显不同, 近年来, 研究重点从单点观测逐步拓展至区域协同监测, 并结合 PMF、CMB 与同位素技术实现多源精细化解析。针对西安, Chen 等[12]利用 PMF 模型结合光学特性表明二次老化是城市区域黑碳的最主要来源。Kondo 等[13]在东海偏远站点的长期观测利用 ^{14}C 技术证实, 在特定时段化石燃料对黑碳的贡献超过 90%。北京及周边地区的研究表明, 多技术耦合方法 PMF-AMS 联合提高了源解析的可信度与时空分辨率。申铠君等[14]对华北地区某城市每个季节 $\text{PM}_{2.5}$ 中黑碳的 ^{14}C 分析发现, 化石燃料贡献达 80% 以上, 其中燃煤和机动车是主要来源, 揭示了黑碳来源的空间差异性。基于 7 波段黑碳仪(AE-33)的高分辨率观测数据, 辛治轩[15]等通过应用改进的钾离子动态约束模型对黑碳进行源解析, 实现了对华北南部城市秋冬季黑碳来源动态及贡献的精准量化, 发现主要贡献为化石燃料燃烧, 其次为生物质燃烧。同时发现烟花爆竹燃放时段内, 钾离子的异常高值会对源解析模型构成干扰, 因此应用改进的黑碳仪模型时, 需排除此类特殊事件时段。而在华北平原的农村地区, 冬季采暖期的生物质燃烧贡献可显著升高。Yang 等在华北平原一处受污染的农村站点, 通过借助单颗粒煤烟光度计(SP2)分离出的难溶黑碳(rBC)数据, 与经正定矩阵因子分解法拆分得到的有机气溶胶(OA)因子进行相关性分析, 来追溯 rBC 的排放源头。发现燃煤源产生的 rBC 核粒径跨度较大, 交通源排放的 rBC 颗粒则核粒径偏小; 而生物质燃烧源释放的 rBC 颗粒, 老化程度明显更高[16]。同时, 王璐[17]等在成都利用 AE-33 与轨迹模型解析黑碳来源, 发现其浓度冬季高、夏季低, 日变化呈双峰; 来源以交通排放为主, 冬季生物质燃烧贡献上升, 且主要受川渝城市群的区域传输影响。整体来看, 受体模型是仍是黑碳气溶胶物在析的常用工具, 2021 年冬季, 彭超等[18]在重庆三区开展 $\text{PM}_{2.5}$ 采样与组分分析, 结合 PMF 模型和轨迹分析解析黑碳来源, 污染期间黑碳主要来自本地和东北方向区域传输。而我国西南的四川盆地[19], 由于地形和能源结构影响, 生物质燃烧对黑碳的贡献常年维持在较高水平。这些研究为中国区域大气污染减排策略提供了重要的科学支持, 同时也揭示了黑碳来源的时空异质性和复杂性。

3.2. 东亚其他地区黑碳气溶胶研究

近年来, 除中国外, 东亚其他地区在黑碳气溶胶源解析方面也取得了显著进展。韩国在高分辨气溶胶质谱仪(AMS)与单颗粒黑碳光度计(SP2)的应用上发展迅速, 通过高时间分辨观测揭示了黑碳粒径分布及光学特征的时空变化规律。Jeong 等在首尔城市站点利用 AMS 与 Aethalometer 结合的方法解析了 $\text{PM}_{2.5}$ 中黑碳的来源[20]; 同时, 已有研究利用卫星与地基遥感观测, 对北京、香港和首尔三个城市的黑碳气溶胶质量空间分布进行了模拟研究, 发现交通排放是主要来源, 其次为工业、能源与生物质燃烧。此外, Lamb 等在 Baengnyeong 岛观测发现, 来自华北及朝鲜半岛的气团在特定气象条件下会造成短时黑碳浓度激增, 验证了区域跨境传输的重要性[21], 在首尔附近站点开展的 48 个剖面观测, 利用单颗粒烟盒光度计(SP2)获取黑碳的垂直质量负荷数据, 发现不同来源的黑碳具有独特的化学示踪关系, 并通过后向轨迹与化学示踪分析揭示了其跨区域传输特征。总体而言, 韩国的研究在方法上体现出多技术结合与区域输送机制分析的特点。

日本的研究则更注重通过多指标耦合手段实现对黑碳来源的精细解析。Tsuchiya 等通过在日本能登

半岛偏远站点开展长期观测,结合放射性碳(^{14}C)测定、稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)、生物质燃烧示踪物和金属元素比值等多种化学分析手段,揭示了东亚大陆气溶胶 outflow 中黑碳与燃烧源排放磁铁矿之间的相对丰度关系及季节性变化规律。研究表明,黑碳与磁铁矿浓度比具有明确的来源特征,遵循“燃煤 > 石油燃烧 > 生物质燃烧”的层级关系,反映了不同燃烧源混合类型及其季节性贡献的差异[22]。Uchida 等进一步利用采集自东亚沿岸 outflow 的样品,采用放射性碳(^{14}C)与稳定碳同位素(^{13}C)双模型对黑碳进行了源解析,发现主要来源为化石燃料,具体贡献比例与类型随季节和气团来源区域的不同而呈现显著差异[23]。相较之下,蒙古国的黑碳研究多集中于乌兰巴托城市群,研究重点在于居民燃烧排放与排放清单修正。Bekbulat [24]等通过家用被动采样器测定居民家庭燃烧排放,并结合主动采样器直接测量元素碳(EC),虽方法相对简化,但有效揭示了家庭燃烧对城市黑碳水平的重要贡献。Lee 等针对乌兰巴托,采用典型的“从浓度反推排放”源解析方法改进了黑碳排放清单,使模型模拟结果与实地观测浓度相匹配,结果表明乌兰巴托黑碳人为排放率被当前库存严重低估,本地高强度的人为源是其最主要来源[25]。此外,Salako 等在韩国与蒙古的联合研究中,基于 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分数据,运用受体模型 CMB 和 PMF 结合各地实测 EC 与 BC 浓度,系统量化了柴油车排放、生物质燃烧、燃煤等主要来源对黑碳的相对贡献,揭示了不同主导排放源对碳质气溶胶光学特性与测量一致性的影响[26]。

朝鲜半岛的黑碳研究则更多聚焦于跨境输送与复合污染效应。Kim 等通过区域模型模拟与情景分析,将模拟的黑碳空间分布、季节变化与排放清单及气象场相结合,定性推断了朝鲜半岛黑碳的来源既包括本地排放,也受到来自中国源区的长距离传输影响,并揭示其季节差异显著[27]。尽管定量研究仍相对不足,但该类工作为理解跨境输送过程提供了重要科学依据。

总体而言,东亚地区黑碳源解析的应用展现出多技术融合与协同发展的趋势。从传统的 Aethalometer 模型[28][29],到高分辨气溶胶质谱与单颗粒烟盒光度计的联合观测,再到放射性碳和磁性颗粒“指纹”方法的引入,研究手段不断向高精度和多维化方向拓展。

4. 源解析方法的制约性

东亚地区黑碳源解析研究虽取得显著进展,但在方法应用与结果解释上仍受多重因素制约。不同解析技术在数据依赖性与适用范围上存在明显差异。受体模型结果受源谱准确性和样本代表性影响较大,而同位素法和分子标志物法虽然识别力强,却受限于高成本与复杂操作,难以实现常规化应用。光学特性法实时性突出,但在混合气溶胶中易受棕碳和有机组分干扰,造成吸收系数高估。各技术间的系统误差缺乏统一量化标准,导致不同研究间的结果可比性不足。

其次,多源混合与传输过程的复杂性加剧了解析不确定性。东亚地区燃煤、交通、生物质及跨境传输源并存,气象条件和季节性变化显著,不同源信号在大气老化和二次转化过程中易发生耦合,使单一方法难以准确区分源贡献。同时,当前区域排放清单与源谱数据库更新滞后、空间分辨率有限,也使得模型反演结果偏离实际排放结构。

同时存在观测与建模体系的协同性不足的问题。多数研究集中于城市区域,而边境、海岛与高原站点的长期序列数据仍匮乏,难以支撑区域尺度的源解析精化。跨国观测数据的格式和质量标准不统一,阻碍了模型互校与结果整合。技术联用虽能在一定程度上提升结果稳健性,但在时间分辨率、采样尺度及数据权重设定等方面仍缺乏成熟框架。总体而言,目前黑碳源解析仍处于多方法并行但体系未完全融合的阶段,数据同化与模型协同仍是提升解析精度的关键瓶颈。

5. 结论与展望

准确解析东亚地区黑碳的来源,是研究其环境行为并有效控制黑碳对环境影响的基础。综合近年来

研究, 东亚地区黑碳源解析正在从单点观测走向区域协同、从单技术分析迈向多模型耦合。不同国家在技术路线和应用场景上各具特色: 中国城市群聚焦燃烧结构与政策响应, 日本与韩国强调光学与辐射特征解析, 蒙古及环渤海区域则逐渐加强燃煤与生物质源监测。然而, 从整体区域视角看, 仍存在数据碎片化、技术标准不一与跨境联动不足等突出问题, 限制了黑碳溯源结果在气候评估与减排政策中的应用深度。

未来研究应在以下三个方面深化

- (1) 构建区域协同观测网络与标准化源谱体系。推动各国间观测数据互认及排放清单的动态更新;
- (2) 发展多维融合解析框架。通过耦合光学、同位素、化学与数值模拟手段, 提升对复杂混合源及输送过程的解析能力;
- (3) 强化源解析结果的政策转化应用。实现从学术研究到减排评估与气候影响定量化的衔接。

通过技术集成与区域合作的深入推进, 东亚地区有望实现黑碳排放源的高精度识别与动态监控, 为区域空气质量改善与碳中和战略提供坚实的科学支撑。

参考文献

- [1] 董千里, 孟鑫, 宫继成, 等. 大气中黑碳的暴露及人体健康效应研究进展[J]. 科学通报, 2024, 69(6): 703-716.
- [2] 张华, 王志立. 黑碳气溶胶气候效应的研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(6): 311-317.
- [3] 赵雪琰, 徐占杰, 董志超, 等. 放射性碳同位素技术在碳质气溶胶源解析中的应用研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(4): 685-698.
- [4] Jenk, T.M., Szidat, S., Schwikowski, M., Gäggeler, H.W., Brütsch, S., Wacker, L., *et al.* (2006) Radiocarbon Analysis in an Alpine Ice Core: Record of Anthropogenic and Biogenic Contributions to Carbonaceous Aerosols in the Past (1650-1940). *Atmospheric Chemistry and Physics*, **6**, 5381-5390. <https://doi.org/10.5194/acp-6-5381-2006>
- [5] Chang, S.J., Jeong, G.Y. and Kim, S.J. (2008) The Origin of Black Carbon on Speleothems in Tourist Caves in South Korea: Chemical Characterization and Source Discrimination by Radiocarbon Measurement. *Atmospheric Environment*, **42**, 1790-1800. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.11.042>
- [6] Lehnndorff, E., Brodowski, S., Schmidt, L., Haumaier, L., Grootes, P.M., Rethemeyer, J., *et al.* (2015) Industrial Carbon Input to Arable Soil since 1958. *Organic Geochemistry*, **80**, 46-52. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2015.01.003>
- [7] 刘颖, 朱君. 生物质燃料输送对青藏高原气溶胶光学辐射特性的影响研究[J]. 气象科技, 2022, 50(6): 878-884.
- [8] 游超, 鄢光剑, 王宁练, 等. 环境介质中左旋葡聚糖记录与植被火燃烧变化研究进展[J]. 科学通报, 2022, 67(21): 2522-2534.
- [9] Hammes, K., Schmidt, M.W.I., Smernik, R.J., Currie, L.A., Ball, W.P., Nguyen, T.H., *et al.* (2007) Comparison of Quantification Methods to Measure Fire-Derived (Black/Elemental) Carbon in Soils and Sediments Using Reference Materials from Soil, Water, Sediment and the Atmosphere. *Global Biogeochemical Cycles*, **21**, GB3016. <https://doi.org/10.1029/2006gb002914>
- [10] 许博, 徐晗, 赵焕, 等. 机器学习耦合受体模型揭示驱动因素对 PM_{2.5} 的影响[J]. 环境科学研究, 2022, 35(11): 2425-2434.
- [11] Whitlock, C. and Larsen, C. (2002) Charcoal as a Fire Proxy. In: Smol, J.P., *et al.*, Eds., *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*, Springer, 75-97. https://doi.org/10.1007/0-306-47668-1_5
- [12] Chen, S., Wang, Q., Zhang, Y., Tian, J., Wang, J., Ho, S.S.H., *et al.* (2023) Heterogeneous Characteristics and Absorption Enhancement of Refractory Black Carbon in an Urban City of China. *Science of the Total Environment*, **879**, Article ID: 162997. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162997>
- [13] Kondo, Y., Oshima, N., Kajino, M., Mikami, R., Moteki, N., Takegawa, N., *et al.* (2011) Emissions of Black Carbon in East Asia Estimated from Observations at a Remote Site in the East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **116**, D16201. <https://doi.org/10.1029/2011jd015637>
- [14] 申铠君, 张向云, 刘頔, 等. 华北典型城市 PM_{2.5} 中碳质气溶胶的季节变化与组成特征[J]. 生态环境学报, 2016, 25(3): 458-463.
- [15] 辛治轩, 牛大伟, 张楠, 杨文, 孔少飞, 叶思杭, 赵雪艳, 韩斌. 华北地区南部城市秋冬季黑碳来源解析——基

- 于改进后的黑碳仪模型[J]. 中国环境科学, 2024, 44(5): 2386-2398.
- [16] Yang, Z., Ma, N., Wang, Q., Li, G., Pan, X., Dong, W., *et al.* (2022) Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North China Plain. *Atmospheric Research*, **276**, Article ID: 106246. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106246>
- [17] 王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛. 成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1561-1572.
- [18] 彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沫, 翟天宇. 重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2024, 45(1): 48-60.
- [19] Lan, Y., Zhou, L., Liu, S., Wan, R., Wang, N., Chen, D., *et al.* (2024) Light Absorption Enhancement of Black Carbon and Its Impact Factors during Winter in a Megacity of the Sichuan Basin, China. *Science of the Total Environment*, **918**, Article ID: 170374. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170374>
- [20] Jeong, M.J., Hwang, S., Yoo, H., Oh, S.M., Jang, J., Lee, Y., *et al.* (2024) Chemical Composition and Source Apportionment of PM_{2.5} in Seoul during 2018-2020. *Atmospheric Pollution Research*, **15**, Article ID: 102077. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102077>
- [21] Lamb, K.D., Perring, A.E., Samset, B., Peterson, D., Davis, S., Anderson, B.E., *et al.* (2018) Estimating Source Region Influences on Black Carbon Abundance, Microphysics, and Radiative Effect Observed over South Korea. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **123**, 13527-13548. <https://doi.org/10.1029/2018jd029257>
- [22] Tsuchiya, N., Ikemori, F., Kawasaki, K., Yamada, R., Hata, M., Furuuchi, M., *et al.* (2025) Linking Combustion-Derived Magnetite and Black Carbon: Insights from Magnetic Characterization of PM_{2.5} in Downwind East Asia. *Environmental Science & Technology*, **59**, 10400-10410. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c14187>
- [23] Uchida, M., Mantoku, K., Kumata, H., Kaneyasu, N., Handa, D., Arakaki, T., *et al.* (2023) Source Apportionment of Black Carbon Aerosols by Isotopes (¹⁴C and ¹³C) and Bayesian Modeling from Two Remote Islands in East Asian Out-flow Region. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **538**, 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2023.02.002>
- [24] Bekbulat, B., Agrawal, P., Allen, R.W., Baum, M., Boldbaatar, B., Clark, L.P., *et al.* (2023) Application of an Ultra-Low-Cost Passive Sampler for Light-Absorbing Carbon in Mongolia. *Sensors*, **23**, Article No. 8977. <https://doi.org/10.3390/s23218977>
- [25] Lee, H., Choi, E., Kim, Y.P., Soyol-Erdene, T., Natsagdorj, A., Wu, Z., *et al.* (2024) Improvement of the Anthropogenic Emission Rate Estimate in Ulaanbaatar, Mongolia, for 2020-21 Winter. *Environmental Pollution*, **349**, Article ID: 123870. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123870>
- [26] Salako, G.O., Hopke, P.K., Cohen, D.D., Begum, B.A., Biswas, S.K., Pandit, G.G., *et al.* (2012) Exploring the Variation between EC and BC in a Variety of Locations. *Aerosol and Air Quality Research*, **12**, 1-7. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.09.0150>
- [27] Kim, M.Y., Lee, S., Bae, G., Park, S.S., Han, K.M., Park, R.S., *et al.* (2012) Distribution and Direct Radiative Forcing of Black Carbon Aerosols over Korean Peninsula. *Atmospheric Environment*, **58**, 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.077>
- [28] Fan, X., Ye, S., Zheng, H., Han, B., Zhang, G., Zheng, Z., *et al.* (2025) Source Apportionment of Black Carbon Using an Advanced Aethalometer Model in a Typical Industrial City of China. *Journal of Environmental Sciences*, **151**, 42-53. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.03.036>
- [29] Dutt, U., Jiang, N., Ross, G. and Gunaratnam, G. (2018) Application of the Aethalometer for Black Carbon Source Analysis. *Air Quality and Climate Change*, **52**, 6-10.