

工业排放对区域大气污染的影响及其源追踪分析

谭静海

北京铝能清新环境技术有限公司 北京 100036

摘要: 本文深入探讨了工业排放对区域大气污染的影响,包括对空气质量、生态系统以及人体健康的危害。同时,详细介绍了多种源追踪分析方法,如受体模型法、同位素示踪法等,阐述了工业排放源追踪分析在制定污染防控策略中的重要性,旨在为有效治理区域大气污染提供科学依据。

关键词: 工业排放; 区域大气污染; 源追踪分析; 空气质量; 污染防控

1 引言

大气污染作为全球严峻的环境挑战,威胁着人类社会的可持续发展。工业在推动进步的同时,排放大量污染物如颗粒物(PM)、二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、挥发性有机物(VOCs)等,这些污染物在大气中发生复杂反应,导致空气质量恶化,引发雾霾、酸雨等问题,严重损害生态系统和人体健康。因此,深入研究工业排放对大气污染的影响,并精准追踪污染源,对于制定有效的防控措施至关重要。这有助于减轻污染,保护环境和公众健康。

2 工业排放对区域大气污染的影响

2.1 对空气质量的影响

工业排放是导致区域空气质量下降的主要原因之一。大量工业废气直接排放到大气中,使得空气中颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等污染物浓度升高。颗粒物尤其是细颗粒物(PM_{2.5})能够在大气中长时间悬浮,降低大气能见度,形成雾霾天气。雾霾天气不仅影响人们的日常生活和出行,还会导致空气质量指数(AQI)超标,使空气质量恶化。二氧化硫和氮氧化物在大气中经过一系列化学反应,可转化为硫酸盐和硝酸盐等二次颗粒物,进一步加重颗粒物污染。此外,氮氧化物还是形成光化学烟雾的重要前体物,光化学烟雾会对人体呼吸道和眼睛造成刺激,影响人体健康。

2.2 对生态系统的影响

工业排放的大气污染物对生态系统造成了多方面的危害。酸雨是工业排放的二氧化硫和氮氧化物在大气中与水汽结合形成的酸性降水。酸雨会改变土壤和水体的酸碱度,影响土壤肥力和水生生物的生存环境。酸性土壤会导致土壤中铝、锰等有害元素溶解度增加,对植物根系造成毒害,影响植物的生长和发育。同时,酸雨还会腐蚀建筑物、文物古迹等,造成巨大的经济损失^[1]。此外,工业排放的挥发性有机物(VOCs)会参与大气光化

学反应,生成臭氧等二次污染物。高浓度的臭氧会对植物叶片造成损伤,影响植物的光合作用和呼吸作用,降低农作物的产量和质量,对生态系统造成破坏。

2.3 对人体健康的影响

工业排放的大气污染物对人体健康的危害是多方面的。颗粒物可进入人体呼吸道,沉积在肺部,引发呼吸道疾病,如哮喘、支气管炎、肺癌等。长期暴露在高浓度颗粒物环境中,还会增加心血管疾病的发病风险。二氧化硫和氮氧化物会刺激人体呼吸道黏膜,引起咳嗽、气喘等症状,对呼吸系统造成损害。臭氧具有强氧化性,会刺激眼睛和呼吸道,导致眼睛红肿、流泪、咽喉疼痛等症状,严重时还会影响肺功能。此外,工业排放中的一些有毒有害物质,如重金属、多环芳烃等,具有致癌、致畸、致突变作用,对人体健康构成潜在威胁。

3 工业排放源追踪分析方法

3.1 受体模型法

受体模型法是一种基于污染物在受体点(如大气环境监测点)的浓度数据,通过数学模型反推污染源贡献的方法。常用的受体模型包括化学质量平衡模型(CMB)、正定矩阵因子分解模型(PMF)等。

3.1.1 化学质量平衡模型(CMB)

CMB模型的基本原理是根据污染源排放物的化学组成特征,将受体点的污染物浓度表示为各污染源贡献的线性组合。其数学表达式为:

$$C_i = \sum_{j=1}^n F_{ij} S_j + E_i$$

其中, C_i 为受体点第 i 种污染物的浓度; F_{ij} 为第 j 种污染源中第 i 种污染物的含量; S_j 为第 j 种污染源的贡献率; E_i 为测量误差。

CMB模型的操作流程主要包括:①污染源采样与分析:收集区域内主要污染源的排放样品,分析其化学组成,建立污染源成分谱数据库。例如,对于燃煤源,需

要分析煤中灰分、硫分以及燃烧后烟气中颗粒物、SO₂、NO_x等污染物的含量；对于工业源，要根据不同工业类型（如钢铁、化工、水泥等）分别采样分析。②受体点采样与分析：在大气环境监测点采集大气样品，分析其中污染物的浓度和化学组成^[2]。③模型计算与结果验证：将污染源成分谱数据和受体点污染物数据输入CMB模型，进行计算求解，得到各污染源的贡献率。同时，需要对计算结果进行验证，常用的验证方法包括相关性分析、残差分析等。

CMB模型的优点是原理简单、计算方便，能够直接给出各污染源的贡献值。然而，该模型需要准确的污染源成分谱数据，且对数据的准确性要求较高。如果污染源成分谱数据不准确或存在误差，将会导致源解析结果出现偏差。

3.1.2 正定矩阵因子分解模型（PMF）

PMF模型是一种基于因子分析的受体模型，它不需要预先知道污染源的成分谱信息，而是通过对受体点污染物浓度数据的分析，自动提取出污染源的因子和贡献率。

PMF模型的基本原理是将受体点污染物浓度矩阵X分解为污染源贡献矩阵G和污染源成分谱矩阵F的乘积，即 $X = GF + E$ ，其中E为误差矩阵。通过最小化目标函数

$$Q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{e_{ij}}{u_{ij}} \right)^2$$

（ e_{ij} 为误差矩阵元素， u_{ij} 为测量不确定度）来求解G和F。

PMF模型的操作流程如下：①数据预处理：对受体点污染物浓度数据进行缺失值处理、异常值剔除等预处理操作，并计算测量不确定度。②模型运行：将预处理后的数据输入PMF模型，设置合适的因子数，运行模型进行计算。③结果解释与验证：根据模型输出的污染源成分谱和贡献率，结合实际情况和专业知对结果进行解释。同时，采用旋转检验、Bootstrap分析等方法对结果进行验证。

与CMB模型相比，PMF模型在源解析过程中更加灵活，能够更好地适应复杂的污染源情况。但PMF模型也存在一定的局限性，例如模型结果的解释需要结合实际情况和专业知，否则可能会出现误判。

3.2 同位素示踪法

同位素示踪法是利用污染物中同位素的组成特征来追踪污染源的方法。不同污染源排放的污染物中同位素的组成存在差异，通过测定受体点污染物中同位素的比值，并与可能的污染源进行对比，可以确定污染物的来源。

3.2.1 硫同位素示踪

硫同位素（ $\delta^{34}\text{S}$ ）在煤炭、石油等化石燃料以及工业生产过程中具有不同的组成特征。其计算公式为：

$$\delta^{34}\text{S}(\text{‰}) = \left[\frac{(S^{34}/S^{32})_{\text{sample}}}{(S^{34}/S^{32})_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 1000$$

其中， $(S^{34}/S^{32})_{\text{sample}}$ 为样品中硫同位素比值， $(S^{34}/S^{32})_{\text{standard}}$ 为标准物质（如维也纳坎顿岛陨石硫，V-CDT）中硫同位素比值。

通过测定大气中SO₂、硫酸盐等含硫污染物中硫同位素的比值，可以判断这些污染物的来源是燃煤、燃油还是其他工业过程。例如，燃煤排放的SO₂中硫同位素比值通常在-10‰+10‰之间，而燃油排放的SO₂中硫同位素比值则相对较高，一般在+5‰+20‰之间。

3.2.2 碳同位素示踪

碳同位素（ $\delta^{13}\text{C}$ ）可用于追踪挥发性有机物（VOCs）等含碳污染物的来源。不同来源的VOCs中碳同位素比值存在差异，如汽车尾气、工业溶剂挥发、生物质燃烧等排放的VOCs具有不同的碳同位素特征。其计算公式与硫同位素类似。通过测定大气中VOCs的碳同位素比值，可以区分不同来源的VOCs对大气污染的贡献。例如，汽车尾气中VOCs的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般在-25‰-30‰之间，而工业溶剂挥发排放的VOCs的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则因溶剂类型不同而有所差异。

同位素示踪法的优点是能够提供较为准确的污染源信息，且不受污染物化学转化过程的影响。但该方法也存在一些局限性，如同位素分析技术要求较高，分析成本相对较高，且对于一些复杂的污染源体系，同位素示踪结果的解释可能存在一定的困难。例如，在某些情况下，不同污染源排放的污染物可能发生混合和反应，导致同位素比值发生变化，增加了结果解释的难度。

3.3 在线监测与源解析技术结合

通过在大气环境监测点和企业排放口安装在线监测设备，实时获取污染物的浓度、成分等数据。结合源解析技术，如受体模型法，对在线监测数据进行分析，可以及时掌握工业排放对区域大气污染的贡献情况。例如，利用在线监测设备获取大气中颗粒物、SO₂、NO_x等污染物的实时浓度数据，同时收集周边工业企业的排放数据^[3]。运用PMF模型等源解析方法，对在线监测数据进行分析，确定不同工业污染源对大气污染的贡献率。这种方法能够快速、准确地追踪工业排放源，为及时采取污染防治措施提供依据。但在线监测设备的运行和维护成本较高，且数据的准确性和可靠性受到设备性能、校准等因素的影响。

3.4 数值模拟与源追踪

在数值模拟中，首先需要构建准确的大气环境模型，包括气象模型和化学传输模型。气象模型用于模拟大气运动和气象条件，如风速、风向、温度、湿度等；化学传输模型用于描述污染物的化学反应和传输过程。常用的气象模型有WRF（WeatherResearchandForecasting Model），化学传输模型有CMAQ（CommunityMultiscaleAirQualityModel）等。然后，收集区域内工业企业的排放数据，建立污染源排放清单。排放清单应包括污染源的位置、排放高度、排放速率、污染物种类和浓度等信息。将污染源排放清单输入到大气环境模型中，运行模型进行模拟计算，得到不同污染源对大气中污染物浓度的贡献。数值模拟方法的优点是能够考虑大气环境的复杂性和污染物的时空变化，提供较为全面的污染源贡献信息。但该方法也存在一些挑战，如模型的准确性依赖于输入数据的准确性和模型的参数设置，且计算过程较为复杂，需要较高的计算资源。

4 工业排放源追踪分析在污染防控中的作用

4.1 为污染防控政策制定提供科学依据

通过工业排放源追踪分析，可以准确确定不同工业污染源对区域大气污染的贡献率。这有助于政府部门制定针对性的污染防控政策，合理分配污染治理资源。例如，对于贡献率较高的污染源，可以加大监管力度，要求企业采取更严格的污染治理措施；对于贡献率较低的污染源，可以适当放宽监管要求，鼓励企业进行技术升级和节能减排。

4.2 评估污染治理措施的效果

在实施污染治理措施后，通过持续的工业排放源追踪分析，可以评估治理措施的效果。如果某污染源的贡献率明显下降，说明治理措施取得了成效；反之，则需

要进一步分析原因，调整治理策略^[4]。这有助于及时发现问题，不断优化污染治理方案，提高污染治理的效率和效果。

4.3 促进企业节能减排和绿色发展

工业排放源追踪分析结果可以向企业反馈，让企业了解自身排放对区域大气污染的影响。这有助于增强企业的环保意识，促使企业采取节能减排措施，加强内部环境管理，推动企业向绿色发展方向转型。例如，企业可以通过改进生产工艺、采用清洁能源、加强废气处理等方式，减少污染物排放，降低对环境的影响。

结语

工业排放严重影响区域大气质量，导致空气质量下降并对生态系统和人体健康造成危害。采用受体模型法、同位素示踪等技术可以有效追踪污染源并确定其贡献率。展望未来，随着科技的进步，监测技术和源解析模型将更加精准高效，尤其是新型在线监测设备和引入人工智能技术的应用，使得实时获取与分析多种污染物数据成为可能。同时，通过结合环境科学、化学等多个学科的知识，以及加强国际合作交流，不仅能够提升对工业排放源的追踪能力，还将有助于全球性大气污染问题的解决，推动区域大气环境持续改善。

参考文献

- [1]康赞.工业排放对大气环境的影响及其应对策略研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(06):63-65.
- [2]田广袤.区域大气污染联防联控机制研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(01):158-159+165.
- [3]陈晓帆.大气污染治理对区域环境空气质量改善的影响研究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(21):160-161+164.
- [4]尚越飞,赵瑞娟,逢薪蓉.关于区域大气环境保护一体化的思考分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(07):164-166.