

环境工程视角下大气颗粒物来源解析与控制策略

周锋利

上海电气集团恒羲光伏科技（南通）有限公司 上海南通 226000

摘要：随着工业化和城市化的快速发展，大气颗粒物污染已成为影响环境质量和公众健康的重要问题。本文从环境工程的角度出发，对大气颗粒物的来源进行了深入解析，并提出了相应的控制策略。首先，概述了大气颗粒物的定义、分类及其对环境和人体健康的影响。其次，详细分析了大气颗粒物的主要来源，包括自然源和人为源，并对各种来源的贡献度进行了评估。然后，探讨了大气颗粒物的传输和转化机制，以及其在大气中的分布特征。在此基础上，提出了控制大气颗粒物污染的策略，包括优化能源结构、加强工业排放控制、改善交通排放管理、提升城市绿化水平和加强区域联防联控等。最后，对实施控制策略的挑战和未来研究方向进行了展望。

关键词：大气颗粒物；来源解析；控制策略；环境工程

引言

大气颗粒物（Particulate Matter, PM）是指悬浮在空气中的固体和液体微粒，其粒径范围从几纳米到几十微米不等。根据粒径大小，大气颗粒物通常被分为总悬浮颗粒物（TSP）、可吸入颗粒物（PM₁₀）和细颗粒物（PM_{2.5}）。大气颗粒物不仅影响大气能见度，造成雾霾天气，而且对人类健康和生态系统产生严重威胁。因此，解析大气颗粒物的来源并制定有效的控制策略，对于改善空气质量、保护公众健康具有重要意义。

一、大气颗粒物来源解析的基本原理与环境工程方法

（一）颗粒物来源构成概述

大气颗粒物指悬浮在空气中的固体和液体微粒，物理化学特性复杂。物理形态上，粒径从亚微米级到数十微米，比表面积不同，影响悬浮时间、传输距离和在人体呼吸系统的沉积部位。化学组成包含无机元素、无机离子、有机化合物和生物成分，其比例和种类因来源、气象条件和传输过程而异。颗粒物来源复杂，主要分人为源和自然源。人为源有工业生产排放（钢铁、水泥、化工等行业烟气含烟尘和工艺粉尘）、交通排放（机动车尾气及磨损颗粒）、燃煤（发电、供热、居民生活用煤产生二氧化硫等）、扬尘（建筑工地、道路、裸露地表扬尘）、生物质燃烧（农作物秸秆焚烧等释放含有机物和黑色碳的颗粒物）。自然源包括风沙扬尘、海盐粒子、火山喷发、自然森林火灾、生物源排放等。各来源排放特征不同，工业排放有固

定排放口，成分稳定含特定重金属；交通排放呈线源或面源分布，以碳粒和氮氧化物为主，有明显时空变化；扬尘受气象和地表状况影响大，以地壳元素为主^[1]。

（二）环境工程视角下的来源解析方法

在环境工程实践中，解析大气颗粒物来源常采用侧重于实际操作和结果应用的方法。定性/半定量方法之一是基于现场调查、物料衡算和排放清单的工程手段。环境工程师实地走访了解区域工业布局等，识别潜在排放源；通过物料衡算，根据生产流程估算污染物量；基于统计资料等，用排放清单估算污染源排放量。这些方法无需复杂模型计算，能快速初步识别主要污染源并估计贡献份额，为后续分析提供基础和方向。另一种定性/半定量方法是基于环境介质化学特征的源汇关系判断。环境工程师采集空气、地表沉降物等样品，分析元素组成、同位素比值、有机组分等化学特征。不同污染源排放的颗粒物有特定“指纹”特征，如燃煤排放富集硫和钾等。通过比较受体点与潜在源的特征“指纹”，可判断污染贡献源。环境工程师根据样品中显著富集的元素或组分反推来源类型。在实际工作中，环境工程师不孤立依赖某一种方法，而是将采样分析的化学特征信息与现场调查等工程经验相结合进行综合判断。该方法不深入讨论复杂模型计算，能更贴近实际地识别主要污染贡献源，为污染控制策略提供技术支持。

二、典型污染源排放特征及其环境影响

（一）主要人为源排放特征分析

工业源是大气颗粒物重要贡献者，不同行业排放特

征有差异。钢铁行业排放颗粒物粒径大,含大量铁及其氧化物、硫化物与未燃尽碳,排放强度与生产规模、工艺水平相关;水泥生产颗粒物以粉尘为主,含硅、钙、铝等元素,粒径分布宽,细颗粒占比高;化工行业排放颗粒物成分复杂,伴有特定工艺相关有机化合物和重金属,粒径和化学组成因产品而异。交通源包括机动车尾气和非道路移动源。机动车尾气主要含元素碳、有机碳及多种金属元素、二次生成颗粒物,粒径集中在PM_{2.5}范围,小于1微米的颗粒物占比高;非道路移动源排放特征与燃料和设备类型有关,柴油设备排放颗粒物富含碳烟和重金属。生活源方面,燃煤排放颗粒物含硫、钾、钙及多种重金属,粒径分布宽;餐饮油烟排放的颗粒物以细颗粒有机气溶胶为主,含脂肪酸、脂肪烃等有机物;散烧产生的颗粒物成分复杂,含大量有机物、元素碳和特定重金属,排放间歇性和不稳定。扬尘源有施工扬尘、道路扬尘和裸地扬尘。施工扬尘以地壳物质为主,粒径分布宽,粗颗粒占比高;道路扬尘由车辆行驶扰动路面堆积物产生,成分与路面材质、过往车辆类型及轮胎磨损有关,以地壳物质为主,细颗粒比例受交通流量和路面清洁程度影响;裸地扬尘是风力卷起地表松散物质,成分与土壤一致,以粗颗粒为主。

这些排放特征影响颗粒物环境行为和健康风险。粒径小的颗粒物能长时间悬浮、远距离传输,增加人群暴露机会;富含重金属和有机污染物的颗粒物毒性强,对人体呼吸和心血管系统健康风险大;排放强度高的源类对局部或区域空气质量影响更显著^[2]。

(二) 自然源与其他源贡献概述

自然源是大气颗粒物重要组成部分。沙尘源来自干旱和半干旱地区,排放量受风力控制,在特定区域或时段可能成主要来源,成分以地壳物质为主,粗颗粒占比高,粒径呈双峰或多峰分布。海盐源在沿海由海浪破碎产生,颗粒物富含氯化钠,粒径以粗颗粒为主,特定气象下对细颗粒物有贡献。生物气溶胶含花粉等,排放与植被、季节和气象有关,在特定区域或季节影响局部空气质量,也影响人体健康。火山喷发、森林火灾等短时间释放大量颗粒物,属偶发性但影响大的来源。此外,二次颗粒物生成、水体蒸发颗粒等次要来源,单独贡献小,但特定条件下对总颗粒物负荷有显著贡献。

(三) 区域/城市尺度下的源贡献格局

不同区域或城市由于产业结构、能源结构、地理气候条件的差异,其颗粒物来源构成往往呈现出不同的

特点。例如,重工业比例高的区域,工业源(特别是钢铁、水泥等行业)的颗粒物排放贡献通常更为突出;以煤炭为主要能源的区域,燃煤排放(包括发电、供热和居民生活)对颗粒物的贡献会相对较大;交通密集的大城市,机动车尾气及其产生的二次颗粒物是重要来源;而干旱、多风地区,扬尘(包括施工、道路和裸地)的贡献则可能更为显著。地理气候条件也起着重要作用,例如盆地或山谷地形不利于污染物扩散,可能导致本地排放源的影响范围扩大;降水丰富的地区,湿沉降作用能够有效清除大气中的颗粒物,可能降低自然源和人为源颗粒物的累积浓度。强调环境工程在区域差异分析中的应用,意味着在制定和实施大气污染防治策略时,必须充分考虑这些区域差异性。环境工程师需要基于详细的源解析结果,识别出特定区域或城市颗粒物污染的“症结”所在,是工业排放为主,还是交通或扬尘问题突出,从而有针对性地采取控制措施,如对特定行业进行技术改造、推广清洁能源、加强道路清扫抑尘、优化交通管理策略等,避免“一刀切”的做法,提高污染防治的效率和效果^[3]。

三、基于环境工程理念的大气颗粒物控制策略

(一) 源头控制策略

从源头减少颗粒物的产生是大气污染防治最根本、最有效的途径。这需要采取一系列具体的工程措施。例如,实施清洁能源替代计划,将传统的燃煤锅炉改造为使用天然气或电力的供热系统,从根本上减少了燃煤过程中产生的大量烟尘和硫氧化物、氮氧化物等前体物。在工业领域,通过改进生产工艺,如采用密闭化生产、物料仓贮、无组织排放收集系统等,可以显著降低生产过程中的颗粒物逸散。提升机动车排放标准,推广使用电动汽车等清洁能源交通工具,能够有效削减移动源排放的尾气颗粒物。对于建筑工地,采用围挡、硬化路面、定期洒水、设置车辆冲洗平台等扬尘管控技术,可以大幅减少施工活动产生的扬尘。此外,在道路两侧和裸露地面进行绿化,利用植被的吸附和阻滞作用,也能起到一定的防尘效果。强调工程技术在源头削减中的关键作用,是因为这些措施直接干预了污染物的产生环节,能够从源头上降低进入大气的颗粒物总量,是实现可持续空气质量改善的基础^[4]。

(二) 过程控制策略

在污染产生和扩散的过程中进行干预,是控制颗粒物排放和降低其环境影响的重要补充手段。工业烟囱排

放是颗粒物的重要来源之一,采用高效除尘技术是控制其排放的关键环节。例如,静电除尘器利用高压电场使颗粒物带电并被吸附到集尘极上;袋式除尘器通过滤袋过滤空气,将颗粒物截留;湿法除尘则利用液体吸收或捕集颗粒物。这些技术能够有效拦截工业排放气流中的大部分颗粒物,使其达标排放。在地面扬尘控制方面,采用机械化清扫代替传统人工清扫,能够更彻底地清除路面尘土,减少车辆行驶扰动产生的扬尘;定时、定量的洒水作业也能有效抑制地面粉尘的飞扬。一些城市规划中提出的通风廊道设计概念,旨在利用城市地形和建筑布局,引导背景清洁空气流入城市中心,加速污染空气的稀释和扩散,虽然实施复杂且效果受多种因素影响,但也体现了在扩散过程中进行干预的思路。说明这些技术如何有效拦截或减少颗粒物的排放和扩散,它们共同作用,能够在污染物进入大气环境或在大气中传播的路径上,对其进行拦截、沉降或稀释,从而降低颗粒物的环境浓度和健康风险。

(三) 末端治理与综合管理

末端治理技术通常是指在污染源排放口或受污染区域末端设置净化装置,以进一步去除颗粒物。例如,室内使用的空气净化器可以通过滤网、静电吸附等方式净化室内空气;而区域空气净化装置(如大型喷雾塔、离子风幕等)虽然在一些特定场合被尝试用于改善局部空气质量,但其在大范围、开放环境下的实际效果和运行成本仍存在争议,作用和局限性较大。因此,更有效、更可持续的策略是基于详细的来源解析结果,实施分区、分类、分时的精细化环境管理。这意味着要根据不同区域的主要污染来源(如工业区、交通密集区、扬尘严重区),采取差异化的控制措施;根据不同污染源的(如固定源、移动源、面源),应用最适合的工程技术和(如)管理手段;并根据气象条件和污染预报,在重污染天气应急响应期间,有针对性地部署工程措施,如加大工业企业的限产停产力度、增加道路清扫和洒水频次、实施严格的机动车限行等。论述环境工程在构建区域联防联控机制中的作用,环境工程师不仅需要研发和应用各项污染控制技术,还需要参与制定区域性的空气质量改善规划,协调不同行政区域在污染控制标准、技术路线选择、应急响应措施等方面的统一与协同,通过

技术共享、信息互通、联防联控平台的搭建,共同应对区域性大气污染问题,提升整个区域的环境治理能力和空气质量水平^[5]。

结语

大气颗粒物来源解析与控制是复杂长期的系统工程,涉及多学科知识和多部门协作。前文阐述来源构成、解析方法、排放特征和控制策略,让我们对大气颗粒物有全面认识。来源解析上,人为源和自然源排放特征与贡献有明显时空差异和复杂性,需持续优化解析方法,提高结果准确性与可靠性以精准识别污染源。控制策略方面,源头控制、过程控制、末端治理与综合管理都不可或缺,源头控制是根本,过程控制是关键,末端治理与综合管理是保障。未来,要加强相关研究,一方面研发更先进高效的解析技术和控制策略,利用大数据、人工智能等提高效率和精准度;另一方面加强国际合作交流,借鉴国外经验技术应对全球性大气污染问题。同时,公众环保意识和参与度很重要,政府、企业和社会应加强宣传教育,鼓励公众参与环保行动,形成全社会共同治理氛围,如此才能改善空气质量,保护公众健康,实现经济与环境良性互动和可持续发展。

参考文献

- [1] 李旭东, 孙宁, 陶冶, 等. 大气颗粒物中类腐殖质的测定, 理化特性及健康影响[J]. 环境化学, 2021, 40(12): 3787-3802. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2020080503.
- [2] 郑子龙, 张凯, 陈义珍, 等. 北京一次混合型重污染过程大气颗粒物元素组分分析[J]. 2021(2014-11): 1219-1226.
- [3] 无[1]. 大气颗粒物来源解析技术及应用[J]. 国际学术动态, 2019, 000(003): P.12-13.
- [4] 牛红亚, 杨旗, 刘召策, 等. 燃煤工业城市大气细颗粒物中水溶性无机离子的季节变化特征及来源解析——以邯郸市为例[J]. 中国环境监测, 2020, 36(1): 8. DOI: CNKI: SUN: IA0B.0.2020-01-005.
- [5] 叶荣民, 王洪涛, 董敏丽, 等. 舟山市大气细颗粒物组分特征及其污染来源解析[J]. 环境工程, 2019, 037(005): 122-128.