

城市化进程中臭氧前体物排放变化对大气环境的影响分析

肖 曲

湖南省生态环境监测中心 湖南 长沙 410014

摘 要: 本文阐述了城市化进程中臭氧前体物排放变化情况。介绍了臭氧前体物定义、分类与来源,分析了其排放的时间、空间变化特征。探讨了排放变化对臭氧生成、其他大气污染物、空气质量及人体健康的影响。最后从优化城市规划、加强污染治理、提升环境管理等方面提出应对策略,以缓解其对大气环境的不良影响。

关键词: 城市化进程; 臭氧前体物; 排放变化; 大气环境; 应对策略

引言: 城市化进程加速,人口与产业高度聚集,臭氧前体物排放随之变化。臭氧前体物通过光化学反应生成臭氧,对大气环境和人体健康有负面影响。其来源包括自然源和人为源,人为源是主要贡献者。研究城市化进程中臭氧前体物排放变化对大气环境的影响,有助于制定科学防控措施,改善空气质量,保障公众健康。

1 臭氧前体物概述

1.1 臭氧前体物定义与分类

臭氧前体物是指在特定环境条件下,通过光化学反应能够促使臭氧生成的一类物质。大气中的臭氧生成是一个复杂的光化学过程,臭氧前体物在太阳紫外线辐射作用下,发生一系列链式反应,最终导致臭氧浓度升高。这类物质本身不一定具有危害,但它们相互作用后产生的臭氧,尤其是近地面高浓度臭氧,会对大气环境和人体健康造成负面影响。主要的臭氧前体物类别,包括挥发性有机物(VOCs)和氮氧化物(NO_x)。挥发性有机物涵盖多种有机化合物,具有较强的挥发性,在常温下易挥发到大气中。常见的挥发性有机物有烷烃、烯烃、芳香烃、醛类、酮类等,如苯、甲苯、二甲苯等芳香烃,广泛存在于涂料、溶剂、胶粘剂等产品中。氮氧化物则以一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO_2)为主,在高温燃烧过程中,空气中的氮气与氧气发生反应生成氮氧化物,是工业生产、交通运输等领域的常见污染物。这两类物质在大气中相遇,在阳光照射下,通过自由基引发的光化学反应,逐步生成臭氧。

1.2 臭氧前体物的来源

臭氧前体物来源主要为自然源与人为源。自然源中,植被是主要排放主体。森林、草地等植被在生长期中,会向大气释放大量挥发性有机物,其中异戊二烯和萜烯类化合物含量较高。这些物质进入大气后,能与氮氧化物发生反应,推动臭氧生成。植被排放受多种因素制约,植物种类不同,排放有机物的种类和数量存在差

异;生长季节、温度、光照等条件也会影响排放情况,夏季高温且光照充足时,植被排放的挥发性有机物显著增多,形成自然源臭氧前体物排放高峰。人为源是城市化进程中臭氧前体物的主要排放源。工业生产领域,石化、化工、涂装等行业大量排放挥发性有机物和氮氧化物^[1]。石化企业在原油加工、油品储运中存在有机物泄漏;化工生产的反应、提纯环节也会产生大量排放。高温燃烧设备则是氮氧化物的主要来源。交通运输方面,机动车尾气排放大量氮氧化物和挥发性有机物,发动机燃烧过程中,高温高压促使氮气与氧气反应生成氮氧化物,未完全燃烧的燃油形成挥发性有机物。此外,生活源排放也不容小觑,建筑装修材料、餐饮油烟、日常清洁剂等,都会释放挥发性有机物,且随着城市化推进,其排放占比不断上升。

2 城市化进程中臭氧前体物排放变化特征

2.1 时间变化特征

城市化进程中,臭氧前体物排放呈现阶段性演变。初期,城市规模小,工业生产处于起步状态,人口与产业聚集度低,排放总量有限。伴随城市化加速,大量人口涌入,工业迅速发展,交通运输规模扩张,排放总量急剧上升。工业领域,石化、化工等行业生产活动频繁,致使挥发性有机物和氮氧化物大量释放;交通方面,机动车保有量快速增长,成为排放重要来源。进入成熟阶段,城市产业结构优化升级,高污染企业外迁或转型,叠加环保技术进步与管理加强,排放总量增速放缓,部分城市甚至出现下降。季节因素显著影响排放情况。夏季高温光照充足,植被生长旺盛,自然源挥发性有机物排放增加;人为活动因空调使用增多、工业生产与交通繁忙,能源消耗上升,人为源排放处于高位。冬季气温降低,植被排放减少,但取暖需求使煤炭等化石燃料燃烧量上升,尤其在以煤取暖地区,氮氧化物排放显著增多。昼夜交替同样改变排放格局。白天工业生产

持续、交通流量大,臭氧前体物排放维持较高水平;夜间多数工业活动减少、交通流量下降,排放随之降低。不过,24小时运行的工业设施与夜间运输活动,仍会产生一定量排放。

2.2 空间变化特征

城市区域与周边区域臭氧前体物排放存在显著差异。城市作为人口与产业集中地,各类生产生活活动密集,臭氧前体物排放强度远高于周边区域。城市中工业企业、机动车、商业活动等集中,大量挥发性有机物和氮氧化物被排放到大气中。而周边区域工业与人口密度较低,主要以农业和自然生态为主,排放源相对较少,自然源排放占比相对较高。城市内部不同功能区排放分布各具特点。工业区集中大量工业企业,石化、化工、涂装等行业生产过程中,从原料储存、加工到产品包装,各个环节都会释放挥发性有机物,高温生产设备还会产生大量氮氧化物,是城市臭氧前体物的主要排放区域。商业区人员流动和商业活动频繁,餐饮油烟排放带来挥发性有机物,交通流量大导致机动车尾气排放的氮氧化物和挥发性有机物也较为突出。居住区排放主要来自居民生活,建筑装修、家用化学品使用、餐饮烹饪等活动产生挥发性有机物排放,虽然单个居民排放强度小,但因人口基数大,总体排放量不可忽视,且早晚交通高峰时段,居住区周边道路机动车排放也会增加区域臭氧前体物浓度。

3 臭氧前体物排放变化对大气环境的影响

3.1 对臭氧生成的影响

臭氧前体物排放变化与臭氧浓度升高存在紧密联系。在太阳紫外线辐射下,挥发性有机物(VOCs)和氮氧化物(NO_x)发生一系列复杂光化学反应^[2]。VOCs提供碳氢化合物, NO_x 中的一氧化氮(NO)与大气中的臭氧(O_3)反应生成二氧化氮(NO_2), NO_2 再经紫外线照射分解出氧原子,氧原子与氧气结合形成臭氧。随着城市化进程中臭氧前体物排放增加,参与光化学反应的物质增多,促使臭氧生成量上升,尤其是在夏季高温、光照充足条件下,反应速率加快,近地面臭氧浓度显著升高。不同前体物对臭氧生成的贡献存在差异。在VOCs与 NO_x 比例较低的环境中, NO_x 浓度是臭氧生成的限制因素,增加 NO_x 排放会促进臭氧生成;而在VOCs浓度相对较高的区域,VOCs成为控制臭氧生成的关键因素,其排放增加会大幅提升臭氧生成量。芳香烃类VOCs反应活性高,能快速参与光化学反应,对臭氧生成贡献较大;烯烃类VOCs则通过与大气中的自由基反应,生成更多的活性中间体,间接促进臭氧生成。 NO_x 中, NO_2 光解是臭氧生成的重要起始步骤,其浓

度变化直接影响臭氧生成速率。

3.2 对其他大气污染物的影响

臭氧前体物排放变化对颗粒物($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10})形成产生重要影响。VOCs经光化学反应生成的二次有机气溶胶,是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要组成部分。VOCs中的芳香烃、烯烃等物质在大气中被氧化,形成醛、酮、酸等含氧有机物,这些物质进一步发生聚合反应,生成低挥发性的有机化合物,最终凝结成细小颗粒物。 NO_x 可转化为硝酸盐,在大气中与铵盐、硫酸盐等结合,形成二次无机颗粒物,增加 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度。此外,臭氧前体物排放变化还会影响颗粒物的粒径分布与化学组成,改变颗粒物的光学和吸湿性等物理化学性质。臭氧前体物与二氧化硫(SO_2)、一氧化碳(CO)等污染物存在相互作用。 SO_2 在大气中被氧化为硫酸,可与VOCs光化学反应产生的有机气溶胶发生非均相反应,改变颗粒物的化学组成与表面性质。 CO 作为一种还原性气体,能与大气中的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)反应,影响自由基的浓度,进而干扰VOCs和 NO_x 的光化学反应进程。这种相互作用使得大气污染物的转化过程更加复杂,污染物之间相互影响、相互促进,共同改变大气中污染物的浓度分布与化学组成。

3.3 对空气质量及人体健康的影响

臭氧及相关污染物浓度升高直接影响空气质量等级。当臭氧、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_x 等污染物浓度超标时,空气质量下降,空气质量指数(AQI)上升,导致空气质量等级从良好变为轻度污染、中度污染甚至重度污染。臭氧作为光化学烟雾的主要成分,会降低大气能见度,影响交通出行;高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 则会导致雾霾天气频发,使天空呈现灰蒙蒙的状态。空气质量恶化不仅影响城市景观,还对生态环境造成破坏,影响植物光合作用与生长发育。高浓度臭氧及污染物对人体健康产生严重危害。臭氧具有强氧化性,进入人体呼吸道后,会刺激和损伤呼吸道黏膜,引发咳嗽、气喘、呼吸困难等症状,长期暴露会导致肺部功能下降,增加患呼吸道疾病的风险。 $\text{PM}_{2.5}$ 粒径小,能深入人体肺部并进入血液循环系统,携带的重金属、有机污染物等有害物质会对心血管系统造成损害,引发心血管疾病,还可能影响神经系统发育,对儿童智力发展产生不良影响。 NO_x 会刺激呼吸道,引发支气管炎、肺炎等疾病,与其他污染物协同作用,加剧对人体健康的危害。

4 应对臭氧前体物排放变化的策略

4.1 优化城市规划与产业布局

合理规划城市功能区是减少臭氧前体物排放影响的基

础。通过科学划定工业区、商业区、居住区,可避免污染源与居住区重叠^[3]。在城市规划中,将高排放的化工、涂装等工业区域设置在城市主导风向的下风向或远离居民区的地带,利用空间隔离减少工业废气对居民生活环境的直接影响。优化交通线路布局,避免主干道穿越人口密集区域,降低交通尾气对周边空气质量的干扰。推动产业升级是从源头控制排放的关键举措。鼓励企业采用清洁生产技术,淘汰高能耗、高污染的落后工艺,通过技术革新降低生产过程中挥发性有机物(VOCs)和氮氧化物(NO_x)的产生。对于无法完成技术升级的高排放企业,引导其向环境容量较大、配套设施完善的工业园区外迁,实现产业集中布局与污染物集中治理。工业园区内建立统一的废气处理设施,提高污染治理效率,减少分散排放造成的治理难度与资源浪费。

4.2 加强污染治理技术应用

工业源治理聚焦高效减排技术推广。针对石化、化工等行业,采用吸附、催化燃烧等技术处理生产过程中排放的VOCs。吸附技术利用活性炭、分子筛等材料对有机废气进行富集,再通过脱附回收实现污染物去除;催化燃烧技术则在催化剂作用下,将VOCs转化为二氧化碳和水,大幅降低排放浓度。对于NO_x排放,选择性催化还原(SCR)和选择性非催化还原(SNCR)技术广泛应用于燃煤电厂、工业锅炉,通过喷入还原剂与NO_x反应,生成无害的氮气和水。交通源减排从车辆与管理两方面发力。推广新能源车辆,以电动汽车、氢燃料电池车替代传统燃油车,从源头上消除尾气排放。优化交通管理系统,通过智能交通信号灯、潮汐车道设置等手段,减少车辆怠速与频繁启停,降低尾气排放。发展公共交通,完善地铁、公交网络,提高公共交通的便捷性与吸引力,鼓励市民绿色出行,减少私家车使用频次。生活源治理重点关注餐饮油烟与装修废气。餐饮行业安装高效油烟净化设备,采用静电吸附、过滤拦截等技术,去除油烟中的油脂、颗粒物和挥发性有机物。对装修行业,推广使用水性涂料、低挥发性胶粘剂等环保材料,减少有机溶剂挥发。建立装修废气监管机制,要求装修工程

在施工过程中采取通风、密封等措施,降低废气扩散对周边环境的影响。

4.3 提升环境管理与公众参与

建立完善的监测体系是精准管控排放的前提。在城市不同区域布设空气质量监测站点,实时监测臭氧、VOCs、NO_x等污染物浓度,利用物联网技术将数据传输至管理平台。通过数据分析,掌握污染物排放的时空变化规律,及时发现高值区域与排放异常情况,为治理决策提供依据。开发污染源在线监测系统,对重点工业企业、交通枢纽等排放源进行实时监控,确保污染治理设施正常运行。加强环保宣传是推动公众参与的重要途径。通过社区宣传、媒体报道等方式,普及臭氧污染成因、危害及防治知识,提高公众对臭氧前体物排放的认知。开展环保教育活动,引导公众从日常生活中践行环保理念,如减少机动车使用、选择环保装修材料、正确处理生活废弃物等。鼓励公众参与环境监督,建立举报反馈机制,对身边的污染行为进行监督举报,形成政府主导、企业施治、公众参与的共治格局,共同应对臭氧前体物排放变化带来的环境挑战。

结束语

城市化进程中臭氧前体物排放变化对大气环境影响复杂,涉及臭氧生成、其他污染物变化及空气质量与人体健康危害。通过优化城市规划与产业布局、加强污染治理技术应用、提升环境管理与公众参与等策略,可有效应对这一挑战。未来需持续关注排放变化,不断优化治理措施,以实现城市大气环境的持续改善。

参考文献

- [1]冯春莉,饶永才,李辉,等.徐州市臭氧污染特征及前体物协同控制策略分析[J].环境科学学报,2023,43(5):325-332.
- [2]康万里.眉山市彭山区臭氧污染特征及其前体物分析[J].资源节约与环保,2024(1):59-62.
- [3]胡娜,李源清,张晓东,等.郑州市高新区夏季臭氧及前体物污染特征和关键前体物溯源研究[J].环境科学学报,2024,44(9):32-41.