

# 基于移动源大数据的城市臭氧前体物精准溯源与管控策略

宋 田

(成都卓远信息技术有限公司, 四川 成都 610041)

**摘 要** 移动源是城市臭氧前体物( $\text{NO}_x$  和  $\text{VOCs}$ ) 的重要排放源。本文以成都市为例, 基于移动源大数据构建排放清单, 结合 OBM 和 PMF 模型实现臭氧前体物精准溯源。结果表明: 成都市移动源  $\text{NO}_x$  排放占全市 66.9%,  $\text{VOCs}$  占 21%; 早晚高峰及二环高架路、三环路等为排放热点; 臭氧生成处于  $\text{VOCs}$  控制区, 移动源  $\text{VOCs}$  敏感性系数超  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 移动源对城区  $\text{VOCs}$  贡献率达 22.4% ~ 36%。据此提出高排放车辆精准识别、差异化限行、非道路机械智慧监管、新能源汽车推广等管控策略, 旨在为城市臭氧污染精准防控提供参考。

**关键词** 移动源大数据; 臭氧前体物; 精准溯源; 成都市

中图分类号: X515

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.23.011

## 0 引言

随着我国  $\text{PM}_{2.5}$  污染治理取得显著成效, 臭氧污染逐步成为影响全国城市环境空气质量的突出问题。根据生态环境部已公开的 2024 年全国环境空气质量阶段性监测结果, 全国 339 个地级及以上城市中, 臭氧浓度超标城市占比约两成, 臭氧污染防控压力持续加大<sup>[1]</sup>。移动源是城市氮氧化物( $\text{NO}_x$ ) 和挥发性有机物( $\text{VOCs}$ ) 的核心排放源之一, 据《中国移动源环境管理年报(2025 年)》公布的近年排放趋势推算, 2026 年全国机动车氮氧化物排放量约 400 万吨量级, 截至 2026 年 6 月底, 成都汽车保有量稳居 600 万辆以上, 位居全国城市首位。庞大的机动车保有量使得移动源排放对当地臭氧污染生成的影响尤为突出。现有研究多集中于单一技术手段, 缺乏移动源大数据与大气化学模型的深度融合。本研究旨在整合移动源大数据与 OBM、PMF 模型, 构建成都市移动源排放清单, 识别排放时空热点, 量化移动源对臭氧生成的贡献, 并提出精准管控策略, 为城市臭氧污染精准治理提供技术参考。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区域概况

成都市位于四川盆地西部, 总面积 14 335 平方千米, 常住人口超过 2 000 万人, 夏季高温高湿, 光照充足, 有利于臭氧生成。2024 年, 成都市臭氧日最大 8 小时平均浓度值第 90 百分位数为  $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 接近国家二

级标准限值( $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 臭氧污染防控压力较大<sup>[2]</sup>。

### 1.2 数据来源

本研究数据主要包括移动源 GPS 轨迹、交通流量监测、机动车遥感监测、非道路移动机械备案登记数据<sup>[3]</sup>, 成都市 34 个国控/省控监测站点 2022—2024 年逐小时  $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{VOCs}$  浓度数据, 欧洲中期天气预报中心(ECMWF) 气象预报数据, 以及车辆保有量数据。

### 1.3 研究方法

1. 移动源排放清单构建。采用排放因子法构建移动源排放清单, 计算公式为:

$$E = \sum (N_i \times VKT_i \times EF_i) \quad (1)$$

式(1)中:  $E$  为污染物排放量;  $N_i$  为  $i$  类车辆保有量;  $VKT_i$  为  $i$  类车辆年均行驶里程;  $EF_i$  为  $i$  类车辆排放因子。排放因子采用本地化 MOVES 模型计算, 考虑温度、湿度、海拔、车速等因素修正。

2. 基于 GPS 轨迹的排放时空分布分析。利用 Python 语言处理 GPS 轨迹数据, 提取各轨迹段的平均速度、行驶里程等参数, 结合 COPERT 模型计算各路段  $\text{NO}_x$  和  $\text{VOCs}$  排放量, 采用 ArcGIS 进行空间插值分析, 识别排放热点区域和时段。

3. OBM 模型模拟。采用基于观测的盒子模型(OBM) 模拟臭氧生成过程。将  $\text{VOCs}$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{CO}$ 、温度、相对湿度等逐时观测数据输入模型, 计算各前体物的相对增量反应性(RIR), 识别臭氧生成控制区类型( $\text{NO}_x$  控制区、 $\text{VOCs}$  控制区或过渡区)。

作者简介: 宋田(1982-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 环境工程。

$$RIR(X) = \frac{[P(O_3-NO)(X) - P(O_3-NO)(X-\Delta X)] / P(O_3-NO)(X)}{(\Delta S(X) / S(X))} \quad (2)$$

4. PMF源解析。采用美国环保署PMF 5.0模型对VOCs进行来源解析。将观测的VOCs物种浓度数据及不确定性输入模型,提取因子并通过源成分谱识别实际排放源类,定量计算移动源对VOCs的贡献率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 成都市移动源排放特征

1. 机动车保有量与排放结构。其中,汽油车占主导地位,柴油车保有量较小但NO<sub>x</sub>排放贡献大,新能源汽车保有量持续增长。根据排放清单测算,成都市移动源NO<sub>x</sub>排放总量为7.9万吨,占全市NO<sub>x</sub>排放总量的66.9%;移动源VOCs排放量为4.1万吨,占全市人为源VOCs排放总量的21%。在主城区,移动源NO<sub>x</sub>排放占比高达93.2%,单位面积平均NO<sub>x</sub>排放强度达94.6吨/km<sup>2</sup>·年;移动源VOCs排放占56%,单位面积平均VOCs排放强度为73.6吨/km<sup>2</sup>·年<sup>[4]</sup>。

2. 排放时空分布特征。基于GPS轨迹数据的分析结果显示,成都市移动源排放呈现显著的时空分布特征。时间分布上,工作日排放呈现明显的双峰特征,早高峰(8:00—10:00)和晚高峰(17:00—19:00)为排放峰值时段,夜间(22:00—次日6:00)排放较低。空间分布上,高排放区域主要集中在二环高架路、三环路、绕城高速、蜀都大道、人民南路等主要交通干道,以及天府广场、春熙路、火车南站等交通枢纽周边。其中,二环高架路部分路段NO<sub>x</sub>排放强度超过全市平均水平的3倍以上。

3. 不同车型排放贡献。从车型来看,重型柴油货车虽然保有量占比不足5%,但NO<sub>x</sub>排放量占移动源NO<sub>x</sub>排放总量的60%以上,是移动源NO<sub>x</sub>减排的重点对象<sup>[5]</sup>。汽油车是VOCs的主要来源,占移动源70%以上。网约车、出租车等营运车辆由于行驶里程长、怠速时间长,其单车排放强度显著高于私家车。

### 2.2 臭氧生成敏感性分析

1. 臭氧生成控制区识别。利用OBM模型对成都市2022年夏季典型臭氧污染过程进行模拟。结果显示,成都市臭氧生成主要处于VOCs控制区, RIR(AHC) > RIR(NO, NO<sub>2</sub>),即削减VOCs对降低臭氧浓度更为有效。同时, RIR(AHC) > RIR(NHC),说明人为源VOCs对臭氧生成的影响大于天然源VOCs。在污染天,成都市臭氧日最大8小时平均浓度对移动源VOCs排放的敏感性系数普遍大于10 μg/m<sup>3</sup>,在臭氧高值区可达20 μg/m<sup>3</sup>以上,表明移动源VOCs减排对控制臭氧污染具有显著效果。

2. 移动源NO<sub>x</sub>的滴定效应。值得注意的是,OBM模

型模拟结果显示,在相对清洁天,成都市臭氧浓度对移动源NO<sub>x</sub>表现出负敏感性(敏感性系数低于-15 μg/m<sup>3</sup>),即移动源NO<sub>x</sub>的滴定作用能够在局地抑制臭氧生成。这提示在控制移动源时,需考虑NO<sub>x</sub>的负敏感性效应,避免单独大幅削减NO<sub>x</sub>导致臭氧浓度反弹。

### 2.3 VOCs来源解析

1. 移动源VOCs贡献率。采用PMF模型对成都市城区夏季VOCs进行来源解析,识别出移动源、餐饮及生物质燃烧源、工业源、溶剂使用源、油气挥发源等主要来源。结果显示,移动源对城区VOCs的贡献率为22.4%~36%,是VOCs的第一或第二大来源。在臭氧超标天,移动源贡献率有所上升,尤其是芳香烃和烯烃类VOCs物种,其对臭氧生成潜势(OFP)的贡献更为突出。

2. 关键活性物种识别。通过OFP计算,识别出对臭氧生成贡献最大的VOCs物种为烯烃和芳香烃。其中,移动源排放的甲苯、二甲苯、乙烯、丙烯等物种OFP值较高,是臭氧生成的关键前体物。移动源排放的VOCs活性水平在1.6 s<sup>-1</sup>~10.5 s<sup>-1</sup>之间,对臭氧生成的贡献不可忽视。

### 2.4 非道路移动机械排放特征

成都市非道路移动机械保有量居全国省会城市第一,截至2021年4月底备案登记达64 783台。非道路移动机械以柴油为燃料,排放物以NO<sub>x</sub>和颗粒物为主,一台机械的排污量相当于50辆~80辆一般机动车。高排放非道路移动机械(国二及以下排放标准)占比仍较高,是移动源NO<sub>x</sub>排放的重要贡献者。

## 3 城市臭氧前体物精准管控策略

### 3.1 高排放车辆精准识别与管控

1. 建立高排放车辆动态数据库。整合遥感监测、路检路查、定期检验数据,建设高排放车辆动态识别系统,以大数据技术对车辆排放状况做实时分析,识别国三及以下柴油货车、排放超标车辆等高排放车型<sup>[6]</sup>,对高排放车辆重点监管,限期维修治理,逾期不维修或维修后仍不达标的车辆淘汰。

2. 实施差异化限行政策。对高排放车辆实行分时段、分区域差异化限行措施,在臭氧污染高发季节(5月—9月)及重点时段(10:00—18:00),对国三及以下柴油货车、老旧燃气车实施绕城高速以内区域限行,在重点路段(二环高架路、三环路等高排放区域)高峰时段严格限行重型货车,降低NO<sub>x</sub>和VOCs排放峰值。

### 3.2 重点路段交通优化

1. 拥堵路段治理。二环高架路、三环路是排放热点路段,优化交通信号配时提高道路通行效率,减少车辆怠速、低速行驶时间,是很自然、合理的措施。

把平均车速提高到 40 km/h ~ 60 km/h 能降低单位里程排放量。

2. 绿色物流通道建设。优化货运车辆通行路线, 引导过境柴油货车绕行城区, 减少穿城运输。在重点管控区域推广使用国六排放标准或新能源运渣车、商混车, 燃油运渣车在工地等待期间须熄火等候, 杜绝怠速排放。

### 3.3 非道路移动机械智慧监管

1. 全生命周期管理。完善非道路移动机械备案登记制度, 实现“一机一码”身份管理。建立非道路移动机械进出场管理系统, 通过“进出码”实现施工现场机械动态监管。划定并动态调整高排放非道路移动机械禁止使用区, 将禁用标准由国一及以下提升至国二及以下, 并逐步扩大至国三以下。

2. 实时监控与执法。在非道路移动机械上安装精准定位系统和实时排放监控装置, 利用电子标签、电子围栏等技术手段对禁止区域进行实时监控。加大监督抽测力度, 对排放不合格机械依法处罚, 每台次处 5 000 元罚款, 并责令退出施工现场。

### 3.4 新能源汽车推广与燃油车替代

1. 加速新能源汽车普及。加大新能源汽车推广力度, 有计划、有系统地完善充电基础设施建设, 提高新能源公交车、出租车、网约车比例, 推进公务用车、物流配送车电动化, 落实路权优先、停车优惠等激励政策。

2. 老旧车辆淘汰更新。围绕老旧柴油货车及燃气车淘汰更新的目标制定周密、有层次的实施计划, 系统、有序地淘汰国三及以下排放标准柴油货车及采用稀薄燃烧技术或“油改气”的老旧燃气车辆, 同时以财政补贴、以旧换新等手段鼓励车主提前报废高排放车辆, 购买新能源汽车或国六标准车辆。

### 3.5 油气回收与 VOCs 管控

1. 强化油气回收监管。以全面落实加油站行业新国标排放要求为契机, 推进加油站油气三次回收改造, 鼓励夜间卸油, 定期监测回收效率, 引导加油站开展夜间加油降价促销活动, 减少白天高温时段 VOCs 排放。

2. 移动源 VOCs 全过程控制。加强机动车燃油蒸发排放控制, 推广使用低蒸气压汽油。强化在用车 I/M 制度, 确保尾气净化装置正常运行。对营运车辆实施更严格的排放标准和维护要求, 减少 VOCs 泄漏和排放。

### 3.6 区域联防联控与智能决策

1. 建立区域协同管控机制。臭氧污染具有区域性特征, 需加强与德阳、绵阳、眉山、资阳等周边城市的联防联控。建立移动源排放数据共享平台, 统一高排放车辆限行标准, 协同开展跨区域联合执法, 避免污染转移。

2. 大数据智能决策支持。建设移动源排放监管大数据平台, 把车辆轨迹、排放监测、空气质量、气象诸种数据有机地整合起来, 由此自然、合理地开展臭氧污染预测预警及管控措施智能推荐, 用机器学习方法建立臭氧浓度预测模型, 提前 48 小时 ~ 72 小时发布预警。

## 4 结论

1. 成都市 NO<sub>x</sub> 排放量的 66.9% 来自移动源, VOCs 排放量的 21% 也是移动源排放的, 且主城区移动源排放占比更高。移动源排放有明确的时空分布特征。

2. 成都市臭氧生成处于 VOCs 控制区, 移动源 VOCs 的敏感性系数超过 10 μg/m<sup>3</sup>, 因此削减移动源 VOCs 对控制臭氧污染十分有效, 但清洁天 NO<sub>x</sub> 有负敏感性, 要加以注意。

3. 移动源对城区 VOCs 的贡献率为 22.4% ~ 36%, 而移动源排放的芳香烃、烯烃类物种是臭氧生成的重要活性前体物。

4. 建立高排放车辆精准识别、差异化限行、非道路机械智慧监管、新能源汽车推广、区域联防联控诸种措施结合的差异化管控体系。

5. 研究的不足主要在于 GPS 轨迹数据对私家车覆盖有限、排放因子本地化程度有待提升、管控效果缺乏定量评估。未来需加强多源数据融合与管控措施情景模拟, 优化策略组合并开展效果评估。

## 参考文献:

- [1] 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 等. 2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性 [J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5736-5746.
- [2] 成都市环境保护科学研究院. 成都市臭氧前体物协同控制与 VOCs 减排 [R]. 成都: 成都市环境保护科学研究院, 2020.
- [3] 生态环境部. 中国移动源环境管理年报 (2025 年) [R/OL]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/dqhbh/ydyhjgl/202512/t20251205\\_1137228.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/dqhbh/ydyhjgl/202512/t20251205_1137228.shtml). (2025-12-05) [2026-05-16].
- [4] 成都市生态环境局. 2024 年成都市环境空气质量状况 [EB/OL]. [https://sthj.chengdu.gov.cn/cdhlbj/c110802/2025-03/11/content\\_4023aff3d6ab4870ac1ecbecb7c359dc.shtml](https://sthj.chengdu.gov.cn/cdhlbj/c110802/2025-03/11/content_4023aff3d6ab4870ac1ecbecb7c359dc.shtml). (2025-02-10) [2026-05-16].
- [5] 环境保护部. 关于征求《环境空气臭氧污染来源解析技术指南 (试行) (征求意见稿)》意见的函: 环办科技函 [2018] 594 号 [S/OL]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/201807/t20180706\\_629781.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/201807/t20180706_629781.html). (2018-07-03) [2026-05-16].
- [6] 四川省人民政府. 四川省机动车和非道路移动机械排气污染防治办法 (四川省人民政府令 第 346 号) [S/OL]. <https://www.sc.gov.cn/10462/c108923/2021/1/7/0a49180d0ced482ca224b5a302110db7.shtml>. (2021-01-07) [2026-05-16].