宋镇泽，牛大伟，薛爽，等. 漯河市城区秋季VOCs污染特征及来源解析[J]. 环境科学与技术，2024，47(S1)：86-94. Song Zhenze，Niu Dawei，Xue Shuang，et al. Analysis of pollution characteristics and sources of VOCs in autumn in urban area of Luohe City[J]. Environmental Science & Technology，2024，47(S1)：86-94.

漯河市城区秋季VOCs污染特征及来源解析

宋镇泽[1,2]， 牛大伟[3]， 薛爽[4]， 刘盈盈[2*]，
耿春梅[2]， 王晓丽[1*]， 杨文[2]

（1.天津理工大学环境科学与安全工程学院，天津 300384；
2.中国环境科学研究院，环境基准与风险评估国家重点实验室，北京 100012；
3.漯河市环境监控中心，河南 漯河 462000；
4.北京艾若尔环保科技有限公司，北京 102200）

摘 要：该文利用2021年11月5-11日漯河市3个市区点位环境挥发性有机物(VOCs)手工采样数据，开展VOCs污染特征和来源解析，识别臭氧生成潜势(OFP)和二次有机气溶胶生成潜势（SOAFP）的关键物种及污染源。结果表明，监测期间漯河市TVOC平均体积分数为51×10^{-9}，以OVOCs(36.1%)和烷烃(30.7%)贡献为主，空间变化为三五一五工厂>水利局>卫健委。OFP均值为348.8 μg/m³，各点位贡献前10物种以芳香烃和OVOCs为主，移动源是贡献最高的排放源；SOAFP均值为1.8 μg/m³，各点位均为芳香烃贡献最大，移动源是主要贡献源类。正定矩阵因子模型解析结果显示，移动源（25.4%）、油气挥发源（18.9%）、溶剂使用源（18.6%）、工业排放源（17.5%）和燃烧源（15.1%）是市区大气VOCs主要排放源。

关键词：VOCs； OFP； 二次有机气溶胶； 来源解析； 漯河

中图分类号：X511 **文献标志码**：A **doi**：10.19672/j.cnki.1003-6504.0840.23.338 **文章编号**：1003-6504(2024)S1-0086-09

Analysis of Pollution Characteristics and Sources of VOCs in Autumn in Urban Area of Luohe City

SONG Zhenze[1,2]， NIU Dawei[3]， XUE Shuang[4]， LIU Yingying[2*]，
GENG Chunmei[2]， WANG Xiaoli[1*]， YANG Wen[2]

（1. College of Environmental Science & Safety Engineering，Tianjin University of Technology，Tianjin 300384，China；
2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment，Chinese Research Academy of Environmental Sciences，Beijing 100012，China；
3. Luohe Environmental Monitoring Center，Luohe 462000，China；
4. Beijing Airuoer Environmental Protection Technology Co.，Ltd.，Beijing 102200，China）

Abstract：Using the manual sampling component data of environmental VOCs at three urban points in Luohe City from November 5 to 11，2021，analysis of VOCs pollution characteristics and sources will be carried out to identify key species and pollution sources of ozone generation potential (OFP) and secondary organic aerosol generation potential (SOAFP). The results showed that the average volume fraction of TVOC in Luohe was 51×10^{-9} during the monitoring period，with OVOCs (36.1%) and alkanes (30.7%) contributing the majority，and the spatial variation is 3515 Factory>Water Resources Bureau>Health Commission. The average OFP was 348.8 μg/m³，the top ten species were aromatic hydrocarbons and OVOCs，and the mobile source was the highest emission source. The mean value of SOAFP was 1.8 μg/m³，among which aromatic hydrocarbon contributed the most at each site，and mobile source was the main contributor. The analytical results of positive definite matrix factor model showed that mobile source (25.4%)，oil and gas volatile source (18.9%)，solvent use source (18.6%)，industrial emission source (17.5%) and combustion source (15.1%) were the main emission sources of urban atmospheric VOCs.

Key words：VOCs；OFP；secondary organic aerosols；source apportionment；Luohe

《环境科学与技术》编辑部：（网址）http://fjks.chinajournal.net.cn（电话）027-87643502（电子信箱）hjkxyjs@vip.126.com
收稿日期：2023-04-23；修回2023-07-10
基金项目：漯河市细颗粒物和臭氧污染协同防控综合解决方案（DQGG202137）
作者简介：宋镇泽（1999-），男，硕士，研究方向为大气挥发性有机物监测及来源分析，（电子信箱）1812213074@qq.com；*通讯作者，（电子信箱）liuyy@craes.org.cn；tjutwxl@163.com。

近年来我国大气污染防治成效显著，全国74个重点城市年均细颗粒物（$PM_{2.5}$）浓度下降了47.2%，而臭氧污染却呈现快速上升趋势[1]，$PM_{2.5}$和臭氧(O_3)复合污染问题不断凸显[2]，二者协同防控成为大气污染防治的关键。挥发性有机物（Volatile organic compounds，VOCs）是O_3和二次有机气溶胶(SOA)的关键前体物之一，不仅影响对流层的氧化能力，造成生态环境系统的破坏，还会威胁到人体健康[3,4]，大气中VOCs的研究是当前$PM_{2.5}$和O_3复合污染协同控制必不可少的组成部分。

国内学者在京津冀[5-8]、长三角[9-11]、珠三角[8,12,13]、成渝地区[14,15]、华北地区[16,17]等城市开展过VOCs污染特征及来源解析有关的研究。孙雪松等[18]研究发现北京市城区秋季O_3污染日VOCs体积分数明显高于清洁日，OVOCs和芳香烃对OFP贡献较清洁日升高，机动车排放对城区秋季VOCs贡献显著。张敬巧等[19]发现溶剂使用及挥发源和机动车源是廊坊市经济开发区秋季VOCs主要排放源。王泰等[20]研究了南京北郊工业乡村混合区秋季VOCs垂直分布特征，发现VOCs体积分数随高度升高而降低，均以烷烃占比为主。林旭等[21]对秋季杭州不同功能区VOCs特征进行了研究，发现工业区VOCs浓度高于居民区，夜间芳香烃浓度在工业区明显高于居民区；不同功能区中对OFP贡献最大的均为芳香烃。陈雪等[22]研究了深圳市秋季VOCs空间分布特征，发现VOCs排放集中在西北部工业区，溶剂排放等工业源对VOCs影响显著。河南省有多个城市作为“2+26”城市群传输通道城市，开展过VOCs和臭氧污染相关研究[23-27]，但主要集中在省会郑州市。齐一谨等[28]研究了郑州秋季臭氧污染期间VOCs污染特征及来源，发现烯烃和芳香烃对臭氧生成潜势（OFP）贡献最大，机动车尾气（汽油车和柴油车）排放源、溶剂涂料使用源和燃烧源对VOCs排放贡献较大。

漯河市位于河南省中南部，该地区以食品、建筑材料、机械、医药制造等轻工业为主，是国内重要的冷链物流基地。2020年漯河市有9个月的空气质量排名在全省较靠后，首要污染物以$PM_{2.5}$、PM_{10}和O_3为主，空气污染较为严重。当前关于漯河市市区VOCs污染特征及来源解析的研究鲜见报道，为此，本研究通过对漯河市秋冬季节交替期间（2021年11月5-11日）3个市区点位的VOCs进行采样分析，研究该城市市区VOCs污染特征及来源，以期为细颗粒物和O_3污染协同控制提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　采样地点及时间

该研究选择漯河市建成区内3个典型点位（三五一五工厂、卫健委、水利局）进行环境VOCs手工采样，3个点位均位于漯河市区，可代表漯河市市区VOCs排放水平。三五一五工厂点位(114.05°E，33.57°N)位于召陵区，周边主要是商业区和居民区，临近交通干道，南方3 km有工业园区和大型制鞋厂。水利局点位(114.01°E，33.58°N)位于郾城区，周边分布着机关单位和居民楼，人口密集，东南方向有多个公园，北邻交通主干道。卫健委点位(114.09°E，33.59°N)位于召陵区，周边主要是居民区、学校、机关单位和医院，东南方向5 km有工业园区。具体的采样位置见图1。

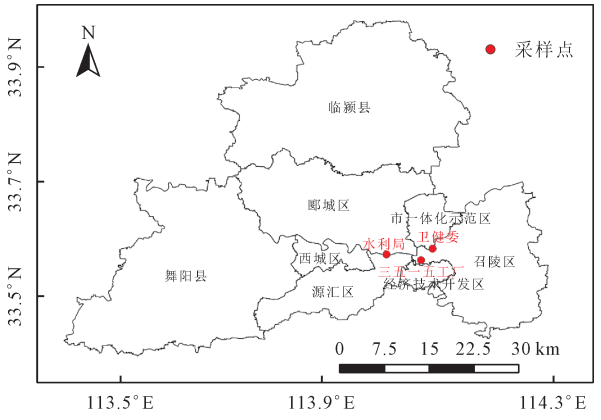


图1 漯河市秋季环境VOCs采样点位图

采样时段为2021年11月5-11日，每日08:00、12:00、18:00在3个点位同步开展VOCs手工气袋采样，每个时段采集平行样。三五一五工厂、卫健委、水利局有效样品分别是40、40和25个，共采集VOCs有效样品105个。该研究采样所用气袋均为全新气袋，采样时安装了颗粒物过滤头，采样前先用采样点位环境空气清洗气袋3次。样品采集完成后避光保存，并在24 h以内分析完毕。

该研究所用常规污染物与气象数据来源于中国环境监测总站“全国城市空气质量实时发布平台”(http://106.37.208.233:20035)。

1.2　样品分析

采用美国赛默飞公司的Thermo 5800GM GC-MS气质联用分析仪进行样品分析，将采样样品空气通入粉尘过滤器进行初步处理，在除湿模块去除样品中的水分，干燥后在富集管中富集，然后迅速加热脱附，与含有标气的载气共同进入检测分析模块，在色谱分析仪（GC）中利用VOCs组分物理性质不同进行分离，最后分别进入火焰离子化检测器（FID）和质谱（MS）检测[29,30]，共检测出烷烃类29种，烯烃类11种，炔烃类(乙炔)1种，卤代烃类35种，芳香烃类17种，OVOCs类21种，共计114种VOCs物质。

为保证分析数据的准确性，分析前对GC-MS（气质联用）仪器采用6个浓度梯度（0.5×10^{-9}、2×10^{-9}、4×10^{-9}、6×10^{-9}、8×10^{-9}和10×10^{-9}（体积浓度，下同））的标准气体进行标定。标准气体为美国Linde标气116混合标气。根据校准后得到的峰面积和标气浓度作出线性回归曲线，得出校准曲线方程，各监测物种的标准曲线的相关系数R^2均在0.991~0.999之间。分析完毕后，对物质的谱图进行手动校准，剔除基线严重漂移的谱图。同时，每隔3 d对仪器进行单点质控，单点质控采用浓度为2×10^{-9}标准气体，测定完毕后，计算测定浓度与已知标准气体浓度的相对误差，各组分经氢火焰离子化检测器的相对误差均≤10%，质谱检测相对误差均≤15%。

1.3 化学反应活性

VOCs的变化对对流层臭氧的光化学生成有重大影响，由于在光化学反应性上有所不同，不同VOCs物种对臭氧的生成贡献也不同。为了确定VOCs的臭氧生成能力，常使用最大增量反应活性系数法（MIR系数法）[31]来衡量各类VOCs的反应活性，其计算采用公式（1）：

$$OFP_i=[VOCs]_i\times MIR_i \quad (1)$$

式中，OFP_i为VOCs物种i的臭氧生成潜势；$[VOCs]_i$为VOCs物种i的浓度；MIR_i为VOCs物种i的最大增量反应系数，其数值参考文献[31,32]。

VOCs是二次有机气溶胶（SOA）的重要前体物，常采用Grosjean提出的气溶胶生成系数（FAC）法来计算SOA生成潜势（secondary organic aerosols formation potentials，SOAFP）[33,34]。

$$SOAFP=VOCs_t/(1-F_{VOCr})\times FAC \quad (2)$$

式中，SOAFP是SOA的生成潜势，μg/m^3；$VOCs_t$为环境中VOCs组分浓度，μg/m^3；F_{VOCr}为VOCs物种参与反应的质量分数，%；FAC为SOA生成系数，%。F_{VOCr}和FAC参考文献[33-36]。

1.4 PMF受体模型

该研究采用美国环境保护署（EPA）的PMF5.0（positive matrix factorization）软件用于分析VOCs来源。PMF是由芬兰的Paatero等[37]在1993年提出的多元统计分析方法，已被广泛应用于国内外各城市的VOCs来源解析[24,38-40]，其计算公式（3）如下：

$$Q=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left[\frac{x_{ij}-\sum_{k=1}^{p}g_{ij}f_{ij}}{u_{ij}}\right] \quad (3)$$

式中，x_{ij}为在i样品中测得的j物种的浓度；g_{ij}为k源对i样品的物种贡献；f_{ij}为来自k源的j物种的比例；p为源的总数；u_{ij}为样品的不确定性偏差。

不确定度UNC的计算为公式（4）。

$$UNC=\begin{cases}\sqrt{(E\times x_{ij})^2+(0.5\times MDL)^2}, & (x_{ij}>MDL)\\ (5/6)\,MDL, & (x_{ij}\le MDL)\end{cases} \quad (4)$$

式中，E为误差系数，MDL为物质的方法检出限，x_{ij}为在i样品中测得的j物种的浓度。

2 结果与讨论

2.1 观测期间常规污染物及气象条件分析

观测期间平均相对湿度48%（21%~93%），平均温度12.2 ℃，平均风速1.2 m/s，扩散条件较差，在这种温湿度差异较为明显，静稳的气象条件下观测到的VOCs能够有效地表征该地区的污染情况[41]。

图2是各点位大气污染物小时浓度变化，3个点位各项污染物的小时变化趋势较为一致，只是在浓度数值上存在差异。5日和6日各点位空气质量等级为轻度污染，三五一五工厂和水利局点位小时$PM_{2.5}$浓度高于《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）日均二级限值（75 μg/m^3），日均$PM_{2.5}$范围分别为47.8~73.8和51.8~

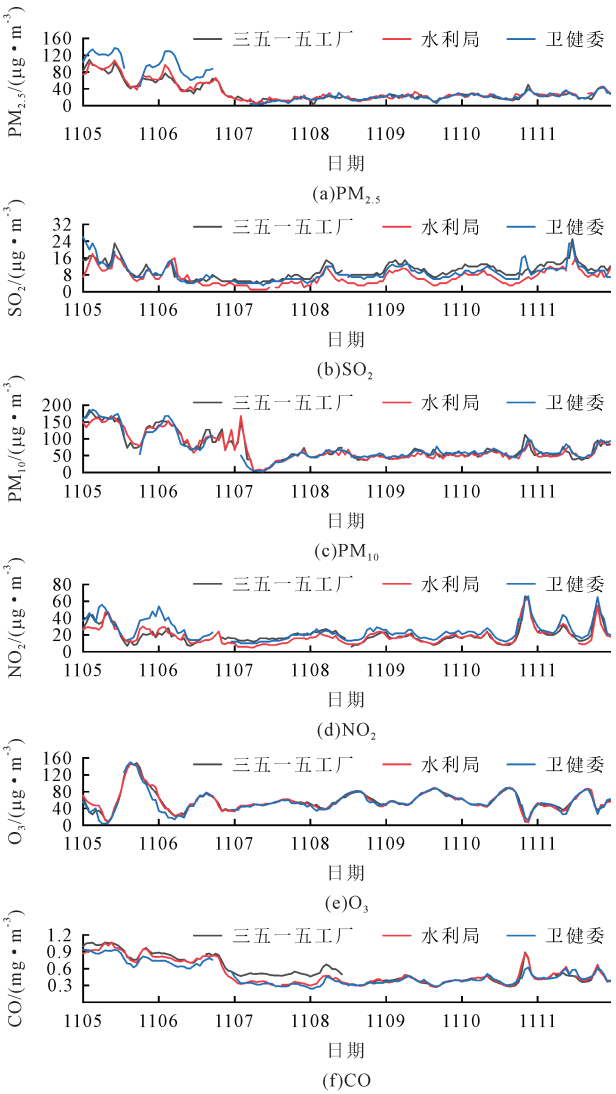


图2 漯河市区观测期间常规污染物时间序列

76.0 μg/m³，2个点位的颗粒物浓度水平差异较小；卫健委点位的$PM_{2.5}$浓度明显高于其他2个点，日均$PM_{2.5}$浓度在90.1~110.1 μg/m³之间。7−11日3点位的环境空气质量处于优良水平。

2.2　VOCs污染特征

观测期间，漯河市TVOC平均浓度为51×10⁻⁹(体积分数，下同)，各组分平均贡献为OVOC(36.1%)>烷烃(30.7%)>芳香烃(10.6%)>卤代烃(9.23%)>烯烃(9.18%)>炔烃(4.0%)。其中三五一五工厂的TVOC浓度最高(54.9×10⁻⁹)，水利局和卫健委的TVOC浓度水平相当，平均浓度分别为48.7×10⁻⁹和48.3×10⁻⁹。

漯河市不同点位VOCs浓度及各组分百分占比时间变化见图3，OVOC和烷烃在不同时段均为优势组分，占比分别超过32.0%和30.4%。芳香烃、烯烃和卤代烃的时空变化相对稳定，处于中等水平，炔烃占比最低(3.3%~4.5%)。三五一五工厂点位的OVOC明显高于其他2个点位，采样期间主导风向为南风，推测OVOC来自南侧的工厂；水利局和卫健委点位烯烃浓度要略高于三五一五工厂，这2个点位临近多条交通干道，更高浓度的烯烃可能来自机动车排放。从时间变化来看，3个点位TVOC浓度最高均在18:00，12:00时VOCs浓度最低，表现出典型早晚高、日间低的排放特征。

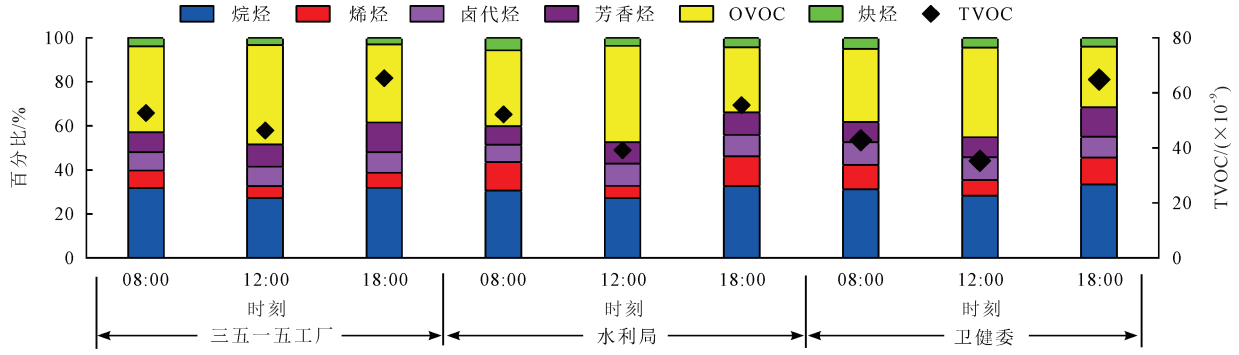


图3 不同时间/点位TVOC浓度及VOCs组分占比变化

观测期间漯河市区大气中TVOC浓度水平高于北京[5]、武汉[42]、郑州[24]和上海[43]，低于杭州[44]。漯河VOCs组分占比与北京、武汉、郑州、杭州和上海具有相似性，均以OVOCs和烷烃类VOCs为主。

2.3　VOCs化学活性分析

观测期间，漯河市臭氧生成潜势(OFP)均值为348.8 μg/m³，3个点位的VOCs臭氧生成潜势(OFP)平均浓度为三五一五工厂(373.5 μg/m³)>卫健委(336.4 μg/m³)>水利局(331.9 μg/m³)。如图4~5所示，3个点位的OFP贡献均以芳香烃、OVOC和烯烃类物质为主，烷烃类物质的贡献较低，卤代烃和炔烃的贡献极低。其中三五一五工厂的OVOC贡献要明显高于其他2个点位，而烯烃贡献则呈现相反的情况，这主要是由于三五一五工厂点位高浓度的OVOC和相对较低烯烃浓度导致的，推测与该点位附近的工业区有关。水利局点位和卫健委点位的OFP均值还是各类组分贡献基本一致，说明这2个点位具有较高的一致性。

该研究中共计算了28种物质(包含苯和异戊二烯)的SOAFP，其中芳香烃类16种，烷烃类11种，烯烃类1种(异戊二烯)，漯河市SOAFP均值为1.8 μg/m³，芳香烃的贡献最大(78.9%)。3个点位的平均SOAFP为三五一五工厂(2.1 μg/m³)>卫健委>(1.7 μg/m³)>水利局(1.6 μg/m³)，芳香烃类物质对SOA生成的贡献最大(76.3%~82.3%)。3个点位SOAFP贡献前10物种基本一致(图5)，除水利局外，三五一五工厂和卫健委点位均是甲苯贡献最大。因此，为有效控制当地SOA生成，应重点关注芳香烃物质的排放。

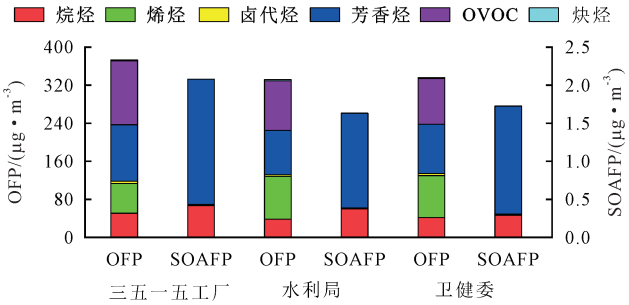


图4 不同点位VOCs各组分对OFP和SOAFP贡献图

2.4　VOCs来源解析

该研究对114种VOCs组分进行筛选，综合分析VOCs浓度水平、信噪比(S/N)、常见示踪物等因素，共筛选出82个物种参与PMF模型运算。经过4~8因子模拟，最终确定了6个因子的解析结果，R^2为0.8，说明拟合效果较好。各因子中VOCs体积分数和对各因子的贡献率如图6所示。

因子1中，含量较高的物种以氟利昂类(113、12、11)、氯乙烷、四氯化碳、1,1,2−三氯乙烷等物种为主，这些物种在大气中具有较低反应活性，但具有较长

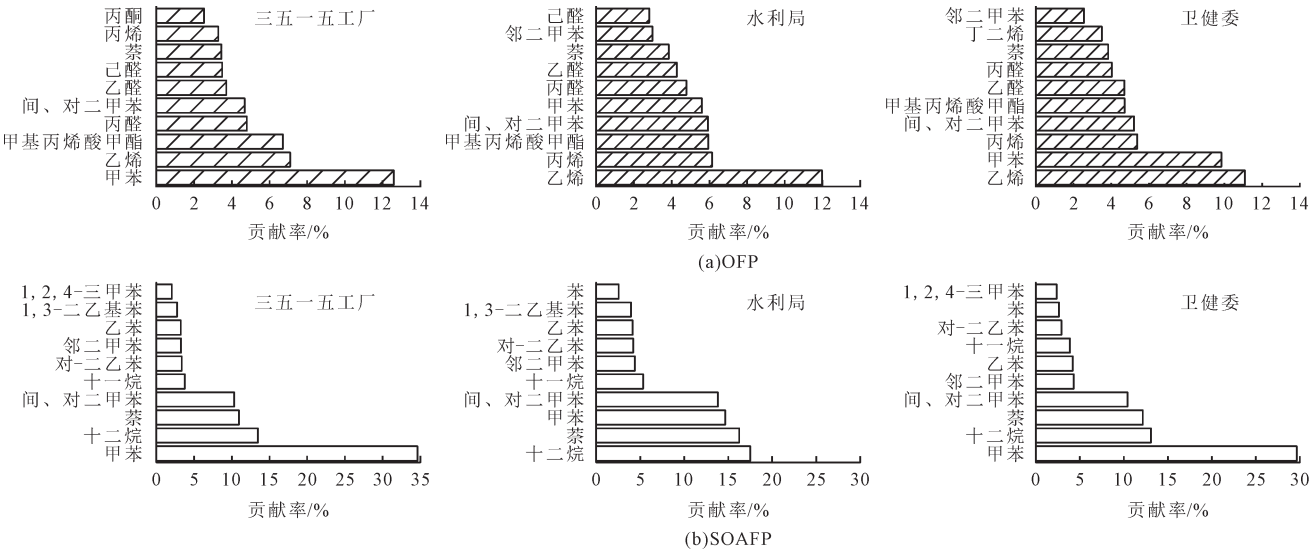


图5 不同点位OFP、SOAFP贡献前10物种

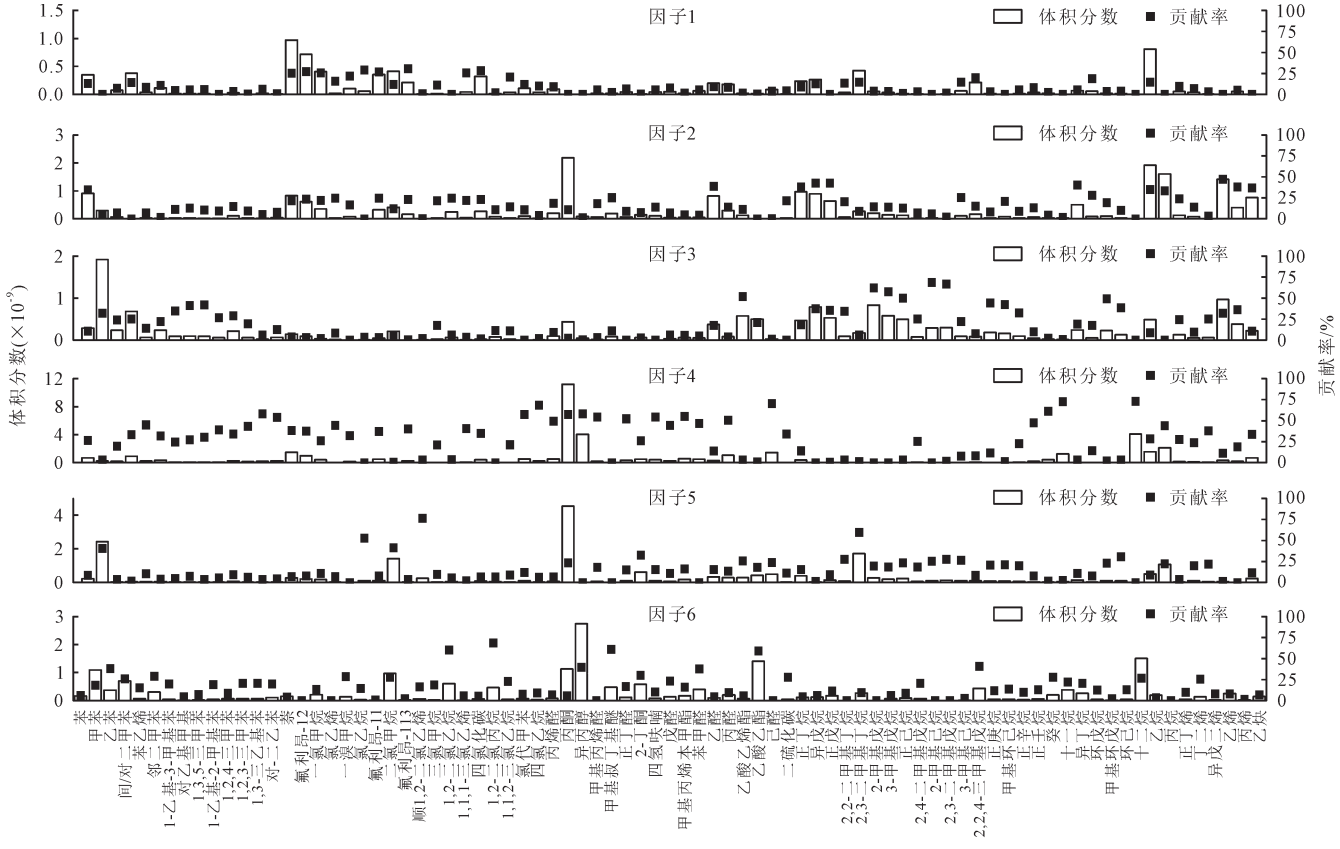


图6 各因子中VOCs体积分数和对各因子的贡献率

寿命[45],通常来自传输。因此,因子1被识别为区域背景源[23]。

因子2中主要物种为乙烯、乙醛、乙炔、丙烯、乙烷、苯等,甲苯/苯小于0.6,符合文献中煤和生物质燃烧的定性范围[46]。有文献研究认为,煤和生物质燃烧都可以产生大量的乙炔[16,42],初步判断该因子为燃烧源。

因子3中,含量较高的物种以2-甲基己烷、2,3-二甲基戊烷、2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、正己烷、甲基环戊烷、正庚烷、甲基环己烷等C_6~C_8烷烃等为主,汽油蒸发主要排放2-甲基戊烷和3-甲基戊烷等C_4~C_5烷烃[7],柴油挥发排放较重的烷烃,尤其是正庚烷和甲基环己烷[47],因此判断该因子为油气挥发源[24]。

因子4中乙烷、丙烷、十一烷、十二烷、癸烷、正壬烷、乙炔和丙酮对该因子的贡献高于对其他因子的贡

献，此外，苯系物也有一定贡献，乙烷、丙烷和丙酮都是机动车尾气排放的示踪物[48]，高碳烷烃（十一烷、十二烷、癸烷、正壬烷）是柴油车尾气排放的特征物种[47,49-51]，故判断该因子为移动源。

因子5的主要物种为2,3-二甲基丁烷、氯乙烷、二氯甲烷、甲苯等，2,3-二甲基丁烷是人造板制造行业制胶工艺有组织和无组织排放的主要物种之一[52]，2,3-二甲基丁烷、二氯甲烷和甲苯也是医药制药行业有组织排放的特征物种[52]，二氯甲烷是典型胶合板制造涂胶工艺的高排放的特征物种[53]，综合判断该因子为工艺过程源。

因子6的主要物种为1,2-二氯乙烷、1,2-二氯丙烷、乙酸乙酯等，酯和卤碳用作工业溶剂或胶粘剂[23,54,55]存在于脱漆剂、清漆和家具中，该因子与工业溶剂使用有关，故判断该因子为溶剂使用源。

综上，该研究利用PMF模型解析出6类污染源，各污染源对漯河市区环境VOCs的贡献如表1所示，移动源是监测期间漯河市TVOCs的主要来源，贡献率为25.4%。因此为有效控制当地污染，需优先加强机动车的管控。

表1　各类排放源对漯河市区及不同点位VOC贡献

污染源	三五一五工厂	水利局	卫健委	全市
区域背景源	3.7%	3.9%	2.6%	4.5%
燃烧源	10.2%	18.9%	12.5%	15.1%
油气挥发源	19.3%	15.4%	9.0%	18.9%
移动源	27.2%	29.2%	27.2%	25.4%
溶剂使用源	23.3%	14.2%	12.8%	17.5%
工艺过程源	16.4%	18.4%	35.9%	18.6%

根据各类源对不同点位VOCs的平均贡献（表1），各点位的移动源贡献显著，与市区交通网密集、车流量大有关。工艺过程源对三五一五工厂点位VOCs的贡献略高于其他2个点位，该点位距离制鞋厂较近、受制鞋企业胶黏工艺VOCs排放影响较大。卫健委点位的溶剂使用贡献明显高于其他2个点位，可能与周边的医院和工业园的类型有关。

为了深入了解各类污染源对漯河市区臭氧和SOAFP的贡献，该研究计算了VOCs各排放源对OFP及SOA的贡献，监测期间移动源对漯河市区OFP贡献最高(28.8%)，其次是油气挥发源(20.3%)、燃烧源(17.6%)、工艺过程源(14.2%)、溶剂使用源(13.3%)和区域背景源(5.7%)。各排放源对SOA生成贡献由高到低依次为移动源(22.2%)、油气挥发源(21.2%)、溶剂使用源(18.2%)、工艺过程源(18.2%)、区域背景源(10.2%)和燃烧源(9.9%)。因此，控制芳香烃、OVOCs和烯烃类挥发性有机物的排放可以同时减少漯河市秋季臭氧和SOA的生成，同时应重点关注移动源、油气挥发源、燃烧源、溶剂使用源和工艺过程源对漯河市区O_3和SOA生成的影响。

3　结论

（1）观测期间，漯河市区TVOC平均浓度为51×10^{-9}，三五一五工厂的TVOC浓度略高于水利局和卫健委，漯河市区各点位均以OVOCs和烷烃贡献为主。

（2）观测期间，漯河市区OFP和SOAFP均值分别为348.8 μg/m³和1.8 μg/m³，OFP贡献较大的VOCs组分是芳香烃和OVOCs，芳香烃对SOA生成贡献最大(78.9%)，三五一五工厂的OFP和SOAFP均高于其他2个点位，芳香烃类挥发性有机物是漯河市臭氧和SOA生成的双控物种。

（3）PMF模型解析结果显示观测期间漯河市区TVOCs主要排放源为移动源（25.4%）、油气挥发源（18.9%）、溶剂使用源（18.6%）、工业排放源（17.5%）和燃烧源（15.1%），控制以上源是控制大气VOCs污染的主要途径。VOCs各排放源中移动源、油气挥发源、溶剂使用源和工艺过程源是对O_3和SOA高贡献的排放源，燃烧源对秋季臭氧生成贡献显著。为减少当地O_3和$PM_{2.5}$的污染，应该着重控制以上排放源排放的芳香烃和OVOCs。

[参考文献]

[1] 张远航．中国大气臭氧污染防治蓝皮书(2020年)[M]. 2020.
Zhang Yuanhang. Blue Book on Prevention and Control of Atmospheric Ozone Pollution in China (in Chinese)[M]. Beijing: Science Press, 2020.

[2] 姜华,高健,李红,等．我国大气污染协同防控理论框架初探[J]. 环境科学研究, 2022,35(3):601-610.
Jiang Hua, Gao Jian, Li Hong, et al. A preliminary study on the theoretical framework of coordinated prevention and control of air pollution in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(3):601-610.

[3] 李嫣,王浙明,宋爽,等．化学合成类制药行业工艺废气VOCs排放特征与危害评估分析[J]. 环境科学, 2014,35(10):3663-3668.

Li Yan, Wang Zheming, Song Shuang, et al. Characteristics and hazard assessment of VOCs emission from process waste gas in chemical synthesis pharmaceutical industry[J]. Environmental Science, 2014,35(10):3663−3668.

[4] Huang X F, Dai J, Zhu Q, et al. Abundant biogenic oxygenated organic aerosol in atmospheric coarse particles: plausible sources and atmospheric implications[J]. Environmental Science and Technology, 2020,54(3):1425−1430.

[5] Liu Y F, Song M D, Liu X G, et al. Characterization and sources of volatile organic compounds (VOCs) and their related changes during ozone pollution days in 2016 in Beijing, China[J]. Environmental Pollution, 2020,257:113599.

[6] Wei W, Li Y, Wang Y T, et al. Characteristics of VOCs during haze and non−haze days in Beijing, China: concentration, chemical degradation and regional transport impact[J]. Atmospheric Environment, 2018,194:134−145.

[7] Liu B S, Liang D N, Yang J M, et al. Characterization and source apportionment of volatile organic compounds based on 1−year of observational data in Tianjin, China[J]. Environmental Pollution, 2016,218:757−769.

[8] Gao Y Q, Li M, Wan X, et al. Important contributions of alkenes and aromatics to VOCs emissions, chemistry and secondary pollutants formation at an industrial site of central Eastern China[J]. Atmospheric Environment, 2021, 244: 117927.

[9] Zheng S S, Xu X F, Zhang Y J, et al. Characteristics and sources of VOCs in urban and suburban environments in Shanghai, China, during the 2016 G20 Summit[J]. Atmospheric Pollution Research, 2019,10(6):1766−1779.

[10] Chen C, Wang L R, Qin Y H, et al. VOC characteristics and their source apportionment in the Yangtze River Delta Region during the G20 Summit[J]. Atmosphere, 2021, 12(7): 928.

[11] Jia H H, Gao S, Duan Y S, et al. Investigation of health risk assessment and odor pollution of volatile organic compounds from industrial activities in the Yangtze River Delta Region, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021,208:111474.

[12] He Z R, Wang X M, Ling Z H, et al. Contributions of different anthropogenic volatile organic compound sources to ozone formation at a receptor site in the Pearl River Delta Region and its policy implications[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019,19(13):8801−8816.

[13] Meng Y, Song J W, Zeng L W, et al. Ambient volatile organic compounds at a receptor site in the Pearl River Delta Region: variations, source apportionment and effects on ozone formation[J]. Journal of Environmental Sciences, 2022,111: 104−117.

[14] Tan Q W, Liu H F, Xie S D, et al. Temporal and spatial distribution characteristics and source origins of volatile organic compounds in a megacity of Sichuan Basin, China[J]. Environmental Research, 2020,185:109478.

[15] Li L Y, Chen Y, Zeng L M, et al. Biomass burning contribution to ambient volatile organic compounds (VOCs) in the Chengdu−Chongqing Region (CCR), China[J]. Atmospheric Environment, 2014,99:403−410.

[16] 秦涛,徐勃,王信梧,等. 淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较[J]. 环境科学, 2022,43(3):1286−1295.
Qin Tao, Xu Bo, Wang Xinwu, et al. Comparison of VOCs pollution characteristics between urban areas and background points in Zibo City in summer[J]. Environmental Science, 2022,43(3):1286−1295.

[17] 贾智海,顾瑶,孔翠丽,等. 青岛市臭氧污染与非污染期间VOCs化学特征及来源解析[J]. 环境科学, 2023,44(4): 1962−1973.
Jia Zhihai, Gu Yao, Kong Cuili, et al. Chemical characteristics and source analysis of VOCs during ozone pollution and non−pollution in Qingdao[J]. Environmental Science, 2023, 44(4):1962−1973.

[18] 孙雪松,张蕊,王裕,等. 北京市城区秋季O_3污染过程VOCs污染特征及反应活性[J]. 环境科学, 2023,44(2):691−698.
Sun Xuesong, Zhang Rui, Wang Yu, et al. Characteristics and reactivity of VOCs during O_3 pollution in autumn in Beijing [J]. Environmental Science, 2023,44(2):691−698.

[19] 张敬巧,吴亚君,李慧,等. 廊坊开发区秋季VOCs污染特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2019,39(8):3186−3192.
Zhang Jingqiao, Wu Yajun, Li Hui, et al. Characteristics and source analysis of VOCs pollution in Langfang development zone in autumn[J]. China Environmental Science, 2019, 39 (8):3186−3192.

[20] 王泰,朱彬,施双双,等. 南京北郊工业乡村混合区秋季边界层VOCs垂直分布特征[J]. 环境科学, 2023,44(1):66−74.
Wang Tai, Zhu Bin, Shi Shuangshuang, et al. Vertical distribution characteristics of VOCs in autumn boundary layer in industrial and rural mixed area of northern suburb of Nanjing [J]. Environmental Science, 2023,44(1):66−74.

[21] 林旭,陈超,叶辉,等. 杭州秋季大气VOCs变化特征及化学反应活性研究[J]. 中国环境监测, 2020,36(2):196−204.
Lin Xu, Chen Chao, Ye Hui, et al. Variation characteristics and chemical reactivity of VOCs in different functional zones of Hangzhou in autumn[J]. Environmental Monitoring in China, 2020,36(2):196−204.

[22] 陈雪,黄晓锋,朱波,等. 深圳市秋季VOCs空间分布特征与关键减排物种[J]. 中国环境科学, 2021,41(9):4069−4076.
Chen Xue, Huang Xiaofeng, Zhu Bo, et al. Spatial distribution characteristics of VOCs and key emission reduction species in autumn Shenzhen[J]. China Environmental Science, 2021,41(9):4069−4076.

[23] 张翼翔,尹沙沙,袁明浩,等. 郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析[J]. 环境科学, 2019,40(10):4372−4381.

Zhang Yixiang, Yin Shasha, Yuan Minghao, et al. Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in spring in Zhengzhou[J]. Environmental Science, 2019,40(10):4372-4381.

[24] 王冰,尹沙沙,黄爱枝,等. 郑州市多站点大气VOCs变化特征及源解析[J]. 环境科学, 2023,44(2):699-708.
Wang Bing, Yin Shasha, Huang Aizhi, et al. Variation characteristics and source analysis of atmospheric VOCs at multiple stations in Zhengzhou City[J]. Environmental Science, 2023,44(2):699-708.

[25] 王鸣,项萍,牛其恺,等. 南阳市冬春交替期大气VOCs污染特征及来源解析[J]. 环境科学学报, 2018,38(6):2233-2241.
Wang Ming, Xiang Ping, Niu Qikai, et al. Characteristics and source analysis of VOCs pollution in Nanyang city during the alternating period of winter and spring[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018,38(6):2233-2241.

[26] 施雨其,郑凯允,丁玮婷,等. 开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2023,44(4):1933-1942.
Shi Yuqi, Zheng Kaiyun, Ding Weiting, et al. Characteristics and source analysis of volatile organic compounds pollution in winter in Kaifeng City[J]. Environmental Science, 2023,44(4):1933-1942.

[27] 王剑平,靳朝喜,李辉,等. 洛阳市吉利区环境空气中挥发性有机物时空分布特征研究[J]. 分析仪器, 2016(3):64-70.
Wang Jianping, Jin Chaoxi, Li Hui, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of volatile organic compounds in ambient air in Jili district of Luoyang City[J]. Analytical Instrumentation, 2016(3):64-70.

[28] 齐一谨,倪经纬,王玲玲,等. 郑州市秋季VOCs污染特征及来源解析研究[J]. 环境科学与技术, 2022,45(4):116-125.
Qi Yijin, Ni Jingwei, Wang Lingling, et al. Characteristics and source apportionment of ambient volatile organic compounds in Zhengzhou in autumn[J]. Environmental Science & Technology, 2022,45(4):116-125.

[29] 秦涛. 淄博市城区大气VOCs污染特征、环境影响及健康风险评价[D]. 天津: 天津理工大学, 2022.
Qin Tao. Pollution Characteristics, Environmental Effect and Health Risk Assessment of Ambient VOCs in Zibo City [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2022.

[30] 宋晗睿,徐勃,王健,等. 我国典型工业城市夏冬季卤代烃来源解析与致癌风险[J]. 环境科学研究, 2022,35(11):2527-2537.
Song Hanrui, Xu Bo, Wang Jian, et al. Halogenated hydrocarbon source apportionment and carcinogenic risks in summer and winter in a typical industrial city of China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(11):2527-2537.

[31] Carter W P L. Reactivity Estimates for Selected Consumer Product Compounds[R]. 2008.

[32] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. Air & Waste, 1994, 44(7): 881-899.

[33] Grosjean D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols[J]. Atmospheric Environment (1967), 1989,23(8):1733-1747.

[34] Grosjean D. *In situ* organic aerosol formation during a smog episode: estimated production and chemical functionality[J]. Atmospheric Environment Part A General Topics, 1992, 26 (6):953-963.

[35] Martín-Reviejo M, Wirtz K. Is benzene a precursor for secondary organic aerosol?[J]. Environmental Science and Technology, 2005,39(4):1045-1054.

[36] Kroll J H, Ng N L, Murphy S M, et al. Secondary organic aerosol formation from isoprene photooxidation under high-NO_x conditions[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32 (18):L18808, doi:10.1029/2005GL023637.

[37] Paatero P, Tapper U. Analysis of different modes of factor analysis as least squares fit problems[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1993,18(2):183-194.

[38] 周振,肖林海,费蕾蕾,等. 东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源[J]. 环境科学, 2022, 43(9):4497-4505.
Zhou Zhen, Xiao Linhai, Fei Leilei, et al. Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in a typical industrial area in Dongguan during periods of ozone and non-ozone pollution in summer[J]. Environmental Science, 2022,43(9):4497-4505.

[39] Vestenius M, Hopke P K, Lehtipalo K, et al. Assessing volatile organic compound sources in a boreal forest using positive matrix factorization (PMF) [J]. Atmospheric Environment, 2021,259:118503.

[40] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds[J]. ChemInform, 2004,35(10): doi:10.1002/chin. 200410285.

[41] 易宵霄,李姜豪,李光华,等. 铜川市秋冬季大气VOCs特征及其O_3和SOA形成潜势分析[J]. 环境科学, 2022,43(1): 140-149.
Yi Xiaoxiao, Li Jianghao, Li Guanghua, et al. Characteristics of atmospheric VOCs in Tongchuan in autumn and winter, and potential analysis of O_3 and SOA formation[J]. Environmental Science, 2022,43(1):140-149.

[42] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, et al. VOC characteristics, sources and contributions to SOA formation during haze events in Wuhan, Central China[J]. Science of the Total Environment, 2019,650:2624-2639.

[43] 林燕芬,段玉森,高宗江,等. 基于VOCs加密监测的上海典型臭氧污染过程特征及成因分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1):126-133.
Lin Yanfen, Duan Yusen, Gao Zongjiang, et al. Typical ozone pollution process and source identification in Shang-

hai based on VOCs intense measurement[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019,39(1):126−133.

[44] 景盛翱,叶旭红,高雅琴,等. 典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性[J]. 环境科学, 2020,41(7):3076−3084.
Jing Sheng'ao, Ye Xuhong, Gao Yaqin, et al. Characteristics and reactivity of VOCs in Hangzhou during a typical photochemical pollution episode[J]. Environmental Science, 2020,41(7):3076−3084.

[45] Li J, Xie S D, Zeng L M, et al. Characterization of ambient volatile organic compounds and their sources in Beijing, before, during, and after Asia−Pacific Economic Cooperation China 2014[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,15(14):7945−7959.

[46] Li B W, Ho S S H, Gong S L, et al. Characterization of VOCs and their related atmospheric processes in a central Chinese city during severe ozone pollution periods[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019,19(1):617−638.

[47] Liu Y, Shao M, Fu L L, et al. Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: part I[J]. Atmospheric Environment, 2008,42(25):6247−6260.

[48] Song M D, Li X, Yang S D, et al. Spatiotemporal variation, sources, and secondary transformation potential of volatile organic compounds in Xi'an, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021,21(6):4939−4958.

[49] Yuan B, Shao M, Lu S H, et al. Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(15): 1919−1926.

[50] 朱玉凡,陈强,刘晓,等. 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善PMF源解析效果[J]. 环境科学, 2022,43(2):707−713.
Zhu Yufan, Chen Qiang, Liu Xiao, et al. Improved performance of PMF source apportionment for volatile organic compounds based on classification of VOCs' aging degree in air mass[J]. Environmental Science, 2022,43(2):707−713.

[51] 刘佳,翟崇治,余家燕,等. 重庆市环境空气中VOCs的空间分布及来源解析[J]. 环境科学与技术, 2018,41(2):71−76.
Liu Jia, Zhai Chongzhi, Yu Jiayan, et al. Source apportionment of VOCs at city center of Chongqing in summer[J]. Environmental Science & Technology, 2018,41(2):71−76.

[52] 周子航,邓也,吴柯颖,等. 成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱[J]. 环境科学, 2019,40(9):3949−3961.
Zhou Zihang, Deng Ye, Wu Keying, et al. Source profiles of VOCs associated with typical industrial processes in Chengdu [J]. Environmental Science, 2019,40(9):3949−3961.

[53] 吕大器,陆思华,邵敏,等. 典型胶合板制造企业VOCs排放特征[J]. 中国环境科学, 2020,40(5):1924−1931.
Lyu Daqi, Lu Sihua, Shao Min, et al. Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from typical plywood industry[J]. China Environmental Science, 2020,40(5):1924−1931.

[54] Hsieh L T, Yang H H, Chen H W. Ambient BTEX and MTBE in the neighborhoods of different industrial parks in Southern Taiwan [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 128(2/3):106−115.

[55] 虞小芳,程鹏,古颖纲,等. 广州市夏季VOCs对臭氧及SOA生成潜势的研究[J]. 中国环境科学, 2018,38(3):830−837.
Yu Xiaofang, Cheng Peng, Gu Yinggang, et al. Formation potential of ozone and secondary organic aerosol from VOCs oxidation in summer in Guangzhou, China[J]. China Environmental Science, 2018,38(3):830−837.