

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.9
第41卷 第9期

目次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析·····	肖致美,徐虹,蔡子颖,李鹏,刘彬,元洁,郑乃源,唐遨,陈魁,邓小文(3879)
基于高分辨率MARGA分析成都市PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征·····	尹寒梅,陈军辉,冯小琼,姜涛,钱骏,刘政(3889)
宿迁市PM _{2.5} 中水溶性无机离子的季节特征和来源分析·····	马红璐,赵欣,陆建刚,王辉,许纯领,欧阳琰,朱新胜,殷堂兵,漆丹,陆亚秋,汪玖阳,陆声兴(3899)
鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布·····	李安娜,温天雪,华维,杨员,孟泽,胡波,辛金元(3908)
鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析·····	林孜,姬亚芹,林宇,国纪良,马妍,赵静琦(3918)
西安市冬季PM _{2.5} 中WSOC的光谱特性和来源解析·····	杨毅,张亚楠,刘焕武,田萍萍,李亚飞,雷颖,王一博(3924)
长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测·····	杜盈盈,陈军,张家洛,甘桂城,刘瑜存,苏明旭,楼晟荣,周敏,陶士康,乔利平(3932)
连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析·····	崔金梦,王体健,李秋潼,董立文,黄丛丞,曹云擎(3941)
成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析·····	王成辉,陈军辉,韩丽,徐晨曦,王波,李英杰,刘政,钱骏(3951)
德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案·····	严茹莎(3961)
超低改造下中国火电排放清单及分布特征·····	屈加豹,王鹏,伯鑫,薛晓达,董广霞,崔磊,康明雄,王彤,汤铃,朱法华,李时蓓(3969)
浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征·····	赵睿东,于兴娜,侯新红,沈丽(3976)
垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选·····	赵思岚,奚鹏飞,郭凤艳,邓双,贾建丽(3985)
兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源·····	韩婷婷,张明军,王圣杰,杜勤勤,马转转,郭蓉,曹晏风(3993)
然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素·····	张涛,王明国,张智印,刘廷,何锦(4003)
河套灌区地下水化学演变特征及形成机制·····	崔佳琪,李仙岳,史海滨,孙亚楠,安海军,邢进平(4011)
石期河流域地下水化学特征及物质来源分析·····	李笑,于爽,李亮,郭永丽(4021)
长江中下游湖泊水体氮磷时空变化特征及其影响因素·····	季鹏飞,许海,詹旭,朱广伟,邹伟,朱梦圆,康丽娟(4030)
2016~2017年长荡湖流域湖库系统营养盐时空分布机制分析·····	李新艳,李恒鹏,姜三元,马培,赖锡军,邓建才,陈东强,耿建伟(4042)
菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响·····	康丽娟,许海,邹伟,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,陈洁(4053)
金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析·····	刘明坤,童俊,朱慧峰,白晓慧(4062)
典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征·····	孙琳婷,赵祯,唐建辉(4069)
微塑料对河水抗生素抗性基因的影响·····	周昕原,王言仔,苏建强,黄福义(4076)
莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价·····	廖杰,魏晓琴,肖燕琴,李青松,范洪勇,刘学军,庄马展,刘超翔(4081)
拟柱孢藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异·····	叶金梅,赵莉,罗旭,彭亮,雷腊梅(4088)
奶水河湿地植物作用及调水水质响应模拟·····	李亚娟,杜彦良,毕二平,王亮,陈翠柏(4095)
浅基质层干植草沟运行效果的现场实验·····	张佳炜,李田,张庭秀(4105)
海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输·····	李佳,谢文霞,姜智绘,单溪环,廖云杰,赵洪涛,李叙勇(4113)
天然黄铁矿吸附去除水中Sb(V):性能与机制·····	石松,吴乾元,李新正,黄满红(4124)
过硫酸盐氧化处理含苯磺酸废水·····	章晋门,卢钧,刘晓琛,陈泉源(4133)
温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响·····	刘智斌,刘秀红,周桐,章世勇,李健敏,杨庆(4141)
ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能·····	缪新年,汪倩,郭凯成,刘文如,沈耀良(4150)
低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能·····	刘雨馨,王建芳,钱飞跃,陈倩苗,乔伟,沈聪(4161)
雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨·····	郭志娟,周亚龙,杨峥,赵传冬,成杭新,孔牧,彭敏(4169)
基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例·····	吴志远,张丽娜,夏天翔,贾晓洋,李慧颖,王世杰(4180)
基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价·····	张富贵,彭敏,王惠艳,马宏宏,徐仁廷,成晓梦,侯召雷,陈子万,李括,成杭新(4197)
云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力·····	张龙,张云霞,宋波,吴勇,周子阳(4210)
水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期·····	胡雨丹,周航,辜娇峰,霍洋,邓鹏辉,魏宾纭,刘俊,廖柏寒(4218)
田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率·····	郭俊梅,杨俊兴,杨军,郑国砥,周小勇,陈同斌,卞建林,孟晓飞,李玉峰(4226)
桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果·····	段春燕,沈育伊,徐广平,滕秋梅,张德楠,何成新,张中峰,周龙武,孙英杰(4234)
秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响·····	杨彩迪,卢升高(4246)
土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应·····	王燕,程东会,檀文炳,余红,席北斗,姜永海,党秋玲(4253)
粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响·····	理鹏,吴建强,沙晨燕,叶春梅,黄沈发(4262)
松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响·····	张拓,徐飞,怀宝东,杨雪,隋文志(4273)
黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应·····	李娜,王宝荣,安韶山,焦峰,黄倩(4284)
土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响·····	程跃扬,靳振江,王晓彤,贾远航,袁武,周军波(4294)
黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系·····	尚秋彤,黄瑞林,倪浩为,隋跃宇,孙波,梁玉婷(4305)
贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性·····	王显,龙健,李娟,刘灵飞,廖洪凯,李宜蓉,杨睿(4314)
玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附·····	刘玉玲,朱虎成,彭鸥,李丹阳,杨蕊嘉,彭晶,铁柏清(4322)
无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法·····	梁杏,孙立群,张鑫,张洁,付鹏宇(4333)
《环境科学》征订启事(4061)	
《环境科学》征稿简则(4132)	
信息(4233, 4293, 4304)	

成都市城区大气 VOCs 季节污染特征及来源解析

王成辉, 陈军辉*, 韩丽, 徐晨曦, 王波, 李英杰, 刘政, 钱骏

(四川省生态环境科学研究院, 成都 610041)

摘要: 为研究成都市城区大气 VOCs 季节变化特征, 本研究在 2018 年 12 月至 2019 年 11 月对 VOCs 组分进行监测, 并对 VOCs 的浓度水平、各化学组成、化学反应活性和来源进行分析。结果表明, 成都市城区春、夏、秋和冬季 VOCs 的平均体积分数分别为 32.29×10^{-9} 、 36.25×10^{-9} 、 40.92×10^{-9} 和 49.48×10^{-9} , 冬季的浓度明显高于其他季节, 春季和夏季的浓度水平相差不大, 各季节 VOCs 的组分浓度水平有所差异, 冬季烷烃占总 VOCs 的比例最大, 可能受机动车排放的影响较明显; 夏季和秋季含氧(氮)挥发性有机物占比远高于春、冬季, 一次源的挥发排放和二次转化的生成贡献较大; 成都市城区不同季节大气中 VOCs 平均浓度排名靠前的关键组分基本无变化, 主要是 $C_2 \sim C_4$ 的烷烃、乙烯、乙炔及二氯甲烷等, 可能受机动车尾气、油气挥发、溶剂使用和 LPG 燃料等影响明显, 夏季丙酮以及乙酸乙酯等含氧有机物浓度贡献突出; 根据 $\cdot OH$ 消耗速率和 OFP 计算可知关键活性物种主要为间/对-二甲苯、乙烯、丙烯、1-己烯、甲苯、异戊烷和正丁烷等, 这些物种应该优先减排和控制; 四季 VOCs 源解析结果显示: 春、夏季温度较秋、冬季高, 光照更强, PMF 明显解析出天然源和二次排放贡献, 同时, 由于夏季温度较高, 解析出油气挥发占 9%; 秋、冬季占比增加的源主要为机动车尾气和燃烧源, 燃烧源的排放占比在 25% 左右, 另餐饮源的排放占比在 9% 左右。

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 季节特征; 化学反应活性; 来源解析; 成都

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)09-3951-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202002153

Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area

WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui*, HAN Li, XU Chen-xi, WANG Bo, LI Ying-jie, LIU Zheng, QIAN Jun

(Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: To investigate the seasonal variations in the concentrations of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) in the urban area of Chengdu, VOC species were monitored from December 2018 to November 2019, and the concentrations, chemical composition, chemical reactivity, and sources of VOCs were analyzed. Average volume fraction of VOCs in spring, summer, autumn, and winter are 32.29×10^{-9} , 36.25×10^{-9} , 40.92×10^{-9} , and 49.48×10^{-9} , respectively. The concentrations in winter are significantly higher than the winter concentrations measured in other areas. There is no significant difference between VOC concentrations in spring and summer, but component concentrations vary from season to season. In winter, alkanes account for the largest proportion of total VOCs owing to vehicle emissions. The proportion of oxygen (nitrogen)-containing volatile organic compounds in summer and autumn is much higher than that in spring and winter. Volatile emissions from primary sources and secondary conversions have a great contribution. The average concentration of key components of VOCs in different seasons did not change significantly. C_2 - C_4 alkanes, ethylene, acetylene, and dichloromethane concentrations may be significantly affected by vehicle exhaust, oil and gas volatilization, solvent use, and LPG fuel use. $\cdot OH$ consumption rate and OFP calculations show that key active species are mainly *m/p*-xylene, ethylene, propylene, 1-hexene, toluene, isopentane, and *n*-butane. Therefore, these species should be given priority in emissions control measures. Since the temperature in spring and summer is higher than in autumn and winter, and the UV rays are more intense, PMF analysis reveals the natural sources and the secondary emission sources as the major sources. The oil and gas volatilization source contributes to 9% of VOC concentrations in summer. The major VOC sources in autumn and winter are vehicle exhaust and combustion sources. Emissions from the combustion sources contribute to 25% and emissions from the catering sources in autumn and winter contribute to 9% of total VOC levels.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); seasonal characteristics; chemical reactivity; source apportionment; Chengdu

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是一类沸点低、分子量小、化学活性强的复杂化合物, 主要包括烷烃、烯烃、芳香烃、醛酮和酯类等, 且大多数具有毒性、刺激性和致癌作用^[1, 2]。VOCs 从源排放作为气态污染物广泛存在于自然环境中, 可以以一次污染物的形态存在, 也可以通过物理和化学反应过程转化为二次污染物, 是臭氧 (O_3) 和二次有机气溶胶 (secondary organic aerosol, SOA) 的重要前体物^[3, 4]。大气中 VOCs 主要有天然来源

和人为来源, 在城区大气中 VOCs 通常来源于工业源的排放和汽车尾气排放, 然而在郊区或者山区, 由于人为活动少, 植被资源丰富, 植物排放的 VOCs 往往是该类地区大气中 VOCs 的重要来源^[5, 6], 大气中的 VOCs 作为 O_3 的重要前体物, 参与光化学反应

收稿日期: 2020-02-22; 修订日期: 2020-03-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0214001)

作者简介: 王成辉(1991~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气挥发性有机物污染防治, E-mail: 412818157@qq.com

* 通信作者, E-mail: 9503062@qq.com

的浓度大小和反应活性会直接影响 O_3 的生成^[7], 近年来随着我国城市化进程和工业经济发展, 多数地区出现了以臭氧为特征污染物的光化学污染过程.

目前, 国内外学者研究环境空气中 VOCs 的热点问题主要集中在的监测技术、组分特征、化学反应机制、对臭氧生成贡献及其来源解析和控制途径等方面. 1996 年, Vega 等^[8]通过苏玛罐采集墨西哥城市大气环境 VOCs 样品, 通过气相色谱法和火焰离子化检测系统进行分析, 并通过 CMB 模型对其来源解析, 主要来源于机动车尾气和液化石油气 (LPG) 的使用与泄漏, 分别占 58.7% 和 24.2%; Qin 等^[9]对 VOCs 进行监测分析, 根据其浓度和反应活性, 确定了臭氧产生潜力最大的 10 个物种. Saito 等^[10]在 2003 年 12 月至 2004 年 11 月对日本名古屋城区大气中 VOCs 进行监测分析发现, 烷烃占比最高, 其次是烯烃、芳香烃和炔烃, 且冬季 VOCs 浓度最高, 夏季最低, 发现 NMHCs 容易发生氧化反应生产 O_3 和 SOA; 王伯光等^[11]于 2004 年在珠江三角洲地区的 8 个大气功能区观测点, 5 个主导风向加强观测点和 3 个不同高度监测点进行了为期 1 a 以上的观测, 系统研究了该地区大气 VOC 的组成特征及其时空分布规律; Liu 等^[12]在 2008 年就针对珠江三角洲地区主要 VOCs 来源分布及其成分谱进行研究; 徐新等^[13]、姜洁^[14]、孙杰等^[15]、吴方望等^[16]和张博韬等^[17]对北京及周边地区大气 VOCs 的浓度变化和时空分布以及化学反应活性、臭氧生成潜势及来源等方面进行了研究; 崔虎雄等^[18]的研究发现上海城区典型污染过程中 VOCs 体积分数迅速增加, 比污染前高 3 倍. 蔡长杰等^[19]在 2006 ~ 2008 年对上海中心城区夏季 VOCs 监测分析, 判别其来源分别为交通工具尾气排放、燃料挥发 (液化石油气/天然气泄漏和汽油蒸发)、溶剂使用、工业生产和生物质/生物燃料燃烧、海洋源, 其贡献率分别为 34%、24%、16%、14% 和 12%. 综合来看, 国内关于 VOCs 的研究主要集中在长三角、珠三角和京津冀等地区, 而成都地区研究的报道相对较少, 连续一年四季观测研究 VOCs 季节变化的研究更少.

成都市地处四川盆地西部, 是典型的盆地平原城市, 风速小, 静风频率高, 作为西南地区的政治经济中心, 工业发展迅速, 机动车保有量不断增加, 最近几年以臭氧污染为特征的大气污染问题突出. 本研究通过长时间的在线观测成都中心城区环境空气中 VOCs 的季节浓度水平、各化学组成和来源, 掌握成都地区 VOCs 的季节组分排放特征, 进而对成都地区 VOCs 控制以及臭氧污染提出更科学有效地防

控措施有重要的指导意义.

1 材料与方法

1.1 观测点位及时间

观测点位于成都市中心城区四川省生态环境科学研究院楼顶 (图 1), 距地面约 35 m, 周边有居民区、医院、商场和饭店等生活配套, 且比邻交通主干道, 车流量较大, 属于成熟的商业、居民和交通混合区. 观测时间为 2018 年 12 月 1 日至 2019 年 11 月 30 日, 观测周期涵盖春、夏、秋和冬这 4 个季节, 能较好反映成都市中心城区大气 VOCs 季节污染状况.



图 1 观测点位示意

Fig. 1 Sketch of observation point

1.2 监测仪器与分析方法

本研究 VOCs 组分观测仪器采用北京大学和武汉天虹合作研发的大气挥发性有机物在线监测系统 (TH-300B), 属于在线气相色谱-质谱/氢火焰离子化检测器法 (GC-MS/FID), 分析物种为 56 种 PAMS 物种加上 67 种 TO15 物种, 去重后, 合计分析物种为 107 种, 观测仪器系统采用超低温在线预浓缩与 GC-MS/FID 联用检测技术, 环境大气通过采样系统采集后, 样品进入浓缩系统, 在毛细管捕集柱中被冷冻捕集, 然后快速加热解吸, 进入分析系统, 经色谱柱分离后被 FID (氢火焰检测器) 和 MS (质谱检测器) 检测, GC-FID 通道检测 $C_2 \sim C_5$ 碳氢化合物, GC-MS 通道检测 $C_5 \sim C_{12}$ 的碳氢化合物、卤代烃 (HVOCs)、含氧挥发性有机物 (OVOCs) 和含氮挥发性有机物 (NVOCs). 该 VOCs 监测仪器 24 h 自动运行, 时间分辨率为 60 min, 其中样品采集时间为 5 min, 每日除 00:00 ~ 01:00 为标准气校核固定时间段, 共采集分析大气样品 23 个.

1.3 质量控制

本研究 VOCs 在线监测仪器由专业技术人员对

其维护,熟悉 VOCs 监测流程和质控要点,所有操作均经过严格的质量控制,确保监测数据的有效性和准确性。主要包括:定期更换 CO₂ 去除管,更换前仔细检查去除管外观有无破损,确保密封良好;定期对空气发生器使用的硅胶、分子筛和活性炭更换;仪器配有自动加热反吹程序,确保样品分析数据质控;每天 00:00 ~ 01:00 为标准气校准核查固定时间段,并对标准气进行线性验证,使相关系数在 0.995 以上,并符合 HJ 759-2015《环境空气 挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法》中的质控要求,目标物相对响应因子的相对标准偏差(RSD)应小于等于 30%,保证测试数据准确性。

1.4 VOCs 的化学反应活性计算方法

VOCs 与·OH 的反应是污染大气中臭氧形成过程的决速步骤,通常用 $L_i^{\cdot OH}$ 来估算初始过氧自由基(RO₂)的生成速率,它反映的是单个 VOCs 物种对白天光化学反应的相对贡献信息^[20]。采用 Atkinson 等^[21]提出的单个物种的反应活性公式计算:

$$L_i^{\cdot OH} = \text{VOCs}_i \times K_i^{\cdot OH} \quad (1)$$

式中, $L_i^{\cdot OH}$ 为 VOCs 中 i 物种的反应速率, s⁻¹; VOCs_i 表示物种 i 的大气浓度, molecule·cm⁻³; $K_i^{\cdot OH}$ 表示物种 i 与大气中·OH 的反应速率常数^[21], cm³·(molecule·s)⁻¹。

为综合衡量各 VOCs 物种的反应活性和对 O₃ 的生成潜势的影响,提出了 VOCs 的增量反应活性(incremental reactivity, IR),通常定义为:在给定的气团 VOCs 的混合物中,加入或者去除单位特定的 VOCs 所产生的 O₃ 浓度的变化,通常, VOCs 物种反应越快,IR 越大,当改变 VOCs/NO_x 比值,使 IR 最大,称为最大增量反应活性(MIR),计算公式如下^[21]:

$$\text{OPF}_i = \text{VOCs}_i \times \text{MIR}_i \quad (2)$$

式中,OPF_{*i*} 表示物种 i 的臭氧生成潜势量, μg·m⁻³; VOCs_i 表示物种 i 的浓度, μg·m⁻³; MIR_{*i*} 表示物种 i 的 MIR 系数^[21], g·g⁻¹,以 VOCs/O₃ 计。

1.5 PMF 模型计算方法

正矩阵因子分解法(positive matrix factorization, PMF)最早是由芬兰赫尔辛基大学 Paatero 和 Tapper 教授在 1993 年提出的多元统计分析方法^[1],随着模式方法的优化改进,在大气环境颗粒物和 VOCs 的源解析方面得到广泛应用。PMF 具有不需要测量源成分谱,分解矩阵中元素分担率为非负值,可以利用数据标准偏差来进行优化,并且可处理遗漏数据和不精确数据等特点。PMF 受体模型的基本原理是:首先利用权重计算出颗粒物中各化学组分的误差,

然后通过最小二乘法来确定出其主要的污染源及其贡献率^[1,22]。

2 结果与讨论

2.1 VOC 浓度变化特征

本研究在 2018 年 12 月 1 日至 2019 年 11 月 30 日观测期间, VOCs 平均体积分数为 39.73×10^{-9} , 小时体积分数范围在 $(4.65 \sim 192.53) \times 10^{-9}$ 之间, 烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃和含氧(氮)有机物的平均体积分数依次为 17.08×10^{-9} 、 3.93×10^{-9} 、 3.95×10^{-9} 、 3.20×10^{-9} 、 5.72×10^{-9} 和 5.28×10^{-9} , 全年烷烃体积分数占比最高。其中在春(3~5 月)、夏(6~8 月)、秋(9~11 月)和冬季(12~2 月) VOCs 的平均体积分数水平依次为 32.29×10^{-9} 、 36.25×10^{-9} 、 40.92×10^{-9} 和 49.48×10^{-9} 。成都市城区大气 VOCs 在冬季的浓度明显高于其他季节,春季和夏季的体积分数水平相差不大,这与上海、广州、香港和韩国首尔的季节变化特征一致^[23~25]。由图 2 可以看出,在不同季节 VOCs 的组分体积分数水平有所差异,冬季烷烃占总 VOCs 的比例最大,可能受机动车排放的影响较明显;夏季和秋季含氧(氮)挥发性有机物占分别为 24% 和 17%,远高于春、冬季,可能由于夏、秋季温度较高,大气光氧化反应较强,一次源的挥发排放和二次转化的生成贡献较大^[14]。

表 1 列出了观测期间成都城区不同季节大气中 VOCs 平均体积分数排名前 10 位的物种。可以看出,关键组分基本无变化,主要是 C₂ ~ C₄ 的烷烃、乙烯、乙炔及二氯甲烷,可能受机动车尾气、油气挥发、溶剂使用和 LPG 燃料等影响明显^[26,27], 1-己烯在春季浓度相对较高,可能受石化企业影响^[28];夏季丙酮以及乙酸乙酯等含氧有机物浓度贡献突出,可能受机动车尾气和溶剂使用贡献较大^[29,30];甲苯和苯在冬季浓度贡献排进前 10 位,可能受机动车尾气以及生物质和燃煤燃烧影响^[31]。

2.2 不同季节 VOCs 的化学反应活性变化

大气中各 VOCs 物种化学反应活性具有差异,进而对臭氧生成的贡献也不同。本研究利用臭氧生成潜势(OPF)和·OH 消耗速率($L_i^{\cdot OH}$)来衡量 VOCs 的反应活性,通过评估大气中 VOCs 不同组分的反应活性、识别对大气中臭氧生成贡献的关键物种,对研究排放控制策略有重要的指导意义^[32]。从图 3 可以看出,不同季节 VOCs 对 OPF 的关键活性物种较为相似,主要为间/对-二甲苯、乙烯、甲苯、丙烯和邻-二甲苯。但物种对 OPF 的贡献在不同季节会有所变化,表现出一定的季节性特征,夏季异戊二烯贡

献较高,由于植物对 VOCs 的排放也受季节变化的影响,其在夏季的化学活性明显高于其他 VOCs 物

种,而到了秋冬季节其活性显著降低;其次丙酮在夏季的贡献进入前10位,可见夏季受溶剂使用源的

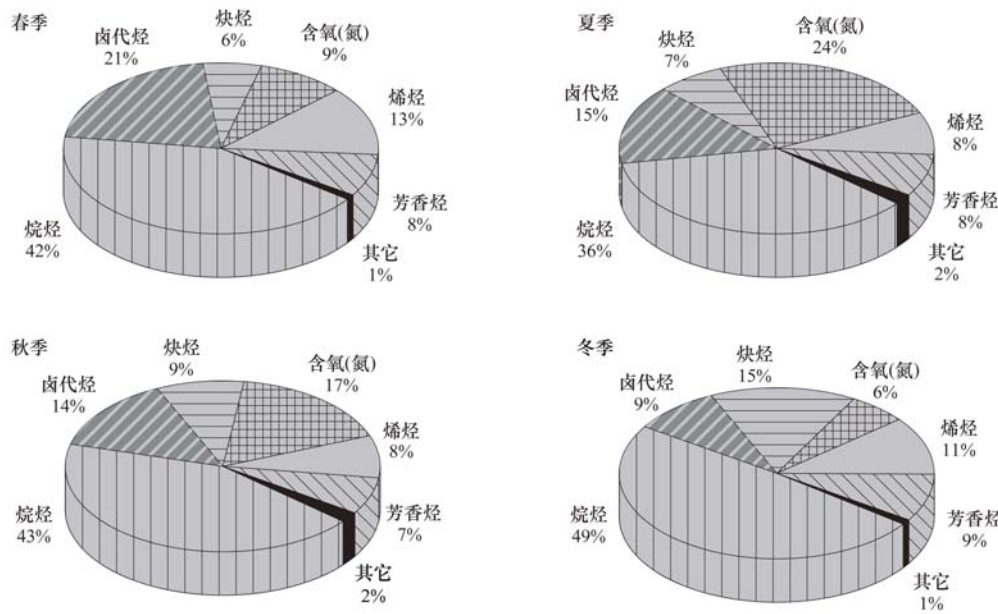


图2 不同季节各 VOCs 组分的含量变化情况

Fig. 2 Changes in the content of VOC components in different seasons

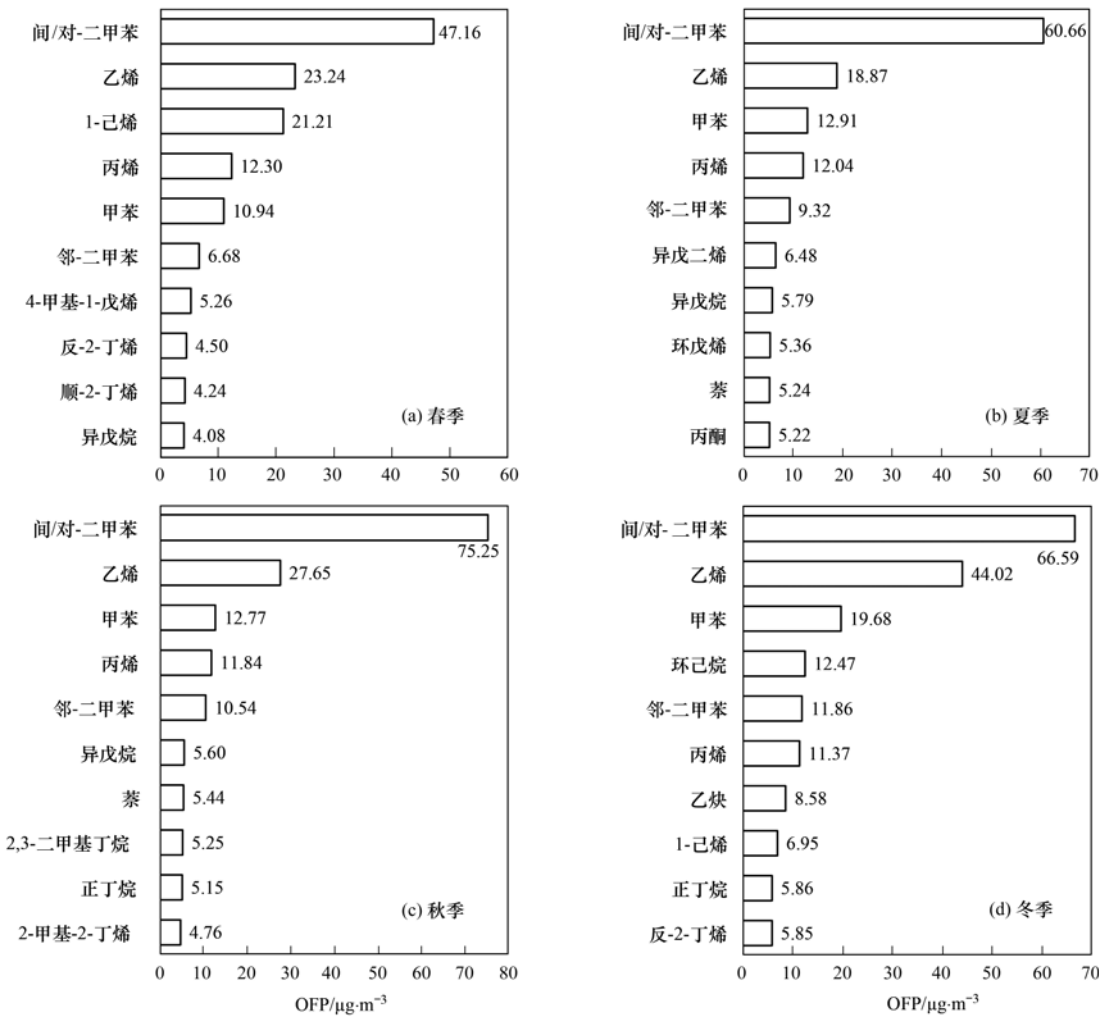


图3 不同季节 VOCs 对 OFP 贡献最大的前 10 位物种

Fig. 3 Top 10 species with the largest contribution of VOCs to OFP in different seasons

表 1 不同季节 VOCs 平均体积分数前 10 位物种的比较

Table 1 Comparison of the top 10 species in the average volume fraction of VOCs in different seasons

序号	春季		夏季		秋季		冬季	
	物种	体积分数 $\times 10^{-9}$	物种	体积分数 $\times 10^{-9}$	物种	体积分数 $\times 10^{-9}$	物种	体积分数 $\times 10^{-9}$
1	乙烷	4.73	丙酮	5.60	乙烷	5.58	乙烷	8.73
2	丙烷	3.15	乙烷	3.57	丙烷	3.72	乙炔	7.77
3	乙烯	2.06	二氯甲烷	2.6	乙炔	3.69	丙烷	5.22
4	乙炔	1.91	丙烷	2.53	丙酮	3.59	乙烯	3.90
5	二氯甲烷	1.71	乙炔	2.47	二氯甲烷	3.51	正丁烷	1.96
6	丙酮	1.46	乙烯	1.67	乙烯	2.45	二氯甲烷	1.80
7	乙酸乙酯	1.40	正丁烷	1.41	正丁烷	1.72	异丁烷	1.21
8	正丁烷	1.20	乙酸乙酯	1.33	乙酸乙酯	1.61	甲苯	1.20
9	异丁烷	1.11	异戊烷	1.24	2,3-二甲基丁烷	1.41	苯	1.09
10	1-己烯	1.03	2,3-二甲基丁烷	1.10	异戊烷	1.20	异戊烷	1.04

影响较大^[30]；秋、冬季正丁烷均进入前 10 位,可能受机动车尾气和餐饮源的影响明显大于春、夏季^[20,33]；冬季乙烯的臭氧生成潜势明显高于其它季节,是由于乙烯·OH 消耗速率在冬季最高,其次可能受机动车尾气的影响较大。

图 4 为不同季节 VOCs 对 $L^{\cdot OH}$ 的贡献前 10 位物种,主要为乙烯、1-己烯、间/对-二甲苯、异戊二烯和

丙烯等,乙烯的化学反应活性较强,·OH 消耗速率在四季表现均突出,1-己烯在春季 $L^{\cdot OH}$ 最高,可能受当地石化企业影响,异戊二烯在夏季·OH 消耗速率最大,受光照和温度等气象条件影响较大,异戊烷在夏季 $L^{\cdot OH}$ 的贡献较大,可能由于温度较高,受油气挥发影响明显^[34]。

通过 OFP 和 $L^{\cdot OH}$ 衡量 VOCs 的反应活性,总体

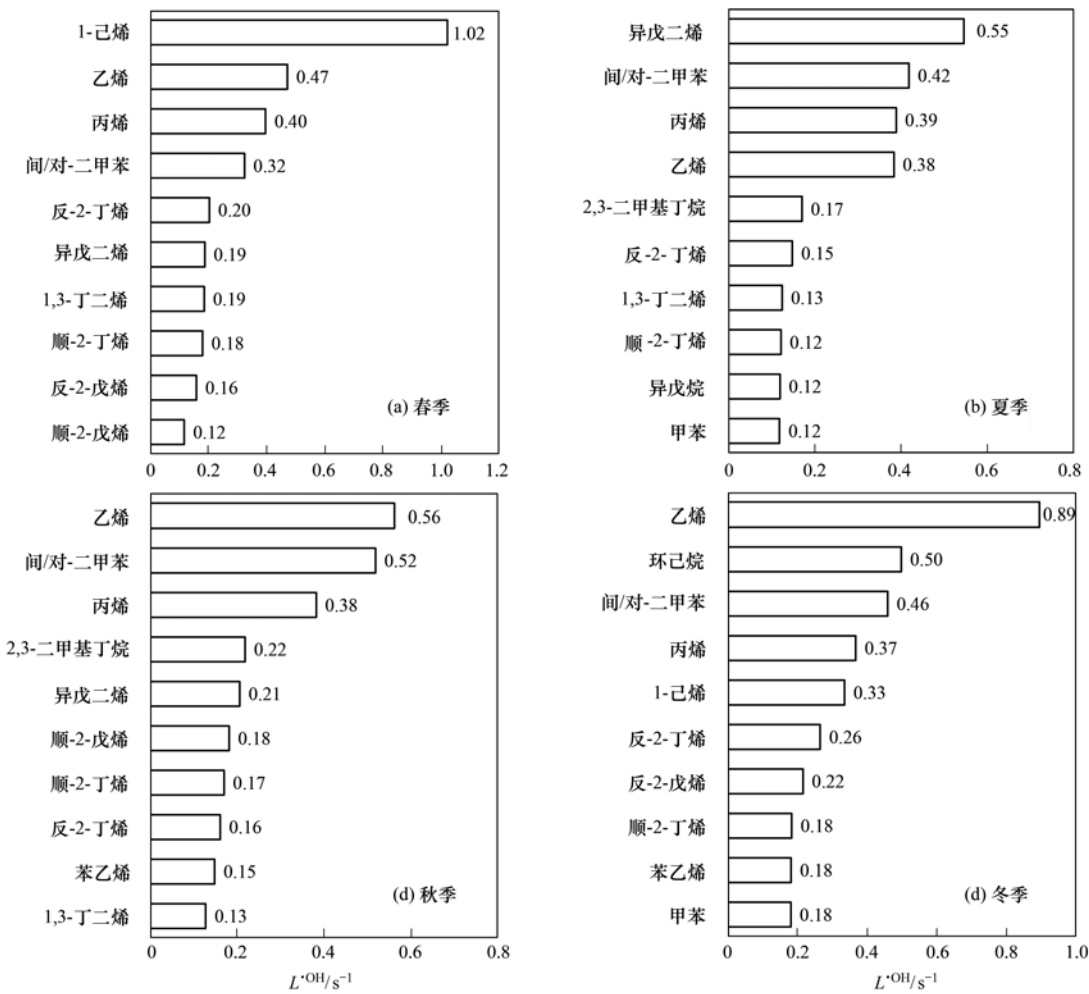


图 4 不同季节 VOCs 对 $L^{\cdot OH}$ 贡献最大的前 10 位物种

Fig. 4 Top 10 species with the largest contribution of VOCs to $L^{\cdot OH}$ in different seasons

而言,成都市城区对应的关键活性物种主要为间/对-二甲苯、乙烯、丙烯、1-己烯、甲苯、异戊烷和正丁烷等,这些物种应该优先减排和控制,这与上海^[20]、广州^[25]和北京^[17]等大气 VOCs 中的关键活性组分较为一致,但 1-己烯在成都城区的活性较为突出. 另一方面可以看出,观测点周边受机动车尾气、油气

挥发、餐饮和溶剂使用等影响,具有明显城区的污染特征.

2.3 VOC 来源解析

针对观测的 VOCs 数据,选取 4、8、11 和 1 月数据代表春、夏、秋和冬这 4 个季节,将排放源特征物种及浓度高于检出限的物种进行筛选,模型进行

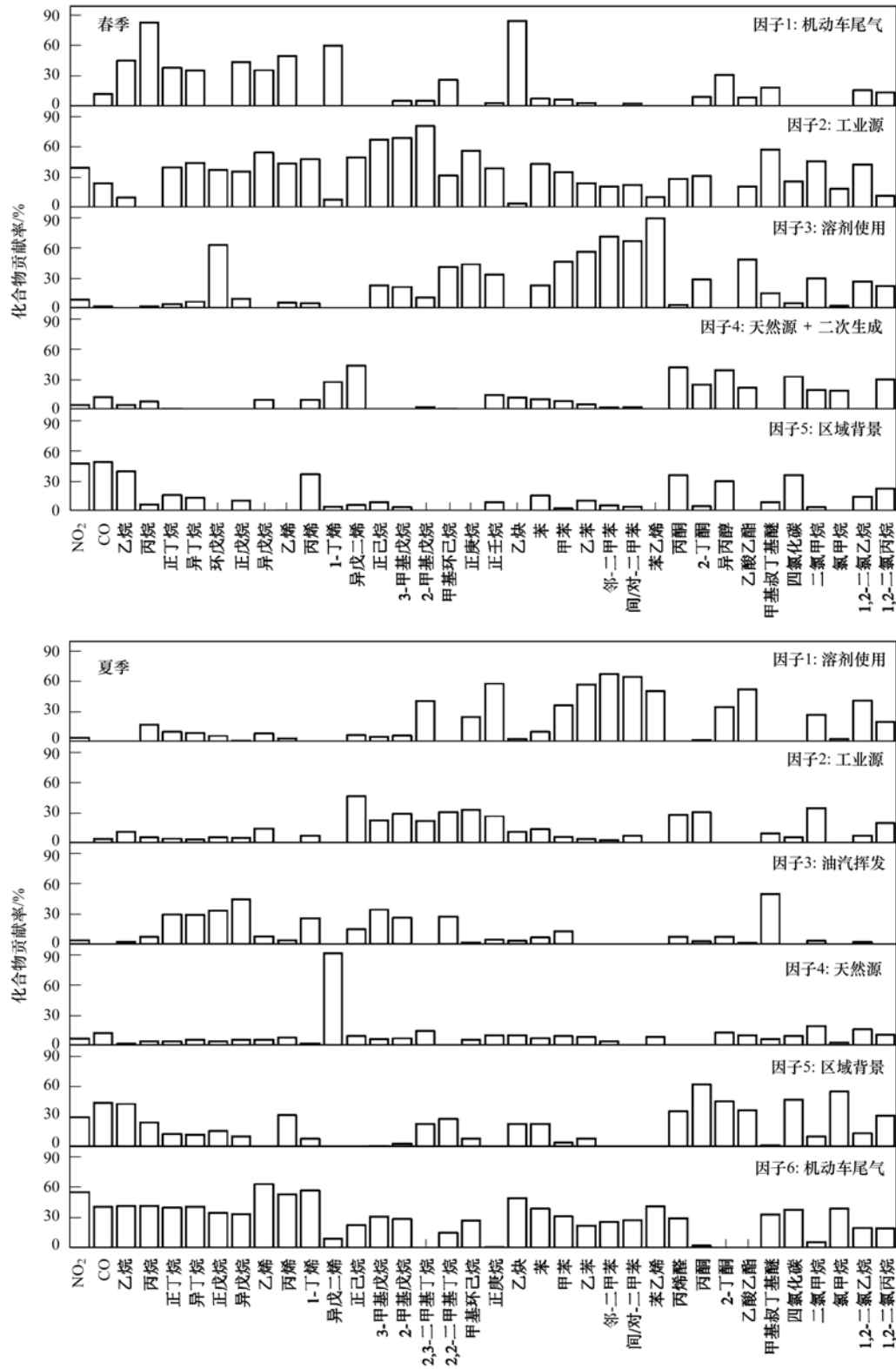
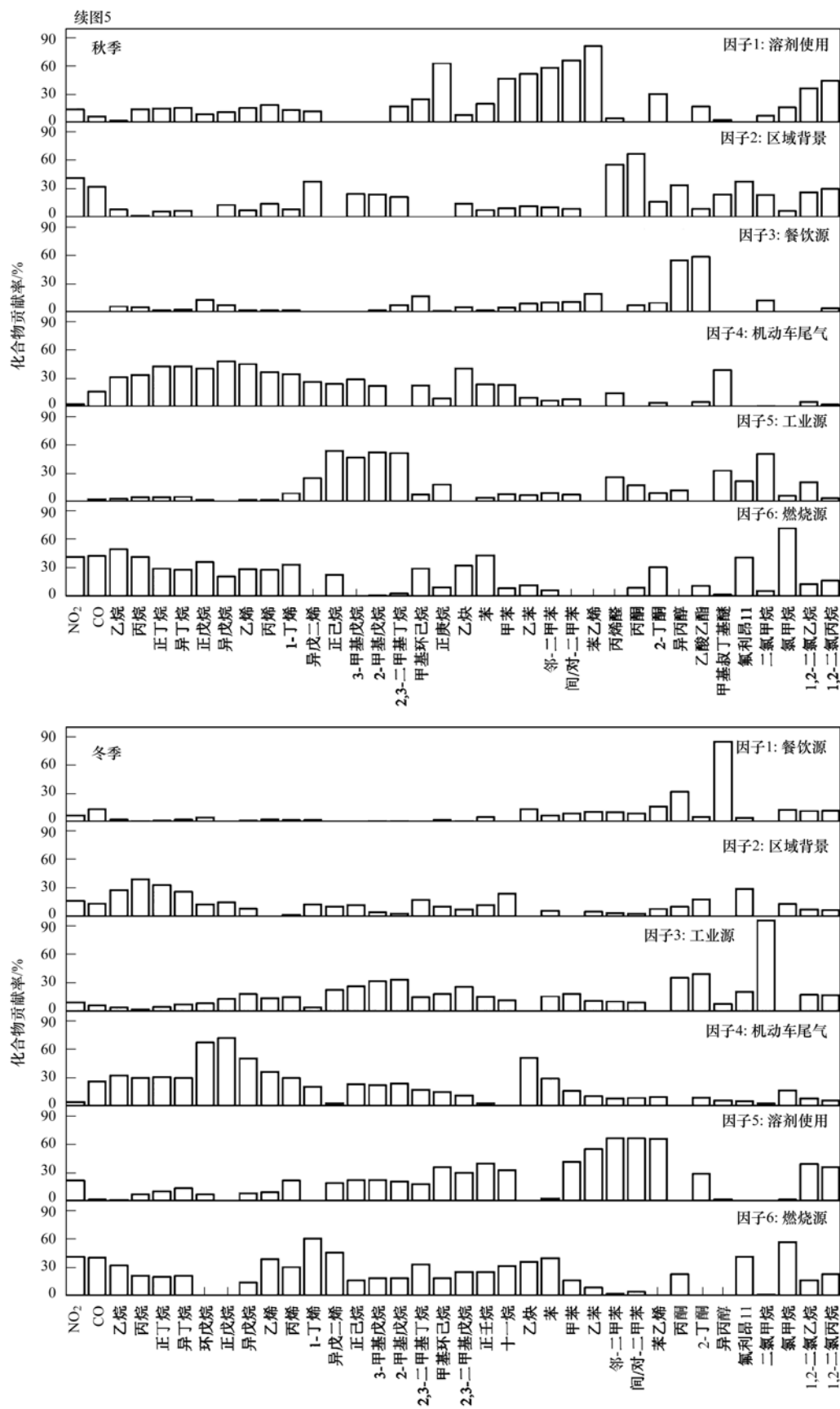


图 5 不同季节各因子中不同物种的贡献

Fig. 5 Contribution of each VOCs species to each factor in different seasons



计算时,对严重偏离平均值的样本,数据缺失较多以及光化学反应活性强、大气存留寿命较短的组分不纳入计算.参加 PMF 来源解析的物种浓度占观测得到的 VOCs 总浓度 80% 左右.同时,将同时观测的

NO₂ 和 CO 数据纳入模型计算,帮助识别排放源.经过诊断检验,最终得到解析因子.

以夏季为例,因子 1 中,贡献比较大的组分是芳香烃,如甲苯、乙苯、邻-二甲苯、间/对-二甲苯和苯

乙烯等,各物种占比在 36% 以上,其他物种占比相对较低,因此判定该因子为溶剂使用^[12];因子 2 中,贡献主要物种为工业排放的二氯甲烷和 1,2-二氯乙烷等卤代烃,以及工业使用的乙酸乙酯和 2-丁酮等物质,因此因子 2 判定为工业源^[14];因子 3 中,贡献较大的物种为机动车油气挥发示踪组分甲基叔丁基醚,正丁烷、异丁烷、正戊烷和异戊烷等,因此判定该因子为油气挥发排放^[23]. 因子 4 中,异戊二烯为主要贡献物种,因此判定为天然源. 因子 5 中,贡献较大的物种有大气化学寿命较强的物种,如氟利昂 11,以及工业源和机动车尾气排放的物种等,物种较为混合,因此判定为区域背景;因子 6 中,贡献较大的物种主要为机动车排放的 $C_2 \sim C_5$ 之间的烷烃、烯烃,以及乙炔,该因子为机动车尾气排放源^[35]. 每个季节因子判别有所不同,包括有工业源、燃烧源、机动车尾气、区域背景、溶剂使用、油气挥发、天然源以及二次生成,如图 5 所示.

根据 PMF 源解析结果,获得各季节排放源对 VOCs 的贡献情况,如图 6 所示. 可以看出,春季占比较大的源主要为工业源(29%)和机动车尾气(28%),其次为区域背景(17%)及溶剂使用(15%);夏季占比较大的主要为机动车尾气(26%)和区域背景(27%),其次为工业源(16%)和溶剂使用(15%);春、夏季温度较秋、冬季更高,光照更强,使用 PMF 明显解析出天然源和二次排放贡献占比,春季天然源和二次生成共占 11%,夏季天然源占比为 7%;同时,夏季温度较高,PMF 解析出油气挥发占比为 9%;秋、冬季贡献占比较大的污染源主要有机动车尾气、燃烧源和区域背景;秋、冬季节,明显解析出燃烧源的排放,且燃烧源占比较大,均占 25% 左右,并解析出餐饮源的排放在 9% 左右;而随着温度降低,光照减弱,未明显解析出天然源和二次排放源的排放;季节对比而言,溶剂使用源与工业源秋、冬季占比较春、夏季有所下降.

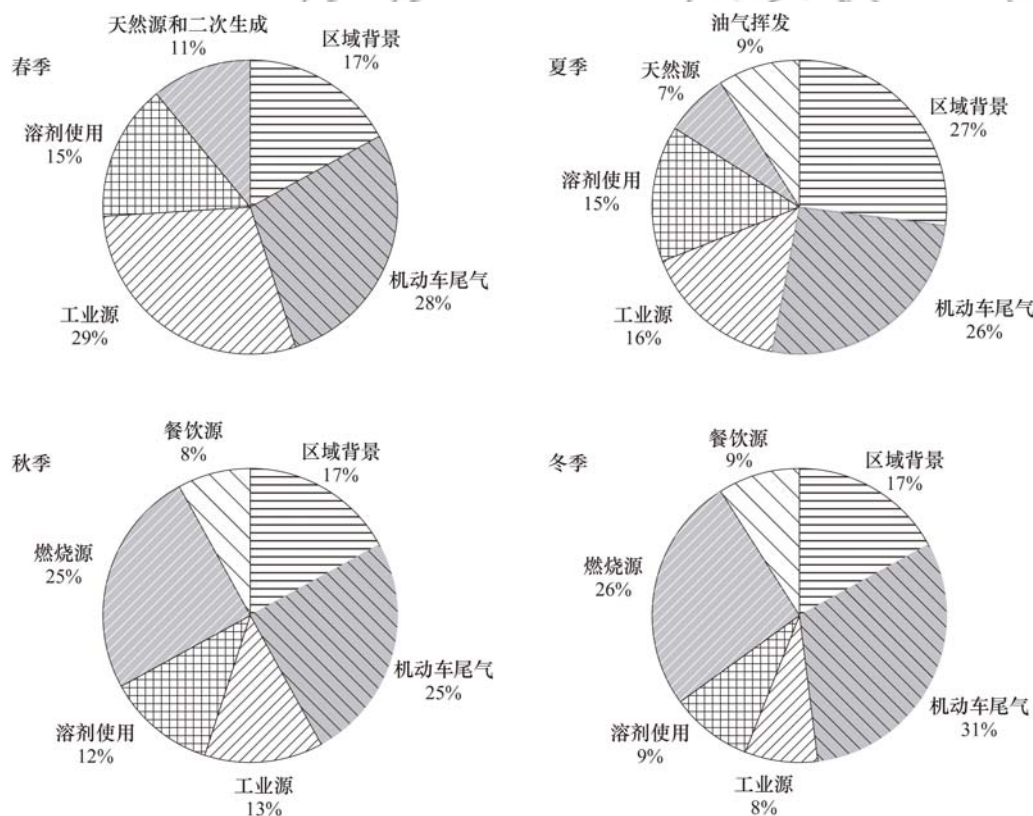


图 6 PMF 源解析典型季节各污染源占比

Fig. 6 Analysis of PMF sources in different seasons

3 结论

(1)成都市城区春、夏、秋和冬季 VOCs 的平均体积分数分别为 32.29×10^{-9} 、 36.25×10^{-9} 、 40.92×10^{-9} 和 49.48×10^{-9} ,冬季的体积分数明显高于

其他季节,春季和夏季的体积分数水平相差不大. 各季节 VOCs 的组分体积分数水平有所差异,冬季烷烃占总 VOCs 的比例最大,可能受机动车排放的影响较明显;夏季和秋季含氧(氮)挥发性有机物占比远高于春、冬季,一次源的挥发排放和二次转化的生

成贡献较大。

(2)成都市城区不同季节大气中 VOCs 平均体积分排名靠前的关键组分基本无变化,主要是 $C_2 \sim C_4$ 的烷烃、乙烯、乙炔及二氯甲烷等,可能受机动车尾气、油气挥发、溶剂使用和 LPG 燃料等影响明显,夏季丙酮以及乙酸乙酯等含氧有机物体积分数贡献突出。

(3)根据 $\cdot OH$ 消耗速率和臭氧生成潜势计算可知:成都市城区对应的关键活性物种主要为间/对-二甲苯、乙烯、丙烯、1-己烯、甲苯、异戊烷和正丁烷等,这些物种应该优先减排和控制。

(4)四季 VOCs 源解析结果显示:春、夏季温度较秋、冬季高,光照更强,PMF 明显解析出天然源和二次排放贡献,同时,由于夏季温度较高,解析出油气挥发占 9%;秋、冬季占比增加的源主要为机动车尾气和燃烧源,燃烧源的排放占比在 25% 左右,另餐饮源的排放占比在 9% 左右。

参考文献:

- [1] 唐孝炎,张远航,邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京:高等教育出版社,2006. 214-263.
Tang X Y, Zhang Y H, Shao M. Atmospheric environmental chemistry (2nd ed.) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 214-263.
- [2] Gee I L, Sollars C J. Ambient air levels of volatile organic compounds in Latin American and Asian cities [J]. Chemosphere, 1998, **36**(11): 2497-2506.
- [3] Yurdakul S, Civan M, Tuncel G. Volatile organic compounds in suburban Ankara atmosphere, turkey: sources and variability [J]. Atmospheric Research, 2013, **120-121**: 298-311.
- [4] Zhang J K, Sun Y, Wu F K, *et al.* The characteristics, seasonal variation and source apportionment of VOCs at Gongga Mountain, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, **88**: 297-305.
- [5] Pinto D M, Blande J D, Souza S R, *et al.* Plant volatile organic compounds (VOCs) in ozone (O_3) polluted atmospheres: the ecological effects [J]. Journal of Chemical Ecology, 2010, **36**(1): 22-34.
- [6] Tsui J K Y, Guenther A, Yip W K, *et al.* A biogenic volatile organic compound emission inventory for Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(40): 6442-6448.
- [7] Duan J C, Tan J H, Yang L, *et al.* Concentration, sources and ozone formation potential of volatile organic compounds (VOCs) during ozone episode in Beijing [J]. Atmospheric Research, 2008, **88**(1): 25-35.
- [8] Vega E, Mugica V, Carmona R, *et al.* Hydrocarbon source apportionment in Mexico City using the chemical mass balance receptor model [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(24): 4121-4129.
- [9] Qin Y, Walk T, Gary R, *et al.* C_2 - C_{10} nonmethane hydrocarbons measured in Dallas, USA-Seasonal trends and diurnal characteristics [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(28): 6018-6032.
- [10] Saito S, Nagao I, Kanzawa H. Characteristics of ambient C_2 - C_{11} non-methane hydrocarbons in metropolitan Nagoya, Japan [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(29): 4384-4395.
- [11] 王伯光,张远航,邵敏. 珠江三角洲大气环境 VOCs 的时空分布特征 [J]. 环境科学, 2004, **25**(S1): 7-15.
- Wang B G, Zhang Y H, Shao M. Special and temporal distribution character of VOCs in the ambient air of Peal River Delta Region [J]. Environmental Science, 2004, **25**(S1): 7-15.
- [12] 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.
- [13] 徐新,王跃思,刘广仁,等. 北京大气中 BTEX 的观测分析与研究 [J]. 环境科学, 2004, **25**(3): 14-18.
Xu X, Wang Y S, Liu G R, *et al.* Measurement and study on the atmospheric trace BTEX in Beijing [J]. Environmental Science, 2004, **25**(3): 14-18.
- [14] 姜洁. 北京大气中痕量挥发性有机污染物的浓度变化研究 [D]. 北京:中国科学院大气物理研究所,2006.
Jiang J. Study on variation of trace volatile Organic compounds in the atmosphere of Beijing [D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [15] 孙杰,王跃思,吴方堃,等. 唐山市和北京市夏秋季节大气 VOCs 组成及浓度变化 [J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1438-1443.
Sun J, Wang Y S, Wu F K, *et al.* Concentration and change of VOCs in summer and autumn in Tangshan [J]. Environmental Science, 2010, **31**(7): 1438-1443.
- [16] 吴方堃,王跃思,安俊琳,等. 北京奥运时段 VOCs 浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 10-16.
Wu F K, Wang Y S, An J L, *et al.* Study on concentration, ozone production Potential and sources of VOCs in the atmosphere of Beijing during Olympics period [J]. Environmental Science, 2010, **31**(1): 10-16.
- [17] 张博韬,安欣欣,王琴,等. 2015 年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征 [J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4400-4407.
Zhang B T, An X X, Wang Q, *et al.* Temporal variation, spatial distribution, and reactivity characteristics of air VOCs in Beijing 2015 [J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4400-4407.
- [18] 崔虎雄,吴迺名,高松,等. 上海城区典型污染过程 VOCs 特征及臭氧潜势分析 [J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3537-3542.
Cui H X, Wu Y M, Gao S, *et al.* Characteristics of ambient VOCs and their role in O_3 formation: a typical air pollution episode in Shanghai urban area [J]. Environmental Science, 2011, **32**(12): 3537-3542.
- [19] 蔡长杰,耿福海,俞琼,等. 上海中心城区夏季挥发性有机物(VOCs)的源解析 [J]. 环境科学学报, 2010, **30**(5): 926-934.
Cai C J, Geng F H, Yu Q, *et al.* Source apportionment of VOCs at city centre of Shanghai in summer [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(5): 926-934.
- [20] 张露露,蒋卫兵,张元勋,等. 上海市青浦区大气挥发性有机化合物的特征 [J]. 中国环境科学, 2015, **35**(12): 3550-3561.
Zhang L L, Jiang W B, Zhang Y X, *et al.* The characteristics of ambient volatile organic compounds (VOCs) in Qingpu Shanghai, China [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(12): 3550-3561.
- [21] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. Chemical Reviews, 2003, **103**(12): 4605-4638.

- [22] Brown S G, Frankel A, Hafner H R. Source apportionment of VOCs in the Los Angeles area using positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(2): 227-237.
- [23] 苏雷燕. 上海市城区大气 VOCs 的变化特征及反应活性的初步研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012. 21-23.
Su L Y. A preliminary study of ambient VOCs variation and chemical reactivity in the urban area of Shanghai, China [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012. 21-23.
- [24] Na K, Kim Y P. Seasonal characteristics of ambient volatile organic compounds in Seoul, Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(15): 2603-2614.
- [25] 邹宇, 邓雪娇, 王伯光, 等. 广州番禺大气成分站挥发性有机物的污染特征[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(5): 808-813.
Zou Y, Deng X J, Wang B G, *et al.* Pollution characteristics of volatile organic compounds in Panyu composition station [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(5): 808-813.
- [26] Guo H, Lee S C, Louie P K K, *et al.* Characterization of hydrocarbons, halocarbons and carbonyls in the atmosphere of Hong Kong[J]. *Chemosphere*, 2004, **57**(10): 1363-1372.
- [27] Kim E, Hopke P K, Edgerton E S. Source identification of Atlanta aerosol by positive matrix factorization[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2003, **53**(6): 731-739.
- [28] 齐应欢. 石化行业挥发性有机物(VOCs)排放特征和环境影响分析[D]. 济南: 山东大学, 2018. 46-50.
Qi Y H. Emission characteristics and environmental impact analysis of volatile organic compounds (VOCs) in petrochemical industry[D]. Jinan: Shandong University, 2018. 46-50.
- [29] 叶伟红, 孙晓慧, 刘劲松, 等. 杭州市交通干线空气中挥发性有机物研究[J]. *中国环境监测*, 2009, **25**(6): 85-89.
Ye W H, Sun X H, Liu J S, *et al.* Study on air pollution of VOC in arterial traffic[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, **25**(6): 85-89.
- [30] 应方, 包贞, 杨成军, 等. 杭州市道路空气中挥发性有机物及其大气化学反应活性研究[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(12): 3056-3064.
Ying F, Bao Z, Yang C J, *et al.* Analysis of volatile organic compounds (VOCs) and their atmospheric chemical reactivity in ambient air around urban traffic roads in Hangzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(12): 3056-3064.
- [31] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [32] Atkinson R, Baulch D L, Cox R A, *et al.* Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: volume II-gas phase reactions of organic species [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(11): 3625-4055.
- [33] 崔彤, 程婧晨, 何万清, 等. 北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1523-1529.
Cui T, Cheng J C, He W Q, *et al.* Emission characteristics of VOCs from typical restaurants in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1523-1529.
- [34] Watson J G, Chow J C, Fujita E M. Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(9): 1567-1584.
- [35] Batterman S A, Peng C Y, James B, *et al.* Levels and composition of volatile organic compounds on commuting routes in Detroit, Michigan[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(39-40): 6015-6030.

CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3879)
Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Chengdu Based on the MARGA	YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3889)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Suqian City	MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, <i>et al.</i> (3899)
Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu	LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, <i>et al.</i> (3908)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan	LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, <i>et al.</i> (3918)
Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of PM _{2.5} in Winter of Xi'an	YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3924)
Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta	DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, <i>et al.</i> (3932)
Component Characteristics and Source Appointment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City	CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, <i>et al.</i> (3941)
Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area	WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3951)
Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer	YAN Ru-sha (3961)
Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction	QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, <i>et al.</i> (3969)
Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province	ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, <i>et al.</i> (3976)
Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas	ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, <i>et al.</i> (3985)
Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City	HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (3993)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin	ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, <i>et al.</i> (4003)
Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area	CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, <i>et al.</i> (4011)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin	LI Xiao, YU Shi, LI Liang, <i>et al.</i> (4021)
Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4030)
Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017	LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, <i>et al.</i> (4042)
Influence of <i>Potamogeton crispus</i> on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure	KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, <i>et al.</i> (4053)
Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir	LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, <i>et al.</i> (4062)
Distribution Characteristics of Per-/polyfluoralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks	SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)
Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water	ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4076)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir	LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, <i>et al.</i> (4081)
Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources	YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, <i>et al.</i> (4088)
Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion	LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, <i>et al.</i> (4095)
Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer	ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)
Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City	LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, <i>et al.</i> (4113)
Adsorption of Sb(V) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism	SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, <i>et al.</i> (4124)
Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation	ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, <i>et al.</i> (4133)
Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater	LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, <i>et al.</i> (4141)
Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process	MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (4150)
Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature	LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4161)
Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiongan New District	GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, <i>et al.</i> (4169)
Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example	WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, <i>et al.</i> (4180)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, <i>et al.</i> (4197)
Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province	ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, <i>et al.</i> (4210)
Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress	HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Field Conditions	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (4226)
Effects of <i>Eucalyptus</i> Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a <i>Eucalyptus</i> plantation in Northern Guangxi	DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (4234)
Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil	YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)
Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources	WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (4253)
Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields	LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River	ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (4273)
Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau	LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (4284)
Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland	CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, <i>et al.</i> (4294)
Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content	SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, <i>et al.</i> (4305)
Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou	WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, <i>et al.</i> (4314)
Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism	LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, <i>et al.</i> (4322)
Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil	LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4333)