

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例  
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2021年1月

第42卷 第1期

Vol.42 No.1



目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测 ..... 顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆 (1)

基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析 ..... 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨 (9)

中原城市群典型城市秋冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及溯源 ..... 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文 (19)

沈阳市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子污染特征及来源解析 ..... 王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀 (30)

保定地区 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素的污染特征及健康风险评价 ..... 雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐 (38)

基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析: 以南京市观测为例 ..... 胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东 (45)

2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源 ..... 高璟璇, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐逸, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁 (55)

柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 ..... 刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽 (65)

天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析 ..... 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂 (75)

2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区 ..... 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李浩, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林 (88)

2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势 ..... 赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (97)

大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析 ..... 李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城 (106)

叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比 ..... 岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国 (114)

东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟 ..... 张冰, 张芊芊, 应光国 (127)

松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估 ..... 杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨 (136)

东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估 ..... 李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮 (147)

河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估 ..... 周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫 (159)

无锡-常州地下水水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估 ..... 王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波 (166)

清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估 ..... 刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛 (175)

会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险 ..... 李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹滢 (184)

三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化 ..... 陈昭宇, 李思悦 (195)

不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布 ..... 岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花 (204)

基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险 ..... 张红娜, 崔娜, 申红妙 (211)

分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制 ..... 闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜 (221)

丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素 ..... 郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进 (234)

太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应 ..... 郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆 (242)

石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量 ..... 邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王盛燕, 王子芳 (251)

前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响 ..... 陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪 (263)

浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制 ..... 陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然 (274)

填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响 ..... 刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励 (283)

FeMnNi-LDHs 对水中 As(III) 的吸附性能与机制 ..... 廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂 (293)

硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制 ..... 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌 (305)

某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征 ..... 颜亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远 (315)

不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替 ..... 李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送 (323)

天然富硒土地划定的富硒阈值 ..... 王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃 (333)

融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测 ..... 高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴俊杰, 刘楚藩 (343)

南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟 ..... 戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平 (353)

闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险 ..... 林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌 (359)

干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响 ..... 杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵 (368)

三元复合调理剂对土壤镉赋存形态和糙米镉累积的调控效应 ..... 蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宇, 周航, 廖柏寒 (378)

风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响 ..... 郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星 (386)

不同施肥措施对水稻土壤微生物抗性的影响 ..... 郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷 (394)

氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性 ..... 张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希 (403)

黄土陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征 ..... 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (411)

生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制 ..... 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺 (422)

植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响 ..... 张瑞海, 宋振, 付卫东, 鄂玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良 (433)

黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应 ..... 史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太 (443)

等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响 ..... 何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华 (450)

秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响 ..... 孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔 (459)

生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响 ..... 杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明 (467)

氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响 ..... 俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红 (477)

微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累 ..... 赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇 (485)

无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟 ..... 阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞 (492)

基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析 ..... 孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超 (501)

《环境科学》征订启事(8) 《环境科学》征稿简则(220) 信息(233, 352, 421)

# 柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析

刘齐<sup>1,2</sup>, 卢星林<sup>3</sup>, 曾鹏<sup>1</sup>, 于爽<sup>1\*</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004; 2. 广西壮族自治区柳州生态环境监测中心, 柳州 545001; 3. 广西壮族自治区生态环境监测中心, 南宁 530028)

**摘要:** 为了解我国西南岩溶工业地区 VOCs 污染特征及其来源, 2019 年 3 月用 GC955 挥发性有机物在线监测系统对柳州市大气 VOCs 进行监测并对其污染特征、臭氧生成潜势 (OFP)、气溶胶生成潜势 (AFP) 和正交矩阵因子模型 (PMF) 进行分析. 结果表明: ①研究区春季监测期间共检出 50 种 VOCs 组分, 日平均摩尔分数为  $25.52 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ . 其中, 烷烃、烯烃、炔烃及芳香烃分布占比为 56.08%、19.63%、14.25% 和 10.04%. ②VOCs 摩尔分数呈现白天低, 夜间高的特征. VOCs 日变化中的峰值与早晚交通高峰出现的时间有一定的相关性, 同时可能受到多方面因素的影响. ③烯烃、芳香烃及烷烃对 OFP 贡献分布为 44.30%、33.03% 及 19.96%, 指示对于芳香烃和烯烃的控制应优先于烷烃. 此外柳州市  $\text{O}_3$  生成处于 VOCs 敏感区, 消减 VOCs 对  $\text{O}_3$  生成具有控制作用. ④芳香烃对 AFP 的贡献高达 95.27%, 因此对于机动车尾气排放、溶剂的使用、汽车产业和化工产业这几个行业工艺上的改进及控制可同时有效地抑制臭氧及霾污染. ⑤柳州春季 VOCs 排放源及其对总 VOCs 的贡献分别为: 工业排放源 (28.34%)、机动车源 (25.47%)、燃烧源 (24.37%)、溶剂使用源 (13.28%) 和植物排放源 (8.54%), 表明控制工业排放源、机动车源和燃烧源是目前控制柳州市环境空气中 VOCs 污染的主要途径, 同时, 重点考虑控制这些排放源排放的烯烃和芳香烃.

**关键词:** 挥发性有机物 (VOCs); 臭氧; 臭氧生成潜势 (OFP); 气溶胶生成潜势 (AFP); 正交矩阵因子模型 (PMF)

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0065-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202004006

## Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou

LIU Qi<sup>1,2</sup>, LU Xing-lin<sup>3</sup>, ZENG Peng<sup>1</sup>, YU Shi<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Ecological Environmental Monitoring Centre of Liuzhou, Liuzhou 545001, China; 3. Guangxi Zhuang Autonomous Region Ecological Environmental Monitoring Centre, Nanning 530028, China)

**Abstract:** The objective was to investigate the characteristics and sources of ambient volatile organic compounds (VOCs) in the karst region in southwestern China. We monitored atmospheric VOCs in Liuzhou by the GC955 VOCs Online Monitoring System and analyzed the pollution characteristics, ozone formation potential (OFP), aerosol formation potential (AFP), and the positive matrix factorization (PMF) model in March 2019. The results show that ① 50 kinds of VOC components were detected during the supervised period, with an average daily concentration of  $25.52 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , which was composed of alkanes (56.08%), alkenes (19.63%), alkynes (14.25%), and aromatics (10.04%), respectively. ② The concentration of VOCs was lower during the day and higher at night, with the highest value at 23:00. The VOC concentration was low in daytime and high at night. The peak value of VOCs with regard to diurnal variation was correlated with the time of morning and the evening traffic peak and may be influenced by various factors. ③ The contribution of alkenes, aromatics, and alkanes to OFP was 44.30%, 33.03%, and 19.96%, respectively. This indicates that the control of aromatic and olefin should prioritize alkanes. In addition, Liuzhou city is in the VOC sensitive area of  $\text{O}_3$  generation, and the reduction of VOCs had a controlling effect on  $\text{O}_3$  generation. ④ The contribution of aromatic hydrocarbons to AFP was up to 95.27%. Therefore, the improvement and control of the processes in motor vehicle exhaust emissions, solvent use, and the automobile industry and the chemical industry could effectively suppress ozone and haze pollution. ⑤ The emission sources of VOCs in spring were mainly industrial emission sources (28.34%), motor vehicle sources (25.47%), combustion sources (24.37%), solvent sources (13.28%), and plant emission sources (8.54%), respectively. This indicates that the control of industrial emission sources, motor vehicle sources, and combustion sources is the main way to control VOC pollution in Liuzhou City. Meanwhile, the olefin and aromatic hydrocarbons emitted by these emission sources should be mainly considered.

**Key words:** volatile organic compounds (VOCs); ozone; ozone formation potential (OFP); aerosol formation potential (AFP); positive matrix factorization (PMF)

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是形成臭氧 ( $\text{O}_3$ ) 和二次有机气溶胶 (SOA)

收稿日期: 2020-04-01; 修订日期: 2020-07-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502302); 国家自然科学基金项目 (41402324); 地质调查项目 (DD20190452); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研费项目 (2020004)

作者简介: 刘齐 (1967 ~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为环境监测, E-mail: 630063076@qq.com

\* 通信作者, E-mail: yushi@karst.ac.cn

的关键前体物<sup>[1]</sup>,对城市光化学烟雾和霾污染有重要影响<sup>[2]</sup>.大多数 VOCs 具有令人不适的特殊气味,并对人体健康造成危害<sup>[3~5]</sup>.虽然从全球尺度上看 VOCs 主要源自于自然界排放,但是随着全球城市化进程的突飞猛进,人类活动密集及工业化程度较强区域的人为源 VOCs 排放量是远超天然排放量.此外,VOCs 排放来源广泛<sup>[6~8]</sup>,组分复杂<sup>[9]</sup>并且是大气污染物中 O<sub>3</sub> 的重要前体物<sup>[10,11]</sup>.因此有必要对此类区域 VOCs 浓度、组成特征及污染来源进行较为深入研究,这对大气污染的防治工作有重要的指导意义.

基于 VOCs 对人类健康的危害及为管理部门制定高效的大气污染治理策略提供科学依据的大背景下,当前我国关于大气 VOCs 的监测研究主要集中在我国人口密集及工业发达的京津冀<sup>[12~14]</sup>、长三角<sup>[15~18]</sup>、珠三角<sup>[19,20]</sup>和一些重要城市<sup>[21~26]</sup>,但对于我国西南工业性城市的 VOCs 污染现状研究还略显欠缺.柳州是国家 II 型大城市,广西第一大工业城市,中国五大汽车城之一,已形成以汽车、机械和冶金为支柱产业,制药、化工、造纸、制糖、建材和纺织等传统产业并存的现代工业体系.环境空气质量监测数据表明,近年来柳州市臭氧作为首要污染物的天数日益上升.基于此,为了解典型西南工业性城市柳州 VOCs 的污染特征及来源,于 2019 年 3 月由广西壮族自治区生态环境监测中心组织,对柳州市大气 VOCs 的浓度水平、组成特征、反应活性和来源解析开展监测分析,以期对柳州市控制 VOCs 排放和改善环境空气质量提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点位及时间

采样点位于柳州市壶西实验中学教学楼楼顶,基本处于城市核心地区.坐标为东经 109.3886°,北纬 24.3406°.地处柳南区,附近有中小学校、居民区、基隆和渡口两个城中村及办公商业区.壶西实验中学南边有一小公园,公园南边是交通干道潭中西路,潭中西路南边有一加油站,加油站距离采样点约 350 m.壶西实验中学数公里外,西面有大型汽车和工程机械等企业,北面隔柳江有大型化工和钢铁等企业.采样口距地面约 18 m.

### 1.2 样品采集分析

VOCs 采用挥发性有机物在线监测系统 (GC955,荷兰)进行采样及分析.其中低沸点组分 (22 种)采用 Synspec GC955-815 分析仪 [PID/FID 双检测器,SY5 型石英毛细管柱 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 5 m + 25 m, 0.32 mm)] 分析;高沸点组分采用

Synspec GC955-615 分析仪 [PID 检测器,SY1 型石英毛细管柱 (30 m, 0.32 mm)] 分析,分析周期均为 30 min. 24 h 连续采样,每天 48 组数据.采样时间为 2019 年 3 月 5 日 00:00 ~ 31 日 24:00,其中 3 月的 12 (17:00 以后)、13、20 和 27 日因进行了校准、核查和去残留等操作,剔出这 4 d 的全天数据,得到 23 d 的有效数据.用美国 EPA 认可 PAMS 标气每周进行一次单点校准,每季度进行一次多点校准.

臭氧和 NO<sub>x</sub> 采用 OPSIS AR500 环境空气质量监测系统连续在线分析.每周使用国家质量技术监督局认证标准气体对仪器进行校准及自检,每季度进行零点和跨度校准检查,每年进行仪器多点线性校准和精密度审核.

### 1.3 臭氧生成潜势

臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP) 一般用来综合衡量理想条件下 VOCs 组分通过化学反应产生 O<sub>3</sub> 的能力,计算公式为:

$$OFP_i = [VOCs_i] \times MIR_i$$

式中, OFP<sub>i</sub> 指第 *i* 个 VOC 组分的臭氧生成潜势 (μg·m<sup>-3</sup>); [VOCs<sub>i</sub>] 为第 *i* 个 VOC 组分的质量浓度 (μg·m<sup>-3</sup>); MIR<sub>i</sub> 指第 *i* 个 VOC 组分的最大增量反应活性系数, g·g<sup>-1</sup>, 以 O<sub>3</sub>/VOCs 计<sup>[27]</sup>.

### 1.4 O<sub>3</sub> 生成敏感性

臭氧的形成主要受到前体物 VOCs 和 NO<sub>x</sub> 的影响.判断 O<sub>3</sub> 生成敏感性的特征比值法包括 O<sub>3</sub> 生成效率 (ozone production efficiency, OPE, O<sub>3</sub>/NO<sub>2</sub>)、VOCs/NO<sub>x</sub> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/NO<sub>2</sub> 等,其中 NO<sub>2</sub> 表示 NO<sub>y</sub> 与 NO<sub>x</sub> 的差值<sup>[28~32]</sup>.本研究采用 VOCs/NO<sub>x</sub> 法,其判断标准为 VOCs/NO<sub>x</sub> < 4.0 时为 VOCs 敏感, VOCs/NO<sub>x</sub> > 8.0 时为 NO<sub>x</sub> 敏感, VOCs/NO<sub>x</sub> 为 4.0 ~ 8.0 时为过渡区<sup>[33]</sup>.

### 1.5 气溶胶生成潜势

二次气溶胶生成潜势 (aerosol formation potential, AFP) 是判断有机气溶胶生成的一种方法,一般认为 6 个碳以上的 VOC 氧化才能形成二次气溶胶<sup>[34]</sup>.根据 Grosjean 烟雾箱实验<sup>[35]</sup>,通过 FAC 系数来估算大气中 VOCs 对其贡献,公式如下:

$$AFP = (VOCs_i \times FAC) / (1 - FVOC_r)$$

式中, VOCs<sub>i</sub> 是经过氧化后的 VOC 组分浓度,即环境空气中的 VOC 组分浓度, μg·m<sup>-3</sup>; FAC 是气溶胶生成系数, %; FVOC<sub>r</sub> 是 VOC 组分中参与反应的质量分数, %.

### 1.6 PMF 源解析

PMF (positive matrix factorization) 模型是由 Paatero 等<sup>[36]</sup>提出的一种新颖有效的源解析方法,是

美国环保署 (USEPA) 确定的区域环境污染评价的重要方法之一, 在气溶胶成分分析和 VOCs 成分分析等方面都有广泛应用<sup>[37,38]</sup>. PMF 源解析技术可以同时确定污染源类型及其贡献, 无需输入源谱数据, 并且对污染源类型及其贡献有非负限制, 使得 PMF 明显优于其它源解析方法.

PMF 基本原理: 假设  $X$  为  $n \times m$  矩阵,  $n$  为样品数,  $m$  为化学组分数目, 那么  $X$  可以分解为矩阵  $G$  和矩阵  $F$ , 其中  $G$  为  $n \times p$  的排放源贡献矩阵,  $F$  为  $p \times m$  的污染源成分谱矩阵,  $p$  为主要污染源的数目. 定义为:

$$X = GF + E$$

式中,  $E$  为残差矩阵, 表示  $X$  与  $GF$  之间存在的差异; PMF 分析的目的是使总方差最小化, 即  $Q$  值最小,  $Q$  定义为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left( \frac{x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj}}{s_{ij}} \right)^2$$

式中,  $s_{ij}$  是第  $i$  个样品第  $j$  种组分的不确定性;  $x_{ij}$ 、 $g_{ik}$  和  $f_{kj}$  分别为  $X$ 、 $G$  和  $F$  矩阵的元素. 在  $g_{ik} \geq 0$  和  $f_{kj} \geq 0$  的约束条件下, 通过迭代最小化算法对  $Q$  求解, 可以同时确定污染源贡献值  $G$  (相对值) 和污染源成分谱  $F$  (化学成分的相对浓度值).

PMF 模型是在受体成分谱已知而源谱未知的情况下, 结合各排放源的标识物和运算结果, 推断排放源类型及其对受体的贡献. PMF 模型可以估计非负的源成分谱和源贡献率, 解析结果更符合实际情况. 与其它因子分析方法一样, PMF 模型不能直接确定因子数目, 需要考虑研究区域的实际情况, 并尝试多次运行软件, 根据分析结果和误差、 $Q$  值以及改变因子数目时  $Q$  值的相对变化等, 确定合理的因子数目.

## 2 结果与讨论

### 2.1 VOCs 浓度水平及组成特征

本研究共检出 50 种 VOCs 组分, 其中, 烷烃 27 种, 烯烃 9 种, 炔烃 1 种, 芳香烃 13 种. 采样期间各组分摩尔分数见表 1. 采样期间日平均浓度为  $22.52 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

由表 1 可知, 在烷烃中, 丙烷 ( $3.48 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )、乙烷 ( $3.44 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )、正丁烷 ( $1.78 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )、异丁烷 ( $1.08 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) 和异戊烷 ( $1.09 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) 是摩尔分数最高的 5 个组分, 对烷烃的贡献为 86.06%; 在烯烃中, 乙烯 ( $3.58 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )、丙烯 ( $0.46 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) 是摩尔分数最高的 2 个组分, 对

表 1 VOCs 组分的摩尔分数、OFP 值和 AFP 值

Table 1 Concentrations of VOCs, OFP value, and AFP value

组分	VOCs $\times 10^{-9}$ / $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	OFP / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	AFP / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
乙烷	3.44	1.20	
丙烷	3.48	3.43	
异丁烷	1.08	3.36	
正丁烷	1.78	4.99	
环戊烷	0.01	0.07	
异戊烷	1.09	4.92	
正戊烷	0.38	1.51	
2,2-二甲基丁烷	0.02	0.09	
2,3-二甲基丁烷	0.34	1.19	
2-甲基戊烷	0.11	0.42	
3-甲基戊烷	0.05	0.22	
正己烷	0.38	1.83	
2,4-二甲基戊烷	0.01	0.07	
环己烷	0.02	0.09	
2-甲基己烷	0.03	0.15	
2,3-二甲基戊烷	0.01	0.06	
3-甲基己烷	0.04	0.27	
甲基环己烷	0.02	0.18	0.003
正庚烷	0.02	0.09	
2,2,4-三甲基戊烷	0.01	0.06	
2,3,4-三甲基戊烷	0.02	0.16	
2-甲基庚烷	0.01	0.07	
3-甲基庚烷	0.01	0.06	
正辛烷	0.14	0.59	
正壬烷	0.02	0.08	
正癸烷	0.06	0.24	0.010
正十一烷	0.05	0.19	0.012
总烷烃	12.63	25.56	0.025
乙烯	3.58	39.29	
丙烯	0.46	8.12	
反-2-丁烯	0.10	3.71	
1-丁烯	0.07	1.65	
顺-2-丁烯	0.05	1.74	
1-戊烯	0.10	0.44	
顺-2-戊烯	0.01	0.32	
异戊二烯	0.04	1.25	
1-己烯	0.01	0.21	
总烯烃	4.42	56.72	
乙炔	3.21	3.47	
总炔烃	3.21	3.47	
苯	0.78	1.88	0.060
甲苯	0.53	8.46	0.134
乙苯	0.15	2.08	0.045
间/对-二甲苯	0.37	14.43	0.125
苯乙烯	0.04	0.31	—
邻-二甲苯	0.17	5.99	0.054
正丙苯	0.01	0.11	0.001
间-乙基甲苯	0.07	2.71	0.034
1,3,5-三甲苯	0.01	0.54	0.006
邻-乙基甲苯	0.02	0.58	0.008
1,2,4-三甲苯	0.08	3.71	0.020
1,2,3-三甲苯	0.02	1.25	0.008
对-二乙苯	0.01	0.26	0.007
总芳香烃	2.26	42.30	0.503
总 VOCs	22.52	128.05	0.528

烯烃的贡献为 91.40%；在芳香烃中，苯 ( $0.78 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )、甲苯 ( $0.53 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )、间/对-二甲苯 ( $0.37 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )、邻-二甲苯 ( $0.17 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) 和乙苯 ( $0.15 \times 10^{-9}$

$\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) 是摩尔分数最高的 5 个组分,对芳香烃的贡献为 88.50%.

柳州及各城市大气中各种烃类的摩尔分数占比见表 2.

表 2 各种烃类的浓度占比<sup>1)</sup>

Table 2 Species ratios of VOCs

城市	烷烃 $\times 10^{-9}$ / $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	占比 /%	烯烃 $\times 10^{-9}$ / $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	占比 /%	炔烃 $\times 10^{-9}$ / $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	占比 /%	芳烃 $\times 10^{-9}$ / $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	占比 /%	总 VOCs $\times 10^{-9}$ / $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	文献
柳州	12.62	56.08	4.42	19.63	3.21	14.25	2.26	10.04	22.52	本研究
郑州	10.29	35.3	1.90	5.2	—	—	3.04	9.9	30.66	[21]
宝鸡	9.67	56.0	1.23	7.1	—	—	5.56	32.2	17.27	[21]
北京	15.50	42.6	4.40	12.1	—	—	8.60	23.6	36.40	[21]
广州	20.72	56.0	7.49	18.5	—	—	12.37	30.5	40.58	[21]
成都	13.17	46.8	3.51	12.5	3.00	10.7	3.03	10.8	28.14	[23]
宜宾	9.07	25.8	3.29	9.4	—	—	9.18	26.2	35.09	[39]

1) 文献[21,39]无炔烃数据

由表 2 可知,与其他城市相比,柳州市春季环境空气中总 VOCs 摩尔分数处于中等偏下水平,烷烃占比最高,烯烃和炔烃次之,芳烃占比最低.芳烃占比较低是柳州环境空气中总 VOCs 较显著的特征.虽然柳州为工业城市,但是苯系物浓度却相对于北京、广州、郑州及成都这 4 个城市处于较低水平,原因可能为如下两点:第一,人口基数较小使得部分人为源排放量较小.柳州市人口约 400 万,远小于北京(2 154 万)、广州(1 404 万)、成都(1 633 万)、郑州(1 100 万)及宜宾(554 万),只与宝鸡相类似(377 万),这意味着诸如汽车尾气排放及燃烧源(供暖、发电)都处于相对较低水平.第二,柳州气候条件可能会影响总 VOCs(含苯系物)的浓度.柳州地处亚热带季风区,常年湿润多雨,年均降雨常年被季风环流影响,年均降水量在 1 400 ~ 1 500 mm 之间,造成空气中污染物被较大范围地冲刷<sup>[40]</sup>,因此使得研究区苯系物浓度相对较低,VOCs 摩尔分数总体较低(表 2)也间接证明此推论.

炔烃是燃烧源的典型排放物种<sup>[41~43]</sup>.柳州环境空气中炔烃质量浓度总体较高,为  $3.21 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,与太原( $3.69 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )、朔州( $1.14 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )、广州( $0.12 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )、济南( $0.45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )和晋城( $4.86 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )空气中的炔烃浓度数据处于同一数量级,与上述 5 个城市中炔烃浓度较高的太原及晋城基本相当<sup>[22]</sup>.这可能是与研究区的工业布局及机动车尾气排放密切相关.如太原是煤炭资源丰富且以能源、冶金、机械和化工为支柱的中心城市,晋城则是以煤炭、炼焦、冶铸和电力为主的工业城市.3 月柳州市的主导风向为偏北风,可能与监测点位北面大量用煤的大型钢铁、化工等企业有关及机动车排放相关<sup>[44]</sup>,因此与上述两个城市的炔烃浓度相当.

## 2.2 VOCs 浓度日变化特征

监测期间,柳州市 VOCs 浓度的日变化特征见图 1.从中可以看出,在 05:00 ~ 19:00 时段,VOCs 摩尔分数维持在  $25 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  以下水平,07:00 ~ 09:00 交通早高峰期间,随着人类活动的增加,VOCs 摩尔分数有小幅幅度抬升,10:00 以后,随着太阳辐射强度增强,导致气温升高及大气边界层升高,使得对流作用相对激烈<sup>[45]</sup>,光化学反应速率加快,造成 VOCs 摩尔分数总体呈下降趋势,并维持在低水平至 16:00,在这以后,VOCs 摩尔分数开始上升.至 18:00,由于交通晚高峰的到来,以及日落后地面温度降低,对流作用减弱,混合边界层降低,光化学反应减弱<sup>[46]</sup>,使得 VOCs 不断累积,浓度直线上升,于 23:00 出现最高值.随后,由于人类活动的急剧减少,VOCs 浓度快速下降.

综上所述,柳州市 VOCs 摩尔分数呈现白天低,夜间高的特征.最高值出现在 23:00.与前人的研究相比<sup>[42,47]</sup>,呈现的规律基本一致,即 VOCs 日变化中

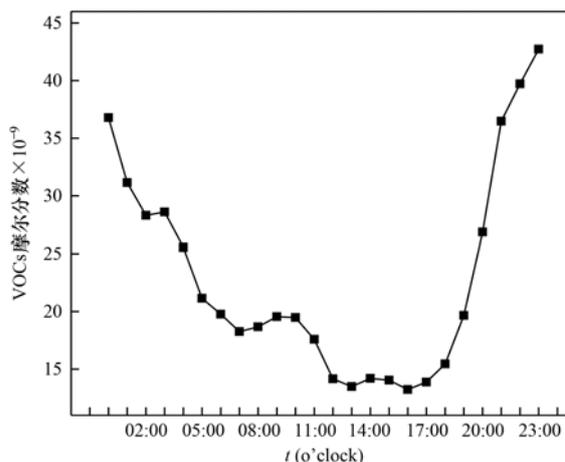


图 1 VOCs 摩尔分数日变化

Fig. 1 Daily variation of the concentration of VOCs

的峰值与早晚交通高峰出现的时间有一定的相关性,同时可能受到工业排放、生物质燃烧、溶剂挥发和气象条件等多方面因素的影响。

### 2.3 VOCs 臭氧生成潜势及关键组分识别

由表 1 可知,监测期间,柳州市 VOCs 的 OFP 为  $128.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。各 VOCs 组分中,烯烃、芳香烃及烷烃对 OFP 贡献分布为 44.30%、33.03% 和 19.96%。虽然烯烃和芳香烃对 VOCs 贡献仅为 19.63% 和 10.03%,但对 OFP 贡献却合计高达 77.33%。这可能是由于芳香烃和烯烃双键键能较弱,与 OH 自由基反应的化学活性较高,导致活性较强的烯烃和芳香烃更易参与光化学反应,从而生成更多的臭氧,进而二者对 OFP 的贡献度较其它 VOCs 物种更高<sup>[15,21]</sup>。反之烷烃对 VOCs 贡献为 56.08%,却对 OFP 贡献分布只占 19.96%,可能由于 C—H 键单键能略强于双键键能,与·OH 间的反应较为缓慢,其光化学反应活性较低,生成臭氧的能力也相对较弱。基于芳香烃和烯烃在柳州春季臭氧形成中具有较大的潜力,管理部门控

制一次排放的芳香烃和烯烃应优先于烷烃,这更有利于控制柳州春季大气臭氧的生成。

监测期间对 OFP 贡献排名前十的组分是乙烯(30.68%)、间/对-二甲苯(11.27%)、甲苯(6.61%)、丙烯(6.34%)、邻-二甲苯(4.68%)、正丁烷(3.90%)、异戊烷(3.84%)、(2.90%)、反-2-丁烯(2.90%)和乙炔(2.71%)。这些组分是柳州市环境空气中臭氧生成潜势的关键活性组分。乙烯通常主要来源于机动车尾气排放及石油化工排放<sup>[31]</sup>,间/对-二甲苯和甲苯等苯系物通常来源于机动车尾气排放和溶剂的使用,1,2,4-三甲苯及邻-二甲苯则可能来源于汽车产业零件涂装、烘干车间和化工产业<sup>[48]</sup>。根据柳州市的工业布局大致可知控制柳州地区的交通和石油化工排放,改进本地汽车制造业加工工序的工业技术有利于减少本地区的臭氧污染。

### 2.4 VOCs 与 O<sub>3</sub> 相关性分析及生成敏感性分析

大气中的 VOCs 与氮氧化物等在紫外光照射和

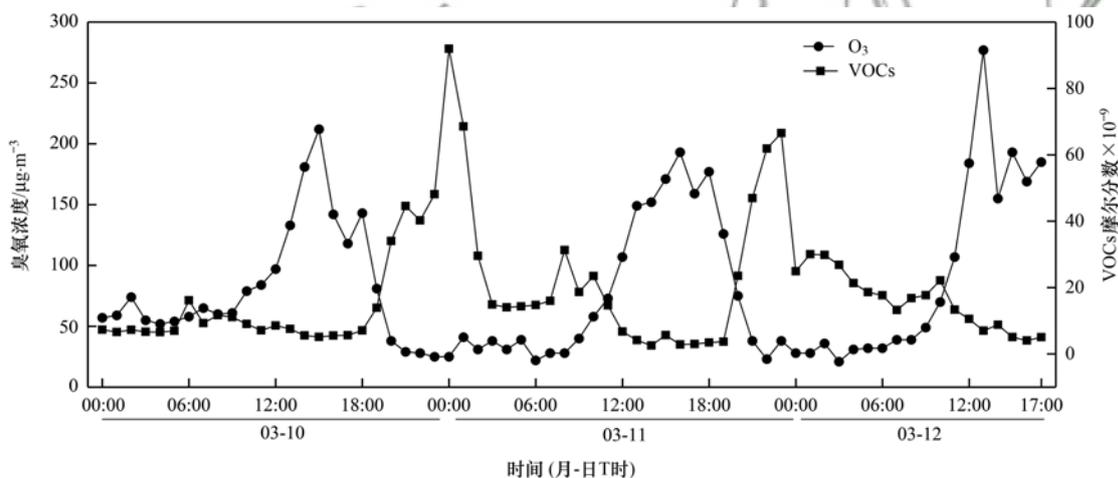


图 2 柳州市 2019 年 3 月 VOCs 与臭氧同时刻变化趋势

Fig. 2 Variation trend of VOCs and O<sub>3</sub> concentrations at the same time in Liuzhou City in March 2019

一定的温度条件下,会发生快速的光化学链式反应,产生臭氧和过氧乙酰硝酸酯(PAN)等具有刺激性和毒性的氧化剂、醛酮类含氧有机物及细颗粒物<sup>[49,50]</sup>。用同一监测点位臭氧浓度较高的 3 月 10 ~ 12 日 17:00 的数据进行分析,VOCs 摩尔分数与臭氧浓度的关系如图 2 所示。从中可见,3 月的 10 日 15:00、11 日 16:00 和 12 日 13:00 臭氧浓度处于波峰值时,VOCs 浓度均处于波谷值,指示 VOCs 参与臭氧的生成反应程度较高。2019 年 3 月 10 ~ 12 日柳州市最低气温 11℃,最高气温 23℃,气温较低,太阳辐射强度不强,光化学反应尚不强烈,因此 VOCs 浓度波谷值不典型。

采用 VOCs/NO<sub>x</sub> 特征比值法判断区域 O<sub>3</sub> 生成的敏感性。2019 年 3 月的 VOCs/NO<sub>x</sub> 特征比值见图 3。

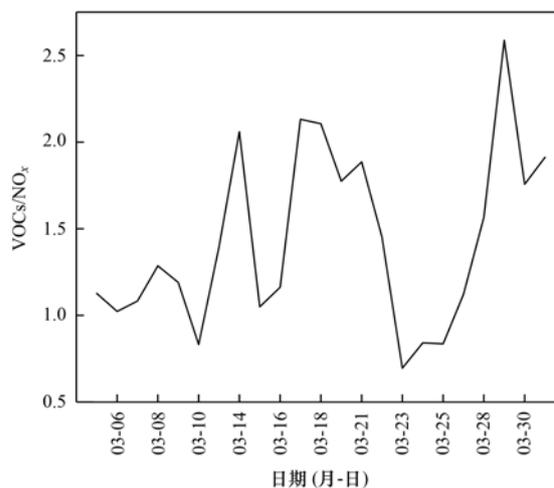


图 3 观测期间特征比值

Fig. 3 Feature ratios during the observation period

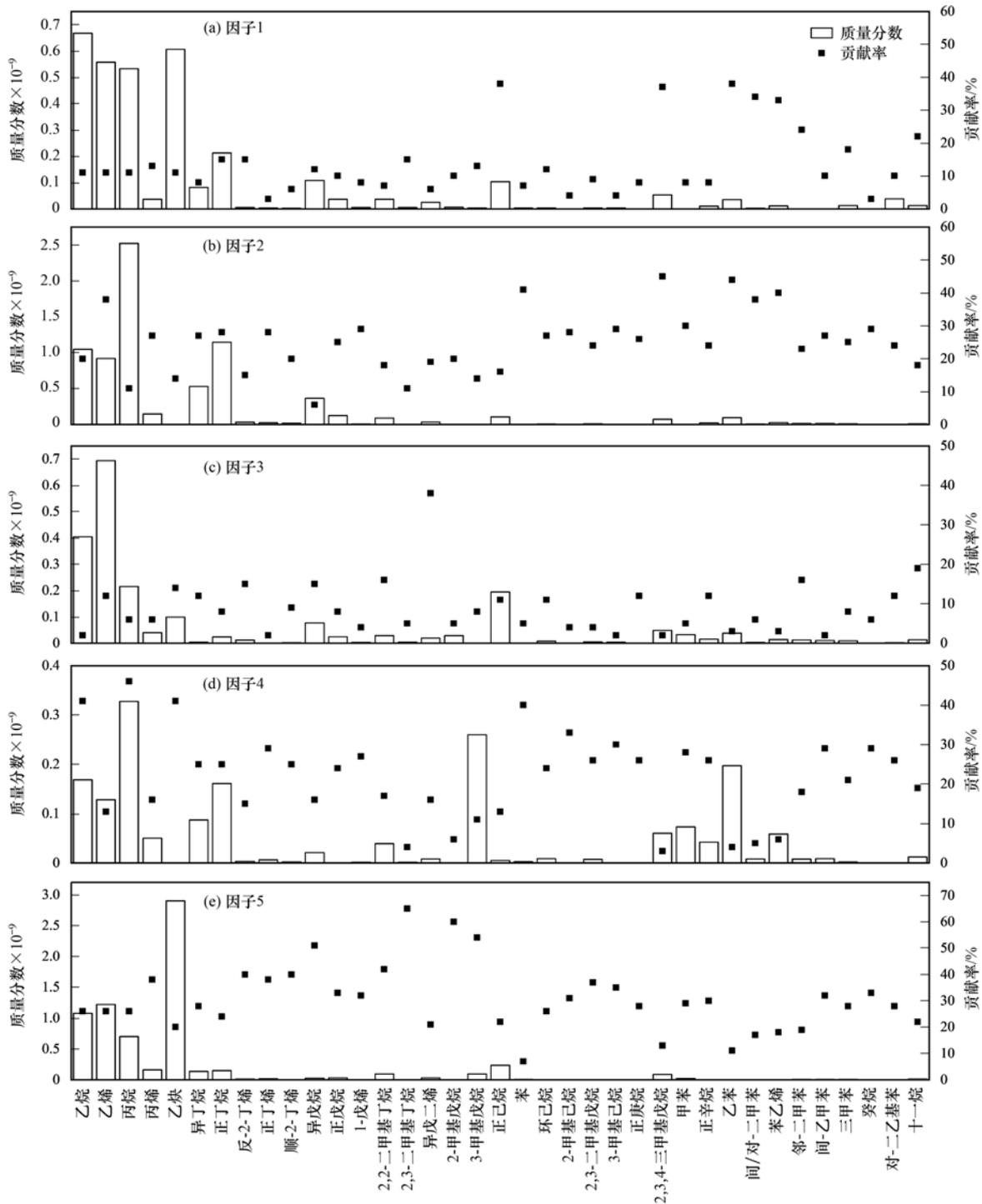


图4 各因子中 VOCs 组分浓度及对各因子的贡献

Fig. 4 Concentrations and contributions of VOCs species for each factor

从中可知 VOCs/NO<sub>x</sub> 的日平均比值在研究时段均低于 4.0, 指示本研究期间柳州市 O<sub>3</sub> 生成处于 VOCs 敏感区. 这一结果与相关研究的结果一致<sup>[51,52]</sup>.

2.5 VOCs 气溶胶生成潜势及关键组分识别

由表 1 可知, 监测期间, 柳州市 VOCs 的 AFP 为 0.528 μg·m<sup>-3</sup>. 各类 VOCs 中, 芳香烃和长链烷烃对 AFP 有贡献<sup>[15]</sup>. 柳州市芳香烃对 AFP 的贡献为 95.27%, 烷烃对 AFP 的贡献为 4.73%, 芳香烃的贡

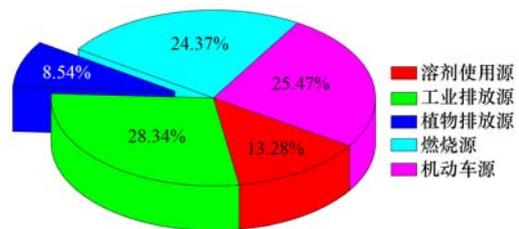


图5 5种排放源对 VOCs 贡献

Fig. 5 Contributions of five emission sources to VOCs

献占主导地位. 监测期间对 AFP 贡献排名前 5 位的

组分是甲苯( $0.134 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、间/对-二甲苯( $0.125 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、苯( $0.060 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、邻-二甲苯( $0.054 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )和乙苯( $0.045 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。可见,柳州市空气中的芳香烃组分既影响臭氧污染,也影响霾污染。从 2.3 节可知苯系物通常来源于机动车尾气排放、溶剂的使用、汽车产业和化工产业,因此对于这 4 个行业工艺上的改进及控制可同时有效地抑制臭氧生成及霾污染。

## 2.6 PMF 源解析

本研究对获得的 50 种 VOCs 的浓度做了如下处理以确保研究的准确性:①剔除掉组分浓度平均值低于检出限的物质和信噪比小于 0.2 的物质,对于组分数据缺失率小于 40% 的物质,其浓度值用中位浓度进行替换。②进行多次的模型重构,使得  $Q$  (Robust) 稳定且约等于  $Q$ (True) 的值(51510),说明此时数据与模型优化最好,并且调整比值残差值与  $r^2$  值,将组分划分为强、弱和坏这 3 种,使组分比值残差大多处在  $+3 \sim -3$  之间,最后,经过多次因子数调整之后,得到因子数为 5 的时候,得到的结果独立性较好且较符合实际。③选择典型来源的特征物种作为输入,如正己烷是溶剂使用源排放的特征物种,烯烃和芳香烃类是我国机动车排放来源的主要特征物种等。

PMF 解析的柳州市 5 种 VOCs 排放源中各组分的贡献率见图 4, 5 种不同的排放源依次分别为:溶剂使用源、工业排放源、植物排放源、燃烧源和机动车源。

因子 1 中,正己烷、乙苯、邻-二甲苯、间/对-二甲苯、苯乙烯和 2,3,4-三甲基戊烷具有较高的指纹谱贡献率。正己烷是溶剂使用源排放的特征物种<sup>[22]</sup>,苯系物在溶剂使用(如油漆、涂料)过程中排放比例较大<sup>[53]</sup>,2,3,4-三甲基戊烷主要用作溶剂,因此,因子 1 被识别为溶剂使用源。

因子 2 中,乙烯、2,3,4-三甲基戊烷、乙苯、间/对-二甲苯、苯乙烯和苯等物质具有较高的指纹谱贡献率。苯系物常用于有机合成<sup>[21]</sup>,苯乙烯、乙烯等物种是焦化行业排放的代表性物种<sup>[22]</sup>,乙烯、苯乙烯、乙苯和间/对-二甲苯等苯系物是工业工艺过程典型排放物种<sup>[22]</sup>,2,3,4-三甲基戊烷主要用于有机合成,因此,因子 2 被识别为工业排放源。

因子 3 中,异戊二烯的指纹谱贡献率最高,其他组分的贡献率都很低。异戊二烯可以用作植物排放的示踪物<sup>[54]</sup>。2019 年柳州市建成区绿化覆盖率为 43.97%,城市绿化水平较高,采样点附近有不少树木绿植,有基隆和渡口两个城中村的菜地等,因此,因子 3 被识别为植物排放源。

因子 4 中,乙烷、丙烷、乙炔和苯等化合物具有较高的指纹谱贡献率,乙炔是化石燃料和生物质燃烧的重要指示物种<sup>[22]</sup>,C2 ~ C3 低碳类烷烃化合物、苯等主要来源于燃煤<sup>[55]</sup>。因此,因子 4 被识别为燃烧源。

因子 5 中,2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、异戊烷、2,2-二甲基丁烷、2,3-二甲基丁烷、反-2-丁烯和顺-2-丁烯的指纹谱贡献率较高。异戊烷、2-甲基戊烷、3-甲基戊烷和 2,3-二甲基丁烷是典型汽车尾气排放示踪物质<sup>[56,57]</sup>,烯烃类物种比例高是我国油品的主要特点<sup>[22]</sup>,因此,因子 5 被识别为机动车源。

综上,本研究解析出监测期间柳州市 VOCs 的 5 类主要排放源。经计算,它们对总 VOCs 的贡献依次分别为工业排放源(28.34%)、机动车源(25.47%)、燃烧源(24.37%)、溶剂使用源(13.28%)和植物排放源(8.54%),如图 5 所示。

## 3 结论

(1) 研究区春季监测期间共检出 50 种 VOCs 组分,日平均摩尔分数为  $25.52 \times 10^{-9} \text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。其中,烷烃占比为 56.08%,烯烃为 19.63%,炔烃为 14.25%,芳香烃为 10.04%。柳州市春季环境空气中总 VOCs 摩尔分数处于偏低水平,但乙炔摩尔分数相对较高。

(2) VOCs 摩尔分数呈现白天低,夜间高的特征。VOCs 日变化中的峰值与早晚交通高峰出现的时间有一定的相关性,同时可能受到工业排放、生物质燃烧、溶剂挥发和气象条件等多方面因素的影响。

(3) 烯烃、芳香烃及烷烃对 OFP 贡献分布为 44.30%、33.03% 和 19.96%。

管理部门控制一次排放的芳香烃和烯烃应优先于烷烃,这更有利于控制柳州春季大气臭氧的生成。此外柳州市  $\text{O}_3$  生成处于 VOCs 敏感区,消减 VOCs 对  $\text{O}_3$  生成具有控制作用。

(4) 研究期间芳香烃对 AFP 的贡献高达 95.27%,可见,柳州市空气中的芳香烃组分既影响臭氧污染,也影响霾污染。因此对于机动车尾气排放、溶剂的使用、汽车产业和化工产业这几个行业工艺上的改进及控制可同时有效地抑制影响臭氧及霾污染。

(5) 应用 PMF 模型解析可知柳州春季 VOCs 排放源及其对总 VOCs 的贡献分别为工业排放源(28.34%)、机动车源(25.47%)、燃烧源(24.37%)、溶剂使用源(13.28%)和植物排放源(8.54%),以工业排放源、机动车源和燃烧源为主。控制工业排放源、机动车源和燃烧源是目前控制柳州市环境空气中 VOCs 污染的主要途径,同时,重点

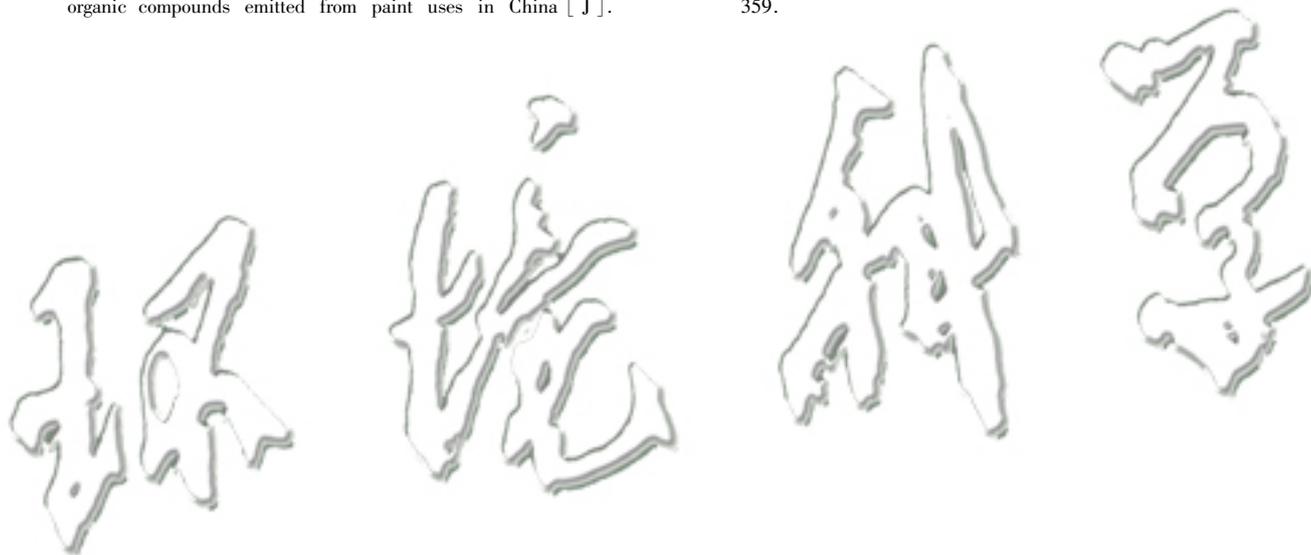
考虑控制这些排放源排放的烯烃和芳香烃。

#### 参考文献:

- [1] 刘丹, 解强, 张鑫, 等. 北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评估[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3693-3701.  
Liu D, Xie Q, Zhang X, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of VOCs during the haze Period in the winter in Beijing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3693-3701.
- [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] 孔琴心, 刘广仁, 李桂忱. 近地面臭氧浓度变化及其对人体健康的可能影响[J]. 气候与环境研究, 1999, **4**(1): 61-66.  
Kong Q X, Liu G R, Li G C. Surface ozone concentration variation and possible influences on human health[J]. Climatic and Environmental Research, 1999, **4**(1): 61-66.
- [4] 耿福海, 毛晓琴, 铁学熙, 等. 2006-2008 年上海地区臭氧污染特征与评价指标研究[J]. 热带气象学报, 2010, **26**(5): 584-590.  
Geng F H, Mao X Q, Tie X X, *et al.* Analysis of ozone characteristics and toward establishing an ozone warning system in shanghai[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2010, **26**(5): 584-590.
- [5] Kampa M, Castanas E. Human health effects of air pollution [J]. Environmental Pollution, 2008, **151**(2): 362-367.
- [6] Zheng J Y, Yu Y F, Mo Z W, *et al.* Industrial sector-based volatile organic compound (VOC) source profiles measured in manufacturing facilities in the Pearl River Delta, China [J]. Science of the Total Environment, 2013, **456-457**: 127-136.
- [7] Rajabi H, Mosleh M H, Mandal P, *et al.* Emissions of volatile organic compounds from crude oil processing-Global emission inventory and environmental release [J]. Science of the Total Environment, 2020, **727**: 138654.
- [8] Rui X X, Alam M S, Stark C, *et al.* Behaviour of traffic emitted semi-volatile and intermediate volatility organic compounds within the urban atmosphere [J]. Science of the Total Environment, 2020, **720**: 137470.
- [9] Shen L J, Xiang P, Liang S W, *et al.* Sources profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) measured in a typical industrial process in Wuhan, central China [J]. Atmosphere, 2018, **9**(8): 297.
- [10] Zhou M M, Jiang W, Gao W D, *et al.* A high spatiotemporal resolution anthropogenic VOC emission inventory for Qingdao City in 2016 and its ozone formation potential analysis [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, **139**: 147-160.
- [11] Zhang Y H, Li C, Yan Q S, *et al.* Typical industrial sector-based volatile organic compounds source profiles and ozone formation potentials in Zhengzhou, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2020, **11**(5): 841-850.
- [12] Li L Y, Xie S D, Zeng L M, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds and their role in ground-level ozone formation in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **113**: 247-254.
- [13] Wu R R, Li J, Hao Y F, *et al.* Evolution process and sources of ambient volatile organic compounds during a severe haze event in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2016, **560-561**: 62-72.
- [14] 张利慧, 毋振海, 李斌, 等. 北京市城区春季大气挥发性有机物污染特征[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(3): 526-535.  
Zhang L H, Wu Z H, Li B, *et al.* Pollution characterizations of atmospheric Volatile Organic Compounds in Spring of Beijing urban area [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(3): 526-535.
- [15] Xu Z N, Huang X, Nie W, *et al.* Influence of synoptic condition and holiday effects on VOCs and ozone production in the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Environment, 2017, **168**: 112-124.
- [16] Zhu H L, Wang H L, Jing S G, *et al.* Characteristics and sources of atmospheric Volatile Organic Compounds (VOCs) along the mid-lower Yangtze River in China [J]. Atmospheric Environment, 2018, **190**: 232-240.
- [17] 王倩. 2019 年 5 月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2555-2564.  
Wang Q. Chemical characteristics and sources of volatile organic compounds in shanghai during an ozone and particulate pollution episode in May 2019 [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2555-2564.
- [18] 闫磊, 黄银芝, 高松, 等. 杭州湾北岸 36 种挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(3): 536-546.  
Yan L, Huang Y Z, Gao S, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of 36 volatile organic compounds on the north coast of Hangzhou bay [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(3): 536-546.
- [19] 罗玮, 王伯光, 刘舒乐, 等. 广州大气挥发性有机物的臭氧生成潜势及来源研究[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(5): 80-86.  
Luo W, Wang B G, Liu S L, *et al.* VOC ozone formation potential and emission sources in the atmosphere of Guangzhou [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **34**(5): 80-86.
- [20] 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.
- [21] 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 Y X, Yin S S, Yuan M H, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in Spring in Zhengzhou [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4372-4381.
- [22] 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 等. 晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4042-4050.  
Yang F, Yan Y L, Ge Y F, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient volatile organic compounds in winter in Jincheng [J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4042-4050.
- [23] 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 等. 成都市 2017 年夏季大气 VOCs 污染特征、臭氧生成潜势及来源分析[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(4): 619-626.  
Xu C X, Chen J H, Han L, *et al.* Analyses of pollution characteristics, ozone formation potential and sources of VOCs atmosphere in Chengdu City in Summer 2017 [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(4): 619-626.
- [24] 曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟. 南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2565-2576.  
Cao M Y, Lin Y C, Zhang Y L. Characteristics and source

- apportionment of atmospheric VOCs in the Nanjing industrial area in autumn[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2565-2576.
- [25] 任义君, 马双良, 王思维, 等. 郑州市春季大气污染 VOCs 特征、臭氧生成潜势及源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2577-2585.
- Ren Y J, Ma S L, Wang S W, *et al.* Ambient VOCs characteristics, ozone formation potential, and source apportionment of air pollution in spring in Zhengzhou[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2577-2585.
- [26] 赵秋月, 李春燕, 陈凤, 等. 南通市夏季 VOCs 污染特征与来源研究[J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(2): 148-156.
- Zhao Q Y, Li C Y, Chen F, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of ambient VOCs in summer in Nantong[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(2): 148-156.
- [27] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [28] Sillman S. The use of NO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, and HNO<sub>3</sub> as indicators for ozone-NO<sub>x</sub>-hydrocarbon sensitivity in urban locations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, **100**(D7): 14175-14188.
- [29] Sillman S, He D Y. Some theoretical results concerning O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-VOC chemistry and NO<sub>x</sub>-VOC indicators [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D22), doi: 10.1029/2001JD001123.
- [30] Zhang Y, Wen X Y, Wang K, *et al.* Probing into regional O<sub>3</sub> and particulate matter pollution in the United States: 2. An examination of formation mechanisms through a process analysis technique and sensitivity study [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D22), doi: 10.1029/2009JD011900.
- [31] Liu X H, Zhang Y, Cheng S H, *et al.* Understanding of regional air pollution over China using CMAQ, part I performance evaluation and seasonal variation[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(30): 3719-3727.
- [32] Sillman S, He D Y, Pippin M R, *et al.* Model correlations for ozone, reactive nitrogen, and peroxides for Nashville in comparison with measurements; Implications for O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-hydrocarbon chemistry [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, **103**(D17): 22629-22644.
- [33] 李凯, 刘敏, 梅如波. 泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3539-3546.
- Li K, Liu M, Mei R B. Pollution characteristics and sensitivity analysis of atmospheric ozone in Taian City[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3539-3546.
- [34] 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 X F, Cheng P, Gu Y G, *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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Polissar A V, Hopke P K, Paatero P, *et al.* The aerosol at Barrow, Alaska: long-term trends and source locations [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(16): 2441-2458.
- [38] Henry R C, Lewis C W, Hopke P K, *et al.* Review of receptor model fundamentals [J]. *Atmospheric Environment (1967)*, 1984, **18**(8): 1507-1515.
- [39] 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 等. 宜宾市冬季挥发性有机物污染特征及来源[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(6): 1020-1025.
- Xu C X, Chen J H, Han L, *et al.* Pollution characteristics and source apportionments of volatile organic compounds in Yibin City in Winter[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(6): 1020-1025.
- [40] Zhu H Y, Wu L J, Xin C L, *et al.* Impact of anthropogenic sulfate deposition via precipitation on carbonate weathering in a typical industrial city in a karst basin of southwest China: a case study in Liuzhou [J]. *Applied Geochemistry*, 2019, **110**, doi: 10.17632/ssnxfwb67.1.
- [41] 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.
- [42] 鲁晓晗, 王丽涛, 马笑, 等. 邯郸市 VOCs 变化特征及 O<sub>3</sub> 和 SOA 生成潜势[J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(3): 30-37.
- Lu X H, Wang L T, Ma X, *et al.* Change characteristics of VOCs and their formation potential of O<sub>3</sub> and SOA in Handan City [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(3): 30-37.
- [43] Ling Z H, Guo H. Contribution of VOC sources to photochemical ozone formation and its control policy implication in Hong Kong [J]. *Environmental Science & Policy*, 2014, **38**: 180-191.
- [44] 曾鹏, 辛存林, 于爽, 等. 典型西南工业城市柳州市核心区大气污染物时空分布与气象因素研究[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(1): 13-26.
- Zeng P, Xin C L, Yu S, *et al.* Spatial and temporal distribution of atmospheric pollutants and meteorological factors in the core district of Liuzhou City, a typical industrial city in Southwest China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 13-26.
- [45] 李雷, 李红, 王学中, 等. 广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4558-4564.
- Li L, Li H, Wang X H, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of atmospheric VOCs in the downtown area of Guangzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4558-4564.
- [46] 林旭. 南京北郊 VOCs 变化特征及其对二次有机气溶胶和臭氧的贡献研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016. 23-25.
- Lin X. The Characteristics, potential contribution of secondary organic aerosols and ozone of VOCs in the Northern Suburb of Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016. 23-25.
- [47] 段佳鹏, 梁胜文, 李蒲, 等. 武汉城区秋季大气挥发性有机物污染特征及部分物种来源的初步分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2017, **29**(4): 23-27.
- Duan J P, Liang S W, Li P, *et al.* Preliminary analysis on characteristics and source of volatile organic compounds pollution in Autumn in Wuhan City [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2017, **29**(4): 23-27.
- [48] 叶代启. 工业挥发性有机物的排放与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2017. 91.
- Ye D Q. Emission and control of industrial volatile organic compounds[M]. Beijing: Science Press, 2017. 91.
- [49] Sarkhosh M, Mahvi A H, Yunesian M, *et al.* Source

- apportionment of volatile organic compounds in Tehran, Iran[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2013, **90**(4): 440-445.
- [50] Cai C J, Geng F H, Tie X X, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(38): 5005-5014.
- [51] 王俏丽, 董敏丽, 李素静, 等. 舟山市臭氧污染分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1143-1151.  
Wang Q L, Dong M L, Li S J, *et al.* Characteristics of ozone pollution distribution and source apportionment in Zhoushan[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1143-1151.
- [52] Li L, An J Y, Shi Y Y, *et al.* Source apportionment of surface ozone in the Yangtze River Delta, China in the summer of 2013 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **144**: 194-207.
- [53] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国涂料应用过程挥发性有机物的排放计算及未来发展趋势预测 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 2809-2815.  
Wei W, Wang S X, Hao J M. Estimation and forecast of volatile organic compounds emitted from paint uses in China [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(10): 2809-2815.
- [54] Gao J, Zhang J, Li H, *et al.* Comparative study of volatile organic compounds in ambient air using observed mixing ratios and initial mixing ratios taking chemical loss into account—a case study in a typical urban area in Beijing[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **628-629**: 791-804.
- [55] 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.
- [56] 韩萌, 卢学强, 冉靓, 等. 天津市城区夏季 VOCs 来源解析 [J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(10): 76-80.  
Han M, Lu X Q, Ran L, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds in urban Tianjin in the summer [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(10): 76-80.
- [57] Wu F K, Yu Y, Sun J, *et al.* Characteristics, source apportionment and reactivity of ambient volatile organic compounds at Dinghu Mountain in Guangdong Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **548-549**: 347-359.



## CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System .....	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i> ( 1 )
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model .....	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> ( 9 )
Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter .....	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i> ( 19 )
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM <sub>2.5</sub> in Winter in Shenyang .....	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i> ( 30 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> Collected in Baoding .....	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> ( 38 )
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing .....	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i> ( 45 )
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019 .....	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i> ( 55 )
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou .....	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i> ( 65 )
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer .....	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i> ( 75 )
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017 .....	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i> ( 88 )
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019 .....	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i> ( 97 )
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise .....	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i> ( 106 )
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves .....	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i> ( 114 )
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed .....	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo ( 127 )
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River .....	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i> ( 136 )
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China .....	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i> ( 147 )
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province .....	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i> ( 159 )
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou .....	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i> ( 166 )
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River .....	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i> ( 175 )
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China .....	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i> ( 184 )
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue ( 195 )
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland .....	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i> ( 204 )
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir .....	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao ( 211 )
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir .....	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> ( 221 )
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir .....	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i> ( 234 )
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake .....	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i> ( 242 )
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed .....	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> ( 251 )
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems .....	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i> ( 263 )
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff .....	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i> ( 274 )
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland .....	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i> ( 283 )
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs .....	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> ( 293 )
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments .....	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> ( 305 )
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants .....	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i> ( 315 )
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion .....	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i> ( 323 )
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land .....	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i> ( 333 )
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors .....	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i> ( 343 )
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China .....	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i> ( 353 )
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province .....	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i> ( 359 )
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation .....	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i> ( 368 )
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice .....	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> ( 378 )
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains .....	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i> ( 386 )
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms .....	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i> ( 394 )
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang .....	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i> ( 403 )
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China .....	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i> ( 411 )
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism .....	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i> ( 422 )
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i> .....	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i> ( 433 )
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer .....	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i> ( 443 )
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen .....	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i> ( 450 )
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils .....	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i> ( 459 )
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation .....	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i> ( 467 )
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application .....	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i> ( 477 )
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i> .....	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i> ( 485 )
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data .....	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i> ( 492 )
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale .....	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i> ( 501 )