

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.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析

付昱萌, 杨红刚*, 卢民瑜, 曾颜, 邹迦新

(武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070)

摘要: 2018年3月~2019年2月, 在鄂州市主城区采用在线气相色谱仪对102种大气挥发性有机物(VOCs)定量检测, 对比分析了VOCs组成、季节变化特征和日变化规律, 并利用最大增量反应活性(MIR)估算了VOCs的臭氧生成潜势(OFP)。结果表明, 鄂州大气VOCs年均体积分数为 $(30.78 \pm 15.89) \times 10^{-9}$, 总体表现为冬季高夏季低, 具体表现为烷烃>含氧化合物>卤代烃>烯烃>芳香烃>炔烃。日变化规律表现为夜晚体积分数高于白天, 且总体上呈“双峰”分布, 芳香烃、卤代烃和OVOCs在00:00至02:00出现“第三峰”。对VOCs臭氧生成潜势(OFP)贡献较大的是芳香烃和烯烃, 贡献率分别为35.45%和29.5%, 其中对OFP贡献率最高的物种为乙烯, 达到24.217%。分析VOCs特征物种, 发现机动车尾气和溶剂使用是鄂州VOCs的主要来源, 其中机动车排放是最主要来源, 控制鄂州机动车排放有助于削减大气VOCs活性较大的组分, 从而减少臭氧的生成。

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 臭氧生成潜势(OFP); 特征污染物; 来源解析; 机动车排放

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1085-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908112

Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City

FU Yu-meng, YANG Hong-gang*, LU Min-yu, ZENG Yan, ZOU Jia-xin

(College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: From March 2018 to February 2019, quantitative detection was made of 102 kinds of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) using online gas chromatography in Ezhou City. We compared and analyzed the composition, seasonal variation, and diurnal variation of VOCs. Using maximum incremental reactivity (MIR), we estimated the ozone generation potential (OFP) of VOCs. The results show that the annual average volume fraction of atmospheric VOCs in Ezhou is $(30.78 \pm 15.89) \times 10^{-9}$, and is overall higher in winter than summer, represented by alkane > oxygen > halogenated hydrocarbon > olefin > aromatic hydrocarbon > alkyne. The night volume fraction is higher than in the daytime, and overall the distribution is “double peak”. The aromatic hydrocarbons, halogenated hydrocarbons, and OVOCs appear as a “third peak” at 00:00-02:00. Aromatic hydrocarbons and olefins contribute more to the OFP potential of VOCs, with contribution rates of 35.45% and 29.5%, respectively. The highest contribution rate to OFP is ethylene, reaching 24.217%. Analysis of VOC characteristic species found that vehicle exhaust fumes and solvent volatilization are the main sources of VOCs in Ezhou. Of these, motor vehicle emissions are the most important source. Controlling Ezhou's motor vehicle emissions helps to reduce the composition of atmospheric VOCs, thereby reducing ozone production.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); ozone generation potential (OFP); characteristic pollutants; source resolution; vehicle emissions

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)一般指常温下饱和蒸气压大于70 Pa在常压下沸点在50~260℃的有机化合物, 主要分为烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃类和含氧化合物等几大类。其来源广泛且组分复杂, 自然源主要为植物排放, 人为源主要为溶剂使用、油气挥发和汽车尾气等。由于经济的快速发展和城镇化进程的加快, 各地光化学烟雾事件发生频次逐渐攀升, 全年臭氧超标天数所占比例逐年增加。1940年在美国洛杉矶发生了首例光化学烟雾污染事件, 自此国内外便开始了对VOCs的研究, Shin等^[1]认为机动车尾气是大气VOCs的主要污染源^[2]。近年来, 经济和工业快速发展, 城镇化比例逐年增加, 随之而来的是我国VOCs年排放量的逐年上升。总体上我国挥发性有机物排放呈现由南向北、由东向西逐渐减弱的态势, 东部经济发达地区VOCs年排放量整体高于西

部偏远地区, 江苏、山东和广东等省份VOCs排放量最高^[3,4]; 同时北京^[5,6]、天津^[7]、上海^[8]和浙江^[9]等排放密度较高地区VOCs的年均增长率均较高。目前关于大气环境VOCs的监测与研究集中在长江三角洲^[10]、珠江三角洲^[11]和京津冀等地区, 对于中部地区环境大气的VOCs浓度、组成及其时空分布特征相关研究数据十分缺乏。

鄂州市位于湖北省东部, 长江中游, 属亚热带季风气候区, 四季分明, 夏季温度高、雨量充沛, 冬季寒冷湿润。为全面深入认识鄂州VOCs前体物对臭氧生成的影响, 本研究基于鄂州市大气监测站对102种VOC物种展开为期1a的在线监测, 探究

收稿日期: 2019-08-13; 修订日期: 2019-10-12

作者简介: 付昱萌(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境污染与防治, E-mail: fymway@163.com

* 通信作者, E-mail: yhg0722@163.com

VOCs 体积分数和组分季节差异及日变化规律, 计算不同 VOC 物种对臭氧生成潜势的贡献, 考察其特征污染物, 并探讨鄂州 VOCs 污染的主要来源, 以期有效控制前体物排放降低臭氧污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 监测时间与地点

在线监测点位于鄂州市鄂城区文苑路 11 号, 鄂州市生态环境局楼顶(距离地面高度约 20 m), 经度为: 114°09'22", 纬度为 30°37'22", 北面 100 m 处为主干道, 人口密度大, 周边大气污染源主要为餐饮和交通, 监测点方圆 3 km 无大型污染源, 可基本代表鄂州主城区的污染特征。

监测时段为 2018 年 3 月至 2019 年 2 月, 包含春季(2018 年 3 ~ 5 月)、夏季(2018 年 6 ~ 8 月)、秋季(2018 年 9 ~ 11 月)和冬季(2018 年 12 月至 2019 年 2 月)这 4 个季节, 每天 24 h 连续监测, 除仪器故障或维修保护等造成的 VOCs 数据缺失外, 全年有效数据达到 86.62%。

1.2 监测设备

在线监测设备采用 TH_PKU-300 大气挥发性有机物快速在线监测系统, 在该系统中气体首先进入浓缩系统, 并在低温条件下冷冻捕集; 然后快速加热进入分析系统, 经气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术检测。该检测系统可测量 56 种碳氢化合物、31 种卤代烃和 13 种含氧化合物。自动检测频率为 1 h, 以每小时前 5 min 的数据为该小时的浓度, 大部分组分的方法检测限在 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下, 有关该设备的具体介绍见文献[12]。

在线监测系统运用内标和外标法对仪器双重标定, 采用目标组分同内标组分的浓度比和响应比搭建曲线, 以便对目标气体定性、定量分析。外标气体摩尔分数为 2×10^{-9} , 每天自动进样, 只有当响应值与外标气体的浓度差小于 $\pm 30\%$ 时, 方为合格, 否则重新标定; 内标气摩尔分数为 4×10^{-9} , 通过外标和内标的校验和审核, 保证仪器运行状态正常。同时对在线监测仪进行定期维护, 每周清理载气缸, 记录捕集井制冷状态, 并定期更换标气瓶, 保证 VOCs 在线产出数据准确可靠。本文将 102 种挥发性有机物的总浓度定义为 TVOCs 浓度。

1.3 OFP 计算方法

臭氧生成潜势(ozone generation potential, OFP)是指: 在某 VOCs 混合气团中, 增加或去除单位的某 VOCs 物种, 所产生的臭氧浓度变化。通常 VOCs 物种反应越快反应活性(incremental reactivity, IR)越

大, 改变 VOCs/ NO_x 比使 IR 最大, 此情况下的 IR 即为最大增量反应活性(maximum incremental reactivity, MIR), 本文采用 Carter^[13]研究的 MIR 系数, OFP 计算公式为:

$$\text{OFP} = [\text{VOC}]_i \times \text{MIR}_i$$

式中, $[\text{VOC}]_i$ 表示 VOCs 物种 i 在大气中的质量浓度, 单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; MIR_i 为 VOCs 物种 i 的 MIR 系数, 单位为 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 以 VOCs/O_3 计。

本研究对鄂州大气 OFP 的计算, 包括在线监测仪可检测出的 102 种 VOC 物种。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 基本特征

2.1.1 VOCs 年变化特征

本研究中 TVOCs 仅为仪器可检出的 102 种 VOC 体积分数之和, 包括 29 种烷烃、12 种烯烃、1 种炔烃、31 种卤代烃、16 种芳香烃和 13 种含氧化合物(含乙腈)。鄂州 TVOCs 全年平均体积分数为 $(30.78 \pm 15.89) \times 10^{-9}$, 各组分体积分数月变化如图 1 所示。以烷烃、含氧化合物和卤代烃为主, 占比分别为 35.10%、18.30% 和 17.94%; 其次为烯烃和芳香烃, 占比分别为 11.26% 和 10.39%, 炔烃占比为 7%。VOCs 月均值呈现夏季低冬季高的特点, 闫磊等^[10]的研究认为, 这可能与区域大气扩散及混合层高度有关。鄂市夏季温度高, 光照强度大, 光化学反应较活跃, 对 VOCs 的扩散和去除有利; 而冬季光照相对较弱, 城市边界层较低结构稳定, 且夜晚经常出现逆温现象, 容易造成 VOCs 的积累^[4]。

2.1.2 VOCs 各组分季节特征

图 2 展示了各季节中含量较高的前 15 种 VOCs 物种及其所占比例。采样期间烷烃(以乙烷、丙烷和正丁烷为主)年均体积分数最高, 占 TVOCs 的 35.10%, 因此烷烃的季节变化对 TVOCs 的季节变换影响较大。烷烃总体季节分布表现为冬季(38.30%) > 秋季(35.95%) > 春季(33.65%) > 夏季(29.01%), 全年体积分数差异较大, 这可能与夏季降雨频繁、边界层较高, 有助于 VOCs 的稀释和扩散, 而冬季大气光化学反应消耗较少, 且边界层较低有利于 VOCs 积累有关。

含氧化合物(以丙酮为主)年均体积分数占 TVOCs 的 18.30%, 总体季节分布为夏季(25.37%) > 春季(20.78%) > 秋季(18.29%) > 冬季(13.33%), 季节差异性较大。这主要是受光化学反应的影响, 夏季光照强度较大, 光化学反应生成 OVOCs 的比重增加, 贡献率达到 80% ~ 90%, 而冬季仅为 33% ~ 35%^[14]。同时春、夏季含氧化合物体积

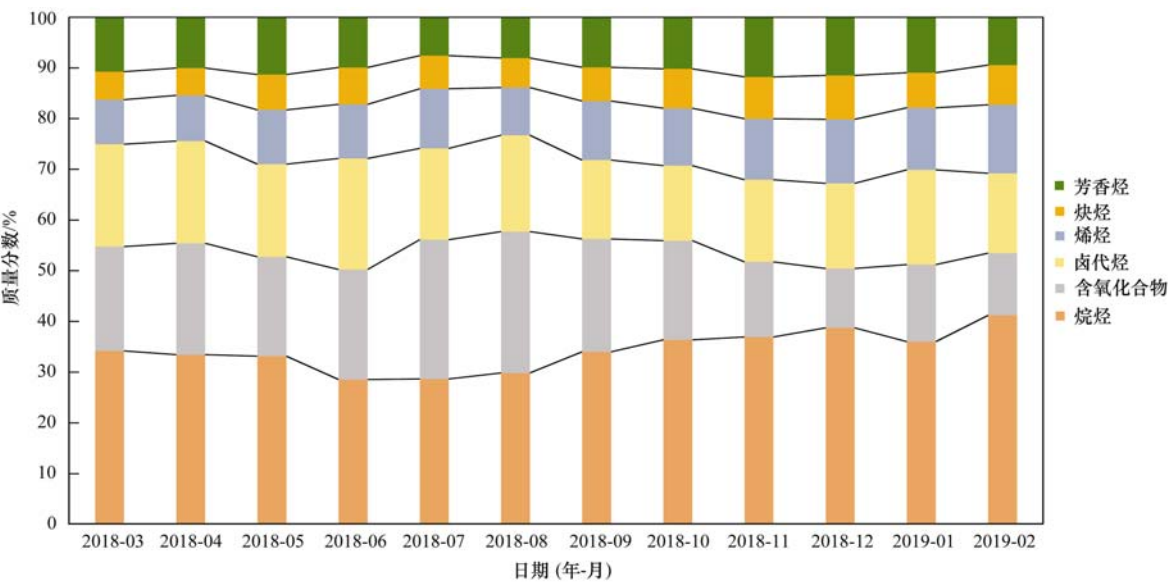


图1 鄂州 VOCs 全年基本特征

Fig. 1 Basic characteristics of VOCs in one year

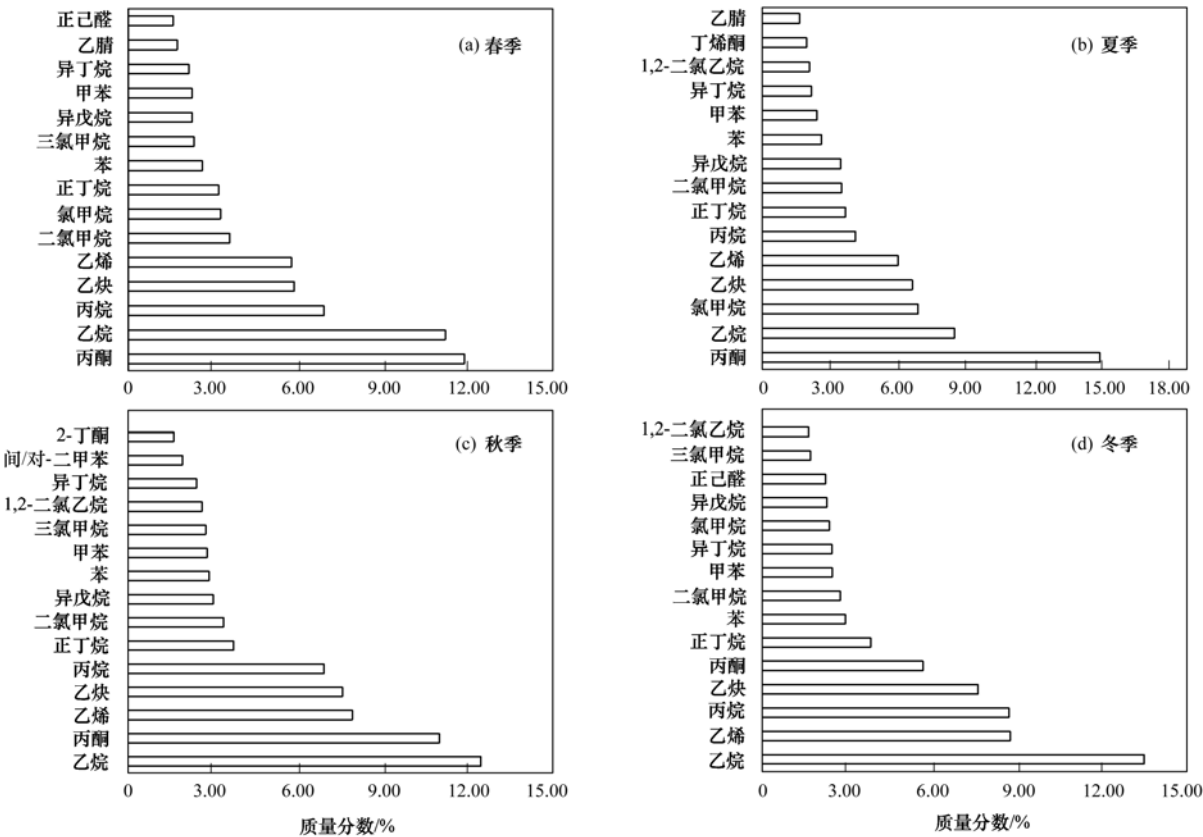


图2 鄂州各季节主要 VOC 物种占比

Fig. 2 Main VOC ratio in each season in Ezhou

分数和占比较高,可能与丙酮的季节性变化有关. 在OVOCs中丙酮占比位居首位,年均体积分数为 3.312×10^{-9} ,而夏季丙酮相比于其他季节具有更高的一次排放,如植物挥发、机动车尾气和生物质燃烧等一次来源^[15],导致丙酮的平均浓度在夏季高于冬季.

卤代烃(以二氯甲烷、氯甲烷为主)年均体积分

数占比为17.94%,仅次于含氧化合物,总体季节分布为夏季(19.84%)>春季(19.64%)>冬季(17.29%)>秋季(15.61%);季节差异性不明显. 这可能与它的来源有关,卤代烃的来源主要包括天然源(海洋、果树)、工业源(乙烯石化、垃圾焚烧发电、海绵加工)、生活源(空调氟利昂)、机动车排放等^[16]. 除了夏季空调使用对夏季卤代烃来源有

明显季节性影响外,其他方面的来源均无明显季节偏向性。

烯烃(以乙烯为主)年均体积分数占比为 11.26%,季节分布为冬季(12.70%)>秋季(11.72%)>夏季(10.56%)>春季(9.4%),全年体积分数较为稳定。烯烃人为源主要为汽车尾气排放和燃料挥发,天然源主要为植物生长代谢^[17],除冬季比其他季节稍高外,排放浓度无明显季节偏向性,这是因为烯烃的沸点相较于烷烃和芳香烃低,冬季低气温降低了烯烃的挥发^[18]。

芳香烃(以苯、甲苯为主)年均体积分数占比为 10.39%,全年体积分数较稳定,各季节体积分数为秋季(10.79%)>冬季(10.68%)>春季(10.66%)>夏季(8.64%)。

乙炔作为一种重要的 VOC,年均体积分数为 2.159×10^{-9} ,占 TVOCs 的 7%,在 102 种 VOCs 中体积分居第 5,其年变化较为稳定:冬季(7.68%)>秋季(7.65%)>夏季(6.59%)>春季(5.87%)。乙炔主要来自燃料燃烧和汽油挥发过程,被广泛用于机动车尾气排放示踪物,化学活性较低,在大气中存在较稳定^[19,20]。

2.1.3 VOCs 小时变化规律

对 6 类 VOCs 物种进行日变化分析,如图 3 所示,烷烃、烯烃和炔烃具有相似的变化规律,四季日变化曲线趋势基本一致,呈典型“双峰”特征,且冬季体积分数明显高于春、夏和秋三季。一般来说,早晚大气较稳定,对流运动弱边界层低,不利于 VOCs

扩散,同时早晚高峰也受到交通高峰的影响,因而早晚浓度较高;而中午对流强,边界层抬升,有利于 VOCs 的稀释混合,且中午日照较强,光化学反应消耗了大量 VOCs,因此中午浓度较低^[19]。

对于烷烃、烯烃和炔烃,受城市交通早高峰影响,第一个峰出现在 07:00~09:00,随后日照增强,光化学反应增强,VOCs 浓度逐渐降低,并在 13:00~15:00 降至最低;接着光化学反应停止,污染物逐渐积累且伴随着城市交通晚高峰,VOCs 浓度在 18:00~19:00 迎来第二个峰值,也是 1 d 中的最大值。春秋冬三季第二峰出现在 18:00~19:00,而夏季的第二峰出现在 19:00~20:00,这可能与夏季光化学反应停止时间较晚,以及夏季人类活动开始时间较晚有关。

芳香烃和卤代烃的日变化无明显的季节特征,相较于以上 3 种烃类,芳香烃和卤代烃出现了“三峰”特征,除了早晚高峰外,在 24:00~次日 02:00 出现了另一次高峰,且峰值较于前两次峰值都要高。芳香烃类物质主要来源于工业源排放和机动车排放^[21],卤代烃的主要人为源为工业排放、生活污染和机动车排放^[22];而鄂州市被称为鄂东的“冶金走廊”和“建材走廊”,拥有湖北省最大的地方钢铁基地——鄂城钢铁厂,因此芳香烃、卤代烃夜间高峰的出现可能与工业的夜间运作及大型货运车夜间运输有关。

OVOCs 日变化季节特征不明显,同芳香烃和卤代烃一样呈“三峰”分布,早高峰的时间有所推迟,到 10:00~11:00 才出现,晚高峰的时间几乎不变,

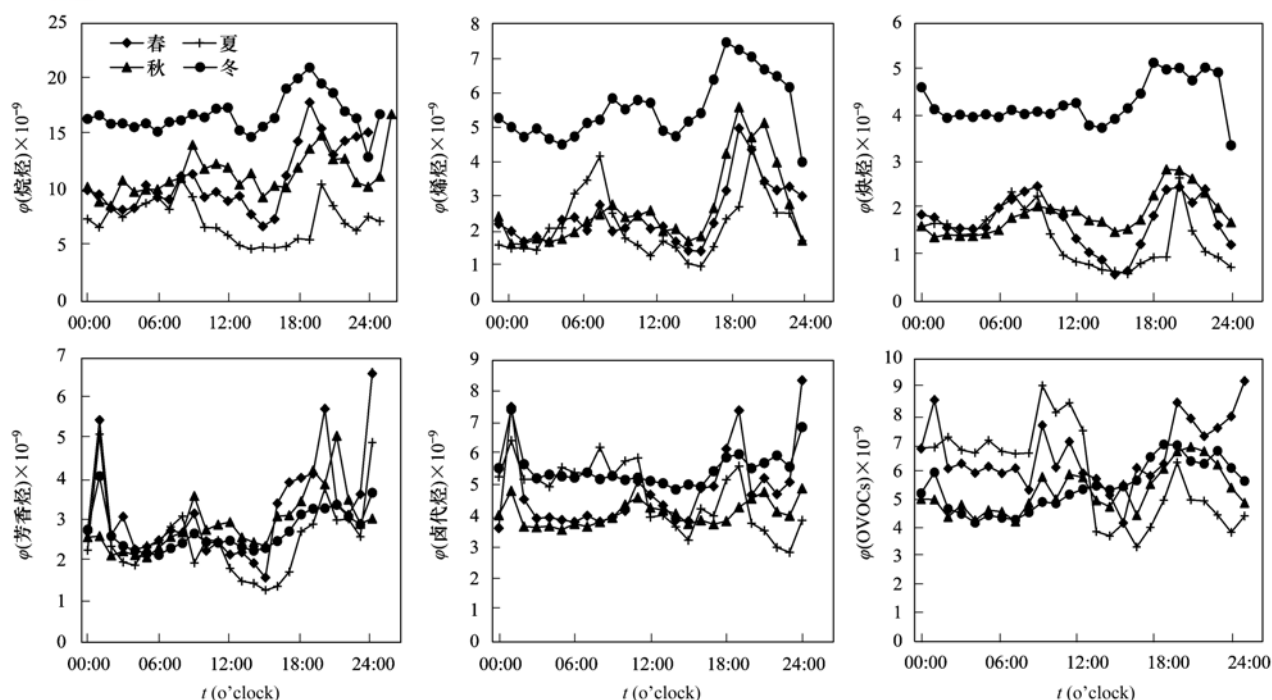


图3 各类 VOCs 体积分数四季日变化

Fig. 3 Daily variation of volume fractions of various VOCs

第三个峰出现在 24:00 ~ 次日 01:00. 相对前 5 类物种,OVOCs 出峰没那么明显,其第二峰宽度普遍较宽,高值延续时间较长. 作为位居 OVOCs 榜首的丙酮,其来源除了石油化工类生产过程中的一次排放,还有丙烷等前体物大气氧化的二次生成,OVOCs 高值时间持续较长的特点,说明鄂州 OVOCs 更主要来自于光化学反应的二次生成.

2.2 鄂州大气 VOCs 物种来源解析

2.2.1 VOCs 臭氧生成潜势

环境空气中的挥发性有机物与臭氧污染等现象的形成关系十分密切,不同组分的化学反应活性对 O₃ 形成有不同影响^[23]. 对鄂州大气 102 种 VOC 物种进行臭氧潜势判别计算,结果表明鄂州大气 TVOCs 的总 OFP 为 182.69 μg·m⁻³,各类 VOCs 对 OFP 贡献表现为芳香烃(35.45%)> 烯烃(29.50%)> OVOCs(19.42%)> 烷烃(11.79%)> 卤代烃(2.53%)> 炔烃(1.31%). 可以发现虽然芳香烃及烯烃在 TVOCs 中的含量仅为 10.39% 和

11.26%,远低于烷烃(35.1%),但其 OFP 贡献率位居前二,说明控制芳香烃和烯烃的排放,是未来控制鄂州市臭氧污染的关键. 同时芳香烃也是二次有机气溶胶的重要前体物,毒性较高,所以对鄂州市芳香烃的排放控制显得尤为重要.

表 1 列出了鄂州市 OFP 贡献前 30 位的物种,此 30 种物种体积浓度共占 TVOCs 的比例为 56.7%,而其臭氧生成潜势达到 OFP 的 81.7%. 其中排名前 10 的有 2 种烯烃,5 种芳香烃,3 种 OVOCs,占 TVOCs 的比例为 16.8%,对 OFP 的贡献率达到 52.0%. 乙烯的 OFP 贡献率以 13.26% 位居榜首,乙烯在机动车和石油化工排放中占有较大比例,同时乙烯也常作为天然源排放的示踪物^[24],说明除了人为源,天然植物排放对鄂州市大气的污染也不可忽视. 其次,OFP 贡献率较大的为间/对-二甲苯和甲苯,芳香烃类物质主要源于机动车排放,和溶剂涂料,因此控制鄂州臭氧排放的首要任务是控制机动车排放和溶剂使用.

表 1 鄂州市 OFP 贡献前 30 位物种及其所占百分比
Table 1 OFP contributions to the top 30 species and their percentages in Ezhou City

序号	物种	OFP /μg·m ⁻³	比例/%	序号	物种	OFP /μg·m ⁻³	比例/%
1	乙烯	24.217	13.26	16	异戊二烯	3.119	1.71
2	间/对-二甲苯	17.975	9.84	17	3-乙基甲苯	3.114	1.70
3	甲苯	12.589	6.89	18	丙酮	2.976	1.63
4	丙烯	7.575	4.15	19	乙腈	2.867	1.57
5	正己醛	7.272	3.98	20	反-2-丁烯	2.651	1.45
6	邻-二甲苯	6.699	3.67	21	乙炔	2.647	1.45
7	丙醛	5.639	3.09	22	顺-2-丁烯	2.592	1.42
8	丁烯酮	5.298	2.90	23	1-丁烯	2.514	1.38
9	1,2,4-三甲基苯	4.147	2.27	24	异丁烷	2.386	1.31
10	1,2,3-三甲基苯	3.609	1.98	25	苯	2.385	1.31
11	异丁烯	3.506	1.92	26	丙烷	2.289	1.25
12	丙烯醛	3.641	1.97	27	1,3-丁二烯	2.068	1.12
13	乙苯	3.555	1.92	28	1,4-二乙基苯	1.995	1.08
14	1,3,5-三甲基苯	3.520	1.90	29	2-乙基甲苯	1.805	0.97
15	正丁烷	3.387	1.83	30	正戊烷	1.781	0.96

2.2.2 特征物种比值

由于不同排放源具有特定的 VOC 物种,且不同 VOC 的光化学年龄也有差别,因此可以用 VOCs 组分中特征污染物的比值,来初步判别相关物种的污染来源与贡献高低. 本文选取 4 组较为典型的特征污染物的比值进行分析,分别为 φ(异戊烷)/φ(正戊烷)、φ(甲苯)/φ(苯)、φ(二甲苯)/φ(苯)和 φ(二甲苯)/φ(乙苯),如图 4 所示.

φ(异戊烷)/φ(正戊烷)比值常用来说明燃烧源的排放特征,φ(异戊烷)/φ(正戊烷)比值约为 2.93 时,表现为机动车排放,煤燃烧比值为 0.56 ~ 0.80,液体汽油和燃料蒸发比值分别在 1.50 ~ 3.00

和 1.80 ~ 4.60 之间^[25]. 本研究点位的比值为 1.846,说明鄂州市 VOCs 中戊烷主要来源为液体汽油和燃料蒸发.

甲苯与苯的比值(T/B)常用来说明城市交通源的排放特征,当 T/B 小于 0.20 时,判断为溶剂使用,在 0.50 ~ 0.60 时为车辆排放,在 1.50 ~ 2.20 时为燃煤排放,比值为 2.50 时为生物质燃烧^[14]. 本研究中 T/B 值为 0.508 2,且二者相关性(R² 为 0.667)较为显著,说明鄂州市 VOCs 中苯和甲苯主要来源均为机动车排放.

二甲苯和苯之间的相关性(R² 为 0.292 4)不显著,但与乙苯之间的相关性(R² 为 0.922 5)较显著,

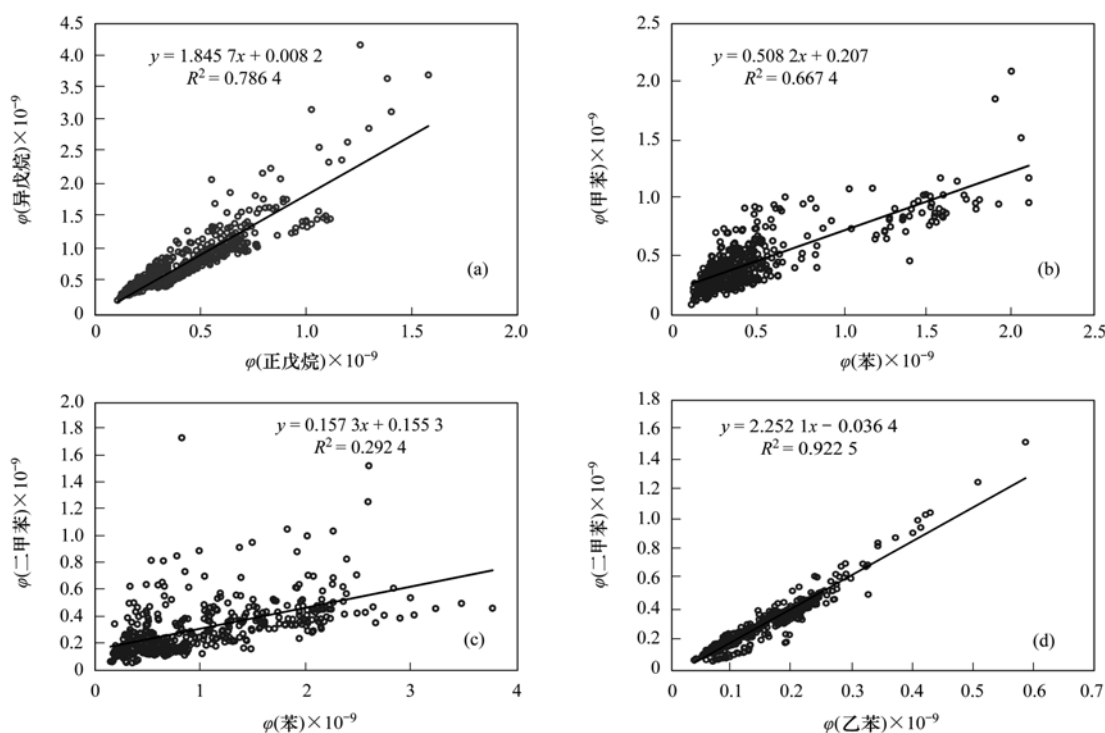


图4 不同 VOC 物种间的相关性

Fig. 4 Correlation between different VOC species

说明二甲苯与苯的污染来源不相同,而与乙苯具有同源性,而溶剂排放的最大污染产物为乙苯^[8],因此二甲苯和乙苯的主要污染源均为溶剂使用。

由以上分析知,鄂州大气中戊烷主要来源于汽油挥发、苯和甲苯的主要污染源均为机动车排放,二甲苯和乙苯的主要污染源均为溶剂使用。为进一步探索机动车尾气对鄂州大气 VOCs 的贡献比例,采用 Chang 等^[26]研究的特征污染物示踪法,选取 3-甲基戊烷作为机动车尾气的特征污染物,计算鄂州大气中乙烯、甲苯及间/对-二甲苯与其比值,并与机动车尾气中二者比值进行对比。有研究发现鄂州大气 VOCs 中乙烯/3-甲基戊烷值为 8.98,而机动车尾气中二者比值为 24.04 ± 0.40 ^[27],因此鄂州 VOCs 约有 37.31% 乙烯来自机动车排放;甲苯/3-甲基戊烷值为 3.42,机动车尾气中二者比值为 6.58,表明鄂州 VOCs 约 52.08% 的甲苯来自机动车排放;间/对-二甲苯/3-甲基戊烷值为 1.229,机动车尾气中二者比值为 2.63 ± 0.04 ,说明鄂州 VOCs 约 46.73% 的间/对-二甲苯来源于机动车排放。因此,控制市机动车尾气排放将对改善鄂州空气质量具有显著影响。

3 结论

(1) 鄂州大气 VOCs 年平均体积分数为 $(30.78 \pm 15.89) \times 10^{-9}$, 总体表现为冬季高夏季低,具体表现为烷烃(35.10%) > 含氧化合物(18.30%) > 卤

代烃(17.94%) > 烯烃(11.26%) > 芳香烃(10.39%) > 炔烃(7%)。对 TVOCs 贡献最大的前 10 个物种为乙烷、丙酮、乙烯、丙烷、乙炔、正丁烷、二氯甲烷、氯甲烷、苯、异戊烷,累计贡献 $\phi(\text{TVOCs})$ 的 58.73%。

(2) 鄂州大气 VOCs 日变化特征总体上呈现夜晚体积分数高于白天的特点,且总体上呈“双峰”分布,第一峰出现在 07:00~09:00,第二峰出现在 18:00~20:00,最低点出现在 13:00~15:00,但芳香烃、卤代烃、OVOCs 在 24:00~次日 02:00 出现“第三峰”,可能与工业的夜间运作及大型货运车夜间运输有关。

(3) 鄂州大气总 OFP 为 $182.69 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 各类 VOCs 对 OFP 贡献表现为芳香烃(35.45%) > 烯烃(29.50%) > OVOCs(19.42%) > 烷烃(11.79%) > 卤代烃(2.53%) > 炔烃(1.31%)。对 OFP 贡献最大的前 10 个物种为乙烯、间/对-二甲苯、甲苯、丙烯、正己醛、邻-二甲苯、丙醛、丁烯酮、1,2,4-三甲基苯和 1,2,3-三甲基苯,累计贡献 OFP 的 52.02%。

(4) 通过比较 4 组典型特征污染物比值发现,鄂州大气中戊烷受汽油挥发影响较大,苯和甲苯受机动车尾气影响较大,二甲苯和乙苯受溶剂使用的影响较大;进一步对鄂州大气进行源解析,发现鄂州大气 VOCs 的最主要污染来源为机动车尾气,控制其尾气排放将在很大程度上削减鄂州大气 VOCs 中活性较大物种的浓度,有利于减少臭氧生成。

参考文献:

- [1] Shin H J, Roh S A, Kim J C, *et al.* Temporal variation of volatile organic compounds and their major emission sources in Seoul, Korea [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(12): 8717-8728.
- [2] Niu Z C, Zhang H, Xu Y, *et al.* Pollution characteristics of volatile organic compounds in the atmosphere of Haicang district in Xiamen city, southeast China[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, **14**(4): 1144-1151.
- [3] 刘金荣, 张宇红, 汤莉莉, 等. 苏州青剑湖 VOCs 季节污染特征及来源解析[J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(8): 126-134.
- Liu J R, Zhang N H, Tang L L, *et al.* Seasonal characterization and source apportionment of VOCs in Suzhou's Qingjian Lake Area[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(8): 126-134.
- [4] 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.
- [5] 盛久江, 王飞, 李霞, 等. 北京城区夏冬两季 VOCs 时间变化和光化学特征的质子转移反应飞行时间质谱 (PTR-TOF-MS) 观测[J]. *环境化学*, 2019, **38**(7): 1590-1599.
- Sheng J J, Wang F, Li X, *et al.* The temporal variation and photochemical characters of VOCs in summer and winter of Beijing based on PTR-TOF-MS [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(7): 1590-1599.
- [6] 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.
- [7] 韩旸, 吴宇峰, 董海燕, 等. 天津滨海新区大气 VOCs 组成及光化学活性分析[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(7): 28-32.
- Han Y, Wu Y F, Dong H Y, *et al.* Composition and chemical reactivity of ambient volatile organic compounds in Binhai New Area, Tianjin[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(7): 28-32.
- [8] 陈长虹, 苏雷燕, 王红丽, 等. 上海市城区 VOCs 的年变化特征及其关键活性组分[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(2): 367-376.
- Chen C H, Su L Y, Wang H L, *et al.* Variation and key reactive species of ambient VOCs in the urban area of Shanghai, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(2): 367-376.
- [9] 李康为, 应方, 陈玲红, 等. 杭州市主城区 VOCs 污染特征及影响因素[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, **53**(4): 671-683.
- Li K W, Ying F, Chen L H, *et al.* Ambient VOCs characteristics and associated effects in urban Hangzhou [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, **53**(4): 671-683.
- [10] 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*, 2019, doi: 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.05.26.
- Yan L, Huang Y Z, Gao S, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of 36 volatile organic compounds measured on the North coast of Hangzhou Bay [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, doi: 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.05.26.
- [11] 朱波, 王川, 于广河, 等. 深圳城市大气中非甲烷烃季节变化特征[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(2): 418-425.
- Zhu B, Wang C, Yu G H, *et al.* Characterization of seasonal variation of non-methane hydrocarbons in the urban atmosphere in Shenzhen [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(2): 418-425.
- [12] Gong S Y, Wang Y T, Wang H Y, *et al.* High-pressure pyrolysis of isoprenoid hydrocarbon *p*-menthane in a tandem micro-reactor with online GC-MS/FID [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018, **135**: 122-132.
- [13] Venecek M A, Carter W P L, Kleeman M J. Updating the SAPRC maximum incremental reactivity (MIR) scale for the United States from 1988 to 2010 [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2018, **68**(12): 1301-1316.
- [14] Zheng H, Kong S F, Xing X L, *et al.* Monitoring of volatile organic compounds (VOCs) from an oil and gas station in northwest China for 1 year [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(7): 4567-4595.
- [15] 韩煜, 牛英博, 夏士勇, 等. 深圳大学城园区典型 OVOCs 污染特征与来源解析[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(11): 4023-4030.
- Han Y, Niu Y B, Xia S Y, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of typical OVOCs in Shenzhen University Town [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(11): 4023-4030.
- [16] 王琛. 广州大气中挥发性卤代烃的时空分布特征与来源分析研究[D]. 广州: 暨南大学, 2010.
- Wang C. Study on spatial-temporal distribution of atmosphere volatile hydrocarbons and their sources apportionment in Guangzhou city [D]. Guangzhou: Jinan University, 2010.
- [17] 印红玲, 袁桦蔚, 叶芝祥, 等. 成都市大气中挥发性有机物的时空分布特征及臭氧生成潜势研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(2): 386-393.
- Yin H L, Yuan H W, Ye Z X, *et al.* Temporal and spatial distribution of VOCs and their OFP in the atmosphere of Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 386-393.
- [18] 徐慧, 张晗, 邢振雨, 等. 厦门冬春季大气 VOCs 的污染特征及臭氧生成潜势[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 11-17.
- Xu H, Zhang W, Xing Z Y, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in winter and spring in Xiamen [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 11-17.
- [19] 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.
- [20] 莫梓伟, 邵敏, 陆思华. 中国挥发性有机物 (VOCs) 排放源成分谱研究进展[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
- Mo Z W, Shao M, Lu S H. Review on volatile organic compounds (VOCs) source profiles measured in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
- [21] 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.
- [22] 武蕾丹, 王秀艳, 杨文, 等. 某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 511-516.
- Wu L D, Wang X Y, Yang W, *et al.* Ozone formation potential and priority species of VOCs in an industrial park [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 511-516.

- [23] 陈曦, 李杏茹. 大气中挥发性含氧有机物研究进展[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2018, **39**(3): 45-55.
Chen X, Li X R. Study advance on oxygenated volatile organic compounds in atmosphere [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2018, **39**(3): 45-55.
- [24] 刘芮伶, 翟崇治, 李礼, 等. 重庆主城区夏秋季挥发性有机物(VOCs)浓度特征及来源研究[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(4): 1260-1267.
Liu R L, Zhai C Z, Li L, *et al.* Concentration characteristics and source analysis of ambient VOCs in summer and autumn in the urban area of Chongqing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(4): 1260-1267.
- [25] 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.
- [26] Chang C C, Wang J L, Lung S C C, *et al.* Source characterization of ozone precursors by complementary approaches of vehicular indicator and principal component analysis [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(10): 1771-1778.
- [27] 曾沛, 郭海, 梁胜文, 等. 武汉市大气 VOCs 污染特征及其对臭氧生成的影响[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(7): 117-124.
Zeng P, Guo H, Liang S W, *et al.* Ambient volatile organic compounds and their contributions to ozone formation in Wuhan [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **41**(7): 117-124.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102, 010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Typess on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)