

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

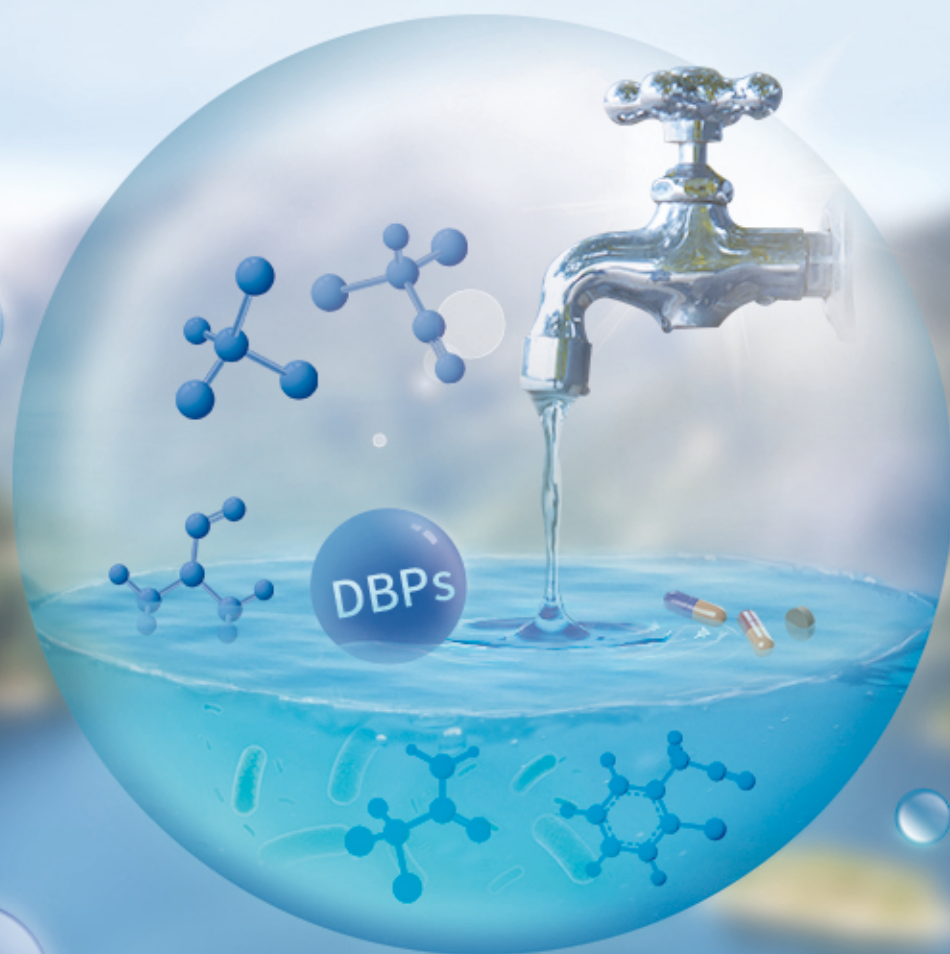
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

- 饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华 (5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹 (5086)

研究报告

- 1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑 (5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (5109)
汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华 (5122)
石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇 (5131)
天津市冬季空气湿度对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹 (5143)
承德市 $PM_{2.5}$ 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升 (5152)
中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍 (5162)
2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (5169)
基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华 (5180)
典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润 (5193)
沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜 (5201)
天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强 (5210)
郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙 (5220)
基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超 (5228)
长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月 (5239)
河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞吟, 张馨童, 姚波, 崔建升 (5250)
城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋 (5264)
北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李颀, 谢珍雯, 陈磊 (5275)
太湖西岸地表水中极性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯 (5284)
河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧 (5294)
白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升 (5303)
雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊 (5312)
基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南 (5322)
千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮 (5333)
巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠 (5346)
洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞 (5355)
成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛 (5364)
雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰 (5375)
粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀 (5384)
红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇 (5394)
减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璇骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲 (5405)
互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞 (5414)
基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邱琰茗, 郭道宇 (5424)
硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘 (5433)
高锰酸钾改性松木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹄, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华 (5440)
混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤 (5450)
负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟 (5460)
一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送 (5472)
生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳 (5481)
紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳 (5491)
南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京 (5500)
城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君 (5510)
我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平 (5519)
典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平 (5526)
稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区: 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠 (5535)
镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 彭杰, 李佳欣, 陈文清 (5545)
纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5554)
《环境科学》征订启事 (5108) 《环境科学》征稿简则 (5151) 信息 (5249, 5263, 5283)

沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势

库盈盈¹, 任万辉², 苏枫枫², 于兴娜^{1*}

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 辽宁省沈阳生态环境监测中心, 沈阳 110000)

摘要: 采用德国 AMA-GC 5000 在线气相色谱仪对沈阳市的工业区、交通区和文教混合区这 3 个不同功能区进行大气挥发性有机物(VOCs)观测, 分析沈阳市不同功能区大气 VOCs 的分布特征, 并利用最大增量反应活性(MIR)估算了大气 VOCs 的臭氧生成潜势(OFP)。结果表明, 沈阳市大气 VOCs 平均总浓度为 $(82.19 \pm 54.99) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中, 采暖期浓度高于非采暖期, 且工业区浓度较交通区和文教混合区明显偏高。VOCs 浓度日变化曲线中, 受早晚交通高峰影响为主的交通区和文教混合区呈双峰特征, 工业区受工厂不定时运作排放影响存在多峰。交通区和文教混合区 VOCs 组分占比表现为: 烷烃 > 芳香烃 > 烯烃 > 炔烃, 但工业区炔烃占比高于烯烃, 由 B/T 和 E/A 比值反映交通区和文教混合区受机动车尾气排放和燃料燃烧共同影响, 工业区还受石油化工影响产生新鲜气团较多, 且采暖期较非采暖期老化气团多。沈阳市大气 VOCs 的 OFP 贡献均值为 $232.89 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 烯烃组分对各功能区贡献均占第一, 且工业区的芳香烃组分因浓度高贡献也较大。

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 臭氧(O_3); 功能区; 物种组成; 臭氧生成潜势(OFP)

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5201-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101137

Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China

KU Ying-ying¹, REN Wan-hui², SU Cong-cong², YU Xing-na^{1*}

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Shenyang Ecological and Environmental Monitoring Center of Liaoning Province, Shenyang 110000, China)

Abstract: Ambient volatile organic compounds(VOCs) were determined by GC 5000 online gas chromatography in three functional areas of Shenyang, namely industrial, traffic, and mixed cultural and educational areas. The pollution characteristics of VOCs in these functional areas during the heating and non-heating periods were analyzed, and the ozone formation potential(OFP) was estimated by using maximum incremental reactivity(MIR). The results show that the average mass concentration of VOCs is $(82.19 \pm 54.99) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ in Shenyang, of which the concentration in industrial areas is significantly higher than that in traffic and cultural and educational mixed areas, and the heating period is higher. The traffic and mixed cultural and educational areas have bi-modal characteristics due to the morning and evening traffic, and the industrial area has multiple peaks affected by the irregular operation hours. The proportion of VOCs in traffic and mixed cultural and educational areas shows the order of alkanes > aromatic hydrocarbons > alkenes > alkynes, but the proportion of alkynes in industrial areas is higher than that of alkenes. The benzene to toluene(B/T) and ethane to acetylene(E/A) ratios reflects that traffic and mixed cultural and educational areas were affected by both vehicle exhaust emissions and fuel combustion. The industrial zone is therefore affected by complex sources, and there are more aged air masses during the heating period than non-heating period. The average OFP contribution of atmospheric VOCs in Shenyang is $232.89 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. The contribution of alkenes is largest for all functional areas, and the aromatic component also contributes more due to the high concentration of industrial areas.

Key words: volatile organic compounds(VOCs); ozone(O_3); functional area; species composition; ozone formation potential(OFP)

自发布大气污染防治行动计划以来,我国大气污染防治取得阶段性成效。细颗粒物浓度持续下降,但大气臭氧污染呈现快速上升和蔓延态势^[1]。挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)作为细颗粒物和臭氧的主要前体物^[2],每年以 2.3% 的速率增长^[3,4],在大气污染中扮演重要角色。不仅与氮氧化物发生光化学反应生成臭氧等大气污染物^[5],提高大气氧化能力,随后可继续氧化 VOCs,通过吸湿等过程形成二次有机气溶胶^[6],从而出现大气复合污染,对环境大气和人体健康等均会造成不可忽视的影响^[7]。因此,要进一步对我国大气污染有效治理,开展有关大气 VOCs 的研究探讨具有重要意义。

目前我国已有不少学者对大气 VOCs 开展了相关研究,包括 VOCs 的污染特征、反应活性、来源解析及健康风险等各方面。王帅等^[8]研究 VOCs 的化学特征发现采样期间 VOCs 浓度以卤代烷烃、芳香烃和含氧 VOCs 为主,且存在秋冬浓度高、春夏浓度低的季节变化;王倩等^[9]和张瑞旭等^[10]利用·OH 消耗速率和臭氧生成潜势(ozone formation

收稿日期: 2021-01-17; 修订日期: 2021-04-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0214604); 国家自然科学基金项目(41775154); 江苏省“六大人才高峰”项目(JNHB-057)

作者简介: 库盈盈(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气化学, E-mail: 1147131417@qq.com

* 通信作者, E-mail: xnyu@nuist.edu.cn

potential, OFP) 评估了大气 VOCs 的反应活性, 利用气溶胶生成系数估算出二次有机气溶胶生成潜势; 莫梓伟等^[11]对我国 VOCs 排放源成分谱测量结果进行了分析总结, 阐述了不完全燃烧产物(烷烃和醛酮类)是机动车尾气的重要组分, 工业排放化学组分复杂等典型排放源 VOCs 成分谱组分特征; 张栋等^[12]的研究对一次重污染过程大气 VOCs 进行实时连续监测, 评估了监测期间苯系物对人体的健康风险, 其中苯的致癌风险为 2.2×10^{-6} , 高于美国环保署规定的安全阈值. 由于大气 VOCs 来源广泛、成分复杂和活性差异大^[13], 导致不同地区大气 VOCs 存在明显的时空分布差异. 为了能详细了解大气中 VOCs 分布特征, 各地区研究正在进行, 但主要集中在长三角^[14,15]、珠三角^[16]及京津冀^[17~19]等地区. 沈阳市作为辽宁省的省会, 是国务院批复确定的中国东北地区重要的中心城市以及先进装备制造业基地, 其冬季采暖期长达 5 个月, 环境空气质量具有典型的燃煤采暖型特征^[20]. 但该区域的 VOCs 研究非常有限, 仅有个别学者开展了相关研究, 如刘雅婷等^[21]的研究考察 2008~2009 年沈阳市大气 VOCs 污染特征, 但主要针对中心商业区的含氧化合物、卤代烃和芳香烃的研究; 吴方堃等^[22]研究背景地区长白山 VOCs 的浓度、季节变化和主要来源, 同时分析周边区域输送对长白山 VOCs 的影响. 但这些研究均存在时间较早或仅单点观测等问题, 对不同功能区大气 VOCs 研究相对匮乏, 且缺少 VOCs 主要组分以及对臭氧贡献等研究.

随着工业发展和城镇建设, 能源消耗增加, 城市光化学烟雾时常出现, 大气污染日益明显^[23]. 2019 年沈阳市环境质量公报显示, 环境大气有 81 d 存在污染, 且超标污染日里, 首要污染物为臭氧的占 39.5%. 为精准控制大气污染状况, 现对沈阳市 3 个典型功能区的大气 VOCs 的浓度水平、组成特征、生成来源以及臭氧贡献评估等方面对比分析, 从而了解沈阳市大气 VOCs 污染状况以及对臭氧生成的影响程度, 以期对沈阳市有效控制臭氧及前体物排放提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 观测地点与时间

本研究选取沈阳市工业区、交通区和文教混合区这 3 个不同功能区进行大气 VOCs 自动在线观测. 3 个点位的布设依据环境空气质量监测点位布设技术规范(HJ 664-2013)相关规定进行设置, 交通区站点位于沈河区大南街, 该街区属于沈阳市市中心圈内, 人群密集, 交通发达, 附近纵横多条交通

干道, 站点距离交通主干道 10 m, 采样口高度为 33 m. 文教混合区站点位于市沈河区天柱山路沈阳农业大学内, 该校园及其附近的公园环境绿化好, 植物排放源多, 站点高度 12 m. 工业区站点设置在市经济技术开发区的化学工业园内, 周围有众多企业, 如石油化工、炼油、制药和喷漆等, 会导致大量工业废气排放及物流车辆尾气, 站点高度为 9 m.

观测时间包括非采暖期与采暖期, 分别为 2019 年 8 月 1~31 日和 2019 年 11 月 16 日~12 月 15 日. 非采暖期平均气温为 $(24.20 \pm 3.39)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $(82.55 \pm 15.09)\%$, 采暖期平均气温和相对湿度较低, 分别为 $(-2.75 \pm 5.41)^\circ\text{C}$ 和 $(56.22 \pm 18.13)\%$. 非采暖期平均风速为 $(1.51 \pm 0.88) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 主导风向为南风; 采暖期平均风速为 $(1.98 \pm 1.23) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 主导风向为西南风. 其气象数据均来自沈阳市大气复合污染立体监测超级站的观测记录. 两段时期均无极端天气出现, 样本具有代表性.

1.2 观测仪器与质量保证

3 个站点均采用德国 AMA 仪器公司生产的 GC5000 在线气相色谱仪对大气 VOCs 进行全天自动连续观测, 该仪器是由两个分系统(GC5000 VOC 分析仪和 GC5000 BTX 分析仪)、一个校准模块(DIM200 VOC 校准仪)以及其他辅助设备组成. 其中, $\text{C}_2 \sim \text{C}_5$ 碳氢化合物等低沸点 VOCs 使用 GC5000 VOC 分析仪两级富集, $\text{C}_6 \sim \text{C}_{12}$ 碳氢化合物等高沸点 VOCs 使用 GC5000 BTX 分析仪单级富集, 两套分析仪均采用氢火焰离子检测器(FID), 色谱柱进行分离, 采样流量为 $10 \sim 50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 最低检出限分别为 $\varphi(\text{丙烷})0.05 \times 10^{-9}$ 和 $\varphi(\text{苯})0.03 \times 10^{-9}$. 为保证数据质量, 每周通过 DIM200 VOC 校准仪对有机物分析仪进行校准维护. 点位数据有效率均在 93% 以上. 为保证数据的可靠性, 每周进行一次全系统空白检查. 每周用美国 Spectra Gases 公司的 PAMS-58 标准气, 选择日常平均浓度做一次单点检查, 每次通标样品与之前标定时标准样品保留时间差异需在 $\pm 5\%$ 及 1 min 以内.

1.3 OFP 计算方法

大气中 VOCs 是生成臭氧的重要前体污染物, 臭氧生成潜势(OFP)可反映在臭氧二次生成过程中各类 VOCs 的相对贡献程度, 进而确定其关键污染源及首要物种. 一般以 Carter^[24]的研究结果为基础来进行大气 VOCs 反应活性的探讨, 通过最大增量反应活性(MIR)及观测中大气 VOCs 物种的实际浓度来评估, 具体公式如下:

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

式中, OFP_i 表示第 i 个物种的臭氧生成潜势

($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); MIR_i 表示第 i 个物种在臭氧最大增量反应中的生成系数 (以 O_3/VOCs 计, $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$); $[\text{VOC}]_i$ 为实际观测中的第 i 个物种大气环境浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

2 结果与讨论

2.1 不同功能区 VOCs 浓度及日变化规律

观测期间, 沈阳市大气 VOCs 平均总浓度为 $(82.19 \pm 54.99) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 范围在 $22.53 \sim 343.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 这比之前刘雅婷等^[21] 所测得的沈阳市 VOCs 浓度低, 一是由于所测物种数量的差异, 二是近年来沈阳市大气污染治理有所成效, 但仍需进一步减排控制. 图 1 为沈阳市大气 VOCs 浓度变化规律及气象参数时间序列. 可以看出, 由于气温下降和化石燃料源使用增多, 采暖期大气 VOCs 浓度水平较非采暖期整体升高. 其中, 工业区 VOCs 平均浓度较交通区和文教混合区明显偏高, 采暖期可达 $(105.88 \pm 54.57) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 这与各功能区排放源强度有关. 此外, 观测过程中大气 VOCs 浓度变化也与气象条件有关. 高浓度的 VOCs 大多分布在风速小和气温较低的情况下, 如工业区 VOCs 日平均最高浓度出现在 8 月 22 日, 达到了 $343.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 此时风速小, 气温与相对湿度在非采暖期均较低; 交通区日平均最高浓度在 12 月 10 日, 与 12 月 9 日相

比, 气温大幅下降且风向出现转变. 而日平均最低浓度出现在文教混合区的 8 月 16 日, 仅为 $22.53 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 当日相对湿度较高, 可能有降水对 VOCs 冲刷沉降.

图 2 为沈阳市不同功能区大气 VOCs 浓度的日变化特征. 从中可知, 文教混合区和交通区曲线均呈现双峰型变化特征, 第一个峰值在 06:00 ~ 08:00 时段出现, 推测是夜间污染物的累积作用以及早高峰期间机动车尾气的排放对 VOCs 浓度的抬升影响^[17]. 随后气温攀升和太阳辐射增强导致大气光化学反应加强, 使得 VOCs 浓度下降, 同时边界层高度升高易发生扩散, 从而使 VOCs 在 14:00 左右达到谷值. 到傍晚, VOCs 浓度又开始明显上升, 在 21:00 前后再次达到峰值, 该峰值则是由于夜间光化学反应的减弱以及边界层高度降低, 造成污染物不易消耗和扩散而产生堆积. 工业区受本地工业生产排放影响大, 且具有不定性, 导致 VOCs 浓度整体偏高, 不规则地出现多个峰值, 这与上海市某化工区^[14] 情况特征类似.

2.2 不同功能区 VOCs 的组成特征及来源分析

本研究讨论了 53 种 VOCs 物种, 包括 28 种烷烃、10 种烯烃、14 种芳香烃和 1 种炔烃 (乙炔). 沈阳市总 VOCs 成分中, 烷烃组分所占比例明显高于其他烃类, 平均浓度为 $124.30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其占比达到

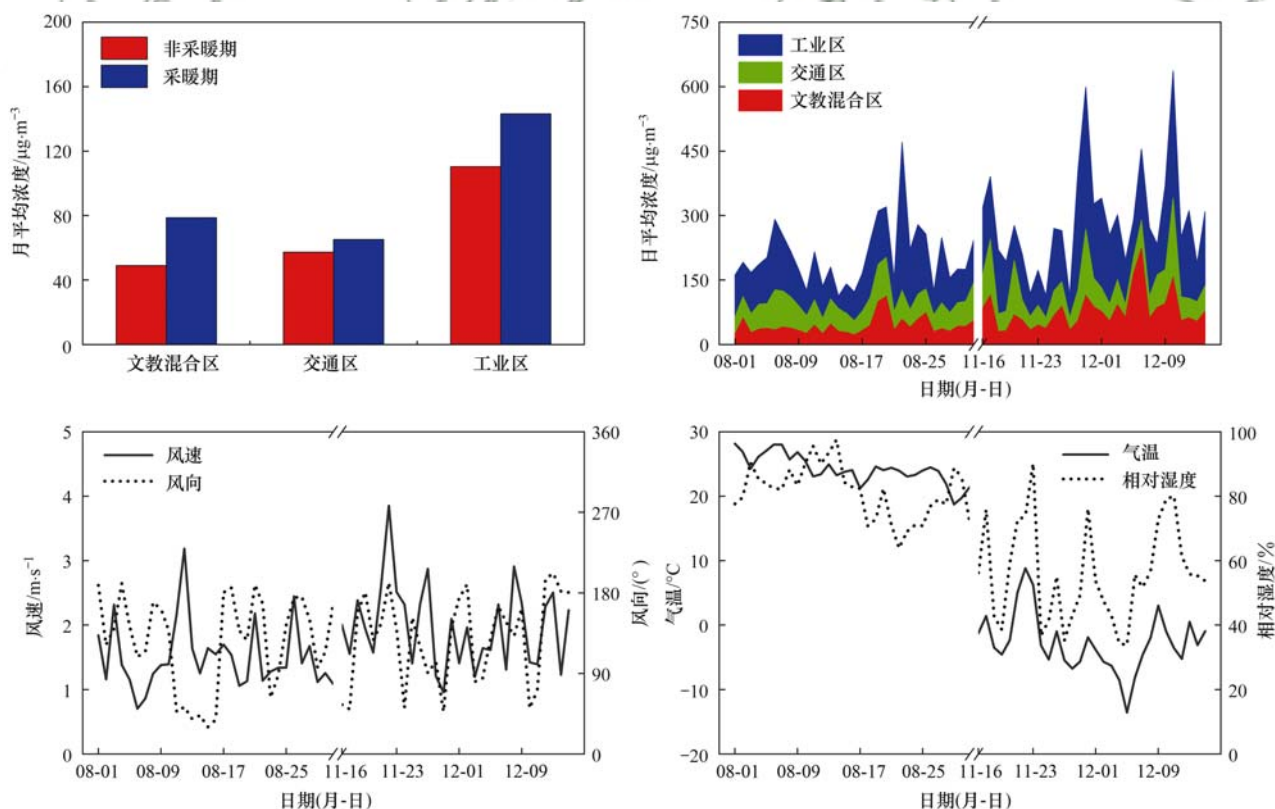


图 1 沈阳市大气 VOCs 浓度变化及气象参数时间序列

Fig. 1 Ambient VOCs concentration changes and meteorological parameters time series in Shenyang

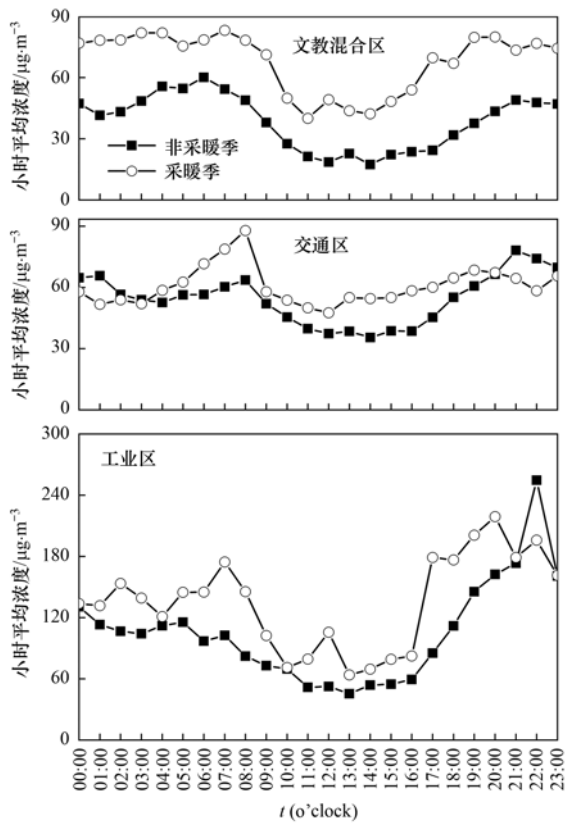


图2 沈阳市不同功能区大气 VOCs 日变化特征
Fig. 2 Daily variation of ambient VOCs in different functional areas of Shenyang

了总 VOCs 的 53.83%；其次是芳香烃和烯烃,分别占 23.82% 和 14.84%,其平均浓度分别为 51.72 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 25.72 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；占比最低的是炔烃,仅占 7% 左右.表 1 给出了近几年国内部分城市的大气 VOCs 各组分占比情况.可以看出,除太原市^[25] 外,沈阳市各组分占比分布与北方各城市均相似.其中,烷烃组分占比偏低,仅高于阳泉^[26] 和邯郸^[27],烯烃和芳香烃组分占比均处于中等水平,而炔烃组分比例突出.这可能与不同城市间能源结构、产业结构、地理条件以及采样时段存在差异有关^[17].

从图 3 看出,非采暖期与采暖期 VOCs 组分占比分布相似.但非采暖期芳香烃组分占比低于采暖期,这是因为夏季气温较高,大气光化学反应剧烈,芳香烃消耗相对较多^[29]；另一方面,夏季植物生长旺盛导致释放异戊二烯等烯烃增多,使组分占比高于采暖期^[30].从功能区方向分析,受周边排放源影响,大气 VOCs 各组分占比则存在一定差异,如交通区和文教混合区的组分占比与工业区明显不同.交通区和文教混合区由于炔烃占比不到 1%,VOCs 组分按比例均表现为:烷烃 > 芳香烃 > 烯烃,但文教混合区的烯烃占比相对较高,这可能是由于文教混合区站点处于大学城内,植被覆盖率较高,能释放出更多的烯烃组分 VOCs^[2].而工业区芳香烃和炔烃

表 1 国内部分城市大气 VOCs 各组分占比情况

Table 1 Composition of ambient VOCs in some cities of China

城市	年份	VOCs 浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	物种数量	VOCs 各组分占比/%				文献
				烷烃	烯烃	芳香烃	炔烃	
沈阳	2019	82.19 ± 54.99	53	53.83	14.84	23.82	7.51	本研究
天津	2019	48.9	56	65.0	14.6	17.4	3.0	[17]
北京	2017	34.36	59	57.13	7.54	33.18	2.15	[19]
太原	2018	32.2	56	58.01	20.06	16.52	5.4	[25]
阳泉	2018	82.1 ± 22.7	68	51.8	8.0	17.8	3.8	[26]
邯郸	2017	102.2 ± 45.8	56	52.3	16.5	27.6	3.6	[27]
晋城	2017	93.35 ± 89.10	47	56.68	9.95	28.17	5.21	[28]

占比明显提升,分布为:烷烃 > 芳香烃 > 炔烃 > 烯烃,这可能与工业区存在大量石油化工、制药和涂料等工业以及化石燃料燃烧排放有关^[10].

沈阳市不同功能区大气 VOCs 浓度前 10 位物种如表 2 所示.各功能区前 10 位 VOCs 的质量分数占到总 VOCs 的 60% 以上,其中,工业区采暖期前 10 位 VOCs 的质量分数最高可达 75%.对比各功能区物种可见,交通区和文教混合区主要物种较为相似,以烷烃组分为主.丙烷和乙烷是烷烃的主要物种,主要来自天然气和液化石油气的燃烧排放^[31].非采暖期存在于汽油蒸气的异丁烷、异戊烷因高温挥发而浓度更高^[16],采暖期则是来自机动车尾气的丙烯排放更多^[32].工业区前 10 位 VOCs 区别于交

通区和文教混合区,其中排名第一和第二的为乙炔和甲苯.乙炔是燃烧源的典型特征物^[17,33],该点的高浓度可能是区内有固定排放源存在.甲苯是石油化工的重要产品,可作溶剂^[10],说明工业区石油化工排放和溶剂使用挥发的影响也非常明显.

已有研究表明,苯和甲苯在环境大气中来源广泛,用苯与甲苯的体积比 (B/T) 可简单地识别大气 VOCs 的来源差异^[34].Barletta 等^[32] 的研究提出 B/T 值接近 0.6 时,机动车尾气排放是中国城市大气中 VOCs 的主要污染源;此外,涂料和溶剂挥发等排放源影响时, B/T 值相对偏小; B/T 值偏大时, VOCs 来源主要为生物质或化石燃料燃烧,特别在 1.5 ~ 2.2 之间受燃煤影响较大^[35].由图 4 发现,各功能区

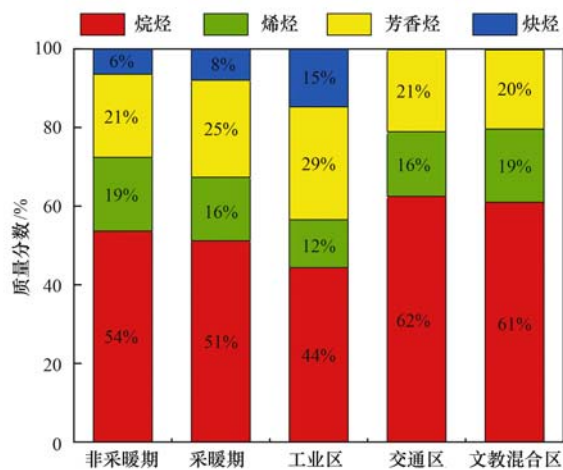


图3 沈阳市不同时期和功能区大气 VOCs 各组分质量分数

Fig. 3 Composition of ambient VOCs in different periods and functional areas of Shenyang

平均比值均大于 0.6,说明各功能区不仅仅受机动车尾气影响. 交通区 B/T 值接近 1.0,呈现机动车尾气和生物质燃烧共同影响特征;文教混合区的比值在非采暖期略低于采暖期,说明在非采暖期受机动车尾气影响相对更大. 工业区 B/T 值采暖期受燃煤源影响突出,且整体变化范围很大,说明工业区除了受到机动车尾气排放和燃料燃烧影响外,还受石油化工和溶剂挥发等其他 VOCs 排放源的影响.

气团老化程度常用光化学年龄作为一种指标,通过以来源相似但活性不同的特征物比值来表示,如乙烷和乙炔的体积比(E/A)^[36]. 有研究发现从同一排放源排放到大气中的乙炔反应活性是乙烷的 3~4 倍^[24],且新鲜机动车尾气中 E/A 值为 0.47 ± 0.26 ^[37],故在大气光化学反应中乙炔消耗快,随后发展 E/A 值就越大,表明气团光化学年龄越长,老

表2 沈阳市不同功能区大气 VOCs 前 10 物种浓度对比/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Top ten species concentrations of ambient VOCs in different functional areas of Shenyang/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$							
序号	物种名称	工业区		交通区		文教混合区	
		非采暖期	采暖期	非采暖期	采暖期	非采暖期	采暖期
1	丙烷	10.76	13.52	10.11	11.03	5.03	10.48
2	乙烷	5.58	9.81	5.63	8.55	4.07	7.93
3	苯	7.08	20.05	3.50	3.88	—	4.67
4	乙炔	14.67	22.76	—	—	—	—
5	正丁烷	7.46	12.05	4.08	4.28	3.32	4.93
6	环戊烷	—	6.30	4.47	4.50	3.38	5.02
7	甲苯	10.86	—	3.31	2.98	2.93	3.17
8	正戊烷	6.06	6.55	—	2.29	—	4.22
9	丙烯	—	7.32	—	3.90	—	4.45
10	异戊烷	5.07	—	3.09	2.28	2.20	2.77
11	2,4-二甲基戊烷	—	4.85	—	2.91	3.03	4.09
12	异丁烷	4.62	—	2.68	—	2.16	—
13	乙烯	—	4.63	2.67	—	2.06	—
14	1-己烯	4.54	—	1.63	—	—	—
15	2,3-二甲基丁烷	—	—	—	—	1.79	—
前 10 物种浓度占比/%		69	75	72	71	61	64

1) “—”表示该物种在此区域阶段观测中质量浓度排序不在前 10

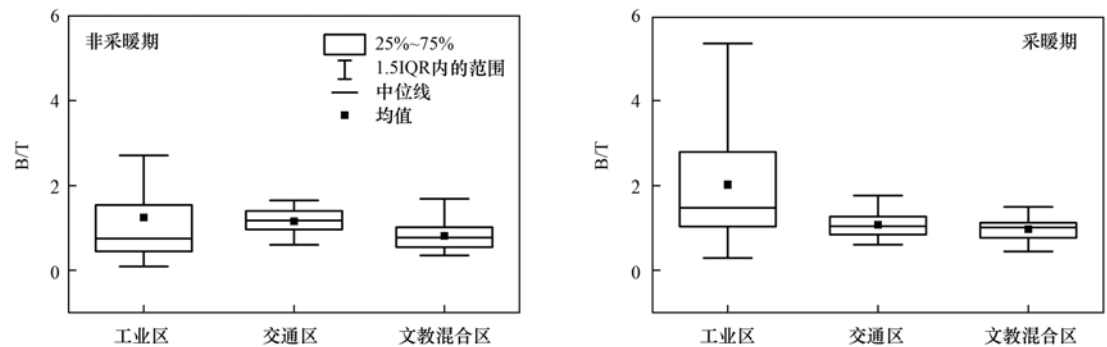


图4 沈阳市不同功能区苯与甲苯(B/T)比值

Fig. 4 Ratio of benzene to toluene(B/T) in different functional areas of Shenyang

化程度越高^[17]. 图5 是各功能区 E/A 值的对比,可以看出,观测期间工业区 E/A 值在 1.0 左右,虽高于新鲜机动车尾气值,但相比交通区和文教混合区

明显偏小,即该区域新鲜气团较多. 各功能区采暖期的 E/A 值均大于非采暖期,说明非采暖期气团老化程度较高.

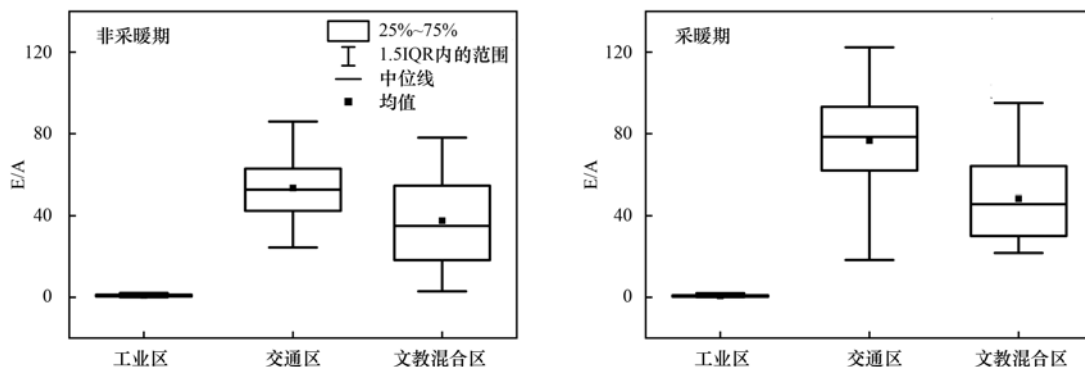


图5 沈阳市不同功能区乙烷与乙炔(E/A)比值

Fig. 5 Ratio of ethane to acetylene(E/A) in different functional areas of Shenyang

2.3 不同功能区大气 VOCs 的臭氧生成潜势

大气 VOCs 成分与大气中臭氧造成的污染特征息息相关,采用最大增量反应活性(MIR)系数法^[24]计算出沈阳市大气总 VOCs 的 OFP 贡献均值为 $232.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其各组分的 OFP 贡献占比如图 6 所示.其中,烯烃对 OFP 贡献均值最大,占比可达

40% 以上;芳香烃次之.沈阳市大气 VOCs 中烷烃占比虽高,但因其生成臭氧的最大反应活性很低,故烷烃 OFP 贡献占比在非采暖期只有烯烃的 50% 左右,且采暖期更低.而炔烃在总 VOCs 中组分占比本身就很小,OFP 贡献仅占 2% 左右.这种 OFP 贡献特征与天津^[17]、太原^[25]和邯郸^[27]等城市相似.

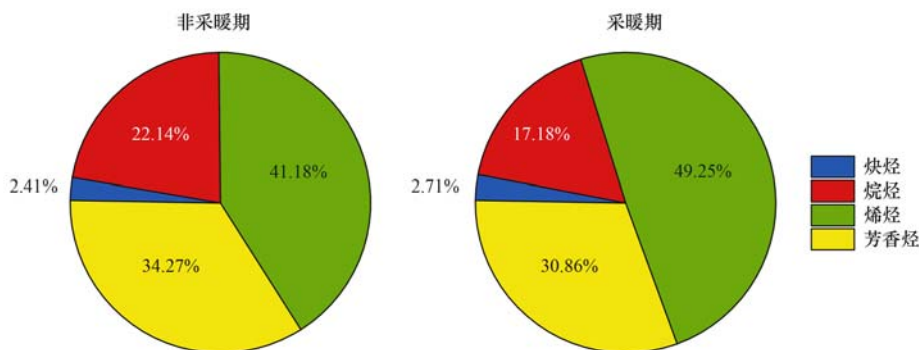


图6 沈阳市不同时期大气 VOCs 各组分对 OFP 贡献占比

Fig. 6 Contribution of ambient VOCs to OFP in different periods of Shenyang

沈阳市不同功能区大气 VOCs 对 OFP 的贡献值表现为:工业区 > 文教混合区 > 交通区,分别为 321.67 、 204.43 和 $172.58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.如图 7 所示,各功能区 VOCs 组分对 OFP 贡献值均为烯烃 > 芳香烃

> 烷烃 > 炔烃,说明在制定沈阳市臭氧污染控制政策时,应重点关注烯烃.此外,工业区芳香烃组分因浓度占比很大且对 OFP 贡献值也很高,故工业区需同时注意烯烃和芳香烃组分 VOCs.

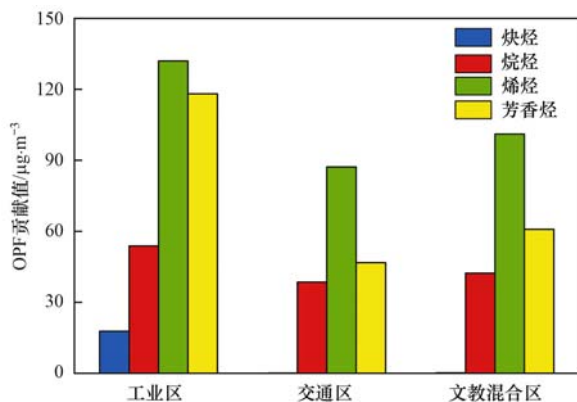


图7 沈阳市不同功能区大气 VOCs 各组分的 OFP 贡献值

Fig. 7 Contribution of ambient VOCs to OFP in different functional areas of Shenyang

图 8 为沈阳市大气 VOCs 对 OFP 贡献率前 10 位物种.从中可见,非采暖期工业区 OFP 贡献率前 10 物种中有 4 种烯烃、3 种苯系物、2 种烷烃和乙炔,占总贡献率的 66.09%,交通区由于交通源和燃烧源影响,前 10 位包括 4 种烯烃、2 种苯系物和 4 种烷烃,而文教混合区则因植物排放烯烃多而有 5 种烯烃、3 种苯系物和 2 种烷烃占据前 10 位.在采暖期燃煤量增加以致苯系物在前 10 物种中的数量均有增加,同时,因气温下降,使得文教混合区植物排放的烯烃数量减少.总之,观测期间沈阳市大气 VOCs 对 OFP 贡献率前 10 位物种大多为烯烃和芳香烃,但对比这些物种浓度发现均不是特别高.这是因为烯烃和芳香烃的最大反应活性较其他物种更为

活泼^[15],所以在浓度不高的情况下 OFP 贡献值也能很高.如乙烯,虽浓度在各功能区的物种排名中均不在前列,但因生成臭氧的活性强,所以对 OFP 贡献大,占比达 12% 以上,其在机动车尾气中产生,也同甲苯一样是石油化工的基本原料^[31,38]. 甲苯虽活

性没有烯烃高,但由于其浓度很高,以致在非采暖期工业区 OFP 贡献第一,约为 15.08%,它和邻-二甲苯等苯系物除了石油化工排放,还主要有机动车尾气排放和溶剂挥发^[8,38],因此控制沈阳市的交通源和石油化工排放,可有效降低本地区的臭氧浓度.

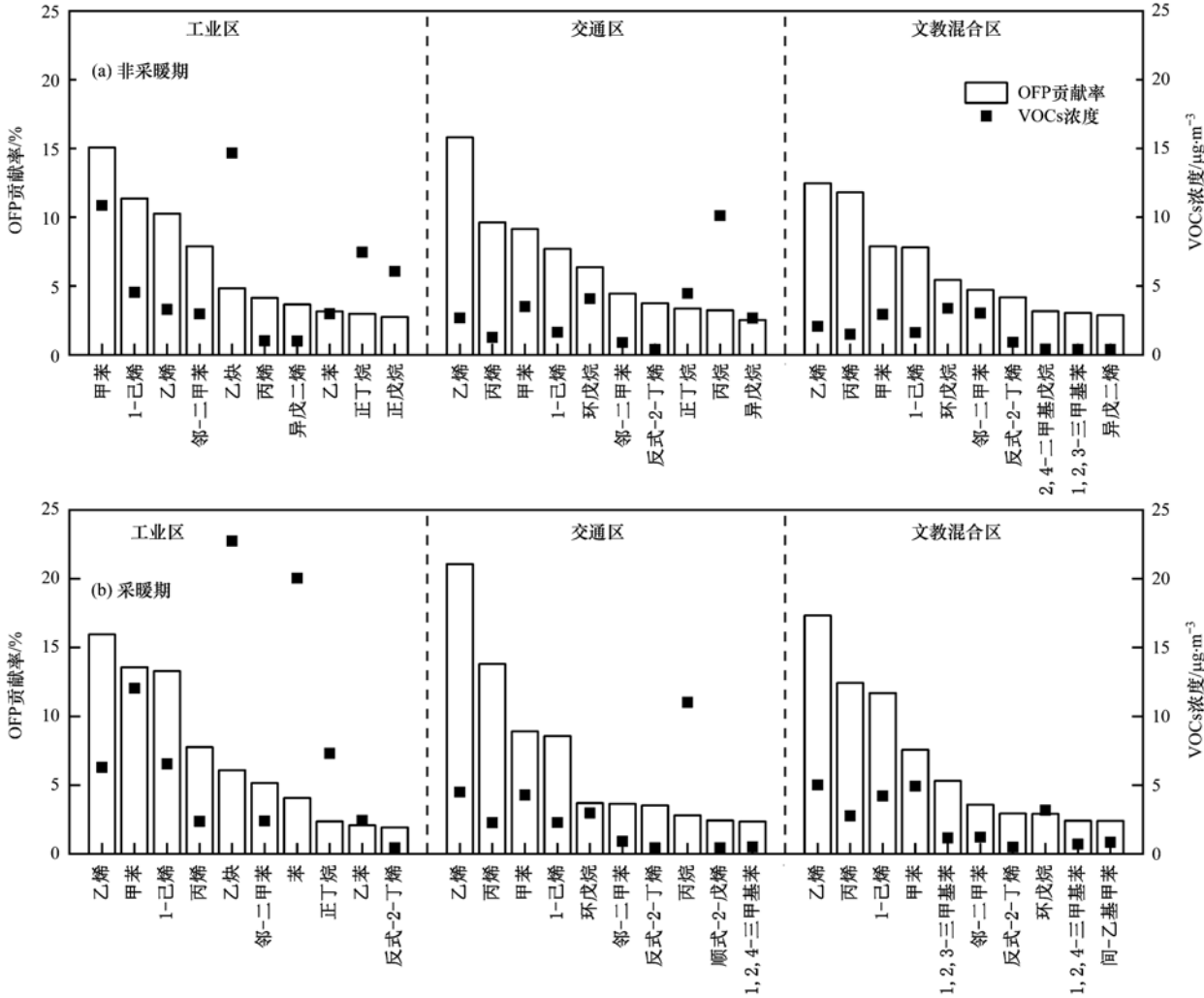


图 8 沈阳市大气 VOCs 对 OFP 贡献率前 10 位物种

Fig. 8 Top ten species contribution rate of ambient VOCs to OFP of Shenyang

3 结论

(1) 沈阳市大气 VOCs 平均总浓度为 $(82.19 \pm 54.99) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,其中采暖期浓度高于非采暖期,工业区浓度较交通区和文教混合区明显偏高. VOCs 浓度日变化特征中交通区和文教混合区 VOCs 受早晚交通高峰影响呈双峰型,受工厂不定时排放影响工业区有多个峰.

(2) 交通区和文教混合区总体上呈烷烃最高,芳香烃和烯烃次之,且物种浓度较高的是丙烷和乙烷;而工业区表现为:烷烃 > 芳香烃 > 炔烃 > 烯烃,以乙炔和甲苯等为主. 由 B/T 值和 E/A 值发现,交通区和文教混合区受机动车尾气排放和燃料燃烧共同影响,气团老化程度大;工业区还受石油化工

源和溶剂挥发排放影响,新鲜气团较多.

(3) 沈阳市大气 VOCs 的 OFP 贡献均值为 $232.89 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,各组分贡献占比中烯烃最大,芳香烃次之. 贡献率前 10 物种以乙烯、甲苯、1-己烯和丙烯等为主,且采暖期苯系物种数增多. 文教混合区烯烃物种最多,交通区烷烃物种较其他两区多,工业区要控制石油化工排放.

参考文献:

- [1] 张远航, 郑君瑜, 陈长虹, 等. 中国大气臭氧污染防治蓝皮书(2020 年)[R]. 南京: 中国环境科学学会臭氧污染控制专业委员会, 2020.
- [2] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, et al. Characteristics, source apportionment and contribution of VOCs to ozone formation in Wuhan, Central China[J]. Atmospheric Environment, 2018, 192: 55-71.

- [3] 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**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138654.
- [4] 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), doi: 10.3390/atmos9080297.
- [5] 江梅, 邹兰, 李晓倩, 等. 我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3522-3532.
Jiang M, Zou L, Li X Q, *et al.* Definition and control indicators of volatile organic compounds in China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3522-3532.
- [6] 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, 1992.
- [7] Bigazzi A Y, Figliozzi M A, Luo W T, *et al.* Breath biomarkers to measure uptake of volatile organic compounds by bicyclists [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50** (10): 5357-5363.
- [8] 王帅, 崔建升, 冯亚平, 等. 石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5325-5335.
Wang S, Cui J S, Feng Y P, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs and O₃ in Shijiazhuang [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5325-5335.
- [9] 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.
- [10] 张瑞旭, 刘煥武, 邓顺熙, 等. 宝鸡市秋冬季大气VOCs浓度特征及其O₃和SOA生成潜势[J]. *中国环境科学*, 2020, **40** (3): 983-996.
Zhang R X, Liu H W, Deng S X, *et al.* Characteristics of VOCs and formation potential of O₃ and SOA in autumn and winter in Baoji, China [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(3): 983-996.
- [11] 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.
- [12] 张栋, 于世杰, 王楠, 等. 郑州市冬季VOCs污染特征、来源及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(8): 2935-2943.
Zhang D, Yu S J, Wang N, *et al.* Characteristics, sources and health risk assessment of ambient VOCs in winter of Zhengzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(8): 2935-2943.
- [13] Rui R 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**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137470.
- [14] 高宗江, 高松, 崔虎雄, 等. 上海市某化工区夏季典型光化学过程VOCs特征及活性研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37** (4): 1251-1259.
Gao Z J, Gao S, Cui H X, *et al.* Characteristics and chemical reactivity of VOCs during a typical photochemical episode in summer at a chemical industrial area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(4): 1251-1259.
- [15] 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 Q, 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.
- [16] Guo H, Wang T, Blake D R, *et al.* Regional and local contributions to ambient non-methane volatile organic compounds at a polluted rural/coastal site in Pearl River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(13): 2345-2359.
- [17] 高璟赟, 肖致美, 徐虹, 等. 2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 55-64.
Gao J Y, Xiao Z M, Xu H, *et al.* Characterization and source apportionment of atmospheric VOCs in Tianjin in 2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 55-64.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 王帅, 林宏, 王佳楠, 等. 沈阳地区冬季空气颗粒物输送路径及潜在源分析[J]. *环境保护科学*, 2021, **47**(1): 80-86.
Wang S, Lin H, Wang J N, *et al.* Analysis of the transport path and potential source of air particles in Shenyang during the winter [J]. *Environmental Protection Science*, 2021, **47**(1): 80-86.
- [21] 刘雅婷, 彭跃, 白志鹏, 等. 沈阳市大气挥发性有机物(VOCs)污染特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2777-2785.
Liu Y T, Peng Y, Bai Z P, *et al.* Characterization of atmospheric volatile organic compounds in Shenyang, China [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(9): 2777-2785.
- [22] 吴方堃, 孙杰, 余晔, 等. 长白山背景站大气VOCs浓度变化特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3308-3314.
Wu F K, Sun J, Yu Y, *et al.* Variation characteristics and sources analysis of atmospheric volatile organic compounds in Changbai mountain station [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3308-3314.
- [23] 张宸赫, 赵天良, 陆忠艳, 等. 2014—2019年沈阳市大气污染物变化及气象因素影响分析[A]. 见: 2020中国环境科学学会科学技术年会论文集(第一卷)[C]. 南京:《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司出版, 2020. 1141-1149.
- [24] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications [M]. California: California Air Resources Board Contract, 2010.
- [25] 司雷霆, 王浩, 李洋, 等. 太原市夏季大气VOCs污染特征及臭氧生成潜势[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(9): 3655-3662.
Si L T, Wang H, Li Y, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in summer in Taiyuan [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(9): 3655-3662.
- [26] 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 等. 阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响[J]. *环境科学*, 2020, **41** (7): 3066-3075.
Niu Y Y, Liu Z C, Li R M, *et al.* Characteristics, source

- apportionment, and environmental impact of volatile organic compounds in summer in Yangquan[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3066-3075.
- [27] 王雨, 王丽涛, 杨光, 等. 邯郸市秋季大气挥发性有机物污染特征[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(7): 1134-1142.
Wang Y, Wang L T, Yang G, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds in autumn in Handan City, China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(7): 1134-1142.
- [28] 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 H, 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.
- [29] 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 等. 连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 630-637.
Qiao Y Z, Chen F, Li H P, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient volatile organic compounds (VOCs) in summer and autumn in different functional zones of Lianyungang, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 630-637.
- [30] 钟雪芬, 陈峰, 丁晖, 等. 福州清洁地区夏季和秋季 VOCs 浓度特征及化学反应活性[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(4): 1393-1401.
Zhong X F, Chen F, Ding H, *et al.* Concentration characteristics and chemical reactivity of ambient volatile organic compounds in summer and autumn in Fuzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(4): 1393-1401.
- [31] McCarthy M C, Aklilu Y A, Brown S G, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds measured in Edmonton, Alberta[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **81**: 504-516.
- [32] Barletta B, Meinard S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Wang M, Shao M, Liu S H, *et al.* Evidence of coal combustion contribution to ambient VOCs during winter in Beijing [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2013, **24**(9): 829-832.
- [36] 盛涛, 陈筱佳, 高松, 等. VOCs 比值法的应用研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(12): 122-130.
Sheng T, Chen X J, Gao S, *et al.* Progress in the research of application of VOCs ratio method[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(12): 122-130.
- [37] 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.
- [38] 刘齐, 卢星林, 曾鹏, 等. 柳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*, 2021, **42**(1): 65-74.
Liu Q, Lu X L, Zeng P, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in spring in Liuzhou [J]. *Environmental Sciences*, 2021, **42**(1): 65-74.

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i> (5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i> (5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i> (5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOW Wei, <i>et al.</i> (5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i> (5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i> (5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i> (5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i> (5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i> (5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i> (5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i> (5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i> (5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i> (5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i> (5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i> (5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i> (5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i> (5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i> (5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i> (5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i> (5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i> (5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i> (5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i> (5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i> (5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i> (5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i> (5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i> (5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong (5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in A Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i> (5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong (5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i> (5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i> (5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i> (5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i> (5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i> (5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i> (5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i> (5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i> (5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i> (5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i> (5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i> (5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i> (5554)