

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

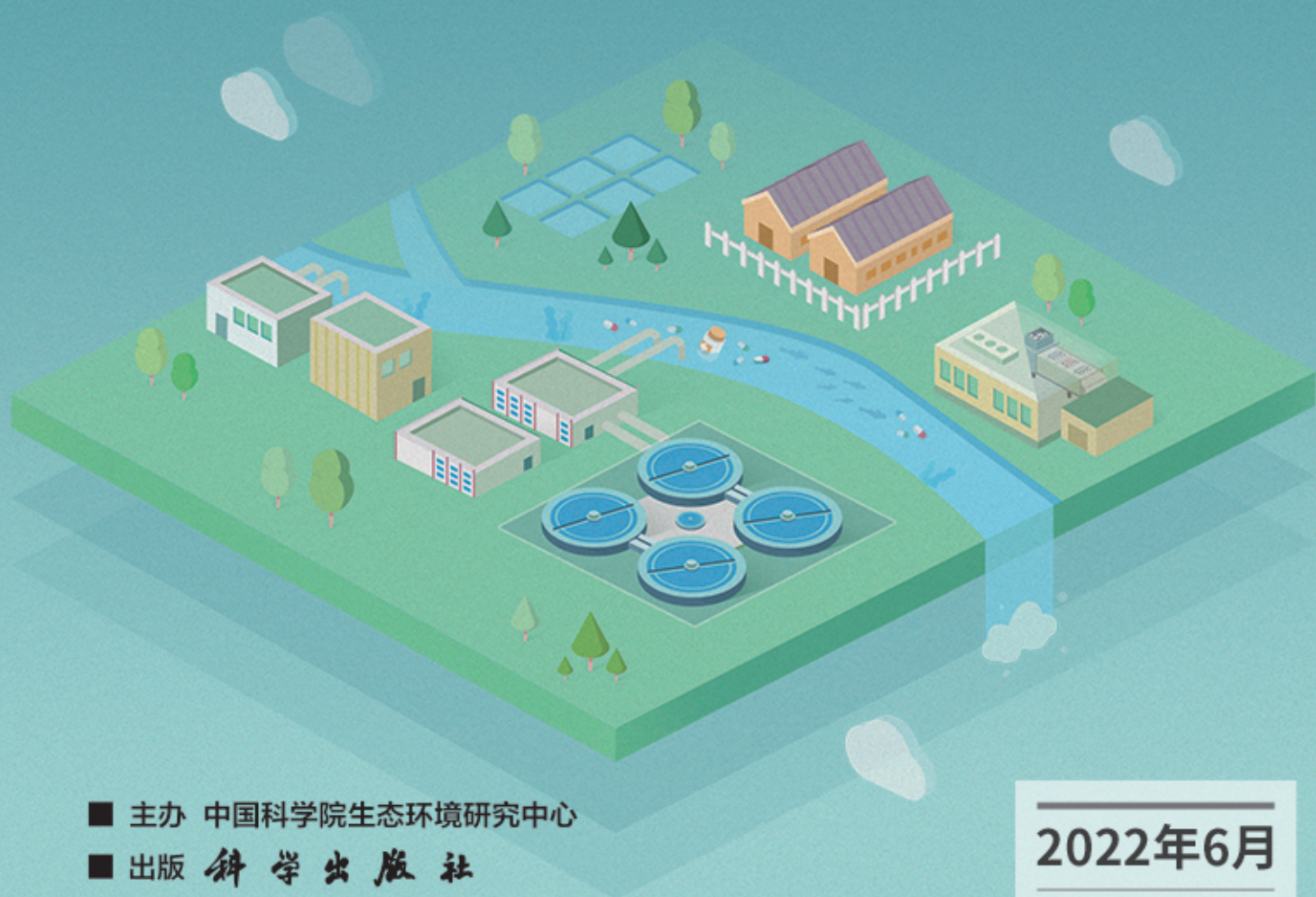
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁敏, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐藤, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡现秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析

温肖宇¹, 赵文婷¹, 罗淑贞¹, 张强^{1*}, 王斌涛¹, 马俊杰¹, 刘新罡²

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要: 基于2020年6~8月运城市区VOCs、O₃和NO₂的在线监测数据,分析了运城市区夏季VOCs的污染特征,同时使用正交矩阵因子分解法(PMF)确定了其主要排放源,并通过最大增量反应活性法(MIR)和气溶胶生成系数法(FAC)对VOCs的化学反应活性进行了评估。结果表明,运城市区夏季凌晨和傍晚时段受VOCs和NO₂污染较为严重,VOCs日变化峰值分别出现在08:00和20:00,峰值的出现主要受交通早晚高峰的影响;6~8月的 $\rho(\text{VOCs})$ 为50.52 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,质量分数最高的物种为烷烃(39.39%)和含氧挥发性有机物(OVOCs, 34.63%)。利用PMF模型共确定了5个VOCs排放源,其中贡献率最大的为机动车尾气排放源(33.10%),其次为工业排放源(29.46%)、天然气及煤燃烧源(17.31%)、溶剂使用源(11.94%)和植物排放源(8.19%)。控制机动车尾气排放源是缓解运城市夏季VOCs污染的关键。VOCs的臭氧生成潜势(OFP)均值为162.88 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中OVOCs的贡献率(45.37%)最高,乙醛、丙醛、乙烯、异戊二烯和甲苯等是关键的活性组分,工业排放源是贡献率最高的排放源;VOCs的二次有机气溶胶生成潜势(SOA_p)均值为0.40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中芳香烃的贡献率最高(88.00%),溶剂使用源是贡献率最高的排放源。

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 污染特征; 源解析; 臭氧生成潜势(OFP); 二次有机气溶胶生成潜势(SOA_p)

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-2979-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109134

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City

WEN Xiao-yu¹, ZHAO Wen-ting¹, LUO Shu-zhen¹, ZHANG Qiang^{1*}, WANG Yun-tao¹, MA Jun-jie¹, LIU Xin-gang²

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwestern University, Xi'an 710127, China; 2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the online monitoring data of VOCs, O₃, and NO₂ in Yuncheng City from June to August 2020, the pollution characteristics of VOCs in Yuncheng City in summer were analyzed. At the same time, the main emission sources were determined using a PMF model, and the chemical reactivity of VOCs was evaluated using the maximum incremental reactivity (MIR) method and fractional aerosol coefficients (FAC). The results showed that the urban area of Yuncheng was seriously polluted by VOCs and NO₂ in the early morning and evening during summer, the peak value of VOCs daily variation occurred at 08:00 and 20:00, respectively, and was mainly affected by the morning and evening peaks in traffic. The $\rho(\text{VOCs})$ from June to August was 50.52 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, and the species with the highest proportion were alkanes (39.39%) and oxygenated volatile organic compounds (OVOCs, 34.63%). Five VOCs emission sources were determined by the PMF model, of which the largest contribution was from motor vehicle exhaust emission sources (33.10%), followed by industrial emission sources (29.46%), natural gas and coal combustion sources (17.31%), solvent use sources (11.94%), and plant emission sources (8.19%). Controlling motor vehicle exhaust emission sources is the key to alleviate VOCs pollution in summer in Yuncheng City. The average ozone formation potential (OFP) of VOCs was 162.88 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, in which OVOCs had the highest contribution rate (45.37%); acetaldehyde, propionaldehyde, ethylene, isoprene, and toluene were the key active components; and industrial emission sources were the emission sources with the highest contribution rate. The average value of secondary organic aerosol formation potential (SOA_p) of VOCs was 0.40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, in which the contribution rate of aromatic hydrocarbons was the highest (88.00%), and the solvent use source was the emission source with the highest contribution rate.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); pollution characteristics; source apportionment; ozone formation potential (OFP); secondary organic aerosol formation potential (SOA_p)

当前在我国重点区域以O₃和PM_{2.5}复合型污染为特征的大气污染问题日益凸显^[1]。挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是大气光化学反应的主要参与者^[2,3],是O₃和PM_{2.5}的共同的前体物^[4]。VOCs光化学反应产生的中间体($\cdot\text{RO}_2$ 和HO₂ $\cdot$)会增强大气氧化性,这些中间体可与NO_x反应生成O₃和二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)等二次污染物^[5-7],加剧城市地区光化学烟雾和灰霾等复合型大气污染,影响人体健康^[8,9]。目前,国内外针对VOCs的研究主要包括污染特征分析、化学反应活性评估和来源解析等方

面。VOCs的化学组成主要包括烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃和含氧挥发性有机物(oxygenated volatile organic compounds, OVOCs)等,其中烷烃质量分数通常可以达到30%~60%^[10-13],是许多城市大气VOCs的主要组成部分。闫磊等^[4]对上海市杭州湾

收稿日期: 2021-09-15; 修订日期: 2021-10-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(SQ2019YFC020023); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41807342); 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG-05-32)

作者简介: 温肖宇(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气挥发性有机物污染分析与溯源, E-mail: 201931908@stumail.nwu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhang-qiang@nwu.edu.cn

北岸的研究发现烷烃质量分数最高,为 33.24%, VOCs 浓度呈冬季高夏季低的特征. Zhang 等^[14]对郑州市 VOCs 的研究发现烷烃质量分数最高,为 45.00%,在雾-霾污染期间乙烷和丙烷是浓度最高的组分.

VOCs 不仅成分复杂,其排放来源也较为广泛,因此分析其主要排放源特征可对制定 VOCs 的减排方案提供依据. 目前针对 VOCs 进行来源解析的方法主要有主成分分析法 (principal component analysis, PCA)、化学质量平衡法 (chemical mass balance, CMB) 和正交矩阵因子分解法 (positive matrix factorization, PMF). 其中 PMF 可以更好地识别源类^[6],同时无需输入源谱数据,并且对污染源类型及其贡献有非负限制,在 VOCs 成分分析方面有着广泛的应用^[15]. 高素莲等^[16]的研究基于 PMF 模型对济南市 VOCs 来源解析发现,机动车排放和工业排放是主要排放源,其贡献率分别为 31.70% 和 27.10%. Qin 等^[17]对许昌市的研究发现,由于受当地的生物质燃烧与发电厂的燃煤影响,许昌市燃烧源(33.10%)的 VOCs 贡献率最高且显著高于许多国内其他城市. VOCs 中的烯烃、OVOCs 和芳香烃等组分具有较高的化学反应活性,是许多城市缓解 O₃ 及 PM_{2.5} 污染问题的重要控制对象. 景盛翱等^[18]对杭州市城区的研究发现,芳香烃与醛酮类化合物对臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP) 的贡献率较高,分别为 40.6% 和 26.0%,甲苯和间/对-二甲苯是优势组分. 牛月圆等^[19]对阳泉市区的研究发现,芳香烃对二次有机气溶胶生成潜势 (secondary organic aerosol formation potential, SOA_p) 的贡献率最高,为 93.4%.

山西省运城市是汾渭平原区域大气污染重点防控城市之一,该区域 O₃ 及 PM_{2.5} 污染问题十分突出^[20]. 汾渭平原区域能源结构以煤为主,产业结构以钢铁、焦化、铸造和能源电力等重化工为主,大气污染物排放总量居高难下^[21],同时地形条件复杂且相对封闭,不利于污染物的扩散^[22]. 本研究分析了运城市区 2020 年 6~8 月 VOCs 污染特征和主要排放源,评估了 VOCs 物种的 OFP 和 SOA_p,以期对运城市政府大气污染防控提供科学依据,也为汾渭平原区域污染防治提供参考.

1 材料与方法

1.1 监测点位

本研究监测点位于山西省运城市盐湖区运城水厂楼顶(111.01°E, 35.04°N),采样点距离地面约 20 m. 监测点位置如图 1,该监测点附近有居民楼、

幼儿园、商场和餐饮等生活配套,东边是一家居建材市场且距监测点 700 m 是安邑水库,南边距离采样点 400 m 有一加油站. 监测点周边主要以居民区和商业区为主且临近交通主干道,是典型的城市区域. 监测点附近没有高大的建筑群影响空气流通和污染物扩散,周边没有明显的污染源,可以较好地反映城市交通、生活等混合污染源的污染影响情况. 此外,距离本研究监测点正南方向 800 m 是运城市运城中学环境空气质量监测国控点,本研究监测点周边情况与该国控点非常相似,这两个点位的设置均是在与当地生态环境局协商和综合考虑后确定的. 因此本研究监测数据基本代表了运城市区的污染状况.



1. 运城水厂监测点; 2. 大明宫建材市场; 3. 安邑水库; 4. 加油站

图 1 运城水厂监测点周边情况

Fig. 1 Surrounding conditions of monitoring sites of Yuncheng water plant

1.2 仪器设备

本研究使用武汉天虹 TH-300B 大气挥发性有机物在线监测系统对环境中的 VOCs 进行观测,该系统主要由超低温在线预浓缩仪和 GC-MS/FID 检测仪组成,在大气样品经过采集后进入超低温在线预浓缩仪,环境中的 VOCs 在毛细管捕集柱中被冷冻捕集,在系统进行快速的热解吸后进入 GC-MS 分析系统,经过色谱柱的分离后, C₂~C₅ 的组分进入 FID 检测器中检测,其余组分进入 MS 检测器检测. 为保证观测数据的准确性,在监测过程中使用醛酮、PAMS、TO-15 和内标 4 种标准气体,其生产厂商为四川中测标物科技有限公司. 醛酮、PAMS 和 TO-15 这 3 种标气证书等级为 BW,不确定度为 5%;内标标气证书等级为 GBWE,包含氯溴甲烷、氯苯-d5、4-溴氟苯和 1,4-二氟苯这 4 种物质. 标准气体稀释时使用零气(除烃空气)和响应的标准气体进行稀释和校准,稀释时不加湿. 多点校准设置 6 个浓度点(0.5、2、4、6、8 和 10 μg·L⁻¹),至少对 5 个浓度点进行拟合验证,使得校准时目标化合物的相关系数

在 0.98 以上；每日使用标准气体进行单点校准,使得 80% 以上的目标化合物的浓度偏差小于 30%,且不合格的关键化合物不超过 5 个. 每周通入零气进行一次空白检查来确保监测系统未被污染,空白满足目标化合物浓度低于 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 观测期间,共检出 68 种 VOCs 组分,包括 29 种烷烃、10 种烯烃、1 种炔烃、16 种芳香烃和 12 种 OVOCs, O_3 和 NO_2 等气态污染物数据来源于中国国家环境监测中心 (<http://106.37.208.233:20035/>),气象数据来源于国家气象数据中心 (<http://data.cma.cn>).

1.3 臭氧生产潜势计算方法

不同的 VOCs 组分的 OFP 不同,通常采用 MIR 法来计算 VOCs 的 OFP,评估 VOCs 组分生成 O_3 的能力^[23]. MIR 计算公式如下:

$$\text{OFP}_i = \text{VOCs}_i \times \text{MIR}_i \quad (1)$$

式中, OFP_i 为 VOCs 物种 i 的臭氧生成潜势, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; VOCs_i 为物种 i 在大气环境中的浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; MIR_i 为 VOCs 物种 i 所对应的最大增量反应活性系数,本研究 MIR 系数采用加州管理条例 2010 年最新数据^[24].

1.4 二次有机气溶胶生成潜势计算方法

SOA_p 可以用来评估 VOCs 组分的二次有机气溶胶生成能力. 本研究采用 FAC 系数法来计算各 VOCs 的 SOA_p ,其计算公式如下:

$$\text{SOA}_p = (\text{VOCs}_i \times \text{FAC}) / (1 - \text{FVOC}_r) \quad (2)$$

式中, VOCs_i 为经过氧化后的 VOC 组分浓度,即环境空气中的 VOC 组分浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; FAC 为气溶胶生成系数,%; FVOC_r 为 VOC 组分中参与反应的

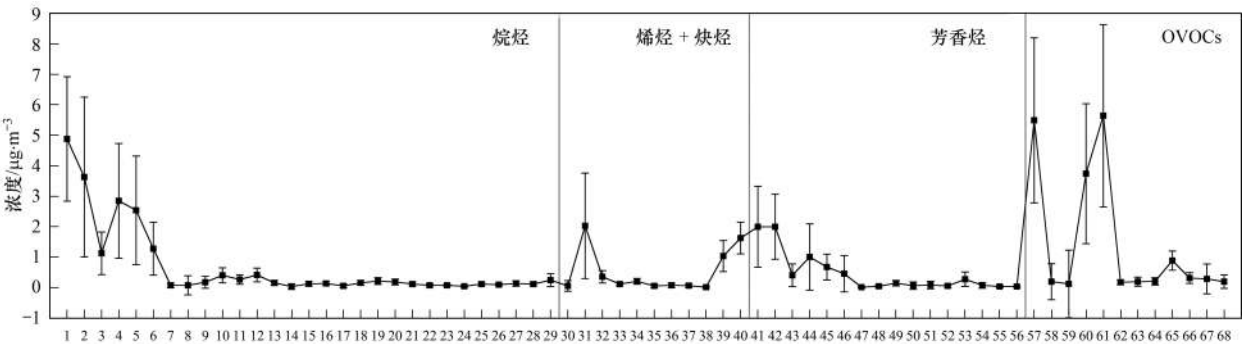
体积分数,%; 本研究 FAC 和 FVOC_r 来自 Grosjean 烟雾箱实验^[25,26].

2 结果与讨论

2.1 运城市区夏季 VOCs 污染特征

2.1.1 VOCs 浓度组成特征

本研究测定了运城市区 68 种 VOCs 组分,其浓度均值如图 2 所示. 运城市区 6 ~ 8 月 $\rho(\text{VOCs})$ 为 $50.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其组分大小依次为: 烷烃 ($19.91 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > OVOCs ($17.49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 芳香烃 ($7.44 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 烯烃 ($4.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 炔烃 ($1.63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),质量分数分别为 39.39%、34.63%、14.70%、8.02% 和 3.23%. 浓度前 10 的 VOCs 依次为: 丙酮 ($5.64 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、乙醛 ($5.49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、乙烷 ($4.88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、丙醛 ($3.74 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、丙烷 ($3.63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、正丁烷 ($2.85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、异戊烷 ($2.54 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、乙烯 ($2.03 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、苯 ($2.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和甲苯 ($2.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),累计占总 VOCs 的质量分数为 68.89%,主要以烷烃、OVOCs 和芳香烃为主,这与监测点临近一大型家具建材市场和交通主干道有关; 乙烷、丙烷、正丁烷和异戊烷占烷烃的 69.81%,主要来源于机动车尾气和液化石油气/天然气排放^[27-29]; 乙烯占烯烃的 50.12%,主要来源于燃烧过程^[30]; 苯和甲苯占芳香烃的 53.76%,苯主要来源于燃烧过程,包括机动车排放、生物质燃烧和燃煤过程等,甲苯除来自于机动车尾气外,涂料和溶剂使用也是其重要来源^[31]. 丙酮、乙醛和丙醛占 OVOCs 的 85.02%,醛酮类化合物与烷烃、烯



1. 乙烷, 2. 丙烷, 3. 异丁烷, 4. 正丁烷, 5. 异戊烷, 6. 正戊烷, 7. 2,2-二甲基丁烷, 8. 环戊烷, 9. 2,3-二甲基丁烷, 10. 2-甲基戊烷, 11. 3-甲基戊烷, 12. 正己烷, 13. 甲基环戊烷, 14. 2,4-二甲基戊烷, 15. 环己烷, 16. 2-甲基己烷, 17. 2,3-二甲基戊烷, 18. 3-甲基己烷, 19. 2,2,4-三甲基戊烷, 20. 正庚烷, 21. 甲基环己烷, 22. 2,3,4-三甲基戊烷, 23. 2-甲基庚烷, 24. 3-甲基庚烷, 25. 正辛烷, 26. 正壬烷, 27. 正癸烷, 28. 正十一烷, 29. 正十二烷, 30. 1-己烯, 31. 乙烯, 32. 丙烯, 33. 反式-2-丁烯, 34. 1-丁烯, 35. 顺式-2-丁烯, 36. 反式-2-戊烯, 37. 1-戊烯, 38. 顺式-2-戊烯, 39. 异戊二烯, 40. 乙炔, 41. 苯, 42. 甲苯, 43. 乙苯, 44. 间/对-二甲苯, 45. 苯乙炔, 46. 邻-二甲苯, 47. 异丙苯, 48. 正丙苯, 49. 间-乙基甲苯, 50. 对-乙基甲苯, 51. 1,3,5-三甲基苯, 52. 邻-乙基甲苯, 53. 1,2,4-三甲基苯, 54. 1,2,3-三甲基苯, 55. 间-二乙基苯, 56. 对-二乙基苯, 57. 乙醛, 58. 正丁醛, 59. 丙烯醛, 60. 丙醛, 61. 丙酮, 62. 异丁烯醛, 63. 戊醛, 64. 己醛, 65. 2-丁酮, 66. 丁烯醛, 67. 苯甲醛, 68. 3-甲基苯甲醛

图2 运城市区夏季 VOCs 组分
Fig. 2 VOCs concentration in summer in Yuncheng City

烃和芳香烃有较为明显的转化生成关系,有明显的二次生成特征^[14].

2.1.2 VOCs 的日变化特征

运城市夏季 $\rho(\text{NO}_2)$ 和 $\rho(\text{O}_3)$ 分别为 $15.23 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $104.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, VOCs、 O_3 和 NO_2 的日变化趋势如图 3 所示. 夏季 VOCs 浓度日变化呈双峰分布, 第一个峰值出现在 08:00, $\rho(\text{VOCs})$ 为 $44.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 同时 $\text{C}_2 \sim \text{C}_5$ 烷烃浓度达到峰值, 因此可推断 08:00 出现峰值主要和机动车尾气排放有关. 随着太阳辐射量与大气边界层的升高, 对流作用加大, 大气光化学反应增强^[12], 环境中的 VOCs 被快速消耗并在 16:00 达到最低值 ($33.64 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 从 17:00 开始, VOCs 浓度开始明显上升, 在 20:00

达到第二个峰值, $\rho(\text{VOCs})$ 为 $44.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 这可能是由于夜间温度和大气边界层较低, 环境污染物扩散条件差和光化学反应相对较弱而导致各种源排放的 VOCs 的累积.

由图 3 可知, O_3 日变化趋势呈单峰分布, 从 07:00 开始明显上升, 直到 17:00 出现最大值. 这是因为随着太阳辐射量增强与温度的增加, VOCs 与 NO_2 光化学反应增强生成大量 O_3 . 17:00 之后太阳辐射量减小, 光化学反应减弱, 同时 $\text{C}_2 \sim \text{C}_5$ 烷烃浓度开始明显上升, VOCs 与 NO_2 大量积累, O_3 浓度逐渐降低. 此外, VOCs 和 NO_2 的日变化趋势相似, 均在交通早晚高峰时段和光照条件较弱时上升.

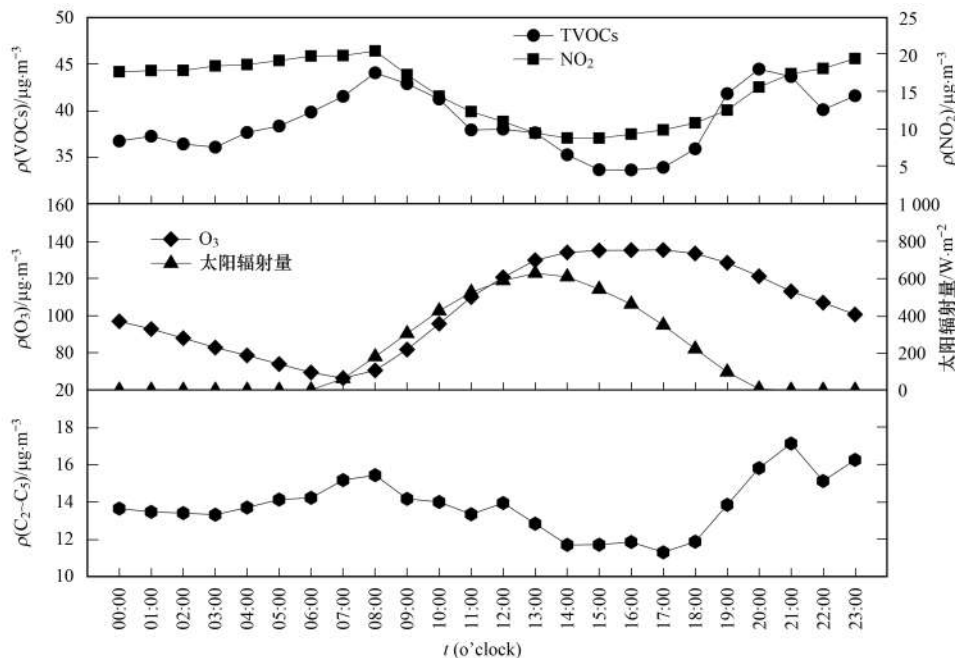


图 3 运城市区夏季 VOCs、 O_3 和 NO_2 日变化趋势

Fig. 3 Diurnal variation trend of VOCs, O_3 , and NO_2 concentrations in summer in Yuncheng City

2.2 VOCs 来源解析

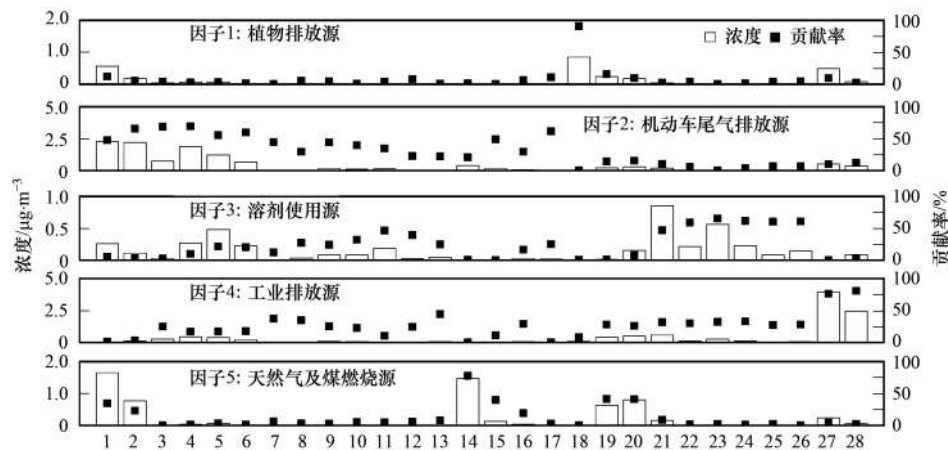
本研究通过美国国家环境保护局 (EPA) 的 PMF 5.0 模型对运城市区夏季 VOCs 进行来源解析. 选择合适的物种输入到模型对来源解析的准确性有重要的意义, 本研究剔除掉缺失值超过 20%、反应活性较高与信噪比 (S/N) 小于 0.5 的物种, 同时保留典型的排放源示踪物种 (如异戊二烯). 综合考虑, 最终筛选出 28 个物种输入到 PMF 模型中, 经过多次运行计算, 共解析出 5 个因子, 其对应的排放源分别为: 植物排放源、机动车尾气排放源、溶剂使用源、工业排放源和天然气及煤燃烧源, 每个排放源中各物种的浓度和贡献率如图 4 所示.

因子 1 中, 异戊二烯是主要的贡献物质, 主要来

自于植物排放^[32], 同时其他物种贡献较少, 因此因子 1 识别为植物排放源.

因子 2 中, 烷烃的贡献率最大, 同时苯也有一定的贡献, 其中 $\text{C}_2 \sim \text{C}_5$ 烷烃和苯是机动车尾气排放的示踪物^[33], 异戊烷和正戊烷来自汽油未完全燃烧的产物^[34]. 此外, 反式-2-戊烯、1-丁烯和丙烯的贡献率较高, 而烯烃在汽油中含量较高是我国油品的主要特点^[35]. 因此, 因子 2 识别为机动车尾气排放源.

因子 3 中, 甲苯、乙苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯、间-乙基甲苯和 1,2,4-三甲基苯是主要的贡献物种, 同时正己烷也有一定的贡献. 有研究表明甲苯、乙苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯主要来自于家居涂料、油漆、合成香料、粘合剂和清洗剂等使用^[36~39], 正己烷是溶剂使用源排放的示踪物^[40]. 因



1. 乙烷, 2. 丙烷, 3. 异丁烷, 4. 正丁烷, 5. 异戊烷, 6. 正戊烷, 7. 环戊烷, 8. 2,3-二甲基丁烷, 9. 2-甲基戊烷, 10. 3-甲基戊烷, 11. 正己烷, 12. 2,3-二甲基戊烷, 13. 正庚烷, 14. 乙烯, 15. 丙烯, 16. 1-丁烯, 17. 反式-2-戊烯, 18. 异戊二烯, 19. 乙炔, 20. 苯, 21. 甲苯, 22. 乙苯, 23. 间/对-二甲苯, 24. 邻-二甲苯, 25. 间-乙基甲苯, 26. 1,2,4-三甲苯, 27. 乙醛, 28. 丙醛

图 4 各排放源中 VOCs 组分浓度及贡献率

Fig. 4 Concentration and contribution rate of VOCs in different emission sources

此,因子 3 识别为溶剂使用源。

因子 4 中,乙醛、丙醛、 $C_6 \sim C_8$ 烷烃、苯和甲苯是主要的贡献物质,这些物质主要来自工业排放^[41],其中醛酮类主要来自石油化工^[40]. 因此,因子 4 识别为工业排放源。

因子 5 中,乙烯、乙炔、丙烯、1-丁烯、乙烷和苯是主要的贡献物质,乙烷、乙烯和 1-丁烯是天然气排放的示踪剂,乙炔是燃烧源的示踪剂^[42,43]. 此外,煤燃烧会释放乙炔、乙烯、丙烯和苯^[41],因此因子 5 识别为天然气及煤燃烧源。

综上,本研究使用 PMF 模型解析出运城市夏季大气 VOCs 共有 5 个主要排放源,分别为机动车尾气排放源(33.10%)、工业排放源(29.46%)、天然气及煤燃烧源(17.31%)、溶剂使用源(11.94%)和植物排放源(8.19%),各个排放源的贡献率如图 5 所示。

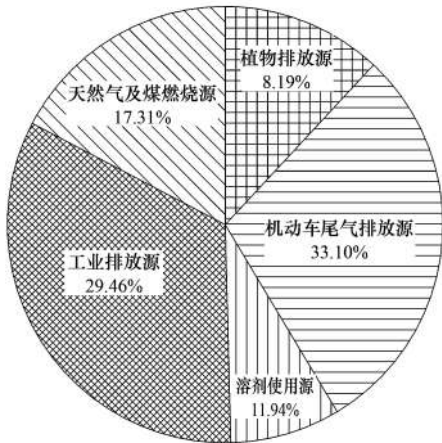


图 5 运城市区夏季大气 VOCs 主要排放源贡献率

Fig. 5 Contribution rate of main VOCs emission sources in summer in Yuncheng City

2.3 运城市区夏季 VOCs 化学反应活性

2.3.1 VOCs 对 O₃ 生成的贡献

运城市区夏季 VOCs 的总 OFP 为 162.88 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,各种组分的 OFP 大小依次为:OVOCs ($73.88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 烯烃 ($40.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 芳香烃 ($29.64 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 烷烃 ($17.63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 炔烃 ($1.55 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),分别占总 OFP 的 45.37%、24.66%、18.19%、10.83% 和 0.95%. OVOCs 的 OFP 最高,主要的 OFP 贡献物种为乙醛和丙醛,有研究表明低碳的 OVOCs 与植物排放、烹饪和有机合成等过程有一定关系^[13]; 烯烃和芳香烃的 OFP 较大,主要贡献物种为乙烯、丙烯、异戊二烯、甲苯、邻-二甲苯和间/对-二甲苯等; 烷烃和炔烃对 O₃ 的生成贡献较低,其中烷烃的浓度最高而 OFP 低于 OVOCs、烯烃和芳香烃,这是由于烷烃的光化学反应活性较低所导致的。

运城市区夏季对 OFP 贡献最高的 10 种物质为乙醛、丙醛、乙烯、异戊二烯、甲苯、间/对-二甲苯、丙烯、异戊烷、邻-二甲苯和正丁烷,其质量分数之和为 42.59%,而其 OFP 贡献率之和为 74.77%,OFP 贡献率最高的组分主要为 OVOCs 和烯烃. VOCs 主要排放源的 OFP 贡献率如图 6 所示,其中 OFP 贡献率最高的为工业排放源(43.06%),其次是机动车尾气排放源(17.43%)、天然气及煤燃烧源(16.01%)、溶剂使用源(12.18%)和植物排放源(11.32%). 因此,控制 OVOCs 和烯烃的排放对减轻运城市区夏季臭氧污染有重要意义,同时应重点关注工业排放源对运城市夏季臭氧污染的影响。

2.3.2 VOCs 对 SOA_p 生成的贡献

运城市夏季 VOCs 的总 SOA_p 为 $0.40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,

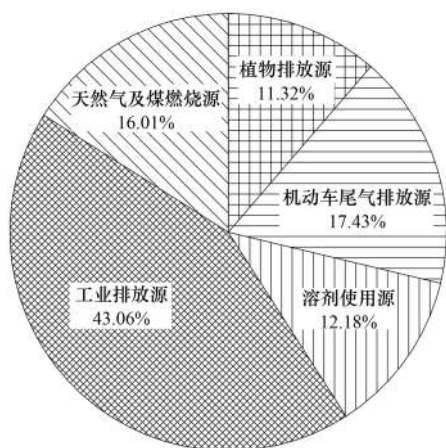


图6 运城市夏季 VOCs 主要排放源的 OFP 贡献率
Fig. 6 Contribution rate of OFP of main VOCs emission sources in summer in Yuncheng City

其中芳香烃的贡献率最高,为 88.00%,其次为烷烃(6.80%)和烯烃(5.20%)。对 SOA_p 贡献率最高的 10 种物质为:甲苯、间/对-二甲苯、苯、邻-二甲苯、乙苯、异戊二烯、间-乙基甲苯、1,2,4-三甲基苯、正十二烷和 1,3,5-三甲基苯,累计占总 SOA_p 的 90.73%,其中甲苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯和异戊二烯也是 OFP 贡献排名前 10 的物种。VOCs 主要排放源对 SOA_p 的贡献率如图 7 所示,其中对 SOA_p 贡献率最高的为溶剂使用源(45.42%),其次是工业排放源(29.27%)、天然气及煤燃烧源(9.73%)、植物排放源(8.34%)和机动车尾气排放源(7.25%)。因此,控制芳香烃的排放可以缓解运城市夏季颗粒物和臭氧污染,此外应重点关注溶剂使用源和工业排放源对运城市夏季颗粒物污染的影响。

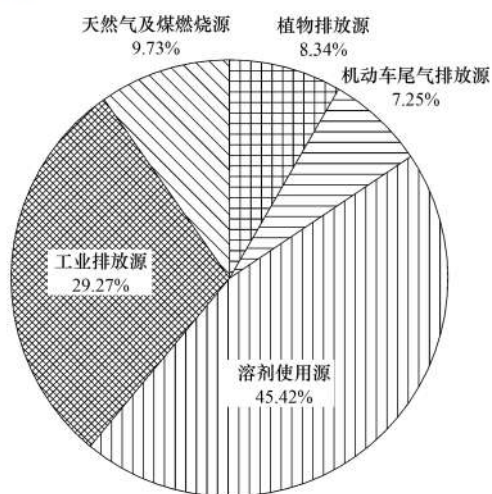


图7 运城市夏季 VOCs 主要排放源的 SOA_p 贡献率
Fig. 7 Contribution rate of SOA_p of main VOCs emission sources in summer in Yuncheng City

3 结论

(1) 运城市区夏季 $\rho(\text{VOCs})$ 为 $50.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,

烷烃和 OVOCs 是主要的组成部分,质量分数分别为 39.39% 和 34.63%。VOCs 污染关键的活性组分为丙酮、乙醛、乙烷、丙醛、丙烷、正丁烷、异戊烷、乙烯、苯和甲苯,累计占总 VOCs 的质量分数为 68.89%。

(2) 运城市区夏季凌晨和傍晚时段受 VOCs 污染较为严重,VOCs 的日变化峰值分别出现在 08:00 与 20:00, $\rho(\text{VOCs})$ 分别为 $44.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $44.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,峰值的出现受交通早晚高峰影响较大。

(3) 机动车尾气排放源是运城市区夏季大气 VOCs 的主要排放源,贡献率为 33.10%,应对其进行重点控制。其它排放源依次为工业排放源、天然气及煤燃烧源、溶剂使用源和植物排放源,贡献率分别为 29.46%、17.31%、11.94% 和 8.19%。

(4) 控制 OVOCs 和芳香烃的排放对减轻运城市区夏季臭氧与颗粒物污染有重要意义。运城市区夏季 VOCs 的总 OFP 和 SOA_p 分别为 $162.88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。其中,OVOCs 占总 OFP 的 45.37%,对 OFP 贡献率最高的排放源为工业排放源。芳香烃占总 SOA_p 的 88.00%,对 SOA_p 贡献率最高的是溶剂使用源。此外还应重点关注工业排放源和溶剂使用源对运城市夏季大气污染的影响。

参考文献:

- [1] 沈建东,叶旭红,朱英俊,等. 杭州市大气 VOCs 浓度特征及其化学活性研究[J]. 中国环境监测, 2020, 36(5): 80-87.
Shen J D, Ye X H, Zhu Y J, et al. Study on the concentration characteristics and chemical reactivity of ambient VOCs in Hangzhou[J]. Environmental Monitoring in China, 2020, 36(5): 80-87.
- [2] Liu Y F, Song M D, Liu X G, et al. Characterization and sources of volatile organic compounds (VOCs) and their related changes during ozone pollution days in 2016 in Beijing, China[J]. Environmental Pollution, 2020, 257, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113599.
- [3] Zhang C, Liu X G, Zhang Y Y, et al. Characteristics, source apportionment and chemical conversions of VOCs based on a comprehensive summer observation experiment in Beijing[J]. Atmospheric Pollution Research, 2021, 12(3): 230-241.
- [4] 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.
- [5] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, et al. VOC characteristics, chemical reactivity and sources in urban Wuhan, central China[J]. Atmospheric Environment, 2020, 224, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117340.
- [6] 罗瑞雪,刘保双,梁丹妮,等. 天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 75-87.
Luo R X, Liu B S, Liang D N, et al. Characteristics of ozone and source apportionment of the precursor VOCs in Tianjin suburbs in summer[J]. Environmental Science, 2021, 42(1):

- 75-87.
- [7] Liu Y H, Wang H L, Jing S G, *et al.* Strong regional transport of volatile organic compounds (VOCs) during wintertime in Shanghai megacity of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **244**, doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2020.117940.
- [8] 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.
- [9] 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 等. 成都市区夏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** (12): 5316-5324.
- Xu C X, Chen J H, Jiang T, *et al.* Characteristics and sources of atmospheric volatile organic compounds pollution in summer in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (12): 5316-5324.
- [10] 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.
- [11] 高亢, 章慧, 刘梦迪, 等. 芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (11): 4885-4894.
- Gao K, Zhang H, Liu M D, *et al.* Characteristics, atmospheric reactivity, and source apportionment of ambient volatile organic compounds in Wuhu [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (11): 4885-4894.
- [12] 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.
- [13] 张敬巧, 吴亚君, 李慧, 等. 廊坊开发区秋季 VOCs 污染特征及来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39** (8): 3186-3192.
- Zhang J Q, Wu Y J, Li H, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient volatile organic compounds in autumn in Langfang development zones [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39** (8): 3186-3192.
- [14] Zhang D, He B, Yuan M H, *et al.* Characteristics, sources and health risks assessment of VOCs in Zhengzhou, China during haze pollution season [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **108**: 44-57.
- [15] 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 Science*, 2021, **42** (1): 65-74.
- [16] 高素莲, 闫学军, 刘光辉, 等. 济南市夏季臭氧重污染时段 VOCs 污染特征及来源解析 [J]. *生态环境学报*, 2020, **29** (9): 1839-1846.
- Gao S L, Yan X J, Liu G H, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in serious ozone pollution period of summer in Jinan [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2020, **29** (9): 1839-1846.
- [17] Qin J J, Wang X B, Yang Y R, *et al.* Source apportionment of VOCs in a typical medium-sized city in North China Plain and implications on control policy [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **107**: 26-27.
- [18] 景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 等. 杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (12): 5306-5315.
- Jing S A, Gao Y Q, Shen J D, *et al.* Characteristics and reactivity of ambient VOCs in urban Hangzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (12): 5306-5315.
- [19] 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.
- [20] 王圣, 徐静馨, 孙雪丽, 等. 汾渭平原采暖期与非采暖期大气环境质量时空变化特征研究 [J]. *环境污染与防治*, 2019, **41** (12): 1451-1458.
- Wang S, Xu J X, Sun X L, *et al.* Spatial-temporal variation characteristics of air pollution in Fenwei Plain during heating and non-heating seasons [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2019, **41** (12): 1451-1458.
- [21] 李勇, 丛怡, 贾佳. 基于熵权法的汾渭平原城市空气质量模糊综合评价 [J]. *环境工程*, 2020, **38** (8): 236-243, 206.
- Li Y, Cong Y, Jia J. Fuzzy comprehensive evaluation of urban air quality in Fenwei Plain based on entropy weight method [J]. *Environmental Engineering*, 2020, **38** (8): 236-243, 206.
- [22] 张岳军, 朱凌云, 郭伟, 等. 汾渭平原大气 SO₂ 和 NO₂ 时空变化特征分析 [J]. *生态环境学报*, 2020, **29** (6): 1147-1156.
- Zhang Y J, Zhu L Y, Guo W, *et al.* Analysis of temporal and spatial variation characteristics of atmospheric SO₂ and NO₂ in Fenwei Plain [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2020, **29** (6): 1147-1156.
- [23] Carter W P L. Development of a condensed SAPRC-07 chemical mechanism [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44** (40): 5336-5345.
- [24] California Code of Regulations. § 94700. MIR values for compounds [EB/OL]. <https://govt.westlaw.com/calregs/Document/I9CE3964045DC11E4A10180321CCBA1E2?%20viewType%20=%20FullTextoriginati&transitionType=Default&contextData=%28sc.Default%29,2010-10-02>.
- [25] Grosjean D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. *Atmospheric Environment*, 1989, **23** (8): 1733-1747.
- [26] 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.
- [27] 王倩, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34** (2): 424-433.
- Wang Q, Chen C H, Wang H L, *et al.* Forming potential of secondary organic aerosols and sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai, China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (2): 424-433.
- [28] Brown S G, Frankel A, Hafner H R. Source apportionment of VOCs in the Los Angeles area using positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41** (2): 227-237.
- [29] Liu B S, Liang D N, Yang J M, *et al.* Characterization and source apportionment of volatile organic compounds based on 1-year of observational data in Tianjin, China [J]. *Environmental*

- Pollution, 2016, **218**: 757-769.
- [30] 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.
- [31] 王鸣, 陈文泰, 陆思华, 等. 我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4393-4399.
Wang M, Chen W T, Lu S H, *et al.* Ratios of volatile organic compounds in ambient air of various cities of China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4393-4399.
- [32] Pang X B, Mu Y J, Zhang Y J, *et al.* Contribution of isoprene to formaldehyde and ozone formation based on its oxidation products measurement in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(13): 2142-2147.
- [33] Wang M, Shao M, Lu 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 熊振华, 钱枫, 苏荣荣. 大气中 VOCs 分布特征和来源的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(S2): 222-228.
Xiong Z H, Qian F, Su R R. Progress on distribution characteristics and sources of volatile organic compounds in atmosphere[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **36**(S2): 222-228.
- [38] Dumanoglu Y, Kara M, Altioik H, *et al.* Spatial and seasonal variation and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in a heavily industrialized region [J]. Atmospheric Environment, 2014, **98**: 168-178.
- [39] 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.
- [40] 崔金梦, 王体健, 李秋潼, 等. 连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 3941-3950.
Cui J M, Wang T J, Li Q T, *et al.* Component characteristics and source appointment of volatile organic compounds in Lianyungang City [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 3941-3950.
- [41] 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.
- [42] 温彦平, 闫雨龙, 李丽娟, 等. 太原市夏季挥发性有机物污染特征及来源分析[J]. 太原理工大学学报, 2016, **47**(3): 331-336.
Wen Y P, Yan Y L, Li L J, *et al.* Pollution characteristic and source analysis of volatile organic compounds in summer in Taiyuan [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2016, **47**(3): 331-336.
- [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.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors; Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, GONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)