

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 邓露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜力的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析

余家燕^{1,2,3}, 韩燕⁴, 陈木兰⁴, 张惠芳⁵, 陈阳⁴, 刘建国^{1*}

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230026; 3. 重庆市生态环境监测中心, 重庆 401147; 4. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 5. 西藏自治区生态环境监测中心, 拉萨 850031)

摘要: 目前在世界范围内, 由于高原城市海拔高、紫外线照射强烈, 造成大气中挥发性有机物的源汇归趋呈现较独特的特点。本研究对2019年拉萨市2个城市站点和1个背景站进行大气挥发性有机物(VOCs)的离线罐采样及实验室组分分析, 探究了拉萨地区VOCs体积分数水平、组成特征和来源贡献。拉萨市平均 φ (VOCs)为 49.83×10^{-9} , 其中烷烃类最高, 占比为61%, 其次为含氧VOCs(OVOCs, 12%)、卤代烃(9%)、烯烃(9%)、芳香烃(5%)和炔烃(4%)。拉萨市市区站点中, 八廓街站和区辐射站的VOCs源贡献顺序为: 燃烧源(分别为64%和48%, 下同) > 交通排放(17%和31%) > 工业排放(14%和14%) > 溶剂涂料(3%和3%) $\approx$ 植物+背景(2%和4%)。八廓街站燃烧源贡献大, 与当地贡香焚烧和供暖排放有关; 区辐射站的交通排放贡献较高, 与距离交通枢纽近且上风向物流中心有关; 工业排放对VOCs具有区域性影响。拉萨地区的VOCs体积分数、组分特征、源类贡献受气象和排放协同影响, 呈现明显季节变化和地区差异。本研究可以提供我国典型高原城市的VOCs组成特征, 可为高原城市臭氧形成和驱动因素的研究积累基础数据。

关键词: 挥发性有机污染物(VOCs); 正定矩阵因子分解法(PMF); 拉萨; 组成特征; 来源解析

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0113-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104038

Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa

YU Jia-yan^{1,2,3}, HAN Yan⁴, CHEN Mu-lan⁴, ZHANG Hui-fang⁵, CHEN Yang⁴, LIU Jian-guo^{1*}

(1. Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Chongqing Eco-Environmental Monitoring Center, Chongqing 401147, China; 4. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 5. Tibet Eco-Environmental Monitoring Center, Lhasa 850031, China)

Abstract: Due to the high altitude of plateau cities and strong ultraviolet radiation, the sources and fates of volatile organic compounds show unique characteristics. In this study, the atmospheric volatile organic compound (VOCs) samples were collected at two urban sites and one background site using tank sampling in Lhasa in 2019, and then the composition, concentration, and sources were characterized. The results showed that the average φ (VOCs) in Lhasa was 49.83×10^{-9} , of which the proportion of alkanes was the highest (61%), followed by OVOCs (12%), halogenated hydrocarbons (9%), olefin (9%), aromatic hydrocarbons (5%), and alkynes (4%). The respective contributions of VOCs sources at urban sites, such as Barkhor Street and Radiation Station in Lhasa, were as follows: combustion (64% and 48%) > traffic emission (17% and 31%) > industrial emission (14% and 14%) > solvents and coatings (3% and 3%) $\approx$ plant + background (2% and 4%). The contribution of combustion was large mostly due to local incense burning (especially at Barkhor Street) and heating emissions. Traffic emissions contributed about one third to the VOCs at Radiation Station, which is related to its proximity to the transportation hub and the storage and logistics center upwind. Industrial emissions have a regional impact on ambient VOCs. Under the synergistic influence of meteorology and emissions, VOCs concentration, composition characteristics, and source contribution showed obvious seasonal variations and site differences in the Lhasa area.

Key words: volatile organic compounds(VOCs); positive matrix factorization(PMF); Lhasa; component and characteristics; source apportionment

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是大气中普遍存在的痕量活性物质, 是生成近地面臭氧和二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)的重要前体物^[1,2]。VOCs的来源有天然源和人为源, 天然源主要来自植被排放和林草火灾等的排放^[3,4]; 人为源主要包括化石燃料燃烧、生物质燃烧、油料储存运输、溶剂与涂料的使用、石油精炼、化工生产和餐饮油烟等生产生活活动^[5]。研究VOCs的组成特征、时空变化和来源是探究臭氧形成机制的重要依据^[6]。

VOCs的化学组成十分复杂, 其组成受源排放、气象和光化学过程的共同影响。VOCs源排放具有

显著的地域差异, 受人为活动和自然排放的共同影响, 且人为排放随着法规政策和控制措施的改变而呈动态变化^[7~13]。不同VOCs物种在大气中生成O₃和SOA的能力存在显著差异^[14,15]。因此, 准确理解一个地区VOCs的化学组成特征, 是评估其大气污染形成的潜力和健康效应的基础。这些特点都给VOCs的来源解析工作带来挑战^[16]。

城市是人类活动的密集区域, 其VOCs体积分

收稿日期: 2021-04-05; 修订日期: 2021-06-24

基金项目: 西藏自治区科技计划项目(XZ201801-GA-09)

作者简介: 余家燕(1981~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境光学监测和大气环境化学, E-mail: yujiayankk@163.com

* 通信作者, E-mail: jgliu@aofm.ac.cn

数一般高于农村和背景点. 整体来看, 城市环境下含氧 VOCs (OVOCs) 物种的体积分数水平远高于 BVOCs 和芳香烃, 含量最丰富的 OVOCs 物种为甲醛、乙醛和丙酮, 可占到美国城市总醛酮类化合物的 48%~64%^[17]. 一般而言, 由于农村、背景点和高山等区域受天然源影响大. 城市环境中, 我国北京、广州、成都、重庆和深圳等城市均呈现 VOCs 体积分数较高的特征, 主要优势种为 OVOCs 中的甲醛、乙醛和丙酮等物种^[18~21]. 世界范围内, 高原城市地区的 VOCs 组成和演化特征目前所知尚有限. 新西兰有研究指出, 其中央高原的 VOCs 以癸醛、苯甲醛和苯乙醛为主^[22].

拉萨市位于青藏高原中部, 是典型的内陆高原城市, 其海拔 3 650 m, 城区为谷地, 群山环绕, 气团流动易受山脉阻隔影响. 拉萨全年日照时间在 2 400~3 150 h, 年总辐射 7 624 MJ·m⁻²^[23]. 产业结构上, 拉萨地区主要以第三产业为主, 工业产品主要以水泥、藏药等中成药、电、酒和自来水瓶装饮用水为主; 生活源排放方面, 存在秋冬季节取暖和宗教焚烧等习惯, 使得其 VOCs 排放来源与内陆城市有较大差异.

本研究的目的是为探究典型高原城市拉萨地区的 VOCs 的全年组成特征, 分析当地自然排放、产业结构和宗教活动对排放的影响并识别其关键来源. 本研究对 VOCs 进行全年观测和典型季节加密观测相结合, 结合正定矩阵因子分解法 (positive matrix factorization, PMF) 分析拉萨市 VOCs 的污染特征、识别其主要来源和对臭氧生成的影响. 本研究可以增进对高原城市 VOCs 排放特征的认识, 探索高海拔和强太阳辐射对高原臭氧形成规律的认识.

1 材料与方法

1.1 观测概况

拉萨市位于中国西藏自治区东南部, 主导风向为偏西风. 拉萨城区平原地带与周围山脉高差较大 (最大可相差 3 500 m), 不利于污染物扩散. 根据拉萨市主导风向及城区各监测点位分布情况 (图 1), 选择城市上风向点 1 个和城市混合区点 1 个, 分别是区辐射站和八廓街. 区辐射站 (E 90.981°, N 29.656°) 位于拉萨城区西部, 位于城市上风向和谷地边缘, 周围以山地和植被为主, 可代表城市周边的环境, 在一定程度上反映了城市生产生活排放 VOCs 的总体情况; 八廓街站 (E 91.138°, N 29.651°) 是城市 O₃ 高体积分数点, 邻近大昭寺等藏式建筑, 人口密集, 可综合反映城市交通、宗教文化和生产生活的排放 VOCs 污染水平, 以上两个点

位于 2019 年进行逐月观测. 同时, 为获取青藏高原背景 VOCs 组成信息, 在藏北高原的纳木错湖旁点位 (E 90.961°, N 30.772°) 进行两次 VOCs 采样 (2019 年 6 月 19 日的 12:00 和 16:00), 作为背景点数据.

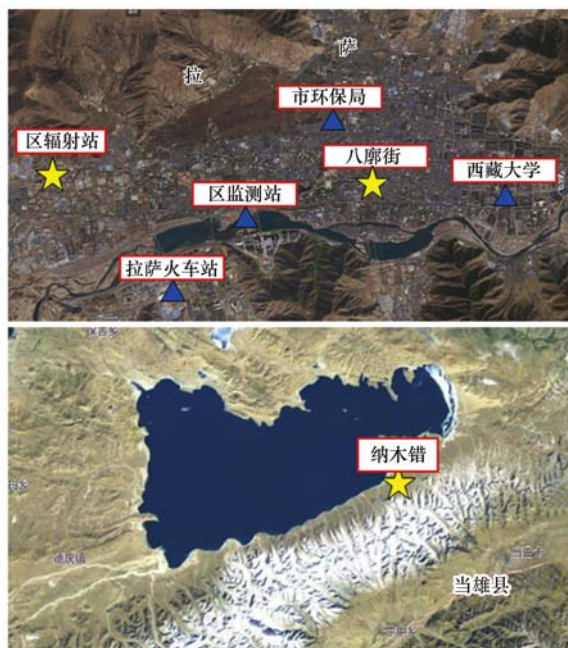


图 1 拉萨市环境空气质量监测站点分布示意

Fig. 1 Distribution of national air quality monitoring stations in Lhasa

1.2 采样方法和频次

为掌握拉萨市区 VOCs 在全年的组成特点, 在区辐射站和八廓街点位, 于 2019 年的 1 月至 12 月, 每月采集 VOCs 样品 2 个, 采样时间为 09:00~10:00 和 15:00~16:00 时, 采样方式为 1 h 累计采样. 为了掌握臭氧体积分数水平较高时期的 VOCs 组成, 2019 年 5 月 25 日至 6 月 1 日在八廓街站点开展了为期 8 d 的加密离线监测, 采样时间为 09:00~19:00, 每隔 2 h 采 1 次样, 每次为 1 h 累积采样. 在纳木错站点进行两次 VOCs 监测 (2019 年 6 月 19 日的 12:00 和 16:00), 作为背景点数据.

采样方法按照文献 [24] 中规定的方法进行 VOCs 离线样品采集, 所用采样罐由美国 Entech 公司生产, 体积为 3.2 L, 最大承受压力 344 737 Pa, 采样流量设置为 26.22 mL·min⁻¹.

使用前对采样罐反复清洗并抽真空, 降低其内表面的活性, 采样前开展真空度检验, 防止真空度泄漏导致采样过程样品受到污染, 每批清洗过的采样罐随机选择 1~2 个进行清洗空白检验. 采样期间要求采样人员禁止使用香水、护手霜等护肤品/化妆品, 避开局地污染源, 采样完成后应按照采样记录表进行样品信息的标识和记录; 采样罐存储和运输均

置于实验室定制的高密度海绵运输包,空运回实验室进行分析.

1.3 VOCs 测定方法

VOCs 组分分析采用气相色谱质谱法,参考文献[24,25]的方法,利用低温预浓缩技术对大气中的 VOCs 进行富集,加热解析后通过 GC-FID/MS 进行分析测量^[26]. 分析设备 GC-MS/FID 型号为安捷伦 GC(7820)和 MS(5977),由气路系统、样品采集系统、冷冻捕集与热解析系统、GC-MS-FID 分析系统和数据处理系统构成. 环境样品在采样泵的动力下被抽入超低温预浓缩系统,在低温下被冷冻富

集(−160℃)在捕集柱上;两个通道的捕集柱分别被加热至 120℃,热解析后目标化合物在载气的吹扫下分别进入两路的分析柱和检测器,气路 I 通过 PLOT(Al₂O₃/KCl)柱进行分离,利用 FID 进行检测,其检测的组分主要是 C₂~C₅ 的碳氢化合物;气路 II 通过 DB-624 柱进行分离,利用 MS 进行检测,其检测组分主要是 C₅~C₁₀ 的碳氢化合物、卤代烃、含氧有机物等. 采样流量 60 mL·min^{−1},色谱柱流速 MS: 1.3 mL·min^{−1}; FID: 1.5 mL·min^{−1},共分析 107 种 VOC 化合物,具体组分名称如表 1 所示.

表 1 本研究的目标 VOCs 化合物¹⁾

Table 1 Target VOCs compounds for this study

编号	名称	编号	名称	编号	名称
1	乙烷*	37	甲基叔丁基醚*	73	顺-1,3-二氯丙烯
2	乙烯*	38	1-己烯	74	1,1,2-三氯乙烷
3	丙烷*	39	正己烷*	75	四氯乙烯
4	丙烯*	40	1,1-二氯乙烷	76	2-己酮
5	异丁烷*	41	乙酸乙烯酯	77	二溴一氯甲烷
6	乙炔*	42	2,4-二甲基戊烷	78	1,2-二溴乙烷
7	正丁烷*	43	甲基环戊烷	79	氯苯
8	反-2-丁烯	44	反-1,2-二氯乙烷	80	乙基苯
9	1-丁烯*	45	顺-1,2-二氯乙烷	81	间-二甲苯*
10	顺-2-丁烯	46	2-丁酮*	82	对-二甲苯*
11	环戊烷	47	乙酸乙酯*	83	正壬烷
12	异戊烷*	48	四氢呋喃	84	邻-二甲苯*
13	正戊烷	49	三氯甲烷	85	苯乙烯*
14	氟利昂 12	50	1,1,1-三氯乙烷	86	溴仿
15	氟利昂 114	51	2-甲基己烷	87	异丙基苯
16	氯甲烷*	52	环己烷	88	1,1,2,2-四氯乙烷
17	氯乙烯	53	2,3-二甲基戊烷	89	正丙苯
18	1,3-丁二烯*	54	四氯化碳	90	间-乙基甲苯
19	溴甲烷	55	3-甲基己烷	91	对-乙基甲苯
20	氯乙烷	56	苯*	92	1,3,5-三甲基苯*
21	氟利昂 11	57	1,2-二氯乙烷*	93	癸烷
22	1-戊烯	58	2,2,4-三甲基戊烷	94	邻-乙基甲苯
23	反-2-戊烯	59	庚烷	95	1,2,4-三甲基苯*
24	异戊二烯*	60	三氯乙烯	96	1,3-二氯苯
25	顺-2-戊烯	61	甲基环己烷	97	1,4-二氯苯
26	丙烯醛	62	1,2-二氯丙烷*	98	1,2,3-三甲基苯
27	1,1-二氯乙烷	63	甲基丙烯酸甲酯	99	苄基氯
28	氟利昂 113	64	1,4-二氧己环	100	间-二乙基苯
29	2,2-二甲基丁烷*	65	二氯溴甲烷	101	对-二乙基苯
30	丙酮*	66	2,3,4-三甲基戊烷	102	1,2-二氯苯
31	异丙醇	67	2-甲基庚烷	103	十一烷
32	二硫化碳	68	反-1,3-二氯丙烯	104	十二烷
33	2,3-二甲基丁烷*	69	3-甲基庚烷	105	1,2,4-三氯苯
34	二氯甲烷*	70	甲基异丁基酮	106	六氯-1,3-丁二烯
35	2-甲基戊烷*	71	甲苯*	107	萘
36	3-甲基戊烷*	72	正辛烷		

1) * 为 PMF 模型筛选出的拟合物

1.4 质量保证/质量控制(QA/QC)

本研究中的 QA/QC 主要包括两部分:VOCs 采样和组分分析. 采样期间的 QA/QC 主要有:采样罐

清洁度检验、采样罐真空度检验、采样过程避免突发局地源;采样后样品保存等方面. 组分分析的 QA/QC 包括分析前、分析中和分析后三大环节,分

析前对检测系统进行 MS 调谐、系统验漏、流量校正、压力校正和标气测试等,利用配气仪配制不同体积分数梯度(0.5×10^{-9} 、 1×10^{-9} 、 2×10^{-9} 、 4×10^{-9} 和 8×10^{-9})的标准使用气体和 4×10^{-9} 的内标使用气,标准气体(PAMS、TO15 和 ISTD)为德国 Linde 公司,可溯源至 NIST;测量前对同一体积分数标气开展重复测定,计算其相对标准偏差获得精密度,本研究各组分精密度在 0.36%~4.92% 之间。

1.5 PMF 模型

PMF 是一种识别和解析受体点大气污染物不同来源及其贡献的数学模型.本研究基于 2019 年 VOCs 监测数据,采用 PMF 模型对拉萨市两个城市站点开展来源解析^[27].根据观测物种信噪比(S/N)、物种体积分数、示踪意义和活性大小筛选了 33 个拟合物种用于 PMF 分析,包括 11 种烷烃(乙烷、丙烷)、5 种烯烃、乙炔、8 种芳香烃、4 种卤代烃和 4 种 OVOCs(表 1)。

2 结果与讨论

2.1 拉萨市 VOCs 污染特征分析

2.1.1 常规监测期间 VOCs 体积分数及化学组成

表 2 统计了观测期间(2019 年全年)拉萨市 VOCs 总体积分数及各类组分平均体积分数,与国

内其他典型地区 VOCs 体积分数水平比较.拉萨市 $\varphi(\text{VOCs})$ (49.83×10^{-9}) 高于北方城市郑州(30.66×10^{-9})和西南的成都(53.39×10^{-9}),与东南的杭州(56.72×10^{-9})相差不大,但 $\varphi(\text{烷烃})$ (30.46×10^{-9}) 高于这 3 个城市, $\varphi(\text{烯烃})$ (4.45×10^{-9}) 与杭州(4.45×10^{-9})接近,低于成都(7.15×10^{-9})和南京(7.46×10^{-9}), $\varphi(\text{芳香烃})$ (2.47×10^{-9}) 低于列出的 5 个城市,卤代烃和 OVOCs 低于杭州.与同为高原站点的青海门源站相比,拉萨市的 $\varphi(\text{VOCs})$ 是高原背景站 (11.03×10^{-9}) 的 4.5 倍,尤其是烷烃和卤代烃,明显高于门源站(分别为 6.46×10^{-9} 和 0.19×10^{-9})。

拉萨市 2019 年 3 个站点的 VOCs 体积分数水平及化学组成见图 2,八廓街 $\varphi(\text{VOCs})$ (58.90×10^{-9}) 最高,其次为区辐射站(40.80×10^{-9}),最后为纳木错背景点(10.10×10^{-9}),体积分数最低.总体上,两个城市站点的化学组成相似度较高,说明受到相似的 VOCs 排放源的影响.八廓街和区辐射站 $\omega(\text{烷烃})$ 均最高,分别为 63.5% 和 57.8%,其次为 OVOCs,质量分数相差不大,在 11%~12% 范围.两个城市站点烯烃和芳香烃体积分数相差不大,区辐射站的卤代烃和炔烃较八廓街稍低.纳木错的 $\omega(\text{OVOCs})$ 最高,其次 $\omega(\text{卤代烃})$ 较高,分别为

表 2 拉萨市与国内其他典型地区 VOCs 体积分数水平比较¹⁾ $\times 10^{-9}$

Table 2 Comparison of VOCs concentration levels between Lhasa and other typical areas in China $\times 10^{-9}$

项目	拉萨 (本研究)	成都城区 ^[28] (2016-03~2017-02)	重庆 ^[29] (2017 年)	南京 ^[30] (2013-08)	杭州 ^[13] (2018-04~2019-03)	郑州 ^[31] (2018-04)	青海门源站 ^[32] (2013 年 9~10 月, 2014 年 6~7 月)
烷烃	30.46	24.48	6.65	43.90	17.41	10.82	6.46
烯烃	4.45	7.15	2.55	7.46	4.45	1.62	3.20
炔烃	1.99	8.55	—	4.73	—	—	—
芳香烃	2.47	8.62	7.27	38.57	6.73	3.07	1.16
卤代烃	4.49	4.6	2.76	—	8.92	7.39	0.19
OVOCs	5.84	—	—	—	19.21	7.76	—
TVOCs	49.83	53.39	19.23	94.66	56.72	30.66	11.03

1) “—”表示文献未提及

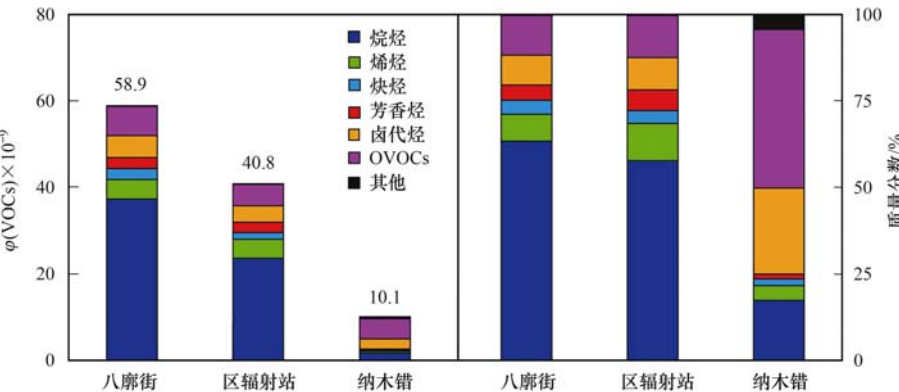


图 2 2019 年拉萨市 3 个站点 VOCs 体积分数水平及化学组成

Fig. 2 VOCs concentration and chemical composition at three sites in Lhasa during 2019

45.9%和24.9%,由于部分卤代烃在环境空气中比较稳定,所以纳木错站的OVOCs和卤代烃体积分数更接近城市站点.八廓街站体积分数排名前5的组分依次是丙烷、正丁烷、丙酮、异丁烷和乙烯,其中丙烷体积分数远高于其他组分;而区辐射站VOCs排名前5的组分与八廓街稍有不同,虽然也是丙烷体积分数最高,但高值并不突出,其次是异丁烷、异戊烷、丙酮和正丁烷.鉴于以上组分通常来自机动车尾气和燃料过程的排放,表明拉萨市典型区域的VOCs组成特征受人为排放源影响较大^[33].具体来源可参见2.2节的来源解析.

拉萨市VOCs体积分数及组成的日变化如图3

所示,八廓街下午的VOCs体积分数较上午略有上升,区辐射站则下降了23%,从化学组成看,八廓街的烷烃占比始终高于区辐射站,烯烃质量分数始终低于区辐射站;八廓街站点下午的烷烃较上午有上升,主要升高物种为异丁烷、环戊烷、3-甲基己烷、甲苯和苯乙烯,初步表明来自燃烧和溶剂等一次排放源在下午有增加,烯烃则均有下降,原因是烯烃光化学活性更高,白天易被消耗所导致^[12],芳香烃和OVOCs质量分数均是下午高于上午.区辐射站趋势与八廓街正好相反,说明同为城市点的两站点排放、扩散和光化学反应模式上都存在差异.

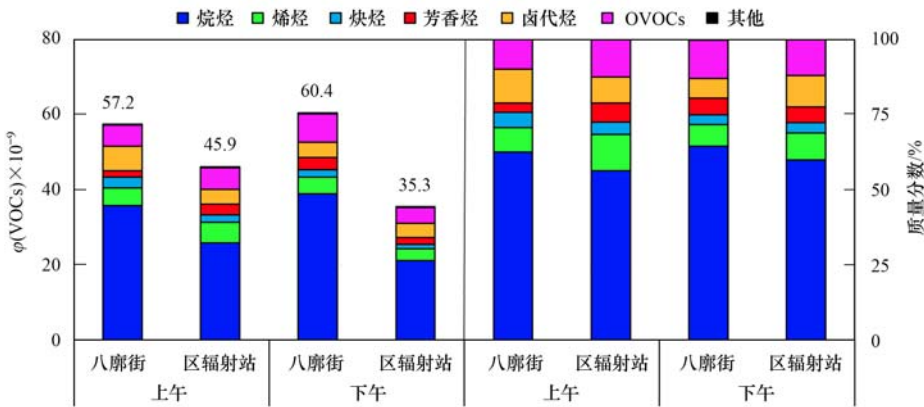
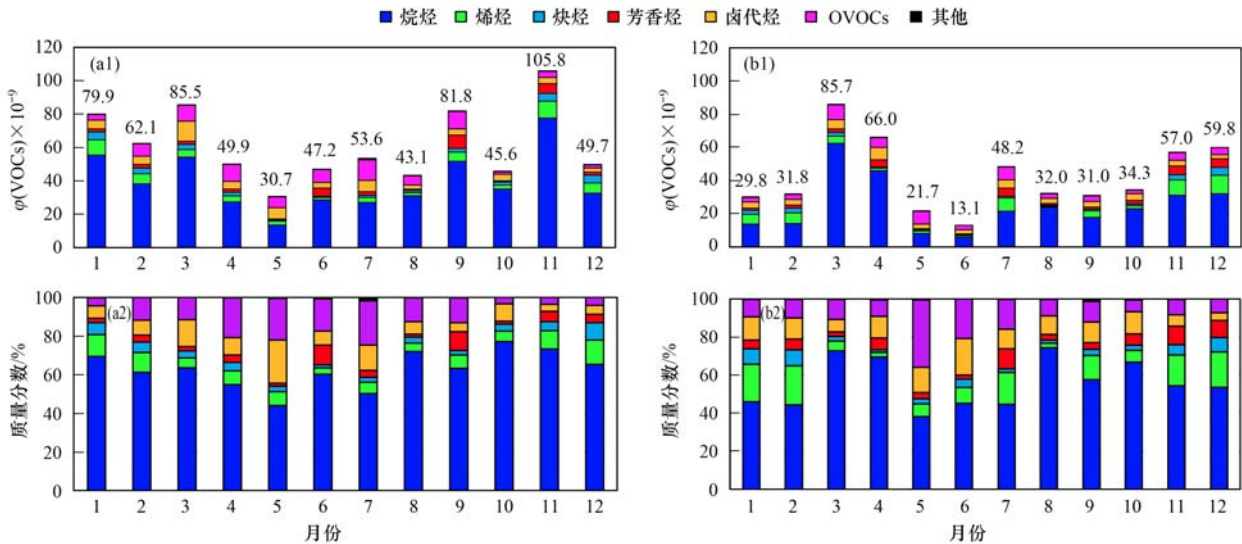


图3 2019年拉萨市城市站点上午、下午VOCs体积分数水平及化学组成

Fig. 3 Concentration and chemical composition of VOCs in the morning and afternoon at urban sites in Lhasa during 2019

拉萨市两个站点VOCs逐月体积分数水平和化学组成存在明显的变化(图4).八廓街 $\phi(\text{VOCs})$ 曲线呈波动性变化,介于 $(30.7 \sim 105.8) \times 10^{-9}$.11月VOCs体积分数最高,夏季5、6和7月体积分数较低,这是因为夏季扩散条件好于冬季,且无采暖

排放影响.烷烃是最主要组分,质量分数介于44.1%~77.2%;烯烃在6月质量分数最低(3.3%),12月最高(12.4%);芳香烃、卤代烃和OVOCs对体积分数的贡献分别介于1.5%~10.2%、3.7%~22.3%和3.2%~22.9%.区辐射



(a)八廓街站,(b)区辐射站

图4 八廓街站和区辐射站VOCs逐月体积分数水平及化学组成

Fig. 4 Monthly VOCs concentration and chemical composition at Barkhor Street Station and Radiation Station

站 VOCs 体积分数在 3 月最高,次高为 4 月,6 月最低.从化学组成来看, ω (烷烃)介于 38.1%~74.4%,同样是各月质量分数最高的组分; ω (烯烃)最低为 2.5%,最高达到 20.4%;OVOCs 在 5 月质量分数最大(35.3%),最低是在 10 月(6.3%); ω (芳香烃)和 ω (卤代烃)分别介于 2.2%~10.6% 和 3.9%~19.0%.除个别月份外,偏冷季节(如 1、2、11 和 12 月)的 VOCs 中烯烃和炔烃的体积分数和质量分数要高于温暖季节(5~8 月),卤代烃和 OVOCs 的整体趋势则相反.

2.1.2 加密监测期间 VOCs 体积分数及化学组成

5 月 25 日至 6 月 1 日加密监测期间,小时 φ (VOCs) 范围在 $(12.90 \sim 237.90) \times 10^{-9}$ 之间,波动较大,平均值为 53.2×10^{-9} (如图 5). VOCs 体积分数高值(> 平均值)主要集中在 09:00、11:00、

17:00 和 19:00 (各覆盖 5 个时次),而 13:00 和 15:00 体积分数相对较低. VOCs 呈现“早晚高,白天低”的日变化规律.由于本研究缺乏探空资料,故用已有报道的拉萨边界层高度进行替代分析^[34],夏季 07:00 边界层高度约为 1.2~1.6 km,10:00 为 1.2~1.6 km,19:00 为 1.4~1.8 km.由此可知,高原城市夏季(09:00~19:00)边界层高度变化不显著,近地面 VOCs 体积分数主要受排放情况影响.由于前 1d 夜间排放的污染物得以积累,而早晨因为上班出行高峰交通排放量大,使得 VOCs 体积分数迅速增加.白天随着紫外辐射和湍流加强,大气光化学反应程度加剧,混合层高度也小幅攀升,污染物水平和垂直扩散加强,VOCs 体积分数逐渐下降;傍晚光照减弱温度降低,光化学反应逐步减弱,并伴随交通晚高峰的影响,VOCs 体积分数开始回升.

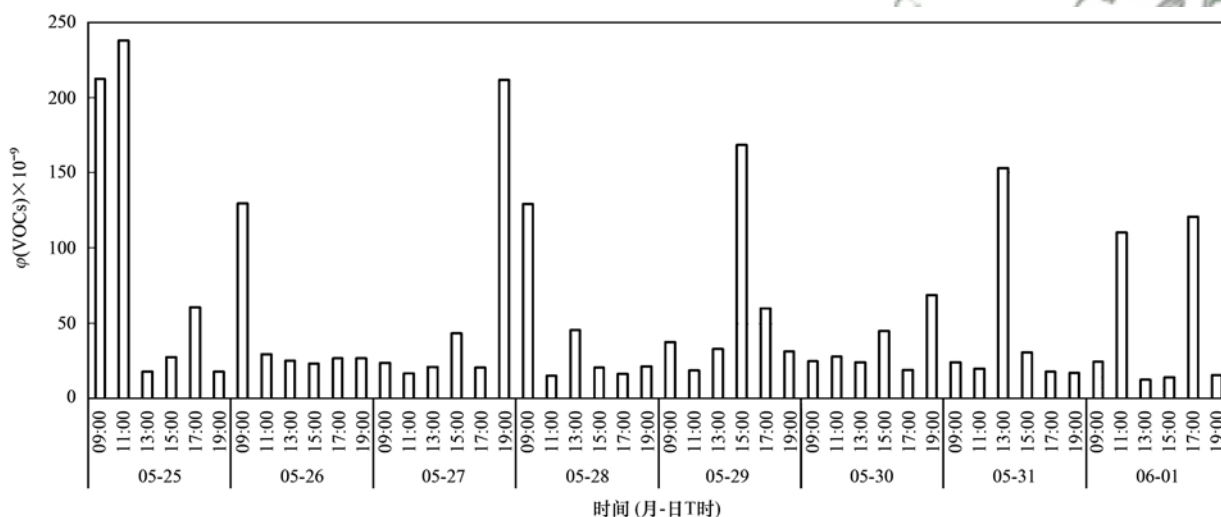
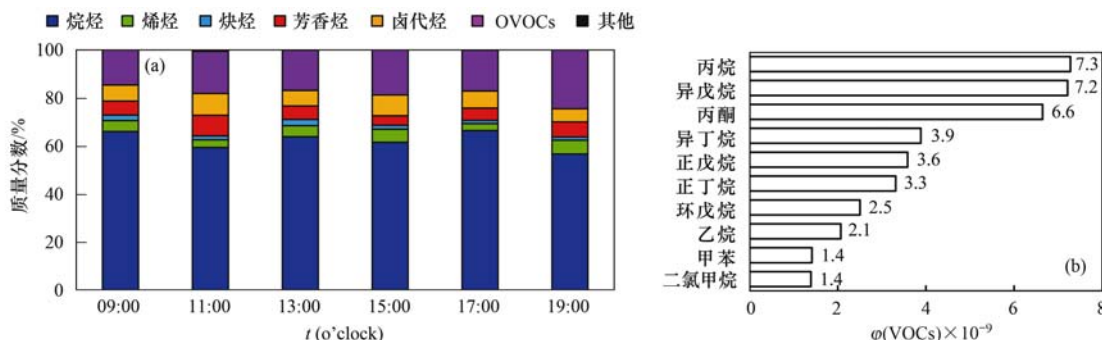


图 5 八廓街站 2019 年 5 月 25 日至 6 月 1 日的 VOCs 体积分数变化

Fig. 5 Variation of VOCs concentration at Barkhor Street Station from May 25 to June 1, 2019

加密观测期间各时次的 VOCs 化学组分占比如图 6(a) 所示,与每月常规监测比例相近,烷烃是最主要的物种,其质量分数介于 56.9%~66.7% 之间,平均质量分数为 62.6%;其次是 OVOCs,平均质量

分数为 17.4%,09:00 质量分数最低(14.2%),19:00 最高(24.0%),最主要的 OVOCs 是丙酮; ω (卤代烃)、 ω (芳香烃)、 ω (烯烃)和 ω (炔烃)的平均值分别为 7.3%、6.0%、4.4% 和 1.9%,其他组



(a) 化学组分占比, (b) 排名前物种

图 6 八廓街站 2019 年 5 月 25 日至 6 月 1 日的 VOCs 化学组成占比和主要组分

Fig. 6 VOCs chemical composition ratio and main components in Barkhor Street Station from May 25 to June 1, 2019

分比如二硫化碳仅占 0.4%。排名前 10 的 VOCs 物种有 7 种都是烷烃[图 6(b)],丙烷、异戊烷、异丁烷、正戊烷和正丁烷是重点关注组分,其次丙酮体积分数也较高。具体来源分析详见 2.2 节。

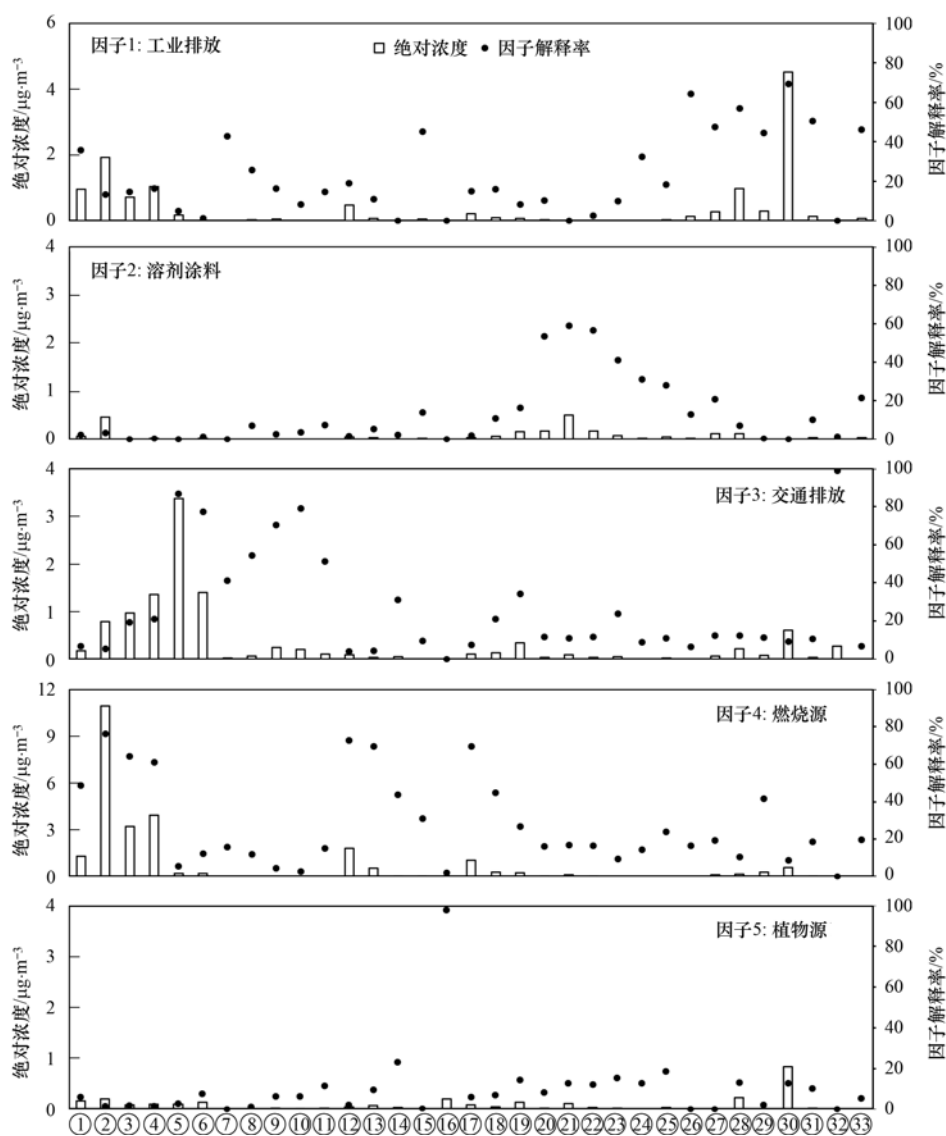
2.2 拉萨市 2019 年 VOCs 来源解析

2.2.1 PMF 因子识别

本研究使用 PMF 模型对输入物种反复调试,使解析得到 Q_{robust} 收敛,且 $Q_{\text{true}}/Q_{\text{robust}}$ 小于 1.5,物种残差介于 $-3.0 \sim 3.0$ 之间,最终确定 5 个因子为解析结果,分别为工业排放、溶剂涂料、交通排放、燃烧源和植物源(图 7)。

因子 1 主要组分包含 $C_2 \sim C_4$ 烷烃、1-3 丁二烯和二氯甲烷等卤代烃和丙酮,其中与卤代烃相关的

工业包含农药、医药、化学纤维、塑料、橡胶和日用化学品等^[35,36],丙酮也是重要的有机合成原料,广泛应用于塑料、橡胶、纤维和喷漆等行业^[37],因此将因子 1 识别为工业排放源。因子 2 主要包含乙苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯等芳香烃和乙酸乙酯,涂料和溶剂使用过程中会排放大量的芳香烃,而乙酸乙酯是许多类树脂的高效溶剂^[38,39],广泛应用于油墨、人造革生产中,将因子 2 识别为溶剂涂料相关的排放源。因子 3 主要是 $C_4 \sim C_5$ 烷烃,这些组分多来自于机动车尾气,比如异戊烷是机动车尾气和汽油挥发的主要成分之一^[40,41],且因子 3 对甲基叔丁基醚(MTBE)的解释率很高,MTBE 是一种汽油添加剂,很多研究中都把 MTBE 作为汽油挥发源的



①乙烷, ②丙烷, ③异丁烷, ④正丁烷, ⑤异戊烷, ⑥正戊烷, ⑦2,2-二甲基丁烷, ⑧2,3-二甲基丁烷, ⑨2-甲基戊烷, ⑩3-甲基戊烷, ⑪正己烷, ⑫乙烯, ⑬丙烯, ⑭1-丁烯, ⑮1,3-丁二烯, ⑯异戊二烯, ⑰乙炔, ⑱苯, ⑲甲苯, ⑳乙苯, ㉑间/对-二甲苯, ㉒邻-二甲苯, ㉓苯乙烯, ㉔1,3,5-三甲基苯, ㉕1,2,4-三甲基苯, ㉖1,2-二氯丙烷, ㉗1,2-二氯乙烷, ㉘二氯甲烷, ㉙氯甲烷, ㉚丙酮, ㉛2-丁酮, ㉜甲基叔丁基醚, ㉝乙酸乙酯

图 7 各因子中 VOCs 物种浓度及对各因子的贡献

Fig. 7 Concentrations and contributions of VOCs species for each other

示踪物^[42,43],因子3可识别为交通排放源.因子4中低碳烷烃、氯甲烷、乙烯、丙烯、乙炔和苯等组分解释率较高,具有燃烧源特征,由于拉萨地区贡香焚烧现象较为突出,本研究测定了当地寺庙中使用较多的4类贡香燃烧产生的主要VOCs组分的质量分数,其主要成分分别为乙烷、丙烷、乙烯、丙烯、甲苯、丙酮、1-丁烯和丙烯醛等物种,与因子4中物质有较好吻合,因此因子4识别为燃烧源.因子5中主要物种为异戊二烯,其主要来自植被排放^[44],识别为植物源.

2.2.2 八廓街 VOCs 来源及反应活性

拉萨市八廓街站2019年VOCs的PMF解析结果如图8(a)所示,燃烧源是八廓街站最主要的排放源(64%),八廓街站方圆500 m内有近10家寺庙,且距离拉萨著名景点大昭寺不到300 m,受到贡香焚烧影响比较突出;其次为交通排放和工业排放,其贡献比例分别为17%和14%,该点位地处繁华商业街,交通排放量比较大,且周边有多家制药厂,北边有多家家俱制造企业、印刷厂等,因此这两类污染源的贡献也比较显著;溶剂涂料和植物+背景的贡献较低,仅占3%和2%.由于各排放源排放的VOCs物种不同,其对臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)的贡献也不一样.

基于最大增量反应活性方法(maximum incremental reactivity)^[45,46]分析了拉萨市八廓街站2019年各种来源的VOCs对OFP的贡献,如图8(b)所示.燃烧源对OFP的贡献依旧最大,其次是交通排放,工业排放对OFP贡献低于其对VOCs体积分数的贡献,这与工业排放的VOCs组分多为低活性的卤代烃有关^[47];溶剂涂料和植物+背景则相反,这是由于溶剂涂料排放的VOCs多为芳香烃,植物源主要排放异戊二烯,均为高活性组分.

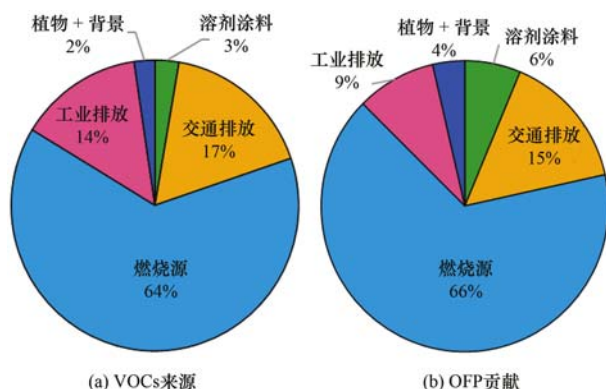


图8 八廓街站2019年VOCs来源及其对OFP的贡献

Fig. 8 VOCs sources at Barkhor Street Station and their contribution to OFP in 2019

2.2.3 区辐射站 VOCs 来源及反应活性

区辐射站2019年VOCs的PMF解析结果如图

9(a)所示,在该点位燃烧源仍然是VOCs的最大贡献源,但明显低于在八廓街的贡献;其次为交通排放(31%),明显高于在八廓街的贡献,区辐射站距离青藏公路和拉萨西站较近,且上风向是当地的仓储物流中心,交通运输繁忙,尤其有较多货车运行,因而贡献较大;工业排放的贡献与对八廓街站的贡献相当,该点位的上风向是当地的工业集中区,有较多的建材、食品和制药企业,对下风向的VOCs体积分数有一定贡献;植物+背景和溶剂涂料分担率较低.从区辐射站2019年各类来源的VOCs对OFP的贡献见图9(b),燃烧源贡献了50%的OFP;交通排放对OFP贡献略高于25%,明显高于八廓街站;工业排放、植物+背景和溶剂涂料对区辐射站的OFP贡献较为接近.

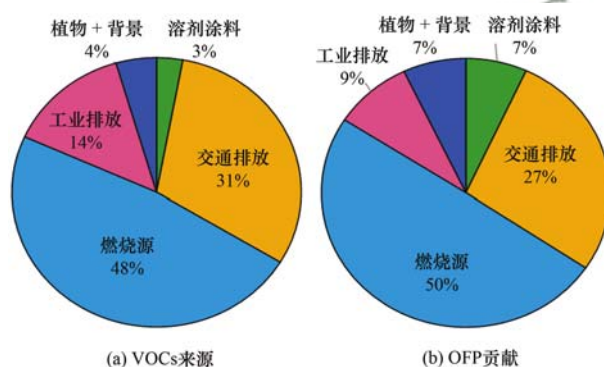


图9 区辐射站2019年VOCs来源及其对OFP的贡献

Fig. 9 VOCs sources at Radiation Station and their contribution to OFP in 2019

3 结论

(1) 本文研究了2019年拉萨市典型区域的VOCs组成和时空分布特征.在城区,烷烃质量分数均最高,其次为OVOC;而背景区域以OVOCs和卤代烃为主要化学物种.拉萨市区VOCs体积分数水平和化学组成存在明显的季节变化特征,冬季最高,主要受周边贡香焚烧、采暖燃烧的影响,其次为春季和秋季,夏季最低.在上风向地区,VOCs体积分数在春季最高,夏季体积分数最低.夏季拉萨市VOCs日变化呈“早晚高,白天低”的日变化规律,主要受气象、光化学反应和排放的影响.

(2) 来源解析结果表明,拉萨市大气VOCs主要有5大类源,分别为燃烧源、交通排放、工业排放、溶剂涂料和植物源.其中燃烧源的贡献最大,交通排放次之,其三为工业排放,各源类贡献季节变化特征明显.地域分布上,市区主要受周边居民生活、商业活动、贡香焚烧的影响,而上风向点受仓储物流中心的影响较为显著.

(3) 本研究可增进对我国西藏自治区典型高原

城市 VOCs 组成和活性的科学认识,为深入理解高原城市的 VOCs 排放现状和臭氧生成活性提供依据,也可管控臭氧污染提供依据。

致谢:感谢中国科学院重庆绿色智能技术研究院三峡所大气研究中心团队对本研究的支持。感谢西藏自治区生态环境监测中心的王彩红和贡桑多吉为本研究开展的严谨和负责的采样工作,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 陆思华, 白郁华, 张广山, 等. 大气中挥发性有机化合物 (VOCs) 的人为来源研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(5): 757-763.
Lu S H, Bai Y H, Zhang G S, *et al.* Source apportionment of anthropogenic emissions of volatile organic compounds[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(5): 757-763.
- [2] Li J L, Zhang M G, Wu F K, *et al.* Assessment of the impacts of aromatic VOC emissions and yields of SOA on SOA concentrations with the air quality model RAMS-CMAQ [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **158**: 105-115.
- [3] 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.
- [4] 杨夏捷, 马远帆, 彭徐剑, 等. 南方林区 2000~2016 年林火释放污染物动态变化研究[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(12): 4687-4696.
Yang X J, Ma Y F, Peng X J, *et al.* Dynamic changes of pollutants released from forest fire in southern forested region during 2000-2016[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(12): 4687-4696.
- [5] 代伶文, 孟晶, 李倩倩, 等. 长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1039-1052.
Dai L W, Meng J, Li Q Q, *et al.* VOCs Emission inventory and variation characteristics of artificial sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1039-1052.
- [6] Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, *et al.* A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(32): 5112-5122.
- [7] 王俏丽. 浙江省沿海地区 PM_{2.5} 和 VOCs 源成分谱构建及大气复合污染来源解析[D]. 杭州: 浙江大学, 2019. 6-7.
- [8] 苏榕, 陆克定, 余家燕, 等. 基于观测模型的重庆大气臭氧污染成因与来源解析[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, **48**(1): 102-112.
Su R, Lu K D, Yu J Y, *et al.* Exploration of the formation mechanism and source attribution of ambient ozone in Chongqing with an observation-based model [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, **61**(1): 23-32.
- [9] 王伶瑞, 李海燕, 陈程, 等. 长三角北部沿海城市 2018 年大气 VOCs 分布特征[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(4): 1385-1400.
Wang L R, Li H Y, Chen C, *et al.* Distributions of VOCs in a coastal city in the northern Yangtze River delta during 2018[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(4): 1385-1400.
- [10] 刘郁葱. 大气排放源化学成分谱的对比分析及其对空气质量模拟的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [11] Wang B G, Shao M, Zhang Y H, *et al.* A study of volatile organic compounds and its emission factors from city vehicles [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, **19**(6): 75-80.
- [12] 区家敏. 珠江三角洲 VOCs 排放来源识别、验证与基于反应活性的控制对策研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [13] 刘金荣. 长三角城市群大气 VOCs 污染特征及来源解析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [14] Li J, Xie S D, Zeng L M, *et al.* Characterization of ambient volatile organic compounds and their sources in Beijing, before, during, and after Asia-Pacific Economic Cooperation China 2014 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(14): 7945-7959.
- [15] 胡崑. 长三角典型城市大气羰基化合物污染特征和来源解析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [16] 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.
- [17] Grosjean E, Grosjean D, Fraser M P, *et al.* Air quality model evaluation data for organics. 2. C₁-C₁₄ carbonyls in Los Angeles air [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(9): 2687-2703.
- [18] 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.
- [19] 刘芮伶, 黄晓锋, 何凌燕, 等. 质子转移反应质谱在线测量大气挥发性有机物及来源研究——以深圳夏季为例 [J]. 环境科学学报, 2012, **32**(10): 2540-2547.
Liu R L, Huang X F, He L Y, *et al.* On-line measurements and source analysis of VOCs in the atmosphere using proton transfer reaction-mass spectrometry: case study in summer of Shenzhen [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(10): 2540-2547.
- [20] Liu Y, Yuan B, Li X, *et al.* Impact of pollution controls in Beijing on atmospheric oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) during the 2008 Olympic Games: observation and modeling implications [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(6): 3045-3062.
- [21] Tan Q W, Liu H F, Xie S D, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and source origins of volatile organic compounds in a megacity of Sichuan Basin, China [J]. *Environmental Research*, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109478.
- [22] Effah E, Barrett D P, Peterson P G, *et al.* Herbivory and attenuated UV radiation affect volatile emissions of the invasive weed *Calluna vulgaris* [J]. *Molecules*, 2020, **25**(14): 3200.
- [23] 赵地, 诺桑, 措加旺姆, 等. 西藏拉萨地区太阳紫外辐射观测 [J]. 大气与环境光学报, 2018, **13**(2): 81-87.
Zhao D, Norsang G, Tsoja W, *et al.* Measurements of solar UV radiation in Lhasa, Tibet [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2018, **13**(2): 81-87.
- [24] HJ 759-2015, 环境空气 挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法 [S].

- [25] US EPA. Analysis of volatile organic compounds in air contained in canisters by method TO-15 [EB/OL]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-01/documents/sop_hw_31_revision_6.pdf, 2014-06-05.
- [26] 梁柳玲, 李青倩, 章洁文, 等. 苏玛罐采样-GC-FID/MS 同时测定环境空气中多种 VOCs [J]. 环境监测管理与技术, 2021, **33**(1): 38-42.
- Liang L L, Li Q Q, Zhang J W, *et al.* Simultaneous determination of VOCs in Air by SUMMA canister sampling-GC-FID/MS [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2021, **33**(1): 38-42.
- [27] U. S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development. EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [EB/OL]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/pmf_5.0_user_guide.pdf, 2014-08-01.
- [28] 何丽. 成都城区大气挥发性有机物污染特征及来源研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [29] 李晓茜. 重庆市北碚城区大气中 VOCs 的组成特征与长期变化规律研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [30] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O₃ 生成潜势的相关性分析 [J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 443-451.
- Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, *et al.* Correlation analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in Summer in Nanjing urban district [J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 443-451.
- [31] 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.
- [32] 白阳. 青藏高原背景站 VOCs 特征及来源分析 [D]. 太原: 山西大学, 2013.
- [33] Zhang X F, Yin Y Y, Wen J H, *et al.* Characteristics, reactivity and source apportionment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in a typical tourist city [J]. Atmospheric Environment, 2019, **215**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116898.
- [34] 刘红燕, 苗曼倩. 青藏高原大气边界层特征初步分析 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 2001, **37**(3): 348-357.
- Liu H Y, Miao M Q. Preliminary analysis on characteristics of boundary layer in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2001, **37**(3): 348-357.
- [35] 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.
- [36] Mo Z W, Shao M, Lu S H. Compilation of a source profile database for hydrocarbon and OVOC emissions in China [J]. Atmospheric Environment, 2016, **143**: 209-217.
- [37] 周子航, 邓也, 吴柯颖, 等. 成都市典型工艺过程挥发性有机物源成分谱 [J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 3949-3961.
- Zhou Z H, Deng Y, Wu K Y, *et al.* Source profiles of VOCs associated with typical industrial processes in Chengdu [J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 3949-3961.
- [38] 王学臣, 王帅, 刘大喜, 等. 典型工业源挥发性有机物排放特征及臭氧生成潜势分析 [J]. 环境污染与防治, 2020, **42**(11): 1387-1391.
- Wang X C, Wang S, Liu D X, *et al.* VOCs emission characteristics and ozone formation potential analysis of typical industrial sources [J]. Environmental Pollution and Control, 2020, **42**(11): 1387-1391.
- [39] 潘昕, 张巍, 黄银芝, 等. 典型涂料制造企业 VOCs 排放量核算与排放特征分析 [J]. 环境工程学报, 2021, **15**(3): 1049-1059.
- Pan X, Zhang W, Huang Y Z, *et al.* Emissions accounting and characteristics of volatile organic compounds in typical paint manufacturing enterprises [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, **15**(3): 1049-1059.
- [40] Zhang Q J, Wu L, Fang X Z, *et al.* Emission factors of volatile organic compounds (VOCs) based on the detailed vehicle classification in a tunnel study [J]. Science of the Total Environment, 2018, **624**: 878-886.
- [41] Wang P, Ying Q, Zhang H L, *et al.* Source apportionment of secondary organic aerosol in China using a regional source-oriented chemical transport model and two emission inventories [J]. Environmental Pollution, 2018, **237**: 756-766.
- [42] 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 等. 成都市冬季挥发性有机物污染特征及来源研究 [J]. 四川环境, 2019, **38**(3): 120-125.
- Han L, Chen J H, Jiang T, *et al.* Pollution characteristics and source apportionments of volatile organic compounds of Chengdu in winter [J]. Sichuan Environment, 2019, **38**(3): 120-125.
- [43] Hsieh L T, Yang H H, Chen H W. Ambient BTEX and MTBE in the neighborhoods of different industrial parks in southern Taiwan [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, **128**(2-3): 106-115.
- [44] 高超, 张学磊, 修艾军, 等. 中国生物源挥发性有机物 (BVOCs) 时空排放特征研究 [J]. 环境科学学报, 2019, **39**(12): 4140-4151.
- Gao C, Zhang X L, Xiu A J, *et al.* Spatiotemporal distribution of biogenic volatile organic compounds emissions in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(12): 4140-4151.
- [45] An J L, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in an industrial area of Nanjing, Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, **97**: 206-214.
- [46] 张俊刚, 王跃思, 王珊, 等. 京津地区大气中非甲烷烃 (NMHCs) 质量浓度水平和反应活性研究 [J]. 环境科学研究, 2008, **21**(5): 158-162.
- Zhang J G, Wang Y S, Wang S, *et al.* Ambient mass concentration and reactivity of non-methane hydrocarbons (NMHCs) in Beijing and Tianjin cities [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, **21**(5): 158-162.
- [47] 孙杰, 王跃思, 吴方堃, 等. 唐山市和北京市夏秋季节大气 VOCs 组成及浓度变化 [J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1438-1443.
- Sun J, Wang Y S, Wu F K, *et al.* Concentration and change of VOCs in summer and autumn in Tangshan [J]. Environmental Science, 2010, **31**(7): 1438-1443.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)