

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

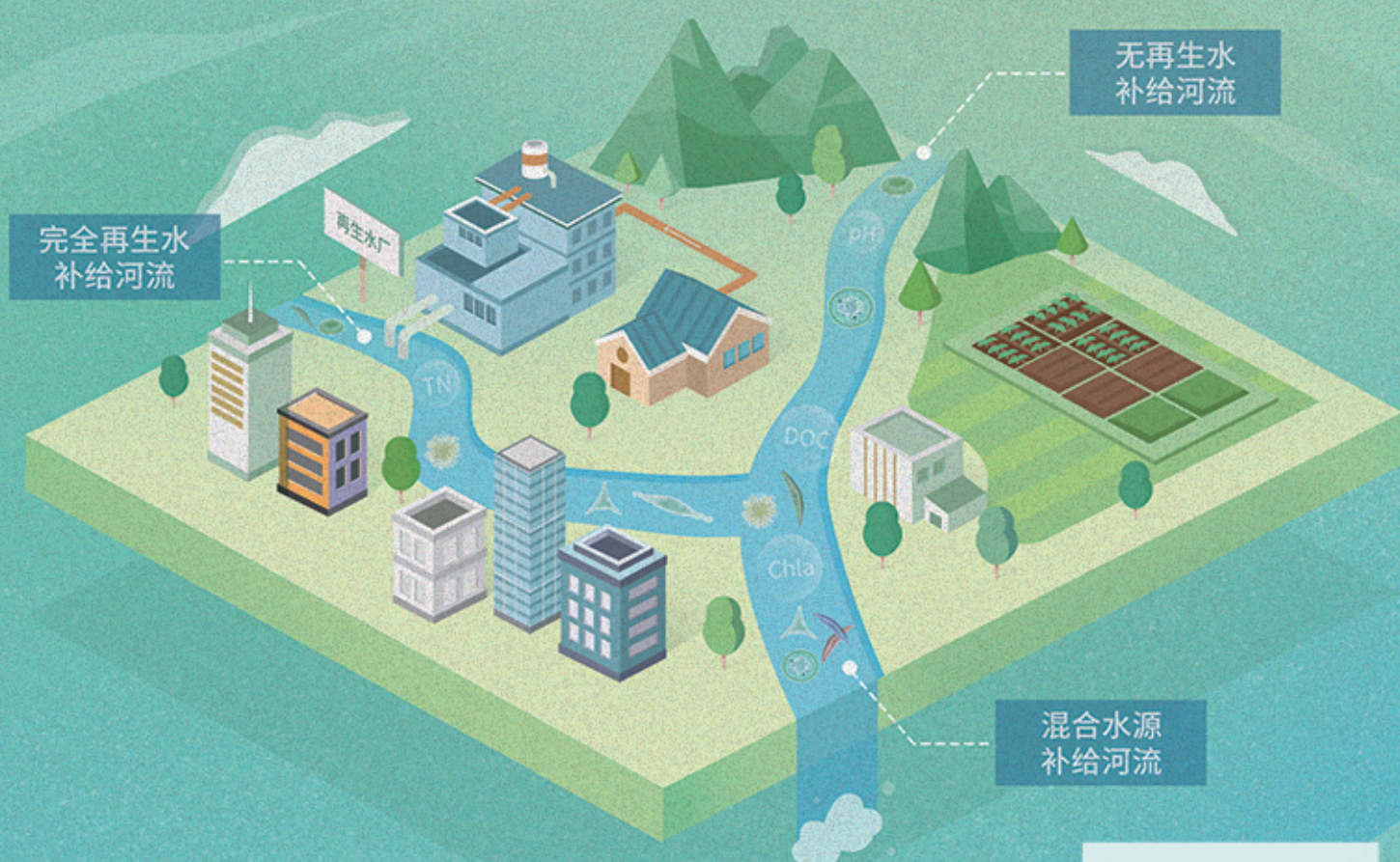
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于 g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜豪, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评价

刘妍¹, 杨宁^{2*}, 孙露娜¹, 吴亚君¹, 宋鹏飞¹, 赵耀³, 娄昆³, 毛洪钧^{1*}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津市城市交通污染防治研究重点实验室, 天津 300071; 2. 天津市生态环境监测中心, 天津 300192; 3. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

摘要: 机动车尾气和蒸发排放的 VOCs 在地下停车场的半密闭环境中不断积累, 威胁居民健康。为探究停车场内挥发性有机物 (VOCs) 浓度水平和变化特征与车队活动水平之间的关系, 阐明其对居民健康的影响, 选取天津市某居民小区地下停车场, 开展了为期 9d 的 VOCs 样品采集, 利用臭氧生成潜势 (OFPs), $\cdot\text{OH}$ 反应速率 (L_{OH}) 和二次有机气溶胶生成潜势 (SOAPs) 综合评价停车场内 VOCs 大气反应活性, 对人体健康风险进行评价。结果表明: ① 停车场内 VOCs 浓度和组分变化主要受车队活动影响, 工作日和周末的浓度峰值均与进场和出场车流峰值同步出现, 即早晚高峰时段, 工作日和周末早高峰浓度分别为 $(463.76 \pm 148.42) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(391.47 \pm 135.37) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 晚高峰为 $(334.29 \pm 176.57) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(416.20 \pm 134.64) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。停车场夜间几乎没有车辆活动, 但夜间 ρ (VOCs) [工作日 $(320.33 \pm 115.57) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 周末 $(364.77 \pm 155.32) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] 仍高于午间 [工作日 $(255.76 \pm 103.65) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 周末 $(350.91 \pm 108.73) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$], 且夜间时段烯炔炔质量分数明显高于其他时段, 这是由于夜间车辆静置时发生昼间排放产生较多的烯炔。② 烯炔炔和芳香炔对 OFPs 和 L_{OH} 贡献率最大 (84.10%~88.04%), 芳香炔对各时间段的 SOAPs 贡献率最大 (98.03%~98.99%), 说明芳香炔和烯炔炔的大气反应活性强且广泛存在于机动车源, 是提高排放标准、升级油品时需首要考虑降低的关键组分。③ 健康风险评价结果表明, 停车场内 VOCs 非致癌风险危险指数 (HI): 0.19~0.55, 暂无健康风险。而各时间段致癌风险均超过阈值 (1×10^{-6}) 1.56~3.11 倍, 停车场作为居民每天必经场所, 应开启机械通风措施保证其中空气流通性。

关键词: 挥发性有机物 (VOCs); 地下停车场; 臭氧生成潜势 (OFPs); $\cdot\text{OH}$ 消耗速率 (L_{OH}); 二次有机气溶胶生成潜势 (SOAPs); 健康风险评价

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5453-11 DOI: 10.13227/j.hjkn.202202066

Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage

LIU Yan¹, YANG Ning^{2*}, SUN Lu-na¹, WU Ya-jun¹, SONG Peng-fei¹, ZHAO Yao³, LOU Kun³, MAO Hong-jun^{1*}

(1. Tianjin Key Laboratory of Urban Transport Emission Research, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300192, China; 3. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: VOCs are an important precursor of secondary organic aerosol (SOA) and ozone (O_3), which causes atmospheric pollution and damage to human respiratory and nervous systems. Underground parking garages are characterized by concentrated emissions of exhaust and evaporation, within a semi-closed space in which the concentration of pollutants continues accumulating. Serving as a passage they must walk through, it poses a threat to the health of residents. Here, the air of an underground parking lot of a residential building in Tianjin was studied. Volatile organic compound (VOCs) samples were collected for nine days. VOCs characteristics and fleet activity were analyzed based on vehicle flow data obtained from the parking lot entry/exit management system. Ozone formation potential (OFPs), $\cdot\text{OH}$ radical reaction rate, and secondary organic aerosol formation potential (SOAPs) were used to comprehensively evaluate VOCs atmospheric reactivity in the parking garage and to evaluate human health risks. These results were compared with published data from other studies on traffic pollution. The results showed: ① the rise in VOCs concentration with inbound/outbound traffic flow peak appeared synchronously, namely during morning and evening rush hours. VOCs concentration was $(463.76 \pm 148.42) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(391.47 \pm 135.37) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ in the morning rush hour and $(334.29 \pm 176.57) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(416.20 \pm 134.64) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ in the evening rush hours. Although cars barely left or drove into the garage at night, VOCs concentrations at night [$(320.33 \pm 115.57) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ on weekdays and $(364.77 \pm 155.32) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ on weekends] were still higher than those at noon [$(255.76 \pm 103.65) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(350.91 \pm 108.73) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] owing to diurnal emissions when vehicles were parked. Moreover, the proportion of olefin at night was significantly higher than that at other periods, because a higher proportion of olefin was the main characteristic of diurnal breathing emissions. During the sampling period, the ρ (VOCs) of the parking lot were 4.39-6.46 times the atmospheric ρ (VOCs) of the same period. ② The proportion of alkanes and aromatics on weekdays and weekends was 37.33%-44.57% and 31.83%-48.81%, respectively. The proportion of alkynes and OVOCs was 10.22%-19.13% and 2.46%-5.05%, respectively. The proportion of halo-hydrocarbons in each period was the lowest, ranging from 0.40% to 1.77%. Alkenes and aromatics contributed the most to OFPs and L_{OH} (84.10%-88.04%). Aromatics contributed the most to SOAPs in every period (98.03%-98.99%). These results indicated that aromatics and olefins had strong atmospheric reactivity and were the main pollutants emitted by motor vehicles. For example, *m/p*-xylene and other active components contributed more to the secondary generation, and their content should be reduced first when gasoline is upgraded. ③ Health risk evaluation results showed that the non-carcinogenic risk index (HI) in the parking lot ranged from 0.19-0.55, indicating no health risk. The carcinogenic risk in each period was 1.56-3.11 times higher than the threshold value (1×10^{-6}). As the parking lot is a place residents must pass through every day, mechanical ventilation measures should be opened to ensure adequate air circulation.

收稿日期: 2022-02-11; 修订日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42177084, 42175123)

作者简介: 刘妍 (1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为机动车 VOCs 排放及其大气环境影响, E-mail: liuyanwork@163.com

* 通信作者, E-mail: tenc_ air@126.com; hongjunm@nankai.edu.cn

Key words: volatile organic compounds (VOCs); underground parking garage; ozone formation potential (OFPs); $\cdot\text{OH}$ radical reaction rate ($L_{\cdot\text{OH}}$); secondary organic aerosol formation potential (SOAPs); health risk assessment

VOCs 既作为二次有机气溶胶 (secondary organic aerosol, SOA) 和臭氧 (O_3) 的重要前体物, 造成大气环境污染, 又因本身具有“三致效应”, 对人体呼吸和神经系统造成损害^[1~5], 控制 VOCs 排放并评估其环境影响和健康危害十分重要. 室内 VOCs 污染引起较多关注, 研究多关注 VOCs 污染的来源解析和健康评估, 研究对象多为住宅、办公区和医院学校等公共场所^[6,7]. 而具有半封闭结构的地下停车场, 因不属于室内环境, 较少受到关注. 地下停车场靠自然通风很难达到充分换气的目的, 需要辅之以机械通风, 机械通风装置往往因能耗问题处于关闭状态, 大量机动车集中排放污染物, 导致污染累积, 危害人群健康^[8]. 同时, 有研究表明, 停车场内污染物可能通过通风系统进一步影响室内空气质量, 导致人群更长时间暴露污染之中^[9,10].

停车场内往往停放大量机动车, 尾气和蒸发集中排放, 又是部分居民每天必经之路, 既是污染排放“源头”也是对人群健康产生危害的污染严重区域^[11,12]. 以往关于停车场的研究仅限于 CO 和 PM 等常规污染物^[8], 设计标准^[13]也仅将 CO 作为空气质量参考指标, 而机动车作为城市挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 的重要来源, 其排放水平不容忽视^[14]. 车辆在停车场中进行冷启动和怠速行驶时会产生大量 VOCs^[15]. 即使在车辆处于停放状态, 由油路系统中的油气挥发带来的蒸发排放 VOCs 量也不容忽视^[16,17]. 根据车辆使用过程, 在停车场内发生的蒸发排放主要有 3 种: ①车辆开入停车场的过程中的油气挥发称为运行损失; ②车辆熄火后, 因油路系统高温引起的热浸排放; ③机动车静置状态下, 油路系统随着环境温度变化产生的昼间排放^[18].

与交通有关的空气污染对公众健康构成威胁^[19], 已有研究表明交通微环境内暴露致癌风险和非致癌风险存在于各类通勤方式^[20], 但因交通流量和人群位置始终处于动态变化过程中, 车队活动对

暴露水平的影响还不清楚^[21,22]. 为综合评估停车场内因机动车活动带来 VOCs 排放和对居民的健康影响, 开展为期 9 d (5 个工作日和 4 个非工作日) 的地下停车场 VOCs 监测研究. 使用 3.2 L 真空采样罐采集某居民区地下停车场的环境空气样品, 分析 99 种 VOCs 组分. 结合臭氧生成潜势 (ozone formation potentials, OFPs)、 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率 ($L_{\cdot\text{OH}}$) 和二次有机气溶胶生成潜势 (secondary organic aerosol formation potentials, SOAFPs) 等多种评价指标综合衡量停车场内 VOCs 的大气反应活性. 利用车辆进场和出场管理系统获得车队进出时间和数量数据, 进一步分析车队活动对停车场内 VOCs 污染特征的影响. 并使用美国环保署 (US EPA) 的健康风险评价模型对人体健康风险进行评价, 与已发表的研究数据进行对比, 以期改善地下停车场空气质量提供基础观测与评价数据.

1 材料与方法

1.1 采样地点与时间

本研究对天津市中心城区某住宅楼地下停车场开展 VOCs 采样分析. 该停车场属于住宅配套设施, 不对外开放, 设置固定车位 723 个, 单层净高约 4.5 m. 大气环境监测点位位于天津市中心城区复康路, 为居民住宅和文教区, 能够较好地反映城市大气环境 VOCs 本底情况.

1.2 样品采集与分析

利用 Vaisala WXT520 型气象变送器 (Helsinki, 芬兰) 监测停车场内的实时气象数据, 具体包括温度、相对湿度、风速和大气压 (表 1); 停车场中进出场车流量统计和进出场时间由停车场管理用车牌识别系统获取 (海康威视, 中国), 测试期间, 该停车场日均车流量为 (583 ± 77) 辆 $\cdot \text{d}^{-1}$. 停车场设有机机械排风风扇, 测试期间未开启, 忽略停车场与外界环境的自然通风量. 停车场限高 2 m, 根据停车场车位注册信息, 该停车场均为小型车, 其中 93% 汽油车, 7% 混合动力和电动车.

表 1 测试期间环境气象参数

Table 1 Meteorological factors in the ambient air of the underground garage during the test

项目	温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	气压/kPa	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
参数	15.51 ± 2.71	51.60 ± 9.62	100.25 ± 0.38	0.29 ± 0.15

停车场内 VOCs 样品使用不锈钢真空采样罐 (Entech, 美国) 采集. 采样罐体积为 3.2 L, 预先抽成真空, 采样时间为 180 min, 采样点设在停车场中心

位置 (图 1), 采样高度为人体呼吸带, 距离地面约 1.5 m. 采样时间为 2020 年 10 月 17 ~ 25 日, 为期 9 d, 包括了 5 个工作日和 4 个非工作日. 每天分 4 个

时间段进行采样,分别为:夜间(00:00~03:00)、早高峰(06:00~09:00)、中午(12:00~15:00)和晚高峰(17:00~20:00),合计 28 个样品。

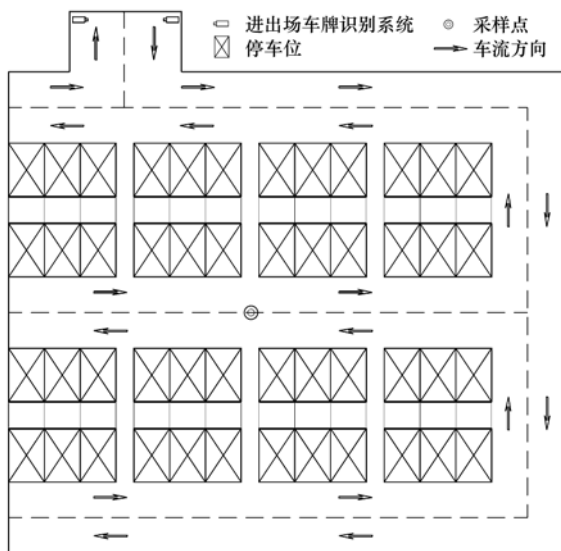


图 1 停车场采样点位示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points

采用“冷阱预浓缩-气相色谱/质谱联用 (Gas Chromatography- Mass Selective detector, GC-MS)”技术分析 VOCs 样品,空气样品经由两级深冷完成“捕集-预浓缩”(Models AC-GCMS 1000, 禾信质谱, 中国),再通过载气(N_2)带入 GC-MS 分析. 标准气购自 (Spectra Gases Inc., 美国), 包含 EPA TO-15 (toxic organics-15) 和 PAMS (photo assessment monitoring stations), 包含 29 种烷烃、11 种烯烃、1 种炔烃、16 种芳香烃、27 种卤代烃和 15 种含氧 VOCs (OVOCs), 合计 99 种 VOCs 组分。

环境本底值监测点位 VOCs 由在线气相色谱分析系统观测得到 (Syntech Spectras GC 955, SYNSPEC, 荷兰), 观测数据时间分辨率为 1h, 目标物种为 PAMS, 合计 56 种组分。

1.3 停车场 VOCs 环境影响评价方法

利用最大增量反应活性系数 (maximum incremental reactivity coefficient, MIR) 计算出 OFPs 和 $L_{i, \cdot OH}$ 综合衡量停车场内 VOCs 的反应活性和对臭氧生成贡献, 通过 SOAPs 评估其对 SOA 生成的贡献^[23,24]。

$$OFP_i = C_i \times MIR_i \quad (1)$$

$$L_{i, \cdot OH} = C_i \times K_{i, \cdot OH} \quad (2)$$

$$SOAP_i = (SOA_i / SOA_T) \times 100 \quad (3)$$

$$SOAP = \sum SOAP_i \times \omega_i \quad (4)$$

式中, OFP_i 为物种 i 的臭氧生成潜势; C_i 为物种 i 的浓度, $\mu g \cdot m^{-3}$; MIR_i 为 VOCs 组分 i 的最大增量反应活性系数; $L_{i, \cdot OH}$ 为物种 i 的 $\cdot OH$ 消耗速率, s^{-1} ;

$K_{i, \cdot OH}$ 为 $\cdot OH$ 反应速率常数, $m^3 \cdot (\mu g \cdot s)^{-1}$; $SOAP_i$ 为物种 i 的二次有机气溶胶生成潜势; SOA_i 为物种 i 的最大增量反应活性; SOA_T 为甲苯的最大增量反应活性; ω_i 为物种 i 的质量分数, %。

1.4 健康风险评价

根据文献^[25], 对于非致癌污染物评价方法如下:

$$EC = CA \times ET \times EF \times ED / AT \quad (5)$$

$$HQ = EC / RfC \quad (6)$$

$$HI = \sum HQ_i \quad (7)$$

对于致癌污染物, 使用终身致癌风险值 (incremental lifetime cancer risk, ILCR) 评价其健康风险:

$$ILCR = EC \times IUR \quad (8)$$

式中, EC (exposure concentration) 为暴露浓度, $mg \cdot m^{-3}$; CA 为污染物浓度, $mg \cdot m^{-3}$; ET 为日暴露时间, $h \cdot d^{-1}$, 居民每日经过停车场次数设为 2 次, 单次约为 15 min^[26], ET 取值 $0.5 h \cdot d^{-1}$; EF 为暴露频率, $d \cdot a^{-1}$, 根据居民出行频率调研^[27], 取值 $250 d \cdot a^{-1}$; ED 为持续暴露时间, 对于非致癌风险一般取为 30 a; 致癌风险取平均寿命 70 a; AT 为平均作用时间, h, 非致癌取值 262 800 h ($30 a \times 365 d \times 24 h$), 致癌风险取值 613 200 h ($70 a \times 365 d \times 24 h$); RfC (reference concentration) 为污染参考浓度, $mg \cdot m^{-3}$, IUR (inhalation unit risk) 为单位吸入风险值参考值, $\mu g \cdot m^{-3}$, 来自 US EPA 综合风险信息系统 (integrated risk information system, IRIS) 公布的有毒有害物质名录和国际癌症研究机构致癌物质名单 (表 2). HQ (hazard quotient) 为单种污染物的危险商值; HI (hazard index) 为危险指数, 即 HQ 风险总和. 当 $HI \geq 1$ 时, 人群暴露在此环境中可能会有不良反应. 当 $ILCR < 10^{-6}$, 表明该元素不存在致癌风险或致癌风险很小。

1.5 质量控制与保证

采样前, 大气采样罐先用清罐仪 (杭州天净, 中国) 高温高压氮气清洗, 清洗 3 个循环后, 抽至真空状态 (小于 200 Pa) 备用. 每批采样罐清洗后抽取 1~2 个测定真空度是否小于 200 Pa, 用氮气加压后测定采样罐本底值是否低于检出限, 如不合标准, 则替换掉该采样罐后重新清洗, 再次测定真空度和本底值, 直至符合标准. 采样过程中, 设置运输空白和采样点空白样品罐. 空气样品采集后于 3 d 内完成分析测试. 通过 5 点法建立标准曲线, 99 种组分标准曲线 $R^2 > 0.99$.

将混合标气稀释至体积分数 1×10^{-9} 后, 重复

表 2 VOCs 健康风险评价系数
Table 2 Coefficient of health risk assessment

类别	化合物名称	RfC/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	IUR/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
烷烃	正戊烷	1.00E+00	— ¹⁾
	正己烷	7.00E-01	—
	环己烷	6.00E+00	—
	正庚烷	4.00E-01	—
	甲基环己烷	3.00E+00	—
	正壬烷	2.00E-02	—
烯烃	丙烯	3.00E+00	—
	丁二烯	2.00E-03	3.00E-05
芳香烃	苯	3.00E-02	7.8E-06
	甲苯	5.00E+00	—
	乙苯	1.00E+00	2.5E-06
	邻-二甲苯	1.00E-01	—
	间/对-二甲苯	1.00E-01	—
	苯乙烯	1.00E+00	—
	正丙苯	1.00E+00	—
	1,3,5-三甲基苯	6.00E-02	—
	1,2,4-三甲基苯	6.00E-02	—
	1,2,3-三甲基苯	6.00E-02	—
卤代烃	氯甲烷	9.00E-02	1.8E-06
	四氯化碳	1.00E-01	6.00E-06
	1,1-二氯乙烯	2.00E-01	—
	1,1-二氯乙烷	5.00E-01	1.6E-06
	1,1,1-三氯乙烷	5.00E+00	—
	1,2-二氯乙烷	7.00E-03	2.60E-05
	三氯乙烯	2.00E-03	4.1E-06
	1,1,2-三氯乙烷	2.00E-04	1.60E-05
	四氯乙烯	4.00E-02	2.6E-07
	1,2-二氯丙烷	4.00E-03	3.70E-05
	氯苯	5.00E-02	—
	间-二氯苯	5.00E-02	—
	对-二氯苯	8.00E-01	1.10E-05
	邻-二氯苯	2.00E-01	—
OVOCs	丙酮	3.09E+01	—
	丙烯醛	2.00E-05	—
	叔丁基甲醚	3.00E+00	2.6E-07

1) “—”表示没有相应参数

进样分析 7 次,定量所得结果标准差 (standard deviaton, SD) 的 3.14 倍为方法检出限 (method detection limit, MDL),范围为:0.01~0.09 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 混合标气 (稀释至体积分数为 5×10^{-9}) 进行 7 次平行分析测试,得到分析结果的算数平均值 $\bar{X}$ 和标准差 SD_5 ,仪器精密度由相对标准差 (relative standard deviation, RSD) 表示,范围为:0.59%~8.46%. 准确度由相对误差 (relative error, RE) 表示,范围为 0.09%~7.75%. 公式如下:

$$\text{MDL} = 3.14 \times \text{SD}_1 \tag{9}$$

$$\text{RSD} = (\text{SD}_5/\bar{X}) \times 100\% \tag{10}$$

$$\text{RE} = (|\bar{X} - 5.0|/5.0) \times 100\% \tag{11}$$

2 结果与讨论

2.1 VOCs 浓度与车辆活动分析

采集停车场内的空气样品,分析 99 种 VOCs 组分. 采样期间,停车场内部机械通风装置未开启,车辆进出口处感应卷帘门仅在车辆通过时开启,其他时间处于常闭状态,停车场与外界通风仅靠自然换气,污染物大量累积. 同时,通过停车场门禁系统记录每小时进出场 (离开停车场和进入停车场) 的车辆,计算逐小时进和出场车辆. 图 2 和图 3 为工作日和周末分类 VOCs 浓度与车流量随时间的变化状况.

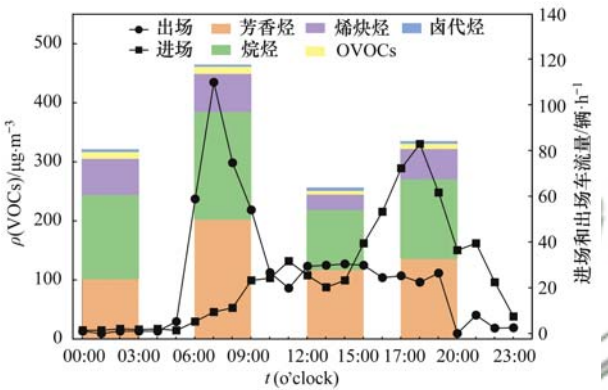


图 2 工作日不同时段分类 VOCs 浓度与车流量变化
Fig. 2 Concentration of VOCs and traffic flow at different time intervals on weekdays

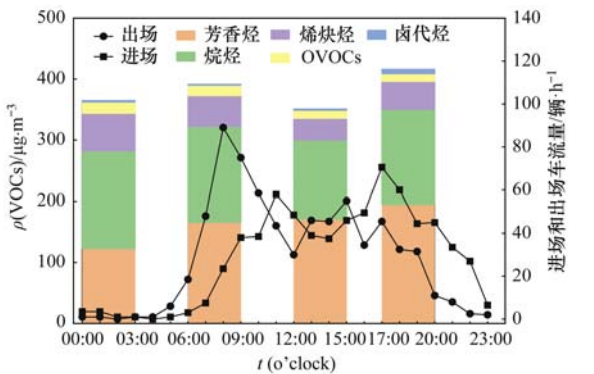


图 3 周末不同时段分类 VOCs 浓度与车流量变化
Fig. 3 Concentration of VOCs and traffic flow at different time intervals on weekends

对比图 2 和图 3 的车辆进出场数量,周末和工作日居民出行习惯明显不同:对于工作日来说,早晨出场车辆和晚间入场车辆呈现明显的早晚高峰. 出场车辆在 06:00 激增,10:00~19:00 保持相对稳定的 20~30 辆 $\cdot\text{h}^{-1}$ 的出车数量,进场车辆从 15:00 起增多,17:00、18:00 和 19:00 时段对应停车行为的“晚高峰”,而周末的进出场车流量峰形较工作日峰形变缓,早高峰延后出现. 车辆出场经历的排放过程为:冷启动排放 (尾气) 和运行损失 (油路系统,属于

蒸发排放),期间可能因拥堵发生怠速排放.车辆入场根据车的运行状态,可将排放分为行驶过程中的尾气排放和与运行损失,车辆驻车状态下,依次产生热浸排放和昼间排放^[26,27].

结合车辆进出场特征,发现测试期间 VOCs 浓度水平和分类特征明显受到停车场内车辆活动影响.对于工作日来说(图 2),停车场夜间、早高峰、中午和晚高峰的 ρ (VOCs) 分别为:(320.33 ± 115.57)、(463.76 ± 148.42)、(255.76 ± 103.65) 和(334.29 ± 176.57) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,早高峰时段 VOCs 浓度明显高于其他时段,分别比夜间、午间和晚高峰高了 44.78%、81.33% 和 38.73%.结合车流特征,早高峰时段(06:00~09:00)出场平均车流量为 243 辆次,入场车流量为 26 辆次,根据车辆状态的排放特征分析,此段时间内停车场内 VOCs 较多来自车辆的冷启动排放.此段时间内 VOCs 浓度较高的 5 种组分依次为:甲苯(56.52 ± 12.54) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、间/对-二甲苯(44.92 ± 8.54) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、异戊烷(34.10 ± 8.97) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、1-丁烯(22.08 ± 7.10) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、2-甲基戊烷(20.15 ± 8.05) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和正戊烷(18.97 ± 7.11) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这 5 种物质占该时间段内 VOCs 总量的 38.33%.根据冷启动排放 VOCs 的研究^[28],可以看出甲苯和间/对-二甲苯在机动车尾气冷启动中占比较高,与本时间段内车队离场的活动特征符合.

周末 4 个时段的 ρ (VOCs) ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 分别为 364.77 ± 155.32 (夜)、391.47 ± 135.37 (早)、350.91 ± 108.73 (中) 和 416.20 ± 134.64 (晚).周末晚高峰时段车队活动频繁,进场车流量为 175 辆次,出场车流量为 110 辆次,VOCs 高值也出现在晚高峰,相较于夜间、早高峰和午间分别高了 14.10%、6.32% 和 18.60%.

工作日和周末夜间时段(00:00~03:00)几乎没有车辆活动,但 VOCs 浓度仍高于午间,可能因为

午间时段场内车辆较少,而夜间几乎停满车辆,大量车夜间发生昼间排放,其排放量也不可忽视.有研究表明,基于日均行驶里程的综合蒸发排放因子为 0.21 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$,已超过国 3 标准汽车尾气排放 0.19 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$,蒸发排放占总移动源排放的比例逐渐升高,是控制移动源 VOCs 的重要环节^[16,18,29].

采样期间停车场内 VOCs 浓度是同一时段大气 VOCs 浓度的 4.39~6.46 倍(表 3),是城市隧道中点的 1.42~1.62 倍^[30,31](表 4),停车场高浓度的 VOCs 污染不容忽视.室内浓度(indoor,I)和室外浓度(outdoor,O)的比值常被用来评价大气环境对室内 VOCs 物种的影响^[6],通过对比各时段大气监测站 VOCs 组分与停车场组分的比值发现,仅有乙烷、丙烷、环己烷、正十一烷和正十二烷比值小于 1,说明可能受到外界环境影响.而这几种烷烃组分浓度在停车场内占比较低(0.86%~1.64%),同时,因其较低的大气反应活性和健康风险,也不属于停车场内需首要控制的关键物种(见 2.2 节和 2.3 节),说明大气环境对停车场内 VOCs 浓度和物种特征影响较小.隧道内 VOCs 主要来自车队尾气和运行损失的混合,根据天津市某一以轻型汽油车为主的城市隧道研究结果,排放前 5 位的组分依次为异戊烷、甲苯、乙烯、甲基叔丁基醚(MTBE)和乙烷^[31].轻型汽油车蒸发热浸和昼间的源谱表现为以正丁烷、异丁烷、异戊烷、甲苯和间/对-二甲苯占比较高为主要特征^[16].停车场内观测到排放占比前 5 位的组分为:甲苯(46.26 ± 12.11) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、间/对-二甲苯(34.40 ± 13.16) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、异戊烷(29.71 ± 8.67) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、正丁烷(18.27 ± 6.42) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和乙苯(17.41 ± 6.06) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对比可知,乙烷、乙烯在停车场内浓度较低,隧道内排放较多,可能因为是经发动机燃烧后生成的小分子组分.而停车场内 VOCs 污染更多地受蒸发特征组分和冷启动未完全燃烧组分影响^[23,32].

表 3 停车场内与大气环境 VOCs 浓度对比(PAMS)/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 3 Comparison of VOCs concentration in underground garage and atmospheric environment (PAMS)/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$					
项目	位置	夜(00:00~03:00)	早(06:00~09:00)	中(12:00~15:00)	晚(17:00~20:00)
工作日	停车场	305.87 ± 53.25	449.64 ± 104.95	245.31 ± 64.33	322.28 ± 103.60
	大气环境	61.79 ± 19.05	69.65 ± 36.78	41.39 ± 16.31	58.91 ± 23.03
周末	停车场	343.76 ± 64.78	372.91 ± 34.72	335.63 ± 16.30	396.02 ± 26.61
	大气环境	78.24 ± 31.10	74.36 ± 36.33	55.97 ± 14.76	66.45 ± 26.92

2.2 OFPs、 L_{OH} 和 SOAPs 与 VOCs 组分特征分析

机动车排放 VOCs 是城市臭氧光化学反应和大气二次有机气溶胶生成的重要前体物,虽然地下停车场内不存在阳光,几乎不存在光化学反应,但停车场内空气终将进入大气循环,作为城市机动车 VOCs 排放“集中”区域,评估停车场内 VOCs 对大气反应

活性如臭氧生成、二次有机气溶胶生成的影响可以为精准控制 VOCs 提供数据基础,利用 MIR 系数, L_{OH} 和 SOAPs 综合评估、识别停车场内关键的 VOCs 活性物种.

VOCs 组分分类(烷烃、烯炔烃、芳香烃、OVOCs 和卤代烃)占比及各类对 OFPs、 L_{OH} 和

表4 不同测试的 VOCs 浓度、大气反应活性评价和健康风险评价

Table 4 Compositions of VOCs, contribution to ozone formation, and health risk assessment from different studies

城市; 采样地点; 年份	浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	大气反应活性评价 OFPs / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	大气反应活性评价 $L_{\cdot\text{OH}}/\text{s}^{-1}$	健康风险评价 (HI)	健康风险评价 (ILCR)
里约热内卢; 地下停车场; 2015 年 ^[33]	苯:54.14 ± 19.72 甲苯:209.24 ± 49.78 乙苯:45.87 ± 18.59 间/对-二甲苯:89.46 ± 33.72 邻-二甲苯:29.47 ± 10.73	苯:43.85 甲苯:830.68 乙苯:127.98 间/对-二甲苯:949.17 邻-二甲苯:220.73	苯:1.78 甲苯:31.67 乙苯:8.63 间/对-二甲苯:32.71 邻-二甲苯:10.77	— ¹⁾	—
天津; 停车场; 2019 年	工作日 夜:320.33 ± 115.57 早:463.76 ± 148.42 中:255.76 ± 103.65 晚:334.29 ± 176.57 周末 夜:364.77 ± 155.32 早:391.47 ± 135.37 中:350.91 ± 108.73 晚:416.20 ± 134.64	工作日 夜:1 408.96 ± 571.07 早:2 231.80 ± 703.45 中:1 152.82 ± 462.35 晚:1 494.51 ± 886.29 周末 夜:1 563.67 ± 745.28 早:1 800.90 ± 690.37 中:1 666.14 ± 545.99 晚:1 942.12 ± 593.52	工作日 夜:109.55 ± 51.22 早:162.77 ± 60.73 中:76.83 ± 34.05 晚:103.98 ± 66.97 周末 夜:122.07 ± 64.94 早:128.17 ± 55.83 中:112.19 ± 46.87 晚:129.17 ± 48.11	工作日 HI 夜:0.45 早:0.29 中:0.19 晚:0.43 周末 HI 夜:0.55 早:0.32 中:0.21 晚:0.28	工作日 ILCR 夜:1.88E-06 早:3.11E-06 中:1.56E-06 晚:1.86E-06 周末 ILCR 夜:2.29E-06 早:2.63E-06 中:2.11E-06 晚:2.59E-06
西安; 城市中心 隧道; 2019 年 ^[27]	夜(20:00 ~ 23:00):211.81 早(7:30 ~ 10:30):211.81 中(11:00 ~ 14:00):138.06 晚(16:30 ~ 19:30):202.98	夜:501.52 早:288.84 中:497.95 晚:501.52	—	夜:0.37 早:0.92 中:0.39 晚:0.71	夜:3.62E-06 早:4.55E-06 中:2.26E-06 晚:3.69E-06
南京; 城市中心隧道; 2015 年 ^[30]	隧道进口:87.28 ± 7.08 隧道出口:225.63 ± 59.19	隧道进口:101.48 隧道出口:402.01	—	隧道进口:0.40 隧道出口:0.62	隧道进口:2.92E-3 隧道出口:5.03E-3
天津; 城市中心隧道; 2017 年 ^[31]	隧道进口:190.85 ± 51.15 隧道出口:257.44 ± 62.02	隧道进口:420.79 ± 127.87 隧道出口:690.58 ± 131.67	—	—	—

1) “—”表示文章中没有相关数据

SOAPs 的贡献率如图4所示. 烷烃和芳香烃在工作日和周末各时间段内占比最高, 分别为 37.33% ~ 44.57% 和 31.83% ~ 48.81%, 烯、炔烃在各时段占比 10.22% ~ 19.13%, OVOCs 为 2.46% ~ 5.05%, 卤代烃在各时段占比均最低, 为 0.40% ~ 1.77%. 车队的出行习惯影响各时间段内发生的车辆排放类型, 而虽同属于机动车源, 蒸发排放和尾气因产生机制不同, VOCs 组分存在一定差异^[32,34]. 芳香烃对工作日和周末的早、中、晚这 3 个时间段的 OFPs 均贡献率最大(52.15% ~ 65.17%), 而夜间烯炔对 OFPs 的贡献率明显上升(工作日: 44.30%, 周末:

40.38%), 这与停车场夜间车辆都处于停放状态, 主要 VOCs 来自汽油车的昼间排放, 根据已有研究结果, 车辆昼间排放烯炔类物质对 OFPs 的贡献率 47.4% ~ 38.9%^[16]. 与 OFPs 类似, $\cdot\text{OH}$ 消耗速率较快的也是烯炔烃和芳香烃, 说明此类 VOCs 的大气反应活性强且广泛存在于机动车源, 是提高排放标准 and 升级油品时需首要考虑降低的关键组分. 而对于 SOAPs 几乎全部贡献来自于芳香烃(98.03% ~ 98.99%), 其中占比前 5 的物种为甲苯(42.48%)、乙苯(18.14%)、邻-二甲苯(10.62%)、3-乙基甲苯(10.37%)和苯(7.75%).

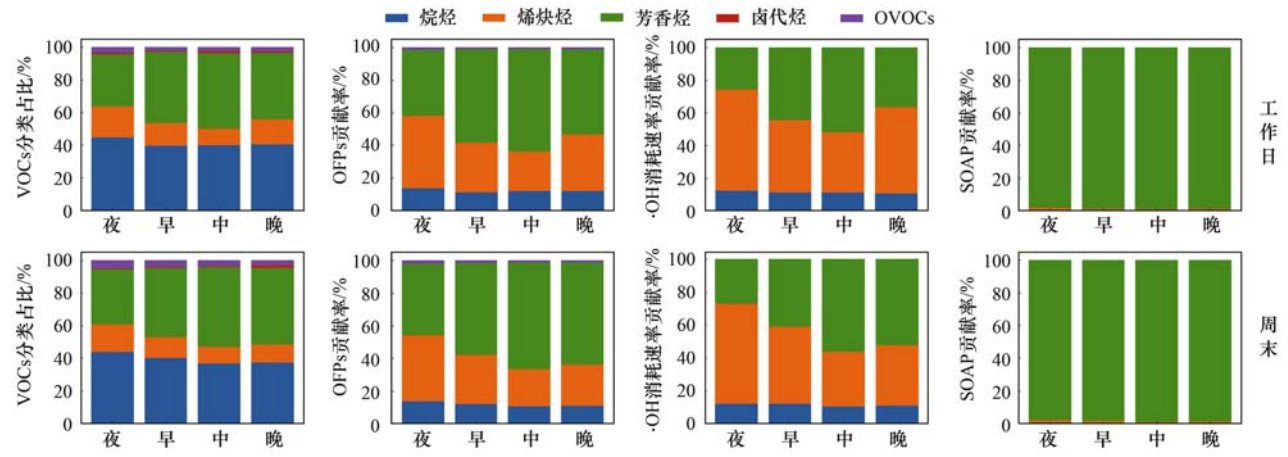
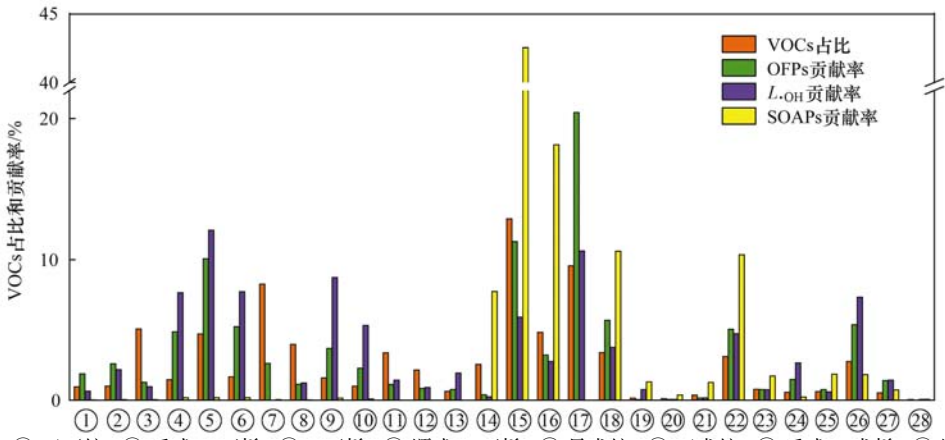


图4 VOCs 组分分类占比及各类对 OFPs、 $L_{\cdot\text{OH}}$ 和 SOAPs 的贡献率

Fig. 4 Concentration of VOCs and their contribution to OFPs, $L_{\cdot\text{OH}}$ and SOAPs

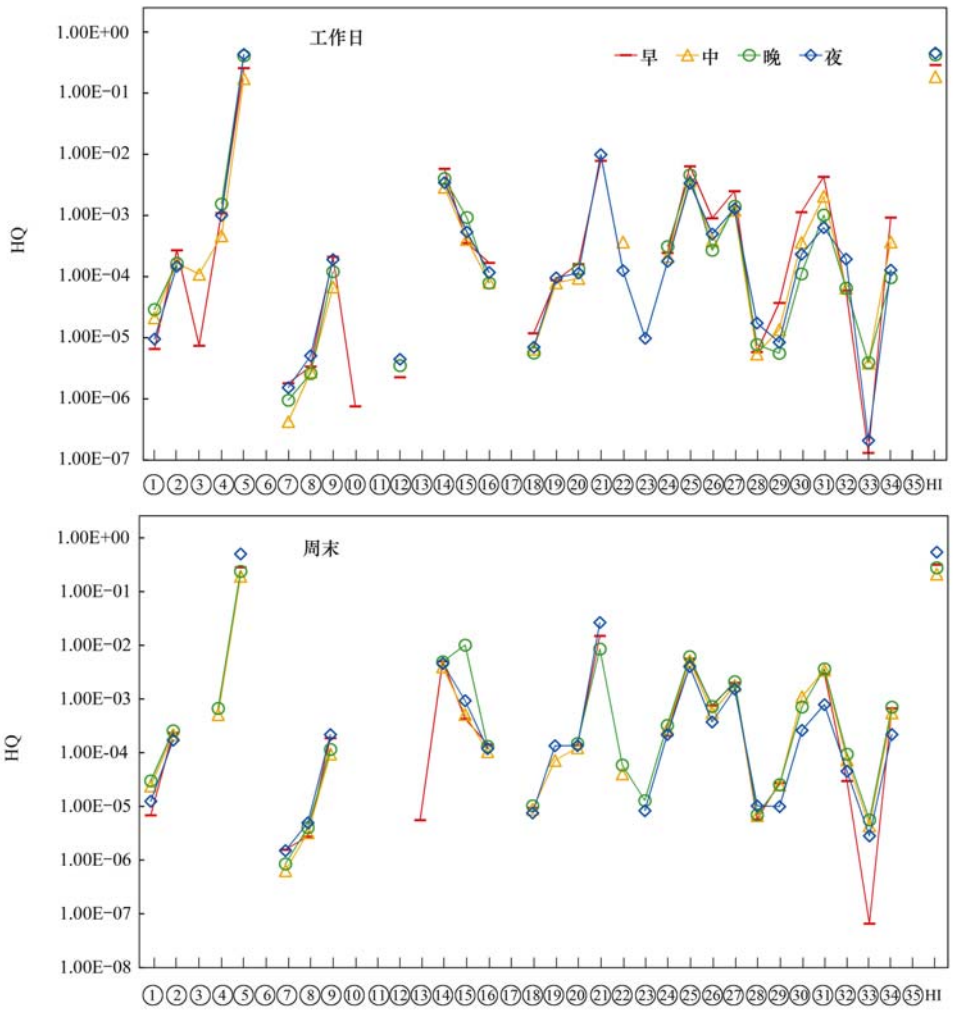
如图 5 所示,为综合评价停车场内各时段平均 VOCs 的大气反应活性,分别筛选出对 OFPs、 L_{OH} 和



① 乙烯, ② 丙烯, ③ 正丁烷, ④ 反式-2-丁烯, ⑤ 1-丁烯, ⑥ 顺式-2-丁烯, ⑦ 异戊烷, ⑧ 正戊烷, ⑨ 反式-2-戊烯, ⑩ 顺-2-戊烯, ⑪ 2-甲基戊烷, ⑫ 3-甲基戊烷, ⑬ 1-己烯, ⑭ 苯, ⑮ 甲苯, ⑯ 乙苯, ⑰ 间/对-二甲苯, ⑱ 邻-二甲苯, ⑲ 苯乙烯, ⑳ 异丙苯, ㉑ 正丙基苯, ㉒ 3-乙基甲苯, ㉓ 4-乙基甲苯, ㉔ 1,3,5-三甲苯, ㉕ 2-乙基甲苯, ㉖ 1,2,4-三甲苯, ㉗ 1,2,3-三甲苯, ㉘ 正十二烷

图 5 前 20 种 VOCs 组分对 OFPs、 L_{OH} 和 SOAPs 贡献率

Fig. 5 VOCs with the largest contribution to OFPs, L_{OH} , and SOAPs



① 丙烯, ② 正戊烷, ③ 氯甲烷, ④ 1,3-丁二烯, ⑤ 丙烯醛, ⑥ 二氯乙烯, ⑦ 丙酮, ⑧ 甲基叔丁基醚, ⑨ 正己烷, ⑩ 1,1-二氯乙烷, ⑪ 1,1,1-三氯乙烷, ⑫ 环己烷, ⑬ 四氯化碳, ⑭ 苯, ⑮ 1,2-二氯乙烷, ⑯ 正庚烷, ⑰ 三氯乙烯, ⑱ 甲基环己烷, ⑲ 1,2-二氯丙烷, ⑳ 甲苯, ㉑ 1,1,2-三氯乙烷, ㉒ 四氯乙烯, ㉓ 氯苯, ㉔ 乙苯, ㉕ 间/对-二甲苯, ㉖ 正壬烷, ㉗ 邻-二甲苯, ㉘ 苯乙烯, ㉙ 正丙基苯, ㉚ 1,3,5-三甲苯, ㉛ 1,2,4-三甲苯, ㉜ 1,3-二氯苯, ㉝ 1,4-二氯苯, ㉞ 1,2,3-三甲苯, ㉟ 1,2-二氯苯

图 6 VOCs 健康风险评价结果 (非致癌物种)

Fig. 6 Health risk assessment (non-carcinogenic)

SOAPs 贡献率最大的前 20 种组分,取并集,得到包含 4 种烷烃、14 种芳香烃和 10 种烯烃在内的 28 种组分. 该 28 种组分占 VOCs 总量的 78.41%,对 OFPs、 L_{OH} 和 SOAPs 的贡献率分别为 94.78%、92.98% 和 99.92%. 间/对-二甲苯浓度占 VOCs 浓度的 9.58%,对 OFPs 生成贡献达 20.44%,1-丁烯浓度占 VOCs 浓度的 4.72%,对 OFPs 贡献占比 10.08%. 苯、甲苯、乙苯、邻-二甲苯和 3-乙基甲苯对 SOAPs 的贡献率高达 89.36%,而该 5 种物质仅占 VOCs 浓度的 26.81%. 可见削减 VOCs 排放总量的同时,也要基于物种大气反应活性,精准控制 VOCs 排放. 有研究表明,燃油烯烃质量分数下降将明显降低尾气 OFPs 生成^[35,36].

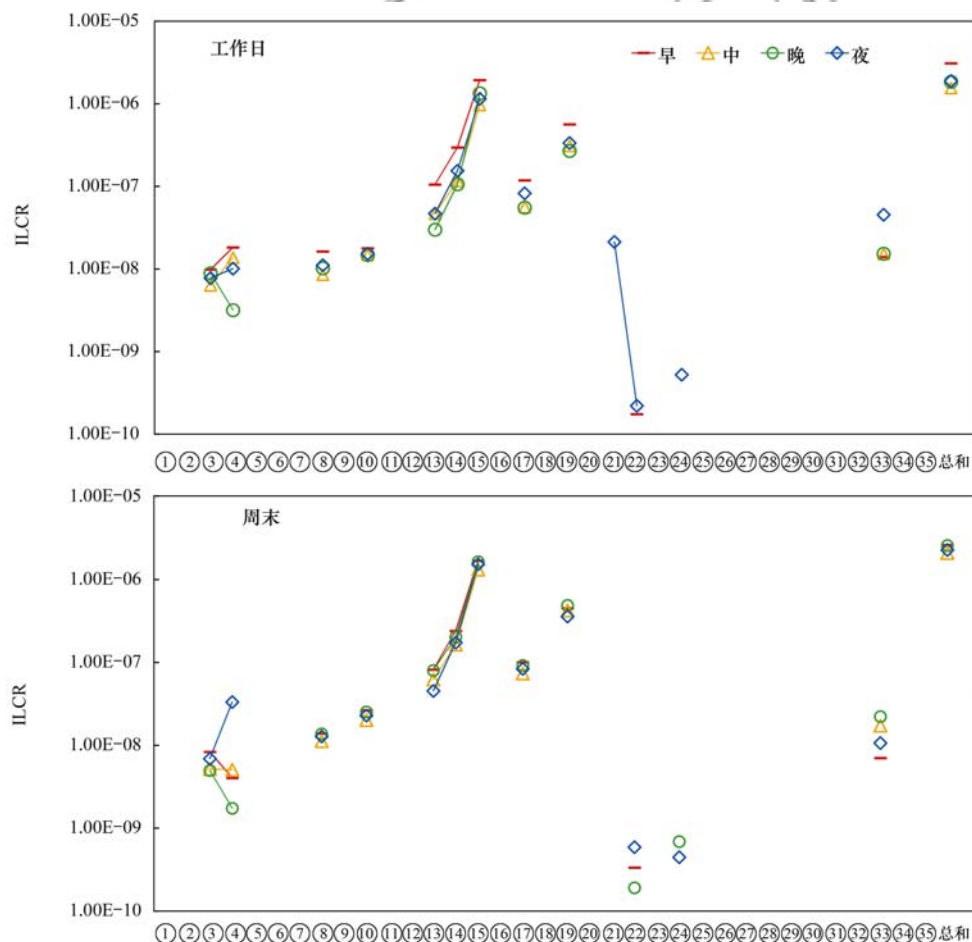
2.3 停车场内 VOCs 健康风险评价

机动车集中排放的环境,如交通干路、隧道和停车场,常出现机动车源污染峰值,对居民健康产生危害^[37]. 而停车场又以每天暴露且需步行其中为主

要特点,容易造成较高的暴露风险^[38]. 利用 US EPA 健康风险评价模型对停车场内各时间段的 VOCs 浓度进行健康风险评价(图 6 和图 7).

2.3.1 非致癌风险评价

利用式(5)~(7),结合表 2 中 VOCs 健康风险评价系数,对人体健康风险进行评价,计算了停车场内早、中、晚和夜 4 个时间段的 35 种主要 VOCs 的非致癌风险危害商值(HQ)和 TVOCs 的非致癌风险危险指数(HI). 对于工作日来说,4 个时间段的 HI 分别为:0.29(早)、0.19(中)、0.43(晚)和 0.45(夜),对于周末来说,HI 分别为 0.32(早)、0.21(中)、0.28(晚)和 0.55(夜). 无论是工作日还是周末,均是夜间 HI 最高,而夜间的车流量最低,VOCs 浓度低于早高峰. 对比各时间段内各物种 HQ 发现,夜间 HI 主要为丙烯醛贡献,其在工作日和周末的贡献率分别为 95% 和 93%. 同时通过对比发现,4 个采样时间段内单个物种的非致癌风险(HQ)最高物



①丙烷, ②异戊烷, ③氟里昂-114, ④氯乙烯, ⑤顺-2-戊烯, ⑥异丙醇, ⑦ 2,2-二甲基丁烷, ⑧ 3-甲基戊烷, ⑨ 1-己烯, ⑩乙酸乙酯, ⑪ 2-甲基己烷, ⑫ 1,1,1-三氯乙烷, ⑬ 2,3-二甲基戊烷, ⑭ 3-甲基己烷, ⑮ 苯, ⑯ 2,2,4-三甲基戊烷, ⑰ 正庚烷, ⑱ 2-戊酮, ⑲ 甲基环己烷, ⑳ 3-甲基庚烷, ㉑ 顺-1,3-二氯乙烯, ㉒ 1,1,2-三氯乙烷, ㉓ 二溴乙烷, ㉔ 氯苯, ㉕ 乙苯, ㉖ 间/对-二甲苯, ㉗ 正壬烷, ㉘ 邻-二甲苯, ㉙ 异丙苯, ㉚ 4-乙基甲苯, ㉛ 2-乙基甲苯, ㉜ 1,2,4-三甲苯, ㉝ 1,3-二氯苯, ㉞ 1,4-二氯苯, ㉟ 1,4-二乙基苯

图 7 VOCs 健康风险评价结果(致癌物种)

Fig. 7 Health risk assessment (carcinogenic)

种均为丙烯醛(HQ:0.19~0.50),占所有物种总量(HI)的比为0.86~0.95,而丙烯醛的浓度范围为0.15~1.12 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,仅占 $\rho(\text{VOCs})$ 的0.08%~0.18%。虽然丙烯醛浓度较低,但可通过呼吸道进入人体,产生自由基使人体过氧化而产生较高的风险,仍应引起重视^[39~41]。

2.3.2 致癌风险

利用式(5)和式(8),结合表2 VOCs 健康风险评价系数,对人体致癌风险进行评价。单个 VOCs 物种的 ILCR 范围在 $1.75 \times 10^{-10} \sim 1.94 \times 10^{-6}$,其中苯在各个时间段的 ILCR 值均超过 EPA 规定成人可接受的终生致癌风险(1×10^{-6})。所测物种的 ILCR 总和在各个采样时段 $1.56 \times 10^{-6} \sim 3.11 \times 10^{-6}$ 范围内波动,说明其对人体健康具有明显的影响。虽略低于道路环境苯系物的致癌风险 4.31×10^{-5} ^[42],但仍高于大部分市内公共场所^[43]。我国目前尚未形成自己的针对空气 VOCs 暴露的健康风险评价体系,相关研究不足。为对比本停车场与其他停车场或交通相关区域(路边和隧道)的 VOCs 污染程度及健康风险,选取近几年国内外研究结果,见表4。西安城市隧道中心 HI 范围为 0.37~0.92^[27],南京隧道进口处 HI 为 0.40,出口处为 0.62^[30],本研究的停车场各时段 HI 范围为 0.19~0.55,说明这些交通区域的健康风险尚可控。而对于致癌风险以上研究结果均超过 1×10^{-6} ,南京隧道^[30]出口处 ILCR 高达 5.03×10^{-3} ,西安隧道^[27]出口为 $2.26 \times 10^{-6} \sim 4.55 \times 10^{-6}$ 。本研究各时段 ILCR 为 $1.86 \times 10^{-6} \sim 3.11 \times 10^{-6}$,暴露于机动车排放为主要污染源的交通环境中的致癌风险都已超过阈值,地下停车场作为很多居民每天必经场所,累积暴露时间效应不容忽视^[44,45]。有必要采取强制措施开启机械通风,以保证人群健康。

3 结论

(1)工作日采样时段内的 $\rho(\text{VOCs})$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)为 320.33 ± 115.57 (夜间)、 463.76 ± 148.42 (早高峰)、 255.76 ± 103.65 (中午)和 334.29 ± 176.57 (晚高峰);周末4个时段的 $\rho(\text{VOCs})$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)分别为 364.77 ± 155.32 (夜)、 391.47 ± 135.37 (早)、 350.91 ± 108.73 (中)和 416.20 ± 134.64 (晚)。停车场内 VOCs 浓度受场内车队活动情况影响,交通流量峰值和 VOCs 浓度峰值均发生在早晚高峰,夜间时段没有车辆活动,但 VOCs 浓度仍高于午间,因大量车夜间发生昼间排放。

(2)烯、炔烃和芳香烃对 OFPs 和 L_{OH} 贡献率最大,夜间时段烯炔烃比例明显高于其他时段,这与车

辆昼间排放烯烃占比较大有关。间/对-二甲苯等活性组分对二次生成贡献率更大,应在油品升级、排放控制等管控阶段首先考虑降低其含量。各时间段内单个 VOCs 物种的 HQ 及非致癌指数 HI 均小于 1,在安全范围之内;而各时间段致癌风险均超过阈值,地下停车场作为居民每天必经场所,应采取机械通风等强制通风措施充分换气,保证其中空气质量。

参考文献:

- [1] Gu Y, Liu B S, Li Y F, *et al.* Multi-scale volatile organic compound (VOC) source apportionment in Tianjin, China, using a receptor model coupled with 1-hr resolution data [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115023.
- [2] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [3] 叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 等. 气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3954-3964.
Ye Z L, Qu Z X, Ma S S, *et al.* Secondary organic aerosols from aqueous reaction of aerosol water [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3954-3964.
- [4] 徐虹, 唐邈, 肖致美, 等. 天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3492-3499.
Xu H, Tang M, Xiao Z M, *et al.* Characteristics of secondary organic particles and the potential formation of SOA from VOCs during wintertime heavy pollution episodes in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3492-3499.
- [5] 王文美, 高璟赞, 肖致美, 等. 天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3585-3594.
Wang W M, Gao J Y, Xiao Z M, *et al.* Characteristics and sources of VOCs at different ozone concentration levels in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3585-3594.
- [6] 刘舒婷, 黄宇, 崔龙, 等. 中国室内挥发性有机物污染特征 [J]. *地球环境学报*, 2021, **12**(3): 243-255.
Liu S T, Huang Y, Cui L, *et al.* Characteristics of indoor volatile organic compounds in China [J]. *Journal of Earth Environment*, 2021, **12**(3): 243-255.
- [7] 毕璐瑶. 包头市家庭住宅空气中 VOCs 暴露评价与风险评估 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2019.
- [8] 李文倬. 基于机动车排放模型的地下车库污染物排放量研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [9] Marć M, Smiełowska M, Zabiegała B, *et al.* Concentrations of monoaromatic hydrocarbons in the air of the underground car park and individual garages attached to residential buildings [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **573**: 767-777.
- [10] Batterman S, Hatzivasilis G, Jia C R, *et al.* Concentrations and emissions of gasoline and other vapors from residential vehicle garages [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(10): 1828-1844.
- [11] 白文艳. 城市商业建筑地下车库气态污染物污染特性及其影响因素研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [12] 陈天增, 葛艳丽, 刘永春, 等. 我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 478-492.
Chen T Z, Ge Y L, Liu Y C, *et al.* VOCs emission from motor vehicles in China and its impact on the atmospheric environment

- [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 478-492.
- [13] GB 50736-2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].
- [14] 高璟贇, 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.
- [15] 张猛. 停车场中 VOCs 组分特征研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [16] Liu Y, Zhong C Z, Peng J F, *et al.* Evaporative emission from China 5 and China 6 gasoline vehicles: emission factors, profiles and future perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **331**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129861.
- [17] Hata H, Inoue K, Kokuryo K, *et al.* Detailed inventory of the evaporative emissions from parked gasoline vehicles and an evaluation of their atmospheric impact in Japan [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(10): 5947-5953.
- [18] Liu H, Man H Y, Tschantz M, *et al.* VOC from vehicular evaporation emissions: status and control strategy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(24): 14424-14431.
- [19] 姚维杰, 王大玮, 谢付莹, 等. 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 714-722.
Yao W J, Wang D W, Xie F Y, *et al.* Spatial distribution characteristics of VOCs and its impact on ozone formation potential in Rizhao city in summer[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 714-722.
- [20] 佟瑞鹏, 张磊. 不同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 663-671.
Tong R P, Zhang L. Health risk assessment of volatile organic compounds for different commuting modes [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 663-671.
- [21] Gong Y, Wei Y J, Cheng J H, *et al.* Health risk assessment and personal exposure to volatile organic compounds (VOCs) in metro carriages-a case study in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1432-1438.
- [22] Gulliver J, Briggs D J. Personal exposure to particulate air pollution in transport microenvironments [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(1): 1-8.
- [23] Man H Y, Liu H, Niu H, *et al.* VOCs evaporative emissions from vehicles in China: species characteristics of different emission processes [J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2020, **1**, doi: 10.1016/j.esc.2019.100002.
- [24] Guo H, Ling Z H, Cheng H R, *et al.* Tropospheric volatile organic compounds in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1021-1043.
- [25] USA EPA. Risk assessment guidance for superfund [R]. Washington: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, 2009. 1-134.
- [26] Hata H, Yamada H, Yanai K, *et al.* Modeling evaporative emissions from parked gasoline cars based on vehicle carbon canister experiments [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **675**: 679-685.
- [27] Xu H M, Feng R, Wang Z X, *et al.* Environmental and health risks of VOCs in the longest inner-city tunnel in Xi'an, northwest China: implication of impact from new energy vehicles [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **282**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117057.
- [28] 张铁臣. 汽油车冷启动挥发性有机物排放及生成机理的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [29] 清华大学, 中国环境科学研究院. 道路机动车排放清单编制技术指南[R]. 北京: 中国环境保护部, 2015.
- [30] 张启钧, 吴琳, 刘明月, 等. 南京市机动车排放 VOCs 的污染特征与健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(10): 3118-3125.
Zhang Q J, Wu L, Liu M Y, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of VOCs from vehicle exhaust in Nanjing, China[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(10): 3118-3125.
- [31] 孙露娜, 刘妍, 赵静波, 等. 天津隧道机动车 VOCs 污染特征与排放因子[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 104-113.
Sun L N, Liu Y, Zhao J B, *et al.* Pollution characteristics and emission factors of VOCs from vehicle emissions in the Tianjin tunnel[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 104-113.
- [32] Yue T T, Yue X, Chai F H, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from the evaporative emissions of modern passenger cars [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **151**: 62-69.
- [33] De Castro B-P, De Souza Machado G, Bauerfeldt G F, *et al.* Assessment of the BTEX concentrations and reactivity in a confined parking area in Rio de Janeiro, Brazil[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **104**: 22-26.
- [34] Liu H, Man H Y, Cui H Y, *et al.* An updated emission inventory of vehicular VOCs and IVOCs in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(20): 12709-12724.
- [35] Sun L N, Zhong C Z, Peng J F, *et al.* Refueling emission of volatile organic compounds from China 6 gasoline vehicles[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **789**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147883.
- [36] 汪欣. 机动车尾气 VOCs 排放及减排措施分析[J]. *资源综合利用*, 2021, **39**(9): 185-187.
Wang X. Analysis of VOCs emissions and emission reduction measures from motor vehicle exhaust [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2021, **39**(9): 185-187.
- [37] 李友平, 唐娅, 范忠雨, 等. 成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 576-584.
Li Y P, Tang Y, Fan Z Y, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of atmospheric VOCs in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 576-584.
- [38] Zhao Y, Song X C. Field survey of particulate matter mass concentration and exposure levels in a commercial garage in Dalian, China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, **11**(11): 1912-1921.
- [39] 陈丹. 珠三角某炼油厂装置区 VOCs 健康风险评价及不确定性研究[D]. 广州: 暨南大学, 2017.
- [40] 甘浩, 徐勃, 张向炎, 等. 淄博市化工园区夏季环境 VOCs 污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(1): 20-29.
Gan H, Xu B, Zhang X Y, *et al.* Characteristics and health risk assessment of atmospheric VOCs in a chemical industrial park of Zibo in summer[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(1): 20-29.
- [41] 刘丹, 解强, 张鑫, 等. 北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3693-3701.
Liu D, Xie Q, Zhang X, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of VOCs during the haze period in the winter in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3693-3701.

- [42] 霍霄玮. 西安市交通主干道环境空气中苯系物的污染特征与健康风险评价[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- [43] 范洁, 樊灏, 沈振兴, 等. 西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2153-2158.
Fan J, Fan H, Shen Z X, *et al.* Concentration analysis and health risk assessment of air pollutants in newly decorated public places in Xi'an [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2153-2158.
- [44] 佟瑞鹏, 张磊, 杨校毅, 等. 家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 672-683.
Tong R P, Zhang L, Yang X Y, *et al.* Source analysis and environmental health risk assessment of VOCs in furniture manufacturing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 672-683.
- [45] 王宇. 北京市典型道路空气中挥发性有机物污染特征与模拟[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.

环境科学

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i> (5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning (5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i> (5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i> (5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu (5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i> (5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i> (5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i> (5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i> (5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i> (5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i> (5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i> (5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i> (5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i> (5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i> (5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i> (5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i> (5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i> (5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i> (5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i> (5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i> (5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i> (5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i> (5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i> (5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i> (5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i> (5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i> (5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i> (5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i> (5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i> (5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i> (5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i> (5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i> (5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i> (5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i> (5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i> (5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i> (5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i> (5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i> (5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i> (5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin (5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao (5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i> (5861)