环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 45 卷　第 4 期
2024 年 4 月 15 日

目　次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 ……杨清可，王磊，朱高立，李颖，范业婷，王雅竹（1869）
交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 ……郑琰，蒋雪梅，肖玉杰（1879）
基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 ……张江艳（1888）
基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径：以南京某国家级开发区为例 ……李慧鹏，李荔，殷茵，何文太，宿杰，赵秋月（1898）
高校碳排放核算与分析：以北京A高校为例 ……曹睿，封莉，张立秋（1907）
北京市制造业减污降碳协同效应分析和驱动因素 ……俞珊，韩玉花，牟洁，张双，张增杰（1917）
碳排放权交易价格与全要素生产率：来自中国的证据 ……吴雪萍（1926）
中国城市$PM_{2.5}$和PM_{10}时空分布特征和影响因素分析 ……李江苏，段良荣，张天娇（1938）
2017~2021年苏皖鲁豫交界区域$PM_{2.5}$和O_3时空变化特征及影响因素 ……陈伟，徐学哲，刘文清（1950）
疫情管控期西安$PM_{2.5}$和O_3污染特征及成因分析 ……原晓红，张强，李琦，谢文豪，刘跃廷，樊亭亭，姜旭朋（1963）
苏南五市秋冬季$PM_{2.5}$化学组成特征和空间差异 ……冯蔚，丁峰，尚玥，谢鸣捷（1975）
湖北咸宁细颗粒物$PM_{2.5}$来源 ……罗怡，朱宽广，陈璞珑，田军，谢旻，战杨志豪，赵润琪（1983）
邢台氨减排对京津冀$PM_{2.5}$改善的溢出效益 ……边泽君，闻超玉，郎建垒，范晓菡，夏祥晨，周颖（1994）
聊城市冬季$PM_{2.5}$载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 ……张敬巧，朱瑶，曹婷，燕丽，王淑兰，刘铮（2003）
高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 ……郭淑政，叶春翔，林伟立，陈熠，曾立民，尹晴晴，刘雪莉（2011）
北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例：高新技术产业的环境影响 ……王洁，姚震，王敏燕，陈速敏，龙腾，王海林，李红，郭秀锐，郝江虹，聂磊（2019）
高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 ……雷丽娟，张懿，罗伊娜，张潇，冯淼（2028）
水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险 ……葛林科，李璇艳，曹胜凯，郑金帅，张蓬，朱超，马宏瑞（2039）
黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 ……王亮，邓雪娇，王潇磊，李明，刘奕尧，娄亚敏，涂响，张坤锋（2054）
藏东多曲河流域锶富集水化学特征及控制因素 ……李敬杰，连晟，王明国，张智印，张涛（2067）
西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 ……张炎炎，辛存林，郭小燕，张博，陈宁，史延飞（2080）
基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 ……孟令华（2096）
丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 ……张子燕，伏永朋，王宁涛，谭建民，刘亚磊（2107）
金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 ……王晓燕，韩双宝，张梦南，尹德超，吴玺，安永会（2118）
德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 ……刘楠，陈盟，高东东，吴勇，王橦橦（2129）
典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 ……许万璐，范一凡，钱新（2142）
抚仙湖子流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 ……王延杰，梁启斌，王艳霞，侯磊，陈奇伯，王伟，李晓琳，高俊淑（2150）
过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 ……曲思彤，单苏洁，王崇铭，吴玲予，李大鹏，黄勇（2160）
矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 ……刘振海，张展华，袁语欣，朱盼盼，陈威，张彤（2171）
生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 ……孙漱玉，黄梦鑫，孔强，张焕新，刘继伟（2185）
微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 ……练建军，谢诗婷，吴培，孟冠华，陈波（2195）
紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 ……马锋锋，薛之一，赵保卫（2203）
土地利用影响下无定河流域浮游植物群落与环境因子响应 ……郭善嵩，胡恩，丁一桐，张嘉渭，孙长顺，卢悦，潘保柱（2211）
鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 ……喻江，王淳，龙永，刘贵花，李春杰，范国权，于镇华（2223）
典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 ……刘双羽，蒙俊杰，邱小琮，周瑞娟，李霖（2233）
污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 ……郭有顺，余仲，郝文彬，孟凡刚（2246）
宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 ……胡健双，王燕，周政，汪雅琴，王秉政，李激（2259）
大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 ……郑亚平，张俊华，田惠文，朱航成，刘舒，丁亚鹏（2268）
基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 ……叶淼，朱琳，刘旭东，黄勇，陈蓓蓓，李欢（2280）
秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 ……叶子壮，王松燕，陆潇，史多鹏，吕慎强，李嘉，杨泽宇，王林权（2292）
长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 ……王长远，马啸驰，郭德杰，刘新红，马艳，罗佳（2304）
土壤盐分变化对N_2O排放影响：基于Meta分析 ……黄艺华，余冬立，史祯琦，胡磊，潘永春（2313）
基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 ……郑慧玲，郑辉峰（2321）
基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 ……张哲，时振钦，朱文博，孙梓欣，赵体侠，邓文萍，刘志强（2332）
防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 ……徐凤璟，黄懿梅，黄倩，申继凯（2342）
长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 ……赵宇航，殷浩凯，胡雪纯，解文艳，刘志平，周怀平，杨振兴（2353）
冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 ……鲁泽让，陈佳钰，李智贤，李永梅，罗志章，杨锐，田明洋，赵吉霞，范茂攀（2363）
辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 ……周波，李晓光，童思陈，吕旭波，郭朝臣，雷坤（2373）
高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 ……张欣悦，肖启涛，谢晖，刘臻婧，邱银国，罗菊花，徐向华，段洪涛（2385）
生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 ……柳晓婉，刘杏认，高尚洁，李贵春（2394）
太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 ……马义淑，曹亚鑫，牛敏，张明罡，程曼，文永莉（2406）
基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 ……张佳琦，潘瑜春，高世臣，赵亚楠，景胜强，周艳兵，郜允兵（2417）
基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 ……李军，李旭，李开明，焦亮，台喜生，臧飞，陈伟，脱新颖（2428）
西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 ……张海琳，张雨，王顶，谢军，张跃强，张宇亭，王洁，石孝均（2440）
重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 ……廖泽源，李杰芹，沈智杰，李彩霞，罗程钟，梅楠，张成，王定勇（2450）
金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 ……魏洪斌，罗明，向垒，查理思（2461）
赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 ……刘龙宇，杨世利，赵黄诗雨，常凯威，余江（2473）
施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 ……张瑶，王天齐，牛硕，杨阳，陈卫平（2479）

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响

王洁[1], 姚震[2], 王敏燕[2], 陈速敏[2], 龙腾[2], 王海林[2], 李红[3], 郭秀锐[1], 郝江虹[1], 聂磊[2*]

(1. 北京工业大学环境与生命学部, 北京 100124; 2. 北京市生态环境保护科学研究院, 城市大气挥发性有机物污染防治技术与应用北京市重点实验室, 北京 100037; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 随着国家产业结构的不断调整和工业企业入驻园区刚性要求的不断强化, 以高新技术为支柱产业的高新技术产业园区不断增加, 为分析涉VOCs高新技术产业对园区环境质量的影响, 选取北京市典型高新技术产业园区作为研究案例, 采用BCT-7800A PLUS挥发性有机物在线监测系统对园区环境VOCs(共计115种)进行了监测, 分析了园区环境VOCs污染水平和臭氧生成潜势, 并计算毒性VOCs的危害指数(HI)和终生癌症风险(Risk). 利用气相色谱-质谱/氢离子火焰检测器联用(GC-MS/FID)和高效液相色谱(HPLC)的方法检测了园区不同点位的环境VOCs, 并对不同点位的环境VOCs污染特征进行了分析. 结果表明: ① 连续监测期间高新技术产业园区φ(TVOCs)为(72.71±52.51)×10^{-9}, VOCs主要贡献组分为烷烃和OVOCs, 占比分别为38.3%和21.8%, 主要受燃料燃烧源影响, 园区OFP均值为404.13 μg·m^{-3}. ② 健康风险评价表明, 连续监测期间园区毒性VOCs造成的非致癌风险(HI)均低于1, 处于可接受水平; 1,2-二氯乙烷平均致癌风险超过安全阈值, 表示该物种存在致癌风险, 三氯甲烷、1,2-二溴乙烷、1,2-二氯丙烷和苯的均值低于安全阈值, 但最高值超过安全阈值, 表明这4个物种在特定高排放时段同样存在致癌风险, 需要引起重点关注. ③ 离线采样检测结果显示, 园区不同点位环境φ(TVOCs)的均值为(37.62±11.01)×10^{-9}, 4个点位VOCs体积分数大于其他研究中的市区环境监测点位(30.34×10^{-9}). OFP均值为246.38 μg·m^{-3}, 5个点位OFP均高于市区监测点位, 园区高新技术企业排放的VOCs对环境存在一定的影响.

关键词: 高新技术产业园区; 溶剂使用; 挥发性有机物; 污染特征; 健康风险

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2024)04-2019-09 **DOI:** 10.13227/j.hjkx.202304216

VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries

WANG Jie[1], YAO Zhen[2], WANG Min-yan[2], CHEN Su-min[2], LONG Teng[2], WANG Hai-lin[2], LI Hong[3], GUO Xiu-rui[1], HAO Jiang-hong[1], NIE Lei[2*]

(1. Faculty of Environment and Life, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Key Laboratory for VOCs Pollution Prevention and Treatment Technology and Application of Urban Air, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: With the continuous adjustment of the national industrial structure and the strengthening of the rigid requirements for industrial enterprises to settle in parks, the number of high-tech industrial parks with high-tech as the pillar industry continues to increase. To analyze the impact of VOCs-related high-tech industries on the environmental quality of parks, Beijing's typical high-tech industrial parks were selected as research cases, and the BCT-7800A PLUS volatile organic compounds online monitoring system was used to monitor 115 types of VOCs in the park environment. The pollution level and ozone generation potential of VOCs in the park environment were analyzed, and the hazard index (HI) and lifetime carcinogenic risk (Risk) of toxic VOCs were calculated. The environmental VOCs at different sites in the park were detected using gas chromatography-mass spectrometry/hydrogen ion flame detector (GC-MS/FID) and high-performance liquid chromatography (HPLC), and the pollution characteristics of environmental VOCs at different sites were analyzed. The research results indicated that: ① during the continuous monitoring period, the high-tech industrial park φ(TVOCs) was (72.71±52.51)×10^{-9}, and the main contributing components of VOCs were alkanes and OVOCs, accounting for 38.3% and 21.8%, respectively. They were mainly affected by fuel combustion sources, and the average OFP of the park was 404.13 μg·m^{-3}. ② The health risk assessment showed that the non-carcinogenic risk (HI) caused by toxic VOCs in the park during continuous monitoring was below 1, which was at an acceptable level. The average carcinogenic risk of 1,2-dichloroethane exceeded the safety threshold, indicating that the species had a carcinogenic risk. The average values of trichloromethane, 1,2-dibromoethane, 1,2-dichloropropane, and benzene were below the safety threshold, but the highest value exceeded the safety threshold, indicating that these four species also had a carcinogenic risk during specific high-emission periods and need to be given special attention. ③ Offline sampling detection results showed the characteristics of the environment at different sites in the park. The average value of φ(TVOCs) was (37.62±11.01)×10^{-9}. The volume fraction of VOCs at four sites was higher than that of other urban environmental monitoring sites in the study (30.34×10^{-9}). The average OFP value was 246.38 μg·m^{-3}. The OFP at five monitoring sites was higher than that at urban monitoring sites, indicating that the VOCs emitted by high-tech enterprises in the park had a certain impact on the environment.

Key words: high-tech industrial park; solvent use; volatile organic compounds; pollution characteristics; health risks

挥发性有机物(VOCs)作为细颗粒物与臭氧的重要前体物[1~3], 对其实施有效减排是“十四五”时

收稿日期: 2023-04-25; **修订日期:** 2023-06-05

基金项目: 北京市科技计划项目(Z181100005418015, Z211100004321006)

作者简介: 王洁(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染物控制, E-mail:18810781925@163.com

* 通信作者, E-mail: nielei@cee.cn

期各级环境管理部门实施细颗粒物与臭氧协同控制的主要手段. “十四五”规划《纲要》将氮氧化物和挥发性有机物的排放总量下降10%以上作为指标之一[4]. 此外，VOCs中的部分物种存在“三致”效应，长期暴露其中会直接威胁人体的健康[5~8].

工业园区由于企业集聚，涉VOCs排放环节多，其VOCs排放特征、环境影响和健康风险受到广泛关注：2012年Ramírez等[9]监测分析了地中海地区最大化工园区周边区域的VOCs浓度水平，量化了附近居民面临的健康风险，发现该地区因VOCs暴露而导致的平均致癌风险高于安全阈值. 2018年Zheng等[10]研究了武汉某化工园区的VOCs组分特征，并结合PMF源解析模型和健康风险评价量化了周边居民的健康风险，发现4种VOCs来源的非致癌风险均高于安全阈值. 2022年Lu等[11]研究了亚运会期间北京市某典型工业园区的污染特征和臭氧生成潜势，发现园区中TVOCs的日平均浓度约为城市站点的2倍，其中芳香烃对臭氧生成的贡献最大. 2023年Liu等[12]对比分析了北京市一个典型化工园区和市区VOCs的污染特征及环境影响，确定了溶剂使用和汽车尾气分别为工业园区和城区VOCs的主要来源. 但国内外对工业园区VOCs排放的研究多集中于化工园区，对其他类型工业园区的研究还鲜见报道. 近年来，随着国家产业结构的不断调整和工业企业入驻园区刚性要求的不断强化，以生物制药、半导体和电子等高新技术为支柱产业的高新技术产业园区不断增加，工艺分析显示很多高新技术产业存在溶剂使用量工序，是VOCs排放源. 为探究高新技术产业园区VOCs污染特征及环境影响，选取北京市典型高新技术产业园区作为研究对象，对其VOCs的体积分数、组分特征和健康风险进行分析，通过了解高新技术产业园区VOCs污染特征及环境影响，以期为科学防治高新产业园区大气VOCs污染和保障人体健康提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究选取北京某高新技术产业园区作为研究对象，该园区以电子工业(半导体、显示器制造等)、包装印刷、制药、汽车及零部件为主导产业. 为表征园区环境VOCs污染特征，在园区布设连续监测站点H，利用在线气相色谱FID/MS法进行24 h连续采样，连续监测时间为2023年1月1日至2月23日，监测数据用以分析居民区周边环境VOCs污染特征和健康风险. 为评估高新技术产业对园区环境VOCs的影响，在园区布设5个离线采样点(C1、C2、E1、E2和R)：其中C1和C2点位设立在园区的核心区，毗邻园区建立初期就存在的企业集群，周边企业以包装印刷和装备制造企业为主，E1和E2点位设立在园区的扩展区，毗邻近几年新入区企业形成的企业集群，周边企业主要以电子信息和半导体为主，R点位设立在居民区，距离交通主干道500 m内. 利用summa罐对5个采样点进行采样，采样时间为2022年9月15~18日，共采集20组样品；第二次污染源普查和企业用电监测结果显示，园区绝大多数生产型企业夜间24 h生产，为量化高新企业VOCs排放对产业园区的影响，规避白天园区内机动车和夜间8 t(含)以上货运机动车(06:00~23:00时禁止通行)的影响，本研究选取20:00~22:00作为采样时段. 6个采样点位设置如图1所示.

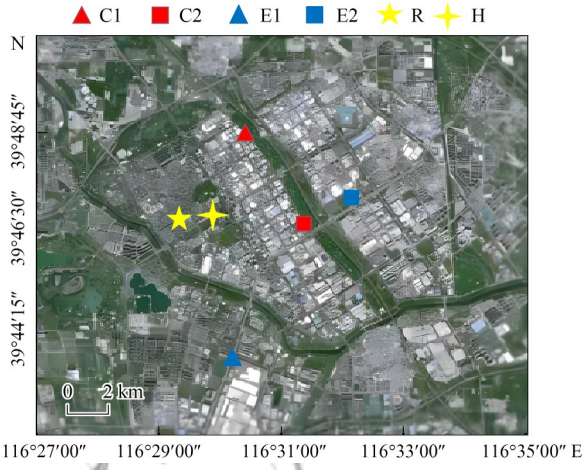


图1 采样点位置分布示意

Fig. 1 Schematic of sampling site location distribution

1.2 样品分析方法及质量控制

1.2.1 连续在线监测方法及质控

采用BCT-7800A PLUS挥发性有机物在线监测系统，仪器利用在线气相色谱FID/MS法，检测115种挥发性有机物. 通过多重毛细柱捕集阱常温捕集挥发性有机物，实现浓缩样品的目的. 多重毛细柱捕集阱采用疏水填料，实现捕集VOCs的同时，去除水分，CO_2和惰性气体. 同时结合色谱分离技术(GC)、氢火焰离子化检测器技术(FID)和质谱检测技术(MSD)对捕集到的VOCs进行在线分析. C2组分通过FID检测器检测，C3及以上组分由MS检测，得到各个目标物组分准确的定性定量结果. 仪器配置双罐采样系统，实现1 h采样时间全覆盖.

采样前将99.999%的高纯氮气冲入采样罐内，再用泵将采样罐内的氮气和挥发性有机物一起抽出，反复进行上述充气和抽气的过程，最后将罐内的挥发性有机物全部抽出采样罐. 每清洗20个罐子抽1个进行清洗空白检测. 每周对仪器进行一次系统

空白测试，系统空白的测定通过零进样作为样品进行分析，以检查仪器系统内部是否有吸附或污染状况. 样品检测限为 $0.024 \times 10^{-9} \sim 0.094 \times 10^{-9}$. 对站房温度、湿度进行监控，保证站房环境要求在符合测试要求. 每日对仪器进样标准样品（2×10^{-9}），其测定结果与初始浓度值相对偏差 ≤ 30%，以确保仪器的精密性和数据的准确性.

1.2.2　离线采样分析方法及质控

样品经气相色谱-质谱 / 氢离子火焰检测器联用仪（GC-MS / FID，Agilent，7890A-5975C）检测，共分析 115 种挥发性有机物（与连续监测分析物种相同），包括烷烃，烯烃（包括乙炔）、芳香烃、含氧有机物（OVOCs）和卤代烃 5 类. 5 种低碳组分（乙炔、乙烯、乙烷、丙烯和丙烷）经色谱柱 1（30 m × 320 μm × 20 μm，Agilent，HPPlotQ）分离后进入 FID 检测，外标法定量；其它 110 种组分经色谱柱 2（60 m × 250 μm × 1 μm，Agilent，DB-1）分离后进入 MS 检测，内标法定量. DNPH 吸附管（USA.Waters）利用 2 mL 乙睛洗脱，高效液相色谱（HPLC，Shimadzu. LC-20AD）分析，经 C18 反向色谱柱（250 mm × 4.6 mm，Agilent，RP-C18）分离，梯度洗脱，保留时间定性，外标法定量.

采样前将使用的 summa 罐用 99.999% 的高纯氮冲洗 3 次，罐内抽真空至 7Pa 并保证密封. 在每天分析环境样品之前，先分析浓度为 5×10^{-9} 的标准样品，用已有的标准曲线进行定量. 同一批次随机选择 summa 充入高纯氨气作为清洗空白、实验室空白和运输空白，每个采样点设置 1 个运输空白，与采集样品在同样条件下运输储存，各个空白中目标化合物均未检出或者低于方法检测限，样品检测限为 $0.002 \times 10^{-9} \sim 0.014 \times 10^{-9}$. 标准曲线共设置 5 个梯度（体积分数分别为 1×10^{-9}、2×10^{-9}、5×10^{-9}、10×10^{-9} 和 15×10^{-9}），每日重复进样标曲最低点和中间点对应浓度的标气，分析过程中定量离子峰面积偏差在 ± 30% 之间，目标化合物的相对偏差偏差 ≤ 30%，以确保仪器的精密性和数据的准确性.

1.3　OFP 计算方法

本研究采用最大增量反应性（maximum incremental reactivity，MIR）来估算不同 VOCs 物种的臭氧生成潜势（ozone formation potential，OFP）. 具体的计算公式如下：

$$OFP_i = MIR_i \times [VOC]_i$$

式中，OFP_i 为物种 i 的臭氧生成潜势，μg·m^{-3}；MIR_i 为物种 i 在臭氧最大增量反应中的臭氧生成系数，g·g^{-1}，本文采用 Carter[13] 的研究获得的 MIR 系数；$[VOC]_i$ 为实际观测中物种 i 的排放浓度，μg·m^{-3}.

1.4　健康风险评价

健康风险评估是定量地描述人体暴露剂量和不良反应之间的方法[14]. 本研究使用美国环保署（U.S. EPA）在 2009 年更新的针对特定场所吸入途径污染物的健康风险评价方法（EPA-540-R-070-002），根据污染物的致癌性将健康风险分为非致癌风险和致癌风险[15,16]. 利用 HI（危害指数）和 Risk（终生癌症风险）评估毒性 VOCs 非致癌风险和致癌风险的具体公式如下.

慢性和亚慢性暴露时的暴露浓度（EC）：

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

非致癌健康风险危害商值（HQ）：

$$HQ = EC / (Rfc \times 1000)$$

危害指数（HI）：

$$HI = \sum_{i=1}^{n} HQ_i$$

终生癌症风险（Risk）：

$$Risk = EC \times IUR$$

式中，CA 为污染物在空气中的浓度，μg·m^{-3}；ET 为暴露时间，取 8 h·d^{-1}；EF 为暴露频率，取 250 d·a^{-1}；ED 为暴露持续时间，取 30 a；AT 为平均生存时间，其中，AT（致癌）取 365 × 70 × 24 h，AT（非致癌）取 365 × 30 × 24 h[17]；Rfc 为参考浓度，μg·m^{-3}；IUR 为吸入单位致癌因子，m^3·μg^{-1}. Rfc 和 IUR 的值从 U.S.EPA 综合风险信息系统（网址为 https:/www.epa.gov / iris）获得.

2　结果与讨论

2.1　园区 VOCs 体积分数与组分特征

园区监测站点 VOCs 各组分体积分数均值与占比见表 1，高新技术产业园区内 φ（TVOCs）的均值为 $(72.71 \pm 52.51) \times 10^{-9}$. 各组分平均占比从大到小依次为：烷烃（38.3%）> OVOCs（21.8%）> 卤代烃（19.1%）> 芳香烃（10.4%）> 烯烃（7.2%）> 炔烃（3.2%）.

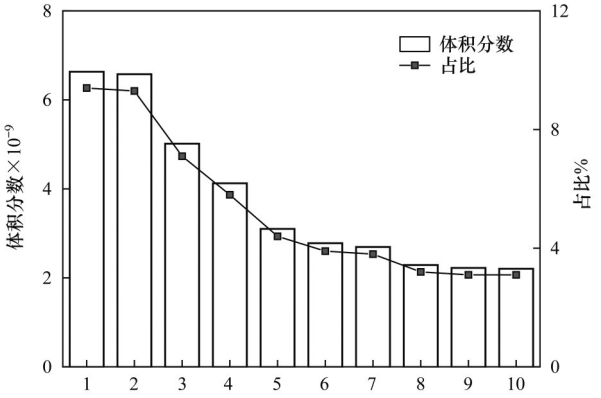
园区体积分数前 10 物种如图 2 所示，监测站点主要贡献物种按体积分数从大到小依次为：乙烷、

表 1　园区监测站点 VOCs 各组分体积分数均值与占比

Table 1　Mean and proportion of VOCs volume fractions of each component in the monitoring station of the park

组分	均值 × 10^{-9}	占比 / %
烷烃	27.00	38.3
OVOCs	15.33	21.8
烯烃	7.33	7.2
炔烃	2.28	3.2
卤代烃	13.44	19.1
芳香烃	7.33	10.4

丙烷、丙酮、二氯甲烷、正丁烷、乙醛、乙烯、乙炔、异戊烷和甲苯，前10名物种对TVOC的平均贡献率总和超过50%（53.4%）. 其中乙烷、丙烷为燃料燃烧的标志物种[18~20]. 这可能是由于连续监测时期处于冬季，供暖需求导致监测数据的燃料燃烧源特征较明显.



1. 乙烷，2. 丙烷，3. 丙酮，4. 二氯甲烷，5. 正丁烷，6. 乙醛，7. 乙烯，8. 乙炔，9. 异戊烷，10. 甲苯

图2 监测站点体积分数前10物种

Fig. 2 Top ten species in site volume fraction

2.2 园区VOCs特征物种比值

VOCs排放来源较多且成分复杂，通过某些特征物种的体积分数比值可以获得相应的VOCs来源信息[21~24]. 监测站点特征物种的比值均值、范围和线性相关系数见表2.

表2 监测站点特征物种比值

Table 2 Site characteristic species ratio

项目	均值	范围	R^2
苯/甲苯	1.05 ± 0.48	0.05~3.18	0.39
间/对-二甲苯/乙苯	2.77 ± 0.44	1.54~4.68	0.98

苯/甲苯的值可被用来区分移动源、溶剂使用源和其他来源的相对贡献大小[25~31]. 已有研究表明，当比值大于0.5时，受化石燃料燃烧和石油化工等工业源影响；当比值等于0.5时，主要受移动源影响；当比值小于0.5时，除移动源外还受溶剂、涂料的挥发影响. 连续监测期间H点位的苯/甲苯均值为1.05，范围为0.05~3.18，结合体积分数主要贡献物种进行分析，连续监测期间园区环境VOCs受化石燃料燃烧影响较大.

间/对-二甲苯/乙苯的值可被用来评估大气老化程度[32,33]. 当间/对-二甲苯/乙苯值小于3，认为此区域受老化气团影响较大[34]. 连续监测期间的间/对-二甲苯/乙苯均值为2.77，表明连续监测期间区域环境VOCs受老化气团一定程度的影响.

2.3 园区VOCs的臭氧生成潜势

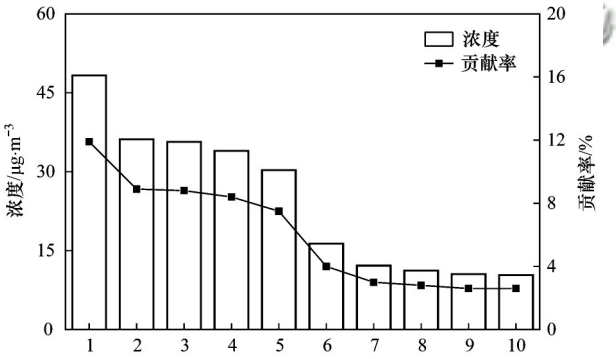
高新技术产业园区监测站点OFP均值及占比如表3所示. OFP均值为404.13 μg·m^{-3}，所有组分中，芳香烃的OFP贡献率（36.9%）占比最高，其次为OVOCs（24.5%）、烯烃（21.3%）、烷烃（15.5%）和卤代烃（1.2%），炔烃贡献率（0.6%）最低.

表3 监测站点OFP均值及占比

Table 3 Mean and proportion of site OFP

组分	均值/μg·m^{-3}	占比/%
烷烃	62.83	15.5
OVOCs	98.97	24.5
烯烃	85.91	21.3
炔烃	2.52	0.6
卤代烃	4.89	1.2
芳香烃	149.01	36.9

监测站点OFP贡献排名前10的物种如图3所示，前10名物种累积贡献率超过60%，主要贡献物种按OFP从高到低依次为：间/对-二甲苯、甲苯、乙醛、丙烯、乙烯、邻-二甲苯、1,2,4-三甲苯、己醛、正丁烯和异戊烷，前10名物种对OFP的平均贡献率总和超过60%（60.5%）.



1. 间/对-二甲苯，2. 甲苯，3. 乙醛，4. 丙烯，5. 乙烯，6. 邻-二甲苯，7. 1,2,4-三甲苯，8. 己醛，9. 正丁烯，10. 异戊烷

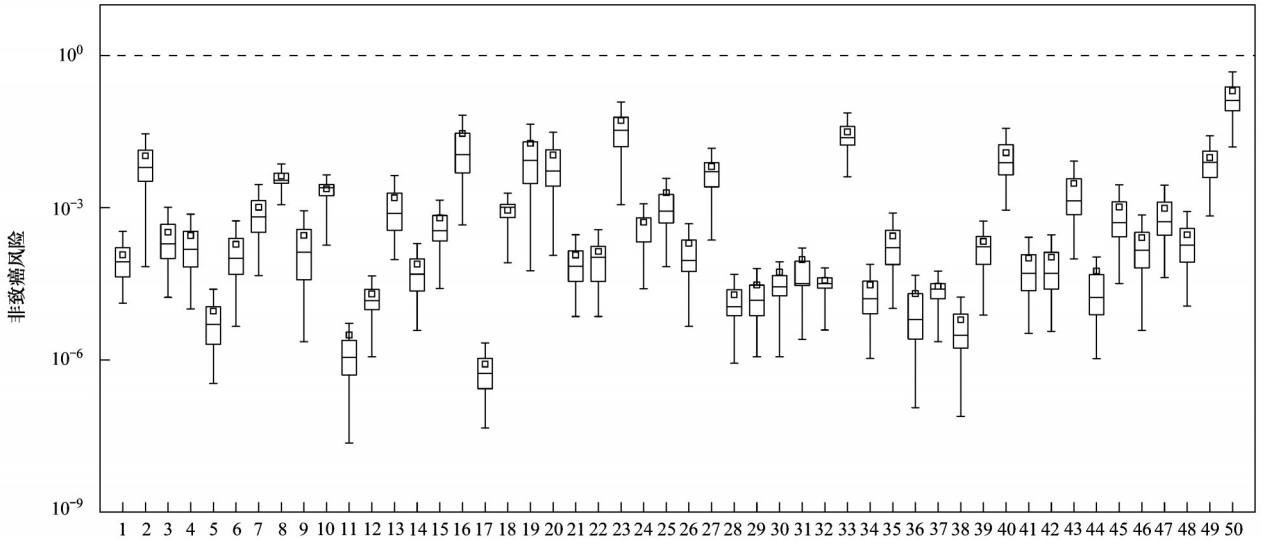
图3 监测站点OFP贡献前10的物种

Fig. 3 Top ten species contributed by site OFP

2.4 VOCs健康风险评价

2.4.1 VOCs的非致癌风险评价

危害指数（HI）用来表征滞留在环境中的污染物对周边人体健康产生的非致癌慢性风险[35~38]，本研究涉及49种毒性VOCs，包括5种烷烃、两种烯烃、10种芳香烃，8种OVOCs和20种卤代烃. 连续监测期间毒性VOCs的危害指数见图4，HI（0.20）范围在0.02~0.82之间，低于上海某石化园区周边区域（0.24）[39]、宝鸡市工业区（0.96）[40]，且均低于EPA建议的可接受水平（HI < 10^0），表明周边居民吸入这些毒性VOCs造成的非致癌风险可忽略不计.



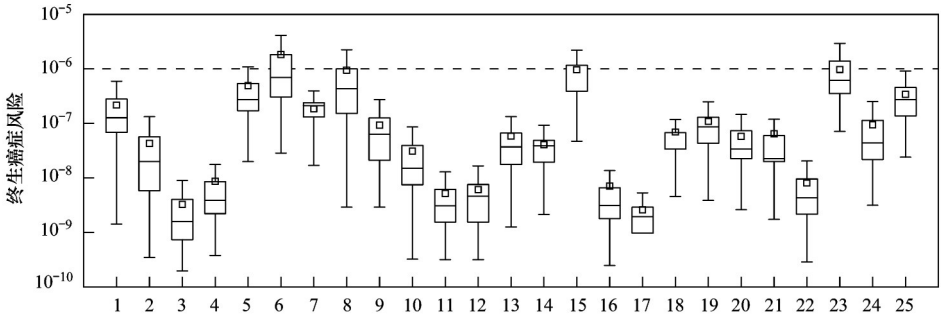
虚线为 EPA 建议的可接受水平的最大值；1. 丙烯，2. 丁二烯，3. 正戊烷，4. 己烷，5. 环己烷，6. 正庚烷，7. 正壬烷，8. 氯甲烷，9. 氯乙烯，10. 溴甲烷，11. 氯乙烷，12. 1,1-二氯乙烯，13. 二氯甲烷，14. 反-1,2-二氯乙烯，15. 三氯甲烷，16. 1,2-二氯乙烷，17. 1,1,1-三氯乙烷，18. 四氯化碳，19. 1,2-二氯丙烷，20. 三氯乙烯，21. 反-1,3-二氯丙烯，22. 顺-1,3-二氯丙烯，23. 1,1,2-三氯乙烷，24. 1,2-,2,4-三氯苯，25. 四氯乙烯，26. 氯苯，27. 氯代甲苯，28. 对二氯苯，29. 邻二氯苯，30. 1,2,4-三氯苯，31. 六氯-1,3-丁二烯，32 丙酮，33. 丙醛，34. 甲基叔丁基醚，35. 乙酸乙烯酯，36. 四氢呋喃，37. 甲基丙烯酸甲酯，38. 4-甲基-2-戊酮，39. 2-己酮，40. 苯，41. 甲苯，42. 乙苯，43. 间 / 对-二甲苯，44. 苯乙烯，45. 邻-二甲苯，46. 1,3,5-三甲苯，47. 1,2,4-三甲苯，48. 1,2,3-三甲苯，49. 萘，50. HI

图 4　监测站点毒性 VOCs 危害指数

Fig. 4　Site toxic VOCs hazard index

2.4.2　VOCs 的致癌风险评价

本研究涉及 25 个毒性 VOCs，包括 1 种烯烃、3 种芳香烃、1 种 OVOCs 和 20 种卤代烃. 图 5 为连续监测期间毒性 VOCs 的终生癌症风险箱式图. 从中可知，主要致癌物种为：三氯甲烷、1,2-二氯乙烷、1,2-二溴乙烷、1,2-二氯丙烷和苯. 其中 1,2-二氯乙烷平均终生癌症风险为 1.81×10^{-6}，超过了 EPA 规定的安全阈值（10^{-6}），表示该物种存在致癌风险. 而三氯甲烷、1,2-二氯丙烷和苯这 3 个物种虽然均值低于安全阈值，但最高值超过了安全阈值，说明这 3 个物种在特定高排放时段同样存在致癌风险，对相关污染的排放也需要加强管控. 三氯甲烷在许多针对城市环境 VOCs 的健康风险评价中没有表现出致癌风险，推测本研究三氯甲烷是受园区内企业排放的影响所以表现出致癌风险，建议针对三氯甲烷的排放源进行调查和管控.



虚线为 EPA 规定的安全阈值；1. 丁二烯，2. 氯乙烯，3. 二氯甲烷，4. 1,1-二氯乙烷，5. 三氯甲烷，6. 1,2-二氯乙烷，7. 四氯化碳，8. 1,2-二氯丙烷，9. 一溴二氯甲烷，10. 三氯乙烯，11. 反-1,3-二氯丙烯，12. 顺-1,3-二氯丙烯，13. 1,1,2-三氯乙烷，14. 二溴一氯甲烷，15. 1,2-二溴乙烷，16. 四氯乙烯，17. 三溴甲烷，18. 四氯乙烷，19. 氯代甲苯，20. 对二氯苯，21. 六氯-1,3-丁二烯，22. 甲基叔丁基醚，23. 苯，24. 乙苯，25. 萘

图 5　监测站点毒性 VOCs 终生癌症风险

Fig. 5　Lifetime cancer risk of site toxic VOCs

2.5　高新技术产业对环境 VOCs 影响分析

为分析园区高新技术产业对环境 VOCs 影响，需要尽可能规避其他 VOCs 污染源的排放，故本研究在非采暖季选择 20:00 ~ 22:00 作为采样监测时间，期间企业处于生产时段，又可以最大程度规避白天园区机动车排放影响和夜间 8 t 及以上货运机动车（06:00 ~ 23:00 时禁止通行）的影响，对园区不同点位（C1、C2、E1、E2 和 R 点位）环境 VOCs 进行了

采样监测，分析了不同点位VOCs污染水平和臭氧生成潜势.

2.5.1 园区不同点位VOCs体积分数与组分特征

采样期间园区不同点位φ(TVOCs)的均值为(37.62 ± 11.01) × 10^{-9}. 各组分平均占比由高到低分别为：OVOCs(39.5%) > 烷烃(26.8%) > 卤代烃(14.9%) > 芳香烃(10.4%) > 烯烃(5.8%) > 炔烃(2.6%).

以园区不同采样点TVOCs体积分数来表征园区内采样点位周围的空气污染状况，E1点位的φ(TVOCs)最高，为46.62 × 10^{-9}；其次是R点位，φ(TVOCs)为43.32 × 10^{-9}；E2点位，φ(TVOCs)为35.07 × 10^{-9}；C2点位，φ(TVOCs)为32.87 × 10^{-9}；C1点位，φ(TVOCs)为30.23 × 10^{-9}，对5个园区点位和北京市区环境监测点位[41]VOCs组成及体积分数进行对比，结果见图6，4个点位VOCs体积分数大于市区环境监测点位(30.34 × 10^{-9})，显示园区企业排放的VOCs对环境存在一定的影响.

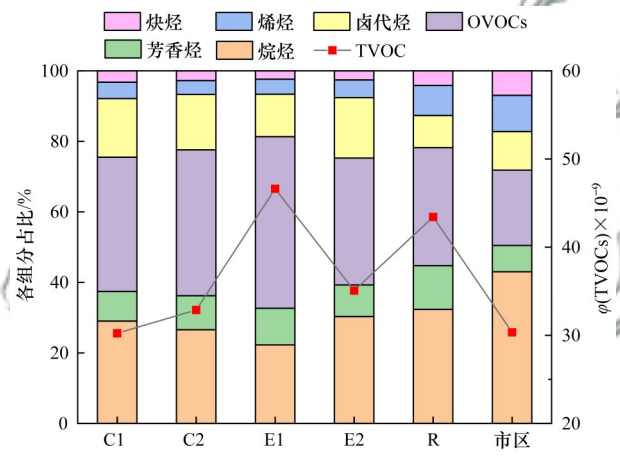


图6 各采样点VOCs组成及体积分数

Fig. 6 VOCs composition and volume fraction at each sampling site

从组分构成来看，不同采样点存在一定的差异，但OVOCs占比均明显高于北京市区环境采样点OVOCs(21.4%)的占比. 园区和北京市区环境6个点位主要贡献物种见表4，C1、C2、E2和R点位贡献最大的物种均为丙酮，E1点位贡献最大的物种为异丙醇，均为园区主导产业所使用的主要有机溶剂[42]. 在园区内部，与核心区和扩展区采样点相比，居民区R点位烷烃、芳香烃和烯烃占比较高，主要烷烃物种为乙烷和异戊烷，主要芳香烃物种为甲苯，主要烯烃物种为乙烯，这些主要贡献物种均为移动源的标志物种[43~45]. 分析是由于R点位设置在居民区附近，而居民区距离交通干道较近，故附近车流量较大，移动源排放影响较为显著.

2.5.2 不同点位VOCs特征物种比值

苯/甲苯在E1和R点位的相关系数较大，可用来识别E1和R点位VOCs的主要来源. 间/对-二甲苯/乙苯在5个点位的相关系数均较大，可用来识别各点位VOCs的主要来源.

表4 各点位主要贡献物种

Table 4 Main contributing species at each site

点位	贡献物种前10位
C1	丙酮、乙醛、乙烷、二氯甲烷、丙烷、乙醇、正丁烷、乙炔和乙烯
C2	丙酮、异丙醇、二氯甲烷、乙醛、乙烷、丙烷、正丁烷、乙醇和氯甲烷
E1	异丙醇、丙酮、乙醛、二氯甲烷、乙烷、丙烷、乙醇、正丁烷和乙烯
E2	丙酮、乙烷、乙醛、二氯甲烷、丙烷、乙醇、正丁烷、乙烯和异戊烷
R	丙酮、乙醛、乙烷、乙醇、异戊烷、丙烷、乙炔、乙烯和正丁烷
市区	乙烷、丙酮、丙烷、乙醛、乙烯、乙炔、正丁烷、二氯甲烷和正十二烷

表5 园区不同点位特征物种比值

Table 5 Ratio of characteristic species at different sites in the park

点位	苯/甲苯	间/对-二甲苯/乙苯
C1	0.46 ± 0.17(范围为0.29~0.67), R^2=0.16	2.62 ± 0.21(范围为2.44~2.89), R^2=0.81
C2	0.64 ± 0.26(范围为0.38~0.96), R^2=0.16	2.76 ± 0.27(范围为2.49~3.20), R^2=0.92
E1	0.55 ± 0.05(范围为0.49~0.59), R^2=0.96	2.87 ± 0.18(范围为2.67~3.13), R^2=0.99
E2	0.48 ± 0.29(范围为0.35~0.67), R^2=0.23	2.66 ± 0.16(范围为2.40~2.83), R^2=0.99
R	0.49 ± 0.04(范围为0.43~0.52), R^2=0.99	2.82 ± 0.10(范围为2.71~2.98), R^2=0.99

离线采样期间该区域点位苯/甲苯范围为0.29~0.96，多数点位低于0.5的频次更多. 显示园区环境VOCs受溶剂使用源影响的特征比较明显. 该区域点位的间/对-二甲苯/乙苯均值范围为2.62~2.87，均小于3，表明区域受老化气团影响.

2.5.3 园区内不同点位VOCs的臭氧生成潜势

园区OFP均值为246.38 μg·m^{-3}. 不同VOCs组分的OFP平均贡献情况见图7，所有组分中芳香烃的OFP贡献率(36.7%)最高，其次为OVOCs(36.6%)、烯烃(14.9%)、烷烃(10.5%)和卤代烃(0.8%)，炔烃贡献率(0.5%)最低.

5个点位与北京市区环境监测点位[29]OFP比较见图8，OFP均值由高到低分别为R点位(297.14 μg·m^{-3})，E1点位(254.11 μg·m^{-3})，E2点位(177.57

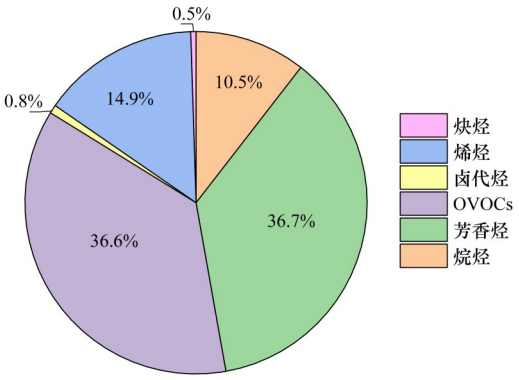


图 7　不同 VOCs 组分的 OFP 贡献率情况

Fig. 7　OFP contribution rate of different VOCs components

μg·m^{-3})，C2 点位(175.60 μg·m^{-3})，C1 点位(164.14 μg·m^{-3})，市区点位(163.32 μg·m^{-3})．5 个点位 OFP 均高于市区点位，其中 R 点位和 E 点位 OFP 均值超过市区点位的 1.8 倍和 1.5 倍，显示园区虽然近年来不断推进涉 VOCs 企业的治理，但排放的 VOCs 对园区及周边环境的影响仍然较为显著．

其中 R 点位 OFP 最高，结合上方组分特征分析中 R 点位的主要贡献物种(乙烷、异戊烷、乙烯和甲苯)为移动源标志物种，特征物种比值分析中显示 R 点位受移动源影响较大这两点因素分析，可能是由于 R 点设置在居民区附近，采样期间居民区附近车流量较大，机动车排放的芳香烃和烯烃叠加园区溶剂源的贡献，从而导致 R 点位的 OFP 在 5 个点位中最高．

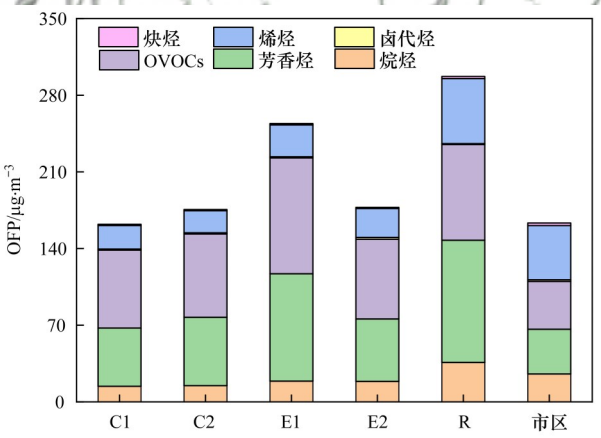


图 8　各采样点 OFP

Fig. 8　OFP at each sampling site

3　结论

(1)连续监测期间园区环境 φ(TVOCs)为(72.71 ± 52.51) × 10^{-9}，主要贡献组分为烷烃，主要贡献物种为乙烷和丙烷，结合特征物种比值分析园区燃料燃烧源特征比较明显．OFP 为 404.13 μg·m^{-3}，主要贡献物种为间 / 对-二甲苯和甲苯．健康风险评价表明，园区内居民区的非致癌风险在美国环境保护局推荐的可接受水平内；1,2-二氯乙烷平均终生癌症风险超过安全阈值，表示该物种存在致癌风险，三氯甲烷、1,2-二溴乙烷、1,2-二氯丙烷和苯在特定高排放时段同样存在致癌风险．

(2)离线采样期间所选取采样点的环境 φ(TVOCs)为(37.62 ± 11.01) × 10^{-9}，OFP 为 246.38 μg·m^{-3}，高于其他研究中的北京市区环境监测结果，园区 OVOCs 占比明显高于北京市环境．园区核心区和扩展区贡献最大的物种为丙酮或异丙醇，与园区主导高新技术产业溶剂使用情况有较强的相关性．

(3)所选取园区仍处于建设中，随着高新技术企业不断集聚，应该持续关注园区溶剂使用量增加所带来的环境影响和健康风险．

参考文献：

[1] 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.

[2] 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.

[3] 陈耿，李瑞瑜，陈春贻，等．典型大气细颗粒物与臭氧复合污染过程中挥发性有机物的贡献及来源[J]．环境污染与防治，2022，**44**(9)：1222-1227.
Chen G, Li R Y, Chen C S, *et al*. VOCs contribution and sources of typical atmospheric $PM_{2.5}$ and O_3 composite pollution process[J]. Environmental Pollution & Control, 2022, **44**(9): 1222-1227.

[4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会．“十四五”规划《纲要》章节指标之 10|氮氧化物和挥发性有机物排放总量下降[EB / OL]．https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjfzgh/202112/t20211225_1309677.html，2021-12-25.

[5] Smith M T, Zhang L. Biomarkers of leukemia risk: benzene as a model[J]. Environmental Health Perspectives, 1998, **106**(S4): 937-946.

[6] Sponring A, Filipiak W, Ager C, *et al*. Analysis of volatile organic compounds (VOCs) in the headspace of NCI-H1666 lung cancer cells[J]. Cancer Biomarkers, 2010, **7**(3): 153-161.

[7] 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.

[8] Du Z J, Mo J H, Zhang Y P. Risk assessment of population inhalation exposure to volatile organic compounds and carbonyls in urban China[J]. Environment International, 2014, **73**: 33-45.

[9] Ramírez N, Cuadras A, Rovira E, *et al*. Chronic risk assessment of exposure to volatile organic compounds in the atmosphere near the largest Mediterranean industrial site [J]. Environment International, 2012, **39**(1): 200-209.

[10] Zheng H, Kong S F, Yan Y Y, *et al*. Compositions, sources and health risks of ambient volatile organic compounds (VOCs) at a petrochemical industrial park along the Yangtze River[J]. Science of the Total Environment, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.

2019.135505.

[11] Lu Y, Pang X B, Lyu Y, *et al*. Characteristics and sources analysis of ambient volatile organic compounds in a typical industrial park: implications for ozone formation in 2022 Asian Games[J]. Science of the Total Environment, 2022, **848**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157746.

[12] Liu C T, Xin Y Y, Zhang C L, *et al*. Ambient volatile organic compounds in urban and industrial regions in Beijing: characteristics, source apportionment, secondary transformation and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2023, **855**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158873.

[13] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. Air & Waste, 1994, **44**(7): 881-899.

[14] 刘奇琛, 黄婧, 郭新彪. 北京市大气挥发性有机物(VOCs)的污染特征及来源[J]. 生态毒理学报, 2017, **12**(3): 49-61.
Liu Q C, Huang J, Guo X B. Pollution characteristics and sources of ambient volatile organic compounds (VOCs) in Beijing[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, **12**(3): 49-61.

[15] Hieu N T, Lee B K. Characteristics of particulate matter and metals in the ambient air from a residential area in the largest industrial city in Korea[J]. Atmospheric Research, 2010, **98**(2-4): 526-537.

[16] Li H M, Wang Q G, Shao M, *et al*. Fractionation of airborne particulate-bound elements in haze-fog episode and associated health risks in a megacity of southeast China[J]. Environmental Pollution, 2016, **208**: 655-662.

[17] US EPA. Risk assessment guidance for superfund (RAGS), volume I human health evaluation manual (Part F)[R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, U. S. Environmental Protection Agency, 2009.

[18] 李俊禧, 陈军辉, 韩丽, 等. 成都市城区环境大气中典型特征VOCs示踪物种分析[J]. 四川环境, 2021, **40**(1): 59-67.
Li J X, Chen J H, Han L, *et al*. Analysis on tracer species of typical characteristic VOCs in urban environment atmosphere of Chengdu[J]. Sichuan Environment, 2021, **40**(1): 59-67.

[19] 王恰. 西安秋冬季$PM_{2.5}$污染特征及化石燃料燃烧等源贡献演变[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院地球环境研究所), 2022.
Wang Y. Characteristics of $PM_{2.5}$ pollution and evolution of fossil fuel combustion and other source in autumn and winter at Xi'an[D]. Xi'an: Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, 2022.

[20] 刘镇, 朱玉凡, 郭文凯, 等. 兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2069-2077.
Liu Z, Zhu Y F, Guo W K, *et al*. Formation potential of ozone and secondary organic aerosol of VOCs from fossil fuel combustion in Lanzhou City[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2069-2077.

[21] Chan L Y, Chu K W, Zou S C, *et al*. Characteristics of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in industrial, industrial-urban, and industrial-suburban atmospheres of the Pearl River Delta (PRD) region of south China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, **111**(D11), doi: 10.1029/2005JD006481.

[22] 张月, 夏士勇, 魏成波, 等. 深圳工业区夏秋季大气挥发性有机物来源研究[J]. 中国环境科学, 2023, **43**(8): 3857-3866.
Zhang Y, Xia S Y, Wei C B, *et al*. Source apportionment of atmospheric volatile organic compounds in summer and autumn in Shenzhen industrial area[J]. China Environmental Science, 2023, **43**(8): 3857-3866.

[23] 刘倬诚. 盆地型城市大气挥发性有机物来源分析及环境影响研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
Liu Z C. Source analysis and environmental impact of ambient volatile organic compounds in basin city[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2021.

[24] 吴亚君. 兰州市大气VOCs污染特征及来源解析[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2019.
Wu Y J. Pollution characteristics and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in atmospheric environment in Lanzhou [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2019.

[25] Barletta B, Meinardi S, Simpson I J, *et al*. Ambient mixing ratios of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in two major urban centers of the Pearl River Delta (PRD) region: Guangzhou and Dongguan[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(18): 4393-4408.

[26] Bolden A L, Kwiatkowski C F, Colborn T. New look at BTEX: are ambient levels a problem?[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(9): 5261-5276.

[27] Xiong Y, Bari A, Xing Z Y, *et al*. Ambient volatile organic compounds (VOCs) in two coastal cities in western Canada: spatiotemporal variation, source apportionment, and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2020, **706**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135970.

[28] An J L, Wang Y S, Wu F K, *et al*. Characterizations of volatile organic compounds during high ozone episodes in Beijing, China[J]. Environmental monitoring and assessment, 2012, **184**(4): 1879-1889.

[29] 王红果, 孙永旺, 王芳, 等. 济源市疫情防控期间VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(3): 761-769.
Wang H G, Sun Y W, Wang F, *et al*. Characteristics, ozone formation potential and source apportionment of VOCs during epidemic prevention in Jiyuan[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(3): 761-769.

[30] 张博韬, 景宽, 王琴, 等. 北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析[J]. 环境科学, 2024, **45**(1): 81-92.
Zhang B T, Jing K, Wang Q, *et al*. Characteristics and source apportionment of VOCs initial mixing ratio in Beijing in summer[J]. Environmental Science, 2024, **45**(1): 81-92.

[31] 阮兆元, 燕鸥, 王体健, 等. 南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2023, **44**(11): 5933-5945.
Ruan Z Y, Yan O, Wang T J, *et al*. Pollution characteristics and sources apportionment of volatile organic compounds in Lishui area of Nanjing[J]. Environmental Science, 2023, **44**(11): 5933-5945.

[32] Yurdakul S, Civan M, Kuntasal Ö, *et al*. Temporal variations of VOC concentrations in Bursa atmosphere [J]. Atmospheric Pollution Research, 2018, **9**(2): 189-206.

[33] 钟雪芬, 陈峰, 丁晖, 等. 福州清洁地区夏季和秋季VOCs浓度特征及化学反应活性[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(4): 1393-1401.
Zhong X F, Chen F, Ding H, *et al*. Concentration characteristics and chemical reactivity of ambient volatile organic compounds in summer and autumn in Fuzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(4): 1393-1401.

[34] 李艳卉. 沈阳某工业区大气VOCs的污染分析及健康风险评价[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2021.

Li Y H. Pollution analysis and health risk assessment of atmospheric VOCs in an industrial area in Shenyang [D]. Shenyang: Shenyang University, 2021.

[35] 盛涛, 陈筱佳, 高松, 等. 上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 4901-4908.
Sheng T, Chen X J, Gao S, *et al*. Pollution characteristics and health risk assessment of VOCs in areas surrounding a petrochemical park in Shanghai[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 4901-4908.

[36] 张轶舜, 王佳, 韩士杰, 等. 郑州市碳素行业无组织 VOCs 排放特征分析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4847-4855.
Zhang Y S, Wang J, Han S J, *et al*. Emission characteristics analysis and health risk assessment of unorganized VOCs in the carbon industry, Zhengzhou[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 4847-4855.

[37] 张子金, 林煜棋, 张煜娴, 等. 南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5673-5686.
Zhang Z J, Lin Y Q, Zhang Y X, *et al*. Source analysis and health risk assessment of toxic volatile organic compounds in Nanjing in Summer and Winter[J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 5673-5686.

[38] 于东宁. 阿拉尔市环境空气 VOCs 污染分布特征成因分析及健康风险评价[D]. 石河子: 石河子大学, 2022.
Yu D N. Distribution characteristics, cause analysis and health risk assessment of ambient air VOCs Pollution in Alar City [D]. Shihezi: Shihezi University, 2022.

[39] 庞晓蝶, 陈来国, 高博, 等. 宝鸡市夏季不同功能区挥发性有机物污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(10): 5418-5430.
Pang X D, Chen L G, Gao B, *et al*. Characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds in different functional zones in Baoji in summer[J]. Environmental Science, 2023, **44**(10): 5418-5430.

[40] Liu Y F, Kong L W, Liu X G, *et al*. Characteristics, secondary transformation, and health risk assessment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in urban Beijing, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2021, **12**(3): 33-46.

[41] Li C L, Liu Y F, Cheng B F, *et al*. A comprehensive investigation on volatile organic compounds (VOCs) in 2018 in Beijing, China: Characteristics, sources and behaviours in response to O_3 formation [J]. Science of the Total Environment, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150247.

[42] 崔阳阳, 周震, 闫静, 等. 北京市电子工业 VOCs 排放特征及行业排放强度对比[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(6): 1287-1294.
Cui Y Y, Zhou Z, Yan J, *et al*. VOCs emission characteristics of electronics industry in Beijing and emission intensity comparison with industries[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(6): 1287-1294.

[43] 付琳琳. 大气挥发性有机物(VOCs)人为源排放特征研究[D]. 北京: 北京大学, 2005.
Fu L L. Study on anthropogenic emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) in the atmosphere [D]. Beijing: Peking University, 2005.

[44] McCarthy M C, Aklilu Y A, Brown S G, *et al*. Source apportionment of volatile organic compounds measured in Edmonton, Alberta [J]. Atmospheric Environment, 2013, **81**: 504-516.

[45] 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.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 45 No. 4

Apr. 15, 2024

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China ····· YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, *et al.* (1869)

Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency ····· ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)

Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition ····· ZHANG Jiang-yan (1888)

Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing ····· LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, *et al.* (1898)

Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University ····· CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)

Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing ····· YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, *et al.* (1917)

Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China ····· WU Xue-ping (1926)

Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Chinese Cities ····· LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)

Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of $PM_{2.5}$ and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021 ····· CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)

Analysis of the Characteristics and Causes of $PM_{2.5}$ and O_3 Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period ····· YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, *et al.* (1963)

$PM_{2.5}$ Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter ····· FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, *et al.* (1975)

Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei ····· LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, *et al.* (1983)

Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric $PM_{2.5}$ Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region ····· BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, *et al.* (1994)

Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in $PM_{2.5}$ During Winter in Liaocheng City ····· ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, *et al.* (2003)

Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa ····· GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, *et al.* (2011)

VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries ····· WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, *et al.* (2019)

Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes ····· LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, *et al.* (2028)

Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment ····· GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, *et al.* (2039)

Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River ····· WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, *et al.* (2054)

Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang ····· LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, *et al.* (2067)

Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China ····· ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, *et al.* (2080)

Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes ····· MENG Ling-hua (2096)

Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin ····· ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, *et al.* (2107)

Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin ····· WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, *et al.* (2118)

Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City ····· LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, *et al.* (2129)

Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network ····· XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)

Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed ····· WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, *et al.* (2150)

Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus ····· QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, *et al.* (2160)

Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects ····· LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, *et al.* (2171)

Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation ····· SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, *et al.* (2185)

Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism ····· LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, *et al.* (2195)

Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar ····· MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)

Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin ····· GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, *et al.* (2211)

Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake ····· YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, *et al.* (2223)

Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River ····· LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, *et al.* (2233)

Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers ····· GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, *et al.* (2246)

Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process ····· HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, *et al.* (2259)

Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area ····· ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, *et al.* (2268)

Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost ····· YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, *et al.* (2280)

Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field ····· YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, *et al.* (2292)

Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics ····· WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, *et al.* (2304)

Effect of Different Soil Salinities on N_2O Emission: A Meta-analysis ····· HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, *et al.* (2313)

Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area ····· ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)

Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model ····· ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, *et al.* (2332)

Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction ····· XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, *et al.* (2342)

Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning ····· ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, *et al.* (2353)

Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity ····· LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, *et al.* (2363)

Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall ····· ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, *et al.* (2373)

Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity ····· ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, *et al.* (2385)

Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil ····· LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, *et al.* (2394)

Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in *Pinus tabuliformis* Forest in Taiyue Mountain ····· MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, *et al.* (2406)

Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites ····· ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, *et al.* (2417)

Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou ····· LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, *et al.* (2428)

Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China ····· ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, *et al.* (2440)

Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing ····· LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, *et al.* (2450)

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines ····· WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, *et al.* (2461)

Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil ····· LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, *et al.* (2474)

Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems ····· ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, *et al.* (2480)