

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

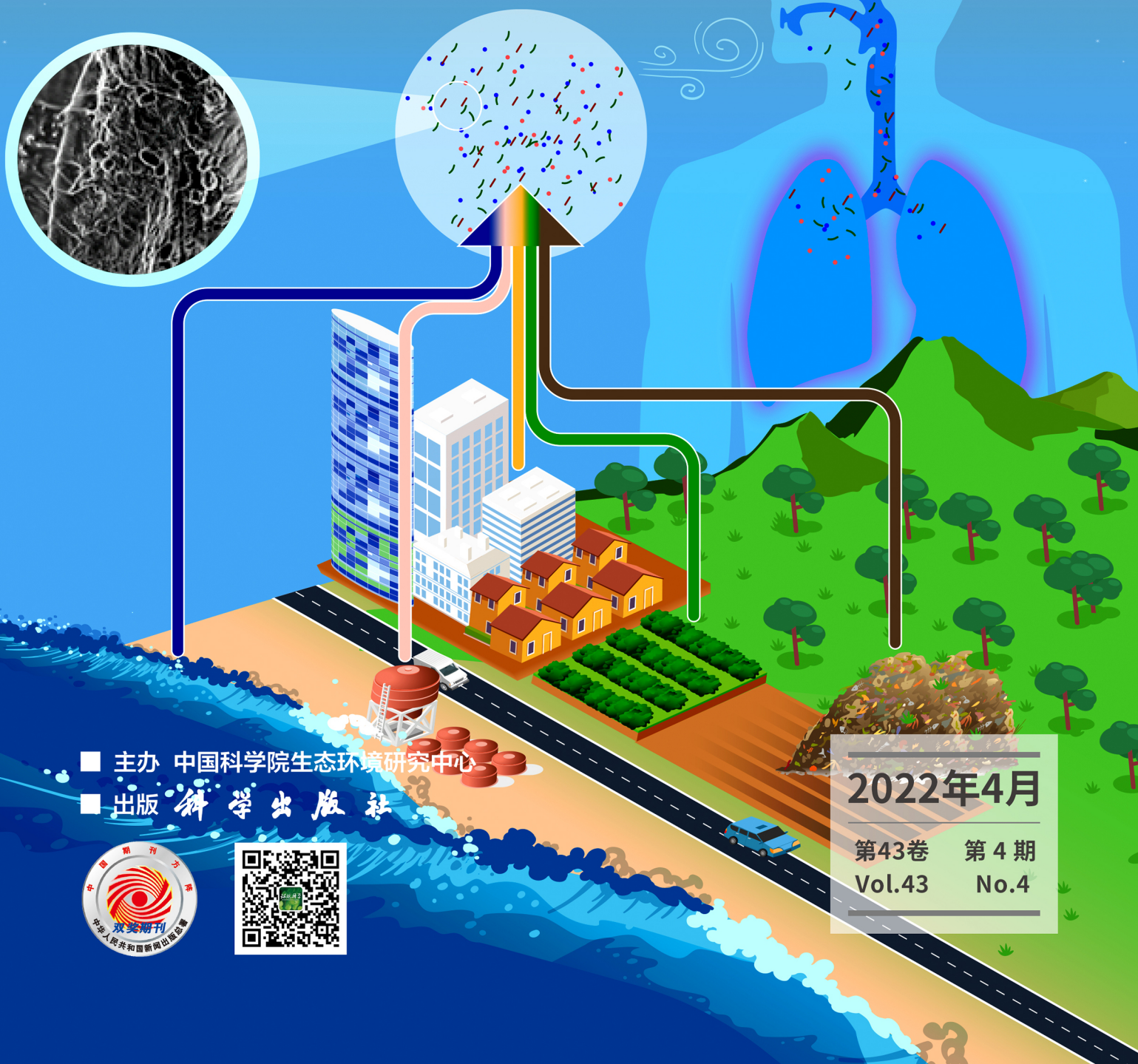
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期  
Vol.43 No.4

# 目次

|                                                                     |                                                      |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 2015~2019年河南省PM <sub>2.5</sub> 时空特征与驱动因素分析                          | 葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)                              |
| 郑州市大气PM <sub>2.5</sub> 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据                 | 曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)          |
| 宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析                                               | 杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)               |
| 上海城区PM <sub>2.5</sub> 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征                             | 庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725) |
| 南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源                                            | 陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)             |
| 春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化                                            | 江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)                |
| 重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势                                          | 李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)      |
| 珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价                                                | 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)   |
| 基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析                                              | 刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)          |
| 基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源                                       | 韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)                      |
| 基于SOA和O <sub>3</sub> 生成潜势的杭州市PM <sub>2.5</sub> 和O <sub>3</sub> 协同控制 | 林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)                             |
| 超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响                                       | 王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)         |
| 西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应                                               | 王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)                              |
| 大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性                                    | 涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)                          |
| 基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征                                         | 高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)     |
| 西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征                                                   | 杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)                      |
| “三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析                                         | 廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)                                  |
| 中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重                                              | 秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)        |
| 新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系                                       | 雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)        |
| 珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素                                           | 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)                 |
| 河套灌区浅层地下水NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N时空变化及驱动因素                   | 袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)                   |
| 盐城地区地下水溶质来源及其成因分析                                                   | 王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)                             |
| 白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义                                                | 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)                            |
| 东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素                                         | 陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)              |
| 松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性                                                  | 程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)                         |
| 区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响                                       | 高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)           |
| 南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素                                         | 朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)          |
| 千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价                                      | 弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)         |
| 蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险                                                | 靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)                   |
| 基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价                                                 | 李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)               |
| 小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响                                               | 张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)       |
| 不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响                                         | 王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)              |
| 南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析                                                 | 岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)                     |
| 老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制                                                  | 王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)   |
| 碳化泡沫负载Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 活化过硫酸盐降解罗丹明B                   | 王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)                          |
| 低总氮浓度下Fe <sup>2+</sup> 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮                            | 郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)                  |
| 污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性                                                 | 杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)                              |
| 长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价                                                | 张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)                         |
| 中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义                                           | 王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)                            |
| 贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素                               | 张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)                              |
| 地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征                                       | 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)                    |
| 矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价                                                | 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)                    |
| 农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价                                              | 朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)                                  |
| 安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析                                                  | 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)                                 |
| 方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果                                               | 任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)           |
| 伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响                                                | 张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)         |
| 我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性                                           | 刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)                              |
| 地膜覆盖和生物炭添加对菜地N <sub>2</sub> O排放的影响                                  | 胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)                        |
| 氮肥运筹对稻田CH <sub>4</sub> 和N <sub>2</sub> O排放的影响                       | 郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)                   |
| 松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性                                        | 王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)                                  |
| 棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响                                       | 周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)                          |
| pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响                                            | 马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)                             |
| 生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响                                             | 张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)                   |
| 有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响                                          | 林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)         |
| 九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征                                 | 黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)        |
| 碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望                                            | 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)                             |
| 《环境科学》征订启事(1929)                                                    | 《环境科学》征稿简则(1975)                                     |
| 信息(1996, 2029, 2080)                                                |                                                      |

# 长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价

张义, 周心劝, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣\*

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

**摘要:** 长江经济带是我国经济快速发展区之一, 高度密集的工业活动正加剧该区域的环境压力. 工业活动是场地土壤重金属污染的重要来源, 但长江经济带工业区土壤重金属污染的空间分布及典型行业污染特征仍不清楚. 从中国知网和 Web of Science 等公共数据库获取了长江经济带 11 个省市 193 个工业区表层土壤 8 种重金属 (Cd、Cr、Cu、Pb、Ni、Hg、As 和 Zn) 的含量, 分析了工业区土壤重金属的整体情况、空间分布和典型行业的污染特征. 结果表明, 长江经济带工业区农用地重金属污染较工业用地严重, 其中 58.49%、39.53% 和 22.64% 的工业区农用地 Cd、Zn 和 Pb 含量超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 的筛选值; 地累积指数 ( $I_{geo}$  值) 分析结果显示, 工业区 8 种重金属污染程度大小依次为 Cd (2.52) > Hg (1.17) > Pb (1.00) > Zn (0.90) > Cu (0.72) > As (0.02) > Cr (-0.40) > Ni (-0.48); 经济带不同地区污染情况存在差异, 上游和中游工业区以 Hg、Cd、As、Cu、Pb 和 Zn 污染为主, 而下游工业区重金属含量普遍较低, 存在 As、Cd 和 Hg 污染; 不同工业类别造成的污染不尽相同, 采矿行业造成的土壤污染最严重, 主要污染物可能为 Hg 和 Cd, 其次为 Cu、Pb 和 Zn; 金属加工业主要污染物可能为 Cd 和 Pb; 化工行业周边土壤各重金属为无污染或仅存在轻度污染, 而石油加工业可能主要造成 Cd 污染. 本研究为长江经济带工业区土壤重金属污染评价与防控提供了重要的理论依据.

**关键词:** 长江经济带; 工业区; 土壤; 重金属; 污染

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-2062-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202106237

## Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt

ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xiao-min, FENG Jiao, LIU Yu-rong\*

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The Yangtze River Economic Belt is one of the areas with rapid economic development in China, although the intensive industrial activities have aggravated the emissions of soil pollutants in this area. Industrial activities are important sources of soil heavy metal contamination; however, the spatial distribution and main emission sources of soil heavy metal contamination in industrial regions of the economic belt remain unclear. Here, we collected data on the concentrations of eight heavy metals (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Hg, As, and Zn) in the surface soils of 193 industrial regions covering 11 provinces and cities of the Yangtze River Economic Belt from China National Knowledge Infrastructure (CNKI), Web of Science, and other public databases. On this basis, we analyzed the spatial distribution characteristics of heavy metals and the contamination characteristics of typical industries. The results showed that the heavy metal contamination in agricultural land was more serious than that in industrial land. A total of 58.49%, 39.53%, and 22.64% of the agricultural land, respectively, contained levels of Cd, Zn, and Pb that exceeded the screening values of the Soil Environmental Quality Control Standard for Soil Pollution Risk of Agricultural Land (GB 15618-2018). The results of geo-accumulation index analysis showed that the contamination degree of the eight heavy metals was in the order of Cd (2.52) > Hg (1.17) > Pb (1.00) > Zn (0.90) > Cu (0.72) > As (0.02) > Cr (-0.40) > Ni (-0.48). As for the spatial distribution, Hg, Cd, As, Cu, Pb, and Zn were the main pollutants in the upstream and middle reaches of the industrial regions, whereas As, Cd, and Hg were the main pollutants in the downstream industrial regions. Different types of industry caused different types of contamination. Mining industries caused the most serious soil contamination, the main pollutants of which were Hg and Cd, followed by Cu, Pb, and Zn. Furthermore, metal processing industries mainly caused Cd and Pb contamination. The surrounding soils of chemical industries were contamination-free or only slightly polluted by the eight heavy metals, whereas petroleum processing industries mainly caused Cd contamination. Our study provides important theoretical basis for the future prevention and control of soil heavy metal contamination in industrial regions of the Yangtze River Economic Belt.

**Key words:** the Yangtze River Economic Belt; industrial region; soil; heavy metal; contamination

长江经济带是我国主要经济快速发展区之一, 以 21% 的区域面积承载着全国 43% 的人口和 44% 的经济总量, 同时又横跨我国东中西三大板块, 覆盖沿长江 11 省市, 生态环境地位突出<sup>[1,2]</sup>. 改革开放以来, 该区域工业的迅速发展导致生态环境受到严重破坏, 土壤重金属污染事件时有发生<sup>[3]</sup>. 土壤重金属污染具有难降解性和持久性等特点, 工业区周边土壤重金属污染不仅会导致土壤功能失调和植物及作物生长受阻, 还会对人类健康构成威胁<sup>[4,5]</sup>. 因此, 评价工业区土壤重金属污染情况和分析工业区

土壤重金属污染特征, 对生态环境的保护和经济的可持续发展具有重要意义.

长江经济带各省市产业结构和经济社会发展较不平衡, 有研究表明, 位于下游地区的江苏、浙江和上海等地工业化进程基本完成, 正迎来服务业的大发展期; 而位于上游和中游地区的云南、贵州、四

收稿日期: 2021-06-29; 修订日期: 2021-09-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1800305)

作者简介: 张义 (1998 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染与转化, E-mail: zy1050296523@163.com

\* 通信作者, E-mail: yrlu@mail.hzau.edu.cn

川、湖北和湖南等地产业分散化程度低,存在工业过度发展的情况<sup>[6]</sup>. 不同地区和不同行业间的重金属污染状况可能存在差异,目前已有针对长江经济带范围内不同类型工业区土壤重金属污染情况的研究<sup>[7~9]</sup>,如王锐等<sup>[10]</sup>的研究发现,经济带矿区及周边土壤中,Cd、Hg、Pb 和 Zn 等重金属含量远超当地土壤背景值;刘小燕等<sup>[11]</sup>和曾伟斌等<sup>[12]</sup>的研究发现,冶炼厂周围土壤易受 Cd、Hg 和 Zn 等重金属的污染. 此外,长江经济带范围内的化工、石油加工和机械制造等其他工业活动也会造成不同程度的土壤重金属污染<sup>[13,14]</sup>. 然而,目前关于长江经济带工业区土壤重金属污染的研究主要集中于单个场地或城市,缺乏区域尺度下对长江经济带工业区土壤重金属污染的系统认识. 此外,虽然方传棣等<sup>[15]</sup>对长江经济带矿区污染特征进行研究,分析得出 Cd 和 Hg 是经济带矿区主要的污染元素,但区域内其他行业可能的主要重金属污染物仍不清楚. 因此,本文搜集了近 10 年来发表的关于长江经济带范围内工业区土壤污染的数据资料,评价了长江经济带范围内工业区土壤重金属污染现状,并分析了重金属污染的空间分布及典型行业污染特征,以期为今后长江经济带工业区土壤重金属污染防控提供理论支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

以“工业”、“土壤”、“重金属”和“industrial”, “soil”, “heavy metal”为关键词,在中国知网和 Web of Science 等数据库搜集 2010 年以来研究长江经济带范围内工业区土壤重金属污染的文献. 文献及数据选取标准为:①文献中明确指出采样地经纬度或能根据文中信息得到,且采样点位于工业区或场地周边 5 km 内;②选取表层(0~20 cm)土壤中 Cd、Cr、Cu、Pb、Ni、Hg、As 和 Zn 这 8 种重金属的总量数据;③土壤重金属含量用原文献中给出的均值表示(符合正态分布的用算术平均值表示,符合对数正态分布的用几何平均值表示);④文献中的土壤重金属含量测定方法为国家标准,实验过程中有严格的质量控制. 最终从 612 篇文献中选取 125 篇进行后续分析,包括了 193 个工业区(样地),9 284 个采样点位,涵盖了长江经济带 11 个省市、71 个地级市和直辖市. 各省市样地数量为:云南省 11 个、贵州省 25 个、四川省 21 个、重庆市 12 个、湖北省 27 个、湖南省 14 个、江西省 13 个、安徽省 18 个、江苏省 26 个、浙江省 13 个和上海市 13 个,工业区分布见图 1. 根据不同地区产业结构、发展水平、工业化程度和所搜集文献的采样地分布情况,将长江经济带分为 3

个区域:上游地区(云南省、贵州省、四川省和重庆市);中游地区(湖北省、湖南省和江西省);下游地区(安徽省、江苏省、浙江省和上海市).

此外,参考《国民经济行业分类》(GB/T 4754-2017)中规定的行业分类,将所搜集文献中涉及的主要工业类型分为黑色、有色金属矿采选业(采矿行业,占有样点比例为 34%,下同)、金属冶炼及压延加工业(金属加工业,16%)、化学原料及化学制品制造业(化工行业,11%)和石油加工业(10%)这 4 类,用于分析不同行业类型与场地周边土壤重金属污染的联系. 需指出的是,从区域尺度对各工业区土壤重金属污染情况进行分析时,除行业类型外,采样范围及样点数量也会影响各工业区土壤重金属平均含量. 为保证文献数量,本研究无法做到搜集的各文献中采样范围和样点数量完全一致,其对工业区重金属含量均值的影响还需进一步研究. 本研究限定了文献中的采样范围(5 km),且大部分文献中的样点数量超过 20 个,在保证所选文献能真实体现研究区域污染情况的同时,也减小了采样范围和样点数量对后续数据分析的影响.

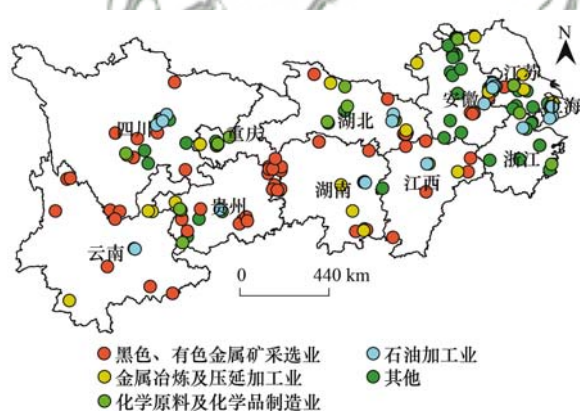


图 1 长江经济带工业区样地分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the industrial regions of the Yangtze River Economic Belt

### 1.2 重金属污染特征分析

分析土壤重金属含量时,所引文献中的采样地类型属工业用地的,以《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600-2018)中的第二类用地筛选值为评价标准;Cr 和 Zn 参考值未存在于该标准中,使用《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB 11T811-2011)中的工业用地筛选值. 所引文献中的采样地类型属农用地的,以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中较严格的筛选值为评价标准.

通过变异系数(CV)反映土壤重金属含量受人类活动影响程度的大小. CV 越大,人为活动的干扰作用越大,污染越严重. 当  $CV \leq 10\%$  时,表现为弱变

异性;当  $10\% < CV < 100\%$  表现为中等变异性;当  $CV \geq 100\%$  时,表现为强变异性<sup>[16]</sup>.

### 1.3 重金属污染评价

运用地累积指数( $I_{geo}$ 值)对研究区内土壤重金属污染程度进行评价.地累积指数法由德国科学家 Muller 于 1969 年提出,目前已被广泛应用于土壤重金属污染的相关研究中.此方法不仅考虑了自然地质过程对背景值造成的影响,也注意到了人为活动对土壤重金属含量的影响<sup>[17]</sup>. $I_{geo}$ 值计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_n}{1.5B_n} \right)$$

式中, $C_n$ 为土壤中重金属  $n$  的实测含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), $B_n$ 为重金属  $n$  的土壤元素背景值( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).在分析时,选取所在省份、直辖市的土壤重金属元素背景值参与计算<sup>[18]</sup>.将  $I_{geo}$  值分为 7 个等级,如表 1 所示.

表 1 地累积指数分级<sup>[17]</sup>

Table 1 Classification standard of geo-accumulation index<sup>[17]</sup>

| 等级 | $I_{geo}$            | 污染程度     |
|----|----------------------|----------|
| 0  | $I_{geo} < 0$        | 无污染      |
| 1  | $0 \leq I_{geo} < 1$ | 轻度污染     |
| 2  | $1 \leq I_{geo} < 2$ | 中度污染     |
| 3  | $2 \leq I_{geo} < 3$ | 中度污染到强污染 |
| 4  | $3 \leq I_{geo} < 4$ | 强污染      |
| 5  | $4 \leq I_{geo} < 5$ | 强污染到极强污染 |
| 6  | $I_{geo} \geq 5$     | 极强污染     |

### 1.4 统计分析

使用 Excel 2019 和 SPSS V21.0 进行重金属含量的描述性统计和  $I_{geo}$  值的计算.使用 Arcgis 10.2 绘制长江经济带工业区土壤重金属污染空间分布

图.使用 Origin 2018 进行柱状图和箱型图的绘制.

## 2 结果与分析

### 2.1 长江经济带工业区土壤重金属含量特征

长江经济带工业区土壤重金属含量特征如表 2 所示.工业用地中,Cu、Ni、Hg 和 Zn 含量均未超过建设用地标准,仅少数样地 As、Pb、Cr 和 Cd 含量超标,超标率分别为 15.38%、3.42%、1.11% 和 0.94%.农用地中,除 Ni 无超标样地外,其余 7 种重金属均有不同程度超标,超标率由高到低顺序为: Cd (58.49%) > Zn (39.53%) > Pb (22.64%) > As (20.00%) > Hg (16.67%) > Cu (16.33%) > Cr (12.50%).农用地中 Cd、Pb、Hg、As 和 Zn 的含量平均值分别达到了农用地标准的 6.77、1.45、1.16、1.24 和 2.72 倍.此外,同一重金属元素在不同工业区土壤中含量差异大.除农用地和工业用地中的 Ni 及农用地中的 Cr 属中等变异性外,其他重金属变异系数均超过了 100% (强变异性),表明无论是在农用地还是工业用地,长江经济带工业区表层土壤重金属污染较为严重.值得注意的是,某些场地土壤重金属含量严重超标,如湖北大冶某有色金属冶炼厂周边农田土壤中  $\omega(\text{Cd})$  达  $81.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,超标 101 倍<sup>[19]</sup>;四川凉山州甘洛县某铅锌矿周边农田土壤中  $\omega(\text{Pb})$  达  $4\,095 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,超标 17 倍<sup>[20]</sup>;贵州万山某汞矿区周围的土壤  $\omega(\text{Hg})$  达  $49.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,超标 6.2 倍<sup>[21]</sup>;湖南郴州柿竹园矿区周边土壤  $\omega(\text{As})$  达  $550.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,超标 27.5 倍<sup>[22]</sup>;贵州都匀某铅锌矿区耕地土壤  $\omega(\text{Zn})$  达

表 2 长江经济带工业区土壤重金属含量特征统计

Table 2 Statistical analysis of soil heavy metal concentrations in industrial regions of the Yangtze River Economic Belt

| 重金属种类 | 样地类型 | 范围<br>$/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 平均数<br>$/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 标准差<br>$/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 变异系数<br>/% | 参考值<br>$/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 超标率<br>/% |
|-------|------|-----------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------|------------------------------------------|-----------|
| Cd    | 工业用地 | 0.01 ~ 74.74                            | 4.32                                     | 10.85                                    | 251.02     | 65                                       | 0.94      |
|       | 农用地  | 0.05 ~ 81.34                            | 5.42                                     | 13.43                                    | 247.95     | 0.8                                      | 58.49     |
| Cr    | 工业用地 | 1.58 ~ 3 370.82                         | 146.84                                   | 366.53                                   | 249.60     | 2 500                                    | 1.11      |
|       | 农用地  | 30.49 ~ 359.43                          | 142.79                                   | 106.74                                   | 74.75      | 350                                      | 12.50     |
| Cu    | 工业用地 | 9.42 ~ 5 024.49                         | 172.87                                   | 533.28                                   | 308.48     | 18 000                                   | 0         |
|       | 农用地  | 22.73 ~ 1 137.86                        | 151.24                                   | 247.86                                   | 163.88     | 200                                      | 16.33     |
| Pb    | 工业用地 | 2.98 ~ 6 137.06                         | 247.14                                   | 684.83                                   | 277.11     | 800                                      | 3.42      |
|       | 农用地  | 21.33 ~ 4 095.00                        | 347.86                                   | 754.12                                   | 216.79     | 240                                      | 22.64     |
| Ni    | 工业用地 | 12.70 ~ 254.75                          | 42.84                                    | 35.38                                    | 82.59      | 900                                      | 0         |
|       | 农用地  | 9.60 ~ 75.60                            | 36.42                                    | 15.89                                    | 43.64      | 190                                      | 0         |
| Hg    | 工业用地 | 0.03 ~ 4.74                             | 0.55                                     | 0.89                                     | 162.22     | 38                                       | 0         |
|       | 农用地  | 0.03 ~ 49.41                            | 3.96                                     | 11.01                                    | 278.03     | 3.4                                      | 16.67     |
| As    | 工业用地 | 0.18 ~ 283.18                           | 34.73                                    | 58.46                                    | 168.36     | 60                                       | 15.38     |
|       | 农用地  | 6.75 ~ 550.67                           | 49.54                                    | 102.46                                   | 206.84     | 40                                       | 20.00     |
| Zn    | 工业用地 | 26.99 ~ 9 800                           | 468.69                                   | 1 191.91                                 | 254.31     | 10 000                                   | 0         |
|       | 农用地  | 40.00 ~ 6 900                           | 817.27                                   | 1 552.44                                 | 189.95     | 300                                      | 39.53     |

6 900 mg·kg<sup>-1</sup>, 超标 23 倍<sup>[23]</sup>.

2.2 长江经济带工业区土壤重金属污染评价

长江经济带工业区不同重金属的污染程度(按  $I_{geo}$  值分类)如图 2 所示, 8 种重金属均对土壤造成了不同程度的污染,  $I_{geo}$  均值由大到小顺序为: Cd (2.52) > Hg (1.17) > Pb (1.00) > Zn (0.90) > Cu (0.72) > As (0.02) > Cr ( - 0.40) > Ni ( - 0.48). Cd、Hg 和 Pb 污染范围广、程度重, 分别有 55%、30% 和 27% 的样地  $I_{geo}$  值处于 3 级(中度污染)以上. Cu 和 Zn 这 2 种重金属污染情况类似, 分别有 16% 和 19% 的样地  $I_{geo}$  值处于 3~6 级(中度污染以上), 且均存在少量  $I_{geo}$  值达到 6 级(极强污染)的点位, 这 2 种重金属污染程度不及 Cd、Hg 和 Pb. 对于 Cr、Ni 和 As, 分别有 72%、82% 和 59% 样点的  $I_{geo}$  值属于 0 级(无污染), 90% 以上的样点处于 3 级(中度污染)以下, 且没有样点达到 6 级(极强污

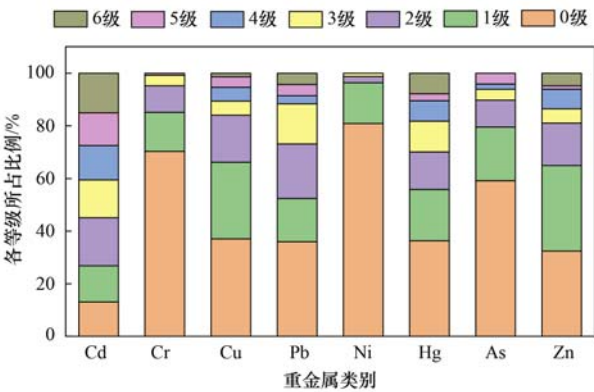


图 2 长江经济带工业区土壤重金属污染程度  
Fig. 2 Classification of soil heavy metal contamination  
in industrial regions of the Yangtze River Economic Belt

染), 这 3 种重金属污染程度较轻.

2.3 长江经济带工业区土壤重金属空间分布特征

长江经济带工业区土壤中不同重金属空间分布情况有所不同(图 3). Hg 污染以贵州最为严重,

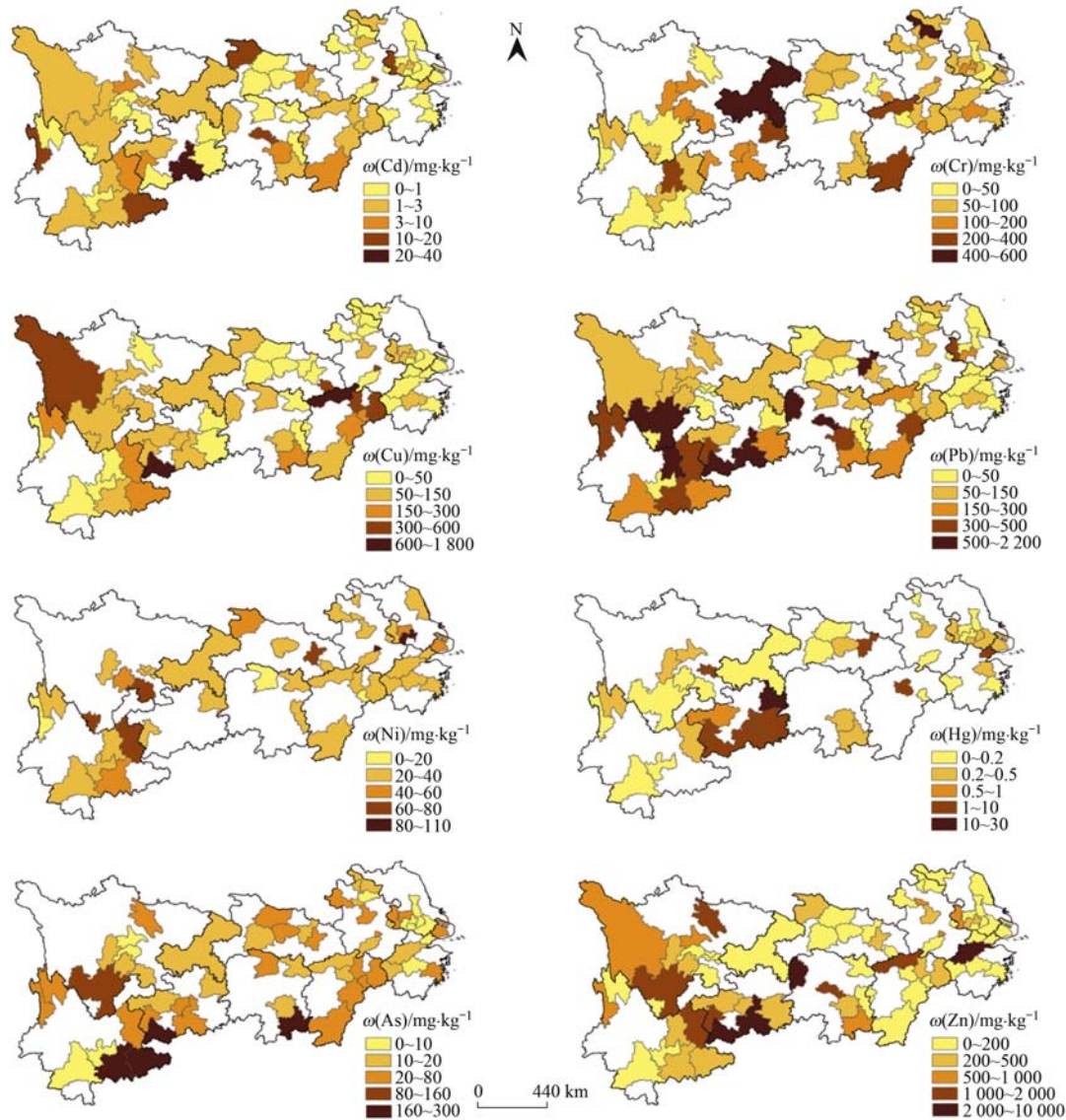


图 3 长江经济带工业区土壤重金属空间分布  
Fig. 3 Spatial distribution of soil heavy metals in industrial regions of the Yangtze River Economic Belt

其中铜仁地区的工业区土壤  $\omega(\text{Hg})$  均值达  $29.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Cd 和 As 污染范围广泛,以云南和贵州最为严重,两地土壤  $\omega(\text{Cd})$  均值分别为  $5.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $6.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{As})$  均值分别为  $68.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $75.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Cr 污染以重庆最为严重,  $\omega(\text{Cr})$  均值达  $576.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Pb 和 Zn 污染以云南、贵州、四川和湖南 4 省较为严重,对应  $\omega(\text{Pb})$  均值分别为  $408.94$ 、 $615.76$ 、 $594.36$  和  $551.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Zn})$  均值分别  $512.79$ 、 $2470.71$ 、 $689.204$  和  $1037.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Cu 污染则以湖北东南部和江西北部最为严重,平均值达  $503.84$  和  $909.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Ni 污染无明显区域分布特征,大部分地区的工业区土壤  $\omega(\text{Ni})$  均值范围为  $20 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,与各地背景值相当.

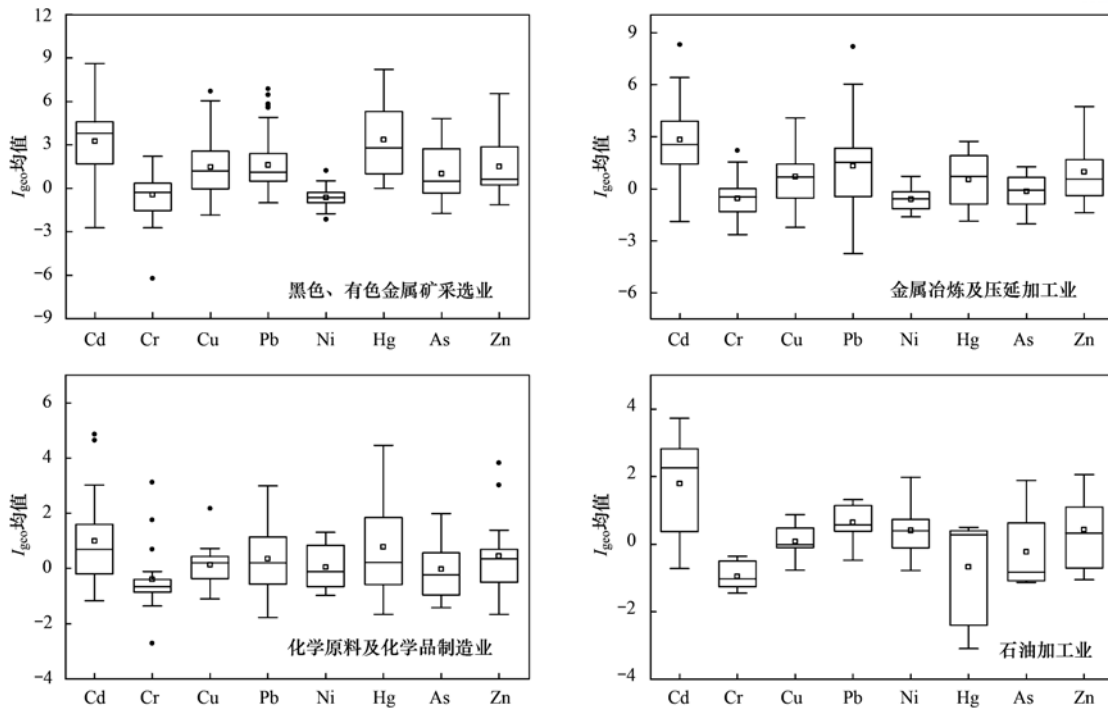


图 4 长江经济带不同类型工业区土壤重金属  $I_{\text{geo}}$  均值

Fig. 4 Average  $I_{\text{geo}}$  values of soil heavy metals for different types of industrial regions of the Yangtze River Economic Belt

$I_{\text{geo}}$  均值为 3 级(中度污染到强污染)外,其他重金属的  $I_{\text{geo}}$  均值均在 0 级或 1 级(无污染或轻度污染).

### 3 讨论

#### 3.1 长江经济带工业区土壤重金属污染特征

以土壤环境质量标准来评价,研究区农用地重金属污染形势严峻,除 Ni 外的 7 种重金属均存在超标样地,以 Cd、Zn 和 Pb 最为严重,其次为 As、Cu、Hg 和 Cr,亟需对污染土壤采取修复措施或在种植作物时对农田合理分区<sup>[26]</sup>. 对比之下,研究区工业用地土壤中 8 种重金属超标率则较低,这主要是工业用地和农用地土壤中重金属含量筛选值差异大造

#### 2.4 长江经济带不同类型工业区土壤重金属污染情况

不同类型的工业活动产生的土壤重金属污染物不尽相同<sup>[24,25]</sup>,因此对不同类型工业区周边土壤重金属污染程度进行了分析(图 4). 采矿行业周边土壤中 Cd 的  $I_{\text{geo}}$  均值处于 4 级(强污染),Hg 的  $I_{\text{geo}}$  均值处于 3 级(中度污染到强污染),Cu、Pb、Zn 和 As 污染处于 2 级(中度污染),而 Cr 和 Ni 污染处于 0 级和 1 级(无污染或轻度污染). 金属加工业周边土壤中 Cd 的  $I_{\text{geo}}$  值达到 3 级(强污染);Pb 的  $I_{\text{geo}}$  值达到 2 级(中度污染);Zn、Cu 和 Hg 污染处于 1 级(轻度污染);As、Ni 和 Cr 污染为 0 级(无污染). 化工行业周边土壤中各重金属的  $I_{\text{geo}}$  均值均处于 0 级或 1 级(无污染或轻度污染). 石油加工业除 Cd 的

成的(表 2).《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600-2018)是以保护人体健康为目标而制定的,在指标制定时,认为在土壤存在污染的情况下,如果采取隔离措施,人不接触(即切断暴露途径),那么土壤污染对人的健康风险则会大大降低,因此筛选值设置较高. 使用地累积指数法评价工业区土壤重金属污染发现,研究区 Cd、Hg 和 Pb 污染最为严重,其次为 Zn 和 Cu,而大部分样地 Ni、Cr 和 As 这 3 种重金属处于无污染状态. 这 2 种评价结果存在差异,可能是因为除工业活动影响外,各工业区所在地的土壤母质不同,部分地区土壤重金属背景值较高,工业活动导致的重金属累积作用

并不显著,从而使  $I_{\text{geo}}$  值偏低. 例如,贵州省土壤 Cd 背景值达  $0.659 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,已接近《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)的筛选值,贵州省在工业区农用地土壤 Cd 超标率为 84.62% 的情况下,  $I_{\text{geo}}$  均值仅为 0.82(轻度污染).

长江经济带不同地区工业场地土壤重金属污染情况存在差异(图 3). 整体上,长江经济带上游省市工业区土壤重金属含量高于中游和下游省市. 上游云南省、贵州省和四川省土壤中主要存在 Hg、As、Cd、Cu、Pb 和 Zn 污染,金属矿物开采可能是这些地区污染严重的主要原因之一. 本研究搜集到的上游地区工业区类型大多为污染严重的矿区,如云南红河州个旧市锡矿区<sup>[27]</sup>,及云南曲靖市会泽县铅锌矿区<sup>[11]</sup>. 据统计,长江经济带 2016 年矿山总数约为 3.5 万,占全国 45.2%,而经济带矿产资源主要集中于上游云贵川等地:云南省矿山数量超 6 000 个,四川和贵州两地矿山数量超 5 000 个<sup>[28]</sup>. 长期的矿物采选活动使重金属在土壤中大量累积,造成严重污染<sup>[29]</sup>. 此外,有研究表明,技术革新效应对工业污染排放有明显抑制作用<sup>[30]</sup>,而上游部分城市经济发展相对落后,处于工业化初期或中期,工业生产能耗高、资源综合利用水平低. 加之部分企业在生产过程中环保意识不强,任意排放废弃物,加剧了上游地区重金属污染<sup>[31,32]</sup>.

本研究所搜集的文献中,中游地区湖北、湖南和江西省工业区的主要行业类型是医化、氯碱和制药等化工行业及铅、锌和铜冶炼等各类金属加工业<sup>[33~35]</sup>. 而对于医化等化工子行业,其主要造成轻金属及各类有机物污染,重金属不是主要污染物<sup>[36]</sup>. 在金属加工和冶炼过程中,含有各种重金属的原材料和催化剂等污染物可能会进入排放的烟气、废水和废渣中,通过烟气沉降、废水排放和废渣堆放等方式进入土壤,造成多种重金属污染. 但金属加工业和化工行业的生产过程大多于车间内进行,相较于采矿行业,产生的污染更易控制. 另外,近年来国家对“化工围江”问题愈发重视<sup>[37]</sup>,各冶炼厂和化工厂排污前往往已对废料进行处理,因此可能使得中游工业区土壤重金属含量稍低于上游.

长江经济带下游的安徽、江苏、浙江和上海工业区土壤中主要存在 Cd、As 和 Hg 污染,土壤重金属含量低于上游和中游. 经济带下游以金属加工业、石油加工业、非金属矿采选业等其他行业以及第三产业为主<sup>[2]</sup>. 本研究所搜集的文献中,石油加工企业主要以有机化工原料生产为主,其次为树脂合成类,而这些子行业的主要污染物为挥发性有机物、石油烃和多环芳烃等有机污染物<sup>[38~41]</sup>,重金

属污染较轻. 此外,对土壤污染治理的投入也是下游地区污染较轻的原因. 经济带下游地区经济发达,近年大量资金被用于工业污染治理. 2017 年,上海和江苏两地已投资超 40 亿元用于污染治理,而云南和贵州两地此类投资不足 6 亿元<sup>[37]</sup>. 产业结构升级及大量的环保投入可能是下游地区重金属污染程度较轻的原因. 需要注意的是,已有研究表明,由于长江下游具有区位优势,以金属加工业为代表的原材料加工业分布重心有从长江中游向下游转移的趋势<sup>[42]</sup>,下游地区需提前做好土壤污染的预防措施.

### 3.2 长江经济带不同类型工业区土壤重金属污染特征

分析发现,4 种长江经济带典型行业类型中,采矿行业造成的土壤重金属污染最为严重,主要污染物可能为 Hg 和 Cd,其次是 Cu、Pb、Zn 和 As,而 Cr 和 Ni 污染程度较轻(图 4). 采矿被认为是土壤中重金属污染的重要来源之一<sup>[43]</sup>,矿区土壤重金属污染不仅来源于矿物采选过程中“三废”的排放,在地表径流、风沙等环境条件作用下,大量堆放于地表的尾矿、废渣中的重金属也极易进入土壤中,带来污染<sup>[44]</sup>. 长江经济带区域内铜矿、铅锌矿、汞矿和钨矿等矿产资源开发强度大<sup>[28]</sup>,而 Hg 和 Cd 分别在铜矿、钨矿和铅锌矿中有明显的累积效应<sup>[15]</sup>. 在矿物开采过程中,富含 Hg 和 Cd 的粉尘释放到大气中,沉积到矿区周围土壤中<sup>[10,45]</sup>,这可能是长江经济带矿区 Hg 和 Cd 污染严重的原因.

长江经济带金属加工行业主要污染物可能为 Cd 和 Pb(图 4). 在金属加工、冶炼过程中,含有重金属的原材料和催化剂等污染物会进入排放的烟气、废水、废渣中,从而通过烟气沉降、废水排放和废渣堆放等过程对土壤造成污染. 不同金属加工行业周边土壤重金属污染情况不尽相同,分析发现,研究区内即使属于同种子行业,不同地区的金属加工业污染特征也有所不同<sup>[12,46,47]</sup>,这可能是不同金属加工工业区使用的矿物原材料组成不同,及不同地区冶炼方式、工艺流程不同所导致.

长江经济带化工行业污染较轻,8 种重金属污染程度均为无污染或轻污染,而石油加工业可能以 Cd 为主要污染物(图 4). 重金属是石油的一部分,且在石油加工过程中会添加重金属作催化剂,从而导致环境中重金属污染的产生<sup>[48]</sup>,土壤 Cd 背景值低导致石油加工业对土壤 Cd 元素的累积作用明显. 需要注意的是,石油加工区的石油烃污染物与重金属共同作用形成复合污染时,会加剧污染土壤的毒性,造成更严重的危害<sup>[49]</sup>. 长江经济带石油加工业周边土壤重金属污染虽不严重,但仍需积极治

理,防止发生复合污染.

#### 4 结论

(1)长江经济带工业区农用地土壤中,大量点位重金属超标,除 Ni 无超标样地外,其余 7 种重金属超标率分别为: Cd (58.49%) > Zn (39.53%) > Pb (22.64%) > As (20.00%) > Hg (16.67%) > Cu (16.33%) > Cr (12.50%); 工业用地土壤中, As 超标率最高,达 15.38%,为主要污染物. 相较于工业用地,农用地土壤中的重金属更易对人体造成危害.

(2)地累积指数评价结果表明,长江经济带工业区土壤中 Cd 为中度到强污染, Hg 和 Pb 为中度污染,而 Zn、Cu 和 As 为轻度污染. 研究区内 8 种重金属污染程度分别为: Cd (2.52) > Hg (1.17) > Pb (1.00) > Zn (0.90) > Cu (0.72) > As (0.02) > Cr (-0.40) > Ni (-0.48).

(3)长江经济带工业区土壤重金属污染的空间分布存在差异,不同地区土壤重金属含量按地理位置由大到小为:上游 > 中游 > 下游. 上游和中游主要存在 As、Cu、Pb、Cd、Hg 和 Zn 污染,下游则存在 As、Cd 和 Hg 污染.

(4)长江经济带 4 种典型行业中,采矿行业周边土壤污染情况最严重,主要污染物可能为 Hg、Cd、Cu、Pb、Zn 和 As; 金属加工业周边土壤污染情况次之,可能存在 Cd 和 Pb 污染; 化工行业周边土壤各重金属无污染或仅存在轻度污染,而石油加工业可能的重金属污染物为 Cd. 在长江经济带土壤重金属污染防治过程中,矿区及周边区域应作为优先管控区域.

#### 参考文献:

- [1] 环境保护部, 国家发展和改革委员会, 水利部. 关于印发《长江经济带生态环境保护规划》的通知[EB/OL]. [https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201707/t20170718\\_418053.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201707/t20170718_418053.htm), 2021-08-05.
- [2] 国家统计局. 2020 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [3] 生态环境部. 2020 中国环境状况公报[EB/OL]. <http://mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202105/P020210526572756184785.pdf>, 2021-08-06.
- [4] 柴育红, 王明新, 赵兴青. 化工工业园区地表灰尘重金属污染及健康风险: 以常州市为例[J]. 环境工程, 2019, 37(8): 190-194, 172.  
Chai Y H, Wang M X, Zhao X Q. Pollution and health risk assessment of heavy metals in surface dust from chemical industrial parks: a case study in Changzhou[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(8): 190-194, 172.
- [5] Wei L L, Wang K, Noguera D R, et al. Transformation and speciation of typical heavy metals in soil aquifer treatment system during long time recharging with secondary effluent: depth distribution and combination[J]. Chemosphere, 2016, 165: 100-109.
- [6] 华小全. 长江经济带: 产业结构升级的时空差异分析[J]. 大理大学学报, 2020, 5(9): 1-9.  
Hua X Q. Analysis on time and spatial differences of industrial structure optimization in Yangtze-River Economic Belt[J]. Journal of Dali University, 2020, 5(9): 1-9.
- [7] 万凯, 袁飞, 李光顺, 等. 恩施州矿山周边耕地土壤重金属污染特征及评价[J]. 资源环境与工程, 2020, 34(S1): 28-32.  
Wan K, Yuan F, Li G S, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in cultivated soil around mines in Enshi prefecture[J]. Resources Environment & Engineering, 2020, 34(S1): 28-32.
- [8] 何如海, 薛中俊, 刘娜, 等. 两种土地利用方式下土壤重金属污染特征与评价[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8): 1858-1864.  
He R H, Xue Z J, Liu N, et al. Characteristics and assessment of heavy metal pollution in soil under two land use[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(8): 1858-1864.
- [9] 涂培. 成都长安垃圾填埋场周边土壤重金属污染现状分析及评价[D]. 成都: 四川农业大学, 2013.  
Tu P. Current situation analysis and evaluation on heavy metal pollution for the soil around Chang-an Landfill site[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013.
- [10] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 3018-3027.  
Wang R, Deng H, Jia Z M, et al. Spatial distribution characteristics, pollution, and ecological risk assessment of soil heavy metals around mercury mining areas[J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 3018-3027.
- [11] 刘小燕, 陈棉彪, 李良忠, 等. 云南会泽铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3): 221-229.  
Liu X Y, Chen M B, Li L Z, et al. Contaminant characteristics and health risk assessment of heavy metals in soils from lead-zincs melting plant in Huize county, Yunnan province, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(3): 221-229.
- [12] 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 等. 多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1105-1113.  
Zeng W B, Gu G Q, Wan X M, et al. Heavy metal contents of soil and surface dust and its ecological risk analysis in a multifunctional industrial park[J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1105-1113.
- [13] 李梦婷, 沈城, 吴健, 等. 快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险[J]. 环境科学, 2021, 42(10): 4889-4896.  
Li M T, Shen C, Wu J, et al. Content characteristics and ecological risks of heavy metals in the soil of different land uses in rapid urbanization area[J]. Environmental Science, 2021, 42(10): 4889-4896.
- [14] 沈城, 刘馥雯, 吴健, 等. 再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 5125-5132.  
Shen C, Liu F W, Wu J, et al. Distribution and ecological risk of heavy metals in the soil of redevelopment industrial sites[J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 5125-5132.
- [15] 方传捷, 成金华, 赵鹏大, 等. 长江经济带矿区土壤重金属污染特征与评价[J]. 地质科技情报, 2019, 38(5): 230-

239.  
Fang C D, Cheng J H, Zhao P D, *et al.* Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in soils of mining areas in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, **38**(5): 230-239.
- [16] 范俊楠, 贺小敏, 陆泗进, 等. 湖北省重点行业企业周边土壤重金属污染现状及潜在生态危害评价[J]. *华中农业大学学报*, 2018, **37**(5): 74-80.  
Fan J N, He X M, Lu S J, *et al.* Status of heavy metal pollution and potential ecological hazard assessment in surrounding soil of enterprises in Hubei Province, China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2018, **37**(5): 74-80.
- [17] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(5): 889-896.  
Guo X X, Liu C Q, Zhu Z Z, *et al.* Evaluation methods for soil heavy metals contamination: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(5): 889-896.
- [18] 中国国家环境监测总站. 中国土壤元素背景值[R]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [19] 许大毛, 张家泉, 占长林, 等. 有色金属冶炼厂周边地表水和农业土壤中重金属污染特征与评价[J]. *环境化学*, 2016, **35**(11): 2305-2314.  
Xu D M, Zhang J Q, Zhan C L, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water and agricultural soil around the Nonferrous Metal Smelter [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(11): 2305-2314.
- [20] 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(9): 2014-2021.  
Yang G, Shen F, Zhong G J, *et al.* Concentration and health risk of heavy metals in crops and soils in a zinc-lead mining area in southwest mountainous regions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(9): 2014-2021.
- [21] 胡国成, 张丽娟, 齐剑英, 等. 贵州万山汞矿周边土壤重金属污染特征及风险评价[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(5): 879-885.  
Hu G C, Zhang L J, Qi J Y, *et al.* Contaminant characteristics and risk assessment of heavy metals in soils from Wanshan mercury mine area, Guizhou province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(5): 879-885.
- [22] 孟忠常, 吴迪, 邓琴, 等. 贵州典型铅锌矿区土壤重金属污染特征与生态危害风险评价[J]. *贵州农业科学*, 2012, **40**(8): 218-221.  
Meng Z C, Wu D, Deng Q, *et al.* Characteristics of heavy metal pollutions in soils of typical lead-zinc mining areas in Guizhou province and the ecological risk assessment [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2012, **40**(8): 218-221.
- [23] 刘劲松, 胡俊良, 张鲲, 等. 柿竹园矿区及周边农田土壤重金属形态分布与生物有效性研究[J]. *金属矿山*, 2018, **47**(11): 155-160.  
Liu J S, Hu J L, Zhang K, *et al.* Study on speciation and bioavailability of heavy metals of agricultural soils in Shizhuyuan mining and its adjacent area[J]. *Metal Mine*, 2018, **47**(11): 155-160.
- [24] 骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势[J]. *化学进展*, 2009, **21**(2-3): 558-565.  
Luo Y M. Current research and development in soil remediation technologies[J]. *Progress in Chemistry*, 2009, **21**(2-3): 558-565.
- [25] Lee C S L, Li X D, Shi W Z, *et al.* Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **356**(1-3): 45-61.
- [26] 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 等. 农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 454-462.  
Wu S Z, Wang D Y, Li W B, *et al.* Risk zoning of heavy metals in a peri-urban area in the black soil farmland based on agricultural products [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 454-462.
- [27] 乔鹏伟, 周小勇, 杨军, 等. 云南个旧锡矿区大屯盆地土壤重金属污染与生态风险评价[J]. *地质通报*, 2014, **33**(8): 1253-1259.  
Qiao P W, Zhou X Y, Yang J, *et al.* Heavy metal pollution and ecological risk assessment of Datun basin in the Gejiu tin mining area, Yunnan province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, **33**(8): 1253-1259.
- [28] 张玉韩, 吴尚昆, 董延涛. 长江经济带矿产资源开发空间格局优化研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, **28**(4): 839-852.  
Zhang Y H, Wu S K, Dong Y T. Optimization of the spatial pattern of mineral resources development in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(4): 839-852.
- [29] Chen N C, Xu L, Chen Z Q. Environmental efficiency analysis of the Yangtze River Economic Zone using super efficiency data envelopment analysis (SEDEA) and tobit models[J]. *Energy*, 2017, **134**: 659-671.
- [30] 胡志强, 苗健铭, 苗长虹. 中国地市尺度工业污染的集聚特征与影响因素[J]. *地理研究*, 2016, **35**(8): 1470-1482.  
Hu Z Q, Miao J M, Miao C H. Agglomeration characteristics of industrial pollution and their influencing factors on the scale of cities in China [J]. *Geographical Research*, 2016, **35**(8): 1470-1482.
- [31] 李芸邑, 刘利萍, 刘元元. 长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3820-3828.  
Li Y Y, Liu L P, Liu Y Y. Spatial distribution pattern and influencing factors of industrial pollution emissions in Yangtze River Economic Belt [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3820-3828.
- [32] 普志坤, 马劼, 周鑫, 等. 云南省矿产资源综合利用现状与对策[J]. *云南地质*, 2020, **39**(2): 325-330.  
Pu Z K, Ma J, Zhou X, *et al.* The present state and strategy of comprehensive utilization of mineral resources in Yunnan [J]. *Yunnan Geology*, 2020, **39**(2): 325-330.
- [33] 龚关, 肖宇鹰, 徐磊, 等. 湖北省典型工业区域土壤重金属形态分布研究[J]. *资源环境与工程*, 2016, **30**(5): 701-703.  
Gong G, Xiao Y Y, Xu L, *et al.* Research on chemical form distribution of soil heavy metals in typical industrial region of Hubei province [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2016, **30**(5): 701-703.
- [34] 叶露. MBR 工艺处理制药废水性能及膜污染调控机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
Ye L. Research on the performances of MBR process for pharmaceutical wastewater and mechanism of membrane fouling control [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [35] 王晖, 丁苗, 饶钦全, 等. 典型医化园区废气和环境空气中挥发性有机物污染特征[J]. *环境监控与预警*, 2018, **10**(6): 43-47.  
Wang H, Ding M, Rao Q Q, *et al.* The pollution characteristic study of volatile organic compounds for waste gas and ambient air

- in a typical pharmaceutical and chemical industry zone [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2018, **10**(6): 43-47.
- [36] 陈志良, 雷国建, 周建民, 等. 典型氯碱污染场地环境风险评价[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(6): 2579-2584.
- Chen Z L, Lei G J, Zhou J M, *et al.* Environmental risk assessment in a typical chlor-alkali contaminated site [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(6): 2579-2584.
- [37] 长江经济带发展统计监测协调领导小组办公室. 长江经济带发展统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [38] 林根满. 石化工业区周边土壤和大气沉降中多环芳烃组成分布特征及源解析[D]. 上海: 东华大学, 2015.
- Lin G M. Composition, distribution and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and atmospheric deposition around the petrochemical industry region [D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [39] 林根满, 吴健, 王敏, 等. 石化工业区周边土壤中多环芳烃的组成及分布特征分析[J]. *环境污染与防治*, 2015, **37**(8): 39-45.
- Lin G M, Wu J, Wang M, *et al.* Analysis of composition and distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in surrounding soil of petrochemical industrial area [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2015, **37**(8): 39-45.
- [40] 冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 等. 典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4594-4603.
- Ran Z X, Chen J Y, Wang Y T, *et al.* Characteristics and influencing factors of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from typical industrial areas of Chengdu[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4594-4603.
- [41] 张涛, 穆肃, 范清华. 某大型化工企业周边居民区积尘中多环芳烃调查及健康风险评价[J]. *中国环境监测*, 2019, **35**(5): 79-86.
- Zhang T, Mu S, Fan Q H. Monitoring and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in residential area around a chemical enterprise [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35**(5): 79-86.
- [42] 李林娟, 王仲智, 孟浩, 等. 基于行业分类的长江经济带工业用地供应规模的时空演化[J/OL]. *世界地理研究*, 1-12 [2021-01-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.p.20201228.1537.004.html>.
- Li L J, Wang Z Z, Meng H, *et al.* Spatial-temporal evolution of industrial land supply in the Yangtze River Economic Belt based on industry classification[J/OL]. *World Regional Studies*, 1-12 [2021-01-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.p.20201228.1537.004.html>.
- [43] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 690-700.
- [44] 张龙, 张云霞, 宋波, 等. 云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4210-4217.
- Zhang L, Zhang Y X, Song B, *et al.* potential of accumulation and application of dominant plants in Lanping lead-zinc mine, Yunnan province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4210-4217.
- [45] Kan X Q, Dong Y Q, Feng L, *et al.* Contamination and health risk assessment of heavy metals in China's lead-zinc mine tailings: a meta-analysis [J]. *Chemosphere*, 2021, **267**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128909.
- [46] 熊国煊, 黄凯, 栾景丽, 等. 铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征研究[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2015, **40**(6): 103-109.
- Xiong G H, Huang K, Luan J L, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in soil around lead-zinc smelting plant [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, **40**(6): 103-109.
- [47] 陈凤, 董泽琴, 王程程, 等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4360-4369.
- Chen F, Dong Z Q, Wang C C, *et al.* Heavy metal contamination of soils and crops near a zinc smelter [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4360-4369.
- [48] 刘薇. 石油化工园区土壤重金属空间分布特征、源解析及污染评价[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
- Liu W. Spatial distribution characteristics, source analysis and pollution evaluation of heavy metals in soil of petrochemical [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2017.
- [49] Khudur L S, Gleeson D B, Ryan M H, *et al.* Implications of co-contamination with aged heavy metals and total petroleum hydrocarbons on natural attenuation and ecotoxicity in Australian soils [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **243**: 94-102.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                      |                                                              |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------|
| Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM <sub>2.5</sub> in Henan Province from 2015 to 2019                                                            | GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>                  | (1697) |
| Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data | QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>      | (1706) |
| Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo                                                                               | YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>     | (1716) |
| Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM <sub>2.5</sub> in Urban Area of Shanghai                                                                                            | ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>        | (1725) |
| Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing                                                                           | CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>       | (1738) |
| Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta                                                           | JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>            | (1747) |
| Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing                                                                        | LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>          | (1756) |
| Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region                                      | ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>        | (1766) |
| Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study                                                                                               | LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>      | (1777) |
| Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System                           | WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>        | (1788) |
| Coordinated Control of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Hangzhou Based on SOA and O <sub>3</sub> Formation Potential                                                          | LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>            | (1799) |
| Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants                                                         | WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>  | (1808) |
| Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an                                                                                             | WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>                 | (1814) |
| Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn                              | TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>                  | (1821) |
| Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors                           | GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>          | (1829) |
| Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City                                                                                                          | YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>               | (1844) |
| Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning                                             | LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong                         | (1853) |
| Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight                                                  | QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>    | (1863) |
| Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang                                    | LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>              | (1873) |
| Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River                                                                    | TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>       | (1885) |
| Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District                                                   | YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> | (1898) |
| Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area                                                                                                        | WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>          | (1908) |
| Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake                                                                      | WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>        | (1920) |
| Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China                              | CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>          | (1930) |
| Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment                                                                                           | CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>            | (1941) |
| Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source                                                                     | GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>                | (1950) |
| Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors                                          | ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>              | (1958) |
| Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China                                               | MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>        | (1966) |
| Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria                                                           | JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>     | (1976) |
| Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity                                                                                                   | LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>                 | (1988) |
| Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay                                                                  | ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>          | (1997) |
| Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands                                                            | WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>   | (2007) |
| Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City                                                                | YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>         | (2018) |
| Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms                                                                                                   | WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>      | (2030) |
| Carbonized Foam Supported Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation                                                                 | WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>               | (2039) |
| Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe <sup>2+</sup> Under Low Nitrogen Concentration                                                                           | ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>       | (2047) |
| Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation                                                                                      | YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>         | (2055) |
| Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt                                                        | ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>        | (2062) |
| Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China                                                               | WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>          | (2071) |
| Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China          | ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>               | (2081) |
| Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background                          | WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>      | (2094) |
| Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment                                                                          | WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>           | (2104) |
| Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment                                                                             | ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui                         | (2115) |
| Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City                                                                                                                  | CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long                    | (2124) |
| Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize                                                                                                     | REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>          | (2133) |
| Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings                                                                                                 | ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>    | (2142) |
| Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China                                                             | LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>             | (2151) |
| Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N <sub>2</sub> O Emission from a Vegetable Field                                                                         | HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>     | (2163) |
| Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions in Paddy Field                                                                           | ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>        | (2171) |
| Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River                       | WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue                         | (2182) |
| Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation                         | ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>             | (2192) |
| Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils                                                                                   | MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>          | (2204) |
| Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area                                                                          | ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>   | (2209) |
| Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil                                        | LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>     | (2219) |
| Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary                                    | HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>          | (2226) |
| System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy                                                    | LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>         | (2237) |