

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期

Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立40周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战 王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙(4801)

河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险 王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅(4810)

海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展 袁东星, 黄勇明, 王婷(4822)

环境水体中硫化物的分析方法:从实验室分析到原位监测 李鹏, 林坤德, 袁东星(4835)

环境水体中无机砷现场分析方法研究进展 薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑(4845)

海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望:厦门大学痕量元素平台建设进展 黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华(4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展 骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠(4869)

水稻土中氮素对微生物固砷的扰动及效应机制 王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮(4876)

中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物 史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林(4888)

中国油气系统甲烷逸散排放估算 陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍(4905)

2015~2020年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征 李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖(4914)

九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征 程宏, 陈荣(4924)

厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征 姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红(4931)

九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制 戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪(4939)

福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制 杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪(4950)

厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制 潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红(4961)

改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附 赵浩, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟(4971)

基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测 徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤(4982)

紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯 徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 谯扬(4992)

研究报告

2019年秋季海南省4次臭氧污染过程特征及潜在源区分析 符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅(5000)

伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制 陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文(5009)

城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性 齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超(5018)

南京北郊 BTEX 特征及健康风险评估 冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀(5030)

我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估 孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱弈, 马长文, 叶建锋(5040)

东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析 陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕(5053)

长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析 刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇(5064)

青藏高原湖泊水环境特征及水质评价 刘智琦, 潘保柱, 韩语, 李刚, 王韬轶(5073)

基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水地球化学特征及控制因素 查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿(5084)

丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系 贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男(5096)

镉沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能 王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科(5106)

基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群 章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇, 厉巍(5115)

寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析 杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广(5123)

中国旱作农田一氧化氮排放及减排:Meta 分析 田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾江新(5131)

硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响:Meta 分析 刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠(5140)

不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响 邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 缙广林(5149)

不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响 唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊(5159)

基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征 刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标(5169)

基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析 高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫(5180)

基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋(5192)

老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响 王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏(5205)

磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响 芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球(5214)

牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响 赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高(5224)

磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和镉累积的影响 帅祖革, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强(5234)

重庆开州区菜地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估 方林发, 叶莘莘, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然(5244)

基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文(5253)

黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征 许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉(5263)

土壤多功能性对微生物多样性降低的响应 陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟(5274)

氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响 苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方(5286)

碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比 李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣(5294)

中国能源消费碳排放的空间化与时空动态 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 顾斌斌, 杜海波(5305)

京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估 杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束樞(5315)

我国塑料污染防治政策分析与建议 李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会(5326)

《环境科学》征订启事(4821) 《环境科学》征稿简则(5213) 信息(5052, 5191, 5273)

基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征

刘孝严^{1,2}, 樊亚男¹, 刘鹏^{1,2}, 吴秋梅^{1,2}, 胡文友^{1,2*}, 田康¹, 黄标^{1,2}

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 长江经济带是我国重大战略发展区域之一, 理清长江经济带农田土壤重金属污染特征与来源对区域土壤重金属污染防控和农业安全生产具有重要意义。在检索文献数据的基础上, 结合空间分析和地累积指数法分析了长江经济带农田土壤重金属(Cd、Cr、Hg、As、Pb、Cu、Zn和Ni)的污染特征、环境风险和主要来源。结果表明: ①农田土壤Cd、Cu、Pb、Hg、Zn和As超过农用地土壤污染风险筛选值的比例分别为39.8%、18.5%、8.3%、6.9%、6.9%和6.4%, 其中土壤Cd的超标比例最高; ②不同区域农田土壤重金属空间分异明显, 上游土壤Cr、Cu、Zn和Ni含量高于中游和下游地区, 中游土壤Cd、As和Pb含量高于上游和下游地区; ③研究区8种重金属的地累积指数分别为: Cd(0.42) > Hg(-0.28) > Pb(-0.32) > Zn(-0.39) > Cu(-0.42) > Cr(-0.7) > As(-0.81) > Ni(-0.73), 其中土壤Cd和Hg地累积风险最高; ④长江经济带中上游地区农田土壤重金属累积主要受地质高背景和矿山开采等因素影响, 中下游地区主要受到快速城镇化、工业生产和高强度农业利用等因素的影响。针对长江经济带农田土壤重金属污染现状及管控需求, 建议加强农田土壤重金属的源头防控, 根据重金属污染程度、地质背景和农产品质量等进行农田土壤重金属污染的分区分级管控和分类管理, 以期实现长江经济带农田土壤环境质量和农业绿色可持续生产。

关键词: 长江经济带; 农田土壤; 重金属污染; 分布特征; 影响因素

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5169-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112303

Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis

LIU Xiao-yan^{1,2}, FAN Ya-nan¹, LIU Peng^{1,2}, WU Qiu-mei^{1,2}, HU Wen-you^{1,2*}, TIAN Kang¹, HUANG Biao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Yangtze River Economic Belt is one of the major strategic development regions in China. It is of great significance to clarify the characteristics and sources of heavy metal pollution in farmland soil of the Yangtze River Economic Belt for the prevention and control of heavy metal pollution and to ensure safe agricultural production. After collecting extensive literature data, we analyzed the pollution characteristics, environmental risk, and potential sources of heavy metals (Cd, Cr, Hg, As, Pb, Cu, Zn, and Ni) in farmland soil of the Yangtze River Economic Belt through the integrated use of spatial and geo-accumulation index analyses. The results showed that: ① the proportion of soil samples exceeding the risk screening values for soil contamination of agricultural land of Cd, Cu, Pb, Hg, Zn, and As were 39.8%, 18.5%, 8.3%, 6.9%, 6.9%, and 6.4%, respectively. Compared with the risk standard, soil Cd had the highest rate of exceeding the standard. ② The contents of Cr, Cu, Zn, and Ni in the upper reaches were higher than those in the middle and lower reaches, and the contents of Cd, As, and Pb in the middle reaches were higher than those in the upper and lower reaches. ③ The results of the geo-accumulation index analysis showed that the contamination degree of the eight heavy metals decreased in the order of Cd(0.42) > Hg(-0.28) > Pb(-0.32) > Zn(-0.39) > Cu(-0.42) > Cr(-0.7) > As(-0.81) > Ni(-0.73), where the accumulation risk of soil Cd and Hg was relatively higher. ④ Higher environmental background and mining activities were the main factors affecting the accumulation of heavy metals in soils in the upper and middle reaches. By contrast, rapid urbanization, industrial production, and intensive agricultural activities were the main factors affecting the heavy metal accumulation in soils in the middle and lower reaches. In view of the current status and control needs of heavy metal pollution in the Yangtze River Economic Belt, it is recommended to strengthen source prevention and control and to also carry out hierarchical control and regional classification management of heavy metal pollution in farmland soils according to the degree of heavy metal pollution, geological background, and quality of agricultural products. The ultimate objective of this research was to archive the farmland soil environmental quality safety and agricultural green sustainable production in the Yangtze River Economic Belt.

Key words: Yangtze River Economic Belt; farmland soil; heavy metal pollution; distribution characteristics; influencing factors

长江是我国第一大河流, 贯穿我国西部、中部和东部地区, 横跨我国十余省, 是我国重要经济中心和工业走廊。长江经济带土壤资源丰富, 土壤类型多样, 耕地面积占全国耕地的33.3%, 但土壤重金属污染和农产品安全问题频发^[1,2]。据文献[3]显示, 全国近一半的重金属重点防控区域位于长江经济带, 且在长三角、长江中游、成渝城市群等区域存在集

中连片的重金属污染问题。此外, 我国多目标地球化

收稿日期: 2021-12-30; 修订日期: 2022-03-08

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2021717); 国家自然科学基金项目(41877512); 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(21)2034); 中国科学院青年创新促进会会员项目(2019312)

作者简介: 刘孝严(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向区域土壤污染调查评估与源解析, E-mail: liuxiaoyan1@issas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: wyhu@issas.ac.cn

学调查也发现长江沿岸存在土壤 Cd 等重金属异常富集现象^[4].

长江经济带上游地区处于有色金属矿带分布密集区域,土壤重金属的自然背景值较高,云贵川等地区土壤重金属超标率在全国范围内属于较高水平^[5]. 张小敏等^[6]的研究发现西南地区土壤重金属含量较我国其他地区高. 中下游地区由于工业化、城镇化进程迅速和农业活动强度较大,部分地区存在主要粮食作物和蔬菜 Cd 等重金属超标现象^[7]. 湖南某工业区周边农田土壤种植的水稻籽粒中 Cd 超标严重^[8]; 在城镇化进程快速的江浙沪地区,三地的交界处土壤重金属含量较高^[9]; 苏州部分农田土壤 Hg 和 Cd 超标率较高,且高风险区主要集中在工业发达乡镇和工厂周边^[10]. 长江经济带土壤重金属污染问题突出,使得生态环境和食品安全受到较大威胁.

为保护和改善长江经济带的生态环境,国家先后出台了一系列的政策来保护长江经济带生态环境,在文献[3]中也明确提出把保护和修复长江生态环境放在首要位置. 虽然目前针对长江经济带土壤重金属污染特征开展了研究,如方传棣等^[11]和张浙等^[12]分析了长江经济带矿区土壤重金属污染特征和健康风险,张义等^[13]对经济带工业区土壤重金属污染特征与空间分布进行研究, Liu 等^[14]分析评价了长江中游主要水稻产区土壤-水稻系统重金属的累积特征, Zhou 等^[15]分析了长江流域农田土壤 Cd 污染现状及与经济环境成本效益的关系. 但针对长江经济带整个区域农田土壤重金属污染特征和影响因素的系统性研究未见报道. 因此,本文通过文献计量手段获取 2009~2020 年间长江经济带 11 省市农田土壤重金属含量信息,明确长江经济带农田土壤重金属的污染特征和空间分布,揭示土壤重金属的污染风险及主要来源,以为长江经济带农田土壤重金属污染防控和环境质量管理提供科学依据和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 文献检索及数据来源

以长江经济带涵盖的 11 个省市:上海、浙江、江苏、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、贵州和云南作为研究区域. 根据文献[3],将整个长江经济带涉及到的省市划分为 3 个区域:上游地区包括云南、贵州、四川和重庆;中游地区包括湖南、湖北和江西;下游地区包括安徽、江苏、浙江和上海.

从公开发表的文献中,以“重金属、农田、各省市名称、土壤”和“heavy metal、soil or farmland、city

name”为关键词在中国知网和 Web of Science 上进行文献检索,主要收集 2009~2020 年间发表的有关长江经济带农田表层土壤重金属(Cd、Cr、Hg、As、Pb、Cu、Zn 和 Ni)含量数据,不包括工业用地、城市用地、绿化和林地等非农用地的研究文献. 为确保研究的准确性,文献的筛选标准为:①研究对象必须是在我国长江经济带开展的区域,且采集样品是农田表层土壤(0~15 cm 或 0~20 cm);②文献中要明确指出研究区域和采样点的具体位置或能够根据文章信息得到;③土壤重金属含量用原文献中给出的均值表示;④文献中样点布设多样,大多采用随机取样,多点混合样本,土壤样品在自然风干,去除样品中的沙石和动植物残体后,经研磨过 60 目或 100 目尼龙筛;⑤土壤重金属采用标准的实验室分析测定(电感耦合等离子体质谱法以及原子吸收分光光度法等),确保样品分析测试质量;⑥土壤 pH 值用原文献给出的均值表示. 共筛选出 282 篇文献,362 组的农田土壤数据,113 671 个采样点位(图 1). 研究区耕作制度分类:混合型(无具体描述)、稻田(水稻)、旱地(小麦、玉米和烟草等)、蔬菜地(大田蔬菜和大棚蔬菜)和园地(茶园和果园等).

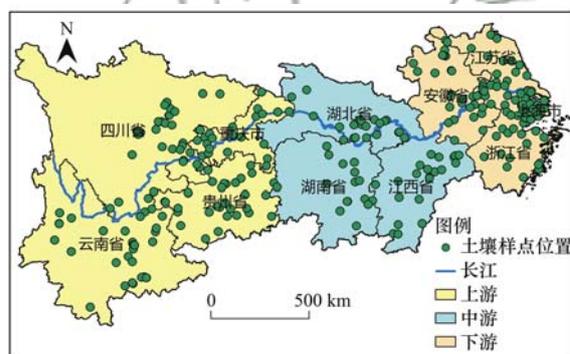


图 1 长江经济带农田土壤调查样点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites of the farmland soils from the Yangtze River Economic Belt

1.2 数据处理与分析

由于部分研究中的采样点受矿区和工业等因素影响较重,可能会导致区域内某种重金属含量存在异常. 因此为保证分析结果的可靠性,在数据统计分析前对土壤重金属数据进行检验处理以剔除异常样本. 本文采用 3 倍标准差法处理文献数据,以 $X \pm 3S$ 为标准, X 表示某重金属所有样点的均值, S 为标准差,超出该范围的异常数据予以剔除^[16].

利用 EXCEL 2016 和 SPSS 22.0 对土壤重金属样本数据进行数据处理、描述性统计分析和方差分析,采用 ArcGIS 10.2 软件绘制土壤重金属含量的空间分布,使用 Origin 2022 绘制土壤重金属含量的区域差异、耕作方式差异和地累积指数.

所引文献中有明确土壤 pH 时,以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中的相应的风险筛选值和管控值作为农田土壤重金属污染评价的依据,无明确 pH 值时则以管控标准中较严格的筛选值和管控值作为评价标准。

1.3 农田土壤重金属污染评价方法

通过地累积指数法(index of geo-accumulation, I_{geo})来评价土壤重金属污染风险水平。地累积指数法是由 Müller^[17]于 1969 年提出,用于沉积物中重金属污染评价。地累积指数法是以对重金属污染影响较大的人为因素和土壤地球化学因素为依据,能够较好地考虑地质背景所带来的影响。不仅能够反映土壤各元素的自然分布特征和累积程度,而且还能判断土壤环境受自然背景和人类活动的影响,其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (K \cdot B_i)]$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_i 为土壤重金属 i 的实测含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); K 为表征岩石地质和沉积特征等影响背景值变化的系数(一般取 $K = 1.5$); B_i 为土壤重金属 i 的评价标准值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),文中采用文献[18]中各省和直辖市的土壤元素背景值。地累积指数法分级标准如表 1 所示,一般认为土壤重金属 i 的 I_{geo} 值越大,污染越严重;当 $I_{geo} > 0$ 时,表明土壤重金属主要来源于人类活动而非成土母质等自然因素。

表 1 地累积指数分级与污染程度

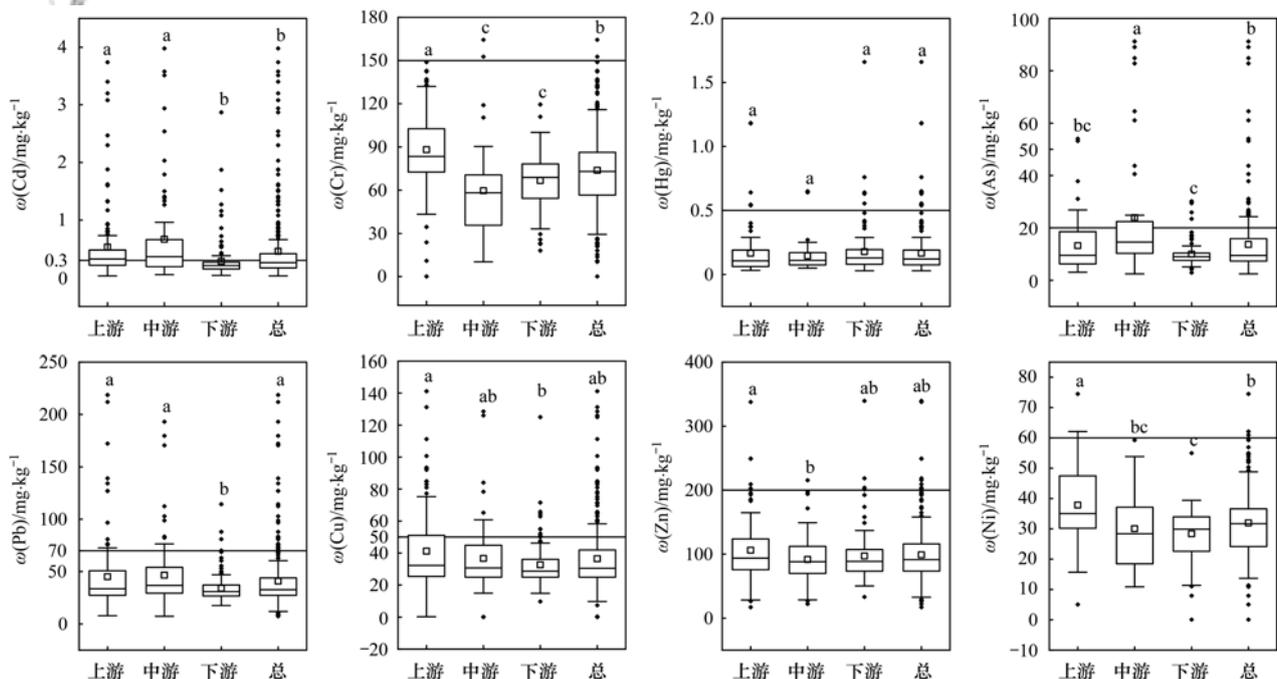
Table 1 Classification of index of geo-accumulation and contamination degree

等级	地累积污染指数(I_{geo})	污染程度
0	$I_{geo} \leq 0$	无污染
1	$0 < I_{geo} \leq 1$	无污染-中度污染
2	$1 < I_{geo} \leq 2$	中度污染
3	$2 < I_{geo} \leq 3$	中度污染-强污染
4	$3 < I_{geo} \leq 4$	强污染
5	$4 < I_{geo} \leq 5$	强污染-极强污染
6	$5 < I_{geo}$	极强污染

2 结果与分析

2.1 长江经济带农田土壤重金属污染特征与区域差异

长江经济带农田土壤中各重金属含量状况如图 2 所示(剔除异常数据),结果表明农田土壤 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 和 $\omega(\text{Ni})$ 的平均值分别为 0.45、73.58、0.17、13.48、40.90、37.09、99.12 和 31.71 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中农用地土壤风险筛选值进行评价,整个区域土壤重金属超标率由高到低依次为: Cd (39.8%) > Cu (18.5%) > Pb (8.3%) > Hg (6.9%) = Zn (6.9%) > As (6.4%) > Ni (2.4%) > Cr (1.5%)。Cd 在上游和下游超标率分别为 54.9% 和 59.5%,远高于下游 15.7% 的超标率; Cu 在上中下游超标率分别为 27.5%、25.8% 和 7.5%。



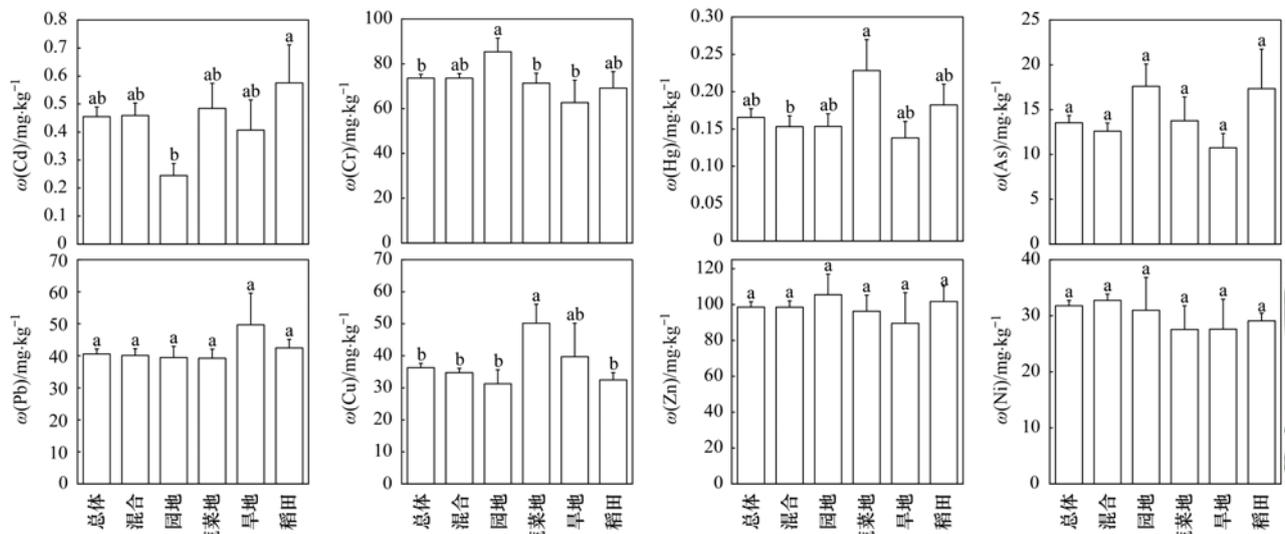
黑线对应筛选值;不同小写字母表示不同地区在 $P < 0.05$ 水平下存在显著差异

图 2 长江经济带不同地区农田土壤重金属含量状况

Fig. 2 Concentrations of heavy metals in farmland soils in different regions of the Yangtze River Economic Belt

As 的超标主要集中在上游和中游地区,超标率分别达 4% 和 22.7%; Pb 在上游和下游超标率分别为 12.4% 和 10.8%,下游仅为 3.5%. Cr 在上游和下游超标率分别为 2.8% 和 2%,在下游无超标. Ni 的超标主要集中于上游地区,为 7.1%. 与土壤环境质量标准的风险管控值相比,主要的超标元素为 Cd 和 Hg,分别有 6.6% 和 2% 的样本超标,其中 Cd 超标主要集中于上游和下游, Hg 超标主要集中于中游. As 和 Pb 超标率较低, Cr 无超标.

对不同耕作方式下土壤重金属含量状况进行分



耕作类型: 总体(所有数据), 混合型(未明确), 稻田, 旱地(小麦、玉米和烟草等), 蔬菜地(大田和大棚蔬菜), 园地(茶园和果园等); 不同小写字母表示不同耕作方式在 $P < 0.05$ 水平下存在显著差异

图 3 长江经济带不同耕作方式下土壤重金属含量状况

Fig. 3 Concentrations of heavy metals in soils under different cropping systems of the Yangtze River Economic Belt

2.2 长江经济带农田土壤重金属空间分布

长江经济带农田土壤重金属含量的空间分布如图 4 所示. 总体上农田土壤 Cd 富集现象明显, $\omega(\text{Cd})$ 较高的点位主要分布在上游和下游地区, 在云南、湖北、湖南、江西和四川等地含量较高, 均值分别为 0.89、0.79、0.66、0.53 和 0.49 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. $\omega(\text{Cr})$ 在上游地区高于中游和下游地区, 且在贵州含量最高, 均值为 96.86 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 土壤 $\omega(\text{Hg})$ 的高富集点位主要分布在上游和下游部分地区, 在贵州、重庆和浙江三地含量水平较高, 均值分别为 0.20、0.17 和 0.245 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 土壤 $\omega(\text{As})$ 在上中下游均有高富集点位分布, 且相对集中分布在湖南和湖北, 均值分别为 35.32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 27.18 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 土壤 $\omega(\text{Pb})$ 在上游和中游地区的云南、贵州和湖南等地相对较高, 均值分别为 58.08、53.67 和 67.96 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 土壤 $\omega(\text{Cu})$ 较高的区域主要分布在云南、江西和贵州等地, 均值分别为 52.98、35.47 和 45.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 土壤 $\omega(\text{Zn})$ 的高富集点位相对集中

析(图 3), 结果显示不同的耕作方式对土壤重金属含量状况存在一定影响. Cd 在不同耕作方式下表现为: 稻田 > 蔬菜地 > 旱地 > 园地; Hg 主要表现为: 蔬菜地 > 稻田 > 园地 > 旱地; Pb 在旱地土壤含量较高, 其他类型相对较低; Cu 在蔬菜地最高, 其次为旱地; Zn 在稻田和园地相对其他类型含量较高; Cr 在园地最高, As 和 Ni 均表现为在园地和稻田含量较高. 总体而言, Cd 和 Hg 在蔬菜地和稻田含量较高, 在旱地和园地含量较低. Cr、As 和 Ni 这三种元素在园地土壤含量最高, 其他类型土壤含量相对较低.

于云南、贵州、湖南和上海, 均值分别为 119.96、114.29、127.13 和 111.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 土壤 $\omega(\text{Ni})$ 在上游的云南和贵州含量较高, 分别为 47.48 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 41.76 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.3 长江经济带农田土壤重金属污染评价

长江经济带农田土壤重金属的地累积指数 (I_{geo}) 如表 2 和图 5 所示. 土壤 Cd、Hg、Pb、Zn、Cu、Cr、Ni 和 As 的 I_{geo} 均值分别为 0.42、-0.30、-0.32、-0.37、-0.42、-0.67、-0.66 和 -0.77. 土壤 Cd、Hg、As、Pb 和 Cu 处于中度及以上污染水平点位所占比例分别为 34.86%、11.16%、3.64%、5.14% 和 4.03%; 此外, Cd、Cu、Hg 和 Pb 分别有 26.91%、29.30%、27.27% 和 19.94% 的样点处于轻度-中度污染水平. 土壤 Cd 的 I_{geo} 值最高, 最大值可达 4.96, 已达到强污染水平. 土壤 Cr 和 Ni 的 I_{geo} 值分别有 88.30% 和 94.48% 为 0 级, 基本不造成污染, 且剩余样本中 Ni 的 I_{geo} 值均低于 1, 说明长江经济带农田土壤 Cr 和 Ni 的污染风险相对较低.

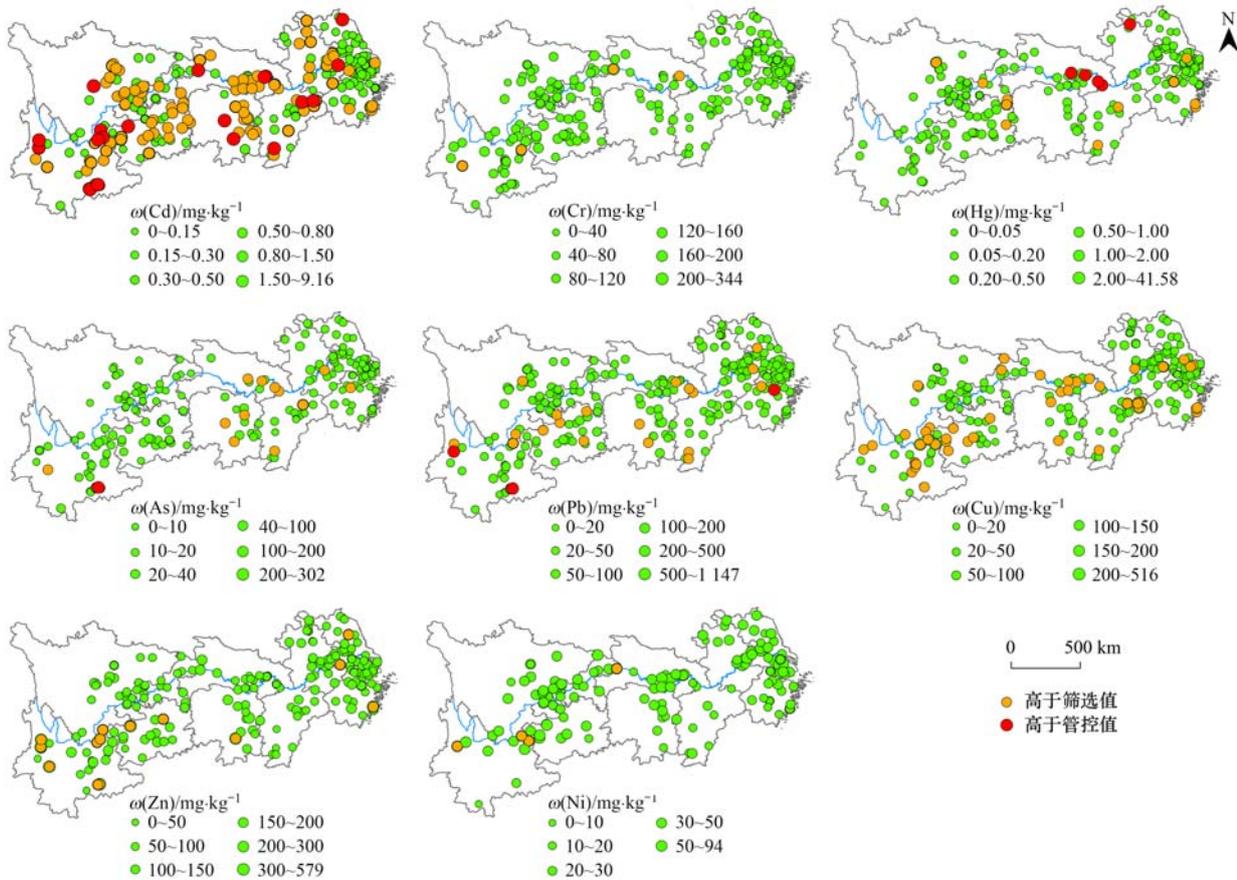


图4 长江经济带农田土壤重金属的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of heavy metals in farmland soils of the Yangtze River Economic Belt

通过对经济带不同省市的 I_{geo} 值分析可知(表2):Cd 的 I_{geo} 均值在四川、湖南、浙江和重庆地区大于1,处于中度污染水平;元素 Hg 在安徽的 I_{geo} 均值大于1,处于中度污染水平;As 元素在安徽和湖北、Pb 元素在湖南和浙江、Cu 元素在浙江的 I_{geo} 均值处于0~1 范围内,处于轻度-中度污染水平,其余地区均处于无污染水平;Cr、Zn 和 Ni 在各省市的 I_{geo} 值均小于0,均处于无污染水平. 总体而言,长江经济带农田土壤 Cd、Hg 污染较为严重,其次为 Pb 和 Cu, Zn、As、Cr 和 Ni 污染程度较轻.

2.4 长江经济带农田土壤重金属的主要来源

针对长江经济带农田土壤重金属来源,目前已有较多的研究报道. 通过对不同区域重金属源解析的研究结果表明,长江经济带农田土壤重金属的来源主要包括自然源和人为来源,且不同区域土壤重金属来源差异与地质背景、矿山开采、工业生产和农业利用等关联密切(表3). 上游和中游的部分区域因重金属含量高的岩石在风化过程中的残积作用导致重金属在土壤中富集,因此自然源是上游和中游农田土壤重金属的重要来源. 上游和中游地区的矿山开采、工业生产和农业活动等过程也是影响土壤重金属污染的主要人为因素. 农业生产中化肥和

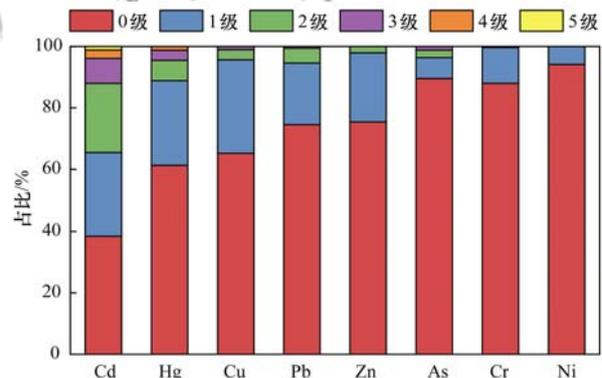


图5 长江经济带农田土壤重金属污染等级(I_{geo})占比

Fig. 5 Proportion of heavy metal pollution levels in farmland soils of the Yangtze River Economic Belt

农药的过量施用,以及长期的污水灌溉等使得中下游的湖南、湖北、江西、江苏和上海等地存在土壤重金属积累或超标问题^[19~21]. 由于磷肥、氮肥和复合肥等肥料中含有一定量的 As、Cd、Pb、Zn、Cr 和 Hg 等重金属,早期施用的杀虫剂等农药中也含有 Hg、Cu、Cd 和 As 等重金属,化肥农药的高强度施用也会导致土壤重金属的累积^[22]. 据文献^[23]显示,在2019年长江经济带上游、中游和下游地区化肥施用量分别达601.1万、618.5万和664.2万t.

此外在长江沿岸的上海、成都、重庆、武汉、

表 2 长江经济带不同省市土壤重金属背景值和 I_{geo} 值¹⁾Table 2 Background values and index of geo-accumulation (I_{geo}) of heavy metals in farmland soils of the Yangtze River Economic Belt

地区	项目	Cd	Cr	Hg	Pb	As	Cu	Zn	Ni
云南	背景值	0.22	65.2	0.06	40.6	18.4	46.3	89.7	42.5
	I_{geo}	0.70 ± 1.46	-0.49 ± 1.87	0.29 ± 0.98	-1.09 ± 1.10	-0.49 ± 1.06	-0.92 ± 1.73	-0.59 ± 1.18	-0.71 ± 1.23
贵州	背景值	0.66	95.9	0.11	35.2	20	32	99.5	39.1
	I_{geo}	-1.82 ± 1.35	-0.67 ± 0.58	0.09 ± 0.74	-0.84 ± 0.59	-0.17 ± 0.79	-0.43 ± 1.05	-0.54 ± 0.80	-0.60 ± 0.63
四川	背景值	0.08	79	0.06	30.9	10.4	31.1	86.5	32.6
	I_{geo}	1.63 ± 0.86	-0.55 ± 0.28	-0.04 ± 1.15	-1.35 ± 0.50	-0.67 ± 0.70	-0.88 ± 1.52	-0.44 ± 0.29	-0.48 ± 0.18
重庆	背景值	0.08	79	0.06	30.9	10.4	31.1	86.5	32.6
	I_{geo}	1.07 ± 0.93	-0.63 ± 0.45	0.04 ± 1.31	-1.18 ± 0.62	-0.62 ± 0.33	-0.59 ± 0.42	-0.53 ± 0.37	-0.64 ± 0.31
湖北	背景值	0.17	86	0.08	26.7	12.3	30.7	83.6	37.3
	I_{geo}	0.96 ± 1.26	-1.36 ± 1.02	-0.40 ± 0.62	0.29 ± 1.41	-0.22 ± 0.68	-1.59 ± 3.38	-0.76 ± 0.73	-0.75 ± 0.76
湖南	背景值	0.13	71.4	0.12	29.7	15.7	27.3	94.4	31.9
	I_{geo}	1.19 ± 1.36	-1.15 ± 0.89	-0.26 ± 0.66	-0.13 ± 0.95	0.29 ± 0.93	-0.25 ± 0.55	-0.23 ± 0.49	-1.00 ± 0.36
江西	背景值	0.11	45.9	0.08	32.3	14.9	20.3	69.4	18.9
	I_{geo}	0.70 ± 1.60	-0.35 ± 0.70	0.14 ± 1.08	-1.11 ± 1.14	-0.64 ± 0.96	-0.04 ± 0.81	-0.62 ± 0.68	-0.40 ± 0.56
安徽	背景值	0.1	66.5	0.03	26.6	9	20.4	62	29.8
	I_{geo}	0.84 ± 1.44	-0.71 ± 0.54	1.03 ± 0.56	0.07 ± 0.65	-0.43 ± 0.56	-0.02 ± 0.60	-0.19 ± 0.57	-1.37 ± 2.61
江苏	背景值	0.13	77.8	0.29	26.2	10	22.3	62.6	26.7
	I_{geo}	-0.14 ± 0.97	-0.88 ± 0.44	-1.91 ± 1.16	-0.75 ± 0.42	-0.29 ± 0.44	-0.09 ± 0.40	-0.09 ± 0.43	-0.46 ± 0.45
浙江	背景值	0.07	52.9	0.09	23.7	9.2	17.6	70.6	24.6
	I_{geo}	1.18 ± 0.75	-0.43 ± 0.50	0.31 ± 1.09	-0.70 ± 0.53	0.00 ± 0.35	0.15 ± 0.64	-0.15 ± 0.55	-0.61 ± 0.54
上海	背景值	0.14	70.2	0.1	25	9.1	27.2	81.3	29.9
	I_{geo}	0.06 ± 0.51	-0.44 ± 0.29	-0.10 ± 0.58	-0.84 ± 0.38	-0.35 ± 0.43	-0.42 ± 0.20	-0.15 ± 0.24	-0.21 ± 0.38
总体	I_{geo}	0.42 ± 1.53	-0.67 ± 0.85	-0.30 ± 1.28	-0.77 ± 0.84	-0.32 ± 0.72	-0.42 ± 1.43	-0.37 ± 0.66	-0.66 ± 0.89

1) 背景值单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

表 3 长江经济带部分地区农田土壤重金属的主要来源

Table 3 Potential sources of heavy metals in farmland soils from typical areas of the Yangtze River Economic Belt

区域	地区	主要来源(重金属或贡献率) ¹⁾	研究对象	文献
上游	个旧矿区周边	矿山开采	Cd、Pb 和 Cr	[31]
	云南沱江沿岸	交通和生活源(Cd、Zn 和 Pb), 自然源(Cu、Cr 和 Ni)	Cd、Zn 和 Pb	[32]
	云南东南地区	人类活动(As 和 Hg), 工业活动(Pb 和 Cd), 自然和人为叠加影响(Cu、Zn 和 Cr)	Cd、Cr 和 Hg	[33]
	云南会泽县	燃煤和肥料(Ni、Cu 和 Cr), 工业活动(Cd、Pb 和 Zn)	Pb、Zn 和 Cd	[34]
	四川成都平原	地质背景值高和人为活动(工业)影响(Cd)	Cd	[35]
	重庆市典型农田	工业排放、燃煤和农业活动(Cd、Zn、Ni、Cu 和 Cr), 当地工业和农业活动(Hg)	Cd、As、Pb 和 Hg、Cu、Zn、Cr 和 Ni	[36]
	重庆酉阳县	地质背景(Cu、As、Cd、Cr 和 Ni), 矿业活动(Cu、Hg、Pb 和 Zn)	Cd 和 Hg	[37]
	三峡库区	畜禽养殖, 工农业生产, 农药化肥使用, 沿江企业	Cd、Cr、Cu、Hg 和 Zn	[38]
中游	湖北省典型农田	肥料施用(31.2)(Cu、Zn 和 Ni), 燃煤和水泥生产(21.4)(Hg 和 As), 交通排放(18.2)(Pb), 自然源(29.2)(Cr、As 和 Cu)	Cd	[26]
	湖南某县稻田	工业污染(Cd), 交通(Pb), 工业废弃物堆放及污水灌溉(As 和 Hg), 自然活动(Cr)	Cd、Pb、As 和 Hg	[39]
	湖南涟源市	燃煤和汽车尾气(Pb、Hg 和 As), 农业活动(Zn、Cu 和 Cd), 自然来源(Cr), 化工、冶金和金属冶炼(Hg 和 Cd)	Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg	[40]
	湖南长沙、醴陵和浏阳	大气沉降(51.21 ~ 94.74), 肥料(3.36 ~ 48.20), 灌溉水(0.58 ~ 12.85)	Cd、Pb 和 As	[41]
	湘江流域	矿产开采及冶炼(Pb 和 Cd)	Cd 和 Pb	[42]
	江西省农田	地质背景高(Pb、Cd 和 Hg), 工矿活动(Cd、Cu、Hg 和 As), 畜禽养殖业(Cu 和 Zn), 污水灌溉(Hg、As 和 Pb)	Cd、Cu、Hg、As 和 Pb	[21, 43]
下游	安徽巢湖典型农田	人为活动(Cd、Cu、Pb 和 Zn), 土壤母质(Cr 和 Ni), 人类活动和土壤母质(As)	As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn	[44]
	江苏张家港	农业和工业活动(As、Cr、Pb、Cd 和 Hg), 土壤母质(Cd 和 Hg)	Cd、Hg	[28]
	江苏南京沿江地区	肥料(Cu 和 Zn), 自然和工业(Cd、Hg 和 Cr), 交通(As 和 Pb)	Cd、Cu 和 Zn	[45]
	江苏南京八卦洲	大气沉降(33), 工业排放(25.4), 土壤母质(10.8)	Cd、As、Pb、Cu、Zn 和 Cr	[46]
	江苏苏州典型农田	污水灌溉, 畜禽养殖, 交通运输	Cu、Cd 和 Hg	[47]
	浙江温岭	电子拆解及工业排入(Cd、Cu、Zn 和 Pb), 土壤母质(Ni)	Cd 和 Cu	[48]
	浙江典型农田	自然(Cr、Cu、Zn 和 Ni), 工农业生产(Cd 和 Hg), 交通源(Pb)	Cd、Pb、Hg、Cu 和 Zn	[49]
上海典型农田	工业活动(27.92)(Hg 和 Pb), 农业活动(27.48)(Cd), 自然来源(20.64)(Pb、Cr 和 As)	Pb、Cd、Hg 和 Cr	[50]	

1) 贡献率的单位为%

长沙和南京等地都是重要的工业城市,城市发展过程中化石燃料的燃烧、金属采矿和冶炼等都可能导致重金属在土壤中累积^[24]. Yuan 等^[25]在对江苏某地进行 Cd 的人为源追踪研究发现,工业生产是人类活动排放 Cd 的主要来源且占总排放量的 62.1%. 蒋璇等^[26]利用正定矩阵因子分析(PMF)模型对湖北省农田土壤金属来源解析,发现农业生产的贡献率为 31.2%,工业排放占比 21.84%. 董驷睿等^[27]利用 PMF 模型对南京沿江地区农田土壤重金属的来源进行解析,发现研究区农田土壤重金属农业源的贡献率为 30.8%,大气沉降和工业源的贡献分别为 33.0% 和 25.4%,自然背景的贡献为 10.8%. 王信凯等^[28]利用地理探测器模型等方法对长江三角洲典型城市农田土壤重金属累积特征与来源的研究发现,工业生产和农业活动是研究区土壤重金属累积的主要原因. 以上研究均证实了工业生产和高强度农业利用等强烈人为活动是造成近些年来土壤重金属积累或污染的主要原因^[25,29,30].

3 讨论

3.1 长江经济带农田土壤重金属污染特征及其影响因素

本文文献计量结果显示,长江经济带不同区域农田土壤重金属污染状况存在差异. 主要表现为长江经济带上游地区土壤 Cr、Cu、Zn 和 Ni 等重金属含量高于中下游地区. 由表 3 可知 Cr 和 Ni 等金属元素主要来源于自然过程. 上游和中游的云南、贵州、四川和广西等地(西南地区)是我国典型的重金属高背景区^[51]. 西南地区地质结构复杂,火成岩或石灰岩母质中重金属含量较高,长期母岩风化残积导致土壤重金属本底值较高^[52~54]. 云贵川等地多种重金属的背景值要高于其他地区(表 2),如云南的 Cr、Cu、Zn 和 Ni 的背景值分别为 65.2、46.3、89.7 和 42.5 mg·kg⁻¹. 刘意章等^[55]的研究发现,在西南高背景区农田土壤 Cr、Ni 和 Zn 等重金属富集显著且主要受风化成土影响. 此外金属矿山开采可能是加剧这些地区重金属富集的主要原因. 2016 年长江经济带 11 省市的矿山数量约 3.5 万个,占全国 45.2%,而经济带的矿产资源主要集中于云贵川等地^[51,52]. 如在云南的兰坪金顶铅锌矿、会泽县铅锌矿和个旧矿区,长期的矿业活动对周边农田重金属污染产生明显影响^[34,56,57]. 张浙等^[12]的研究发现长江经济带的铅锌矿和锡矿土壤重金属污染较为突出. 因此,长江经济带上游本身地质高背景特性和金属矿山开采等人为活动可能加剧农田土壤重金属的富集.

长江经济带中游地区土壤 Cd、As 和 Pb 含量高于上游和下游地区. 本文搜集到的相关研究主要集中在中游地区的湘江流域、江汉平原、鄱阳湖流域和冶矿城市等地农田. 如湖北 Pb 高值区主要分布在江汉平原^[26]. 有“世界钨都”之称的江西大余县是全国 Cd 污染严重的地区之一^[58]. 在有色金属之乡的湖南,多数有色金属和稀有金属矿藏的开采和冶炼也多集中于湘江流域,该区域土壤存在 Cd、Pb 和 As 等污染^[42]. 此外湖北、湖南和江西的工业活动主要集中在氯碱和制药等化工行业、装备制造和铅锌铜的金属冶炼加工业等^[59,60]. As 常作为伴随元素存在于多种金属矿中,因此金属矿的开采与冶炼可能造成 As 累积^[61]. 方传棣等^[11]的研究也发现 Cd 和 As 的平均含量在长江经济带中游矿区土壤最高. 张义等^[13]的研究发现 Cd 和 Pb 可能为长江经济带金属加工业和采矿主要的污染物. 农田土壤酸化会促进重金属活性及其迁移和扩散能力的增强,加剧重金属污染的危害. 近年来江西农田土壤总体成酸化趋势,其中土壤酸化最严重的地区为赣州市,其次为鄱阳湖周边^[62];湖南省有 72.6% 的耕地存在不同程度的土壤酸化,且强酸性耕地面积增加明显^[63]. 以上因素可能造成中游地区农田部分金属风险较高.

长江经济带下游地区农田土壤重金属含量低于上游和中游地区,但也存在局部地区土壤 Cd、Hg、As、Pb 和 Cu 等重金属富集问题. 肖俊清等^[64]的研究发现长江三角洲地区受到 Cd、Pb 和 Cu 等重金属污染,且 Cd 污染最为严重. 甘婷婷等^[65]的研究也发现长三角农用地 Cd 累积最为严重,其次为 Cu 和 Hg 等. 人为因素作为影响江浙地区土壤重金属累积的主要因素,占比分别为 59.71% 和 67.85%^[66]. 长江下游工业生产、快速城镇化和高强度农业利用等,导致区域农田土壤重金属明显累积. 安徽、江苏、浙江和上海等地产业主要以钢铁、化工、电镀、纺织、电子和汽车制造等为主,规模以上工业企业占全国的 30% 左右^[7],这些产业都是长三角地区重要的工业生产类型,对周边农田土壤重金属累积影响较大. 电镀工业产生的“三废”中含有大量的 Cu、Cr 和 Zn 等金属物质,纺织工业中的燃料和助剂等化工原料多含有 Cd、Cu、Hg、As 和 Ni 等^[67,68]. 此外农业集约化生产中化肥农药的高强度施用也是农田土壤重金属积累的主要原因^[7,65,69]. 大量施用含 As 有机及无机肥料,可能也会导致农田土壤 As 含量增高^[60]. Shi 等^[70]的研究发现畜禽粪便和污水灌溉是浙江农田土壤 Hg 的主要来源,畜禽粪便也是部分区域农田土壤中 As 和 Cu 的重要来源.

3.2 长江经济带农田土壤重金属风险管控建议

针对长江经济带重金属分布状况及来源情况,建议加强长江经济带农田土壤重金属污染的源头防控^[71].长江经济带农田土壤存在多种重金属污染,其中 Cd 和 Hg 是需要优先关注的农田土壤重金属污染物,因此需要进一步加强对农田 Cd 和 Hg 污染源的监管.矿山开采和金属加工业是长江经济带上游和中游地区重要的工业活动,应加强对矿产资源开采的管控、限制开发范围及规模,减少重金属污染物对周边农田等环境的影响.长江经济带下游地区工业生产、大气沉降和农业高强度利用等是农田土壤重金属累积的重要来源.应严格控制工业“三废”的排放,督促各企业严格执行国家标准,杜绝超标现象;调整优化产业结构,减少引入含重金属污染物的过程,对于造成土壤污染的企业实施限期整改治理;农业生产过程中加强环境监管力度,引导生产者合理使用化肥、农药和农用薄膜等农业投入品,并严格控制污水灌溉、污泥和固体废弃物用于农业生产.

由于长江经济带上中下游农田地质背景、重金属污染类型和污染程度存在明显的区域差异.中上游的多个地区为我国典型的重金属地质高背景区,现有土壤环境质量评价标准可能难以支撑区域土壤环境质量标准化和差异化管理.建议根据农田土壤重金属污染程度、地质背景和农产品质量等进行农田土壤重金属污染的分区分级管控和分类管理,推进地质高背景区土壤标准建立^[72~74].在优先保护类农田应严格控制新建金属冶炼、加工和化工等工业企业;在安全利用类农田主要通过农艺调控、筛选低累积品种、合理轮作套作和施用土壤改良剂等措施实现中低度重金属污染农田的安全利用;在严格控制类农田,主要采取种植结构调整,如禁止种植重金属易超标的农作物、轮作休耕和退耕还林还草等措施.另外对重金属高污染农田,可通过土壤污染的工程治理和生物修复等多种措施实现农田土壤污染的高效修复^[75].

4 结论

(1)长江经济带农田土壤 Cd 的超标比例最高,达到 39.8%,主要位于上游和中游地区,其次为 Cu、As 和 Pb, Hg、Zn、Cr 和 Ni 的超标率较低;地累积指数评价结果也表明土壤 Cd 的地累积风险最高,地累积指数均值为 0.42,其次为 Hg、Pb 和 Cu, Zn、As、Cr 和 Ni 污染风险较低.

(2)长江经济带农田土壤重金属污染来源与地质背景、工业生产和农业活动密切相关.上游和中

游地区农田土壤重金属累积和污染主要受到地质高背景和矿山开采冶炼等因素叠加影响,中下游地区主要受到快速城镇化、工业生产和农业活动等因素的综合影响.

(3)建议加强长江经济带农田土壤重金属污染的源头防控,实行土壤重金属污染的区域差异性评价和污染风险的差异化管理,加强经济带高风险元素的防控和治理,以实现长江经济带农田土壤环境质量和农业绿色可持续生产.

参考文献:

- [1] 刘朋超,麻泽浩,魏鹏刚,等.长江流域重金属污染特征及综合防治研究进展[J].三峡生态环境监测,2018,3(3):33-37.
Liu P C, Ma Z H, Wei P G, et al. Progress of researches on heavy metal pollution characteristics and comprehensive prevention and control in the Yangtze River Basin[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2018, 3(3): 33-37.
- [2] 谢德体.长江经济带区域发展与土壤资源保护[J].中国科学院院刊,2015,30(S1):203-210.
Xie D T. Regional development of Yangtze River Economic Belt and its soil resources protection[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(S1): 203-210.
- [3] 环境保护部,国家发展和改革委员会,水利部.长江经济带生态环境保护规划[EB/OL].<http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201707/W020170718547124128228.pdf>, 2017-07-18.
- [4] 成杭新,杨忠芳,奚小环,等.长江流域沿江镉异常源追踪与定量评估的研究框架[J].地学前缘,2005,12(1):261-272.
Cheng H X, Yang Z F, Xi X H, et al. A research framework for source tracking and quantitative assessment of the Cd anomalies along the Yangtze River Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(1): 261-272.
- [5] 国土资源部中国地质调查局.中国耕地地球化学调查报告(2015)[EB/OL].<https://www.cgs.gov.cn/upload/201506/20150626/gdbg.pdf>, 2015-06-26.
- [6] 张小敏,张秀英,钟太洋,等.中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J].环境科学,2014,35(2):692-703.
Zhang X M, Zhang X Y, Zhong T Y, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 692-703.
- [7] 杭小帅,王火焰,周健民.长江三角洲地区土壤重金属污染的防治与调控[J].土壤通报,2013,44(1):245-251.
Hang X S, Wang H Y, Zhou J M. Prevention and regulation countermeasures of soil heavy metal contamination in Yangtze River Delta[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(1): 245-251.
- [8] 张晓文.湖南某工业区土壤及水稻重金属污染源解析[D].北京:中国农业科学院,2019.
Zhang X W. Apportionment of heavy metal pollution sources of soil and rice in an industrial area of Hunan Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [9] 邵迪维.长三角农田土壤典型重金属污染特征及生物有效性调控[D].杭州:浙江大学,2017.
Shao D W. Pollution characteristics of typical heavy metals in farmland soil of Yangtze River Delta and regulation on

- bioavailability[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [10] 丁焕新, 陈吉, 孙永泉, 等. 苏州市农田重金属污染防治现状与对策[J]. 安徽农业科学, 2020, **48**(6): 71-73.
Ding H X, Chen J, Sun Y Q, *et al.* Present situation and countermeasures of prevention and control of heavy metal pollution in farmland in Suzhou City [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, **48**(6): 71-73.
- [11] 方传棣, 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.
- [12] 张浙, 卢然, 伍思杨, 等. 长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3763-3772.
Zhang Z, Lu R, Wu S Y, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of mine soil in Yangtze River Economic Belt [J]. Environmental Science, 2022, **43**(7): 3763-3772.
- [13] 张义, 周心劝, 曾晓敏, 等. 长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 2062-2070.
Zhang Y, Zhou X Q, Zeng X M, *et al.* Characteristics and assessment of heavy metal contamination in soils of industrial regions in the Yangtze River economic belt [J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 2062-2070.
- [14] Liu Z P, Zhang Q F, Han T Q, *et al.* Heavy metal pollution in a soil-rice system in the yangtze river region of China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, **13**(1), doi: 10.3390/ijerph13010063.
- [15] Zhou X Y, Wang X R. Cd contamination status and cost-benefits analysis in agriculture soils of Yangtze River basin [J]. Environmental Pollution, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.112962.
- [16] Liu X M, Wu J J, Xu J M. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS [J]. Environmental Pollution, 2006, **141**(2): 257-264.
- [17] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. GEO Journal, 1969, **2**(3): 108-118.
- [18] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [19] Rai P K, Lee S S, Zhang M, *et al.* Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms, and management [J]. Environment International, 2019, **125**: 365-385.
- [20] 方玉东. 我国农田污水灌溉现状、危害及防治对策研究[J]. 农业环境与发展, 2011, **28**(5): 1-6.
- [21] 夏文建, 徐昌旭, 刘增兵, 等. 江西省农田重金属污染现状及防治对策研究[J]. 江西农业学报, 2015, **27**(1): 86-89, 96.
Xia W J, Xu C X, Liu Z B, *et al.* Status of heavy metal pollution in farmland Soil of Jiangxi Province and its control countermeasures [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2015, **27**(1): 86-89, 96.
- [22] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(2): 466-480.
Wang M, Li S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, **20**(2): 466-480.
- [23] 国家统计局. 中国统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [24] 许岚. 长江流域重金属污染源分析及预防措施探讨[A]. 见: 第六届重金属污染防治及风险评估研讨会暨重金属污染防治专业委员会2016年学术年会论文集[C]. 厦门: 中国环境科学学会, 2016.
- [25] Yuan Z W, Luo T, Liu X W, *et al.* Tracing anthropogenic cadmium emissions: from sources to pollution [J]. Science of the Total Environment, 2019, **676**: 87-96.
- [26] 蒋璇, 熊晶, 吴亦潇, 等. 湖北省农田土壤重金属来源解析与质量评价[J]. 环境科学与技术, 2019, **42**(12): 211-217.
Jiang X, Xiong J, Wu Y X, *et al.* Source apportionment and pollution characteristics of heavy metal in agricultural soil in Hubei province [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **42**(12): 211-217.
- [27] 董隼睿, 胡文友, 黄标, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田土壤重金属源解析[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(7): 2103-2111.
Dong L R, Hu W Y, Huang B, *et al.* Source appointment of heavy metals in suburban farmland soils based on positive matrix factorization [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(7): 2103-2111.
- [28] 王信凯, 张艳霞, 黄标, 等. 长江三角洲典型城市农田土壤重金属累积特征与来源[J]. 土壤学报, 2021, **58**(1): 82-91.
Wang X K, Zhang Y X, Huang B, *et al.* Accumulation and sources of heavy metals in agricultural soil in a city typical of the Yangtze River Delta, China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, **58**(1): 82-91.
- [29] Liu G M, Liu B L, Yang L Q, *et al.* Using pXRF to assess the accumulation, sources, and potential ecological risk of potentially toxic elements in soil under two greenhouse vegetable production systems in North China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(10): 11105-11115.
- [30] Chen H Y, Yuan X Y, Li T Y, *et al.* Characteristics of heavy metal transfer and their influencing factors in different soil-crop systems of the industrialization region, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **126**: 193-201.
- [31] 张敏, 包立, 杨浩瑜, 等. 云南省个旧市矿区周边农田污染评价[A]. 见: 2019年中国土壤学会土壤环境专业委员会、土壤化学专业委员会联合学术研讨会论文摘要集[C]. 重庆: 中国土壤学会土壤环境专业委员会, 2019.
- [32] 金修齐. 小尺度农田土壤重金属空间分布、来源解析及污染评价——以云南泮江沿岸某农田为例[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
Jin X Q. Spatial distribution, sources and pollution assessment of heavy metals in small scale farmland soil—a case study of a farmland in Bijiang watershed of Yunnan Province [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [33] 张丽, 张乃明, 包立, 等. 滇东南农田土壤重金属分布特征及污染风险评价[J]. 土壤通报, 2020, **51**(2): 473-480.
Zhang L, Zhang N M, Bao L, *et al.* Heavy metal distribution and pollution risk assessment in farmland soil in southeastern Yunnan province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, **51**(2): 473-480.
- [34] 卢鑫, 胡文友, 黄标, 等. 基于UNMIX模型的矿区周边农田土壤重金属源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1421-1429.
Lu X, Hu W Y, Huang B, *et al.* Source apportionment of heavy metals in farmland soils around mining area based on UNMIX model [J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1421-1429.
- [35] 李冰. 成都平原农田土壤镉污染成因与阻控技术研究[D].

- 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- Li B. Reasons of soil cadmium pollution and control technology in Chengdu plain [D]. Yangling; Northwest A & F University, 2014.
- [36] Li S Y, Jia Z M. Heavy metals in soils from a representative rapidly developing megacity (SW China): levels, source identification and apportionment[J]. *Catena*, 2018, **163**: 414-423.
- [37] 王锐, 邓海, 严明书, 等. 重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4749-4756.
- Wang R, Deng H, Yan M S, *et al.* Assessment and source analysis of heavy metal pollution in farmland soils in Southern Youyang County, Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4749-4756.
- [38] 王金霞, 李谢玲, 何清明, 等. 三峡库区典型农业区土壤重金属污染特征及风险评价[J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(8): 227-234.
- Wang J X, Li X L, He Q M, *et al.* Characterization and risk assessment of heavy metal pollution in agricultural soils in Three Gorge Reservoir Area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(8): 227-234.
- [39] 穆莉, 王跃华, 徐亚平, 等. 湖南省某县稻田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(3): 573-582.
- Mu L, Wang Y H, Xu Y P, *et al.* Pollution characteristics and sources of heavy metals in paddy soils in a county of Hunan Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(3): 573-582.
- [40] Liang J, Feng C T, Zeng G M, *et al.* Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **225**: 681-690.
- [41] Yi K X, Fan W, Chen J Y, *et al.* Annual input and output fluxes of heavy metals to paddy fields in four types of contaminated areas in Hunan Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **634**: 67-76.
- [42] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 260-265.
- Liu C Z, Huang Y Z, Lei M, *et al.* Soil contamination and assessment of heavy metals of Xiangjiang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(1): 260-265.
- [43] 吴昌华, 徐昌旭, 池泽新. 江西省耕地重金属污染防治问题及治理策略[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, **31**(4): 1-3, 37.
- Wu C H, Xu C X, Chi Z X. Problems and strategies of heavy metal pollution control in cultivated land in Jiangxi Province[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, **31**(4): 1-3, 37.
- [44] 秦先燕, 李运怀, 孙跃, 等. 环巢湖典型农业区土壤重金属来源解析[J]. *地球与环境*, 2017, **45**(4): 455-463.
- Qin X Y, Li Y H, Sun Y, *et al.* Source apportionment of soil heavy metals in typically agricultural region around Chaohu Lake, China[J]. *Earth and Environment*, 2017, **45**(4): 455-463.
- [45] 董驷睿, 胡文友, 黄标, 等. 南京沿江典型蔬菜生产系统土壤重金属异常的源解析[J]. *土壤学报*, 2014, **51**(6): 1251-1261.
- Dong L R, Hu W Y, Huang B, *et al.* Sources of heavy metals in soils of a typical vegetable production system along yangtze river in Nanjing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, **51**(6): 1251-1261.
- [46] Hu W Y, Wang H F, Dong L R, *et al.* Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of southeast China: An integrated approach [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **237**: 650-661.
- [47] 沈建伟, 徐加宽, 刘建国, 等. 苏州市农田土壤重金属污染状况研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(S2): 87-89, 93.
- Shen J W, Xu J K, Liu J G, *et al.* Study on heavy metal pollution in agricultural soils of Suzhou [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(S2): 87-89, 93.
- [48] 赵科理, 傅伟军, 叶正钱, 等. 电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3151-3159.
- Zhao K L, Fu W J, Ye Z Q, *et al.* Spatial variation of soil heavy metals in an E-waste dismantling area and their distribution characteristics [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3151-3159.
- [49] 张云芸, 马瑾, 魏海英, 等. 浙江省典型农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(6): 1233-1241.
- Zhang Y Y, Ma J, Wei H Y, *et al.* Heavy metals in typical farmland soils of Zhejiang Province: levels, sources and ecological risks[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2019, **28**(6): 1233-1241.
- [50] Fei X F, Xiao R, Christakos G, *et al.* Comprehensive assessment and source apportionment of heavy metals in Shanghai agricultural soils with different fertility levels [J]. *Ecological Indicators*, 2019, **106**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105508.
- [51] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 143-153.
- [52] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2822-2833.
- Chen W X, Li Q, Wang Z, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2822-2833.
- [53] 罗慧, 刘秀明, 王世杰, 等. 中国南方喀斯特集中分布区土壤Cd污染特征及来源[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(5): 1538-1544.
- Luo H, Liu X M, Wang S J, *et al.* Pollution characteristics and sources of cadmium in soils of the karst area in South China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(5): 1538-1544.
- [54] 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.
- [55] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 等. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2877-2884.
- Liu Y Z, Xiao T F, Xiong Y, *et al.* Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, Southwestern China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2877-2884.
- [56] 冉继伟, 宁平, 孙鑫, 等. 云南个旧土壤农作物重金属污染特征及潜在风险[J]. *中国环境监测*, 2019, **35**(5): 62-68.
- Ran J W, Ning P, Sun X, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and potential risks of soil and crops in Gejiu, Yunnan[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35**(5):

- 62-68.
- [57] 唐瑞玲, 王惠艳, 吕许朋, 等. 西南重金属高背景区农田系统土壤重金属生态风险评价[J]. 现代地质, 2020, **34**(5): 917-927.
Tang R L, Wang H Y, Lü X P, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in farmland system from an area with high background of heavy metals, Southwestern China [J]. Geoscience, 2020, **34**(5): 917-927.
- [58] 王小玲, 王歆, 刘腾云, 等. 江西主要类型重金属污染现状及修复实践[J]. 江西科学, 2014, **32**(5): 594-599.
Wang X L, Wang X, Liu T Y, *et al.* Contaminated situation and remediation practice of the main types by heavy metals in Jiangxi Province[J]. Jiangxi Science, 2014, **32**(5): 594-599.
- [59] 刘媛, 胡忆东. 长江中游城市群产业研究进展及其发展趋势[J]. 城市发展研究, 2016, **23**(10): 21-26.
Liu Y, Hu Y D. The development of the research about the industry of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River and the expecting to forecast the developing trend of the urban agglomeration [J]. Urban Development Studies, 2016, **23**(10): 21-26.
- [60] Hu Y A, Cheng H F, Tao S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: a critical review [J]. Environment International, 2016, **92-93**: 515-532.
- [61] 曾希柏, 苏世鸣, 吴翠霞, 等. 农田土壤中砷的来源及调控研究与展望[J]. 中国农业科技导报, 2014, **16**(2): 85-91.
Zeng X B, Su S M, Wu C X, *et al.* Research and prospect of arsenic source and its regulation in arable land soil [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, **16**(2): 85-91.
- [62] 李伟峰, 叶英聪, 朱安繁, 等. 近30a江西省农田土壤pH时空变化及其与酸雨和施肥量间关系[J]. 自然资源学报, 2017, **32**(11): 1942-1953.
Li W F, Ye Y C, Zhu A F, *et al.* Spatio-temporal variation of pH in cropland of Jiangxi Province in the past 30 years and its relationship with acid rain and fertilizer application [J]. Journal of Natural Resources, 2017, **32**(11): 1942-1953.
- [63] 文星, 李明德, 涂先德, 等. 湖南省耕地土壤的酸化问题及其改良对策[J]. 湖南农业科学, 2013, (1): 56-60.
Wen X, Li M D, Tu X D, *et al.* Acidification problems of arable land in Hunan Province and its improvement countermeasures [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2013, (1): 56-60.
- [64] 肖俊清, 袁旭音, 李继洲. 长江三角洲地区土壤和水稻重金属污染特征研究[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(19): 10206-10208, 10211.
Xiao J Q, Yuan X Y, Li J Z. Characteristics of heavy metal pollution in soil and rice of Yangtze River Delta Region [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, **38**(19): 10206-10208, 10211.
- [65] 甘婷婷, 赵南京, 殷高方, 等. 长江三角洲地区农用地土壤重金属污染状况与防治建议[J]. 中国工程科学, 2021, **23**(1): 174-184.
Gan T T, Zhao N J, Yin G F, *et al.* A review on heavy metal pollution of agricultural land soil in the Yangtze River Delta and relevant pollution control strategy [J]. Strategic Study of CAE, 2021, **23**(1): 174-184.
- [66] Yang S H, Qu Y J, Ma J, *et al.* Comparison of the concentrations, sources, and distributions of heavy metal(loid)s in agricultural soils of two provinces in the Yangtze River Delta, China [J]. Environmental Pollution, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114688.
- [67] 厉炯慧, 翁珊, 方婧, 等. 浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1509-1515.
Li J H, Weng S, Fang J, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil around Haining Electroplating Industrial Park [J]. Environmental Science, 2014, **35**(4): 1509-1515.
- [68] 钟哲辉. 重金属及全氟化合物在纺织印染末端废水中的污染特征及生态风险[D]. 上海: 东华大学, 2021.
Zhong Z H. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metal and perfluorinated compounds in terminal discharge of printing and dyeing wastewater [D]. Shanghai: Donghua University, 2021.
- [69] 张慧, 高吉喜, 宫继萍, 等. 长三角地区生态环境保护形势、问题与建议[J]. 中国发展, 2017, **17**(2): 3-9.
Zhang H, Gao J X, Gong J P, *et al.* Current situation, problems and suggestions on ecological environment protection in the Yangtze River Delta Region [J]. China Development, 2017, **17**(2): 3-9.
- [70] Shi T R, Ma J, Wu F Y, *et al.* Mass balance-based inventory of heavy metals inputs to and outputs from agricultural soils in Zhejiang Province, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **649**: 1269-1280.
- [71] 庄国泰. 我国土壤污染现状与防控策略[J]. 中国科学院院刊, 2015, **30**(4): 477-483.
Zhuang G T. Current situation of national soil pollution and strategies on prevention and control [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, **30**(4): 477-483.
- [72] 胡文友, 陶婷婷, 田康, 等. 中国农田土壤环境质量管理现状与展望[J]. 土壤学报, 2021, **58**(5): 1094-1109.
Hu W Y, Tao T T, Tian K, *et al.* Status and prospect of farmland soil environmental quality management in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, **58**(5): 1094-1109.
- [73] 骆永明, 滕应. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, **33**(2): 145-152.
Luo Y M, Teng Y. Regional difference in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, **33**(2): 145-152.
- [74] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国农业部. 农用地土壤环境管理办法(试行) [EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bl/201710/t20171009_423104.htm, 2017-09-25.
- [75] 曾晓舵, 王向琴, 涂新红, 等. 农田土壤重金属污染阻控技术研究进展[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(9): 1900-1906.
Zeng X D, Wang X Q, Tu X H, *et al.* Research progress on speciation and physiological control of heavy metal in soil-plant system [J]. Ecology and Environment Sciences, 2019, **28**(9): 1900-1906.

CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University .....	..... HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review .....	..... LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary .....	..... CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach .....	..... YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay .....	..... QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province .....	..... YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen .....	..... PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters .....	..... ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS .....	..... XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes .....	..... XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019 .....	..... FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley .....	..... CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas .....	..... QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China .....	..... SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed .....	..... CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season .....	..... LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau .....	..... LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope .....	..... ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir .....	..... HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation .....	..... WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems .....	..... ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions .....	..... DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis .....	..... TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis .....	..... LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China .....	..... SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions .....	..... TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis .....	..... LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model .....	..... GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS .....	..... ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area .....	..... WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils .....	..... LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil .....	..... ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L. ....	..... SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing .....	..... FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios .....	..... HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region .....	..... XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity .....	..... CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes .....	..... SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction .....	..... LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China .....	..... HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings .....	..... YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China .....	..... LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)