

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展	陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓 (1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展	孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙 (1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展	王思梦, 秦伯强 (1228)
淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展	赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超 (1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应	吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋 (1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区	李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯 (1267)
基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析	刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛 (1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势	佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧 (1287)
浙江省大气颗粒物 PM _{2.5} 化学组分污染特征分析	周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳峰, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静 (1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源	徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕 (1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献	闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思 (1319)
江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征	宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜 (1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性	宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏 (1336)
2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变	孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧 (1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单	徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺 (1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控	欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙 (1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估	曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建 (1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征	余悦, 邢新丽, 程铖, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华 (1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析	陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成 (1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价	徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军 (1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析	王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫 (1416)
牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁 (1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析	丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞 (1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析	温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞 (1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价	单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文 (1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素	高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔 (1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素	丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文 (1484)
典型城市内河细菌群落组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析	谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郭蕾 (1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算	郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中 (1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制	曾少毅, 李坤权 (1519)
高比表面疏脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附	闵炳坤, 李坤权 (1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征	刘晨旭, 白晓慧 (1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析	杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕 (1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响	邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章 (1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化	李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源 (1562)
鄱阳湖平原直播稻 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 洪大林, 程婕 (1572)
不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析	周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君 (1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估	李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升 (1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价	杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清 (1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析	石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然 (1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析	康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价	王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨 (1636)
三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳 (1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价	王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东 (1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制	马强, 卫泽斌, 吴启堂 (1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制	林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞 (1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价	刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红 (1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应	张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚 (1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性	冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕 (1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与韭菜菊修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 何川黔, 高波 (1714)
地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议	王锐, 李瑜, 余京, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锆元素富集特征及成因分析	安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原 (1735)
三峡库区消落带落叶杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化	谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓 (1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响	张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平 (1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响	王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明 (1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化	张丹, 彭双, 王丹青, 王一鸣, 林先贵 (1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响	张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林 (1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)	

长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价

刘海¹, 魏伟^{2*}, 黄健敏¹, 赵国红¹

(1. 安徽省公益性地质调查管理中心, 合肥 230091; 2. 四川农业大学建筑与城乡规划学院, 成都 611830)

摘要: 为研究长江流域安徽段土壤-作物系统重金属的污染特征及健康风险, 采集了水稻和小麦及其根系土样品 338 组, 测定了 8 种重金属含量, 采用污染指数法、潜在生态危害、多元统计分析和健康风险进行评价。结果表明, 水稻根系土和小麦根系土重金属含量均超过江淮流域背景, 根系土 Cd、Cu、Cr 和 Ni 具有明显的积累效应, 水稻根系土较小麦土污染严重; 潜在生态风险为轻微-中等风险等级, 主要来源于 Cd 和 Hg 元素。多元统计分析显示 Cu、Pb、Zn 和 Cd 为工业源和农业源, Cr、Ni 为自然源, As 和 Hg 为农业源。水稻对重金属的吸收富集强度依次分别为: Cd > Zn > Cu > Hg > Ni > As > Cr = Pb, 小麦对重金属的吸收富集强度依次分别为: Zn > Cd > Cu > Hg > Ni > As = Pb > Cr; 根系土重金属健康风险评估结果显示儿童更易受到重金属污染威胁, 经口摄入是发生非致癌风险的主要暴露途径。非致癌风险评价表明小麦根系土对儿童具有一定的非致癌风险, 但不存在致癌风险。摄入水稻和小麦对成人和儿童均有一定程度的非致癌风险和不可接受的致癌风险。

关键词: 长江流域; 土壤-作物系统; 重金属; 污染; 健康风险

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1686-12 DOI: 10.13227/j.hjks.202203292

Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin

LIU Hai¹, WEI Wei^{2*}, HUANG Jian-min¹, ZHAO Guo-hong¹

(1. Public Geological Survey Management Center in Anhui Province, Hefei 230091, China; 2. College of Architecture and Urban-Rural Planning, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611830, China)

Abstract: In order to explore the pollution characteristics and health risks of heavy metals in a soil-crop system in the Anhui section of the Yangtze River basin, a total of 338 groups of soil samples from rice, wheat, and their roots were collected, and the contents of eight types of heavy metals were determined. Additionally, the pollution index method, potential ecological hazard, multivariate statistical analysis, and health risk were used to evaluate the heavy metal content in rice and wheat root soil. The results showed that Cd, Cu, Cr, and Ni in the soil had an obvious accumulation effect, and the pollution of rice root soil was more serious than that of wheat soil. The potential ecological risk was mild to moderate, which mainly came from the elements Cd and Hg. Multivariate statistical analysis showed that Cu, Pb, Zn, and Cd were industrial sources and agricultural sources; Cr and Ni were natural sources; and As and Hg were agricultural sources. The absorption and enrichment intensity of heavy metals by rice was in the order of Cd > Zn > Cu > Hg > Ni > As > Cr = Pb, and those in wheat were ordered as Zn > Cd > Cu > Hg > Ni > As = Pb > Cr. The root soil heavy metal health risk assessment indicated that oral intake was the main exposure route of non-carcinogenic risk, and children were more vulnerable to heavy metal pollution. Non-carcinogenic risk assessment showed that wheat root soil posed non-carcinogenic risk to children but no carcinogenic risk. Intake of rice and wheat had some degree of non-carcinogenic risk and unacceptable carcinogenic risk for both adults and children.

Key words: Yangtze River basin; soil-crop system; heavy metals; pollution; health risk assessment

土壤是地球上生命的关键要素, 土壤重金属关系农产品的质量安全, 直接或间接影响人体健康, 从而广泛受到关注。随着农业集约化的发展, 农业耕作中各种化学农药和化肥的过度使用, 农田土壤中重金属的积累已成为一个严重问题^[1]。重金属可通过多种途径进入人体(例如摄入土壤、吸入灰尘、皮肤接触土壤以及食用在受污染土壤中生长的农作物)^[2,3], 引发心血管、肾脏和神经系统等疾病, 甚至癌症^[3]。据统计, 每年全世界约 6 亿人在食用污染农作物后患病, 超过 42 万人死亡^[4]。已有研究表明, 农作物重金属主要来源于其生长的土壤环境, 不同作物间的富集及积累差异明显^[5]。因此, 评价土壤和农作物重金属对人体健康的危害具有重要的现实意义。

近年来, 国内外学者就土壤-农作物系统方面开展了大量的研究^[4~18], 其研究热点集中在重金属含量、污染评估与来源识别、农作物安全性和健康风险评价^[4~18]等方面, 农作物种类包括水稻^[5,6,9,15]、玉米^[12]、小麦^[12]、蔬菜^[7,17]、水果^[18]和茶叶^[10]等。土壤-农作物间污染特征和健康风险仍是当前的研究热点。然而, 以往的研究区域大多数以污染场地或典型农田区块为主^[4~18], 区域性的研究工作略显不足。因此, 开展区域性土壤-作物重金属协同健康风险评估研究工作有助于优化调整农产品结构, 避

收稿日期: 2022-03-31; 修订日期: 2022-06-07

基金项目: 安徽省自然资源厅公益性项目(2015g-17)

作者简介: 刘海(1984~), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为环境风险评估与管理, E-mail: 103304365@qq.com

* 通信作者, E-mail: jpwflz@scau.edu.cn

免食源性危害。

长江流域安徽段农业资源条件优越,是我国水稻、小麦和玉米等重要的农产品产区和国家商品粮生产基地之一^[19,20]。流域内农田土壤和农作物中均存在 Cd、Hg、As、Pb、Fe 和 Mn 等重金属超标或异常现象^[20,21],研究区土壤重金属的研究主要集中在单个城市的小尺度范围^[19],对整个流域土壤-作物系统中的重金属研究更少^[22]。尤其在土壤与农作物重金属污染水平、潜在来源和生态环境及健康风险的评价研究相对不足,尚不能全面了解区域土壤-作物系统的污染特征和健康状况。鉴于此,本研究旨在评估长江流域安徽段土壤-作物中重金属污染特征及对人体健康的危害,研究内容主要包括:①测定土壤-农作物(水稻和小麦)中的重金属含量;②评价土壤-作物系统重金属污染程度,确定土壤重金属的污染来源;③协同评估不同暴露途径土壤-作物的健康风险。以期为土壤和农作物重金属污染评价、治理和风险管控提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于安徽省中部,地理坐标东经 115°45′~119°23′,北纬 29°34′~33°10′。区域面积 7.58 万 km²,涉及合肥、芜湖、安庆、池州、铜陵、马鞍山和滁州等 46 个市县区。属亚热带湿润季风气候和暖温带半湿润气候,年平均气温为 15.7~16.6℃,年均降水量为 1 500~1 800 mm^[23]。区内形成了平原、丘陵、低山为主的复杂地貌类型,地势南北高、中间低,整体上自西南向东北倾斜;区内江河纵横交错,湖泊众多,主要集中分布于长江两岸。

研究区地跨华北地台、秦岭褶皱系、扬子地台 3 个一级地质单元,岩浆岩、沉积岩和变质岩均有分布,地质构造复杂,成矿条件优越,各类金属和非金属矿产资源种类多,储量也较为丰富^[19,20],其中铜陵矿集区是长江中下游铁铜硫金成矿带的重要组成部分。研究区土壤母质主要以河流冲积物母质、晚更新世黄土母质、红土母质(蠕虫状网纹)、基岩风化残-坡积物(洪积物)母质为主^[19,20]。土壤类型主要为水稻土和红壤。土地利用类型主要为农用地(包括水田、旱地和园地)和林地^[19]。粮食作物以水稻和小麦为主,经济作物主要有棉花、油菜籽、茶

叶、山核桃、丹皮和生姜等。

1.2 样品采集与测试

2017 年 7~8 月在研究区采集水稻和小麦及其根系土样品 338 组(图 1),其中水稻及其根系土 285 组,小麦及其根系土 53 组。采用 GPS 定位采样点,农作物样品采集按照五点梅花法选取 4~5 个样点,每个样点取 60 cm×60 cm 样方一个,分别采集然后组合成一个样品,样品重量不低于 1 000 g。根系土壤样品与农作物样品同点采集,主要采用网格化布点,平均采样密度为 8 点·km⁻²,采集 0~20 cm 的连续土壤柱,土壤样品由 3~5 个子样等量混合而成。

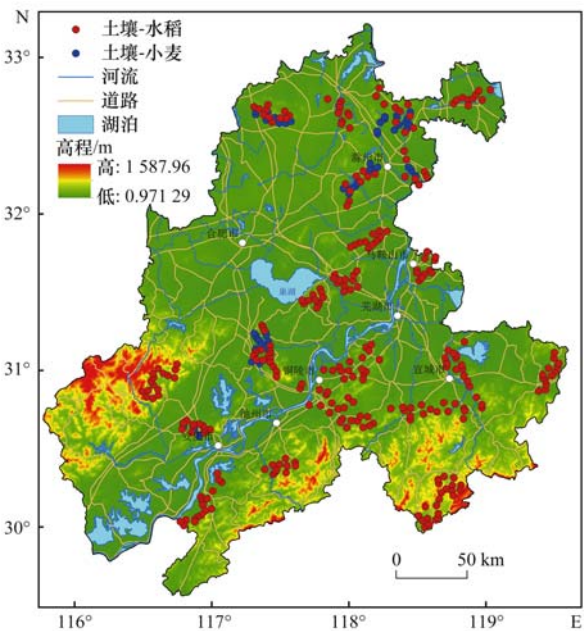


图 1 研究区位置及土壤-农作物采样点分布示意
Fig. 1 Location and distribution of sampling sites

依据《生态地球化学评价动植物样品分析方法》(DZ/T 0253-2014)标准,农作物重金属测试采用电感耦合等离子体光谱法(ICP-AES)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)为主,以原子荧光法(AFS)和比色法(COL)为辅的分析方法配套方案进行测试。以《区域地球化学样品分析方法》(DZ/T 0279-2016)为依据,根系土使用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定 Cr、Ni、Cu、Pb 和 Zn 等 5 种元素,电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定 Cd,原子荧光法(AFS)测定 As 和 Hg,离子选择性电极法(ISE)测定 pH。各重金属的检出限如表 1 所示。测试过程中采用试样空白、平行双样和国家标准样品进行质量

表 1 重金属检出限/mg·kg⁻¹

Table 1 Detection limits for the examined heavy metals/mg·kg ⁻¹								
元素	As	Hg	Cd	Cr	Ni	Cu	Pb	Zn
土壤	0.2	0.005	0.02	3	0.05	1	2	2
农作物	0.01	0.000 5	0.000 1	0.005	0.005	0.005	0.005	0.05

保证和控制,加标回收率在 95%~105%。所有样品分析误差均小于 10%。

1.3 评价方法

1.3.1 内梅罗污染指数法

内梅罗污染指数法既可反映土壤和农作物中单一重金属元素的污染水平,也能评价多种重金属的综合污染水平,计算公式如下:

$$PI_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

$$NPI = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{max}^2}{2}} \quad (2)$$

表 2 污染指数及潜在生态风险分级标准

Table 2 Classification criteria of pollution index method and potential ecological hazards

污染指数				潜在生态风险		
PI	污染等级	NPI	污染水平	E_r^i	RI	等级
$PI < 1.0$	清洁	$NPI \leq 0.7$	清洁	$E_r^i < 40$	$RI < 150$	轻度
$1.0 \leq PI < 2.0$	轻污染	$0.7 < NPI \leq 1.0$	尚清洁	$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中度
$2.0 \leq PI < 3.0$	中污染	$1.0 < NPI \leq 2.0$	轻污染	$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	较重
$PI \geq 3.0$	重污染	$2.0 < NPI \leq 3.0$	中污染	$160 \leq E_r^i < 320$	$RI \geq 600$	重度
		$NPI > 3.0$	重污染	$E_r^i \geq 320$		严重

1.3.2 潜在生态风险评价

潜在生态风险指数由瑞典学者 Hakanson 基于重金属的理化性质和环境的相互作用提出,用以评价重金属污染程度及其潜在生态危害^[24]。采用如下公式计算:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n \left(T_r^i \times \frac{W_i}{B_i} \right) \quad (3)$$

式中,RI 为综合生态风险指数,无量纲; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险指数,无量纲; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数,无量纲; W_i 为重金属元素 i 的实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; B_i 为重金属元素 i 的背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。重金属 Cu、As、Cd、Cr、Hg、Zn、Ni 和 Pb 的毒性响应系数分别为 5、10、30、2、5、5、5 和 5^[25]; 重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的背景值分别为 9.40、0.104、69.4、24.9、0.041、25.0、25.9 和 53.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[23]。潜在生态风险指数评价标准见表 2。

1.3.3 富集系数

富集系数反映生物富集、累积和吸收能力与程度的数量关系,可定量评估农作物中重金属累积的风险和危害程度,是评估食物链重金属对人类暴露量的重要指标^[15]。计算公式如下:

$$BCF = \frac{C_p}{C_s} \quad (4)$$

式中,BCF 为富集系数, C_p 为农作物中重金属实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_s 为土壤重金属实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

式中, PI_i 为土壤或农作物中重金属元素 i 污染指数; C_i 为土壤或农作物重金属 i 的实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; S_i 为土壤或农作物重金属 i 的评价标准, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; NPI 为内梅罗综合污染指数, P_{ave} 为重金属 i 单项污染指数的平均值; P_{max} 为重金属 i 单项污染指数的最大值。

根系土重金属污染评价标准采用《土壤环境质量农用地污染风险管控标准(试行)》(GB 1568-2018)筛选值。农作物籽实的重金属污染评价标准采用《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017),污染指数评价标准见表 2。

1.3.4 健康风险评价

采用美国环保署推荐的健康风险评价模型对研究区成人和儿童的致癌和非致癌健康风险进行评价。儿童和成人通过上述 4 种暴露途径的日均摄入量采用如下公式计算^[13~17]:

$$ADI_{\text{摄食-土}} = \frac{C_{\pm} \times \text{IngR}_{\pm} \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (5)$$

$$ADI_{\text{呼吸吸入}} = \frac{C_{\pm} \times \text{InhR}_{\pm} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (6)$$

$$ADI_{\text{皮肤接触}} = \frac{C_{\pm} \times CF \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (7)$$

$$ADI_{\text{摄食-作物}} = \frac{C_{\text{作物}} \times \text{IngR}_{\text{作物}} \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (8)$$

重金属对人体的非致癌和致癌风险指数计算如下:

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ_i = \sum_{i=1}^n \frac{ADI_i}{RfD_i} \quad (9)$$

$$TCR = \sum_{i=1}^n CR_i = \sum_{i=1}^n ADI_i \times SF_i \quad (10)$$

式中,ADI 为重金属日均摄入量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; HI 和 HQ 分别为重金属综合和单项元素非致癌健康风险指数; TCR 和 CR 分别为重金属综合和单项重金属致癌健康风险指数。公式(5)~(8)中所用参数的含义和取值见表 3; 公式(9)~(10)中所用参数的含义和取值见表 4。

表 3 健康风险评价日均暴露参数
Table 3 Health risk assessment exposure parameters

参数	含义	单位	取值		文献
			儿童	成人	
$C_{\text{土}}$	根系土重金属含量	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	本研究	本研究	本研究
$C_{\text{作物}}$	农作物籽实重金属含量	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	本研究	本研究	本研究
$\text{IngR}_{\text{土}}$	土壤颗粒摄取速率	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	200	100	[26]
$\text{IngR}_{\text{水稻}}$	水稻摄取速率	$\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	198.4	389.2	[27]
$\text{IngR}_{\text{小麦}}$	小麦摄取速率	$\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	94.47	159.9	[28]
EF	暴露频率	$\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	350	350	[26]
ED	暴露时间	a	6	24	[26]
$\text{InhR}_{\text{土}}$	土壤颗粒吸入速率	$\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	7.65	20	[26]
BW	体重	kg	16	60	[28]
CF	转换因子	$\text{kg}\cdot\text{mg}^{-1}$	10^{-6}	10^{-6}	[26]
PEF	土壤粉尘扩散因子	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	$1.36\text{E}+09$	$1.36\text{E}+09$	[29]
AF	土壤对皮肤的黏附系数	$\text{mg}\cdot\text{cm}$	0.2	0.07	[26]
SA	可能接触土壤的皮肤面积	$\text{cm}^2\cdot\text{d}^{-1}$	2 800	5 700	[26]
ABS	皮肤吸收系数	无量纲	0.001	0.001	[26]
AT-非致癌	平均暴露时间	d	$\text{ED}\times 365$	$\text{ED}\times 365$	[26]
AT-致癌	平均暴露时间	d	70×365	70×365	[26]

表 4 模型参数 RfD 和 SF 值^[9,30]
Table 4 Model parameters RfD and SF values

元素	RfD/ $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$			SF/ $(\text{kg}\cdot\text{d})\cdot\text{mg}^{-1}$		
	经口摄入	呼吸吸入	皮肤接触	经口摄入	呼吸吸入	皮肤接触
As	$3.00\text{E}-04$	$1.23\text{E}-04$	$1.23\text{E}-04$	$1.5\text{E}+00$	$1.51\text{E}+01$	$3.66\text{E}+00$
Cd	$1.00\text{E}-03$	$1.00\text{E}-05$	$1.00\text{E}-05$	$6.10\text{E}+00$	$6.30\text{E}+00$	— ¹⁾
Cr	$3.00\text{E}-03$	$2.86\text{E}-05$	$6.00\text{E}-05$	$8.50\text{E}-03$	$4.20\text{E}+01$	—
Cu	$4.00\text{E}-02$	$4.02\text{E}-02$	$1.20\text{E}-02$	—	—	—
Hg	$3.00\text{E}-04$	$8.57\text{E}-05$	$2.10\text{E}-05$	—	—	—
Ni	$2.00\text{E}-02$	$2.06\text{E}-02$	$5.40\text{E}-03$	—	$8.40\text{E}-01$	—
Pb	$3.50\text{E}-03$	$3.52\text{E}-03$	$5.25\text{E}-04$	$8.50\text{E}-03$	—	—
Zn	$3.00\text{E}-01$	$3.00\text{E}-01$	$6.00\text{E}-02$	—	—	—

1) “—”表示无该数值

重金属的非致癌风险可分为无风险($\text{HQ}_i/\text{HI}<1$)和有风险($\text{HQ}_i/\text{HI}>1$);致癌风险可分为无风险($\text{CR}_i/\text{TCR}<10^{-6}$)、有人体可耐受的风险($10^{-6}<\text{CR}_i/\text{TCR}<10^{-4}$)和有人体不可耐受的风险($\text{CR}_i/\text{TCR}\geq 10^{-4}$).

1.4 实验数据处理

采用 ArcGIS 10.8 软件制作研究区域分布示意图,Excel 2013 和 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析,基于 Origin 2021 软件绘制相关图件.

2 结果与讨论

2.1 根系土重金属含量及污染特征

研究区根系土 pH 在 4.58 ~ 8.38,平均值为 6.31,整体偏酸性水平(表 5).水稻根系土和小麦根系土重金属平均含量由高到低依次为: $\text{Zn}>\text{Cr}>\text{Cu}>\text{Pb}>\text{Ni}>\text{As}>\text{Cd}>\text{Hg}$ 和 $\text{Cr}>\text{Zn}>\text{Ni}>\text{Cu}>\text{Pb}>\text{As}>\text{Cd}>\text{Hg}$,均高于江淮流域背景值^[23],表明重金属在根系土中都有一定程度的累积.水稻根系土中

$\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 平均值分别为 10.93、0.31、41.47、71.93、0.08、30.43、35.62 和 84.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;为背景值^[23]的 1.16、3.12、1.67、1.04、2.02、1.22、1.38 和 1.58 倍;小麦根系土中为 11.50、0.15、31.00、88.78、0.05、44.96、27.33 和 72.94 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 5),为背景值^[23]的 1.22、1.52、1.24、1.28、1.36、1.80、1.06 和 1.37 倍.水稻根系土中 Cd 和 Hg 累积最为明显;而小麦根系土中为 Cd 和 Ni.

水稻根系土重金属的变异系数依次为: Cu (190.89%)> Cd (95.16%)> Pb (90.54%)> As (78.13%)> Ni (63.02%)> Hg (54.56%)> Zn (41.51%)> Cr (40.72%),小麦根系土 Ni (115.61%)> Hg (92.34%)> Cd (71.15%)> Cr (63.95%)> As (47.51%)> Cu (33.67%)> Zn (31.21%)> Pb (21.11%).水稻根系土 Cu 为异常的强变异,Cd、Pb、As、Ni 和 Hg 为强变异;小麦根系土中 Ni 为异常的强变异,Hg、Cd 和 Cr 为强变

表 5 不同根系土重金属参数描述性分析
Table 5 Descriptive statistics for heavy metals in soil

耕地类型	参数	pH	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
水稻土 (n=285)	最大值/mg·kg ⁻¹	8.38	91.90	2.45	1 015.80	242.40	0.30	151.40	441.50	416.90
	最小值/mg·kg ⁻¹	4.65	0.90	0.08	13.50	13.80	0.02	7.70	15.10	30.30
	平均值/mg·kg ⁻¹	6.47	10.93	0.31	41.47	71.93	0.08	30.43	35.62	84.27
	标准差/mg·kg ⁻¹	0.97	8.54	0.30	79.16	29.29	0.04	19.18	32.25	34.98
	变异系数/%	14.97	78.13	95.16	190.89	40.72	54.56	63.02	90.54	41.51
	超标率/%		4.21	13.33	7.02	0.00	0.00	1.75	1.75	0.35
	NPI	0.87	PI							
小麦土 (n=53)	最大值/mg·kg ⁻¹	8.03	29.8	0.846	61.4	330.9	0.331	300.9	49.2	137.3
	最小值/mg·kg ⁻¹	4.58	2.6	0.068	17.3	41.1	0.021	17.5	17.8	43.5
	平均值/mg·kg ⁻¹	6.15	11.50	0.15	31.00	88.78	0.05	44.96	27.33	72.94
	标准差/mg·kg ⁻¹	1.01	5.46	0.11	10.44	56.77	0.05	51.98	5.77	22.76
	变异系数/%	16.40	47.51	71.15	33.67	63.95	92.34	115.61	21.11	31.21
	超标率/%		0.35	0.35	1.40	1.75	0.00	2.11	0.00	0.00
	NPI	0.65	PI							
			0.38	0.38	0.62	0.36	0.11	0.64	0.27	0.36

异. 表明研究区土壤重金属具有明显的空间异质性, 受人类活动影响较大. 研究区农田根系土重金属平均含量高于安徽省北部农田表层土壤重金属含量^[12], 但低于采矿活动强烈的铜陵地区^[27]. 与长江三角洲^[31]和珠江三角洲^[4]农作物根系土重金属平均含量相比较, 区内农作物根系土中 Cr、Cd、Cu、Ni 和 As 等重金属的平均含量明显偏高, 呈明显富集. 研究区属长江中下游典型的铁铜硫金成矿带, 具有较高的高地质背景值^[32], 推测 Cu、Ni 和 Cd 的富集受采矿、冶炼活动影响, 另外, 随着城镇化进程的加快, 区内农业节约、集约化程度高, 大量施用农业和化肥, 也导致重金属的富集^[15,17].

以土壤环境质量筛选值 (GB 1568-2018) 为评价标准, 水稻根系土中除 Cr 和 Hg 不超标外, As、Cd、Cu、Cr、Ni、Pb 和 Zn 均存在不同程度的超标, Cd 超标较为严重 (超标率 13.33%); 小麦根系土中除 Hg、Pb 和 Zn 不超标外, As、Cd、Cu、Cr 和 Ni 有少量的超标, 以 Ni 超标较为严重 (超标率 2.11%)

(表 5). 水稻根系土重金属的单因子污染平均值指数 (PI) 依次为: Cu(0.83) > Cd(0.78) > Ni(0.43) > Zn(0.42) > As(0.36) = Pb(0.36) > Cr(0.29) > Hg(0.16). 小麦根系重金属的单因子污染平均值指数 (PI) 依次为 Ni(0.64) > Cu(0.62) > Cd(0.38) = As(0.38) > Cr(0.36) = Zn(0.36) > Pb(0.27) > Hg(0.11) (表 5), 根系土单因子污染指数 (PI) 均值均小于 1, 污染等级为清洁. 水稻土内梅罗综合污染指数 (NPI) 为 0.87, 污染等级为尚清洁, 小麦根系土的综合污染指数为 0.65, 污染等级为清洁. 需要关注水稻土的重金属污染, 尤其是 Cu、Cd 元素的污染.

2.2 根系土潜在生态风险评价

研究区根系土 pH 整体处于偏酸性水平, 酸性条件下容易提高重金属的活性, 增加土壤重金属污染的生态风险水平. 比较 8 种重金属 E_r^i 的平均值可知 (表 6), 研究区根系土重金属元素的风险值由大到小依次为: Cd(82.84) > Hg(74.94) > As(11.72) > Cu(8.00) > Pb(6.62) > Ni(6.54) > Cr(2.15) >

表 6 根系土重金属潜在生态风险评价指数
Table 6 Potential ecological risk assessment index of heavy metals in root soils

潜在生态风险指数				样点频数分布数量和比例/%				
				$E_r^i < 40$	$40 \leq E_r^i < 80$	$80 \leq E_r^i < 160$	$160 \leq E_r^i < 320$	$E_r^i \geq 320$
元素	最大值	最小值	平均值	RI < 150	150 ≤ RI < 300	300 ≤ RI < 600	RI ≥ 600	
				轻度	中度	较重	重度	严重
As	97.77	0.96	11.72	333(98.52)	4(1.18)	1(0.30)	0	0
Cd	707.60	19.62	82.84	73(21.60)	159(47.04)	71(21.01)	29(8.58)	6(1.78)
Cu	203.98	2.71	8.00	335(99.11)	1(0.30)	0	2(0.59)	0
Cr	9.54	0.40	2.15	338(100)	0	0	0	0
Hg	322.93	15.61	74.94	68(20.12)	156(46.15)	96(28.40)	17(5.03)	1(0.30)
Ni	60.18	1.54	6.54	336(99.41)	2(0.59)	0	0	0
Pb	85.23	2.92	6.62	336(99.41)	1(0.30)	1(0.30)	0	0
Zn	7.84	0.57	1.55	338(100)	0	0	0	0
RI	847.51	68.44	194.37	147(43.49)	146(43.20)	41(12.13)	4(1.18)	

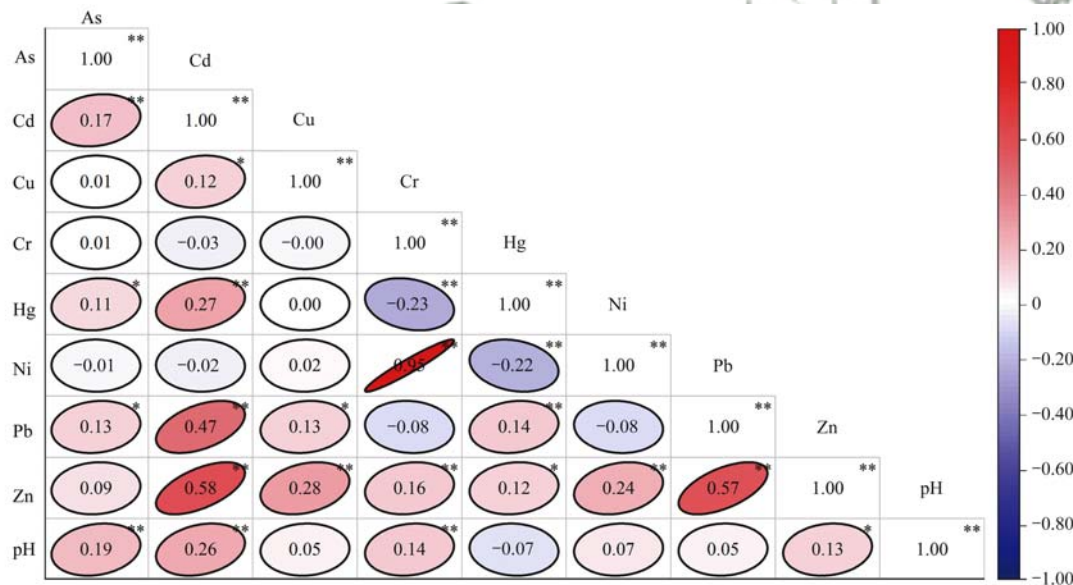
Zn(1.55). Cd 和 Hg 是生态危害较为严重的两种重金属元素,根系土 Cd 采样点中有 78.40% 的样品处于中度危害以上污染水平,其中较重危害水平的占 21.01%,中度危害的占 8.58%,严重危害的占 1.78%. 根系土 Hg 有 79.88% 的样品处于中度危害以上污染水平,其中较重危害水平的占 28.40%,重度危害的占 5.03%,严重危害的占 0.30%. 此外,As、Cu、Ni 和 Pb 元素均有个别采样点的生态风险较高. 根系土样品点中 Cr 和 Zn 两种元素的潜在生态风险均处于轻度危害水平.

研究区根系土潜在生态风险综合指数 RI 介于 68.44~847.51,均值为 194.37. 按风险等级划分属于中度风险级别. 轻度、中度、重度和严重这 4 种风险等级的样品点比例分别为 43.49%、43.20%、12.13% 和 1.18% (表 6). 潜在风险主要来源于 Cd 和 Hg,可能与农作物种植大量施用农药、化肥导致

Cd、Hg 的富集相关^[33~35]. 其结果与中国东部地区^[36]及长江三角洲地区相一致^[31]. 考虑了重金属的毒性指数,导致潜在生态风险评价与内梅罗污染指数评价具有一定差异.

2.3 土壤重金属溯源

重金属元素之间的关系可以为重金属的来源提供重要的信息. 研究区根系土中 Cr 和 Ni 之间互为极显著正相关关系($P < 0.01$,图 2),其相关系数达 0.95,指示着 Cr 和 Ni 可能具有一致的来源. Zn、Pb、Cd 和 Cu 这 4 种元素之间互为显著的正相关性($P < 0.01$),表明他们之间可能具有相似的来源. Hg 与 Cr 和 Ni 表现为显著的负相关性($P < 0.01$),说明 Hg 与 Cr 和 Ni 的来源不同. 此外,Cr 与 Cd 和 Pb 之间,Ni 和 Cu、Pb、As 之间相关性不显著,指示着上述元素可能具有不同的来源.



* 表示相关系数在 0.05 水平上显著, ** 表示相关系数在 0.01 水平上显著; 椭圆长轴方向表示相关系数的正负, 右上-左下方向对应正值, 左上-右下方向对应负值, 椭圆越扁, 对应绝对值较大的相关系数, 反之越小, 色柱表示相关系数的范围

图 2 根系土重金属元素相关性

Fig. 2 Plot of Pearson correlation coefficients of heavy metals in soil

主成分分析适宜性检验结果表明,KMO 值为 0.557,Bartlett 球形检验显著性水平为 0.00 ($P < 0.01$),表明分析结果具有统计学的意义. 按照特征值大于 1 的原则提取,提取了 3 个主成分,相应的特征值分别为 2.262、2.082 和 1.090,累计贡献率为 67.929%. 可以解析 8 种元素的绝大部分信息 (表 7).

成分 1(PC1)以 Cu、Pb、Zn 和 Cd 的载荷最高,分别为 0.429、0.772、0.865 和 0.785,其方差贡献率为 28.280%. 相关性分析也指示 Cu、Pb、Zn 和 Cd 这 4 种元素之间两两之间具有显著的正相关. 有研究表明,工业废气、汽车尾气排放是大气重金属

污染的主要来源,大气中的重金属元素以干湿沉降的方式进入农业土壤,能引起土壤中的 Cd、Cu、Pb 和 Zn 等重金属含量升高^[37]. 如大气沉降对英格兰和威尔士农业中土壤的 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的贡献率分别为 52.90%、38.93%、77.73% 和 48.78%^[37]; 对长江三角洲地区农田土壤中的 Zn 和 Pb 的贡献率在 72%~84% 之间,对 Cd 和 Cu 的贡献率也在 35% 左右^[38]. 近年来,研究区城镇化进程加快,尤其是融入长三角一体化发展以来,工业及采矿业飞速发展,如芜湖的轻纺和机电产业,铜陵和池州的有色金属开采冶炼及化工业,马鞍山的钢铁制造业等,这些传统的化工企业、冶炼企业、有色金属企业和采矿业

等均是土壤中重金属元素的主要来源. 研究区为安徽省典型的集约化农业区, 现代化农业生产过程中大量使用的化肥、农药和除草剂等农业化学投入品等也会导致重金属富集, 尤其是 Cu 和 Zn 的大量累积^[37]. 当地居民常年养殖畜禽, 并有一部分规模化畜禽养殖场, 畜禽饲料和防疫用品等一般富含 Cu 和 Zn 等元素. 因此推断 Cd、Cu、Pb 和 Zn 主要来自工业源和农业源等人类活动.

表 7 研究区根系土重金属元素旋转主成分矩阵
Table 7 Rotated component matrix for principal component analysis loadings for heavy metals in soil

元素	成分		
	PC1	PC2	PC3
As	0.179	0.048	0.692
Cd	0.785	-0.043	0.222
Cu	0.429	-0.030	-0.585
Cr	0.009	0.974	0.010
Hg	0.291	-0.341	0.461
Ni	0.048	0.978	-0.023
Pb	0.772	-0.106	0.051
Zn	0.865	0.210	-0.061
特征值	2.262	2.082	1.090
方差/%	28.280	26.022	13.626
累积方差/%	28.280	54.303	67.929

PC2 以 Cr、Ni 的载荷最大, 分别为 0.974 和 0.978, 其方差贡献率达 26.022%. 污染指数表明研究区 Cr 处于无污染状态. 相关性分析表明 Ni 和 Cr 具有极显著的相关性(0.96, $P < 0.01$), 变异系数也相对较小. Cr 和 Ni 在土壤中的含量与其在成土母质中含量相近, 与成岩成分有关, 受人为影响较小^[39]. 如意大利 Piemonte 地区^[40]和欧洲地中海地

区^[41]农业土壤中 Cr 和 Ni 主要受控于成土母质. 研究区属于典型的地质高背景带^[32], 尤其是基性岩浆岩中 Cr 和 Ni 的含量均高于背景值^[42]. 故推断 Cr 和 Ni 来源主要为自然源.

PC3 为 As 和 Hg 组合, 载荷分别为 0.692 和 0.461, 方差贡献率达 13.626%. Hg 和 As 是农药的重要组成部分, 农药施用导致农业土壤 Hg 和 As 富集. 我国每年大约有 5.5×10^7 t 农业化肥流入土壤之中^[43]. 研究区是典型的农业区^[20], 每年农业种植也施用大量的农药和化肥, 据 2020 年安徽省统计年鉴显示, 安徽省化肥和农药使用量分别为 289.90 万 t 和 8.33 万 t. 李宏薇等^[44]也证实研究区 As 和 Hg 主要来源于农业活动. 因而认为 As 和 Hg 通过施用化肥和农药进入土壤并进行积累. 据此判断 As 和 Hg 为农业源.

2.4 农作物重金属含量及污染特征

水稻籽实中 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 平均值分别为 0.10、0.12、3.86、0.13、0.003、0.54、0.06 和 21.24 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 小麦籽实中为 0.05、0.05、6.15、0.16、0.003、0.69、0.12 和 30.32 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 8). 从重金属变异系数来说, 水稻籽实中 Cd (173.04%) 为异常的强变异, Ni (82.54%) 和 Hg (57.50%) 为强变异, 其余为中等强度变异; 小麦籽实中 Ni (69.40%)、Cd (70.64%) 和 Hg (72.21%) 为强变异, 其余元素均为中等强度变异. 说明研究区农作物重金属来源受外源干扰较大, 可能与区内矿产开采、冶炼和农业生产等人为活动有关.

表 8 农作物重金属含量特征
Table 8 Concentration distributions of heavy metals in crops

作物类型	参数	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
水稻籽实 ($n = 285$)	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.35	2.553	8.33	0.66	0.032 5	2.43	0.139	31.76
	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.01	0.005	1.09	0.08	0.002 2	0.08	0.034	12.11
	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.10	0.12	3.86	0.13	0.003	0.54	0.06	21.24
	标准差/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.05	0.21	1.19	0.06	0.00	0.44	0.02	3.58
	变异系数/%	47.97	173.04	30.78	48.22	57.50	82.54	29.68	16.85
	超标率/%	0.00	17.19	— ¹⁾	0.00	1.05	—	0.00	—
	国家限量标准	0.5	0.20	—	1.00	0.02	—	0.20	—
	NPI	0.53	0.14	0.60	— ¹⁾	0.13	0.25	0.28	—
小麦籽实 ($n = 53$)	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.064	0.213	9.92	0.38	0.013	1.8	0.33	78.37
	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.03	0.019	3.69	0.11	0.001	0.14	0.05	15.72
	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.05	0.05	6.15	0.16	0.003	0.69	0.12	30.32
	标准差/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.01	0.04	1.33	0.05	0.00	0.48	0.05	10.43
	变异系数/%	20.53	70.64	21.62	32.96	72.21	69.40	44.44	34.41
	超标率/%	0.00	7.55	—	0.00	0.00	—	1.89	—
	国家限量标准	0.50	0.10	—	1.00	0.02	—	0.20	—
	NPI	0.47	0.09	0.26	—	0.16	0.15	0.60	—

1) “—”表示 GB 2726-2017 中没有相关标准

鉴于食品安全国家标准(GB 2762-2017)未给出水稻和小麦 Cu、Zn 和 Ni 等 3 种重金属的限量标准,因此本研究仅对农作物的 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 的污染状况进行评价.与食品安全国家标准(GB 2762-2017)相比,水稻中 Cd 和 Hg 超标率为 17.19% 和 1.05%,小麦中 Cd 和 Pb 的超标率为 7.55% 和 1.89%(表 8).农作物中 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 的单污染指数(PI)均值都小于 1,水稻籽实和小麦籽实的内梅罗综合指数(NPI)均值为 0.53 和 0.47(表 8),总体来说研究区农作物基本安全.

综合农作物重金属含量、重金属超标元素、超标率和污染指数等指标可知,研究区农作物中 Cd 的风险最高,这可能与 Cd 具有较高的迁移能力有关^[19].水稻污染程度高,小麦受污染程度相对较低,可以通过调整种植结构对 Cd 进行防治与管控.

2.5 农作物迁移富集特征

水稻对重金属的平均富集系数大小分别为: Cd (0.436) > Zn(0.283) > Cu(0.124) > Hg(0.075) > Ni (0.020) > As (0.012) > Cr (0.002) = Pb (0.002); 小麦对重金属的平均富集系数大小: Zn (0.448) > Cd(0.390) > Cu(0.213) > Hg(0.077) > Ni (0.022) > As (0.005) = Pb (0.005) > Cr

(0.002),见图 3.

结果显示水稻和小麦对 Cd、Cu 和 Zn 的富集系数较高,而其余元素的富集系数较低,说明研究区重金属 Cd、Zn 和 Cu 的生物有效性较强,易于造成生物富集.水稻和小麦的 Cd 的迁移系数相对来说偏高,这可能是由于 Cd 在土壤中以生物可利用态为主,有利于被迁移富集到农作物中^[19].特定环境下 Cu、Zn 和 Cd 具有一定的协同作用,也可能导致 Cu 和 Zn 元素的富集.水稻和小麦中 Pb、Cr 和 As 的迁移系数相对较低,这可能与农作物中 Pb、Cr 和 As 的来源有关,土壤中的 Pb、Cr 和 As 可能不是农作物的主要来源.因此农田土壤重金属污染防治工作应特别关注 Cd、Cu 和 Zn 的污染.

2.6 重金属健康风险评价

2.6.1 根系土重金属健康风险评价

成人和儿童经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入这 3 种暴露途径的重金属单项非致癌健康风险指数(HQ)和非致癌风险总指数(HI)如表 9 所示.非致癌风险评价结果表明,对于同一重金属元素不同暴露途径的非致癌风险,成人和儿童的 HQ 依次为:经口摄入 > 皮肤接触 > 呼吸吸入.表明重金属经口摄入是导致非致癌风险的主要暴露途径,这与前人相关研究结果基本一致^[6,7].水稻根系土和小麦根系土在 3 种不同暴露途径的 HQ 由高到低均表现为: As > Cr > Pb > Ni > Cu > Cd > Hg > Zn,水稻根系土和小麦根系土 8 种重金属 HQ 均小于 1,表明单一重金属不会威胁区内居民健康.

不同重金属元素 3 种途径的非致癌总风险指数 HI 表明,儿童在小麦根系土中 HI 为 1.01,略大于 1,显示小麦根系土对儿童具有非致癌风险;而对于成人来说水稻根系土和小麦根系土的 HI 均小于 1,说明根系土对成年人可能不存在非致癌风险.根系土中 As、Cr 和 Pb 这 3 种元素对 HI 贡献最为明显,上述 3 种元素对成人和儿童的 HI 贡献率近 95% 以上.表明 As、Cr 和 Pb 为根系土中构成非致癌健康风险的主要污染物.

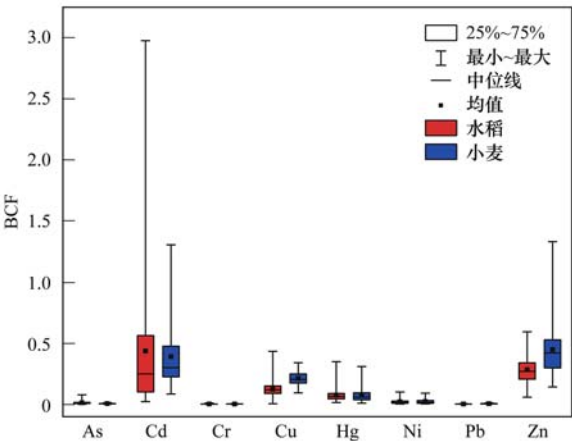


图3 重金属在土壤-作物系统的富集系数

Fig. 3 Biological concentration factors of heavy metals in soil-crop systems

表9 根系土不同途径重金属非致癌暴露风险值

Table 9 Risk of non-carcinogenic exposure to heavy metals in different pathways in different crop root soils

类型		HQ								HI
		As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn	
水稻根系土	儿童	4.40E-01	4.80E-03	1.25E-02	3.28E-01	3.37E-03	1.84E-02	1.24E-01	3.41E-03	0.93
	成人	5.88E-02	7.06E-04	1.68E-03	4.66E-02	4.56E-04	2.47E-03	1.67E-02	4.58E-04	0.13
小麦根系土	儿童	4.63E-01	2.34E-03	9.38E-03	4.05E-01	2.26E-03	2.72E-02	9.53E-02	2.96E-03	1.01
	成人	6.19E-02	3.44E-04	6.52E-04	1.92E-02	3.06E-04	3.65E-03	1.28E-02	3.96E-04	0.10

各根系土对成人和儿童的单项致癌风险指数(CR)和致癌风险总指数(TCR)如表 10 所示.不同根系土对儿童的 CR 均大于成人.对于水稻土来说,

除 As 和 Cd 的 CR 在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间外, Cr、Ni 和 Pb 均小于 10^{-6} , 小麦土除 As 的 CR 在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间外,其余均小于 10^{-6} ,说明根系土重金属引起

表 10 根系土不同途径重金属致癌暴露风险值

Table 10 Risk of carcinogenic exposure to heavy metals in different pathways in different crop root soils

类型		CR					TCR
		As	Cd	Cr	Ni	Pb	
水稻根系土	儿童	1.70E-05	1.96E-06	7.15E-07	7.39E-10	3.11E-07	1.99E-05
	成人	9.08E-06	1.04E-06	5.78E-07	2.06E-09	1.66E-07	1.09E-05
小麦根系土	儿童	1.78E-05	9.53E-07	8.83E-07	1.09E-09	2.39E-07	1.99E-05
	成人	9.56E-06	5.08E-07	7.14E-07	3.04E-09	1.27E-07	1.09E-05

的单项致癌风险尚在可接受范围.

不同作物根系土对儿童的 TCR 均大于成人,但均小于 10^{-4} ,介于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间,说明根系土对成人和儿童的致癌风险在可接受范围内.根系土中 As 元素对 TCR 的贡献尤为显著,水稻根系土中成人和儿童的贡献率分别为 83.54% 和 85.04%,而在小麦根系土中其贡献率分别为 87.60% 和 89.58%.说明根系土中 As 元素为构成致癌健康风险的主要污染物.

2.6.2 农作物重金属健康风险评价

成人和儿童可食用作物摄入的重金属单项非致癌健康风险指数(HQ)和非致癌风险总指数(HI)如表 11 所示.成人和儿童的 HQ 和 HI 大小均表现为水稻 > 小麦.对于儿童来说,水稻中 As、Cd 和 Cu 元素的 HQ 均大于 1;就成人来说,仅有水稻的 As 的 HQ 大于 1.结果显示,As、Cd 和 Cu 元素对儿童构成非致癌健康风险,成人仅有 As 构成非致癌健康风险.

表 11 农作物不同途径重金属非致癌暴露风险值

Table 11 Risk of non-carcinogenic exposure to heavy metals in different pathways in different crops

类型		HQ								HI
		As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn	
水稻	儿童	3.97E+00	1.42E+00	1.15E+00	5.07E-01	1.96E-01	3.19E-01	1.93E-01	8.42E-01	8.60
	成人	2.08E+00	7.45E-01	6.00E-01	2.65E-01	1.02E-01	1.67E-01	1.01E-01	4.40E-01	4.50
小麦	儿童	8.73E-01	2.97E-01	8.70E-01	2.95E-01	5.66E-02	1.96E-01	1.93E-01	5.72E-01	3.35
	成人	3.94E-01	1.34E-01	3.93E-01	1.33E-01	2.56E-02	8.86E-02	8.72E-02	2.58E-01	1.51

食用水稻和小麦引发的非致癌健康风险总指数(HI)均大于 1,表现为儿童 > 成人.表明食用研究区水稻和小麦存在一定的非致癌健康风险.农作物中 As、Cd 和 Cu 这 3 种元素对 HI 的贡献率最大,占 76.08%.因此需要特别关注对农作物 As、Cd 和 Cu 这 3 种元素的管控,以避免造成较大的食源性危害.

食用农作物对成人和儿童的单项致癌风险指数(CR)和致癌风险总指数(TCR)如表 12 所示.结果显示,农作物 CR 和 TCR 基本表现为水稻 > 小麦,且成人 > 儿童,大部分 CR 和 TCR 高于

USEPA 推荐的最大可接受水平(10^{-6}),故食用研究区的水稻和小麦对附近居民健康构成严重威胁,具有不可接受的致癌风险.另外,农作物中 Cd 元素对 TCR 的贡献率占 81.70%,说明农作物中 Cd 元素构成致癌健康风险的关键因子.为降低当地居民通过稻米摄入重金属的风险,建议在综合考虑土壤污染和农作物对根系土中重金属富集能力的基础上,将 Cd 作为重金属污染防控工作中优先控制的元素,采取适当措施开展对研究区土壤进行治理.

表 12 农作物不同途径重金属致癌暴露风险值

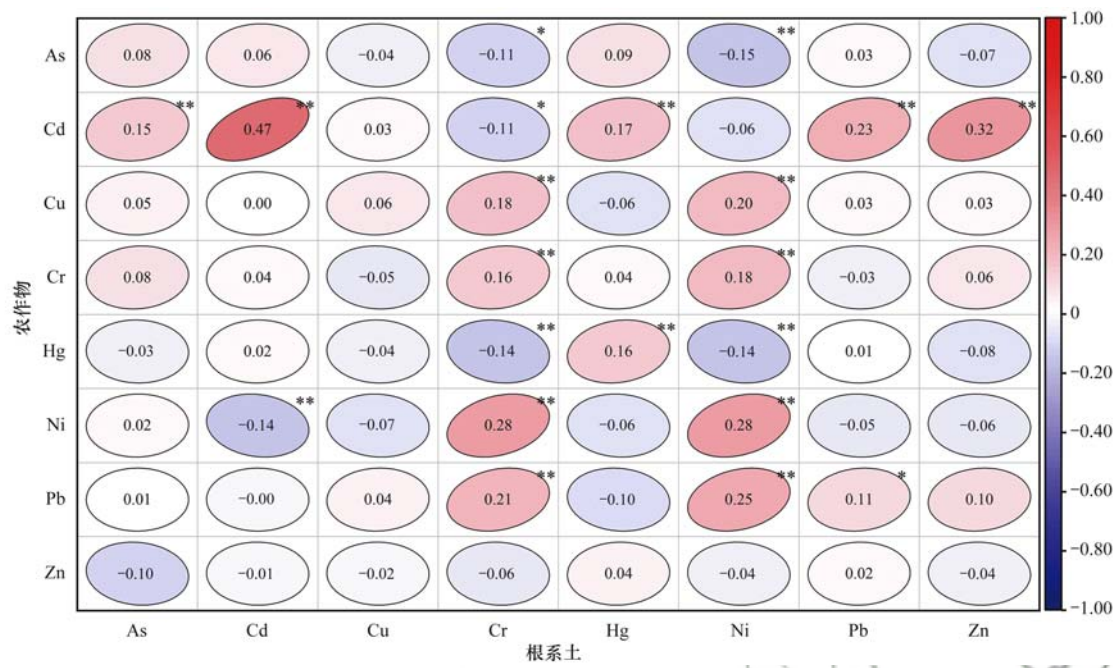
Table 12 Risk of carcinogenic exposure to heavy metals in different pathways in different crops

类型		CR				TCR
		As	Cd	Cr	Pb	
水稻	儿童	1.53E-04	7.45E-04	1.11E-06	4.92E-07	9.00E-04
	成人	3.20E-04	1.56E-03	2.32E-06	1.03E-06	1.88E-03
小麦	儿童	3.37E-05	1.55E-04	6.44E-07	4.93E-07	1.90E-04
	成人	6.08E-05	2.80E-04	1.16E-06	8.89E-07	3.43E-04

2.7 根系土与农作物重金属相关性分析

为明确研究区土壤对农作物重金属累积的影响,根据根系土和农作物的重金属含量的测试结果,对土壤-农作物(水稻和小麦)系统中的重金属含量进行了 Pearson 相关性检验分析(图 4).

结果表明,土壤-农作物系统中 Cd 元素具有一定的相关性,相关系数为 0.47($P < 0.01$,图 4),表明 Cd 在土壤-农作物系统中具有一定的迁移富集,与富集系数研究结果相一致.除 Cd 元素外,根系土中其余重金属元素与农作物重金属元素相关性不明



* 表示相关系数在 0.05 水平上显著, ** 表示相关系数在 0.01 水平上显著; 椭圆长轴方向表示相关系数的正负, 右上-左下方向对应正值, 左上-右下方向对应负值, 椭圆越扁, 对应绝对值较大的相关系数, 反之越小, 色柱表示相关系数的范围

图4 土壤-农作物系统重金属含量相关性
Fig. 4 Relation analysis of heavy metals in soil-crop systems

显, 与前人的结论一致^[45], 表明农作物从土壤中吸收和富集重金属的能力与土壤中的重金属的含量并无线性关系. 土壤重金属在农作物生长过程的迁移转化、富集行为相当复杂, 农作物中的重金属含量可能与土壤中重金属的化学形态、生物有效性等因素有关^[9]. 往后的研究工作应重点关注重金属不同形态对生物吸收的贡献程度, 评价其生物有效性, 提出合理的防治措施.

3 结论

(1) 长江流域安徽段农作物根系土中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 元素均高于江淮流域背景值. 以 Cd、Hg 和 Ni 最为突出, 且变异系数较大, 受人类活动影响明显. 根系土重金属主要分为 3 种来源, Cu、Pb、Zn 和 Cd 为工业源和农业源, Cr 和 Ni 为自然源, As 和 Hg 为农业源. As、Cd 和 Cu 是农作物根系土的主要超标元素. 潜在生态风险危害主要表现为 Cd 和 Hg, 以中度危害以上污染水平为主, 根系土整体上处于轻微~中度潜在生态风险水平.

(2) 研究区水稻和小麦中 Zn 的含量均是最大, 其次为 Cu、Ni 和 Cr, Hg 含量最低. 以 Cd 的超标最为严重, 超标率分别为 17.19% 和 7.55%. 水稻对重金属的富集强度依次分别为: Cd > Zn > Cu > Hg > Ni > As > Cr = Pb, 小麦对重金属的吸收富集强度依次分别为: Zn > Cd > Cu > Hg > Ni > As = Pb > Cr. 除 Cd 元素外, 农作物中其余重金属元素与根系土重金属

元素相关性不明显.

(3) 根系土 8 种重金属不同暴露途径下 HQ 均小于 1, 表明单一重金属不会威胁区内居民健康. 非致癌总风险指数 (HI) 显示小麦根系土对儿童具有一定的非致癌健康风险. 根系土重金属引起成人和儿童的单项致癌风险指数 (CR) 和致癌风险总指数 (TCR) 尚在可接受范围.

(4) 水稻和小麦中 As、Cd 和 Cu 元素对儿童构成非致癌健康风险, As 对成人构成非致癌健康风险, 食用研究区的水稻和小麦存在一定的非致癌风险. 食用研究区的水稻和小麦具有不可接受的致癌风险, 农作物中 Cd 元素构成致癌健康风险的关键因子.

参考文献:

[1] Wuana R A, Okieimen F E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation[J]. ISRN Ecology, 2011, **2011**, doi: 10.5402/2011/402647.

[2] Gu Q B, Yu T, Yang Z F, *et al.* Prediction and risk assessment of five heavy metals in maize and peanut: a case study of Guangxi, China [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2019, **70**, doi: 10.1016/j.etap.2019.103199.

[3] Khan K, Lu Y L, Khan H, *et al.* Heavy metals in agricultural soils and crops and their health risks in Swat District, northern Pakistan[J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, **58**: 449-458.

[4] Zheng S N, Wang Q, Yuan Y Z, *et al.* Human health risk assessment of heavy metals in soil and food crops in the Pearl River Delta urban agglomeration of China[J]. Food Chemistry, 2020, **316**, doi: 10.1016/j.foodchem.2020.126213.

- [5] Mao C P, Song Y X, Chen L X, *et al.* Human health risks of heavy metals in paddy rice based on transfer characteristics of heavy metals from soil to rice[J]. CATENA, 2019, **175**: 339-348.
- [6] 尹伊梦, 赵委托, 黄庭, 等. 电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 916-926.
- Yin Y M, Zhao W T, Huang T, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a soil-rice system in an e-waste dismantling area [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 916-926.
- [7] 张浩, 王辉, 汤红妍, 等. 铅锌尾矿库土壤和蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(3): 1085-1094.
- Zhang H, Wang H, Tang H Y, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and health risk evaluation of soil and vegetables in various functional areas of lead-zinc tailings pond [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(3): 1085-1094.
- [8] 叶脉, 张景茹, 张路路, 等. 广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5579-5588.
- Ye M, Zhang J R, Zhang L L, *et al.* Transfer factor and health risk assessment of heavy metals in a soil-crop system in a high incidence area of nasopharyngeal carcinoma, Guangdong [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5579-5588.
- [9] 林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 等. 闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 359-367.
- Lin C Q, Cai Y H, Hu G R, *et al.* Bioaccessibility and health risks of the heavy metals in soil-rice system of southwest Fujian province[J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 359-367.
- [10] 韩伟, 王成文, 彭敏, 等. 川南山区土壤与农作物重金属特征及成因[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2480-2489.
- Han W, Wang C W, Peng M, *et al.* Characteristics and origins of heavy metals in soil and crops in mountain area of southern Sichuan[J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2480-2489.
- [11] 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 等. 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 975-984.
- Huang Z T, Yi S W, Chen B B, *et al.* Pollution properties and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils and crops around a typical manganese mining area[J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 975-984.
- [12] Zhang T, Xu W X, Lin X N, *et al.* Assessment of heavy metals pollution of soybean grains in north Anhui of China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **646**: 914-922.
- [13] Zheng S N, Wang Q, Yuan Y Z, *et al.* Human health risk assessment of heavy metals in soil and food crops in the Pearl River Delta urban agglomeration of China[J]. Food Chemistry, 2020, **316**, doi: 10.1016/j.foodchem.2020.126213.
- [14] Setia R, Dhaliwal S S, Singh R, *et al.* Phytoavailability and human risk assessment of heavy metals in soils and food crops around Sutlej river, India[J]. Chemosphere, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128321.
- [15] Baruah S G, Ahmed I, Das B, *et al.* Heavy metal (loid)s contamination and health risk assessment of soil-rice system in rural and peri-urban areas of lower Brahmaputra valley, Northeast India [J]. Chemosphere, 2021, **266**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129150.
- [16] Kharazi A, Leili M, Khazaei M, *et al.* Human health risk assessment of heavy metals in agricultural soil and food crops in Hamadan, Iran[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, **100**, doi: 10.1016/j.jfca.2021.103890.
- [17] Liu X M, Gu S B, Yang S Y, *et al.* Heavy metals in soil-vegetable system around E-waste site and the health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2021, **779**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146438.
- [18] Yang L, Ren Q, Zheng K X, *et al.* Migration of heavy metals in the soil-grape system and potential health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150646.
- [19] 周葆华, 胡睿鑫, 赵宽, 等. 皖江经济带土壤 Cd 空间分布特征与生态风险评价[J]. 自然资源学报, 2021, **36**(12): 3261-3270.
- Zhou B H, Hu R X, Zhao K, *et al.* Spatial distribution characteristic of Cd in soils and its ecological risk assessment in the economic belt of Yangtze River in Anhui [J]. Journal of Natural Resources, 2021, **36**(12): 3261-3270.
- [20] 李子杰, 孟源思, 郑梦蕾, 等. 某流域农田土壤-水稻系统重金属空间变异特征及生态健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(5): 957-968.
- Li Z J, Meng Y S, Zheng M L, *et al.* Spatial variability and ecological health risk assessment of heavy metals in farmland soil-rice system in a watershed of China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(5): 957-968.
- [21] 王茜, 张光辉, 田言亮, 等. 皖江经济区基本农田地球化学特征及成因[J]. 地质学报, 2016, **90**(8): 1988-1997.
- Wang Q, Zhang G H, Tian Y L, *et al.* The character and influencing factors of geochemical distribution in basic farmland of economic zone along Yangtze River in Anhui[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, **90**(8): 1988-1997.
- [22] 鲁潇, 于坤, 孙庆业, 等. 铜陵矿区周边莲藕重金属元素含量及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(9): 2049-2056.
- Lu X, Yu K, Sun Q Y, *et al.* Heavy metal content and health risk assessment of lotus roots around the Tongling mining area, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(9): 2049-2056.
- [23] 陈兴仁, 陈富荣, 贾十军, 等. 安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究[J]. 中国地质, 2012, **39**(2): 302-310.
- Chen X R, Chen F R, Jia S J, *et al.* Soil geochemical baseline and background in Yangtze River-Huaihe River basin of Anhui Province[J]. Geology in China, 2012, **39**(2): 302-310.
- [24] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [25] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(2): 112-115.
- [26] US EPA. Exposure factors handbook[R]. Washington, DC: US EPA, 2011.
- [27] Li Y B, Fang F M, Wu M H, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment in soil-rice system near Xinqiao mine in Tongling city, Anhui province, China [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2018, **24**(3): 743-753.

- [28] Liu Y M, Liu D Y, Zhang W, *et al.* Health risk assessment of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb, As and Cr) in wheat grain receiving repeated Zn fertilizers [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113581.
- [29] US EPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [R]. Washington, DC: US EPA, 2002.
- [30] Huang J L, Wu Y Y, Sun J X, *et al.* Health risk assessment of heavy metal(loid)s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with Positive matrix factorization model [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **415**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125629.
- [31] 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.
- [32] 江红艳, 王寅. 皖东地质高背景区土壤重金属污染分析及人体健康风险评估[J]. *安徽农业科学*, 2020, **48**(14): 78-82. Jiang H Y, Wang Y. Analysis of heavy metal pollution and risk assessment of human health in soil with high geological background area in eastern Anhui province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, **48**(14): 78-82.
- [33] Teng Y, Ke Y Y, Zhou Q X, *et al.* Derived regional soil - environmental quality criteria of metals based on Anhui soil-crop systems at the regulated level [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **825**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154060.
- [34] Dong B, Zhang R Z, Gan Y D, *et al.* Multiple methods for the identification of heavy metal sources in cropland soils from a resource-based region [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 3127-3138.
- [35] Wang H F, Wu Q M, Hu W Y, *et al.* Using multi-medium factors analysis to assess heavy metal health risks along the Yangtze River in Nanjing, Southeast China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **243**: 1047-1056.
- [36] Wu Q M, Hu W Y, Wang H F, *et al.* Spatial distribution, ecological risk and sources of heavy metals in soils from a typical economic development area, Southeastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **780**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146557.
- [37] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, *et al.* An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **311**(1-3): 205-219.
- [38] Hou Q Y, Yang Z F, Ji J F, *et al.* Annual net input fluxes of heavy metals of the agro-ecosystem in the Yangtze River Delta, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **139**: 68-84.
- [39] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(8): 2524-2530.
- [40] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(3): 313-324.
- [41] Micó C, Recatalá L, Peris M, *et al.* Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(5): 863-872.
- [42] 陶春军, 贾十军, 陈永宁, 等. 滁州地区土壤地球化学基准值与背景值研究 [J]. *安徽地质*, 2013, **23**(4): 286-291. Tao C J, Jia S J, Chen Y N, *et al.* A study on geochemical baseline value and environmental background value of soils in the Chuzhou area [J]. *Geology of Anhui*, 2013, **23**(4): 286-291.
- [43] 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.
- [44] 李宏薇, 尚二萍, 张红旗, 等. 耕地土壤重金属污染时空变异对比—以黄淮海平原和长江中游及江淮地区为例 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(9): 3464-3473. Li H W, Shang E P, Zhang H Q, *et al.* Comparative research on spatio-temporal variability of heavy metal pollution in cultivated soils—A case study of Huang-Huai-Hai Plain and middle reaches of the Yangtze River and Jianghuai Region [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(9): 3464-3473.
- [45] 陈洁, 王娟, 王怡雯, 等. 影响不同农作物镉富集系数的土壤因素 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 2031-2039. Chen J, Wang J, Wang Y W, *et al.* Influencing factors of cadmium bioaccumulation factor in crops [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2031-2039.

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)