

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 姜建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 PM _{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 PM _{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM _{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘焕武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM _{2.5} 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM _{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O ₃ 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO ₂ 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
亳清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥肥施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	
《环境科学》征稿简则(1984)	
信息	(2167, 2191, 2324)

龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析

王蕊¹, 陈楠², 张二喜³

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 生态环境部环境发展中心, 北京 100029; 3. 西京学院理学院, 西安 710123)

摘要:以龙岩市2个典型地块为研究对象,采集了土壤样品174件及谷物类样品87件,利用污染指数法、Hakanson潜在生态风险指数法和美国EPA人体暴露风险评价模型开展不同利用类型土壤及农作物Pb、Cd和As的污染评价、生态风险评价和不同暴露途径下的健康风险评估,并对比分析Pb、Cd和As对土壤及农作物污染风险的贡献。结果表明,I区不同利用类型土壤及农作物Pb、Cd和As的污染等级较低,Cd是主要土壤污染和生态风险因子,对土壤综合污染和综合潜在生态风险的贡献率分别为55.3%和60.2%。II区土壤及农作物Pb、Cd和As的污染等级较高,Pb和Cd是主要土壤污染和生态风险因子,对综合污染的贡献率分别为44.2%和51.6%,对综合潜在生态风险的贡献率分别为23.7%和67.3%。Pb是主要农作物污染因子,对薏米和水稻综合污染的贡献率分别为60.6%和51.7%。经口-土壤暴露途径下,2个典型地块土壤Cd和As对成人和儿童的致癌风险均在可接受范围内,I区土壤Pb、Cd和As的非致癌风险较小,II区3种污染物对总非致癌风险的贡献率为:Pb(68.1%)>As(30.5%)>Cd(1.38%)。经口-水稻摄入途径下,2个典型地块水稻Pb均无致癌风险,Cd和As对成人和儿童的致癌风险贡献率分别为:As(76.8%)>Cd(22.7%)和Cd(69.1%)>As(30.3%)。I区和II区3种污染物具有较高非致癌风险,均以As的贡献最为显著,贡献率分别为84.0%和52.0%,其次为Cd,最后为Pb。

关键词:土壤; 农作物; 污染; 健康风险; 贡献

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2252-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204204

Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City

WANG Rui¹, CHEN Nan², ZHANG Er-xi³

(1. Ministry of Natural and Resources Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Environmental Development Centre of Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China; 3. College of Science, Xijing University, Xi'an 710123, China)

Abstract: A total of 174 soil samples and 87 grain samples were collected in two typical fields in Longyan City. The pollution index method, Hakanson potential ecological risk index method, and EPA human exposure risk assessment model were used to evaluate the pollution status, ecological risk, and health risks of heavy metals Pb, Cd, and As in soil of different land use types. The contributions of Pb, Cd, and As to soil and crop pollution risk were also analyzed. The results indicated that the pollution levels of Pb, Cd, and As in soils and crops of different utilization types in region I were low. Cd was the main soil pollutant and ecological risk factor, contributing 55.3% to comprehensive soil pollution and 60.2% to comprehensive potential ecological risk, respectively. The pollution levels of Pb, Cd, and As in soils and crops in region II were high. Pb and Cd were the main soil pollutants and ecological risk factors, contributing 44.2% and 51.6% to comprehensive pollution and 23.7% and 67.3% to comprehensive potential ecological risk, respectively. Pb was the main pollution factor of crops, contributing 60.6% and 51.7% to the comprehensive pollution of coix and rice, respectively. The carcinogenic risks of Cd and As in soil of the two typical regions for adults and children were all within the acceptable range under the oral-soil exposure pathway. The contribution of Pb, Cd, and As to the total non-carcinogenic risk in region I was Pb (68.1%) > As (30.5%) > Cd (1.38%). There was no carcinogenic risk of Pb in rice in the two typical regions under the oral-rice intake pathway. The contribution of Cd and As to carcinogenic risk in adults and children were As (76.8%) > Cd (22.7%) and Cd (69.1%) > As (30.3%), respectively. Three pollutants in region I and II had high non-carcinogenic risk, and As was the most significant contributor (84.0% and 52.0%, respectively), followed by Cd and Pb.

Key words: soil; crop; pollution; health risk; contribution

随着我国经济社会的快速发展,土壤环境形势发生了很大变化,也给社会发展带来了新威胁和新挑战^[1]。文献[2]显示,全国土壤环境状况总体不容乐观,部分地区土壤污染较重。重金属污染由于具有隐蔽性、长期性和不可逆性等特点,一直以来备受人们关注^[3~10]。

污染评价,常用的方法为指数法^[11,12],这些方法在实际应用过程中往往因评价目的、环境地球化

学意义等的不同而选择不同的参照值,进而可能导致评价结果具有较大差异。健康风险评价,常采用美国EPA推荐的模型^[13~18]和文献[19],基于污染物含量和暴露参数对人群的健康风险进行等级划分。

收稿日期: 2022-04-17; 修订日期: 2022-07-07

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221694)

作者简介: 王蕊(1984~),女,博士,主要研究方向为矿山环境调查、风险评估与修复, E-mail: wangruijoy@126.com

当前对于健康风险评价的研究侧重于经土壤或农作物等单一途径^[20~29]。有研究表明,通过直接经口摄入土壤、皮肤接触土壤、吸入土壤颗粒物等方式是重要的暴露途径,同时,农作物中污染物相对于土壤更容易被人体吸收,因而农作物一旦受到污染,农产品的健康风险也不容忽视^[14~17,30,31]。

近年来,关于污染风险评价的已有大量成果,受土壤自身物理化学性质等自然因素和耕作方式等人为因素的影响,土壤和农作物的污染评价结果之间^[16,20,30~32],土壤污染状况、潜在生态风险评价和通过土壤暴露途径的健康风险评价结果之间^[15,16,18,30,31,33~35],以及农作物污染评价和通过摄入农作物途径的健康风险评价结果之间^[16,17,20,30~32,36]并非呈简单的正相关关系。例如,有研究表明,虽然土壤的污染程度高,但通过土壤暴露途径对人体无明显健康风险^[15,16,33,35];反之,部分污染物的含量低于筛选值,而健康风险却异常显著^[18,30,33,34]。又如,虽然农作物对污染物的吸收富集能力强,但通过直接摄入农作物途径对人群基本无健康风险^[16,31,36];反之,农作物的污染程度低,却具有较高农作物摄入健康风险^[17,20,30,32]。

笔者前期分别在福建省龙岩市新罗区西南部和西部开展了土壤 Pb、Cd 和 As 的地球化学分布特征研究及来源分析^[37,38]。本文以上述 2 个典型地块为研究对象,在已有工作基础上,利用单因子污染指数法、综合污染指数法和 Hakanson 潜在生态风险指数法对不同土地利用类型的土壤和农作物 Pb、Cd 和 As 进行污染评价,研判 Pb、Cd 和 As 的污染及潜在生态危害程度。有研究证实,经口摄入是最主要的暴露途径,对健康风险的贡献率可达 80%~90% 以上^[14~17,30,33~35],因此,采用美国 EPA 人体暴露风险评价模型,对经口-土壤和经口-农作物等 2 种暴露途径下的成人和儿童健康风险进行评估。同时,厘定 Pb、Cd 和 As 对污染风险的贡献率,以期为保护当地土壤质量、开展农业种植结构调整优化、保障当地农产品质量和居民健康等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

龙岩市新罗区位于福建省西南部,地处中山、低山、丘陵和盆地,山脉和河谷盆地均为北东走向,总体地势呈两边高中间低的态势,平均海拔为 685 m。受地形的影响,形成海洋性气候与大陆性气候的过渡带,年平均气温为 19.9℃,年均降水量为 1 692.3 mm。受自然条件的影响,植被群落比较复杂,种类繁多,层次较为明显。典型的植被包括针叶

林、常绿阔叶林、竹林和灌草丛这 4 个植被型,毛竹林、杉木林和灌草丛这 3 个群系。全区矿产资源丰富,已探明的矿产有 60 余种,主要有煤矿、石灰石矿、铁矿和高岭土矿。土壤类型多为黄红壤,土体深厚,剖面土层分化明显。本研究典型地块 I 区和 II 区分别位于新罗区西南部和西部,地势较平坦,区域内土地利用类型有林地、耕地、居民住宅用地和小型工矿地等(图 1)。其中,土地面积中林地占比最大。耕地主要为水田,其次为旱地,分布于沿线山脚平缓地带和村庄周围,主要种植水稻和薏米等作物以及白术和太子参等药材。

1.2 样品采集、预处理及分析方法

采用多点采样法,工作区 I 区和 II 区的样点密度分别为 150 m×150 m 和 100 m×100 m,工作区周边及不同土地利用类型的土壤和农作物采样点示意如图 1 所示。其中, I 区共设置 110 个采样点,于林地、旱地和水田分别采集 49、41 和 20 件表层土壤样品(0~20 cm)。II 区共设置 64 个采样点,于林地、旱地和水田分别采集 38、13 和 13 件表层土壤样品。每个样点土壤采集量约为 1~2 kg,农作物采集量(干重)约为 30~50 g,含水率以 80%~90% 来估计。土壤样品经自然风干后去除植物残体和砾石等杂物,四分法取土研磨过 200 目筛备用。农作物样品先用水冲洗干净,除去粘附土壤和因施肥、喷农药引起的污染,再用去离子水冲洗 1~2 次,在室温下晾干后,去壳,去杂和挑去不完整粒,并将挑选的籽粒于 65℃ 烘干 8 h,粉碎后过 60 目筛保存备用。

采用 HF-HCl-HNO₃-HClO₄ 四酸消解法提取土壤 Pb 和 Cd,王水提取法提取土壤 As。农作物 Pb、Cd 和 As 采用干法消解法提取。土壤和农作物中提取液的 Pb 和 Cd 采用 WFS-120B 原子吸收分光光度计测定,As 采用 AFS-3000 双道原子荧光光度计测定。土壤 Pb、Cd 和 As 的分析检出限分别为 1.50、0.02 和 0.2 mg·kg⁻¹。农作物 Pb、Cd 和 As 的分析检出限分别为 0.005、0.03 和 0.01 mg·kg⁻¹。测试过程中每批样品插入重复样、空白样和标准控制样(GSS-1、GSS-5 和 GSS-28)控制分析质量。其中,土壤 Pb、Cd 和 As 的总量分析结果与标准值之间的相对误差 RE 范围为 0.02%~28.5%、0.81%~30.0% 和 0.52%~22.2%,相对标准偏差 RSD 范围为 0.21%~16.3%、2.62%~17.9% 和 1.37%~12.6%。重复性样品检验结果的相对双差 RD 范围为 0.05%~21.9%、0.10%~28.9% 和 0.08%~16.9%。农作物样品分析的准确度采用加标回收法控制,Pb、Cd 和 As 的加标回收率为 95.4%~109%、90.3%~102% 和 89.9%~93.7%。重复样品中 Pb、

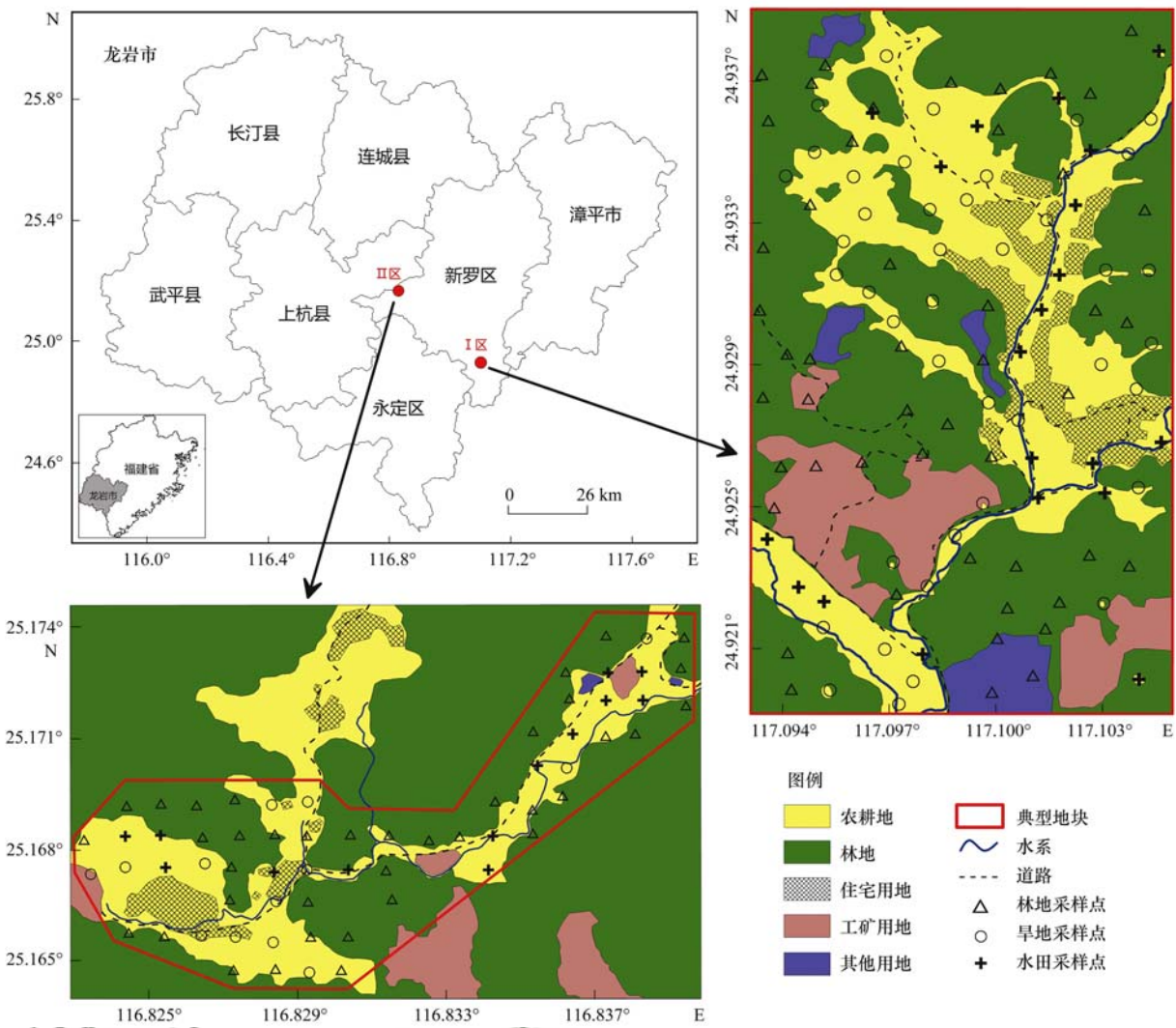


图1 研究区土地利用现状和采样点分布示意

Fig. 1 Current land use situation and sampling sites distribution of the study area

Cd 和 As 的相对偏差为 0 ~ 28.6%、0 ~ 28.6% 和 0 ~ 26.6%。以上分析结果均符合规范要求,测试结果可靠^[39~42]。

1.3 土壤与农作物污染评价方法及分级标准

根据式(1)和式(2)分别计算单因子污染指数和综合污染指数,对研究区土壤和农作物这 3 种元素的污染状况进行评价。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

$$P = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_i}{S_i}\right)^2_{\max} + \left(\frac{C_i}{S_i}\right)^2_{\text{ave}}}{2}} \tag{2}$$

式中, P_i 为污染物 i 的单项污染指数; P 为 3 种污染物的综合污染指数; C_i 为污染物 i 的实测含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_i 为污染物 i 的参比值(取值分别为筛选值^[43]和谷物中污染物的限量值^[44])。

单因子及综合污染指数分级标准如表 1 所示。

表 1 单因子及综合污染指数分级标准

Table 1 Criteria for different grades of singer factor and comprehensive pollution index					
等级	一级	二级	三级	四级	五级
单因子污染指数	$P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 2$	$2 < P_i \leq 3$	$3 < P_i \leq 4$	$P_i > 4$
	清洁	轻微污染	轻度污染	中度污染	重度污染
综合污染指数	$P \leq 0.7$	$0.7 < P \leq 1$	$1 < P \leq 2$	$2 < P \leq 4$	$P > 4$
	清洁	尚清洁	轻度污染	中度污染	重度污染

由于单个污染因子对于综合污染评价结果有不同的权重,针对单一污染物,所占权重越大,污染程

度越高。本研究即通过权重方法^[45,46]表征 Pb、Cd 和 As 的污染程度贡献率,计算公式如下:

$$PW_i = P_i \times \left(\sum_{i=1}^{n=3} P_i \right)^{-1} \times 100\% \tag{3}$$

式中,PW_i 为 Pb、Cd 和 As 对土壤或农作物综合污染程度的贡献率,无量纲。

1.4 土壤污染物潜在生态风险评价方法及分级标准

采用传统的 Hakanson 潜在生态风险指数法对研究区土壤进行生态风险评价,利用式(4)和式(5)分别计算单项潜在生态风险指数 E 值和综合潜在生态风险指数 RI 值。

$$E_i = T_i \times A_i = T_i \times (C_i/C_r) \tag{4}$$
$$RI = \sum_{i=1}^{n=3} E_i = \sum_{i=1}^{n=3} (T_i \times A_i) = \sum_{i=1}^{n=3} \left(T_i \times \frac{C_i}{C_r} \right) \tag{5}$$

式中,RI 为 3 种污染物的综合潜在生态风险指数;E_i 为污染物 i 的单项潜在生态风险指数;T_i 为污染物 i 的毒性系数,Pb、Cd 和 As 分别取值 5、30 和 10^[47,48];A_i 为污染物 i 的污染指数;C_i 为污染物 i 的实测含量,mg·kg⁻¹;C_r 为参照值。本研究拟采用庞绪贵等^[49]研究方法求取的土壤环境背景值作为参照值,典型地区共 174 个表层土壤样本,按照 K-S

非参数检验法对数据频率分布形态进行正态检验,Pb、Cd 和 As 的含量数据均不服从正态或对数正态分布。经算数平均值加减 3 倍算数标准偏差或几何平均值乘除几何标准偏差的立方反复剔除后,Pb 和 Cd 呈对数正态分布(n = 140 和 n = 156),As 呈正态分布(n = 126),采用几何平均值或算数平均值代表 Pb、Cd 和 As 的背景值,分别取值 44.8、0.31 和 7.50 mg·kg⁻¹。

由于在应用 E_i 和 RI 进行生态风险评价时,常根据参评污染物的种类和数量对其进行分级调整。本研究即采用马建华等^[48]提出的调整方法,首先,根据污染物种类,设定 E_i 第一级界限值为 30;其次,根据 Hakanson 的 RI 第一级界限值 150 除以 8 种污染物(PCB、Hg、Cd、As、Pb、Cu、Cr 和 Zn)的毒性系数总值 133,得到单位毒性系数值 1.13,并将 Pb、Cd 和 As 的毒性系数总值(45)乘以 1.13,取 10 位整数得到 RI 第一级界限值;最后,将 E_i 和 RI 的第一级界限值乘以 2 得到第二级界限值,余者类推。调整后的潜在生态风险分级标准如表 2 所示。

表 2 潜在生态风险分级表

Table 2 Criteria for different grades of potential ecological risk index					
E _i	< 30	30 ~ 60	60 ~ 120	120 ~ 240	> 240
RI	< 50	50 ~ 100	100 ~ 200	> 200	
生态风险级别	轻微风险	中等风险	较强风险	很强风险	极强风险

单一污染物的综合潜在生态风险指数贡献率计算公式如下:

$$PE_i = (E_i/RI) \times 100\% \tag{6}$$

式中,PE_i 为 Pb、Cd 和 As 对土壤的综合潜在生态风险贡献率,无量纲。

1.5 健康风险评价方法

根据 USEPA 提出的健康风险评价模型,本研

究在确定经口-土壤和经口-农作物这 2 种暴露途径的基础上,分别对研究区敏感人群进行健康风险评价。2 种暴露途径的人体日均暴露剂量[EDI_i, mg·(kg·d)⁻¹]计算模型和参数取值如表 3 所示。每种暴露途径分别以成人和儿童计算日均暴露量。

不同暴露途径下,污染物的总非致癌风险指数

表 3 不同暴露途径下的日均暴露量计算公式及参数取值¹⁾

Table 3 Formulas and parameter values of daily exposure under different exposure routes						
暴露途径	公式	参数	含义	参数取值		文献
				成人	儿童	
经口-土壤摄入	$EDI_i = \frac{C_s \times EF \times SIR \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6}$	C _s	表层土壤中污染物含量/mg·kg ⁻¹	—	—	
		SIR	每日摄入土壤量/mg·d ⁻¹	100	200	[19]
		ED	暴露期/a	24	6	[19]
		EF	暴露频率/d·a ⁻¹	350	350	[19]
		BW	体重/kg	61.8	19.2	[19]
		AT(致癌)	平均作用时间/d	27 740	27 740	[19]
		AT(非致癌)	平均作用时间/d	2 190	2 190	[19]
经口-农作物摄入	$EDI_i = \frac{C_p \times EF \times CIR \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-3}$	C _p	农作物中污染物含量/mg·kg ⁻¹	—	—	
		CIR(水稻)	每日水稻摄取量/g·d ⁻¹	336.7	240.1	[50,51]
		CIR(薏米)	每日薏米摄取量/g·d ⁻¹	—	—	

1) 参数 C_s 和 C_p 为根据实地调查获得的土壤及农作物中污染物含量值,mg·kg⁻¹; 参数 CIR 为每日水稻或薏米的摄取量,g·d⁻¹,文献[50]关于福建省成人的薏米摄入量(2.37 g·d⁻¹)远小于水稻摄入量的推荐值(336.7 g·d⁻¹),且文献[51]没有关于福建省儿童的薏米摄入量推荐值,因此,考虑到薏米不是当地居民的主要粮食作物,本研究成人和儿童的每日薏米摄取量忽略不计

和致癌风险指数计算公式如下：

$$HI = \sum_{i=1}^{n=3} HQ_i = \sum_{i=1}^{n=3} \frac{EDI_i}{RfD_i} \tag{7}$$

$$TCR = \sum_{i=1}^n CR_i = \sum_{i=1}^n EDI_i \times SF_i \tag{8}$$

式中,HI 为 3 种污染物的总非致癌风险指数. HQ_i 为污染物 i 经口-土壤或经口-农作物摄入途径的非致癌风险指数. 若 HI 或 HQ_i 均小于 1,说明土壤和作物 Pb、Cd 和 As 的非致癌风险可忽略. 若二者大

于 1,表示超过人体健康可接受非致癌风险. TCR 为 3 种污染物的总致癌风险指数. CR_i 为致癌污染物 i 经单一途径的致癌风险. 一般认为,致癌风险指数低于 10^{-6} ,说明不会对健康造成显著影响;介于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间,致癌风险在可控范围内;超过 10^{-4} 则存在致癌风险. RfD_i 为污染物 i 的参考剂量. SF_i 为致癌污染物 i 的致癌风险斜率因子. Pb、Cd 和 As 的 RfD 与 SF 值参考文献[19]中的推荐值和前人研究成果,如表 4 所示.

表 4 不同暴露途径下 Pb、Cd 和 As 的 RfD 和 SF 值¹⁾

Table 4 RfD and SF values of Pb, Cd, and As under different exposure routes

参数	污染物	暴露途径		文献
		经口-土壤摄入	经口-农作物摄入	
$RfD/mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	Pb	3.50E-03	3.50E-03	[14~17,30~32,34~36]
	Cd	1.00E-03	1.00E-03	[19]
	As	3.00E-04	3.00E-04	[19]
$SF/kg \cdot d \cdot mg^{-1}$	Pb	—	8.50E-03	[14,20,30]
	Cd	6.10	6.10	[16,17,19,30,32]
	As	1.50E+00	1.50E+00	[16~20,30,32,35]

1) “—”表示无数值

单一污染物经口-土壤或经口-农作物摄入途径的非致癌和致癌风险贡献率计算公式如下：

$$PHQ_i = \frac{HQ_i}{HI} \times 100\% \tag{9}$$

$$PCR_i = \frac{CR_i}{TCR} \times 100\% \tag{10}$$

式中, PHQ_i 为 Pb、Cd 和 As 的非致癌风险贡献率,无量纲. PCR_i 为 3 种污染物的致癌风险贡献率,无量纲.

1.6 数据处理方法

本研究利用 K-S 非参数检验方法检验数据的正态分布情况,选用 Excel 2010 和 SPSS 25.0 软件对数据进行处理和统计分析,图形处理采用 Sigmaplot 14.0、Surfer 13.0 和 ArcGIS 10.2 软件绘制.

2 结果与分析

2.1 土壤与农作物 Pb、Cd 和 As 分布特征

典型地块不同土地利用类型土壤 Pb、Cd 和 As 的含量统计见表 5.

表 5 显示,以土壤环境质量标准中的筛选值^[43]和食品安全国家标准中污染物的限量值^[44]为参照,研究 I 区和 II 区土壤及农作物 As 均未超标,而 Pb 和 Cd 有不同程度超标,且其在土壤中的超标率和超标倍数显著高于农作物. 对于 Pb,结合 LSD 多重比较分析结果可知(表 5),I 区土壤 Pb 在林地、旱地和水田的总量差异均不显著($P > 0.05$),不同利用类型土壤 Pb 的污染程度均较低,平均超标率约为

2.73%,仅 1 个农作物点位超标,超标率约为 1.64%. II 区土壤 Pb 在旱地和水田的总量与林地差异显著($P < 0.05$),其中,旱地和水田 Pb 的超标率分别为 61.5% 和 53.8%,最大超标倍数高达 16.3 和 13.4 倍;配套农作物中 Pb 的超标率约为 15.4% 和 23.1%,最大超标倍数分别为 3.93 和 4.27 倍. 对于 Cd,I 区和 II 区土壤 Cd 在林地、旱地和水田的总量差异均不显著($P > 0.05$),2 个典型地块不同利用类型土壤 Cd 的平均超标率分别约为 68.2% 和 71.9%,最大超标倍数分别为 4.94 和 6.97 倍;全部农作物点位薏米和水稻 Cd 的平均超标率仅约为 5% 左右,最大值约为标准限量的 1.44 倍.

2.2 土壤与农作物 Pb、Cd 和 As 污染评价

不同土地利用方式下,土壤和农作物 Pb、Cd 和 As 的污染样点占全部样点的比例如表 6 和表 7 所示.

研究 I 区和 II 区土壤 3 种污染物的平均单项污染指数大小顺序分别为: Cd(1.33) > Pb(0.55) > As(0.34) 和 Pb(1.80) > Cd(1.45) > As(0.14). 表 6 显示 As 在 2 个典型地块均呈清洁水平. I 区土壤 Pb 整体呈清洁-轻微污染水平,仅 1 个旱地点位为重度污染,占比为 2.44%; Cd 在林地、旱地和水田的平均污染指数分别为 1.39、1.46 和 0.91,达到轻度-中度-重度污染水平的样点数约占总样点数的 18% 左右,是最主要的污染因子. II 区土壤 Pb 在林地、旱地和水田达到轻度以上污染水平的样点占比为 2.63%、23.1% 和 23.1%; Cd 的污染等级为轻

表 5 不同利用类型土壤与农作物 Pb、Cd 和 As 的含量统计¹⁾

Table 5 Contents of Pb, Cd, and As in soils and crops of different land use types

典型地区	元素	土地利用类型	样本数	土壤				农作物			
				含量范围 /mg·kg ⁻¹	含量均值 /mg·kg ⁻¹	超标倍数	超标率 /%	含量范围 /mg·kg ⁻¹	含量均值 /mg·kg ⁻¹	超标倍数	超标率 /%
I 区	Pb	林地	49	12.2~143	51.0±22.1a	0.14~1.59	4.08	—	—	—	—
		旱地	41	15.0~375	52.7±53.9a	0.17~4.16	2.44	ND~0.21	0.02±0.04	0~1.07	2.44
		水田	20	6.03~73.1	44.7±19.2a	0.06~0.73	0	ND~0.14	0.06±0.05	0~0.71	0
	Cd	林地	49	0.04~1.00	0.42±0.22a	0.14~3.33	71.4	—	—	—	—
		旱地	41	0.03~1.48	0.44±0.27a	0.05~4.94	75.6	ND~0.25	0.02±0.06	0~1.27	4.87
		水田	20	0.14~0.64	0.37±0.14a	0.35~1.59	45.0	ND~0.29	0.03±0.07	0~1.44	5.00
	As	林地	49	2.93~30.6	12.8±6.53ab	0.07~0.77	0	—	—	—	—
		旱地	41	5.36~32.6	11.5±5.56b	0.13~0.82	0	ND~0.20	0.05±0.04	0~0.98	0
		水田	20	6.08~23.6	15.0±4.79a	0.20~0.79	0	0.01~0.12	0.08±0.03	0.05~0.58	0
II 区	Pb	林地	38	24.3~401	67.8±61.4c	0.27~4.46	15.8	—	—	—	—
		旱地	13	48.6~1466	291±464ab	0.54~16.3	61.5	0.01~0.79	0.12±0.23	0.05~3.93	15.4
		水田	13	36.3~1342	344±496a	0.36~13.4	53.8	0.01~0.85	0.19±0.31	0.05~4.27	23.1
	Cd	林地	38	0.20~2.09	0.48±0.31a	0.68~6.97	81.6	—	—	—	—
		旱地	13	0.17~0.64	0.37±0.13a	0.56~2.13	61.5	ND~0.05	0.02±0.02	0.02~0.27	0
		水田	13	0.25~1.02	0.49±0.22a	0.63~2.55	53.8	ND~0.20	0.05±0.07	0~1.00	7.69
	As	林地	38	0.48~33.1	4.52±5.21a	0.01~0.83	0	—	—	—	—
		旱地	13	1.15~21.9	5.38±6.67a	0.03~0.55	0	ND~0.02	0.01±0.01	0~0.10	0
		水田	13	1.42~22.9	6.86±7.54a	0.05~0.76	0	ND~0.11	0.03±0.03	0~0.55	0

1) 同列不同小写字母表示 Pb、Cd 和 As 含量在各土地利用类型间的差异显著 ($P<0.05$)；“—”表示无数值；“ND”表示未检出

表 6 不同利用类型土壤 Pb、Cd 和 As 污染样点占比

Table 6 Contamination sample proportions of soil heavy metals in different land use types

典型地块	土地利用类型	元素	单因子污染样本占比/%					综合污染样本占比/%				
			清洁	轻微	轻度	中度	重度	清洁	尚清洁	轻度	中度	重度
I 区	林地	Pb	95.9	4.08	0	0	0	22.4	24.5	46.9	6.12	0
		Cd	28.6	53.1	14.3	4.08	0					
		As	100	0	0	0	0					
	旱地	Pb	97.6	0	0	0	2.44	17.1	39.0	36.6	7.32	0
		Cd	24.4	58.5	9.76	4.88	2.44					
		As	100	0	0	0	0					
	水田	Pb	100	0	0	0	0	35.0	55.0	10.0	0	0
		Cd	55.0	45.0	0	0	0					
		As	100	0	0	0	0					
II 区	林地	Pb	84.2	13.2	0	0	2.63	5.26	31.6	55.3	5.26	2.63
		Cd	21.1	60.5	15.8	0	2.63					
		As	100	0	0	0	0					
	旱地	Pb	46.2	30.8	0	7.69	15.4	0	30.8	46.2	7.69	15.4
		Cd	38.5	53.8	7.69	0	0					
		As	100	0	0	0	0					
	水田	Pb	46.2	30.8	0	0	23.1	7.69	38.5	30.8	0	23.1
		Cd	53.8	38.5	7.69	0	0					
		As	100	0	0	0	0					

度以上污染水平的样点占比为 18.4%、7.69% 和 7.69%，因而 Pb 和 Cd 是最主要的污染因子。从综合污染情况看，I 区土壤 Pb、Cd 和 As 在林地、旱地和水田的综合污染等级为轻度及以上的污染样点占比分别为 53.0%、43.9% 和 10.0%。其中，中度污染水平的样点占比为 6.12%、7.32% 和 0，无重度污染。II 区土壤 Pb、Cd 和 As 在林地、旱地和水田的综合污染等级为轻度及以上的污染样点占比分别为

63.2%、69.3% 和 53.9%。其中，达到中度-重度污染水平的样点占比分别为 7.89%、23.1% 和 23.1%。

表 7 显示，研究 I 区农作物 3 种污染物的平均单项污染指数大小顺序分别为：As (0.29) > Pb (0.18) > Cd (0.13)，而 As 在所有农作物样本中均呈清洁水平，个别点位农作物 Pb 和 Cd 污染等级为轻微污染。II 区农作物 3 种污染物的平均单项

污染指数大小为: Pb (0.79) > Cd (0.19) > As (0.10). 其中, 薏米和水稻 Pb 的污染等级为轻度及以上的样点占比分别为 15.4% 和 23.1%, Cd 和 As 均呈清洁水平. 综合污染指数表明, I 区和 II 区薏米 Pb、Cd 和 As 的综合污染指数均值分别为 0.25 和 0.47, 综合污染等级为轻度及以上的比例分别为 2.44% 和 15.4%. 水稻 Pb、Cd 和 As 的综

合污染指数均值分别为 0.43 和 0.83, 污染等级为轻度及以上的比例分别为 5.00% 和 23.1%. 因而典型地块谷物类农作物中 3 种污染物的污染程度表现为水稻 > 薏米.

2.3 土壤 Pb、Cd 和 As 潜在生态风险评价

不同土地利用方式下, 土壤 Pb、Cd 和 As 的潜在生态风险样点占比结果如表 8 所示.

表 7 旱地和水田农作物 Pb、Cd 和 As 污染样点占比

Table 7 Contamination sample proportions of crop heavy metals in dry land and paddy fields

典型地块	土地利用类型	元素	单因子污染样本占比/%					综合污染样本占比/%				
			清洁	轻微	轻度	中度	重度	清洁	尚清洁	轻度	中度	重度
I 区	旱地	Pb	97.6	2.44	0	0	0	92.7	4.88	2.44	0	0
		Cd	95.1	4.88	0	0	0					
		As	100	0	0	0	0					
	水田	Pb	100	0	0	0	0	95.0	0	5.00	0	0
		Cd	95.0	5.00	0	0	0					
		As	100	0	0	0	0					
II 区	旱地	Pb	84.6	0	7.69	7.69	0	84.6	0	7.69	7.69	0
		Cd	100	0	0	0	0					
		As	100	0	0	0	0					
	水田	Pb	76.9	0	7.69	7.69	7.69	76.9	0	0	23.1	0
		Cd	100	0	0	0	0					
		As	100	0	0	0	0					

表 8 不同利用类型土壤 Pb、Cd 和 As 潜在生态风险样点占比

Table 8 Potential ecological risk sample proportions of soil heavy metals in different land use types

典型地块	土地利用类型	元素	单项潜在生态风险样本占比/%					综合潜在生态风险样本占比/%			
			轻微	中等	较强	很强	极强	轻微	中等	较强	很强
I 区	林地	Pb	100	0	0	0	0	36.7	55.1	8.16	0
		Cd	32.7	51.0	16.3	0	0				
		As	93.9	6.12	0	0	0				
	旱地	Pb	97.6	2.44	0	0	0	34.1	58.5	7.32	0
		Cd	26.8	58.5	12.2	2.44	0				
		As	95.1	4.88	0	0	0				
	水田	Pb	100	0	0	0	0	20.0	80.0	0	0
		Cd	30.0	65.0	5.00	0	0				
		As	95.0	5.00	0	0	0				
II 区	林地	Pb	97.4	2.63	0	0	0	47.4	47.4	2.63	2.63
		Cd	26.3	55.3	15.8	2.63	0				
		As	97.4	2.63	0	0	0				
	旱地	Pb	76.9	7.69	0	15.4	0	38.5	46.2	7.69	7.69
		Cd	38.5	53.8	7.69	0	0				
		As	100	0	0	0	0				
	水田	Pb	76.9	0	0	23.1	0	30.8	38.5	15.4	15.4
		Cd	7.69	69.2	23.1	0	0				
		As	92.3	7.69	0	0	0				

表 8 显示, I 区和 II 区土壤 3 种污染物的单项潜在生态风险指数排序分别为: Cd (40.2) > As (17.0) > Pb (5.63) 和 Cd (44.6) > Pb (18.9) > As (6.89), 可见, Cd 是最主要的生态风险因子. 其中, I 区土壤 Cd 在林地、旱地和水田达到中等及以上生态风险的样本占比分别为 67.3%、73.1% 和 70.0%, As 和 Pb 呈轻微生态风险的样本占比可达 95% 以上, 仅个别点位为中等生态风险. II 区土壤

Cd 在林地、旱地和水田呈中等-较强级别生态风险的样点占比分别为 71.1%、61.5% 和 92.3%, 基本无很强级别以上风险. 相较于 Cd, 旱地和水田 Pb 的很强风险占比最高, 分别为 15.4% 和 23.1%. 综合生态风险评价结果表明, I 区不同利用类型土壤 Pb、Cd 和 As 的综合生态风险呈中等级别的样本占比平均值约为 64.5%, 个别点位为较强生态风险, 无很强级别风险. II 区林地、旱地和水田土壤呈较强-

很强级别的区域 RI 值介于 109 ~ 254 之间,样本占比分别为 5.26%、15.4% 和 30.8%。

2.4 土壤与农作物 Pb、Cd 和 As 健康风险评价

不同土地利用方式下,Pb、Cd 和 As 经口-土壤

和经口-农作物这 2 种暴露途径对成人和儿童的单

项非致癌风险指数 (HQ)、总非致癌风险指数

(HI)、单项致癌风险指数 (CR) 和总致癌风险指数

(TCR) 如表 9 所示。

表 9 经口-土壤和经口-农作物摄入途径的非致癌与致癌风险评价结果¹⁾

Table 9 Non-carcinogenic and carcinogenic risk in oral-soil and oral-crop ingestion pathways										
典型地块	土地利用类型	元素	非致癌风险				致癌风险			
			经口-土壤摄入		经口-农作物摄入		经口-土壤摄入		经口-农作物摄入	
			成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
I 区	林地	Pb	0.09	0.15	—	—	—	—	—	—
		Cd	2.59E-03	4.17E-03	—	—	1.25E-06	2.01E-06	—	—
		As	0.27	0.43	—	—	9.42E-06	1.52E-05	—	—
		HI/TCR	0.36	0.58	—	—	1.07E-05	1.72E-05	—	—
	旱地	Pb	0.09	0.15	—	—	—	—	—	—
		Cd	2.72E-03	4.37E-03	—	—	1.31E-06	2.11E-06	—	—
		As	0.24	0.38	—	—	8.48E-06	1.36E-05	—	—
		HI/TCR	0.33	0.54	—	—	9.78E-06	1.57E-05	—	—
	水田	Pb	0.08	0.13	0.38	0.22	—	—	9.03E-07	5.48E-07
		Cd	2.27E-03	3.65E-03	0.64	0.37	1.09E-06	1.76E-06	3.08E-04	1.77E-04
		As	0.31	0.50	5.23	3.00	1.10E-05	1.78E-05	1.86E-04	1.07E-04
		HI/TCR	0.39	0.63	6.26	3.59	1.21E-05	1.95E-05	4.95E-04	2.84E-04
II 区	林地	Pb	0.12	0.19	—	—	—	—	—	—
		Cd	3.00E-03	4.83E-03	—	—	1.45E-06	2.33E-06	—	—
		As	0.09	0.15	—	—	3.32E-06	5.35E-06	—	—
		HI/TCR	0.22	0.35	—	—	4.77E-06	7.68E-06	—	—
	旱地	Pb	0.52	0.83	—	—	—	—	—	—
		Cd	2.28E-03	3.67E-03	—	—	1.10E-06	1.77E-06	—	—
		As	0.11	0.18	—	—	3.95E-06	6.36E-06	—	—
		HI/TCR	0.63	1.01	—	—	5.05E-06	8.13E-06	—	—
	水田	Pb	0.61	0.98	1.15	0.66	—	—	2.71E-06	1.55E-06
		Cd	3.04E-03	4.89E-03	1.08	0.62	1.46E-06	2.35E-06	5.22E-04	3.00E-04
		As	0.14	0.23	2.25	1.29	5.04E-06	8.11E-06	8.00E-05	4.59E-05
		HI/TCR	0.75	1.21	4.49	2.58	6.50E-06	1.05E-05	6.05E-04	3.47E-04

1) “—”表示无数值

表 9 显示,经口-土壤暴露途径下,研究 I 区和 II 区土壤 Cd 和 As 对成人和儿童的 CR 和 TCR 值均未超过我国推荐的最大可接受水平(10^{-4}),因而认为土壤暴露对人体的致癌风险在可接受范围内。经口-农作物摄入途径下,研究 I 区水稻 Pb、Cd 和 As 对成人和儿童的 TCR 值超出 10^{-4} 的样点占比分别为 90.0% 和 75.0%,最大超出倍数约为 29.1 和 16.7 倍。II 区水稻中 3 种污染物对成人和儿童的 TCR 值超出 10^{-4} 的样点占比分别为 76.9% 和 61.5%,最大超出倍数约为 22.5 和 12.9 倍。2 个典型地块水稻 Pb 对居民的 CR 值均低于 10^{-4} ,无致癌风险。水稻 Cd 或 As 会对成人和儿童产生致癌风险,其中,I 区水稻 As 对居民产生致癌风险的样点数量约为 Cd 的 3.00 倍,而 Cd 的最大超出倍数高于 As 约 10.1 倍。II 区水稻 Cd 对居民产生致癌风险的样点数量和最大超出倍数平均高于 As 约 3.50 和 7.40 倍。

非致癌风险结果表明,经口-土壤暴露途径下,

研究 I 区和 II 区不同利用类型土壤单个污染物 Cd 的 HQ 值远小于 1,对人体无非致癌风险。I 区仅个别点位 Pb 或 As 对成人和儿童有非致癌风险,3 种污染物对成人的 HI 值大于 1 的样点占比分别为 0、2.44% 和 0,对儿童产生非致癌风险的样点占比分别为 6.12%、4.88% 和 0,最大超出倍数约为 1.24 ~ 2.13 倍,可见,I 区土壤暴露对人体的非致癌风险较小。II 区林地、旱地和水田土壤这 3 种污染物对人群的综合非致癌风险较高,HI 值超出上限的样点占比分别为 2.63%、15.4% 和 23.1%,最大超出倍数约为 1.40 ~ 4.92 倍,其中,部分点位旱地和水田 Pb 的非致癌风险已经达到了较高水平,需引起重视。经口-农作物摄入途径下,I 区全部水稻点位 Pb、Cd 和 As 对成人和儿童的 HI 值均大于 1,最大超出倍数分别为 9.46 和 5.43;II 区水稻中 3 种污染物对成人和儿童产生非致癌风险的样点占比分别为 84.6% 和 69.2%,最大超出倍数分别为 15.5 和 8.92。从单个污染物的 HQ 值、大于

1 的样点数量和超出倍数等指标看, I 区和 II 区 3 种污染物经口-水稻途径的非致癌风险总体表现为: As > Cd > Pb.

对比 2 个典型地块 Pb、Cd 和 As 在经口-土壤和经口-农作物这 2 种途径下对成人或儿童的健康风险可知, 直接摄入水稻途径的健康风险指数均比土壤暴露高出不同数量级, 尤以 Cd 最为显著, 其次为 As, 最后为 Pb. 对比 2 个典型地块 Pb、Cd 和 As 对不同人群产生的健康风险可知, 经口-土壤暴露途径, 儿童在林地、旱地和水田土壤的非致癌风险指数和致癌风险指数约高于成人 1.61 倍, 可能因儿童的生理和行为特征(如体重较轻、对有毒有害物质的解毒和排泄功能较弱等)使其对污染物敏感性更高^[14,16,27,35,36,52]. 经口-农作物摄入途径, 水稻 Pb、Cd 和 As 对成人的非致癌和致癌风险约高于儿童 1.74 倍, 可能与成人的暴露时间较长, 水稻摄入量较大等因素有关^[16,20,31].

2.5 Pb、Cd 和 As 对土壤与农作物污染风险的贡献分析

不同土地利用方式下, I 区和 II 区土壤 Pb、Cd 和 As 对污染评价、潜在生态风险评价和经口-土壤暴露途径下的健康风险评估结果的贡献率, 如图 2 所示.

图 2 显示, 土壤 Pb、Cd 和 As 对研究区污染风险特征的贡献差异较大. 从土壤污染评价和潜在生态风险评价结果看, I 区和 II 区林地、旱地和水田 Cd 对综合污染和综合潜在生态风险的贡献率均值高于 Pb 和 As, 其中, 2 个典型地块不同利用类型土壤 Cd 对综合污染评价结果的贡献率均值约为 55.3% 和 51.6%, 对综合潜在生态风险贡献率均值分别为 60.2% 和 67.3%. 然而, 从污染物经口-土壤暴露途径的致癌风险评估结果看, I 区和 II 区不同利用类型土壤 As 对总致癌风险指数的贡献率为 87.6% 和 66.3%, 分别约为 Cd 的 7.1 倍和 2.0 倍.

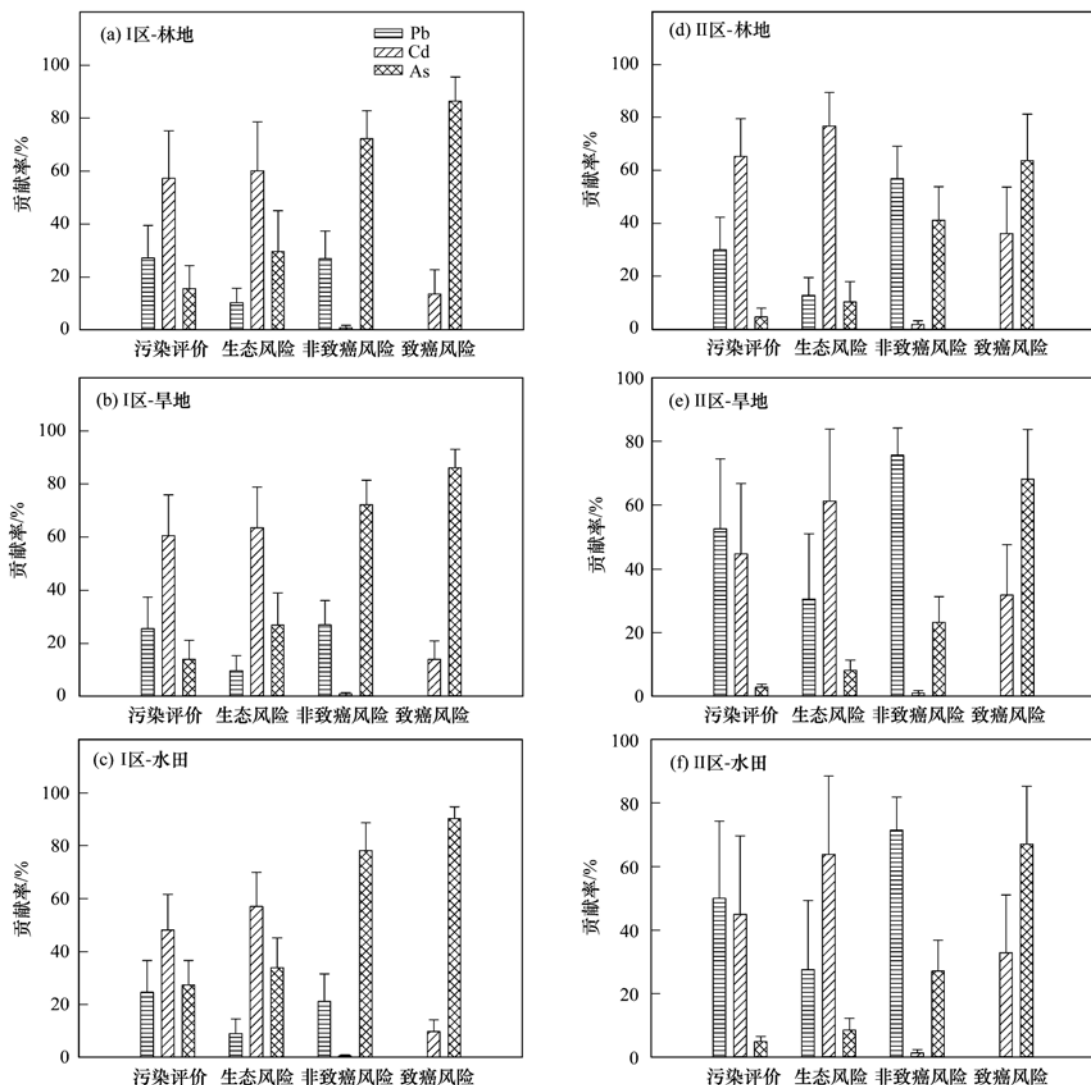


图 2 Pb、Cd 和 As 对土壤污染、潜在生态风险及经口-土壤途径的健康风险的贡献率

Fig. 2 Contribution of Pb, Cd, and As to soil pollution, ecological risk, and health risks under the oral-soil exposure pathway

从非致癌风险评估结果看, I 区土壤 3 种污染物对总非致癌风险的贡献率为: As (74.2%) > Pb (25.0%) > Cd (0.80%)。II 区土壤 Pb 对总非致癌风险的贡献率最高, 均值为 68.1%。其次为 As, 贡献

率约为 30.5%。Cd 的贡献率仅占 1.38%。

Pb、Cd 和 As 对水稻综合污染评价和经口-水稻暴露途径下的健康风险评估结果的贡献率, 如图 3 所示。

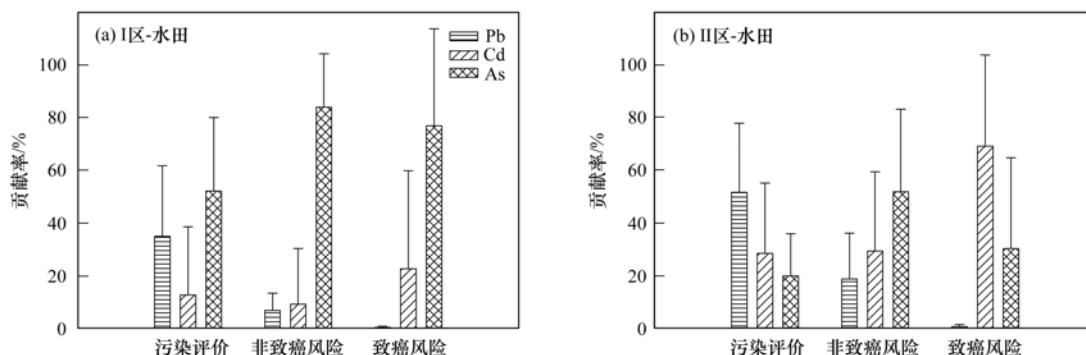


图3 Pb、Cd 和 As 对水稻污染及经口-水稻途径的健康风险的贡献率

Fig. 3 Contribution of Pb, Cd, and As to rice pollution and health risks under the oral-rice intake pathway

图 3 显示, 从水稻综合污染评价结果看, I 区由于水稻样本中 As 的检出率高于 Pb 和 Cd, 导致 As 对综合污染的贡献率均值最大, 约为 52.3%, II 区 Pb 对综合污染的贡献最大, 贡献率约为 51.7%。从污染物经口-水稻摄入途径的健康风险评估结果看, I 区和 II 区水稻 Pb 无致癌风险, Cd 和 As 对成人和儿童存在高致癌风险, 贡献率分别为: As (76.8%) > Cd (22.7%) 和 Cd (69.1%) > As (30.3%)。2 个典型地块 Pb、Cd 和 As 均具有高非致癌风险, 其中对总非致癌风险的贡献均以 As 最为显著, 贡献率分别为 84.0% 和 52.0%。其次为 Cd, 贡献率分别约为 9.16% 和 29.3%。最后为 Pb, 贡献率分别约为 6.81% 和 18.7%。本研究未考虑经口-薏米摄入途径的健康风险, 从薏米的综合污染评价结果看, I 区和 II 区薏米 Pb、Cd 和 As 对综合污染的贡献率大小规律与水稻一致, 其中, I 区 As 的贡献率最大, 平均值约为 65.2%, II 区 Pb 的贡献率最大, 平均值约为 60.6%。

3 讨论

本研究选择龙岩市 2 个典型地块, 通过不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染评价、潜在生态风险评价和不同暴露途径下的健康风险评价, 证实了在污染物种类、来源、检出率、含量水平、选取的评价方法、模型参数取值等多重因素的影响下, 土壤和农作物系统中 Pb、Cd 和 As 污染风险特征的复杂性。

对于土壤 Pb, I 区主要受地质背景因素影响^[30], Pb 的污染程度低, 经口-土壤途径的非致癌风险低; II 区受矿山开采冶炼、酸性废水灌溉、耕作方式等人类活动影响^[31], 旱地和水田 Pb 的超标率

和超标倍数显著高于林地, 污染及潜在生态风险等级较高, 同时, Pb 经口-土壤途径的非致癌风险较大, 即使 Pb 的暴露参考剂量 (RfD) 大于 Cd 和 As 数倍, 对成人和儿童总非致癌风险的贡献率仍最高, 均值约为 68.1%。对于土壤 Cd, 由于 Cd 是分散元素, 绝对含量一般低于其它重金属^[33], 但因其标准限值严格, 无论是自然成因还是人为成因, 均易导致土壤 Cd 的污染程度较高。综合污染指数法的计算公式中含有评价参数中最大的单项污染指数, 突出含量高的污染物对土壤质量的影响, 同时, 本研究虽然在潜在生态风险评价中降低了背景值的影响, 但 Cd 的毒性系数较高, 因而 I 区和 II 区土壤的单项污染指数 (P_i) 和单项潜在生态风险指数 (E_i) 均表明, Cd 是主要的污染因子和生态风险因子, 对综合污染和综合潜在生态风险的贡献率分别达 50% 和 60% 以上。然而, 2 个典型地块 Cd 经口-土壤途径对成人和儿童均无健康风险, 对总非致癌风险的贡献率均不足 1.50%, 对总致癌风险的贡献率均值仅为 12.3% 和 33.6%。对于土壤 As, I 区和 II 区土壤 As 均未超标, 污染及生态风险程度较低, 虽然 2 个典型地块 As 经口-土壤途径的非致癌风险较小, 且无致癌风险, 但其对成人和儿童的总非致癌风险和总致癌风险的贡献率较高, 仍需引起关注。

对于水稻 Pb, I 区和 II 区 Pb 经口-水稻途径均无致癌风险, 且非致癌风险低于 Cd 和 As, 对总非致癌风险的贡献率仅约为 6.81% 和 18.7%。然而, 2 个典型地块水稻 Pb 的污染程度均高于 Cd 和 As, 特别是 II 区, 水稻 Pb 对农作物综合污染的贡献率可达 51.7%, 这一结果与 II 区土壤 Pb 污染和 Pb 经口-土壤途径的非致癌风险特征不同, 可能与土壤及配套农作物 Pb 的含量水平差异有关。对于水稻 Cd 和

As, I 区和 II 区水稻 Cd 和 As 污染程度低,基本呈清洁水平,但经口-水稻途径对成人和儿童却存在高非致癌风险和致癌风险,且 As 对健康风险的贡献较大,有研究表明,水田的氧化还原电位较低,在淹水状态下易引起 As 元素以亚砷酸盐形态存在,毒性和可溶性较大,通过食用稻米可对人体产生暴露风险^[53]. 本研究 I 区和 II 区土壤 Pb、Cd 和 As 的超标率和超标倍数均高于农作物数倍,但直接摄入农作物的健康风险比土壤暴露高出不同数量级. 因此,在实际污染风险评估工作中,需要对土壤和农作物的污染风险进行综合评价,并进行对比分析,从而得出较科学的评价结果,为下一步开展针对性管控,将污染风险控制可接受水平提供参考依据.

4 结论

(1) 研究区所有土壤及农作物点位 As 均未超标. 2 个典型地块土壤 Cd 在林地、旱地和水田的总量差异均不显著,平均超标率分别约为 68.2% 和 71.9%,最大超标倍数分别为 4.94 和 6.97 倍; 配套农作物 Cd 的基本未超标. I 区不同利用类型土壤和农作物 Pb 超标程度较低, II 区土壤 Pb 在旱地和水田的总量与林地差异显著,其中,旱地和水田 Pb 的超标率分别为 61.5% 和 53.8%,最大超标倍数高达 16.3 和 13.4 倍; 薏米和水稻中 Pb 的超标率约为 15.4% 和 23.1%,最大超标倍数分别为 3.93 和 4.27 倍.

(2) I 区不同利用类型土壤 Pb、Cd 和 As 的综合污染和综合潜在生态风险等级较低, Cd 是主要土壤污染和生态风险因子,对综合污染和综合潜在生态风险的贡献率达到 55.3% 和 60.2%. 配套农作物中 3 种污染物基本呈清洁水平. II 区林地、旱地和水田土壤 Pb、Cd 和 As 的综合污染等级较高,达到中度-重度污染水平的样点占比分别为 7.89%、23.1% 和 23.1%,综合潜在生态风险呈较强-很强级别的样点占比分别为 5.26%、15.4% 和 30.8%. Pb 和 Cd 是主要土壤污染和生态风险因子,对综合污染的贡献率均值分别为 44.2% 和 51.6%,对综合生态风险的贡献率均值分别为 23.7% 和 67.3%. 配套农作物 Cd 和 As 均呈清洁水平, Pb 为主要农作物污染因子,对薏米和水稻综合污染的贡献率分别达到 60.6% 和 51.7%.

(3) 致癌风险结果表明,经口-土壤暴露途径下, I 区和 II 区不同利用类型土壤 Cd 和 As 对成人和儿童的致癌风险均在可接受范围内. 经口-水稻摄入途径下, 2 个典型地块水稻 Pb 均无致癌风险, Cd 和 As 对成人和儿童存在致癌风险,贡献率分别为: As

(76.8%) > Cd (22.7%) 和 Cd (69.1%) > As (30.3%). 非致癌风险结果表明,经口-土壤暴露途径下, I 区土壤 3 种污染物的非致癌风险较小. II 区土壤 Pb、Cd 和 As 的非致癌风险较高,贡献率为: Pb (68.1%) > As (30.5%) > Cd (1.38%). 经口-水稻摄入途径下, 2 个典型地块水稻 Pb、Cd 和 As 具有较高非致癌风险,均以 As 对总非致癌风险的贡献最为显著,贡献率分别为 84.0% 和 52.0%. 其次为 Cd,贡献率分别为 9.16% 和 29.3%. 最后为 Pb,贡献率分别为 6.81% 和 18.7%.

参考文献:

- [1] 李丽, 张兴, 李军宏, 等. 土壤污染现状与土壤修复产业进展及发展前景研究[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(3): 45-48.
- [2] Li L, Zhang X, Li J H, *et al.* Current status of soil pollution and progress of soil reclamation industry[J]. *Environmental Science and Management*, 2016, 41(3): 45-48.
- [3] 王玉军, 刘存, 周东美, 等. 客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状——关于《全国土壤污染状况调查公报》中有关问题的讨论和建议[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1465-1473.
- [4] Wang Y J, Liu C, Zhou D M, *et al.* A critical view on the status quo of the farmland soil environmental quality in China: discussion and suggestion of relevant issues on report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8): 1465-1473.
- [5] Yang W T, Zhou H, Gu J F, *et al.* Effects of a combined amendment on Pb, Cd, and As availability and accumulation in rice planted in contaminated paddy soil[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2017, 26(1): 70-83.
- [6] Hu Y A, Liu X P, Bai J M, *et al.* Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(9): 6150-6159.
- [7] Nuralkyzy B, Wang P, Deng X Q, *et al.* Heavy metal contents and assessment of soil contamination in different land-use types in the Qaidam Basin[J]. *Sustainability*, 2021, 13(21), doi: 10.3390/su132112020.
- [8] Okoro L C, Nwachukwu M O, Ike S G I. Assessment of heavy metal contents in three different land used soils in Ohaji/Egbema Imo State, Nigeria[J]. *Asian Soil Research Journal*, 2021, 5(1): 38-47.
- [9] Islam S, Ahmed K, Habibullah-Al-Mamun, *et al.* Potential ecological risk of hazardous elements in different land-use urban soils of Bangladesh [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 512-513: 94-102.
- [10] Gasparatos D, Mavromati G, Kotsovilis P, *et al.* Fractionation of heavy metals and evaluation of the environmental risk for the alkaline soils of the Thriassio plain: a residential, agricultural, and industrial area in Greece[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 1099-1108.
- [11] 董艺博, 陈超, 周丽, 等. 罗甸县不同土地利用类型对土壤重金属含量的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(2): 392-399.
- [12] Dong Y B, Chen C, Zhou L, *et al.* Effect of different land-use patterns on content of topsoil heavy metals in Luodian County,

- Guizhou[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, **34**(2): 392-399.
- [10] 李彤, 吴泉源, 姚磊, 等. 龙口市北部平原区不同土地利用类型对土壤重金属污染距离的影响[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(7): 1224-1230.
- Li T, Wu Q Y, Yao L, *et al.* Effects of different land use types on pollution distance of heavy metals in north plain of Longkou City[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(7): 1224-1230.
- [11] Weissmannová H D, Mihočová S, Chovanec P, *et al.* Potential ecological risk and human health risk assessment of heavy metal pollution in industrial affected soils by coal mining and metallurgy in Ostrava, Czech Republic [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(22), doi: 10.3390/ijerph16224495.
- [12] Aboubakar A, Douaïk A, Mewouo Y C M, *et al.* Determination of background values and assessment of pollution and ecological risk of heavy metals in urban agricultural soils of Yaoundé, Cameroon[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, **21**(3): 1437-1454.
- [13] US Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund: human health evaluation manual Part A[R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [14] 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.
- [15] 张迪, 周明忠, 熊康宁, 等. 贵州遵义下寒武统黑色页岩区土壤重金属污染和人体健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(5): 1247-1257.
- Zhang D, Zhou M Z, Xiong K N, *et al.* Assessment of pollution and human health risk from heavy metals in soils and crops in the lower Cambrian black shale area, Zunyi, Guizhou Province[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(5): 1247-1257.
- [16] 郑堃, 任宗玲, 覃小泉, 等. 韶关工矿区水稻土和稻米中重金属污染状况及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(5): 915-925.
- Zheng K, Ren Z L, Qin X Q, *et al.* Status and risk assessment of heavy metal pollution in paddy soil and rice grains from the industrial and mining area of Shaoguan, Guangdong Province [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(5): 915-925.
- [17] 王世玉, 吴文勇, 刘菲, 等. 典型污灌区土壤与作物中重金属健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(4): 1550-1560.
- Wang S Y, Wu W Y, Liu F, *et al.* Assessment of human health risks of heavy metals in the typical sewage irrigation areas[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(4): 1550-1560.
- [18] 王宇珊, 刘成坚, 陈晓燕, 等. 垃圾焚烧厂周边土壤的重金属污染风险评价[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2020, **52**(5): 57-64.
- Wang Y S, Liu C J, Chen X Y, *et al.* Pollution risk assessments of heavy metals in soils around a municipal solid waste incinerator [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2020, **52**(5): 57-64.
- [19] HJ 25.3-2019, 建设用地土壤污染风险评估技术导则[S].
- HJ 25.3-2019, Technical guidelines for risk assessment of soil contamination of land for construction[S].
- [20] 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.
- [21] 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 等. 铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 437-444.
- Wang Y Y, Li F F, Wang X Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in surface farmland soil around a lead and zinc smelter[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 437-444.
- [22] 曹春, 张松, 张鹏, 等. 大宝山污灌区土壤-蔬菜系统重金属污染现状及其风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(7): 1521-1531.
- Cao C, Zhang S, Zhang P, *et al.* Heavy metal contamination in soil-vegetable systems and its health risks in an area irrigated with acid mine drainage in Dabaoshan, Guangdong, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(7): 1521-1531.
- [23] 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.
- [24] 都雪利, 李波, 崔杰华, 等. 辽宁某冶炼厂周边农田土壤与农产品重金属污染特征及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(10): 2249-2258.
- Dou X L, Li B, Cui J H, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and risk of farmland soil and agricultural products around a smelter in Liaoning [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(10): 2249-2258.
- [25] 闫晓露, 郑欢, 赵炬杭, 等. 辽东湾北部河口区土壤重金属污染源识别及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(8): 3028-3039.
- Yan X L, Zheng H, Zhao X H, *et al.* Source identification and health risk assessment of soil heavy metal in the estuary of Northern Liaodong Bay, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(8): 3028-3039.
- [26] 熊佳, 韩志伟, 吴攀, 等. 独山锡冶炼厂周边土壤镉砷空间分布特征、污染评价及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(2): 655-664.
- Xiong J, Han Z W, Wu P, *et al.* Spatial distribution characteristics, contamination evaluation and health risk assessment of arsenic and antimony in soil around an antimony smelter of Dushan County [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(2): 655-664.
- [27] 林苒, 梁文静, 焦旸, 等. 陕西潼关县金矿矿区周边农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 2021, **48**(3): 749-763.
- Lin J, Liang W J, Jiao Y, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil around the gold mining area in Tongguan of Shaanxi Province [J]. Geology in China, 2021, **48**(3): 749-763.
- [28] 冯康宏, 范缙, Hii L U S, 等. 基于生物可给性的某冶炼厂土壤重金属健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2021, **41**

- (1): 442-450.
- Feng K H, Fan J, Hii L U S, *et al.* Human health risk assessment of heavy metals in soil from a smelting plant based on bioaccessibility [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41** (1): 442-450.
- [29] 耿紫琪, 王鹏飞, 付雅祺, 等. 稻米中铬的生物可给性及其对人体的健康风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2020, **15** (6): 205-211.
- Geng Z Q, Wang P F, Fu Y Q, *et al.* Bioaccessibility of chromium in rice and its human health risk assessment [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, **15** (6): 205-211.
- [30] 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.
- [31] 陈凤, 董泽琴, 王程程, 等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38** (10): 4360-4369.
- Chen F, Dong Z Q, Wang C C, *et al.* Heavy metal contamination of soils and crops near a zinc smelter [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (10): 4360-4369.
- [32] 肖冰, 薛培英, 韦亮, 等. 基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41** (6): 2869-2877.
- Xiao B, Xue P Y, Wei L, *et al.* Characteristics of Cd, As, and Pb in soil and wheat grains and health risk assessment of grain-Cd/As/Pb on the field scale [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (6): 2869-2877.
- [33] 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 等. 浙中典型硫铁矿区农田土壤重金属含量特征及健康风险[J]. *环境科学*, 2022, **43** (1): 442-453.
- Cheng X M, Sun B B, Wu C, *et al.* Heavy metal concentration characteristics and health risks of farmland soils in typical pyrite mining area of the central Zhejiang Province, China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (1): 442-453.
- [34] 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 等. 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43** (2): 936-945.
- Liu Y, He Z H, Niu X K, *et al.* Health risk assessment of soil heavy metals in a small watershed of a mining area in Yunnan [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (2): 936-945.
- [35] 郭志娟, 周亚龙, 王乔林, 等. 雄安新区土壤重金属污染特征及健康风险[J]. *中国环境科学*, 2021, **41** (1): 431-441.
- Guo Z J, Zhou Y L, Wang Q L, *et al.* Characteristics of soil heavy metal pollution and health risk in Xiong'an New District [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41** (1): 431-441.
- [36] 周艳, 王金忠, 李群, 等. 铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41** (10): 4733-4739.
- Zhou Y, Wan J Z, Li Q, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment of corn grains from a Pb-Zn mining area [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (10): 4733-4739.
- [37] 王蕊, 陈明, 陈楠, 等. 龙岩市适中镇一带土壤重金属异常成因与生态效应评价[J]. *地球与环境*, 2018, **46** (4): 388-395.
- Wang R, Chen M, Chen N, *et al.* Genesis and ecological effect assessment of heavy metal anomaly in soil of the Longyan City [J]. *Earth and Environment*, 2018, **46** (4): 388-395.
- [38] 王蕊, 陈楠, 张二喜, 等. 龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析[J]. *环境科学*, 2021, **42** (3): 1114-1122.
- Wang R, Chen N, Zhang E X, *et al.* Geochemical patterns and source analysis of soil heavy metals in an iron and manganese ore area of Longyan City [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (3): 1114-1122.
- [39] DD 2005-02, 区域生态地球化学评价技术要求(试行)[S].
- [40] DD 2005-03, 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)[S].
- [41] DZ/T 0011-2015, 地球化学普查规范(1:50000)[S].
- [42] DD 2005-01, 多目标区域地球化学调查规范(1:250000)[S].
- [43] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [44] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [45] Ge Y X, Wu J, Zhang D S, *et al.* Uncertain analysis of fuzzy evaluation model for water resources carrying capacity: a case study in Zhanhuang County, North China Plain [J]. *Water*, 2021, **13** (20), doi: 10.3390/w13202804.
- [46] Han L, Song Y H, Duan L, *et al.* Risk assessment methodology for Shenyang chemical industrial Park based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73** (9): 5185-5192.
- [47] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14** (8): 975-1001.
- [48] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. *地理研究*, 2020, **39** (6): 1233-1241.
- Ma J H, Han C X, Jiang Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index [J]. *Geographical Research*, 2020, **39** (6): 1233-1241.
- [49] 庞绪贵, 代杰瑞, 陈磊, 等. 山东省 17 市土壤地球化学背景值[J]. *山东国土资源*, 2019, **35** (1): 46-56.
- Pang X G, Dai J R, Chen L, *et al.* Soil geochemical background value of 17 cities in Shandong Province [J]. *Shandong Land and Resources*, 2019, **35** (1): 46-56.
- [50] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册-成人卷[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population-Adults [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.
- [51] 段小丽. 中国人群暴露参数手册概要-儿童卷[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- Duan X L. Highlights of the Chinese exposure factors handbook-Children [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016.
- [52] 李洋, 张乃明, 魏复盛. 滇东锡高背景区菜地土壤健康风险评价与基准[J]. *中国环境科学*, 2020, **40** (10): 4522-4530.
- Li Y, Zhang N M, Wei F S. A benchmark study on soil health risks of vegetable fields in a high-cadmium background area in eastern Yunnan [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40** (10): 4522-4530.
- [53] He W L, Li X L, Guo S, *et al.* Arsenic accumulation, speciation and bioavailability in rice cultivated in arsenic acid exposed soil [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2021, **67** (5): 307-316.

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i>	(1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qì, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i>	(1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i>	(1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i>	(1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i>	(1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling	(1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i>	(1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i>	(1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i>	(1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i>	(1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i>	(1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i>	(1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i>	(1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i>	(1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i>	(1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i>	(1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi	(1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i>	(1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i>	(2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i>	(2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i>	(2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i>	(2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i>	(2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i>	(2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i>	(2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i>	(2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i>	(2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen	(2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i>	(2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i>	(2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi	(2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i>	(2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu	(2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i>	(2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i>	(2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i>	(2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i>	(2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i>	(2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i>	(2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i>	(2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi	(2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i>	(2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i>	(2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i>	(2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i>	(2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i>	(2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i>	(2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i>	(2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i>	(2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i>	(2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i>	(2395)