E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

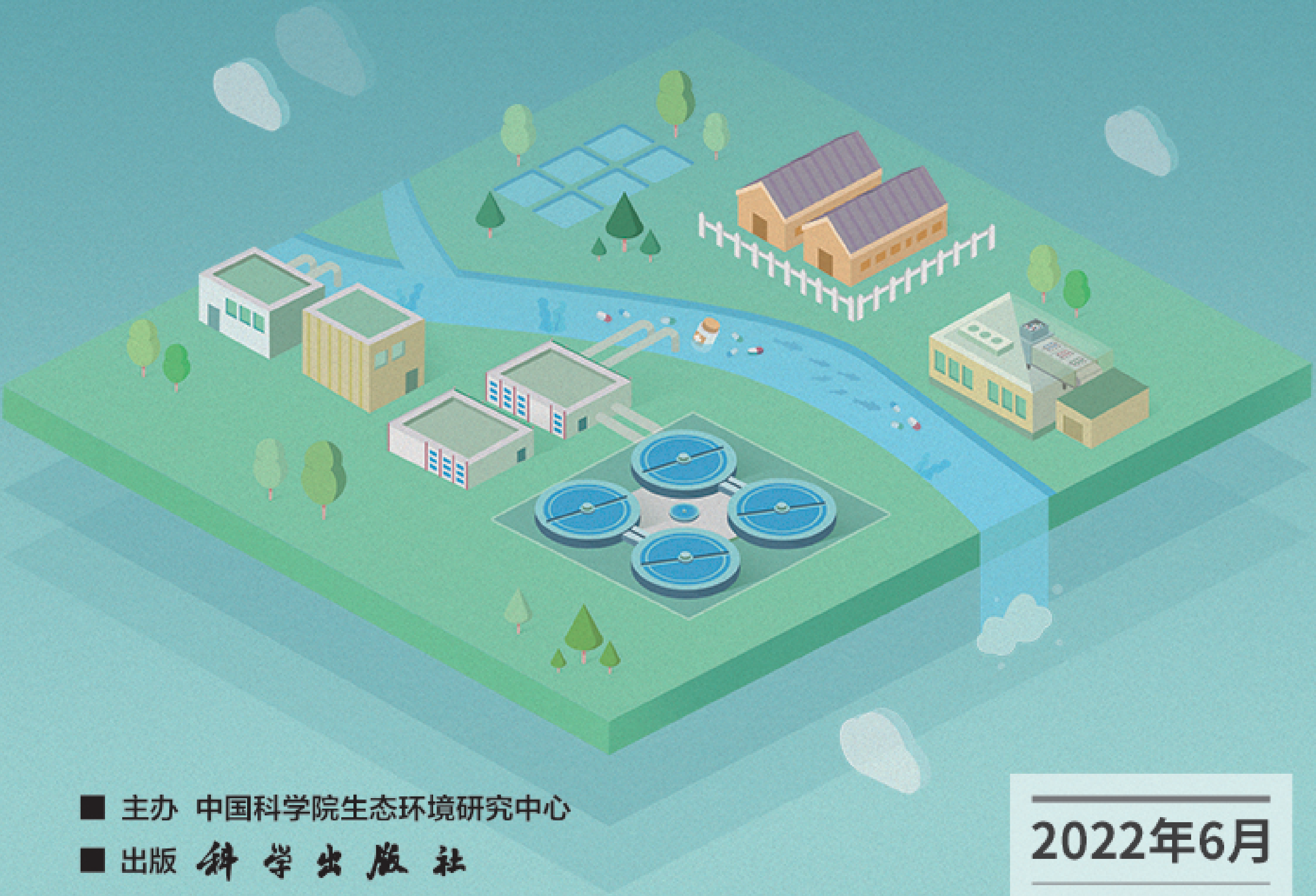
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅，魏琳，彭晶倩，何鹏，施鸿媛，汤冬梅，吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年6月
第43卷 第 6 期
Vol.43 No.6

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 43 卷　第 6 期
2022 年 6 月 15 日

目　次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 $PM_{2.5}$浓度影响 …… 邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇(2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 $PM_{2.5}$浓度、粒径分布、组分和来源的影响 …… 黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹(2840)
COVID-19 管控期间苏州市 $PM_{2.5}$中金属元素浓度变化及来源解析 …… 缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强(2851)
2015～2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化 …… 谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜娴, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉(2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 $PM_{2.5}$来源 …… 彭超, 李振亮, 曹云擎, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬(2867)
保定市冬季 $PM_{2.5}$的氧化潜势特征及其影响来源分析 …… 吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟(2878)
南京江北新区 $PM_{2.5}$中水溶性有机氮的污染特征及其来源 …… 关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜(2888)
广西十万大山背景点 $PM_{2.5}$中非极性有机气溶胶组成及来源解析 …… 邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜娴, 章炎麟(2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素:以京津冀地区为例 …… 张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋,程苗苗(2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因 …… 唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹(2917)
天津市 $PM_{2.5}$-O_3 复合污染特征及气象影响分析 …… 肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟赟, 徐虹, 戢运峰, 邓小文(2928)
2016～2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析 …… 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华(2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化 …… 晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹(2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 …… 赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳(2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源 …… 苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华(2966)
运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 …… 温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王妘涛, 马俊杰, 刘新罡(2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁 …… 范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕(2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价 …… 武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌(2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险 …… 张坤锋, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王恩瑞, 孙兴滨, 王山军(3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制 …… 宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞(3016)
高原湖泊周边浅层地下水:氮素时空分布及驱动因素 …… 李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹(3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析 …… 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇(3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价 …… 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰(3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险 …… 刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞(3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价 …… 张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻(3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 …… 陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健(3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应 …… 陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲(3088)
2015～2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子 …… 屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明(3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游动植物群落结构特征与环境因子关系 …… 王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松(3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析 …… 葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越(3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制 …… 谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华(3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法 …… 顾晶晶, 冶运涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉(3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化 …… 陈旭东, 高良敏(3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染 …… 石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹(3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响 …… 吴香香, 艾萍, 李大鹏(3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析 …… 席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐蘇士, 荆红卫, 刘保献(3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征 …… 章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉(3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制 …… 曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石烜, 金鹏康(3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性 …… 唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭(3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制 …… 龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永(3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析 …… 李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军(3221)
2000～2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征 …… 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利(3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征 …… 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡(3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析 …… 温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红(3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响 …… 刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕(3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价 …… 张倩, 韩贵琳(3269)
南阳盆地东部山区土壤锗分布特征及其影响因素分析 …… 董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京(3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价 …… 严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华(3288)
石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复 …… 许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红(3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响 …… 谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒(3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应 …… 罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平(3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应 …… 罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰(3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响 …… 靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰(3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征 …… 廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰(3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征 …… 廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉(3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应 …… 梁建设, 白永平, 杨雪荻, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩(3365)
《环境科学》征订启事(3004)　《环境科学》征稿简则(3047)　信息(3252, 3298, 3327)

生态知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响

刘永林[1,2], 刘属灵[1,2], 吴梅[1,2], 田兴磊[3*], 刘双燕[1,2]

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 重庆师范大学GIS应用研究重点实验室, 重庆 401331; 3. 山东省地质科学研究院, 济南 250013)

摘要: 人类活动(土地利用)和环境变化(土地覆被变化)对土壤中硒和重金属含量分布具有重要影响. “退耕还林”生态工程的实施改变了土地利用/覆被,为研究土地利用/覆被变化对土壤中硒和重金属影响提供了理想的实验场所. 在西南典型“退耕还林”区,采集了旱地、水田和林地(天然林地和次生林地)的91件表层土壤样品. 测定和分析了土壤中硒、重金属、pH和有机质等参数. 结果表明:①研究区表土中$\omega(\mathrm{Se})$(0.42×10^{-6})、$\omega(\mathrm{As})$(13.0×10^{-6})和$\omega(\mathrm{Sb})$(1.03×10^{-6})均值显著高于渝西地区的土壤背景值; ②人工次生林地表土中Se、Cd、Cr、Ni、Pb和Zn含量都显著高于旱地,表明“退耕还林”工程的实施可能会显著影响表土中硒和重金属富集; ③土壤有机质(SOM)含量水平是控制表土中硒和重金属含量差异的重要因子. 结果发现土地利用/覆被变化通过影响土壤pH和SOM间接深刻地影响土壤中硒和重金属迁移和富集.

关键词: 土地利用/覆被变化; 硒; 重金属; 有机质; 退耕还林

中图分类号: X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)06-3262-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202109035

Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a “Return Cropland to Forest” Area, Southwest China

LIU Yong-lin[1,2], LIU Shu-ling[1,2], WU Mei[1,2], TIAN Xing-lei[3*], LIU Shuang-yan[1,2]

(1. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Key Laboratory of GIS Application Research, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 3. Shandong Institute of Geological Sciences, Ji'nan 250013, China)

Abstract: Human activities (land use) and environmental change (land cover change) affect the concentration of Se and heavy metals in soils. The implementation of the “Return Cropland to Forest (RCF)” ecological project has changed the land use and cover, which has provided an ideal experimental area for studying the effects of land use and cover change on selenium (Se) and heavy metals in the soil. In this study, 91 top soil samples from different land use and land cover types, including dry land, paddy land, natural forest land, and secondary forest land, were collected, and the contents of Se, heavy metals, and soil organic matter (SOM) and pH were analyzed. The results showed that: ① the average values of $\omega(\mathrm{Se})$ (0.42×10^{-6}), $\omega(\mathrm{As})$ (13.0×10^{-6}), and $\omega(\mathrm{Sb})$ (1.03×10^{-6}) were higher than the soil background values of western Chongqing. ② The concentrations of Se, Cd, Cr, Ni, Pb, and Zn in soils from secondary forest land were significantly higher than those from dry land soils, suggesting that the Se and heavy metals might have significantly increased in the surface soil after the implementation of the RCF ecological project. ③ The SOM was the key controlling factor for the enrichment and distribution of Se and heavy metals in the top soils. Our results indicated that the land use and land cover change would deeply impact the concentrations of Se and heavy metals in the top soils via influencing the soil properties, especially the SOM.

Key words: land use/land cover change; selenium; heavy metals; soil organic matter; return cropland to forest

土壤中硒(Se)含量的丰缺程度引起的区域人体健康问题已得到广泛确认[1~6],而开发富硒土壤资源是解决土壤硒含量分布不均匀的重要途径之一. 但随着社会经济的快速发展,土壤重金属污染问题[7,8],已经比较严重. 据文献[9],我国耕地土壤重金属污染状况令人堪忧[7,9~12]. 因此,富硒土壤中硒与重金属含量水平、相互关系及其对人体健康的联合影响,已越来越受到科学界和政府部门广泛关注[13~17].

土壤中硒和重金属丰缺程度,同时受到土壤外部因素和内在因素影响[8,18~21]. 自然状况下,成土母质是土壤中硒和重金属的重要来源[18,22~25],也主要控制着土壤矿物成分和基本理化性质,从而间接影响土壤中硒和重金属的迁移和富集. 随着土壤发育程度增加,土壤内部因素(pH值、有机质、微生物和黏粒含量等)对硒和重金属影响快速增加[14,21,26,27]. 其中土壤pH值和有机质(SOM)对硒和重金属含量分布、迁移转化和富集影响最为广泛和深刻[16,19,20,28]. 但随着社会经济发展,人为活动对土壤中硒和重金属含量水平的影响越来越大,如矿区周边农田土壤中硒和重金属含量增高等[29,30]; 化肥施用导致耕地土壤中镉(Cd)含量升高[31]等.

土地利用/覆被变化是人为活动的重要体现形式,也是反映全球环境变化的重要因子,其对土壤

收稿日期: 2021-09-04; **修订日期**: 2021-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41502329); 重庆市教育委员会科学技术计划项目(KJZDK202100504, KJQN201900519)

作者简介: 刘永林(1983~),男,博士,副教授,主要研究方向为土地利用与土壤环境地球化学,E-mail: liu3986130@163.com

* 通信作者,E-mail: xinglei_tian@163.com

pH 值和 SOM 的含量变化有显著影响[32]. 因此,土地利用/覆被变化也可能会通过影响土壤 pH 和 SOM 而间接影响土壤中元素迁移转化和富集程度,如土壤中 N、P 和 K[33,34]. 土地利用类型差异对土壤中硒和重金属含量分布的研究较多[13,26,31,33,35],但缺乏土地覆被变化对土壤中硒和重金属含量分布的影响研究. 自 20 世纪 50 年代,我国开始实行“退耕还林”和“退湖还田”等生态工程,明显改变了地区的土地利用/覆被. 这为广泛而深入地认识土地利用/覆被变化对土壤中硒和重金属含量分布的影响提供了良好的实验场所. 为此,本文主要研究目标有:①明确土地利用/覆被变化对土壤中硒和重金属含量是否具有差异影响; ②明确土地利用/覆被变化对土壤中硒和重金属含量差异影响的主控因素,以期为更好地管理和开发富硒土壤资源,提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

重庆市江津区位于四川盆地东南部,属亚热带湿润季风气候区,年均气温 18.4℃,年均降水量 1 001 mm. 研究区总体地势南高北低,境内地貌类型分为河谷阶地、丘陵和山地[图 1(b)]. 其中河谷阶地零星分布在长江沿岸,丘陵分布在向斜谷地,山地主要分为背斜低山和倒置中低山[图 1(b)]. 江津区受到晚白垩世燕山运动第三期影响,形成多个背斜和向斜平行相间排列. 总体构造特点表现为向斜开阔,背斜紧密. 白垩纪(K)地层出露于研究区南部,岩性为砂岩夹泥岩; 侏罗纪(J)地层出露于背斜两翼和向斜核部,为研究区出露面积最广的地层,岩性为泥岩、粉砂岩及砂岩; 三叠纪(T)地层出露于背斜核部,岩性主要为湖河相碎屑岩和浅海相碳酸盐岩. 因此,研究区成土母岩可分为白垩纪、侏罗纪和中晚三叠世的陆相红色碎屑岩,与早三叠世的海相碳酸盐岩. 其中,陆相红色碎屑岩面积最广,为研究区主要成土母岩.

重庆市自 2000 年实施“退耕还林”工程,而江津区是重庆市退耕还林的重点区县. 经过退耕还林工程的实施和社会经济的快速发展,江津区土地利用/覆被已发生巨大的变化[图 1(c)和 1(d)],林地面积由 2000 年的1 581.74 km^2(占比 49.21%)增加至 2015 年的1 771.55 km^2(占比 55.36%),对应的耕地面积由1 508.21 km^2(占比 46.93%)下降至1 231.13 km^2(占比 38.47%).

1.2　样品采集与化学分析

研究区陆相红色碎屑岩分布广泛,也是主要农业活动和“退耕还林”区,因此为减少成土母岩的影响,仅采集此分布区的土壤样品. 为较客观对比“退耕还林”前后表土中硒与重金属含量的差异,采取以下采样原则:①就近原则,即旱地与对应的人工次生林相距近; ②旱地和人工次生林的成土母岩、地形地貌等地理环境相似. 江津区共采集 91 件表层土壤(0 ~ 20 cm)样品[图 1(b)],其中旱地(长期耕作)41 件,水田 10 件,林地 40 件(其中天然林地 24 件,次生林地 17 件). 天然林地和次生林地(至少退耕还林 5 a 以上,且未施用化肥)通过实地调研和询问当地居民获得具体位置. 所有土壤样品在室内自然风干,剔除土壤中植物根系、小碎石等杂质,研磨棒打碎土壤团块,过 2 mm 孔径筛(10 目); 取一定量 10 目样品,研磨过 0.15 mm 孔径筛(100 目),待测. 取 50 mg 100 目土壤样品,采用氢氟酸、浓硝酸和高氯酸(体积比为 3∶3∶1)消解样品. 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定土壤中锌(Zn)和铜(Cu),电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定土壤中镉(Cd)、铬(Cr)、镍(Ni)、铅(Pb)和锑(Sb). 浓硝酸和高氯酸(体积比 5∶1)消解土壤样品,用氢化物原子荧光光度计(HF-AFS)测定样品中 Se 和砷(As). 以超纯水为浸提液,采用玻璃电极法测定土壤 pH(水土比 2.5∶1.0); 重铬酸钾法测定土壤中有机质(SOM). 整个实验过程中,使用两组空白样,两组土壤标准物质(GSS-1、GSS-3 或 GSS-6)与样品同时消解和分析测试,以控制实验质量,相对误差率在 ±10% 之内.

1.3　数据处理与分析

SPSS 20.0 用于相关性分析和非参数检验; Mann-Whitney U 和 Kruskal-Wallis 非参数检验分别用于两个独立样本和多个独立样本分析. ArcGIS 10.2、OriginLab 2016 和 CorelDRAW X7 用于绘制各种图形.

2　结果与分析

2.1　表土中硒与重金属含量特征

研究区表土 pH 值在 4.06 ~ 7.92,均值 6.17(表 1),为弱酸环境(5.5 ~ 6.5)[36]. 表土 ω(SOM)为 0.40% ~ 5.89%,均值 1.60%(表 1),为中等含量(1.0% ~ 2.0%)[36].

研究区表土 ω(Se)为 $0.06 \times 10^{-6} \sim 2.57 \times 10^{-6}$,均值 0.42×10^{-6}(表 1),分别是渝西地区(0.25×10^{-6})[37]和中国表土(0.24×10^{-6})[38] Se 含量的 1.66 倍和 1.75 倍. 根据 Tan 等[3]划分的中国土壤 Se 含量标准,研究区分别有 6.59%、7.69%、40.66% 和 45.05% 样品属于缺硒($< 0.125 \times$

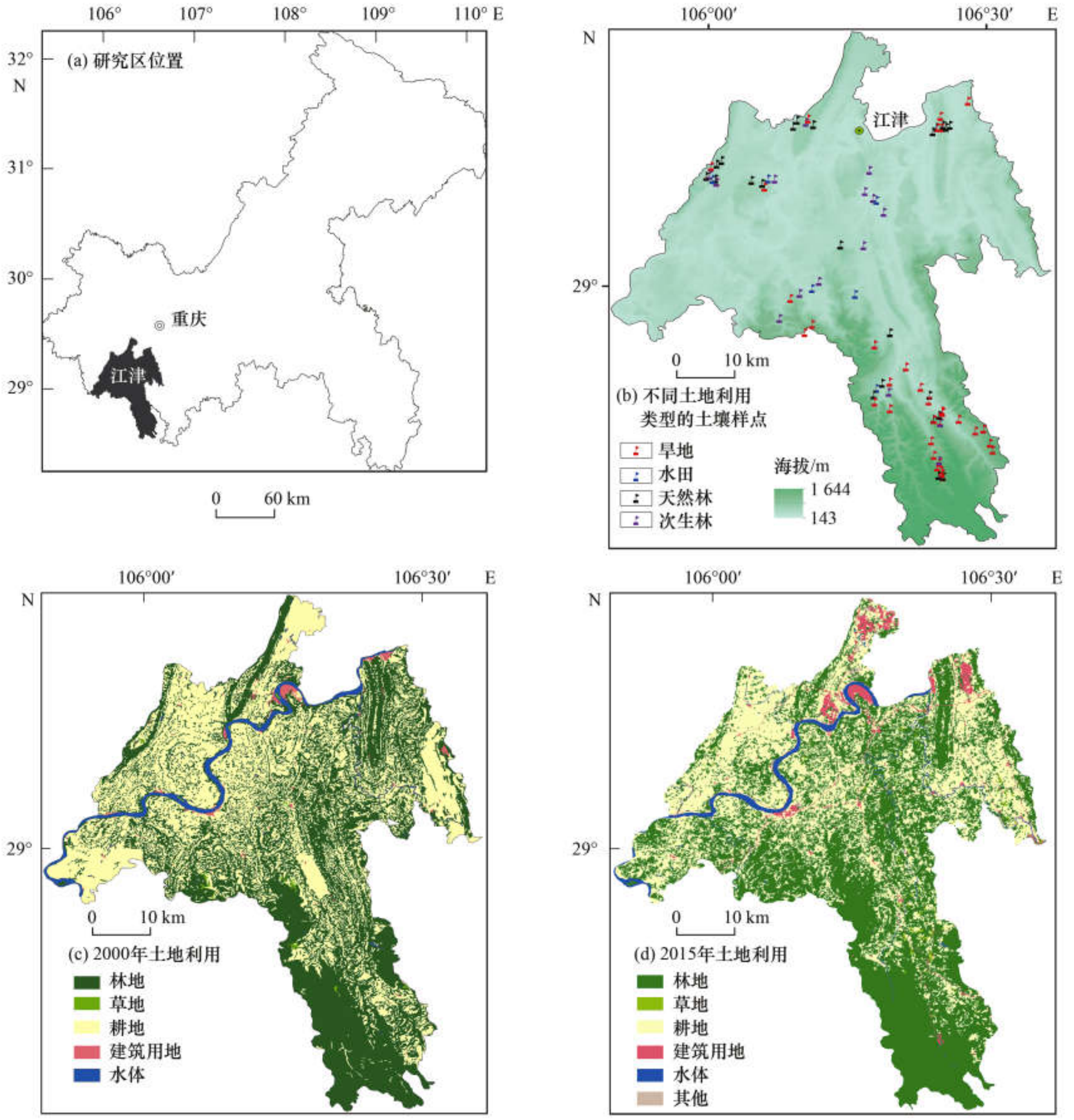

106°
107°
108°
109°
110° E
32°
N
31°
30°
29°
(a) 研究区位置
重庆
江津
0 60 km
106°00′
106°30′
E
N
29°
江津
0 10 km
(b) 不同土地利用类型的土壤样点
旱地
水田
天然林
次生林
海拔/m
1 644
143
(c) 2000年土地利用
林地
草地
耕地
建筑用地
水体
(d) 2015年土地利用
林地
草地
耕地
建筑用地
水体
其他

图1 研究区土壤样点和土地利用分布示意

Fig. 1 Map for soil sampling site and the distribution of land use

表1 表土中硒与重金属含量统计特征1)

Table 1 Statistical characteristics for Se and heavy metals in soils

项目	最小值	最大值	平均值	中值	SD	CV/%	渝西[37]	中国[40]
pH	4.06	7.92	6.17	6.13	0.89	14.4	6.48	—
SOM	0.40	5.89	1.60	1.48	0.88	54.7	1.67	1.32
Se	0.06	2.57	0.42	0.37	0.34	81.5	0.25	0.24[38]
As	0.01	35.4	13.0	12.0	6.99	53.9	5.87	6.30
Cd	0.01	0.80	0.26	0.23	0.15	58.0	0.22	0.11
Cr	33.2	103	59.9	59.1	14.06	23.5	71.6	56.2
Cu	11.7	67.3	26.4	26.0	10.16	38.5	24.4	19.6
Ni	12.8	49.2	27.8	27.6	7.65	27.6	33.1	23.5
Pb	14.4	44.0	25.5	25.4	5.46	21.4	28.0	25.4
Sb	0.31	2.19	1.03	0.94	0.35	33.6	0.66	0.56
Zn	40.5	159	79.9	82.0	23.95	30.0	84.0	56.1

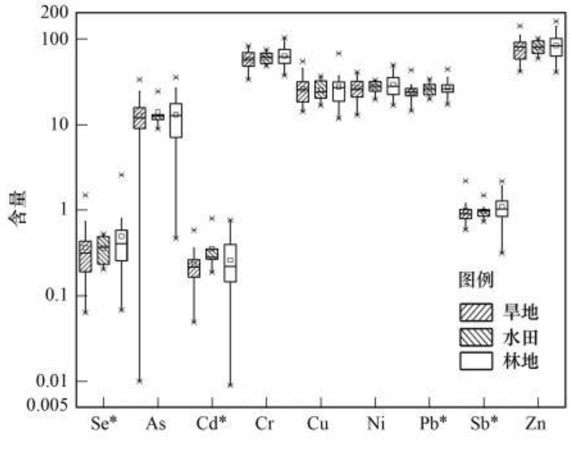
1)pH值无量纲, SOM单位为%,其余单位为$\times 10^{-6}$; SD表示标准偏差; CV表示变异系数

10^{-6})、边缘硒(0.125×10^{-6}~0.175×10^{-6})、中等硒(0.175×10^{-6}~0.40×10^{-6})和足硒(0.40×10^{-6}~3.0×10^{-6}). 总计有85.71%的表土样品ω(Se)高于0.175×10^{-6},说明研究区土壤总体富硒. 研究区表土中Se含量分布为中等变异(50%~100%, CV=81.5%).

研究区表土中 $\omega(\mathrm{As})$(13.0×10^{-6})、$\omega(\mathrm{Cd})$(0.26×10^{-6})、$\omega(\mathrm{Cr})$(59.9×10^{-6})、$\omega(\mathrm{Cu})$(26.4×10^{-6})、$\omega(\mathrm{Ni})$(27.8×10^{-6})、$\omega(\mathrm{Pb})$(25.5×10^{-6})、$\omega(\mathrm{Sb})$(1.03×10^{-6})和 $\omega(\mathrm{Zn})$(79.9×10^{-6})的均值分别是渝西地区表土的 2.21、1.18、0.84、1.08、0.84、0.91、1.56 和 0.95 倍,表明仅 As 和 Sb 显著高于渝西区表土背景值,而其余重金属接近或低于渝西区表土背景值. 依据中国农业土壤重金属污染等级[39],研究区表土重金属(除 Sb)均值都未超标. 但分别有 3.3% 和 28.6% 表土样品中 As 和 Cd 含量超过农田土壤重金属污染标准值($5.5 < \mathrm{pH} \leq 6.5$,水田),表明研究区仅局部地区表土存在 As 和 Cd 污染,其中 Cd 污染相对较严重.

2.2　不同土地利用类型下表土中硒与重金属含量差异

Kruskal-Wallis 非参数检验结果显示不同土地利用类型下的表土中仅 Se、Cd、Pb 和 Sb 具有显著性差异,而其余 5 种重金属无显著差异(图 2). 对 Se 来讲,林地(0.49×10^{-6},平均值,下同) > 水田(0.37×10^{-6}) > 旱地(0.36×10^{-6}); 对 Cd 来讲,水田(0.35×10^{-6}) > 林地(0.26×10^{-6}) > 旱地(0.23×10^{-6}); 对 Pb 来讲,林地(26.9×10^{-6}) > 水田(26.0×10^{-6}) > 旱地(24.0×10^{-6}); 对 Sb 来讲,林地(1.09×10^{-6}) > 旱地(0.98×10^{-6}) > 水田(0.97×10^{-6}).



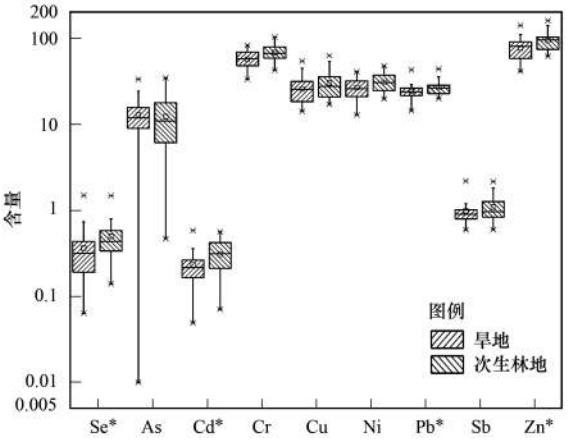
∗ 表示通过 Kruskal-Wallis 非参数检验($P < 0.05$)

图 2　不同土地利用类型下表土中硒与重金属含量特征

Fig. 2　Concentration of Se and heavy metals in soils from different land use types

2.3　“退耕还林”前后表土中硒与重金属含量差异

Mann-Whitney U 非参数检验结果显示(图 3),退耕还林后,次生林地表土中 $\omega(\mathrm{Se})$(0.50×10^{-6})、$\omega(\mathrm{Cd})$(0.31×10^{-6})、$\omega(\mathrm{Cr})$(67.8×10^{-6})、$\omega(\mathrm{Ni})$(30.8×10^{-6})、$\omega(\mathrm{Pb})$(26.9×10^{-6})和 $\omega(\mathrm{Zn})$(94.0×10^{-6})的均值均显著高于旱地表土的(0.36×10^{-6}、023×10^{-6}、57.0×10^{-6}、26.5×10^{-6}、24.0×10^{-6} 和 76.7×10^{-6}),而 As、Cu 和 Sb 含量无显著性差异.



∗ 表示通过 Mann-Whitney U 非参数检验($P < 0.05$)

图 3　“退耕还林”前后表土中硒与重金属含量特征

Fig. 3　Content characteristics for Se and heavy metals in soils after dry land abandonment

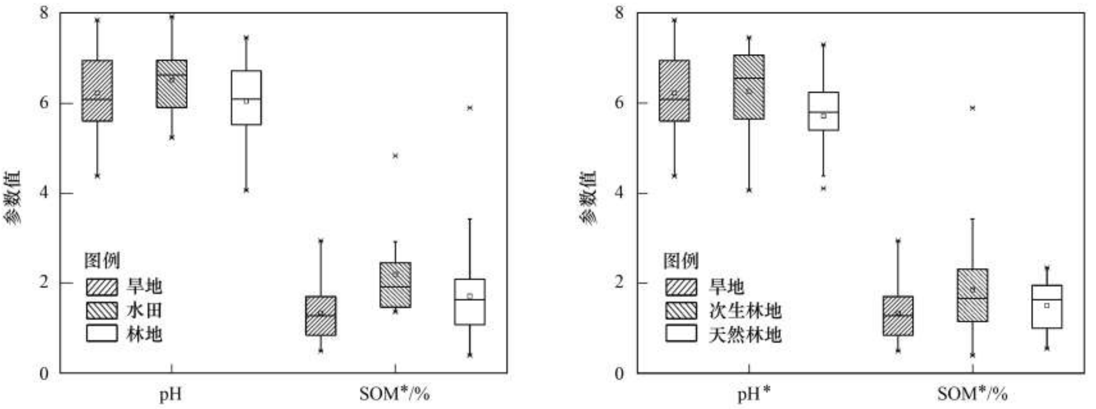
3　讨论

3.1　土地利用/覆被变化对表土中硒含量影响

研究区林地表土硒含量高于水田和旱地耕作土(图 2),“退耕还林”前后也显示次生林地表土硒含量显著高于旱地(图 3),这一结果与多数前人研究结果一致[41,42]. 但 Tan 等[3]的研究结果显示耕作土硒含量高于自然林地土. 不同土地利用类型下表土中硒含量的差异,可能是不同土地利用方式导致土壤中基本理化性质呈现差异,从而引起土壤在利用和发育过程中保硒能力存在有较大差异. 研究区土地利用/覆被变化导致土壤 pH 值和 SOM 具有显著差异性(经过 Kruskal-Wallis 非参数检验,图 4).

有研究表明[2,28,43],随着土壤 pH 值增加,土壤中硒形态主要为易于迁移的硒酸根(Se^{6+}),相反,土壤中硒形态主要为易被吸附的亚硒酸根(Se^{4+}),所以导致中性和碱性土壤中硒不易富集,而酸性土壤中硒易于富集. 研究区土壤 pH 值与硒含量呈显著负相关关系($r = -0.186$, $P < 0.05$, 表 2),也证明了这一点. 然而,天然林地(6.26)、次生林地(5.71)和旱地(6.22)的表土 pH 均值都属于弱酸性,表明除了土壤 pH,还有其它因素影响不同土地利用类型下表土中硒含量差异.

研究区土壤 SOM 与硒含量呈显著正相关关系($r = 0.597$, $P < 0.01$),说明相对于土壤 pH, SOM 是影响土壤硒含量分布的主要因素. SOM 对土壤硒含量具有两面性[20]:一方面, SOM 通过吸附作用吸附硒,从而导致土壤中硒含量增高; 另一方面, SOM 被微生物等矿化,从而释放硒. 图 4 显示,相对于旱



* 表示通过 Kruskal-Wallis 非参数检验（$P < 0.05$）

图 4 土地利用/覆被变化下表土 pH 和 SOM 的差异

Fig. 4 Effect of land use/land cover change on the concentration differences for pH and SOM

表 2 表土中硒、重金属及土壤性质的相关性特征$^{1)}$

Table 2 Correlation among Se, heavy metals, and soil properties in soils

	pH	SOM	Se	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Sb
SOM	0.115									
Se	−0.186*	0.597**								
As	−0.047	0.204*	0.109							
Cd	0.450**	0.399**	0.349**	−0.014						
Cr	0.236*	0.159	0.179*	0.319**	0.465**					
Cu	0.189*	0.145	0.143	0.276**	0.436**	0.742**				
Ni	0.303**	0.107	0.092	0.389**	0.427**	0.904**	0.746**			
Pb	0.075	0.534**	0.492**	0.368**	0.516**	0.645**	0.620**	0.603**		
Sb	−0.042	0.489**	0.444**	0.543**	0.214*	0.405**	0.498**	0.357**	0.689**	
Zn	0.302**	0.280**	0.227*	0.291**	0.607**	0.835**	0.846**	0.834**	0.736**	0.475**

1）* 表示 $P < 0.05$，** 表示 $P < 0.01$

地，天然林地和次生林地土壤 SOM 含量显著较高，从而导致林地（天然林和次生林）土壤中硒含量较高. 这一结论验证了土地利用/覆被变化通过影响土壤 pH 和 SOM 而间接影响土壤中硒含量、分布和富集，“退耕还林”可能会增加土壤中硒含量水平.

3.2 土地利用/覆被变化对表土中重金属含量影响

从图 2 可知，林地表土中 Pb 和 Sb 含量显著高于耕作土（水田和旱地），而 Cd 呈现水田最高. “退耕还林”后的次生林地表土 Cd、Cr、Ni、Pb 和 Zn 含量都显著高于耕地. 这可能归因于土壤理化性质差异及其重金属来源差异[17,21,37]. 表 2 显示，Cd（$r = 0.450$，$P < 0.01$）、Cr（$r = 0.236$，$P < 0.05$）、Ni（$r = 0.303$，$P < 0.01$）和 Zn（$r = 0.302$，$P < 0.01$）与 pH 值呈显著正相关关系，而 Cd（$r = 0.399$，$P < 0.01$）、Pb（$r = 0.534$，$P < 0.01$）、Sb（$r = 0.489$，$P < 0.01$）和 Zn（$r = 0.280$，$P < 0.01$）与 SOM 呈显著正相关关系.

有研究表明[19,22,26,27,33,44~46]，土壤 pH 值和 SOM 对重金属的吸附和解析、迁移和转化的影响最为重要. pH 主要通过影响土壤中重金属的形态而间接影响重金属的含量、迁移和转化. 总体上，研究区表土中 Cd、Cr、Ni、Pb 和 Zn 含量随土壤 pH 值升高而增加（表 2）. Cd、Ni、Pb 和 Zn 在 pH 为 6.5 ~ 7.5 时最高，而 Cr 在 pH 为 5.5 ~ 6.5 时最高；但 Cd 在 pH < 4.5 时最低，Cr、Ni 和 Zn 含量在 pH 为 4.5 ~ 5.5 时最低（未列出图表数据）. 这种弱酸性和中性土壤中重金属平均含量较高的原因可能是随着土壤 pH 值升高，土壤中黏土矿物、铁/铝/锰水合氧化物和有机质表面的负电荷增加，从而对重金属离子的吸附力增强[1,19,44]. 但随着 pH 值过高（碱性和强碱性）[45]，土壤中重金属形成沉淀物和羟基络合而溶出，从而会导致表土中重金属含量降低. 研究区 70% 的水田土壤样品 pH 值在 6.5 ~ 7.5 范围，这可能是导致水田 Cd 含量最高的主要原因之一. “退耕还林”后的人工次生林地 pH 值多在 5.5 ~ 6.5 范围，而旱地 pH 值范围较宽，这可能是造成人工次生林地土壤重金属含量较高的主要原因之一.

除了土壤 pH 值，土壤有机质也是影响土壤重金属富集、迁移和转化的重要因素[8,19,46]. 一方面，土壤有机质中存在官能团和配体（羧基、羟基等），

可以通过络合作用与重金属结合，形成稳定的化合物，而不利于重金属的迁移. 如 Halim 等[47]的研究表明，腐殖酸的添加降低了土壤中重金属的有效性；另一方面，有机质分解过程中可能会产生大量无定形的携带负电荷的胶体有机聚合物，增大土壤对重金属的吸附能力[26]；再者，土壤有机质也可为土壤提供螯合物以增加土壤中重金属的活动性[48].

林地（次生林或天然林）表土有机质含量显著高于旱地，这可能是导致林地（次生林或天然林）表土重金属含量高于旱地的另一主要原因. 水田中 Cd 含量显著高于林地，可能是由于农业化肥的使用[26]，以及水田较长期处于还原环境利于有机质累积，因此，更有利于 Cd 在水田土壤中富集所致.

4　结论

（1）研究区表土中 Se、As 和 Sb 均值含量显著高于渝西地区土壤背景值，而其余重金属接近或低于渝西地区土壤背景值.

（2）林地表土中 Se、Pb 和 Sb 含量显著高于耕作土，而水田土壤中 Cd 含量高于林地.

（3）“退耕还林”后，人工次生林表土中 Se、Cd、Cr、Ni、Pb 和 Zn 含量都显著高于旱地，表明“退耕还林”可能会显著增加表土中硒和重金属含量.

（4）林地（次生林或天然林）与旱地表土中 pH 值和 SOM 含量的差异是导致土地利用/覆被变化下表土中硒和重金属含量差异的原因，尤其是 SOM.

参考文献：

[1] Paul V, Sankar M S, Vattikuti S, *et al*. Pollution assessment and land use land cover influence on trace metal distribution in sediments from five aquatic systems in southern USA [J]. Chemosphere, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128243.

[2] He Y Z, Xiang Y J, Zhou Y Y, *et al*. Selenium contamination, consequences and remediation techniques in water and soils: a review[J]. Environmental Research, 2018, **164**: 288-301.

[3] Tan J A, Zhu W Y, Wang W Y, *et al*. Selenium in soil and endemic diseases in China [J]. Science of the Total Environment, 2002, **284**(1-3): 227-235.

[4] Dinh Q T, Cui Z W, Huang J, *et al*. Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: a review[J]. Environment International, 2018, **112**: 294-309.

[5] Santos M D, Da Silva Júnior F M R, Muccillo-Baisch A L. Selenium content of Brazilian foods: a review of the literature values[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2017, **58**: 10-15.

[6] Rayman M P. The argument for increasing selenium intake[J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2002, **61**(2): 203-215.

[7] Yuan X H, Xue N D, Han Z G. A meta-analysis of heavy metals pollution in farmland and urban soils in China over the past 20 years[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, **101**: 217-226.

[8] Yang Q, Yang Z F, Filippelli G M, *et al*. Distribution and secondary enrichment of heavy metal elements in karstic soils with high geochemical background in Guangxi, China[J]. Chemical Geology, 2021, **567**, doi: 10.1016/j.chemgeo.2021.120081.

[9] 环境保护部，国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京：中华人民共和国生态环保部，2014.

[10] 蔡美芳，李开明，谢丹平，等. 我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究[J]. 环境科学与技术，2014，**37**（S2）：223-230.

Cai M F, Li K M, Xie D P, *et al*. The status and protection strategy of farmland soils polluted by heavy metals [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **37**(S2): 223-230.

[11] Guo K G, Xiang W, Zhou W D, *et al*. In situ plant bionic remediation of cadmium-contaminated soil caused by a high geological background in Kaihua, Zhejiang Province, China[J]. Chemosphere, 2021, **269**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128693.

[12] Ni M F, Mao R, Jia Z M, *et al*. Heavy metals in soils of Hechuan County in the upper Yangtze (SW China): comparative pollution assessment using multiple indices with high-spatial-resolution sampling[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **148**: 644-651.

[13] 刘飞，杨柯，徐仁廷，等. 广西都安县典型水田硒地球化学特征及影响因素[J]. 环境科学，2021，**42**（10）：4897-4907.

Liu F, Yang K, Xu R T, *et al*. Selenium geochemical characteristics and influencing factors of paddy fields in Du'an County, Guangxi[J]. Environmental Science, 2021, **42**(10): 4897-4907. ;S +2mm;S +2mm

[14] 尹炳，汪建飞，师胜，等. 矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应[J]. 环境科学，2020，**41**（4）：1904-1913.

Yin B, Wang J F, Shi S, *et al*. Selenium uptake characteristics of reclaimed soil-crop from mining wasteland and its antagonistic effects on heavy metals[J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1904-1913.

[15] Etteieb S, Zolfaghari M, Magdouli S, *et al*. Performance of constructed wetland for selenium, nutrient and heavy metals removal from mine effluents[J]. Chemosphere, 2021, **281**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130921.

[16] Yang H, Yang X F, Ning Z P, *et al*. The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-plant-human system: an overview[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **422**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126876.

[17] 刘杨，齐明星，王敏，等. 不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响[J]. 环境科学，2021，**42**（4）：2024-2030.

Liu Y, Qi M X, Wang M, *et al*. Effects of different exogenous selenium species application on growth and cadmium uptake of pak choi in cadmium contaminated Soil [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 2024-2030.

[18] Zinn Y L, De Faria J A, De Araujo M A, *et al*. Soil parent material is the main control on heavy metal concentrations in tropical highlands of Brazil[J]. CATENA, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.catena.2019.104319.

[19] Yuan C L, Li Q, Sun Z Y, *et al*. Effects of natural organic matter on cadmium mobility in paddy soil: a review[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, **104**: 204-215.

[20] Li Z, Liang D L, Peng Q, *et al*. Interaction between selenium and soil organic matter and its impact on soil selenium bioavailability: a review[J]. Geoderma, 2017, **295**: 69-79.

[21] Liu Y L, Tian X L, Liu R, *et al*. Key driving factors of selenium-enriched soil in the low-Se geological belt: a case study in Red Beds of Sichuan Basin, China[J]. CATENA, 2021, **196**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104926.

[22] Zhang S, Xu Y F, Wu M J, *et al.* Geogenic enrichment of potentially toxic metals in agricultural soils derived from black shale in northwest Zhejiang, China: pathways to and risks from associated crops[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, **215**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112102.

[23] Xu Y F, Li Y H, Li H R, *et al.* Effects of topography and soil properties on soil selenium distribution and bioavailability (phosphate extraction): a case study in Yongjia County, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **633**: 240-248.

[24] Fry K L, Wheeler C A, Gillings M M, *et al.* Anthropogenic contamination of residential environments from smelter As, Cu and Pb emissions: implications for human health [J]. Environmental Pollution, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114235.

[25] Wang J W, Zhang Y S, Wang T, *et al.* Effect of modified fly ash injection on As, Se, and Pb emissions in coal-fired power plant [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, **380**, doi: 10.1016/j.cej.2019.122561.

[26] 陈孜涵, 汪丙国, 赵建芳. 江汉平原旱地和水田土壤镉的吸附与解吸特征及影响因素[J]. 地球科学, 2022, **47**(2): 544-555.
Chen Z H, Wang B G, Zhao J F. Adsorption and desorption characteristics of Cd in upland and paddy soil of Jianghan Plain [J]. Earth Science, 2022, **47**(2): 544-555.

[27] Bhuiyan M A H, Karmaker S C, Bodrud-Doza M, *et al.* Enrichment, sources and ecological risk mapping of heavy metals in agricultural soils of dhaka district employing SOM, PMF and GIS methods[J]. Chemosphere, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128339.

[28] Dinh Q T, Wang M K, Tran T A T, *et al.* Bioavailability of selenium in soil-plant system and a regulatory approach [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2019, **49**(6): 443-517.

[29] Huang S S, Hua M, Feng J S, *et al.* Assessment of selenium pollution in agricultural soils in the Xuzhou District, Northwest Jiangsu, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(4): 481-487.

[30] 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 等. 中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4414-4421.
Zhang J L, Qu M K, Chen J, *et al.* Meta-analysis of the effects of metal mining on soil heavy metal concentrations in Southwest China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4414-4421.

[31] 崔祥芬, 张琴, 田森林, 等. 中国稻田土壤镉污染及务农性暴露概率风险[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(8): 3878-3886.
Cui X F, Zhang Q, Tian S L, *et al.* Status of paddy soil Cd pollution and probabilistic health risk via agricultural contact in China[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(8): 3878-3886.

[32] Smith P. Land use change and soil organic carbon dynamics[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, **81**(2): 169-178.

[33] 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 等. 生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 914-921.
Zhou H H, Yuan X Y, Xiong Y T, *et al.* Effects of biochar input on changes of available nutrient elements in riparian soils with different landuse types[J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 914-921.

[34] Amiotti N M, Zalba P, Schmidt E S, *et al.* Essential nutrients in soil humic and fulvic acids under different land use systems[J]. Agrochimica, 2017, **61**(4): 287-295.

[35] 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 等. 地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 2094-2103.
Wang X W, Liu H Y, Gu X F, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in soils affected by different land use types in superimposed pollution area with high geological background[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 2094-2103.

[36] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].

[37] 鲍丽然, 龚媛媛, 严明书, 等. 渝西经济区土壤地球化学基准值与背景值及元素分布特征[J]. 地球与环境, 2015, **43**(1): 31-40.
Bao L R, Gong Y Y, Yan M S, *et al.* Element geochemical baseline and distributions in soil in Chongqing west economic zone, China[J]. Earth and Environment, 2015, **43**(1): 31-40.

[38] Liu H L, Wang X Q, Zhang B M, *et al.* Concentration and distribution of selenium in soils of mainland China, and implications for human health [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2021, **220**, doi: 10.1016/j.gexplo.2020.106654.

[39] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准[S].

[40] 鄢明才, 顾铁新, 迟清华, 等. 中国土壤化学元素丰度与表生地球化学特征[J]. 物探与化探, 1997, **21**(3): 161-167.
Yan M C, Gu T X, Chi Q H, *et al.* Abundance of chemical elements of soils in China and supergenesis geochemistry characteristics [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 1997, **21**(3): 161-167.

[41] 崔萌, 孙向阳, 姜新福, 等. 北京市挂甲峪地区土壤全硒含量分布特征[J]. 土壤, 2019, **51**(4): 829-833.
Cui M, Sun X Y, Jiang X F, *et al.* Distribution pattern of soil total selenium in Guajiayu area of Beijing[J]. Soils, 2019, **51**(4): 829-833.

[42] Tolu J, Thiry Y, Bueno M, *et al.* Distribution and speciation of ambient selenium in contrasted soils, from mineral to organic rich [J]. Science of the Total Environment, 2014, **479-480**: 93-101.

[43] 吴正祥, 周勇, 刘婧仪, 等. 鄂西北山区耕层土壤有机质空间变异及影响因子分析[J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(5): 1141-1152.
Wu Z X, Zhou Y, Liu J Y, *et al.* Spatial variability of soil organic matter and its influencing factors in Mountain areas of northwestern Hubei Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, **30**(5): 1141-1152.

[44] Yang S H, Qu Y J, Ma J, *et al.* Comparison of the concentrations, sources, and distributions of heavy metal(loid)s in agricultural soils of two provinces in the Yangtze River Delta, China[J]. Environmental Pollution, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114688.

[45] Pedron F, Petruzzelli G, Barbafieri M, *et al.* Strategies to use phytoextraction in very acidic soil contaminated by heavy metals [J]. Chemosphere, 2009, **75**(6): 808-814.

[46] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, *et al.* The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(1): 84-91.

[47] Halim M, Conte P, Piccolo A. Potential availability of heavy metals to phytoextraction from contaminated soils induced by exogenous humic substances[J]. Chemosphere, 2003, **52**(1): 265-275.

[48] Vega F A, Covelo E F, Andrade M L, *et al.* Relationships between heavy metals content and soil properties in minesoils [J]. Analytica Chimica Acta, 2004, **524**(1-2): 141-150.

HUANJING KEXUE Vol. 43 No. 6
Environmental Science (monthly) Jun. 15, 2022

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on $PM_{2.5}$ Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region …… QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, *et al.* (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on $PM_{2.5}$ Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China …… HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, *et al.* (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in $PM_{2.5}$ During COVID-19 Control in Suzhou …… MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, *et al.* (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019 …… XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, *et al.* (2858)
Source Apportionment of $PM_{2.5}$ Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing …… PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, *et al.* (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of $PM_{2.5}$ in Baoding City in Winter …… WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, *et al.* (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in $PM_{2.5}$ in Jiangbei New Area, Nanjing …… GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, *et al.* (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi …… XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, *et al.* (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example …… ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, *et al.* (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis …… TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, *et al.* (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of $PM_{2.5}$-O_3 Compound Pollution in Tianjin …… XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, *et al.* (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020 …… ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, *et al.* (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province …… YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, *et al.* (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn …… ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, *et al.* (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan …… SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, *et al.* (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City …… WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, *et al.* (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China …… FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River …… WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, *et al.* (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia …… ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, *et al.* (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism …… SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, *et al.* (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors …… LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, *et al.* (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai …… ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, *et al.* (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake …… ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, *et al.* (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks …… LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, *et al.* (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area …… ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, *et al.* (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin …… CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, *et al.* (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water …… CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, *et al.* (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020 …… QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, *et al.* (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City …… WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, *et al.* (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years …… GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, *et al.* (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China …… TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, *et al.* (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data …… GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, *et al.* (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution …… CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution …… SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, *et al.* (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water …… WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing …… XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, *et al.* (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation …… ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, *et al.* (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron …… CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, *et al.* (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System …… TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, *et al.* (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions …… GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, *et al.* (3211)
Effect of HumicAcid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis …… LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, *et al.* (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020 …… XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, *et al.* (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland …… SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, *et al.* (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau …… WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, *et al.* (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China …… LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, *et al.* (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province …… ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin …… DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, *et al.* (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (*Rhinopithecus roxellana*) Habitat in Shennongjia Mountains …… YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, *et al.* (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation …… XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, *et al.* (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice …… TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, *et al.* (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments …… LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, *et al.* (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai …… LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, *et al.* (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops …… JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, *et al.* (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing …… LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, *et al.* (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018 …… LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, *et al.* (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data …… LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, *et al.* (3365)