

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.12
第41卷 第12期

目次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分	闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启 (5215)
2015~2018年我国PM _{2.5} 健康损害价值的动态评估	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (5225)
2011~2017年中国PM _{2.5} 多尺度时空分异特征分析	杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮 (5236)
关中地区PM _{2.5} 时空演化及人口暴露风险	黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨 (5245)
中原城市冬季两次重污染形成机制及来源	贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉 (5256)
西北工业城市冬季PM _{2.5} 污染特征及理化性质	杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽 (5267)
基于PMF模型的PM _{2.5} 中金属元素污染及来源的区域特征分析	邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向铎鹏 (5276)
重庆主城区降尘中重金属污染特征及评价	张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达 (5288)
鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析	孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞峰, 许彩琴 (5295)
杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽 (5306)
成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏 (5316)
石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析	王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷 (5325)
厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析	吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕 (5336)
建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单	梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国 (5345)
我国西北工业区城市大气多氯联苯来源及健康风险	毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民 (5352)
基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征	黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏 (5362)
新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析	卓海华, 姜保峰, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静 (5371)
三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征	钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠 (5381)
衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价	张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮 (5389)
宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征	崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌 (5400)
梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析	江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 翟映雪, 李睿, 陈建耀 (5410)
汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子	赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发 (5419)
山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险	王世亮, 曹雪稚 (5428)
太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析	吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建 (5438)
岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价	叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕 (5448)
澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素	孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生 (5458)
白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性	申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升 (5470)
生物炭粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响	王鹏飞, 甄蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠 (5480)
Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ 异质结光催化降解四环素-铜复合物	黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍 (5488)
超滤膜负载UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制	尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭 (5500)
低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试	廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳 (5509)
盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响	高京, 张少华, 王锐, 金鹏康 (5518)
限NH ₄ ⁺ 和限NO ₂ ⁻ 厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征	宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (5527)
厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性	闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (5535)
二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能	毕薇薇, 阮书瑜, 陈昊傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖 (5544)
中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析	赵靓, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫 (5552)
我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术	窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明 (5562)
硒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明 (5571)
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	叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章 (5579)
胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果	王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊 (5589)
毛竹遗态Fe/C复合材料对As(V)污染土壤的钝化修复性能	赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩 (5600)
大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解	杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5609)
1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性	韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍 (5617)
铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征	贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏 (5628)
生物炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响	崔丙健, 崔二革, 胡超, 樊向阳, 高峰 (5636)
废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响	侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余嫻, 杨林章 (5648)
基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析	夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣骥 (5656)
氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N ₂ O排放的影响	许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪 (5668)
《环境科学》第41卷(2020年)总目录	(5677)
《环境科学》征订启事(5344)	
《环境科学》征稿简则(5361)	
信息(5287, 5499, 5508)	

硒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值

王锐^{1,2}, 邓海^{1,2}, 贾中民^{1*}, 严明书^{1,2}, 周皎^{1,2}, 何忠庠^{1,2}, 梁绍标^{1,2}, 董金秀^{1,2}, 苏黎明^{1,2}

(1. 重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队, 重庆 400038; 2. 重庆市土地质量地质调查重点实验室, 重庆 400038)

摘要: 为查明 Se 在土壤-农作物系统中的分布特征, 开展富 Se 土壤阈值研究, 在重庆市黔江区采集表层土壤 8789 件, 深层土壤 155 件, 并采集玉米籽实 141 件和水稻籽实 159 件(同时分别采集对应根系土样品 141 件和 159 件), 分析了土壤及农作物中的 Se、有机质、S、Mn、 TFe_2O_3 、 Al_2O_3 和 K_2O 等含量及土壤 pH, 利用地统计法分析了表层及深层土壤 Se 的分布特征, 基于多元回归分析, 研究 Se 生物有效性的影响因素, 基于根系土各组分含量及农作物 Se 含量进行土壤富 Se 阈值研究。结果表明, 研究区高 Se 土壤占全区的 32.72%; 表层土壤及深层土壤 Se 含量的分布主要受到成土母质的控制, 土壤 Se 源稳定且表层富集现象明显。玉米和水稻的富 Se 率分别为 75.35%、46.81%, 土壤有机质和 S 含量均会限值 Se 的生物有效性。若种植作物为玉米, 建议以 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为富 Se 土壤阈值; 若种植作物为水稻, 在土壤 $\text{pH} \leq 7.5$ 时, 建议以 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为富 Se 土壤阈值; 在土壤 $\text{pH} > 7.5$ 时, 建议以 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为富 Se 土壤阈值。同样地, 若研究区种植有其他大宗农作物, 亦可用该方法进行建议富 Se 土壤阈值研究。

关键词: 硒; 土壤; 农作物; 生物有效性; 影响因素; 富硒土壤阈值

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)12-5571-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202006113

Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils

WANG Rui^{1,2}, DENG Hai^{1,2}, JIA Zhong-min^{1*}, YAN Ming-shu^{1,2}, ZHOU Jiao^{1,2}, HE Zhong-xiang^{1,2}, LIANG Shao-biao^{1,2}, DONG Jin-xiu^{1,2}, SU Li-ming^{1,2}

(1. Southeast Sichuan Geological Group, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 400038, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Land Quality Geological Survey, Chongqing 400038, China)

Abstract: In order to determine the distribution characteristics of Se in soil-crop systems, we carried out a study on the Se-rich soil threshold by collecting 8789 surface soils and 155 deep soils in the Qianjiang District of Chongqing City, China, and 141 corn seeds and 159 rice seeds (simultaneously collecting 141 and 159 corresponding root soil samples, respectively). We then analyzed the Se content, organic matter, S, Mn, TFe_2O_3 , Al_2O_3 , and K_2O in soils and crops, and soil pH. We also analyzed the surface layer using geostatistical methods and the distribution characteristics of Se in deep soils using multiple regression analysis to study the factors influencing the bioavailability of Se. Based on the contents of each component of root soil and the Se contents of crops, the Se rich threshold was examined. The results showed that the high-Se soils in the study area account for 32.72% of the total area; the distribution of Se contents in the surface and deep soils is mainly controlled by the parent material, the source of soil Se is stable, and the surface enrichment is obvious. The Se-rich rates of corn and rice were 75.35% and 46.81%, respectively, and soil organic matter and S content will limit the bioavailability of Se. If the planted crop is corn, it is recommended to use $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ as the Se-rich soil threshold; if the planted crop is rice, when the soil pH is ≤ 7.5 , it is recommended to use $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ as the Se-rich soil threshold, while at a soil pH > 7.5 , it is recommended to use $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ as the threshold. Similarly, if other large crops are planted in the study area, this method can also be used to carry out a study on the proposed Se-rich soil threshold.

Key words: Selenium; soil; crops; bioavailability; influencing factors; Se-rich soil threshold

Se 位于元素周期表第四周期 VI A 族, 原子量为 78.96^[1]. Se 是分散的稀有元素, 自然界中 Se 主要以硒化物的形式作为杂质存在于金属硫化物矿中^[2]. 土壤 Se 及分布受到成土母质、成土过程、土壤性质等多因素的影响^[3]. Se 是一种重要的健康元素, 缺乏和过量摄入都会对人体造成危害, Se 的缺乏会引起大骨节病、地方性心肌病等疾病, 同时也会对人体的心血管系统造成影响^[4~8]. Se 会和某些重金属元素发生拮抗反应, 主要表现在 Se 可以与 Cd 等重金属元素发生反应, 生成重金属 Se 蛋白复合物, 该物质不易被人体及动物体吸收^[9~12]. 此外,

重金属会限制生物体内抗氧化酶的生物功能并对生物膜产生破坏, 而 Se 会减缓重金属的毒害作用, 提高人体及动植物体自身的免疫能力和抗逆性^[13]. 因此, 查明土壤 Se 的地球化学特征及 Se 在土壤-农作物中的迁移规律具有重要的意义。

土壤中的 Se 并不是全部都能被植物吸收利用, 能够被植物直接吸收的形态即为生物有效态, 植物

收稿日期: 2020-06-11; 修订日期: 2020-06-19

基金项目: 重庆市地勘局科研项目(DKJ-2020-CDN-A-005); 渝国土房管项目([2016]582, [2017]631)

作者简介: 王锐(1994~), 男, 硕士, 主要研究方向为环境地球化学及土壤污染防治, E-mail: 1372661182@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhongminjia@163.com

对元素吸收程度即为元素的生物有效性,而元素的生物有效性受到多种因素的影响,例如土壤理化性质、土壤组分及农作物种类等^[14~16]. 因此,进行区域 Se 资源评价时,不仅要考虑土壤中 Se 的含量,同时应重视不同种类农作物中 Se 的含量及农作物对土壤 Se 的吸收程度,而以往有关富 Se 土壤的研究均以相应标准给出的富 Se 土壤阈值进行“一刀切”式的评价,很少结合农作物 Se 含量及土壤中其它组分含量进行评价,这势必会出现一定程度的误判和漏判. 已有研究表明,渝东南地区表层土壤及农作物 Se 含量丰富,且分布面积较广,但并未对富 Se 资源进行深入研究^[17]. 本文以重庆市黔江区为研究对象,进行土壤 Se 来源和分布特征、农作物 Se 生物有效性及影响因素分析,并考察基于不同种类的农作物进行土壤富 Se 阈值研究,以期为地区富 Se 土地的划分和富 Se 资源的有效利用提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黔江区位于重庆市东南地区,地理坐标为东经 108°28′~108°56′,北纬 29°04′~29°52′,东北和西北与湖北咸丰县和利川市相邻,南及重庆市酉阳县,西抵重庆市彭水县,东西宽 45 km、南北长 90 km,总面积为 2 402 km²(图 1). 黔江区地处四川盆地东南边缘,山脉河流走向近似平行,由东北向西南倾斜,呈“六岭五槽”地貌,平坝星落其间. 山地占全区幅员面积的 90%,东南部山脉条状明显,切割深;西北部以低山和浅切割中山为主,无明显条状带. 黔江区地处亚热带,受山地地形和季风的影响,形成具有山区变化特征的典型亚热带湿润性季风气候和典型的山区气候,表现为四季分明,无霜期长,降水多,季节分配不均,垂直变化明显和局部小气候. 多年平均气温 15.4℃,年均降水量 1 300 mm,年均日照 1 340 h,无霜期 223~309 d. 该区河流较多,河流流程 419 km,流域面积大于 50 km² 的有 15 条,以八面山为分水岭,东南为阿蓬江、诸佛江支流,西北为郁江支流,均属乌江支系.

1.2 样品采集分析

采用 1:50 000 比例尺,采集 0~20 cm 的表层土壤 8 789 件. 深层样品基本采样密度为每 4 km² 有 1 个点,采集深度约为自地表 120~200 cm 之间,深层土壤按 16 km² 等质量组合成一件分析样品,共组合深层土壤分析样 155 件. 根据田块特点采用星形法、蛇形法等方法,采集玉米及根系土样 141 件,水稻及根系土 159 件,多株农作物或根系土充分混合均匀后,四分法取样.

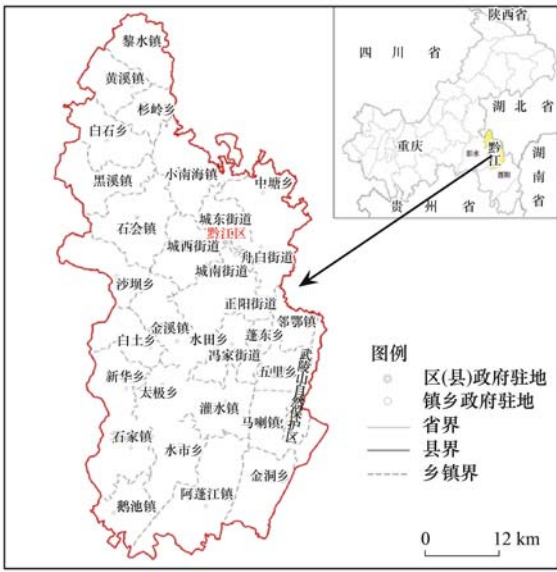


图 1 研究区交通位置示意

Fig. 1 Map of the traffic locations in the study area

土壤样品在自然条件下阴干. 在样品干燥过程中要经常揉搓样品,以免胶结,并去除土壤中的砾石以及植物根系. 干燥后的样品在过筛前用木槌轻轻敲打,以便使土壤样品恢复至自然粒级状态. 样品晾干后用尼龙筛,截取 2 mm (10 目) 粒级的样品 500 g,装瓶. 农作物样品在自然条件下风干,风干场地需清洁无污染,将样品风干后脱粒,利用粉碎机将玉米及水稻籽实磨碎至 60 目,并装进自封袋中编号. 土壤及农作物样品分析测试由国土资源部成都矿产资源监督检测中心完成.

土壤及农作物样品分析及检出限见表 1,各分析方法的检出限均符合《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)^[18] 的要求.

表 1 元素分析方法与检出限¹⁾

Table 1 Elemental analysis methods and detection limits			
样品	指标	测定方法	检出限
土壤	Se	AFS	0.01
	有机质	VOL	0.05
	S	XRF	30
	Mn	ICP-MS	5
	TFe ₂ O ₃	XRF	0.05
	Al ₂ O ₃	XRF	0.05
	K ₂ O	XRF	0.05
	pH	ISE	0.1
农作物	Se	ICP-MS	0.005

1) Se、S 及 Mn 检出限单位为 mg·kg⁻¹; 有机质、TFe₂O₃、Al₂O₃ 及 K₂O 为质量分数(%), pH 无量纲

土壤样品采用分析国家一级标准物质(GSS-4、GSS-5、GSS-7、GSS-8、GSS-9、GSS-12、GSS-18、GSS-20、GSS-21、GSS-22、GSS-23、GSS-24、GSS-26、GSS-27 及 GSS-29)的方法进行准确度(相对误

差,RE 检验)。随机抽样分析(数量为每批次试样数的 20%~30%)进行精密度检验。农作物每一批样品插入同类型标准物质 1~2 个与样品同时分析,并计算单个样品单次测试值的相对误差,要求相对误差 $\leq 30\%$ 。精密度控制:采用重复分析的方法控制样品分析的精密度,每件样品进行重复分析,双份分析的相对双差 $\leq 30\%$ 。样品分析测试结果符合文献[18]的要求,数据质量可靠。

1.3 数据处理方法

数据整理利用 Excel 2010 及 SPSS 25.0 完成,半方差函数拟合利用 GS+9.0 完成,图件绘制利用 CorelDRAW18、SPSS 25.0、Excel 2010 及 ArcGIS10.2 完成。

2 结果与讨论

2.1 土壤 Se 含量

统计研究区采集的 8789 件表层土壤样品及

155 件深层土壤中 Se 的含量结果见表 2。表层土壤 Se 的含量范围为 0.02~14.94 mg·kg⁻¹,平均含量为 0.43 mg·kg⁻¹,变异系数为 1.67,研究区表层土壤及根系土中 Se 的平均含量低于广西^[19, 20]、湖北恩施^[21~23]及陕西紫阳^[24]等富 Se 区。深层土壤 Se 的含量范围为 0.09~3.27 mg·kg⁻¹,平均含量为 0.23 mg·kg⁻¹,变异系数为 1.15。表层土壤和深层土壤 Se 含量的变异系数均较大,说明其含量在空间上分布不均匀^[25]。此外,表层土壤 Se 含量的平均值是深层土壤 Se 含量平均值的 1.86 倍,表明 Se 可能出现了表层富集现象。

表 3 为文献[18]给出的土壤 Se 含量分级标准,根据该标准,对研究区表层土壤 Se 进行分级,结果见图 2。可以看出,研究区表层土壤 Se 处于缺乏、边缘、适量、高及过剩的比例分别为 1.97%、7.19%、57.72%、32.72%及 0.40%,说明研究区土壤 Se 资源较丰富,具备开发富 Se 资源的潜力。

表 2 土壤 Se 含量

Table 2 Soil selenium contents					
指标	样品类型	最小值	最大值	平均值	变异系数
Se/mg·kg ⁻¹	表层土壤(n=8790)	0.02	14.94	0.43	1.67
	深层土壤(n=155)	0.09	3.27	0.23	1.15

表 3 土壤 Se 含量分级标准

Table 3 Classification standards of Se contents in soils					
指标	缺乏	边缘	适量	高	过剩
Se/mg·kg ⁻¹	≤ 0.125	0.125~0.175	0.175~0.4	0.4~3.0	>3.0

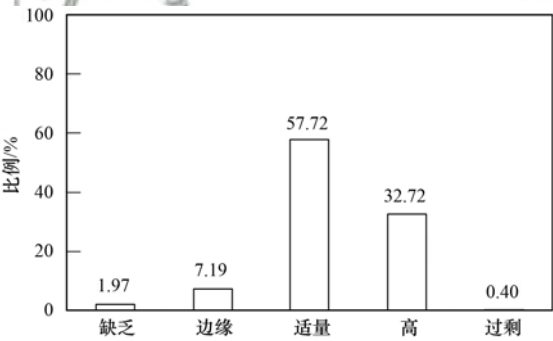


图 2 表层土壤 Se 含量等级统计

Fig. 2 Statistics of topsoil Se content grades

2.2 土壤 Se 分布特征

对表层土壤和深层土壤 Se 含量进行正态分布检验,结果见表 4,可以看出,表层土壤和深层土壤 Se 含量的原始数据均不符合正态分布,经对数变换后,基本符合正态分布。

利用 GS+9.0 软件对经对数变换后的表层和深层土壤 Se 数据进行半方差函数分析,结果见表 5。表层和深层土壤 Se 均为指数函数类型,块金系数分别为 0.139 和 0.152,说明土壤 Se 含量空间自相关性强,主要受到自然因素的控制^[26]。

表 4 土壤 Se 含量正态分布检验

Table 4 Tests for a normal distribution of soil Se contents						
样品类型	原始数据			自然对数		
	偏度	峰度	K-S(P)	偏度	峰度	K-S(P)
表层土壤	12.08	262.59	0.00	0.77	1.73	0.08
深层土壤	9.87	111.80	0.00	1.88	7.84	0.05

表 5 土壤 Se 含量的变异参数

Table 5 Variation of Se contents in soils by parameter							
样品类型	函数模型	块金值 (C ₀)	基台值 (C ₀ +C)	块金系数 [C ₀ /(C ₀ +C)]	变程 (km)	决定系数 (R ²)	残差 (RSS)
表层土壤	指数函数	0.053	0.379	0.139	6.21	0.896	0.017
深层土壤	指数函数	0.035	0.230	0.152	14.13	0.778	0.010

利用普通克里金法对表层和深层土壤 Se 含量进行空间插值,结果见图 3. 从中可知,表层土壤 Se 含量的高值区呈条带状分布,空间变异明显,与深层

土壤 Se 含量分布情况对比发现,二者高含量区和低含量区的分布格局类似,此外,土壤 Se 含量与地层的分布的空间相似性较高.

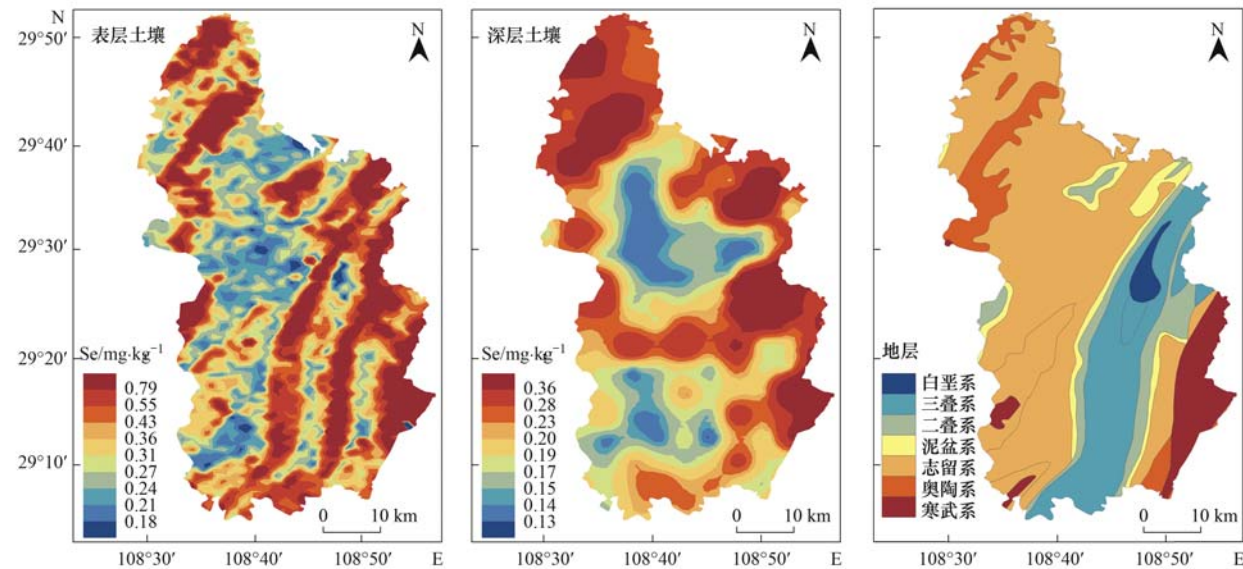


图 3 土壤 Se 含量及地层空间分布
Fig. 3 Soil Se contents and stratal spatial distribution

统计不同地层出露区表层土壤与深层土壤 Se 的含量,结果见图 4. 不同地层分布区表层土壤 Se 含量的大小顺序为二叠系($0.99\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 寒武系($0.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 泥盆系($0.49\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 奥陶系($0.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 三叠系($0.44\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 志留系($0.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 白垩系($0.27\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),深层土壤也是二叠系($0.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和寒武系($0.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)地层分布区土壤 Se 含量较高. 调查发现,研究区二叠系地层主要出露灰岩及含煤页岩,寒武系地层主要出露灰岩及炭质泥页岩,含煤黑色岩系由于自身 Se 含量丰富,土壤对母岩具有继承性,使得土壤中 Se 富集^[27,28]. 因此,研究区土壤 Se 主要受到成土母质的控制,Se 源稳定,可进行长期的富 Se 土地开发利用.

对同一地层而言,表层土壤 Se 含量均高于深层土壤,进一步证明了土壤 Se 出现了表层富集现象. 表 6 为表层土壤 Se 含量与土壤其他组分含量的相关分析结果. 可以看出,土壤有机质、铁锰、铝及钾的含量均和土壤 Se 含量呈显著正相关关系. 主要原因可能为,母岩在风化过程中,可溶性的矿物发生淋溶作用而流失,使得黏土矿物、铁锰氧化物及有机质在表层富集,对 Se 有着较强的吸附螯合作用,使得 Se 在表层富集^[29]. 此外,Tim 等^[30]的研究发现,湿沉降是土壤中 Se 的主要来源之一,研究区降水丰沛,所以大气沉积也可能造成土壤 Se 的输入.

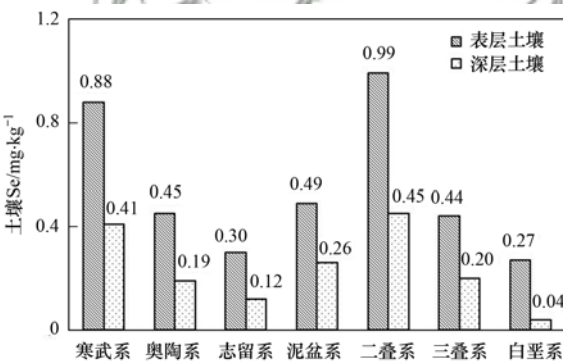


图 4 不同地层分布区土壤 Se 含量
Fig. 4 Se content of soils in different strata distribution areas

表 6 表层土壤 Se 含量与土壤组分含量相关关系¹⁾
Table 6 Correlation between Se content in surface soil and soil component content

指标	有机质	TFe ₂ O ₃	Mn	Al ₂ O ₃	K ₂ O
Se	0.674 **	0.266 *	0.125 **	0.281 **	0.176 *

1) ** 表示在 0.01 水平上显著相关,* 表示在 0.05 水平上显著相关

2.3 农作物 Se 含量特征

分别统计研究区采集的 141 件玉米样品及 159 件水稻样品的 Se 含量特征,基于《富硒稻谷》(GB/T 22499-2008)^[31]及《富硒农产品》(DB50/T 705-2016)^[32]中给出的相应标准,计算富 Se 率,结果见表 7. 玉米及水稻 Se 含量范围分别为 $0.01\sim0.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.01\sim0.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值分别为 $0.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,富 Se 率分别为 75.35% 和 46.81%,农作物 Se 含量丰富.

表 7 农作物 Se 含量及富 Se 率				
Table 7 Se contents and Se-rich ratios of crops				
农作物	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	富 Se 率 /%
玉米	0.01	0.22	0.03	75.35
水稻	0.01	0.21	0.05	46.81

2.4 Se 生物有效性

元素富集系数是指农作物样品中元素含量与根系土中对应元素含量的比值,可反映作物对土壤中元素的吸收富集能力及元素的生物有效性,计算式如下^[19]:

$$K = C_{\text{crop}}/C_{\text{soil}} \tag{1}$$

式中, K 表示元素的富集系数; C_{crop} 为 Se 在作物中的含量,单位为mg·kg⁻¹; C_{soil} 为 Se 元素在根系土中的含量,单位为mg·kg⁻¹.

利用式(1)分别计算玉米和水稻对土壤 Se 的富集系数,结果见图 5. 玉米、水稻 Se 富集系数的变化范围分别为 0.02~0.46 和 0.03~0.51,平均值分别为 0.09 和 0.13.

利用 SPSS 进行多元回归分析,得到农作物吸收模型,结果见表 8,玉米和水稻元素吸收模型的 R 值分别为 0.606、0.692,NME 均小于 0,说明模型拟合低估了实际值,NRMSE 均较低^[19],说明模型拟合效果较好.

可以看出,土壤有机质含量与富集系数 K 呈负相关关系,即土壤中的有机质会导致植物对 Se 的富集能力减弱,主要原因为,土壤有机质对 Se 具有吸附和配位反应能力,对土壤 Se 具有固定作用,在土壤中易与 Se 形成螯合物,抑制了植物对 Se 的吸收^[33,34]. Se 是典型的亲 S 元素,无论在土壤还是在

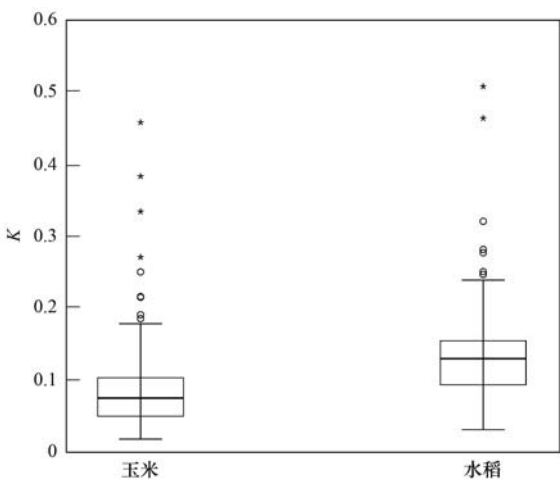


图 5 农作物 Se 富集系数 K

Fig. 5 Coefficients of Se enrichment in crops

动植物体中,都存在普遍的 Se 和 S 的相互作用. 植物对 Se 的吸收是通过硫酸盐转运的,相关研究表明,S 对 Se 生物有效性的影响是双向的,在土壤硫含量较低时,硒酸盐与硫酸盐表现为协同作用,土壤硫含量较高时,硒酸盐与硫酸盐则表现为拮抗作用,主要原因为,在土壤 S 和 Se 的浓度较高时, SO_4^{2-} 比 SeO_4^{2-} 先进入植物体内,进而抑制植物对 SeO_4^{2-} 的吸收,而在土壤 S 和 Se 浓度较低时, SO_4^{2-} 和 SeO_4^{2-} 同时进入植物体内,表现为协同作用^[35,36],研究区土壤中 Se 含量丰富,因此 S 和 Se 表现为拮抗作用. 可见,农作物 Se 含量不仅受到土壤 Se 含量的影响,也会受到土壤其他组分含量的影响,因此,富 Se 土壤的评价应充分考虑农作物及土壤中元素的含量特征,仅以土壤 Se 含量进行富 Se 土壤评价往往会存在误差.

表 8 农作物 Se 吸收模型						
Table 8 Models of crop Se absorption						
农作物	元素吸收模型	R	Sig.	NME	NRMSE	
玉米	$\lg K_{\text{corn}} = -0.590 \lg(\text{有机质}) - 0.119 \lg S - 0.783$	0.606	0.000	-0.068	0.089	
水稻	$\lg K_{\text{rice}} = -0.648 \lg(\text{有机质}) - 0.092 \lg S - 0.526$	0.692	0.000	-0.044	0.061	

2.5 富硒土壤阈值划分

以富 Se 农作物标准为基础,在既定土壤富 Se 阈值下,土壤富 Se 且农作物富 Se 以及土壤不富 Se 且农作物不富 Se 的区域即为正确区,土壤不富 Se 但农作物富 Se 的区域即为遗漏区,土壤富 Se 但农作物不富 Se 的区域即为误判区. 按照《天然富硒土地划定与标识》(DD 2019-10)^[37]给出的一般富 Se 土壤的标准为基础值(当 $\text{pH} \leq 7.5$ 时,富 Se 土壤阈值为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 当 $\text{pH} > 7.5$ 时,富 Se 土壤阈值为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、文献^[31,32]给出的富 Se 农作物标准

(水稻 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,玉米 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),进行研究区富 Se 阈值的划分,结果见图 6(实线代表富 Se 农作物标准,虚线代表土壤富 Se 阈值)和表 9. 可以看出,以文献^[37]给出的富 Se 土壤阈值进行判断时,存在明显的误判和遗漏,对富 Se 土壤阈值进行适当调整,正确率出现了一定的提高,例如,当 $\text{pH} \leq 7.5$ 时,以 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为玉米富 Se 阈值,其正确率为 76.1%,明显高于以 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为阈值时的判定结果,但是,随着正确率的提高,误判率也不断提高,因此,不能以正确率作为唯一判定标准.

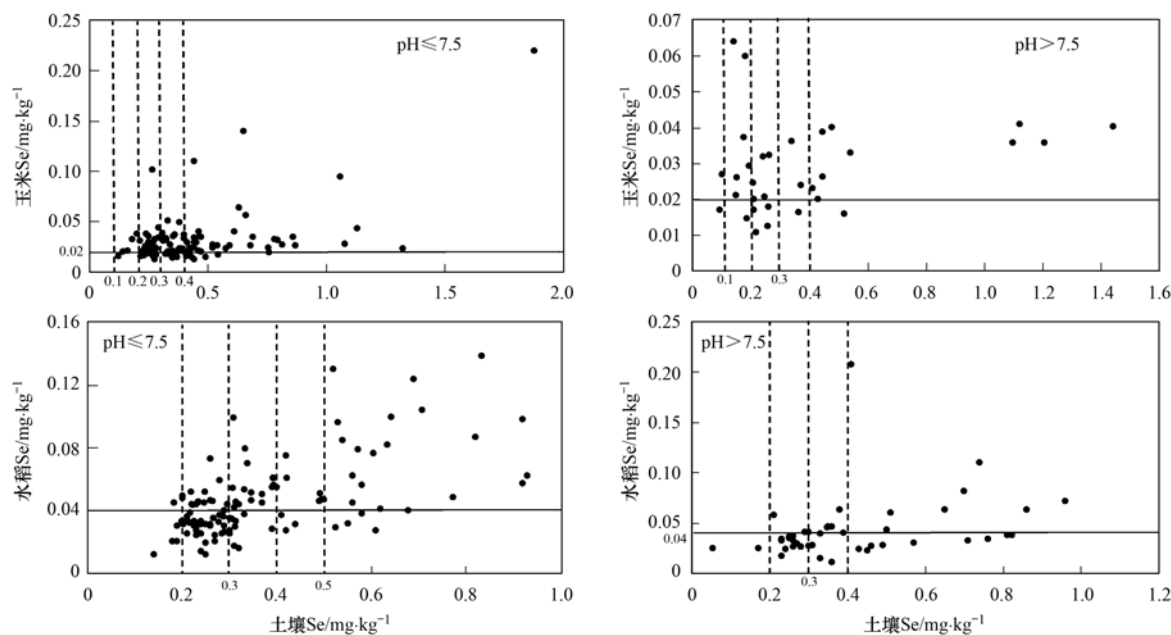


图6 富 Se 土壤阈值
Fig. 6 Se-rich soil threshold

表9 富 Se 土壤阈值统计结果
Table 9 Statistical results of Se-rich soil threshold

农作物	土壤 pH	富 Se 阈值 /mg·kg ⁻¹	正确样本数/件 (比例件/%)	遗漏样本数/件 (比例件/%)	误判样本数/件 (比例件/%)
玉米	pH ≤ 7.5 (n = 109)	0.1	83 (76.1)	0	26 (23.9)
		0.2	79 (72.5)	5 (4.6)	25 (22.9)
		0.3	69 (63.3)	27 (24.8)	13 (11.9)
		0.4	59 (54.1)	40 (36.7)	10 (9.2)
	pH > 7.5 (n = 32)	0.1	25 (78.1)	0	7 (21.9)
		0.2	19 (59.4)	7 (21.9)	6 (18.7)
		0.3	18 (56.3)	12 (37.5)	2 (6.2)
		0.4	17 (53.1)	14 (43.8)	1 (3.1)
水稻	pH ≤ 7.5 (n = 115)	0.2	62 (53.9)	1 (0.9)	52 (45.2)
		0.3	79 (68.7)	17 (14.8)	19 (16.5)
		0.4	74 (64.3)	33 (28.7)	8 (7.0)
		0.5	71 (61.7)	39 (33.9)	5 (4.4)
	pH > 7.5 (n = 44)	0.2	18 (40.9)	0	26 (59.1)
		0.3	28 (63.6)	2 (4.5)	14 (31.9)
		0.4	27 (61.4)	8 (18.2)	9 (20.4)

利用表 8 给出的元素吸收模型、根系土壤测试数据及富 Se 农作物标准,反推计算土壤的富 Se 阈值,结果见图 7。玉米数据计算结果显示,当土壤 pH ≤ 7.5 时,土壤 Se 含量范围为 0.14 ~ 0.49 mg·kg⁻¹,平均含量为 0.29 mg·kg⁻¹,当 pH > 7.5 时,土壤 Se 含量范围为 0.10 ~ 0.61 mg·kg⁻¹,平均含量为 0.26 mg·kg⁻¹。水稻数据计算结果显示,当土壤 pH ≤ 7.5 时,土壤 Se 含量范围为 0.21 ~ 0.40 mg·kg⁻¹,平均含量为 0.33 mg·kg⁻¹,当 pH > 7.5 时,土壤 Se 含量范围为 0.20 ~ 0.70 mg·kg⁻¹,平均含量为 0.42 mg·kg⁻¹。

结合表 9 的统计结果,给出如下建议:若种植作物为玉米,无论土壤呈中酸性还是碱性,均以 0.3

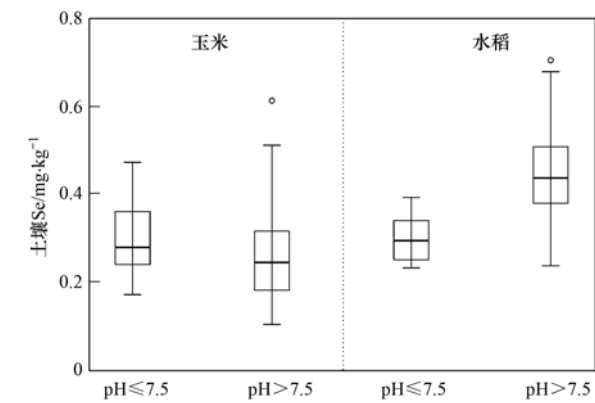


图7 富 Se 土壤阈值计算结果
Fig. 7 Calculated results of Se-rich soil threshold

mg·kg⁻¹作为富 Se 土壤阈值,虽然取该值时,正确率

并非最高,但误判率相对较低。若种植作物为水稻,在土壤 $\text{pH} \leq 7.5$ 时,以 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为富 Se 土壤阈值,若取 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,虽然误判率较低,但遗漏率偏高;在土壤 $\text{pH} > 7.5$ 时,以 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为富 Se 土壤阈值。同样地,若研究区种植有其他大宗农作物,亦建议用该方法进行富 Se 土壤阈值的划分。由于研究区大宗农作物 Se 含量超过相应 Se 限值的样本较少,因此,本研究未给出土壤 Se 的限量。

3 结论

(1)研究区采集的土壤 Se 含量统计结果显示,表层和深层土壤中 Se 含量的平均值分别为 $0.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,变异系数分别为 1.67 和 1.15,空间分布不均匀;土壤地球化学等级划分结果显示,表层土壤 Se 含量处于适量和高的比例分别占全区的 57.72% 和 32.72%,土壤 Se 资源丰富。

(2)半方差函数分析结果显示,表层和深层土壤 Se 均为指数函数类型,块金系数分别为 0.139 和 0.152,说明土壤 Se 含量空间自相关性强。二叠系和寒武系地层出露区表层及深层土壤 Se 含量均较高,这与二叠系及寒武系出露的黑色岩系及灰岩有关,说明研究区土壤 Se 主要来源于成土母质,土壤 Se 源稳定,适于长期开发富 Se 资源。表层土壤 Se 富集现象明显,主要和土壤中有有机质、铁锰氧化物及黏土矿物有关。

(3)玉米及水稻 Se 含量的平均值分别为 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,富 Se 率分别为 75.35% 和 46.81%,农作物 Se 含量丰富。玉米及水稻 Se 吸收模型显示,研究区农作物硒生物有效性主要受控于土壤有机质及 S 含量,土壤有机质和 S 均会抑制植物对 Se 的吸收。

(4)若种植作物为玉米,无论土壤呈中酸性还是碱性,均以 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为富 Se 土壤阈值。若种植作物为水稻,在土壤 $\text{pH} \leq 7.5$ 时,以 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为富 Se 土壤阈值;在土壤 $\text{pH} > 7.5$ 时,以 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为富 Se 土壤阈值。同样地,若研究区种植有其他大宗农作物,亦可用该方法进行富 Se 土壤阈值的划分。

参考文献:

- [1] 王锐,余涛,曾庆良,等.我国主要农耕地土壤硒含量分布特征、来源及影响因素[J].生物技术进展,2017,7(5): 359-366.
Wang R, Yu T, Zeng Q L, et al. Distribution characteristics, origin and influencing factors of soil selenium concentration of main farming areas in China[J]. Current Biotechnology, 2017, 7(5): 359-366.
- [2] Bañuelos G S, Arroyo I, Pickering I J, et al. Selenium biofortification of broccoli and carrots grown in soil amended with Se-enriched hyperaccumulator *Stanleya pinnata* [J]. Food Chemistry, 2015, 166: 603-608.
- [3] 余涛,杨忠芳,王锐,等.恩施典型富硒区土壤硒与其他元素组合特征及来源分析[J].土壤,2018,50(6): 1119-1125.
Yu T, Yang Z F, Wang R, et al. Characteristics and sources of soil selenium and other elements in typical high selenium soil area of Enshi[J]. Soils, 2018, 50(6): 1119-1125.
- [4] Girling C A. Selenium in agriculture and the environment[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1984, 11(1): 37-65.
- [5] Long Z D, Yuan L X, Hou Y Z, et al. Spatial variations in soil selenium and residential dietary selenium intake in a selenium-rich county, Shitai, Anhui, China [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2018, 50: 111-116.
- [6] Rayman M P. The importance of selenium to human health[J]. The Lancet, 2000, 356(9225): 233-241.
- [7] 李继云,任尚学,陈代中.陕西省环境中的硒与大骨节病关系的研究[J].环境科学学报,1982,2(2): 91-101.
Li J Y, Ren S X, Chen D Z. A study of Kaschi-beck disease associated with environmental Selenium in Shanxi area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1982, 2(2): 91-101.
- [8] 杨咏元,杜宝珍.陕西省环境中硒与克山病的发病关系[J].中国环境科学,1983,4(2): 53-55.
- [9] Sieprawka A, Kornas A, Filek M. Involvement of selenium in protective mechanisms of plants under environmental stress conditions-review [J]. Acta Biologica Cracoviensia. Series Botanica, 2015, 57(1): 9-20.
- [10] Filek M, Zembala M, Hartikainen H, et al. Changes in wheat plastid membrane properties induced by cadmium and selenium in presence/absence of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2009, 96(1): 19-28.
- [11] Hartikainen P, Soininen H, Reinikainen K J, et al. Neurotransmitter markers in the cerebrospinal fluid of normal subjects Effects of aging and other confounding factors [J]. Journal of Neural Transmission/General Section JNT, 1991, 84(1-2): 103-117.
- [12] 蔡黎新,蔡碧忍.硒镉摄入对大鼠脏器中硒、镉、铜、锌、锰含量的影响[J].中国公共卫生,2001,17(10): 893-894.
Cai L X, Cai B R. Effect of Selenium, cadmium supplement on contents of Se, Cd, Cu, Zn, Mn in rat organ [J]. China Publichealth, 2001, 17(10): 893-894.
- [13] Parker D R, Feist L J, Varvel T W, et al. Selenium phytoremediation potential of *Stanleya pinnata* [J]. Plant and Soil, 2003, 249(1): 157-165.
- [14] Peng Q, Li J, Wang D, et al. Effects of ageing on bioavailability of selenium in soils assessed by diffusive gradients in thin-films and sequential extraction[J]. Plant and Soil, 2019, 436(1-2): 159-171.
- [15] Wang M K, Cui Z W, Xue M Y, et al. Assessing the uptake of selenium from naturally enriched soils by maize (*Zea mays* L.) using diffusive gradients in thin-films technique (DGT) and traditional extractions[J]. Science of the Total Environment, 2019, 689: 1-9.
- [16] Jia M M, Zhang Y X, Huang B, et al. Source apportionment of selenium and influence factors on its bioavailability in intensively managed greenhouse soil: a case study in the east bank of the Dianchi Lake, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 170: 238-245.
- [17] 曾琴琴,王永华,刘才泽,等.秀山-酉阳地区土壤环境地球化学特征[J].四川地质学报,2019,39(2): 294-298.
Zeng Q Q, Wang Y H, Liu C Z, et al. Pedogeochemistry in the

- Xiushan-Youyang region[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2019, **39** (2): 294-298.
- [18] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [19] Gu Q B, Yang Z F, Yu T, *et al.* Application of ecogeochemical prediction model to safely exploit seleniferous soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **177**: 133-139.
- [20] 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**: 103199.
- [21] 王锐, 余涛, 杨忠芳, 等. 富硒土壤硒生物有效性及影响因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, **27** (7): 1647-1654.
- Wang R, Yu T, Yang Z F, *et al.* Bioavailability of soil selenium and Its influencing factors in selenium-enriched soil [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27** (7): 1647-1654.
- [22] 曾庆良, 余涛, 王锐. 土壤硒含量影响因素及富硒土地资源区划研究——以湖北恩施沙地为例[J]. *现代地质*, 2018, **32** (1): 105-112.
- Zeng Q L, Yu T, Wang R. The influencing factors of selenium in soils and classifying the selenium-rich soil resources in the typical area of Enshi, Hubei [J]. *Geoscience*, 2018, **32** (1): 105-112.
- [23] 张光弟, 葛晓立, 张绮玲, 等. 湖北恩施硒中毒区土壤硒的分布及其控制因素[J]. *中国地质*, 2001, **28** (9): 37-40, 36.
- Zhang G D, Ge X L, Zhang Q L, *et al.* Distribution of selenium in soil of the Enshi selenium intoxication area Hubei and its constraints[J]. *Chinese Geology*, 2001, **28** (9): 37-40, 36.
- [24] Zhang Y, Wu S Y, Zheng H, *et al.* Modes of selenium occurrence and LCD modeling of selenite desorption/adsorption in soils around the selenium-rich core, Ziyang County, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25** (15): 14521-14531.
- [25] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2012, **33** (2): 599-605.
- Liu Y L, Zhang L J, Han X F, *et al.* Spatial variability and evaluation of soil heavy metal contamination in the urban-transect of Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2012, **33** (2): 599-605.
- [26] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, **58** (5): 1501-1511.
- [27] 张靖源, 陈剑平, 黄邵华, 等. 广西鹿寨水稻及其种植土壤中硒含量分布特征分析[J]. *南方农业学报*, 2016, **47** (11): 1856-1860.
- Zhang J Y, Chen J P, Huang S H, *et al.* Distribution characteristics of selenium content in rice and rhizosphere soil in Luzhai, Guangxi[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, **47** (11): 1856-1860.
- [28] Forduce F M, Zhang G D, Green K, *et al.* Soil, grain and water chemistry in relation to human selenium-responsive diseases in Enshi District, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2000, **15** (1): 117-132.
- [29] Zhu J M, Zheng B S. Distribution of selenium in a mini-landscape of Yutangba, Enshi, Hubei Province, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16** (11-12): 1333-1344.
- [30] Blazina T, Sun Y B, Voegelin A, *et al.* Terrestrial selenium distribution in China is potentially linked to monsoonal climate [J]. *Nature Communications*, 2014, **5**: 4717.
- [31] GB/T 22499-2008, 富硒稻谷[S].
- [32] DB50/T 705-2016, 富硒农产品[S].
- [33] Wang Q Y, Zhang J B, Zhao B Z, *et al.* Influence of long-term fertilization on selenium accumulation in soil and uptake by crops [J]. *Pedosphere*, 2016, **26** (1): 120-129.
- [34] Xiao K C, Tang J J, Chen H, *et al.* Impact of land use/land cover change on the topsoil selenium concentration and its potential bioavailability in a karst area of southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **708**: 135201.
- [35] Di Tullo P, Pannier F, Thiry Y, *et al.* Field study of time-dependent selenium partitioning in soils using isotopically enriched stable selenite tracer [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **562**: 280-288.
- [36] Shand C A, Eriksson J, Dahlin A S, *et al.* Selenium concentrations in national inventory soils from Scotland and Sweden and their relationship with geochemical factors [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, **121**: 4-14.
- [37] DD 2019-10, 天然富硒土地划定与标识[S].

CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China	YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, <i>et al.</i> (5215)
Dynamic Assessment of PM _{2.5} Health Damage Value in China from 2015 to 2018	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)
Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM _{2.5} in China from 2011 to 2017	YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (5236)
Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to PM _{2.5} in the Guanzhong Area	HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, <i>et al.</i> (5245)
Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City	JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, <i>et al.</i> (5256)
Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of PM _{2.5} in a Northwest Industrial City	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, <i>et al.</i> (5267)
Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric PM _{2.5} and Its Sources Based on the PMF Model	DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, <i>et al.</i> (5276)
Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing	ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, <i>et al.</i> (5288)
Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, <i>et al.</i> (5295)
Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China	JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (5306)
Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (5316)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O ₃ in Shijiazhuang	WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (5325)
Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen	WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, <i>et al.</i> (5336)
Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, <i>et al.</i> (5345)
Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China	MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, <i>et al.</i> (5352)
Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower	HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5362)
Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, <i>et al.</i> (5371)
Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area	QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5381)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, <i>et al.</i> (5389)
Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City	CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, <i>et al.</i> (5400)
Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin	JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, <i>et al.</i> (5410)
Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin	ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (5419)
Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province	WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake	LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, <i>et al.</i> (5438)
Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater	YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5448)
Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers	SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (5458)
Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake	SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5470)
Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar	WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (5480)
Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ Heterojunction	HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, <i>et al.</i> (5488)
Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66	YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, <i>et al.</i> (5500)
Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons	LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, <i>et al.</i> (5509)
Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW	GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, <i>et al.</i> (5518)
Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems	SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (5527)
Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, <i>et al.</i> (5535)
Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(II)-Activated Calcium Peroxide	BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, <i>et al.</i> (5544)
Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China	ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, <i>et al.</i> (5552)
Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China	DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, <i>et al.</i> (5562)
Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (5571)
Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong	YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5579)
DA-6 and GLDA Enhanced <i>Panicum virgatum</i> L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, <i>et al.</i> (5589)
Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of α -Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ /C Using a Bamboo Template on As(V) Contaminated Soils	ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, <i>et al.</i> (5600)
Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in <i>Zophobas morio</i> : Effects of Gut Microbiota	YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, <i>et al.</i> (5609)
Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium	HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)
Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings	JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)
Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach (<i>Ipomoea aquatica</i> Forssk.) Irrigated with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, <i>et al.</i> (5636)
Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake	HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (5648)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model	XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5656)
Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N ₂ O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils	XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, <i>et al.</i> (5668)