

doi: 10. 11720/wtyht. 2022. 2554

周文龙,杨志忠,张涛,等. 黔南荔波县水稻—根系土系统中硒含量影响因素分析[J]. 物探与化探,2022,46(2):502–510. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2554>

Zhou W L, Yang Z Z, Zhang T, et al. An analysis of factors influencing the selenium content in the rice-root soil system in Libo County, southern Guizhou Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(2): 502–510. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2554>

黔南荔波县水稻—根系土系统中硒含量 影响因素分析

周文龙,杨志忠,张涛,忙是材,杨正坤

(贵州省有色金属和核工业地质勘查局 地质矿产勘查院, 贵州 贵阳 550005)

摘要: 硒是人体必需的微量元素之一,其对重金属元素毒性具有拮抗作用,通过食物链转化方式获得硒是人体最主要和最安全可行的途径。以荔波县大面积分布的天然优质富硒耕地为研究对象,采集分析了 30 组水稻籽实和配套根系土样品,据此评价稻米食用安全性,研究水稻—根系土系统硒含量关系,探究土壤理化条件对水稻硒吸收运移的影响,以期为研究区富硒农业发展提供科学依据。结果显示:研究区水稻根系土硒(Se_s)含量大部分达富硒水平,平均值为 0.41×10^{-6} ,稻米硒(Se_R)平均值 0.0307×10^{-6} ,绿色安全稻米占 70%;水稻根系土中 Se_s 和 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 MgO 、有机质呈现显著正相关关系,且与 Cr、Cd 等重金属元素呈伴生关系;水稻籽实 Se_R 与根系土 Se_s 呈显著正相关关系,而水稻籽实硒富集系数与根系土 Se_s 、As、Cd、Cr、Hg、Ni、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、有机质等呈显著负相关关系,说明土壤有机质及铁铝氧化物对硒的吸附和固定作用降低了水稻对硒的吸收利用率,硒与重金属元素在土壤—稻米系统中的吸收运移可能具有一定拮抗作用。研究区富硒耕地资源丰富,但稻米存在 Cr、Cd 轻度超标的风险,发展富硒农业时应关注重金属元素生态效应。

关键词: 硒;水稻;根系土;重金属;富硒农业;黔南荔波县

中图分类号: P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)02-0502-09

0 引言

硒是人类和动物所必需的微量元素,对重金属元素的毒性具有拮抗作用,具有增强人体免疫力、抗衰老、预防癌变等生物学功能^[1-2]。研究认为通过食物链转化方式获得硒是人体最主要和最安全可行的途径^[2]。人体硒摄入量安全范围较窄,硒缺乏可引起人类和动物发生克山病、大骨节病和白肌病等,而摄入过量的硒也可能造成硒中毒^[3-4]。土壤硒是作物硒的主要来源,而土壤硒含量受成土母岩、土壤理化性质、土地利用方式、土壤有机质等因素的影响^[5-6]。从世界范围来看,硒在表层土壤中分布极不均匀,我国土壤硒背景值为 0.29×10^{-6} ,全国有 72% 的地区处于缺硒或低硒状态^[5],而贵州省耕地

表层土壤硒背景值为 0.48×10^{-6} ^[7],远高于全国平均值。调查发现荔波县耕地土壤硒平均含量 0.42×10^{-6} ,富硒耕地约 $1.28 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (土壤硒含量在 $(0.40 \sim 3.0) \times 10^{-6}$ 之间的耕地),占全县耕地面积近 62%^[6]。全县天然富硒耕地中硒平均含量 0.55×10^{-6} ,其中优先保护和安全利用类富硒耕地约 $1.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占全部富硒耕地面积的 93.3%,具有开发绿色富硒农产品的天然优势。

研究认为,硒从土壤到植物的迁移受土壤硒含量、存在形态及土壤理化性质等影响^[8-10]。姜超强等研究认为,水稻根系能从土壤中富集硒且硒向水稻籽粒的转运和积累相对恒定,水稻根系、茎叶和籽粒中的硒含量均随着土壤硒含量增加而增加^[11]。陈锦平等对浔郁平原水稻、龙眼等农作物硒富集特征研究证明,水稻籽实富硒率较高,且土壤硒含量和

收稿日期: 2020-12-02; 修回日期: 2021-08-24

基金项目: 贵州省公益地勘基金项目(黔耕调(2017-03);黔色耕调(2017-03-33))资助

第一作者: 周文龙(1984-),男,高级工程师,硕士,主要从事矿产地质勘查、农业地质调查等技术研究工作。Email: E578064048@126.com

通讯作者: 杨志忠(1982-),男,高级工程师,主要从事矿产地质勘查等技术研究工作。Email: 809439420@qq.com

酸碱性对水稻籽粒硒含量影响较大^[12],但受多种因素影响,情况较为复杂。例如,章倩在海南岛西部地区研究发现,水稻硒含量与根系土壤硒含量、pH 值、CEC(阳离子交换量)和有机质之间不存在直接相关关系^[13]。

本文依托“贵州省荔波县耕地质量地球化学调查评价”项目成果,依据荔波县水稻根系土和水稻籽实元素及土壤理化指标数据资料,分析水稻根系土和籽实硒含量及其影响因素,开展水稻安全性评价,为荔波县绿色富硒农业发展提供科学依据。

1 研究区概况

研究区荔波县位于贵州省南部,与广西河池接壤,地理坐标东经 107°37′~108°18′,北纬 25°7′~25°9′,面积约 2 431 km²,属亚热带季风气候。地貌整体呈现出北东高西南低,中部为槽谷的形态特征,主要发育岩溶—峰丛洼地、谷地地貌。大地构造上处于扬子准地台—黔南台陷与华南褶皱带的接合

带,主要出露地层有南华系、震旦系、寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、白垩系及第四系;岩性以碳酸盐岩为主,兼有黏土岩、泥页岩和砂岩等;土壤类型以水稻土、石灰土为主,兼有红壤、黄壤和粗骨土;耕地利用类型以水田、旱地为主,兼有果园和茶园等,其中水田广泛分布全区。

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

水稻与根系土样品于 2018-08-30~2018-9-13 水稻成熟收获季节采集,采样点位如图 1。采样时以 GPS 定点位置为主采样点,结合地形,灵活采用“S”形、“X”形采样法在主采样点四周 30~50 m 范围内采集 4 个分样点,等分组合成 1 件混合水稻籽实样品;在每个水稻籽实采样点上采集根系土,采集深度为 0~20 cm,组合样鲜重大于 1.0 kg。样品采集时避开沟渠、田埂、路边、粪堆及微地形高低不平无代表性地段。

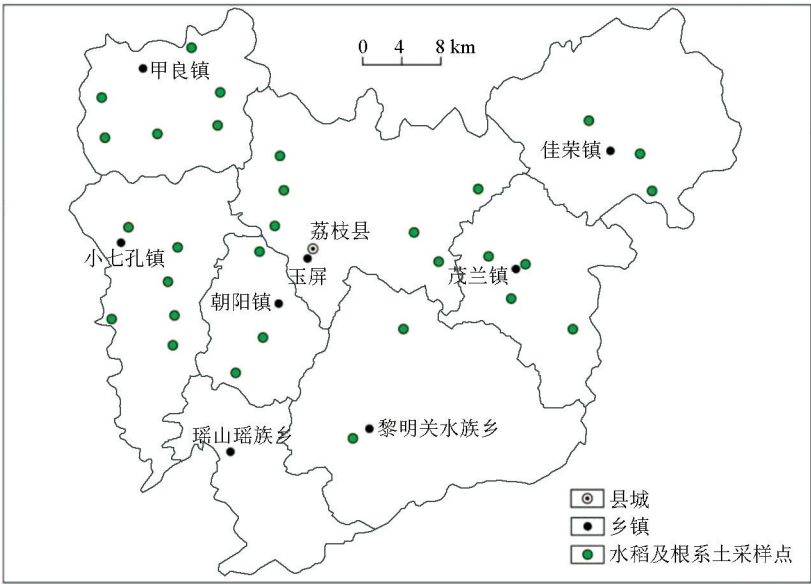


图 1 研究区采样位置
Fig. 1 Sampling sites of the study area

水稻籽实样品晒干后脱粒,混合铺平,用方格法缩分,称取 500 g 样品装袋编号,送实验室用蒸馏水清洗干净后在自然状态下风干(温度<40℃),之后脱壳处理制成精米;于 80~90℃鼓风烘干 15~30 min,再于 60℃鼓风干燥 24~48 h 至恒重,用食品加工机磨细至全部通过 40 目筛(0.42 mm),混匀备用。根系土鲜样置于通风干燥处自然风干,期间不时用木棒碾压防止板结,同时剔除植物根系、秸秆、

石块、虫体等杂质,过 10 目筛(2.0 mm),混匀,称取 200 g 样品送实验室;取 10 目(2.0 mm)样品 50 g 送测 pH;剩余 10 目土壤样品继续研磨至全部过 100 目筛(0.149 mm),取 30 g 样品送测有机质;另取 80 g 左右 100 目(0.149 mm)样品用无污染行星磨机粉碎至 200 目(0.074 mm),用于 As、Cd、Cr、Pb、Hg、K₂O、Na₂O、MgO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 CaO 等指标测试。

2.2 样品分析与质量控制

样品分析测试由自然资源部昆明矿产资源监督检查中心完成。水稻籽实样品按照 GB 5009. 268—2016 标准,采用 ICAP-RQ 电感耦合等离子体质谱仪测定 Se、As、Cr、Hg、Cd 和 Pb。根系土样品按照 LY/T 1239—1999 标准,采用 AFS-3100 原子荧光光度计分析 As;采用 XGY-1011A 型原子荧光光度计分析 Hg、Se;采用 ICAP-7400 电感耦合等离子体光谱仪分析根系土 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、K₂O、Na₂O、MgO、Fe₂O₃、CaO、SiO₂ 和 Al₂O₃;采用 PHS-3E 型酸度计,按照 LY/T 1239—1999 标准测试根系土 pH。

根系土样品分析时密码插入 6 件国家土壤一级标准物质分析,各元素的报出率均大于 99. 96%,各指标测定值的准确度和精密度合格率为 100%。水稻籽实样品分析测试时密码插入 1 件国家稻米一级标准物质分析,测定值的准确度和精密度合格率为 100%。

2.3 数据处理

本次采用 SPSS19. 0 和 Microsoft Excel 2016 完成数据描述性统计分析、方差分析及相关性分析,采用 Arcgiss10. 2 和中国地质调查局发展研究中心“土地质量地球化学评价管理与维护(应用)子系统”绘制图件。

3 结果与讨论

3.1 根系土元素含量特征

研究区水稻及根系土各指标含量统计结果见表 1。与全国背景值^[14]相比,研究区根系土地球化学

指标呈现经历强烈风化淋滤作用的典型南方酸性土壤特征,即 Ca、Mg、Na 和 Mn 大量淋失而贫化,而有机质、K、Hg、Se、Cr 和 Pb 相对富集,体现了水稻土壤淹水还原条件和人工干预下肥力较高,而重金属元素 Hg、Cr 和 Pb 等呈现一定程度富集的特点。与贵州省耕地土壤背景值^[7]相比,研究区根系土中 Cd、Hg 相对富集,推断与研究区荔波—独山汞矿、锑矿成矿带石炭系和泥盆系成土母岩的高 Cd、Hg 背景密切相关,而有机质相对富集则与研究区水稻秸秆大量还田、水淹厌氧和酸性环境条件下水田土壤有机质分解矿化速度相对较慢而积累有关。

研究区根系土 Se_s 含量在 (0. 24~0. 94)×10⁻⁶,平均值 0. 41×10⁻⁶,高于全国土壤 Se 平均值 0. 29×10⁻⁶^[14],亦远高于我国克山病、大骨节病流行区耕地土壤 Se 含量 0. 151×10⁻⁶^[15]和全国水稻土硒平均值 0. 201×10⁻⁶^[3],但低于贵州省水稻土硒背景值 0. 46×10⁻⁶^[7]。对根系土 Se_s 正态检验得出 Sk = 0. 51,Ku=0. 99,属左偏正态分布(图 2)。

3.2 水稻籽实元素含量及富硒与安全性评价

研究区水稻籽实 Se_R 含量在 (0. 029 5~0. 032)×10⁻⁶,平均值为 0. 030 7×10⁻⁶,接近全国水稻 Se 平均含量 0. 032×10⁻⁶^[16]。付中彪等对赣南地区研究发现水稻 Se 平均值为 0. 05×10⁻⁶^[10];张靖源等研究发现,广西鹿寨县水稻 Se 平均值为^[16]0. 05×10⁻⁶;张栋等研究发现,新疆水稻 Se 含量为 (0. 010~0. 062)×10⁻⁶^[17],平均值为 0. 031×10⁻⁶。诸多研究发现水稻对硒有一定的富集和较高的有机转化能力,其对硒的吸收利用是主动而非被动^[18]。一般认

表 1 研究区水稻籽实 Se _R 与根系土中 Se _s 等指标统计 (n=30)										
Table 1 Contents of elements in rice seed and root soil in study area (n=30)										
指标	pH	Se _R	Se _s	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb
最大值	6. 90	0. 032	0. 90	14. 80	1. 46	120. 00	92. 10	0. 55	36. 6.	55. 50
最小值	4. 58	0. 0295	0. 24	2. 66	0. 15	39. 20	6. 34	0. 06	4. 26	14. 10
平均值	5. 37	0. 0307	0. 41	6. 58	0. 50	74. 90	20. 90	0. 14	19. 39	24. 05
变异系数/%	11. 46	1. 99	33. 36	47. 35	66. 08	29. 65	80. 00	63. 60	46. 39	34. 22
K 值	与全国对比	0. 80	0. 97	1. 41	0. 58	0. 15	1. 25	0. 93	1. 98	0. 72
	与贵州对比			0. 85	0. 49	1. 24	0. 76	0. 61	1. 07	0. 49
指标	Zn	Mn	有机质	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
最大值	131. 00	321. 00	7. 72	5. 85	14. 83	83. 23	1. 21	1. 51	0. 47	2. 25
最小值	18. 10	38. 30	2. 41	1. 28	5. 29	61. 79	0. 12	0. 25	0. 16	0. 32
平均值	67. 61	128. 78	4. 52	3. 25	9. 43	74. 54	0. 45	0. 63	0. 26	1. 06
变异系数/%	43. 61	63. 65	27. 35	42. 73	30. 59	8. 91	57. 08	59. 10	32. 05	54. 85
K 值	与全国对比	0. 91	0. 22	1. 60	1. 10	0. 75	1. 15	0. 30	0. 81	0. 17
	与贵州对比	0. 65	0. 18	1. 47						

注:元素含量单位为 10⁻⁶,氧化物、有机质含量单位为 10⁻²,pH 无量纲;Se_R 表示水稻籽实硒;Se_s 表示根系土全硒;其他元素指标均来自根系土;根系土元素富集系数 K 值=均值/全国土壤背景值(贵州省土壤背景值);全国土壤背景值引自《中国土壤元素背景值》^[14];贵州省土壤背景值引自蔡大为等^[7]的研究成果;水稻硒平均值引自姜超强等^[11]的研究成果。

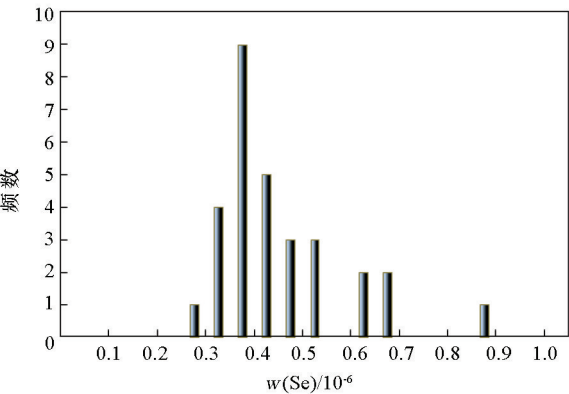


图 2 水稻根系土硒含量直方分布

Fig. 2 Histogram of Selenium content distribution in rice root soil

为农作物硒主要来自于土壤,富硒土壤是生产富硒农作物的基础^[19]。研究认为原生地质环境下土壤硒主要来源于富硒的沉积岩,如黑色页岩和煤系地层^[20],土壤硒对成土母岩具有一定的继承性。笔者对研究区土壤硒来源的研究证明,区内土壤硒高值展布区与二叠系阳新统合山组煤系地层、石炭系下统祥摆组煤系地层和寒武系炭质泥页岩地层分布区高度一致^[6]。

研究区 30 件水稻籽实样品重金属元素含量统计结果见表 2。参照《食品安全国家标准食品中污

染物限量》(GB 2762—2017)^[21],所有水稻籽实样品中 Hg 含量均低于检出限,无超标样品;Pb 和 As 含量均处于安全限值范围内;Cd 含量超标样品 1 件,属于重度超标,采集于甲良镇;Cr 含量超标样品数 9 件,均属轻度超标,主要集中分布于方村向斜一带的甲良镇和小七孔镇。

研究区绿色安全的水稻籽实样品为 21 件,占比 70%。土壤 Cr 背景值偏高是水稻籽实 Cr 超标的重要原因。另外,研究区水稻土 pH<6.0,水稻籽实 Cr 超标与酸性土壤环境中重金属 Cr 易活化转变为水溶态、离子交换态和碳酸盐结合态等植物易吸收利用态有关^[22]。因此,研究区在发展绿色富硒农业时应关注重金属元素 Cd、Cr 的生态效应。

3.3 根系土硒含量与土壤性质关系

前人研究认为,土壤硒含量受成土母岩、地形地貌、土壤类型、土地利用方式、土壤理化性质等诸多因素的影响^[4-5,23-24],在自然成土过程中,成土母岩对土壤硒含量的影响会逐渐降低,而理化性质的影响会趋于增强^[25]。从表 3 可以看出,根系土中 Se_s 与 Fe₂O₃、Al₂O₃、MgO、K₂O、As、Cd、Cr、Hg、Ni 呈极显著正相关关系($p<0.01$ 水平),与有机质呈显著正相关关系($p<0.05$ 水平),反映根系土中硒与重金属等元素的伴生关系,这与付中彪等对赣南地区水稻

表 2 水稻籽实中重金属元素含量特征及其超标情况 (n=30)

Table 2 Concentration characteristics of heavy metals in rice seed (n=30)

参数	As _R	Cd _R	Cr _R	Hg _R	Pb _R
最大值 (C _{ijMax})	0.332	0.780	1.700	—	0.125
最小值 (C _{ijMin})	0.152	0.016	0.450	—	0.036
平均值 (C _{ijAve})	0.225	0.093	0.923	—	0.067
食品安全标准限值 (L _{ij})	0.5	0.2	1.0	0.02	0.2
超标数量	0	1	9	0	0
超标指数 (E _{ij})		4.40	1.09~1.70		
超标等级		重度超标	轻度超标		

注:元素含量单位为 10⁻⁶;“—”表示未超过检出限;食品安全标准参考《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)^[21];E_{ij}=C_{ij}/L_{ij},E_{ij} 为农产品 i 中污染物 j 的单因子超标指数,C_{ij} 为农产品 i 中污染物 j 的含量测定值,L_{ij} 为农产品 i 中污染物 j 的食品安全国家标准限值;E_{ij}≤1.0 为未超标,1.0<E_{ij}≤2.0 为轻度超标,E_{ij}>2.0 为重度超标。

表 3 水稻根系土硒与各理化指标相关系数 (n=30)

Table 3 Correlation coefficient between selenium and various physical and chemical indicators in rice root soil (n=30)

指标	r	指标	r	指标	r
As	0.746 **	Pb	0.321	CaO	0.313
Cd	0.465 **	有机质	0.373 *	MgO	0.474 **
Cr	0.514 **	pH	0.167	K ₂ O	0.462 **
Cu	0.227	SiO ₂	-0.489 **	Na ₂ O	0.107
Hg	0.577 **	Fe ₂ O ₃	0.477 **		
Ni	0.526 **	Al ₂ O ₃	0.424 **		

注:“**”表示在 0.01 水平上(双侧)显著相关;“*”表示在 0.05 水平上(双侧)相关。

土的研究结果一致^[10]。考虑到研究区水稻土为酸性,且酸性环境条件下重金属元素易于活化被农作物吸收的特点,在发展富硒农业时应关注土壤重金属元素的生态效应。

研究认为土壤有机质对土壤硒含量有重要影响。例如,浙江嘉善地区土壤硒与有机碳具有良好的正相关关系^[23]。笔者对研究区土壤有机质与硒含量关系研究也得出了相同的结论^[6]。有研究认为,在酸性土壤中微生物的还原作用促使大部分亚硒酸盐被地表土壤固定,硒优先进入低分子量的腐殖质组分中,与金属腐殖质复合体一起呈现出无机复合状态,因此有机质对土壤中的硒起吸附和固定作用,从而使硒富集在表层土壤中^[26-28]。水稻根系土腐殖质含量高,腐殖质对硒的吸附固定作用使得硒趋于在腐殖层富集。

研究区根系土 Se_s 与 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 MgO 和 K_2O 呈极显著正相关关系 ($p < 0.01$ 水平),这是因为土壤中的 Fe 、 Al 氧化物黏粒对各种形态的硒具有吸附和固定作用, Fe 、 Al 氧化物在酸性的 pH 环境中带正电,可吸附硒形成内、外球表面复合体,在酸性土壤中这种吸附作用更明显^[29]。研究发现,铁、锰、铝氧化物对硒的吸附作用随着土壤 pH 的升高而降低,在 $\text{pH} < 6.0$ 时,铁、锰、铝氧化物对亚硒酸盐的吸附率高达 60% 以上^[30]。笔者对研究区岩溶洼地水稻土高硒原因的研究印证了此观点,在研究区水稻土耕作层 $\text{pH} < 6.0$ 的酸性条件下,铁铝氧化物黏粒对硒的吸附固定作用使得硒含量极低的碳酸盐岩发育区形成富硒水稻土^[6]。

3.4 水稻籽实硒含量的影响因素

大量研究表明,农作物对土壤硒的吸收受到土壤 pH 值、有机质、氧化还原电位等诸因素的影响^[31]。水稻虽属于非聚硒农作物但其对硒有一定的富集能力,能主动从土壤中吸收利用硒,将吸收的大部分硒转化成有机态,累积分布于植物全株^[32]。由研究区水稻籽实 Se_R 与根系土各指标含量的统计分析(表 4)可以看出,水稻籽实 Se_R 与根系土 Se_s 呈显著正相关关系 ($p < 0.05$ 水平)。水稻籽实 Se_R 在一定程度上取决于根系土 Se_s 的水平,但在更大程度上取决于土壤硒的有效性^[33]。

大量研究发现,并不是所有的硒都能被植物吸收利用,硒在土壤中以水溶态、离子交换态、碳酸盐态、腐殖酸态、铁锰氧化物态、强有机态、残渣态等多种形式存在,而土壤中供给水稻吸收利用的硒主要为水溶态和腐殖酸态,因为水溶态的硒相对较少,所以土壤中腐殖酸态硒的供给决定了水稻中硒的含

量^[33]。作物对养分的吸收形态主要为存在于水溶液中的离子态,而腐殖酸态的硒很容易经过矿化作用转化为无机态的硒酸盐 (Se^{6+}) 或亚硒酸盐 (Se^{4+}),这些硒酸盐或亚硒酸盐进入水溶液形成水溶态的硒从而被植物吸收^[34]。付中彪研究发现水稻籽实 Se_R 与根系土铁铝氧化物、有机碳有负相关性^[10],这与土壤有机质和铁铝氧化物对硒的吸附和固定作用有关^[33]。从表 4 可见,研究区水稻籽实 Se_R 与根系土有机质、 Al_2O_3 呈显著负相关关系 ($p < 0.01$ 水平);从表 5 可见水稻籽实硒富集系数 (K_R) 与根系土 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Se_R 等呈极显著负相关关系 ($p < 0.01$ 水平),与根系土有机质呈显著负相关关系 ($p < 0.05$ 水平);同时,图 3、4、5 也显示随着根系土 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和有机质升高,水稻籽实硒富集系数 (K_R) 呈现出整体下降的趋势,这可能与土壤有机质、铁铝氧化物等对土壤硒的吸附和固定作用有关。表 4 显示水稻籽实硒富集系数 (K_R) 与根系土 Se_R 呈极显著负相关关系 ($p < 0.01$ 水平),这是因为水稻根系能从土壤中富集硒,即使土壤硒含量较低时,水稻根系也能从土壤中富集硒,而土壤硒含量升高,水稻对硒的吸收利用效率有所降低^[11],图 6 显示的水稻籽实硒富集系数 (K_R) 随根系土 Se_s 增加而降低也说明了这一规律。研究发现:在酸性条件下,土壤中 H^+ 的增加减少了土壤表面的负电荷,使得游离的硒酸根、亚硒酸根阴离子更容易被铁铝氧化物和腐殖质吸附^[35-37],从而降低了土壤中硒的生物有效性。这解释了虽然研究区大面积分布天然富硒土地,但水稻籽实硒含量普遍较低的原因。

另外,表 3 显示根系土硒与根系土 As 、 Cd 、 Cr 、 Hg 、 Ni 、 Pb 呈极显著正相关关系 ($p < 0.01$ 水平),表 4 显示水稻籽实硒与根系土 As 、 Cd 、 Cr 、 Hg 、 Ni 、 Pb 无相关性,表 5 显示水稻籽实硒富集系数 (K_R) 与根系土 As 、 Cd 、 Cr 、 Hg 、 Ni 呈极显著负相关关系 ($p < 0.01$ 水平),与 Cd 呈显著负相关关系 ($p < 0.05$ 水平);这说明根系土中的 Se 虽与重金属 As 、 Cd 、 Cr 、 Hg 、 Ni 、 Pb 存在一定伴生关系,但在土壤—稻米系统中的吸收运移却可能表现为一定拮抗作用,这可能是水稻在吸收转运硒的同时,硒通过根系对体内重金属元素的吸收和运输有选择性调控作用^[37],关于这一点还有待进一步研究证实。

研究认为,人为增加土壤硒含量可在一定程度上提高水稻硒的含量^[12-16,32-33],但当硒肥浓度过高时会毒害作物^[38],造成土壤硒污染。因此,在天然富硒土壤(土壤硒含量在 $(0.40 \sim 3.0) \times 10^{-6}$ 之间)上种植农作物既能保证作物的正常生长^[39],同时能

表 4 水稻籽实硒与根系土理化指标相关系数 (n=30)

Table 4 Correlation coefficient between Se content in rice seed and index in root soil (n=30)

指标	r	指标	r	指标	r
Se _s	0.167 *	Ni	-0.057	Al ₂ O ₃	-0.374 * *
As	0.279	Pb	-0.011	CaO	-0.168
Cd	0.068	有机质	-0.503 * *	MgO	-0.261
Cr	0.099	pH	-0.146	K ₂ O	-0.178
Cu	-0.082	SiO ₂	0.334	Na ₂ O	0.086
Hg	-0.024	Fe ₂ O ₃	-0.127		

注:“* *”表示在 0.01 水平上(双侧)显著相关;“*”表示在 0.05 水平上(双侧)相关。

表 5 水稻籽实硒富集系数 (K_R) 与根系土理化指标相关系数 (n=30)

Table 5 Correlation coefficient between Se enrichment coefficient (K_R) of rice seed and physicochemical indexes of root soil (n=30)

元素	r	元素	r	元素	r
As	-0.699 * *	Pb	-0.216	CaO	0.320
Cd	-0.412 *	SOM	-0.447 *	MgO	-0.508 * *
Cr	-0.546 * *	pH	-0.122	K ₂ O	-0.461 *
Cu	-0.241	SiO ₂	0.547 * *	Na ₂ O	-0.154
Hg	-0.526 * *	Fe ₂ O ₃	-0.541 * *	Se _R	-0.903 * *
Ni	-0.529 * *	Al ₂ O ₃	-0.479 * *		

注:K_R=ω(Se_R)/ω(Se_s);“* *”表示在 0.01 水平上(双侧)显著相关;“*”表示在 0.05 水平上(双侧)相关。

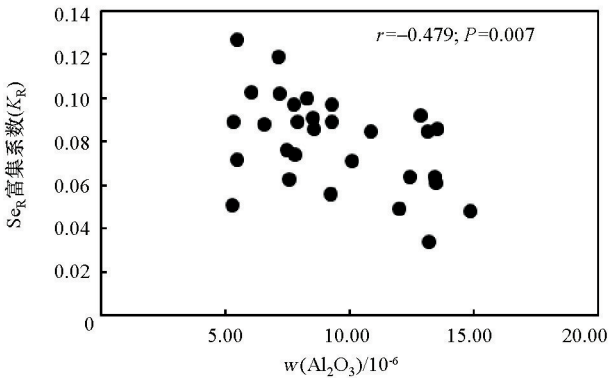


图 3 水稻籽实硒富集系数 K_R 与根系土 Al₂O₃ 散点图 (n=30)

Fig. 3 Scatter plot of Se enrichment factor in rice seed and Al₂O₃ in root soil (n=30)

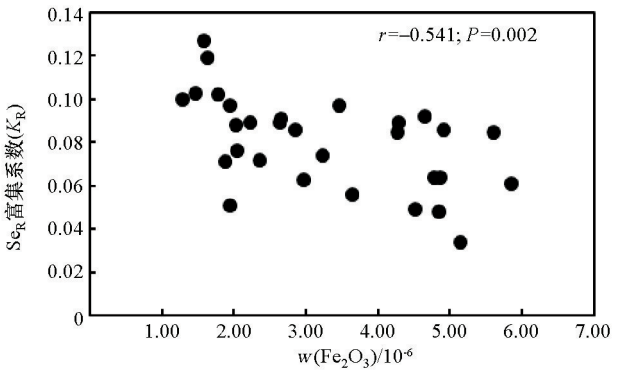


图 4 水稻籽实硒富集系数 K_R 与根系土 Fe₂O₃ 散点图 (n=30)

Fig. 4 Scattered plots of Se enrichment factor in rice seed and Fe₂O₃ in root soil (n=30)

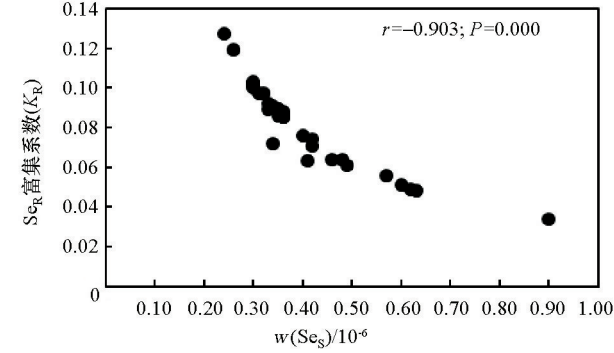


图 5 水稻籽实硒富集系数 K_R 与根系土有机质散点图 (n=30)

Fig. 5 Scatter plot of Se enrichment factor in rice seed and SOM in root soil (n=30)

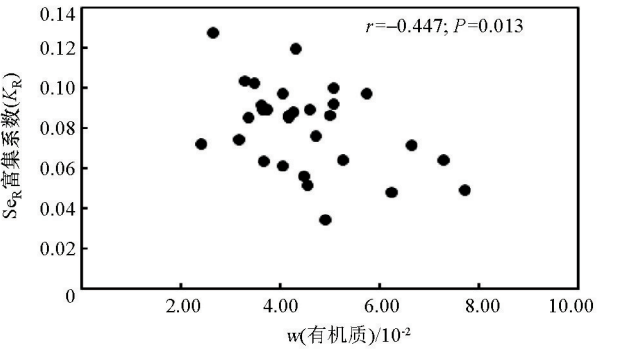


图 6 水稻籽实硒富集系数 K_R 与根系土 Se_s 散点图 (n=30)

Fig. 6 Scatter plot of Se enrichment factor in rice seed and Se in root soil (n=30)

减少富硒农产品的生产成本和环境风险。研究显示硒酸盐的生物有效性高于亚硒酸盐,植物对硒酸盐的吸收速率大于亚硒酸盐^[40-41],而土壤 pH 的升高会抑制硒酸盐的老化从而提高硒的有效性^[42],因此可采取适当的农艺手段调节土壤 pH 值等理化性质,增加土壤中的硒酸盐含量,以提高水稻等农作物对硒的吸收利用率,从而提高农产品中的硒含量。研究区天然绿色富硒耕地资源丰富,具有发展富硒农业得天独厚的优势。

4 结论

1) 研究区水稻根系土 Se_s 大部分达富硒水平,为 $(0.24 \sim 0.94) \times 10^{-6}$,平均值为 0.41×10^{-6} ,达到富硒耕地水平。水稻籽实的 Se_R 平均值为 0.0307×10^{-6} ,接近于全国平均水平。

2) 在研究区酸性土壤环境条件下,水稻根系土中有机质和铁铝氧化物等对土壤硒的吸附和固定作用使得硒趋向于耕作层富集。另外,根系土中 Se 与 As、Cd、Cr、Hg 等重金属元素存在伴生关系。

3) 研究区水稻籽实 Se_R 与根系土 Se_s 呈显著正相关关系,而水稻籽实硒富集系数(K_R)与根系土 Se_s 、As、Cd、Cr、Hg、Ni、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、有机质等呈显著负相关关系,说明土壤有机质及铁铝氧化物对硒的吸附和固定作用降低了水稻对硒的吸收利用率,硒与重金属元素在土壤—稻米系统中的吸收运移可能表现为一定拮抗作用。

4) 研究区富硒耕地土资源丰富,具备发展绿色富硒农业的天然优势,但水稻籽实存在 Cr、Cd 元素超标的风险,因此在发展富硒农业时应关注土壤重金属元素的生态效应。

参考文献 (References):

[1] Patrick L. Selenium biochemistry and cancer: A review of the literature [J]. *Alternative Medicine Review*, 2004, 9(3): 239–258.

[2] 葛晓立,李家熙,万国江,等. 张家口克山病地区土壤硒的地球化学形态研究[J]. *岩矿测试*, 2000, 19(4): 254–258.

Ge X L, Li J X, Wan G J, et al. Study on characteristics of selenium geochemical speciation in soil in Zhangjiakou Keshan disease area[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2000, 19(4): 254–258.

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

[4] Fordyce F M. Selenium deficiency and toxicity in the environment [G]// Aolle Selinus. *Essentials of Medical Geology*. Uppsala, Dordrecht: Springer, 2013: 375–416.

[5] 周墨,陈国光,张明,等. 赣南地区土壤硒元素地球化学特征及其影响因素研究:以青塘—梅窑地区为例[J]. *现代地质*, 2018(6): 1292–1301.

Zhou M, Chen G G, Zhang M, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soils of south Jiangxi Province: A typical area of Qingtang-Meiyao[J]. *Geoscience*, 2018, 32(6): 1292–1301.

[6] 周文龙,张涛,吴昭阳,等. 黔南荔波地区耕地土壤中硒的分布特征及影响因素分析[J]. *贵州地质*, 2020, 37(3): 313–319.

Zhou W L, Zhang T, Wu Z Y, et al. Characteristics of soil selenium distribution of cultivated land and its influential factors in Libo of South Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 2020, 37(3): 313–319.

[7] 蔡大为,李龙波,蒋国才,等. 贵州耕地主要元素地球化学背景值统计与分析[J]. *贵州地质*, 2020, 37(3): 233–239.

Cai W, Li L B, Jiang G C, et al. Statistics and analysis of geochemical background of main elements of cultivated land in Guizhou Province[J]. *Guizhou Geology*, 2020, 37(3): 233–239.

[8] Matos R P, Lima V M P, Windmoller C C, et al. Correlation between the natural levels of selenium and soil physiochemical characteristics from Jequitinhonha Vally (MG), Brazil [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 172: 195–202.

[9] Samazíková P, Praus L, Szúková J, et al. The effect of organic matter rich amendments on selenium mobility in soil [J]. *Pedosphere*, 2017, 24(9): 1–11.

[10] 付中彪,何宁洁,鲍征宇,等. 赣南地区水稻—根系土系统中硒含量影响因素分析[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(5): 220–229.

Fu Z B, He N H, Bao Z Y, et al. Analysis of influencing factors of selenium content in rice-root soil system in Southern Jiangxi [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(5): 220–229.

[11] 姜超强,沈嘉,祖朝龙. 水稻对天然富硒土壤硒的吸收及转运[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 809–816.

Jiang C Q, Shen J, Zu C L, et al. Selenium uptake and transport of rice under different Se-enriched natural soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 809–816.

[12] 陈锦平,刘永贤,潘丽萍,等. 潯郁平原不同作物的硒富集特征及其影响因素[J]. *土壤*, 2018, 50(6): 1155–1159.

Chen J P, Liu Y X, Pan L P, et al. Selenium accumulation characteristics and its influencing factors of different crops in Xunyu Plain[J]. *Soils*, 2018, 50(6): 1155–1159.

[13] 章倩. 海南西部土壤—水稻系统硒分布特征[D]. 海口:海南大学, 2013.

Zhang Q. Distribution of Se in Soil-rice systems in West Part of Hainan Island[D]. Haikou: Hainan University, 2013.

[14] 中国环境监测总站. 中国土壤元素平均值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

China Environmental Monitoring Station. Average value of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.

[15] 张宝军,杨林生,王五一,等. 大骨节病区土壤元素分布特征及其与病情的关系:以四川省塘县为例[J]. *土壤学报*, 2011, 48(2): 230–237.

Zhang B J, Yang L S, Wang W Y, et al. Distribution of soil elements and its relationship with kaschin-back disease in KBD afflicted regions: A case study of Rangtang County, Sichuan Province [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 230-237.

[16] 张靖源,陈剑平,黄绍华,等. 广西鹿寨水稻及其种植土壤中硒质量分数分布特征[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.

[17] 张栋,翟勇,张妮,等. 新疆水稻主产区土壤硒含量与水稻籽粒硒含量的相关性[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(1): 139-143.

Zhang D, Zhai Y, Zhang N, et al. Correlation between soil selenium content and rice grain selenium content in Xinjiang rice production areas[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2017(1): 139-143.

[18] 吴永尧,彭振坤,罗泽民. 水稻对硒的生物富集作用动态研究[J]. *华中师范大学学报:自然科学版*, 1998, 32(4): 490-494.

Wu Y Y, Peng Z K, Luo Z M. Research on the dynamics of bioaccumulation of Se in rice[J]. *Journal of Central China Normal University: Natural Science Edition*, 1998, 32(4): 490-494.

[19] Wang Z J, Gao Y X. Biogeochemical cycling of selenium in Chinese environments [J]. *Applied Geochemical*, 2001, 16(11/12): 1345-1351.

[20] Huang S, Hua M, Feng J, et al. Assessment of selenium pollution in agriculture soil in the Xuzhou District, Northwest Jiangsu, China [J]. *Journal Environment Science*, 2009, 21(4): 481-487.

[21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. GB 2726—2017 食品安全国家标准食品中污染物限量[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.

National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. GB 2726—2017 National Food Safety Standard Limits of Contaminants in Foods[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.

[22] 李杰,朱立新,康志强. 南宁市郊周边农田土壤—农作物系统重金属元素迁移特征及其影响因素[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 43-52.

Li J, Zhu L X, Kang Z Q. Characteristics of transfer and their influencing factors of heavy metals soil-crop system of peri-urban agricultural soil of Nanning, South China [J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 43-52.

[23] 胡艳华,王加恩,蔡子华,等. 浙北嘉善地区土壤硒的含量、分布及其影响因素初探[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(6): 84-88.

Hu Y H, Wang J E, Cai Z H, et al. Content, distribution and influencing factors of selenium in soil of Jiashan Area, Northern Zhejiang Province [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(6): 84-88.

[24] 刘永贤,陈锦平,潘雨萍,等. 浔郁平原富硒土壤成因及其影响因素研究[J]. *土壤*, 2018, 50(6): 1139-1144.

Liu Y X, Chen J P, Pan L P, et al. Studies on causes and influential factors of selenium-rich Soil in Xunyu Plain[J]. *Soils*, 2018, 50(6): 1139-1144.

[25] Yang Z F, Tao Y U, Hou Q Y, et al. Geochemical characteristics of soil selenium in farmland of Hainan island [J]. *Geoscience*, 2012, 26(5): 837-849.

[26] 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, 33(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, 33(1): 105-112.

[27] Supriatin S, Weng L, Comans R N J. Selenium-rich dissolved organic matter determines selenium uptake in wheat grown on low-selenium arable land soil [J]. *Plant and Soil*, 2016, 408(1/2): 76-94.

[28] Matos R P, Lima V M P, Windmoller C C, et al. Correlation between the nature levels of selenium and soil physicochemical characteristics from the Jequitinhonha Valley (MG), Brazil [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 172: 195-202.

[29] 徐文波,朱建明,秦海波,等. 铁/锰和铝氧化物吸附硒的行为研究[J]. *矿物学报*, 2017, 37(3): 357-365.

Xu W P, Zhu J M, Qin H B, et al. A study on selenium oxyanions adsorbed onto Iron/Manganese/Aluminum oxides [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017, 37(3): 357-365.

[30] Winkel L H, Johnson C A, Lenz M, et al. Environment selenium research; From microscopic to global understanding [J]. *Environment Science & Technology*, 2012, 46(2): 571-579.

[31] 吴永尧,罗泽民,彭振坤. 水稻对硒的生物富集分布[J]. *湖南师范大学:自然科学学报*, 1998, 21(4): 76-79.

Wu Y Y, Luo Z M, Peng Z K. Studies of the selenium bioaccumulation and distribution in rice[J]. *Journal of Natural Science of Human Normal University*, 1998, 21(4): 76-79.

[32] Johnsson L. Selenium uptake by plants as a function of soil type, organic matter content and pH [J]. *Plant and Soil*, 1991, 133(1): 57-64.

[33] 罗杰,王佳媛,游远航,等. 硒在土壤—水稻系统中的迁移转化规律[J]. *西南师范大学学报:自然科学版*, 2012, 37(3): 60-66.

Luo J, Wang J Y, You Y H, et al. Migration and transformation of Se in the soil-rice system [J]. *Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition*, 2012, 37(3): 60-66.

[34] Liu J, Peng Q, Liang D L, et al. Effect of aging on the fraction distribution and bioavailability of selenium in three different soils [J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 2351-2359.

[35] Li Z, Liang D, 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.

[36] 周小娟,张嫣,祝莉玲,等. 武汉市侏儒—消泗地区农田系统中硒的分布特征及有效性研究[J]. *地质科技情报*, 2016, 35(4): 158-163.

Zhou X J, Zhang Y, Zhu L L et al. Research on selenium distribution and effectiveness in the farm system in Zhuru and Xiaosi areas, Wuhan City [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(4): 158-163.

[37] 刘帅,吴志超,赵亚荣,等. 外源硒对镉胁迫下菜心 Fe、Mn、Cu、Zn 吸收与转运的影响[J]. 农业环境科学学报,2018,37(3):431-439.
Liu S, Wu Z C, Zhao Y R, et al. Effects of selenium on the uptake and transport of trace elements by cadmium-stressed flowering Chinese cabbage[J]. Journal of Agro-Environment Science,2018,37(3):431-439.

[38] Kikkert J, Berkelaar E. Plant uptake and translocation of inorganic forms Slenium [J]. Archives of Environment Contamination & Toxicology, 2013, 65(3): 485-465.

[39] Djanaguiraman M, Devi D D, Shanker A K, et al. Selenium-an

antioxidative protectant in soybean during senescence [J]. Pant & Soil, 2005, 272(1/2): 77-86.

[40] Shanker K, Srivastava M M. Uptake and translocation of selenium by maize (Zea mays) from its environmentally important forms [J]. Journal Environmental Biology, 2001, 22(3): 225-228.

[41] Zhang Y, Pan G, Chen J, et al. Uptake and transport of selenite and selenite by soybean seedlings of two genotypes [J]. Plant and Soil, 2003, 253(2): 437-443.

[42] Wang D, Zhou F, Yang W, et al. Selenium redistribution during aging in different Chinese soil and the dominant influential factors [J]. Chemosphere, 2017, 182: 284-292.

An analysis of factors influencing the selenium content in the rice-root soil system in Libo County, southern Guizhou Province

ZHOU Wen-Long, YANG Zhi-Zhong, ZHANG Tao, MANG Shi-Cai, YANG Zheng-Kun

(Institute of Geology and Mineral Resources Exploration, Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, China)

Abstract: Selenium (Se), one of the trace elements essential to human body, plays an antagonistic role toward the toxicity of heavy metals. The most important, safe, and feasible way for human body to take Se is to transform Se via food chain. This study collected and analyzed 30 groups of samples of rice seeds and corresponding root soil from the natural high-quality Se-rich farmland that is widely distributed in Libo County. Based on this, this study evaluated the edible safety of rice, studied the selenium content in the rice-root soil system, and investigated the influence of the physical and chemical conditions of soil on rice’s absorption and transport of selenium, aiming to provide a scientific basis for the development of Se-rich agriculture in the study area. The results are as follows. Most root soil of rice in the study area is Se-rich, with an average Se content of 0.41×10^{-6} . The rice in the study area has an average $w(\text{Se})$ of 0.0307×10^{-6} , and green and safe rice accounted for 70%. For the root soil of rice in the study area, there is a significant positive correlation between $w(\text{Se})$ and $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$, $w(\text{MgO})$, and $w(\text{organic matter})$, and there is associated relationship between $w(\text{Se})$ and some heavy metals including Cr and Cd. There was a significant positive correlation between Se content of rice seeds and that of root soil. By contrast, there is a significant negative correlation between the Se enrichment coefficient of rice and the contents of Se, As, Cd, Cr, Hg, Ni, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , and organic matter in root soil. The results indicate that the absorption and fixation of Se by the organic matter and Fe-Al oxides in soil reduce rice’s absorption and utilization rate of selenium. The negative correlation between Se enrichment coefficient of rice and the heavy metal contents of root soil suggests that Se may play a certain antagonistic role toward the absorption and transport of heavy metals in the soil-rice system. The study area is rich in Se-rich farmland resources, yet there is a risk that the contents of Cr and Cd in rice slightly exceeds relevant standards. Therefore, it is necessary to pay attention to the ecological effects of heavy metal elements in the development of Se-rich agriculture in the study area.

Key words: selenium(Se); rice; root soil; heavy metals; selenium-enriched agriculture; Libo County, southern Guizhou Province

(本文编辑:蒋实)