

doi: 10.12029/gc20220618001

张俊, 戴亮亮, 巩浩, 彭志刚, 许青阳, 胡向荣, 贺灿, 吴文彬, 陈伟, 曾剑. 2025. 基于预测农作物 Se 含量构建富硒土地质量评价体系——以湖南龙山县为例[J]. 中国地质, 52(1): 362–371.

Zhang Jun, Dai Liangliang, Gong Hao, Peng Zhigang, Xu Qingyang, Hu Xiangrong, He Can, Wu Wenbin, Chen Wei, Zeng Jian. 2025. Construction of Se-enriched land quality evaluation system based on predicted Se content in crops: A case study of Longshan County, Hunan Province[J]. Geology in China, 52(1): 362–371(in Chinese with English abstract).

基于预测农作物 Se 含量构建富硒土地质量评价体系 ——以湖南龙山县为例

张俊, 戴亮亮, 巩浩, 彭志刚, 许青阳, 胡向荣, 贺灿, 吴文彬, 陈伟, 曾剑

(中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南长沙 410600)

摘要:【研究目的】硒(Se)是人体必需的微量元素之一。富硒土地和富硒农产品的开发利用成为了乡村振兴的重要实践, 但仅根据土壤 Se 含量难以准确地指导地方政府进行富硒土地资源开发。【研究方法】本文以湖南省龙山县西北部作为研究区, 基于 1:50000 土地质量地球化学调查数据和全国土地调查成果数据探讨了水稻 Se 生物富集系数的影响因素, 并据此建立了水稻籽实 Se 含量多元线性回归预测模型, 结合耕地地力和环境质量提出了富硒土地质量评价体系。【研究结果】(1)研究区土壤 Se 含量为 0.19~0.84 mg/kg, 平均值 0.48 mg/kg, 水稻籽实 Se 含量为 0.02~0.23 mg/kg, 平均值 0.10 mg/kg, 水稻籽实富硒率为 83%。(2)水稻籽实 Se 生物富集系数与土壤 Cd、S 和 TC 呈极显著负相关关系, 相关系数分别-0.617、-0.452 和-0.574。(3)区划结果显示, 研究区以无公害富硒中高产耕地为主, 面积占比 78%, 无公害中高产耕地和无公害低产耕地面积相对较小, 面积分别占 13% 和 4%; 安全利用富 Se 耕地和谨慎利用耕地面积分别占 4% 和 1%。【结论】在科学预测农作物籽实 Se 元素含量的基础上, 本文构建了一种基于农作物富 Se 水平、耕地地力和环境质量的地块尺度富 Se 土地质量评价体系, 对地方政府进行富 Se 土地资源开发利用具有重要参考示范意义。

关键词: 硒; 富 Se 水稻; 预测模型; 富硒土地; 区划方法; 土壤地球化学调查工程; 龙山县; 湖南省

创新点: 利用土壤理化性质与 Se 生物富集系数的密切联系, 建立了农作物籽实 Se 含量预测模型, 构建了一种基于农作物富 Se 水平、耕地地力等级和耕地环境质量的地块尺度富 Se 土地质量评价体系。

中图分类号: S511 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)01-0362-10

Construction of Se-enriched land quality evaluation system based on predicted Se content in crops: A case study of Longshan County, Hunan Province

ZHANG Jun, DAI Liangliang, GONG Hao, PENG Zhigang, XU Qingyang, HU Xiangrong,
HE Can, WU Wenbin, CHEN Wei, ZENG Jian

(Changsha General Survey of Natural Resources Center, Changsha 410600, Hunan, China)

收稿日期: 2022-06-18; 改回日期: 2022-08-26

基金项目: 中国地质调查局项目“湘西片区土地质量地球化学调查”(DD20211576)资助。

作者简介: 张俊, 男, 1999 年生, 助理工程师, 主要从事环境地球化学研究; E-mail: 2463707356@qq.com。

通信作者: 戴亮亮, 男, 1993 年生, 工程师, 主要从事环境地球化学、生态地球地球化学研究; E-mail: dailiangliang@mail.cgs.gov.cn。

Abstract: This paper is the result of soil geochemical survey engineering.

[Objective] Selenium (Se) is one of the essential trace elements for human body. The development and utilization of Se-rich land and Se-rich agricultural products have become a pivotal practice in rural revitalization. Nonetheless, it is challenging to accurately guide the local government to develop Se-rich land resources in accordance with nothing more than the content of Se in soil. **[Methods]** The northwestern part of Longshan County, Hunan Province were selected as the explored area in this paper. The influencing factors of Se bioconcentration factors of rice were systematically and comprehensively explored on the basis of 1 : 50000 land quality geochemical survey data and national land survey results data. Accordingly, the prediction model of Se bioconcentration factors of rice was established. Aside from that, the Se-rich land quality evaluation system was put forth by integrating with land fertility and ecological environment. **[Results]** (1) The soil Se content was 0.19–0.84 mg/kg, with an average value of 0.48 mg/kg. The Se content of rice seeds was 0.02–0.23 mg/kg, with an average value of 0.10 mg/kg, and the Se-rich rate of rice seeds was 82%. (2) The Se bioconcentration factors of rice seeds displayed negative association with soil Cd, S, and TC, among which the correlation coefficients were -0.617 , -0.452 , and -0.574 , separately. (3) As suggested by the zoning results, the pollution-free medium-high yield cultivated land with Se enrichment in the explored area accounts for 78%; The pollution-free medium-high yield cultivated land, the pollution-free low yield cultivated land, the cultivated land of safe utilization, the cultivated land of prudent utilization account for 13%, 4%, 4% and 1%, respectively. **[Conclusions]** On the basis of scientific prediction of crop seeds Se content, a block scale Se-rich land quality evaluation system was innovatively constructed based on Se content of crops, land fertility and ecological environment in this paper. On this basis, this research is expected to offer paramount reference and demonstration significance for local governments to develop Se-rich land resources.

Key words: selenium; Se-rich rice; predictive model; Se-rich land; zoning method; soil geochemical survey engineering; Longshan County; Hunan Province

Highlights: A prediction model of Se content in crop seeds was constructed based upon the close relationship between soil physical and chemical properties and the Se bioconcentration factor. A block scale Se-rich land quality evaluation system was constructed in line with Se content of crops, land fertility and ecological environment.

About the first author: ZHANG Jun, male, born in 1999, assistant engineer, mainly engaged in environmental geochemistry; E-mail: 2463707356@qq.com.

About the corresponding author: DAI Liangliang, male, born in 1993, engineer, mainly engaged in environmental geochemistry, ecological geochemistry research; E-mail: dailiangliang@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey “Land Quality Geological Survey in Western Hunan” (No. DD20211576).

1 引 言

Se 是人体必需的微量元素之一(黄冰霞等, 2019), 人体对 Se 的摄入不足会处于不健康或亚健康状态, 并引发多种疾病。据统计, 中国人群 Se 摄入量为 $13.3 \mu\text{g}/\text{d}$ (周国华, 2020), 远低于中国营养学会对成年人摄入量 $60\sim 400 \mu\text{g}/\text{d}$ 的推荐值。目前, 通过食物摄入补充人体 Se 元素是一条安全有效的途径。大米是中国最重要的主食之一(刘冰权等, 2021), 而大米 Se 含量普遍不高(平均值为 $0.032 \text{ mg}/\text{kg}$)(张栋等, 2017), 在很大程度上限制了人体对 Se 的摄入, 因此利用富 Se 土地种植天然富 Se 农产品具有重要意义。

由于农作物吸收土壤 Se 的影响因素十分复杂, 仅依靠土壤 Se 含量进行富 Se 土地区划存在一定的局限性(马旭东等, 2022)。为此, 部分学者利用土壤理化指标与 Se 生物富集系数的密切联系, 构建了农作物籽实 Se 含量的预测模型, 提高了富 Se 土地资源开发规划的准确性(Gu et al., 2019)。但此类富 Se 土地评价多针对土壤 Se 含量和预测农作物 Se 含量来展开, 缺乏土地地力评价和环境质量评价, 导致难以全面准确地指导地方政府进行富 Se 土地开发(徐雪生等, 2022)。因此, 在科学预测农作物籽实 Se 元素含量的基础上, 提出一种既考虑农作物籽实富 Se 水平, 又兼顾土地地力条件和环境质量状况的富 Se 土地评价方案, 精细指导

地方政府进行富硒产业规划成为了目前亟待解决的科学问题。

本文以湖南省龙山县西北部为研究区,利用 1:50000 土地质量地球化学调查取得的土壤水稻数据和全国土地调查成果数据,在研究土壤水稻籽实 Se 分布规律和水稻 Se 生物富集系数影响因素的基础上,建立水稻籽实 Se 含量预测模型,预测出水稻籽实 Se 含量,再结合地块耕地地力等级和环境质量状况进行地块尺度的富 Se 耕地区划。研究成果对地方政府进行富 Se 土地资源开发利用具有重要参考示范意义。

2 材料与方 法

2.1 研究区概况及样品采集

研究区位于湖南省龙山县西北部石羔街道,处于 109°24'E~109°29'E, 29°27'N~29°34'N, 区内地势由西北向东南逐渐升高, 出露地层主要为白垩系砂质泥岩和砾岩等陆源碎屑岩地层以及沿着酉水河南侧分布的第四系冲洪积松散堆积物(图 1)。研究区雨热同期, 四季分明, 属亚热带季风湿润气候, 土地利用类型以集中连片分布的耕地为主。

按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)相关规定, 在研究区内共采集 1:50000 表层土壤样品 174 件, 水稻样品 35 件。采集土壤样品时, 在采样点周围 100 m 或更大范围内用梅花形布点法或蛇形布点法等量采集 3~5 个子样, 通过缩分组成一个样品。农作物样品于作物集中成熟期采集, 同时还采集对应农作物根系土, 其采集深度 0~20 cm。

土壤样品过 20 目的孔径筛后混匀称重, 再用混匀法(四分法)对样品进行分解。对于新鲜动植物样品, 按照《食品安全国家标准食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016)的要求进行样品加工, 对于谷物等低含水量样品, 取可食部分, 经高速粉碎机粉碎均匀, 保存待测。

2.2 样品分析测试

本次分析测试由湖北省地质实验测试中心(自然资源部武汉矿产资源监督检测中心)完成, 具体分析方法和检出限如表 1 所示。土壤样品分析时候插入 12 个国家一级标准物质, 水稻籽实样品插入 2 个国家一级标准物质进行准确度和精密度控制, 计算测定值与标准值的绝对偏差, 所有标准物

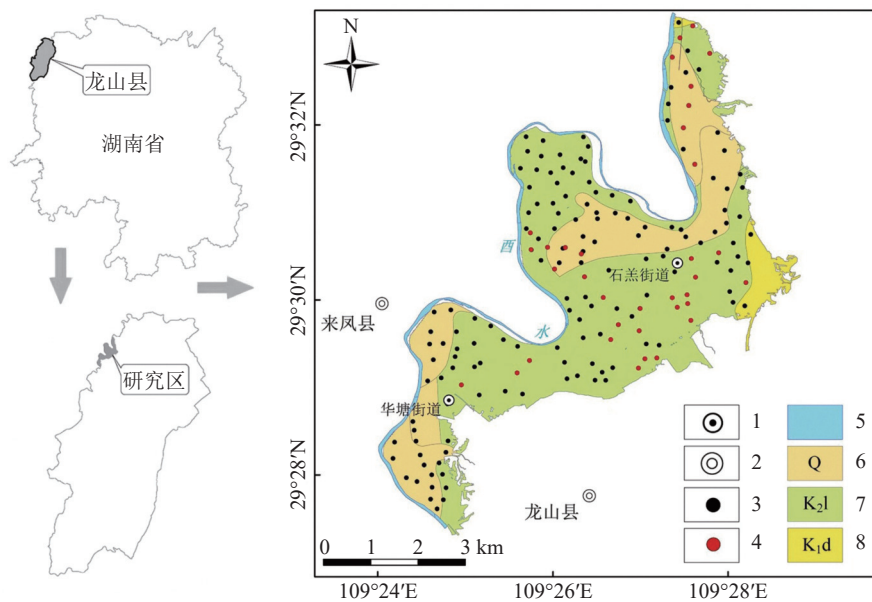


图 1 研究区地理位置及采样点位图

1—乡镇位置; 2—县政府驻地; 3—表层土采样点位; 4—水稻采样点位; 5—河流; 6—第四系; 7—上白垩统栏垅组; 8—下白垩统东井组

Fig.1 Location and sampling map of the study area

1—Township location; 2—County government station; 3—Sampling sites of topsoil; 4—Sampling sites of rice; 5—River; 6—Quaternary; 7—Upper Cretaceous Lanlong Formation; 8—Lower Cretaceous Dongjing Formation

表 1 样品分析及检出限

Table 1 Analysis methods and detect limits of samples

样品类型	分析方法	测定元素或指标	规范检出限	分析方法检出限
土壤	X射线荧光光谱法 (XRF)	SiO ₂	0.1	0.05
		Al ₂ O ₃	0.05	0.03
	高频燃烧红外吸收法 (HFIR)	S	30	15
		TC	0.1	0.02
	电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)	Cd	0.03	0.02
离子选择性电极 (ISE)	pH	0.1	0.01	
水稻	原子荧光光谱法(AFS)	Se	0.01	0.01
	原子荧光光谱法(AFS)	Se	-	0.005

注: SiO₂、Al₂O₃、TC检出限单位为%, S、Cd、Se检出限单位为 mg/kg, pH无量纲。

质测定值与标准物质推荐值之间的相对误差均小于 10%, 测定值的准确度和精密度合格率均为 100%。另随机抽取样品总数的 5% 编为密码样进行重复性检验, 计算基本分析结果和重复性检验数据之间的相对双差, 检验测试数据质量, 土壤样品重复性检验总合格率均大于 98%, 符合规范要求。综上, 各分析方法的检出限、准确度和精密度均符合《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)要求, 分析质量可靠。

3 结果与讨论

3.1 研究区土壤 Se 含量特征

研究区表层土壤 Se 含量范围为 0.19~0.84 mg/kg, 平均值 0.48 mg/kg, 高于中国表层土壤 Se 背景值 (0.26 mg/kg) 和湖南省表层土壤 Se 背景值 (0.45 mg/kg) (侯青叶等, 2020), 是全国表层土壤背景值的 2.24 倍。从研究区表层土壤 Se 含量空间分布特征 (图 2) 来看, 研究区表层土壤 Se 含量由低到高总体上沿东南-西北走向展布。此外, 研究区内表层土壤 Se 含量的变异系数 CV 值为 26%, 说明工作区内表层土壤 Se 含量相对均匀, 含量变化差异不是很明显。

按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)的评价标准, 本文对研究区土壤 Se 元素含量进行分级。如表 2 所示, 绝大部分表层土壤样品 Se 含量范围在 0.4~3.0 mg/kg, 即是说绝大部分表层土壤样品 Se 含量等级为高, 所占比例为 72%。表明研究区存在丰富的富 Se 土壤资源, 具有广阔的开发前景, 不存在硒缺乏现象。

3.2 水稻籽实及根系土中 Se 含量

根据国家标准《富硒稻谷》(GB/T 22499—2008)

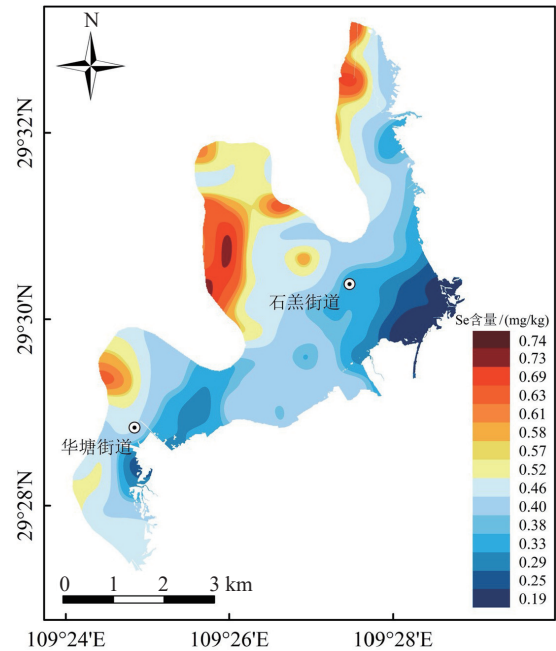


图 2 表层土壤 Se 含量空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution characteristics of Se contents in surface soil

表 2 表层土壤 Se 含量分级标准及统计

Table 2 Classification standard and statistics of Se content in top soil

硒含量范围/(mg/kg)	硒含量分级	样品数/件	所占比例/%
<0.125	缺乏	0	0
0.125~<0.175	边缘	0	0
0.175~<0.4	适量	49	28
0.4~<3.0	高	125	72
≥3.0	过剩	0	0

规定, 将水稻籽实 Se 含量 0.04~0.30 mg/kg 作为富 Se 水稻参考值。研究区水稻籽实及根系土 Se 含量 (表 3) 显示, 根系土 Se 含量范围为 0.25~0.75 mg/kg, 平均值为 0.45 mg/kg; 水稻籽实 Se 含量范围为 0.02~0.23 mg/kg, 平均含量为 0.10 mg/kg, 研究区水

表3 水稻籽实与根系土 Se 含量 (mg/kg)

Table 3 Se content (mg/kg) of rice seeds and rhizosphere soil

种类	样品数	最大值	最小值	平均值	标准差	富硒率
水稻	籽实	35	0.23	0.02	0.10	0.06
	根系土	35	0.75	0.25	0.45	0.20

注: 富Se率=(富Se样本数/总样本数)×100%。

稻籽实富 Se 率为 83%, 仅有 3 件水稻样品 Se 含量低于 0.04 mg/kg, 说明研究区水稻籽实中 Se 含量十分丰富, 有开发富 Se 稻米的巨大潜力。

3.3 水稻籽实吸收 Se 影响因素

元素生物富集系数就是某元素在生物体内的含量与该元素在环境(以土壤为主)中含量的比值, 是评价元素从土壤到农作物迁移的重要指标, 反映了土壤-农作物系统中元素迁移的难易程度(廖启林等, 2013; 王吉秀等, 2013; 窦韦强等, 2021), 是一个无量纲数据(方如康, 2003)。生物富集系数计算公式如下:

$$BCF_i = \frac{C_i \text{作物籽实}}{C_i \text{根系土}} \quad (1)$$

式中, BCF_i (Bioconcentration factor) 是元素 i 的生物富集系数; C_i 作物籽实是作物籽实中 i 元素的含量; C_i 根系土是根系土中 i 元素的含量。

根据式(1), 可得研究区水稻 Se 生物富集系数范围为 0.05~0.67, 平均值为 0.22。影响农作物吸收 Se 等微量元素的因素非常复杂, 既与农作物种类、品种和农业活动有关, 又与土壤中微量元素赋存状态以及土壤理化性质密切相关(陈雪龙等, 2012; 袁知洋等, 2017)。

由图3可以看出, 水稻籽实和根系土中 Se 含

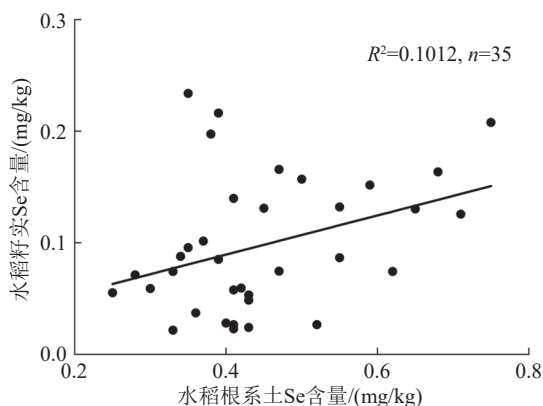


图3 水稻籽实 Se 与土壤 Se 含量散点图

Fig.3 Scatter plot of Se content in rice and rhizosphere soil

量相关性一般, 这说明水稻籽实中 Se 含量水平并不简单地取决于土壤 Se 含量, 还受到土壤其他组分含量的影响。研究表明, 水稻吸收土壤 Se 主要受土壤理化性质的影响, 如有机质、氧化物及土壤 pH 等(吴俊, 2018; 陈秋菊等, 2019; 袁知洋等, 2019; 付中彪等, 2019; 周文龙等, 2022)。

利用 SPSS 软件对水稻籽实 Se 生物富集系数与土壤理化指标进行相关分析, 结果如表4所示, 水稻籽实 Se 生物富集系数仅与土壤 S、Cd 和 TC 呈 0.01 水平显著负相关。Se 是典型的亲硫元素, 无论是在土壤还是在动植物体中, 都普遍存在 Se 和 S 的相互作用。相关研究表明, 植物对 Se 的吸收是通过硫酸盐转运, S 对 Se 生物有效性的影响是双向的(王晓芳等, 2014)。当土壤 S 含量较低时, 硒酸盐与硫酸盐表现为协同作用; 当土壤 S 含量较高时, 硒酸盐与硫酸盐则表现为拮抗作用, 其主要原因是当土壤 S 和 Se 含量较高时, 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, 而当土壤 S 和 Se 含量较低时, SO_4^{2-} 与 SeO_4^{2-} 同时进入植物体内, 表现为协同作用(Girling, 1984)。水稻籽实 Se 生物富集系数与土壤 Cd 呈显著负相关, 有研究表明, 土壤硒与重金属存在一定的拮抗关系, 硒的高含量能抑制生物对重金属的吸收, 降低重金属的毒性(Wan et al., 2016; 王锐等, 2019), 在高硒环境下, 稻谷对重金属的吸收能力显著下降(刘冰权等, 2021)。水稻籽实 Se 富集系数与 TC 呈显著负相关, 主要原因可能是 TC 可以将 Se 吸附或与 Se 发生配位反应形成螯合物, 对土壤中的 Se 具有固定作用, 从而抑制农作物对 Se 的吸收(Wang et al., 2016)。

3.4 水稻籽实 Se 富集系数预测模型的构建

利用研究区水稻籽实和对应根系土的数据, 构建水稻籽实 Se 富集系数预测模型, 选取与水稻籽实 Se 富集系数显著相关的 S、Cd、TC 作为预测变量, 为减少由于变量数值大小对方程的影响、消除量纲的影响, 采用对数模型。随机选取 25 套水

表 4 Se 的生物富集系数与土壤理化指标相关系数

Table 4 Association coefficients of BCF_{Se} with soil physicochemical properties

	Cd	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	TC	pH	BCF
Cd	1						
SiO ₂	-0.510**	1					
Al ₂ O ₃	0.290	-0.830**	1				
S	0.408*	-0.094	-0.049	1			
TC	0.220*	-0.079	0.068	0.423*	1		
pH	0.601**	-0.507**	0.273	0.065	0.178	1	
BCF	-0.617**	0.337*	-0.337*	-0.452**	-0.574**	-0.263	1

注: *为 $P<0.05$, **为 $P<0.01$ 。

稻籽实及其对应根系土样品进行多元线性回归建模,再用剩余的 10 套样品对建立的模型进行验证,得到水稻籽实 Se 富集系数多元回归模型为 $\lg BCF_{Se} = -0.277\lg S - 1.141\lg Cd - 1.193\lg TC - 1.95$ 。

F 检验通过比较两组数据的方差确定数据是否有显著性差异, F 值与给定显著水平的标准 F 值相比越大,说明随机误差越小,处理效果越明显(郭鸿飞, 2019; 王锐等, 2020)。对预测模型进行 F 检验, $F=11.149 > F_{0.01, 3, 24}=4.718$, 说明回归方程通过了 0.01 水平下的显著性检验。预测模型的相关系数 R 为 0.763, 说明方程拟合性良好。归一化平均误差(NME)代表模型得出的预测值与实测值之间的平均偏差(式 2), 可以体现模型的准确度; 归一化均方根差(NRMSE)代表模型得出的预测值与实测值之间的偏离程度(式 3), 可以体现模型的精确度(Vries et al., 2011)。

$$NME = \frac{\bar{e} - \bar{o}}{\bar{o}} \quad (2)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - o_i)^2}}{\bar{o}} \quad (3)$$

式中, \bar{e} 和 \bar{o} 分别代表水稻籽实 Se 富集系数的预测值平均值与实测值平均值; e_i 和 o_i 分别代表了第 i 件样品水稻籽实 Se 富集系数的预测值与实测值; n 代表样品数量。NME 绝对值和 NRMSE 值越小, 说明水稻籽实 Se 富集模型准确度、精密度高。

水稻籽实 Se 富集预测模型的归一化平均误差为 0.0743, 归一化均方根差为 0.302, 说明水稻籽实 Se 富集模型的准确度和精确度都比较好。利用测试集数据对模型进行检验, 结果(图 4)显示水稻 Se 的预测值与实测值相关性良好, 相关系数 R 为 0.712, 且方程斜率接近 1, 表明所建的模型能够较好地预测水稻籽实 Se 含量。

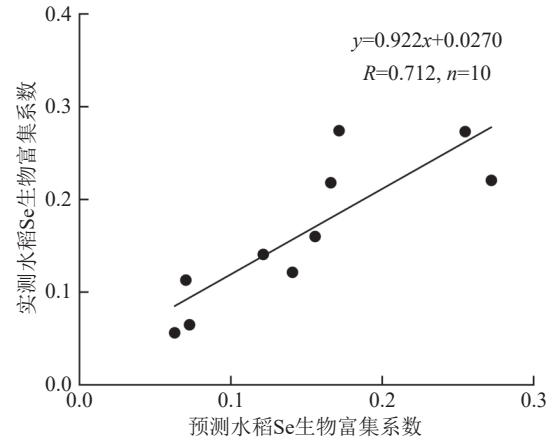


图 4 水稻 Se 含量预测值和实测值相关关系图

Fig.4 Correlation diagram between of predictive values and measured values of Se contents in rice

利用采集的表层土壤 S、Cd、TC 含量数据, 通过 GeoIPAS 软件土地质量地球化学调查模块, 运用幂指数加权法进行地块插值, 保证研究区每一个地块内至少有一个实测点或插值点, 再将所有地块的土壤 S、Cd、TC 含量数据代入所建立的水稻籽实 Se 富集模型, 得出研究区水稻籽实 Se 富集系数, 再结合土壤 Se 含量, 计算出研究区地块水稻籽实 Se 含量。

3.5 地块尺度的富硒耕地质量评价

为更准确进行富 Se 土地区划, 指导地方政府进行富 Se 农业产业规划, 本研究提出了一种基于农作物富 Se 水平、耕地地力等级和耕地环境质量的地块尺度富 Se 土地质量评价方案。按照水稻籽实 Se 含量是否大于 0.04 mg/kg 判定水稻籽实是否富 Se, 耕地地力等级和耕地环境质量等级根据徐雪生等(2022)提出的耕地质量评价体系进行判定。首先, 根据耕地的立地条件、土壤理化性质、土壤养分和土地管理水平对每一块耕地图斑的地力等级进行综合判定, 然后根据《土地质量地球化学评价规

范》(DZ/T 0295—2016)确定土壤环境单指标分级标准,以土壤环境单指标最差等级确定土壤环境综合等级,本研究土壤环境单指标选择 Cd、Hg、As、Pb、Cr 五种主要土壤重金属(陈文轩等,2020),最后选择建模预测的水稻籽实 Se 含量作为农作物富硒水平评价指标,富 Se 耕地质量评价指标及对应权重见表 5。对每一地块的农作物富 Se 水平、耕地地力等级和耕地环境质量进行叠加评价,按照农作物富 Se 水平和环境质量占主导,耕地地力等级为次要的原则,将研究区耕地划分为无公害富硒中高产耕地、无公害中高产耕地、无公害低产耕地、安全利用富 Se 耕地和谨慎利用耕地五大类,划分标准见表 6。

研究区地块尺度的富 Se 耕地质量评价结果(图 5)显示,主要以无公害富 Se 中高产耕地(1 等)为主,面积为 11.23 km²,占比 78%,集中连片分布,富 Se 开发潜力巨大;无公害中高产耕地(2 等)和无公害低产耕地(3 等)面积相对较小,分别占 13% 和 4%;潜在可开发富 Se 耕地(4 等)和谨慎利用耕地(5 等)面积分别占 4% 和 1%,呈零星点状分布。对

于无公害富 Se 中高产耕地应加强土壤质量和土壤及农作物富 Se 监测,防止新的外源污染输入,并进行富 Se 土地和富 Se 农产品开发(蔡海生等,2020)。对于无公害中高产耕地和无公害低产耕地,建议采取地力提升措施,提高土壤肥力。对于安全利用富 Se 耕地和谨慎利用耕地,一方面应进行土壤酸碱度调控,降低土壤重金属活性(王锐等,2022),另一方面建议种植农作物重金属低积累品种,进而降低 Cd 的生态风险(陈小华等,2019)。

4 结 论

(1)研究区土壤 Se 含量为 0.19~0.84 mg/kg,平均值为 0.48 mg/kg,是全国表层土壤的 2.24 倍。水稻籽实 Se 含量为 0.02~0.23 mg/kg,平均含量为 0.10 mg/kg,富 Se 率为 83%,表明研究区水稻籽实中 Se 含量相对较高,具备开发富 Se 水稻的潜力。

(2)相关分析表明,水稻籽实 Se 生物富集系数与土壤 Cd、S、和 TC 呈极显著负相关关系,相关系数分别-0.617、-0.452 和 -0.574,利用多元线性回归

表 5 富 Se 耕地质量评价指标及权重

Table 5 Quality evaluation index and weight of Se-rich cultivated land

一级指标	二级指标	三级指标	等级划定
耕地地力	立地条件及土壤性状 (0.40)	地形部位 (0.15)	I 等 (高产能) II 等 (中产能) III 等 (低产能)
		坡度 (0.13)	
		土层厚度 (0.13)	
		剖面构型 (0.12)	
土壤养分 (0.40)	有机质 (0.50)、P (0.20) K (0.30)	土壤质地 (0.12)	
		土壤结构 (0.11)	
土壤管理 (0.20)		pH (0.24)	
		利用现状 (0.4)	
		灌溉保证率 (0.3)	
生态环境	Cd、Hg、As、Pb、Cr	排涝能力 (0.3)	A、B、C
农作物富硒水平	预测水稻籽实 Se 含量		1 级 (富硒) 2 级 (非富硒)

表 6 富 Se 耕地质量综合等级划分

Table 6 Quality classification of Se-rich cultivated land

等级	R : G : B	分级	定义
1 等	4 : 168 : 24	I A1 I B1 II A1 II B1 III A1 III B1	无公害富硒中高产耕地
2 等	144 : 243 : 127	I A2 II A2 I B2 II B2	无公害中高产耕地
3 等	225 : 225 : 0	III A2 III B2	无公害低产耕地
4 等	225 : 153 : 0	I C1 II C1 III C1	安全利用富硒耕地
5 等	225 : 0 : 0	I C2 II C2 III C2	谨慎利用耕地

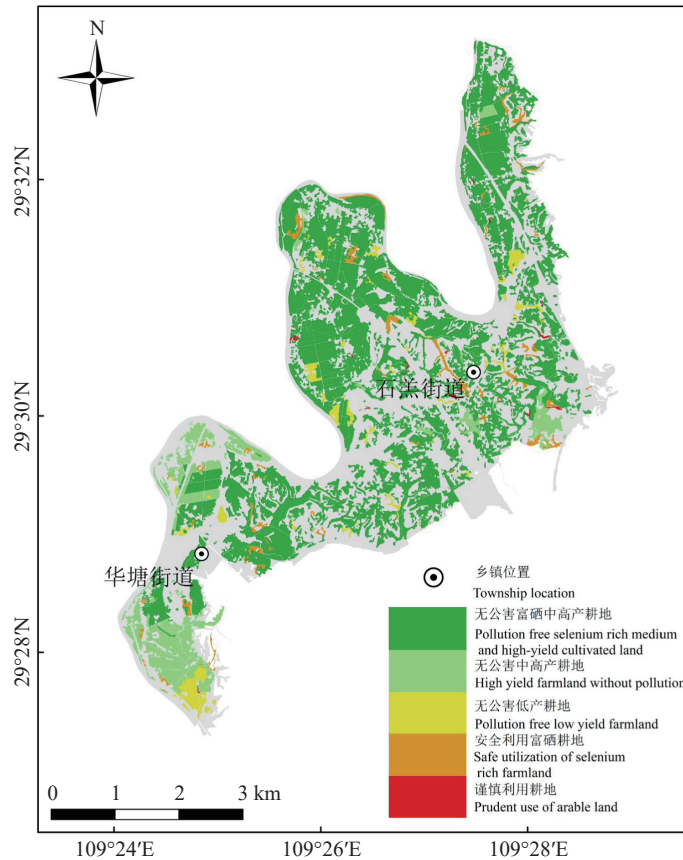


图 5 研究区富 Se 耕地质量综合等级图
Fig.5 Distribution of comprehensive grade of Se-rich arable land in the study area

模型构建了水稻籽实 Se 含量预测模型。

(3)为更准确进行富 Se 土地质量评价,本研究构建了一种基于农作物富 Se 水平、耕地地力和环境质量的地块尺度富 Se 土地质量评价体系,结果显示,研究区以无公害富 Se 中高产耕地为主,面积占比 78%,无公害中高产耕地和无公害低产耕地面积相对较小,面积分别占 13% 和 4%;安全利用富 Se 耕地和谨慎利用耕地面积分别占 4% 和 1%。

致谢: 对编辑和审稿专家提出的宝贵修改意见和建议表示由衷的感谢。

References

Cai Haisheng, Chen Yi, Zhang Xueling. 2020. Suitability evaluation and zoning method research on development and utilization of selenium-rich soil resources based on niche theory[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(24): 9208–9219 (in Chinese with English abstract).
Chen Qiuju, Gan Yiqun, Zhang Ruowen. 2019. Distribution characteristics and causes of selenium enrichment in surface soils of

the Jiangnan Plain[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 26(4): 8–14, 43 (in Chinese with English abstract).
Chen Wenxuan, Li Qian, Wang Zhen, Sun Zhaojun. 2020. Spatial distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in farmland soil in China[J]. *Environmental Science*, 41(6): 2822–2833 (in Chinese with English abstract).
Chen Xiaohua, Shen Genxiang, Bai Yujie, Guo Chunxia, Qian Xiaoyong, Gu Hairong, Hu Shuangqing, Zhao Qingjie, Wang Zhenqi, Fu Kan. 2019. The enrichment characteristics of Cd in soil by different crops and the selection of low accumulation varieties[J]. *Environmental Science*, 40(10): 4647–4653 (in Chinese with English abstract).
Chen Xuelong, Wang Xiaolong, Qi Yanping. 2012. Study on the relationship between soil physicochemical properties and selenium distribution in Daqing Longfeng Wetland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 19(4): 159–162 (in Chinese with English abstract).
Dou Weiqiang, An Yi, Qin Li, Dong Mingming, Lin Dasong. 2021. Quantitative relationship between bioaccumulation coefficient of cadmium in rice and its influencing factors[J]. *Soil*, 53(4): 788–793 (in Chinese with English abstract).
Fang Rukang. 2003. *Environmental Dictionary* [M]. Beijing: Science

- Press, 127–128 (in Chinese).
- Fu Zhongbiao, He Ningjie, Bao Zhengyu, Tian Huan, Ma Ming, Chen Guoguang. 2019. Analysis of influencing factors of selenium content in rice–root soil system in southern Jiangxi[J]. *Geological Science and Technology Information*, 38(5): 220–229 (in Chinese with English abstract).
- Girling C A. 1984. Selenium in agriculture and environment[J]. *Agricultural Ecosystem and Environment*, 11(1): 37–65.
- Gu Q B, Yu T, Yang Z F, Ji J F, Hou Q Y, Wang L, Wei X J, Zhang Q Z. 2019. Prediction and risk assessment of five heavy metals in maize and peanut: A case study of Guangxi, China[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 70: 1–8.
- Guo Hongfei. 2019. Application of F test method and T test method in the process of method validation[J]. *Shanxi Metallurgy*, 42(4): 114–116 (in Chinese with English abstract).
- Hou Qingye, Yang Zhongfang, Yu Tao, Xia Xueqi, Cheng Hangxin, Zhou Guohua. 2020. China Environmental Monitoring Station [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1428–1431 (in Chinese).
- Huang Bingxia, Zhi Tiantian, Zhao Zhigang, He Ning, Han Chengyun. 2019. Selenium and human health[J]. *Journal of Yichun University*, 41(9): 95–101 (in Chinese with English abstract).
- Liao Qilin, Liu Cong, Cai Yuman, Zhu Bowan, Wang Cheng, Hua Ming, Jin Yang. 2013. Preliminary study on element bioconcentration factor (BCF) in grain of rice and wheat in typical areas of Jiangsu[J]. *Geology in China*, 40(1): 331–340 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bingquan, Sha Min, Xie Changyu, Zhou Qiangqiang, Wei Xingxing, Zhou Fan. 2021. Soil selenium geochemical characteristics and influencing factors of selenium bioavailability in rice root soil in Qingxi area, Jiangxi Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 40(5): 740–750 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xudong, Yu Tao, Yang Zhongfang, Zhang Husheng, Wu Zhiliang, Wang Jue, Li Minghui, Lei Fenghua. 2022. Geochemical characteristics of zinc in soil and prediction of zinc content in maize and rice grains in Linshui Country, Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 49(1): 324–335 (in Chinese with English abstract).
- Wan Y N, Yu Y, Wang Q, Qiao Y, Li H. 2016. Cadmium uptake dynamics and translocation in rice seedling: Influence of different forms of selenium[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 133: 127–134.
- Wang Jixiu, Gao Xi, Ma Sha, Wu Guoxing. 2013. Bioaccumulation of Cd, Pb and Zn in soil–Eupatorium adenophorum–Eupatorium adenophorum fruit fly system[J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 21(7): 877–882 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q Y, Zhang J B, Zhao B Z, Xin X L, Deng X H, Zhang H L. 2016. Influence of long-term fertilization on selenium accumulation in soil and uptake by crops[J]. *Pedosphere*, 26(1): 120–129.
- Wang Rui, Deng Hai, Yan Mingshu, Zhang Yongwen, Zhou Jiao, Yu Fei, Li Yu. 2020. Study on bioavailability of selenium based on regression equation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 51(5): 1049–1055 (in Chinese with English abstract).
- Wang Rui, Hou Wanling, Li Yutong, Yu Tao, Chen Juan. 2019. Land safety zoning method for high selenium and high cadmium areas[J]. *Environmental Science*, 40(12): 5524–5530 (in Chinese with English abstract).
- Wang Rui, Yu Jing, Li Yu, Zhou Jiao, Jia Zhongmin, Yu Fei, Zhang Yunyi, Jiang Yulian. 2022. Zoning method for safe utilization of cultivated land at risk of heavy metal pollution at plot scale[J]. *Environmental Science*, 43(8): 4190–4198 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaofang, Chen Siyang, Luo Zhang, Huang Qingqing, Qiao Yuhui, Sun Hongjie, Li Huaifen. 2014. Mechanisms of selenium uptake, transport and transformation in plants[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 31(6): 539–544 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jun. 2018. Geochemical characteristics of selenium-rich soil in Shouning County, Fujian Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 42(2): 386–391 (in Chinese with English abstract).
- Vries W D, McLaughlin M J, Groenenberg J E. 2011. Transfer functions for solid–solution partitioning of cadmium for Australian soils[J]. *Environmental Pollution*, 159(12): 3583–3594.
- Xu Xuesheng, Luo Jianlan, Huang Fengqiu, Wang Huanhuan, Xia Xueqi, Lu Jiang, Zhang Zihu, Zhu Lifan. 2022. Construction of the evaluation system for Se-rich arable land and its application in Xinxu Town, Xintian County, Hunan Province[J]. *Geology in China*, 49(3): 789–801 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Zhiyang, Xiang Jianqiao, Wu Dongmei, Xu Chunyan, Huang Bin, Duan Bihui, Zou Hui, Li Chuncheng, Zhao Min. 2017. Characteristics of selenium and cadmium in main crops in Enshi selenium-rich soil area and its relationship with selenium and cadmium in root soil[J]. *Resource Environment and Engineering*, 31(6): 706–712 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Zhiyang, Zheng Jinlong, Dai Guangzhong, Yang Liangzhe, Xiang Jianqiao. 2019. Study on the relationship between soil selenium and cadmium and their physical and chemical properties in Enshi selenium-rich soil area[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 32(8): 1852–1859, 1967 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dong, Shi Lichao, Ye Jun, Hou Zhenan, Wang Cunhu, Wu Yonghai. 2017. Effects of different valences of exogenous selenium on selenium uptake and transport in rice under drip irrigation[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 31(1): 65–71 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Guohua. 2020. Research progress and evaluation methods of selenium-rich land resources[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 39(3): 319–336 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Wenlong, Yang Zhizhong, Zhang Tao, Mang Shicai, Yang Zhengkun. 2022. Analysis of influencing factors of selenium content in rice–root soil system in Libo County, South Guizhou[J].

Geophysical and Geochemical Exploration, 46(2): 502–510 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡海生, 陈艺, 张学玲. 2020. 基于生态位理论的富硒土壤资源开发利用适宜性评价及分区方法[J]. 生态学报, 40(24): 9208–9219.
- 陈秋菊, 甘义群, 张若雯. 2019. 江汉平原沙洋地区表层土壤中硒的分布特征及富硒原因分析[J]. 安全与环境工程, 26(4): 8–14, 43.
- 陈文轩, 李茜, 王珍, 孙兆军. 2020. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 41(6): 2822–2833.
- 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃. 2019. 不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选[J]. 环境科学, 40(10): 4647–4653.
- 陈雪龙, 王晓龙, 齐艳萍. 2012. 大庆龙凤湿地土壤理化性质与硒元素分布关系研究[J]. 水土保持研究, 19(4): 159–162.
- 窦韦强, 安毅, 秦莉, 董明明, 林大松. 2021. 稻米镉的生物富集系数与其影响因素的量化关系[J]. 土壤, 53(4): 788–793.
- 方如康. 2003. 环境学词典[M]. 北京: 科学出版社, 127–128.
- 付中彪, 何宁洁, 鲍征宇, 田欢, 马明, 陈国光. 2019. 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, 38(5): 220–229.
- 郭鸿飞. 2019. F 检验法和 T 检验法在方法验证过程中的应用探究[J]. 山西冶金, 42(4): 114–116.
- 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 夏学齐, 成杭新, 周国华. 2020. 中国土壤地球化学参数[M]. 北京: 地质出版社, 1428–1431.
- 黄冰霞, 支添添, 赵志刚, 何宁, 韩成云. 2019. 硒元素与人类健康[J]. 宜春学院学报, 41(9): 95–101.
- 廖启林, 刘聪, 蔡玉曼, 朱伯万, 王成, 华明, 金洋. 2013. 江苏典型地区水稻与小麦籽实中元素生物富集系数 (BCF) 初步研究[J]. 中国地质, 40(1): 331–340.
- 刘冰权, 沙珉, 谢长瑜, 周强强, 魏星星, 周梵. 2021. 江西赣县清溪地区土壤硒地球化学特征和水稻根系土硒生物有效性影响因素[J]. 岩矿测试, 40(5): 740–750.
- 马旭东, 余涛, 杨忠芳, 张虎生, 武芝亮, 王珏, 李明辉, 雷风华. 2022. 四川省邻水县土壤镉地球化学特征及玉米水稻籽实镉含量预测[J]. 中国地质, 49(1): 324–335.
- 王吉秀, 高熹, 马沙, 吴国星. 2013. Cd、Pb 和 Zn 在土壤—紫茎泽兰—泽兰实蝇系统中的生物富集效应研究[J]. 中国生态农业学报, 21(7): 877–882.
- 王锐, 邓海, 严明书, 张永文, 周皎, 余飞, 李瑜. 2020. 基于回归方程的硒元素生物有效性研究[J]. 土壤通报, 51(5): 1049–1055.
- 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟. 2019. 高硒高镉区土地安全区划方法[J]. 环境科学, 40(12): 5524–5530.
- 王锐, 余京, 李瑜, 周皎, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲. 2022. 地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法[J]. 环境科学, 43(8): 4190–4198.
- 王晓芳, 陈思杨, 罗章, 黄青青, 乔玉辉, 孙宏杰, 李花粉. 2014. 植物对硒的吸收转运和形态转化机制[J]. 农业资源与环境学报, 31(6): 539–544.
- 吴俊. 2018. 福建省寿宁县富硒土壤地球化学特征[J]. 物探与化探, 42(2): 386–391.
- 徐雪生, 骆检兰, 黄逢秋, 王欢欢, 夏学齐, 鲁江, 张子虎, 朱丽芬. 2022. 富硒耕地质量评价体系构建及其在湖南省新田县新圩镇的应用[J]. 中国地质, 49(3): 789–801.
- 袁知洋, 项剑桥, 吴冬妹, 徐春燕, 黄彬, 段碧辉, 邹辉, 李春诚, 赵敏. 2017. 恩施富硒土壤区主要农作物硒镉特征以及和根系土硒镉关系研究[J]. 资源环境与工程, 31(6): 706–712.
- 袁知洋, 郑金龙, 戴光忠, 杨良哲, 项剑桥. 2019. 恩施富硒土壤区土壤硒镉与其理化性质关系研究[J]. 西南农业学报, 32(8): 1852–1859, 1967.
- 张栋, 史力超, 冶军, 侯振安, 王存虎, 吴永海. 2017. 滴灌条件下不同价态外源硒对水稻硒吸收及转运的影响[J]. 中国水稻科学, 31(1): 65–71.
- 周国华. 2020. 富硒土地资源研究进展与评价方法[J]. 岩矿测试, 39(3): 319–336.
- 周文龙, 杨志忠, 张涛, 忙是材, 杨正坤. 2022. 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, 46(2): 502–510.