

湘西稻田土壤 - 水稻系统硒的生物地球化学特征

唐 祥¹, 周雨舟¹, 谭 洁², 徐章倩¹, 聂三安¹, 周卫军^{1*}

¹湖南农业大学资源学院, 湖南 长沙

²湖南农业大学风景园林与艺术设计学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年12月3日; 录用日期: 2026年1月13日; 发布日期: 2026年1月22日

摘要

【目的】研究湘西稻田土壤 - 水稻系统中硒的分布、吸收、富集及驱动因素, 揭示了土壤 - 水稻硒生物地球化学特征, 可为土壤硒资源的合理开发与利用提供依据, 对湘西发展特色富硒产品具有重要意义。

【方法】通过半方差函数模型、克里金插值分析了湘西稻田土壤 - 水稻系统中硒的分布, Spearman相关性分析和随机森林模型分析湘西稻田土壤 - 水稻系统中硒的影响因素。【结果】(1) 湘西稻田土壤硒平均含量为0.415 mg/kg, 显著高于中国背景值(0.29 mg/kg), 硒资源整体较为丰富。湘西地区稻米硒平均含量达0.048 mg/kg, 56.21%的样本符合富硒标准(≥ 0.04 mg/kg), 但硒富集系数(BCF均值0.1275)较低, 硒转移效率受限。(2) 通过半方差函数模型分析, 湘西稻田土壤Se、稻米Se含量与BCF最优半方差函数模型均为指数模型, 三者的最优模型R²分别为0.715、0.852、0.789, 其块基比分别为0.120、0.106、0.124, 空间自相关性极强, 变异来源主要受结构性因素影响; 根据克里金插值可看出湘西土壤Se主要聚集在湘西东部, 稻米Se主要聚集在湘西东南部, 基本上都分布在富硒地区, 具有聚类特征。(3) 湘西地区石灰岩风化物母质发育土壤Se含量最高, 紫色砂页岩风化物母质的土壤硒含量最低, 第四纪红色黏土母质区种植的稻米Se含量最高。在本研究构建的随机森林模型中显示, 土壤有机质含量是影响土壤Se含量的最重要因素; 稻米Se含量主要受气候因素影响, 其中日照时长是影响稻米Se含量的主要气候因素, 土壤Cu含量是影响稻米Se含量的主要土壤因素。【结论】湘西稻田土壤硒资源总体较为丰富, 稻米硒含量达标率较高(56.21%), 其空间分布呈现强结构性自相关(块基比 < 0.125), 土壤硒富集于东部而稻米硒富集于东南部; 土壤有机质和气候因子(日照、温度、降水)分别是土壤硒与稻米硒的主要影响因素, 硒转移效率(BCF均值0.1275)与土壤Cu、Zn含量呈显著负相关, 表明土壤中较高的Cu、Zn含量可能抑制硒向水稻的迁移, 是潜在的限制作物硒富集的关键环境因子。

关键词

稻田土壤, 硒, 生物地球化学特征, 随机森林

*通讯作者。

Biogeochemical Characteristics of Selenium in the Soil-Rice System of Xiangxi Paddy Fields

Xiang Tang¹, Yuzhou Zhou¹, Jie Tan², Zhangqian Xu¹, San'an Nie¹, Weijun Zhou^{1*}

¹College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha Hunan

²College of Landscape Architecture and Art Design, Hunan Agricultural University, Changsha Hunan

Received: December 3, 2025; accepted: January 13, 2026; published: January 22, 2026

Abstract

[Objective] This study aimed to investigate the distribution, absorption, accumulation, and driving factors of selenium (Se) in the soil-rice system of paddy fields in Xiangxi, revealing the biogeochemical characteristics of Se in soil and rice. The findings provide a basis for the rational development and utilization of soil selenium resources and are significant for the development of distinctive selenium-enriched products in Xiangxi. **[Methods]** The spatial distribution of Se in the soil-rice system of Xiangxi paddy fields was analyzed using semivariance function models and kriging interpolation. Spearman correlation analysis and random forest models were employed to examine the influencing factors of Se in the soil-rice system of Xiangxi paddy fields. **[Results]** (1) The average Se content in Xiangxi paddy soils was 0.415 mg/kg, significantly higher than the background value in China (0.29 mg/kg), indicating overall rich selenium resources. The average Se content in rice from Xiangxi was 0.048 mg/kg, with 56.21% of samples meeting the selenium-rich standard (≥ 0.04 mg/kg). However, the selenium bioaccumulation factor (BCF mean 0.1275) was relatively low, indicating limited Se transfer efficiency. (2) Through semivariance function analysis, the optimal semivariance models for soil Se, rice Se, and BCF were all exponential models, with optimal model R^2 values of 0.715, 0.852, and 0.789, and nugget-to-sill ratios of 0.120, 0.106, and 0.124, respectively, demonstrating strong spatial autocorrelation, mainly influenced by structural factors. Kriging interpolation indicated that soil Se was mainly concentrated in eastern Xiangxi, while rice Se was mainly concentrated in southeastern Xiangxi, both distributed in selenium-rich areas with clustering characteristics. (3) Soil developed from limestone weathering had the highest Se content, while soil from purple sandstone-shale weathering had the lowest Se content. Rice planted in Quaternary red clay regions had the highest Se content. The random forest model constructed in this study indicated that soil organic matter content was the most important factor affecting soil Se content. Rice Se content was primarily influenced by climatic factors, with sunlight duration being the main climatic factor, while soil copper (Cu) content was the major soil factor affecting rice Se content. **[Conclusion]** Overall, paddy soils in Xiangxi are relatively rich in Se, and the rate of rice meeting Se content standards is high (56.21%). Spatial distribution exhibits strong structural autocorrelation (nugget-to-sill ratio < 0.125), with soil Se enriched in the east and rice Se enriched in the southeast. Soil organic matter and climatic factors (sunlight, temperature, precipitation) are the main influencing factors for soil and rice Se, respectively. Selenium transfer efficiency (BCF mean 0.1275) is significantly negatively correlated with soil Cu and Zn content, suggesting that higher Cu and Zn concentrations in soil may inhibit Se transfer to rice, representing key environmental factors that potentially limit crop Se enrichment.

Keywords

Paddy Soil, Selenium, Biogeochemical Characteristics, Random Forest

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

硒(Se)是土壤、植物与人类所必需的微量元素之一，能提高人体抗氧化、抗肿瘤及抗衰老的能力[1]。克山病和大骨节病的发生与人体硒缺乏密切相关[2][3]。而在我国，硒资源匮乏问题突出，约 72% 的国土处于缺硒或低硒状态，土壤硒含量空间分布不均，富硒地区十分有限。水稻主要通过根系与叶面吸收的方式吸收与富集 Se，具有强大的富硒能力，并且作为我国居民的主食作物之一，是人体摄取 Se 的主要来源。因此，研究 Se 元素在水稻 - 土壤系统中的分布和影响因素，对提高我国居民的健康水平具有重要意义。

近年来，有许多关于 Se 的研究。肖凯琦等研究发现湖南省龙山县耕地土壤 Se 其块金系数为 43.2%，属于中等空间变异，说明土壤硒既受自然因素(成土母质、土壤类型等)又受人为因素(人类活动)的影响[4]。申顺研究发现镇雄县土壤硒的空间分布变异程度属于中等，且成土母质、土壤类型、海拔、pH 和有机质对土壤 Se 含量均有影响[5]。宁驰等对临澧县的稻田进行研究，发现临澧县稻田土壤 Se、稻米 Se 含量与 BCF 的空间自相关性显著，且受到成土母质、土壤理化性质与气候因素影响[6]。周文龙等基于黔南荔波县水稻 - 根系土系统的研究发现，土壤有机质与铁铝氧化物对硒的吸附固定作用会限制水稻对硒的富集。同时，研究结果提示硒与重金属元素在该系统的迁移过程中可能存在拮抗关系[7]。可以发现现有研究多为小尺度的研究，且多集中在土壤硒或水稻硒单方面上，因此本研究以湘西稻田土壤 - 水稻系统为研究对象，采集土壤和水稻样本，将三年数据合并进行分析，旨在：(1) 揭示湘西土壤 Se、水稻 Se 及生物富集系数(BCF)的长期、稳定的空间分布特征；(2) 阐明成土母质、土壤属性和气候因子对湘西 Se 分布与富集的影响。合并分析可能平滑或掩盖了年度间的真实波动，为数据带来难以量化的、非系统性的噪音，但可以增强统计可靠性，评估在区域尺度上硒含量的总体状况与潜在风险，为宏观管理决策提供更具普遍性的科学依据。

2. 材料与方法

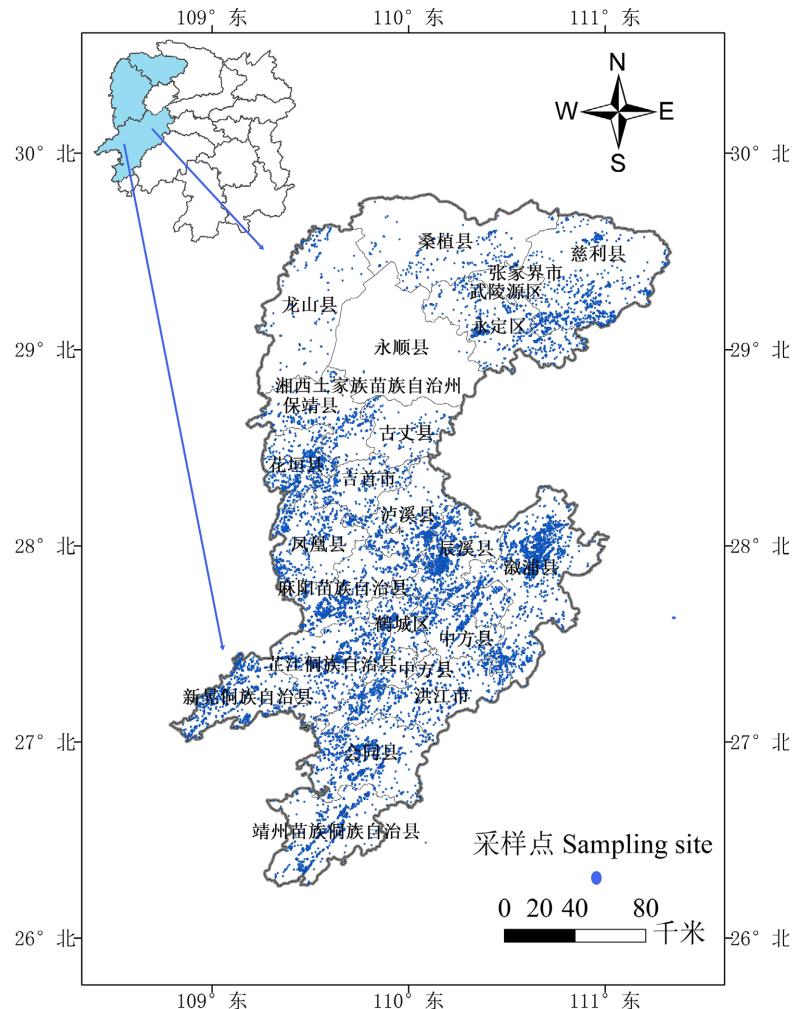
2.1. 研究区域概况

本研究聚焦于中国湖南省西部的湘西地区。湖南省自古以来就有“鱼米之乡”的称号，是我国重要的水稻主要产区之一。湘西地区位于湖南省西部，总面积 1.55 万平方公里，约占湖南省总面积的 7.4%。湘西地形地貌以山地为主，夹杂着丘陵与小平原，整体呈现西北高、东南低的特征，主要由武陵山脉和雪峰山脉构成，是沅水、澧水中上游及其支流的汇聚之地，其行政区域主要包括湘西土家族苗族自治州及周边地区。该地区气候为亚热带湿润气候，四季分明，夏季炎热潮湿，冬季寒冷干燥。年均降水量较大，约为 1400~2400 毫米，湿润的气候条件对水稻的生长提供了良好的自然条件。

2.2. 样品的采集与分析

本研究数据来源于 2018~2020 年湖南省耕地土壤与农产品重金属污染加密调查项目。基于全国第二次土地调查更新的土地利用现状图，采用网格化布点法，结合地形特征、土壤类型及农作物种植结构等要素，差异化设置调查样点，同步采集稻田土壤及其对应水稻样品(空间分布见图 1)。土壤样品(0~20 cm 表层)通过双对角线五点混合法获取，水稻样本使用不锈钢剪截取稻穗后装入无菌密封袋保存。土壤样品经自然风干后，依次经 10 目和 100 目筛网过筛处理，用于理化性质检测；水稻样品经三级梯度清洗去除

杂质, 常温脱水后脱壳粉碎, 制备为待测样本。



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为湘 S (2024) 060 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 1. Sample point map of Xiangxi

图 1. 湘西采样点图

土壤样品指标的测定参照鲍士旦[8]的方法, 土壤 pH 值采用电位法测定, SOM 采用重铬酸钾容量法 - 外加热法。土壤样品用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2\text{-HF}$ (6:3:3) 消化法测定 Se、Cu 和 Zn 的含量, 而稻谷样品使用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (4:1) 消化法测定[9] [10]。采用原子荧光分光光度计(HG-AFS, Model 930)测定总 Se 含量, 采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS, Model NEXION 350 X)分析 Cu 和 Zn 含量。

2.3. 数据源

湘西遥感数据通过美国地质调查局(<https://glovis.usgs.gov/>)获取并选择 Landsat 8 遥感影像为数据源, 湘西气象要素年度空间插值数据集数据(海拔、气温、降水量、日照与湿度)来源于资源环境科学数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>) [11], 成土母质与土壤类型数据源于第二次全国土壤普查数据为 1:50,000 的湖南省土壤图数据(<http://www.soilinfo.cn/map/index.aspx>)并按第三次全国土壤普查土壤分类系统分类。

2.4. 富集因子

生物富集因子(bioconcentration factor, BCF)常被用于评估植物富集元素能力[12]，在稻田系统中被描述为稻米中的元素浓度与稻田土壤中的该元素浓度之比[13]：

$$BCF = \frac{SeN}{Se} \quad (1)$$

其中 SeN 是水稻糙米中的 Se 含量(mg/kg)， Se 是稻田土壤中的 Se 含量(mg/kg)。该参数表明了 Se 从稻田土壤转移到水稻可食用部分的潜力。

2.5. 耕地土壤硒含量分级与富硒级别标准

中酸性土壤($pH \leq 7.5$)的富硒分级，依据岳晴晴等[14]与丁庭康等[15]制定的以土壤富硒标准阈值的 2 倍和 3 倍为界的“富硒标准”规定，定义了四个富硒级别：非富硒($Se < 0.4 \text{ mg/kg}$)；低富硒($0.4 \text{ mg/kg} \leq Se < 0.8 \text{ mg/kg}$)；中富硒($0.8 \text{ mg/kg} \leq Se < 1.2 \text{ mg/kg}$)；高富硒($Se \geq 1.2 \text{ mg/kg}$)。

2.6. 水稻硒含量分级标准

水稻 Se 分级标准根据《富硒稻谷》(GB/T 22499-2008)：稻米 $Se < 0.04 \text{ mg/kg}$ (非富硒)， $0.04 \sim 0.3 \text{ mg/kg}$ (富硒)， $\geq 0.3 \text{ mg/kg}$ (硒超标)。

2.7. 随机森林

随机森林模型是由 Breiman 提出的基于决策树算法的机器学习模型[16]。该模型是一种基于 Bagging 的集成算法，通过对原始训练集进行有放回抽样(bootstrap)，生成 B 个不同子训练集，每个子集训练一棵决策树，然后对这些树的输出取平均或多数投票。在特征重要性评估中，模型通过计算变量分裂前后均方误差(MSE)的下降幅度，量化各输入变量对预测结果的贡献度，从而识别关键驱动因子[17]。

2.8. 数据分析与处理

利用 Excel2016、SPSS23 和 RStudio4.2.0 进行数据统计与分析(ANOVA, Games-Howell 法)。在分析之前，对湘西数据都进行了正态性和同质性检查，并使用三倍标准差法(阈值法)剔除异常值，经此数据预处理后，最终保留的有效样本量为 13,683 个。剔除异常值后湘西土壤 Se 含量、稻米 Se 含量与富集因子 BCF 均服从偏正态分布，符合地统计学分析的要求。然后使用 GS+进行半方差函数模型分析；使用 ArcGIS10.8 软件进行普通克里金插值法绘制空间分布图，用 RStudio 进行 Spearman 相关性分析；用“randomForest”包进行随机森林算法计算变量的解释强度；在 $p < 0.05$ 的显著性水平下，不同母质土壤硒含量、稻米硒含量以及 BCF 采用塔姆黑尼检验进行方差分析(ANOVA)。

3. 结果

3.1. 稻田土壤 - 水稻系统中硒含量特征

土壤 - 水稻系统中硒含量特征如表 1 和图 2 所示，湘西稻田土壤硒含量达到富硒水平的样点有 6566 个，占比 47.99%；其中低富硒水平样点有 6353 个，占比 96.75%；中富硒水平的样点有 216 个，占比 3.29%；有 7117 个非富硒水平的样点，占比 52.01%。稻米硒含量达到富硒水平的样点有 7692 个，占比 56.21%；有 5991 个非富硒水平的样点，占比 43.78%。土壤硒的富集系数均小于 1，主要集中在 0.05~0.15 之间，有 7817 个，占比 57.13%。湘西稻田土壤 Se、稻米 Se 平均含量与平均 BCF 分别为 0.415 mg/kg (大于 0.4 mg/kg)、 0.048 mg/kg (大于 0.04 mg/kg)与 0.1275 ，可见湘西地区硒资源较为丰富。湘西稻田土壤

Se、稻米 Se 含量与 BCF 的变异系数(CV)分别为 35.4%，53.8% 和 66.1%，都呈中等变异性。

Table 1. Descriptive statistical analysis of indexes of paddy field in Xiangxi
表 1. 湘西稻田土壤与水稻硒含量指标的描述性统计

指标 Indexes	最小值 Min	中位数 Median	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV(%)
土壤硒 Se (mg/kg)	0.070	0.393	0.865	0.415	0.147	35.4
稻米硒 SeN (mg/kg)	0.001	0.043	0.124	0.048	0.026	53.8
富集因子 BCF	0.0014	0.1091	0.8588	0.1275	0.0843	66.1

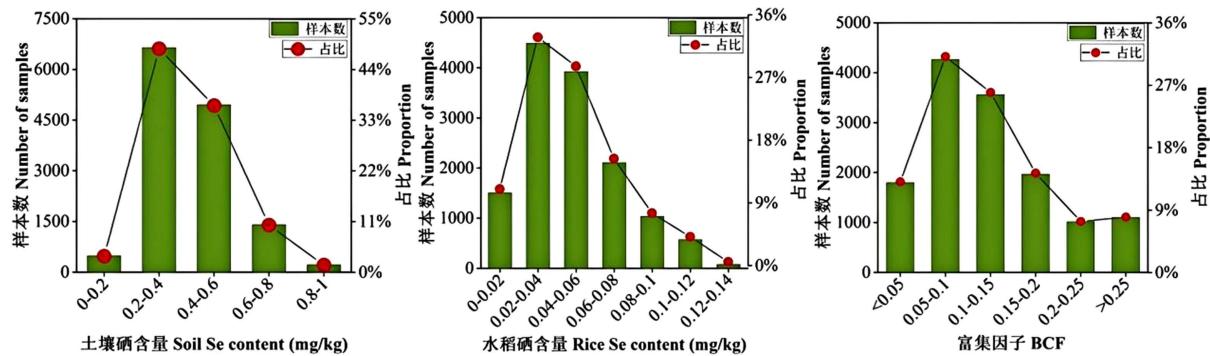


Figure 2. Frequency distribution of selenium content and BCF in the soil-rice system of cultivated land in Xiangxi
图 2. 湘西耕地土壤 - 水稻系统中硒含量与 BCF 频率分布图

3.2. 半方差函数模型分析

从表 2 可以得出, 通过对线性模型、指数模型、球面模型和高斯模型四种模型的比较, 土壤硒、水稻硒和富集因子 BCF 三者的最优模型均为指数模型, 三者的最优模型 R^2 分别为 0.715、0.852、0.789, 三者的残差分别为 1.209×10^{-6} 、 2.718×10^{-8} 和 2.746×10^{-7} , 具有较好的拟合性。而三者最优模型的块金系数分别为 12%、10.6%、12.4%, 说明三者均主要受结构性因素影响。

Table 2. Semivariance model and theoretical parameters of soil selenium, rice selenium and enrichment factor BCF in Xiangxi
表 2. 湘西土壤硒水稻硒和富集因子 BCF 的半方差模型及理论参数

	模型 Model	块金值 C_0	基台值 $(C_0 + C)$	块基比 $C_0/(C_0 + C)$	变程 Range (m)	拟合系数 R^2	残差 RSS
土壤硒 Se	线性模型	0.01158	0.01336	87.6%	94928	0.679	1.340×10^{-6}
	指数模型	0.00153	0.01276	12.0%	10500	0.715	1.209×10^{-6}
	球面模型	0.00060	0.01270	4.7%	9200	0.660	1.420×10^{-6}
	高斯模型	0.00190	0.01270	15.0%	7967	0.660	1.423×10^{-6}
水稻硒 SeN	线性模型	0.00336	0.00371	90.5%	28514	0.610	7.148×10^{-8}
	指数模型	0.00038	0.00359	10.6%	2730	0.852	2.718×10^{-8}
	球面模型	0.00014	0.00359	4.0%	2610	0.824	3.251×10^{-8}
	高斯模型	0.00054	0.00358	15.0%	2234	0.824	3.238×10^{-8}
富集因子 BCF	线性模型	0.01199	0.01300	92.3%	28514	0.699	3.915×10^{-7}
	指数模型	0.00157	0.01264	12.4%	2370	0.789	2.746×10^{-7}
	球面模型	0.00088	0.01266	7.0%	2470	0.777	2.974×10^{-7}
	高斯模型	0.00217	0.01264	17.2%	2095	0.777	2.907×10^{-7}

3.3. 空间分布特征

图 3 显示了基于普通克里金原理的稻田土壤 Se、稻米 Se 含量和 BCF 的空间分布。湘西稻田土壤 Se 含量较高的地区主要集中在辰溪县、慈利县、永定区南部、花垣县、吉首市西部、辰溪县、溆浦县和洪江市东西两侧，湘西中部和南部土壤大部分为非富硒地区。龙山县、保靖县、古丈县、凤凰县、泸溪县、芷江侗族自治县和新晃侗族自治县的稻米主要为非富 Se 或低富 Se 稻米，而稻米 Se 含量较高的地区主要位于慈利县和湘西东南部地区，与富硒土壤地区大致吻合，其中靖州苗族自治县、会同县和洪江市虽然大部分地区为非富 Se 土壤但富 Se 水稻面积较高。湘西南部地区和北部地区 BCF 高于中部，BCF 较高的地区主要位于靖州苗族侗族自治县、吉首市、洪江市和辰溪县等，其区域大致与富硒水稻区域吻合，与富硒土壤区域有一定差异，其中武陵源区、吉首市和芷江侗族自治县 BCF 较高但水稻富 Se 程度较低。整体上看湘西东部是湘西的主要富硒地区，湘西东南部地区的水稻的硒富集能力较高。

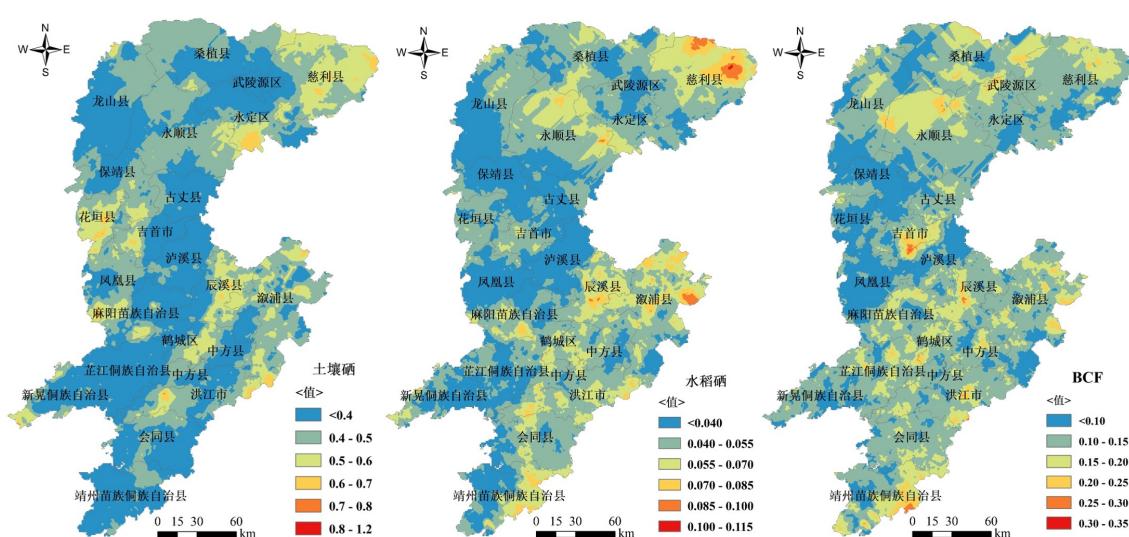


Figure 3. Interpolation diagram of Se content in the soil-rice system and BCF in Xiangxi

图 3. 湘西稻田土壤 - 水稻系统中硒含量与 BCF 空间分布图

3.4. 不同母质发育稻田土壤 - 水稻系统中硒含量与富集因子特征

从图 4 可看出七种成土母质中石灰岩母质和花岗岩母质土壤、水稻 Se 含量和 BCF 无显著差异，但土壤 Se 含量显著高于其他母质，水稻 Se 含量显著低于除紫色砂页岩母质以外的母质，BCF 最低且与其他母质呈显著差异。第四纪红色粘土母质发育的土壤中 Se 含量低于花岗岩母质和板页岩母质但无显著差异，其上种植的水稻中 Se 含量显著高于其他母质发育而来的土壤，且富集系数最高，并与板页岩母质、花岗岩母质和石灰岩母质发育的土壤呈显著差异。

3.5. 稻田土壤 - 水稻系统中硒含量与富集因子相关性分析

研究区稻田土壤 Se、稻米 Se 含量与 BCF 与所有因子(土壤特性，必需微量元素和地理因素)之间的关系如图 5 所示。Spearman 分析结果表明稻田土壤 Se 含量与土壤 Cu 含量、土壤 Zn 含量、pH、SOM、CEC、降水、海拔呈显著正相关，与温度和水稻 Zn 含量呈显著负相关($p < 0.05$)。稻米 Se 含量与温度、日照、降水呈显著正相关，与土壤 Cu 含量、海拔、湿度呈显著负相关($p < 0.05$)。BCF 与日照、温度、水稻 Zn 含量显著正相关，与土壤 Se 含量、土壤 Cu 含量、土壤 Zn 含量、pH、SOM、CEC、湿度与海拔呈显著负相关($p < 0.05$)。

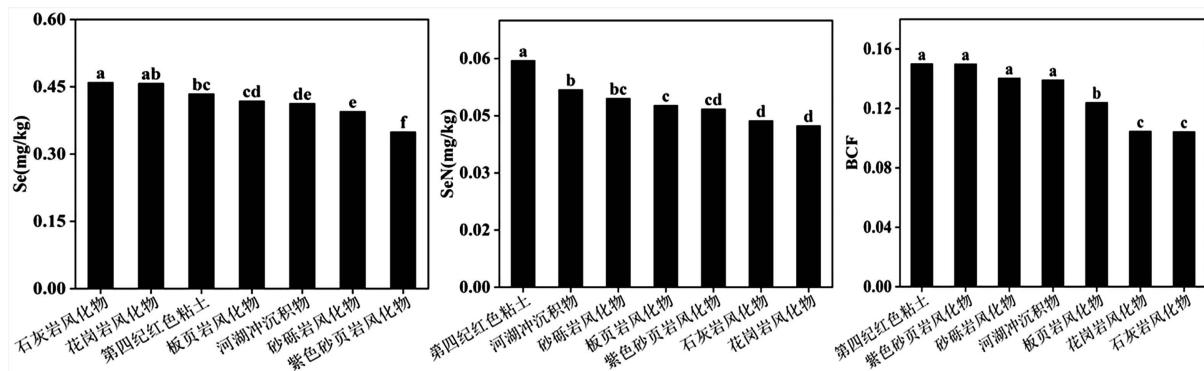


Figure 4. Average Se content in the soil-rice system and BCF of different parent materials

图 4. 不同成土母质的稻田土壤 - 水稻系统中平均硒含量与 BCF

Table 3. Average values of soil physicochemical data for different soil parent materials in Xiangxi paddy fields
表 3. 湘西稻田土壤不同土壤母质的土壤理化数据平均值

母质类型	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	pH	土壤 Se (mg/kg)	稻米 Se (mg/kg)	BCF	有机质含量 (mg/kg)	CEC (mol/kg)
石灰岩风化物	28.63	92.95	6.13	0.460	0.043	0.104	32.90	12.69
花岗岩风化物	31.11	90.28	5.47	0.457	0.042	0.105	34.30	12.76
第四纪红色粘土	24.02	80.01	5.50	0.434	0.060	0.150	29.97	11.22
板页岩风化物	24.81	87.53	5.43	0.419	0.048	0.124	33.00	11.06
河湖冲积物	26.27	85.77	5.91	0.413	0.051	0.139	28.59	12.03
砂砾岩风化物	25.04	81.62	5.63	0.395	0.050	0.140	29.01	11.49
紫色砂页岩风化物	26.36	80.52	5.87	0.350	0.047	0.149	26.81	12.44

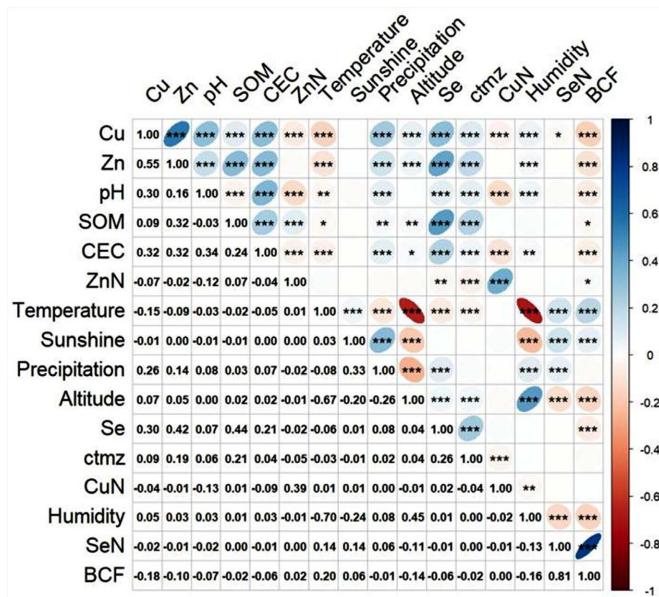


Figure 5. Relationship between soil physicochemical properties (SOM, CEC and pH), essential micronutrients (Cu and Zn) and climatic factors (sunshine, temperature, precipitation and humidity) and altitude and soil selenium, rice selenium and enrichment factors

图 5. 稻田土壤理化性质(SOM, CEC 和 pH), 必需微量元素(Cu 和 Zn)和气候因素(日照、气温、降水量与湿度)和海拔与土壤硒、水稻硒和富集因子间的关系

3.6. 湘西稻田土壤 - 水稻系统中硒含量与富集因子和影响因素的随机森林模型分析

对湘西土壤理化和气候数据进行随机森林模型分析(图 6), 其中稻田土壤 Se 含量的因子重要性排序前五为 SOM、Cn、Zu、成土母质、CEC, 表明湘西土壤硒的赋存可能主要受有机质 - 金属元素复合作用及母质类型的调控; 水稻 Se 含量的因子重要性排序前五为日照、温度、降水、海拔、湿度, 表明湘西水稻 Se 的富集可能主要受气候条件(如光照和温度)的驱动, 而土壤因素的影响相对较弱; BCF 的因子重要性排序前五为 SeN、Cu、日照、降水、湿度。表明湘西水稻 Se 的富集系数除了受水稻体内 Se 的积累水平影响外, 环境因子对硒生物有效性的调控也起着重要作用。根据图 7 的交互偏依赖图可看出, 土壤 Se 含量大致是随着有机质和土壤 Cu 含量的增加而增加。随着日照时长的增加, 水稻 Se 的含量也在增加, 土壤 Cu 含量对水稻 Se 的影响大致为先抑制后促进, 在 30 mg/kg 时抑制效果最大。而随着土壤 Cu 和 Zn 含量的增加 BCF 则在不断减小, 说明土壤 Cu 和 Zn 对 BCF 起到抑制作用。

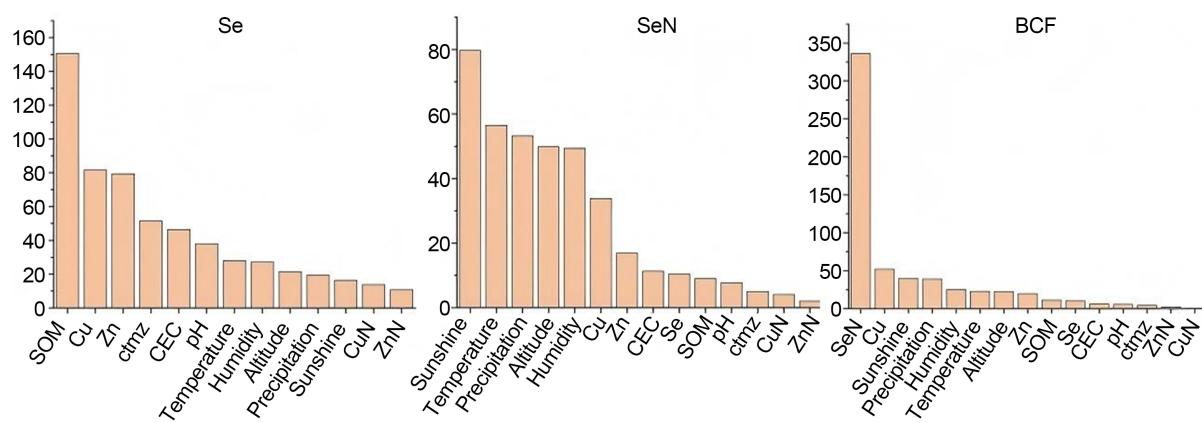


Figure 6. Importance ranking diagram of soil Se, rice Se, and BCF in paddy fields based on random forest model
图 6. 基于随机森林模型的稻田土壤 Se、水稻 Se、BCF 的重要性排序图

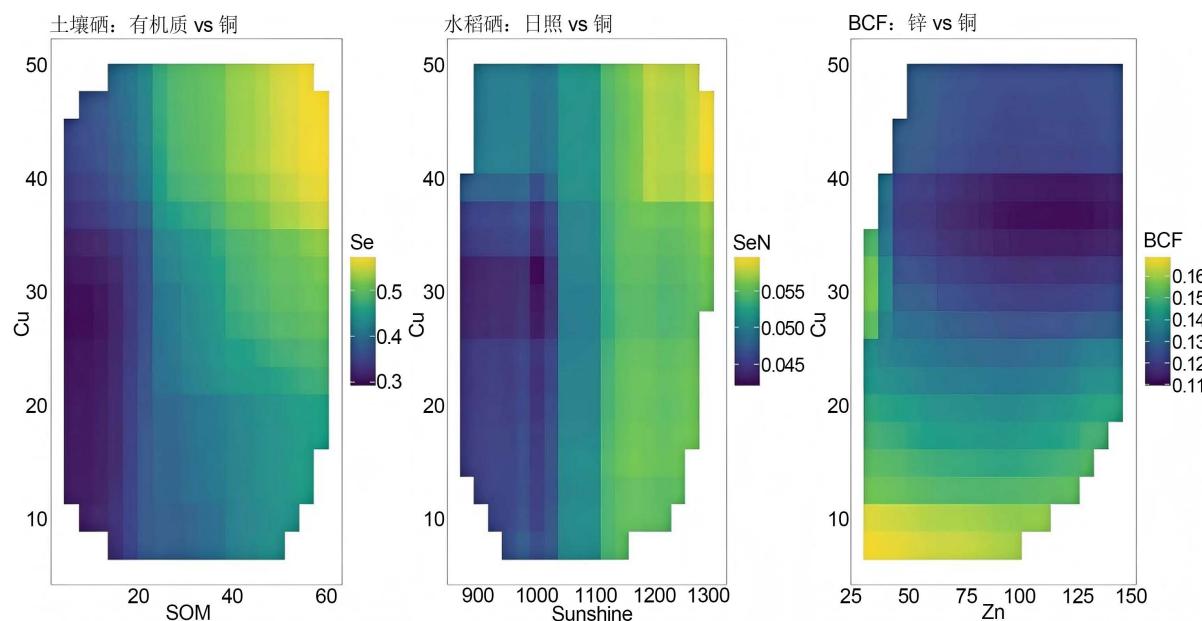


Figure 7. Interactive partial dependence plots of paddy soil Se, rice Se and BCF based on a random forest model
图 7. 基于随机森林模型的稻田土壤 Se、水稻 Se、BCF 的交互偏依赖图

4. 讨论与分析

4.1. 湘西稻田土壤-水稻系统硒的空间分异分析

研究区的稻田土壤 Se 平均含量(0.415 mg/kg)比中国背景土壤水平(0.29 mg/kg) [18]高 1.43 倍。根据土壤富 Se 分类标准[14] [15]，发现研究区非富 Se 土壤($Se < 0.4 \text{ mg/kg}$; 52.01%)、低富 Se 土壤($0.4 \text{ mg/kg} \leq Se < 0.8 \text{ mg/kg}$; 46.40%)、中富 Se 土壤($0.8 \text{ mg/kg} \leq Se < 1.2 \text{ mg/kg}$; 1.58%)、无高富 Se 土壤($Se \geq 1.2 \text{ mg/kg}$)。Fang 等[19]研究发现我国水稻中 Se 的平均含量为 0.02 mg/kg，而本研究中水稻籽粒中 Se 的平均含量为 0.048 mg/kg，符合富硒稻米 Se 含量的最低允许含量(0.04 mg/kg) (中国国家标准局，GB/T22499-2008)，且富 Se 稻米($0.04 \text{ mg/kg} \leq Se < 0.3 \text{ mg/kg}$)占比为 56.21%，说明研究区的水稻 Se 含量较为充足。富集系数(BCF)通常用于评估植物对土壤中某元素或化合物吸收和生物累积能力[12]。Jiao 等[20]调查了中国 5 个富硒水稻产区共 182 份富 Se 水稻样本，发现稻米的平均 BCF 为 0.89，翁进等[21]研究发现慈利县水稻的平均 BCF 为 0.129。而本研究中 BCF 为 0.0014~0.8588 (均值为 0.1275)，低于 Jiao 等的研究发现，考虑到两地土壤硒底值的差异，湘西地区硒从土壤向水稻的转移效率相对较低可能受区域特异性因素限制。

变异系数(CV)是衡量耕地土壤养分空间变异程度的指标，其值低于 10% 表示弱变异性，介于 10% 至 100% 之间为中等变异性，超过 100% 则属于强变异性[22]。湘西稻田土壤硒、水稻硒与 BCF 的变异系数分别为 35.4%，53.8% 和 66.1%，说明稻田土壤 Se、水稻 Se 和 BCF 都呈现中等变异性。块金值与基台值之比(块基比， $C_0/(C_0 + C)$)是判断系统变量空间相关性强弱的关键指标，并能揭示空间变异中结构性因素(如成土母质、母岩、土壤矿物组成、地形等自然因素)与随机性因素(如耕作方式、施肥制度、种植模式等人为因素)的主导作用。其判定标准为：当 $C_0/(C_0 + C) < 25\%$ 时，变量表现出强烈的空间自相关性，主要由结构性因素控制；当 $25\% \leq C_0/(C_0 + C) \leq 75\%$ 时，呈现中等空间自相关性，受结构性与随机性因素共同作用；当 $C_0/(C_0 + C) > 75\%$ 时，空间自相关性极弱，随机性因素占主导，此时空间插值方法进行预测的可靠性较低[23]。研究区土壤 Se、稻米 Se 含量与 BCF 的最优模型均为指数模型，且块基比均小于 25%，说明湘西稻田土壤 Se、水稻 Se 含量与 BCF 空间变异来源主要受结构性因素影响，且空间自相关性极强。水稻 Se 和 BCF 的变程较小且接近，表明水稻 Se 的空间自相关范围较土壤 Se 更小(可能受田间管理或微地形影响)，而 BCF 的空间自相关范围与水稻 Se 相似，可能受相同局部因子(如田间灌溉)影响。丁庭康等研究发现宜章县的土壤 Se 最优半方差函数模型为指数模型，块基值为 50.5%，表明研究区域的土壤 Se 受结构性因素影响的同时也受随机因素的影响[15]。刘质宗等研究发现西盟县的土壤硒最优半方差模型为球状模型，土壤全 Se 和有效硒的块基效应分别为 15.63% 和 29.73%，表明土壤全硒和有效硒具有较强空间相关性，主要受结构性因素的影响[24]。两者结果与本文大致相同，说明结构性因素对硒具有重要影响。根据克里金插值图来看，土壤 Se 主要聚集在湘西东部，水稻 Se 主要聚集在湘西东南部，基本上都分布在富硒地区，具有聚类特征。靖州、会同县和洪江市虽土壤硒含量较低，但稻米硒富集面积较高，可能原因是土壤中硒的生物有效性较高或本地水稻品种对硒的吸收转化效率较高或存在其他未知的促进因子，这有待通过测定土壤有效硒含量及进行品种比较试验加以验证。湘西南部和北部 BCF 较高但土壤硒含量较低，这一现象可能与这些区域土壤中抑制硒迁移的重金属元素(如 Cu、Zn)含量较低有关，与相关性分析结果吻合。根据分布规律，东部核心富硒带(辰溪、慈利等)：具备土壤-稻米双高硒特征，是优先开发区域，可打造标准化富硒水稻种植基地。东南部高效富集带：土壤硒中等但 BCF 高，需通过品种选育和农艺优化(如调节 pH、增施有机肥)提升硒富集效率。中部硒含量较低区域：土壤和稻米硒含量均低，需通过外源硒肥补充或因地制宜转向非富硒特色作物种植。

4.2. 多尺度因子作用下的湘西稻田 - 土壤系统中硒的调控

在大多数文献里成土母质一般被认为是土壤 Se 的主要来源[25]。在本研究中, 七种成土母质发育而来的稻田土壤 Se 含量存在显著差异($p < 0.05$), 石灰岩风化物母质发育的土壤容易富集硒元素, 这可能由于成土过程中持续的钙供应延缓了脱硅富铝化淋溶, 形成了高阳离子交换量、高盐基饱和度的土壤环境, 保肥性强且有机质丰富, 有效吸附并保存了硒[26]。然而, 本研究发现该类母质上水稻硒含量及 BCF 反而较低, 其中储存的硒可能多以固定态存在, 生物有效性不高。紫色砂页岩母质形成的紫色土, 因母岩年轻疏松、易受侵蚀、土层浅薄, 硒元素极易流失, 故含量较低。根据表 3 可以发现石灰岩母质和花岗岩母质发育而来的土壤其中 Cu、Zn 和有机质的含量都要高于其他母质发育而来的土壤, 土壤中的 Se 可能更容易被金属元素及有机质吸附固定, 从而降低硒的生物有效性。而低分子量有机酸能溶解并释放土壤固定态硒, 提高硒的生物有效性[27]。

Spearman 分析结果表明稻田土壤 Se 含量与土壤 Cu 含量、土壤 Zn 含量、pH、SOM、CEC、降水、海拔显著正相关, 与温度和水稻 Zn 含量显著负相关。从图 6 来看, 随机森林结果显示 SOM、Cu 和 Zn 在影响土壤 Se 含量的影响因素中排行前三, 是主要影响因子, 且其与土壤 Se 呈显著正相关关系。结合已有研究, 这一结果可能表明 SOM、Cu 和 Zn 通过形成有机物 - 阳离子 - 硒三元配合物的方式捕获硒氧阴离子[28], 形成了富硒土壤, 而阳离子与硒和有机物形成的三元复合物降低了土壤中 Se 的迁移率, 导致土壤有效硒含量降低, 呈现出 BCF 与 SOM、Cu、Zn、CEC 显著负相关的结果($p < 0.05$), 使其难以被水稻吸收。NAZ 等[29]发现土壤有机质(SOM)可以补偿 pH 值对硒吸收的影响, 表明高有机质含量的土壤会因 pH 值而限制植物对硒的吸收。而有研究认为在强酸性和湿润环境下, 土壤硒主要以亚硒酸盐的形式存在[30], 土壤中的大量的铁铝氧化物和黏土矿物容易将硒吸附[31], 随着土壤 pH 的增加, 土壤中阳离子交换量提高, 对土壤中阳离子有吸附作用的矿质颗粒和有机质颗粒显著增加[32]。本研究中土壤 Se 随着 pH 增加而增加, 其内在机制较为复杂, 可能涉及不同 pH 条件下硒的形态转化、吸附 - 解吸平衡及淋溶损失的差异。一种可能的解释是, 在酸性较强的湘西地区, 适度提升 pH 可能改变了硒的赋存形态, 减少了其活性形态的淋溶损失, 从而在统计上表现出与全硒含量的正相关关系。

土壤中 Se 的生物有效性, 即能被植物吸收利用的部分, 并不完全取决于其全量, 而主要受其化学形态控制。硒酸盐移动性强、易被植物吸收; 而亚硒酸盐易被土壤组分吸附固定; 有机态硒的转化则依赖于微生物过程[30]。而土壤有机质(SOM)对硒生物有效性的影响呈现双重作用。一方面, 高分子量有机物具有较大的比表面积和较强的螯合能力, 降低了硒的生物利用率; 另一方面, 低分子量可溶性有机质可以溶解土壤中结合态的硒, 提高其生物利用率[33]。根据杨忠兰的研究, 硒和有机质之间的相互作用体现在三个方面: ① 硒与有机质的吸附位点络合; ② 硒与有机质 - 金属的间接络合; ③ 硒在有机质调控下的微生物还原[34]。本研究中 SOM 与土壤硒正相关、与 BCF 负相关的结果, 可能表明在湘西稻田的当前条件下, 有机质对硒的固定效应强于其活化效应, 导致高有机质土壤中硒的储存量大但迁移率低。除此之外, 本研究由于样本量大、覆盖区域广, 侧重于硒含量的宏观空间分布与主控因子分析, 未能对土壤硒的具体形态进行测定, 这在一定程度上限制了对硒生物有效性转化微观机制的深入阐释。未来的研究可结合连续提取或光谱技术, 进一步厘清湘西土壤中硒的形态分配及其驱动因素。

随机森林结果显示日照、温度与降水是稻米 Se 含量的主要影响因子, Spearman 相关性分析结果表明稻米 Se 含量与温度、日照、降水显著正相关, 与土壤 Cu 含量、海拔、湿度显著负相关, 说明水稻 Se 含量主要受气候因子的影响。植物根系对有机态 Se 的主动吸收是一个耗能过程, 其所需能量来自于叶绿体光合作用产生的 ATP, 因此日照时长对于水稻 Se 与 BCF 起着重要影响[35][36], 但过长的日照时间反而会损伤水稻的光合器官, 进而影响水稻对 Se 的吸收。根系吸收硒依赖于主动运输(如离子通道和载体

蛋白), 需消耗能量(ATP), 温度通过影响酶的活性(如 ATP 酶)和呼吸作用速率, 调控硒的吸收效率。降水可导致大气以及周围环境中的 Se 大量输入农田, 进而影响土壤-植物系统中 Se 的含量和形态, 并改变 Se 的迁移、转化与生物有效性[37], 但强降水也可能通过淋溶作用流失土壤中生物有效性较高的可溶态 Se (如 SeO_4^{2-}), 降低土壤 Se 的生物有效性, 导致 BCF 降低。

Spearman 相关性分析表明 BCF 与日照、温度、水稻 Zn 含量显著正相关, 与土壤 Se 含量、土壤 Cu 含量、土壤 Zn 含量、pH、SOM、CEC、湿度与海拔呈显著负相关。BCF 与 pH 呈显著负相关, 其原因在于硒的化学形态受土壤环境控制: 酸性湿润条件下, 亚硒酸(SeO_3^{2-})主导, 其低溶解度和强吸附性(易与黏粒、氧化物、有机质结合)导致硒积累多但流动性差; 碱性氧化条件下, 硒酸(SeO_4^{2-})占优势, 其高溶解度和弱吸附性则赋予硒高度的迁移性[38]。由于研究区域属于经典的南方酸性土壤环境, 研究数据中大部分样本呈酸性, 所以 BCF 与 pH 在酸性条件下呈负相关, 而在碱性条件下应呈正相关。BCF 与土壤 Se 呈显著负相关, 可能是因为土壤 Se 达到一定水平后, 水稻吸收土壤中的 Se 趋于饱和。BCF 与 ZnN 也呈现显著正相关关系, 这与 Xu 等[39]研究结果一致, 调查泸溪县 820 组稻田土壤和稻米样品也发现增加稻米 Zn 的含量可以增加水稻的 Se 吸收和生物利用度。还有研究发现 Se 与一些重金属(如镉、Cu 和 Zn)的共同暴露后导致 Se 相关转运蛋白编码基因的表达上调[20], 而 Se 蛋白的上调直接促进细胞对 Se 的吸收[40]。

5. 结论

(1) 湘西稻田土壤硒、水稻硒与 BCF 的变异系数分别为 35.4%, 53.8% 和 66.1%, 说明稻田土壤 Se、水稻 Se 和 BCF 都呈现中等变异性。湘西稻田土壤 Se、水稻 Se 含量与 BCF 最优半方差函数模型均为指数模型, 三者的最优模型 R^2 分别为 0.715、0.852、0.789, 其块基比分别为 0.120、0.106、0.124, 空间自相关性极强, 主要受结构性因素影响; 土壤 Se 主要聚集在湘西东部, 水稻 Se 主要聚集在湘西东南部, 基本上都分布在富硒地区, 具有聚类特征。

(2) 根据岳晴晴和丁承康制定的土壤富 Se 分类标准, 湘西区域非富 Se 样点占($\text{Se} < 0.4 \text{ mg/kg}$) 52.01%、低富硒样点占($0.4 \text{ mg/kg} \leq \text{Se} < 0.8 \text{ mg/kg}$) 46.40%、中富 Se 样点占($0.8 \text{ mg/kg} \leq \text{Se} < 1.2 \text{ mg/kg}$) 1.58%、无高富硒样点($\text{Se} \geq 1.2 \text{ mg/kg}$), 平均硒含量为 0.415 mg/kg, 表明湘西稻田土壤硒资源较为丰富。水稻籽粒硒平均含量 0.048 mg/kg, 达富硒标准($\geq 0.04 \text{ mg/kg}$)的样本占比 56.21%, 但硒转移效率可能受特异性因素影响。

(3) 在本研究中, 七种成土母质发育而来的稻田土壤 Se 含量存在显著差异。其中石灰岩风化物母质的土壤 Se 含量最高, 第四纪红色黏土母质区种植的水稻 Se 含量最高。根据随机森林模型分析, SOM、土壤 Cn 含量、土壤 Zu 含量对稻田土壤 Se 含量影响较大, 日照、温度、降水对水稻 Se 含量影响较大, BCF 除了受水稻体内 Se 的积累水平影响外, 土壤 Cu 含量、日照、降水对 BCF 影响较大。

基金项目

国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-26); 湖南省耕地重金属加密调查项目(2020ST-01)。

参考文献

- [1] 张均华, 朱练峰, 禹盛苗, 等. 稻田硒循环转化与水稻硒营养研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2900-2906.
- [2] 赵君, 张哲寰, 穆华一, 等. 克山病高发区土壤-农作物硒元素特征研究[J]. 西北地质, 2021, 54(4): 250-258.
- [3] 谷海军, 郝丽萍, 李丽, 等. 2018 年河北省张家口市克山病病区人群内外环境硒水平调查分析[J]. 疾病监测, 2022, 37(4): 517-522.

- [4] 肖凯琦, 徐宏根, 李毅, 等. 湖南省龙山县耕地土壤硒含量特征及其影响因素[J]. 环境化学, 2024, 43(2): 464-474.
- [5] 申顺. 镇雄县耕地土壤硒分布及其影响因素研究[J]. 南方农业, 2024, 18(15): 96-100.
- [6] 宁驰, 周雨舟, 黄志先, 等. 临澧县稻田土壤硒、水稻硒空间分布及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(1): 155-165.
- [7] 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.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [9] Liu, Y., Tian, X., Liu, R., Liu, S. and Zuza, A.V. (2021) Key Driving Factors of Selenium-Enriched Soil in the Low-Se Geological Belt: A Case Study in Red Beds of Sichuan Basin, China. *Catena*, **196**, Article ID: 104926. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104926>
- [10] Xu, Y., Hao, Z., Li, Y., Li, H., Wang, L., Zang, Z., et al. (2020) Distribution of Selenium and Zinc in Soil-Crop System and Their Relationship with Environmental Factors. *Chemosphere*, **242**, Article ID: 125289. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125289>
- [11] 徐新良. 中国气象要素年度空间插值数据集[Z]. 资源环境科学数据注册与出版系统, 2022.
- [12] 蒋岚, 徐悦, 张晓宇, 等. 全氟化合物在鱼类肝脏中的生物富集因子预测与影响因素分析[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(2): 249-258.
- [13] Song, T., Su, X., He, J., Liang, Y., Zhou, T. and Liu, C. (2018) Selenium (Se) Uptake and Dynamic Changes of Se Content in Soil-Plant Systems. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**, 34343-34350. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3373-4>
- [14] 岳晴晴, 周卫军, 龙立长, 等. 洪江市耕地土壤硒含量分布特征及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(5): 1080-1089.
- [15] 丁庭康, 周卫军, 岳晴晴, 等. 宜章县耕地土壤硒含量空间分布特征及成因[J]. 土壤, 2023, 55(3): 626-633.
- [16] Breiman, L. (2001) Random Forests. *Machine Learning*, **45**, 5-32. <https://doi.org/10.1023/a:1010933404324>
- [17] 杜树坤, 张晶, 韩志军, 等. 基于随机森林模型的“网格-月”尺度武装冲突风险预测及影响因素分析——以中南半岛为例[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(10): 2026-2038.
- [18] 魏复盛, 杨国治, 蒋德珍, 等. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J]. 中国环境监测, 1991(1): 1-6.
- [19] Fang, Y., Wang, L., Xin, Z., Zhao, L., An, X. and Hu, Q. (2008) Effect of Foliar Application of Zinc, Selenium, and Iron Fertilizers on Nutrients Concentration and Yield of Rice Grain in China. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **56**, 2079-2084. <https://doi.org/10.1021/jf800150z>
- [20] Jiao, L., Zhang, L., Zhang, Y., Wang, R., Lu, B. and Liu, X. (2022) Transcriptome Analysis Provides New Insight into the Distribution and Transport of Selenium and Its Associated Metals in Selenium-Rich Rice. *Environmental Pollution*, **301**, Article ID: 118980. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118980>
- [21] 翁进, 李榕, 孙元贵, 等. 湖南省慈利县农作物富硒程度调查评价与富硒农业发展建议[J]. 国土资源导刊, 2017, 14(1): 12-16.
- [22] 韦体, 潘峰, 吴登宇, 等. 高原夏菜种植基地土壤养分含量及分布特征[J]. 西南农业学报, 2023, 36(5): 1002-1010.
- [23] 武德传, 周冀衡, 樊在斗, 等. 云南烤烟多酚含量空间变异分析[J]. 作物学报, 2010, 36(1): 141-146.
- [24] 刘志宗, 王晟, 刘奇, 等. 西盟县土壤硒元素空间分异特征及影响因素[J]. 土壤, 2024, 56(5): 1111-1119.
- [25] 魏振山, 涂其军, 唐蜀虹, 等. 天山北坡乌鲁木齐至沙湾地区富硒土壤地球化学特征及成因探讨[J]. 物探与化探, 2016, 40(5): 893-898.
- [26] 王锐, 余涛, 曾庆良, 等. 我国主要农耕区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.
- [27] Dinh, Q.T., Li, Z., Tran, T.A.T., Wang, D. and Liang, D. (2017) Role of Organic Acids on the Bioavailability of Selenium in Soil: A Review. *Chemosphere*, **184**, 618-635. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.034>
- [28] Dinh, Q.T., Cui, Z., Huang, J., Tran, T.A.T., Wang, D., Yang, W., et al. (2018) Selenium Distribution in the Chinese Environment and Its Relationship with Human Health: A Review. *Environment International*, **112**, 294-309. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.12.035>
- [29] Naz, M., Shabbir, R., K. Verma, K., Rastogi, A., D. Rajput, V., Javed, T., et al. (2022) Recent Developments to Mitigate Selenium Deficiency in Agricultural Eco-systems. *Phyton*, **91**, 915-927. <https://doi.org/10.32604/phyton.2022.018688>
- [30] He, Y., Xiang, Y., Zhou, Y., Yang, Y., Zhang, J., Huang, H., et al. (2018) Selenium Contamination, Consequences and Remediation Techniques in Water and Soils: A Review. *Environmental Research*, **164**, 288-301.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.02.037>

- [31] Gabos, M.B., Goldberg, S. and Alleoni, L. (2015) Modeling Selenium (IV and VI) Adsorption Envelopes in Selected Tropical Soils Using the Constant Capacitance Model. *Environmental Toxicology & Chemistry*, **33**, 2197-2207. <https://doi.org/10.1002/etc.2574>
- [32] 刘瑞, 周卫军, 彭素华, 等. 湖南省石门县耕地土壤硒含量特征及影响因素解析[J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 840-847.
- [33] Wang, D., Peng, Q., Yang, W., Dinh, Q.T., Tran, T.A.T., Zhao, X., et al. (2020) DOM Derivations Determine the Distribution and Bioavailability of Dom-Se in Selenate Applied Soil and Mechanisms. *Environmental Pollution*, **259**, Article ID: 113899. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113899>
- [34] 杨忠兰, 翟凡, 温莉, 等. 土壤-植物系统中硒的生物有效性及其影响因素研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 464-472.
- [35] Abrams, M.M., Shennan, C., Zasoski, R.J. and Burau, R.G. (1990) Selenomethionine Uptake by Wheat Seedlings. *Agronomy Journal*, **82**, 1127-1130. <https://doi.org/10.2134/agronj1990.00021962008200060021x>
- [36] Deng, X., Liu, K., Li, M., Zhang, W., Zhao, X., Zhao, Z., et al. (2017) Difference of Selenium Uptake and Distribution in the Plant and Selenium Form in the Grains of Rice with Foliar Spray of Selenite or Selenate at Different Stages. *Field Crops Research*, **211**, 165-171. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.008>
- [37] Bitterli, C., Bañuelos, G.S. and Schulin, R. (2010) Use of Transfer Factors to Characterize Uptake of Selenium by Plants. *Journal of Geochemical Exploration*, **107**, 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.09.009>
- [38] 宋江涛, 林治家, 张锦煦, 等. 湖南隆回县土壤硒元素地球化学特征及其影响因素: 以石门-滩头镇为例[J]. 华南地质, 2021, 37(1): 83-92.
- [39] Xu, Z., Zhou, W., Zhou, Y., Cui, H., Liu, R. and Shang, G. (2024) Factors Controlling Accumulation and Bioavailability of Selenium in Paddy Soils: A Case Study in Luxi County, China. *Environmental Pollution*, **348**, Article ID: 123196. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123196>
- [40] Cao, D., Liu, Y., Ma, L., Jin, X., Guo, G., Tan, R., et al. (2018) Transcriptome Analysis of Differentially Expressed Genes Involved in Selenium Accumulation in Tea Plant (*Camellia sinensis*). *PLOS ONE*, **13**, e0197506. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197506>