

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.06.08

引用格式: 阎琨, 杨源祯, 李伟. 广西钦州典型农业区表层土壤 Se 含量分布特征及影响因素[J]. 中国地质调查, 2023, 10(6): 69-76. (Yan K, Yang Y Z, Li W. Distribution characteristics and influencing factors of surface soil selenium content in typical agricultural areas of Qinzhou in Guangxi [J]. Geological survey of China, 2023, 10(6): 69-76.)

广西钦州典型农业区表层土壤 Se 含量分布特征及影响因素

阎琨^{1,2}, 杨源祯^{1*}, 李伟¹

(1. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东烟台 264000;

2. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430000)

摘要: 为了解广西钦州典型农业区表层土壤中 Se 含量水平和空间分布特征, 系统分析 Se 含量分布的影响因素, 为富硒土地的规划利用提供科学依据, 在钦州市新光农场采集 348 件表层土壤样品, 利用多元统计分析、冷热点分析、地理探测器等方法, 讨论不同因素对 Se 元素分布的影响。结果表明: 研究区表层土壤中 Se 含量为 0.07~2.56 mg/kg, 平均值为 0.91 mg/kg, 89.38% 的土壤样品符合富硒标准; Se 含量在空间上呈聚集分布状态, 热点区域主要位于研究区西部和西北部; 数理统计分析表明, 以泥盆纪碎屑岩、碳酸盐岩为成土母质的土壤具有较高的 Se 含量, Al_2O_3 和 Fe_2O_3 与 Se 含量相关性显著; 地理探测器分析表明, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、成土母质和有机质含量对 Se 含量的空间变异能力解释能力较强。综合分析表明, 成土母质和土壤理化性质是土壤 Se 含量空间分布的主要影响因素, 研究对钦州富硒土地调查与利用有较好的参考价值。

关键词: 钦州市; 表层土壤; Se; 影响因素; 地理探测器

中图分类号: P632 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2023)06-0069-08

0 引言

Se 是一种对人体很重要的非金属元素, 可以提高机体免疫力、提升机体抗癌抗衰老能力^[1-2], 人体需要的 Se 主要通过食物链从土壤中获取^[3-4]。近年来, 多地纷纷开展富硒土地调查评价工作, 为生态文明建设贡献力量。时章亮等^[5]对四川雷波县农耕地土壤 Se 含量进行调查评价, 认为其受成土母质控制, 与有机质、亲硫元素密切相关; 牛雪等^[6]利用因子分析、聚类分析对三江平原土壤 Se 来源进行分析, 认为其主要受表层土壤有机质及黏土吸附作用影响; 马骁等^[7]对福建蒲城耕地土壤开展评价, 在圈定富硒土地基础上, 对富硒土地和农产品开发提出了合理建议。

钦州市是广西壮族自治区主要的农业产区, 具有多个特色农业产业园, 对该区进行土地质量调查评价, 对助力乡村振兴, 服务生态文明建设具有重要意义。本文通过对钦州市典型农业区新光农场进行调查评价, 研究其 Se 含量水平及分布特征, 分析其形成原因及影响因素, 旨在为提升钦州市乃至北部湾地区富硒土地的利用作出贡献。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

新光农场位于钦州市钦北区与灵山县交界处(图 1), 地处亚热带季风气候区, 地貌类型以河流冲洪积平原和丘陵为主, 出露主要地层为志留纪碎屑岩、泥盆纪碳酸盐岩和碎屑岩、三叠纪酸性侵入岩、

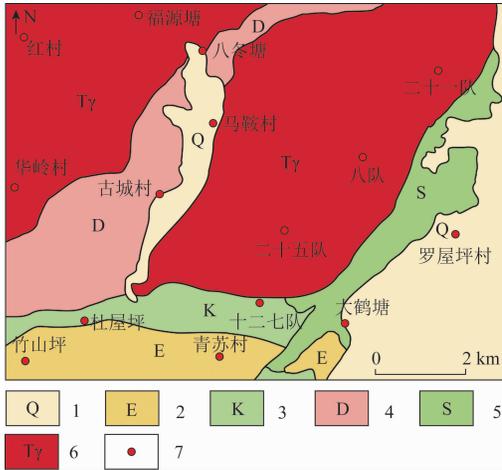
收稿日期: 2023-05-22; 修订日期: 2023-11-07。

基金项目: 中国地质调查局“广西钦州湾海岸带综合地质调查(编号: DD20191024)”“广西北仑河口—茅尾海一带重要红树林湿地资源调查(编号: ZD20220131)”和“胶东北部海岸带与岛礁综合地质调查(编号: ZD20220604)”项目联合资助。

第一作者简介: 阎琨(1988—), 男, 工程师, 从事环境地球化学调查与研究。Email: 544507188@qq.com。

* 通信作者简介: 杨源祯(1990—), 男, 工程师, 从事海岸带地质调查与评价工作。Email: 452998432@qq.com。

白垩纪紫红色碎屑岩、古近纪土黄色砂砾岩、第四纪冲洪积砂土层等。土壤类型主要为赤红壤、小部分为水稻土,主要土地利用类型为林地、园地、耕地。研究区农作物以荔枝、龙眼、水稻为主。



1. 第四系; 2. 古近系; 3. 白垩系; 4. 泥盆系; 5. 志留系; 6. 三叠纪花岗岩; 7. 地名

图1 研究区地质简图

Fig.1 Geological sketch of the study area

1.2 样品采集与处理

2019年10月,采用网格布点法采集研究区农用地表层土壤样品348件,采样深度为0~20 cm,平均采样密度为4件/km²。采用四分法采样,在采样点10~20 m内向四周辐射4个采样点,等份混合成一个样品。样品重量大于2 kg,样品置于布袋内系紧,现场记录并标记。样品经过充分自然晾干后过10目筛,取400 g置入聚乙烯瓶中,送入实验室测试。

1.3 检测项目与测试方法

土壤样品主要测试氧化物、微量元素、pH值、有机质等28个指标。样品分析由南宁矿产资源监督检测中心负责。Se测定采用氢化物发生-原子荧光光谱法,主要氧化物、S等元素测定由X射线荧光光谱法完成,Ge、Zn、Ni元素测定采用耦合等离子体质谱法,pH值采用pH计测定,有机质由滴定管测定。测试过程中利用GSS-22、GSS-23、GSS-29、GSS-30控制测试质量,精密度和准确度的计算公式为

$$\Delta \lg \bar{C} = |\lg \bar{C}_i - \lg C_s| \quad (1)$$

$$RSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_s)^2}{n-1}} / C_s \quad (2)$$

式中: $\Delta \lg \bar{C}$ 为准确度; RSD 为精密度,%; C_i 为标准样品的检测结果; C_s 为标准值。

计算结果见表1,质量控制均符合规范要求。

表1 研究区主要测试指标检出限、准确度、精密度

Tab.1 Detection limit, accuracy and precision of main test indicators in the study area

测试指标	检出限($\mu\text{g/g}$)	准确度	精密度/%
Al_2O_3	0.02*	0.009	3.05
Fe_2O_3	0.05*	0.000	0.28
K_2O	0.05*	0.021	6.25
有机质	0.10*	0.017	4.15
Ge	0.10	0.005	2.85
Ni	2.00	0.030	7.81
S	30.00	0.033	7.98
Se	0.01	0.016	7.70
Zn	4.00	0.008	2.31
pH值	0.10**	0.003	0.76

注:“*”单位为%，“**”为无量纲。

1.4 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性及其驱动力的统计学方法,要求因变量为连续变量,自变量为类型变量^[8]。对于为连续变量的自变量,通常利用ArcGIS中的自然断点法转化为类型变量^[9]。本文利用地理探测器中的因子探测和交互探测进行分析。

1.4.1 因子探测

因子探测的目的是为了了解各自变量因子对因变量结果是否具有解释力以及解释力的大小,其理论模型为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (3)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (4)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (5)$$

式中: h 为因子 X 的分类; N_h 和 N 分别为分类 h 的数量和全部的数量; σ_h^2 和 σ^2 分别为分类 h 的方差和全域 Y 值的方差; SSW 和 SST 分别为层内方差之和和全区总方差; q 值越大,表明该自变量 X 对 Y 的解释力越强。

1.4.2 交互探测

交互探测目的是识别不同因子之间的相互作用,即不同因子共同作用时是否会增强或减弱对因变量的解释力。不同因子之间的交互作用可分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立、非线性增强5种。

1.5 全局莫兰指数和热点分析

1.5.1 全局莫兰指数

全局莫兰指数是空间相关性检验的常用方法,可以表示属性值在空间上是否聚集^[10-11]。其公式为

$$I = \frac{n \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6)$$

$$Z = \frac{1 - E(I)}{\sqrt{var(I)}}. \quad (7)$$

式中: I 为全局莫兰指数, x_i, x_j 分别为位置 i, j 的属性值, \bar{x} 为所有 i, j 点属性的平均值, n 为数据个数。 w_{ij} 为栅格单元的权重; Z 为莫兰指数显著性检验得分, $E(I)$ 和 $var(I)$ 为莫兰指数的期望值和变数。莫兰指数小于 0 表示数据空间负相关, 等于 0 表示不相关, 大于 0 表示正相关。当 $|Z|$ 分别大于 1.65、1.96、2.58 时, 表明显著性检验 P 值分别小于 0.1、0.05、0.01。

1.5.2 热点分析

全局莫兰指数可以反映属性的空间聚集情况, 不能确定具体聚集的区域, 利用热点分析 (Getis - Ord G_i^*) 可以有效识别空间具有统计显著性的聚类区域^[11-12]。其公式为

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j}{\sum_{i=1}^n x_j}, \quad (8)$$

$$Z(G_i^*) = \frac{(G_i^* - E(G_i^*))}{\sqrt{var(G_i^*)}}. \quad (9)$$

式中: G_i^* 为热点指数, $Z(G_i^*)$ 为标准化的热点指数, $E(G_i^*)$ 和 $var(G_i^*)$ 分别为 G_i^* 的期望数和变数, 其余指标含义同上文。若 $Z(G_i^*) > 0$, 表明位置 i 周围值高于均值, 属于高值聚集热点区; 若 $Z(G_i^*) < 0$, 表明位置 i 周围值低于均值, 属于低值聚集冷点区 $Z(G_i^*)$ 与显著性检验 $G_i^*(P)$ 的关系如上文。

2 结果与讨论

2.1 表层土壤 Se 含量特征

研究区表层土壤中 Se 含量为 0.07 ~ 2.56 mg/kg, 平均值为 0.91 mg/kg, 标准差为 0.41。变异系数为 0.45, 表明空间分布受到多种因素影响^[13]。研

究区表层土壤 Se 平均值高于全国 A 层土壤背景值 (0.29 mg/kg)^[14]、北部湾地区土壤背景值 (0.44 mg/kg)^[15] 和南宁市土壤背景值 (0.57 mg/kg)^[16]。研究区表层土壤较高的 Se 含量可能与其成土母质沉积 - 构造背景密切相关。根据硒生态景观分级标准对硒进行评价^[8,17], 显示绝大多数土壤属于足硒 - 富硒土壤范围 (表 2)。

表 2 研究区 Se 含量等级表

Tab.2 Selenium content levels in the study area

含量分级	分级标准/ (mg · kg ⁻¹)	硒效应	样品数	比例/%
缺乏	(0, 0.125]	硒不足	3	0.84
边缘	(0.125 - 0.175]	潜在硒不足	3	0.84
中等	(0.175 - 0.400]	足硒	32	8.94
高	(0.400 - 3.000]	富硒	320	89.38
过剩	≥ 3 000	硒中毒	0	0.00

2.2 表层土壤 Se 空间分布

利用 ArcGIS 10.7 克里金插值法, 得到表层土壤 Se 含量平面分布图 (图 2)。研究区西部存在 Se 分布的高值区, 含量为 1.34 ~ 1.48 mg/kg, 其余高值区在研究区西北部和东部零星分布; Se 含量低值区主要分布在研究区南部, 部分分布在研究区中部, Se 含量多为 0.07 ~ 0.64 mg/kg。利用莫兰指数进行全局空间自相关分析, 莫兰指数为 0.432, Z 得分为 8.344, $P < 0.05$, 具有统计学意义, 表明表层土壤中 Se 含量分布具有显著的空间自相关性^[18]。冷热点分析表明 (图 3): 热点区域 $G_i^*(P) < 0.01$ 的样品点占比为 6.14%, 主要位于研究区西部, $G_i^*(P) < 0.05$ 的样品点占比为 3.35%, 主要分布在研究区西部和西北部; 冷点区域 $G_i^*(P) < 0.05$ 的样品点占比为 5.59%, 主要分布在研究区中部和南部。

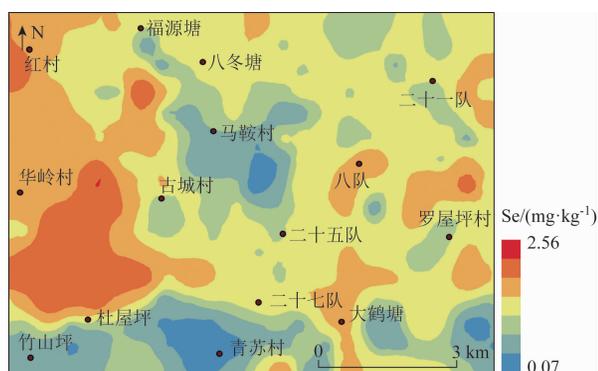


图 2 研究区表层土壤 Se 含量分布

Fig.2 Distribution of selenium content in surface soil of the study area

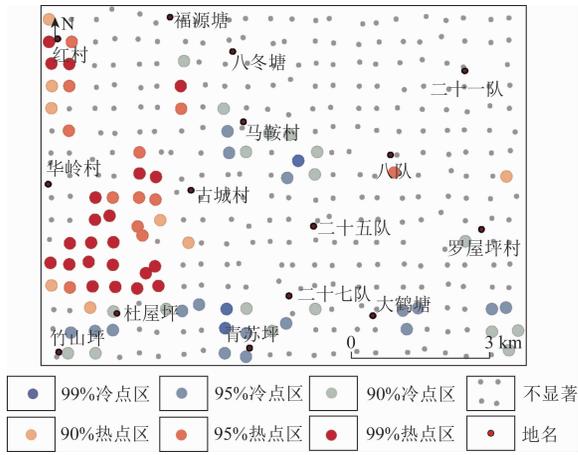


图3 研究区 Se 含量冷热点分析

Fig.3 Analysis of cold and hot spots of selenium content in the study area

2.3 土壤 Se 含量分布影响因素

土壤中 Se 含量分布呈现明显的自相关,且冷热点区域与 Se 含量分布的低值区和高值区具有较好的对应关系,这为系统讨论土壤中 Se 的来源提供了较好的基础。

2.3.1 成土母质

土壤中的 Se 常与地质背景有关,主要来源于成土母质,并与土壤性质、气候等相关^[19-21]。本次统计了研究区不同母质土壤中 Se 含量,平均含量由高到低依次为泥盆纪碎屑岩和碳酸盐岩母质、志留纪碎屑岩母质、三叠纪花岗岩母质、第四纪冲洪积层母质、古近纪碎屑岩母质、白垩纪碎屑岩母质(图4)。第四纪冲洪积层由于成土时间短,其物质组成及元素含量与上游地层密切相关^[22], 钦江流域上游主要为志留纪碎屑岩。Se 含量最高的为泥盆纪碎屑岩和碳酸盐岩母质,含量达 1.39 ± 0.46 mg/kg,该区域为热点区; Se 含量最低的为白垩纪碎屑岩母质,为 0.45 ± 0.20 mg/kg,为主要的冷点区。这表明土壤中 Se 含量主要受土壤母质控制。志留纪和泥盆纪碳酸盐岩、碎屑岩为母质的土壤,Se 含量较高,总体表现为不同成土母质 Se 含量碳酸盐岩 > 碎屑岩 > 酸性岩浆岩的特征,这表明不同的沉积-构造背景形成的岩石系列组合,对 Se 含量有着控制作用。有研究认为,碳酸盐岩母质的土壤往往由较厚的原岩形成,因此 Se 形成了初次富集^[23],成土过程中碳酸盐的大量淋失,形成二次富集^[18]。杨志强等^[15]对研究区南部和北部湾沿海地区土壤硒元素成土母质分析表明,Se 含量具有随沉积时代由老到新逐渐降低的趋势,其研究的志留

纪和泥盆纪碎屑岩 Se 含量为 0.53 mg/kg,比本文同时代地层土壤 Se 含量低,这表明还存在其他因素控制 Se 的分布。

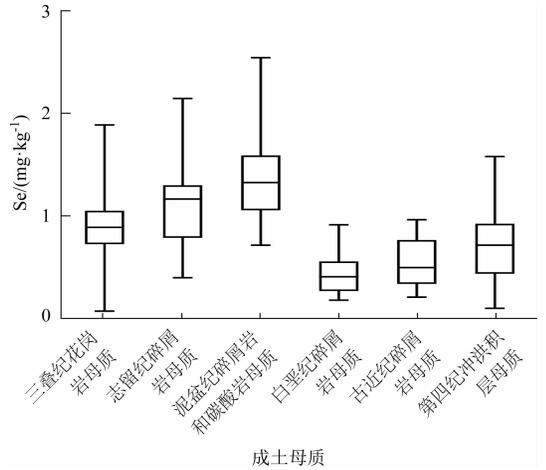


图4 研究区不同成土母质 Se 含量统计

Fig.4 Statistics of selenium content in different soil forming parent material of the study area

2.3.2 土壤类型

研究区主要土壤类型为赤红壤,少量为水稻土。根据统计结果,水稻土中 Se 含量为 0.84 ± 0.22 mg/kg,赤红壤中 Se 含量为 0.91 ± 0.42 mg/kg(图5)。赤红壤中 Se 含量变化范围较大,变异系数较高,表明受人类活动影响较大。与研究区南部滨海地区滨海盐土相比,研究区 Se 含量明显偏高,这可能是由于滨海盐土呈碱性,土壤淋滤作用强,Se 易发生迁移淋滤^[16]。以上对比表明,土壤类型对 Se 含量分布有一定影响作用。

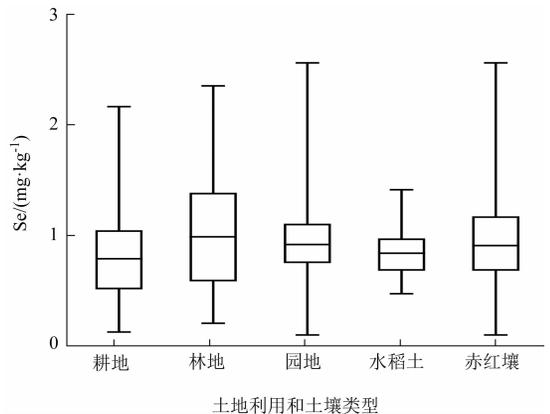


图5 研究区不同土地利用和土壤类型 Se 含量统计
Fig.5 Statistics of selenium content in different land use and soil types of the study area

2.3.3 土地利用类型

耕地、林地、园地中表层土壤 Se 含量分别为

0.80 ± 0.39 mg/kg、1.01 ± 0.49 mg/kg、0.94 ± 0.35 mg/kg(图 5)。受人类活动影响较小的林地 Se 含量大于人类活动影响较大的耕地,表明人类活动对 Se 含量有一定的影响。林地中受人类活动较小,形成土壤—植物—土壤的循环作用,使得 Se 富集于表层土壤,而耕地由于人类活动加速土壤中有有机质分解,导致 Se 迁移和被吸收^[24]。不同植物对 Se 的吸收效率不同,也可能导致不同土地类型 Se 含量的差异。

2.3.4 土壤理化性质

土壤理化性质是影响 Se 含量及利用效率的关键因素之一^[5-6]。表层土壤中 Se 含量与 Ni、Zn 及有机质含量相关性显著,表明其可能主要来自成土母质和有有机质的富集^[25]。研究区土壤中 Se 含量与 Al₂O₃、Fe₂O₃、S 等指标相关性显著(图 6),与前人认为的铝、铁等氧化物对 Se 有较明显的吸附作用结论相一致^[19-20],这主要是由于 Se 容易与 Fe 的硫化物、氧化物发生沉淀反应,使土壤中 Se 含量增加。Se 含量与 K 呈负相关,与 Al₂O₃ 正相关,表明黏土矿物对 Se 的吸附作用较强,长石类对 Se 吸附较弱^[26]。前人研究认为,有机质、铁铝矿物对 Se 的吸附与 pH 值密切相关,在 pH 值为 4~6 时吸附最大^[27],本次研究 pH 值为 3.19~8.19,中位数为 4.83,总体为酸性环境。在碱性土壤中,Se 含量基本不受 pH 值影响,多以硒酸盐形式存在,易被植物吸收,但同时也容易流失,不易保存;酸性土壤中,Se 含量与 pH 值呈负相关,而此时 Se 多以亚硒酸盐形式存在,生物有效性较低^[27-28],可能不利于植物的吸收。研究认为通过合理施肥,控制土壤的 pH 值和有机质含量,可能有利于作物对 Se 的吸收^[15]。

2.4 各因子影响程度分析

利用地理探测器对研究区表层土壤中 Se 含量的影响因素进行分析,将 Al₂O₃、Fe₂O₃、有机质含量、pH 值、采样高程 5 个指标利用自然断点法分别分为 5 类,成土母质、土壤类型和土地利用类型按实际分类。

2.4.1 因子探测

研究区因子探测结果显示,土壤类型对土壤 Se 含量不具有解释力。(P = 0.588, P 值确保解释力有意义, P 值大于 0.05 则无解释力),土地利用类型对土壤中 Se 含量解释力相对较差(P = 0.000 3, q = 0.04),其余因子对土壤中 Se 含量解释力相对较好(P = 0)。其中 Al₂O₃、Fe₂O₃、成土母质、有机质含量具有较高的解释力, q 值分别为 0.497、0.393、0.345、0.207(图 7),而土壤的 pH 值和高程对土壤 Se 含量的解释力则相对较低, q 值分别为 0.082 和 0.066。这表明成土母质和土壤理化性质对土壤中 Se 含量具有较好的控制作用。

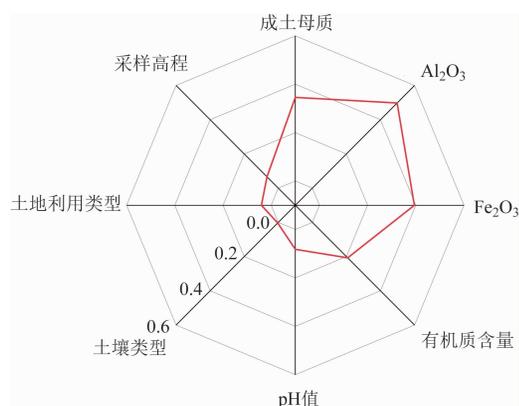


图 7 研究区因子探测雷达图

Fig. 7 Radar chart of factor detection in the study area

2.4.2 交互探测

研究区交互探测结果见图 8。不同因子交互探测作用显示,其解释力均高于单个因子的解释力,均为双因子增强或非线性增强,无非线性减弱和单因子非线性减弱。其中双因子增强指的是交互作用解释力大于双因子最大解释力,非线性增强指的是交互作用解释力大于双因子解释力之和。Al₂O₃ 与其他因子交互作用具有较强的解释力, q 值均大于 0.5,其中与有机质含量因子交互作用 q 值最高,达 0.588。成土母质和 Fe₂O₃ 与其他因子交互作用也具有较高的解释力,均大于

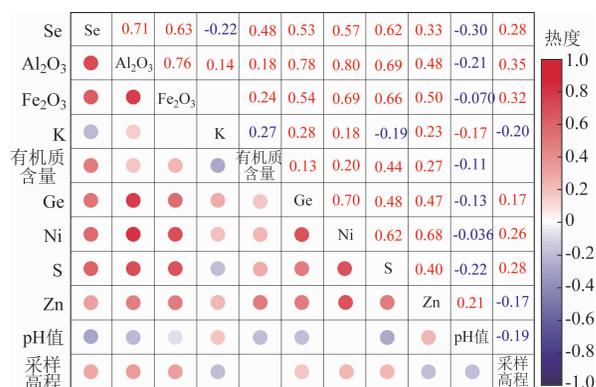


图 6 研究区不同指标与 Se 相关性热图

Fig. 6 Heat map of the correlation between different indicators and selenium in the study area

0.355。研究区表层土壤中有机质含量与土壤 pH 值、土壤类型、土地利用类型交互作用显示解释力较弱, q 值均小于 0.30, 而与采样高程具有较高的解释力, q 值为 0.347。pH 值、土壤类型、土地利用类型、采样高程两两之间交互作用显示解释能力较弱, q 值均小于 0.15。研究表明, 在热带亚热带地区, 土壤中 Se、Ge 等更容易被黏土矿物和 Fe - Mn 氧化物吸附^[29-30]。广西较强的土壤风化作用以及成土母质中的方解石、白云石、长石等矿物分解, 使得 K_2O 、 Na_2O 、 MgO 大量流失, 生成大量含 Al 和 Fe 次生矿物, 强烈的吸附作用造成土壤中 Se 的富集^[26]。

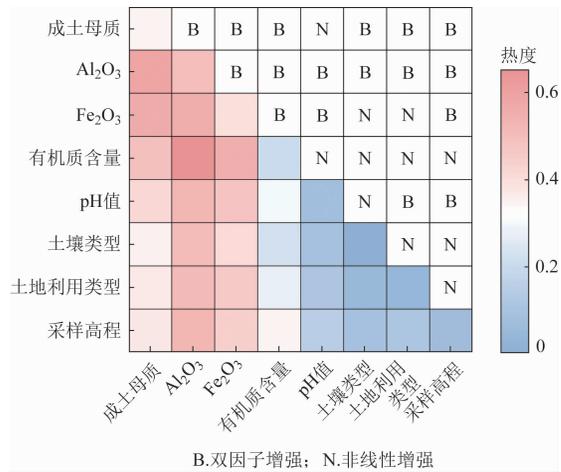


图 8 研究区交互探测热图

Fig. 8 Interactive detection heat map in the study area

3 结论

(1) 研究区表层土壤中 Se 含量为 0.07 ~ 2.56 mg/kg, 平均值为 0.91 mg/kg, 高于北部湾地区和南宁市土壤背景值。根据 Se 景观评价, 89.38% 的土壤样品属于富硒水平。

(2) 研究区表层土壤全局莫兰指数和冷热点分析表明, Se 的空间分布具有明显的空间自相关性, 热点区域主要位于研究区西部和西北部。泥盆纪碎屑岩和碳酸盐岩为成土母质的土壤具有较高的 Se 含量; 白垩纪碎屑岩形成的土壤则具有较低的 Se 含量。土地利用类型和土壤类型对 Se 含量分布影响相对较小。

(3) 地理探测器因子探测表明, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、成土母质和有机质含量对 Se 含量的空间分布具

有较高的解释力; 交互探测显示, 成土母质与土壤理化性质对 Se 含量的空间分布具有双因子增强作用。

参考文献 (References):

[1] Ben Amara I, Troudi A, Garoui E, et al. Protective effects of selenium on methimazole nephrotoxicity in adult rats and their offspring [J]. *Experimental and Toxicologic Pathology*, 2011, 63(6):553-561.

[2] Jarzyńska G, Falandysz J. Selenium and 17 other largely essential and toxic metals in muscle and organ meats of Red Deer (*Cervus elaphus*) - Consequences to human health [J]. *Environment International*, 2011, 37(5):882-888.

[3] Kolachi N F, Kazi T G, Wadhwa S K, et al. Evaluation of selenium in biological sample of arsenic exposed female skin lesions and skin cancer patients with related to non-exposed skin cancer patients [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(17):3092-3097.

[4] 张丽珊, 朱岩, 可夫, 等. 东北大骨节病区主要土壤腐殖酸硒与大骨节病关系的研究 [J]. *应用生态学报*, 1990, 1(4):333-337.
Zhang L S, Zhu Y, Ke F, et al. Study on relations between Kaschin-Beck disease and content of selenium bounded by humic acids in soil in Northeast China [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1990, 1(4):333-337.

[5] 时章亮, 金立新, 廖超, 等. 四川雷波县重点耕地区土壤硒含量特征及其成因分析 [J]. *物探与化探*, 2020, 44(5):1253-1260.
Shi Z L, Jin L X, Liao C, et al. Content characteristics and genesis of soil selenium in important cultivated areas of Leibo County, Sichuan Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(5):1253-1260.

[6] 牛雪, 何锦, 庞雅婕, 等. 三江平原西部土壤硒分布特征及其影响因素 [J]. *物探与化探*, 2021, 45(1):223-229.
Niu X, He J, Pang Y J, et al. Distribution feature of soil selenium in west Sanjiang plain and its influencing factors [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(1):223-229.

[7] 马骁, 陈智贤, 林联桂, 等. 福建浦城县耕地土壤元素地球化学评价 [J]. *中国地质调查*, 2020, 7(2):89-94.
Ma X, Chen Z X, Lin L G, et al. Geochemical evaluation of cultivated soil elements in Pucheng County of Fujian Province [J]. *Geological Survey of China*, 2020, 7(2):89-94.

[8] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1):116-134.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.

[9] 龚仓, 王亮, 王顺祥, 等. 基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2022, 43(10):4566-4577.
Gong C, Wang L, Wang S X, et al. Spatial differentiation and influencing factor analysis of soil heavy metal content at town level based on geographic detector [J]. *Environmental Science*, 2022,

- 43(10):4566-4577.
- [10] 刘昭玥,费杨,师华定,等. 基于 UNMIX 模型和莫兰指数的湖南省汝城县土壤重金属源解析[J]. 环境科学研究,2021,34(10):2446-2458.
- Liu Z Y,Fei Y,Shi H D,et al. Source apportionment of soil heavy metals in Rucheng County of Hunan Province based on UNMIX model combined with Moran index[J]. Research of Environmental Sciences,2021,34(10):2446-2458.
- [11] 杜挺,谢贤健,梁海艳,等. 基于熵权 TOPSIS 和 GIS 的重庆市县域经济综合评价及空间分析[J]. 经济地理,2014,34(6):40-47.
- Du T,Xie X J,Liang H Y,et al. County economy comprehensive evaluation and spatial analysis in Chongqing City based on entropy weight - TOPSIS and GIS [J]. Economic Geography, 2014, 34(6):40-47.
- [12] 陈文峰,孟德友,贺振. 河南省城市化水平综合评价及区域格局分析[J]. 地理科学进展,2011,30(8):978-985.
- Chen W F,Meng D Y,He Z. Comprehensive evaluation and spatial pattern of regional urbanization level in Henan[J]. Progress in Geography,2011,30(8):978-985.
- [13] 代勇,李章平,李燕燕,等. 重庆市主城区街道灰尘重金属的污染特征分析[J]. 环境化学,2015,34(1):188-189.
- Dai Y,Li Z P,Li YY,et al. Analysis of heavy metal pollution characteristics in street dust in the main urban area of Chongqing[J]. Environmental Chemistry,2015,34(1):188-189.
- [14] 刘铮. 中国土壤微量元素[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1996.
- Liu Z. Chinese Soil Trace Elements[M]. Nanjing:Jiangsu Science and Technology Press,1996.
- [15] 杨志强,李杰,郑国东,等. 广西北部湾沿海经济区富硒土壤地球化学特征[J]. 物探与化探,2014,38(6):1260-1264,1269.
- Yang Z Q,Li J,Zheng G D,et al. Geochemical characteristics of selenium - rich soil in Beibu Gulf coastal economic zone of Guangxi[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2014,38(6):1260-1264,1269.
- [16] 李杰,杨志强,刘枝刚,等. 南宁市土壤硒分布特征及其影响因素探讨[J]. 土壤学报,2012,49(5):1012-1020.
- Li J,Yang Z Q,Liu Z G,et al. Distribution of selenium in soils of Nanning city and its influencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica,2012,49(5):1012-1020.
- [17] 谭见安. 中华人民共和国地方病与环境图集[M]. 北京:科学出版社,1989.
- Tan J A. Atlas of Endemic Disease and Environment of the People's Republic of China[M]. Beijing,Science Press,1989.
- [18] 牟叶果,陈清霞,李龙波,等. 贵阳市花溪区表层土壤硒空间分异特征及其影响因素[J]. 环境科学学报,2022,42(8):415-424.
- Mou Y G,Chen Q X,Li L B,et al. Spatial differentiation and influencing factors of surface soil selenium in Huaxi District, Guiyang[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2022,42(8):415-424.
- [19] 王美珠,章明奎. 我国部分高硒低硒土壤的成因初探[J]. 浙江农业大学学报,1996,22(1):89-93.
- Wang M Z,Zhang M K. A discussion on the cause of high - Se and low - Se soil formation[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University,1996,22(1):89-93.
- [20] 王五一,李永华,雒昆利,等. 大巴山区土壤中硒、氟的地球化学特征[J]. 地理研究,2003,22(2):177-184.
- Wang W Y,Li Y H,Luo K L,et al. The geochemical characteristics of selenium and fluorine in soils of Daba Mountains[J]. Geographical Research,2003,22(2):177-184.
- [21] 尹宗义,王会锋,任蕊,等. 陕西省石头河一带土壤及植物富硒特征[J]. 物探与化探,2014,38(2):349-353.
- Yin Z Y,Wang H F,Ren R,et al. The selenium - rich characteristics of soils and plants in Shitou river area,Shanxi province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2014,38(2):349-353.
- [22] 王世纪,吴小勇,刘军保. 浙北地区土壤硒元素特征及其生态环境效应评价[J]. 中国地质,2004,31(S1):118-125.
- Wang S J,Wu X Y,Liu J B. Characteristics of elemental selenium in soils and evaluation of eco - environmental effects in northern Zhejiang[J]. Geology in China,2004,31(S1):118-125.
- [23] 王甘露,朱笑青. 贵州省土壤硒的背景值研究[J]. 环境科学研究,2003,16(1):23-26.
- Wang G L,Zhu X Q. A study on the selenium background level in the soils in Guizhou [J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(1):23-26.
- [24] 曹容浩. 福建省龙海市表层土壤硒含量及影响因素研究[J]. 岩矿测试,2017,36(3):282-288.
- Cao R H. Study on selenium content of surface soils in Longhai, Fujian and its influencing factors[J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, 36(3):282-288.
- [25] 赵少华,宇万太,张璐,等. 环境中硒的生物地球化学循环和营养调控及分异成因[J]. 生态学杂志,2005,24(10):1197-1203.
- Zhao S H,Yu W T,Zhang L,et al. Biogeochemical cycling of selenium, nutrition adjustment and differentiation cause in environment[J]. Chinese Journal of Ecology,2005,24(10):1197-1203.
- [26] 覃建勋,付伟,郑国东,等. 广西岩溶区表层土壤硒元素分布特征与影响因素探究——以武鸣县为例[J]. 土壤学报,2020,57(5):1299-1310.
- Qin J X,Fu W,Zheng G D,et al. Selenium distribution in surface soil layer of karst area of Guangxi and its affecting factors: A case study of Wuming county [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5):1299-1310.
- [27] 朱建明,梁小兵,凌宏文,等. 环境中硒存在形式的研究现状[J]. 矿物岩石地球化学通报,2003,22(1):75-81.
- Zhu J M,Liang X B,Ling H W,et al. Advances in studying occurrence modes of selenium in environment[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry,2003,22(1):75-81.
- [28] Zhang L H,Shi W M,Wang X C. Difference in selenium accumulation in shoots of two rice cultivars [J]. Pedosphere, 2006, 16(5):646-653.
- [29] 杨忠芳,余涛,侯青叶,等. 海南岛农田土壤 Se 的地球化学特征[J]. 现代地质,2012,26(5):837-849.
- Yang Z F,Yu T,Hou Q Y,et al. Geochemical characteristics of soil selenium in farmland of Hainan Island[J]. Geoscience,2012,

26(5):837-849.

[30] 段铁仁,杨忠芳,杨琼,等.广西北部湾地区土壤锗分布特征、影响因素及其生态环境评价[J].中国地质,2020,47(6):1826-1837.

Duan Y R, Yang Z F, Yang Q, et al. The distribution, influencing factors and ecological environment evaluation of soil germanium in Beibu Gulf of Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1826-1837.

Distribution characteristics and influencing factors of surface soil selenium content in typical agricultural areas of Qinzhou in Guangxi

YAN Kun^{1,2}, YANG Yuanzhen¹, LI Wei¹

(1. *Yantai Geological Survey Center of Coastal Zone, China Geological Survey, Shandong Yantai 264000, China*;
2. *School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430000, China*)

Abstract: In order to analyze the content level and spatial distribution characteristics of selenium in the surface soil of typical areas in Qinzhou of Guangxi, and the influencing factors of selenium content distribution, and provide scientific basis for the planning and utilization of selenium rich land, the authors in this paper collected 348 surface soil samples from Xinguang Farm to discuss the impact of different factors on the distribution of selenium element, through multiple statistical analysis, cold and hot spot analysis, geographic detectors. The results Xinguang show that selenium content in the surface soil of the study area was 0.07-2.56 mg/kg, with an average value of 0.91 mg/kg, and 89.38% of the samples met the selenium enrichment standard. The spatial distribution of soil selenium content was aggregated, and the hot spots were mainly located in the western and northwestern part of the study area. The statistical analysis shows that soil derived from Devonian carbonate rocks and clastic rocks has higher selenium content, and there is a significant correlation between Al_2O_3 , Fe_2O_3 and selenium content. Al_2O_3 , Fe_2O_3 , soil parent material, and organic matter content have strong explanatory power for the spatial variability of selenium content, by geodetector analysis. The comprehensive analysis shows that parent material and soil physicochemical property are the main factors affecting the distribution of soil selenium content. This research has good reference value for the investigation and utilization of selenium rich land in Qinzhou.

Keywords: Qinzhou City; surface soil; selenium; influencing factors; geographic detectors

(责任编辑:刘丹,王晗)