

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.03.021

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. 土壤, 2023, 55(3): 626–633.

## 宜章县耕地土壤硒含量空间分布特征及成因<sup>①</sup>

丁庭康<sup>1</sup>, 周卫军<sup>1\*</sup>, 岳晴晴<sup>1</sup>, 彭素华<sup>2</sup>, 刘沛<sup>1</sup>, 崔浩杰<sup>1</sup>, 谭振华<sup>3</sup>

(1 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2 湖南农业大学图书馆, 长沙 410128; 3 湖南省宜章县农业农村局湘南脐橙综合试验站, 湖南宜章 424206)

**摘要:**厘清宜章县耕地土壤硒含量空间分布及影响因素,对开发特色富硒农产品和保障人体健康具有重大意义。采用野外调查采样、实验室分析测定、数学统计和模型模拟等方法,分析宜章县耕地土壤硒含量分布特征及其影响因素。研究表明:①宜章县耕层土壤硒含量平均值0.64 mg/kg,变幅为0.13~2.80 mg/kg,变异系数为44.57%,属中等变异程度,耕地土壤硒含量高、耕地富硒面积大;②土壤硒含量呈聚集性分布,中部有一条自东北向南从玉溪镇经梅田镇、浆水镇、长村乡、一六镇、笆篱镇、天塘乡的中高富硒带,块金效应值为0.505,说明宜章县土壤硒空间自相关性程度为中等,土壤硒含量受空间结构因素(自然因素)和随机因素(人为因素)共同影响;③不同成土母质发育的土壤硒含量差异较大,板页岩发育的耕地土壤硒含量最高,平均硒含量达到0.76 mg/kg;④不同土壤类型对硒含量有明显影响,潮土和黑色石灰土的土壤硒平均含量最高,均达到了0.68 mg/kg,紫色土和黄壤硒含量较低,平均硒含量分别只有0.54 mg/kg和0.53 mg/kg;⑤相关分析表明:土壤硒含量与pH呈显著负相关,与有机质、锰、铜、锌和CEC显著正相关。在富硒农产品开发时,须考虑土壤硒含量分布特征,并结合相应土壤管理、科学施肥、农艺措施等进行。

**关键词:**宜章县;土壤硒;空间分布;影响因素;富硒农产品

中图分类号: S153.6 文献标志码: A

## Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Selenium Content in Cultivated Land in Yizhang County

DING Tingkang<sup>1</sup>, ZHOU Weijun<sup>1\*</sup>, YUE Qingqing<sup>1</sup>, PENG Suhua<sup>2</sup>, LIU Pei<sup>1</sup>, CUI Haojie<sup>1</sup>, TAN Zhenhua<sup>3</sup>

(1 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2 Library of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3 Xiangnan Navel Orange Comprehensive Experimental Station, Agricultural and Rural Bureau of Hunan, Yizhang County, Yizhang, Hunan 424206, China)

**Abstract:** Understanding the spatial distribution and influencing factors of selenium (Se) content in cultivated soil in Yizhang County is of great significance for the development of characteristic Se-rich agricultural products and the protection of human health. The distribution characteristics and influencing factors of Se content in cultivated soil in Yizhang County were analyzed by field investigation, laboratory analysis, mathematical statistics and model simulation. The results showed that: 1) The average Se content of topsoil in Yizhang County is 0.64 mg/kg, ranging from 0.13 to 2.80 mg/kg, and the coefficient of variation is 44.57%, which is a moderate degree of variation. 2) There is a middle-high selenium-rich belt from Yuxi Town to Meitian Town, Jiangshui Town, Changcun Township, Yiliu Town, Fence Town and Tiantang Township from northeast to south in the middle. The nugget effect value is 0.505, indicating that the spatial autocorrelation degree of soil Se in Yizhang County is moderate, and soil Se content is affected by spatial structure factors (natural factors) and random factors (human factors). 3) There are significant differences in Se content in soils developed from different soil parent materials. Soil Se content of cultivated land developed from slate shale is the highest, with an average selenium content of 0.76 mg/kg. 4) Different soil types have obvious effects on selenium content, and the average content of Se in fluvo-aquic soil and black calcareous soil is the highest, reaching 0.68 mg/kg, and the average selenium content of purple soil and yellow soil is only 0.54 mg/kg and 0.53 mg/kg, respectively. 5) Correlation analysis showed that soil Se content is significantly negatively correlated with pH and positively correlated with organic matter, Mn, Cu,

①基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-26)和湖南省耕地重金属加密调查项目(2020ST-01)资助。

\* 通讯作者(wjzh0108@163.com)

作者简介: 丁庭康(1999—),男,湖南醴陵人,硕士研究生,主要研究方向为农业资源利用。E-mail: 1907560194@qq.com

Zn and CEC. In developing Se-rich agricultural products, the distribution characteristics of soil Se content should be considered, and the corresponding soil management, scientific fertilization and agronomic measures should be combined.

**Key words:** Yizhang County; Soil selenium (Se); Spatial distribution; Influencing factors; Se-rich agricultural products

硒是人类和动物都必需的一种微量营养元素,国内外大量研究均证实硒可以提高人体免疫能力、进行重金属解毒,同时在预防部分癌症和地方病等方面也具有重要的作用<sup>[1-3]</sup>。硒缺失有可能引起关节炎、克山病等疾病,而硒过量则会大大增加癌症的发病率<sup>[4]</sup>。人类获取硒的途径主要是摄入食物,而食物中硒来源于土壤,所以土壤中的硒才是人类获取硒元素的最终来源<sup>[5-6]</sup>。与此同时,中国是全球缺硒40个国家之一,是严重缺硒的国家,2/3地区缺硒,硒的空间分布不均,且差距明显<sup>[7]</sup>。

近年来对土壤硒元素含量的研究成果很多,众多学者对不同地区的硒元素空间分布特征和影响因素进行了大量的分析,一般都认为硒元素其影响因素主要为成土母质、土壤类型、人为影响方式和土壤理化性状<sup>[8]</sup>。朱建明等<sup>[9]</sup>在研究恩施富硒土壤的硒元素的来源时,发现主要因素为人类活动与富硒地层的风化作用,人类活动以物理堆积和迁移为主,同时由于在耕地土壤中耕作,改变了土壤的理化性质,从而带来农作物的富硒;商靖敏等<sup>[10]</sup>研究发现,在洋河流域表层土壤中硒相关性最好的是土壤的黏粒性,pH越高,硒含量越低,同时随着海拔的升高硒含量有明显的增加;姜磊<sup>[11]</sup>在万源富硒区土壤中硒的分析表明,pH的增高会导致硒元素的增加,有机质也是影响硒含量的一个决定因素;郑新如等<sup>[12]</sup>在对石泉县中部地区硒的影响因素分析中认为成土母质是导致硒含量差异的主要因素,同时硒含量与主要重金属As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Zn、Pb等元素存在着较强的伴生关系。表明不同地区由于众多因素的影响下对硒的因素分析也有不同的结果,具有一定的地区差异性。本文以郴州市宜章县作为研究地区,采用网格布点法布设样点进行采样分析测定及空间预测,以期弄清宜章县耕地土壤硒资源分布情况和影响因素,为富硒农产品开发和人体健康提供支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

宜章县位于湖南省的南部,隶属郴州市,地理位置112°37'~113°20'E、24°53'~25°41'N,总面积2 117 km<sup>2</sup>,属于典型的亚热带湿润季风性气候。宜章县地处南岭山脉中段,以山地类型为主,地势南北高、

中间低,大致呈现出由南北西3个方向向中东部倾斜的趋势。研究区内主要分布水稻土、红壤、红色石灰土、紫色土等土壤类型;成土母质以石灰岩风化物、板页岩风化物、近代河湖冲积物和沉积物以及花岗岩风化物为主。宜章县是全国粮食生产大县、全国茶业百强县和全国脐橙标准化生产示范县,同时还是全国100个重点产煤县之一和湖南省10个煤炭基地县之一。自然资源丰富,产业发展潜力大,具有开发富硒新兴产业和产品的潜力。

### 1.2 样品的采集

土壤样品采集布点使用全国第二次土地调查更新后的土地利用现状图,采用网格布点法,综合考虑地形地貌、土壤类型、农作物类型等因素,差异化布设调查点位。其中研究区耕地布点密度为11.91 km<sup>2</sup>一个样点,共采集了2 437个有效土壤样点,采用双对角线五点混合采样法,采集耕作表层土壤(0~20 cm),采样与分析时间为2019年。

### 1.3 制样与测定方法

将取回的土样放置在风干室内,剔除土壤中混杂的砖瓦、石块、石灰结核、动植物残体等,室内自然风干,研磨过筛。粗制完成的土壤样品按要求分为省库样品、流转中心留存样品和实验室检测样品进行样品装运。实验室检测样品经流转中心插入质控样品后流转至检测实验室。

pH采用玻璃电极法测定,有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定,土壤全铜、全锌、全锰的测定采用酸溶法,土壤阳离子交换容量(CEC)采用乙酸铵法测定<sup>[13-14]</sup>,全硒测定参照NY1104—2006《土壤中全硒的测定》<sup>[15]</sup>。

### 1.4 数据分析与统计

本研究采用IBM SPSS Statistics 23进行数据描述性统计和单因素方差分析,利用GS+建立半方差函数模型,采用ArcGIS 10.5进行Moran's I指数分析和冷热点分析;在半方差模型基础上用普通克里金插值法绘制宜章县耕地土壤富硒水平分布图,Microsoft Excel 2016绘制其余统计表格和图件。

湖南省耕地基本上呈酸性,依据中国地质调查局地质调查标准DD 2019-10《天然富硒土地划定与标识》<sup>[16]</sup>规定:在中酸性土壤(pH≤7.5)中,当土壤硒含量达到0.40 mg/kg时,该土壤定义为富硒土壤。为了

区别土壤富硒水平的高低,本研究以土壤富硒标准阈值的 2 倍和 3 倍为界,定义了 4 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 结果与分析

### 2.1 耕地土壤硒含量总体分布特征

根据表 1 可知,宜章县耕地土壤硒含量变幅为  $0.13 \sim 2.80 \text{ mg/kg}$ , 硒平均值为  $0.64 \text{ mg/kg}$ , 是全国表层土壤硒平均值( $0.29 \text{ mg/kg}$ )<sup>[17]</sup>的 2.2 倍。其中,水田硒含量的变幅为  $0.13 \sim 2.80 \text{ mg/kg}$ , 平均值为

$0.63 \text{ mg/kg}$ , 略低于耕地平均值;旱地硒含量变幅为  $0.21 \sim 2.64 \text{ mg/kg}$ , 平均值为  $0.65 \text{ mg/kg}$ , 略高于耕地硒含量平均值;旱地和水田硒含量变异系数分别为 44.08% 和 44.89%, 呈中等变异程度。

根据本研究定义的富硒级别划分标准,宜章县土壤样本中硒含量达到高富硒水平有 98 个样点, 占比 4.02%(图 1); 423 个样点达到中富硒水平, 占比 17.36%; 达到低富硒水平有 1 537 个样点, 占比 63.07%; 达到富硒水平的三者合计高达 84.45%。仅有 379 个样点为非富硒水平, 占比 15.55%。宜章县耕地土壤总体处于富硒水平, 以低富硒水平为主, 富硒耕地资源比较丰富。

表 1 硒含量描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistical characteristics of Se contents in different land use types

土地利用类型	样点数	最大值(mg/kg)	最小值(mg/kg)	平均值(mg/kg)	标准差(mg/kg)	变异系数(%)
旱地	938	2.64	0.21	0.65	0.284 6	44.08
水田	1 499	2.80	0.13	0.63	0.284 7	44.89
耕地	2 437	2.80	0.13	0.64	0.284 6	44.57

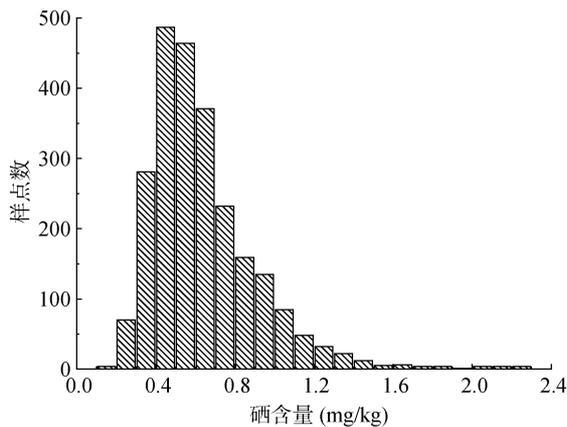


图 1 土壤硒含量频率分布图

Fig. 1 Frequency distribution of soil Se content

### 2.2 耕地土壤硒的空间结构特征及其分布特征

**2.2.1 全局自相关分析** 为了进一步研究宜章县耕地土壤硒在区域内的空间聚集程度和相关性,运用 Moran's I 指数对耕地中硒含量分布进行全局自相关分析,同时运用热点分析指标(Getis-Ord Gi)分析局部空间自相关程度。全局自相关分析结果显示, Moran's I 指数为 0.237,  $P < 0.01$ ,  $Z_{score}$  为 32.67 > 2.58, 具有统计意义,表明宜章县耕地土壤硒含量具有显著的空间自相关性,具有一定强度的空间集聚性。

**2.2.2 局部冷热点分析** 在进行 Moran's I 指数计算后,再通过冷热点分析进一步研究宜章县耕地土壤硒含量在区域范围内的集聚性,同时绘制了  $P < 0.01$  的空间分布图(图 2)。宜章县土壤热点区集中分布在

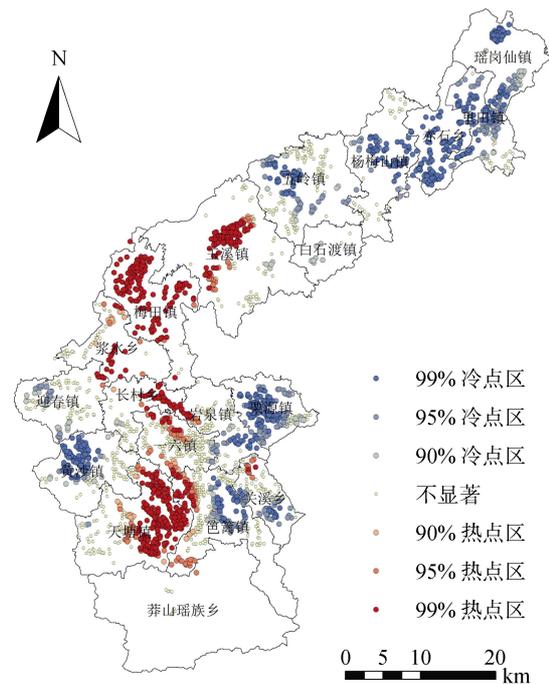


图 2 冷热点分析图

Fig. 2 Cold hot spot analysis chart

中部(天塘镇、长村乡、岩泉镇)、中西部地区(梅田镇、浆水乡、玉溪镇),而冷点区主要分布在东北部(瑶岗仙镇、里田镇、赤石乡、杨梅山镇)、东部(栗源镇、关溪乡、笆篱镇)、西部(黄沙镇)。

**2.2.3 半方差函数分析** 半方差函数是地统计学中研究土壤空间变异性的一个重要函数,可以用来分

析土壤元素的空间分布结构特征和随机性特征<sup>[18]</sup>。通过对 4 个模型进行半方差函数建立，如表 2 所示，指数模型的确定系数  $R^2$  最高为 0.856，残差(RSS)为  $4.774 \times 10^{-4}$ ，趋势最接近于 0，拟合效果最好，能够准确地反映土壤硒的空间分布特征。半方差函数模型的块金效应值是指随机因素(人类行为活动)引起的空间变异占系统总变异的比值，随机因素引起的变异

程度越高，块金效应值就越大；相反，块金效应值越小，则表明研究区由结构性因素(成土母质、土壤类型等)引起的变异程度较大<sup>[19]</sup>。研究区块金效应值为 0.505，介于 0.25~0.75，表明研究区土壤硒元素空间自相关性程度为中等，受结构性因素影响的同时也受随机因素的影响<sup>[20]</sup>。变程为 3.07 km，说明硒的空间自相关范围比较大。

表 2 土壤硒的半方差函数模型和相关参数  
Table 2 Semi-variance function model and related parameters of soil Se

理论模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0+C$	块金效应值 $C_0/C_0+C$	变程(km)	决定系数 $R^2$	残差 RSS( $\times 10^{-4}$ )
指数模型	0.048	0.097	0.505	3.07	0.856	4.774
高斯模型	0.048	0.098	0.505	2.43	0.844	6.991
球状模型	0.044	0.098	0.556	3.60	0.813	5.754
线性模型	0.064	0.103	0.369	4.39	0.622	1.146

### 2.3 土壤硒含量空间分布特征

根据半方差函数分析的指数模型为基础，采用普通克里金插值法得到宜章县耕地土壤硒含量空间分布结果示意图(图 3)。由图可知，宜章县大部分耕地处于低富硒水平，在中部有一条自东北向南从玉溪镇经梅田镇、浆水镇、长村乡、一六镇、笆篱镇、天塘镇的中高富硒带。其中，高富硒水平耕地主要分布在宜章县中西部，位于梅田镇西部和玉溪镇西部；中富硒耕地分布在中部和西部的连片耕地上，主要分布在一六镇、天塘镇和长村乡，在梅田镇和玉溪镇同样也有中富硒耕地分布，呈现出很高的集聚状态。少量非富硒水平的耕地分布在北部区域，主要分布在东北部赤石乡，在中部笆篱镇和白石渡镇也有小块集聚分布，占全县耕地比仅 2.2%。全县分布最多的低富硒水平耕地基本全覆盖，面积占比高达 83%。总体看来宜章县耕地土壤硒含量比较高，富硒耕地资源丰富，具有很大的富硒产业发展前景。

**2.3.1 不同成土母质发育的耕地土壤硒含量的变化** 土壤的形成与成土母质密切联系，所以土壤硒含量与成土母质含硒量也同样相关，通过对宜章县的样本分析中得出成土母质硒含量表现为：板页岩风化物>石灰岩风化物>砂岩风化物>河湖冲沉积物>花岗岩风化物>紫色砂页岩风化物(表 3)。研究区以板页岩风化物母质发育的耕地土壤硒含量平均值最高，达到了 0.76 mg/kg，接近于中富硒水平。这是由于在板页岩风化物母质发育的泥质岩类风化物中带有碎屑物和次生矿物，以团聚结构为主，有机质比较丰富<sup>[21]</sup>，对硒的吸附作用较强，所以板页岩风化物母质中硒含量显著高于其他母质，是所有成土母质中硒含量最高的。方差分析也表明板页岩与其他母质具有显著性差

异，其余成土母质平均硒含量差异较小，但也都处在低富硒水平。紫色砂页岩风化物平均硒含量最低，为 0.59 mg/kg，但是也达到了富硒水平，说明宜章县耕地土壤硒含量整体比较丰富。

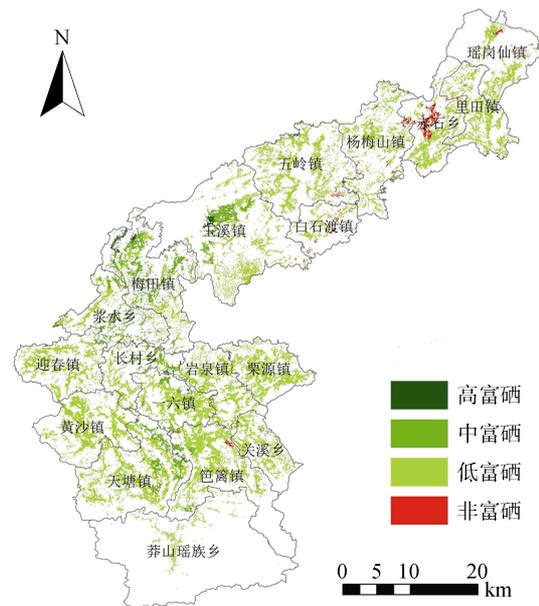


图 3 耕地土壤硒含量等级分布图  
Fig. 3 Distribution map of Se content in cultivated land soil

**2.3.2 不同土壤类型的硒含量特征** 土壤硒含量同时也与土壤质地、土壤熟化程度、地力等级、气候等有关<sup>[22]</sup>，根据全国第二次土壤普查的数据得知，研究区土地类型主要以水稻土、红壤、红色石灰土、黄壤、紫色土、黑色石灰土为主。按照土壤类型进行了研究区内硒含量平均值的描述性统计(表 4)，可以看出在不同土壤类型中，潮土、黑色石灰土和红壤硒含量较高。宜章县地处亚热带湿润季风气候，淋溶作

表 3 不同成土母质耕地硒含量  
Table 3 Se contents in cultivated lands with different soil parent materials

母质类型	样点数	硒含量(mg/kg)			标准偏差(mg/kg)	变异系数(%)
		最大值	最小值	平均值		
板页岩风化物	228	2.24	0.19	0.76 a	0.33	43.42
石灰岩风化物	1 703	2.75	0.13	0.63 b	0.28	43.94
砂岩风化物	54	2.29	0.17	0.62 b	0.33	52.66
河湖冲沉积物	236	1.75	0.17	0.61 b	0.26	41.86
花岗岩风化物	150	2.80	0.25	0.60 b	0.29	47.91
紫色砂页岩风化物	66	1.83	0.23	0.59 b	0.25	42.13

注:表中同列数据小写字母不同表示各成土母质之间差异显著( $P<0.05$ )。

表 4 不同土壤类型耕地硒含量  
Table 4 Se contents in cultivated lands with different soil types

土壤类型	样本数	硒含量 (mg/kg)			标准差(mg/kg)	变异系数(%)
		最大值	最小值	平均值		
潮土	10	1.24	0.35	0.68	0.25	37.03
黑色石灰土	16	1.04	0.35	0.68	0.24	35.94
红壤	720	2.64	0.21	0.66	0.29	43.28
红色石灰土	129	2.29	0.24	0.59	0.27	45.42
黄壤	39	2.13	0.22	0.53	0.31	59.21
水稻土	1 499	2.80	0.13	0.63	0.28	44.89
紫色土	24	0.88	0.28	0.54	0.16	29.97

用强,但是红壤成土母质大都为石灰岩风化物,由石灰岩风化物发育的红壤质地黏重,对于硒的吸附作用大于淋溶作用,所以硒含量较高<sup>[23]</sup>。紫色土和黄壤硒含量均值比较低,分别为0.54 mg/kg和0.53 mg/kg。紫色土是由紫色砂页岩风化物发育而成,紫色岩是中、新生代的产物,成岩年龄较小,土壤固结性一般,土体更新快,也容易产生水土流失,母岩中的碳酸钙一定程度地淋失,形成的土壤有机质积累量较低<sup>[24]</sup>,导致土壤硒含量较低。宜章县不同土壤类型硒含量为0.53~0.68 mg/kg,总体变幅比较小,变异系数也都处在10%~100%,属中等变异程度。

## 2.4 耕地土壤硒含量成因分析

### 2.4.1 土壤矿质元素、CEC对土壤硒含量的影响

相关性分析(表5)发现硒与Mn、Cu、Zn具有极显著的正相关性,其中Cu<sup>2+</sup>与硒含量相关性最高,相关系数达到了0.469;其次为Zn<sup>2+</sup>,相关系数为0.366;Mn<sup>2+</sup>相关系数为0.290;矿质离子的增加会增加硒的含量,Cu、Zn、Mn三者之间也互相呈现出极显著的正相关关系,说明土壤硒与矿质离子具有相同的来源,均来自于成土母质。土壤中硒和矿质元素均对成土母质有较好的继承性,二者呈现出较好的协同作用,矿质元素的增加将会随之带来更多的硒,这与湖北恩施<sup>[25]</sup>、陕西紫阳<sup>[26]</sup>和广西都安<sup>[27]</sup>等高地质背景

表 5 耕地土壤硒含量与 pH、SOM、Mn、Cu、Zn 和 CEC 的相关性

Table 5 Correlation of Se content with pH, SOM, Mn, Cu, Zn and CEC in cultivated soil

	Se	pH	SOM	Mn	Cu	Zn	CEC
Se	1	-0.094**	0.266**	0.290**	0.469**	0.366**	0.153**
pH		1	0.317**	0.036	-0.041*	0.014	0.298**
SOM			1	-0.052*	0.153**	0.131**	0.445**
Mn				1	0.342**	0.334**	0.110**
Cu					1	0.654**	0.156**
Zn						1	0.169**
CEC							1

注:\*,\*\*分别表示相关性达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平(双尾)。

成因的富硒土壤同时富集矿质元素的特征一致。

CEC是指带负电荷的土壤胶体借静电引力吸附土壤溶液中各种阳离子的数量,是土壤缓冲性能的主要来源<sup>[28]</sup>。对硒与CEC的相关性分析中,宜章县耕地土壤中硒含量与CEC呈极显著正相关,相关系数为0.153( $P<0.01$ ),说明伴随着CEC的增加,也会增加土壤中硒的含量。这可能是由于研究区内耕地主要以壤质土为主,土壤中黏粒较高,吸附阳离子较多,与此同时也加强了对硒元素的吸收和固定。

2.4.2 土壤 pH 对土壤硒含量的影响 土壤 pH 是影响土壤硒含量的一个重要因素<sup>[29]</sup>。根据表 5 相关

性分析可知 pH 与土壤硒呈显著负相关( $P < 0.01$ ), 相关系数为  $-0.094$ 。研究区内土壤 pH 最高为 8.7, 最低 3.9, 平均值为 6.3, 进一步研究 pH 与土壤硒含量的关系, 对 pH 从小到大进行排序, 按照 0.6 和 0.8 个单位进行分组划分, 统计组内硒含量的平均值(图 4)。结果表明, 在  $\text{pH} < 5.5$  的情况下, 土壤硒含量随 pH 的升高而大幅减少;  $\text{pH} > 5.5$  后, 土壤硒含量随 pH 升高而降低的幅度有所缓和。

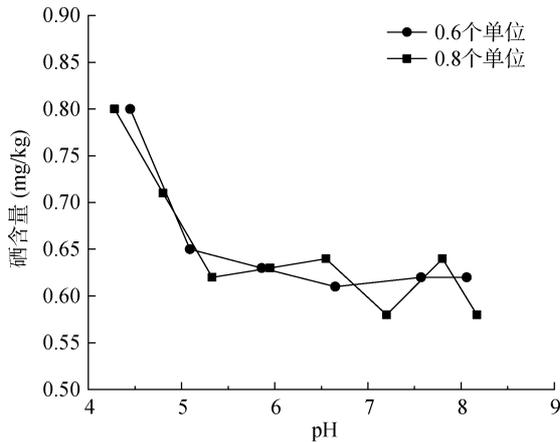


图 4 土壤硒与 pH 的关系

Fig. 4 Relationship between soil Se and pH

**2.4.3 土壤有机质对土壤硒含量的影响** 土壤有机质是自然环境中的一种还原性物质, 有机质在腐质化的时候会产生腐殖酸和颗粒物体, 容易吸收硒元素<sup>[30]</sup>。根据表 6 对有机质与土壤硒相关性分析发现二者呈显著的正相关关系。原因在于土壤有机质可以使土壤硒与腐殖质结合为有机复合体的难溶化合物, 提高了对土壤硒的吸附与固定<sup>[31]</sup>。为了进一步探究宜章县土壤有机质与土壤硒的关系, 以有机质含量从小到大的顺序, 按照 8 g/kg 和 10 g/kg 为间隔进行有机质分组, 保证每个区间有超过 30 个样本量统计土壤硒含量的平均值。结果(图 5)表明:  $\text{SOM} < 20$  g/kg 的情况下, 土壤硒含量随着有机质的升高而降低; 而在  $\text{SOM} > 20$  g/kg 的情况下, 土壤硒含量随着有机质的增加而显著增加, 一般情况下, 有机质含量越高, 硒含量越高<sup>[32]</sup>。

### 3 讨论

#### 3.1 耕地土壤硒的空间分布特征

宜章县内耕地土壤硒含量为 0.13 ~ 2.80 mg/kg, 平均值 0.64 mg/kg, 是全国土壤平均硒含量(0.29 mg/kg)的 2.2 倍, 变异系数为 44.57%, 属中等程度变异。按照本文划分标准富硒水平下, 富硒土壤样品数

2 058, 占比 84.45%, 其中高富硒 4.02%, 中富硒 17.36%, 低富硒 63.07%。宜章县富硒耕地资源丰富, 可以因地制宜发展相关产品, 提高富硒农产品经济效益的同时保障人体健康。

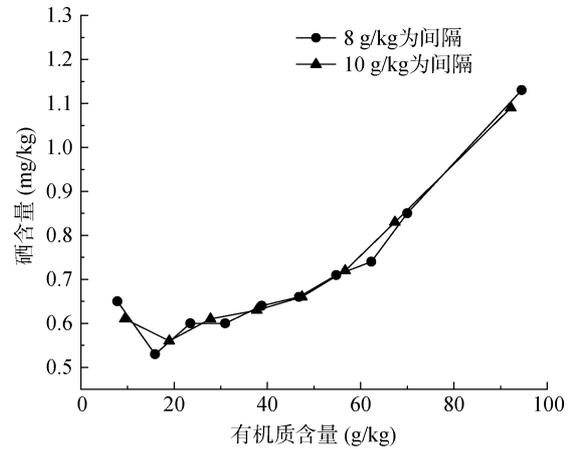


图 5 土壤硒与有机质的关系

Fig. 5 Relationship between soil Se and organic matter

本研究中, Moran's I 指数为 0.237, 块金效应值为 0.505, 介于 0.25 ~ 0.75, 说明研究区土壤硒空间自相关性程度为中等, 表明土壤硒含量受空间结构因素和随机因素共同影响。本研究结果与朱青等<sup>[33]</sup>研究结果一致, 同牟叶果等<sup>[34]</sup>研究结果有不同, 可能是由于研究区域差异较大, 宜章县地处湖南南部, 属亚热带季风性气候, 土壤硒含量影响因素与贵州地区有不同。

在空间分布上, 宜章县耕地以低富硒水平耕地为主, 占比达 83%; 中、高富硒水平耕地土壤分布少数几个乡镇(梅田镇、玉溪镇、天塘镇)。建议合理布局富硒农产品的资源, 优化产业链, 注意水土保持的同时提高富硒农产品的经济价值。非富硒水平耕地仅在赤石乡有集中分布, 可以通过调节 pH 和增加有机质含量来提高耕地土壤硒含量, 预防缺硒疾病的发生。

#### 3.2 耕地土壤硒含量的成因分析

土壤是成土母岩在风化作用下而形成的产物, 由于成土母质中各种成分含量的差别, 导致不同母质发育的土壤中各元素的含量差异也不同<sup>[35]</sup>。土壤硒含量对成土母质通常情况下具有非常明显的继承性<sup>[36]</sup>, 席冬梅等<sup>[37]</sup>也在研究中发现成土母质是土壤中硒元素的决定性来源。本研究中, 板页岩风化物的成土母质硒含量最高, 且与其他母质具有显著性的差异, 但是在本研究中成土母质并不能完全解释土壤中硒的含量差异。除板页岩风化物之外的其他成土母质硒含量差异性并不明显, 这也与孙国新和张召阳<sup>[38]</sup>

在对比全国土壤硒含量与母质硒含量的分布中有相似的结论,戴慧敏等<sup>[39]</sup>在东北平原上研究硒含量也发现硒对成土母质的继承性并不是很明显。

不同土壤类型中,黄壤硒含量最低,这与蔡立梅等<sup>[40]</sup>和罗海怡等<sup>[41]</sup>的研究中黄壤硒含量较高的结果有差异。据分析,研究区内黄壤含矿质离子含量较少,从而导致硒元素的集聚效应变小,所以黄壤中硒含量比较低。紫色土硒含量也较低,此结果与李杰等<sup>[24]</sup>和蔡大为等<sup>[42]</sup>研究结果相符,紫色土容易发生水土流失,土壤结构较差,有机质含量比较低,导致硒含量也比较低,这也与成土母质中紫色砂页岩风化物发育的土壤硒含量较低达成一致。

宜章县耕地土壤硒含量与 pH 呈负相关关系,尤其在强酸环境下(pH<5.5),土壤硒含量随着 pH 的增加明显下降。这与李晓慧等<sup>[30]</sup>研究结果一致,土壤硒含量与 pH 呈极显著负相关;而郑新如等<sup>[12]</sup>在对 pH 与硒含量的相关分析中发现两者呈正相关关系。在偏碱性土壤环境中,硒主要以硒酸态为主,酸性和中性土壤环境中亚硒酸盐存在较多。亚硒酸盐与吸附质的亲和力较强,而硒酸态与吸附质的亲和力较弱,溶解度大<sup>[31]</sup>,在一般情况下,土壤的 pH 越高,也就是越偏碱性的环境中,土壤中的硒越容易溶解,硒的淋溶性也越高,这些都容易导致硒的流失。除此之外,硒的甲基化程度也是影响硒含量的一个重要因素,土壤中的 pH 越高,硒的甲基化能力就会越强,使得土壤中硒的流转速率变快,硒元素流失得也越快,土壤中硒的含量也就会变得越低<sup>[32]</sup>。

土壤有机质与土壤硒含量呈显著正相关,但是在 SOM<20 g/kg 的时候对土壤硒含量有抑制作用。在李永华和王五一<sup>[31]</sup>的研究中,对有机质对硒的影响分析中得出有机质对硒含量的集聚具有两面性,当它只作为阴离子的环境物质时,会降低硒的迁移和传输能力,植物也难以进行吸收;当有机质作为媒介可以吸附阴离子的时候,同时也会吸附硒元素,增强对硒的吸收和固定作用。因此,在富硒资源开发中,要合理利用二者的关系。

#### 4 结论

1)宜章县耕地土壤硒含量比较丰富,适合发展富硒产业,对提高当地经济水平和改善人体健康具有重大作用。

2)在空间分布上,宜章县耕地土壤硒含量具有强烈的空间自相关性,分布状况聚集,以低富硒耕地为主,中高富硒耕地分布于中部和西部,富硒耕地资源

丰富,具有很大的开发潜力。

3)土壤硒含量与 pH 呈负相关关系,与有机质、Cu、Zn、Mn 和 CEC 呈显著正相关,板页岩风化物硒含量明显高于其他母质,紫色土发育土壤硒含量较低,与紫色砂页岩母质硒含量较低一致,宜章县耕地土壤硒含量的空间变异性是在随机因素(土壤理化性状)和结构性因素(成土母质、土壤类型)共同作用下的结果。

#### 参考文献:

- [1] Shi Z M, Pan P J, Feng Y W, et al. Environmental water chemistry and possible correlation with Kaschin-Beck Disease (KBD) in northwestern Sichuan, China[J]. *Environment International*, 2017, 99: 282–292.
- [2] Navarro-Alarcon M, Cabrera-Vique C. Selenium in food and the human body: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 400(1/2/3): 115–141.
- [3] Li Z, Liang D L, 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.
- [4] 罗程, 陈梁凯, 王晓倩, 等. 硒与疾病的流行病学研究及展望[J]. *生物技术进展*, 2017, 7(5): 493–499.
- [5] 杨忠芳, 汤奇峰, 成杭新. 爱恨交织的化学元素[M]. 北京: 地质出版社, 2019.
- [6] 王学求, 柳青青, 刘汉粮, 等. 关键元素与生命健康: 中国耕地缺硒吗?[J]. *地学前缘*, 2021, 28(3): 412–423.
- [7] 刘伊玲. 中卫: 富硒农业创新样板[J]. *中国品牌*, 2022(1): 78–79.
- [8] 孙国新, 李媛, 李刚, 等. 我国土壤低硒带的气候成因研究[J]. *生物技术进展*, 2017, 7(5): 387–394.
- [9] 朱建明, 左维, 秦海波, 等. 恩施硒中毒区土壤高硒的成因: 自然硒的证据[J]. *矿物学报*, 2008, 28(4): 397–400.
- [10] 商靖敏, 罗维, 吴光红, 等. 洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素[J]. *环境科学*, 2015, 36(1): 301–308.
- [11] 姜磊. 万源富硒区土壤中硒元素环境化学特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- [12] 郑新如, 潘爱芳, 马润勇, 等. 石泉县中部地区土壤硒分布特征及影响因素[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(1): 131–138.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 中华人民共和国农业农村部. 土壤中全硒的测定: NY/T 1104—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [16] 中华人民共和国自然资源部. 天然富硒土地划定与标识: DZ/T 0380—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [17] 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, 7(1): 1–6.
- [18] 江叶枫, 饶磊, 郭熙, 等. 江西省耕地土壤氮素空间变异特征及其影响因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(1): 70–79.

- [19] 李娜, 陈署晔, 赖宁, 等. 基于GIS和地统计的伊犁州农田土壤养分空间变异特征分析[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(11): 2096–2103.
- [20] 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 等. 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1887–1894.
- [21] 王珏, 周卫军, 商贵铎, 等. 不同母质柑橘园土壤养分特征及肥力综合评价[J]. 生态学杂志, 2022, 41(5): 933–940.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 杨良策, 李明龙, 杨延安, 等. 湖北省恩施市表层土壤硒含量分布特征及其影响因素研究[J]. 资源环境与工程, 2015, 29(6): 825–829, 848.
- [26] 王思贤. 陕西紫阳下寒武统富硒黑色岩系成因和沉积环境——有机质特征和地球化学证据[D]. 西安: 西北大学, 2020.
- [27] 刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 等. 广西都安县典型水田硒地球化学特征及影响因素[J]. 环境科学, 2021, 42(10): 4897–4907.
- [28] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [29] 冯辉, 张学君, 张群, 等. 北京大清河流域生态涵养区富硒土壤资源分布特征和来源解析[J]. 岩矿测试, 2019, 38(6): 693–704.
- [30] 李晓慧, 高宇, 赵万伏, 等. 宁夏青铜峡农耕土壤硒含量分布特征及其影响因素分析[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(5): 422–429.
- [31] 李永华, 王五一. 硒的土壤环境化学研究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 230–233.
- [32] Johnson C C, Ge X, Green K A, et al. Selenium distribution in the local environment of selected villages of the Keshan Disease belt, Zhangjiakou District, Hebei Province, the People's Republic of China[J]. Applied Geochemistry, 2000, 15(3): 385–401.
- [33] 朱青, 郭熙, 韩逸, 等. 南方丘陵区土壤硒空间分异特征及其影响因素——以丰城市为例[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 834–843.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 黄春雷, 魏迎春, 简中华, 等. 浙中典型富硒区土壤硒含量及形态特征[J]. 地球与环境, 2013, 41(2): 155–159.
- [37] 席冬梅, 邓卫东, 毛华明. 云南省主要反刍家畜饲养基地土壤硒含量、分布及其影响因素研究[J]. 云南农业大学学报, 2007, 22(4): 531–536.
- [38] 孙国新, 张召阳. 中国表层土壤汞和硒分布空间异质性的因素分析[J]. 科技导报, 2022, 40(3): 121–129.
- [39] 戴慧敏, 宫传东, 董北, 等. 东北平原土壤硒分布特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1356–1364.
- [40] 蔡立梅, 王硕, 温汉辉, 等. 土壤硒富集空间分布特征及影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 83–90.
- [41] 罗海怡, 罗先熔, 刘攀峰, 等. 广西三江县土壤硒含量分布特征及其影响因素研究[J]. 现代地质, 2022, 36(2): 645–654.
- [42] 蔡大为, 李龙波, 任明强, 等. 贵州省土壤硒含量背景值研究[J]. 地球与环境, 2021, 49(5): 504–509.