

DOI: 10.11766/trxb201904280083

朱青, 郭熙, 韩逸, 江叶枫, 余慧敏, 傅聪颖. 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.

ZHU Qing, GUO Xi, HAN Yi, JIANG Yefeng, YU Huimin, FU Congying. Spatial Differentiation of Soil Selenium in Hilly Regions of South China and Its Influencing Factors: A Case Study in Fengcheng City[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4): 834–843.

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

朱青^{1, 2}, 郭熙^{1, 2†}, 韩逸^{1, 2}, 江叶枫^{1, 2}, 余慧敏^{1, 2}, 傅聪颖^{1, 2}

(1. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 2. 江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 南昌 330045)

摘要: 江西省丰城市是典型的富硒土壤分布区, 基于丰城市 2015—2016 年采集的 699 个表层 (0~20 cm) 土壤样点数据, 运用地统计分析、相关性分析、地理探测器等方法, 系统分析了丰城市土壤硒的含量、空间分异特征及其影响因素, 以期对土壤硒的涵养与富硒土地的生产功能提供有价值的参考。结果表明: 丰城市土壤硒含量在 0.13~0.69 mg·kg⁻¹ 之间, 平均值为 0.33 mg·kg⁻¹, 是全国土壤硒元素背景值 (0.29 mg·kg⁻¹) 的 1.14 倍, 变异系数为 27.27%, 呈中等程度变异性。经半方差函数分析, 土壤硒变程为 12.86 km, 空间自相关范围较大; 块金效应值为 44.30%, 表明土壤硒空间变异主要受结构性因素影响。在空间分布上, 热点区 (高值聚集) 主要分布在泉港镇西部、董家镇东南部、尚庄街办中部、上塘镇西南部、曲江镇西北部、洛市镇中部和南部以及秀市镇西南部。砷、铜、汞、氧化钾、氧化钙、pH、成土母质和高程对土壤硒空间变异均有显著影响 ($P<0.05$), 但影响程度不一。其中, 砷的独立解释能力最高, 为 29%, 对丰城市表层土壤硒的富集与迁移起到重要作用。

关键词: 土壤硒; 聚类特征; 空间变异; 影响因素; 丰城市

中图分类号: S158.5; S159.2 **文献标志码:** A

Spatial Differentiation of Soil Selenium in Hilly Regions of South China and Its Influencing Factors: A Case Study in Fengcheng City

ZHU Qing^{1, 2}, GUO Xi^{1, 2†}, HAN Yi^{1, 2}, JIANG Yefeng^{1, 2}, YU Huimin^{1, 2}, FU Congying^{1, 2}

(1. College of Land Resource and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Key Laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province, Nanchang 330045, China)

Abstract: In Jiangxi Province, Fengcheng City is a typical area rich in soil selenium. Based on the data of the 699 soil samples collected from the surface layer (0-20 cm) of farmlands in Fengcheng City in 2015—2016, geostatistical analysis, correlation analysis and geographic detectors were applied to systematically analyze spatial differentiation of soil selenium in distribution

* 国家重点研发计划资助项目 (2017YFD0301603)、江西省赣鄱英才“555”领军人才项目 (201295) Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2017YFD0301603), the Gan Po “555” Talent Research Funds of Jiangxi Province (No. 201295)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: guoxi@jxau.edu.cn

作者简介: 朱青 (1995—) 男, 江西都昌人, 硕士研究生, 主要从事土地资源开发与保护研究。E-mail: jzcc0504@163.com

收稿日期: 2019-04-28; 收到修改稿日期: 2019-07-30; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-09-06

and its influencing factors. The research was done in an attempt to provide certain valuable reference for conservation of soil selenium and the production function of the selenium-rich land. Results show that soil selenium contents of Fengcheng City ranged from 0.13 to 0.69 mg·kg⁻¹ with coefficient of variation being 27.27% or moderate in level and averaged 0.33 mg·kg⁻¹, about 1.14 times as high as the soil selenium background value (0.29 mg·kg⁻¹) of the country. Semi-variogram function analysis shows that the range of soil selenium was 12.86 km and quite large for spatial autocorrelation, and that its nugget effect value was 44.30%, which indicates that spatial variation of soil selenium was mainly affected by structural factors. In the spatial distribution, hot spot areas (area where high values concentrate) were distributed mainly in the west of Quangang Town, the southeast of Dongjia Town, the center of the Shangzhuang Neighborhood, the southwest of Shangtang Town, the northwest of Qujiang Town, the center and south of Luoshi Town and the southwest of Xiushi Town. Arsenic, copper, mercury, potassium oxide, calcium oxide, pH, soil parent material and elevation are factors affecting spatial variability of the soil selenium but vary in extent ($P < 0.05$). Arsenic is the highest in the effect, explaining 29% of the variability, and plays an important role in the enrichment and migration of selenium in the topsoil of Fengcheng City.

Key words: Soil selenium; Clustering characteristics; Spatial variation; Influencing factor; Fengcheng City

硒是土壤微量元素之一，是植物生长发育必不可少的营养元素，在参与维持植物体内养分和离子平衡、增强植物抵抗重金属污染、提高植物环境胁迫的抗逆性等方面发挥着重要作用^[1]。更为重要的是，土壤中的硒主要是通过植物吸收转移至食物链而进入人体，其丰缺程度与人体健康密切相关^[2]，如人体缺硒会引起大骨节病、克山病等疾病发生，而摄入过量硒则会引起脱发脱甲病、高畸胎率等疾病^[3]。我国是世界上缺硒严重的国家之一，72%的县（市）表现出不同程度缺硒，缺硒省份多达 22 个，只有极少部分地区有较高的硒储备量，被称为足硒区或富硒区^[4-5]。因此，了解土壤硒空间分布的内在规律，以充分发挥富硒地区的资源优势显得尤为重要。近年来，关于土壤中硒的含量、分布特征及影响因素等研究工作已广泛开展^[6-11]。但前人研究仅局限于了解土壤硒含量的空间分布特征^[12-13]，对土壤硒的空间聚类特征研究较为缺乏，而了解土壤硒在空间上的聚集情况，对目前富硒产业规模化发展具有重要的现实指导意义。此外，目前学者们对土壤硒在空间分布影响因素的探究多停留在相关性分析^[6-9, 14-15]、经典回归模型^[10]等传统分析方法，对于多因子影响及其交互作用的定量分析相对薄弱。而地理探测器是研究空间分异，以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[16]，可以全面地分析和评估影响因子对土壤硒空间分异的影响程度及交互作用，弥补了以往研究方法的不足。

江西省丰城市是我国富硒产业较为发达的地区

之一。近年来，马迅等^[17]以丰城市生态硒谷为研究区，发现全硒较高的土壤能够向作物提供较多的有效硒；韩笑等^[18]以丰城市为例，系统阐述了农田土壤中硒含量与土壤理化性状之间的关系。但在涉及不同类型土壤硒的含量、空间分异特征及影响因素等综合信息仍未见相关报道。为此，本研究基于丰城市 2015—2016 年采集的 699 个表层（0~20 cm）土壤样点数据，运用地统计分析、相关性分析、地理探测器等方法，结合土地利用方式、距离因子、成土母质、地形因子、土壤重金属、碱性氧化物、土壤 pH 和有机质，对丰城市土壤硒空间分异特征及其影响因素进行研究，以期调节土壤硒水平、开发利用富硒土地资源、预测和防止硒环境问题提供强有力的地球化学依据和技术支持，为当地富硒特色产业的发展提供有力保障。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本研究以丰城为案例区，研究区位于江西省中部、赣江中下游，鄱阳湖盆地南端，地理坐标介于 115°25′~116°27′E、27°42′~28°27′N 之间，总面积 2 845 km²。2017 年末，全市人口总数为 129.8 万人。丰城地势南高北低，由西南向东北逐渐倾斜。南部为低山区，约占总面积的 17%；中部相对低平，为河谷冲击平原，约占总面积的 24%；西北和东南地形起伏，为丘陵地区，约占总面积的 59%，是典型

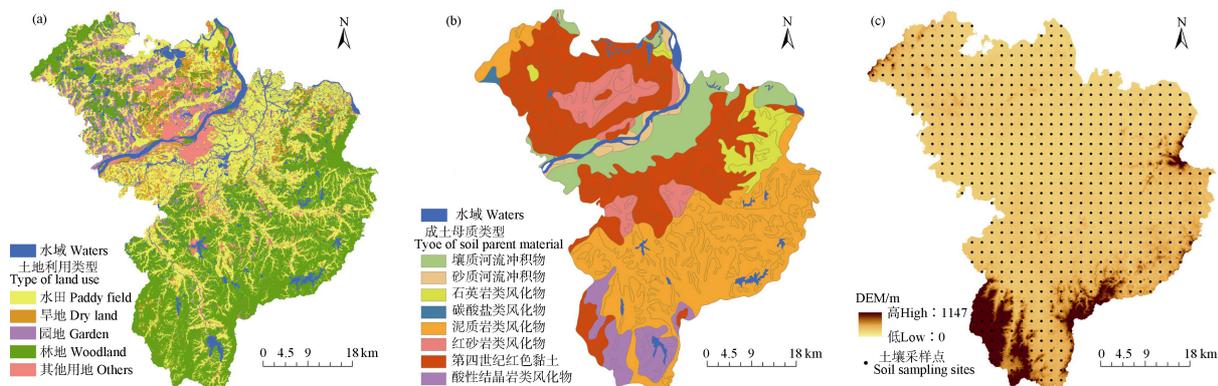
的南方丘陵区。丰城地处亚热带湿润气候区，气候温和，四季分明，雨量充沛，光照充足，霜期较短，生长期长，是全国主要粮食生产基地，享有“煤海粮仓金丰城”之称。2018年，全市完成生产总值达到382.22亿元，财政总收入达到70.47亿元。

丰城市富硒土地资源丰富，土地利用类型以耕地、林地和园地为主（图1a），多数水田土层深厚，土壤渗而不漏、渍面不滞，富有较多的有机质，土质良好。成土母质主要是泥质岩类风化物、第四纪红色黏土、红砂岩类风化物和河流冲积物（图1b）。

1.2 数据来源与测定方法

研究区表层（0~20 cm）土壤样点（共699个）于2015—2016年采用网格法（1 km×1 km）完成土

样采集（图1c）。丰城市成土母质类型来自于第二次土壤普查数据。丰城市土地利用类型来自于2015年1:10 000土地利用变更调查数据库。土壤样品主要分析了硒（Se）、砷（As）、汞（Hg）、铜（Cu）、镉（Cd）、氧化钾（K₂O）、氧化钙（CaO）、pH、有机质（Soil Organic Matter, SOM）等元素指标。Se采用原子荧光法测定；K₂O、CaO等采用X射线荧光光谱法测定；pH采用玻璃电极法测定；As、Hg采用原子荧光法测定；Cd采用火焰原子吸收法测定；Cu采用X荧光法测定；SOM采用重铬酸钾容量法测定。所有测试结果均满足（DD2005-3）《生态地球化学评价样品分析技术要求》所规定分析方法的精密度和准确度要求，所有样品合格率均超过85%，检测结果可信。



注：壤质河流冲积物；砂质河流冲积物；石英岩类风化物；碳酸盐类风化物；泥质岩类风化物；红砂岩类风化物；第四纪红色黏土；酸性结晶岩类风化物 Note: Loamy river alluvial, Sandy river alluvial, Weatherings of quartzite, Weatherings of carbonate, Weatherings of argillaceous rock, Weatherings of red sandstone, Quaternary red clay, Weatherings of acidic crystalline rock

图1 研究区土地利用类型、成土母质类型、DEM以及土壤采样点分布

Fig. 1 Types of land use, types of soil parent material, DEM and distribution of the soil sampling sites in the study area

1.3 数据处理与分析方法

为确保数据准确性，本文采用拉依达准则进行异常值和缺失值的剔除，剔除后土壤样点为667个。基于研究区30 m分辨率的数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）数据（图1c），通过Arc GIS 10.5软件提取出高程、坡度、坡向、曲率、地形起伏度等地形因子，具体计算公式见文献[19]。借助IBM SPSS Statistic 24.0软件对土壤样点数据进行描述性统计分析和相关性分析，并在地理探测器软件进行因子探测和交互探测分析。运用半方差函数

在GS+7.0软件进行空间结构分析。普通克里格插值、全局空间自相关和热点分析均在Arc GIS 10.5软件平台上进行。

由于地理探测器输入的自变量要求为类别数据，需要对连续性变量做离散化处理。本文结合前人研究^[16-20]及先验知识，将坡度按照<5°、5°~10°、10°~15°、15°~20°、20°~25°、25°~30°、30°~35°、>35°划分为8类；坡向以45°为间隔划分为8类。其他连续变量通过自然断点法划分为8类，以确保在同样空间分层条件下，结果具有可比性。

2 结果与讨论

2.1 丰城市土壤硒描述性统计

研究区土壤硒含量描述性统计特征如表 1 所示, 丰城市土壤硒含量平均值为 $0.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是全国土壤硒元素背景值^[21] ($0.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 1.14 倍, 变幅处于 $0.13\sim 0.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 变异系数为 27.27%,

呈中等程度变异性。整体数据分布呈偏左态, 经自然对数变换后, 土壤硒服从正态分布, 符合地统计学分析的要求。

根据我国对硒元素安全阈值的划分^[22], 从表 2 可以看出, 98.20% 的土壤硒采样点含量高于 $0.125 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 不存在缺硒和硒过量的现象。总体来看, 丰城市土壤硒含量普遍处于较高水平, 足硒和富硒土地资源丰富。

表 1 土壤硒含量描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistics of soil selenium content

样本数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	偏度	分布类型
Samples	Minimum/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Maximum/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Mean/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	SD/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	CV/ %	Skewness	Distribution type
667	0.13	0.69	0.33	0.09	27.27	0.74	对数正态 Lognormal

表 2 丰城市土壤硒含量不同级别面积比例

Table 2 Ratio of different levels of soil selenium content in area in Fengcheng

土壤范畴	硒含量阈值	效应	面积比例
Soil category	Se content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Effect	Percentage of research area/%
缺硒 Deficient	≤ 0.125	硒缺乏 Se deficient	0
边缘 Marginal	$0.125\sim 0.175$	潜在缺硒 Potentially Se deficient	1.80
中等 Moderate	$0.175\sim 0.40$	足硒 Se sufficient	80.21
高硒 High	$0.40\sim 3.0$	富硒 Se-rich	17.99
过量 Excess	≥ 3.0	硒中毒 Se poisoning	0

2.2 丰城市土壤硒空间结构特征

半方差函数可研究土壤硒空间分布格局的随机性和结构性特征^[23]。从半方差函数拟合结果可以看出(表 3), 土壤硒空间分布的最优模型为球状模型, 决定系数 R^2 为 0.953, 残差 RSS 为 8.316×10^{-5} , 趋

近于 0, 表明其拟合精度较高, 能够较好地反映土壤硒的空间结构特征。硒的块金效应为 44.30%, 属于中等空间变异性, 表明硒具有较强空间相关性, 主要受结构性因素影响。土壤硒变程为 12.86 km, 说明硒的空间自相关范围较大。

表 3 土壤硒的半方差函数模型及相应参数

Table 3 Semi-variogram function model for soil selenium and its corresponding parameters

模型	块金值	基台值	块金效应	变程	拟合系数	残差
Model	Nugget	Partial sill	Nugget/Sill /%	Range/km	Fitting coefficient	Residual
球状模型 ^①	0.037 2	0.084 0	44.30	12.86	0.953	8.316×10^{-5}
指数模型 ^②	0.017 3	0.084 3	20.52	3.75	0.953	8.437×10^{-5}
高斯模型 ^③	0.042 0	0.084 1	49.94	5.94	0.951	9.242×10^{-5}
线性模型 ^④	0.065 5	0.090 6	72.30	36.97	0.471	9.299×10^{-4}

①Spherical model, ②Exponential model, ③Gaussian model, ④Linear model

2.3 丰城市土壤硒空间分异特征

为直观反映土壤硒的空间分布特征，在半方差函数模型拟合的基础上，对土壤硒进行普通克里格插值，得出丰城市土壤硒含量的空间分布图。由图 2 可知，丰城市整体土壤硒含量较高，部分地区硒含量超过 0.40 mg·kg⁻¹(富硒土壤划分值^[22])，主要呈块状分布在洛市镇北部、丽村镇西南部、桥东镇西南部、尚庄街办北部、泉港镇西北部和董家镇南部。

本研究为进一步探测土壤硒在整个研究区域的空间聚集状态与相关程度，采用全局统计量 Moran's *I* 指数对土壤硒含量分布进行全局空间自相关分析；利用热点分析指标 (Getis-Ord G_i^*) 进行局部空间自相关分析。分析结果表明，研究区土壤硒具有显著空间自相关性，其 Moran's *I* 指数值为 0.32, $P < 0.05$, Z_{score} 为 12.01 > 1.96, 具有统计学意义，表明研究区土壤硒具有显著的空间自相关性，这与半方差函数分析结果 (表 3) 一致。在对研究区土壤硒进行热点分析时，发现 G_i^* (P) 值 < 0.05 以下共有 81 个行政村 (如表 4)，其中热点区 (高值聚集) 为秀市镇座山村、尚庄街办侯塘岗村等 57 个行政村，比例达 10.84% (共有 526 个行政村)，占研究区总面积的 12.63%，平均硒含量为 0.49 mg·kg⁻¹；冷点区 (低值聚集) 有铁路镇青峰村、石江乡上舍村等 24 个行政村，比例达 4.56%，占研究区总面积的 5.61%，平均硒含量为 0.21 mg·kg⁻¹。

为直观显示研究区土壤硒面积分布的热点区域空间位置，绘制了 G_i^* (P) 值 < 0.05 的空间分布图 (图 3)。土壤硒在空间分布上呈现出显著的聚集特征，其中在泉港镇西部、董家镇东南部、尚庄街办中部、上塘镇西南部、曲江镇西北部、洛市镇中部和南部以及秀市镇西南部均有较大面积的热点区分布，而冷点区行政村主要分布在蕉坑乡、石江乡南

部和袁渡镇东北部、段潭乡西北部。

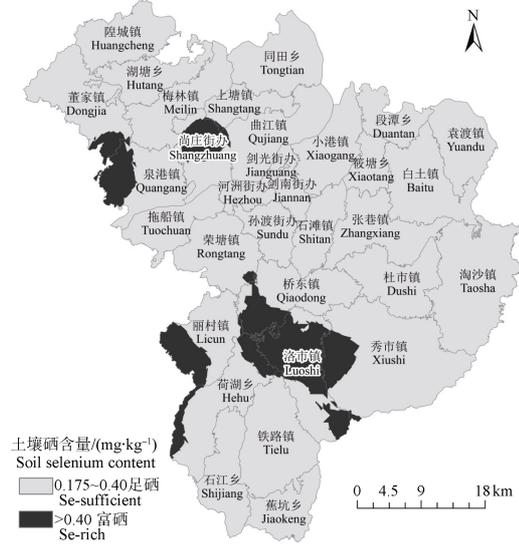


图 2 研究区土壤硒含量空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of soil selenium in the study area

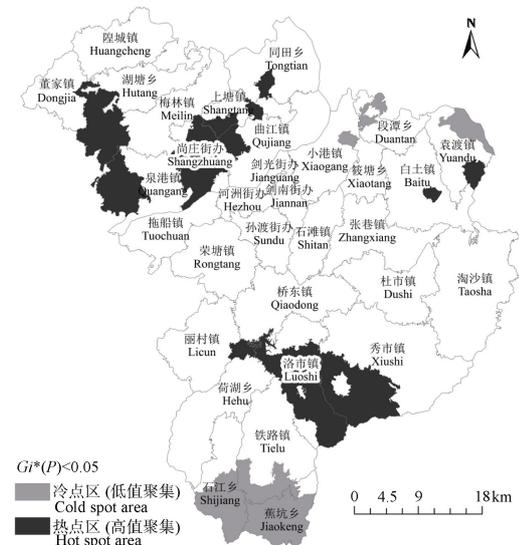


图 3 研究区冷热点区分布
Fig. 3 Distribution of cold-/hot-spots in the study area

表 4 土壤硒热点分析结果

Table 4 Analysis of soil selenium hot spots (G_i^* (P) < 0.05)

行政村 Administrative village	行政村个数比 Ratio of administrative village/%	面积比 Area ratio/%	平均值 Mean/(mg·kg ⁻¹)
57 热点区域 Hot spot area	10.84	12.63	0.49
24 冷点区域 Cold spot area	4.56	5.61	0.21

2.4 丰城市土壤硒空间变异的影响因素

本文在结合前人研究^[7-8, 11, 24-26]的基础上,选取土地利用方式、距离因子、成土母质、地形因子、土壤理化性质指标等因素对影响研究区土壤硒的空间变异展开分析与讨论。

2.4.1 土地利用方式 通过对研究区 667 个表层土壤硒含量进行统计分析(表 5)可知,不同土地利用方式的土壤硒平均含量大小依次为:林地($0.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=园地($0.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>旱地($0.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>水田($0.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。可看出林地和园地土壤硒含量最高,水田硒含量最低,这主要是因为林地与园地生态系统受到人为干扰要小于水田,长期耕作的水田使土壤中有机质被大

量消耗,有机结合态的硒在土壤中的迁移和吸收速率增加,导致硒含量相对较低^[27]。但在不同土地利用方式下,土壤硒含量的差异较小,这与以往研究结果基本一致^[9, 14]。

2.4.2 距离因子 本研究从土壤采样点到河流距离、道路距离(公路、铁路、农村道路)和农村居民点距离三个方面进行 Pearson 相关性分析。土壤硒与农村居民点距离呈显著正相关关系($P<0.05$), r 为 0.090。说明硒的含量随着农村居民点的距离增大而提高,从侧面反映出人类活动对土壤硒的含量具有一定的影响。土壤硒与河流距离和道路距离远近无显著相关关系,说明研究区表层土壤硒的分布与水的流动以及交通流的关系不大。

表 5 不同土地利用方式土壤硒描述性统计特征

Table 5 Descriptive statistics characteristics of soil selenium relative to land use type

土地利用方式 Land use type	样点数 Number	最小值 Minimum/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最大值 Maximum/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	平均值 Mean/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差 SD/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变异系数 CV/%
水田 Paddy field	311	0.13	0.65	0.32	0.08	25.00
旱地 Dry land	42	0.17	0.61	0.33	0.08	24.24
园地 Garden	30	0.17	0.51	0.34	0.09	26.47
林地 Woodland	284	0.14	0.69	0.34	0.10	29.41

2.4.3 成土母质 成土母质是表层土壤硒含量的主要来源^[10],在本次研究的八种成土母质类型中(表 6),从变异系数来看,研究区中不同成土母质类型的土壤硒变异系数在 6.25%~32.14%之间,处于弱变异和中等变异程度。从平均含量来看,红砂岩类风化物($0.37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>石英岩类风化物($0.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>泥质岩类风化物($0.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>第四纪红色黏土($0.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>碳酸盐类风化物($0.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>壤质河流冲积物($0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>砂质河流冲积物($0.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>酸性结晶岩类风化物($0.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),不同成土母质类型土壤硒含量呈现出较大差异,其中红砂岩类风化物最高,酸性结晶岩类风化物最低,两者相差 $0.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明成土母质是土壤硒含量的重要影响因素,这与前人研究保持一致^[10, 13, 25]。

江西省丰城地区以红壤居多,其主要由泥质岩类风化物、红砂岩类风化物发育而来^[19],而这类母质形成的土壤硒含量会显著高于碳酸盐类土壤^[28],因此在开发富硒产品中具有巨大潜力和利用前景。

2.4.4 地形因子 地形条件是引起地表水热条件、成土母质和土壤养分含量重新分配的重要因素,其对土壤硒含量有一定的影响^[26]。Pearson 相关性分析结果表明,研究区土壤硒与高程呈显著正向相关性($P<0.05$), r 为 0.065,这与商靖敏等^[7]研究结果相一致,表明海拔较高处土壤的整体硒含量较低海拔处高。究其原因:①丰城市海拔相对较高处多为丘陵和低山地区,约占总面积的 76%,植被覆盖密集,其枯枝落叶经腐殖化和矿化等过程循环作用后,形成土壤硒富集^[25];

表 6 不同成土母质类型土壤硒描述性统计特征

Table 6 Descriptive statistics characteristics of soil selenium relative to soil-forming parent materials

成土母质类型 Parent material	样点数 Number	硒 Se			
		平均值 Mean/ (mg·kg ⁻¹)	标准差 SD/(mg·kg ⁻¹)	变幅 Amplitude/(mg·kg ⁻¹)	变异系数 CV/%
第四纪红色黏土 ^①	229	0.33	0.08	0.13~0.65	24.24
红砂岩类风化物 ^②	40	0.37	0.09	0.23~0.61	24.32
泥质岩类风化物 ^③	236	0.34	0.09	0.14~0.69	26.47
壤质河流冲积物 ^④	74	0.30	0.06	0.17~0.51	20.00
砂质河流冲积物 ^⑤	11	0.29	0.09	0.17~0.45	31.03
石英岩类风化物 ^⑥	33	0.36	0.10	0.14~0.68	27.78
酸性结晶岩类风化物 ^⑦	42	0.28	0.09	0.16~0.49	32.14
碳酸盐类风化物 ^⑧	2	0.32	0.02	0.30~0.33	6.25

①Quaternary red clay, ②Weatherings of red sandstone, ③Weatherings of argillaceous rock weathering, ④Loamy river alluvial, ⑤Sandy river alluvial, ⑥Weatherings of quartzite, ⑦Weatherings of acidic crystalline rock, ⑧Weatherings of carbonate

②在海拔较高处的气温较低, 有机质分解速率缓慢, 利于有机结合态的硒累积, 硒不易被淋溶和植被吸收^[8, 24]。但在图 3 中发现相对较高处海拔的南部为低值聚集区, 硒含量相对较低, 平均含量为 0.20 mg·kg⁻¹。原因可能是: ①该地区成土母质主要以酸性结晶岩类风化物为主, 其形成的土壤硒含量相对偏低, 与本文研究结果一致; ②该地为玉华山风景带, 处在扬子板块和华夏板块的结合部位, 地质构造复杂, 地球化学特征异常明显^[29], 土壤硒易发生变化和转移。

2.4.5 土壤理化性质 土壤硒含量与土壤理化性质有着密切的关系^[14]。研究区土壤硒与土壤重金属中的砷、铜含量具有显著的正相关性($P < 0.01$), r 分别为 0.404 和 0.212。研究表明^[15, 30-31], 硒与砷、铜在来源、富集、迁移等方面具有相似的地球化学行为, 存在伴生关系, 且砷对硒具有吸附作用。Tao 等^[32]在研究影响绵阳市土壤硒分布的控制因素时, 发现砷、铜、汞等元素和硒有着相似的空间分布, 认为硒在土壤形成过程中与这些元素密切相关, 并指出硒和砷、铜、镉之间有着密切的共生关系。但本研究发现硒与汞、镉之间没有显著的正相关性, 这可能与研究区地理环境和采样点数量有关。

土壤硒与 K₂O、CaO、pH 表现出明显的负相关

关系 ($P < 0.05$), r 为 -0.344、-0.089 和 -0.179。分析原因可知, K₂O、CaO 均为碱性氧化物, 易与水反应生成碱性物质, 对硒具有贫化作用^[9]。pH 控制着亚硒酸盐 (SeO₃²⁻) 和硒酸盐 (SeO₄²⁻) 之间的转化^[33], 由样点数据可知研究区以酸性土壤为主, 土壤 pH 均值为 5.1, 呈弱酸性, 其可加速 SeO₄²⁻ 向 SeO₃²⁻ 的转化, 转化后的 SeO₃²⁻ 易被氧化物和黏土矿物等吸附, 不易被植物吸收, 从而引起土壤硒元素的富集。这与 Neal 和 Sposito^[34]观点相一致, 其认为 SeO₃²⁻ 主要存在于弱酸性-中性的潮湿环境中, 易被土壤强烈吸附, 而 SeO₄²⁻ 仅被弱吸附和浸出。因此, 土壤偏碱性会增强硒元素的可溶性, 导致土壤硒的移动和流失; 土壤偏酸性则会影响土壤中硒的活性, 使硒的有效性降低。

土壤硒与有机质呈现显著正相关关系 ($P < 0.01$), r 为 0.141。根据研究^[35-36]可知, 有机质在腐质化过程中可促进硒的活化, 使土壤硒能够与腐殖质结合为有机复合体的难溶化合物, 对土壤硒的吸附与固定起到了重要作用。但值得一提的是, 有机质对硒的生态效应具有双重性, 当它作为阴离子的环境宿体时, 则会抑制硒的迁移能力和传输, 植物便难以吸收^[33]。因此在农业生产过程中, 合理科学施肥, 改善有机质对土壤硒元素的影响是提高经济效益和维持农业可持续发展的重要手段之一。

2.4.6 各影响因子影响程度 为定量分析各影响因子对土壤硒空间变异的独立解释能力和交互作用状况,本研究利用地理探测器对土地利用方式、距离因子、地形因子、成土母质、土壤重金属(As、Cd、Cu、Hg)、碱性氧化物(K₂O、CaO)、pH、有机质进行因子探测和交互探测分析。由因子探测分析(表7)可知,砷、铜、汞、氧化钾、氧化钙、pH、成土母质和高程对土壤硒空间变异的影响程度均显著($P<0.05$),但影响程度不一。在所有因素中,砷对土壤硒的空间变异独立解释能力最高,为29%;铜和汞的独立解释能力分别为11%和6%。碱性氧化物中,氧化钾的独立解释

能力为14%,氧化钙次之,为8%。高程、pH和成土母质对土壤硒空间变异的独立解释能力较低,分别为8%、7%、6%。

从交互探测结果(表7)可看出,影响因子两两交互作用均会大于各单因子对土壤硒变异的影响,但不同因子之间交互作用强度有所不同。其中,砷与pH的交互作用影响最强,为44%;与高程的交互作用次之,为43%。此外,砷的叠加可大大增加单因子对土壤硒空间变异的解释力。这在一定程度上表明砷与土壤硒的分布具有紧密的关联性,对土壤硒的富集与迁移起到重要作用。这与2.4.5一节分析结果相一致,论证了砷对硒具有较强的吸附作用。

表 7 各影响因子对土壤硒的因子探测和交互探测分析结果

Table 7 Factor detection and interaction detection of soil selenium relative to affecting factor

因素类型 Element type	因子 Factor	因子探测 q 值		交互探测 q 值						
		Factor detection q value	P	Interactive detection q value						
				As	Cu	Hg	K ₂ O	CaO	高程 Elevation	pH
土壤重金属 Soil heavy metal	As	0.29	<0.01	—	—	—	—	—	—	—
	Cu	0.11	<0.01	0.32	—	—	—	—	—	—
	Hg	0.06	<0.05	0.35	0.20	—	—	—	—	—
碱性氧化物 Basic oxide	K ₂ O	0.14	<0.01	0.37	0.25	0.23	—	—	—	—
	CaO	0.08	<0.05	0.38	0.26	0.20	0.25	—	—	—
地形因子 ^①	高程 Elevation	0.08	<0.05	0.43	0.28	0.21	0.29	0.25	—	—
	pH	0.07	<0.01	0.44	0.26	0.19	0.28	0.19	0.19	—
	成土母质 ^②	0.06	<0.05	0.35	0.20	0.16	0.20	0.18	0.15	0.22

①Terrain factor, ②Parent material

3 结 论

丰城市土壤硒平均含量为 $0.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是全国土壤硒元素背景值 ($0.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 1.14 倍, 不存在缺硒和硒过量的现象。其在空间分布上呈现出显著的聚集特征, 热点区集中分布在泉港镇西部、董家镇东南部、尚庄街办中部、上塘镇西南部、曲江镇西北部、洛市镇中部和南部以及秀市镇西南部, 占总面积的 12.63%, 平均含量为 $0.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 属于富硒土壤聚集区, 可以考虑将该区发展为富硒产业基地, 打造富硒产业生态链, 以有效推动当地的

经济发展。砷、铜、汞、氧化钾、氧化钙、pH、成土母质和高程对土壤硒空间变异的影响程度均显著 ($P<0.05$)。其中, 砷的独立解释能力最高, 与土壤硒的分布具有紧密的关联性, 对土壤硒的富集与迁移起到重要作用。

参考文献 (References)

- [1] Chen M, Liu G L. Selenium nutrition of higher plants and its role in the food chain. [J] Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27 (4): 185—188. [陈铭, 刘更另. 高等植物的硒营养及在食物链中的作用(二)[J]. 土壤通报, 1996, 27 (4): 185—188.]
- [2] Pérez-Sirvent C, Martínez-Sánchez M J, García-Lorenzo

- M L, et al. Selenium content in soils from *Murcia* region (SE, Spain) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2010, 107 (2): 100—109.
- [3] Yin Z H, Ju S J, Ma X L, et al. Biogeochemistry and ecological effect of selenium[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1989, 8 (4): 45—50. [尹昭汉, 鞠山见, 马晓丽, 等. 硒(Se)的生物地球化学及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1989, 8 (4): 45—50.]
- [4] Zheng D X, Li R B, Wang W Y. A preliminary exposition on low-selenium zone in the world[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1982, 2 (3): 241—250. [郑达贤, 李日邦, 王五一. 初论世界低硒带[J]. 环境科学学报, 1982, 2 (3): 241—250.]
- [5] Wang Z J. Some biogeochemical aspects of selenium in Chinese low-selenium belt[J]. *Environmental Chemistry*, 1993, 12 (3): 237—243. [王子健. 中国低硒带生态环境中硒的环境行为研究进展[J]. 环境化学, 1993, 12 (3): 237—243.]
- [6] Huang C L, Song M Y, Wei Y C. Study on selenium contents of typical selenium-rich soil in the middle area of Zhejiang and its influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2013, 34 (11): 4405—4410. [黄春雷, 宋明义, 魏迎春. 浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨[J]. 环境科学, 2013, 34 (11): 4405—4410.]
- [7] Shang J M, Luo W, Wu G H, et al. Spatial distribution of Se in soils from different land use types and its influencing factors within the Yanghe watershed, China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36 (1): 301—308. [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.]
- [8] Zhang H B, Luo Y M, Wu L H, et al. Hong Kong soil researches II. Distribution and content of selenium in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (3): 404—410. [章海波, 骆永明, 吴龙华, 等. 香港土壤研究 II. 土壤硒的含量、分布及其影响因素[J]. 土壤学报, 2005, 42 (3): 404—410.]
- [9] Dai H M, Gong C D, Dong B, et al. Distribution of soil selenium in the Northeast China Plain and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (6): 1356—1364. [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.]
- [10] Chi F Q, Xu Q, Kuang E J, et al. Distribution of selenium and its influencing factors in soils of Heilongjiang Province, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (5): 1262—1274. [迟凤琴, 徐强, 匡恩俊, 等. 黑龙江省土壤硒分布及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2016, 53 (5): 1262—1274.]
- [11] Shao Y, Cai C F, Zhang H T, et al. Controlling factors of soil selenium distribution in a watershed in Se-enriched and longevity region of South China[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2018, 25 (20): 20048—20056.
- [12] Zhang J D, Wang L, Wang H D, et al. Distribution of soil total selenium in Ziyang, Shanxi[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48 (6): 1404—1408. [张建东, 王丽, 王浩东, 等. 紫阳县土壤硒的分布特征研究[J]. 土壤通报, 2017, 48 (6): 1404—1408.]
- [13] Zhang H, Ma X P, Li X Y, et al. Characteristics and spatial distribution of selenium content in cultivated soils of Tailai County[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23 (9): 100—107. [张慧, 马鑫鹏, 李昕阳, 等. 泰来县耕地土壤硒含量特征及空间分布[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23 (9): 100—107.]
- [14] Luo Y J, Han G H, Sun X P, et al. Distribution of soil selenium in Three Gorges Reservoir region (Chongqing Section) and its influential factors[J]. *Soils*, 2018, 50 (1): 131—138. [罗友进, 韩国辉, 孙协平, 等. 三峡库区(重庆段)土壤硒分布特征及影响因素[J]. 土壤, 2018, 50 (1): 131—138.]
- [15] Zhang Y F, Miao G W, Ma Q, et al. Geochemical characteristics of Se in soil of the Pingan district, Haidong City, Qinghai Province[J]. *Earth and Environment*, 2019, 47 (1): 74—80. [张亚峰, 苗国文, 马强, 等. 青海省海东市平安区土壤 Se 的地球化学特征[J]. 地球与环境, 2019, 47 (1): 74—80.]
- [16] Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (1): 116—134. [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.]
- [17] Ma X, Zong L G, Zhu X D, et al. Effectiveness and influential factors of soil selenium in selenium valley, Fengcheng, Jiangxi[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17 (4): 1588—1593. [马迅, 宗良纲, 诸旭东, 等. 江西丰城生态硒谷土壤硒有效性及其影响因素[J]. 安全与环境学报, 2017, 17 (4): 1588—1593.]
- [18] Han X, Zhou Y, Wu W L, et al. Selenium contents of farmland soils and their relationship with main soil properties in Fengcheng, Jiangxi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37 (6): 1177—1183. [韩笑, 周越, 吴文良, 等. 富硒土壤硒含量及其与土壤理化性状的关系——以江西丰城为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (6): 1177—1183.]
- [19] Zhang S M, Wang Z M, Zhang B, et al. Prediction of spatial distribution of soil nutrients using terrain attributes and remote sensing data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (5): 188—194. [张素梅, 王宗明, 张柏, 等. 利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (5): 188—194.]
- [20] Wang H, Gao J B, Hou W J. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different morphological types

- of geomorphology in karst areas : Based on the geographical detector method[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73 (9): 1674—1686. [王欢, 高江波, 侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J]. *地理学报*, 2018, 73 (9): 1674—1686.]
- [21] China National Environmental Monitoring Station. The background value of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 370. [中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 370.]
- [22] Tan J A. Atlas of local diseases and environment of the People's Republic[M]. Beijing: Science Press, 1989: 39. [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: 39.]
- [23] Jiang Y F, Rao L, Guo X, et al. Spatial variability of farmland soil nitrogen of Jiangxi Province and its influencing factors[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27 (1): 70—79. [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.]
- [24] 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. [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.]
- [25] Chen X Z, Li J H. Concentration, distribution, and influencing factors on soil selenium in Guangzhou[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31 (4): 401—407. [陈显著, 李就好. 广州市土壤硒含量的分布及其影响因素研究[J]. *福建农业学报*, 2016, 31 (4): 401—407.]
- [26] 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. [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.]
- [27] Zhou M, Chen G G, Zhang M, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soils of South Jiangxi Province: A typical area of Qingtang-Meijiao[J]. *Geoscience*, 2018, 32 (6): 1292—1301. [周墨, 陈国光, 张明, 等. 赣南地区土壤硒元素地球化学特征及其影响因素研究: 以青塘—梅窖地区为例[J]. *现代地质*, 2018, 32 (6): 1292—1301.]
- [28] Zhou Y, Wu W L, Meng F Q, et al. Review on the content, specification of selenium and its availability in soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31 (6): 527—532. [周越, 吴文良, 孟凡乔, 等. 土壤中硒含量、形态及有效性分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31 (6): 527—532.]
- [29] Zhong F J, Pan J Y, Xia F, et al. A study of an integrated anomaly model and an exploration model for uranium exploration in Yuhuashan area, Jiangxi Province[J]. *Geology in China*, 2017, 44 (6): 1234—1250. [钟福军, 潘家永, 夏菲, 等. 江西玉山地区铀矿综合信息找矿模型研究[J]. *中国地质*, 2017, 44 (6): 1234—1250.]
- [30] Fan H F, Wen H J, Ling H W, et al. Recent progress in research on selenium speciation in the supergene environment[J]. *Earth and Environment*, 2006, 34 (2): 19—26. [樊海峰, 温汉捷, 凌宏文, 等. 表生环境中硒形态研究现状[J]. *地球与环境*, 2006, 34 (2): 19—26.]
- [31] Dong L K, Fang B. Analysis of spatial heterogeneity of soil heavy metals in tea plantation: Case study of high quality tea garden in Jiangsu and Zhejiang[J]. *Geographical Research*, 2017, 36 (2): 391—404. [董立宽, 方斌. 茶园土壤重金属乡镇尺度下空间异质性分析——以江浙优质名茶种植园为例[J]. *地理研究*, 2017, 36 (2): 391—404.]
- [32] Y Tao, Yang Z F, Lü Y Y, et al. The origin and geochemical cycle of soil selenium in a Se-rich area of China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139 (1): 97—108.
- [33] Li Y H, Wang W Y. Process on the study soil environmental chemistry of selenium[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33 (3): 230—233. [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.]
- [34] Neal Rosemary H, Sposito G. Selenate adsorption on alluvial soils[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1989, 53 (1): 70—74.
- [35] Tang Y X, Wang H M, Liu Q L, et al. Study on the content, speciation distribution and availability of selenium in wheat field soils of Hebei[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25 (S1): 194—197. [唐玉霞, 王慧敏, 刘巧玲, 等. 河北省麦田土壤硒的含量、形态及其有效性研究[J]. *华北农学报*, 2010, 25 (S1): 194—197.]
- [36] Li L J. Analysis of abundance and enrichment factors of selenium in soil[J]. *Marine Environmental Science*, 1994, 13 (3): 38—42. [李丽娟. 土壤中硒元素丰度及富集因素分析[J]. *海洋环境科学*, 1994, 13 (3): 38—42.]

(责任编辑: 檀满枝)