

许雄钡, 许鹏飞, 叶文荣, 姜振辉, 秦海燕, 黄春雷, 王磊, 张前前. 浙东南温州市土壤硒空间分布及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2026, XU Xiongchao, XU Pengfei, YE Wenrong, JIANG Zhenhui, QING Haiyan, HUANG Chunlei, WANG Lei, ZHANG Qianqian. Spatial Distribution of Soil Selenium and Its Influencing Factors in Wenzhou Southeast Zhejiang Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

浙东南温州市土壤硒空间分布及其影响因素研究*

许雄钡^{1,2}, 许鹏飞², 叶文荣², 姜振辉¹, 秦海燕², 黄春雷³, 王磊², 张前前^{1†}

(1. 浙江农林大学环境与资源学院/森林食物资源挖掘与利用全国重点实验室, 杭州 311300; 2. 浙江省第十一地质大队, 浙江温州 325006; 3. 浙江省地质院, 杭州 310007)

摘要: 浙东南是我国东南沿海重要的生态屏障与特色农业资源富集区, 具有丰富的硒资源。然而, 针对该区域土壤硒空间分布格局及其关键驱动因子的系统性研究仍较缺乏。本研究选取典型区域温州市为对象, 基于《1:50000 土地质量地球化学调查技术规范》, 自行设计并采集了 25753 份表层土壤样品。综合运用现场地质地貌勘查、土壤养分与重金属分析、土壤硒含量测定等方法, 通过 GIS 空间分析、相关分析及多元回归等方法, 探讨温州市土壤硒的空间分布特征及其主要控制因素。结果表明: 温州市表层土壤硒含量均值为 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变化范围为 $0.03 \sim 2.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数为 40%, 属于中等变异水平; 其中, 富硒土壤 ($\geq 0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 占全区面积的 25.6%。土壤硒空间分布具有显著的自相关性, 呈现中部(以瓯海、瑞安等低山丘陵区为主)高、东、西两侧低的区域分异格局。地层、成土母质、地貌类型、土壤类型、土地利用类型和土壤质地均对土壤硒空间变异有显著影响, 尤以成土母质作用最为突出。此外, 土壤硒含量与土壤 pH 显著负相关, 而与有机质、全氮、重金属含量显著正相关。多元回归结果表明, 土壤类型、成土母质、pH 和硒含量是调控土壤硒空间分异的主要驱动因子。综上, 温州市表层土壤硒的空间分异是地质背景、土壤理化性质及人为活动等多种因素共同作用的结果。本研究结果可为区域土地质量评价与富硒特色农业的合理开发利用提供科学依据。

关键词: 硒; 土壤; 浙东南; 空间分布; 影响因素

中图分类号: S159.2; X825 文献标志码: A

Spatial Distribution of Soil Selenium and Its Influencing Factors in Wenzhou Southeast Zhejiang Province

XU Xiongchao^{1,2}, XU Pengfei², YE Wenrong², JIANG Zhenhui¹, QING Haiyan², HUANG Chunlei³, WANG Lei², ZHANG Qianqian^{1†}

(1. School of Environment and Resources, Zhejiang A&F University/National Key Laboratory for Exploring and Utilizing Forest Food Resources, Hangzhou 311300, China; 2. The 11th Geological Brigade of Zhejiang Province, Wenzhou, Zhejiang 325006, China; 3. Zhejiang Institute of Geosciences, Hangzhou 310007, China)

Abstract: 【Objective】Southeast Zhejiang is an important ecological barrier and an enrichment area of characteristic agricultural resources along the southeast coast of China, possessing rich selenium (Se) resources. A detailed understanding of the spatial heterogeneity of soil selenium and its controlling factors is fundamental for planning Se-enriched agriculture and managing land resources sustainably. However, systematic investigations on the spatial distribution patterns of soil selenium and its key driving

*国家自然科学基金项目(42307432)、浙江省自然科学基金项目(LQ24D030001)和浙江省软科学基金项目(2025C35048)资助
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42307432); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LQ24D030001) and Zhejiang Provincial Soft Science Foundation of China (No.2025C35048)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: qqzhang@zafu.edu.cn

作者简介: 许雄钡(1997—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事土壤地球化学研究。 E-mail: 13965449697@163.com

收稿日期: 2025-06-20; 收到修改稿日期: 2026-03-11; 网络首发日期(www.cnki.net):

factors in this region remain insufficient. **【Method】** This study selected Wenzhou City, a representative area with complex geology and diverse land use within southeastern Zhejiang, as the research focus. The primary objectives were to: 1) characterize the spatial distribution of Se in surface soils; 2) evaluate the influences of various natural and anthropogenic factors on soil Se content; and 3) identify the dominant factors controlling its spatial variability. Following the technical specifications for 1:50,000 land quality geochemical surveys, a systematic sampling strategy was designed and implemented, collecting 25,753 topsoil samples (0–20 cm depth). Field investigations of geology and geomorphology, laboratory analyses of soil nutrients, heavy metals, and selenium content, as well as GIS-based spatial analysis, correlation analysis, and multiple regressions, were comprehensively integrated to systematically explore the spatial distribution patterns of soil Se and its primary controlling factors in Wenzhou. **【Result】** The results revealed that the average Se content in the topsoil soils of Wenzhou City was $0.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, with a range of 0.03 to $2.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The coefficient of variation was 40%, indicating a moderate degree of variability. The Se-rich soil (selenium content $\geq 0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) accounted for 25.6% of the total area of the region. Also, the geostatistical analysis demonstrated a strong spatial autocorrelation for soil Se, with an effective range of approximately 13.35 km based on the best-fitted exponential semivariogram model ($R^2=0.994$). In addition, the spatial distribution exhibited a clear regional pattern, characterized by significantly higher Se levels predominantly in the central part of the city, encompassing low mountainous and hilly areas like Ouhai and Ruian, compared to the eastern and western regions. Stratigraphic unit, soil parent material, geomorphic type, soil type, land use type, and soil texture all had significant effects on soil Se variation, among which parent material played the most dominant role. Soil Se content was significantly negatively correlated with soil pH, while showing significant positive correlations with organic matter, total nitrogen, and heavy metals. Multiple regression analysis indicated that soil type, parent material, pH, and arsenic content were the primary factors controlling soil Se spatial differentiation. **【Conclusion】** The spatial differentiation of surface soil Se in Wenzhou City is the result of the combined action of multiple factors such as geological background, soil physical and chemical properties, and human activities. These findings provide a scientific basis for regional land quality evaluation and the rational development and utilization of Se-rich characteristic agriculture.

Key words: Selenium; Soil; Southeast Zhejiang; Spatial distribution; Influencing factors

硒是地壳中的微量元素（平均约 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ），其来源主要包括成土母质风化、大气沉降和生物循环等自然过程，以及农业生产活动中带入的硒，多重来源共同决定土壤硒的本底水平^[1-2]。全球硒资源地理分布呈现高度异质性，土壤硒积累受风化、吸附-解吸、有机质络合等生物地球化学过程控制，常通过与土壤黏粒、有机质、铁锰氧化物或微生物结合转化为有机硒，影响其有效性^[3-4]。硒含量的高低直接调控植物对硒的吸收效率，进而通过土壤-植物-人体食物链影响人体健康。适量硒可优化土壤微生物群落结构，提升土壤肥力，促进植物光合作用与抗逆性；过量则导致土壤生态功能退化，引发植物毒害效应^[3]。同时，硒在人体抗氧化防御、免疫调节及疾病预防中不可或缺。缺硒会增加克山病、大骨节病等风险，而我国72%的国土缺硒，近7亿人口处于低硒暴露状态，成人膳食硒摄入不足比例达78.7%^[5-7]。因此，系统阐明土壤硒的空间格局及影响因素，是推进富硒农业精准发展和硒资源合理利用的科学基础。

土壤硒空间分异受多种因素驱动，可归纳为自然环境（如成土母质、地形地貌、地层）、土壤理化性质（如pH、有机质、质地等）及人为活动（土地利用类型、农业管理措施）三大类。然而，不同区域的主导因素差异显著^[8-12]。例如迟凤琴等^[9]与Jones等^[10]认为土壤有机质和pH是影响土壤硒含量变化的关键因子；而夏飞强等^[11]发现土壤硒含量主要受成土母质和土地利用类型控制，同时与有机质、重金属呈明显正相关性，但与土壤pH并没有相关性；商靖敏等^[12]则指出土壤硒含量的高低与土壤pH、理化性质和土壤质地相关，而与成土母质和土壤类型无显著相关性。近期研究进一步揭示了母质风化、地形、气候的影响。Liu等^[13]通过研究发现土壤硒的空间分布是母质风化、土地利用和地形气候共同作用的结果，而Qin等^[14]研究则指出土壤硒主要受有机质、pH、土地利用方式、成土母质控制，而地形和气候的影响可忽略。这类结论差异源于土壤硒积累过程中环境因素的复杂性^[15]，其区域间调控因子差异显著，且受多因素交互调控，因此需要综合考虑多因素的交互作用以揭示其空间分布规律。

浙东南温州市发育自中生代火山岩基底的富硒成土系统，具有由西南向东北梯级倾斜的地貌特征。其硒富集机制显著区别于湖北恩施、陕西紫阳等南方沉积型富硒区，独特的亚热带高温多雨气候与酸性火山岩风化过程在此形成成因耦合。浙江省地质院对全市土地质量的调查结果显示，温州境内25.6%的国土面积具备培育天然富硒农产品的资源优势，该比例在浙东南乃至全国均具典型性，彰显巨大的富硒特色农业

开发潜力。然而,对温州特色地球化学背景下表层土壤硒空间分布规律及其主导驱动机制的研究仍存在明显空白。为此,本研究以在温州市开展的1:50000土地质量地球化学调查数据及多年定位实验数据为基础,运用统计学、GIS空间分析技术等方法,查明区域内表层土壤硒的空间分异特征,并结合土地利用方式、成土母质、土壤类型、土壤质地、地层类型、地形地貌和理化因子等多元因子,深度探讨驱动温州市表层土壤硒空间分异的多尺度耦合机制,旨在为温州市富硒土壤资源开发利用和发展富硒农业提供理论指导和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

温州市位于浙江省东南部,东濒东海,南毗福建省宁德市,西及西北部与丽水市相连,北和东北部与台州市接壤。作为浙东南重要的特色农产品生产区域,其地理坐标位于 $27^{\circ}03' \sim 28^{\circ}36'N$ 、 $119^{\circ}37' \sim 121^{\circ}18'E$ 之间。该区域属亚热带海洋季风气候,多年平均气温 $17.3 \sim 19.4^{\circ}C$,年降水量 $1\,113 \sim 2\,494\text{ mm}$,无霜期 $241 \sim 326\text{ d}$,全年日照数 $1\,442 \sim 2\,264\text{ h}$ 。地形地貌呈西南向东北阶梯状倾斜,西部为海拔超过 $1\,000\text{ m}$ 的中山山地,中部主要为海拔 $500 \sim 1\,000\text{ m}$ 的低山、丘陵及山间盆地,东部则为海拔低于 20 m 的山前冲积平原、海积平原及河口三角洲(图1a)。土壤类型以红壤和水稻土为主,二者合计占温州市土壤总面积的70%以上(图1b)。土壤母质复杂多样,主要由滨海相沉积物、湖沼相沉积物、河流相冲(洪)积物、碳酸岩类风化物、火山碎屑岩类风化物及火山侵入类风化物等6种类型构成(图1c)。区域地层可划分为第四系和前第四系地层,第四系广泛分布于平原盆地区,主要由平原区海陆交互沉积/冲积层及山麓沟谷区坡积、洪积层构成;前第四系主要出露于基岩山区,属华南地层区浙东南分区,主体为下白垩统磨石山群及永康群火山-沉积岩系,局部见上古生界变质杂岩零星分布(图1d)。

样品运回实验室后,置于阴凉、清洁、通风环境中自然风干,使用无毒材料的研磨工具仔细碾碎风干土样,过2 mm孔径(10目)尼龙筛,取筛下细土作为备用样品。所有采样点均为本次研究现场采集,未使用历史数据,确保数据一致性和可靠性,同时严格实施全过程质量控制包括预留足量样品用于测试及复核,以确保分析结果的准确性和可靠性。

本研究涉及的地层、成土母质、土壤类型、土地利用类型、地形地貌及土壤质地等基础数据,均依托于《温州市1:50000土地质量地质调查》项目,分类依据严格遵循国家/行业标准及区域地质特征:地层基于《温州市1:50000区域地质调查图》及野外剖面实测,参照《中国地层指南及说明书(修订版)》;成土母质依托《温州市1:250000多目标区域地球化学调查》成果,按《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295—2016)及母质成因、岩性特征划分;土壤类型以第二次土壤普查数据为基础,结合土地质量调查剖面采样分析,依据《中国土壤系统分类检索(第三版)》划分为水稻土、红壤等七类;土地利用类型参考温州市土地利用变更调查结果及野外核查,按《土地利用现状分类》(GB/T21010-2017)确定为乔木林地、水田等类型;地形地貌通过地理空间数据云30 m分辨率遥感影像解译与野外实地调查验证,参照《地貌类型划分规范》(GB/T32399-2015)及研究区地形特征,按海拔与形态划分为山地、丘陵等六类;在野外采样过程中,聘请经验丰富的土壤学专家参照《土壤质地分类标准》(GB/T19341-2017),通过指测法对每个采样点的土壤质地进行了现场定性鉴定与分类(砂土、壤土、黏土),并详细记录,并由省级质量控制组复核。

1.3 项目测定与方法

土壤全硒(Se)含量测定严格依据《NY 1104-2006 土壤中全硒的测定》^[16],称取风干过筛土壤样品2 g(精确至0.0002 g)于消解罐内,加入15 ml硝酸-高氯酸混合酸,按推荐的升温程序在微波消解仪上进行消解,冷却后用去离子水定容至50 ml,取上层清液于原子荧光光谱仪(AFS-820,北京吉天)上测定硒含量;土壤镉(Cd)、铜(Cu)、铬(Cr)、镍(Ni)、铅(Pb)、锌(Zn)和钼(Mo)测定采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)^[17];土壤砷(As)和汞(Hg)测定采用原子荧光光谱法(AFS);土壤pH采用复合电极法测定,水土比为2.5:1;土壤全氮(N)采用凯氏定氮法消解蒸馏测定;土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾外加热-容量法^[18]。针对每批次样品均插入不少于10%的国家一级标准物质(GSS系列)和空白样,所有检测项目的标准物质分析结果与标准值相比的对数偏差($\Delta \lg C$)和相对标准偏差(RSD)值均满足《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295—2016)所规定的要求,样品合格率超过90%,确保数据准确可靠。

1.4 土壤硒含量分级与富硒标准

土壤硒含量分级标准在不同研究中虽存在细微差异,但核心划分逻辑一致,尤其在富硒土壤界定上,普遍以 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为关键阈值。基于《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295-2016)及相关研究^[19-21],结合温州市耕地土壤特征,本文以硒含量 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为界限将温州市耕地土壤分为过剩土壤($\geq 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、富硒土壤($0.4 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、适量土壤($0.175 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、边缘土壤($0.125 \sim 0.175 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和非富硒土壤($< 0.125 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)五种类型进行统计。

1.5 数据处理

为确保分析数据的统计学可靠性,本研究严格遵循质量控制与预处理流程:首先基于拉依达准则(Pauta Criterion)对原始数据进行异常值识别和剔除,剔除后保留有效样点25511个,经异常值处理后研究区土壤硒含量经Kolmogorov-Smirnov检验符合正态性假设($P > 0.05$),满足参数统计分析要求。采用SPSS 23.0软件进行试验数据处理,通过单因素方差分析(one-way ANOVA)检验土壤硒与各项参数下硒含量的组间差异显著性(Duncan法, $P < 0.05$)。空间异质性分析采用GS+9.0软件执行地统计学半方差分析,并基于块金值(C_0)、基台值(C_0+C)、结构比例 $[C/(C_0+C)]$ 及变程(A)等要素定量解析硒空间自相关的强度、尺度、空间依赖性贡献率及主导格局,并通过最小残差平方和(RSS)与决定系数(R^2)选取最优理论模型。基于优化的半方差模型参数,运用ArcGIS 10.8软件的普通克里金插值法构建土壤硒空间分布格局图。采用相关性分析解析土壤硒与土壤理化性质之间的关系。采用逐步回归分析方法明确影响土壤硒的关键驱动因子,该方法可有效规避共线性干扰并筛选核心解释变量。本研究将自变量分为概念型指标与数值型指

标两类：其中概念型指标指无法直接用数值量化、以定性分类描述为主的指标（如地层、成土母质、地貌类型等），与pH、土壤硒含量等可直接量化的数值型指标相对应，本文中地层、成土母质、地貌类型、土壤类型、土地利用类型和土壤质地为定性变量，采用虚拟变量进行赋值^[22]。全部可视化图均由Origin 2022b软件制图。

2 结 果

2.1 温州市及其辖区土壤硒含量统计特征

研究结果显示温州市土壤硒含量平均值为0.32 mg·kg⁻¹，变化范围为0.03~2.54 mg·kg⁻¹，变异系数为40%，属中等变异强度。其中，富硒（≥0.4 mg·kg⁻¹）土壤面积占比为25.57%。温州市12个县（市、区）土壤硒含量平均值在0.21 mg·kg⁻¹（龙港市）至0.49 mg·kg⁻¹（瓯海区）之间，存在显著差异（*P*<0.05）。富硒土壤（≥0.4 mg·kg⁻¹）的比例由大到小顺序依次是瓯海>鹿城>龙湾>瑞安>苍南>乐清>洞头>平阳>泰顺>文成>永嘉>龙港（表1）。

表 1 温州市及其辖区土壤硒统计特征

Table 1 Statistical characteristics of soil selenium distribution in Wenzhou city and its constituent districts

行政区 Districts	样本数 Number / (份)	最小值 Minimum / (mg·kg ⁻¹)	最大值 Maximum / (mg·kg ⁻¹)	平均值 Average / (mg·kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation / (mg·kg ⁻¹)	变异系数 Variable coefficient /%	硒含量分级面积比例 Area proportion of Se			
							富硒	适量	边缘	缺乏
							High	Moderation	Edge	Absence
							/%	/%	/%	/%
瓯海区 Ouhai	817	0.11	1.31	0.49 ^a	0.19	0.38	68.39	30.99	0.62	0.00
鹿城区 Lucheng	536	0.03	1.17	0.42 ^b	0.18	0.43	52.44	46.13	0.06	0.76
龙湾区 Longwan	392	0.10	2.50	0.35 ^d	0.25	0.72	34.64	42.92	21.19	1.25
瑞安市 Ruan	3657	0.08	2.54	0.39 ^c	0.22	0.57	32.94	53.19	12.96	0.91
乐清市 Yueqing	2960	0.09	1.82	0.37 ^c	0.19	0.49	24.73	72.39	2.86	0.02
洞头区 Dongtou	254	0.09	0.88	0.33 ^{ef}	0.16	0.49	24.27	61.73	12.86	1.14
龙港市 Longgang	186	0.08	0.33	0.21 ^h	0.04	0.19	0	83.96	16.04	0.00
苍南县 Cangnan	3107	0.06	2.54	0.35 ^d	0.19	0.53	25.01	71.47	3.19	0.33
平阳县 Pingyang	2811	0.04	1.90	0.34 ^{de}	0.17	0.51	22.04	74.03	3.41	0.52
泰顺县 Taishun	3529	0.07	2.15	0.31 ^g	0.17	0.55	19.07	63.23	15.51	2.19
文成县 Wencheng	3461	0.05	1.73	0.32 ^f	0.17	0.52	17.51	73.90	7.43	1.16
永嘉县 Yongjia	3801	0.07	2.19	0.30 ^g	0.14	0.47	16.03	76.14	6.94	0.88
温州市 Wenzhou	25511	0.03	2.54	0.32	0.13	0.40	25.57	66.22	2.87	0.78

注：不同小写字母表示不同县（市、区）土地之间差异显著（*P*<0.05）。Note: Lowercase letters denote statistically significant differences (*P*<0.05) across counties, county-level cities, and urban districts.

2.2 土壤硒空间分布特征

土壤硒空间分布的最优模型为指数模型，决定系数（*R*²）为0.994，残差（RSS）为2.968×10⁻⁷，趋近于0，表明该模型可高精度解析土壤硒的空间结构特征（表2）。半方差分析结果表明，块金值（*C*₀）<0.25）表明土壤硒具有强烈的空间自相关性，其空间变异性主要由结构性因素（如母岩属性、地形、气候）驱动。块金效应（*C*₀/（*C*₀+*C*）=0.14）显示随机性因素（如人为活动）对空间变异的贡献率仅为14%，而结构性因素主导（贡献率达86%）硒的空间分布格局。

基于最优半方差函数模型参数，运用普通克里格法对温州市表层土壤硒含量进行空间插值，生成其空间分布格局图（图2）。富硒土壤（≥0.4 mg·kg⁻¹）占总面积的25.57%，主要分布在瑞安、苍南、平阳、瓯海等地中西部低山丘陵区；适量硒土壤（0.175~0.4 mg·kg⁻¹）占比66.22%，主要分布在瑞安市、乐清市、

永嘉县、平阳县、苍南县、文成县、泰顺县地势较低的平原区；边缘硒土壤（ $0.125\sim 0.175\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）占比7.43%，主要分布在瑞安市、永嘉县、泰顺县低山区；而缺乏硒土壤（ $<0.125\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）等级仅占0.78%，主要在西部低山区。全市未发现硒过剩土壤（ $>3.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）。土壤硒高值区受地形地貌特征、地质背景等因素控制明显。

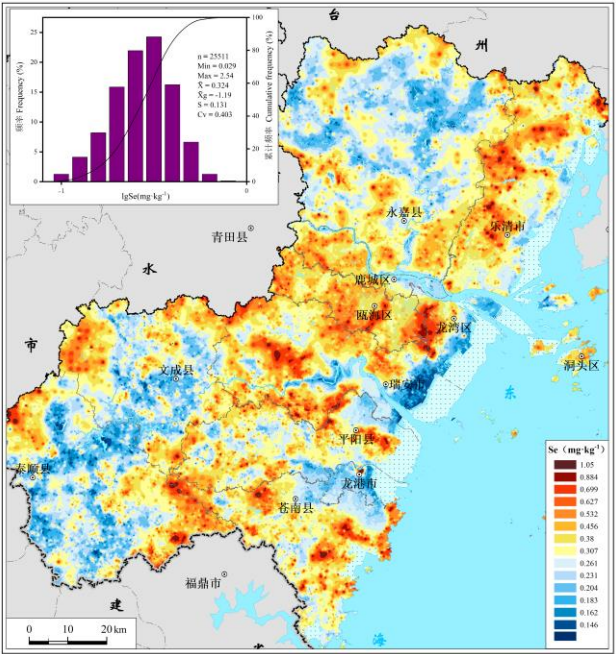


图 2 温州市表层土壤硒元素评价图（以彩图发表）

Fig. 2 Geochemical evaluation map of selenium in surface soils in Wenzhou city

表 2 土壤硒的半方差函数模型及相应参数

Table 2 Fitted variogram model for soil selenium and the associated parameters

模型 Model	块金值 Nugget variance (C_0)	基台值 Sill (C_0+C)	块金效应 Nugget/Sill/ $C_0/(C_0+C)$	变程 Range/m	拟合系数 R^2	残差 Residual (RSS)
高斯模型 Gaussian model	0.0039	0.0100	0.39	9751	0.975	1.173×10^{-6}
球状模型 Spherical model	0.0031	0.0101	0.31	12210	0.983	7.907×10^{-7}
指数模型 Exponential model	0.0015	0.0104	0.14	13350	0.994	2.968×10^{-7}
线性模型 Linear model	0.0053	0.0114	0.46	18906	0.794	9.622×10^{-6}

2.3 概念型指标对土壤硒含量的影响

表层土壤硒含量在不同地层、成土母质、地貌类型间均存在极显著差异（图3）。地层类别对表层土壤硒含量具有显著性影响（ $F=463, P<0.01$ ），呈现规律如下：震旦系（ $0.453\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）>侏罗系（ $0.346\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）>白垩系（ $0.335\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）>第四系（ $0.293\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）。整体上看不同成土母质之间硒含量差异显著（ $F=3396, P<0.01$ ），硒含量从高到低依次是：中酸性火山碎屑岩类风化物（ $0.457\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）、中酸性侵入岩类风化物（ $0.448\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）、湖沼相沉积物（ $0.357\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）、紫色碎屑岩类风化物（ $0.322\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）、河流相冲（洪）积物（ $0.297\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）和滨海相沉积物（ $0.252\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）。地貌类型对表层土壤硒含量也有极显著影响（ $F=717, P<0.01$ ），不同地貌表层土壤硒含量分布表现为：岗地（ $0.463\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）>山地（ $0.431\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）>丘陵（ $0.391\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）>盆地（ $0.321\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ） $\approx$ 谷地（ $0.329\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）>平原（ $0.286\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）。

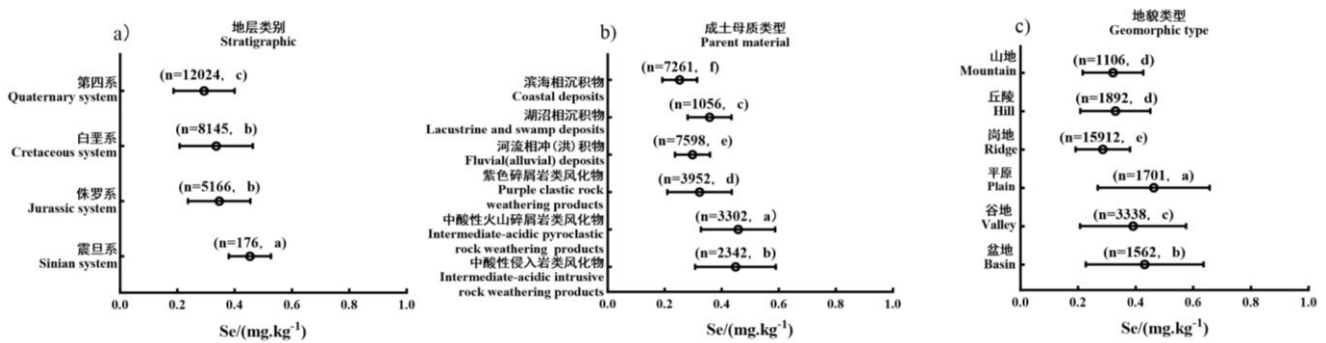


图 3 不同地层、成土母质及地貌类型下的表层土壤硒含量分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of selenium content in the surface soil under different stratigraphic, parent materials and geomorphic types

注:不同小写字母表示各类型土壤硒含量之间差异显著 ($P<0.05$)。下同。 Notes: Different lowercase letters indicate significant differences in Se content among various types of soil at the 0.05 level. The same below

表层土壤硒含量在不同土壤类型、土地利用类型、土壤质地中均存在极显著差异 (图4)。全市主要七类土壤类型中均存在极显著差异 ($F=552$, $P<0.01$)，其含量由高至低依次为：粗骨土 $\approx$ 黄壤 $>$ 红壤 $>$ 水稻土 $>$ 紫色土 $\approx$ 潮土 $>$ 滨海盐土。不同土地利用方式下土壤硒含量亦存在显著差异 ($F=817$, $P<0.01$)，表现为：乔木林地 ($0.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) $\approx$ 茶园 ($0.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) $>$ 灌木林地 ($0.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) $\approx$ 果园 ($0.47 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) $\approx$ 旱地 ($0.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) $>$ 水田 ($0.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。此外，不同质地土壤硒含量亦呈现极显著差异 ($F=136$, $P<0.01$)，壤土含量最高 ($0.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，次为黏土 ($0.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，砂土含量最低 ($0.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

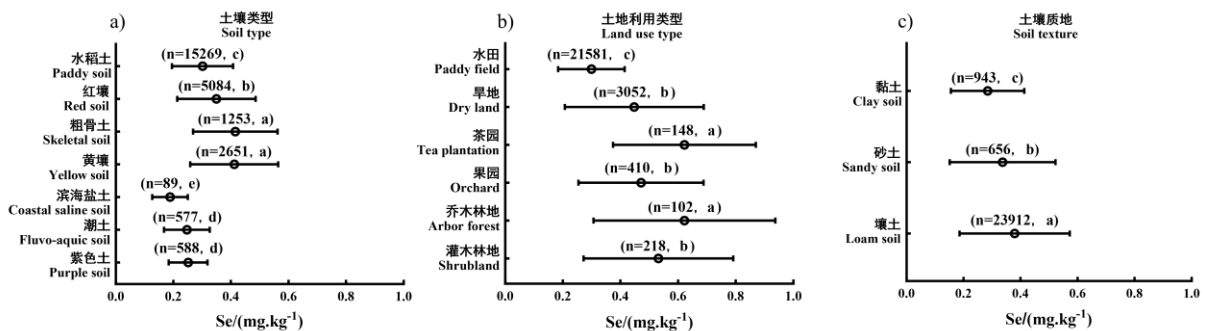


图 4 不同土壤类型、土地利用类型及土壤质地表层土壤硒含量分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of selenium content in the surface soil under different soil types, land use types and soil textures

2.4 概念型指标与数值型指标对土壤硒含量的调控关系

Pearson相关性分析揭示了数值型指标与土壤硒含量的关联性 (图5)。土壤硒含量与pH和镍元素呈极显著负相关 ($P<0.01$)，与土壤有机质及全氮含量呈极显著正相关 ($P<0.01$)，而与钼、锌、铅、砷、汞等重金属元素呈极显著正相关 ($P<0.01$)。

为深入解析概念型指标的类型约束与数值型指标的梯度控制对硒空间格局的联合驱动机制，用虚拟变量编码法对定性的概念型指标进行定量转化，遴选与硒显著相关的因子为自变量 (X)、表层土壤硒含量为因变量 (Y)，构建多元回归模型，通过比较标准化回归系数确定因子贡献度并筛选主导因子。结果显示 (表3)，最终的回归方程中包含土壤类型、成土母质、pH和砷含量4个因子 ($F=645.11$, $P<0.01$)，共同解释了土壤硒含量总变异的39.1%。为评估单独利用数值型指标对硒含量的预测能力，本研究额外构建了一个仅包含数值型指标的多元线性回归模型，结果表明若完全忽略由地质背景和成土过程所决定的概念型指标，模型对硒空间变异的解释能力将下降约20%。

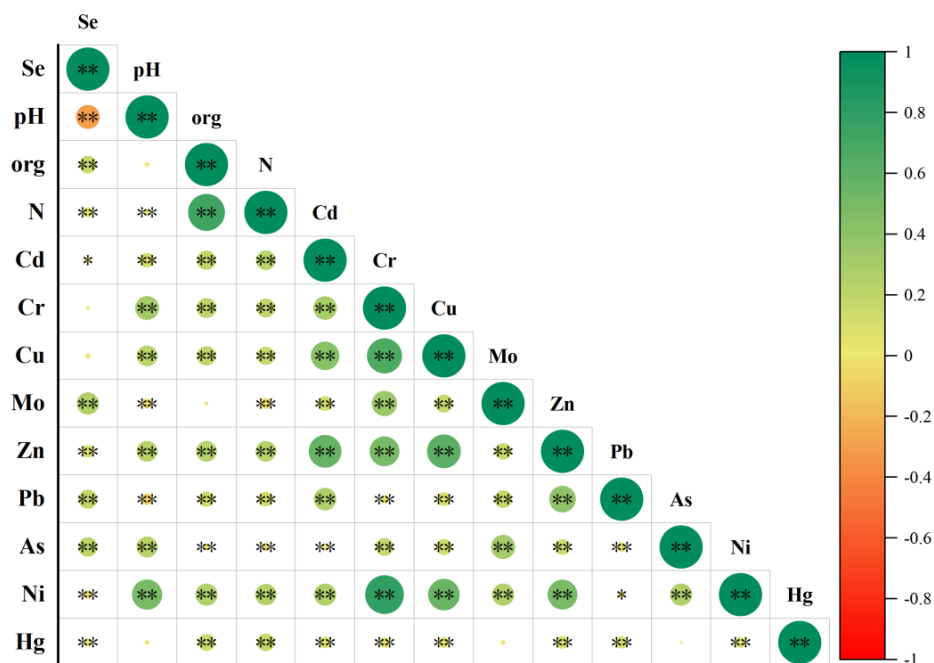


图 5 表层土壤硒与土壤数值型指标参数相关性（以彩图发表）

Fig. 5 Correlation between surface soil selenium and quantitative soil index parameters

注：Org：有机质；“*”在 0.05 水平下相关性显著，“**”在 0.01 水平下相关性显著。Notes: Org: soil organic matter “*”Significant at the level of 0.05; “**”Significant at the 0.01 level.

表 3 数值型指标和概念型指标与土壤硒含量之间的多元线性回归模型

Table 3 Multiple linear regression models predicting soil selenium content from quantitative and conceptual indicators

指标类型		回归方程	R^2	重要性排序
Variable type		Regression equation		Importance ranking
土壤硒 Total selenium	概念型+数值型 Conceptual type+ Quantitative type	$Y=2.25-0.15TRMZ-0.17pH+0.01As-0.19TRLX$	0.391	$TRLX>pH>TRMZ>As$
	数值型 Quantitative type	$Y=0.435-0.018pH+0.006As-0.032Cd+0.019Hg+0.01Pb$	0.295	$pH>As>Cd>Hg>Pb$
	概念型 Conceptual type	$Y=0.435-0.018pH+0.006As-0.032Cd+0.019Hg+0.01Pb$		

注:TRMZ: 成土母质类型; TRLX:土壤类型。Notes: TRMZ: Parent material; TRLX: Soil type.

3 讨论

温州市表层土壤硒平均含量达到 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 呈现中等变异强度, 与全球土壤平均硒浓度($0.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[10,23]基本持平, 高于中国土壤硒含量平均水平 ($0.290 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[24]。依据本研究分级标准, 研究区土壤以适硒为主, 富硒面积占比25.57%, 高于江西丰城的18.0%^[25], 是中国主要农耕区富硒土壤面积 (8.7%) 的2.9倍^[26]。富硒区主要分布于永嘉与乐清交界的低山区、瓯海-平阳-苍南西部、苍南南部以及龙湾一带 (表1和图2), 说明全市富硒土壤分布广、潜力大, 产业开发前景显著。研究结果为温州市富硒土壤资源的科学评估及后续的开发利用保护提供了重要依据, 助力区域农业可持续发展。

本研究发现地质背景与成土母质对硒分布具有显著控制作用, 震旦系与侏罗系土壤往往表现出较高的硒含量, 而白垩系与第四系则相对较低 (图3), 体现母岩地球化学特征的继承性, 土壤母质类型结果可印证此结论。研究发现, 土壤硒含量呈现: 中酸性火山碎屑岩类风化物>中酸性侵入岩类风化物>湖沼相沉积物>紫色碎屑岩类风化物>河流相冲 (洪) 积物>滨海相沉积物。这主要因为中酸性火成岩因火山/

岩浆侵入的热液活动促使硒在气-液界面富集,其残积母质中硒与铁氧化物共沉淀形成稳定结合态,从而维持较高水平^[1,27]。紫色碎屑岩类风化物则受限于物理风化主导的快速崩解,搬运距离有限,其快速的物理形成过程和较弱的化学风化过程对富硒原岩具有明显继承性^[28-29]。然而,运积型母质如河流相冲(洪)积物和滨海相沉积物在搬运过程中发生水力分选,经历了较多的分散和稀释作用,轻质有机质及吸附态硒优先流失,造成土壤硒含量较少。同时,本研究发现随海拔升高出现的硒富集现象,这与前人研究结果基本一致^[6,25],主要源于以下三方面耦合:(1)随海拔升高温度下降抑制微生物矿化作用,利于有机结合态硒保存^[5];(2)高海拔区域往往伴随着更强的降水和风力作用,随母岩物理风化程度加深而逐步累积,形成土壤硒富集^[30];(3)坡积环境下黏粒定向迁移,导致硒在缓坡区表层富集。

本研究发现土壤硒在不同土壤类型的富集顺序为:粗骨土 $\approx$ 黄壤 $>$ 红壤 $>$ 水稻土 $>$ 紫色土 $\approx$ 潮土 $>$ 滨海盐土。粗骨土多为残积物或坡积物,其成土过程相对缓慢,其高硒反映年轻土壤的母质继承优势^[31-32]。然而,黄壤在强烈淋溶下仍维持硒储量的关键机制在于:(1)2:1型黏土矿物对硒的选择性吸附较为强烈;(2)富铝化过程产生的非晶态 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 形成硒的封闭微区^[33-34]。红壤成土母质为第四系红土砾石层及凝灰岩、花岗岩的风化物,盐基淋溶,富铝化现象明显,虽与黄壤一样主要为中酸性火山岩岩石风化产物,但红壤硒含量低于黄壤,这源于:(1)红壤多分布于500 m以下低山丘陵区,高温高湿下深度风化,盐基淋溶与富铝化显著,黏粒流失,进而降低硒持留能力和有效性;(2)黄壤主要分布于海拔500 m以上的丘陵山地和高原区域,气候湿润,植被生长茂盛,植物残体分解后归还土壤的有机物质较多,有机质对硒有一定的吸附和固定作用,有助于提高土壤硒含量^[15]。本研究红壤有机质平均值($24.18 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著低于黄壤($30.62 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)也起到间接佐证作用。滨海盐土硒含量背景值最低,这是由于滨海盐土是由近代海相或冲海相沉积物经盐渍化、脱盐化过程发育而成,土壤pH介于7.5~8.5,偏碱性,土壤淋溶作用强,硒主要以硒酸盐形式存在,相较于酸性环境中的亚硒酸盐形态更容易发生迁移淋溶和被植物吸收^[35]。

土地利用类型主要体现为人类活动对土壤硒的干扰作用,研究发现土壤硒含量呈现以下趋势(图4):乔木林地($0.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) $\approx$ 茶园 $>$ 灌木林地($0.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) $\approx$ 果园 $\approx$ 旱地 $>$ 水田($0.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。林地和茶园所在区域多以碎屑岩类作为成土母质,风化后形成的土壤本身硒含量丰富,同时丰富的植被可从深层母质吸取硒封存于枯枝败叶后返回地表,经过腐殖质化和有机质矿化过程释放硒^[36]。而水田低硒则源于:(1)频繁的淹水状态可降低Eh,促进硒的还原,并随排水迁移;(2)长期耕作种植活动使大部分硒被植物吸收而收获。本研究中土壤质地分类主要依赖于野外定性鉴定,虽揭示了质地类型对硒含量的显著影响(图4),但难以精确量化不同粒级组分的具体效应。该定性数据初步印证了黏粒可能通过吸附作用影响硒的固存,为进一步研究提供了方向。未来研究需结合实验室的颗粒组成定量分析(如吸管法或激光粒度仪),以更精确地解析黏粒、粉粒含量与硒吸附、迁移之间的定量关系,从而深入揭示质地对硒生物有效性的微观机制。

相关分析结果表明,土壤有机质与土壤硒呈显著正相关,这与韩笑等^[37]、黄春雷等^[38]的研究结论一致。其主要原因是土壤有机质比表面积大、络合能力强,高分子量有机酸能够与土壤硒络合形成难溶化合物,显著提升硒的固定能力^[39]。土壤全氮(N)与硒的显著正相关本质上是有机质介导的生物地球化学耦合过程,有机质矿化过程中,微生物分泌的胞外酶分解含氮有机物,同步释放结合态硒。土壤pH与硒含量呈显著负相关(图5),这主要是由于研究区表层土壤pH介于3.59~9.61,平均值为5.25,整体呈酸性,研究区土壤中硒元素与pH呈负相关关系,呈现出土壤pH越小,硒含量越高的特征,与前人的研究一致^[15,40]。其主要原因可能是在酸性条件下,硒以亚硒酸(H_2SeO_3)形态存在,易被铁锰氧化物、黏土矿物和有机质通过吸附或络合作用固定;而在碱性条件下,硒主要以硒酸(H_2SeO_4)形态存在,其水溶性较强且带负电荷,与土壤胶体间的静电斥力增大,导致吸附能力显著下降,进而易发生迁移淋溶^[41-42]。值得注意的是,表层土壤硒含量与砷、铅等重金属呈正相关性,这与前人研究一致^[25,39],系内在的硒-重金属共生效应所致,表现为硒与砷铅等重金属元素普遍存在共生现象,重金属元素多以硫化物形式存在,硒与硫易以类质同象伴生,且硒与砷、铅的析出电位相近,具有强亲和力,硒易与上述金属元素结合形成化合物,岩石风化形成的土壤继承了原生矿物中的元素伴生关系^[43-44]。此外,相关研究发现有机质和Zn等重金属可以通过形成有机物-阳离子-硒三元配合物的方式捕获硒氧阴离子,从而促进土壤硒的富集^[23-24]。

综上, 硒元素在空间分布上呈斑块状分布格局, 土壤硒的 $C/(C_0+C)$ 为14%, 揭示强烈空间自相关性, 印证了空间变异主要由结构性因素造成。同时, 纯数值型模型与综合模型的对比结果有力地证明, 土壤硒的空间分异是地表地球化学过程与深层地质背景共同作用的结果。回归方程结果进一步表明驱动土壤全硒空间变异的主要驱动因子依次是: 土壤类型、pH、成土母质和砷元素(表3)。以上共同印证了土壤类型和成土母质等结构性因子通过母质遗传奠定了硒分布的宏观格局, 而人类活动(如灌溉耕作)与土壤理化性质(pH、有机质)则通过次生过程在局部尺度上改造硒的生物有效性^[14,26]。

4 结 论

温州市表层土壤硒含量平均值为 $0.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 参照分级标准处于适量水平, 高于全国背景值($0.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 其中富硒土壤($\geq 0.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)面积约占耕地的25.6%, 主要分布在瓯海、瑞安、苍南、平阳等中西部低山丘陵区。研究表明成土母质、土地利用类型、地貌类型、土壤质地和土壤类型均显著影响土壤硒的空间分布, 其中成土母质的作用最为突出。土壤 pH、有机质含量及部分重金属元素也与硒分布存在显著相关性。逐步回归发现, 土壤类型、成土母质、pH 及砷元素是驱动温州市土壤硒含量变化的核心要素, 硒的空间分布格局是由多种因素共同作用的结果, 其中结构性因子和次生过程均发挥了重要作用。本研究系统阐明了温州市土壤硒的分布规律与主控机制, 为区域富硒资源的科学开发、农业产业规划及生态环境保护提供了重要依据, 后续可结合硒赋存形态分析, 深入探究其迁移转化机制。

参考文献 (References)

- [1] Floor G H, Román-Ross G. Selenium in volcanic environments: A review[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(3): 517-531.
- [2] Qu L L, Xu J Y, Dai Z H, et al. Selenium in soil-plant system: Transport, detoxification and bioremediation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 452: 131272.
- [3] Wang Z, Huang W, Pang F. Selenium in soil-plant-microbe: A review[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2022, 108(2): 167-181.
- [4] Deng G G, Fan Z Q, Wang Z Y, et al. Dynamic role of selenium in soil-plant-microbe systems: Mechanisms, biofortification, and environmental remediation[J]. *Plant and Soil*, 2025, 515(2): 1085-1105.
- [5] Yang H, Yang X F, Ning Z P, et al. The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-plant-human system: An overview[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 422: 126876.
- [6] Liu Z Z, Wang S, Liu Q, et al. Spatial differentiation and influencing factors of soil Se in Ximeng County[J]. *Soils*, 2024, 56(5): 1111-1119. [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.]
- [7] Cai S Y, Tang Z X, Zhao L Y, et al. Dietary selenium intake in Chinese adult[J]. *Food and Nutrition in China*, 2024, 30(10): 78-83. [蔡姝雅, 唐增煦, 赵丽云, 等. 中国 18 岁及以上成人膳食硒的摄入状况[J]. *中国食物与营养*, 2024, 30(10): 78-83.]
- [8] Xie T Y, Shi Z M, Gao Y W, et al. Modeling analysis of the characteristics of selenium-rich soil in heavy metal high background area and its impact on main crops[J]. *Ecological Informatics*, 2021, 66: 101420.
- [9] 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.]
- [10] Jones G D, Droz B, Greve P, et al. Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change[J]. *P NAS*, 2017, 114(11): 2848-2853.
- [11] Xia F Q, Zhang X, Yang Y, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soils and agricultural products in Ningguo City, Anhui Province[J]. *Soils*, 2021, 53(3): 585-593. [夏飞强, 张祥, 杨艳, 等. 安徽省宁国市土壤和农产品硒地球化学特征及影响因素[J]. *土壤*, 2021, 53(3): 585-593.]
- [12] 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.]

- [13] Liu X Y, Ma Q R, Song Z F, et al. Research on the spatial pattern distribution of soil selenium using machine learning methods integrating geographic proximity in complex terrain[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2024, 24(7): 2776-2790.
- [14] Qin Y L, Zhang L, Wang Q L, et al. Driving factors of soil selenium accumulation in regional enrichment area at selenium-deficient soil belt of China: An enlightenment of Moran's index and machine learning[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2025, 274: 107746.
- [15] Wan H S, Zhang W C, Wu W, et al. The controlling factors of soil selenium content in a selenium-deficient area in southwest China[J]. *Agronomy*, 2023, 13(4): 1031.
- [16] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of Total Selenium in Soils: NY/T 1104-2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. [中华人民共和国农业部. 土壤中全硒的测定: NY/T 1104-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.]
- [17] Chen Z W, Xu J, Yang S Y, et al. Spatio-temporal distribution and influencing factors of selenium in soil-crop system from the plateau basin region, Northeastern Yunnan[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(2): 781-792. [陈子万, 许晶, 杨树云, 等. 滇东北高原盆地土壤—苹果作物系统硒时空分布及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(2): 781-792.]
- [18] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [19] Tan J A, Zhu W Y, Wang W Y, et al. Selenium in soil and endemic diseases in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 284(1/2/3): 227-235.
- [20] Tan J A. Environmental life elements and Keshan disease: An eco-chemical geography study[M]. Beijing: China Medical Science Press, 1996. [谭见安. 环境生命元素与克山病——生态化学地理研究[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1996.]
- [21] Yang J Z, Li K, Gao J W, et al. Integrated assessment and agricultural planning in selenium-rich hilly soils: A case study on land use, heavy metal contamination, and nutrient element distribution[J]. *Land*, 2024, 13(11): 1798.
- [22] Jiang Y F, Ye Y C, Guo X, et al. Spatial variability of ecological stoichiometry of soil nitrogen and phosphorus in farmlands of Jiangxi Province and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1527-1539. [江叶枫, 叶英聪, 郭熙, 等. 江西省耕地土壤氮磷生态化学计量空间变异特征及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1527-1539.]
- [23] Tolu J, Bouchet S, Helfenstein J, et al. Understanding soil selenium accumulation and bioavailability through size resolved and elemental characterization of soil extracts[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 6974.
- [24] Dinh Q T, Cui Z W, Huang J, et al. Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: A review[J]. *Environment International*, 2018, 112: 294-309.
- [25] Zhu Q, Guo X, Han Y, et al. 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. [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.]
- [26] Zang H W, Zhang Z Z, Long Z D, et al. Some key scientific questions in utilization of selenium resources in China[J]. *Current Biotechnology*, 2021, 11(4): 542-549. [臧华伟, 张泽洲, 龙泽东, 等. 中国硒资源利用中若干关键科学问题的探讨[J]. *生物技术进展*, 2021, 11(4): 542-549.]
- [27] Gong J J, Gao J W, Fu Y G, et al. Vertical distribution and major influencing factors of soil selenium in tropical climate: A case study of Chengmai County, Hainan Island[J]. *Chemosphere*, 2023, 312(Pt 1): 137207.
- [28] Zhong S Q, Han Z, Du J, et al. Relationships between the lithology of purple rocks and the pedogenesis of purple soils in the Sichuan Basin, China[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 13272.
- [29] Li C P, Li X, Wang X, et al. Effect of the acidification environment on exchangeable cations and acid buffering capacity of weathering products of purple parent rock[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(1): 258-271. [李春培, 李雪, 汪璇, 等. 酸化环境对紫色母岩风化产物交换性盐基离子及其酸缓冲容量的影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61(1): 258-271.]
- [30] Li X Z, Hou Q Y, Duan Y R, et al. Soil selenium enrichment in the Loess Plateau of China: Geogenic evidence, spatial distribution, and its influence factors[J]. *Chemosphere*, 2023, 340: 139846.

- [31] Liu W H, Wu Y Q, Zhong Y Z, et al. Concentrations, distribution and influencing factors of selenium (Se) in soil of arid and semi-arid climate: A case from Zhangye-Yongchang region, north-western China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2023, 250: 107239.
- [32] Hao L T, Zhang J D, Zhang S X, et al. Distribution characteristics and main influencing factors of selenium in surface soil of natural selenium-rich area: A case study in Langao County, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, 43(1): 333-346.
- [33] Zhao L L, Hong H L, Fang Q, et al. Hydrologic regulation of clay-mineral transformations in a redoximorphic soil of subtropical monsoonal China[J]. *American Mineralogist*, 2023, 108(10): 1881-1896.
- [34] Ippolito J A, Scheckel K G, Barbarick K A. Selenium adsorption to aluminum-based water treatment residuals[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, 338(1): 48-55.
- [35] Liao Q, Xing Y, Li A M, et al. Enhancing selenium biofortification: Strategies for improving soil-to-plant transfer[J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2024, 11(1): 148.
- [36] Pisarek P, Bueno M, Thiry Y, et al. Influence of tree species on selenium and iodine partitioning in an experimental forest ecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 809: 151174.
- [37] 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.]
- [38] Huang C L, Wei Y C, Jian Z H, et al. Study on selenium contents and combined forms of typical selenium-rich soil in the central part of Zhejiang Province[J]. *Earth and Environment*, 2013, 41(2): 155-159. [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.]
- [39] Cui X D, Hua M, Huang S S, et al. Spatial distribution of surface soil selenium and its influential factors in a typical selenium-enriched area in Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(11): 2472-2482. [崔晓丹, 华明, 黄顺生, 等. 江苏典型富硒区表层土壤硒空间分布及影响因素分析[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(11): 2472-2482.]
- [40] Xiao K Q, Gong H, Dai L L, et al. Delineation and cause analysis of natural pollution-free selenium-rich land in Wulong Mountain[J]. *Geological Review*, 2025, 71(2): 625-634. [肖凯琦, 巩浩, 戴亮亮, 等. 湖南省乌龙山天然无公害富硒土地划定、成因分析与开发利用展望[J]. *地质论评*, 2025, 71(2): 625-634.]
- [41] Liu Y X, Chen J P, Pan L P, et al. Studies on causes and influential factors of selenium-rich soil in Xunyu Plain[J]. *Soils*, 2018, 50(6): 1139-1144. [刘永贤, 陈锦平, 潘丽萍, 等. 浔郁平原富硒土壤成因及其影响因素研究[J]. *土壤*, 2018, 50(6): 1139-1144.]
- [42] Wu T L, Huang Y H, Qi H T, et al. Study of soil ecological safety threshold values of copper, zinc, lead and cadmium[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2026, 63(1): 97-109. [吴同亮, 黄奕航, 祁海涛, 等. 基于生态安全的土壤铜、锌、铅、镉阈值研究[J]. *土壤学报*, 2026, 63(1): 97-109.]
- [43] Lei W S, Lin X, Duan X X, et al. Source and migration of selenium in the soil[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* 2024, 54(1): 264-278. [雷万杉, 林鑫, 段星星, 等. 土壤中硒元素来源和迁移作用研究现状[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)* 2024, 54(1): 264-278.]
- [44] Di D L, Xiao J, Gai X, et al. Phytic acid-modified biochar reduces soil Cd release by regulating pH and aggregates structure[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, <https://dx.doi.org/10.11766/trxb202507010321>. [邸东柳, 肖江, 盖旭, 等. 植酸改性生物炭通过调控 pH 和团聚体结构降低土壤 Cd 释放[J/OL]. *土壤学报*, <https://dx.doi.org/10.11766/trxb202507010321>.]

(责任编辑: 檀满枝)