doi: 10.11720/wtyht.2026.0084
唐雨, 成晓梦, 贺灵, 等. 四川省典型山地区土壤硒元素含量特征、资源评价及影响因素研究[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 580−589. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0084
Tang Y, Cheng X M, He L, et al. Concentration characteristics, resource evaluation and influencing factors of soil selenium in a typical mountainous area of Sichuan Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 580−589. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0084

四川省典型山地区土壤硒元素含量特征、资源评价及影响因素研究

唐雨[1], 成晓梦[1,2], 贺灵[1,2], 吴超[1,2], 韩伟[1,2], 赵辰[1,2,3], 张富贵[1,2,3]
(1. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 天津 300309; 2. 中国地质调查局 土地质量地球化学调查评价研究中心, 天津 300309; 3. 中国地质调查局 地球表层碳—汞地球化学循环重点实验室, 天津 300309)

摘 要: 我国硒摄入量不足一直倍受广泛关注。全国范围土地质量地球化学调查结果显示, 我国西南山区硒含量较高。然而, 这些地区硒的来源及其富集的影响因素尚不清楚。本次选择乌蒙山区富硒条件较好的沐川县为研究区, 采用随机森林模型和 SHAP 方法, 结合高程(EL)、年均地表温度(LST)、降水(Prec)、成土母质(PMT)及土壤理化性质等因素开展土壤硒含量及其影响因素研究。结果发现, 沐川县土壤中硒平均含量为 0.38×10^{-6}, 是中国土壤背景值的 1.8 倍, 整体处于较高水平; 硒含量较丰富及以上等级土地面积为 703.59 km^2, 占总面积的 49.99%, 具备较好的富硒土地潜力; 随机森林模型预测效果较好, 训练集和测试集的相关系数 R^2 分别为 0.84 和 0.76; SHAP 分析表明, SOM 是影响 Se 含量变化的主导因子, 高 EL、SOM、Mn 区域有利于 Se 富集, 而高 Prec、LST 和高 pH 会促进 Se 淋失。研究认为, 沐川县表层土壤 Se 富集受成土母质、地形、气候和土壤理化性质共同控制, 其中 SOM 对 Se 保留作用最为明显, 本次研究结果可为乌蒙山区富硒土地资源评价和开发利用提供一定依据。

关键词: 硒元素; 含量特征; 富硒资源; 影响因素; 随机森林; 山地区
中图分类号: X142; X825; P632; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)03-0580-10

0 引言

硒(Se)是人体必需的微量元素。研究发现适量硒对人体健康至关重要, 对增强人体免疫力和抗衰老能力有积极的影响, 人体缺硒可诱发克山病、大骨节病、心血管疾病和甲状腺功能异常等疾病[1-3]。然而, 硒的生物学功能具有双重特性, 硒含量缺乏与过量之间的范围很窄, 过量的硒会导致毒性并影响人类的神经和智力发育[4], 表现为头发变干变脆、易脱落, 指甲变脆、易脱落, 皮肤损伤及神经系统异常, 严重者死亡[5]。中国湖北恩施和美国南达科达州均发生过严重的硒中毒事件。因此如何提高缺硒地区人群的硒摄入量和降低高硒地区人群的硒摄入量是目前亟待解决的问题。植物中的硒主要以无机硒和有机硒两种形态存在, 其中硒蛋氨酸是人体不能自行合成的重要有机硒来源[6], 因此, 食物是人体获取硒的重要途径, 而土壤则是食物链中硒的重要来源。开展土壤 Se 含量特征及其影响因素的调查研究, 有助于认识区域土壤 Se 的分布规律, 为富硒土地划定与评价, 以及富硒资源利用提供依据。

自然状态下, 土壤硒含量主要受地质背景、理化性质、景观条件和土壤类型等因素控制[7-12]。杨忠芳[13]、周亚龙等[14]、王学求等[10] 及周国华等[15] 研究均表明, 土壤高硒与黑色岩系密切相关。成晓梦等[7] 对沐川县西部表层土壤的研究指出, 有机质对表层

收稿日期: 2026-03-31; **修回日期:** 2026-04-26
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20242025);四川省自然科学基金项目 (2025ZNSFSC0010)
第一作者: 唐雨(1999−), 男, 硕士研究生, 研究方向为生态地球化学方法。Email: 2057204371@qq.com
通讯作者: 张富贵(1980−), 男, 正高级工程师, 从事土地质量调查方法的研究工作。Email: 375545821@qq.com

土壤硒含量的影响显著强于铁氧化物。Winkel 等[16]研究表明, Se 的迁移性和生物有效性通常随 pH 升高以及铁氧化物、黏粒含量降低而增强。Blazina 等[17]提出, 中国陆地硒分布与东亚季风降水密切相关, 并明确指出降水是季风区土壤 Se 分布的重要控制因素。近年的调查研究还发现, 中国许多地区富硒土地通常还与景观条件密切相关[18-20]。因此, 揭示富硒土壤中硒迁移富集的主要影响因素, 对富硒土壤资源的合理利用具有重要现实意义。

本文利用国家多目标区域地球化学填图计划 2017~2021 年在沐川县采集的 6 746 件表层土壤样品研究了土壤硒的含量特征和影响因素, 基于随机森林方法分析了土壤有机质(soil organic matter, SOM)、高程(elevation, EL)、年均地表温度(annual mean land surface temperature, LST)、降水(precipitation, Prec)、成土母质类型(parent material types, PMT)、土地利用类型(land use type, LUT)及土壤理化性质等因素对土壤硒空间分布的影响。本次研究的目的有 3 个: ①研究典型山地区土壤硒含量及其空间分布特征; ②研究典型山地区土壤硒分布的影响因素; ③研究典型山地区土壤硒的表生地球化学行为。

1　研究区概况

沐川县位于四川盆地西南边缘向凉山山地过渡地带。受构造运动影响, 县境西部抬升较快, 东部相对缓慢, 地表总体呈西南向东北倾斜。全县地貌较为复杂, 分为平坝、台地、高丘陵、低山、低中山、山原 6 个类型。研究区气候类型属亚热带季风气候, 季节变化明显, 春季多雨, 夏季湿热。沐川县大地构造位于扬子准地台、四川台坳、川中台拱西南缘的弧形褶带, 西南接凉山凹陷带, 东北连威远台凸, 县内褶皱构造较为发育, 断裂相对较少[8]。褶皱轴向弯曲呈弧形分布, 整体宽缓且不对称。组成褶皱的地层为中生代红色砂页岩层, 地层倾角平缓。研究区出露地层主要有二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系及第四系, 其中三叠系、侏罗系以砂岩、粉砂岩、泥岩夹砂岩、砂岩夹泥页岩为主, 层状构造较为发育。区域岩性分布存在一定差异, 西部以石灰岩和砂岩为主, 东部则以红砂岩为主(图 1)。土壤类型主要包括潮土、黄壤、石灰岩土、水稻土及紫色土 5 类, 其中以水稻土和紫色土分布范围最广, 黄壤次之, 其他土

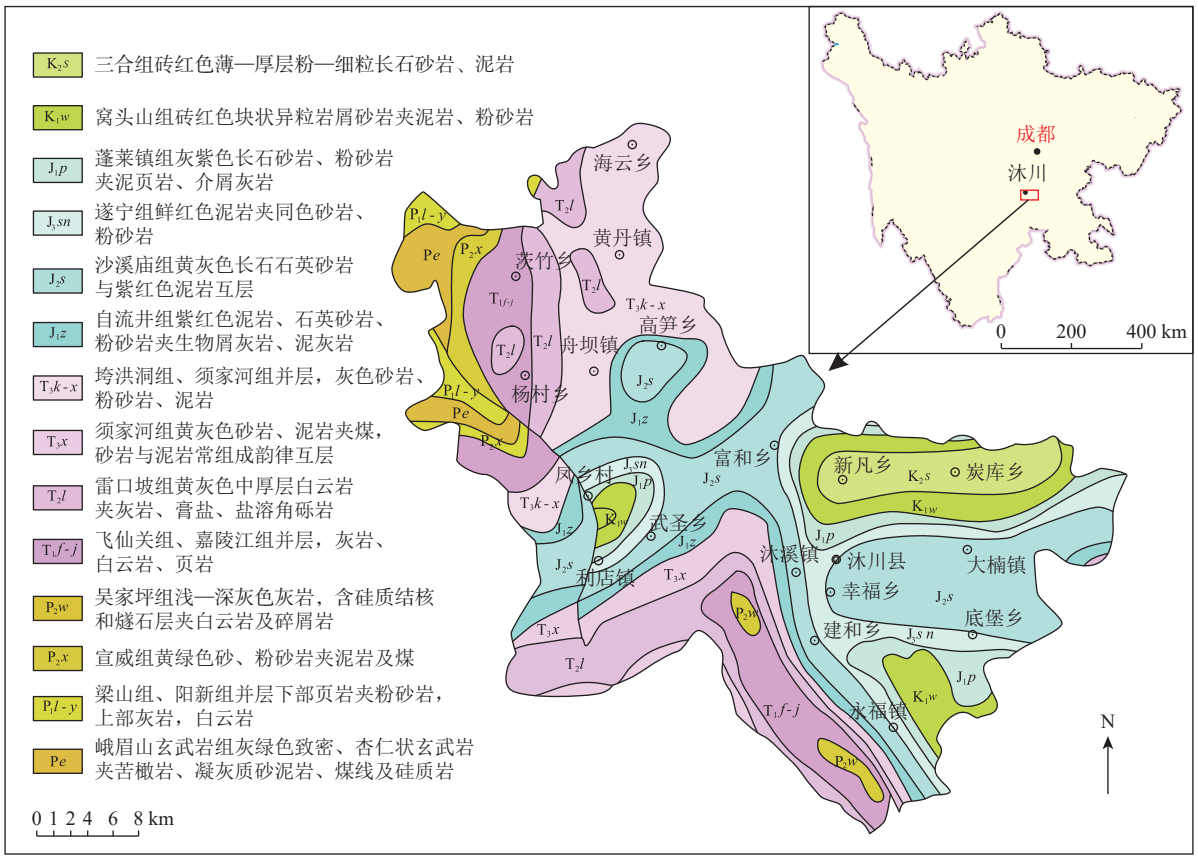


图 1　沐川县地质简图

Fig. 1　Geological sketch map of Muchuan

壤类型分布范围最小。区内主要经济作物为水稻、玉米和茶叶等。

2 材料与方法

2.1 采样与处理

本次调查采用网格加土地利用现状图斑为底图布设，土壤样点主要布设在农用地并避免出现较多空白区，使区域评价更具代表性。在布设的采样点上，以某一定位设计点为中心，向四周辐射 50 m 左右采用“S”形布设 4 个分样点，采样深度为 0~20 cm，每件样品由 5 个等份组合成一个混合样。将采集的各分样点土壤掰碎，挑出杂物，充分混合后装入棉布袋带回。随后将土壤样品置于干净通风无污染的场地自然风干，用木棍或塑料棍敲打，去除杂物并全部通过 2 mm 的孔径筛，称取 200 g 装入干净塑料瓶送往实验室分析测试。

2.2 分析测试

样品分析测试由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所分析测试研究中心承担，测试工作参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)及《多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T 0258—2014)开展。Se 采用原子荧光光谱法 (AFS) 测定，SOM 采用高频燃烧红外吸收法 (CS) 测定，pH 采用离子选择性电极法 (ISE) 测定，Mn 采用 X 射线荧光光谱法测定。样品分析过程中，按照相关规范要求，在各分析批次中插入 GBW07401~GBW07408、GBW07423~GBW07426 系列国家一级标准物质，以检验分析结果的准确度。同时布设重复样，对测试精密度进行监控。质量监控表明，各待测指标在检出限、标准物质回收率和相对标准偏差等方面均达到或优于 DZ/T 0258—2014 的技术要求，本次分析数据质量可靠，能够满足研究需要。

2.3 土地利用类型

土地利用类型来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)，空间分辨率为 30 m。中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)是以美国陆地卫星 Landsat 遥感影像作为主要信息源，通过人工目视解译构建的中国国家尺度多时期土地利用/土地覆盖专题数据库。数据采用二级分类系统，一级分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 类，二级在一级类型基础上进一步分为 25 个类型。

2.4 成土母质类型

成土母质是提取了全国 1∶200 000 数字地质图(公开版)空间数据库，来源于全国地质资料馆(www.ngac.org.cn)。

2.5 气候数据

气候数据包括 LST 和 Prec 数据，均来自国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)，数据集是以国际上现有的 Princeton 再分析资料、GLDAS 资料、GEWEX-SRB 辐射资料，以及 TRMM 降水资料为背景场，融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成。数据格式为 NETCDF，时间分辨率为 3 h，水平空间分辨率为 0.1°。

2.6 土壤硒含量评价方法

本次研究执行《土地质量地球化学评价规范》(DZ/ T0295—2016) 规定的表层土壤硒元素的含量等级划分标准(表 1)，本研究将土壤硒含量介于 $(0.4\sim3.0)\times10^{-6}$ 之间的土壤认定为富硒土壤。

表 1 土壤硒含量划分界限值

Table 1 Grading thresholds for soil selenium content

土壤Se等级	硒含量/10^{-6}	硒总体情况
一等	>3.0	过剩
二等	0.4~3.0	高
三等	0.175~0.40	适量
四等	0.125~0.175	边缘
五等	≤0.125	缺乏

2.7 随机森林回归模型

随机森林回归(random forest regression, RFR)是一种常用的集成学习方法，其基本思想是通过构建多棵决策树，并对各决策树的预测结果取平均，以提高模型预测的准确性与稳定性。该方法最初由 Leo Breiman 和 Adele Cutler 提出[21]，是随机森林算法在回归问题中的具体应用。随机森林模型涉及多个重要参数，主要包括决策树的数量(n_estimators)、分裂使用的特征数量(max_features)、最大树深(max_depth)、分裂内部节点所需的最小样本数(min_samples_split)以及叶子节点所需的最小样本数(min_samples_leaf)等。结合本研究数据特征，并经过反复试验和调优，最终模型参数设置如下：n_estimators: 220, max_depth: 5, min_samples_split: 5, min_samples_leaf: 4，其他参数则保持默认设置。该参数组合能够在保证模型泛化能力的同时，较好提升模型的预测效果，并增强其处理复杂数据的稳定性。

2.8 数据统计分析

使用 Excel 2024 进行描述性统计，地质简图、硒空间分布图及硒元素养分地球化学等级图均用 ArcGIS 10. 8 制作，随机森林模型重要性特征图与随机森林模型中驱动因子蜂群图使用 Python 3.9 制作，图

形处理使用 CorelDraw 2026 进行。

3　结果与讨论

3.1　表层土壤 Se 含量及赋存特征

数据统计分析之前, 本研究对采集的表层土壤原始数据进行了 3δ 数据剔除(均值±3 倍标准离差), 以减少异常值的影响。相关元素数据统计见表 2。

统计结果显示, 研究区 Se 含量范围为(0.06~0.75)×10^{-6}, 平均含量为 0.38 ×10^{-6}, 是中国土壤背景值的 1.8 倍, 表现出明显富集特征, 变异系数是 0.32, 属于中度变异; SOM 含量范围为(3.89~52.8)×10^{-3}, 平均含量为 24.6×10^{-3}, 是中国土壤背景值的 7.9 倍, 变异系数为 0.38, 属于高度变异; pH 范围为 3.7~8.6, 平均值 5.5, 约是中国土壤背景值的 0.7 倍, 研究区整体以酸性土壤为主; Mn 含量范围为(47~1 623)×10^{-6}, 平均含量为 556 ×10^{-6}, 中位值为 460×10^{-6}, 变异系数为 0.64, 属于高度变异。

表 2　表层土壤元素含量统计

Table 2　Statistical summary of characteristic values of element contents in surface soil

指标	剔除后样本数	最大值	最小值	平均值	中位值	变异系数	全国背景值[22]
Mn	6 526	1 623	47	556	460	0.64	580
Se	6 326	0.75	0.06	0.38	0.37	0.32	0.21
pH	6 745	8.6	3.7	5.5	5.1	0.19	7.67
SOM	6 468	52.8	3.89	24.6	23.0	0.38	3.10

注: SOM含量单位为10^{-3}, 其他元素含量单位为10^{-6}, pH无量纲。

从各元素的空间分布特征来看, Se 高值区与 SOM、Mn 高值区及 pH 低值区呈现出较好的空间耦合特征(图 2), 在研究区西部的茨竹乡、杨村乡一带, 以及中南部局部区域表现出较为相似的分布特征, 而在东部和东南部局部地区仍存在差异。

研究区土壤 Se 整体上以稳定态赋存为主, 活性组分所占比例较低。图 3 显示, 强有机结合态(F_6)、铁锰氧化物结合态(F_5)与残渣态(F_7)为主要形态, 三者合计占比超 89%, 而水溶态(F_1)、可交换态(F_2)、碳酸盐结合态(F_3)、弱有机结合态(F_4)等活性态硒占比极低, 为次要赋存形态。不同样品之间虽有一定波动, 但整体组成形态占比基本一致。该特征说明, 研究区土壤 Se 的土壤环境对 Se 具有较强的吸附能力, Se 不易随水淋溶或发生二次迁移, 环境安全性较高。同时, 铁锰氧化物结合态与有机结合态硒作为潜在可利用态, 在氧化还原条件、pH 值等环境因子发生变化时, 可部分转化为活性态硒, 为土壤硒的长期有效性提供了物质基础, 这也是研究区土壤具备富硒潜力的重要原因。

3.2　表层土壤硒含量等级评价

表层土壤硒地球化学评价能够反映区域硒资源禀赋的空间差异, 是开展资源保护与合理利用的重要基础。依据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295—2016), 对研究区表层土壤进行地球化学划定与评价。结果表明, 研究区较丰富及以上等级土壤面积为 703.59 km^2, 占土壤总面积的 49.99%, 适量等级土壤面积占 49.64%, 表明研究区大部分土壤 Se 含量处于适宜或较高水平, 整体上具备较好的富硒资源条件(图 4)。

从开发利用角度看, 研究区表现出较好的富硒资源开发潜力。一方面, 富硒等级分布范围较广, 且在空间上呈现一定连片分布特征, 有利于开展规模化开发与集中利用; 另一方面, 适量等级占比较高, 说明区域土壤 Se 背景总体较优, 可为分区开发与梯度利用提供基础。结合土地利用现状, 高海拔地区以林地和茶园为主, 该类用地有机质含量较高, 生态环境稳定, 适宜发展富硒特色农业; 中低海拔地区以旱地和水田为主, 可通过精细化管理与调控措施, 提升土壤 Se 有效性, 从而实现差异化利用。相比之下, 边缘区和缺乏区面积较小, 对整体资源格局影响有限。综上, 研究区不仅具有较好的硒资源禀赋, 而且在空间分布和利用类型上具备一定优势, 整体开发利用前景较为良好。

3.3　基于随机森林模型下 Se 的影响因素

土壤 Se 含量受 PMT、EL、Prec、LUT 及 SOM 等多种因素共同控制, 变量间多存在非线性关系和交互作用, 传统线性方法难以准确揭示其影响规律。随机森林无需预设函数形式, 能够处理多变量耦合关系, 对噪声和异常值适应性较强, 且具有较好的稳定性与泛化能力。同时, 该模型可输出变量重要性, 有助于识别土壤 Se 富集的主控因子。

3.3.1　模型精度与验证

为评估随机森林模型对表层土壤 Se 含量的预测能力, 分别在训练集与测试集上对模型拟合效果进行检验。随机森林模型对表层土壤 Se 含量的预测性能评估结果表明, 训练集的决定系数 R^2 为

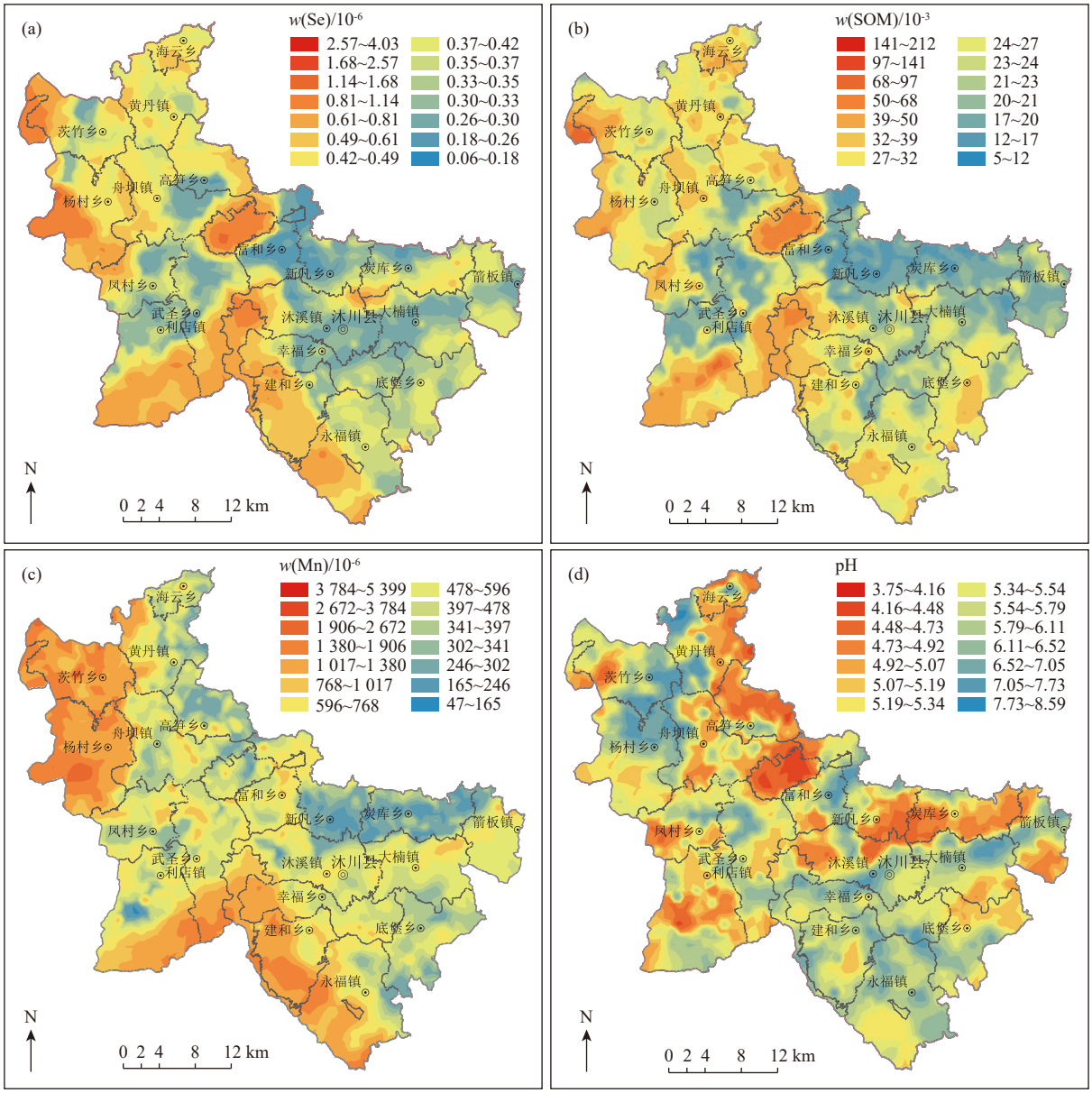
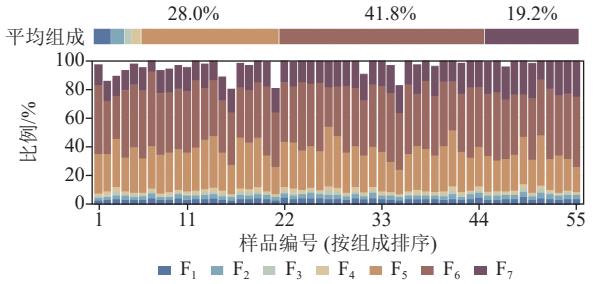


图 2　表层土壤重要指标含量空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of key element indicator contents in surface soil



F_1—水溶态；F_2—可交换态；F_3—碳酸盐结合态；F_4—弱有机结合态；F_5—铁锰氧化物结合态；F_6—强有机结合态；F_7—残渣态

F_1—water-soluble state; F_2—exchangeable state; F_3—carbonate-bound state; F_4—weak organic bound state; F_5—iron-manganese oxide bound state; F_6—strong organic bound state; F_7—residual state

图 3　土壤 Se 不同赋存状态堆叠柱状图

Fig. 3　Stacked bar chart of the proportions of different occurrence states of soil Se

0.84，平均绝对误差（*MAE*）为 0.05，均方根误差（*RMSE*）为 0.08（图 5a），预测值与实测值整体分布集中，且多数样本点沿 1∶1 参考线附近分布，说明模型能够较好地刻画 Se 含量与多环境因子之间的非线性关系。相比之下，测试集的 R^2 为 0.76，*MAE* 与 *RMSE* 分别为 0.06 和 0.10（图 5b），虽然拟合精度较训练集略有降低，但整体预测结果仍保持较好的一致性，且未出现明显的系统性偏差。

散点分布特征显示模型对中低 Se 含量区间的预测表现较为稳定，而在高值区间却存在一定离散性，表明其在复杂环境条件下对极端值的刻画仍具有一定不确定性。总体而言，随机森林模型在训练集与测试集上均表现出较好的泛化性能和预测能力，

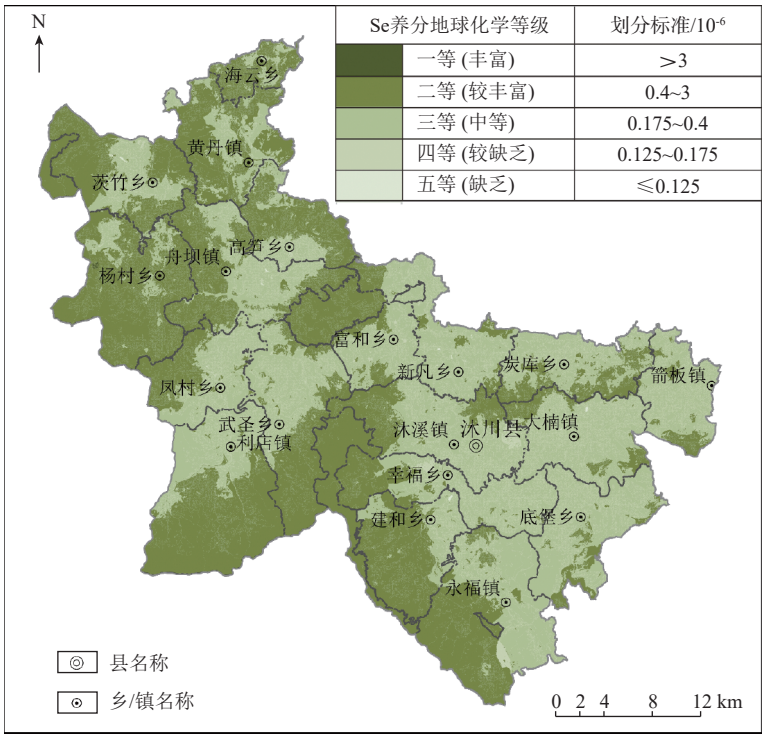


图 4　土壤硒地球化学等级分布

Fig. 4　Geochemical grade of soil selenium (Se) nutrients in survey area

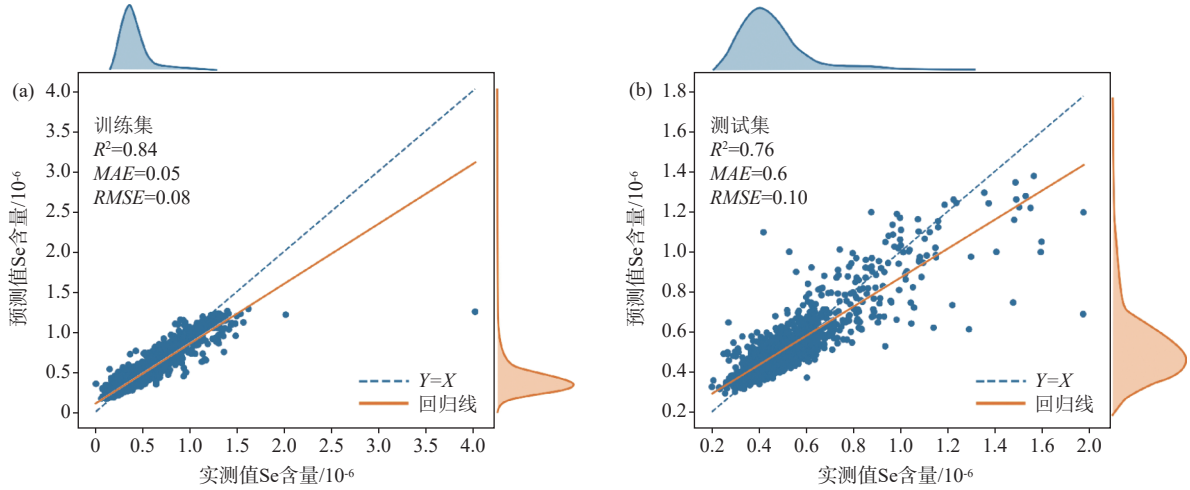


图 5　随机森林模型对表层土壤 Se 含量的预测性能评估

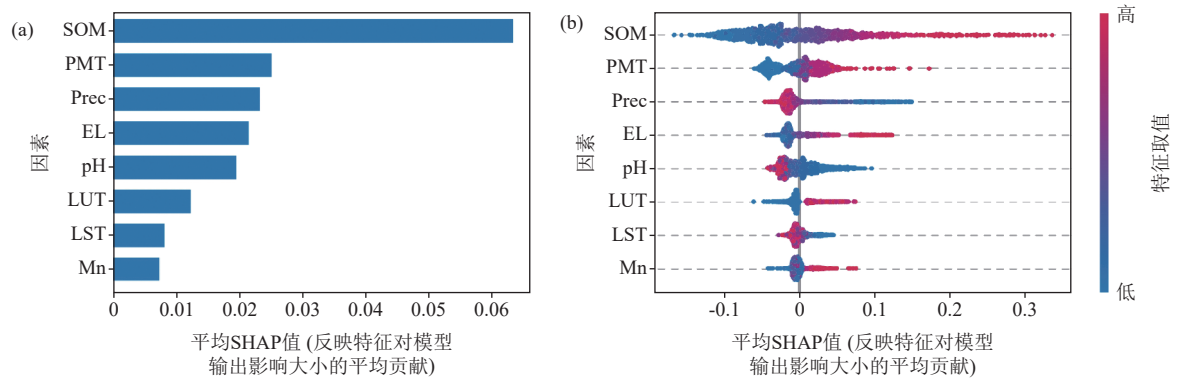
Fig. 5　Evaluation of the Random Forest model's predictive performance for surface soil selenium content

可满足后续变量贡献分析与空间预测分析的需要。

3.3.2　基于 SHAP 的变量贡献度全局分析

利用随机森林的特征重要性及 SHAP 分析对随机森林模型进行量化解释。各指标重要性特征图结果表明, 不同环境因子对表层土壤 Se 含量预测的贡献存在明显差异(图 6a)。SOM 对模型的输出贡献值最高, 说明 SOM 在随机森林模型中起主导作用; 相比之下, PMT、Prec、EL 及 pH 的贡献程度相对较弱, 而 LUT、LST 与 Mn 的整体贡献则更为有限。

SHAP 蜂群图反映了各环境因子对 Se 累积的贡献方向, SHAP 值位于 0 右侧表示该变量在当前样本条件下提高 Se 预测值, 位于 0 左侧则表示降低预测值。点的颜色表示变量取值大小, 其中红色代表高值, 蓝色代表低值。SHAP 蜂群图结果显示, SOM、EL、LUT、Mn 和 PMT 在高取值范围内对应的 SHAP 值以正值为主, 说明这些因子随取值增大通常促进 Se 富集。相反, Prec、LST 和 pH 在高取值区间内多表现为负向贡献, 表明其对 Se 富集具有一定抑制作用。这与已有的研究结论[20, 23]基本是一致的。海拔较高地区的土地利用现状主要以林地和茶



a—各指标随机森林模型重要性特征图; b—随机森林模型中驱动因子蜂群图; SOM、PMT、Prec、EL、LUT 及 LST 分别表示土壤有机质、成土母质、降水、高程、土地利用类型及年均地表温度

a—feature importance plot of the Random Forest model for each indicator; b—bee swarm plot of driving factors in the Random Forest model; SOM, PMT, Prec, EL, LUT, and LST represent soil organic matter, parent material, precipitation, elevation, land use type, and annual average surface temperature, respectively

图 6　土壤驱动因素解释

Fig. 6　Interpretation of soil driving factors

园为主, 其表层土壤平均含量分别为 0.77×10^{-6} 和 0.87×10^{-6}(表 3 及图 7)。这些地区由于凋落物不断输入, 为土壤提供了丰富的有机碳源, SOM 含量通常较高, 利于土壤硒含量的累积[14, 24-25], 同时林地和茶园人为扰动较弱[26-27], 有利于土壤结构稳定; 另一方面, 研究区降水条件相对较弱且林冠和枯落物层的覆盖, 可有效减缓流水侵蚀过程, 从而减少了 SOM 随泥沙流失[28]。在此基础上, 较高的 SOM 含量有助于增强对 Se 的吸附与固定作用, 从而促进 Se 在表层土壤中的富集[29]。

表 3　不同高程带土地利用类型的土壤中硒含量特征统计

Table 3　Statistics of selenium content characteristics by land use type and elevation zone

等级	低海拔区(≤650 m)			中海拔区(650~1 000 m)			高海拔区(≥1 000 m)		
	样品数	占比/%	均值/10^{-6}	样品数	占比/%	均值/10^{-6}	样品数	占比/%	均值/10^{-6}
茶园	263	6.2	0.36	94	4.4	0.67	133	29.2	0.87
果园	51	1.2	0.35	13	0.6	0.43	1	0.2	0.57
旱地	2043	48.7	0.35	952	45.3	0.44	71	15.6	0.66
林地	497	11.8	0.36	394	18.7	0.57	212	46.5	0.77
水田	1 247	29.7	0.36	623	29.7	0.42	27	2.4	0.55
其他	71	2.1	0.34	17	0.8	0.42	11	5.9	0.62

低海拔地区降水相对充沛, 地表温度较高。湿热气候条件下, 风化淋溶作用增强, 促使表层土壤 Se 发生大量迁移与流失[30-32]。同时, 该区域内的成土母质主要由白垩系窝头山组(K_1w)、三合组(K_2s)和侏罗系沙溪庙组(J_2s)发育形成的砂岩、泥岩风化物构成, 其 Se 含量范围为(0.31~0.38)$\times10^{-6}$, 这类母质风化物对上覆土壤 Se 含量的贡献相对有限, 并非研究区土壤硒的主要来源[7-8]。此外, 低海拔地区的土地利用类型以旱地为主, 土壤多为氧化环境, 土壤表面的负电荷增加, 难溶性的 Se^{4+}易被氧化为可溶性更强的 Se^{6+}, 从而削弱土壤对硒的吸附能力, 并增强淋溶效应, 进一步加剧土壤 Se 亏损[16, 33]。

综上所述, 研究区土壤 Se 含量并非受单一因素支配, 而是地形、气候、土地利用类型、成土母质及土壤理化性质共同作用的结果。高海拔地区由于有机质积累较多、淋溶作用较弱, 且以林地和茶园为主, 整体上更有利于 Se 富集; 低海拔地区则受到高温多雨、母质供硒有限及氧化环境下淋溶增强等因素影响, 更容易发生 Se 迁移与亏损。

4　结论

1)研究区表层土壤 Se 含量总体较高, 且空间分异明显, 其分布与 SOM、Mn 及 pH 等因子具有较好的对应关系, 表明土壤 Se 在区域尺度上表现出显著的环境依赖性。

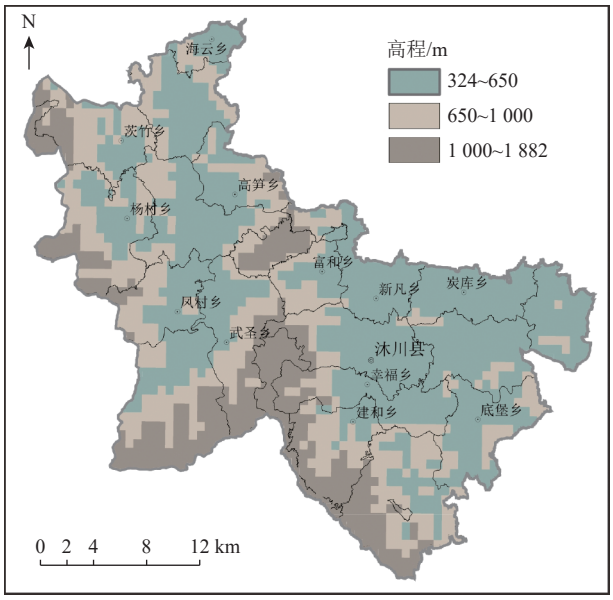


图 7　沐川县高程分布及分级

Fig. 7　Elevation distribution and classification of Muchuan County

2)土壤 Se 含量受地形、气候、成土母质及土壤性质等多种环境因子共同控制,其中 SOM 作用最为关键。Se 富集主要发生在高海拔、有机质丰富及林地、茶园分布区,而在低海拔、湿热及高 pH 条件下更易发生迁移与亏损。

3)研究区土壤 Se 资源禀赋总体较好,以高硒及适量等级为主,具备一定的空间集中性和开发利用基础。不同地貌与土地利用类型对应不同的 Se 富集特征,可为富硒土地识别、分区利用及特色农业发展提供科学依据。

参考文献(References):

[1] Roman M, Jitaru P, Barbante C. Selenium biochemistry and its role for human health[J]. Metallomics, 2014, 6(1): 25−54.

[2] 李傲瑞, 乔新星, 赵飞飞, 等. 硒与人体健康关系研究进展 [J]. 绿色科技, 2020, 22(12): 121−122.
Li A R, Qiao X X, Zhao F F, et al. Research progress on the relationship between selenium and human health[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020, 22(12): 121−122.

[3] Chen Z N, Lu Y Q, Dun X L, et al. Research progress of selenium-enriched foods[J]. Nutrients, 2023, 15(19): 4189.

[4] 毛大钧, 苏宏灿, 严良英, 等. 鄂西自治州硒中毒流行病学调查分析 [J]. 中国地方病学杂志, 1990(5): 311−314.
Mao D J, Su H C, Yan L Y, et al. Epidemiological investigation and analysis of selenium poisoning in western Hubei Autonomous Prefecture[J]. Chinese Jouranl of Endemiology, 1990(5): 311−314.

[5] 王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 等. 天然富硒土地划定的富硒阈值 [J]. 环境科学, 2021, 42(1): 333−342.
Wang H Y, Zeng D M, Guo Z J, et al. Selenium threshold for the delimitation of natural selenium-enriched land[J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 333−342.

[6] Burk R F, Norsworthy B K, Hill K E, et al. Effects of chemical form of selenium on plasma biomarkers in a high-dose human supplementation trial[J]. Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention, 2006, 15(4): 804-810.

[7] 成晓梦, 孙彬彬, 贺灵, 等. 四川省沐川县西部地区土壤硒含量特征及影响因素 [J]. 岩矿测试, 2021, 40(6): 808−819.
Cheng X M, Sun B B, He L, et al. Characteristics and influencing factors of soil selenium content in western Muchuan County, Sichuan Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(6): 808−819.

[8] 韩伟, 王乔林, 宋云涛, 等. 四川省沐川县北部土壤硒地球化学特征与成因探讨 [J]. 物探与化探, 2021, 45(1): 215−222.
Han W, Wang Q L, Song Y T, et al. Geochemical characteristics and genesis of selenium in soilin northern Muchuan County, Sichuan Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1): 215−222.

[9] 成杭新, 彭敏, 赵传冬, 等. 表生地球化学动力学与中国西南土壤中化学元素分布模式的驱动机制 [J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 159−191.
Cheng H X, Peng M, Zhao C D, et al. Epigenetic geochemical dynamics and driving mechanisms of dis-tribution patterns of chemical elements in soil, Southwest China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 159−191.

[10] 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.
Wang X Q, Liu Q Q, Liu H L, et al. Key elements and human health: Is China's arable land selenium-deficient?[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(3): 412−423.

[11] 刘秀金, 杨柯, 成杭新, 等. 四川省泸州市页岩和碳酸盐岩区水稻根系土 Se 含量和生物有效性的控制因素 [J]. 地质通报, 2020, 39(12): 1919−1931.
Liu X J, Yang K, Cheng H X, et al. Control factors of selenium content and bioavailability of rice root soil in shale and carbonate rock areas, Luzhou City, Sichuan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(12): 1919−1931.

[12] 鄢明才, 迟清华. 中国东部地壳与岩石的化学组成 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
Yan M C, Chi Q H. The chemical compositions of crust and rocks in the eastern part of China[M]. Beijing: Science Press, 1997.

[13] 杨忠芳. 爱恨交织的化学元素 [M]. 北京: 地质出版社, 2019.
Yang Z F. Chemical elements intertwined with love and hate[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2019.

[14] 周亚龙, 彭敏, 成杭新, 等. 全国主要农耕区富硒土地资源调查与开发利用模式 [J]. 物探化探计算技术, 2022, 44(6): 833−841.
Zhou Y L, Peng M, Cheng H X, et al. Investigation and development mode of selenium-enriched land resources in major farming areas of China[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 44(6): 833−841.

[15] 周国华. 富硒土地资源研究进展与评价方法 [J]. 岩矿测试, 2020, 39(3): 319−336.
Zhou G H. Research progress of selenium-enriched land resources and evaluation methods[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020,

39(3): 319−336.

[16] Winkel L H E, Vriens B, Jones G D, et al. Selenium cycling across soil-plant-atmosphere interfaces: A critical review[J]. Nutrients, 2015, 7(6): 4199−4239.

[17] Blazina T, Sun Y B, Voegelin A, et al. Terrestrial selenium distribution in China is potentially linked to monsoonal climate[J]. Nature Communications, 2014, 5: 4717.

[18] 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 it's influence factors[J]. Chemosphere, 2023, 340: 139846.

[19] 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.
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.

[20] Xu Z Q, Zhou W J, Zhou Y Z, et al. Factors controlling accumulation and bioavailability of selenium in paddy soils: A case study in Luxi County, China[J]. Environmental Pollution, 2024, 348: 123196.

[21] 苗瑞雪, 贺银海, 刘孝阳, 等. 利用机器学习模型预测土壤重金属空间分布的研究进展 [J]. 环境科学研究, 2025, 38(5): 1087−1097.
Miao R X, He Y H, Liu X Y, et al. Predicting the spatial distribution of heavy metals in soil using machine learning models: A review[J]. Research of Environmental Sciences, 2025, 38(5): 1087−1097.

[22] 侯青叶. 中国土壤地球化学参数 [M]. 北京: 地质出版社, 2020.
Hou Q Y. Soil geochemical dataset of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.

[23] Jones G D, Droz B, Greve P, et al. Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(11): 2848−2853.

[24] Bowden R D, Deem L, Plante A F, et al. Litter input controls on soil carbon in a temperate deciduous forest[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(S1): S66−S75.

[25] Zhu R H, Zheng Z C, Li T X, et al. Dynamics of soil organic carbon mineralization in tea plantations converted from farmland at Western Sichuan, China[J]. PLoS One, 2017, 12(9): e0185271.

[26] Zhang Q, Zhang Y, Wang Y H, et al. Effects of pruning on tea tree growth, tea quality, and rhizosphere soil microbial community[J]. Microbiology Spectrum, 2023, 11(5): e01601−e01623.

[27] Chen C P, Juang K W, Cheng C H, et al. Effects of adjacent land-use types on the distribution of soil organic carbon stocks in the montane area of central Taiwan[J]. Botanical Studies, 2016, 57(1): 32.

[28] Wang T, Kang F F, Cheng X Q, et al. Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a hilly ecological restoration area of North China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 163: 176−184.

[29] Tian M, Sun B B, Wu C, et al. Spatial distributions and the main driving factors of soil total nitrogen in Zhejiang Province, China[J]. Geoderma, 2024, 452: 117112.

[30] Natasha, Shahid M, Niazi N K, et al. A critical review of selenium biogeochemical behavior in soil-plant system with an inference to human health[J]. Environmental Pollution, 2018, 234: 915−934.

[31] Dhillon S K, Dhillon K S, Kohli A, et al. Evaluation of leaching and runoff losses of selenium from seleniferous soils through simulated rainfall[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(2): 187−192.

[32] 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.

[33] 朱燕云, 吴文良, 赵桂慎, 等. 硒在动植物及微生物体中的转化规律研究进展 [J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3): 189−198.
Zhu Y Y, Wu W L, Zhao G S, et al. Progress of selenium biological transformation in animals, plants, and microorganisms[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(3): 189−198.

Concentration characteristics, resource evaluation and influencing factors of soil selenium in a typical mountainous area of Sichuan Province

TANG Yu [1], CHENG Xiao-Meng [1, 2], HE Ling [1, 2], WU Chao [1, 2], HAN Wei [1, 2], ZHAO Chen [1, 2, 3], ZHANG Fu-Gui [1, 2, 3]

(1. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Tianjin* 300309, *China*; 2. *Research Center for Geochemical Survey and Assessment of Land Quality, China Geological Survey, Tianjin* 300309, *China*; 3. *Key Laboratory of Carbon–Mercury Geochemical Cycle in the Earth's Surface System, China Geological Survey, Tianjin* 300309, *China*)

Abstract: Insufficient selenium intake in China has received widespread attention. Nationwide land quality geochemical surveys have shown that selenium contents are relatively high in the mountainous areas of southwestern China. However, the sources of selenium and the factors influencing its enrichment in these areas remain unclear. In this study, Muchuan County, which has favorable selenium-rich conditions in the Wumeng mountainous area, was selected as the study area. A random forest model and SHAP method were used to investigate soil selenium content and its influencing factors by integrating environmental variables, including elevation (EL), annual mean land surface temperature (LST), precipitation (Prec), parent material (PMT), and soil physicochemical properties. The results showed that the mean selenium content in the soils of Muchuan County was 0.38×10^{-6}, which was 1.8 times the background value of soils in China,

indicating an overall relatively high level. The area of land with relatively abundant selenium and above was 703.59 km^2, accounting for 49.99% of the total area, indicating good potential for selenium-rich land resources. The random forest model showed good predictive performance, with R^2 values of 0.84 and 0.76 for the training and test sets, respectively. SHAP analysis showed that SOM was the dominant factor controlling the variation in Se content. Areas with high EL, SOM, and Mn were favorable for Se enrichment, whereas high Prec, LST, and pH promoted Se leaching.The research suggests that the Se enrichment in the surface soil of Muxian County is jointly controlled by the parent material of the soil, topography, climate and soil physical and chemical properties. Among them, SOM has the most significant effect on Se retention. The results of this study can provide certain basis for the evaluation and development and utilization of selenium-rich land resources in the Wumeng Mountainous Area.

Key words: selenium; concentration characteristics; selenium-rich resources; influencing factors; random forest; mountainous area

（本文编辑: 蒋实）