

doi: 10.12029/gc20201220002

息朝庄, 张鹏飞, 吴林锋, 杨茗钛, 范云飞, 夏浩东. 2024. 贵州省惠水县涟江大坝土壤硒分布特征及影响因素研究[J]. 中国地质, 51(2): 650–662.
Xi Chaozhuang, Zhang Pengfei, Wu Linfeng, Yang Mingtai, Fan Yunfei, Xia Haodong. 2024. Distribution characteristics and influencing factors of Selenium in soil from Lianjiang Dam in Huishui County, Guizhou Province[J]. Geology in China, 51(2): 650–662(in Chinese with English abstract).

贵州省惠水县涟江大坝土壤硒分布特征及影响因素研究

息朝庄^{1,2}, 张鹏飞³, 吴林锋³, 杨茗钛³, 范云飞³, 夏浩东⁴

(1. 湖南城市学院土木工程学院, 湖南 益阳 413000; 2. 城市地下基础设施结构安全与防灾湖南省工程研究中心, 湖南 益阳 413000; 3. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局核资源地质调查队, 贵州 贵阳 550005; 4. 自然资源实物地质资料中心, 河北 燕郊 065201)

摘要:【研究目的】涟江大坝位于贵州省惠水县, 为查明该地区土壤硒分布特征, 系统采集了表层土壤样品 337 件, 成土母岩样品 4 件, 土壤剖面样品 16 件, 分析测定 Se、养分元素和 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 重金属元素等含量。【研究方法】通过表层土壤、成土母岩、土壤剖面样品中 Se、养分元素、重金属元素含量对比分析, 结合相关性分析方法, 对该区土壤 Se 分布特征进行评估。【研究结果】区内土壤偏酸性, 土壤中 Se 元素含量范围为 0.19~3.65 mg/kg; 土壤中养分元素 P、B 和 SOM 含量高; 区内不同成土母质表层土壤 Se 平均值具有上石炭统灰岩>中二叠统茅口组灰岩>中二叠统栖霞组灰岩>上白垩统茅台组砂岩>中三叠统罗楼组灰岩>中三叠统边阳组碎屑岩的变化规律; 区内土壤剖面中 Se 含量随深度加深而降低。【结论】区内富硒土壤丰富, 主要为中等和高级, 富硒土壤面积为 42.94 km²; 土壤中 Se 与 SOM 呈显著正相关关系, Se 与 K₂O、pH 呈显著负相关关系。

关键词: 硒; 土壤; 生态环境; 茅口组灰岩 P₂m; 茅台组砂岩 K₂m; 环境地质调查; 涟江大坝; 惠水; 贵州省

创 新 点: 采用表层土壤、成土母岩、土壤剖面样品中 Se、养分元素、重金属元素含量对比和相关性分析方法, 首次对惠水县涟江大坝土壤 Se 元素分布特征进行评估。

中图分类号: P595; S153.6; X14 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)02-0650-13

Distribution characteristics and influencing factors of Selenium in soil from Lianjiang Dam in Huishui County, Guizhou Province

XI Chaozhuang^{1,2}, ZHANG Pengfei³, WU Linfeng³, YANG Mingtai³, FAN Yunfei³, XIA Haodong⁴

(1. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, Hunan, China; 2. Hunan Engineering Research Center of Structural Safety and Disaster Prevention for Urban Underground Infrastructure, Yiyang 413000, Hunan, China; 3. Nuclear Resources Geological Survey, Non-ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, Guizhou, China; 4. Cores and Samples Center of Natural Resources, Yanjiao 065201, Hebei, China)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

收稿日期: 2020-12-20; 改回日期: 2021-01-20

基金项目: “贵州省耕地质量地球化学调查评价”(黔耕调 2017-03)和湖南省自然科学基金省市联合基金项目(2022JJ50277)联合资助。

作者简介: 息朝庄, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 主要从事地质勘查和生态地球化学研究; E-mail: xczsummmmm@126.com。

通讯作者: 张鹏飞, 男, 1984 年生, 高级工程师, 主要从事矿产勘查研究; E-mail: 52187088@qq.com。

[Objective] Lianjiang Dam is located in Huishui County of Guizhou Province. To find out the Se distribution features of soil in Lianjiang Dam, 337 surface soil samples, 4 soil mother rock samples and 16 soil profile samples were collected, and the contents of Se, nutrient elements and heavy metal elements such as As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn were analyzed and determined. **[Methods]** The contents of Se, nutrient elements and heavy metal elements in the samples from surface soil, soil mother rock and soil profile were compared and the Se distributions features of soil were evaluated based on correlative analysis method. **[Results]** It showed that the soil in this area were acidic with the contents of Se in the soil from 0.19 to 3.65 mg/kg. The contents of nutrient elements such as P, B and SOM in the soil were high. The average Se values of surface soil of different mother rocks in this area appeared the transformation law: Upper Carboniferous limestone > Middle Permian Maokou Formation limestone > Middle Permian Qixia Formation limestone > Upper Cretaceous Maotai Formation sandstone > Middle Triassic Luolou Formation limestone > Middle Triassic Bianyang Formation clastic rocks. The Se contents of soil profile in this area decreased with the depth deepening. **[Conclusion]** The Selenium-rich soil is abundant in this area, mainly of medium and high. The area of selenium-rich soil is about 42.94 km². There is a significant positive correlation between Se and SOM, while a significant negative correlation between Se and K₂O, and pH in soil.

Key words: Se; soil; ecosystem; Maokou Formation limestone (P_2m); Maotai Formation sandstone (K_2m); environmental geological survey engineering; Lianjiang Dam; Huishui; Guizhou Province

Highlights: The Se distributions features of soil were evaluated for the first time in Lianjiang Dam of Huishui Country, based on comparing the contents of Se, nutrient elements and heavy metal elements in the samples from surface soil, soil mother rock and soil profile and using correlative analysis method.

About the first author: XI Chaozhuang, male, born in 1979, doctor, associate professor, mainly engaged in geological exploration and ecological geochemistry research; E-mail: xczsummmmm@126.com.

About the corresponding author: ZHANG Pengfei, male, born in 1984, senior engineer, mainly engaged in mineral exploration research; E-mail: 52187088@qq.com.

Fund support: Supported by the projects of Geochemical Survey and Evaluation of Cultivated Land Quality in Guizhou Province (No.2017-03) and Hunan Province Natural Science Foundation of Provincial and Municipal Joint Fund Project (No.2022JJ50277).

1 引 言

硒(Se)元素是人体必需的微量元素之一(Keshavarzi et al., 2012)。当人体 Se 摄入量正常时,具有预防衰老与癌症(Bridges and Zalups, 2005)、降低体内重金属毒性(Gailer, 2007)、提高个体抵抗艾滋病能力等作用(Litov and Combs, 1991; Rayman, 2000)。据研究,人体缺 Se 将会引起大骨节病、克山病、心肌病和软骨病等疾病的发生(Chen et al., 1980; 谭见安, 1996; Stone, 2009; 安永会等, 2010; 吕瑶瑶等, 2012; Liu et al., 2022)。其中土壤是最基本的环节,不同成土母岩 Se 等元素质量分数差异较大(余涛等, 2018; Lü et al., 2014)。全球土壤 Se 元素分布很不均匀(Wang and Gao, 2001),这使得全球有 5~10 亿人口处于低 Se 摄取水平;在全球很多国家,人体 Se 日平均摄取量低于世界卫生组织建议的最低摄取值(40 µg/d)(Combs, 2001; Abdulah et al., 2005; Haug et al., 2007);中国是大面积缺 Se 的国家,有十多个省土壤存在缺

Se 现象,约有 72% 土壤不同程度缺 Se(王锐等, 2018)。

有学者研究认为表层土壤 Se 含量富集分布源于地质背景(Supriatin et al., 2016; 曾庆良等, 2018)。不同地质背景的表层土壤 Se 含量分布存在较大差异。中国在过去十多年来开展了多项地质调查评价工作,多地开展地质调查项目、区域生态地球化学调查项目,获得了土壤 Se 元素的迁移、转化和富集规律,找到了一批富硒地区,推广了一些富硒农产品耕种,增加了农产品附加值,对中国农业生产具有重要的科学意义和现实意义(魏振山等, 2016; 杨笑笑等, 2020; 覃建勋等, 2020; 李玉超等, 2020; 时章亮等, 2020; 王仁琪等, 2024; 张栋等, 2024)。王世纪等(2004)研究了浙北地区土壤硒元素特征,并开展了生态环境效应评价;廖启林等(2007)对溧阳—宜兴进行硒元素调查评价,认为富硒土壤的形成与特定地质背景有关;孙朝等(2010)指出 Se 从土壤到植物迁移转化主要受 Se 全量、土壤 pH 值、有机质和土壤黏粒影响;文帮勇等(2014)指出江西龙

南地区富硒土壤分布受控于富含硒的基岩;廖启林等(2016)对江苏宜溧富硒稻米产区进行地质地球化学研究,并指出了 Se 等元素在米-土-岩之间的分布迁移特征;吴俊(2018)以福建省寿宁县为研究区,探讨了土壤硒分布特征;罗为群等(2018)报道了广西平果县发现大面积富硒土壤和富硒水果;廖启林等(2020)指出江苏富硒土壤物质来源具有多源复合性;王仁琪等(2022)认为水稻对土壤中硒的富集利用和土壤中硒的形态关系密切,富硒水稻前景广阔。2017 年,在惠水县全境范围内进行了耕地质量调查与评价工作,课题组系统采集了惠水县涟江大坝表层土壤、土壤剖面、成土母岩样品,本文以该数据为基础对研究区土壤 Se 元素含量进行系统分析,总结研究区土壤 Se 元素分布特征,探讨富 Se 土壤硒源和影响因素,以期为研究区提升土地利用附加值和开发富硒农产品提供依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

研究区位于贵州省惠水县涟江大坝,面积 140 km²,其中耕地面积 43.6 km²,属中亚热带季风湿润气候,冬无严寒,夏无酷暑,气候温和,雨量充沛,雨热同季。年平均气温 15.9℃,年均降水量 1180 mm,年均日照总时数 1174 h,无霜期 280 d,年平均蒸发量为 1517 mm。

研究区出露地层(图 1)主要有:上白垩统茅台组(K₂m),岩性为灰带砖红色块状砾岩和含砾砂岩、泥质石英砂岩和粉砂岩、泥岩;中三叠统边阳组(T₂b),岩性为灰绿、青灰色薄—中厚层泥灰岩及页岩夹砂岩;罗楼组(T₁l),岩性为浅灰、灰白色厚层块状泥晶灰岩;中二叠统茅口组(P₂m),岩性为浅灰、深灰色中厚至块状生物屑灰岩及燧石灰岩夹硅质岩;中二叠统栖霞组(P₂q),岩性为浅灰、深灰色灰岩夹燧石灰岩;上石炭统大埔组(C₂d),岩性为厚层状灰岩;中泥盆统鸡窝寨组(D₃j),岩性为灰、深灰色中厚层泥晶灰岩;麟山组(D₁₋₂m),岩性为石英砂岩、砂页岩为主夹灰岩;独山组(D₂d),岩性为灰色中、薄层砂质灰岩及砂质泥灰岩。

区内矿产资源较丰富,以沉积矿产为主,热液型矿产次之,矿种有铁矿、锰矿、水晶、大理石、硅矿、饰面灰岩及建筑用砂等矿产;区内土壤类型有石灰土、黄壤、水稻土、紫色土和潮土;土壤不同利用类

型为耕地、旱地、果园、林地等。主要农作物为水稻、玉米、金钱橘、早熟蔬菜、黑糯米、生姜等;县内禽类养殖发达,为农业生产提供有机肥保障。

2.2 样品采集和加工

2.2.1 样品采集

表层土壤样点布设方法选用“网格+耕地图斑”,以 1 km² 网格(正方形大格)为编号单元,按大格分成 333 m×333 m 的小正方形布设采样小格。采样点布设在方格内的水田、旱地、果园与茶园中,点密度为 9.2 点/km²。

研究区布置 4 条土壤剖面,其中濛江街道赤土村和首创村、好花红镇兴涟村、涟江街道大坡村各布设 1 条土壤剖面,按每条采集 4 件样品,共布设土壤垂向剖面 16 件;成土母岩的布设与土壤垂向剖面布设相结合,共布设 4 件样品。

表层土壤样品采集在上一季作物收成之后、下一季作物还未施肥和种植之前进行,按室内设计点位,并在野外以实际采样点位置为中心,根据采样地块形状来确定子样位置(息朝庄等, 2022, 2023)。如采样地块分别为长方形、近似正方形时(图 2),则分别采用“S”形、“X”形布设子样点。子样点必须在同一地块内采集,且距实际采样点的 GPS 点位距离为 20~50 m。表层土壤样坑采样深度为 0~20 cm,每个子样点的采样部位、采样深度和样品质量要求一致。由 3~4 个子样等量混合形成 1 件样品,将采集的各子样点的土壤掰碎,挑出根系、秸秆、石块、虫体等杂物,充分混合后用四分法留取 1.0~1.5 kg 装入样品袋。采用红油漆标记样点号在电线杆、桥墩、岩石(基岩)、树干、建筑物等较固定地物上,样品采集时间 2017 年 10 月至 2018 年 5 月。

土壤剖面深度以见到成土母岩为准,分层采集腐殖层、淋溶层、淀积层和母质层样品;土壤覆盖较厚的地区,剖面深为 150~200 cm,样品重量为 1 kg;成土母岩样品配合土壤剖面进行采集;采集区域内有代表性的主要岩石类型样品;尽量采集新鲜的成土母岩样品,每种样品采集 5~10 件,每件样品重量大于 1 kg。样品采集时间 2018 年 5 月至 2019 年 5 月。

2.2.2 样品加工

土壤样品晾晒与加工场地均确保无污染。取样均及时清理登记,并悬挂在自制样品架自然风干;然后将风干后的样品平铺在制样板上,用木棍

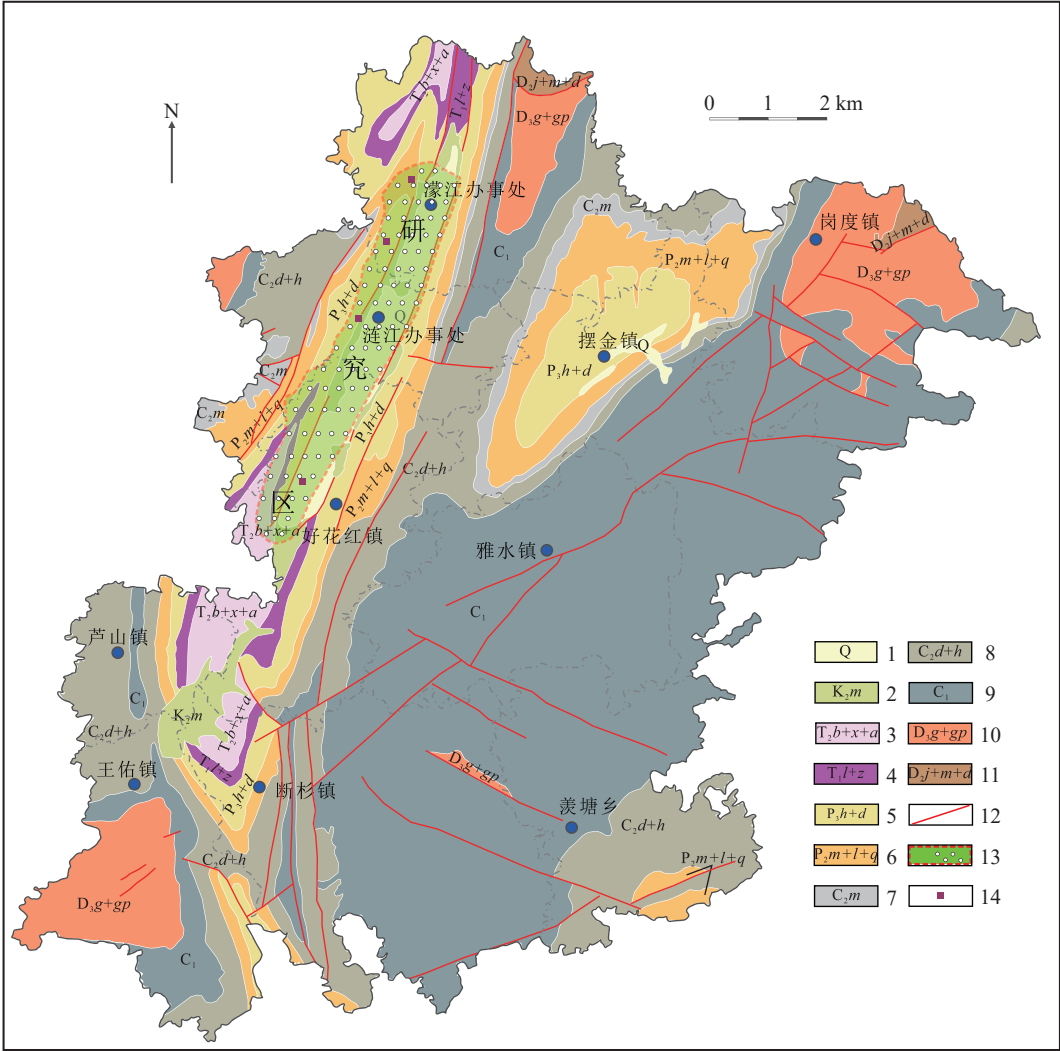


图 1 惠水县地质略图(据杨胜发等, 2019)

1—第四系; 2—上白垩统茅台组; 3—中三叠统边阳组+新苑组+安顺组; 4—下三叠统罗楼组+紫云组; 5—上二叠统含山组+大隆组; 6—中二叠统茅口组+梁山组+栖霞组; 7—石炭系马平组; 8—上石炭统大埔组+黄龙组; 9—下石炭统; 10—上泥盆统革老河组+高坡场组; 11—中泥盆统鸡窝寨组+独山组+蟒山组; 12—断层; 13—研究区及采样点位置; 14—成土母岩及土壤剖面采样位置

Fig.1 Geological sketch of Huishui County (after Yang Shengfa et al., 2019)

1—Quaternary; 2—Upper Cretaceous Maotai Formation; 3—Middle Triassic Bianyang Formation + Xinyuan Formation + Anshun Formation; 4—Lower Triassic Luolou Formation + Ziyun Formation; 5—Upper Permian Hanshan Formation + Dalong Formation; 6—Middle Permian Maokou Formation + Liangshan Formation + Qixia Formation; 7—Carboniferous Maping Formation; 8—Upper Carboniferous Dapu Formation+Huanglong Formation; 9—Lower Carboniferous; 10—Upper Devonian Gelaohe Formation+Gaopochang Formation; 11—Middle Devonian Jiwozhai Formation+Dushan Formation+Mangshan Formation; 12—Fault; 13—The study area and sampling points; 14—Sampling location of parent rock and soil profile

进行碾压, 同时将杂物清除; 压碎的土样均通过 2 mm 的孔径筛; 过筛后土壤样品均称重后混匀(图 2)。将土壤样品和成土母岩送至云南省地质矿产勘查开发局中心实验室完成分析测试。

2.3 测试分析

本研究分析测试由云南省地质矿产勘查开发局中心实验室完成, 分析时间为 2017 年至 2019 年。

采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)、电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-OES)和 X 射线荧光光谱法(XRF), 以原子荧光光谱法(AFS)、交流电弧-发射光谱法(ES)、离子选择性电极法(ISE)、催化分光光度法(COL)及容量法(VOL)的分析方法及检出限(表 1), 样品测试均符合《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0258-2014)质量要求。



图 2 表层土壤采样和加工方法
Fig.2 Sampling and processing methods of top soil

表 1 土壤样品分析及检出限

Table 1 Testing method and detection limits of soil sample									
序号	项目	检测方法	方法检出限	规范限量	序号	项目	检测方法	方法检出限	规范限量
1	N	VOL	18	20	13	Se	AFS	0.003	0.01
2	P	ICP-OES	2.38	10	14	V	ICP-OES	1.18	5
3	K ₂ O	ICP-OES	0.2	0.5	15	Tl	ICP-MS	0.02	0.1
4	B	ES	0.48	1	16	As	AFS	0.27	1
5	SOM	VOL	0.2	1	17	Cd	ICP-MS	0.02	0.03
6	pH	ISE	0.01	0.1	18	Cr	ICP-MS	0.82	5
7	Co	ICP-MS	0.07	1	19	Cu	ICP-MS	0.89	1
8	F	ISE	85	100	20	Hg	AFS	0.0004	0.0005
9	Ge	AFS	0.07	0.1	21	Ni	ICP-MS	0.439	2
10	I	COL	0.2	0.5	22	Pb	ICP-MS	0.96	2
11	Mn	ICP-MS	2.91	10	23	Zn	ICP-MS	2.15	4
12	Mo	ICP-MS	0.04	0.3					

注：K₂O、SOM单位为g/kg；pH无量纲；其他元素 mg/kg；元素报出率100%；SOM为有机质。

3 结果与分析

3.1 涟江大坝表层土壤 Se 元素特征

涟江大坝表层土壤共采样 337 个，其含量范围、平均值、标准差和变异系数等特征参数统计结果见表 2，从表中可以看出：(1)涟江大坝表层土壤中养分元素 N、K₂O、B、有机质含量平均值和分异系数分别为 2.11 g/kg 和 0.34%、0.62% 和 0.53%、68.53 mg/kg 和 0.21%、1.89g/kg 和 0.45%，与贵州省耕地土壤和中国土壤 A 层背景值(国家环境保护局, 1990)相对比,B 和有机质含量高;P 的含量平均值 512.83 mg/kg 远远高于贵州省耕地土壤背景值(陈旭晖, 2001; 高雪等, 2013); N、K₂O、B、有机质变异系数很小,分异性弱。(2)微量元素中 Se、Ge、Co、F、I、Mn、Mo、V、Tl 含量平均值和分异系数分

别为 0.85 mg/kg 和 0.53%、1.26 mg/kg 和 0.13%、9.62 mg/kg 和 0.48%、608.44 mg/kg 和 0.30%、1.13 mg/kg 和 1.03%、286.20 mg/kg 和 0.73%、6.27 mg/kg 和 0.69%、122.21 mg/kg 和 0.28%、0.62 mg/kg 和 0.27%，与贵州省土壤 A 层背景值和中国土壤 A 层背景值相对比,Se 和 Mn 含量高;Se、Ge、Co、F、I、Mn、Mo、V、Tl 变异系数小,分异性弱。(3)重金属元素中 Cd、Hg、Cu 含量超出贵州省土壤 A 层背景值;研究区 pH 值的变化范围为 4.96~8.78,显示酸性至碱性均有分布,土壤 pH 大于 7.5 有 75 个,pH 在 6.5~7.5 的 111 个,pH 在 5.5~6.5 的 126 个,pH 小于 5.5 的 65 个,土壤总体偏酸性;重金属元素变异系数 0.27%~0.54%,分异性弱。

3.2 研究区不同乡镇表层土壤 Se 元素特征

涟江大坝共有濠江街道、涟江街道和好花红镇

表 2 涟江大坝表层土壤元素特征参数统计表 ($n=337$)
Table 2 Characteristic parameters statistical of elements in topsoil of Lianjiang Dam ($n=337$)

项目	涟江大坝表层土壤						贵州省 土壤	贵州省 耕地土壤	中国土壤	R1	R2	R3
	最大值	最小值	平均值	标准差	中位数	变异系数	A层背景值					
N	5.86	0.44	2.11	0.73	2.02	0.34		6.2			0.34	
P	1720.00	302.00	512.83	145.51	489.00	0.28		0.4			1282.07	
K ₂ O	3.25	0.39	1.17	0.62	0.98	0.53	1.6	1.8	1.9	0.73	0.65	0.62
B	119.00	31.60	68.53	14.40	67.40	0.21	72.8	2	47.8	0.94	34.27	1.43
SOM	19.64	0.34	4.21	1.89	3.96	0.45	4.3	0.7	3.1	0.98	6.02	1.36
pH	8.78	4.96	-	0.87	6.64	0.13	6.2	15.1	6.7	1.09	0.45	1.00
Co	35.20	2.29	9.62	4.65	8.70	0.48	19.2		12.7	0.50		0.76
F	1474.00	254.00	608.44	180.67	586.00	0.30	1066		478	0.57		1.27
Ge	1.79	0.85	1.26	0.17	1.25	0.13	1.8		1.7	0.70		0.74
I	18.20	0.38	1.13	1.17	0.86	1.03	8.6		3.8	0.13		0.30
Mn	1297.00	54.90	286.20	209.65	215.00	0.73	794		583	0.36		0.49
Mo	27.60	1.16	6.27	4.33	5.03	0.69	2.4		2	2.61		3.14
Se	3.65	0.19	0.85	0.45	0.73	0.53	0.4		0.3	2.13		2.84
V	252.00	60.30	122.21	33.61	117.00	0.28	138.8		82.4	0.88		1.48
Tl	1.14	0.27	0.62	0.17	0.61	0.27	0.7		0.6	0.88		1.03
As	18.10	2.23	8.49	3.51	8.61	0.41	20		11.7	0.42		0.73
Cd	1.29	0.01	0.47	0.21	0.42	0.46	0.7		0.1	0.67		4.66
Cr	141.00	26.50	80.87	18.97	80.90	0.23	95.9		61	0.84		1.33
Cu	83.00	14.70	31.54	10.05	30.10	0.32	32		22.6	0.99		1.40
Hg	0.56	0.01	0.12	0.07	0.12	0.54	0.1		0.1	1.23		1.23
Ni	63.80	8.15	26.30	9.81	24.90	0.37	39.1		26.9	0.67		0.98
Pb	91.60	13.40	25.44	6.95	25.10	0.27	35.2		26	0.72		0.98
Zn	145.00	30.00	65.17	19.90	61.80	0.31	99.5		74.2	0.65		0.88

注: N、SOM单位g/kg; K₂O、变异系数%, 其他元素单位 mg/kg; R1为元素含量平均值/贵州省土壤A层背景值; R2为养分含量平均值/贵州省耕地土壤; R3为元素含量平均值/中国土壤A层背景值。

三个乡镇,各取样 17、73、247 个,其表层土壤 Se 元素特征参数见表 3。从表中可看出:土壤中 Se 含量平均值,好花红镇>涟江街道>濛江街道;Se 元素含量超过贵州省土壤 A 层背景值,变异系数范围 0.30%~0.52%,分异性小。

3.3 不同成土母岩表层土壤 Se 元素特征

涟江大坝不同成土母岩表层土壤取样情况(表 4)为: K₂m(190 个)、T₂b(6 个)、T₁l(27 个)、P₂m(58 个)、P₂q(37 个)、C₂d(19 个),其 Se 元素含量平均值分别为 0.82 mg/kg、0.57 mg/kg、0.73 mg/kg、0.88 mg/kg、0.84 mg/kg、1.11 mg/kg; 地层 C₂d 中 Se 含量平均值最高, P₂m 中最大值最高,变异系数 0.32%~0.59%,分异性小。

3.4 不同土地利用类型表层土壤 Se 元素特征

涟江大坝 337 个样品中水田 270 个、旱地 54 个、果园 13 个,其表层土壤 Se 元素含量特征参数

表 3 不同乡镇表层土壤特征参数 (mg/kg)
Table 3 Characteristic parameters in topsoil of the towns in the Lianjiang Dam (mg/kg)

乡镇	n	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%	R2
濛江街道	17	0.87	0.30	0.54	0.16	0.30	1.80
涟江街道	73	1.67	0.29	0.69	0.30	0.43	2.30
好花红镇	247	3.65	0.19	0.92	0.48	0.52	3.07

注: n为取样数量; R2为养分含量平均值/贵州省耕地土壤。

统计结果(表 5)显示, Se 元素含量平均值最大为旱地,其次为水田、果园,变异系数范围为 0.42%~0.55%,分异性小。

3.5 土壤类型 Se 元素含量特征

涟江大坝不同土壤类型可以分为水稻土、黄壤、紫色土,取样分别为 169 个、101 个、67 个,分析测试结果(表 6)表明,土壤类型中 Se 元素含量平均值紫色土>水稻土>黄壤,变异系数范围为 0.42%~0.60%,分异性小。

3.6 涟江大坝成土母岩和土壤剖面 Se 元素特征

本研究还采取了涟江大坝 4 个成土母岩和

表 4 不同成土母岩表层土壤 Se 元素特征参数 (mg/kg)
Table 4 Characteristic parameters of Se in topsoil in the different parent rocks (mg/kg)

地层	岩性	n	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%
K ₂ m	上白垩统茅台组砂岩	190	2.50	0.29	0.82	0.39	0.47
T ₂ b	中三叠统边阳组碎屑岩	6	0.83	0.30	0.57	0.18	0.32
T ₁ l	下三叠统罗楼组灰岩	27	1.81	0.40	0.73	0.29	0.40
P ₂ m	中二叠统茅口组灰岩	58	3.65	0.29	0.88	0.52	0.59
P ₂ q	中二叠统栖霞组灰岩	37	3.08	0.19	0.84	0.49	0.58
C ₂ d	上石炭统大埔组灰岩	19	2.48	0.43	1.11	0.58	0.53

表 5 不同土地利用类型表层土壤 Se 元素特征参数 (mg/kg)

Table 5 Characteristic parameters of Se in topsoil of different land use types (mg/kg)

项目	<i>n</i>	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%
水田	270	3.65	0.19	0.83	0.46	0.55
旱地	54	2.28	0.41	0.95	0.40	0.42
果园	13	1.81	0.33	0.82	0.41	0.49

表 6 土壤类型 Se 元素含量特征参数

Table 6 Content characteristic parameter of Se in the different soil type

项目	<i>n</i>	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%
水稻土	169	3.65	0.19	0.87	0.52	0.60
黄壤	101	2.30	0.34	0.77	0.33	0.42
紫色土	67	2.28	0.33	0.93	0.40	0.43

4 组土壤剖面 16 个样品, 从上到下分别采取自腐殖层、淋溶层、淀积层、母质层, 其特征及 Se 含量见表 7 和图 3。其中 2YLYS11 与 2YLPM11~2YLPM14 剖面采于濛江街道赤土村, 成土母岩为 P_2m (中二叠统茅口组灰岩); 6HSYS11 与 6HSPM11~6HSPM14 剖面采于好花红镇兴涟村, 成土母岩为 P_2m ; 6HSYS21 与 6HSPM21~6HSPM24 剖面采于涟江街道大坡村, 成土母岩为 K_2m (上白垩统茅台组砂岩); 6HSYS31 与 6HSPM31~6HSPM34 剖面采于濛江街道首创村, 成土母岩为 K_2m 。从表 7 和图 3 可看出, 成土母岩中 Se 含量范围为 0.02~0.28 mg/kg,

与大陆地壳 Se 元素平均含量 0.05~0.12 mg/kg (Vinogradov and Ryabchikov, 1962; 黎彤, 1976; 鄢明才和迟清华, 1997) 对比, 有两个成土母岩 Se 含量较高; P_2m 中 Se 具有较明显的富集特征; 4 组土壤剖面中 Se 含量随深度加深而降低(图 3); 土壤剖面 Se 绝大多数都超过贵州省土壤 A 层背景值, 富 Se 深度可以达到 150 cm。

4 讨 论

涟江大坝表层土壤中 Se 含量范围为 0.19~3.65 mg/kg, 平均值 0.85 mg/kg, 高于中国土壤背景值和贵州省土壤背景值, 不同地质单元中表层土壤中上石炭统大埔组粉砂岩 Se 含量平均值最高, 而分布范围与中二叠统茅口组(P_2m)灰岩和上白垩统茅台组(K_2m)砂岩分布范围较为一致, 在土壤剖面上显示出表层富集的特征。

4.1 涟江大坝表层土壤 Se 元素相关性

研究区 337 件表层土壤样品的元素特征(表 2)以及 Se 与其他元素相关关系(图 4)表明, 涟江大坝表层土壤中 Se 元素含量与 N、有机质、Ge、Zn 呈显著正相关, 与 K_2O 、pH 呈负相关。

4.2 土壤中 Se 元素分布情况

依据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T

表 7 土壤剖面 Se 元素特征参数						
Table 7 Se element characteristic parameter of soil profile						
采样地点	项目	地层	岩性	剖面标高/cm	样品编号	Se/(mg/kg)
濛江街道赤土村	成土母岩	P_2m	灰岩		2YLYS11	0.02
好花红镇兴涟村		P_2m	灰岩		6HSYS11	0.28
涟江街道大坡村		K_2m	砂岩		6HSYS21	0.05
濛江街道首创村		K_2m	砂岩		6HSYS31	0.13
濛江街道赤土村	土壤剖面		腐殖层	0~15	2YLPM11	0.95
濛江街道赤土村			淋溶层	15~40	2YLPM12	0.61
濛江街道赤土村			淀积层	40~120	2YLPM13	0.44
濛江街道赤土村			母质层	120~150	2YLPM14	0.44
好花红镇兴涟村			腐殖层	0~15	6HSPM11	0.77
好花红镇兴涟村			淋溶层	15~35	6HSPM12	0.62
好花红镇兴涟村			淀积层	35~117	6HSPM13	0.30
好花红镇兴涟村			母质层	117~131	6HSPM14	0.30
涟江街道大坡村			腐殖层	0~10	6HSPM21	0.55
涟江街道大坡村			淋溶层	10~35	6HSPM22	0.49
涟江街道大坡村			淀积层	35~125	6HSPM23	0.44
涟江街道大坡村			母质层	125~150	6HSPM24	0.39
濛江街道首创村			腐殖层	0~10	6HSPM31	1.92
濛江街道首创村			淋溶层	10~35	6HSPM32	2.11
濛江街道首创村			淀积层	35~125	6HSPM33	1.83
濛江街道首创村			母质层	125~150	6HSPM34	0.85

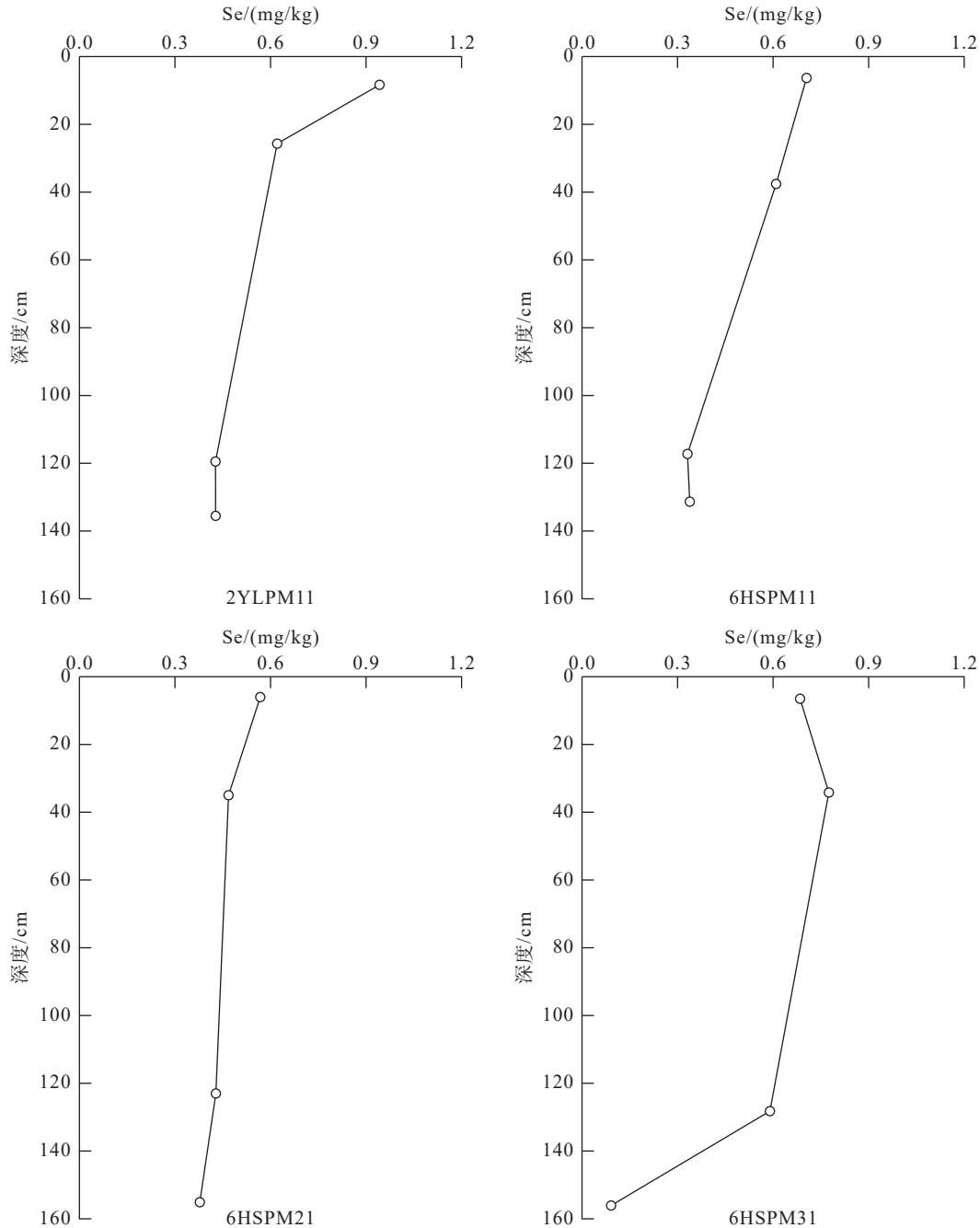


图 3 土壤剖面 Se 含量随深度变化图
Fig.3 Se content changes with depth in the soil

0295–2016), 以土壤中硒含量 $>0.4 \text{ mg/kg}$ 为标准划分富硒耕地, 绘制 Se 元素分布图。其划分标准: 一等, $\leq 0.125 \text{ mg/kg}$ 为缺乏; 二等, $0.125 \sim 0.175 \text{ mg/kg}$ 为边缘; 三等, $0.175 \sim 0.40 \text{ mg/kg}$ 为中等; 四等, $0.40 \sim 3.0 \text{ mg/kg}$ 为高; 五等, $>3.0 \text{ mg/kg}$ 为过剩。总体来看, 涟江大坝区内富硒土壤丰富(图 5), 主要为中等、高两个等级。全坝区富硒土壤(以土壤中硒

含量 $>0.4 \text{ mg/kg}$ 为标准划分富硒土壤)面积为 42.94 km^2 , 占涟江大坝区内耕地总面积的 98.45%。

4.3 涟江大坝土壤 Se 影响因素

土壤中 Se 主要来源于岩石风化(时章亮等, 2020), 据前人研究富硒土壤主要与有机质含量较高的河湖相沉积物、硫化物矿床、黑色岩系、含煤岩系地层等成土母岩的风化土密切相关(Girling,

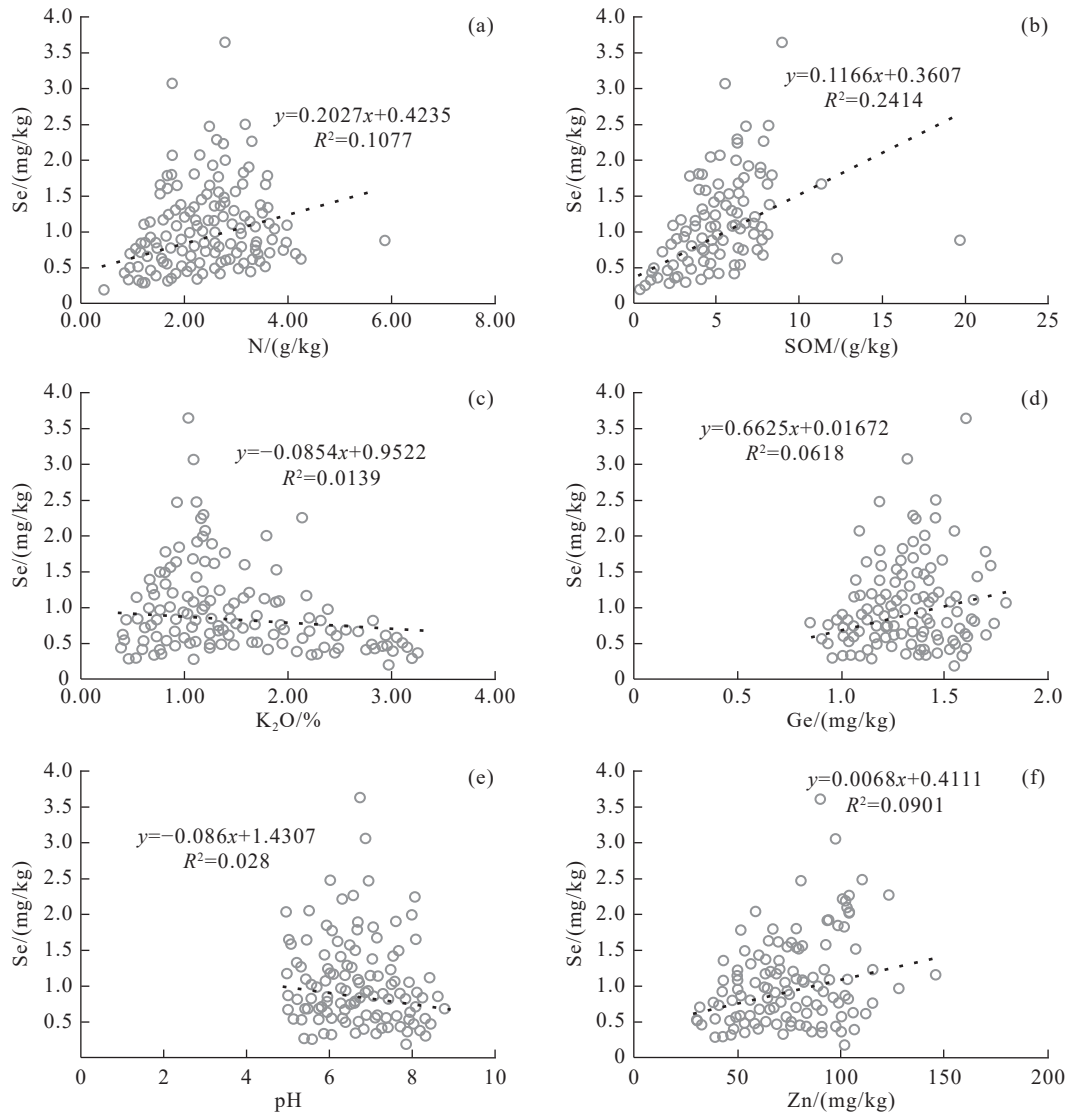


图4 涟江大坝表层土壤中 Se 与其他元素相关性散点图

Fig.4 Scatter plot of correlation between Se and other elements in the topsoil of Lianjiang Dam

1984; Wang et al., 2001)。

4.3.1 不同成土母岩表层土壤 Se 元素来源

有研究认为成土母质制约着土壤硒的含量(夏卫平和谭见安, 1990), 成土母岩中元素的含量是土壤元素重要来源之一。涟江大坝不同成土母岩表层土壤取样情况显示(表4), Se 含量平均值 $C_2d>P_2m>P_1q>K_2m>T_1l>T_2b$ 。

4.3.2 不同土地利用类型

不同土地利用类型对土壤 Se 含量具有一定的影响, 涟江大坝的土地利用类型以水田、旱地、果园、林地为主, 本次采集的样品主要在水田、旱地、果园中。将不同土地利用类型表层土壤 Se 含量进

行对比, 发现具有明显的不同(表4)。Se 元素含量平均值旱地>水田>果园, 水田、旱地、果园 Se 含量平均值均高于贵州省土壤 A 层背景值。

4.3.3 不同土壤类型

不同土壤类型具有不同的成土母质和物理化学性质, 从而导致 Se 在不同土壤类型中的分布有差异。涟江大坝土壤类型主要有水稻土、黄壤和紫色土(表5), 其 Se 含量平均值为紫色土>水稻土>黄壤。

4.3.4 土壤剖面

涟江大坝土壤剖面 Se 元素呈现出表层富集特征(表7, 图3), 这与前人研究成果相似(李玉超等, 2020), 4 组土壤剖面中表层土壤与深层土壤 Se 含

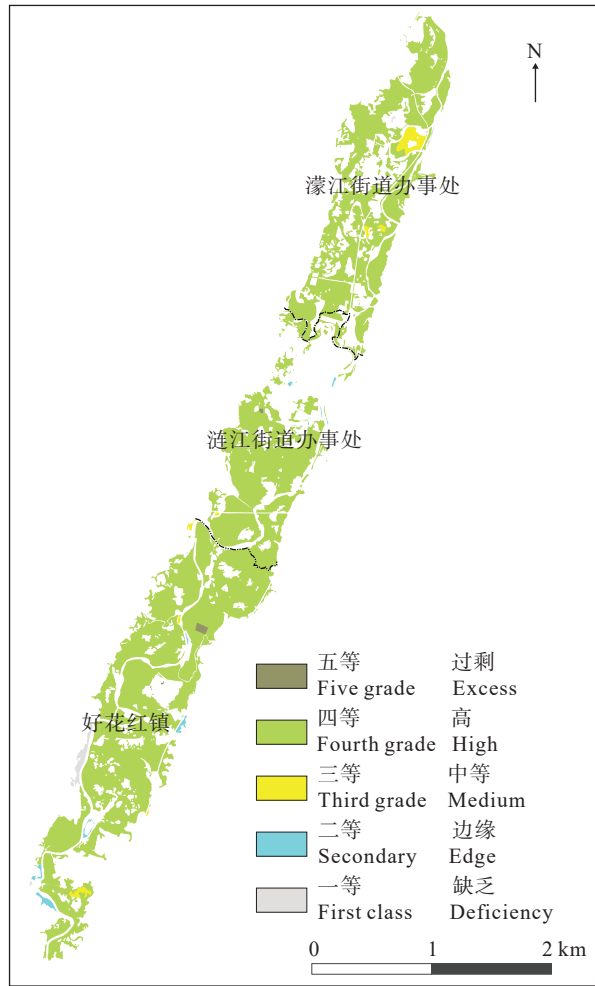


图 5 涟江大坝 Se 特色元素指标等级图
Fig.5 Element index grade chart of Se in the Lianjiang Dam

量相比都大于 1, 这说明土壤中 Se 元素受到成土过程的较大影响。其中 2YLPM11-14 剖面中 Se 元素在 15~40 cm 深度呈现明显富集, 6HSPM11-14、6HSPM21-24、6HSPM31-34 剖面中 Se 元素在 15~35 cm 深度呈现明显富集, 这主要是因为腐殖层与淋滤层接触部位养分或有机质含量增加导致 Se 富集。4 组土壤剖面中深部母质层 Se 含量范围 0.3~0.85 mg/kg, 均高于中国土壤 Se 背景值 0.3 mg/kg, 此外, 4 件成土母岩中 Se 含量范围为 0.02~0.28 mg/kg, 与大陆地壳 Se 元素含量 0.12 mg/kg (Vinogradov et al., 1962; 黎彤, 1976; 鄯明才和迟清华, 1997) 对比, P_2m 中 Se 具有较明显的富集特征, 说明富硒土壤、母质层与富硒岩石之间有密切成因关系。

4.3.5 土壤物理化学性质

(1) N、 K_2O 、P、B 含量。涟江大坝样品中表层

土壤元素 N、P、B 与贵州省耕地土壤和中国土壤 A 层背景值相对比, P、B 含量高, K_2O 含量较低; 样品中 Se 与 N 的相关系数 $R^2=0.107$ (图 5a), 具有显著正相关关系; Se 与 K_2O 的相关系数 $R^2=0.013$ (图 5c), 具有显著负相关关系。

(2) SOM 含量。有机质主要影响 Se 固定和吸附作用, SOM 含量越高的土壤对 Se 的吸附能力越强 (时章亮等, 2020)。涟江大坝土壤 Se 含量与有机质含量关系见表 2 和图 5b, $R^2=0.241$, 呈显著正相关关系, 这是由于富含 SOM 的土壤更能改善土壤结构, 导致土壤表面积增大从而使 Se 吸附与固定, 陕西、浙江等地区 (王金达等, 2000; 黄春雷等, 2013) 的研究也显示, Se 的吸附能力和土壤 SOM 含量呈正相关关系。

(3) Ge、Zn 含量。涟江大坝表层土壤样品中 Se 元素与 Ge、Zn 含量均呈正相关关系 (图 5d、f), R^2 分别为 0.061、0.090, 这与刘艳娟 (2009) 研究结果相似。

(4) pH。土壤 pH 可控制 Se 和土壤组分的吸附与解吸过程 (朱建明等, 2003), 也可通过影响 Se 的化学价态影响其含量。在碱性条件下, Se 活泼性较强, 可被氧化为硒酸盐, 更易迁移淋溶 (邝逸根等, 2005); 在酸性和湿润条件下, Se 主要以亚硒酸盐的形式存在, 容易被氧化物、有机质与黏粒矿物吸附。研究区土壤 pH 偏酸性, 表层土壤中 Se 与 pH 具有显著负相关关系 (图 5e)。

5 结 论

(1) 涟江大坝表层土壤中 Se 元素含量范围为 0.19~3.65 mg/kg, 平均值 0.85 mg/kg, 中位数 0.73 mg/kg, 高于中国土壤背景值和贵州省土壤背景值; 土壤中养分元素 N、 K_2O 、P、B、有机质含量平均值分别为 2.11 mg/kg、0.62%、512.83 mg/kg、68.53 mg/kg、1.89 g/kg, 与贵州省耕地土壤和中国土壤 A 层背景值相对比, P、B 和有机质含量高; 土壤养分条件优良, 有利于富硒农作物的种植。

(2) 涟江大坝区内富硒土壤丰富, 主要为中等和高。全坝区富硒土壤为 42.94 km², 占涟江大坝区内耕地总面积的 98.45%。

(3) 涟江大坝不同成土母岩表层土壤取样情况表明, Se 含量平均值 $C_2d>P_2m>P_1q>K_2m>T_1l>T_2b$ 。

(4) 涟江大坝土壤剖面呈现出表层富集特征。4 组土壤剖面中 Se 元素在 15~40 cm 深度呈现明显富集; 剖面中 Se 含量随深度加深而降低; 4 组土壤剖面中深部母质层 Se 含量均高于中国土壤 Se 背景值, 结合成土母岩 P_2m 中 Se 具有较明显的富集特征, 说明富硒土壤、母质层与富硒岩石之间有密切成因关系; 涟江大坝样品中 Se 与 SOM 呈显著正相关关系; Se 与 K_2O 、pH 呈显著负相关关系。

References

- Abdulah R, Miyazaki K, Nakazawa M, Koyama H. 2005. Low contribution of rice and vegetables to the daily intake of selenium in Japan[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 56(7): 463–471.
- An Yonghui, Li Xufeng, He Jin, Jia Xiaofeng, Li Liang. 2010. Distribution characteristics of Kaschin–Beck disease in relation to geological environment of Zoige County[J]. *Geology in China*, 37(3): 587–593 (in Chinese with English abstract).
- Bridges C C, Zalups R K. 2005. Molecular and ionic mimicry and the transport of toxic metals[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 204(3): 274–308.
- Chen X S, Yang G Q, Chen J S, Chen X C, Wen Z M, Ge K Y. 1980. Studies on the relations of selenium and Keshan disease[J]. *Biological Trace Element Research*, 2(2): 91–107.
- Chen Xuhui. 2001. Variations of soil nutrient content and fertilization in Guizhou[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 7(2): 121–128 (in Chinese with English abstract).
- Combs G F. 2001. Selenium in global food systems[J]. *British Journal of Nutrition*, 85(5): 517–547.
- Gailer J. 2007. Arsenic–selenium and mercury–selenium bonds in biology[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 251(1/2): 234–254.
- Gao Xue, Chen Haiyan, Tong Qianqian. 2013. Nutrient status of surface soil of cultivated land in Guizhou[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 41(12): 87–91 (in Chinese with English abstract).
- Girling C A. 1984. Selenium in agriculture and the environment[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 11(1): 37–65.
- Haug A, Graham R D, Christophersen O A, Lyons G H. 2007. How to use the world's scarce selenium resources efficiently to increase the selenium concentration in food[J]. *Microbial Ecology in Health and Disease*, 19(4): 209–228.
- Huang Chunlei, Wei Yingchun, Jian Zhonghua, Song Mingyi. 2013. Study on selenium contents and combined forms of typical selenium-rich soil in the central part of Zhejiang Province[J]. *Earth and Environment*, 41(2): 155–159 (in Chinese with English abstract).
- Keshavarzi B, Moore F, Najmeddin A, Rahmani F. 2012. The role of Selenium and selected trace elements in the etiology of esophageal cancer in high risk Golestan Province of Iran[J]. *Science of the Total Environment*, 433: 89–97.
- Li Tong. 1976. Chemical element abundances in the Earth and its major shells[J]. *Geochimica*, (3): 167–174 (in Chinese with English abstract).
- Li Yigen, Dong Yanxiang, Zheng Jie, Li Yan, Wu Xiaoyong, Zhu Chaohui. 2005. Selenium: abundant soil survey and assessment in Zhejiang[J]. *Quaternary Sciences*, 25(3): 323–330 (in Chinese with English abstract).
- Li Yuchao, Wang Chengyu, Yu Chengguang. 2020. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soil from Dandong area[J]. *Liaoning Province Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 50(6): 1766–1775 (in Chinese with English abstract).
- Liao Qilin, Cui Xiaodan, Huang Shunsheng, Huang Biao, Ren Jinghua, Gu Xueyuan, Fan Jian, Xu Hongting. 2020. Element geochemistry of selenium-enriched soil and its main sources in Jiangsu Province[J]. *Geology in China*, 47(6): 1813–1825 (in Chinese with English abstract).
- Liao Qilin, Hua Ming, Feng Jinshun, Jin Yang, Wu Xinmin, Yan Chaoyang, Zhu Baiwan. 2007. Natural Se-rich tea in local Se-rich soils in southern Jiangsu[J]. *Geology in China*, 34(2): 347–353 (in Chinese with English abstract).
- Liao Qilin, Ren Jinghua, Xu Weiwei, Cui Xiaodan, Jin Yang, Li Wenbo, Fan Jian, Zhu Bowan. 2016. Geological and geochemical background of Se-rich production in Yili area, Jiangsu Province[J]. *Geology in China*, 43(5): 1791–1802 (in Chinese with English abstract).
- Litov R E, Combs G F. 1991. Selenium in pediatric nutrition[J]. *Pediatrics*, 87(3): 339–351.
- Liu Xiujin, Yang Ke, GuoFei, Tang Shiqi, Liu Yinghan, Zhang Li, Cheng Hangxin, Liu Fei. 2022. Effects and mechanism of igneous rock on selenium in the tropical soil–rice system in Hainan Province, South China[J]. *China Geology*, 5(1): 1–11.
- Liu Yanjuan. 2009. Investigation of Selenium, Zinc and Germanium in Soil and Special Agricultural Products in Yanhe County, Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou University (in Chinese with English abstract).
- Lü Yaoyao, Yu Tao, Yang Zhongfang, Zhao Wanfu, Guo Wei, Huang Boming, Li Peng. 2012. The regulation mechanism of selenium distribution in Kaschin–Beck disease area: A case study in Aba area, Sichuan Province[J]. *Environmental Chemistry*, 31(7): 935–944 (in Chinese with English abstract).
- Lü Y Y, Yu T, Yang Z F, Zhao W F, Zhang M, Wang Q. 2014. Constraint on Selenium bioavailability caused by its geochemical behavior in typical Kaschin–Beck disease areas in Aba, Sichuan Province of China[J]. *Science of the Total Environment*, 493: 737–749.
- Luo Weiqun, Jiang Zhongcheng, Hu Zhaoxin, Xie Yunqiu, Huang Jing, Liang Jianhong. 2018. Large area of selenium-rich soil and selenium-rich *Hylocereus undulatus* discovered in Pingguo County, Guangxi[J]. *Geology in China*, 45(3): 630–631 (in Chinese).
- Qin Jianxun, Fu Wei, Zheng Guodong, Deng Bin, Wu Tiansheng, Zhao Xinjin, Lu Bingke, Qin Yongxin. 2020. Selenium distribution in

- surface soil layer of Karst area of Guangxi and its affecting factors: a case study of Wuming County[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 57(5): 1299–1310 (in Chinese with English abstract).
- Rayman M P. 2000. The importance of selenium to human health[J]. *The Lancet*, 356(9225): 233–241.
- Shi Zhangliang, Jin Lixin, Liao Chao, Bao Yuhan, Liu Xiaobo, Deng Huan, Xu Kequan. 2020. Content characteristics and genesis of soil selenium in important cultivated areas of Leibo County, Sichuan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 44(5): 1253–1260 (in Chinese with English abstract).
- State Department of Environmental Conservation. 1990. Background Value of Soil Environment in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press (in Chinese).
- Stone R. 2009. A medical mystery in middle China[J]. *Science*, 324(5933): 1378–1381.
- Sun Zhao, Hou Qingye, Yang Zhongfang, Yang Xiaoyan, Huang Yong, Chen Enke. 2010. Factors controlling the transport and transformation of selenium in typical soil environments: A case study of the Chengdu economic zone in Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 37(6): 1760–1768 (in Chinese with English abstract).
- Supriatin S, Weng L P, Comans R N J. 2016. Selenium-rich dissolved organic matter determines selenium uptake in wheat grown on low-selenium Arable land soils[J]. *Plant and Soil*, 408(1/2): 73–94.
- Tan Jianan. 1996. Environmental Life Elements and Keshan Disease: A Study on Ecological Chemiscogeography[M]. Beijing: China Medical Science Press(in Chinese).
- Vinogradov A P, Ryabchikov D I. 1962. Detection and Analysis of Rare Elements[M]. London: Oldbourne Press.
- Wang Jinda, Yu Junbao, Zhang Xuelin. 2000. Geochemical features of elements of selenium etc. in soil of Leoss Plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 20(5): 469–473 (in Chinese with English abstract).
- Wang Renqi, Zhang Zhimin, Chao Xu, Feng Haiyan, Yang Zhongfang. 2022. A study of the selenium speciation in paddy soil and status of selenium-enriched rice in western part of Ankang City, Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 49(2): 398–408 (in Chinese with English abstract).
- Wang Renqi, Tan Keyan, Sun Qian, Li Hang, Zhang Longlong, Wang Yu, Yuan Xin, Zhu Xiaohua, Cai Jingyi. 2024. Health risk assessment of heavymetals in typical oats production region of Bashang area in Zhangjiakou, Hebei Province[J]. *Geology in China*, 51(1): 264–275 (in Chinese with English abstract).
- Wang Rui, Yu Tao, Yang Zhongfang, Hou Qingye, Zeng Qingliang, Ma Honghong. 2018. Bioavailability of soil selenium and its influencing factors in selenium-enriched soil[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 27(7): 1647–1654 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shiji, Wu Xiaoyong, Liu Junbao. 2004. Characteristics of elemental selenium in soils and evaluation of eco-environmental effects in northern Zhejiang[J]. *Geology in China*, 31(S): 118–125 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z J, Gao Y X. 2001. Biogeochemical cycling of selenium in Chinese environments[J]. *Applied Geochemistry*, 16(1112): 1345–1351.
- Wei Zhenshan, Tu Qijun, Tang Shuhong, Wang Huabing, Zhao Xuejiao, Bai Jinqi. 2016. A discussion on the geochemical features and origin of selenium-rich soil on the northern slope of the Tianshan Mountains from Urumqi to Shawan County[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 40(5): 893–898 (in Chinese with English abstract).
- Wen Bangyong, Zhang Taoliang, Li Xizhou, Xie Zhengdong. 2014. A feasibility study of selenium-rich soil development in Longnan County of Jiangxi Province[J]. *Geology in China*, 41(1): 256–263 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jun. 2018. The distribution of soil selenium in Shouning County of Fujian Province and its influencing[J]. *Geology in China*, 45(6): 1167–1176 (in Chinese with English abstract).
- Xi Chaozhuang, Wu Linfeng, Zhang Pengfei, Yang Mingtai, Fan Yunfei, Huang Danyan. 2022. Investigation and evaluation of soil heavy metal pollution: A case study of Lianjiang high-efficiency agricultural park in Huishui, Guizhou Province[J]. *Journal of Hunan City University (Natural Science)*, 31(4): 51–56 (in Chinese with English abstract).
- Xi Chaozhuang, Zhang Pengfei, Wu Linfeng, Yang Mingtai, Fan Yunfei, Deng Huijuan. 2023. Investigation and evaluation of heavy metal pollution in cultivated land in Huishui County, Guizhou Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 42(7): 1228–1239 (in Chinese with English abstract).
- Xia Weiping, Tan Jianan. 1990. A comparative study of selenium content in Chinese rocks[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 10(2): 125–131 (in Chinese with English abstract).
- Yan Mingcai, Chi Qinghua. 1997. Chemical Composition of the Crust and Rocks of Eastern China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Yang Shengfa, Yang Mingtai, Fan Yunfei, Wang Furui, Li Yantao, Liao Junkai, Xu Pengfei. 2019. A Geochemical Survey and Evaluation Report on Cultivated Land Quality in Huishui County, Guizhou Province[R]. Guiyang: Nuclear Resources Geological Survey, Non-ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou (in Chinese).
- Yang Xiaoxiao, Zeng Daoming, Luo Xianrong, Sun Binbin, Wu Chao, Huang Wenbin, Yang Chunli. 2020. Geochemical characteristics of Selenium, Fluorine and Iodine in surface soils of the Xinhui area, the Pearl River Delta, China[J]. *Earth and Environment*, 48(2): 181–189 (in Chinese with English abstract).
- Yu Tao, Yang Zhongfang, Wang Rui, Zeng Qingliang, Hou Wanling. 2018. Characteristics and sources of soil selenium and other elements in typical high selenium soil area of Enshi[J]. *Soils*, 50(6): 1119–1125 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Qingliang, Yu Tao, Wang Rui. 2018. The influencing factors of selenium in soils and classifying the selenium-rich soil resources in the typical area of Enshi, Hubei[J]. *Geoscience*, 32(1): 105–112 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Dong, Li Yongchun, Su Rilige, Yuan Guoli, Tai Surigala, Wang Yongliang, Chen Guodong, Zhou Wenhui, Du Yuchunzi, Yang Jianyu. 2024. Ecological health risk assessment of soil heavy metals in Wuyuan County, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 51(1): 248–263 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jianming, Liang Xiaobing, Ling Hongwen, Wang Mingshi, Wang Fushun, Liu Shirong. 2003. Advances in studying occurrence modes of selenium in environment[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 22(1): 75–81 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安永会, 李旭峰, 何锦, 贾小丰, 李亮. 2010. 若尔盖县大骨节病分布特征及其与地质环境的关系[J]. *中国地质*, 37(3): 587–593.
- 陈旭晖. 2001. 贵州土壤养分含量的变化与施肥管理[J]. *植物营养与肥料学报*, 7(2): 121–128.
- 高雪, 陈海燕, 童倩倩. 2013. 贵州耕地耕层土壤养分状况评价[J]. *贵州农业科学*, 41(12): 87–91.
- 国家环境保护局. 1990. 中国土壤环境背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 黄春雷, 魏迎春, 简中华, 宋明义. 2013. 浙中典型富硒区土壤硒含量及形态特征[J]. *地球与环境*, 41(2): 155–159.
- 黎彤. 1976. 化学元素的地球丰度[J]. *地球化学*, (3): 167–174.
- 酃逸根, 董岩翔, 郑洁, 李琰, 吴小勇, 朱朝晖. 2005. 浙江富硒土壤资源调查与评价[J]. *第四纪研究*, 25(3): 323–330.
- 李玉超, 王诚煜, 于成广. 2020. 辽宁丹东地区土壤 Se 元素地球化学特征及其影响因素[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 50(6): 1766–1775.
- 廖启林, 崔晓丹, 黄顺生, 黄标, 任静华, 顾雪元, 范健, 徐宏婷. 2020. 江苏富硒土壤元素地球化学特征及主要来源[J]. *中国地质*, 47(6): 1813–1825.
- 廖启林, 华明, 冯金顺, 金洋, 吴新民, 颜朝阳, 朱伯万. 2007. 苏南局部富硒土壤及其天然富硒茶叶初步研究[J]. *中国地质*, 34(2): 347–353.
- 廖启林, 任静华, 徐伟伟, 崔晓丹, 金洋, 李文博, 范健, 朱伯万. 2016. 江苏宜溧富硒稻米产区地质地球化学背景[J]. *中国地质*, 43(5): 1791–1802.
- 刘艳娟. 2009. 贵州省沿河县土壤及特色农产品硒锌镉调查研究[D]. 贵阳: 贵州大学.
- 吕瑶瑶, 余涛, 杨忠芳, 赵万伏, 郭伟, 黄波铭, 李鹏. 2012. 大骨节病区硒元素分布的调控机理研究——以四川省阿坝地区为例[J]. *环境化学*, 31(7): 935–944.
- 罗为群, 蒋忠诚, 胡兆鑫, 谢运球, 黄静, 梁建宏. 2018. 广西平果县发现大面积富硒土壤与富硒火龙果[J]. *中国地质*, 45(3): 630–631.
- 覃建勋, 付伟, 郑国东, 邓宾, 吴天生, 赵辛金, 卢炳科, 覃勇新. 2020. 广西岩溶区表层土壤硒元素分布特征与影响因素探究——以武鸣县为例[J]. *土壤学报*, 57(5): 1299–1310.
- 时章亮, 金立新, 廖超, 包雨函, 刘晓波, 邓欢, 徐克全. 2020. 四川雷波县重点耕地区土壤硒含量特征及其成因分析[J]. *物探与化探*, 44(5): 1253–1260.
- 孙朝, 侯青叶, 杨忠芳, 杨晓燕, 黄勇, 陈恩科. 2010. 典型土壤环境中硒的迁移转化影响因素研究——以四川省成都经济区为例[J]. *中国地质*, 37(6): 1760–1768.
- 谭见安. 1996. 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.
- 王金达, 于君宝, 张学林. 2000. 黄土高原土壤中硒等元素的地球化学特征[J]. *地理科学*, 20(5): 469–473.
- 王仁琪, 张志敏, 晁旭, 冯海艳, 杨忠芳. 2022. 陕西省安康市西部稻田土壤硒形态特征与水稻富硒状况研究[J]. *中国地质*, 49(2): 398–408.
- 王仁琪, 谭科艳, 孙倩, 李航, 张隆隆, 王玉, 袁欣, 朱晓华, 蔡敬怡. 2024. 河北省张家口坝上典型莜麦产区重金属元素健康风险评估[J]. *中国地质*, 51(1): 264–275.
- 王锐, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 马宏宏. 2018. 富硒土壤硒生物有效性及影响因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 27(7): 1647–1654.
- 王世纪, 吴小勇, 刘军保. 2004. 浙北地区土壤硒元素特征及其生态环境效益评价[J]. *中国地质*, 31(增刊): 118–125.
- 魏振山, 涂其军, 唐蜀虹, 王化兵, 赵雪娇, 白金启. 2016. 天山北坡乌鲁木齐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*, 40(5): 893–898.
- 文帮勇, 张涛亮, 李西周, 谢振东. 2014. 江西龙南地区富硒土壤资源开发可行性研究[J]. *中国地质*, 41(1): 256–263.
- 吴俊. 2018. 福建省寿宁县土壤硒分布特征及影响因素[J]. *中国地质*, 45(6): 1167–1176.
- 息朝庄, 吴林锋, 张鹏飞, 杨茗钦, 范云飞, 黄丹艳. 2022. 土壤重金属污染现状调查与评价: 以贵州惠水涟江高效农业园区为例[J]. *湖南城市学院学报 (自然科学版)*, 31(4): 51–56.
- 息朝庄, 张鹏飞, 吴林锋, 杨茗钦, 范云飞, 邓会娟. 2023. 贵州惠水耕地土壤重金属污染调查与评价[J]. *地质通报*, 42(7): 1228–1239.
- 夏卫平, 谭见安. 1990. 中国一些岩类中硒的比较研究[J]. *环境科学学报*, 10(2): 125–131.
- 鄢明才, 迟清华. 1997. 中国东部地壳与岩石的化学组成[M]. 北京: 地质出版社.
- 杨胜发, 杨茗钦, 范云飞, 王福瑞, 李艳桃, 廖俊凯, 徐鹏飞. 2019. 贵州省惠水县耕地质量地球化学调查评价报告[R]. 贵阳: 贵州省有色金属和核工业地质勘查局核资源地质调查院.
- 杨笑笑, 曾道明, 罗先熔, 孙彬彬, 吴超, 黄文斌, 杨春丽. 2020. 珠三角新会地区表层土壤硒、氟、碘地球化学特征研究[J]. *地球与环境*, 48(2): 181–189.
- 余涛, 杨忠芳, 王锐, 曾庆良, 侯宛苓. 2018. 恩施典型富硒区土壤硒与其他元素组合特征及来源分析[J]. *土壤*, 50(6): 1119–1125.
- 曾庆良, 余涛, 王锐. 2018. 土壤硒含量影响因素及富硒土地资源区划研究——以湖北恩施沙地为例[J]. *现代地质*, 32(1): 105–112.
- 张栋, 李永春, 苏日力格, 袁国礼, 郅苏日嘎拉, 王永亮, 陈国栋, 周文辉, 杜雨春子, 杨建雨. 2024. 内蒙古五原县某地土壤重金属生态环境风险评价[J]. *中国地质*, 51(1): 248–263.
- 朱建明, 梁小兵, 凌宏文, 王明仕, 汪福顺, 刘世荣. 2003. 环境中硒存在形式的研究现状[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 22(1): 75–81.