



张亚峰, 施泽明, 苗国文, 等. 青藏高原北缘富硒土地成因类型与生态潜力[J]. 岩矿测试, 2025, 44(3): 436–446.

DOI: [10.15898/j.ykcs.202307030087](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202307030087).

ZHANG Yafeng, SHI Zeming, MIAO Guowen, et al. Genetic Types and Ecological Potential of Selenium-Enriched Land in the Northern Margin of the Qinghai—Xizang Plateau[J]. Rock and Mineral Analysis, 2025, 44(3): 436–446.

DOI: [10.15898/j.ykcs.202307030087](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202307030087).

青藏高原北缘富硒土地成因类型与生态潜力

张亚峰^{1,2,3}, 施泽明^{1*}, 苗国文^{2,3*}, 许光^{2,3}, 姬丙艳³, 马瑛^{2,3}, 姚振^{2,3}

(1. 成都理工大学地球与行星科学学院, 四川 成都 610059;

2. 青海省第五地质勘查院, 青海 西宁 810099;

3. 青海省富硒资源利用工程技术研究中心, 青海 西宁 810099)

摘要: 青藏高原土壤硒(Se)在全国处于中-低水平, 对其局部发现的富硒土地开展成因类型研究, 可为构建青藏高原硒资源研究与开发利用体系提供科学依据, 同时对改善青藏高原低 Se 摄入风险具有现实意义。本文在中国主要天然富硒土地特征及成因类型基础上, 对青藏高原北缘通过土壤、岩石等多介质协同监测, 分析 Se 及相关元素分布特征, 总结了该地区主要存在干旱咸水湖沉积型、硫化物矿化型和有机质吸附型三种富硒土地类型。①干旱咸水湖沉积型富硒土地 Se 含量处于 0.30~1.16mg/kg, 重金属低于风险管控筛选值, 空间上与 Sr、Mg、Fe、Ca、Mo 等有益元素叠加富集, 硒来源于西宁群红色泥岩风化物, 具有 Se 源沉积稳定、总量 Se 适中、重金属低、多种有益元素复合等优势, 是青藏高原北缘乃至整个西北地区生态潜力较大的硒类型。②硫化物矿化型富硒土地 Se 含量处于 0.30~2.22mg/kg; Ni、Cd、Cr 和 As 存在 0.2%~2.4% 的点位超筛选值, As 存在 0.1% 的点位超管控值, 重金属呈高背景, 具有潜在生态风险及气候高寒冷凉适宜产出作物有限等劣势, 可在监测下发展林下经济和野生中草药产业。③有机质吸附型富硒土地 Se 含量处于 0.30~0.59mg/kg; Ni、Cd、Cr 和 As 不超标, Se 具有增加草料营养、抵御重金属吸收等双重作用, 可通过进一步探寻有机质在吸附-释放硒过程中的平衡条件, 来调控 Se 发挥最大生态效应。

关键词: 青藏高原; 富硒土地; 干旱咸水湖沉积; 生态潜力

要点:

(1) 青藏高原北缘富硒土地存在干旱咸水湖沉积型、硫化物矿化型和有机质吸附型三种 Se 富集类型。

(2) 干旱咸水湖沉积型富硒土地具有 Se 源稳定、Se 总量适中有有效量高、重金属低、多种有益元素复合的特征。

(3) 干旱咸水湖沉积型 Se 富集土地能产出相对优质的富硒农产品, 具有较高的利用价值, 生态潜力较大。

中图分类号: P66

文献标识码: A

硒(Se)属稀散非金属元素, 化学性质与硫元素相似, 是动物体必需、植物体有益的营养元素^[1-2]。Se 广泛分布在岩石、土壤、地下水、大气和动植物体内, 通常在岩石、土壤及水体中主要以亚硒酸盐和硒

酸盐等无机态存在, 在动植物体内经生物转化与氨基酸结合形成硒代蛋氨酸、硒代半胱氨酸等有机态。一般地, 对机体而言, 无机硒毒性较强, 吸收率低; 而有机硒无毒副作用, 吸收率及健康价值更高^[3-4]。

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2024-09-24; 接受日期: 2025-03-08; 网络出版日期: 2025-03-12

基金项目: 青海省地质勘查基金项目“青海省西宁—乐都富硒区生态地球化学评价”(QHDKJJ10)

第一作者: 张亚峰, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事生态地球化学研究。E-mail: 371221815@qq.com。

通信作者: 施泽明, 博士, 教授, 主要从事环境地球化学研究。E-mail: shizm@cdut.edu.cn。

通信作者: 苗国文, 硕士, 正高级工程师, 主要从事环境地球化学研究。E-mail: 27861538@qq.com。

土壤是动植物有机硒积累转化的直接来源,其 Se 的富集与贫化与成土母质密切相关^[5]。研究表明,沉积岩、岩浆岩及变质岩均可形成富硒岩层,不同成岩环境决定了土壤 Se 富集贫化的元素组合特征^[6]。因此,查明成岩环境,对于建立岩石-土壤 Se 运移模型、研究富硒土壤成因、识别富硒土地资源优劣、科学指导富硒土地资源高效开发利用具有重要的研究价值和现实意义。

2021 年以来,中国地质学会在全国相继认定了第三批天然富硒土地,涉及湖北、陕西、江西、贵州及新疆、青海、宁夏等 24 个省、自治区及直辖市共计 6.16 万 hm^2 ,富硒土壤硒含量在 0.30mg/kg 以上。富硒资源成因方面,湖北恩施 Se 源主要是二叠纪还原条件下沉积的一套黑色岩系;陕西安康 Se 源主要是寒武纪沉积的一套硅岩建造;江西丰城 Se 源主要是二叠纪一套煤系岩层;贵州开阳 Se 源也是寒武纪缺氧陆棚环境沉积的黑色岩系^[7-8]。新疆焉耆盆地 Se 由侏罗系陆相含煤地层迁移至盆地内古近—新近系、第四系湖泊沉积物中形成富集;宁夏银川平原 Se 来自贺兰山煤层经二次沉积搬运后富集;青海柴达木盆地 Se 为第四系湖相盐类沉积,青海西宁盆地为古近系干旱咸水湖碎屑岩沉积^[9]。碱性土壤 Se 活性强,生物有效性高,易被淋溶^[10];而中酸性土壤 Se 易被氧化物、有机质等吸附络合,生物有效性有限^[11]。中国西北地区土地多呈碱性-强碱性,在该区域研究富硒土壤具有重要意义。

青藏高原土壤 Se 在全国处于中-低水平,位于 Se 低-缺乏边缘^[12]。刘熙会等(2022)研究指出在青海兴海县、贵德县及西藏昌都市、山南市存在因环境低 Se 导致的人群发生大骨节病的状况^[13],7~12 周岁儿童大骨节病检出率为 10.6%,虽已通过换粮、补硒等措施加以控制,但低硒的生态本底未改变^[14]。因此,开展青藏高原富硒资源研究显得尤为重要。青海开展的土地质量地球化学调查在西宁盆地、门源盆地、柴达木盆地及囊谦盆地均发现了富硒土地资源^[15],其中青藏高原北缘一带工作程度较高,富硒成因类型多样,在西北地区具有代表性。本文以青藏高原北缘土壤、岩石、水系沉积物为主要研究对象,通过测定土壤 Se 及相关指标含量,分析数据特征,并从成岩环境和成土过程等方面剖析了 Se 的富集特征,开展了成因类型探讨,为富硒土地资源服务乡村振兴、现代农业及高原绿色有机富硒农畜产品输出地建设提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于青藏高原北缘,自西北向东南依次跨越走廊南山、门源盆地、达坂山、青海湖盆地、西宁盆地、民和盆地、拉脊山、共和盆地、贵德盆地、青海南山、河卡山 11 个地貌景观,整体上呈现“山盆”相间的格局。包含黄河谷地和湟水谷地两个主要的农牧区,土壤类型以栗钙土、灰钙土和草甸土为主,作物以小麦、油菜、马铃薯为主(图 1)。断裂构造发育,主断裂带有北祁连北缘断裂、黑河断裂、中祁连北缘断裂、疏勒南山—拉脊山断裂和宗务隆—青海南山断裂,呈北西—南东向展布。地层从古元古代到新生代除青白口纪外均有出露,老地层分布在达坂山、拉脊山脉,在河谷盆地多为新生代地层。

2 实验部分

2.1 样品采集与处理

在研究区全域范围内按 1 个点/ 4km^2 的密度采集表层(0~20cm)土壤样品,选取多点组合方法,在设计点位选择 1 个主点,并在同一地块中以“梅花法”选择 3~4 个副点采集表层 0~20cm 土壤样品。主副点等量混合成 1 组样品,共获取 8273 组表层土壤样品(图 1)。土壤样经烘干后过孔径为 0.85mm 尼龙筛,取筛下物 200g 置于低于 60℃ 的恒温干燥箱内充分烘干,烘干样经玛瑙球磨机研磨至粒度 0.075mm,测定 pH、Se、S、Cr、Cu、Ca、Pb、Sr、Zn、Fe、Mn、Mo、Mg、Cd、As、Hg 和有机碳(C_{org})指标。

在拉脊山北侧支沟老虎沟一带采集“岩石—残积物—土壤样”协同样,按不同岩性出露状况共获取 7 套样本。在拉脊山、青海湖北部和西宁盆地三个区域分别采集“岩石—水系沉积物—土壤样”协同样,水系沉积物发育不好的地段用残积物替代,残积物发育不好的用土壤样替代。青海湖北部共获取 18 套分析样,拉脊山共 51 套分析样,西宁盆地共 24 套分析样。在达坂山分别采集土壤、底泥、土壤样品共采集 39 件,底泥样品 9 件。岩石样品采集在同一露头敲击新鲜岩石面,多点聚合成一个样,破碎、缩分后研磨至粒度 0.075mm 测定 Se。残积物选取与对应岩石样品岩性一致的基岩风化岩屑,截取孔径 2mm 以下 0.42mm 以上粒级段研磨至 0.075mm 测定 Se。土壤样品采集与残积物物源一致的表层土壤,样品处理方法与前述土壤一致,测定 Se。在祁连山铜矿一带布置水平土壤剖面,穿越铜矿上下游,以 200~500m 点距视土壤发育状况采集表层土壤样品,

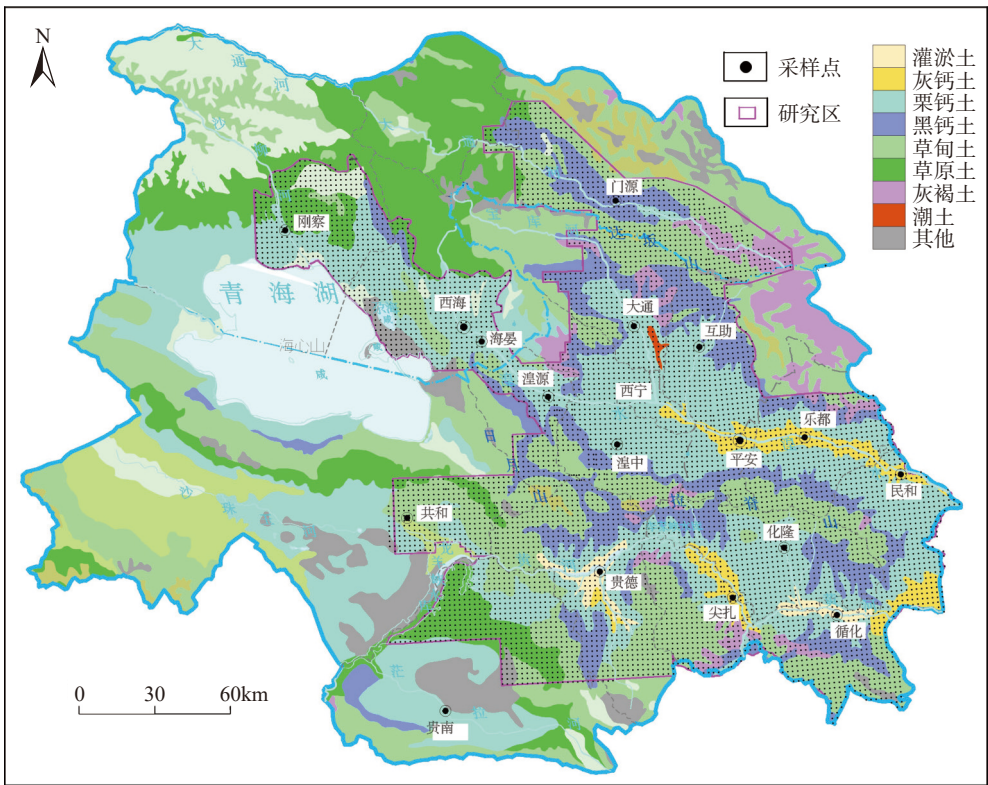


图1 研究区土壤类型及采样点位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil type and sampling point location in the study area.

并延河流上下游采集底泥样品,测定 Se、Cu、S、C_{org}。

2.2 样品分析测试与质量控制

样品测试由安徽省地质实验研究所完成。选用离子选择性电极法 (IES) 测定 pH 值;原子荧光光谱法 (AFS) 测定 Se、As、Hg; X 射线荧光光谱法 (XRF) 测定 Cr、Cu、Pb、Sr、Zn、Fe、Mn、S、Mg、Ca、Mn 含量;极谱法 (POL) 测定 Mo 含量;电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定 Cd 含量;氧化还原容量法 (VOL) 测定 C_{org}。分析质量控制按照《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T 0258—2014)执行, Se、As、Hg、Cr、Cu、Pb、Sr、Zn、Mn、Mo、Cd 和 S 的检出限为 0.01、0.2、0.0005、3、1、2、5、1、5、20、0.3 和 0.02 mg/kg; Fe、Mg、Ca 和 Corg 的检出限为 0.05、0.02、0.02 和 0.05%; pH 的检出限为 0.1。分析方法准确度用分析国家一级标准物质 (GBW) 方法进行检验。选用 8 个国家一级土壤标准物质 (GBW07401 ~ GBW07408) 用选定分析方法对每个标准物质进行 12 次分析, 分别计算每个标准物质的平均值与标准值之间对数偏差 ($\Delta \lg C$)、相对标准偏差 (RSD)。选用 6 个国家一级土壤标准物质 (GBW07412 ~ GBW07417) 用选定分析方法对每个标准物质进行 12 次分析, 分别计算每个标准物

质的 pH 检测平均值 ($pH_{平均}$)、和平均值与标准值间的最大相对误差 ($RE_{最大}$)。表 1 列出了质量监控数据, 结果显示, 本次研究中样品分析测试报出率为 100%, $\Delta \lg C$ 范围为 $-0.042 \sim 0.035$, RSD 范围为 0.18%~4.99%, pH 的 $RE_{最大}$ 范围为 $-0.08\% \sim 0.08\%$ 。各项分析技术指标的原始一次性合格率均为 100%, 数据质量可靠, 满足研究要求。

3 青藏高原北缘土壤硒分布特征

以往研究表明, 研究区存在富硒土地, 且硒的分布受水系搬运、成土母质和地形等因素共同影响^[12]。利用研究区土壤硒数据, 以 Se 含量 $\geq 0.3 \text{ mg/kg}$ 和 Se 含量 $\geq 0.4 \text{ mg/kg}$ 圈定富硒土地 (图 2)。根据群落关系, 结合地质背景和土地利用类型等特征, 将富硒土地划分为青海湖北部、拉脊山、达坂山、西宁盆地 4 处。

3.1 西宁盆地硒富集特征

西宁盆地富硒区的土壤元素特征及相关关系见表 2, 用 K 值 (平均值/背景值) 反映研究区某元素相对全国背景的富集 (或贫化) 程度, 相关系数揭示元素间的协同或拮抗作用。西宁盆地富硒区土壤 Se 含量在 0.30 ~ 1.16 mg/kg 之间, 平均值为 0.54 mg/kg;

表 1 分析方法质量监控

Table 1 Quality control of analysis methods.

指标	项目	GBW07401	GBW07402	GBW07403	GBW07404	GBW07405	GBW07406	GBW07407	GBW07408
Se	ΔlgC	-0.006	0.021	-0.019	0.019	0.006	0.009	0.026	0.009
	RSD	4.46	4.63	4.53	4.81	2.46	4.43	4.95	4.55
As	ΔlgC	0.008	-0.006	-0.024	0.013	0.007	-0.014	-0.028	0.01
	RSD	2.9	4.24	3.4	3.38	2.13	4.12	4.8	3.22
Hg	ΔlgC	0.026	0.028	-0.022	0.009	-0.012	0.006	-0.029	-0.026
	RSD	4.48	4.78	4.85	2.68	3.49	2.51	4.9	4.28
Cr	ΔlgC	0.035	0.031	0.029	0.016	0.007	0.034	0.025	-0.035
	RSD	4.07	4	4.01	0.99	0.91	3.1	0.53	4.89
Cu	ΔlgC	0.026	0.018	0.022	0.026	-0.035	0.029	-0.035	-0.011
	RSD	1.69	4.35	3.38	1.35	0.45	1.66	0.72	2.59
Pb	ΔlgC	-0.017	0.006	0.01	-0.005	0.001	-0.01	-0.016	-0.008
	RSD	1.35	4.57	2.3	2.48	0.28	0.51	4.23	3.83
Zn	ΔlgC	-0.018	0.013	0.021	0.001	-0.015	0.004	0.015	-0.003
	RSD	0.55	1.4	1.85	0.35	1.09	3.05	0.45	1.4
Fe	ΔlgC	-0.013	-0.009	-0.002	0.01	0.014	0.01	-0.004	-0.018
	RSD	0.57	0.57	0.4	0.42	0.43	0.41	0.18	0.82
Mn	ΔlgC	-0.01	0.003	0	0.026	-0.001	0.016	-0.018	-0.007
	RSD	0.65	0.49	1.17	0.56	0.43	0.39	1.36	1.23
S	ΔlgC	-0.014	-0.021	-0.028	0.008	-0.005	0.025	-0.019	0.012
	RSD	2.67	1.25	3.06	0.99	0.83	1.45	0.94	3.24
Mg	ΔlgC	-0.017	0.02	0.015	0	0.014	0.013	-0.017	0.013
	RSD	0.95	0.71	2.02	0.69	0.89	0.89	1.26	1.58
Ca	ΔlgC	0.01	0.018	-0.01	0	0.022	0.019	0	0.007
	RSD	0.42	0.42	0.59	0.45	0.86	1.59	2.49	1.83
Mo	ΔlgC	0.018	-0.009	-0.015	-0.024	0.015	-0.024	-0.018	0.025
	RSD	4.14	4.13	4.6	3.92	4.23	4.2	3.79	4.6
Cd	ΔlgC	-0.026	0.006	-0.038	-0.042	-0.023	-0.038	-0.034	-0.035
	RSD	3.26	4.6	4.51	4.5	4.91	4.19	4.99	3.04
C _{org}	ΔlgC	-0.02	-0.018	-0.026	0.014	0.013	0.005	0.007	0.014
	RSD	3	4.31	2.72	4.63	4.92	1.47	4.06	3.92
pH	项目	GBW07412	GBW07413	GBW07414	GBW07415	GBW07416	GBW07417	—	—
	pH _{平均}	6.06	8.18	8.20	5.63	5.37	5.36	—	—
	RE _{最大}	0.08	-0.06	0.06	0.08	-0.07	-0.08	—	—

注: RSD 和 RE 单位为 %; 其他无量纲。

As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 含量均低于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618—2018) 风险管控筛选值。土壤 Se、S、Sr、Mg、Ca 均高于全国土壤背景值 ($K>2$), 盐类物质强烈富集; Se 与 Sr 和 Mg 呈显著正相关, 表现出协同沉积特征。Cu、Zn、Mn、Mo 和 Fe 基本与全国背景值持平或略高。综合来看, 该富硒区元素组合呈多种有益元素富集、有害元素贫化的特征。

西宁盆地土壤 Se 以干旱咸水湖沉积型为主, 主要沉积在古近纪西宁组^[12]。将西宁盆地、富硒土壤和古新世咸水湖三者边界线进行空间叠加, 结合古地理古气候和元素组合特征, 分析三者的相互制约关系, 以此探讨 Se 的富集类型 (图 3)。富硒区集中在盆地腹地, 边界由西宁组和咸水湖边界共同控制。追溯西宁盆地沉积环境为干旱炎热的咸水湖条件, 随湖盆退缩, 盐类物质沉淀聚集在西宁组红色泥岩中, 这也是富硒土壤同时富含 Ca、Mg、Fe、Sr 的根源, 元素间具有同源性^[17]。到中新世气候逐渐

趋于湿润, 沉积环境由咸水湖相向淡水湖相转变, 此时期沉积了一套新近系的贵德群红色泥岩, Se 在此条件下未富集。在盆地外缘和内部局部区域, 沉积了一套白垩系民和组的棕红色、砖红色泥岩夹杂钙芒硝, 其沉积环境为干燥气候条件下的河流-湖泊相^[18-19]。此时期 Se 在盆地内富集, 但在盆地外缘未富集, 反映了两者的地形及气候差异。因此, 极其干旱的咸水湖是 Se 沉积的有利条件^[20]。

3.2 拉脊山和达坂山硒富集特征

3.2.1 拉脊山区

拉脊山区富硒土地 Se 含量处于 0.30~2.22mg/kg; 重金属 Hg、Pb 属低背景, 均低于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618—2018) 风险筛选值; Ni、Cd、Cr 和 As 存在 0.2%~2.4% 的点位超筛选值, As 存在 0.1% 的点位超管控值。据前人研究显示, 拉脊山富硒岩石与黑色岩系关系密切, Se 含量主要受硫化物、有机质影响。中国多数富硒土壤区 Se 与 S 均具显著正相

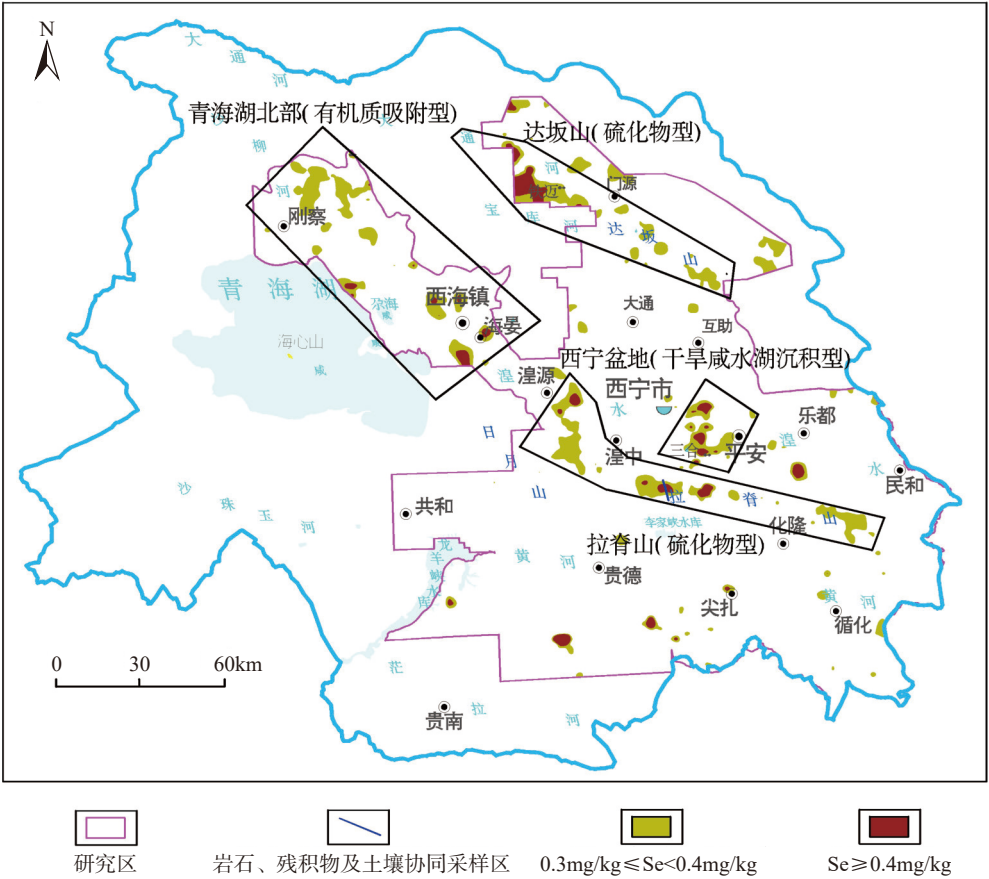


图2 青藏高原北缘富硒土壤分区

Fig. 2 Division of Se-enriched soil area in the northern margin of the Qinghai—Xizang Plateau.

表 2 西宁市盆地富硒区元素含量特征统计

Table 2 Statistics of element content characteristics in Se-enriched area of Xining Basin.

元素	含量 (mg/kg)		K	相关系数*	元素	含量 (mg/kg)		K	相关系数*	元素	含量 (mg/kg)		K	相关系数*
	平均值	背景值 ^[16]				平均值	背景值 ^[16]				平均值	风险值		
Se	0.54	0.26	2.1	1.00	Cu	27	25	1.1	0.10**	As	16	25	0.6	0.29**
S	6145	353	17.4	0.05	Zn	72	71	1.0	0.07**	Cd	0.2	0.6	0.3	-0.01
Sr	367	154	2.4	0.20**	Mn	641	580	1.1	0.01	Cr	81	250	0.3	0.06
Mg	31200	14800	2.1	0.25**	Mo	1.22	0.86	1.4	0.31**	Hg	0.034	3.4	0.01	-0.07**
Ca	85400	28500	3.0	-0.22**	Fe	46700	44900	1.0	0.23**	Pb	24	170	0.1	0.07**

注：“*”表示 Se 与该元素的相关系数；“**”表示在 99% 的置信区间呈显著相关；K=均值/背景值(风险值)；风险值参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)。

关关系^[21-23], Se 常在硫化物发育的火山岩地区发生富集^[24-26]。拉脊山区土壤 Se 富集具三方面特征:一是 Se 富集区的展布形态呈西北—东南向延伸在山脊一带,空间上与该处广泛分布的硫化物矿化带高度吻合(图 2);二是本地原岩风化的土壤中 Se 与 Cu、Ni、Cr、As、Zn、Cd 等亲硫重金属元素具较好的相关性;三是在拉脊山老虎沟断层破碎带和有褐铁矿化的角砾岩中 Se 含量高达 1mg/kg 以上(表 3),反映拉脊山 Se 富集与硫化物矿化相关。拉脊山地区

是青海重要的早古生代海相火山岩岩浆 Cu-Ni 硫化物成矿带,区内已查明大型 Fe-Ni、Fe-P 矿床和中型 Cu-Au、Cu 多金属矿点(床),以及与岩浆热液有关的 Au 矿(床)^[27]。火山岩 Cu 矿化发育,常以 Cr、Ni 矿化或高背景的超基性或基性岩体产出。Cu、Ni 矿化以硫化物为主,Au 矿化的原生载金矿物也主要为硫化物,尤以黄铁矿、毒砂为主。拉脊山地区普遍存在的硫化物矿化为 Se 富集提供了天然储备优势。

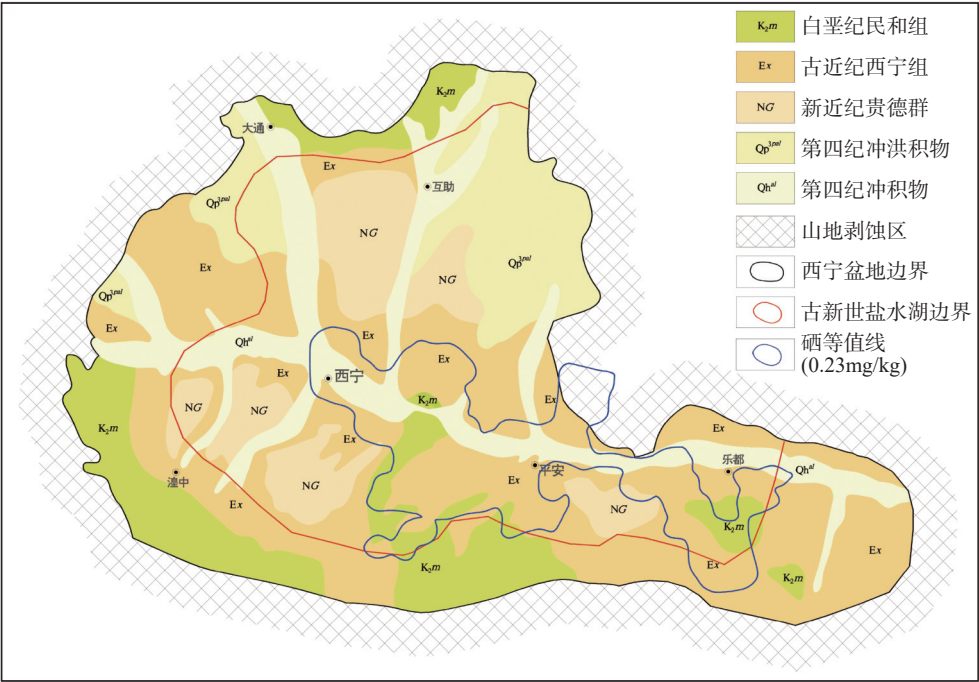


图3 西宁盆地富硒区与古咸水湖、盆地间的空间制约示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spatial constraints between the Se-enriched area of Xining Basin and the ancient saline lake-basin.

表 3 拉脊山主要岩性及风化物 Se 含量统计

Table 3 Statistics of Se content of main lithology and weathered materials in Laji Mountain.

介质	Se 含量 (mg/kg)							
	玄武岩 (n=25)	安山岩 (n=4)	凝灰岩 (n=6)	角砾岩 (n=2)	灰岩 (n=7)	砂岩 (n=3)	破碎带 (n=1)	褐铁矿化角砾岩 (n=1)
岩石	0.12	0.09	0.08	0.08	0.06	0.24	1.08	1.25
残积物	0.24	0.12	0.12	0.21	0.20	0.44	1.19	0.61
土壤	0.30	0.24	0.22	0.23	0.30	0.37	0.84	0.47

在拉脊山支沟老虎沟一带按不同岩性采集的岩石、残积物和土壤协同样数据显示 (图 2, 表 3), 中基性火山岩分布区呈现由岩石—残积物—土壤 Se 含量逐步升高, 土壤 Se 含量可达原岩 Se 的 2 倍以上。反映在表生地质作用下, 介质粒度变细和有机质含量增高也是该区高 Se 土壤形成的主要原因。

综上, 拉脊山土壤 Se 高值区形成原因有两个: 一是普遍发生硫化物矿化的火山岩为土壤提供了大量 Se 源, 在硫化物矿化地段形成高 Se 土壤; 二是土壤有机质对 Se 的强吸附作用, 使 Se 在表层土壤二次富集, 形成富 Se 土壤。

3.2.2 达坂山区

达坂山富 Se 带也是硫化物矿化形成的富硒土地。达坂山区富硒土地 Se 处于 0.30 ~ 0.71mg/kg; 重金属 Hg、Pb 属低背景, 均低于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618—

2018) 风险筛选值; Cu 存在 4 个点位超筛选值, 占比为 0.1%。用祁连山铜矿附近布设的土壤剖面来追溯 Se 源。祁连山铜矿区位于中祁连山前寒武系中央隆起带与北祁连山中段加里东褶皱带之接壤处, 二者以大坂山深大断裂为界。区域出露地层主要有三叠系西大沟组的砂岩, 二叠系大黄沟组的砂岩、泥岩及页岩和窑沟组的砂岩、粉砂岩, 志留系肮脏沟组的砂岩、板岩夹安山岩等。土壤剖面元素含量曲线及底泥含量图 (图 4) 显示, 在祁连山铜矿上游 2km 处土壤 Se 呈上升趋势 (Se 含量 0.4mg/kg); 当靠近铜矿核心时, 土壤 Se、Cu、S 含量急剧上升 (Se 含量 12.6mg/kg, Cu 含量 4146mg/kg, S 含量 5988mg/kg), Se、Cu、S 呈高度正相关; 到铜矿下游 1km 处, Se 含量急剧降低 (Se 含量 0.74mg/kg)。底泥 Se 含量变化与土壤相似, 在矿区附近 Se 达到极值 9.49mg/kg, 矿区下游底泥 Se 含量较上游高出 3 ~ 10 倍, 指示矿区



图4 达坂山区土壤 Se、Cu 和 S 元素含量变化图

Fig. 4 Changes of Se, Cu and S contents of soil in Daban Mountain.

附近的 Se 随水流向下游迁移。

为进一步探寻达坂山富 Se 成因机理中有机碳的吸附贡献, 对比区内 Se-S、Se-Cu、Se-C_{org} 的相关性, 可得出 Se-Cu>Se-S>Se-C_{org} 的特征 (表 4), 而 Se 与 C_{org} 的相关系数较低, 且不显著。由此推断, 达坂山处土壤中 Se 主要来源于硫化物矿化。

3.3 青海湖北部硒富集特征

青海湖北部土壤 Se 主要在沙柳河与哈尔盖河间富集。此区域出露志留系花岗岩体, 伴有托赖岩群变质岩和二叠系砂岩、灰岩、碎屑岩。地貌为中低山丘陵; 土壤类型为高山草甸土; 质地表现为表土黑壤土, 心土黑粉砂质壤土, 发育有致密的泥炭层; 呈植被覆盖度高、土层厚、有机质高的特征。富硒土地 Se 含量处于 0.30 ~ 0.59mg/kg; Hg、Pb、As、Cd、Cr、Cu、Zn、Ni 等均低于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618—2018) 风险筛选值。

用区内采集的岩石、水系沉积物、土壤介质 Se 与拉脊山和西宁盆地比对分析 (表 5), 青海湖北部由

表 4 土壤 Se 与相关元素相关性分析

Table 4 Correlation analysis of Se in soil with related elements.

元素	Se	S	Cu	C _{org}
Se	1			
S	0.88**	1		
Cu	0.98**	0.79**	1	
C _{org}	0.01	0.12	0.05	1

注: “**”表示 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。

岩石—水系沉积物—土壤呈现了 Se 急剧升高的特征, 尤其水系沉积物中较原岩增加了近 3 倍, 推断水系沉积物是 Se 运移的关键介质。其后再经土壤熟化, 表生富集将 Se 含量再次提升, 直至接近岩石 Se 含量的 5 倍。由此推断, 青海湖北部土壤 Se 在岩石—水系沉积物—土壤过程中逐步富集, 在粒度变细和有机质增加的过程中形成 Se 富集。这一富集行为与西宁盆地刚好相反, 分别反映了原岩的主导富集 (原岩>水系沉积物>土壤) 和表生的主导富集

表 5 不同地区不同介质中 Se 含量统计

Table 5 Statistics of Se content in different media of different regions.

介质	青海湖北部		拉脊山		西宁盆地	
	样品数量 (件)	Se 含量 (mg/kg)	样品数量 (件)	Se 含量 (mg/kg)	样品数量 (件)	Se 含量 (mg/kg)
岩石	18	0.07	51	0.15	24	0.67
水系沉积物	14	0.20	51	0.25(残积物)	24	0.61
土壤	22	0.34	51	0.29	24	0.47

(土壤>水系沉积物>原岩)。

4 富硒土地资源生态潜力初探

富硒土地可培育富硒农产品, 可将特色土地资源的功能转化到人群健康上。青海东部 Se 与人体 Se 含量调查显示, 相对低 Se 环境, 富 Se 环境生活的人群其食用的粮食 Se、人发 Se 均具有较高水平, 青海东部富 Se 环境产生了较明显的健康效应^[25]。基于青藏高原北缘存在的三种 Se 富集类型, 结合地方农牧业及人群健康现状, 探讨不同成因类型富硒土地的潜力, 科学指导富硒资源成果转化。

青藏高原北缘干旱咸水湖沉积型富硒土地, 属物源区 Se 经构造气候再次改造沉积类型, 由于干旱咸水环境将一套富含 Se、Mg、Sr、Ca 的盐类物质, 以及低 Cd、Cr、Hg、Pb、As 等有害物质聚集到盆地中的 Se 类型。具有老地层供 Se、新地层储 Se、岩石风化释放 Se、表土聚集 Se、农作物转化 Se、人体代谢储备 Se 的生物链循环序列。相比硫化物矿化型富硒土地, 它具有无重金属富集的优越性; 相比有机质吸附型, 它具有沉积稳定、生物有效性高的优势。加之, 碱性土壤进一步提升了 Se 的有效性。这类富硒土地均处于盆地腹地, 地形区位优势, 具有较大的生态利用潜力。

硫化物矿化型富硒土地属物源区本地富集, 伴生有 Cu、Ni、Fe、Mn、As 等重金属。该类型富硒土地在开发利用方面具有两方面的局限: 一是因其伴生重金属, 不利于绿色产品的开发。当然, 因 Se 与重金属间具拮抗作用, 使得农产品重金属可能不超标, 需做好产品的监测评价, 研究重金属的有效性, 提出可行的绿色种植技术指南; 二是该类型富硒土地多处于高山林草区, 高寒冷凉的气候对农产品的生长造成制约, 可关注野生中药材、林下经济等产业。这类富硒土地有一定重金属伴生, 并且地形区位较差, 生态利用潜力有限。

有机质吸附型富硒土地属源地富集, 且只存在于表土层^[26], 有机质吸附作用使得 Se 的活性降低^[27-28], 在青藏高原草原区具一定使用价值。一方面可为畜牧业提供优质草资源, 增加草料营养, 强健畜禽机能; 另一方面削弱土壤、水体、大气降尘等介质高氟背景对草料的影响, 抵御地质高背景下 Cd、As、Pb 等临界或超标带来的生态风险, 提高农畜产品输出的安全指数。如何最大化发挥 Se 的价值, 还需探寻有机质总量的平衡阈值, 使有机质作为有机-无机复合体黏粒并吸附阴离子^[29-30], 不断释放 Se, 为草料生长所吸收。另外, 还可使有机质型 Se 向亲水性的有机酸结合态和富里酸结合态转化, 增加有效 Se 的供应。这些工作还需结合土壤理化性质和土地利用类型做进一步的试验研究。可以说, 这类富硒土地地处林草地区, 地形有一定优势, 有效硒也有提升调控空间, 生态利用潜力有待进一步挖掘。

5 结论

通过青藏高原北缘土壤 Se 及相关元素的特征分析, 总结出研究区存在三种富硒土地类型, 分别为: 干旱咸水湖沉积型、硫化物矿化型和有机质吸附型。其中, 干旱咸水湖沉积型 Se 富集具有 Se 源沉积稳定、总量 Se 适中、有效 Se 高、重金属低、多种有益元素复合、处于谷地易农易耕等优势, 是该地区乃至西北地区生态潜力较大的类型; 硫化物矿化型富硒土地存在重金属高背景的特征, 有一定生态风险, 可在重金属监测安全的前提下发展林下经济和野生中草药产业, 生态利用潜力有限; 有机质吸附型富硒土地多处于林草区, Se 具有增加草料营养、抵御重金属风险的双重作用, 可通过探寻有机质在吸附-释放过程中的平衡条件, 来调控 Se 发挥最大生态效应。基于服务生态潜力实现的目的, 建议重点围绕干旱咸水湖沉积型富硒土地区域, 从硒的富集释放机制方面开展深入研究, 为生态价值转化提供科学依据。

Genetic Types and Ecological Potential of Selenium-Enriched Land in the Northern Margin of the Qinghai—Xizang Plateau

ZHANG Yafeng^{1,2,3}, SHI Zeming^{1*}, MIAO Guowen^{2,3*}, XU Guang^{2,3}, JI Bingyan³, MA Ying^{2,3}, YAO Zhen^{2,3}

- (1. School of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. The Fifth Institute of Geological and Exploration of Qinghai Province, Xining 810099, China;
3. Qinghai Engineering Research Center of Selenium-Enriched Resource Utilization, Xining 810099, China)

HIGHLIGHTS

- (1) There are three Se-enriched types in the Se-enriched land on the northern margin of the Qinghai—Xizang Plateau: arid saline lake sedimentary, sulfide mineralization, and organic matter adsorption.
(2) The sedimentary Se-enriched land in the arid saline lake has the characteristics of stable Se source, moderate total amount of Se, high effective amount, low heavy metals, and a variety of beneficial elements.
(3) The sedimentary Se-enriched land in arid saline lakes can produce relatively high-quality Se-enriched agricultural products, which have high utilization value and great ecological potential.

ABSTRACT: The study of the genesis type of selenium (Se)-enriched land found in the Qinghai—Xizang Plateau can provide a scientific basis for the construction of the research, development and utilization system of Se resources on the Qinghai—Xizang Plateau and has practical significance for improving the risk of low Se intake on the Qinghai—Xizang Plateau. On the basis of summarizing the characteristics and genesis types of the main natural Se-enriched lands in China, the distribution characteristics of Se and related elements are analyzed through the coordinated monitoring of soil and rock, and the conclusion is that there are three types of Se-enriched lands in the northern margin of the Qinghai—Xizang Plateau, namely, arid saline lake sedimentary type, sulfide mineralization type and organic matter adsorption type. (1) In the sedimentary Se-enriched land of the arid saline lake, the Se content ranges from 0.30 to 1.16mg/kg, and the contents of heavy metals are below the risk control screening values. Spatially, Se overlaps and co-enriches with beneficial elements such as Sr, Mg, Fe, Ca, and Mo. Se is derived from the red mudstone weathering of the Xining Group, which has the advantages of stable Se source sedimentation, moderate total amount of Se, low heavy metals, and composite of a variety of beneficial elements. It is a type of Se with greater ecological potential in the northern margin of the Qinghai—Xizang Plateau and even the entire northwest region. (2) In sulfide mineralized Se-enriched land, Se content ranges from 0.30 to 2.22mg/kg; Ni, Cd, Cr and As exceed screening values in 0.2%–2.4% of the samples; As exceeds control values in 0.1% of the samples. The land has high natural heavy metal backgrounds, posing ecological risks and limitations of high-altitude and cold climate, which can be used to develop the forest-based economy and wild Chinese herbal medicine industry under monitoring. (3) In the organic matter adsorption type Se-enriched land, Se content ranges from 0.30 to 0.59mg/kg, and Ni, Cd, Cr and As do not exceed the standard. Se has the dual effects of increasing forage nutrition and resisting heavy metal absorption, so the maximum ecological effect of Se can be regulated by further exploring the equilibrium conditions of organic matter in the process of adsorption-release of Se.

KEY WORDS: Qinghai—Xizang Plateau; Se-enriched land; arid saltwater lake sedimentation; ecological potential

参考文献

- [1] 唐志敏, 湛龙, 张晓东, 等. 基于生态位理论与 AHP-TOPSIS 模型的福建长汀县富硒土地资源综合评价[J]. 岩矿测试, 2024, 43(4): 592–602.
Tang Z M, Zhan L, Zhang X D, et al. Comprehensive evaluation of selenium-enriched land resources in Changting County, Fujian Province based on niche theory and AHP-TOPSIS model[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2024, 43(4): 592–602.
- [2] Hilal T, Killam B Y, Grozdanovic M, et al. Structure of

- the mammalian ribosome as it decodes the selenocysteine UGA codon[J]. *Science*, 2022, 376(6599): 1338–1343.
- [3] Dalia A M, Loh T C, Sazili A Q, et al. Influence of bacterial organic selenium on blood parameters, immune response, selenium retention and intestinal morphology of broiler chickens[J]. *BMC Veterinary Research*, 2020, 16(1): 365.
- [4] Zhang W X, Li Y, Deng H Y, et al. Effects of organic selenium on growth properties, selenium absorption and utilization, antioxidant activity and immunity in weaning piglets[J]. *Food and Nutrition Sciences*, 2020, 11(5): 385–395.
- [5] 王凌霄, 余涛, 李凤嫣, 等. 土壤中硒的生物有效性表征方法及影响因素研究进展[J]. *岩矿测试*, 2023, 42(2): 239–253.
- Wang L X, Yu T, Li F Y, et al. A summary of research progress on bioavailability assessment method of selenium in soil and its influencing factors[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2023, 42(2): 239–253.
- [6] 成晓梦, 吴超, 孙彬彬, 等. 浙江中部典型黑色岩系分布区土壤-作物富硒特征与重金属风险评价[J]. *现代地质*, 2021, 35(2): 425–433.
- Cheng X M, Wu C, Sun B B, et al. Selenium-rich characteristics and risk assessment of heavy metals in soil and crop in a typical black shale area of the central part of Zhejiang Province, China[J]. *Geoscience*, 2021, 35(2): 425–433.
- [7] 张建东, 王丽, 雒昆利, 等. 安康南部大巴山区硒过剩土壤分布及来源研究[J]. *土壤*, 2022, 54(4): 847–855.
- Zhang J D, Wang L, Luo K L, et al. Distribution and source of selenium excess soils in Daba mountain area of southern Ankang[J]. *Soils*, 2022, 54(4): 847–855.
- [8] 王玮, 王政, 孔祥意, 等. 基于 INLA-SPDE 模型的区域土壤硒元素空间预测及富硒区优选[J/OL]. *环境科学* (2024-08-20) [2025-03-07]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202405093>.
- Wang W, Wang Z, Kong X Y, et al. Spatial prediction of selenium in soils by using INLA-SPDE approach and the delimitation of selenium-enriched land with low heavy metals pollution risk[J/OL]. *Environmental Science* (2024-08-20) [2025-03-07]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202405093>.
- [9] 于龙龙, 吴磊, 张志敏, 等. 富硒区土壤养分质量评价: 以陕西省紫阳县闹热村为例[J]. *现代地质*, 2021, 35(4): 923–930.
- Yu L L, Wu L, Zhang Z M, et al. Evaluation of soil nutrient quality in selenium-rich area: A case study of Naore Village, Ziyang County, Shannxi Province[J]. *Geoscience*, 2021, 35(4): 923–930.
- [10] 陈继平, 任蕊, 王晖, 等. 关中塬土地地区土壤 pH 变化对硒形态及有效性的影响[J]. *西北地质*, 2020, 53(1): 254–260.
- Chen J P, Ren R, Wang H, et al. Effect of Lou soil pH change on selenium forms and availability[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(1): 254–260.
- [11] 邹山进洪. 闽侯县表层土壤及农产品硒含量特征[J]. *物探与化探*, 2023, 47(1): 247–256.
- Zou S J H. Selenium contents in surface soil and agricultural products in Minhou County[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2023, 47(1): 247–256.
- [12] 张亚峰, 姬丙艳, 沈晓, 等. 西宁盆地咸水湖相沉积型富硒土壤的形成机理及意义[J]. *物探与化探*, 2023, 47(2): 470–476.
- Zhang Y F, Ji B Y, Shen X, et al. Formation mechanisms and significance of saline-lacustrine Se-rich soils in the Xining Basin[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2023, 47(2): 470–476.
- [13] 刘熙会, 张小平, 李倩倩, 等. 青藏高原地区大骨节病的流行特征及致病因素探究[J]. *环境化学*, 2022, 41(4): 1137–1147.
- Liu X H, Zhang X P, Li Q Q, et al. Epidemiological trend and pathogenic factors of KBD in Qinghai—Xizang Plateau region[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(4): 1137–1147.
- [14] 王婧, 李海蓉, 杨林生. 青藏高原大骨节病流行区环境、食物及人群硒水平研究[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(10): 1677–1686.
- Wang J, Li H R, Yang L S. Selenium levels in the environment, food, and human hair in Kashin-Beck Disease endemic areas of the Qinghai—Xizang Plateau[J]. *Progress Neography*, 2020, 39(10): 1677–1686.
- [15] 周殷竹, 刘义, 王彪, 等. 青海省囊谦县农耕区土壤硒的富集因素[J]. *地质通报*, 2020, 39(12): 1952–1959.
- Zhou Y Z, Liu Y, Wang B, et al. Soil selenium enrichment factors in agricultural area of Nangqian County, Qinghai Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(12): 1952–1959.
- [16] 奚小环, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 基于大数据的中国土壤背景值与基准值及其变化特征研究——写在《中国土壤地球化学参数》出版之际[J]. *物探与化探*, 2021, 45(5): 1095–1108.
- Xi X H, Hou Q Y, Yang Z F, et al. Big data based studies of the variation features of Chinese soil's background value versus reference value: A paper written on the occasion of soil geochemical parameters of China's publication[J]. *Geophysical Prospecting and Geochemical Prospecting*, 2021, 45(5): 1095–1108.
- [17] 郑长远, 雷宏武, 崔银祥, 等. 西宁盆地南部天然 CO₂ 泄漏和浅部含水层响应[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(6): 223–232.
- Zheng C Y, Lei H W, Cui Y X, et al. Natural CO₂ leakage and responses of shallow aquifers in the

- southern Xining Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(6): 223–232.
- [18] 胥彪. 晚中新世西宁盆地沉积演化及环境变化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- Xu B. Late Miocene sedimentary evolution and environmental changes in Xining Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [19] 马强, 苗国文, 朱明霞, 等. 干旱咸水湖沉积型富硒土地的划定及开发利用探讨——以青海省洪水泉为例[J/OL]. 物探与化探 (2024-02-14) [2025-03-07]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1906.P.20250214.1041.002>.
- Ma Q, Miao G W, Zhu M X, et al. Discussion on delineation and exploitation of selenium-rich sedimentary land in arid saline lake——Take the case of Hongshuiquan in Qinghai Province [J]. *Geophysical Prospecting and Geochemical Prospecting* (2024-02-14) [2025-03-07]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1906.P.20250214.1041.002>.
- [20] 康弋, 夏炎, 杜倩倩, 等. 洛阳市农田土壤中硒时空变化规律及其生态效应研究[J/OL]. 中国地质 (2024-01-20) [2025-03-07]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.p.20250117.1708.016>.
- Kang G, Xia Y, Du Q Q, et al. Spatial and temporal variation of selenium in farmland soil and its ecological effect in Luoyang City [J]. *Geology in China* (2024-01-20) [2025-03-07]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.p.20250117.1708.016>.
- [21] 吉恒召, 易志强, 李娇艳等. 豫西南寒武系黑色岩系中富硒岩石地球化学特征及成因[J]. *现代矿业*, 2020, 36(6): 13–17, 25.
- Ji H Z, Yi Z Q, Li J Y, et al. Geochemical characteristics and genesis of selenium-rich rocks in the Cambrian black series in southwest Henan Province[J]. *Modern Mining*, 2020, 36(6): 13–17, 25.
- [22] 蒋天宇, 余涛, 侯青叶, 等. 基于 DGT 技术对土壤硒生物有效性及其影响因素的分析[J]. *现代地质*, 2021, 35(3): 637–646.
- Jiang T Y, Yu T, Hou Q Y, et al. Analysis of soil selenium bioavailability and its influencing factors based on DGT technology[J]. *Geoscience*, 2021, 35(3): 637–646.
- [23] 王美华. 浙西典型石煤矿山周边耕地富硒土壤地球化学特征及影响因素[J]. *现代地质*, 2022, 36(3): 941–952.
- Wang M H. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium-enriched soils in cultivated land around typical stone coal mines in western Zhejiang[J]. *Geoscience*, 2022, 36(3): 941–952.
- [24] 曹锦山, 王伟, 李五福, 等. 青海拉脊山东段峡门蛇绿混杂岩带的物质确定及其构造意义[J]. *地质与资源*, 2022, 31(6): 716–728.
- Cao J S, Wang W, Li W F, et al. Determination of the Xiamen ophiolite melange in the eastern section of Laji Mountain, Qinghai Province: Tectonic implication[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(6): 716–728.
- [25] 张亚峰, 苗国文, 马强, 等. 青海平安富 Se 土壤区环境及人体 Se 量调查[J]. *地球与环境*, 2019, 47(5): 717–721.
- Zhang Y F, Miao Q W, Ma Q, et al. Investigations of the selenium content in human and the environment of Se-enriched soils in the Pingan district, Qinghai[J]. *Earth and Environment*, 2019, 47(5): 717–721.
- [26] 来素涵, 孙阳阳, 李帅, 等. 土壤硒与有机质的作用机制及其对生物有效性的研究进展[J]. *中国无机分析化学*, 2025, 15(2): 218–230.
- Lai S H, Sun Y Y, Li S, et al. Research progress on the mechanism of action of soil selenium and organic matter and its bioavailability[J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2025, 15(2): 218–230.
- [27] 钟信林. 寒区黑土有机质组成与演化过程及其富硒机制研究——以东北海伦为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2022.
- Zhong X L. Study on organic matter composition, evolutionary process and its significance of selenium enrichment of black soil in cold regions: A case study of Hailun, northeast China[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2022.
- [28] 阳召文, 袁永强, 顾尚义, 等. 贵州黑色岩系和煤系地层发育的富硒黄壤中硒的空间分异特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2024, 43(4): 809–818.
- Yang Z W, Yuan Y Q, Gu S Y, et al. Spatial differentiation characteristics of selenium in Se-rich yellow soils developed from black shale and coal bearing formations in Guizhou Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2024, 43(4): 809–818.
- [29] 肖凯琦, 徐宏根, 李毅, 等. 湖南省龙山县耕地土壤硒含量特征及其影响因素[J]. *环境化学*, 2024, 43(2): 464–474.
- Xiao K Q, Xu H G, Li Y, et al. Characteristics and influencing factors of soil Se content in cultivated land in Longshan County, Hunan Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(2): 464–474.
- [30] 周欣, 刘强, 丁小琴, 等. 江苏海安里下河平原地区富硒土地资源评价及开发潜力[J/OL]. *现代地质* (2024-03-09) [2025-03-07]. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2024.023>.
- Zhou X, Liu Q, Ding X Q, et al. Evaluation and development potential of selenium-rich land resources in Lixiahe Plain of Hai'an City, Jiangsu[J/OL]. *Geoscience* (2024-03-09) [2025-03-07]. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2024.023>.