

doi: 10. 11720/wtyht. 2023. 1325

张亚峰,姬丙艳,沈骁,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. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1325>

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. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1325>

西宁盆地咸水湖相沉积型富硒土壤的形成机理及意义

张亚峰¹, 姬丙艳², 沈骁¹, 姚振¹, 马强¹, 王帅¹, 贺连珍¹, 韩伟明¹

(1. 青海省第五地质勘查院, 青海 西宁 810099; 2. 青海省第四地质勘查院, 青海 西宁 810000)

摘要:通过对西宁盆地土壤和岩石 Se 的调查分析发现,古近系西宁组和白垩系民和组岩石及发育的土壤中 Se 值最高,是西宁盆地土壤主要的富硒母质。进一步结合西宁盆地退缩过程中的古地理资料,西宁盆地由于干旱炎热的咸水湖相到湿润冷凉的咸水—淡水湖相对应沉积了古近系西宁组和新近系贵德群,Se 在咸水湖边界和干旱炎热的咸水湖相环境的共同作用下,并经地貌、水系等改造,形成了西宁盆地咸水湖相沉积型富硒土壤的现有格局。该类型富硒土壤有重金属低、Se 含量适中、有效 Se 高等优势,具有较好的开发利用价值。

关键词:富硒土壤;咸水湖沉积;西宁盆地

中图分类号: P66

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)02-0470-07

0 引言

硒(Se)是一种稀有分散元素,在地壳中丰度为 $(0.05\sim0.09)\times10^{-6}$,以有机或无机形态广泛分布在岩石、土壤、地下水、大气和动植物体内,并通过不同介质间的迁移转化实现 Se 的地球化学循环^[1]。Se 在各类岩石中分布极不均匀,据文献统计^[2-3],变质岩中 Se 含量最高,处于 $(0.031\sim0.131)\times10^{-6}$ 之间;岩浆岩中 Se 含量较低,一般为 $(0.059\sim0.108)\times10^{-6}$;沉积岩中 Se 含量处于中间水平,一般为 $(0.028\sim0.118)\times10^{-6}$ 。我国土壤 Se 含量多处于 $(0.1\sim2.0)\times10^{-6}$ 之间,平均值为 0.2×10^{-6} ^[2]。

我国有 72% 的国土面积存在低 Se 风险,由东北向西南延伸形成一条低硒带,青海处于这条低硒带的边缘^[4-5],面临缺 Se 风险。已有研究表明^[6],土壤中的 Se 主要来源于成土母质及人为因素,其中成土母质是最重要的来源。张亚峰等^[7]对青海东部富硒土壤研究表明,青海东部属于高 Se 环境生态系统,土壤水溶态 Se 高于全国平均值。马强等^[8]对青海东部富硒土壤成因研究认为,古近系西宁组的红

层是当地土壤 Se 富集的主要载体。笔者通过系统研究西宁盆地的土壤、岩石及岩相古地理特征,提出了盆地土壤富硒机理,对科学评价富硒土壤资源、指导富硒产业开发具有重要意义,同时可对研究相似成因类型的富硒土壤提供借鉴。

1 西宁盆地地质概况

西宁盆地位于青海省东北部,以近 EW 向分布在拉脊山以北,西以日月山、北以大阪山为界,东部与兰州盆地相连,面积约 4 600 km²。黄河支流湟水河从西宁盆地流过,切穿整个新生代地层。盆地基底和周边山地基岩主要有震旦系千枚岩、灰岩,寒武系玄武岩、安山岩,奥陶系安山岩、火山碎屑岩,志留系砾岩、砂岩,三叠系板岩及加里东花岗岩类^[9]。盆地内新生界厚度由南向北逐步变薄,与下伏基岩呈不整合接触。古近系地层为西宁组,时代为古新世—渐新世,岩性主要为棕红色泥岩、粉砂岩、砂岩等,中部含石膏沉积^[9-11]。新近系地层为贵德群,时代为中新世,岩性主要为棕红色泥岩、粉砂岩、砂岩、灰色砾岩等,石膏层未沉积^[9,12](图 1)。

收稿日期: 2022-06-24; 修回日期: 2022-10-13

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”(10)

第一作者: 张亚峰(1986-),女,高级工程师,地球化学专业,从事富硒资源研究及应用领域的相关工作。Email:371221815@qq.com

通讯作者: 姬丙艳(1980-),男,正高级工程师,地球化学专业,从事生态地球化学研究工作。Email:195356614@qq.com

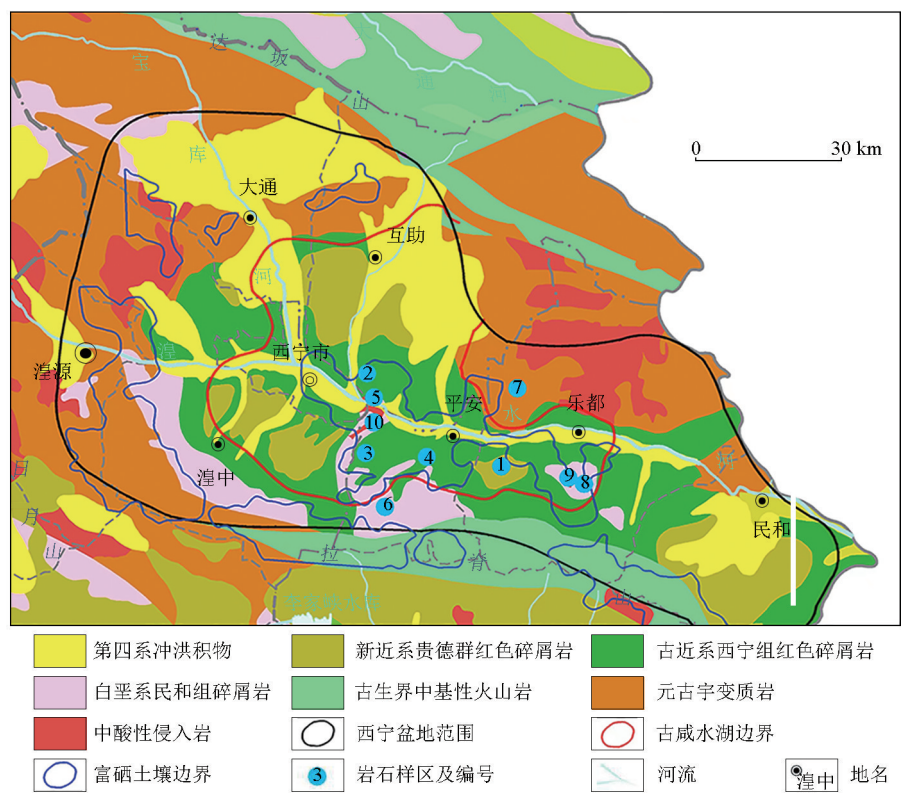


图 1 西宁盆地地质简图
Fig. 1 Geological map of the Xining Basin

2 数据来源

依据土地质量地球化学调查取得的土壤、岩石 Se 含量数据,统计分析各地层区岩石、土壤 Se 含量,研究其分布特征。其中,西宁盆地内富硒土壤圈定使用的为 1:250 000 多目标区域地球化学调查数据,土壤采样密度为 1 个点/4 km²,依据结果划定平安—乐都连片富硒土壤 840 km²(图 1)。为更精确研究西宁盆地富硒土壤的分布和成因,在平安—乐都富硒区按 4~8 个点/km² 的采样密度进行土壤加密调查,共获取 5 486 个土壤样点,覆盖盆地腹地主要耕地和林草地共 1 500 km²。针对盆地内出露的古元古界东岔沟组砂岩、长城系青石坡组砂岩、奥陶系二长花岗岩、志留系花岗闪长岩、白垩系民和组砂岩泥岩、古近系西宁组泥岩、新近系贵德群泥岩共 7 种代表性地层岩石,采集了 10 件岩石样(图 1)。土壤样采集采取“梅花法”,每个设计点以 1 个主点和 4 个副点的表层 0~20 cm 土样进行组合,用四分法留取 1 kg 装入布袋中进行阴干晾晒,后将晒干的土样过 20 目尼龙筛,并取筛下物 100 g 用玛瑙球磨机研磨至 200 目待测。岩石样采集用地质锤在同一露头上敲击新鲜岩石面,多点采集岩石小块,聚合成一

个样,后对样品进行破碎、缩分,过 160 目筛后取筛下物 50 g 研磨至 200 目待测。分别称取加工好的土壤和岩石样各 0.5 g 在 750 ℃ 下艾斯卡半熔,热水提取后分取提取液,加热酸化,硼氢化钾还原,原子荧光法测定 Se。样品测试严格按照土地质量地球化学评价规范(DZ/T 0295—2016)^[13] 要求。分析数据原始报出率为 100%,在测试中随机插入国家一级标准物质同时测定,计算各项技术指标的原始一次性合格率均为 100%。另外抽取 6% 的样品做重复性分析,原始一次性合格率为 100%。综合判断认为,测试数据质量可靠,满足数据处理及研究需要。

3 西宁盆地 Se 分布特征

3.1 土壤 Se 含量与分布特征

将获取的土壤调查数据按所处地质单元分区统计得出表 1。各地质单元内发育形成的土壤 Se 含量由高到低依次为:古近系>白垩系>第四系>元古宇>新近系>侵入岩>古生界。基于古近系发育的土壤 Se 均值为 0.33×10⁻⁶,属区内最高值,变异系数最高(1.19),指示 Se 存在局部富集。基于白垩系发育的土壤 Se 均值为 0.29×10⁻⁶,处于次高值。第四

表 1 西宁盆地不同地质单元土壤硒含量统计

Table 1 Statistics of selenium content of soil in different geological units in the Xining Basin

地质单元	样品数	平均值/ 10^{-6}	离差/ 10^{-6}	变异系数
第四系	2587	0.28	0.14	0.51
古近系	2074	0.33	0.39	1.19
新近系	13	0.22	0.14	0.63
白垩系	472	0.29	0.25	0.86
古生界	67	0.15	0.05	0.33
元古宇	189	0.26	0.13	0.48
侵入岩	49	0.20	0.09	0.47
全区	5486	0.28	0.27	0.97

系发育的土壤 Se 均值为 0.28×10^{-6} ,也处于较高水平。基于古生界发育的土壤 Se 均值为 0.15×10^{-6} ,处于最低水平。将土壤数据按同一时期不同沉积环境进行分类统计,对比西宁盆地腹地和边缘分布的白垩系民和组,前者在干旱的咸水湖环境下沉积形成的土壤 Se 均值为 0.26×10^{-6} ,后者在陆地环境下

沉积形成的土壤 Se 均值为 0.20×10^{-6} 。基于以上两点说明古近系是 Se 富集的有利地层,干旱的咸水湖相是 Se 富集的有利沉积环境。

依据马强等^[14]关于青海省富硒土壤标准探讨中推荐的青海省碱性富硒土壤硒含量值须大于(等于) 0.23×10^{-6} 的结论建议,本文按此推荐值来划定富硒区域,揭露研究区硒的沉积机理。将西宁盆地土壤调查获取的数据使用 Explorer 软件编制 Se 含量分布图(图 2)。图面显示,西宁盆地富硒土壤呈不规则状分布在湟水谷地及其两侧丘陵地区,富硒土壤核心区处于盆地腹地。富硒区与古近系西宁组地层在空间上高度吻合,尤其盆地北部红崖子沟蔡家附近和南部拉树岭—大寨子一带是西宁组地层的边界,同时也是土壤 Se 高低值区分界线;平安—高店一线以南出露地层主要为新近系贵德群,其岩石风化形成的土壤 Se 含量低;曹家堡北部、大庄廓、上槽子等地均为黄土覆盖区,形成低 Se 土壤区。

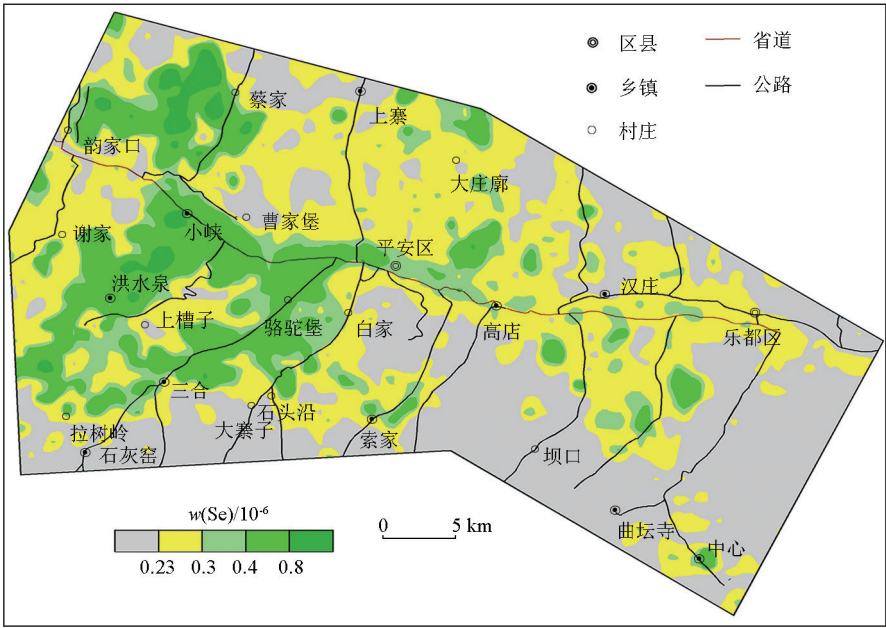


图 2 西宁盆地土壤硒分布

Fig. 2 Distribution of soil selenium in the Xining Basin

3.2 岩石 Se 含量特征

表 2 列出了西宁盆地内 7 个代表性地层岩石的 Se 含量值,由于每类岩石取样数据较少,故只对数据的变化趋势进行对比分析。数据大致呈现古近系西宁组>白垩系民和组>元古宇岩石>酸性岩。区内 3 处古近系西宁组红色泥岩中 Se 含量均处于高值,在 $(0.64 \sim 0.95) \times 10^{-6}$ 之间;其次为白垩系民和组,Se 值也较高;新近系贵德组红色泥岩、长城系青石坡组青灰色砂岩和古元古界东岔沟组石英砂岩中 Se 含量相当,区间值为 $(0.13 \sim 0.15) \times 10^{-6}$,处于次低值区;奥陶系二长花岗岩和志留系花岗闪长岩中

Se 含量在 $(0.04 \sim 0.05) \times 10^{-6}$ 范围内,属盆地内最低。再者,对比不同区位分布的白垩系民和组 Se 值发现,在平安区小峡镇和平安区石灰窑地区岩石 Se 含量差异较明显,推测岩石 Se 受盆地内外沉积环境差异所致。进一步结合西宁盆地古地理及沉积相资料^[15-17],即平安区石灰窑一带处于西宁盆地边缘,沉积环境属陆相沉积,而平安区小峡一带处于西宁盆地腹地,沉积环境属咸水湖相沉积,干旱的咸水湖沉积环境较湿润的陆相沉积环境更有利于 Se 的富集沉淀。

表 2 西宁盆地不同地层岩石 Se 含量

Table 2 Selenium content of rocks in different strata in the Xining Basin

序号	取样地区	地层	岩性	Se 含量值/10 ⁻⁶
1	乐都区高店南	新近系贵德群	红色泥岩	0.14
2	互助县北硝沟	古近系西宁组	红色泥岩	0.87
3	平安区洪水泉	古近系西宁组	红色泥岩	0.64
4	平安区石沟沿	古近系西宁组	红色泥岩	0.95
5	平安区小峡镇	白垩系民和组	棕红色砂岩	0.73
6	平安区石灰窑	白垩系民和组	棕红色泥岩	0.20
7	乐都区汉庄北	古元古界东岔沟组	石英砂岩	0.13
8	乐都区吴家台	长城系青石坡组	青灰色砂岩	0.15
9	乐都区晁家南	奥陶系二长花岗岩	二长花岗岩	0.05
10	平安区白草湾	志留系花岗闪长岩	花岗闪长岩	0.04

4 西宁盆地土壤 Se 影响因素

综合土壤和岩石中 Se 的分布特征,其一可确定古近系西宁组地层分布是土壤 Se 富集的首要制约因素,土壤继承了西宁组岩石成土母质的富硒特性;其二图 1 显示富硒土壤的分布同时受水系展布影响,西宁组岩石风化碎屑物在湟水河支流和主干水流冲刷搬运作用下,形成区域上的扩张和延伸,这在湟水河两侧狭长的河谷区表现最为明显,富 Se 土壤沿湟水河流向由小峡向平安镇延伸,并逐步在下游两岸减弱直至消失;其三富硒土壤受沉积环境影响,同一时期咸水湖相干旱沉积环境有利于 Se 的富集,陆相沉积环境不易于 Se 的富集。

5 富 Se 土壤的形成机制

5.1 西宁盆地演化及沉积过程

西宁盆地古近系西宁组在时间上表现为由粗变细的沉积旋回,在始新世中晚期出现大量的石膏盐沉积,石膏盐分布在盆地腹地的大部分地区。而方小敏等^[9]总结野外露头 and 钻孔剖面资料发现,西宁组沉积厚度从昆仑山山前向西宁盆地北缘逐渐变薄,沉积物由砂砾岩向砂岩、泥岩、含石膏泥岩过渡,粒级逐步变细。而对应沉积相显现出由昆仑山前的洪积扇近端沉积,到西宁盆地边缘的远端沉积,直至盆地腹地的干旱咸水湖相沉积变化。古水流指示西宁盆地四周水流向均指向腹地汇集。盆地内沉积的砾石成分表明其来源于昆仑山。那么当西宁组地层沉积时,西宁盆地刚开始受弱挤压呈弯折发育阶段,拉脊山并未隆升,盆地范围较大,气候炎热干旱,伴随强烈的蒸发和大流域盐类离子供给形成了汇集西宁的膏盐层。到中新世贵德群开始沉积时,盆地受到强烈挤压变形,拉脊山开始不断隆升,古水流发生

变化,拉脊山分割西宁盆地呈河湖相沉积环境,后逐步转变为现在的山间盆地格局。

5.2 土壤 Se 富集机理

前述特征表明古新世时期沉积的西宁组岩石及其发育的土壤 Se 均处于最高,故以古新世岩相古地理作为研究 Se 富集机制的基础和重点;而高 Se 的民和组岩石及其发育的土壤成为探寻不同沉积环境下 Se 富集机制的另一方向。图 1 将西宁盆地地质简图与西宁盆地范围、古新世咸水湖边界^[17-18]及富硒土壤分布范围等要素叠加,进一步综合反映盆地 Se 的富集机理。

图面显示,Se 受咸水湖边界控制,富集在咸水湖相沉积形成的西宁组和民和组地层。这一特征在咸水湖南界三合一带和东界乐都东体现最为显著。其次,Se 适宜在干旱炎热的气候条件下富集沉积,而非湿润气候,这一特征在咸水湖盆北部、西南部和南部高店以南分布的湿润气候条件下沉积形成的贵德群地层中表现明显。中新世时期气候趋于湿润,沉积以咸水—淡水湖相沉积为主,Se 并未在此条件下富集^[18-20]。再者,第四系黄土、冲洪积物对土壤 Se 在空间上的展布和浓度进行了最后的表生改造。以曹家堡北部至哈拉直沟一带为例,西宁组之上覆盖有大面积的黄土,低 Se 含量背景的黄土与残坡积物混合成土后土壤 Se 含量也较低;而在西宁市以东经湟水及部分支流沉积改造形成的河流阶地,由于其物源来自高 Se 背景的地层,经水流搬运沉积形成了湟水谷地 Se 高值带;相反在西宁市以西及北部沟谷的河流阶地,其物源广泛又不具备高 Se 背景,故形成土壤 Se 低值区。

总之,从古新世到中新世西宁盆地均为湖相沉积,但沉积环境由咸水湖相逐步向淡水湖相过渡,气候也经历了干旱炎热氧化环境到湿润冷凉的还原环境的转变。在地域、气候、水、河流等共同作用下,形成了现有的盆地富 Se 格局。

6 咸水湖相沉积型富硒土壤的价值意义

近年来,科技工作者在新疆焉耆盆地、甘肃等地^[21-29]也发现了类似西宁盆地成因的富硒土壤,其在盆地构造形成过程中,侏罗系含煤地层成为古近—新近纪、第四纪沉积的主要物源,Se 随之迁移至新生界古近—新近系、第四系盖层中保存至今,形成富 Se 土壤。而在柴达木盆地、天山北坡^[22-23]等地发现的富硒土壤,其物源地层时代更新。柴达木盆地富硒土壤的 Se 主要来自于第四系湖积物,成盐作用、土壤粒度、有机质含量等对 Se 的迁移富集具有显著影响。天山北坡乌沙地区土壤 Se 也来自第四系河湖相沉积,干旱、碱性及氧化环境共同促成了 Se 的富集。

西北地区富硒土壤形成的共同点是其物源多为盐(咸)水湖相沉积物,在气候干旱的咸水湖盆退缩条件下,盐类物质富集沉淀,加上地质构造的演化改造,形成咸水湖相沉积型富 Se 土壤。相比硫化物型、火山岩型富 Se 土壤,它具有硒资源沉积稳定、硒含量适中、无重金属富集、处于湖盆谷地适宜耕作、土壤呈碱性有效 Se 高等特点,具有较好的开发利用价值^[30-36]。当然,此类土壤因碱性较强,存在不同程度的盐渍化等问题值得进一步研究。

7 结论

西宁盆地咸水湖相沉积是青海东部富 Se 土壤形成的根本原因,在地层、沉积环境及咸水湖共同影响下,经古新世干旱炎热的咸水湖相沉积逐步向中新世湿润冷凉的咸水—淡水湖相过渡,在地域、气候、水等共同作用下,Se 沉积在古近系西宁组地层中,并经现代河流搬运改造形成了目前土壤 Se 的分布格局。这种成因的富硒土壤在我国西北地区较为多见,具有较好的开发利用价值。

参考文献 (References):

[1] 赵燕. 邯邢地区富硒土壤成因及开发利用研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2020.
Zhao Y. Study on the genesis and utilization of selenium rich soil in Handan and Xingtai area[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Geosciences, 2020.

[2] 李家熙, 张光弟, 葛晓立, 等. 人体硒缺乏与过剩的地球化学环境特征及其预测[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
Li J X, Zhang G D, Ge X L, et al. Prediction and geochemical environmental character of human selenium imbalances[M]. Beijing:

Geological Publishing House, 2000.

[3] 彭祚全, 黄剑锋. 世界硒都恩施硒资源研究概述[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
Peng Z Q, Huang J F. A review of selenium resources in the world [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.

[4] 孙国新, 李媛, 李刚, 等. 我国土壤低硒带的气候成因研究[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 387-394.
Sun G X, Li Y, Li G, et al. Climatic causes of the selenium-deficient soil belt in China[J]. Selenium and Environment, 2017, 7(5): 387-394.

[5] 姜秋凤, 王在模. 青海高原土壤中硒的研究[J]. 青海大学学报: 自然科学版, 2000, 18(1): 10-15.
Jiang Q F, Wang Z M. Study on selenium in soils of Qinghai[J]. Journal of Qinghai University: Natural Science, 2000, 18(1): 10-15.

[6] 王锐, 余涛, 曾庆良, 等. 我国主要农耕区土壤硒含量分布特征、来源及影响因素[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 359-366.
Wang R, Yu T, Zeng Q L, et al. Distribution characteristics, origin and influencing factors of soil selenium concentration of main farming areas in China[J]. Current Biotechnology, 2017, 7(5): 359-366.

[7] 张亚峰, 苗国文, 马强, 等. 青海东部碱性土壤中硒的形态特征[J]. 物探与化探, 2019, 43(5): 1138-1144.
Zhang Y F, Miao G W, Ma Q, et al. Distribution characteristics of Se speciation of alkaline soil in eastern Qinghai[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5): 1138-1144.

[8] 马强, 姬丙艳, 张亚峰, 等. 青海东部土壤及生物体中硒的地球化学特征[J]. 地球科学进展, 2012, 27(10): 1148-1152.
Ma Q, Ji B Y, Zhang Y F, et al. Geochemical characteristics of selenium in soils and organisms in the east of Qinghai Province[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(10): 1148-1152.

[9] 方小敏, 宋春晖, 戴霜, 等. 青藏高原东北部阶段性变形隆升: 西宁、贵德盆地高精度磁性地层和盆地演化记录[J]. 地学前缘, 2007, 14(1): 230-242.
Fang X M, Song C H, Dai S, et al. Cenozoic deformation and uplift of the NE Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from high-resolution magnetostratigraphy and basin evolution[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(1): 230-242.

[10] 孙秀玉, 赵英娘, 何卓生. 青海西宁—民和盆地渐新世至中新世孢粉组合[J]. 地质论评, 1984, 30(3): 207-216.
Sun X Y, Zhao Y N, He Z S. Oligocene to Miocene sporopollen assemblages in the Xining-Minhe Basin, Qinghai[J]. Geological Review, 1984, 30(3): 207-216.

[11] 喻建新, 张海峰, 林启祥, 等. 青海省民和县古近系西宁群孢粉植物群的地质意义[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(4): 401-405.
Yu J X, Zhang H F, Lin Q X, et al. Geological implications of sporopollenites flora from Tertiary Xining Group in Minhe County, Qinghai Province[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(4): 401-405.

[12] 邱占祥, 邱铸鼎. 中国晚第三纪地方哺乳动物群的排序及其分期[J]. 地层学杂志, 1990, 14(4): 241-260.

Qiu Z X, Qiu Z D. Neogene local mammalian faunas: Succession and ages[J]. *Journal of Stratigraphy*, 1990, 14(4): 241-260.

[13] DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范[S]. 2016.

DZ/T 0295—2016 Specification of land quality geochemical assessment[S]. 2016.

[14] 马强, 张亚峰, 黄强, 等. 青海省富硒土壤标准探讨[J]. *物探与化探*, 2022, 46(3): 772-780.

Ma Q, Zhang Y F, Huang Q, et al. Exploring the standards of Se-rich in Qinghai Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(3): 772-780.

[15] 沈骁, 姬丙艳, 许光, 等. 青海西宁—乐都富硒土壤成因探讨[J]. *中国矿业*, 2016, 25(S1): 382-389.

Shen X, Ji B Y, Xu G, et al. Discussion on the genetic type of selenium-rich area in Xining-Ledu[J]. *China Mining Magazine*, 2016, 25(S1): 382-389.

[16] 姬丙艳, 张亚峰, 姚振, 等. 青海省西宁—乐都富硒区生态地球化学评价[R]. 青海省第五地质勘查院, 2014.

Ji B Y, Zhang Y F, Yao Z, et al. Evaluation of ecological geochemistry in Se-rich areas of Xining and Ledu, Qinghai Province[R]. The Fifth Geological Exploration Institute of Qinghai Province, 2014.

[17] 姬丙艳, 许光, 张亚峰, 等. 青海东部生态地球化学成果及经济效益示范[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2020.

Ji B Y, Xu G, Zhang Y F, et al. Demonstration of ecological geochemistry achievements and economic benefits in eastern Qinghai [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2020.

[18] 刘艳蕊, 杨一博, 方小敏, 等. 沉积相变迁对内陆湖泊沉积易溶盐作为古环境指标的影响——以西宁盆地为例[J]. *沉积学报*, 2014, 32(1): 101-109.

Yang Y R, Yang Y B, Fang X M, et al. Control sedimentary facies alternation on water soluble salts in inland lake sediments as a paleoenvironmental proxy: A case study from Xining Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(1): 101-109.

[19] Abels H A, Dupont-Nivet G, Xiao G, et al. Step-wise change of Asian interior climate preceding the Eocene-Oligocene Transition (EOT) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 299(3/4): 399-412.

[20] 肖国桥, 周新郢, 葛俊逸, 等. 西宁盆地晚始新世石膏—红色泥岩旋回的古环境指示[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(5): 919-924.

Xiao G Q, Zhou X Y, Ge J Y, et al. Sedimentary characteristics and paleoenvironmental significance of late Eocene gypsum mudstone-cycles in Xining Basin, Northeastern Tibetau[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(5): 919-924.

[21] 王刚, 涂其军, 马宏超, 等. 焉耆盆地富硒土壤地球化学特征及成因探讨[J]. *新疆地质*, 2019, 37(4): 473-478.

Wang G, Tu Q J, Ma H C, et al. A Discussion on the geochemical features and origin of selenium-rich soil in Yanqi Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 2019, 37(4): 473-478.

[22] 姬丙艳, 沈骁, 姚振, 等. 青海柴达木盆地绿洲农业区硒地球化学特征——以诺木洪绿洲为例[J]. *物探与化探*, 2020, 44(1): 199-206.

Ji B Y, Shen X, Yao Z, et al. Geochemical characteristics of selenium in the oasis agricultural area of Qaidam Basin, Qinghai Province; Exemplified by Nomhon oasis[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(1): 199-206.

[23] 魏振山, 涂其军, 唐蜀虹, 等. 天山北坡乌鲁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*, 2016, 40(5): 893-898.

Wei Z S, Tu Q J, Tang S H, et al. 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*, 2016, 40(5): 893-898.

[24] 乔新星, 晁旭, 任蕊, 等. 陕西关中富硒土壤研究及开发利用——以三原—阎良地区为例[J]. *物探与化探*, 2021, 45(1): 230-238.

Qiao X X, Chao X, Ren R, et al. Research, development and utilization of selenium-rich soil of Shaanxi: A case study of Sanyuan-Yanliang area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(1): 230-238.

[25] 赵吉海, 王庆军, 王刚, 等. 焉耆县北大渠乡土壤硒含量特征及影响因素研究[J]. *新疆地质*, 2021, 39(2): 306-311.

Zhao J H, Wang Q J, Wang G, et al. Characteristics of soil selenium content and its influencing factors in Beidaqu Township, Yanqi County, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 2021, 39(2): 306-311.

[26] 杨建锋, 马贵林, 石天池, 等. 石嘴山市富硒土壤分布及地球化学特征[J]. *宁夏工程技术*, 2020, 19(2): 183-184.

Yang J F, Ma G L, Shi T C, et al. The Geochemical characteristics and distribution of selenium-enriched soil in Shizuishan City[J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2020, 19(2): 183-184.

[27] 李春亮, 李泽, 杨菁, 等. 甘肃省富硒土壤标准研究与探讨[J]. *西北地质*, 2021, 54(1): 242-246.

Li C L, Li J, Yang J, et al. Study and discussion on standard of selenium-rich in Gansu Province[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(1): 242-246.

[28] 姬丙艳, 张亚峰, 马瑛, 等. 青海东部富 Se 土壤及 Se 赋存形态特征[J]. *西北地质*, 2012, 45(1): 302-306.

Ji B Y, Zhang Y F, Ma Y, et al. The feature of selenium-rich soil and its combined form in Eastern Qinghai [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 45(1): 302-306.

[29] 张亚峰, 苗国文, 马强, 等. 青海省海东市平安区土壤 Se 的地球化学特征[J]. *地球与环境*, 2019, 47(1): 74-80.

Zhang Y F, Miao G W, Ma Q, et al. Geochemical characteristics of Se in soil of the Pinaan District, Haidong City, Qinghai Province [J]. *Earth and Environment*, 2019, 47(1): 74-80.

[30] 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员探讨[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 Se in soil in northern Muchuan County, Sichuan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(1): 215-222.

[31] 吴兴盛. 福建省武平县富硒土壤特征及成因分析[J]. *物探与化探*, 2021, 45(3): 778-784.

Wu X S. Characteristics and genesis of Se-rich soil in Wuping area, Fujian Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(3): 778-784.

[32] 肖高强, 宗庆霞, 向龙洲, 等. 云南省盈江县旧城—姐冒地区土

壤和农产品硒地球化学特征及影响因素[J]. 物探与化探, 2020,44(2):412-418.

Xiao G Q,Zong Q X,Xiang L Z,et al. Geochemical characteristics and influencing factors of Selenium in soils and agricultural products in the Jiucheng-Jiemao area, Yingjiang County, Yunnan Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020,44(2): 412-418.

[33] 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.

[34] 张亚峰,姚振,马强,等. 青藏高原北缘土壤碳库和碳汇潜力研究[J]. 地球科学进展,2018,33(2):206-212.

Zhang Y F,Yao Z,Ma Q,et al. Study on the soil carbon pool and potential capacity of carbon sequestration in the Northern Tibetan Plateau[J]. Advances in Earth Science,2018,33(2):206-212.

[35] 时章亮,金立新,廖超,等. 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,2020,44(5):1253-1260.

Shi Z L,Jin L X,Liao C,et al. Content characteristics and genesis of soil selenium in important cultivated areas of Leibo County Sichuan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020,44(5):1253-1260.

[36] 王志强,杨建锋,魏丽馨,等. 石嘴山地区碱性土壤硒地球化学特征及生物有效性[J]. 物探与化探,2022,46(1):229-237.

Wang Z Q,Yang J F,Wei L X,et al. Geochemical characteristics and bioavailability of selenium in alkaline soil in Shizuishan area, Ningxia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46 (1):229-237.

Formation mechanisms and significance of saline-lacustrine Se-rich soils in the Xining Basin

ZHANG Ya-Feng¹,JI Bing-Yan²,SHEN Xiao¹,YAO Zhen¹,MA Qiang¹,
WANG Shuai¹,HE Lian-Zhen¹,HAN Wei-Ming¹

(1. The Fifth Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining 810099,China; 2. The Fourth Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining 810000,China)

Abstract: As shown by the investigation and analysis of the Se content in soils and rocks of the Xining Basin, the rocks and soils in the Paleogene Xining Formation and the Cretaceous Minhe Formation have the highest Se content, which makes them the major Se-rich parent materials of soils in the basin. By combining the paleogeographic data on the retreating process of the basin, it can be concluded that the Paleogene Xining Formation and the Neogene Guide Group were deposited from the arid and hot saline lacustrine facies to the humid and cool saline-freshwater lacustrine facies. The combined action of the saline lake boundary and the arid and hot saline-lacustrine environment, as well as the following transformation by landforms and water systems, contributed to the formation of the existing framework of saline-lacustrine sedimentary Se-rich soils in the Xining Basin. Such Se-rich soils enjoy the advantages of a low heavy metal content, a moderate Se content, and a high available Se content and thus are of great value in development and utilization.

Key words: Se-rich soil; saline lacustrine deposit; Xining Basin

(本文编辑:蒋实)