

# 青海省囊谦县农耕区土壤硒的富集因素

周殷竹<sup>1</sup>, 刘义<sup>1</sup>, 王彪<sup>2</sup>, 周金龙<sup>3</sup>, 王思源<sup>1</sup>

ZHOU Yinzhu<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>, WANG Biao<sup>2</sup>, ZHOU Jinlong<sup>3</sup>, WANG Siyuan<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051;

2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048;

3. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052

1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding 071051, Hebei, China;

2. Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China;

3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China

**摘要:**土壤质量地球化学调查结果显示,青海省囊谦县城周边农耕区存在较大范围的足量( $0.15 < \text{Se} \leq 0.30 \text{ mg/kg}$ )—富硒( $\text{Se} > 0.30 \text{ mg/kg}$ )土地。足—富硒土壤的分布对成土母质具有较好的继承性。同时,土壤Se含量还受地球化学环境、土壤类型与质地、土壤性质等自然条件综合影响。其中,富硒土的土壤类型主要为草甸土( $\text{Se} = 0.08 \sim 0.69 \text{ mg/kg}$ , 平均值  $0.26 \text{ mg/kg}$ )和栗钙土( $\text{Se} = 0.20 \sim 0.42 \text{ mg/kg}$ , 平均值  $0.32 \text{ mg/kg}$ )。土壤Se含量通常随土壤pH值的增加而降低。硒更易富集于土壤壤质化程度较高、粒度较细的红粘土和黑粘土中。富含有机质( $12.1 \sim 98.6 \text{ g/kg}$ , 平均值  $30.8 \text{ g/kg}$ )和铁铝氧化物(铁氧化物含量  $2.86\% \sim 6.34\%$ , 平均值  $4.34\%$ , 铝氧化物含量  $10.07\% \sim 17.87\%$ , 平均值  $13.59\%$ )的土壤有利于土壤硒的富集。

**关键词:**富硒土地; 影响因素; 农耕区; 青海省囊谦县

**中图分类号:**P595;S15 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)12-1952-08

Zhou Y Z, Liu Y, Wang B, Zhou J L, Wang S Y. Influence factors of soil selenium in cultivated area of Nangqian County, Qinghai Province. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(12): 1952–1959

**Abstract:** The results of geochemical evaluation of soil quality show that there is large area of selenium-rich ( $\text{Se} > 0.30 \text{ mg/kg}$ ) sufficient ( $0.15 < \text{Se} \leq 0.30 \text{ mg/kg}$ ) land ( $65.25 \text{ km}^2$ ) in cultivated area around Nangqian County. Selenium-rich/sufficient soil shows a good inheritance of parent material. Meanwhile, soil selenium content is affected by natural factors including geochemistry, environment for soil formation, soil type/texture and soil properties. Meadow soil (soil Se content ranging between  $0.08 \text{ mg/kg}$  and  $0.69 \text{ mg/kg}$  with an average of  $0.26 \text{ mg/kg}$ ) and chestnut soil (soil Se content ranging between  $0.20 \text{ mg/kg}$  and  $0.42 \text{ mg/kg}$  with an average of  $0.32 \text{ mg/kg}$ ) are the main selenium-rich soil types. Soil Se content generally shows an opposite trend of pH. Selenium is more liable to be enriched in red clay and black clay with higher loamification level and finer particles. Higher organic matter (ranging between  $12.1 \text{ g/kg}$  and  $98.6 \text{ g/kg}$  with an average of  $30.8 \text{ g/kg}$ ) and iron-aluminum oxides content (from  $2.86\%$  to  $6.34\%$  with an average of  $4.34\%$  and from  $10.07\%$  to  $17.87\%$  with an average of  $13.59\%$ , respectively) are advantageous to soil selenium enrichment as well.

**Key words:** Se-rich land; influence factors; cultivated area; Nangqian County, Qinghai

硒(Se)是人体与动物必需的微量元素,是一种有机体的重要保护性因子<sup>[1]</sup>。硒缺乏或过量都会产生不同的生物效应。硒缺乏可引发克山病、大骨节

病、白肌病等地方性疾病<sup>[2-3]</sup>;硒过量可导致“蹒跚症”“碱毒症”等慢性中毒症的发生<sup>[4-6]</sup>,体现在皮肤褪色、指甲和手指变形、贫血、智力低下等<sup>[7]</sup>。土壤

收稿日期:2020-06-20;修订日期:2020-08-27

资助项目:中国地质调查局项目《兰州—西宁经济区综合地质调查》(编号:DD20160262)

作者简介:周殷竹(1990-),女,博士,工程师,从事同位素水文地球化学研究。E-mail: yinzhu\_zhou@qq.com

通讯作者:刘义(1988-),男,硕士,工程师,从事水工环地质调查及评价研究。E-mail: liuyi51861@163.com

Se 含量及空间分布状况可直接影响到农作物的吸收,进而通过食物链影响人体健康<sup>[8]</sup>。

中国约 72% 市(县)的土壤处于严重缺硒或低硒状态<sup>[9]</sup>,低硒带呈北东—南西走向,中国华北、东部、西北属于缺硒地区<sup>[10-11]</sup>。富硒土地主要分布在我国东南部平原区<sup>[12-15]</sup>,其中以湖北恩施最著名<sup>[7]</sup>,西北平原区以陕西紫阳较为出名<sup>[16]</sup>,而在高原地区尤为罕见,仅在青海省海东市的平安—乐都<sup>[17]</sup>和玉树州囊谦县<sup>[18]</sup>有富硒土的报道。

## 1 研究区概况

青海省玉树州囊谦县地处青藏高原东部,南部为横断山脉,北部毗邻青藏高原主体,是青海省通往西藏地区的重要交通枢纽。研究区位于囊谦县及附近扎曲河谷区(东经 96°17′00″~96°36′00″、北纬 32°06′00″~32°25′00″),总体呈西北高、东南低,河谷低、两侧高的特点,海拔高程在 3640~4800 m 之间。

研究区地势高寒,太阳辐射强烈,日照时间较长,多年平均气温 3.7℃,平均降水量为 525.2 mm,平均蒸发量为 899.4 mm。全区地形复杂,各地气候差异较大。河谷地带多为小气候区,温暖而湿润。

研究区土层较薄,质地疏松,土壤类型主要有高山寒漠土、高山草甸土、黑钙土、山地草甸土、灰褐土、高山草原土、栗钙土 7 类。农牧业是囊谦县的

支柱产业,占三产总产值比重为 79.0%,集中在海拔 3800 m 以下的低山丘陵区、丘间洼地及河谷平原区。囊谦县还具有丰富的矿产资源(如金、银、铜、铁、铅盐等矿产)。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

本研究按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)<sup>[19]</sup>,避开明显点状污染地段、垃圾堆,以及新堆积的土壤、田埂等,对重点耕地及开发利用条件相对较好的草地采用网格布点法(取样密度为 4 点/km<sup>2</sup>)布设采样点(图 1)。于 2018 年 6~9 月在囊谦县城周边农耕区采集表层(采样深度为 0~20 cm)农田土壤样品共 400 组(图 1),采样点控制面积约 100 km<sup>2</sup>。土壤样品采集后混合均匀,现场编录后用优质厚棉布采样袋收集,11℃密封避光保存。样品置于室内阴凉处充分风干,压碎,剔除碎石、砂砾、植物残体等杂物,研磨、过 200 目筛后,保证样品重量大于 500 g,送检。

### 2.2 样品测试

土壤样品经过混合酸溶液(9 mL 浓 HNO<sub>3</sub> + 2 mL HClO<sub>4</sub> + 3 mL HF)和 HCl 在 180℃下消解 24 h 后,采用非色散原子荧光光谱法(HG-AFS)测定总 Se 含量,检出限为 0.01 mg/kg;称取 0.5 g 土壤样品经过上述方法消解蒸干并用 50 mL 2% HNO<sub>3</sub> 溶

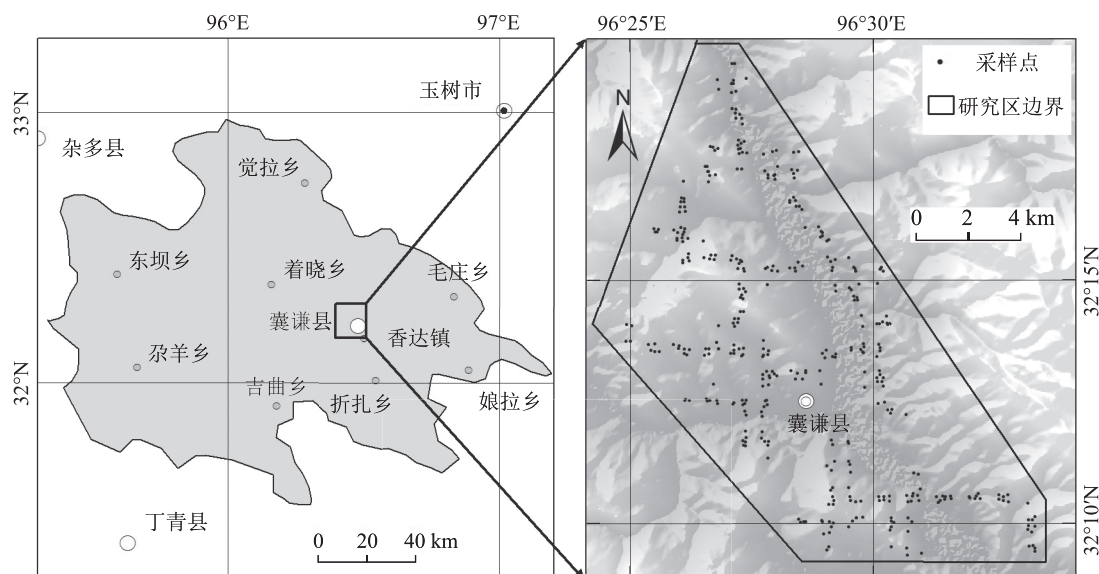


图 1 研究区采样点分布图

Fig. 1 Sampling points distribution in the study area

解,采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)进行微量元素分析;经 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{K}_2\text{CrO}_4$ 氧化分解后,采用硫酸亚铁铵滴定法测定土壤总有机碳( $\text{C}_{\text{org}}$ )含量,检出限为 $0.10\text{ mg/kg}$ ;土壤腐殖质采用VOL法测定;采用离子选择电极(ISE)法测定土壤pH值,检出限为 $0.1$ ;经过称重( $4\text{ g}$ )、粉末压片后,采用X射线荧光光谱仪(XRF)直接测定土壤 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 含量和重金属元素中的Cr、Zn、Cu、Pb含量,采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测定土壤 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 含量和土壤有效硫、硅、铁、硼、锰、钼、铜、锌含量;采用原子荧光光谱法(AFS)测定重金属元素中的As和Hg含量,采用ICP-MS测定重金属元素中的Cd和Ni含量。

### 2.3 数据处理

本文采用Excel 2016进行数据统计并用SPSS 17.0进行方差分析和显著性水平检验,利用MapGIS 6.7软件采用评价网格法进行数据的统计与分析。研究区每个网格控制面积为 $0.25\text{ km}^2$ ,共100个控制点(400个网格),总控制面积 $100\text{ km}^2$ ,对各控制点进行剔除异常值求平均值,之后进行各测试指标含量的分析,并利用Grapher 10.0绘制相关散点图。

### 2.4 土壤Se元素富集等级划分

依照《天然富硒土地划定与标识(试行)》(DD2019-10)<sup>①</sup>,结合青海省土壤Se含量背景值<sup>[9]</sup>和青藏高原地区土壤Se含量平均值<sup>[20]</sup>,并参考《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016),对土壤Se元素富集等级进行划分(表1)。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤Se空间分布特征

土壤全Se含量可衡量土壤Se潜在供应能力和储量<sup>[21]</sup>。研究区土壤Se含量为 $0.08\sim 0.69\text{ mg/kg}$ ,平均值为 $0.25\text{ mg/kg}$ ,略低于全国土壤Se平均含量( $0.29\text{ mg/kg}$ )<sup>[22]</sup>,高于青海省<sup>[9]</sup>和青藏高原的土壤Se平均含量(均为 $0.15\text{ mg/kg}$ )<sup>[20]</sup>。基于前期土壤

Se元素富集等级评价结果<sup>[18]</sup>(图2),研究区土壤Se含量以足-高硒为主(占83.84%),其中足硒占52.53%、高硒占31.31%,硒缺乏-边缘土地占16.16%,无硒过剩区。

区内高硒土壤主要分布于扎曲(Se含量 $0.12\sim 0.36\text{ mg/kg}$ ,平均值 $0.27\text{ mg/kg}$ ,高硒土占37.21%)、香曲(Se含量 $0.08\sim 0.69\text{ mg/kg}$ ,平均值 $0.27\text{ mg/kg}$ ,高硒土占34.62%)和牙不曲-强曲(高硒土占22.22%)。

其中,富硒土壤质地以红粘土为主,主要分布在扎曲的西岸(图3),为主要的农/牧业活动区域。

研究区土壤pH( $6.55\sim 8.70$ )中位值为8.31,整体呈碱性,酸碱度适中。其中,强碱性土壤占16.16%,碱性土壤占74.84%,中-酸性土壤占9.00%。

研究区土壤有机质( $12.1\sim 98.6\text{ g/kg}$ )中位值为 $32.3\text{ g/kg}$ ,高于青海省中位值 $29.10\text{ g/kg}$ <sup>[9]</sup>。区内土壤有机质含量总体较高,中等-丰富占83.51%,较缺乏-缺乏占16.49%,富硒区土壤有机质以较丰富-丰富为主<sup>[18]</sup>。

相对硒缺乏-边缘土壤,足-富硒土壤具有相对较高的有机质(平均值 $32.2\text{ g/kg}$ )、总铁(平均值 $30.7\text{ g/kg}$ )、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ( $43.8\text{ g/kg}$ )、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ( $13.7\text{ g/kg}$ )、 $\text{SO}_4^{2-}$ (平均值 $780\text{ mg/kg}$ )含量。

### 3.2 土壤Se含量的影响因素

#### 3.2.1 成土母质

受成土母质和表生地球化学环境控制,天然成因的土壤Se元素分布存在较大的空间变异性<sup>[12]</sup>。

原生地质环境中的Se主要来自富硒沉积岩(如黑色岩系或含煤系地层)<sup>[23]</sup>和富硒基性火山岩<sup>[24]</sup>。富硒地质体的风化淋滤是土壤Se富集的重要原因<sup>[25]</sup>。结合研究区区域地质(图2),可见足-富硒土壤的分布对成土母质具有较好的继承性,其分布整体与侵入岩,石炭系灰岩、砂质灰岩、砂岩,古近系红色泥岩等一致(图3)。

#### 3.2.2 土壤类型与质地

##### (1) 土壤类型

研究区内,不同类型的土壤Se含量特征具有一定的差异(表2),富硒土占比依次为草甸土(24.24%)>栗钙土(6.06%)>灰褐土(1.01%)>高山草原土(0.00%)。

表1 土壤硒元素富集等级划分标准

Table 1 Enrichment level of soil selenium

| 等级                                            | 缺乏-边缘                 | 适量                           | 高                           | 过剩                |
|-----------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| Se含量<br>/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | $\text{Se} \leq 0.15$ | $0.15 < \text{Se} \leq 0.30$ | $0.30 < \text{Se} \leq 3.0$ | $\text{Se} > 3.0$ |

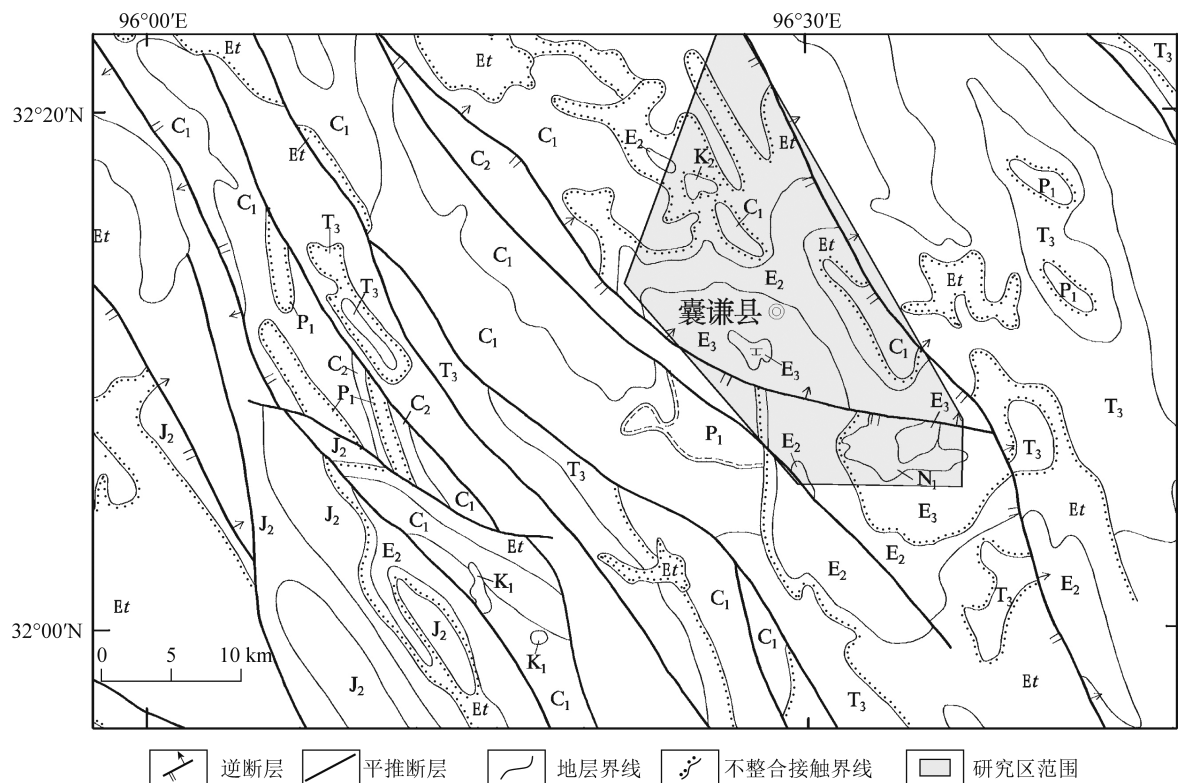


图 2 研究区地质图

Fig. 2 Geological map of the study area

N<sub>1</sub>—新近系碎屑岩、泥质岩、碳酸盐岩;E<sub>1</sub>—古近系碎屑岩、泥质岩、碳酸盐岩夹石膏;E<sub>2</sub>—古近系碳酸盐岩、碎屑岩、泥质岩;K<sub>2</sub>—上白垩统碎屑岩、泥质岩、碳酸盐岩夹石膏;K<sub>1</sub>—下白垩统陆相火山岩泥质岩、碳酸盐岩;J<sub>2</sub>—中侏罗统陆相碎屑岩夹煤层、碳酸盐岩;T<sub>3</sub>—上三叠统陆相中酸性火山岩、海相碎屑岩、碳酸盐岩夹中基性火山岩及煤层;P<sub>1</sub>—下二叠统碎屑岩、碳酸盐岩、火山碎屑岩;C<sub>2</sub>—中石炭统碳酸盐岩、碎屑岩、火山碎屑岩;C<sub>1</sub>—下石炭统碳酸盐岩、碎屑岩、中基性火山岩及煤层

表 2 不同土壤类型 Se 含量统计值

Table 2 Statistics of selenium content in different soil types

| 统计特征值                      | 栗钙土   | 草甸土   |       | 灰褐土   | 高山草原土 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            |       | 高山草甸土 | 山地草甸土 |       |       |
| 样本数/个                      | 17    | 48    | 22    | 6     | 6     |
| 最大值/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 0.42  | 0.69  | 0.56  | 0.40  | 0.28  |
| 最小值/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 0.20  | 0.08  | 0.12  | 0.08  | 0.09  |
| 平均值/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 0.32  | 0.26  | 0.24  | 0.20  | 0.20  |
| 标准差                        | 0.12  | 0.13  | 0.11  | 0.11  | 0.07  |
| 变异系数/%                     | 42.95 | 49.59 | 45.01 | 54.27 | 37.42 |
| 偏度                         | 1.33  | 1.16  | 1.68  | 1.34  | -0.15 |
| 峰度                         | 2.01  | 1.39  | 2.73  | 2.44  | -0.75 |
| 该类土样中富硒土比值/%               | 35.29 | 37.50 | 27.27 | 16.67 | 0.00  |
| 总土样中富硒土比值/%                | 6.06  | 18.18 | 6.06  | 1.01  | 0.00  |

富硒土的土壤类型主要为草甸土(Se 含量范围 0.08~0.69 mg/kg,平均值为 0.26 mg/kg)和栗钙土(Se 含量范围 0.20~0.42 mg/kg,平均值为 0.32 mg/kg)。其中,以高山草甸土富硒占比最高(18.18%)且具有最高的土壤 Se 含量,栗钙土具有最高的土壤 Se 含量平均值(0.32 mg/kg)。从偏度上看,栗钙土、草甸土和灰褐土的土壤 As 含量均属于正偏离,其中,山地草甸土有较大的正偏离,其分布较正态分布向右偏离;高山草原土 Se 含量偏度较低,接近对称分布。Wilding<sup>[24]</sup>将变异系数(CV)分为高变异水平(CV>36%)、中等变异水平(16%<CV<36%)和低变异水平(CV<16%)。研究区不同类型的土壤 Se 含量均属于高变异水平,其中灰褐土的变异水平最强,空间相关性最弱。

其中,草甸土的成土母质多为坡积或残坡积物,具有较高的有机质(平均含量 33.7 mg/kg)及腐殖质(19.5 mg/kg)和较强的肥力,土壤较肥沃,草甸

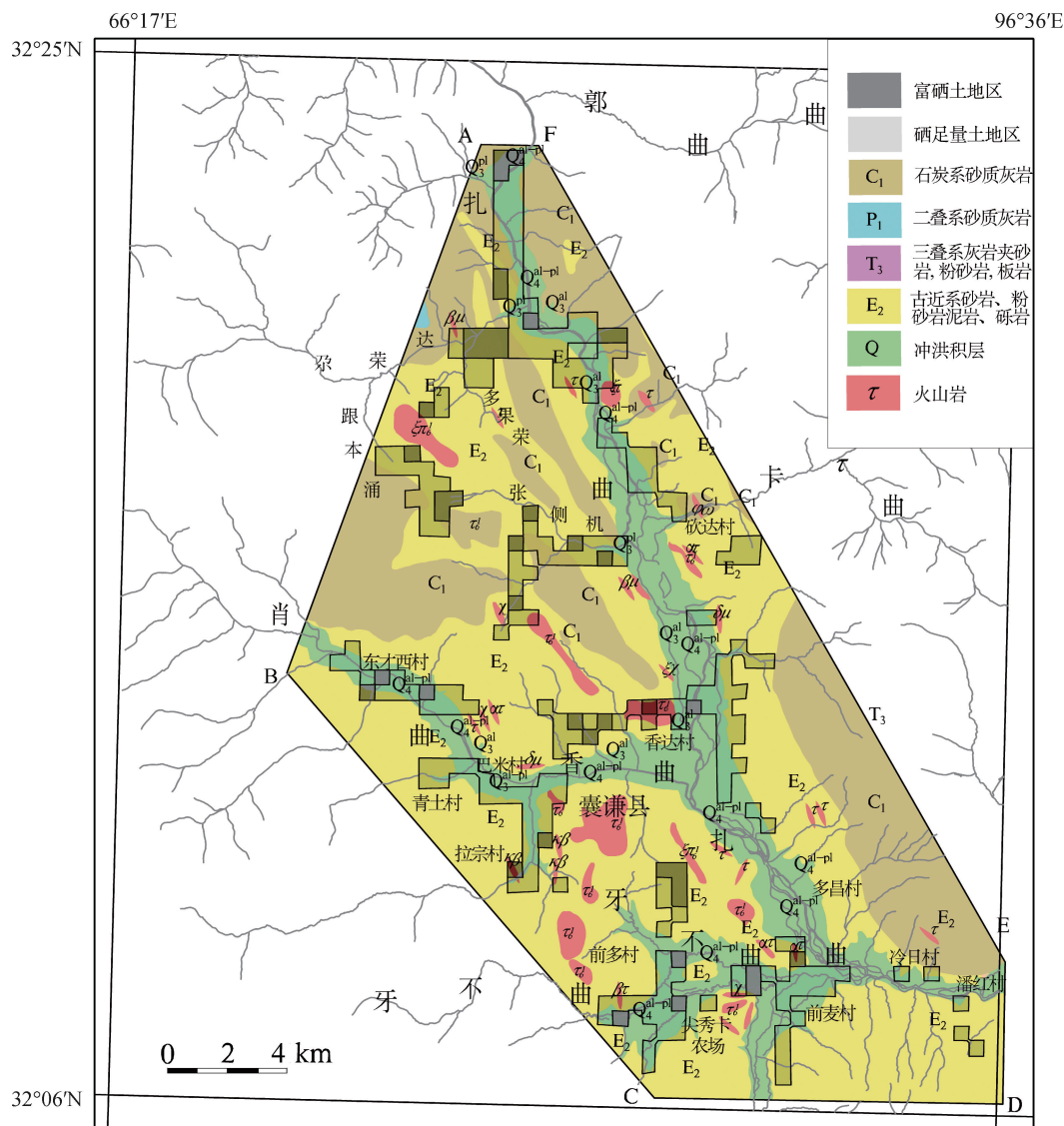


图3 研究区地层岩性与足-富硒土地分布

Fig. 3 Formation lithology and distribution of selenium-rich/sufficient land

土的腐殖质组成中,活性腐殖质含量较低。山地草甸土有机质积累、分解和转化都强于高山草甸土。栗钙土(有机质平均含量 35.5 mg/kg,腐殖质平均含量 20.6 mg/kg)主要沿河流两侧的漫滩、阶地分布。土体具有较明显的腐殖质累积过程,属较肥沃的土壤。

## (2) 土壤质地

研究区富硒土壤质地主要为研究区山区内广泛分布的红粘土(由砂泥岩经风化逐渐堆积形成)和有机质含量较高的黑粘土(图4),土质密实。

### 3.2.3 土壤性质

#### (1) 土壤 pH 值

Se 元素主要以硒酸盐、亚硒酸盐、元素 Se、硒化合物等形式存在于土壤中<sup>[25]</sup>。其中,中-酸性土( $4 < \text{pH} \leq 7.5$ )中 Se 的主要形态为亚硒酸盐,在通气良好的碱性土壤( $\text{pH} > 7.5$ )中,难溶性的  $\text{SeO}_3^{2-}$  被氧化为易溶的  $\text{SeO}_4^{2-}$ ,Se 的主要形态为硒酸盐<sup>[26]</sup>。

土壤对阴离子的吸附量通常随土壤 pH 的增加而降低<sup>[27]</sup>。研究区足-富硒土壤的 Se 含量与土壤 pH 值呈较好的负相关关系( $R^2 = 0.2032, p < 0.1, n = 80$ )(图5-a),相对低硒土壤(pH 平均值为 8.26),高硒土壤具有较低的 pH 值(平均值为 8.07)。这是由于碱性环境下 Se 的迁移淋滤作用较强,易使 Se 产生淋滤消耗,不利于土壤中 Se 的固定。迁移淋滤

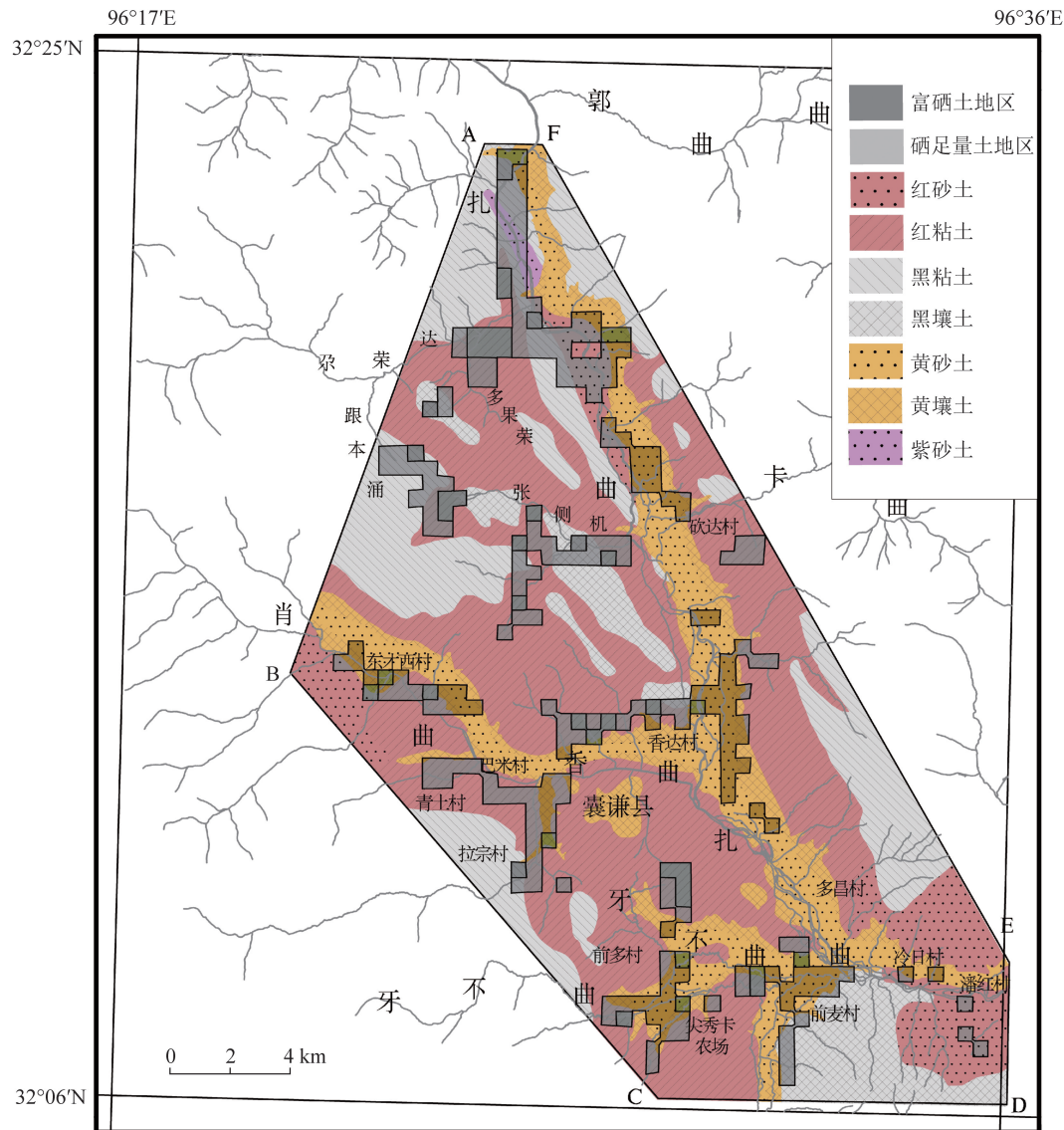


图 4 研究区土壤质地与足-富硒土地分布

Fig. 4 Soil texture and distribution of selenium-rich/sufficient land

作用随着 pH 值增加一定程度上增强,使土壤 Se 含量降低。

#### (2) 有机质含量与类型

土壤养分地球化学评价结果显示,富硒区土壤有机质以较丰富-丰富为主,除个别点外,土壤 Se 含量与土壤有机质含量呈较好的正相关性 ( $R^2 = 0.1859, p < 0.05, n = 80$ ) (图 5-b),说明有机质是形成富硒土壤的有利因素。通常,土壤有机质对 Se 具有很强的吸附作用<sup>[28]</sup>,并且在有机质分解过程中可能会促进 Se 的活化<sup>[29]</sup>。研究区足-富硒土壤有机

质中,腐殖质约占 60.0%,为主要的有机质组成。土壤有机质在腐殖化过程中可产生溶解性腐殖酸和细颗粒胶体<sup>[27]</sup>,土壤中溶解性腐殖质由于具有多种有效官能团<sup>[30]</sup>,可与 Se 以腐殖质结合的形式存在,一定程度上可以吸附/固定土壤中的 Se,间接影响土壤中的 Se 含量<sup>[31]</sup>。而放牧干扰、开垦草地、草地自然退化均可不同程度使土壤表层土发生剥蚀,土壤固碳能力下降<sup>[32]</sup>,有机质含量降低,进而影响土壤 Se 的固定。

#### (3) 氧化物矿物种类/含量

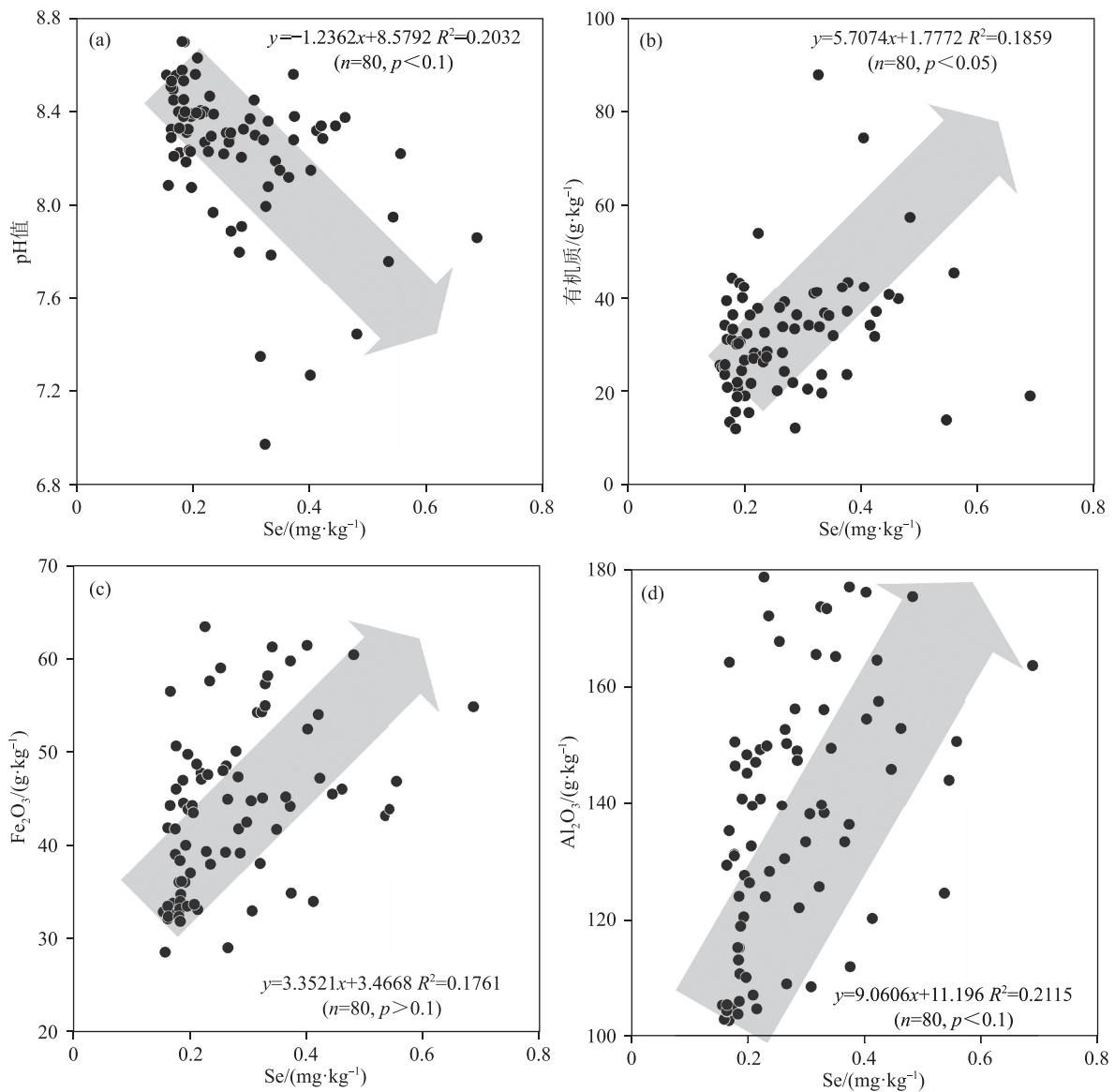


图5 土壤pH值(a)、土壤有机质含量(b)、土壤铁氧化物含量(c)、土壤铝氧化物含量(d)与土壤Se含量相关性图解

Fig. 5 Correlation between pH(a), organic matter contents(b), iron oxides contents(c), aluminum oxides(d) and selenium contents in soil

足-富硒土壤的Se含量与土壤 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量( $R^2=0.1761$ ,  $p>0.1$ ,  $n=80$ )和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量( $R^2=0.2115$ ,  $p<0.1$ ,  $n=80$ )呈较好的正相关性(图5-c、d),说明铁铝氧化物对Se有较强的吸附力和亲和力。此外,土壤中铁铝氧化物对Se的吸附还受土壤pH和氧化还原电位的影响。还原环境易使 $\text{Fe}^{3+}$ 还原为 $\text{Fe}^{2+}$ ,其吸附Se的能力降低<sup>[33]</sup>。经盐基离子淋失后的土壤铁、铝元素相对富集,形成利于土壤Se富集的地球化学环境<sup>[34]</sup>。Se更容易在土壤壤质化程度较高、粒度较细的粘土中富集。红粘土中较高含量

的铁、无定型铝、铁铝氧化物矿物对土壤Se有较强的吸附作用,其利于Se的富集;同时,红粘土对土壤溶解性有机碳具有较大的吸附量,较高的土壤有机质/有机碳有利于土壤Se的富集。黑粘土具有较高含量的有机质,其利于土壤中Se的吸附和固定。

综上所述,除成土母质和自然环境外,土壤理化性质是土壤Se富集的重要因素。

#### 4 结 论

(1)研究区土壤Se含量以足-高硒为主(占

83.84%),其中足硒占52.53%、高硒占31.31%,硒缺乏-边缘土地占16.16%,无硒过剩区。

(2)足-富硒土壤的分布对成土母质具有较好的继承性,其分布整体与侵入岩及石炭系灰岩、砂质灰岩、砂岩和古近系红色泥岩等一致。

(3)富硒土的土壤类型主要为草甸土和栗钙土,主要的土壤质地为红粘土和黑粘土。

(4)碱性环境下Se的迁移淋滤作用较强,不利于土壤中Se的固定;Se更容易在土壤壤质化程度较高、粒度较细、铁铝氧化物矿物含量较高的粘土中富集。

**致谢:**感谢中国地质环境监测院赵凯高级工程师对本文提出的宝贵意见。

## 参考文献

- [1] 陈怀满.环境土壤学(第二版)[M].北京:科学出版社,2005.
  - [2] 吕瑶瑶,余涛,杨忠芳,等.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,2012,31(7):935-944.
  - [3] Tan J, Wang W, Zhu Z, et al. Selenium in environment and Kashin-Beck disease[J]. Acta Geochimica, 1988, 7(3): 273-280.
  - [4] 王延亮,侯伟,侯占清,等.略论吉林省大骨节病与地质环境的关系[J].中国地质,2010,37(3):577-581.
  - [5] Zhu J M, Johnson T M, Finkelman R B, et al. The occurrence and origin of selenium minerals in Se-rich stone coals, spoils and their adjacent soils in Yutangba, China[J]. Chemical Geology, 2012, (1): 27-38.
  - [6] Lenz M, Lens P N L. The essential toxin the changing perception of selenium in environmental sciences[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(12): 3620-3633.
  - [7] 张光弟,葛晓立,张绮玲,等.湖北恩施硒中毒区土壤硒的分布及其控制因素[J].中国地质,2001,28(9):37-41.
  - [8] 赵串串,王媛,高瑞梅.青海省黄土丘陵区主要林分土壤微量元素丰缺状况研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(3):130-135.
  - [9] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990:1-371.
  - [10] 郭宇.恩施地区硒的地球化学研究及富硒作物栽培实验研究[D].中国地质大学(武汉)博士学位论文,2012:14.
  - [11] 谭见安.环境生命元素与克山病生态化学地理研究[M].北京:中国医药科技出版社,1996:13.
  - [12] 孙维侠,赵永存,黄标,等.长三角典型地区土壤环境中Se的空间变异特征及其与人类健康的关系[J].长江流域资源与环境,2008,17(1):113-118.
  - [13] 况琴,吴山,黄庭,等.生物质炭和钢渣对江西丰城典型富硒区土壤硒有效性的调控效果与机理研究[J].岩矿测试,2019,(6):705-714.
  - [14] 朱海娣,毛雪,吴承龙,等.石台县土壤硒资源分布特征及其利用[J].中国农业资源与区划,2017,38(9):130-134.
  - [15] 廖青,梁潘霞,邢颖,等.广西富硒区土壤耐硒菌株的分离及鉴定[J].西南农业学报,2017,30(10):2303-2307.
  - [16] 吴思源.陕西紫阳典型高硒土壤吸附/解吸硒的LCD模型拟合[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2015.
  - [17] 刘超,王晋民,魏廷珍.青海乐都富硒区6种主要蔬菜富硒能力研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,(5):67-70.
  - [18] 周殷竹,王彪,刘义,等.青海囊谦县城周边农耕地土壤质量地球化学评价及富硒土地利用分区[J].干旱区资源与环境,2020,34(10):93-101.
  - [19] 中华人民共和国国土资源部.土地质量地球化学评价规范(DZ/T 0295—2016)[M].北京:地质出版社,2016.
  - [20] 张晓平,张玉霞.西藏土壤中硒的含量及分布[J].土壤学报,2000,37(4):558-562.
  - [21] 张栋,翟勇,张妮,等.新疆水稻主产区土壤硒含量与水稻籽粒硒含量的相关性[J].中国土壤与肥料,2017,(1):139-143.
  - [22] 刘铮.中国土壤微量元素[M].南京:江苏科学技术出版社,1996:1-351.
  - [23] Wang Z, Gao Y. Biogeochemical cycling of selenium in Chinese environments[J]. Appl. Geochem., 2001, 16(11/12): 1345-1351.
  - [24] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accommodation, and implication to soil surveys [C]//Nielsen D R, Bouma J. Soil Spatial Variability. Wageningen: Pudoc Publishers, 1985: 166-194.
  - [25] 朱建明,梁小兵,凌宏文,等.环境中硒存在形式的研究现状[J].矿物岩石地球化学通报,2003,22(1):75-81.
  - [26] Kausch M F, Pallud C E. Modeling the impact of soil aggregate size on selenium immobilization[J]. Biogeosciences, 2013, 9(9): 1323-1336.
  - [27] 瞿建国,徐伯兴,龚书椿.上海不同地区土壤硒的形态分布及其有效性研究[J].土壤学报,1998,35(3):398-403.
  - [28] 安永龙,黄勇,张艳玲,等.北京房山南部地区富硒土壤生物有效性特征及来源[J].地质通报,2020,39(2/3):387-399.
  - [29] 唐玉霞,王慧敏,刘巧玲,等.河北省麦田土壤硒的含量、形态及其有效性研究[J].华北农学报,2010,25(S1):194-197.
  - [30] 李文慧.土壤溶解性腐殖质与多环芳烃的结合作用研究[D].北京大学硕士学位论文,2009.
  - [31] 李克让,王绍强,曹明奎.中国植被和土壤碳储量[J].中国科学(D辑),2003,33(1):72-80.
  - [32] 王长庭,龙瑞军,王启基,等.高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系[J].草业学报,2005,14(4):15-20.
  - [33] 武少兴,龚子同,黄标.我国土壤中的溶态硒含量及其与土壤理化性质的关系[J].中国环境科学,1997,17(6):522-525.
  - [34] 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.
- ①自然资源部中国地质调查局.天然高硒土地划定与标识(试行)(DD 2019—10).2019.