



辽宁北部地区岩石-土壤-植物中硒元素地球化学研究

丁秋红¹, 唐 韬², 王龄广³, 陈树旺¹, 邢德和¹

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 辽宁省第七地质大队有限责任公司, 辽宁 丹东 118000; 3. 辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110032

摘要: 通过对辽宁北部地区岩石、土壤和植物中硒元素的地球化学研究, 分析了硒元素在岩石-土壤-植物中的释放-迁移-吸收特征与数量变化规律。研究表明: 岩石样品硒含量平均值为 0.08×10^{-6} , 总体上岩石中硒质量分数呈现火山岩 > 碳酸盐岩 > 花岗岩/沉积岩 > 变质岩的规律; 垂向上硒质量分数呈现土壤 A 层 > 土壤 B 层 > 成土母岩的变化规律; 土壤表层硒平均含量 0.24×10^{-6} , 土壤中硒质量分数总体上呈现棕壤 (A、B 层) > 水稻土 (A、B 层) > 草甸土 (A、B 层) > 风砂土 (A、B 层) 的规律; 植物中硒平均含量 0.07×10^{-6} , 植物对土壤中硒富集能力大小依次为杂草 > 榛子 > 水稻 > 玉米; 土壤和水稻、土壤和榛子之间硒含量存在显著的正相关, 土壤和杂草、土壤和玉米之间相关性不明显。

关键词: 硒元素; 地球化学; 岩石-土壤-植物; 辽宁省

GEOCHEMICAL STUDY ON SELENIUM IN ROCK-SOIL-PLANT IN NORTHERN LIAONING PROVINCE

DING Qiu-hong¹, TANG Tao², WANG Ling-guang³, CHEN Shu-wang¹, XING De-he¹

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Liaoning No. 7 Geological Brigade Co., Ltd., Dandong 118000, Liaoning Province, China; 3. Liaoning Geological and Mineral Survey Institute Co., Ltd., Shenyang 110032, China

Abstract: Through the geochemical study of Se in rocks, soils and plants in northern Liaoning Province, the paper analyzes the release-migration-absorption of Se in rock-soil-plant. The results indicate that the average Se content in rocks is 0.08×10^{-6} . For different rock types, the Se contents generally show the rule of volcanic rock > carbonate rock > granite/sedimentary rock > metamorphic rock. Vertically, the Se content shows the variation of soil layer A > soil layer B > pedogenic mother rock. The average Se content in topsoil is 0.24×10^{-6} , with the general pattern of brown soil (A&B layers) > paddy soil (A&B layers) > meadow soil (A&B layers) > aeolian sandy soil (A&B layers); The average Se content in plants is 0.07×10^{-6} , with the soil Se enrichment capacity of plants in the order of weeds > hazelnut > paddy rice > corn. There are significant positive correlations between soil and rice, soil and hazelnut, but no obvious correlations between soil and weeds, soil and corn.

Key words: selenium; geochemistry; rock-soil-plant; Liaoning Province

收稿日期: 2020-07-02; 修回日期: 2021-01-29. 编辑: 黄欣、张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“1:250000 铁岭市幅(K51C002003)区域地质调查”(编号 200313000034)、“松辽盆地北部及外围石炭—二叠系油气地质调查”(编号 DD20190097).

作者简介: 丁秋红(1964—), 女, 博士, 研究员, 从事中生代地层古生物研究及区域油气地质调查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//1109251593@qq.com

0 引言

硒(Se)元素对于植物以及人体的有效性已经得到广泛的重视,在中国东北地区越来越多的富硒土壤被发现和利用^[1-3].在地学界,对硒元素的研究多集中在土壤硒的含量、分布、存在形式及其转化,以及土壤质量评价方面^[4-12].辽宁北部铁岭地区地处松辽平原中段,是辽宁省主要的产粮区,素有“辽北粮仓”之称.笔者在铁岭地区开展1:25万生态地质调查,将岩石-土壤-植物系统作为一个整体来研究硒元素的释放与迁移、植物吸收与积累及其分布的动态特征与数量规律,分析了硒元素在岩石、土壤和植物中的含量、空间分布特征及其变化规律,以期土壤硒的生态环境演化研究提供科学依据,为辽宁北部地区开发富硒农林产品起到有效的推动作用.

1 研究区概况

1.1 自然地理

研究区地处辽宁省北部,行政区主要包括铁岭市以及沈阳市的康平、法库两个县.该区属温带季风气候,全年四季分明,雨量适中,在农业气候综合区划中属于辽北温和半湿润农业气候区,适宜多种农作物生长.主要河流为辽河、秀水河.

研究区分为3个地貌单元:东部低山丘陵区属长白山余脉,是主要的林业基地,该区地貌以丘陵为主,少量低山及河谷平原,海拔高度200~696 m;中部为山前倾斜平原,是东部低山丘陵向西部冲积平原过渡地带,呈带状北东向分布;西部冲积平原为辽河及秀水河等冲积而成,发育有二级、一级阶地,二级阶地海拔高度100 m左右,一级阶地沿河谷底部近河床分布,相对高度5~10 m,为堆积阶地,辽河河床内见有心滩和边滩.

1.2 区域地质

研究区地层出露较全,主要有太古宇,中、新元古界,古生界的寒武系、奥陶系、志留系、石炭系、二叠系,中生界的侏罗系、白垩系和新生界的第四系.其中,第四系较为发育,出露面积接近全区总面积的一半,主要分布于康平、昌图、开原以及铁岭至沈北一带的河漫滩、阶地以及两岸冲积平原处.基岩组成有沉积岩、岩浆岩和变质岩.研究区经历了长期复杂的构造和变质

作用以及多期岩浆活动,发育有多种矿产资源.新生代升降运动形成松辽拗陷、河谷阶地等现代构造特征和地貌景观.

1.3 土壤地质

根据成土母质或成土母岩、地貌和第四纪地质等特征,研究区内的土壤包括:棕壤、褐土、草甸土、沼泽土、水稻土、风砂土以及新积土和盐碱土等.棕壤主要分布在低山丘陵区,包括酸性岩质棕壤、中性岩质棕壤、基性岩质棕壤、碳酸盐质棕壤以及碎屑岩质棕壤等;草甸土、沼泽土和风砂土主要分布在平原区、河漫滩、一级阶地等^[13].

2 材料与方法

本次研究,采取岩石-土壤-植物综合取样法,在采样点上进行植物、土壤和成土母岩取样.植物样品取地上部分的茎、叶和果实,同时采集其立地土壤的A、B层土壤及其基岩的岩石样品(如果能够采到).采用五点取样法在20~200 m²范围内采集混合样.其中植物样品采集10~20株代表性植物并进行混合,混合后的新鲜样品重量不少于500 g.室温下干燥,干燥后样品重量不低于50 g.采样的样地尽量满足下列要求:①样地内有足够的植物数量;②同一样地内土壤条件基本一致;③样地间采集植物类型尽量相同.

在研究区采集岩石样品60件,土壤A层样品171件,土壤B层样品169件,植物样品189件(图1).样品由中国地质调查局国家地质实验测试中心测试分析.数据统计分析使用Excel工作表.

3 分析结果

3.1 岩石Se元素地球化学

本次研究的60件岩石样品分别来自碳酸盐岩、花岗岩、火山岩、碎屑沉积岩和变质岩.分析结果表明,Se在不同类型的岩石中分布不均匀,同类岩石,不同样品的Se含量差别也较大(表1).岩石Se含量介于 0.22×10^{-6} ~ 0.62×10^{-6} ,平均值为 0.08×10^{-6} .其中,火山岩中的Se含量最高,平均值为 0.14×10^{-6} ;其次为碳酸盐岩,平均值为 0.11×10^{-6} ;最低为变质岩,平均值为 0.05×10^{-6} .Se元素含量最大值出现在碳酸盐岩类中,岩性为灰岩,达 0.62×10^{-6} .



图1 研究区采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution sketch map of sampling sites in the study area
1—土壤A层、B层、植物采样点(sampling sites for soil layers A, B and plants); 2—土壤A层、B层、植物、岩石采样点(sampling sites for soil layers A, B, plants and rocks); 3—公路(highway); 4—河流(river)

表1 研究区岩石中硒元素含量特征表

Table 1 Characteristics of Se content in rocks of the study area

| 种类 | 样品数/ 件 | 平均值/ 10^{-6} | 最大值/ 10^{-6} | 最小值/ 10^{-6} | 极差 (R) | 标准偏差 (SD) | 变异系数 (CV) |
|------|--------|----------------|----------------|----------------|--------|-----------|-----------|
| 碳酸盐岩 | 11 | 0.11 | 0.62 | 0.01 | 0.61 | 0.17 | 1.55 |
| 花岗岩 | 13 | 0.07 | 0.22 | 0.02 | 0.20 | 0.05 | 0.75 |
| 火山岩 | 8 | 0.14 | 0.57 | 0.04 | 0.53 | 0.18 | 1.26 |
| 变质岩 | 15 | 0.05 | 0.44 | 0.01 | 0.43 | 0.10 | 1.81 |
| 沉积岩 | 13 | 0.07 | 0.31 | 0.02 | 0.29 | 0.07 | 0.97 |

地壳中 Se 元素的丰度为 0.05×10^{-6} ^[14], 在研究区除变质岩 Se 元素平均值为 0.05×10^{-6} 外, 其他各类岩石 Se 元素的平均含量均高于地壳中 Se 元素的丰度值, 总体上岩石中 Se 质量分数呈现火山岩>碳酸盐岩>花岗岩/沉积岩>变质岩的规律。

3.2 土壤 Se 元素地球化学

本次研究的 171 件土壤 A 层样品和 169 件土壤 B 层样品, 分别采自棕壤、草甸土、水稻土和风砂土。分析结果表明, 硒元素在不同类型的土壤中分布不均匀,

同类土壤不同深度的 Se 元素的含量差别也较大(表2)。A 层土壤 Se 含量介于 $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.30 \times 10^{-6}$, 平均值为 0.24×10^{-6} ; B 层土壤 Se 含量介于 $0.08 \times 10^{-6} \sim 0.22 \times 10^{-6}$, 平均值为 0.19×10^{-6} 。在 A 层土壤样品中, 棕壤中的 Se 含量最高, 平均值为 0.30×10^{-6} ; 其次为水稻土, 平均值为 0.23×10^{-6} ; 最低为风砂土, 平均值为 0.1×10^{-6} 。Se 元素含量最大值出现在碳酸盐岩类棕壤中, 达 0.85×10^{-6} 。在 B 层土壤样品中, 仍然是棕壤中的 Se 含量最高, 平均值为 0.22×10^{-6} ; 其次为水稻土, 平均值为 0.18×10^{-6} ; 最低为风砂土, 平均值为 0.08×10^{-6} 。在 A 层土壤中 Se 元素平均含量 0.24×10^{-6} , 明显高于 B 层土壤中 Se 元素平均含量 0.19×10^{-6} 。在研究区, 土壤中 Se 含量总体上呈现棕壤(A、B 层)>水稻土(A、B 层)>草甸土(A、B 层)>风砂土(A、B 层)的规律。

表2 研究区土壤中硒元素含量特征表

Table 2 Characteristics of Se content in soils of the study area

| 种类 | 样品数/ 件 | 平均值/ 10^{-6} | 最大值/ 10^{-6} | 最小值/ 10^{-6} | 极差 (R) | 标准偏差 (SD) | 变异系数 (CV) |
|----------|--------|----------------|----------------|----------------|--------|-----------|-----------|
| 棕壤(A 层) | 86 | 0.30 | 0.85 | 0.05 | 0.80 | 0.13 | 0.44 |
| 风砂土(A 层) | 12 | 0.10 | 0.18 | 0.04 | 0.14 | 0.04 | 0.40 |
| 水稻土(A 层) | 19 | 0.23 | 0.43 | 0.14 | 0.29 | 0.07 | 0.33 |
| 草甸土(A 层) | 51 | 0.19 | 0.40 | 0.05 | 0.35 | 0.07 | 0.39 |
| 棕壤(B 层) | 87 | 0.22 | 0.71 | 0.06 | 0.65 | 0.10 | 0.46 |
| 风砂土(B 层) | 11 | 0.08 | 0.13 | 0.03 | 0.10 | 0.03 | 0.42 |
| 水稻土(B 层) | 19 | 0.18 | 0.45 | 0.08 | 0.37 | 0.07 | 0.43 |
| 草甸土(B 层) | 52 | 0.16 | 0.34 | 0.01 | 0.33 | 0.08 | 0.51 |

世界范围内大部分土壤 Se 含量为 $0.10 \times 10^{-6} \sim 2.00 \times 10^{-6}$, 缺 Se 土壤 Se 含量平均为 0.15×10^{-6} , 个别土壤 Se 含量低于 0.01×10^{-6} , 而高 Se 土壤 Se 含量高达 $30 \times 10^{-6} \sim 324 \times 10^{-6}$, 大多数土壤中 Se 平均含量为 0.20×10^{-6} ^[15]。中国东北平原土壤 Se 含量为 $0.01 \times 10^{-6} \sim 5.30 \times 10^{-6}$, 平均含量为 0.184×10^{-6} ^[2]。在辽宁北部地区, 土壤 A 层 Se 含量平均为 0.24×10^{-6} , 略高于全球大多数土壤 Se 含量平均值, 明显高于东北平原土壤 Se 含量平均值。

关于富硒土壤的定义国内外并未有统一的标准^[16-18], 谭见安^[17]以我国地方病与低硒环境为依据提出了中国硒元素生态景观界限值, 将土壤中 Se 含量低于 0.125×10^{-6} 的土壤称为低硒土壤; 土壤中 Se 量高于

0.4×10⁻⁶时,称其为富(高)硒土壤. 辽宁北部地区除风沙土外,土壤 A 层 Se 含量变化范围均介于 0.125×10⁻⁶~0.4×10⁻⁶之间,相当于足硒土壤的水平.

3.3 植物 Se 元素地球化学

本次研究的 187 件植物样品包括玉米(果实)、水稻(果实)、榛子(果实)和杂草(叶部)4 类植物. 榛子主要产自棕壤,杂草主要产自棕壤和风砂土,水稻主要产自水稻土和草甸土,玉米主要产自棕壤、草甸土、水稻土和风砂土.

分析结果表明,硒元素在不同种类的植物中分布不均匀,同类植物不同植株的 Se 含量差别较大(表 3). 植物中 Se 含量介于 0.004×10⁻⁶~0.19×10⁻⁶之间,平均含量为 0.07×10⁻⁶. 其中,灌木植物榛子的 Se 元素含量最高,平均值达 0.11×10⁻⁶;水稻籽实中的 Se 元素含量均值为 0.05×10⁻⁶;玉米籽实中的 Se 元素含量最低,平均值达 0.02×10⁻⁶. 在研究区,植物中硒质量分数总体上呈现榛子>杂草>水稻>玉米的规律.

表 3 研究区植物中硒元素含量特征表
Table 3 Characteristics of Se content in plants of the study area

| 种类 | 样品数/件 | 平均值/10 ⁻⁶ | 最大值/10 ⁻⁶ | 最小值/10 ⁻⁶ | 极差(R) | 标准偏差(SD) | 变异系数(CV) |
|----|-------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|----------|----------|
| 杂草 | 27 | 0.09 | 0.19 | 0.01 | 0.17 | 0.05 | 0.58 |
| 榛子 | 13 | 0.11 | 0.13 | 0.08 | 0.04 | 0.01 | 0.15 |
| 玉米 | 139 | 0.02 | 0.09 | 0.004 | 0.09 | 0.03 | 1.13 |
| 水稻 | 11 | 0.05 | 0.12 | 0.02 | 0.09 | 0.03 | 0.51 |

根据我国粮食卫生标准^[19-20],研究区除玉米籽实

外,杂草、榛子和水稻的籽实中 Se 含量均满足 0.04×10⁻⁶~0.30×10⁻⁶富 Se 的标准范围,但远远低于国家富 Se 粮食限量上限标准 0.30×10⁻⁶.

研究表明^[21-23],Se 作为生态系统中一种重要的微量元素,也是人体必须的微量元素之一,对人体有重要的生理作用,适量的 Se 能改善人体的免疫力,提高机体抗氧化能力. 长期食用低于 0.1×10⁻⁶的含 Se 食物会导致人体 Se 缺乏反应症,长期食用 Se 含量高于 1.0×10⁻⁶的食物则会引起硒中毒. 辽宁北部地区,野生植物榛子的 Se 含量介于 0.08×10⁻⁶~0.13×10⁻⁶之间,农作物水稻的 Se 含量介于 0.02×10⁻⁶~0.12×10⁻⁶之间,农作物玉米的 Se 含量介于 0.004×10⁻⁶~0.09×10⁻⁶之间,均小于 1.0×10⁻⁶硒中毒值范围,处于长期食用安全值范围内.

4 讨论

4.1 岩石-土壤中的 Se 元素迁移

Se 元素在土壤 A 层中的均值为 0.24×10⁻⁶,在土壤 B 层中的均值为 0.19×10⁻⁶,在岩石中的均值为 0.08×10⁻⁶. Se 元素在土壤中的含量明显高于在岩石中的含量(图 2),这表明土壤中的 Se 元素与成土母岩之间既存在成因上的联系也存在明显的区别,成土母质决定了土壤中 Se 的最初含量.

研究区成土母岩主要有泥质粉砂岩、细砂岩、砂岩、泥晶灰岩、白云岩、二长花岗岩、玄武岩,各种岩石类型中 Se 元素含量有所差别,导致其土壤母质层(风化层)中 Se 元素含量不同. 由其母岩风化而来的表层土壤既继承了成土母岩中 Se 含量特征,又进一步产生富集作用. 同时,从垂向看由深层至浅层,Se 元素的含

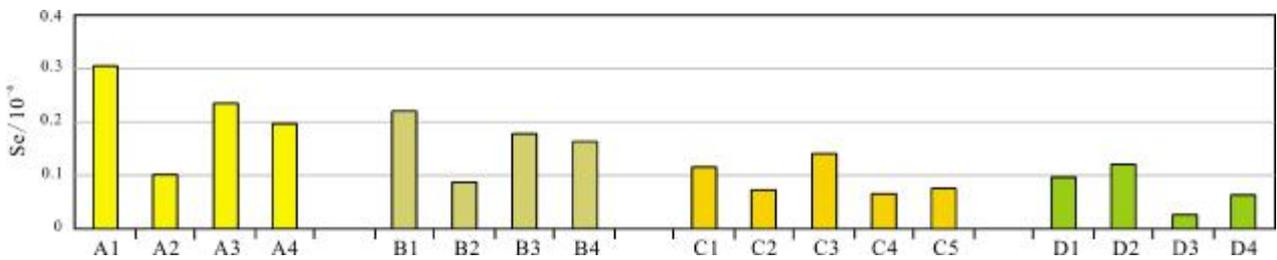


图 2 岩石-土壤-植物中硒元素的含量变化

Fig. 2 Variations of Se content in rock-soil-plant

A1—棕壤(A 层)(brown soil of layer A); A2—风砂土(A 层)(sandy soil of layer A); A3—水稻土(A 层)(paddy soil of layer A); A4—草甸土(A 层)(meadow soil of layer A); B1—棕壤(B 层)(brown soil of layer B); B2—风砂土(B 层)(sandy soil of layer B); B3—水稻土(B 层)(paddy soil of layer B); B4—草甸土(B 层)(meadow soil of layer B); C1—碳酸盐岩(carbonate rock); C2—花岗岩(granite); C3—火山岩(volcanic rock); C4—变质岩(metamorphic rock); C5—沉积岩(sedimentary rock); D1—杂草(weed); D2—榛子(hazelnut); D3—玉米(corn); D4—水稻(paddy rice)

量总体上呈逐渐升高的趋势, 硒质量分数呈现土壤 A 层>土壤 B 层>成土母岩的变化规律. 表明在成土过程中硒元素在有机质等物质参与的物理、化学作用下, 逐步向表层土壤富集, 形成硒元素深部低、地表富集的迁移特征.

有关 Se 元素在土壤中迁移富集的影响因素, 前人做过大量的研究^[24-27]. 研究表明, 土壤 Se 含量受控于成土母质, 成土母质是土壤 Se 元素的主要物质来源, 土壤表层 Se 主要是母质风化和植物富集的结果. 同时, 土壤理化性质(包括有机质、pH 值、黏粒含量)、土地利用方式、海拔高度及外源输入组分(如施肥、喷洒)等对土壤 Se 的迁移富集都具有一定的影响作用.

4.2 土壤-植物中的 Se 元素吸收

从表 2、3 和图 2 的对比结果看, Se 元素在土壤 A 层中的均值为 0.24×10^{-6} , 在植物中的均值为 0.07×10^{-6} , Se 元素在土壤 A 层的中含量明显高于在植物中的含量. 研究表明, 植物对土壤中 Se 的吸收与土壤中 Se 的有效性密切相关, 同时也与植物对土壤中元素的吸收率有关, 土壤中 Se 含量高并不意味着植物对 Se 的吸收高.

在土壤-植物系统 Se 元素吸收的研究中, 采用了生物富集系数 BAC (Biological Accumulating Coefficient), 即植物灰烬中 Se 的含量与土壤中 Se 含量的比值^[28], 表示 Se 元素在植物和土壤之间富集、浓缩、积累、放大和吸收能力与程度的数量关系, 即植物对土壤 Se 元素的富集能力. 富集系数越大则表示富集能力越强.

分析统计结果(表 4)表明, 不同的植物在相同的土壤类型下 Se 富集能力不同, 相同的植物在不同的土壤类型下 Se 富集能力亦不同. 其中, 玉米对 Se 元素的富集能力在风砂土中(A 层)>水稻土(A 层)>棕壤(A 层)>草甸土(A 层), 杂草对 Se 元素的富集能力风砂土(A 层)>棕壤(A 层), 水稻对 Se 元素的富集能力水稻土(A 层)>草甸土(A 层). 研究区的 4 种植物 Se 富集系数平均值较低, 除去杂草外, 均在 0.40 以下, 富集能力大小依次为杂草>榛子>水稻>玉米.

对研究区的土壤和立地植物 Se 含量进行相关性分析. 土壤和水稻 Se 含量的 11 组对应数据的相关性分析结果表明两者之间存在极显著的正相关关系(图 3a). 土壤和杂草 Se 含量的 27 组对应数据相关性分析结果表明两者之相关性不明显(图 3b). 土壤和榛子

表 4 研究区不同土壤条件下植物硒富集系数参数表

Table 4 Se enrichment coefficients of plants by soil conditions in the study area

| 植物种类 | 棕壤(A 层) | 风砂土(A 层) | 草甸土(A 层) | 水稻土(A 层) | 平均值 |
|------|---------|----------|----------|----------|------|
| 杂草 | 0.27 | 0.63 | | | 0.45 |
| 榛子 | 0.26 | | | | 0.26 |
| 玉米 | 0.12 | 0.38 | 0.11 | 0.15 | 0.19 |
| 水稻 | | | 0.20 | 0.30 | 0.25 |

Se 含量的 12 组对应数据的相关性分析结果表明两者之间存在显著的正相关关系(图 3c). 土壤和玉米 Se 含量的 132 组对应数据相关性分析结果表明两者之相关性不明显(图 3d). 由于土壤中的 Se 存在不均匀性, 不同植物对硒富集程度亦不同. 上述研究表明, 通过进一步研究土壤 Se 含量与不同种类农林产品 Se 含量的相关关系, 对开发富 Se 农林产品可以起到有效的指导作用.

5 结论

1) 研究区东部为低山丘陵区, 基岩风化物质搬运距离较近, 土壤基本保留了当地母岩的元素地球化学特征. 岩石样品 Se 含量平均值高于地壳中 Se 元素的丰度值, 总体上岩石中 Se 质量分数呈现火山岩>碳酸盐岩>花岗岩/沉积岩>变质岩的规律. 土壤 Se 含量受控于成土母质, 与成土母岩之间存在成因上的联系, 垂向上由深层至浅层, Se 质量分数呈现土壤 A 层>土壤 B 层>成土母岩的变化规律.

2) 研究区土壤表层 Se 平均含量略高于全球大多数土壤 Se 含量平均值, 明显高于中国东北平原土壤 Se 含量平均值. 土壤中 Se 质量分数总体上呈现棕壤(A、B 层)>水稻土(A、B 层)>草甸土(A、B 层)>风砂土(A、B 层)的规律. 除风砂土外, 土壤 A 层 Se 含量相当于足 Se 土壤的水平.

3) 研究区植物中 Se 含量平均值处于长期食用安全值范围内. 植物中 Se 质量分数总体上呈现榛子>杂草>水稻>玉米的规律. 除玉米籽实外, 杂草、榛子和水稻的籽实中 Se 含量介于富 Se 的标准范围内.

4) 不同的植物在相同的土壤类型下对 Se 的富集能力不同, 相同的植物在不同的土壤类型下对 Se 的富

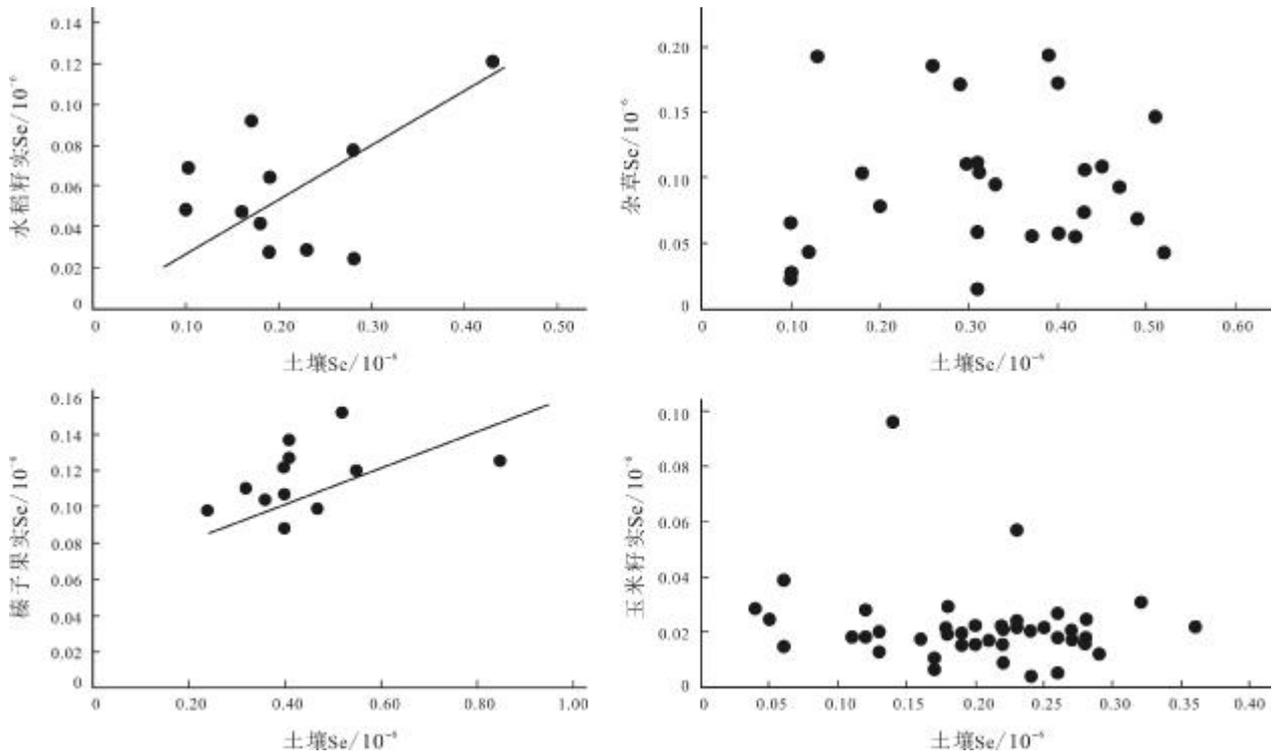


图3 土壤含硒与立地植物含硒量关系

Fig. 3 Scatter plots showing the correlation between Se content in plants and soils

集能力亦不同. 研究区植物对土壤中 Se 富集能力大小依次为杂草>榛子>水稻>玉米.

5) 对研究区的土壤和立地植物 Se 含量进行相关性分析结果显示,土壤与水稻、土壤与榛子之间存在显著的正相关,土壤与杂草、土壤与玉米之间相关性不明显.

致谢:沈阳地质调查中心卞雄飞高级工程师,郑月娟、高飞、张春晖、张志斌教授级高级工程师,共同完成野外工作,特此致谢!

参考文献(References):

- [1]孙梓耀,王菲,崔玉军. 黑龙江省松嫩平原南部土壤硒元素的有效性与其生态效应[J]. 黑龙江农业科学, 2016(9): 43-49.
Sun Z Y, Wang F, Cui Y J. Effectiveness and ecological Effects of Soil Selenium in southern of Songnen plain of Heilongjiang province [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016(9): 43-49.
- [2]戴慧敏,宫传东,董北,等. 东北平原土壤硒分布特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1356-1364.
Dai H M, Gong C D, Dong B, et al. Distribution of soil selenium in the northeast china plain and its influencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1356-1364.
- [3]付强,王冬艳,李月芬,等. 吉林中部黑土区土壤硒元素土壤地球化学研究[J]. 世界地质, 2014, 33(1): 102-111.
Fu Q, Wang D Y, Li Y F, et al. Pedogeochemical research on Se in black soil areas of central Jilin province[J]. Global Geology, 2014, 33(1): 102-111.
- [4]张哲寰,赵君,戴慧敏,等. 黑龙江省讷河市土壤-作物系统 Se 元素地球化学特征[J]. 地质与资源, 2020, 29(1): 38-43.
Zhang Z H, Zhao J, Dai H M, et al. Geochemistry of selenium in soil-crop system of Nehe city, Heilongjiang province[J]. Geology and Resources, 2020, 29(1): 38-43.
- [5]杨立国,马志超,王鑫. 内蒙古通辽市科尔沁区土壤硒地球化学特征[J]. 地质与资源, 2019, 28(4): 383-388.
Yang L G, Ma Z C, Wang X. Geochemical characteristics of selenium in the soil of Horqin District Inner Mongolia[J]. Geology and Resources, 2019, 28(4): 383-388.
- [6]迟凤琴,徐强,匡恩俊,等. 黑龙江省土壤硒分布及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1262-1274.
Chi F Q, Xu Q, Kuang E J, et al. Distribution of selenium and its influencing factors in Soils of Heilongjiang province, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(5): 1262-1274.
- [7]龚河阳,李月芬,汤洁,等. 吉林省西部土壤硒含量、形态分布及影响因素[J]. 吉林农业大学学报, 2015, 37(2): 177-184, 190.
Gong H Y, Li Y F, Tang J, et al. Content, form distribution and influencing factors of soil selenium in western Jilin province [J].

- Journal of Jilin Agricultural University, 2015, 37(2): 177-184, 190.
- [8]王金达, 于君宝, 张学林. 黄土高原土壤中硒等元素的地球化学特征[J]. 地理科学, 2000, 20(5): 469-473.
- Wang J D, Yu J B, Zhang X L. Geochemical features of elements of selenium etc. in soil of Loess Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(5): 469-473.
- [9]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.
- Zhu J M, Liang X B, Ling H W, et al. Advances in studying occurrence modes of selenium in environment [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22(1): 75-81.
- [10]马宝艳, 张学林. 吉林省区域环境中硒的生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2000, 20(1): 91-96.
- Ma B Y, Zhang X L. Ecological risk assessment of selenium in regional environment of Jilin Province [J]. China Environmental Science, 2000, 20(1): 91-96.
- [11]廖启林, 崔晓丹, 黄顺生, 等. 江苏富硒土壤元素地球化学特征及主要来源[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1813-1825.
- Liao Q L, Cui X D, Huang S S, et al. Element geochemistry of selenium-enriched soil and its main sources in Jiangsu Province [J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1813-1825.
- [12]赵燕, 栾文楼, 郭海全, 等. 河北省石家庄市藁城区富硒土壤特征、成因与生态环境健康评价[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 764-776.
- Zhao Y, Luan W L, Guo H Q, et al. Characteristics, causes and ecological environment health evaluation of selenium-enriched soil in Gaocheng District of Shijiazhuang City, Hebei Province [J]. Geology in China, 2021, 48(3): 764-776.
- [13]陈树旺, Zhukovskaya A A, 邢德和, 等. 铁岭地区生态地质研究[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 25-62.
- Chen S W, Zhukovskaya A A, Xing D H, et al. Study on ecological geology in Tieling Area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 25-62. (in Chinese)
- [14]黎彤, 倪守斌. 地球和地壳的化学元素丰度[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 1-136.
- Li T, Ni S B. Abundance of chemical elements in the earth and crust [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 1-136. (in Chinese)
- [15]Swaine J D. The trace-element content of soils [J]. Soil Science, 1956, 81(2): 144.
- [16]李家熙, 张光第, 葛晓云, 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: 1-204.
- Li J X, Zhang G D, Ge X Y, et al. Prediction and geochemical environmental character of human selenium imbalances [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 1-204.
- [17]谭见安. 中华人民共和国地方病与环境图集[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 39.
- Tan J A. The Atlas of endemic diseases and their environments in the People's Republic of China [M]. Beijing: Science Press, 1989: 39.
- [18]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 22499-2008, 富硒稻谷[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-3.
- AQSIQ, Standardization Administration of China. GB/T 22499—2008, Rich selenium paddy [S]. Beijing: China Standard Press, 2009: 1-3.
- [19]中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 2762-2017, 食品安全国家标准——食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- State Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Administration of Food and Drug Administration. GB 2762—2017, Food safety national standard food pollutant limit [S]. Beijing: China Standard Press, 2017. (in Chinese)
- [20]张培毅, 宋鸿彬, 杨占田, 等. 硒对克山病区人体红细胞免疫功能的影响[J]. 微量元素与健康研究, 1998, 15(3): 12-14.
- Zhang P Y, Song H B, Yang Z T, et al. Effects of Selenium on erythrocyte immunity function of residents in a Keshan disease area [J]. Studies of Trace Elements and Health, 1998, 15(3): 12-14.
- [21]张勇胜, 李仁兰, 刘妍, 等. 硒对人体健康作用的研究进展[J]. 内科, 2018, 13(4): 623-625, 662.
- Zhang Y S, Li R L, Liu Y, et al. Advances in research on the effects of selenium on human health [J]. Internal Medicine of China, 2018, 13(4): 623-625, 662. (in Chinese)
- [22]李颂, 衣喆, 王春玲, 等. 微量元素硒的营养价值及应用[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(20): 120-123, 132.
- Li S, Yi Z, Wang C L, et al. The nutritive value and application of trace element selenium [J]. Food Research and Development, 2014, 35(20): 120-123, 132.
- [23]吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 土地利用对土壤性质影响的区域差异研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1697-1702.
- Wu W B, Yang P, Tang H J, et al. Regional variability of effects of land use system on soil properties [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(8): 1697-1702.
- [24]周墨, 陈国光, 张明, 等. 赣南地区土壤硒元素地球化学特征及其影响因素研究: 以青塘-梅窖地区为例[J]. 现代地质, 2018, 32(6): 1292-1301.
- Zhou M, Chen G G, Zhang M, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of Selenium in soils of South Jiangxi province: A typical area of Qingtang-Meijiao [J]. Geoscience, 2018, 32(6): 1292-1301.
- [25]王秋爽, 罗杰, 蔡立梅, 等. 广东省揭西县土壤硒的分布特征及影响因素研究[J]. 土壤, 2018, 50(6): 1126-1133.
- Wang Q S, Luo J, Cai L M, et al. Distribution of soil selenium and its influential factors in Jiexi County, Guangdong Province [J]. Soil, 2018, 50(6): 1126-1133.

(下转第 636 页/Continued on Page 636)

- 755-758.
- Zhang C F, Weng A H, Sun S D, et al. Computation of whole-time apparent resistivity of large rectangular loop [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(4): 755-758.
- [11]薛国强, 李貅, 郭文波, 等. 大回线源瞬变电磁场响应特性[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(5): 586-590.
- Xue G Q, Li X, Guo W B, et al. Characters of response of large-loop transient electro-magnetic field [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(5): 586-590.
- [12]薛国强, 闫述, 周楠楠. 偶极子假设引起的大回线源瞬变电磁响应偏差分析[J]. 地球物理学报, 2011, 54(9): 2389-2396.
- Xue G Q, Yan S, Zhou N N. Theoretical study on the errors caused by dipole hypothesis of large-loop TEM response[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(9): 2389-2396.
- [13]陈宣华, 邵兆刚, 熊小松, 等. 祁连山带断裂构造体系、深部结构与构造演化[J]. 中国地质, 2019, 46(5): 995-1020.
- Chen X H, Shao Z G, Xiong X S, et al. Fault system, deep structure and tectonic evolution of the Qilian Orogenic Belt, Northwest China [J]. Geology in China, 2019, 46(5): 995-1020.
- [14]宋洪伟, 夏凡, 尚铭森. MT法在河北献县地区地热勘查中的应用[J]. 地质与资源, 2018, 27(3): 284-287.
- Song H W, Xia F, Shang M S. Application of MT method in geothermal prospecting in Xianxian area, Hebei Province [J]. Geology and Resources, 2018, 27(3): 284-287.
- [15]罗卫锋, 胡志方, 李桂林, 等. 基于大地电磁技术测定的准噶尔盆地乌伦古坳陷至乌伦古北隆起带石炭系地层及其油气前景分析[J]. 中国地质. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20200325.1034.002.html>, 2020-03-26.
- Luo W F, Hu Z F, Li G L, et al. Carboniferous strata and their oil and gas prospects from Wulungu depression to the north uplift in the Junggar Basin based on magnetotelluric technology [J]. Geology in China. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20200325.1034.002.html>, 2020-03-26.
- [16]张帆, 孙中任, 尤宏亮, 等. 辽西金羊盆地大地电磁测深参考道处理效果研究[J]. 地质与资源, 2017, 26(2): 176-183.
- Zhang F, Sun Z R, You H L, et al. Study on magnetotellurics with magnetic reference method in Jinyang Basin, Western Liaoning [J]. Geology and Resources, 2017, 26(2): 176-183.
- [17]时彬, 郇恒飞, 高铁, 等. 大地电磁静态效应模拟研究[J]. 地质与资源, 2015, 24(4): 373-377.
- Shi B, Huan H F, Gao T, et al. Study on the simulation of magnetotelluric static effect [J]. Geology and Resources, 2015, 24(4): 373-377.
- [18]李树军, 孙钢, 张国, 等. 辽东地区含石墨地层条件下的物探找矿效果——以钓鱼台金银矿为例[J]. 地质与资源, 2017, 26(3): 310-316.
- Li S J, Sun G, Zhang G, et al. Geophysical prospecting effect in the graphite-bearing strata in Eastern Liaoning: a case study of the Diaoyutai gold-silver deposit [J]. Geology and Resources, 2017, 26(3): 310-316.
- [19]严加永, 吕庆田, 罗凡, 等. 钦杭何在? 来自综合地球物理探测的认识[J]. 中国地质, 2019, 46(4): 690-703.
- Yan J Y, Lü Q T, Luo F, et al. Where is Qinzhou-Hangzhou juncture belt? Evidence from integrated geophysical exploration [J]. Geology in China, 2019, 46(4): 690-703.
- [20]叶涛, 陈小斌, 严良俊. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(三)——构建二维反演初始模型的印模法[J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3596-3606.
- Ye T, Chen X B, Yan L J. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric (III): Using the impressing method to construct starting model of 2D magnetotelluric inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(10): 3596-3606.

(上接第 576 页 /Continued from Page 576)

- [26]蒋慧豪, 罗杰, 蔡立梅, 等. 广东省普宁市土壤硒的分布特征及影响因素研究[J]. 现代地质, 2019, 33(1): 161-168.
- Jiang H H, Luo J, Cai L M, et al. Distribution of selenium and its influencing factors in soils of Puning city, Guangdong province [J]. Geoscience, 2019, 33(1): 161-168.
- [27]谢薇, 杨耀栋, 侯佳渝, 等. 天津市蓟州区富硒土壤成因与土壤硒来源研究[J]. 物探与化探, 2019, 43(6): 1373-1381.
- Xie W, Yang Y D, Hou J Y, et al. Studies on causes and influential factors of Selenium-enriched soils in Jizhou district of Tianjin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1373-1381.
- [28]商翎, 提福魁, 王淑华, 等. 元素生态地球化学及其应用[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1997: 29-26.
- Shang L, Ti F K, Wang S H, et al. Elemental ecological geochemistry and application [M]. Shenyang: Liaoning University Press, 1997: 29-26. (in Chinese)