

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018092902

范薇, 周金龙, 王松涛, 等. 新疆若羌县绿洲带土壤硒含量的空间分布及影响因素分析[J]. 环境化学, 2019, 38(7): 1470-1478.

FAN Wei, ZHOU Jinlong, WANG Songtao, et al. Spatial distribution of selenium and its influencing factors in soils of oasis zone in Ruoqiang County, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(7): 1470-1478.

新疆若羌县绿洲带土壤硒含量的空间分布及影响因素分析*

范薇^{1,2} 周金龙^{1,2**} 王松涛³ 杜江岩³

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐, 830052; 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 乌鲁木齐, 830052; 3. 新疆地矿局第二水文地质工程地质大队, 昌吉, 831100)

摘要 为研究若羌县土壤 Se 含量、分布特征与土壤性质的关系, 在研究区采集 434 个表层土壤样品, 分析了若羌县土壤 Se 含量及其影响因素. 结果表明, 若羌县表层土壤 Se 含量变幅为 0.06—0.47 mg·kg⁻¹, 平均值为 0.18 mg·kg⁻¹, 总体属于中等、边缘及缺硒土壤, 不存在硒中毒土壤. 不同土壤类型中草甸土 Se 含量最高 (0.23 mg·kg⁻¹), 盐土最低 (0.13 mg·kg⁻¹). 成土母质以洪积物发育的土壤 Se 含量最高 (0.25 mg·kg⁻¹), 湖积物最低 (0.14 mg·kg⁻¹). 不同土地利用方式下, 水田土壤 Se 含量最高 (0.32 mg·kg⁻¹). 研究区土壤 MgO、有机碳 C_{org}、黏粒含量、TN 和铁锰氧化物是影响土壤 Se 含量的主要因素.

关键词 土壤硒含量, 影响因素, 新疆若羌县.

Spatial distribution of selenium and its influencing factors in soils of oasis zone in Ruoqiang County, Xinjiang

FAN Wei^{1,2} ZHOU Jinlong^{1,2**} WANG Songtao³ DU Jiangyan³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, 830052, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi, 830052, China; 3. No.2 Hydrogeology and Engineering Geology Party of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Changji, 831100, China)

Abstract: To evaluate selenium content and distribution, and to study its relationship with soil properties, 434 topsoil samples were collected. The results showed that selenium content ranged from 0.06 to 0.47 mg·kg⁻¹ with average of 0.18 mg·kg⁻¹. On the whole, the selenium level belonged to medium, marginal or deficient, with no Se-poisoning. Among soil types, meadow soil had the highest Se content (0.23 mg·kg⁻¹), while saline soil had the lowest Se content (0.13 mg·kg⁻¹). Among soil parent materials, the highest content was recorded in diluvial deposit with an average Se content by 0.25 mg·kg⁻¹, while lake deposit was the lowest with an average by 0.14 mg·kg⁻¹. In terms of land use, paddy soil had the highest Se content (0.32 mg·kg⁻¹). MgO, C_{org}, clay contents, TN, iron and manganese oxides were the main factors, which affected soil selenium content.

Keywords: soil selenium content, influencing factors, Ruoqiang County.

硒元素有“抗癌之王”之称, 是人体必需微量元素, 有高抗氧化、提高人体免疫力等作用, 缺硒或摄

2018年9月29日收稿 (Received: September 29, 2018).

* 中央返还两权款资金项目“新疆和田-若羌绿洲带 1:25 万土地质量地球化学调查 (S15-1-LQ)”资助.

Supported by the Central Government Returned the Two Rights Fund Project “Xinjiang Hetian-Ruoqiang Oasis Belt 1:250000 Land Quality Geochemical Survey (S15-1-LQ)”.

** 通讯联系人, Tel: 15299181811, E-mail: zjzhoujl@163.com

Corresponding author, Tel: 15299181811, E-mail: zjzhoujl@163.com

入过量都易引起生物地球化学疾病^[1-2],如新疆的脱甲病等是因摄入硒含量较高的植物所致^[3].土壤硒是植物硒的最终来源,因此开展土壤硒的相关研究对人体健康具有重要意义.我国目前已在湖北^[4]、陕西^[5]、安徽^[6]、江西^[7]、浙江^[8]、海南^[9]、贵州^[10]、青海^[11]、新疆^[12]等地发现富硒土壤资源.作为“中国红枣产业龙头县”,新疆维吾尔自治区(以下简称“新疆”)若羌县土壤硒研究目前还处于空白.

本文以若羌县绿洲带土壤为研究对象,探讨研究区内不同土壤类型、成土母质、土地利用方式、土壤理化性质等对土壤硒含量的影响及其空间分布,以为当地富硒农业开发及地方性疾病防治等提供科学依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区概况

若羌县绿洲带位于新疆南部,地处塔克拉玛干沙漠南缘、昆仑山北麓,介于东经 87°50′—88°35′,北纬 38°46′—39°25′之间.属于暖温带大陆性干旱荒漠气候,四季分明,昼夜温差较大,降水稀少,蒸发量大.研究区从南向北地貌为山前冲洪积砾质平原、冲积细土平原.出露地层主要有第四系上更新统-全新统冲洪积层、第四系全新统冲积层和第四系全新统风积层.土壤母质包括冲积物、冲洪积物、湖积物和风积物等,土壤类型主要为棕漠土、灌淤土、盐土和草甸土.主要作物为小麦、核桃、红枣等.

1.2 样品采集与处理

2015 年 7—8 月在研究区根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166—2004)采用网格布点法采集土壤样,在采样点周围 50—100 m 范围内 3 处以上多点等量采集组成 1 个土壤样,采样深度为 0—20 cm,共采集 434 个土壤样品,其中农用地土壤 147 个,采样密度为每平方千米 1 个点;非农用地土壤 287 个,采样密度为 1 点/4 km².原始样品重量大于 1 kg,采集的样品经晾晒、过筛后装入封口袋室温避光保存.研究区土壤采样点分布见图 1.

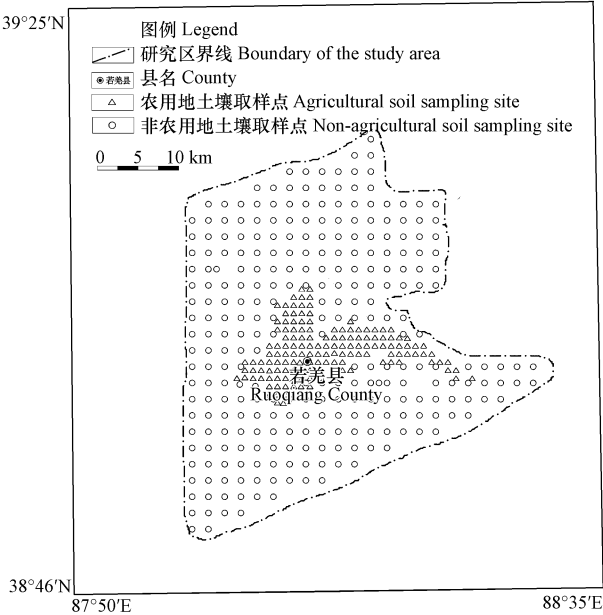


图 1 土壤采样点分布图

Fig.1 Map of sampling sites

1.3 分析项目与方法

土壤样品分析由国土资源部乌鲁木齐矿产资源监督检测中心(新疆矿产实验研究所)承担,并严格按照《多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T 0258—2014)进行.采用原子荧光法测定土壤 Se、As 和 Hg,检出限分别为 0.01 mg·kg⁻¹、0.112 mg·kg⁻¹和 0.0005 mg·kg⁻¹;X 射线荧光光谱法测定土壤中的 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O、CaO、Cl、Cr、Mn 和 P,检出限分别为 0.055% (质量分数,下同)、0.049%、0.004%、0.008%、0.003%、6.968 mg·kg⁻¹、3.505 mg·kg⁻¹、3.254 mg·kg⁻¹和 3.880 mg·kg⁻¹;等离子体原子发射光谱

法测定土壤中的 Cd 和 Pb,检出限分别为 0.002 mg·kg⁻¹和 0.650 mg·kg⁻¹;全谱直读光谱法测定土壤中的 Ni、Cu、Zn、Na₂O 和 MgO 检出限分别为 0.744 mg·kg⁻¹、0.952 mg·kg⁻¹、0.644 mg·kg⁻¹、0.006% 和 0.0001%;发射光谱法测定土壤中的 B,检出限为 0.902 mg·kg⁻¹;ICP-MS 法测定土壤中的 I,检出限为 0.09 mg·kg⁻¹;凯氏法测定土壤中的 N,检出限为 19.58 mg·kg⁻¹;红外碳硫仪测定土壤中的全碳(TC),检出限为 0.013%;容量法测定土壤中的有机碳(C_{org}),检出限为 0.063%;离子选择电极法测定土壤中的 F,检出限为 36.0 mg·kg⁻¹;燃烧碘量法测定土壤中的 S,检出限为 8.194 mg·kg⁻¹;pH 计电极法测定土壤 pH,检出限为 0.03.剔除异常值后的土壤理化性质见表 1.

表 1 土壤的基本理化性质(n=434)

Table 1 General physical-chemical properties of the soil samples(n=434)

土壤属性 Soil property	pH(H ₂ O)	C _{org} /%	黏粒 Clay /%	粉粒 Silt /%	砂粒 Sand /%
算术平均值	8.31	0.28	43.55	41.62	14.83
变幅	7.55—9.16	0.09—1.2	0—67	0—67	0—67
标准差	0.30	0.18	22.10	17.59	17.97
变异系数/%	3.61	63.59	50.75	42.26	121.21

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 土壤 Se 含量

研究区表层土壤 Se 含量变幅为 0.06—0.47 mg·kg⁻¹,平均值为 0.18 mg·kg⁻¹,低于全国(0.29 mg·kg⁻¹)^[13-14]、新疆伊犁哈萨克自治州(0.33 mg·kg⁻¹)^[15]以及新疆天山北坡乌鲁木齐至沙湾地区的土壤 Se 含量均值(0.63 mg·kg⁻¹)^[16],与新疆乌鲁木齐市(0.2 mg·kg⁻¹)较为接近^[17].由表 2 可以看出,研究区 77.0%表层土壤属于硒反应不足和潜在不足;足硒面积为 16.8%,仅有 6.2%面积属于富 Se 土壤,零星分布在研究区中部(图 2).

表 2 表层土壤 Se 含量安全阈值^[18]

Table 2 Safety threshold value of selenium content in topsoil related to human health^[18]

土壤分级 Soil grade	Se 浓度阈值 Selenium content threshold/(mg·kg ⁻¹)	Se 效应 Selenium effect	面积比例 Area proportion/%
缺 Se	≤0.125	Se 反应不足	41.5
边缘	0.125—0.175	Se 潜在不足	35.5
中等	0.175—0.4	足 Se	16.8
高 Se	0.4—3	富 Se	6.2
过量	>3	Se 中毒	0

2.2 Se 在不同土壤类型中的分布

研究区灌淤土和棕漠土面积较大,硒含量在不同土壤类型中表现为(表 3):盐土(0.13 mg·kg⁻¹)<棕漠土(0.15 mg·kg⁻¹)<灌淤土(0.22 mg·kg⁻¹)<草甸土(0.23 mg·kg⁻¹),与中国主要土壤类型中 Se 含量基本吻合^[19-20].灌淤土和草甸土的 Se 含量均值高于研究区均值,由于灌淤土和草甸土黏粒和有机碳含量较高,Se 在迁移过程中易被黏土矿物和有机碳吸附,导致硒酸盐物质的积累,故 Se 含量相对较高.而盐土由于 Na⁺分散作用导致黏粒含量较低,并且其较高的 pH 能增强 Se 的甲基化从而增加 Se 在土壤中的迁移性进而影响了 Se 的含量^[21].灌淤土受耕作、施肥、灌溉淤积等影响,Se 含量变异系数较大.

2.3 土壤 Se 含量的影响因素

2.3.1 土壤理化性质的影响

土壤理化性质会影响硒的吸附^[22],研究区表层土壤 Se 含量与土壤黏粒、粉粒、砂粒、pH、总氮 TN、SiO₂、总硫 TS、CaO、K₂O、MgO、Na₂O、有机碳 C_{org}、Mn、Al₂O₃和 Fe₂O₃等土壤理化性质的 Spearman 相关分析见表 4.结果表明,土壤 Se 含量与黏粒含量、pH、TN、CaO、MgO、C_{org}、Mn 和 Fe₂O₃呈极显著正相关;与砂

粒、粉粒含量和 SiO_2 呈极显著负相关;与 K_2O 呈显著负相关;与 TS 、 Na_2O 和 Al_2O_3 无显著相关性。

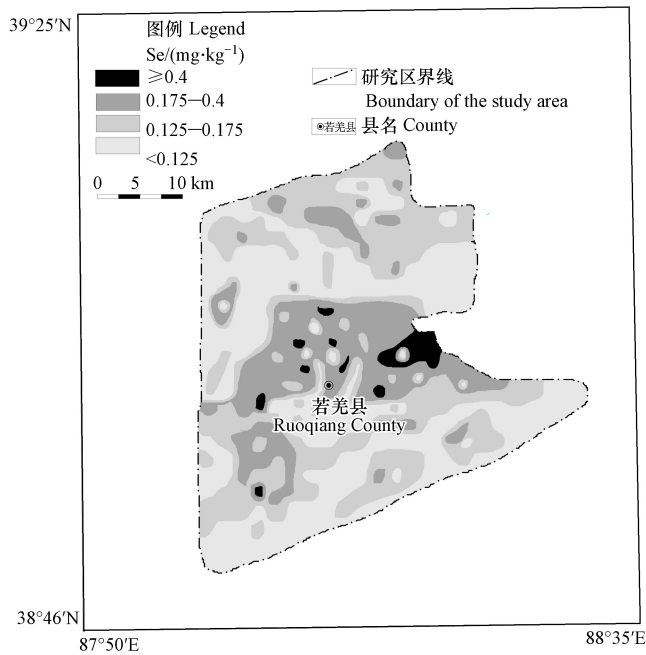


图 2 表层土壤 Se 浓度空间分布图
Fig.2 Spatial distribution of selenium contents in topsoil

表 3 不同土壤类型 Se 含量
Table 3 Selenium contents of different soil types

土壤类型 Soil type	样品数 Samples	平均值 Average/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变幅 Range/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差 Standard deviation/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variation/%
灌淤土	139	0.22	0.07—0.47	0.10	46.64
棕漠土	131	0.15	0.08—0.47	0.07	44.94
盐土	107	0.13	0.09—0.28	0.04	30.52
草甸土	57	0.23	0.06—0.47	0.10	45.62
总计	434	0.18	0.06—0.47	0.08	41.93

前人研究表明^[23],土壤 Se 含量与 pH 大多呈负相关关系,与本文研究结果不同.而龚河阳等^[24]在吉林省西部研究也发现土壤铁锰结合态硒与土壤 pH 呈明显正相关,孙朝等^[25]在四川省成都经济区研究得出土壤中有效硒与土壤 pH 呈较弱的正相关关系.有文献报道,在碱性土壤中,难溶的硒酸盐被氧化为易溶的亚硒酸盐,随着土壤 pH 升高,水溶性硒增加,使得硒与土壤 pH 呈正相关关系^[26].而本文研究中土壤 pH 偏碱性,使得土壤 Se 含量随 pH 升高而升高.研究区土壤 Se 含量与 TN 呈显著正相关关系,这与李杰^[27]等和陈娟等^[28]的研究结果相同,而 C_{org} 和 TN 呈极显著正相关关系可能是土壤 Se 含量与 TN、 C_{org} 均呈极显著正相关关系的原因.土壤中铁、锰氧化物、黏粒含量以及有机碳对 Se 有较强的吸附作用^[29-31],由于黏粒含量可以影响土壤物理化学吸附与离子交换作用的强弱,进而影响 Se 的吸附程度^[32].较高的黏粒含量通过有机-无机复合体的形式使 Se 富集效果显著^[33-34].廖金凤^[35]研究得出黏粒中 Se 含量是土壤平均 Se 含量的 4 倍,证明了土壤黏粒对 Se 有显著的吸附和富集作用.土壤 C_{org} 与有机质含量相关,而有机质对土壤 Se 起吸附和固定作用,研究表明,表层土壤中 80% 以上的 Se 与有机质结合^[36-38].且土壤 C_{org} 含量较黏土矿物对土壤 Se 有更强的吸附能力^[39].研究区土壤 Se 含量与 CaO 的正相关性可能与亚硒酸盐易受 CaO 的固定有关^[40],且土壤 Se 含量与 MgO 相关性最好,表明土壤 Se 含量与成土过程有密切联系^[41].研究表明,盐碱化、沙化对硒具有贫化作用^[3],这和研究区低硒区域与高 K_2O 含量盐碱化土壤吻合,且 Se 与 SiO_2 、 K_2O 呈负相关关系表明石英、长石等矿物含量相对高的沙质土壤,Se 含量相对较低^[42].砂粒含量通常与 Se 含量呈负相关特性^[43-44],本研究证实了此观点.

表 4 土壤 Se 含量与土壤理化性质的相关系数 (n=434)
Table 4 Correlation coefficient between soil selenium contents and soil physicochemical properties (n=434)

Se	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	pH	TN	SiO ₂	TSS	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	C _{org}	Mn	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Se	1														
砂粒		1													
粉粒			1												
黏粒				1											
pH					1										
TN						1									
SiO ₂							1								
TSS								1							
CaO									1						
K ₂ O										1					
MgO											1				
Na ₂ O												1			
C _{org}													1		
Mn														1	
Al ₂ O ₃															1
Fe ₂ O ₃															

注: ** 表示极显著相关 (P<0.01), * 表示显著相关 (P<0.05).
Note: ** indicates extremely significant correlation (P<0.01), * indicates significant correlation (P<0.05).

2.3.2 成土母质的影响

不同成土母质发育表层土壤 Se 含量由高到低顺序为:洪积物>风积物>沼泽沉积物>冲洪积物>冲积物>湖积物(表 5).除洪积物和风积物母质土壤 Se 含量大于研究区平均值外,其余均低于研究区平均值.方差分析显示,风积物发育的表层土壤 Se 含量与其他 5 种母质发育的表层土壤 Se 含量呈显著差异 ($P<0.05$).

表 5 不同母质发育表层土壤 Se 含量

Table 5 Selenium contents of topsoil developed from different parent materials

母质类型 Parent material	样品数 Samples	平均值 Average/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变幅 Range/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差 Standard deviation/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variation/%
冲洪积物	161	0.16	0.07–0.47	0.08	48.78
冲积物	26	0.15	0.08–0.26	0.05	31.53
风积物	96	0.24	0.06–0.47	0.11	44.53
洪积物	8	0.25	0.11–0.47	0.14	56.77
湖积物	37	0.14	0.09–0.23	0.04	25.16
沼泽沉积物	106	0.17	0.09–0.47	0.08	50.68
总计	434	0.18	0.06–0.47	0.08	42.91

2.3.3 土地利用方式的影响

研究区不同土地利用方式土壤 Se 含量略有差异:水田>旱田>林地>草地>未利用地>城镇用地>水域(表 6).此结论与徐强等^[44]研究结果相似,因旱田土壤通气条件和 Eh 较水田高,有机 Se 易分解为 Se^{4+} 和 Se^{6+} ,分别被粘土矿物和植被吸附吸收.研究表明,0—20 cm 土层深度耕地和林地的土壤有机质和全氮含量较其他土地利用方式下的含量高,这与耕地和林地的土壤 Se 含量密切相关^[45].而耕地土壤 Se 含量平均值是城镇用地土壤 Se 含量平均值的 2 倍左右,说明人类活动的强弱或利用方式不同对土壤 Se 含量影响程度不同.耕地过程中的施肥也会导致土壤 Se 含量增加.

表 6 不同土地利用方式表层土壤 Se 含量

Table 6 Selenium contents in topsoils under different land use types

土地利用方式 Type of land use	样品数 Samples	平均值 Average/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变幅 Range/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差 Standard deviation/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variation/%
草地	6	0.18	0.06–0.44	0.14	76.50
林地	117	0.22	0.07–0.47	0.10	45.32
水田	3	0.32	0.25–0.39	0.07	22.18
旱田	6	0.26	0.17–0.47	0.11	42.93
水域	6	0.09	0.08–0.11	0.02	16.13
城镇用地	16	0.14	0.09–0.21	0.03	22.92
未利用地	280	0.16	0.08–0.47	0.08	48.69
总计	434	0.18	0.06–0.47	0.09	39.24

3 结论(Conclusion)

- (1)若羌县表层土壤 Se 含量变幅为 0.06—0.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 0.18 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,总体属于中等、边缘及缺硒土壤,研究区中部零星分布有 6.2%面积的富 Se 土壤,研究区较有特色且品质较好的农产品红枣可作为重点富硒产品进行开发利用.
- (2)若羌县表层土壤 MgO 、 C_{org} 、黏粒含量、TN 和铁锰氧化物是影响土壤 Se 含量的主要因素.
- (3)不同土壤类型、成土母质及土地利用方式中表层土壤 Se 含量差异明显,人类活动也是土壤 Se

富集的主要影响因素.

参考文献 (References)

- [1] 商靖敏,罗维,吴光红,等.洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素[J].环境科学,2015,36(1):301-308.
SHANG J M, LUO W, WU G H, et al. Spatial Distribution of Se in soils from different land use types and its influencing factors within the Yanghe Watershed, China[J].Environmental Science, 2015,36(1):301-308(in Chinese).
- [2] 彭琴,李哲,梁东丽,等.不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制[J].环境科学,2017,38(4):1667-1674.
PENG Q, LI Z, LIANG D L, et al. Dynamic differences of uptake and translocation of exogenous selenium by different crops and its mechanism[J]. Environmental Science, 2017,38(4):1667-1674(in Chinese).
- [3] 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(in Chinese).
- [4] 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].武汉:中国地质大学,2012:30-39.
GUO Y. Geochemistry of selenium in Enshi area and experimental study of selenium-enriched crop cultivation[D]. Wuhan: China University of Geosciences,2012:30-39(in Chinese).
- [5] 王玮祺,吴思源,王小垚,等.陕西紫阳富硒核心区周边土壤中硒的赋存形态分析[J].环境化学,2014,33(11):1999-2000.
WANG W Q, WU S Y, WANG X Y, et al. Analysis of the speciation of selenium in the soil around the selenium-rich core area of Ziyang, Shanxi Province[J]. Environmental Chemistry,2014,33(11):1999-2000(in Chinese).
- [6] 周乾坤,周守标,孔娟娟,等.施硒对紫云英硒积累和硒形态的影响研究[J].水土保持学报,2014,28(4):304-309.
ZHOU Q K, ZHOU S B, KONG J J, et al. Effects of applying amount of selenium on selenium accumulation and selenium forms of astragalus sinicus[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2014,28(4):304-309(in Chinese).
- [7] 文帮勇,张涛亮,李西周,等.江西龙南地区富硒土壤资源开发可行性研究[J].中国地质,2014,41(1):256-263.
WEN B Y, ZHANG T L, LI X Z, et al. A feasibility study of selenium-rich soil development in Longnan county of Jiangxi Province[J]. Geology in China,2014,41(1):256-263(in Chinese).
- [8] 郦逸根,董岩翔,郑洁,等.浙江富硒土壤资源调查与评价[J].第四纪研究,2005,25(3):323-330.
LI Y G, DONG Y X, ZHENG J, et al. Selenium: Abundant soil survey and assessment in Zhejiang[J]. Quaternary Sciences,2005,25(3):323-330(in Chinese).
- [9] 耿建梅,王文斌,温翠萍,等.海南稻田土壤硒与重金属的含量、分布及其安全性[J].生态学报,2012,32(11):3477-3486.
GENG J M, WANG W B, WEN C P, et al. Concentrations and distributions of selenium and heavy metals in Hainan paddy soil and assessment of ecological security[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(11):3477-3486(in Chinese).
- [10] 任海利,高军波,龙杰,等.贵州开阳地区富硒地层及风化土壤地球化学特征[J].地球与环境,2012,40(2):161-170.
REN H L, GAO J B, LONG J, et al. Geochemical characteristics of selenium-rich strata and weathered soil from Kaiyang county, Guizhou Province[J].Earth and Environment,2012,40(2):161-170(in Chinese).
- [11] 宋晓珂,李宗仁,王金贵,等.青海东部富硒土壤中硒的形态和价态转化特征[J].干旱区资源与环境,2018,32(6):136-142.
SONG X K, LI Z R, WANG J G, et al. Speciation and valence state transformation characteristics of selenium-rich soil in eastern Qinghai [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2018,32(6):136-142(in Chinese).
- [12] 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.
ZHANG D, ZHAI Y, ZHANG N, et al. Correlation between soil selenium content and rice grain selenium content in Xinjiang rice production areas[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2017(1):139-143(in Chinese).
- [13] 刘铮.中国土壤微量元素[M].南京:江苏科学技术出版社,1996,330-332.
LIU Z. Chinese soil trace elements[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1996,330-332(in Chinese).
- [14] 魏盛盛,陈静生,吴燕玉,等.中国土壤环境背景值研究[J].环境科学,1991,12(4):12-20.
WEI F S, CHEN J S, WU Y Y, et al. Study on the background contents on 61 elements of soils in China[J].Environmental Science,1991,12(4):12-20(in Chinese).
- [15] 王琪,刘禹含,杨景娜,等.新疆伊犁土壤硒资源分布及与土壤性质的关系分析[J].农业资源与环境学报,2014,31(6):555-559.
WANG Q, LIU Y H, YANG J N, et al. Analysis on the distribution of selenium resources and its relationships with soil properties of Ili district, Xinjing uygur autonomous region, China[J].Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014,31(6):555-559(in Chinese).
- [16] 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 Urunqi to Shawan county[J].Geophysical & Geochemical Exploration, 2016,40(5):893-898(in Chinese).
- [17] 成杭新,李括,李敏,等.中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J].地学前缘,2014,21(3):265-306.

- CHEN H X, LI K, LI M, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014,21(3):265-306(in Chinese).
- [18] 谭见安.环境生命元素与克山病[M].北京:中国医药科技出版社,1996,1-265.
- TAN J A. Environmental life element and keshan disease[M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 1996,1-265 (in Chinese).
- [19] 王世纪,吴小勇,刘军保,等.浙北地区土壤硒元素特征及其生态环境效应评价[J].*中国地质*,2004,31(S1):118-125.
- WANG S J, WU X Y, LIU J B, et al. Characteristics of elemental selenium in soils and evaluation of eco-environmental effects in northern Zhejiang[J]. *Geology in China*,2004,31(S1):118-125(in Chinese).
- [20] TAN J A, ZHU W Y, WANG W Y, et al. Selenium in soil and endemic diseases in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 284(1):227-235.
- [21] 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, KANG 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(in Chinese).
- [22] 冯璞阳,李哲,者渝芸,等.我国 18 种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究[J].*环境科学*,2016,37(8):3160-3168.
- FENG P Y, LI Z, ZHE Y Y, et al. Selenate adsorption and desorption in 18 kinds of Chinese soil with their physicochemical properties [J]. *Environmental Science*,2016,37(8):3160-3168(in Chinese).
- [23] 章海波,骆永明,吴龙华,等.香港土壤研究. II:土壤硒的含量、分布及影响因素[J].*土壤学报*,2005,42(3):404-410.
- ZHANG H B, LUO Y M, WU L H, et al. Hong Kong soil researches II .distribution and content of selenium in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005,42(3):404-410(in Chinese).
- [24] 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, YANG 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(in Chinese).
- [25] 孙朝,侯青叶,杨忠芳,等.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*,2010,37(6):1760-1768.
- SUN Z, HOU Q Y, YANG Z F, et al. 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*, 2010,37(6):1760-1768(in Chinese).
- [26] 瞿建国,徐伯兴,龚书椿,等.上海不同地区土壤中硒的形态分布及其有效性研究[J].*土壤学报*,1998,35(3):398-403.
- QU J G, XU B X, GONG S C, et al. Study on speciation distribution and availability of selenium in different soils of Shanghai[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998,35(3):398-403(in Chinese).
- [27] 李杰,杨志强,刘枝刚,等.南宁市土壤硒分布特征及其影响因素探讨[J].*土壤学报*,2012,49(5):1012-1020.
- LI J, YANG Z Q, LIU Z G, et al. Distribution of selenium in soils of Nanning City and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012,49(5):1012-1020(in Chinese).
- [28] 陈娟,宋帅,史雅娟,等.富硒农业生产基地土壤硒资源空间分布特征及评价[J].*环境化学*,2015,34(12):2185-2190.
- CHEN J, SONG S, SHI Y J, et al. Spatial distribution and assessment of selenium in soils of a Se-enrich agricultural production base[J]. *Environmental Chemistry*, 2015,34(12):2185-2190(in Chinese).
- [29] BEN AMARA I, TROUDI A, GAROUI E, et al. Protective effects of selenium on methimazole nephrotoxicity in adult rats and their offspring[J]. *Experimental and Toxicologic Pathology*, 2011,63(6):553-561.
- [30] TOLU J, THIRY Y, BUENO M, et al. Distribution and speciation of ambient selenium in contrasted soils, from mineral to organic rich[J]. *Science of the Total Environment*,2014,479-480(1):93-101.
- [31] 侯少范,王丽珍,李德珠,等.控制土壤硒化学行为因素的探讨[J].*地理研究*,1991,10(4):12-17.
- HOU S F, WANG L Z, LI D Z, et al. The study of the controlling factors of selenium chemical behavior in soil[J]. *Geographical Research*, 1991,10(4):12-17(in Chinese).
- [32] 陈怀满.环境土壤学[M].北京:科学出版社,2005:180.
- CHEN H M. Environmental soil science[M]. Beijing: Science Press,2005:180(in Chinese).
- [33] SHAND C A, ERIKSSON J, DAHLIN A S, et al. Selenium concentrations in national inventory soils from Scotland and Sweden and their relationship with geochemical factors[J]. *Journal of Geochemical Exploration*,2012, 121(121):4-14.
- [34] WANG M C, CHEN H M. Forms and distribution of selenium at different depths and among particle size fractions of three Taiwan soils[J]. *Chemosphere*,2003,52(3):585-593.
- [35] 廖金凤.海南省土壤中的硒[J].*地域研究与开发*,1998,17(2):66-69.
- LIAO J F. Selenium in soils of Hainan Province[J]. *Areal Research and Development*, 1998,17(2):66-69(in Chinese).
- [36] WU G H, SHANG J M, PAN L, et al. Heavy metals in surface sediments from nine estuaries along the coast of Bohai Bay, Northern China [J]. *Marine Pollution Bulletin*,2014,82(1-2):194-200.
- [37] 黄春雷,宋明义,魏迎春.浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨[J].*环境科学*,2013,34(11):4405-4410.
- HUANG C L, SONG M Y, WEI Y C, et al. Study on selenium contents of typical selenium-rich soil in the middle area of Zhejiang and its

- influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(11):4405-4410(in Chinese).
- [38] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 环境中硒的生物地球化学循环和营养调控及分异成因[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(10):1197-1203.
ZHAO S H, YU W T, ZHANG L, et al. Biogeochemical cycling of selenium, nutrition adjustment and differentiation cause in environment [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(10):1197-1203(in Chinese).
- [39] WANG S S, LIANG D L, WANG D, et al. Selenium fractionation and speciation in agriculture soils and accumulation in corn (*Zea mays* L.) under field conditions in Shaanxi Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 427-428(12):159-164.
- [40] 杨良策, 李明龙, 杨延安, 等. 湖北省恩施市表层土壤硒含量分布特征及其影响因素研究[J]. *资源环境与工程*, 2015, 29(6):825-829, 848.
YANG L C, LI M L, YANG T A, et al. Study on selenium content distribution of surface soil and its influencing factors in Enshi City, Hubei Province[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2015, 29(6):825-829, 848(in Chinese).
- [41] 罗友进, 韩国辉, 孙协平, 等. 三峡库区(重庆段)土壤硒分布特征及影响因素[J]. *土壤*, 2018, 50(1):131-138.
LUO Y J, HAN G H, SUN X P, et al. Distribution of soil selenium in three gorges reservoir region (Chongqing section) and its influential factors[J]. *Soils*, 2018, 50(1):131-138(in Chinese).
- [42] 孙梓耀, 王菲, 崔玉军, 等. 黑龙江松嫩平原南部土壤硒元素含量及其分布特征的影响因素[J]. *黑龙江农业科学*, 2016, 38(10):28-35.
SUN Z Y, WANG F, CUI Y J, et al. Influence factors of soil selenium content and its distribution characteristics in south of the songnen plain in Heilongjiang Province[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2016, 38(10):28-35(in Chinese).
- [43] ANTANA A, JADVYG L, SARUNAS A, et al. Selenium concentration dependence on soil properties [J]. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2008, 1(6):163-167.
- [44] 徐强, 迟凤琴, 匡恩俊, 等. 方正县土壤硒的分布特征及其与土壤性质的关系[J]. *土壤通报*, 2015, 46(3):597-602.
XU Q, CHI F Q, KUANG E J, et al. Distribution characteristics of selenium in Fangzheng county and its relationship with soil properties [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(3):597-602(in Chinese).
- [45] 王雪梅, 柴仲平, 杨雪峰, 等. 荒漠绿洲区不同土地利用方式下土壤养分差异分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1):91-96.
WANG X M, CHAI Z P, YANG X F, et al. Analysis on soil nutrients difference under different land use patterns in desert oasis region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1):91-96(in Chinese).