

黑龙江省克山县土壤-作物系统硒元素地球化学特征

张哲寰^{1,2}, 赵 君^{1,2}, 宋运红^{1,2}, 贺鹏飞^{1,2}, 魏明辉^{1,2}

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 中国地质调查局 黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 130024

摘 要: 黑龙江省克山县是我国克山病区。通过分析土壤表层(0~20 cm)样品 809 件, 深层(150~200 cm)样品 205 件, 对不同类型土壤中微量元素 Se 的含量、有效态含量、农作物籽实 Se 含量特征进行了研究。结果显示: 土壤表层 Se 元素含量平均为 0.249×10^{-6} , 低于全国平均值, 高于世界、和东北平原黑龙江省土壤平均值, 土壤表层 Se 含量以足硒为主要特征, 足硒土壤面积达 93.95%; 土壤深层 Se 含量平均为 0.167×10^{-6} , 明显低于土壤表层, Se 含量不足或缺 Se 土壤面积占 62.62%; 不同类型土壤表层 Se 含量由高到低顺序为黑钙土>草甸土>黑土>暗棕壤, 深层 Se 含量由高到低依次为暗棕壤>黑土>草甸土>黑钙土, 与土壤表层高低顺序相反; 不同土地利用类型 Se 含量显示建设用地和耕地 Se 含量较高, 林地和水利用地含量较低, 反映 Se 含量受人类活动影响明显; 玉米、大豆、水稻主要农作物籽实 Se 含量平均为 0.033×10^{-6} , 呈低 Se 特征。

关键词: 土壤; 硒含量; 籽实; 地球化学; 克山县; 黑龙江省

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyz.2020.06.013

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SELENIUM IN THE SOIL-CROP SYSTEM OF KESHAN COUNTY, HEILONGJIANG PROVINCE

ZHANG Zhe-huan^{1,2}, ZHAO Jun^{1,2}, SONG Yun-hong^{1,2}, HE Peng-fei^{1,2}, WEI Ming-hui^{1,2}

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Key Laboratory of Black Land Evolution and Ecological Effects, CGS, Shenyang 110034, China

Abstract: Keshan County in Heilongjiang Province is the place after which the endemic Keshan disease was named. By analyzing 809 topsoil samples (0–20 cm) and 205 deep-soil samples (150–200 cm), the paper studies the characteristics of selenium (Se) content in soil and crop seeds and available Se content by different soil types. The results show that the average Se content in surface soil is 0.249×10^{-6} , lower than the national average and higher than that of the world and Heilongjiang Province in Northeast China Plain, mainly characterized by Se-sufficiency, with the area accounting for 93.95%. The average Se content in deep soil is 0.167×10^{-6} , obviously lower than that in surface soil, with the Se-low and Se-deficient soil areas making up 62.62%. The Se content in surface layer of different soil types from high to low is chernozem and meadow soil (the same), followed by black soil and dark brown soil. On the contrary, the Se content in deep layer is dark brown soil, black soil, meadow soil and chernozem in order. The Se content of different land use types show that the Se content in construction land and cultivated land is high, that in forest land and water conservancy land low, indicating the Se content is obviously affected by human activities. The Se content in seeds of main crops such as maize, soybean and rice is 0.033×10^{-6} averagely, showing the characteristics of low-Se.

Key words: soil; Se content; crop seed; geochemistry; Keshan County; Heilongjiang Province

收稿日期:2020-08-25;修回日期:2020-09-08. 编辑:黄欣、张哲.

基金项目:中国地质调查局“兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查”项目(编号 DD20190520).

作者简介:张哲寰(1968—),女,工程师,主要从事环境地质调查与研究工作,通信地址 沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail://601984163@qq.com

0 引言

硒(Se)是人和动物必需的微量元素,其丰缺与人体健康关系密切^[1]。硒对人体具有多重作用,人体缺硒会造成免疫机能下降,引发克山病、大骨节病等多种缺硒疾病^[2-6],人体过量摄入硒则会引起硒中毒^[7-8],而适量摄入 Se 能预防癌症及心血管疾病、增加机体免疫力、抗氧化和延缓衰老^[9-12]。因此 Se 元素越来越受到人们的关注。

土壤中的 Se 主要来源于成土母质,众多研究表明 Se 的形态、含量及分布受土壤 pH 值、黏粒、有机质及铁铝化合物等因素影响^[13-17]。Se 在土壤中的含量、形态以及在土壤—植物的迁移转化等是影响籽实中 Se 含量的主要因素,因此,有必要将土壤—作物系统作为一个整体来研究 Se 元素的分布、迁移转化和积累等特征,可以为改善土壤生态环境质量、开发富硒农产品提供依据。

1 研究区概况

黑龙江省克山县位于松嫩平原北部高平原区,小兴安岭南缘向松嫩低平原的过渡地带,面积 3189.26 km²,地貌为侵蚀堆积沙、土波状高平原。克山县气候属寒温带大陆性季风气候,一年四季分明,主要河流有乌裕尔河与润津河,主要土壤类型有黑土、草甸土、暗棕壤、黑钙土,主要土地利用类型为耕地和林地。克山县是黑龙江省产粮大县,有耕地 2530 km²,占土地面积的 78.0%。主要农作物有玉米、大豆、水稻、马铃薯及杂粮。克山县曾是我国克山病的重病区,1907~1945 年这里流行过 3 次大的无名疾病,1935 年把这种病因不明的无名疾病命名为克山病^[18]。

2 样品分析

2.1 样品采集

以克山县全域为研究区,网格化定位采样。土壤表层(0~20 cm)每 1 km² 采集一个土样,共采集土样 3244 件。按照 2 km × 2 km 的格网,将 4 个土样混合成一个分析样品,共组合土壤表层分析样品 809 件。深层样(150~200 cm)每 4 km² 采集一个样品,共采集 824 件深层样品,按照 4 km × 4 km 的格网,将每 4 件土样混合组成一个分析样品,共组合深层分析样品 205 件。另采集根系土样品 3 件,籽实样品 24 件。

2.2 分析测试

土壤表层样品 Se 元素全量、有效态 Se 含量采用 HG-AFS 方法测试,籽实样品 Se 元素含量采用 ICP-AES 方法测试。样品分析由具有 MA 认证资质的辽宁省地质矿产研究院有限责任公司实验室测试完成。

2.3 数据处理方法

采用 ArcGIS 软件和 SPSS25 进行数据处理和分析。

3 结果与讨论

3.1 土壤 Se 地球化学特征

3.1.1 土壤表层 Se 含量及比较

克山县土壤表层 Se 含量范围值 $0.098 \times 10^{-6} \sim 0.460 \times 10^{-6}$,平均 0.249×10^{-6} ,变异系数 0.185,属弱分异型(见表 1)。按照谭见安对 Se 生态效应评价划分的标准^[4],克山县土壤表层 Se 含量以足 Se 为主,足 Se 土壤面积占全县总面积的 93.95%。与其他地区相比,克山县土壤 Se 含量平均值略低于全国土壤,而高于世界、黑龙江省、松嫩平原南部、吉林省西部、东北平原、中国东北土壤 Se 含量平均值,也高于黑龙江省克山病区和青藏高原克山病区。

3.1.2 不同类型土壤 Se 含量

克山县土壤类型主要有黑土、草甸土、暗棕壤和黑钙土,其面积分别占全县面积的 61.86%、31.69%、5.27%和 0.95%。不同类型土壤表层 Se 含量在 $0.191 \times 10^{-6} \sim 0.254 \times 10^{-6}$,平均 0.249×10^{-6} (见表 2),由大到小的顺序依次是黑钙土、草甸土>黑土>暗棕壤。从变异系数(CV)上看,暗棕壤和草甸土属于中分异型,黑土、黑钙土为弱分异型,表明不同类型土壤 Se 元素含量空间分布差异不大。

深层土壤 Se 含量变化范围值在 $0.124 \times 10^{-6} \sim 0.173 \times 10^{-6}$,平均值 0.167×10^{-6} ,均低于同类型土壤表层 Se 含量。深层土壤中 Se 含量基本代表了原生自然成土环境下 Se 的背景值,不同类型土壤深层 Se 含量由高到低依次是暗棕壤>黑土>草甸土>黑钙土,这一顺序恰好与土壤表层 Se 含量高低顺序相反(图 1)。从元素变异系数上看,各类土壤深层 Se 含量均属中分异型。用环境富集系数^[27](土壤表层 Se 含量实测值与深层土壤 Se 含量实测值的比值)作为衡量土壤 Se 富集程度的指标,富集系数越大,说明 Se 越趋于在土壤表层富集,反之则为贫化。计算结果显示黑钙土和草甸

表 1 研究区与其他地区土壤表层 Se 含量对比
Table 1 Topsoil Se contents in the study area and other areas

地区	样品数	最小值/ 10^{-6}	最大值/ 10^{-6}	平均值/ 10^{-6}	标准差	变异系数(CV)	数据来源
克山县	809	0.098	0.460	0.249	0.046	0.185	本文
黑龙江省	400	0.008	0.660	0.147			文献[19]
黑龙江省松嫩平原南部				0.204			文献[20]
吉林省西部				0.117			文献[21]
东北平原		0.010	5.300	0.184			文献[22]
中国东北		0.015	0.540	0.108			文献[23]
青藏高原克山病区		0.050	0.260	0.130			文献[24]
黑龙江省克山病区				0.189			文献[4]
全国土壤				0.290			文献[25]
世界土壤				0.200			文献[26]

表 2 不同类型土壤表层和深层 Se 含量
Table 2 Se contents in surface soil and deep soil by soil types

土壤类型	成土母质	样品数	最小值/ 10^{-6}	最大值/ 10^{-6}	平均值/ 10^{-6}	标准差	变异系数(CV)	富集系数	富集程度
全区		809	0.098	0.460	0.249	0.046	0.185	1.491	弱富集
暗棕壤	花岗岩和玄武岩风化物	40	0.11	0.33	0.191	0.04	0.211	1.098	自然状态
表层	草甸土	258	0.14	0.46	0.254	0.05	0.200	1.543	强烈富集
	黑钙土	7	0.23	0.31	0.254	0.03	0.120	2.016	强烈富集
	黑土	504	0.1	0.39	0.251	0.04	0.160	1.471	弱富集
全区		205	0.070	0.340	0.167	0.037	0.222		
暗棕壤	花岗岩和玄武岩风化物	8	0.070	0.240	0.173	0.052	0.301		
深层	草甸土	69	0.095	0.260	0.162	0.035	0.216		
	黑钙土	2	0.087	0.160	0.124	0.052	0.419		
	黑土	126	0.098	0.340	0.170	0.037	0.218		

注:1)因为分析数据服从正态分布,文中平均值均指算术平均值. 2)CV ≥ 0.5 为高分异型,0.2<CV ≤ 0.5 为中分异型,CV ≤ 0.2 为弱分异型. 3)环境富集系数 ≤ 0.6 ,发生显著贫化;0.6<环境富集系数 ≤ 0.85 ,发生弱贫化;0.85<环境富集系数 ≤ 1.15 ,自然状态;1.15<环境富集系数 ≤ 1.50 ,发生弱富集;环境富集系数>1.5,发生强烈富集.

土属强烈富集,黑土属弱富集,暗棕壤属自然状态. 其中,黑钙土富集系数最高为 2.016,说明土壤 Se 元素发生了显著的地表富集,人类活动对该地区土壤 Se 含量影响较大.

3.1.3 不同土地利用类型土壤表层 Se 含量

不同土地利用类型土壤 Se 含量平均值变化范围在 $0.216\times 10^{-6}\sim 0.266\times 10^{-6}$,其由高到低的顺序依次是建设用地>耕地>草地>林地>水利用地(表 3),显示土壤

Se 分布与人类活动强度关系密切,人类活动强越,Se 含量越高,这与前人研究成果一致^[28-30].

3.1.4 土壤 Se 含量等级评价

根据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中 Se 元素养分等级标准和谭见安对 Se 生态效应评价标准^[4],评价克山县土壤表层 Se 含量养分等级.结果显示全区土壤表层 Se 含量以适量为主,样品足 Se 率达 93.95%(表 4).从不同土壤类型看,黑钙土、黑

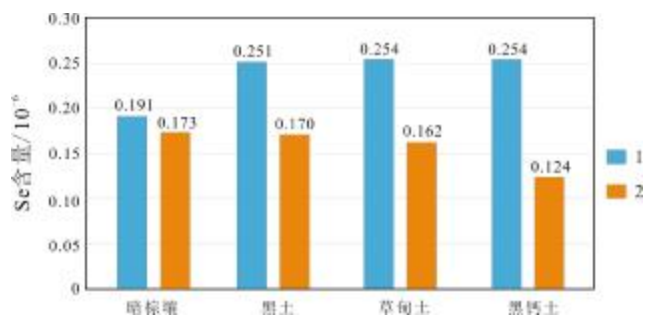


图 1 土壤表层与深层 Se 含量均值柱状图

Fig. 1 Histogram for average Se contents in surface and deep soil
1—表层土壤 (surface soil); 2—深层土壤 (deep soil)

土、草甸土属足 Se 状态, 足 Se 率分别为 100%、96.43%和 93.80%;暗棕壤足 Se 率为 62.50%,属于潜在 Se 不足状态.

表 3 不同利用类型土壤表层Se 含量
Table 3 Topsoil Se content by land use types

土地利用类型	样品数	最小值/ 10 ⁻⁶	最大值/ 10 ⁻⁶	平均值/ 10 ⁻⁶	标准差	变异 系数
草地	29	0.16	0.34	0.244	0.049	0.201
建设用地	35	0.2	0.35	0.266	0.038	0.143
耕地	655	0.13	0.46	0.252	0.044	0.175
林地	69	0.098	0.39	0.224	0.055	0.246
水域及水利用地	21	0.16	0.3	0.216	0.044	0.204

由于样品是网格化采集,也就说明全县有 93.95% 的土壤面积 Se 含量养分等级适量,面积为 299 631 hm²; Se 含量潜在不足样品占 5.43%, 面积为 17 318 hm²; Se 含量不足样品占 0.37%,面积为 1 180 hm²;富 Se 样品占 0.25%,面积 797 hm². 克山县土壤表层 Se 元素含

表 4 不同类型土壤 Se 含量等级
Table 4 Grading and percentage of Se content by soil types

土壤 Se 生态效应划分	含量分级	缺乏	边缘	适量	高	过剩
	Se 含量	≤0.125	>0.125~0.175	>0.175~0.40	>0.40~3.0	>3.0
	生态效应	Se 不足	潜在 Se 不足	足 Se	富 Se	Se 中毒
表层	全区	0.098~0.12	0.13~0.17	0.18~0.39	0.41~0.46	
	样品数	3	44	760	2	
	占例	0.37%	5.43%	93.95%	0.25%	
	暗棕壤	0.11	0.13~0.17	0.18~0.33		
	样品数	1	14	25		
	占例	2.50%	35.00%	62.50%		
	草甸土		0.14~0.17	0.18~0.38	0.41~0.46	
	样品数		14	242	2	
	占例		5.43%	93.80%	0.78%	
	黑钙土			0.23~0.31		
	样品数			7		
	占例			100.00%		
深层	黑土	0.098~0.12	0.13~0.17	0.18~0.39		
	样品数	2	16	486		
	占例	0.40%	3.17%	96.43%		
	全区	0.07~0.12	0.13~0.17	0.18~0.34		
	样品数	24	105	77		
	占例	11.65%	50.97%	37.38%		

含量单位:10⁻⁶.

量等级评价结果见图 2,从图中可以看出全县土壤表层基本不缺 Se,缺 Se 土壤只零星分布在研究区的东北部。

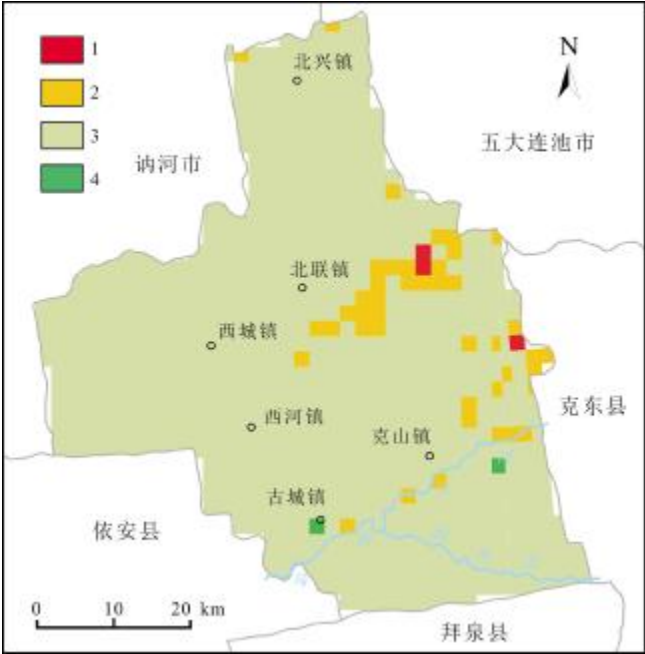


图 2 克山县土壤表层 Se 含量评价图

Fig. 2 Evaluation map of Se content in the surface soil of Keshan County

1—缺乏, $\leq 0.125 \times 10^{-6}$ (deficient); 2—边缘, $0.125 \times 10^{-6} \sim 0.175 \times 10^{-6}$ (marginal); 3—适量, $0.175 \times 10^{-6} \sim 0.40 \times 10^{-6}$ (appropriate); 4—高, $0.40 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-6}$ (high)

土壤深层样品足 Se 率为 37.38%,面积 94 970 hm^2 ;潜在 Se 不足占 50.97%,面积 172 370 hm^2 ; Se 缺乏占 11.65%,面积 51 560 hm^2 。克山县深层土壤总体处于 Se 潜在不足或不足状态,克山县土壤深层 Se 元素含量等级评价如图 3。

3.2 土壤表层 Se 含量影响因素

研究表明,土壤 pH 和土壤有机质含量(SOM)对 Se 含量有影响,研究区 pH 值介于 5.02~8.50 之间,不同酸碱度土壤中 Se 含量变化不大,均属弱分异型(见表 5、图 4)。克山县土壤 Se 在碱性土壤中含量相对较高,在酸性土壤中的含量相对较低,Se 含量与 pH 呈正相关关系(图 5),这与其他地区研究结果有所不同,原因有待于进一步研究。土壤 Se 含量与 SOM 呈正相关关系(图 6),这与多数学者研究结果一致^[1, 13, 18, 21]。

3.3 土壤表层 Se 有效态含量

元素 Se 在土壤中以不同形态存在,而能被植物吸

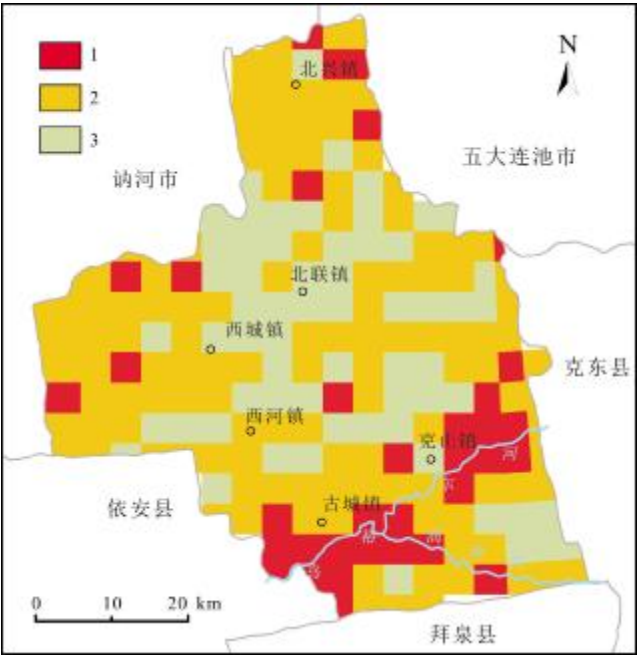


图 3 克山县土壤深层 Se 含量评价图

Fig. 3 Evaluation map of Se content in the deep soil of Keshan County

1—缺乏, $\leq 0.125 \times 10^{-6}$ (deficient); 2—边缘, $0.125 \times 10^{-6} \sim 0.175 \times 10^{-6}$ (marginal); 3—适量, $0.175 \times 10^{-6} \sim 0.40 \times 10^{-6}$ (appropriate)

表 5 不同酸碱度土壤表层 Se 含量特征

Table 5 Topsoil Se content by pH values

土壤酸碱度	pH	样本数	最小值/ 10^{-6}	最大值/ 10^{-6}	均值/ 10^{-6}	标准差	变异系数 (CV)
酸性	5.0~6.5	491	0.10	0.38	0.242	0.047	0.194
中性	6.5~7.5	265	0.14	0.46	0.258	0.043	0.167
碱性	7.5~8.5	55	0.20	0.41	0.265	0.042	0.158

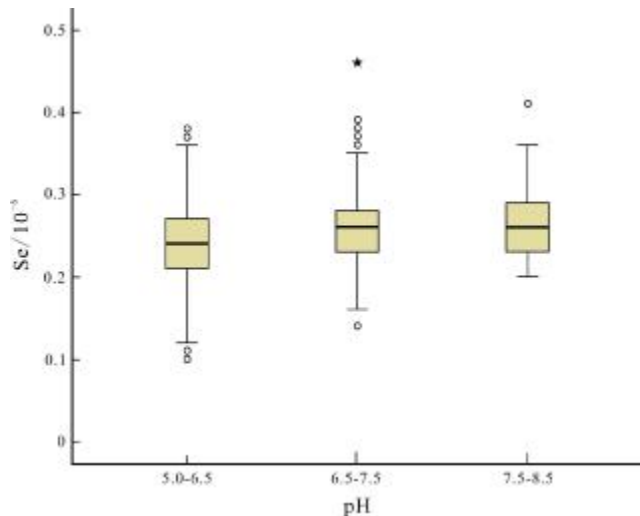


图 4 不同酸碱度土壤表层 Se 含量分布箱式图

Fig. 4 Box diagram of Se content distribution in topsoil by pH values

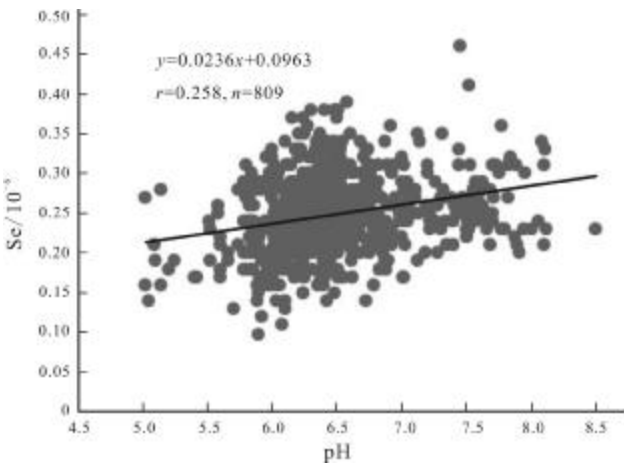


图 5 土壤表层 Se 含量与 pH 值关系散点图

Fig. 5 Scatter diagram of topsoil Se content vs. pH value

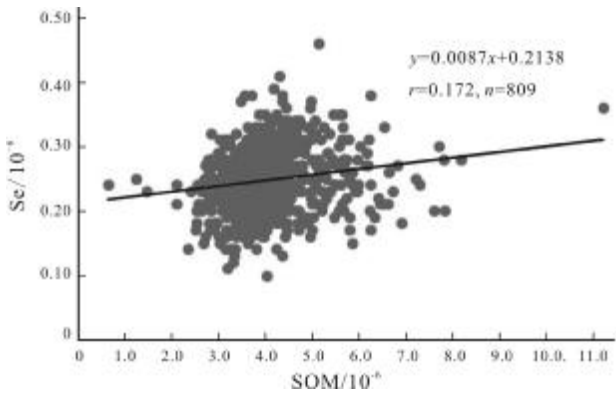


图 6 土壤表层 Se 含量与 SOM 关系散点图

Fig. 6 Scatter diagram of topsoil Se content vs. SOM

收的 Se 的形态称为有效态,它反映土壤对植物供应 Se 的能力. Se 的有效态主要是亚硒酸盐和硒酸盐. 克山县土壤硒的有效态含量在 $0.235\times10^{-9}\sim3.01\times10^{-9}$, 平均 1.488×10^{-9} , 变异系数 0.772 (表 6). 有效态 Se 含量为高分异型, 空间变异大. Se 的活化系数(有效态含量与全量比值)为 0.60%, 活化率低, 低于黑龙江省松嫩平原南部土壤 Se 的活化率(4.7%)^[31], 表明克山县土壤 Se 元素有效态转化程度较弱.

土壤 Se 生物有效性是多种因素综合作用的结果, 其中主要的影响因素包括土壤 pH、土壤有机质、土壤

胶体、硝酸盐和土壤水分, 多数研究认为土壤 pH 与 Se 植物有效性显著相关^[32-36].

土壤 pH 是通过影响 Se 在土壤中的价态和水溶性来影响 Se 的植物有效性. 研究区土壤呈弱酸性(pH 平均 6.48), 酸性土壤有利于 Se 的还原, 能增加亚硒酸盐(SeO_3^{2-})在土壤中 Se 的形态所占的比例, 但亚硒酸盐容易被与铁、铝水合物吸附, 从而降低 Se 的植物有效性. 此外, 降低 pH 还能提高土壤胶体对 Se 的吸附能力, 从而显著降低硒的植物有效性.

土壤中有机质对 Se 的植物有效性影响比较复杂, 它可以吸附固定 Se, 降低 Se 的有效性, 也可以在有机态 Se 较多, 且有利于有机物质矿化的条件下释放 Se.

土壤胶体物质能够以配位吸附的方式固定 Se, 主要胶体类型包括铁铝氧化物、黏土矿物、非晶态二氧化硅和碳酸盐, 这种固定吸附 Se 的能力很强, 可以显著降低土壤 Se 的植物有效性.

在硝酸盐含量较高的土壤中, 硒酸的还原受到抑制, 从而增加土壤 Se 的植物有效性.

3.4 籽实 Se 含量

人和动物获得 Se 主要来自各种食物, 籽实中 Se 是食物链中 Se 转化的重要环节. 相关研究表明, 人和动物缺 Se 和 Se 中毒之间的范围很窄, 如果食物中的 Se 含量小于 0.05×10^{-6} , 就会造成人体缺 Se, 而大于 3.0×10^{-6} , 又会产生中毒, 最安全的范围是 $0.100\times10^{-6}\sim0.360\times10^{-6}$ 之间^[35]. 本研究采集了玉米、大豆、水稻 3 种主食农作物, 测得 Se 平均含量分别为 0.022×10^{-6} 、 0.042×10^{-6} 和 0.038×10^{-6} , 3 种作物 Se 含量平均为 0.033×10^{-6} , 属于低 Se 植物($<0.04\times10^{-6}$), 低于硒含量安全范围, 远低于国家富硒粮食限量上限标准 0.30×10^{-6} . 因此, 克山县玉米、大豆、水稻中 Se 含量偏低, 应通过农业土壤改良和科技创新提高农产品中硒的含量.

4 结论

1) 克山县土壤表层 Se 含量平均为 0.249×10^{-6} , 低

表 6 土壤表层 Se 元素有效态含量
Table 6 Available Se content in topsoil

Se 元素含量	样品数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(CV)	活化系数
全 Se 含量/ 10^{-6}	809	0.10	0.46	0.249	0.05	0.200	
Se 有效态/ 10^{-9}	3	0.235	3.01	1.488	1.149	0.772	0.60%

于全国土壤平均值,高于世界土壤平均值。土壤表层Se含量以足Se状态为主,占总面积93.95%;Se潜在不足占5.43%;Se含量不足占0.37%;富Se土壤占0.25%,面积797 hm²。土壤深层Se含量平均为0.167×10⁻⁶,足Se率为37.38%,其余为Se潜在不足或缺乏。

2) 不同类型土壤Se含量由高到低的顺序是黑钙土、草甸土>黑土>暗棕壤。Se含量空间变化差异不大,暗棕壤和草甸土属于中分异型,黑土、黑钙土属于弱分异型。

3) 不同土地利用类型Se含量由高到低的顺序是建设用地>耕地>草地>林地>水利用地,显示人类活动越强,Se含量越高,表明人类活动对Se含量有影响。

4) 土壤深层Se含量平均为0.167×10⁻⁶,低于土壤表层含量。不同类型土壤深层Se含量由高到低依次是暗棕壤>黑土>草甸土>黑钙土,与表层土壤高低顺序相反。

5) 克山县土壤有效态Se含量在0.235×10⁻⁹~3.01×10⁻⁹之间,平均含量1.488×10⁻⁹。Se的活化系数为0.60%,活化率较低,Se元素有效态转化程度弱。

6) 研究区玉米、大豆、水稻等主要农作物籽实Se元素平均含量0.033×10⁻⁶,属于低Se作物,应通过农业科技创新,土壤改良,提高农产品中硒的含量。

参考文献:

- [1]王敬国. 生物地球化学:物质循环与土壤过程[M]. 北京:农业大学出版社,2017:385-392.
- [2]邵国璋,关光伟. 黑龙江省土壤硒(Se)元素背景值与地方性疾病的关系[J]. 中国环境监测,1993,9(2):61-62.
- [3]张丽珊,朱岩,可夫,等. 东北大骨节病区主要土壤腐殖酸硒与大骨节病关系的研究[J]. 应用生态学报,1990,1(4):333-337.
- [4]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,1996:265.
- [5]环境与地方病组. 克山病与自然环境和硒营养背景[J]. 营养学报,1982,4(3):175-182.
- [6]彭安,王子健,Whanger P D,等. 硒的环境生物无机化学[M]. 北京:中国环境科学出版社,1995:239.
- [7]尹昭汉,崔剑波,马晓丽,等. 东北地区生态环境中的Se及其生态效应[J]. 应用生态学报,1995,6(3):308-312.
- [8]尹昭汉,鞠见山,马晓丽,等. 硒(Se)的生物地球化学及其生态效应[J]. 生态学杂志,1989,8(4):45-50.
- [9]宫丽,马光. 硒元素与健康[J]. 环境科学与管理,2007,32(9):32-35.
- [10]Zhang X L, Ren S F, Li W C, et al. Study on correlation between humic acid and selenium in Kaschin-Beck disease areas[J]. Journal of Environmental Sciences, 1991,3(4):102-107.
- [11]Rotruck J T, Pope A L, Ganther H E, et al. Selenium: Biochemical release a component of glutathione peroxidase[J]. Science, 1973,179(4073):588-590.
- [12]Schwarz K, Foltz C M. Selenium as an integral part of factor 3 against dietary necrotic liver degeneration[J]. Journal of the American Chemical Society, 1957,79(12):3292-3293.
- [13]王松山,梁东丽,魏威,等. 基于路径分析的土壤性质与硒形态的关系[J]. 土壤学报,2011,48(4):823-830.
- [14]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.
- [15]李永华,王五一,杨林生,等. 陕南土壤中水溶态硒、氟的含量及其在生态环境的表征[J]. 环境化学,2005,24(3):279-283.
- [16]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, 2012,121:4-14.
- [17]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.
- [18]孙建纯. 地方病防治指南[M]. 北京:人民卫生出版社,1999:130-131.
- [19]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.
- [20]夏学齐,杨忠芳,薛圆,等. 黑龙江省松嫩平原南部土壤硒元素循环特征[J]. 现代地质,2012,26(5):850-858,864.
- [21]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.
- [22]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.
- [23]程伯容,鞠山见,岳淑娣,等. 我国东北地区土壤中的硒[J]. 土壤学报,1980,17(1):55-61.
- [24]Zhang B J, Yang L S, Wang W Y, et al. Environmental selenium in the Kaschin-Beck disease area, Tibetan Plateau, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2011,33(5):495-501.
- [25]熊毅,李庆逵. 中国土壤[M]. 2版. 北京:科学出版社,1987:517-536.
- [26]Yu T, Yang Z F, Lv Y Y, et al. The origin and geochemical cycle of soil selenium in a Se-rich area of China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014,139:97-108.
- [27]廖启林,金洋,吴新民,等. 南京地区土壤元素的人为活动环境富集系数研究[J]. 中国地质,2005,32(1):141-147.
- [28]廖启林,华明,张为,等. 人为活动对江苏土壤元素含量分布的影响[J]. 地质学刊,2012,36(2):147-156.

(下转第555页/Continued on Page 555)

相沉积母质(细质)及土壤黏粒成分越多,土壤有机质含量越高。气温、降水量影响土壤有机质的积累和分解,低温湿润气候条件有利于有机质的增加。耕种开垦时间长、化肥农药施用多和农作物连作等人为因素,减少了有机质的积累。土壤酸碱性对有机质的含量有一定的影响。通常情况下,弱碱性土壤有利于有机质的积累,但本次研究的典型黑土区土壤酸碱性对有机质影响的规律性不明显。

参考文献:

- [1]李世泉,王岩松.东北黑土区水土保持监测技术[M].北京:中国水利水电出版社,2008:1-3.
- [2]刘春梅,张之一.我国东北地区黑土分布范围和面积的探讨[J].黑龙江农业科学,2006(2):23-25.
- [3]方洪宾,赵福岳,姜琦刚,等.松辽平原第四纪地质环境与黑土退化[M].北京:地质出版社,2009:158-198.
- [4]韩晓增,李娜.中国东北黑土地研究进展与展望[J].地理科学,2018,38(7):1032-1041.
- [5]韩晓增,邹文秀.我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议[J].中国科学院院刊,2018,33(2):206-212.
- [6]王文娟,邓荣鑫,张树文.东北典型黑土区沟蚀发生风险评价研究[J].自然资源学报,2014,29(12):2058-2067.
- [7]国土资源部中国地质调查局.中华人民共和国多目标区域地球化学图集——松辽平原中南部地区[M].北京:地质出版社,2013:214-307.
- [8]陈怀满.环境土壤学[M].北京:科学出版社,2005:14-19.
- [9]蒋辉.环境地质学[M].北京:化学工业出版社,2008:50-52.
- [10]张凤荣.土壤地理学[M].北京:中国农业出版社,2002:16-17.
- [11]刘景双,于君宝,王金达,等.松辽平原黑土有机碳含量时空分异规律[J].地理科学,2003,23(6):668-673.
- [12]汪景宽,张旭东,王铁宇,等.黑土土壤质量演变初探Ⅱ——不同地区黑土中有机质、氮、硫和磷现状及变化规律[J].沈阳农业大学学报,2002,33(4):270-273.
- [13]伍光和,田连恕,胡双熙,等.自然地理学[M].3版.北京:高等教育出版社,2000:256-264.
- [14]张素荣,张燕,杨俊泉,等.海河流域平原区土壤碳密度分布特征和碳储量估算[J].地质调查与研究,2015,38(4):305-310.
- [15]蒋小燕,张琴,谢振东.鄱阳湖及周边经济区表层土壤营养元素分布现状与丰缺评价[J].地质调查与研究,2010,33(3):226-231.
- [16]牟树森,青长乐.环境土壤学[M].北京:农业出版社,1993:7-37.
- [17]李瑞敏,刘永生,陈有鉴,等.农业地质地球化学评价方法研究—土地生态安全之地学探索[M].北京:地质出版社,2007:8-28.
- [18]朱立新,马生明,汤丽玲.中国东部平原土壤地球化学基准值、重金属元素异常成因和生态效应[M].北京:地质出版社,2012:59-66.
- [19]储金字,秦明周.环境地学[M].武汉:华中科技大学出版社,2010:113-145.
- [20]王云,魏复盛.土壤环境化学元素[M].北京:中国环境科学出版社,1995:27-41.
- [21]赵羿,胡远满,曹宇,等.土地与景观—理论基础·评价·规划[M].北京:科学出版社,2005:166-169.
- [22]张之一.黑龙江省土壤开垦后土壤有机质含量的变化[J].黑龙江八一农垦大学学报,2010,22(1):1-4.
- [23]辛刚,颜雨,汪景宽,等.不同开垦年限黑土有机质变化的研究[J].土壤通报,2002,33(5):332-335.
- [24]张孝存,郑粉莉,王彬,等.不同开垦年限黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与有机质关系[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2011,39(5):90-95.
- [25]韩天富,韩晓增.走粮豆轮作均衡持续丰产的农业发展道路[J].大豆科技,2016,(1):1-3.
- [29]王祖伟,徐利森,张文具.土壤微量元素与人类活动强度的对应关系[J].土壤通报,2002,33(4):303-305.
- [30]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.
- [31]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生态效应[J].黑龙江农业科学,2016(9):43-49.
- [32]王锐,余涛,杨忠芳,等.富硒土壤硒生物有效性及影响因素研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(7):1647-1654.
- [33]梁若玉,和娇,史雅娟,等.典型富硒农业基地土壤硒的生物有效性与剖面分布分析[J].环境化学,2017,36(7):1588-1595.
- [34]安梦鱼,张青,王煌平,等.土壤植物系统硒累积迁移的影响因素及调控[J].中国农学通报,2017,33(11):64-68.
- [35]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.
- [36]付强,王冬艳,李月芬.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.

(上接第 591 页/Continued from Page 591)