

黑龙江省五常市东部土壤中硒分布及影响因素

刘 凯^{1,2}, 杜守营³, 戴慧敏^{1,2}, 魏明辉^{1,2}, 宋运红^{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 110034;
3. 沈阳市鹏德环境科技有限公司, 辽宁 沈阳 110034

摘 要: 硒是人和动物必需的微量元素之一, 富硒土壤的开发利用前景广阔. 黑龙江省五常市东部优质水稻种植区土壤中 Se 含量为 0.03×10^{-6} ~ 0.5×10^{-6} , 算数平均值 0.245×10^{-6} , 属于低 Se 和缺 Se 土壤面积占 90.37%, 足 Se 面积占 9.48%, 富 Se 面积仅 0.15%. 进一步研究显示, 低 Se 的成土母质是导致研究区土壤缺 Se 的主要原因. 土壤 Se 含量的空间分布受土壤质地、氧化物、有机质以及微地形的影响.

关键词: 土壤硒; 微地形; 五常市; 黑龙江省

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.06.015

SELENIUM DISTRIBUTION AND INFLUENCING FACTORS OF SOIL IN EASTERN WUCHANG CITY, HEILONGJIANG PROVINCE

LIU Kai^{1,2}, DU Shou-ying³, DAI Hui-min^{1,2}, WEI Ming-hui^{1,2}, SONG Yun-hong^{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;
3. Shenyang Pengde Environmental Technology Co., Ltd., Shenyang 110034, China

Abstract: Selenium (Se) is one of the essential trace elements for human beings and animals, thus the development and utilization of Se-rich soil have bright prospects. The Se content in the soil of high-quality rice planting area of eastern Wuchang City, Heilongjiang Province, is 0.03×10^{-6} ~ 0.5×10^{-6} , averagely 0.245×10^{-6} , with Se-low and Se-deficient soil areas accounting for 90.37%, Se-sufficient area 9.48% and Se-rich area only 0.15%. Further study shows that Se-low parent material is the main cause for soil Se deficiency in the area. The spatial distribution of soil Se content is affected by soil texture, oxides, organic matter and micro-terrain.

Key words: soil selenium; micro-terrain; Wuchang City; Heilongjiang Province

0 前言

硒(Se)是人体及动物生长所需的微量元素,适当剂量的 Se 对于生物体具有积极的促进作用. 然而由于 Se 自身特殊的理化性质,在表生地球化学循环过程

中,易发生次生富集与贫化^[1],这就导致 Se 的生物学功能具有明显的两面性^[2],国内外已经有多项研究报告 Se 缺乏或者过量都会引起人、畜产生多种不良病症. 一方面, Se 缺乏会导致人和动物发生克山病、白肌

收稿日期: 2020-07-17; 修回日期: 2020-08-03. 编辑: 张哲.

基金项目: 国际地学对比计划项目“全球黑土地关键带演化机制及可持续利用”(IGCP665); 中国地质调查局地质调查项目“兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查”(DD20190520).

作者简介: 刘凯(1989—),男,工程师,硕士,主要从事土地质量地球化学调查研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail/liukai.3566005@163.com

病和大骨节病等多种症状^[3-4];另一方面 Se 过量会导致慢性或急性中毒,如发生在家畜身上的“碱性病”与“盲跄症”等慢性中毒症以及引起人类皮肤褪色、指甲和手指变形、贫血,出现神经症状及智力改变等症^[5-6]。

土壤是表生系统元素地球化学循环的核心,它作为元素的储库,为植物生长所需营养成分提供保障^[7]。人体摄取的 Se 大多是通过食物链的方式最终从植物中获得^[8],土壤则是植物 Se 最主要的供给源^[9]。然而 Se 元素在土壤中的分布极不均匀,存在很大的空间变异性^[10]。土壤中 Se 的含量不仅取决于土壤矿物质和有机质,还受到土壤理化性质及外部环境的影响^[11-12]。基于此,土壤 Se 含量及影响其分布特征因素的研究,对于农产品生产、富 Se 土地的高效利用以及人体健康具有重要意义^[2]。

黑龙江省五常市因盛产优质水稻而闻名,但该区土壤中硒含量的详细分布情况鲜有报道。本文在土地质量地球化学调查基础上,系统总结研究区土壤中 Se 元素的分布特征及影响因素。

1 研究区概况

研究区位于黑龙江省五常市东部的水稻种植区,坐标范围为东经 127°25′~127°42′,北纬 44°53′~45°02′,面积约 270 km²,行政区范围主要隶属于小山子镇。研究区北、东、南三面环山,岩性主要为不同时代的花岗岩、花岗闪长岩和正长花岗岩及少量中酸性火山熔岩(图 1)。牯牛河和苇沙河分别从南部和东南向西北流经研究区。研究区主要地貌类型为黏土质垄岗状高平原、泥质砂砾石一级阶地及泥沙质漫滩。土壤类型有草甸土、白浆土、沼泽土和水稻土。其中草甸土分布面积较大,主要分布于牯牛河-苇沙河两岸的漫滩地区,白浆土主要分布于河流一级阶地上,这两类土壤部分经过“早改水”改造后,黑土层有增厚趋势,基础肥力逐渐增高,适宜种植水稻。水稻土主要分布在牯牛河西岸以及苇沙河东岸的一级阶地上,地势平坦,土质肥沃。

2 材料与方法

2.1 样品采集

土壤样品采集以 1:5 万地形图上的公里网格作为

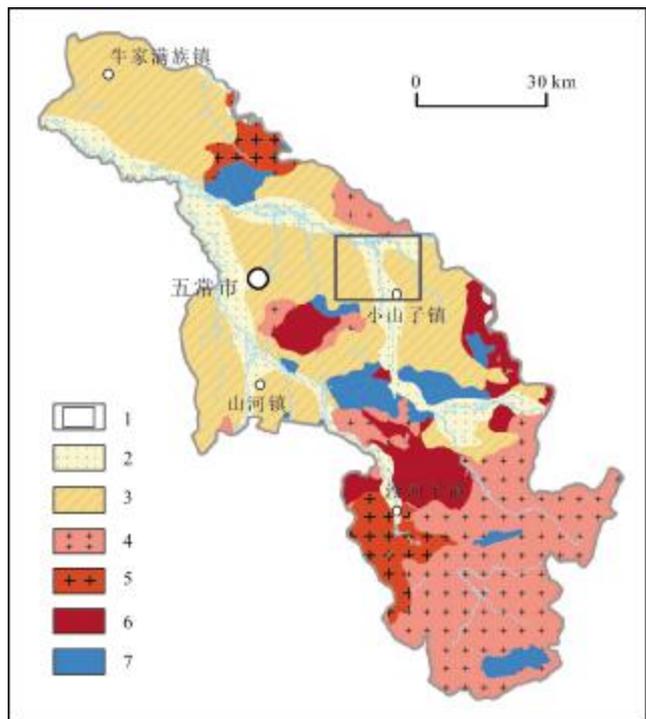


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the study area

1—研究区范围 (study area); 2—全新世冲洪积物 (Holocene alluvium-diluvium); 3—更新世冲洪积物 (Pleistocene alluvium-diluvium); 4—中生代花岗岩质岩 (Mesozoic granitoid); 5—古生代花岗岩质岩 (Paleozoic granitoid); 6—元古宙花岗岩质岩 (Proterozoic granitoid); 7—中酸性火山熔岩 (acid-intermediate volcanic lava)

采样单元,采样密度为 8 点/km²。采样点位置在保证代表性的前提下尽量均匀,每一个采样点在 30 m 范围内采集 3 个子样品组合成一件测试样品。土壤采样深度为 0~20 cm,样品重量为 1000 g。本次共计采集样品 2126 件,全部为水田土壤。土壤样品晾晒干燥后充分混匀,用“四分法”取约 200 g 送实验室测试。

2.2 分析项目与方法

样品分析与质量要求依据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)、《多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T 0258—2014)执行。土壤 Se 的测定采用原子荧光法 (AFS),有机碳 (TOC) 采用氧还原容量法, Fe₂O₃ 采用电感耦合等离子体发射光谱法 (ICP-OES), K₂O、SiO₂ 采用原子 X 射线荧光光谱法, pH 采用玻璃电极法测试。

2.3 数据处理

分析指标参数统计、描述性统计分析、Pearson 相关分析、散点图的绘制运用 Microsoft Excel 2016 和

IBM SPSS Statistics 19 软件完成, 地图的绘制采用 ArcGIS 10.2 软件完成。

3 结果与讨论

3.1 土壤 Se 含量特征

对研究区全部土壤样品测试数据进行异常值剔除, 统计 2126 个有效土壤样品的测试结果表明, 区内表层土壤中 Se 含量为 $0.03 \times 10^{-6} \sim 0.5 \times 10^{-6}$, 算数平均值 0.245×10^{-6} , 标准离差为 0.07×10^{-6} , 变异系数 0.27, 说明 Se 含量分布较均匀。土壤 Se 含量水平高于黑龙江省土壤 Se 含量平均值 (0.147×10^{-6}) [2], 但低于全国 (0.29×10^{-6}) 水平 [13]。目前, 国内关于土壤 Se 含量等级多数是参考谭见安 [14] 1989 年提出的划分标准。2018 年, 黑龙江省发布了富 Se 土壤评价的地方标准 [15], 将土壤 pH 值作为参考指标, 更突出 Se 的生物有效性及地域性。因此本次评价参考该标准, 结果见表 1、图 2。

研究区土壤 Se 含量总体上属于低 Se 和缺 Se 状态, 面积占 90.37%, 足 Se 面积占 9.48%, 富 Se 面积仅 0.15%。富 Se 和足 Se 土壤区的地形相对低洼, 土壤黏

表 1 黑龙江省土壤硒含量分级标准及统计结果
Table 1 Classification criteria and statistics of soil Se content in Heilongjiang Province

土壤 pH	<6.5	6.5~7.5	>7.5	面积占比/%
过量硒	≥ 3.0	≥ 3.0	≥ 3.0	0.00
富硒	0.4-3.0	0.35-3	0.325-3.0	0.15
足硒	0.3-0.4	0.275-0.35	0.25-0.325	9.48
低硒	0.175-0.3	0.15-0.275	0.125-0.25	81.97
缺硒	≤ 0.175	≤ 0.15	≤ 0.125	8.40

硒含量单位: 10^{-6} 。据文献 [15]。

粒含量高, 其中东北角的富 Se 区被当地人称为“饺子地”和“红眼饺子地”, 是由沼泽地改变成的水田。低 Se 土壤区广泛分布于牯牛河及苇沙河的一级阶地上, 地势相对平缓, 以白浆土为主。缺 Se 土壤区沿河床和河漫滩分布, 土壤中含砂量高。

成土母质是土壤中 Se 的主要来源。研究区成土母质以全新世冲积物和更新世冲洪积物为主, 其物质来源主要为周围山区的 Se 含量低的花岗质岩石 [9]。因

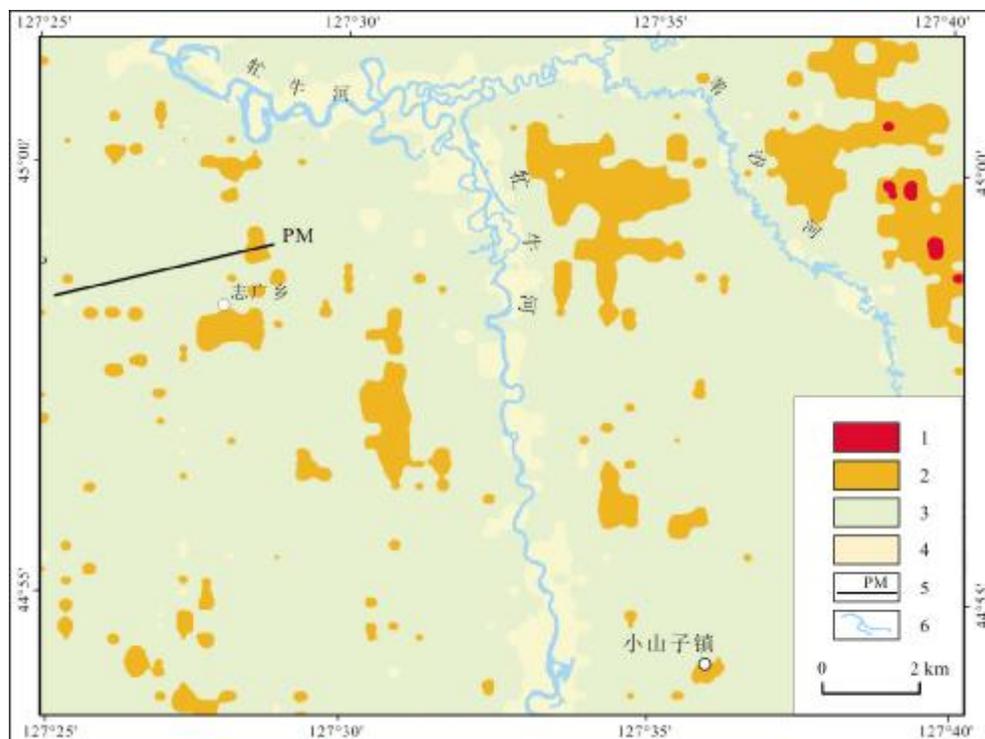


图 2 研究区土壤硒含量分布图

Fig. 2 Distribution map of soil Se content in the study area

1—富硒土壤 (Se-rich soil); 2—足硒土壤 (Se-sufficient soil); 3—低硒土壤 (Se-low soil); 4—缺硒土壤 (Se-deficient soil); 5—剖面位置 (section location); 6—河流 (river)

此低 Se 的成土母质可能是研究区土壤 Se 含量整体较低的主要原因。

3.2 土壤 Se 空间分布的影响因素

众多研究表明,成土母质决定了研究区内土壤 Se 的整体含量水平,而地形、水文条件等因素使 Se 在土壤表层发生空间再分布,Se 元素容易被黏粒、氧化物、有机质吸附而发生表生富集^[1-2,7,9]。

3.2.1 土壤质地对 Se 含量的影响

侯少范等^[16]在暖温带景观土壤 Se 的分异特征研究中,认为黏粒、含 Se 次生化合物以及有机、无机产物和砂粒的垂直运动和分选作用,在土壤 Se 的地理分异过程中具有重要的作用,也是影响低 Se 带土壤 Se 含量的重要因素之一。戴慧敏等^[1]对东北平原土壤 Se 分布特征及影响因素的研究中指出,土壤 Se 含量与 K_2O 表现出明显的负相关关系,缺 Se 区域与砂化区空间分布吻合,即砂化对 Se 具有贫化作用。对研究区土壤 K_2O 和 SiO_2 进行升序排列,分别以含量 0.1% 和 1% 的分段间隔对样品的 Se 含量取平均值做散点图,结果显示研究区土壤 Se 含量与土壤中 K_2O 和 SiO_2 呈明显负相关关系(图 3、4),负相关系数均达到 -0.92

($p < 0.01$)。说明砂质土壤有利于 Se 在土壤中的迁移,相反对 Se 的吸附作用极弱。

3.2.2 氧化铁对 Se 含量的影响

对研究区土壤 TFe_2O_3 进行升序排列,以 0.1% 的含量间隔对样品的 Se 含量取平均值,得到 26 组数据。对其做散点图(图 5),结果显示土壤 Se 含量与 TFe_2O_3 呈现显著正相关关系,相关系数为 0.46 ($p < 0.01$),表明土壤中铁的氧化物对 Se 具有明显富集作用。Se 在土壤中以多种价态存在,其中硒酸盐和亚硒酸盐是土壤 Se 的主要存在形态^[17],但四价的硒酸盐更容易被金属氧化物吸附。金属氧化物的吸附能力是氧化铁 > 氧化铝 > 氧化锰^[18]。土壤中 Se 的可溶性和移动性在很大程度上取决于氧化物的含量和活度^[19]。土壤中亚硒酸盐易与铁形成水溶性极低的氧化物和水合氧化物,不易被植物吸收利用^[20]。尤其是在稻田淹水条件下,土壤中的硒酸盐可被还原为亚硒酸盐,有利于土壤中 Se 的固定和吸附^[21]。铁、锰、铝氧化物对硒酸盐的吸附随着 pH 值降低而升高,且当 pH 在 4~6 时,吸附率最高^[22]。研究区以水田为主,土壤 pH 平均值为 5.69,整体上呈酸性,这些因素都促进了氧化物对 Se 的吸附。

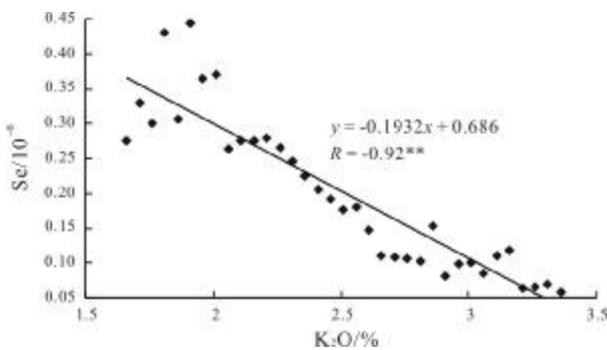


图 3 土壤 Se 与 K_2O 散点图

Fig. 3 Scatter diagram of Se vs. K_2O in soil

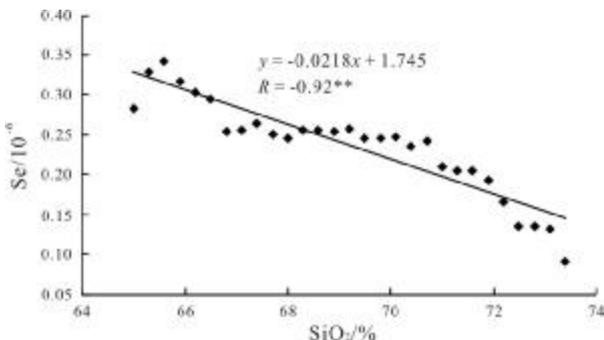


图 4 土壤 Se 与 SiO_2 散点图

Fig. 4 Scatter diagram of Se vs. SiO_2 in soil

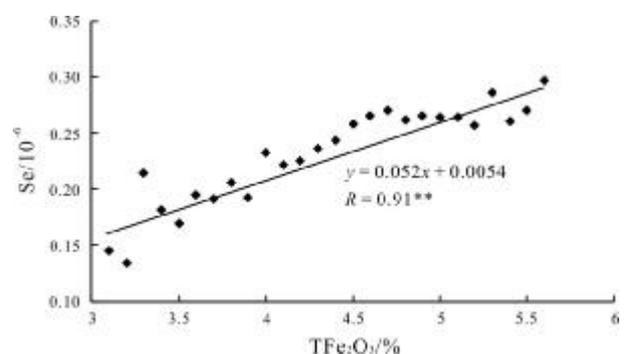


图 5 土壤 Se 与 TFe_2O_3 散点图

Fig. 5 Scatter diagram of Se vs. TFe_2O_3 in soil

3.2.3 土壤有机碳对 Se 含量的影响

以往研究发现,土壤有机碳(TOC)与硒含量呈显著正相关关系^[23]。中国低 Se 带土壤中 80% 以上的 Se 以有机物结合形式存在,Se 可以与腐殖酸结合成复合体,可以经微生物和植物合成氨基 Se 和蛋白质^[19]。杨忠芳等^[13]对海南岛土壤的研究结果表明,表层土壤中 Se 含量与有机碳含量具有显著的正相关关系,Se 能够与腐殖质缔合从而在土壤中快速固定下来,并且发现土壤有机碳含量较低时,土壤有机碳对有效 Se

含量的控制程度强于土壤有机碳含量高的土壤,也即土壤有机碳含量增加超过某一界限后,有效 Se 含量随之增加的幅度不大。

对研究区土壤 TOC 进行升序排列,以 0.1% 的含量间隔对样品的 Se 含量取平均值,得到 44 组数据。对其做散点图(图 6),显示研究区土壤 Se 与 TOC 含量整体呈正相关。尤其当 TOC 含量低于 4% 时,正相关性更加明显($Se=0.043\times TOC+0.1562, R=0.48, n=1973$);而当土壤 TOC 含量大于 4% 时,二者呈散点分布无相关性。研究发现 TOC 大于 4% 的采样点多位于由沼泽改水田的区域,土壤中含有较多分解不完全的有机质,这可能是有机碳与土壤 Se 没有显著相关性的原因。结果显示研究区有机碳对 Se 具有明显的富集作用,但由于 Se 在土壤中通常以与腐殖质缔合的形态存在,所以在有机碳含量较高的土壤中,Se 的生物有效性反而会下降^[24-25]。

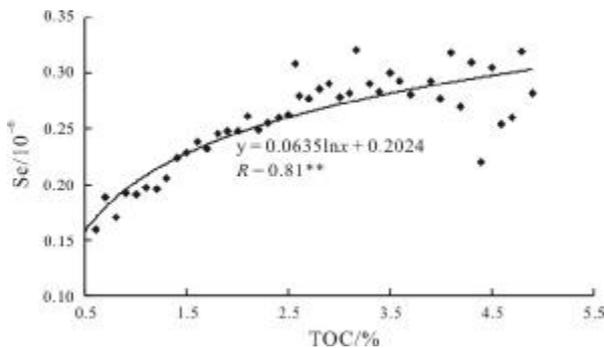


图 6 土壤 Se 与有机碳散点图

Fig. 6 Scatter diagram of Se vs. TOC in soil

3.2.4 微地形对土壤 Se 含量的影响

在表生环境下,Se 是一个活泼元素,地形及淋失条件的微小变化会影响土壤 Se 的分布^[26]。以志广乡西侧一处剖面为例(图 2),从土壤 Se 含量和高程的关系图(图 7)可以看出,随着高程降低,土壤 Se 含量整体呈升高趋势,并且与坡度关系密切。以水平距离 2500 m 为界,坡的上部坡度约为 3°,土壤 Se 含量稳定在 0.24×10^{-6} 左右;坡下部变缓,坡度约为 1.5°,含量迅速升至 0.3×10^{-6} ,增长了 25%。这表明,在其他条件类似时,坡度越平缓,越有利于 Se 的再分配,越有利于土壤 Se 的富集^[27]。原因在于较高地势土壤中的 Se(土壤水不饱和)易于氧化、淋溶流失而贫化,处于低地势土壤中的 Se(土壤水相对饱和)则容易积累而富集^[28]。

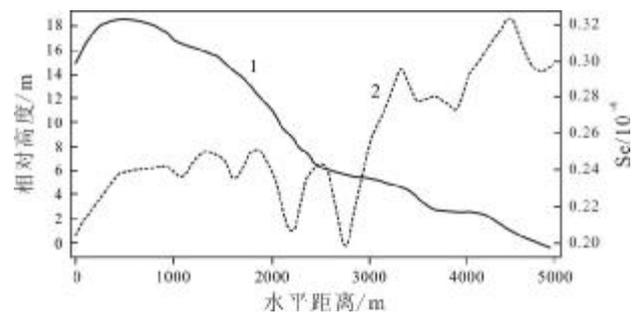


图 7 土壤 Se 含量与高程关系图

Fig. 7 Relationship between soil Se content and elevation

1—高程(elevation); 2—土壤硒含量(soil Se content)

3.2.5 人类活动对土壤 Se 含量的影响

研究区以农田为主,植物对 Se 的长期吸收导致土壤 Se 的耗竭也是造成低 Se 环境形成的原因^[29]。农田生态系统中,虽然短时间内作物对 Se 的吸收并不严重,但因为长期耕作,农产品收获后形成 Se 大量支出;同时常规施肥没有补施足量的 Se,致使 Se 的收支失衡,形成低 Se 土壤。

4 结论

(1) 五常东部地区土壤 Se 含量为 $0.03\times 10^{-6}\sim 0.5\times 10^{-6}$,算数平均值 0.245×10^{-6} ,属于低 Se 和缺 Se 土壤面积占 90.37%,足 Se 面积占 9.48%,富 Se 面积仅 0.15%。研究区成土母质以全新世冲积物和更新世冲积物为主,其物质来源为周边低 Se 的花岗质岩石。因此,成土母质是导致研究区土壤低 Se 的主要原因。

(2) 土壤 Se 的表生富集受土壤质地、有机碳和氧化铁影响。微地形也是造成土壤 Se 空间再分布的重要因素。坡度越缓,越有利于 Se 在土壤中富集。

参考文献:

- [1]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.
- [2]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.
- [3]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,1996:14-20.
- [4]刘建新,宋明义,黄春雷. 浙江长兴富硒农产品开发情况调查[J]. 广东微量元素科学,2012,19(3):27-31.
- [5]冯彩霞,刘家军,刘燊,等. 硒资源及其开发利用概况[J]. 地质与资源,2002,11(3):152-156.
- [6]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.
- [7] RAYMAN M P. The argument for increasing selenium intake [J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2002, 61(2): 203-215.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Beladel B, Nedjimi B, Mansouri A, et al. Selenium content in wheat and estimation of the selenium daily intake in different regions of Algeria[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2013, 71(1): 7-10.
- [11] 梁东丽, 彭琴, 崔泽玮, 等. 土壤中硒的形态转化及其对有效性的影响研究进展[J]. 硒与环境, 2017, 7(5): 374-380.
- [12] 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.
- [13] 杨忠芳, 余涛, 侯青叶, 等. 海南岛农田土壤 Se 的地球化学特征[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 837-849.
- [14] 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: 72-75.
- [15] DB23/T 2071-2018 富硒土壤评价标准[S]. 黑龙江省质量技术监督局, 2018: 4-5.
- [16] 侯少范, 李德珠, 王丽珍, 等. 暖温带地理景观中土壤硒的分异特征[J]. 地理学报, 1992, 59(1): 31-39.
- [17] 迟凤琴. 土壤环境中的硒和植物对硒的吸收转化[J]. 黑龙江农业科学, 2001(6): 33-34.
- [18] 秦海波, 朱建明. 中国典型高硒区硒的环境地球化学研究进展[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 367-373.
- [19] 刘铮. 微量元素的农业化学[M]. 北京: 农业出版社, 1991: 306-316.
- [20] Hamdy A A, Gissel-Nielsen G. Fixation of selenium by clay minerals and iron oxides[J]. *Zeitschrift für Pflanzenernahrung und Bodenkunde*, 1977, 140(1): 63-70.
- [21] Wang Z J, Gao Y X. Biogeochemical cycling of selenium in Chinese environments[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(11/12): 1345-1351.
- [22] 徐文坡, 朱建明, 秦海波, 等. 铁、锰和铝氧化物吸附硒的行为研究[J]. 矿物学报, 2017, 37(3): 357-365.
- [23] 布和敖斯尔, 张东威, 刘力. 土壤硒区域环境分异及安全阈值的研究[J]. 土壤学报, 1995, 32(2): 186-193.
- [24] 李永华, 王五一. 硒的土壤环境化学研究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 230-233.
- [25] He Z L, Yang X E, Zhu Z X, et al. Fractionation of soil selenium with relation to Se availability to plants[J]. *Pedosphere*, 1994, 6(3): 209-216.
- [26] 朱建明, 郑宝山, 毛大均, 等. 渔塘坝微地域硒分布的景观地球化学研究[J]. 地球化学, 2000, 29(1): 43-49.
- [27] 朱建明, 郑宝山, 王中良, 等. 渔塘坝微地域高 Se 环境中土壤 Se 的分布规律及其影响因素[J]. 环境科学, 1998, 19(6): 33-36.
- [28] 朱建明, 尹祚莹, 凌宏文, 等. 渔塘坝微景观中硒的高硒成因探讨[J]. 地球与环境, 2007, 35(2): 117-122.
- [29] 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.

(上接第 634 页/Continued from Page 634)

- [15] 陆访仪, 赵永存, 黄标, 等. 海伦市耕层土壤有机质含量空间预测方法研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 662-667.
- [16] 陶培峰, 王建华, 李志忠, 等. 基于高光谱的土壤养分含量反演模型研究[J]. 地质与资源, 2020, 29(1): 68-75, 84.
- [17] 张凤荣, 张小京, 周建. 都市区设施农业用地空间变化及其政策启示[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 637-644.
- [18] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报, 1997, 12(2): 105-111.
- [19] 吕立刚, 周生路, 周兵兵, 等. 区域发展过程中土地利用转型及其生态环境响应研究——以江苏省为例[J]. 地理科学, 2013, 33(12): 1442-1449.
- [20] 崔佳, 臧淑英. 哈大齐工业走廊土地利用变化的生态环境效应[J]. 地理研究, 2013, 32(5): 848-856.