

松嫩平原吕大火房垂直剖面中硒赋存形态及影响因素分析

张 立^{1,2}, 姜 侠^{2,3}, 崔玉军^{1,2}, 窦智慧¹, 李 瑛^{1,2}, 孙振伟¹

1. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150036;

2. 黑龙江省黑土地水土资源研究重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150036;

3. 黑龙江省地质矿产局, 黑龙江 哈尔滨 150036

摘 要: 吕大火房剖面位于松嫩平原东部, 是研究松嫩平原富硒土壤带中硒来源的典型自然剖面。在白垩系嫩江组(K_2n)两条垂直剖面上共采集了 33 件样品, 分析了硒及其赋存的 7 种形态、总有机碳(TOC)、pH 等理化指标。结果表明, 所采集的样品硒含量在 $0.01 \times 10^{-6} \sim 3.05 \times 10^{-6}$ 之间, 平均含量 0.56×10^{-6} , 不同层位样品硒含量差异较大; 剖面样品中硒以残渣态硒为主要赋存形式, 残渣态硒平均含量 0.092×10^{-6} , 所占比例为 51.98%。剖面样品硒含量主要受成土母质(油页岩)影响, 相关分析结果表明, TOC 和 pH 对剖面硒含量分布有一定的影响, TOC 与强有机结合态硒、腐殖酸结合态硒、离子交换态硒、水溶态硒呈正相关关系, pH 与各形态硒均呈负相关关系。

关键词: 地球化学; 富硒土壤; 硒形态; 白垩系嫩江组; 松嫩平原

开放科学标志码(OSID):

DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.06.016



ANALYSIS ON THE OCCURRENCE FORMS OF SELENIUM AND INFLUENCING FACTORS IN LYUDAHUOFANG VERTICAL SECTION OF SONGNEN PLAIN

ZHANG Li^{1,2}, JIANG Xia^{2,3}, CUI Yu-jun^{1,2}, DOU Zhi-hui¹, LI Ying^{1,2}, SUN Zhen-wei¹

1. Heilongjiang Institute of Natural Resources Survey, Harbin 150036, China; 2. Heilongjiang Key Laboratory of Black Soil and Water Resources Research, Harbin 150036, China; 3. Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Harbin 150036, China

Abstract: The Lyudahuofang section located in the east of Songnen Plain is a typical natural section for the study of selenium (Se) source in the Se-rich soil belt of Songnen Plain. A total of 33 samples are collected from two vertical sections of Cretaceous Nenjiang Formation (K_2n) to analyze Se and its seven occurrence forms, and physicochemical indexes such as TOC and pH. The results show that the Se content is $0.01 \times 10^{-6} \sim 3.05 \times 10^{-6}$, averagely 0.56×10^{-6} , with great variance in samples from different layers. Residual selenium is the main form in section samples with the average content of 0.092×10^{-6} , accounting for 51.98%. The Se content is mainly affected by parent material (oil shale). The correlation analysis results show that TOC and pH have certain effects on the distribution of Se content. That is, TOC is positively correlated with Se of strong organic bound, humic acid bound, ion-exchangeable and water soluble forms; while pH is negatively correlated with Se of all forms.

Key words: geochemistry; Se-rich soil; form of selenium; Cretaceous Nenjiang Formation; Songnen Plain

收稿日期:2020-08-17;修回日期:2020-09-11. 编辑:张哲.

基金项目:黑龙江省地质勘查专项“黑龙江省两大平原示范区综合改革试验区寒地富硒土地环境调查评价”项目(KCZX-YCCZ-2015031).

作者简介:张立(1981—),男,硕士,高级工程师,主要从事生态地球化学调查研究工作,通信地址 黑龙江省哈尔滨市香坊区新乡里街 9 号,E-mail//11741785@qq.com

0 引言

硒(Se)广泛分布于自然环境中,是人和动物必需的微量元素。人体硒缺乏可导致克山病、大骨节病等地方病的发生,而人体摄入过量的硒则会导致硒中毒^[1-2]。大量研究表明,人体中摄入的硒 90%来自食物,人体所摄入食物中硒含量的水平直接影响着人体中硒的含量水平^[3]。在有条件的地区,大力开发富硒农产品,通过食用富硒农产品进行科学补硒是增强人体免疫力、提高人类健康水平的重要途径^[4]。世界上 40 多个国家和地区缺硒,我国有 72%以上国土面积缺硒^[5]。土壤中硒含量和赋存形态会影响植物对硒的吸收状况,硒元素经过土壤—植物—食物进入人体,最终会影响人和动物的生长发育。

以往多是关于土壤硒分布特征及其影响因素方面的研究,如曾庆良等^[6]对湖北恩施沙地土壤硒含量及影响因素进行研究;戴慧敏等^[7]依据“全国土壤现状调查及污染防治”项目所取得的数据对松辽平原中南部表层、深层土壤中硒分布特征及影响因素进行研究;迟凤琴等^[8]采集了黑龙江省 400 余个 0~20 cm 耕作层土壤样品及 21 个主要类型土壤剖面样品,分析研究了土壤硒含量、分布规律及影响因素。而关于各地区富硒土壤来源、硒形态分布特征及影响因素有关的研究相对较少^[9]。本文利用 2015 年黑龙江省开展的“两大平原”示范区市县级富硒土地调查结果,通过对松嫩平原吕大火房垂直剖面中硒含量特征、赋存形态及其影响因素进行分析研究,力求追踪出松嫩平原富硒土壤的矿源层,为富硒土壤的可持续利用提供科学依据。

1 研究区概况

松嫩平原(黑龙江部分)位于黑龙江省西部,是东北平原的重要组成部分,由松花江和嫩江两大水系冲积而形成,行政区划为齐齐哈尔、大庆、绥化及哈尔滨部分市县。松嫩平原新生界地层广泛发育,出露的中生界地层主要是白垩系上统嫩江组(K_2n),为一套湖相碎屑岩沉积建造,主要岩石组合为细砂岩、粉砂岩、泥岩夹油页岩。嫩江组可分为 5 个岩性段:一段主要为泥岩和页岩,夹油页岩及粉砂质泥岩;二段为泥岩与粉砂质泥岩互层,底部为油页岩;三段上部为细砂岩和粉砂岩,下部为泥岩;四段以泥岩为主,夹细砂和粉砂岩;五段为泥岩夹砂岩^[10]。土壤类型主要为黑土、黑钙土、

草甸土、暗棕壤、白浆土、盐碱土、水稻土、沼泽土和风沙土,土地利用类型主要为耕地、草地、林地、建筑用地和未利用地。

吕大火房垂直剖面位于松嫩平原东部,黑龙江省海伦市海南乡吕大火房屯附近,为天然露头,两条垂直剖面 HP01 和 HP02 相距约 1.2 km,经重新开挖后进行采样,采样地点均出露嫩江组一段、二段地层。

2 材料与方法

2.1 样品采集

按照中国地质调查局 2014 年颁布的《多目标区域地球化学调查规范》DZ/T 0258—2014 技术要求,对松嫩平原海伦市海南乡出露的两处白垩系嫩江组典型剖面开展样品采集工作。依据剖面中不同层位的组分、颜色变化来进行样品的采集,其中 HP01 剖面深 4 m,采集 19 件样品,HP02 剖面深 6 m,采集 14 件样品,每件样品重量约 1 kg。样品经过自然风干后,对干燥后的样品用木槌适当敲打、破碎,过 0.84 mm(20 目)尼龙筛,经室内风干混匀后约 200 g 装入牛皮纸袋备用。

2.2 分析测试

样品分析测试工作由黑龙江省地质矿产实验测试研究中心完成,用玛瑙无污染样品制备机将样品粉碎至 0.15 mm(100 目)备用。全硒的测定采用原子荧光光谱法(AFS),检出限为 0.01×10^{-6} ;总有机碳(TOC)采用容量法,检出限为 0.1%;pH 采用玻璃电极法,检出限为 0.05。利用不同的提取剂来提取硒元素的各形态含量:用水来提取水溶态硒,用氯化镁提取离子交换态硒,用醋酸-醋酸钠提取碳酸盐结合态硒,用焦磷酸钠提取腐殖酸结合态硒,用盐酸羟胺提取铁锰结合态硒,用过氧化氢提取强有机结合态硒,用氢氟酸提取残渣态硒^[11]。

分析过程中进行了分析质量监控,从国家一级土壤地球化学标准物质 GBW 系列(GSS1-24)中选取 12 个标准样品进行了 12 次分析,分析方法的准确度和精密度合格率均达到 99%以上。各种理化指标分析方法、检出限、报出率、准确度和精密度均满足规范要求,分析数据准确、可靠。

2.3 数据处理

数据统计分析、Pearson 相关分析、柱状图和散点图的绘制采用 Microsoft Excel 2016 和 IBM SPSS

Statistics 19 软件进行处理,剖面硒元素含量特征分布图采用 MapGIS 6.7 软件绘制.

3 结果与分析

3.1 总硒、硒形态含量特征

剖面样品分析结果显示,硒元素在嫩江组两条垂直剖面中含量最大值为 3.05×10^{-6} ,最小值为 0.01×10^{-6} ,平均值为 0.56×10^{-6} . 其中, HP01 剖面样品硒含量区间为 $0.01\times10^{-6}\sim0.73\times10^{-6}$, 平均值为 0.19×10^{-6} ; HP02 剖面硒含量区间为 $0.14\times10^{-6}\sim3.05\times10^{-6}$, 平均值为 1.06×10^{-6} (表 1). 由表 1 可知,两条剖面样品中 HP02 剖面平均硒含量较高,不同层位剖面样品硒含量差异明显,变化幅度较大.

表 1 剖面样品硒含量
Table 1 Se contents in section samples

剖面号	样本数/件	平均值/ 10^{-6}	范围/ 10^{-6}	标准差/ 10^{-6}	变异系数/%
HP01	19	0.19	0.01~0.73	0.187	96.40
HP02	14	1.06	0.14~3.05	1.046	99.05

本次研究只对 HP01 剖面的 19 件样品进行了硒元素形态分析测试. 由表 2 中统计可知 HP01 剖面不同形态硒平均含量及所占比例情况:残渣态硒(0.092×10^{-6} , 51.98%)>腐殖酸态硒(0.034×10^{-6} , 19.21%)>强有机态硒(0.025×10^{-6} , 14.12%)>铁锰氧化态硒(0.017×10^{-6} , 9.6%)>碳酸盐态硒 (0.004×10^{-6} , 2.26%)>水溶态硒 (0.003×10^{-6} , 1.7%)>离子交换态硒 (0.002×10^{-6} , 1.13%). 可见, HP01 剖面样品中的硒主要是以残渣态、腐殖酸态的形式存在的.

表 2 HP01 剖面中不同形态硒含量及所占比例
Table 2 Contents and proportions of Se by forms in section HP01

硒形态	平均值/ 10^{-6}	范围/ 10^{-6}	所占比例/%
水溶态	0.003	0.001~0.017	1.7
离子交换态	0.002	0.001~0.01	1.13
碳酸盐态	0.004	0.002~0.007	2.26
腐殖酸态	0.034	0.01~0.06	19.21
铁锰氧化态	0.017	0.009~0.033	9.6
强有机态	0.025	0.009~0.053	14.12
残渣态	0.092	0.001~0.53	51.98

3.2 总硒、硒形态分布特征

硒在剖面中的分布大致可以分为表聚型、双峰型、心土聚集型、均匀分布型和底聚型. 在干旱、半干旱地区,土壤硒的分布特征多以表聚型为主,源于同一母质的土壤,土壤 TOC 含量高的其总硒含量一般也高^[12]. 由图 1 和图 2 中两条垂直剖面中硒元素含量分布可见,吕大火房垂直剖面硒分布属于底聚型,此种分布规律可能归因于受成土母质的影响,底部油页岩硒元素本身含量较高所致.

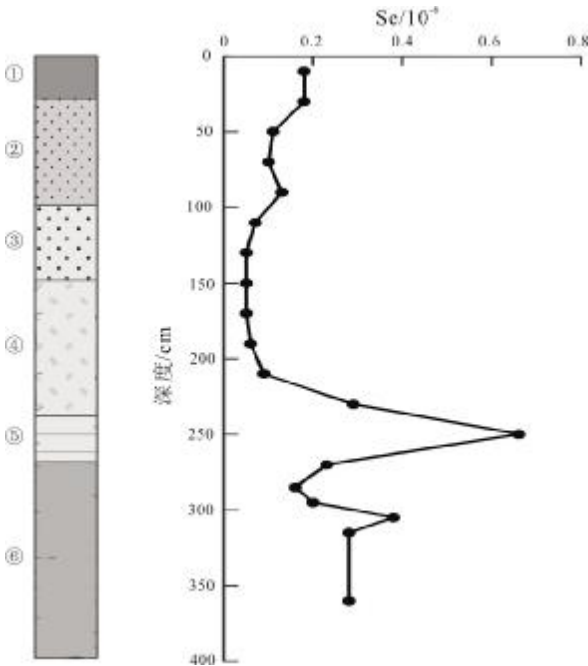


图 1 HP01 剖面中 Se 元素含量分布特征

Fig. 1 Distribution of Se contents in section HP01

- ①—黑色黏土(black clay); ②—灰黄色黏土(grayish yellow clay); ③—黄色粗砂 (yellow coarse sand); ④—黄色砂砾石 (yellow sand gravel); ⑤—砂砾石与油页岩互层(interbed of sand gravel and oil shale); ⑥—灰黑色油页岩(dark gray oil shale)

HP01 剖面深度达 4 m,自上而下,按照土壤颜色、成分发生的变化分别采集不同深度范围样品. 从图 1 可以看出,耕作黏土层厚度达 1 m, 1~2.7 m 主要为基岩风化层,含砂、砂砾石,碎石较多, 2.7 m 以下为灰黑色油页岩. 硒含量曲线显示,在耕作层和基岩风化层上部和中部,硒含量变化不大,含量区间 $0.05\times10^{-6}\sim0.18\times10^{-6}$,而在基岩风化层下部,硒含量陡然升高,达到峰值 0.66×10^{-6} ,随后 2.7 m 以下油页岩层硒含量有所减少,但区间值仍在 $0.20\times10^{-6}\sim0.38\times10^{-6}$ 之间,相对较高.

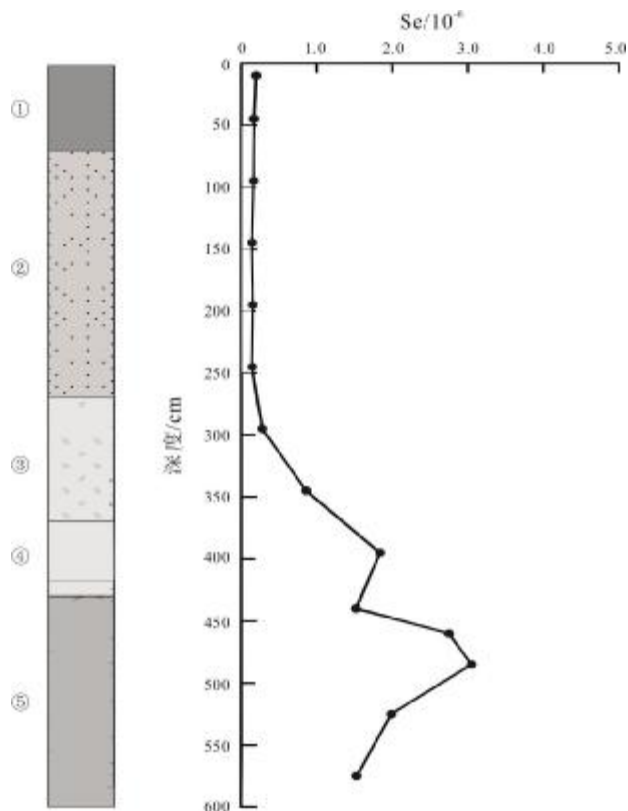


图 2 HP02 剖面中 Se 元素含量分布特征

Fig. 2 Distribution of Se contents in section HP02

①—黑色黏土(black clay); ②—灰黄色黏土(grayish yellow clay); ③—黄色砂砾石(yellow sand gravel); ④—砂砾石与油页岩互层(interbed of sand gravel and oil shale); ⑤—灰黑色油页岩(dark gray oil shale)

HP02 剖面深度达 6 m,由图 2 可见,0~2.7m 为耕作黏土层;2.7~4.3 m 为基岩风化层,多为砂砾石;4.3 m 以下为灰黑色油页岩.曲线与剖面 HP01 相似,深度在 0~2.7 m 之间,硒含量基本无变化,区间值 0.14×10^{-6} ~ 0.28×10^{-6} ;在 2.7~4.3 m 之间,硒含量逐渐升高,深度在大约 4 m 处达到第一个峰值 1.84×10^{-6} ;硒含量在 4.4 m 处略有所降低,为 1.52×10^{-6} ;到 4.6 m 处又升高到 2.75×10^{-6} ;从 4.6 m 向下,到 5 m 处达到最高峰值 3.05×10^{-6} ;随后含量有所降低,但含量均在 1.5×10^{-6} 以上,含量区间为 1.53×10^{-6} ~ 1.99×10^{-6} .综上所述,在嫩江组油页岩层和基岩风化层下部硒含量明显高于耕作层,富集明显.初步判断,嫩江组油页岩是松嫩平原土壤硒元素的矿源层.

图 3 是 HP01 剖面 19 件样品硒形态特征对比,样品编号从小到依次对应采集深度由浅到深.其中 1~6 号样品形态比例分布较一致,以腐殖酸态、强有机态

为主,残渣态硒所占比例不足 30%;7~11 号样品形态比例分布相似,以腐殖酸态硒为主,残渣态硒所占比例远低于平均水平;12~19 号样品形态比例分布高度相似,绝大部分残渣态硒所占比例达 50%以上.对比图 1 中 HP01 剖面样品成分分布特征,充分说明了不同组分对硒元素形态分布产生了巨大的影响.一般认为水溶态硒和离子交换态硒是硒活性较高的部分,可供植物吸收利用,硒的有效性较高;残渣态硒是非常稳定的形态,其硒的有效性较差,很难被植物吸收^[13-14].整体上,HP01 剖面样品总硒含量较高,但其硒的有效性较低.随着土壤成熟度的提高,硒元素赋存形态也逐渐发生变化,由深部成熟度低的土壤到地表成熟度高的土壤,残渣态硒所占的比例逐渐减小,而有机态硒、铁锰氧化态硒、离子交换态硒和水溶态硒所占比例逐渐增加.因此,可以大致判断硒元素由深部到地表形态的变化情况:母岩分解过程中,最先出现固态的残渣态硒,经成壤过程不断发生物理、化学变化,部分残渣态硒转化成腐殖酸态硒、强有机态硒和铁锰氧化态硒,到耕作层经农作物的吸收与利用,硒有效态逐渐体现.

3.3 影响硒、硒形态分布的因素

由剖面总硒、硒形态分布结果可知,影响其分布的主要因素为成土母岩(油页岩)本身硒含量所造成的.但影响硒及硒形态分布的因素是多元化的,其中 pH、TOC 等理化性质不但对硒含量分布具有重要的影响,而且也是控制硒有效性的主要因素,影响硒各形态之间的转化.本次研究测定了 HP01 剖面样品的理化性质,包括 pH、TOC(表 3).19 件样品均呈酸性,变幅较小,TOC 含量差异较明显,变化幅度较大,变异系数达到 58.97%.

表 3 剖面样品理化性质

Table 3 Physicochemical properties of section samples

指标	平均值	范围	标准差	变异系数/%
pH	6.05	5.92~6.23	0.087	1.44
TOC/%	0.329	0.10~0.76	0.194	58.97

对 HP01 剖面中各层位 pH、TOC 和 Se 含量进行对比(图 4).地表以下 0~100 cm, pH 和 Se 含量变化较稳定,TOC 含量在 0~40 cm 区间处于一个较高的水平,含量区间在 0.66%~0.76%之间,在 40~100 cm 急剧下降,约为 0.3%,但相对稳定;100~200 cm 深度, pH

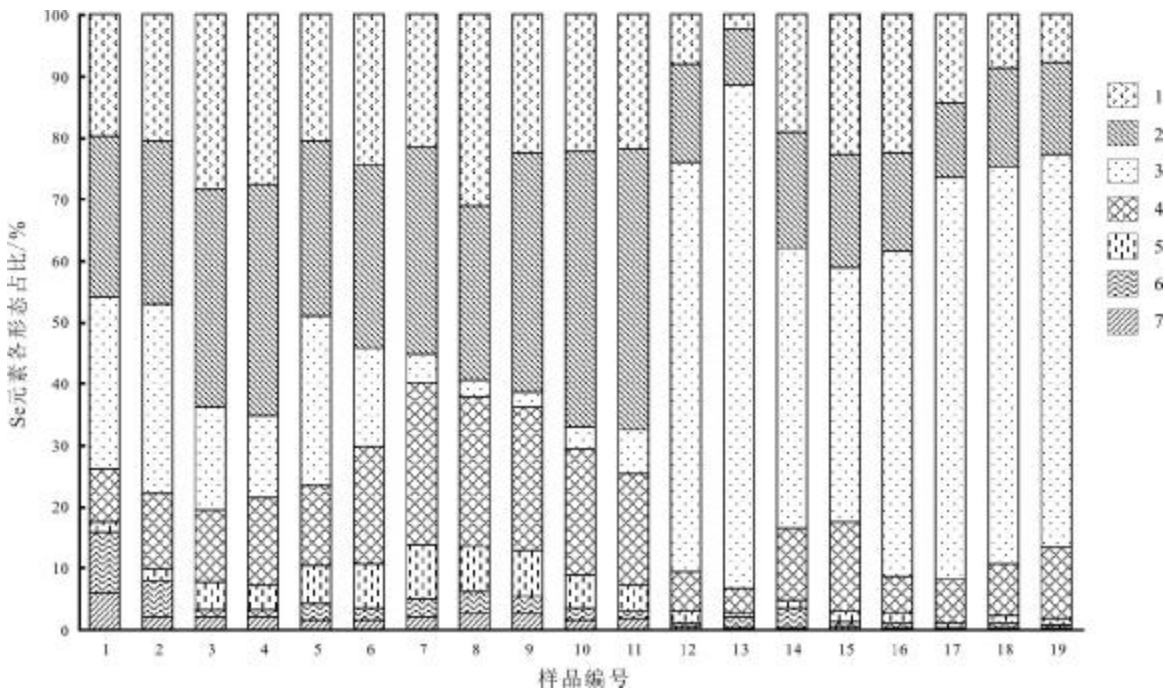


图 3 HP01 剖面样品中 Se 元素形态特征对比

Fig. 3 Characteristic comparison of different Se forms in the samples from section HP01

1—强有机态(strong organic bound state); 2—腐殖酸态(humic acid bound state); 3—残渣态(residual state); 4—铁锰氧化态(Fe-Mn oxidation state); 5—碳酸盐态(carbonate state); 6—水溶态(water soluble state); 7—离子交换态(ion exchangeable state)

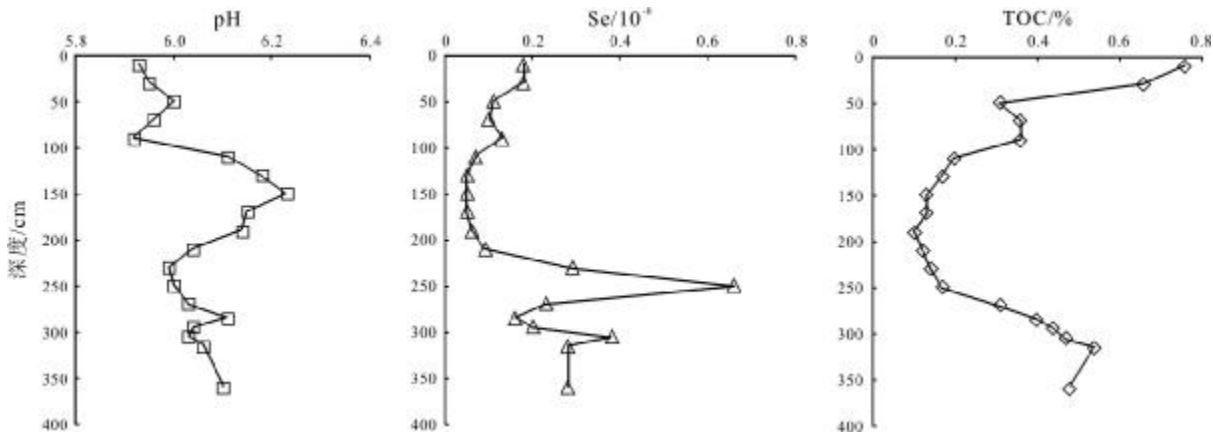


图 4 HP01 剖面中 pH、Se 和 TOC 含量特征

Fig. 4 Features of pH, Se and TOC contents in section HP01

逐渐变大,总 Se 趋于稳定, TOC 含量逐步降低到最小值 0.1%; 200~300 cm 深度, pH 小幅度变小, 相对稳定, Se 含量陡然升高, 达到最大峰值后又急速回落, TOC 含量逐渐升高; 300~400 cm 深度, pH 依然变化不大, Se 含量又急剧升高至第二个峰值, 随后略有降低, TOC 继续升高至 0.54% 后略有降低. 综上所述, 由于 HP01 剖面样品 pH 变幅较小, 故而对总硒含量分布影响不明显, 200 cm 以下的基岩风化层, 随着 Se 含

量的升高, TOC 含量逐渐升高, 则说明总 Se 含量与 TOC 有着强烈的正相关关系.

对比图 3 和图 4, 整体上 pH 变化幅度较小, 但在深度约 100~200 cm 之间, pH 有较明显的上升过程, 该深度范围除铁锰氧化态硒有明显下降外, 其余各形态硒所占比例均有增加, 其中碳酸盐结合态硒所占比例达到最高. 这说明, 在土壤演化过程中 pH 对硒形态含量变化产生了一定的影响. 为了更好地研究剖面样

品中各形态硒与物理化学性质之间的关系,对 HP01剖面样品 pH、TOC 与各形态硒含量进行相关分析. 结果表明: pH 与腐殖酸结合态硒呈显著负相关,相关系数 $r = -0.74$ ($n=19$, $p<0.01$); pH 与强有机结合态硒呈显著负相关,相关系数 $r = -0.52$ ($n=19$, $p<0.05$); pH 与水溶态硒呈显著负相关,相关系数 $r = -0.51$ ($n=19$, $p<0.05$); pH 与碳酸盐结合态硒呈显著负相关,相关系数 $r = -0.48$ ($n=19$, $p<0.05$); pH 与其他形态硒也呈不同程度的负相关关系. TOC 与强有机结合态硒呈显著正相关关系,相关系数 $r = 0.66$ ($n=19$, $p<0.01$); TOC 与腐殖酸结合态硒呈显著正相关关系,相关系数 $r = 0.45$ ($n=19$, $p<0.05$); TOC 与离子交换态硒呈显著正相关关系,相关系数 $r = 0.58$ ($n=19$, $p<0.05$); TOC 与水溶态硒呈显著正相关关系,相关系数 $r = 0.49$ ($n=19$, $p<0.05$). 综上所述, pH、TOC 与硒元素在剖面中赋存形式的变化是密切相关的.

4 讨论与结论

国内关于富硒土壤硒来源研究结果表明,富硒土壤分布与地层分布关系密切,例如二叠系孤峰组及茅口组黑色炭质硅质岩是“世界硒都”湖北恩施富硒土壤的矿源层^[15-16]. 本次研究采集的两条剖面均位于松嫩平原白垩系嫩江组,分析结果显示油页岩层硒含量远高于区域硒元素背景值,因此判断白垩系嫩江组灰黑色油页岩与松嫩平原富硒土壤带的形成有很大的联系. 由富含硒的母岩发育而成的土壤,残渣态硒含量比较高^[17],本次研究剖面样品硒的形态以残渣态为主,其含量主要取决于矿源层油页岩中硒的含量.

以往关于影响土壤硒含量的因素已有诸多报道和研究,陈显著等^[18]对广州市土壤研究发现,影响土壤硒分布的主要因素是成土母质、pH、土壤有机质和阳离子交换量(CEC);杨忠芳等^[19]对海南岛土壤的研究结果表明,有机碳、黏土矿物、铁锰氧化物及风化淋溶程度对土壤硒有显著影响;王月平等^[20]对黑龙江省宝清县东部土壤的研究表明,TOC 与 pH 是影响土壤硒含量的主要因素;张立等^[21]对黑龙江省海伦市农耕区土壤硒研究结果认为影响土壤硒含量的主要因素是 pH、有机碳和成土母质,这与本次研究结果相吻合.

本研究以硒元素在垂直剖面上的分布、赋存形态为研究对象,探讨影响硒、硒形态分布的主要因素,得出以下结论:

1)不同层位样品硒含量差异较大,基岩风化层下部和油页岩层硒元素含量最高. 剖面样品硒形态以残渣态为主,平均含量 0.092×10^{-6} ,占比为 51.98%;其次为腐殖酸结合态,平均含量 0.034×10^{-6} ,占比为 19.21%.

2)松嫩平原吕大火房垂直剖面样品硒含量主要受成土母质(油页岩)影响,同时, TOC 和 pH 对剖面硒含量分布有一定的影响. TOC 与总硒含量、强有机结合态硒、腐殖酸结合态硒、离子交换态硒、水溶态硒呈显著正相关关系, pH 与总硒含量、各形态硒均有不同程度的负相关关系.

3)通过本次研究,初步判断白垩系嫩江组油页岩是松嫩平原富硒土壤带的矿源层. 对硒元素赋存形态研究发现,以残渣态硒为主,硒的有效性较低. 结合研究区土壤 pH 现状,建议利用天然物料人为调控土壤酸碱度,促进硒形态的转换,以提高硒的生物有效性.

参考文献:

- [1]熊咏民,毕华银,王治伦,等. 大骨节病、克山病共存区及特异病区血硒及有关生化指标的测定[J]. 广东微量元素科学,1998,5(10):18-21.
- [2]李日邦,谭见安,王五一,等. 提高食物链硒通量防治大骨节病和克山病示范研究[J]. 地理学报,1999,54(2):158-164.
- [3]李军,张忠诚. 微量元素硒与人体健康[J]. 微量元素与健康研究,2011,28(5):59-63.
- [4]谢邦廷,贺灵,江官军,等. 中国南方典型富硒区土壤硒有效性调控与评价[J]. 岩矿测试,2017,36(3):273-281.
- [5]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.
- [6]曾庆良,余涛,王锐. 土壤硒含量影响因素及富硒土地资源区划研究——以湖北恩施沙地为例[J]. 现代地质,2018,32(1):105-112.
- [7]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.
- [8]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.
- [9]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.
- [10]张德军,张健,苏飞,等. 松辽盆地西南隆起区发现晚白垩世嫩江组叶肢介化石[J]. 地质与资源,2019,28(3):231-235,265.
- [11]徐明星,潘卫丰,岑静,等. 浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离[J]. 环境科学,2013,34(7):2775-2781.

(下转第 584 页/Continued on Page 584)

- [16] 闫颖. 五种农药对土壤酶活性影响的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2004.
- [17] 王艳. 不同有机物料对有机磷农药污染土壤酶活性及土壤微生物量的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1205-1209.
- [18] 闫雷, 李晓亮, 秦智伟, 等. 农药对土壤酶活性影响的研究进展[J]. 农机化研究, 2009, 31(11): 223-226.
- [19] 王光华, 金剑, 韩晓增, 等. 不同土地管理方式对黑土土壤微生物量碳和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1275-1280.
- [20] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 寒地黑土大豆轮作与连作不同年限土壤酶活性及相关肥力因子的变化[J]. 大豆科学, 2009, 28(4): 611-615.
- [21] 李文凤, 房翠翠, 牛玉昊, 等. 高原地区不同农作物土壤酶活性与土壤养分关系研究[J]. 北方园艺, 2014, 38(12): 159-161.
- [22] 刘岚君, 何季, 文雪峰. 间作不同农作物对刺梨园土壤微生物类群及酶活性的影响[J]. 山地农业生物学报, 2019, 38(6): 8-13, 42.
- [23] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 等. 广东省典型土壤类型和土地利用方式对土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1464-1471.
- [24] 陈大勋. 福建省几种土壤类型酶活性的研究[J]. 福建农学院学报, 1986, 15(1): 78-85.
- [25] Tu C M. Effect of four experimental insecticides on enzyme activities and levels of adenosine triphosphate in mineral and organic soils[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 1990, 25(6): 787-800.
- [26] 闫颖, 袁星, 樊宏娜, 等. 五种农药对土壤转化酶活性的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 588-591.
- [27] 王天元, 宋雅君, 滕鹏起. 土壤脲酶及脲酶抑制剂[J]. 化学工程师, 2004, 18(8): 22-24.
- [28] 王涵, 王果, 黄颖颖, 等. pH 变化对酸性土壤酶活性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2401-2406.

(上接第 608 页/Continued from Page 608)

- [12] Carter D L, Brown M J, Robbins C W. Selenium concentrations in alfalfa from several sources applied to a low selenium, alkaline soil [J]. Soil Science Society of America, 1969, 33(5): 715-718.
- [13] 李辉勇. 土壤溶液中硒的价态变换及其影响因素[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2001, 27(2): 139-142.
- [14] 马凤娟, 姬丙艳, 沈骁, 等. 青海东部地区植物富硒特征及影响因素[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(13): 1-4.
- [15] 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): 37-40, 36.
- [16] 杨良策, 李明龙, 杨廷安, 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.
- [17] 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.
- [18] 陈显著, 李就好. 广州市土壤硒含量的分布及其影响因素研究[J]. 福建农业学报, 2016, 31(4): 401-407.
- [19] 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.
- [20] 王月平, 张立, 崔玉军, 等. 宝清县东部土壤硒含量特征及其与土壤性质的关系[J]. 物探与化探, 2019, 43(4): 904-911.
- [21] 张立, 刘国栋, 吕石佳, 等. 黑龙江省海伦市农耕地土壤硒分布特征及影响因素[J]. 现代地质, 2019, 33(5): 1046-1054.