

## 三峡库区(重庆段)土壤硒分布特征及影响因素<sup>①</sup>

罗友进<sup>1,2</sup>, 韩国辉<sup>1</sup>, 孙协平<sup>1</sup>, 廖敦秀<sup>1</sup>, 谢永红<sup>1</sup>, 魏朝富<sup>2\*</sup>

(1 重庆市农业科学院, 重庆 401329; 2 西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:** 重庆是我国缺硒(Se)的重点区域, 多目标地球化学调查采用现代分析测试手段进行土壤 Se 元素的分布及富集的研究, 对特色农业资源的开发利用具有重要意义。以每 4 km<sup>2</sup> 1 个表层和每 16 km<sup>2</sup> 1 个深层土壤数据对三峡库区重庆段土壤 Se 分布特征及其影响因素进行了分析探讨。结果表明: 三峡库区(重庆段)表层土壤 Se 含量在 0.006 ~ 5.79 mg/kg 之间, 平均值为 0.16 mg/kg, 以缺 Se 或潜在缺 Se 为主, 其分布面积达到 73.19%, 足 Se 面积为 25.77%, 富 Se 或 Se 中毒区域仅为 0.16%; 深层土壤 Se 含量在 0.03 ~ 0.62 mg/kg 之间, 平均值为 0.12 mg/kg, 缺 Se 面积占到 67.36%, 潜在缺 Se 面积也占到 20.68%。不同类型间以黄壤表层土壤 Se 含量最高, 其次是石灰土, 且与水稻土和紫色土存在着显著性差异。不同土地利用方式间以林地与建筑用地表层土壤中 Se 含量相对较高, 但各土地利用方式间不存在显著性差异。表层土壤 Se 含量相对于深层土壤表现出明显的富集特征, 富集面积达到 76.97%, 但以弱富集区域为主, 占到总面积的 56.93%。土壤有机质、总氮含量与表层土壤 Se 含量存在较好相关性; 与主要重金属以及 S 的相关性分析表明, 其存在着较强的伴生关系, 以 Cd 的伴生关系最为密切。表层土壤 Se 含量随着海拔和坡度的增加而增加, 随着 pH 的增加而减少。此外, Fe、Al 也是影响表层土壤 Se 含量的重要因素。

**关键词:** 土壤硒; 分布特征; 影响因素; 三峡库区(重庆段)

中图分类号: S159.2; S158.5 文献标识码: A

硒(Se)是人类饮食中必要的营养元素和必需的人体结构元素, 具有营养、毒性和解毒三重生物学功能。Se 摄入量不足会导致克山病等疾病的发生; 摄入量过多则会导致如“碱性病”或“瞎撞病”、脱甲病等<sup>[1-4]</sup>。同时, Se 也是对抗重金属的天然解毒剂, 能在体内与重金属(如 Hg、Pb、As 和 Cd 等)、蛋白质结合成复合物而排出体外<sup>[5]</sup>。越来越多的临床研究数据表明人体补 Se 可以显著降低癌症的发病率及死亡率<sup>[6]</sup>, 由此可见环境 Se 水平与人的健康密切相关。土壤 Se 是人体摄入 Se 的最终来源, 因此, 研究土壤 Se 对于区域农产品安全以及人体健康具有重要意义。

Se 通过植物体进入食物链, 但受一系列地质、地理因素控制。植物体内 Se 含量与其本身种属、生长环境、土壤 Se 的有效性等密切相关。戴慧敏等<sup>[5]</sup>研究认为铁锰氧化物、有机质、土壤类型、质地等理化性质对 Se 具有明显的富集作用, 人类活动也是影响 Se 富集的主要因素。商靖敏等<sup>[7]</sup>研究发现黏粒含量与表层土壤中 Se 含量相关性较好, 同时 Se 含量随

着海拔的增高而显著增加, 随 pH 增加显著减少, TOC、Fe 和 Al 含量也是影响土壤 Se 含量的重要因素。陈显著和李就好<sup>[8]</sup>研究指出土壤 Se 含量主要受到成土母质的影响, 土壤属性如 pH、有机质含量及 CEC 等也对其有影响。章海波等<sup>[9]</sup>研究认为土壤 Se 含量的主要影响因素是成土母质、土壤 pH、黏粒、有机质和 Fe、Al 含量。徐强等<sup>[10]</sup>研究指出土壤类型、成土母质、土地利用方式、土壤有机碳和土壤粒径分布等是影响土壤 Se 含量分布的因素。张光第等<sup>[11]</sup>研究认为控制高 Se 区 Se 元素分布的因素主要有土壤母质、富 Se 生物资源分布和出露的岩石。因此, 对于土壤、植物系统中 Se 环境效应及其影响因素已进行了相应较多的研究, 但其影响机理却仍不甚清楚。

Se 在地壳中分布极不均匀, 世界土壤 Se 含量范围为 0.030 ~ 2.000 mg/kg。谭见安<sup>[12]</sup>从 Se 的生物学功能及环境病理学的角度指出在全国范围内存在一条从东北地区向西南方向经过黄土高原再向西南延伸向西藏高原的低 Se 带, 其含量仅为 0.1 mg/kg。三

基金项目: 国家“十二·五”科技支撑计划项目(2012BAD14B18)和自然科学基金青年项目(41401594)资助。

\* 通讯作者(weicf@swu.edu.cn)

作者简介: 罗友进(1984—), 男, 浙江玉环人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤质量与环境研究。E-mail: luoyoujin1984@163.com

峡库区(重庆段)位于我国的西南地区,西南地区分布着较大面积的紫色土,属于“极低 Se”土类。严明书等<sup>[13]</sup>研究指出重庆土壤 Se 含量分布受地层、母岩岩性、土壤类型、土壤层位等因素的影响;高 Se 土壤主要分布在三叠系、二叠系、志留系、奥陶系及寒武系的石灰土中。童建川<sup>[14]</sup>研究指出重庆地区紫色地层岩石属于地质极缺 Se 岩石,其发育成土的紫色土全 Se 含量也处于低-中等水平。而赵婉彤<sup>[15]</sup>对重庆江津地区土壤 Se 含量研究则发现江津地区农业土壤 Se 含量主要处于中等水平。由此可见,由于本地区母质岩层丰富、地形地貌复杂,土壤 Se 分布差异性较大且涉及不同土壤类型、不同地形地貌以及地质等影响因素等综合信息在本研究区域仍未见报道。因此,本研究以三峡库区《多目标区域地球化学调查》项目数据为基础,对三峡库区巫山-重庆段土壤 Se 含量进行统计分析,结合区域母质类型、地形地貌以及土地利用,探讨其土壤 Se 分布特征及影响因素,以期为本区域土壤 Se 的环境本底调查和表生地球化学研究以及涉及人体健康等奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

本研究区域为三峡库区巫山-重庆段,位于四川盆地东部,总面积为 12 326 km<sup>2</sup> (107°00' ~ 110°07' E, 29°30' ~ 31°20' N),海拔为 175 ~ 1 300 m,年平均降雨量为 1 050 ~ 1 500 mm,年平均温度为 13.8 ~ 18.8 °C,其中 96.2% 为丘陵山区,内有川东平行岭谷、齐耀山、大巴山等多种自然景观,地形高度、坡度变化大,

地貌类型复杂,主要有河谷平原、侵蚀剥蚀台地、侵蚀剥蚀丘陵、侵蚀剥蚀中山、褶皱抬升低山、褶皱抬升中山、喀斯特地貌等;同时区内汇集长江及其支流,是保护长江母亲河生态环境的主要流域之一。属沉积岩广泛发育区,大面积出露侏罗系、三叠系,零星见二叠系,土壤类型主要为紫色土、黄壤、石灰土、水稻土等,主要土地利用方式为耕地、林地、草地、建筑用地、滩涂等,耕种作物主要有水稻、玉米、红薯、柑橘以及各类蔬菜等。此外,研究区人口众多,资源丰富,是中国东西部连接的重要交通通道和独具发展潜力的经济轴线,是西部乃至全国发展经济格局中的十分特殊的自然、经济区域,是长江流域经济和生态建设的重要地区。

### 1.2 样品采集与分析测定

研究区样品来源于三峡库区《多目标区域地球化学调查》项目,样品采集根据《多目标区域地球化学调查规范》,将研究区划分成 1 km×1 km 网格状,每个基本网格内采集土壤表层样品,采样深度为 0~20 cm;同时按 2 km×2 km 网格状,采集深层土壤样品,采样深度为 150~200 cm(土壤较薄区域采集发生层),由于奉节至巫山一带土壤较薄,按 4 km×4 km 网格内采集样品;由于受到地形地貌以及交通等条件的限制,每个样品尽最大限度代表采样网格内的主要土壤类型。表层土样按 2 km×2 km 大格的 4 个基本网格内的样品进行分别加工,然后再等量缩分组合成 1 个分析样品,共计 3 085 个样品;深层土样按 4 km×4 km 大格的 4 个基本网格内的样品进行分别加工,然后再等量缩分组合成 1 个分析样品,共计 769 个样品(图 1)。

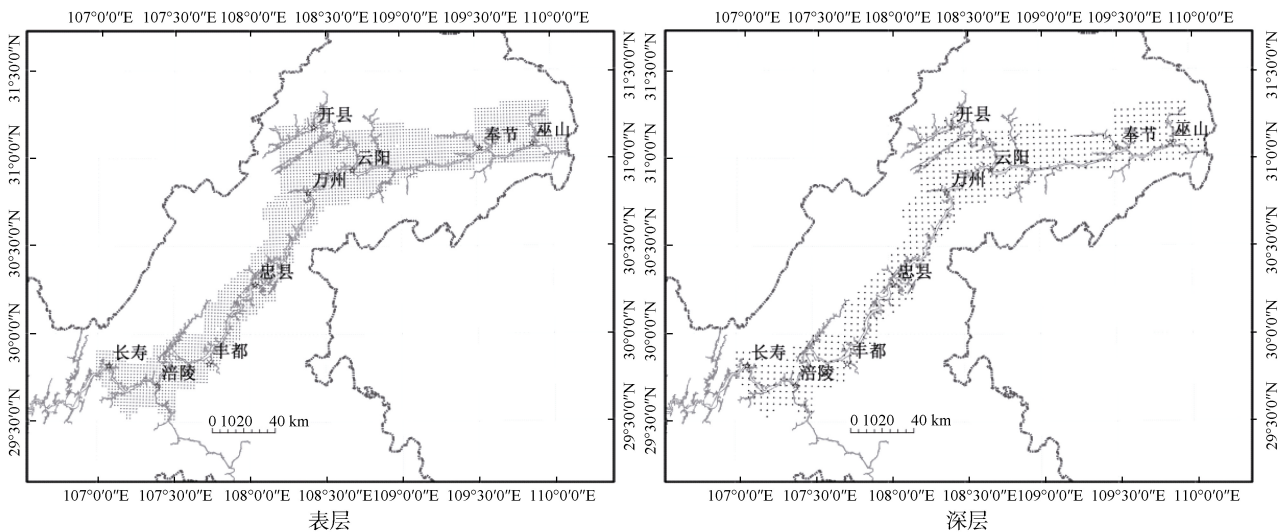


图 1 三峡库区(重庆段)表层与深层土壤样点分布图

Fig. 1 Spatial distribution of surface and deep soil sampling sites in Three Gorges Reservoir Region (Chongqing Section)

分析 Se、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、CaO、MgO、S、N、有机碳、pH、As、Hg、Cd、Cr、Cu、Zn、Pb、Ni 等元素指标。样品由成都地质综合岩矿测试中心进行分析, Se 采用原子荧光法测定, SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、CaO、MgO 等采用 X 射线荧光光谱法测定, S、N 采用元素分析法测定, 有机碳采用容量法测定, pH 采用玻璃电极法测定, As、Hg 采用原子荧光法测定, Cd 采用火焰原子吸收法测定, Cr、Cu、Zn、Pb 采用 X 荧光法测定, Ni 采用电感耦合等离子体原子发射光谱法测定。测定过程及结果均受中国地质调查局分析质量监控组监控及检查验收。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤硒含量分布特征

三峡库区(重庆段)表层土壤 Se 含量的统计分析表明(表 1), 其平均含量为 0.16 mg/kg, 变异系数为 103.1%, 范围为 0.006~5.79 mg/kg, 呈偏右态、尖削峰分布。童建川<sup>[14]</sup>通过对重庆 17 个区县紫色土区 Se 环境的研究, 指出其土壤中 Se 含量在 0.077~0.566 mg/kg 之间。赵婉彤<sup>[15]</sup>对重庆江津地区农业土壤 Se 含量的调查指出其土壤中 Se 含量 >0.2 mg/kg 的样品占到总样品的 90.2%, 其土壤 Se 含量属于中等水平。与我国其他地方相关研究相比发现, 三峡库区表层土壤中的 Se 含量较低, 只高于黑龙江地区土壤 Se 含量<sup>[16]</sup>, 低于其他地区以及全国土壤均值(表 1)。深层土壤 Se 含量的统计分析表明, 其平均含量为 0.12 mg/kg, 变异系数为 41.9%, 变幅为 0.03~0.62 mg/kg。

表 1 三峡库区(重庆段)与全国各地表层土壤 Se 含量  
Table 1 Se contents in surface and deep soils in Three Gorges Reservoir Region (Chongqing Section) and in surface soils of other regions of China

地区	平均值 (mg/kg)	变异 系数(%)	范围 (mg/kg)	文献
三峡库区(表层)	0.16	103.1	0.006~5.79	本文
三峡库区(深层)	0.12	41.9	0.03~0.62	本文
全国	0.29	87.9	0.05~0.99	[17]
北京平原	0.20	-	0.04~5.26	[18]
河北平原	0.19	26.0	0.05~0.34	[19]
东北平原	0.18	-	0.01~5.3	[5]
洋河流域	0.30	92.1	0.02~3.24	[7]
黑龙江	0.15	-	0.008~0.66	[16]
广东	0.28	71.4	0.03~1.42	[20]
贵州	0.37	59.6	0.06~1.33	[21]
香港	0.76	54.8	0.07~2.26	[9]
浙江省嘉善县	0.33	12.0	0.06~2.73	[22]

基于谭见安<sup>[23]</sup>对我国 Se 元素生态景观安全阈值的划分, 对本区域表层土壤中 Se 的丰缺情况进行了分析(表 2、图 2)。从表 2 可知, 研究区域表层土壤主要为缺 Se 或潜在缺 Se, 其分布面积则分别占到 39.25% 和 33.94%, 足 Se 面积为 25.77%, 富 Se 或 Se 中毒区域仅为 0.16%; 深层土壤缺 Se 面积占到 67.36%, 潜在缺 Se 也达到 20.68%。从图 2 可以看出, 三峡库区(重庆段)表层土壤 Se 含量空间分布存在明显差异, 总体上呈条带状结合斑块状分布, 在巫山老地层区、涪陵老地层区、红岩盆地、假角山背斜、铁峰山-碛村背斜、忠县背斜和方斗山冲断背斜等区域相对较高。

表 2 三峡库区(重庆段)土壤 Se 含量分级统计  
Table 2 Statistics of Se contents in different grades in surface and deep soils in Three Gorges Reservoir Region (Chongqing Section)

全硒含量(mg/kg)	Se 效应	比例(%)	
		表层土壤	深层土壤
<0.125	缺 Se	39.25	67.36
0.125~0.175	潜在缺 Se	33.94	20.68
0.175~0.4	足 Se	25.77	11.70
0.4~3	富 Se	0.10	0.26
>3	Se 中毒	0.06	0.00

统计分析表明, 本研究区域不同类型土壤中 Se 含量存在着显著性差异, 具体表现为黄壤(0.215 mg/kg) 石灰土(0.201 mg/kg)>水稻土(0.144 mg/kg) 紫色土(0.141 mg/kg)(表 3); 不同土地利用方式下土壤 Se 含量则不存在显著性差异, 但其中以林地与建筑用地表层土壤中 Se 含量相对较高(表 4)。这与前人研究结果基本一致。戴慧敏等<sup>[5]</sup>研究发现城镇用地土壤 Se 含量最高, 其次是林地、旱地和水田, 草地、林草混杂地、未利用地以及水域等则较低; 商靖敏等<sup>[7]</sup>则研究发现林地土壤 Se 含量最高, 城镇工矿用地、农业用地和草地明显低且三者间不存在显著性差异。这可能是由于土地利用方式对土壤 Se 含量的影响是多方面综合的结果。迟凤琴等<sup>[16]</sup>研究认为后期人类活动是影响土壤 Se 含量的主要因素, 但这种影响在城镇地区比较复杂。以石油和煤为能源的电力、钢铁、冶金等企业排放的工业污染物如垃圾、废水等含有很高的 Se<sup>[24]</sup>, 可能会通过直接或间接排入土壤而使土壤 Se 含量增加, 石油及煤的燃烧排放的废气会导致大气环境中 Se 含量增加, 大气沉降到土壤上, 也可能会导致土壤 Se 含量的增加<sup>[25]</sup>, 城镇垃圾的堆放也可能会增加土壤中 Se 的含量。农田生态系统中, 长期耕作会导致土壤中的 Se 被植物大量消耗, 而常规施肥不能补足损失的 Se, 从而致使农田土壤中 Se 含量较低; 森林生态系统中 Se 转化到有机物中, 并最终在土壤

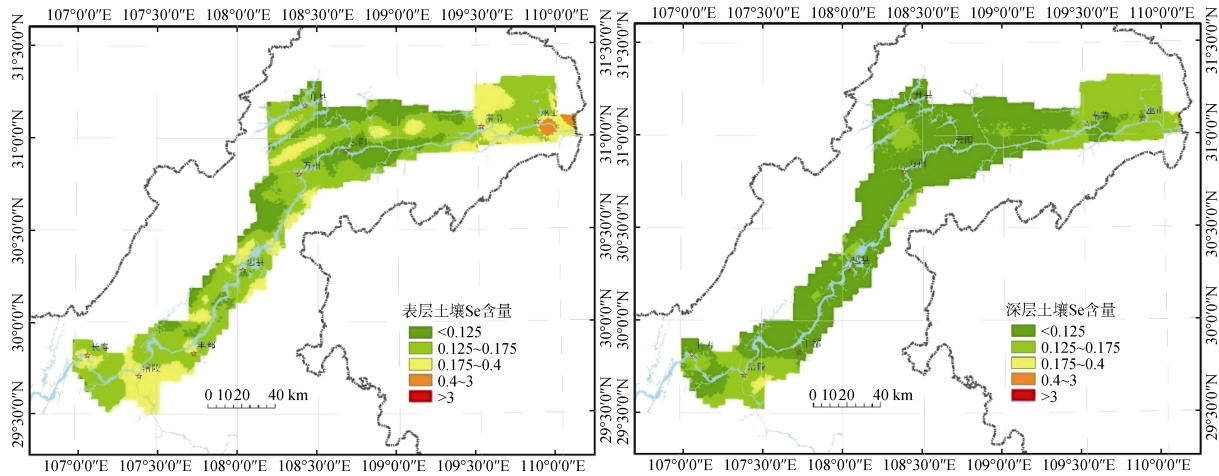


图 2 三峡库区(重庆段)土壤 Se 含量丰缺分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of Se contents in surface and deep soils in Three Gorges Reservoir Region (Chongqing Section)

表层累积，从而导致森林表层土壤 Se 含量较高<sup>[26]</sup>。迟凤琴等<sup>[16]</sup>认为在耕种农田中则表现为首先使土壤质地发生变化，黏粒增加或减少、有机质变化等均会影响 Se 含量的增加或减少，耕种及耕种方式改变如水田改变为旱地后，可以使地表土壤酸碱度下降，向酸化方向演变，使土壤 Se 含量增加；耕种过程长期施肥行为也能导致 Se 元素的聚集<sup>[27]</sup>。

2.2 土壤硒富集特征

廖启林等<sup>[28]</sup>将同一空间内同一片土壤中的表层与深层元素含量进行对比计算得到元素的富集系数并将计算所得的值划分 6 段区间，分别为<0.6(强烈贫化)、0.6 ~ 0.85(弱贫化)、0.85 ~ 1.15(基本自然状态)、1.15 ~ 1.5(弱富集)、1.5 ~ 4.0(强烈富集)、>4.0(极强富集)。根据其研究，得到本研究区域土壤全 Se 表生富集系数分布(图 3)。从中可知，本研究区域土壤表

表 3 不同土壤类型 Se 含量 (mg/kg)

Table 3 Se contents in different soil types

土壤类型	平均值	范围
紫色土	0.141 ± 0.092 b	0.044 ~ 2.600
黄壤	0.215 ± 0.287 a	0.060 ~ 5.790
石灰土	0.201 ± 0.270 a	0.063 ~ 4.080
水稻土	0.144 ± 0.050 b	0.015 ~ 0.400

表 4 不同土地利用方式下表层土壤 Se 含量 (mg/kg)

Table 4 Se contents in surface soils under different land use types

土地利用方式	平均值	范围
草地	0.149 ± 0.063	0.044 ~ 0.380
旱地	0.152 ± 0.160	0.060 ~ 4.080
建筑用地	0.184 ± 0.168	0.062 ~ 1.180
林地	0.196 ± 0.250	0.006 ~ 5.790
水田	0.144 ± 0.052	0.015 ~ 0.400
园地	0.140 ± 0.056	0.054 ~ 0.360
滩涂	0.145 ± 0.051	0.095 ~ 0.240
未利用地	0.139 ± 0.065	0.066 ~ 0.430

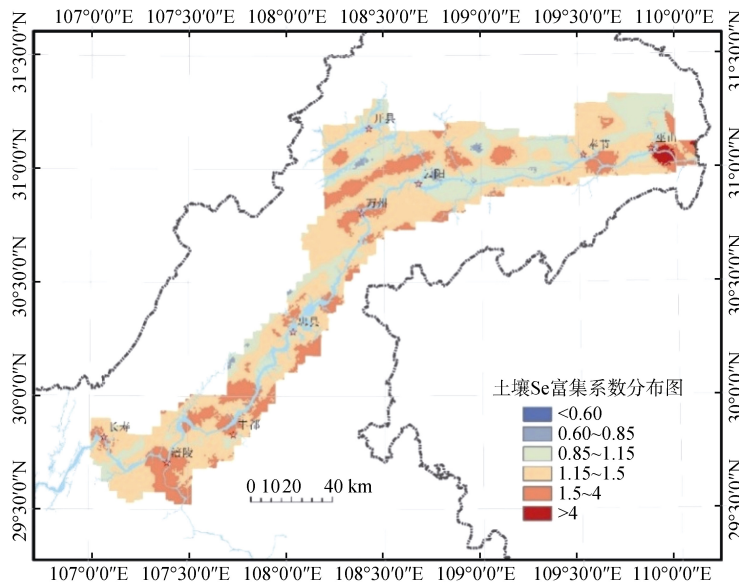


图 3 三峡库区(重庆段)土壤 Se 富集系数分布

Fig. 3 Distribution of concentration coefficients of soil Se in Three Gorges Reservoir Region (Chongqing Section)

层 Se 相对深层富集明显,富集面积达到 76.97%,其中以弱富集区域为主,占到总面积的 56.93%,其分布格局与表层土壤 Se 含量分布格局极为相似,在涪陵老地层区、假角山背斜、铁峰山-碛村背斜、方斗山冲断背斜以及巫山老地层区部分区域等相对较高;强烈贫化与弱贫化区域呈星点状分布于研究区域;基本自然状态主要分布于梁平盆地、云阳至奉节沿江等区域。

### 2.3 影响因素

影响土壤 Se 含量的因素众多,主要有成土母质、土壤性质、气候以及人为因素等。土壤 Se 含量主要来自于成土母质,而表层土壤中 Se 主要是母质风化和植物富集的结果<sup>[29]</sup>。

**2.3.1 成土母质** 母质是影响自然土壤 Se 含量分布的主要因素。王美珠和章明奎<sup>[29]</sup>通过对我国部分地区高 Se、低 Se 土壤原因的初探,认为母质(母岩)类型是导致土壤 Se 含量高低的主要原因。陈俊坚等<sup>[20]</sup>的研究指出广东省土壤 Se 空间分布格局与区域成土母质密切相关,高 Se 土壤主要位于石灰岩和砂页岩区域,低 Se 土壤主要位于紫色页岩和花岗岩地区。贾士军<sup>[30]</sup>研究发现安徽省内侏罗纪火山岩、震旦纪-三叠纪地层、白垩和侏罗纪燕山期侵入岩对应的表层土壤中 Se 含量相对较高,空间上富 Se 土壤的分布与上述地层分布区一致。但戴慧敏等<sup>[5]</sup>通过对东北平原表层和深层土壤中 Se 含量的对比分析表明其表层土壤中的 Se 含量受控于深层土壤中 Se 含量较弱即继承成土母质的程度较弱。本研究区成土母质发育于二叠系、三叠系以及侏罗系,主要包括二叠系(P)、三叠系下统飞仙关组/大冶组/嘉陵江组(T<sub>1j</sub>/T<sub>1d</sub>/T<sub>1f</sub>)、三叠系中统巴东组/雷口坡组(T<sub>2b</sub>/T<sub>2l</sub>)、三叠系上统须家河组(T<sub>3xj</sub>)、侏罗系中下统自流井组(J<sub>1z-2x</sub>)、侏罗系中统沙溪庙组(J<sub>2s</sub>)、侏罗系上统遂宁组(J<sub>3sn</sub>)和侏罗系上统蓬莱镇组(J<sub>3p</sub>)等。根据本研究区成土母质的分布情况对其表层土壤中 Se 含量进行了统计分析,结果见表 5。其结果表明,来自于二叠系母质发育的表层土壤中 Se 要明显高于其他地层母质发育的土壤,其次

是发育于三叠系下统飞仙关组/大冶组/嘉陵江组的土壤,其余地层母质发育的表层土壤中 Se 含量相对较低且不存在明显的差异。

表 5 不同成土母质区表层土壤 Se 含量(mg/kg)  
Table 5 Se contents in surface soils derived from different parental materials

成土母质	平均值	范围
P	0.905 ± 1.616	0.100 ~ 5.790
T <sub>1j</sub> /T <sub>1d</sub> /T <sub>1f</sub>	0.236 ± 0.316	0.100 ~ 4.000
T <sub>2b</sub> /T <sub>2l</sub>	0.172 ± 0.070	0.006 ~ 0.510
T <sub>3xj</sub>	0.208 ± 0.082	0.076 ~ 0.780
J <sub>1z-2x</sub>	0.193 ± 0.078	0.048 ~ 0.680
J <sub>2s</sub>	0.129 ± 0.056	0.044 ~ 1.180
J <sub>3p</sub>	0.130 ± 0.037	0.015 ~ 0.310
J <sub>3sn</sub>	0.129 ± 0.050	0.060 ~ 0.900

**2.3.2 土壤性质** 众多研究表明,土壤 Se 含量与土壤理化性质关系密切。通过对本区域表层土壤 Se 含量与土壤属性的相关分析(表 6),表明表层土壤 Se 含量与有机质含量、总氮、总 S、Fe 等含量呈正相关关系,与 Al、pH、K、Mg、Na 等呈负相关关系;同时也发现与土壤中主要重金属均存在显著正相关关系(表 7),即表明存在伴生关系。

土壤 pH 是影响土壤 Se 含量的主要因素之一<sup>[1,5,31-32]</sup>。土壤 pH 可以影响 Se 在土壤中的存在价态、形态和土壤中 Fe、Al、Ca、Mg 等元素对其的吸附、解吸过程<sup>[33]</sup>。土壤中 Se 的主要存在形式有硒化物、有机硒、元素硒、亚硒酸盐和硒酸盐等,在酸性中性土壤中亚硒酸盐是主要的存在形式,碱性土壤中硒酸盐是主要形式,硒酸盐更易于迁移淋溶。同时,土壤 pH 越高,Se 的甲基化越强,在土壤中的流失就越多。杨忠芳等<sup>[34]</sup>研究则认为在中碱性土壤中 Se 含量基本不受 pH 制约,而酸性土壤条件下,随着 pH 下降土壤 Se 含量可迅速增加。因此,土壤 pH 对土壤 Se 含量的影响相对复杂,涉及 CEC、Eh 等因素,其机理仍需进一步研究。

表 6 土壤 Se 含量与土壤性质间的相关性

Table 6 Correlation coefficients between Se content and other properties of surface soil in Three Gorges Reservoir Region (Chongqing Section)

	C <sub>org</sub>	TN	pH	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TS
Se	0.313*	0.281*	-0.054*	-0.004	-0.082*	-0.203*	-0.182*	0.015	-0.046	0.075*	0.194*

注: \*表示相关性达到  $P < 0.01$  显著水平,下表同。

表 7 土壤 Se 含量与土壤主要重金属间的相关性

Table 7 Correlation coefficients between Se and heavy metal contents in soils in Three Gorges Reservoir Region (Chongqing Section)

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Zn	Pb
Se	0.232*	0.667*	0.468*	0.164*	0.082*	0.232*	0.211*	0.125*

土壤有机质也是影响土壤 Se 含量的主要因素<sup>[1, 5, 10, 16, 31-32]</sup>。Shand 等<sup>[35]</sup>指出在构建土壤 Se 元素分布图时,土壤有机碳是唯一需要考虑的土壤属性。土壤有机 Se 占到总 Se 含量的 50%<sup>[36-37]</sup>,有些区域甚至可以达到 80% 以上<sup>[38]</sup>。土壤有机质对土壤 Se 的吸附与固定起重要作用,土壤有机质含量高的土壤,其对土壤中 Se 的吸附能力越强,土壤中 Se 含量也相对较高。本研究中表层土壤 Se 含量与有机质呈正相关关系也进一步验证了此观点。

本研究中发现表层土壤中 Se 含量与 Fe 呈正相关,与 Al、Ca、Mg 呈负相关关系,在一定程度上证明了土壤中 Se 含量与成土过程存在联系。成土过程中,铁铝氧化物对 Se 的积累和淋溶具有重要影响。在湿润地区,Se 与铁铝化合物一起流失,这也在一定程度造成本区域表层土壤 Se 含量相对较低。另外,本研究还发现表层土壤中 Se 含量与土壤中 TN 和 TS 呈正相关,这与李杰等<sup>[32]</sup>研究结果相一致,而与商靖敏等<sup>[7]</sup>研究结果则不同。土壤 Se 与土壤主要重金属的伴生关系密切,则表明在发展富硒产业时需考虑重金属元素的影响。

**2.3.3 地形地貌** 对采自不同区域表层土壤中 Se 含量与对应海拔、坡度以及坡向进行了相关分析(表 8)。结果表明,本研究区表层土壤中 Se 含量与海拔、坡度呈显著正相关,而与坡向则不存在明显的相关关系。这与商靖敏等<sup>[7]</sup>、Yu 等<sup>[39]</sup>关于土壤中 Se 含量与海拔之间关系的研究结果相一致。其认为可能原因是随着海拔高度的增加,气温降低,致使有机质分解缓慢,有利于土壤有机复合态 Se 的累积,同时土壤中易被淋溶和植物吸收的 Se 含量减少,最终使土壤 Se 得以富集。表层土壤 Se 含量与坡度也呈正相关,这可能与土地利用类型相关,本研究区域坡度相对较大区域主要土地利用类型为林地等。

表 8 土壤 Se 含量与海拔、坡度、坡向间的相关性  
Table 8 Correlation coefficients between soil Se content and altitude, slope and aspect in Three Gorges Reservoir Region (Chongqing Section)

	海拔	坡度	坡向
土壤 Se	0.125	0.156	0.007

### 3 结论

三峡库区(重庆段)表层土壤 Se 平均含量低于我国土壤 Se 平均含量。表层土壤和深层土壤均以缺 Se 或潜在缺 Se 为主要特征,呈条带状结合斑块状分布,在巫山老地层区、涪陵老地层区、红岩盆地、假角山

背斜、铁峰山-碛村背斜、忠县背斜和方斗山冲断背斜等区域相对较高。表层土壤 Se 含量相对于深层土壤富集,以弱富集为主要分布特征。不同类型间以黄壤表层土壤 Se 含量最高,其次是石灰土,且与水稻土和紫色土存在着显著性差异。不同土地利用方式间以林地与建筑用地表层土壤中 Se 含量相对较高,但各土地利用方式间不存在显著性差异。土壤有机质、总氮含量与表层土壤 Se 含量存在较好相关性;与主要重金属以及 S 的相关性分析表明,其存在着较强的伴生关系,以 Cd 的伴生关系最为密切。表层土壤 Se 含量随着海拔和坡度的增加而增加,随着 pH 的增加而减少。此外,Fe、Al 也是影响表层土壤 Se 含量的重要因素。

### 参考文献:

- [1] Gabos M B, Alleoni L R F, Abreu C A. Background levels of selenium in some selected Brazilian tropical soils [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 145: 35-39
- [2] Wang J, Li H R, Li Y H, et al. Speciation, distribution, and bioavailability of soil selenium in the Tibetan Plateau Kashin-Beck Disease area—A case study in Songpan County, Sichuan Province, China[J]. *Biological Trace Element Research*, 2013, 156(1/3): 367-375
- [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): 59-64
- [4] 孟惠平, 吕明. 微量元素硒的抗衰老作用研究[J]. *微量元素与健康研究*, 2008, 25(5): 62-64
- [5] 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
- [6] Rayman M P. Selenium and human health[J]. *Lancet*, 2012, 379(9822): 1256-1268
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 章海波, 骆永明, 吴龙华, 等. 香港土壤研究. 土壤硒的含量、分布及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2005, 42(3): 404-410
- [10] 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
- [11] 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): 36-40
- [12] 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
- [13] 严明书, 龚媛媛, 杨乐超, 等. 重庆土壤硒的地球化学特征及经济意义[J]. *物探与化探*, 2014, 38(2): 325-330
- [14] 董建川. 重庆紫色土区硒分布特征研究[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 41(3): 170-175

- [15] 赵婉彤. 重庆市江津区土壤硒含量分布及影响因素的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016
- [16] 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
- [17] 刘铮. 中国土壤微量元素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996
- [18] 郭莉, 杨忠芳, 阮起和, 等. 北京市平原区土壤中硒的含量和分布[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 859-864
- [19] 李振宁. 河北省平原区土壤中硒异常源追踪及生态效应评价[D]. 石家庄: 石家庄经济学院, 2010
- [20] 陈俊坚, 张会化, 余炜敏, 等. 广东省土壤硒空间分布及潜在环境风险分析[J]. 生态环境学报, 2012, 12(6): 1115-1120
- [21] 何亚琳. 贵州省土壤含硒量及其分布[J]. 土壤学报, 1996, 33(4): 391-397
- [22] 胡艳华, 王加恩, 蔡子华, 等. 浙北嘉善地区土壤硒的含量、分布及其影响因素初探[J]. 地质科技情报, 2010, 29(6): 84-88
- [23] 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
- [24] Huang S S, Hua M, Feng J S, et al. Assessment of selenium pollution in agricultural soils in the Xuzhou District, Northwest Jiangsu, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(4): 481-487
- [25] Perkins W T. Extreme selenium and tellurium contamination in soils-An eighty year-old industrial legacy surrounding a Ni refinery in the Swansea Valley[J]. Science of the Total Environment, 2011, 412-413: 162-169
- [26] Qin H B, Zhu J M, Liang L, et al. The bioavailability of selenium and risk assessment for human selenium poisoning in high-Se areas, China[J]. Environment International, 2013, 52: 66-74
- [27] De Temmerman L, Waegeneers N, Thiry C, et al. Selenium content of Belgian cultivated soils and its uptake by field crops and vegetables[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468-469: 77-82
- [28] 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
- [29] 王美珠, 章明奎. 我国部分高硒低硒土壤的成因初探[J]. 浙江农业大学学报, 1996, 22(1): 89-93
- [30] 贾士军. 安徽省富硒土壤评价标准及富硒土壤成因浅析[J]. 资源调查与环境, 2013, 34(2): 133-139
- [31] 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
- [32] 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
- [33] Goh K H, Lim T T. Geochemistry of inorganic arsenic and selenium in a tropical soil: Effect of reaction time, pH, and competitive anions on arsenic and selenium adsorption[J]. Chemosphere, 2004, 55(6): 849-859
- [34] 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
- [35] 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
- [36] Yamada H, Kamada A, Usuki M, et al. Total selenium content of agricultural soils in Japan[J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2009, 55: 616-622
- [37] 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
- [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
- [39] 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

## Distribution of Soil Selenium in Three Gorges Reservoir Region (Chongqing Section) and Its Influential Factors

LUO Youjin<sup>1,2</sup>, HAN Guohui<sup>1</sup>, SUN Xieping<sup>1</sup>, LIAO Dunxiu<sup>1</sup>, XIE Yonghong<sup>1</sup>, WEI Chaofu<sup>2\*</sup>

(1 *Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China*; 2 *College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China*)

**Abstract:** Soil selenium (Se) is seriously deficient in Congqing of southwest China. A Multi-Purpose Regional Geochemical Survey (MPRGS) was performed in the Three Gorges Reservoir Region (Chongqing Section) in order to stimulate the development of native Se-rich agricultural resources. Soil were collected with the sampling density of 1 sample/4 km<sup>2</sup> for surface soil and 1 sample/16 km<sup>2</sup> for deep soil, respectively, and then the spatial distribution of soil Se and its influential factors were studied. The results showed that the content of Se in surface soil ranged from 0.006 to 5.79 mg/kg with a mean of 0.16 mg/kg, for the total region, about 39.25% and 33.94% were Se deficient and potentially deficient, 25.77% was sufficient, while only 0.16% is rich and poisoning. Se in deep soil ranged from 0.03 to 0.62 mg/kg with a mean of 0.12 mg/kg, and Se deficient and potential deficient accounted for 67.36% and 20.68% in area, respectively. Se content in surface soil varied significantly with soil type, with highest in yellow soil, followed by limestone soil, which were significantly higher than those in paddy soil and purple soil. There were no significant differences in Se contents among different land use types, but Se contents were higher in forestry and construction land types. The obviously Se enrichment in surface soil was found, which accounted to 76.97% of the total area but 56.93% of which was weak enrichment. Se content in surface soil was significantly positively correlated with soil organic matter and total nitrogen contents, altitudes and slope, but significantly negatively correlated with soil pH. The associated relationship was observed between Se and heavy metal contents (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Zn and Pb) in surface soil, particularly of Cd. Furthermore, Fe and Al contents were also important influential factors of Se content in surface soils.

**Key words:** Soil selenium; Distribution; Influential factors; Three Gorges Reservoir Region (Chongqing Section)