

韩笑, 周越, 吴文良, 等. 富硒土壤硒含量及其与土壤理化性状的关系: 以江西丰城为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1177–1183.

HAN Xiao, ZHOU Yue, WU Wen-liang, et al. Selenium contents of farmland soils and their relationship with main soil properties in Fengcheng, Jiangxi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1177–1183.

富硒土壤硒含量及其与土壤理化性状的关系 ——以江西丰城为例

韩笑, 周越, 吴文良, 孟凡乔*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 为了解富硒土壤的硒含量及其分布特征, 明确土壤硒与主要土壤性状指标的关系, 选择江西丰城地区不同硒水平的水田和旱作农田, 于2014年9月选取了14个村落于作物收获后布设土壤剖面采样点。在0~100 cm的土壤剖面进行分层(20 cm)取样, 测定土壤全硒含量及主要理化性状。结果表明, 丰城地区农田土壤(0~20 cm)全硒平均含量(算术平均值)为0.49 mg·kg⁻¹, 41.2%的农田土壤高于0.4 mg·kg⁻¹, 99%高于0.125 mg·kg⁻¹。1 m剖面中土壤硒含量在0~20 cm最高, 硒含量随着土壤深度的增加而逐渐降低, 且在60 cm以下基本保持不变。富硒条件下, 水田土壤硒含量在0~40 cm土层上显著高于旱地土壤; 非富硒条件下, 二者的全硒含量在1 m土体上无显著差异。土壤有机质含量对土壤全硒含量有决定性影响, 而黏粒仅对水田土壤硒有显著影响。pH对土壤全硒含量呈现抑制作用, 而土壤总铁、总铝和阳离子交换量对土壤全硒呈现富集效应。研究表明, 在富硒地区, 水田比旱地更有利于土壤硒的积累, 提高土壤肥力水平对增加土壤硒含量有显著作用。

关键词: 土壤全硒; 土地利用方式; 江西; 丰城; 土壤理化性质

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)06-1177-07 doi:10.11654/jaes.2017-1375

Selenium contents of farmland soils and their relationship with main soil properties in Fengcheng, Jiangxi

HAN Xiao, ZHOU Yue, WU Wen-liang, MENG Fan-qiao*

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Fengcheng City, one of China's most important farming regions, contains soil that is rich in selenium (Se). This study analyzes the Se contents and Se distribution within 0~100 cm profiles under different land use (paddy and upland), as well as the relationship between Se contents and the physio-chemical properties of the soil. The results showed that the average soil Se content was 0.49 mg·kg⁻¹ (arithmetic mean) for farmland soils of Fengcheng; among which 41.2% and 99% soils had Se contents higher than 0.4 and 0.125 mg·kg⁻¹, respectively. Se was accumulated in the surface layer of farmland soils and its content was stable and lower in the 60~100 cm layer. In Se-rich soils, soils for paddy use had a significantly higher Se content than upland soils in the 0~40 cm layer. In the non-Se-rich soils, no significant differences in Se content were observed between paddy and upland soils across the 0~100 cm profile. Across the 0~100 cm profile, soil organic carbon had a determining effect on paddy and upland soil Se content, while soil clay content only exhibited its positive effect on soil Se content for paddy use. Soil pH tended to reduce the soil Se content and other soil properties including total Fe, total Al and CEC showed the effects of increasing soil Se content. The results of our study could provide technical support for rational management and utilization of Se-rich soils in Fengcheng.

Keywords: soil selenium; land use; Jiangxi; Fengcheng; soil physico-chemical properties

收稿日期: 2017-10-12 录用日期: 2018-01-30

作者简介: 韩笑(1988—), 女, 山西忻州人, 博士研究生, 主要从事农田碳循环研究。E-mail: ilovebigapple@163.com

*通信作者: 孟凡乔 E-mail: mengfq@cau.edu.cn

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项项目(201303106)

Project supported: The non-profit research foundation for agriculture(201303106)

硒是生态系统中一种重要的微量元素,摄入不足或者过度都会损害人体健康。农业生产所获得的植物产品是人类摄入硒安全有效的方式,而土壤硒水平直接决定了植物性硒的含量和生物有效性^[1]。研究表明,农田土壤中硒的含量和形态受多种因素影响^[1],如土壤母质、土壤有机质、质地、剖面分布、pH 以及矿物类型等,这些因素导致土壤中的硒以多种形态存在并时刻处于迁移转化中。土壤硒有显著的成土母质继承性^[2]。在微生物作用下,土壤硒多以与氨基酸或者蛋白质等有机化合物结合的形态存在^[3],因而总体上土壤硒含量和有机质含量呈正相关^[4]。硒在土壤垂直方向上的分布可以分为表土层聚集型、心土层聚集型或均匀分布等^[2],其中南方地区由于铁铝土和富铁土淋溶程度高,硒分布一般表现为心土层聚集型^[5]。土壤粘粒对硒有较强的富集作用,因此黏性土壤中的硒含量往往高于砂性土壤^[4]。土壤 pH 和氧化还原电位共同影响土壤中硒的形态、含量以及与其有机质或土壤矿物颗粒的吸附结合程度^[6]。

我国是世界上缺硒严重的国家,同时硒资源的分布极不均匀。我国土壤硒含量范围为 0.05~0.8 mg·kg⁻¹,平均值 0.29 mg·kg⁻¹,存在一条从东北到西南的低硒带,缺硒省份多达 22 个^[7]。只有极少部分地区有较高的硒储备量,被称为足硒区或富硒区。江西丰城市是我国富硒产业较发达的地区之一,经江西省地质调查研究院调查,丰城市富硒土壤控制面积达 524.7 km²^[8]。近年来,该市以富硒种植业和养殖业为主导产业,以富硒加工产业为拓展,在农田土壤硒资源利用等方面形成了自己的特色,产生了良好的生态、经济和社会效益。虽然关于硒与土壤理化性质的关系已有大量报道,但对该地区土壤硒的定量化研究尚不多见,同时由于土壤环境的复杂多变,要明确某地区硒含量与土壤理化因素的关系,需结合具体土壤条件和土地利用方式进行研究。因此,本研究对江西丰城地区不同硒水平的典型水田和旱作土壤进行取样分析,研究结果将为进一步了解丰城地区富硒土壤硒含量及其分布特征,明确主要土壤性状指标与硒含量的关系,以及富硒土壤资源的综合利用和种植业区划提供科学理论指导和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

丰城市位于江西省中部,赣江中下游地区,年平均气温为 15.3~17.7℃,年均降水量约 1550 mm。丰城

市拥有耕地面积约 8 万 hm²,其中水田 6.9 万 hm²,旱地 1.4 万 hm²,富硒土壤资源总面积达 5.3 万 hm²,地貌类型以山地、丘陵为主,中部为平原。丰城市土壤类型以水稻土、红壤、黄壤为主,土层深厚肥沃,有机质含量高。本研究区域重点选择丰城中部,赣江流域河谷冲积平原的尚庄、秀市、曲江、筱塘、剑光、董家等 6 个乡镇。该区域地形相对平缓,土壤母质主要为砂岩风化物 and 冲积物,主要河流为赣江及其支流,主要作物为水稻、玉米、大豆、马铃薯和蔬菜等。江西省地质调查研究院研究成果^[8]表明,该地区富硒和非富硒土壤交叉混杂分布,受土壤、地形、土地利用以及植被等因素的综合影响。

1.2 样品采集与分析

依据江西省土地硒资源分布^[8],于 2014 年 10 月作物收获后在丰城富硒和非富硒地区的农田土壤(土壤类型为红壤)布设剖面样点。选取泉塘村、魏家村和石路口村等 14 个村,每个村的水稻田和旱作农田各采集三个样点。每个样点又由 3 个同一取样深度的子采样点均匀混合而得,子样点距离 10~30 m,土壤质地类型一致。每个子样点按照 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 进行采集。每个子样点每层取样质量为 1 kg。

土壤带回实验室后,拣除大(>5 mm)的石块和植物残根等杂质后自然风干。在风干过程中,及时将板结的土壤块捏碎。待样品完全风干,分别过 1 mm 和 0.15 mm 筛,装入自封袋,室温下避光保存。测定指标包括:①土壤总硒含量:取过 0.15 mm 筛的土壤样品,以王水(硝酸:盐酸=1:3)为消解液,利用微波消解仪(美国 CEM 公司,MARS5)进行消解。消解液经还原和水浴加热后,利用原子荧光光度计(北京吉天,AFS-920)测定总硒含量。具体参数:负高压 280V;灯电流 85 mA;原子化温度 200℃;原子化器高度 8 mm;载气流量 300 mL·min⁻¹;屏蔽器流量 800 mL·min⁻¹。样品的消解和测定过程中均加入空白和国家标准物质进行质量控制,分析过程中硒的回收率均在 90%~110%之间^[9]。②土壤有机质(SOM)含量:利用 CN 元素分析仪(意大利 Thermo 公司,Flash EA 2000)测定土壤有机碳。丰城地区为酸性土壤,经预试验发现其无机碳含量可忽略不计,故认为全碳含量为有机碳含量。土壤有机碳乘以 1.724 折算为土壤有机质。③土壤阳离子交换量(CEC):采用氯化钡-硫酸镁强迫交换法^[10]。④土壤黏粒含量:采用吸管法测定^[10]。⑤土壤酸碱度(pH):采用水土比 2.5:1 的电位法^[10]。

⑥土壤总铁(T-Fe)和总铝(T-Al)含量:取过 0.15 mm 筛的土壤样品,以王水(硝酸:盐酸=1:3)为消解液,利用微波消解仪(美国 CEM 公司,MARS5)进行消解。利用原子吸收光谱仪测定消解原液中的总铁和总铝含量,其中浓度较高的样品需经稀释后测定^[10]。

1.3 数据处理

数据处理采用 Excel 2010 软件,方差分析和相关性分析采用 SPSS 17.0 软件,作图采用 Excel 2010 软件。

2 结果与分析

2.1 丰城市土壤硒含量特点

总体上,丰城地区农田耕层(0~20 cm)土壤全硒含量变幅为 0.12~1.83 mg·kg⁻¹(n=68),呈偏(左)态分布(图 1),几何和算术平均值分别为 0.41、0.49 mg·kg⁻¹。其中,99%的土壤样品全硒含量高于 0.125 mg·kg⁻¹(该值为足硒和缺硒的划分标准^[11]),80.9%(55 个)的样品高于我国土壤全硒含量均值 0.29 mg·kg⁻¹^[12],41.2%(28 个)的样品全硒含量高于 0.4 mg·kg⁻¹^[11],表明丰城地区耕层农田土壤的全硒含量普遍处于较高水平。

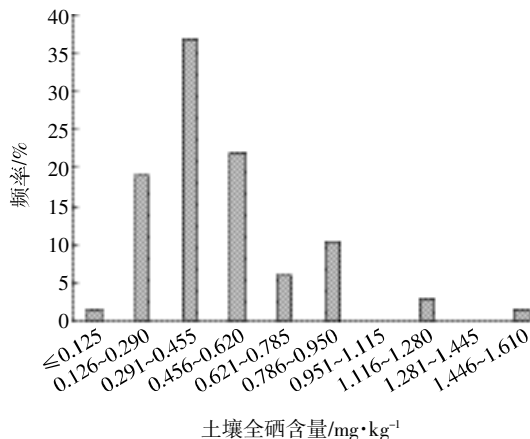


图 1 丰城市农田土壤全硒含量频度分布

Figure 1 Frequency distribution of farmland soil total Se contents in Fengcheng City

2.2 不同土地利用方式硒分布特点

对水田和旱地农田 0~100 cm 剖面土壤的全硒含量进行分析,结果表明丰城地区土壤剖面中硒均呈现土壤上层比下层高的表聚型趋势,即土壤硒在 0~20 cm 含量最高,随着土壤剖面深度的增加土壤硒含量逐渐减少,且在 60 cm 以下土壤硒含量基本保持不变(图 2,表 1)。富硒条件下,水田的土壤全硒含量显著高于旱地($P<0.05$,图 2),尤其在 0~40 cm 土层极为显著;而在非富硒条件下,水田和旱地土壤在 0~100 cm 土层无显著差异。结果表明,在富硒地区,水田(即长期水稻种植)比旱地更有利于硒元素在土壤中的积累,尤其是在 0~40 cm 土层。

2.3 土壤全硒含量与土壤理化性状的关系

表 1 为土壤主要理化性状的统计参数。表 2 为不同土地利用方式下,丰城地区土壤全硒含量与土壤主要理化性状的相关关系和逐步回归分析结果。相关分析表明,除旱地 60~100 cm 层外,整个 1 m 土体中无论水田还是旱地,土壤全硒含量与土壤有机质含量均呈显著正相关。CEC 与土壤全硒含量呈极显著正相关,而 pH 与全硒含量多呈负相关。对于水田土壤,在 1 m 土体的各层,黏粒含量与全硒含量均呈极显著正

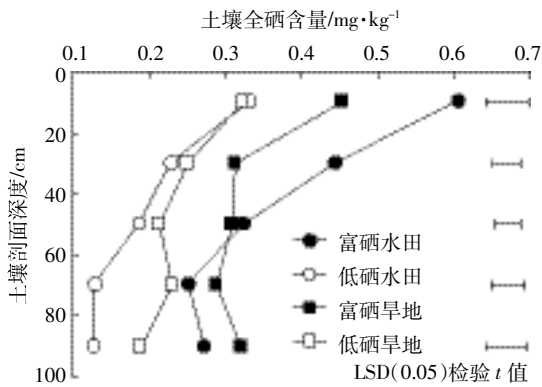


图 2 丰城水田和旱地剖面土壤全硒含量比较

Figure 2 Comparison of soil(0~100 cm) total Se contents between paddy and upland soils in Fengcheng City

表 1 全部样点的主要土壤理化性状的统计参数

Table 1 The statistical parameters of major soil physic-chemical properties of all the samples

项目	算数平均值	几何平均值	最小值	最大值	中位数	变异系数
pH	6.03	5.97	3.50	8.24	6.20	13.62%
有机质/g·kg ⁻¹	14.25	10.90	1.52	54.13	9.45	79.30%
总铁/mg·g ⁻¹	32.35	30.85	9.57	117.11	30.31	32.28%
总铝/mg·g ⁻¹	122.54	115.92	32.09	244.62	116.47	33.60%
CEC/cm ³ ·kg ⁻¹	24.94	24.87	21.00	31.69	24.92	7.64%
黏粒/%	13.56	10.56	2.60	43.55	10.36	73.00%

表 2 不同土地利用方式下不同土层全硒含量与土壤理化性状的关系

Table 2 Relationship between soil total Se contents and physic-chemical properties under different land use

利用方式	土层/cm	相关系数 r						逐步回归方程
		土壤有机质	总铁(T-Fe)	总铝(T-Al)	pH	CEC	黏粒(Clay)	
水田	0~20	0.806**	0.429*	—	—	—	0.573**	0~20 cm: $\text{Se} = -0.037 - 0.017 \times \text{SOM}$ ($R^2=0.63, P<0.01, n=38$)
	20~40	0.548*	—	—	—	—	0.752**	
	40~60	0.754*	—	—	-0.489*	0.601**	0.748**	
	60~80	0.600*	—	—	—	—	0.677**	0~100 cm: $\text{Se} = -0.721 + 0.007 \times \text{SOM} + 0.008 \times \text{T-Fe} + 0.014 \times \text{Clay} + 0.02 \times \text{CEC}$ ($R^2=0.64, P<0.01, n=190$)
	80~100	0.363*	—	—	—	—	0.826**	
	0~100	0.687**	—	—	-0.328**	0.495**	0.765**	
旱地	0~20	0.689**	0.524**	0.484*	-0.662**	—	—	0~20 cm: $\text{Se} = -1.012 + 0.062 \times \text{SOM}$ ($R^2=0.79, P<0.01, n=30$)
	20~40	0.965**	—	—	-0.496*	—	—	
	40~60	0.807**	0.507*	—	0.423*	—	—	0~100 cm: $\text{Se} = 2.29 - 0.327 \times \text{pH}$ ($R^2=0.58, P<0.01, n=150$)
	60~80	—	—	—	—	—	—	
	80~100	—	—	-0.765*	—	—	—	
	0~100	0.767**	—	—	-0.355**	0.941**	—	

注: * 和 ** 表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关; “—” 表示该土壤性状与全硒含量相关性不显著。

Note: * and ** indicate significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$ level; “—” represents the soil property has no significant relationship with soil selenium content.

相关,在旱地无相关关系。土壤总铁、总铝与土壤全硒含量仅在表层以及个别层次呈现正相关关系。

将土壤有机质、黏粒含量、阳离子交换量、pH、总铁和总铝含量与土壤全硒含量进行多元逐步回归分析,结果(表 2)表明:表层土壤(0~20 cm)有机质的变化可以分别解释水田和旱地土壤全硒 63% 和 79% 的变异。在 1 m 土体,土壤有机质、总铁、CEC 和黏粒含量共同解释了 64% 的水田土壤全硒的变异,土壤 pH 的变化可以解释 58% 的旱地土壤全硒变异。其中,土壤有机质、总铁、黏粒和 CEC 呈现促进关系,而土壤 pH 呈现抑制关系。

3 讨论

3.1 丰城农田土壤全硒含量和分布特点

本研究发现,总体上丰城地区土壤全硒含量较高,40% 以上地区能够达到 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的富硒标准,80% 以上土壤高于我国土壤元素背景值的平均水平^[12],而 99% 地区的土壤全硒都高于 $0.125 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,达到足硒标准,说明江西丰城地区土壤硒整体处于较高水平。土壤全硒的含量取决于其所处的地质地球化学背景,并受降水、温度等自然因素的影响,而在局部地区,人类活动如土地利用等,在某种程度上加速了这种作用进程,甚至改变了元素迁移转化的途径^[13]。

母质类型是决定土壤硒含量最主要的因素,土壤总硒含量与其母质的含硒量有极显著的正相关关

系^[14-15]。江西丰城地区土壤以红壤(铁铝土)居多,主要由泥质岩类风化物、红砂岩类风化物和河积物发育而来^[8,16],这类母质发育的土壤,其硒含量显著高于硅铝土和碳酸盐土壤^[15]。有研究发现砂岩中硒含量($0.85 \sim 1.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著高于花岗岩($0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[2]。

由于土地利用方式、耕作条件等的不同,土壤中生物、化学、物理变化过程呈现差异,导致了土壤在利用和发育过程中保硒能力也有较大差异,主要体现在硒元素的流失和富集^[17]。本研究发现,在富硒地区,水田比旱地更有利于硒元素在土壤中的积累,这与前人的研究结果^[18]一致。一方面,水田耕作熟化有利于硒在土壤中的累积;另一方面,水田土壤渍水时间长,土壤中的硒多以四价态(即亚硒酸盐)存在,极易被黏土矿物和有机质吸附而固定下来^[16,19],部分被吸附下来的亚硒酸盐还可被还原为单质硒,这些均限制了硒在土壤中的迁移和转化。相比之下,旱地土壤中的硒多以活性强的硒酸盐形式存在,所以旱地土壤保硒能力相对较弱^[20];此外,不同类型的作物对硒的消耗能力不同也是导致水田和旱地土壤硒含量不同的重要原因^[21-23]。

通常认为,南方红壤地区表层土壤的有机质含量较低,其对硒的吸附作用不能阻滞由降雨导致的土壤硒向下迁移,因此硒在土壤剖面上一般表现为心土层富集^[5],这与本研究中丰城地区土壤硒在 1 m 土壤剖面上呈表聚型的结果恰好相反。我们分析,由于丰城

地区无论水田或旱地 0~40 cm 土壤有机质含量远高于 40~100 cm,耕层土壤通过有机质以及作物根际对硒的富集作用较强,所以丰城地区农田土壤硒呈现表聚型的趋势,如魏然等^[24]对江西省鄱阳湖流域根系土壤的形态分析表明,根系土中硒的强有机态、腐植酸结合态约占硒全量的 66.2%。另外,丰城地区分布着较多煤矿资源,煤矿中含有硒化物,故大气中矿尘的沉降也可能导致表层土壤硒含量较高^[16,23,25]。

3.2 土壤理化性状对硒的影响

本研究结果表明,土壤有机质含量与土壤全硒呈极显著正相关关系,无论是水田或旱地,土壤有机质的变化可以解释表层土壤全硒>60%的变异。这说明,在相同气候条件下,由相近母质发育而来的土壤,其有机质含量是影响土壤全硒含量的主要因素^[3,24,26]。有研究表明,高硒区表层土壤的硒提取液中,98%以上为有机态(正六价)^[27],这进一步说明土壤有机质对土壤全硒含量的重要作用。

在旱地土壤 1 m 土体内,丰城地区农田土壤全硒含量与土壤 pH 值呈现负相关关系。土壤 pH 值会对硒的形态产生直接和间接影响,首先不同的土壤的酸碱度可影响硒与土壤组分(Fe、Al、Ca 和 Mg 离子等)的吸附和解吸过程^[28],其次,土壤 pH 可通过调节氧化还原电位、黏土矿物吸附量、土壤微生物种类和活性等过程影响土壤硒的形态^[29]。有研究表明,在中性和酸性土壤中,四价态的 SeO_3^{2-} 是土壤硒的主要存在形式,碱性条件下土壤硒以迁移性高的六价态为主^[30],四价态硒更易被土壤中的有机质和黏土矿物吸附而固定下来,所以酸性土壤往往比碱性土壤保硒能力强,而土壤对亚硒酸盐的吸附能力会随 pH 值的升高而降低^[31]。此外,有学者发现,pH 可以影响硒在土壤中的甲基化过程^[32]。在一定范围内,碱性环境更加有利于硒的甲基化,从而使硒从土壤中溢出的可能性增加。有研究提出,在旱地土壤中,随着酸度增加,硒含量也逐渐增加;在水田土壤中,硒含量与 pH 没有相关性,可能的原因是水动力的冲刷作用削弱了 pH 对硒的影响^[33]。

在水田土壤 1 m 土体中,除土壤有机质外,土壤总铁、黏粒含量、阳离子交换量对土壤全硒的积累也起到了积极作用。土壤铁铝氧化物主要包括晶质和非晶质的铁铝氧化物、氢氧化物和偏氢氧化物,其对土壤中硒的极强吸附作用在许多研究中已被证实^[34]。有研究认为亚硒酸盐很容易被黏粒与三价铁铝形成难溶的复合体所吸附,使硒在土壤中的迁移能力降低^[18]。

也有学者发现 1:1 型矿物比 2:1 型矿物对硒有更强的吸附力,而氧化铁的吸附能力又显著强于其他黏土矿物^[35-36]。虽然丰城地区土壤中总铁和总铝含量均较高,但土壤总铝并没有与硒含量表现出较明显的相关性,这可能是由铁铝氧化物对硒的亲力和吸附力不同造成的^[18]。Hamdy 等^[35]也发现 1:1 型矿物比 2:1 型矿物对硒有更强的吸附力,而氧化铁的吸附能力又显著强于其他黏土矿物。土壤黏粒对硒有较强富集能力,黏粒含量越高,越能有效减少土壤硒的流失,即在同一地区,黏性土壤硒含量往往高于砂性土壤。丰城地区水田土壤黏粒含量远高于旱地,尤其是 0~40 cm 土层,这可能是水田比旱地有利于土壤硒富集的原因之一。土壤阳离子交换量高的土壤,其缓冲能力、保肥能力都较高,有利于土壤硒的积累。土壤环境复杂多变,本研究中土壤全硒含量与有机质含量有较强的相关性,而其他因子对硒的影响程度在不同的土地利用方式或土壤层次上存在较大差异。合理施肥提高土壤肥力对于丰城地区农田土壤硒资源的保护和合理利用有重要意义。需要说明的是,除以上因素外,其他土壤性状指标如磷、钾等也会对全硒造成影响^[16],今后应补充这方面的分析。

4 结论

(1)丰城农田土壤全硒平均含量(算术)为 $0.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤硒普遍处于较高水平。

(2)丰城农田土壤剖面中,硒含量均为上层比下层高,有表聚型趋势,60 cm 土层以下含量基本保持不变。富硒条件下,水田比旱地更有利于土壤硒的积累,而非富硒条件下,水田和旱地土壤无显著差异。

(3)丰城地区的水田和旱地土壤,在 1 m 土体内土壤有机质是全硒的决定性影响因子,而黏粒仅对水田土壤硒有显著影响。总铁对表层农田土壤硒,总铝、pH 和 CEC 对于深层土壤硒有显著影响。pH 对农田土壤全硒表现出抑制作用,而其他土壤性状,如土壤总铁、总铝和阳离子交换量对土壤全硒则呈现富集效应。

参考文献:

- [1] Bhatia P, Aureli F, D'Amato M, et al. Selenium bioaccessibility and speciation in biofortified *Pleurotus* mushrooms grown on selenium-rich agricultural residues[J]. *Food Chemistry*, 2013, 140(1/2):225-230.
 - [2] 章海波,骆永明,吴龙华,等. 香港土壤研究 II. 土壤硒的含量、分布及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2005, 42(3):404-410.
- ZHANG Hai-bo, LUO Yong-ming, WU Long-hua, et al. Hong kong soil

- researches II. Distribution and content of selenium in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3):404-410.
- [3] 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.
- WANG Song-shan, LIANG Dong-li, WEI Wei, et al. Relationship between soil physico-chemical properties and selenium species based on path analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4):823-830.
- [4] Kausch M F, Pallud C E. Modeling the impact of soil aggregate size on selenium immobilization[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(9):1323-1336.
- [5] 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, 21(6):1115-1120.
- CHEN Jun-jian, ZHANG Hui-hua, YU Wei-min, et al. Spacial distribution and the potentially environmental risk of soil selenium in Guangdong Province[J]. *Ecology and Environment*, 2012, 21(6):1115-1120.
- [6] Elrashidi M A, Adriano D C, Workman S M, et al. Chemical equilibria of selenium in soils: A theoretical development[J]. *Soil Science*, 1987, 144(2):274-280.
- [7] 郑达贤, 李日邦, 王五一. 初论世界低硒带[J]. 环境科学学报, 1982, 2(3):241-250.
- ZHENG Da-xian, LI Ri-bang, WANG Wu-yi. A preliminary exposition on low-selenium zone in the world[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1982, 2(3):241-250.
- [8] 尹国胜, 袁存堤, 邓国辉, 等. 江西省鄱阳湖及周边经济区农业地质调查总体综合评价报告[R]. 南昌:江西省地质调查研究院, 2014.
- YIN Guo-sheng, ZHONG Cun-di, DENG Guo-hui, et al. Comprehensive evaluation report of agricultural geological survey of Poyang Lake and surrounding economic zone in Jiangxi Province[R]. Nanchang: Institute of Geological Survey of Jiangxi Province, 2014.
- [9] 李 艳, 程永毅, 陈可雅, 等. 水加辅助酸微波消解:原子荧光测定土壤砷、硒[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(11):155-160.
- LI Yan, CHENG Yong-yi, CHEN Ke-ya, et al. Determination of soil arsenic and selenium by atomic fluorescence under microwave digestion with aqua regia plus assisted acid[J]. *Journal of Southwest Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2016, 38(11):155-160.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Soil agro-chemical analysis[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2000.
- [11] 中华人民共和国地方病与环境图集编纂委员会. 中华人民共和国地方病与环境图集[M]. 北京:科学出版社, 1989.
- Commission of the compilation of local diseases and environmental atlas of the People's Republic of China. Local disease and environmental atlas of the People's Republic of China[M]. Beijing:Science Press, 1989.
- [12] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990.
- China National Environmental Monitoring Centre. Element background value in Chinese soils[M]. Beijing:China Environmental Science Press, 1990.
- [13] 何伟相, 马逸麟, 梅丽辉. 鄱阳湖区农业环境质量地球化学分区[J]. 岩矿测试, 2008, 27(4):269-273.
- HE Wei-xiang, MA Yi-lin, MEI Li-hui. Geochemical zoning based on agricultural environmental quality in the Poyang Lake Area[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2008, 27(4):269-273.
- [14] 王金达, 于君宝, 张学林. 黄土高原土壤中硒等元素的地球化学特征[J]. 地理科学, 2000, 20(5):469-473.
- WANG Jin-da, YU Jun-bao, ZHANG Xue-lin. Geochemical features of elements of selenium etc. in soil of Loess Plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(5):469-473.
- [15] 周 越, 吴文良, 孟凡乔, 等. 土壤中硒含量、形态及有效性分析[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(6):527-532.
- ZHOU Yue, WU Wen-liang, MENG Fan-qiao, et al. Review on the content, specification of selenium and its availability in soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(6):527-532.
- [16] 文邦勇, 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 Bang-yong, ZHANG Tao-liang, LI Xi-zhou, 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.
- [17] Zieve R, Peterson P J. Factors influencing the volatilization of selenium from soil[J]. *Science of the Total Environment*, 1981, 19(3):277-284.
- [18] 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 Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, et al. Selenate adsorption and desorption in 18 kinds of Chinese soil with their physicochemical properties[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(8):3160-3168.
- [19] 刘冠男, 薛 薇, 孙春美, 等. 亚硒酸盐在不同理化性质土壤中运移规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3):485-491.
- LIU Guan-nan, XUE Wei, SUN Chun-mei, et al. Selenite transport in soils with various physico-chemical properties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3):485-491.
- [20] 徐 强, 迟凤琴, 匡恩俊, 等. 方正县土壤全硒空间变异研究[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1):18-25.
- XU Qiang, CHI Feng-qin, KUANG En-jun, et al. The spatial variability of soil total selenium in founder prefecture[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2016(1):18-25.
- [21] Dorst S H V, Peterson P J. Selenium speciation in the soil solution and its relevance to plant uptake[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 1984, 35(6):601-605.
- [22] 缪树寅, 梁东丽, 赵文龙, 等. 硒酸盐和亚硒酸盐对 7 种不同基因型小麦种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(10):1934-1940.
- MIAO Shu-yin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, et al. Phytotoxicity differences among 7 winter wheat genotypes in China when amended selenate and selenite[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(10):1934-1940.
- [23] 魏 然, 杨忠芳, 侯青叶, 等. 江西省鄱阳湖流域农田生态系统土壤 Se 元素含量变化研究[J]. 地学前缘, 2012, 19(1):277-284.
- WEI Ran, YANG Zhong-fang, HOU Qing-ye, et al. The change of selenium element content in soils of the agroecosystem in Poyang Lake Basin, Jiangxi Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1):277-284.
- [24] 魏 然, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 江西省鄱阳湖流域根系土硒形态分析及其迁移富集规律[J]. 物探与化探, 2012, 36(1):109-113.

- WEI Ran, HOU Qing-ye, YANG Zhong-fang, et al. An analysis of speciation of selenium as well as its transformation and enrichment in root soil of Poyang Lake Basin, Jiangxi Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 36(1):109-113.
- [25] 刘瑞卿, 王钧伟. 矿物质与矿物离子对煤中硒释放行为的影响[J]. 环境化学, 2013, 32(1):100-105.
- LIU Rui-qing, WANG Jun-wei. Influence of minerals and mineral ions on selenium release behaviors during coal pyrolysis[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(1):100-105.
- [26] 王晓杰, 孟凡乔, 吴文良. 内蒙古武川县土壤硒分布特性研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(3):624-629.
- WANG Xiao-jie, MENG Fan-qiao, WU Wen-liang. Distribution patterns of soil Se in Wuchuan County, Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(3):624-629.
- [27] 罗杰, 王佳媛, 游远航, 等. 硒在土壤-水稻系统中的迁移转化规律[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2012, 37(3):60-66.
- LUO Jie, WANG Jia-yuan, YONG Yuan-hang, et al. Migration and transformation of Se in the soil rice system[J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2012, 37(3):60-66.
- [28] 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.
- [29] 黄青青, 杜威, 王琪, 等. 水稻对不同土壤中硒酸盐/亚硒酸盐的吸收和富集[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5):1423-1429.
- HUANG Qing-qing, DU Wei, WANG Qi, et al. Uptake and accumulation of Se by rice in different soils supplied with selenite or selenate[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(5):1423-1429.
- [30] Cary E E, Gissel Nielsen G. Effect of fertilizer anions on the solubility of native and applied selenium in soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1973, 37(4):187-190.
- [31] 严佳, 宗良纲, 杨旒, 等. 不同 pH 条件和 P-Se 交互作用对茶园土壤 Se(IV) 吸附行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5):935-942.
- YAN Jia, ZONG Liang-gang, YANG Ni, et al. Effects of pH and phosphate on Se(IV) adsorption by tea garden soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):935-942.
- [32] 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.
- LI Yong-hua, WANG Wu-yi, YANG Lin-sheng, et al. Concentration and environmental significance of water soluble-Se water soluble-F in soils of south Shaanxi Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2005, 24(3):279-283.
- [33] Fujii R, Deverel S J, Hatfield D B. Distribution of selenium in soils of agricultural fields, western San Joaquin Valley, California[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 52(5):1274-1283.
- [34] 谭文峰, 周素珍, 刘凡, 等. 土壤中铝氧化物与黏土矿物交互作用的研究进展[J]. 土壤, 2007, 39(5):726-730.
- TAN Wen-feng, ZHOU Su-zhen, LIU Fan, et al. Advancement in the study on interactions between iron-aluminum(hydro-) oxides and clay minerals in soil[J]. *Soils*, 2007, 39(5):726-730.
- [35] Hamdy A A, Gissel-Nielsen G. Fixation of selenium by clay minerals and iron oxides[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 140(1):63-70.
- [36] Al-saleh I, Billede G. Determination of selenium concentration in serum and toenail as an indicator of selenium status[J]. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, 2006, 77(2):155-163.