

赣南低丘红壤水稻土硒及其生物有效形态的组成与分布^①

张宝军¹, 钟松臻¹, 龚如雨¹, 吴代赦²

(1 南昌大学公共卫生学院, 南昌 330006; 2 南昌大学资源环境与化工学院, 南昌 330031)

摘要:为了更好地了解我国南方低丘红壤水稻土中生物有效硒的组成与特性,在赣南地区采集了 26 份代表性土样,并对土壤总硒、磷酸盐提取态硒及土壤 pH、土壤有机质等进行了测定分析。结果表明:研究区域土壤总硒为 234.7 $\mu\text{g/kg}$ ($n = 26$),属于中等含硒水平土壤。有机硒是土壤浸提液中硒的主要存在方式,约占土壤可提取态硒(8.88 $\mu\text{g/kg}$)的 90%。土壤浸提液中亚硒酸盐含量(0.62 $\mu\text{g/kg}$, $n = 26$)高于硒酸盐(0.47 $\mu\text{g/kg}$, $n = 21$)。除亚硒酸盐外,土壤浸提液中各形态硒(包括有机硒、无机硒和硒酸盐)与土壤总硒或可提取态硒均具有显著的正相关关系($P < 0.05$)。随高程增加土壤 pH 略有升高,而土壤各形态硒(亚硒酸盐除外)则有不同程度的下降趋势。土壤 pH、有机质与土壤浸提液中各形态硒均无明显的相关关系($P > 0.05$),不过,有机质对土壤中亚硒酸盐的形态转化及其生物有效性的影响值得进一步研究。

关键词:红壤水稻土; 硒; 有机硒; 亚硒酸盐; 土壤 pH; 土地高程

中图分类号: X132; X825 **文献标识码:** A

硒是动物和人体必需的微量元素之一,它是否为植物(特别是农作物)所必需目前尚无定论。食物链途径是人体摄取硒的主要方式,而土壤含硒水平特别是土壤生物有效硒的水平及其组成对作物硒的吸收等具有重要作用。除湖北恩施外,我国绝大部分地区的土壤均处于硒缺乏或边缘性硒缺乏状态,特别是克山病、大骨节病等地方性硒缺乏病的流行区域^[1-2]。与其他土壤类型相比,我国红壤中硒的含量(345 $\mu\text{g/kg}$, $n = 15$)相对较高,不过,红壤中水溶态硒的含量及其比例却非常低^[1]。施用外源性硒肥^[3]或选用高累积的作物栽培品种^[4]可以增加硒在水稻籽粒中的累积。与此同时,通过调控土壤 pH 等理化指标^[5-6]等也可在一定程度上减少土壤生物有效硒的淋失^[7-8]。降水量大、高温高湿等是我国南方地区典型的气候特征,且这一区域的水稻田多分布于低山丘陵地区、地块面积普遍不大,因而,本研究以赣南红壤水稻土为研究对象,对土壤总硒及生物有效硒的组成、含量特征及其与土壤理化性质的相关性进行了分析,重点探讨了不同高程条件下土壤硒形态、土壤理化性质等的分布规律,对我国南方低山丘陵地区稻田养分元素硒的精细管理及适当增加人群膳食途径硒的摄入水平具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

供试土壤样品采自江西省赣南地区的信丰县和安远县的红壤水稻田,共采集了 26 个耕层土样。每个土壤采样点均使用手持 GPS 进行定位,并记录各采样点高程。所有土样风干后分别过孔径为 0.1、0.25 和 0.149 mm 的尼龙筛,用于土壤 pH、土壤有机质和土壤硒(含不同形态)的测定。除一个土壤样点呈弱碱性($\text{pH} = 7.07$)外,其余土壤样点的 pH 平均为 5.13 (4.66 ~ 5.65, $n = 25$)。土壤有机质为 16.29 g/kg (6.52 ~ 27.51 g/kg, $n = 26$)。

1.2 测定方法

土壤 pH 采用复合 Ag/AgCl 电极 pH 计(PB-10, Sartorius)进行测定(液土比为 2.5 : 1)。土壤有机质的测定采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化滴定法。

土壤总硒测定使用氢化物发生原子荧光光度计(AFS-8130, 北京吉天仪器有限公司):土样(约 0.1 g)用 5 ml HNO_3 (65.0% ~ 68.0%)、1 ml HClO_4 (72.0%)和 3 ml HF (40.0%)完全消解后,首先加入等体积的浓 HCl (36.0% ~ 38.0%)将六价硒还原为四价硒(100℃, 30 min),然后,以 5% HCl (v/v)为载液、以 1.5% KBH_4 溶于 0.5% KOH 溶液作还原剂进行测定。测定时仪器

^①基金项目:国家自然科学基金项目(41161016)资助。

作者简介:张宝军(1978—),男,河南长葛人,博士,讲师,主要从事环境变化与人类健康研究。E-mail: zhangbaojun@ncu.edu.cn

的灯电流为 80 mA, 负高压为 280 V, 载气和屏蔽气的流速分别为 0.3 L/min 和 0.8 L/min。

土壤磷酸盐(KH_2PO_4)提取态硒采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, iCAPQ, Thermo Scientific)进行测定。称取 1.5 g 土样于 50 ml 离心管, 加入 10 ml KH_2PO_4 (16 mmol/L) 震荡均匀 (300 r/min, 1 h); 土壤悬浮液离心 (2 200 r/min, 20 min) 后进行过滤 ($<0.22 \mu\text{m}$); 测定前吸取 4.80 ml 过滤液, 加入 0.20 ml 的 HNO_3 (v/v, 50%) 使测定液的酸度为 2%。另外, 吸取 1.50 ml 过滤液直接用于土壤可提取态硒的形态分析。土壤硒的形态分析采用配置有 PRP-X100 离子交换柱 (Hamilton, USA) 的离子交换色谱仪 (ICS-3000, Dionex, USA)。流动相的组成为 50 mmol/L NH_4NO_3 、1 mmol/L NH_4EDTA 、2% (v/v) 的 CH_3OH 和 0.1 mol/L 三羟甲基氨基甲烷 (TRIS)。

1.3 统计与分析

土壤浸提液中有机硒的含量为可提取态总硒与可提取无机硒 (Se^{4+} 和 Se^{6+}) 之间的差值, 土壤总硒及

磷酸盐浸提液中各形态硒的含量均为仪器直接测定结果。图表制作和相关系数计算使用 SPSS19.0 (IBM, USA) 和 Excel 2003 (Microsoft, USA) 软件来完成。

2 结果与讨论

2.1 红壤水稻土总硒含量特征

赣南地区红壤水稻土硒的含量范围为 98.0 ~ 609.0 $\mu\text{g/kg}$ (表 1), 除个别土样含硒量较低 (98.0 $\mu\text{g/kg}$ 和 141.7 $\mu\text{g/kg}$) 或较高 (424.7 $\mu\text{g/kg}$ 和 609.0 $\mu\text{g/kg}$) 外, 其他土样的含硒量均在 150 ~ 340 $\mu\text{g/kg}$ 之间。总体上, 本区域土壤硒的平均值为 234.7 $\mu\text{g/kg}$ ($n = 26$) (表 1), 这一结果高于我国地方病区 (大骨节病) 耕层土壤的含硒水平 (151 $\mu\text{g/kg}$, $n = 23$)^[2] 和全国水稻土的含硒水平 (201 $\mu\text{g/kg}$, $n = 41$)^[1], 低于全国 A 层土壤 (0 ~ 20 cm) 硒的背景值 (290 $\mu\text{g/kg}$)^[9] 和江西省鄱阳湖流域根际土壤含硒量 (310 $\mu\text{g/kg}$)^[10]。与比利时^[11]、印度^[12] 等国家的土壤相比, 本研究区域土壤含硒水平更低。

表 1 土壤总硒、磷酸盐可提取硒及其形态组成 ($\mu\text{g/kg}$, $n = 26$)
Table 1 Concentrations of total Se in soil, extractable Se by KH_2PO_4 and composition of Se species in the soil extract

硒形态	算术均值	标准差	几何均值	最小值	最大值
土壤总硒	234.7	104.1	218.1	98.0	609.0
可提取硒	8.88	2.70	8.50	4.66	15.76
可提取有机硒	7.88	2.15	7.60	4.36	12.28
可提取无机硒	1.00	1.25	0.58	0.01	5.90
可提取亚硒酸盐	0.62	0.64	0.38	0.01	3.28
可提取硒酸盐	0.47	0.98	0.19	<0.01	4.62

注：可提取硒酸盐不包括未检出土样 ($n = 5$), 下同。

不同学者从多个研究角度提出了土壤含硒水平的划分标准。不过, 布和敖斯尔等^[13]于 1995 年提出的中国不同功能区土壤与作物总硒的安全阈值标准 (土壤含硒量位于 100 ~ 1 000 $\mu\text{g/kg}$ 属于中硒水平) 显然对我国土壤硒的分级分类显得过于宽泛。Tan 等^[1]对我国地方病区及非病区的土壤等环境要素进行了系统研究, 认为生活在土壤总硒含量 $>175 \mu\text{g/kg}$ 区域内的人群很少或不发生克山病、大骨节病等地方性疾病。从地球化学的角度, 葛晓立等^[14]也提出了我国土壤硒的划分标准: 即土壤总硒含量 $>400 \mu\text{g/kg}$ 为富硒土壤, 200 ~ 400 $\mu\text{g/kg}$ 为中硒土壤, 100 ~ 200 $\mu\text{g/kg}$ 为低硒土壤, $<100 \mu\text{g/kg}$ 为缺硒土壤。根据上述划分标准及世界各地土壤含硒量, 赣南低丘红壤水稻土处于中等含硒水平。

2.2 红壤水稻土中有效硒的含量及其组成特征

如表 1 所示, 磷酸盐溶液 (16 mmol/L KH_2PO_4) 可

提取态硒的平均含量为 8.88 $\mu\text{g/kg}$, 约占土壤总硒含量的 3.78%; 土壤浸提液中有机制硒和无机态硒分别为 7.88 $\mu\text{g/kg}$ 和 1.00 $\mu\text{g/kg}$, 其中, 有机态硒是浸提液中硒的主要存在形式, 约占 90%; 虽然土壤浸提液中无机硒所占的比例很低 (11.26%), 但其波动性很大 (最大值为最小值的 590 倍) 对于可提取无机硒来说, 硒酸盐含量 (以 Se^{6+} 计, 0.47 $\mu\text{g/kg}$) 略低于亚硒酸盐的含量 (以 Se^{4+} 计, 0.62 $\mu\text{g/kg}$)。由于土壤溶液中硒酸盐的可移动性较强, 因而, 其波动性明显强于亚硒酸盐, 甚至个别样品中未检出硒酸盐。

不同浸提剂对土壤有效硒的浸提效率存在一定的差异。与热水 (含 0.1% CaCl_2) 和 AB-DTPA (ammoniumbicarbonate-diethylenetriamine pentaacetic) 相比, KH_2PO_4 (1 mol/L) 的浸提效率最高, 且与植株组织硒的关系最为密切 ($r = 0.93$)^[15]。Keskinen

等^[16]使用 6 种不同的浸提剂(包括单一浸提和顺序浸提)对砂壤、黏壤进行硒的浸提效率研究,认为磷酸盐缓冲液(K_2HPO_4 - KH_2PO_4)比较适宜于较低水平的土壤生物有效硒的浸提,其浸提效率随磷酸盐缓冲液浓度(0.1 mol/L 和 1 mol/L)和 pH(4.4 和 7.0)的升高有明显提高。耿建梅等^[17]使用 0.1 mol/L KH_2PO_4 、0.5 mol/L $NaHCO_3$ 和 H_2O 3 种浸提剂对稻田土壤有效硒的浸提效率、平均变异系数及其与植株累积硒的相关系数等研究后认为前者更适合稻田土壤硒的浸提。考虑到 KH_2PO_4 是酸性水稻土常用的浸提剂^[18],且与植物含硒量具有较强的相关性^[19]、测定时的盐基效应^[20]等因素,本研究采用了 16 mmol/L KH_2PO_4 (pH = 4.8)进行红壤水稻土有效硒的浸提和分析^[21-22]。

此外,土壤、作物类型也会影响土壤硒的浸提效率。我国各类土壤水溶态硒的比例为 1.22%~9.88%,除荒漠土、盐土、钙质褐土外,其他土壤水溶态硒所占的比例均不足 4%^[1]。虽然 KH_2PO_4 比较适合酸性土壤硒的浸提且其浸提效率相对较高,但是可提取态硒的比例一般也不超过 5%^[1]。以 16 mmol/L 的 KH_2PO_4 为例,不同作物(小麦、玉米和水稻)土壤有

效硒的比例分别为 2.9%^[22]、1.1%~3.4%^[21]和 3.78%(本研究)。Stroud 等^[21]研究发现,土壤有效硒以亚硒酸盐为主(>70%),其次为可提取态有机硒,而大部分的硒酸盐则低于检出限,而本研究却发现土壤可提取态硒绝大部分(90%)以有机形态存在,且无机硒主要是亚硒酸盐(72.18%)。由于上述研究所使用的浸提剂种类和浓度完全一致,因而,上述结果的差异很可能与土壤类型及作物种类有关。

2.3 不同土壤有效硒形态的相关分析

除亚硒酸盐外,各形态有效硒均与土壤总硒呈显著正相关关系($P<0.05$)(表 2),且其相关系数从大到小依次为:可提取硒酸盐($r = 0.77$, $P<0.01$)>可提取总硒($r = 0.70$, $P<0.01$)>可提取无机硒($r = 0.66$, $P<0.01$)>可提取有机硒($r = 0.49$, $P<0.05$)。除亚硒酸盐外的其他各形态硒(可提取有机硒、无机硒、硒酸盐)与土壤可提取态总硒也呈显著正相关关系($P<0.05$),其相关系数分别为 0.89、0.63 和 0.62。虽然土壤可提取亚硒酸盐、可提取硒酸盐均与可提取无机硒呈显著正相关关系($P<0.01$),但是,它们两者之间(土壤可提取亚硒酸盐和硒酸盐)之间并无显著的相关关系($r = 0.26$, $P>0.05$)(表 2)。

表 2 土壤硒形态及部分土壤性质的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between Se species and soil properties

	土壤总硒	可提取硒	可提取有机硒	可提取无机硒	可提取亚硒酸盐	可提取硒酸盐	pH	土壤有机质
土壤总硒	1.00	0.70**	0.49*	0.66**	0.20	0.77**	-0.20	0.02
可提取硒	0.70**	1.00	0.89**	0.63**	0.34	0.62**	-0.37	0.02
可提取有机硒	0.49*	0.89**	1.00	0.21	0.00	0.26	-0.31	-0.17
可提取无机硒	0.66**	0.63**	0.21	1.00	0.73**	0.87**	-0.27	0.34
可提取亚硒酸盐	0.20	0.34	0.00	0.73**	1.00	0.26	-0.14	0.36
可提取硒酸盐	0.77**	0.62**	0.26	0.87**	0.26	1.00	-0.28	0.18

注: * 表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平, ** 表示相关性达到 $P<0.01$ 显著水平。

进一步的分析发现,赣南低丘红壤水稻土有效硒不仅主要以有机形态存在,而且,土壤可提取有机硒与浸提液总硒的相关系数($r = 0.89$, $P<0.01$)也明显高于其与土壤总硒的相关系数($r = 0.49$, $P<0.05$)(表 2)。然而,对于易于与铁锰氧化物等土壤胶体物质相结合的亚硒酸盐^[5, 23],它与土壤可提取硒及土壤总硒之间均不存在相关关系($P>0.05$)(表 2)。据此,有必要深入研究作物根系对土壤各种有效态硒(特别是可提取有机结合态硒)的吸收机制^[6]。随着土壤 pH 和 Eh 的改变,土体中不同价态硒(Se^{4+} 、 Se^{6+})^[18]及不同硒结合形式(可溶态、可交换态及碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态)^[23]也会有所变化。此外,在土壤微生物的作用下,同样也存在不同硒形

态的相互转化,例如亚硒酸盐的异化还原^[24]就很可能促进土壤亚硒酸盐向有机硒的形态转化。

土壤 pH 与土壤总硒及可提取各形态硒均无明显的相关关系($P>0.05$, 表 2)。虽然有机质对土壤培肥和土壤结构改善具有积极的作用,但是,它与土壤总硒及可提取各形态硒同样也不存在显著的相关关系($P>0.05$, 表 2)。王松山等^[23]认为这种简单的相关分析很容易忽略土壤性质相互作用产生的共线性问题。事实上,土壤 pH 可直接(控制硒与土壤金属离子的吸附与解吸过程)或间接(通过 Eh、黏土矿物、土壤微生物等)影响土壤硒的形态^[18],而在母质相同的条件下土壤对硒的吸附和固持作用也存在有机质和氧化铁之间的竞争关系^[23]。所以,在对土壤有效硒进行研

究时必须同时考虑到 pH、有机质等土壤基本理化性质的作用方式及其影响程度^[5-6]。

2.4 不同高程红壤水稻土硒形态的分布特征

本研究中各土壤采样点的高程范围为 175 ~ 348 m, 除个别采样点高程低于 180 m($n = 1$)或高于 300 m

($n = 3$)外, 绝大部分的采样点位于 180 ~ 300 m 之间。根据各采样点的高程分布情况, 将其分为高(>250 m)、中(210 ~ 250 m)、低(<210 m)3 组: 各组的平均高程依次为 295、227 和 195 m, 各组采样点的数量如表 3 所示。

表 3 不同高程范围内土壤硒形态及部分土壤性质($n = 26$)
Table 3 Soil Se species and soil properties under different groups of land elevation

高程 (m)	土壤总硒 ($\mu\text{g/kg}$)	可提取硒 ($\mu\text{g/kg}$)	可提取亚硒酸盐 ($\mu\text{g/kg}$)	可提取硒酸盐 ($\mu\text{g/kg}$)	可提取有机硒 ($\mu\text{g/kg}$)	pH	土壤有机质 (mg/kg)	样本量 n
<210	288 ± 147	9.7 ± 3.4	0.6 ± 0.4	0.9 ± 1.8	8.4 ± 2.3	5.06 ± 0.20	16.0 ± 6.7	8
210 ~ 250	233 ± 73	9.1 ± 2.3	0.5 ± 0.3	0.4 ± 0.3	8.3 ± 2.1	5.17 ± 0.25	18.2 ± 6.1	10
>250	183 ± 63	7.8 ± 2.4	0.8 ± 1.1	0.2 ± 0.2	6.8 ± 1.9	5.39 ± 0.69	14.2 ± 4.3	8

不同高程土壤各形态硒的分布存在一定的差异(表 3)。随着高程的升高, 土壤总硒含量由 288 $\mu\text{g/kg}$ 逐步降至 183 $\mu\text{g/kg}$ 。对土壤总硒(y)与高程(x)两个变量进行线性拟合, 其拟合方程为: $y = -0.962x + 463.6$ ($R^2 = 0.181$, $n = 26$)。该拟合方程表明: 在一定的高程范围内(<300 m), 高程每升高 100 m, 红壤水稻土总硒将减少 96.2 $\mu\text{g/kg}$ 。与此同时, 除亚硒酸盐外, 土壤可提取各形态硒也都呈逐步下降的趋势(表 3)。例如, 随高程增加土壤可提取有机硒从 8.4 $\mu\text{g/kg}$ 降至 6.8 $\mu\text{g/kg}$, 降低了约 19.1%, 而可提取硒酸盐则从 0.9 $\mu\text{g/kg}$ 下降至 0.2 $\mu\text{g/kg}$, 降幅高达 77.8%。

土壤有机质、pH 等理化性质与土壤各形态硒也存在一定的交互作用^[25]。例如, 虽然土壤可提取亚硒酸盐随高程增加其变化规律并不明显, 但是, 它与土壤有机质的变化规律却恰好相反(表 3)。通常, 土壤有机质对无机硒具有一定的吸附和固持作用, 且在同一 pH 条件下亚硒酸盐的吸附作用高于硒酸盐^[5], 因而, 土壤有机质的含量是土壤剖面亚硒酸盐^[25]及水稻各器官硒分布^[26]的一个重要影响因素。除亚硒酸盐外, 土壤各形态硒均随土壤酸度增强或高程降低有不同程度的增加(表 3)。已有研究表明, pH = 5.0 时亚硒酸盐主要以主动方式进入水稻根内, 而 pH = 3.0 和 pH = 8.0 时则主要通过水通道或其他被动方式进入水稻根内^[6]。因此, 加强土壤 pH 和有机质对土壤固液界面亚硒酸盐等各形态硒的吸附-解吸研究^[27], 对提高我国南方低丘红壤水稻土硒的生物有效性具有重要的理论和现实意义。

3 结论

赣南低丘红壤水稻土属于中等含硒土壤, 土壤可提取硒的比例一般不超过 4%, 且主要以有机硒形式

存在。虽然土壤提取液中无机硒所占的比例仅占 11.26%, 但其波动性很大(特别是可提取硒酸盐), 这很可能与不同土壤形态硒自身的特性及土壤环境条件等有关。除亚硒酸盐外, 可提取各形态硒与土壤总硒、土壤可提取硒均呈显著正相关关系($P < 0.05$)。研究区土壤各形态硒(亚硒酸盐除外)和土壤酸度均有随高程增加而降低的趋势, 而土壤可提取亚硒酸盐与土壤有机质的变化规律则恰好相反。土壤 pH 和土壤有机质均与各形态硒无明显相关关系($P > 0.05$)。今后, 有必要对我国南方地区低丘红壤生物有效硒的淋溶特点、不同形态硒的土壤吸附作用机制、硒与土壤有机质的相互作用, 以及水稻对不同形态硒的吸收机理等内容进行深入研究。

致谢: 感谢英国诺丁汉大学的 Martin R Broadley 教授和 Scott D Young 副教授在土壤硒形态测定过程中提供的支持和帮助。

参考文献:

- [1] Tan J A, Zhu W Y, Wang W Y, et al. Selenium in soil and endemic diseases in China[J]. Science of the Total Environment, 2002, 284(1): 227-235
- [2] 张宝军, 杨林生, 王五一, 等. 大骨节病区土壤元素分布特征及其与病情的关系——以四川省壤塘县为例[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 230-237
- [3] 郑甲成, 刘婷. 不同浓度硒肥对水稻硒含量和产量的影响[J]. 土壤, 2014, 46(1): 88-93
- [4] 周鑫斌, 施卫明, 杨林章. 富硒与非富硒水稻品种对硒的吸收分配的差异及机理[J]. 土壤, 2007, 39(5): 731-736
- [5] 朴河春, 袁芷云, 刘广深, 等. 硒酸盐和亚硒酸盐在土壤中吸附作用差异[J]. 土壤通报, 1996, 27(3): 130-132
- [6] 张联合, 李友军, 苗艳芳, 等. pH 对水稻离体根系吸收亚硒酸盐生理机制的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 523-528

- [7] 龚子同, 黄标. 土壤中硒, 氟, 碘元素的空间分异与人类健康[J]. 土壤学进展, 1994, 22(5): 1–12
- [8] Dhillon K S, Dhillon S K, Kohli A, et al. Evaluation of leaching and runoff losses of selenium from seleniferous soils through simulated rainfall[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(2): 187–192
- [9] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, 12(4): 12–19
- [10] 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
- [11] 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: 77–82
- [12] Bajaj M, Eiche E, Neumann T, et al. Hazardous concentrations of selenium in soil and groundwater in North-West India[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 189(3): 640–646
- [13] 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
- [14] 葛晓立, 李家熙, 万国江, 等. 张家口克山病地区土壤硒的地球化学形态研究[J]. 岩矿测试, 2000, 19(4): 254–258
- [15] Oram L L, Strawn D G, Möller G. Chemical speciation and bioavailability of selenium in the rhizosphere of *Symphyotrichum eatonii* from reclaimed mine soils[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 45(3): 870–875
- [16] Keskinen R, Ekholm P, Yli-Halla M, et al. Efficiency of different methods in extracting selenium from agricultural soils of Finland[J]. Geoderma, 2009, 153(1): 87–93
- [17] 耿建梅, 王文斌, 罗丹, 等. 不同浸提剂对海南稻田土壤有效硒浸提效果比较[J]. 土壤, 2010, 42(4): 624–629
- [18] 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
- [19] 李辉勇, 刘鹏, 刘军鸽, 等. 酸性水稻土有效硒提取剂的比较研究[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 12–14
- [20] 任昕昕, 邱然, 罗海. 高电压辅助激光解吸/离子化质谱中盐效应的研究[J]. 分析化学, 2014(11): 1697–1701
- [21] Stroud J L, Broadley M R, Foot I, et al. Soil factors affecting selenium concentration in wheat grain and the fate and speciation of Se fertilisers applied to soil[J]. Plant and Soil, 2010, 332(1–2): 19–30
- [22] Chilimba A D C, Young S D, Black C R, et al. Maize grain and soil surveys reveal suboptimal dietary selenium intake is widespread in Malawi[J]. Scientific Reports, 2011, 1: 72
- [23] 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
- [24] 雷磊, 朱建明, 秦海波, 等. 硒的微生物地球化学研究进展[J]. 地球与环境, 2011, 39(1): 97–104
- [25] 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): 166–178
- [26] 周骏, 刘兆云, 孟立丰, 等. 土壤性质对土壤–水稻系统中硒迁移的影响[J]. 土壤, 2016, 48(4): 734–741
- [27] 周鑫斌, 于淑慧, 谢德体. pH 和三种阴离子对紫色土亚硒酸盐吸附–解吸的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1069–1077

Composition and Spatial Distribution of Bioavailable Se in Hilly Red Paddy Soil of Southern Jiangxi Province

ZHANG Baojun¹, ZHONG Songzhen¹, GONG Ruyu¹, WU Daishe²

(1 School of Public Health, Nanchang University, Nanchang 330006, China; 2 School of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang 330031, China)

Abstract: 26 typical samples were collected from paddy soils in Southern Jiangxi Province and the total Selenium (Se) concentrations, phosphate extractable Se, pH and SOM were analyzed to better understand the composition and features of bioavailable Se in the hilly red paddy soil of Southern China. The total soil Se concentration was 234.7 $\mu\text{g/kg}$ ($n = 26$), which belonged to the moderate level. Organic Se was the predominant fraction in the soil extract, approximately accounting for 90% of the available Se in soil (8.88 $\mu\text{g/kg}$). The concentration of Selenite (0.62 $\mu\text{g/kg}$, $n=26$) in the soil extract was higher than that of Selenate (0.47 $\mu\text{g/kg}$, $n=21$). Se species including organic Se, inorganic Se and Selenate in the soil extract were significantly positively correlated with the total Se in soil and Se in soil extract ($P < 0.05$). Soil pH slightly increased with land elevations while the species of Se in the soil extract decreased except Selenite. There was no significant correlation between pH, SOM and Se species in soil extract ($P > 0.05$), however, the effect of SOM on transformation of Selenite in soil and its bioavailability need further study.

Key words: Red paddy soil; Se; Organic Se; Selenite; Soil pH; Land elevation