

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.
XIE Bang-ting, HE Ling, JIANG Guan-jun, et al. Regulation and Evaluation of Selenium Availability in Se-rich Soils in Southern China[J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, 36(3): 273 – 281. 【DOI: 10. 15898/j. cnki. 11 – 2131/td. 201610100152】

中国南方典型富硒区土壤硒有效性调控与评价

谢邦廷¹, 贺灵², 江官军¹, 孙彬彬^{1,2}, 曾道明², 周国华^{2*}
(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 多目标区域地球化学调查发现中国南方酸性土壤的硒含量普遍较高,但其生物有效性一般较低,土壤硒有效性直接关系到富硒土地资源的可利用性,而土壤酸碱度是影响土壤硒生物有效性的重要因素。本文选取福建、海南富硒红壤(pH 为 3.91~4.98)、富硒水稻土(pH 为 4.33~5.75),以生石灰、燃煤炉渣为改良剂,分别设置 6 个实验处理以调控土壤硒生物有效性。结果表明:添加生石灰和燃煤炉渣均能提升南方酸性土壤的 pH,上升幅度在 1~2 个 pH 单位,从而有利于土壤中硒元素的活化,显著提高了土壤中硒元素的生物有效性;燃煤炉渣用量与其 10 倍的生石灰对提升土壤硒有效度的效果相当,而燃煤炉渣作为调控物料更为经济、实用,既可以实现炉渣的有效利用,又可以改善土壤结构、提高土壤硒有效度。

关键词: 硒有效度; 调控实验; 生石灰; 燃煤炉渣; 南方富硒土壤

中图分类号: O613.52; S151.93 **文献标识码:** A

硒是人体必需的微量生命元素,人体内硒主要来自于食物,食物硒含量水平直接影响到人体摄入水平与健康^[1]。研究发现,中国有近 7 亿人生活在缺硒的环境中,72% 的县(市)存在不同程度的缺硒,其中 1/3 为严重缺硒区,克山病和大骨节病分布与中国低硒带具有很好的空间对应性,全世界则有 2/3 的地区缺硒^[2-3]。开发富硒农产品,通过食物补硒是解决人体缺硒,增强免疫力,提高健康水平、延年益寿的重要途径^[4-5]。土壤硒含量及其生物有效性是影响土壤-作物系统中硒迁移积累以及富硒农产品产出与否的关键。近年来多目标区域地球化学调查表明,中国南方红壤区土壤硒含量普遍较高,土壤硒含量大于 0.4 mg/kg 的“富硒土壤”呈大范围区域分布^[6],为发展富硒农产品提供了基础条件。然而,富硒农产品的产出不仅与土壤硒总量有关,更大程度上与土壤硒生物有效性有关。已有研究表明,土壤中能被植物吸收利用的有效硒非常少,

一般不到总硒的 5%,与土壤性质及土壤硒的存在形式密切相关^[7-8]。中国南方地区广泛分布红壤,红壤中的硒主要以四价(亚硒酸盐态)存在,容易被红壤中大量存在的铁铝氧化物、黏土矿物吸附形成铁铝复合体,导致红壤中硒生物有效性较低^[9],直接影响到南方富硒土壤资源的有效利用。

大量研究表明,土壤酸碱度是影响土壤硒生物有效性的重要因素。石灰、燃煤炉渣是土壤结构和酸碱度的常用调节剂。根据土壤类型及其酸性状况施用适量的石灰,能显著改变土壤酸碱度,改善土壤中养分元素的有效性,提高土壤生产力,增加农作物产量^[10-11]。此外,施用石灰增加土壤 pH,能够降低 Cd、Pb 等有害重金属元素的活性,降低其生物有效性^[12-13]。农田施用炉渣大多以改良土壤结构、增加黏性土壤的通透性为目的,也见有关炉渣对土壤溶液中氨氮和磷吸附作用的研究^[14-17]。赵娜等^[18]研究发现,施用炉渣后土壤 pH 会上升,且土壤 pH 的

收稿日期: 2016-10-10; 修回日期: 2017-05-02; 接受日期: 2017-05-28
基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费项目《典型红壤区农业生态地质研究》课题二“典型地质环境区红壤化过程地球化学特征研究”(201411091-2)
作者简介: 谢邦廷,硕士,勘查地球化学专业。E-mail: 451968158@qq.com。
通讯作者: 周国华,博士,教授级高级工程师,主要从事环境地球化学调查与研究。E-mail: zhoughuohua@igge.cn。

提升幅度随炉渣施用量而增加。因此,通过调控土壤理化性状提高土壤硒的生物有效性,对于富硒红壤资源的开发利用具有重要的实际意义。本文以福建龙海与诏安、海南万宁与琼海典型富硒区土壤为研究对象,以生石灰、燃煤炉渣为调节剂,开展了土壤硒生物有效性室内调控实验,以研究添加不同物料及其剂量对土壤硒生物有效性的影响,拟为南方红壤区富硒土壤开发利用提供基础依据。

1 实验部分

1.1 实验材料及预处理

1.1.1 土壤

9 件实验土壤样品采自福建龙海、诏安及海南万宁、海口富硒土壤区,土壤样品的理化性质见表 1。在选定的采样田块内,在约 15 m 范围内以 S 形分布采集 5 点表层(0 ~ 20 cm)土壤,剔除植物根系碎片、砾石和杂物,装入洁净布样袋,混合组成 1 件样品,质量大于 2 kg。土壤样自然风干,用木棒敲碎后过 10 目(2 mm)尼龙筛,混匀,备用。

1.1.2 生石灰

从市场购买生石灰粉末(CaO) 5 kg,装入布袋研碎,过 10 目筛,混匀,备用。

土壤改良和污染治理时生石灰施用量一般为 1 ~ 5 吨/公顷^[19-20]。本次实验生石灰施用量设置 5 个浓度级,加上空白,共有 6 个处理,即 0、0.5、1、2、4、8 吨/公顷(标识为 T1 ~ T6)。按耕层厚度 20 cm、土壤平均容重 1.2 g/cm³,计算得出上述 6 个处理每 100 g 土壤样品的生石灰添加量分别为:0(空白)、0.0208、0.0417、0.0833、0.1667、0.3333 g。实验时每个烧杯装入 100 g 过 10 目筛的风干土,用精度为 1/10000 的电子天平称取需添加的生石灰量,加入

烧杯,用玻璃棒充分搅匀。

1.1.3 燃煤炉渣

燃煤炉渣取自中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所锅炉房,原煤产自山西大同。测得燃煤炉渣 pH 为 11.01,有机碳(orgC)含量为 6.47%,总硒含量为 0.37 × 10⁻⁶,有效硒含量为 0.028 × 10⁻⁶。

考虑到燃煤炉渣的碱性不如生石灰,结合炉渣或粉煤灰农用的通常施用量,实验时将炉渣添加量设定为生石灰的 10 倍,即炉渣添加量为:0(空白)、5、10、20、40、80 t/公顷。计算出 6 个实验处理 100 g 土壤样品炉渣添加量分别为 0(空白)、0.2083、0.4167、0.8333、1.6667、3.3333 g。实验时,用 1/10000 精度的电子天平称取燃煤炉渣,添加到装有 100 g 土壤的烧杯中,用玻璃棒充分搅拌均匀。

1.2 室内实验方法

用洒水器往每个烧杯中喷入去离子水 20 ~ 30 mL,边喷边搅动,使实验土壤均匀润湿,盖上塑料布保湿、防尘。在 25℃ 室温下培养 3 个月。每隔 7 天左右,观察土壤湿润度。如果较为湿润,再次搅动土壤;如果土壤变干,则再加入适量去离子水,使土壤处于湿润状态,并搅动土壤。及时除去实验过程中长出的杂草。3 个月后,撤去塑料布,彻底风干烧杯中土壤,取出土壤装于布样袋中,破碎过 10 目筛,混合均匀,分成 3 份。40 g 土壤一份,装入纸样袋,送实验室测定 pH、有机碳、阳离子交换量(CEC);30 g 土壤一份,进一步研磨至 200 目后,测定硒等元素全量;另取 30 g 样品,用玛瑙钵研磨至 100 目,送实验室测定土壤硒有效态。

1.3 土壤指标分析测试方法

实验样品送国土资源部郑州矿产资源监督检测中心,依照《多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T

表 1 实验土壤样品理化性质
Table 1 Physico-chemical properties of soil samples for the experiment

样品编号	采样地区	地质成因	土地利用	土壤类型	全硒含量 (10 ⁻⁶)	有机碳含量 (%)	pH	CEC [cmol(+) / kg]
S1	龙海市角美镇	冲-洪积	旱地	水稻土	0.66	2.31	5.75	10.9
S2	龙海市颜厝镇	残坡积	果园	红壤	0.86	1.30	4.39	5.74
S3	龙海华侨农场	残坡积	果园	红壤	0.77	1.33	4.46	9.81
S4	龙海市东泗乡	残坡积	林地	红壤	0.42	1.11	4.91	7.43
S5	龙海市海澄镇	残积土	林地	红壤	1.11	0.85	4.41	7.99
S6	诏安县红星乡	残坡积	果园	红壤	0.60	2.41	3.91	12.3
S7	万宁市横岭村	冲洪积	水田	水稻土	1.25	1.30	4.33	9.97
S8	万宁市横岭村	残坡积	果园	红壤	2.48	0.48	4.50	6.69
S9	海口市琼山区	残坡积	旱地	红壤	2.72	0.82	4.98	10.6

0258—2014)及《生态地球化学评价样品分析技术要求》(DD2005-03),测定土壤有机碳、pH、CEC、硒全量、有效态等指标。

1.3.1 样品前处理与指标测定

经过 3 个月实验后的样品,取小于 2 mm 的土壤样 10 g 以土:液比 1:2.5(*w/V*)提取,振荡 30 min,以 pH-3C 型数字酸度计测定土壤 pH,测定精度为 0.01pH 单位。取 10 mg 土壤以氧化热解法测定有机碳,检出限为 0.1%。称取 0.25 g 研磨至 200 目的土壤样品,用硝酸-高氯酸分解,在盐酸溶液中与硼氢化钾反应生成氢化物气体,使用 AFS-8330 双道原子荧光光度计测定硒含量,方法限为 0.01 mg/kg。取 2.5 g 土壤样品,采用滴定法测定土壤阳离子交换量(CEC)。称取 1.0 g 土壤样品,采用 0.1 mol/L 磷酸二氢钾溶液浸提土壤硒有效态量,使用 AFS-8330 双道原子荧光光度计测定硒含量^[21-22]。

1.3.2 分析质量控制

分析时插入国家一级标准物质监控分析质量,分析合格率达 100%,重复样合格率均为 100%,分析检出限、报出率以及正确度、精密度等参数全部达到了 DZ/T 0258—2015 多目标区域地球化学调查规范(1:25 万)要求,分析质量满足本次研究需要。

2 结果与讨论

2.1 添加物料对土壤 pH 的影响

2.1.1 添加生石灰

由表 1 可知,本次实验的 9 件土壤样品均为酸性(pH<6.5)土壤,其中 8 件为强酸性(pH<5.0)土壤。添加生石灰后,土壤 pH 均有所上升(表 2),且随生石灰添加量的增加,pH 上升程度也相应增加。与土壤初始 pH 相比,添加生石灰可使土壤 pH 提升 0.83~2.48 个单位不等;土壤 pH 初始值越高,添加生石灰 pH 提升幅度越小。

虽然,添加不同量的生石灰后土壤 pH 均有所上升,但其最高值为 7.0,仍为中性土,适合绝大多数作物生长对土壤 pH 的要求。例如,水稻生长的最适宜 pH 为 6.0~7.0^[23]。因此,施加适量生石灰不会对农业生产造成明显的负面影响。

2.1.2 添加燃煤炉渣

添加炉渣对土壤 pH 的影响如表 2 所示。可见经过燃煤炉渣调控后,土壤 pH 均有所上升。与空白相比,土壤样品 pH 提升 1.2~2.8 个单位不等。与生石灰组实验结果相同,土壤 pH 初始值最高的 S1 号土壤样品 pH 增加量最少,并且对于同一件土

表 2 生石灰及炉渣添加量对土壤 pH 的影响

Table 2 Effect of the amount of quicklime and cinder added on pH of soil

处理 编号	生石灰添加量 (g/100g 土)	pH								
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
T1	0	5.75	4.39	4.46	4.91	4.41	3.91	4.33	4.50	4.98
T2	0.0208	5.74	4.47	4.52	5.03	4.27	4.70	4.57	4.56	5.07
T3	0.0417	5.78	4.81	4.64	5.13	4.55	4.95	4.68	4.68	5.15
T4	0.0833	5.92	5.08	5.20	5.97	5.05	4.60	5.01	4.94	5.46
T5	0.1667	6.11	5.51	5.48	6.30	5.45	5.14	6.03	5.44	5.95
T6	0.3333	6.58	6.36	5.97	7.00	6.53	5.74	6.81	5.95	6.31
最大提升单位		0.83	1.97	1.51	2.09	2.12	1.83	2.48	1.45	1.33

处理 编号	炉渣添加量 (g/100g 土)	pH								
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
T1	0	5.72	4.41	4.55	4.80	4.15	4.01	4.14	4.48	4.99
T2	0.2083	5.76	4.79	4.60	5.11	4.62	4.24	4.65	4.59	5.05
T3	0.4167	5.86	4.85	4.73	5.50	4.61	4.43	4.85	4.76	5.28
T4	0.8333	6.00	5.32	5.17	6.18	4.94	4.70	5.40	5.05	5.49
T5	1.6667	6.26	5.69	5.60	7.10	5.41	5.62	6.35	5.61	5.91
T6	3.3333	6.92	6.44	6.38	7.60	6.24	5.39	6.82	6.41	6.25
最大提升单位		1.20	2.03	1.83	2.80	2.09	1.38	2.68	1.93	1.26

壤样品而言,土壤 pH 也是随着燃煤炉渣添加量的增加而上升。

农学研究表明,各种农作物的种植需要适宜的土壤 pH 值范围,强酸性土壤对于许多农作物生长是不利的。因此,通过施用生石灰或燃煤炉渣等碱性物料,适度提高土壤 pH 值,改良土壤理化性状,从而有利于土壤中硒元素的活化,显著提升了土壤中硒元素的生物有效性。

2.2 添加物料对土壤硒有效度的影响

通常以有效度来表征土壤元素的生物有效性高低。土壤硒有效度(%)是土壤中硒元素有效态量与硒全量的比值,以百分比表示。

2.2.1 添加生石灰

由表 3 可见,除了 S1(龙海市角美镇水稻土)和 S3(龙海市华侨农场红壤)外,其他 7 件土壤样品添加生石灰后土壤硒有效度平均值或最高值得到不同程度的提升。此外,样品 S1 的土壤硒有效度平均值增幅最大达 1.52 倍;S2 为 1.41 倍;样品 S4 至 S9 分别增加了 1.48 倍、1.41 倍、1.26 倍、2.06 倍、2.17 倍和 1.68 倍。样品 S3 土壤添加生石灰后硒有效度未增反降,暂未得到合理解释。

分析 9 件实验土壤硒有效度与生石灰量添加量的关系(表 3)可以发现,大部分土壤硒有效度随生石灰量添加量的增加表现为先升后降的变化规律,即在较低添加比例时,硒有效度随生石灰量的增加

而上升,但当生石灰添加量达到一定量后,硒有效度并不随之继续增长,甚至有时反而下降。这意味着采用适当的生石灰添加量,才能有效提升土壤硒生物有效性,并不是生石灰添加得越多越好。因此,在采用生石灰调控土壤酸碱度提升土壤硒生物有效性时,应通过深入的实验研究确定最佳的生石灰添加比例,以达到经济有效的目的。

2.2.2 添加燃煤炉渣

由于燃煤炉渣的化学成分较为复杂,添加燃煤炉渣的量相对较大,在改变土壤酸碱度的同时,也改变了土壤物理性质和化学组成,例如增加土壤有机碳含量,从而影响土壤硒赋存形态及其生物有效性。9件样品6种炉渣添加量处理的土壤硒有效度见表4。虽然,添加燃煤炉渣后土壤硒有效度总体有所上升,但与添加生石灰实验结果(表3)相比较,

添加炉渣对土壤硒有效度的影响规律比较复杂,不同土壤间的差异性较大。添加燃煤炉渣后,9件土壤硒有效度的变化可分为以下三种情况:一是随炉渣添加量的增加而升高,如S2、S5、S6;二是随炉渣添加量的增加而降低,如S3、S7、S8、S9;三是先升高后降低,如S1、S4。各种添加处理土壤硒有效度最大增幅分别为:S1土壤样品提高约2.1倍;S2提高约13.24倍;S3提高约1.34倍;S4提高约2.65倍;S5提高约1.52倍;S6提高约1.09倍;S7提高约1.04倍;S9提高约1.44倍。

由上可知,实验土壤添加燃煤炉渣后可提高土壤硒的有效度。且与生石灰相似,炉渣添加量并不是越多越好,除S5、S6号样品土壤硒有效度随炉渣量升高而增高外,其余土壤样品的炉渣添加量需控

表3 添加生石灰对土壤硒有效度的影响

Table 3 Effect of quicklime added on the bio-availability of selenium in soil

样品编号	处理编号	总硒含量 (10 ⁻⁶)	硒有效量 (10 ⁻⁶)	硒有效度 (%)	样品编号	处理编号	总硒含量 (10 ⁻⁶)	硒有效量 (10 ⁻⁶)	硒有效度 (%)
S1	T1	0.507	0.015	2.98	S6	T1	0.487	0.052	10.68
	T2	0.487	0.0076	1.56		T2	0.469	0.044	9.38
	T3	0.487	0.014	2.85		T3	0.477	0.064	13.42
	T4	0.494	0.012	2.47		T4	0.476	0.059	12.41
	T5	0.507	0.023	4.53		T5	0.508	0.057	11.18
	T6	0.506	0.013	2.56		T6	0.498	0.056	11.20
S2	T1	0.654	0.031	4.68	S7	T1	1.490	0.024	1.61
	T2	0.620	0.041	6.56		T2	1.682	0.037	2.18
	T3	0.630	0.039	6.16		T3	1.838	0.036	1.95
	T4	0.627	0.040	6.42		T4	1.985	0.030	1.50
	T5	0.624	0.041	6.62		T5	1.677	0.027	1.63
	T6	0.656	0.034	5.23		T6	1.750	0.058	3.32
S3	T1	0.659	0.050	7.52	S8	T1	1.117	0.033	2.95
	T2	0.658	0.024	3.65		T2	1.092	0.050	4.55
	T3	0.621	0.0074	1.20		T3	1.077	0.052	4.82
	T4	0.646	0.040	6.17		T4	1.088	0.043	3.95
	T5	0.681	0.045	6.68		T5	1.055	0.068	6.42
	T6	0.673	0.032	4.72		T6	1.171	0.037	3.13
S4	T1	0.320	0.029	9.00	S9	T1	2.538	0.057	2.24
	T2	0.329	0.028	8.43		T2	2.527	0.038	1.51
	T3	0.322	0.016	4.82		T3	2.575	0.077	2.99
	T4	0.328	0.034	10.38		T4	2.363	0.089	3.76
	T5	0.328	0.044	13.30		T5	2.512	0.058	2.30
	T6	0.311	0.033	10.73		T6	2.465	0.055	2.24
S5	T1	0.810	0.028	3.45					
	T2	0.796	0.038	4.74					
	T3	0.835	0.019	2.27					
	T4	0.831	0.019	2.24					
	T5	0.805	0.039	4.86					
	T6	0.851	0.041	4.77					

表 4 添加炉渣对土壤硒有效度的影响

Table 4 Effect of cinder added on the bio-availability of selenium in soil

样品编号	处理编号	总硒含量 (10 ⁻⁶)	硒有效量 (10 ⁻⁶)	硒有效度 (%)	样品编号	处理编号	总硒含量 (10 ⁻⁶)	硒有效量 (10 ⁻⁶)	硒有效度 (%)
S1	T1	0.499	0.018	3.51	S6	T1	0.501	0.063	12.61
	T2	0.515	0.016	3.14		T2	0.517	0.039	7.62
	T3	0.506	0.013	2.54		T3	0.494	0.039	7.87
	T4	0.481	0.023	4.70		T4	0.490	0.051	10.37
	T5	0.452	0.033	7.39		T5	0.490	0.046	9.36
	T6	0.457	0.018	4.01		T6	0.489	0.068	13.83
S2	T1	0.648	0.0047	0.73	S7	T1	1.902	0.052	2.75
	T2	0.660	0.013	1.97		T2	1.727	0.021	1.23
	T3	0.623	0.039	6.18		T3	1.702	0.049	2.85
	T4	0.631	0.013	2.10		T4	1.768	0.028	1.59
	T5	0.638	0.012	1.81		T5	1.725	0.0070	0.40
	T6	0.630	0.061	9.67		T6	1.769	0.0045	0.25
S3	T1	0.686	0.044	6.36	S8	T1	1.167	0.044	3.80
	T2	0.683	0.029	4.17		T2	1.132	0.032	2.86
	T3	0.709	0.060	8.51		T3	1.518	0.030	2.01
	T4	0.669	0.053	7.93		T4	1.325	0.015	1.10
	T5	0.651	0.044	6.70		T5	1.167	0.024	2.07
	T6	0.683	0.042	6.13		T6	1.167	0.021	1.82
S4	T1	0.315	0.015	4.78	S9	T1	2.436	0.047	1.94
	T2	0.316	0.033	10.51		T2	2.490	0.046	1.87
	T3	0.314	0.027	8.48		T3	2.476	0.069	2.80
	T4	0.311	0.039	12.65		T4	2.476	0.039	1.59
	T5	0.299	0.036	11.89		T5	2.370	0.037	1.55
	T6	0.322	0.032	9.92		T6	2.358	0.042	1.76
S5	T1	0.845	0.032	3.73					
	T2	0.854	0.041	4.80					
	T3	0.874	0.032	3.61					
	T4	0.856	0.037	4.27					
	T5	0.861	0.044	5.11					
	T6	0.854	0.049	5.69					

制在适当范围内,才能达到最佳效果。这是因为添加燃煤炉渣一方面可提高土壤 pH 值、改变结构等土壤理化性状,有利于土壤中 Se 元素的活化,增加其生物有效性;另一方面,燃煤炉渣含有较高的有机质,随炉渣添加量的增加,有机质对土壤硒的固定作用也会逐渐体现。

2.3 两组物料对提高土壤硒有效度的效果评价

2.3.1 两组物料的土壤硒有效度分析

随着生石灰添加量的增加,土壤硒有效性变化较为复杂,有些情况下添加生石灰较空白处理的硒有效度还要低(如 S1 样品的 T2、T4、T6 处理,S5 样品的 T3、T4 处理)。这是因为采用 0.1 mol/L 磷酸二氢钾溶液浸提的土壤硒有效态含量,不仅受到土壤理化性状及其所决定的土壤硒赋存形态的影响,而且也与实验操作过程中提取液中硒元素有可能发

生二次吸附沉淀有关,再者提取液中有效态硒浓度很低,分析测试结果易受到分析测试偶然误差的影响。

分析统计添加生石灰与燃煤炉渣的 6 种浓度处理后 9 件样品土壤硒有效度的中位数,结果见图 1。由图可见:一是当生石灰与燃煤炉渣的添加比例为 1:10 时,除了 T2、T5 处理外,其他 T3、T4、T6 处理的两种物料对土壤硒有效态的影响程度比较接近,说明炉渣调控效率大致相当于生石灰的 1/10;二是生石灰对土壤有效度的影响显示出跳跃性,T2、T5 处理异常高,而 T6 反常地低。这可能是与生石灰添加量少,不易与土壤充分混匀,导致实验反应和采样存在不均匀性有关。而同一级次处理的炉渣添加量是生石灰的 10 倍,易与土壤充分混匀和接触反应,添加炉渣对土壤硒有效度的影响则显得很有规律,

随添加量的增加而依次增加。添加炉渣一方面可提高土壤 pH 值、改变结构等土壤理化性状,有利于土壤中 Se 元素的活化,增加其生物有效性;另一方面,燃煤炉渣含有较高的有机质,随炉渣添加量的增加,有机质对土壤硒的固定作用也会逐渐体现。土壤硒有效度随燃煤炉渣添加量逐渐上升,意味着在炉渣例添加量不至于影响到土壤耕作性能时,适当增加添加比例是有利于提升土壤硒有效性的。因此,建议使用量为 20 ~ 40 吨/公顷(相当于 1.3 ~ 2.7 吨/亩)。

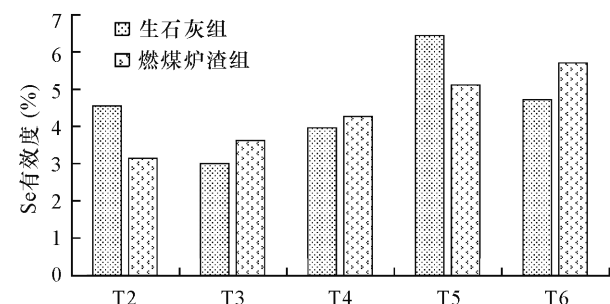


图1 生石灰组与炉渣组土壤硒有效度中位数的对比

Fig. 1 Comparison of the median of the availability on Se in soil after adding quicklime and cinder

2.3.2 两组物料实际使用效果评价

多数情况下,两组实验调控后的土壤硒有效度均有所提升,但调控后土壤硒有效度都在 10% 以内。土壤似乎存在某种调节机制,如土壤中的一些还原微生物(嗜汞古菌界)对硒具有还原作用,可将硒酸盐、亚硒酸盐还原成元素硒^[24],以及土壤的吸附-解吸作用^[25]将土壤有效硒维持在一定的平衡水平上。因此,通过添加生石灰、燃煤炉渣等物料方法,只能在一定程度上提升土壤硒的有效度。然而,我们认为适度提升土壤硒有效度是有益的,既可适度增加作物对土壤硒的吸收利用,有利于富硒农产品的产出,也可避免土壤硒大量活化淋失以及作物过量吸收导致农产品中硒含量过高的风险。此外,与添加生石灰情况相似,土壤硒有效度随燃煤炉渣添加量的变化也受到土壤硒活化作用机理、实验分析测试误差的影响,有效度的变化规律十分复杂,仍需作进一步研究。

虽然由于缺乏土壤有效硒与作物硒含量关系模型,无法给出土壤硒有效度最适宜范围。但是土壤硒有效度适当增加,是有利于富硒农产品的产出的。

而且土壤硒有效度增加的有限性既可避免土壤硒大量活化淋失(及其带来的生态污染风险),也可规避作物过量吸收硒造成农产品硒过量及其带来的中毒风险。

因此,对于理化性质与福建、海南红壤相似的土壤,可通过添加生石灰或燃煤炉渣来提高土壤硒有效度。而选择燃煤炉渣作为调控物料更加经济、实用,既可以实现炉渣的有效利用,减少炉渣堆存处置问题,又可以改善红壤土壤结构、提高土壤硒有效度。而且,燃煤炉渣含有丰富的有机碳,施用燃煤炉渣还能适当增加土壤有机碳含量。

3 结论

利用天然物料生石灰和燃煤炉渣调控中国南方红壤酸碱度,并由此提升土壤硒的生物有效性,这一研究在国内外还不多见。本文开展的土壤硒生物有效性室内调控实验表明,添加生石灰和燃煤炉渣均能有效提升南方酸性土壤的 pH,同时能显著提升土壤中硒元素的生态有效性,提升土壤硒的可利用性,为改良中国南方红壤强酸性的不利土壤性状、有效利用富硒土地资源开发富硒农产品提供了一种重要的技术途径。本研究表明,燃煤炉渣用量为生石灰的 10 倍时,燃煤炉渣对土壤硒有效度的提升效果与添加生石灰相当,建议实际使用时生石灰用量为 2 ~ 4 吨/公顷,或燃煤炉渣使用量为 20 ~ 40 吨/公顷。相对来说,选择燃煤炉渣作为调控物料更为经济、有效。

需要指出的是,由于受样本代表性和实验周期的限制,土壤硒有效性与添加物料剂量间关系、作用机理、稳定及持久性尚难以作出科学解释和判断,有待进一步开展深入、细致的实验研究。

4 参考文献

- [1] 谭见安,李日邦. 环境硒与健康[M]. 北京:人民卫生出版社,1989.
Tan J A, Li R B. Environmental Selenium and Health [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 1989.
- [2] 杨琼,侯青叶,顾秋蓓,等. 广西武鸣县典型土壤剖面 Se 的地球化学特征及其影响因素研究[J]. 现代地质,2016,30(2):455-462.
Yan Q, Hou Q Y, Gu Q B, et al. Study of geochemical characteristics and influencing factors of soil selenium in

- the typical soil profiles in Wuming country of Guangxi [J]. *Geoscience*, 2016, 30(2): 455–462.
- [3] 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.
Yang Z F, Yu T, Hou Q Y, et al. Geochemical characteristics of soil selenium in farmland of Hainan Island[J]. *Geoscience*, 2012, 26(5): 837–849.
- [4] 吴永尧,彭振坤,罗泽民. 硒的多重生物学功能与人和动物的健康[J]. *湖南农业大学学报*, 1997, 23(3): 294–300.
Wu Y Y, Peng Z K, Luo Z M. Multi-biological functions of selenium to the health of human beings and animals [J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 1997, 23(3): 294–300.
- [5] 张东威. 中国土壤中硒及其土壤环境质量标准研究(简报)[J]. *水土保持研究*, 1994(增刊): 112.
Zhang D W. Study on Se and its soil environmental quality standards in China (brief) [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1994(Supplement): 112.
- [6] Yu T, Yang Z F, Lü 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.
- [7] 徐文,唐文浩,邝春兰,等. 海南省土壤中硒含量及影响因素分析[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(6): 3026–3027.
Xu W, Tang W H, Kang C L, et al. Analysis on content of Se in soil of Hainan Province and its influencing factors [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(6): 3026–3027.
- [8] 宋明义,刘建新,黄春雷. 浙江富硒土壤地球化学特征与生物学效应[J]. *广东微量元素科学*, 2012, 19(3): 32–38.
Song M Y, Liu J X, Huang C L. Geochemistic characteristics and biological effects of selenium-rich soil in northern Zhejiang [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2012, 19(3): 32–38.
- [9] Stroud J L, McGrath S P, Zhao F J. Selenium speciation in soil extracts using LC-ICP-MS [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2012, 92(2): 222–236.
- [10] 于世举. 石灰改良酸性土壤的效果[J]. *现代农业科技*, 2012(1): 277–278.
Yu S J. Effect of lime improved acid soil [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2012(1): 277–278.
- [11] 王文军,朱宏斌,武际,等. 不同土壤改良剂在皖南酸性红壤油菜上的效应[J]. *安徽农业科学*, 2002, 30(4): 529–530.
Wang W J, Zhu H B, Wu J, et al. Study on the different soil ameliorations on rapeseed in acid soils in southern Anhui [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2002, 30(4): 529–530.
- [12] 敖俊华,黄振瑞,江永,等. 石灰施用对酸性土壤养分状况和甘蔗生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(15): 266–269.
Ao J H, Huang Z R, Jiang Y, et al. Effects of applying lime on the properties of acid soil and the growth of sugarcane [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(15): 266–269.
- [13] 廖敏,黄昌勇,谢正苗. 施加石灰降低不同母质土壤中镉毒性的机理研究[J]. *农业环境保护*, 1998, 17(3): 101–103.
Liao M, Huang C Y, Xie Z M. Study on the decrease of mechanism of cadmium toxicity after liming in different soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 1998, 17(3): 101–103.
- [14] 张青,李菊梅,徐明岗,等. 改良剂对复合污染红壤中镉锌有效性的影响及机理[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4): 861–865.
Zhang Q, Li J M, Xu M G, et al. Effects of amendments on bioavailability of cadmium and zinc in compound contaminated red soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4): 861–865.
- [15] 杨金辉,陈思光,虢青伟,等. 煤渣对水中氨氮和总磷吸附的试验研究[J]. *铀矿冶*, 2011, 30(4): 221–224.
Yang J H, Chen S G, Guo Q W, et al. Experimental study of adsorbing ammonia nitrogen and phosphorus in water by cinders [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2011, 30(4): 221–224.
- [16] 马万征,赵光雷,何会民,等. 煤渣对废水中氨氮吸附效果的影响因素研究[J]. *环境与健康杂志*, 2013, 30(4): 346–348.
Ma W Z, Zhao G L, He H M, et al. Ammonia nitrogen adsorption efficiency by cinder and influencing factors in wastewater treatment [J]. *Journal of Environment and Health*, 2013, 30(4): 346–348.
- [17] 黄泽辉,韩宝军,邓登飞,等. 煤渣过滤调酸钨冶炼废水的研究[J]. *赣南师范学院学报*, 2014(6): 46–48.
Huang Z H, Han B J, Deng D F, et al. Investigation on coal cinder filtering acid adjusting tungsten smelting

- waste water[J]. Journal of Gannan Normal University, 2014(6):46-48.
- [18] 赵娜,李鹏飞,林德华,等. 炉渣对调节稻田土壤 pH 和盐度的有效性分析[J]. 亚热带农业研究,2010,6(4):264-266.
Zhao N, Li P F, Lin D H, et al. Effect of slag on pH and salinity of paddy soil [J]. Subtropical Agriculture Research, 2010, 6(4):264-266.
- [19] 蔡东,肖文芳,李国怀,等. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J]. 中国农学通报,2010,26(9):206-213.
Cai D, Xiao W F, Li G H, et al. Advance on study of liming on acid soils [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(9):206-213.
- [20] 胡德春,李贤胜,尚健,等. 不同改良剂对棕红壤酸性的改良效果[J]. 土壤,2006,38(2):206-209.
Hu D C, Li X S, Shang J, et al. Influences of various modifiers on acidity of brown red soil[J]. Soils, 2006, 38(2):206-209.
- [21] 王腾云,周国华,孙彬彬,等. 福建沿海地区土壤-稻谷重金属含量关系与影响因素研究[J]. 岩矿测试, 2016, 35(3):295-301.
Wang T Y, Zhou G H, Sun B B, et al. The relationship between heavy metal contents of soils and rice in coastal areas, Fujian Province, including influencing factors[J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35(3):295-301.
- [22] 陈志慧,孙洛新,钟莅湘,等. 快速催化极谱法测定土壤中的有效态钼[J]. 岩矿测试, 2014, 33(4):584-588.
Chen Z H, Sun L X, Zhong L X, et al. Determination of available molybdenum in soil by rapid catalytic polarography[J]. Rock and Mineral Analysis, 2014, 33(4):584-588.
- [23] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
Lu R K. Principles of Soil Plant Nutrition and Fertilization [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998.
- [24] 邹宇,于俊林,徐晶. 硒及微生物富硒研究进展[J]. 食品研究与开发,2006,27(9):171-173.
Zou Y, Yu J L, Xu J. Research advance of the selenium and concentrating selenium of microbe [J]. Food Research and Development, 2006, 27(9):171-173.
- [25] Dhillon K S. Adsorption-desorption reactions of selenium in some soils of India[J]. Geoderma, 1999, 93:19-31.

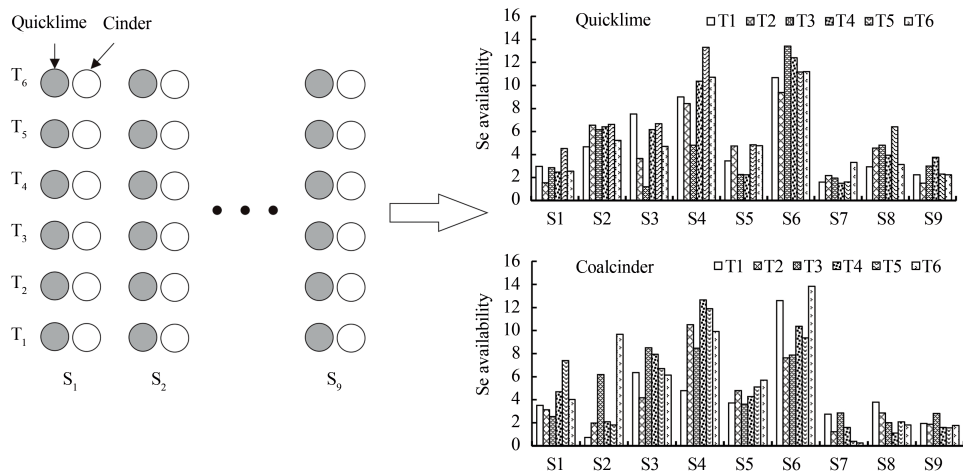
Regulation and Evaluation of Selenium Availability in Se-rich Soils in Southern China

XIE Bang-ting¹, HE Ling², JIANG Guan-jun¹, SUN Bin-bin^{1,2}, ZENG Dao-ming², ZHOU Guo-hua^{2*}

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

Highlights

- Coalcinder and quicklime were used to regulate red soil pH and selenium bio-availability.
- Soil pH from Fujian and Hainan increased significantly as the addition of coalcinder and quicklime.
- Selenium bio-availability in soils enhanced as moderate amount of quicklime or coalcinder added.



Abstract: The multi-purpose regional geochemical survey showed that the concentration of selenium in acid soil in Southern China is generally high, but the bio-availability of selenium in soil is relatively low, which affects the usage of selenium-rich soil. The pH values of soils are an important factor affecting the bio-availability. Se-rich red soil samples with pH of 3.91 – 4.98 and Se-rich paddy soil samples with pH of 4.33 – 5.75 were collected from Fujian Province and Hainan Island. Six experiments were conducted using lime and coal slag as the modifier to improve the bio-availability of selenium in soil. The results show that soil pH can be significantly elevated by 1 to 2 units by using the modifiers, which advances the mobility of Se in soils and improves selenium bio-availability in soils. Coalcinder and 10 times weights of quicklime have the same effect to promote selenium availability. The coalcinder as a regulation material is more economical and practical. It can not only realize the effective utilization of cinder, but also improve the soil structure and increase the soil selenium availability.

Key words: Se availability; regulation experiment; quicklime; coalcinder; selenium-rich soil in Southern China