

况琴, 吴山, 黄庭, 等. 生物质炭和钢渣对江西丰城典型富硒区土壤硒有效性的调控效果与机理研究[J]. 岩矿测试, 2019, 38(6): 705 - 714.

KUANG Qin, WU Shan, HUANG Ting, et al. Effect and Mechanism of Biomass Carbon and Steel Slag as Ameliorants on Soil Selenium Availability in a Typical Se-rich Area of Fengcheng City, Jiangxi Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(6): 705 - 714.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.201901190014】

## 生物质炭和钢渣对江西丰城典型富硒区土壤硒有效性的调控效果与机理研究

况琴<sup>1</sup>, 吴山<sup>1</sup>, 黄庭<sup>1</sup>, 吴代赦<sup>1\*</sup>, 向京<sup>2</sup>

(1. 南昌大学资源环境与化工学院, 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西 南昌 330031;

2. 武汉中地格林环保科技有限公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 江西丰城富硒土壤中总硒含量较高, 但能被植物直接吸收利用的有效态硒含量偏低。土壤中硒的生物有效性是影响作物富硒的关键因素, 寻找安全有效的改良剂对提高富硒土壤中硒的有效性至关重要。本文以生物质炭和钢渣为改良剂, 共设置了8个不同处理, 通过室内土培试验和盆栽实验, 原子荧光光谱法测定有效态硒的含量, 探究了两种改良剂在不同处理水平下对丰城富硒土壤中有效硒的调控效果。土培试验结果表明, 施加不同量的生物质炭和钢渣均能提高研究区土壤 pH, 提升幅度为 0.1 ~ 3.79 个单位。元素形态分析结果表明, 改良剂主要通过影响有机结合态硒来调控土壤有效态硒, 施加生物质炭的土壤有机质含量显著增加, 且有机质对硒表现为固定作用, 导致有效态硒含量降幅为 8.4% ~ 15.1%, 使土壤有效态硒含量总体偏低; 而钢渣对土壤 pH 的显著影响有利于活化土壤中的硒元素, 土壤有效态硒含量可提高 1.4 ~ 2.0 倍。盆栽实验结果表明, 土壤经钢渣处理后小白菜硒含量提高 30% 以上, 而经生物质炭处理后小白菜硒含量降幅在 7.14% ~ 42.8% 之间。本研究认为, 生物质炭不适用于调控研究区土壤中硒的有效性, 钢渣可作为研究区土壤硒有效性的调控材料, 既实现了固废再利用, 也提高了土壤中硒的有效度。

**关键词:** 富硒土壤; 有效态; 原子荧光光谱法; 土壤改良剂; 生物质炭; 钢渣

**要点:**

(1) 揭示了土壤理化性质(pH、有机质和阳离子交换量)对土壤有效态硒的影响。

(2) 对比了生物质炭和钢渣两种改良剂对富硒红壤中硒有效性的调控效果。

(3) 钢渣可提高研究区土壤中硒的有效性, 生物质炭不适宜作为该地区土壤硒有效性的调控材料。

**中图分类号:** O657.31; S151.93

**文献标识码:** A

硒是人体必需的微量元素之一, 影响着人体各项生理系统<sup>[1]</sup>, 硒的丰缺与人体健康程度密切相关。硒含量过高将引起人出现脱发等不良反应<sup>[2]</sup>, 而缺硒则易引发克山病、大骨节病等 10 余种疾病<sup>[3]</sup>。研究发现我国三分之一的地区为严重缺硒区, 导致当地居民食物中硒的摄入量偏低<sup>[4]</sup>。农产品是居民食物的主要来源, 通过摄入富硒作物是解决人体缺硒最有效的

途径之一<sup>[5]</sup>。添加外源硒是目前常用的人工富硒方式, 郭文慧等<sup>[6]</sup>对紫甘薯的研究表明, 施硒能增加作物产量, 同时能提高作物中硒的含量。适当喷施亚硒酸钠可提高稻谷产量及其硒含量<sup>[7]</sup>。但不同作物对硒的富集能力具有差异性, 且不同类型土壤对外源硒的储存、释放能力也不同, 因而通过添加外源硒来生产富硒农产品有一定弊端。

收稿日期: 2019-01-19; 修回日期: 2019-04-08; 接受日期: 2019-07-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800900)

作者简介: 况琴, 硕士, 环境科学与工程专业。E-mail: 645262207@qq.com。

通信作者: 吴代赦, 博士, 教授, 主要从事环境地球化学研究。E-mail: dswu@ncu.edu.cn。

土壤中硒的生物有效性是影响作物富硒的关键因素之一,富硒土壤中能被作物吸收利用的有效硒不到总硒的5%。曹容浩<sup>[3]</sup>发现土壤有效硒主要受总硒、pH、有机质等因素影响,且土壤酸碱度是影响硒生物有效性的主要因素。我国南方地区土壤多以红壤为主,土壤中的硒大多以亚硒酸盐的形态存在,极易被铁铝氧化物吸附,导致土壤中生物有效态硒含量偏低<sup>[8]</sup>,严重影响了富硒土壤资源的开发利用。基于此,有不少学者通过施加改良剂来提高土壤中硒的有效性,如施加秸秆生物质炭、钙镁磷肥等<sup>[9]</sup>,谢邦廷等<sup>[8]</sup>在土壤中添加生石灰和燃煤炉渣后,提高了pH和有效硒含量。但长时间添加生石灰易引起土壤板结,不利于作物生长,燃煤炉渣中可能含有放射性元素<sup>[10]</sup>,会对人体健康带来威胁;磷肥等肥料施入土壤后易引起水体富营养化,也会在一定程度上提高土壤中镉元素的含量<sup>[11]</sup>。因此,寻找安全有效的改良剂对提高富硒土壤中硒的有效性至关重要。

生物质炭是一种运用广泛的新兴土壤改良剂,含大量碳酸盐等碱性物质,能明显改善土壤酸碱度<sup>[12]</sup>。钢渣中含有CaO、MgO、SiO<sub>2</sub>等多种氧化物同时存在少量植物生长必须的微量元素,钢渣对农田土壤具有良好的改良效果,是一种潜在的多金属复合污染土壤改良剂。施加钢渣可有效提高土壤pH值和有效硅含量,并增加农作物产量<sup>[13]</sup>。如邓腾灏博等<sup>[14]</sup>研究表明土壤中施加钢渣后pH可从3.5提升到7.0,显著提高了酸性土壤的碱性,同时降低了土壤有效态重金属的含量及稻米中重金属的浓度。

丰城市境内存在大面积富硒土壤,平均硒含量为0.49mg/kg<sup>[15]</sup>,属富硒地带(0.400~3.00mg/kg)<sup>[16]</sup>。但该地区土壤主要以红壤为主,铁、铝氧化物含量较高,土质透气透水性能差、土质黏重,极大限制了土壤中硒的有效性。目前,诸旭东等<sup>[17]</sup>通过添加钙镁磷肥、叶面喷硒等调控措施提高了该地区大米中的硒含量,但添加外源硒成本较高,不易大面积使用。本文以江西丰城富硒区土壤为研究对象,通过施加生物质炭、钢渣调控土壤理化性质,研究不同改良剂对土壤中硒生物有效性的影响,并探究不同类型生物质炭对土壤有效硒的调控是否具有相同效果,以期对富硒农产品的开发利用提供参考依据。

## 1 实验部分

### 1.1 研究区域与样品采集

董家镇位于丰城市西北边陲,处丰城、高安两市

交界处,气候类型为亚热带湿润气候,雨量充沛、四季分明,气候温和,该地区生态环境保护良好,素有“绿水青山”的美称。全镇有49平方多公里的富硒土壤资源,是“中国生态硒谷”核心区。

在前期调查的基础上,2018年7月,于董家镇泉南村富硒园地内,按梅花布点法采集园地表层土壤(0~20cm)各1kg左右,混合均匀后用四分法取2~3kg土壤为供试样品带回实验室。剔除植物根系、石块等杂物,置于阴凉处,自然风干过程中用木棒将土壤敲碎后,过10、20、60目筛、混匀、备用。供试土壤pH4.24,总硒量为0.72mg/kg,有机质含量为3.28%,阳离子交换量(CEC)为4.2cmol/kg。

### 1.2 供试改良剂

#### 1.2.1 生物质炭

从市场购买约3kg生物质炭粉末(江苏华丰农业生物工程有限公司),去除大块杂质,过60目筛备用,pH=10.5。生物质炭的施加量会影响其对土壤理化性质的改良效果,当施加量为10g/kg时,其对土壤理化性质的影响不太明显,基于此,本次试验设置3个不同梯度,即2g/kg、10g/kg、30g/kg(记为处理1~3)。试验时每个塑料烧杯中加入100g过10目筛的供试土壤,并分别添加0.2g、1.0g、3.0g生物质炭于烧杯后,用玻璃棒搅拌均匀。

#### 1.2.2 钢渣

钢渣采自南昌市钢铁厂,采回的钢渣经研磨后过60目筛,混匀,备用,测得pH为9.2,总硒含量为0.42mg/kg。同时测定了钢渣中部分重金属含量Cr(131.2mg/kg)、As(22.7mg/kg)、Cd(0.18mg/kg)、Hg(1.20mg/kg)和Pb(33.2mg/kg)几种重金属含量值均在《肥料中砷、镉、铅、铬、汞生态指标》(GB/T 23349—2009)的限定值内(Cr:500mg/kg、As:50mg/kg、Cd:10mg/kg、Hg:5mg/kg和Pb:200mg/kg),因此,本实验所选钢渣可适用于土壤中。土壤改良时钢渣用量一般低于10g/kg<sup>[14]</sup>。实验设置3个不同梯度的钢渣添加量,即1、5、15g/kg(记为处理6~8)。实验时每个塑料烧杯中加入100g过10目筛的供试土壤,同时分别加入0.1、0.5、1.5g钢渣至烧杯后,用玻璃棒充分搅拌均匀。

本实验以0.1g钢渣+2g生物质炭记为处理4,设一组空白对照,记为处理BK/5,每个处理重复3次。

### 1.3 土培试验

称取100g供试土壤于塑料烧杯中,添加改良剂并搅拌均匀后,用量筒量取约34mL纯水缓慢加入

烧杯中,边加边搅拌,使供试土壤被均匀润湿,盖上塑料薄膜保湿。实验过程中观察土壤湿度,若发现土壤有变干的趋势及时加入适量纯水,每隔三天用称量法补充蒸发损失的水分,保证土壤润湿度,同时每隔7d搅拌一次土壤,并及时去除长出的杂草。土培实验持续时间为60d,于15、45和60d各取样一次。取出的土壤置于干燥通风处自然风干后研磨过20目和60目,装袋备用。

#### 1.4 盆栽实验

试验于2018年9月15号在南昌大学环境楼楼顶进行。共设置7个处理和一个空白,试验用盆为聚乙烯材质(直径18cm,高19.5cm),每盆装土1kg。将小白菜种子在35℃催芽处理,小白菜种子发芽后的第二天将其移至土壤中种植,每盆定植5株,定期浇纯水,直至成熟。为防止试验过程中蔬菜营养匮乏,实验开始时每盆施加定量的有机肥作为底肥,每天定期浇水,保持土壤湿度,蔬菜生长中期追加底肥,蔬菜整个生长成熟期为45d,成熟后采摘蔬菜可食用部分,同时将收获小白菜后的土壤风干磨碎过筛待测其中的有效态硒。

#### 1.5 土壤各项指标测试方法

土壤pH的测定参照标准NY/T 1377—2007《土壤的测定》:称取过20目筛的土壤样品10.0g于离心管中,按土液比1:2.5浸提,剧烈振荡5min后静置1~3h,测定土壤上清液pH,测定精度为0.01。

土壤有机质的测定参照标准HJ 615—2011《土壤有机碳的测定 重铬酸钾氧化-分光光度法》:称取一定试样于100mL具塞消解管中,分别加入0.1g硫酸汞和5.0mL重铬酸钾溶液,再加入7.5mL硫酸,摇匀后置于135℃恒温加热器中开塞加热半小时,冷却定容。

阳离子交换量(CEC)的测定由江西索立德环保

服务有限公司完成,分析方法参照LY/T 1243—1999《森林土壤 阳离子交换量的测定》。

有效态硒的提取和测定:称取过20目筛土壤3.000g,用0.7mol/L磷酸二氢钾溶液浸提土壤有效态硒<sup>[18]</sup>,提取的上清液经消化处理用AFS-8230双通道原子荧光光度计测定硒含量<sup>[18-19]</sup>。

#### 1.6 分析质量控制

样品分析时,插入土壤标准物质(GBW07408)进行质控分析。经检查,样品重复率为100%,合格率为100%,分析精密度、报出率、检出限及相关参数均达到了《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》(DZ/T 0258—2014)的要求。分析结果满足本次研究所需。

## 2 两种改良剂对硒有效性的影响及作用机理

### 2.1 不同处理对土壤硒有效性的影响

土壤中硒的生物有效性与其不同的赋存形态有关。由硒在土壤中不同形态的分布结果(表1)可知,土壤中的硒主要以有机结合态和残渣态形式存在,水溶态和可交换态硒含量较少。添加改良剂后供试土壤中硒的形态分布比例有所不同,其中以水溶态和有机结合态硒的变化最显著。土壤中施加生物质炭后,水溶态硒的含量随时间推移逐渐减少,有机结合态硒含量则有所上升;添加钢渣后,水溶态和可交换态硒含量有所增加,有机结合态硒含量呈下降的趋势。铁锰氧化物结合态和残渣态在此次实验中基本没什么变化。由本实验结果可发现,当土壤环境变化时,有机结合态硒易转化为其他形态硒。

土壤中有效硒含量的高低可以反映植物对硒的吸收富集水平,是决定植物中硒含量的主要因素。本实验中,不同处理下土壤有效硒含量呈现不同的变化趋势(图1)。土壤中施加生物质炭后,有效硒

表1 土壤中各形态硒含量

Table 1 Content of different Se species in soil

处理 编号	水溶态硒(μg/kg)			可交换态硒(μg/kg)			铁锰氧化物结合态硒(μg/kg)			有机结合态硒(μg/kg)			残渣态硒(μg/kg)		
	15d	45d	60d	15d	45d	60d	15d	45d	60d	15d	45d	60d	15d	45d	60d
1	10.52	9.78	8.61	10.76	10.07	9.33	64.88	65.52	66.01	302.64	305.16	309.78	331.20	329.47	326.47
2	10.46	9.64	8.46	10.98	9.69	9.01	64.62	65.72	65.72	303.62	307.20	310.98	330.32	327.75	326.03
3	9.70	8.80	8.02	9.40	9.16	8.62	64.30	65.26	66.98	305.84	311.98	314.64	330.76	324.80	321.94
4	10.42	8.43	7.11	10.49	7.74	8.16	65.27	64.89	64.26	311.06	319.85	315.84	322.76	319.10	324.64
5	10.05	10.09	10.54	10.21	9.54	9.12	64.02	65.17	66.73	312.58	308.76	306.22	323.15	326.43	327.69
6	10.72	11.52	12.01	9.81	10.58	10.03	68.96	67.82	67.02	308.50	304.22	302.32	322.01	325.86	325.67
7	12.06	15.46	17.78	10.63	11.39	12.55	75.40	74.72	74.16	309.20	305.74	301.76	322.70	322.67	326.75
8	15.16	19.04	23.64	12.82	15.40	17.34	75.48	74.56	74.68	307.00	302.30	295.08	327.53	328.68	329.26

含量随培养时间的推移呈逐渐下降的趋势,且当生物质炭添加量增大时,有效硒含量的下降幅度也越大。土培实验结束后,处理1~4中土壤有效硒含量降幅分别为8.4%、10.8%、15.1%和23.6%(图1a)。而谢珊妮等<sup>[9]</sup>用秸秆生物质炭改良强酸性高硒茶园土壤有效硒时发现,土壤中施加秸秆生物质炭,60d后土壤有效硒提升的幅度大于土培至30d土壤有效硒含量提高的幅度,与本文得出的结论不一致。这可能与秸秆生物质炭的原料、制备条件、添加量及土壤本身的性质有关。制备生物质炭的原料和条件不同时,其孔隙结构、比表面积、pH等理化性质也将表现出显著的差异<sup>[20]</sup>。赵世翔等<sup>[21]</sup>研究发现制备生物质炭的温度从300℃升高至600℃时,其比表面积可由2.35m<sup>2</sup>/g增大到107.76m<sup>2</sup>/g,当制备温度由500℃增至600℃时,生物质炭的比表面积增幅可达到942.17%。生物质炭表面碱性官能团的含量随制备温度的升高而增大<sup>[22]</sup>。本试验所用生物质炭pH为10.5,制备温度为550℃,而谢珊妮等<sup>[9]</sup>所用秸秆生物质炭pH为7.87。本研究土培实验结束后,空白组与添加3g/kg生物质炭实验组中土壤富里酸含量分别为4.43g/kg和7.08g/kg,胡敏酸含量分别为6.21g/kg和11.32g/kg。富里酸能提高土壤中硒的有效性,而胡敏酸则会降低土壤有效硒含量<sup>[23]</sup>。因此,本实验使用的生物质炭对硒主要表现为固定吸附性。

土壤中添加钢渣后,有效硒含量有不同程度的提升,且有效硒含量随土培时间的推移有逐渐上升的趋势。土培实验结束时,处理7和8中有效硒含量分别为27.41μg/kg、38.98μg/kg,与对照组(19.36μg/kg)相比(图1b),有效硒含量是对照组的1.4倍和2.0倍。

实验发现,处理4中有效硒含量降得最多。由土壤中各形态含量结果表明,添加钢渣后可在一定程度上提高土壤中水溶态硒的含量,但因生物质炭具有较强的吸附固定作用,导致处理4土壤中的有效硒含量下降较快。

## 2.2 不同处理影响土壤中硒有效性的机理

### 2.2.1 改良剂对土壤pH的影响

本实验的供试土壤为酸性土,经生物质炭调控处理后,pH值均有所上升,且随生物质炭添加量的增加而增大(图2a)。土培实验进行至60d时,添加生物质炭使土壤pH提升了0.1~0.61个单位不等。生物质炭是目前运用最广的一种土壤改良剂,其表面含有大量羟基、酚羟基等含氧官能团,这些官

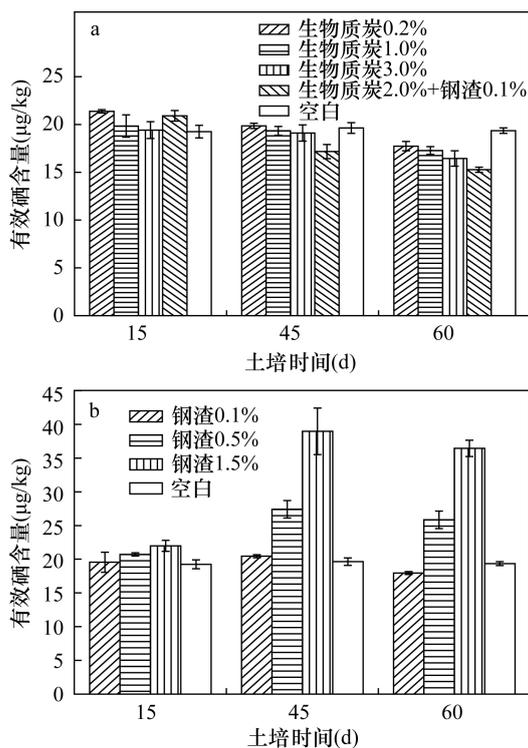


图1 两种改良剂对土壤有效硒的调控效果

Fig. 1 Effect of two amendments on the available selenium in soil

能团与H<sup>+</sup>发生络合反应,达到中和土壤酸度的目的<sup>[24]</sup>,另一方面生物质炭中丰富的钾、钠盐基离子通过吸持作用降低了土壤中交换性H<sup>+</sup>、Al<sup>3+</sup>的水平<sup>[25]</sup>。

添加钢渣后,土壤pH也呈上升趋势(图2b),pH上升程度与钢渣的添加量成正比。土培实验结束时,与对照组相比,土壤pH提升幅度为0.38~3.79个单位。相比于生物质炭,钢渣对土壤pH的改良效果更显著。钢渣中Ca、Mg、Si等多种氧化物经水解后释放出的OH<sup>-</sup>中和了土壤中的H<sup>+</sup>,同时含硅物质会抑制Al<sup>3+</sup>的活性<sup>[26]</sup>。由图2b中可以看出,当钢渣施用量超过0.5%时,将大幅度改善土壤pH。

pH是影响土壤理化性质最重要的参数之一。pH通过改变土壤表面电荷进而影响土壤对硒的吸附能力<sup>[9]</sup>,pH升高时,土壤表面的OH<sup>-</sup>也有所增加,释放出的OH<sup>-</sup>会竞争土壤表面的吸附位点,降低铁铝氧化物对硒的吸附能力<sup>[27]</sup>,从而提高有效硒含量。实验结果表明,两种改良剂均能提高土壤pH。由添加生物质炭和钢渣后土壤pH随时间的动态变化(图2)可以看出,土壤pH随土培时间呈下降的趋势。培养结束时,以空白对照组为例,pH由

初始 4.24 降为 4.07,下降了 0.17 个单位。这主要是因为表层耕地土壤中有一定量的铵态氮残留,土培过程中因铵态氮逐渐发生硝化反应释放出的质子导致 pH 下降<sup>[28]</sup>。图 3 结果显示,土培实验结束后空白组与添加改良剂的土壤中铵态氮含量低于硝态氮,土培过程中土壤的硝化反应导致了 pH 下降。

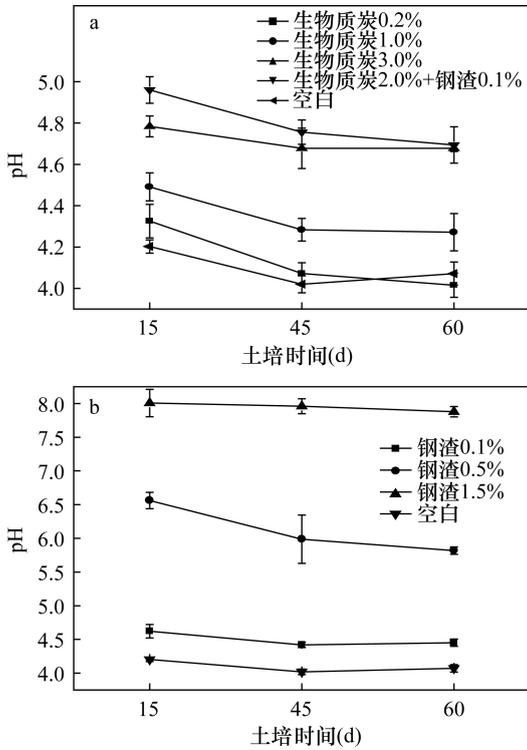


图 2 两种改良剂对土壤 pH 的影响  
Fig. 2 Effect of two amendents addition on soil pH

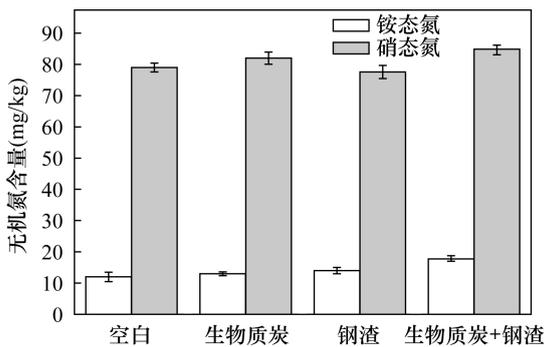


图 3 土培结束时土壤铵态氮和硝态氮含量  
Fig. 3 Content of soil  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and  $\text{NO}_3^-$  in soil at the end of incubation

### 2.2.2 改良剂对土壤有机质和 CEC 的影响

土壤有效硒受土壤总硒、pH 和 Eh、化学矿物组

成、有机质、阳离子交换量、土壤黏粒、土壤中离子竞争等因素的影响。本研究中,改良剂施入土壤后有机质含量变化(表 2)显示,添加少量生物质炭对土壤有机质的影响并不明显,当添加量较大时,土壤有机质含量有所上升,且有机质含量随生物质炭施加量的增加明显增大。而钢渣对土壤有机质的影响并不显著。在改善土壤有机质方面,生物质炭中含有较高的碳,其自身缓慢的分解有利于土壤腐植质的形成<sup>[29]</sup>,从而可显著提高土壤有机质含量。因钢渣自身存在的特性,钢渣施加进土壤后,对土壤有机质基本无显著影响。

有机质对土壤中硒的吸附作用由有机质的组分和量所决定,并对硒的影响表现出双重性:一方面与有机质结合的硒经矿化作用可转变为亚硒酸等可溶性硒释放到土壤中<sup>[30]</sup>,提升土壤中可溶性硒的含量,另一方面有机质具有较强的固定性,会降低土壤有效硒含量<sup>[2]</sup>。研究表明有机质对硒的影响主要表现为固定作用<sup>[31]</sup>。

土壤 CEC 是土壤主要理化性质之一,不同土壤中 CEC 含量也不同,其主要受 pH、土壤质地和有机质含量的影响<sup>[3]</sup>。本实验中添加少量生物质炭、钢渣对土壤 CEC 的影响都较小,但随两种改良剂添加量的增大,土壤 CEC 也随之增大,且钢渣的影响效果明显高于生物质炭(表 2)。王文艳等<sup>[32]</sup>发现 pH 对 CEC 的贡献最为显著,且土壤 pH 与 CEC 具有显著的正相关关系。因此,钢渣在提高土壤 pH 时,也将明显增加 CEC 的含量。CEC 含量越高时,土壤表面所含的负电荷量也越多,对硒的吸附量则会降低,有利于提高土壤有效硒的含量。

表 2 不同处理对土壤性质的影响

Table 2 Effects of different treatments on soil properties

处理方法	有机质含量(%)			CEC(mol/kg)		
	15d	45d	60d	15d	45d	60d
生物质炭 0.2%	3.21	3.11	2.63	4.0	3.9	3.7
生物质炭 1.0%	3.38	3.22	2.77	4.2	4.2	4.3
生物质炭 3.0%	5.52	4.81	4.54	4.8	4.5	4.3
生物质炭 2% + 钢渣 0.1%	3.30	3.12	2.66	4.4	4.2	4.3
空白对照组 (BK)	3.28	2.80	2.66	4.2	4.1	4.0
钢渣 0.1%	3.23	3.00	2.80	4.0	4.2	3.9
钢渣 0.5%	3.09	2.82	2.79	6.7	6.8	6.2
钢渣 1.5%	2.90	2.86	2.79	9.8	9.0	8.8

为明确土壤理化性质与有效硒之间的关系,本文对两者进行了相关性分析。结果表明,有效硒含量与 pH、CEC 呈显著正相关,相关系数分别为 0.787

和 0.780 ( $p < 0.01$ ), 与有机质呈负相关, 相关系数为 0.382 ( $p < 0.05$ )。

### 3 两种改良剂提高土壤有效硒的效果评价

不同处理下, 土壤有效硒含量在土培试验过程中表现出一定的差异性(图4)。土培结束后, 8个处理中, 除处理7、8外, 其他处理对土壤有效硒的影响较为相近, 均呈下降的趋势。添加生物质炭可在一定程度上提高土壤 pH, 但本实验所用生物质炭的孔隙度和比表面积较大, 且生物质炭施入土壤后会提高土壤中富里酸的含量。因此, 随生物质炭添加量的增加, 土壤中有效硒含量降得也越快。钢渣能有效改善土壤酸碱度, 有助于硒元素的活化, 并提高土壤中硒的有效性。实验结果显示, 当钢渣添加量为 0.5% 和 1.5% 时, 土壤 pH 值分别为 5.82 和 7.88, 而大部分植物生长的最适 pH 在 5.0~7.0 之间。本实验的两种调控材料, 生物质炭主要表现为固定性, 不适合用来改善研究区土壤中硒的有效性, 钢渣作为调控材料, 能显著提高研究区土壤有效硒含量, 但应根据植物生长条件来确定钢渣的添加量。本文建议钢渣使用量不应超过 1.5%。

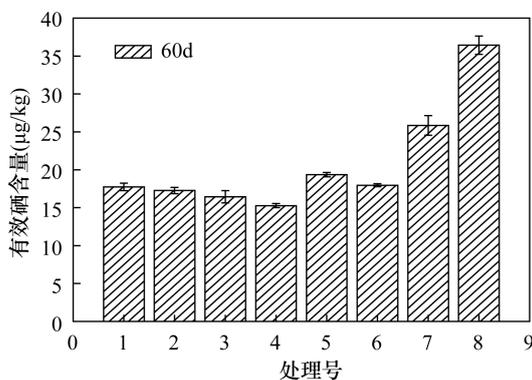


图4 不同处理对土壤有效硒的改良效果

Fig. 4 Effect of different treatments on the available selenium in soil

### 4 盆栽小白菜富硒试验

蔬菜是人类生存所必需的食物, 不同蔬菜品种对硒的吸收性能也不同。十字花科植物对硒有较强的富集能力, 而小白菜是常见的十字花科蔬菜, 是人体补硒的理想硒源, 且其生长周期短、适于四季栽种, 有利于大规模生产。本文盆栽实验以小白菜为试验蔬菜, 研究两种改良剂不同添加量对小白菜富硒的影响效果。

土壤有效态硒的含量是影响植物中硒含量的主要因素, 且土壤中化学有效态硒含量的增加可直接影响硒的生物有效性<sup>[9]</sup>。盆栽试验结果(图5)显示, 与对照组相比, 处理7和8中小白菜硒含量增幅分别为 30.0% 和 58.8%, 处理1、处理2和处理6中虽均未提高小白菜硒含量, 但种植出的小白菜基本仍属于富硒蔬菜(富硒蔬菜的硒含量  $\geq 0.01$  mg/kg), 而处理3和处理4中的小白菜硒含量都低于 0.01 mg/kg。本实验中, 碱性改良剂钢渣通过提高土壤硒的有效性, 进而提高了小白菜中硒的含量, 可使当地的硒资源得到充分利用, 为进一步开发富硒蔬菜提供了依据。

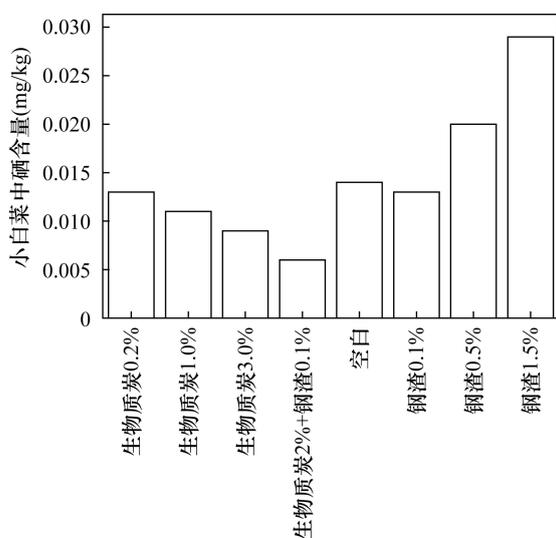


图5 不同处理下小白菜可食用部分硒含量

Fig. 5 Se content in edible parts of Chinese cabbage under different treatments

### 5 结论

利用改良剂调控富硒土壤中硒生物有效性的土培模拟实验结果表明, 施加生物质炭和钢渣均能提高酸性土壤 pH 和 CEC 含量, 并能在一定程度上提升硒的有效性, 但施加生物质炭后土壤中有机质含量显著增加, 且有机质对硒表现为固定作用, 导致土壤有效硒含量总体偏低, 而钢渣对 pH 和 CEC 的影响效果更明显, 并能显著活化硒的有效性。因此, 钢渣较生物质炭更适合作为该地区土壤硒有效性的调控材料。根据蔬菜生长的 pH 环境, 本研究建议钢渣的使用量不要超过 1.5%。

土壤自身具有吸附-解吸作用, 并含有多种还原性微生物, 能将土壤中有效硒含量维持在一定的水平。土壤中添加钢渣后可将有效硒含量提升至一

定程度,同时促进作物对硒的吸收利用,有利于富硒农产品的生产。但改良剂对土壤有效硒活化的机理及其变化规律十分复杂,今后还需进一步研究。

## 6 参考文献

- [1] 李杰,刘久臣,汤奇峰,等. 川西高原地区水体中硒含量及分布特征研究[J]. 岩矿测试,2018,37(2):183-192.  
Li J, Liu J C, Tang Q F, et al. Study of the content and distribution of selenium in water samples from the Western Sichuan Plateau and the incidence of Kaschin Beck disease[J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(2):183-192.
- [2] 王锐,余涛,杨忠芳,等. 富硒土壤硒生物有效性及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(7):1647-1654.  
Wang R, Yu T, Yang Z F, et al. Bioavailability of soil selenium and its influencing factors in selenium-enriched soil[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(7):1647-1654.
- [3] 曹容浩. 福建省龙海市表层土壤硒含量及影响因素研究[J]. 岩矿测试,2017,36(3):282-288.  
Cao R H. Study on selenium content of surface soils in Longhai, Fujian and its influencing factors[J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, 36(3):282-288.
- [4] 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.  
Yang Q, Hou Q Y, Gu Q B, et al. Study of geochemical characteristics and influencing factors of soil selenium[J]. Geoscience, 2016, 30(2):455-462.
- [5] Rayman M P, Sargent M, Infante H G. Food-chain selenium and human health; Emphasis on intake[J]. The British Journal of Nutrition, 2008, 100(2). DOI: 10.1017/S0007114508922522.
- [6] 郭文慧,刘庆,史衍玺,等. 施硒对紫甘薯硒素累积及产量和品质的影响研究[J]. 中国粮油学报,2016,31(9):31-37.  
Guo W H, Liu Q, Shi Y X, et al. Effects of applying selenium on the accumulation of selenium, yield, and quality of purple sweetpotato[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(9):31-37.
- [7] 穆婷婷,杜慧玲,景小兰,等. 外源硒对谷子产量因子及硒含量的影响[J]. 作物杂志,2017,14(1):73-78.  
Mu T T, Du H L, Jing X L, et al. Effects of exogenous selenium on yield components and selenium content in grain of foxtail millet[J]. Crops, 2017, 14(1):73-78.
- [8] 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 B T, He L, Jiang G J, 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.
- [9] 谢珊妮,宗良纲,张琪惠,等. 3种改良剂对强酸性高硒茶园土壤硒有效性调控效果与机理[J]. 茶叶科学,2017,37(3):299-307.  
Xie S N, Zong L G, Zhang Q H, et al. Effects of three amendments on selenium availability of highly acidic and Se-rich soil in tea garden and their relative mechanisms[J]. Journal of Tea Science, 2017, 37(3):299-307.
- [10] 廖桥,彭博,李碧雄. 炉渣建材资源化利用现状[J]. 重庆建筑,2018,17(3):53-57.  
Liao Q, Peng B, Li B X. A review of resource utilization of slag building material[J]. Chongqing Architecture, 2018, 17(3):53-57.
- [11] 杨慧,刘立晶,刘忠军,等. 我国农田化肥施用现状分析及建议[J]. 农机化研究,2014,36(9):260-264.  
Yang H, Liu L J, Liu Z J, et al. Analysis and suggestions of agricultural fertilizer application in China[J]. Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(9):260-264.
- [12] 王怀臣,冯雷雨,陈银广. 废物资源化制备生物质炭及其应用的研究进展[J]. 化工进展,2012,31(4):907-914.  
Wang H C, Feng L Y, Chen Y G. Advances in biochar production from wastes and its applications[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(4):907-914.
- [13] 王晨晔,陈艳,郭占成,等. 以钢渣为原料合成Ca-Mg-Al-Fe层状双金属氢氧化物及其对甲基橙的吸附[J]. 过程工程学报,2018,18(3):570-574.  
Wang C Y, Chen Y, Guo Z C, et al. Preparation of Ca-Mg-Al-Fe layered double hydroxides using steel-making slag as raw material and its adsorption to methyl orange[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2018, 18(3):570-574.
- [14] 邓腾灏博,谷海红,仇荣亮. 钢渣施用对多金属复合污染土壤的改良效果及水稻吸收重金属的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(3):455-460.  
Deng Teng H B, Gu H H, Qiu R L. Ameliorative effects of steel slag application on multi-metal contaminated soil and heavy metal uptake of rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(3):455-460.
- [15] 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 X, Zhou Y, Wu W L, et al. Selenium content of farmland soils and their relationship with main soil properties in Fengcheng, Jiangxi [J]. Journal of Agro - Environment Science, 2018, 37(6): 1177 - 1183.
- [16] 李家熙,张光弟. 人体硒缺乏与过剩的地球化学环境特征及其预测[M]. 北京:地质出版社,2000.
- Li J X, Zhang G D. Characteristics and Prediction of Human Selenium Deficiency and Excess Geochemical Environment[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.
- [17] 诸旭东,宗良纲,马迅,等. 内源调控与外源补硒对红壤中硒有效性及水稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 398 - 404.
- Zhu X D, Zong L G, Ma X, et al. Effects of endogenous and exogenous regulation on effectiveness of selenium and rice yield in selenium enriched soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(2): 398 - 404.
- [18] 瞿建国,徐伯兴,龚书椿. 连续浸提技术测定土壤和沉积物中硒的形态[J]. 环境化学, 1997, 16(3): 277 - 283.
- Qu J G, Xu B X, Gong S C. Sequential extraction techniques for determination of selenium speciation in soils and sediments[J]. Environmental Chemistry, 1997, 16(3): 277 - 283.
- [19] 贺攀红,杨珍,荣耀,等. 氢化物发生-电感耦合等离子体发射光谱法测定铀矿地质样品中痕量硒[J]. 岩矿测试, 2016, 35(2): 139 - 144.
- He P H, Yang Z, Rong Y, et al. Determination of trace selenium in uranium - bearing geological samples by hydride generation - inductively coupled plasma - optimal emission spectrometry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35(2): 139 - 144.
- [20] 陈再明,陈宝梁,周丹丹. 水稻秸秆生物碳的结构特征及其对有机污染物的吸附性能[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 9 - 19.
- Chen Z M, Chen B L, Zhou D D. Composition and sorption properties of rice - straw derived biochars[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1): 9 - 19.
- [21] 赵世翔,于小玲,李忠徽,等. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 333 - 342.
- Zhao S X, Yu X L, Li Z H, et al. Effects of biochar pyrolyzed at varying temperatures on soil organic carbon and its components: Influence on the soil active organic carbon [J]. Environmental Science, 2017, 38(1): 333 - 342.
- [22] 赵世翔,于小玲,李忠徽,等. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤腐殖物质组成及性质的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(2): 769 - 782.
- Zhao S X, Yu X L, Li Z H, et al. Effects of biochar pyrolyzed at varying temperatures on soil organic carbon and its components: Influence on the composition and properties of humic substances [J]. Environmental Science, 2017, 38(2): 769 - 782.
- [23] Wang D, Xue M Y, Wang Y K, et al. Effects of straw amendment on selenium aging in soils mechanism and influential factors[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657(20): 871 - 881.
- [24] 袁金华,徐仁扣. 生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4): 541 - 547.
- Yuan J H, Xu R K. Research progress of amelioration effects of biochars on acid soils[J]. Soil, 2012, 44(4): 541 - 547.
- [25] 韩学博. 不同生物质炭对植烟土壤理化性状、重金属生物有效性及烤烟生长的影响[D]. 临安:浙江农林大学, 2017.
- Han X B. Effect of Different Biochars on Soil Physical and Chemical Properties, Heavy Metal Bioavailability and Tobacco Growth [D]. Lin'an: Zhejiang Agriculture & Forestry University, 2017.
- [26] 朱李俊,刘国威,王磊,等. 钢渣对稀土矿区酸性土壤的改良效果[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(6): 159 - 162.
- Zhu L J, Liu G W, Wang L, et al. Improvement effect of steel slag on acid soil in rare earth mining area [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(6): 159 - 162.
- [27] Kamei - Ishikawa N, Tagami K, Uchida S. Sorption kinetics of selenium on humic acid [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2007, 274(3): 555 - 561.
- [28] 卢再亮,李九玉,徐仁扣. 钢渣与生物质炭配合施用对红壤酸度的改良效果[J]. 土壤, 2013, 45(4): 722 - 726.
- Lu Z L, Li J Y, Xu R K. Amelioration effects of steel slag combined with biochar on red soil acidity[J]. Soil, 2013, 45(4): 722 - 726.
- [29] 花莉,金素素,唐志刚. 生物质炭输入对土壤CO<sub>2</sub>释放影响的研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(11): 6501 - 6503.
- Hua L, Jin S S, Tang Z G. Effect of bio - charcoal on release of carbon dioxide in soil [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(11): 6501 - 6503.
- [30] 何振立,杨肖娥,祝军,等. 中国几种土壤中的有机态

硒及其分布特征[J]. 环境科学学报,1993,13(3): 281-287.

He Z L, Yang X E, Zhu J, et al. Organic selenium and its distribution in soils [J]. Journal of Environmental Science, 1993, 13(3): 281-287.

[31] 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 H B, Luo Y M, Wu L H, et al. Hong Kong soil

researches II. Distribution and content of selenium in soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 404-410.

[32] 王文艳, 张丽萍, 刘俏. 黄土高原小流域土壤阳离子交换量分布特征及影响因子[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 123-127.

Wang W Y, Zhang L P, Liu Q. Distribution and affecting factors of soil cation exchange capacity in watershed of the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 123-127.

## Effect and Mechanism of Biomass Carbon and Steel Slag as Ameliorants on Soil Selenium Availability in a Typical Se-rich Area of Fengcheng City, Jiangxi Province

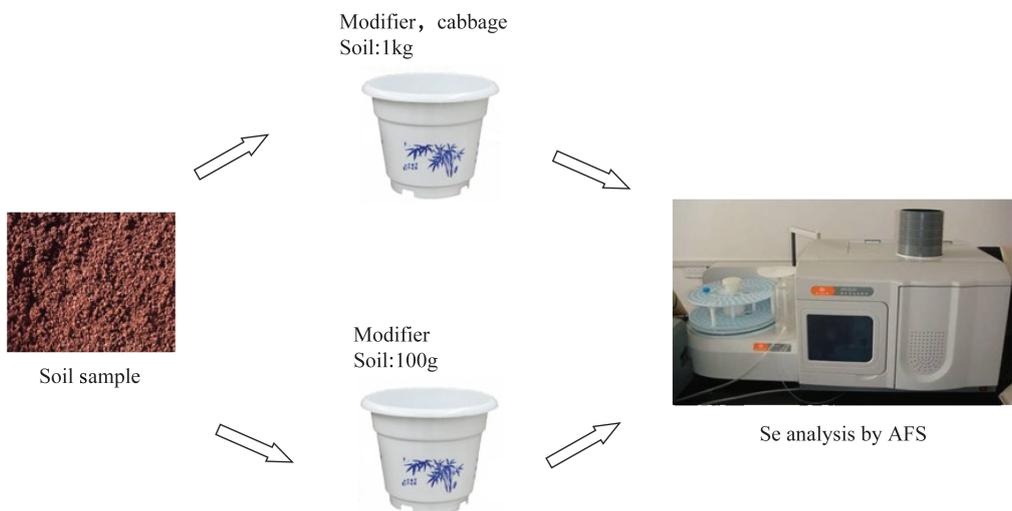
KUANG Qin<sup>1</sup>, WU Shan<sup>1</sup>, HUANG Ting<sup>1</sup>, WU Dai-she<sup>1\*</sup>, XIANG Jing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education; School of Resource, Environment and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Wuhan Zongdy Green Environmental Protection Technology Co., LTD, Wuhan 430074, China)

### HIGHLIGHTS

- (1) The effect of physical and chemical properties of soil (pH, organic and cation exchange capacity) on soil selenium availability was revealed
- (2) The effects of two modifiers on the selenium availability in selenium-rich red soils were compared.
- (3) Steel slag can effectively improve the availability of selenium in soils in the study area, while biochar was not suitable as an adjusting material for selenium availability in soils in the region.



**ABSTRACT**

**BACKGROUND:** The total selenium content in the selenium – rich red soils in Fengcheng City of Jiangxi Province was relatively high, but the available selenium content directly absorbed and utilized by plants was low. The bioavailability of selenium in soils is a key factor affecting selenium in crops.

**OBJECTIVES:** To find safe and effective ameliorants for improving the availability of selenium in selenium – rich soils.

**METHODS:** Biomass carbon and steel slag were used as modifiers, and 8 different experiments were set up. Through indoor soil test and pot experiment, the content of available selenium in the selenium – rich red soils in Fengcheng was determined by atomic fluorescence spectrometry, and the regulation effect of two kinds of ameliorants on available selenium under different treatment levels was investigated.

**RESULTS:** The results of the soil tests showed that different amounts of biomass carbon and steel slag can increase the soil pH in the study area by 0.1 – 3.79 units. The results of elemental speciation analysis indicated that the ameliorant mainly controlled the soil available selenium by affecting the organically bound selenium. The soil organic matter content increased significantly after the application of biochar in the soil, but the organic matter showed a fixed effect on selenium. The available selenium content decreased by 8.4% – 15.1%, resulted in the overall lower available selenium content in soils. The significant effect of steel slag on soil pH was beneficial to the activation of selenium in soils, and the soil available selenium content can be increased by 1.4 to 2.0 times. The results of the pot experiment showed that the selenium content of Chinese cabbage increased by more than 30% after treatment with steel slag, while the selenium content of Chinese cabbage decreased by 7.14% – 42.8% after treatment with biochar.

**CONCLUSIONS:** This study shows that biochar is not suitable for regulating the availability of selenium in the soil of the study area. Steel slag can be used as a control material for soil selenium availability in the study area, which not only realizes solid waste recycling, but also improves the availability of selenium in soil.

**KEY WORDS:** selenium – rich soil; available selenium; atomic fluorescence spectrometry; soil ameliorant; biomass carbon; steel slag