

钢渣与生物质炭配合施用对红壤酸度的改良效果^①

卢再亮^{1,2}, 李九玉^{1,2}, 徐仁扣^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 采用厌氧热解方法制备污泥生物质炭和花生秸秆炭, 研究了钢渣和生物质炭单独施用及配合施用对红壤酸度的改良效果, 结果表明, 钢渣、花生秸秆炭和污泥生物质炭均含有一定量的碱性物质, 向红壤中添加钢渣和生物质炭可以中和土壤酸度, 提高土壤 pH, 增加土壤交换性盐基阳离子含量, 降低土壤交换性铝含量。90 天培养实验结束时, 这 3 种改良剂分别使土壤 pH 相对对照提高 1.10、0.72 和 0.48。钢渣与花生秸秆炭配合施用对土壤酸度的改良效果最好, 使土壤 pH 相对对照提高 2.14, 单施污泥生物质炭的改良效果最小。钢渣和生物质炭含一定量的养分元素, 添加钢渣和生物质炭可以同时改善土壤肥力。钢渣含丰富的钙, 添加钢渣使土壤交换性钙含量增幅最大, 相对对照增加 4.5 倍; 添加花生秸秆炭使土壤交换钾增加最显著, 相对对照约增加 7 倍; 污泥生物质炭含丰富的磷, 添加污泥生物质炭使土壤有效磷增加最显著, 相对对照增加 5.4 倍。添加钢渣和 2 种生物质炭均显著提高了土壤交换性镁含量, 将钢渣与生物质炭配合施用, 土壤交换性镁含量的增幅更大。由于钢渣和 2 种生物质炭的碱含量和养分含量各有特点, 因此可以根据土壤酸度状况和养分含量选择将钢渣与不同生物质炭配合施用, 以达到既能最大限度中和土壤酸度又能补充土壤所必需养分的目的。

关键词: 钢渣; 污泥生物质炭; 花生秸秆炭; 红壤; 酸度改良

中图分类号: S153

红壤是中国南方地区的主要土壤类型, 是亚热带地区的重要土壤资源^[1]。但红壤酸性强, 其酸害和铝毒以及较低的肥力水平导致这类土壤上农作物生长不良或产量较低^[2], 因此高酸度使红壤在亚热带农林生产中的作用不能得到充分的发挥。改良红壤酸度的主要措施是施用石灰性物质^[3-4], 石灰性物质能有效中和土壤酸度, 提高土壤交换性钙含量。但由于石灰的溶解度很小, 其改良效果主要局限于土壤表层, 长期施用还可能造成土壤板结及钙、镁养分失衡。近年来研究表明, 农作物秸秆等农业有机废弃物在厌氧条件下低温热解制备的生物质炭一般呈碱性, 具有较高的 pH^[5], 可以改良酸性土壤^[6-7]。而且生物质炭还可改善土壤的理化性质和肥力水平^[6]。一些碱性工业废弃物也可用于改良酸性土壤^[8-9]。钢渣是炼钢工业产生的废渣, 钢渣呈碱性且富含硅, 也是一种潜在的土壤改良剂, 既可提高土壤 pH 还可同时改善土壤硅素营养^[10-11]。如将无机工业废弃物与生物质炭配合施用, 既可提高对酸性土壤的改良效果, 又可同时改善

土壤的理化性状, 但目前文献中还没有钢渣与生物质炭配合施用对土壤酸度改良效果的报道。本文研究了钢渣与生物质炭配合施用对红壤酸度的改良效果, 研究结果可为新的土壤改良方法的建立提供参考。

1 材料和方法

1.1 土壤和改良剂

土壤采自安徽宣城市郎溪县, 发育于第四纪红色黏土, 为 0~15 cm 的耕层红壤。土壤样品经自然风干后研磨过 0.25 mm 孔径筛备用。供试土壤的基本性质见表 1。

将粉碎过 1 mm 筛的花生秸秆装满陶瓷坩埚, 盖好盖子后置于马弗炉中, 350℃ 焖烧 225 min 后关闭电源, 自然冷却至室温^[12], 将生物质炭取出, 磨细过 0.25 mm 筛后备用。所用污泥生物质炭的原料取自南京市城东污水处理厂, 新鲜污泥风干后磨细过 0.25 mm 筛, 然后用与花生秸秆炭相似制备方法在 500℃ 下制成污泥生物质炭。所用钢渣由江苏博际集团提供, 将钢渣磨细过 0.25 mm 筛备用。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41230855)资助。

* 通讯作者(rkxu@issas.ac.cn)

作者简介: 卢再亮(1986—), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 主要研究方向为污泥生物质炭的农业利用及其环境风险评价。E-mail: wo94renou74@163.com

将钢渣和生物质炭按 1 : 5 的固/液比制成悬液,用 pH 复合电极测定悬液 pH。用酸碱滴定法测定钢渣和生物质炭的含碱量^[5],将 1 g 钢渣或生物质炭与 15 ml 去离子水混匀制成悬液,然后用 0.1 mol/L HCl 将悬液 pH 滴定至 2.0,用自动电位滴定仪指示滴定终点。生物质炭

的总碳和总氮含量用碳/氮分析仪测定。生物质炭和钢渣的可溶性盐基阳离子用去离子水提取,它们的交换性盐基阳离子用乙酸铵溶液提取,提取液中钙和镁用原子吸收分光光度法测定,钾和钠用火焰光度法测定。所得生物质炭的基本性质列于表 2,钢渣的基本性质列于表 3。

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Basic properties of soil used

pH	有机质	交换性 H ⁺	交换性铝	交换性钙	交换性镁	交换性钾	交换性钠
	(g/kg)	(mmol/kg)					
4.17	15.75	3.4	42.3	10.88	3.74	4.16	1.62

表 2 两种生物质炭基本性质
Table 2 Basic properties of biochars

生物质炭	热解温度()	产率(%)	pH	含碱量	可溶性盐基离子	交换性盐基离子	总碳	总氮	总磷	碳/氮
				(cmol/kg)						
花生秸秆炭	350	39.4	8.88	299	34	80	410.0	25.0	4.0	17
污泥生物质炭	500	52.0	6.59	185	11	13	111.0	14.0	30.0	7.9

表 3 钢渣基本性质
Table 3 Basic properties of steel slag

处理	pH	含碱量	可溶性钙	可溶性镁	可溶性钾	交换性钙	交换性镁	交换性钾
(cmol/kg)								
钢渣	11.23	1 399	281.19	8.71	6.67	98.03	3.80	1.3

1.2 实验设计

培养实验共设置对照、钢渣、花生秸秆炭、污泥生物质炭、钢渣+花生秸秆炭、钢渣+污泥生物质炭 6 个处理,钢渣的加入量为 3 g/kg,花生秸秆炭和污泥炭的加入量为 20 g/kg。称取 200 g 风干土于塑料烧杯中,按上述比例添加钢渣、生物质炭和两种混合物,将土壤与这些改良剂充分混合,然后用去离子水将土壤含水量调节至田间持水量的 70%,用保鲜膜封口,并在保鲜膜中间留 1 小孔,以便气体交换并减少水分损失。将塑料杯置于 25 的恒温培养箱中恒温培养,每隔 3 天补充水分以保持土壤含水量恒定。在培养实验开始后的第 3、6、10、20、30、41、50、60、75 和 90 天取新鲜土样测定 pH。每个处理设置 3 次重复。培养实验持续 90 天,实验结束后将土壤样品取出风干、研磨过 0.25 mm 孔径筛供土壤其他性质测定。

1.3 测定项目和方法

将土壤样品按 1 : 2.5 的土/液比与去离子水充分混合,放置 30 min 后用复合 pH 电极测定土壤 pH。土壤交换性酸用 1 mol/L 氯化钾溶液浸提,用碱滴定法测定^[13]。土壤有效磷用盐酸-氟化铵浸提,钼蓝比色法测定。土壤铵态氮和硝态氮用 2 mol/L 氯化钾溶液浸提^[13],提取液中的铵态氮和硝态氮用流动分析

仪测定。土壤交换性盐基用 1 mol/L 乙酸铵溶液提取,提取液中钙和镁用原子吸收分光光度法测定,钾和钠用火焰光度法测定^[13]。

2 结果与讨论

2.1 添加钢渣和生物质炭对土壤 pH 的影响

添加钢渣和生物质炭后红壤 pH 的动态变化如图 1 所示。不加钢渣和生物质炭的对照体系,土壤 pH 随着培养时间的延长呈现逐渐下降的趋势,90 天培养结束时,土壤 pH 由起始的 4.12 下降至 3.78,下降

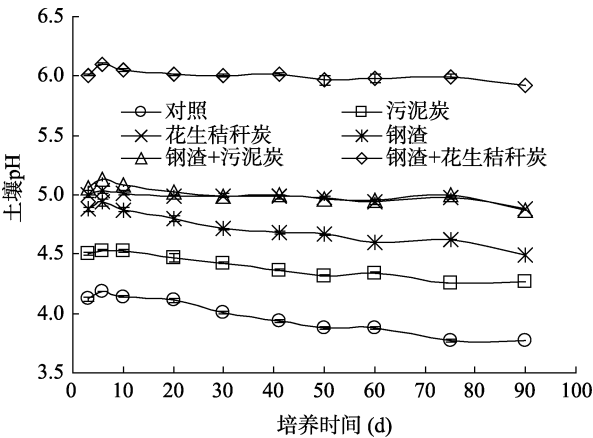


图 1 培养期间土壤 pH 的动态变化
Fig. 1 Changes of soil pH during incubation

0.34 个单位。这主要是因为土壤采自农田耕层,土壤中残留一定量的铵态氮,培养过程中这些铵态氮逐渐发生硝化反应,释放的质子导致土壤 pH 下降。图 2 中的结果证明了这一点,培养实验结束时土壤铵态氮处于很低水平,而硝态氮含量处于较高水平,说明铵态氮通过硝化反应转变为硝态氮。添加钢渣和生物质炭处理,其铵态氮和硝态氮也有相似的变化趋势(图 2),导致培养过程中土壤 pH 也略有下降(图 1)。

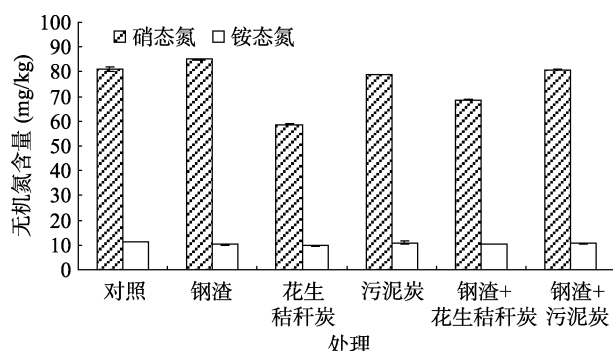


图 2 培养实验结束时土壤铵态氮和硝态氮含量

Fig. 2 Contents of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$ at end of incubation

与对照相比,添加钢渣和生物质炭均不同程度提高了土壤 pH。当钢渣和生物质炭单独施用,它们对土壤酸度改良效果的大小顺序为:花生秸秆炭>钢渣>污泥生物炭,与它们所含碱性物质的贡献相一致(表 2、表 3)。说明当钢渣和生物质炭添加到红壤中,钢渣和生物质炭中的碱性物质释放到土壤中,中和土壤酸度,导致土壤 pH 升高。培养实验结束时,土壤 pH 相对对照分别提高 1.10、0.72 和 0.48,因此花生秸秆炭和钢渣对红壤酸度有很好的改良效果,污泥生物炭有较好的改良效果。将钢渣与两种生物质炭配合施用,其改良效果好于钢渣和生物质炭单独施用。当钢渣与污泥生物炭配合施用,培养实验结束时土壤 pH 相对对照提高 1.2,略高于钢渣和污泥生物炭单独施用 pH 的提高值之和,说明两者配合施用的改良效果为各自改良效果的加和。但当钢渣与花生秸秆炭配合施用,培养实验结束时土壤 pH 相对对照提高 2.14,比钢渣和花生秸秆炭单独施用 pH 的提高值之和 0.32,两者配合施用的改良效果显著高于各自单独施用的效果之和,说明当钢渣和秸秆生物炭配合施用对各自所含碱性物质的释放具有促进作用,但这种相互促进的机制目前还不清楚,有待进一步研究。

对改良后土壤 pH 的变化量与改良剂含碱量进行了相关分析,发现两者之间呈很好的直线相关关系(图 3),进一步说明改良剂的含碱量是决定其改良效

果的关键因素。在已知土壤 pH 缓冲容量并确定改良所要达到的目标土壤 pH 后,可根据改良剂的含碱量计算改良剂需要量^[9]。

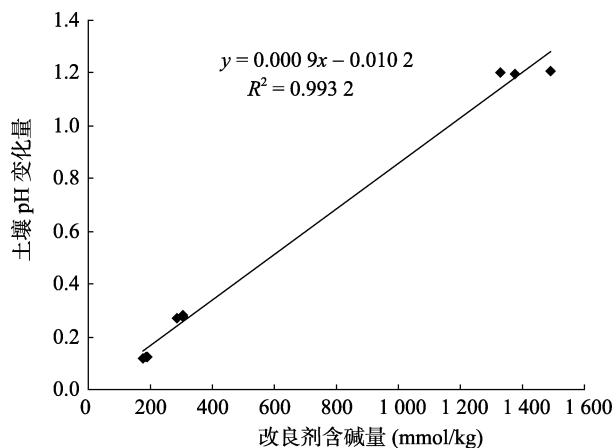


图 3 土壤改良剂含碱量与土壤 pH 值变化量线性关系

Fig. 3 Linear relationship between alkalinity of soil ameliorants and change of soil pH

2.2 添加钢渣和生物质炭对土壤交换性盐基阳离子和交换性酸的影响

表 4 列出了添加钢渣和生物质炭对土壤交换性酸和交换性盐基阳离子的影响,结果表明添加钢渣和生物质炭对土壤交换性 H^+ 的影响很小,因为交换性 H^+ 在交换性酸中所占比例很小,土壤交换性酸主要以交换性铝存在。添加钢渣和生物质炭使土壤交换性铝含量显著减小,钢渣与花生秸秆炭配合施用导致土壤交换性铝的降幅最大,其次为钢渣与污泥炭配合施用处理和花生秸秆炭单独施用处理,污泥炭单独施用导致土壤交换性铝的降幅最小。不同处理交换性铝下降幅度的大小顺序与土壤 pH 升高的顺序一致,说明添加钢渣和生物质炭中和了土壤酸度,促进土壤交换性铝的水解和向铝羟基化合物沉淀的转化。

表 4 结果表明,添加钢渣和生物质炭显著提高了土壤交换性盐基阳离子的数量,钢渣与花生秸秆炭配合施用导致土壤交换性盐基阳离子的增幅最大,钢渣与污泥生物炭配合施用及钢渣和花生秸秆炭单独施用的效果相近,污泥炭单独施用导致土壤交换性盐基阳离子的增加幅度最小,因为污泥炭可溶性盐基和交换性盐基阳离子含量低于钢渣和花生秸秆炭。从表 4 还可发现,土壤交换性铝与交换性盐基阳离子存在此消彼涨的关系,说明土壤交换性盐基阳离子含量增加也是导致土壤交换性铝减小的原因。当比较不同交换性盐基阳离子的变化时,可以发现,由于钢渣含大量钙,添加钢渣及将钢渣与花生秸秆炭和污泥生物炭配合施用均导致土壤交换性钙含量大幅增加,与对照相比土壤交换性钙提高 4~5 倍。添加花生秸秆炭和

表 4 添加改良剂对土壤交换性盐基离子和交换性酸的影响
Table 4 Effects of ameliorants incorporated on soil exchangeable base cations and exchangeable acidity

处理	交换性钾	交换性钠	交换性钙	交换性镁	交换性盐基总量	交换性氢	交换性铝
	(mmol/kg)					(cmol/kg)	
对照	3.4 c	1.1 a	9.2 d	2.7 e	16.3 d	0.22 a	4.82 a
钢渣	3.4 c	1.4 a	50.3 b	9.0 c	66.8 b	0.11 b	1.4 c
花生秸秆炭	26.7 a	1.4 a	25.4 c	9.3 c	62.8 b	0.11 b	0.99 d
污泥炭	4.4 b	1.7 a	20.6 c	6.4 d	33.2 c	0.11 b	3.28 b
钢渣+花生秸秆炭	25.9 a	1.4 a	56.0 a	13.9 a	96.2 a	0.05 c	0.00 f
钢渣+污泥炭	3.7b c	1.1 a	51.6 ab	11.3 b	67.7 b	0.13 b	0.72 e

注：同一列数据小写字母不同表示处理间差异达到 $P<0.05$ 显著水平。

污泥炭也使土壤交换钙含量显著提高,但增加幅度低于添加钢渣处理。添加花生秸秆炭使土壤交换性钾显著增加,钢渣与花生秸秆炭配合施用也有相似的变化趋势。添加钢渣和 2 种生物质炭均使土壤交换性镁含量显著增加,将钢渣与花生秸秆炭和污泥炭配合施用效果更佳。

2.3 添加钢渣和生物质炭对土壤有效态磷的影响

添加钢渣和生物质炭对土壤有效磷的影响如图 4 所示,结果表明添加钢渣对土壤有效磷含量没有影响,但添加花生秸秆炭使土壤有效磷含量显著增加,相对对照增加 42%。添加污泥生物质炭使土壤有效磷含量大幅度增加,为对照处理的 6.4 倍。但当钢渣与污泥生物质炭配合施用时,与单施污泥炭相比,土壤有效磷含量的增幅有所减小,为对照处理的 5.2 倍,说明添加钢渣使土壤有效磷含量有所降低,这与钢渣中铁氧化物对磷的专性吸附和对磷的固定有关。添加 2 种生物质炭使土壤有效磷含量提高的幅度与生物质炭总磷含量大小一致,污泥生物质炭总磷含量为花生秸秆炭总磷含量的 7.5 倍,这是添加污泥生物质炭使土壤有效磷含量的增幅大于添加花生秸秆炭处理的主要原因。

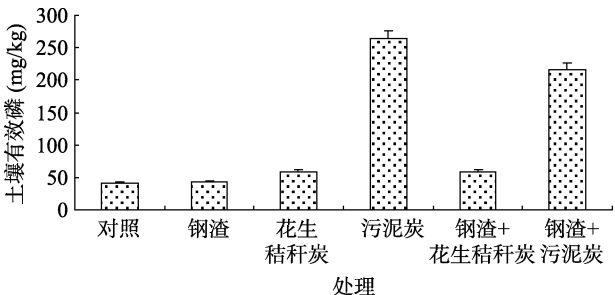


图 4 培养实验结束时土壤有效磷的含量

Fig. 4 Contents of available phosphorus in soil at the end of incubation

3 结论

钢渣、花生秸秆炭和污泥生物质炭均含有一定量的碱性物质,向红壤中添加钢渣和生物质炭可以中和

土壤酸度,提高土壤 pH,增加土壤交换性盐基阳离子含量,降低土壤交换性铝含量。钢渣与花生秸秆炭配合施用对土壤酸度的改良效果最好,单施污泥生物质炭的改良效果最小。钢渣含丰富的钙,添加钢渣使土壤交换性钙含量增幅最大,添加花生秸秆炭使土壤交换钾增加最显著,污泥生物质炭含丰富的磷,添加污泥生物质炭使土壤有效磷增加最显著。添加钢渣和 2 种生物质炭均显著提高了土壤交换性镁含量,将钢渣与生物质炭配合施用,土壤交换性镁含量的增幅更大。由于钢渣和 2 种生物质炭的碱含量和养分含量各有特点,因此可以根据土壤酸度状况和养分含量选择将钢渣与不同生物质炭配合施用,以达到既能最大限度中和土壤酸度又能补充土壤所必需养分的目的。

参考文献：

[1] 李庆逵. 中国红壤[M]. 北京: 科学出版社, 1983

[2] 张桃林. 中国红壤退化机制与防治[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999

[3] Adams F. Soil Acidity and Liming[M]. 2nd Edition. Agronomy Monograph 12. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America and Soil Science Society of America, 1984

[4] 王宁, 李九玉, 徐仁扣. 土壤酸化及酸性土壤的改良和管理[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(23): 48-51

[5] Yuan JH, Xu RK, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 3 488-3 497

[6] 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

[7] Yuan JH, Xu RK. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(1): 110-115

[8] 李九玉, 王宁, 徐仁扣. 工业副产品对红壤酸度改良的研究[J]. 土壤, 2009, 41(6): 932-939

[9] Li JY, Wang N, Xu RK, Tiwari D. Potential of industrial byproducts in ameliorating acidity and aluminum toxicity of soils under tea plantation[J]. Pedosphere, 2010, 20(5): 645-654

- [10] 臧惠林. 钢渣在我国南方土壤施用效果的初步研究[J]. 土壤, 1987, 19(2): 299–303
- [11] 刘鸣达, 张玉龙, 王耀晶, 杨丹. 施用钢渣对水稻土 pH、水溶态硅动态及水稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(1): 47–50
- [12] 佟雪娇, 李九玉, 姜军, 徐仁扣. 添加秸秆生物质炭对红壤吸附 Cu(II)的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(5): 37–41
- [13] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999

Amelioration Effects of Steel Slag Combined with Biochar on Red Soil Acidity

LU Zai-liang^{1,2}, LI Jiu-yu^{1,2}, XU Ren-kou^{1*}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China; 2 *University of Chinese Academy of Sciences*, Beijing 100049, China)

Abstract: Biochars were prepared from wastewater sludge and peanut straw using a pyrolysis method. Amelioration effects of the biochars, steel slag and steel slag combined with biochars on red soil acidity were investigated. Results indicated that steel slag and the biochars contained alkaline substances and incorporation of steel slag and biochars neutralized soil acidity, increased soil pH and soil exchangeable base cations and decreased soil exchangeable aluminum. At the end of 90d incubation, soil pH increased by 1.10, 0.72 and 0.48 units due to the incorporation of peanut straw char, steel slag and wastewater sludge char. Steel slag combined with peanut straw char had greatest ameliorating effect on soil acidity, and led to soil pH increased by 2.14 units, while the amelioration of the biochar generated from wastewater sludge on soil acidity was lowest. Steel slag and biochars contain some nutrients and addition of steel slag and biochar can improve soil fertility. Among the treatments of steel slag, peanut straw char, biochar from wastewater sludge, incorporation of steel slag obtained the greatest increase in soil exchangeable Ca^{2+} due to the highest content of Ca in it, and soil exchangeable Ca^{2+} was 4.5 fold higher than that of control. Incorporation of peanut straw char increased soil exchangeable K^{+} greatly, and soil exchangeable K^{+} was 7 folds higher than that of control. Incorporation of biochar from wastewater sludge led to greatest increase in soil available phosphorus due to the highest content of P in it and soil available phosphorus was 5.4 folds higher than that of control. Both slag and biochars increased soil exchangeable Mg^{2+} significantly, and higher increase in soil exchangeable Mg^{2+} was obtained by combination of steel slag with biochars. Therefore, incorporation of steel slag combined with biochars not only neutralized soil acidity, but also increased contents of some soil nutrients because of variation of steel slag and biochars in alkalinity and nutrient contents.

Key words: Steel slag, Biochar from wastewater sludge, Peanut straw char, Red soil, Amelioration of soil acidity