

范弟武, 李秀芝, 黄 斌, 等. 稻壳炭施加对设施土壤的改良效果[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2): 345-350.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.02.017

稻壳炭施加对设施土壤的改良效果

范弟武^{1,2}, 李秀芝², 黄 斌², 韩建刚^{1,2}

(1. 南京林业大学 江苏省南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学生物与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 向已利用 10 年的设施土壤中施加 0 g/kg、4 g/kg、8 g/kg、10 g/kg、15 g/kg、20 g/kg、40 g/kg、60 g/kg、80 g/kg 稻壳炭进行生菜盆栽试验, 以期明确稻壳炭施加对设施土壤的改良效果。结果表明: 与对照组相比, 施加稻壳炭 80 g/kg 后, 土壤 pH 增加 11.2%, 可有效改善土壤酸化问题; 40 g/kg、60 g/kg、80 g/kg 稻壳炭施加后, 土壤电导率(EC) 分别增加 34.4%、34.7%、37.1%; 稻壳炭添加量为 8 g/kg、10 g/kg、15 g/kg、20 g/kg、40 g/kg、60 g/kg 时, 生菜地上部分鲜质量分别增加 59.2%、55.3%、68.1%、91.2%、59.9%、108.7%, 说明施加 8~15 g/kg 稻壳炭同样有很好的增产效果; 施加 4 g/kg 稻壳炭时, 生菜中全氮含量增加了 22.1%, 效果明显优于高施加量处理。因此, 综合稻壳炭对设施土壤的改良效果及经济效益等考虑, 在改良设施土壤时, 以施加 8~10 g/kg 的稻壳炭为宜。

关键词: 稻壳炭; 设施土壤; 生菜

中图分类号: S156 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)02-0345-06

Improving effects of rice husk char on greenhouse soil

FAN Di-wu^{1,2}, LI Xiu-zhi², HUANG Bin², HAN Jian-gang^{1,2}

(1. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
2. College of Biology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: A lettuce pot experiment was carried out by mixing 0 g/kg, 4 g/kg, 8 g/kg, 10 g/kg, 15 g/kg, 20 g/kg, 40 g/kg, 60 g/kg, 80 g/kg of rice husk char with greenhouse soil which has been used about ten years to define the improvement effects of rice husk char. Compared with the control (no rice husk char), applying 80 g/kg of rice husk char resulted in an increase of soil pH by 11.2%, which effectively improved the soil acidification. High-dose (40 g/kg, 60 g/kg and 80 g/kg) of rice husk char increased the electrical conductivity of soil by 34.4%, 34.7% and 37.1% respectively. The above-ground fresh weight of lettuce were boosted by 59.2%, 55.3%, 68.1%, 91.2%, 59.9% and 108.7% respectively by application of 8 g/kg, 10 g/kg, 15 g/kg, 20 g/kg, 40 g/kg, and 60 g/kg rice husk char, indicating that low doses (8—15 g/kg) of rice husk char achieved a yield-raising effect. The total nitrogen content in lettuce was increased by 22.1% at low dose (4 g/kg), which was the highest increment in all treatments. Considering improving effects and economic efficiency, rice husk char at 8—10 g/kg is favorable for greenhouse soil.

Key words: rice husk char; greenhouse soil; lettuce

收稿日期: 2015-07-29

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20131424); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 南京林业大学 2015 年度大学生实践创新训练计划项目(2015sjcx189)

作者简介: 范弟武(1992-), 男, 安徽宣城人, 硕士研究生, 主要从事环境生态学方面研究, (Tel) 15050558396; (E-mail) 709719226@qq.com

通讯作者: 韩建刚, (Tel) 15805163075; (E-mail) hanjiangang76@126.com

近 30 年来, 中国设施农业得以迅速发展, 并成为世界上设施栽培面积最大的国家^[1]。由于长年利用, 中国设施农业土壤出现酸化、盐渍化和板结等问题, 这些都严重影响设施农业的可持续发展^[2]。很多研究者对土壤改良做了卓有成效的研究。李尚科等^[3]

向设施菜田次生盐渍土壤中施加有机肥和秸秆,发现能有效改良土壤。钱晓雍等^[4]通过向设施土壤中添加 5 种不同有机废料,显著降低了土壤中盐分含量。

生物炭(Biochar)是指生物有机质在缺氧或低氧环境中经过裂解后形成的固体产物^[5-6]。生物炭具有疏松多孔、比表面积大等特性^[7],可改善土壤微生物环境^[8],提高作物产量^[9-14]。王红兰等^[15]研究发现施加生物炭能够减少地表径流及土壤侵蚀的发生。房彬等^[16]的研究结果表明,生物炭作为土壤改良剂施用于农田能有效改良土壤和提高耕作性能。这些研究多集中于生物炭对土壤特性和作物生长的影响,而生物炭添加剂量对土壤和作物影响的报道却较少。Ellen 等^[14]研究发现,与对照组相比,低剂量生物炭施加可以促进作物的生长。侯艳伟等^[17]的研究结果表明,1%的生物炭施加量对油菜产量无显著影响,而 5%的施加量反而使油菜产量降低了 42.9%。Amit 等^[18]发现施加低剂量生物炭可提高作物生长能力并抑制作物立枯病菌,但较高的添加量会增加作物的发病率。

本研究通过盆栽生菜试验,向已利用 10 年的设施土壤中添加不同剂量稻壳炭,观测土壤 pH、电导率(EC)、碱解氮和有效磷含量以及作物生物量、全氮和全磷含量等的变化,研究低剂量稻壳炭对设施土壤的改良效果。

1 材料与方法

1.1 生物炭

稻壳炭市购,自然风干后过 2 mm 筛。称取 1.000 g 稻壳炭,加入 50 ml 蒸馏水,在 25 ℃条件下振荡 2 h,静置 24 h 后,测定水溶液中离子的浓度。将稻壳炭于 105 ℃下烘 2 h 后,分析其挥发分含量、固定碳含量、灰分含量及 pH 值。稻壳炭的基本理化特性为: NH_4^+ 0.427 mg/L、 NO_3^- 0.296 mg/L、 NO_2^- 0.169 mg/L、 PO_4^{3-} 3.610 mg/L、挥发分 5.2%、固定碳 52.6%、灰分 42.2%、pH 9.98。

1.2 盆栽试验

所用设施土壤为江苏省蔬菜研究所已轮作 10 年的大棚土壤,存在酸化、盐渍化等问题。土壤过 2 cm 筛,便于盆栽种植生菜。试验前的设施土壤 pH 为 4.84,土壤电导率为 0.664 ms/cm,土壤中碱解氮和有效磷含量分别为 523.3 mg/kg 和 233.6 mg/kg。

生菜种植周期为 2015 年 4 月 12 日至 5 月 26

日,试验在江苏省农业科学院南京溧水白马实验基地温室大棚内进行。试验共设置 9 个稻壳炭添加量处理:0 g/kg(对照)、4 g/kg、8 g/kg、10 g/kg、15 g/kg、20 g/kg、40 g/kg、60 g/kg、80 g/kg,每盆设施土壤质量 6.0 kg,稻壳炭与设施土壤充分混合,每个处理重复 5 次。生菜幼苗购于江苏省农业科学院蔬菜研究所。试验期间,定期测定土壤含水量、土温和生菜光合速率,定期浇水,浇水时应防止水分从盆底流出,避免盐分因淋洗而流失。整个生长过程不施用任何肥料及杀虫剂。45 d 后收获生菜,去净根部土壤后分别测定生菜地上和地下部分鲜质量。生菜植株在 60 ℃烘箱内烘干后粉碎,并过 1 mm 筛用于分析生菜中全氮和全磷含量。

1.3 测定和分析

分别采集试验第 1 d(4 月 12 日)和试验最后 1 d(5 月 26 日)2 批次土样,经自然风干后,分别过筛(1 mm),封装备用,用于测定相关指标。生物炭硝态氮、亚硝态氮和铵态氮含量通过流动分析仪 AutoAnalyzer3-AA3(英国 Seal Analytical 公司和德国 BRAN+LUEBBE 公司产品)测定,磷酸根含量采用钼酸铵分光光度法测定。土壤 pH 值和 EC 值分别用 pH 计(雷磁 PHS-3C 型)和电导仪测定,按 1:5 的土:水比例对土样进行前处理。碱解氮含量采用碱解-扩散法测定,有效磷含量利用双酸浸提法测定,测定方法参照文献^[19]。

生菜全氮含量利用半微量开氏法测定,全磷含量采用紫外分光光度法测定,生菜生物量直接用分析天平称量。

数据采用 Excel 2010 和 Origin 8.0 进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同稻壳炭添加量对土壤 pH 值和电导率的影响

图 1 显示,与对照组相比,添加稻壳炭提高了土壤 pH。其中试验第 1 d(4 月 12 日)各处理(稻壳炭添加量 4 g/kg、8 g/kg、10 g/kg、15 g/kg、20 g/kg、40 g/kg、60 g/kg、80 g/kg) pH 值分别增加了 3.5%、6.2%、9.1%、11.6%、9.9%、17.4%、26.9%、27.7%,试验最后 1 d(5 月 26 日)各处理组分别增加了 1.3%、2.7%、4.4%、4.4%、2.5%、7.6%、9.3%、11.2%,可以看出土壤 pH 随着稻壳炭施加量的增加而增加。施加稻壳炭后试验第 1 d 和试验最后 1

d 土壤中土壤电导率的变化与土壤 pH 值变化不同。试验第 1 d, 各处理与对照之间土壤电导率变化不大; 试验最后 1 d, 与对照组比, EC 值随着稻壳炭添加量的增加先增加再逐渐稳定, 其中, 当添加量为

40 g/kg、60 g/kg、80 g/kg 时, 土壤电导率增加量分别为 34.4%、34.7%、37.1%。同时, 试验最后 1 d 与试验第 1 d 相比, 各处理 EC 都明显增加。

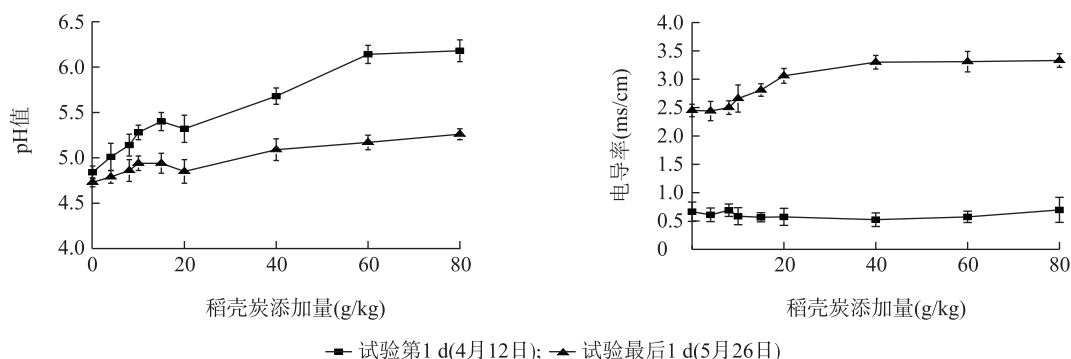


图 1 不同稻壳炭添加量对土壤 pH 值和电导率的影响

Fig.1 Effects of rice husk char application rates on soil pH value and electrical conductivity

2.2 不同稻壳炭添加量对设施土壤碱解氮和有效磷含量的影响

土壤中碱解氮和有效磷是可以直接被植物利用吸收的。从图 2 可以看出, 试验第 1 d(4 月 12 日), 当稻壳炭施加量为 0~20 g/kg 和 60~80 g/kg 时, 土壤中碱解氮含量均呈现下降趋势, 而施加量为 20~60 g/kg 时, 却呈现上升趋势, 但总体依然呈下降趋势。试验最后 1 d(5 月 26 日), 土壤中碱解氮含量也随稻壳炭施加量的增加先下降后上升, 然后再下

降, 与对照相比, 当施加量为 80 g/kg, 碱解氮减少了 63.2%。试验第 1 d(4 月 12 日), 当稻壳炭添加量为 4~15 g/kg 时, 土壤中有效磷含量明显上升, 随后随着稻壳炭添加量的增加而不断降低; 而在试验最后 1 d(5 月 26 日), 稻壳炭添加量为 4~15 g/kg 时, 土壤中有效磷含量明显上升, 添加量为 20 g/kg、40 g/kg、60 g/kg 时, 有效磷含量逐渐趋于稳定并有缓慢下降的趋势。

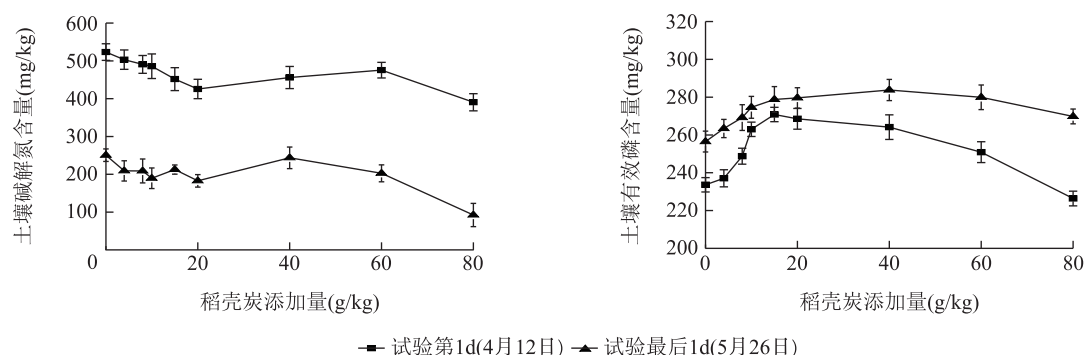


图 2 不同稻壳炭添加量对土壤碱解氮及有效磷含量的影响

Fig.2 Effects of rice husk char application rates on alkali-hydrolyzable nitrogen and available phosphorus contents in soil

2.3 不同稻壳炭添加量对生菜生物量的影响

施加稻壳炭后各处理组生菜的生物量变化如图 3 所示。与对照相比, 施加稻壳炭处理明显提高生菜地上部分鲜质量, 当稻壳炭添加量为 20 g/kg 和 60 g/kg 时, 生菜地上部分鲜质量分别增加 91.2%和

108.7%。当稻壳炭添加量为 20 g/kg 和 60 g/kg 时, 地下部分鲜质量分别增加 55.8%和 42.97%。添加稻壳炭后各个处理组的地上部分干质量均有增加, 在施加量为 20 g/kg 和 60 g/kg 时, 地上部分干质量分别增加 91.9%和 94.8%。而当稻壳炭添加

量为 60 g/kg 时,地下部分干质量较对照增加

86.0%,其他处理组增加不明显。

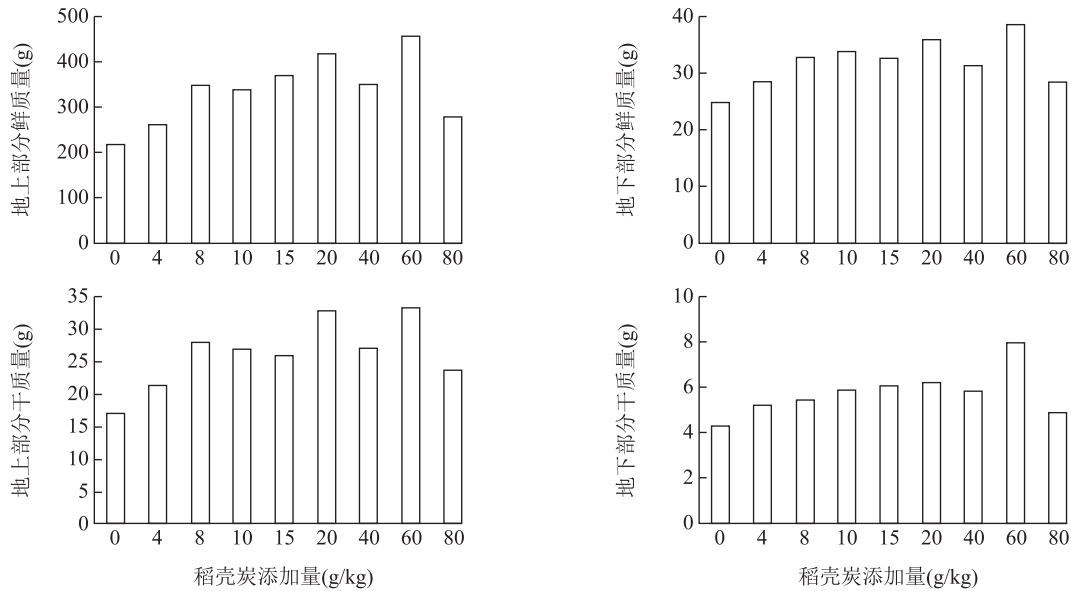


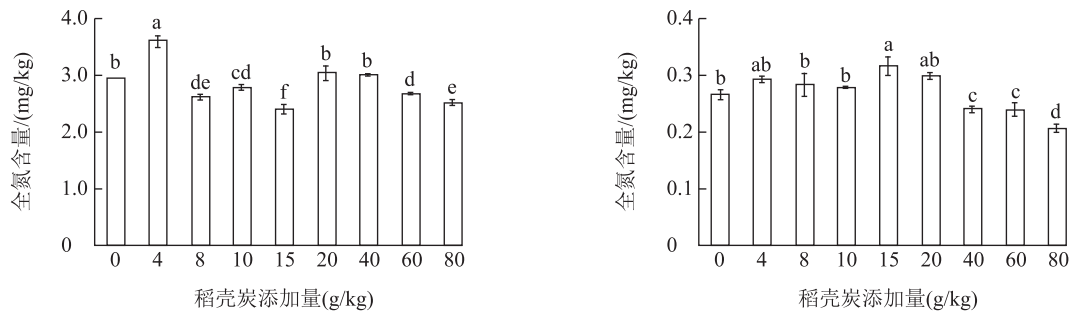
图 3 不同稻壳炭添加量对生菜地上和地下部分干、鲜质量的影响

Fig.3 Effects of rice husk char application rates on dry weight and fresh weight of above-ground and underground parts of lettuce

2.4 不同稻壳炭添加量对生菜中全氮和全磷含量的影响

全氮和全磷含量是分析作物品质的 2 个重要基础指标。施加不同剂量稻壳炭后生菜中全氮和全磷含量的变化见图 4。与对照比较,稻壳炭添加量为 4 g/kg、20 g/kg 和 40 g/kg 时,生菜中全氮含量分别增加了 22.1%、3.0%和 2.0%,而其他各剂量的稻壳炭

添加处理反而降低了生菜的全氮含量,不利于氮素积累;当添加量为 4 g/kg、8 g/kg、10 g/kg、15 g/kg 时生菜全磷增加量分别为 9.8%、6.8%、4.9%、18.9%,而当添加量继续增加时,生菜中全磷含量呈下降趋势。说明施加低剂量的稻壳炭可显著促进植物对磷的吸收,而施加高剂量的稻壳炭则会抑制植物磷的积累。



不同字母表示差异达 0.05 显著水平。

图 4 不同稻壳炭添加量对生菜全氮、全磷含量的影响

Fig.4 Effects of rice husk char application rates on total nitrogen and total phosphorus contents in lettuce

3 讨论

3.1 施加稻壳炭对设施土壤 pH 值和电导率的影响

生物炭一般呈碱性,能够提高酸性土壤的 pH

值^[5,20-21]。本试验中随着稻壳炭施加量增加,土壤 pH 值也随之升高,这与吴志丹等^[22]和袁金华等^[23]研究结果一致。在试验第 1 d 和试验最后 1 d,土壤 pH 值比对照分别增加了 26.9%和 11.2%,说明施加生物炭的初期和后期,生物炭均能很好地提高土

壤的 pH, 试验中还发现高剂量稻壳炭的施加对土壤 pH 影响更大。Zwieten 等^[24]认为稻壳炭中含有较多盐基离子, 盐基离子通过吸附作用可以降低土壤中交换性氢离子和交换性铝离子的水平, 从而升高土壤的 pH。

土壤电导率的变化规律与可溶性盐分的变化规律基本相同, 呈极显著线性关系^[3]。本研究结果表明, 施加稻壳炭可以增加土壤中的电导率, 当添加量达到 20 g/kg 时, 土壤电导率逐渐趋于稳定, 说明低剂量稻壳炭施加可有效促进土壤中可溶性盐分的生成, 高剂量施加时促进效果逐渐趋于稳定。此外, 试验最后 1 d 的土壤电导率要远高于试验第 1 d 的土壤电导率, 表明施加生物炭后, 植物和生物炭的共同作用, 可以提高设施土壤中的电导率。

3.2 施加稻壳炭对设施土壤碱解氮和有效磷含量的影响

施加稻壳炭有效地降低了设施土壤中碱解氮含量, 这与 José^[13]的研究结果一致。然而周桂玉等^[25]的研究结果表明施加生物炭可增加土壤中碱解氮含量, 尚杰等^[26]也发现施用生物炭可增加旱作农田土壤的碱解氮含量, 这与本研究结果不一致, 原因可能是所使用的生物炭及外界环境等因素不同导致的。本试验中稻壳炭促进生菜对氮素的吸收, 从而降低土壤中碱解氮含量。

施加稻壳炭后设施土壤中有效磷含量有明显增加的趋势。这是由于稻壳炭中磷含量很低, 因而能从设施土壤中吸附大量磷酸根, 减少有效磷的淋溶流失, 促进土壤有机态磷的矿化, 增加了有效磷含量; 另一方面可能是由于生物炭可作为可溶性磷酸盐和可交换磷的重要来源^[12]。Atkinson 等^[27]研究发现添加生物炭可以提高土壤中磷的有效性以及植物对磷素吸收。

3.3 设施土壤中施加稻壳炭对生菜生物量的影响

设施作物的产量是反映设施土壤修复状况的一个重要指标。前人研究结果显示, 施用生物炭可以提高玉米^[28-29]、莴苣^[30]、小麦^[31]等作物的产量。本试验结果表明, 添加生物炭有效提高了生菜产量, 施加稻壳炭可促进生菜地上部分干物质的积累, 但地下部分干物质的积累增加不显著。这可能是因为施加稻壳炭使生菜生长状态良好, 体内积累更多养分, 进而产量增加。

3.4 施加稻壳炭对生菜全氮和全磷含量的影响

施加低剂量稻壳炭, 可促进生菜对土壤中有效氮的吸收利用。与对照相比, 随着稻壳炭施加量增加, 土壤中全氮含量下降, 生菜对氮素的吸收量减少, 植物中全氮含量也随之下降。同时, 生菜产量随着稻壳炭施加量的增加呈先上升后下降的趋势, 即生菜产量与生菜中全氮和全磷含量并不呈现很好的相关性。这可能是因为生菜的生长不仅受到氮、磷营养元素的影响, 同时还会受到其他营养元素或外界条件的影响。设施作物中氮、磷养分含量不仅取决于土壤中养分情况, 而且与作物生长状况密切相关^[32]。杨峰等^[33]研究发现大豆和玉米叶片氮、磷含量及其比例之间存在显著的相关性, 特别是叶片磷含量与氮磷比相关性极显著。

总之, 施加稻壳炭可有效提高设施土壤 pH 值, 从而改善设施土壤的酸化问题。高剂量 (40~80 g/kg) 稻壳炭施加会增加设施土壤的电导率。施加 8~60 g/kg 稻壳炭能有效提高生菜地上和地下部分鲜质量, 说明稻壳炭有利于生菜的生长和干物质的积累。因此, 在确保稻壳炭对修复设施土壤及生菜产量起到积极作用的同时, 降低稻壳炭施加量可有效节约成本。建议在改良设施土壤时, 施加稻壳炭以 8~10 g/kg 为宜。

参考文献:

- [1] 朱白澍, 梁 涛. 我国设施农业土壤障碍现状[J]. 磷肥与复肥, 2010, 25(3): 73-75.
- [2] 农明英, 张乃明, 史 静, 等. 外源有机物料对次生盐渍化大棚土壤的改良效果[J]. 中国土壤与肥料, 2013(6): 5-10.
- [3] 李尚科, 沈根祥, 郭春霞, 等. 有机肥及秸秆对设施菜田次生盐渍化土壤修复效果研究[J]. 广东农业科学, 2012(2): 61-63, 73.
- [4] 钱晓雍, 沈根祥, 郭春霞, 等. 不同废弃物对设施菜地次生盐渍化土壤的修复效果[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 737-743.
- [5] HOSSAIN M K, STREZOV V, CHAN K Y, et al. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar [J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(1): 223-228.
- [6] LEHMANN J. A handful of carbon [J]. Nature, 2007, 447(7141): 143-144.
- [7] VIGER M, HANCOCK R D, MIGLIETTA F, et al. An investigation into the reactions of biochar in soil[J]. Soil Research, 2010, 48(7): 501-515.
- [8] LU H F, MUHAMMAD S L, LIU X Y. Changes in soil microbial

- community structure and enzyme activity with amendment of biochar-manure compost and pyroligneous solution in a saline soil from Central China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2015, 70: 67-76.
- [9] DAVID A R, ANDREW J C, NICHOLAS A P, et al. Algal biochar enhances the re-vegetation of stockpiled mine soils with native grass[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 165: 173-180.
- [10] MÉNDEZA A, PAZ-FERREIROB J, GILA E, et al. The effect of paper sludge and biochar addition on brown peat and coir based growing media properties[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 193: 225-230.
- [11] 徐楠楠, 林大松, 徐应明, 等. 生物炭在土壤改良和重金属污染治理中的应用[J]. *农业环境与发展*, 2013, 34(4): 29-34.
- [12] LI M, LOU Z J, WANG Y. Alkali and alkaline earth metallic (AAEM) species leaching and Cu(II) sorption by biochar[J]. *Chemosphere*, 2015, 119: 778-785.
- [13] JOSE A A, PABLO S, VIDAL B, et al. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels[J]. *Agron Sustain Dev*, 2013, 33: 475-484.
- [14] ELLEN R G, YAEL M H, MAX K, et al. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media[J]. *Plant Soil*, 2010, 337: 481-496.
- [15] 王红兰, 唐翔宇, 张 维, 等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 107-112.
- [16] 房 彬, 李心清, 赵 斌, 等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(8): 1292-1297.
- [17] 侯艳伟, 池海峰, 毕丽君. 生物炭施用对矿区污染农田土壤上油菜生长和重金属富集的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(6): 1057-1063.
- [18] AMIT K J, YIGAL E, ELLEN R G, et al. Rhizoctonia solani suppression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 69: 110-118.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 张 祥, 王 典, 姜存仓, 等. 生物炭及其对酸性土壤改良的研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(5): 997-1000.
- [21] BENJAMIN S, BALWANT S. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soil[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014(191): 99-107.
- [22] 吴志丹, 尤志明, 江福英, 等. 生物黑炭对酸化茶园土壤的改良效果[J]. *福建农业学报*, 2012, 27(2): 167-172.
- [23] 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(5): 472-476.
- [24] ZWIETEN L V, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327: 235-246.
- [25] 周桂玉, 窦 森, 刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 2075-2080.
- [26] 尚 杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3): 509-517.
- [27] ATKINSON C J, FITZGERALD J D, HIPPS N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review[J]. *Plant Soil*, 2010, 33: 1-18.
- [28] 冯爱青, 张 民, 路艳艳, 等. 控释氮用量及生物炭对玉米产量及土壤生物化学性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 159-164.
- [29] 张 娜, 李 佳, 刘学欢, 等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(8): 1569-1574.
- [30] GUNES A, INAL A, TASKIN M B, et al. Effect of phosphorus-enriched biochar and poultry manure on growth and mineral composition of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in alkaline soil[J]. *Soil Use and Management*, 2014, 6(30): 182-188.
- [31] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6534-6542.
- [32] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [33] 杨 峰, 黄 山, 崔 亮, 等. 玉米/大豆套作下作物叶片氮、磷动态特征及其相关性分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 781-789.

(责任编辑: 张震林)