

竹炭对红壤改良及青菜养分吸收、产量和品质的影响

马嘉伟¹, 胡杨勇¹, 叶正钱¹, 王旭东¹, 吴东涛¹, 单胜道^{1,2}, 王海龙¹

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 嘉兴职业技术学院, 浙江 嘉兴 314036)

摘要: 采用大田试验研究了竹炭对红壤肥力和青菜 *Brassica chinensis* 产量、品质及养分吸收的影响。试验设置 4 个处理: 处理 1 为对照(不施肥); 处理 2 为常规化肥, 用量为复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)2 000 kg·hm⁻²; 处理 3 为竹炭, 用量为 2 250 kg·hm⁻²; 处理 4 为竹炭和化肥配施, 竹炭 2 250 kg·hm⁻², 复合肥 2 000 kg·hm⁻²。结果表明: 添加竹炭可以提高土壤酸碱度(pH 值), 提升土壤有机碳质量分数($P<0.05$), 但对土壤有效氮、有效磷、有效钾无显著影响。同时, 竹炭能提高青菜产量, 与化肥配施效果更好。竹炭单施降低了青菜含氮量($P<0.05$), 与化肥配施降低了磷钾利用率($P<0.05$)。竹炭处理的植株维生素 C 质量分数得到显著提高, 但还原糖质量分数有所降低。图 1 表 4 参 20

关键词: 土壤学; 竹炭; 红壤; 有机碳; 生物碳; 青菜产量; 青菜品质

中图分类号: S154.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2013)05-0655-07

Bamboo char for soil fertility improvement and nutrient uptake, yield, and quality in *Brassica chinensis*

MA Jiawei¹, HU Yangyong¹, YE Zhengqian¹, WANG Xudong¹, WU Dongtao¹,
SHAN Shengdao^{1,2}, WANG Hailong¹

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, School of Environmental and Resource Science, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Jiaxing Vocational and Technical College, Jiaxing 314036, Zhejiang, China)

Abstract: To study the effects of bamboo char on soil fertility improvement and on nutrient uptake, yield, and quality in *Brassica chinensis*, a field trial was conducted with four treatments: 1) control(no fertilizer); 2) compound fertilizer (N:P₂O₅:K₂O = 15:15:15)2 000 kg·hm⁻²; 3) bamboo char, 2 250 kg·hm⁻²; and 4) a combination of bamboo char (2 250 kg·hm⁻²) and the compound fertilizer (2 000 kg·hm⁻²). The treatments were arranged in a randomized block design with three replications. Plant shoots and soil samples in each plot were collected at harvest. Soil pH and soil organic carbon content in the bamboo char treatment were significantly ($P<0.05$) higher than those in the compound fertilizer treatment. There were no significant differences between the concentrations of soil available N, P, and K among the treatments. Plant shoot yield and vitamin C concentration were significantly ($P<0.05$) higher than the compound fertilizer treatment. [Ch, 1 fig. 4 tab. 20 ref.]

Key words: soil science; bamboo char; red soil; soil organic carbon; biochar; *Brassica chinensis* yield; *Brassica chinensis* quality

收稿日期: 2012-11-05; 修回日期: 2012-12-12

基金项目: 浙江省科技计划项目(2010C12001); 浙江省科技创新活动新苗人才计划项目(2011R412025); 浙江农林大学研究生科研创新基金资助项目(3122013240144)

作者简介: 马嘉伟, 从事固体废弃物处理与资源化利用研究。E-mail: majiaw@139.com。通信作者: 叶正钱, 教授, 博士, 从事土壤与植物营养环境生态等研究。E-mail: yezhq@zafu.edu.cn

生物炭是生物质材料在高温缺氧环境下裂解后剩余下来的一种高度炭化的多孔物质, 具有高度的芳香环分子结构, 比一般的有机物质具更高的稳定性^[1-2]。施用生物炭被认为是把碳封存在土壤中培育高碳土壤的重要途径。农林业生产过程中产生的大量废弃物如秸秆、稻壳、畜禽粪便等都可以通过热解制成生物炭, 能在土壤中存储相当长的时间^[3]。生物炭还田是应对全球气候变化的重要途径, 同时也为废弃物的资源化循环利用提供了新的解决思路, 对减轻环境污染, 开发利用生物质资源和提高资源利用率具有重要意义。已有研究表明: 生物炭可以作为改良剂改善土壤环境, 促进植物对养分的吸收, 提高土壤肥力, 控制农田养分流失^[4-5]。生物炭施入土壤后释放矿质营养供植物吸收利用^[6], 而自身较难被分解。其次, 生物炭因为具有多孔性、较大的比表面积和电荷密度, 从而比土壤中的其他有机物质更能够吸持水分^[7]和营养元素^[8], 可以显著改良土壤结构, 提高养分可利用性, 提高作物产量^[9-10]。Chan 等^[11]研究发现生物炭可以提高氮肥利用率, 与无机肥料配施可以增加作物产量。但也有研究发现, 生物炭的施用有时候也可以导致植物生物量下降, 影响作物产量^[12]。目前, 对生物炭还田的大田试验研究, 特别是针对植株养分吸收、产量和品质的综合研究还较少。红壤是中国重要的土地资源。中国红壤分布区气候温暖, 雨水充沛, 雨热同期, 使得红壤地区耕地土壤有机质分解迅速, 有机碳积累比较困难, 影响土壤保肥能力, 继而影响作物的生长和产量。为此, 本试验开展添加生物炭改良红壤的研究, 考察生物炭施加后对土壤有机碳提高的作用效果, 并探求它对植物养分吸收与品质的影响。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验在浙江农林大学研究基地进行。该地区平均海拔为 39 m, 中亚热带季风气候, 年平均气温为 16.4 °C, 年平均日照时数 1 847.3 h, 年平均降水量 1 628.6 mm, 全年无霜期 237.0 d。供试土壤为红壤, 基本性质为: 酸碱度 pH 5.88, 碱解氮为 86.8 mg·kg⁻¹, 有效磷 12.0 mg·kg⁻¹, 速效钾 125.0 mg·kg⁻¹, 有机碳 10.6 g·kg⁻¹。供试化肥为复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)。供试生物炭为竹炭, 由竹产品加工下脚料制得, 其基本性质为: 粒径 2.0 mm, 酸碱度 pH 9.41。供试作物品种为美冠青梗菜 *Brassica chinensis*, 由浙江农林大学农场提供。该作物四季可种, 春夏播种出苗后, 一般 4 周就可以收割上市。

1.2 试验设计

1.2.1 试验 1: 竹炭对青菜生长、土壤肥力的影响(大田试验) 试验设 4 个处理: 处理 1 为对照(不施肥); 处理 2 为常规, 单施化肥, 用量为 2 000 kg·hm⁻²; 处理 3 为单施竹炭, 用量为 2 250 kg·hm⁻²; 处理 4 为竹炭加化肥配合施用, 用量为竹炭 2 250 kg·hm⁻², 化肥 2 000 kg·hm⁻²。试验面积为 9 m²·小区⁻¹, 3 次重复, 随机区组排列。所有肥料于青菜播种前作基肥施入。肥料均匀撒施后翻耕(20 cm)入土。青菜于 2011 年 7 月 11 日播种, 8 月 13 日收获, 田间管理按照常规农艺管理方法进行。

样品的采集与处理: 在青菜收获期, 在每个小区中, 避开田边 10 cm, 收获青菜地上部(可食部分), 称取鲜质量, 根据实际取样面积合算出每小区的单位面积产量。同时, 在每小区随机采取代表性植株 20 株作为植物样品, 称鲜质量并测定株高后, 用去离子水洗净, 在烘箱 105 °C 杀青, 75 °C 下烘干, 称量。将烘干植物样磨碎, 过 20 目筛, 保存, 供营养元素分析测定用。另取地上部鲜样, 取回实验室后用去离子水洗净、擦干后, 马上进行农产品品质分析。采集每个小区耕层土样(0~20 cm), 自然风干后, 研磨过筛, 储存备用。

样品的测定按照土壤农业化学分析方法^[13]进行: 植株样品用硫酸-双氧水(H₂SO₄-H₂O₂)消煮, 采用碱解扩散法测定全氮, 钒钼黄比色法测定全磷, 火焰光度计测定全钾。蔬菜品质均用新鲜蔬菜样品测定: 还原型维生素 C 采用 2, 6-二氯酚酚滴定法, 还原糖采用 Cu 还原滴定法测定。

土壤样品测定方法: 土壤 pH 值按土水比 1.0:2.5 提取、酸度计法测定; 土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定; 碱解氮采用碱解扩散法测定; 有效磷采用氟化铵-盐酸(NH₄F-HCl)浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度计法测定。

1.2.2 试验 2: 竹炭对土壤 pH 值的影响(室内培养试验) 针对红壤酸性和生物炭对提高土壤 pH 值的作用, 在上述大田试验的基础上, 开展实验室竹炭对红壤 pH 值影响的实验。取上述试验地原始空白土壤(过 2 mm 筛), 按生物炭与风干土壤质量 0, 1%, 2%, 4%, 8%, 12%, 16% 的比例进行添加, 按照

土水比 1.0:2.5 加蒸馏水，混匀。待平衡 2 h 后测定酸碱度 pH 值的变化。

1.3 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 18.0 进行数据处理，数据统计采用邓肯新复极差法 (DMRT) 进行统计分析 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤理化性质的影响

大多数植物在微酸性或中性土壤中生长良好，pH 值过低将阻碍植物的正常生长。从表 1 可以看出，空白处理(处理 1)在青菜种植前后的土壤 pH 值无明显变化。经过一季(33 d)的作物生长，单施化肥(处理 2)显著降低了土壤 pH，下降幅度达 11.5%；与化肥单施相比，单施竹炭(处理 3)则提高了土壤 pH 值，但与处理 1 没有显著差异($P>0.05$)；竹炭与化肥配施(处理 4)减缓了 pH 值下降，显著高于化肥单施(处理 2)。通过室内培养试验发现，竹炭对红壤 pH 值的作用效果与竹炭用量密切相关，当竹炭添加比例升高时，土壤 pH 值随竹炭用量的增加而显著升高(图 1)。以上表明化肥可使土壤 pH 值在较短时间内发生较大变化，而竹炭在防止土壤酸化方面有一定的效果。

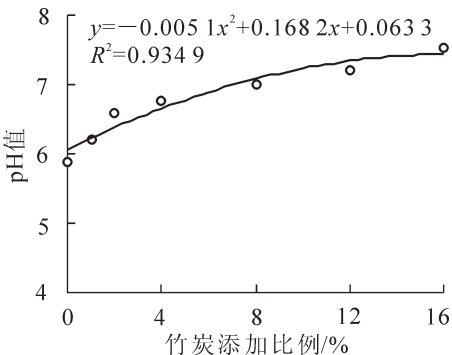


图 1 不同比例竹炭对红壤 pH 的影响

Figure 1 Change of red soil pH affected by bamboo char application

表 1 不同处理对土壤理化性质的影响

Table 1 Effect of different treatments on soil chemical properties

处理	pH 值	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	有机碳/(g·kg ⁻¹)
处理 1	5.82 a	49.47 c	12.07 b	70.00 c	5.53 b
处理 2	5.15 c	67.20 a	22.75 a	85.83 b	5.75 b
处理 3	5.99 a	47.25 c	12.07 b	80.00 b	8.19 a
处理 4	5.53 b	58.97 b	20.58 a	97.50 a	8.78 a

说明：同一列小写字母不同表示处理间差异达 0.05 显著水平。

在大田生产中，氮素营养对作物生长发育往往起着关键的作用。青菜生长速度快，生长过程中需要大量的氮。从表 1 可以看出，不同处理对土壤碱解氮的影响不同。与对照(处理 1)相比，施化肥(处理 2 和处理 4)显著提高了土壤的碱解氮质量分数，表明化肥施入土壤能迅速提高土壤中可利用氮，可满足短期内植物快速生长的需要。而单施竹炭(处理 3)与对照(处理 1)无明显差异。但是与种植青菜前相比，到青菜收割时任一处理的土壤碱解氮水平都有明显降低。

与土壤 pH 值变化趋势相同，在种植青菜前后，对照(处理 1)和单施竹炭(处理 3)对土壤有效磷水平都没有影响，而化肥对提高土壤有效磷的作用明显。到青菜收获时，施化肥的 2 个处理土壤有效磷质量分数都提高了将近 1 倍。与种植青菜前土壤相比，土壤速效钾均有不同程度的下降，以不施肥最明显。到青菜收获时，其他各处理的土壤速效钾质量分数都显著高于对照，表明竹炭、化肥的施用补充了土壤钾素，以竹炭化肥配施效果最显著。

土壤有机碳是土壤质量的重要指标之一，它可以改善土壤团聚体和稳定性、水分入渗和保持、养分吸持和交换、支持微生物活动等^[14]。到青菜收获时，单施化肥(处理 2)与对照(处理 1)之间有机碳质量分数没有差异，而添加竹炭的 2 个处理(处理 3 和处理 4)则有显著增加，其中处理 4 的土壤有机碳质量分数最高，比对照增加 58.7%，这表明施加生物炭可以快速提高土壤碳库。

2.2 不同处理对青菜生长和品质的影响

生物炭有助于改善土壤理化性质, 从而对提高作物产量具有积极作用。从表 2 可以看出: 与对照(处理 1)相比, 不同处理均能显著提高青菜产量, 其中, 以单施化肥(处理 2)效果最显著, 产量提高了 13.6 倍; 处理 4 次之, 提高 12.2 倍。这显然与试验地土壤养分水平特别是碱解氮水平($86.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)有关。单施竹炭(处理 3)也有一定增产效果, 增幅为 101.3%。说明在该试验条件下, 竹炭添加能提高青菜产量, 但其作用效果远小于化肥; 化肥能在短期内满足青菜快速生长对养分的需要, 而竹炭与化肥配施效果也较好。

表 2 不同施肥对青菜生长和品质的影响

Table 2 Effect of different treatments on plant growth and vegetable quality of *Brassica chinensis*

处理	鲜产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	株高/cm	维生素 C/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	还原糖/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
处理 1	636.7 d	6.90 c	28.09 c	12.3 a
处理 2	9 297.7 a	17.63 b	30.50 c	11.5 a
处理 3	1 281.7 c	7.58 c	75.08 a	11.8 a
处理 4	8 402.0 b	18.44 a	41.41 b	9.5 b

说明: 同一列小写字母不同表示处理间差异达 0.05 显著水平。

从表 2 可以看出: 与对照(处理 1)相比, 单施竹炭(处理 3)对青菜株高的促进作用不大(增加 9.8%), 青菜株高生长主要受化肥施用的影响, 并且化肥与竹炭配合施用对株高的促进作用最为显著(处理 4)。不同处理不仅影响青菜的生长和产量, 对青菜品质也有明显的作用。不同处理之间青菜维生素 C 质量分数产生了不同的变化, 施竹炭的 2 个处理都显著提高了青菜植株维生素 C 质量分数, 以竹炭单施(处理 3)青菜维生素 C 质量分数最高, 比对照(处理 1)提高 1.67 倍; 其次是竹炭与化肥配施(处理 4), 比对照增加 47.4%, 相比化肥单施增加 35.8%。与对照相比, 单施化肥处理的维生素 C 质量分数无明显变化。

与对照(处理 1)相比, 其他各处理的还原糖质量分数均有不同程度地下降, 其中竹炭与化肥配施(处理 4)青菜还原糖质量分数最低, 比对照(处理 1)下降 22.8%, 达到显著性差异。

2.3 不同处理对青菜养分吸收的影响

从表 3 可以看出: 不同处理对青菜的养分吸收产生了不同影响。与对照(处理 1)相比, 单施化肥处理提高了植株氮、磷、钾质量分数, 差异显著。单施竹炭(处理 3)则降低了植株氮和磷质量分数, 下降幅度分别为 22.8%(差异显著, $P < 0.05$)和 12.1%, 对钾无明显影响。竹炭与化肥配施(处理 4)的植株氮、钾质量分数为最高, 与对照差异显著, 植株磷以单施化肥的处理最高, 与氮、钾的变化略有差异。

从植物养分吸收总量可以看出: 本试验中肥料利用率偏低, 这与土壤类型及耕作季节有关。不同处理之间因为产量和营养特征的差异, 而导致小区养分吸收量差异显著, 施化肥(处理 2 和处理 4)显著提高植株养分吸收量, 以化肥单施(处理 2)最高。与对照(处理 1)相比, 竹炭单施的青菜氮磷钾吸收量也都有所提高, 其中对钾的吸收达到显著差异($P < 0.05$)。而竹炭与化肥配施(处理 4)的各养分吸收量低于化肥单施, 其中磷钾差异达到显著, 这说明竹炭施用对提高土壤养分利用率有所一定的促进作用。

表 3 不同处理对植株养分吸收影响

Table 3 Effect of different treatments on plant nutrients uptake

处理	青菜地上部养分/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)			养分吸收量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		
	全氮	全磷	全钾	全氮	全磷	全钾
处理 1	21.17 b	3.63 cd	22.50 c	1.26 b	0.22 c	1.35 d
处理 2	35.21 a	5.53 a	38.87 b	42.10 a	6.93 a	51.07 a
处理 3	16.34 c	3.19 d	22.53 c	2.33 b	0.46 c	3.28 c
处理 4	39.08 a	5.16 ab	43.70 a	36.72 a	4.91 b	41.36 b

说明: 同一列小写字母不同表示处理间差异达 0.05 显著水平。

2.4 相关分析

将植株养分含量及品质有关的指标与土壤 pH 值、碱解氮、有效磷、速效钾、有机碳进行相关分析，结果如表 4 所示。从表 4 中可知：青菜产量与土壤碱解氮、有效磷、速效钾呈极显著正相关(R^2 为别为 0.889, 0.922 和 0.741)，与土壤的 pH 值呈显著负相关($R^2=-0.855$)。维生素 C 与土壤 pH 和有机碳达到显著正相关(R^2 为别为 0.608 和 0.657)，与土壤速效养分相关性为负，但没有达到统计学显著(P 值均 >0.05)。还原糖与土壤速效钾呈极显著负相关($R^2=-0.724$)，与有机碳呈显著负相关($R^2=-0.577$)，植株中养分含量(全氮、全磷、全钾)与土壤中的碱解氮、有效磷、速效钾的相关性达显著或极显著水平，与土壤 pH 的相关性达显著负相关。说明本试验中，土壤酸碱度能显著影响植株养分含量和作物产量，有机碳质量分数对作物品质有显著影响。

表 4 不同因素之间的相关分析结果
Table 4 Correlation analysis between the different parameters

项目	产量	维生素 C	还原糖	全氮	全磷	全钾
pH	-0.855**	0.608*	0.421	-0.827**	-0.873**	-0.759**
碱解氮	0.889**	-0.531	-0.299	0.804**	0.879**	0.760**
有效磷	0.922**	-0.415	-0.515	0.861**	0.908**	0.845**
速效钾	0.741**	0.075	-0.724**	0.706*	0.585*	0.758**
有机碳	0.114	0.657*	-0.577*	0.118	-0.103	0.265

说明：** $r_{0.01}=0.708$ ；** $r_{0.05}=0.576$ 。

3 结论与讨论

生物炭可显著改变土壤理化性质，这与其本身特性有关。生物炭一般呈碱性，施加在土壤中可以降低土壤交换性酸的数量，提高土壤 pH 值^[15]。生物炭富含芳香烃、羧基等基团，可增加土壤离子交换位点，土壤吸持容量及供给可交换养分能力得到提高，炭对阳离子的吸附作用提高了土壤的保肥持肥能力，促进了植物对养分的吸收。生物炭含有可溶性养分，起着肥料的作用，施入土壤后可提高可利用养分水平，有效调节土壤氮、磷、钾等营养元素循环。同时，生物炭的孔隙结构及吸附作用使其成为土壤微生物的良好栖息环境，Graber 等^[16]研究发现施用生物炭丰富了微生物群落，提高环境系统生物量，增强作物抵抗病虫害的能力。

本研究表明：竹炭提高土壤 pH 值的作用大小与其用量有关，土壤 pH 值随竹炭用量的增加而明显升高，这说明竹炭对改良酸性红壤有重要意义。在本试验条件下，虽然大田竹炭用量较小(2 250 kg·hm⁻²)，对提高土壤 pH 值的效果不显著，但是，添加竹炭的处理(处理 3 和处理 4)显著增加了土壤有机碳质量分数，尤其是与化肥配施效果更佳，这可能是因为施入土壤中的竹炭改良了土壤结构，而化肥则通过促进作物生长，进而影响作物根系活力，增加了根系分泌物。

与对照(处理 1)相比，施加竹炭的青菜产量显著提高，与 Grossman 等^[17]研究结果一致，表明在肥力较低的土壤上施炭可提高作物产量。但显然以竹炭与化肥配施更接近实际增产期望，这是由生物炭和肥料的互补或协同作用引起的，生物炭通过对土壤物理、化学性质及微生物活性改善的间接作用，能够延长肥料养分的释放期，同时，肥料消除了生物炭养分不足的缺陷。这个结果暗示，在土壤肥力较高水平下，减少一定化肥用量，同时添加生物炭可以促进产量提高，这有待于进一步的试验来证实。

对于土壤肥力较低的土壤来说，化肥显然可以迅速增加土壤可利用养分含量，以满足植株生长的需求。在本试验中，不同施肥对土壤速效养分影响不同，进而影响植物的营养状况。单施竹炭虽然促进了青菜的生长和养分的吸收，但是青菜植株养分含量较低，特别是氮含量，比对照(处理 1)还低；氮磷钾含量远远低于施化肥的 2 个处理。表明竹炭处理的养分供应不够，因而株高和产量远低于有化肥的 2 个处理。张晗芝等^[18]在研究生物炭对玉米 *Zea mays* 养分吸收时发现，在石灰性土壤(pH 8.0)上，生物炭的施入抑制了玉米幼苗的株高生长(播种后 1 个月)，但随着玉米的生长发育，生物炭的抑制作用逐渐消失，到收获时(播种后 60 d)生物炭对玉米植株干质量和氮、磷 养分的吸收没有促进作用，原因可能与主要

与土壤性质有关。但是竹炭与化肥配施对肥料利用率有影响,降低了植物养分的吸收,特别是磷钾。这与 Yan 等^[12]的研究结果类似。该研究表明:施用竹炭后加剧了植物磷素缺乏,可能与竹炭的吸附固定有关。通过相关分析可发现,青菜产量、植株氮磷钾质量分数及土壤速效氮磷钾养分之间呈显著或极显著相关。这说明本试验地土壤肥力较低,青菜生长受养分制约,施用化肥对青菜的生长作用显著。

施竹炭对提高植株维生素 C 质量分数效果显著,但还原糖都呈现出下降趋势,这可能是因为竹炭对土壤理化性状的改善影响了青菜作物根系生长和活力,从而影响植物对养分的吸收作用,进而影响植株体内碳水化合物的合成与分配^[19]。这也与气候、农艺条件有关。相关分析结果显示,还原糖与植株氮磷钾质量分数都达到显著负相关,可能是在化肥影响下,植株的快速生长,形成了相对“稀释”作用^[20]。

综上所述,竹炭可以显著改善青菜作物的营养状况,增加青菜作物产量,同时也提高了维生素 C 质量分数。综合分析指出,在肥力相对较低的土壤上,竹炭单施对植物生长有促进作用,与化肥配施效果尤佳,可达到实际增收效果。竹炭施加土壤后,能显著提高土壤有机碳质量分数,达到碳封存的目的,这对于减少温室气体,减缓全球变暖具有重要意义。而竹炭的不同用量对植物养分吸收利用及肥料利用率的作用规律,以及竹炭对土壤蓄水保肥的长期动态作用有待于进一步探讨,这一点在南方红壤区尤为重要。

参考文献:

- [1] 杨放,李心清,王兵,等.生物炭在农业增产和污染治理中的应用[J].地球与环境,2012,40(1):100-107.
YANG Fang, LI Xinqing, WANG Bing, et al. The application of biochar to improving agricultural production and pollution abatement [J]. *Earth Environ*, 2012, 40(1): 100-107.
- [2] 李力,刘娅,陆宇超,等.生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J].环境化学,2011,30(8):1411-1421.
LI Li, LIU Ya, LU Yuchao, et al. Review on environmental effects and applications of biochar [J]. *Environ Chem*, 2011, 30(8): 1411-1421.
- [3] SWIFT R S. Sequestration of carbon by soil [J]. *Soil Sci*, 2001, 166(11): 858.
- [4] ATKINSON C, FITZGERALD J, HIPPS N. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review[J]. *Plant Soil*, 2010, 337(1): 1-18.
- [5] 袁金华,徐仁扣.生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J].生态环境学报,2011,20(4):779-785.
YUAN Jinhua, XU Renkou. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions [J]. *Ecol Environ*, 2011, 20(4): 779-785.
- [6] NOVAK J M, LIMA I, XING B, et al. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand [J]. *Ann Environ Sci*, 2009, 3: 195-206.
- [7] LEHMANN J. Bio-energy in the black [J]. *Front Ecol Environ*, 2007, 5(7): 381-387.
- [8] GROSSMAN J, O'NEILL B, LEHMANN J, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70(5): 1719-1730.
- [9] HOSSAIN M K, STREZOV V, YIN C K, et al. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. *Chemosphere*, 2010, 78(9): 1167-1171.
- [10] van ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant Soil*, 2010, 327(1): 235-246.
- [11] CHAN K Y, van ZWIETEN L, MESZAROS I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment [J]. *Soil Res*, 2008, 45(8): 629-634.
- [12] YAN G Z, KAZUTO S, SATOSHI F, et al. The effects of bamboo charcoal and phosphorus fertilization on mixed planting with grasses and soil improving species under the nutrients poor condition [J]. *J Jpn Soc Reveg Technol*, 2004, 30(1): 33-38.
- [13] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [14] 蔡立群,齐鹏,张仁陟,等.不同保护性耕作措施对麦-豆轮作土壤有机碳库的影响[J].中国生态农业学报,2009,17(1):1-6.

- CAI Liqun, QI Peng, ZHANG Renzhi, *et al.* Effects of different conservation tillage measures on soil organic carbon pool in two sequence rotation systems of spring wheat and pease [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2009, **17**(1): 1 – 6.
- [15] 黄超, 刘丽君, 章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2011, **37**(4): 439 – 445.
- HUANG Chao, LIU Lijun, ZHANG Mingkui. Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth[J]. *J Zhejiang Univ Agric & Life Sci*, 2011, **37**(4): 439 – 445.
- [16] GRABER E R, MELLER H Y, KOLTON M, *et al.* Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media [J]. *Plant Soi*, 2010, **337**(1): 481 – 496.
- [17] GROSSMAN J, O'NEILL B, LEHMANN J, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, **70**(5): 1719 – 1730.
- [18] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(11): 2713 – 2717.
- ZHANG Hanzhi, HUANG Yun, LIU Gang, *et al.* Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seedling stage[J]. *Ecol Environ*, 2010, **19**(11): 2713 – 2717.
- [19] 刘永立, 胡海涛, 兰大伟. 维生素 C 的生物合成及其基因调控研究进展[J]. 果树学报, 2006, **23**(3): 431 – 436.
- LIU Yongli, HU Haitao, LAN Dawei. Advance in research on vitamin C biosynthesis and gene engineering[J]. *J Fruit Sci*, 2006, **23**(3): 431 – 436.
- [20] 高妙真, 蔡伯岩, 曲文章. 氮素水平对甜菜干物质积累分配和产糖量的影响[J]. 中国甜菜糖业, 1999(5): 5 – 9.
- GAO Miaozen, CAI Boyan, QU Wenzhang. The affection on different nitrogen levels to the accumulation and distribution of the dry matter and sugar yield in the sugarbeet plant [J]. *China Beet Sugar*, 1999(5): 5 – 9.