

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201403021

方培结, 李青芳, 张超兰, 等. 生物炭对岩溶区石灰土性质及作物生长的影响[J]. 广西植物, 2015, 35(3):317-324

Fang PJ, Li QF, Zhang CL, et al. Effects of biochar on the properties of limestone soil in karst area and crop growth[J]. *Guihaia*, 2015, 35(3):317-324

生物炭对岩溶区石灰土性质及作物生长的影响

方培结^{1,2}, 李青芳^{2,3}, 张超兰¹, 张春来², 卜巧珍^{2,3}, 曹建华^{2*}

(1. 广西大学 环境学院, 南宁 530004; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所国土资源部/广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 广西师范大学 生命科学学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 以玉米(迪卡 008)和大豆(开鲜 9 号)为供试材料, 通过野外盆栽实验, 设置 5 个处理, 每个处理蔗渣生物炭材料分别以土壤质量百分比 0(CK)、0.5%(T1)、1%(T2)、2%(T3)、5%(T4)添加, 研究蔗渣生物炭对岩溶区石灰土性质及农作物生长的影响。结果表明: 生物炭对石灰土 pH 和碱解氮均无显著影响, 土壤容重显著降低, 提高了土壤有机碳、全氮、速效磷和速效钾的含量; 与对照相比, 玉米组和 大豆组 T2、T3、T4 处理的土壤有机碳含量分别显著增加了 53.01%、96.77%、237.03% 和 32.66%、107.84%、256.46%, 速效磷分别显著增加了 32.26%、34.78%、85.37% 和 34.85%、35.60%、81.71%, 速效钾分别显著增加了 41.93%、82.49%、155.15% 和 69.77%、116.58%、206.91%; T3、T4 处理土壤全氮分别显著增加了 5.68%、25.57% 和 9.04%、19.77%, T3、T4 处理玉米棒干重分别显著增加了 11.51%、16.41%; T1、T2、T3、T4 处理大豆豆荚干重分别显著增加了 11.07%、11.24%、35.14%、24.89%。可见, 蔗渣生物炭作为土壤改良剂, 在一定程度上改善了石灰土的养分状况, 促进了玉米和大豆生长。

关键词: 生物炭; 石灰土; 土壤性质; 玉米; 大豆; 生物量**中图分类号:** Q948.116; S156.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2015)03-0317-08

Effects of biochar on the properties of limestone soil in karst area and crop growth

FANG Pei-Jie^{1,2}, LI Qing-Fang^{2,3}, ZHANG Chao-Lan¹, ZHANG Chun-Lai²,
BU Qiao-Zhen^{2,3}, CAO Jian-Hua^{2*}

(1. School of Environment, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resource & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Science, Guilin 541004, China; 3. College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: A field pot experiment was conducted to study the effects of biochar on the properties of karst limestone soil and crop growth with the plants of maize and soybean planted respectively, five mass percentage levels of biochar from sugarcane bagasse were divided and added into limestone soil, which were no biochar (CK), 0.5% (T1), 1% (T2), 2% (T3) and 5% (T4). The results showed that biochar did not have significant effects on soil pH and available N. However, the soil bulk density was reduced significantly, and the SOC, total N, available P and available K were increased because of the biochar. As compared to the control, the contents of TOC after the treatments of T2, T3 and T4 in maize and soybean group increased by 53.01%, 96.77%, 237.03% and 32.66%, 107.84%, 256.46%, respectively, available P significantly increased by 32.26%, 34.78%, 85.37% and 34.85%, 35.60%, 81.71%, available K

收稿日期: 2014-05-18 修回日期: 2014-08-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41302289); 中国地质调查项目(12120113005300); 国土资源部公益性行业科研专项(201211086-05); 广西重点实验室建设项目(13-051-05); 广西自然科学基金(青年基金)(2013GXNSFBA019217); 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科合 14125008-2-1)。

作者简介: 方培结(1989-), 男, 江西上饶人, 硕士, 主要研究方向为水土环境污染修复理论与技术, (E-mail)fpjie0906@163.com。

*通讯作者: 曹建华, 教授, 博士生导师, 主要从事水土环境污染修复理论与技术研究, (E-mail)jhcao@karst.edu.cn。

significantly increased by 41.93%, 82.49%, 155.15% and 69.77%, 116.58%, 206.91%, respectively. The soil total N after treatments of T3 and T4 in maize and soybean group significantly increased by 5.68%, 25.57% and 9.04%, 19.77%, respectively. The dry weight of maize cob after treatments of T3 and T4 significantly increased by 11.51%, 16.41%, respectively. However, soybean significantly increased 11.07%, 11.24%, 35.14%, 24.89% in T1, T2, T3 and T4 treatments, respectively. Therefore, biochar from bagasse as soil amendment, improved soil properties and nutrients to some extent, accelerate maize and soybean growth.

Key words: biochar; limestone soil; soil properties; maize; soybean; biomass

生物炭是生物质在缺氧或无氧条件下在 350~700 °C 下裂解得到的固体副产物,是一种含碳量高、多空腔、吸附能力强、碱性、稳定性高的多用途材料(Kwapinski *et al.*, 2010; 何绪生等, 2011)。生物炭研究源于 20 世纪 90 年代亚马逊流域黑土(*Terra preta*)的发现(Glaser *et al.*, 2001; Renner, 2007)。近十几年来,生物炭的应用研究在国内外得到了飞速发展,在环境保护和农业生产等领域取得丰硕的研究成果。目前,关于生物炭的研究主要集中于三个方面:第一,生物炭作为土壤改良剂,施加到土壤中,改善土壤的结构和提高土壤的肥力,以促进农作物的生长;第二,生物炭作为碳的稳定富集体添加到土壤中,增加土壤有机碳库量,同时减少 CO₂、N₂O 和 CH₄ 等温室气体的排放;第三,生物炭作为环保材料,应用于土壤重金属、农药等有机物污染修复(Lehmann, 2007; Sohi *et al.*, 2010; 谢祖彬等, 2011; Jha *et al.*, 2010)。但随着研究不断深入,研究结果也不尽相同。生物炭对土壤改良研究视生物炭原料、土壤类型和农作物种类不同而不同(Zhang *et al.*, 2012; Yao *et al.*, 2012; Rajkovich *et al.*, 2011)。目前,国内外生物炭关于土壤改良的研究多集中在风化程度高的土壤和酸性土壤,而对西南地区的岩溶石灰土的研究还鲜见报道。

我国西南地区拥有岩溶连片区,岩溶面积达 51 万 km² (Jiang *et al.*, 2014)。岩溶石灰土是岩溶地区岩石、大气、水、生物等四大圈层相互作用的产物(李阳兵等, 2004)。岩溶生态系统导致岩溶石灰土

具有以下性质:①碳酸盐岩分化成土速率慢,土壤侵蚀速率快;②土壤有机碳易于积累,而营养元素供给速率慢;③营养元素供给不平衡,石灰土粘重;④在有机质含量较低时团粒结构性差;⑤富钙偏碱的岩溶环境使石灰土呈现富钙偏碱的特性(曹建华等, 2003)。现今,我国西南许多岩溶山区面临严重的石漠化问题,解决石漠化土壤是关键,如何保存和改良岩溶山区现存的石灰土,提高石灰土的肥力,促进岩溶山区农作物生长,是解决岩溶石漠化途径之一(曹建华等, 2008)。结合生物炭研究,通过野外盆栽试验,将蔗渣生物炭添加到岩溶石灰土中,探究生物炭对岩溶区石灰土的性质和农作物产量的影响。

1 材料与方 法

1.1 材 料

供试土壤采自广西壮族自治区桂林市临川县潮田乡灯明洼地(110°14' E, 25°15' N) 0~30 cm 耕作土,自然风干后过 4 mm 尼龙筛备用。土壤为棕色石灰土,土壤性质见表 1。

以桂林市永福县顺丰糖厂生产的当年的蔗渣为原料,出厂新鲜蔗渣晾晒 3 d 备用。用自制的炭化炉烧制生物炭,温度控制在 500 °C 左右,停留时间约 2h。生物炭的主要性状为 pH 值 8.31、全碳 633.20 g·kg⁻¹、全氮 6.32 g·kg⁻¹、全磷 1.52 g·kg⁻¹、全钾 4.04 g·kg⁻¹、灰分 14.09%、产率 20%。玉米(迪卡 008)和大豆(开鲜 9 号)均购置于市场。

表 1 供试土壤的性质

Table 1 Characters of soil used in this study

pH	总氮 Total N (g·kg ⁻¹)	总磷 Total P (g·kg ⁻¹)	总钾 Total K (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)	Ca (g·kg ⁻¹)	Mg (g·kg ⁻¹)	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)
6.91	2.23	1.07	7.56	131.91	11.84	194.63	11.44	5.60	1.54

1.2 方 法

1.2.1 盆栽试验地点 野外盆栽试验位于桂林市灵

川县潮田乡毛村(110°33' E, 25°10' N),土壤采集点和试验点都是典型的峰丛洼地和峰丛谷地,属中亚

热带湿润气候,降雨充沛,气候温和,年平均降雨量 $1\,915.2\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,年平均蒸发量 $1\,378.3\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,年平均气温 $18.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,受季风影响,全年的降水分配不均,降雨主要在 4—7 月,9 月到来年 2 月份为旱季,降雨很少(Yang *et al.*, 2010)。

1.2.2 盆栽试验设计 试验设两组,一组种植玉米,另一组种植大豆,每组设五个处理,每个处理生物炭与土壤质量百分比分别为 0%(CK)、0.5%(T1)、1%(T2)、2%(T3)、5%(T4),每个处理 3 次重复,栽种玉米和大豆两种作物共 30 盆。盆栽采用直径 31 cm、高 50 cm PVC 装置。将生物炭与供试土壤按比例混合均匀后,每盆装入 $(25\pm 0.1)\text{ kg}$ 。2013 年 4 月 26 日播种,玉米每盆播种 4~5 粒种子,大豆每盆播种 10 粒,待玉米和大豆分别长至三叶期时选苗,每盆留 2 株长势相同的玉米,每盆留 4 株长势相同的大豆。播种前施加底肥 N: $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、P: $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、K: $125\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (尿素、磷酸氢二铵、氯化钾),玉米在拔节期追施一次肥(N: $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、P: $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、K: $125\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),大豆则不追加施肥。视天气和玉米的生长情况每隔 2~3 d 灌溉一次,每个处理灌溉岩溶水(富含 Ca^{2+} 和 HCO_3^{-}) 2~3 L。2013 年 8 月 2 日采收大豆,2013 年 8 月 12 日采收玉米,将玉米棒和玉米秸秆,大豆秸秆和大豆荚分开展采收,并带回实验室分别进行生物量分析,植物采收完之后取土回实验室进行土壤性质分析。

1.2.3 测定指标及方法 土壤指标分析测试均参考鲁如坤(2000)的方法。其中,pH 测定采用 pH 计电位法(水土比 2.5:1),有机碳用重铬酸钾容量法—外加热法,全氮用开氏消煮法,碱解氮用碱解扩散法,速效磷用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 浸提—钼锑抗比色法,速效钾用 NH_4OAc 浸提—火焰光度法。生物炭阳离子交换量采用乙酸铵交换法(Gaskin *et al.*, 2008),pH 采用炭水比 1:20(W/V),振荡 24 h 后静置测量(Zhao *et al.*, 2013),生物炭总碳、总氮用德国 elementar 公司生产的 CNS 元素分析仪测定(Zhang *et al.*, 2010),生物炭灰分及 P、K、Ca、Mg 元素含量测定参照(Yuan *et al.*, 2011)的方法。玉米和大豆生物量的测定玉米秸秆和玉米棒、大豆秸秆和豆荚分开展采收,采收完之后带回实验室在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min,然后在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重。

1.2.4 数据处理 使用 Excel 2007 处理实验数据,SPSS 16.0 进行单因素方差分析及相关性分析,多

重比较用 Duncan 法($P\leq 0.05$),Origin 8.5 绘图。

2 结果与分析

2.1 生物炭土壤 pH 影响

生物炭对石灰土 pH 没有显著影响(图 1)。玉米组和大豆组的 CK、T1、T2、T3、T4 处理土壤 pH 分别为 6.43、6.29、6.23、6.27、6.40 和 6.33、6.29、6.30、6.47、6.33,虽然各处理间土壤 pH 有变化,但均没达到显著变化水平。

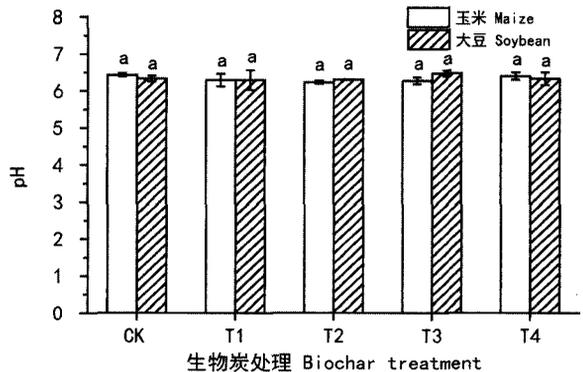


图 1 生物炭对土壤 pH 的影响 不同小写字母表示同一种植物不同生物炭处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Fig. 1 Effects of biochar on soil pH Different small letters meant significant differences among treatments in the same crop at 0.05 level. The same below.

2.2 生物炭对土壤容重影响

土壤容重随着生物炭添加量增加而显著降低(图 2)。其中,玉米组 CK、T1、T2、T3、T4 处理土壤容重分别为 1.40 、 1.35 、 1.27 、 1.19 、 $0.99\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,与 CK 相比,T1、T2、T3、T4 分别显著降低了 3.57%、9.29%、15.00%、29.29%;大豆组 CK、T1、T2、T3、T4 处理土壤容重分别为 1.26 、 1.14 、 1.08 、 0.99 、 $0.86\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,T1、T2、T3、T4 分别比 CK 显著降低了 9.52%、14.29%、21.43%、31.75%。相关性分析结果显示,土壤容重与生物炭添加量呈极显著负相关($P\leq 0.01$,下同),玉米组和大豆组的相关性系数分别达到 -0.982 和 -0.933 。

2.3 生物炭对土壤有机碳及 C/N 的影响

生物炭对土壤有机碳含量及 C/N 影响表现出相似的变化趋势(图 3),即土壤有机碳含量和 C/N 随着生物炭添加量增加而增加,当生物炭添加量达到 1%时,随着生物炭添加量增加而显著增加。其中,玉米组和大豆组的 CK、T1、T2、T3、T4 处理土

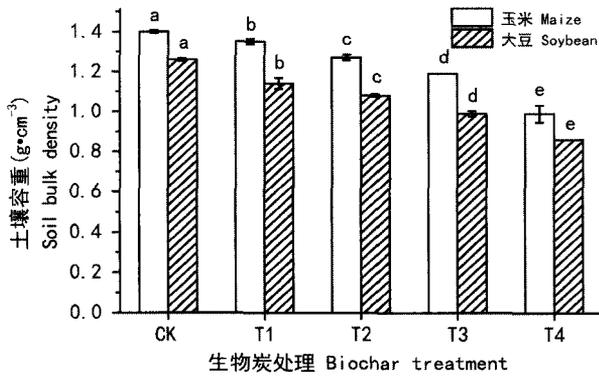


图2 生物炭对土壤容重的影响
Fig. 2 Effects of biochar on soil bulk density

壤有机碳含量分别为 11.45、13.93、17.52、22.53、38.59 和 10.84、12.13、14.38、22.53、38.64 g · kg⁻¹，T2、T3 和 T4 处理与玉米组和大豆组分别比 CK 显著增加 53.01%、96.77%、237.03% 和 32.66%、107.84%、256.46%。玉米组和大豆组 CK、T1、T2、T3、T4 处理 C/N 分别为 6.49、7.96、10.18、12.55、17.42 和 6.14、6.70、7.94、11.68、18.23。其中，玉米组 T2、T3、T4 处理土壤 C/N 分别比 CK 显著增加了 56.86%、93.37%、168.41%，大豆组 T2、T3、T4 处理土壤 C/N 分别比 CK 显著增加了 29.32%、90.23%、196.91%。T1 处理的土壤有机碳含量和 C/N 较 CK 的增加均不显著。

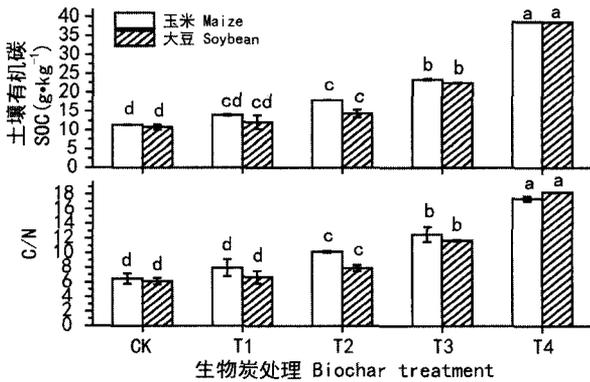


图3 生物炭对土壤有机碳含量和 C/N 的影响
Fig. 3 Effects of biochar on SOC and C/N

相关性分析结果表明，土壤有机碳含量和 C/N 与生物炭添加量的极显著正相关，有机碳与生物炭添加量相关性系数为 0.992 和 0.994，土壤 C/N 与生物炭添加量相关性系数为 0.972 和 0.992。

2.4 生物炭对土壤全氮及碱解氮的影响

生物炭增加土壤全氮的含量，但是对土壤碱解

氮未产生显著影响(图 4)。玉米组和大豆组 CK、T1、T2、T3、T4 处理土壤全氮分别为 1.76、1.75、1.72、1.86、2.21 和 1.77、1.81、1.81、1.93、2.12 g · kg⁻¹。其中，T3、T4 处理于玉米组和大豆组分别比 CK 显著增加了 5.68%、25.57% 和 9.04%、19.77%，且 T4 比 T3 也显著增加；玉米组和大豆组中的 T1、T2 处理与 CK 之间均变化不显著。玉米组和大豆组土壤碱解氮含量分别为 115.48、115.14、116.66、114.72、115.52 和 131.72、130.20、129.06、126.44、128.66 mg · kg⁻¹。无论是种植玉米还是大豆，各试验处理间土壤碱解氮含量均未发生显著变化，但大豆组各生物炭试验处理土壤碱解氮含量均高于相同处理下玉米组的。

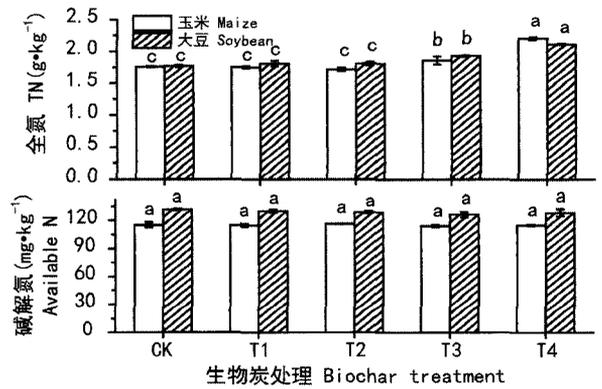


图4 生物炭对土壤全氮和碱解氮的影响
Fig. 4 Effects of biochar on soil TN and available N

2.5 生物炭对土壤速效磷和速效钾的影响

土壤速效磷和速效钾的含量随着生物炭添加量的增加而增加，玉米组土壤速效磷和速效钾的含量均高于同一水平处理下大豆组土壤速效磷的含量(图 5)。玉米组和大豆组 CK、T1、T2、T3、T4 处理土壤速效磷分别为 14.29、15.04、18.90、19.26、26.49 和 13.23、13.82、17.84、17.94、24.04 mg · kg⁻¹，其中玉米组和大豆组的 T2、T3、T4 处理土壤速效磷的含量分别比 CK 显著增加了 32.26%、34.78%、85.37% 和 34.85%、35.60%、81.71%，T1 较 CK 虽有增加但不显著。

玉米组和大豆组的 CK、T1、T2、T3、T4 处理土壤速效钾含量分别为 202.17、206.58、286.94、368.95、515.83 和 151.12、179.12、256.56、327.30、463.80 mg · kg⁻¹。其中玉米组和大豆组中 T2、T3、T4 处理较 CK 分别显著增加了 41.93%、82.49%、155.15% 和 69.77%、116.58%、206.91%，T1 较 CK

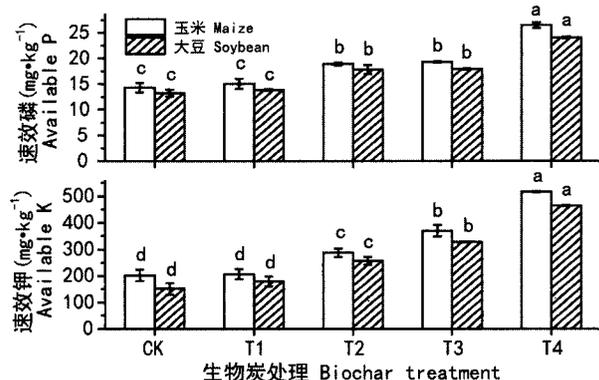


图5 生物炭对土壤速效磷和速效钾的影响

Fig. 5 Effects of biochar on soil available P and K

增加没达到显著水平。

2.6 生物炭对作物生物量和产量的影响

施加生物炭对玉米和大豆的生物量和产量产生不同的影响(表2)。玉米组,当生物炭添加量达到2%,玉米秸秆和玉米棒干重均比CK显著增加;且T4处理玉米秸秆干重比T3处理显著增加,而T4处理玉米棒干重比T3没有显著增加。如T3、T4处理玉米秸秆干重较CK显著增加了12.92%、33.01%,玉米棒干重分别显著增加了11.51%、16.41%。大豆组,添加生物炭均能显著增加大豆秸秆和豆荚干重。其中,大豆秸秆干重随着生物炭添加量增加而增加;当生物炭添加量小于2%,豆荚干重随着生物炭添加量增加而增加,当生物炭添加量大于2%,和2%生物炭添加量相比,增施生物炭会降低豆荚干重。如,T1、T2、T3、T4处理大豆秸秆干重分别比CK显著增加了14.30%、17.69%、33.61%、63.77%;豆荚干重则分别增加了11.07%、11.24%、35.14%、24.89%;T4处理豆荚干重比T3处理显著降低7.59%。

3 讨论

3.1 生物炭对土壤性质的影响

在以往的研究中,当土壤pH较低时,生物炭往往能显著增加其pH;而当土壤pH较高时,则无显著影响。如Chan *et al.* (2008)的研究发现添加生物炭能增加酸性土壤的pH,而Chintala *et al.* (2013)的研究表明生物炭能明显增加pH较低的土壤pH,对pH相对较高的土壤pH无显著影响。本研究结果表明,生物炭对石灰土pH无显著影响,原因可能

生物炭中的-COOH、-OH等碱性基团和灰分中可溶态K、Ca、Mg等金属元素能显著提高酸性土壤pH(袁金华等,2011;Xu *et al.*,2012)。但在岩溶石灰土的富钙偏碱的环境里,石灰土的pH较高(曹建华等,2003),如本试验中土壤pH为6.91,具有一定的抗缓冲能力,生物炭的碱性不足以显著提高石灰土的pH。

生物炭具有比表面积较大、孔隙结构丰富、质地轻等特点(Zhao *et al.*,2013),施加到土壤中能够降低土壤容重,起到疏松土壤作用,从而降低土壤容重,Mukherjee *et al.* (2014)试验结果也证明生物炭能显著降低土壤容重,这与本次研究结果相吻合。但是并不是所有土壤容重降低都有利于植物生长,有研究指出生物炭应用于质地粘重较大的土壤中增加土壤空隙和增加土壤持水性能,促进植物根系的生长;但质地疏松的土壤中应用会加大土壤空隙,反而降低土壤持水性能,不利于植物的生长(潘洁等,2013)。石灰土一般粘重较大,所以生物炭施加到石灰土降低土壤容重能起到有利作用,促进植物生长。

生物炭富含碳,且结构高度芳香化,稳定性较高,施加到土壤中能长期存在土壤中,显著地增加土壤有机碳的含量,起到长期稳定增加土壤碳库(Lehmann *et al.*,2006),这与本次试验研究结果相一致。但土壤有机碳的增加并不意味着土壤的肥力就会增加,有研究指出,长期单一施用生物炭会显著降低土壤水溶性有机碳含量(章明奎等,2012);且土壤有机质中腐殖酸(胡敏酸和富里酸)的比例下降,而黑炭和胡敏素的含量显著增加(黄超等,2011);反而导致土壤肥力下降。

添加生物炭会增加土壤中全氮的含量,但对碱解氮的含量没有显著影响。全氮增加可能是因为生物炭本身含有一定的氮,在生物炭矿化过程中会释放氮;并且生物炭的吸附能力会减少氮的流失,提高土壤保氮能力(Zheng *et al.*,2013);同时生物能够降低土壤容重,提高土壤通气水平,减少因反硝化作用而损失的土壤氮(潘逸凡等,2013;Laird *et al.*,2010)。但生物炭中的氮大多数是以C-N杂环形式存在(Silber *et al.*,2010),且生物炭释放的氮大多数是有机氮(Mukherjee *et al.*,2013),而植物不能直接利用有机氮(王常慧等,2004),并且生物炭在提高全氮含量的同时显著提高土壤C/N,C/N会降低土壤对氮肥的使用效率(Galvez *et al.*,2012;Alburquerque *et al.*,2013;李贵才等,2001),因此土壤

表 2 不同处理对玉米和大豆的生物量和产量的影响
Table 2 Effects of biochar on the biomass and yield of maize and soybean

生物炭处理 Treatment	玉米秆干重 (g) Dry weight of maize straw	玉米棒干重 (g) Dry weight of maize cob	大豆秸秆干重 (g) Dry weight of soybean straw	豆荚干重 (g) Dry weight of soybean
CK	181.57±4.95c	139.60±1.13b	76.08±2.67d	48.58±4.17d
T1	189.52±2.12bc	137.75±7.00b	86.96±0.45c	53.96±1.55c
T2	196.04±9.90bc	152.35±7.85ab	89.54±1.48c	54.04±1.12c
T3	205.02±5.66b	155.67±1.63a	101.65±1.27b	65.65±2.27a
T4	241.50±10.61a	162.51±6.36a	124.60±8.57a	60.67±2.57b

注: 不同小写字母表示不同处理间差异显著($P \leq 0.05$)。

Note: Different small letters meant significant differences among treatments at 0.05 level.

碱解氮含量没有显著改变。

石灰土中含有丰富的 Ca^{2+} , 当水溶性磷肥施加到土壤中去后会与土壤中的 Ca^{2+} 发生一系列的反应, 最后生成不能被植物吸收利用的磷酸十钙沉淀, 大大降低了磷肥的使用效率(向万胜等, 2004)。生物炭本身和灰分中含有一定量的磷, 而且这部分磷大多数能够被植物吸收利用; 施加生物炭, 土壤速效磷与土壤 pH 和有机质含量呈正相关(靖彦等, 2013), 本次试验中土壤 pH 没有发生显著改变, 但有机质的增加会使土壤速效磷的释放增加(向万胜等, 2004); 生物炭能够降低土壤中铁氧化物对磷的吸附和增加土壤磷的活性(Cui *et al.*, 2011); 生物炭的保肥能力, 能够减少土壤水溶性磷的淋失, 从而提高土壤速效磷的含量。生物炭在增加岩溶石灰土速效磷的同时也显著增加土壤速效钾的含量, 生物炭显著增加土壤速效钾这一研究结果与刘玉学等(2013)研究结果一致。原因可能有两方面, 第一, 生物炭含有大量的可溶性被植物吸收利用的钾, 施加到土壤中能显著提高土壤速效钾含量; 第二, 生物炭良好的比表面积和孔隙结构, 能够加强水溶性和易流失的钾吸附, 减少水溶性钾的淋失量(Peng *et al.*, 2011; 张祥等, 2013)。

在玉米拔节期对玉米追施磷肥和钾肥, 而大豆在生长过程中没有追肥, 从而导致种植玉米土壤的速效磷和速效钾的含量均高于同一生物炭处理下种植大豆的土壤的速效磷和速效钾的含量。大豆根瘤菌的固氮作用, 且玉米对氮的需求要高于大豆, 则导致种植大豆土壤碱解氮的含量高于同一生物炭处理水平下种植玉米的土壤碱解氮含量。

3.2 生物炭对生物量的影响

生物炭最初被发现就是因为生长在富含生物炭的亚马逊流域黑土(terra preta)上的农作物生长比周边好(Renner, 2007)。本文研究结果证明, 添加

生物炭能增加玉米和大豆的生物量和产量, 与大多数国内外研究结果相似。如 Zhang *et al.*(2012)研究表明无论是否施加氮肥, 生物炭均能增加玉米的产量; Major *et al.*(2010)研究结果显示, 添加生物炭的第一年对玉米生长没有显著影响, 但在第二、三和四年均会显著增加玉米的产量; Tagoe *et al.*(2008)将生物炭与化肥同施, 结果增加了大豆产量。综合前面的分析与讨论, 导致这一结果原因可能有两方面: 第一, 生物炭良好的性质能够改善土壤的理化性质, 促进植物的生长, 如本次试验中显著降低土壤容重, 增加土壤孔隙率, 促进植物根系生长; 第二, 生物炭提高了土壤的肥力, 如本试验中生物炭提高石灰土中全氮、速效磷、速效钾和有机质的含量, 为农作物生长更好的提供养分。

4 结论

研究表明: 将蔗渣生物炭施加到岩溶石灰土中, 能够显著降低土壤容重, 当生物炭添加达 1% 时能显著增加土壤有碳、速效磷和速效钾的含量, 当添加量达 2% 时土壤全氮有显著增加; 但对土壤 pH 和碱解氮含量无显著影响。生物炭通过提高石灰土的肥力, 改善植物的生长环境, 促进了玉米和大豆的生长。在本研究条件下, 当生物炭添加量达到 2%, 玉米的生物量和产量均有显著增加; 各生物炭处理均能显著增加大豆的生物量和产量; 生物炭对大豆生物量和产量增加效果要好于玉米。可见, 生物炭作为土壤改良剂, 在一定程度上改善了岩溶区石灰土的养分状况, 促进了玉米和大豆的生长。

参考文献:

Albuquerque JA, Salazar P, Barrón V, *et al.* 2013. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral

- fertilization levels[J]. *Agron Sust Dev*, **33**(3):475-484
- Cao JH(曹建华), Yuan DX(袁道先), Pan GX(潘根兴). 2003. Some soil features in karst ecosystem(岩溶生态系统中的土壤)[J]. *Adv Earth Sci*(地球科学进展), **18**(1):37-44
- Cao JH(曹建华), Yuan DX(袁道先), Tong LQ(童立强). 2008. Features of karst ecosystem and integrating measure for rock desertification in Southwest China(中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策)[J]. *Pratac Sci*(草业科学), **25**(9):40-50
- Chan K, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. 2008. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. *Soil Res*, **45**(8):629-634
- Chintala R, Schumacher TE, McDonald LM, et al. 2013. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures[J]. *CLEAN-Soil Air Wat*, **41**(9 999):1-9
- Cui HJ, Wang MK, Fu ML, et al. 2011. Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar[J]. *J Soils & Sed*, **11**(7):1135-1141
- Galvez A, Sinicco T, Cayuela ML, et al. 2012. Short term effects of bioenergy by-products on soil C and N dynamics, nutrient availability and biochemical properties[J]. *Agric Ecosyst & Environ*, **160**:3-14
- Gaskin J, Steiner C, Harris K, et al. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. *Trans Asabe*, **51**(6):2061-2069
- Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. 2001. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics[J]. *Naturwissenschaften*, **88**(1):37-41
- He XS(何绪生), Zhang SQ(张树清), She D(余雕), et al. 2011. Effects of biochar on soil and fertilizer and future research(生物炭对土壤肥料的作用及未来研究)[J]. *Chin Agric Sci Bull*(中国农学通报), **27**(15):16-25
- Huang C(黄超), Liu LJ(刘丽君), Zhang MK(章明奎). 2011. Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth(生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响)[J]. *J Zhejiang Univ: Agric & Life Sci Ed*(浙江大学学报·农业与生命科学), **37**(4):439-445
- Jha P, Biswas A, Lakaria B, et al. 2010. Biochar in agriculture-prospects and related implications[J]. *Curr Sci*, **99**(9):1218-1225
- Jiang Z, Lian Y, Qin X. 2014. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Sci Rev*, **132**:1-12
- Jing Y(靖彦), Chen XM(陈效民), Liu ZX(刘祖香), et al. 2013. Effects of combined application of biochar and inorganic fertilizers on the available phosphorus content of upland red soil(生物黑炭与无机肥料配施对旱作红壤有效磷含量的影响)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **24**(4):989-994
- Kwapinski W, Byrne CMP, Kryachko E, et al. 2010. Biochar from biomass and waste[J]. *Waste Biom Valor*, **1**(2):177-189
- Laird D, Fleming P, Wang B, et al. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, **158**(3-4):436-442
- Lehmann J. 2007. Bio-energy in the black[J]. *Front Ecol Environ*, **5**(7):381-387
- Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems-a review[J]. *Mitig Adapt Strat Glob Chang*, **11**(2):395-419
- Li GC(李贵才), Han XG(韩兴国), Huang JH(黄建辉), et al. 2001. A review of affecting factors of soil nitrogen mineralization in forest ecosystems(森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **21**(07):1187-1195
- Li YB(李阳兵), Wang SJ(王世杰), Li RL(李瑞玲). 2004. Some soil features of karst ecosystem(岩溶生态系统的土壤)[J]. *Ecol & Environ*(生态环境), **13**(3):434-438
- Liu YX(刘玉学), Wang YF(王耀锋), Lü HH(吕豪豪), et al. 2013. Effects of different application rates of rice straw biochar and bamboo biochar on yield and quality of greengrocery (*Brassica chinensis*) and soil properties(不同稻秆炭和竹炭施用水平对小青菜产量、品质以及土壤理化性质的影响)[J]. *J Plant Nutr Fert*(植物营养与肥料学报), **19**(6):1438-1444
- Lu RK(鲁如坤). 2000. The Methods for Agricultural Chemical Study(土壤农业化学分析方法)[M]. Beijing(北京): China Agricultural Press(中国农业科技出版社)
- Major J, Rondon M, Molina D, et al. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant & Soil*, **333**(1-2):117-128
- Mukherjee A, Lal R, Zimmerman A. 2014. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil[J]. *Sci Total Environ*, **487**:26-36
- Mukherjee A, Zimmerman AR. 2013. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar-soil mixtures[J]. *Geoderma*, **193-194**:122-130
- Pan J(潘洁), Xiao H(肖辉), Cheng WJ(程文娟), et al. 2013. Effect of biochar on vegetable yields and the soil physical and chemical properties in greenhouse(物黑炭对设施土壤理化性质及蔬菜产量的影响)[J]. *Chin Agric Sci Bull*(中国农学通报), **29**(31):174-178
- Pan YF(潘逸凡), Yang M(杨敏), Dong D(董达), et al. 2013. Effects of biochar on soil nitrogen cycle and related mechanisms: a review(生物质炭对土壤氮素循环的影响及其机理研究进展)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **24**(9):2666-2673
- Peng X, Ye LL, Wang CH, et al. 2011. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China[J]. *Soil & Till Res*, **112**(2):159-166
- Rajkovich S, Enders A, Hanley K, et al. 2011. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil[J]. *Biol & Fert Soils*, **48**(3):271-284
- Renner R. 2007. Rethinking biochar[J]. *Environ Sci Technol*, **41**(17):5932-5933
- Silber A, Levkovitch I, Graber E. 2010. pH-dependent mineral release and surface properties of corn straw biochar: agronomic implications[J]. *Environ Sci Technol*, **44**(24):9318-9323
- Sohi SP, Krull E, Lopez-Capel E, et al. 2010. A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil[J]. *Adv Agr*, **105**:47-82
- Tagoe SO, Horiuchi T, Matsui T. 2008. Effects of carbonized and dried chicken manures on the growth, yield, and N content of soybean[J]. *Plant & Soil*, **306**(1-2):211-220
- Wang CH(王常慧), Xing XR(邢雪荣), Han XG(韩兴国). 2004. Advances in study of factors affecting soil N mineralization in grassland ecosystems(草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **15**(11):2184-2188

- Xiang WS(向万胜), Huang M(黄敏), Li XY(李学垣). 2004. Progress on fractioning of soil phosphorous and availability of various phosphorous fractions to crops in soil(土壤磷素的化学组分及其植物有效性)[J]. *Plant Nutr Fert Sci*(植物营养与肥料学报), **10**(6):663-670
- Xie ZB(谢祖彬), Liu Q(刘琦), Xu YP(许燕萍), et al. 2011. Advances and perspectives of biochar research(生物炭研究进展及其研究方向)[J]. *Soils*(土壤), **43**(6):857-861
- Xu RK, Zhao AZ, Yuan JH, et al. 2012. pH buffering capacity of acid soils from tropical and subtropical regions of China as influenced by incorporation of crop straw biochars[J]. *J Soils & Sed*, **12**(4):494-502
- Yang H, Zhang L, Cao J. 2010. Effects of different land use types on soil organic carbon and carbon management index in Karst area[J]. *Agric Sci & Technol*, **11**(9-10):136-139
- Yao Y, Gao B, Zhang M, et al. 2012. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. *Chemosphere*, **89**(11):1467-1471
- Yuan JH(袁金华), Xu RK(徐仁扣). 2011. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions(生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展)[J]. *Ecol Environ Sci*(生态环境学报), **20**(4):779-785
- Yuan JH, Xu RK, Zhang H. 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. *Bioresour Technol*, **102**(3):3488-3497
- Zhang A, Cui L, Pan G, et al. 2010. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China [J]. *Agric Ecosyst & Environ*, **139**(4):469-475
- Zhang A, Liu Y, Pan G, et al. 2012. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain [J]. *Plant & Soil*, **351**(1-2):263-275
- Zhang MK(章明奎), Bayou WD, Tang HJ(唐红娟). 2012. Effects of biochar's application on active organic carbon fractions in soil (生物质炭对土壤有机质活性的影响)[J]. *J Soil Water Conserv*(水土保持学报), **26**(2):127-132
- Zhang X(张祥), Wang D(王典), Jiang CC(姜存仓), et al. 2013. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China Region(生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响)[J]. *Chin J Eco-Agric*(中国生态农业学报), **21**(08):979-984
- Zhao L, Cao X, Mašek O, et al. 2013. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures[J]. *J Hazard Mat*, **256**(15):1-9
- Zheng H, Wang Z, Deng X, et al. 2013. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil [J]. *Geoderma*, **206**:32-39

(上接第 302 页 Continue from page 302)

- metals for three dominant plants in Pb-Zn mine tailings eastern Guangdong(粤东铅锌尾矿三种优势植物对重金属的吸收和富集特性研究)[J]. *Guihaia*(广西植物), **32**(6):743-749
- Mattina MJI, Lannucci BW, Musante C, et al. 2003. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil[J]. *Environ Poll*, **124**(3):375-378
- Malandrino M, Abollino O, Buoso S, et al. 2011. Accumulation of heavy metals from contaminated soil to plants and evaluation of soil remediation by vermiculite[J]. *Chemosphere*, **82**(2):169-178
- Pan P(潘攀), Yang JC(杨俊诚), Deng SH(邓仕槐), et al. 2011. Proceedings and prospects of pesticides and heavy metals contamination in soil-plant system(土壤-植物体系中农药和重金属污染研究现状及展望)[J]. *J Agro-Environ Sci*(农业环境科学学报), **30**(12):2389-2398
- Pan YH(潘义宏), Wang HB(王宏斌), Gu ZP(谷兆萍), et al. 2010. Accumulation and translocation of heavy metals by macrophytes(大型水生植物对重金属的富集与转移)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **30**(23):6430-6441
- Rascio N, Navari-izzo F. 2011. Heavy metal hyper-accumulating plants; How and why do they do it? And what makes them so interesting[J]. *Plant Sci*, **180**(2):169-181
- Saifullah, Meers E, Qadir M, et al. 2009. EDTA-assisted Pb phyto-extraction[J]. *Chemosphere*, **74**(10):1279-1291
- Sarret G, Saumitou-Laprade P, Bert V, et al. 2002. Froms of Zinc accumulated in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri* [J]. *Plant Physiol*, **130**(4):1815-1826
- Sun YB(孙约兵), Zhou QX(周启星), Guo GL(郭观林). 2007. Phytoremediation and strengthening measures for soil contaminated by heavy metals(植物修复重金属污染土壤的强化措施)[J]. *Chin J Environ Eng*(环境工程学报), **1**(3):103-110
- Wang YZ(王永志), Yang YH(杨毅恒), Chu N(初娜), et al. 2008. Clustering analysis for speciation of Cu in soil samples of Dawu River in dexing copper mine(德兴铜矿大坞河流域土壤 Cu 元素形态的聚类分析)[J]. *Progr Geophysics*(地球物理学进展), **23**(1):233-236
- Wei SH(魏树和), Zhou QX(周启星), Wang X(王新). 2003. Characteristics of 18 species of weed hyperaccumulating heavy metals in contaminated soils(18种杂草对重金属的超积累特性研究)[J]. *J Basic Sci & Eng*(应用基础与工程科学学报), **11**(2):152-160
- Xia JQ(夏家淇). 1996. Detailed Explanation of Soil Environmental Quality Standards(土壤环境质量标准详解)[M]. Beijing(北京):China Environmental Sciences Press(中国环境科学出版社):53
- Yan Y(闫妍), Li JP(李建平), Zhao ZG(赵志国), et al. 2008. Advances in the mechanisms of heavy metal tolerance and accumulation in hyper accumulators(超富集植物对重金属耐受和富集机制的研究进展)[J]. *Guihaia*(广西植物), **28**(4):505-510
- Zhang B(张本). 1988. Studies on Poyang Lake(鄱阳湖研究)[M]. Shanghai(上海):Shanghai Science and Technology Press(上海科学技术出版社):5-10
- Zeng FP(曾凡萍), Xiao HY(肖化云), Zhou WB(周文斌). 2007. Spatial and temporal variations and their source analysis of copper, lead and zinc in riverwaters and sediments of the Le'an River(乐安江河水和沉积物中 Cu, Pb, Zn 的时空变化特征及来源分析)[J]. *Res Environ Sci*(环境科学研究), **20**(6):14-20