

文章编号: 1008-2786-(2015)4-449-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000056

生物炭对土壤理化性质及橡胶幼苗生物量的影响

潘丽冰^{1,2} 徐凡珍^{1,2} 沙丽清^{1*}

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园热带森林重点实验室, 云南 昆明 650223; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为探讨生物炭对西双版纳土壤性质及橡胶(*Hevea brasiliensis*) 幼苗生长的影响, 评价其对橡胶人工林固碳增汇的潜在能力, 将不同量的生物炭(与土壤质量比分别为 CK: 0; B2.5: 2.5%; B5: 5%) 与复合肥(0 kg/hm²; F: 300 kg/hm²) 交互(共 6 个处理: CK, F, B2.5, B2.5 + F, B5, B5 + F) 加入土壤中进行 1 a 的橡胶幼苗盆栽实验研究, 对土壤进行水分、温度、土壤呼吸速率以及养分测定, 对幼苗进行地径、株高、光合速率以及生物量的测定。结果表明: 生物炭增加了土壤 pH 值, 降低了土壤容重; 显著提高土壤含水量(雨季较对照提高了 26.9% ~ 76.3%, 旱季则提高了 30.8% ~ 63.5%); 生物炭显著增加土壤全碳和全磷含量, 降低了土壤硝态氮, B5 和 B5 + F 处理的土壤有效磷显著高于对照, 分别是对照的 18.3 倍和 16 倍; 在雨季和旱季土壤呼吸速率均表现为: B5 + F > B2.5 + F > B5 > F > B2.5 > CK, CK 的土壤呼吸速率显著低于其他所有处理; 施肥处理的幼苗生物量显著高于 CK 和所有单施生物炭处理, 以 B2.5 + F 处理效果更明显; 施肥与生物炭均显著提高了橡胶幼苗光合速率。综上所述, 生物炭可以改善土壤性质, 保持和提高水分和大部分土壤养分, 促进植物生长, 具有促进地上固碳及土壤固碳的潜力。从本短期的实验来看, 单施生物炭不能促进橡胶幼苗生长, 与肥料配合使用更能促进橡胶幼苗生长。

关键词: 生物炭; 土壤养分; 土壤水分; 土壤呼吸; 橡胶幼苗

中图分类号: S156

文献标志码: A

最新的 IPCC 报告表明, 全球陆地和海洋表面平均温度在 1988—2012 年间上升了 0.85℃^[1]。CO₂ 是导致全球变暖的主要气体^[2], 预计下一世纪其对全球变暖的贡献将达到 60%^[3]。增加造林面积、提高林业生产力、减少化石燃料的燃烧等是减缓全球变暖的有效方法^[3-7], 生物炭施入土壤中也成为一种固碳途径^[8-9]。

生物炭是由生物质原料在缺氧的情况下高温热解形成的大部分含有抗化学和微生物降解结构的黑色固体产物^[8]。生物质转变成生物炭之后可以保留 50% 的碳含量, 主要由稳定碳、不稳定碳及灰分组成, 其性质稳定, 分解速率低, 在 5 ~ 10 a 仅分解

10% ~ 20%, 能在一定条件下存留几十年甚至上百 years^[9-12]。这一特性使得生物炭可以间接从大气中固定碳, 成为一个碳库, 当今全球变化背景下, 将生物炭添加在土壤中成为一种固碳减排新思路。很多研究表明, 生物炭在土壤中可以提高土壤 pH 值, 对酸性土壤起到一定的改善作用^[13-14]。生物炭本身可以提供植物直接吸收的养分, 且其孔隙结构可以保持一定的水分及养分, 改善土壤性质^[15], 提高作物产量^[14, 16-17]。此外, 生物炭的应用对温室气体的排放也有一定影响, 生物炭施加提高 CO₂、N₂O、NH₃ 的排放^[18], 但也有研究表明生物炭可以降低碳排放速率^[19]。人类活动和土地利用方式的改变会额外

收稿日期(Received date): 2014-10-10; 修回日期(Accepted): 2015-02-23。

基金项目(Foundation item): 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070304)、中国科学院“一三五”专项—突破三(XTBG-T03)和国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833501)。[Supported by the "Strategic Priority Research Program" of the Chinese Academy of Sciences (XDA05070304), the CAS 135 Program (XTBG-T03) and the Development Program in Basic Science of China (2010CB833501).]

作者简介(Biography): 潘丽冰(1989-), 女, 广西南宁人, 硕士研究生, 主要从事生物炭应用于橡胶林的研究。[Pan Libing (1989-), female, born in Nanning of Guangxi Province, master degree candidate, mainly study in biochar application in rubber plantation.]E-mail: panlibing@xtbg.ac.cn

* 通信作者(Corresponding author): 沙丽清, 男, 副研究员。[Sha Liqing, male, Associate professor.]E-mail: shalq@xtbg.ac.cn

增加土壤温室气体的排放,利用生物炭进行固碳增汇,能使土地增产的同时减缓全球变暖,这是一种双赢政策^[20]。

国内外目前主要将生物炭应用于农田中^[14, 21-22],林业方面相关的研究较少,而关于生物炭应用于橡胶林(*Hevea brasiliensis*)的研究,国内目前还少见报道。在热带地区,由于土壤风化程度深,在强降雨下土壤养分淋溶严重,尤其土地利用改变之后,原有的生态系统功能遭到破坏,养分淋溶和迁移加剧,土壤更加贫瘠。橡胶林作为西双版纳的主要人工林之一,自1960年代引进种植后,其种植面积不断扩大,至今已超过 $40 \times 10^4 \text{ hm}^2$,是云南省种植面积的55.7%^[23]。橡胶人工林的大规模种植改变了土壤原有的立地条件,土壤肥力水平低下^[24],需通过人为经营(除草、施肥等)来提高土壤生产力,而人为经营下的橡胶人工林生态系统结构单一、林下植被稀少,土壤裸露,水土流失严重^[25]。此外,原始林向橡胶人工林的转变也改变了土壤碳循环以及有机质积累等^[26-28]。因此,改善橡胶林土壤环境,提高其固碳增汇作用对完善其生态系统服务功能和减缓全球变化具有重要意义。若能在未来研究中证明生物炭能应用于橡胶人工林,则生物炭堪称橡胶人工林的“黑色黄金”^[29]。

本研究对土壤施加生物炭以及施肥处理,进行1 a的橡胶幼苗盆栽培养,进行生物量、土壤养分、土壤水分、土壤温度等测定,比较不同处理下的土壤呼吸差异,以及施加生物炭后土壤呼吸对土壤含水量和温度的响应,分析评价生物炭对橡胶幼苗土壤性质及其生长的影响,为改善橡胶林土壤、提高橡胶林固碳增汇作用及橡胶林的可持续性经营提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区域概况

云南西双版纳傣族自治州位于中国的西南部,处于北回归线以南,属于西南热带季风气候,终年温暖,湿润多雨。一年中干湿季分明,可分为干热季、雨季及雾凉季,干热季为3—4月,气温较高,雨量较少;湿热季为5—10月,全年大约80%以上的雨水在此季节降落;雾凉季为11月至次年2月,在此季节期间早晚有浓雾,降水较少。年平均气温 21.6°C ,最热月平均气温 25.3°C 。该区地带性土壤

为由白垩纪砂岩发育而成的砖红壤,土层深厚,pH值为6.0左右。实验地位于中国科学院西双版纳热带植物园苗圃基地荫棚内。实验荫棚设置于海拔为565 m的开阔平地上,地理坐标为 $21^\circ 55' 06''\text{N}$, $101^\circ 16' 09''\text{E}$ 。实验样地底部铺有沙土,沙土表面铺上一层石灰岩石子,顶部有遮阳网遮蔽,整个实验样地光照充足,降雨时均匀分布。

1.2 研究方法

1.2.1 材料准备与实验设置

该实验使用的生物炭是将橡胶树木材经过土法焖制($400 \sim 500^\circ\text{C}$)约48 h而成,盆栽所用土壤为当地具有代表性的砖红壤。实验用的花盆直径为38 cm,高度为25 cm。将生物炭粉碎至2 mm粒径后,按质量比0、2.5%、5%(相当于田间施加浓度0 t/hm²、30 t/hm²和60 t/hm²)加入25 kg干土中,混合均匀后装入花盆中。每一质量比与复合肥做交互实验,共6个处理,分别记为①对照组CK;②生物炭B2.5(生物炭质量占土壤总质量比为2.5%,下同);③生物炭B5;④复合肥F;⑤生物炭与复合肥交互B2.5 + F;⑥生物炭与复合肥交互B5 + F。实验设置5个区组,每个区组6个处理,每个处理3个重复。施复合肥(为橡胶专用复合肥,N、P总养分含量 $\geq 40\%$)用量为300 kg/hm²,分三次于2013年5月、6月、7月施入。2013年1月将长势一致的当年生橡胶幼苗(株高约30 cm)移栽至盆中,实验初期每两天浇水一次,待幼苗根系稳定后一个星期浇水一次,雨季则不浇水。

1.2.2 研究方法

土壤的容重用环刀法(FHZDZTR0004)测定;土壤pH值用电位法测定(LY/T 1239-1999);土壤全碳、全氮用碳氮分析仪(Vario MAX CN,Elementar Analysensysteme GmbH,Germany)测定;土壤全磷用HClO₄-HF消解后用全谱直读等离子体发射光谱仪(ICP-AES)(iCAP6300,Thermo Fisher Scientific U.S.A)测定(LY/T 1254-1999);土壤有效磷用0.03 mol/L NH₃F-0.025 mol/L HCl浸提,钼锑抗比色法测定(LY/T 1233-1999);土壤水解氮用碱解扩散法测定(LY/T 1229-1999);土壤经2 mol/L KCl溶液浸提后用连续流动分析仪(Auto Analyzer 3,SEAL Analytical GmbH)测定浸提液中的铵态氮和硝态氮含量。

土壤呼吸速率用Li-6400(Li-Cor, Lincoln, NE, USA)配合土壤呼吸室于早晨9:00—11:00进

行测定;光合作用测定仪器为 Li-6400 (Li-Cor, Lincoln, NE, USA), 于 12 月测定, 每株幼苗选择 3 片成熟叶片进行测定, 设定光照强度为 $1\,000\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; 土壤温度用 6310 针式土壤温度计测量土壤表面以下 5 cm 处的温度; 土壤体积含水量用 TDR (Time Domain Reflectometer) 测量土壤表面以下 5 cm 处的土壤含水量。由于花盆大小的限制, 不适合安放呼吸环进行每月监测, 于是分别在 3 月、4 月、7 月和 8 月测定土壤温度、土壤含水量和土壤呼吸, 代表旱季和雨季, 每月测定 2 次。每个月测定幼苗地径和株高, 实验结束后测幼苗地径及株高, 并收获幼苗于室内烘箱 $65\ ^\circ\text{C}$ 烘干 48 h 后测定其生物量, 对幼苗生物量与地径进行拟合, 得出生物量与地径的拟合方程式, 从而得到不同处理的幼苗生物量的变化情况。实验开始于 2013-02-01, 于 2014-02-28 结束。

实验数据用软件 SPSS 20.0 进行方差分析, 多重比较采用最小显著差异法 (LSD), 用 Sigmaplot 11.0 作图。显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 生物炭对土壤理化性质的影响

实验结束后采集不同处理的土壤进行土壤容重、pH 值及全碳、全氮、全磷、有效磷、水解氮、铵态氮和硝态氮的测定, 结果如表 1 所示。施肥和生物炭处理不同程度地降低了土壤容重, 其中 B5 和 B5 + F 较对照分别降低了 4.7% 和 7.4%, 而 B2.5 + F 降低幅度较小, 仅降低了 0.09%。各处理间除了水

解氮和铵态氮没有显著性差异, 其他养分均显示出差异性。生物炭施加处理均提高了土壤 pH 值、全碳、全氮、全磷和有效磷含量, 其中 B5 和 B5 + F 均显著高于其他处理。生物炭显著提高了土壤全碳, 不同生物炭浓度提高程度不同, B2.5 和 B2.5 + F 的全碳均提高了约 1.2 倍, B5 和 B5 + F 的全碳较对照均显著提高了约 2 倍。施肥和生物炭不同程度地提高了土壤有效磷含量, 其中 B5 和 B5 + F 的有效磷含量分别是对照的 18.3 倍和 16 倍, 这两个处理均显著高于其他处理。硝态氮则随着施肥和生物炭浓度的增高而降低, 施加生物炭及其施肥处理均显著低于对照。

2.2 生物炭对土壤呼吸速率的影响

从图 1 可以看出, 旱季同一处理的土壤呼吸速率均低于雨季的土壤呼吸速率。无论是旱季还是雨季, 单施生物炭、单施复合肥还是同时施加生物炭与复合肥的处理, 土壤呼吸速率均比对照高。旱季和雨季土壤呼吸速率均随着生物炭的增加而增加, 表现为 $B5 > B2.5 > CK$, $B5 + F > B2.5 + F > F$ 。旱季施加 5% 生物炭配合施肥的处理 (即 B5 + F) 土壤呼吸速率最高 ($1.40\ \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 大约为 CK 的 6 倍, 雨季 B5 + F 的土壤呼吸速率为 $1.84\ \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 约为 CK 的 4 倍。在施加同浓度的生物炭处理下, 施肥明显促进了土壤呼吸, 旱季和雨季均表现为 $F > CK$, $B2.5 + F > B2.5$, $B5 + F > B5$ 。

2.3 生物炭对土壤温度和土壤水分的影响

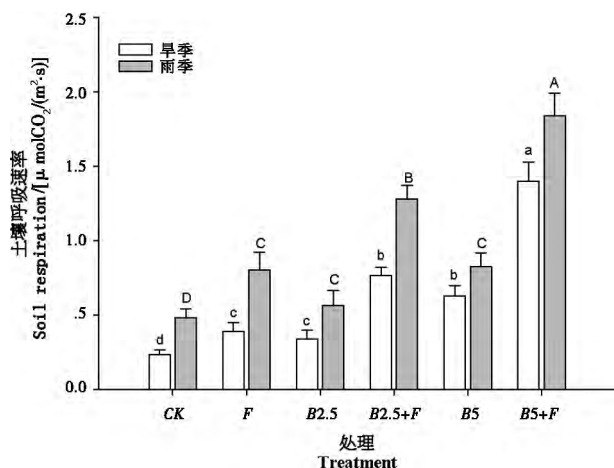
无论在旱季还是在雨季, 施肥以及施加生物炭对土壤温度没有显著性影响 (图 2), 不同的生物炭

表 1 不同处理土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties of different treatments

指标	处 理					
	CK	F	B2.5	B2.5 + F	B5	B5 + F
容重	1.07	1.05	1.04	1.06	1.02	0.99
pH 值	$5.49 \pm 0.09\text{b}$	$5.42 \pm 0.03\text{b}$	$5.5 \pm 0.04\text{b}$	$5.47 \pm 0.08\text{b}$	$5.79 \pm 0.04\text{a}$	$5.86 \pm 0.02\text{a}$
全碳 (g/kg)	$7.87 \pm 0.3\text{c}$	$7.57 \pm 0.1\text{c}$	$17.64 \pm 0.29\text{b}$	$18.1 \pm 0.2\text{b}$	$23.68 \pm 0.58\text{a}$	$23.23 \pm 0.65\text{a}$
全氮 (g/kg)	$1.08 \pm 0.04\text{c}$	$1.13 \pm 0.02\text{bc}$	$1.19 \pm 0.01\text{ab}$	$1.13 \pm 0.03\text{bc}$	$1.23 \pm 0.02\text{a}$	$1.16 \pm 0.03\text{b}$
全磷 (g/kg)	$0.36 \pm 0\text{e}$	$0.37 \pm 0\text{de}$	$0.39 \pm 0\text{cd}$	$0.4 \pm 0.02\text{bc}$	$0.43 \pm 0.01\text{a}$	$0.42 \pm 0.01\text{ab}$
有效磷 (mg/kg)	$0.15 \pm 0.03\text{b}$	$0.16 \pm 0.05\text{b}$	$0.73 \pm 0.27\text{b}$	$0.8 \pm 0.23\text{b}$	$2.75 \pm 0.66\text{a}$	$2.4 \pm 0.28\text{a}$
水解氮 (mg/kg)	$139.8 \pm 12.96\text{a}$	$125.2 \pm 5.83\text{a}$	$110.4 \pm 8.72\text{a}$	$107.8 \pm 5.45\text{a}$	$111.6 \pm 9.19\text{a}$	$112.2 \pm 7.06\text{a}$
铵态氮 (mg/kg)	$6.92 \pm 0.38\text{a}$	$6.71 \pm 0.2\text{a}$	$5.97 \pm 0.2\text{a}$	$5.69 \pm 0.3\text{a}$	$6.51 \pm 0.35\text{a}$	$6.24 \pm 0.75\text{a}$
硝态氮 (mg/kg)	$2.01 \pm 0.43\text{a}$	$1.3 \pm 0.84\text{ab}$	$0.36 \pm 0.06\text{b}$	$0.55 \pm 0.07\text{b}$	$0.34 \pm 0.04\text{b}$	$0.7 \pm 0.09\text{b}$

注: 不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) (different letters means significant difference in treatments ($P < 0.05$)).



注: 不同小写字母表示旱季不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示雨季不同处理间差异显著, 下同。Note: different capital and lowercase letters mean significant difference in treatments in dry season and rainy season respectively (the same below)

图 1 旱季和雨季不同处理的土壤呼吸速率

Fig. 1 Soil respiration rate of different treatments in dry and rainy season

处理与对照的土壤温度相比没有太大差异。所有处理雨季的土壤温度均高于旱季的土壤温度。

如图 3, 所有处理的土壤含水率均呈现出雨季高而旱季低的特点, 在雨季和旱季的土壤含水率均随着施肥和生物炭浓度的增加而增高, 均为 $B5 + F > B5 > B2.5 + F > B2.5 > CK + F > CK$ 。旱季的对照处理与其他处理有显著性差异, 土壤含水量比对照提高了 30.8% ~ 63.5%。而雨季对照处理的土壤含水率与单施肥料处理无显著差异, 与其他处理均有显著差异, 其中 $B5 + F$ 较对照增加了土壤含水量 76.3%, 最低则为 F , 增加了 26.9%。

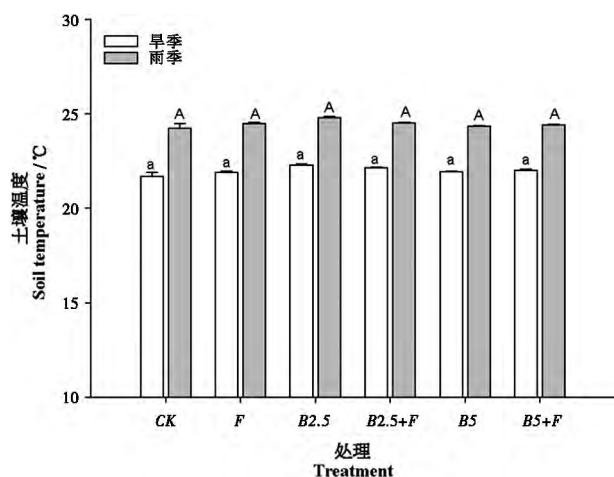


图 2 旱季和雨季不同处理的土壤温度比较

Fig. 2 Soil temperature of different treatments in dry and rainy season

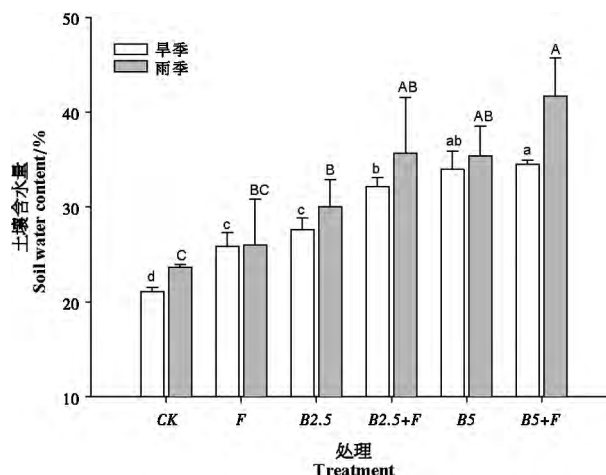


图 3 旱季和雨季不同处理的土壤含水量比较

Fig. 3 Soil water content of different treatments in dry and rainy season

2.4 生物炭对橡胶幼苗生物量的影响

幼苗收获后, 将幼苗地径与幼苗干物质量进行拟合, 可以得出方程式: $y = 0.0087e^{0.1578x}$ ($P < 0.0001$), 其中 y 为幼苗干物质量, 单位为 $kg \cdot day^{-1}$, x 为幼苗地径, 单位为 mm 。根据每个月测量的幼苗地径可以计算出幼苗每个月的生物量, 如图 5 所示。

从图 4 可以看出, 5 月施肥之前各处理幼苗生物量没有显示出太大的差距。施肥后, 施肥处理与不施肥处理的幼苗生物量差距表现得越来越明显。施肥处理的幼苗生物量均显著高于对照和未施肥的生物炭处理, 各施肥处理之间差异不显著, 其中 $B2.5 + F$ 处理的幼苗生物量最高。未施肥且施加生物炭的处理幼苗生物量低于对照处理, CK 的幼苗生物量显著高于 $B2.5$ 的生物量, 与 $B5$ 无差别, 表

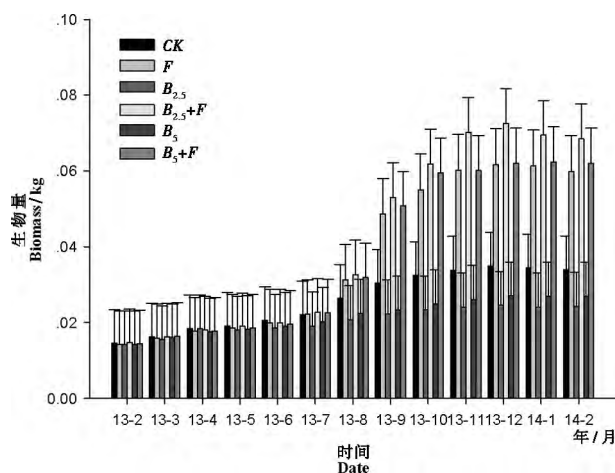


图 4 不同处理的橡胶幼苗生物量变化

Fig. 4 Seasonal variation of rubber seedling biomass in different treatments

现出生物炭对幼苗生长具有一定的抑制性。

2.5 生物炭对橡胶幼苗光合速率的影响

在同一光强下, $B2.5 + F$ 的光合速率最大, 为 $2.06 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。各处理的光合作用速率大小排列为 $B2.5 + F (2.06 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}) > B5 + F (1.95 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}) > B5 (1.88 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}) > B2.5 (1.84 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}) > F (1.79 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}) > CK (1.26 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1})$ 。其中, 对照处理的光合作用速率与其他处理均有显著性差异, 其他 5 个处理之间差异均不显著 (图 5)。

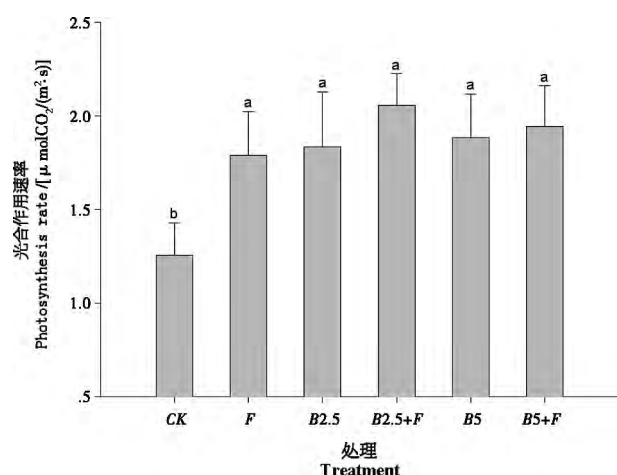


图5 不同处理的橡胶幼苗光合作用速率

Fig. 5 Photosynthesis rate of rubber seedling in different treatments

3 讨论

3.1 生物炭对土壤性质的影响

施加生物炭之后, 土壤容重降低, 土壤透气性有所增加。土壤容重越低, 其透气性越好, 有利于微生物及植物根系的生长。在热带, 橡胶人工林的长期人为管理和施肥容易造成土壤板结, 生物炭降低土壤容重, 可以改善土壤的通气性, 有利于提高微生物活性。生物炭可以增加土壤 pH 值, 从对照的 5.49 增到了 $B5 + F$ 的 5.86, 与 Vaccari 等^[30] 的实验结果相似, 但没有达到显著性差异。热带土壤因高温、降雨量大, 风化程度高而呈酸性, 土壤磷的有效性低。生物炭对土壤 pH 值的提高有助于缓解土壤的酸化, 提高土壤磷的有效性 (表 1)。通过对 371 个独立的生物炭实验进行 Meta 分析表明, 生物炭施加会提高土壤肥力, 如全磷、全氮、全碳等^[31]。本实验结果发现, 生物炭不同程度地提高了土壤的全碳、全氮、全磷和有效磷, 其中 5% 的生物炭和该浓度下的

施肥处理作用更加明显。除了生物量碳, 土壤碳库是森林系统中主要的碳库之一^[32], 增加土壤碳储量对于减缓全球变化具有重要作用。本研究表明, 生物炭能够增加土壤全碳 (表 1), 对于土壤固碳具有一定的潜力, 而生物炭对土壤有效磷含量的提高能够改善热带土壤因酸性大导致土壤磷有效性低的状态, 有利于促进植物的生长。生物炭能更好的保持土壤全碳、全氮等养分归因于生物炭提高了土壤阳离子交换量, 同时降低了土壤酸性^[33]。生物炭提高土壤有效磷可能与橡胶生物炭中含有大量的有效磷有关^[29], 土壤可以从生物炭得到额外的有效磷。此外, 生物炭本身含有大量的孔隙, 在保存土壤水分的同时可以容纳一定的土壤养分。因此, 生物炭通过离子交换、养分供给以及孔隙保持等将养分固定在浅土层, 有利于提高植物对养分的利用效率。本研究生物炭及施肥处理均降低了土壤硝态氮含量, 生物炭本身含氮量低^[29], 除了植物根系吸收外, 还可能与生物炭表面呈负电荷有关^[10]。

生物炭对土壤温度没有太大影响, 各处理土壤温度比较接近。土壤含水量随着施肥和生物炭浓度的增加而增加, 相比于对照, 旱季土壤含水量最高增加了 63.5%, 雨季则最高增加了 76.3%。这可能与生物炭本身结构有关。生物炭具有多孔结构, 本身可以吸附一定的水分, 加入土壤之后降低了土壤容重, 增加土壤孔隙度, 因而土壤含水量增加^[34]。

生物炭加入土壤后增加土壤孔隙度、降低土壤酸性以及对养分、水分的保持和提高可以在改善橡胶林土壤环境问题的同时增加土壤含碳量, 促进植物生物量的增长, 这对于提高橡胶产量、增强橡胶人工林固碳增汇能力具有现实意义。

3.2 生物炭对土壤呼吸的影响

土壤呼吸作为全球碳循环的一个重要组成部分, 其所释放的 CO_2 是大气中 CO_2 的主要来源, 土壤呼吸微小的变化可引起大气中 CO_2 浓度的明显改变^[35]。本实验结果表明, 生物炭会提高土壤呼吸速率, 增加土壤对大气的 CO_2 排放, 尤其 $B5 + F$ 的促进作用更为明显。旱季和雨季 $B5 + F$ 处理的土壤呼吸速率分别是对照的 4.96 倍和 2.83 倍。很多研究也表明, 生物炭会促进土壤向大气排放 CO_2 。生物炭和有机肥与土壤混合土柱实验结果表明, 生物炭增加了土壤 CO_2 的排放, 可能是土壤透气性的提高促进了需氧微生物的生长, 土壤孔隙度的增加促进了微生物的定居繁殖, 加速有机物的分解^[18]。

生物炭的加入会提高土壤的通气性,增加养分及水分,为根际微生物生长提供良好场所,从而促进土壤呼吸^[36]。Laird 等^[37]认为生物炭促进土壤呼吸可能是由于生物炭通过改变土壤容重、土壤孔隙度和土壤 pH 值为微生物提供了有利的生存条件。生物炭配合肥料使用后土壤呼吸速率比单独施加生物炭更高,可能植物在养分水分充足的情况下根系生长更旺盛,分泌物增多,土壤微生物代谢活动增强。土壤与生物炭混合后排放的 CO₂ 量因生物炭制备材料以及实验土壤类型的不同而有所差异。用柳枝稷制成的生物炭加入土壤 4 d 后土壤 CO₂ 排放量显著增加,但 6 d 后下降,各生物炭处理与对照之间没有显著差异^[38],而用不同原材料和热解温度制成的 16 种生物炭在农业土壤、森林土壤以及垃圾填埋土壤中进行的室内培养实验结果表明,每种生物炭在不同的土壤中对土壤 CO₂ 排放影响不一^[39]。

3.3 生物炭对橡胶幼苗生长的影响

单独施加生物炭处理和配合肥料施加生物炭处理的幼苗叶片光合作用速率均显著高于对照,可能是生物炭孔隙度大,在增加土壤透气性的同时可以吸附土壤养分并缓慢释放,施加肥料更能满足植物生长的需要。本实验幼苗在旱季时生长速度较慢,进入雨季后生长速度较快,尤其施肥处理的幼苗增长更明显。实验结果表明,单施生物炭并不能促进橡胶幼苗的生长,反而出现抑制现象,生物炭与肥料的混合使用更能促进幼苗生长。有研究表明,单施生物炭不能提高作物产量,而氮肥与生物炭一起施用,萝卜产量相比于对照最高增加了 266%,可能由于生物炭本身高的碳氮比限制了作物对氮的利用,施加氮肥后产量增加,说明生物炭有提高植物利用氮效率的潜力^[14];也有研究将单施生物炭对作物生长的抑制作用解释为植物对土壤硝态氮的吸收受到了抑制,即使生物炭改善了土壤环境,提高土壤有效磷含量^[40]。生物炭的挥发性有机化合物可能会对土壤及植物生长产生抑制作用^[41]。挥发性物质中的有毒物质比如苯酚会直接抑制植物根系的生长^[42],且在挥发物质含量高的生物炭中酚醛化合物会刺激微生物生长,从而引起氮的固定,土壤无机氮含量降低,植物对氮的吸收利用受到影响^[43]。本研究单施生物炭和配合施肥处理均提高了土壤有效磷含量,而未施加肥料的生物炭处理硝态氮浓度均低于该生物炭浓度下的施肥处理,是否受到氮的限制还需作进一步的研究。国内外研究生物炭对作物产

量或植物生物量的作用结果不一,这主要和生物炭的材料和制备温度、施加浓度、实验土壤性质以及植物性质等有关。马莉等^[16]用 450 °C、600 °C 和 750 °C 下制成的生物炭与土壤以 0.5%、1%、2% 质量比混合研究对小麦生长的影响,结果发现生物炭可以显著促进小麦生长,750 °C 制成的生物炭显著提高小麦地上部分的干物质的量,而 600 °C 制成的生物炭浓度由 0.5% 增加到 1% 可以提高第二茬小麦的生物量,而生物炭质量比为 2% 时小麦生物量反而有所下降,而在温带地区的田间生物炭施加实验表明,施加 30 t/hm² 和 60 t/hm² 的生物炭使小麦产量提高,且两个浓度之间没有显著差别,说明高浓度的生物炭也可以提高作物产量^[30]。

4 结 论

本实验结果表明,生物炭加入土壤可以改善土壤透气性,增加土壤含水量,降低土壤酸性,显著促进土壤呼吸速率。生物炭可以保持和提高土壤肥力,其中土壤全碳和有效磷得到大幅度的提高。单施生物炭并不能达到促进幼苗生长的效果,在与肥料混合使用时更能促进橡胶幼苗的生长。因此,在研究生物炭应用于橡胶林时建议与肥料一起施用,可以达到地上生物量(植物)固碳和地下土壤固碳的双重效果。

盆栽实验与田间条件有较大差异,为了科学地阐述生物炭对土壤理化性质、土壤呼吸及橡胶树生长的影响,还需进行长期的田间实验研究。

参考文献(References)

- [1] IPCC. Summary for policymakers of climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press 2013.
- [2] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press 2007: 129–234
- [3] Dhillon R, von Wuehlisch G. Mitigation of global warming through renewable biomass[J]. Biomass and Bioenergy 2013 48: 75–89
- [4] Dixon RK, Brown S, Houghton Rea, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science(Washington),1994 263: 185–189
- [5] Hoffert MI, Caldeira K, Jain AK, et al. Energy implications of future stabilization of atmospheric CO₂ content[J]. Nature 1998 395: 881–884

- [6] Silver W ,Ostertag R ,Lugo A. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands[J]. *Restoration Ecology* 2000 ,8: 394 – 407
- [7] Fang Jingyun ,Chen Anping. Dynamic forest biomass Carbon pool in China and their significance [J]. *Acta Botanica Sinica* ,2001 ,43 (9) :967 – 973 [方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. *植物学报* 2001 ,43(9) :967 – 973]
- [8] Tenenbaum DJ. Biochar: Carbon mitigation from the ground up[J]. *Environmental Health Perspectives* 2009 ,117: A70 – A73
- [9] Lehmann J ,Gaunt J ,Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review [J]. *Mitigation and adaptation strategies for global change* 2006 ,11: 395 – 419
- [10] Lehmann J ,Rillig MC ,Thies J ,et al. Biochar effects on soil biota – A review[J]. *Soil Biology & Biochemistry* 2011 ,43: 1812 – 1836
- [11] Li Feiyue ,Liang Yuan ,Wang Jianfei ,et al. Biochar to Sequester Carbon and mitigate greenhouses emissio: a review [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences* 2013 ,27(5) :681 – 686 [李飞跃,梁媛,汪建飞,等. 生物炭固碳减排作用的研究进展[J]. *核农学报* 2013 ,27(5) :681 – 686]
- [12] Steinbeiss S ,Gleixner G ,Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry* 2009 ,41: 1301 – 1310
- [13] Huang Chao ,Liu Lijun ,Zhang Mingkui. Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth [J]. *Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci.* 2011 ,37(4) :439 – 445 [黄超,刘丽君,章明奎. 生物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]
- [14] Chan K ,Van Zwieten L ,Meszaros I ,et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment [J]. *Soil Research* 2008 ,45: 629 – 634
- [15] Glaser B ,Lehmann J ,Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review [J]. *Biology and fertility of soils* 2002 ,35: 219 – 230
- [16] Ma Li ,Hou Zhenan ,Lv Ning. Effects of biochar application on wheat growth and Nitrogen balance [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences* 2012 ,49(4) :589 – 594 [马莉,侯振安,吕宁,等. 生物炭对小麦生长和氮素平衡的影响[J]. *新疆农业科学* ,2012 ,49(4) :589 – 594]
- [17] Lenton TM ,Vaughan NE. The radiative forcing potential of different climate geoengineering options [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2009 ,9: 5539 – 5561
- [18] Troy SM ,Lawlor PG ,O'Flynn CJ ,et al. Impact of biochar addition to soil on greenhouse gas emissions following pig manure application [J]. *Soil Biology and Biochemistry* 2013 ,60: 173 – 181
- [19] Kimetu JM ,Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents [J]. *Soil Research* 2010 ,48: 577 – 585
- [20] Sohi S ,Krull E ,Lopez – Capel E ,et al. A review of biochar and its use and function in soil [J]. *Advances in Agronomy* 2010 ,105: 47 – 82
- [21] Laird D ,Fleming P ,Wang B ,et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma* 2010 ,158: 436 – 442
- [22] Oguntunde PG ,Fosu M ,Ajayi AE ,et al. Effects of charcoal production on maize yield , chemical properties and texture of soil [J]. *Biology and Fertility of Soils* 2004 ,39: 295 – 299
- [22] Liu X ,Feng Z ,Jiang L ,et al. Rubber plantation and its relationship with topographical factors in the border region of China ,Laos and Myanmar [J]. *Journal of Geographical Sciences* 2013 ,23: 1019 – 1040
- [24] Tang Yanlin ,Deng Xiaobao ,Li Yuwu ,et al. Research on the different of soil fertility in the different forest types in Xishuangbanna [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* 2007 ,35(3) :779 – 781 [唐炎林,邓晓保,李玉武,等. 西双版纳不同森林类型土壤肥力差异性研究[J]. *安徽农业科学* 2007 ,35(3) :779 – 781]
- [25] Zhou Zong ,Hu Shaoyun ,Tan Yingzhong. Ecological environment impact from large-scale rubber planting in Xishuangbanna [J]. *Yunnan Environmental Science* 2006 ,25: 67 – 69 [周宗,胡绍云,谭应中. 西双版纳大面积橡胶种植与生态环境影响[J]. *云南环境科学* 2006 ,25: 67 – 69]
- [26] Li Mingrui ,Sha Liqing. Soil nitrogen mineralization under different land use patterns in Xishuangbanna [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* 2005 ,16(1) :54 – 58 [李明锐,沙丽清. 西双版纳不同土地利用方式下土壤氮矿化作用研究[J]. *应用生态学报* ,2005 ,16(1) :54 – 58]
- [27] Sha Liqing ,Zhengzheng ,Feng Lizhi ,et al. Biogeochemical cycling of Nitrogen at a Tropical Seasonal Rain Forest in Xishuangbanna , SW China [J]. *Acta Phytocologica Sinica* ,2002 ,26(6) :689 – 694 [沙丽清,郑征,冯志立,等. 西双版纳热带季节雨林生态系统氮的生物地球化学循环研究[J]. *植物生态学报* ,2002 ,26(6) :689 – 694]
- [28] Zhang M ,Schaefer DA ,Chan OC ,et al. Decomposition differences of labile Carbon from litter to soil in a tropical rain forest and rubber plantation of Xishuangbanna ,southwest China [J]. *European Journal of Soil Biology* 2013 ,55: 55 – 61
- [29] Dharmakeerthi R. Biochar and its potential uses in rubber plantations [J]. *Bulletin of the Rubber Research Institute of Sri Lanka* ,2010 ,51: 61 – 69
- [30] Vaccari F ,Baronti S ,Lugato E ,et al. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat [J]. *European Journal of Agronomy* 2011 ,34: 231 – 238
- [31] Biederman LA ,Harpole WS. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis [J]. *GCB Bioenergy* 2013 ,5: 202 – 214
- [32] Lal R. Forest soils and carbon sequestration [J]. *Forest ecology and management* 2005 ,220: 242 – 258
- [33] 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 and soil* 2010 ,327: 235 – 246
- [34] Gao Haiying ,He Xusheng ,Geng Zengchao ,et al. Effects of biochar and biochar-based Nitrogen fertilizer on soil water-holding capacity [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin* 2011 ,27(24) :207 – 213 [高海英,何绪生,耿增超,等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J]. *中国农学通报* ,2011 ,27(24) :207 –

- 213]
- [35] Schlesinger WH ,Andrews JA. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry* 2000 ,48: 7 – 20
- [36] Zimmerman AR ,Gao B ,Ahn M – Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry* 2011 ,43: 1169 – 1179
- [37] Laird DA ,Brown RC ,Amonette JE ,et al. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar[J]. *Biofuels ,Bioprod-ucts and Biorefining* 2009 ,3: 547 – 562
- [38] Smith JL ,Collins HP ,Bailey VL. The effect of young biochar on soil respiration [J]. *Soil Biology and Biochemistry* ,2010 ,42: 2345 – 2347
- [39] Spokas KA ,Reicosky DC. Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production [J]. *Annals of Environmental Sci-ence* 2009 ,3: 179 – 193
- [40] Asai H ,Samson BK ,Stephan HM ,et al. Biochar amendment tech-niques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties ,leaf SPAD and grain yield [J]. *Field Crops Research* , 2009 ,111: 81 – 84
- [41] Spokas KA ,Novak JM ,Stewart CE ,et al. Qualitative analysis of vol-atile organic compounds on biochar [J]. *Chemosphere* ,2011 ,85 (5) : 869 – 882
- [42] Fernandes MB ,Skjemstad JO ,Johnson BB ,et al. Characterization of carbonaceous combustion residues: I. Morphological ,elemental and spectroscopic features[J]. *Chemosphere* 2003 ,51(8) : 785 – 795
- [43] Deenik JL ,McClellan T ,Uehara G ,et al. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations [J]. *Soil Science Society of America Journal* ,2010 ,74(4) : 1259 – 1270

Effect of Biochar on Soil Properties and Rubber(*Hevea brasiliensis*) Seedling Biomass

PAN Libing^{1,2} ,XU Fanzhen^{1,2} ,SHA Liqing¹

(1. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology ,Xishuangbanna Tropical Botanical Garden ,Chinese Academy of Sciences ,Yunnan Kunming 650223 ,China;

2. University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China)

Abstract: A pot experiment was carried out with biochar (CK: 0; B2. 5: 2. 5% ; B5: 5% ; w/w) and fertilizer(0 kg/ hm² ; F: 300 kg/hm²) (totally 6 treatments: CK ,CK + F ,B2. 5 ,B2. 5 + F ,B5 and B5 + F) during 2014. The study investigated the effects of biochar application in rubber plantation on i) enhancing carbon sequestration ii) soil properties and iii) rubber seedling biomass. The study revealed that biochar application significantly increased soil pH ,soil water content (26. 9% ~ 76. 3% in rainy season and 30. 8% ~ 63. 5% in the dry season ,respectively) , Soil C ,Phosphorus and reduced soil bulk density ,soil nitrate. Soil available phosphorus of B5 and B5 + F treatments was raised to 18. 3 and 16 folds as compared to the control. Soil respiration in the dry and rainy season showed the same pattern: B5 + F > B2. 5 + F > B5 > F > B2. 5 > CK ,the control was significantly lower than any other treat-ments. Rubber seedling biomass of treatments with fertilizer showed a great difference from the control and treat-ments with biochar alone ,and B2. 5 + F was more remarkable. Both biochar and fertilizer also enhanced seedling photosynthetic rate dramatically. It was concluded that biochar changed the soil properties (soil moisture and most of soil nutrients that promote the growth of plants) and has a potential to improve carbon sequestration of both above and below ground. For this reason ,it is suggested that adding biochar with fertilizer rather than alone could enhance rubber seedling growth.

Key words: Biochar; soil nutrient; soil water content; soil respiration; rubber seedlings