

DOI: 10.5846/stxb201805281170

郭雄飞.生物炭对间作体系中刨花润楠生长及土壤养分年际变化的影响.生态学报,2019,39(13): - .

Guo X F.Effects of biochar on *Machilus pauhoi* growth and soil nutrient interannual variation in an intercropping system. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (13): - .

生物炭对间作体系中刨花润楠生长及土壤养分年际变化的影响

郭雄飞^{1, 2, 3, *}

1 西华师范大学环境科学与工程学院,南充 637000

2 西华师范大学环境科学研究所,南充 637000

3 华南农业大学资源环境学院,广州 510642

摘要:为探究生物炭对刨花润楠(*Machilus pauhoi*)的促生及土壤保肥的长期效应,以刨花润楠-梅叶冬青(*Ilex latifolia*)间作系统为研究对象,开展田间小区试验,研究 0 kg(CK)、1.2 kg(T1)、2.4 kg(T2)、和 4.8 kg(T3)4 个生物炭用量对 2015—2017 年间刨花润楠生长动态及土壤养分含量年际变化的影响。结果表明:移栽前期,刨花润楠生长较慢,但 16 月后生长速度加快。生物炭可促进刨花润楠株高、叶长及叶宽的生长,但不同用量间差异不显著;与对照相比,T1、T2 和 T3 处理下刨花润楠地上部干重分别增加 35.71%、59.02%和 31.81%,地下部干重分别增加 28.02%、39.69%和 20.52%;3 个年份生物炭处理下 0—15 cm 和 15—30 cm 土层 pH、有机质和速效钾含量均高于对照,且均随着生物炭施用量的增加而增加;生物炭处理下土壤全氮、全磷、全钾含量均略有提高。施用生物炭后,2015 年和 2016 年 0—15 cm 土层碱解氮含量降低,2017 年则有所增加,但影响不显著($P>0.05$)。15—30 cm 土层碱解氮含量变化不明显;生物炭对 2015 年 0—15 cm 土层有效磷含量的影响不显著,到 2016 年和 2017 年则增加其含量,且 T1 和 T3 处理下效应最显著。生物炭可增加 15—30 cm 土层有效磷含量,但到后期(2017 年)效应不显著($P>0.05$)。总体看来,不同处理下土壤各养分含量均表现为 0—15 cm>15—30 cm,2015 年>2016 年>2017 年。刨花润楠生物量与 0—15 cm 土壤养分含量间存在显著正相关性,各养分含量间也存在正相关关系。适量生物炭(T2)处理促生保肥效应最佳,且具有长效性。

关键词:生物炭;刨花润楠;土壤养分;年际变化

Effects of biochar on *Machilus pauhoi* growth and soil nutrient interannual variation in an intercropping system

GUO Xiongfei^{1, 2, 3, *}

1 College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637000, China

2 Institute of environmental science, China West Normal University, Nanchong 637000, China

3 College of Resources and Environmental Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: To explore the long-term effects of biochar on growth promotion and soil nutrients of the intercropping system of *Machilus pauhoi* and *Ilex latifolia*, a field plot experiment was carried out to study the growth dynamics of *M. pauhoi* and inter-annual variability of soil nutrient content from 2015 to 2017 under the treatment of four biochars of 0 (CK), 1.2 (T1), 2.4 (T2), and 4.8 kg (T3). The results showed that the *M. pauhoi* growth rate was slow in the early stage, but accelerated after transplantation at 16 months. Biochar promoted the height, leaf length, and leaf width growth of

基金项目:西华师范大学博士启动项目(412666)

收稿日期:2018-05-28; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gxfwnu@qq.com

M. pauhoi, but there was no significant difference between the different dosages. Compared with the control, the shoot dry weight of *M. pauhoi* under T1, T2, and T3 treatments increased by 35.71%, 59.02% and 31.81% respectively, whereas the root dry weight increased by 28.02%, 39.69%, and 20.52% respectively. The soil pH, organic matter, and available potassium content in 0—15 and 15—30 cm soil layers increased with biochar application rates over three years. After biochar application, the content of total nitrogen, phosphorus, and potassium in the soil increased slightly. The alkali hydrolysable nitrogen content in the 0—15 cm soil layer decreased in 2015 and 2016, but increased in 2017 and the increment effect was not significant ($P > 0.05$). There was no obvious change in alkali hydrolysable nitrogen content in the 15—30 cm soil layer. The change in available phosphorus content in the 0—15 cm soil layer in 2015 was not obvious after biochar application, but it increased in 2016 and 2017. In addition, the effect of T1 and T3 treatments were the most significant. Biochar increased the available phosphorus content in the 15—30 cm soil layer, but it was not significant later (year 2017) ($P > 0.05$). In general, the trend of the soil nutrient content under each treatment was: 0—15 > 15—30 cm, year 2015 > 2016 > 2017. There was a significant positive correlation between *M. pauhoi* biomass and the 0—15 cm soil nutrient content, and different soil nutrient contents. With respect to biochar application, the effect of T2 was most pronounced with regard to promoting growth and holding fertilizer and was also long lasting.

Key Words: biochar; *Machilus pauhoi*; soil nutrients; interannual variation

生物炭是近年来农林、环境等诸多领域关注的焦点,可由农林废弃物在缺氧条件下高温热裂解产生,不仅减少温室气体的排放^[1],还可变废为宝,提高农林废弃物的利用率^[2]。作为土壤改良剂,生物炭在改善土壤理化性质、增加土壤持水能力、持留土壤养分、促进植物生长、并能吸附重金属等有毒物质等方面显示出较大潜力^[3-5],在农林业上有较大范围的应用,对植物的生长及产量的提高均有较明显的促进作用,成为近年来的研究热点。

刨花润楠(*Machilus pauhoi*)为高大常绿阔叶乔木,属樟科润楠属植物^[6]。其树干挺直,树冠伞状,春季繁花似锦,新叶呈红色,极具观赏价值;树皮研粉后可用于各种熏香的调和剂;其种子含油率较高,可榨油,是优良的工业润滑油,亦可供制造蜡烛和肥皂等用途^[7]。同时刨花润楠木材芳香、细致,可用作柱、梁、家具等用材^[8],不但具有多种经济用途,而且具有重要的生态价值,是我国亚热带地区以及中亚热带地区品质优良的乡土阔叶树种,已被广西林业厅列入广西重点发展的珍贵树种。

目前,国内外有关刨花润楠的研究极少,且其中大部分只是简要阐述了刨花润楠生物育苗栽培技术、生态学特性和种植造林的基本措施^[9]。在自然生长条件下,刨花楠为深根性偏阴树种,幼苗生长缓慢,幼年喜荫耐湿,中年喜光喜湿,生长迅速,呈现“慢-快-慢-快-慢”的生长规律^[10],普遍来讲,其播种后前3年幼苗期生长速度较慢。随着广西珍贵树种发展脚步的加快及国家对珍贵树种培育的重视,有关刨花润楠的推广研究将会逐渐深入。

梅叶冬青(*Ilex asprella*),灌木,可高达3 m,适应性较强,移栽易成活,在肥沃或瘦瘠的地方均可生长,其根、叶均可入药^[11]。本章实验针对刨花润楠幼苗喜荫耐湿的特性,选择具有一定经济药用价值的梅叶冬青作为遮阴护理植物及绿肥,通过间作梅叶冬青为刨花润楠幼苗生长制造适宜的环境,还可以提高单位土地的经济效益,提高土壤的可持续利用性。同时设计施用生物炭改良土壤的处理,以提升土壤肥力,增加土壤持水特性,保证刨花润楠幼苗生长所需水分的供应。

目前关于生物炭的研究主要是针对农田土壤和农作物,对林地土壤改良及林木生长发育影响的研究则非常缺乏,并且大部分还停留在盆栽试验阶段,特别是在野外间作条件下,有关生物炭对不同发育年限植物生长动态及土壤长期生产力影响方面的研究甚少。鉴于此,本研究以刨花润楠-梅叶冬青间作系统为研究对象,开展田间水泥池小区试验,施用不同量生物炭,研究了种植3年间刨花润楠植株生长动态、3年试验期后其生物量变化情况、3年间0—15 cm和15—30 cm土层土壤pH、土壤养分含量年际变化情况。分析生物炭对刨花润

楠生长发育和土壤养分含量的影响,探讨生物炭对木本植物生长及林地环境的影响,为农林废弃物的资源化利用以及加强生物炭在活化林地土壤养分,改良土壤,提高造林成活率及改善地区生境等方面的研究与应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤:均采用广州市华南农业大学树木园林地表层土,下层采用广州市红壤,按照接近实际林地的土层厚度混合使用。

供试生物炭:生物炭为陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司提供,材料为废弃的果树树干、枝条,将原材料碎成小块后,充分干燥(80℃),然后充满氮气在裂解炉中(450℃)进行无氧热解 2 至 8 小时。最后,停火冷却至室温。磨细过 3 mm 筛。得到的生物炭的 pH 值为 10.3,C、H、N 和 O 的总含量分别为 72.38%、2.62%、1.19%和 23.81%。硝态氮和铵态氮含量分别为 0.52 mg/kg 和 1.86 mg/kg。

供试植物:刨花润楠苗木(购于广东省韶关市仁化县董塘镇苗圃)、梅叶冬青(购于广州市龙洞苗木公司)。

1.2 试验设计

试验于 2014 年 11 月在广州市华南农业大学资源环境学院农场,体积为 1 m×1 m×2 m、面积为 2 m²的水泥池中进行,共有 12 个水泥池,每个水泥池作为一个小区。折合每个小区的面积,生物炭与试验设置 4 个梯度的生物炭处理分别为:0、1.2、2.4、4.8 kg(林地施炭标准为 12 t/hm²,相当于本实验 1.2 kg 处理)。N 肥、P 肥和 K 肥分别采用尿素、过磷酸钙和硫酸钾,其施肥比例按照前人研究得出的刨花润楠种植的生物量最大的施用比例(尿素:过磷酸钙:硫酸钾=261:150:181,mg/株),按照苗木数量换算分别为每个水泥池 41.76 g 尿素、24 g 过磷酸钙和 28.96 g 硫酸钾的底肥。将各水平的生物炭与供试林地表层土混合,再用工具将其充分翻搅均匀,作为小区表层 0—15 cm 土层。先在每个水泥池底部填入 80 cm 厚度的广州红壤,然后在每个水泥池上部填入施加了生物炭的林地表层土。每个处理 3 个重复,所有处理随机排列。压紧至预定高度,尽量使土壤与实际林地土壤状态接近。其表层土壤的基本理化性质如表 1。

表 1 土壤基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

土样 Soil sample	pH	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	全钾 Total K/ (g/kg)	碱解氮 Alkaline nitrogen/ (mg/kg)	有效磷 Available P/ (mg/kg)	速效钾 Available K/ (mg/kg)
林地表层土 Surface soil of woodland	5.65	15.25	0.305	0.248	2.763	19.32	9.95	36.67
下层红壤土 Lower red soil	6.05	3.16	0.203	0.165	1.702	11.59	3.20	20.08

每个水泥池均按 9:6 比例设置刨花润楠+梅叶冬青间作。按照梅花种植模式,其模式如图 1:

1.3 样品采集与测定

生长指标的测定:分别在刨花润楠移栽后的 4、8、12、16、20、24、28 个月,测量其株高、叶长、叶宽动态变化,选取刨花润楠和望江南顶端的第 3 片复叶。每个处理选取 3 片测量,取其平均值。

生物量测定:经过 3 年试验期后采用收获法测定植株的生物量。

土壤样品的采集与测定:试验苗木栽植后,于 2015 年 3 月、2016 年 3 月、2017 年 3 月(其中,试验初期 2014 年 12 月取样测本底值),在每个小区内,按 S 形曲线选择 5 个取样点,每个取样点分 0—15 cm 和 15—30 cm 采集土壤样品,将同土层的 5 个样品混匀成一个。将土样在室内自然风干 2 周后磨碎过筛,采用电位计法

(土:水 = 1:1)测定土壤 pH 值;采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质;采用半微量凯氏定氮法测定土壤全氮;采用碱解扩散法测定土壤碱解氮;采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定土壤全磷;采用碳酸氢钠浸提-分光光度法测定有效磷;采用氢氧化钠熔融-火焰分光光度计法测定土壤全钾;采用 NH_4OAc 浸提-火焰分光光度计法测定速效钾。

1.4 数据统计

所有数据用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件进行数据处理和方差分析,多重比较采用最小显著差异法。

2 结果与分析

2.1 生物炭对刨花润楠幼苗生长动态的影响

2.1.1 生物炭对刨花润楠株高动态的影响

图 2 所示为刨花润楠株高生长动态,在移栽 4 个月后,施炭处理高于 CK,但不同施用量间差异不明显。移栽 8、12、16 和 20 个月后,相应处理下的增加幅度分别为 5.71%、16.56% 和 30.02%, 8.85%、17.89% 和 29.90%, 18.04%、26.81% 和 34.75%, 13.59%、25.30% 和 34.41%。说明随着生长期的延长,处理间差异逐渐增大。从研究所选取的整个生长期来看,移栽 12 个月后到 20 个月间刨花润楠株高生长速度最高,整个生长期持续保持较高的长势,且各生物炭处理下长势均高于 CK。

2.1.2 生物炭对刨花润楠叶长和叶宽动态的影响

图 3 所示为刨花润楠叶长及叶宽生长动态。移栽 4 个月后,施炭处理高于 CK,但不同用量间差异不明显,随着生长期的延长,各处理间的差异逐渐加大,移栽 20 个月后,施炭处理与 CK 间叶长和叶宽的差异显著 ($P < 0.05$),但各施用量间叶长差异不显著 ($P > 0.05$)。此期间叶宽与叶长的生长情况基本一致,但与叶长不同的是, T2、T3 处理间差异不显著 ($P > 0.05$),但均与 T1 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。从研究所选取的整个生长期来看,移栽后 4 个月到 12 个月间,刨花润楠叶长和叶宽生长相对平缓。叶宽和叶长的增长速度最快,长势最旺的时期分别为移栽 12 个月到 16 个月间和 12 个月

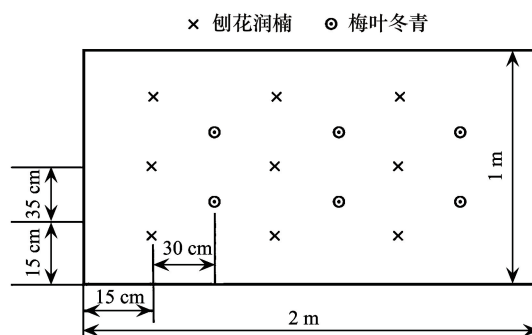


图 1 试验种植模式图

Fig.1 Experimental planting pattern

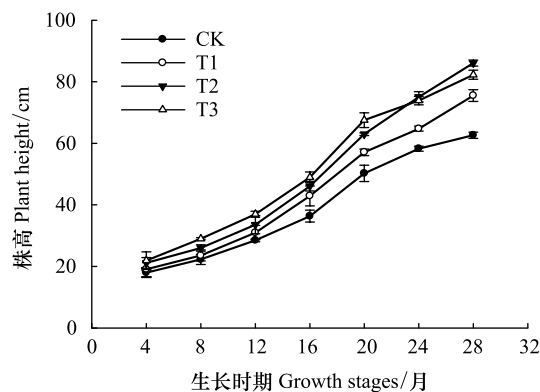


图 2 生物炭对刨花润楠株高的影响

Fig. 2 The effect of biochar on the plant height of *M. pauhoi*

CK:空白对照 Blank control; T1:施生物炭 1.2 kg Apply 1.2 kg of biochar; T2:施生物炭 2.4 kg Apply 2.4 kg of biochar; T3:施生物炭 4.8 kg Apply 4.8 kg of biochar

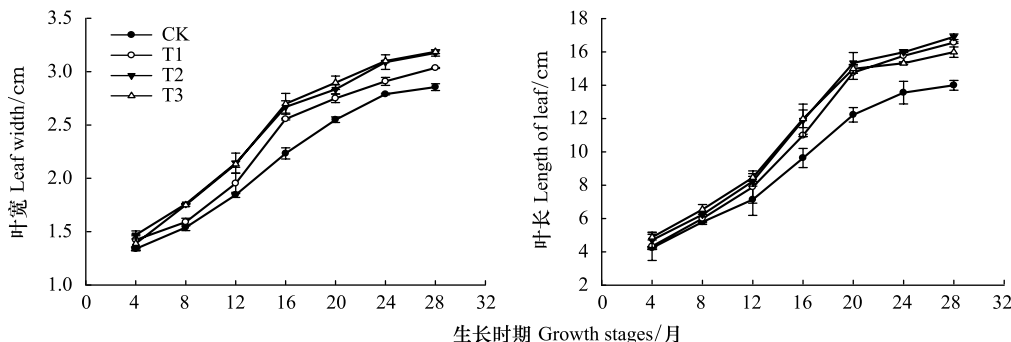


图 3 生物炭对刨花润楠叶长的影响

Fig.3 The effect of biochar on the leaf length of *M. pauhoi*

到 20 个月间,随后仍具有较高长势,但逐渐趋于平缓。

2.2 生物炭对刨花润楠幼苗生物量的影响

图 4 显示,各用量施炭处理下刨花润楠地上部和地下部根系干重均高于 CK。随生物炭施用量的增加,地上部和地下部干重均表现为先升高后降低,且 T2 处理下达最大。

2.3 生物炭对土壤 pH 及养分含量的年际动态影响

2.3.1 土壤 pH 和有机质

由图 5 可知,总体上看,施加生物炭可增加 3 个年份 0—15 cm 土壤 pH 和有机质含量,且均随着施炭量的增加而增加。施加生物炭较 CK 也可提高 15—30 cm 土壤 pH。其中,在 2016 年,15—30 cm 土壤 pH 随生物炭施用量的增加而增加,在 2017 年,不同处理间无显著性差异($P>0.05$)。在 2015 和 2017 年,生物炭处理下 15—30 cm 土层有机质含量均高于 CK 处理,但不同施用量间差异性不显著($P>0.05$)。在 2016 年,CK、T1、T2 间差异性不显著($P>0.05$),但 T3 显著高于其他处理($P<0.05$)。

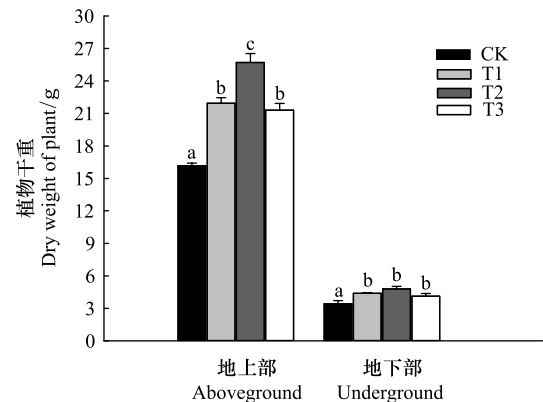


图 4 生物炭对刨花润楠干重的影响

Fig.4 The effect of biochar on the dry weight of *M. pauhoi*

不同的字母表示差异显著 ($P<0.05$)

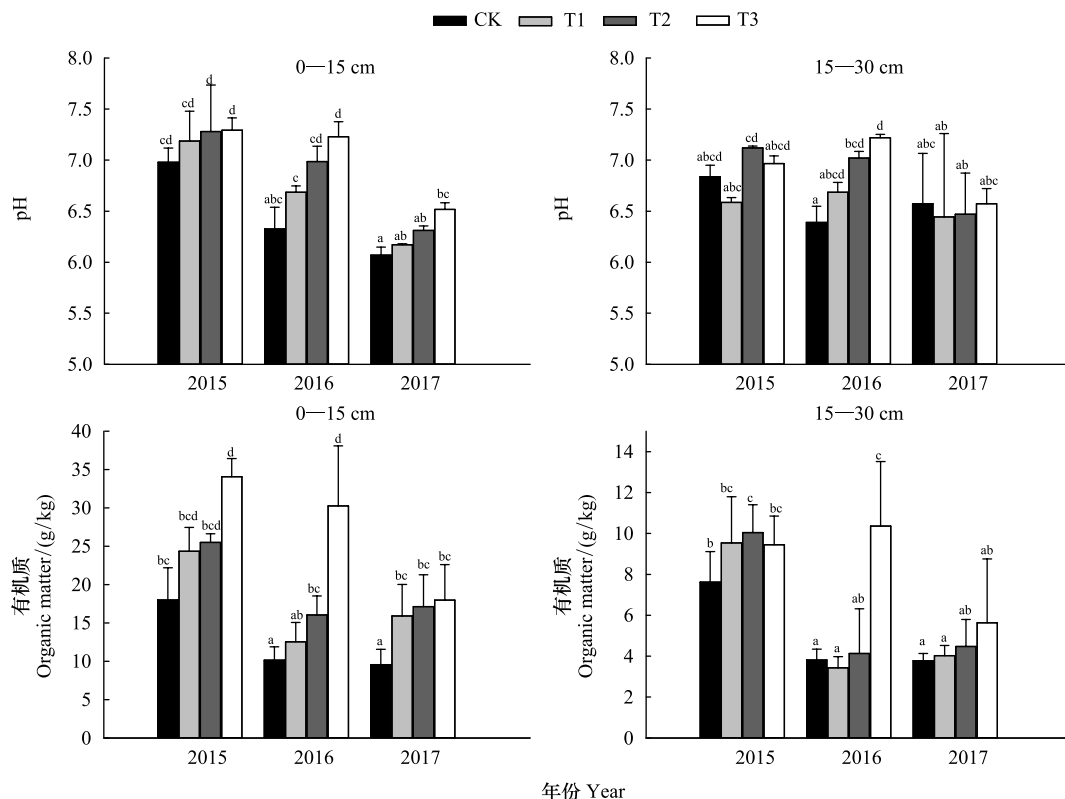


图 5 不同处理下 0—15cm 和 15—30cm 土层 pH 和有机质含量

Fig.5 Soil pH and organic matter contents of different treatment in 0—15cm and 15—30cm

2.3.2 土壤全氮和碱解氮

由图 6 可知,在 2015 年,施炭对 0—15 cm 土壤全氮含量及 15—30 cm 土壤碱解氮无明显规律性影响,增加了 15—30 cm 土壤全氮含量,显著降低了 0—15 cm 土壤碱解氮含量($P<0.05$)。在 2016 年,施炭处理降低

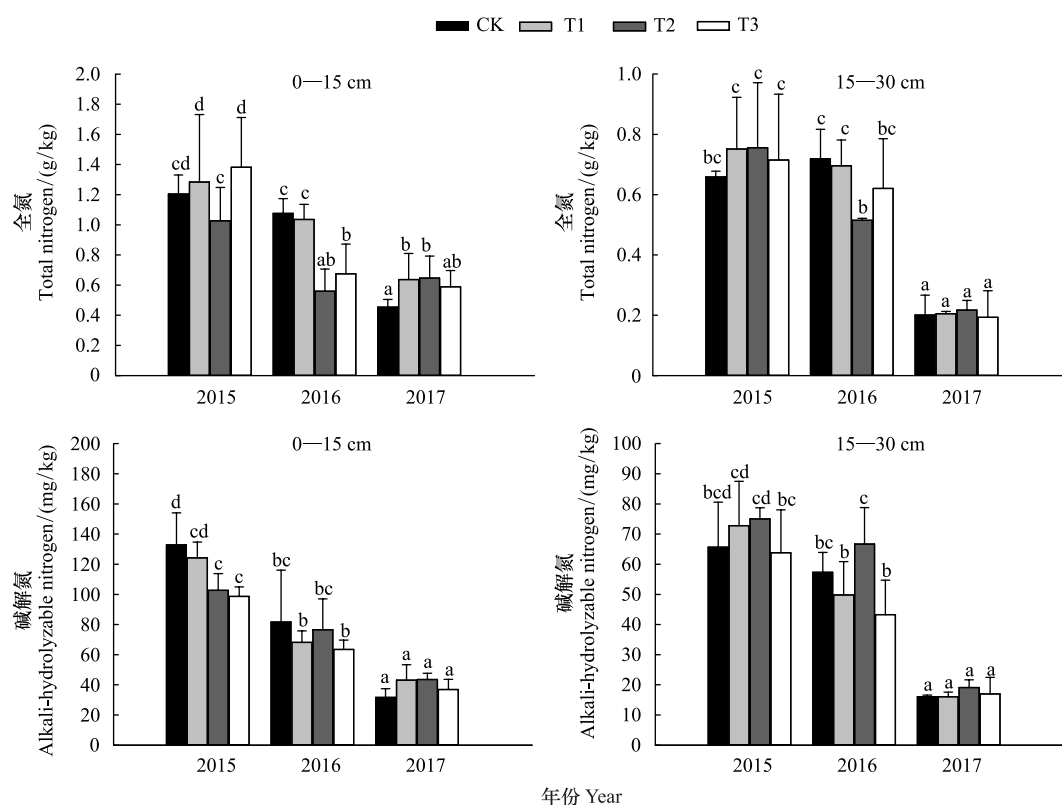


图6 不同处理下0—15cm和15—30cm土层全氮和碱解氮含量

Fig.6 Total and alkali-hydrolyzable nitrogen contents of different treatment in 0—15cm and 15—30cm

了不同深度土壤全氮和碱解氮含量,且 T2 对全氮下降幅度最大,T3 对碱解氮下降幅度最大。在 2017 年,施炭处理下不同深度土壤全氮和碱解氮含量均高于 CK,除 0—15 cm 土壤全氮在 T1 和 T2 处理下与 CK 间差异显著外($P<0.05$),各处理间均无显著差异($P>0.05$)。

2.3.3 土壤全磷和有效磷

由图 7 可知,就 0—15 cm 土壤而言,不同处理下土壤全磷和有效磷含量变化趋势一致。在 2015 年,施炭处理下 0—15 cm 土壤全磷含量均高于 CK,有效磷含量除 T1 外均低于 CK。在 2016 年,各处理间差异不显著($P>0.05$),除 T2 和 T3 较 CK 全磷有小幅度的降低外,施炭处理较 CK 均有一定程度的增加。在 2017 年,除 T2 和 T3 较 CK 全磷有小幅度的增加外,生物炭对土壤全磷及有效磷含量的影响与 2016 年类似。就 15—30 cm 土壤而言,土壤全磷含量在不同处理间无明显规律性变化,有效磷含量则表现为施炭处理下高于 CK,但各施炭量间差异不显著($P>0.05$)。

2.3.4 土壤全钾和速效钾

由图 8 可知,就 0—15cm 土壤全钾而言,在 2015 年,各处理间无显著差异($P>0.05$)。在 2016 年,T1 处理高于 CK,T2 和 T3 处理则低于 CK 处理。在 2017 年,T1、T2 和 T3 处理较 CK 有一定程度增加。3 个年份不同处理间 15—30 cm 土壤全钾均无显著性差异($P>0.05$)。总体上,3 个年份 0—15 cm 和 15—30 cm 土壤速效钾均随生物炭施用量的增加而增加。

此外,对比不同年份间的差异,0—15 cm 和 15—30 cm 土壤 pH、全钾、碱解氮和速效钾及 0—15 cm 土壤全氮均呈现出 2015 年>2016 年>2017 年。15—30 cm 土层全氮、0—15 cm 和 15—30 cm 土壤有机质、全磷含量均表现为:2015 年高于 2016 年和 2017 年,2016 年与 2017 年则无显著差异($P>0.05$)。土壤有效磷在不同年份间也无显著性差异($P>0.05$)。各处理下土壤 pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量均呈现出 0—15 cm 土层高于 15—30 cm 土层的趋势。与 0—15 cm 土层相比,15—30 cm 土壤受生物炭的影响较小。

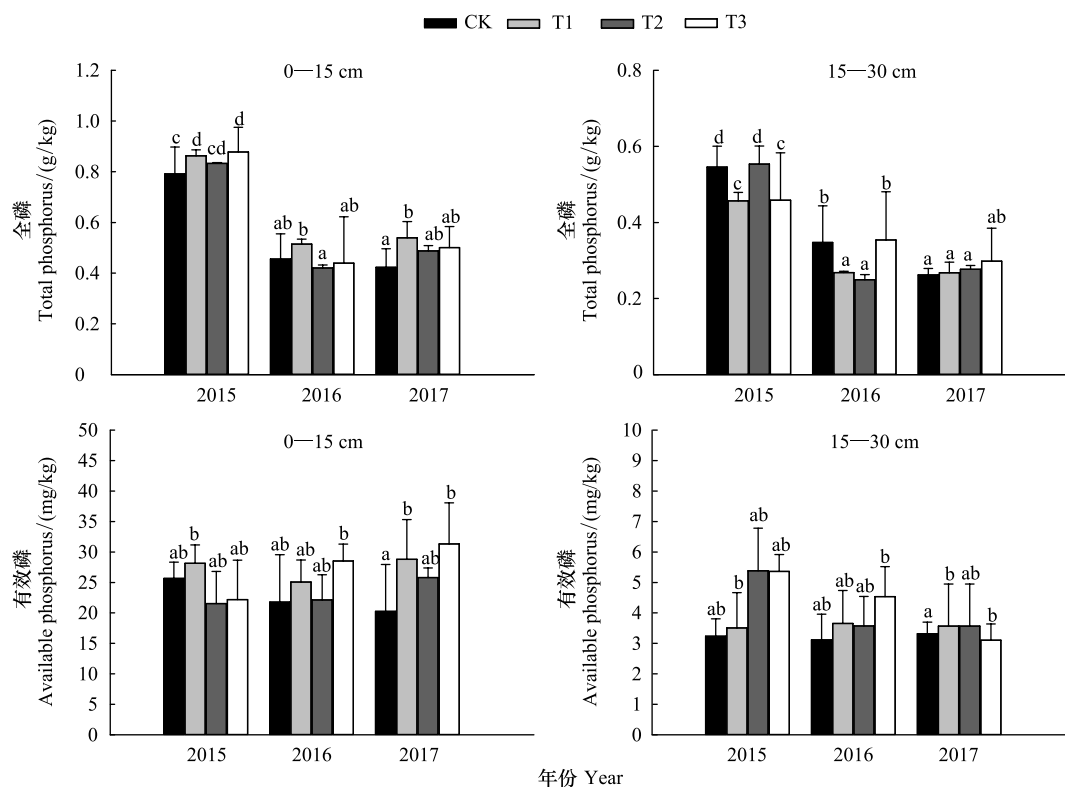


图 7 不同处理下 0—15cm 和 15—30cm 土层全磷和有效磷含量

Fig.7 Total and available phosphorus contents of different treatment in 0—15cm and 15—30cm

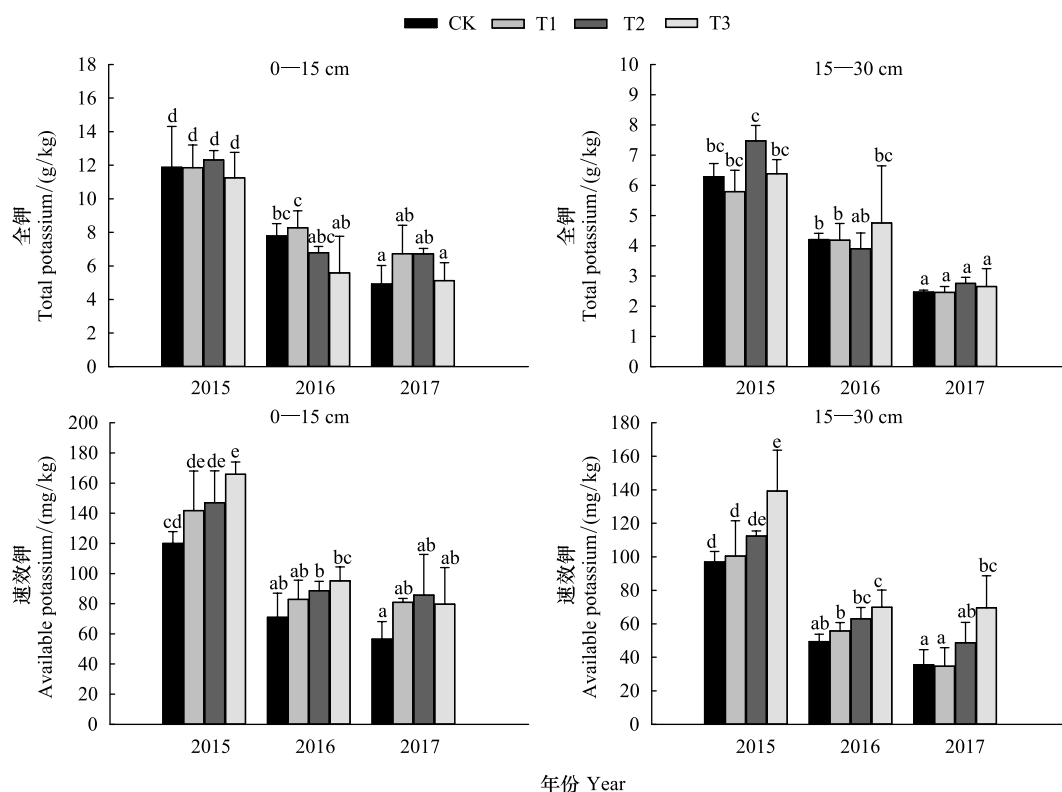


图 8 不同处理下 0—15cm 和 15—30cm 土层全钾和速效钾含量

Fig.8 Total and available potassium contents of different treatment in 0—15cm and 15—30cm

2.4 刨花润楠生物量、土壤 pH 与土壤养分含量间的相关性分析

本研究生物炭施用在土壤 0—15 cm 表层,因此,刨花润楠生物量和土壤养分间的相关性分析仅用表层(0—15 cm)土壤的养分来分析。表 2 结果显示,刨花润楠地上和地下部生物量与表层土壤养分含量均呈正相关关系,与土壤 pH 均呈负相关关系,且地上部生物量与全钾相关性未达显著性水平($P>0.05$),与土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷含量间均呈极显著正相关($P<0.01$),与土壤全磷和速效钾含量之间均呈显著正相关($P<0.05$),地下部生物量与土壤各养分含量间均呈极显著正相关($P<0.01$)。

土壤 pH 与土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量之间均呈负相关关系,其中与全氮和全磷的相关性达显著性水平($P<0.05$);土壤各养分含量间均呈正相关关系,其中,土壤有机质含量与全钾、有效磷和速效钾含量之间均呈显著正相关($P<0.05$);土壤全氮含量与全磷、全钾、有效磷、速效钾含量均呈显著正相关($P<0.05$),与碱解氮含量呈极显著正相关($P<0.01$);土壤全磷含量与土壤全钾和速效钾含量均呈显著正相关($P<0.05$),与有效磷含量呈极显著正相关($P<0.01$);土壤全钾含量与碱解氮和有效磷含量也均呈显著正相关($P<0.05$),与速效钾含量呈极显著正相关($P<0.01$);土壤碱解氮含量与土壤有效磷、速效钾含量之间,有效磷与速效钾含量之间均呈极显著正相关($P<0.01$)。综上所述,刨花润楠生物量与土壤养分含量之间具有较大的正相关系数,表明刨花润楠的生长与土壤的养分含量之间有密切的关系。

表 2 土壤 pH 与养分含量各指标间的相关性分析

Table 2 Correlation analyses between each index of soil pH and chemical properties

	地上生物量 Aboveground biomass	地下生物量 Underground biomass	pH	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	碱解氮 Alkaline nitrogen	有效磷 Available P	速效钾 Available K
地上生物量 Aboveground biomass	1									
地下生物量 Underground biomass	0.845 **	1								
pH	-0.401	-0.423	1							
有机质 Organic matter	0.902 **	0.936 **	-0.344	1						
全氮 Total N	0.732 **	0.863 **	-0.512 *	0.362	1					
全磷 Total P	0.601 *	0.724 **	-0.489 *	0.441	0.652 *	1				
全钾 Total K	0.429	0.696 **	-0.379	0.608 *	0.557 *	0.609 *	1			
碱解氮 Alkaline nitrogen	0.823 **	0.972 **	-0.345	0.444	0.779 **	0.456	0.580 *	1		
有效磷 Available P	0.847 **	0.933 **	-0.393	0.603 *	0.512 *	0.874 **	0.605 *	0.819 **	1	
速效钾 Available K	0.555 *	0.903 **	-0.171	0.676 *	0.559 *	0.607 *	0.683 **	0.700 **	0.711 **	1

* * $P<0.01$, * $P<0.05$

3 讨论

3.1 不同生物炭施用量对刨花润楠生长及生物量的影响

有关生物炭对作物生长及产量的影响已有不少研究。有田间试验表明,添加生物炭对当年玉米产量较对照无显著影响,但是从施用生物炭后的第二年(2016 年)开始玉米产量显著增加。这些试验在不同土壤环境以及气候中,其效应均有此表现^[12],这可能与生物炭改善了土壤理化性状,尤其是提高了土壤有效养分含量,从而促进了作物生长有关^[13-14],本研究结果显示,施用生物炭初期对刨花润楠苗高、叶长和叶宽的增长有一定程度的促进作用,但较 CK 差异不显著,且该生长期内刨花润楠生长速度相对较为平缓。施用生物炭第二年开始,刨花润楠的苗高、叶长和叶宽较 CK 差异逐渐增大并显著高于 CK,可能的原因是,生长初期,土壤养分充足,刨花润楠对养分的吸收达高限,生物炭固持土壤水分和养分促进植物生长的效应不明显,而生长一年后,土壤养分逐渐减少,生物炭的促生作用才得以体现,这与 Major^[12]和张娜^[15]等学者的研究结论一致,同时,与刨花润楠间作的梅叶冬青生物量也逐渐增大,形成了更多的枯落物充当绿肥,间作效应也逐渐增强,促

进了刨花润楠的生长,因此第二年到第三年间其生长速度加快。随生长期的延长,生长 2 年后,生物炭处理下的刨花润楠株高、叶长和叶宽均显著高于 CK 处理,收获时其植株干物质质量对生物炭的响应也是如此,但其增加幅度并非与生物炭施用量呈正比,T3 处理下其株高、植株干重均小于 T2。表明施用低量的生物炭有利于刨花润楠的生长与干物质积累,与较低生物炭施用量相比,高量生物炭施用对植物的生长发育影响则不显著。此外,从种植后 3 年的整个生长情况来看,适宜范围内施用生物炭具有明显的后发作用。植株在 2015 年、2016 年、2017 年 3 个生长期生长呈现出慢-快-慢的变化。

3.2 不同生物炭施用量对土壤 pH、养分含量的影响

由于生物炭本身呈碱性,因此施入土壤后可影响土壤 pH,尤其是对酸性土壤的影响尤为显著。试验中生物炭处理的土壤 pH 显著高于 CK,且随施炭量的增加而增加。各处理下土壤 pH 均表现为 0—15 cm 土层大于 15—30 cm 土层,这与施炭时施于土壤上层,因此生物炭对 0—15 cm 土壤 pH 的影响较 15—30 cm 显著有关。不同年份土壤 pH 呈现出 2015 年最高,且随时间的推移逐渐降低的趋势,其可能的原因是,生物炭本身呈碱性,施入土壤初期显著增加土壤 pH,但由于南方气候的原因,降雨量大,并多呈酸性,导致生长后期土壤 pH 又逐渐回低。

土壤有机质含量在生物炭处理下显著高于 CK,并随施炭量的增加呈现持续增高的趋势,且施用两年后(2017 年)增长趋势仍然显著,表明生物炭固持土壤有机质的性能具有长效性,这与前人研究结果一致^[16-17]。究其原因,多数学者认为生物炭通过吸附土壤有机质分子,催化小分子有机质聚合形成土壤有机质;另一方面,生物炭自身含碳量高,施入土壤后可以提高土壤有机质含量,且分解速度非常缓慢,可以对土壤肥力的提高起到长效作用^[18]。

施炭初期,土壤全氮含量在 0—15 cm 和 15—30 cm 土层上均高于 CK 处理,在 2016 年和 2017 年各处理间差异则不显著。这与张旭辉等^[19]和郭俊梅等^[20]研究结果一致。对于土壤全磷而言,各年份低用量生物炭(T1)处理均显著提高 0—15 cm 土层全磷含量,15—30 cm 则只在 2017 年表现出一定的增加效应。0—15 cm 和 15—30 cm 土层全钾含量在施炭后也略有增加,但不显著,与韩光明等^[21]的研究结果一致。

本研究中,生物炭施入土壤后,0—15 cm 土壤碱解氮含量在 2015 年和 2016 年均表现为随施炭量的增加而降低,15—30 cm 土层则有所增加。到 2017 年,上下层土壤各施炭处理间均无显著差异,但均高于对照,这与李明等^[22]水稻和玉米秸秆炭(500℃)的添加使红壤水稻土铵态氮减少,而硝态氮积累增加的研究结果一致。造成这种现象的原因可能是施入生物炭后,土壤 pH 值提高,导致土壤养分有效性降低以及土壤中 C/N 比提高,增强了土壤中有效氮的生物固定^[23-24],从而限制了土壤氮素的利用,而后期(2017 年)土壤 pH 又逐渐降低,使得该生物固定效应降低,并且由于生物炭的吸附功能,土壤碱解氮含量又逐渐小幅度增加。生物炭调节土壤有效氮含量以吸附土壤溶液中的硝态氮和铵态氮,减少土壤氮的淋溶损失^[23]和促进土壤中有机态氮的矿化为主^[25],表现出土壤碱解氮含量增加。

就土壤有效磷含量而言,生物炭对其在 0—15 cm 土层中浓度的影响随着时间的推移逐渐显著,在 15—30 cm 土层中则表现为生物炭处理下土壤有效磷含量均高于 CK 处理,这与 Su 等^[26]在两年的温室盆栽试验中得出生物炭可提高土壤有效磷含量的结论一致。本试验供试土为酸性土壤,施加生物炭后增加了土壤 pH 值,降低了可交换铝水平,释放闭蓄态磷,从而增加土壤有效磷^[27],但到 2017 年,高施用量的生物炭并不能持续增加 15—30 cm 土壤有效磷含量,这与高施炭量下 C/N 过高引起土壤中有效磷的生物固定,同时加剧了 Ca^{2+} 促磷酸根的沉降反应^[28]有关。且后期(2017 年)土壤 pH 回低,又减少了闭蓄态磷的释放。生物炭增加土壤有效磷含量的效应以吸附土壤溶液中的磷酸根,减少有效磷的淋溶^[29]和促进土壤有机态磷的矿化作用为主^[30]。

本研究还发现,施加生物炭可显著提高土壤中速效钾的含量,且随生物炭施用量的增加而增加,这与许多研究结果一致^[31-33]。生物炭能提高土壤速效钾含量,一方面可能是由于生物炭本身富含较多的可溶性钾,施入土壤后增加了土壤速效钾含量;或者生物炭具有较大的比表面积和丰富的官能团,可提高了土壤阳离子交

换量,从而增强了土壤中的钾离子的吸附^[34];另一方面可能是生物炭的孔隙结构能减小水分的渗滤速度,减缓土壤中 K^+ 的淋失,从而增加了土壤速效钾的含量^[35]。

此外,从 2015—2017 年,土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量随时间的推移均显著降低。究其原因,一方面,随着植物的生长,植株对土壤养分的吸收量增加,另一方面,土壤养分随降水逐渐流失。本研究中 0—15 cm 土层的养分含量较 15—30 cm 土层的高,其主要原因有三个方面的点,其一是基肥主要集中在 0—15 cm 土层,并且上层土是林地表层土壤,其养分含量本底值高于下层红壤土;其二是水泥池中枯落物集中于土壤表层,分解后增加了土壤表层养分含量;其三是施用生物炭时是将其施于 0—15 cm 土层,有利于 0—15 cm 土壤养分的固持。

3.3 刨花润楠生物量与土壤 pH、养分含量之间的相关性

本研究中,刨花润楠生物量与土壤养分含量呈显著或极显著正相关,且地下部生物量与土壤养分间的相关性大于地上部,说明刨花润楠的生长较程度上有赖于土壤养分的供给,并且对地下根系干物质质量积累的影响更加直接。表明本研究中土壤养分含量是限制刨花润楠生长的重要因子。土壤 pH 与土壤全氮和全磷含量呈显著负相关,说明 pH 影响了土壤氮、磷的形态分布。土壤各养分含量之间的相关性较大,尤其是土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量两两间均呈极显著正相关,土壤速效养分间的变化一致性可能与降水有关,雨水冲刷一定程度上能同步影响土壤中各水溶态养分含量,这与隋媛媛等^[36]和 Mendham 等^[37]的研究结论一致。

4 结论

(1)施用生物炭后第 2 年(2016 年),刨花润楠生长速度较快,其株高、叶长、叶宽等相比对照增加显著,光合作用强度增加,且 T2 处理下施炭效应最显著。2017 年测定其生物量,T2 处理对其植株干物质的积累促进效应最显著。

(2)施用生物炭后对 0—15 cm 和 15—30 cm 土壤 pH、有机质和速效钾含量的影响最明显,均随施炭量增加而显著增加。施炭后第一年(2015 年)及第三年(2017 年)也显著增加 0—15 cm 土壤全氮含量。T1 处理对土壤全磷含量的提高效应在 3 个年份都表现的较为明显。T2 处理在 2015 年对土壤全钾含量有提高效应,其他年份各处理下土壤全钾含量无显著差异。

(3)整体来看,不同处理下土壤中各养分含量均表现为 0—15 cm 高于 15—30 cm,且 2015 年土壤中各养分含量高于 2016 年,2016 年高于 2017 年。

(4)刨花润楠生物量与 0—15 cm 土壤养分含量存在显著正相关性,土壤 pH 与各养分含量间呈负相关关系,各养分含量之间也存在正相关关系,其中,碱解氮、有效磷、速效钾含量两两间均呈极显著正相关。速效养分(碱解氮、有效磷、速效钾)含量高的土壤,其他养分含量也高。

总体来看,施用生物炭均能提高土壤养分含量,促进了刨花润楠生长,提高其干物质积累。在本研究中,综合植株生长、土壤肥力等因素,以 T2 处理综合效应最好。该研究为生物炭在林地的应用、人工林土壤质量管理和可持续经营等方面提供参考。

参考文献(References):

- [1] Antal M J, Grønli M. The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2003, 42(8): 1619-1640.
- [2] 陈温福, 张伟明, 孟军. 生物炭与农业环境研究回顾与展望. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5): 821-828.
- [3] Lin Q M, Xu M G. Beyond biochar-soil, plant and environment: research progress and future prospects. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(3): 467-470.
- [4] Paz-Ferreiro J, Lu H, Fu S, Méndez A, Gascó G. Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: a review. *Solid Earth Discussions*, 2013, 5(2): 2155-2179.
- [5] O'Connor D, Peng T Y, Zhang J L, Tsang D C W, Alessi D S, Shen Z T, Bolan N S, Hou D Y. Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: a review of in situ field trials. *Science of the Total Environment*, 2018, 619-620: 815-826.

- [6] Zhu Q, Liao B Y, Li P, Li J C, Deng X M, Hu X S, Chen X Y. Phylogeographic pattern suggests a general northeastward dispersal in the distribution of *Machilus pauhoi* in South China. *PLoS One*, 2017, 12(9): e0184456.
- [7] 傅立国. 中国植物红皮书——稀有濒危植物. 北京: 科学出版社, 1992: 698-698.
- [8] 吴振伙, 吴兆平, 全尚龙. 刨花润楠综合利用价值及其育苗技术. *现代农业科技*, 2008, (20): 55-55.
- [9] 李桃祯. 氮磷钾配方施肥对刨花润楠幼林生长生理和土壤性质的影响研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [10] 钟全林, 胡松竹, 黄志强, 程建华, 肖水清. 刨花楠生长特性及其生态因子影响分析. *林业科学*, 2002, 38(2): 165-168.
- [11] Peng M H, Dai W P, Liu S J, Yu L W, Wu Y N, Liu R, Chen X L, Lai X P, Li X, Zhao Z X, Li G. Bioactive glycosides from the roots of *Ilex asprella*. *Pharmaceutical Biology*, 2016, 54(10): 2127-2134.
- [12] Major J, Rondon M, Molina D, Riha S J, Lehmann J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2): 117-128.
- [13] Wang H L, Lin K D, Hou Z N, Richardson B, Gan J. Sorption of the herbicide terbuthylazine in two New Zealand forest soils amended with biosolids and biochars. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(2): 283-289.
- [14] 姜玉萍, 杨晓峰, 张兆辉, 陈春宏, 王良军. 生物炭对土壤环境及作物生长影响的研究进展. *浙江农业学报*, 2013, 25(2): 410-415.
- [15] 张娜. 生物炭对麦玉复种体系作物生长及土壤理化性质的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2015.
- [16] 赵殿峰, 徐静, 罗璇, 饶智, 廖允成, 温晓霞, 孙渭, 徐世峰, 丁朋辉, 高明博. 生物炭对土壤养分、烤烟生长以及烟叶化学成分的影响. *西北农业学报*, 2014, 23(3): 85-92.
- [17] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, Chan K Y, Downie A, Rust J, Joseph S, Cowie A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 235-246.
- [18] Laird D A, Brown R C, Amonette J E, Lehmann J. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2009, 3(5): 547-562.
- [19] 张旭辉, 李治玲, 李勇, 王洋清. 施用生物炭对西南地区紫色土和黄壤的作用效果. *草业学报*, 2017, 26(4): 63-72.
- [20] 郭俊姆, 姜慧敏, 张建峰, 李玲玲, 张水勤, 谢义琴, 李先, 刘晓, 周贵宇, 杨俊诚. 玉米秸秆炭还田对黑土土壤肥力特性和氮素农学效应的影响. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 67-75.
- [21] 韩光明. 生物炭对不同类型土壤理化性质和微生物多样性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013.
- [22] 李明, 李忠佩, 刘明, 江春玉, 吴萌. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响. *中国农业科学*, 2015, 48(7): 1361-1369.
- [23] Deenik J L, McClellan A T, Uehara G. Biochar volatile matter content effects on plant growth and nitrogen transformations in a tropical soil//Western Nutrient Management Conference, Vol. 8. Salt Lake City, UT, USA, 2009: 26-31.
- [24] Clough T J, Condon L M, Kamman C, Müller C. A review of biochar and soil nitrogen dynamics. *Agronomy*, 2013, 3(2): 275-293.
- [25] Lehmann J, da Silva Jr J P, Steiner C, Nehls T, Zech W, Glaser B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343-357.
- [26] 苏倩, 侯振安. 生物炭对新疆灰漠土壤无机磷形态的影响. *新疆农业科学*, 2012, 49(11): 2102-2107.
- [27] 邱志腾. 生物炭对红壤的降酸效果与毛豆生长的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [28] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, Nehls T, Macedo J L V, Blum W E H, Zech W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, 2007, 291(1/2): 275-290.
- [29] Lehmann J, Rondon M. Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics//Uphoff N, ed. *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*. Boca Raton: CRC Press, 2006: 517-530.
- [30] Lehmann J, Joseph S. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. London: Earthscan, 2009: 15801-15811.
- [31] 勾芒芒, 屈忠义, 杨晓, 张栋梁. 生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 137-142.
- [32] 傅秋华, 张文标, 钟泰林, 张宏, 蒋文伟. 竹炭对土壤性质和高羊茅生长的影响. *浙江农林大学学报*, 2004, 21(2): 159-163.
- [33] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 张雯, 高海英. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响. *生态学报*, 2013, 33(20): 6534-6542.
- [34] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 袁国军. 生物炭与氮肥配施对土壤肥力及红枣产量、品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 468-475.
- [35] Chen Y, Shinogi Y, Taira M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(7): 526-530.
- [36] 隋媛媛, 杜峰, 张兴昌. 黄土丘陵区撂荒群落土壤速效养分空间变异性研究. *草业学报*, 2011, 20(2): 76-84.
- [37] Mendham D S, Sankaran K V, O'Connell A M, Grove T S. *Eucalyptus globulus* harvest residue management effects on soil carbon and microbial biomass at 1 and 5 years after plantation establishment. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(12): 1903-1912.