

# 生物炭基肥与平茬措施对喀斯特土壤养分含量及刺槐幼苗热能的影响

时正伦<sup>a,b</sup>, 郭雅倩<sup>a,b</sup>, 周之栋<sup>a,b</sup>, 朱倩<sup>a,b</sup>, 薛建辉<sup>a,b,①</sup>, 吴永波<sup>a,b</sup>

(南京林业大学: a. 生物与环境学院, b. 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

**摘要:**以喀斯特山地石灰土为基础栽培基质,以1年生刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)幼苗为实验对象,采用室外盆栽法研究了生物炭基肥(分别添加不同量的稻壳炭、木炭以及堆肥和化肥)和平茬措施(平茬高度分别为10、15和20 cm)对土壤养分含量及刺槐枝、叶的灰分含量、干质量和热能相关指标的影响。结果表明:施用生物炭基肥可显著增加土壤有机质和速效养分含量,其中,各施肥处理组的土壤有机质含量均较对照组提高13.49%~103.97%,速效氮、速效磷和速效钾含量也不同程度提高,以4%稻壳炭-堆肥-化肥和4%木炭-堆肥-化肥2个处理组的土壤有机质以及速效磷和速效钾含量的增幅较大;但平茬措施对土壤有机质和速效养分含量无显著影响。生物炭基肥和平茬措施对刺槐枝、叶的灰分含量、干质量和热能相关指标具有不同的影响效应。各施肥处理组的叶灰分含量显著低于对照组,枝灰分含量与对照组无显著差异,而枝、叶的干质量、干质量热值、去灰分热值和热量以及总干质量和总热量总体高于对照组;其中,施用4%稻壳炭-堆肥-化肥后,枝、叶的干质量、干质量热值、去灰分热值和热量以及总干质量和总热量均最高,较对照组分别提高28.41%、21.36%、22.94%、21.82%、23.01%、19.80%、54.52%、46.74%、24.84%和50.21%。采取不同平茬措施后,枝灰分含量及枝、叶的干质量热值和去灰分热值以及总热量无显著变化,但其他指标有显著差异。相关性分析结果表明:除土壤速效氮含量与幼苗总干质量、叶干质量热值与枝干质量热值和枝去灰分热值以及叶去灰分热值与枝干质量热值和枝去灰分热值的相关性不显著外,其他指标间均呈显著或极显著正相关。综合分析结果表明:施用生物炭基肥对土壤养分指标及刺槐热能相关指标有显著效应,平茬措施仅对刺槐枝、叶热量有显著效应,二者的交互作用仅对刺槐叶灰分含量、枝热量和总热量有显著效应。施用含4%稻壳炭的生物炭基肥并采取高度10 cm的平茬措施,可作为喀斯特石漠化山地刺槐能源林的适宜栽培措施之一。

**关键词:**刺槐;喀斯特土壤;生物炭基肥;平茬措施;土壤养分;热能

中图分类号: S792.27; Q945.12 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2019)02-0071-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2019.02.10

**Effects of biochar based fertilizer and stumping measure on karst soil nutrient content and heat energy of *Robinia pseudoacacia* seedlings** SHI Zhenglun<sup>a,b</sup>, GUO Yaqian<sup>a,b</sup>, ZHOU Zhidong<sup>a,b</sup>, ZHU Qian<sup>a,b</sup>, XUE Jianhui<sup>a,b,①</sup>, WU Yongbo<sup>a,b</sup> (Nanjing Forestry University: a. College of Biology and the Environment, b. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2019, 28(2): 71-78

**Abstract:** Taking lime soil from karst mountain area as basic cultivation medium and one-year-old seedlings of *Robinia pseudoacacia* Linn. as research object, effects of biochar based fertilizer (adding different amounts of rice husk biochar, wood biochar, and compost and chemical fertilizer, respectively) and stumping measure (stumping height at 10, 15 and 20 cm, respectively) on soil nutrient content and ash content, dry mass and heat energy related indexes of branch and leaf of *R. pseudoacacia* were studied

收稿日期: 2018-08-11

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFC0502605);“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD07B0404);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 时正伦(1994—),男,江苏南京人,硕士研究生,主要从事森林恢复生态学方面的研究。

①通信作者 E-mail: jhxue@cnbg.net

by using outdoor pot method. The results show that application of biochar based fertilizer can significantly increase contents of organic matter and available nutrient in soil, in which, organic matter content in soil of each fertilization treatment group increases by 13.49%–103.97% compared with that of the control group, and contents of available nitrogen, available phosphorus and available potassium also increase at different degrees, while increments of contents of organic matter, available phosphorus and available potassium in soil of two treatment groups of 4% rice husk biochar-compost-chemical fertilizer and 4% wood biochar-compost-chemical fertilizer are relatively large; however, stumping measure has no significant effect on contents of organic matter and available nutrient in soil. Biochar based fertilizer and stumping measure have different effects on ash content, dry mass and heat energy related indexes of branch and leaf of *R. pseudoacacia*. Ash content in leaf of each fertilization treatment group is significantly lower than that of the control group, and that in branch has no significant difference with that of the control group, while dry mass, dry mass calorific value, ash free calorific value and heat of branch and leaf, and total dry mass and total heat are generally higher than those of the control group; in which, dry mass, dry mass calorific value, ash free calorific value and heat of branch and leaf, and total dry mass and total heat are all the highest after application of 4% rice husk biochar-compost-chemical fertilizer, which increase by 28.41%, 21.36%, 22.94%, 21.82%, 23.01%, 19.80%, 54.52%, 46.74%, 24.84% and 50.21%, respectively compared with those of the control group. There is no significant change in ash content in branch and dry mass calorific value and ash free calorific value of branch and leaf, and total heat after different stumping measures, but there are significant differences in other indexes. The correlation analysis result shows that except that correlations of content of available nitrogen in soil with total dry mass of seedling, dry mass calorific value of leaf with dry mass calorific value of branch and ash free calorific value of branch, and ash free calorific value of leaf with dry mass calorific value of branch and ash free calorific value of branch are not significant, there are significant or extremely significant positive correlations among other indexes. The comprehensive analysis result shows that application of biochar based fertilizer has a significant effect on soil nutrient indexes and heat energy related indexes of *R. pseudoacacia*, while stumping measure only has a significant effect on heat of branch and leaf of *R. pseudoacacia*, and their interaction only has a significant effect on ash content in leaf, heat of branch and total heat of *R. pseudoacacia*. Application of biochar based fertilizer containing 4% rice husk biochar and taking measure of stumping height at 10 cm can be used as one of suitable cultivation measures for energy forest of *R. pseudoacacia* in karst rocky desertification mountainous area.

**Key words:** *Robinia pseudoacacia* Linn.; karst soil; biochar based fertilizer; stumping measure; soil nutrient; heat energy

在中国,贵州省分布的喀斯特地貌面积最大、发育最复杂,裸露的碳酸盐岩面积达  $15 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[1]</sup>,且该区域能源种类单一,以不可再生的煤炭能源为主,不利于经济的长期发展<sup>[2]</sup>,因而,开发新型能源成为贵州喀斯特地区可持续发展的重要举措之一。其中,建设林木生物质能源林可兼顾生态和经济效益,既能改善喀斯特地区的生境,又可解决喀斯特地区的经济和能源现状。近年来,对喀斯特地区植被森林的研究主要集中在植被恢复模式、人工造林技术及生物工程措施等方面<sup>[3-4]</sup>。但随着水土流失和人类活动的加剧,加之林木栽培成活率降低,喀斯特石漠化面积不断扩大,因此,选择合适的能源树种和经营措施对于喀斯特地区能源林建设至关重要。目前,发展森林生物质能源已被置于能源替代战略的重要地位<sup>[5]</sup>,但关于生物质能源林的开发和选育技术则有待进一步

的深入研究<sup>[6]</sup>。

刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)是一种适应性较强的树种,能够适应喀斯特地区贫瘠的土壤条件,已成为喀斯特地区植被恢复的适宜树种<sup>[7]</sup>;刺槐也是典型的能源树种,具有萌蘖力强、生长迅速、抗逆性强、生产成本低、饲料产量高和热能高等特点<sup>[8-9]</sup>。施用生物炭基肥和实施平茬措施是目前能源林建设的重要经营手段。生物炭基肥作为新型的绿色缓释肥,对土壤养分含量和植物生长具有积极的影响,可增加土壤养分、促进植株生长、提高能源林产量<sup>[10-14]</sup>。平茬可促进植株萌芽,使植物生长旺盛、营养价值增高<sup>[15]</sup>,是植物热能资源收获的重要技术之一。

作者采用室外盆栽法,以喀斯特山地石灰土为基础栽培基质,以1年生刺槐幼苗为实验材料,比较了

不同生物炭基肥施用方案与不同平茬措施交互作用下刺槐幼苗枝、叶的灰分含量、干质量和热能相关指标的差异,并同步分析了土壤养分含量的变化,以期明确施肥和平茬等栽培管理措施对喀斯特土壤养分含量以及刺槐幼苗生长和热能的影响效应,为贵州喀斯特地区刺槐能源林建设提供基础研究数据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

供试土壤采自贵州省安顺市普定县白岩镇原生日地,具体地理坐标为北纬  $26^{\circ}09' \sim 26^{\circ}31'$ 、东经  $105^{\circ}27' \sim 105^{\circ}58'$ ,为典型的喀斯特地貌。土壤为棕色石灰土,采自地表耕作层,取土深度  $0 \sim 20$  cm。土壤理化性质:土壤容重  $1.48 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , pH 7.72,有机质含量为  $14.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效氮、速效磷和速效钾含量分别为  $134.88$ 、 $10.62$  和  $248.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试生物炭为稻壳炭和木炭(热解温度  $500^{\circ}\text{C}$ 、烧制时间  $40$  min)。稻壳炭:pH 9.41,灰分、总碳、总氮、速效磷和速效钾含量分别为  $13.5\%$ 、 $46.3\%$ 、 $0.6\%$ 、 $21.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $2.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,比表面积  $91.45 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。木炭:pH 8.89,灰分、总碳、总氮、速效磷和速效钾含量分别为  $63.5\%$ 、 $58.9\%$ 、 $1.3\%$ 、 $53.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $2.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,比表面积  $380.83 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

供试堆肥为猪粪堆肥, pH 8.50,总养分含量为  $4.24\%$ ,有机质、总氮、总磷和总钾含量分别为  $82.3\%$ 、 $1.17\%$ 、 $1.82\%$  和  $0.71\%$ 。

供试化肥为 NPK 复合肥,由尿素(含  $46.7\% \text{ N}$ )、磷酸二氢铵(含  $61.7\% \text{ P}_2\text{O}_5$ ) 和氯化钾(含  $63.2\% \text{ K}_2\text{O}$ ) 按照质量比  $3.6:2.7:1.8$  的比例混合而成。

供试材料为 1 年生刺槐幼苗,生长旺盛且长势均匀,株高  $(60 \pm 5)$  cm、地径  $(6.0 \pm 2.0)$  mm。

### 1.2 方法

1.2.1 实验设计 采用室外盆栽法进行生物炭基肥与平茬交互实验,设置 6 个生物炭基肥处理和 3 个平茬处理,共 18 个处理,每个处理设置 6 个重复。

6 个生物炭基肥处理分别为 BF0(CK)、BF1(堆肥-化肥)、BF2(2%稻壳炭-堆肥-化肥)、BF3(4%稻壳炭-堆肥-化肥)、BF4(2%木炭-堆肥-化肥)和 BF5(4%木炭-堆肥-化肥),其中生物炭添加量分别为 2% 和 4% (质量分数)。BF0:以 9 kg 石灰土作为栽培基质;BF1:在 9 kg 石灰土中分别加入 136 g 堆肥和

1 份化肥(包含 3.6 g 尿素、2.7 g 磷酸二氢铵和 1.8 g 氯化钾);BF2:在 9 kg 石灰土中分别加入 180 g 稻壳炭、136 g 堆肥和 1 份化肥。BF3:在 9 kg 石灰土中分别加入 360 g 稻壳炭、136 g 堆肥和 1 份化肥;BF4:在 9 kg 石灰土中分别加入 180 g 木炭、136 g 堆肥和 1 份化肥;BF5:在 9 kg 石灰土中分别加入 360 g 木炭、136 g 堆肥和 1 份化肥。

3 个平茬处理分别为 S1、S2 和 S3。S1:在茎高 10 cm 处进行平茬;S2:在茎高 15 cm 处进行平茬;S3:在茎高 20 cm 处进行平茬。

1.2.2 处理方法和样品采集 实验于 2017 年 1 月至 10 月在南京林业大学下蜀林场进行。

采用固液吸附法制作生物炭基肥,将生物炭、堆肥和化肥按上述实验设计分别混合后溶于一定体积水中,充分搅拌混匀并静置平衡 24 h,然后置于  $60^{\circ}\text{C}$  烘箱中烘干至恒质量,装于自封袋中保存、备用。

按上述实验设计将生物炭基肥与 9 kg 石灰土充分混合均匀,装入上口口径 23 cm、高度 32 cm 的花盆中,盆底垫托盘;平衡 1 周后栽植刺槐幼苗,每盆 1 株,同时进行平茬。栽植过程中采取常规栽培措施(除草和病虫害防治等),定期浇水并将托盘中渗漏的水分倒回盆中以减少养分流失。于 2017 年 10 月结束处理。

处理结束后,采用四分法<sup>[16]1-3</sup>采集土壤样品,取土深度  $0 \sim 15$  cm,将土样混合后作为 1 个重复;于阴凉通风处自然风干,去除石砾后过筛(2 mm),用于土壤养分含量测定。同时用枝剪剪取刺槐幼苗的地上部分,用蒸馏水冲洗,分别收集各单株全部的枝、叶,于  $105^{\circ}\text{C}$  杀青 15 min,再于  $75^{\circ}\text{C}$  烘干至恒质量,粉碎后过筛(2 mm),用于测定植物枝、叶的灰分含量、干质量和热能相关指标。

1.2.3 土壤和植物样品测定 采用低温外热重铬酸钾氧化-比色法<sup>[16]36-39</sup>测定土壤有机质含量;采用碱解扩散法<sup>[16]42-44</sup>测定土壤速效氮含量;采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法<sup>[16]54-56</sup>测定土壤速效磷含量;采用乙酸铵浸提-火焰光度法<sup>[16]67-68</sup>测定土壤速效钾含量。各指标重复测定 3 次,结果取平均值。

采用直接灰化法<sup>[17]46</sup>分别测定每株幼苗的枝、叶灰分含量;采用烘干称重法<sup>[17]40</sup>分别测定每株幼苗的枝、叶干质量,二者之和即为每株幼苗的总干质量。分别称取 0.5 g 枝、叶样品粉末,用 DZLR 全自动量热仪(南京大展机电技术研究所)测定单位干质量枝、

叶完全燃烧所释放的热值(干质量热值);按照公式“去灰分热值=干质量热值/(1-灰分含量)”分别计算枝、叶去灰分热值;按照公式“热量=干质量×干质量热值”分别计算每株幼苗的枝、叶热量,二者之和即为每株幼苗的总热量。

### 1.3 数据处理和分析

采用 SPSS 19.0 和 EXCEL 12.0 软件进行数据统计、分析和作图;采用 Duncan's 新复极差法对各指标进行双因素和单因素方差分析以及相关性和多重比较。

通过双因素方差分析检验,生物炭基肥处理对土壤养分指标及热能相关指标的影响具有统计学意义,而平茬措施对除枝、叶热量外的其他指标的影响均无统计学意义,二者的交互作用仅对叶灰分含量、枝热量和总热量的影响有统计学意义,因此,每一生物炭

基肥处理组的数据均由同一施肥水平下 3 个平茬处理(S1、S2 和 S3)的数据计算获得,而每一平茬处理组的数据也由同一平茬措施下 6 个生物炭基肥处理(BF0、BF1、BF2、BF3、BF4 和 BF5)的数据计算获得。

## 2 结果和分析

### 2.1 生物炭基肥和平茬措施对喀斯特土壤养分含量的影响

生物炭基肥和平茬措施对喀斯特土壤养分含量的影响见表 1。分析结果表明:生物炭基肥对土壤有机质和速效养分含量有显著( $P<0.05$ )影响,平茬措施对土壤有机质和速效养分含量无显著影响,生物炭基肥与平茬措施的交互作用对土壤有机质和速效养分含量无显著影响。

表 1 生物炭基肥和平茬措施对喀斯特土壤养分含量的影响( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Effects of biochar based fertilizer and stumping measure on karst soil nutrient content ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

编号 No.	处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	有机质含量/% Content of organic matter	速效氮 含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Content of available nitrogen	速效磷 含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Content of available phosphorus	速效钾 含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Content of available potassium
BF0(CK)	9 kg LS	2.52±0.07f	101.59±3.23c	10.98±0.38c	163.52±9.73d
BF1	9 kg LS, 136 g Co-CF	2.86±0.06e	118.17±6.66ab	53.51±3.07b	383.44±9.55c
BF2	9 kg LS, 2%RHB-136 g Co-CF	4.44±0.16c	110.60±4.16b	62.82±1.89ab	686.84±93.99b
BF3	9 kg LS, 4%RHB-136 g Co-CF	5.14±0.02a	119.24±1.24a	71.34±6.17a	859.91±28.63a
BF4	9 kg LS, 2%WB-136 g Co-CF	4.08±0.21d	121.61±4.43a	63.26±7.50ab	603.82±32.27b
BF5	9 kg LS, 4%WB-136 g Co-CF	4.93±0.03b	113.95±0.88ab	63.53±1.93ab	684.76±11.73b
S1	平茬高度 10 cm Stumping height at 10 cm	3.95±1.04a	113.79±9.02a	55.65±22.85a	566.19±226.16a
S2	平茬高度 15 cm Stumping height at 15 cm	4.01±0.98a	114.64±13.29a	55.54±22.73a	546.43±226.90a
S3	平茬高度 20 cm Stumping height at 20 cm	4.02±1.00a	114.14±7.03a	53.53±25.11a	580.53±269.29a

<sup>1)</sup> 同列中同类处理间不同的小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ) Different lowercases among the same type of treatments in the same column indicate the significant ( $P<0.05$ ) difference.

<sup>2)</sup> LS: 石灰土 Lime soil; Co: 堆肥 Compost; CF: 化肥(包含 3.6 g 尿素、2.7 g 磷酸二氢铵和 1.8 g 氯化钾) Chemical fertilizer (including 3.6 g urea, 2.7 g monoammonium phosphate and 1.8 g potassium chloride); RHB: 稻壳炭 Rice husk biochar; WB: 木炭 Wood biochar.

由表 1 可见,各施肥处理组的土壤有机质含量均显著高于对照(BF0, CK)组,增幅为 13.49%~103.97%;土壤有机质含量随生物炭施加量的增加而升高,其中,稻壳炭基肥对土壤有机质含量的提升效果优于木炭基肥。各施肥处理组的土壤速效氮含量均显著高于对照组,以 BF4(2%木炭-堆肥-化肥)处理组的土壤速效氮含量最高(121.61 mg·kg<sup>-1</sup>)。各施肥处理组的土壤速效磷和速效钾含量均显著高于对照组,其中,稻壳炭基肥处理组的土壤速效磷和速效钾含量总体上高于木炭基肥处理组,且以 BF3(4%

稻壳炭-堆肥-化肥)处理组对土壤速效磷和速效钾含量的提升效果明显。

由表 1 还可见:3 个平茬处理组的土壤有机质、速效氮和速效磷含量均无明显变化,仅速效钾含量有一定程度的变化,以 S3(平茬高度 20 cm)处理组的土壤速效钾含量最高,分别较 S1(平茬高度 10 cm)和 S2(平茬高度 15 cm)处理组提高 2.53%和 6.24%。

### 2.2 生物炭基肥和平茬措施对刺槐幼苗单株枝、叶的灰分含量和干质量以及热能相关指标的影响

#### 2.2.1 对灰分含量和干质量的影响 生物炭基肥和

平茬措施对刺槐幼苗单株枝、叶的灰分含量和干质量的影响见表 2。分析结果显示:生物炭基肥和平茬措施各自对枝、叶的灰分含量和干质量以及总干质量无显著影响,生物炭基肥与平茬措施的交互作用仅对叶灰分含量有显著( $P < 0.05$ )影响。

由表 2 可见:各施肥处理组的叶灰分含量显著低于对照(BF0, CK)组,降幅为 7.14%~14.72%,但各施肥处理组的枝灰分含量与对照组无显著差异。除 BF4(2%木炭-堆肥-化肥)处理组的枝干质量低于对照组外,各施肥处理组的枝、叶干质量以及总干质量均高于对照组。其中,BF3(4%稻壳炭-堆肥-化肥)处理组的枝、叶干质量和总干质量均最高,较对照组

分别提高 28.41%、21.36%和 24.84%,且其枝、叶干质量和总干质量与对照组差异显著;BF5(4%木炭-堆肥-化肥)处理组的枝、叶干质量以及 BF1(堆肥+化肥)处理组的枝、叶干质量也高于对照组,且与对照组差异显著。

由表 2 还可见:3 个平茬处理组的枝灰分含量无显著变化,其他指标存在一定差异。其中,S3(平茬高度 20 cm)处理组的枝、叶灰分含量以及枝干质量和总干质量均最低、叶干质量最高,且其叶灰分含量和叶干质量与 S1(平茬高度 10 cm)和 S2(平茬高度 15 cm)处理组差异显著,而其枝干质量和总干质量仅与 S1 处理组差异显著。

表 2 生物炭基肥和平茬措施对刺槐幼苗单株枝、叶的灰分含量和干质量的影响( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Effects of biochar based fertilizer and stumping measure on ash content and dry mass of branch and leaf of individual of *Robinia pseudoacacia* Linn. seedlings ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

编号 No.	处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	灰分含量/% Ash content		干质量/g Dry mass		
		枝 Branch	叶 Leaf	枝 Branch	叶 Leaf	总计 Total
BF0(CK)	9 kg LS	4.22±0.62a	9.24±0.51a	10.91±1.09b	11.19±2.39b	22.10±2.52b
BF1	9 kg LS, 136 g Co-CF	4.11±0.51a	8.42±0.79b	11.82±2.31a	13.23±1.65a	25.04±2.48b
BF2	9 kg LS, 2%RHB-136 g Co-CF	4.06±0.40a	8.52±0.30b	10.89±2.53b	12.32±0.97ab	23.21±2.61b
BF3	9 kg LS, 4%RHB-136 g Co-CF	4.33±0.31a	7.88±0.57b	14.01±4.25a	13.58±1.04a	27.59±4.14a
BF4	9 kg LS, 2%WB-136 g Co-CF	4.67±0.86a	8.58±1.30b	9.83±2.30c	12.57±1.78ab	22.40±2.21b
BF5	9 kg LS, 4%WB-136 g Co-CF	4.35±0.44a	8.39±0.60b	11.83±4.84a	12.68±1.31a	24.51±5.15b
S1	平茬高度 10 cm Stumping height at 10 cm	4.41±0.75a	8.64±0.58a	13.73±4.03a	11.86±1.81b	25.59±5.23a
S2	平茬高度 15 cm Stumping height at 15 cm	4.24±0.52a	8.69±0.78a	11.29±2.66ab	12.33±1.52b	23.62±2.78ab
S3	平茬高度 20 cm Stumping height at 20 cm	4.24±0.43a	8.18±1.02b	9.62±1.73b	13.59±1.48a	23.21±2.46b

<sup>1)</sup> 同列中同类处理间不同的小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ) Different lowercases among the same type of treatments in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference.

<sup>2)</sup> LS: 石灰土 Lime soil; Co: 堆肥 Compost; CF: 化肥(包含 3.6 g 尿素、2.7 g 磷酸二氢铵和 1.8 g 氯化钾) Chemical fertilizer (including 3.6 g urea, 2.7 g monoammonium phosphate and 1.8 g potassium chloride); RHB: 稻壳炭 Rice husk biochar; WB: 木炭 Wood biochar.

2.2.2 对热值和热量的影响 生物质炭基肥和平茬措施对刺槐幼苗单株枝、叶的热值和热量的影响见表 3;18 个处理组的总热量见图 1。分析结果显示:生物炭基肥处理对刺槐幼苗枝、叶的热值和热量以及总热量均有显著影响,平茬措施仅对枝、叶热量有显著影响,生物炭基肥和平茬措施的交互作用仅对枝热量和总热量有显著影响。

由表 3 可见:各施肥处理组枝、叶的干质量热值、去灰分热值和热量以及总热量总体高于对照组。其中,BF3 处理组枝、叶的干质量热值、去灰分热值和热量以及总热量 7 个指标均最高,较对照组分别提高 22.94%、21.82%、23.01%、19.80%、54.52%、46.74%和 50.21%,且与对照组差异显著。此外,BF1(堆肥-化肥)处理组枝的干质量热值、去灰分热值和热量以

及总热量均显著高于对照组;BF2(2%稻壳炭-堆肥-化肥)和 BF4 处理组仅叶热量显著高于对照组;BF5 处理组除叶去灰分热值外的其他 6 个指标均显著高于对照组。另外,各施肥处理组叶的干质量热值、去灰分热值和热量均大于枝。

由表 3 还可见:3 个平茬处理组枝、叶的干质量热值和去灰分热值以及总热量均无显著差异,仅枝、叶热量存在一定差异。其中,S1 处理组的枝热量最高(212.59 kJ),与 S2 和 S3 处理组差异显著;S3 处理组的叶热量最高(251.98 kJ),仅与 S1 处理组差异显著。此外,各平茬处理组叶的干质量热值、去灰分热值和热量也均大于枝。

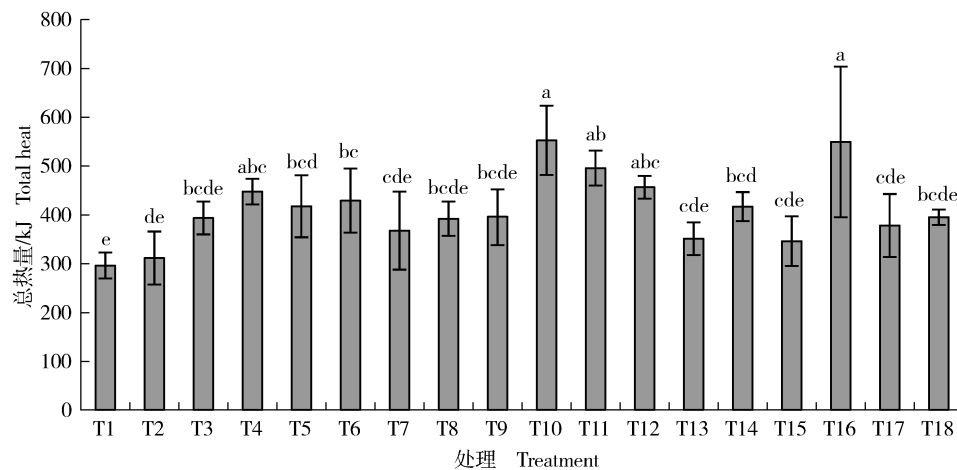
对刺槐幼苗单株总热量的比较结果(图 1)表明:在 18 个处理组中,T1(BF0-S1)处理组的总热量最低,

表3 生物炭基肥和平茬措施对刺槐幼苗单株枝、叶热值和热量的影响( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>Table 3 Effects of biochar based fertilizer and stumping measure on calorific value and heat of branch and leaf of individual of *Robinia pseudoacacia* Linn. seedlings ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

编号 No.	处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	干质量热值/(kJ·g <sup>-1</sup> ) Dry mass calorific value		去灰分热值/(kJ·g <sup>-1</sup> ) Ash free calorific value		热量/kJ Heat		
		枝 Branch	叶 Leaf	枝 Branch	叶 Leaf	枝 Branch	叶 Leaf	总计 Total
BF0(CK)	9 kg LS	13.73±1.25b	16.45±2.79c	14.34±1.27b	18.13±3.09b	148.96±11.83c	185.13±53.00c	334.09±53.79d
BF1	9 kg LS, 136 g Co-CF	16.76±2.51a	17.76±1.02bc	17.48±2.57a	19.39±1.11ab	197.04±41.61b	234.64±30.00ab	431.69±46.53bc
BF2	9 kg LS, 2%RHB-136 g Co-CF	14.53±1.39b	18.26±1.80abc	15.15±1.44b	19.96±1.94ab	158.90±42.14bc	226.33±40.96b	385.23±50.70bcd
BF3	9 kg LS, 4%RHB-136 g Co-CF	16.88±2.38a	20.04±1.54a	17.64±2.78a	21.72±1.76a	230.17±52.06a	271.66±28.55a	501.84±55.37a
BF4	9 kg LS, 2%WB-136 g Co-CF	14.91±1.47ab	17.91±1.68abc	15.64±1.53b	19.60±1.88b	144.94±32.24c	226.74±47.62b	371.68±45.41cd
BF5	9 kg LS, 4%WB-136 g Co-CF	16.82±2.18a	18.88±2.22ab	17.56±2.24a	20.61±2.39ab	201.54±93.76b	239.55±39.82ab	441.09±110.41b
S1	平茬高度 10 cm Stumping height at 10 cm	15.37±2.74a	17.93±2.15a	16.07±2.81a	19.62±2.32a	212.59±75.46a	215.10±52.89b	427.69±117.31a
S2	平茬高度 15 cm Stumping height at 15 cm	15.76±2.37a	18.11±1.94a	16.45±2.45a	19.84±2.14a	177.31±48.63b	224.94±43.15ab	402.25±68.06a
S3	平茬高度 20 cm Stumping height at 20 cm	15.68±1.67a	18.59±2.45a	16.37±1.76a	20.24±2.64a	150.88±32.74c	251.98±39.75a	402.86±50.13a

<sup>1)</sup> 同列中同类处理间不同的小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercases among the same type of treatments in the same column indicate the significant ( $P<0.05$ ) difference.

<sup>2)</sup> LS: 石灰土 Lime soil; Co: 堆肥 Compost; CF: 化肥 (包含 3.6 g 尿素、2.7 g 磷酸二氢铵和 1.8 g 氯化钾) Chemical fertilizer (including 3.6 g urea, 2.7 g monoammonium phosphate and 1.8 g potassium chloride); RHB: 稻壳炭 Rice husk biochar; WB: 木炭 Wood biochar.



T1-T3: BF0-S1, BF0-S2, BF0-S3; T4-T6: BF1-S1, BF1-S2, BF1-S3; T7-T9: BF2-S1, BF2-S2, BF2-S3; T10-T12: BF3-S1, BF3-S2, BF3-S3; T13-T15: BF4-S1, BF4-S2, BF4-S3; T16-T18: BF5-S1, BF5-S2, BF5-S3. 不同的小写字母表示处理组间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercases indicate the significant ( $P<0.05$ ) difference among treatment groups.

BF0(CK): 9 kg LS; BF1: 9 kg LS, 136 g Co-CF; BF2: 9 kg LS, 2%RHB-136 g Co-CF; BF3: 9 kg LS, 4%RHB-136 g Co-CF; BF4: 9 kg LS, 2%WB-136 g Co-CF; BF5: 9 kg LS, 4%WB-136 g Co-CF; S1: 平茬高度 10 cm Stumping height at 10 cm; S2: 平茬高度 15 cm Stumping height at 15 cm; S3: 平茬高度 20 cm Stumping height at 20 cm. LS: 石灰土 Lime soil; Co: 堆肥 Compost; CF: 化肥 (包含 3.6 g 尿素、2.7 g 磷酸二氢铵和 1.8 g 氯化钾) Chemical fertilizer (including 3.6 g urea, 2.7 g monoammonium phosphate and 1.8 g potassium chloride); RHB: 稻壳炭 Rice husk biochar; WB: 木炭 Wood biochar.

图1 生物炭基肥和平茬措施的交互作用对刺槐幼苗单株总热量的影响  
Fig. 1 Effect of interaction between biochar based fertilizer and stumping measure on total heat of individual of *Robinia pseudoacacia* Linn. seedlings

而 T10(BF3-S1)处理组的总热量最高(542.25 kJ), 且 T16(BF5-S1)处理组的总热量仅次于 T10 处理组,说明在平茬高度 10 cm 条件下,使用含 4%稻壳炭或 4%木炭的生物炭基肥有利于刺槐幼苗总热量的

提升。

### 2.3 土壤养分含量以及刺槐幼苗干质量和热值指标间的相关性分析

在施用不同生物炭基肥和采取不同平茬措施的

条件下, 土壤养分含量以及刺槐幼苗单株干质量和热值相关指标间的相关性分析结果见表 4。

由表 4 可见: 土壤有机质、速效磷和速效钾的含量与枝、叶的干质量热值和去灰分热值均呈极显著 ( $P < 0.01$ ) 正相关, 与总干质量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 正相

关; 土壤速效氮含量与枝、叶的干质量热值和去灰分热值均呈显著正相关, 但与总干质量呈不显著正相关。此外, 总干质量与枝的干质量热值和去灰分热值均呈显著正相关, 与叶的干质量热值和去灰分热值均呈极显著正相关。

表 4 生物炭基肥和平茬措施交互作用下土壤养分含量以及刺槐幼苗单株干质量和热值指标间的相关系数<sup>1)</sup>

Table 4 Correlation coefficient among nutrient content in soil and indexes of dry mass and calorific value of individual of *Robinia pseudoacacia* Linn. seedlings under interaction between biochar based fertilizer and stumping measure<sup>1)</sup>

指标 Index	不同指标间的相关系数 Correlation coefficient among different indexes							
	OM	AN	AP	AK	DC <sub>B</sub>	DC <sub>L</sub>	AC <sub>B</sub>	AC <sub>L</sub>
AN	0.257*							
AP	0.735**	0.549**						
AK	0.897**	0.358**	0.797**					
DC <sub>B</sub>	0.284**	0.226*	0.302**	0.349**				
DC <sub>L</sub>	0.372**	0.227*	0.280**	0.335**	0.198			
AC <sub>B</sub>	0.280**	0.230*	0.299**	0.343**	0.999**	0.187		
AC <sub>L</sub>	0.364**	0.234*	0.274**	0.322**	0.189	0.997**	0.178	
m	0.223*	0.167	0.159*	0.336*	0.339*	0.421**	0.331*	0.397**

<sup>1)</sup> OM: 土壤有机质含量 Content of organic matter in soil; AN: 土壤速效氮含量 Content of available nitrogen in soil; AP: 土壤速效磷含量 Content of available phosphorus in soil; AK: 土壤速效钾含量 Content of available potassium in soil; DC<sub>B</sub>: 枝干质量热值 Dry mass calorific value of branch; DC<sub>L</sub>: 叶干质量热值 Dry mass calorific value of leaf; AC<sub>B</sub>: 枝去灰分热值 Ash free calorific value of branch; AC<sub>L</sub>: 叶去灰分热值 Ash free calorific value of leaf; m: 总干质量 Total dry mass. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

### 3 讨论和结论

土壤中有效养分是植物营养供给的直接来源, 而施用生物炭基肥可显著提高土壤有机质和氮、磷、钾等速效养分含量<sup>[10]</sup>。张文玲等<sup>[18]</sup>和高海英等<sup>[19]</sup>的研究结果表明: 与施用低量生物炭基肥相比, 施用量生物炭基肥对土壤养分含量的增加效应更明显, 与生物炭具有较强的保肥能力有关。本研究结果表明: 稻壳炭基肥对土壤养分供给优于木炭基肥, 且添加 4% 稻壳炭的处理组土壤养分含量较高。形成这一现象的原因为: 相对于木炭而言, 稻壳炭孔隙更多, 对土壤养分的吸附作用更强, 能够更有效地避免养分的淋溶损失, 从而使土壤养分含量显著提高。张冰莹<sup>[20]</sup>认为, 土壤有机质含量对灌木植物的热值具有显著促进作用。本研究结果表明: 施用生物炭基肥除可提高土壤有机质和速效养分含量外, 对刺槐枝、叶热值也具有不同程度的提高作用, 且土壤有机质含量以及速效养分含量与刺槐枝、叶热值指标呈极显著或显著正相关, 表明施用生物炭基肥, 可使土壤养分增加, 进而促进刺槐枝、叶的生长和高能物质积累, 从而显著提高枝、叶热值。此外, 相关研究结果<sup>[21]</sup>表明: 刺槐苗

适宜的平茬株龄应在 3 a 左右。在本研究中, 采用不同的平茬措施对土壤养分含量无显著影响, 这可能是由于本研究采用 1 年生刺槐实生苗, 根系不发达, 对土壤的培肥能力有限。

植物热值和生物量是能源树种质量评价的 2 个重要指标<sup>[4, 22]</sup>。本研究结果表明: 施用生物炭基肥可使刺槐幼苗枝、叶的热值和热量以及总热量不同程度提高, 其中, 施用 4% 稻壳炭-堆肥-化肥可使刺槐幼苗枝、叶的干质量热值、去灰分热值和热量以及总热量 7 个指标达到最高, 且与对照组差异显著, 主要原因是生物炭基肥具有土壤改良剂的作用, 施于石灰土中可增加土壤养分含量, 促进植物对营养元素的吸收, 进而促进植物生长, 并间接提高了植物的热值<sup>[23]</sup>和热能。

本研究结果表明: 采取不同的平茬措施对刺槐幼苗枝、叶的干质量和热量的影响效应存在差异, 其中, 平茬高度 20 cm 可使刺槐幼苗叶的干质量和热量达到最高, 而平茬高度 10 cm 则可使刺槐幼苗枝的干质量和热量以及总干质量和总热量达到最高, 这一现象与不同平茬高度对植物幼苗不同器官形态建成的效应差异有关, 其中, 平茬高度 10 cm 时枝条萌蘖能力最强, 可显著促进刺槐枝条的直径和长度<sup>[24-25]</sup>。另

外,相关研究结果还表明:刺槐幼苗叶热值高于枝热值,这主要是因为叶是植物生理活动最活跃的器官,含有较多的高能物质(如蛋白质、脂肪和纤维等),且其自身也可以合成高能有机物<sup>[26-27]</sup>。此外,生物炭基肥与平茬措施对刺槐幼苗枝热量和总热量的交互作用显著,说明生物炭基肥和平茬措施的不同处理组合对刺槐枝热量的影响效应存在差异,因而,在选择刺槐能源林栽培措施时,若以刺槐的枝热值为生产经营目标,应综合考虑生物炭基肥和平茬措施的共同作用。

在刺槐种植过程中,施用生物炭基肥可显著提高土壤的养分含量,以4%稻壳炭-堆肥-化肥处理的效果明显;采取平茬措施可不同程度促进刺槐幼苗的生长,增加枝、叶的干质量,提升植株的总热量,且以高度10 cm的平茬措施为优;此外,生物炭基肥与平茬措施对刺槐幼苗的总热量有显著的交互作用。综上所述,施用含4%稻壳炭的生物炭基肥并采取高度10 cm的平茬措施,可作为喀斯特石漠化山地刺槐能源林的适宜栽培措施之一。

#### 参考文献:

- [1] 路洪海,冯绍国. 贵州喀斯特地区石漠化成因分析[J]. 四川师范学院学报(自然科学版), 2002, 23(2): 189-191, 212.
- [2] 周丽莎. 基于战略拟合的贵州煤炭行业实证研究[D]. 贵阳: 贵州大学经济管理学院, 2008: 1-2.
- [3] 周小舟,蒋宣斌,王震,等. 石漠化综合治理与植被恢复技术体系[J]. 现代农业科技, 2013(1): 234-236.
- [4] 龙健,江新荣,邓启琼,等. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 419-427.
- [5] 普罗. 生物质能源产业发展现状与展望[J]. 绿色科技, 2018(10): 172-174, 179.
- [6] 孙永明,袁振宏,孙振钧. 中国生物质能源与生物质利用现状与展望[J]. 可再生能源, 2006(2): 78-82.
- [7] 容丽. 贵州喀斯特植被退化地区先锋植物的人工群落模式研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学地理与环境科学学院, 2002: 2.
- [8] 梁山. 大叶速生槐经济价值分析及高效育苗技术[J]. 现代农村科技, 2011(4): 46-47.
- [9] 杨芳绒. 河南洛宁浅山区刺槐能源林生物量与热值研究[D]. 北京: 北京林业大学林学院, 2013: 2.
- [10] 魏春辉,任奕林,刘峰,等. 生物炭及生物炭基肥在农业中的应用研究进展[J]. 河南农业科学, 2016, 45(3): 14-19.
- [11] 王智慧,唐春双,范博文,等. 不同配比炭基肥对玉米生长、土壤养分及呼吸的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2017, 29(3): 1-4, 28.
- [12] 康日峰,张乃明,史静,等. 生物炭基肥料对小麦生长、养分吸收及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(6): 33-38.
- [13] HORÁK J, ŠIMANSKÝ V. Effect of biochar and biochar combined with N-fertiliser on soil organic carbon content[J]. Agriculture (Pol'nohospodárstvo), 2016, 62(4): 155-158.
- [14] ŠIMANSKÝ V, KLIMAJ A. How does biochar and biochar with nitrogen fertilization influence soil reaction? [J]. Journal of Ecological Engineering, 2017, 18(5): 50-54.
- [15] 梁山. 大叶速生槐的饲料价值及栽培利用技术[J]. 青海农牧业, 2011(1): 41, 43.
- [16] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 张文玲,李桂花,高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 153-157.
- [19] 高海英,何绪生,陈心想,等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1948-1955.
- [20] 张冰莹. 岷江上游干旱河谷三种主要灌木热值研究[D]. 成都: 四川师范大学地理与资源科学学院, 2015: 29-30.
- [21] 茹小兰. 刺槐幼林抚育效果试验研究[J]. 现代农村科技, 2018(1): 64-65.
- [22] 万劲,方升佐. 能源林的发展概述[J]. 现代农业科技, 2006(10): 14-17.
- [23] 战秀梅,彭靖,王月,等. 生物炭及炭基肥改良棕壤理化性状及提高花生产量的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1633-1641.
- [24] 郭荫槐. 刺槐薪炭林特性的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 1987, 18(4): 25-29.
- [25] 贾斌,郭瑛伟,田文明,等. 刺槐薪炭林平茬技术的研究[J]. 辽宁林业科技, 1995(2): 49-51.
- [26] 鲍雅静,李政海,韩兴国,等. 植物热值及其生物生态学属性[J]. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1095-1103.
- [27] 官丽莉,周小勇,罗艳. 我国植物热值研究综述[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 452-457.

(责任编辑:郭严冬)