

# 不同生物炭对湿地松各组分生物量和碳储量的影响<sup>①</sup>

林志斌<sup>1,2</sup>, 谢祖彬<sup>1\*</sup>, 刘 钢<sup>1</sup>, 刘 琦<sup>1</sup>, 孙 波<sup>3</sup>, 王桂君<sup>4</sup>, 朱建国<sup>1</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 中国科学院红壤生态实验站(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 4 长春师范大学城环学院, 长春 130032)

**摘 要:** 通过将不同生物质原料(木屑和鸡粪)放置在低温(400°C)无氧条件下进行裂解, 形成不同生物炭, 研究了不同生物炭对湿地松不同组分(树叶、树皮、树枝和树干)生物量、碳密度、碳储量以及碳素年净固定量的影响。试验结果表明: 以木屑和鸡粪为原料制备而成的两种生物炭 pH 和养分含量等性质差异显著; 生物质裂解后, 木屑 pH 由 8.25 降到木屑炭的 7.46, 而鸡粪炭 pH 为 10.48, 高于鸡粪的 9.35; 同时, C、N、P 和 K 元素在两种生物炭中均出现富集, 鸡粪生物炭 N、P 和 K 含量显著高于木屑生物炭, 但两种生物炭速效 P 和速效 K 占总 P、总 K 的比例与原料相比均出现显著降低。经过一年试验, 鸡粪生物炭还田处理显著提高湿地松各个组分生物量, 其中湿地松地上部分生物量增量是对照的 4.92 倍, 而木屑炭处理对湿地松各个组分生物量影响不显著; 木屑炭和鸡粪炭处理改变湿地松生物量增量在树叶和树皮中的分配比例, 但对湿地松各个组分的碳密度影响不显著; 鸡粪炭处理能显著提高湿地松各个组分碳素年净固定量, 该处理湿地松地上部分碳素年净固定量(99.64 g/棵)分别是木屑炭处理(19.85 g/棵)和对照处理(25.77 g/棵)的 5.02 倍和 3.87 倍。由此可见, 鸡粪炭可以作为提高林木土壤肥力的改良剂。

**关键词:** 生物炭; 湿地松; 碳储量; 净生产力

**中图分类号:** S727.3; S-3

森林作为陆地生态系统最大的碳库之一, 对调节全球碳平衡和气候变化具有重要的意义<sup>[1]</sup>。随着全球温室气体排放的增加(例如 CO<sub>2</sub> 等), 森林生态系统被视为减缓全球气候变暖的重要手段<sup>[2-3]</sup>。而人工林是森林的重要组成部分, 除了作为增加森林碳汇的主要途径外, 更是人类经济发展过程中获取薪材的重要来源<sup>[4]</sup>。我国人工林面积居世界首位, 达到  $6.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 其中南方人工林面积占全国人工林面积 63%<sup>[5-6]</sup>。人工林给我国带来生态、经济效益的同时, 也面临着诸多问题。有研究表明, 随着人工林种植代数的增加, 人工林土壤会出现酸化, 有机质降低, 营养元素(P、K)减少等一系列土壤退化问题<sup>[7-9]</sup>。土壤退化将导致林木生长量减少, 碳蓄积速度下降。Zhang 等<sup>[10]</sup>研究指出, 杉木树种第二代生物量增量比第一代少 24%, 而第三代则比第二代少 40%。因此, 如何维持人工林生产力, 成为国内外研究热点。

生物炭是一种生物质原料在低温无氧条件下裂解形成的富含碳的有机物质<sup>[11]</sup>。制备生物炭的生物质

资源广泛存在, 包括木质材料、农作物秸秆、畜禽粪便等<sup>[12]</sup>。有研究表明, 生物炭能够改良土壤, 提高作物产量<sup>[11,13-14]</sup>。目前生物炭对农作物影响的研究比较多, 对人工林影响的研究甚少。生物炭对人工林树木不同组分(树叶、树皮、树干、树枝等)生物量、碳密度、碳储量、碳素年净固定量有何影响? 这些问题都有待进一步研究。

湿地松生长快, 木材用途广, 松脂含量高, 目前成为我国南方丘陵区的主要造林树种之一<sup>[15]</sup>。本试验运用不同生物质原料烧制而成的生物炭, 研究不同生物炭对湿地松不同组分生物量、碳密度和碳储量的影响。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地自然概况

试验地位于江西省鹰潭市余江县刘家站中国科学院红壤生态实验站(116°56'E, 28°12'N), 该区属于亚热带季风气候区, 年均降水量 1 727 mm, 年均蒸发量

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171191, 31200419)、科技部国家科技支撑项目(2013BAD11B01, 2008BAD95B05)和江苏省科技支撑计划项目(BE2013451)资助。

\* 通讯作者(zbxie@issas.ac.cn)

作者简介: 林志斌(1988—), 男, 福建仙游人, 硕士研究生, 主要从事生物炭利用研究。E-mail: zblin@issas.ac.cn

1 318 mm, 年均温 18.1℃, 无霜期 262 天; 土壤为红壤, 母质为第四纪红黏土, 其下为白垩纪红砂岩; 地形以低岗丘陵地为主, 海拔 40~60 m。生态站种植了不同的人工植被, 以人工林地和园地等利用方式为主。栽培试验用地布置在人工林内一片空地上, 坡度小于

5°, 面积约为 20 m×20 m, 空地周围是稀疏马尾松林。供试土壤取自上述空地。取土前清除地面凋落物和草本植物, 然后按 0~30、30~50、50~70、70~100 cm 分层取土。将不同层土壤装在尼龙袋内带回, 备用。0~30 cm 表层土壤基本性质见表 1。

表 1 土壤和幼苗基本性质  
Table 1 Basic properties of soil and *Pinus elliottii* sapling in macrocosm experiment

| 样品    | C(g/kg) | N(g/kg) | P(g/kg) | K(g/kg) | pH   | C/N    |
|-------|---------|---------|---------|---------|------|--------|
| 土壤    | 4.84    | 0.55    | 0.24    | 9.32    | 4.82 | 8.87   |
| 湿地松幼苗 | 438.18  | 3.36    | 0.57    | 2.64    | —    | 130.58 |

1.2 原料和生物炭

本试验分别选用鸡粪和木屑原料(< 2 mm)制作生物炭, 将原料放置在 400℃无氧条件下烧制而成。烧制前, 将原材料放置在通风水泥场地进行风干 3 天。原料放入炭化炉(专利批准号: 200920232191.9, 中国科学院南京土壤研究所研制 ZBX1 型)后, 抽真空, 充氮气, 反复 3 次。采用“梯级升温法”控制温度, 首先将温度设置到 200℃, 然后每 1.5 h 升高 50℃; 达到最高目标温度后, 维持加热直至出气口再无气体溢出, 关闭加热程序, 冷却。整个炭化过程大约 10 h。将烧制成的生物炭粉碎成均匀粉末, 备用。

1.3 栽培试验

试验在用 2 cm 厚聚乙烯(PVC)板制成的大型生长箱内进行, 生长箱尺寸为 100 cm×100 cm×120 cm (长×宽×高), 底部用 PVC 板密封。生长箱外部自上而下, 分别在 5、60、120 cm 位置用 3 cm 厚 PVC 板条进行加固, 外表面先后贴上隔热泡沫和铝膜。在生长箱一个侧面离底部 10 cm 处, 安装一个开关阀门, 防止箱内积水。

生长箱放置行间距为 2.5 m×2.5 m (以箱中心为准)。箱放置之后, 往生长箱内底部铺一层 10 cm 厚石英砂(粒径 0.5~2 mm, 石英砂先用 2 mol/L HCl 溶液清洗, 再用蒸馏水反复清洗干净), 接着将取自人工林地的土壤按自然土层先后顺序(自上往下为 0~30、30~50、50~70、70~100 cm)装入生长箱内, 回填 0~30 cm 土层时, 根据试验处理将该土层与生物质原料或生物炭混合均匀。

本试验共设置 5 个处理, 3 次重复, 试验处理随机分布, 分别是: 对照(CK), 添加 2.16 kg/m<sup>2</sup> 木屑处理(SD), 添加 2.4 kg/m<sup>2</sup> 木屑炭处理(SDB), 添加 1.26 kg/m<sup>2</sup> 鸡粪处理(CM)和添加 2.4 kg/m<sup>2</sup> 鸡粪炭处理(CMB)。

生长箱土壤装填完毕第二天(2012-05-04), 往每个生长箱内移栽 2 棵苗龄为 2 年的湿地松幼苗(*Pinus*

*elliottii*)。所有移栽的湿地松幼苗高度在 95~120 cm 之间, 地径(苗干靠近地表 30 cm 处的树木直径)在 1.4~1.9 cm 之间。幼苗移栽后当天, 每个生长箱浇灌 2.5 L 水, 并且在接下去 3 周内, 除了自然降水外, 每周每个生长箱各浇灌 1 次水(2.5 L), 以确保生长箱内幼苗存活。试验期间, 每 2 个月除 1 次杂草。

1.4 湿地松生长指标测量

在试验期间(2012-05-04—2013-04-26), 每 2 个月采集 1 次树叶样品, 树叶采集后, 每个处理随机选取 5 片叶子测其长度, 求其平均值作为该生长箱内湿地松树叶长度。收集生长箱内枯枝落叶并测量树高(*H*)和地径(*D*)。枯枝落叶收集后, 用去离子水冲去杂质, 接着在温度 80℃烘箱内烘 48 h, 然后称重, 磨碎, 过 0.25 mm 筛, 备用。

1.5 树木和生物炭分析

经过近 1 年的试验后, 将每个生长箱内的 1 棵湿地松进行全株采伐(除根外, 由于残留根与另一棵苗木根交错在一起), 采伐后湿地松分为叶、枝、干、皮 4 部分。湿地松各个组分在 105℃烘箱内烘 0.5 h 进行杀青处理, 然后调至 80℃条件下烘干至恒重, 测定各组分生物量。取不同组分样品用粉碎机进行粉碎, 过 0.25 mm 筛, 备用。

生物炭和原料 pH 采用物水比为 1:20 测定。生物炭和原料全磷(TP)采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>3</sub> 消煮-钼锑抗比色法测定, 速效磷(AP)采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定; 生物炭和原料全钾(TK)采用 HF-HClO<sub>3</sub> 消煮法测定, 速效钾(AK)采用 CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub> 提取法测定<sup>[16]</sup>; 湿地松枯枝落叶以及树木各个组分全碳(TC)、生物炭和原料全碳、全氮(TN)采用碳氮元素分析仪测定(SerCon Ltd., Crewe, UK)。

1.6 树木初始生物量和碳储量计算

1.6.1 苗木初始生物量计算 根据实测所得树木地上部分不同组分的生物量(*B*)、树高(*H*)和地径(*D*)

的数据,建立相对生长方程  $B = aD^2H + b^{[17]}$ ,见表 2。接着基于栽培时期湿地松树高及地径数据,计算移栽时湿地松幼苗各个组分初始生物量。

表 2 湿地松生物量估算模型  
Table 2 The growth models of different organ biomasses of *Pinus eliottii*

| 项目     | 生物量方程                   | 相关系数 $r$ |
|--------|-------------------------|----------|
| 整株(除根) | $B = 31.24D^2H + 35.92$ | 0.94     |
| 树叶     | $B = 11.90D^2H + 10.64$ | 0.88     |
| 树皮     | $B = 6.01D^2H + 4.59$   | 0.95     |
| 树枝     | $B = 5.35D^2H + 1.59$   | 0.89     |
| 树干     | $B = 7.99D^2H + 19.10$  | 0.93     |

注:  $B$  代表生物量;  $D$  代表地径;  $H$  代表树高。

**1.6.2 湿地松地上部分碳储量和年净固定量计算** 湿地松不同组分及枯枝落叶碳储量是根据各个组分生物量乘转换系数求得。不同组分的转换系数是该组分实测所得碳密度值(即碳含量),湿地松各个组分碳储量计算公式如下:

$$M_i = B_i \times C_i \quad (1)$$

式中:  $M_i$  代表湿地松不同组分及枯枝落叶碳储量;  $B_i$  代表湿地松不同组分及枯枝落叶生物量;  $C_i$  代表湿地松不同组分及枯枝落叶碳密度。

湿地松地上部分碳年净固定量(annual net carbon fixation, ANCF),即固碳潜力,计算公式如下:

表 3 不同原料对生物炭性质的影响  
Table 3 The biochar properties of different feedstocks

| 样品  | 炭化率(%) | pH      | TC(g/kg) | TN(g/kg) | TP(g/kg) | TK(g/kg) | AP(mg/kg)  | AK(mg/kg) |
|-----|--------|---------|----------|----------|----------|----------|------------|-----------|
| 木屑  | —      | 8.25 d  | 446.10 b | 3.83 c   | 0.52 d   | 2.72 d   | 21.38 d    | 1.07 d    |
| 木屑炭 | 27.79  | 7.46 c  | 489.82 a | 6.53 b   | 1.11 c   | 5.25 c   | 32.91 c    | 1.19 c    |
| 鸡粪  | —      | 9.35 b  | 287.08 d | 23.86 a  | 15.71 b  | 29.19 b  | 2 578.48 b | 28.49 b   |
| 鸡粪炭 | 47.52  | 10.48 a | 304.17 c | 25.56 a  | 27.06 a  | 55.65 a  | 2 692.4 a  | 47.47 a   |

注:炭化率为生物炭干重/原料干重;表中同列不同小写字母代表样品间差异在  $P<0.05$  水平显著。

**2.2 不同生物炭对湿地松不同组分生物量的影响**  
经过 1 年栽培试验,与对照(CK)相比,在鸡粪(CM)和鸡粪炭处理(CMB)中,湿地松针叶长度显著增加(CM:  $P = 0.007$ ; CMB:  $P = 0.006$ ,图 1),添加木屑处理(SD)显著减小湿地松针叶长度( $P = 0.030$ ),而在木屑炭处理(SDB)中,湿地松针叶长度与 CK 相比,则无明显差异( $P = 0.356$ )。

通过湿地松生物量( $B$ )与树高( $H$ )、地径( $D$ )之间的数学模型(表 2),计算移栽时湿地松地上部分各个组分的初始生物量。结果显示:不同处理间湿地松各个组分之间的初始生物量差异不显著(图 2)。栽培 1 年后,添加鸡粪和鸡粪炭显著增加湿地松树叶、树皮、

$$ANCF = \sum_i^n (B_i \times C_i - B_{oi} \times C_{oi}) + B_1 \times C_1 \quad (2)$$

式中:  $i$  代表树木叶、皮、枝、干等 4 个组分;  $B_o$ 、 $C_o$  分别代表湿地松移栽时的初始生物量和碳密度;  $B_1$  和  $C_1$  分别代表湿地松年枯枝落叶生物量和碳密度。

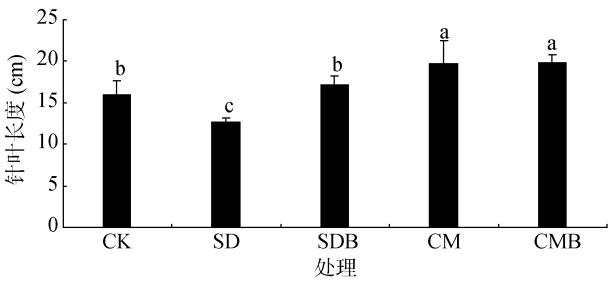
1.7 数据分析

试验数据利用 SPSS13.0 单因素分析(ANOVA)方法,运用 LSD 多重比较分析不同生物炭对湿地松不同组分生物量、碳密度、碳储量以及碳素年净固定量的影响。差异显著性在  $P<0.05$  水平上。

2 结果

2.1 不同原料生物炭性质差异

木屑和鸡粪在无氧条件下,经过低温(400℃)裂解形成的生物炭性质差异明显(表 3)。木屑生物炭 pH 比木屑低,而鸡粪生物炭 pH 与其原料相比,显著提高( $P<0.05$ )。与原料相比,两种生物炭 TC、TN、TP、TK 含量均显著富集。原料经过低温裂解后,AP 和 AK 在生物炭中的含量升高,并且鸡粪生物炭 AP 和 AK 含量分别是木屑炭的 81.8 倍和 39.9 倍。木屑制成生物炭后,AP 占 TP 比例和 AK 占全 TK 比例分别由 4.11%、39.34% 降到 2.96%、36.16%;鸡粪制成生物炭后,AP 占 TP 比例和 AK 占 TK 比例分别由 16.42%、97.60% 降到 9.94%、85.30%。



(柱图上方不同小写字母表示处理间差异在  $P<0.05$  水平显著 ( $n = 3$ ),下同)

图 1 不同处理对湿地松针叶长度的影响(针叶采集时间 2013 年 4 月 26 日)  
Fig. 1 The needle length of *Pinus eliottii* (sampled on April 26, 2013) in different treatments

树枝、树干生物量(图 3)。与 CK 相比,除了 SD 处理中的湿地松枯枝落叶生物量显著增加外( $P = 0.017$ ),其他处理之间枯枝落叶生物量则无明显差异(图 3)。同时,在 CM 和 CMB 处理中,湿地松地上部分总生物量与 CK 相比,分别提高了 93.87%( $P = 0.001$ )、54.74%( $P = 0.025$ )。5 个不同处理湿地松地上部分生物量大小排列顺序为:CM>CMB>SD>CK>SDB。

木屑炭和鸡粪炭对湿地松各个组分生物量的增量影响效果不一(表 4)。与 CK 相比,CM 和 CMB 处理显著提高湿地松树叶、树皮、树枝、树干以及湿地松地上部分生物量增量。同时,在 CMB 处理

中,树叶生物量增量占树木地上部分生物量增量的比例显著大于 SDB 处理( $P = 0.026$ ),而树皮生物量增量占树木地上部分生物量增量的比例则显著低于 SDB 处理( $P = 0.021$ )。在 CM 和 CMB 处理中,树木地上部分生物量增量分别是 CK 处理的 4.94 倍( $P = 0.001$ )、3.07 倍( $P = 0.031$ )。5 个处理湿地松地上部分生物量增量大小排列顺序为:CM>CMB>SD>CK>SDB(表 4)。

2.3 不同生物炭对湿地松不同组分碳密度、碳储量以及碳素年净固定量的影响

SDB 和 CMB 处理对湿地松树叶、树皮、树枝、

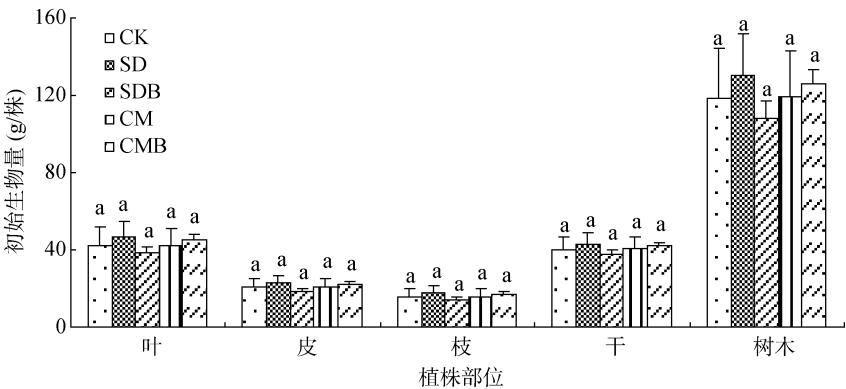


图 2 不同处理湿地松幼苗不同组分初始生物量

Fig. 2 The initial biomasses in different organs of *Pinus elliottii* in different treatments

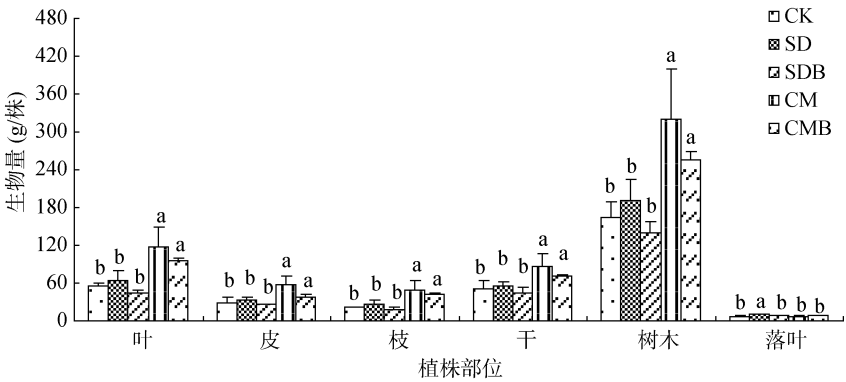


图 3 不同处理一年后湿地松不同组分和枯枝落叶生物量及分配

Fig. 3 Biomasses in different organs and litter fall of *Pinus elliottii* in different treatments after a year

表 4 不同处理湿地松不同组分生物量增量及其分配

Table 4 Biomass increments and distributions in different organs of *Pinus elliottii* in different treatments

| 处理  | 叶       |          | 皮       |          | 枝       |         | 干       |         | 树木       |
|-----|---------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|
|     | 增量(g/棵) | 比例(%)    | 增量(g/棵) | 比例(%)    | 增量(g/棵) | 比例(%)   | 增量(g/棵) | 比例(%)   | 增量(g/棵)  |
| CK  | 13.96 b | 35.41 ab | 9.25 b  | 22.78 ab | 5.84 b  | 15.23 a | 9.92 b  | 26.57 a | 38.97 b  |
| SD  | 17.56 b | 30.28 ab | 10.62 b | 23.86 ab | 9.79 b  | 19.54 a | 12.89 b | 26.36 a | 50.86 b  |
| SDB | 5.66 b  | 24.34 b  | 7.84 b  | 36.26 a  | 4.33 b  | 16.05 a | 6.67 b  | 23.35 a | 24.51 b  |
| CM  | 75.27 a | 39.34 a  | 37.39 a | 19.76 ab | 33.54 a | 17.23 a | 45.67 a | 23.68 a | 191.87 a |
| CMB | 50.89 a | 42.56 a  | 14.81 b | 12.16 b  | 24.33 a | 20.35 a | 29.78 a | 24.93 a | 119.81 a |

注: 树木生物量增量不包括树根部分; 比例指湿地松各个组分生物量增量占地上部分增量比例。

树干以及枯枝落叶碳密度没有显著性影响(表 5)。而在 SD 处理中,除了树叶和树枝碳密度无显著变化外,湿地松树皮、树干、湿地松地上部分以及枯枝落叶碳密度均显著高于 CK 处理。

碳素在湿地松各个组分中的储量,基本上与其生物量呈正比关系。由结果可以看出(表 6):在 CM 和 CMB 处理中,湿地松树叶、树皮、树枝、树干碳储量显著高于 CK 和 SDB 处理,且 CM 和 CMB 处理中湿地松地上部分碳储量分别是 CK 的 1.96 倍 ( $P = 0.001$ ), 1.56 倍( $P = 0.023$ )。5 个处理中,湿地松地上

部分碳储量的大小顺序为:CM>CMB>SD>CK>SDB。

湿地松不同组分碳素年净固定量与该组分年生物量增量有密切联系。在 CM 和 CMB 处理中,树叶、树皮、树枝、树干以及树木地上部分碳素年净固定量显著高于 CK 处理(表 7)。但是 SD 和 SDB 处理对湿地松不同组分碳素年净固定量影响不显著。不同处理间,树木地上部分碳素年净固定量变化范围为 25.77 ~ 99.64 g/棵。在 CM 和 CMB 处理中,湿地松地上部分碳素年净固定量与 CK 相比,分别提高了 286.65% ( $P = 0.001$ )、156.54%( $P = 0.028$ )。

表 5 不同处理湿地松各组分碳素含量(g/kg)  
Table 5 Carbon concentrations in different organs of *Pinus elliottii* in different treatments

| 处理  | 叶        | 皮         | 枝         | 干         | 树木       | 枯枝落叶      |
|-----|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| CK  | 479.93 a | 467.02 b  | 474.24 ab | 469.08 c  | 473.53 b | 452.01 c  |
| SD  | 484.76 a | 478.06 a  | 481.88 a  | 479.20 a  | 481.36 a | 497.79 a  |
| SDB | 482.85 a | 467.85 b  | 476.83 ab | 476.29 ab | 476.96 b | 492.60 ab |
| CM  | 479.36 a | 470.76 ab | 476.78 b  | 475.43 b  | 476.30 b | 484.31 ab |
| CMB | 480.04 a | 466.33 b  | 478.93 ab | 476.90 ab | 476.90 b | 481.70 b  |

注：树木碳密度不包括树根部分。

表 6 不同处理湿地松各组分碳储量  
Table 6 Carbon storages in different organs of *Pinus elliottii* in different treatments

| 处理  | 叶(g/棵)  | 皮(g/棵)   | 枝(g/棵)  | 干(g/棵)  | 枯枝落叶(g/棵) | 合计(g/棵)  |
|-----|---------|----------|---------|---------|-----------|----------|
| CK  | 26.88 b | 13.88 bc | 10.21 b | 23.50 b | 3.22 b    | 77.68 b  |
| SD  | 31.12 b | 15.97 bc | 13.27 b | 26.90 b | 5.05 a    | 92.31 b  |
| SDB | 21.18 b | 12.33 c  | 8.74 b  | 21.09 b | 3.98 ab   | 67.32 b  |
| CM  | 56.45 a | 27.32 a  | 23.56 a | 40.89 a | 3.73 b    | 151.95 a |
| CMB | 46.06 a | 17.15 b  | 19.82 a | 34.32 a | 4.10 ab   | 121.45 a |

表 7 不同处理湿地松各组分碳素年净固定量  
Table 7 Annual net carbon fixations in different organs of *Pinus elliottii* in different treatments

| 处理  | 叶(g/棵)  | 皮(g/棵)  | 枝(g/棵)  | 干(g/棵)  | 枯枝落叶(g/棵) | 合计(g/棵) |
|-----|---------|---------|---------|---------|-----------|---------|
| CK  | 8.48 b  | 4.98 b  | 3.31 b  | 5.79 b  | 3.22 b    | 25.77 b |
| SD  | 10.73 b | 6.07 b  | 5.48 b  | 7.84 b  | 5.05 a    | 35.16 b |
| SDB | 4.46 b  | 4.27 b  | 2.61 b  | 4.52 b  | 3.98 a    | 19.85 b |
| CM  | 37.90 a | 18.34 a | 16.59 a | 23.08 a | 3.73 b    | 99.64 a |
| CMB | 26.36 a | 7.59 b  | 12.33 a | 15.73 a | 4.10 a    | 66.11 a |

注：湿地松碳素年净固定量不包括树根部分。

### 3 讨论

#### 3.1 不同生物炭性质的差异

从本研究结果可以看出,生物炭性质与生物质原料性质关系密切。在本试验中,木屑在 400℃条件下烧制形成生物炭后,pH 从 8.25 降到 7.46,而鸡粪炭 pH(10.48)则显著高于鸡粪(9.35)。木屑经过低温裂解,pH 降低,这与多数研究结果相反<sup>[8,18-19]</sup>。这可能因为木屑中纤维素化合物和半纤维素化合物在低温无氧

条件下分解成为有机酸和酚类物质从而使木屑炭 pH 降低<sup>[20]</sup>。而鸡粪炭中则含很高的灰分<sup>[21]</sup>,包括大量矿质元素如 Na、K、Mg 和 Ca 等,这些矿质元素以氧化物或碳酸盐的形式存在于灰分中<sup>[22]</sup>,从而使鸡粪炭 pH 增大。Singh 等<sup>[18]</sup>研究表明,柳叶桉树木在 400℃条件下制成的生物炭表面总酸度为 6.07 mmolC/g,总碱度为 0.38 mmolC/g,而畜禽粪便在同等条件下制成生物炭表面总酸度为 5.10 mmolC/g,总碱度为 4.29 mmolC/g。Chan 和 Xu<sup>[23]</sup>研究也发现,不同种类

的生物质炭 pH 变化显著,其中绿色废物生物质炭最低(6.2),家禽粪生物质炭最高(9.6)。因此,生物炭 pH 与生物质原料密切相关。

生物炭 C 含量显著高于原料 C 含量。木屑、鸡粪经过低温裂解 C 含量分别由 446.10、287.08 g/kg 增加到 489.82、304.17 g/kg。C 含量高却难以分解,是生物质炭最基本的性质之一<sup>[11,22]</sup>。生物质原料在低温无氧裂解过程中 C 产生富集,主要是因为氢和氧挥发损失,而不稳定态 C 小部分矿化形成气体挥发,大部分则转化为芳香族化合物固定在生物炭中<sup>[24-25]</sup>。低温裂解过程中,原料 N 会产生挥发、改变结构等一系列变化,不挥发的 N 形成难以分解的芳香族 N 环结构,比如氮苯、咪唑等<sup>[26-27]</sup>积累在生物炭中。虽然两种原料通过低温裂解,N 含量均有所提高,但是鸡粪中 N 富集程度比木屑低。这是因为与木屑相比,鸡粪中 N 含量和易挥发性含 N 物质含量高,在相同裂解条件下(400℃),鸡粪通过挥发而损失更多的 N 素<sup>[28]</sup>。

木屑和鸡粪制成生物炭后,鸡粪炭和木屑炭中 P、K 含量显著提高,并且鸡粪炭 P、K 含量显著高于木屑炭。主要是因为鸡粪含有大量的 P、K 矿质元素,而木屑中 P、K 矿质元素,含量相对低很多,P、K 矿质元素在低温裂解过程中,由于其相对稳定、不易挥发而在生物炭内富集<sup>[26,29-30]</sup>。两者生物质原料制成炭后,AP 和 AK 含量均显著提高,但是 AP、AK 占 TP、TK 的比例均下降。Zheng 等<sup>[28]</sup>也研究表明,随着裂解温度增高,生物炭中 P、K 含量不断增加,但是在高温条件下(> 400℃),AP、AK 量占 TP、TK 的比例降低。主要是因为生物质在相对高温裂解过程中,部分 P 元素与 Ca、Mg 元素形成不易溶解的白磷酸钙晶体 $((\text{CaMg})_3(\text{PO}_4)_2)$ 或其他不易溶解的磷酸盐矿物(如  $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ ),而部分 K 元素则嵌入晶格内部与氧形成化学键<sup>[28-29,31]</sup>。因此,生物炭理化性质与其生物质原料性质密切相关。

### 3.2 不同生物炭对湿地松各组分生物量和碳素的影响

不同生物炭对湿地松生长影响效果不一。从本研究结果可以看出,CM 和 CMB 处理能够显著促进湿地松生长,且湿地松的地上部分生物量增量分别是 CK 的 1.96 倍和 1.56 倍(表 4)。鸡粪和鸡粪炭促进湿地松生长的原因之一是通过改变树木的叶片形态和叶片数量来增加湿地松光合作用,从而提高树木的有机质储量。通过分析可知,CM 和 CMB 处理中湿地松叶片长度分别比 CK 增加 23.1% 和 23.8%,且在 CM 和 CMB 处理中湿地松叶片生物量分别是 CK 的

2.10 和 1.71 倍。而在 SD 和 SDB 处理中,湿地松叶片长度变化不明显。有学者研究得出类似结果,Uzoma 等<sup>[32]</sup>研究结果显示,添加牛粪生物炭(15 t/hm<sup>2</sup>)处理的玉米高度明显增高且叶片数量增多。Susan 等<sup>[13]</sup>将添加生物炭处理中松树生物量的增加部分归因于外生菌根丰度的改变。

CM 和 CMB 处理能够显著增加湿地松各组分生物量另外一个主要原因是,鸡粪和鸡粪炭能够提供养分元素。从木屑、木屑炭、鸡粪和鸡粪炭的理化性质可以知道,鸡粪和鸡粪炭能够为土壤提供大量的 N、P 和 K 等营养元素,且 AP 占 TP 的比例分别为 16.42% 和 9.94%,AK 占 TK 的比例分别达 97.6% 和 84.30%。有研究也表明,以植物为原料的生物炭对农作物增产效果不明显,而以畜禽粪便为原料的生物炭则能够显著提高农作物产量<sup>[14,33-34]</sup>。另外,CM 和 CMB 处理能够影响湿地松生物量增量在不同组分之间的分配。CM 和 CMB 处理树叶生物量增量占总增量的比例分别是 39.34% 和 42.56%,显著高于 CK(35.41%),而 CM 和 CMB 处理中树皮生物量增量占总增量的比例则相对降低。

5 个处理中,湿地松幼苗不同组分的碳密度大小排列均为:叶>枝>干>皮。SD 处理树皮、树枝、树干、枯枝落叶碳密度显著增大。SD 和 SDB 处理湿地松枯枝落叶碳密度大于 CM 和 CMB 处理,可能与土壤养分含量供应有关。首先,木屑和木屑炭 C/N 值较大(分别为 116.48 和 75.01),添加木屑和木屑炭处理能够增大土壤 C/N 值,降低土壤矿质元素矿化,从而降低湿地松养分吸收<sup>[35]</sup>。其次,已有研究表明<sup>[36]</sup>,在根系养分相对不足的情况下,树木通过加强叶片养分内吸收来维持正常的生长发育。由于木屑和木屑炭 P、K 等养分含量低,加上在贫瘠的红壤地区,养分供应不足,老叶衰老过程中,养分元素通过内部再分配转移到新叶,从而使老叶中碳密度相对增大。而 CM 和 CMB 处理,P、K 等营养元素供应相对充足,养分内部转移相对减少。所以,可能是上述两个因素共同影响不同处理条件下湿地松枯枝落叶碳密度。但是,具体养分迁移机理有待进一步研究。

湿地松不同组分的碳储量是通过其生物量和相应碳密度乘积计算所得,因此不同组分的碳储量与其生物量和碳密度密切相关。CM 和 CMB 处理显著提高湿地松各组分碳储量。虽然 CM 和 CMB 处理中湿地松各组分碳密度相对较低,但是由于其生物量显著增大,所以其碳储量也随之增大。同理,SD 和 SDB 处理各组分湿地松碳储量与对照差异不显著。5 个处理中,湿地松树干碳储量分别占湿地松地上部分碳储

量的比例为：SD(39.97%)>SDB(31.33%)>CK(30.25%)>CMB(28.26%)>CM(26.91%)，而树叶碳储量分别占湿地松地上部分碳储量的比例为：CMB(37.93%)>CM(37.15%)>CK(34.60%)>SD 33.71%)>SDB(31.46%)。由此可见，在养分充足的情况下，湿地松幼苗优先发展能提高树木生长的营养器官，例如树叶。另外，5个处理中枯枝落叶碳储量占湿地松地上部分总碳储量的比例分别为：SDB(5.91%)>SD(5.47%)>CK(4.15%)>CMB(3.38%)>CM(2.45%)。这说明木屑生物炭可能会加快湿地松生态系统碳素循环，而鸡粪生物炭则促进碳素在树木体内的存储，继而提高生态系统碳固定，这对森林碳汇有重要的意义。

森林生态系统生产力研究的主要内容之一是确定系统同化 CO<sub>2</sub> 的能力<sup>[17]</sup>。在本试验中，添加 CM 和 CMB 处理显著提高湿地松地上部分的碳素年净固定量，分别是 CK 的 4.94 倍、3.07 倍。说明添加鸡粪和鸡粪炭处理，能够显著提高湿地松幼苗的生产力。但是，长期添加生物炭对森林土壤理化性质的影响过程有待进一步研究。

## 4 结论

低温无氧裂解后形成的生物炭性质与生物质原料密切相关；添加鸡粪生物炭处理，能够显著促进湿地松生长，提高湿地松不同组分生物量积累，同时影响生物量增量在树叶和树皮中的重新分配。木屑生物炭和鸡粪生物炭对湿地松幼苗各组分的碳密度影响不显著，但是鸡粪生物炭较木屑炭处理能显著提高湿地松各组分的碳储量和碳素年净固定量。

## 参考文献：

- [1] Nowak DJ, Daniel EC, Jack CS. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2006, 4(3): 115–123
- [2] Lal, R. Forest soils and carbon sequestration[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 220(1): 242–258
- [3] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和密度研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13–16
- [4] Jim C, Peter H. Wood from planted forests: a global outlook 2005–2030[J]. Forest Products Journal, 2008, 58(12): 6–18
- [5] 国家林业局森林资源管理司. 中国森林资源第七次清查结果及其分析[J]. 林业经济, 2010(2): 66–72
- [6] 国家林业局. 中国林业 1999—2005[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007
- [7] Zhang XQ, Miko UF K, Hou ZH, Guo ZH. Carbon stock changes in successive rotations of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb) Hook) plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 202(1): 131–147
- [8] Chen JH, Liu XY, Zheng JW, Zhang B, Lu HF, Chi ZZ, Pan GX, Li LQ, Zheng JF, Zhang XH, Wang JF, Yu XY. Biochar soil amendment increased bacterial but decreased fungal gene abundance with shifts in community structure in a slightly acid rice paddy from Southwest China[J]. Applied Soil Ecology, 2013, 71: 33–44
- [9] Guo YJ, Han JG. Soil biochemical properties and arbuscular mycorrhizal fungi as affected by afforestation of rangelands in northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(9): 1 690–1 697
- [10] Zhang J, Wang SL, Feng ZW, Wang QK. Stability of soil organic carbon changes in successive rotations of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb) Hook) plantations[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(3): 352–359
- [11] Lehmann J. A handful of carbon[J]. Nature, 2007, 447(7141): 143–144
- [12] Lehmann J. Bio-energy in the black[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2007, 5(7): 381–387
- [13] Susan JR, Michal RP, Juan C López-Gutiérrez, Hugues BM. Biochar enhances seedling growth and alter root symbioses and properties of sub-boreal forest soils[J]. Canadian Journal of Soil Science. 2012, 92(2): 329–334
- [14] Xie ZB, Xu YP, Liu Q, Zhu JG, Tu C, James EA, Georg C, Jean WHY, Hu SJ. Impact of biochar application on nitrogen nutrition of rice greenhouse-gas emission and soil organic carbon dynamics in two paddy soils of China[J]. Plant and Soil, 2013, 370(2): 527–540
- [15] 刘茜, 项文化, 蔡宝玉. 湿地松人工林养分循环及密度关系的研究[J]. 林业科学, 1998, 34(3): 11–17
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [17] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华. 南亚热带杉木生态系统生物量和碳素积累及其空间分布特征[J]. 林业科学, 2009, 45(8): 147–153
- [18] Singh B, Singh BP, Cowie AL. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(7): 516–525
- [19] Wang Y, Hu YT, Zhao X, Wang SQ, Xing GX. Comparisons of biochar properties from wood material and crop residues at different temperatures and residence times[J]. Energy Fuels, 2013, 27(10): 5 890–5 899
- [20] Abe I, Iwasaki S, Iwata Y, Kominami H, Kera K. Relationship between production method and adsorption property of charcoal[J]. TANSO, 1998, 185: 277–284
- [21] Hatton BJ, Singh B. Influence of Biochars on N<sub>2</sub>O emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39(4): 1 224–1 235
- [22] 许燕萍, 谢祖彬, 朱建国, 刘钢, 刘琦. 制炭温度对玉米和小麦生物炭理化性质的影响[J]. 土壤, 2013, 45(1): 73–78
- [23] Chan KY, Xu Z. Biochar for Environmental Management: Science and Technology[C]. UK: Earthscan, 2009: 67–84
- [24] Cao XY, Kyong SR, Mark Chappell, Li Y, Mao JD. Chemical structures of swine-manure chars produced under

- different carbonization conditions investigated by advanced solid-state  $^{13}\text{C}$  nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy[J]. *Energy Fuels*, 2011, 25(1): 388–397
- [25] Esben WB, Per A, Helge E, Henrik HN. Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 46(3): 73–79
- [26] Cao XD, Willie H. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5 222–5 228
- [27] Knicker H. Black nitrogen—an important fraction in determining the recalcitrance of Charcoal[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(9): 947–950
- [28] Zheng H, Wang ZY, Deng X, Zhao J, Luo Y, Jeff N, Stephen H, Xing BS. Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 130(2): 463–471
- [29] Tsai WT, Liu SC, Chen HR, Chang YM, Tsai YL. Textual and chemical properties of swine-manure-derived biochar pertinent to its potential use as a soil amendment[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(2): 198–203
- [30] Keri BC, Patrick GH, Minori U, Jeffrey MN, Kyoung SR. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 107(3): 419–428
- [31] Mohammad IA, Abdulrasoul AO, Ahmed HE, Mahmoud N, Adel RU. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 131(3): 374–379
- [32] Uzoma KC, Inoue M, Andry H, Fujimaki H, Zahoor A, Nishihara E. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. *Soil Use and Management* 2011, 27(2): 205–212
- [33] 张含芝, 黄云, 刘钢, 许燕萍, 刘金山, 卑其诚, 简兴武, 朱建国, 谢祖彬. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学形状的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(11): 2 713–2 717
- [34] Steiner C, Teixeira WG, Lehmann J, Nehls T, Jeferson LVM, Winfried EB, Wolfgang Z. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central Amazonian upland soil[J]. *Plant and Soil*, 2007, 291(1): 275–290
- [35] Lehmann J, da Silva Jr JP, Steiner C, Nehls T, Zech W, Glaser B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferrasol of the central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendment[J]. *Plant and soil*, 2003, 249(2): 343–357
- [36] 王文卿, 林鹏. 树林叶片衰老过程中养分元素内吸收研究[J]. *武汉植物学研究(增刊)*, 1999, 17(S1): 117–122

## Impacts of Biochars on Biomass and Carbon Storage in Different Organs of *Pinus elliottii*

LIN Zhi-bin<sup>1, 2</sup>, XIE Zu-bin<sup>1\*</sup>, LIU Gang<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, SUN Bo<sup>3</sup>, WANG Gui-jun<sup>4</sup>, ZHU Jian-guo<sup>1</sup>

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China; 2 *University of Chinese Academy of Sciences*, Beijing 100049, China; 3 *The Ecological Experimental Station of Red Soil, Academic Sinica (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China; 4 *College of Urban and Environment Science, Changchun Normal University, Changchun* 130032, China)

**Abstract:** Artificial forest plays an important role in the buildup of forest carbon sink. However, successive rotations of fast-growing species cause soil degradation, which lead to the apparent decline of the tree growing rate. This paper aims to investigate the effects of sawdust biochar and chicken manure biochar on biomass, carbon concentration and carbon storage in different organs of *Pinus Elliottii*. The results showed that feedstock decided the biochar properties. After pyrolysis, the pH of sawdust biochar (7.46) was lower than the sawdust pH of 8.25, while the pH of chicken manure biochar (10.48) was higher than the pH of chicken manure (9.35). The elements of C, N, P and K were enriched during sawdust and chicken manure biochar pyrolysis. And contents of N, P and K in chicken manure biochar were significantly higher than those in sawdust biochar. The percentages of available P and K in total P and K were reduced after feedstocks were converted to biochars. After one year experiment, chicken manure biochar significantly increased biomass in different organs of *Pinus elliottii*. The increment of tree aboveground biomass in the chicken manure biochar treatment was 4.92 times of that in the control, while sawdust biochar had no significant effect on tree growth. And chicken manure biochar and sawdust biochar had significant effects on the distribution of increased biomass in leaf and bark of *Pinus Elliottii*. No significant differences on carbon concentration in different organs of *Pinus Elliottii* were found in both biochars treatments. Annual net carbon fixations (ANCF) in different organs were significantly increased in the treatment of chicken manure biochar. And ANCF of tree aboveground in the treatment was 5.02 times of that in sawdust biochar treatment and 3.87 times of that in the control, respectively. Thus, chicken manure biochar could be used as an amendment to increase productivity of artificial forest. However, the effects of different biochars on the properties of soils need further research.

**Key words:** Biochar, *Pinus Elliottii*, Carbon storage, Net primary production