



陈继来,唐旭,王小倩,等.生物质炭添加对毛竹(*Phyllostachys edulis*)出笋和新竹生长的影响研究[J].江西农业大学学报,2026,48(1):142–152.

CHEN J L,TANG X,WANG X Q,et al.Effects of biochar addition on shoot emergence and new bamboo growth in moso bamboo (*Phyllostachys edulis*)forests[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2026,48(1):142–152.

生物质炭添加对毛竹(*Phyllostachys edulis*) 出笋和新竹生长的影响研究

陈继来^{1,2,3},唐旭⁴,王小倩^{1,2,3},高冠女^{1,2},张全智³,周本智^{1,2*}

(1.中国林业科学研究院 亚热带林业研究所,浙江 杭州 311400;2.国家林业和草原局 钱江源森林生态系统定位观测研究站,浙江 杭州 311400;3.东北林业大学 生态学院,黑龙江 哈尔滨 150000;4.浙江省建德市林业总场,浙江 杭州 311600)

摘要:【目的】毛竹(*Phyllostachys edulis*)是我国森林资源的重要组成部分,在南方分布广泛。探究不同粒径和不同施入量的生物质炭对毛竹林竹笋和新竹生长的影响,可为毛竹林土壤改良、科学经营提供理论依据。【方法】于浙江省杭州市富阳区国家林业和草原局钱江源森林生态系统定位研究站庙山坞林区选取立地条件和林分条件相似的毛竹纯林,设置对照(CK)和6个处理,分别为粗粒径(5 mm)低量生物质炭(CB1, 5 t/hm²)、粗粒径(5 mm)中量生物质炭(CB2, 10 t/hm²)、粗粒径(5 mm)高量生物质炭(CB3, 15 t/hm²)、细粒径(2 mm)低量生物质炭(XB1, 5 t/hm²)、细粒径(2 mm)中量生物质炭(XB2, 10 t/hm²)和细粒径(2 mm)高量生物质炭(XB3, 15 t/hm²),研究不同粒径和不同生物质炭施入量对毛竹出笋和新竹生长的影响。【结果】与对照相比(CK),6种处理均能提高出笋量,其中CB2、XB2处理的出笋量显著高于其他处理,分别增长了91.30%和108.70%。6种处理的新竹平均胸径均高于CK,且CB2和XB2处理的平均胸径显著大于CK,分别为10.20 cm和10.35 cm,表明CB2和XB2处理对平均胸径促进作用最好。此外,CB1、CB2、CB3、XB1、XB2和XB3处理下中径材和大径材的比例上升,其中CB3处理显著提升了大径材的占比,增加了27%,说明CB3处理在毛竹林大径材数量方面的提升效果最好。新竹生长动态显示,在调查期间内,竹笋的地径生长和高度生长呈现明显的阶段性规律:前期以地径增长为主,高度生长较为缓慢;后期则高度生长迅速,地径生长趋缓。在一定时间范围内,细粒径生物质炭对竹笋地径生长和高度生长的促进效应优于粗粒径生物质炭。【结论】在6种处理中,细粒径的中量生物质炭(XB2)处理可显著提高毛竹林的出笋量与平均胸径,并增加中大径材的数量;而粗粒径的高量生物质炭(CB3)处理则对大径材数量的增加表现出显著促进作用。因此,在实际毛竹经营中,以提高出笋量、平均胸径及中大径材数量为培育目标时,施入细粒径的中量生物质炭(XB2)效果好;以培育大径材为主要目标时,则粗粒径的高量生物质炭(CB3)效果更为显著。

关键词:生物质炭;粒径;毛竹;竹笋

中图分类号:S718.5 **文献标志码:**A

文章编号:1000-2286(2026)01-0142-11

CSTR:32399.14.aauj.2026013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



收稿日期:2025-05-24 **修回日期:**2025-09-16 **接受日期:**2025-09-24

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFD220040205)

Project supported by the National Key R&D Program of China During the 14th Five-Year Plan Peri(2021YFD220040205)

作者简介:陈继来,硕士生, orcid.org/0009-0000-4673-434X, 1175496147@qq.com; *通信作者:周本智,研究员,博士,博士生导师,主要从事森林生态学研究, orcid.org/0009-0007-2460-2558, benzhi_zhou@126.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

Effects of biochar addition on shoot emergence and new bamboo growth in moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forests

CHEN Jilai^{1,2,3}, TANG Xu⁴, WANG Xiaoqian^{1,2,3}, GAO Guannü^{1,2},
ZHANG Quanzhi³, ZHOU Benzhi^{1,2*}

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China; 2. Qianjiangyuan Forest Ecosystem Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Hangzhou 311400, China; 3. School of Ecology, Northeast Forestry University, Harbin 150000, China; 4. General Forestry Farm, Jiande City, Zhejiang Province, Hangzhou 311600, China)

Abstract: [Objective] Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) is an important forest resource in China and is widely distributed in southern China. Investigating the effects of biochar with different particle sizes and different application rates on the growth of bamboo shoots and new bamboo culms in *Phyllostachys edulis* forests can provide a theoretical basis for soil improvement and scientific management of *Phyllostachys edulis* forests. [Method] Pure *Phyllostachys edulis* stands with similar site conditions and stand conditions were selected in Miaoshanwu Forest Area of Qianjiangyuan Forest Ecosystem Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Fuyang District, Hangzhou City, Zhejiang Province. One control group (CK) and six treatment groups were established, namely: biochar with coarse particle size (5 mm) at a low application rate (CB1, 5 t/hm²); biochar with coarse particle size (5 mm) at a medium application rate (CB2, 10 t/hm²); biochar with coarse particle size (5 mm) at a high application rate (CB3, 15 t/hm²); biochar with fine particle size (2 mm) at a low application rate (XB1, 5 t/hm²); biochar with fine particle size (2 mm) at a medium application rate (XB2, 10 t/hm²); and biochar with fine particle size (2 mm) at a high application rate (XB3, 15 t/hm²). [Result] The results showed that: compared with the control group (CK), all six treatments increased the number of bamboo shoots germinated. Among them, the number of bamboo shoots in the CB2 and XB2 treatments was significantly higher than that in other treatments, increasing by 91.30% and 108.70%, respectively. The average diameter at breast height (DBH) of new bamboo culms in all six treatments was higher than that in CK, and the average DBH in the CB2 and XB2 treatments was significantly larger than that in CK, reaching 10.20 cm and 10.35 cm, respectively, indicating that the CB2 and XB2 treatments exhibited the most pronounced promoting effect on the average DBH. In addition, the proportions of medium-diameter timber and large-diameter timber increased under the CB1, CB2, CB3, XB1, XB2, and XB3 treatments. Notably, the CB3 treatment significantly increased the proportion of large-diameter timber by 27%, suggesting that it had the best effect on improving the quantity of large-diameter timber in *Phyllostachys edulis* stands. The growth dynamics of new bamboo culms revealed that the ground diameter and height growth of bamboo shoots showed distinct phasic patterns during the study period: in the early stage, growth was dominated by ground diameter increment, while height growth was relatively slow; in the late stage, height growth accelerated rapidly, whereas ground diameter growth slowed down. Within a certain time frame, the promoting effect of biochar with fine particle size on the ground diameter and height growth of bamboo shoots was superior to that of biochar with coarse particle size. [Conclusion] Among the six treatments, the application of biochar with fine particle size at a medium rate (XB2) significantly increased the bamboo shoot germination quantity, average diameter at breast height (DBH), and the quantity of medium and large-diameter timber in *Phyllostachys edulis* stands. In contrast, the application of biochar with coarse particle size at a high rate (CB3) exhibited a significant promoting effect on the increase in the quantity of large-diameter timber. Therefore, in practical *Phyllostachys edulis* management, applying biochar with fine

particle size at a medium rate (XB2) yields good results when the cultivation goal is to improve bamboo shoot germination quantity, average DBH, and the quantity of medium and large-diameter timber. When the primary goal is to cultivate large-diameter timber, the application of biochar with coarse particle size at a high rate (CB3) is more effective.

Keywords: biochar; particle size; moso bamboo; bamboo shoots

【研究意义】生物质炭(biochar)是植物生物质在限氧或缺氧条件下热解生成的含碳量达60%~85%的高度芳香化固态物质^[1]。作为一类由高密度芳香烃构成的多孔材料,其表面结构具有显著异质性,呈现无序多孔特征且比表面积较大^[2]。该物质化学性质多呈碱性,兼具较强吸附能力、较高阳离子交换量(CEC)及稳定化学结构,在土壤中滞留时间较长,能够有效吸附水分和养分。将其作为土壤改良剂,可在提升作物产量、调控土壤碳氮转化过程,以及降低全球变暖潜能值方面实现协同优化,形成具有多重效益的解决方案^[3-4]。毛竹(*Phyllostachys edulis*)作为禾本科竹亚科刚竹属的高大竹种,是亚热带森林生态系统的重要组成部分。我国拥有丰富的竹林资源,其中毛竹是分布范围最广的竹类物种^[5]。该物种属于散生竹类型,通过地下竹鞭实现无性繁殖:竹鞭侧芽分化萌发形成竹笋,继而生长为新竹植株,而新竹又不断促进地下鞭系统,由此构建地上植株与地下竹鞭相互关联的有机整体^[6]。鉴于生物质炭特殊的组成结构及高度化学稳定性,其施用于毛竹林土壤后,可有效改善土壤酸性环境、提升肥力水平,并促进毛竹的生长发育。【前人研究进展】研究^[7]显示,生物质炭的高度化学稳定性使其能够通过调控土壤水分与养分的固持能力,对植物光合作用、林木及根系生长产生显著促进效应。作为高效的土壤碱性改良材料,该物质施入后可优化土壤水分吸附机制,强化与水土环境中养分的交互作用,进而提升土壤对养分的吸附容量^[8]。潘陆荣等^[9]研究指出,观光木幼苗的株高与地径生长量随生物质炭施用量增加呈显著正相关。木麻黄田间试验显示,7.5 t/hm²施用量使树高较对照提升20.0%,而2.5 t/hm²处理组增幅达30.2%^[10]。吴志庄等^[11]对人工林的研究表明,施炭1年后黄连木的地径、树高、冠幅和比叶面积较对照分别提高30.09%、55.08%、23.07%和25.03%。在生物质炭结构效应方面,粒径分级研究发现,随粒径减小(<0.5 mm、0.5~1.0 mm、1.0~2.0 mm),其表面孔隙结构显著优化,比表面积增大且C—O、—OH、—COO等含氧官能团强度增强^[12]。土壤物理性质改良方面,王丹丹等^[13]证实随施用量增加,土壤容重呈梯度下降趋势。周加顺等^[14]研究显示,生物质炭可使土壤有效磷含量提升18.77%~80.04%,速效钾含量增幅达80.19%~396.18%。此外,生物质炭添加可以提高土壤细菌群落的多样性及物种丰富度,促进微生物活动,改善养分环境^[15]。生物质炭改良通过促进植物源硅积累与提升土壤pH值,对毛竹生长形成双重促进效应^[16]。总之,生物质炭添加后土壤发生变化,从而能促进植物生长。因此,研究不同粒径和不同施入量生物质炭添加对植物生长及生长特性的影响,对森林土壤施炭配置改良和养分利用效率有重要意义。研究^[17]表明,生物质炭施用可使土壤有机碳(SOC)和颗粒有机碳(POC)含量分别提升47.4%~50.4%和63.7%~74.6%,通过增强土壤碳储量与毛竹林生态系统的长期碳汇能力,在固碳减排中发挥关键作用。其多孔结构特性不仅能增加土壤有机质含量、提升保水能力与肥力水平,还可显著提高水溶性碳(WSOC)和微生物量碳(MBC)含量,增幅分别达13.3%和12.0%^[18]。长期来看,针对集约经营导致的土壤有机碳储量下降与酶活性衰退问题,生物质炭施用可通过改善土壤理化性质,为毛竹林生长创造有利的生境条件^[19]。

【本研究切入点】目前,研究试验大多集中在生物质炭配施肥料对土壤生物特性的影响上,而添加不同粒径和不同施入量的研究较少。【拟解决的关键问题】本研究设置不同粒径和不同施入量2个因子组合,分别为粗粒径(5 mm)的低量生物质炭(CB1, 5 t/hm²),粗粒径(5 mm)的中量生物质炭(CB2, 10 t/hm²),粗粒径(5 mm)的高量生物质炭(CB3, 15 t/hm²),细粒径(2 mm)的低量生物质炭(XB1, 5 t/hm²),细粒径(2 mm)的中量生物质炭(XB2, 10 t/hm²),细粒径(2 mm)的高量生物质炭(XB3, 15 t/hm²),共6组不同粒径(粗5 mm和细2 mm)和不同施入量(5, 10, 15 t/hm²)的生物质炭添加处理,以及以照CK组探究生物质炭施用模式(不同粒径和不同施入量)对毛竹林新出竹笋及新竹生长情况的影响。以期为毛竹林土壤优化、林地可持续发展和生物质炭资源的合理利用提供理论参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

试验位于浙江省杭州市富阳区国家林业和草原局钱江源森林生态系统定位研究站庙山坞林区,地理位置为 30°06' N, 120°36' E。庙山坞自然保护区面积约 536.7 hm²,核心区面积 348.8 hm²,海拔 136.9 m。研究区属于典型的亚热带季风气候,土壤为红壤,毛竹为该区域主要竹种,夏热冬暖,四季分明,季风发达,年平均气温为 16.9 °C,最热月平均气温 25.4 °C,最冷月平均温度 4.5 °C^[20]。春夏秋冬四季降雨量依次递减,年平均降水量为 1 513 mm。此外,该地区年日照时数达 1 995 h,全年无霜期长达 237 d^[21],试验林所在区域总面积 4 000~5 000 m²,坡度 27°,立竹度 1 420 株/hm²,样地所在林区属护林区域,试验期间研究区内不进行挖笋和其他破坏笋的作业,新生竹并未在人为干扰或自然环境条件下发生非正常死亡(断梢、病虫害等),即所有新生竹笋除去退笋后全部成竹。

1.2 试验设计

于 2023 年 6 月,在试验区内随机选择立地条件相似的毛竹林 3 处,每个林分各设置 7 个 10 m×10 m 样地,进行生物质炭处理试验。为防止相互干扰,样地之间间隔至少 10 m。根据国内外生物质炭添加研究试验的强度和竹林经营情况^[22],生物质炭添加试验分 7 个处理,分别为对照 CK、粗粒径低量生物质炭 CB1、粗粒径的中量生物质炭 CB2、粗粒径的高量生物质炭 CB3、细粒径的低量生物质炭 XB1、细粒径的中量生物质炭 XB2 和细粒径的高量生物质炭 XB3,每种处理重复 3 次,共计 21 个样方,如表 1 所示。

各处理中生物质炭添加采用平铺法。在上述试验地中,于 2023 年 6 月将生物质炭均匀撒于地表,生物质炭一次性全部施用,试验中的生物质炭由竹枝在 450 °C 下炭化 3 h 制得,竹炭的物理化学性质如下:碳(C)78.5%、氮(N)0.79%、磷(P)1.24 g/kg、钾(K)7.81 g/kg、pH 值为 9.02、灰分 17.4%、特定表面积 295 m²/g、孔隙体积 0.04 cm³/g、表观密度 0.15 g/mL。试验除设置的生物质炭处理外,无其他人为因素干扰。

表 1 试验处理表
Tab.1 Experimental treatment table

施入量 Application rate	粒径 Particle size	
	C(粗 5 mm)	X(细 2 mm)
B1(5 t/hm ²)	CB1	XB1
B2(10 t/hm ²)	CB2	XB2
B3(15 t/hm ²)	CB3	XB3

1.3 样地调查

在 2024 年春笋出笋期,从 2024 年 3 月 30 日毛竹林发笋开始直至 4 月 29 日发笋完全结束,其间每隔 5 d 对样地进行调查。

新出笋、成竹及退笋数量在样地内同步统计,退笋特征根据郑郁善等^[23]得出的特征判断。根据竹笋得到地径和竹高,生长动态参照胡国华等^[24]和陈建华等^[25]的方法,具体为在发笋盛期,分别在每个样地随机选取 10 株约同一时期的竹笋,采用最小刻度 1 mm 的钢制卷尺测量笋高,钢制胸径围尺测量地径,按固定时间间隔记录生长数据。2024 年 7 月初对样地内所有新竹使用胸径围尺和钢制卷尺进行测量记录胸径。

1.4 数据处理

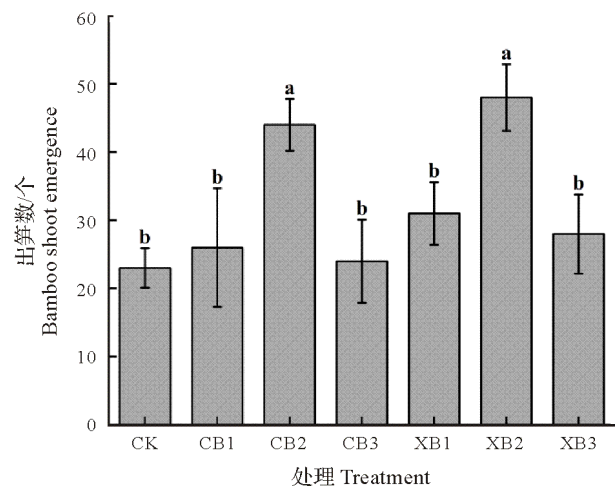
利用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 对数据进行统计分析。图表制作采用 Origin 2025 及 Excel 2019。统计同一指标不同处理间差异水平用单因素方差分析(one-way ANOVA),采用 SPSS 25.0 的双因素方差分析(two-way ANOVA)分析不同粒径、不同施入量及其相互作用对新竹出笋生长指标的差异,显著性水平设置为 $P<0.05$,极显著性水平设置为 $P<0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 生物质炭添加对出笋量的影响

生物质炭添加处理后,不同施入量下的出笋量存在极显著差异($P<0.01$),不同粒径影响不显著,如

表 2 所示。不同处理下毛竹林分出笋量有一定差异,如图 1 所示。随着生物质炭施入量的增加,样地的出笋量呈先上升后下降的趋势。在粗粒径模式下,出笋数量范围是 24~44 株;细粒径模式下,出笋数量范围是 28~48 株。直至出笋期结束,CB2 和 XB2 处理的出笋量均显著高于 CK,且 XB2 达最大值,为 48 株。生物质炭添加处理的出笋量均大于 CK,CB1~CB3 处理较 CK 的增长率分别是 13.04%、91.30%、4.35%;XB1~XB3 处理较 CK 的增长率分别是 34.78%、108.70%、21.74%。由此可知,生物质炭添加能够促进春笋萌发,且 CB2 和 XB2 处理更为显著。



不同字母表示不同处理的生长指标在 0.05 水平上差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate statistically significant differences in growth parameters among treatments at the 0.05 level.

图 1 不同生物质炭添加毛竹林分出笋量

Fig.1 Bamboo shoot emergence in moso bamboo forests under different biochar application treatments

表 2 粒径和剂量对出笋数及特征指标影响的双因素方差分析

Tab.2 Two-way analysis of variance(ANOVA)on the effects of particle size and dosage on the number of bamboo shoots emergence and characteristic indicators

参数 Parameters	粒径 Particle size		施入量 Application rate		粒径×施入量 Particle size×Application rate	
	F	P	F	P	F	P
出笋量 Bamboo shoot emergence	2.917	0.110	23.627	**	0.024	0.977
平均胸径 Mean diameter at breast height(DBH)	0.006	0.937	8.688	**	0.097	0.900
大径阶 Large-diameter class	4.707	*	15.240	**	4.331	*
中径阶 Medium-diameter class	0.309	0.581	0.226	0.798	1.226	0.302
小径阶 Small-diameter class	0.510	0.479	0.543	0.585	0.750	0.478

“*”表示 $P < 0.05$, “**”表示 $P < 0.01$ 。
* significant at 0.05 level, ** significant at 0.01 level.

2.2 生物质炭添加对新竹胸径的影响

生物质炭添加处理后,不同施入量下的平均胸径存在极显著差异 ($P < 0.01$),不同粒径影响不显著,如表 2 所示。CB2 和 XB2 处理下新竹平均胸径均显著高于 CK,且不同处理下新竹平均胸径有一定差异(图 2)。随着生物质炭施入量的增加,新竹平均胸径呈先增后减的趋势,变化范围为 9.21~10.35 cm,其中 CB1~CB3 处理较 CK 平均胸径的增长率分别为 3.01%、13.84%、5.36%;XB1~XB3 处理较 CK 平均胸径的

增长率分别为 2.79%、15.51%、4.46%。生物质炭添加可促进新竹胸径生长,随着生物质炭施入量的增加,毛竹林新竹平均胸径增加,其中 CB2 和 XB2 处理下效果最为显著。

按照胸径(DBH)的径阶整化方法,根据实际情况将毛竹林新竹胸径共划分 3 个径阶,具体分为小径阶<9.0 cm、9 cm≤中径阶<11.0 cm、大径阶≥11 cm。进行每木检尺后,统计新竹的各径阶所占百分比。不同生物质炭添加处理下毛竹林分新竹各径阶占比如图 2 所示。

双因素方差分析表明,生物质炭添加处理后,不同粒径下的大径阶占比存在显著差异($P<0.05$),不同施入量下的大径阶占比存在极显著差异($P<0.01$),粒径和施入量的交互作用对大径阶占比有显著影响($P<0.05$),如表 2 所示。就径阶分布整体趋势来看,CB1、CB2、CB3、XB1、XB2、XB3 处理下的占比最值均出现在[9, 11.0)cm 中径阶内,CK 的最值出现在<9.0 cm 小径阶内。生物质炭添加处理中,6 种处理下新竹胸径径阶均以中径阶为主,所占比例为 33%~52%,CB1 和 XB3 处理下呈现最大值为 52%;大径阶所占比例在 CB3 处理下呈现最大值为 33%,且显著高于 CK,CB2 和 XB2 处理下分别为 29% 和 27%,CK 为 11%;而小径阶所占比例在 CK 处理下呈现最大值为 53%,其次 XB1 处理下为 39%,在 XB2 处理下呈现最小值为 27%。进一步比较 6 种处理发现,生物质炭添加处理能够促进毛竹林分的新竹从小径阶向中大径阶分化。随着生物质炭添加量的增加,≥9.0 cm 的中大径阶占比增大,<9.0 cm 的小径阶占比减小,且 CB3 显著增加了≥11.0 cm 的大径阶的新竹占比。

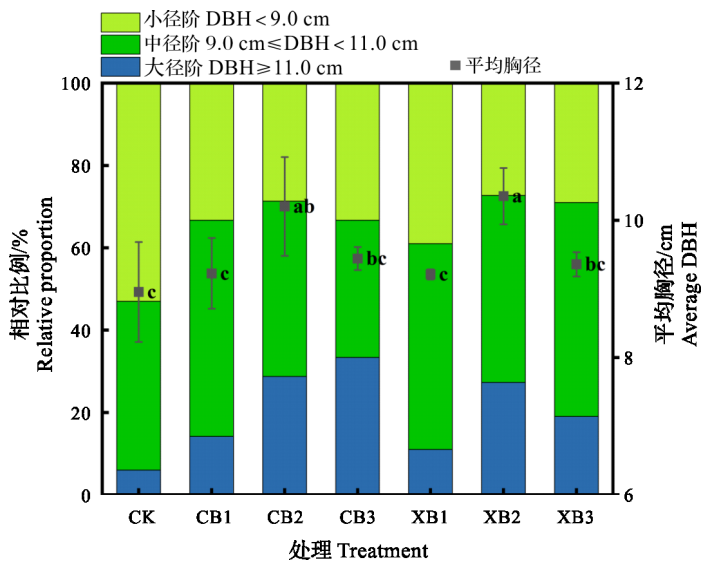


图2 不同生物质炭添加处理毛竹林分新竹平均胸径和各径阶占比
Fig.2 Effects of different biochar application treatments on the mean diameter at breast height (DBH) and proportions of diameter classes in new culms of moso bamboo stands

2.3 生物质炭添加对新竹生长动态的影响

生物质炭添加处理和对照,竹笋地径生长动态总体一致,呈现前期快速增长趋势,且在4月9日达到最大值。不同处理间,竹笋地径由大到小依次表现为XB3、CB2、XB2、CB3、XB1、CB1和CK,对应值分别为 11.26, 10.58, 10.56, 10.40, 9.93, 9.92, 9.42 cm。回归分析得出,地径生长与时间的关系满足指数函数模型,且模型检验结果均显著,其中地径生长与时间的最优拟合方程如表 3 所示。由图 3 可以看出,在 4 月 9 日达到饱和点之后,增长趋势不明显。其中,6 种处理中 XB3 处理下地径在生长过程中一直处于最高位置。

在调查期内,笋高呈现“J”型增加的趋势(图 4)。回归分析显示,最优的拟合方程幂函数曲线可以表达时间与笋高生长之间的函数关系,如表 4 所示。图 4 可知,在 3 月 30 日、4 月 4 日、4 月 9 日处理间笋高无明显差异。4 月 9 日之后,笋高呈显著升高趋势,其中, XB1 的增加幅度最为明显。进一步分析可知,4 月 24—29 日 6 种处理的笋高生长幅度最为明显, CB1、CB2 和 CB3 3 种处理的增长幅度为 688.62 cm, XB1、XB2 和 XB3 的幅度为 662.81 cm。可以看出,在一定范围内细粒径下的生物质炭添加对笋高的促进作用

要优于粗粒径。

综上,细粒径生物质炭添加相较粗粒径生物质炭对竹笋生长和地径增加具有更明显的促进作用。

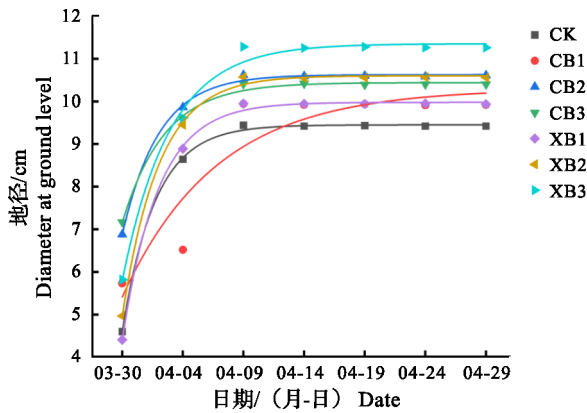


图3 不同生物质炭添加时间与地径的关系

Fig.3 Relationship between biochar application timing and basal diameter

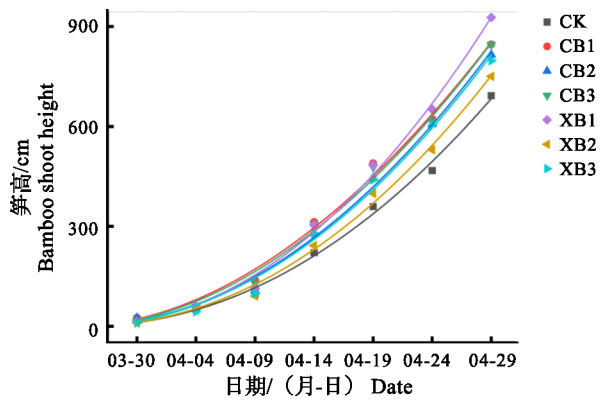


图4 不同生物质炭添加时间与笋高的关系

Fig.4 Relationship between biochar application timing and bamboo shoot height

表 3 地径、笋高与时间生长的回归方程

Tab.3 Regression models for temporal growth of basal diameter and bamboo shoot height

处理 Treatment	地径—拟合方程 Fitting equation	R^2	P	笋高—拟合方程 Fitting equation	R^2	P
CK	$y=9.449-30.436\times0.159x$	0.999	<0.01	$y=11.573\times x^{2.095\ 7}$	0.995	<0.01
CB1	$y=10.299-9.269\times0.527x$	0.868	<0.05	$y=21.464\times x^{1.891\ 94}$	0.993	<0.01
CB2	$y=10.625-19.623\times0.191x$	0.998	<0.01	$y=16.229\times x^{2.019\ 38}$	0.995	<0.01
CB3	$y=10.440-13.729\times0.239x$	0.996	<0.01	$y=19.479\times x^{1.940\ 54}$	0.994	<0.01
XB1	$y=9.978-30.175\times0.185\ x$	0.999	<0.01	$y=15.035\times x^{2.118\ 28}$	0.995	<0.01
XB2	$y=10.602-29.268\times0.193x$	0.998	<0.01	$y=12.311\times x^{2.113\ 54}$	0.995	<0.01
XB3	$y=11.351-22.007\times0.278x$	0.993	<0.01	$y=15.492\times x^{2.036\ 4}$	0.992	<0.01

3 讨 论

出笋量关系着竹林的更新换代与可持续发展^[26],生物质炭作为一种碱性改良剂添加入土壤,对改善土壤质量、提高土壤水肥具有重要作用。本研究中不同粒径和不同施入量的生物质炭添加促进了春笋的萌发。生物质炭的添加可以有效地增加土壤中的养分,毛竹根系在地下盘根错节形成竹鞭,竹鞭在地下长出新鞭后,对养分有趋向性,迅速占据和拓展土壤空间,从而获取更多的水养资源^[20,27]。有研究指出,垂直方向 0~40 cm 毛竹林土壤土层中集中了 80% 以上的根系^[28];生物质炭添加能够促进垂直方向 0~30 cm 和水平方向 0~20 cm 细根的生长^[29],这也解释了本研究生物质炭添加后,促进竹鞭在垂直和水平方向上的生长,从而增加了出笋量。在本研究处理下,新出竹笋数量都有所增加,CB2 和 XB2 2 种处理下出笋数量均显著高于对照处理,但高量生物质炭添加处理没有显著变化,这可能是由于高量施入生物质炭后,出笋的数量又受限于母竹的水肥供给能力,养分不均会加剧种内竞争,会导致退笋数量的增加,降低了出笋量^[27,30]。

新竹的胸径与林分生产力和稳定性存在紧密联系,新笋的基径可近似看作是新竹的胸径。毛竹胸径是衡量竹株个体大小及林分质量的核心指标,其发育过程与竹笋生长特征紧密关联,竹笋规格直接决定新竹胸径,而中大径竹比例则显著影响林分的材种结构及利用价值^[31]。也是新竹质量特征的体现。本研究中 CB2 和 XB2 2 种生物质炭添加处理显著增加平均胸径。由于新竹的养分受母竹养分供给的影响,生物质炭添加可减少土壤水分胁迫,可促进植物生长发育^[30]。生物质炭本身含有氮磷等植物生长所

需的各种元素,能够起到补充土壤养分的作用^[32]。本研究中平均胸径随生物质炭施入量的增加先增加后下降。这可能是高量生物质炭会促进微生物的固定养分,从而减少土壤中植物可利用养分,降低了胸径^[33-34]。与对照相比,6种处理下,均增加了中径阶和大径阶占比,降低了小径阶的占比,且CB3处理对大径阶的新竹占比表现显著。这可能是细粒径生物质炭施入土壤后,可通过与土壤颗粒形成微小团粒结构,降低容重并提升孔隙率及导水能力,进而加速植物对水分养分的吸收过程;而粗粒径的生物质炭添加后,促进大团聚体颗粒形成,释放养分缓慢,表明阳离子交换量会随作用时间的推移而增加,大团聚体颗粒会在微生物的作用下分裂为小颗粒^[35-36],增加了其表面电荷、自由基含量和孔径体积,减少了养分的淋失。高量生物质炭的添加,随着作用时间的增加,能够持续释放所含的矿物质,使得土壤的孔隙度和生态环境得到持续改善,使其向大径阶成长^[35,37-38]。

不同粒径及施入量的生物质炭添加虽未改变笋期地径与笋高的生长趋势,却对其发育进程产生显著影响。在研究期内,竹笋地径呈现“快速增长-平稳停滞”的变化模式,与陈建华等^[25]的观测结果一致;笋高生长则遵循“前期缓增-后期骤增”的时序规律,符合毛竹林竹笋—幼竹生长的典型特征。总的来说,地径与笋高生长的阶段性差异表现为:粗生长在初期占优,高生长在中后期更为显著,这与胡国华等^[24]的研究结论相契合。此外,细粒径生物质炭处理在竹笋生长促进效应上显著优于粗粒径处理,尤其在地径增量与生长速率提升方面表现突出。

4 结 论

本研究分析了不同粒径和不同施入量生物质炭对毛竹出笋与新竹生长的影响。结果表明,与对照相比(CK),6种处理均能提高出笋量,其中CB2、XB2处理的出笋量显著高于其他处理,说明这2种处理在促进毛竹林出笋方面效果更为显著。在新竹胸径方面,各处理组的平均胸径均高于CK,且CB2和XB2处理的平均胸径显著大于CK,表明其对增加毛竹林平均胸径具有最优效果。此外,CB1、CB2、CB3、XB1、XB2和XB3处理均提高了中径材和大径材的比例,尤其是CB3处理显著提升了大径材的占比,说明CB3处理在促进毛竹林大径材形成方面具有明显潜力。在新竹生长动态方面,调查期间内竹笋的地径生长与高度生长呈现明显的阶段性规律:前期以地径增长为主,高度生长较为缓慢;后期则高度生长迅速,地径生长趋缓。研究表明,在一定时间范围内,细粒径生物质炭对竹笋地径生长和高度生长的促进效应优于粗粒径生物质炭。基于上述结果,在实际毛竹经营中,为同时提高出笋量、平均胸径及中大径材数量,建议优先选用细粒径的中量生物质炭(XB2)进行添加;若以显著增加毛竹林大径材数量为主要目标,则可选用粗粒径的高量生物质炭(CB3)处理。合理的施加生物质炭可以提高毛竹林的经济效益,促进毛竹林地的合理经营和可持续发展,对南方毛竹林地土壤养分和地力维持与提升具有重要的现实意义。由于影响毛竹林生产的因素有很多,林分结构、施肥方法、施肥时间等均可以对林地产生影响。因此,不同施肥方法、施肥时间和养分配比对毛竹林出笋和新竹生长的影响情况仍需进一步研究。

参考文献 References:

- [1] STEPHEN J, L. C A, LUKAS V Z, et al. How biochar works, and when it doesn't: a review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar[J]. GCB bioenergy, 2021, 13(11): 1731-1764.
- [2] 丁艳丽, 刘杰, 王莹莹. 生物炭对农田土壤微生物生态的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3311-3317.
DING Y L, LIU J, WANG Y Y. Effects of biochar on microbial ecology in agriculture soil: a review[J]. Chinese journal of applied ecology, 2013, 24(11): 3311-3317
- [3] 郜礼阳, 林威鹏, 张凤姬, 等. 生物炭对酸性土壤改良的研究进展[J]. 广东农业科学, 2021, 48(1): 35-44.
GAO L Y, LIN W P, ZHANG F J, et al. Research progress of biochar in improving soil acidification[J]. Guangdong agricultural science, 2021, 48(1): 35-44.
- [4] HOSSAIN M Z, BAHAR M M, SARKAR B, et al. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant[J]. Biochar, 2020, 2(4): 379-420.
- [5] 丁苏雅, 段敏, 朱瀚卿, 等. 竹生物质炭和竹凋落物对毛竹林土壤营养元素和酶活性的影响[J]. 土壤, 2023, 55(4):

- 795-803.
- DING S Y, DUAN M, ZHU H Q, et al. Effects of bamboo biochar and bamboo litter on soil nutrients and enzyme activities in a moss bamboo forest[J]. *Soil*, 2023, 55(4): 795-803.
- [6] 周本智. 基于小观察窗技术的竹林地下系统动态研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
- ZHOU B Z. Dynamics of bamboo's below-ground system based on minirhizotron technique[D]. Beijing: Chinese academy of forestry, 2006.
- [7] DOMINIC W, E A J, ALAYNE S-P F, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change[J]. *Nature communications*, 2010, 1(1): 56.
- [8] BRUNO G, JOHANNES L, WOLFGANG Z. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review[J]. *Biology and fertility of soils*, 2002, 35(4): 219-230.
- [9] 潘陆荣, 亢亚超, 潘虹, 等. 生物质炭对铝胁迫下观光木幼苗生长生理特性的影响[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2021, 41(5): 18-26.
- PAN L R, KANG Y C, PAN H, et al. Effects of biochar on the growth and physiological characteristics of *tsoongiodendron odorum* seedlings under aluminum stress[J]. *Journal of southwest forestry university(natural science edition)*, 2021, 41(5): 18-26.
- [10] RIZIKI M, BENSON M, BENJAMIN D. Assessing the potential of biochar for improving soil physical properties and tree growth[J]. *International journal of agronomy*, 2021: 6000184.
- [11] 吴志庄, 王道金, 厉月桥, 等. 施用生物炭肥对黄连木生长及光合特性的影响[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(6): 992-997.
- WU Z Z, WANG D J, LI Y Q, et al. Effects of biochar fertilizer application on growth properties and photosynthetic and characteristics of *Pistacia chinensis*[J]. *Ecology and environmental sciences*, 2015, 24(6): 992-997.
- [12] 杨毅琦, 王海洋, 梁煌, 等. 不同粒径生物质炭的施用对水稻甲基汞富集的影响研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, 41(4): 744-751.
- YANG Y Q, WANG H Y, LIANG H, et al. Effect of biochar with different particle sizes on the enrichment of methylmercury in rice[J]. *Journal of Zhejiang A&F university*, 2024, 41(4): 744-751.
- [13] 王丹丹, 郑纪勇, 颜永毫, 等. 生物炭对宁南山区土壤持水性影响的定位研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 101-104.
- WANG D D, ZHENG J Y, YAN Y H, et al. Effect of biochar application on soil water holding capacity in the southern region of Ningxia[J]. *Journal of soil and water conservation*, 2013, 27(2): 101-104.
- [14] 周加顺, 于洪喜, 杨洁, 等. 不同用量生物质炭对小白菜和大蒜产量与品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(13): 59-64.
- ZHOU J S, YU H X, YANG J, et al. Effect of biochar amendment levels on the yield and quality of Chinese cabbage and garlic[J]. *Chinese agricultural science bulletin*, 2020, 36(13): 59-64.
- [15] 尉鹏雁, 游惠明, 谭芳林, 等. 生物炭添加对红树林湿地土壤细菌群落的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2025, 47(1): 141-151.
- WEI P Y, YOU H M, TAN F L, et al. Effects of biochar addition on soil bacterial communities in mangrove wetlands[J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2025, 47(1): 141-151.
- [16] 王佳雨, 朱玲姣, 黄程鹏, 等. 硅肥和生物质炭添加对毛竹林土壤活性硅组分的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, 41(3): 496-505.
- WANG J Y, ZHU L J, HUANG C P, et al. Effects of silicon fertilizer and biochar on active silicon components in *Phyllostachys edulis* forest soil[J]. *Journal of Zhejiang A&F university*, 2024, 41(3): 496-505.
- [17] TIAN J, WANG J, DIPPOLD M, et al. Biochar affects soil organic matter cycling and microbial functions but does not alter microbial community structure in a paddy soil[J]. *Science of the total environment*, 2016, 556: 89-97.
- [18] 蔡晓青. 施用生物质炭基肥和化肥对毛竹林土壤呼吸组分的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- CAI X Q. Effects of biochar-based and chemical fertilizer on soil respiration in moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) plantations[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2019.
- [19] 方慧云. 生物质炭输入对毛竹林固碳量及土壤温室气体排放的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- FANG H Y. Effects of biochar application on carbon sequestration and greenhouse gases emissions in bamboo forests[D].

- Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2019.
- [20] 周本智, 傅懋毅. 庙山坞自然保护区毛竹林细根生产和周转研究[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(2): 239-245.
- ZHOU B Z, FU M Y. Fine root production and turnover of *Phyllostachys pubescens* stands in miaoshanwu nature reserve[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2008, 30(2): 239-245.
- [21] 葛晓改, 周本智, 肖文发, 等. 生物质炭添加对毛竹林土壤呼吸动态和温度敏感性的影响[J]. 植物生态学报, 2017, 41(11): 1177-1189.
- GE X G, ZHOU B Z, XIAO W F, et al. Effects of biochar addition on dynamics of soil respiration and temperature sensitivity in a *Phyllostachys edulis* forest[J]. Chinese journal of plant ecology, 2017, 41(11): 1177-1189.
- [22] HUANG C, WANG L, GONG X, et al. Silicon fertilizer and biochar effects on plant and soil PhytOC concentration and soil PhytOC stability and fractionation in subtropical bamboo plantations [J]. Science of the total environment, 2020, 715: 136846.
- [23] 郑郁善, 邱尔发. 毛竹出笋退笋规律的研究[J]. 林业科学, 1998(S1): 73-77.
- ZHENG Y S, QIU E F. Study on the regulation of shoot emergence and degradation in *Phyllostachys heterocycla* cv. *pubescens* shoot[J]. Scientia silvae Sinicae, 1998(S1): 73-77.
- [24] 胡国华, 陈建华, 谷战英, 等. 不同抚育措施对竹笋地径及笋高生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(11): 63-65.
- HU G H, CHEN J H, GU Z Y, et al. Effects of different tending measures on ground diameter and height of bamboo shoots [J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2013, 33(11): 63-65.
- [25] 陈建华, 余婷婷, 谷战英, 等. 不同地表覆盖对毛竹笋高及地径的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(4): 10-13.
- CHEN J H, SHE T T, GU Z Y, et al. Effects of different mulching modes on bamboo shoots height and ground diameter[J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2014, 34(4): 10-13.
- [26] 王希贤, 吴君, 李磊, 等. 生物炭和氮肥对沿海沙地鼓节竹笋生长和光合特性的效应[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2022, 51(2): 217-223.
- WANG X X, WU J, LI L, et al. Effects of biochar and nitrogen fertilizer on the growth and photosynthetic characteristics of bamboo shoots of *Bambusa tuldoidea* 'swolleninternode' in coastal sandy land[J]. Journal of Fujian agriculture and forestry university(natural science edition), 2022, 51(2): 217-223.
- [27] 李承基, 官凤英, 周潇, 等. 配比施肥对带状采伐毛竹林立竹数量和质量恢复的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(2): 79-85.
- LI C J, GUAN F Y, ZHOU X, et al. Effects of fertilization application on quantity and quality recovery of restoring strip-harvested moso (*Phyllostachys edulis*) bamboo forests[J]. Journal of Nanjing forestry university(natural science edition), 2024, 48(2): 79-85.
- [28] 童冉, 陈庆标, 周本智, 等. 毛竹和雷竹地下系统结构及生物力学性质[J]. 生态学报, 2020, 40(7): 2242-2251.
- TONG R, CHEN Q B, ZHOU B Z, et al. Structural and biomechanical properties of underground systems of moso bamboo and lei bamboo[J]. Acta ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2242-2251.
- [29] 张明发, 张胜, 滕凯, 等. 湖南花垣烟区秸秆生物炭配施量对土壤pH及烤烟根系的影响[J]. 作物杂志, 2022(6): 193-200.
- ZHANG M F, ZHANG S, TENG K, et al. Effects of fertilizing with straw biochar on soil pH and root growth of flue-cured tobacco in Huayuan, Hunan[J]. Crops, 2022(6): 193-200.
- [30] KAMMANN C I, LINSEL S, GÖBLING J W, et al. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil-plant relations[J]. Plant and soil, 2011, 345(1/2): 195-210.
- [31] 刘恩斌, 周国模, 葛宏立, 等. 基于最大熵原理的多尺度毛竹胸径分布统一模型构建及应用[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4070-4077.
- LIU E B, ZHOU G M, GE H L, et al. Constructing unite distribution model of multiple scaling' moso bamboo's diameter on maximum entropy and application[J]. Acta ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4070-4077.
- [32] 崔文芳, 陈静, 鲁富宽, 等. 生物炭与氮肥减量调控对土壤养分和肥力的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(11): 2429-2436.
- CUI W F, CHEN J, LU F K, et al. Effects of biochar and nitrogen reduction on soil nutrient and fertility[J]. Southwest China

journal of agricultural sciences, 2021, 34(11): 2429-2436.

- [33] 李博洋, 叶茵, 楚睿雯, 等. 施加生物炭对谷子干物质积累、转运、分配和土壤理化性质的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(3): 695-708.
- LI B Y, YE Y, CHU R W, et al. Effects of biochar application on dry matter accumulation, transport, and distribution of fox-tail millet and soil physicochemical properties[J]. Acta agronomica Sinica, 2024, 50(3): 695-708.
- [34] ROBERTSON S J, RUTHERFORD P M, LÓPEZ-GUTIÉRREZ J C, et al. Biochar enhances seedling growth and alters root symbioses and properties of sub-boreal forest soils[J]. Canadian journal of soil science, 2012, 92(2): 329-340.
- [35] HAO X, MUHAMMAD R, CONG M, et al. Assessing the difference of biochar and aged biochar to improve soil fertility and cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) productivity[J]. Journal of soils and sediments, 2022, 23(2): 606-618.
- [36] WANG L W, DAVID O C, JÖRG R, et al. Biochar aging: mechanisms, physicochemical changes, assessment, and implications for field applications[J]. Environmental science & technology, 2020, 54(23): 67.
- [37] ROSA J M D L, ROSADO M, PANEQUE M, et al. Effects of aging under field conditions on biochar structure and composition: implications for biochar stability in soils[J]. Science of the total environment, 2018(613/614): 969-976.
- [38] 文曼, 郑纪勇. 生物炭不同粒径及不同添加量对土壤收缩特征的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 46-50.
- WEN M, ZHENG J Y. Effects of different sizes of biochar and their addition rates on soil shrinkage characteristics[J]. Research of soil and water conservation, 2012, 19(1): 46-50.

(责任编辑: 刘玉香)



第一作者简介:陈继来, 硕士生, 毕业于东北林业大学生态学院森林生态学专业, 主要从事亚热带林业毛竹林生态系统研究, 参与十四五国家重点研发计划项目, 获得学校奖学金。



通信作者简介:周本智, 博士, 博士生导师。中国林科院亚热带林业研究所研究员, 长期从事亚热带森林生态系统定位观测和研究, 主持国家“十一五”到“十四五”科技支撑(重点研发)课题(专题)4项, 国家自然科学基金3项, 发表论文180余篇。兼任中国林学会森林生态分会常务理事、浙江林学会森林生态专业委员会副主任委员等。