

吴君, 何天友, 陈凌艳, 等. 施肥对沿海沙地鼓节竹叶片建成成本及适应性的影响 [J]. 福建农业学报, 2023, 38 (1): 90–98.
WU J, HE T Y, CHEN L Y, et al. Fertilization for Cultivating *Bambusa tuldoidea* on Coastal Sandy Land [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 38 (1): 90–98.

施肥对沿海沙地鼓节竹叶片建成成本及适应性的影响

吴 君¹, 何天友², 陈凌艳², 江登辉², 施成坤³, 荣俊冬¹, 郑郁善^{1,2}, 陈礼光^{1*}

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学园林学院, 福建 福州 350002;
3. 福建省东山赤山国有防护林场, 福建 漳州 363400)

摘 要:【目的】探究生物炭与氮肥配施条件下沿海沙地鼓节竹的生长发育潜能和适应能力, 为沿海沙地防护树种的栽培提供参考。【方法】以福建省漳州市赤山林场试验地选取的 4 年生鼓节竹为研究对象, 采用生物炭种类 (A)、生物炭量 (B) 和氮肥量 (C) 3 因素 3 水平正交试验进行施肥管理, 测定叶片热值和生物量建成成本, 分析鼓节竹在不同施肥条件下相同时期的能量利用策略和适应能力的差异。【结果】生物炭和氮肥配施能提高鼓节竹叶片碳、氮含量, 提高鼓节竹叶片去灰分热值 (AFCV)、叶片生物量建成成本 (CC_{area}) 及产量。相较于对照组 (CK), 处理 5 (小麦秸秆生物炭、400 g·丛⁻¹生物炭量、900 g·丛⁻¹施氮肥量) 的碳含量提高了 28.83%, 出笋量提高了 106.38%, 叶片单位面积建成成本 (CC_{area}) 提高了 50.07%, 灰分含量 (AC) 降低了 67.63%, 去灰分热值 (AFCV) 处理 5 最佳。相关分析结果表明, 鼓节竹叶片生物量建成成本与去灰分热值 (AFCV)、碳含量极显著正相关 ($P < 0.01$), 与氮含量、灰分含量 (AC) 显著负相关 ($P < 0.05$)。极差结果表明, 氮肥用量是影响鼓节竹叶片建成成本的首要因素。【结论】隶属函数结果显示, 处理 5 的作用效果最佳, 即 400 g·丛⁻¹的小麦生物炭配施 900 g·丛⁻¹的氮肥, 不仅显著影响鼓节竹的叶片生长及适应性, 也对鼓节竹产量产生影响, 可以应用于沿海沙地鼓节竹栽培。

关键词: 鼓节竹; 施肥; 热值; 建成成本

中图分类号: S 795.7

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2023) 01-0090-09

Fertilization for Cultivating *Bambusa tuldoidea* on Coastal Sandy Land

WU Jun¹, HE Tianyou², CHEN Lingyan², JIANG Denghui², SHI Chengkun³,
RONG Jundong¹, ZHENG Yushan^{1,2}, CHEN Liguang^{1*}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. College of Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. Chishan Forest Farm in Dongshan Country, Fujian, Zhangzhou, Fujian 363400, China)

Abstract: 【Objective】Growth promotion and adaptability enhancement of *Bambusa tuldoidea* on coastal sandy land in Fujian by application of biochar and nitrogen fertilizer were evaluated. 【Method】Four-year-old *B. tuldoidea* plants obtained from the Chishan Mountain Farm were used in a 3 factors 3 levels orthogonal experimentation with variables that included applying biochar of different types (A), biochar in different amounts (B), and nitrogen fertilization (C). Calorific value of leaves (AFCV), cost of unit area of biomass (CC_{area}), and adaptability of the plants were the criteria for economic evaluation and fertilization selection. 【Result】The combined use of biochar and nitrogen fertilizer in cultivating *B. tuldoidea* significantly elevated the carbon, nitrogen, AFCV, cost, and yield of the tree leaves. Treatment No. 5, which applied wheat straw biochar at 400g·plant⁻¹ along with a nitrogen fertilizer at 900g·plant⁻¹, raised the carbon content in leaves by 28.83%, the number of bamboo shoots by 106.38%, and the CC_{area} by 50.07%, while lowered the ash content (AC) by 67.63%, over control. In addition, it achieved the highest AFCV among all treatments. An extremely significant correlation was found

收稿日期: 2022-10-27 初稿; 2022-12-09 修改稿

作者简介: 吴君 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 森林培育理论与技术 (E-mail: wj1145750160@163.com)

* 通信作者: 陈礼光 (1974-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 森林培育 (Email: fjclg@126.com)

基金项目: 福建省科技计划区域发展项目 (2015N3015); 福建省科技创新团队项目 (闽教科 [2018] 49 号); 福建农林大学科技创新发展基金项目 (CXZX2017118)

between the biomass cost and AFCV or carbon content ($p < 0.01$), whereas a significant negative correlation between that and nitrogen or AC ($p < 0.05$). Nitrogen fertilization was the primary factor affecting the cost of *B. tuldoidea* biomass.

【Conclusion】Treatment No. 5, which combined the applications of 400g of wheat biochar and 900g of nitrogen fertilizer per plant, significantly enhanced the leaf growth, biomass production, and plant adaptability of *B. tuldoidea*. It was considered the choice fertilization for building the ecologically beneficial forest on the coastal sandy land in the province.

Key words: *Bambusa tuldoidea*; fertilization; calorific value; construction cost

0 引言

【研究意义】我国以木麻黄 (*Casuarina equisetifolia*) 为主的一代沿海防护林逐渐进入自然衰老阶段, 防护能力下降, 同时我国现有沿海防护林存在防护树种单一、结构模式简单以及病虫害程度严重等问题^[1], 使二代林更新困难, 生态效益得不到提高, 因此急需引入新树种改善沿海沙地的树种结构, 增加树种多样性, 同时实现防护林的可持续经营。竹子的地下鞭根系统发达, 在防止水土流失等方面效果显著, 优于其他树种, 栽种不同竹种可以有效增加沿海防护林的生态多样性。鼓节竹 (*Bambusa tuldoidea* 'Swolleninternode') 隶属于簕竹属 (*Bambusa*) 的丛生竹, 是优良的园林观赏竹种^[2]。鼓节竹作为沿海防护林已经成功引种^[3]。沿海地区的土壤多为沙土, 土壤贫瘠, 肥力低, 不利于大多数植物的生长发育^[4], 因此提高土壤养分利用率以及鼓节竹的适应性及抗逆性对沿海沙地鼓节竹生长发育及可持续经营十分重要。【前人研究进展】热值以及生物量建成成本是衡量植物对环境适应性及抗逆性的重要指标。热值是衡量植物第一生产力的重要指标^[5], 也是衡量植物对环境适应性及抗逆性的重要指标, 不仅能够反映植物各种生理活动的变化和生长状况的差异, 也能够体现各种环境因子对植物生长的影响^[6,7]。生物量建成成本是指合成单位生物量需要消耗的能量, 是衡量植物构建自身所需要的物质和能量成本的一个重要指标, 反映了植物的能量分配和利用策略^[8]。生物量建成成本较低则表明植物的生长较为旺盛, 而生物量建成成本较高则表明植物的抗逆性较强^[9]。生物炭是一种富含碳元素的物质, 是由生物质在人工控制的热解条件下制备而成, 具有稳定化学性能和生物性能、很强的吸附性、发达的孔隙结构等特点^[10], 是改善土壤结构及其肥力、提高作物产量的主要原因。不同生物炭种类及其施用量对植物的生物量影响不同^[11], 施用适量生物炭能够有利于植物的生长发育, 施用过量生物炭则对植物的生长产生负面影响^[12]。施加生物炭可以有效提高烤烟 (*Nicotiana tabacum*)^[13]、玉米 (*Zea mays* L.)^[14]、扁核酸红枣 (*Zizyphus Jujube*

Dates)^[15] 等植物的产量。施加生物炭能够减少土壤氮素的流失, 促进植物对养分的吸收利用; 生物炭与氮肥配施能显著促进水稻的生长发育、干物质的积累以及产量^[16]。【本研究切入点】生物炭与氮肥配施多用于作物栽培, 目前有关于沿海沙地鼓节竹的生物炭和氮肥配施研究还较少。【拟解决的关键问题】本研究以沿海沙地的鼓节竹为研究对象, 分析生物炭和氮肥配施对鼓节竹叶片碳含量、灰分含量 (AC)、去灰分热值 (AFCV)、生物建成成本、适应能力和出笋量的影响, 筛选出生物炭和氮肥的最佳配比, 为沿海沙地环境下鼓节竹的科学施肥和可持续经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于福建省漳州市东山县赤山国有林场 (118°18' E, 23°40' N), 属亚热带海洋季风性气候, 降雨量充足, 5~9月湿润多雨, 11月至次年2月干燥少雨, 年均降雨量 945 mm, 年均气温 20.8℃。试验前对试验地的土壤进行采集分析, 有机质 4.720 g·kg⁻¹, 土壤全氮 0.148 g·kg⁻¹、全磷 0.106 g·kg⁻¹、全钾 9.904 g·kg⁻¹、水解氮 9.97 g·kg⁻¹、速效磷 3.47 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

在赤山林场的试验地选取生长状况较为一致的4年生鼓节竹, 每个处理5丛, 每丛5株。采用L₉(3⁴)正交试验设计进行施肥处理, 共设9个处理, 不进行任何施肥处理为对照 (CK), 各处理重复3次, 因素与水平表参照表1, 施肥组合表参照表2。

玉米、小麦、水稻秸秆生物炭 (勤丰众成生物质新材料南京有限公司生产)。于2020年9月中旬 (鼓节竹发笋末期) 施肥, 施肥采用沟施, 在鼓节竹周边挖出环状施肥沟, 将生物炭一次性全部均匀施入沟中, 施肥后覆土; 氮肥 (尿素, 含N 46%) 溶解在水中后均匀浇在施肥沟中。氮肥分次施加能够显著提高氮肥叠加利用率, 减少损失率^[17]。氮肥分3次, 每次间隔15 d, 分别按总量的50%、30%、20%施入。

1.3 出笋量、叶片样品采集及碳、氮养分测定

叶片采集: 于2020年10月下旬进行取样。选择

表 1 试验因素与水平
Table 1 Factors and levels of experimental design

水平 Level	因素 Factor		
	生物炭种类 Biochar species	生物炭量 Amount of biocha/(g·丛 ⁻¹)	氮肥量 Amount of nitrogen/(g·丛 ⁻¹)
1	玉米秸秆生物炭 Corn straw biochar (A1)	100 (B1)	300 (C1)
2	小麦秸秆生物炭 Wheat straw biochar (A2)	400 (B2)	600 (C2)
3	水稻秸秆生物炭 Rice straw biochar (A3)	1 000 (B3)	900 (C3)

表 2 鼓节竹的施肥组合
Table 2 Fertilizations applied for *B. tuldooides* cultivation

处理 Treatment	施肥组合 Fertilization combination		
	A	B	C
1	A1	B1	C1
2	A1	B2	C2
3	A1	B3	C3
4	A2	B1	C2
5	A2	B2	C3
6	A2	B3	C1
7	A3	B1	C3
8	A3	B2	C1
9	A3	B3	C2

A: 生物炭种类; B: 生物炭量; C: 氮肥量
A: Biochar of different types; B: Biochar in different amounts; C: Nitrogen fertilization

混合取样法,在相同处理的 5 丛鼓节竹里选取生长状况较为一致的成熟功能叶片,置于冰盒中带回实验室。将叶片清洗、擦拭干净后装入牛皮纸袋中,放入烘箱,先 105 ℃ 杀青 15 min,然后 85 ℃ 恒温烘干至恒重,用粉碎机粉碎后,过 2 mm 网筛,装入样品管内进行后续试验。

叶片养分测定:叶片全碳、全氮含量采用碳氮分析仪测定。

出笋量测定:每丛竹子以无竹笋记为 0,有笋长出则具体记录出笋个数。

1.4 叶片热值和生物量建成成本相关指标测定

1.4.1 比叶面积 相同处理每丛选取 3~5 株生长状况较好的鼓节竹,每株取 5 片展开的成熟叶片,去除叶柄后用扫描仪进行扫描记录,使用 Photoshop CS4 和 Matlab 7.9 计算单叶面积,比叶面积 (Special leaf area, SLA) = 叶面积/叶干质量^[18]。

1.4.2 灰分和热值测定 灰分采用马弗炉干灰化法测定^[18],灰分含量 (Ash content, AC) = (灰分重量/干样品重量) × 100%。

热值测定:热值测定环境温度为 23~26 ℃ (低

温或高温都会导致数值波动大,不准确)。称取烘干磨碎后的样品 0.5 g (精确到 0.000 1),每个样品重复 3 次,使用热值分析仪 (C5000, IKA, Germany) 测定样品干质量热值 (GCV),去灰分热值 AFCV (kJ·g⁻¹) = GCV / (1 - AC)^[19]。

1.4.3 叶片建成成本计算 叶片单位质量建成成本 [Mass-based leaf construction cost, CC_{mass}(g·g⁻¹)] 参考 Williams 等^[20] 的公式计算:

$$CC_{mass} = [(0.06968 \text{ AFCV} - 0.065)(1 - AC) + 7.5(k N_{mass})] / EG。$$

式中, N_{mass} 为叶片氮含量, EG 为生长效率,一般为 0.87^[9]; k 为氮的氧化态形式 (若为 NO₃⁻, 则 k=5, 若为 NH₄⁺, 则 k=-3); 参照 Shen 等^[21] 的方法,用氮的 2 种氧化形态计算出 CC_{mass} 值的平均数作为结果。

叶片单位面积建成成本 [Area-based leaf construction cost, CC_{area}(g·m⁻²)] 的计算公式为:

$$CC_{area} = CC_{mass} / SLA^{[1]}。$$

1.5 数据处理与分析

使用 Excel 2007 进行数据整理, SPSS、DPS 对数据进行极差分析、单因素方差分析 (通过 LSD 法多重比较进行显著性检验,字母标记表示结果)、相关性分析,运用模糊隶属函数法^[22] 对所测指标进行综合评价,求出各项指标的隶属函数值,隶属函数公式如下:

$$U(X_j) = (X_j - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}) \tag{1}$$

$$U(X_j) = 1 - [(X_j - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})] \tag{2}$$

式中, U (X_j) 表示鼓节竹 j 指标的标准化值, X_{jmax}、X_{jmin} 表示鼓节竹 j 指标的最大值和最小值。若所测指标与鼓节竹适应性和抗逆性呈正相关则采用 (1) 式计算,若所测指标与鼓节竹适应性和抗逆性呈负相关则采用 (2) 式计算。

权重计算公式:

$$W_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \tag{3}$$

式中， V_j 表示鼓节竹 j 指标的标准差系数， W_j 表示鼓节竹 j 指标在所有指标中的重要程度，即权重。
综合评价计算公式：

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \times W_j]$$

(4)

式中， D 表示不同处理下鼓节竹性状的综合评价价值。

2 结果与分析

2.1 叶片热值相关指标

不同处理鼓节竹叶片碳、氮、灰分含量、比叶面积和去灰分热值的测定结果见表 3。处理 5 的叶片碳含量最高，较最低的处理 9 高 21.86%，其次为处理 7，各处理的碳含量均大于对照组，说明生物炭与氮肥配施能够促进叶片碳含量的积累，这可能是处

理 5 的鼓节竹合成更多的有机物用于适应沿海沙地环境的原因。处理 4 的叶片氮含量最高，是处理 5 的 1.32 倍，其次为处理 7，各处理的氮含量均大于对照组，且各处理之间无显著性差异 ($P>0.05$)。各处理灰分含量均小于对照，对照组的叶片灰分含量较最低的处理 5 高 67.63%。处理 8 的比叶面积最高，各处理的比叶面积均显著小于对照 ($P<0.05$)。处理 5 的去灰分热值最高，较最低的处理 4 高 12.26%，其次为处理 8，除处理 4 以外的其他处理的去灰分热值均大于对照。这可能是生物炭与氮肥配施增加了鼓节竹的养分供应，使鼓节竹有足够的能量用来合成具有保护性的物质，表现为自身叶片灰分含量降低，竹叶片碳含量及去灰分热值增加，从而增强鼓节竹适应环境的能力，能较好地适应沿海沙地环境，增大鼓节竹抗逆性和生长适应性。

表 3 不同处理对叶片碳、氮、灰分、比叶面积、去灰分热值的影响
Table 3 Effects of treatments on carbon, nitrogen, ash, specific leaf area, and AFCV of *B. tuldoidea* leaves

处理 Treatment	碳含量 Carbon content/%	氮含量 Nitrogen content/%	灰分含量 AC/%	比叶面积 SLA/ (m ² ·kg ⁻¹)	去灰分热值 AFCV/ (kJ·g ⁻¹)
1	44.59±0.38 ab	2.69±0.46 ab	5.33±0.5 abc	6.99±2.14 b	20.23±0.08 ab
2	41.43±0.31 b	2.34±0.009 b	6.56±0.1 abc	6.72±0.81 b	19.13±0.22 cd
3	45.04±0.36 ab	2.51±0.01 ab	5.51±0.2 abc	6.88±0.51 b	19.21±0.21 cd
4	39.18 ±0.4 b	2.95±3.41 a	7.52±1.92 a	6.58±0.57 b	18.60±0.82 d
5	50.22±0.29 a	2.20±0.02 b	4.49±0.08 c	6.63±0.03 b	20.88±0.09 a
6	48.87±0. 32 a	2.55±0.78 ab	5.06±1.16 bc	7.45±0.91 b	20.39±0.09 ab
7	49.99±0.21 a	2.71±0.01 ab	4.51±0.97 c	7.40±1.81 b	20.13±0.43 ab
8	44.14±0.27 ab	2.49±0.01 ab	6.47±1.0 abc	7.73±1.21 b	20.78±0.42 a
9	41.21±0.11 b	2.22±0.004 b	6.98±1.78 ab	7.01±0.31 b	19.76±0.39 bc
CK	38.98±0.15 b	1.96±0.002 b	7.56±0.98 a	12.61±0.22 a	19.11±0.11 cd

数值为平均值（±标准误），同一列含相同字母表示差异不显著（ $P>0.05$ ），不含相同字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。
Data are presented as mean±standard error; Those with same letter on same column indicate no significant difference at $p>0.05$; Those with different letters, significant difference at $p<0.05$.

2.2 不同处理对叶片建成成本的影响

叶片建成成本一般分为叶片单位质量建成成本和叶片单位面积建成成本，能够体现植物对环境的适应性和抗性，其中叶片单位面积建成成本更加能够体现植物的竞争力。由表 4 可知，处理 5 的叶片单位面积建成成本最高，较最低的处理 8 高出 21.3%，较对照组高出 50.07%，其次为处理 7，各处理间差异不显著 ($P>0.05$)，且均大于对照组。较高的叶片单位面积建成代表着植物对环境有更高的生长适应性和抗性，处理 5 的单位面积建成最高，说明处

理 5 的施肥组合能提高鼓节竹在沿海沙地的抗逆性来抵御不良影响的影响，相较于对照，施肥后鼓节竹的生长适应性均有一定程度的提升。极差结果表明，3 个因素对鼓节竹叶片单位面积建成成本的重要性影响程度为 $C>B>A$ ，即氮肥用量对鼓节竹叶片单位面积建成成本影响较大，其次为生物炭用量，生物炭种类的影响较小。
不同处理对叶片单位质量建成成本的影响见表 5，处理 5 的叶片单位质量建成成本最高，较最低的处理 4 高出 10.08%，较对照组高出 10.87%，各处理间

表 4 不同处理对叶片单位面积建成成本的影响

Table 4 Effects of treatments on CC_{area}

处理 Treatment	施肥组合 Fertilization combination			叶片单位 面积建成成本 CC _{area} / (g·m ⁻²)
	A	B	C	
1	A1	B1	C1	202.14 ab
2	A1	B2	C2	210.57 ab
3	A1	B3	C3	206.22 ab
4	A2	B1	C2	209.18 ab
5	A2	B2	C3	237.15 a
6	A2	B3	C1	200.79 ab
7	A3	B1	C3	203.50 ab
8	A3	B2	C1	195.49 ab
9	A3	B3	C2	213.30 ab
CK				158.03
K1	618.93	614.82	598.42	
K2	647.12	643.21	633.05	
K3	612.29	620.31	646.87	
k1	206.31	204.94	199.47	
k2	215.71	214.40	211.02	
k3	204.10	206.77	215.62	
R	9.40	9.46	16.15	

最优组合

The best combination

A2 B2 C3

Ki: 第*i*因素的量之和; *ki*: 第*i*因素的平均含量; 同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。表5、表6同。

Ki: Sum of quantities of the i^{th} factor; *Ki*: Average content of the i^{th} factor. Different lowercase letters indicate significant differences among different stands ($P<0.05$). The same applied in Table 5 and table 6.

差异显著 ($P<0.05$), 且均显著高于对照组。较高的叶片单位质量建成表明鼓节竹在沿海沙地环境下有更强的抗逆性和生长适应性, 处理 5 的叶片单位质量建成成本最高, 说明处理 5 的鼓节竹适应性和抗逆性最强。极差结果表明, 3 个因素按照对叶片单位质量建成成本影响重要性排序为 $C>B>A$, 即氮肥用量对叶片单位质量建成成本的影响较大, 其次为生物炭用量, 生物炭种类影响最小。

2.3 不同处理对鼓节竹出笋量的影响

鼓节竹作为一种丛生竹, 出笋量关系着竹林的更新换代与可持续发展。不同处理对鼓节竹出笋量的影响不同 (表 6), 处理 5 的出笋数最多, 处理 1 的出笋数最少, 各处理间差异不显著 ($P>0.05$), 且出笋数均大于对照组, 处理 5 相比对照出笋量提高了 106.38%, 处理 1 相比对照提高了 12.57%, 说明

表 5 不同处理对叶片单位质量建成成本的影响

Table 5 Effects of treatments on CC_{mass}

处理 Treatment	施肥组合 Fertilization combination			叶片单位质量建成成本 CC _{mass} / (g·g ⁻¹)
	A	B	C	
1	A1	B1	C1	1.45 abc
2	A1	B2	C2	1.44 cde
3	A1	B3	C3	1.42 cde
4	A2	B1	C2	1.39 de
5	A2	B2	C3	1.53 a
6	A2	B3	C1	1.47 ab
7	A3	B1	C3	1.46 ab
8	A3	B2	C1	1.41 cde
9	A3	B3	C2	1.43 bcd
CK				1.38
K1	4.31	4.30	4.33	
K2	4.39	4.38	4.27	
K3	4.31	4.33	4.41	
k1	1.44	1.43	1.44	
k2	1.46	1.46	1.42	
k3	1.44	1.44	1.47	
R	0.02	0.03	0.05	

最优组合

The best combination

A2 B2 C3

生物炭与氮肥配施能增加鼓节竹的出笋量。极差结果表明, 氮肥用量对鼓节出笋量的影响较大, 其次为生物炭用量, 生物炭种类的影响较小。

2.4 影响生物量建成成本因素的相关性分析

对鼓节竹叶片热值相关指标及建成成本的相关性分析 (表 7) 表明: 叶片单位质量建成成本 (CC_{mass}) 与去灰分热值 (AFCV)、叶片碳含量极显著正相关 ($P<0.01$), 和叶片灰分含量 (AC) 极显著负相关 ($P<0.01$); 叶片单位面积建成成本 (CC_{area}) 与叶片氮含量、比叶面积 (SLA) 显著负相关 ($P<0.05$); 去灰分热值 (AFCV) 与叶片碳含量极显著正相关 ($P<0.01$), 与比叶面积 (SLA) 显著正相关 ($P<0.05$), 与灰分含量 (AC) 极显著负相关 ($P<0.01$); 叶片碳含量和灰分含量 (AC) 极显著负相关 ($P<0.01$)。

2.5 不同施肥处理对鼓节竹的综合评价

处理 5 的单位质量建成成本、单位面积建成成本、去灰分热值、碳含量、灰分含量和出笋量的隶属函数值最高 (表 8), 说明处理 5 的鼓节竹对沿海沙地的适应性和抗性最强且产量最高。处理 4 的氮

表 6 不同处理对鼓节竹出笋量的影响
Table 6 Effects of treatments on number of *B. tuldoidea* shoots emerged

处理 Treatment	施肥组合 Fertilization combination			出笋量 Bamboo shoots yield/ (个·株 ⁻¹)
	A	B	C	
1	A1	B1	C1	6.00 b
2	A1	B2	C2	9.67 ab
3	A1	B3	C3	9.00 ab
4	A2	B1	C2	8.33 ab
5	A2	B2	C3	11.00 a
6	A2	B3	C1	8.33 ab
7	A3	B1	C3	10.00 ab
8	A3	B2	C1	8.33 ab
9	A3	B3	C2	6.67 ab
CK				5.33
K1	24.67	24.33	22.66	
K2	27.66	29.00	24.67	
K3	25.00	23.51	30.00	
k1	8.22	8.11	7.55	
k2	9.22	9.67	8.22	
k3	8.33	7.84	10.00	
R	1.00	1.83	2.45	
最优组合 The best combination	A2 B2 C3			

含量最高，说明处理 4 的鼓节竹叶片光合作用可能更高。各处理的比叶面积相差不大。根据综合评价排序，不同处理的排序为处理 5>处理 7>处理 8>处理 6>处理 4>处理 2>处理 1>处理 3>处理 9>CK，最佳处理为处理 5，即小麦秸秆生物炭 400 g·丛⁻¹ 配施氮肥 900 g·丛⁻¹。

3 讨论与结论

热值受多种环境因素的影响，其数值的高低体现了植物的代谢水平^[5]。王金旺等^[23]的研究表明，秋茄（*Kandelia obovata*）叶片热值随着维度的升高而升高，且在冬季时热值显著提高，这可能是因为叶片为了抵御不良生长环境而增加了有机物的积累。碳元素是储能有机质的骨架，碳含量的高低决定了植物体内有机质的总量，碳含量越高越表明植物的热值越高，其构建生物体所需的能量也就越多^[24]。本研究发现在沿海沙地环境下，施肥处理下的鼓节竹叶片碳含量和去灰分热值均高于未施肥处理，这可能是肥料为鼓节竹提供了更多的营养物质，使其具有合成更多的有机物的能力来抵御沿海沙地不良环境的影响。而灰分物质主要是由矿质元素构成，它们的合成不需要直接的能量，通常高的叶片灰分含量则会相对于低的热值^[25]。本研究的结果表明，鼓节竹叶片生物量建成成本与去灰分热值、碳含量显著正相关（ $P<0.05$ ），与灰分含量显著负相关（ $P<0.05$ ），这与前人研究一致^[1,19]。在逆境中植物为了适应环境需要提高含能物质的合成量。本研究结果表明，生物炭与氮肥配施能显著提高鼓节竹叶

表 7 鼓节竹叶片热值相关指标及建成成本的相关性分析
Table 7 Correlations among calorific value-related indices and biomass cost-related factors of *B. tuldoidea* leaves

项目 Item	单位质量 建成成本 CC _{mass}	单位面积 建成成本 CC _{area}	去灰分热值 AFCV	氮含量 Nitrogen content	碳含量 Carbon content	灰分含量 AC	比叶面积 SLA	出笋量 Bamboo shoots yield
单位质量建成成本 CC _{mass}	1							
单位面积建成成本 CC _{area}	0.527*	1						
去灰分热值 AFCV	0.758**	0.205	1					
氮含量 Nitrogen content	-0.273	-0.423*	-0.394	1				
碳含量 Carbon content	0.871**	0.245	0.718**	-0.174	1			
灰分含量 AC	-0.852**	-0.296	-0.624*	0.141	-0.958**	1		
比叶面积 SLA	0.148	-0.663*	0.565*	0.064	0.353	-0.214	1	
出笋量 Bamboo shoots yield	0.29	0.299	0.099	-0.217	0.413	-0.418	-0.175	1

*: $P<0.05$, 显著相关; **: $P<0.01$, 极显著相关。
*: $P<0.05$, significant correlation; **: $P<0.01$, highly significant correlation.

表 8 不同生物炭与氮肥配施对鼓节竹的综合评价
Table 8 Overall evaluation on biochar/nitrogen fertilizer combinations for *B. tulldoides* cultivation

处理 Treatment	单位质量 建成成本 CC _{mass}	单位面积 建成成本 CC _{area}	去灰分热值 AFCV	氮含量 Nitrogen content	碳含量 Carbon content	灰分含量 AC	比叶面积 SLA	出笋量 Bamboo shoots yield	综合评价 Comprehe-nsive evaluation	排序 Sort
1	0.12	0.05	0.09	0.13	0.01	0.05	0.02	0.04	0.50	7
2	0.04	0.04	0.03	0.07	0.01	0.12	0.01	0.23	0.54	6
3	0.04	0.04	0.04	0.10	0.01	0.06	0.01	0.20	0.49	8
4	0.01	0.04	0.00	0.18	0.00	0.17	0.00	0.16	0.57	5
5	0.19	0.07	0.13	0.04	0.02	0.00	0.00	0.31	0.76	1
6	0.13	0.04	0.10	0.11	0.02	0.03	0.03	0.16	0.63	4
7	0.14	0.04	0.09	0.13	0.02	0.00	0.03	0.25	0.71	2
8	0.06	0.03	0.13	0.09	0.01	0.11	0.05	0.16	0.64	3
9	0.07	0.05	0.07	0.05	0.01	0.14	0.02	0.07	0.47	9
CK	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.18	0.24	0.00	0.44	10

片热值和叶片碳含量，降低鼓节竹叶片比叶面积、灰分含量，可能是由于生物炭与氮肥的添加促进植物的生长代谢，促进了有机物的合成，从而增强鼓节竹对海沙地环境的适应性，增大鼓节竹的抗逆性和生长适应性。

生物量建成成本反映了植物对能量的利用策略^[8]，叶片单位面积建成成本更能体现植物的竞争力。叶片建成成本能体现植物构建叶片所投入的能量成本，较高的叶片建成成本说明植物需要更多的能量构建叶片，同时对生长环境具有更强的适应性和抗性^[26]。研究表明木兰科的落叶树种相较于常绿树种，其叶片寿命短，比叶面积较大，有利于获取光能和营养积累，叶片建成成本较低，因此能适应于亚热带短生长季节和低水热条件^[27]。董周焱等^[1]通过研究滨海地区 8 种植物的生物量建成成本发现，单位面积建成成本较高的树种虽然生长势不是最高的，但叶片对不良环境的抵抗力更强，更有助于植物在滨海地区生长。相较于对照处理，生物炭与氮肥配施能显著降低比叶面积，同时施肥后的鼓节竹叶片单位面积建成和单位质量建成均高于对照，说明生物炭与氮肥配施能提高鼓节竹对环境的适应性和抗性，使鼓节竹更能适应沿海沙地的缺水与土壤贫瘠的环境。

沿海沙地土壤肥力差，有机质和养分含量较低。鼓节竹作为丛生竹在生长发笋期对于养分的需求较高，出笋量不仅关系着新老竹丛的更替，还对竹林的可持续发展起关键性作用，在此时期应通过施肥来补充植物的养分需求。袁晶晶等^[28]研究发现，与单纯施用氮肥相比，适量的生物炭与氮肥配

施更能提高产量，因此生物炭与氮肥配施能显著提高红枣的产量及品质，该研究结果与宋世龙等^[29]相似。生物炭与氮肥配施对鼓节竹的出笋量有显著的提升作用，氮肥用量对出笋量有较大的影响，其次为生物炭用量，A2B2C3 处理氮肥出笋量最大，说明氮肥的含量与发笋数有着很大的关系，氮肥的施用与出笋数成正比，再次验证了氮元素对发笋期的重要性。

本研究结果对照组的生物量建成成本、去灰分热值、碳含量和出笋量均小于处理组，而比叶面积却大于处理组，表明在沿海沙地条件下未经施肥处理的鼓节竹更容易获取光能合成营养物质供自身生长发育，但其叶片薄、抗逆性较弱、产量低，虽能够在沿海沙地生长，但是否能长时间存活及完成竹丛的新老更替还难以判断。而经生物炭和氮肥配施处理后的鼓节竹，叶片建成成本提高，碳含量、出笋量也更高，灰分含量更低，虽然需要耗费更多的能量供自身生长，但叶片的寿命长，在沿海沙地的不利环境中具有更高的适应性和抗逆性，能够在沿海沙地里更长久存活以及生长良好，且产量较高，能够较好完成竹丛的更新换代，从而能够增加沿海防护林的树种多样性、改善沿海防护林的脆弱生境，进一步增强沿海防护林的生态抗逆性、提高防护效益和经济效益，实现防护林的可持续发展。

综上所述，生物炭和氮肥配施对鼓节竹叶片的热值和生物量建成成本具有显著影响，其中处理 5 与其他处理组相比，具有更高的叶片单位面积建成成本、单位质量建成成本、去灰分热值、碳含量和出笋量，以及更低的氮含量、灰分含量和比叶面

积, 所以 $400 \text{ g} \cdot \text{丛}^{-1}$ 的小麦生物炭配施 $900 \text{ g} \cdot \text{丛}^{-1}$ 的氮肥配施可以使鼓节竹具有更高的生长发育潜能和适应能力, 这为将来沿海沙地鼓节竹的生长发育和可持续经营提供理论依据。在生物炭种类 (A)、生物炭用量 (B)、氮肥用量 (C) 因素中, 对鼓节竹叶片生物量建成成本影响最大的为氮肥用量, 其次为生物炭用量。在生物炭种类中以小麦生物炭的效果最佳, 这可能与小麦生物炭某种特殊的孔隙结构或者物质有关, 需要更深层次的研究。

参考文献:

- [1] 董周焱, 柏新富, 侯玉平, 等. 胶东滨海8种树木叶片热值、建成成本及其适应能力 [J]. 林业科学, 2015, 51 (3): 8-15.
DONG Z Y, BAI X F, HOU Y P, et al. Leaf calorific value of 8 tree species in the coastal areas of Jiaodong and cost of construction of leaf biomass and its adaptability [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51 (3): 8-15. (in Chinese)
- [2] 黄滔, 刘玮, 唐红, 等. 4个观赏竹种的光合特性及其影响因子分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2016, 25 (1): 24-33.
HUANG T, LIU W, TANG H, et al. Analyses on photosynthetic characteristics of four ornamental bamboo species and its influence factors [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2016, 25 (1): 24-33. (in Chinese)
- [3] 凡莉莉, 薛磊, 杜溶谔, 等. 福建省沿海沙地竹子适应性研究进展 [J]. 竹子学报, 2017, 36 (4): 41-46.
FAN L L, XUE L, DU R Q, et al. The research progress of bamboo adaptability in Fujian coastal sandy land [J]. *Journal of Bamboo Research*, 2017, 36 (4): 41-46. (in Chinese)
- [4] 荣俊冬, 凡莉莉, 陈礼光, 等. 不同用量保水剂对沿海沙地麻竹生理特征的影响 [J]. 南方农业学报, 2019, 50 (2): 323-329.
RONG J D, FAN L L, CHEN L G, et al. Effects of different dosages of super absorbent polymers(SAP) on physiological indexes of *Dendrocalamus latiflorus* in coastal sand [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50 (2): 323-329. (in Chinese)
- [5] 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.
GUAN L L, ZHOU X Y, LUO Y. A review on the study of plant calorific value in China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24 (4): 452-457. (in Chinese)
- [6] 许宇星, 陈少雄. 一年生高密度初植桉树能源林生物量及热值研究 [J]. 热带作物学报, 2012, 33 (11): 2079-2084.
XU Y X, CHEN S X. Biomass and calorific value of OneYear-old *Eucalyptus* with various high densities [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2012, 33 (11): 2079-2084. (in Chinese)
- [7] 周群英, 陈少雄, 韩斐扬, 等. 短周期尾巨桉能源林生物量与能量特征研究 [J]. 热带亚热带植物学报, 2013, 21 (1): 45-51.
ZHOU Q Y, CHEN S X, HAN F Y, et al. Studies on biomass and energy characteristics of short rotation energy plantations of *Eucalyptus urophylla* \times *E. grandis* [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2013, 21 (1): 45-51. (in Chinese)
- [8] 严雪婷, 顾肖璇, 陈鹭真. 红树植物生活史过程的能量利用策略 [J]. 生态学杂志, 2021, 40 (1): 245-254.
YAN X T, GU X X, CHEN L Z. Energy-use strategy of mangrove individuals along the life history [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40 (1): 245-254. (in Chinese)
- [9] DAEHLER C C. Performance comparisons of Co-occurring native and alien invasive plants: Implications for conservation and restoration [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2003, 34: 183-211.
- [10] 钟文晶, 符帝俊, 齐丹, 等. 生物炭的制备及其应用研究进展 [J]. 海南热带海洋学院学报, 2022, 29 (2): 101-108.
ZHONG W J, FU D J, QI D, et al. Research progress on the preparation of biochar and its application [J]. *Journal of Hainan Tropical Ocean University*, 2022, 29 (2): 101-108. (in Chinese)
- [11] 覃姜薇, 陈雄, 林运萍, 等. 不同生物炭种类与施用量对胡椒园土壤培肥效果研究 [J]. 热带农业工程, 2016, 40 (2): 42-45.
QIN J W, CHEN X, LIN Y P, et al. Effects of different biochar species and application amount on soil nutrient of pepper gardens [J]. *Tropical Agricultural Engineering*, 2016, 40 (2): 42-45. (in Chinese)
- [12] 张继旭, 张继光, 张忠锋, 等. 秸秆生物炭对烤烟生长发育、土壤有机碳及酶活性的影响 [J]. 中国烟草科学, 2016, 37 (5): 16-21.
ZHANG J X, ZHANG J G, ZHANG Z F, et al. Effects of straw biochar on tobacco growth, soil organic carbon and soil enzyme activities [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2016, 37 (5): 16-21. (in Chinese)
- [13] 周劲松, 闫平, 张伟明, 等. 生物炭对水稻苗期生长、养分吸收及土壤矿质元素含量的影响 [J]. 生态学杂志, 2016, 35 (11): 2952-2959.
ZHOU J S, YAN P, ZHANG W M, et al. Effects of biochar on seedling growth, nutrient absorption of *Japonica rice* and mineral element contents of substrate soil [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35 (11): 2952-2959. (in Chinese)
- [14] LASHARI M S, LIU Y M, LI L Q, et al. Effects of amendment of biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain [J]. *Field Crops Research*, 2013, 144: 113-118.
- [15] 江立. 生物炭与氮肥配比对土壤微生物特性和红枣产量的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2020, 39 (9): 81-86.
JIANG L. The combination of biochar addition and nitrogen fertilizer application affects soil microbial community and functions and jujube yield [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39 (9): 81-86. (in Chinese)
- [16] 柳瑞, 高阳, 李恩琳, 等. 减氮配施生物炭对水稻生长发育、干物质积累及产量的影响 [J]. 生态环境学报, 2020, 29 (5): 926-932.
LIU R, GAO Y, LI E L, et al. Effects of reduced nitrogen and biochar application on plant growth, dry matter accumulation and rice yield [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29 (5): 926-932. (in Chinese)
- [17] 王少杰. 黄土高原旱作覆膜玉米不同时期施氮效果及气态氮损失

- [D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- WANG S J. *Effect of nitrogen application splits application to dry-land mulching maize on fate of nitrogen and gaseous nitrogen losses in the loess plateau*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [18] 高景, 王金牛, 徐波, 等. 不同雪被厚度下典型高山草地早春植物叶片性状、株高及生物量分配的研究 [J]. *植物生态学报*, 2016, 40 (8): 775–787.
- GAO J, WANG J N, XU B, et al. Plant leaf traits, height and biomass partitioning in typical ephemerals under different levels of snow cover thickness in an alpine meadow [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40 (8): 775–787. (in Chinese)
- [19] 肖燕, 张科燕, 张树斌, 等. 羊蹄甲属藤本和树木叶片热值与建成成本的比较研究 [J]. *植物科学学报*, 2020, 38 (3): 428–436.
- XIAO Y, ZHANG K Y, ZHANG S B, et al. Differences in leaf caloric values and construction costs between liana and tree species in *Bauhinia* [J]. *Plant Science Journal*, 2020, 38 (3): 428–436. (in Chinese)
- [20] WILLIAMS K, PERCIVAL F, MERINO J, et al. Estimation of tissue construction cost from heat of combustion and organic nitrogen content [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1987, 10 (9): 725–734.
- [21] SHEN X Y, PENG S L, CHEN B M, et al. Do higher resource capture ability and utilization efficiency facilitate the successful invasion of native plants? [J]. *Biological Invasions*, 2011, 13 (4): 869–881.
- [22] 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 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. (in Chinese)
- [23] 王金旺, 陈秋夏, 李效文, 等. 红树植物秋茄与无瓣海桑叶片热值比较研究 [J]. *湿地科学*, 2016, 14 (3): 376–381.
- WANG J W, CHEN Q X, LI X W, et al. Comparison of foliage caloric values of mangrove species *Kandelia obovata* and *Sonneratia apetala* [J]. *Wetland Science*, 2016, 14 (3): 376–381. (in Chinese)
- [24] 鲍雅静, 李政海, 韩兴国, 等. 植物热值及其生物生态学属性 [J]. *生态学报*, 2006, 25 (9): 1095–1103.
- BAO Y J, LI Z H, HAN X G, et al. Plant caloric value and its bio-ecological attributes [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25 (9): 1095–1103. (in Chinese)
- [25] 刘艳莉, 陈鹏东, 侯玉平, 等. 烟台沙质海岸前沿4种草本植物热值与建成成本分析 [J]. *生态环境学报*, 2018, 27 (7): 1211–1217.
- LIU Y L, CHEN P D, HOU Y P, et al. Calorific value and construction cost of 4 herbaceous species in the coastal frontier of Yantai [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27 (7): 1211–1217. (in Chinese)
- [26] 宋莉英, 彭长连, 彭少麟. 华南地区3种入侵植物与本地植物叶片建成成本的比较 [J]. *生物多样性*, 2009, 17 (4): 378–384.
- SONG L Y, PENG C L, PENG S L. Comparison of leaf construction costs between three invasive species and three native species in South China [J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17 (4): 378–384. (in Chinese)
- [27] 侯皓, 刘慧, 贺鹏程, 等. 木兰科常绿与落叶物种叶片构建策略的差异 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27 (3): 272–278.
- HOU H, LIU H, HE P C, et al. Different leaf construction strategies in evergreen and deciduous species of Magnoliaceae [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2019, 27 (3): 272–278. (in Chinese)
- [28] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施对土壤肥力及红枣产量、品质的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (2): 468–475.
- YUAN J J, TONG Y A, LU S H, et al. Effects of biochar and nitrogen fertilizer application on soil fertility and jujube yield and quality [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (2): 468–475. (in Chinese)
- [29] 宋世龙, 杨卫君, 陈雨欣, 等. 氮肥减量配施生物炭对北疆灌区春小麦光合和干物质转运特性及产量的影响[J/OL]. *麦类作物学报*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1359.S.20221117.0938.012.html>.
- SONG S L, YANG W J, CHEN Y X, et al. Effects of reduced nitrogen fertilizer combined with biochar on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and distribution, and yield of spring wheat in irrigated area of northern Xinjiang[J/OL]. *Journal of Triticeae Crops*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1359.S.20221117.0938.012.html>.

(责任编辑: 黄爱萍)