

竹龄和竹秆纵向部位对籐竹材性及纤维性能的影响

闫实¹, 杨正勇¹, 周晓剑¹, 陈新义¹, 杨杰芳², 贺磊², 黄慧²

(1. 西南林业大学 云南省木材胶黏剂及胶合制品重点实验室, 云南 昆明 650224; 2. 江西省林业科学院, 江西南昌 330013)

摘要: 【目的】研究竹龄及竹秆纵向部位对籐竹 *Bambusa blumeana* 材性及纤维性能的影响, 为籐竹的开发利用提供理论和实践依据。【方法】通过范式洗涤法、纤维离析与显微观察、碱煮法对竹龄 (1、2、3、4 a) 和竹秆纵向部位 (基部、中部、梢部) 的籐竹密度、纤维形态、化学组分、力学性能、纤维束拉伸性能进行性能分析。【结果】随竹龄的增长, 籐竹的气干密度、全干密度、木质素质量分数、拉伸强度、顺纹抗剪强度随之增大, 纤维素质量分数逐渐降低。竹龄为 2、3、4 a 的籐竹, 其竹秆不同纵向部位的平均长度差异极显著 ($P < 0.01$)。籐竹的纤维形态受竹秆纵向部位的影响较为明显。籐竹竹秆纵向部位基部至梢部, 气干密度、全干密度、木质素质量分数、抗弯强度、顺纹抗剪强度及纤维束拉伸强度和模量均增大, 纤维素质量分数逐渐降低。竹龄和竹秆纵向部位对半纤维素质量分数、苯醇抽提物质量分数的影响不显著。【结论】籐竹纤维性能优良, 在纤维化开发利用方面具有较大潜力。籐竹不同竹龄及竹秆纵向部位性能差异显著, 其中竹龄为 3 和 4 a 的籐材可作为加工开发的优先选取材料。图 5 表 3 参 40

关键词: 籐竹; 竹龄; 纵向部位; 力学性能; 纤维束

中图分类号: S781 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2024)04-0861-09

Effects of bamboo age and longitudinal position on wood and fiber properties of *Bambusa blumeana*

YAN Shi¹, YANG Zhengyong¹, ZHOU Xiaojian¹, CHEN Xinyi¹, YANG Jiefang², HE Lei², HUANG Hui²

(1. Yunnan Provincial Key Laboratory of Wood Adhesives and Glued Products, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Jiangxi Academy of Forestry Sciences, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the effects of bamboo age and longitudinal position on wood and fiber properties of *Bambusa blumeana*, so as to provide theoretical and practical basis for the development and utilization of *B. blumeana*. [Method] The density, fiber morphology, chemical composition, mechanical properties and fiber bundle tensile properties of *B. blumeana* of different ages (1, 2, 3 and 4 years old) and different longitudinal parts (base, middle and tip) were analyzed by normal form washing, fiber segregation and microscopic observation and alkali boiling. [Result] With the increase of age, the air-dry density, total dry density, lignin mass fraction, tensile strength and longitudinal shear strength of *B. blumeana* increased, while the cellulose mass fraction gradually decreased. The average length difference of different longitudinal parts of *B. blumeana* aged 2, 3 and 4 were extremely significant ($P < 0.01$). The fiber morphology of *B. blumeana* was significantly influenced by the longitudinal position. From the base to the tip of the longitudinal parts of *B.*

收稿日期: 2023-12-06; 修回日期: 2024-03-26

基金项目: 江西省科技合作专项国际合作重点项目 (20203BDH80W009); 江西省重点研发计划“揭榜挂帅”(20223BBH80004); 江西省林业科技创新项目 (创新专项 [2020] 02 号); 江西省林业科学院重点研发项目 (2019511501); 云南省专家工作站 (202305AF150006); 高等学校学科创新引智计划 (D21027)

作者简介: 闫实 (ORCID: 0009-0007-8117-2611), 从事竹材开发与利用研究。E-mail: 15650069598@163.com。通信作者: 黄慧 (ORCID: 0000-0002-7206-3436), 研究员, 博士, 从事竹质材料研究。E-mail: 75281329@qq.com

blumeana, the air-dry density, total dry density, lignin mass fraction, bending strength, longitudinal shear strength, fiber bundle tensile strength and modulus all increased, while the cellulose mass fraction gradually decreased. The effects of bamboo age and longitudinal position on the mass fraction of semi fiber and benzenol extract were not obvious. [Conclusion] *B. blumeana* fiber has excellent properties and great potential in the development and utilization of fibrosis. There are significant differences in the properties of *B. blumeana* at different ages and longitudinal parts, among which *B. blumeana* of 3 and 4 years old can be used as the preferred material for processing and development. [Ch, 5 fig. 3 tab. 40 ref.]

Key words: *Bambusa bambusa*; bamboo age; longitudinal part; mechanical properties; fiber bundle

竹材绿色、低碳、速生、可再生、可降解，是优良的生物质材料，竹材砍伐后加工成竹制品可起到碳转移、缓冲碳排放等作用。在全球可持续发展背景下，竹材的开发利用受到广泛关注，可替代木材、塑料、钢材、人造纤维等^[1-2]。中国竹林面积较大，但在竹类划分中，仅分为毛竹 *Phyllostachys edulis* 和杂竹。这种划分不能满足竹产品对竹资源以及竹种差异性的需求^[3]，且很多国家的竹资源开发仅限于简单利用或初级加工利用，大量竹资源尤其是丛生竹资源的应用价值未得到充分挖掘^[4]。

籐竹 *Bambusa blumeana* 也称籐竹，隶属禾本科 Poaceae 竹亚科 Bambusoideae 籐竹属 *Bambusa*，地下茎合轴丛生，茎秆下部枝条繁茂多刺，原产于印度尼西亚和马来西亚东部，在菲律宾、泰国、越南均有栽培，中国福建、台湾、广西、云南、海南等省也有栽培^[5-6]。籐竹秆型高大、秆径中等、节间较长，属秆型优良的大型高产丛生竹种，具有较高的经济利用价值^[7]，目前已被应用于家具、观赏园艺、手工艺品制作、住房建设等，但精深加工利用较少^[8-9]。竹材理化性能、力学性质等材性数据是竹材开发利用的基础，决定了竹材的应用范畴。王鹏程等^[10]对梁山慈竹 *Dendrocalamus farinosus* 不同径向位置的纤维形态研究发现：竹龄为 3 a 的梁山慈竹纤维形态较优。姚开泰等^[11]对不同竹龄和纵向部位的青皮竹 *B. textilis* 物理力学性能研究发现：随竹龄增大，青皮竹的密度逐渐增大，竹龄为 4 a 的青皮竹全干密度和纤维束拉伸强度最高，随着竹秆纵向部位升高，纤维趋于细短，纤维束拉伸性能下降。朱宗伟等^[12]研究表明：对于麻竹 *D. latiflorus* 的综纤维素，冷水、热水和质量分数为 1% 的氢氧化钠 (NaOH) 抽出物质量分数随竹龄的增长逐渐减小；苯醇抽提物质量分数随竹龄的增长变化不大。牛思杰等^[13]研究发现：竹龄可作为筛选原材料的优先指标。综上所述，竹龄和部位对竹材理化性质有较大影响。鉴于此，本研究探究竹龄及纵向部位对籐竹竹材气干密度、全干密度、纤维形态、化学组分、抗弯性能、顺纹抗剪强度、纤维束拉伸性能的影响及变化规律，以期对籐竹的工业化利用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

籐竹采自云南省临沧市沧源瓦族自治县 (23°21'N, 99°27'E)。在同一片竹林中，分散选取有代表性、无明显缺陷、竹龄为 1、2、3、4 a 的籐竹，各竹龄采集 8~10 株。籐竹的胸径、节高以及壁厚如表 1 所示。截取离地面高度分别在 1~3 m (基部)、3~5 m (中部)、5~7 m (梢部) 的竹段样本进行后续研究。

1.2 研究方 法

1.2.1 气干密度及全干密度测试 参照严彦等^[14]的方法，从不同竹龄、不同纵向部位的籐竹竹筒上截取试样。测试气干密度和全干密度。

1.2.2 化学组分测定 随机选取不同竹龄、不同纵向部位的籐竹试样，去青并粉碎，过 40~60 目筛。采用范氏洗涤法测定纤维素、半纤维素和木质素质量分数。参照周鑫等^[15]的方法，测定苯醇抽提物质量分数。每组样品测定 3 个重复，取平均值。

表 1 不同竹龄籐竹胸径、节高及壁厚

Table 1 Diameter at breast height, node height and wall thickness of *B. blumeana* of different ages

竹龄/a	胸径/cm	节高/cm	壁厚/mm
1	40.2~70.8	23.6~45.6	4.6~10.0
2	33.9~52.2	20.4~36.5	3.5~7.9
3	36.3~63.7	33.3~41.5	4.8~9.9
4	45.2~70.6	30.9~43.8	4.5~12.7

1.2.3 纤维形态测试 将竹条劈成火柴棒大小，浸泡在质量分数为 95% 的冰乙酸与质量分数为 30% 的过氧化氢的体积比为 1:1 的混合液中，于 80 ℃ 水浴中处理 10 h，至试样变白。使用去离子水洗涤试样至中性，将纤维充分打散。在 Olympus BX 51 光学显微镜下测定纤维长度和纤维宽度。纤维长度每组测定 100 根，纤维宽度每组测定 50 根。

1.2.4 籐材力学性能测试 调节竹材含水率为 12%。抗弯性能、顺纹抗剪强度参考严彦等^[14]的方法进行加工测定。

1.2.5 籐竹纤维束拉伸性能 将竹片放入到质量分数为 5% 的 NaOH 溶液中，60 ℃ 水浴加热 20 h，经温水冲洗数遍至中性，含水率控制在 30%~60%，之后用平板硫化压机平压和双辊混炼挤压将竹片松散疏解，使用梳子进一步分丝，获得籐竹纤维束。将纤维束用纤维切断器切断至 80 mm 长，抽取 30 根无明显缺陷的纤维束进行测试。为防止测试时纤维束发生滑移，对试样进行一定的处理^[16]。参照黄慧等^[17]的方法测定纤维束拉伸性能，加载速率为 2 mm·min⁻¹，夹持长度为 80 mm，标距为 60 mm，测定前在光学显微镜下测量纤维束直径。

1.3 数据处理

采用 SPSS 27 对纤维形态进行单因素方差分析 (one-way ANOVA)，显著性水平为 0.01，采用 Origin 2022 绘图，采用 gauss 函数对纤维束拉伸强度进行拟合。

2 结果与讨论

2.1 竹龄和竹秆纵向部位对竹材密度的影响

密度是评估竹材品质和质量的基本指标之一，与竹材力学性能、硬度等密切相关^[18]。一般而言，密度越高，则竹材纤维结构更坚硬和紧密，机械性能越好^[19]。如图 1 所示：不同竹龄和竹秆纵向部位的籐竹气干密度、全干密度最大值可达 0.723、0.739 g·cm⁻³，平均气干密度为 0.587 g·cm⁻³，平均全干密度为 0.669 g·cm⁻³，低于毛竹的全干密度 (0.700 g·cm⁻³) 和气干密度 (0.759 g·cm⁻³)^[20-21]。籐竹的气干密度随着竹龄的增长而呈增大趋势，其中竹龄为 1 a 的籐竹平均气干密度为 0.566 g·cm⁻³，而竹龄为 4 a 的籐竹平均气干密度可达 0.615 g·cm⁻³，籐竹的全干密度随竹龄的增长也呈增大趋势。这种变化主要是由于竹材生长的过程中，其细胞壁和内部组成物质在生长过程中不断生成和累积，纤维壁厚也随着竹龄显著增长，导致气干密度及全干密度增加^[22]，这与毛竹、麻竹的变化趋势一致^[23-24]。另外，籐竹竹材的气干密度、全干密度随着竹秆纵向部位的增加呈逐步增加的趋势，基部至梢部气干密度从 0.554 g·cm⁻³ 增加到 0.619 g·cm⁻³，全干密度从 0.590 g·cm⁻³ 增加到 0.723 g·cm⁻³。这种变化可能是随着竹秆高度的增加，单位横截面积内维管束分布数量不断增多，维管束分布密度逐渐增大，从而使竹秆梢部密度更高^[25]。

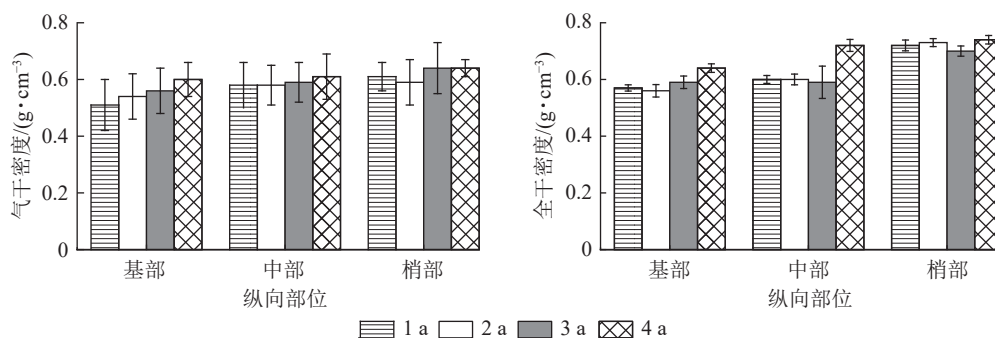


图 1 不同竹龄下籐竹竹秆纵向部位的气干密度和全干密度

Figure 1 Air-dry density and total dry density of longitudinal part of *B. blumeana* under different bamboo ages

2.2 竹龄和竹秆纵向部位对竹材化学组分的影响

竹材化学组成的不同可能会引起竹材结构和性能间的差异^[26]。如表 2 所示：籐竹纤维素平均质量分数为 41.4%，与慈竹相当^[27]；半纤维素质量分数为 12.2%~17.2%，木质素质量分数为 26.6%~32.4%，均值为 29.6%，高于慈竹 (24.0%)、毛竹 (22.4%)。因此，在竹浆造纸方面，可选择竹龄为 1 和 2 a 的籐竹。苯醇抽提物平均质量分数为 2.6%，低于毛竹 (3.6%)^[28]。苯醇抽提物是以苯、乙醇混合物进行抽提，可从

原料中溶解树脂、脂肪、蜡、色素及可溶性单宁等。籐竹的苯醇抽提物低,表明籐竹的耐虫、抗菌等性能可能优于毛竹和慈竹^[29]。随竹龄增加,纤维素质量分数先降低后略微增大,竹龄为1a的籐竹纤维素质量分数最高,均值达45.3%,竹龄为3a的籐竹纤维素质量分数最低。半纤维素质量分数随竹龄的增加先减少后增大,但总体变化较小。木质素质量分数随竹龄的增加逐渐增大,这是由于随竹龄增大,竹材木质化加剧所致^[30]。苯醇抽提物质量分数随竹龄增大而增加。从基部至梢部,纤维素质量分数逐渐降低,半纤维素质量分数差异不大,木质素质量分数逐渐增大,苯醇抽提物质量分数无明显变化规律。籐竹化学组分随竹秆位置的变化趋势与毛竹相似^[31]。

表2 不同竹龄下籐竹竹秆纵向部位的化学组分

Table 2 Chemical fractions of longitudinal part of *B. blumeana* under different bamboo ages

竹龄/a	纵向部位	纤维素质量分数/%	半纤维素质量分数/%	木质素质量分数/%	苯醇抽提物质量分数/%	竹龄/a	纵向部位	纤维素质量分数/%	半纤维素质量分数/%	木质素质量分数/%	苯醇抽提物质量分数/%
1	基部	49.0±0.9	13.9±0.2	24.8±0.6	2.1±0.2	3	基部	40.8±1.3	14.6±0.3	29.4±0.9	2.6±0.8
	中部	44.4±0.4	13.2±2.3	28.2±2.1	2.0±0.3		中部	38.3±1.0	14.2±1.4	32.2±2.0	2.7±0.0
	梢部	44.2±1.6	14.1±0.4	27.4±1.6	3.3±0.6		梢部	36.2±2.4	15.8±1.2	31.4±2.8	2.6±0.3
2	基部	48.6±1.4	12.2±0.6	26.6±1.7	2.0±0.1	4	基部	41.3±0.6	14.3±0.4	29.6±0.4	3.4±0.5
	中部	42.2±0.9	13.2±0.3	29.8±0.5	2.9±0.4		中部	38.8±1.6	14.8±0.3	32.0±1.7	2.8±0.1
	梢部	39.0±1.1	14.2±1.4	32.4±1.1	2.7±0.1		梢部	34.1±1.8	17.2±0.5	31.6±0.8	2.6±0.1

说明:数值为平均值±标准差。

2.3 竹龄和竹秆纵向部位对竹材纤维形态的影响

由表3可知:籐竹纤维长度为0.42~5.99 mm,纤维宽度为6.50~38.87 μm。整体纤维形态特征与同属的油籐竹 *B. lapidea* 较为接近,属细长、柔性型纤维,是制浆造纸的上等原料,在纤维化利用方面极具开发潜力^[32]。不同竹龄之间籐竹纤维长度和宽度有一定差异,竹龄为1a的籐竹相对较小,竹龄为2和3a的籐竹趋于稳定,竹龄为4a时,籐竹纤维长度和宽度最大,竹龄为1a的籐竹平均纤维长度为2.01 mm,竹龄为4a的籐竹平均纤维长度为2.83 mm。籐竹纤维长度纵向变化从大到小依次为中部、梢部、基部,纤维宽度基部到梢部呈逐渐减小的趋势,长宽比梢部最大。显著性分析表明:竹龄为1、2、3a的籐竹纵向部位的平均纤维宽度差异不显著。竹龄为4a的籐竹不同纵向部位的平均纤维长度差异极显著 ($P<0.01$),竹龄为1a的差异不显著。牛思节等^[13]研究发现纤维形态受竹龄影响最大,纤维长度随竹龄增大,但在轴向高度上纤维长度未见明显差异。蔡焱等^[33]研究认为:毛竹的纤维长宽比在轴向高度

表3 不同竹龄下籐竹竹秆纵向部位的纤维形态

Table 3 Fiber morphology of longitudinal part of *B. blumeana* under different bamboo ages

竹龄/a	纵向部位	纤维长度/mm	纤维宽度/μm	平均纤维长度/mm	平均纤维宽度/μm	纤维长宽比
1	基部	0.42~5.40	6.50~31.90	1.90±0.91 a	14.14±5.37 a	134
	中部	0.46~5.11	7.57~26.63	2.10±1.13 a	13.85±4.49 a	152
	梢部	0.59~3.60	6.66~27.81	2.02±0.80 a	15.00±4.47 a	135
2	基部	0.58~5.00	8.65~30.89	2.39±1.13 a	17.45±5.41 ab	137
	中部	0.68~4.67	7.59~29.27	2.43±0.77 a	16.57±6.19 b	147
	梢部	0.49~5.46	7.89~35.74	2.40±1.07 a	19.48±8.39 a	123
3	基部	0.60~4.63	10.15~28.79	2.20±0.93 a	15.80±4.47 a	139
	中部	0.68~4.50	8.56~33.83	2.32±0.85 a	19.90±6.15 a	117
	梢部	0.71~5.06	9.19~30.41	2.29±1.02 a	17.02±5.33 b	134
4	基部	0.54~5.99	13.16~38.31	2.74±1.35 a	23.39±7.21 a	117
	中部	0.77~5.96	11.78~33.87	3.18±1.20 b	19.58±5.20 b	162
	梢部	0.62~5.30	7.29~25.53	2.56±1.10 b	13.64±3.89 c	188

说明:平均纤维长度和宽度为平均值±标准差。不同字母表示相同竹龄不同部位间差异极显著($P<0.01$)。

上呈先减小后增加再减小的趋势，并在 5.5 m 处达最大值。姚开泰等^[11]研究表明：青皮竹不同竹龄间纤维长度和宽度差异较小，但竹龄为 3 a 的纤维形态差异明显，青皮竹纤维长度和宽度随竹秆部位高度增加而减小。可见，关于竹龄和纵向部位对竹材纤维形态的影响没有统一变化趋势，本研究籐竹纤维形态变化趋势也与其他研究有所差异。

2.4 竹龄和竹秆纵向部位对竹材力学性能的影响

如图 2 所示：籐竹的平均抗弯强度为 110.7 MPa，与广泛应用的毛竹 (109.1 MPa) 相近，平均抗弯模量为 11.53 GPa，较毛竹 (7.91 GPa) 高 45.8%，表明籐竹比毛竹具有更好的韧性^[34]。平均顺纹抗剪强度为 9.9 MPa，较毛竹 (16.6 MPa) 低 46.8%。籐竹抗弯强度随着竹龄的增加呈增大趋势，竹龄为 4 a 的籐竹抗弯强度可达 135.9 MPa，抗弯模量高达 14.24 GPa，这与毛竹等的变化规律相似^[35]。此外，籐竹抗弯强度和抗弯模量随着竹秆高度的增高呈上升趋势，梢部抗弯强度均值为 123.6 MPa，抗弯模量均值为 13.46 GPa。籐竹顺纹抗剪强度随竹龄的增加同样呈增大趋势，最大顺纹抗剪强度可达 12.6 MPa；随着竹秆高度的增加呈现上升趋势，梢部顺纹抗剪强度均值为 11.6 MPa。竹秆从基部至梢部，维管束横截面积逐渐减小，维管束密度增加，导管直径变窄，自由水含率随之减少，这些变化会导致竹材密度的增加，从而使竹材的力学性能得到相应的提高^[36-37]。籐竹不同竹龄和竹秆纵向部位力学性能的变化与竹材密度、含水率、不同类型细胞的径向分布以及细胞壁厚度和化学组分的变化有关^[38]。

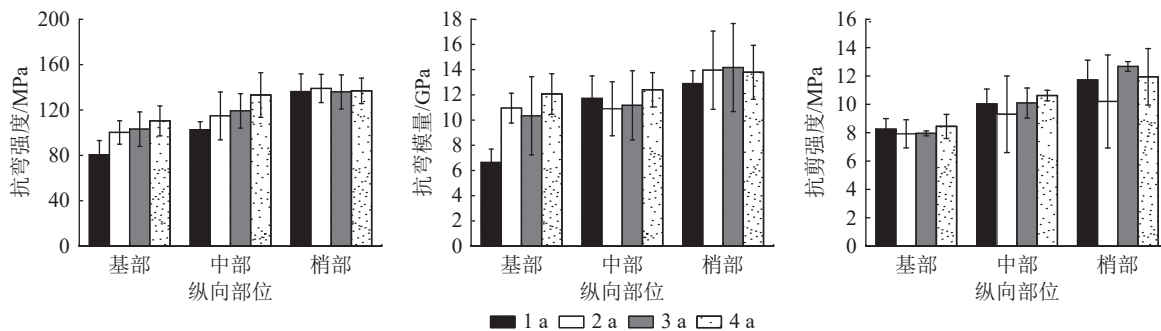


图 2 不同竹龄下籐竹竹秆纵向部位的力学性能

Figure 2 Mechanical properties of longitudinal part of *B. blumeana* under different bamboo ages

2.5 竹龄和竹秆纵向部位对竹材纤维束拉伸性能的影响

从图 3 和图 4 可知：籐竹纤维束直径主要分布在 0.1~0.4 mm，纤维束拉伸强度主要分布在 100.0~600.0 MPa，平均拉伸强度为 250.1 MPa，拉伸模量主要分布在 10.00~60.00 GPa，平均拉伸模量为

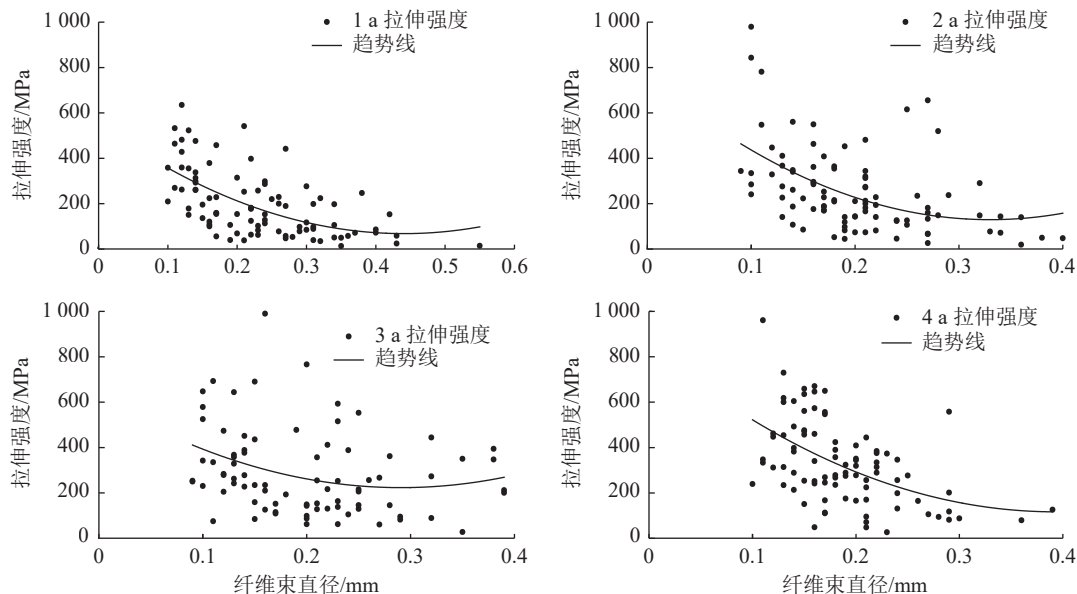


图 3 不同竹龄下籐竹纤维束的拉伸强度

Figure 3 Tensile strength of fiber bundles of *B. blumeana* under different bamboo ages

23.14 GPa。通过肉眼和手感观察，籐竹纤维束相较毛竹纤维束更细、柔韧性更好。纤维束拉伸强度与竹材本身性能、制备工艺、测试方法等有关^[39]。纤维束直径对纤维束拉伸性能有着明显的影响，较小的直径有着较大的力学强度。随着竹龄的增加，籐竹纤维束拉伸强度以及模量都呈增大趋势，竹龄为 1 a 的籐竹纤维束平均拉伸强度和拉伸模量分别达 191.7 MPa 和 21.73 GPa，竹龄为 3 a 的籐竹分别为 325.4 MPa 和 25.23 GPa。与竹龄 1 a 的籐竹相比，竹龄 3 a 的纤维束直径分布更为均匀，说明竹龄 3 a 的籐竹力学性能范围分布较广。籐竹纤维束最大拉伸强度及模量可分别达 1 089.4 MPa 和 80.65 GPa。随着竹龄的增加，纤维细胞壁厚，纤维长度变长，这都会对纤维束拉伸强度造成正面影响^[40]。由图 5 可知：与基部相比，竹秆中部和梢部的纤维束直径分布更为集中，说明中部和梢部的拉伸性能比基部更稳定。拉伸强度及拉伸模量随竹秆高度增加而逐渐增大，基部变化趋势与纤维长度和宽度基本一致，其拉伸性能可能受到纤维形态的影响。

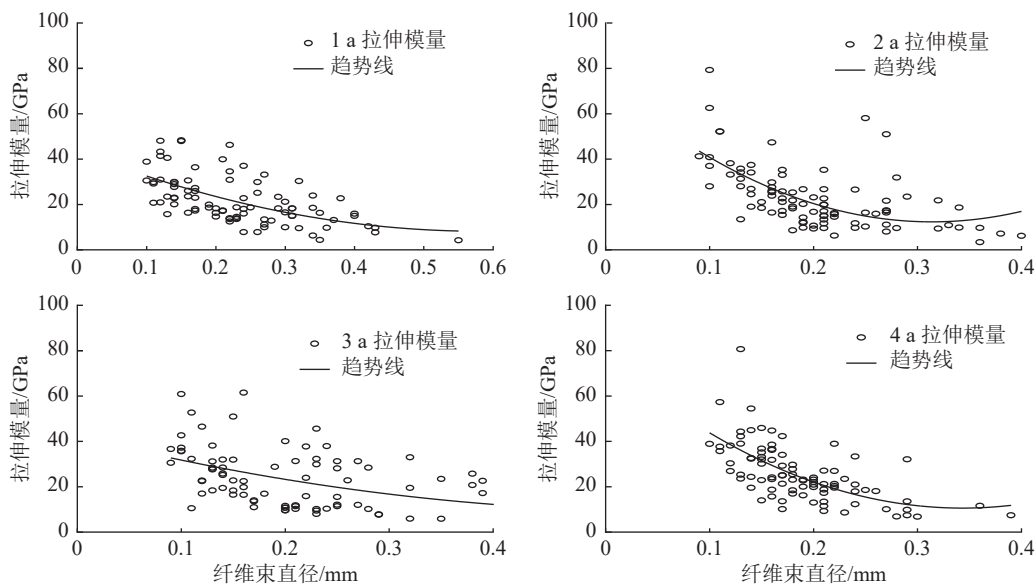


图 4 不同竹龄下籐竹纤维束的拉伸模量

Figure 4 Tensile modulus of fiber bundles of *B. blumeana* under different bamboo ages

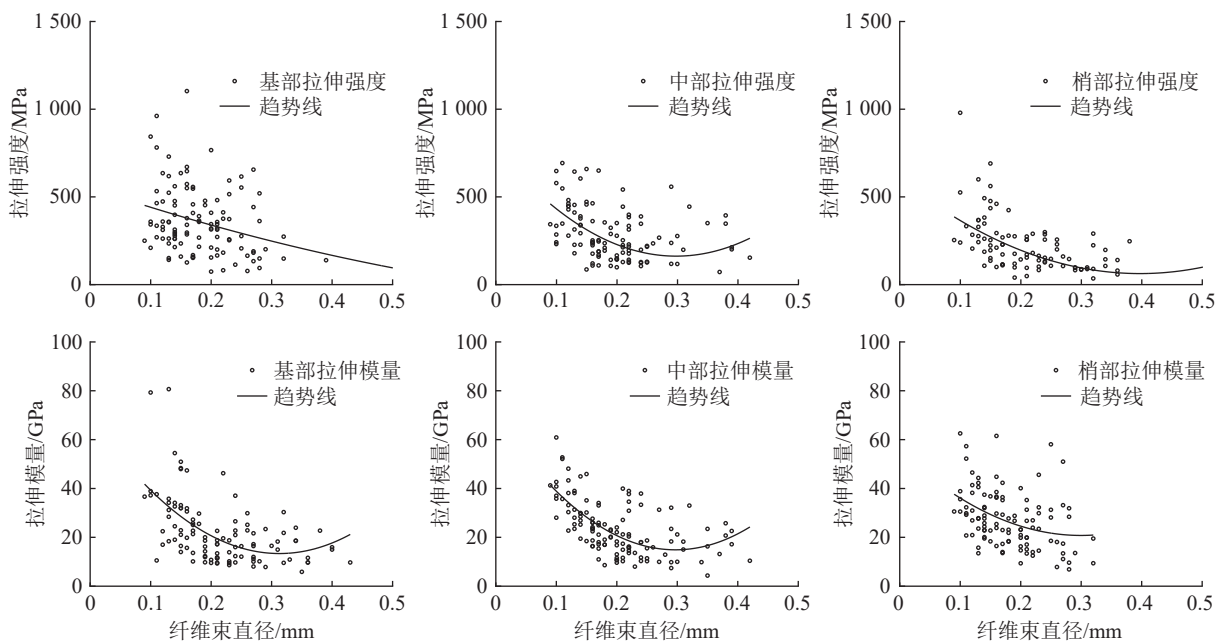


图 5 竹秆不同纵向部位下籐竹纤维束的拉伸性能

Figure 5 Tensile properties of fiber bundles of *B. blumeana* under different longitudinal parts

3 结论

竹龄以及纵向部对籐竹气干密度、全干密度、竹材力学性能、竹纤维束拉伸性能有较明显影响。竹龄和纵向部位对半纤维素、长宽比影响不明显。竹龄为 1 和 2 a 的籐竹是竹浆造纸的优良选择, 竹龄为 3 和 4 a 的籐竹竹材的中上部位是竹集成材、竹重组材的优先选择。籐竹纤维束有增强热塑性和热固性树脂的潜质, 对于复合材料的性能有一定增强作用。

4 参考文献

- [1] 王戈, 费本华, 方长华, 等. 落实“以竹代塑”倡议助力竹业提速增效[J]. 世界竹藤通讯, 2022, 20(4): 1-4.
WANG Ge, FEI Benhua, FANG Changhua, *et al.* Implement “the bamboo as a substitute for plastic initiative” to help the bamboo industry to speed up and improve the efficiency [J]. *World Bamboo Rattan*, 2022, 20(4): 1-4.
- [2] 费本华, 漆良华. 实施我国国家竹材储备战略计划的思考[J]. 世界林业研究, 2020, 33(3): 38-42.
FEI Benhua, QI Lianghua. Thoughts on the strategic planning of implementing national bamboo reserve [J]. *World Forestry Research*, 2020, 33(3): 38-42.
- [3] 徐晴, 江泽慧. 利用空间信息学应对“以竹代塑”资源供给挑战[J]. 世界竹藤通讯, 2024, 22(1): 1-7.
XU Qing, JIANG Zehui. Harnessing spatial informatics to address the challenges in resource supply of “bamboo as a substitute for plastic” [J]. *World Bamboo Rattan*, 2024, 22(1): 1-7.
- [4] 李延军, 许斌, 张齐生, 等. 我国竹材加工产业现状与对策分析[J]. 林业工程学报, 2016, 1(1): 2-7.
LI Yanjun, XU Bin, ZHANG Qisheng, *et al.* Present situation and the countermeasure analysis of bamboo timber processing industry in China [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2016, 1(1): 2-7.
- [5] DIERICK D, HÖLSCHER D, SCHWENDENMANN L. Water use characteristics of a bamboo species (*Bambusa blumeana*) in the Philippines [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2010, 150(12): 1568-1578.
- [6] 史军义, 周德群, 马丽莎, 等. 中国竹类多样性、地理区划及发展趋势[J]. 世界竹藤通讯, 2022, 20(4): 5-10.
SHI Junyi, ZHOU Dequn, MA Lisha, *et al.* Bamboo resources in China: species diversity, geographical zoning and development trend [J]. *World Bamboo Rattan*, 2022, 20(4): 5-10.
- [7] LOBREGAS M O S, BUNIAO E V D, LEAÑO Jr J L. Alkali-enzymatic treatment of *Bambusa blumeana* textile fibers for natural fiber-based textile material production [J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 194(11): 62-68.
- [8] 李智勇, Trinh Thang Long, 李楠, 等. 亚洲主要国家竹种资源与利用[J]. 世界竹藤通讯, 2020, 18(4): 1-7.
LI Zhiyong, Trinh Thang Long, LI Nan, *et al.* Main bamboo species and their utilization in Asia countries [J]. *World Bamboo Rattan*, 2020, 18(4): 1-7.
- [9] 徐有明, 滕方玲. 我国高性能重组竹研究进展及其研发建议[J]. 世界竹藤通讯, 2015, 13(3): 1-7.
XU Youming, TENG Fangling. Research progress on high-performance reconstituted bamboo lumber in China and its development suggestions [J]. *World Bamboo Rattan*, 2015, 13(3): 1-7.
- [10] 王鹏程, 代永刚, 汪佑宏, 等. 竹龄对梁山慈竹纤维形态特征的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(5): 853-860.
WANG Pengcheng, DAI Yonggang, WANG Youhong, *et al.* Effect of age on the fiber morphological characteristics of *Dendrocalamus farinosus* [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2018, 45(5): 853-860.
- [11] 姚开泰, 谭伟, 周海洋, 等. 竹龄和竹秆纵向部位对青皮竹物理力学性能的影响[J]. 林业工程学报, 2021, 6(5): 76-81.
YAO Kaitai, TAN Wei, ZHOU Haiyang, *et al.* Effects of age and culm longitudinal position on physical and mechanical properties of *Bambusa textilis* McClure bamboo [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2021, 6(5): 76-81.
- [12] 朱宗伟, 李兵云, 李海龙. 竹龄对竹材化学成分及制浆造纸性能的影响[J]. 中国造纸, 2023, 42(4): 8-13.
ZHU Zongwei, LI Bingyun, LI Hailong. Effects of bamboo growth-age on its chemical components and kraft pulping performance [J]. *China Pulp & Paper*, 2023, 42(4): 8-13.
- [13] 牛思杰, 王娜, 崔百祥, 等. 不同竹龄和部位对毛竹纤维形态及结晶度的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(2): 446-452.
NIU Sijie, WANG Na, CUI Baixiang, *et al.* Effects of different ages and positions on fiber morphology and crystallinity of *Phyllostachys edulis* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, 40(2): 446-452.
- [14] 严彦, 刘焕荣, 张秀标, 等. 毛竹材性差异对胶合竹层板应力分级的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(2): 260-264.

- YAN Yan, LIU Huanrong, ZHANG Xiubiao, *et al.* The effect of *Phyllostachys pubescens* f. *lutea* Wen property on the E-Rated classification of laminated bamboo board [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2017, **44**(2): 260 – 264.
- [15] 周鑫, 卢婧雯, 岳凤霞, 等. 广西10种野生竹材的化学组分分析及木质素结构表征[J]. *中国造纸*, 2023, **42**(8): 46 – 54, 68.
- ZHOU Xin, LU Jingwen, YUE Fengxia, *et al.* Chemical composition analysis and isolated lignin structural characterization of 10 wild bamboo species in Guangxi [J]. *China Pulp & Paper*, 2023, **42**(8): 46 – 54, 68.
- [16] OSORIO L, TRUJILLO E, van VUURE A W. Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/epoxy composites [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2011, **30**(5): 396 – 408.
- [17] 黄慧, 王玉, 孙丰文, 等. 分丝方法对竹纤维提取及机械性能的影响[J]. *林业工程学报*, 2016, **1**(6): 23 – 28.
- HUANG Hui, WANG Yu, SUN Fengwen, *et al.* Effect of splitting method on bamboo fiber extraction and its mechanical properties [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2016, **1**(6): 23 – 28.
- [18] 陈冠军, 袁晶, 余雁, 等. 竹材顺纹抗压性能的种间差异及其影响因子研究[J]. *木材加工机械*, 2018, **29**(6): 23 – 27.
- CHEN Guanjun, YUAN Jing, YU Yan, *et al.* Study on interspecific differences of the compression performance parallel to the grain of bamboo and its influencing factors [J]. *Wood Processing Machinery*, 2018, **29**(6): 23 – 27.
- [19] DIXON P G, GIBSON L J. The structure and mechanics of moso bamboo material [J/OL]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2014, **11**(99): 20140321 [2024-12-01]. doi: 10.1098/rsif.2014.0321.
- [20] 方徐勤, 王传贵, 张双燕. 冬、夏采伐期毛竹主要物理力学性能的对比[J]. *东北林业大学学报*, 2019, **47**(2): 70 – 73.
- FANG Xuqin, WANG Chuangui, ZHANG Shuangyan. Properties of bamboo in different cutting periods [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, **47**(2): 70 – 73.
- [21] 张闻博, 费本华, 田根林, 等. 不同纬度毛竹物理力学性质的比较研究[J]. *北京林业大学学报*, 2019, **41**(4): 136 – 145.
- ZHANG Wenbo, FEI Benhua, TIAN Genlin, *et al.* Comparative study on physical mechanic properties of *Phyllostachys edulis* in different latitudes [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, **41**(4): 136 – 145.
- [22] FUJII T. Cell wall structure of the culm of azumanezasa (*Pleioblastus chino* Max.) [J]. *Mokuzai Gakkaishi*, 1985, **31**: 865 – 872.
- [23] 章怡, 王冰冰, 王传贵. 竹黄对毛竹材基本密度和顺纹抗压强度的贡献率[J]. *东北林业大学学报*, 2022, **50**(9): 105 – 108.
- ZHANG Yi, WANG Bingbing, WANG Chuangui. Contribution rate of *Phyllostachys heterocycle* to basic density and compressive strength of parallel to grain [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022, **50**(9): 105 – 108.
- [24] 尤龙杰, 尤龙辉, 涂永元, 等. 不同竹龄麻竹材气干密度、力学性质及燃烧性能的比较研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, **37**(10): 124 – 132.
- YOU Longjie, YOU Longhui, TU Yongyuan, *et al.* Comparative study on air-dried density, mechanical properties and combustion performance of *Dendrocalamus latiflorus* Munro in different ages [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2017, **37**(10): 124 – 132.
- [25] GROSSER D, LIESE W. On the anatomy of Asian bamboos, with special reference to their vascular bundles [J]. *Wood Science and Technology*, 1971, **5**(4): 290 – 312.
- [26] YUE Panpan, FU Genque, HU Yajie, *et al.* Changes of chemical composition and hemicelluloses structure in differently aged bamboo (*Neosinocalamus affinis*) culms [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, **66**(35): 9199 – 9208.
- [27] 彭博, 王传贵, 张双燕. 四川两种竹材理化性质及纤维形态分析[J]. *世界竹藤通讯*, 2018, **16**(3): 15 – 19.
- PENG Bo, WANG Chuangui, ZHANG Shuangyan. Analysis of physical & chemical properties and fiber configuration of 2 species of bamboos from Sichuan Province [J]. *World Bamboo Rattan*, 2018, **16**(3): 15 – 19.
- [28] 陈友地, 秦文龙, 李秀玲, 等. 十种竹材化学成分的研究[J]. *林产化学与工业*, 1985, **5**(4): 32 – 39.
- CHEN Yongdi, QIN Wenlong, LI Xiuling. Studies on the chemical composition of ten bamboo materials [J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 1985, **5**(4): 32 – 39.
- [29] 雷刚, 王鹏程, 汪佑宏, 等. 皖南几种散生竹主要材性研究[J]. *西北林学院学报*, 2022, **37**(2): 223 – 228.
- LEI Gang, WANG Pengcheng, WANG Youhong, *et al.* Main properties of several monopodial bamboos in southern Anhui Province [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, **37**(2): 223 – 228.

- [30] 向娥琳. 毛竹生长过程中细胞壁结构与性能的变化研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2018.
XIANG Elin. *Study on the Cell Wall Structure and Property during the Growth of Moso Bamboo* [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2018.
- [31] FUJII Y, AZUMA J I, MARCHESSAULT R H, *et al.* Chemical composition change of bamboo accompanying its growth [J]. *Holzforchung*, 1993, **47**(2): 109 – 115.
- [32] 陈铭, 郭琳, 郑笑, 等. 中国15个主产区毛竹纤维形态比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, **42**(6): 7 – 12.
CHEN Ming, GUO Lin, HENG Xiao, *et al.* Comparison of cell morphology of moso bamboo fibers from fifteen main producing regions in China [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2018, **42**(6): 7 – 12.
- [33] 蔡焱, 王宝金, 官洁茹, 等. 金寨毛竹纤维形态及化学成分[J]. 东北林业大学学报, 2020, **48**(2): 81 – 86.
CAI Yi, WANG Baojin, GUAN Jieru, *et al.* Fiber morphology and chemical composition of moso bamboo from Jinzhai [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, **48**(2): 81 – 86.
- [34] 李荣荣, 贺楚君, 彭博, 等. 毛竹材不同部位纤维形态及部分物理性能差异[J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(4): 854 – 860.
LI Rongrong, HE Chujun, PENG Bo, *et al.* Differences in fiber morphology and partial physical properties in different parts of *Phyllostachys edulis* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(4): 854 – 860.
- [35] 黄俊杰, 谭敬尹, 胡传双, 等. 广东省4个竹种物理力学性能研究[J]. 林产工业, 2023, **60**(4): 25 – 32.
HUANG Junjie, TAN Jingyin, HU Chuanshuang, *et al.* Research on the physico-mechanical properties of four bamboo species in Guangdong Province [J]. *China Forest Products Industry*, 2023, **60**(4): 25 – 32.
- [36] 於琼花, 俞友明, 金永明, 等. 雷竹人工林竹材物理力学性质[J]. 浙江林学院学报, 2004, **21**(2): 130 – 133.
YU Qionghua, YU Youming, JIN Yongming, *et al.* Physical and mechanical properties of bamboo timber in plantation forests of *Phyllostachys praecox* [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2004, **21**(2): 130 – 133.
- [37] 王献轲, 方长华, 刘嵘, 等. 竹材不同尺度单元纵向拉伸性能研究进展[J]. 竹子学报, 2020, **39**(4): 14 – 24.
WANG Xianke, FANG Changhua, LIU Rong, *et al.* The longitudinal tensile properties of bamboo units with different scales [J]. *Journal of Bamboo Research*, 2020, **39**(4): 14 – 24.
- [38] OKAHISA Y, KOJIRO K, KIRYU T, *et al.* Nanostructural changes in bamboo cell walls with aging and their possible effects on mechanical properties [J]. *Journal of Materials Science*, 2018, **53**(6): 3972 – 3980.
- [39] GAO Xun, ZHU Deju, FAN Shutong, *et al.* Structural and mechanical properties of bamboo fiber bundle and fiber/bundle reinforced composites: a review [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, **19**: 1162 – 1190.
- [40] 李兴会, 罗蓓, 何蕊. 青皮竹和慈竹不同发育期竹材解剖特征研究[J]. 世界竹藤通讯, 2017, **15**(4): 9 – 12.
LI Xinghui, LUO Bei, HE Rui. Anatomical characteristics of *Bambusa textilis* McClure and *Bambusa emeiensis* in different growth periods [J]. *World Bamboo Rattan*, 2017, **15**(4): 9 – 12.