

海南儋州高种椰子木纤维形态与化学成分的空间变异研究

陆全济, 蒋汇川*, 李家宁, 李 民, 李冠君

中国热带农业科学院橡胶研究所/海南省热带作物栽培生理学重点实验室/省部共建国家重点实验室培育基地, 海南海口 571101

摘 要: 椰子木 (*Cocos nucifera* L.) 作为热带地区重要的经济树种, 其纤维形态和化学成分直接影响其加工性能和综合利用潜力。本研究以海南儋州树龄 40 a 高种椰子木为对象, 采用光学显微观察、图像测量及化学成分测定方法, 系统研究不同树干高度 (底部、中部、上部) 和径向部位 (外部、中部、内部) 纤维的形态指标 (长度、宽度、壁厚、腔径、长宽比及壁腔比) 和主要化学成分 (综纤维素、纤维素、酸不溶木素) 的空间变异特征。结果表明: 高度方向上, 纤维长度 (696.84~969.94 μm)、壁厚 (9.78~18.36 μm) 和壁腔比 (1.13~5.82) 从底部至上部呈显著递减, 腔径 (3.60~10.15 μm) 则呈递增; 纤维宽度 (17.41~20.76 μm) 和长宽比 (40.39~48.79) 变化较小, 但整体随高度的增加呈下降趋势。径向方向上, 纤维宽度、壁厚及壁腔比由外部向内递减, 而纤维长度、长宽比和腔径则呈递增。化学成分分析结果显示, 综纤维素 (59.14%~70.32%) 与纤维素含量 (41.03%~44.85%) 随高度和径向增加而下降; 酸不溶木素含量 (21.40%~23.60%) 则在高度上呈先降后升, 在径向上呈递增。总体来看, 椰子木底部和外部区域纤维表现为长纤维、壁厚、小腔径, 对应较高的综纤维素和纤维素含量, 更有利于制浆利用。与竹材相比, 椰子木纤维具有粗而短、高壁厚、高壁腔比和低长宽比的形态特性, 表明其适用于中短纤维制浆。本研究揭示椰子木纤维形态与化学成分的空间分布规律, 为其在制浆造纸、纤维板及生物能源利用方面提供理论依据, 对提升椰子木资源利用率和促进热带木材产业可持续发展具有重要意义。

关键词: 椰子木; 海南高种; 纤维形态; 化学成分; 空间变异

中图分类号: S667.4 文献标志码: A

Spatial Variation in Fiber Morphology and Chemical Composition of Wood from Hainan Tall Coconut (*Cocos nucifera* L.) Trees in Danzhou, Hainan

LU Quanji, JIANG Huichuan*, LI Jianing, LI Min, LI Guanjun

Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Science / Hainan Key Laboratory for Cultivation & Physiology of Tropical Crops / State Key Laboratory Incubation Base for Cultivation and Physiology of Tropical Crops, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: Coconut wood (*Cocos nucifera* L.), an economically significant tropical tree, exhibits variations in fiber morphology and chemical composition that directly influence its processing performance and comprehensive utilization potential. This study systematically investigated the spatial variability of fiber morphological indices (length, width, cell wall thickness, lumen diameter, aspect ratio, and cell wall-lumen ratio) and chemical components (holocellulose, cellulose, and lignin) across different trunk heights (bottom, middle, top) and radial positions (outer, middle, inner) in 40-year-old coconut trees from Hainan. The analyses were conducted using wood microscopy, image analysis software, and chemical assays. Fiber length (696.84–969.94 μm), cell wall thickness (9.78–18.36 μm), and cell wall-lumen ratio (1.13–5.82) decreased significantly from the bottom to the top, while lumen diameter (3.60–10.15 μm) increased. Fiber

收稿日期 2025-05-26; 接受日期 2025-06-19

基金项目 海南省自然科学基金项目 (No. 521MS097)。

作者简介 陆全济 (1984—), 男, 硕士, 助理研究员。*通信作者 (Corresponding author): 蒋汇川 (JIANG Huichuan), E-mail: jianghc@catas.cn。

width (17.41–20.76 μm) and aspect ratio (40.39–48.79) showed minor variations but exhibited an overall downward trend with increasing height. Fiber length, cell wall thickness, and cell wall-lumen ratio decreased from the outer to inner regions, whereas lumen diameter increased. Chemical analysis indicated decreasing trends for holocellulose (59.14%–70.32%) and cellulose (41.03%–44.85%) content along both vertical and radial gradients, while lignin (21.40%–23.60%) initially decreased and then increased vertically, with higher inner-region content. The study identified superior fiber morphology (longer fibers, thicker cell walls, smaller lumen diameters) and higher holocellulose and cellulose content in the bottom and outer regions. Compared to bamboo, coconut fibers are thicker, with thicker cell walls and smaller lumens but lower aspect ratio, making them particularly suitable for medium-to-short fiber pulping processes. This research elucidates the spatial variation mechanisms of coconut wood fiber morphology and chemical composition, could providing a theoretical foundation for optimizing pulping, fiberboard manufacturing, and bioenergy applications, Such insights can enhance resource utilization efficiency and support sustainable development in tropical timber industries.

Keywords: coconut wood; Hainan Tall; fiber morphology; chemical components; spatial variation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.10.015

椰子 (*Cocos nucifera* L.) 作为热带地区重要的经济作物, 既是海南的省树, 也是支撑区域经济的重要产业。近年来, 海南省椰子种植面积持续扩大, 从 2018 年的 3.44 万 hm^2 增至 2022 年的 3.91 万 hm^2 , 占全国总种植面积的 90% 以上^[1-4]。然而, 每年因种植更新产生的大量椰子木更新材中, 因缺乏有效利用途径, 多数被就地填埋或焚烧, 既造成木材资源的严重浪费, 更引发环境污染风险。因此, 开发椰子木的综合加工利用技术, 不仅有助于缓解我国木材供需矛盾, 也对提升椰子产业附加值和实现社会、经济、生态效益的协调发展具有重要意义。

在木材应用领域, 椰子木因独特纹理及良好的力学性能, 已在家具、地板、桁架、横梁等承重结构, 以及正交胶合木和吸音材料等产品中得到应用^[5-8]。然而, 椰子木内部维管束分布不均、材性变异显著, 导致制材加工难度高、锯材性能稳定性不足, 从而限制了其高效利用^[9]。要提升其资源化利用水平, 亟需从纤维形态和化学成分层面揭示结构特征与利用潜力之间的关系。

目前, 国内外学者针对棕榈科植物维管束开展了较多研究, 如有关油棕木纤维形态、分布规律及化学成分等方面已有报道^[10-13], 但针对椰子木纤维形态与化学成分, 尤其是不同部位变异性的系统性研究尚少。作为同属棕榈科的典型植物, 椰子木材性变异是否与其纤维形态相关, 纤维在高度方向 (底部、中部、上部) 及径向部位 (内部、中部、外部) 的分布是否存在规律性, 以及其纤维特性与其他材料的差异, 均需深入探究。

植物的纤维形态与化学成分是决定木材制浆

造纸、人造板生产等纤维化利用的重要因素。随着造纸业的发展, 木质纤维需求的增加对拓宽椰子木的利用具有潜在的价值。椰子木维管束主要由厚壁纤维细胞组成, 其纤维长度、宽度及长宽比等形态特征及化学成分中综纤维素、木质素含量的变异规律, 直接影响纤维的力学性能、化学可及性及加工适用性^[6]。目前, 椰子木在制浆造纸和人造板工业中的应用潜力尚未被充分挖掘, 关键在于缺乏对其纤维基础特性及化学成分的系统性研究。

基于此, 本研究以中国海南儋州地区高种椰子木为研究对象, 系统分析纤维形态 (长度、宽度、壁厚等) 与化学成分 (综纤维素、纤维素和酸不溶木素) 在树干高度和径向部位的变异规律特征。旨在揭示椰子木纤维特性与化学成分的空间变异规律, 探明纤维形态与化学成分对纤维化加工性能的影响, 为椰子木在制浆造纸、人造板及其他生物质利用领域的高效开发提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

试验材料椰子木 3 株, 品种均为海南高种, 树高分别为 10、11、13 m, 树龄为 40 a, 采自海南儋州市沙河水库两院试验场, 地理坐标 19°49'N, 109°51'E, 海拔 126 m。

1.2 方法

1.2.1 木材取样及处理 将砍伐的椰子木沿树干高度 1.0、5.0、9.0 m 处截取厚 3 cm 的圆盘各 1 个, 分别标记为底部、中部、上部; 将圆盘沿横

断面径向方向由外至内均匀截取规格为 20 mm×20 mm×30 mm (径向×弦向×纵向) 的三部分试材, 分别对应标记为外部、中部、内部 (图 1), 试样共计 9 组 (底外、底中、底内、中外、中中、中内、上外、上中、上内)。所有试材置于恒温电热鼓风干燥箱内, 65 °C 条件下干燥至含水率约 12% 以备用。

1.2.2 纤维形态测定 将试样劈成小细条, 混匀, 随机取若干条试样放入试管中, 倒入 30% 过氧化氢和 99.5% 冰醋酸 (体积比为 1:1) 的混合液, 放入 70~80 °C 水浴锅中加热离析, 直至试样淡白或边缘开始离析为止, 倒出混合液, 用蒸馏水冲洗数次至干净。最后加入少量蒸馏水至试管, 用拇指按住试管口轻轻震荡使纤维充分分离分散。用镊子夹取少量纤维转移至载玻片上, 滴入番红染色, 盖上盖玻片, 用吸水纸吸去多余的水分。使用 Leica 显微镜成像系统获取图像, 选用 10 倍

物镜测量纤维长度, 40 倍物镜测量纤维宽度、壁厚和腔径, 每组样品随机 150 根纤维以上。使用 Digimizer 图像测量分析软件测量纤维长度和宽度等形态指标。

1.2.3 化学成分测定 将样品劈开成火柴大小的小木条, 在温度为 65 °C 的恒温干燥箱内干燥至质量恒定, 然后用微型木材粉碎机粉碎木条, 最后粉末过 40 目分样筛以备用。按照国家标准 GB/T 2677.8—1994《造纸原料酸不溶木素含量的测定》、GB/T 2677.10—1994《造纸原料综纤维素含量的测定》, 分别测定酸不溶木素、综纤维素。纤维素的测定采用硝酸-乙醇法^[14]。

1.3 数据处理

采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 探究高度和径向部位对各指标的影响, 通过 Duncan 检验法进行组间差异比较 ($P < 0.05$), 使用 R 软件 (Version 4.5.0) 完成统计分析。

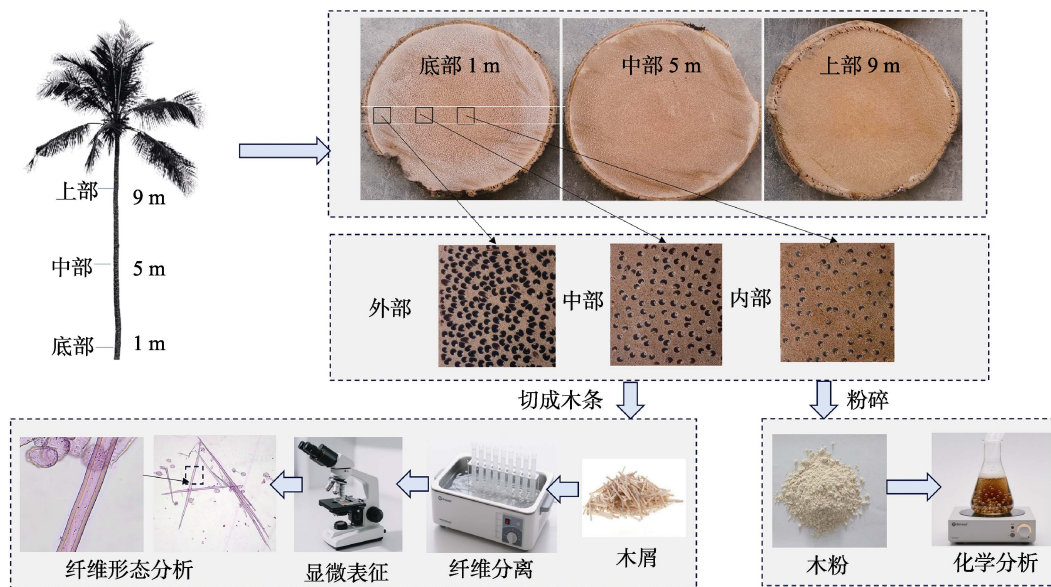


图 1 椰子木取样及纤维形态和化学成分测定

Fig. 1 Sampling of coconut wood and determination of fiber morphology and chemical components

2 结果与分析

2.1 椰子木不同部位的纤维长度、宽度和长宽比

2.1.1 纤维长度 在高度方向, 椰子木纤维长度从底部至上部显著递减。底部、中部、上部纤维长度均值分别为 969.94、834.43、696.84 μm (表 1)。底部、中部、上部纤维长度主要分布在 600~1400、400~1200、400~1000 μm 区间, 占比频率分别为 83.33%、87.99%、82.89% (图 2), 此变化可能与维管束内纤维细胞发育成熟度有

关, 底部纤维细胞发育时间更长, 纤维细胞延伸更充分。

在径向方向, 纤维长度从外部到内部呈先增大再减小的变化规律, 差异显著。外部、中部、内部的均值分别为 814.98、877.65、808.58 μm (表 1)。分布频率 (图 2) 表明, 外部、中部、内部的纤维长度主要分布在 400~1400 μm 区间, 整体上中部位置的纤维长度更长些, 分布峰值相对于外部和内部更大一些。根据国际木材解剖协会关

表 1 椰子木不同部位纤维形态特征

Tab. 1 Morphological characteristics of fibers from different parts of coconut wood

部位 Position	纤维形态 Fiber morphology						
	长度 Length/ μm	宽度 Width/ μm	长宽比 Aspect ratio	壁厚 Wall thickness/ μm	腔径 Lumen diameter/ μm	壁腔比 Wall-lumen ratio	
高度	底部	969.94 \pm 282.37 ^a	20.76 \pm 4.14 ^a	47.51 \pm 14.08 ^a	18.36 \pm 5.27 ^a	3.60 \pm 1.47 ^c	5.82 \pm 2.46 ^a
	中部	834.43 \pm 263.92 ^b	17.56 \pm 3.96 ^b	48.79 \pm 15.59 ^a	11.96 \pm 3.49 ^b	7.28 \pm 3.32 ^b	1.94 \pm 0.95 ^b
	上部	696.84 \pm 212.95 ^c	17.61 \pm 3.65 ^b	40.39 \pm 12.70 ^b	9.78 \pm 2.99 ^c	10.15 \pm 4.17 ^a	1.13 \pm 0.59 ^c
径向	外部	814.98 \pm 279.26 ^b	19.54 \pm 4.29 ^a	42.31 \pm 13.74 ^b	15.12 \pm 5.66 ^a	6.15 \pm 3.79 ^b	3.78 \pm 2.98 ^a
	中部	877.65 \pm 276.08 ^a	18.98 \pm 4.17 ^a	46.86 \pm 13.55 ^a	13.22 \pm 5.62 ^b	7.16 \pm 4.09 ^a	2.93 \pm 2.67 ^b
	内部	808.58 \pm 273.83 ^b	17.41 \pm 3.82 ^b	47.53 \pm 15.97 ^a	11.75 \pm 4.41 ^c	7.71 \pm 4.44 ^a	2.18 \pm 1.58 ^c
均值	833.74 \pm 277.85	18.64 \pm 4.19	45.57 \pm 14.63	13.37 \pm 5.43	7.01 \pm 4.17	2.97 \pm 2.57	

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

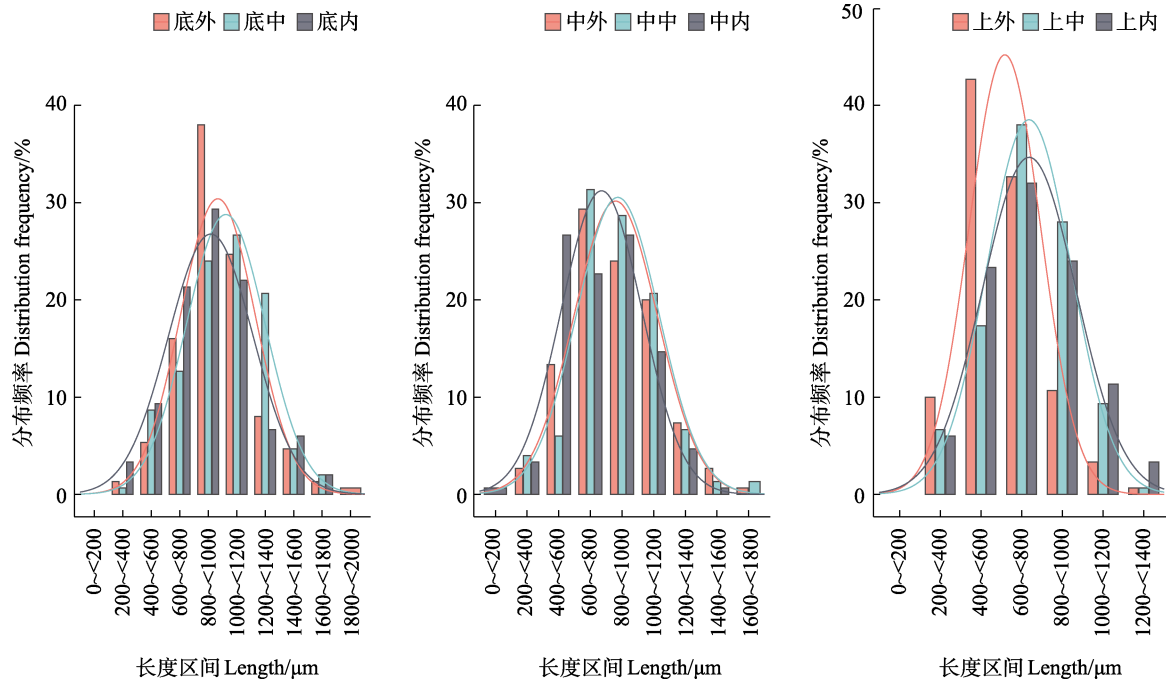


图 2 不同部位纤维长度分布频率

Fig. 2 Fiber length distribution at different positions

于木材纤维长度分级标准，长度为 $<900 \mu\text{m}$ 属于短纤维， $900\sim 1600 \mu\text{m}$ 属于中等纤维， $>1600 \mu\text{m}$ 属于长纤维。基于此分类，椰子木底部的纤维属于中等纤维，中部和上部属于短纤维^[15]，显示椰子木整体更适用于中短纤维制造。

2.1.2 纤维宽度 在高度方向，椰子木纤维宽度从底部到上部逐渐减小，且差异显著。底部、中部、上部的平均值分别为 20.76、17.56、17.61 μm （表 1）。随高度升高，纤维宽度略有下降趋势，表明上部细胞相对较为纤细，可能受限于纤维细胞横向拓展空间。底部、中部、上部的纤维宽度

主要分布在 15~27、12~24、12~21 μm 区间，频率占比分别为 88.66%、90.00%、90.88%（图 3）。

在径向方向，椰子木纤维宽度从外部到内部逐渐减小，外部、中部、内部纤维宽度平均值分别为 19.54、18.98、17.41 μm 。不同高度上的径向方向，外部、中部、内部的分布频率与该高度的分布一致，总体分布在 12~24 μm 之间（图 3）。

2.1.3 纤维长宽比 在高度方向，纤维长宽比从底部向上总体呈现减小趋势，底部、中部、上部纤维长宽比平均值分别为 47.51、48.79、40.39（表 1）。纤维长宽比的分布范围有一定的差异性，底

部、中部和上部的长宽比主要分布在 30~60、30~70、20~60 区间,分布频率分别为 73.77%、77.90%、90.88% (图 4)。根据纤维制浆性能的评价标准,优质纸浆原料的长宽比应在 80 以上^[16],椰子木纤维普遍偏低,说明其更适用于中短纤维纸浆制品。在径向方向,纤维长宽比从外到内呈现递增

规律,外部、中部、内部纤维长宽比平均值分别为 42.31、46.86、47.53 (表 1)。纤维长宽比在外部、中部和内部主要分布在 20~70 区间(图 4)。

2.2 椰子木不同部位的纤维壁厚、腔径及壁腔比

2.2.1 纤维壁厚 木纤维的壁厚不仅影响纤维品质,还直接影响纸张的品质。壁薄、壁腔比小的

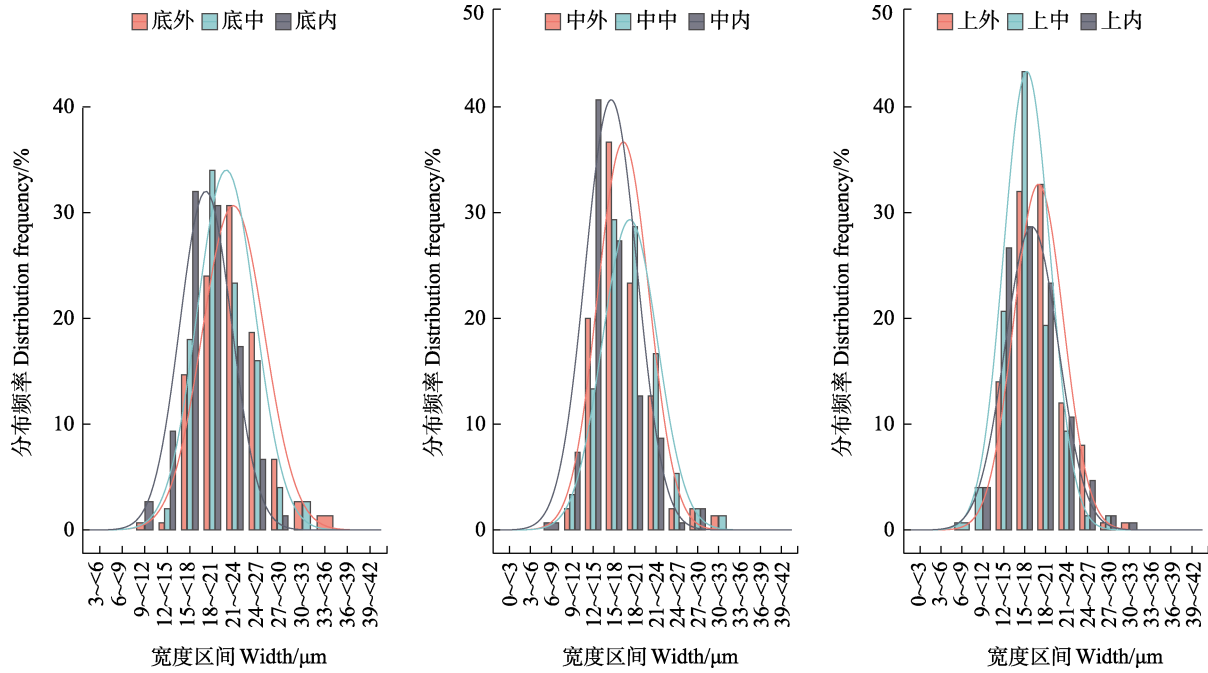


图 3 不同部位纤维宽度分布频率
Fig. 3 Fiber width distribution at different positions

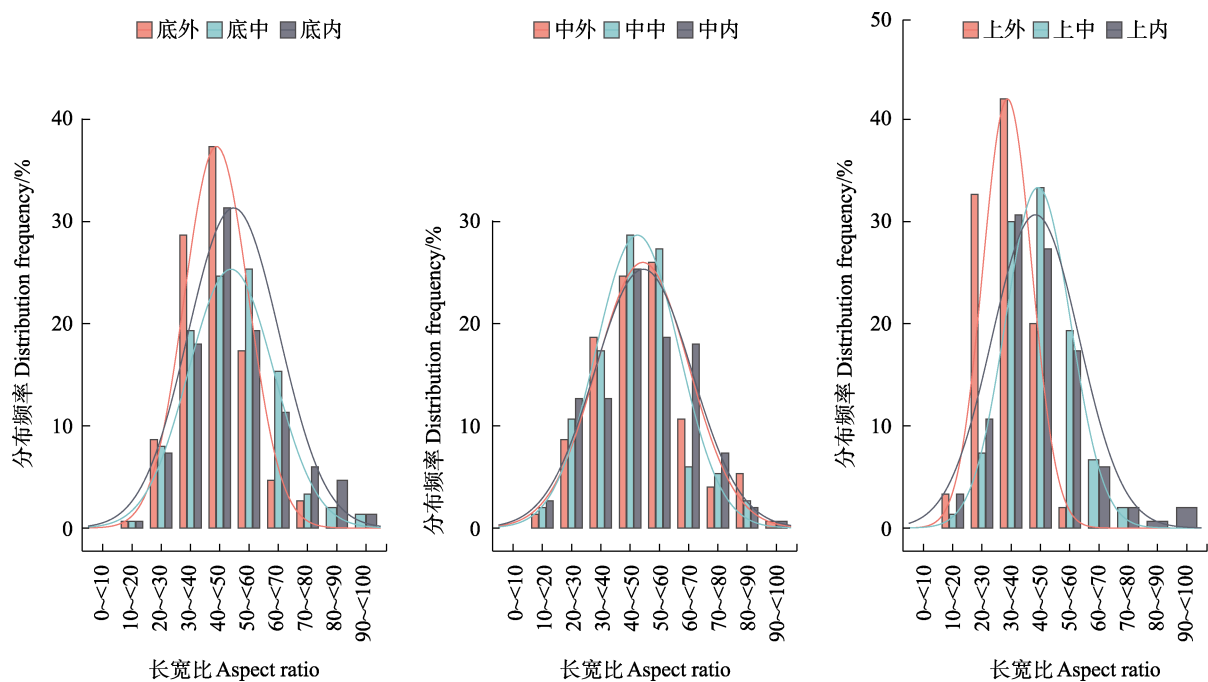


图 4 不同部位纤维长宽比分布频率
Fig. 4 Fiber aspect ratio distribution at different positions

纤维原料,可压扁性好,能赋予纸张较好的纤维结合强度,成纸质地紧密^[17]。在高度方向,椰子木纤维壁厚从底部到上部递减,且差异显著。底部、中部、上部纤维壁厚平均值分别为 18.36、11.96、9.78 μm (表 1)。底部、中部和上部,纤维壁厚主要分布在 10~24、8~16、6~14 μm 区间,

分布频率分别为 83.78%、75.55%和 83.76%(图 5)。底部纤维壁厚超过 18 μm ,说明该区域具有良好的机械支撑能力。在径向方向,纤维壁厚从外部到内部显著递减,外部、中部、内部纤维壁厚平均值为 15.12、13.22、11.75 μm (表 1)。外部、中部和内部纤维壁厚主要分布在 6~24 μm 区间(图 5)。

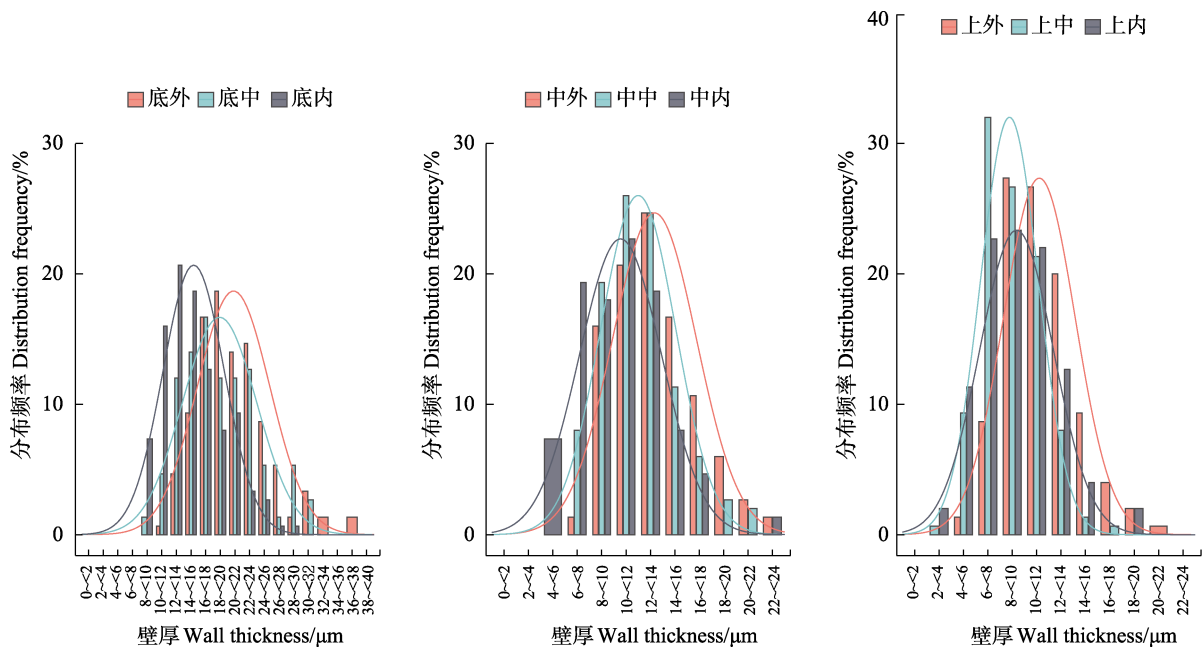


图 5 不同部位纤维壁厚分布频率

Fig. 5 Fiber wall thickness distribution at different positions

2.2.2 纤维腔径 在高度方向,纤维腔径从底部到上部递增,与纤维的壁厚变化正好相反,不同高度的纤维腔径差异显著。底部、中部、上部纤维腔径平均值分别为 3.60、7.28、10.15 μm (表 1),这表明随着椰子木高度的增加,纤维壁厚变小,腔径变大。底部、中部和上部纤维腔径主要分布在 2~6、2~10、4~14 μm 区间,分布频率分别为 86.70%、82.00%和 81.11%。在径向方向,纤维腔径从外部到内部递增,外部、中部、内部纤维腔径平均值分别为 6.15、7.16、7.71 μm (表 1)。外部、中部和内部纤维腔径主要分布在 2~14 μm 区间(图 6)。

2.2.3 纤维壁腔比 壁腔比小的纤维原料,可压扁性好,在纤维之间容易形成较大的接触面,可赋予纸张较好的纤维结合强度,成纸质地紧密^[17]。在高度方向,椰子木纤维壁腔比从底部到上部递减,不同高度的纤维壁腔比差异显著。底部、中部、上部纤维壁腔比平均值分别为 5.82、1.94、1.13 (表 1)。底部、中部和上部纤维壁腔比主要

分布在 2~10、0~3 和 0~2 区间,分布频率分别为 92.21%、87.78%和 92.66%(图 7)。在径向方向,椰子木壁腔比从外部到内部递减,不同径向部位的壁腔比差异显著。外部、中部、内部纤维壁腔比平均值分别为 3.78、2.93、2.18 (表 1)。底部高度位置的外部、中部和内部纤维壁腔比主要分布在 4~11、3~10 和 2~6 区间,而中部和上部高度位置的外部、中部和内部纤维壁腔比均主要分布在 0~3 区间(图 7)。

2.3 椰子木化学成分

通过对椰子木主要化学成分(综纤维素、纤维素、酸不溶木素)的测定发现,其含量在树干高度和径向部位上存在显著空间变异。不同高度(底部、中部、上部)及径向部位(外部、中部、内部)的化学成分含量差异明显,具体测定结果见表 2。

2.3.1 综纤维素 综纤维素是指木材中除去木质素以外的全部碳水化合物组分的总和,主要包括纤维素和半纤维素。在造纸过程中,植物的综纤

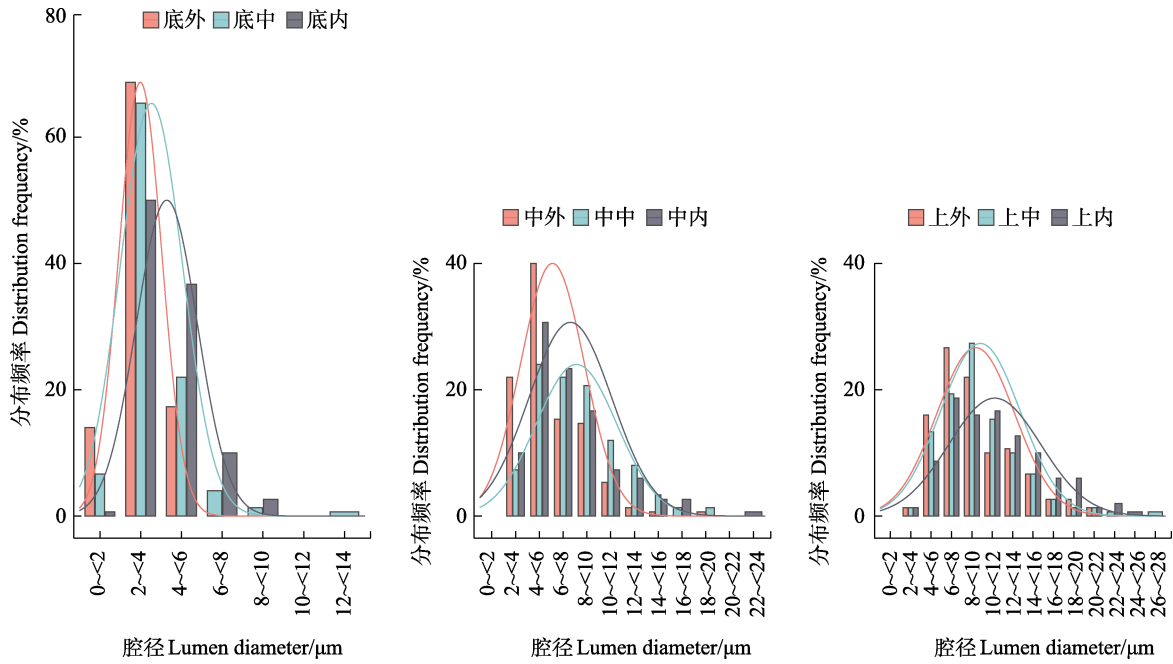


图 6 不同部位纤维腔径分布频率

Fig. 6 Distribution of fiber lumen diameters at different positions

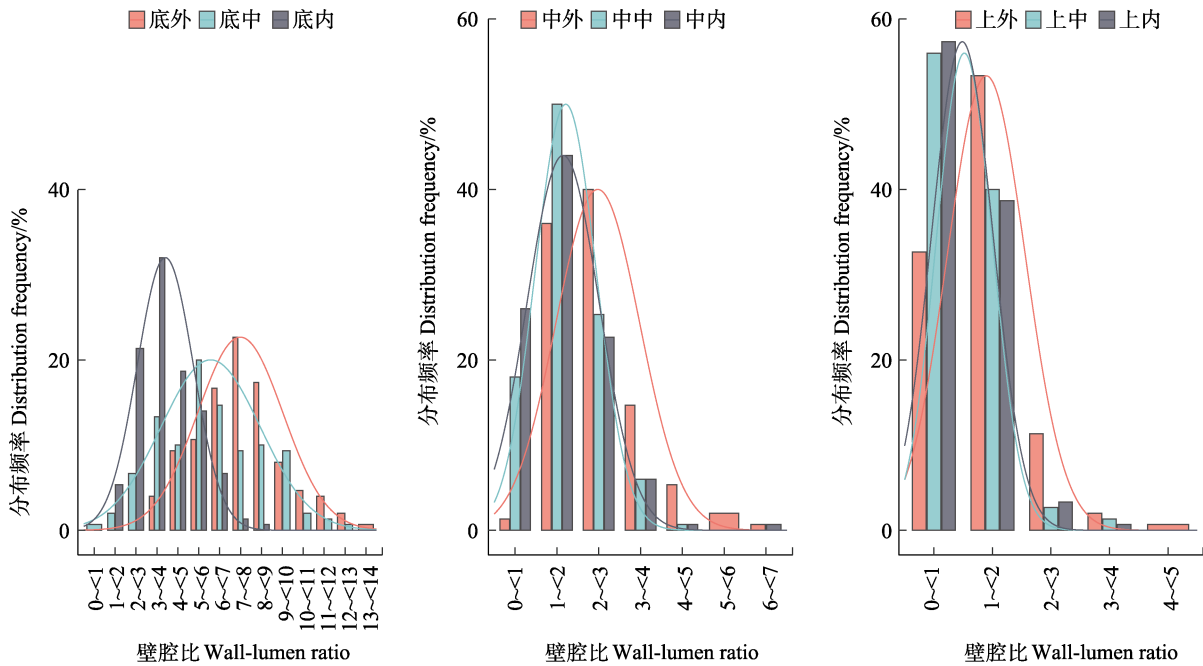


图 7 不同部位纤维壁腔比分布频率

Fig. 7 Distribution of the fiber wall-lumen ratio at different positions

纤维素含量越高，其纸浆率越高^[18]。椰子木综纤维素总体含量为 59.14~70.32%，平均值为 64.51%（表 2），在高度方向，综纤维素含量随着高度增加而递减，底部、中部和上部的综纤维素含量分别为 67.80%、63.46%和 62.28%（表 2）。径向方向，综纤维素含量从外部到内部逐渐减小，外部、中部和内部的综纤维素含量分别为 70.32%、

64.07%和 59.14%（表 2）。底部和外部区域综纤维素含量最高，反映出其细胞成熟度高、维管束密度高、次生壁发达的结构特征，这些区域也是制浆造纸中最具利用潜力的部分。

2.3.2 纤维素 木材纤维素是构成木材细胞壁的主要结构性多糖，是纸张纤维的主要成分，其长度、聚合度和结晶度直接影响纸张的强度^[16]。椰子木纤

表 2 椰子木不同部位化学成分含量
Tab. 2 Chemical compositions of coconut wood in different positions 单位: %

部位 Position	化学成分 Chemical composition			
	综纤维素 Holocellulose	酸不溶木素 Acid-insoluble lignin	纤维素 Cellulose	
高度	底部	67.80±2.78 ^a	23.47±2.15 ^a	43.84±3.21 ^a
	中部	63.46±6.23 ^b	21.40±1.89 ^c	43.31±2.34 ^b
	上部	62.28±6.12 ^c	22.33±1.23 ^b	41.99±2.45 ^c
径向	外部	70.32±1.89 ^a	21.71±1.78 ^c	44.85±2.67 ^a
	中部	64.07±2.34 ^b	21.89±1.89 ^b	43.26±1.78 ^b
	内部	59.14±5.12 ^c	23.60±2.01 ^a	41.03±2.34 ^c
均值	64.51±5.62	22.40±1.91	43.05±2.53	

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

纤维素总体含量为 41.03~44.85%，平均值为 43.05% (表 2)。在高度方向，纤维素含量随着高度增加而递减，底部、中部和上部的纤维素的含量分别为 43.84%、43.31%和 41.99%；在径向方向上，纤维素含量从外部到内部逐渐减小，外部、中部和内部的纤维素含量分别为 44.85%、43.26%和 41.03% (表 2)。

2.3.3 酸不溶木素 酸不溶木素是木质素的一种分类形式，是指在特定酸性条件下不溶于酸溶液的木质素组分，是植物细胞壁的重要化学成分^[19]。椰子木的酸不溶木素总体含量为 21.40~23.60%，平均值为 22.40% (表 2)。在高度方向，酸不溶木素随着高度的增加先减小后增加，底部、中部和上部酸不溶木素的含量分别为 23.47%、21.40%和 22.33%；在径向方向，酸不溶木素含量从外部到内部递增，外部、中部和内部的酸不溶木素含量分别为 21.71%、21.89%和 23.60% (表 2)。

3 讨论

3.1 纤维形态变异

椰子木纤维形态特征与维管束发育密切相关。本研究显示，椰子木纤维平均长度为 833.74 μm ，宽度为 18.64 μm ，壁厚为 13.37 μm ，长宽比为 45.57，呈现出纤维长度中等、直径较粗、壁厚腔小的形态特征。在高度方向，纤维长度与壁厚自底部向上部呈现显著递减趋势，纤维长度变化范围为 696.84~969.94 μm ，壁厚变化范围为 9.78~18.36 μm ，而纤维宽度变化不明显。这种高度分

布与纤维细胞的发育阶段及木质化程度密切相关：底部纤维细胞因形成时间早，次生壁物质持续积累，木质化程度较高，因此具有较大的纤维长度与壁厚，能够为树体提供较强的力学支撑；而上部纤维细胞处于发育早期阶段，细胞壁较薄且纤维较短。在径向分布，纤维长度、宽度和壁厚由外部向内部逐渐减小。

与竹纤维相比，椰子木纤维在形态上变化明显。竹纤维 (如毛竹、慈竹) 平均长度更长 (1.83~2.00 mm)，但其宽度 (15.0~16.2 μm) 和壁厚 (6.45~6.68 μm) 均低于椰子木^[20-21]。此外，椰子木纤维长宽比 (45.57) 显著低于竹纤维 (74.38~170.70)，表明其形态更为粗短^[22]。这种差异源于生长模式的根本不同：竹材通过快速高生长形成轴向力学优化结构，纤维长度在中部达到峰值以平衡支撑效率；而椰子木生长缓慢，底部纤维因纤维细胞次生壁长期沉积形成厚壁结构，形成“底部强、顶部弱”的高度梯度，以适应树冠重量支撑及抗风摆动生理需求。值得注意的是，竹材纤维壁厚随竹龄增加而增厚^[17, 23]，而椰子木底部纤维的高壁厚 (平均 13.37 μm) 则是长期木质化积累的结果，这与木材的成熟机制相似，但椰子木的缓慢生长使其底部纤维具备更稳定的力学结构。

从制浆性能角度看，竹纤维的高长宽比 (如毛竹约 123.5) 使其更适于生产高强度纸张^[24-25]，而椰子木纤维的粗短形态 (长宽比 45.57) 可能降低成纸的耐折度与撕裂强度。然而，椰子木纤维的高壁厚与壁腔比 (平均 2.97) 使其刚性更强，可能更适用于高密度纸板或纤维复合材料。研究还发现，油棕木纤维虽与椰子木类似，呈现壁厚随高度递减的趋势，但其纤维长度变化不显著^[26]，进一步证实了木本单子叶植物底部纤维强化机制的普遍性。

综上，椰子木纤维形态的分布规律是其生长适应性应对调控的结果。这一结果为椰子木纤维的定向利用提供理论依据，例如优先选用底部及外部区域的高性能纤维用于高强度材料，同时通过工艺调控优化纤维分离与改性工艺。针对上部及内部区域纤维壁薄、腔径大、木质素含量较高的特点，可通过预处理改善其化学可及性。在制浆造纸中，结合底部纤维高壁腔比的刚性优势，可设计差异化蒸煮工艺以提升纸浆质量。针对纤维长宽比偏低的共性特征，可通过纤维复合技术弥补成纸性能短板，从而实现全树范围内不同部

位纤维资源的高效分级利用。

3.2 化学成分变异

椰子木的综纤维素、纤维素及酸不溶木素含量在树干高度与径向部位呈现显著空间梯度分布，其变异规律与维管束密度、纤维细胞发育进程密切相关。高度方向，综纤维素与纤维素含量自底部至上部递减，酸不溶木素含量呈先降后升分布，其中底部综纤维素（67.80%）和纤维素（43.84%）含量分别比上部高 8.9% 和 4.4%，显示出基部组织的资源优势；径向方向，综纤维素（59.14%~70.32%）与纤维素（41.03%~44.85%）含量由外向内递减，酸不溶木素（21.71%~23.60%）则表现为内部显著高于外部；FATHI 等^[26]研究的椰子木综纤维素（66.7%）、纤维素（42%）和木质素（25.1%）含量与 KOLYA 等^[27]研究的椰子木纤维素（27.0%）、半纤维素（34.9%）和木质素（29.3%）的含量具有差异性，纤维素和木质素差异都较大。本研究的结果与 FATHI 的结果类似，这一差异可能来自不同部位、树龄和品种的差异。研究表明海南高种椰子木纤维的纤维素和木质素含量高于矮种椰子，这与相关合成基因的拷贝数扩张、高表达水平、以及关键结构变异相关^[28]。

该分布特征与维管束组织分布的空间变异直接相关：外部及底部区域因维管束密度高，纤维细胞占比大，次生壁中纤维素与半纤维素积累充分，而内部区域随薄壁细胞比例增加，木质素相对含量上升。这与 RAMLE 等^[10]在油棕木纤维中的研究结论一致，进一步证实维管束组织中纤维细胞对综纤维素和纤维素的主导积累作用。与毛竹相比，椰子木综纤维素和纤维素含量略低，但显著高于油棕^[26-27]，木质素含量与二者相当^[16, 29]，体现了维管植物化学成分的共性特征。

化学成分的空间变异对制浆造纸及纤维复合材料加工利用具有关键指导意义：底部与外部区域因高综纤维素（>67%）、低酸不溶木素（<22%）的优势，纤维结合力强且纸浆得率高，是优质纸浆原料的理想取材部位；内部区域因酸不溶木素含量较高（>23%），需通过强化脱木素工艺降低加工难度。工业生产中优先取材于树干基部及外围区域进行加工利用。

4 结论

本研究系统揭示海南树龄 40 a 的高种椰子木

纤维形态及化学成分在树干高度和径向部位的空间变异规律，为定向开发制浆造纸、纤维板材及复合材料等高性能产品提供科学依据。

椰子木纤维形态在高度和径向方向呈现显著梯度变化。在高度方向，纤维长度、壁厚及壁腔比自底部至上部递减，腔径递增；纤维宽度与长宽比整体呈下降趋势。在径向方向，纤维宽度、壁厚及壁腔比由外部向内部递减，纤维长度、长宽比及腔径递增。底部和外部区域纤维形态最优，表现为长纤维、厚壁、低腔径，是纤维加工的优质取材部位。

化学成分在高度和径向方向亦存在显著差异。综纤维素与纤维素含量在高度和径向方向均呈递减趋势，酸不溶木素含量在高度方向先降后升，径向方向内部高于外部。底部和外部区域因维管束密度高，综纤维素和纤维素含量更高，制浆潜力更大。

参考文献

- [1] 海南省统计局, 国家统计局海南调查总队. 海南统计年鉴 2024[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
Hainan Provincial Bureau of Statistics, Survey Office of National Bureau of Statistics in Hainan. Haina statistical yearbook 2024[M]. Beijing: China Statistics Press, 2024. (in Chinese)
- [2] 陆全济, 蒋汇川, 李家宁, 李民, 李冠君. 海南椰子木维管束形态特征及其与物理力学性能的关系[J]. 木材科学与技术, 2024, 38(3): 21-32.
LU Q J, JIANG H C, LI J N, LI M, LI G J. Relationship between morphological characteristics of vascular bundles and physical and mechanical properties of Hainan coconut wood[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2024, 38(3): 21-32. (in Chinese)
- [3] 卢丽兰, 刘蕊, 肖勇, 李静, 沈晓君, 李和帅, 范海阔. 椰子种质资源、栽培与利用研究进展[J]. 热带作物学报, 2021, 42(6): 1795-1803.
LU L L, LIU R, XIAO Y, LI J, SHEN X J, LI H S, FAN H K. Research progress on coconut germplasm resources, cultivation and utilization[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(6): 1795-1803. (in Chinese)
- [4] 罗红霞, 戴声佩, 李茂芬, 李海亮, 胡盈盈, 郑倩, 禹萱. 基于 Gaofen-2 影像和面向对象的椰子林分类研究[J]. 热带作物学报, 2024, 45(5): 1021-1030.
LUO H X, DAI S P, LI M F, LI H L, HU Y Y, ZHENG Q, YU X. Object-oriented classification of coconut palms based on Gaofen-2 imagery[J]. Chinese Journal of Tropical Crops,

- 2024, 45(5): 1021-1030. (in Chinese)
- [5] KOLYA H, KANG C W. Unveiling enhanced sound absorption in coconut wood through hemicellulose and lignin modification[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 276(2): 134083.
- [6] RANA M N, DAS A K, ASHADUZZAMAN M. Physical and mechanical properties of coconut palm (*Cocos nucifera*) stem[J]. Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research, 2015, 50(1): 39-46.
- [7] SRIVARO S, TOMAD J, SHI J, CAI J. Characterization of coconut (*Cocos nucifera*) trunk's properties and evaluation of its suitability to be used as raw material for cross laminated timber production[J]. Construction and Building Materials, 2020, 254: 119291.
- [8] SRIVARO S, PÁSZTORY Z, LE DUONG H A, LIM H, JANTAWEE S, TOMAD J. Physical, mechanical and thermal properties of cross laminated timber made with coconut wood[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2021, 79(6): 1519-1529.
- [9] LU Q J, JIANG H C, LI J N, LI M, LI G J. Some physical and mechanical properties of coconut palm (*Cocos nucifera*) stem in Hainan Island, China[J]. Wood Research, 2024, 69(1): 23-36.
- [10] RAMLE S F M, SULAIMAN O, HASHIM R, HAMID Z A A, MURATA Y. Chemical characterization from parenchyma and vascular bundle at different parts of oil palm trunk[C]//AIP Conference Proceedings, Malaysia: American Institute of Physics Publishing, 2019.
- [11] SRIVARO S, RATTANARAT J, NOOTHONG P. Comparison of the anatomical characteristics and physical and mechanical properties of oil palm and bamboo trunks[J]. Journal of Wood Science, 2018, 64(3): 186-192.
- [12] GRIMWOOD B E, ASHMAN F, DENDY D A V, JARMAN C G, LITTLE E C S, TIMMINS W H. Coconut palm products: their processing in developing countries[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1975.
- [13] KILLMANN W. Some physical properties of the coconut palm stem[J]. Wood Science and Technology, 1983, 17(3): 167-185.
- [14] 蒋汇川, 韦鹏练, 李宁, 罗建举. 木薯粗根纤维形态、组织比量及化学成分分析[J]. 广西林业科学, 2009, 38(4): 218-222.
- JIANG H C, WEI P L, LI N, LUO J J. Study on the fiber morphology, tissue ratios and chemical components in the thick roots of Cassava[J]. Guangxi Forestry Science, 2009, 38(4): 218-222. (in Chinese)
- [15] 朱海龙. 美洲黑杨 NL351 和 2-2 的 KP 法蒸煮、氧脱木质素特性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
- ZHU H L. Study on delignification properties of populus deltooides NL351 and 2-2 in KP pulping and oxygen delignification[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014. (in Chinese)
- [16] 蔡焱, 王宝金, 官洁茹, 胡凯, 李鲲鹏, 袁天成, 王传贵. 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 Y, WANG B J, GUAN J R, HU K, LI K P, YUAN T C, WANG C G. Fiber morphology and chemical composition of moso bamboo from Jinzhai[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(2): 81-86. (in Chinese)
- [17] 李权, 巫其荣, 胡吉萍, 林金国. 绿竹竹龄和竹秆径向部位对纤维形态特征的影响[J]. 中国造纸学报, 2018, 33(2): 13-16.
- LI Q, WU Q R, HU J P, LIN J G. Effects of bamboo ages and radial positions in culm on fiber morphology of *Dendrocalamopsis oldhami*[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2018, 33(2): 13-16. (in Chinese)
- [18] 李琳, 代洋洋, 王永贵, 岳金权. 山地杨边材和心材差异性分析[J]. 造纸科学与技术, 2014, 33(1): 19-25.
- LI L, DAI Y Y, WANG Y G, YUE J Q. Analysis of the differences between sapwood and heartwood of mountain poplar[J]. Pulp & Paper Science and Technology, 2014, 33(1): 19-25. (in Chinese)
- [19] 王堃. 木质生物质预处理、组分分离及酶解糖化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- WANG K. Research on pretreatment, component separation and enzymatic hydrolysis saccharification of lignocellulosic biomass[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)
- [20] 齐锦秋, 胡瑶, 谢九龙, 黄兴彦, 罗浩, 陈思敏. 3 年生慈竹竹秆不同部位的解剖特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014(2): 187-192.
- QI J Q, HU Y, XIE J L, HUANG X Y, LUO H, CHEN S M. Anatomical characteristics of different parts of three -year-old *Neosinocalamus affinis* culms[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2014(2): 187-192. (in Chinese)
- [21] 裴继诚. 植物纤维化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2012.
- PEI J C. Plant fiber chemistry[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [22] 袁敏, 陈宇杰, 余英, 张艳丽, 王勇, 王志坤. 四川宜宾三种竹材纤维形态、化学成分与制浆性能[J]. 世界竹藤通讯, 2024, 22(5): 32-37.
- YUAN M, CHEN Y J, YU Y, ZHANG Y L, WANG Y, WANG Z K. Fiber morphology, chemical composition and

- pulping properties of three bamboo species in Yibin, Sichuan[J]. *World Bamboo and Rattan*, 2024, 22(5): 32-37. (in Chinese)
- [23] CHANG F, WANG E I, PERNG Y, CHEN C. Effect of bamboo age on the pulping properties of *Bambusa stenostachya* Hackel[J]. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2013, 47(3/4): 285-293.
- [24] 郭起荣, 杨光耀, 陈伏生, 黎祖尧, 杜天真, 胡宜柏, 邹文生. 厚皮毛竹纤维形态研究[J]. *江西农业大学学报*, 1999, 21(2): 223-225.
- GUO Q R, YANG G Y, CHEN F S, LI Z Y, DU T Z, HU Y B, ZOU W S. Study on the fiber morphology of *Phyllostachys heterocycla* 'Pachyloen'[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1999, 21(2): 223-225. (in Chinese)
- [25] 牛思杰, 王娜, 崔百祥, 王传贵, 武恒, 张双燕. 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 S J, WANG N, CUI B X, WANG C G, WU H, ZHANG S Y. 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. (in Chinese)
- [26] FATHI L. Structural and mechanical properties of the wood from coconut palms, oil palms and date palms[D]. Hamburg: University of Hamburg, 2014.
- [27] KOLYA H, JANG E S, HASHITSUME K, KANG C W. Effects of ammonium persulfate on coconut wood (*Cocos nucifera*) cellulose, hemicellulose, and lignin polymers: Improved sound absorption capacity[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(30): e52674.
- [28] WANG S C, XIAO Y, ZHOU Z W, YUAN J Q, GUO H, YANG Z, YANG J, SUN P C, SUN L S, DENG Y, XIE W Z, SONG J M, MUHAMMAD T Q, XIA W, LIU R, GONG S F, WANG Y, WANG F Y, LIU X Q, ALISDAIR F, WANG X Y, FAN H K, CHEN L L, LUO J. High-quality reference genome sequences of two coconut cultivars provide insights into evolution of monocot chromosomes and differentiation of fiber content and plant height[J]. *Genome Biology*, 2021, 22: 1-25.
- [29] 孙娅东, 张文根, 黎祖尧, 张雷, 张艳华, 李苑. 不同引种地厚竹纤维形态和含量比较[J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(12): 51-57.
- SUN Y D, ZHANG W G, LI Z Y, ZHANG L, ZHANG Y H, LI Y. Comparison of fiber morphology and contents of *Phyllostachys edulis* 'Pachyloen' at different introduction sites[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2017, 37(12): 51-57. (in Chinese)