

孝顺竹纤维生长形态特征研究

代亚星^{1,2,3}, 袁金玲^{2*}, 华克达⁴, 孙志虎¹, 于磊², 岳晋军², 陈双林²

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400;
3. 湖南省靖州苗族侗族自治县林业局, 湖南 怀化 418400; 4. 杭州市富阳区农业农村局, 浙江 杭州 311400)

摘要:【目的】孝顺竹(*Bambusa multiplex*)为地下茎合轴丛生,在我国亚热带分布广泛,具有较好的适应性和耐寒性,通过解析其纤维生长形态特征,为合理利用和深入研究竹纤维资源提供依据。【方法】以孝顺竹的笋和秆为材料,通过富兰克林法分离纤维,利用纤维分析仪检测纤维性状并采用单因素方差分析和 Pearson 相关性分析节间长度与纤维性状之间的关系。【结果】①孝顺竹笋的第2~4节间的纤维性状没有显著差异,可以作为纤维生长研究的测试材料;在孝顺竹笋第2~4节间不同生长长度下,纤维长度、纤维长宽比和扭结率等3个性状呈正态分布,其中纤维长度(y_1)、纤维长宽比(y_2)与竹笋节间长度(x_1)呈极显著正相关($P<0.01$),且二者与节间长度的回归方程分别为 $y_1=0.347 \ln x_1+0.622$, $y_2=0.004 x_1^3-0.282 x_1^2+8.773 6 x_1+23.601$ 。②孝顺竹秆的节间长度、纤维长度、纤维宽度、纤维长宽比和扭结角等5个性状在第1~13节间的差异达极显著水平($P<0.01$),前4个性状随着节位数的增加呈先升高后降低的趋势,最后1个性状则呈波动上升趋势;其中节间长度、纤维长度和纤维长宽比均在第6节间达到最大值,分别为 (46.35 ± 6.44) cm、 (2.55 ± 0.05) mm和 174.81 ± 4.40 ;第2节间的纤维长度和纤维长宽比分别为 (2.31 ± 0.07) mm和 (161.38 ± 4.39) ,均最接近全秆平均值 (2.31 ± 0.03) mm、 161.18 ± 0.06 。③孝顺竹秆的纤维长度、扭结指数和扭结率等3个性状呈正态分布,其中竹秆纤维长度(y_3)与节间长度(x_2)呈极显著正相关($P<0.01$),纤维长度与节间长度的回归方程为 $y_3=0.857 x_2^{0.28}$ 。④孝顺竹秆的全秆纤维长度等性状与竹龄的相关性不大;1~4年生孝顺竹全秆平均纤维长度、纤维宽度、纤维长宽比、平均卷曲度、扭结指数、扭结率、扭结角、细小纤维指数分别为 (2.31 ± 0.03) mm、 (14.34 ± 0.05) μ m、 161.18 ± 0.06 、 $(4.13\pm 0.11)\%$ 、 $(200.30\pm 4.97)\%$ 、 $(275.78\pm 6.53)\%$ 、 $(24.95\pm 0.05)^\circ$ 、 $(86.85\pm 0.38)\%$ 。【结论】孝顺竹笋2~4节间发育过程中纤维性状稳定,纤维性状与节间长度有相关性,可用于探究竹笋纤维发育机制的材料;孝顺竹秆各节间的纤维性状有显著差异,体现了纤维发育的动态过程,纤维长度与节间长度呈显著正相关,全秆纤维长度等性状与秆龄相关性不大,表明竹秆纤维生长规律独特受多因素影响。

关键词:孝顺竹;竹笋;竹秆;节间;纤维特征

中图分类号:S795

文献标志码:A

文章编号:1000-2006(2025)04-0023-06

Study on the fiber growth and development characteristics of *Bambusa multiplex*

DAI Yaxing^{1,2,3}, YUAN Jinling^{2*}, HUA Keda⁴, SUN Zhihu¹, YU Lei², YUE Jinjun², CHEN Shuanglin²

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China; 3. Forestry Bureau of Jingzhou Miao and Dong Autonomous County, Huaihua 418400, China; 4. Fuyang District Agricultural and Rural Bureau of Hangzhou City, Hangzhou 311400, China)

Abstract: 【Objective】*Bambusa multiplex* has sympodial tufted rhizomes and is widely distributed in subtropical bamboo regions of China, with good adaptability and cold tolerance. Analyzing the morphological characteristics of its fiber growth provides a basis for the rational utilization and in-depth study of bamboo fiber resources. 【Method】Using shoots and culms of *B. multiplex* as materials, fiber traits were detected by a fiber analyzer after fiber separation by the Franklin method, and the relationship between internodal length and fiber traits was analyzed by One-way analysis of variance (ANOVA) and Pearson's correlation (PCR). 【Result】Fiber traits in the 2nd to 4th internodes of *B. multiplex* shoots showed no significant differences, making them suitable test materials for fiber growth research. Under different growth

收稿日期 Received: 2024-04-05

修回日期 Accepted: 2025-06-05

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD2200505); 浙江省农业新品种选育重大专项(2021C02070-4)。

第一作者: 代亚星(dyx339999@163.com)。* 通信作者: 袁金玲(yjl_369@sina.com), 研究员。

引文格式: 代亚星, 袁金玲, 华克达, 等. 孝顺竹纤维生长形态特征研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2025, 49(4): 23-28.

DAI Y X, YUAN J L, HUA K D, et al. Study on the fiber growth and development characteristics of *Bambusa multiplex*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2025, 49(4): 23-28. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202404008.

lengths of the 2nd to 4th internodes in shoots, three traits—fiber length, ratio of fiber length to width and kink rate—exhibited normal distributions. Bamboo shoots fiber length (y_1) and ratio of fiber length to width (y_2) were extremely significantly positively correlated with shoot internode length (x_1), respectively. Their regression equations with internode length were: $y_1 = 0.347 \ln x_1 + 0.622$, $y_2 = 0.004 x_1^3 - 0.282 x_1^2 + 8.773 x_1 + 23.601$. In culms, five traits—internode length, fiber length, fiber width, ratio of fiber length to width, and kink angle—showed extremely significant differences among the 1st to 13th internodes. The first four traits increased and then decreased with increasing internode number, while the last trait showed a fluctuating upward trend. Internode length, fiber length, and ratio of fiber length to width reached their maximum values at the 6th internode, measuring (46.35 ± 6.44) cm, (2.55 ± 0.05) mm, and 174.81 ± 4.40 , respectively. Fiber length and ratio of fiber length to width in the 2nd internode $[(2.31 \pm 0.07)$ mm and $(161.38 \pm 4.39)]$ were closest to the whole-culm averages $[(2.31 \pm 0.03)$ mm and $(161.18 \pm 0.06)]$. In culms, three traits—fiber length, kink index, and kink rate—showed normal distributions. Bamboo culms fiber length (y_3) was extremely significantly positively correlated with culm internode length (x_2), described by the regression equation: $y_3 = 0.857 x_2^{0.28}$. Traits such as whole-culm fiber length were not strongly correlated with culm age. For one–four-year-old *B. multiplex* culms, the average whole-culm fiber length, fiber width, ratio of fiber length to width, mean curl degree, kink index, kink rate, kink angle, and fine fiber index were (2.31 ± 0.03) mm, (14.34 ± 0.05) μ m, 161.18 ± 0.06 , $(4.13 \pm 0.11)\%$, $(200.30 \pm 4.97)\%$, $(275.78 \pm 6.53)\%$, $(24.95 \pm 0.05)^\circ$, and $(86.85 \pm 0.38)\%$, respectively. 【Conclusion】 The stable fiber traits in the 2nd to 4th internodes of *B. multiplex* shoots make them suitable for future research. The correlation between fiber traits and internode length aids in exploring the mechanisms of fiber development in bamboo shoots. Significant differences in fiber traits among culm internodes reflect the dynamic process of fiber development. The significant positive correlation between fiber length and internode length, along with the weak correlation between whole-culm fiber traits and culm age, indicate that bamboo fiber growth follows unique laws influenced by multiple factors.

Keywords: *Bambusa multiplex*; bamboo shoots; bamboo culm; internode; fiber characteristics

植物纤维具有高强度、可再生和可生物降解的特点,被广泛应用于造纸业、建筑业、食品工业、生物医学等领域^[1-2];纤维长度、纤维长宽比等特性是纤维品质的重要体现,通常纤维长度和纤维长宽比越大纤维品质越好,纤维长宽比大于100为优质的造纸原料,小于45时则不宜造纸^[3]。按照来源,植物纤维大致可分为木材纤维和非木材纤维两大类。木材纤维特别是针叶材的纤维长度较好^[4-5],竹材纤维属于非木材纤维,其纤维长度1.33~3.04 mm,平均2.04 mm^[6],介于针叶材和阔叶材之间,属于较优良的纤维类型^[7-8],被广泛应用于纺织、造纸、家居、生物基复合材料等领域,是减少塑料污染、减轻环境负荷、推进可持续发展的重要载体。关于竹材纤维的品质已有较多的研究,如撑绿竹(*Bambusa pervariabilis* $\times$ *Dendrocalamopsis grandis*)的平均纤维长度1.93 mm、纤维宽度14.03 μ m、纤维长宽比137.56,属于优良的制浆造纸纤维^[9];慈竹(*Bambusa emeiensis*)等6种丛生竹的平均纤维长度均大于2.00 mm^[10];泰国4种竹子*B. vulgaris*、*B. longispiculata*、*D. membranaceus*和*Thyrsocalamus liang*的平均纤维长度为1.74~2.16 mm^[11]。

竹材纤维细胞的细胞壁主要由纤维素、半纤维素和木质素等生物大分子构成,这些成分在细胞壁中的排列方式和相互作用对细胞壁的性能具有决

定性作用。笋的生长在多个水平上受到控制,诸如生长素(IAA)和赤霉素(GA)等激素及下游靶基因(与细胞壁生物生成相关的基因)^[12]。了解竹材纤维发育过程对于竹材纤维的开发利用和发育机制解析具有重要作用,有助于推进“以竹代塑”在建材领域的推广应用。孝顺竹(*Bambusa multiplex*)为地下茎合轴丛生,在我国亚热带竹区分布广泛,具有较好的适应性和耐寒性,其纤维细长、制浆得率高,是重要的纤维用材竹种^[13]。迄今鲜有竹材纤维发育过程的研究报道,为此,以不同发育时期的孝顺竹为材料,解析其纤维发育特征,为其竹材纤维的合理利用以及其他竹种的纤维发育研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地及试验材料

试验地位于浙江省杭州市富阳区庙山坞自然保护区($119^\circ 56' \sim 120^\circ 02' E$, $30^\circ 03' \sim 30^\circ 06' N$),属亚热带季风湿润气候,年平均气温16.1 $^\circ C$,极端最高气温40.2 $^\circ C$,极端最低气温-14.4 $^\circ C$;年平均降水量1441.9 mm^[14],土壤为砂质山地黄壤。试验用孝顺竹于2004年栽植,株行距4 m $\times$ 5 m,面积约1333 m²,主要作为观赏景观用,采用常规抚育措施,每隔3~5 a清理1次老竹,每年增施有机肥4.0

t/hm²。2022 年 7—8 月孝顺竹出笋期,在林分中选择无病虫害、笋箨完好无损且笋肉饱满的孝顺竹笋,自基部截断,置于装有冰袋的泡沫箱中,带回实验室备用。同年 10 月初,在同一试验林中选取胸径、基部直径和节位数相似的 1~4 年生的秆各 3 株作为生物学重复样品,齐地伐倒,去除枝叶和梢头,带回实验室备用。

1.2 研究方法

1.2.1 孝顺竹笋和秆的节位数

参考周芳纯^[15]的方法,将孝顺竹笋或秆自基部往上,逐节编号为节位数,第 1 节记为节位数 1,第 2 节记为节位数 2,⋯,第 *n* 节记为节位数 *n*。

1.2.2 纤维分离与提取

清洗竹笋样品表面的泥土和刺毛后擦干,测量高度、地径、质量;剥去笋箨,测定质量、逐节间长度;纵向切成条状,制成样品。取 7.00~9.00 g 竹笋样品置于 10 mL 试管中,采用富兰克林离析法分离纤维^[16],加入 30% (体积分数)过氧化氢与冰醋酸体积比为 1:1 的混合液淹没样品;放入 100 ℃ 水浴中解离 8 h;将解析出的纤维组织用纯净水清洗至呈絮状,挤出水分,称取 0.16 g,加入自来水打磨后使用纤维分析仪 (Valmet FS5, 芬兰) 测量纤维长度、纤维宽度、纤维长宽比、平均卷曲度、扭结指数、扭结率、扭结角、细小纤维指数等性状。

秆样品处理时,清洗竹秆表面的泥土和刺毛后擦干,取第 1~13 节间,先测量逐节间长度,然后将各节间纵向劈条,再切割成火柴状,制成样品;每样品取 3.00~4.00 g 进行纤维解析及检测,方法同上。

1.2.3 孝顺竹笋纤维发育特征分析

1) 孝顺竹笋第 2~4 节纤维性状的差异。孝顺竹笋逐节的发育按照节位数的顺序,即第 1 节最先开始伸长发育,随之第 2 节、3 节⋯⋯逐节相继发育伸长。由于第 1 节间与竹箨紧密相连,取样误差偏大;而取样过高的节间则受发育时间久、气象因子影响大、取样便捷性低等因素影响,因此试验选取第 2~4 节间作为测试对象。为检测以第 2~4 节

间取样的效果,取大小各异的 10 株笋为材料,该 10 株笋高 45.60~105.00 cm,地茎 1.85~2.20 cm;去箨后检测逐第 2~4 节的节间长度为 5.00~37.40 cm。逐节间进行纤维分离、检测和分析。

2) 孝顺竹笋纤维性状随节间长度生长的变化。以随机挖取的 64 株孝顺竹笋为材料,笋高 30.00~150.00 cm,地径 1.60~2.50 cm;去箨后取其第 2~4 节间作为试验材料,并弃掉其中节间过短不足以进行样品解析的节间,共获得 85 个节间材料,节间长度为 0.50~36.20 cm。然后对逐节间进行纤维分离、检测和分析。

1.2.4 孝顺竹秆的纤维性状特征分析

1) 孝顺竹秆不同节位数的纤维性状。以 12 株孝顺竹秆的第 1~13 节间为样品,逐节间进行纤维分离、检测和分析,研究不同节位数之间的纤维性状特征。

2) 孝顺竹秆纤维性状与节间长度的相关性。利用上述 12 株孝顺竹秆的第 1~13 节间的纤维数据及逐节间长度数据,开展正态分布检验、相关性分析和回归分析,研究孝顺竹秆的纤维性状与节间长度的关系。

3) 孝顺竹秆不同竹龄的纤维性状。根据竹龄将上述 12 株孝顺竹秆分成 1、2、3、4 a 共 4 组,分析不同竹龄的纤维特性。

1.3 数据分析

利用 Microsoft Excel 2018 整理数据,数值表示为平均值±标准偏差。然后用 SPSS 23.0 软件进行单因素方差 (One-way ANOVA)、LSD 法进行多重比较 ($\alpha = 0.05$)、Kolmogorov-Smirnova 正态分布检验、相关性分析和回归建模,采用 Origin 2022 进行回归方程模拟作图。

2 结果与分析

2.1 孝顺竹笋的纤维生长发育特征

2.1.1 竹笋第 2~4 节间的纤维性状

对 10 株孝顺竹笋第 2~4 节间的 8 个纤维性状进行方差分析和多重比较的结果如表 1 所示。可

表 1 孝顺竹笋第 2~4 节间的纤维性状

Table 1 Fiber characteristics of the 2nd to 4th internodes of *Bambusa multiplex* shoots

节位数/节 internodal number	纤维长度/mm fiber length	纤维宽度/ μ m fiber width	纤维长宽比 ratio of fiber length to width	平均卷曲度/% mean curl degree	扭结指数/% kink index	扭结率/% kink rate	扭结角/($^{\circ}$) kink angle	细小纤维 指数/% fine fiber index
2	1.75±0.11 A	14.11±0.15 b	123.86±7.35 A	8.70±0.38 a	443.16±111.98 a	509.59±175.05 a	28.93±0.44 a	81.14±1.06 a
3	1.79±0.13 A	14.34±0.21 ab	125.60±9.55 A	9.00±0.32 a	420.28±106.81 a	486.63±163.16 a	29.43±0.46 a	82.27±1.33 a
4	1.65±0.18 A	15.01±0.35 a	111.75±13.72 A	8.84±0.54 a	419.12±111.33 a	484.61±180.78 a	30.20±0.77 a	78.93±1.74 a

注:小写字母表示数据符合方差齐性检验,两两比较为邦弗伦尼法;大写字母表示数据不符合方差齐性检验,两两比较为塔姆黑尼法。不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。Lowercase letters indicate that the data meet the Chi-square test, and the two-way comparison is based on the Bonferroni method. Uppercase letters indicate that the data do not meet the Chi-square test, and the two-way comparison is based on the Tammany method. Different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

以看出,纤维长度、纤维长宽比、平均卷曲度、扭结指数、扭结率、扭结角、细小纤维指数等7个性状在第2~4节之间的差异均未达显著水平,仅纤维宽度在第2节间与第4节间存在显著差异($P < 0.05$)。总体来看,孝顺竹笋第2~4节间的8个纤维性状发育程度较为接近,因此选取第2~4节间作为检测纤维发育程度的试验材料是可行的。

2.1.2 竹笋纤维性状与节间长度的相关拟合模型

对孝顺竹笋85个节间的节间长度以及纤维长度、纤维宽度、纤维长宽比、平均卷曲度、扭结指数、扭结率、扭结角、细小纤维指数等纤维性状进行检测,结果的平均值分别为(10.97±1.08)cm、(1.30±0.04)mm、(17.90±0.44)μm、78.55±3.79、(8.18±0.18)%、(331.80±16.85)%、(202.81±7.18)%、(30.62±0.30)°、(84.08±0.68)%;变幅分别为0.50~36.20 cm、0.34~2.25 mm、13.14~29.26 μm、20.62~159.80、4.19%~13.16%、109.30%~900.60%、66.40%~424.00%、26.48°~37.07°、74.72%~98.39%。

对85个节间的纤维长度的8个纤维性状数据作Kolmogorov-Smirnova正态分布检验结果表明,纤维长度、纤维长宽比和扭结率等3个性状数据均服从正态分布,其他5个性状不符合正态分布。进一步开展节间长度与该3个性状的相关分析发现,纤维长度与节间长度呈极显著正相关($R = 0.823, P < 0.01$),纤维长度(y_1)与竹笋节间长度(x_1)的拟合

方程为 $y_1 = 0.347 \ln x_1 + 0.622$;扭结率与节间长度的相关性未达显著水平($R = -0.007, P > 0.05$);纤维长宽比(y_2)与节间长度(x_1)呈极显著正相关($R = 0.901, P < 0.01$),纤维长宽比与竹笋节间长度的拟合方程为 $y_2 = 0.004 x_1^3 - 0.282 x_1^2 + 8.773 6 x_1 + 23.601$ 。

2.2 孝顺竹秆的纤维特征

2.2.1 不同节位数的纤维特征

对12株孝顺竹秆第1~13节间的节间长度和8个纤维性状进行方差分析发现,节间长度、纤维长度、纤维宽度、纤维长宽比和扭结角等5个性状在不同节位数之间的差异达极显著水平($P < 0.01$),而平均卷曲度、扭结指数、扭结率和细小纤维指数等4个性状在不同节位数之间的差异未达显著水平。对差异达极显著水平的5个性状开展多重比较的结果(图1)可以看出,随着节位数的增加,节间长度和纤维长度(图1a)、纤维宽度和纤维长宽比(图1b)等4个性状呈现出先升高后降低的趋势,而扭结角则呈波动上升趋势(图1c)。节间长度、纤维长度和纤维长宽比均在第6节间达到最大值,分别为(46.35±6.44)cm、(2.55±0.05)mm、174.81±4.40;纤维宽度在第7节间达到最大值(14.68±0.15)μm;扭结角在第13节间达到最大值(24.95±0.05)°。第2节间的纤维长度和纤维长宽比分别为(2.31±0.07)mm和161.38±4.39,均最接近全秆平均值(2.31±0.03)mm、161.18±0.06。

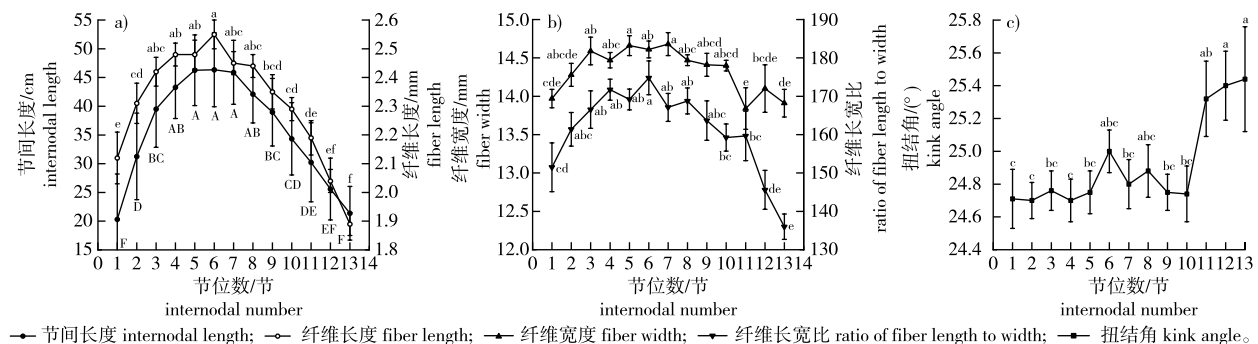


图1 孝顺竹秆1~13节的节间长度及纤维性状变化趋势

Fig. 1 Differences and trend plots of internodal length and fiber traits of 1st to 13th internodes *B. multiplex* culms

2.2.2 秆节间长度与纤维性状的相关拟合模型

对测得的156个竹秆节间的纤维性状数据作Kolmogorov-Smirnova正态分布检验结果表明,纤维长度、扭结指数和扭结率3个性状数据符合正态分布,其他5个性状不符合正态分布。进一步开展节间长度与该3个性状的相关性分析发现,扭结指数与节间长度相关性未达显著水平($R = -0.194, P >$

0.05)、扭结率与节间长度相关性未达显著水平($R = 0.173, P > 0.05$),纤维长度与节间长度呈极显著正相关($R = 0.836, P < 0.01$)。竹秆纤维长度(y_3)与节间长度(x_2)的回归方程分别为: $y_3 = 0.857 x_2^{0.28}$ 。

对1~4年生孝顺竹秆的纤维性状特征进行多重比较的结果(表2)可以看出,纤维长度、纤维长

宽比、扭结指数、扭结率等 4 个性状在不同竹龄间没有明显的变异规律;而平均卷曲度、扭结角、细小纤维指数等 3 个性状表现为 1 年生最大,2~4 年生略小的趋势。1~4 年生全秆平均纤维长度、纤维宽度、纤维长宽比、平均卷曲度、扭结指数、扭结率、扭结角、细小纤维指数分别为 (2.31±0.03) mm、(14.34±0.05) μm、161.18±0.06、(4.13±0.11) %、(200.30±4.97) %、(275.78±6.53) %、(24.95±0.05) °、(86.85±0.38) %。

表 2 不同竹龄孝顺竹纤维性状差异
Table 2 Fiber characteristics of *B. multiplex* culms at different ages

竹龄/a age	节间长度/cm internodal length	纤维长度/mm fiber length	纤维 宽度/μm fiber width	纤维长宽比 ratio of fiber length to width	平均 卷曲度/% mean curl degree	扭结指数/% kink index	扭结率/% kink rate	扭结角/(°) kink angle	细小纤维 指数/% fine fiber index
1	38.19±1.54 B	2.37±0.05 A	13.94±0.13 b	169.79±3.06 A	5.46±0.20 A	200.92±5.89 a	274.26±10.51 B	25.28±0.13 a	89.18±0.41 a
2	36.01±1.58 A	2.25±0.03 B	14.58±0.08 a	154.58±2.39 B	3.37±0.21 B	173.42±12.49 b	230.48±13.53 C	24.94±0.13 b	88.01±0.59 ab
3	37.85±1.97 A	2.37±0.04 A	14.41±0.07 a	164.94±2.87 A	3.71±0.13 B	218.72±9.38 a	309.80±12.64 A	24.66±0.06 b	87.26±0.68 b
4	31.07±1.59 A	2.24±0.04 B	14.43±0.07 a	155.42±2.69 B	3.96±0.17 B	208.12±11.49 a	288.57±15.29 A	24.93±0.11 b	82.95±0.93 b
均值 mean	35.78±0.86	2.31±0.03	14.34±0.05	161.18±0.06	4.13±0.11	200.30±4.97	275.78±6.53	24.95±0.05	86.85±0.38

3 讨 论

纤维发育作为竹子重要的生物学过程,直接关系竹材的品质与应用潜力,其从细胞分化起始,历经伸长、次生壁加厚等阶段,最终形成具备特定结构与功能的纤维细胞。然而,当前学界对竹纤维发育进程与纤维特征间关系的研究仍存在明显缺口。

关于竹子最长节间长度的节位数已有较多研究结果,如茶秆竹 (*Pseudosasa amabilis*) 最长节间长位于第 9 节^[17],撑篙竹 (*B. pervariabilis*) 最大节间长度在第 15~20 节^[18],粉单竹 (*B. chungii*) 的最大节间长度在第 9~12 节^[19],毛竹 (*P. edulis*) 第 18 节间长最长^[20]。马灵飞等^[21]的研究发现大木竹 (*B. wenchouensis*)、粉单竹 (*B. chungii*) 等 6 种竹子的纤维长度与节间长度呈正相关,与本研究的结果较为一致。

本研究发现在 1~4 年生情况下,孝顺竹秆的纤维长度、纤维长宽比、扭结指数、扭结率等特性受立竹竹龄因素的影响不明显;马灵飞等^[22]研究了不同竹龄、不同竹秆部位的毛竹纤维性状,发现竹材纤维长度主要受竹秆部位的影响,与竹龄无显著关系;牛思杰等^[23]的研究发现竹龄影响毛竹材的纤维长度,纤维长度随竹龄的增长而增大;这些差异可能是试验取材等因素造成的,有待于进一步研究验证。Chen 等^[20]研究发现节间长度可能是由快速生长引起的机械压力介导的一种权衡;上官小霞等^[24]发现棉花的纤维发育受转录因子、功能基因、植物激素、非编码 RNA 及表观遗传优势等调控;Xiao 等^[25]发现生长素、茉莉酸甲酯和赤霉素等

对棉花纤维发育有着积极作用。因此,竹子不同节间的纤维特性的差异可能是受遗传因素、气象因子、节的构造等多重因素导致的,有待于更多深入研究明确。

参考文献 (reference):

[1] TURSUNOV O, DOBROWOLSKI J. A brief review of application of laser biotechnology as an efficient mechanism for the increase of biomass for bio-energy production via clean thermo-technologies [J]. American Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2025, 21(1):66–71.

[2] KHAN R, JOLLY R, FATIMA T, et al.Extraction processes for deriving cellulose: a comprehensive review on green approaches [J].Polymers for Advanced Technologies, 2022(7):33.DOI:10.1002/pat.5678.

[3] 高慧,徐斌,邵卓平.青檀树皮的化学组成与细胞壁结构[J].经济林研究,2007,25(4):28–33. GAO H,XU B,SHAO Z P. Chemical compositions and structure of cell wall in *Pteroceltis tatarinowii* Bark [J].Non-Wood Forest Research, 2007, 25(4):28–33.DOI:10.3969/j.issn.1003–8981.2007.04.007.

[4] 陈庭巧,朱亚艳,赵杨,等.马尾松半同胞子代材性遗传变异分析[J].中南林业科技大学学报,2015,35(2):38–43.CHEN T Q,ZHU Y Y,ZHAO Y,et al.Analysis on genetic variation of wood properties of *Pinus massoniana* half-sib progeny [J].Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(2):38–43.DOI:10.14067/j.cnki.1673–923x.2015.02.008.

[5] 陈希,王志杰,王建.常见四种阔叶材纤维形态和化学成分的研究[J].湖南造纸,2009(1):3.CHEN X,WANG Z J,WANG J.Analysis on several kinds of fast-growing plants' fibre configuration and chemical components [J].Papermaking Equipment & Materials,2009(1):3. DOI: 10.3969/j. issn. 1672 – 3066. 2009. 01.002.

[6] 马乃训,张文燕.纸浆竹林集约栽培模式研究综述[J].林业科技开发,1997(5):10–12 .MA N X,ZHANG W Y.Summary of intensive cultivation model of pulp bamboo forest [J].Journal of Forestry Engineering, 1997(5):10–12. DOI: 10.13360/j. issn.

- 1000-8101.1997.05.003.
- [7] 马乃训,张文燕.竹材制浆造纸述评[J].林业科学研究,1995, 8(3):5..MA N X,ZHANG W Y.The perspective on bamboo paper-making[J].Forest Research, 1995, 8(3):5. DOI: CNKI: SUN;LYKX.O.1995-03-015.
- [8] QUENTIN V, ANTONELLA E, JEAN-MARC S, et al. Interfacial characterization by pull-out test of bamboo fibers embedded in poly(lactic acid)[J]. Fibers, 2018, 6(1):7. DOI: 10.3390/fib6010007.
- [9] 苟光前,丁雨龙,方洪刚,等.撑绿竹纤维形态特征及化学成分的初步研究[J].纸和造纸,2010(5):3. GOU G Q,DING Y L, FANG H G, et al. Research on fiber configuration and chemical components of *B. pervariabilis* × *D. daii* [J]. Paper and Paper Making, 2010(5):3.
- [10] 陈丽娟,张朝燕,赖永平,等.四川6种丛生竹的纤维形态研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015(5):8. CHEN L J,ZHANG C Y,LAI Y P, et al. Fiber morphology of six sympodial bamboos in Sichuan[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2015(5):8. DOI: 10.13207/j.cnki.jnwf.2015.05.031.
- [11] CUI K, HE C Y, ZHANG J G, et al. Temporal and spatial profiling of internode elongation-associated protein expression in rapidly growing culms of bamboo[J]. Journal of Proteome Research, 2012, 11(4):2492-2507. DOI:10.1021/pr2011878.
- [12] KHANTAYANUWONG S, YIMLAMAI P, CHITBANYONG K, et al. Fiber morphology, chemical composition, and properties of kraft pulping handsheet made from four Thailand bamboo species[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 20. DOI: 10.1080/15440478.2022.2150924.
- [13] 袁金玲,顾小平,岳晋军,等.孝顺竹开花生物学特性及杂交试验[J].林业科学,2011, 47(8):61-66. YUAN J L,GU X P, YUE J J, et al. Flowering biology and crossing of *Bambusa multiplex*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(8):61-66. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20110810.
- [14] 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):7. 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):7. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2286.2008.02.012.
- [15] 周芳纯.毛竹秆形结构的研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),1981(1):16. ZHOU F C. Studies on the structure of culm form of *Phyllostachys pubescens*[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 1981(1):16. DOI:10.3969/j.jssn.1000-2006.1981.01.002.
- [16] DONALDSON L A. Within-and between-tree variation in microfibril angle in *Pinus radiata* [J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 1992, 22(1):77-86.
- [17] CHENG L, HUI C. Internode morphometrics and allometry of tonkin cane *Pseudosasa amabilis* [J]. Ecology and Evolution, 2017. DOI:10.1002/ece3.3483.
- [18] 黄大勇.撑篙竹秆形结构研究[J].世界竹藤通讯,2019, 17(4):11-15. HUANG D Y. Study on the culm form structure of *Bambusa pervariabilis*[J]. World Bamboo Rattan, 2019, 17(4):11-15. DOI:10.13640/j.cnki.wbr.2019.04.003.
- [19] 黄大勇,黄大志,韦丽颜,等.粉单竹秆形结构与生物量[J].世界竹藤通讯,2020, 18(3):5. HUANG D Y, HUANG D Z, WEI L Y, et al. Culm form structure and biomass of *Bambusa chungii* [J]. World Bamboo Rattan, 2020, 18(3):5. DOI: 10.12168/sjz-ttx.2020.03.005.
- [20] CHEN M, GUO L, RAMAKRISHNAN M, et al. Rapid growth of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*): cellular roadmaps, transcriptome dynamics, and environmental factors[J]. Plant Cell, 2022, 34(10):3577-3610. DOI: 10.1093/plcell/koac193.
- [21] 马灵飞,朱丽青.浙江省6种丛生竹纤维形态及其组织比量的研究[J].浙江农林大学学报, 1990, 7(1):63-68. MA L F, ZHU L Q. Fiber forms and tissue percentage of six species of sympodial bamboos in Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 1990, 7(1):63-68.
- [22] 马灵飞,马乃训.毛竹材性变异的研究[J].林业科学,1997, 33(4):9. MA L F, MA N X. Study on variation in bamboo wood properties of *Phyllostachys heterocycle* var. *pubescens* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1997, 33(4):9. DOI: CNKI: SUN; LYKE.O.1997-04-007.
- [23] 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 S J, WANG N, CUI B X, 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.
- [24] 上官小霞,曹俊峰,杨琴莉,等.棉花纤维发育的分子机理研究进展[J].棉花学报,2022(1):34. SHANGGUAN X X, CAO J F, YANG Q L, et al. Research progress on the molecular mechanism of cotton fiber development [J]. Cotton Science, 2022(1):34. DOI:10.11963/cs20210076.
- [25] XIAO G H, ZHAO P, ZHANG Y. A pivotal role of hormones in regulating cotton fiber development [J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10:87. DOI:10.3389/fpls.2019.00087.

(责任编辑 王国栋)