

## 毛竹材性差异对胶合竹层板应力分级的影响

严彦<sup>1</sup>, 刘焕荣<sup>2</sup>, 张秀标<sup>2\*</sup>, 陈国宁<sup>2</sup>, 武恒<sup>3</sup>

(1. 安徽太平试验中心, 太平 245716; 2. 国际竹藤中心, 北京 100102; 3. 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036)

**摘要:** 通过测试不同杆高部位毛竹竹材的密度、抗弯强度及弹性模量, 采用不同杆高部位的竹条制备胶合竹层板, 并以抗弯弹性模量为指标对其进行分级, 初步研究了不同杆高部位材性的差异对胶合竹层板分级的影响。结果表明, 毛竹气干密度从基部至梢部呈现增大趋势, 杆高 3~9 m 处密度增大趋势较缓, 气干密度值相近。毛竹抗弯强度及弹性模量从基部至梢部呈现增大趋势, 梢部性能最优, 其中杆高 1~5 m 部位竹材性能接近, 杆高 5~9 m 部位性能接近; 胶合竹层板 E-Rated 级别与竹材抗弯强度及弹性模量密切相关, 相对应 E-Rated 级别由低到高大致可分为 4 级。

**关键词:** 胶合竹层板; 抗弯强度; 抗弯弹性模量; E-Rated 分级

中图分类号: S785

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)02-0260-05

### The effect of *Phyllostachys pubescens f. lutea* Wen property on the E-Rated classification of laminated bamboo board

YAN Yan<sup>1</sup>, LIU Huanrong<sup>2</sup>, ZHANG Xiubiao<sup>2</sup>, CHEN Guoning<sup>2</sup>, WU Heng<sup>3</sup>

(1. Anhui Taiping Experimental Station, Taiping 245716; 2. International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102;

3. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** The paper analyzed the influence of materials in different positions of bamboo culm on the E-Rated classification of laminated bamboo board. We tested the density, bending strength and modulus from the bottom up to the bamboo culm. Laminated bamboo board was graded according to bending modulus made from strips in different locations of bamboo culm. We found that the density, bending strength and modulus increased from the bottom to up of a bamboo culm. The density fluctuated gently between 3 and 9 m, and the bending performance was similar to those in the range of 1-5 m and 5-9 m, respectively. The laminated bamboo board E-Rated grade was closely related to the bending performance of bamboo materials at different locations of the culm, which could be divided into four grades.

**Key words:** bamboo laminated board; bending strength; modulus of elasticity; E-Rated classification

世界有竹类植物 88 属, 1 400 余种<sup>[1]</sup>。竹子与人类的生产生活息息相关, 表现在生产工具、生活用品、建筑及文化用品等方面; 随着对竹材的结构及性能的深入研究, 竹质工程结构材料在人们的经济与生活中扮演着重要角色<sup>[2]</sup>。竹材具有强度高、硬度大、韧性好和耐磨等特点, 但它也有径级小、出材率低且加工效率低等缺点<sup>[3]</sup>, 竹材的抗弯强度、抗弯弹性、抗拉强度及硬度等约为一般木材(中软阔叶树材和针叶树材)的 2 倍左右, 可与麻栎等硬

阔叶树材相媲美<sup>[4]</sup>; 与钢材相比, 竹材密度要低很多, 仅为钢材的 1/8, 但竹材的顺纹抗压强度为钢材的 1/5, 顺纹抗拉强度为 1/2, 说明竹材有非常好的力学性能<sup>[5]</sup>。

胶合木最早出现在欧洲, 其关键技术是将变异性显著的天然木材制成了截面、长度、形状、密度、刚度和强度等指标可设计、质量可控制的工程材料<sup>[6]</sup>。其制造过程需预先对不同级别的木材进行应力分级, 美国木结构学会的结构胶合木设计及制造

收稿日期: 2015-08-25

基金项目: 国际竹藤中心基本科研业务费专项资金项目(1632015013), 国际竹藤中心基本科研业务费专项基金项目(1632011002)和 2014 年安徽省属社会公益类科研机构专项基金项目(2014YS003)共同资助。

作者简介: 严彦, 助理研究员。E-mail: yanyan@icbr.ac.cn

\* 通信作者: 张秀标, 博士, 助理研究员。E-mail: zhangxb@icbr.ac.cn

标准 AITC 117-2004<sup>[7]</sup>中,详细地叙述了结构用胶合木的设计加工技术要求以及木材 E-Rated 分级方法;国内任海青等研究采用应力分级方法,将结构用国产杉木规格材分为 3 级<sup>[8]</sup>,王朝晖等研究了东北人工林落叶松规格材机械分等<sup>[9]</sup>。而对于竹材应力分级方面,尚处于起步阶段,陈国宁等参照美国标准,用 3 点弯曲的方法测试了胶合竹层板的抗弯弹性模量,并讨论了层板应力等级<sup>[10-11]</sup>。

竹材密度、竹秆纵向部位与各力学强度间均有较好的正相关关系,即竹秆部位增高、竹材密度增大,各力学强度也随之增大<sup>[12]</sup>,毛竹从基部到梢部抗弯强度和抗弯弹性模量逐渐增加<sup>[13]</sup>,Qi 等对慈竹重组材的研究表明秆高对重组竹材力学性能影响显著<sup>[14]</sup>。

本研究以安徽黄山地区毛竹为试验材料,截取不同秆高部位竹材,测试其密度、抗弯强度和抗弯弹性模量;采用不同秆高部位竹材制备精刨竹条,采用间歇连续热压制备出胶合竹层板,并对其进行应力分等评价其力学性能;为将竹材作成性能稳定的结构工程材料提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 原材料

试验用毛竹 (*Phyllostachys heterocycla* (Carr.)) 采集于安徽黄山,选择 4 年生竹龄毛竹,竹高 (14±0.5) m,胸径 (12±1) cm,竹基部向上 1 m 部截去,剩余部分按每段 2 m,自基部至梢部截成 5 段,分别编号:1<sup>#</sup> (1~3 m)、2<sup>#</sup> (3~5 m)、3<sup>#</sup> (5~7 m)、4<sup>#</sup> (7~9 m) 和 5<sup>#</sup> (9~11 m),待气干后每段均制备密度和弯曲试样,其余材料经开条、粗刨和精刨加工成精刨竹条,竹条含水率 10%。

酚醛树脂,型号 16L511,固含量 48%~51% (3 g/135℃/1 h),pH 值 10.5~11.5 (25℃),粘度 20~40 CPS (25℃),购自北京太尔化工有限公司。

### 1.2 样品制备

竹条按 1<sup>#</sup>至 5<sup>#</sup>顺序依次浸入酚醛树脂中浸渍 2 h 后取出晾干。晾干后的竹条进入拼板机进行拼接,组坯时将竹条侧立、浸胶竹条与未浸胶竹条交替放置,端头对齐侧面拼接。板材成型后即胶合竹层板,经截断和表面刨光处理后备用,胶合竹层板编号与竹条编号对应,尺寸均为 2 000 mm×90 mm×15 mm (图 1)。

### 1.3 试验设备

竹材抗弯强度及抗弯弹性模量测试仪器: INSTRON 5582 万能力学实验机,传感器载

10 kN,精度±10 N,购自美国 INSTRON 公司。

竹层板应力分级测试仪器:依据标准 Modulus of Elasticity of E-Rated Lumber by Static Loading<sup>[14]</sup> 中对应力分级方法的描述制作而成,其中两个压辊重量均为 10 LBs,数显千分表精度 0.001 mm。

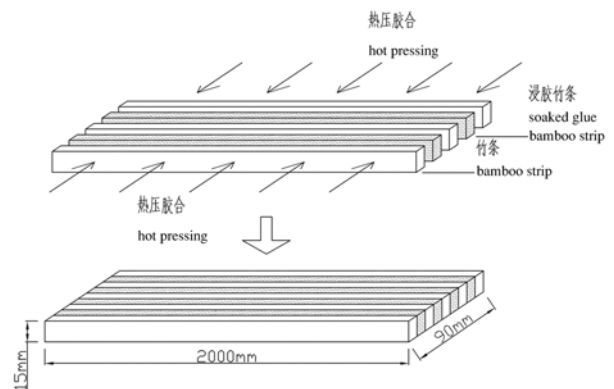


图 1 竹层板加工图

Figure 1 The schematic diagram of bamboo laminated board

## 1.4 试验方法

1.4.1 含水率及密度测试方法 含水率及密度的测试方法参考标准 GB/T 15780-1995<sup>[15]</sup>进行。

(1) 试样规格:从 1<sup>#</sup>到 5<sup>#</sup>竹筒,分别依次截取 20 个试样,试样尺寸为 10 mm×10 mm×t mm (t 为竹条厚度)。

(2) 试验过程:按测试标准要求,分别测量试件宽度和厚度各 3 次取算数平均值,为试件的宽度和厚度;用天平称重后将试件放置在 103℃ 的电热鼓风干燥箱中干燥至绝干,用天平再次称重;最后使用标准规定的计算公式计算竹条密度和含水率。

1.4.2 抗弯强度及抗弯弹性模量测试方法 抗弯强度 (MOR) 及抗弯弹性模量 (MOE) 的测试方法参照标准 GB/T15780-1995<sup>[15]</sup>。

(1) 试样规格:从 1<sup>#</sup>到 5<sup>#</sup>竹筒,分别依次截取抗弯强度和抗弯弹性模量各 30 个试样,试样尺寸为 160 mm×10 mm×t mm (t 为竹条厚度)。加工试件时避开竹节处及竹材缺陷。

(2) 试验过程:3 点弯曲试验在 INSTRON 5582 万能力学实验机上完成,使用 10 kN 载荷传感器,精度±10 N,简支梁式的 3 点弯曲加载方式,加载辊和支撑辊直径 20 mm,跨距 120 mm,载荷加载速度为 4 mm·min<sup>-1</sup>,室内温度 25℃,湿度 40%。抗弯强度由公式 (1) 计算得到:

$$\delta_{bw} = \frac{3P_{max}l}{2bh^2} \quad (1)$$

其中:  $\delta_{bw}$  为抗弯强度,MPa;  $P_{max}$  为最大破

坏载荷, N;  $l$  为 3 点弯支座间跨距, 120 mm;  $b$  为试件宽度, mm;  $h$  为试件厚度, mm。

抗弯弹性模量由公式 (2) 计算得到:

$$E_w = \frac{23Pl^3}{108bh^3f} \quad (2)$$

其中:  $E$  为抗弯弹性模量, MPa;  $P$  为上、下限载荷之差, N;  $l$  为两支座间跨距, mm;  $b$  为试样宽度, mm;  $h$  为试样高度, mm;  $f$  为上、下限荷载间的试样变形值, mm。

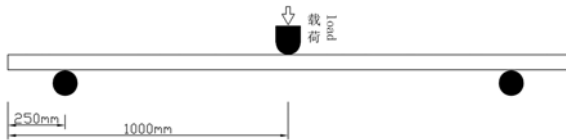


图 2 竹层板 3 点弯曲

Figure 2 Bamboo laminated board three point bending

**1.4.3 竹层板应力分级测试方法** 竹层板抗弯弹性模量(MOE)的测试方法参照标准 AITC 116-2004<sup>[16]</sup>进行, 竹层板 E-Rated 分级参照标准 AITC 117-2004<sup>[7]</sup>和 AITC Test T124-2007<sup>[17]</sup>进行。

(1) 试样规格: 从 1<sup>#</sup>到 5<sup>#</sup>竹层板, 每个编号 30 块层板, 试样尺寸为 2 000 mm(长)×90 mm(宽)×15 mm(厚)。

(2) 试验过程: 标准要求使用简支梁式 3 点弯曲的测试方法测试层板的 MOE 值, 测试 3 点弯曲跨距与层板厚度的比为 100, 层板简支梁跨距 1 500mm(图 2), MOE 计算公式由公式 3 计算得到。

$$E = \frac{Pl^3}{4\Delta bd^3} \quad (3)$$

其中:  $E$  竹层板抗弯弹性模量, GPa;  $P$  压头载荷之差, N;  $l$  两支座间跨距, mm;  $b$  层板宽度, mm;  $d$  层板高度, mm;  $\Delta$  不同荷载间的层板挠度之差, mm。

## 2 结果与分析

### 2.1 气干密度差异

竹材密度是竹材性质的重要指标之一, 一定程度上影响着竹材的物理力学性能, 同时竹材密度对其刨切表面质量有明显影响, 密度越大切剖面质量越好<sup>[18]</sup>。如图 3 所示, 从基部至梢部, 气干密度呈现增大趋势, 且中间部位 (3~9 m) 密度增大趋势较缓。影响气竹材气干密度纵向变化的主要原因是由于竹秆由基部到梢部竹壁单位横截面积内维管束分布个数逐渐增加<sup>[19]</sup>, 维管束横截面积逐渐缩小, 维管束密度增大, 导管孔径变细, 从而导致竹秆基

部到梢部密度逐渐增大<sup>[20]</sup>。

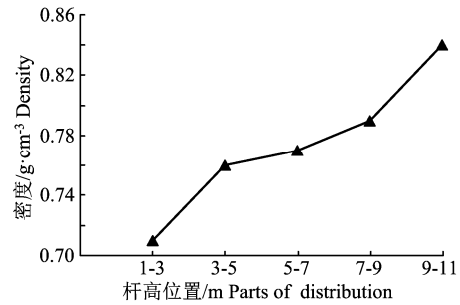


图 3 密度分布

Figure 3 The density distribution

### 2.2 抗弯性能差异

竹材力学性能是竹材加工利用的重要依据之一, 竹材力学性能的差异很大程度上影响着竹质工程材料的物理力学性能。如表 1 所示, 纵向上从基部到梢部, 壁厚随杆高的增加呈下降趋势, 密度、弦向抗弯强度和模量等随杆高的增加呈上升趋势。其中秆高 1~5 m 部位竹材的平均抗弯强度与抗弯弹性模量分别在 118.48 MPa 至 135.01 MPa, 6.52 GPa 至 7.67 GPa 之间; 秆高 5~9 m 部位竹材的平均抗弯强度与抗弯弹性模量分别在 163.43 MPa 至 166.24 MPa 之间, 9.86 GPa 至 10.75 GPa 之间; 秆高 9~11 m 部位竹材的平均抗弯强度与抗弯弹性模量分别为 175.55 MPa 和 12.25 GPa。图 4 也反映出秆高 1~5 m 部位竹材的弯曲性能接近, 5~9 m 部位竹材的弯曲性能接近及 9~11 m 部位竹材的抗弯性能高于其他部位。

### 2.3 层板应力分级

参照标准 AITC 117-2004<sup>[7]</sup>中对胶合木结构材分级的方法对胶合竹层板进行应力分级, 竹层板跨厚比为 100:1, 对层板中心加载点测得挠度后由公式 (3) 计算出层板 MOE 值, 取 95% 置信值, 依据标准 AITC Test T124-2007 中 Table T124-1<sup>[17]</sup>, 层板样本数量  $n=30$  时, 确定层板应力级别。表 2 前 2 列为标准中 Table T124-1 数值, 其中: 第 1 列数值为层板等级, 从最低 1.3E 级到最高 2.6E 级共 14 个级别; 第 2 列数值为样本数量  $n=30$  时, 各等级对应的层板抗弯弹性模量  $E$  值, 其中左列为标准对应值 (psi), 换算后得到右列值 (GPa)。将试验测得的层板 MOE 95% 置信值与标准中各等级对照, 得到 1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup> 胶合竹层板抗弯弹性模量分布于 E-Rated 对应级别。

胶合竹层板抗弯性能由基部至梢部逐渐增强 (见表 3), 其中 1<sup>#</sup> 层板性能最低, MOE 值分布于 1.3E 级别以下; 2<sup>#</sup> 层板也相对较低, MOE 值分布于

1.3E 级~1.4E 级之间; 3<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>层板性能接近, 高于 2<sup>#</sup>层板, MOE 值分布于 1.7E 级~1.8E 级之间; 5<sup>#</sup>层板性能最高, MOE 值分布于 2.4E 级~2.5E 级之间。不同杆高部位的竹材性能对胶合竹层板抗弯弹性模量有较大影响, 基部到梢部的胶合竹层板性能差异显著, 相对应 E-Rated 级别由低到高大致可分

为 4 个级别。对 1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>竹材材性与胶合竹层板 MOE 进行相关性分析, 图 4 (a) 反映出竹材 MOR 与胶合竹层板 MOE 呈线性相关, 相关系数 0.85, 图 4 (b) 反映出竹材 MOE 与胶合竹层板 MOE 也呈线性相关, 相关系数 0.94。

表 1 竹材及层板弯曲性能

Table 1 Bamboo properties and laminated board bending performance

秆高/m Parts	壁厚/mm Thickness	竹材性能 Bamboo properties			层板抗弯弹性模量/GPa MOE of laminated board
		密度/g·cm <sup>-3</sup> Density	抗弯强度/MPa MOR	抗弯弹性模量/GPa MOE	
1~3	9.66	0.71	118.48	6.52	7.85
3~5	8.41	0.76	135.01	7.67	8.92
5~7	7.13	0.77	163.43	9.86	11.93
7~9	6.17	0.79	166.24	10.75	12.22
9~11	5.23	0.84	175.55	12.25	16.55

表 2 长跨距 E-Rated 分级对照

Table 2 Classification of long span E-Rated test

等级 Grade	$E_{n=30}$		层板 MOE95%置信值/GPa MOE at 95% confidence level	层板编号 Number
	10 <sup>6</sup> psi	GPa		
2.6E	2.52	17.38	16.10	5#
2.5E	2.42	16.69		
2.4E	2.32	16.00		
2.3E	2.22	15.31		
2.2E	2.12	14.62		
2.1E	2.03	14.00	11.45~11.83	3#/4#
2.0E	1.93	13.31		
1.9E	1.83	12.62		
1.8E	1.73	11.93		
1.7E	1.63	11.24	8.63	2#
1.6E	1.53	10.55		
1.5E	1.43	9.86		
1.4E	1.33	9.17	7.49	1#
1.3E	1.23	8.48		
1.3E 以下		<8.48		

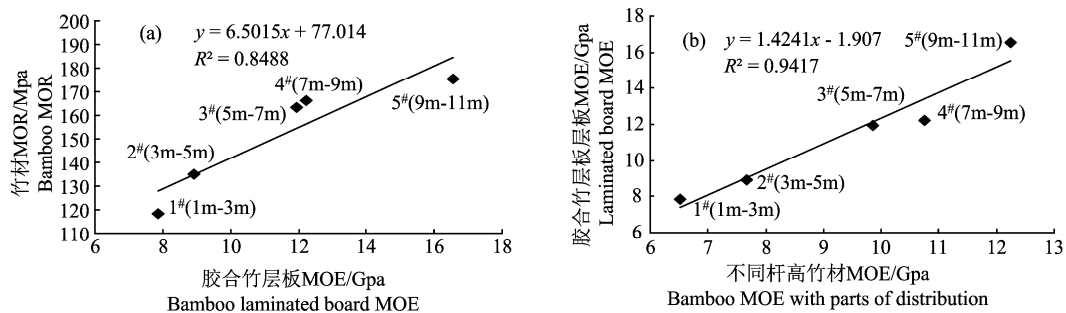


图 4 竹材材性与层板间关系

Figure 4 The relationship between bamboo properties and laminated board

综上所述,株内材性差异导致了不同部位竹材制备的胶合竹层板抗弯性能差异,这为按秆高分类

竹材,从而加工获得不同性能的竹层板提供了依据,具有实用意义。

表 3 胶合竹层板应力分级试验结果

Table 3 Result of E-Rated of bamboo laminated board

秆高/m Parts	跨厚比 Span-to- depth ratio	数量/块 Number of pieces	层板 MOE (GPa)			标准差 Standard deviation	95%置信值 MOE at 95% confidence level	层板应力级别 Grade
			最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	平均值 Mean value			
1~3	1 500:15	30	9.21	5.87	7.85	0.012	7.49	1.3 级以下
3~5	1 500:15	30	10.32	7.81	8.92	0.007	8.63	1.3~1.4 级
5~7	1 500:15	30	11.34	12.72	11.93	0.021	11.45	1.7~1.8 级
7~9	1 500:15	30	13.76	10.93	12.22	0.014	11.83	1.7~1.8 级
9~11	1 500:15	30	18.96	15.59	16.55	0.011	16.10	2.4~2.5 级

### 3 结论

毛竹气干密度从基部至梢部呈现增大趋势,秆高 3~9 m 处密度增大趋势较缓,气干密度值相近。

毛竹抗弯强度、抗弯弹性模量从基部至梢部呈现增大趋势,梢部弯曲性能最优,其中秆高 1~5 m 处性能接近,气干密度值相近,而秆高 5~9 m 处性能接近。

胶合竹层板长跨距抗弯弹性模量与竹材抗弯强度、抗弯弹性模量密切相关;基部到梢部的胶合竹层板性能差异显著,呈现由低到高趋势,相对应 E-Rated 级别大致可分为 4 个级别。

按秆高分类加工竹材,可获得不同性能等级的竹层板,从而为进一步生产性能均一稳定的胶合竹结构工程材料提供依据,具有实用意义。

### 参考文献:

- [1] WU Z Y, RAVEN P H, HONG D Y, et al. Flora of China: vol 22 [M]. Beijing: Science Press; St. Louis: Missouri Botanical Garden Press, 2006.
- [2] JIANG Z H. Bamboo and Rattan in the World [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007:2-7.
- [3] 江泽慧, 王戈, 费本华, 等. 竹木复合材料的研究及发展[J]. 林业科学研究, 2002, 15(6): 712-718.
- [4] 张齐生. 中国竹材工业化利用[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [5] 尹思慈. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- [6] LO T Y, CUI H Z, LEUNG H C. The effect of fiber density on strength capacity of bamboo[J]. Mater Lett, 2004, 58(21): 2595-2598.
- [7] AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION (AITC). Standard Specifications for Structural Glued Laminated Timber of Softwood Species, Design and Manufacturing: AITC117-2004[S]. AITC, Englewood, CO., 2004.
- [8] 任海青, 郭伟, 费本华, 等. 轻型木结构房屋用杉木规格材机械应力分等研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(3): 363-366.
- [9] 王朝晖, 任海青, 骆秀琴, 等. 落叶松规格材机械应力分等方法的研究[J]. 木材工业, 2009, 23(3): 1-4.
- [10] 陈国宁, 陈桂华, 孙正军, 等. 胶合竹层板的应力分级方法[J]. 木材加工机械, 2014, 25(3): 12-15.
- [11] 陈国宁. 胶合竹层板的制备及力学性能研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [12] 苏文会, 顾小平, 马灵飞, 等. 大木竹竹材力学性质的研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(5): 621-624.
- [13] 李光荣, 辜忠春, 李军章. 毛竹竹材物理力学性能研究[J]. 湖北林业科技, 2014, 43(5): 44-49.
- [14] QI J Q, XIE J L, HUANG X Y, et al. Influence of characteristic inhomogeneity of bamboo culm on mechanical properties of bamboo plywood: effect of culm height[J]. J Wood Sci, 2014, 60(6): 396-402.
- [15] 中华人民共和国林业部. 竹材物理力学性质试验方法:GB/T 15780-1995 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [16] AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION (AITC). Modulus of Elasticity of E-Rated Lumber by Static Loading: AITC 116-2004 [S] AITC, Englewood, CO., 2004.
- [17] AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION (AITC). Reinspection or Testing of Individual Lots of E-Rated Lumber for Conformance to Specifications: AITC Test T124-2007 [S]. AITC, Englewood, CO., 2007.
- [18] 杨永福, 李黎, 武丽清. 毛竹物理性质对刨切表面质量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(1): 133-136.
- [19] GROSSER D, LIESE W. On the anatomy of Asian bamboos, with special reference to their vascular bundles[J]. Wood Sci Technol, 1971, 5(4): 290-312.
- [20] 周覃一, 任海青, 李霞镇, 等. 毛竹材气干密度的变异研究[J]. 世界竹藤通讯, 2009, 7(4): 18-21.