

2 种造林方式的毛竹材质生成中微纤丝角的变化

杨淑敏, 江泽慧, 任海青, 费本华

(中国林业科学研究院 木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 应用 X-射线衍射法对实生苗和埋鞭 2 种造林方式的毛竹 *Phyllostachys pubescens* 各 3 个竹龄的竹材微纤丝角进行了测定分析, 所选竹材各个竹龄细胞次生壁微纤丝角的径向变异规律都呈现下降或波动趋势, 从竹青到竹黄存在显著差异。埋鞭和实生苗造林的竹材微纤丝角最大值分别为 12.05° 和 10.97°, 最小值分别为 7.67° 和 8.24°, 变化幅度均小于 5°; 其微纤丝角平均值分别为 9.41° 和 9.71°, 相差不大。2 种方式的竹材微纤丝角随竹龄增加未呈现一致的规律性变化, 竹龄对微纤丝角的影响显著。纵向微纤丝角从下到上没有明显规律, 埋鞭的竹材下、中和上部的平均微纤丝角分别为 9.64°, 9.25° 和 9.34°, 小于实生苗的分别为 9.73°, 9.82° 和 9.58°, 存在显著差异。探讨了不同造林方式获得的毛竹竹材的微纤丝角的时空变异规律, 为合理有效地开发竹资源提供科学依据。图 4 表 3 参 22

关键词: 林业工程; 毛竹; 造林方法; 微纤丝角; X-射线衍射

中图分类号: S781 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2010)02-0217-06

Variation of microfibril angle in developmental *Phyllostachys pubescens* culms by two forestation methods

YANG Shu-min, JIANG Ze-hui, REN Hai-qing, FEI Ben-hua

(Research Institute of Wood Industry, The Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: To provide a scientific basis for reasonable exploitation of bamboo resources, temporal and spatial variation patterns of the microfibril angle (MFA) in *Phyllostachys pubescens* (moso bamboo) were studied. Buried rhizomes (R) and seedlings (S) aged 30, 54, and 78 months were measured and analyzed by X-ray diffraction estimation. Results showed that when the distance ranged from bark to pith for all bamboo, MFA radial variation of secondary cell walls for the three ages decreased or had no pattern. The maximum MFA(R) was 12.05° and MFA(S) was 10.97° with the minimum of 7.67° [MFA (R)] and 8.24° [MFA (S)] for a difference of less than 5°. There was a significant difference between age and MFA ($P < 0.05$) but no regular pattern. No pattern for longitudinal variations of MFA with bamboo height were found with bamboo rhizomes having a base of 9.64°, a middle of 9.25°, and a top of 9.34°, significantly ($P < 0.05$) more than bamboo seedlings of 9.73° for the base, 9.82° for the middle, and 9.58° for the top. [Ch, 4 fig. 3 tab. 22 ref.]

Key words: forest engineering; *Phyllostachys pubescens*; method of forestation; microfibril angle; X-ray diffraction

微纤丝角(microfibril angle, MFA)为细胞次生壁 S_2 层微纤丝排列方向与细胞主轴所形成的夹角, 或可表述为细胞壁中纤维素链的螺旋卷索与纤维轴之间的夹角^[1-2]。微纤丝角大小对木材性质、纸张强度、纤维复合材料性能及纺织品强度均有很大的影响^[3-4], 是衡量木材性质的重要指标之一。传统

收稿日期: 2009-03-18; 修回日期: 2009-10-16

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目(2006BAD19B0403, 2008BADA9B0302)

作者简介: 杨淑敏, 博士, 从事木材解剖研究。E-mail: sm.yang@yahoo.com.cn。通信作者: 江泽慧, 教授, 首席专家, 从事林业工程研究。E-mail: shangke620@hotmail.com

测定微纤丝角的方法有碘染色法、汞浸渍法、偏光显微镜法、X-射线衍射法和荧光显微镜法等。X-射线衍射法测定的微纤丝角是大量数据的平均值,具有快速、准确、可信度高等优点,应用较广。近年来,对针阔叶树微纤丝角的变异规律及其与其他物理力学和化学特性的相关关系进行了大量研究,但对竹材的研究还比较少^[5-7]。毛竹 *Phyllostachys pubescens* 是中国南方重要的森林资源,据不完全统计,中国现有毛竹林面积达 300 万 hm^2 , 约占全世界竹林面积的 20%, 并且近年来栽植面积有不断扩大趋势^[8]。笔者选取了由实生苗和埋鞭育苗培育的毛竹的各 3 个竹龄的竹材,探讨毛竹微纤丝角的时空变异规律,从而揭示竹材生长发育规律及其结构形成与功能的相互关系,为合理有效地开发竹材资源提供科学依据。

1 实验材料和方法

1.1 试验区概况

庙山坞自然保护区(30°03' ~ 30°06'N, 119°56' ~ 120°02'E)位于中国亚热带北部的浙江省富阳市,属浙西低山丘陵区天目山系余脉,山体主脉呈东西走向,由主脉延伸的多呈南北向,支脉为本区主体,峡谷相间,谷向朝南,濒临富春江。海拔为 50.0 ~ 536.9 m, 土壤为长石砂岩或石英砂岩发育而成的红壤。气候属中亚热带季风气候,季风显著,四季分明,降水充沛,温暖湿润,水热资源丰富。区内气候温和,夏季炎热,冬少严寒;年平均气温 16.1 $^{\circ}\text{C}$, 极端最高气温 40.2 $^{\circ}\text{C}$, 极端最低气温 -14.4 $^{\circ}\text{C}$; 年平均降水量为 1 441.9 mm, 多集中于 5 - 6 月。其中黄公望森林公园森林面积为 333 hm^2 , 森林覆盖面积 96.5%, 是中国林业科学研究院亚热带林业研究所的竹木研究基地。

1.2 试验材料和方法

1.2.1 实验材料 实验材料为毛竹,采于 2007 年 9 月中旬。选择立地条件基本相同的地段,具有代表性的 30, 54 和 78 个月的 2 种造林方式的毛竹各 3 根,参考《GB/T 15780-1995 竹材物理力学性质试验方法》的试样采集方法。竹材伐倒后,记录胸径、枝下高和竹高,从离地面约 1.5 m 的整竹节处,向上每隔约 2.0 m 长完整竹节处的截取竹段,直至 7.5 m 处,运回气干以备试验。分别在不同竹龄的第 13 节,第 20 节和第 27 节的竹段截取 $T \times 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ (径向 \times 弦向 \times 纵向, T 为竹壁厚度)大小的竹块 3 块,然后沿径向从竹青到竹黄将竹块劈成大小为 $1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ (径向 \times 弦向 \times 纵向)的小样片待用。削制过程中要求测试面的光滑平整,并要使编号准确无误。

1.2.2 测定方法 采用 X-射线衍射法测定微纤丝角,测试仪器为美国 Panalytical 公司最新型号的粉末 X-射线衍射仪(X'Pertpro),样品用双面胶垂直固定在旋转样品台上,采用点聚焦光源,透射衍射模式。入射光路与试样弦面垂直,接收光路与入射光路的夹角为 22.6 $^{\circ}$ 。主要扫描参数如下:管电压 40 kV,管电流 40 mA,扫描步进 0.5 $^{\circ}$,样品台旋转范围 0 $^{\circ}$ ~ 360 $^{\circ}$ 。根据衍射图谱强度,采用 0.6T 法用高斯函数拟合并计算微纤丝角度。由于竹材较硬,纵向长于 20 mm 的小竹块在劈制小竹片时比较困难,所制样品 $1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 需要用硬质塑料制作模具,模具固定在样品台上,再将小竹片贴到模具上。分析时实生苗以竹龄前加“s”来区分埋鞭育苗,如:30 个月的竹材, s30 和 30 分别代表实生苗和埋鞭育苗。

1.2.3 分析方法 用 X-射线衍射仪法测定微纤丝角的计算方法有 M40 法、M50 法、函数法和 0.6T 法等 4 种。其中 M40 法和 M50 法都是经验方法。40%角受衍射弧高度(即衍射强度)的影响,而高度与辐射的微纤丝数目相应成比例。Yamato 的二次曲线法适用于 25 $^{\circ}$ 和 10 $^{\circ}$ 以下的微纤丝角。0.6T 法是考虑到微纤丝角很大变化范围内,衍射强度曲线侧边的斜度非常相似,认为确定弧的宽度应不考虑峰值,而仅利用外侧边缘。0.6T 法除具有一定理论基础外,在实际操作中还有其优越性。

笔者利用 0.6T 法计算竹材的微纤丝角,将 X-射线衍射仪所得的 Phi 扫描强度曲线(图 1)数据导入 Origin 处理软件,基于高斯函数拟合自动对 X-射线衍射谱进行 S-G 平滑,本底的测定与扣除,实现了微纤丝角的快速计算。

对于双峰拟合,拟合函数为:

$$y = a + b_1 \exp \left[\frac{-(x-u)^2}{2\sigma_1^2} \right] + b_2 \exp \left[\frac{-(x-u-180)^2}{2\sigma_2^2} \right] \quad [9]$$

其中： a 是常数， u 和 $u + 180$ 是峰值所对应的中心， σ_1 和 σ_2 是拐点高度处的半峰宽， b_1 和 b_2 时峰高，此时 $T = \sigma_1 + \sigma_2$ ， $M_{FA} = 0.6T$ ，对于单峰拟合， $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ ，则 $M_{FA} = 1.2\sigma$ ^[10]。毛竹典型的 Phi 扫描强度曲线及高斯函数拟合情况，通常拟合相关系数在 0.99 以上，通过拟合得到 σ_1 和 σ_2 然后计算出微纤丝角。

2 结果与分析

2.1 2 种苗型竹材微纤丝角的径向变异模式

从竹青到竹黄，按照 1 mm 厚取样测试后的微纤丝角径向变化趋势见图 2。2 种苗型的竹材微纤丝角的径向变异模式无明显差异。微纤丝角未呈现出明显的一致性规律，可以有如下趋势：①微纤丝角在靠近竹青处较小，随之增大，而后呈现逐渐下降趋势，直至竹黄处达到最小或竹黄处有所上升。②微纤丝角从竹青到竹黄呈下降趋势。③从竹黄到竹青微纤丝角呈无规律的波动趋势。方差分析结果表明(表 1)：竹壁径向不同位置的微纤丝角均有显著差异($\alpha = 0.01$)。

埋鞭育苗的竹材微纤丝角最大值和最小值分别为 12.05°和 7.67°，差值小于 4.39°。实生苗的竹材微纤丝角最大值和最小值分别为 10.97°和 8.24°，差值小于 2.72°。埋鞭育苗和实生苗造林得到的竹材的微纤丝角平均值分别为 9.41°和 9.71°，相差不大(表 2)。苗型对微纤丝角的影响不显著($\alpha = 0.05$)。

2.2 2 种苗型竹材微纤丝角的竹龄变异模式

微纤丝角随竹龄的变化趋势如图 3 和表 3。2 种苗型在竹材的上中下 3 个部位都是 30 个月的微纤丝角最大，78 个月的次之，54 个月的最小。2 种苗型同一竹龄间除 78 个月的成竹上部竹材的微纤丝角相差无几外，其他对比竹龄均是实生苗的竹材比埋鞭育苗的竹材的大。埋鞭育苗所得竹材的 30，54，78 个月的平均微纤丝角分别为 9.65°，9.11°和 9.47°，分别小于实生苗所得竹材相应 3 个竹

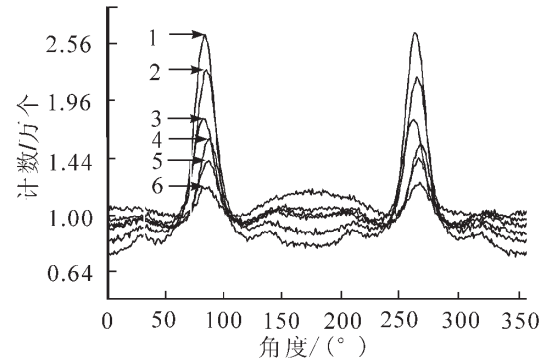


图 1 毛竹微纤丝角的 X-射线衍射图谱(1~6 顺序为竹青到竹黄)

Figure 1 X-ray diffraction pattern of microfibril angle for moso bamboo (b1-b6 from periphery to inner)

表 1 苗型，竹龄，位置对微纤丝角影响的方差分析

Table 1 Analysis of variance for microfibril angle by plantation type, age and position

差异源	离差平方和	自由度	方差	F 值	概率值 (Sig.)
苗型	0.242	1	0.242	2.219	0.14 ^{ns}
纵向高度	3.326	2	1.663	15.233	0**
径向位置	27.228	6	4.538	41.565	0**
竹龄	6.367	2	3.184	29.161	0**
误差	8.843	81	0.109		
总计	8 536.186	93			

说明：* 在 0.01 水平上显著相关，Sig.<0.01 差异显著，ns 无显著差异。

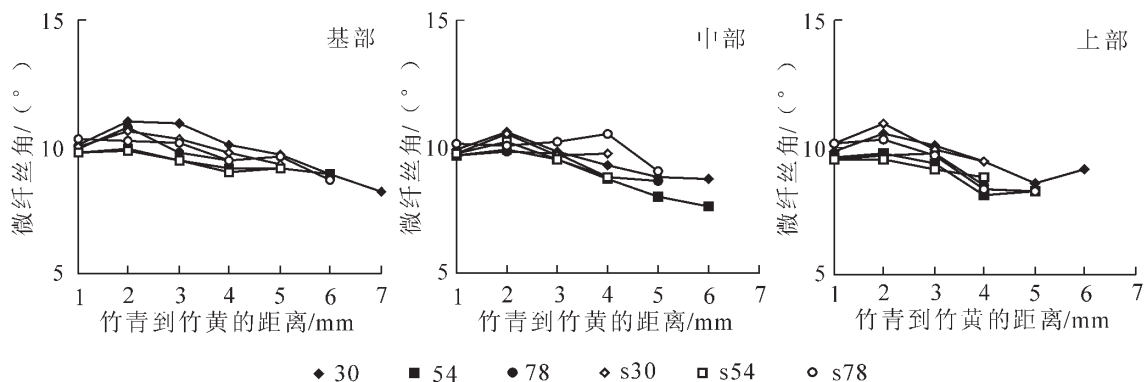


图 2 毛竹微纤丝角的径向变异

Figure 2 Radial variation of microfibril angle for moso bamboo

龄的微纤丝角 10.01°, 9.41°和 9.70°(表 3)。2 种苗型不同竹龄间的微纤丝角呈现明显差异(表 1)。

表 2 竹材微纤丝角比较表

Table 2 Variation of microfibril angle for moso bamboo

项目	埋鞭育苗竹材微纤丝角/(°)			实生苗竹材微纤丝角/(°)		
	30	54	78	s30	s54	s78
最大值	12.05	10.17	11.22	10.97	10.21	10.50
最小值	8.20	7.67	8.34	9.12	8.72	8.24
平均值	9.65	9.11	9.47	10.01	9.41	9.70
总平均值	9.41			9.71		

表 3 不同竹龄不同部位的竹材微纤丝角比较表

Table 3 Variation of microfibril angle in different ages and radial locations

部位	各竹龄微纤丝角平均值/(°)					
	30	54	78	s30	s54	s78
下部	9.84	9.40	9.69	10.00	9.44	9.75
中部	9.50	8.91	9.32	9.91	9.55	9.99
上部	9.61	9.04	9.38	10.14	9.26	9.35

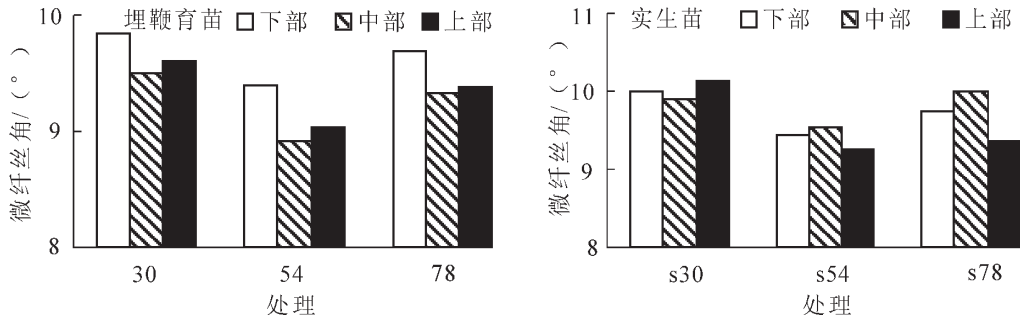


图 3 微纤丝角随竹龄变化趋势

Figure 3 Variation of microfibril angle in different age for moso bamboo

2.3 2 种苗型竹材微纤丝角的纵向变异模式

竹秆不同高度对微纤丝角的影响见图 4。竹秆不同高度埋鞭育苗竹材的微纤丝角均比实生苗的小。埋鞭育苗所得竹材下、中和上部的平均微纤丝角分别为 9.64°, 9.25°和 9.34°, 其中下部的平均微纤丝角较大, 上部次之, 中部最小; 实生苗所得竹材下、中和上部的平均微纤丝角分别为 9.73°, 9.82°和 9.58°, 其中中部的平均微纤丝角较大, 下部次之, 上部最小。经方差分析, 各个高度处的微纤丝角存在显著差异(表 1)。

3 讨论

木材微纤丝角与木材的物理力学性质紧密相关, 对木材的机械性能和尺寸稳定性具有重要影响, 与木材密度、纵向收缩率和弹性模量呈正相关, 与木材抗拉强度、抗撕裂强度和硬度呈负相关^[11-12]。并且微纤丝角也与木材的化学特性相关, 木素的含量随微纤丝角的降低而降低^[13]。微纤丝角在决定木材性质上有重要作用, 很多学者对其变异规律进行了研究。已经报道的有微纤丝角在种源、家系及无

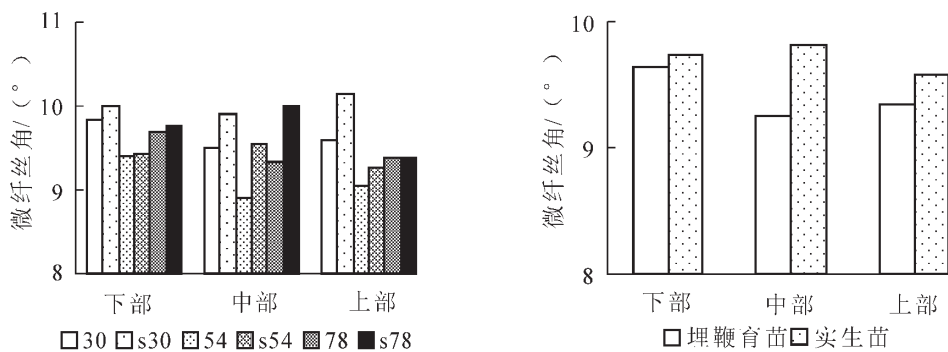


图 4 竹材微纤丝角随高度变异模式

Figure 4 Variation pattern of microfibril angle in different radial locations for moso bamboo

性系间的变异以及同一树种株间, 株内不同位置的变异规律, 并且立地条件和经营措施对微纤丝角的影响也有研究^[14]。

树木内的微纤丝角因树种的基因型和细胞形成时的外界条件不同而不同, 但以前所报道的树木木材微纤丝角的径向变异遵循如下规律: 微纤丝角在髓心处最大, 从髓心到形成层逐渐变小, 一般在 10 ~ 16 a 后达到稳定值^[15-19]。成熟材和早材的微纤丝角分别比幼龄材及晚材的要大^[13,16,20]。微纤丝角在单株树木中的纵向变异是随树高的增加而逐渐减小, 当达到一定的高度后微纤丝角达到较为稳定的值, 但在树木梢头部木材微纤丝角又有所增大^[15-17,21-22]。一般应压木比正常材在相同树干处木材微纤丝角要大^[16,20-21]。

在本研究中, 2 种造林方式的竹材微纤丝角随竹龄增加未呈现一致的规律性变化, 竹龄对微纤丝角的影响极显著。各个竹龄微纤丝角的径向变化为在靠近竹青处较小, 随之增大, 而后呈现逐渐下降趋势或回升; 从竹青到竹黄呈下降趋势或呈现波动趋势。纵向微纤丝角从下到上未有明显规律, 2 种造林方式, 埋鞭竹材的下部、中部和上部的平均微纤丝角分别为 9.64°, 9.25°和 9.34°, 小于相应部位的实生苗的 9.73°, 9.82°和 9.58°。各个高度处的微纤丝角存在显著差异。2 种造林方式竹材平均微纤丝角的变化幅度均小于 5°, 要比木材小得多。笔者对比测定了 2 种造林方式的竹材微纤丝角的变异规律, 还需和竹材环境因子、种源和干形等因子综合分析, 用此来评定微纤丝角对竹材其他物理、力学和化学特性等的影响。

参考文献:

- [1] 曹福亮. 林分密度对南方型杨树木材性质的影响[J]. 南京林业大学学报, 1994, **18** (2): 41 - 46.
CAO Fuliang. Effects of planting density on wood properties [J]. *J Nanjing For Univ*, 1994, **18** (2): 41 - 46.
- [2] WALKER J C F, BUTTERFIELD B G. The importance of microfibril angle to the processing industries [J]. *New Zealand J For Sci*, 1996, **40**: 34 - 40.
- [3] 孙成志, 尹思慈. 10 种国产针叶树材管胞次生壁纤丝角的测定[J]. 林业科学, 1980, **16** (4): 302 - 303.
SUN Chengzhi, YIN Sici. The study on S2 microfibril angle of tracheid for 10 native species [J]. *Sci Silv Sin*, 1980, **16** (4): 302 - 303.
- [4] JOHN F S, BENDTSEN B A. Measuring micro-fibrillar angles using light microscopy [J]. *Wood Sci*, 1980, **17** (4): 565 - 567.
- [5] 江泽慧, 邹惠渝, 阮锡根, 等. 应用 X-射线衍射技术研究竹材超微结构(I)竹材纤丝角[J]. 林业科学, 2000, **36** (3): 122 - 125.
JIANG Zehui, ZOU Huiyu, RUAN Xigen, *et al.* A study on the ultrastructure of bamboo cell wall by X-ray [J]. *Sci Silv Sin*, 2000, **36** (3): 122 - 125.
- [6] 王朝晖. 竹材材性变异规律与加工利用研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2001.
WANG Zhaohui. *The Study on Variability in Bamboo Timber Properties and Relationship with Its Processings* [D]. Beijing: The Chinese Academy of Forestry, 2001
- [7] 余雁, 王戈, 覃道春, 等. X-射线衍射法研究毛竹微纤丝角的变异规律[J]. 东北林业大学学报, 2007, **35** (8): 28 - 29, 51.
YU Yan, WANG Ge, QIN Daochun, *et al.* Variation in microfibril angle of moso bamboo by X-ray diffraction [J]. *J North-east For Univ*, 2007, **35** (8): 28 - 29, 51.
- [8] JIANG Zehui. *Bamboo and Rattan in the World* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007.
- [9] CAVE I D. X-ray measurement of microfibril angle [J]. *For Prod J*, 1966, **16** (10): 37 - 42
- [10] STUART S, EVANS R. X-ray diffraction estimation of the microfibril angle variation in eucalypt wood [J]. *Appita*, 1994, **48** (3): 197 - 200.
- [11] CAVE I D, WALKER J C F. Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: the influence of microfibril angle[J]. *For Prod J*, 1994, **44**: 43 - 48.
- [12] ARMSTRONG J P, KYANKA G H, THORPE J L. S2 fibril angle-elastic modulus relationship of TMP Scotch pine fibers [J]. *Wood Sci*, 1977, **10** (2): 72 - 80.
- [13] SAKA S. Relationship between microfibrillar angles and lignin content in the S2 layer of softwood tracheids [J]. *Cell Chem*

- Technol*, 1987, **21** (3): 225 – 231.
- [14] SHUPE T F, CHOONG E T, STOKKE D D, *et al.* Variation in cell dimensions and fibril angle for two fertilized even-aged loblolly pine plantations [J]. *Wood Fiber Sci*, 1996, **28** (2): 268 – 275.
- [15] MCMILLIN C W. Fibril angle of loblolly pine wood as related to specific gravity [J]. *Wood Sci Tech*, 1973, **2**: 166 – 176.
- [16] DONALDSON L A. Within- and between-tree variation in microfibril angle in *Pinus radiata* [J]. *New Zealand J For Sci*, 1992, **22** (1): 77 – 86.
- [17] DONALDSON L A. Variation in microfibril angle among three genetic group of *Pinus radiata* [J]. *New Zealand J For Sci*, 1993, **23** (1): 90 – 99.
- [18] LINDSTRÖM J W, EVANS H, VERILL S P. Influence of cambial age and growth conditions on microfibril angle in young Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] [J]. *Holzforschung*, 1998, **52**: 573 – 581.
- [19] BONHAM V A, BARNATT J R. Fibre length and microfibril angle in silver birch [J]. *Holzforschung*, 2001, **55**: 159 – 162.
- [20] DONALDSON L A. Effect of physiological age and site on microfibril angle in *Pinus radiata* [J]. *IAWA J*, 1996 (4): 421 – 429.
- [21] 阮锡根, 王婉华, 潘彪. 应力木纤丝角的研究 [J]. 林业科学, 1993, **29** (6): 534 – 536.
RUAN Xigen, WANG Wanhua, PAN Biao. Study of microfibril angles in reaction wood [J]. *Sci Silv Sin*, 1993, **29** (6): 534 – 536.
- [22] EVANS R, STRINGER S, KIBBLEWHITE R P. Variation of microfibril angle, density and fibre orientation in twenty-nine *Eucalyptus nitens* trees [J]. *Appita J*, 2000, **53**: 450 – 457.