

## 木材微纤丝角的测定方法及其进展

黄艳辉<sup>1</sup>, 赵荣军<sup>2</sup>, 费本华<sup>2\*</sup>, 余雁<sup>3</sup>, 张波<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 中国林业科学研究院 木材工业研究所, 北京 100091; 3. 国际竹藤网络中心, 北京 100102)

**摘要:** 本文首次较系统的介绍了木材微纤丝角的近 20 种测定方法, 并将其归为三类: 显微技术法、X 射线法和近红外光谱预测法。以 X 射线衍射法为重点, 在对各种方法进行仔细分析和优缺点对比的基础上, 总结出三类测定方法的特点: 显微技术法是获得微纤丝角微观信息不可替代的方法; X 射线法测定迅速、重现性好、代表性强, 特别适用于大量试样的变异研究; 近红外光谱预测法既适用于大量试样的变异分析, 又可实现模型共享和多组分快速预测。同时, 提出了改进和发展测定方法的建议。

**关键词:** 微纤丝角; 测定方法; 木材性质; X 射线衍射

**中图分类号:** S781.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-7461(2006)04-0184-05

## Measurement Methods and Development of Wood Microfibril Angle

HUANG Yan-hui<sup>1</sup>, ZHAO Rong-jun<sup>2</sup>, FEI Ben-hua<sup>2</sup>, YU Yan<sup>3</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>

(1. Institute of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&amp;F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China)

**Abstract:** This paper systematically introduced nearly twenty measurement methods of microfibril angle of wood, and divided them into three kinds: microscopic method, X-ray method and near infra-red spectroscopy estimating method. Advantages and shortcomings of all the methods were analyzed and compared with the emphasis of X-ray methods to gain the strongpoints of the three kinds: microscopic method was the only one for getting the micro-information of microfibril angle; X-ray method was rapid and repeatable, and its measurement results had good representativeness, so this method was suitable specially for variation research of the massive specimens; the near infra-red spectroscopy estimating method was also suitable for variation analysis, and it might realize model sharing and the multi-component fast forecast. Finally, the improvement and the development suggestions of measurement method were proposed.

**Key words:** microfibril angle; measurement method; timber property; X-ray diffraction

木材细胞壁的骨架物质是纤维素, 组成纤维素的基本单位是微纤丝。微纤丝与细胞主轴之间的夹角称为微纤丝角 (microfibril angle, MFA), 通常所说的微纤丝角是指木材细胞壁次生壁 S2 层纤维角。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<sup>[1,2]</sup>, 是衡量木材性质的重要指标之一。各国学者一直非常重视这方面的研究, 从国内外有关文献统计来看, 用到的测定方法就有 20 余种, 但是, 综合分析各种测定方法的文章至今未见报道。因此, 本文在前人研究的基

础上, 系统分析了木材微纤丝角的各种测量方法优缺点, 提出改进测定方法的建议, 对教学、科研和实际应用具有重要意义。

## 1 方法分类

测定微纤丝角的方法很多, 按照测试原理和测定仪器, 可以将它们归为三类: 显微技术法、x 射线法、近红外光谱预测法。

显微技术法是通过显微镜观测而得到木材微纤丝角的方法, 包括光学显微镜法<sup>[2]</sup>、电子显微镜法、

收稿日期: 2005-11-16 修回日期: 2005-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目“针叶材管胞的力学性质及其主要影响因子研究”(30371125)

作者简介: 黄艳辉(1982-), 女, 河南洛阳人, 硕士生, 西北农林科技大学机械与电子工程学院木材科学与技术专业。

\* 通讯作者: 费本华。

荧光显微镜法、共聚焦显微镜法<sup>[3]</sup>、荧光共聚焦显微镜法、双折射共聚焦显微镜法<sup>[4]</sup>、偏振光显微镜法<sup>[5]</sup>、偏振光共聚焦显微镜法等<sup>[4]</sup>。其中光学显微镜法又包括直接观察法、超声波检测法、碘结晶法<sup>[1,6]</sup>、软腐腔法<sup>[7,9]</sup>和离子染色法等。

X射线法是指X射线入射到取向的纤维晶体时,纤维晶胞的每个原子均散射X射线,当这些散射射线满足相干波的条件时就会在空间某处产生衍射线,研究衍射强度随试样旋转角度变化的曲线,通过曲线拟合和理论计算,就可得到试样的微纤丝角。它包括X射线衍射法(X-RAY Diffraction, XRD)<sup>[10-12]</sup>、小角X射线衍射法(Small-Angle X-RAY Scattering, SAXS)<sup>[11,12]</sup>、大角X射线衍射法(Wide-Angle X-RAY Scattering, WAXS)<sup>[11]</sup>、SilviScan(木材材性快速测定仪)测量法<sup>[13]</sup>。

近年来,人们尝试了一种测定微纤丝角的新方法——近红外光谱预测法<sup>[14,15]</sup>,它是将木材试样的微纤丝角测量值与采集的该试样的近红外光谱谱图一一对应,建立校正曲线模型,再利用此模型去预测其它未知试样的微纤丝角。

## 2 方法比较

### 2.1 显微技术法

2.1.1 光学显微镜法 光学显微镜法主要包括直接观察法、碘结晶法、软腐腔法和超声波检测法。

在光学显微镜下观察试样纵面或单根纤维与微纤丝的取向相一致的特征,如胞壁上的条纹、裂隙和纹孔等,从而间接得到微纤丝角的方法,就叫做直接观察法<sup>[10]</sup>。它是测量微纤丝角最为传统的方法,其优点是成本低廉,操作简单,测量较为迅速,但是,微纤丝的排列是三维的,而人们所观测的微纤丝角是二维平面上的,所以用显微镜观察到的并不是微纤丝角本身,又由于条纹、裂隙和纹孔的变异性很大,所以测得的微纤丝角往往偏大,且只能反映被测试样微观细部的微纤丝角,此外,该法还要求实验人员有丰富的经验。

碘结晶法是将木材微切片经脱木素处理后用碘化钾溶液染色,使其纤维间隙中填以碘的针状结晶,然后放在光学显微镜下观察,该碘结晶的长度方向,即指示微纤丝的排列方向<sup>[1]</sup>。虽然碘结晶法可以测定针叶材管胞次生壁各层的微纤丝角,且准确度很高,测定范围大,但是此方法对操作人员的经验要求较高,实验操作时间较长,获得碘结晶的成功率不高,不利于测定阔叶材的微纤丝角,被测试样的胞壁也易受化学处理的影响而易产生胀缩。碘结晶法一直是研究者测定纤丝角的一种常用方法:孙成志、李

坚、崔永志、黄寿先等都利用碘结晶法对杉木的微纤丝角进行了测定<sup>[1]</sup>;邱肇荣等利用碘结晶法对长白落叶松木材管胞微纤丝角的变异进行了研究<sup>[16]</sup>;刘一星等使用碘结晶法对火炬松的微纤丝角进行了测定,得出了管胞长度、管胞直径、管胞长宽比、微纤丝角、生长轮宽度、晚材率、胞壁率和生长轮密度等材性指标变异规律的数学模型<sup>[17]</sup>。有些学者还对原方法进行了改进,如方文彬利用碘、氢氧化钠的混合溶液处理试样切片,再用干燥法除去切片中水分,这样既节省了成本,又得到了好的实验结果<sup>[6]</sup>。

国外学者还利用一种生物性方法——软腐腔法——来测定微纤丝角,该法是利用软腐菌产生的贯穿于S2层的菌丝体,并且形成平行于微纤丝的特有的斜方空腔,在显微镜下观察斜方空腔的方向即可得到微纤丝角<sup>[7,9]</sup>。研究表明,此方法测定的微纤丝角范围大,能得到准确可靠的微纤丝角数值,但所需时间较长(至少需要一个月),而且不容易得到符合要求的软腐腔<sup>[7,9]</sup>。

超声波检测法克服了直接观察法分辨率低、变异性大的缺点,也克服了碘结晶法操作复杂、成功率低的缺点,它是将木材微切片经超声波处理2~4h,使细胞壁产生足够的裂隙或条纹,然后再放在光学显微镜下观察,裂隙或条纹的方向即为微纤丝的方向。该方法简单迅速,被认为是视觉观测微纤丝角最便利的一种方法<sup>[18]</sup>,但是,研究者发现,在超声波处理过程中会产生大量的纤维性颤动,导致裂隙或条纹模糊不清,以致无法分辨其方向,为了解决这个问题,Wang H H等对测定条件进行了改进:在5%钴盐和5%铜盐溶液存在的条件下,采用超声波技术测定微纤丝角,使该法成功地应用于测定某些特殊的针叶材树种,如具有明显螺旋加厚的海岸型花旗松,还可以测定某些阔叶材树种、非木质材料以及纸浆纤维的微纤丝角<sup>[18]</sup>。

2.1.2 其它显微镜法 电子显微镜法与光学显微镜法不同的是利用它可直接观察到微纤丝角<sup>[4]</sup>。荧光显微镜法、共聚焦显微镜法、荧光共聚焦显微镜法、双折射共聚焦显微镜法都是把显微镜与计算机联用,利用计算机的图像处理技术,把光学成像的分辨率提高30%~40%,从而能得到细胞或组织内部微细结构的荧光图像。共聚焦图像有高反差、高清晰度、定位准确的优点,克服了荧光显微镜照射面积大、层面不清、定位不准、图像质量易受光强弱、样品厚度影响的缺点。偏振光显微镜法是根据垂直入射的完全偏振光通过木材试样后会出现消光的原理,所得到的消光角即为微纤丝角<sup>[5,19]</sup>。偏振光显微镜法既可以测定针叶材的微纤丝角,也可以测定阔叶

材的微纤丝角,因而比较常用。汞浸法是将水银加压浸注到纤维胞腔中,再利用偏振光显微镜观察,从而得到微纤丝角<sup>[10]</sup>。这些方法都比较省时,得到的微纤丝角也很精确,但对仪器的性能要求较高,付出的实验成本较大<sup>[6]</sup>。

所有这些显微技术法都是直接或间接地得到试样微观细部的微纤丝角,因而它们是获得微纤丝角微观信息不可替代的方法,也是某些特定木材的微纤丝角测定的唯一方法<sup>[4]</sup>。

## 2.2 X 射线法

自 20 世纪 60 年代,就开始利用 X 射线测定纤维类材料的微纤丝角,使用 X 射线的测定方法比较多,主要有 X 射线衍射法(XRD)、小角 X 射线衍射法(SAXS)与大角 X 射线衍射法(WAXS),它们的原理是相同的<sup>[11,12]</sup>,其不同点表现为:X 射线的传播模式不同、检测器与试样间的距离不同、所得的衍射图不同。对于 XRD,X 射线的传播模式可以是对称传播(入射与散射的 X 射线与试样平面的垂线成一相同的角度 THETA),也可以是垂直传播(入射的 X 射线与试样平面垂直,散射的 X 射线与试样平面的垂线成一角度 2THETA),检测器与试样间的距离很近,其衍射强度图是非均匀的衍射环;对于 SAXS,X 射线的传播模式是垂直传播,检测器与试样间的距离较远,其衍射强度图是非均匀的衍射面;而 WAXS,X 射线的传播模式是对称传播,检测器与试样间的距离较远,其衍射强度图是非均匀的衍射环。为了对比这几种测定方法,Andersson S 等分别利用小角 X 射线衍射法、大角 X 射线衍射法和偏光显微镜法测量了挪威云杉中的微纤丝角,结果表明,三种方法得到的微纤丝角数值一致<sup>[11]</sup>。Saren M 等认为垂直与对称两种模式下的 XRD 法与 SAXS 法所得到的微纤丝角数值是极其接近的,但是,在髓心附近,采用对称传播模式的 XRD 法比 SAXS 法所得到的微纤丝角数值稍小<sup>[12]</sup>。阮锡根等还把 X 射线衍射法与碘结晶法的测定结果作了比较,结果表明,X 射线衍射法测得的微纤丝角较其它方法显著可靠,比碘结晶法稍小<sup>[10]</sup>。

X 射线衍射法是四种 X 射线法中最常用的方法,该法操作简易迅速,无需对试样作任何预处理,测定一个试样只需几分钟,得到的微纤丝角数值是成千上万个细胞的平均值,因此极具代表性,又由于可重复性强,故特别适用于大量试样微纤丝角的变异研究<sup>[20-26]</sup>;另外,在配有计算机的 X 射线衍射仪上,可以随时观察衍射强度曲线,及时调整扫描时间和放样角度,得到完整平滑的衍射强度曲线和相关的曲线参数,并能将其自动保存。但 X 射线衍射法

仍需用碘染色法来校核,且不同树种误差也较大<sup>[10]</sup>,另外,作者和其他研究者还发现,在微纤丝角过大的近髓心区域内,试样的衍射强度随其旋转角度变化的峰曲线往往出现平峰甚至凹峰,这种现象会对理论计算造成很大困难,影响微纤丝角的测定值,导致测定的髓心区域的微纤丝角准确度较低<sup>[8]</sup>。Meylan B 最早提出了从(002)面衍射弧的分布来估计微纤丝角的方法,Stuart S 等又从理论上作了进一步解释<sup>[27]</sup>,诸多研究也表明该面的衍射强度最高,所以通常都采用(002)面的衍射强度曲线来求平均微纤丝角,其计算方法有 0.4T 法、0.5T 法、函数法和 0.6T 法四种<sup>[10]</sup>。在这几种方法中,0.4T 法所测得的数据和其它实验数据较一致,而作为经验法被采用;0.6T 法是考虑到微纤丝角大的变化范围与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:当微纤丝角小于 20 度时,0.4T 法的测定值与用碘结晶法测定的结果比较一致;当超过这一角度时,差异不断增加,而 0.6T 法则在此时测得的值较为精确<sup>[10]</sup>。随着研究的深入,Cave I D 对 X 射线衍射法进行了改良,Yamamoto H<sup>[28]</sup>等使用改良后的方法对两种阔叶树和两种针叶树的大范围微纤丝角进行了测定,指出该法比碘染色法更为精确。

目前,X 射线衍射法备受研究者推崇,仅国内利用该法测定微纤丝角的文章就有几十篇:费本华<sup>[20,21]</sup>、江泽慧<sup>[22]</sup>、任海青<sup>[23]</sup>、杨文忠<sup>[24]</sup>、李火根<sup>[25]</sup>等利用此法分别对银杏与铜钱树、杨树、三角枫、杨树、美洲黑杨的微纤丝角进行了测定,得到了微纤丝角变异规律以及同其它木材性质之间的关系;江泽慧、邹惠渝等利用此法发现了竹材中微纤丝角的变异规律<sup>[26]</sup>;作者使用具有高能检测器的 X 射线衍射仪 XPERTPRO 对杉木和马尾松的微纤丝角进行了测量(设定扫描一个试样的时间为 3 min,试样旋转角度为 360 度),获得了很平滑的衍射强度曲线,并利用自编的峰处理软件(该软件可利用 0.4T 或 0.5T 法自动对峰进行拟合,并在几秒钟内计算出微纤丝角数值)得到了微纤丝角数值,结果与其它研究者相一致<sup>[1,5,10]</sup>。

SilviScan 是澳大利亚联邦科学工业研究院林业与林产品研究所研发的一种木材材性快速测定仪,它也是利用 X 射线衍射的原理测量生长锥中径切面不同位置的平均微纤丝角,实现木材微纤丝角的无损快速测定;另外,SilviScan 上安装有 CCD 显微镜,从而更有利于在精确位置测定微纤丝角。同时,SilviScan 可以直接测量木材密度、木材细胞直径、纤

纤维素结晶宽度,还可以间接推算幼龄材界限、纤维粗糙度、弹性模量等。现在,SilviScan已被应用于材性预测、锯材加工及质量评估、纸浆造纸、复合材料等领域。在微纤丝角研究方面,Laurence R S等提出将SilviScan法与近红外光谱预测法联用能使测定结果更为精确<sup>[29]</sup>。Yang J L, Evans R则利用SilviScan法测定了桉树的微纤丝角和密度,再用微纤丝角和密度预测弹性模量,结果发现,微纤丝角变化可以说明87%的弹性模量变化,微纤丝角和密度的变化可以说明92%的弹性模量变化<sup>[30]</sup>。

综上所述,X射线法快速简便,重现性好,代表性强,且对试样的要求低,不需对试样作任何预处理,只要具备一套专用的仪器设备就可以进行测量,因此它特别适用于大量试样微纤丝角的变异研究<sup>[20-26]</sup>。但是,由于所测得的微纤丝角是整个试样各个壁层微纤丝角的平均值,所以在应用上仍受到一定程度的限制,不能像显微技术法一样进行局部微观微纤丝角的测定<sup>[10]</sup>。

### 2.3 近红外光谱预测法

近红外光谱预测法最近才被应用到木材领域,它最突出的优点是:如果建立的模型具有一定的代表性,且准确可信,就可在短时间内预测成千上万个样品,还可以实现模型共享。因为采集试样的光谱只需几秒钟,所以它与X射线法一样特别适用于大数量试样的变异分析;此外,该法属于典型的无损在线检测,试样无需特殊的预处理,测试效果重现性好,还可实现多组分快速预测,例如有些研究者用一次扫描的光谱与已建立的微纤丝角、抗弯强度、抗拉强度等数据模型同时预测这些材性指标<sup>[14]</sup>。与其他模型预测法一样,它的缺点是必须利用其它方法得到准确的微纤丝角真值,而且需要大量的具有统计意义的角度范围大的微纤丝角真值来支撑模型,另外,它不能进行局部微观微纤丝角的测定。

Laurence等用该法预测了辐射松生长锥的微纤丝角,采用由7个主成分得到的微纤丝角校准曲线对参与建模的试样进行了预测,得到的微纤丝角值与SilviScan-2测定的微纤丝角真值有很好的相关性( $R^2=0.95$ );同时,用校准曲线预测了两个生长锥的微纤丝角,结果与SilviScan-2测得的微纤丝角相一致( $R^2=0.98$ )。陆文达利用近红外光谱(NIR)对混合树种木材的密度、纵向弹性模量和微纤丝角进行了研究,结果表明,密度和纵向弹性模量所得到的校准曲线具有很高的决定系数( $R^2$ )<sup>[31]</sup>,微纤丝角次之。

## 3 建议与展望

测定微纤丝角的方法很多,最常用的是显微技

术法中的碘结晶法和偏振光显微镜法、X射线法中的X射线衍射法。碘结晶法适合于测定针叶材管胞的微纤丝角,测定角度范围大,试验成本低;偏振光显微镜法既可以测定针叶材也可以测定阔叶材的微纤丝角,还可以与碘结晶法联用;X射线衍射法快速,重现性好,适合于大量试样微纤丝角变异规律的研究。近红外光谱预测法虽然在木材领域里刚刚起步,但是其模型资源共享、多组分快速预测的突出优点是其他方法无法与之相比的。

各种方法都有各自的优点,但是都不可避免的存在着一些缺陷,如利用X射线衍射法测定髓心部位的大角度微纤丝角时会出现平峰或凹峰,给峰曲线拟合和理论计算造成很大困难,所以,微纤丝角的测定方法还需要不断地改进和发展,结合作者自己的理解给出以下建议:对已有的测定方法进行改进和完善,可以是试样本身的改进,也可以是测定条件的改进,Cave I D等采用(002)和(040)两个晶面反射的联合分析来测定整个细胞壁平面微纤丝角的分布及细胞壁横切面的形态<sup>[32]</sup>;两种或两种以上的方法联合使用,模型预测法就是利用其它方法得到微纤丝角真值,再利用近红外仪进行预测;尝试利用本行业或相关行业的其它仪器来测量微纤丝角,研究与木材相关的行业如造纸、纺织等行业的测定方法对我们会有极大的启发<sup>[33]</sup>。

总之,研究者必须根据自己的研究目的及科研条件来选择合适的测定方法,得到快速准确的微纤丝角数值。

### 参考文献:

- [1] 孙成志,尹思慈.十种国产针叶材管胞次生壁纤维角的测定[J].林业科学,1980,16(4):302-303.
- [2] Senft J F, Bendtsen B A. Measuring micro-fibrillar angles using light microscopy[J]. Wood and Fiber Sci,1985,17(4):564-567.
- [3] Batchelor W J, Conn A B, Parker I H. Measuring the fibril angle of fibres using confocal microscopy[J]. Appita, 1997,50(5):377-380.
- [4] Huang C-L, Kutscha N P, Leaf G J, et al. Comparison of microfibril angle measurement techniques[A]. Butterfield B G, Microfibril Angle in Wood[C]. Westport, New Zealand: Printed by the University of Canterbury, 1997. 177-204.
- [5] 尹思慈,阮锡根,孙成志,等.应用偏光显微镜测定马尾松木材次生壁的微纤丝角[J].林业科学,1986,22(2):209-212.
- [6] 方文彬.用碘结晶法测量针叶材的微纤丝角[J].中南林学院学报,1995,15(2):151-154.
- [7] Anagnost S E, Mark R E, Hanna R B. Utilization of soft-rot cavity orientation for the determination of microfibril angle. Part1[J]. Wood Fiber Sci,2000,32(1):81-87.
- [8] Brandstrom J, Daniel G, Nilsson T. Use of soft rot cavities to determine microfibril angles in wood; Advantages, Disadvantages

- and Possibilities[J]. *Holzforchung*,2002,56(5):468-472.
- [9] Khalili S, Nilsson T, Daniel G. The use of soft rot fungi for determining the microfibril orientation in the S2 layer of pine tracheids [J]. *Holz Roh-Werkst*, 2001,58(6): 439-447.
- [10] 阮锡根,尹思慈,孙成志. 应用 X 射线衍射--(002) 衍射弧法--测定木材纤维次生壁的微纤丝角[J]. *林业科学*,1982,18(1): 64-70.
- [11] Andersson S, Serimma R, Torkkeli M, et al. microfibril angle of norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] compression wood: comparison of measuring techniques [J]. *The Japan Wood Research Society*, 2000, 46: 343-349.
- [12] Saren M, Serimma R, Andersson S, et al. Effect of growth rate on mean microfibril angle and cross-section shape of tracheids of norway spruce[J]. *Trees*,2004,18:354-362.
- [13] Xu P, Lloyd D, Walker J, et al. Effects of density and microfibril angle of low-stiffness wood in radiate pine butt logs[J]. *Holzforchung*, 2004, 58: 673 - 677.
- [14] 王志玲,王正,王元秀,矫强. 现代近红外光谱技术--人造板性能无损检测的新方法[J]. *世界林业研究*,2004,17(6):22-24.
- [15] Laurence R S, Evans R, Matheson A C. Estimation of Pinus radiata D. Don clear wood properties by near-infrared spectroscopy [J]. *J Wood Sci*,2002,48:132-137.
- [16] 邱肇荣,刘君良,张士诚. 长白落叶松木材管胞微纤丝角的变异研究[J]. *吉林林学院学报*,1996,12(3):152-155.
- [17] 刘一星,吴玉章,李坚. 火炬松木材材性变异规律[J]. *东北林业大学学报*,1999,27(5):29-34.
- [18] Wang H H, Drummond J G, Reath S M, et al. An improved fibril angle measurement method for wood fibres [J]. *Wood Sci and Technol*,2001,34(6):493-503.
- [19] 肖绍琼,木乔英. 云南杉木纤维胞壁纤丝角的研究[J]. *西南林学院学报*,1992,12(2):221-224.
- [20] 费本华,江泽慧,阮锡根. 银杏微纤丝角及其与生长轮密度相关模型的建立[J]. *木材工业*,2000,14(3):13-15.
- [21] 费本华. X 射线衍射法测定铜钱树木材微纤丝角及其变异的研究[J]. *安徽农业大学学报*,1995,22(3):262-265.
- [22] 江泽慧,费本华,长江滩地不同品系杨树木材纤维形态、微纤丝角和结晶度变异研究[J]. *安徽农学院学报*,1992,19(4): 255 - 262.
- [23] 任海青. 三角枫木材细胞组织比量及微纤丝角径向变异研究[J]. *安徽农业大学学报*,1997,24(1):14-17.
- [24] 杨文忠,方升佐. 杨树无性系微纤丝角的时空变异变异模式[J]. *东北林业大学学报*,2004,32(1):25-28.
- [25] 李火根,黄敏仁,阮锡根. 美洲黑杨新无性系木材细胞次生壁 S2 层微纤丝角株内变异的初步研究[J]. *西北林学院学报*,1997,12(1):61-65.
- [26] 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 1. 竹材纤丝角[J]. *林业科学*,2000,36(3):122-125.
- [27] Stuart S, Evans R. X-ray diffraction estimation of the microfibril angle variation in Eucalypt wood[J]. *Appita*, 1995, 48 (3) : 197 - 200.
- [28] Yamamoto H, Okuyama T, Yashida M. Method of determining the mean microfibril angle of wood over a wide range by the improved Cave's method[J]. *J Wood Res Soc*, 1993, 39(4) : 375 - 381.
- [29] Laurence R S, Evans R. Estimation of microfibril angle of increment cores by near infrared spectroscopy[J]. *IAWA*, 2002,23(2):225-234.
- [30] Yang J L, Evans R. Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density [J]. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 2003,61:449-452.
- [31] 陆文达. 近红外光谱(NIR)应用于密度和刚度变异宽广的多样性树种木材[J]. *国际木业*,2002,32(12):32-32.
- [32] Cave I D. Theory of X-ray measurement of microfibril angle in wood[J]. *Wood Sci and Technol*,1997,31(4):225-234.
- [33] 江泽慧,李坚,尹思慈,等. 中国木材科学的近期发展[J]. *四川农业大学学报*,1998,16(1):1-43.

## 更正

本人在第 3 期“罗布麻总黄酮含量的研究”一文中,因疏忽出现错误,特更正如下:

在第 115 页左栏第 6 行中“用水稀释至刻度,摇匀放置 20 min”应删除。

左栏第 13 行中“2. 2. 1”改为“1. 2. 2”。

左栏第 30 行,即最后一行中“24 倍”更正为“2. 4 倍”,右栏第 2 行中“50 倍”更正为“5. 0 倍”。

向读者致歉。