

引种美国红橡的纤维形态、微纤丝角及结晶度

李聪聪¹, 潘彪¹, 王慧¹, 黄利斌²

(1. 南京林业大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 江苏省林业科学研究院, 江苏 南京 211153)

摘要:【目的】为引种栎木的科学利用提供理论依据。【方法】以 14 年生美国红橡纳塔栎 *Quercus nuttallii*、水栎 *Quercus nigra*、舒玛栎 *Quercus shumardii* 为对象, 采用富兰克林解离法及 X-射线衍射法(XRD)研究其纤维形态、微纤丝角及结晶度, 并对数据进行方差分析及回归分析。【结果】3 种美国红橡纤维长度分别为 1 172.14、1 178.68 和 1 162.45 μm , 纤维宽度分别为 15.86、16.56 和 16.91 μm , 种间差异均不显著($P>0.05$); 双壁厚度分别为 10.23、11.19 和 10.96 μm , 壁腔比分别为 1.85、2.10 和 1.91, 种间差异均显著($P<0.05$); 3 种美国红橡的微纤丝角分别为 33.79°、30.48°和 34.10°, 结晶度分别为 51.35%、53.30%和 52.97%, 种间均具有极显著差异($P<0.01$)。3 种美国红橡纤维长度、宽度、双壁厚、壁腔比以及结晶度均随生长轮的增加呈增长趋势, 微纤丝角随生长轮的增加呈下降趋势, 并且年轮间存在着一定的波动。【结论】14 年生纳塔栎、水栎和舒玛栎纤维尺寸、微纤丝角、结晶度径向变化尚未稳定, 仍处于幼龄期。纤维长度、宽度、双壁厚及微纤丝角与生长轮有较好的拟合关系。图 3 表 2 参 21

关键词: 木材科学与技术; 美国红橡; 纤维形态; 微纤丝角; 结晶度

中图分类号: S781.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2020)01-0158-07

Fiber morphology, microfibril angle and crystallinity of American red oak introduced

LI Congcong¹, PAN Biao¹, WANG Hui¹, HUANG Libin²

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] Measuring and analyzing the fiber morphology, microfibril angle and crystallinity can provide a theoretical basis for its quality prediction and utilization. [Method] Taking 14-year-old *Quercus nuttallii*, *Q. nigra* and *Q. shumardii* as the research object, with the maceration method and X-ray diffractometer (XRD) employed, a study is conducted of their fiber morphology, microfibril angle and crystallinity with a regression and variance analysis made of the data. [Result] (1) The fiber lengths of the three species of oak are 1 172.14, 1 178.68 and 1 162.45 μm , the fiber widths of the three species of oak are 15.86, 16.56 and 16.91 μm with no significant differences among species ($P>0.05$). The double-wall thickness of three species of oak are 10.23, 11.19 and 10.96 μm , and the wall thickness-lumen diameter ratios of the three species of oak are 1.85, 2.10 and 1.91 with significant differences among species ($P<0.05$). The microfibril angles of three species of oak are 33.79°, 30.48° and 34.10° and the crystallinities of the three oak species are 51.35%, 53.30% and 52.97% with extremely significant differences among species ($P<0.01$). (2) The fiber length, the fiber width, the double-wall thickness, the wall thickness-lumen diameter ratio and the crystallinity of three species of oak displayed an ascending trend from pith to bark. The microfibril angle displayed a descending trend from pith to bark with some fluctuations between the rings. [Conclusion] The radial change of the fiber morphology, the mi-

收稿日期: 2019-03-14; 修回日期: 2019-06-20

基金项目: 江苏省科技计划项目(BE2015370)

作者简介: 李聪聪, 从事木材解剖研究。E-mail: 976940379@qq.com。通信作者: 潘彪, 教授, 从事木材材性改良及木材解剖研究。E-mail: panbiao@njfu.edu.cn

crofibril angle and the crystallinity of 14-years-old *Q. nuttallii*, *Q. nigra* and *Q. shumardii* was not stable but stayed in the juvenile stage. Also, the fiber length, fiber width, double wall thickness and microfibril angle demonstrate favorable fitting with growth rings. [Ch, 3 fig. 2 tab. 21 ref.]

Key words: wood science and technology; American red oak; fiber morphology; microfibril angle; crystallinity

木材作为环境友好型的绿色原材料，是国民经济发展的基础材料。为坚持生态发展战略，中国林业相关部门启动了一批重点生态工程，在天然林保护的同时，大力发展人工林种植。随着国内民众生态意识的增强和国家森林保护力度的加大，木材刚性需求增加，木材的对外依赖度达到了近 50%。据测算，到 2020 年，中国木材年需求量将达到 8 亿 m³，对大径材和珍贵树种用材需求也会大幅增加^[1]。引进国外优良树种是提高林业生产力、填补国内名特优新经济林、满足人们对林产品需求的有效途径，对于在短期内实现有效供给、缓解木材及林产品的供需矛盾，实现可持续发展，具有十分重要的意义。中国土壤气候条件与北美相似，引种美国红橡树种具有得天独厚的优势。引种树种能在短时间内增加当地的植物种类，树种的合理布局和应用，对弥补优质用材资源不足有重要意义。橡树又称栎树，是壳斗科 Fagaceae 栎属 *Quercus* 树种的统称，用途广泛，材质优异，是优质商品材和燃料的重要来源^[2]。中国自 1998 年开展北美栎树种质资源引种与栽培研究，对引种试验、引种树苗抗逆性^[3]研究较多，为栎类树种引进开发利用提供了理论基础。纤维形态特征与木材生长状况以及强度、密度以及物理、力学性质有密切关系，可用来进行木材的材性预测。微纤丝角在一定程度上可以反映木材的物理和力学性质，如木材的尺寸稳定性、干缩湿胀及弹性模量、强度和蠕变特性等，是评价木材品质性能和良种选育的重要依据^[4]。木材的结晶度与木材密度、强度、尺寸稳定性存在着正相关关系^[5]，研究结晶度有助于了解木材解剖结构与其性质之间联系。本研究以纳塔栎 *Quercus nuttallii*、水栎 *Quercus nigra* 和舒玛栎 *Quercus shumardii* 为对象，比较了 3 种美国红橡纤维形态、微纤丝角和结晶度的异同，以期为引种栎木的科学利用提供理论依据，为更大范围引种栽培提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

根据 GB/T 1927-2009《木材物理力学试材采集方法》采集试样^[6]。选取 14 年生纳塔栎、水栎、舒玛栎各 4 株；其中纳塔栎、水栎采自江苏省林业科学研究院句容苗圃(年平均气温为 15.2 ℃，年降水量为 1 058.8 mm)。纳塔栎平均树高为 8.48 m，平均胸径为 19.28 cm；水栎平均树高为 10.68 m，平均胸径为 15.38 cm；舒玛栎采自于南京彩树种植有限公司江宁区种植基地(年平均气温为 15.4 ℃，年降水量为 1 200.0 mm)，平均树高为 11.70 m，平均胸径为 15.20 cm。

1.2 实验方法

1.2.1 木材纤维形态测定 将样木自胸高处圆盘锯解，立即沿南北向自髓心向外逐年切取样块并依次编号，由于第 1，2 年轮宽度较窄，合并为 1 个样品。将各标号木块切成火柴棍大小，每个年轮制 4 组平行样。用富兰克林离析法^[7]离析细胞，制成临时切片，置于普通光学显微镜下；随机测量 50 个细胞长度、宽度和腔径，计算双壁厚、壁腔比。结果取平均数。

1.2.2 木材微纤丝角测定 将 3 种样木按 1.2.1 制成厚度约为 2 mm 的试样，采用 Ultima IV 组合型多功能水平 X-射线衍射仪(XRD)按 Cave 0.6T 法^[8]测量试材微纤丝角。结果取平均数。

1.2.3 木材结晶度测定 将 3 种样木按 1.2.1 制成火柴棍大小试样，磨成 80~100 目木粉，室温下压成薄片后测定木材结晶度，同时分析木材 2θ 衍射强度曲线。计算结果取平均数。木材纤维的衍射强度在 $2\theta=22^\circ$ 是极大值，其积分强度用 I_{002} 表示；在 $2\theta=18^\circ$ 附近出现波谷，是木材纤维中无定形区衍射的散射强度，其积分强度用 I_{am} 表示。相对结晶度(I_{cr})公式^[9]如下： $I_{cr}=100\times(I_{002}-I_{am})/I_{002}$ 。

1.2.4 数据处理 试验数据采用 Excel 2013 进行方差分析及回归分析，Origin 软件作图。

2 结果与分析

2.1 纤维形态

由表1可知：纳塔栎纤维长度径向变化范围为1 032.46~1 255.46 μm ，平均值为(1 172.14 $\pm$ 86.88) μm ；水栎纤维长度径向变化范围为1 018.04~1 281.27 μm ，平均值为(1 178.68 $\pm$ 95.54) μm ；舒玛栎纤维长度径向变化范围为1 010.34~1 292.56 μm ，平均值为(1 162.45 $\pm$ 112.67) μm 。其中，舒玛栎的平均纤维长度最短，纳塔栎和水栎之间差异较小，三者栎木纤维长度种间不具有显著差异($P>0.05$)。按照国际木材解剖学家协会理事会发布的纤维长度分级标准(<0.9 mm 的属于短纤维，0.9~1.6 mm 的属于中等纤维，>1.6 mm 的属于长纤维)，3种栎木纤维均属于中等纤维，大于62年生蒙古栎 *Q. mongolica* 纤维平均长度(1 001.20 μm)^[10]，与40年生欧洲栓皮栎 *Q. suber*(960.00~1 220.00 μm)^[11]、33年生冬青栎 *Q. ilex*(1 103.00 μm)及24年生深红栎 *Q. coccifera* 纤维平均长度(1 116.00 μm)相近^[12]。由图1A可见：3种栎木纤维长度从髓心至树皮方向总体呈上升趋势，但径向变化尚未趋于稳定，说明树木仍处于幼龄期。

3种栎木纤维宽度为14.14~18.51 μm ，舒玛栎纤维宽度最大(16.91 $\mu\text{m}\pm$ 1.20 μm)，水栎(16.56 $\mu\text{m}\pm$ 0.70 μm)和纳塔栎(15.86 $\mu\text{m}\pm$ 1.11 μm)略小，变异系数均小于10%，变异较小。纤维宽度种间差异不显著($P>0.05$)。3种栎木纤维宽度均小于40年生欧洲栓皮栎(18.40~21.49 μm)。由图1B可知：3种栎木纤维宽度的径向变化均随生长轮增加而增加，但存在着一定的波动。

纤维双壁厚是木材质量、基本密度和强度的物质基础^[13]，受生态环境条件和气候因子的影响较大^[14]。研究发现：水栎双壁厚最大(11.19 $\mu\text{m}\pm$ 0.54 μm)，纳塔栎(10.23 $\mu\text{m}\pm$ 0.91 μm)和舒玛栎(10.96 $\mu\text{m}\pm$ 1.03 μm)略小，3种栎木双壁厚种间具有显著差异($P<0.05$)。由图1C可知：随生长轮增加，3种栎木纤维双壁厚径向均呈增长趋势。较其他2种栎，水栎更易受生态环境条件和气候因子影响，因而纤维双壁厚变化波动也较大。

纤维壁腔比是纤维双壁厚与纤维胞腔直径的比值，是衡量木材纤维强度的重要指标。纤维壁腔比越小，则木材密度越大，材质越坚硬^[15]。木材纤维工业原料中通常要求纤维为中级长度(900.00~1 600.00 μm)，长宽比不低于35，壁腔比小于1^[16]。本研究发现：3种栎木壁腔比为1.55~2.44，水栎壁腔比平均值最大(2.10 $\pm$ 0.23)，纳塔栎(1.85 $\pm$ 0.26)和舒玛栎(1.91 $\pm$ 0.16)略低，纤维壁腔比种间具有显著差异($P<0.05$)。3种栎木壁腔比均大于1，未达到纤维工业原料要求。从髓心向外，3种栎木壁腔比径向均略微上升，在一定范围内存在波动(图1D)。

表1 纤维形态的比较分析

Table 1 Comparative analysis of fiber morphology

树种	纤维长度				纤维宽度			
	变化范围/ μm	平均值/ μm	变异系数/%	P	变化范围/ μm	平均值/ μm	变异系数/%	P
纳塔栎	1 032.46~1 255.46	1 172.14 $\pm$ 86.88	7.41		14.14~17.69	15.86 $\pm$ 1.11	7.02	
水栎	1 018.04~1 281.27	1 178.68 $\pm$ 95.54	8.11	0.941 560	15.53~17.34	16.56 $\pm$ 0.70	4.24	0.062 224
舒玛栎	1 010.34~1 292.56	1 162.45 $\pm$ 112.67	9.69		15.43~18.51	16.91 $\pm$ 1.20	7.08	
树种	双壁厚				壁腔比			
	变化范围/ μm	平均值/ μm	变异系数/%	P	变化范围/ μm	平均值/ μm	变异系数/%	P
纳塔栎	8.77~11.67	10.23 $\pm$ 0.91	8.89		1.55~2.32	1.85 $\pm$ 0.26	13.97	
水栎	10.65~12.15	11.19 $\pm$ 0.54	4.85	0.028 812*	1.68~2.44	2.10 $\pm$ 0.23	10.97	0.035 464*
舒玛栎	9.40~12.34	10.96 $\pm$ 1.03	9.37		1.67~2.15	1.91 $\pm$ 0.16	8.22	

说明： P 为各指标平均值的种间差异显著性分析；“*”表示0.05水平上具有显著性差异

2.2 微纤丝角

微纤丝角是影响木材强度的主要因素，通常作为材质评定及早期良种选育的重要指标。本研究发现：纳塔栎微纤丝角径向变化范围为30.02°~38.73°，平均值为33.79°。水栎为26.12°~33.52°，平均值为30.48°。舒玛栎为37.65°~30.93°，平均值为34.10°。3种栎木微纤丝角大小依次为舒玛栎(34.10°)、纳塔

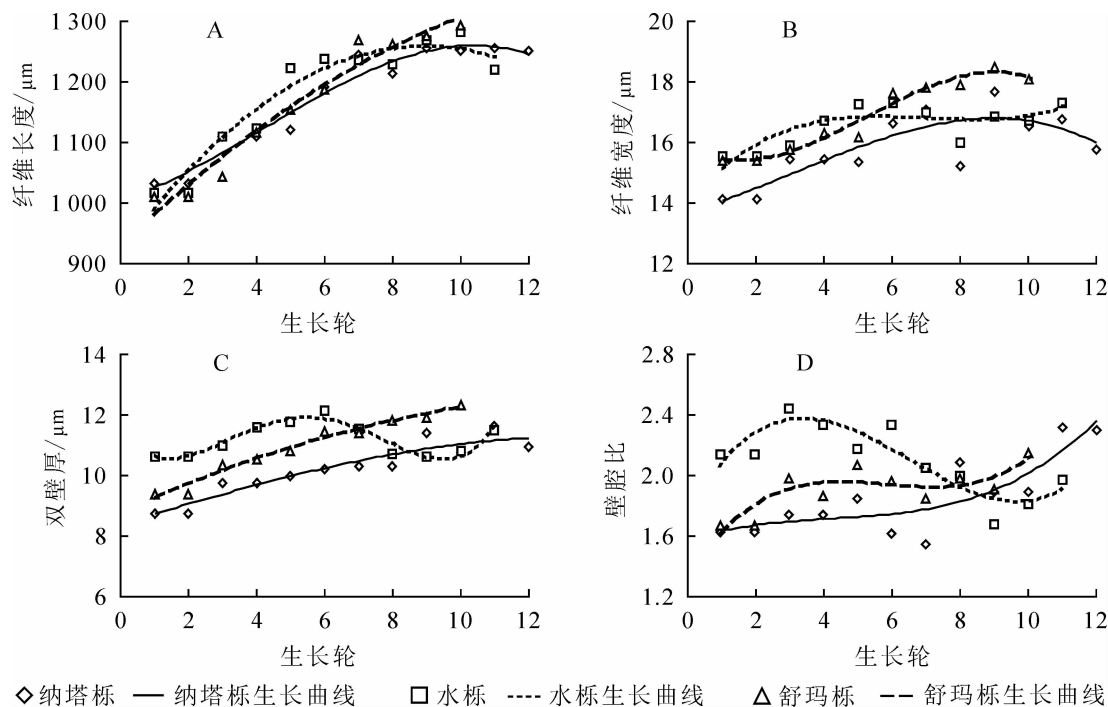


图 1 纤维形态随生长轮的径向变化规律

Figure 1 Radial variation of fiber morphology and growth ring from pith to bark

栎(33.79°)和水栎(30.48°)，微纤丝角种间具有极显著差异($P<0.01$)。3 种栎木微纤丝角平均值为 32.79°，略大于采用细胞壁高分辨率显微照片测定的夏栎 *Q. robur*(22°~31.6°)^[17]的微纤丝角，可能与栎木未达到成熟状态有关，也可能是因为测量方法不同，XRD 法测量时采用的是细胞壁各壁层微纤丝角平均值。

从图 2 可以看出：3 种栎木微纤丝角随生长轮增加总体呈下降趋势。原因可能是试材越靠近髓心，树木年龄越小，形成层原始细胞产生的子细胞胞壁就越薄，各层的平均微纤丝角就越大^[18]。

2.3 结晶度

纳塔栎结晶度径向变化范围为 50.07%~52.52%，平均值为 51.35%。水栎结晶度径向变化范围为 51.45%~55.47%，平均值为 53.30%。舒玛栎结晶度径向变化范围为 51.23%~53.83%，平均值为 52.97%。结晶度大小依次为水栎(53.30%)、舒玛栎(52.97%)和纳塔栎(51.35%)，均大于加拿大栎 *Q. canariensis* (38.93%)^[19]，3 种栎木种间具有极显著差异($P<0.01$)。纳塔栎、水栎和舒玛栎结晶度的变异系数分别为 1.63%、2.80%和 1.43%，变异较小。如图 3 所示：结晶度随生长轮增加总体呈上升趋势，还未处于平稳状态，可能与其处于生长时期有关。结晶度径向变化趋势与其他学者研究一致：在树木生长初期形成层

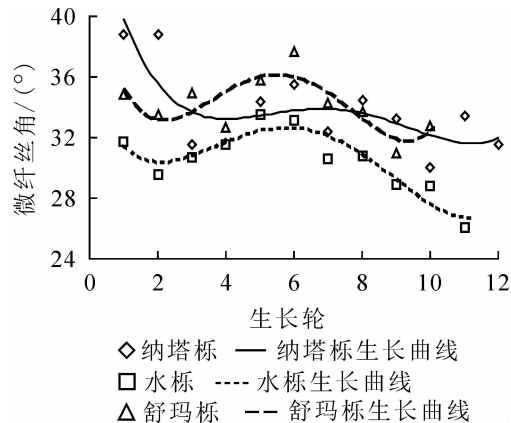


图 2 微纤丝角随生长轮的径向变化规律
Figure 2 Radial variation of microfibril angle and growth ring from pith to bark

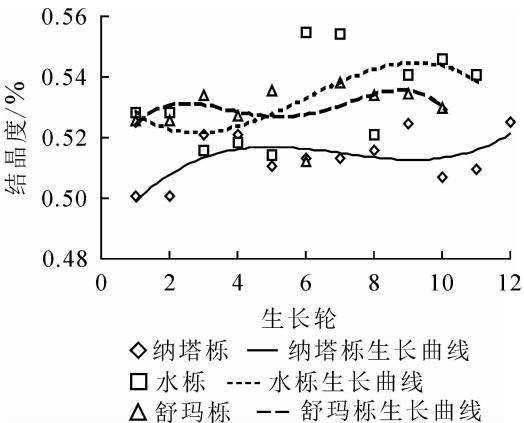


图 3 结晶度随生长轮的径向变化规律
Figure 3 Radial variation of the crystallinity and growth ring from pith to bark

细胞分裂速度较快, 结晶度较小, 随着树龄的增加, 结晶度也逐渐增大最后趋于稳定^[20]。

2.4 预测模型

纤维形态、微纤丝角与生长轮间关系密切。对生长轮与纤维形态、微纤丝角进行拟合分析, 建立适当的模型, 对人工林材质早期预测及林木的定向培育、优化利用具有十分重要理论意义和应用价值。以生长轮为自变量(x), 纤维长度、纤维宽度、纤维双壁厚、微纤丝角分别为因变量(y), 进行回归拟合。

如表2所示: 3种引种栎木纤维长度与生长轮的关系与2次曲线拟合度较好, 相关系数(R^2)均在0.900以上, 回归效果理想, 与大多数研究结果一致^[21], 符合生物学生长规律。3种引种栎木纤维宽度与生长轮的3次曲线拟合度高, 其中舒玛栎拟合效果最佳, 相关系数达到0.960。纳塔栎和舒玛栎纤维双壁厚与生长轮的2次曲线有较好的拟合关系, 水栎纤维双壁厚与生长轮的3次曲线拟合关系较好, 其中舒玛栎拟合效果最佳, 相关系数达到0.972。纳塔栎微纤丝角与生长轮的关系与对数函数有较好的拟合, 水栎及舒玛栎与2次曲线有较好的拟合, 其中水栎拟合效果最佳, 相关系数为0.748。

表2 纤维形态、微纤丝角与生长轮的回归分析

Table 2 Regression analysis of fiber morphology, microfibril angle, and growth ring

拟合类型	样木	回归方程	R^2
纤维长度与生长轮	纳塔栎	$y = -2.004 \ 3x^2 + 48.641 \ 0x + 964.540 \ 0$	0.943
	水栎	$y = -4.235 \ 4x^2 + 76.000 \ 0x + 917.510 \ 0$	0.933
	舒玛栎	$y = -1.673 \ 2x^2 + 54.666 \ 0x + 926.210 \ 0$	0.962
纤维宽度与生长轮	纳塔栎	$y = -0.004 \ 0x^3 + 0.040 \ 0x^2 + 0.330 \ 0x + 13.710 \ 0$	0.689
	水栎	$y = 0.889 \ 0x^3 - 0.190 \ 0x^2 + 1.280 \ 0x + 14.310 \ 0$	0.656
	舒玛栎	$y = -0.010 \ 0x^3 + 0.220 \ 0x^2 - 0.590 \ 0x + 15.832 \ 0$	0.960
双壁厚与生长轮	纳塔栎	$y = -0.120 \ 0x^2 + 0.400 \ 0x + 8.340 \ 0$	0.884
	水栎	$y = -0.116 \ 0x^3 + 0.790 \ 0x^2 - 1.630 \ 0x + 11.580 \ 0$	0.922
	舒玛栎	$y = -0.020 \ 0x^2 + 0.510 \ 0x + 8.780 \ 0$	0.972
微纤丝角与生长轮	纳塔栎	$y = -2.529 \ 0 \ln x + 38.007 \ 0$	0.481
	水栎	$y = -0.143 \ 9x^2 + 1.356 \ 4x + 28.960 \ 0$	0.748
	舒玛栎	$y = -0.110 \ 0x^2 + 0.988 \ 3x + 32.896 \ 0$	0.337

3 结论

对纳塔栎、水栎和舒玛栎纤维形态测量得知: 3种引种栎木纤维长度为 $1\ 010.34 \sim 1\ 292.56 \ \mu\text{m}$, 纤维宽度为 $14.14 \sim 18.51 \ \mu\text{m}$, 纤维长度、宽度种间不具有显著差异($P > 0.05$), 其径向变化均为从髓心至树皮方向呈上升趋势, 但径向变化尚未趋于稳定; 3种栎木纤维双壁厚为 $8.77 \sim 12.34 \ \mu\text{m}$, 壁腔比为 $1.55 \sim 2.44$, 纤维双壁厚、壁腔比种间具有显著差异($P < 0.05$), 其径向变化均为从髓心至树皮方向略微上升, 在一定范围内存在波动。

3种栎木中舒玛栎微纤丝角最大(34.10°), 纳塔栎(33.79°)和水栎(30.48°)略小, 微纤丝角种间具有极显著差异($P < 0.01$)。径向变化为微纤丝角随着生长轮增加而降低; 结晶度大小依次为水栎(53.30%)、舒玛栎(52.97%)和纳塔栎(51.35%), 结晶度种间具有极显著差异($P < 0.01$), 径向变化为结晶度随生长轮增加总体呈平缓上升趋势。

对生长轮与各指标进行拟合分析发现: 3种栎木纤维长度与生长轮关系用2次曲线拟合效果理想, 相关系数均在0.900以上。纤维宽度与生长轮关系: 舒玛栎用3次曲线拟合效果理想, 相关系数在0.900以上。双壁厚与生长轮的关系: 舒玛栎用2次曲线拟合效果理想, 相关系数在0.900以上。微纤丝角与生长轮的关系: 水栎用2次曲线拟合效果较好, 相关系数在0.700以上。

由此认为: 14年生引种美国红橡仍处于幼龄期, 纤维形态、微纤丝角与结晶度径向变化趋势尚未趋于稳定。

4 参考文献

- [1] 刘珉. 多角度解读第 8 次全国森林资源清查结果[J]. 林业经济, 2014, **36**(5): 3 – 9, 15.
LIU Min. Study on the 8th national forest inventory from multiple perspective [J]. *For Econ*, 2014, **36**(5): 3 – 9, 15.
- [2] 陈益泰, 孙海菁, 王树凤, 等. 5 种北美栎树在我国长三角地区的引种生长表现[J]. 林业科学研究, 2013, **26**(3): 344 – 351.
CHEN Yitai, SUN Haijing, WANG Shufeng, *et al.* Growth performances of five north Ameirican oak species in Yangzi river Delta of China [J]. *For Res*, 2013, **26**(3): 344 – 351.
- [3] 兰士波. 中国北方落叶栎类研究进展及前景[J]. 中国林副特产, 2018(4): 71 – 76.
LAN Shibo. Present research progress and prospect on deciduous oak of northern China [J]. *For By-Prod Spec China*, 2018(4): 71 – 76.
- [4] ZHANG Bo, FEI Benhua, YU Yan, *et al.* Microfibril angle variability in masson pine (*Pinus massoniana* Lamb.) using X-ray diffraction [J]. *For Studies China*, 2007, **9**(1): 33 – 38.
- [5] 胡梦霄, 杭芸, 黄华宏, 等. 杉木木材结晶度的近红外预测模型建立及变异分析[J]. 浙江农林大学学报, 2017, **34**(2): 361 – 368.
HU Mengxiao, HANG Yun, HUANG Huahong, *et al.* A near infrared prediction model and variation analysis of wood crystallinity in *Cunninghamia lanceolata* [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2017, **34**(2): 361 – 368.
- [6] 全国木材标准化技术委员会. 木材物理力学试材采集方法: GB/T 1927–2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [7] 郑明朝, 黄金, 韦鹏练, 等. 15 年生巨尾桉纤维特性分析[J]. 江西农业学报, 2018, **30**(9): 31 – 34.
ZHENG Mingchao, HUANG Jin, WEI Penglian, *et al.* Fiber characteristics of 15-year-old *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* [J]. *Acta Agric Jiangxi*, 2018, **30**(9): 31 – 34.
- [8] 杨振亚. 4 个引种栎类树种苗期抗逆性初步研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
YANG Zhenya. *Studies on Stress-resistance of Four Introduced Oaks Seedlings* [D]. Taian: Shangdong Agricultral University, 2016.
- [9] 方忠艳, 廖薇, 余丽萍, 等. 贵州不同种源山棕纤维结晶度的分析与比较[J]. 西部林业科学, 2018, **47**(1): 92 – 96, 103.
FANG Zhongyan, LIAO Wei, YU Liping, *et al.* Comparative study on crystallinity of mountain palm fiber from different provenances of Guizhou [J]. *J West China For Sci*, 2018, **47**(1): 92 – 96, 103.
- [10] 赵西平, 张超男, 刘高均, 等. 蒙古栎次生木质部解剖结构分析[J]. 西南林业大学学报, 2013, **33**(6): 76 – 79.
ZHAO Xiping, ZHANG Chaonan, LIU Gaojun, *et al.* Anatomical structure analyses of secondary xylem of *Quercus mongolica* [J]. *J Southwest For Univ*, 2013, **33**(6): 76 – 79.
- [11] LEAL S, SOUSA V B, PEREIRA H. Within and between-tree variation in the biometry of wood rays and fibres in cork oak (*Quercus suber* L.) [J]. *Wood Sci Technol*, 2006, **40**(7): 585 – 597.
- [12] VOULGARIDIS E. Wood cell morphology characteristics of some oak species and mediterranean shrubs [J]. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 1990, **48**(7/8): 261 – 267.
- [13] 梅爱君, 徐卫南, 童再康, 等. 不同地区光皮桦木材纤维形态特征的研究[J]. 林业科技, 2017, **42**(3): 20 – 24.
MEI Aijun, XU Weinan, TONG Zaikang, *et al.* Study on morphological properties of *Betula luminifera* wood fiber for different regions [J]. *For Sci Technol*, 2017, **42**(3): 20 – 24.
- [14] 刘晓玲, 符韵林. 人工林观光木主要解剖特性及基本密度研究[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**(5): 769 – 776.
LIU Xiaoling, FU Yunlin. Anatomy and basic density of *Tsoongiodendron odorum* [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2013, **30**(5): 769 – 776.
- [15] 于朝阳, 裴姗姗, 胡进波, 等. 莎丽格木材解剖学特征及物理力学性能研究[J]. 林产工业, 2018, **45**(11): 17 – 21.
YU Zhaoyang, CHANG Shanshan, HU Jinbo, *et al.* Study on the anatomical features and physical-mechanical proper-

- ties of salicaceae wood [J]. *China For Prod Ind*, 2018, **45**(11): 17 – 21.
- [16] 周维, 卢翠香, 杨中宁, 等. 6年生大花序桉不同种源木材纤维特性的差异分析[J]. 西部林业科学, 2016, **45**(2): 29 – 34.
ZHOU Wei, LU Cuixiang, YANG Zhongning, *et al.* Genetic variation in fiber characteristics of 9 provenances of *Eucalyptus cloeziana* [J]. *J West China For Sci*, 2016, **45**(2): 29 – 34.
- [17] LEHRINGER C, DANIEL G, SCHMITT U. TEM/FE-SEM studies on tension wood fibres of *Acer* spp. *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. [J]. *Wood Sci Technol*, 2009, **43**(7/8): 691 – 702.
- [18] 杨燕, 张青. 西南桦木材微纤丝角的径向变异规律[J]. 木材加工机械, 2010, **21**(4): 16 – 18, 24.
YANG Yan, ZHANG Qing. The radial variation patterns of microfibril angle of alder birch [J]. *Wood Proc Mach*, 2010, **21**(4): 16 – 18, 24.
- [19] HADDADOU I, ALIOUCHE D, BROSSE N, *et al.* Characterization of cellulose prepared from some Algerian lignocellulosic materials (zeen oak wood, Aleppo pine wood and date palm rachis) [J]. *Eur J Wood Prod*, 2015, **73**(3): 419 – 421.
- [20] 廖声熙, 杨振寅, 崔凯, 等. 翠柏木材管胞特性及结晶度的径向变异分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, **37**(1): 87 – 90.
LIAO Shengxi, YANG Zhenyin, CUI Kai, *et al.* Radical variation of wood tracheid character and crystallinity of precious *Calocedrus macrolepis* [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2013, **37**(1): 87 – 90.
- [21] 郭东强, 叶露, 周维, 等. 2个种源邓恩桉木材纤维特性及变异[J]. 浙江农林大学学报, 2014, **31**(4): 502 – 507.
GUO Dongqiang, YE Lu, ZHOU Wei, *et al.* Wood fiber features for two provenances of *Eucalyptus dunnii* [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2014, **31**(4): 502 – 507.