

网络出版时间:2020-03-16 08:44 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.09.006
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20200312.1021.030.html

引种美国红橡幼龄材的物理力学性质研究

毕玉金¹,王 慧¹,潘 彪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】测定从北美引种的 3 种美国红橡木材的物理力学性质,以弥补我国家具和室内装修优质木材资源不足的现状。【方法】以引种的 14 年生(幼龄期)美国红橡纳塔栎(*Quercus nuttallii*)、舒玛栎(*Quercus shumardii*)和水栎(*Quercus nigra*)为研究对象,按照国家标准方法测定其木材的密度、干缩性、冲击韧性、顺纹抗压强度、抗弯强度和抗弯弹性模量等基本物理力学性能指标,分析各指标间的相关性,并采用隶属函数法对各树种木材材性进行综合评价。【结果】3 种美国红橡幼龄材气干密度、体积气干缩率、冲击韧性、顺纹抗压强度、抗弯强度和抗弯弹性模量分别为 $0.725 \sim 0.767 \text{ g/cm}^3$, $9.650\% \sim 10.622\%$, $216.59 \sim 255.14 \text{ kJ/m}^2$, $45.57 \sim 54.44 \text{ MPa}$, $104.24 \sim 105.40 \text{ MPa}$, $7.11 \sim 7.77 \text{ GPa}$ 。3 种美国红橡种间弦向全干干缩率差异极显著($P \leq 0.01$),而种间径向全干干缩率和抗弯强度均差异不显著。相关性分析表明,红橡幼龄材气干密度与抗弯强度极显著相关;顺纹抗压强度与抗弯弹性模量极显著相关,与抗弯强度显著相关;抗弯强度与抗弯弹性模量极显著相关。3 种红橡材性综合评价结果显示,纳塔栎和舒玛栎的材性略优于水栎。与其他栎属树种成熟材相比,引种的美国红橡幼龄材的大多数指标均接近其他栎属成熟材水平。【结论】3 种美国红橡木材都属于高强度、高等级木材,材性优良,可作为制作家具和室内装修的优质用材。

【关键词】美国红橡;幼龄材;木材物理性质;木材力学强度

【中图分类号】S781.3

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2020)09-0037-07

Physical and mechanical properties of introduced American red oaks juvenile wood

BI Yujin¹, WANG Hui¹, PAN Biao¹, HUANG Libin²

(1 College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;
2 Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing, Jiangsu 211153, China)

Abstract: 【Objective】The physical and mechanical properties of introduced three varieties of American red oak were systematically determined to increase the resources of high quality furniture and interior decoration timber in China. 【Method】The wood physical and mechanical strength indexes including air-dry density, dry shrinkage, impact ductility, compression strength parallel to grain, bending strength and modulus of elasticity in static bending of 14 years old *Quercus nuttallii*, *Quercus shumardii* and *Quercus nigra* were investigated, and the relationship between them were comprehensively evaluated and compared among the three American red oaks. 【Result】The air-dry density, volume air-dry shrinkage rate, impact bending strength, compression strength parallel to grain, bending strength and modulus of elasticity were $0.725 \sim 0.767 \text{ g/cm}^3$, $9.650\% \sim 10.622\%$, $216.58 \sim 255.14 \text{ kJ/m}^2$, $45.57 \sim 54.44 \text{ MPa}$, $104.24 \sim 105.40 \text{ MPa}$, and $7.11 \sim 7.77 \text{ GPa}$, respectively. The differences in wood tangential oven-dry shrinkage rate among the three

【收稿日期】2019-08-02

【基金项目】江苏省科技计划项目“优质用材及观赏北美栎树良种选育”(BE2015370)

【作者简介】毕玉金(1995—),男,山东日照人,在读硕士,主要从事木材解剖研究。E-mail:791253382@qq.com

【通信作者】潘 彪(1964—),男,浙江浦江人,教授,硕士生导师,主要从事木材材性改良及解剖研究。E-mail:185618663@qq.com

red oaks were extremely significant, while the differences in radial oven-dry shrinkage rate and bending strength were not significant. The air-dry density of red oaks juvenile wood was extremely correlated with bending strength. The compression strength parallel to grain was extremely significantly correlated with modulus of elasticity and it was significantly correlated with bending strength. The bending strength was significantly correlated with modulus of elasticity. Comprehensive evaluation based on subordinate function showed that wood physical and mechanical properties of *Q. nuttallii* and *Q. shumardii* were better than *Q. nigra*. Most physical and mechanical strength indexes of juvenile red oak wood were close to other mature *Quercus* woods. 【Conclusion】 All the three species of American red oaks had high strength and wood quality, and they could be used as furniture or interior renovation wood.

Key words: America red oak; juvenile wood; wood physical properties; wood mechanical properties

红橡又称红栎,属于壳斗科(Fagaceae)栎属(*Quercus* L.)树种,主要产自美国及欧洲国家,其木材是家具和室内装修的优质用材^[1]。《中国植物志》将栎属分为槲栎组(Sect. *Robur*)、沼生栎组(Sect. *Erythrobalanus*)、麻栎组(Sect. *Aegilops*)、高山栎组(Sect. *Suber*)和巴东栎组(Sect. *Englerianae*),其中麻栎组对应美国红橡,槲栎组对应美国白橡。白橡心材多为灰褐色,早材管孔内侵填体丰富,晚材管孔壁薄,多数呈多角形;红橡心材多为红褐色,早材管孔内侵填体少或无,晚材管孔壁厚,多数呈圆形^[2]。

为缓解我国木材进口压力,弥补家具和室内装修优质木材资源不足的现状,早在 1998 年江苏林业科学研究院就开展了北美栎属树种种质资源引种与栽培研究,系统引种了多种美国红橡。目前,国内对引种美国红橡的研究多集中于生长特性^[3-4]、引种技术^[5-6]和抗逆性^[7-8]等方面,未见国内外关于红橡木

材物理力学性质方面的研究。木材材性是加工利用的基础,本试验研究了纳塔栎(*Quercus nuttallii*)、舒玛栎(*Quercus shumardii*)和水栎(*Quercus nigra*)3 种美国红橡幼龄材的基本物理性质和基本力学强度,旨在为其引种和加工利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

纳塔栎、舒玛栎和水栎均引自美国,现 14 年生,尚处于幼龄期^[3],每个树种 4 株,栽植时株行距 0.8 m×0.8 m,样株基本情况见表 1。取样地点位于江苏省林科院句容和江宁种植基地(31°37′~32°07′N,118°28′~119°06′E),该地区年均温 15.2℃,年降雨量 1 034~1 210 mm,无霜期 240~250 d,土壤黄棕壤,土层 40 cm。按照 GB 1927—2009《木材物理力学试材采集方法》和 GB 1929—2009《木材物理力学试材锯解及试样截取方法》进行取样和制样。

表 1 引种红橡样株的基本情况

Table 1 Basic information of the introduced red oaks

树种 Species	胸径/cm DBH	树高/m Tree height	枝下高/m Clear bole height
纳塔栎 <i>Quercus nuttallii</i>	19.28±0.98	8.48±1.08	2.30±0.18
舒玛栎 <i>Quercus shumardii</i>	15.20±2.45	11.70±1.63	1.93±0.15
水栎 <i>Quercus nigra</i>	15.38±1.07	10.68±2.74	2.29±0.26

1.2 方 法

1.2.1 木材密度和干缩率的测定 木材密度按照 GB 1933—2009《木材密度测定方法》进行测定;木材的气干干缩率和全干干缩率按照 GB 1932—2009《木材干缩性 测定方法》进行测定。每个指标的有效样本数量不少于 30 个。并根据以下公式计算木材的全干差异干缩:

全干差异干缩=全干弦向干缩率/全干径向干缩率。

1.2.2 木材力学性能的测定 木材的顺纹抗压强

度、抗弯强度、抗弯弹性模量和冲击韧性的测定分别按照 GB 1935—2009《木材顺纹抗压强度试验方法》、GB 1936.1—2009《木材抗弯强度试验方法》、GB 1936.2—2009《木材抗弯弹性模量测定方法》和 GB 1940—2009《木材冲击韧性试验方法》进行。抗弯抗压试验在三思万能力学试验机上进行,冲击韧性试验在人造板冲击试验机上进行。顺纹抗压强度试件数量为 30 个,抗弯强度、抗弯弹性模量试件数量为 24 个,冲击韧性试件数量为 50 个。根据下列公式计算木材的综合强度和综合品质系数:

综合强度=顺纹抗压强度+抗弯强度;
综合品质系数=综合强度/基本密度。

1.2.3 引种的 3 种红橡与栎属其他树种材性的比较 将纳塔栎、舒玛栎和水栎幼龄材的气干密度、差异干缩、顺纹抗压强度、抗弯强度、抗弯弹性模量和冲击韧性 with 栎属其他树种如麻栎^[9]、辽东栎^[10]、黄牛奶栎^[11]和厚叶栎^[11]成熟材进行比较,以评判 3 种红橡幼龄材的材性。

1.2.4 数据分析 使用 Excel 2010、SPSS Statistics 22.0 等数据处理软件,按照 GB 1928—2009《木材物理力学物理力学试验方法总则》统计各指标的平均值、变异系数和准确指数(P)等数据,并对各组数据进行方差分析和相关性分析。变异系数(Coefficient of variation, CV)又称离散系数,是标准差与平均值的比值,其值越大,则说明数据的离散程度越大。准确指数小于 5%时表示数据结果较为可靠。

采用模糊数学中的隶属函数法,通过计算不同树种各项指标的隶属函数值,并累加求和,综合比较 3 种红橡的材性优劣。隶属函数值总和越大,则材性越优。隶属函数值计算公式^[12]为:

隶属函数值=(X-X_{min})/(X_{max}-X_{min})×100%;
(1)

若某指标与木材材性呈反比关系,则使用反隶属函数公式计算:

隶属函数值=[1-(X-X_{min})/(X_{max}-X_{min})]×

100%。
(2)

式中:X 表示某种红橡某指标的平均值,X_{max}表示某种红橡某指标的最大测定值,X_{min}表示某种红橡某指标的最小测定值。

2 结果与分析

2.1 3 种红橡木材物理性质的比较

2.1.1 密度 木材密度是表征材性的重要指标之一,因木材质量与体积均受含水率影响,木材密度通常由气干密度、全干密度和基本密度来表征。气干密度是指木材在一定大气状态下达到平衡含水率时质量与体积之比,是木材工业生产和产品贸易运输中常用的指标;全干密度是木材在含水率为 0 时质量与体积之比;基本密度是全干质量与生材体积之比。这 3 个指标是树木培育、木材品质改良及木材科学研究领域中常用的评价指标。由表 2 可知,舒玛栎的气干密度、绝干密度和基本密度均最大,水栎次之,纳塔栎最小。舒玛栎气干密度为 0.767 g/cm³,等级属于重级(0.751~0.950 g/cm³)^[13];水栎、纳塔栎的气干密度分别为 0.749 和 0.725 g/cm³,等级为中级(0.551~0.750 g/cm³)^[13]。方差分析结果(表 2)表明,舒玛栎与纳塔栎的种间密度(气干密度、全干密度和基本密度)差异极显著,纳塔栎与水栎的种间密度差异不显著,舒玛栎与水栎差异显著。

表 2 3 种红橡木幼龄材密度的比较

树种 Species	气干密度 Air-dry density			全干密度 Oven-dry density			基本密度 Basic density		
	平均值/ (g·cm ⁻³) Mean	变异 系数/% CV	准确 指数/% P	平均值/ (g·cm ⁻³) Mean	变异 系数/% CV	准确 指数/% P	平均值/ (g·cm ⁻³) Mean	变异 系数/% CV	准确 指数/% P
舒玛栎 Q. shumardii	0.767 aA	3.998	1.255	0.730 aA	4.061	1.275	0.617 aA	4.087	1.283
水栎 Q. nigra	0.749 bAB	5.807	1.981	0.709 bAB	5.769	1.968	0.607 bAB	5.962	2.034
纳塔栎 Q. nuttallii	0.725 bB	4.118	1.902	0.690 bB	3.996	1.752	0.580 bB	4.385	2.062

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著(P<0.05),标不同大写字母表示差异极显著(P<0.01)。表 4 同。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference at P<0.05, and different capital letters indicate extremely significant difference at P<0.01. The same for Table 4.

2.1.2 干缩性 木材的干缩性是衡量木材材性的重要指标之一,其大小通常用干缩率表示。木材的干缩性具有各向异性,弦向干缩率远大于径向干缩率。因木材的纵向干缩率极小,故可忽略不计。由表 3 可知,体积气干干缩率以舒玛栎最大,达到 10.622%,水栎和纳塔栎次之,分别为 9.761%和 9.650%。体积全干干缩率以纳塔栎最大,达到 15.985%,舒玛栎和水栎次之,分别为 15.444%和

14.347%。经检验,3 种红橡幼龄材除径向全干干缩率差异不显著外,其他指标均存在显著或极显著差异(表 3)。
木材的差异干缩是判断木材在干燥时是否容易发生干裂、变形和翘曲的重要依据,差异干缩越大则木材在干燥时发生干裂、变形和翘曲的倾向越大。由表 3 可知,纳塔栎、舒玛栎和水栎的全干差异干缩分别为 2.645,2.553 和 2.297,等级为大或很大级

(大:2.21~2.60;很大:2.61 以上)^[13],表明红橡在干燥时发生开裂、变形和翘曲的可能性很大,在加工过程中必须注意木材的尺寸稳定性。

木材弦向和径向干缩的差异由解剖构造决定,如木射线的粗细和生长轮管孔的分布类型^[14]。红橡是典型的环孔材^[2],早材区域因管孔大、密度低致

使干缩小;而晚材则相反,管孔小、密度高致使干缩大。在木材的径向,早晚材串联,在干缩时互不影响;在木材的弦向,早晚材并联,干缩大的晚材会强制干缩小的早材一起收缩;同时红橡又具有较多的能够大幅抑制木材径向收缩的宽木射线^[2],导致红橡的径向干缩率远小于弦向干缩率。

表 3 3 种红橡木幼龄材气干干缩率和全干干缩率的比较

Table 3 Comparison of juvenile wood air-dry and oven-dry shrinkage rate among three species of red oaks										
指标 Index		纳塔栎 <i>Q. nuttallii</i>			舒玛栎 <i>Q. shumardii</i>			水栎 <i>Q. nigra</i>		
		平均值 Mean	变异系数 CV	准确指数 <i>P</i>	平均值 Mean	变异系数 CV	准确指数 <i>P</i>	平均值 Mean	变异系数 CV	准确指数 <i>P</i>
气干干缩率 Air-dry shrinkage rate	径向/% Radial	2.052 bB	10.957	4.802	2.686 aA	13.537	4.249	2.683 aA	16.390	5.592
	弦向/% Tangential	7.225 bAB	8.622	3.779	7.681 aA	6.758	2.121	6.851 bB	8.938	3.049
	体积/% Volume	9.650 bB	11.919	5.224	10.622 aA	7.709	2.420	9.761 bB	8.687	2.964
全干干缩率 Oven-dry shrinkage rate	径向/% Radial	4.389 a	6.222	2.874	4.336 a	10.631	3.336	4.396 a	12.714	4.338
	弦向/% Tangential	11.567 A	4.632	2.140	10.948 B	4.676	1.467	9.952 C	6.459	2.204
	体积/% Volume	15.985 aA	4.985	2.303	15.444 bA	4.769	1.497	14.347 bB	5.909	2.016
全干差异干缩 Oven-dry shrinkage ratio difference		2.645 aA	7.580	3.714	2.553 aA	12.390	4.227	2.297 bB	13.403	4.573

注:同行数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),标不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference at $P<0.05$, and different capital letters indicate extremely significant difference at $P<0.01$.

2.2 3 种红橡木材基本力学性质的比较

对 3 种美国红橡幼龄材的顺纹抗压强度、抗弯弹性模量、抗弯强度和冲击韧性等基本力学性质进行测定和方差分析,结果如表 4 所示。纳塔栎、舒玛栎和水栎顺纹抗压强度分别为 52.72,54.44 和 45.57 MPa,等级均为中级(44.1~59.0 MPa)^[13];抗弯强度分别为 105.40,104.54 和 104.24 MPa,等

级均为中级(88.1~118.0 MPa)^[13];抗弯弹性模量分别为 7.77,7.11 和 7.71 GPa,等级为甚低级和低级(甚低: <7.5 GPa;低:7.5~10.3 GPa)^[13];冲击韧性分别为 221.95,255.14 和 216.59 kJ/m²,等级为甚高级(>102.1 kJ/m²)。方差分析表明,3 种美国红橡的种间抗弯强度差异不显著,其他指标存在显著或极显著差异(表 4)。

表 4 3 种红橡木幼龄材基本力学性质的比较

Table 4 Comparison of juvenile wood mechanical property among three species of red oaks						
树种 Species	顺纹抗压强度 Compression strength parallel to grain			抗弯强度 Bending strength		
	平均值/MPa Mean	变异系数/% CV	准确指数/% <i>P</i>	平均值/MPa Mean	变异系数/% CV	准确指数/% <i>P</i>
纳塔栎 <i>Q. nuttallii</i>	52.72 aA	8.90	3.18	105.40 a	11.09	4.44
舒玛栎 <i>Q. shumardii</i>	54.44 aA	4.81	1.72	104.54 a	9.02	3.47
水栎 <i>Q. nigra</i>	45.57 bB	5.10	2.89	104.24 a	6.12	2.23
树种 Species	抗弯弹性模量 Modulus of elasticity			冲击韧性 Toughness		
	平均值/GPa Mean	变异系数/% CV	准确指数/% <i>P</i>	平均值/(kJ·m ⁻²) Mean	变异系数/% CV	准确指数/% <i>P</i>
纳塔栎 <i>Q. nuttallii</i>	7.77 aA	13.24	5.30	221.95 bB	13.78	3.78
舒玛栎 <i>Q. shumardii</i>	7.11 bA	14.81	5.69	255.14 aA	12.65	4.38
水栎 <i>Q. nigra</i>	7.71 aA	14.08	5.13	216.59 bB	14.40	3.91

纳塔栎、舒玛栎和水栎木材的综合强度分别为 158.12,158.98 和 149.81 MPa,均属于高强度木材(107.9~166.6 MPa)^[15];木材的综合品质系数分别为 272.62,257.66 和 246.81 MPa·cm³/g,均属于高等级木材级别(>215.6 MPa·cm³/g)^[15]。因

此,红橡木材不仅具有较高的力学强度,还具有典雅美观的颜色和花纹,是家具、地板和室内装修的优质用材^[16-17]。本研究中红橡幼龄材的抗弯弹性模量很低,表明其受外力时容易弯曲变形^[18-19]。有研究表明^[20],幼龄材的抗弯弹性模量与成熟材有显著差

异,约是成熟材的 55%~90%^[21]。故本研究中红橡抗弯弹性模量偏低的情况符合幼龄材的特点。

2.3 3 种红橡木材物理力学性质间的相关性

木材各物理力学性质指标间存在相关关系,其中气干密度与力学性质的相关性更优^[22-23]。由表 5 红橡幼龄材物理力学性质指标间的相关性分析结果可知,气干密度与体积全干干缩率和抗弯强度极显

著相关,与弦向全干干缩率显著相关;径向和弦向全干干缩率均与体积全干干缩率极显著相关;顺纹抗压强度与全干干缩率(弦向、体积)和抗弯弹性模量极显著相关,与抗弯强度显著相关;抗弯强度与抗弯弹性模量极显著相关,与体积全干干缩率显著相关。除此之外,红橡其余物理力学指标之间相关性均不显著。

表 5 红橡幼龄材物理力学性质指标间的相关性

Table 5 Correlation of physical and mechanical properties of juvenile red oak wood								
指标 Index	气干密度 Air-dry density	径向全干 干缩率 Radial oven- dry shrinkage rate	弦向全干 干缩率 Tangential oven-dry shrinkage rate	体积全干 干缩率 Volume oven-dry shrinkage rate	顺纹抗 压强度 Compression strength	抗弯强度 Bending strength	抗弯弹 性模量 Modulus of elasticity	冲击韧性 Toughness
气干密度 Air-dry density	1							
径向全干干缩率 Radial oven-dry shrinkage rate	-0.089	1						
弦向全干干缩率 Tangential oven-dry shrinkage rate	-0.245 *	-0.057	1					
体积全干干缩率 Volume oven-dry shrinkage rate	-0.301 **	0.404 **	0.871 **	1				
顺纹抗压强度 Compression strength	-0.108	0.085	0.548 **	0.559 **	1			
抗弯强度 Bending strength	0.344 **	-0.086	-0.172	-0.248 *	0.245 *	1		
抗弯弹性模量 Modulus of elasticity	0.083	-0.108	-0.012	-0.109	-0.355 **	0.611 **	1	
冲击韧性 Impact bending strength	-0.012	0.183	0.129	-0.070	-0.130	0.081	0.081	1

注: * *. 代表相关性极显著; *. 代表相关性显著。
Note: * *. The correlation is very significant; *. The correlation is significant.

2.4 3 种红橡木材物理力学性能的综合评价

要比较不同木材间的物理力学性能,需综合考量多项指标。隶属函数法是一种将多项指标计算在内的综合评价方法,能够有效消除各指标因绝对值大小不同而造成的影响^[24]。故通过比较 3 种红橡木材不同物理力学性质指标隶属函数值总和的大小,来评判其材性优劣的方法是有效可行的。纳塔

栎、舒玛栎、水栎幼龄材物理力学指标的隶属函数法综合评价结果如表 6 所示。由表 6 可知,纳塔栎和舒玛栎的隶属值总和相近,且略大于水栎的隶属值总和。纳塔栎和舒玛栎木材的综合强度和综合品质系数均大于水栎,故隶属值排名与力学强度试验结果相符,表明纳塔栎和舒玛栎的力学性能略优于水栎。

表 6 3 种红橡木幼龄材物理力学性能的综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of physical and mechanical properties of three kinds of juvenile red oaks wood								
树种 Species	基本密度 Basic density	冲击韧性 Toughness	顺纹抗压强度 Compression strength	抗弯强度 MOR	抗弯弹性模量 MOE	全干差异干缩 Shrinkage ratio difference	总和 Sum	排名 Rank
纳塔栎 <i>Q. nuttallii</i>	0.396	0.600	0.467	0.482	0.485	0.466	2.895	1
舒玛栎 <i>Q. shumardii</i>	0.419	0.484	0.501	0.435	0.360	0.691	2.890	2
水栎 <i>Q. nigra</i>	0.431	0.556	0.485	0.474	0.482	0.431	2.859	3

2.5 3 种红橡幼龄材与栎属其他树种成熟材材性的比较

纳塔栎、舒玛栎、水栎幼龄材与栎属其他树种成熟材物理力学性质的比较结果见表 7。由表 7 可知,与栎属其他树种木材相比,本研究中美国红橡冲

击韧性和差异干缩大,抗弯弹性模量低,原因可能与样本取自 14 年生幼龄材有关。另外,3 种红橡幼龄材的气干密度和顺纹抗压强度均接近栎属其他树种成熟材的水平,而抗弯强度较低。

表 7 3 种红橡幼龄材与栎属其他树种成熟材物理力学性质的比较

Table 7 Comparison of wood physical and mechanical properties between red oaks juvenile wood and other mature *Quercus* wood

树种 Species	气干密度/ (g·cm ⁻³) Air-dry density	全干差异干缩 Oven shrinkage ratio difference	顺纹抗压强度/MPa Compression strength	抗弯 强度/MPa MOR	抗弯弹性 模量/GPa MOE	冲击韧性/ (kJ·m ⁻²) Toughness
纳塔栎 <i>Q. nuttallii</i>	0.73	2.65	52.7	105.4	7.8	221.9
舒玛栎 <i>Q. shumardii</i>	0.77	2.55	54.4	104.5	7.1	255.1
舒玛栎* <i>Q. shumardii</i>	0.73	—	—	123.0	14.9	—
水栎 <i>Q. nigra</i>	0.75	2.30	45.6	104.2	7.7	216.6
水栎* <i>Q. nigra</i>	0.73	2.20	46.7	114.6	14.0	—
麻栎 <i>Q. acutissima</i>	0.93	1.85	52.1	128.6	16.8	122.3
辽东栎 <i>Q. liaotungensis</i>	0.77	1.88	56.5	119.0	18.6	110.2
黄牛奶栎 <i>Q. laurina</i>	0.81	2.25	48.5	127.1	20.0	145.6
厚叶栎 <i>Q. crassifolia</i>	0.75	2.14	42.9	89.5	14.6	121.6

注：* 数据来自 <https://www.wood-database.com/>。
Note: * Data from <https://www.wood-database.com/>.

3 结 论

1) 3 种美国红橡均为高等级木材,密度大、强度高,但干缩大。纳塔栎、舒玛栎和水栎幼龄材的气干密度分别为 0.725、0.767 和 0.749 g/cm³,为中至重级;全干差异干缩分别为 2.645、2.553 和 2.297,为大或很大级;顺纹抗压强度分别为 52.72、54.44 和 45.57 MPa,抗弯强度分别为 105.40、104.54 和 104.24 MPa,抗弯弹性模量分别为 7.77、7.11 和 7.71 GPa,冲击韧性分别为 221.95、255.14 和 216.59 kJ/m²。3 种美国红橡种间弦向全干干缩率差异极显著($P\leq 0.01$),而种间径向全干干缩率和抗弯强度均差异不显著。

2) 3 种红橡材性接近,纳塔栎和舒玛栎材性略优于水栎。与其他栎属树种成熟材相比,红橡幼龄材的全干差异干缩和冲击韧性偏高,抗弯强度和抗弯弹性模量偏低,气干密度和顺纹抗压强度均接近成熟材水平。引种的美国红橡纳塔栎、舒玛栎和水栎木材物理力学性能优良,是家具制作和室内装修的优质用材。

[参考文献]

[1] 端木妍. 栎木 [J]. 江西林业科技, 2011(5): 17-20.
Duan M X. The oak (Fagaceae) [J]. Jiangxi Forestry Science and Technology, 2011(5): 17-20.

[2] 汪浩明, 王 旋, 张耀丽. 白橡和红橡的应用及其鉴别 [J]. 家具, 2016(6): 28-31.
Wang H M, Wang X, Zhang Y L. Application and identification of white oak and red oak [J]. Furniture, 2016(6): 28-31.

[3] 王 慧, 潘 彪, 黄利斌. 引进优质用材树种美国红橡的生长特性 [J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(6): 80-84.
Wang H, Pan B, Huang L B. Study on growth characteristics of

American red oak introduced with high-quality wood [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2018, 45(6): 80-84.

[4] 黄利斌, 李晓储, 朱惜晨, 等. 北美栎树引种试验研究 [J]. 林业科技开发, 2005(1): 30-34.
Huang L B, Li X C, Zhu X C, et al. Studies on introduction of north American oaks [J]. Journal of Forestry Engineering, 2005(1): 30-34.

[5] 方 芳, 王 松, 范正文, 等. 3 种北美栎树引种应用研究进展 [J]. 江苏林业科技, 2018, 45(4): 40-44.
Fang F, Wang S, Fan Z W, et al. Research progress on introduction and application of three north American oak species [J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 2018, 45(4): 40-44.

[6] 黄利斌, 窦全琴, 汤 瑾, 等. 栎树的生物学特性与栽培研究综述 [J]. 江苏林业科技, 2014, 41(6): 43-50, 54.
Huang L B, Dou Q Q, Tang J, et al. Review on biological characteristics and cultivation of oak [J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 2014, 41(6): 43-50, 54.

[7] 杨 静, 何开跃, 李晓储, 等. 淹水胁迫对两种栎树生长的影响 [J]. 林业科技开发, 2008(4): 34-37.
Yang J, He K Y, Li X C, et al. Influences of waterlogging stress on the growth and leaf anatomical structures of two oak species [J]. Journal of Forestry Engineering, 2008(4): 34-37.

[8] 黄利斌, 杨 静, 何开跃, 等. 纳塔栎和南方红栎 2 年生苗耐水湿性试验 [J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(5): 7-9, 35.
Huang L B, Yang J, He K Y, et al. Response of *Quercus nuttallii* and *Quercus falcata* saplings to flooding stress [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(5): 7-9, 35.

[9] 成俊卿. 木材学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1985.
Cheng J Q. Wood science [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1985.

[10] 汪师孟, 夏美君. 中国栎属木材的构造及物理-力学性质(一) [J]. 北京林业大学学报, 1983(3): 21-33.
Wang S M, Xia M J. Structural and physico-mechanical properties of Chinese oak wood (I) [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1983(3): 21-33.

[11] Ruiz-Aquino F, González-Pena, Marcos M, et al. Mechanical properties of wood of two Mexican oaks; relationship to selected physical properties [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, 76: 69-77.

[12] 龚 明. 作物抗旱性鉴定方法与指标及其综合评价 [J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 1989(1): 73-81.
Gong M. Methods and indexes for identification and comprehensive evaluation of drought resistance of crops [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 1989 (1): 73-81.

[13] 江泽慧, 彭镇华. 世界主要树种木材科学特性 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
Jiang Z H, Peng Z H. *Wood properties of the global important tree species* [M]. Beijing: Science Press, 2016.

[14] Badel E, Perré P. The shrinkage of oak predicted from its anatomical pattern: validation of a cognitive model [J]. *Trees* (Berlin), 2007, 21(1): 111-120.

[15] 尹思慈. 木材品质和缺陷 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1991.
Yin S C. *Wood quality and defects* [M]. Beijing: China Forestry Press, 1991.

[16] 毛卫国, 徐 伟, 黄琼涛, 等. 实木家具力学性能与选材指标分析 [J]. *林业科技开发*, 2015, 29(6): 127-131.
Mao W G, Xu W, Huang Q T, et al. Building of wood selecting index for solid wood furniture based on mechanical property analysis [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2015, 29(6): 127-131.

[17] Nick G. *The real wood bible* [M]. New York: Firefly Books (U. S.), 2012.

[18] 尚秀华, 张沛健, 罗建中, 等. 赤桉幼龄材物理力学性质研究 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5): 32-41.
Shang X H, Zhang P J, Luo J Z, et al. Physical and mechanical properties of *Eucalyptus camaldulensis* juvenile wood [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(5): 32-41.

[19] 罗 浩, 齐锦秋, 谢九龙, 等. 四川蓝桉幼龄材物理力学性质研究 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(2): 90-96.
Luo H, Qi J Q, Xie J L, et al. Physical-mechanical properties of *Eucalyptus globulus* juvenile wood from Sichuan [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(2): 90-96.

[20] Evans I J W, Senft J F, Green D W. Juvenile wood effect in red alder analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones [J]. *Forest Products Journal*, 2000, 50: 75-87.

[21] Bao F C, Jiang Z H, Jiang X M, et al. Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China [J]. *Wood Sci Tech*, 2001, 35(4): 363-375.

[22] 孙 恒, 冀晓东, 赵红华, 等. 人工林刺槐木材物理力学性质研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2018(7): 104-112.
Sun H, Ji X D, Zhao H H, et al. Physical and mechanical properties of *Robinia pseudoacacia* wood in artificial forests [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018(7): 104-112.

[23] Carrillo A, Garza M, María de Jesús Nanez, et al. Physical and mechanical wood properties of 14 timber species from Northeast Mexico [J]. *Annals of Forest Science*, 2011, 68(4): 675-679.

[24] 乔志霞, 沈火林, 安 岩. 番茄耐高温胁迫能力鉴定方法的研究 [J]. *西北农业学报*, 2006(6): 114-120.
Qiao Z X, Shen H L, An Y. The research on identifying methods in tolerance to high temperature of tomato [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2006(6): 114-120.