

同跨高比不同软化处理方法对荆条抗弯性能的影响

高 璟, 张晓燕, 赵丽娟, 刘倩云

(河北农业大学 河北省林木种质资源与森林保护重点实验室, 河北 保定 071000)

摘 要:荆条是优良编织材料, 荆条软化处理试验可为提高其柔软度、研发荆编家具提供理论依据。采用水煮、碳酸氢钠、尿素、乙二胺 4 种软化处理方法处理荆条, 通过测定同跨高比时荆条的最大弯曲挠度、抗弯弹性模量、抗弯强度, 分析不同软化处理对荆条纵向弯曲性能的影响。结果表明, 4 种软化处理的最大弯曲挠度表现为尿素、水煮>碳酸氢钠>乙二胺, 并随直径的增大而增大, 抗弯强度表现为碳酸氢钠>水煮>乙二胺>尿素。弹性模量表现为 尿素<水煮<乙二胺、碳酸氢钠, 大致随直径的增大而减小。4 种软化处理方法中, 尿素处理方法挠度大、抗弯弹模小、抗弯强度能满足使用要求, 其软化效果最佳。

关键词:荆条; 软化处理; 同跨高比; 最大弯曲挠度; 抗弯弹性模量

中图分类号:S793.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)05-0224-06

Influence about Different Softening Treatments on Bending Properties of *Vitex negundo* Twigs with the Same Span to Diameter Ratio

GAO Jing, ZHANG Xiao-yan, ZHAO Li-juan, LIU Qian-yun

(Key Lab of Forest Resources and Forest Protection, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: *Vitex negundo* twigs are fine woven materials, in order to improve the flexibility of the twigs and to provide theoretical basis for woven furniture, 4 different softening method were adopted to soft the twigs with the same ratios of span to diameter, such as boiling water, solutions of sodium hydrogen carbonate, urea, and ethylenediamine. The bending performances such as maximum bending deflection, modulus of elasticity and bending strength of the twigs were tested to analyze the effects of the treatments on the bending properties. The results indicated that: the sequence of the maximum bending deflection was urea and boiling water > sodium hydrogen carbonate > ethylenediamine, and the maximum bending deflection increased with the diameter. The sequence of the bending strength was sodium hydrogen carbonate > boiling water > ethylenediamine > urea. The sequence of the modulus of elasticity was urea < boiling water < ethylenediamine and sodium hydrogen carbonate, and the modulus of elasticity generally decreased with the diameter. The large bending deflection and small modulus of elasticity were gained after being treated with urea and at the same time the bending strength could satisfy the requirement, so the softening effect with urea was the best.

Key words: *Vitex negundo*; softening treatment; same span to diameter ratio; bending strength; maximum bending deflection

荆条广泛分布于我国东北、华北、西北、华中、西南等省、区^[1]。北京北部山区、河北承德、内蒙古昭

乌达盟等地区都有自然形成的天然屏障分布,是北方干旱山区阳坡、半阳坡的典型植被^[2],多为灌木,对荒山护坡和防止风沙具有良好的环境保护作用,是优良的水土保持树种。荆条性强健,其根茎萌发力强,平茬后第 2 年仍可旺盛生长,同时由于荆条枝条粗细均匀、坚韧有弹性,又是优良的编织材料。但由于当年生枝条质脆易折,限制了荆条的适用范围,只能做筐、篓等粗糙用品。因此提高荆条柔软度,使其能满足编织工艺的要求、创造高附加值产品——荆编家具,对荆条进行软化处理,是提高荆条使用价值的重要途径和关键技术。

荆条木质部细胞壁是由纤维素、半纤维素和木素组成的。木素是天然的粘合剂,其作用是把纤维素、半纤维素粘合起来,从而赋予细胞壁一定的硬度和强度,细胞之间也由于木素的作用而彼此牢固地粘结在一起。软化荆条的目的是使细胞壁强度降低,可塑性增强,同时使细胞间的结合力减弱,有利于细胞间的滑动。为此,本研究采用水煮、碳酸氢钠、尿素、乙二胺 4 种方法^[3-4],对荆条进行软化处理,通过最大弯曲挠度、抗弯弹性模量表征荆条的软化效果,揭示不同软化处理对荆条弯曲性能的影响,为荆条加工利用——编制荆条家具提供理论依据。

几十年来,国内外的学者主要对木材的软化弯曲处理及木材的力学性质进行了研究^[5-7]。由于国内外还没有灌木及藤材物理力学性能测试的相应国家标准,因而现有的关于灌木或藤力学性质测试方法的研究也较少,主要有红岭等沙柳材物理力学性质测试方法^[8]研究,罗真付^[9]等棕榈藤力学性质测试方法研究,高璟^[10]等荆条藤柳力学性质测试与对比研究,高璟^[11]等高径比跨高比对荆条纵向抗压抗弯性能测试精度的影响。基于国内外研究者的相关研究方法,本研究结合灌木枝条的圆形截面截取试样,但这样截取的试样直径粗细不同,若采用相同跨度(即两支座间距),则由于跨高比不同对抗弯力学指标的测试结果必定造成影响,使荆条的抗弯力学性能指标缺乏相互比较的基础,为此以同跨高比为前提条件,采用水煮、碳酸氢钠、尿素、乙二胺 4 种软化处理方法,测试了荆条的最大弯曲挠度、抗弯弹性模量、抗弯强度,据此分析不同软化处理对荆条弯曲性能的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*),直径 8、10 mm,采自河北省保定市易县清西陵。

1.2 仪器

WDW-100 微控电子万能试验机、电子万用炉、数显恒温水浴锅 HH-1、电子天平、游标卡尺、1 000 mL 量筒、125 mL 量筒、温度计。

1.3 试剂

10% 尿素(分析纯):用电子天平称取 100 g 的尿素,溶于 900 mL 蒸馏水,现配现用。

10% NaHCO₃(分析纯):用电子天平称取 100 g 的 NaHCO₃,溶于 900 mL 蒸馏水,现配现用。

10% 乙二胺(分析纯):密度 0.9 g/mL,用量筒准确量取 111 mL 的乙二胺,溶于 900 mL 蒸馏水,现配现用。

1.4 试样制备

梁横截面抗弯强度计算公式是在纯弯曲时,以平面假设和单向受力假设为基础推导出的。而弯曲试验采用的中央单点加荷的 3 点弯曲试验,横截面上不仅有弯矩,而且有剪力。因此,梁的横截面上不仅有正应力,而且还有切应力。由于切应力的存在,梁的横截面不能保持平面,而发生翘曲。同时,由于横向力的作用,梁各层纵向纤维之间还存在着挤压应力。由此可见,在纯弯曲时所作的平面假设和单向受力假设,都不再成立。但是,精确的理论分析证明,工程中常见的梁,当跨度与高度之比 L/h (简称跨高比) >5 时,正应力计算公式可以推广应用于横力弯曲,其计算结果略低于精确解。随着跨高比的减小,其误差随之增大。

根据“高径比跨高比对荆条纵向抗压抗弯性能测试精度的影响^[11]”一文的结论,跨高比为 8~12 均能满足测试精度要求,考虑试样过短不利于测试抗弯弹性模量,因此本试验选用跨高比为 12,并且直径取 8 mm 和 10 mm 的 2 组试件测试,即按照跨高比 12,将直径为 10 mm 的试样截成 150 mm 长、跨度为 120 mm 的试件,直径为 8 mm 的试样截成 120 mm 长、跨度为 96 mm 的试件。为避免节疤影响,锯截试件时应保证试样中部加载部位附近无节疤。

1.5 软化处理方法

荆条软化处理方法考虑木材改性的物理和化学方法及荆条的传统软化方法,在对荆条软化工艺条件分析研究基础上,采用了 4 种处理方案:1)水煮处理,用水浸泡 2 d,加热至 100℃,处理时间 2.5 h;2)尿素处理,用 10% 的尿素浸泡 2 d,加热至 100℃,处理时间 1.5 h;3)碳酸氢钠处理,10% 的碳酸氢钠浸泡 2 d,加热至 100℃,处理时间 75 min;4)乙二胺处理,10% 的乙二胺浸泡 2 d,加热至 60℃,处理时

间 1.5 h。每种处理方法均选取直径为 8 mm 和 10 mm 的 2 组试样各 30 个,以便比较分析不同粗细的荆条弯曲软化的差异。

1.6 试验方法

试验方法参照 GB/T1936. 1-2009“木材抗弯强度试验方法”^[12]及 GB/T1936. 1-2009 “木材抗弯弹性模量试验方法”^[13]。采用中央单点加载法测定。

水煮、碳酸氢钠、尿素、乙二胺 4 种软化处理方法处理荆条后直接测定能体现软化效果的力学指标:纵向抗弯强度、最大弯曲挠度、抗弯弹性模量。由于试件均为圆形截面,其惯性矩 $I_z = \pi d^4 / 64$,抗弯强度及弹性模量计算公式由材料力学理论^[14-15]得出。

抗弯强度 MOR 计算公式:

$$\sigma_w = \frac{8FL}{\pi d^3}$$

(1)

表 1 跨高比为 12、直径 8 mm 和 10 mm 各软化处理的测试指标平均值

测试指标	未处理		水煮法		尿素法		碳酸氢钠法		乙二胺法	
	8 mm	10 mm	8 mm	10 mm	8 mm	10 mm	8 mm	10 mm	8 mm	10 mm
抗弯强度/MPa	138.52	117.08	84.46	88.94	69.88	70.31	93.01	90.30	79.02	84.54
弯曲挠度/mm	11.150	12.818	17.029	20.300	15.744	21.262	14.016	16.535	13.028	15.959
弹性模量/GPa	11.964	11.450	7.921	8.085	7.149	6.830	8.400	8.272	8.347	8.340

注:未处理荆条抗弯强度实测值含水率为 17%,表中平均值为换算成含水率 12% 的结果。

2.2 同跨高比不同软化处理方法对荆条最大弯曲挠度的影响

弯曲挠度是衡量荆条弯曲软化效果的重要力学指标之一,在同跨高比前提下,其值越大,则弯曲软化效果越好。软化处理后,荆条的弯曲挠度增加。

由表 1 可知,直径 8 mm 的各处理弯曲挠度表明:最大弯曲挠度的均值,水煮>尿素>碳酸氢钠>乙二胺>未处理。处理比未处理的最大弯曲挠度高 16.84%~52.73%。

由表 1 可知,直径 10 mm 的各处理弯曲挠度表明:最大弯曲挠度的均值,尿素>水煮>碳酸氢钠>乙二胺>未处理。处理比未处理的最大弯曲挠度高 24.50%~65.88%。

表 1 同种处理方法下,直径 10 mm 的最大弯曲挠度大于直径 8 mm 的最大弯曲挠度,即最大弯曲

式中: F —最大荷载(N); L —两支座距离(mm); d —试件直径(mm)。

最大弯曲挠度为试样弯曲最大位移量,从弯曲曲线上读取。

抗弯弹性模量 MOE 计算公式:

$$E_w = \frac{4\Delta FL^3}{3\pi d^4 \Delta f}$$

(2)

式中: ΔF —上下限荷载之差(N); Δf —上下限荷载间试件中部的挠度(mm); L —2 支座距离(mm); d —试件直径(mm)。

2 结果与分析

2.1 同跨高比不同软化处理方法的抗弯性能

根据跨高比为 12、直径为 8 mm 和 10 mm 各软化处理的测试指标平均值,汇总得出表 1。

挠度随直径的增大而增大。

2.2.1 同跨高比不同软化处理方法的最大弯曲挠度的方差分析 根据跨高比为 12、直径为 8 mm 和 10 mm 各处理荆条的最大弯曲挠度进行方差分析^[16],得出表 2、表 3。

表 2、表 3 表明,未处理与碳酸氢钠和乙二胺处理的荆条最大弯曲挠度显著性 $F > 0.05$,差异不显著;而与尿素和水煮处理的显著性 $F < 0.05$,差异显著。各处理间,尿素与水煮的显著性 $F > 0.05$,差异不显著;尿素与碳酸氢钠和乙二胺的显著性 $F < 0.01$,差异极显著。

2.2.2 相同软化处理方法不同粗细的最大弯曲挠度的方差分析 根据跨高比为 12、对相同软化处理不同粗细荆条的最大弯曲挠度进行方差分析得出表 4。

表 2 跨高比为 12、直径 8 mm 各处理挠度方差分析统计值

因变量	对比	(I)水平设置	(J)水平设置	标准误	显著性
V2 LSD	未处理与处理间	1	2	1.136 537	0.001
V2 LSD	未处理与处理间	1	3	1.136 537	0.438
V2 LSD	未处理与处理间	1	4	1.136 537	0.926
V2 LSD	未处理与处理间	1	5	1.136 537	0.023
V2 LSD	各处理间	2	3	1.136 537	0.009
V2 LSD	各处理间	2	4	1.136 537	0.001
V2 LSD	各处理间	2	5	1.136 537	0.260

注:因变量 V2 表示直径 8 mm、水平设置中 1 表示未处理、2 表示水煮、3 表示碳酸氢钠、4 表示乙二胺、5 表示尿素。

表 3 跨高比为 12、直径 10 mm 各处理挠度方差分析统计值

Table 3 Variance analysis of deflection of twigs with diameter 10 mm and span to diameter ratio 12 after treated by different methods					
因变量	对比	(I)水平设置	(J)水平设置	标准误	显著性
V3 LSD	未处理与处理间	1	2	1.422 569	0.001
V3 LSD	未处理与处理间	1	3	1.422 569	0.396
V3 LSD	未处理与处理间	1	4	1.422 569	0.656
V3 LSD	未处理与处理间	1	5	1.422 569	0.000
V3 LSD	各处理间	5	2	1.422 569	0.500
V3 LSD	各处理间	5	3	1.422 569	0.001
V3 LSD	各处理间	5	4	1.422 569	0.000

注:因变量 V3 表示直径 10 mm、水平设置中 1 表示未处理、2 表示水煮、3 表示碳酸氢钠、4 表示乙二胺、5 表示尿素。

表 4 跨高比为 12、相同软化处理不同粗细荆条的
最大弯曲挠度方差分析统计值

Table 4 Variance analysis of deflection of twigs with different diameters and span to diameter ratio 12 after treated by different methods				
因变量	(I)水平设置	(J)水平设置	标准误	显著性
未软化处理	1	2	0.889 402	0.023
水煮处理	1	2	1.287 974	0.008
10%碳酸氢钠处理	1	2	1.123 209	0.020
10%乙二胺处理	1	2	1.128 369	0.010
10%尿素处理	1	2	0.907 993	0.000

注:水平设置中 1 表示直径 8 mm、2 表示直径 10 mm。

表 4 表明,未处理和碳酸氢钠处理细的(直径 8 mm)与粗的(直径 10 mm)荆条的最大弯曲挠度显著性 $F<0.05$,差异显著;而水煮、乙二胺、尿素处理不同粗细的差异性 $F<0.01$,差异极显著。

综上所述,同跨高比前提下,直径为 8 mm 的最大弯曲挠度均值,水煮>尿素>碳酸氢钠>乙二胺>未处理;直径为 10 mm 的最大弯曲挠度均值,尿素>水煮>碳酸氢钠>乙二胺>未处理。未处理荆条的最大弯曲挠度与水煮、尿素处理的荆条的最大弯曲挠度差异显著;而水煮与尿素处理二者间无显著差异。相同处理不同粗细荆条的最大弯曲挠度差异显著,最大弯曲挠度随直径的增大而增大。

2.3 同跨高比不同软化处理方法对荆条纵向抗弯强度的影响

表 1 表明,抗弯强度均值,未处理>碳酸氢钠>水煮>乙二胺>尿素,说明软化处理后荆条的纵向抗弯强度降低。其中尿素处理的纵向抗弯强度最低,但与藤的纵向抗弯强度(70.75 MPa)^[10]近似,能满足编制家具等使用要求。

2.3.1 同跨高比不同软化处理方法的纵向抗弯强度的方差分析 根据跨高比为 12、直径为 8 mm 和 10 mm 各处理的荆条纵向抗弯强度进行方差分析,结果表明,未处理荆条的抗弯强度与处理过的荆条的抗弯强度显著性 $F<0.01$,差异极显著。各处理间,尿素与水煮和碳酸氢钠的显著性 $F<0.01$,差异极显著;而尿素与乙二胺直径 8 mm 的差异性 $F>$

0.05,差异不显著,与直径 10 mm 的差异性 $F<0.01$,差异极显著。

2.3.2 相同软化处理方法不同粗细的纵向抗弯强度的方差分析 根据跨高比为 12 的同种软化处理不同粗细荆条的纵向抗弯强度进行方差分析,结果表明,未处理荆条细的(直径 8 mm)与粗的(直径 10 mm)二者的抗弯强度显著性 $F<0.05$,差异显著;而水煮、碳酸氢钠、乙二胺、尿素不同粗细的差异性 $F>0.05$,差异不显著。

综上所述,同跨高比前提下,纵向抗弯强度均值,未处理>碳酸氢钠>水煮>乙二胺>尿素,说明软化处理后荆条抗弯强度降低。未处理荆条的抗弯强度与处理后的荆条的抗弯强度差异显著。未处理不同粗细荆条的抗弯强度差异显著,细的(直径 8 mm)的抗弯强度大于粗的(直径 10 mm);相同处理不同粗细荆条的抗弯强度无显著差异。

2.4 同跨高比不同软化处理方法对荆条弹性模量的影响

抗弯弹性模量代表木材的弹性,即比例极限内抵抗弯曲变形的能力。抗弯弹摸越大,则越刚硬;反之,则比较柔曲。软化处理后,荆条的抗弯弹性模量降低。

由表 1 可知,直径 8 mm 的抗弯弹性模量表明,弹性模量均值,未处理>碳酸氢钠>乙二胺>水煮>尿素。处理比未处理的弹性模量降低 29.79%~40.24%。

由表 1 可知,直径 10 mm 的抗弯弹性模量表明,弹性模量均值,未处理>乙二胺>碳酸氢钠>水煮>尿素。处理比未处理的弹性模量降低 27.16%~40.35%。

软化处理后,荆条的抗弯弹性模量降低,经过处理的荆条弹性模量比未处理的降低 27.16%~40.35%。同种处理方法下,除水煮条件下直径 10 mm 的弹性模量稍大于直径 8 mm 的外,尿素、碳酸氢钠、乙二胺 3 种处理方法均是直径 10 mm 的弹性模量小于直径 8 mm 的弹性模量,说明同跨高比前提下,弹性模量随直径增大而减小,与最大弯曲挠度

的结果一致。

2.4.1 同跨高比不同软化处理方法的弹性模量的方差分析 根据跨高比为 12、直径为 8 mm 和 10 mm 各处理的荆条弹性模量进行方差分析,结果表明,未处理荆条的弹性模量与处理过的荆条的弹性模量显著性 $F<0.01$,差异极显著。直径 8 mm 的荆条,尿素与水煮的显著性 $F>0.05$,差异不显著;尿素与乙二胺、碳酸氢钠的显著性 $F<0.05$,差异显著。直径 10 mm 的荆条,尿素与水煮的显著性 $F<0.05$,差异显著;尿素与碳酸氢钠和乙二胺的显著性 $F<0.01$,差异极显著。

2.4.2 相同软化处理方法不同粗细的弹性模量的方差分析 根据跨高比为 12 的同种软化处理不同粗细的荆条弹性模量进行方差分析,结果表明,未处理、水煮、碳酸氢钠、乙二胺、尿素处理 5 种情况下,细的(直径 8 mm)与粗的(直径 10 mm)的荆条弹性模量的显著性 $F>0.05$,差异均不显著。

综上所述,同跨高比前提下,直径为 8 mm 的弹性模量均值,未处理>碳酸氢钠>乙二胺>水煮>尿素;直径为 10 mm 的弹性模量均值,未处理>乙二胺>碳酸氢钠>水煮>尿素,说明软化处理后荆条弹性模量降低。未处理荆条的弹性模量与处理后的荆条的弹性模量差异显著;且尿素处理与乙二胺、碳酸氢钠、水煮处理的抗弯弹性模量差异显著,说明尿素处理的软化效果最佳。同种处理不同粗细的抗弯弹性模量随直径增大而减小,但二者无显著差异。

2.5 软化处理对纵向抗弯强度与抗弯弹性模量二者相关关系的影响

根据未处理荆条在含水率 12%时的纵向抗弯强度和抗弯弹性模量^[17],发现二者之间存在线性相关性,并得出关系式:

$$E_w = 84.735\sigma_w + 1\,441.4 \text{ (MPa)}, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.605\,6。$$

根据水煮处理荆条的纵向抗弯强度和抗弯弹性模量,得出关系式:

$$E_w = 68.243\sigma_w + 2\,086.6 \text{ (MPa)}, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.347\,8。$$

根据 10%碳酸氢钠处理荆条的纵向抗弯强度和抗弯弹性模量,得出关系式:

$$E_w = 65.059\sigma_w + 23\,824 \text{ (MPa)}, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.3531。$$

根据 10%乙二胺处理荆条的纵向抗弯强度和抗弯弹性模量,得出关系式:

$$E_w = 71.411\sigma_w + 2\,503.2 \text{ (MPa)}, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.524\,2。$$

根据 10%尿素处理荆条的纵向抗弯强度和抗

弯弹性模量,得出关系式:

$$E_w = 61.711\sigma_w + 2\,664.2 \text{ (MPa)}, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.281\,5。$$

由相关系数看出,水煮、碳酸氢钠、乙二胺、尿素 4 种软化处理后纵向抗弯强度与抗弯弹性模量的相关性均降低。

3 结论与讨论

最大弯曲挠度表现为,尿素、水煮>碳酸氢钠>乙二胺>未处理;未处理荆条的最大弯曲挠度与水煮、尿素处理的荆条的最大弯曲挠度差异显著;而水煮与尿素处理二者间无显著差异;相同处理不同粗细荆条的最大弯曲挠度差异显著,最大弯曲挠度随直径的增大而增大。

纵向抗弯强度表现为,未处理>碳酸氢钠>水煮>乙二胺>尿素;未处理荆条的抗弯强度与处理后的荆条的抗弯强度差异显著。未处理不同粗细荆条的纵向抗弯强度差异显著,细的(直径 8 mm)的抗弯强度大于粗的(直径 10 mm);相同处理不同粗细荆条的纵向抗弯强度无显著差异。

抗弯弹性模量表现为,未处理>乙二胺、碳酸氢钠>水煮>尿素;未处理荆条的弹性模量与处理后的荆条的弹性模量差异显著;尿素处理与水煮、碳酸氢钠、乙二胺处理的抗弯弹模差异显著,说明尿素处理的软化效果最佳;同种处理不同粗细的抗弯弹模无显著差异。

综合分析 4 种软化处理的弯曲挠度、抗弯弹性模量、抗弯强度,尿素处理方法抗弯弹性模量最小、弯曲挠度大,软化效果最佳。其次是荆条编织中采用的传统软化处理方法——水煮处理。

参考文献:

[1] 张金瑞,高甲荣,崔强,等. 三种典型立地荆条种群及种间分布的空间点格局[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(2): 226-233.
ZHANG J R, GAO J R, CUI Q, *et al.* Point pattern analysis for relationships of *Vitex negundo* var. *heterophylla* in three tipycal stands [J]. January of Zhejiang A & F University, 2013,30(2):226-233. (in Chinese)
[2] 胡淑平,余新晓,郭永盛. 北京山区天然荆条灌丛立地条件的数量化分析[J]. 林业资源管理,2010(3):60-63.
HU S P, YU X X, GUO Y S. Quantification analysis on site conditions of natural *Vitex negundo* community in Beijing mountainous area [J]. Forest Resource Management, 2010 (3):60-63. (in Chinese)
[3] 陈金法,刘占朝,王团荣. 荆条软化剂研制试验[J]. 河南林业科技,1997,17(1):16-24 .
CHEN J F, LIU Z C, WANG T R. Developed tests on softer-

ner of twigs of the chaste of tree[J]. Journal of Forestry Science and Technology,17(1):16-24. (in Chinese)

[4] 胡玉喜,林金星. 高度木质化材料软化的简便方法[J]. 植物杂志,2000(3):31.
HU Y X, LIN J X. Simple methods high-wooded material[J]. Journal of Plants,2000(3):31. (in Chinese)

[5] 佟达,宋魁彦,李坚. 水热—微波软化处理对水曲柳弯曲的影响[J]. 林业科学,2011,47(11):129-132.
TONG D, SONG Y K, LI J. Effect of hydrothermal-micro-wave softened treatment on bending ash wood[J]. Forestry Science,2011,47(11):129-132. (in Chinese)

[6] 叶翠仙,陆继圣,刘经榜. 荷木小径材弯曲工艺[J]. 福建林学院学报,2001, 21(2):135-138.
YE C X, LU J S, LIU J B. Technology of bending for small-diameter logs of schima superba[J]. Journal of Fujian Forestry College, 2001,21(2):135-138. (in Chinese)

[7] REMOND R, PASSARD J, PERRE P. The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood;a comprehensive model applied to drying and bending [J]. European Journal of Mechanics - A/solids, 2007, 26(3):558-572.

[8] 红岭, 安珍. 沙柳材物理力学性质的测定[J]. 林产工业, 2012(4):56-59.
HONG L, AN Z. Physical and mechanical properties determination of salix [J]. China Forest Products Industry, 2012(4): 56-59. (in Chinese)

[9] 罗真付, 张雪峰, 陆步云, 等. 棕榈藤力学性质及测试方法的研究[J]. 家具与室内装饰, 2012(7):108-110.
LUO Z F, ZHANG X F, LU B Y, *et al.* Mechanical properties and test methods of rattan[J]. Furniture & Interior Design, 2012(7):108-110. (in Chinese)

[10] 高璟, 张晓燕, 卢国新, 等. 荆条藤柳力学性质测试与对比研究[J]. 林业实用技术, 2012(11):103-106.

[11] 高璟, 张晓燕, 卢国新, 等. 高径比跨高比对荆条纵向抗压抗弯性能测试精度的影响[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4): 214-218.
GAO J, ZHANG X Y, LU G X, *et al.* The Influence of height to diameter and span to diameter ratios on test precision of compressive and bending properties of *Vitex negundo* twigs [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(4): 214-218. (in Chinese)

[12] GB/T1936.1-2009. 木材抗弯强度试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2009.

[13] GB/T1936.2-2009. 木材抗弯弹性模量试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2009.

[14] 孙训芳, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(I) [M]. 北京:高等教育出版社, 2009:97-178.

[15] 毕杰春, 宁宝宽, 黄杰, 等. 实验力学[M]. 北京:化学工业出版社, 2011:65-69, 71-75.

[16] 续九如, 黄智慧, 编著. 林业试验设计[M]. 北京:中国林业出版社, 1992:76-80.

[17] 刘一星, 赵广杰. 木质资源材料学[M]. 北京:中国林业出版社, 2003:200-203, 279-287.

(上接第 156 页)

[14] 刘梦培, 杜红岩, 朱高浦, 等. 甜仁仁用杏果实形态主要评价指标的选择[J]. 中南林业科技大学学报, 2014(3):38-42.
LIU M P, DU H Y, ZHU G P, *et al.* Selection of main evaluation indexes of *sweet almond*-apricot fruit morphology[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014(3):38-42. (in Chinese)

[15] 孙浩元, 杨丽, 张俊环, 等. 杏种质资源部分数量性状的分级指标探讨[J]. 中国农学通报, 2008, 24(1):147-151.
SUN H Y, YANG L, ZHANG J H, *et al.* Classification criteria of some quantitative characteristics of apricot germplasm resources[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(1):147-151. (in Chinese)

[16] 刘勇, 孙中海, 刘德春等. 部分柚类品种数值分类研究[J]. 果树学报, 2006, 23(1):35-40.
LIU Y, SUN Z H, LIU D C, *et al.* Study on numerical taxonomy of pomelo cultivars [J]. Journal of Fruit Science, 2006,23(1):35-40. (in Chinese)

[17] 孙垚, 肖千文, 黄丽媛, 等. 核桃单株经济性状的主成分分析[J]. 四川农业大学学报, 2011, 29(2):185-190.
SUN Y, XIAO Q W, HUANG L Y, *et al.* Economic Characters of Walnut Plants from Principal Component Analysis [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2011, 29(2):185-190. (in Chinese)

[18] DIAS J S, MONTEIRO A A, LIMA M B. Numerical taxonomy of Portuguese Tronchuda cabbage and Galega kale landraces using morphological characters[J]. Euphytica, 1993, 69(1-2):51-68.

[19] 殷冬梅, 李拴柱, 崔党群, 等. 花生主要农艺性状的相关性及聚类分析[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(2):212-216.
YIN D M, LI S Z, CUI D Q, *et al.* Agronomic character and cluster analysis of peanut cultivars[J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2010, 32(2):212-216. (in Chinese)

[20] 苏艳, 王盼乔, 胡建斌. 十五份甜瓜种质苗期性状的聚类分析及相关分析[J]. 北方园艺, 2014(7):5-8.
SU Y, WANG P Q, HU J B. Clustering and correlation analysis of 15 *Cucumis melo* L. germplasma based on the phenotypic traits of the seeding period[J]. Northern Horticulture, 2014(7):5-8. (in Chinese)