

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021045

三种针叶树材单根管胞形态与拉伸性能

冯启明, 任素红, 吕建雄, 王玉荣, 龚迎春, 赵荣军

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 选取杉木、白皮松、日本落叶松三种针叶树材为研究对象, 探究并比较位于不同生长轮的单根管胞的形态参数及拉伸力学性能。结果表明, 三种针叶树材的管胞长度、宽度、长宽比及拉伸强度、弹性模量、断裂伸长率基本符合随生长轮增加而增大的变化规律; 杉木管胞的长度、宽度最大, 日本落叶松晚材第9生长轮的管胞具有最佳的拉伸性能。方差分析表明, 杉木和白皮松的第3生长轮与其他生长轮的管胞形态具有显著性差异 ($P < 0.05$)。杉木、日本落叶松的第3生长轮与其他生长轮的管胞拉伸力学性能具有显著性差异 ($P < 0.05$), 而白皮松各生长轮间的拉伸力学性能没有显著性差异。研究结果为人工林木质纤维的高效利用及建筑用材提供依据。

关键词: 针叶树材; 单根管胞; 管胞形态; 拉伸; 力学性能

中图分类号: S781.82; S781.29

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2022) 01-0043-06

Study on the Morphology and Tensile Properties of Single Tracheids of Three Softwoods

FENG Qi-ming, REN Su-hong, LYU Jian-xiong, WANG Yu-rong, GONG Yi-chun, ZHAO Rong-jun

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

Abstract: The morphological parameters and tensile mechanical properties of single tracheids in different growth rings of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*), Chinese lace-bark pine (*Pinus bungeana*), and Japanese larch (*Larix kaempferi*) were studied and compared. The results showed that the length, width, ratio of length to width, tensile strength, elongation at break, and the elastic modulus of the tracheids of the three species of softwood nearly increased with growth rings. The length and width of Chinese fir tracheids were the largest, and the mechanical properties of larch latewood from the ninth growth ring tracheids were the best among three species. Analysis of variance showed that the morphologies of tracheids of the third growth ring were significantly different from that of other growth rings ($P < 0.05$) of Chinese fir and Chinese lace-bark pine. There were significant differences in tracheid tensile mechanical properties between the third growth ring and other growth rings of Chinese fir and larch ($P < 0.05$), while there was no significant difference in that among all the growth rings of Chinese lace-bark pine. These data provided the important basis for the efficient utilization of plantation wood fiber and building lumber.

Key words: softwood; single tracheid; tracheid morphology; stretch; mechanical properties

收稿日期: 2021-04-21; 修改日期: 2021-07-20

基金项目: 浙江省省院合作林业科技项目“高强度人工林杉木工程木产品制造关键技术”(2021SY09); “十三五”国家重点研发计划课题“木材细胞壁结构调控对性能的影响机制”(2017YFD0600202)。

作者简介: 冯启明 (1995—), 女, 博士研究生。Email: fenghester@foxmail.com

通讯作者: 赵荣军, 女, 研究员。Email: rongjun@caf.ac.cn

木材作为一种可再生的生物质材料,被大量用于家具、建筑、制浆造纸等领域,具有十分巨大的发展潜力。为了科学高效地利用人工林木材资源,有必要对其细胞形态与性质进行深入研究。木材分为针叶树材与阔叶树材,其中针叶树材的主要组成细胞是管胞,约占总体积的90%,管胞的长度、宽度等是针叶树材重要的形态参数。目前有学者开展了马尾松 (*Pinus massoniana*)^[1]、翠柏 (*Calocedrus macrolepis*)^[2]、兴安落叶松 (*Larix gmellini*)^[3]、长白落叶松 (*Larix olgensis*)^[4]、银杏 (*Ginkgo biloba*) 与赤松 (*Pinus densiflora*)^[5]、云南油杉 (*Keteleeria evelyniana*)^[6]等针叶树材的单根管胞形态变化规律及分布频率的研究,表明针叶树材管胞的平均长度为3~5 mm,直径在15~80 μm 范围内,这样微小尺度的单根管胞力学性能测定十分困难且复杂^[7]。

国外对白云杉 (*Picea glauca*) 和香脂冷杉 (*Abies balsamea*)^[8]、火炬松 (*Pinus taeda*)^[9]及挪威云杉 (*Picea abies*)^[10]等针叶树材管胞的力学性能进行了一系列的研究,在试验方法上针对纤维夹紧、定向及细胞壁横截面面积的测量这几个难点进行了积极探索,采用胶粘方式取代机械夹紧,成效显著^[11]。

国内对单根纤维的力学性能研究较少^[7,11]。2008年,国际竹藤中心的研究团队在引进国际先进农业科学技术计划(“948”计划项目)和国家自然科学基金项目的资助下,研发出中国第一台植物短纤维力学性能测试专用设备^[12],开启了国内单根纤维研究的篇章。其后,国内学者们研究了毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 和马尾松^[13]、日本落叶松^[14-15]、长白落叶松^[4,16]、杉木、苧麻 (*Boehmeria nivea*)^[17]、马尾松^[18]、谷子茎秆 (*Setaria italica*)^[19]、棕榈 (*Trachycarpus fortunei*)^[20-21]等单根纤维(包括针叶树材管胞)的拉伸性能及变异规律。但目前对不同树种、不同生长轮单根管胞形态与拉伸力学性能对比研究鲜有报道。

鉴于此,本文选取三种人工林针叶树材——杉木、白皮松和日本落叶松为研究对象,对比其单根管胞性能的差异,为我国人工林树种培育、木质纤维的高效利用及建筑用材提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选取较为常见、纤维利用广泛且性能相对优异的三种代表性针叶树材树种^[22],人工林杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、白皮松 (*Pinus bungeana*)、日本落叶松 (*Larix kaempferi*) 作为试验材料,基本信息见表1。取样地分别位于浙江开化、北京、辽宁清原。

表1 三种针叶树材样木基本信息

Tab.1 Basic information about three species of softwood samples

试样名称	树龄/a	胸径/cm	树高/m
杉木(F)	20	17.6	17.4
白皮松(P)	44	13.0	16.5
日本落叶松(L)	30	24.5	18.2

在样木主干1.3 m处截取40 mm厚的圆盘(图1a、1b),沿南北向通过髓心锯取宽20 mm的木条(图1b),之后将木条锯切成宽度为10 mm、高度为30 mm的中心条,选取北向中心条为研究材料(图1c)。目前的研究表明杉木(简称F)、日本落叶松(简称L)的成熟年龄约14 a^[23-24],为保证试验的变量单一,分别在北向中心条的第3、9、15个生长轮处取样(其中日本落叶松的早材(LE)、晚材(LL)分别取样)以区分幼龄材至成熟材,切成1 mm×1 mm×3 mm的小木条备用(图1d)。

1.2 试验设备

恒温水浴锅,高精度植物短纤维力学性能测试仪,激光共聚焦显微镜,体视显微镜。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备

将小木条样品放进试管中,加入配制的离析液($V_{\text{氧化氢}}:V_{\text{冰醋酸}}=1:1$),放置在60℃水浴锅中20 h,观察小木条变成白色后取出,用蒸馏水反复洗去残留的离析液。将小木条用玻璃棒充分打散于水中,形成纤维悬浮液。用滴管吸取少量悬浮液滴在载玻片上,使木材管胞充分分散,最后将带有单根管胞的载玻片放入60℃烘箱中烘干备用。在体视显微镜下用超精细镊子,在选定的每个生长轮位置选取两端尖削的单根管胞横放在开有凹槽的有机玻璃板上,在管胞两端滴AB胶固定(图1e、1f)12 h备用。

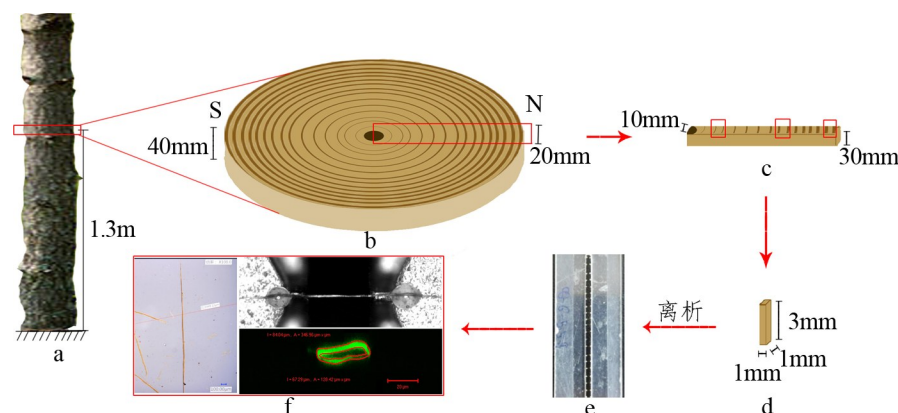


图1 试验过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experiment steps

1.3.2 管胞形态参数测量

每个树种的3个生长轮分别随机选取30根形态完整的管胞，在体视显微镜下分别用100、300倍的物镜观察并测量单根管胞的长度、宽度，用Excel计算长宽比。

1.3.3 单根管胞拉伸性能测量

采用高精度植物短纤维力学性能测试仪，根据GB/T 35378—2017《植物单根短纤维拉伸力学性能测试方法》测定管胞的断裂载荷。设置拉力量程为100 G，拉伸速率为0.005 mm/s。每组选取有效数据15个。

为计算单根管胞的拉伸强度值，还需要测试其横截面积。将力学测试后所得数据有效的15根断裂管胞置于吖啶橙（Acridine Orange）溶液中染色1 min后，固定在载玻片上，设置激光光源波长为488 nm，利用激光共聚焦显微镜测量管胞横截面积（图2）。

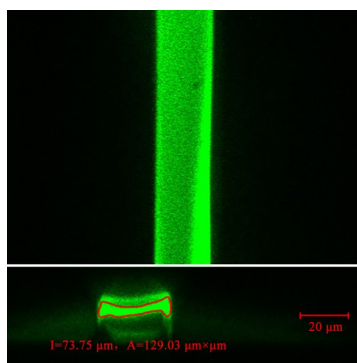


图2 管胞横截面积测量

Fig.2 Measurement of the cross-section area of a single tracheid

根据GB/T 35378—2017中的公式计算拉伸强度、弹性模量、断裂伸长率。结果用Excel和SPSS Statistics软件进行分析。

2 结果与讨论

2.1 三种针叶树材单根管胞的形态参数

三种针叶树材单根管胞形态参数（3个生长轮）的平均值，列于表2。

表2 三种针叶树材单根管胞形态参数的平均值

Tab.2 Average values of single tracheid morphological parameters of three species of softwood

树种	管胞长度		管胞宽度		长宽比	
	测量值/ μm	CV/%	测量值/ μm	CV/%	计算值	CV/%
F	3 376.72	14.09	26.18	19.43	134.09	25.80
P	2 276.86	19.24	20.81	17.12	114.36	30.64
LE	2 841.43	23.48	23.83	12.12	120.53	24.48
LL	2 767.27	18.98	18.83	16.17	149.87	21.77

表2显示，杉木管胞的长度最长，且变异系数（CV）最小，性质较为稳定；白皮松管胞的长度最短；日本落叶松的管胞长度均值与其他学者关于日本落叶松管胞长度的研究结果（2 939.90 μm ）接近^[25]。杉木管胞的宽度最大，但CV也较大；日本落叶松早材的管胞宽度仅次于杉木，CV最小，性质较为稳定。日本落叶松晚材的长宽比最大，且CV最小；白皮松的长宽比最小，而CV最大，管胞形态稳定性相对较差。综上所述，日本落叶松晚材管胞的三种形态参数最为稳定，性能更优。

图3是三种针叶树材不同生长轮的单根管胞长度、宽度和长宽比。

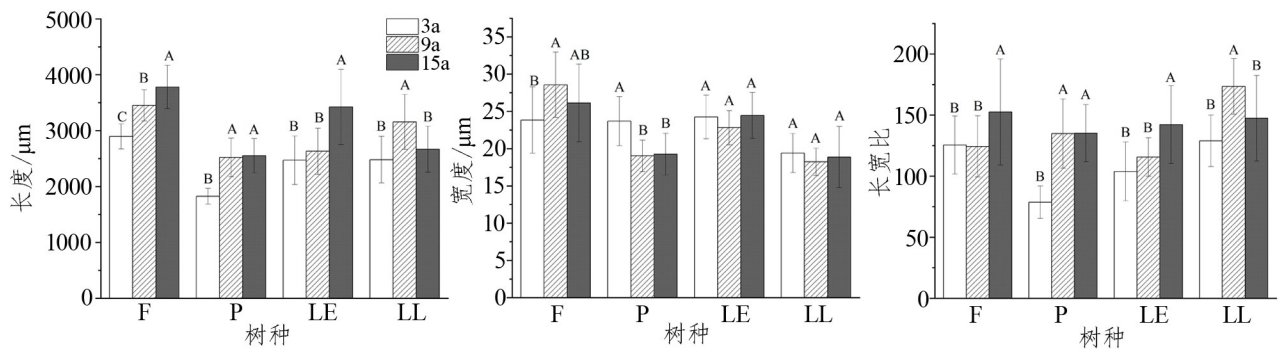


图3 三种针叶树材不同生长轮管胞长度、宽度及长宽比

Fig.3 Tracheid length, width, and ratio of length to width in different growth rings of samples

图3显示，在所测的三个生长轮中，杉木、白皮松和日本落叶松早材的管胞平均长度随生长轮的增加而增加，即在第15生长轮处分别达到最大值3 781.45、2 552.21、3 423.30 μm ，与文献中兴安落叶松管胞长度的变异规律一致^[2]；日本落叶松晚材则在第9生长轮处达到最大值3 154.69 μm 。杉木的管胞平均宽度随生长轮的增加而先增后减，在第9生长轮处达到最大值28.57 μm ，而白皮松和日本落叶松都是先减少后增加。杉木、白皮松和日本落叶松早材的管胞平均长宽比都随生长轮的增加而增大，分别第15生长轮处达到最大，而日本落叶松晚材的管胞长宽比在第9生长轮处达到最大值173.44。

由图3可知，管胞形态的显著性差异集中出现在第3生长轮与另两个生长轮之间，第9与第15生长轮的显著性差异只体现在杉木、日本落叶松管胞的长度和长宽比参数上 ($P<0.05$)。在三个生长轮中，随着生长轮的增加，树木从幼龄材逐渐过渡到成熟材，其管胞长度、宽度与长宽比逐渐增大，且同一生长轮内从早材到晚材的管胞形态参数也随着树龄增长而差异减小。至成熟材后，管胞的形态趋于稳定，各生长轮间管胞形态差异变小^[1]。

管胞长度是评价其质量的重要指标之一，通常原料纤维达到中等长度 (900 μm 以上)、长宽比大于50，适于制浆造纸及纤维利用，更长的管胞长度则能提高纸张的抗撕裂强度^[26]。所以这几种针叶树材管胞都可作为制浆造纸及纤维加工用原料，其中第9、第15生长轮的杉木管胞与第15生长轮的日本落叶松早材、第9生长轮的日本落叶松晚材管胞长度均超过了3 000 μm ，性能较佳。此外，

日本落叶松晚材第9生长轮各项形态参数的变异系数相对较小，性质最为稳定。

2.2 三种针叶树材单根管胞拉伸力学性能
三种针叶树材单根管胞力学性能 (3个生长轮) 的平均值，列于表3。

表3 三种针叶树材单根管胞力学性能平均值
Tab.3 Average values of single tracheid mechanical properties of three species of softwood

树 种	拉伸强度		弹性模量		断裂伸长率	
	测量值/MPa	CV/%	测量值/GPa	CV/%	计算值/%	CV/%
F	963.73	30.15	20.91	34.10	4.78	21.55
P	442.92	21.95	12.90	22.95	3.33	33.63
LE	599.04	45.87	12.91	42.53	3.85	34.29
LL	1 529.28	25.73	21.36	30.62	5.63	36.06

日本落叶松早、晚材拉伸强度测试结果与其他学者关于落叶松管胞拉伸强度的研究结果 (150~1 780 MPa) 基本一致^[14]；弹性模量测试结果与其他学者的研究结果 (11.44 GPa) 略有不同^[16]。日本落叶松晚材的拉伸强度、断裂伸长率与弹性模量平均值均为最高，且拉伸强度和弹性模量的CV相对较小、仅高于白皮松，但断裂伸长率的CV最大，说明日本落叶松晚材的力学性质不太稳定。日本落叶松晚材的拉伸强度与弹性模量约为早材的2~3倍，这与其他学者的研究一致^[16, 25, 27]。杉木管胞的拉伸强度和弹性模量测试结果与其他学者的研究结果 (616.59 MPa, 34.57 GPa) 有所不同^[16, 25]。这些差异可能是由管胞取样的生长轮、树高，树木的生长环境、无性系等因素导致的^[25]。白皮松的拉伸强度、断裂伸长率与弹性模量平均值最低。

三种针叶树材不同生长轮管胞的拉伸强度、弹性模量及断裂伸长率的测试结果，见图4。

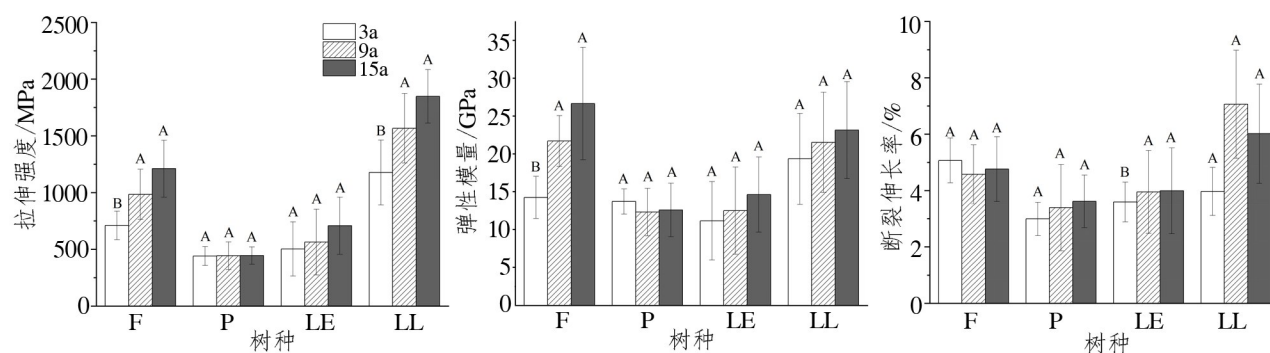


图4 三种针叶树材不同生长轮管胞拉伸强度、弹性模量及断裂伸长率

Fig.4 Tensile strength, elastic modulus, and elongation at break of tracheids in different growth rings of samples

从图4可以看出,在三个生长轮中,三种针叶树材管胞拉伸强度均随生长轮的增加而增加,变化规律与文献相似^[28],并在第15生长轮处分别达到最大值1 210.85、445.14、708.03、1 847.45 MPa;显著性分析表明,杉木与日本落叶松晚材的第3生长轮与另两个生长轮管胞的拉伸强度之间存在显著性差异 ($P<0.05$)。白皮松和日本落叶松早材管胞的断裂伸长率都随生长轮的增加而增大,分别第15生长轮处达到最大值3.62%、3.99%;而杉木和日本落叶松晚材管胞的断裂伸长率则分别第3、9生长轮处达到最大值5.07%、7.06%;仅日本落叶松早材的第3与另两个生长轮之间存在显著性差异 ($P<0.05$)。杉木与日本落叶松早晚材的管胞弹性模量都随着生长轮的增加而增大,分别第15生长轮处达到最大值26.69、14.65、23.17 GPa,白皮松管胞的弹性模量则随着生长轮的增加而先减小后增大;仅杉木的第3与另两个生长轮管胞的弹性模量间存在显著性差异 ($P<0.05$)。

力学性质的变化与细胞形态、化学组成、微纤丝角、结晶度及含水率等的变化有关^[14,28],木质素含量越高,拉伸强度与断裂伸长率越小,弹性模量越大^[29];微纤丝角越小,拉伸强度与弹性模量越大^[30];结晶度越大,细胞壁弹性模量越大^[30]。本文管胞力学性质的径向变异可能受到管胞细胞壁中综纤维素含量变化、微纤丝角从髓心至边材递减、结晶度变化等多重因素的影响,需要进一步深入研究。

从图4可知,日本落叶松晚材管胞的三种力学性能指标普遍较高,说明其刚度大、柔韧性好;另外,其变异系数也相对较小,说明其性能稳定,力学性能最为优异^[14]。

2.3 三种针叶树材单根管胞形态与拉伸性能之间的相关性

三种针叶树材的管胞形态参数与拉伸力学性能的相关性,列于表4。

表4 三种针叶树材管胞形态参数与力学性质的相关系数
Tab.4 Relationship between morphological parameters and mechanical properties of the tracheids

指标	管胞长度	管胞宽度	长宽比	横截面积
拉伸强度	0.40	-0.25	0.67*	-0.13
弹性模量	0.61*	0.11	0.59*	-0.09

*显著相关 ($P<0.05$)。

表4显示,管胞的拉伸强度与管胞长度、长宽比成正相关,其中与长宽比是显著正相关 ($P<0.05$);与管胞宽度、横截面积呈负相关 ($P<0.05$)。管胞弹性模量与管胞长度、宽度、长宽比都呈正相关 ($P<0.05$),其中管胞长度、管胞长宽比是显著正相关;与横截面积呈负相关 ($P<0.05$)。管胞长度与长宽比对拉伸强度、弹性模量的相关性系数较大,认为两者对管胞力学性能具有相对显著的影响;而管胞的宽度和横截面对力学性能影响较小。

3 结论

1) 在本试验范围内,三个生长轮中,三种针叶树材单根管胞的长度、宽度、长宽比基本上随着生长轮的增加而增大,杉木管胞的长度与宽度最大,白皮松管胞的最小。第3生长轮与其他生长轮间的管胞形态具有显著性差异。日本落叶松晚材第9生长轮管胞长宽比最大、长度较长,变异系数较小、管胞形态最为稳定,性能较好。

2) 三个生长轮中,三种针叶树材管胞拉伸力

学性能随着生长轮增加而增大, 显著性差异主要体现在第3生长轮与其他生长轮间。日本落叶松晚材管胞的力学性能较好、变异系数较小, 性能最佳, 说明日本落叶松更具有作为优质建筑用材的潜力。

3) 综合管胞形态及拉伸性能, 三种针叶树材管胞都是良好的木质纤维原料, 其中日本落叶松晚材第9生长轮的管胞性能最优, 说明日本落叶松在九年生时即可采伐并进行木纤维利用, 而其他树种都是在第15生长轮处性能更佳。

4) 管胞长度与长宽比对拉伸强度、弹性模量具有相对显著的影响, 而管胞的宽度和横截面积对拉伸力学性能影响较小。建议深入探究管胞的其他形态参数, 如壁厚、壁腔比等对宏观/微观力学性能的影响, 及从化学成分、细胞结构等层面深入分析其影响机理。

参考文献:

- [1] 张波. 马尾松木材管胞形态及微力学性能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [2] 廖声熙, 崔凯, 张鹏, 等. 翠柏木材管胞形态和结晶度的株内变异[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(6): 159-164.
LIAO S X, CUI K, ZHANG P, et al. Variation of wood tracheid character and crystallinity of *Calocedrus Macrolepis*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(6): 159-164.
- [3] 白默飞, 刘盛全, 周亮, 等. 兴安落叶松管胞形态特征和微纤丝角及其径向变异的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2009, 36(2): 189-193.
BAI M F, LIU S Q, ZHOU L, et al. Tracheid morphology characteristics and microfibrillar angle and their variation patterns of *Larix gmelinii*[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2009, 36(2): 189-193.
- [4] 邢新婷, 邵亚丽, 安珍, 等. 长白落叶松木材单根管胞力学性能分析[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(4): 597-602.
XING X T, SHAO Y L, AN Z, et al. Mechanical properties of single tracheids of *Larix olgensis* wood[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2013, 40(4): 597-602.
- [5] Purusatama B D, Kim N H. Cross-field pitting characteristics of compression, lateral, and opposite wood in the stem wood of *Ginkgo biloba* and *Pinus densiflora*[J]. IAWA journal, 2019, 41(1): 1-13.
- [6] 冉茂亚, 李有贵, 秦磊, 等. 云南油杉瘿瘤材构造与化学成分分析及应用[J]. 木材科学与技术, 2021, 35(3): 38-44.
RAN M Y, LI Y G, QIN L, et al. Microstructural characterization and chemical composition and application of burl wood of *Keteleeria Evelyniana*[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35(3): 38-44.
- [7] 黄艳辉, 费本华, 赵荣军, 等. 木材单根纤维力学性质研究进展[J]. 林业科学, 2010, 46(3): 146-152.
HUANG Y H, FEI B H, ZHAO R J, et al. Advance on mechanics properties of wood single fiber[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(3): 146-152.
- [8] Law K N, Garceau J J, Koran Z. Measurement of intra-increment tensile strength by using a zero-span technique[J]. Wood Science, 1977, 10: 42-48.
- [9] Groom L H, Mott L, Shaler S M. Mechanical properties of individual southern pine tracheids. Part 1: Determination and variability of stress-strain curves with respect to tree height and juvenility[J]. Wood and Fiber Science, 2002, 34(1): 14-27.
- [10] Terziev N, Daniel G, Marklund A. Effect of dislocations in Norway spruce tracheids on the mechanical properties of paper[M]. ESWN-Stockholm, 2003.
- [11] 余雁, 江泽慧, 任海青, 等. 管胞细胞壁力学研究进展评述[J]. 林业科学, 2003, 39(5): 133-139.
YU Y, JIANG Z H, REN H Q, et al. A review: current international research into cell wall mechanics of tracheids[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(5): 133-139.
- [12] 费本华, 余雁, 黄安民, 等. 木材细胞壁力学研究进展[J]. 生命科学, 2010, 22(11): 1173-1176.
FEI B H, YU Y, HUANG A M, et al. Progress in cell wall mechanics of wood[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2010, 22(11): 1173-1176.
- [13] 黄艳辉. 毛竹纤维细胞力学性质研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [14] 上官蔚蔚, 邢新婷, 邵亚丽, 等. 日本落叶松不同无性系单根纤维拉伸性能研究[J]. 木材加工机械, 2011, (5): 16-20.
SHANGGUAN W W, XING X T, SHAO Y L, et al. Single fiber tensile performance among different Japanese Larch clones[J]. Wood Processing Machinery, 2011, (5): 16-20.
- [15] 史蕾, 张守攻, 吕建雄, 等. 日本落叶松木材单根纤维的力学性能研究[J]. 木材加工机械, 2012, (5): 16-18, 33.
SHI Q, ZHANG S G, LV J X, et al. Study on the mechanical properties of *Larix kaempferi* wood single fiber[J]. Wood Processing Machinery, 2012, (5): 16-18, 33.
- [16] 邵亚丽. 落叶松木材管胞微力学性质变异性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- [17] 王戈, 余雁, 曹双平, 等. 微拉伸技术测试植物单根纤维纵向拉伸性能[J]. 林业科学, 2011, 47(7): 151-155.
WANG G, YU Y, CAO S P, et al. Longitudinal tensile properties determination of vegetable single fibers by the micro-tensile technology[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(7): 151-155.
- [18] 赵荣军, 程献宝, 孙娟, 等. 针叶材管胞纵向抗拉强度研究[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(4): 491-495.
ZHAO R J, CHENG X B, SUN J, et al. Study on the longitudinal tensile strength of the tracheids of soft wood[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2011, 38(4): 491-495.
- [19] 张亮. 谷子茎秆与纤维拉伸力学特性测试研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2019.
- [20] 朱家伟. 棕榈棕干与棕丝维管束对比研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [21] 陈长洁. 棕榈多尺度纤维材料的制备与性能[D]. 苏州: 苏州大学, 2019.
- [22] 周永东, 高鑫, 周凡, 等. 40 mm厚杉木锯材高温干燥工艺研究[J]. 木材科学与技术, 2021, 35(2): 54-58.
ZHOU Y D, GAO X, ZHOU F, et al. High-temperature drying technology for 40 mm-thickness Chinese fir lumber[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35(2): 54-58.
- [23] 李坚, 刘一星, 崔永志, 等. 人工林杉木幼龄材与成熟材的界定及材质早期预测[J]. 东北林业大学学报, 1999, (4): 24-28.
LI J, LIU Y X, CUI Y Z, et al. Demarcation of juvenile wood and mature wood of planted Chinese fir and its wood quality prediction[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1999, (4): 24-28.
- [24] 鲍甫成, 江泽慧, 姜笑梅, 等. 中国主要人工林树种幼龄材与成熟材

(下转第74页)