

L 型构件双圆棒榫节点抗弯强度模型及其数值模拟

沈 杨,王天龙*

(北京林业大学 木质材料科学与应用教育部重点实验室,木材科学与工程北京市重点实验室,北京 100083)

摘 要:为解决现有圆棒榫节点抗弯强度研究中试验偶然性的问题,采用有限元法,建立 L 型构件双圆棒榫节点抗弯强度模型,进行数值模拟,并通过相应的试验对模拟结果进行了验证。结果表明:1)所建立的有限元模型可用于实木榫接合家具设计中的抗弯强度预测,不同直径下有限元分析结果与试验结果平均误差均 $<15\%$,且圆棒榫变形情况与试验结果相符;2)双圆棒榫接合构件抗弯节点主要破坏形式为榫损伤,抗弯强度随直径增加而增加,但增幅减小;3)直径为 10 mm 的双圆棒榫可用于椅子腿部与望板接合部位,直径为 8 mm 的双圆棒榫可用于椅子腿与扶手连接处,性能满足 GB 103547 所规定的要求,直径为 6 mm 的双圆棒榫不适用于椅子连接。

关键词:圆棒榫;抗弯强度;家具;节点;有限元

中图分类号:S781.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)05-0168-05

Numerical Simulation Research on the Bending Strength of Double Dowel Joint

SHEN Yang, WANG Tian-long*

(Key Laboratory of Wood Material Science and Utilization of the Ministry of Education/Beijing City Key Laboratory of Wood Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of accidental test in the research on the bending strength of dowels, through the finite element method, the bending strength model of L-shaped double dowel joints was established, and the experimental results were used to verify the model. The results showed that 1) the finite element model established in this research could be used to predict the bending strength. The error between the finite element analysis results and the experimental results was within 15% , and the deformation of dowel was consistent with the experiment. 2) The main failure form was the dowel damage, the bending strength of the double dowel increased as the increase of diameter with reduced amplitude of increment. 3) The double dowel with a diameter of 10 mm could be used for the joint between the chair leg and the viewing plate, the 8 mm size could be used for the connection of the chair armrest, and the 6 mm size was not suitable for the chair connection, and the performance requirements of GB 103547 was met with the 10 mm and 8 mm sizes.

Key words: dowel; bending resistance strength; furniture; corner joints; finite element analysis

木质家具接合形式一般有榫接合、钉接合、胶接合、木螺钉接合以及连接件接合^[1]。榫接合因精巧的外观、牢固的结构,从古代一直沿用至今。而家具的结构强度取决于其节点强度。对榫接合家具进行力学性能评估时,根据其连接方式,通常测定节点抗弯

强度、抗拔强度或抗扭转强度,在同样连接方式下,抗弯强度往往小于抗拔强度及抗扭强度,故在进行榫接合家具结构设计时,需要重点考虑抗弯强度^[2-4]。

在榫接合形式中,按照榫头形状可分为:直角榫、燕尾榫、圆棒榫、椭圆榫等,圆棒榫因节约木材、

收稿日期:2020-09-28 修回日期:2020-10-10

基金项目:林业公益性行业科研专项重大项目(201404502)。

作者简介:沈 杨。研究方向:家具设计与制造。E-mail:1051985583@qq.com

*通信作者:王天龙,硕士生导师,副教授。研究方向:家具设计与制造。E-mail:luckywtl@126.com

结构简单等优点,被广泛运用于传统木结构家具和现代板式家具中。为了探究圆棒榫在家具中的使用性能,有学者从纯理论的角度分析了圆棒榫在实木家具结构中的强度,论证其利用合理性并给出了使用相关注意事项^[5];也有学者针对 T 型、L 型梓木构件,研究了圆棒榫各参数对接合性能的影响,给出了较优圆棒榫参数^[6];还有学者采用单因素试验法,得出了圆棒榫用于中密度纤维板接合时,各参数与接合强度的关系公式^[7]。然而在现有圆棒榫接合强度相关研究中,大部分都是通过试验测试,得出仅适用于特定材料下的关系公式或结论^[8-11]。这种研究方法往往受到材料差异、加工精度等不可控因素的影响,如要得到准确的结果则需要大量的重复试验,费时费力,故需要寻找一种具有普遍性的、能规避外部因素的研究方法。

目前有限元方法已经被广泛运用于板式家具的结构设计中,而对于榫接合家具的有限元方法运用研究相对有限,仍需进一步研究^[12]。本研究采用有限元分析法,对双圆棒榫节点抗弯强度进行了研究,建立了可用于预测双圆棒榫节点抗弯强度的有限元模型,同时,进行抗弯强度试验,并将试验中材料相关参数带入模型,得到仿真值,并通过两者的比较对模型进行验证。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验基材采用梓木(*Sassafras tzumu*),含水率平均值为 10.4%,试件尺寸为 150 mm×50 mm×25 mm。

双圆棒榫材料为桦木(*Betula alnoides*),圆榫

类型为螺旋型,直径选用 Φ6、Φ8、Φ10 mm,长度为 40 mm。

1.2 试验方法

选取 L 型构件,圆棒榫与榫孔的配合为过盈配合,过盈量为 0.1 mm,其结构示意图 1,参考 GB/T 10357.3-2013《家具力学性能试验 第 3 部分:椅凳类强度和耐久性》^[13],设计图 2 所示的加载试验,在距节点 100 mm 处的部位进行加载,通过位移法进行加载,加载速度为 10 mm·min⁻¹,当位移量到达 30 mm 时,停止加载。

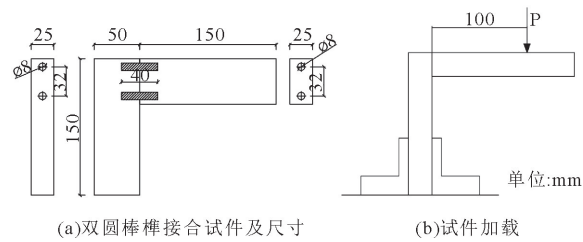


图 1 试件尺寸及加载示意

Fig. 1 Schematic diagram of specimen assembly and loading

2 结果与分 析

2.1 有限元模型建立

使用有限元仿真软件进行数值模拟,根据试验试件分别建立相应的有限元模型。

1)根据图 1 的装配图分别建立 L 型试件、加载头以及圆棒榫的几何模型,并根据真实情况装配。

2)赋予材料属性,将木材设定为正交各项异性材料,并考虑到木材的塑形。构件赋予梓木的材料属性,9 个弹性参数^[14]见表 1,并根据实际情况指派材料方向;圆棒榫弹性模量为 10 000 MPa,泊松比设定为 0.27^[15-16];加载头设定为刚性材料。

表 1 基材材料的 9 个弹性参数

Table 1 Nine elastic parameters of the base material

弹性常数	弹性模量/MPa			剪切模量/MPa			泊松比 μ		
	E_L	E_R	E_T	G_{LT}	G_{LR}	G_{RT}	μ_{LR}	μ_{LT}	μ_{RT}
梓木	13 196	862.3	519.6	197.33	577.07	806.8	0.55	0.02	0.021

3)创建相互作用属性,分析实际加载情况,确定仅双圆棒榫与榫孔之间有摩擦,其余部件为刚性连接。因此创建接触属性,设定切向方向接触类型为摩擦,摩擦系数为 0.54,法向方向为“硬”接触。创建圆棒榫表面与榫孔内表面的接触关系,并设定过盈配合,过盈量为 0.1 mm。

4)创建载荷和边界条件,设定 L 型构件里竖直构件底部 X、Y、Z 3 方向的铰接固定。因为本研究加载方式为位移加载,故设定加载最大位移为 30 mm,考虑到实际情况,并保证计算结果的收敛性,

需要添加预紧力,设定初始位移为 0.01 mm。

5)划分网格,根据有限元理论,网格的划分决定着计算的准确度,网格越精细,单元越多,计算结果越准确,但计算量也会急剧增大。综合考虑结果准确度和网格均匀性,设定网格大小为 5 mm,类型为四面体,划分技术为自由,所用算法为默认算法,并在边界合适地方使用映射的三角形网格。

6)优化与作业提交,检查模型网格,对于榫孔处部分畸变网格进行优化,并检查整体模型,确定无模型干涉后,提交作业进行计算。

2.2 有限元过程分析

图 2 为有限元分析结果,其中图 2(a)为 L 型试件在加载完成后的变形情况;图 2(b)为双圆棒榫在加载过程中的应力变化过程;图 2(c)为双圆棒榫加载过程中各部位等效塑性应变过程。

由图 2(a)可知,在位移达到 30 mm 时,双圆棒榫接合的 L 型构件已失去连接强度,双圆棒榫并未出现断裂现象;由图 2(b)可知,在加载过程中,初期加载时,双圆棒榫所受的最大应力是榫 1 顶部中间所受的拉应力,然后随着位移量的增加,最大应力为榫 1 底部中间所受的压应力,接下来为榫 2 顶部的拉应力、榫 2 底部的压应力。当双圆棒榫应力达到

最大值时,榫 1 和榫 2 的顶部及底部中间都受到较大应力,随着位移量进一步增加,榫 1 顶部拉应力骤减,榫 1 和榫 2 底部压应力持续增大。由此可以得知是因为榫 1 顶部达到了屈服应力而使圆棒榫最大应力减小;同时,由图 2(c)可知,随着加载过程的进行,试件最大等效塑性形变由榫 2 到榫 1,最终出现在榫 2 顶部中间,而榫 1 顶部中间没有塑性变形,这是因为在有限元分析中,如果单元所受应力超过了屈服应力,会被删除。实际试验中,在榫 1 和榫 2 上表面都观察到了开裂现象。这说明有限元分析结果与试验结果基本吻合,材料变形情况与试验中的榫头变形情况一致。

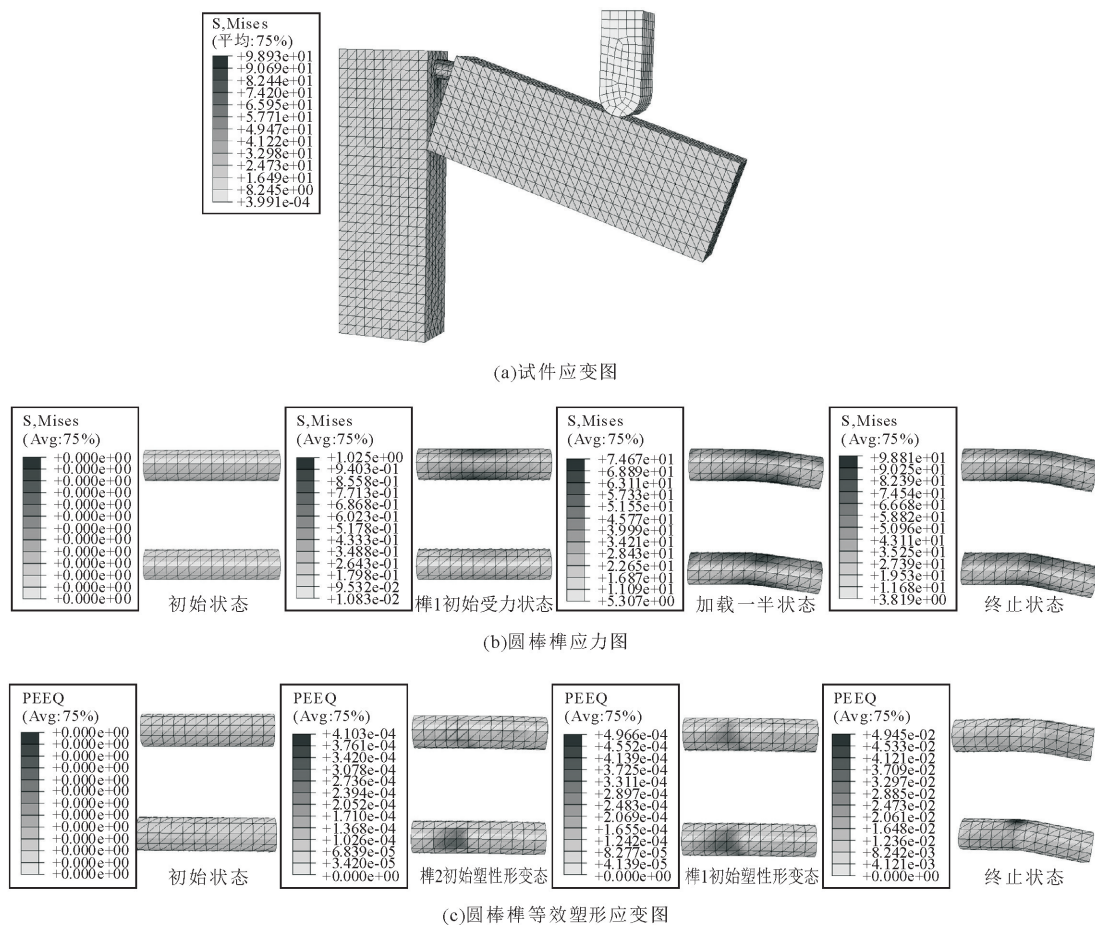


图 2 有限元分析结果

Fig. 2 Finite element analysis results

2.3 抗弯强度仿真验证

通过双圆棒榫节点能承受的最大载荷来表示抗弯强度,故通过软件后处理模块,输出有限元模型中加载头节点处的支反力—位移曲线(图 3),由图 3 可知,不同直径下的支反力均呈现先线性增加,然后呈对数增加,最终趋于固定值,其变化趋势与实际加载试验中的载荷位移曲线一致。由图 4 可知,在不同直径下,有限元分析结果与试验结果之间的误差也不相同。在直径为 6 mm 时,有限元分析的极限

破坏载荷为 524 N,与试验结果的最大误差为 18.32%,最小误差为 3.05%,平均误差为 12.79%;直径为 8 mm 时,极限破坏载荷为 805 N,与试验结果的最大误差为 11.57%,最小误差为 2.99%,平均误差为 6.92%;直径为 10 mm 时,曲线上最大载荷为 1 102 N,但考虑到分析误差,取值为 1 030 N,与试验结果的最大误差为 17.18%,最小误差为 2.23%,平均误差为 8.43%。综上可得,有限元分析结果与试验结果的平均误差均 $<15\%$,在工程允

表 2 模拟结果与试验对比

Table 2 Comparison of simulation results and experiments

直径/mm	模拟值/N	试验测定值/N					平均误差/%
		1	2	3	4	5	
6	524	578	604	540	620	613	12.79
8	804	897	856	828	843	874	6.92
10	1030	1180	1053	1207	1002	1142	8.43

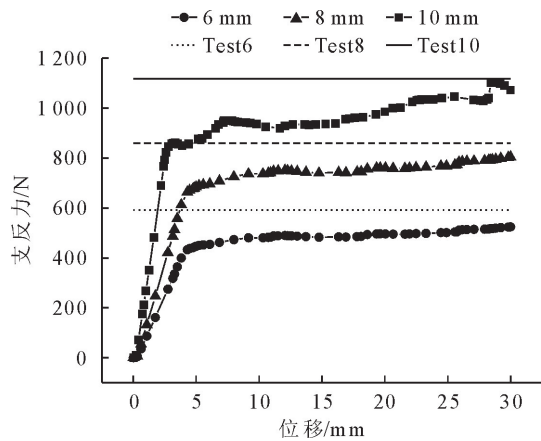


图 3 抗弯强度对比

Fig. 3 Comparison of bending strength

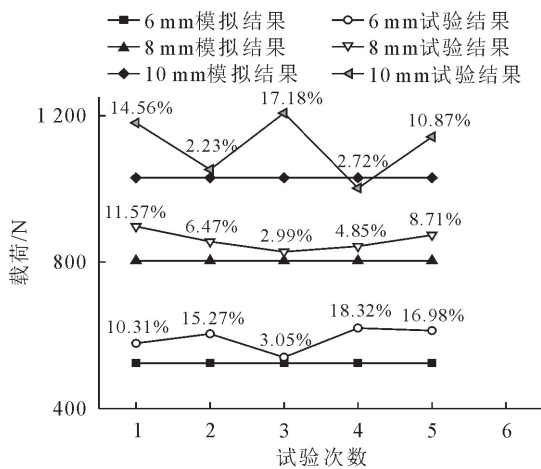


图 4 误差分析

Fig. 4 Analysis of error

许范围内,可以用于实木榫接家具的设计^[17-18]。

在有限元分析过程中,当使用几何非线性法进行求解计算时,在材料的强度方面,当某个单元达到屈服应力时,模型会删除该单元,从而降低材料刚度,而在实际中,木材在达到屈服强度后,木材的断裂为韧性断裂,不会影响材料的刚度,因此导致模拟值偏小;在模型的损伤方面,由于模型存在大位移和断裂的情况,会导致无法得到精确结果,在确保结果准确性的前提下,一般会设定合适大小的阻尼,从而得到精确结果,但在设置阻尼后,会在一定程度上减小所产生的应力和应变。同时,由于木材是一种非均质、各向异性的材料,木材的力学性能又受到密度、含水率、缺陷等因素影响,试验测试时难以保证

试件的完全一致,因此试验测试结果会在一个范围内波动。

2.4 直径对双圆棒榫抗弯强度的影响

对不同直径下双圆棒榫抗弯强度仿真值进行比较,结果见图 5,在 L 型构件中,双圆棒榫抗弯强度随着直径的增加而增加。但圆棒榫直径从 6 mm 增大为 8 mm 时,平均抗弯强度从 524 N 增加到 804 N,增加幅度为 53.4%;直径从 8 mm 增加为 10 mm 时,平均抗弯强度从 804 N 增为 1 030 N,增加幅度为 28.1%。这表明随着圆棒榫直径的增加,增加幅度逐渐降低。这可能的原因是在抗弯强度试验中,圆棒榫节点处存在着剪切力、破坏弯矩以及轴向抗拔力,其中影响最为显著的是破坏弯矩。当破坏形式为圆棒榫屈服,圆棒榫直径越大,根据弯矩计算公式,可知其对应的破坏弯矩越大,故抗弯强度随直径呈递增关系。但在 L 型构件中,在圆棒榫直径增大的同时,榫孔离边的距离就越小,从而在试验中,也会发生构件自身损坏的现象,从而影响抗弯强度增加幅度。

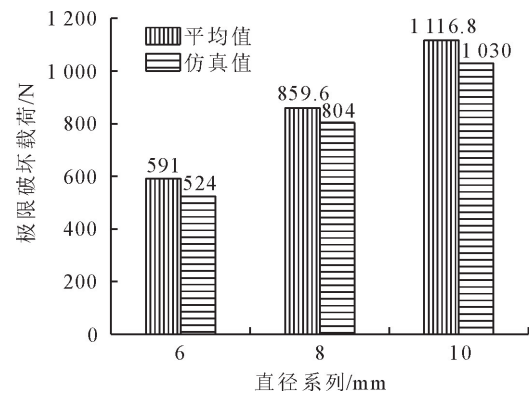


图 5 直径对抗弯强度的影响

Fig. 5 Effect of diameter on bending strength

3 结论

建立的模型能较好地仿真实际过程中节点的损伤形式和破坏强度,可以将此模型运用于榫接家具结构设计,并预测圆棒榫接合的抗弯强度。

在 L 型双圆棒榫接合节点中,主要破坏形式为圆棒榫损伤,节点抗弯强度随着直径的增加而增大,但其增幅逐渐减小,仿真值与试验值的误差均 $<15\%$ 。

直径为 10 mm 和 8 mm 的双圆棒榫结构强度

均达到国标规定的承重结构强度要求,可用于椅子后腿与望板、腿与扶手连接处;但直径为 6 mm 的双圆棒榫不适用于家具承重连接处。

参考文献:

- [1] 李素瑕,松木家具框架节点接合强度性能研究[D].长沙:中南林业科技大学,2006.
- [2] 胡文刚,关惠元.椭圆榫节点抗弯强度的数值分析研究[J].西北林学院学报,2018,33(5):225-230.
HU W G, GUAN H Y. Numerical study on the bending strength of oval mortise and tenon joint[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(5): 225-230. (in Chinese)
- [3] 柳万千.家具力学[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,1993.
- [4] 曹友霖,王天龙,王娱.基于有限元法速生杨层积材增强家具直榫优化[J].西北林学院学报,2019,34(1):218-223.
CAO Y L, WANG T L, WANG Y. Poplar LVL strengthen and furniture joint size optimization based on finite element analysis[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(1): 218-223. (in Chinese)
- [5] 董宏敢,邵卓平.在实木家具结构中圆棒榫的强度分析[J].木材工业,2007(2):38-40.
- [6] 陈新义.榫木构件“T”型、“L”型节点双圆榫接合性能研究[D].长沙:中南林业科技大学,2013.
- [7] 李祥民.中密度纤维板一双圆棒榫接合性能研究[D].雅安:四川农业大学,2017.
- [8] 李素瑕,刘文金.几种连接方式对脱脂马尾松家具结构强度的影响[J].西北林学院学报,2014,29(1):169-173.
LI S X, LIU W Q. Effects of joint methods on the structural strength of *Pinus massoniana* furniture[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(1): 169-173. (in Chinese)
- [9] 董宏敢,邵卓平.接合方式对板式家具搁板承载力的影响[J].西北林学院学报,2007,22(5):161-163.
DONG H G, SHAO Z P. Influence of the shelf connected style on carrying capacity in panel furniture[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(5): 161-163. (in Chinese)
- [10] 司传领.板式家具角部结合性能的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2002.
- [11] 周腾飞.榫木构件节点四合一连接件接合强度研究[D].长沙:中南林业科技大学,2015.
- [12] 胡文刚,关惠元.板式家具结构设计有限元法研究综述[J].世界林业研究,2020,33(2):68-71.
- [13] GB/T 10357.3-2013.家具力学性能试验第3部分:椅凳类强度和耐久性[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [14] 杨建福.榫卯结构参数对其力学性能的影响研究[D].北京:北京工业大学,2017.
- [15] 郭兆霞,高颖,伊松林,等.杨木柜类家具T型节点连接强度及其补强研究[J].西北林学院学报,2017,32(2):280-285, 314.
GUO Z X, GAO Y, YI S L, *et al.* Strength and reinforcement of T-type joint of poplar solid wood cabinet[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(2): 280-285, 314. (in Chinese)
- [16] 李威,高颖,孟鑫森,等.角钢-集成材L形组合柱的受压性能研究[J].林业工程学报,2020,5(1):53-60.
- [17] 张杰,任忠先.现代家具结构设计的科学方法[J].森林工程,2013,29(4):141-144.
- [18] 宋明强,沈隽.有限元法与ANSYS在家具结构分析中的应用[J].西北林学院学报,2008,23(1):174-177.
SONG M Q, SHEN J. Application of finite element method and ANSYS in the analysis of furniture structure[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(1): 174-177. (in Chinese)
- [13] 李静,赵秀兰,魏世强,等.无公害蔬菜无土栽培基质理化特性研究[J].西南农业大学学报,2000,22(2):112-115.
LI J, ZHAO X L, WEI S Q, *et al.* Study on the physico-chemical properties of soil-less cultural substrates of pollution-free vegetable[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2000, 22(2): 112-115. (in Chinese)
- [14] 谢彦如,唐丹,张蒲,等.不同基质配比对辣椒穴盘苗生长的影响[J].北方园艺,2020(4):7-14.
- [15] 吴继红.几种固形栽培基质物料的理化性状比较[J].吉林农业科学,2006,31(4):17-20.
- [16] 郑坚,马晓华,廖亮,等.基质成分比对木荷容器苗生长及存苗率的影响[J].森林与环境学报,2017,37(2):218-224.
- [17] 武捷,李新国,安烁宇.不同基质配比对酸柚苗生长的影响[J].热带作物学报,2018,39(3):443-447.
WU J, LI X G, AN S Y. Effects of different substrate ratios on the growth of *Sour pummelo* seedlings[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(3): 443-447. (in Chinese)
- [18] 曹钰,胡涛,张鸽香.基质配比对美国流苏容器苗生长的影响[J].东北林业大学学报,2018,46(9):26-30.
- [19] LI D D, SI L T, ZHANG G Y, *et al.* Quantitative trait loci analysis for chlorophyll content of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings under low-light stress[J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 30(9): 4692-4699.
- [20] 鲁敏,姜凤岐,宋轩.容器苗质量评定指标的研究[J].应用生态学报,2002,13(6):763-765.
- [21] 姚雨仙,黄俊华,陈玉萍.不同基质配方对草原锦鸡儿容器苗质量的影响[J].新疆农业大学学报,2014,37(1):48-53.
- [22] 潘泰臣,张胜利,于金鑫,等.基于二次回归通用旋转组合设计的华山松容器育苗基质研究[J].西北林学院学报,2020,35(5):85-90.
PAN T C, ZHANG S L, YU J X, *et al.* Substrate compositions and fertilizer formulations for breeding container seedlings of *Pinus armandii* based quadratic regression universal rotation combination design[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 85-90. (in Chinese)
- [23] 刘欢,王超琦,吴家森,等.氮素指数施肥对杉木无性系苗生长及养分含量的影响[J].应用生态学报,2016,27(10):3123-3128.
LIU H, WANG C Q, WU J S, *et al.* Effects of exponential N fertilization on the growth and nutrient content in clonal *Cunninghamia lanceolata* seedlings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3123-3128. (in Chinese)

(上接第 93 页)