

## 不同结构多层单板铝箔复合功能板性能

李江晓<sup>1</sup>,王 飞<sup>1</sup>,郭龙明<sup>2</sup>,李 城<sup>1\*</sup>,杨红旗<sup>1\*</sup>

(1. 河南农业大学 林学院,河南 郑州 450002;2. 中建七局建筑装饰工程有限公司,河南 郑州 450003)

**摘 要:**以杨木单板为基材,金属铝箔为增强功能材料,聚醋酸乙烯酯乳液改性酚醛树脂为胶黏剂,热压制备多层单板铝箔复合功能人造板材,探讨金属铝箔在板材内部不同位置对多层单板铝箔复合功能人造板性能的影响。结果表明,金属铝箔的位置由板材上下两表面向芯层变化时,杨木单板与金属铝箔之间的胶合强度逐步提高,但板材的静曲强度、弹性模量逐渐降低,耐水性能减弱,金属铝箔在板材中的位置对复合功能板的性能有显著影响。研究结果为木基金属复合多层功能板材的设计与制备提供了理论依据和技术支持。

**关键词:**杨木单板;铝箔;功能胶合板;酚醛树脂;聚乙酸乙烯酯乳液

**中图分类号:**TS653

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2023)04-0259-04

## Performance of Multi-layer Plywood With Different Structures Made With Poplar Veneers and Aluminum Foils

LI Jiang-xiao<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>, GUO Long-ming<sup>2</sup>, LI Cheng<sup>1\*</sup>, YANG Hong-qi<sup>1\*</sup>

(1. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China;

2. Construction Decoration Co. LTD of China, No. 7 Engineering Bureau, Zhengzhou 450002, Henan, China)

**Abstract:** In this paper, multi-layer plywoods with different structures made with poplar veneers and functional aluminum foils were prepared by hot-press using phenol formaldehyde resin modified by polyvinyl acetate emulsion as the adhesive. The effects of different positions of aluminum foils on the plywood performance were studied and discussed. The results showed that the bonding strength between poplar veneers and aluminum foils increased when the position of aluminum foil changes from the surfaces to the core layer, but the modulus of rupture and modulus of elasticity elastic of plywood decreased gradually. Meanwhile, the water resistance weakened. Panel structure had a significant impact on the performance of plywood. This research provides theoretical basis and technical support for the design and application of wood based metal multi-layer functional composites.

**Key words:** poplar veneer; aluminum foil; functional plywood; phenol resin; polyvinyl acetate emulsion

木基金属复合材料是木材综合高值化利用,制备各种功能人造板的新途径<sup>[1-4]</sup>。多层单板铝箔复合功能人造板是以金属铝箔为功能材料,旋切杨木单板为基础材料,热塑改性酚醛树脂为胶黏剂,使用热压方法制造的一种新型木基复合功能型板材,既保持了木材的自然降解、环境友好性的天然优势,又

克服了实木板材在家具、木地板、建筑装饰中产生的翘曲变形、耐水性差等缺陷,是综合利用木材,拓宽木材利用领域的重要方法和途径,也是木基人造板的精深加工、科技附加值高的人造板材<sup>[5-9]</sup>。研究表明,中密度纤维板、胶合板表面覆贴金属铝箔,不仅提高了板材的物理力学性能,而且显著增强了板材

收稿日期:2022-06-04 修回日期:2022-07-18

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(15A220005);河南省高等学校重点科研项目计划(21A220004);河南省高等学校重点科研项目(21A220001)。

第一作者:李江晓,硕士,讲师。研究方向:木材综合加工利用。E-mail:ccicc04@163.com

\* 通信作者:杨红旗,博士,教授,硕士生导师。研究方向:木材高值化综合利用。E-mail:yhq0373342@163.com

李 城,副教授,硕士生导师。研究方向:生物质胶黏剂。E-mail:lichengzzm@163.com

的阻燃性与耐水性<sup>[10-12]</sup>。但是,金属铝箔位于多层单板铝箔复合功能板内部不同位置时,对板材性能的影响没有进行深入研究。本研究以旋切杨木单板为基材,金属铝箔为功能材料,聚醋酸乙烯酯乳液改性酚醛树脂为胶黏剂,热压制备多层单板铝箔复合功能板,并测试板材性能,研究金属铝箔位于板材内部不同位置时对板材性能的影响,为金属增强多层功能复合人造板材的设计与制备提供理论和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

旋切杨木单板,厚度为 2.1 mm,幅面尺寸 310 mm×310 mm,郑州佰沃科技发展有限公司;金属铝箔厚度为 0.18 mm,幅面尺寸 1 000 mm×2 000 mm(自裁成 310 mm×310 mm),河南明泰铝业股份有限公司;酚醛树脂胶黏剂,固体含量 48%,pH 为 8.9,新乡市平航木业有限公司;聚醋酸乙烯酯乳液(白乳胶),固体含量 43%,pH 为 6.1,河南双塔胶业有限公司。

### 1.2 试验设备

MS7-H550 数显加热磁力搅拌器,电子天平(精确到 0.01 g),PHS-3C 台式酸度计,W9020A 电热恒温鼓风干燥箱,BD-8820-BE 平板硫化机,HHW21.600AII 电热恒温水浴箱,XHW-W300kN 微机控制电子万能试验机。

### 1.3 试验方法

杨木单板胶合面用 100 目砂纸打磨表面;金属铝箔双面用 100 目砂纸打磨,用纯棉纱布蘸取 NaOH 溶液(5%)擦拭铝箔表面,然后用纯净水冲洗后烘干备用<sup>[13-17]</sup>。

酚醛树脂(PF)、聚醋酸乙烯酯乳液(PVAc)、纯净水按照 2:1.5:1 的比例配制成胶黏剂<sup>[18-20]</sup>。由于改性胶黏剂固含量低,因此复合功能板材内部杨木单板与金属铝箔双面涂胶,板材上下表面旋切杨木单板单面涂胶,每面涂胶量 240 g/m<sup>2</sup>;金属铝箔具有不透水性,阻挡了热压过程中板材内部水蒸气向外排放的通道,易出现板材分层现象等缺陷,因此,涂胶后在干燥箱(50℃)中干燥至胶黏剂不粘手,让胶黏剂中的部分水分挥发<sup>[21-23]</sup>。

多层单板铝箔复合功能人造板材总层数为 11 层,板材结构与编号如图 1 所示。同时,压制 11 层纯杨木单板胶合板作为对照板材(编号为 15)。

### 1.4 热压工艺

热压制备工艺参数为热压温度 140℃,热压压力 1.0 MPa,热压时间 15 min<sup>[23]</sup>。热压结束后,用

平板重物压在试件上面并在室内放置 24 h,然后锯制试件进行检测。每组试验平行压制 2 张板。

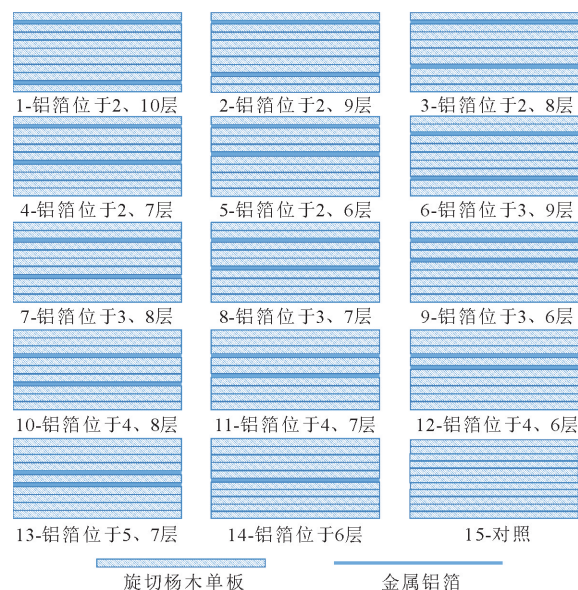


图 1 板材结构与编号

Fig. 1 The structure of multiply plywood and number

### 1.5 性能检测

按照《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》(GB/T 17657—2013)要求,检测金属铝箔与杨木单板之间的胶合强度,以及功能板材的静曲强度、弹性模量、吸水厚度膨胀率等 4 项性能<sup>[24]</sup>。每张板材中取胶合强度试样 6 个,静曲强度和弹性模量试样 3 个,吸水厚度膨胀率试样 3 个,2 张板材检测数据求平均值,利用 SPSS 软件对数据进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验结果方差分析

试验结果方差分析显示:金属铝箔在板材内部的不同位置,对胶合强度、静曲强度、弹性模量与吸水厚度膨胀率等 4 项性能影响极显著(表 1)<sup>[23]</sup>。

表 1 铝箔位置对板材性能影响方差分析

Table 1 Analysis of the aluminum foils position on the plywood performance

	误差平方和	自由度	均方	显著度
胶合强度	0.362	13	0.028	<0.01
静曲强度	629.737	13	48.441	<0.01
弹性模量	6 256 233.500	13	481 248.731	<0.01
吸水厚度膨胀率	22.102	13	1.007	<0.01

### 2.2 铝箔位置对胶合强度的影响

金属铝箔位于板材表面的杨木单板下面时胶合强度最低,位于板材中心位置时最高(图 2)。随着铝箔由板材表面向靠近芯层位置分布时,胶合强度总体呈上升趋势。结果还表明,当固定一层铝箔的

位置(靠近板材表面),另一层铝箔由芯层位置向板材表面移动时,胶合强度呈逐渐降低。这是因为板材内部的金属铝箔具有不透水性,热压过程中,金属铝箔阻挡了复合板材内部水蒸气向外排放的通道,且金属铝箔的位置越靠板材表面,板材内部会残留更多水蒸气。热压结束后,如果卸压过慢,残留的水蒸气会局部聚集在层板之间、胶层之间,形成薄水层;如果卸压过快,水蒸气会急速膨胀并对外排放,对胶层产生冲击,造成胶层剥离,造成胶结失败,胶合强度降低。对照胶合板因没有铝箔存在,水蒸气较容易排出,因此胶合强度最高。

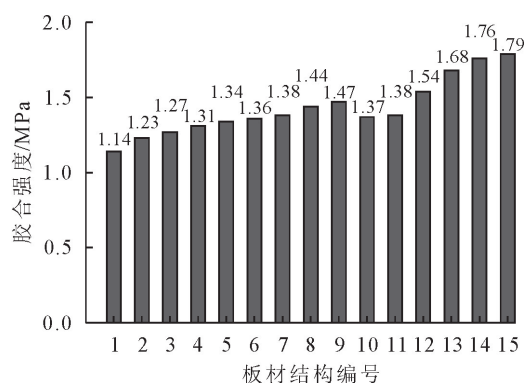


图2 铝箔位置对胶合强度的影响

Fig. 2 Influence of aluminum foil position on bonding strength

### 2.3 铝箔位置对静曲强度的影响

金属铝箔位于板材表面的杨木单板下面时,板材静曲强度最高,金属铝箔位于中心层时,板材静曲强度最低,当金属铝箔位置向板材芯部靠近时,静曲强度总体上呈下降趋势(图3)。当一层金属铝箔固定在靠近板材表面时,另一侧金属铝箔的位置向中心层移动时,板材的静曲强度降低;随着两层金属铝箔向芯层移动,板材的静曲强度呈下降趋势;但当铝箔位置呈对称形式时,静曲强度高于附近不对称结构板材的静曲强度。施加在板材上表面上的垂直压力致使板材产生从内向外逐渐增大的形变,金属铝箔的刚性与韧性抵消了产生的形变,保护内层杨木单板、胶层不会断裂,静曲强度增高<sup>[23]</sup>。但是当金属铝箔位于中心层时,杨木单板、胶层失去金属铝箔保护,受力产生形变易发生断裂,静曲强度降低。对照胶合板内部没有金属铝箔存在,杨木单板与胶层受力产生形变易发生断裂,因此静曲强度低于多层单板铝箔复合功能板。

### 2.4 铝箔位置对弹性模量的影响

金属铝箔的刚性与韧性,既增加了板材静曲强度,也增加了板材的弹性模量(图4)。金属铝箔的位置越靠近板材表面时,复合功能板材的弹性模量越高,且金属铝箔对称分布时比不对称的抗弯性能更高。但板材弹性模量的增强效果不如静曲强度的

增强效果显著。对照胶合板因缺乏增强金属铝箔,弹性模量最低。

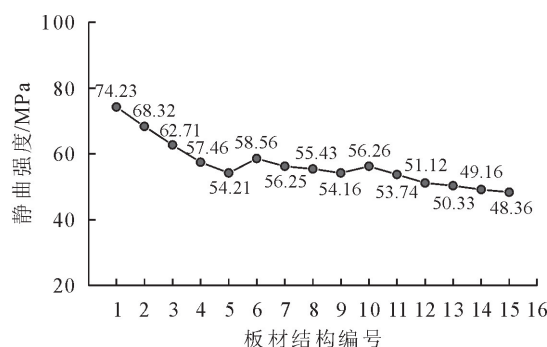


图3 铝箔位置对静曲强度的影响

Fig. 3 Influence of aluminum foil position on the modulus of rupture

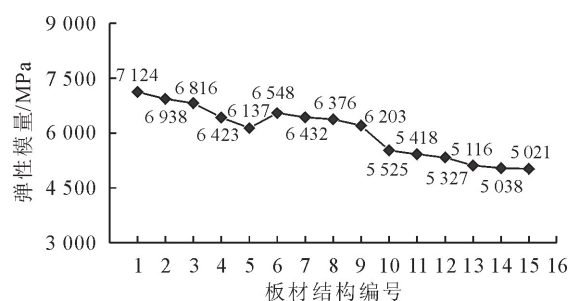


图4 铝箔位置对弹性模量的影响

Fig. 4 Influence of aluminum foil position on the modulus of elasticity

### 2.5 铝箔位置对吸水厚度膨胀率的影响

金属铝箔位置由中心层向板材上下表面移动时,吸水厚度膨胀率呈快速下降趋势(图5)。金属铝箔具有不透水性,水分无法从上下表面进入板材内部,杨木单板只能从板材边部吸水,吸水厚度膨胀率降低。对照胶合板中杨木单板吸水通道较为畅通,因此厚度膨胀率最高。

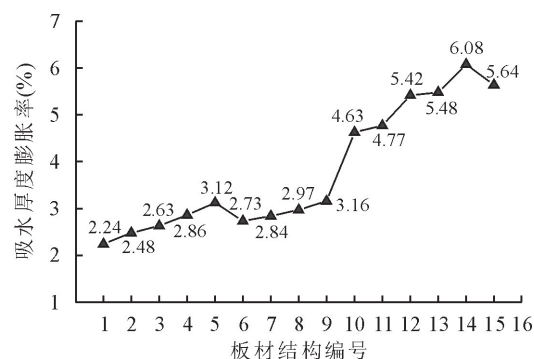


图5 铝箔位置对吸水厚度膨胀率的影响

Fig. 5 Influence of aluminum foil position on the thickness swelling rate of water absorption

## 3 结论与讨论

金属铝箔作为增强功能材料,旋切杨木单板为木质基材,制备金属增强型木质基层功能板材,增



加和改善了木质基人造板的功能与性能。金属铝箔具有不透水性,隔断了水分进出板材内部的通道,水分难以排出,造成局部胶层剥离或胶结失败,胶合强度降低。当金属铝箔位置从中心层向板材表面移动时,胶合强度线性下降 35.23%,吸水厚度膨胀率快速下降 63.16%,增加了板材在潮湿环境中的稳定性和耐久性。金属铝箔特有的刚性与韧性,承担和抵消了作用在板材表面的垂直压力,保护内层杨木单板和胶层不会断裂,增加了板材的静曲强度弹性模量。当金属铝箔位置从中心层向板材表面移动时,板材的静曲强度、弹性模量呈线性增强,分别增加了 50.10%与 41.41%。金属铝箔在板材内部的位置对复合功能人造板的性能影响极显著,且金属铝箔位置靠近板材表面呈对称排列时,金属铝箔增强效果达到最高,复合板材的各项性达到最优。后续还应进一步研究金属铝箔位置对复合功能板材的电磁屏蔽、防火阻燃、有害气体释放等特性,以及板材密度变化对板材性能的影响。

#### 参考文献:

- [1] 刘仁玲,郭强,黄金田,等. 木基金属复合材料的研究进展[J]. 西北林学院学报,2022(3):1-8.  
LIU R L, GUO Q, HUANG J T, *et al.* Progress of the development of wood-based composite materials [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022(3):1-8. (in Chinese)
- [2] 柴媛,傅峰,梁善庆. 木基金属功能复合材料研究进展[J]. 北京林业大学学报,2019,41(3):151-160.  
CHAI Y, FU F, LIANG S Q. Progress of wood based metal functional composites[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019,41(3):151-160. (in Chinese)
- [3] 杨红旗,陈志林,王金林. 铝/木复合装饰人造板的研究现状与展望[J]. 木材工业,2011,25(3):34-37.  
YANG H Q, CHEN Z L, WANG J L. Review of decorative aluminum/wood panels[J]. China Wood Industry, 2011,25(3):34-37. (in Chinese)
- [4] 饶鑫,杨静,卫佩行,等. 增强型单板层积材研究进展[J]. 西北林学院学报,2015,30(1):222-226.  
RAO X, YANG J, WEI P H, *et al.* Progress on reinforced laminated veneer lumber[J]. Journal of Northwest forestry university, 2015,30(1):222-226. (in Chinese)
- [5] 叶雨静,徐伟,黄琼涛,等. 单板厚度对小径柚木单板层积材力学性能的影响[J]. 林产工业,2019,56(9):6-10.  
YE Y J, XU W, HUANG Q T, *et al.* Effect of veneer thickness on mechanical properties of small-diameter teak laminated veneer lumber[J]. China Forest Products Industry, 2019,56(9):6-10. (in Chinese)
- [6] 付海燕,丁叶蔚,王正,等. 木质复合门单板层积材构件的优化设计及应用[J]. 木材工业,2019,33(4):54-57.  
FU H Y, DING Y W, WANG Z, *et al.* Structural optimization design of laminated veneer lumber components for making wood-based composite doors[J]. China Wood Industry, 2019,33(4):54-57. (in Chinese)
- [7] 周兆,曹建春,汤佩钊,等. 铝箔覆面刨花板[J]. 木材工业,2000,14(1):32-34.  
ZHOU Z, CAO J C, TANG P Z, *et al.* Particleboard overlaid with aluminum foil[J]. China Wood Industry, 2000,14(1):32-34. (in Chinese)
- [8] 杨生,桂宇帆,王振丰,等. 浸渍胶膜纸制备电热功能胶合板的性能分析[J]. 中国人造板,2018,25(1):6-11.  
YANG S, GUI Y F, WANG Z F, *et al.* Performance analysis of electric heating functional plywood with impregnated paper [J]. China Wood-Based Panels, 2018,25(1):6-11. (in Chinese)
- [9] 陈广胜,陈文帅,于海鹏. 木基复合界面化学物理相容性研究进展[J]. 东北林业大学学报,2011,39(8):110-112.  
CHEN G S, CHEN W S, YU H P. Progress in research on chemical and physical compatibility of interfaces in wood-based composites [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011,39(8):110-112. (in Chinese)
- [10] 梁祥鹏,杨亚峰,陈广辉,等. 铝箔贴面中密度纤维板的阻燃性能评价[J]. 木材工业,2015,29(4):43-46.  
LIANG X P, YANG Y F, CHEN G H, *et al.* Fire retardancy of medium density fiberboard overlaid with aluminum foil [J]. China Wood Industry, 2015,29(4):43-46. (in Chinese)
- [11] BAL B C, BEKTA S I, MENGELOGLU F, *et al.* Some technological properties of poplar plywood panels reinforced with glass fiber fabric[J]. Construction and Building Materials, 2015,101:952-957.
- [12] 李江晓,武轲,陈广辉,等. 单板与铝箔复合多层板的燃烧性能研究[J]. 木材工业,2019,33(1):16-20.  
LI J X, WU K, CHEN G H, *et al.* Combustion properties of the wood/ aluminum multilayer composite[J]. China Wood Industry, 2019,33(1):16-20. (in Chinese)
- [13] JIANG S C, WEI Y Q, HU Z, *et al.* Potential application of bamboo powder in PBS bamboo plastic composites[J]. Journal of King Saud University-Science, 2020,32(1):1130-1134.
- [14] LEENA K, ATHIRA K K, BHUVANESWARI S, *et al.* Effect of surface pre-treatment on surface characteristics and adhesive bond strength of aluminium alloy[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016,70:265-270.
- [15] WEI R, WANG X, CHEN C, *et al.* Effect of surface treatment on the interfacial adhesion performance of aluminum foil/CFRP laminates for cryogenic propellant tanks[J]. Materials & Design, 2017,116:188-198.
- [16] PACAPHOL K, AHT-ONG D. The influences of silanes on interfacial adhesion and surface properties of nanocellulose film coating on glass and aluminum substrates[J]. Surface and Coatings Technology, 2017,320:70-81.
- [17] 杨红旗. 铝木复合装饰板的制备及性能研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2012:18-19.
- [18] 许国娟,贾晨辉,刘晶,等. 酚醛树脂增韧改性研究进展及应用现状概述[J]. 复合材料科学与工程,2021(9):118-128.  
XU G J, JIA C H, LIU J, *et al.* Toughening modification dopment and the application status of phenolic resin[J]. Composites Science and Engineering, 2021(9):118-128. (in Chinese)

- XU M J, NIU R Q, YANG K, *et al.* A weighted clustering model for land eco-environmental sensitivity evaluation[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(10): 118-129, 144. (in Chinese)
- [26] 苏博雅, 齐实, 梁斌, 等. 西北五省生态敏感性分析[J]. *甘肃农业大学学报*, 2019, 54(2): 171-179.
- SU P Y, QI S, LIANG B, *et al.* Analysis of ecological sensitivity of five provinces in Northwestern China[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, 54(2): 171-179. (in Chinese)
- [27] HINTON G E. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. *Science*, 2006, 313: 504-507.
- [28] 靖远县志编纂委员会. 靖远县志[M]. 郑州: 中州古籍出版社, 2019.
- [29] BAI H, LI Z W, GUO H L, *et al.* Urban green space planning based on remote sensing and geographic information systems[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4213.
- [30] 黄发明, 杨光照, 苏晨旭, 等. 基于GIS和层次分析法的县域生态敏感性评价[J]. *南昌大学学报: 理科版*, 2019, 43(6): 599-605.
- HUANG F M, YANG G Z, SU C X, *et al.* Ecological sensitivity assessment based on GIS and analytic hierarchy process: case study of Longnan county in Jiangxi Province[J]. *Journal of Nanchang University: Natural Science*, 2019, 43(6): 599-605. (in Chinese)
- [31] 毛颀, 贾京默. 黑龙江县域农林用地景观格局变化特征[J]. *森林工程*, 2022, 38(2): 44-53.
- [32] 乔育, 种培芳. 天水市生态敏感性分析研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 2021, 56(5): 137-143, 152.
- QIAO Y, ZHONG P F. Analysis on ecological sensitivity of Tianshui city[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2021, 56(5): 137-143, 152. (in Chinese)
- [33] 严军, 王婷, 秦珏. 基于变异系数法的马鞍山江心洲生态敏感性定量研究[J]. *生态科学*, 2020, 39(2): 124-132.
- YAN J, WANG T, QIN J. Research on ecological sensitivity analysis of Ma'anshan Jiangxinzhou based on the method of variation coefficient[J]. *Ecological Science*, 2020, 39(2): 124-132. (in Chinese)
- [34] 刘宝元, 郭索彦, 李智广, 等. 中国水力侵蚀抽样调查[J]. *中国水土保持*, 2013(10): 26-34
- [35] KINGMA D P, BA J. Adam: a method for stochastic optimization[J]. *ArXiv Preprint ArXiv*, 2014, 1412: 6980.
- [36] 高明宇, 倪海明, 张博洋, 等. 一种基于GoogLeNet卷积神经网络的节缺陷识别方法[J]. *森林工程*, 2021, 37(4): 66-70.
- [37] LUNDBERG S M, LEE S I. A unified approach to interpreting model predictions[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, 30.
- [38] PEDREGOSA F, VAROQUAUX G, GRAMFORT A, *et al.* Scikit-learn: machine learning in python[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2011, 12: 2825-2830.
- [39] 王紫薇, 黄文哲, 周阳阳, 等. 泥河沟流域生态敏感性分析评价[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(6): 210-215.
- WANG Z W, HUANG W Z, ZHOU Y Y, *et al.* Integrated ecological sensitivity analysis and evaluation of Nihegou catchment[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(6): 210-215. (in Chinese)
- [40] 王亚楠, 黄安, 高阳, 等. 万年县乡村地域系统韧性评价及其空间分异格局[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 209-216, 225.
- WANG Y L, HUANG A, GAO Y, *et al.* Resilience evaluation and spatial differentiation pattern of rural regional system in Wannian county[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(6): 209-216, 225. (in Chinese)

(上接第262页)

- [19] 李锰, 张挺, 顾继友, 等. 热固性酚醛树脂增韧及低温快速固化改性研究[J]. *木材科学与技术*, 2021, 35(3): 65-70.
- LI M, ZHANG T, GU J Y, *et al.* Toughening and low temperature rapid curing modification of phenol formaldehyde resin[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2021, 35(3): 65-70. (in Chinese)
- [20] 杨红旗, 陈广辉, 王金林. PVAc改性酚醛树脂制备铝木复合材料研究[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(3): 170-173.
- YANG H Q, CHEN G H, WANG J L. PF adhesive modified by PVAc for manufacturing technology of decorative fiberboard with aluminum foils[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(3): 170-173. (in Chinese)
- [21] 李江晓, 陈广辉, 王金林, 等. 酚醛树脂改性对铝木复合材料性能的影响[J]. *浙江林业科技*, 2013, 33(2): 15-18.
- LI J X, CHEN G H, WANG J L, *et al.* Effect of modified PF adhesive on the properties of decorative fiberboard with aluminum foils[J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2013, 33(2): 15-18. (in Chinese)
- [22] 杨红旗, 陈广辉, 王金林, 等. 改性酚醛树脂对铝箔贴面中密度纤维板性能的影响[J]. *木材工业*, 2012, 26(4): 9-11.
- YANG H Q, CHEN G H, WANG J L, *et al.* Influence of modified phenol-formaldehyde resin on properties of aluminum foil overlaid medium density fiberboard[J]. *China Wood Industry*, 2012, 26(4): 9-11. (in Chinese)
- [23] 梁祥鹏. 多层实木铝箔复合制备功能人造板技术研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016: 18-31.
- [24] GB/T 17657—2013, 人造板及饰面人造板理化性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.