

## 楸木板材干燥含水率时间序列仿真分析与预测

吴凤霞<sup>1</sup>, 尤广林<sup>1</sup>, 邓广明<sup>2</sup>, 孙建平<sup>1\*</sup>

(1. 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004; 2. 华鹤集团 华鹤家具有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161005)

**摘要:**对楸木板材常规窑干过程中含水率时间序列进行仿真分析,研究干燥过程中木材含水率的实时监控和预测。首先分析楸木板材干燥含水率随时间的变化特征,并通过三阶多项式对其进行拟合分析,然后利用人工神经网络构建模型模拟仿真分析,并利用构建的模型对木材干燥含水率进行预测。结果表明,常规干燥木材含水率呈非线性下降趋势,多项式拟合构建含水率与时间的定标函数为  $y=60.7155-0.0595x-0.0004256x^2+0.0000006496x^3$ ,函数拟合仿真与实测值误差较大;构建拓扑结构为  $6\times8\times1$  的 BP 神经网络模型对含水率时间序列仿真结果最大误差为 2.87%,利用训练好的网络模型预测含水率,平均误差为 3.63%,最大误差为 11.15%,最小误差为 0.04%,25 个样本中 3 个样本预测误差超过 10%,其余 22 个样本的预测误差都小于 9%;木材干燥含水率时间序列仿真分析和预测局部较大误差发生在含水率波动较大的区域,可以利用构建的 BP 神经网络对楸木干燥含水率进一步预测。

**关键词:**木材干燥;含水率;神经网络;仿真分析

**中图分类号:**S781

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2024)01-0223-05

### Prediction and Simulation Analysis on Time Serials of *Juglans mandshurica* Lumber Moisture Content During Conventional Kiln Drying

WU Feng-xia<sup>1</sup>, YOU Guang-lin<sup>1</sup>, DENG Guang-ming<sup>2</sup>, SUN Jian-ping<sup>1\*</sup>

(1. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China;

2. Huahe Group Huahe Furniture Co., Ltd., Qiqihar 161005, Heilongjiang, China)

**Abstract:** In this study, the time series of moisture content in *Juglans mandshurica* lumber during drying process were simulated and analyzed, and the real-time monitoring and prediction of moisture content in wood drying process were studied. Firstly, the change characteristics of the lumber moisture with time were analyzed, and fitted by the third-order polynomial. Then, the artificial neural network was employed to construct the model for simulation and analysis, and the model was used to predict the wood drying moisture content. The results showed that the moisture content of conventional drying wood presented a non-linear downward trend. The calibration function of water content and time constructed by polynomial fitting was  $y=60.7155-0.0595x-0.0004256x^2+0.0000006496x^3$ , and there existed a large error between function fitting simulation and measured value. The maximum error of the simulation results was 2.87% obtained by constructing BP neural network model with the topology structure of  $6\times8\times1$ . By the trained BP network model to predict water content, the average error was 3.63%, the maximum and minimum errors were 11.15% and 0.04%. The prediction errors of 3 samples in 25 samples were more than 10%, the prediction errors of the remaining 22 samples were less than 9%. Moreover, local large errors occurred in the region with large fluctuation of water content. The BP neural network can be used to

收稿日期:2022-11-04 修回日期:2022-12-18

基金项目:国家自然科学基金(32260359);广西自然科学基金重点项目(2022GXNSFDA035065)。

第一作者:吴凤霞。研究方向:木材科学与技术。E-mail:FengXW0621@163.com

\*通信作者:孙建平,博士,教授。研究方向:木制复合材料性能优化设计与无损评价。E-mail:sjp\_jpcn@163.com

predict the drying moisture content of *J. mandshurica* lumber in one step.

**Key words:** wood drying; moisture content; neural network; simulation analysis

木材干燥是保证木质产品质量的关键技术之一,对木材进行合理的干燥,能够增强木材的尺寸稳定性,减少木材降等损失,提高木材利用率。楸木(*Juglans mandshurica*)又称核桃楸,属于落叶乔木,密度为  $0.522 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,由于良好的力学性能而被广泛应用于家具、建筑等行业;但楸木在干燥过程中容易产生开裂、翘曲变形等缺陷<sup>[1]</sup>,造成木材的浪费,干燥质量难以控制,而木材含水率(moisture content, MC)是木材干燥这一复杂、非线性动力学系统选择干燥基准的重要参照参数,也是影响木材干燥质量的关键因素,所以对楸木干燥含水率的实时监测显得尤为重要。国内外的学者对木材干燥过程中的含水率做了大量的研究工作,主要集中在木材水分迁移特性<sup>[2-3]</sup>、含水率的空间分布与梯度<sup>[4-7]</sup>、木材含水率的精确测定方法<sup>[7-11]</sup>、含水率的计算与预测<sup>[12-13]</sup>、干燥过程中含水率的模拟仿真<sup>[14-16]</sup>。对楸木干燥的研究主要集中在干燥工艺的确定<sup>[17]</sup>、控制和减少干燥缺陷<sup>[18]</sup>等方面,而基于时间序列的楸木干燥含水率预测研究较少。

研究发现木材干燥含水率<sup>[19]</sup>是随时间变化的动态参数,不仅受环境的影响还与其历史状态有密切的关系,是随时间变化的随机性时间序列。要实现多因素、动态的、复杂非线性木材干燥时间序列参数的预测与控制,最有效的方法是时间序列分析结合人工神经网络技术构建智能模型。而人工神经网络是一个由大量简单的处理单元(神经元)广泛连接组成的网络,用来模拟大脑神经系统的结构和功能,它能从已知数据中自动地归纳总结,获得这些数据的内在规律,经过数据训练后的模型具有很强的非线性映射能力,能够准确预测未来的趋势。

本研究在分析楸木干燥含水率时间序列特征的基础上,通过多项式拟合和人工神经网络建模,对楸木常规干燥过程中水分随时间变化规律进行分析,探索干燥木材含水率时间序列的发展过程和趋势;对木材干燥过程中影响木材干燥质量的重要因素含水率进行模拟仿真,实现木材含水率的精确预测。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

楸木板材产地为黑龙江省虎林市。选取材质和纹理均匀的楸木弦切板材,板材尺寸为  $2\,100 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ,初始含水率约 60%,所选板材无虫眼、开裂等情况,且厚度均匀,无明显翘曲变形。

在进行堆垛之前板材两端已经过石蜡封端。

### 1.2 仪器设备

采用意大利纳狄(Nardi)公司生产的程控干燥设备,干燥窑内部体积约为  $90 \text{ m}^3$ 。干燥过程采用顶风型、全息、电脑程控检验方式。干燥室内风机自动换向,空气恒温循环、均匀加热(最高温度可达  $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )。其他实验工具:干湿球温度计、导线型电阻式木材水分检测系统、游标卡尺、卷尺、电钻等。

### 1.3 试验方法

**1.3.1 干燥方法** 堆垛方式:首先在干燥窑底部平行放置 4 根隔条,再放置 5 块楸木板材作为第 1 层,每层木板之间均平行放置 4 根隔条,直到放置完 5 层木板。为防止干燥过程中顶层板的翘曲,在最顶层板材上放置 4 根混凝土方条。

干燥工艺:采用表 1 的干燥基准<sup>[20]</sup>,根据木材含水率控制干燥窑的温度对木材进行干燥,使木材最终含水率达到 8 % 左右。

从表 1 可以看出,楸木板材含水率不同则设定不同的干燥温度;按照含水率的不同主要分为 5 个干燥阶段,其中第 1 阶段也称预热处理,即干燥木材的预处理阶段,在温度  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、含水率(MC)60%下预热 24 h,使木材内外温度一致;第 2 阶段为木材的初期阶段,在温度  $52 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、含水率  $>38\%$  下进行,这个过程主要是使木材中的温度和湿度达到适宜的状态,使木材的含水率达到平衡值;第 3 阶段在温度  $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、含水率  $>25\%$  下进行,这个过程中,木材的干燥又分为含水率高于纤维饱和点的恒速干燥和含水率低于纤维饱和点的减速干燥过程;第 4 阶段在温度  $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、含水率  $<25\%$  下进行,以减少木材干燥过程中产生的缺陷;第 5 阶段为后期处理阶段,在温度  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、含水率 8 % 下处理 16 h,以消除干燥时产生的内应力。

表 1 楸木板材干燥基准

Table 1 Wood drying standard of *Juglans mandshurica* lumber

干燥阶段	1	2	3	4	5
MC(%)	60	$>38$	$>25$	$<25$	8
温度/ $^{\circ}\text{C}$	50	52	60	70	50

**1.3.2 温度与含水率的测定** 由图 1 可见,在单块检测板上用电钻钻出 6 个深度为 25 mm 的检测孔,每 2 个孔位为一组共计 3 组,埋入 3 对检测探头,连接导线至干燥窑外电阻式水分检测系统,取 3 处含水率的平均值作为单块检测板的平均含水率。并且,在材堆的顶部、中部和底部分别等距各取 2 块板

材,共计 6 块板材以供含水率的检测。在干燥过程中根据板材不同的含水率设定干燥温度基准,利用导线式木材水分检测系统检测材堆中 6 块板材的含水率,取平均值,每 2 h 记录 1 次数据,干燥时间为 582 h,板材最终含水率为 8% 左右。利用干湿球温度计记录干燥窑内的温度,记录随干燥时间变化的板材含水率和窑内温度共 291 组数据,然后对采集的数据进行时间序列分析,通过多项式拟合和构建人工神经网络模型对板材含水率进行预测。



图 1 板材含水率检测探头安装孔位

Fig. 1 Hole position of water content detection probe

1.3.3 时间序列多项式拟合 时间序列分析着重研究数据序列的相互依赖关系,是对离散指标的随机过程进行统计分析,如用  $x(t)$  表示某一指标(含水率)随时间  $i$  的变量,  $\{x(i), i=1, 2, \dots\}$  是一时间序列。对  $i=1, 2, \dots, t$  记录随干燥时间变化的板材含水率数据点  $x(1), x(2), \dots, x(t)$ ,  $x(t)$  称为长度为  $t$  的含水率时间序列。通过时间序列分析方法可以分析序列  $x(t)$  的变化规律,实现对下一时间点的板材含水率  $x(n+m)$  ( $m=1, 2, \dots$ ) 进行预测。

多项式拟合是指选择适当的多项式类型来拟合观测数据,多项式拟合不要求拟合曲线经过所有离散数据点,而要求它能够反映出离散数据整体的变化趋势,它是用解析表达式逼近离散数据的一种方法<sup>[21]</sup>。假设给定数据点为时间序列  $\{x(i), i=1, 2, \dots, n\}$  和有由多项式构成的函数类  $\varphi$ , 并且函数次数均不超过  $m$  ( $m \leq n$ ), 求多项式(1)满足式(2), 根据多项式和时间序列得到式(3), 使式中的  $\delta$  达到最小, 满足式上 2 个条件的  $f_m(x)$  为时间序列  $x(i)$  的最小二乘拟合多项式, 当  $m=1$  时, 为线性拟合<sup>[22]</sup>。

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x^1 + a_0 \quad (1)$$

式中:  $f(x)$  为多项式函数;  $a$  为系数;  $x$  为变量。

$$f_m(x) = \sum_{k=0}^m a_k x^k \in \varphi \quad (2)$$

式中:  $f_m(x)$  为多项式函数类  $\varphi$  的求和;  $m$  为多项式函数项数。

$$\delta = \sum_{i=0}^n (f_m(x_i) - x(i))^2 = \sum_{i=0}^n \left( \sum_{k=0}^m a_k x_i^k - (i) \right)^2 \quad (3)$$

式中:  $\delta$  为多项式函数类  $\varphi$  与时间序列数据点的偏差平方和;  $x(i)$  为随时间  $i$  变化的含水率数据点;  $n$  为时间序列的项数。

1.3.4 神经网络建模预测干燥板材含水率 神经网络可以从时间序列数据样本中自动地学习数据的

历史规律,而无需繁复地查询和表述过程,并能自动地逼近最佳体现样本数据规律的函数,而且不考虑函数是什么形式,都以黑匣子的形式体现输入与输出之间的内在关系。神经网络用于时间序列的分析预测,是指通过神经网络模型去逼近一个时间序列或者一个时间序列的变形,可通过时间序列的前  $m$  个值  $m[x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-m)]$  去预测后  $s$  个值  $x(t), x(t+1), \dots, x(t+s-1)$ , 也就是说,利用一个拓扑结构为  $m-p-s$  的神经网络模型来拟合或逼近一个函数。当  $s=1$  时,为时间序列的一步预测,即有:  $x(t) = f[x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-m)]$ , 当  $s>1$  时,为时间序列的多步预测,此时,网络模型有  $s$  个输出,依次对应  $s$  个预测值。

运用分析软件 Matlab 2021b 中的拟合工具箱和神经网络工具箱进行多项式拟合和构建 Back Propagation(BP)网络模型<sup>[23]</sup>。BP 网络一般主要由输入层、隐层、输出层组成,隐层中的每一个节点分别与输入层和输出层的节点连接。输入层及输出层节点数一般可根据实际需要加以确定,隐层节点数可依据具体情况分析确定。输入层和隐层之间的激活函数采用正切 Sigmoid 函数,隐层与输出层采用线性函数。为了避免 BP 算法存在局部极小问题和学习收敛速度慢的缺点,采用非线性阻尼最小二乘法 Levenberg-Marquardt (L-M) 算法来训练 BP 网络, L-M 算法是一种利用标准的数值优化技术的快速算法,能够提高网络的训练速度。

确定网络的拓扑结构、参数设置与算法后,利用样本对模型进行训练学习,最后利用训练好的模型对含水率进行预测。

## 2 结果与分析

### 2.1 含水率、温度时间序列特征

采用设定的干燥基准后,采用预埋的导线式传感器每 2 h 测定 6 块楸木样板的含水率并取平均值,并记录干燥窑内的温度,楸木板材含水率、窑内温度随干燥时间变化的趋势见图 2, 可以看出,含水率逐渐降低,呈三段变化趋势, 0~180 h 含水率基本呈直线下降, 181~360 h 含水率也基本呈线性下降,但降低速度较前一段快,此后逐渐平稳在 8% 左右,总体呈非线性的变化趋势。与之相对应,根据干燥基准,在预热阶段干燥温度升高到 50℃, 板材预热后,温度一直保持在 50℃ 直至板材含水率降低到 30% 左右,也就是 230 h 左右,干燥温度逐渐上升到 63℃ 左右,也就是干燥时间约 320 h 板材含水率降至 15% 左右;持续保温至 430 h 左右,温度逐渐下降至 50℃, 板材含水率达到 8% 左右并保持一段时间



消除干燥内应力,直至干燥结束。

## 2.2 含水率多项式拟合

采用多项式拟合方法对楸木干燥含水率进行拟合,根据拟合得到的系数,建立板材含水率与时间的定标函数为: $y = 60.7155 - 0.0595x - 0.0004256x^2 + 0.0000006496x^3$ 。含水率时间序列多项式拟合度  $R^2$  为 0.992,多项式拟合残差见图 3,可以看出,均方根之间的偏差量不大,数据的拟合度较高。

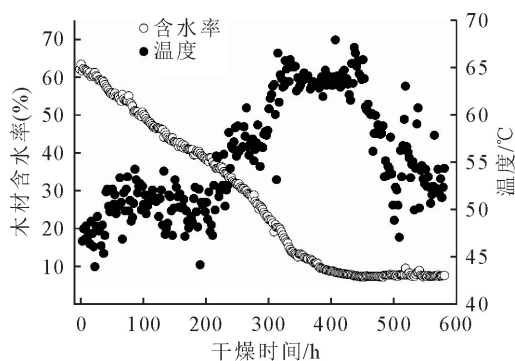


图 2 楸木干燥含水率与温度变化

Fig. 2 Drying moisture content and temperature variation of *J. mandshurica* lumber

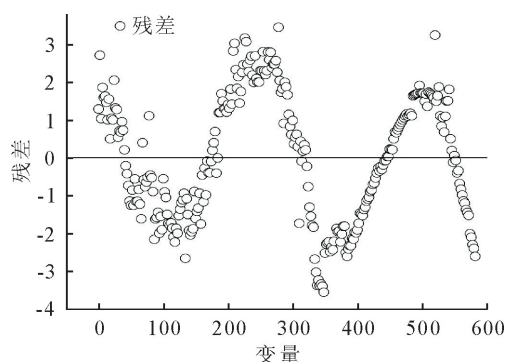


图 3 残差分析

Fig. 3 Residual analysis

对多项式拟合的误差分析见图 4,其中实线为仿真拟合曲线,可以看出,楸木含水率随时间变化大致与三阶多项式相接近;虚线为多项式仿真拟合与板材实际含水率之间的误差,可以看出,在含水率  $> 30\%$  的阶段误差较小,仿真误差  $< 10\%$ ;而最大误差  $35\%$  出现在后期处理阶段,也就是楸木板材含水率为  $8\%$  左右,这与三阶的多项式曲线有关,与残差图相对应,较大误差出现在干燥时间为 250、350 h 和 500 h 附近,对应的含水率分别约  $30\%$ 、 $15\%$  和  $8\%$ 。这些误差值主要产生在纤维饱和点(约为  $30\%$ )及以下,由于木材中的水分主要为细胞腔内的自由水和细胞壁内的结合水,而本研究选择的电阻式含水率测试方法是通过测试板材内部水分的离子导电能力以判断板材的水分含量,这种方法受到自由水的

影响较大。随着干燥时间的延长,板材的含水率降到纤维饱和点以下,此时随着自由水的消失,板材内部细胞腔内缺乏支撑离子自由移动的水分通道,板材的电学性能出现非线性变化,造成较大的含水率测试误差,因此也造成了 BP 神经网络的预测值和实测值之间的误差。并且模型隐层的节点个数也会造成预测值误差。

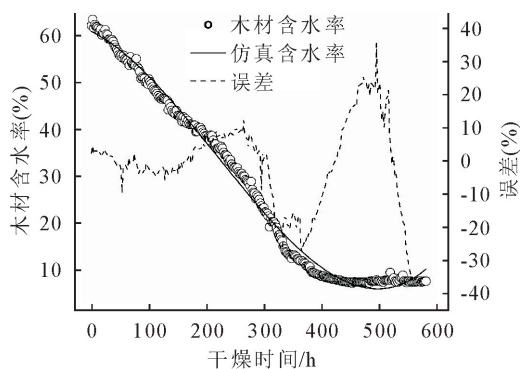


图 4 多项式拟合与误差

Fig. 4 Polynomial fitting and error

## 2.3 基于 BP 网络的板材干燥含水率模拟仿真

根据试错法确定网络最佳的拓扑结构为  $6 \times 8 \times 1$ ,以此构建 BP 神经网络模型对楸木板材干燥含水率进行仿真分析和预测。也就是利用含水率时间序列的前 6 个含水率值预测第 7 个含水率,隐层节点数为 8 构建网络模型对数据进行模拟仿真分析,实现板材含水率的一步预测。本研究测试含水率序列长度为 291,数据样本为 285 个,利用前 260 个样本作为 BP 网络模型的输入对模型进行训练,另外 25 个样本对模型进行验证,在迭代 255 次后模型收敛,训练样本的决定系数  $R^2$  为 0.996。BP 网络模型对板材干燥含水率仿真及误差见图 5,可以看出,训练好的模型对含水率的仿真结果基本与实际含水率一致,仿真误差范围为  $\pm 3\%$ ,最大误差为  $2.87\%$ 。说明模型仿真结果与实测值拟合情况良好,该 BP 神经网络模型具有很好的性能。另外还发现,局部最大误差基本发生在含水率时间序列变化较大的位置,对应含水率局部极大值拐点,也说明模型仿真真实地反映原始数据的变化特征。

## 2.4 板材干燥含水率预测

训练好的 BP 模型对含水率仿真分析说明该模型能根据含水率序列的前 6 个数值很好地预测板材干燥下一个含水率值,这样便可以根据板材干燥的历史数据准确地预测板材在干燥过程中含水率的变化,从而实现对板材干燥过程中含水率变化的实时监测。

利用未参与训练的 25 个含水率样本验证 BP

模型的推广性能, 目标值、实测值和误差数据见图 6, 25 个测试样本平均误差为 3.63%, 最大误差为 11.15%, 最小误差为 0.04%, 其中有 3 个样本预测误差超过 10%, 分别为 -11.15%、10.26% 和 10.6%, 其余 22 个样本的预测误差都 < 9%。同样, 局域较大误差发生在相邻含水率波动较大的区域, 这和多项式仿真误差结果相同。

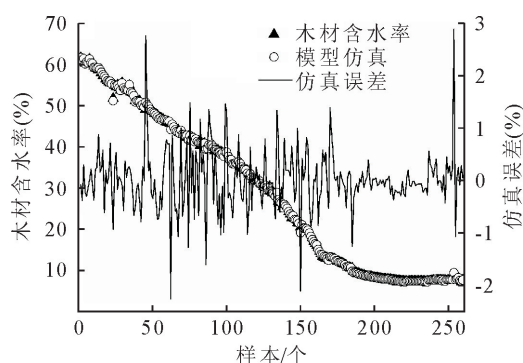


图 5 BP 模型含水率仿真与误差

Fig. 5 BP model moisture content simulation and error

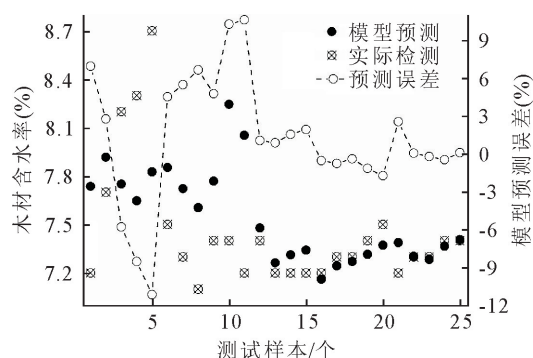


图 6 模型含水率输出与目标值误差

Fig. 6 Model moisture content output and target value error

### 3 结论

常规干燥楸木含水率呈三段非线性下降趋势, 利用多项式拟合构建含水率与时间的定标函数为:  $y = 60.7155 - 0.0595x - 0.0004256x^2 + 0.000006496x^3$ 。含水率时间序列多项式拟合度  $R^2$  为 0.992, 但是在含水率较低的时候, 拟合仿真误差较大。

构建拓扑结构为  $6 \times 8 \times 1$  的 BP 神经网络模型, 训练后模型仿真误差范围为  $\pm 3\%$ , 最大误差为 2.87%, 模型仿真结果与实测值拟合情况良好。

利用训练好的 BP 神经网络模型预测 25 个干燥含水率的变化, 3 个样本预测误差超过 10%, 但最大误差 < 12%, 其余 22 个样本的预测误差都 < 9%, 可以利用该 BP 神经网络模型对楸木板材常规干燥含水率进行预测。

### 参考文献:

- [1] 平立娟, 王喜明. 木材含水率分级干燥及其节能分析[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 247-253.  
PING L J, WANG X M. Moisture content classification and energy saving in wood drying[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 247-253. (in Chinese)
- [2] 吕超, 詹天翼, 王旋, 等. 木材内部水分扩散特性研究现状及发展趋势[J]. 世界林业研究, 2019, 32(6): 43-48.  
LÜ C, ZHAN T Y, WANG X, et al. Research on water diffusion characteristics in wood[J]. World Forestry Research, 2019, 32(6): 43-48. (in Chinese)
- [3] DANVIND J, EKEVAD M. Local water vapor diffusion coefficient when drying norway spruce sapwood[J]. J. Wood Sci., 2006, 52(3): 195-201
- [4] 周正. 基于有限元方法的木材干燥过程含水率分布模型研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [5] 姜新波, 宋靖, 夏鹏. 桦木波动干燥过程中温度和水分扩散数值模拟[J]. 森林工程, 2022, 38(1): 34-41, 51.  
JIANG X B, SONG J, XIA P. Numerical simulation of temperature and moisture diffusion during wave drying of birch[J]. Forest Engineering, 2022, 38(1): 34-41, 51. (in Chinese)
- [6] WATANABE K, LAZARESCU C, SHIDA S, et al. A novel method of measuring moisture content distribution in timber during drying using CT scanning and image processing techniques[J]. Drying Technology, 2012, 30(3): 256-262.
- [7] 刘元泽. 基于融合方法的木材干燥过程中含水率空间分布模型研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [8] 王磊. 木材含水率检测系统设计与检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [9] SUN Y, LIU Y, YU H, et al. Non-destructive prediction of moisture content and freezable water content of purple-fleshed sweet potato slices during drying process using hyperspectral imaging technique[J]. Food Analytical Methods, 2016, 10(5): 1535-1546.
- [10] 吴小亚. 木材含水率在线检测系统的优化设计[D]. 临安: 浙江农林大学, 2018.
- [11] 汪紫阳, 李耀翔, 尹世逵. 应用近红外光谱技术检测木材含水率的方法[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(12): 82-86.  
WANG Z Y, LI Y X, YIN S K. Moisture content prediction of wood by near infrared spectroscopy[J]. Journal of North-East Forestry University, 2018, 46(12): 82-86. (in Chinese)
- [12] 赵景尧. 对流干燥木材热质迁移数值模型研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- [13] 周正, 孙丽萍. 基于算术平均值和递推估计算法的木材含水率检测研究[J]. 森林工程, 2013, 29(6): 52-55.  
ZHOU Z, SUN L P. Determination of lumber moisture content based on arithmetic method and recursive estimation[J]. Forest Engineering, 2013, 29(6): 52-55. (in Chinese)
- [14] CHAI H, CHEN X, CAI Y, et al. Artificial neural network modeling for predicting wood moisture content in high frequency Vacuum drying process[J]. Forests, 2018, 10(1): 16-26.

(下转第 255 页)

- [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese)
- [21] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, *et al.* Geographical detectors based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [22] WANG J F, HU Y. Environmental health risk detection with Geo Detector [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33: 114-115.
- [23] 董玉祥, 徐茜, 杨忍, 等. 基于地理探测器的中国陆地热带北界探讨[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 135-147.
- DONG Y X, XU Q, YANG R, *et al.* Delineation of the northern border of the tropical zone of China's main land using geo-detector[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 135-147. (in Chinese)
- [24] 刘吉平, 赵丹丹, 田学智, 等. 1954—2010 年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力[J]. *生态学报*, 2014, 34(12): 3234-3244.
- LIU J P, ZHAO D D, TIAN X Z, *et al.* Landscape pattern dynamics and driving forces analysis in the Sanjiang Plain from 1954 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3234-3244. (in Chinese)
- [25] SHRESTHA M K, YORK A M, BOONE C G, *et al.* Land fragmentation due to rapid urbanization in the Phoenix Metropolitan Area: Analyzing the spatiotemporal patterns and drivers[J]. *Applied Geography*, 2012, 32(2): 522-531.
- [26] 张利利, 余济云, 李锐, 等. 1998—2010 年五指山市土地利用景观格局变化分析[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(1): 221-225.
- ZHANG L L, SHE J Y, LI R, *et al.* Changes of land use and landscape pattern in Wuzhishan during 1998—2010[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(1): 221-225. (in Chinese)
- [27] 王芳, 谢小平, 陈芝聪. 太湖流域景观空间格局动态演变[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(11): 3720-3730.
- WANG F, XIE X P, CHEN Z C. Dynamic evolution of landscape spatial pattern in Taihu lake basin, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(11): 3720-3730. (in Chinese)
- [28] 江恩赐, 李秀霞, 徐龙. 吉林省四平市集体建设用地流转驱动力实证研究[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(5): 199-202.
- JIANG E C, LI X X, XU L. Empirical research for collective construction land circulation driving force in Siping City of Jilin Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(5): 199-202. (in Chinese)
- [29] 虎陈霞, 郭旭东, 连纲. 长三角快速城市化地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以嘉兴市为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(3): 333-340.
- HU C X, GUO X D, LIAN G. Effects of land use change on ecosystem service value in rapid urbanization areas in Yangtze River delta: a case study of Jiaxing City[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(3): 333-340. (in Chinese)
- (上接第 227 页)
- [15] 张冬妍, 刘星, 曹军, 等. 干燥过程中木材含水率神经网络预测模型(英文)[J]. *林业科学*, 2008, 44(12): 94-98.
- ZHANG D Y, LIU Y X, CAO J, *et al.* Neural network prediction model of wood moisture content for drying process[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(12): 94-98. (in Chinese)
- [16] CHASIoTIS V K, TZEMPELIKOS D A, FILIOS A E, *et al.* Artificial neural network modelling of moisture content evolution for convective drying of cylindrical quince slices[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020(172): 105074.
- [17] 刘能文, 喻迺秋, 吕泽群, 等. 50 mm 榉木常规蒸汽干燥工艺研究[J]. *林产工业*, 2015, 42(1): 39-42.
- [18] 周振林, 李海波, 王鹏. 榉木干燥过程中的质量控制[J]. *中国林副特产*, 2001(2): 16-17.
- [19] 刘志佳, 李黎, 鲍甫成, 等. 弯曲木构件弹性恢复与终含水率的关系研究[J]. *西北林学院学报*, 2009, 24(4): 169-173.
- LIU Z J, LI L, BAO F C, *et al.* Relationship between elasticity deformation and final moisture content of bending wooden samples[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(4): 169-173. (in Chinese)
- [20] 孟兆新, 李尚, 肖定福, 等. 木材干燥窑内部流场改进与风速均匀性研究[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(3): 247-251.
- MENG Z X, LI S, XIAO D F, *et al.* Improvement of internal flow field of wood drying kiln and its wind speed distribution uniformity[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(3): 247-251. (in Chinese)
- [21] 杨云升. Matlab 曲线拟合及其在试验数据处理中的应用[J]. *电脑与信息技术*, 2009, 17(2): 34-36.
- YANG Y S. Curve fitting based on matlab and the application on test data [J]. *Computer and Information Technology*, 2009, 17(2): 34-36. (in Chinese)
- [22] 何岸青. 基于多项式拟合与支持向量机的股票关键拐点预测[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [23] 顾哲衍, 陈杭, 伊鑫. 基于 BP 神经网络与 SVM 模型的黄尾河径流预测比较分析[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(5): 201-206.
- GU Z Y, CHEN H, YI X. Comparative analysis of Huangwei river runoff prediction based on BP neural network and SVM model[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(5): 201-206. (in Chinese)