

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240359

基于支持向量回归 (SVR) 的马尾松木材脱脂率预测

郭佳伦 钟浩珉 赵俊博 陈瑶

(北京林业大学木质材料科学与应用教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:【目的】脱脂处理是提升松木制品性能的重要手段,但传统脱脂率检测方法耗时且破坏试样。本研究旨在探索一种快速、无损的脱脂率检测方法,基于木材表面颜色变化,利用支持向量回归(SVR)构建脱脂率预测模型。【方法】采用氨气-水蒸气在高温条件下对马尾松木材进行处理,分析不同条件对木材表面颜色参数和脱脂率的影响,探讨其相关性。利用 3 种不同的核函数(多项式核函数、Sigmoid 核函数、径向基函数)构建基于 SVR 的脱脂率预测模型,并通过比较选择最优模型。【结果】经氨气-水蒸气热处理脱脂后,马尾松表面明度(L^*)和黄蓝指数(b^*)低于未处理木材,红绿指数(a^*)则高于未处理木材。随着氨水质量分数和处理温度的增加, L^* 、 a^* 和 b^* 呈逐渐降低趋势,总色差(ΔE^*)逐渐增大,脱脂率随之提高。在 180 °C、较高氨水质量分数的处理条件下, ΔE^* 达到最大值 58.89,脱脂率达到最高值 70.00%。颜色参数与脱脂率呈局部二次函数关系,相关系数最高为 0.713。在以径向基函数为核函数的 SVR 模型中,预测含脂率和脱脂率的均方根误差分别为 0.523 和 4.315,决定系数分别为 0.847 和 0.823,该预测模型可应用于脱脂率检测的前期筛选。【结论】本研究成功构建了基于 SVR 的马尾松木材脱脂率预测模型。该模型在脱脂率检测的前期筛选中具有一定的应用价值,能够在一定程度上实现检测过程的快速、简便和无损化。本研究为马尾松木材脱脂率检测的效率提升和质量改进提供了一种新的方法。

关键词: 支持向量回归; 机器学习; 预测模型; 脱脂; 马尾松; 颜色参数

中图分类号: [S784];TP181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2025)03-0151-11

引文格式: 郭佳伦, 钟浩珉, 赵俊博, 等. 基于支持向量回归(SVR)的马尾松木材脱脂率预测 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(3): 151-161. Guo Jialun, Zhong Haomin, Zhao Junbo, et al. Deresination rate prediction of Masson pine wood based on support vector regression (SVR)[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(3): 151-161.

Deresination rate prediction of Masson pine wood based on support vector regression (SVR)

Guo Jialun Zhong Haomin Zhao Junbo Chen Yao

(Key Laboratory of Wood Material Science and Application of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Deresination treatment is an important method for improving the performance of pine wood products. However, traditional methods for detecting deresination rate are both time-consuming and destructive to samples. This paper aims to explore a rapid and non-destructive method for detecting the deresination rate based on changes in wood surface color and using support vector regression (SVR) to construct a deresination rate prediction model. [Method] *Pinus massoniana* wood was treated with ammonia gas and water vapor under high-temperature conditions. The effects of different conditions on wood surface color parameters and deresination rate were analyzed, and their correlations were investigated. Three different kernel functions (polynomial kernel function, Sigmoid kernel function, and radial basis

收稿日期: 2024-10-29 修回日期: 2025-02-13

基金项目: 广西林业科技推广示范项目(2024GXJK23)。

第一作者: 郭佳伦。主要研究方向: 木材热加工。Email: gjlun2000@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学材料学院。

责任作者: 陈瑶, 副教授。主要研究方向: 木材功能性改良。Email: ychen@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

function) were used to construct SVR-based deresination rate prediction models, and the optimal model was selected through comparison. [Result] After deresination by ammonia gas-water vapor heat treatment, the surface lightness (L^*) and yellow-blue index (b^*) of Masson pine wood were lower than those of untreated wood, while the red-green index (a^*) was higher than that of untreated wood. With increasing ammonia mass fraction and treatment temperature, L^* , a^* , and b^* showed a gradual downward trend, the total color difference (ΔE^*) increased gradually, and the deresination rate improved accordingly. Under treatment conditions of 180 °C and a higher ammonia mass fraction, ΔE^* reached its maximum value of 58.89, and the deresination rate achieved its highest value of 70.00%. The color parameters showed a local quadratic relationship with deresination rate, with the highest correlation coefficient being 0.713. In SVR model with radial basis function as kernel function, the root mean square errors for predicting lipid content and deresination rate were 0.523 and 4.315, respectively, and the coefficients of determination were 0.847 and 0.823, respectively. This prediction model can be applied to preliminary screening in deresination rate detection. [Conclusion] This study successfully constructs a deresination rate prediction model for Masson pine wood based on SVR. The model has certain application value in preliminary screening of deresination rate detection, and can achieve rapid, convenient, and non-destructive detection to some extent. This research provides a new method for improving the efficiency and quality of deresination rate detection in Masson pine wood.

Key words: support vector regression; machine learning; prediction models; deresination; Masson pine (*Pinus massoniana*); color parameters

脱脂处理是防止松木在加工和使用中出现溢脂现象,提高松木制品使用性能的重要方法^[1]。目前常用的脱脂率检测方法主要依据 GB/T 2677.6—1994《造纸原料有机溶剂抽出物含量的测定》^[2]的方法和乙醇浸泡法^[3],但是这两种脱脂率检测方法的周期较长,对木材破坏大,无法满足现代化、简洁快捷、无损检测的要求。木材表面颜色变化可反映木材化学组分变化与处理条件的表现参数,且容易通过快速无损的检测方式获得^[4]。因此,基于木材表面的颜色参数,探索一种快速、可靠的非破坏性木材脱脂率检测方法,这对于实现松木脱脂率的高效检测具有重要意义。

机器学习法通过算法对多个变量的数据进行分析,在木材性能的快速检验和预测领域已得到广泛应用,多种机器学习方法,如回归树模型、支持向量回归(support vector regression, SVR)和人工神经网络(artificial neural network, ANN)等,已被用于研究木材表面颜色与木材密度、质量损失、尺寸稳定性、生物耐候性、力学性能的相关性^[5-6]。研究表明,热处理木材表面颜色与尺寸稳定性和生物耐久性存在显著相关性^[7-8],可通过颜色参数有效预测木材性能。热处理木材颜色的变化与其化学成分密切相关,而这些化学成分的变化是热处理木材力学性能变化的根本原因,进而建立颜色参数与化学成分之间的响应关系,为利用颜色预测木材力学性能提供科学依据^[9]。已有研究采用回归树模型,通过木材表

面颜色预测抗弯强度(modulus of rupture, MOR)和抗弯弹性模量(modulus of elasticity, MOE),发现颜色参数明度值(L^*)、红绿指数(a^*)、黄蓝指数(b^*)、总色差(ΔE^*)对模型的预测精度有重要影响,预测准确率最高可达 88% 和 90%^[10]。支持向量回归模型也被用于预测热处理木材的力学性能,以 L^* 、 a^* 、 b^* 为输入值, MOR、MOE 和抗剪强度为输出值,预测的最大偏差仅为 10 MPa,预测精度最高可达 90%,并且预测精度随着热处理条件的加剧而提高^[11]。结合机器学习法和颜色参数的 SVR 模型还可以准确评估古代木构件的密度、MOR、MOE 以及顺纹抗压强度,其决定系数(R^2)和均方根误差(root mean square error, RMSE)分别比传统的机器学习模型优化了 25% 和 9%^[12]。此外,利用 ANN 建立的基于热处理辐射松(*Pinus radiata*)颜色的 MOR 和 MOE 预测模型,预测值与实际值吻合良好, R^2 分别为 0.91 和 0.78,能够有效地模拟颜色参数与热处理木材力学性能之间的关系,为力学性能的预测提供了可靠的方法^[13]。

松脂的脱除与处理条件和木材颜色的变化密切相关,可以尝试使用机器学习根据处理条件、脱脂率与木材颜色的关系预测脱脂率,评估木材颜色变化与脱脂率的相关性,实现脱脂率的快速准确预测。基于小样本数据的 SVR 在模型构建、收敛速度和泛化能力等方面,相较于其他机器学习方法展现出明显优势,且预测准确度更高,对热处理木材性能的预测应用前景广阔^[14]。因此,本研究拟采用氨气-水蒸

气对马尾松(*P. massoniana*)木材进行热处理脱脂,探索处理温度和氨水质量分数对马尾松木材颜色以及脱脂率的影响,探究马尾松木材颜色变化和脱脂率之间的响应关系,并通过 SVR 构建利用木材颜色参数对脱脂率的预测模型,以期对马尾松木材脱脂率检测的提质增效提供新的选择。

1 材料与方 法

1.1 马尾松木材热处理脱脂试验

1.1.1 材 料

速生马尾松木材购自江苏中铭昊木业有限公司,气干密度 0.456 g/cm^3 ,试样规格为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。氨水(优级纯 GR, 25%~28%),购自上海玻尔化学试剂有限公司。苯(分析纯 AR, $\geq 99.5\%$),购自上海麦克林生化科技股份有限公司。无水乙醇(优级纯 GR),购自现代东方(北京)科技发展有限公司。

1.1.2 氨气-水蒸气热处理

为使木材细胞处于饱水状态,从而在氨气热处理中形成碱性环境,首先在室温下使用去离子水浸泡马尾松木材两周,两周后每隔 24 h 测量一次木材的质量,直至两次测量之差小于 0.02 g 。在内衬容积 200 mL 的水热合成反应釜内加入 20 mL 不同体积质量分数(0%, 5%, 10% 和 20%)的氨水溶液,将浸泡至饱水状态的木材试样置于混合溶液的上方。使用聚四氟乙烯支架在水热合成反应釜内将试样架起,确保木材不接触水热合成反应釜内的液面。使用电热鼓风干燥箱加热水热合成反应釜,促使氨水产生气态氨,渗透进入木材内部形成碱性环境,并对试样在 140 、 160 、 $180 \text{ }^\circ\text{C}$ 下进行热处理,处理 5 h。热处理结束后,待反应釜降至室温后取出样品,冲洗干净并擦干表面水分。随后,将样品放入真空干燥箱中,干燥至质量不变,干燥温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,干燥时间约 7 天。

1.1.3 木材表面色度指数测试

参照国际照明委员会推荐的 $L^*a^*b^*$ (1976)标准色度系统^[15]对木材的表面颜色进行检测,并计算色差。采用 CM-2300d 分光测色计(柯尼卡美能达(中国)投资有限公司),测得木材试样处理前后色度学参数明度值 L^* 、 a^* 和 b^* ,每个试样测 20 个点取平均值。按照式(1)~(4)计算材色变化值 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 和总色差 ΔE^* 。

$$\Delta L^* = L^* - L_0^* \quad (1)$$

$$\Delta a^* = a^* - a_0^* \quad (2)$$

$$\Delta b^* = b^* - b_0^* \quad (3)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

式中: L_0^* 、 a_0^* 和 b_0^* 为处理前试样表面的明度值、红绿指数和黄蓝指数, L^* 、 a^* 和 b^* 为处理后试样表面的明度值、红绿指数和黄蓝指数。

1.1.4 含脂率和脱脂率测试

将处理后的木材试样放在电热鼓风干燥箱中 $103 \text{ }^\circ\text{C}$ 下进行干燥,定期称量质量,直到间隔 2 h 的质量之差小于试样质量 0.5% 时,认为试样达到绝干状态。取绝干后的试样粉碎成 $40 \sim 60$ 目的木粉,称量此时绝干木粉的质量 m_0 ,再依据索氏抽提法对脱脂后的马尾松木粉进行有机溶剂的抽提,称量抽提后木粉的质量为 m_1 ,然后计算含脂率和脱脂率,具体实验步骤参照 GB/T 2677.6—1994《造纸原料有机溶剂抽出物含量的测定》。按下式计算马尾松木材苯醇抽出物含量,即含脂率(X)。

$$X = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: m_0 、 m_1 为抽提前、后的木粉质量, g。

木材脱脂率(D)为

$$D = \frac{X_0 - X_1}{X_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中: X_0 、 X_1 为处理前、后的含脂率。

1.1.5 色度指数与脱脂率相关性回归拟合分析

在 SPSS 软件中进行相关性及回归拟合分析,获得不同处理条件下马尾松木材表面颜色参数与含脂率、脱脂率之间的相关关系以及变化趋势。

1.2 SVR 脱脂率预测模型的建立

以处理后马尾松的颜色参数(L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE^*)作为输入值,脱脂率作为输出值,建立 SVR 预测模型。首先将数据集划分为 70% 的训练集和 30% 的测试集,以避免过度拟合。接着,从多项式核函数、Sigmoid 核函数、径向基函数中选择 RMSE 最低, R^2 最高,且拟合情况最优的核函数。然后,通过调节相关超参数(惩罚系数 C 和核函数参数 g),确定 RMSE 最小的参数组合。最后,利用测试集验证预测效果,并评估模型性能,确保模型的准确性和稳定性。

1.2.1 核函数的选择

利用 3 种不同的核函数(多项式核函数、Sigmoid 核函数、径向基函数)构建 SVR 预测模型,对马尾松木材的含脂率和脱脂率进行预测。这些核函数将原始数据映射到高维空间,使得原本在低维空间中线性不可分的数据变得线性可分,从而提高 SVR 的处理效果。根据均方根误差(RMSE)和 R^2 评估结果,筛选出最适合的核函数。RMSE 越小,表示模型的预测结果与真实值的差距越小,即模型的表现越

好; R^2 的取值范围是 $[0, 1]$, R^2 值越高, 表示预测值与实测值之间的吻合程度越好。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

式中: n 为数据总个数, y_i 和 \hat{y}_i 分别为实测值和预测值。

$$R^2 = 1 - \left(\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right) / \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (8)$$

式中: \bar{y} 为实测值的平均值。

1.2.2 优化超参数

网格搜索是超参数优化的常用方法, 尤其适用于优化 SVR 等机器学习模型的性能。该方法在预设的取值范围内, 系统地生成所有可能的参数组合, 并通过交叉验证等技术评估每组参数, 最终选择具有

最低均方根误差的参数组合, 作为 SVR 脱脂率预测模型的超参数组合^[16]。

本研究采用网格搜索法优化 SVR 模型, 其中惩罚系数 C 和核函数参数 g 需要调整, 这两个参数对模型的复杂程度、拟合程度和泛化能力有重要影响^[17]。 C 和 g 的取值范围是 $[2^{-8}, 2^8]$, 步长为 0.5, 即 C 和 g 的值将从 2^{-8} 到 2^8 , 每隔 0.5 个指数单位取一个值。网格搜索法超参数优化的基本流程如图 1 所示。

2 结果与分析

2.1 马尾松木材表面颜色

图 2 显示: 随着处理温度的升高和氨水质量分数的增加, 马尾松木材颜色逐渐加深, 明度降低, 色调从浅黄色到深褐色转变。

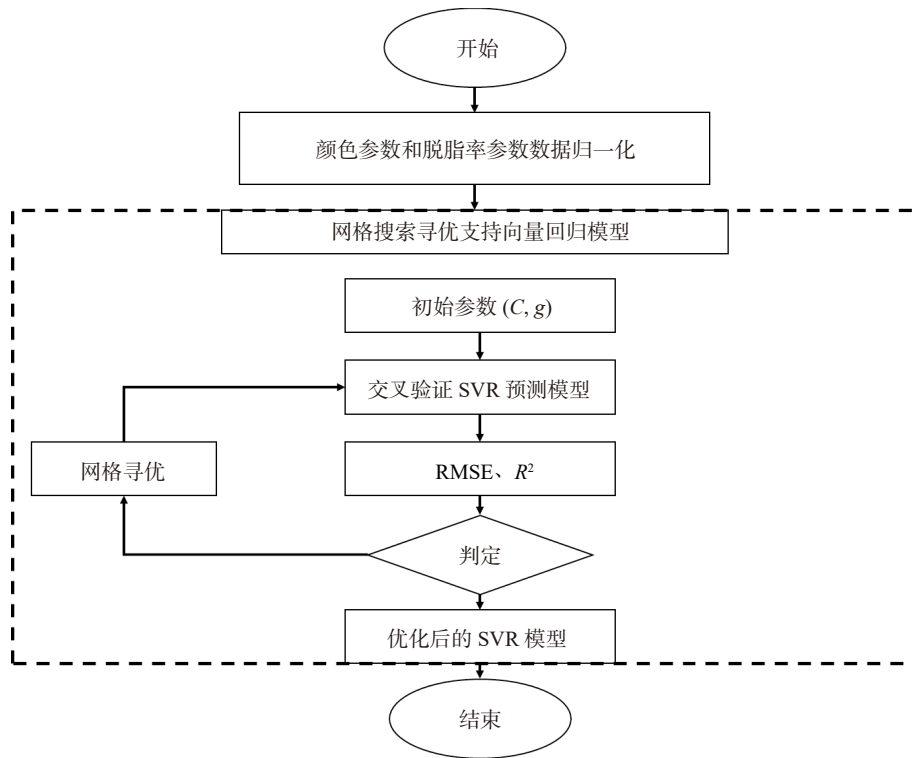


图 1 基于网格搜索的 SVR 超参数寻优流程图

Fig. 1 Flowchart of SVR hyperparameter optimization based on grid search



对照组 140 °C 140 °C 140 °C 140 °C 160 °C 160 °C 160 °C 160 °C 180 °C 180 °C 180 °C 180 °C
0 5% 10% 20% 0 5% 10% 20% 0 5% 10% 20%

图 2 不同处理条件下的马尾松木材表面颜色变化

Fig. 2 Changes in surface color of *Pinus massoniana* wood under different treatment conditions

随着处理温度的升高和氨水质量分数的增加,木材的 L^* 呈现递减的趋势,其中氨气-水蒸气处理温度的影响较氨水质量分数更为明显。具体而言,在 140 °C、氨水质量分数 5% 的处理条件下,比未处理组 L^* 下降了 55.65%,而在 160、180 °C 处理温度下分别下降了 68.96%、71.78%。而氨水质量分数对 L^* 的影响有限,在 180 °C,氨水质量分数 0 的处理条件下,与未处理组相比, L^* 下降了 71.27%,而在 180 °C,氨水质量分数 20% 时, L^* 最低,与未处理组相比下降了 72.61%。在不同温度和氨水质量分数下,马尾松木材 a^* 和 b^* 与未处理组相比有不同的变化规律, a^* 值在 140 和 160 °C 条件下增加,且随着氨水质量分数的升高而降低,但在 180 °C 处理温度下, a^* 值变化不大,且随氨水质量分数升高略有降低,表明木材表面颜色逐渐趋于绿色; b^* 则呈现出明显的递减趋势,与未处理组相比最大下降了 77.40%(图 3),表明木材颜色逐渐趋于蓝色。但由于 a^* 值与 b^* 值仍未正值,且总体数值较小,氨气-水蒸气处理后马尾木材颜色依然在红黄方向。总的来说,随着处理温度的升高和氨水质量分数的增加会导致马尾松木材表面 L^* 、 a^* 和 b^* 的降低,但马尾松表面 L^* 和 b^* 低于未处理木材,而 a^* 则高于或略低于未处理木材,即木材表面的颜色会更加暗淡、偏绿和偏蓝,但依然呈现红黄颜

色。这与其他热处理以及氨处理马尾木材表面颜色 (L^* 、 a^* 、 b^*) 的研究基本一致^[18-19]。

在相同氨水质量分数下,随着处理温度的升高, ΔL^* 变化值逐渐增加,木材颜色越来越暗,且随着温度升高,变化幅度变缓。在相同的温度下,氨水质量分数的增加会导致 ΔL^* 变化值略有增加。由于 a^* 和 b^* 的数值较小,其变化对 ΔE^* 的贡献相对较小。图 4 显示木材 ΔE^* 的变化趋势与 ΔL^* 呈镜像相反关系,即处理温度越高,氨水质量分数越大, ΔE^* 越大,木材颜色与对照组颜色差异越大。在 140、160 和 180 °C 处理条件下, ΔE^* 最大分别为 51.24、57.6 和 58.89,且在较高温度下增幅变缓。在相同温度下,氨水质量分数的增加对 ΔE^* 的影响不大(图 4)。这说明处理温度的升高和氨水质量分数的增加会导致马尾松木材表面颜色与对照组颜色差异 (ΔE^*) 增大,其中处理温度的影响作用更加显著。

氨气-水蒸气热处理脱脂试验中温度、氨水质量分数均与 L^* 、 a^* 、 b^* 呈极显著负相关 ($p < 0.01$), 相关系数分别为 -0.614、-0.911、-0.851, 与 ΔE^* 呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 相关系数为 0.664(表 1)。这表明在氨气-水蒸气热处理脱脂实验中,处理温度和氨水质量分数对木材表面颜色参数 (L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE^*) 均有显著影响。且随着温度和氨水质量分数的增加, L^* 、

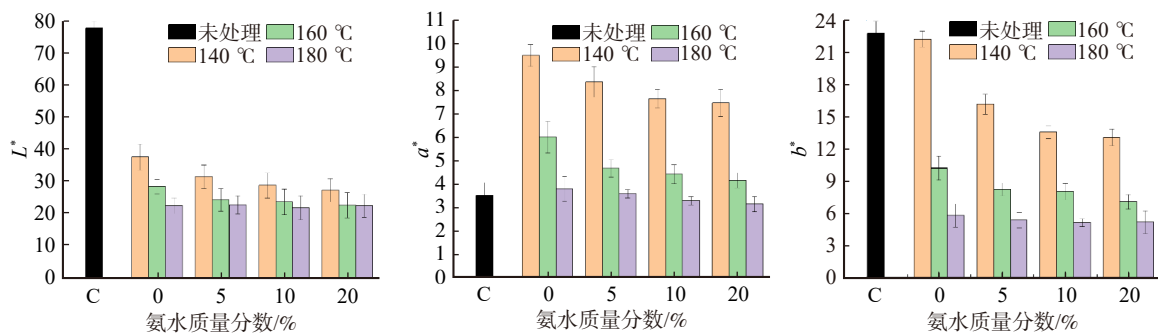


图 3 不同处理条件下马尾松木材色度参数

Fig. 3 Colorimetric parameter of *P. massoniana* wood under different treatment conditions

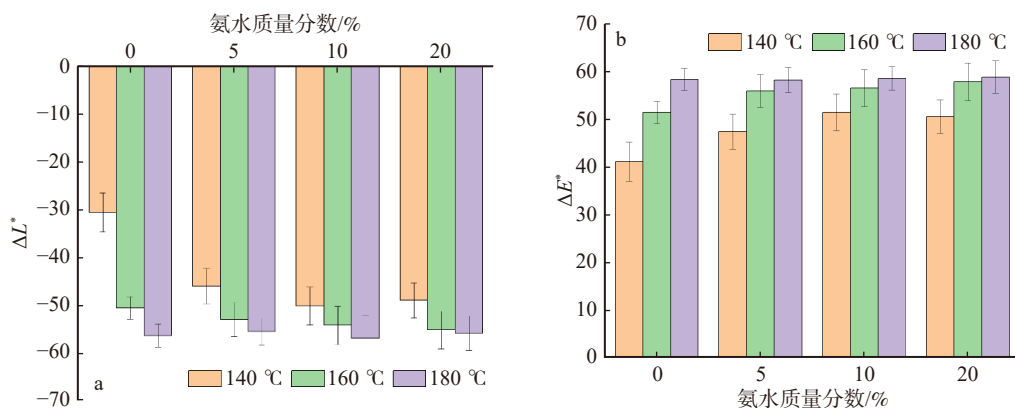


图 4 不同处理条件下的马尾松木材 ΔL^* 和 ΔE^*

Fig. 4 ΔL^* and ΔE^* values of *P. massoniana* under different treatment conditions

表1 脱脂处理马尾松材色度参数与处理条件间的相关性

Tab. 1 Correlations between colorimetric parameters of degreasing treated *P. massoniana* and treatment conditions

色度参数	温度	氨水质量分数
L^*	-0.614**	-0.385**
a^*	-0.911**	-0.243**
b^*	-0.851**	-0.299**
ΔE^*	0.664**	0.378**

注: *表示在0.05水平上显著相关, **表示在0.01水平上极显著相关, 下同。

a^* 和 b^* 的值均显著降低, 即样品的颜色会更加暗淡, 向绿轴和蓝轴方向偏移; 而 ΔE^* 显著增大, 即处理后的木材表面颜色与未处理的样品差异更加明显。总体而言, 提高温度和氨水质量分数均能显著改变木材表面颜色。

综上所述, 氨气-水蒸气热处理脱脂实验对马尾松木材表面颜色有显著影响。随着处理温度的升高和氨水质量分数的增加, 马尾松木材的 L^* 、 a^* 、 b^* 减小, ΔE^* 增大。处理温度和氨水质量分数均对 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE^* 具有显著影响, 但处理温度的影响更加显著。这一结果与先前的研究基本一致: 处理温度与氨水质量分数均会显著改变木材颜色, 且随着处理温度的升高和氨水质量分数的增加, L^* 、 b^* 逐渐减小^[18], ΔE^* 逐渐增大。不过关于氨水质量分数对 a^* 的影响, 以及处理温度和氨水质量分数对于木材表面颜色影响的显著性, 不同研究之间存在差异^[19-20]。

2.2 脱脂率

随着处理温度的升高和氨水质量分数的增加, 马尾松木材的含脂率呈现递减的趋势, 脱脂率则呈现递增的趋势, 且其中处理温度对这些变化的影响较氨水质量分数更为显著。在180℃、20%氨水质量分数的处理条件下, 马尾松木材达到了最低含脂

率3.76%与最高脱脂率70.00%。具体来说, 在20%氨水质量分数下, 随着处理温度的升高, 木材含脂率逐渐降低, 脱脂率逐渐升高。与140℃相比, 160℃和180℃下木材的含脂率分别下降了12.13%和49.33%, 脱脂率分别上升了17.07%和70.73%。这说明较高的温度可以有效降低木材含脂率, 并提升木材脱脂率。在180℃下, 随着氨水质量分数的增加, 木材含脂率逐渐降低, 脱脂率逐渐升高。与未加入氨水处理的木材相比, 5%、10%、20%氨水质量分数处理条件下, 木材含脂率分别下降了15.13%、26.39%和36.81%; 脱脂率分别上升了13.46%、24.53%和34.62%(图5)。这说明氨水质量分数的增加也能有效降低木材含脂率, 并提升木材脱脂率。总的来说, 处理温度的升高和氨水质量分数的增加均会导致马尾松木材含脂率的降低以及脱脂率的提高, 从而达到脱脂的目的, 其中处理温度的影响作用更加明显。

氨气-水蒸气热处理马尾松木材的脱脂机制(图6)为: 热处理脱脂过程中, 添加的氨水受热产生气态氨气, 进入木材内部的树脂道, 在水的作用下形成弱碱性环境, 与树脂酸上的羧基发生皂化反应, 生成树脂酸盐进而脱去树脂。概括来说, 马尾松木材树脂的脱除可以归结于两个方面的原因: 一方面处理温度的升高使得常温下呈固态的松香发生软化, 流动性提高, 能更好地溶解于松节油中, 同时受热的松节油热流动性增强, 并蒸发为气态随水蒸气排出木材^[21]; 另一方面在热处理脱脂过程中, 氨水产生气态氨, 这些气态氨在蒸气压力作用下渗透进饱水状态的马尾松木材细胞内, 与水作用形成弱碱性环境, 使得松香主要成分树脂酸中的羧基在高温条件下与碱液发生皂化反应, 生成松香酸盐, 并伴随液体的流动排出木材, 进而降低含脂率, 提高脱脂率^[22-23]。

表2显示: 氨气-水蒸气热处理脱脂中温度分别

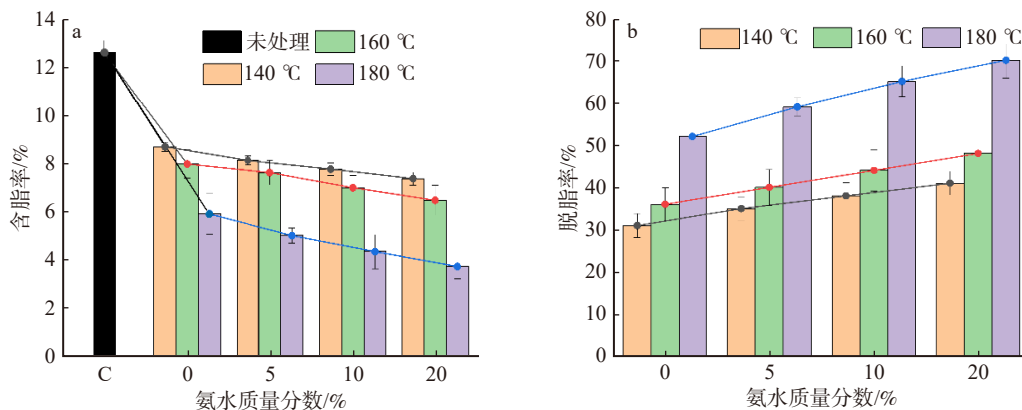


图5 不同处理条件的马尾松材含脂率和脱脂率

Fig. 5 Resin content and deresination rate of *P. massoniana* under different treatment conditions

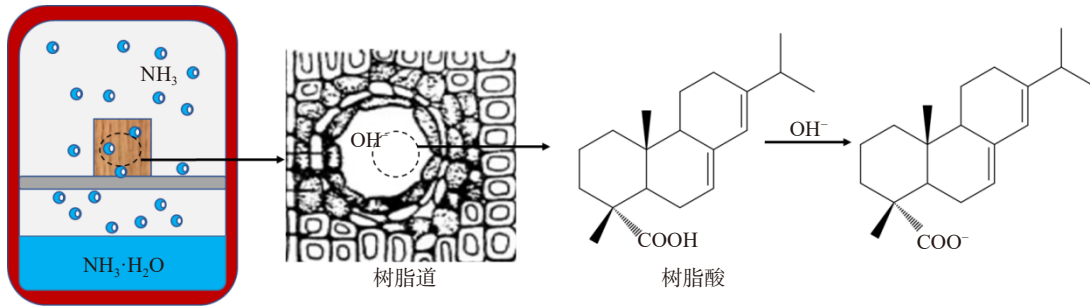


图 6 氨气-水蒸气热处理马尾松木材脱脂机制示意图

Fig. 6 Schematic diagram of degreasing mechanism of *P. massoniana* wood during ammonia-water vapor heat treatment

与含脂率、脱脂率呈极显著相关($p < 0.01$), 其中含脂率呈极显著负相关($r = -0.837$), 脱脂率呈极显著正相关($r = 0.835$); 氨水质量分数与含脂率、脱脂率呈显著相关($p < 0.05$), 其中含脂率呈显著负相关($r = -0.395$), 脱脂率呈极显著正相关($r = 0.398$)。这表明在氨气-水蒸气热处理脱脂实验中, 处理温度和氨水质量分数对含脂率、脱脂率均有显著影响。具体而言, 温度升高时, 含脂率显著降低, 脱脂率显著提高; 氨水质量分数增加时, 含脂率亦显著降低, 脱脂率显著提高。综上所述, 提高温度和氨水质量分数均能有效降低马尾松木材含脂率, 并提升脱脂率。

综上所述, 氨气-水蒸气热处理脱脂对马尾松木材的树脂含量有着显著性影响。随着处理温度的升高和氨水质量分数的增加, 马尾松木材含脂率降低, 脱脂率提高, 在 180 °C、20% 氨水质量分数的处理条件下, 马尾松木材达到了最低含脂率(3.76%)与最高脱脂率(70.00%)。处理温度和氨水质量分数都是影响马尾松木材含脂率和脱脂率的显著性因素, 但处理温度对二者的影响更加显著。这一结果与先前的研究基本一致, 即提高处理温度和增加碱液质量分数均会降低含脂率, 提高脱脂率。

2.3 颜色参数与脱脂率的相关性回归拟合

L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE^* 与含脂率呈极显著相关($p < 0.01$), 其中 L^* 、 a^* 、 b^* 呈极显著正相关(r 分别为 0.757、0.808、0.771), ΔE^* 呈极显著正相关($r = -0.691$); L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE^* 与脱脂率呈极显著相关($p < 0.01$), 其中 L^* 、 a^* 、 b^* 呈极显著负相关(r 分别为 -0.752、-0.806、0.768), ΔE^* 呈极显著正相关($r = 0.984$), 4 个颜色参

数(L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE^*)均对含脂率和脱脂率表现出显著性影响(表 3)。

选择与含脂率和脱脂率相关性极显著的马尾松木材颜色参数 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE^* , 分别建立其与含脂率和脱脂率的回归方程, 并进行回归拟合。脱脂试验中马尾木材颜色参数与含脂率和脱脂率均存在局部二次函数关系(图 7)。具体而言, L^* 、 a^* 、 b^* 越大, 木材含脂率越高, 脱脂率越低; 随着 ΔE^* 越大, 木材含脂率越低, 脱脂率越高。这表明随着木材颜色的加深以及表面颜色的变化越明显, 马尾松木材的脱脂效果越好。

L^* 对应的含脂率、脱脂率的方程分别为 $y_1 = -0.024x^2 + 1.61x - 18.52$ 与 $y_2 = 0.19x^2 - 12.668x + 244.91$ 。图 7a 表明: 随着 L^* 的增加, 含脂率提高, 脱脂率降低, 当 L^* 较低时, 马尾松木材的含脂率较低, 脱脂率较高, 即脱脂后的马尾松木材表面颜色越暗, 脱脂效果越好。此外, $R_1^2 = 0.708$, $R_2^2 = 0.705$ 表明脱脂后木材表面 L^* 的变化能够分别解释含脂率 70.8%、脱脂率 0.5% 的变异情况(图 7a)。 ΔE^* 对应的含脂率、脱脂率的方程分别为 $y_1 = -0.011x^2 + 0.85x - 7.21$ 与 $y_2 = 0.085x^2 - 6.65x + 157.49$, 图 7d 表明: 随着 ΔE^* 的增加, 含脂率先增大后降低, 脱脂率先降低后增大, 当 ΔE^* 较高时, 马尾松木材的含脂率较低, 脱脂率较高, 即脱脂后木材表面颜色变化越明显, 脱脂效果越好。此外, $R_1^2 = 0.696$, $R_2^2 = 0.694$ 表明脱脂后木材表面 ΔE^* 的变化能够分别解释含脂率 69.6%、脱脂率 69.4% 的变异情况。综上所述, 处理后马尾松材的颜色参数与含脂率、脱脂率间具有

表 2 马尾松木材含脂率和脱脂率分别与处理条件间的相关性

Tab. 2 Correlations between resin content and deresination rate of *P. massoniana* with treatment conditions, respectively

项目	温度	氨水质量分数
含脂率	-0.837**	-0.394*
脱脂率	0.835**	0.398*

表 3 马尾松木材含脂率和脱脂率分别与表面颜色参数间的相关性

Tab. 3 Correlations between resin content and deresination rate of *P. massoniana* with colorimetric parameters, respectively

项目	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
含脂率	0.757**	0.808**	0.771**	-0.691**
脱脂率	-0.752**	-0.806**	-0.768**	0.684**

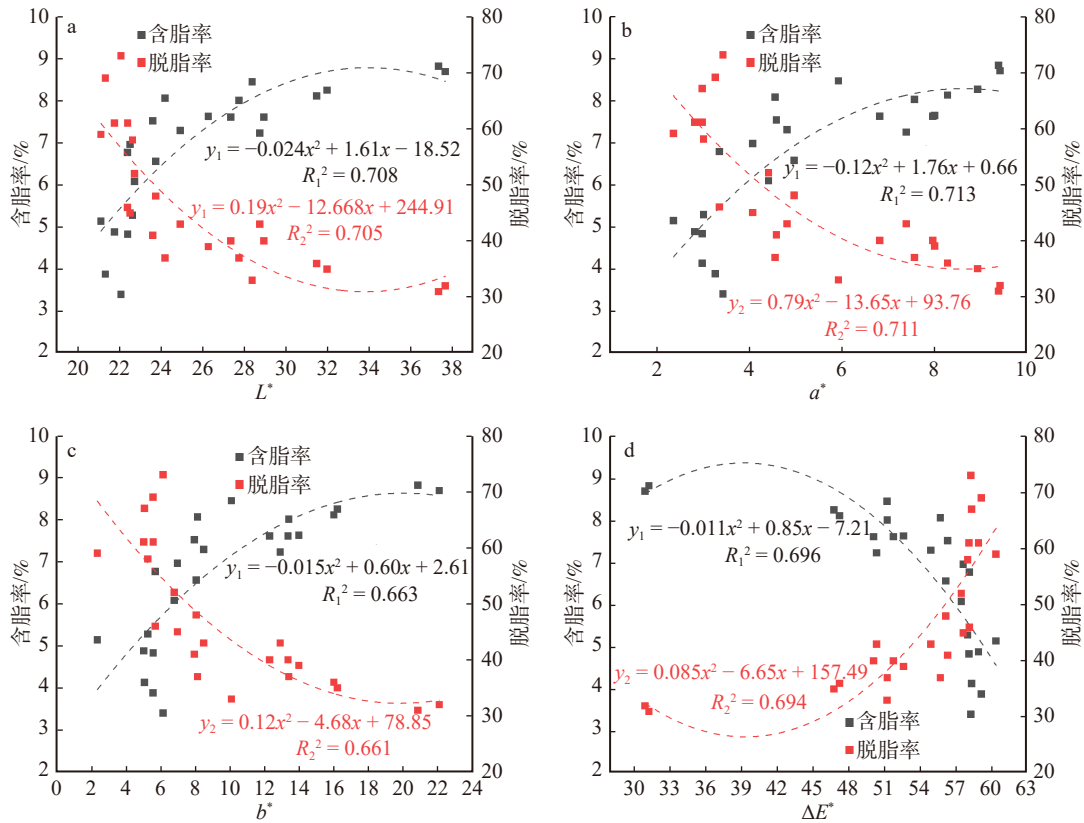


图7 马尾松颜色参数分别与含脂率、脱脂率的回归拟合分析

Fig. 7 Regression fitting analyses between color parameters with resin content and deresination rate of *P. massoniana*, respectively

极显著相关性, L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE^* 均与二者存在局部二次函数的关系,可作为参数用于预测马尾松木材的脱脂效果。

2.4 预测模型

2.4.1 SVR 核函数的选择

采用多项式核函数的含脂率和脱脂率 SVR 模型的 RMSE 分别为 0.984、8.141, R^2 分别为 0.568、0.561(表 4),这意味着该模型脱脂率预测值与实测值的吻合程度为 56.8% 和 56.1%,这一吻合程度相对较低。采用 Sigmoid 核函数时,训练集得到的 RMSE 和 R^2 值分别为 0 与 1,此时预测模型过度拟合,由于过度拟合的模型对训练集数据中噪点过于敏感的特点,导致在测试集数据上的泛化能力较差^[24-25],含脂率和脱脂率预测的 RMSE 值分别为 2.178、18.226, R^2 值分别为 0.551、0.234, RMSE 较高, R^2 较低,无法很好地进行数据预测。径向基函数的含脂率和脱脂率预测的 RMSE 值分别为 0.523、4.315,为 3 种核函数中最低,预测结果与真实值的差距最小,预测 R^2 值达到 0.847、0.823,为 3 种核函数中最高,预测值与实测值之间的吻合程度较好,对本研究中 4 个特征值、2 个输出值的数据分布有较好的适应性,其预测效果优于上述其他核函数。综上,本研究构建的 SVR 预测模型中径向基函数的 RMSE 最低, R^2 最高,拟合情况较好,可作为马尾松

表 4 不同核函数对马尾松含脂率和脱脂率的预测效果

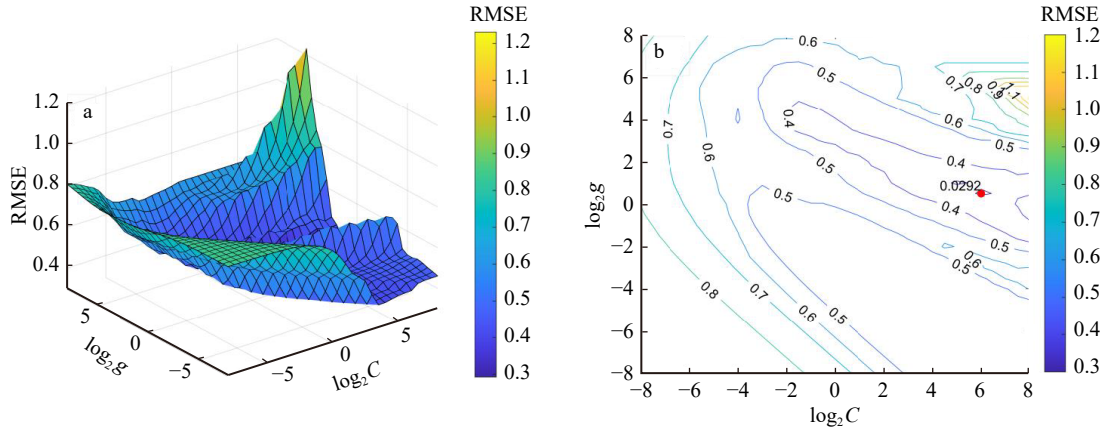
Tab. 4 Prediction effect of resin content and deresination rate of *P. massoniana* by different kernel functions

项目	核函数	训练集		测试集	
		RMSE	R^2	RMSE	R^2
含脂率	多项式	1.039	0.479	0.984	0.568
	Sigmoid	0	1	2.178	0.551
	径向基	0.692	0.764	0.523	0.847
脱脂率	多项式	8.454	0.471	8.142	0.561
	Sigmoid	0	1	18.226	0.234
	径向基	5.483	0.751	4.315	0.823

脱脂预测模型的函数。

2.4.2 优化超参数

通过网格搜索和交叉验证的方法,在预设的参数范围内进行超参数优化,以确定使均方根误差最小的参数组合。图 8 展示了超参数优化的结果,其中 3D 视图和等高线图分别以 $\log_2 C$ 和 $\log_2 g$ 为坐标轴, RMSE 为 Z 轴,颜色条从紫色(表示低 RMSE)渐变至黄色(表示高 RMSE)。图 8a 揭示了 RMSE 随 C 和 g 变化的三维形态,表明存在一个 C 和 g 的组合范围,在此范围内模型的 RMSE 达到最小值,从而实现最佳性能。图 8b 进一步精确定位 RMSE 的最小值点,并以红点标出,此时对应的参数 $\log_2 C =$



C 为惩罚系数, g 为核函数参数。

图 8 SVR 参数优化 3D 视图(a)和等高线图(b)

Fig. 8 3D view (a) and contour map (b) of SVR parameter optimization

6 和 $\log_2 g = 0.5$, 即最佳参数 C 为 64, g 为 1.41。

2.4.3 SVR 模型预测效果

含脂率、脱脂率的预测值与实测值均呈现良好的线性关系, 其最佳拟合方程分别为含脂率 $y_1 = 0.8769x + 0.6679$, 脱脂率 $y_2 = 0.9293x + 4.1359$, 所有数据集的实测值与预测值之间存在显著相关性。 R^2 分别为 0.847 和 0.823, 表明模型预测值与真实值的吻合程度超过 82%(图 9)。图 10 进一步揭示了预

测值与实测值之间的差异较小, RMSE 分别为 0.523 和 4.315。例如: 输入颜色参数 $L^* = 27.35$, $a^* = 6.82$, $b^* = 12.35$, $\Delta E^* = 51.76$ 时, SVR 模型预测的马尾松木材含脂率和脱脂率分别为 6.91% 和 44.25%, 实测含脂率和脱脂率分别为 7.61% 和 40.13%。这表明模型在含脂率和脱脂率预测上的误差较小, 验证了 SVR 模型的可靠性。

综上, 优化超参数后的径向基函数 SVR 模型在

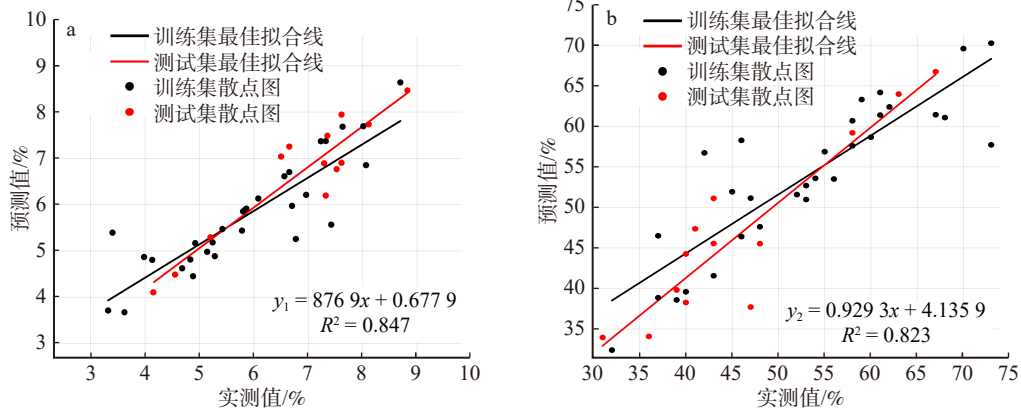


图 9 马尾松含脂率(a)、脱脂率(b)的实测值与预测值的回归拟合

Fig. 9 Regression fitting between measured (a) and predicted values (b) of resin content and deresination rate of *P. massoniana*

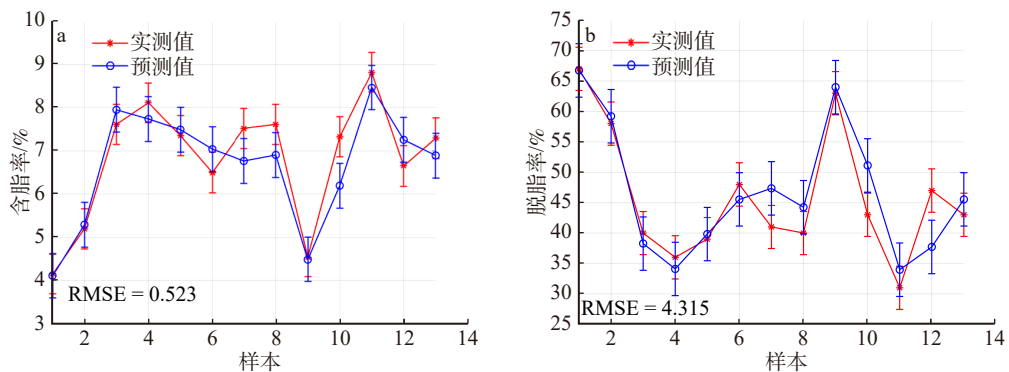


图 10 马尾松含脂率(a)、脱脂率(b)的实测值与预测值对比

Fig. 10 Comparison between measured (a) and predicted values (b) of resin content and deresination rate of *P. massoniana*

利用马尾松木材表面颜色参数预测含脂率和脱脂率方面表现良好, 具有较低的误差和较高的预测精度。模型的均方根误差分别为 0.523 和 4.315, R^2 分别为 0.847 和 0.823, 这些指标显示优化后的 SVR 模型具有较好的预测性能。

3 结 论

为了提高马尾松木材脱脂率的检测效率, 本研究采用氨气-水蒸气对马尾松进行热处理脱脂试验, 分析处理温度和氨水质量分数对马尾松木材颜色以及脱脂率的影响。随后, 利用支持向量回归(SVR)构建脱脂率预测模型, 探究木材颜色参数变化与脱脂率之间的响应关系, 并预测马尾松木材的脱脂率。研究的具体结论有以下 3 点。

(1)经氨气-水蒸气热处理脱脂后, 马尾松木材的颜色参数明度(L^*)、红绿指数(a^*)和黄蓝指数(b^*)均随氨水质量分数和处理温度的增加而降低, 总色差(ΔE^*)呈现上升趋势。在 180 °C 和较高氨水质量分数的处理条件下, ΔE^* 达到最大值 58.89。处理温度和氨水质量分数均与各颜色参数呈极显著相关。这表明氨气-水蒸气热处理脱脂工艺能显著改变马尾松木材颜色, 处理温度和氨水质量分数均对颜色产生显著性影响。

(2)氨气-水蒸气热处理脱脂后, 马尾松木材的含脂率随氨水质量分数和处理温度的增加而降低, 脱脂率则呈现相反趋势。在 180 °C、20% 氨水质量分数的处理条件下, 脱脂率达到最低值 3.76%, 脱脂率达到最大值 70.00%。处理温度和氨水质量分数均与含脂率以及脱脂率呈显著相关。这表明氨气-水蒸气热处理脱脂工艺能显著降低马尾松含脂率, 实现脱脂目的, 且处理温度和氨水质量分数均对含脂率和脱脂率产生显著性影响。

(3)马尾松木材的表面颜色(L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE^*)均与含脂率、脱脂率之间存在明显的局部二次函数关系, 且显示较好的数据拟合性, 这表明了利用颜色参数预测脱脂率的可行性。进一步以径向基函数作为核函数, 构建了马尾松木材表面颜色-脱脂率的预测模型, 该模型均方根误差分别为 0.523、4.315, R^2 分别达到 0.847 和 0.823。基于 SVR 构建的预测模型误差较小, 预测准确率大于 82%。

综上所述, 利用 SVR 通过马尾松木材表面颜色参数可以准确、可靠地进行脱脂率检测的前期筛选, 从而提高马尾松木材脱脂率的检测效率。同时, 在氨气-水蒸气热处理脱脂过程中, 处理温度和氨水的质量分数对马尾松木材表面颜色参数和脱脂率均有显著影响。本研究在提高马尾松木材脱脂率检测效

率方面做了有意义的尝试, 为利用颜色参数作为马尾松木材脱脂率的快速评价指标提供了理论依据, 具有一定的创新性和应用价值。未来的研究可拓展更多适用树种, 以扩展应用范围; 可引入更多的参数指标, 以提高模型的预测精度。

参 考 文 献

- [1] 张文梁, 曹金珍. 松脂及松木脱脂技术研究进展 [J]. 林产工业, 2021, 58(10): 60-64.
Zhang W L, Cao J Z. Research progress on pine resin and degreasing technology of pine[J]. China Forest Products Industry, 2021, 58(10): 60-64.
- [2] 国家技术监督局. 造纸原料有机溶剂抽出物含量的测定: GB/T 2677.6—1994[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Fibrous raw material determination of solvent extractives: GB/T 2677.6—1994[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.
- [3] Matsumura J, Booker R E, Ridoutt B G, et al. Impregnation of radiata pine wood by vacuum treatment (II): effect of pre-steaming on wood structure and resin content[J]. Journal of Wood Science, 1999, 45(6): 456-462.
- [4] 杨少春, 王克奇, 戴天虹, 等. 基于直方图的木材表面颜色分类研究 [J]. 森林工程, 2008, 24(1): 34-36.
Yang S C, Wang K Q, Dai T H, et al. A study of color classification on wood surface based on histogram[J]. Forest Engineering, 2008, 24(1): 34-36.
- [5] Hazir E, Ozcan T, Koç H K. Prediction of adhesion strength using extreme learning machine and support vector regression optimized with genetic algorithm[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, 45(8): 6985-7004.
- [6] Yang H, Cheng W, Han G. Wood modification at high temperature and pressurized steam: a relational model of mechanical properties based on a neural network[J]. BioResources, 2015, 10(3): 5758-5776.
- [7] 李腊梅, 谢桂军, 李兴伟, 等. 蒸汽热处理红锥木材颜色变化及其材性预测 [J]. 森林工程, 2023, 39(5): 92-104.
Li L M, Xie G J, Li X W, et al. Color change and timber property prediction of *Castanopsis hystrix* wood after steam heat-treated[J]. Forest Engineering, 2023, 39(5): 92-104.
- [8] Zhang L L, Liu M H, Liu Y X, et al. Evaluation of the colour parameters on hygroscopicity and dimensional stability of thermally modified *Populus tomentosa* Carr.[J]. Industrial Crops & Products, 2023, 205(1): 285-297.
- [9] Liu M H, Zhang L L, Chen J, et al. Response relationships between the color parameters and chemical compositions of heat-treated wood[J]. Holzforschung, 2024, 78(7): 387-401.
- [10] Vahid N, Hamidreza F, Arezoo F, et al. Prediction of mechanical properties of artificially weathered wood by color change and machine learning[J]. Materials, 2021, 14(21): 6314.
- [11] Chen S, Wang J P, Liu Y X, et al. The relationship between color and mechanical properties of heat-treated wood predicted based

- on support vector machines model[J]. *Holzforschung*, 2022, 76(11-12): 994-1002.
- [12] Xin Z B, Ke D F, Zhang H J, et al. Non-destructive evaluating the density and mechanical properties of ancient timber members based on machine learning approach[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 341: 127855.
- [13] Fu Z Y, Zhou F, Gao X, et al. Assessment of mechanical properties based on the changes of chromatic values in heat treatment wood[J]. *Measurement*, 2020, 152: 107215.
- [14] Nasir V, Nourian S, Avramidis S, et al. Classification of thermally treated wood using machine learning techniques[J]. *Wood Science and Technology*, 2019, 53(1): 275-288.
- [15] Tominaga S. Color classification of natural color images[J]. *Color Research & Application*, 1992, 17(4): 230-239.
- [16] 刘小生, 章治邦. 基于改进网格搜索法的 SVM 参数优化 [J]. *江西理工大学学报*, 2019, 40(1): 5-9.
- Liu X S, Zhang Z B. Parameter optimization of support vector machine based on improved grid search method[J]. *Journal of Jiangxi University of Science and Technology*, 2019, 40(1): 5-9.
- [17] Açıkkar M. Fast grid search: a grid search-inspired algorithm for optimizing hyperparameters of support vector regression[J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2024, 32(1): 68-92.
- [18] Stanciu D M, Sova D, Savin A, et al. Physical and mechanical properties of ammonia-treated black locust wood[J]. *Polymers*, 2020, 12(2): 377.
- [19] 陈宣宗, 张爱文, 陈李璨, 等. 高温水热处理对马尾松木材颜色变化的影响 [J]. *浙江林业科技*, 2018, 38(6): 1-7.
- Chen X Z, Zhang A W, Chen L C, et al. Effect of hydrothermal treatment on color of *Pinus massoniana* wood[J]. *Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2018, 38(6): 1-7.
- [20] 李任杰, 韩裕龙, 李俊源, 等. 木材变色机理研究进展 [J]. *世界林业研究*, 2024, 37(2): 66-73.
- Li R J, Han Y L, Li J Y, et al. Research progress on wood discoloration mechanism[J]. *World Forestry Research*, 2024, 37(2): 66-73.
- [21] 平立娟, 刘君良, 王喜明. 高温高湿处理对樟子松脱脂率及微观结构的影响 [J]. *木材工业*, 2020, 34(4): 38-42.
- Ping L J, Liu J L, Wang X M. Effect of high-temperature and high humidity treatment on extraction rate and micro-structure of Mongolian Scotch pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)[J]. *China Wood Industry*, 2020, 34(4): 38-42.
- [22] 张志文, 陈广元. 高温高湿处理对落叶松锯材树脂脱除及分布影响分析 [J]. *森林工程*, 2011, 27(3): 61-63.
- Zhang Z W, Chen G Y. Effect of high temperature and humidity treatment on the moving and distribution of pine resin[J]. *Forest Engineering*, 2011, 27(3): 61-63.
- [23] 彭万喜. 人工速生工业林木木材增值利用——人工林松木脱脂新技术研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2003.
- Peng W X. Value-added utilization of wood from plantation fast-growing industrial forests: research on new technology of pine wood degreasing in plantation forests[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2003.
- [24] Ivan I, Romman T, Nataliya S, et al. The additive input-doubling method based on the SVR with nonlinear kernels: small data approach[J]. *Symmetry*, 2021, 13(4): 612.
- [25] Wang Y G, Wu J R, Hu Z H, et al. A new algorithm for support vector regression with automatic selection of hyperparameters[J]. *Pattern Recognition*, 2029, 133: 108989.

(责任编辑 吴娟
责任编辑 于志明)