

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020170

基于 Stearns-Noechel 优化模型的木材单板染色配方预测

管雪梅, 李文峰, 黄静一

(东北林业大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)



摘要: 以樟子松单板为染色基材, 采用活性染料对其进行染色, 获取3组单色染料染色样本与8组混合染料染色样本。将自适应权值粒子群算法 (APSO) 与 Stearns-Noechel 模型结合, 对8组混合染料染色样本进行染色配方预测。结果表明: 采用 APSO 预测的配方绝对偏差均小于0.1, 约为最小二乘法 and 传统粒子群算法的 1/2; 迭代次数约为传统粒子群算法的 60%, 寻优速度较快。优化模型获得三种珍贵材的 R-Y-B 染色配方分别为: 花梨木—0.192%, 0.419%, 0.082%; 鸡翅木—0.137%, 0.284%, 0.193%; 黑酸枝—0.336%, 0.581%, 0.204%。采用该配方对樟子松单板进行染色, 染色拟合样与标准样间的色差均小于 2, 且两者光谱反射率间的误差小, 染色效果较好。

关键词: Stearns-Noechel 模型; 自适应权值粒子群算法; 木材单板; 配方预测; 配方绝对偏差

中图分类号: S781.7; TS62; S791.253 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2021) 05-0018-06

Prediction of Wood Veneer Staining Formulations Based on Stearns-Noechel Optimization Model

GUAN Xue-mei, LI Wen-feng, HUANG Jing-yi

(College of Machinery Electricity, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: *Pinus sylvestris* veneer was used as the staining base material, which was stained with reactive dyes. Three groups of single-dyed samples and eight groups of mixed-dyed samples were obtained. Using the adaptive particle swarm algorithm (APSO) combining with the Stearns-Noechel model, the dyeing formula were predicted for eight groups of mixed-dyed samples. The results showed that the absolute deviation of formula obtained by APSO was less than 0.1, which was about 1/2 of the least square method and the traditional particle swarm algorithm. The optimization speed was efficient, and the number of iterations was about 60% of that of the traditional particle swarm optimization algorithm. The R-Y-B dyeing formulas of the three precious wood species obtained through by the optimized model were 0.192%, 0.419%, 0.082% for rosewood; 0.137%, 0.284%, 0.193% for wenge wood; and 0.336%, 0.581%, 0.204% for black rosewood. Using this formula of dyeing camphor pine veneer, the color difference between the dye fitting sample and the control sample were less than 2, and the error between the spectral reflectance of both was small. The performance of dyeing was fine.

收稿日期: 2020-11-24; 修改日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“基于深度学习的木材染色计算机智能配色模型研究”(32171691); 中央高校项目“基于光谱拟合的木材染色配色模型研究”(257202BF02); 黑龙江省自然科学基金联合引导项目“基于深度学习的东北速生材单板染色光谱拟合配色模型研究”(LH2020C37)。

作者简介: 管雪梅 (1980—), 女, 副教授。Email: gxm_maomao1980@163.com

Key words: Stearns-Noechel model; adaptive particle swarm algorithm (APSO); wood veneer; formula prediction; absolute deviation of formula

木材作为优良的家具材料, 兼具实用性与观赏性, 深受消费者喜爱。随着天然林禁伐, 木材供需矛盾突出。为解决这一矛盾, 大力开发人工林已成为解决木材供需问题的主要途径之一^[1]。

木材材色是决定其品质的一个重要指标^[2], 而人工林木材颜色单一, 因此需要通过染色的方法对其颜色进行适当的调整。在染色过程中, 染料的配方决定了染色产品的颜色。目前, 常用的配色方法有人工配色法和计算机配色法两种。人工配色法对操作人员的要求较高, 且耗时长, 成本高, 很难满足现代工业生产的需要。计算机配色法, 获得染料配方的速度快, 工作效率高, 有效地节约了生产成本, 应用前景广阔^[3]。

常见的计算机配色模型有 Friele 模型^[4-5]、Kubelka-Munk 模型^[6-7]和 Stearns-Noechel 模型^[8-9]。其中, Stearns-Noechel 模型是在大量实验基础上得到的一种经验模型。由于基于 Stearns-Noechel 的配色模型在配色时能取得较高的精度, 且结合了反射光谱配色法, 能有效地解决同色异谱的现象, 已经在纺织领域得到了广泛的应用^[10-13]。而在木材领域, 采用 Stearns-Noechel 配色模型对染料配方进行预测的相关研究还相对较少, 有待进一步开发。

在传统的 Stearns-Noechel 配色模型中, 常采用最小二乘法求解目标配方的最优值, 该方法的求解速度慢, 且精度有待进一步提高。因此本研究采用智能算法——粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 代替模型中的最小二乘法对目标配方进行寻优。PSO 是一种通过对鸟群觅食行为进行模拟而产生的基于群体的智能算法。该算法简单易于实现, 寻优速度快, 但存在对参数依赖性大、易陷入局部最优等缺点^[14]。本文采用分线性的动态惯性权重系数对 PSO 中的参数进行优化, 得到自适应权值粒子群算法 (adaptive particle swarm algorithm, APSO), 其求解精度和寻优速度大大提高^[15]。将 APSO 与 Stearns-Noechel 配色模型结合, 能有效地提高单板染色配方的预测精度, 对提高木材染色配方的预测效率、加快木材染色工业化进程具有现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

樟子松 (*Pinus sylvestris*) 单板: 外购, 幅面规格为 60 mm×40 mm×0.5 mm (L×T×R), 含水率为 8%。

染料: 活性红 X-3B 染料 (简称 R)、活性黄 X-RG 染料 (简称 Y)、活性艳蓝 (简称 B), 均为固体, 外购。

其他试剂: 染色渗透剂脂肪醇聚氧乙烯醚 (JFC), 促染剂氯化钠 (NaCl)、固色剂无水碳酸钠 (Na_2CO_3)、缓冲剂硅酸钠 (Na_2SiO_3) 和磷酸钠 (Na_3PO_4)、漂白剂双氧水, 均采购于北京化工厂。

1.2 仪器设备

恒温水浴锅、电子天平、自制染色笼、电热恒温干燥箱、高光谱成像仪、SC-20 型色差仪等。

1.3 试验方法

根据 Stearns-Noechel 模型与反射光谱配色法对染色配方进行预测时, 要求配色结果的光谱反射率与标准样尽可能地相同。因此, 试验在确定单板染色工艺与标准样的基础上, 应用 APSO 对模型进行优化以获得更优的预测配方。

1.3.1 单板染色

1) 漂白: 配置 500 mL 质量分数为 4% 的双氧水, 加入 Na_2SiO_3 和 Na_3PO_4 各 0.5 g, 作为漂液。将单板装入自制染色笼并放入烧杯中, 然后加入漂液, 浴比为 1:20。加热水浴锅至 65 °C, 将装有单板的烧杯放入水浴锅中, 恒温漂白处理 2 h。

2) 干燥: 将漂白单板用清水冲去表面残液, 放入 65 °C 的干燥箱中干燥至含水率为 8%。

3) 染色: 采用蒸馏水配置混合染料的总质量分数为 1%, 取染液 500 mL, 加入 1 g/L 的渗透剂 JFC 与 15 g/L 的氯化钠搅拌均匀。将漂白好的单板装入自制染色笼并放入烧杯中, 然后加入染色溶液, 设置浴比为 1:20。加热水浴锅至 70 °C, 将烧杯放入水浴锅中, 染色处理 2 h 后, 向烧杯中加入 20 g/L 的 Na_2CO_3 固色 30 min。将固色好的单板用清水冲去表面残留的染液, 放入 65 °C 的干燥箱中干燥至含水率为 8%。

1.3.2 获取预测配方

首先, 确定 Stearns-Noechel 模型中可变参数 M 的大小。其次, 在 Stearns-Noechel 模型的基础上利用反射光谱配色法进行配方预测。最后, 采用粒子群算法代替传统预测模型中的最小二乘法求解配方。为了进一步提高模型配方的预测精度, 对粒子群算法进行优化, 采用分线性的动态惯性权重系数来提高粒子群算法的求解速度与精度。

1.3.3 试验结果分析

首先, 利用提出的模型对 8 组混合染料染色样本进行配方的反向预测, 利用配方绝对偏差来对获得的结果进行评价。计算方法如式 1:

$$\text{配方绝对偏差} = \sum_{i=1}^3 |A_i - X_i| \quad (1)$$

式中: A_i 、 X_i —标准样、拟合样不同组分的三种染料的配方。

接着利用提出的模型对珍贵材的染色配方进行预测, 按预测配方配置染色溶液, 并应用于单板染色 (方法同 1.3.1 节), 制得染色单板拟合样。

利用 SC-20 型色差仪测量标准样和拟合样之间染色色差, 采用正版 Matlab 软件绘制反射率误差对比图, 评价模型的预测精度。

2 试验模型

2.1 Stearns-Noechel 模型参数 M 的确定

1944 年, Stearns 与 Noechel 在 Duntley 理论的基础上, 通过大量的试验得出了中间函数 $f[R(\lambda)]$ 的经验公式, 被称为 Stearns-Noechel 模型, 具体公式如式 2 所示:

$$f[R(\lambda)] = \frac{1 - R(\lambda)}{M(R(\lambda) - 0.01) + 0.01} \quad (2)$$

式中: $R(\lambda)$ —当波长为 λ nm 时的光谱反射率的值; M —可变常量, 通常取值范围为 $[0, 1]$ 。

M 作为 Stearns-Noechel 模型中唯一可变的参数, 其大小由染料的性质和染色的基材决定, 在相同的染色工艺条件下, 根据染色基材的不同需要对 M 的取值进行调整。在本研究中, 采用的染色基材为樟子松, 根据樟子松的特性, 结合王泉等^[16]提出的循环赋值法对参数 M 进行求解, 最终求得以樟子松为染色基材时, 取 $M = 0.25$, 获得的预测配方的绝对偏差最小。

2.2 拟合配方的计算

采用反射光谱匹配法对染色配方进行预测时, 要求拟合样与标准样在不同波长下的光谱反射率尽量相等。即:

$$F^{S \text{ tan dard}} \approx F^{F \text{ itting}} \quad (3)$$

式中:

$$F^{S \text{ tan dard}} = \left[f(R_{\lambda_1}^{S \text{ tan dard}}) \quad f(R_{\lambda_2}^{S \text{ tan dard}}) \quad \cdots \quad f(R_{\lambda_n}^{S \text{ tan dard}}) \right]^T,$$

$$F^{F \text{ itting}} = \left[f(R_{\lambda_1}^{F \text{ itting}}) \quad f(R_{\lambda_2}^{F \text{ itting}}) \quad \cdots \quad f(R_{\lambda_n}^{F \text{ itting}}) \right]^T,$$

$R_{\lambda}^{S \text{ tan dard}}$ 、 $R_{\lambda}^{F \text{ itting}}$ —波长为 λ nm 时标准样、拟合样的光谱反射率。

根据 Duntley 理论: 混合组分的光谱反射率可由单一组分的反射率与混合比例的乘积的加和表示, 则公式 3 可整理为:

$$F^{S \text{ tan dard}} \approx F \times X \quad (4)$$

$$\text{式中: } F = \begin{bmatrix} f(R_{\lambda_1}^1) & f(R_{\lambda_1}^2) & f(R_{\lambda_1}^3) \\ f(R_{\lambda_2}^1) & f(R_{\lambda_2}^2) & f(R_{\lambda_2}^3) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f(R_{\lambda_n}^1) & f(R_{\lambda_n}^2) & f(R_{\lambda_n}^3) \end{bmatrix} \text{ 表示三种单一}$$

组分的染色单板在波长为 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ 范围内的中间函数矩阵; $X = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T$ 表示混合染料中三种单色染料的比例。

综上所述: 基于 Stearns-Noechel 的配色模型对标准样染色配方进行预测的实质, 即求公式 4 的最小二乘解。在传统 Stearns-Noechel 配色模型中常使用的方法为最小二乘法。

2.3 采用自适应权值粒子群算法 (APSO) 对配方进行求解

采用 APSO 代替最小二乘法对公式 4 进行求解, 可以有效地提高最优解的寻找速度与精度。

APSO 中粒子 i 的自我更新方式如式 5、6:

$$V_i^{t+1} = \omega V_i^t + c_1 r_1 (P_i^t - X_i^t) + c_2 r_2 (P_g^t - X_i^t) \quad (5)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (6)$$

式中: V_i 、 X_i —分别表示粒子 i 在不同时刻的速度与位置; ω —惯性权重, 取值范围为 $[0, 1]$; c_1 、 c_2 —学习因子, 皆为非负数; r_1 、 r_2 —服从 $[0, 1]$ 分布的、相互独立伪随机数; P_i^t —粒子 i 的历史最优解; P_g^t —全局最优解。

在传统粒子群算法中, ω 为固定值, 因此为找

到一个最优的 ω 值，需进行多次迭代，消耗时间长。为了提高 PSO 的性能，本次研究采用分线性的动态惯性权重系数对其进行优化，表达式如 7 所示。当目标函数值趋于局部最优时，惯性权重增大；当目标函数值分散程度较高时，惯性权重变小。同时当微粒的目标函数值优于平均目标函数值时，其惯性权重因子小，从而对其进行保留；相反，则其惯性权重因子大，令其向较好的区域靠拢。由于此时 ω 的值会随目标函数值的改变而改变，因此又将其称为自适应权重。

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times (f - f_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}}, & f \leq f_{\text{avg}} \\ \omega_{\max}, & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ — ω 的预设最大和最小值； f —微粒当前的目标函数值； $f_{\min}$ —当前所有微粒的最小目标函数值； f_{avg} —当前所有微粒的目标函数值的平均。

3 试验仿真与分析

3.1 优化模型求解

根据前期预试验结果，确定表 1 所示的 11 组染料配方（按各染料在染液中的质量分数计），每组用 6 块樟子松单板进行染色试验，各取 3 块染色较好的作为染色标准样本。

表1 每组的染料配方

Tab.1 Dyeing formulation for each group

编号	染料配方/%			编号	染料配方/%		
	R	Y	B		R	Y	B
1	0.1	0.5	0.4	7	0.2	0.6	0.2
2	0.1	0.6	0.3	8	0.2	0.7	0.1
3	0.1	0.7	0.2	9	1	0	0
4	0.2	0.3	0.5	10	0	1	0
5	0.2	0.4	0.4	11	0	0	1
6	0.2	0.5	0.3				

利用高光谱成像仪分别对 3 组单色染色单板和 8 组混合染色标准样进行扫描，并对获得的高光谱图像进行处理。在 400~700 nm 波段范围内以 5 nm 为间隔进行取值，对结果进行归一化后，得到各组染色样品的光谱反射率如图 1 所示。将各组光谱反射率带入式 2，得到各组分的中间函数 $f[R(\lambda)]$ ，进而得到三种单一染料组分染色单板的中间函数矩阵 F 与标准样中间函数矩阵 F^{Standard} 。

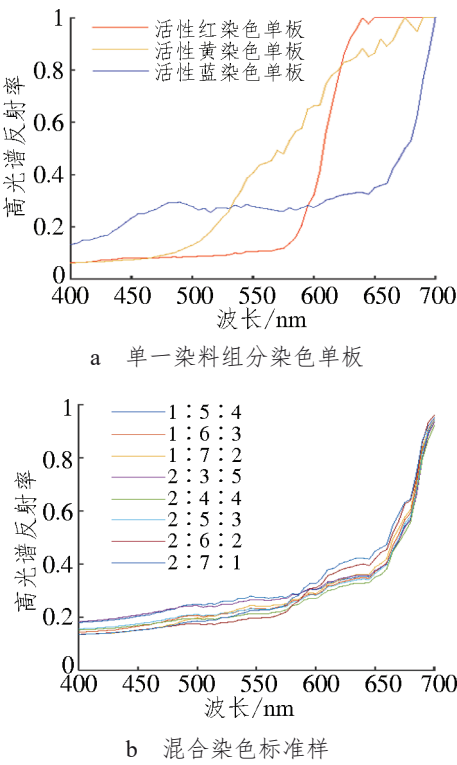


图1 各组分染色样品的光谱反射率
Fig.1 The spectral reflectance of dyed samples

以与木材颜色相近的 5# 标样为例，采用最小二乘法、传统粒子群算法与 APSO 对公式 4 进行求解。设置 APSO 的初始种群规模 $N = 100$ ，粒子群参数 $c_1 = 2$ ， $c_2 = 2$ ，最大权重 $\omega_{\max} = 0.9$ ，最小权重 $\omega_{\min} = 0.1$ ，最大迭代次数 $M = 100$ 。由于采用智能算法搜索得到的结果具有随机性，因此取 50 次优化结果的平均值作为最终结果。配方的具体解算结果如表 2 所示。

表2 标准样 5# 的解算结果对比

Tab.2 Comparisons of calculation results of control sample 5#

计算方法	标准样染料比例			拟合样染料配方			配方绝对偏差
最小二乘法				0.254	0.303	0.442	0.193
粒子群算法	0.2	0.4	0.4	0.199	0.315	0.484	0.170
APSO				0.244	0.386	0.369	0.089

由表 2 可知，利用 APSO 对标准样 5# 进行预测时，获得配方的绝对偏差最小，约为采用最小二乘法和传统粒子群算法对配方进行预测时的 1/2；且采用 APSO 求解时，配方的绝对偏差 < 0.1 ，获得的拟合配方预测效果较好。

利用 APSO 对 8 组染色标准样的配方进行预测，结果如表 3 所示。

表3 APSO 预测结果

Tab.3 Prediction results of APSO

试验 编号	标准样染料配方/%			拟合样染料配方/%			配方绝对偏差
	R	Y	B	R	Y	B	
1	0.1	0.5	0.4	0.132	0.497	0.371	0.064
2	0.1	0.6	0.3	0.124	0.594	0.280	0.050
3	0.1	0.7	0.2	0.119	0.671	0.210	0.058
4	0.2	0.3	0.5	0.212	0.324	0.462	0.074
5	0.2	0.4	0.4	0.244	0.386	0.369	0.089
6	0.2	0.5	0.3	0.162	0.516	0.321	0.075
7	0.2	0.6	0.2	0.175	0.595	0.229	0.059
8	0.2	0.7	0.1	0.221	0.657	0.121	0.085

由表 3 可知，采用 APSO 对 8 组染色标准样的配方进行预测时，配方绝对偏差均 < 0.1。其中，第 2 组试验的配方绝对偏差最小（0.050），第 5 组试验的配方绝对偏差最大（0.089）。8 组预测结果的三种染料的配比与实际染料配比相近。

利用 Matlab 绘制采用传统粒子群算法与 APSO 对函数进行最优解搜索时的优化过程曲线见图 2。

当目标函数值趋于平稳时，即优化算法找到了最优值。图 2 显示，传统粒子群算法在迭代次数约为 47 次时寻到最优值，而 APSO 在迭代次数约为 30 次时就寻到了最优值。由此可见，利用 APSO 对 Stearns-Noechel 配色模型中的目标配方进行求解可以高效地解算出精确的染色配方。

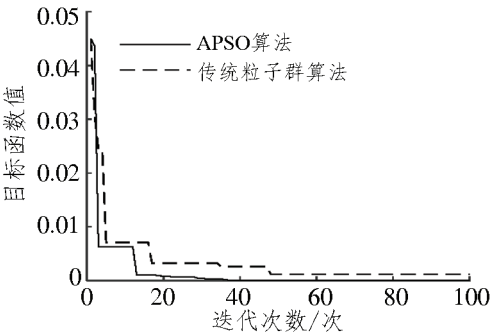


图2 不同算法优化过程曲线

Fig.2 Optimization process curves of different algorithms

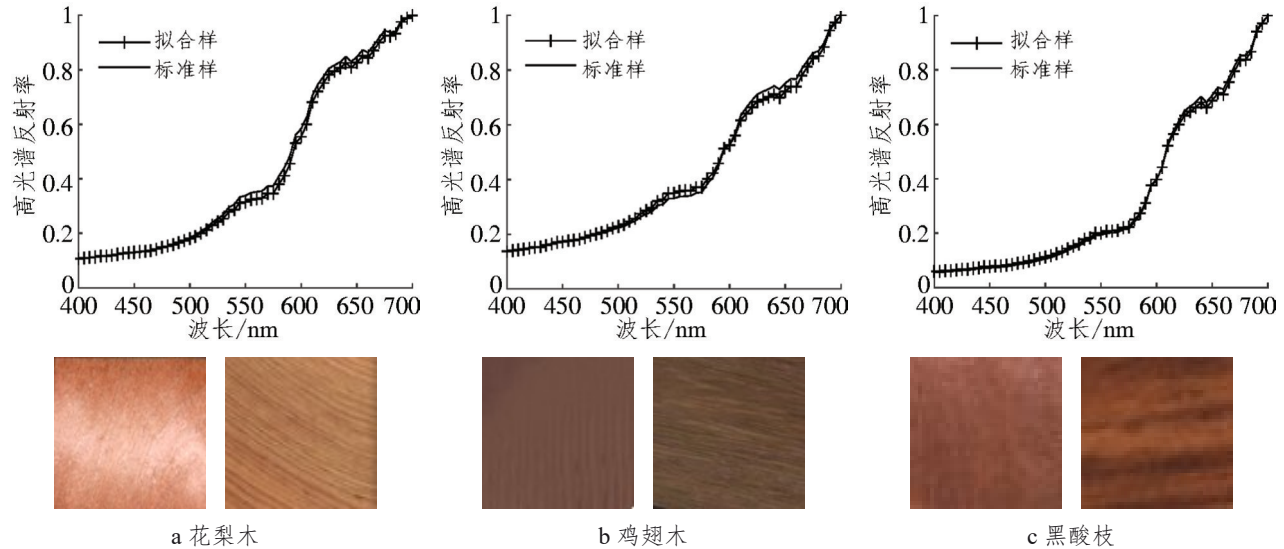
3.2 优化模型验证

选用花梨木（*Pterocarpus* spp.）、鸡翅木（*Millettia* spp.）和黑酸枝木（*Dalbergia* spp.）木材作为验证标准样本，采用高光谱成像仪对三种木材进行扫描，获得的表面光谱反射率分别带入优化后的模型进行测试，配方预测结果见表 4。根据获得的配方对木材单板进行染色，效果如图 3 所示，标准样与拟合样反射率误差对比如图 3 所示。

表4 三种珍贵材的染色配方预测

Tab.4 Dyeing formula prediction of three precious wood species

样本	R	Y	B	拟合样色差 ΔE
花梨木	0.192	0.419	0.082	1.48
鸡翅木	0.137	0.284	0.193	1.62
黑酸枝	0.336	0.581	0.204	0.71



注：各树种左图为拟合样、右图为验证标准样照片。

图3 三种珍贵木材拟合样与对照样反射率误差对比

Fig.3 Comparisons of reflectance errors between fitting samples and control samples of three precious wood species

以纺织行业的色差评定标准为参考, 认为色差在 2~5 之间时即为可接受色差^[17]。由表 4 可知, 三种珍贵材拟合样与对照样的色差分别为 1.48、1.62、0.71, 色差均 < 2, 色差在可接受范围内。由图 3 可知, 采用优化后的木材单板染色配方预测方法获得的珍贵材拟合样与对照样间光谱反射率误差小, 颜色相似度高。

4 结论

1) 本研究提出了一种将 APSO 与 Stearns-Noechel 模型结合的木材单板染色配方预测方法。利用高光谱成像系统对木材染色单板的光谱反射率进行采集, 采用循环迭代法确定了以樟子松为染色基材时, 最优参数 M 为 0.25。分别采用最小二乘法、传统的粒子群算法和 APSO 对标准样进行配方预测, 结果表明采用 APSO 对 8 组标准样的配方进行预测, 得到配方的绝对偏差值均小于 0.1, 三种染料的预测配方与实际配方间误差小; 且 APSO 的寻优效率更高。

2) 选用花梨木、鸡翅木以及黑酸枝木三种珍贵木材对优化模型进行测试, 获得三种珍贵材的 R-Y-B 染色配方分别为花梨木: 0.192%, 0.419%, 0.082%; 鸡翅木: 0.137%, 0.284%, 0.193%; 黑酸枝: 0.336%, 0.581%, 0.204%。染色拟合样与对照样间色差均小于 2, 且两者光谱反射率误差小, 染色效果较好。

3) 采用 APSO 与 Stearns-Noechel 配色模型结合的方法可以对木材单板染色配方进行有效地预测, 但针对不同的染色基材, 需要事先获取 M 值。如何建立一个可适用于任意染色基材的配方预测模型还有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 李莲芳. 优质高效人工用材林精准培育基础与关键措施剖析[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(3):1-9, 197.
LI L F. Analysis on the foundation and essential factors of precise cultivation of a high-quality and efficiency artificial timber forest[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2019, 39(3): 1-9, 197.
- [2] 王敬贤, 赫亮, 王建军, 等. 低盐活性红染料染色柞木单板的工艺与性能[J]. 森林工程, 2020, 36(6):51-57.
WANG J X, HE L, WANG J J, et al. Processes and performances of Chinese oak veneers modified with low-salt reactive red dyes[J]. Forest Engineering, 2020, 36(6): 51-57.

- [3] 刘强强, 吕文华, 石媛, 等. 木材染色研究现状及功能化展望[J]. 中国人造板, 2019, 26(9):1-5.
LIU Q Q, LYU W H, SHI Y, et al. Advances in wood dyeing and its functionalizing prospects[J]. China Wood-Based Panels, 2019, 26(9): 1-5.
- [4] YANG L, BAI J, ZHANG R Y, et al. The optimization of color-prediction models for colored cotton fiber yarns[J]. Textile Research Journal, 2019, 89(19/20): 4007-4014.
- [5] Hemingray C, Westland S. A novel approach to using neural networks to predict the colour of fibre blends[J]. Coloration Technology, 2016, 132(4):297-303.
- [6] 高新, 潘如如, 高卫东. 基于单常数 Kubelka-Munk 理论的棉纤维颜色预测[J]. 丝绸, 2020, 57(9):34-38.
GAO X, PAN R R, GAO W D. Cotton fiber color prediction based on the single constant Kubelka-Munk theory[J]. Journal of Silk, 2020, 57(9): 34-38.
- [7] YANG R H, XU Y Y, XIE C P, et al. Kubelka-Munk double constant theory of digital rotor spun color blended yarn[J]. Dyes and Pigments, 2019(165): 151-156.
- [8] WEI C N, WAN X X, LI J F. Color prediction model for pre-colored fiber blends based on modified Stearns-Noechel function[J]. Dyes and Pigments, 2017(147): 544-551.
- [9] SHEN J J, ZHOU X, MA H, et al. Spectrophotometric prediction of pre-colored fiber blends with a hybrid model based on artificial neural network and Stearns - Noechel model[J]. Textile Research Journal, 2017, 87(3):296-304.
- [10] 高新, 潘如如, 高卫东. 采用改进 Stearns-Noechel 模型的混色棉纤维颜色预测[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2020, 46(4):549-554.
GAO X, PAN R R, GAO W D. Color prediction of blended cotton fibers using improved stearns-noechel model[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2020, 46(4): 549-554.
- [11] 马崇启, 朱宝基, 刘凤坤, 等. 基于 Stearns-Noechel 模型的色纺纱配色算法改进[J]. 天津工业大学学报, 2019, 38(3):41-46.
MA C Q, ZHU B J, LIU F K, et al. Improvement of color spinning matching algorithm based on Stearns-Noechel model[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2019, 38(3): 41-46.
- [12] 徐亚亚, 杨瑞华, 邓茜茜. 多通道转杯纺羊毛织物的 Stearns-Noechel 配色模型[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2020, 46(3):357-361.
XU Y Y, YANG R H, DENG Q Q. Stearns-noechel color matching model for multi-channel rotor spun wool fabric[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2020, 46(3): 357-361.
- [13] 章斐燕, 李启正, 张声诚, 等. 基于 Stearns-Noechel 优化模型的交织混色织物配色设计系统[J]. 丝绸, 2015, 52(1):26-30.
ZHANG F Y, LI Q Z, ZHANG S C, et al. Color matching system for colored interwoven fabrics based on optimized stearns-noechel model [J]. Journal of Silk, 2015, 52(1): 26-30.
- [14] 张杨. 改进群体智能优化算法及其应用[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [15] 杨辉, 李莹, 周艳丽. 基于 APSO 的地铁节能运行速度优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8):1926-1934.
YANG H, LI Y, ZHOU Y L. Research on optimization of energy-saving operation speed of metro based on APSO[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(8): 1926-1934.
- [16] 王泉, 姚佳, 李艳清, 等. Stearns-Noechel 模型在天然彩色棉混色中的应用[J]. 纺织学报, 2016, 37(1):93-97.
WANG Q, YAO J, LI Y Q, et al. Application of Stearns-Noechel model on color blending of naturally colored cotton[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(1): 93-97.
- [17] 王桂芳. 宋锦面料设计配色与成品间色差问题研究[D]. 东华大学, 2021.

(本文编校 孟凡丹、向 琴)