

基于色彩参数和高光谱特征的针叶树种色素含量预估

王艺恒¹, 孙 昆¹, 温 喆¹, 锁应博², 张 曲¹, 王戈戎¹, 魏进华^{1*}

1. 北华大学林学院, 吉林 吉林 132013

2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430072

摘 要 光谱成像技术广泛应用于植物理化参数无损测定等领域研究,而色素与色彩参数相关性研究也有学者探索。但比较并优选分别以色彩参数值、光谱参数值作为自变量与色素含量拟合出的模型,还未见报道。本实验以5种针叶树种为研究对象,筛选蓝边幅值Db、黄边幅值Dy、红边幅值Dr、绿峰幅值Rg、红谷幅值Rr、蓝边面积SDB、黄边面积SDy、红边面积SDr、比值植被指数RVI、差值植被指数DVI、归一化植被指数NDVI 11种光谱植被参数作为该光谱分析的基础,将实测针叶色彩参数值、光谱参数值分别作为自变量,采用多元线性逐步回归方法(SMLR)预估色素含量建立模型,以 R^2 、RMSE为评价标准,对比选出模型精度最高的参数组合应用于实践。研究结果表明:(1)树种间针叶色素含量、色相参数值、光谱反射率均存在一定差异($p < 0.05$)。(2)树种间针叶光谱反射率红松显著低于北美短叶松、樟子松、赤松($p < 0.05$),针叶树种原始光谱在可见光波段500和680 nm附近呈现“蓝谷现象”和“红谷现象”,在550和760 nm波段附近呈现“绿峰现象”和“红边现象”;一阶微分光谱反射率在700 nm附近产生剧烈变化。(3)色素含量与色彩参数、光谱反射率、光谱特征参数存在显著线性关系。(4)花青素和叶绿素分别以 L, a^* 和 L, a^*, b^* , S色彩参数组合为自变量时,拟合模型 R^2 最高,分别为0.588和0.638;而类胡萝卜素、叶绿素a、叶绿素b都是以 $FD_{652}, FD_{700}, SDB, SDy, RVI, DVI$ 和NDVI光谱参数组合为自变量时,拟合模型 R^2 最高,分别为0.779, 0.786, 0.774。该研究运用高光谱相机、色彩色差仪、紫外-可见分光光度计实现了快速预估针叶色素含量,在色彩参数值与光谱值都与色素含量存在显著相关性的基础上,成功选出建立模型精度最高的参数组合,在针叶树种色素预估时可以根据精度需求及研究条件选择不同方法和参数值。

关键词 针叶树种; 色素含量; 植物光谱; 色彩参数

中图分类号: S791.24

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)02-0537-07

引 言

赤松(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)、红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、北美短叶松(*Pinus banksiana* Lamb)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)松科松属针叶常绿乔木,作为东北冬季为数不多的常绿树种,不仅为北方寒冷的冬天增添一抹绿色,且还具有重要的生态作用。叶片色素含量是研究植物生理代谢、抗逆性、观赏特性评价研究的重要评价指标^[1-2]。

传统测定色素的方法过程繁琐且误差较大,因此,有学者探究色素与色相参数的相关性,通过叶色参数预估色素含

量并建立最优模型^[3-5],目前,将色彩参数值、光谱参数值分别作为自变量预估色素含量而建立模型并对比选出最优拟合模型应用于实践,还未见报道。光谱成像受植被的色素含量、内部结构、生化物质等的影响,光谱技术分析可提供鲜叶中化合物快速以及非破坏性原位测定^[6-7]。因此,光谱成像技术广泛应用于植被生态遥感监测^[8-9]、植物理化参数无损测定^[10]等领域的研究。本工作利用紫外-可见分光光度仪、色彩色差计、高光谱相机获取5种松属植物针叶色素含量、色彩参数值、光谱特征参数值,对实测的针叶色彩参数值、光谱参数值分别作为自变量与色素含量建立模型,筛选出最优模型的参数组合,旨在为今后树种色素测定提供高效无损的方法和理论支撑。

收稿日期: 2021-01-21, **修订日期**: 2021-02-24

基金项目: 吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20180349KJ), 国家科技支撑项目(2017YFC050410102)资助

作者简介: 王艺恒, 1998年生, 北华大学林学院硕士研究生 e-mail: 1873900274@qq.com

* 通讯作者 e-mail: weijh99@163.com

1 实验部分

1.1 研究地概况

试验区位于吉林市北华大学树木园,土壤为粘壤土。地理位置为 $125^{\circ}40' - 127^{\circ}56'E$, $42^{\circ}31' - 44^{\circ}40'N$ 。区内属温带大陆性季风气候,年平均气温为 $3 \sim 5^{\circ}C$,年降水量 $550 \sim 910 \text{ mm}^{[11]}$ 。

1.2 样品

选择生长环境一致、规格相近、健康无病虫害的赤松[胸径 $(0.17 \pm 0.01) \text{ m}$ 、冠幅 $(4.23 \pm 0.24) \text{ m}$]、红松[胸径 $(0.16 \pm 0.02) \text{ m}$ 、冠幅 $(4.28 \pm 0.26) \text{ m}$]、油松[胸径 $(0.17 \pm 0.02) \text{ m}$ 、冠幅 $(4.39 \pm 0.04) \text{ m}$]、北美短叶松[胸径 $(0.19 \pm 0.04) \text{ m}$ 、冠幅 $(4.53 \pm 0.17) \text{ m}$]、樟子松[胸径 $(0.19 \pm 0.03) \text{ m}$ 、冠幅 $(4.93 \pm 0.15) \text{ m}$]各 9 株为试验材料,10 月从东西南北 4 个方向采集样品,每个方向分别从植株上、中、下采集 10 束针叶混合均匀作为 1 组样品,每株树取样 4 组,共 180 组样品。

1.3 方法

1.3.1 针叶色素含量的测定

参照李合生^[12]的分光光度计法,利用紫外-可见分光光度仪测定叶绿素、类胡萝卜素和花青素含量。针叶质量为 0.3 g ,提取液体体积为 10 mL 。

1.3.2 针叶色彩参数值的测定

运用色彩色差仪(CHROMAMETER CR_410)测定针叶的 L (明亮度)、 a^* (红绿比)、 b^* (黄蓝比)值,并计算出饱和度 $c(c = (a^*^2 + b^*^2)^{1/2})$ 、色光值 $S(S = 2000 \times (a^*/L) \times (a^*^2 + b^*^2)^{1/2})$ 。

1.3.3 光谱采集

取 5 种树种不同方向的健康针叶用水冲洗,并用滤纸吸干。用芬兰 SPECIM 手持智能型 AISA 高光谱相机进行光谱测量,该光谱相机波长范围为 $400 \sim 1000 \text{ nm}$,本研究只选取 $400 \sim 800 \text{ nm}$ 之间的波段进行相关分析。

1.3.4 光谱数据微分处理

利用 ENVI 扩展工具 Savitzky-Golay 滤波进行平滑处理。光谱一阶微分计算公式

$$FDR_{\lambda_n} = \frac{dR}{d\lambda} = \frac{R_{\lambda_{n+1}} - R_{\lambda_n}}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

式(1)中, FDR_{λ_n} 为波段从 n 到 $n+1$ 之间光谱一阶微分, $R_{\lambda_{n+1}}$, R_{λ_n} 分别为 $n+1$, n 处原始光谱反射率值, λ_n 为单个波段, $\Delta\lambda$ 为 1。

1.3.5 “三边”参数以及植被指数计算方法

筛选 11 种高光谱特征参数作为本文光谱分析的基础,包括“三边”幅值和面积、绿峰和红谷幅值(R_g 、 R_r)等 8 种“三边”参数^[13]和归一化(NDVI)、比值(RVI)以及差值(DVI)等 3 种植被指数^[14]。

1.4 模型构建与验证

针叶树种色素含量与光谱反射率数据配套样本数为 180 个,用 K 折交叉验证法随机选取 144 个样本作为建模数据集,剩下 36 个样本为验证集。

2 结果与讨论

2.1 树种针叶色素含量特征

树种之间红松针叶各色素含量与其他 4 个树种有极显著差异($p < 0.01$),且含量均最高。油松针叶各色素含量均显著低于其他树种($p < 0.05$)。5 个色素含量统计值详见表 1。

表 1 针叶树种色素含量统计描述

Table 1 Statistical description of pigment content in conifer species

色素	数据集	样本数/个	平均值	最大值	最小值	标准差	变异系数
花青素(吸光度值)	建模	144	0.170	0.273	0.117	0.029	0.172
	验证	36	0.164	0.222	0.113	0.028	0.174
类胡萝卜素(吸光度值)	建模	144	1.267	2.386	0.534	0.494	0.390
	验证	36	1.745	2.946	0.860	0.662	0.380
叶绿素/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	建模	144	15.661	31.277	0.998	6.739	0.430
	验证	36	17.738	24.584	13.176	3.614	0.204
叶绿素 a/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	建模	144	11.803	22.538	4.778	4.624	0.392
	验证	36	17.539	27.412	10.194	4.531	0.258
叶绿素 b/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	建模	144	4.262	8.775	1.405	1.968	0.462
	验证	36	5.823	10.435	3.056	1.986	0.341

2.2 树种针叶色彩参数特征、光谱反射率曲线特征

北美短叶松色彩参数值 L , a^* , C , S 值显著高于其他 4 个树种($p < 0.01$);而红松针叶 b^* 值含量明显高于其他 4 个树种,呈极显著关系($p < 0.01$)。由于常绿针叶树种针叶属于同色系,饱和度越大,颜色越明亮,因此,明亮度 L 值、

a^* (红绿比)、饱和度 c 值、色光值 S 值变化一致。

5 种树种针叶原始光谱反射率变化规律相似,详见图 1(a)。在可见光波段 500 和 680 nm 附近形成“蓝谷”和“红谷”现象,550 nm 波段附近呈现“绿峰”现象。光谱反射率在 700 ~ 760 nm 波段显著上升,并在 760 nm 附近呈现“红边”现

象，这是由于植物色素在不同波段强吸收所致。这与宇李等^[15]研究结果一致，与臧卓等^[16]分析马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)和杉木(*Cunninghamia lanceolata* Lamb.) Hook)色素和冠层光谱数据敏感波段的结论大体一致。

原始光谱进行导数微分处理可以有效消除系统误差，降

低反射、散射等背景噪音对光谱的影响^[17]。由图 1(b)可见，5 种针叶树种在 700 nm 附近的光谱反射率有明显不同，同时发现针叶光谱反射率与色彩参数值特征变化规律相似，红松光谱反射率、色彩参数值 L , a^* , c , S 显著低于北美短叶松、樟子松、赤松($p < 0.05$)。

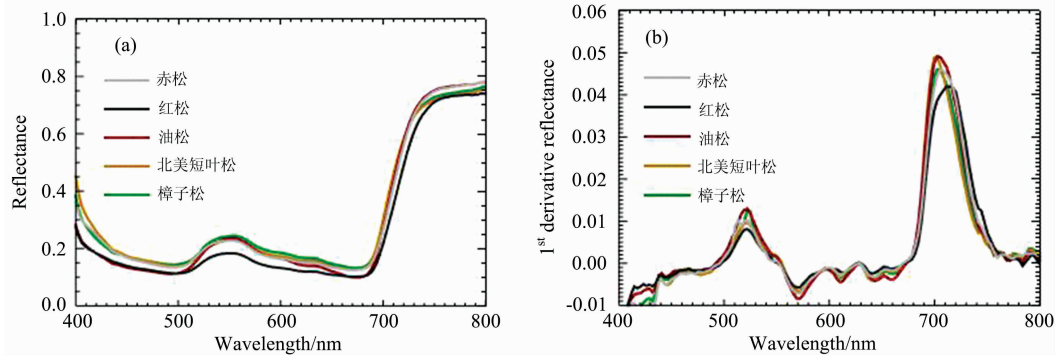


图 1 针叶树种原始光谱曲线 (a) 和针叶树种一阶导数光谱曲线 (b)

Fig. 1 Original (a) and first-order differential (b) spectral curves of conifer species

2.3 相关性分析

2.3.1 针叶色素含量与色彩参数值相关性

5 个色素含量与色彩参数值 L (明亮度) 达到最大负相关，相关系数为 -0.620 , -0.775 , -0.752 , -0.797 , -0.830 , 结果详见表 2。这与 Li^[18] 研究结果一致，色素含量与色彩参数呈显著负相关。

表 2 针叶树种色素含量与色彩参数相关性分析

Table 2 Correlation analysis between pigment content and color parameters of conifer species

色彩参数	花青素	类胡萝卜素	叶绿素	叶绿素 a	叶绿素 b
L	-0.620^{**}	-0.775^{**}	-0.752^{**}	-0.797^{**}	-0.830^{**}
a^*	-0.461^*	-0.662^{**}	-0.644^{**}	-0.702^{**}	-0.734^{**}
b^*	0.329	0.525^*	0.513^*	0.569	0.588
c	-0.375	-0.575^{**}	-0.561^*	-0.618	-0.641
S	-0.366	-0.575^{**}	-0.561^*	-0.619^{**}	-0.644^{**}

2.3.2 针叶色素含量与光谱值相关性

由图 2 可见，5 种树种的色素含量与光谱反射率相关系数拟合曲线变化趋势一致，原始光谱反射率与色素含量在 536~570, 702~723, 528~610, 693~732, 519~634 和 690~738 nm 间呈现显著负相关，相关系数值在 710~760 nm 波段显著上升，在 760 nm 附近出现拐点并且相关系数变化平缓。一阶光谱反射率花青素在蓝边区域 (490~530 nm) 和 513 nm 波段处出现极值点，而其余 4 个色素在黄边区域 (550~580 nm) 和 569 nm 波段附近出现极值点。色素在 652 nm 附近达到最大正相关；在 700 nm 波段出现最大负相关。Main 等^[19] 表明基于红边导数光谱建立的指数用于估算叶片叶绿素含量适用性和稳定性最好，与本工作的红边参数与 5 种针叶色素含量具有极显著相关性，并参与拟合模型决定系数高的结论大体一致。对 5 种色素含量与光谱反射率正负相关系数最大值 (绝对值) 及所在波长进行统计，详见表 3。

树种色素含量与光谱特征参数相关性分析结果详见表 4。

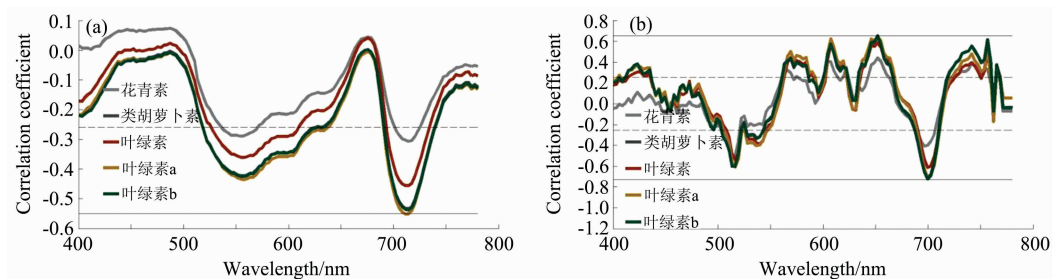


图 2 树种原始光谱反射率与色素含量相关性分析 (a) 和一阶光谱反射率与色素含量相关性分析 (b)

Fig. 2 Correlation analysis between raw spectra reflectance and pigment content (a) and first order spectral reflectance (b) and pigment content of tree species

表 3 树种色素含量与光谱反射率相关系数

Table 3 Correlation coefficient between pigment content and spectral reflectance of tree species

光谱类型	花青素		类胡萝卜素		叶绿素		叶绿素 a		叶绿素 b	
	波段	相关系数	波段	相关系数	波段	相关系数	波段	相关系数	波段	相关系数
原始光谱	487	0.075	676	0.001	676	0.041	676	-0.005	676	0.003
	715	-0.307*	715	-0.533**	715	-0.456**	712	-0.551**	715	-0.537**
一阶光谱	652	0.439**	652	0.641**	652	0.586**	652	0.647**	652	0.655**
	513	-0.519**	700	-0.714**	700	-0.612**	700	-0.713**	700	-0.722**

表 4 树种色素含量与光谱特征参数相关性分析

Table 4 Correlation analysis between pigment content and spectral characteristic parameters of tree species

光谱参数	花青素	类胡萝卜素	叶绿素	叶绿素 a	叶绿素 b
绿峰幅值 Rg	-0.286*	-0.418**	-0.356**	-0.429**	-0.420**
红谷幅值 Rr	0.041	-0.004	0.034	-0.011	-0.002
蓝边幅值 Db	-0.306*	-0.349**	-0.285*	-0.349**	-0.337**
黄边幅值 Dy	-0.066	-0.016	-0.034	-0.032	-0.006
红边幅值 Dr	-0.347**	-0.598**	-0.525**	-0.616**	-0.602**
蓝边面积 SDb	-0.519**	-0.629**	-0.544**	-0.627**	-0.626**
黄边面积 SDy	0.459**	0.621**	0.554**	0.631**	0.624**
红边面积 SDr	-0.087	-0.133	-0.115	-0.141	-0.140
比值植被指数 RVI	-0.608**	-0.642**	-0.623**	-0.677**	-0.632**
差值植被指数 DVI	-0.575**	-0.761**	-0.710**	-0.777**	-0.694**
归一化植被指数 NDVI	0.595**	0.713**	0.697**	0.770**	0.704**

2.4 模型拟合及验证

只用单变量方法预估某一化学成分,往往容易忽略某些重要信息,常进行多波段选择和重组,因此,多元线性回归是最好的方法之一^[20]。刘昕等^[21]通过比较一元线性回归、多元线性逐步回归和偏最小二乘法 3 种方法,验证多元线性逐步回归最适宜植物叶片盖度预测模型。为了更准确地拟合各个色素与色彩参数、光谱参数模型,选用多元线性逐步回归分析方法,由所有显著相关的色彩参数、光谱反射率建立线性预测函数模型。方程式如式(2)

$$y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n \quad (2)$$

式(2)中, y 为色素含量估测值; a_n 为第 n 个特征变量的系数; X_n 为第 n 个特征变量, a_0 为常数。

2.4.1 叶片色素含量与色彩参数值、光谱值模型拟合

将显著相关的色彩参数视为自变量逐步代入与各色素含量进行回归方程模型拟合,相关参数详见表 5。

表 5 针叶树种色素含量与色彩参数值模型拟合评价指标

Table 5 Pigment content and color parameter model fitting evaluation indexes of conifer species

色素类型	相关系数 r	决定系数 R^2	调整 R^2	标准估计误差	Durbin-Watson
花青素	0.767	0.588	0.540	0.019	1.787
类胡萝卜素	0.824	0.679	0.593	0.337	1.893
叶绿素	0.799	0.638	0.542	0.194	2.090
叶绿素 a	0.825	0.681	0.622	0.245	1.867
叶绿素 b	0.863	0.745	0.698	1.089	2.112

以色素含量为因变量,以原始和一阶微分的光谱反射

率、光谱特征参数与色素含量相关性最高波段的反射率为自变量,选表 3、表 4 与色素含量相关性 r 值(绝对值)分别大于 0.460, 0.620, 0.550, 0.620 和 0.620 植被指数利用建模数据构建模型,相关拟合参数见表 6。

表 6 针叶树种色素含量与光谱值模型拟合评价指标

Table 6 Pigment content and spectral value model of conifer species

色素类型	相关系数 r	决定系数 R^2	调整 R^2	标准估计误差	Durbin-Watson
花青素	0.694	0.482	0.432	0.022	2.114
类胡萝卜素	0.882	0.779	0.749	0.247	1.876
叶绿素	0.785	0.616	0.565	0.205	2.097
叶绿素 a	0.887	0.786	0.758	0.177	1.838
叶绿素 b	0.880	0.774	0.744	0.196	1.893

2.4.2 模型筛选与验证

对比色素含量与色彩参数值(表 5)、色素含量与光谱反射率(表 6)拟合 R 、 R^2 、标准估计误差、DW 值选出拟合最优模型,其中花青素、叶绿素分别以 L , a^* 和 L , a^* , b^* , S 色彩参数组合为自变量时, R^2 最高;而类胡萝卜素、叶绿素 a、叶绿素 b 都是以 FD_{652} , FD_{700} , SDb, SDy, RVI, DVI, NDVI 光谱参数组合为自变量时, R^2 最高模型最优。为了验证模型的稳定性以及适应性,以 R^2 , RMSE 为评价指标,利用验证集对模型预测性能进行验证,结果见表 7。

5 种色素含量实测值与预测值拟合散点图详见图 3,类胡萝卜素、叶绿素 b 和叶绿素 a 验证集 R^2 达到 0.76 以上,

表 7 最优拟合模型及精度验证
Table 7 Optimal fitting model and accuracy verification

色素类型	模型	建模		验证	
		R ²	RMSE	R ²	RMSE
花青素	$y=1.535-0.023L+0.109a^*$	0.588	0.019	0.590	0.024
类胡萝卜素	$y=2.618-60.118FD_{652}-36.335FD_{700}+6.329SDb+8.615SDy+0.171RVI-1.946DVI-0.424NDVI$	0.779	0.224	0.770	0.345
叶绿素	$y=292.089-5.673L+48.308a^*-19.202b^*-0.185S$	0.638	0.201	0.636	0.215
叶绿素 a	$y=19.369-1760.51FD_{652}-266.4FD_{700}+96.842SDb+165.019SDy+3.78RVI-3.82DVI+16.352NDVI$	0.786	0.187	0.777	0.214
叶绿素 b	$y=16.161+2406.3FD_{652}-337.164FD_{700}-26.171SDb-165.976SDy-2.781RVI-23.02DVI-27.467NDVI$	0.774	0.179	0.764	0.184

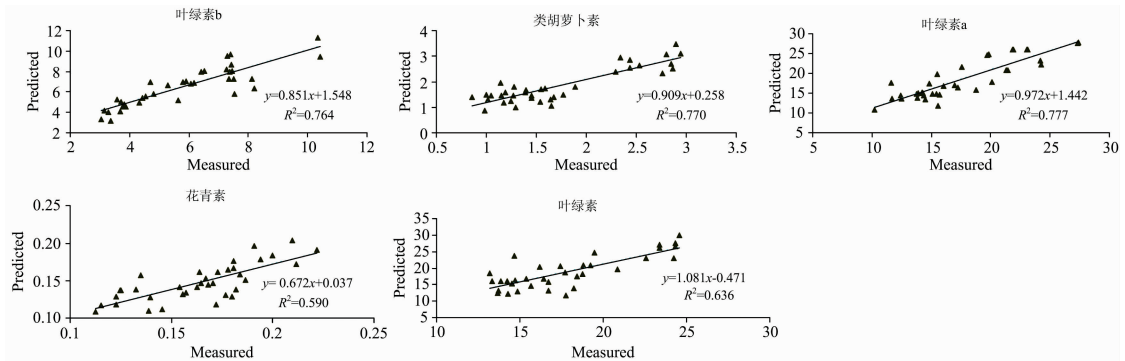


图 3 色素含量实测值与预测值拟合散点图

Fig. 3 Scatter plot of measured and predicted pigment contents

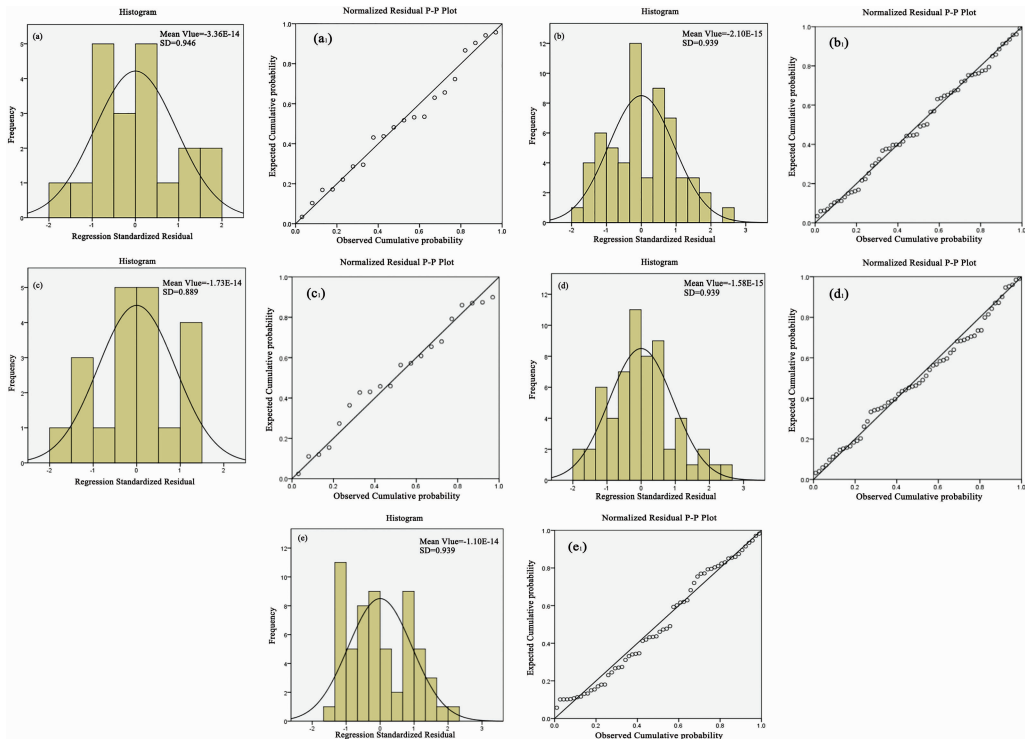


图 4 最优模型标准残差直方图和标准化残差 p-p 图

Fig. 4 Standard residual histograms and normalized residual p-p plots

表明模型的模拟效果较优；以色彩参数值为自变量的花青素、叶绿素验证集 R^2 分别为 0.590、0.636。

2.5 误差项模型检验

为了避免某些因素随着色素含量实测变化而对回归模型结果产生不同影响，导致预估结果出现误差，用误差项正态性检验方法和 Durbin-Watson 检验。模型残差独立性检验 DW 检验表达式为式(3)

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (\epsilon_i - \epsilon_{i-1})^2}{\sum_{i=2}^n \epsilon_i^2} \quad (3)$$

式(3)中， ϵ_i 为第 i 期的残差， ϵ_{i-1} 为第 $i-1$ 期的残差， \sum 是对 i 从第 2 期到第 i 期的求和。

对表 7 进行误差项检验，从标准残差直方图和标准化残差 p-p 图看出(见图 4)，5 个模型正态分布曲线中心轴两侧几乎接近对称，散点都在斜线附近。查阅 Durbin-Watson 分布表，各色素含量的 DW 值均出现无自相关值域中，认定残差独立，通过检验。

3 结 论

(1) 树种间针叶色素含量、色相参数值、光谱反射率均

存在规律性，红松光谱反射率、色彩参数值 L ， a^* ， c ， S 均显著低于北美短叶松、樟子松、赤松($p < 0.05$)；而红松色彩参数值 b^* 、色素含量值最高。

(2) 针叶色素含量与色彩参数、光谱参数等均存在显著相关性，色素含量与一阶微分光谱反射率相关性高于原始光谱；色素含量与色彩参数值 L 呈现最大负相关。

(3) 针叶类胡萝卜素、叶绿素 a、叶绿素 b 含量都是以 FD_{652} 、 FD_{700} 、 SDb 、 SDy 、 RVI 、 DVI 、 $NDVI$ 光谱参数组合为自变量时模型最优，决定系数 R^2 均高于 0.774，而花青素、叶绿素含量分别以 L ， a^* 和 L ， a^* ， b^* ， S 色彩参数组合为自变量时构建模型最优，决定系数 R^2 介于 0.588 和 0.638 之间。

(4) 运用高光谱技术和色彩色差技术可以实现高通量快速测定东北 5 种常见松属树种叶片中花青素、类胡萝卜素、叶绿素含量，对比以色彩参数值、光谱参数值为自变量时与色素含量分别建立模型，成功筛选出拟合模型精度最高的参数组合。在今后针叶树种色素预估可以通过高光谱遥感为大尺度机载星载提供科研指导，而小样本小数据用色彩参数值预估即可。本研究为针叶树种的叶色性状测定提供了无损、高效便捷的方法和理论支撑。

References

- [1] Skudra I, Ruza A. Rural Sustainability Research, 2017, 37(332): 29.
- [2] LIU Chang, SUN Peng-sen, LIU Shi-rong(刘畅, 孙鹏森, 刘世荣). Forestry Scientific Research(林业科学研究), 2017, 30(1): 88.
- [3] WANG Gai-ping, ZHANG Lei, YAO Xue-bing, et al(王改萍, 张磊, 姚雪冰, 等). Journal of Nanjing Forestry University • Natural Science Edition(南京林业大学学报 • 自然科学版), 2020, 44(5): 41.
- [4] PAN Li-qin, LI Ji-yuan, WEI Hai-zhong, et al(潘丽芹, 李纪元, 韦海忠, 等). Molecular Plant Breeding(分子植物育种), 2020, 18(2): 579.
- [5] ZHAO Yi-xuan, SUN Gui-fang, YANG Jian-wei, et al(赵艺璇, 孙桂芳, 杨建伟, 等). Forestry and Ecological Sciences(林业与生态科学), 2019, 34(1): 93.
- [6] Buddenbaum H, Stern O, Paschmionka B, et al. Int. J. Remote Sens., 2015, 36(18): 4590.
- [7] Li Y, Shao W, Dong R, et al. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2018, 26(2): 95.
- [8] JING Chuan-bao, ZHOU Wei-qi, QIAN Yu-guo(靖传宝, 周伟奇, 钱雨果). Journal of Ecology(生态学报), 2019, (22): 8383.
- [9] WANG Ya-hui, CHEN Er-xue, GUO Ying, et al(王雅慧, 陈尔学, 郭颖, 等). Forestry Scientific Research(林业科学研究), 2020, (1): 11.
- [10] PAN Qing-mei, ZHANG Jin-song, ZHANG Jun-pei, et al(潘庆梅, 张劲松, 张俊佩, 等). Forestry Scientific Research(林业科学研究), 2019, (6): 1.
- [11] ZHANG Shu-bin, WANG Xiang-ping, WU Peng, et al(张树斌, 王襄平, 吴鹏, 等). Journal of Ecology(生态学报), 2018, 38(22): 7990.
- [12] LI He-sheng(李合生). Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment(植物生理生化实验原理和技术). Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2006.
- [13] Horler D N H, Dockray M, Barber J, et al. Advances in Space Research, 1983, 3(2): 273.
- [14] Blackburn G A. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(3): 273.
- [15] ZI Li, XIE Fu-ming, SHU Qing-tai, et al(字李, 谢福明, 舒清态, 等). Journal of Fujian Agricultural and Forestry University • Natural Science Edition(福建农林大学学报 • 自然科学版), 2019, 48(1): 55.
- [16] ZANG Zhuo, LIN Hui, YANG Min-hua(臧卓, 林辉, 杨敏华). Journal of Central South Forestry University of Science and Technology(中南林业科技大学学报), 2013, 33(1): 35.
- [17] HOU Yan-jun, DONG Lin-lin(侯艳军, 董琳琳). Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2021, 58(3): 350.
- [18] Li Y, Sun Y, Jiang J, et al. Plant Methods, 2019, 15: 73.

- [19] Russell Main, Moses Azong Cho, Renaud Mathieu, et al. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66: 751.
- [20] BAI Xue-qi, ZHANG Xiao-li, ZHANG Ning, et al(白雪琪, 张晓丽, 张 凝, 等). Journal of Beijing Forestry University(北京林业大学学报), 2016, 38(11): 16.
- [21] LIU Xin, YANG Guang, CHEN Hao-yu, et al(刘 昕, 杨 光, 陈昊宇, 等). Journal of Northeast Forestry University(东北林业大学学报), 2020, 48(2): 54.

Prediction of Conifer Pigment Content Based on Color Parameters and Hyperspectral Characteristics

WANG Yi-heng¹, SUN Kun¹, WEN Zhe¹, SUO Ying-bo², ZHANG Qu¹, WANG Ge-rong¹, WEI Jin-hua^{1*}

1. Forestry College of Beihua University, Jilin 132013, China

2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract Spectral imaging technology is widely used in the field of non-invasive determination of physical and chemical parameters of plants, and scholars have also explored the correlation between pigments and color parameters. However, it has not been reported that the models fitted using color parameter values and spectral parameter values as independent variables and pigment content, respectively, are compared and optimized. In this experiment, five conifer species were used as research objects, and 11 spectral vegetation parameters, including blue edge amplitude Db, yellow edge amplitude Dy, red edge amplitude Dr, green peak amplitude Rg, red valley amplitude Rr, blue edge area SDb, yellow edge area SDy, red edge area SDr, ratio vegetation index RVI, difference vegetation index DVI, and normalized vegetation index NDVI, were screened as the basis of spectral analysis in this paper. The measured conifer color parameter values and spectral parameter values were used as independent variables, respectively. Stepwise multiple linear regression (SMLR) was used to estimate the pigment content to establish a model, with R^2 and RMSE as evaluation criteria, and the parameter combinations with the highest model accuracy were compared and selected for practice. The results of the study indicate that: (1) There are differences in leaf pigment content, color phase parameter values, and reflectance spectral between tree species ($p < 0.05$). (2) The leaf spectral reflectance of *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc. was significantly lower in *Pinus sylvestris* var. mongolica Litv., *Pinus banksiana* Lamb and *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. ($p < 0.05$). The original spectrum of conifer species shows “blue valley phenomenon” and “red valley phenomenon” near 500 and 680 nm in the visible band, and “green peak phenomenon” and “red edge phenomenon” near 550 and 760 nm bands; the first-order differential spectral reflectance produces dramatic changes near 700 nm. (3) Pigment content was significantly correlated with color parameters, spectral reflectance, and spectral characteristic parameters, and there was a significant linear relationship. (4) When anthocyanins and chlorophyll were combined with L, a^* and L, a^*, b^* , and S color parameters as independent variables, respectively, the fitted model R^2 was the highest, 0.588 and 0.638, respectively. In contrast, carotenoids, chlorophyll a, and chlorophyll b were all combined with FD652, FD700, SDb, SDy, RVI, DVI, and NDVI spectral parameters as independent variables. The fitted model R^2 was the highest, 0.779, 0.786, and 0.774, respectively. In this study, a hyperspectral camera, color difference instrument and UV-Vis spectrophotometer were used to realize rapid prediction of needle pigment content. Based on a significant correlation between color parameter value and spectral value and pigment content, the parameter combination with the highest accuracy of the established model was successfully selected. Different methods and parameter values could be selected according to the accuracy requirements and research conditions in predicting of needle pigment.

Keywords Conifer species; Pigment content; Plant spectrum; Chromatic parameters

(Received Jan. 21, 2021; accepted Feb. 24, 2021)

* Corresponding author