

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.037

杨树叶片叶绿素含量高光谱估算模型研究*

程志庆¹ 张劲松¹ 孟平¹ 李岩泉¹ 王鹤松² 李春友³

(1. 中国林业科学研究院林业研究所国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 3. 河北农业大学园林与旅游学院, 保定 071000)

摘要: 以盆栽 107 号杨树为研究对象, 在验证杨树叶片的 SPAD 值可作为衡量其叶绿素含量指标的基础上, 基于最佳指数-相关系数法(OIFC), 提取了杨树叶绿素特征波段(中心波长 350、715、1 150 nm), 建立了以该组合波段原始光谱数据为自变量的杨树叶片叶绿素含量估算模型; 利用相关系数法, 提取了杨树叶绿素归一化植被指数的计算波段(中心波长 705、953 nm)与一阶光谱导数的叶绿素特征波段(中心波长 647、691、721 nm), 且分别建立了基于归一化植被指数、叶面叶绿素指数、一阶光谱导数为自变量的杨树叶片叶绿素含量估算模型; 比较分析所建立的模型精度, 筛选出杨树叶片的叶绿素含量最优估算模型。结果表明: 化学法测得杨树叶片叶绿素含量与其对应的 SPAD 值之间具有显著的幂函数关系, R^2 可达 0.902 3。利用 OIFC 法提取的叶绿素最佳三波段组合的高光谱数据为自变量, 与叶片叶绿素含量构建的模型预测值与实测值具有显著的线性关系, 决定系数为 0.944 5; 相比其他模型, 该模型的精度最高且均方根误差最小。可见, 基于 OIFC 法构建的杨树叶绿素高光谱模型具有较高的精度, 是估算杨树叶片叶绿素含量的最优模型。

关键词: 杨树 叶片 叶绿素含量 高光谱 估算模型

中图分类号: TP722; S123 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0264-08

Hyperspectral Estimation Model of Chlorophyll Content in Poplar Leaves

Cheng Zhiqing¹ Zhang Jinsong¹ Meng Ping¹ Li Yanquan¹ Wang Hesong² Li Chunyou³

(1. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of the State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. College of Landscape and Travel, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract: The feasibility of using SPAD value as a measure for chlorophyll content of poplar by potted poplar was tested, and methods of the poplar leaf chlorophyll content estimation by hyperspectral analysis technology were explored. Through analyzing the characteristics of poplar leaves' hyperspectral curve, the characteristic bands combination of 350 nm, 715 nm and 1 150 nm were extracted by optimum index factor. The normalized difference vegetation index (NDVI) calculated by the maximum correlation bands (705 nm, 953 nm) between NDVI and the poplar chlorophyll content, the maximum correlation bands (647 nm, 691 nm, 721 nm) between the first derivative of hyperspectral data and the poplar chlorophyll content and leaf chlorophyll index (LCI) were made by regression analysis to establish the estimation models. In order to select the best model, these models were analyzed and compared. The results showed that exponential relationship between SPAD values and chlorophyll content measured by chemical method

收稿日期: 2015-03-06 修回日期: 2015-06-01

* 国家自然科学基金资助项目(41105076)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB956202)和林业公益性行业科研专项资助项目(201204105)

作者简介: 程志庆, 博士生, 主要从事林业高光谱模型研究, E-mail: chengzhiqing1@126.com

通讯作者: 张劲松, 研究员, 博士生导师, 主要从事复合农林业和林业气象研究, E-mail: zhangjs@caf.ac.cn

and its corresponding value was significant, determination coefficient R^2 was up to 0.902 3. The fitting accuracy of the estimation model with the characteristic bands combination of 350 nm, 715 nm and 1 150 nm was extracted by optimum index factor and correlation coefficient was the highest. The determination coefficient R^2 was 0.944 5, root mean square error was 2.553 8 mg/cm². Therefore, the characteristic bands combination of 350 nm, 715 nm and 1 150 nm extracted by optimum index factor and correlation coefficient is able to build a more accurate model for estimation of poplar chlorophyll content.

Key words: Poplar Leaves Chlorophyll content Hyperspectral Estimation model

引言

叶绿素含量是衡量植物养分状况、光合能力以及植物生长发育阶段的良好指示器^[1],常被作为环境生理研究的重要指标^[2-4],同时也是遥感估算植被生产力以及陆面生态模型计算的关键参数。杨树因其生长迅速、成林早、木材用途广、防护效益高等优势,是我国农田防护林的主要树种。因此,大面积快速、准确测定杨树叶片叶绿素含量,对于准确测算农田防护林区域尺度生产力,加强防护林的经营管理,提升防护林的生态功能具有重要意义^[5]。

植物叶片叶绿素含量的传统测量方法为耗时且破坏性大的化学测定法^[6]。目前常见的便携式叶绿素仪测定叶绿素相对含量(SPAD)法是一种光谱学方法,属于单点、接触式测量^[7],上述两种方法都难以满足大面积叶绿素含量的测定及区域尺度生产力测算的需要。因此,需要探究新的测定方法。

20 世纪 80 年代以来,随着遥感技术的全面发展以及高光谱地物分析技术的深入研究,所形成的高光谱遥感技术可直接对地物进行微弱光谱差异的定量分析^[8],在大面积植被叶绿素测算等区域生态参数观测的研究与应用中表现出强大优势^[9],但其仍离不开地物波谱数据库以及相应的遥感知识库和模型库的有力支持^[10-11]。定量分析地面实测的高光谱特征及其与植物理化因子的关系,并建立数据库及相关预测模型是高光谱遥感理论及应用研究的工作基础。目前,植被叶绿素含量的地物高光谱估算模型研究思路大多是:在分析光谱反射率或光谱植被指数与叶绿素含量关系的基础上,通过统计回归建立预测模型,该技术主要应用于农业领域^[11-18]。由于树木种类繁多、冠层结构复杂,并且不同试验条件与植被类型下,高光谱特征波段的选取及组合方法、光谱植被指数等相关参数建立的叶绿素含量估算模型需要进行订正或有效性检验^[19-20]。对于速生杨树叶片叶绿素含量高光谱估算模型的研究至今鲜见报道。因此,本文以 107 号速生杨树为试验对象,采用程志庆等^[21]提出的最佳指数-相关系数法(OIFC)提取能够反映杨树叶片叶

绿素含量的最佳特征波段,建立该特征波段光谱数据为自变量的杨树叶片叶绿素含量(SPAD 值)估算模型,并与归一化植被指数(NDVI)、叶面叶绿素指数(LCI)以及一阶光谱导数等传统光谱分析法构建的模型进行比较,以期筛选出 107 号杨树叶片叶绿素含量最优估算模型,为大面积快速、准确测定速生杨树叶片叶绿素含量提供理论依据,进而为准确测算农田防护林区域尺度生产力提供技术支撑。

1 试验部分

1.1 样品采集

试验地点为河北农业大学科技园,位于 115°24'31.31"E、38°48'22.31"N,海拔高度 18 m。采样时间为 2014 年 6—9 月。试验材料采用盆栽一年生、相近形态的速生 107 号杨树苗,分别作 6 组处理:极度干旱、不施氮处理;干旱、不施氮处理;正常水分、不施氮处理(即为空白对照);极度干旱、施氮处理;干旱、施氮处理;正常水分、施氮处理。水分处理条件为(最大田间持水量的 70%(正常)、55%(干旱)和 40%(极度干旱));氮素处理条件为(每株施氮量(氮素与土壤的质量比)为 0.167 g/kg)。本试验处理是为了保证结果的全面性与精确性,获得不同梯度叶绿素含量的杨树叶片,并通过 SPAD-502 便携式叶绿素仪选取了不同叶绿素含量的叶片样本共 310 个。

1.2 光谱测定

使用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec Pro FR 光谱仪(光谱波段 350~2 500 nm,视场角 25°)进行反射光谱测定,利用仪器自带的植被探头与叶片夹式光谱探测器在野外直接测定杨树叶片光谱。为减小误差,测量前用标准白板进行校正,同时将叶片表面的浮尘用干净干燥的试纸擦去。每个样本观测记录 2 次采集数据(测定时避开叶脉),取其平均值作为该处的光谱反射率。利用植被探头与叶片夹,采用光谱仪自带光源,保证叶片平整且被探测面积相同,有效地消除了背景反射、叶片表面弯曲造成的光谱波动造成的影响,保证了研究结果的

精确性。

1.3 叶绿素测定

由于高光谱建模需要大量的数据支持,而化学测定方法较为繁琐同时破坏性大,要获取大量叶绿素数据难度较大。因此,本研究建模时采用 SPAD-502 便携式叶绿素仪(日本柯尼卡美能达公司)测量的 SPAD 值作为叶绿素含量。相关研究表明,在农作物中叶绿素含量与 SPAD 值呈显著性正相关^[22],为了验证 SPAD 值与杨树叶片叶绿素含量的关系,本研究在各组中选取不同 SPAD 值的样本共 90 个,用打孔器获取圆状叶片,然后使用便携式叶绿素仪测定其 SPAD 值,最后利用化学法测定叶绿素含量。叶绿素的化学测定为:利用 95% 的乙醇浸提叶片 24 h,通过分光光度计在 663 nm 与 645 nm 处进行比色测定,获得叶绿素浓度后换算成单位面积内叶绿素含量。其他 220 个样本使用 SPAD-502 便携式叶绿素仪进行叶绿素测定,测定位置为对应光谱的测定位置。

1.4 数据处理

利用光谱处理软件 View Spec Pro 6.15 将采集的光谱数据进行平均处理,然后利用 Matlab R2012b 编程对光谱数据进行处理。

1.4.1 最佳指数-相关系数法的计算方法

利用商权法将最佳指数与最大相关系数同时作为评价因子,当获得两者最大值时的波段即为所选取特征波段。计算步骤如下:

(1) 最佳指数法计算最佳组合波段数一般选取 3 个。其计算公式为

$$I_{OIF} = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i}{\sum_{r=1}^3 |R_{ij}|} \quad (1)$$

式中 S_i ——第 i 波段的标准差

R_{ij} —— i, j 两波段的相关系数

r —— i, j 两波段的组合数

(2) 3 波段最大相关系数的计算公式为

$$R_{std} = R - r_{std} \quad (2)$$

式中 R_{std} ——3 波段相关系数同时最大判断指标

R ——3 波段各自与叶绿素相关系数的总和

r_{std} ——3 波段各自与叶绿素相关系数的标准差

(3) 最佳指数与相关系数的商权法联合

设被测评系统中对象集 $F = (F_1, F_2, \dots, F_n)$, 指标集 $C = (C_1, C_2, \dots, C_m)$, 得到原始评价信息矩阵

$$R = (r_{ab})_{m \times n} \quad (3)$$

式中 r_{ab} ——第 b 指标下第 a 项目的评价值

由于系统中各因素的量纲不一定相同,数值有时相差悬殊,从而造成数据的比较难度增大。因此,需要对原始数据进行优化指标处理以及归一化处理。其方法如下:

正指标数据优化处理公式为

$$r'_{ab} = \frac{r_{ab} - \min(r_{ab})}{\max(r_{ab}) - \min(r_{ab})} \quad (4)$$

负指标数据优化处理公式为

$$r'_{ab} = \frac{\max(r_{ab}) - r_{ab}}{\max(r_{ab}) - \min(r_{ab})} \quad (5)$$

式中 r'_{ab} ——第 b 指标下第 a 项目的优化指标值

$\max(r_{ab}), \min(r_{ab})$ —— r_{ab} 的最大、最小值

第 b 指标下第 a 项目指标值的比重值(P_{ab}) 计算公式为

$$P_{ab} = r'_{ab} / \sum_{a=1}^n r'_{ab} \quad (6)$$

商权法计算的第 b 指标的商值

$$H_b = -k \sum_{a=1}^n P_{ab} \ln P_{ab} \quad (7)$$

其中 $k = \frac{1}{\ln n}$

当 $P_{ab} = 0$ 时, $P_{ab} \ln P_{ab} = 0$ 。

第 b 指标的商权计算公式为

$$w_b = \frac{1 - H_b}{m - \sum_{b=1}^m H_b} \quad (8)$$

综合权重计算公式为

$$w'_b = \frac{\lambda_b w_b}{\sum_{b=1}^m \lambda_b w_b} \quad (9)$$

式中 λ_b ——主观权重 w'_b ——综合权重

最佳指数-相关系数法(OIFC)提取的总指标引用 Zadeh 的定义,将可行方案集映射到“距离”空间,并将 $L_p(w'_b, b)$ 作为综合评价的总指标,即

$$L_{pb}(w'_b, b) = \left[\sum_{b=1}^n (\lambda_b r'_{ab})^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (10)$$

一般情况下,取 $p = 1$ (L_1 称为海明距离,只注重偏差的总和),即

$$L_{1b}(w'_b, b) = \sum_{b=1}^n \lambda_b r'_{ab} \quad (11)$$

归一化处理公式为

$$L_1 = \frac{L_{1b}}{\sum_{b=1}^n L_{1b}} \quad (12)$$

上述公式中 $a = 1, 2, \dots, m; b = 1, 2, \dots, n$ 。 L_1 越大则其综合评价值越高,这样就可以按照 L_1 从小到

大的顺序排序,从而获得测评结果。本研究中 L_1 即为最优指数-相关系数选择指标。

1.4.2 一阶光谱导数的计算方法

由于光谱仪采集的是离散数据,因此可以对原始光谱数据进行一阶微分计算^[23],即

$$R'_i = \frac{R_{i+1} - R_{i-1}}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}} = \frac{R_{i+1} - R_{i-1}}{2\Delta\lambda} \quad (13)$$

式中 R_i ——第 i 个通道波长的光谱反射率

R'_i —— R_i 的一阶微分

λ_i ——第 i 个通道的波长

1.4.3 叶面叶绿素指数的计算方法

叶面叶绿素指数反映叶面叶绿素含量^[11],公式为

$$I_{LCl} = \frac{R_{850} - R_{710}}{R_{850} + R_{680}} \quad (14)$$

式中 I_{LCl} ——叶面叶绿素指数

R_{850} 、 R_{710} 、 R_{680} ——波长为 850、710、680 nm 的光谱反射率

叶面叶绿素指数对叶绿素的含量很敏感,但对叶面散射和叶面内部结构变化不敏感,而本试验采用植被探头与叶片夹结合的方法,散射基本相同,同一品种的杨树叶片结构也相同。

1.4.4 归一化植被指数的计算方法

归一化植被指数计算公式^[24]

$$I_{NDVI} = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red}} \quad (15)$$

式中 I_{NDVI} ——归一化植被指数

R_{NIR} ——反射光谱中近红外部分反射率

R_{red} ——反射光谱中红光部分反射率

本研究中通过提取叶绿素含量与归一化植被指数值最大相关性波段的方法选取归一化植被指数的最佳波段。

1.5 数据分析

将提取的光谱波段数据通过 Matlab R2012b 编程,并与叶绿素含量进行相关分析,以及通过 Matlab R2012b 编程进行建立模型。将 90 个 SPAD 值与化学法测定叶绿素测定样品数据导入 Origin 8.0 软件,通过拟合探讨 SPAD 值与化学法测得叶绿素含量之间的关系;其他 220 个样品分为 2 组,其中选取 110 个样品数据用以建立估算模型,剩余 110 个样品数据用以检验模型。通过模型估算值与实测值拟合检验,最终筛选出精度最高的估测模型。

为检验实测值与估测值之间的拟合效果,计算拟合方程斜率及其拟合决定系数 (R^2)、均方根误差、相对误差。

2 结果与分析

2.1 SPAD 值与叶绿素含量关系及其高光谱反射曲线

为了验证实测杨树叶片 SPAD 值与化学法测定的叶绿素含量之间的关系,利用 90 组数据对杨树叶片 SPAD 值与叶绿素含量进行拟合。由图 1 可见,杨树化学法测定的叶绿素含量与其对应的 SPAD 值之间具有显著的幂函数关系, R^2 可达 0.9023。因此,SPAD 值可以用来衡量杨树叶片叶绿素含量。这与相关 SPAD 值可以作为植物叶片叶绿素含量衡量指标的研究结果一致^[7, 17, 25]。

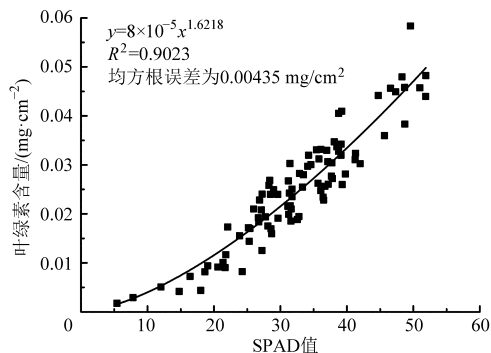


图 1 SPAD 值与化学法测定的叶绿素含量之间的关系

Fig. 1 Relationship between values of SPAD and chlorophyll content measured by chemical method

图 2 为杨树叶片 SPAD 值的高光谱反射曲线。为了能清晰地分辨不同 SPAD 值区间光谱差异,通过对异常数据进行剔除,并利用小波分析的方法对受到仪器自身因素干扰的 350~400 nm 区间部分数据进行降噪处理后,利用每组对应 SPAD 值区间内的所有高光谱数据平均值表示该组的高光谱反射率。由于小波分析在降噪的同时会将部分有用信息消除,因此,在本研究中的其他数据处理没有采用该方法。从图 2 中可见,在 350~400 nm 波段内由于叶绿素吸收较大,造成反射率小于 15%,但该波段内呈现随 SPAD 值增大而反射率随之减小的趋势;在 500~680 nm、750~1 300 nm 与 2 000~2 500 nm 波段内光谱反射率随 SPAD 值的不同其反射率的变化差值较大,其中 500~680 nm 与 2 000~2 500 nm 波段内光谱反射率随 SPAD 值的增大而减小,但反射率在 750~1 300 nm 波段的变化趋势与前者相反。在 680~750 nm 波段为植物光谱“红边”位置的区间,在该光谱区间内光谱反射率变化大,但不同 SPAD 值的光谱反射率差异较小。可见,不同的 SPAD 值光谱反射率在特定的光谱波段内具有一定的差异。

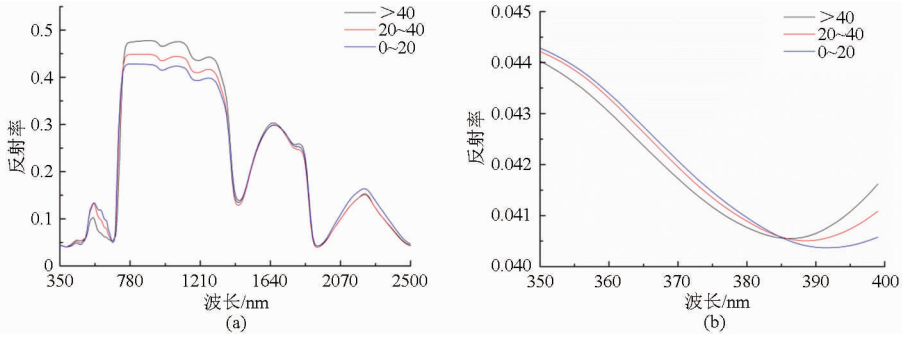


图2 不同叶片 SPAD 值的光谱反射曲线

Fig. 2 Spectral reflectance of different leaf SPAD values

(a) 不同叶片 SPAD 值在 350 ~ 2 500 nm 光谱反射曲线 (b) 不同叶片 SPAD 值在 350 ~ 400 nm 光谱反射曲线

2.2 杨树叶绿素特征波长选取

2.2.1 最佳指数-相关系数法的叶绿素特征波段选取

通过最佳指数-相关系数法(OIFC)对现有波段进行计算,从图3与图4可见,评价 L_1 值最大的3个波段范围分别是:第1波段为350~365 nm,第2波段为705~715 nm,第3波段为710~1385 nm。由最大 L_1 值决定杨树叶绿素3个特征波长为:350、715、1150 nm,其分别位于近紫外、红光与近红外波段上。

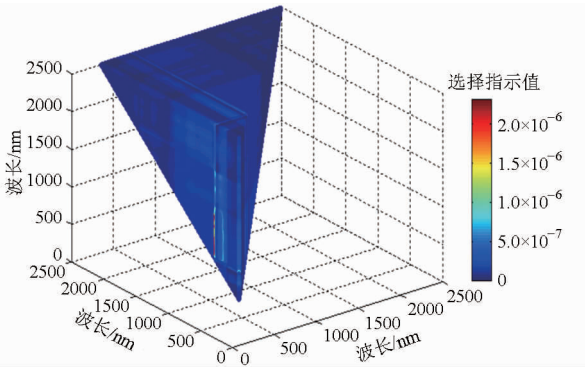


图3 最佳指数-相关系数选择指标(L_1)分布图

Fig. 3 Distribution of OIFC selection index (L_1) value

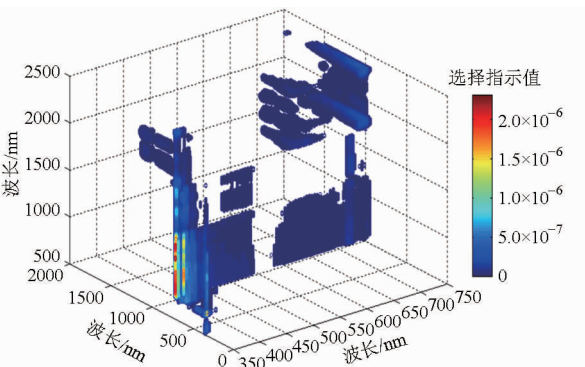


图4 最佳指数-相关系数选择指标(L_1)最大值分布图

Fig. 4 Distribution of maximum OIFC selection index (L_1) value

研究证明叶绿素含量的波段主要集中于可见光与近红外波段,但叶绿素在少量中、近紫外线的条件下对其具有较强的吸收^[26-27],从图2中可以看出,

在近紫外波段不同叶绿素含量其反射率尽管差异较小,但随着叶绿素含量的增大光谱反射率呈减小趋势。因此,近紫外波段在叶绿素含量的估算中也具有一定的贡献。

2.2.2 归一化植被指数与一阶光谱导数的叶绿素特征波段选取

(1) 归一化植被指数的波段选取

将所有波段进行两两组合的归一化计算后,与叶片 SPAD 值进行相关性分析。由于相关系数存在正负值,对等高线图的判读会造成一些干扰,因此,为能更加方便直观地进行比较,利用相关系数的平方值表示两波段归一化值与叶片 SPAD 值的相关性。图5可见,相关系数平方值(r^2)最大的波段位于700~1400 nm。本研究选用 r^2 最大的中心波长为705 nm与953 nm的组合作为杨树叶片 SPAD 值的归一化植被指数计算波长。所选取的两波长分别位于红光与近红外区域,符合归一化植被指数计算要求的波段范围内。

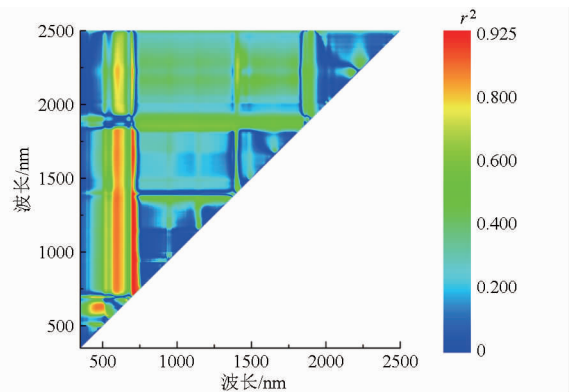


图5 所有 NDVI 波段组合与杨树叶片 SPAD 值的相关系数平方

Fig. 5 Correlation coefficient square of all combinations of wavelength used for linear regression analysis of NDVI against SPAD values of poplar

(2) 一阶光谱导数的波长选取

由图6中的杨树叶片一阶光谱导数曲线图可

见,一阶光谱导数中有 4 个峰值,分别位于 510 ~ 572 nm、685 ~ 746 nm、1 356 ~ 1 522 nm 以及 1 844 ~ 1 904 nm 波段;其中最大值 0.010 3 位于 702 nm。从图 6 中一阶光谱导数与杨树叶片 SPAD 值的相关系数可见,相关系数大于 0.5 的所有波长位于 491 ~ 563 nm、608 ~ 757 nm、1 261 ~ 1 473 nm 以及 1 812 ~ 2 496 nm,位于波长 721 nm 处的相关性最大,为 0.932 0。

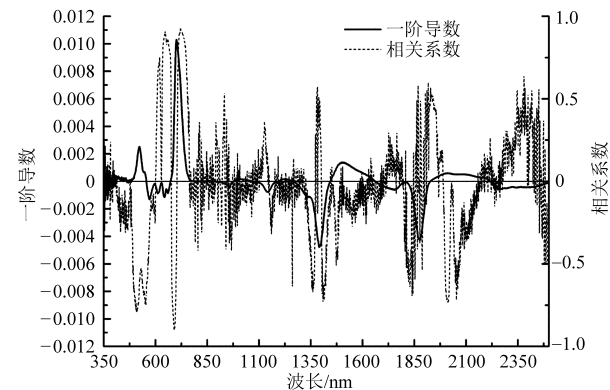


图 6 一阶光谱导数曲线以及一阶光谱导数与 SPAD 值之间的相关系数

Fig. 6 Curves of the first derivative spectral data and correlation coefficients between the first derivative spectral data and SPAD values

相关研究证明叶绿素的光谱吸收波段主要体现在可见光波段^[28]。图 6 中可见光区域一阶光谱导数与叶片 SPAD 值的相关系数有 3 个最大的峰值,且相关系数的绝对值都大于 0.9,因此,选用一阶光谱导数中在可见光范围内相关性最大的 3 个中心波长作为杨树叶片 SPAD 值建模的特征波长,分别为:647 nm (相关系数 0.908 2)、691 nm (相关系数 -0.901 1)、721 nm (相关系数 0.932 0)。

表 1 回归模型与决定系数

Tab. 1 Regression models and their accuracy parameters ($n = 110$)

变量	估测模型	R^2	F
R_{350} 、 R_{715} 、 R_{1150} (OIFC 法)	$C_{chl} = -32.1868R_{350} - 159.639R_{715} + 121.6395R_{1150} + 28.5926$	0.934 5 **	504.249 6
I_{NDVI}	$C_{chl} = 70.1063I_{NDVI} + 4.4055$	0.921 8 **	1 272.637 8
I_{LCI}	$C_{chl} = 63.4615I_{LCI} - 1.1375$	0.884 9 **	830.042 4
R'_{647} 、 R'_{691} 、 R'_{721} (一阶导数)	$C_{chl} = 2.544.3063R'_{647} - 407.6445R'_{691} + 2.498.7997R'_{721} + 17.5199$	0.894 7 **	454.345 5

注: ** 表示差异达极显著水平 ($P < 0.01$),下同。

表 2 模型拟合精度比较

Tab. 2 Fitting accuracy parameters of model checking ($n = 110$)

变量	实测值与估测值拟合方程	检验指标			
		斜率	R^2	均方根误差/($mg \cdot cm^{-2}$)	相对误差/%
R_{350} 、 R_{715} 、 R_{1150} (OIFC 法)	$y = 1.0266x - 1.0445$	1.026 6	0.944 5 **	2.553 8	7.721 1
I_{NDVI}	$y = 1.0796x - 2.6008$	1.079 6	0.939 2 **	2.762 9	7.164 1
I_{LCI}	$y = 1.0945x - 2.9932$	1.904 5	0.930 7 **	2.971 1	7.397 7
R'_{647} 、 R'_{691} 、 R'_{721} (一阶导数)	$y = 1.1400x - 4.2896$	1.143 0	0.873 3 **	4.042 5	9.203 3

2.3 叶片叶绿素含量估算模型的建立

利用 Matlab R2012b 编程,将 OIFC 法提取的波段高光谱数据为自变量对叶片 SPAD 值进行偏最小二乘法建模,并与其他方法建立的叶片 SPAD 值回归模型进行比较。结果如表 1 所示。表中 C_{chl} 表示叶绿素含量 (mg/cm^2)。

从表 1 中可以看出,由 OIFC 法提取的 3 个波长 (350、715、1 150 nm) 光谱数据和归一化植被指数 (705、953 nm) 分别构建的叶绿素含量模型决定系数 R^2 最大,且同时达到 0.9 以上,其中由 OIFC 法选取波段光谱数据所建立的模型决定系数最高,达到 0.934 5,由归一化植被指数构建的模型决定系数次之,为 0.921 8。而叶面叶绿素指数与一阶光谱导数构建的模型决定系数较前面两者低,分别为 0.884 9 和 0.894 7。可见,使用 OIFC 法提取的 3 个波段光谱数据建立的叶片 SPAD 值估算模型具有最高的拟合优度。

2.4 叶片叶绿素含量估算模型的验证

为了检验估算模型的可靠性,利用 110 个检验数据的 SPAD 值及其对应的光谱反射率,对所构建的 4 种模型进行测试与检验,筛选出检验精度高的模型,结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,以上 4 种模型中,除一阶光谱导数 R'_{647} 、 R'_{691} 、 R'_{721} 为变量的估算模型的估算值与实测值的拟合方程决定系数 R^2 小于 0.9 外,其他模型的决定系数均高于 0.9;OIFC 法提取的 3 个波长 (350、715、1 150 nm) 光谱模型估算值与实测值拟合的精度最高,决定系数 R^2 为 0.944 5,相对误差为 7.721 1%,均方根误差为 2.553 8 mg/cm^2 ;归一化植被指数 (705、953 nm) 模型次之,决定系数 R^2 为

0.939 2, 相对误差为 7.164 1%, 均方根误差为 2.762 9 mg/cm²。叶面叶绿素指数建立的模型相对于 OIFC 法提取波段的光谱数据模型与归一化植被指数模型的估算值与实测值的拟合方程决定系数较低,但其决定系数 R^2 也能高达 0.930 7, 相对误差为 7.397 7%, 均方根误差为 2.971 1 mg/cm²。

虽然由上述方法所构建的所有模型精度都比较可观,但从模型估算值与实测值的拟合方程中可以看出,由 OIFC 法提取的 3 个波段模型估算与实测值拟合方程的斜率更接近于 1, 截距最小,更接近于实测值。因此,由 OIFC 法提取的 3 波段模型为杨树叶绿素含量的最优估算模型。

3 讨论

对比 3 种构建模型参数波段的提取方法:OIFC 法提取波段的叶绿素含量估算模型具有较高的估算精度。而另外 3 种方法所构建的模型精度明显低于 OIFC 法模型的估算精度。这是因为 OIFC 法是基于包含信息最多,且保证提取波段组合与叶绿素相关性最高。OIFC 法提取杨树叶绿素光谱波段包括近紫外、红光与近红外波段,而归一化植被指数和叶面叶绿素指数的光谱波段主要集中于红光与近红外波段,相关研究显示:叶绿素对近紫外线波段范围内的光具有较强的吸收,并指出该波段对叶绿素含量估算具有很大潜力^[26-27]。本研究中发现叶面叶绿素指数也表现出相对较好的预测精度($R^2 = 0.930 7$),与梁爽等^[15]利用叶面叶绿素指数对苹果叶片叶绿素含量进行估算获得的较好估算精度($R^2 = 0.845$)

相一致,但是相比本文中基于杨树叶绿素含量所选特征波段构建的模型预测精度,叶面叶绿素指数构建的模型精度相对较低。有关高光谱指数应用的研究显示:物种叶片结构等因素会导致植被指数的适用范围具有一定限制^[29-30]。一阶导数可以消除高光谱部分背景干扰,构建较高精度的参数估算模型^[31-32],然而在本研究中利用最大相关系数法提取的基于一阶导数的最佳波段所构建的模型,其预测精度相比其他方法构建模型的预测精度相对较低,这可能与选取特征波段的方法有关。可见,更加适合的特征波段提取方法对植被参数估算模型精度的也具有很大影响。

4 结束语

利用化学法测定的 107 号杨树叶绿素含量与其对应的 SPAD 值之间具有显著的幂函数关系, R^2 可达 0.902 3。说明 SPAD 值可作为 107 号杨树叶绿素含量的衡量指标。利用 OIFC 法可提取 107 号杨树叶绿素特征的 3 个波段最佳组合,其中心波长分别为 350、715、1 150 nm;利用该 3 波段组合的高光谱数据所建立的 107 号杨树叶片叶绿素含量模型,对比基于归一化植被指数、叶面叶绿素指数以及一阶光谱导数法所建立的 107 号杨树叶绿素估算模型,具有较高的模拟精度。所筛选出的模型能够为遥感估测杨树叶片冠层叶绿素含量提供参考依据,为区域杨树生产力估算奠定了基础,对杨树人工林的经营管理具有重要的指导与参考意义。

参 考 文 献

- Collins W. Remote sensing of crop type and maturity[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1978, 44(1): 43-55.
- Hörtensteiner S, Bernhard K. Chlorophyll breakdown in higher plants[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics, 2011, 1807(8): 977-988.
- Datt B. A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants: tests using eucalyptus leaves[J]. Journal of Plant Physiology, 1999, 154(1): 30-36.
- 赵春江. 农业遥感研究与应用进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 277-293.
Zhao Chunjiang. Advances of research and application in remote sensing for agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 277-293. (in Chinese)
- 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感的多学科应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 89.
- 吉海彦, 王鹏新, 严泰来. 冬小麦活体叶片叶绿素和水分含量与反射光谱的模型建立[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(3): 514-516.
Ji Haiyan, Wang Pengxin, Yan Tailai. Estimations of chlorophyll and water contents in live leaf of winter wheat with reflectance spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(3): 514-516. (in Chinese)
- Minolta C. Manual for chlorophyll meter SPAD-502[M]. Osaka: Minolta Radiometric Instruments Divisions, 1989: 18.
- 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 247-260.
Shi Zhou, Liang Zongzheng, Yang Yuanyuan, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 247-260. (in Chinese)
- 朱西存, 赵庚星, 姜远茂, 等. 基于高光谱红边参数的不同物候期苹果叶片的 SPAD 值估测[J]. 红外, 2012, 32(12): 31-38.

- 10 苏理宏,李小文,梁顺林,等. 典型地物波谱库的数据体系与波谱模拟[J]. 地球信息科学, 2002, 4(4): 7-15.
- 11 Daughtry C, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(2): 229-239.
- 12 Wu C, Niu Z, Tang Q, et al. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: modeling and validation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(8): 1230-1241.
- 13 吴长山,童庆禧,郑兰芬,等. 水稻、玉米的光谱数据与叶绿素的相关分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 8(1): 31-37.
- Wu Changshan, Tong Qingxi, Zheng Lanfen, et al. Correlation analysis between spectral data and chlorophyll of rice and maize [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2005, 8(1): 31-37. (in Chinese)
- 14 谭昌伟,王纪华,郭文善,等. 利用遥感红边参数估算夏玉米农学参数的可行性分析[J]. 福建农林大学学报:自然科学版, 2006, 35(2): 123-128.
- Tan Changwei, Wang Jihua, Guo Wenshan, et al. Agronomy parameters of summer maize diagnosed by red edge parameters obtainable from remotely sensing data[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition*, 2006, 35(2): 123-128. (in Chinese)
- 15 吴见,彭道黎. 高光谱遥感林业信息提取技术研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(9): 2305-2312.
- Wu Jian, Peng Daoli. Advances in researches on hyperspectral remote sensing forestry information extracting technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(9): 2305-2312. (in Chinese)
- 16 Blackburn G A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(4): 657-675.
- 17 梁爽,赵庚星,朱西存. 苹果树叶片叶绿素含量高光谱估测模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(5): 1367-1370.
- Liang Shuang, Zhao Gengxing, Zhu Xicun. Hyperspectral estimation model of chlorophyll content in apple leaves [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(5): 1367-1370. (in Chinese)
- 18 姚付启,张振华,杨润亚,等. 基于红边参数的植被叶绿素含量高光谱估算模型[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 123-129.
- Yao Fuqi, Zhang Zhenhua, Yang Runya, et al. Hyperspectral models for estimating vegetation chlorophyll content based on red edge parameter [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(2): 123-129. (in Chinese)
- 19 Riedell W E, Blackmer T M. Leaf reflectance spectra of cereal aphid-damaged wheat [J]. *Crop Science*, 1999, 39(6): 1835-1840.
- 20 Liu Huiqing, Huete A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 457-465.
- 21 程志庆,张劲松,郑宁. 一种基于最佳指数-相关系数法的高光谱波段提取方法:CN, 201410310957.6[P]. 2014-10-29.
- Cheng Zhiqing, Zhang Jingsong, Zheng Ning. A method for the extraction of high spectral bands based on optimum index factor and correlation coefficient: CN, 201410310957.6[P]. 2014-10-29. (in Chinese)
- 22 薛香,吴玉娥. 小麦叶片叶绿素含量测定及其与 SPAD 值的关系[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(11): 2701-2702.
- 23 Wang L, Qu J J, Hao X, et al. Estimating dry matter content from spectral reflectance for green leaves of different species [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(22): 7097-7109.
- 24 鞠昌华,田永超,朱艳,等. 小麦叠加叶片的叶绿素含量光谱反演研究[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(6): 1068-1074.
- Ju Changhua, Tian Yongchao, Zhu Yan, et al. Spectral inverse study of stacked leaf chlorophyll concentration in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28(6): 1068-1074. (in Chinese)
- 25 Uddling J, Gelang-Alfredsson J, Piikki K, et al. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings [J]. *Photosynthesis Research*, 2007, 91(1): 37-46.
- 26 范雅,蔡红星,李霜,等. 叶绿素的紫外吸收光谱[J]. 光散射学报, 2011, 23(1): 80-82.
- Fan Ya, Cai Hongxing, Li Shuang, et al. The ultraviolet absorption spectra of the chlorophyll [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2011, 23(1): 80-82. (in Chinese)
- 27 范雅,蔡红星,李霜,等. 叶绿素紫外吸收特性的分析研究[J]. 光散射学报, 2009, 20(4): 356-358.
- Fan Ya, Cai Hongxing, Li Shuang, et al. The ultraviolet absorption characteristics analysis and research of the chlorophyll [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2009, 20(4): 356-358. (in Chinese)
- 28 潘瑞焱,王小青,李娘辉. 植物生理[M]. 北京:高等教育出版社, 2004: 62.
- 29 Main R, Cho M A, Mathieu R, et al. An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(6): 751-761.
- 30 Haboudane D, Miller J R, Tremblay N, et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2): 416-426.
- 31 Tsai F, Philpot W. Derivative analysis of hyperspectral data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1): 41-51.
- 32 Xue L, Yang L. Deriving leaf chlorophyll content of green-leafy vegetables from hyperspectral reflectance [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(1): 97-106.