

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2022. 04. 002

基于高光谱的内蒙古大兴安岭白桦 叶片叶绿素含量估算*

王冰, 何金有, 张鹏杰, 杨晓雨

(内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: 为构建内蒙古大兴安岭的白桦叶片叶绿素含量的高光谱估算模型, 通过测定白桦叶片的叶绿素含量和对应光谱曲线, 在分析叶片反射光谱特征及其与叶绿素含量关系的基础上, 筛选适合叶绿素估算的特征参数, 运用一元线性和非线性回归模型建立白桦叶片叶绿素含量的高光谱遥感估算模型。结果显示: (1) 火烧迹地的白桦叶绿素含量总体较对照样地低, 且变异程度大。(2) 白桦叶片的光谱曲线体现了绿色植物特有的光谱特征, 呈现出明显的“绿峰”和“红谷”现象; 火烧迹地的光谱反射率总体较对照高, 火烧迹地的光谱较对照呈现出绿峰“红移”和红边“蓝移”现象。(3) 450~1 075 nm 范围的光谱反射率与白桦叶绿素含量均呈负相关关系, 708 nm 处相关系数绝对值最大 ($r=-0.788$); 除黄边幅值 D_y 、黄边位置 λ_y 、红边面积与蓝边面积的差值 (SDr-SDb) 外, 其他光谱特征参数与白桦叶片的叶绿素含量均具有显著相关性。(4) 以 708 nm 反射率为自变量建立的白桦叶片叶绿素含量一元线性回归模型最佳, 其表达式为 $y=4.14-8.94x$ ($R^2=0.622$)。基于叶片光谱反射率建立的一元线性回归模型, 可以很好地预测白桦叶片叶绿素含量。

关键词: 白桦; 叶绿素含量; 光谱特征; 相关系数

中图分类号: S 718.4; S 792.153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8246 (2022) 04-0011-08

Leaf Chlorophyll Content Estimation of *Betula platyphylla* in Daxing'anling Based on Hyperspectral

WANG Bing, HE Jin-you, ZHANG Peng-jie, YANG Xiao-yu

(Forestry College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010019, P. R. China)

Abstract: The Hyperspectral estimation model of chlorophyll content of *Betula platyphylla* leaves in Daxing'anling, Inner Mongolia was established. By measuring the chlorophyll content and corresponding spectral curve of *B. platyphylla* leaves, and based on the analysis of the characteristics of reflectance spectrum and its relationship with chlorophyll content, the characteristic parameters suitable for chlorophyll estimation were selected, and a hyperspectral remote sensing estimation model of chlorophyll content in leaves was established by using univariate linear and nonlinear regression models. The results showed: (1) The chlorophyll content of *B. platyphylla* in the burned area was lower than that in the control area, and the degree of variation was large. (2) The spectral curves of *B. platyphylla* leaves reflected the unique spectral characteristics of green plants, showing an obvious "green peak" and "red valley" phenomenon. The spectral reflectance of the burned area was generally higher than that of the control area, and the spectrum of the burned area showed the phenomenon of green peak "red shifting" of and red edge "blue shifting". (3) The spectral reflectance in the range of 450~1 075 nm had a negative correlation with the

* 收稿日期: 2022-01-24

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目 (2018MS03049), 内蒙古自治区科技计划项目 (2020GG0067), “十三五”国家重点研发计划项目 (2017YFC0504003)。

第一作者简介: 王冰 (1981—), 女, 副教授, 博士, 主要从事林业遥感研究。E-mail: wbingbing2008@126.com

chlorophyll content of *B. platyphylla*, and the absolute value of the correlation coefficient at 708 nm was the highest ($r = -0.788$); Except for yellow edge amplitude D_y , yellow edge position λ_y and the difference between red edge area and blue edge area (SDr-SDb), other spectral characteristic parameters were significantly correlated with the chlorophyll content of *B. platyphylla* leaves. (4) The linear regression model of chlorophyll content in *B. platyphylla* leaves established with 708 nm reflectance as independent variable was the best, and its expression was $y = 4.14 - 8.94x$ ($R^2 = 0.622$). The univariate linear regression model based on leaf spectral reflectance can well predict the chlorophyll content of *B. platyphylla* leaves.

Key words: *Betula platyphylla*; chlorophyll content; spectral characteristics; correlation coefficient

叶绿素作为植物的主要生化参数,不仅可以评价植物的光合能力,而且是监测植物营养胁迫、发育阶段和病虫害的重要指标,对森林生产力的估计、全球碳循环研究等也有重要意义^[1-2]。在森林经营中,准确了解树木生长环境及叶片健康水平对于实现林木乃至整个林分的合理经营至关重要^[3]。

叶绿素含量的测定通常采用分光光度法,即依据叶绿素不溶于水而易溶于丙酮等有机溶剂而来提取叶绿素,按照提取方法又可分为研磨法和浸提法,已应用在多种植物的叶绿素研究中^[4-6]。植物叶片有机分子结构中的化学键在一定光辐射水平下发生振动,引起相应波长的光谱反射和吸收,展现出不同的光谱反射率;通过分析植物化学组分敏感光谱的反射率与该组分含量或浓度的相关关系,可以对植物化学组分信息作出诊断^[7-9]。受叶绿素吸收作用的影响,植物叶片在可见光、近红外波段存在明显的吸收谷和反射峰^[10],可以实现植被叶绿素含量的估测;而高光谱遥感因其光谱分辨率高且连续,被广泛应用在植物叶绿素的估算模型构建中。(1)“三边”即蓝边(490~530 nm)、黄边(560~640 nm)和红边(680~760 nm)，“三边”参数可以很好地反映植被的光谱特征,对叶绿素、含水量等植被生化参数的变化也较敏感。“红边”是植物光谱的最明显特征,植物的“红边效应”,即植物光谱随叶绿素含量高低、生长活力旺盛等状况而发生向红外或蓝光方向移动的现象^[11-12],已被应用于植被长势的监测。如:袁小康等^[13]研究发现夏玉米(*Zea mays*)叶片叶绿素含量越低,冠层光谱反射率越高,绿峰位置“红移”,而红边位置“蓝移”;陈兵等^[14]建立了黄萎病棉叶叶绿素含量的光谱红边参数诊断模型;冯伟等^[15]建立了白粉病胁迫下小麦(*Triticum aestivum*)冠层叶绿素密度的高光谱估算模型;史冰全等^[16]证明应用“三边”参数估算植被叶绿素的方法是可行的。(2)在高光谱遥感监测中,利用植被指数估测植

被状况也多有研究^[17]。如:纪童等^[18]基于与叶绿素相关性较高的高光谱波段植被指数(NDVI₇₀₅、NDVI₆₇₀、CI和EVI等),构建了植被指数反演叶绿素含量模型;曹英丽等^[19]研究发现采用最优子集选择算法筛选出的植被指数特征组合的水稻(*Oryza sativa*)叶绿素回归模型反演精度最高。以上关于叶绿素高光谱反演研究中,以农作物居多,而针对北方林木的研究较少。

在大兴安岭地区,白桦(*Betula platyphylla*)占该林区面积的39.2%,是兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林常见的伴生树种。特别在火烧迹地中,白桦作为先锋树种,表现出更新能力和竞争适应性强的特点,可迅速成林,在大兴安岭地区发挥着重要的生态功能。本研究以内蒙古大兴安岭的白桦为研究对象,通过测定其叶片的叶绿素含量和对应光谱,在分析叶片反射光谱与叶绿素含量间关系的基础上,筛选适合叶绿素高光谱反演的特征参数,建立白桦叶片叶绿素含量的高光谱遥感估算模型,以期对白桦的生长发育和健康胁迫研究及经营管理提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古根河市境内,属寒温带湿润气候,寒冷湿润,冬长夏短,春秋相连,年平均气温-5.3℃,境内遍布永冻层。森林资源丰富,主要树种有兴安落叶松、白桦和山杨(*Populus davidiana*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

通过收集资料和现场踏查,于2019年8月,在根河林业局上央格气林场的2003年火烧迹地(51°05′26.909″~51°05′29.444″E、121°31′52.708″~121°31′50.620″N)和未过火区(51°04′59.015″~51°05′00.346″E、121°31′57.379″~121°31′53.620″

N) 分别设置1块30 m×80 m的样地, 样地内以10 m×20 m划分网格, 用于调查和取样。

1.2.2 叶片收集与测定

在样地各网格内, 选取一棵长势状态良好且靠近中心的白桦用于叶片收集, 共取样18棵。将白桦树冠分为上、下2层, 使用高枝剪采集各层叶片样本, 每层取5~10片, 放入保温箱中(箱内温度保持在0℃), 带回实验室, 用于叶片光谱和叶绿素含量的测定。

(1) 叶片光谱测定 叶片光谱测定采用美国ASD HandHeld 2手持式地物光谱仪, 每个叶片重复测定3次, 最终得到该样本的光谱曲线。

(2) 叶片叶绿素含量测定 采用乙醇-分光光度法, 根据叶绿体色素提取液对可见光谱的吸收特性获取叶绿素含量。在每组样本中, 将采集完光谱的新鲜叶片用蒸馏水洗涤干净后, 去除叶脉, 剪碎后相互混合均匀; 称取0.4 g, 置于50 mL由无水乙醇、蒸馏水两种溶液按照9:2的比例配置成的混合溶液中, 在实验室遮光环境下静置24 h, 直至样品完全发白; 采用分光光度仪测量645 nm和663 nm波段处的吸光度值, 再根据公式计算叶片叶绿素a、叶绿素b含量及叶绿素总量。

$$Chla \text{ (mg/L)} = 9.784OD_{663} - 0.990OD_{645}$$

$$Chlb \text{ (mg/L)} = 21.426OD_{645} - 4.650OD_{663}$$

$$Chl \text{ (mg/L)} = 5.134OD_{663} + 20.436OD_{645}$$

式中: $Chla$ 、 $Chlb$ 分别为叶绿素a、b含量, OD_{645} 、 OD_{663} 分别为叶绿体色素在645 nm和663 nm处的吸光度。

1.2.3 叶片光谱处理

(1) 光谱数据预处理 为减少数据采集过程中产生的误差, 利用光谱数据处理软件View Spec Pro 分别对火烧迹地和对照样地上白桦叶片的光谱曲线进行均值处理, 并将处理后的结果作为样地内白桦叶片的原始光谱数据。同时, 为了提高信噪比, 保留400~1 075 nm的波段数据进行分析。

(2) 光谱数据去包络线处理 去包络线是一种能有效增强吸收特征的光谱分析方法, 可以有效突出光谱曲线的吸收和反射特征, 并将反射率归一化到一致的光谱背景上, 有利于光谱曲线特征波段的提取及特征值的比较^[20]。用ENVI软件对原始光谱数据进行平滑和去包络线处理, 获取去包络线后的光谱数据, 并选取552~700 nm波段范围内的光谱数据进行吸收深度和归一化吸收深度的计算, 其计算公式如下。

$$BD = 1 - R'$$

$$NBDI = |BD - BD_{max}| / (BD + BD_{max})$$

式中: BD 为光谱吸收深度、 $NBDI$ 为归一化吸收深度, R' 为去包络线后的反射率、 BD_{max} 为光谱吸收的最大深度。

(3) 光谱数据一阶导数处理

用Origin软件对原始光谱进行一阶求导, 提取“红边”“蓝边”和“黄边”三边参数共19个^[16], 见表1。

表1 光谱特征参数列表

Tab. 1 List of spectral characteristic parameters

光谱特征参数	定义
红边幅值 Dr	红光范围(680~760 nm)内最大一阶微分值
红边位置 λ_r	Dr 相对应的波长位置/nm
蓝边幅值 Db	蓝光范围(490~530 nm)内最大一阶微分值
蓝边位置 λ_b	Db 相对应的波长位置/nm
黄边幅值 Dy	黄光范围(560~640 nm)内最大一阶微分值
黄边位置 λ_y	Dy 相对应的波长位置/nm
绿峰幅值 Rg	绿光范围(510~560 nm)内的最大波段反射率
绿峰位置 λ_g	Rg 相对应的波长位置/nm
红谷幅值 Rr	红边范围(640~680 nm)内的最小波段反射率
红谷位置 λ_v	Rr 相对应的波长位置/nm
红边面积 SDr	红边范围内一阶导数光谱包围的面积
蓝边面积 SDb	蓝边范围内一阶导数光谱包围的面积
黄边面积 SDy	黄边范围内一阶导数光谱包围的面积

1.2.4 叶绿素模型构建

以地面实测的叶片叶绿素含量和相应的叶片光谱数据为基础, 利用二者间的统计相关性筛选敏感波段, 并选取与叶绿素含量高度相关的光谱特征参数, 使用一元线性回归模型构建叶片尺度的叶绿素含量估算模型。其中, 80%的数据用于叶片叶绿素估算模型的构建, 剩余20%数据用于模型的精度验证。

(1) 建模参数筛选 自变量的选取采用了皮尔森(Person)相关分析法, 相关系数 r 在0~1之间, 一般认为 r 的绝对值越大, 二者的相关程度越高, 其计算公式^[21]如下。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中: x_i 与 y_i 均为实测值; \bar{x} 与 \bar{y} 均为平均值。

(2) 模型构建 基于筛选出的光谱特征参数,

运用线性与非线性回归模型,在 SPSS 软件中构建白桦叶片叶绿素含量的高光谱遥感估算模型。

一元线性函数 $y=b_0+b_1x$

对数函数 $y=b_0+b_1\ln(x)$

复合函数 $y=b_0(b_1^x)$

增长函数 $y=e^{(b_0+b_1x)}$

指数函数 $y=b_0 \cdot e^{b_1x}$

式中: y 为白桦叶片叶绿素含量值; x 为光谱变量; b_0 、 b_1 为系数。

(3) 模型验证与评价 选用决定系数 R^2 、均方根误差 $RMSE$ 及相对误差 RE 对估计模型进行精度评价。 R^2 越大, $RMSE$ 和 RE 越小,模型的模拟精度越高^[22]。

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - y'_i)^2}{\sum (\bar{y} - y_i)^2}$$

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

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y'_i - y_i}{y_i}$$

式中: n 为样本数; \bar{y} 为平均值; y_i 为实测值, y'_i 为预测值。

2 结果与分析

2.1 白桦叶片叶绿素含量统计特征

对火烧迹地和对照样地的白桦叶片叶绿素含量进行统计,见表2。从表2可以看出,火烧迹地和对照样地的白桦叶片叶绿素含量均值分别为 1.593 和 2.088 mg/g,对照样地的白桦叶绿素含量总体较火烧迹地高,且其变异程度小。

表2 叶绿素含量统计特征

Tab. 2 Statistical characteristics of chlorophyll content

样本	平均值/mg · g ⁻¹	最小值/mg · g ⁻¹	最大值/mg · g ⁻¹	标准差/mg · g ⁻¹	变异系数/%
火烧迹地	1.593	0.924	2.292	0.372	23.36
对照样地	2.088	1.611	2.667	0.354	16.98
总体	1.785	0.924	2.667	0.435	24.39

2.2 白桦叶片光谱特征

2.2.1 原始光谱特征

火烧迹地和对照样地白桦叶片的原始光谱曲线体现了绿色植物特有的光谱特征(图1)。在可见光 499~583 nm 波段范围内光谱曲线呈现缓慢上升后下降的趋势,在绿光波段(550 nm 附近)存在明显的反射峰;在可见光 583~695 nm 波段范围内缓慢下降,在红光波段(680 nm 附近)存在明显的吸收谷,即可见光波段的“绿峰”和“红谷”现象。火烧迹地的白桦叶片各波段反射率总体上较对照样地高,且“绿峰”现象较明显,而两者的“红谷”现象差异不大。各样地白桦叶片反射率随波长的变化趋势较一致,即可见光波段的反射率较低,而在可见光至近红外波段(695~779 nm)范围内呈快速上升,之后形成一个高反射平台。

2.2.2 去包络线后光谱特征

包络线去除后,白桦叶片光谱反射率依然为火烧迹地的较高(图1)。经过包络线去除后的光谱曲线,其吸收、反射特征明显被放大,其中火烧迹地的放大效果较对照样地明显,特别是在“绿峰”处。在可见光 499~583 nm 波段范围内火烧迹地上

白桦叶片的反射率明显比对照样地高;在可见光 583~695 nm 波段范围内的吸收谷更为明显,火烧迹地与对照样地的反射率在吸收谷附近的差异不大;680 nm 后,两条光谱曲线的差异明显缩小,基本趋于一致,均呈现快速上升后的高平台状态。

经去包络线的光谱曲线计算得到光谱吸收深度和归一化吸收深度两个光谱特征参数(表3)。由表3可知,火烧迹地和对照样地的白桦叶片光谱吸收深度差异较小,均在 0.885 左右;但二者的归一化吸收深度差异明显,分别为 0.446 和 0.297,火烧迹地的值较大。

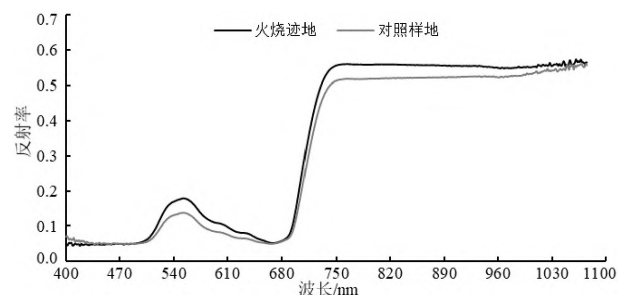


图1 去包络线光谱

Fig. 1 Envelope removal spectrum

表 3 光谱特征参数

Tab.3 Spectral characteristic parameters

光谱特征参数	火烧迹地	对照样地
552~700 nm(BD)	0.887	0.883
552~700 nm(NBDI)	0.446	0.297

2.2.3 一阶导数光谱特征

图 2 为火烧迹地和对照样地白桦叶片一阶微分光谱曲线。由图 2 可知，各样地白桦叶片的一阶微分光谱均体现出明显的“三边”特征。“三边”即蓝边（490~530 nm）、黄边（560~640 nm）和红边（680~760 nm），是植物光谱的典型特征，可以反映植物的生长状况^[30]。基于一阶微分光谱计算得到的光谱特征参数值见表 4。从表 4 可以看出，火烧迹地上白桦叶片的绿峰位置较对照样地出现“红移”现象（即向长波方向移动）、红边位置较对照样地出现“蓝移”现象（即向短波方向移动），且三边的面积均大于对照样地。

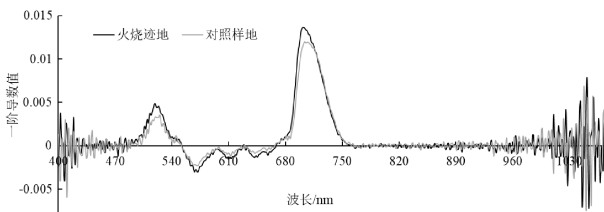


图 2 一阶导数光谱

Fig.2 First derivative spectrum

表 4 光谱特征参数值

Tab.4 Spectral characteristic parameter values

光谱特征参数	火烧迹地	对照样地
Dr	0.014	0.012
λr	703.000	704.000
Db	0.005	0.004
λb	519.000	525.000
Dy	-0.003	-0.002
λy	572.000	572.000
Rg	0.178	0.137
λg	553.000	552.000
Rr	0.050	0.048
λv	669.000	667.000
SDr	0.505	0.463
SDb	0.100	0.072
SDy	0.104	0.070
Rg/Rr	3.568	2.854
SDr/SDb	4.847	6.638
SDr/SDy	5.038	6.407
(SDr-SDb)	0.401	0.393
(SDr-SDb)/(SDr+SDb)	0.658	0.738
(SDr-SDy)/(SDr+SDy)	0.669	0.730

2.3 白桦叶片叶绿素含量与光谱特征参数间的相关分析

计算火烧迹地和对照样地白桦叶片光谱反射率与相应叶绿素含量间的相关系数，绘制相关系数随波长变化的曲线（图 3）。由图 3 可知，在 450~1075 nm 范围内，相关系数均为负值，即该波段范围内的光谱反射率与叶绿素含量均呈负相关关系。其中 708 nm 处的相关系数绝对值最大 ($r = -0.788$)，因此，选择 708 nm 处的反射率作为模型构建的光谱特征参数之一。

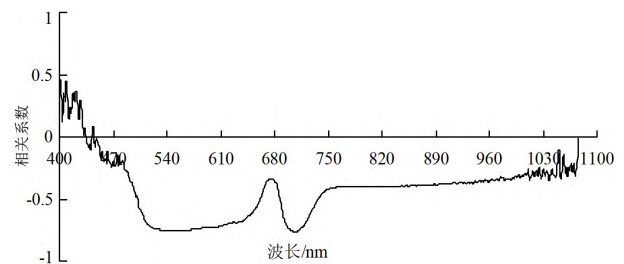


图 3 相关系数随波长变化的曲线

Fig.3 Curve of correlation coefficient with wavelength

各光谱特征参数与白桦叶片叶绿素含量间的相关系数见表 5。

表 5 光谱特征参数与白桦叶绿素含量相关系数

Tab.5 Correlation coefficient between spectral characteristic parameters and chlorophyll content of *B. platyphylla*

光谱特征参数	r
Dr	-0.703 **
λr	0.451 *
Db	-0.573 **
λb	-0.247
Dy	0.366
λy	-0.103
Rg	-0.729 **
λg	-0.388 *
Rr	-0.405 *
λv	-0.659 *
SDy	-0.723 **
SDb	-0.683 **
SDr	-0.520 **
Rg/Rr	-0.460 *
SDr/SDb	0.538 **
SDr/SDy	0.655 **
(SDr-SDb)	-0.189
(SDr-SDb)/(SDr+SDb)	0.558 **
(SDr-SDy)/(SDr+SDy)	0.656 **
552~700 nm(BD)	0.625 **
552~700 nm(NBDI)	-0.627 **
708 nm 反射率	-0.788 **

注：* 表示 0.05 显著性水平，** 表示 0.01 显著性水平。

由表5可知,黄边幅值 D_y 、黄边位置 λ_y 、红边面积与蓝边面积的差值 (SD_r-SD_b) 与白桦叶绿素含量的相关性均不显著 ($P>0.05$); 红边位置 λ_{Dr} 、绿峰位置 λ_g 、红谷幅值 R_r 、红谷位置 λ_v 、绿峰反射率与红谷反射率的比值 (R_g/R_r) 与白桦叶绿素含量呈显著相关 ($P<0.05$); 红边位置 λ_r 、蓝边位置 λ_b 、绿峰幅值 R_g 、黄边面积 SD_r 、蓝边面积 SD_b 、红边面积 SD_y 、红边面积与蓝边面积的比值 SD_r/SD_b 、红边面积与黄边面积的比值 SD_r/SD_y 、红边面积与蓝边面积的归一化值 ($SD_r-SD_b)/(SD_r+SD_b)$ 、红边面积与黄边面积的归一化值 ($SD_r-SD_y)/(SD_r+SD_y)$ 、BD (552~700

nm)、NBDI (552~700 nm) 与白桦叶绿素含量呈极显著相关 ($P<0.01$), 其中 SD_r/SD_b 、 SD_r/SD_y 、 $(SD_r-SD_b)/(SD_r+SD_b)$ 、 $(SD_r-SD_y)/(SD_r+SD_y)$ 与白桦叶绿素含量呈正相关关系, 其余参数与白桦叶绿素含量呈负相关关系。

2.4 白桦叶片叶绿素含量模型构建

2.4.1 叶绿素含量的高光谱模型构建

将树冠上、下两层的叶绿素含量作为模型构建和检验的叶绿素数据, 共得到 35 组叶绿素数据; 将 35 组叶绿素样本按 8:2 的比例进行系统抽样, 统计并计算建模集和检验集的叶绿素含量特征 (表6)。

表6 叶绿素含量统计特征

Tab.6 Statistical characteristics of chlorophyll content

样本	样本数量	平均值/ $mg \cdot g^{-1}$	最小值/ $mg \cdot g^{-1}$	最大值/ $mg \cdot g^{-1}$	标准差/ $mg \cdot g^{-1}$	变异系数/%
全部	35	1.785 4	0.924 4	2.667 3	0.435 4	24.39
建模集	28	1.853 4	1.219 8	2.667 3	0.381 8	20.60
检验集	7	1.577 6	0.924 4	2.650 7	0.586 5	37.18

以相关系数最高为原则, 通过比较, 选择出与叶绿素含量相关性最显著的光谱特征参数作为自变量, 以白桦叶片叶绿素含量作为因变量, 构建白桦叶片叶绿素含量的线性和非线性估算模型。由表5可知, 反射率 (708 nm) 与白桦叶片叶绿素含量相关系数最大, 以其为自变量建模结果如表7。建立的模型中, 一元线性模型的 R^2 最大, 其白桦叶片叶绿素估算模型为 $y = 4.141 - 8.943 6x$, 模型的决定系数 $R^2 = 0.622$, 方程的参数满足 F 检验、 t 检验, 对叶绿素的预测估计能力最好, 相对于其他模型, 具有较好的稳定性, 各样本拟合图见图4。

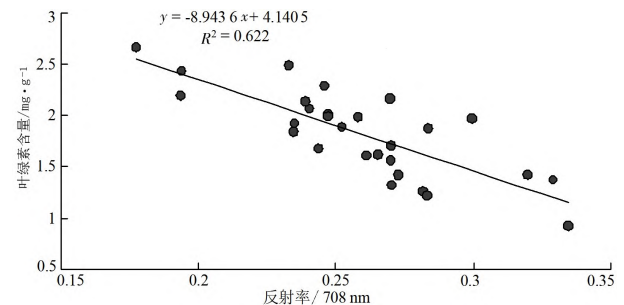


图4 白桦叶绿素估计模型

Fig.4 Chlorophyll estimation model of *B. platyphylla*

表7 基于敏感波段 (708nm) 构建线性和非线性模型结果

Tab.7 Results of linear and nonlinear model construction in sensitive band (708nm)

模型	R^2	模型表达式
一元线性	0.622	$y = 4.141 - 8.943 6x$
对数函数	0.620	$y = -1.228 - 2.242 \ln(x)$
复合函数	0.604	$y = 6.755 \times 0.006^x$
增长函数	0.604	$y = e^{1.91 - 5.162x}$
指数函数	0.604	$y = 6.755 + e^{-5.162x}$

表8 白桦叶绿素含量估计模型验证评价指标

Tab.8 Validation and evaluation indexes of chlorophyll content estimation model of *B. platyphylla*

自变量	模型表达式	R^2	RMSE	RE/%
反射率(708 nm)	$y = 4.14 - 8.94x$	0.613	0.072	8.24

一元线性回归模型模拟的决定系数调整后的 R^2 为 0.613, 均方根误差为 0.072, 相对误差为 8.24%。利用检验集叶绿素含量的实测数据与模型预测值绘制散点图 (图5)。

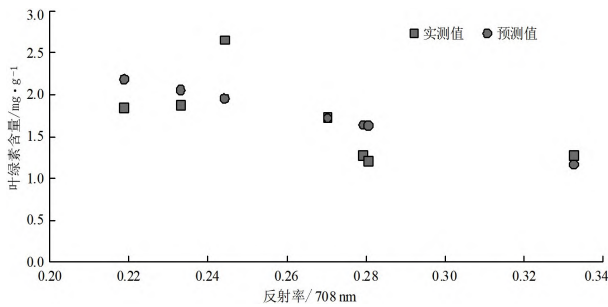


图5 白桦叶绿素含量估计模型的验证

Fig. 5 Validation of chlorophyll content estimation model of *Betula platyphylla*

由图5可知,实测值与预测值较为接近,基于此特征参数构建的一元线性回归模型表现了较好的预测能力。

3 讨论与结论

3.1 讨论

研究区白桦叶片的反射率整体为可见光波段低、近红外波段高,有明显的“绿峰”和“红谷”现象,符合绿色植被光谱的一般特征。火烧迹地的白桦叶片的叶绿素含量较对照样地低,且其变异程度小。对照样地近期末受到林火干扰,立地条件较一致,林木长势较均一;火烧迹地的林木更新时间较短,且受林火程度强弱的影响,林木更新年龄存在一定差异。有研究表明,在一定年龄范围内,叶片叶绿素含量随林龄的增大而增加。幼龄阶段,叶绿体发育不完全,叶绿素含量较少,随着林龄增加,光合作用增强,叶绿素大量合成并保持,叶片颜色逐渐加深^[23]。火烧迹地的白桦叶片反射率较对照样地高,且在450~1 075 nm范围内,白桦叶片光谱反射率与叶绿素含量间的相关系数均为负值,这与袁小康等^[13]的研究结果较一致。表明白桦叶片光谱反射率随着叶绿素含量的增加而降低,即叶片叶绿素含量越高,光谱反射率越低,吸收作用越强。本研究还发现,白桦叶片叶绿素含量与光谱反射率间的相关系数在708 nm处的绝对值最大($r=-0.788$),这与陈澜等^[22]对猕猴桃(*Actinidia chinensis*)叶片的研究结果较一致,其研究发现,不同生育期原始光谱与叶绿素含量的极显著相关值多数出现在707 nm附近。

可见光波段(400~760 nm)的植被光谱反射率主要受到叶绿素的影响,由于叶绿素对绿光较红光和蓝光吸收低而形成“绿峰”;叶绿素在红光波

段的强吸收和近红外波段的高反射导致红光与近红外波段过渡区的反射率急剧上升,形成“红边”。“绿峰”和“红边”参数的变化可以指示叶绿素含量的变化,“绿峰”和“红边”位置会随叶绿素含量的变化而发生偏移。当叶片中叶绿素含量减少时,“绿峰”和“红边”位置会分别向长波和短波方向移动(即红移和蓝移);当叶绿素含量增加时,其变化相反^[23]。火烧迹地上白桦叶片的叶绿素含量比对照样地低,所以其“绿峰”位置和“红边”位置较对照样地分别出现“红移”和“蓝移”现象。

本研究显示,白桦叶片的叶绿素含量与大部分的光谱特征参数有较强的相关性,且多数呈负相关,其中绿峰幅值(Rg)、红边幅值(Dr)、黄边面积(SDy)分别与叶绿素含量的相关系数达到了-0.729、-0.703、-0.723,均呈现出极显著相关性($P<0.01$)。自变量间的相关分析表明,大部分自变量间均存在显著相关性,为防止共线性问题影响模型的预估能力,本研究采用一元线性回归的方法构建了叶绿素含量模型。林少喆等^[25]构建了基于“三边”参数的冬小麦冠层SPAD值的一元线性回归模型;史冰全等^[16]利用最优的光谱数据位置特征参数拟合出油松(*Pinus tabulaeformis*)林叶绿素含量的线性回归模型,以上研究方法与本文相似。本研究最终将以708 nm反射率为自变量的模型确定为白桦叶片叶绿素含量的最佳估算模型,其表达式为 $y=4.14-8.94x$,经过模型验证,该模型的相对误差值在允许误差范围内,相比于其他光谱特征参数,该模型的预估能力最好,具有一定的参考价值。

3.2 结论

通过对内蒙古大兴安岭火烧迹地和对照样地上白桦叶片的叶绿素含量和光谱特征的分析,构建了白桦叶片叶绿素含量的高光谱估算模型,主要得到如下结论。

(1) 火烧迹地和对照样地的白桦叶片叶绿素含量均值分别为1.593、2.088 mg/g,火烧迹地的白桦叶绿素含量总体较对照样地低,且变异程度大。

(2) 白桦叶片的光谱曲线体现了绿色植物特有的光谱特征,呈现出明显的“绿峰”和“红谷”现象,火烧迹地的光谱反射率总体较对照高,表明白桦叶片叶绿素含量越低,其光谱反射率越高;经过去包络线处理后,其光谱曲线的吸收、反射特征

明显被放大,其中火烧迹地的放大效果较对照样地明显;经过一阶导数处理后,白桦叶片的光谱均体现出明显的“三边”特征,火烧迹地的光谱较对照呈现出绿峰位置“红移”和红边位置“蓝移”的现象。

(3) 450~1 075 nm 范围的光谱反射率与白桦叶绿素含量均呈负相关关系,708 nm 处的反射率与白桦叶绿素含量的相关系数绝对值最大,其值达到了0.788。除黄边幅值 D_y 、黄边位置 λ_y 、红边面积与蓝边面积的差值 (SD_r-SD_b) 外,其他光谱特征参数与白桦叶片的叶绿素含量均具有显著相关性。

(4) 以相关系数最高为原则,以708 nm 反射率为自变量构建白桦叶片叶绿素含量的一元线性回归模型最佳,其表达式为 $y = 4.14 - 8.94x$ ($R^2 = 0.622$),相对误差为8.24%,模型的预估能力较好。

参考文献:

[1] 杨曦光,范文义,于颖. 森林叶绿素含量的高光谱遥感估算模型的建立[J]. 森林工程,2010,26(2):8-11.

[2] 张友胜. 植物叶绿素特征及其在森林生态学中的应用[J]. 安徽农业科学,2008,36(3):1014-1017.

[3] 邢艳秋,黄超,陈世宏. SPAD 叶绿素仪在评价树木叶片光环境和健康水平上的应用初探[J]. 森林工程,2011,27(1):1-4.

[4] 邱念伟,王修顺,杨发斌. 叶绿素的快速提取与精密测定[J]. 植物学报,2016,51(5):667-678.

[5] 舒展,陈根云,许大全,等. 叶绿素含量测定的简化[J]. 植物生理学通讯,2010,46(4):399-402.

[6] 张宪政. 植物叶绿素含量测定——丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业科学,1986(3):26-28.

[7] 杨巧明,谢贵水. 基于高光谱的橡胶单叶叶绿素含量研究[J]. 热带农业工程,2011,35(2):9-14.

[8] 马湫. 光谱及高光谱成像技术在作物特征信息提取中的应用研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.

[9] 姜庆虎,童芳,余明珠,等. 高光谱技术——生态学领域研究的新方法[J]. 植物科学学报,2015,33(5):633-640.

[10] 尼加提·卡斯木,师庆东,王敬哲,等. 基于高光谱

特征和偏最小二乘法的春小麦叶绿素含量估算[J]. 农业工程学报,2017,33(22):208-216.

[11] 李改艳. 东北东部主要阔叶树种叶绿素与 SPAD 值模型及影响因素[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2016.

[12] 邹红玉,郑红平. 浅述植被“红边”效应及其定量分析方法[J]. 遥感信息,2010(4):112-116.

[13] 袁小康,周广胜,王秋玲,等. 不同灌溉量夏玉米叶绿素含量的高光谱特征及其反演[J]. 生态学报,2021,41(2):543-552.

[14] 陈兵,韩焕勇,王方永,等. 利用光谱红边参数监测黄萎病棉叶叶绿素和氮素含量[J]. 作物学报,2013,39(2):319-329.

[15] 冯伟,王晓宇,王晨阳,等. 白粉病胁迫下小麦冠层叶绿素密度的高光谱估测[J]. 农业工程学报,2013,29(13):114-123.

[16] 史冰全,张晓丽,白雪琪,等. 基于“三边”参数的油松林叶绿素估算模型[J]. 东北林业大学学报,2015,43(5):80-83.

[17] 汪泉,宋文龙,张怡卓,等. 基于改进 VGG16 网络的机载高光谱针叶树种分类研究[J]. 森林工程,2021,37(3):79-87.

[18] 纪童,王波,杨军银,等. 基于高光谱的草坪草叶绿素含量模拟估算[J]. 光谱学与光谱分析,2020,40(8):2571-2577.

[19] 曹英丽,邹焕成,郑伟,等. 水稻叶片高光谱数据降维与叶绿素含量反演方法研究[J]. 沈阳农业大学学报,2019,50(1):101-107.

[20] 郭超凡,郭逍宇. 基于可见光波段包络线去除的湿地植物叶片叶绿素估算[J]. 生态学报,2016,36(20):6538-6546.

[21] 魏志安. 基于高光谱数据的稀土矿区复垦植被叶片叶绿素含量估算研究[D]. 南昌:江西理工大学,2020.

[22] 陈澜,常庆瑞,高一帆,等. 猕猴桃叶片叶绿素含量高光谱估算模型研究[J]. 西北农林科技大学学报,2020,48(6):79-89,98.

[23] 何婷婷. 陕北坡地枣树冠层结构及其光照分布特性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2010.

[24] 孙小香. 水稻叶片叶绿素和氮素含量的高光谱估测研究[D]. 南昌:江西农业大学,2019.

[25] 林少喆,彭致功,王春堂,等. 基于“三边”参数的冬小麦冠层 SPAD 值监测模型[J]. 排灌机械工程学报,2021,39(1):102-108.

(编辑:李甜江)