

引用格式: 邓超, 陈志彪, 陈海滨, 等. 南方红壤侵蚀区长汀县不同生态恢复年限下芒萁叶绿素含量的高光谱估算模型[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(6): 948-957. [Deng C, Chen Z B, Chen H B, et al. Hyperspectral estimation models of chlorophyll content for *dicranopteris dichotoma* leaves at different ecological restoration stages in the eroded red soil areas of southern China[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(6): 948-957.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180513

南方红壤侵蚀区长汀县不同生态恢复年限下芒萁叶绿素含量的高光谱估算模型

邓超^{1,2}, 陈志彪^{1,2*}, 陈海滨^{1,2}, 陈志强^{1,2}

1. 福建师范大学 湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

Hyperspectral Estimation Models of Chlorophyll Content for *Dicranopteris Dichotoma* Leaves at Different Ecological Restoration Stages in the Eroded Red Soil Areas of Southern China

DENG Chao^{1,2}, CHEN Zhibiao^{1,2*}, CHEN Haibin^{1,2}, CHEN Zhiqiang^{1,2}

1. Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-geographical Processes of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: *Dicranopteris dichotoma* is an important zonal herbaceous plant for ecological restoration in the eroded red soil areas of southern China, and is an effective control of soil erosion. Using remote sensing techniques to monitor the chlorophyll content can help diagnose the vegetation growth and healthy condition of *dicranopteris dichotoma*. Based on hyperspectral reflectance data and the corresponding chlorophyll contents of *dicranopteris dichotoma* leaf from six different ecological restoration stages in Zhuxi small watershed of Changting County, Fujian Province, this study analyzed the hyperspectral curve properties of leaf, transformed the original spectral into the first derivative, and selected the sensitive wavebands to create ratio (RVI) and normalized (NDVI, FDNDVI) hyperspectral indices. Then correlation analysis was conducted for the chlorophyll contents and hyperspectral indices which were selected from reported indices and newly constructed indices with sensitive wavelengths. Based on the correlation coefficients, we can chose the best indices to create estimation models. The linear, exponential, multiplicative, quadratic polynomial, logarithmic, and multivariate regression models were constructed for comparison. Furthermore, the optimal estimation model was determined by the accuracy of each estimation model. Results showed that the sensitive wavelengths of the original spectral for *dicranopteris dichotoma* leaf at different ecological restoration stages were 407 nm, 603 nm, and that the optimal wavebands of the first derivative were 463 nm, 554 nm, 674 nm, and 739 nm. The relationship between the chlorophyll content of *dicranopteris dichotoma* leaf and the hyperspectral indices of red edge position (λ_r), NDVI[603, 407], Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (mNDVI₇₀₅), Vogelmann Index

收稿日期: 2018-10-12; 修回日期: 2019-02-25.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502905); 福建省社会发展引导性(重点)项目(2016Y0024); 福建省教育厅中青年骨干教师教育科研项目(JT180292)。[**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC0502905; Social Development Pilot Project of Fujian, No.2016Y0024; Education Research Project for Young and middle-aged Teachers of Fujian Education Department, No.JT180292.]

作者简介: 邓超(1992-), 女, 四川资阳人, 硕士生, 研究方向为侵蚀过程与生态调控。E-mail: 1558083334@qq.com

*通讯作者: 陈志彪(1962-), 男, 福建平潭人, 教授, 博士, 主要从事水土保持与资源环境等方面研究。

E-mail: chenzhib408@vip163.com

(Vog) were very significant, and the correlation coefficients were over 0.85. The estimation models of chlorophyll content established by hyperspectral indices of mNDVI₇₀₅, Leaf Chlorophyll Index (LCI), Vog, RVI_{603/407}, NDVI [603, 407] showed better test results, and the R^2 were over 0.8. The model established by FDNDVI[739, 463] index had the highest verification accuracy, and the R^2 reached 0.741. The multivariate regression model based on hyperspectral indices got highest test results with the highest R^2 . Therefore, the LCI index and the multivariate regression model based on hyperspectral indices have the strongest ability for predicting chlorophyll concentration, which provides scientific basis for dynamic monitoring of *dicranopteris dichotoma* in the eroded red soil regions of southern China. It is significant for monitoring soil and water conservation plants. Meanwhile, the objective of this research was to provide effective technical support for ecological restoration by building hyperspectral estimation models of chlorophyll content, with a rapid and non-destructive method for monitoring vegetation growth.

Key words: eroded red soil areas; ecological restoration; *dicranopteris dichotoma*; chlorophyll content; spectral index; estimation; Zhuxi small watershed of Changting County

***Corresponding author:** CHEN Zhibiao, E-mail: chenzhib408@vip163.com

摘要:芒萁是南方红壤侵蚀区生态恢复重要的地带性草本植物,对生态系统修复具有重要作用,监测其叶绿素含量能有效诊断生长健康状况。本文以福建省长汀县朱溪流域6个不同生态恢复年限下的芒萁叶片高光谱反射数据以及实测叶绿素含量为数据源,借助高光谱遥感技术分析不同恢复年限芒萁叶片原始光谱特征,筛选出光谱敏感波段并构建光谱指数,基于相关性分析,建立芒萁叶绿素单变量以及多元逐步回归模型,并确定最佳估算模型。结果表明:高光谱指数建立的单变量估算模型中,改进红边归一化植被指数(mNDVI₇₀₅)、叶面叶绿素指数(LCI)、红边指数(Vog)、比值光谱指数(RVI_{603/407})、NDVI[603, 407]高光谱指数建立的二次模型精度高,建模决定系数 R^2 均超过了0.8,其中以高光谱指数为自变量建立的多元回归模型拟合 R^2 值(0.886)最高。综合建模精度和模型验证精度,LCI指数构建的单变量模型以及基于高光谱指数的多元回归模型是估算芒萁叶片叶绿素含量最佳模型。本研究建立的叶绿素高光谱估算模型对快速、无损地监测水土保持植物芒萁生长具有重要意义。

关键词:南方红壤侵蚀区;生态恢复;芒萁;叶绿素含量;高光谱指数;估算模型;长汀县朱溪流域

1 引言

叶绿素含量是植物的重要生长参数,是植物进行光合作用重要的物质^[1]。叶绿素含量的变化可以反映植物叶片光合作用功能的强弱以及表征逆境胁迫下植物组织、器官的衰老状况,对植物的光合能力、发育阶段及营养状况有重要的指示作用^[2],通过研究植物的叶绿素含量能有效的监测植物生长发育状况。传统的化学分析法得到植物的叶绿素含量虽然结果可靠,但是对植物具有破坏性且不能对同一植物进行长期的动态监测^[3]。高光谱遥感技术具有波段多且窄的特点^[4],并具有省时、减少破坏的优点,能定量分析植被光谱差异,识别植物类型,反演植物叶绿素、水分等生理生化参数^[5],感知环境因子对植物的影响^[6]。高光谱技术在生态环境监测,尤其是在植被叶绿素含量变化研究中发挥着越来越重要的作用^[7-8]。在湿地生态系统^[9]以及草原生态系统^[10]植被监测的相关研究中取得了较好的效果。同时,通过建立苹果树^[11]、白毛杨^[12]、马尾松^[13]

等的叶绿素高光谱估算模型能有效监测单一植被物种的生长状况。

严重的水土流失造成土壤养分流失、土壤质量下降,加剧生态系统的退化^[14]。芒萁作为水土保持的先锋植物,是严重退化生态系统最后退出,也是治理中最早侵入的地带性草本之一。在区域生态恢复过程中,芒萁能很快替代其他人工种植的草本,成为优势草种,其生长的好坏可反映对水土流失的控制及生态恢复的效果。叶绿素是诊断植被健康状况的重要指标,通过建立叶绿素含量的高光谱估算模型可快速监测芒萁的生长状况。选择土壤侵蚀区不同生态恢复年限下芒萁进行研究,对南方红壤侵蚀区生态恢复与重建具有重要意义^[15-16]。近年来,对水稻、玉米等农作物和对杨树、梧桐等树种的生理生化参数进行深入的研究,而利用高光谱遥感技术对严重退化区生态恢复具有重要作用的水土保持植物芒萁叶片叶绿素含量研究还尚未见报道。

本文以福建长汀县土壤侵蚀区朱溪流域的地带性草本芒萁为研究对象,分析不同生态恢复年限

下芒萁叶片光谱特征以及通过高光谱指数构建叶绿素含量的估算模型,为南方红壤侵蚀区芒萁的长势监测提供技术支撑。

2 研究区概况与数据源

2.1 研究区概况

福建省长汀县是中国南方红壤侵蚀区的典型代表地区,是水土流失最严重的县份之一,由于不合理的土地利用方式,该地区土壤和植被遭到严重破坏,生物多样性减少,土地生产力下降,导致严重的水土流失和生态系统退化^[7]。其地理位置为116°23'30"E-116°30'30"E, 25°38'15"N-25°42'55"N。流域地势自东北向西南倾斜,海拔270~680 m,地貌以低山、丘陵为主,地形较为破碎,在河流沿岸及支流有河谷盆地分布。气候属于中亚热带季风性湿润气候,流域常年平均气温约为18.4℃,1月平均气温大约为8℃,7月平均气温约为27.2℃,年降雨量介于1400~2450 mm之间,全年降水量呈典型的双峰型。土壤以湿热的气候下风化而发育成的红壤为主,风化壳深厚,一般为10~20 cm,节理发育,结构松软,抗侵蚀性差,土层保水保肥能力差。

2.2 样品测定

在研究区内分别选择生态恢复年限为6a、12a、18a、36a的来油坑(6a)、龙颈(12a)、游坊(18a)、八十里河(36a)的4个生态恢复样地(图1),以及未治理对照地和风水林对照样地各一个,其中每一个样地选择上、中、下坡为采样点,并以东南西北4个方向采样,将采集好的叶片迅速装入自封袋并编号,放入保鲜箱中,野外采样完成后尽快带回实验室。

2.3 光谱数据测定

测定芒萁叶片光谱采用光谱仪Field Spec3,该光谱仪波段范围为350~2500 nm,光谱测量在室内进行,能有效避免测量多个样品时因角度不同造成光谱信息误差。在测定前进行标准白板校正,每个样品重复测定10次光谱,剔除光谱反射率大于1的异常数据,对处理后的光谱数据进行分析,求均值并作为该样品最终光谱反射率。测定72个芒萁叶片样本共720条光谱数据,利用ViewSpePro软件分析光谱数据。考虑到光谱曲线末端噪音较大以及植物色素的影响集中于可见光波段^[18],本文选取400~1350 nm的波段范围进行分析。

2.4 叶绿素含量测定

将测定完光谱数据的芒萁叶片从保鲜袋中取出,继续测定叶片的叶绿素含量。首先将叶片剪碎、混匀,每份称取0.2 g,倒入研钵中,分别加入少量的无水C₂H₅OH及适量的石英砂和CaCO₃粉,研磨成匀浆,再用无水C₂H₅OH洗入离心管中,离心之后将上清液倒入25 ml容量瓶,再用无水C₂H₅OH定容至25 ml,摇匀之后,用紫外可见分光光度计测量665 nm和649 nm处的吸光度^[19],并采用叶绿素浓度计算公式计算芒萁叶片浓度含量。

$$\text{叶绿素a浓度(Chla)} = 13.95 \times D_{665} - 6.88 \times D_{649} \quad (1)$$

$$\text{叶绿素b浓度(Chlb)} = 24.96 \times D_{665} - 7.32 \times D_{649} \quad (2)$$

$$\text{叶绿素总浓度(Chl)} = (\text{Chla} + \text{Chlb}) \times (V/M) \quad (3)$$

$$\text{叶绿素含量} = \text{叶绿素总浓度} \times \text{浸提液体积} \times \text{稀释倍数/样品质量} \quad (4)$$

式中: D_{665} 和 D_{649} 分别表示在665 nm和649 nm处的吸光度值; V 为定容体积/ml; M 为样品重量/g。叶绿素浓度单位为mg/L,含量单位为mg/g。



图1 研究区样地概况和室内实验

Fig. 1 Overview of the study area and laboratory experiment

3 研究方法

目前用于估算叶绿素含量的高光谱指数,主要包括比值植被指数和归一化植被指数。其中,红边参数能有效反映叶绿素含量的变化,尤其是定量描述红边特征的红边位置(λ_r)、红边幅值(Dr)和红边峰值面积(SDr)。另外,对光谱曲线进行导数处理可有效消除干扰信息。本文在原始光谱曲线特征、一阶微分光谱与叶绿素含量的相关性分析基础上,

挑选出相关系数高的敏感波段,并通过波段组合构建比值和归一化光谱指数,波段组合在反映植物信息方面比单波段的数据更可靠。从各指数(表1)中挑选与叶绿素含量相关性较高的14种高光谱指数建立单变量回归模型。为充分利用波段信息来估算芒萁叶绿素含量,进一步通过多元回归分析^[20]进行波段选择与重组。多元回归分析的一般形式为:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_ix_i \quad (5)$$

式中: Y 代表芒萁的叶绿素含量; b_i 代表第*i*个特征

表1 估算芒萁叶片叶绿素含量的高光谱指数

Tab. 1 Hyperspectral indices for estimating the chlorophyll content of *dicranopteris dichotoma* leaves

高光谱指数类型	高光谱指数	定义或计算公式	参考文献
常用光谱指数	红边位置(λ_r)	红边位置	[15],[21]–[22]
	红边振幅(Dr)	红边内一阶微分的最大值	
	红边面积(SDr)	红边内一阶微分的总和	
	蓝边位置(λ_b)	蓝边位置	
	蓝边振幅(Db)	蓝边内一阶微分的最大值	
	蓝边面积(SDb)	蓝边内一阶微分的总和	
	红边内一阶微分总和与蓝边内一阶微分总和比值(SDr/SDb)	红边内一阶微分总和与蓝边内一阶微分总和比值	
	红边内一阶微分归一化总和与蓝边内一阶微分总和的归一化值	$(SDr-SDb)/(SDr+SDb)$	
	归一化植被指数(NDVI)	$(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670})$	[23]
	红边归一化植被指数($NDVI_{705}$)	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705})$	[24]
	改进红边归一化植被指数($mNDVI_{705}$)	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705}-2R_{445})$	[25]
	改进红边比值植被指数(mSR_{705})	$(R_{750}-R_{445})/(R_{750}+R_{445})$	[26]
	结构不敏感色素指数(SIPI)	$(R_{800}-R_{445})/(R_{800}+R_{680})$	[27]
	植被衰减指数(PSRI)	$(R_{680}-R_{500})/R_{750}$	[28]
	叶面叶绿素指数(LCI)	$(R_{850}-R_{710})/(R_{850}+R_{680})$	[11]
	归一化比值叶绿素指数(PSND)	$(R_{810}-R_{674})/(R_{810}+R_{674})$	[29]
	红边指数(Vog)	R_{740}/R_{720}	[30]
敏感波段构建的光谱指数	$RVI_{750/700}$	R_{750}/R_{700}	[31]
	$RVI_{603/407}$	R_{603}/R_{407}	本文
	$NDVI[603, 407]$	$(R_{603}-R_{407})/(R_{603}+R_{407})$	
	$FDRVI[554, 463]$	DR_{554}/DR_{463}	
	$FDRVI[739, 674]$	DR_{739}/DR_{674}	
	$FDRVI[674, 554]$	DR_{674}/DR_{554}	
	$FDRVI[739, 554]$	DR_{739}/DR_{554}	
	$FDNDVI[739, 463]$	$(DR_{739}-DR_{463})/(DR_{739}+DR_{463})$	
	$FDNDVI[739, 554]$	$(DR_{739}-DR_{554})/(DR_{739}+DR_{554})$	
	$FDNDVI[554, 463]$	$(DR_{554}-DR_{463})/(DR_{554}+DR_{463})$	
	$FDNDVI[674, 554]$	$(DR_{674}-DR_{554})/(DR_{674}+DR_{554})$	
	$FDNDVI[674, 463]$	$(DR_{674}-DR_{463})/(DR_{674}+DR_{463})$	

注: R_x 表示波长在*x*处的原始光谱反射率; DR_x 同表示波长在*x*处的一阶微分光谱反射率; $FDRVI[x_1, x_2]$ 表示在波长 x_1, x_2 处一阶微分的比值植被指数; $FDNDVI[x_1, x_2]$ 为在波长 x_1, x_2 处一阶微分的归一化植被指数; $(DR_\alpha-DR_\beta)/(DR_\alpha+DR_\beta)$ 为在波长 α, β 处的归一化植被指数。

变量的回归系数; b_0 为回归常数; x_i 表示第*i*个高光谱指数。

将挑选出的70组芒萁叶片样本随机分成两组,其中54组样本数据用于建模,16组样本用于验证。将高光谱指数作为自变量,芒萁叶片叶绿素含量作为因变量,分别建立线性、指数、乘幂、二次多项式、对数模型,决定系数(R^2)最大的模型选定为每一指数的最优模型。在模型建立的同时通过验证数据集对模型进行检验,结合验证模型的决定系数、均方根误差(RMSE)(式(6))和相对误差(RE)(式(7))评价实测值与估算值的拟合效果,并绘制二者之间的关系图,筛选出芒萁叶片叶绿素含量最佳的预测模型,估算模型具体流程如图2所示。

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2 / n} \quad (6)$$

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i' - y_i|}{y_i} \times 100\% \quad (7)$$

式中: y_i 表示实测值; y_i' 代表预测值; n 为样本数量。

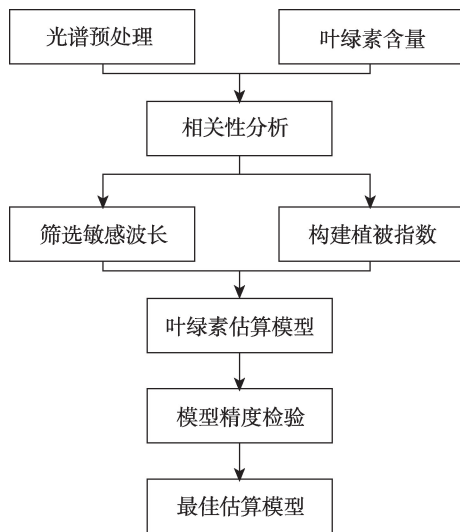


图2 芒萁叶绿素估算模型流程

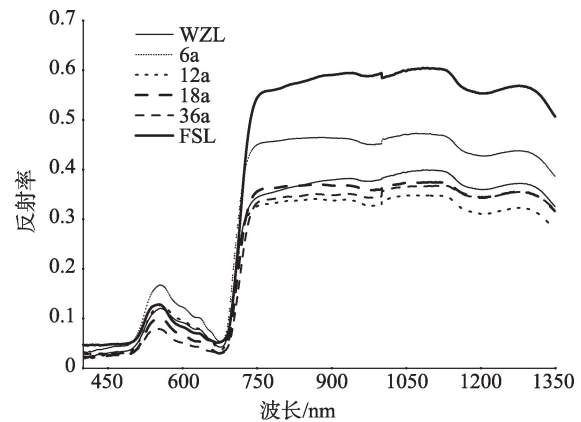
Fig. 2 Flowchart of determining the best *dicranopteris dichotoma* chlorophyll estimation model

4 结果及分析

4.1 不同生态恢复年限下芒萁叶片原始光谱特征

不同生态恢复年限下的芒萁光谱曲线均呈现出典型植物光谱特征,在波长500 nm处是蓝紫光对叶绿素的吸收谷,550 nm附近存在一个明显的反射峰;在波长680 nm处是红光吸收谷,由于红光对叶绿

素的强烈吸收,不同生态恢复年限下的芒萁叶片反射率在两处吸收谷差异较小,在可见光区域反射率受各种色素影响较大;在近红外波段,光谱曲线受到水分和叶片结构的影响较大,尤其在700~750 nm之间反射率急剧增加,形成一个陡坡称为“红边”,风水林对照地的红边斜率最大,龙颈(12a)的红边斜率最小。在800~1350 nm之间出现一个高反射率平台,反射率值仅出现小范围波动。不同生态恢复年限的芒萁光谱反射率值存在差异。从图3可看出,不同生态恢复年限下的芒萁叶片绿峰值不同,风水林对照地的芒萁叶片反射率最大,此处芒萁叶片叶绿素含量实测值也最大。在700~1350 nm间,风水林对照地的芒萁叶片反射率远远高于其他样地,光谱反射率最大达到0.6,生态恢复12年的芒萁光谱反射率最小,差异性可能是受到细胞结构的影响^[25]。



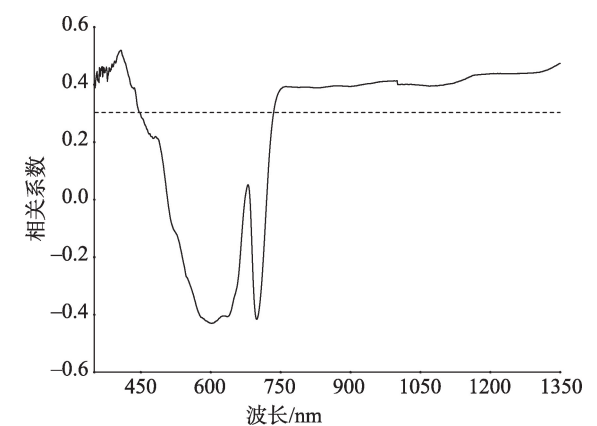
注:WZL指未进行生态修复的未治理对照样地;FSL指生态恢复较好的风水林对照样地;6a、12a、18a、36a代表生态恢复年限分别为6年、12年、18年和36年。

图3 长汀县朱溪流域不同生态恢复年限下的芒萁叶片原始光谱反射率曲线变化特征

Fig. 3 The characteristics of original spectral curves for *dicranopteris dichotoma* leaf at different ecological restoration stages in Zhuxi small watershed of Changting County

4.2 芒萁叶片叶绿素含量与原始光谱反射率及一阶导数的相关分析

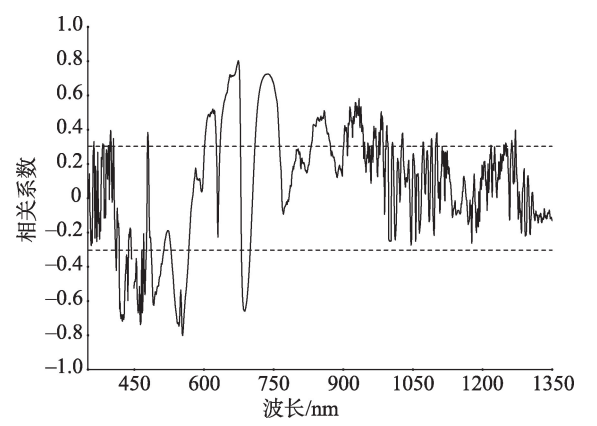
将不同生态恢复年限下的芒萁叶片叶绿素含量与原始光谱数据进行相关性分析。从图4可看出:原始光谱反射率与叶绿素含量在407 nm处相关系数最大(+0.520),随着波长增加相关系数值逐渐减小,在波长为603 nm处达到最大负相关(-0.430)。699 nm之后随着波长增加,相关系数值快速增大,到760 nm处相关系数值趋于稳定。可见,407 nm和



注：图中虚线表示显著性达0.01检验水平时相关系数的临界值。

图4 长汀县朱溪流域芒萁叶绿素含量与原始光谱反射率相关系数
Fig. 4 Correlation coefficients between chlorophyll content and the original spectral data of *dicranopteris dichotoma* in Zhuxi small watershed of Changting County

603 nm波段可作为估算芒萁叶片叶绿素含量的敏感波长。芒萁光谱一阶微分与叶绿素含量的相关性分析(图5)发现,相关系数波动性较大,出现多个极点和拐点,波长674 nm处相关系数值最大可达0.803;在绿光波段范围内,波长554 nm处达到最大负相关(-0.801)。在350~700 nm可见光波段叶绿素含量与一阶微分存在较大的相关性,在463 nm、739 nm附近均出现较高的相关性,相关系数值分别为-0.737、0.725,当波长大于1000 nm之后,相关性较弱,较少



注：图中虚线表示显著性达0.01检验水平时相关系数的临界值。

图5 长汀县朱溪流域芒萁叶绿素含量与一阶微分光谱的相关系数
Fig. 5 Correlation coefficients between chlorophyll content and the first derivative spectral data of *dicranopteris dichotoma* in Zhuxi small watershed of Changting County

能通过0.01($r=0.303, n=54$)极显著检验水平。因此,可以选取一阶微分与芒萁叶片叶绿素含量相关性较大的4个波长作为估算叶绿素含量的敏感波长。

4.3 高光谱指数与叶绿素含量的相关性

将选取的30个高光谱指数与叶片叶绿素含量进行相关性分析(表2)。芒萁叶片叶绿素含量与红边位置(λ_r)呈极显著相关,相关系数达0.862,但与红边幅值、红边面积相关系数值都未能通过0.01显

表2 长汀县朱溪流域叶绿素含量与高光谱指数的相关性分析
Tab. 2 Correlation coefficients between the hyperspectral indices and chlorophyll content of *dicranopteris dichotoma* in Zhuxi small watershed of Changting County

高光谱指数	相关系数	高光谱指数	相关系数
λ_r	0.862 **	SRI	0.834 **
Dr	-0.023	PSND	0.377 **
SDr	0.424 **	Vog	0.860 **
λ_b	-0.083	$RVI_{750/700}$	0.808 **
Db	-0.168	$RVI_{603/407}$	-0.754 **
SDb	-0.168	NDVI[603, 407]	-0.874 **
SDr/SDb	0.758 **	FDRVI[554, 463]	-0.292
(SDr-SDb)/(SDr+SDb)	0.114	FDRVI[739, 674]	0.588 **
NDVI	0.443 **	FDRVI[674, 554]	-0.350 **
NDVI ₇₀₅	0.824 **	FDRVI[739, 554]	0.669 **
mNDVI ₇₀₅	0.857 **	FDNDVI[739, 463]	0.755 **
mSR ₇₀₅	0.162	FDNDVI[739, 554]	0.724 **
SIPI	-0.718 **	FDNDVI[554, 463]	0.393 **
PSRI	-0.330 **	FDNDVI[674, 554]	0.278
LCI	0.848 **	FDNDVI[554, 688]	-0.759 **

注：**表示在0.01水平上显著。

著性检验,说明芒萁叶片叶绿素含量与红边位置关系较为密切,可将红边位置作为参量来构建估算模型。蓝边(490~530 nm)内最大一阶微分值(Db),蓝边位置(λb)与叶绿素含量相关性不显著;红边面积与蓝边面积比值(SDr/SDb)与叶绿素含量呈极显著正相关,相关系数值达0.758。

4.4 基于高光谱指数的叶绿素含量估算模型建立与验证

4.4.1 单变量线性和非线性估算模型

在构建的植被指数中,NDVI[603, 407]、FDNDVI[739, 463]、FDNDVI[739, 554]与叶绿素含量的相关系数都较高,其中NDVI[603, 407]是相关系数最大的指数(表2)。挑选出14个相关性系数大于0.700的高光谱指数作为自变量,芒萁叶片叶绿素含量作为因变量分别建立线性、二次、对数、幂函数以及指数5种回归模型,再根据 R^2 最大为优选原则确定出每一种指数的最佳拟合模型(表3),从表中可以看出以 λr 和SDr/SDb建立的最佳估算模型都为线性模型;SIPI的最佳估算模型为乘幂模型;SRI和RVI_{750/700}最佳估算模型为指数模型;基于原始光谱数据与一阶微分光谱选取的敏感波长而构建的植被指数的最佳估算模型均为二次多项式模型。大部分模型的 R^2 值都大于0.700,其中mNDVI₇₀₅、LCI、Vog、RVI_{603/407}、NDVI[603, 407]指数构建的最佳模型都为二次多项式,决定系数 R^2 均超过了0.800。为了验证

模型的适用性,以预测决定系数(R^2)、均方根误差(MERS)、相对误差(RE)为评价指标,分析验证数据集检验模型的预测能力发现:预测 R^2 值达0.870以上的高光谱指数共有6个,分别为FDNDVI[739, 463]、NDVI₇₀₅、SRI、RVI_{750/700}、Vog、LCI;MERS最小的4个指数分别是FDNDVI[739, 463]、NDVI₇₀₅、Vog、LCI;RE最小的4个指数分别是FDNDVI[739, 463]、mNDVI₇₀₅、NDVI₇₀₅、LCI。综合3个指标确定模型验证精度,精度最高的指数为FDNDVI[739, 463],其次为LCI和NDVI₇₀₅。同时,建模精度较高的指数分别为LCI和mNDVI,而FDNDVI[739,463]和NDVI₇₀₅指数建模的 R^2 值都处于中等水平,分别为0.741、0.750。红边位置的建模精度和验证精度都处于中等水平,通过敏感波段构建的植被指数中FDNDVI[739, 463]为芒萁叶绿素估算模型的最佳指数,已报道的高光谱指数中LCI、mNDVI都能较好的估算芒萁叶片叶绿素含量。LCI指数构建的二次模型的拟合 R^2 、预测 R^2 值都较高,是最佳单变量估算模型。

4.4.2 多元逐步回归模型

虽然以敏感波长为自变量、芒萁叶绿素含量为因变量建立多元回归方程拟合 R^2 值达0.700以上,但模型的预测 R^2 仅为0.634,预测精度较低(表4)。而基于高光谱指数建立的回归方程拟合 R^2 值(0.886)高于敏感波段建立的多元回归模型和高光谱指数建立的单变量回归模型,预测 R^2 值达0.800以上,精度较高(图6)。

表3 长汀县朱溪流域芒萁叶片叶绿素含量估算模型及评价指标
Tab. 3 Chlorophyll content estimation models of *dicranopteris dichotoma* leaf and evaluation indicators in Zhuxi small watershed of Changting County

高光谱指数	模型建立		模型验证		
	回归方程	拟合 R^2	预测 R^2	MERS	RE%
λr	$y=0.096x-66.543$	0.779	0.859	0.363	22.87
SDr/SDb	$y=0.018x-0.962$	0.592	0.776	0.332	19.92
NDVI ₇₀₅	$y=1.794-9.103x+19.72x^2$	0.750	0.886	0.256	16.20
mNDVI ₇₀₅	$y=2.831-13.123x+21.146x^2$	0.849	0.860	0.281	16.14
SIPI	$y=2.71x^{(-25.09)}$	0.577	0.683	0.420	21.59
LCI	$y=5.212-21.726x+26.671x^2$	0.865	0.872	0.273	16.38
SRI	$y=0.2e^{0.772x}$	0.743	0.882	0.287	17.12
Vog	$y=9.969-18.516x+9.133x^2$	0.820	0.878	0.261	17.20
RVI _{750/700}	$y=0.275e^{0.469x}$	0.693	0.877	0.306	17.40
RVI _{603/407}	$y=4.693-1.506x+0.139x^2$	0.833	0.782	0.326	18.38
NDVI[603, 407]	$y=4.583-9.133x+5.149x^2$	0.835	0.740	0.359	18.37
FDNDVI[739, 463]	$y=13.333-35.175x+24.404x^2$	0.741	0.908	0.235	15.47
FDNDVI[688, 554]	$y=-9.885+18.412x-6.812x^2$	0.728	0.689	0.410	29.43
FDNDVI[739, 554]	$y=1.370-3.818x+4.408x^2$	0.777	0.729	0.386	28.72

表4 长汀县朱溪流域芒萁叶片叶绿素含量多元回归模型

Tab. 4 Multivariate regression models for the chlorophyll content estimation of *dicranopteris dichotoma* in Zhuxi small watershed of Changting County

光谱形式	回归方程	拟合 R^2	预测 R^2	RMSE
敏感波长	$y = 1.443 - 2359.116 \times R_{463}' - 1793.879 \times R_{554}' - 237.549 \times R_{674}' + 227.782 \times R_{739}'$	0.757	0.634	0.598
高光谱指数	$y = -25.830 + 0.03x_1 + 0.579x_2 - 1.662x_3 - 6.195x_4 + 6.593x_5$	0.886	0.838	0.349

注：表中 R'_x 代表在波长 x 处的一阶微分值； x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 分别代表高光谱指数 λr , FDNDVI[688, 554], NDVI[603, 407], mNDVI₇₀₅, Vog。

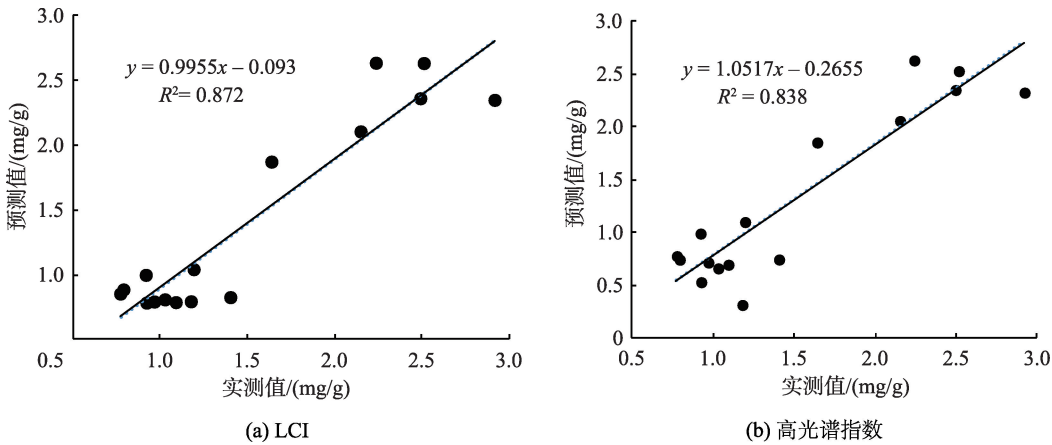


图6 长汀县朱溪流域芒萁叶片叶绿素含量实测值与预测值拟合散点图

Fig. 6 Scatter plots for the relationship between predicted and measured values of the chlorophyll content in Zhuxi small watershed of Changting County

最后综合建模精度和验证模型精度,就单变量指数来看,LCI指数建立的二次模型是不同生态恢复年限下芒萁叶片叶绿素含量的最佳估算模型;多元回归模型中,以 λr ,FDNDVI[688, 554],NDVI[603, 407],mNDVI₇₀₅,Vog指数为自变量建立的模型拟合 R^2 值最高,预测精度较高,是最佳的估算模型。

5 讨论

5.1 芒萁叶绿素含量的敏感波长

通过波段组合构建的光谱指数能更准确地反映植被信息。研究者利用相关系数法确定原始光谱曲线和一阶微分光谱中的敏感波段,构建了互花米草、水稻、杉木等^[32]植被的光谱指数,发现红边是估测水稻的敏感波段,而互花米草的敏感波段主要集中在红边导数(680~760 nm),杉木敏感波段部分出现在红边位置附近,苹果树敏感波段不仅出现在红边附近还出现在500~600 nm范围内。因此,在借鉴前人研究方法的基础上本文选取敏感波长时分别基于原始光谱和一阶微分来确定,敏感波段主要为407、603、463、554、674和739 nm,芒萁叶片叶绿

素含量的敏感波段与其他植物的敏感波段不同,这可能由于研究的植被种类不同而有差异,但红边都是重要的敏感波段选取处。

5.2 芒萁叶绿素含量的最佳光谱指数

一阶微分和原始光谱选取的波段构建的植被指数与叶绿素含量都表现出较好的相关性,这与前人的研究结果^[9,11,25]类似。文中通过一阶微分构建的FDNDVI[739, 554]虽然预测效果较LCI指数略低,但比NDVI₇₀₅、SIPI等常见光谱指数好。不同的植被指数具有不同的特点,本文系统分析了在估算叶绿素含量方面效果较好的高光谱指数,发现芒萁叶片最佳的高光谱指数为LCI、mNDVI,同时这些指数在小麦^[7]、水稻^[26]、苹果树^[11]等其他植被叶绿素含量的估算中也有较好的表现。由于易受到营养胁迫的影响,在红壤侵蚀区,土壤养分流失会影响芒萁的生长,而芒萁本身对养分需求较低,因此,为避免单一的植被指数不能准确的估算叶绿素含量的变化,针对红壤侵蚀区不同生态恢复条件下的芒萁叶片叶绿素,本文选择了单变量模型的同时还建立多元回归模型,发现基于高光谱植被的多元回归模型精度大于单变量模型,这与王家强^[8]在胡杨

叶绿素含量的估测模型研究中多元回归模型精度均大于一元线性模型的结果一致。

6 结论

本文基于芒萁高光谱数据和叶绿素实测数据,分析了南方红壤侵蚀区不同生态恢复阶段芒萁叶片叶绿素含量的原始光谱特征以及构建了单变量估算模型和多元逐步回归模型,并确定了芒萁叶绿素的最佳估算模型,结论如下:

(1) 不同生态恢复年限下的芒萁叶片原始光谱反射率在可见光范围内主要受到植被色素的影响,反射率存在一定的差异。生态系统恢复越好,光谱反射率的红边斜率越大。

(2) 叶片原始光谱与叶绿素含量在可见光区域主要表现出负相关,一阶微分光谱与叶绿素含量在可见光范围内相关性显著,并出现多个极值。原始光谱曲线敏感波长为407 nm和603 nm,一阶微分曲线的敏感波长是463 nm、554 nm、674 nm和739 nm。

(3) 在建立的单变量回归模型中,LCI构建的一元二次模型建模精度和验证模型精度均较高,都能较好的预测芒萁叶片叶绿素含量;多元回归模型中,以高光谱指数 λ_r , FDNDVI[688, 554], NDVI[603, 407], mNDVI₇₀₅, Vog为自变量的多元回归模型是最佳的预测模型。

本文研究发现LCI指数在芒萁叶绿素含量的估算中具有优势,与其他植物最佳估算指数结果不同。同时,多元回归模型精度优于单变量模型,这与前人研究结果类似。芒萁叶绿素估算模型是在某一红壤侵蚀区实验数据的基础上构建和验证,今后还可通过不同土壤侵蚀区,不同季节下的芒萁数据来对模型进行检验和完善,以便进一步提高模型的稳定性和区域拓展性。通过卫星图像的反演,可将实验室的实测数据与星载或机载高光谱遥感影像,实现对水保植物芒萁的大面积监测。

参考文献(References):

- [1] Reich P B. Effects of low concentrations of $\alpha(3)$ on net photosynthesis, dark respiration, and chlorophyll contents in aging hybrid poplar leaves[J]. *Plant Physiology*, 1983, 73(2):291-296.
- [2] 王会霞,石辉,李秧秧.城市大气环境下绿化植物叶片比叶重和光合色素含量[J]. *中国环境科学*, 2011,31(7): 1134-1142. [Wang H X, Shi H, Li Y Y. Leaf mass per area and photosynthetic pigments of greening plant species under different urban atmospheric environment[J]. *China Environmental Science*, 2011,31(7):1134-1142.]
- [3] Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003,86(4):542-553.
- [4] 刘伟东,项月琴,郑兰芬,等.高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析[J]. *遥感学报*, 2000,4(4): 279-283. [Liu W D, Xiang Y Q, Zheng L F, et al. Relationships between rice LAI, CH.D and hyperspectra data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000,4(4):279-283.]
- [5] 王润生.高光谱遥感的物质组分和物质成分反演的应用分析[J]. *地球信息科学学报*, 2009,11(3):261-267. [Wang R S. Spectral identification and inversion of composition and component of objects with hyperspectral remote sensing[J]. *Journal of Geo- information Science*, 2009,11(3):261-267.]
- [6] 彭羽,米凯,覃亚,等.半干旱草原不同生态恢复阶段优势植物的高光谱特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014,34(11):3090-3094. [Peng Y, Mi K, Qin Y, et al. Spectral reflectance characteristics of dominant plant species at different eco-restoring stages in the semi-arid grassland[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014,34(11):3090-3094.]
- [7] 梁亮,杨敏华,张连蓬,等.基于SVR算法的小麦冠层叶绿素含量高光谱反演[J]. *农业工程学报*, 2012,28(20):162-171,294. [Liang L, Yang M H, Zhang L P, et al. Chlorophyll content inversion with hyperspectral technology for wheat canopy based on support vector regression algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012,28(20):162-171,294.]
- [8] 王家强,伍维模,李志军,等.基于高光谱指数的天然胡杨叶绿素遥感建模研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2014,28(10):95-99. [Wang J Q, Wu W M, Li Z J, et al. Remote sensing modeling research of natural *Populus Euphratica* chlorophyll based on hyperspectral indices[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014,28(10):95-99.]
- [9] 艾金泉,陈文惠,陈丽娟,等.冠层水平互花米草叶片光合色素含量的高光谱遥感估算模型[J]. *生态学报*, 2015,35(4):1175-1186. [Ai J Q, Chen W H, Chen L J, et al. Hyperspectral remote sensing estimation models for foliar photosynthetic pigment contents at canopy level in an invasive species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(4):1175-1186.]
- [10] 肖汉,陈秀万,杨振宇,等.基于光谱分析的草地叶绿素含量估测植被指数[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014,34(11): 3075-3078. [Xi H, Chen X W, Yang Z N, et al. Vegetation index estimation by chlorophyll content of grassland based on spectral analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014,34(11):3075-3078.]
- [11] 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. [Li S, Zhao G X, Zhu X C. Hyperspectral estimation models of chlorophyll content in apple leaves[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012,32(5):1367-1370.]
- [12] 张永贺,郭啸川,褚武道,等.基于红边位置的木荷叶片叶绿素含量估测模型研究[J].红外与激光工程,2013,42(3):798-804. [Zhang Y H, Guo X C, Chu W D, et al. Estimation model of schima superba leaf chlorophyll content based on red edge position[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(3):798-804.]
- [13] 杜华强,葛宏立,范文义,等.马尾松针叶光谱特征与其叶绿素含量间关系研究[J].光谱学与光谱分析,2009,29(11):3033-3037. [Du H Q, Ge H L, Fan W Y, et al. Study on relationships between total chlorophyll with hyperspectral features for leaves of pinus massoniana forest[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009,29(11):3033-3037.]
- [14] 孙小涛,周忠发,陈全,等.重点生态功能区水土流失敏感性评价与分布研究——以贵州省雷山县为例[J].水土保持学报,2016,30(6):73-78. [Sun X T, Zhou Z F, Chen Q, et al. Sensitivity evaluation and the spatial distribution of soil erosion in keyecological function areas: A case of Leishan city of Guizhou[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(6):73-78.]
- [15] Chen Z, Chen Z, Bai L, et al. A catastrophe model to assess soil restoration under ecological restoration in the red soil hilly region of china[J]. Pedosphere, 2017,27(4):778-787.
- [16] Chen Z, Chen Z, Yan X, et al. Stoichiometric mechanisms of dicranopteris dichotoma, growth and resistance to nutrient limitation in the Zhuxi watershed in the red soil hilly region of China[J]. Plant and Soil, 2016,398(1-2):367-379.
- [17] 陈志强,陈志彪.南方红壤侵蚀区土壤肥力质量的突变——以福建省长汀县为例[J].生态学报,2013,33(10):3002-3010. [Chen Z Q, Chen Z B. Mutation of soil fertility quality in the red eroded area of southern China: A case study in Changting County, Fujian Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(10):3002-3010.]
- [18] 褚武道,陈文惠,艾金泉,等.基于偏最小二乘法的樟树叶片叶绿素含量高光谱估算[J].福建师范大学学报(自然科学版),2014,30(1):65-70,90. [Chu W D, Chen W H, Ai J Q, et al. Hyperspectral estimation of camphor tree leaf chlorophyll content based on partial least squares regression[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2014,30(1):65-70,90.]
- [19] 宫兆宁,赵雅莉,赵文吉,等.基于光谱指数的植物叶片叶绿素含量的估算模型[J].生态学报,2014,34(20):5736-5745. [Gong Z N, Zhao Y L, Zhao W J, et al. Estimation model for plant leaf chlorophyll content based on the spectral index content[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(20):5736-5745.]
- [20] 李春昉,郭际,赵绍丰.多元统计分析之因子分析浅析[J].价值工程,2010,29(15):128-129. [Li C F, Guo J, Zhao S F. [The analysis of factor analysis in multivariate statistical analysis[J]. Value Engineering, 2010,29(15):128-129.]
- [21] Horler D N H, Dockray M, Barber J. The red edge of plant leaf reflectance[J]. International Journal of Remote Sensing, 1983,4(2):273-288
- [22] 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(S2):123-129. [Yao F Q, Zhang Z H, Yang R Y, et al. Hyperspectral models for estimating vegetation chlorophyll content based on red edge parameter[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(s2):123-129.]
- [23] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sensing and Environment, 1979,8(2):127-150.
- [24] Gitelson A, Merzlyak M N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. spectral features and relation to chlorophyll estimation[J]. Journal of Plant Physiology, 1994,143(3):286-292.
- [25] 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.
- [26] Sims D A, Gamon J A. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: A comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features[J]. Remote Sensing of Environment, 2003,84(4):526-537.
- [27] Peñuelas J, Gamon J A, Fredeen A L, et al. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water- limited sunflower leaves[J]. Remote Sensing of Environment, 1994,48(2):135-146.
- [28] Merzlyak M N, Chivkunova O B, Gitelson A A, et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening[J]. Physiologia Plantarum, 2010,106(1):135-141.
- [29] Blackburn G A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: An evaluation of some hyperspectral approaches[J]. Remote Sensing of Environment, 1998,66(3):273-285.
- [30] Vogelmann J E, Rock B N, Moss D M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993,14(8):1563-1575.
- [31] 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(2-3):416-426.
- [32] 焦全军,张霞,张兵,等.基于叶片光谱的森林叶绿素浓度反演研究[J].国土资源遥感,2006,18(2):26-30. [Jiao Q J, Zhang X, Zhang B, et al. The petrieval of forest chlorophyll concentration based on foliar spectra[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2006,18(2):26-30.]