

DOI: 10.5846/stxb201304270834

艾金泉, 陈文惠, 陈丽娟, 张永贺, 周毅军, 郭啸川, 褚武道. 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. 生态学报, 2015, 35(4): 1175-1186.

Ai J Q, Chen W H, Chen L J, Zhang Y H, Zhou Y J, Guo X H, Chu W D. Hyperspectral remote sensing estimation models for foliar photosynthetic pigment contents at canopy level in an invasive species, *Spartina alterniflora*. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1175-1186.

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

艾金泉, 陈文惠*, 陈丽娟, 张永贺, 周毅军, 郭啸川, 褚武道

福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

摘要:以闽江河口鱗鱼滩湿地互花米草(*Spartina alterniflora*)的实测冠层高光谱反射率和叶片光合色素含量(LPPC)为数据源,在分析 LPPC 与原始光谱反射率、一阶导数光谱反射率、22 种已报道光谱指数和 14 种新构建的植被指数相关性的基础上,利用直线回归、指数回归、对数回归以及乘幂回归方法,系统地比较了 36 种植被指数在估算互花米草 LPPC 中的表现。研究表明:(1)一阶导数光谱反射率组合的植被指数用于估算互花米草的 LPPC 优于原始光谱反射率;(2)红边区域一阶导数光谱是估测互花米草 LPPC 的最佳波段;(3)对于单一色素含量的估算,叶绿素 a (Chla)的最佳估算指数为 FDNDVI[723,703];叶绿素 b (Chlb)的最佳估算指数为 FDRVI[723,525];类胡萝卜素(Cars)的最佳估算指数为 FDNDVI[723,703];(4)对于使用统一参量同时估算 Chla、Chlb、Cars,由 FDRVI[723,703]建立的对数估算模型效果最佳。研究成果可为湿地植物生化参量反演提供参考,也可为闽江河口湿地入侵种互花米草的动态监测和生态评估管理提供有力的科学依据。

关键词:光合色素;敏感波段;植被指数;红边;湿地植物

Hyperspectral remote sensing estimation models for foliar photosynthetic pigment contents at canopy level in an invasive species, *Spartina alterniflora*

AI Jinquan, CHEN Wenhui*, CHEN Lijuan, ZHANG Yonghe, ZHOU Yijun, GUO Xiaochuan, CHU Wudao

College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Foliar photosynthetic pigments are the most important biochemical parameters relative to the physiological function of wetland plants. Quantitative estimation of photosynthetic pigments can provide important information about the dynamics of the vegetation productivity, vegetation stress, or nutrient cycles within wetland ecosystems. However, the estimation of foliar photosynthetic pigments is complicated because canopy reflectance in the visible and near infrared wavelengths is affected by confounding effects that come not only from foliar photosynthetic pigment contents variation but also from the changing environmental conditions of wetland ecosystem. Our objective was to address the question by establishing hyperspectral remote sensing estimation models for foliar photosynthetic pigments at canopy level in an invasive species, *Spartina alterniflora*. In this study, the hyperspectral reflectance of canopy leaf and leaf photosynthetic pigment contents (LPPC) from *S. alterniflora* in Min River Shanyu beach were recorded as data source. The correlation between LPPC and raw spectral reflectance, the first derivative reflectance, 22 reported vegetable indices and 14 new formed indices were determined. Based on the results of correlation analysis, a total of 36 indices were tested by linear regression, exponential regression, logarithm regression and the power of regression to explore their potentials in LPPC estimation in

基金项目:福建省科技计划项目(2010R1037);福建师范大学研究生科技创新基金资助

收稿日期:2013-04-27; 网络出版日期:2014-04-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: whchenfz@sohu.com

S. alterniflora. The results showed that: (1) This study selected 5 wavebands in the region of 400—900 nm, which appeared to be the optimal wavebands for the *S. alterniflora* foliar photosynthetic pigments estimation. Of the selected wavebands, the most frequently occurring wavebands were 723 nm, 703 nm, 525 nm, 752 nm, 668 nm. (2) Vegetation index portfolio by the first derivative reflectance was evidently better than raw reflectance for estimating LPCC in *S. alterniflora*. Combining the optimal wavebands, the results indicated that the first derivative of reflectance in the red edge region (680—760 nm) was the optimal band for estimating LPCC. (3) For a single pigment content, the best indexes for estimating chlorophyll a (Chla), chlorophyll b (Chlb) carotenoids (Cars) were FDNDVI[723,703], FDRVI[723,525], and FDNDVI[723,703], respectively. The three new formed indices were proved to have better linearity with corresponding photosynthetic pigment. (4) Using the same index to estimate different pigments, the best model was the logarithmic model using FDRVI[723,703], with high predicted correlation coefficients R^2 of 0.6997, 0.7187, and 0.7132, respectively. This study would not only provide a good reference for hyperspectral remote sensing retrieval of biochemical variables in wetland vegetation, but also provide a strong scientific basis for the dynamic monitoring of *S. alterniflora* and management of ecological assessment in Min River estuary.

Key Words: photosynthetic pigment; sensitive bands; vegetation index; red edge; wetland vegetation

叶片光合色素含量广泛用于诊断植被生长状况和健康状况,是植被环境胁迫、光合作用能力和植物发育阶段的指示器^[1]。叶片光合色素含量与植被独特的光谱特征有密切的联系,在可见光波段内,叶片光谱特征主要受光合色素含量的影响,在近红外波段主要受叶片内部结构、叶片含水量及叶面积指数等影响;而高光谱遥感技术能通过微弱的光谱响应光合色素含量变化,因而,可用高光谱遥感估算叶片光合色素含量。王福民等^[2]对水稻色素含量的估算研究表明,红边是估测水稻最敏感的波段。Wu 等^[3]基于高光谱植被指数建立了冬小麦叶绿素含量的高光谱估算模型,发现改进型的两种综合植被指数 MCARI/OSAVI[705,750]和 TCARI/OSAVI[705,750]最适合叶绿素含量反演。Main 等^[4]研究了 73 种已见报道估算叶片叶绿素含量的高光谱指数的鲁棒性,结果表明基于红边位置导数光谱和红边拐点的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。Sims 等^[5]比较常用的高光谱指数在不同植被类型、不同的叶片冠层结构反演叶片叶绿素含量中的表现,发现简单比值植被指数 mSR_{705} 和归一化差值植被指数 mND_{705} 与叶绿素含量相关性最好。这些研究表明,利用高光谱遥感技术估算陆地植被叶片光合色素含量是可行可靠的,只是对于不同的植物所用的最佳波段和最佳估算参量不同。

湿地植被是湿地生态系统最重要的组成部分,是衡量湿地生态系统健康的关键指标,对区域环境的稳定性具有很强的指示器作用^[6]。湿地植被光合色素含量状况是湿地植被光谱变异最重要的影响因子,使用高光谱遥感无损估算其光合色素含量有利于了解其光谱特征变异机理、生理状况、物种组成和生物化学循环的研究^[7]。但是,研究者也注意到,由于湿地生物多样性高、水文条件复杂等特殊的生态环境,给高光谱遥感技术应用于湿地植被生化参数的估测带来了诸多挑战^[7]。很幸运的是,通过文献查找发现,仍有少数研究者已经开展了高光谱遥感在天然湿地植被光合色素含量的估算研究。卢霞等^[8]研究了大米草(*Spartina anglica*)室内叶片光谱特征参数与叶绿素浓度关系,发现利用水分指数(WI)基于三次函数构建的叶绿素浓度的高光谱检测模型精度最高。李凤秀等^[9]采用可见光-近红外波段对冠层水平湿地小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)叶片 Chla 含量建立了高光谱遥感估算模型,发现比值微分光谱指数 FRVI[548,556]建立的 Chla 的线性预测模型表现最佳。Ge 等^[10]对湿地植物入侵种芦竹(*Arundo donax*)冠层叶片的光合色素含量估算研究表明,693 nm 波段是色素含量最敏感的波段。这表明高光谱遥感技术用于估算天然湿地植被叶片光合色素含量成为可能。

自 1979 年以来,互花米草作为外来种被引入福建省沿海滩涂,它迅速扩张,已对当地生态安全产生了威胁。如何有效的对它的长势进行动态监测,具有重要的意义。本文以闽江河口鱗鱼滩湿地入侵物种互花米草

为研究对象,选定闽江河口湿地生态定位观测站 200 m 附近的小区域作为实验区,以野外实测数据作为数据源,利用导数光谱技术和相关性分析法,确定互花米草光合色素含量的敏感波段,构建新的植被指数,并同已报道的植被指数进行比较,旨在确定具有适用性和可靠性强的光合色素含量估算模型。本研究可为入侵种互花米草的光谱特征变异机理、长势动态监测、入侵机制和生态管理评估提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

实验区位于闽江河口鳔鱼滩湿地生态定位观测站附近(图 1),地理坐标为 $26^{\circ}00'36''$ — $26^{\circ}03'42''$ N, $119^{\circ}34'12''$ — $119^{\circ}41'40''$ E,地处中亚热带和南亚热带过渡区。区内气候温暖湿润,年均气温 19.7°C ,年均降水量 1380 mm 左右,年均降水日数为 153 d,受正规半日潮影响^[11]。该湿地是闽江河口面积最大和保护较好的一处天然湿地,湿地植物以芦苇(*Phragmites australis*)、短叶茳芏(*Cyperus malaccensis*)和互花米草为主,其中,互花米草是外来入侵种。近年来互花米草蔓延严重,2002 年还是零星分布,到 2008 年已经超过 200 hm²,给该湿地生态系统造成严重的生态威胁^[12]。

1.2 数据获取

1.2.1 冠层光谱采集

冠层光谱反射率的测定采用美国 Analytical Spectral Device (ASD) 公司生产的便携式野外地物光谱仪 FieldSpec3,该光谱仪波段范围在 350—2500 nm,其中,350—1000 nm 光谱采样间隔为 1.4 nm,光谱分辨率为 3 nm;1000—2500 nm 光谱采样间隔为 2 nm,光谱分辨率为 10 nm。在光谱输出时,仪器自动进行重采样(重采样间隔为 1 nm),共输出 2151 个波段数。

本研究采样点位于鳔鱼滩观鸟台以西 200 m 范围左右互花米草入侵严重区域(图 1),采样日期是 2012 年 10 月 20 日和 2012 年 10 月 22 日(8:00—15:00 属于低潮期,植被不受潮汐影响,地面无积水),风力小于 3 级,无云,天气晴朗,时间是地方时 10:00—13:30。总共选取 36 个样方,各个样方相隔 10 m 左右,所有样方互花米草长势较好(没有其他植物),植株高约 180—220 cm,植株密度约 200—300 株/m²,覆盖度大于 90%,叶片颜色呈淡绿色,冠层结构接近呈平直型。传感器探头使用 25° 视场角,高度保持在冠层上方 1.0 m 附近。每个样方的大小为 1 m × 1 m,每次采集 10 条光谱曲线,且每组数据采集前都用白板对仪器进行一次校正,以消除环境变化带来的影响,总共采集 36 个有效样本 360 条冠层光谱曲线。

数据预处理采用 ViewSpePro 软件,对采集的冠层光谱曲线进行平滑、去噪、一阶导数处理,并以每个采样点 10 条光谱曲线的平均值作为该采样点的冠层反射率。考虑到湿地土壤含水量高,易对中红外波段产生较大的噪音和借鉴相关研究经验^[8,10],本研究只选取 400—900 nm 之间的波段进行分析。

1.2.2 光合色素含量测定

野外光谱测量完后,采叶人员同时采集相应样本点冠层上部、中部、下部成熟叶片 6—8 叶,装入自封袋,标号,直接保存在放有冰袋的保鲜箱中,采样同一天拿回实验室进行光合色素含量测定。具体测定方法如下^[13],先将采样叶片全部剪碎均匀混合,称取剪碎混合后的新鲜叶片 3 份,每份 0.200 g,分别放入研钵中,加入少量石英砂和碳酸钙粉及 2—3 mL 96% 的乙醇研磨成匀浆,再加入乙醇 10 mL 继续研磨至组织变白,静置 3—5 min,过滤到 25 mL 棕色容量瓶中,再用 UV2450-紫外分光光度计测量 665 nm、649 nm 下的光密度 OD 值,然后根据下面公式计算叶绿素含量浓度:

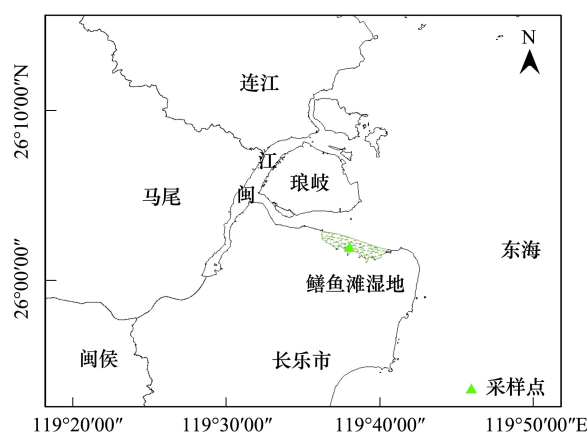


图 1 研究区地理位置与采样点

Fig.1 The location of the study area and sampling site

$$\text{Chla}(\text{mg/L}) = 13.95 \times \text{OD}_{665} - 6.88 \times \text{OD}_{649} \quad (1)$$

$$\text{Chlb}(\text{mg/L}) = 24.96 \times \text{OD}_{649} - 7.32 \times \text{OD}_{665} \quad (2)$$

$$\text{Cars}(\text{mg/L}) = (1000 \times \text{OD}_{470} - 2.05 \times \text{Chla} - 114.8 \times \text{Chlb}) / 245 \quad (3)$$

$$X(\text{mg/g}) = \text{浓度}(\text{mg/L}) \times \text{提取液体积}(\text{mL}) / \text{质量}(\text{g}) / 1000 \quad (4)$$

式中, OD_{665} 为 665 nm 处的吸光度; OD_{649} 为 649 nm 处的吸光度; OD_{665} 为 665 nm 处的吸光度。

1.3 本文用到的高光谱植被指数

总结和筛选已报道用于冠层水平绿色植物叶片光合色素含量估算的高光谱指数, 选择其中常用的 22 种分析(表 1 前 22 个指数)。所选指数主要有以下几类: 比值植被指数, 如 $\text{RVI}_{750/550}$; 归一化植被指数, 如 NDVI ; 综合植被指数, 如 MCARI/OSAVI ; 微分比值植被指数 $\text{DR}_{715}/\text{DR}_{705}$; 微分归一化植被指数 BmSR_{705} 。这些已报道的高光谱指数中, 所用到的估测光合色素含量的敏感波段集中在 445、550、670、700、705、730、760、800 nm 附近, 这为提出新的高光谱植被指数提供了参考。

本文充分借鉴前人研究经验, 基于光谱特征分析和原始光谱、一阶导数光谱与光合色素含量间的相关性分析, 选取得到的所有峰值点和拐点(图 1, 图 2), 通过波段组合, 构建新的光谱指数并选取其中 14 个表现最好的指数纳入本文分析(表 1 中后 14 个指数)。

表 1 本文用于估算互花米草叶片光合色素含量的高光谱指数

Table 1 Hyperspectral indices used for estimation foliar pigment content of *S. alterniflora* in this study

光谱指数 Spectral indices	计算公式 Algorithm formula	参考文献 References	编号 Eq.ID
$\text{RVI}_{750/550}$	R_{750}/R_{550}	[14]	(5)
$\text{RVI}_{750/700}$	R_{750}/R_{700}	[15]	(6)
R_{762}/R_{734}	R_{762}/R_{734}	[16]	(7)
MSR	$[(R_{750}/R_{705}) - 1] / \sqrt{(R_{750}/R_{705}) + 1}$	[17]	(8)
NDVI	$(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670})$	[15, 18]	(9)
PRI	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	[19]	(10)
NDVI705	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$	[17, 20]	(11)
TVI	$\sqrt{\text{NDVI} + 0.5}$	[21]	(12)
$m\text{ND}_{705}$	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$	[5]	(13)
Green-NDVI	$(R_{800} - R_{550}) / (R_{800} + R_{550})$	[22]	(14)
SIPI	$(R_{800} - R_{445}) / (R_{800} - R_{680})$	[23]	(15)
CARI	$\text{CARI} = \frac{ 670a + R_{670} + b R_{700}}{R_{670} \sqrt{a^2 + 1}}$ $a = (R_{700} - R_{500}) / 150; b = R_{550} - 550a$	[24]	(16)
EVI	$2.5 \times ((R_{800} - R_{670}) / (R_{800} - (6 \times R_{670}) - (7.5 \times R_{475}) + 1))$	[25]	(17)
MCARI	$((R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{550})) \times (R_{700} / R_{670})$	[26]	(18)
MCARI/OSAVI	$\frac{((R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{550})) \times (R_{700} / R_{670})}{(1 + 0.16) \times (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16)}$	[26]	(19)
Boochs ^A	D_{703}	[27]	(20)
$\text{DR}_{715}/\text{DR}_{705}$	$\text{DR}_{715}/\text{DR}_{705}$	[16, 28]	(21)
BmSR_{705}	$(\text{DR}_{750} - \text{DR}_{445}) / (\text{DR}_{750} + \text{DR}_{445})$	[29]	(22)
REIP	红边内最大一阶导数波长	[15]	(23)
FDNDVI[750, 550]	$(\text{DR}_{750} - \text{DR}_{550}) / (\text{DR}_{750} + \text{DR}_{550})$	[30]	(24)
BmND_{705}	$(\text{DR}_{750} - \text{DR}_{445}) / (\text{DR}_{750} + \text{DR}_{705} - 2\text{DR}_{445})$	[29]	(25)
SRE/SBE	红边内最大一阶微分与蓝边内最大一阶微分的比值	[31]	(26)
MCCV	全波段中原始光谱反射率与光合色素含量相关性最大波长处的反射率值	本文	(27)
MCCFDV	全波段中一阶导数光谱反射率与光合色素含量相关性最大波长处的一阶导数值	本文	(28)

续表

光谱指数 Spectral indices	计算公式 Algorithm formula	参考文献 References	编号 Eq.ID
RVI _{668/723}	R_{668}/R_{723}	本文	(29)
RVI _{723/703}	R_{723}/R_{703}	本文	(30)
RVI _{752/703}	R_{752}/R_{703}	本文	(31)
RVI _{723/525}	R_{723}/R_{525}	本文	(32)
FDRVI[723,668]	DR_{723}/DR_{668}	本文	(33)
FDRVI[723,703]	DR_{723}/DR_{703}	本文	(34)
FDRVI[752,703]	DR_{752}/DR_{703}	本文	(35)
FDRVI[723,525]	DR_{723}/DR_{525}	本文	(36)
FDNDVI[723,668]	$(DR_{723} - DR_{668})/(DR_{723} + DR_{668})$	本文	(37)
FDNDVI[723,703]	$(DR_{723} - DR_{703})/(DR_{723} + DR_{703})$	本文	(38)
FDNDVI[752,703]	$(DR_{752} - DR_{703})/(DR_{752} + DR_{703})$	本文	(39)
FDNDVI[525,723]	$(DR_{525} - DR_{723})/(DR_{525} + DR_{723})$	本文	(40)

R_x 指波长 x nm 处原始光谱反射率; DR_x 指波长 x nm 处一阶导数光谱反射率

1.4 模型构建、评价与验证

采用交叉验证法对数据建模,从所有的有效样本中,随机选取 24 个样本作为建模数据集,其他 12 个作为验证数据集。利用建模数据集,以各高光谱植被指数为自变量 x ,互花米草光合色素含量为因变量 y 建立估测模型。对同一组数据,建模过程中,选取直线回归、指数回归、对数回归以及乘幂回归中决定系数 R^2 最大的模型进行建模,并相应给出模型的决定系数($C-R^2$)和均方根误差(RMSEC)作为精度评价标准。

模型建立后,利用验证数据集对其预测能力进行检验,并相应给出验证模型的决定系数($P-R^2$)、均方根误差(RMSEP)和斜率(Slope)作为精度评价标准。最终模型的确定取决于相对较高的决定系数($C-R^2$ 、 $P-R^2$)和相对较低的均方根误差(RMSEC、RMSEP);此外结合验证模型的 Slope 的大小进行精度检验,Slope 越接近 1,模型的精度就越高^[32-33]。其中,

$$RMSE = \sqrt{\sum (y_m - y_c)^2 / n} \tag{41}$$

式中, y_m 是光合色素含量的实测值, y_c 是模型的估测值, n 为样本的数量。

2 结果与分析

2.1 互花米草光合色素统计分析

为了减少误差和奇异值对模型拟合的影响,先对冠层水平互花米草叶片光合色素测定数据进行统计描述分析和奇异值去除,奇异值的判定方法见文献^[34]。奇异值删除后,叶片光合色素与光谱配套的数据样本总数为 36。随机选取 24 个样本作为建模数据集,其他 12 个作为验证数据集,各样本光合色素统计描述见表 2。

表 2 互花米草叶片光合色素含量统计描述

Table 2 Statistic description of LPPC in *S. alterniflora*

色素 Pigment	数据集 Datasets	样本数 Samples	平均值 Mean/(mg/g)	最大值 Max/(mg/g)	最小值 Min/(mg/g)	标准差 Standard deviation /(mg/g)	变异系数 Coefficient of variation/%
Chla	建模 Calibration	24	1.350	2.412	0.682	0.446	0.345
	验证 validation	12	1.343	2.577	0.792	0.472	0.351
Chlb	建模	24	0.473	0.895	0.266	0.155	0.328
	验证	12	0.451	0.866	0.296	0.155	0.344
Cars	建模	24	0.276	0.500	0.101	0.097	0.351
	验证	12	0.275	0.471	0.141	0.096	0.349

由表 2 可知, Chla 含量的最大值为 2.577 mg/g, 最小值为 0.682 mg/g; Chlb 含量的最大值为 0.895 mg/g, 最小值为 0.266 mg/g; Cars 含量的最大值为 0.500 mg/g, 最小值为 0.101 mg/g; 其光合色素含量有较大的分布区间, 可满足建模要求。

2.2 互花米草光谱特征分析

图 2 是互花米草叶片原始光谱平均反射率与一阶导数光谱平均反射率曲线。从图 2 可知, 互花米草原始光谱反射率曲线具有典型植物光谱特征。在绿光波段(520—600nm), 波长 550nm 附近产生了一个明显反射峰(绿峰), 主要是绿光对光合色素的强烈反射造成的; 在红光波段, 波长 670nm 附近产生了一个较明显的吸收谷(红谷), 主要是红光对叶绿素的吸收作用产生的。在近红外波段(700—900 nm), 其光谱特征主要受叶片结构和水分的影响, 最显著的特征是在 700—800nm 之间有一反射的陡坡(红边)。一阶导数光谱反射率在 525nm 和 727nm 处出现两个极大值, 代表光谱反射率增速最快的极点, 525nm 处反射率上升是由于叶绿素的反射作用增强引起的, 而 727 nm 处主要由于红边效应的作用(图 2)。

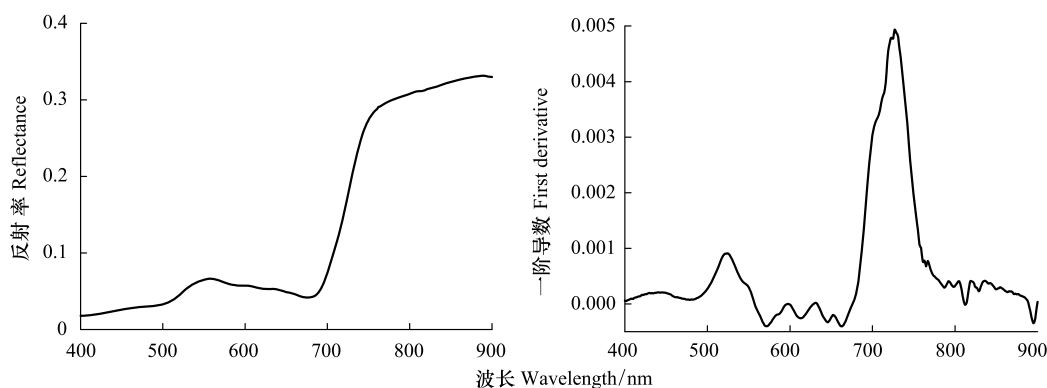


图 2 互花米草反射率光谱与一阶导数光谱曲线

Fig.2 Reflected spectra and first derivative curves of *S. alterniflora*

2.3 叶片光合色素含量与原始光谱及一阶导数光谱的相关性分析

图 3 显示互花米草叶片光合色素含量与原始光谱及一阶导数的相关性。由图 3 可知, Chla、Chlb、Cars 与原始光谱的相关性变化趋势一致, 都呈较强的负相关关系。在红至近红外波段(700—900 nm), 原始光谱与光合色素最大相关性出现在 703nm 附近, Chla、Chlb、Cars 与原始光谱达到了最大相关性值分别为 -0.747、-0.682、-0.746; 拐点出现在 752 nm 附近, 从 700 到 752 nm 之间, 相关系数值逐渐增大, 而 752nm 后相关系数值趋于稳定。在可见光波段(400—700 nm), 互花米草叶片光合色素含量与一阶导数相关性波动性比较大, 出现多个极值和拐点。

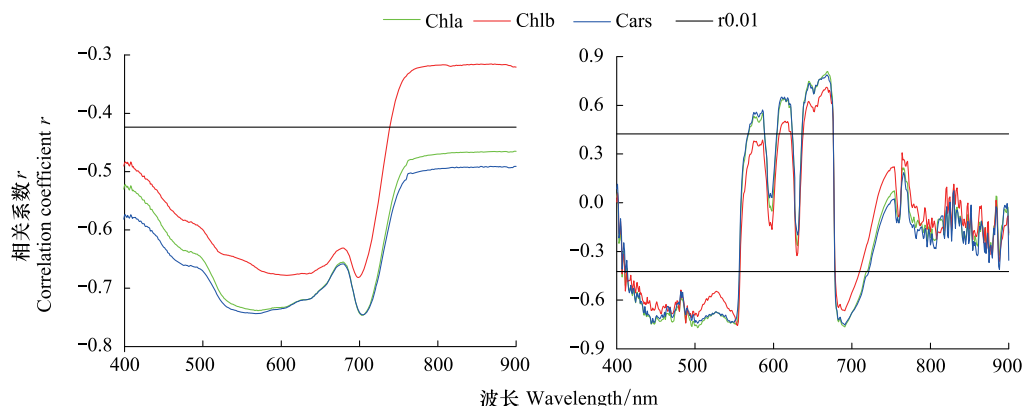


图 3 叶片光合色素与原始反射率及一阶导数光谱反射率的相关性 ($n=36$)

Fig.3 Correlograms between LPPC and raw reflected spectral and its first derivative spectral

在绿光波段(520—600 nm),波长 525 nm 处是互花米草光合色素与一阶导数光谱的一个极值点,系蓝边的拐点产生;在红光波段(630—690 nm),Chla、Chlb、Cars 在 668 nm 处达到了最大的正相关关系,值分别为 0.808,0.711,0.787,系红光吸收谷的位置;在 691 nm 处出达到了最大的负相关关系,值分别为-0.764,-0.665,-0.753;在红边区域(680—760 nm),723 nm 附近出现拐点,波长小于 723 nm 时光谱一阶导数与叶片光合色素相关性达到 0.01 极显著相关水平的检验($r = 0.4238, n = 36$),波长大于 723 nm 时没有通过检验(图 3)。

2.4 互花米草叶片光合色素含量与高光谱指数的相关性分析

通过互花米草叶片光合色素与高光谱植被指数之间的相关性分析(表 3)可知,所有光谱指数中,基于原始光谱组合的植被指数相对于单波段的 MCCV 没有明显优势,而对于导数光谱所组合的植被指数相对于导数单波段的 MCCFDV 优势明显,并且基于原始光谱反射率组合的植被指数与光合色素含量间的相关系数 r 整体低于基于一阶导数光谱反射率组合的植被指数,这说明一阶导数光谱反射率组合的植被指数更适合用于估算互花米草光合色素含量。其中,FDNDVI[752,703]与 Chla 相关系数 r 达到最大,值为 0.842;FDRVI[723,525]与 Chlb 的相关性达到最大,值为 0.894;FDNDVI[723,525]与 Cars 的相关性达到最大,值为 0.835。

表 3 叶片光合色素含量与高光谱植被指数之间的相关性分析 ($n = 36$)

Table 3 Correlation coefficients between hyperspectral vegetable indices and LPPC

指数 Indices	相关系数 r Correlation coefficient r			指数 Indices	相关系数 r Correlation coefficient r		
	Chla	Chlb	Cars		Chla	Chlb	Cars
MCCV	-0.747	-0.682	-0.746	RVI _{752/703}	0.765	0.824	0.723
RVI _{750/550}	0.703	0.768	0.668	RVI _{723/525}	0.486	0.534	0.487
RVI _{750/700}	0.715	0.792	0.674	MCCFDV	0.808	0.711	0.787
R_{762}/R_{734}	0.729	0.773	0.683	Boochs ^A	-0.651	-0.517	-0.657
MSR	0.698	0.769	0.658	DR_{715}/DR_{705}	0.700	0.748	0.624
NDVI	0.567	0.439	0.580	BmSR ₇₀₅	0.744	0.769	0.705
PRI	-0.124	0.099	-0.102	REIP	0.583	0.570	0.566
NDVI705	0.658	0.769	0.698	FDNDVI[750,550]	0.757	0.811	0.715
TVI	0.548	0.624	0.534	BmND ₇₀₅	0.833	0.858	0.809
mND_{705}	0.776	0.844	0.801	SRE/SBE	0.831	0.883	0.812
Green-NDVI	0.664	0.719	0.635	FDRVI[668,723]	0.827	0.864	0.831
SIPI	0.441	0.506	0.444	FDRVI[723,703]	0.839	0.889	0.826
CARI	0.551	0.554	0.522	FDRVI[752,703]	0.831	0.866	0.791
EVI	0.555	0.447	0.581	FDRVI[723,525]	0.841	0.894	0.820
MCARI	-0.609	-0.489	-0.604	FDNDVI[723,668]	-0.821	-0.856	-0.829
MCARI/OSAVI	-0.749	-0.659	-0.726	FDNDVI[723,703]	0.836	0.880	0.832
RVI _{668/723}	-0.326	-0.398	-0.332	FDNDVI[752,703]	0.842	0.8650	0.811
RVI _{723/703}	0.631	0.702	0.602	FDNDVI[525,723]	-0.840	-0.881	-0.835

2.5 互花米草叶片光合色素含量的高光谱遥感估算模型构建与验证

挑选表 3 中至少与一种光合色素相关性 r 值大于 0.8 的 12 个植被指数利用建模数据集构建模型,以 $C-R^2$ 、RMSEC 为评价指标,结果如表 4 所示。表 4 可知,除 mND_{705} 、MCCFDV 外其他指数对互花米草光合色素的估算都取得了较好的效果。其中,对 Chla 的建模精度最高的 4 个指数依次为 FDRVI[752,703]、FDNDVI[752,703]、BmND₇₀₅、FDNDVI[723,703];对 Chlb 的建模精度最高的 4 个指数依次为 FDRVI[723,525]、SRE/SBE、FDNDVI[723,525]、FDRVI[723,703];对 Cars 的建模精度最高的 4 个指数依次为 FDNDVI[723,525]、SRE/SBE、FDNDVI[723,703]、FDRVI[723,703]。

为了验证模型的适用性和稳健性,利用验证数据集对模型预测能力进行验证,以 $P-R^2$ 、RMSEP、Slope 为

评价指标,其结果如表4所示。对 Chla 的验证精度最高的4个指数依次为 FDRVI[723,525]、 mND_{705} 、FDRVI[723,703]、FDNDVI[723,703];对 Chlb 的验证精度最高的4个指数依次为 FDRVI[723,525]、MCCFDV、FDNDVI[723,703]、FDRVI[723,703];对 Cars 的验证精度最高的4个指数依次为 FDRVI[723,703]、FDNDVI[723,703]、 mND_{705} 、FDRVI[723,525]。

表4 叶片光合色素含量估算模型及评价指标

Table 4 LPPC estimation models and evaluating indicator

指数 Indices	光合色素 Pigment	模型函数 Model function	建模 Calibration		验证 Validation		
			决定系数 $C-R^2$	均方根误差 RMSEC	决定系数 $P-R^2$	均方根误差 RMSEP	斜率 Slope
mND_{705}	Chla	$y = 5.871x - 2.0854$	0.5850	0.2815	0.7104	0.2818	0.4839
	Chlb	$y = 2.3211x - 0.8854$	0.7553	0.0752	0.7081	0.0961	0.5818
	Cars	$y = 1.2957x - 0.4826$	0.6113	0.0588	0.7021	0.0513	0.5508
MCCFDV	Chla	$y = 2.6972e^{3035.8x}$	0.7370	0.2364	0.7009	0.2852	0.4663
	Chlb	$y = 0.7971e^{2032x}$	0.5071	0.1053	0.7436	0.0966	0.3913
	Cars	$y = 0.5096e^{2414.3x}$	0.5015	0.0712	0.5718	0.0669	0.3844
$BmND_{705}$	Chla	$y = 2.6476x + 2.1173$	0.7573	0.2153	0.6343	0.3006	0.4575
	Chlb	$y = 0.9574x + 0.7502$	0.8181	0.0648	0.6545	0.1021	0.5118
	Cars	$y = 0.5487x + 0.4346$	0.6980	0.0519	0.6149	0.0617	0.4589
SRE/SBE	Chla	$y = 1.8671\ln(x) - 1.8124$	0.7388	0.2233	0.6646	0.2865	0.5125
	Chlb	$y = 0.6992\ln(x) - 0.7115$	0.8559	0.0577	0.6712	0.0939	0.5874
	Cars	$y = 0.3972\ln(x) - 0.3971$	0.7172	0.0502	0.6502	0.0585	0.5301
FDRVI[723,703]	Chla	$y = 2.5189\ln(x) + 0.3622$	0.7376	0.2238	0.7079	0.2799	0.4867
	Chlb	$y = 0.9384\ln(x) + 0.1047$	0.8458	0.0597	0.7301	0.0938	0.5601
	Cars	$y = 0.5337\ln(x) + 0.0663$	0.7105	0.0508	0.7177	0.0556	0.5098
FDRVI[668,723]	Chla	$y = 16.59x + 2.7481$	0.6992	0.2687	0.6753	0.2397	0.5619
	Chlb	$y = 6.179x - 0.9935$	0.8013	0.0928	0.6682	0.0678	0.6341
	Cars	$y = 3.5859x - 0.5778$	0.7009	0.0531	0.6869	0.0516	0.6021
FDRVI[752,703]	Chla	$y = 1.337\ln(x) + 2.238$	0.7736	0.2079	0.6328	0.2956	0.4744
	Chlb	$y = 0.4785\ln(x) + 0.7906$	0.8186	0.0647	0.6494	0.1005	0.5238
	Cars	$y = 0.2763\ln(x) + 0.4591$	0.7091	0.0509	0.6059	0.0612	0.4715
FDRVI[723,525]	Chla	$y = 0.36x + 0.5937$	0.7077	0.2246	0.7295	0.2619	0.5417
	Chlb	$y = 0.1363x + 0.2637$	0.8579	0.0522	0.8058	0.0809	0.5988
	Cars	$y = 0.0706x + 0.1347$	0.6766	0.0507	0.6992	0.0542	0.5533
FDNDVI[723,668]	Chla	$y = -8.2384\ln(x) + 2.7425$	0.6989	0.2398	0.6733	0.2693	0.5617
	Chlb	$y = -3.0685\ln(x) + 0.9914$	0.8010	0.0678	0.6659	0.0931	0.6336
	Cars	$y = -1.7812\ln(x) + 0.5766$	0.7009	0.0516	0.6856	0.0532	0.6024
FDNDVI[723,703]	Chla	$y = 5.3318x + 0.3237$	0.7379	0.2237	0.6997	0.2826	0.4869
	Chlb	$y = 1.9849x + 0.0907$	0.8448	0.0598	0.7187	0.0953	0.5596
	Cars	$y = 1.1311x + 0.0578$	0.7126	0.0506	0.7132	0.0559	0.5127
FDNDVI[752,703]	Chla	$y = 2.8975x + 2.2634$	0.7655	0.2116	0.6580	0.2894	0.4726
	Chlb	$y = 1.0408x + 0.8008$	0.8159	0.0652	0.6802	0.0968	0.5258
	Cars	$y = 0.5966x + 0.4636$	0.6963	0.0519	0.6158	0.0608	0.4628
FDNDVI[723,525]	Chla	$y = -8.7581x - 4.6124$	0.7379	0.2239	0.6037	0.3425	0.4996
	Chlb	$y = -3.2737x - 1.756$	0.8541	0.0581	0.6246	0.1225	0.5829
	Cars	$y = -1.8677x - 0.996$	0.7219	0.0497	0.6058	0.0692	0.5173

综合比较,虽然已见报道的指数中 $BmND_{705}$ 、SRE/SBE 等模型(图4)对互花米草的光合色素的建模精度很高,但其验证模型的精度都相对较低;而 mND_{705} 预测精度很高,但其建模模型精度却较低,说明已见报道的

植被指数建立的互花米草光合色素模型的稳定性不强,不是最佳估算模型。为了找到更好的估算模型,本文选取建模精度和预测精度排名都能在所有估算模型前 4 名的模型作为最佳模型,这样既保证了模型的精度又使模型的可靠性更强。发现对于单一色素含量估算而言,Chla 和 Cars 的最佳估算指数为 FDNDVI[723, 703], Chlb 的最佳估算指数为 FDRVI[723, 525], 其直观形状如图 4 所示。其中 FDNDVI[723, 703] 建立的 Chla 估算模型的 $C-R^2$ 、RMSEC、 $P-R^2$ 、RMSEP、Slope 分别为 0.7379、0.2237、0.6997、0.2826、0.4869; FDRVI[723, 525] 建立的 Chlb 估算模型的 $C-R^2$ 、RMSEC、 $P-R^2$ 、RMSEP、Slope 分别为 0.8579、0.0522、0.8058、0.0809、0.5988; FDNDVI[723, 703] 建立的 Cars 估算模型的 $C-R^2$ 、RMSEC、 $P-R^2$ 、RMSEP、Slope 分别为 0.7126、0.0506、0.7132、0.0559、0.5127。

整体上看,如果只用一个植被指数来估算 3 种不同的光合色素含量,那么以 FDRVI[723, 703] 建立的对数估算模型效果最佳,它是所有指数中唯一的对 Chla、Chlb、Cars 估算精度 $C-R^2$ 、 $P-R^2$ 均能达到 0.7 以上的指数,且其 RMSEC、RMSEP、Slope 精度排名位于所有模型前 4 以上(图 4)。结合单一色素估算的最佳波段,不难发现红边区域一阶导数光谱是互花米草色素含量估算的最佳波段。

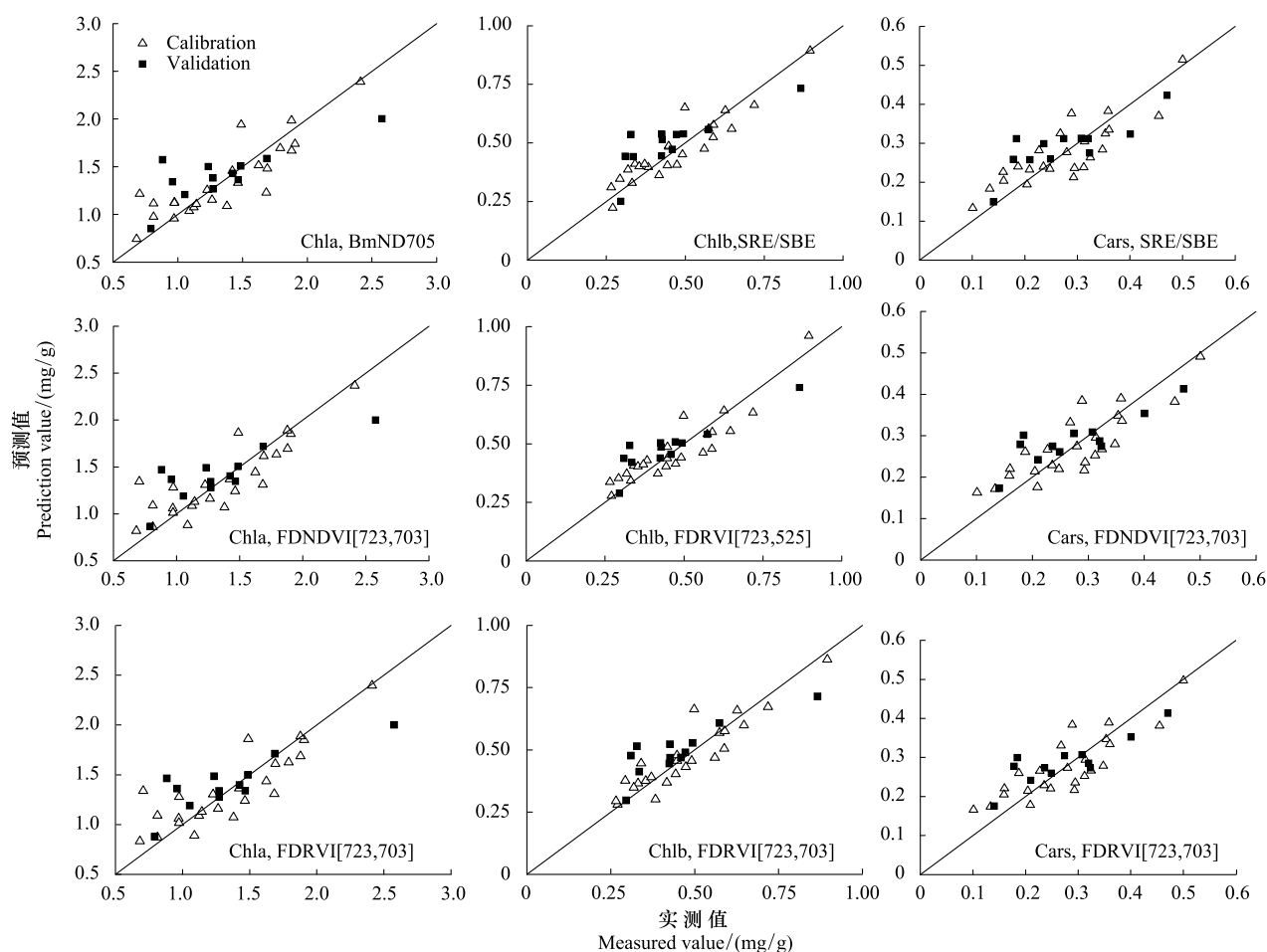


图 4 叶片光合色素含量实测值与预测值拟合散点图

Fig.4 Scatter plots describing the measured and predicted LPPC

3 讨论

3.1 冠层水平互花米草叶片光合色素含量估算的最佳波段

冠层水平,植物的光谱反射率由绿色植物和非绿色植物的光谱组成,它受植物冠层结构(叶片的方向性和阴影等)和土壤背景等外部因素的影响^[35]。为了消除外部因素对植物光谱产生的噪音对估测精度的影响,

研究者通常使用导数光谱技术、相关性分析、主成分分析、植被指数构建、红边位移效应分析等方法确定光合色素估算的最佳波段。杨杰等^[36]通过任意两波段组合的比值光谱指数和归一化光谱指数与水稻叶绿素含量相关性分析表明,709、724、745 nm 和 749 nm 波段组合的指数能较好的预测 Chla、Chlb 的含量。Zarco-Tejada 等^[37]通过叶片辐射传输模型 PROSPECT-5 模拟发现由 515 nm 和 570 nm 两波段组合的比值植被指数 R_{515}/R_{570} 用于人工种植葡萄的 Cars 的估算精度最高。Kochubey 等^[38]对冬小麦、玉米、甜菜和野生葡萄四种农作物叶片叶绿素含量变化引起一阶导数光谱反射率值变化的研究发现,当农作物叶片的叶绿素含量从小到大变化时,红边区域(690—730 nm)一阶导数光谱反射率值的变化也出现从小到大的相应变化,725、715 nm 及 702 nm 是表现最敏感的波段。

本文充分借鉴以上研究成果,利用导数光谱技术和相关系数法(图 2 中的峰值点或拐点)得到了互花米草光合色素敏感的波段,并对其构建光谱指数进行验证(表 4),表明 723、703、525、752、668 nm 的一阶导数光谱是估测互花米草叶片光合色素含量的敏感波段。由此可知,冠层水平,红边导数光谱(680—760 nm)是估测互花米草叶片光合色素含量的最佳波段,这一研究结论与冯伟等^[31]、Main 等^[4]研究结果类似,只是所选取的具体波段不一样。这可能有以下几方面的原因^[4,7]:(1)研究表明,红边是主要由植物的色素含量、水分含量等固有的生化参量决定的,并且相对于其他波段(蓝光或红外波段)不易受土壤等背景影响的波段,而运用红边导数光谱处理进一步的消除了土壤等背景光谱的影响,故用红边一阶导数波段组合的光谱指数反演叶绿素含量效果比较好;(2)估算的具体植物类别不同,他们的冠层结构可能有差异,且湿地植物光谱变异性强,所以导致具体使用的光谱波段不一样。

3.2 互花米草光合色素含量高光谱遥感估测的可行性

利用高光谱遥感技术精确估测湿地植物互花米草的光合色素,对于监测其生长状况和生态评估管理具有重要的意义。虽然本文对互花米草光合色素含量估算取得了较好的效果,但本研究取得的研究成果是对实验条件进行了严格的控制下取得的。首先采样点位于闽江河口湿地生态定位站观鸟台以西 200 m 附近的小区,湿地土壤单一,地形平坦;其次,互花米草的叶片冠层光谱采集是基于模拟陆地植物光谱条件下采集的,包括采集的时间是互花米草不受潮汐影响的时间段,地面没有明显积水以及尽量选取接近平直型的冠层进行光谱采集。但真实的湿地环境复杂,不但湿地植物生物多样性高,而且受到潮汐的影响,而本研究只研究了秋季互花米草色素含量的高光谱估算模型,并没有对不同季节、不同湿地环境条件下互花米草光合色素估测模型进行研究,这也是今后需进一步深入研究的方向。此外,在冠层水平下证明用高光谱能够准确测定互花米草的光合色素含量,在卫星遥感也不一定行,还需研究相应的反演模型进一步能使本研究的结论推广至航空或航天高光谱遥感。

4 结论

本研究通过导数光谱技术、相关性分析法和构建新的植被指数等高光谱处理方法,利用地面实测数据,比较 22 种已报道的植被指数和 14 种新构建的植被指数在估算冠层水平互花米草叶片光合色素含量中的表现,得出的主要结论如下:

(1)不同色素含量与原始光谱反射率和一阶导数光谱反射率在各波长范围相关性变化趋势具有一致性,但其相关系数大小有所差异。

(2)已报道指数和新构建的指数均表明,一阶导数光谱反射率组合的植被指数用于估算互花米草光合色素的含量优于原始光谱反射率。

(3)通过导数光谱技术、相关性分析和最优估算模型精度比较得出,互花米草光合色素估算的敏感波段依次是 723、703、525、752、668 nm 的一阶导数光谱。

(4)对于单一色素的估算,Chla、Chlb、Cars 的最佳估算模型分别是由 FDNDVI[723,703]、FDRVI[723,525]、FDNDVI[723,703]建立的线性估算模型。

(5)对于不同色素使用同一植被指数估算而言,指数 FDRVI[723,703]建立的对数估算模型效果最好。

参考文献(References):

- [1] Xue L H, Yang L Z. Deriving leaf chlorophyll content of green-leafy vegetables from hyperspectral reflectance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(1): 97-106.
- [2] 王福民, 黄敬峰, 刘占宇, 王秀珍. 水稻色素含量估算的最优比值色素指数研究. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2009, 35(3): 321-328.
- [3] Wu C Y, Niu Z, Tang Q, Huang W J. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(8/9): 1230-1241.
- [4] Main R, Cho M Z, Mathieu R, O'Kennedy M M, Ramoelo A, Koch S. An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(6): 751-761.
- [5] 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. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 526-537.
- [6] Leonard L A, Luther M E. Flow hydrodynamics in tidal marsh canopies. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40(8): 1474-1484.
- [7] Adam E, Mutanga O, Rugege D. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: A review. *Wetlands Ecology and Management*, 2010, 18(3): 281-296.
- [8] 卢霞, 刘付程, 田慧娟. 大米草室内叶片光谱特征参数与叶绿素浓度关系研究. *测绘科学*, 2010, 35(6): 99-102.
- [9] 李凤秀, 张柏, 刘殿伟, 王宗明, 宋开山, 靳华安, 刘焕军. 湿地小叶章叶绿素含量的高光谱遥感估算模型. *生态学杂志*, 2008, 27(7): 1077-1083.
- [10] Ge S K, Carruthers R I, Spencer D F, Yu Q. Canopy assessment of biochemical features by ground-based hyperspectral data for an invasive species, giant reed (*Arundo donax*). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 147(1/3): 271-278.
- [11] 曾从盛, 张林海, 仝川. 闽江河口湿地芦苇和互花米草氮、磷养分季节动态. *湿地科学*, 2009, 7(1): 16-25.
- [12] 高元竞. 闽江河口湿地生态服务功能价值评价 [D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- [13] 林辉, 臧卓, 刘秀英, 孙华. 森林树种高光谱遥感研究. 北京: 中国林业出版社, 2011: 23-23.
- [14] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 289-298.
- [15] Haboudane D, Millera J R, Tremblay N, Zarcote-Jada P J, Dextraze L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2/3): 416-426.
- [16] 王强, 易秋香, 包安明, 罗毅, 赵金. 基于高光谱反射率的棉花冠层叶绿素密度估算. *农业工程学报*, 2012, 28(15): 125-132.
- [17] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2/3): 337-354.
- [18] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127-150.
- [19] Gamon J A, Serrano L, Surfus J S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 1997, 112(4): 492-501.
- [20] Gitelson A A, Merzlyak M N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platnoides* L. leaves. spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 1994, 143(3): 286-292.
- [21] Yang X H, Huang J F, Wang J W, Wang X Z, Liu Z Y. Estimation of vegetation biophysical parameters by remote sensing using radial basis function neural network. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2007, 8(6): 883-895.
- [22] Gitelson A A, Merzlyak M N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(3-4): 494-500.
- [23] Peñuelas J, Gamon J A, Fredeen A L, Merino J, Field C B. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 135-146.
- [24] Kim M S, Daughtry C S T, Chappelle E W, McMurtrey III J E, Walthall C L. The Use of High Spectral Resolution Bands for Estimating Absorbed Photosynthetically Active Radiation (A par). France: Proceedings of the 6th Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing Vai D' Isere, 1994: 299-306.
- [25] Huete A R, Liu H Q, Batchily K, Vanleeuwen W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59(3): 440-451.
- [26] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, de Colstoun E B, McMurtrey J E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy

- reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(2): 229-239.
- [27] Boochs F, Kupfer G, Dockter K, Kühbauch W. Shape of the red edge as vitality indicator for plants. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(10): 1741-1753.
- [28] Vogelmann J E, Rock B N, Moss D M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(8): 1563-1575.
- [29] Le Maire G, François C, Dufrêne E. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(1): 1-28.
- [30] 蒋金豹, 陈云浩, 黄文江. 用高光谱微分指数估测条锈病胁迫下小麦冠层叶绿素密度. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(8): 2243-2247.
- [31] 冯伟, 朱艳, 田永超, 马吉锋, 庄森, 曹卫星. 基于高光谱遥感的小麦冠层叶片光合色素密度监测. *生态学报*, 2008, 28(10): 4902-4915.
- [32] 任红艳, 史学正, 庄大方, 江东, 徐新良, 黄耀欢, 刘磊, 施润和. 土壤全氮含量与碳氮比的高光谱反射估测影响因素研究. *遥感技术与应用*, 2012, 27(3): 372-379.
- [33] 梁亮, 杨敏华, 张连蓬, 林卉, 周兴东. 基于 SVR 算法的小麦冠层叶绿素含量高光谱反演. *农业工程学报*, 2012, 28(20): 162-171.
- [34] 黄敬峰, 王福民, 王秀珍. 水稻高光谱遥感实验研究. 杭州: 浙江大学出版社, 2010: 136-161, 284-300.
- [35] Blackburn G A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(3): 273-285.
- [36] 杨杰, 田永超, 姚霞, 曹卫星, 张玉森, 朱艳. 水稻上部叶片叶绿素含量的高光谱估算模型. *生态学报*, 2009, 29(12): 6561-6571.
- [37] Zarco-Tejada P J, Guillén-Climent M L, Hernández-Clemente R, Catalinac A, González M R, Martín P. Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171-172: 281-284.
- [38] Kochubey S M, Kazantsev T A. Changes in the first derivatives of leaf reflectance spectra of various plants induced by variations of chlorophyll content. *Journal of Plant Physiology*, 2007, 164(12): 1648-1655.