

DOI: 10.5846/stxb201309262374

章文龙, 曾从盛, 高灯州, 胡伟芳, 陈晓艳, 林伟. 闽江河口湿地秋茄叶绿素含量高光谱遥感估算. 生态学报, 2014, 34(21): 6190-6197.

Zhang W L, Zeng C S, Gao D Z, Hu W F, Chen X Y, Lin W. Estimating the chlorophyll content of *Kandelia candel* based on hyper-spectral remote sensing in the Min River Estuarine wetland. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6190-6197.

闽江河口湿地秋茄叶绿素含量高光谱遥感估算

章文龙^{1,2}, 曾从盛^{1,2,3,*}, 高灯州^{1,2}, 胡伟芳^{1,2}, 陈晓艳¹, 林伟¹

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福州 350007;

3. 湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007)

摘要: 叶绿素含量是表征植被胁迫状态的一个重要指示因子, 同时也是其它生化参数估算的重要基础, 对其进行遥感反演具有重要意义。选取闽江河口秋茄(*Kandelia candel*)作为研究对象, 分别于 2013 年 4 月和 7 月采集叶片, 室内测定其叶片正面和反面反射光谱, 同时测定其叶绿素含量(单位面积含量和单位质量含量)。选取 13 个常用参数进行敏感性分析, 并进一步选取与叶绿素相关系数较高的参数建立估算模型。结果表明, 秋茄叶片反面反射率高于正面, 尤其在绿光波段和近红外波段部分区域(1450—2450 nm)表现较为明显。对所选取的大部分参数而言, 其与单位面积叶绿素含量的相关系数要高于与单位质量叶绿素含量的相关系数; 基于正面光谱计算的光谱参数与叶绿素含量的相关系数要高于基于反面光谱计算的光谱参数。估算与验证模型结果进一步表明, TCARI、Vog1、Vog2 和 Vog3 能较好的估算不同生长期秋茄叶片的叶绿素含量。此外, 在使用 GM、Carter2 和 PSSRb 估算叶片叶绿素含量时, 可以适当考虑反面光谱的应用。这些结果也预示着利用高光谱遥感数据估算秋茄叶片叶绿素含量是可行的, 并且具有较高的估算精度。

关键词: 叶绿素; 高光谱; 秋茄; 闽江河口

Estimating the chlorophyll content of *Kandelia candel* based on hyper-spectral remote sensing in the Min River Estuarine wetland

ZHANG Wenlong^{1,2}, ZENG Congsheng^{1,2,3,*}, GAO Dengzhou^{1,2}, HU Weifang^{1,2}, CHEN Xiaoyan¹, LIN Wei¹

1 School of geographical sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Research Center of Wetlands in Subtropical Region, Fuzhou 350007, China

3 Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process (Fujian Normal University), Ministry of Education, Fuzhou 350007, China

Abstract: *Kandelia candel* is widely distributed in tropical and subtropical region, and plays a key role in maintaining wetland function. Chlorophyll content is necessary for studying productivity and photosynthesis of vegetation, which can also indicates the healthy condition of vegetation living in a stressed environment. Remote sensing techniques offer timely, up-to-date, and relatively accurate information such as biomass, leaf area index and chlorophyll content of wetland vegetation. Although plenty research efforts on estimating chlorophyll content from spectral reflectance measurements have been mainly focused on forest and crop ecosystems. However, very limited work has been done at wetland vegetation. The aim of this study was to estimate the chlorophyll content of *K. candel* based on hyper-spectral remote sensing data. This study was carried out in the Min River Estuary, which is one of the most important estuarine wetlands in Southeast China. The laboratory spectral reflectance of *K. candel* leaves (front and back) was determined by ASD FieldSpec2500 in April, 2013 and July, 2013, and the leaf chlorophyll content (two dimensional) was measured simultaneously. Thirteen parameters including visible ratios (NPC1 and PRI1), visible/NIR ratios (NDVI, Lic2, TCARI, MCRAI and PSSRa) and red edge

基金项目: 国家基础科学人才培养基金(J1210067); 福建师范大学地理科学学院研究生创新基金

收稿日期: 2013-09-26; 网络出版日期: 2014-03-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: czeng@fjnu.edu.cn

reflectance-ratio (Vog1, Vog2, Vog3, GM, Catter2 and CI) indices, were used to establish the estimation models. The results showed that the reflectance of leaf back was higher than that of leaf front, especially more obvious in green band and part of the near infrared band (1450—2450 nm). The correlation coefficients between chlorophyll content and most of the parameters were higher when selecting area instead of quality as dimension. And the most of the parameters calculated by leaf front reflectance had higher correlation coefficient with chlorophyll content than that of leaf back. Besides, we also observed that Vog1, Vog2 and Vog3 not only had higher correlation coefficient with chlorophyll content, but were also slightly affected by leaf growth phase and structure. The limitations of using NDVI for estimation of chlorophyll content had been reported in the literature, and NDVI also had lower correlation coefficient with chlorophyll content of *K. candel* leaves. Consequently, TCARI, Vog1, Vog2 and Vog3 calculated by leaf front reflectance and the chlorophyll content in per unit area were selected to establish the estimation and validation models. The root means square error (RMSE) of estimation models ranged from 4.93 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ to 10.24 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, while it ranged from 4.17 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ to 9.56 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ in validation models. These results indicated that TCARI, Vog1, Vog2 and Vog3 were the most useful parameters to estimate the chlorophyll content of *K. candel* during different growth periods. In addition, GM, Carter2, PSSRb generally had higher correlation coefficient with chlorophyll content when they were calculated by leaf back reflectance, which indicated that we should consider using leaf back reflectance when we choose GM, Carter2, PSSRb to estimate chlorophyll content of *K. candel* leaves. To some extent, it can be concluded that remote sensing technology could play a vital role in the chlorophyll content retrieval of *K. candel* by laboratory spectral reflectance.

Key Words: chlorophyll; hyper-spectral; *Kandelia candel*; Min River Estuary

红树林是滨海或河口湿地重要的生态系统,在防风消浪、促淤保滩、固岸护堤、净化海水和空气等方面发挥重要作用。叶绿素含量是表征植被胁迫状态的一个重要指示因子^[1],同时也是其它生化参数估算的重要基础。利用高光谱遥感数据建立湿地植被叶绿素含量的估算模型,对湿地生态系统的健康状况动态监测、恢复重建以及管理等都具有重要意义。

当前关于叶绿素高光谱估算研究已经取得较大进展,其估算方法大致包括 3 种:回归分析法、物理模型法和光谱参数法。其中光谱参数法在构建指数时一定程度考虑了其物理机制,同时所需波段较少,而被广泛利用^[1]。但尽管如此,各光谱指数受到植被种类、发育阶段及背景环境等多种因素影响^[2],其对不同植被、不同生长期的敏感性及内在的理论解释等仍有待进一步深入研究。目前,常见的光谱参数包括:高光谱的位置变量、高光谱面积变量、可见光比值指数、可见/红外比值指数、红边反射率植被指数和红边导数指数等^[1, 3-4]。为更深入理解各光谱参数的物理机制,部分学者利用 PROSPECT+SAIL 模型,基于实测数据对各参数的叶片结构敏感性进行探讨,发现部分红边反射率比值植被指数对叶片

结构变化比较不敏感,并可以较好的估算叶绿素含量^[1]。孟庆野等^[2]通过模拟和实测进一步发现用红谷代替 670 nm 可以一定程度上提高 TCARI 的估算精度。以往这些研究主要是基于叶片正面的室内光谱或者冠层光谱,对叶片的反面光谱特征关注较少。然而,在实际工作中,叶片反面光谱也是叶片的重要组成部分,且其与叶片正面的结构存在较大差异(特别是颜色和气孔分布)。因此有必要加强基于叶片反面光谱对叶绿素含量反演的研究,并将其与正面光谱的反演结果进行比较。此外,目前常用的叶绿素单位量纲包括单位面积叶绿素含量和单位质量叶绿素含量两种,在秋茄叶片叶绿素含量遥感估算时以哪种量纲表征更为合适,也有待进一步研究。此外,从研究的对象来看,已有研究主要集中在农作物、森林植被及少量湿地植被^[3,5-10],对秋茄(*Kandelia candel*)叶绿素含量的高光谱遥感估算相对匮乏。综上所述,通过测定闽江河口不同生长期秋茄叶片叶绿素含量与叶片正反面光谱,选取 13 个参数建立相应的估算模型,并分析各参数对生长期及叶片结构的敏感性,以期为实现湿地红树林生态系统健康状况遥感监测提供科学参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

鱔鱼滩湿地是闽江口最大的天然洲滩湿地,具有较高的生物多样性,其地理坐标 26°00′36″—26°03′42″ N, 119°34′12″—119°41′40″ E。区内受潮汐作用影响显著,属正规半日潮;气候属南亚热带与中亚热带过渡带,暖热湿润,年均气温为 19.3 °C,年平均降水量 1380 mm 左右,年均降水日数为 153 d;土壤为滨海盐土和沙土, pH 值偏酸性^[11]。湿地植被主要有秋茄、芦苇 (*Phragmites australis*)、短叶茛苳 (*Cyperus malaccensis* Lam. var. *brevifolius* Bocklr)、蔗草 (*Scirpus triquetus*) 和互花米草 (*Spartina alterniflora*) 等。秋茄叶片为椭圆形,长度约为 8—10 cm,宽度约为 4—7 cm。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

以闽江口鱔鱼滩湿地红树科秋茄(树龄约为 7 a)作为研究对象,分别于 2013 年 4 月 20 日和 7 月 20 日采样,每次采样时选取不同植株的新叶和成熟叶,叶片采集后立即放入保温箱,并在 4 h 内送回实验室,进一步清理叶片表面尘埃,用于室内光谱和叶绿素含量测定。

1.2.2 叶片光谱测定

叶片室内反射光谱用美国 ASD (Analytica Spectra Devices, Inc) 公司生产的 FieldSpec2500 进行测定,测量波段范围为 350—2500 nm,其中在 350—1000 nm 光谱分辨率为 3 nm,光谱间隔为 1.4 nm;在 1000—2500 nm 光谱分辨率为 10 nm,光谱间隔为 2 nm。根据秋茄叶片形状特征,选取宽度大于 5 cm 的叶片,利用 BRDF 系统建立相应的测试环境:探头垂直向下,视场角 25°,距离叶片样品表面约为 10 cm,光源使用光谱仪配套的功率为 50 W 的卤素灯,入射天顶角设置为 45°,入射方位角 0°,观测天顶角 0°。测定时,将叶片展开放置于对采集波段接近全吸收的工作台上,先测定叶片正面的反射光谱,然后将叶片反向,测定同一个部位的反面光谱,为确保测量精度,每次测定保存 8 条光谱,15 min 进行 1 次白板校正。

1.2.3 叶片色素含量测定与计算

测定完叶片正面和反面反射光谱后,用自制打

孔器(半径 R 约为 2 cm)取样,并称重记录为 W_1 ,之后去除主要叶脉,叶脉重记录为 W_2 ;将去除叶脉后的叶片剪碎,称取两份,每份 0.20 g,分别加入少量无水乙醇及少量石英砂和碳酸钙粉,将其研磨成匀浆,至组织发白,用无水乙醇将所有溶液洗入离心管,在 4000 转/min 条件下离心 5 min,最后将上清液移入 25 mL 容量瓶定容(此法可有效减少过滤造成叶绿素残留和分解的损失)。最后用紫外可见分光光度计测量 665 nm 和 649 nm 处的吸光度,依据以下公式计算叶绿素浓度^[12]:

$$\text{Chla}(\text{mg/L}) = 13.95 \times D_{665} - 6.88 \times D_{649}$$

$$\text{Chlb}(\text{mg/L}) = 24.96 \times D_{665} - 7.32 \times D_{649}$$

$$\text{Chlt}(\text{mg/g}) = (\text{Chla} + \text{Chlb}) \times V/M$$

$$\text{Chlt}(\mu\text{g}/\text{cm}^2) = \frac{(\text{Chla} + \text{Chlb}) \times V \times 1000}{M \times \pi \times R^2} \times (W_1 - W_2)$$

式中,Chla 和 Chlb 分别为提取液中叶绿素 a 和叶绿素 b 浓度;Chlt (mg/g) 为单位质量叶绿素的含量,Chlt ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 表示单位面积叶绿素含量; D_{649} 和 D_{665} 分别为 649 nm 与 665 nm 吸光度; V 为定容的体积 (mL); M 为测定样品重 (g); W_1 和 W_2 分别指打孔器采集样品总重 (g) 和叶脉重量 (g); R 为打孔器半径 (cm)。

1.2.4 统计分析

利用 ViewSpecPro 软件计算光谱反射率计算;用 SPSS 17.0 计算 Pearson 相关系数;用 Origin 8.0 作图。

1.2.5 光谱参数定义

选取常用的可见光比值植被指数 (NPC1 和 PRI1),可见/近红外比值指数 (NDVI、Lic2、TCARI、MCRAI 和 PSSRa) 和红边反射率植被指数 (Vog1、Vog2、Vog3、GM、Catter2 和 CI) 共 13 个参数用于秋茄叶片叶绿素含量估算,各参数定义如表 1 所示。

1.2.6 检验方法

根据测定的样本数及其叶绿素含量大小,随机挑选出约 1/4 的测定样本用于检验。其中 2013 年 4 月建模样本为 57,检验样本为 16;2013 年 7 月建模样本为 35,检验样本为 12。为衡量各参数的估算精度,分别选取相关系数 (r)、决定系数 (r^2) 和均方根误差 (RMSE) 作为评价指标。在样本数相同的条件下,一般认为 r 和 r^2 越大越好, RMSE 越小越好,

RMSE 的计算公式如下:

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

式中, y_i 为实测值, \hat{y} 为估算值, i 为样点号, n 为样本数。

表 1 高光谱参数定义

Table 1 Hyper-spectral parameters definition

参数计算公式 Calculation formula	文献 References	参数计算公式 Calculation formula	文献 References
$NDVI = (R_{774} - R_{667}) / (R_{774} + R_{667})$	[1, 4]	$Vog3 = R_{740} / R_{720}$	[1, 13]
$MCARI = [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{550})] \times (R_{700} / R_{670})$	[1, 4]	$GM = R_{750} / R_{700}$	[14]
$PSSRa = R_{800} / R_{680}$	[15]	$Cater2 = R_{695} / R_{760}$	[16]
$Lic2 = (R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$	[17]	$CI = (R_{675} \times R_{690}) / (R_{683} \times R_{683})$	[1, 4]
$TCARI = 3[(R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{550})] \times (R_{700} / R_{670})$	[18]	$NPCI = (R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + R_{430})$	[19]
$Vog1 = (R_{734} - R_{747}) / (R_{715} - R_{720})$	[1, 13]	$PR11 = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	[20]
$Vog2 = (R_{734} - R_{747}) / (R_{715} - R_{726})$	[1, 13]		

2 结果与分析

2.1 秋茄叶片正反面反射光谱特征比较

为对比秋茄叶片正反面光谱特征,将其正面光谱和反面光谱求算平均值,结果如图 1 所示。图 1 表明,不同生长期秋茄叶片正面反射光谱均表现为

典型的植被光谱特征:在绿光波段出现绿峰,然后红光波段出现谷值,近红外波段出现明显的反射平台。对比秋茄叶片正反面光谱特征表明,无论在 4 月还是 7 月,反面光谱均要高于正面光谱,特别是在绿光波段和近红外波段的部分区域表现的尤为明显 (1450—2450 nm)。

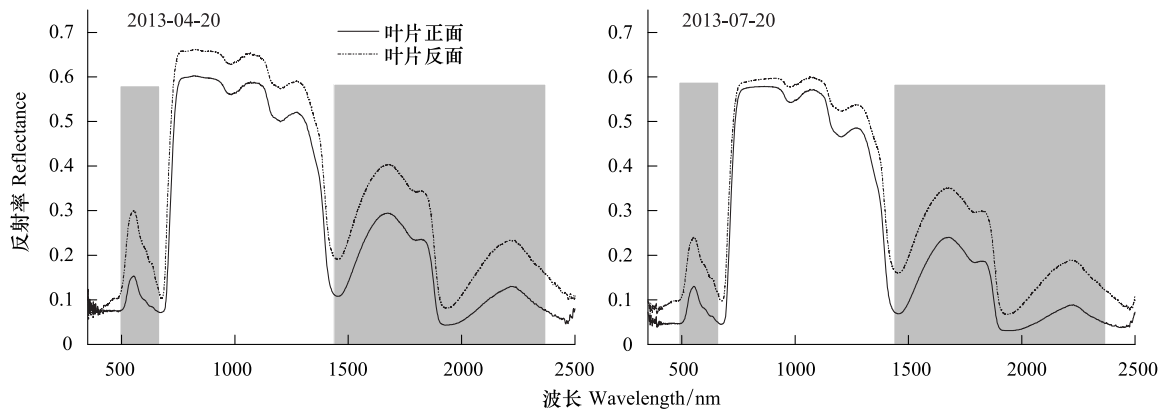


图 1 秋茄叶片正面与反面反射光谱特征

Fig.1 The spectral characteristics of leaf front and leaf back of *K. candell*

2.2 光谱参数与叶绿素含量相关关系

为分析不同光谱参数估算叶绿素的敏感性,将不同生长期、正反面光谱计算的参数与叶绿素含量(单位面积叶绿素含量和单位质量叶绿素含量)做相关分析(表 2)。表 2 表明,无论基于正面光谱还是反面光谱,所选取的光谱参数与秋茄叶绿素含量基本都达到显著 ($P < 0.05$) 或极显著相关 ($P < 0.01$)。且对大部分参数而言,其与单位面积叶绿素含量的相关系数要优于与单位质量叶绿素含量的相关

系数。

从对季节和正反面光谱的敏感性看,各光谱参数表现不尽相同。当以单位面积叶绿素含量作为计算单位时,对正反面光谱敏感的光谱参数有 TCARI、GM、Carter2、MCARI、PSSR 和 NPCI,其中基于正面光谱计算的 TCARI、MCARI 和 NPCI 与叶绿素含量的相关系数要高于基于反面光谱计算的;GM、Carter2 和 PSSRb 则与之相反。Vog1、Vog2 和 Vog3 对生长期和正反面光谱敏感性均较低,且与叶绿素含量具

有较高的相关系数。PRI1、CI、NDVI 和 Lic2 在 4 月份对正反面光谱不敏感,在 7 月则较为敏感。

当以单位质量叶绿素含量作为计算单位时,基于正面光谱计算的大部分光谱参数与叶绿素的相关

系数要高于基于反面光谱的,但在不同生长期各参数对正反面光谱的敏感性略有不同。此外,对于部分参数而言,在叶绿素含量高光谱估算时可以适当考虑反面光谱的应用。

表 2 叶绿素含量与高光谱参数的相关系数

Table 2 The correlation coefficient between chlorophyll content and hyper-spectral parameters

时间 Time	参数 Parameter	正面光谱 Spectral reflectance of leaf front		反面光谱 Spectral reflectance of leaf back	
		叶绿素 Chlorophyll/ ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	叶绿素 Chlorophyll/ (mg/g)	叶绿素 Chlorophyll/ ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	叶绿素 Chlorophyll/ (mg/g)
2013-04-20 ($n=73$)	Vog1	0.83 **	0.65 **	0.81 **	0.59 **
	Vog2	0.83 **	0.64 **	0.80 **	0.58 **
	Vog3	0.82 **	0.66 **	0.79 **	0.53 **
	TCARI	-0.79 **	-0.68 **	-0.57 **	-0.44 **
	GM	0.69 **	0.56 **	0.73 **	0.46 **
	Carter2	-0.65 **	-0.55 **	-0.71 **	-0.47 **
	PRI1	0.64 **	0.69 **	0.64 **	0.55 **
	MCARI	-0.64 **	-0.53 **	-0.54 **	-0.40 **
	PSSRb	0.48 **	0.43 **	0.64 **	0.41 **
	CI	-0.45 **	-0.42 **	-0.45 **	-0.38 **
	NPCI	-0.45 **	-0.46 **	-0.39 **	-0.30 **
	NDVI	0.44 **	0.37 **	0.46 **	0.30 **
	Lic2	0.43 **	0.36 **	0.41 **	0.27 *
	2013-07-20 ($n=47$)	Vog1	0.94 **	0.79 **	0.86 **
Vog2		0.94 **	0.80 **	0.84 **	0.68 **
Vog3		0.89 **	0.73 **	0.86 **	0.75 **
TCARI		-0.90 **	-0.79 **	-0.62 **	-0.44 **
GM		0.68 **	0.47 **	0.84 **	0.73 **
Carter2		-0.48 **	-0.33 *	-0.84 **	-0.76 **
PRI1		0.59 **	0.66 **	0.37 **	0.44 **
MCARI		-0.82 **	-0.75 **	-0.36 *	-0.12
PSSRb		0.33 *	0.13	0.87 **	0.76 **
CI		-0.22	-0.10	-0.69 **	-0.72 **
NPCI		-0.30 *	-0.24	-0.06	0.03
NDVI		0.08	-0.06	0.75 **	0.79 **
Lic2		0.07	-0.07	0.69 **	0.77 **

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

2.3 叶绿素含量估算与验证

2.3.1 叶绿素含量估算模型

表 2 分析表明对于大部分参数而言,光谱参数与单位面积叶绿素含量具有较高相关系数,且基于正面光谱所计算的参数与叶绿素含量的相关系数也相对较高。因此,以单位面积叶绿素含量为计算单位,以正面光谱作为参数计算光谱,并进一步选择相关系数较高的参数(TCARI、Vog1、Vog2 和 Vog3)作为估算参数,分别用线性、对数和指数模型进行回归

分析,尝试建立秋茄叶绿素含量估算模型。在建立模型之前,为检验模型的精度,将样本分成两个部分,一部分用于训练,一部分用于检验,模型估算结果和检验结果如表 3 所示。表 3 表明,基于正面光谱计算的 TCARI、Vog1、Vog2 和 Vog3 均能较好的估算秋茄叶片单位面积叶绿素含量,其中 TCARI 与叶绿素含量主要呈对数或指数关系,而 Vog1、Vog2 和 Vog3 与叶绿素含量则主要表现为线性或对数关系。综合分析估算模型和检验模型的 r^2 和 RMSE, Vog1

和 Vog2 估算精度略高于其它两个参数,并且它们对生长期敏感性较低。结合叶片的叶绿素含量变化幅度来看,当样本中叶绿素含量变化幅度较大时,Vog3

可能有较好的估算效果。此外,为进一步阐明叶绿素含量与光谱参数的关系,以 Vog1 为例,绘制其最佳拟合曲线图,结果如图 2 所示。

表 3 叶绿素含量估算与验证模型

Table 3 Chlorophyll content estimation model and its validation

时间 Time	叶绿素含量估算模型 Estimation model/($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)					验证模型 Validation Model	
	参数 Parameter	模型 Model	方程 Equation	r^2	RMSE	r^2	RMSE
2013-04-20 ($T=57, V=16$)	TCARI	线性	$y = -142.76x + 97.198$	0.63	9.58	0.66	8.08
		对数	$y = -37.884\ln(x) + 6.593$	0.62	9.65	0.62	8.69
		指数	$y = 125.06e^{-3.049x}$	0.72	9.66	0.64	9.56
	Vog1	线性	$y = 84.753x - 14.45$	0.68	8.86	0.84	6.78
		对数	$y = 75.259\ln(x) + 70.942$	0.70	8.57	0.84	6.86
		指数	$y = 13.987e^{1.599x}$	0.61	10.00	0.82	8.26
	Vog2	线性	$y = 217.51x - 32.079$	0.67	9.00	0.85	7.37
		对数	$y = 93.148\ln(x) + 141.01$	0.69	8.80	0.85	7.10
		指数	$y = 10.225e^{4.06x}$	0.59	9.94	0.83	8.28
Vog3	线性	$y = 86.408x - 64.928$	0.65	9.22	0.85	7.37	
	对数	$y = 123.96\ln(x) + 15.032$	0.66	9.16	0.86	5.46	
	指数	$y = 4.764e^{1.714x}$	0.64	10.24	0.82	7.18	
2013-07-20 ($T=35, V=12$)	TCARI	线性	$y = -188.52x + 103.71$	0.81	6.47	0.84	6.06
		对数	$y = -43.987\ln(x) - 6.71$	0.86	5.67	0.83	7.29
		指数	$y = 123.49e^{-3.262x}$	0.83	5.85	0.85	6.39
	Vog1	线性	$y = 118.02x - 49.883$	0.87	5.37	0.90	4.73
		对数	$y = 106.66\ln(x) + 68.634$	0.85	5.72	0.91	4.36
		指数	$y = 8.83e^{2.0217x}$	0.87	5.14	0.87	5.99
	Vog2	线性	$y = 301.74x - 74.293$	0.88	5.27	0.91	4.46
		对数	$y = 131.03\ln(x) + 166.92$	0.86	5.59	0.92	4.17
		指数	$y = 5.812e^{5.1691x}$	0.88	4.93	0.88	5.67
Vog3	线性	$y = 142.32x - 147.1$	0.78	6.94	0.83	6.73	
	对数	$y = 207.04\ln(x) - 17.215$	0.78	6.98	0.84	6.62	
	指数	$y = 1.707e^{-2.423x}$	0.78	7.15	0.79	7.55	

所有估算模型和验证模型均通过置信水平为 0.01 的检验;T:训练样本,V:验证样本

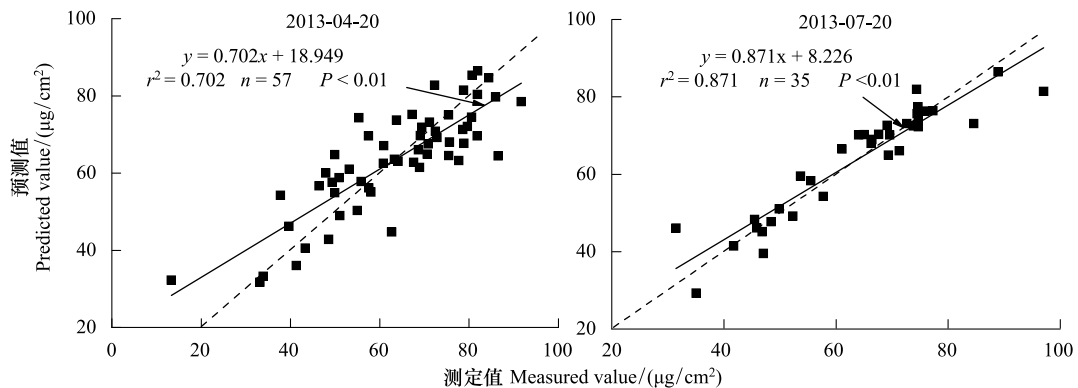


图 2 基于 Vog1 叶绿素最佳估算模型

Fig.2 The best chlorophyll content estimation model based on Vog1

2.3.2 叶绿素含量估算模型验证

表 3 分析表明 Vog1 和 Vog2 能较高的估算秋茄叶绿素含量,且对生长期敏感性较低,并以 Vog1 为例获取最佳估算模型散点图。在此,利用验证样本

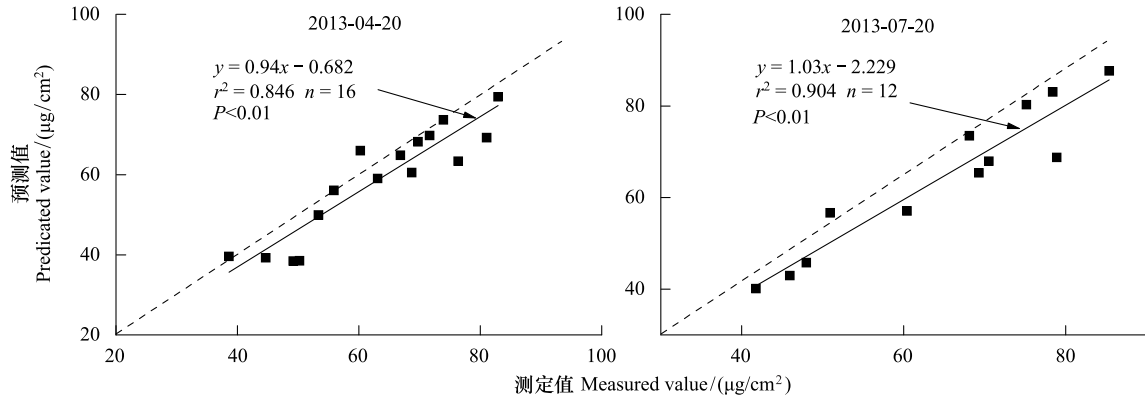


图 3 基于 Vog1 叶绿素的预测模型

Fig.3 Validation of models for chlorophyll content estimation based on Vog1

3 结论与讨论

(1)秋茄叶片反面反射率高于正面,尤其在绿光波段和近红外波段部分区域(1450—2450 nm)表现较为明显。产生这一现象的原因可能是叶片反面有较为发达的气孔组织,从而形成许多空腔,在此条件下,使得其具有更大的反射表面,最终导致叶片反面反射率高于正面反射率。

(2)本研究认为利用室内实测高光谱遥感数据估算秋茄叶片叶绿素含量时,以单位面积叶绿素含量表征时具有更好的估算精度。这一现象可以从辐射传输理论得到解释。一般认为,光线在叶片的消光作用分为散射和吸收,其分散和吸收程度与光线在叶片内通过的光程有关,而叶片表面的光泽又与单位面积内的散射吸收物质直接相关^[21]。另一方面,不同叶片或同一叶片的不同部位,其叶片厚度也并非均质的,即使有叶片质量相同,但其表面积却不尽相同,从而使得单位质量叶绿素反演的精度受到影响。

(3)TCARI、Vog1、Vog2 和 Vog3 可以较好的用于秋茄叶片叶绿素估算。之前学者尝试利用 PROSPECT+SAIL 模型,基于实测数据对各参数的叶片结构敏感性进行的探讨,研究结果证明 Vog 对叶片结构变化比较不敏感^[1,21]。本研究中 Vog 在估算秋茄叶片叶绿素时也得到类似的结论。TCARI 虽然

对 Vog1 的估算精度进一步验证,结果如图 3 所示。图 3 可以看出,无论是 2013 年 4 月,还是 7 月,Vog1 均能根据建立的模型对验证样本进行较好的预测。

对秋茄叶片正反面光谱敏感,但其在不同季节,基于正面光谱其均有较高的估算精度。

(4)对于部分参数而言,利用高光谱遥感数据对其叶绿素进行估算时可以适当考虑反面光谱的应用。如大部分情况下,基于反面光谱计算的 GM、Carter2 和 PSSRb 对秋茄叶片叶绿素估算精度要高于基于正面光谱的。

(5)NDVI 和 MCRAI 对秋茄叶片叶绿素含量估算的精度相对较低。这主要是因为它们对叶片结构较为敏感,且具有易饱和的特点,在叶绿素高于 40 μg 时,线性关系消失^[21]。

(6)本研究主要是基于室内实测光谱进行秋茄叶绿素估算得到的初步结果。但在实际工作中利用遥感数据对秋茄叶绿素进行估算时,其还受到叶片角度、冠层结构和土壤背景等的影响,且光谱在大气传输中也会一定程度受到影响。因此,所得的结果还有待进一步验证。

References:

- [1] Yan C Y, Niu Z, Wang J H, Liu Y L, Huang W J. The assessment of spectral indices applied in chlorophyll content retrieval and a modified crop canopy chlorophyll content retrieval model. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(6): 742-750.
- [2] Meng Q Y, Dong H, Qin Q M, Wang J L, Zhao J H. MTCARI: A kind of vegetation index monitoring vegetation leaf chlorophyll content based on hyperspectral remote sensing. *Spectroscopy and*

- Spectral Analysis, 2012, 32(8): 2218-2222.
- [3] Wang X Z. The Study on Spectral Remote Sensing Estimation Models about Bio-physical and Bio-chemical Parameters of Rice [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [4] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, Noland T L, Sampson P H. Canopy optical indices from infinite reflectance and canopy reflectance models for forest condition monitoring: application to hyperspectral CASI data // Proceedings of the IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Hamburg: IEEE, 1999: 1878-1881.
- [5] Zarco-Tejada P J, Morales A, Testi L, Villalobos F J. Spatio-temporal patterns of chlorophyll fluorescence and physiological and structural indices acquired from hyperspectral imagery as compared with carbon fluxes measured with eddy covariance. Remote Sensing of Environment, 2013, 133: 102-115.
- [6] Boegh E, Houborg R, Bienkowski J F, Braban C F, Dalgaard T, Van Dijk N, Dragosits U, Holmes E, Magliulo V, Schelde K, Di Tommasi P, Vitale L, Theobald M R, Cellier P, Sutton M. Remote sensing of LAI, chlorophyll and leaf nitrogen pools of crop-and grasslands in five European landscapes. Biogeosciences Discussions, 2012, 9(8): 10149-10205.
- [7] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Morales A, Berjón A, Agütera J. Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 463-476.
- [8] Zhang X Z, Zheng G Q, Dai Y B, Li G Q, Hu F. Estimation models of summer maize leaf pigment content based on canopy reflectance spectra. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(6): 55-60.
- [9] Zhao G F, Li J, Liu B F, Tahir M N. Monitoring model of leaf nitrogen content of winter wheat in guanzhong district by hyperspectral remote sensing. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(3): 530-536.
- [10] Williams G J. Estimating Chlorophyll Content in a Mangrove Forest Using a Neighbourhood Based Inversion Approach [D]. Enschede: University of Twente, 2012.
- [11] Liu J Q. Research of Minjiang River Estuary wetland. Beijing: Science Press, 2006.
- [12] Zou Q. Experiment Guidance of Plant Physiology. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] Vogelmann J, Rock B, Moss D. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(8): 1563-1575.
- [14] Gitelson A A, Merzlyak M N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(12): 2691-2697.
- [15] Blackburn G A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(4): 657-675.
- [16] Carter G A. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. International Journal Remote Sensing, 1994, 15(3): 697-703.
- [17] Lichtenthaler H K, Gitelson A, Lang M. Non-destructive determination of chlorophyll content of leaves of a green and an aurea mutant of tobacco by reflectance measurements. Journal of Plant Physiology, 1996, 148(3/4): 483-493.
- [18] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, De Colstoun E B, McMurtrey J E III. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(2): 229-239.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Niu Z, Wang C Y. Remote Sensing Applications for Carbon Cycle. Beijing: Science Press, 2008.

参考文献:

- [1] 颜春燕, 牛铮, 王纪华, 刘良云, 黄文江. 光谱指数用于叶绿素含量提取的评价及一种改进的农作物冠层叶绿素含量提取模型. 遥感学报, 2005, 9(6): 742-750.
- [2] 孟庆野, 董恒, 秦其明, 王金梁, 赵江华. 基于高光谱遥感监测植被叶绿素含量的一种植被指数 MTCARI. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8): 2218-2222.
- [3] 王秀珍. 水稻生物物理与生物化学参数的光谱遥感估算模型研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [8] 张学治, 郑国清, 戴廷波, 李国强, 胡峰. 基于冠层反射光谱的夏玉米叶片色素含量估算模型研究. 玉米科学, 2010, 18(6): 55-60.
- [9] 赵刚峰, 李军, 刘冰峰, Tahir M N. 关中冬小麦叶片氮素含量高光谱遥感监测模型. 麦类作物学报, 2012, 32(3): 530-536.
- [11] 刘剑秋. 闽江河口湿地研究. 北京: 科学出版社, 2006.
- [12] 邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 牛铮, 王长耀. 碳循环遥感基础与应用. 北京: 科学出版社, 2008.