

基于反射光谱指数的锐齿栎叶片色素含量估算

刘 畅, 孙鹏森*, 刘世荣

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要: [目的] 探讨锐齿栎叶片色素含量和光谱反射率之间的关系, 确定无损、快速估算锐齿栎叶片色素含量的敏感反射光谱波段和光谱指数。[方法] 在 2 个样地进行了 2 年的野外观测试验, 于生长季内同步测定了锐齿栎叶片的光谱反射率和不同光合色素含量, 分析了 350~2 500 nm 范围内光谱反射率和敏感光谱指数与叶片色素含量及比率之间的定量关系。[结果] 锐齿栎叶片的光谱反射率随叶片色素含量呈明显的规律性变化, 与 Chl a、Chl b、Chl 和 Car 的含量在可见光的绿光黄光及红边区域表现为显著或极显著的负相关性, 与 Car/Chl 表现为极显著的正相关性; 在近红外和短波红外区域, 光谱反射率与色素的相关性不及可见光区。本文构建的色素敏感光谱指数 $ND_{(705,350)}$ 、 $ND_{(800,705)}$ 、 $mND_{(800,705)}$ 和 $mPRI$ 可以准确地估算锐齿栎叶片的 Chl a、Chl b、Chl 含量和 Car/Chl 比率。独立的试验数据检验表明估算值和实测值的拟合关系较好。[结论] $ND_{(705,350)}$ 、 $ND_{(800,705)}$ 、 $mND_{(800,705)}$ 和 $mPRI$ 可有效地估算锐齿栎叶片的色素含量及比率。

关键词: 叶绿素; 类胡萝卜素; 高光谱; 锐齿栎; 反射光谱指数

中图分类号: S792.18

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)01-0088-11

Estimating Leaf Pigment Contents of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* with Reflectance Spectral Indices

LIU Chang, SUN Peng-sen, LIU Shi-rong

(Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] To detect the relationship between the leaf pigment contents and spectral reflectance and to recommend useful hyperspectral wavebands and hyperspectral indices for nondestructive and quick estimation of pigment content of *Quercus aliena* var. *acuteserrata*. [Method] A field experiment was conducted in two plots over two years. The hyperspectral reflectance of 350~2 500 nm and different photosynthetic pigments content of leaves were systematically measured and analyzed. [Result] Spectral reflectance varied with different pigment contents. In green, yellow and red edge region of visible light region, the leaf spectral reflectance and Chl a, Chl b, Chl, and Car contents showed significant or highly significant negative correlation, the leaf spectral reflectance and Car/Chl showed highly significant positive correlation. In the near infrared and shortwave infrared region, the correlation between the spectral reflectance and the pigment was less than that in the visible light region. The established spectral indices sensitive to pigments, $ND_{(705,350)}$, $ND_{(800,705)}$, $mND_{(800,705)}$ and $mPRI$ could be used to accurately predict the Chl a, Chl b, Chl contents and Car/Chl of leaves. The results of independent data verification showed that the fitting relationship of predicted value and the measured value was excellent. [Conclusion] The research indicated that the leaf pigment contents and ratio of *Q. aliena* var. *acuteserrata* could be predicted effectively with $ND_{(705,350)}$,

收稿日期: 2016-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(31290223)

作者简介: 刘 畅,男,在读硕士,主要从事高光谱遥感方面的研究。Email:mliuchang1117@163.com

* 通讯作者: 孙鹏森,男,副研究员,主要从事生态水文学、高光谱遥感等方面的研究。电话:010-62889534, Email:sunpsen@caf.ac.cn

$ND_{(800,705)}$, $mND_{(800,705)}$ and $mPRI$.

Keywords: chlorophyll; carotenoid; hyperspectral; *Quercus aliena* var. *acuteserrata*; reflectance spectral index

光合色素与植物的生理功能密切相关,叶绿素(Chl)在植物进行光合碳同化的过程中具有吸收和传递光能的作用;而类胡萝卜素(Car)能够为光合系统提供能量^[1],这些光合色素的绝对和相对含量决定植物的光合潜力^[2]。当入射光的能量超出叶片光合作用的利用能力时,植物会通过叶黄素循环散失掉过剩的光能^[3],光合色素含量的变化能够提供叶片生理状态的相关信息。与传统化学分析方法相比,反射光谱技术能够快速、无损伤地获取植物的色素含量信息,且可以在不同的空间尺度上得到应用^[4]。高光谱遥感的发展则克服了传统单波段、多光谱遥感在波段数、波段范围、精细信息表达等方面的局限性,以较窄的波段区间、较多的波段数量提供更丰富的遥感信息,在植物生理生态学领域得到了广泛地应用。反射光谱指数指特定波段的光谱反射率通过比值、差值等数学运算得到的结果,简单比值指数和归一化差值指数等是较为常见的光谱指数;在光合色素和反射光谱关系的研究中,反射光谱指数法是行之有效、应用最为广泛的研究方法。Rouse等(1974)在研究中发现归一化植被指数($NDVI$)与Chl的含量密切相关^[5]。Gitelson和Merzlyak(1994)提出的绿色归一化植被指数($Green\ NDVI$)有效地避免了675 nm附近Chl光谱吸收的影响,提高了 $NDVI$ 对高Chl含量叶片的估算精度^[6]。Sims和Gamon(2002)在研究中利用445 nm处的光谱反射率(R_{445})消除叶片结构对光谱反射的影响,建立了改良的光谱指数(mSR_{705} 和 mND_{705}),减小了叶片表面反射差异引起的误差^[1]。Chappelle等(1992)基于大豆(*Glycine max* (L.) Merr)叶片提出了反射光谱的比值分析指数($RARS$)估测叶片的Chl a、Chl b和Car的含量^[2]。Gamon等(1992)在研究中建立了生理反射指数(PRI)用以估测叶片中类胡萝卜素和叶绿素的比值(Car/Chl),之后 PRI 广泛应用于植物生理状态的光谱监测中^[7]。Blackburn(1998)基于4种不同的植物叶片构建了特定色素简单比值指数($PSSR$)和特定色素归一化比值指数($PSND$)来估测叶片的Chl a、Chl b和Car的含量^[8]。Gitelson等(2002)在对不同树种叶片的反射光谱研究中发现510 nm附近的光谱反射率的倒数对Car的含量最敏感,但Chl也会影响这些光谱波段,为了消除Chl对

510 nm附近光谱反射率的影响,选用550 nm和700 nm建立了类胡萝卜素反射指数(CRI_{550} 和 CRI_{700})来评估Car的含量^[9]。随后,Gitelson等(2006)又提出改良的类胡萝卜素反射指数($mCRI$),其对叶片Car含量的估算效果更为准确^[10]。王福民等(2009)通过分析所测范围内所有光谱波段反射率的归一化差值与水稻(*Oryza sativa* L.)叶片Car含量之间的关系,发现 $ND_{(1536,707)}$ 可以较好地估算Car含量^[11]。杨杰等(2010)的研究提出简单比值指数 $SR_{(723,770)}$ 和归一化差值指数 $ND_{(770,713)}$ 可以稳定、准确地估算水稻叶片的Car含量^[12]。许改平等(2014)通过测定不同条件下盆栽毛竹(*Phyllostachys heterocyclus* (Carr.) Mitford cv. Pubescens)实生苗的色素含量和反射光谱发现,色素含量与光谱反射率在可见光的绿光和红光区有显著或极显著的相关关系^[13]。由于以上研究的控制条件、试验材料等的不同,其研究结果也存在一定的差异,由此可见,在已开发的众多反射光谱指数中哪些的普适性好、精度高,还有待于检验。

本研究依托宝天曼森林生态系统定位研究站,以不同年际间不同样地的野外试验为基础,通过对锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata* Maxim. ex Wenz.)叶片反射光谱与叶片光合色素间的相关性分析,提取对色素含量的敏感波段以构建反射光谱指数,并对比分析前人提出的其他形式的色素敏感光谱指数在锐齿栎上的应用效果,探讨叶片尺度上利用高光谱技术获取光合色素含量的可行方法,进而建立色素含量的定量估算模型,以为锐齿栎叶片色素含量的无损监测和光合生产力评价提供参考。

1 材料和方法

1.1 取样及反射光谱测量

本研究在宝天曼森林生态定位站设置的2块样地内进行了2年的野外观测试验,在2块样地内随机选取生长状况良好的锐齿栎,用自制的采枝器在每株上部相近的高度位置取3个向阳的枝条,枝条取下后迅速插入水中,每枝条选取3片健康叶分别测定反射光谱5次并取平均值。叶片光谱测量采用美国ASD公司生产的FieldSpec 4地物光谱辐射仪

自带的叶片夹与植物探头进行,光谱测量范围为350~2 500 nm。叶片的反射光谱采集完成后,将枝条上的叶片立刻取下标记并放入装有冰袋的保温箱内,带回生态站,以液氮冷冻保存。试验时间为2014年6~10月和2015年5~10月,每月重复测定1次。

1.2 叶片光合色素含量测定

采用分光光度计法测定每组叶片样本的叶绿素和类胡萝卜素含量^[16]。

1.3 数据分析

本研究利用叶片的色素含量及比率与光谱反射

率的相关分析确定色素的敏感波段,通过色素敏感波段的光谱反射率组合构建光谱指数,并与叶片光合色素含量建立关系,同时对比分析前人提出的色素敏感的光谱指数(表1)在本研究中的应用效果,以期找到用于估算锐齿栎叶片色素含量及比率的反射光谱指数。研究利用2014年的反射光谱数据与叶片色素数据建立色素估算模型,基于2015年的数据,采用均方根差(RMSE)、平均相对误差(RE)、估算精度($E-R^2$)和准确度(以Slope表示)4个统计指标对所筛选的光谱指数及其估算模型进行测试和检验。

表1 本文中用于建模的反射光谱指数

Table 1 The reflectance spectral index for modeling in this paper

相关色素 Related to pigment	反射光谱指数 Reflectance spectral index	缩写 Acronym	定义或计算公式 Definition or algorithm formula	参考文献 Reference
叶绿素 a Chl a	特定色素简单比值指数 Pigment specific simple ratio index	PSSRa	R_{800}/R_{680}	Blackburn, 1998
	特定色素归一化差值指数 Pigment specific normalized difference index	PSNDa	$(R_{800} - R_{680})/(R_{800} + R_{680})$	Blackburn, 1998
	反射光谱的比值分析指数 Ratio analysis of reflectance spectra index	RARSa	R_{675}/R_{700}	Chappelle <i>et al.</i> , 1992
	归一化差值指数 Normalized difference index	ND _(705,350)	$(R_{705} - R_{350})/(R_{705} + R_{350})$	This work
	特定色素简单比值指数 Pigment specific simple ratio index	PSSRb	R_{800}/R_{635}	Blackburn, 1998
叶绿素 b Chl b	特定色素归一化差值指数 Pigment specific normalized difference index	PSNDb	$(R_{800} - R_{635})/(R_{800} + R_{635})$	Blackburn, 1998
	反射光谱的比值分析指数 Ratio analysis of reflectance spectra index	RARSb	$R_{675}/(R_{650} \times R_{700})$	Chappelle <i>et al.</i> , 1992
	归一化差值指数 Normalized difference index	ND _(800,705)	$(R_{800} - 705)/(R_{800} + R_{705})$	This work
	归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	NDVI	$(R_{800} - R_{680})/(R_{800} + R_{680})$	Rouse <i>et al.</i> , 1974
	绿色归一化植被指数 Green normalized difference vegetation index	Green NDVI	$(R_{750} - R_{550})/(R_{750} + R_{550})$	Gitelson & Merzlyak, 1994
叶绿素 Chl	红边归一化植被指数 Red-edge normalized difference vegetation index	ND ₇₀₅	$(R_{750} - R_{705})/(R_{750} + R_{705})$	Sims & Gamon, 2002
	改良红边归一化植被指数 Modified red- edge normalized difference vegetation index	mND ₇₀₅	$(R_{750} - R_{705})/$ $(R_{750} + R_{705} - 2 \times R_{445})$	Sims & Gamon, 2002
	改良归一化差值指数 Modified normalized difference index	mND _(800,705)	$(R_{800} - R_{705})/(R_{800} + R_{705} - R_{400})$	This work
	特定色素简单比值指数 Pigment specific simple ratio index	PSSRc	R_{800}/R_{470}	Blackburn, 1998
	特定色素归一化差值指数 Pigment specific normalized difference index	PSNDc	$(R_{800} - R_{470})/(R_{800} + R_{470})$	Blackbur, 1998
类胡萝卜素 Car	反射光谱的比值分析指数 Ratio analysis of reflectance spectra index	RARSc	R_{760}/R_{500}	Chappelle <i>et al.</i> , 1992
	类胡萝卜素反射指数 Carotenoid reflectance index	CRI ₅₅₀ CRI ₇₀₀	$1/R_{510} - 1/R_{550}$ $1/R_{510} - 1/R_{700}$	Gitelson <i>et al.</i> , 2002
	改良的类胡萝卜素反射指数 Modified carotenoid reflectance index	mCRI	$R_{780}/[(1/R_{510}) - (1/R_{550})]$	Gitelson <i>et al.</i> , 2006
	简单比值指数 Simple ratio index	SR _(530,900)	R_{530}/R_{900}	This work

续表1

相关色素 Related to pigment	反射光谱指数 Reflectance spectral index	缩写 Acronym	定义或计算公式 Definition or algorithm formula	参考文献 Reference
类胡萝卜素/叶绿素 Car/Chl	生理反射指数 Physiological reflectance index	<i>PRI</i>	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	Gamon <i>et al.</i> , 1992
	植物衰老反射指数 Plant senescence reflectance index	<i>PSRI</i>	$(R_{678} - R_{500}) / R_{750}$	Merzlyak <i>et al.</i> , 1999
	结构不敏感色素指数 Structure-insensitive pigment index	<i>SIPi</i>	$(R_{800} - R_{445}) / (R_{800} - R_{680})$	Peñuelas <i>et al.</i> , 1995
	改良的生理反射指数 Modified physiological reflectance index	<i>mPRI</i>	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570} - 2 \times R_{450})$	This work

R_{λ} 表示波长在 λ nm 处的光谱反射率。

R_{λ} indicates the spectral reflectance at the wavelength of λ nm.

2 结果和分析

2.1 锐齿栎叶片色素的差异及变化特征

表2显示了本文中用于建模及检验的样本集叶片色素含量的统计结果:Chl a含量的变化区间分别为0.841~3.30 mg·g⁻¹和0.913~3.11 mg·g⁻¹,变异系数分别为28.7%和25.1%;Chl含量的变化

区间分别为1.11~4.91 mg·g⁻¹和1.24~4.40 mg·g⁻¹,变异系数分别为22.3%和22.4%;Car含量的变化区间分别为0.297~0.511 mg·g⁻¹和0.278~0.529 mg·g⁻¹,变异系数分别为9.85%和13.3%;Car/Chl的变化区间分别为0.0818~0.294和0.101~0.272,变异系数分别为28.8%和17.8%;数据显示样本的代表性较好。

表2 锐齿栎叶片色素含量及比率的变化

Table 2 Changes in pigment content and its ratio of leaves

样本集 Sample	试验时间 Time of experiment	样本数 No. of sample	最大值 Max. value	最小值 Min. value	平均值 Mean value	标准偏差 SD	变异系数 CV/%
Chl a	建模 Modeling	2014	3.30	0.841	2.32	0.498	21.5
	检验 Validation	2015	3.11	0.913	2.27	0.489	21.5
Chl b	建模 Modeling	2014	1.77	0.265	1.03	0.295	28.7
	检验 Validation	2015	1.36	0.326	0.860	0.216	25.1
Chl	建模 Modeling	2014	4.91	1.11	3.35	0.746	22.3
	检验 Validation	2015	4.40	1.24	3.13	0.701	22.4
Car	建模 Modeling	2014	0.511	0.297	0.421	0.0415	9.85
	检验 Validation	2015	0.529	0.278	0.415	0.0553	13.3
Car/Chl	建模 Modeling	2014	0.294	0.0818	0.132	0.0383	28.8
	检验 Validation	2015	0.272	0.101	0.137	0.0243	17.8

图1所示2014年和2015年不同样地内锐齿栎叶片平均色素含量及比率在生长季的变化情况。在整个生长季内,相同时间段内叶片平均色素含量及比率差异不明显;而在生长季的不同观测时期则有明显变化趋势。5~6月份,叶片Chl a、Chl b、Chl和Car含量逐渐上升,表明在此时期内叶片处于形态和功能的建成期,叶片的各种色素都在储备;7~8月份,叶片Chl a、Chl b、Chl和Car含量保持在较高水平,表明此时期叶片的生理功能已经成熟健全,叶片色素含量高;9~10月份,叶片Chl a、Chl b、Chl和Car含量则开始呈现下降走势,这表明叶片开始衰老,叶片内的色素不断分解(图1A,图1B,图1C,图1D)。Car/Chl在生长季内呈现出与色素含量指标相反的变化规律(图1E)。

2.2 锐齿栎叶片反射光谱的变化特征

同一时期样地内不同色素含量的锐齿栎叶片样本的反射光谱特征具有一定的相似性,本节以2014年的一株锐齿栎的叶片样本为对象,每月选取一片叶的光谱反射率为代表绘制成图(图2),来说明在生长季的不同时期,不同色素含量的锐齿栎叶片的反射光谱特征。图2显示叶片的光谱反射率在350~750 nm可见光区随着叶片Chl a、Chl b和Car含量的增加而明显降低,而在750~1400 nm近红外波段,叶片光谱反射率的变化与叶片色素含量没有明显的规律性。由此可见,叶片色素含量变化对可见光区光谱反射率的影响最大,这为研究利用反射光谱技术反演锐齿栎叶片光合含量及比率提供了依据。

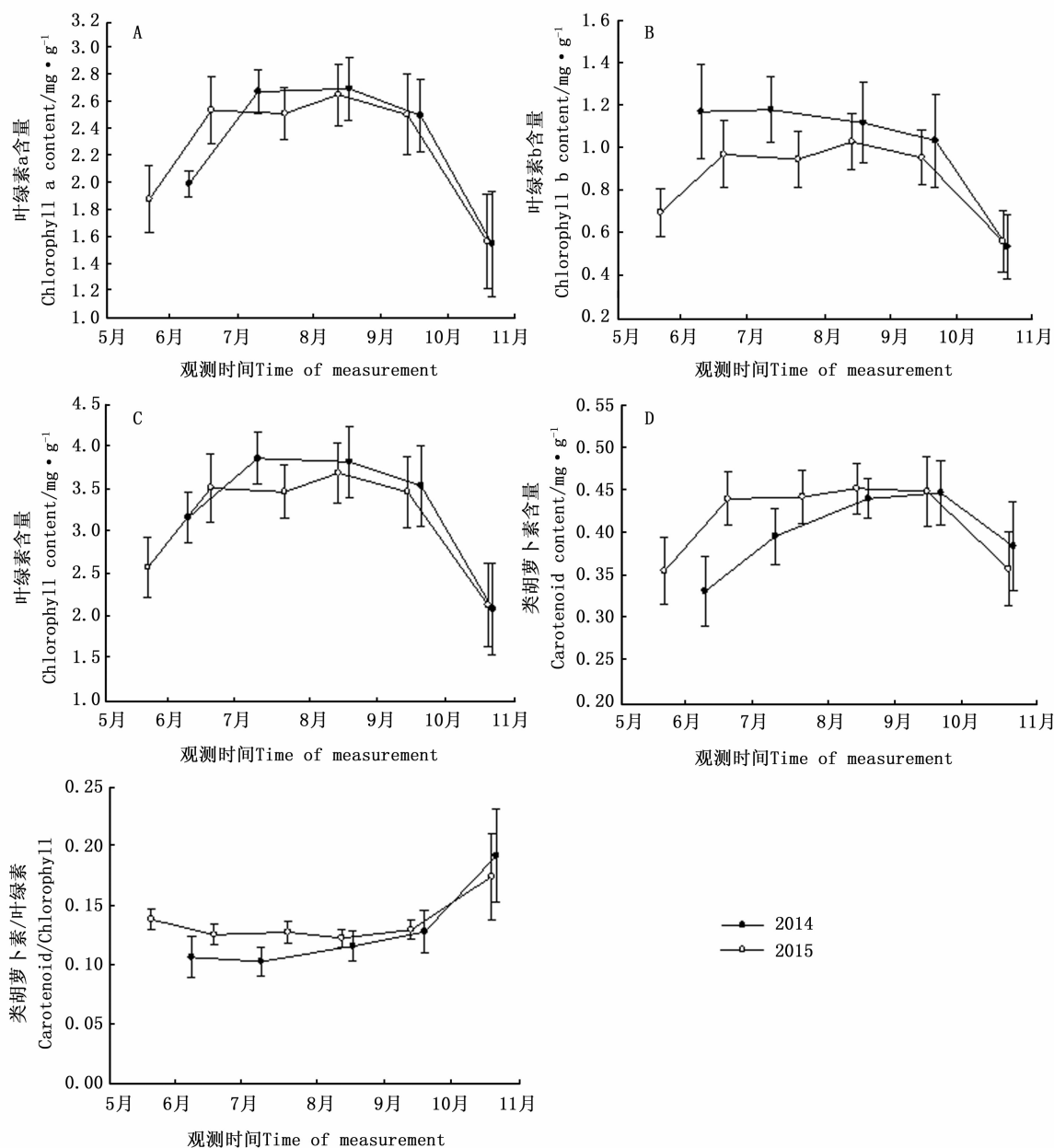


图1 锐齿栎叶片色素含量及比率在生长季的变化(平均值 \pm 标准差)

Fig. 1 Changes in pigment content and its ratio of leaves during the growing season (MEAN \pm SD).

2.3 锐齿栎叶片色素含量与光谱反射率的相关性

对2014年所有叶片的色素含量及比率与对应的光谱反射率($n=150$)进行总体相关分析,以色素和光谱反射率的相关系数与波长为坐标绘制成图,得到图3。结果显示,波长小于730 nm的光谱反射率与叶片Chl a、Chl b、Chl和Car含量呈现负相关,其中,在绿光黄光区及红边区域,叶片Chl a、Chl b和Chl含量与光谱反射率的负相关达到较高水平($r < -0.70$),叶片Car含量与光谱反射率的负相关达到 $r < -0.46$ 水平,Chl a、Chl b和Chl相关性最好

的波段分别为550 nm ($r_{\text{Chl a}} = -0.815$, $r_{\text{Chl b}} = -0.769$, $r_{\text{Chl}} = -0.833$)和705 nm ($r_{\text{Chl a}} = -0.823$, $r_{\text{Chl b}} = -0.767$, $r_{\text{Chl}} = -0.837$), Car相关性最好的波段分别为510 nm ($r_{\text{Car}} = -0.51$)和531 nm ($r_{\text{Car}} = -0.49$)。与其他色素含量指标不同,叶片Car/Chl与波长小于730 nm的光谱反射率呈正相关,在绿光黄光区及红边区域,正相关达到较高水平($r_{\text{Car/Chl}} > 0.82$),相关性最好的波段为570 nm ($r_{\text{Car/Chl}} = 0.85$)和705 nm ($r_{\text{Car/Chl}} = 0.86$)。在近红外区域,Chl b、Chl和Car/Chl与光谱的相关性

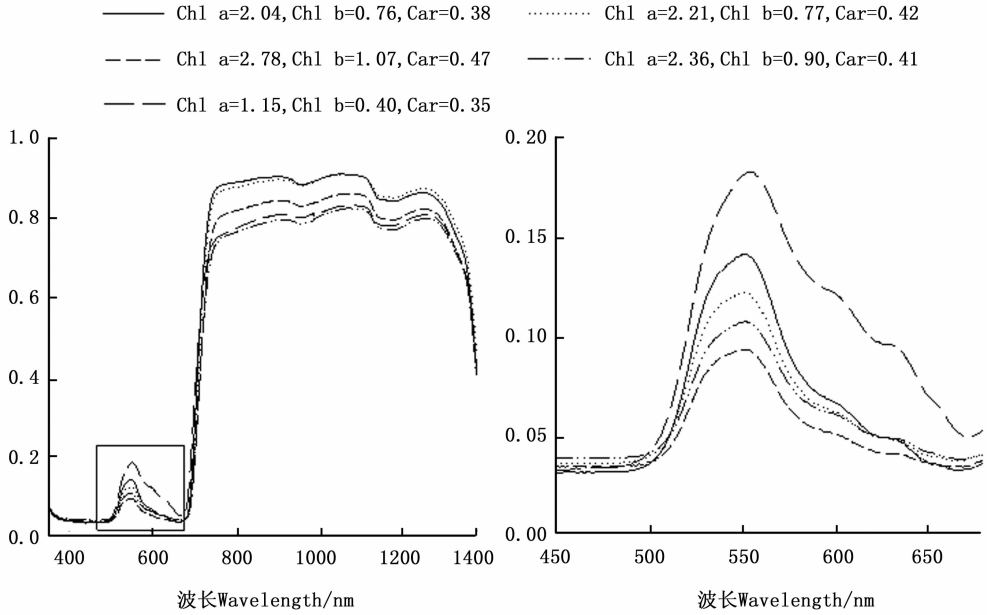


图 2 不同色素含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)水平锐齿栎叶片的光谱反射率特征
Fig. 2 Reflectance characteristics of leaves at different pigment content levels

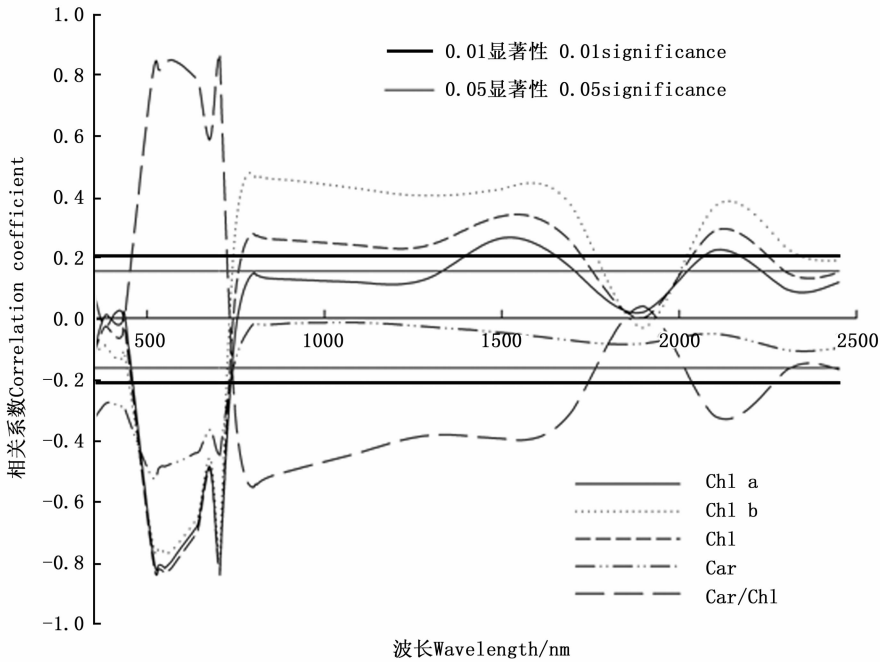


图 3 锐齿栎叶片色素含量及比率与光谱反射率数据的相关性($n = 150$)
Fig. 3 The correlation between leaf pigment content, its ratio and spectral reflectance($n = 150$).

达到了 0.01 的极显著水平, Chl a 和 Car 与光谱的相关性不显著;而在短波红外区域,色素含量与光谱反射率的相关性较差且不稳定。从整体上看, Car 与反射光谱的相关性明显低于其他色素含量指标。由此可见,绿光黄光及红边区域与锐齿栎叶片色素含量的关系密切,而近红外波段对色素含量变化的敏感性不高但稳定,通过对这几个区域反射光谱信息的充分挖掘,有助于构建用于锐齿栎叶片色素含

量监测的适宜光谱指数。

2.4 锐齿栎叶片色素含量与光谱指数的定量关系

本研究利用 2014 年锐齿栎叶片光谱反射率与色素含量及比率的相关分析得到的单一色素敏感波段,在可见光区和近红外区域选取参考波段,参照前人的模式和方法构建了归一化差值指数 $ND_{(705,350)}$ 估算 Chl a 的含量,归一化差值指数 $ND_{(800,705)}$ 估算 Chl b 的含量,改良的归一化差值指数 $mND_{(800,705)}$ 估

算 Chl 的含量,简单比值指数 $SR_{(530,900)}$ 估算 Car 的含量,改良的生理反射指数 $mPRI$ 估算 Car/Chl。其中, $ND_{(705,350)}$ 用于 Chl a 含量估算的线性 $S-R^2$ 和非线性 $S-R^2$ 分别为 0.746 和 0.778, $ND_{(800,705)}$ 用于 Chl b 含量估算的线性 $S-R^2$ 和非线性 $S-R^2$ 分别为 0.631 和 0.758, $mND_{(800,705)}$ 用于 Chl 含量估算的线性 $S-R^2$ 和非线性 $S-R^2$ 分别为 0.820 和 0.851, $SR_{(530,900)}$ 用于 Car 含量估算的线性 $S-R^2$ 和非线性 $S-R^2$ 分别为 0.341 和 0.362, $mPRI$ 用于 Car/Chl 含量估算的线性 $S-R^2$ 和非线性 $S-R^2$ 分别为 0.872 和 0.876 (表 3)。基于 2014 年不同样地的反射光谱和色素试验数据,图 4 展示了本研究构造的光谱指数对锐齿栎叶片各种光合色素含量及比率的线性和非线性拟合结果。

2.5 模型的检验

为了检验模型的可靠性,利用 2015 年 2 块样地测定的数据,对锐齿栎叶片色素含量及比率与反射光谱指数间的相关方程进行检验(表 3)。检验结果显示,与前人提出的 Chl a 相关光谱指数相比,基于 $ND_{(705,350)}$ 建立的锐齿栎叶片 Chl a 含量线性和非线性监测模型的测试效果更好(图 5A, 图 5B),观测值与估算值之间的 $E-R^2$ 分别达到 0.717 和 0.677,高于 $PSSRa$ 、 $PSNDa$ 和 $RARSa$; $RMSE$ 分别为 $0.392 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.522 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,与 $PSSRa$ 、 $PSNDa$ 和 $RARSa$ 相差不大; RE 分别为 6.8% 和 8.2%,与 $PSSRa$ 、 $PSNDa$ 和 $RARSa$ 相差不大; $Slope$ 分别为 0.962 和 1.156,与 $RARSa$ 相近但明显优于 $PSSRa$ 和 $PSNDa$ 。基于 $ND_{(800,705)}$ 建立的叶片 Chl b 含量线性和非线性监测模型比前人提出的相关光谱指数的测试效果略好(图 5C, 图 5D),观测值与估算值之间的 $E-R^2$ 分别为 0.701 和 0.698,稍高于 $PSSRb$ 、 $PSNDb$ 和 $RARSb$; $RMSE$ 分别为 $0.282 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.315 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, RE 分别为 13.5% 和 13.8%,两者与 $PSSRa$ 、 $PSNDa$ 和 $RARSa$ 相差不大; $Slope$ 分别为 0.861 和 1.095,与 $PSSRb$ 和 $RARSb$ 相近但明显优于 $PSNDb$ 。图 5E 和图 5F 显示基于 $mND_{(800,705)}$ 建立的叶片 Chl 含量线性和非线性监测模型的测试效果较好,观测值与估算值之间的 $E-R^2$ 分别为 0.779 和 0.778, $RMSE$ 分别为 $0.555 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.569 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, RE 分别为 7.75% 和 7.56%, $Slope$ 分别为 0.757 和 0.899; 与前人提出光谱指数相比,基于 $ND_{(705,350)}$ 建立的线性和非线性监测模型的各项指标均明显高于 $NDVI$,与 ND_{705} 、 mND_{705} 相近,模型的 RE 优于 $GreenNDVI$ 。基于 $SR_{(530,900)}$ 建立的叶片 Car 含量线性和非

线性监测模型的测试效果优于前人构造的光谱指数 $PSSRc$ 、 $PSNDc$ 、 $RARSc$ 、 CRI_{550} 、 CRI_{700} 和 $mCRI$ (图 5G, 图 5H),观测值与估算值之间的 $E-R^2$ 分别达到 0.672 和 0.643; 但 $SR_{(530,900)}$ 与叶片 Car 含量的线性和非线性拟合精度 $S-R^2$ 仅为 0.341 和 0.347,且 $Slope$ 远小于 1; 故认为本研究中反射光谱指数与叶片 Car 含量的关系较差。有研究认为利用反射光谱指数估测 Car/Chl 比估测 Car 绝对含量更为可靠^[7,17-18]。图 5I 和图 5J 显示基于 $mPRI$ 建立的锐齿栎叶片 Car/Chl 线性和非线性监测模型的测试效果较好,观测值与估算值之间的 $E-R^2$ 分别达到 0.701 和 0.721, $RMSE$ 分别为 0.016 和 0.015, RE 分别为 4.5% 和 4.2%, $Slope$ 分别为 0.981 和 0.982; 而前人提出的 Car/Chl 几个相关光谱指数中, $PSRI$ 和 $SIPI$ 的估算效果不佳,只有 PRI 估算效果较好,拟合精度和准确度较高,但都不及本研究新提出的 $mPRI$ 表现优秀(表 3)。

3 讨论

高光谱遥感快速发展使得定量化植被的单一光合色素含量成为可能,高光谱信息能帮助我们评估植物的生理状态,估算植被生产力^[8]。植物叶片内的光合色素的含量不同,其变化规律及影响因素错综复杂,Chl 和 Car 的光谱吸收波段存在交叉重叠,已有的基于光谱指数的估算模型对不同时期的不同类型植被的估算结果存在一定的差异。本研究综合分析了 2014 年和 2015 年不同样地的锐齿栎叶片的反射光谱与光合色素含量及比率之间的定量关系,结果显示,不同色素含量水平下锐齿栎叶片的光谱反射率有明显的规律性差异,叶片光谱反射率与 Chl a、Chl b、Chl 和 Car 的含量在可见光的绿光黄光及红边区域表现为显著或极显著的负相关性,与 Car/Chl 表现为极显著的正相关性;在近红外和短波红外区域,光谱反射率与色素的相关性不及可见光区。

通过几个或多个光谱波段构建反射光谱指数可以减小或消除外部环境因素和叶片内部结构的影响,放大植被的理化信息,且光谱指数包括波段信息丰富,明显提高了对植物理化信息的估算能力^[9,19],因此,光谱指数构建适宜的敏感光谱指数已成为遥感提取植被生化组分信息的重要方法^[7-11]。本研究利用 2014 年锐齿栎叶片光谱反射率与色素含量及比率的相关分析得到的特定色素敏感波段,在可见光区和近红外区域选取参考波段,参照前人的模

表 3 叶片色素含量 (mg/g) 及比率 (y) 与不同光谱指数 (x) 的定量关系 (n=150) 及检验效果 (n=195)

Table 3 Quantitative relationships of leaf pigment content and its ratio (y) to different spectral indices (x) (n=150) and their predicting performance (n=195)

相关色素 Related to pigment	光谱指数 Spectral index	建模 Modeling			检验 Validation				
		模型 Model	回归方程 Regression equation	拟合精度 S-R ²	估算精度 E-R ²	均方根误差 RMSE	平均相对误差 RE/%	斜率 Slope	
叶绿素 a Chl a	PSSRa	线性 Linear	$y = 0.089 2x + 0.495 6$	0.191	0.220	0.477	8.573	0.211	
		非线性 Non-linear	$y = 0.121 9x^{0.969 6}$	0.297	0.221	0.471	8.372	0.256	
	PSNDa	线性 Linear	$y = 8.696 8x - 5.347 5$	0.375	0.588	0.407	7.702	0.255	
		非线性 Non-linear	$y = 0.029 4e^{4.921 8x}$	0.477	0.603	0.376	7.180	0.319	
	RARSa	线性 Linear	$y = 6.761x - 0.054 1$	0.686	0.645	0.381	6.993	0.931	
		非线性 Non-linear	$y = 7.291 4x^{1.1031}$	0.707	0.644	0.398	7.335	0.991	
ND _(705,350)	线性 Linear	$y = -5.169 3x + 4.501 3$	0.746	0.717	0.392	6.818	0.962		
非线性 Non-linear	$y = 6.908 8e^{-2.653x}$	0.778	0.677	0.522	8.216	1.156			
叶绿素 b Chl b	PSSRb	线性 Linear	$y = 0.059 6x - 0.103 8$	0.646	0.653	0.272	12.669	0.854	
		非线性 Non-linear	$y = 0.233 5e^{0.075 4x}$	0.744	0.627	0.300	12.657	1.056	
	PSNDb	线性 Linear	$y = 4.415 9x - 2.907 3$	0.452	0.586	0.256	12.634	0.392	
		非线性 Non-linear	$y = 0.004 6e^{6.008 4x}$	0.603	0.622	0.223	11.107	0.490	
	RARSb	线性 Linear	$y = 0.099 5x + 0.113$	0.676	0.675	0.339	14.179	1.196	
		非线性 Non-linear	$y = 0.165 5x^{0.819 5}$	0.768	0.679	0.305	13.223	1.095	
ND _(800,705)	线性 Linear	$y = -2.855 5x - 0.798 3$	0.631	0.701	0.282	13.462	0.861		
非线性 Non-linear	$y = 0.092 3e^{-3.689x}$	0.758	0.698	0.315	13.812	1.095			
叶绿素 Chl	NDVI	线性 Linear	$y = 12.307x - 7.793$	0.431	0.262	0.708	9.376	0.098	
		非线性 Non-linear	$y = 0.004 2e^{7.343 7x}$	0.654	0.246	0.674	8.971	0.183	
	Green NDVI	线性 Linear	$y = 10.61x - 4.636 9$	0.784	0.783	0.711	10.032	0.732	
		非线性 Non-linear	$y = 21.13x^2 - 17.643x + 4.570 2$	0.804	0.787	0.861	11.364	1.014	
	ND705	线性 Linear	$y = 7.140 4x - 1.081 6$	0.805	0.789	0.539	7.661	0.696	
		非线性 Non-linear	$y = 0.347 7e^{3.574 2x}$	0.859	0.779	0.688	8.313	1.114	
	mND705	线性 Linear	$y = 6.627 9x - 1.090 7$	0.814	0.775	0.543	7.642	0.710	
		非线性 Non-linear	$y = 0.348 9e^{3.305 4x}$	0.863	0.764	0.708	8.514	1.129	
	mND _(800,705)	线性 Linear	$y = 7.351 5x - 1.541 5$	0.820	0.779	0.555	7.751	0.757	
		非线性 Non-linear	$y = 6.793 1x^{1.792 7}$	0.851	0.778	0.569	7.555	0.899	
类胡萝卜素 Car	PSSRc	线性 Linear	$y = 0.008 7x + 0.221 9$	0.203	0.009	0.062	5.722	0.042	
		非线性 Non-linear	$y = 0.000 1x^2 + 0.004 3x + 0.268 3$	0.204	0.007	0.063	5.710	0.039	
	PSNDC	线性 Linear	$y = 1.887 3x - 1.307 2$	0.186	0.019	0.058	5.458	0.044	
		非线性 Non-linear	$y = 29.316x^2 - 51.11x + 22.639$	0.203	0.011	0.062	5.657	0.047	
	RARSc	线性 Linear	$y = 0.007 8x + 0.259 4$	0.251	0.110	0.056	5.258	0.119	
		非线性 Non-linear	$y = 0.279 3e^{0.019 4x}$	0.255	0.106	0.055	5.190	0.125	
	CRI550	线性 Linear	$y = 0.016 6x + 0.214 7$	0.401	0.075	0.058	5.601	0.110	
		非线性 Non-linear	$y = 0.124 5x^{0.483 8}$	0.422	0.077	0.057	5.460	0.106	
	CRI700	线性 Linear	$y = 0.015 4x + 0.222 8$	0.314	0.041	0.056	5.536	0.073	
		非线性 Non-linear	$y = -0.002 8x^2 + 0.085 5x - 0.201 1$	0.359	0.044	0.058	5.527	0.058	
mCRI	线性 Linear	$y = 0.014 8x + 0.268 6$	0.279	0.021	0.059	5.678	0.057		
	非线性 Non-linear	$y = 0.286 2e^{0.037x}$	0.282	0.019	0.059	5.642	0.058		
SR _(530,900)	线性 Linear	$y = -0.627 2x + 0.492 6$	0.341	0.672	0.045	4.356	0.251		
	非线性 Non-linear	$y = -2.060 3x^2 + 0.003 1x + 0.450 1$	0.347	0.643	0.047	4.577	0.185		
类胡萝卜 素/叶绿素 Car/Chl	PRI	线性 Linear	$y = -1.031 3x + 0.188$	0.848	0.690	0.014	3.874	0.854	
		非线性 Non-linear	$y = -1.441 3x^2 - 0.982 7x + 0.191 2$	0.853	0.673	0.015	4.027	0.868	
	PSRI	线性 Linear	$y = 2.193 4x + 0.123 1$	0.179	0.085	0.026	5.609	0.049	
		非线性 Non-linear	$y = 56.3x^2 - 0.481 8x + 0.131 2$	0.204	0.046	0.025	4.861	0.006	
	SIPI	线性 Linear	$y = 2.071 8x - 1.956 3$	0.386	0.493	0.023	4.910	0.197	
		非线性 Non-linear	$y = -63.642x^2 + 134.12x - 70.389$	0.530	0.480	0.024	6.934	0.528	
	mPRI	线性 Linear	$y = -0.611 8x + 0.193 2$	0.872	0.701	0.016	4.485	0.981	
		非线性 Non-linear	$y = 0.466 6x^2 - 0.663 4x + 0.192 2$	0.876	0.721	0.015	4.215	0.982	

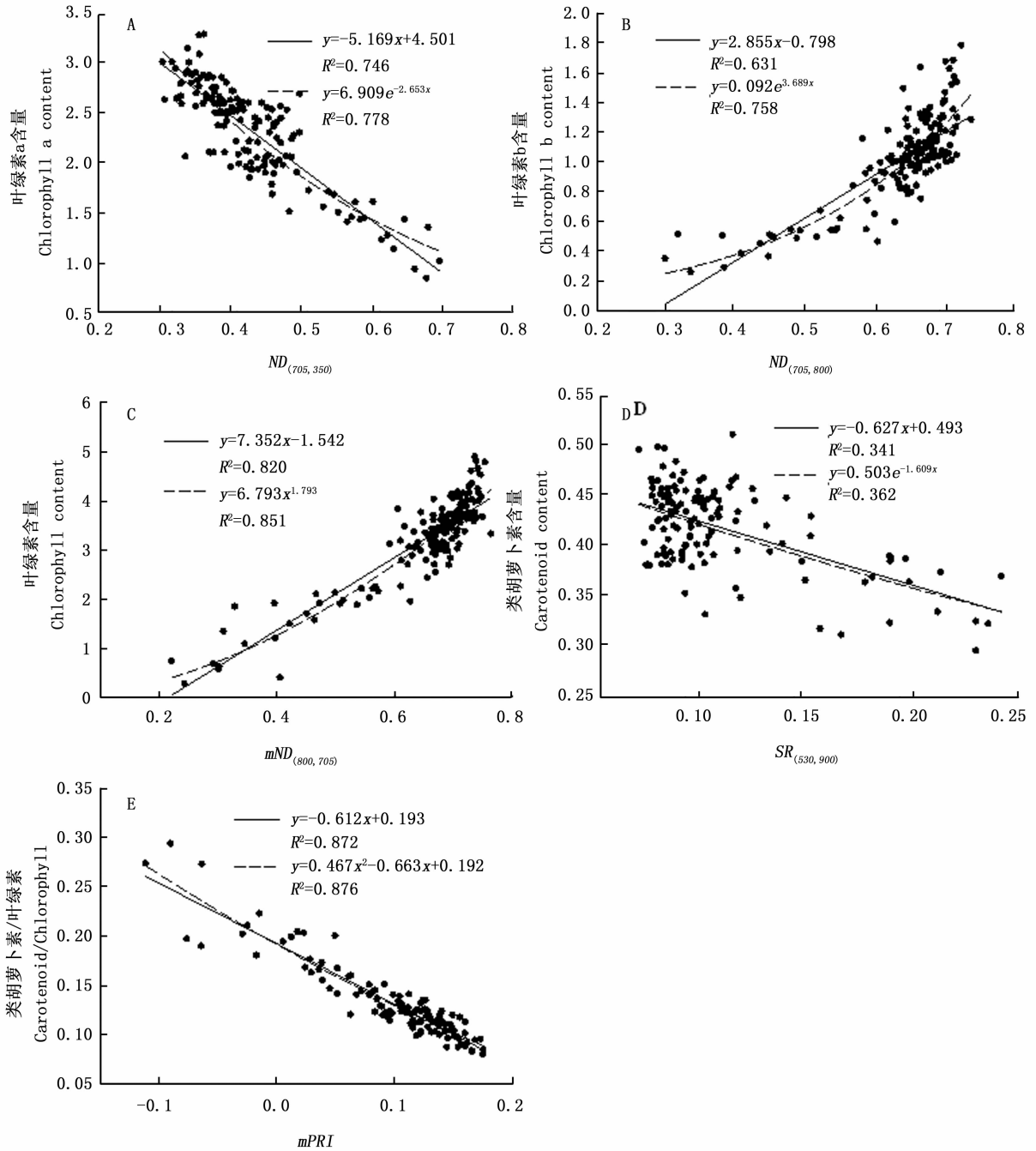


图4 锐齿栎叶片色素含量及比率与光谱指数的线性和非线性关系 ($n = 150$)

Fig. 4 The linear and non-linear relationships between leaf pigment content, its ratio and spectral index ($n = 150$).

式和方法分别构建了 $ND_{(705, 350)}$ 、 $ND_{(800, 705)}$ 、 $mND_{(800, 705)}$ 、 $SR_{(530, 900)}$ 、和 $mPRI$ 来分别估算叶片 Chl a、Chl b、Chl、Car 的含量和 Car/Chl。结果表明, 本文构建的单一色素相关光谱指数可以准确地估算锐齿栎叶片的 Chl a、Chl b、Chl 含量, 但叶片 Car 的含量的估算效果相对较差。文中所选的 Chl 相关光谱指数的敏感波段范围与 Sims 和 Gamon (2002) 对多个不同树种和功能型叶片 Chl 含量的研究结果相近^[1], 均在红边区域内, 说明红边波段组合的光谱指

数估算锐齿栎叶片 Chl 含量具有较好的普适性; 所选的 Car 相关光谱指数的敏感波段范围与唐延林等 (2004) 对水稻 Car 含量的研究结果相近^[20], 但本研究中光谱指数对 Car 的估算效果不佳; $mPRI$ 对 Car/Chl 的估算效果优秀, 则说明利用反射光谱指数估测 Car/Chl 比估测 Car 绝对含量更为可靠^[1, 17, 18]。在构建光谱指数参考波段的选择中, 可见光和近红外波段的组合表现更好, 短波红外波段对叶片水分状况变化敏感, 锐齿栎在生长季的水分波动变化较

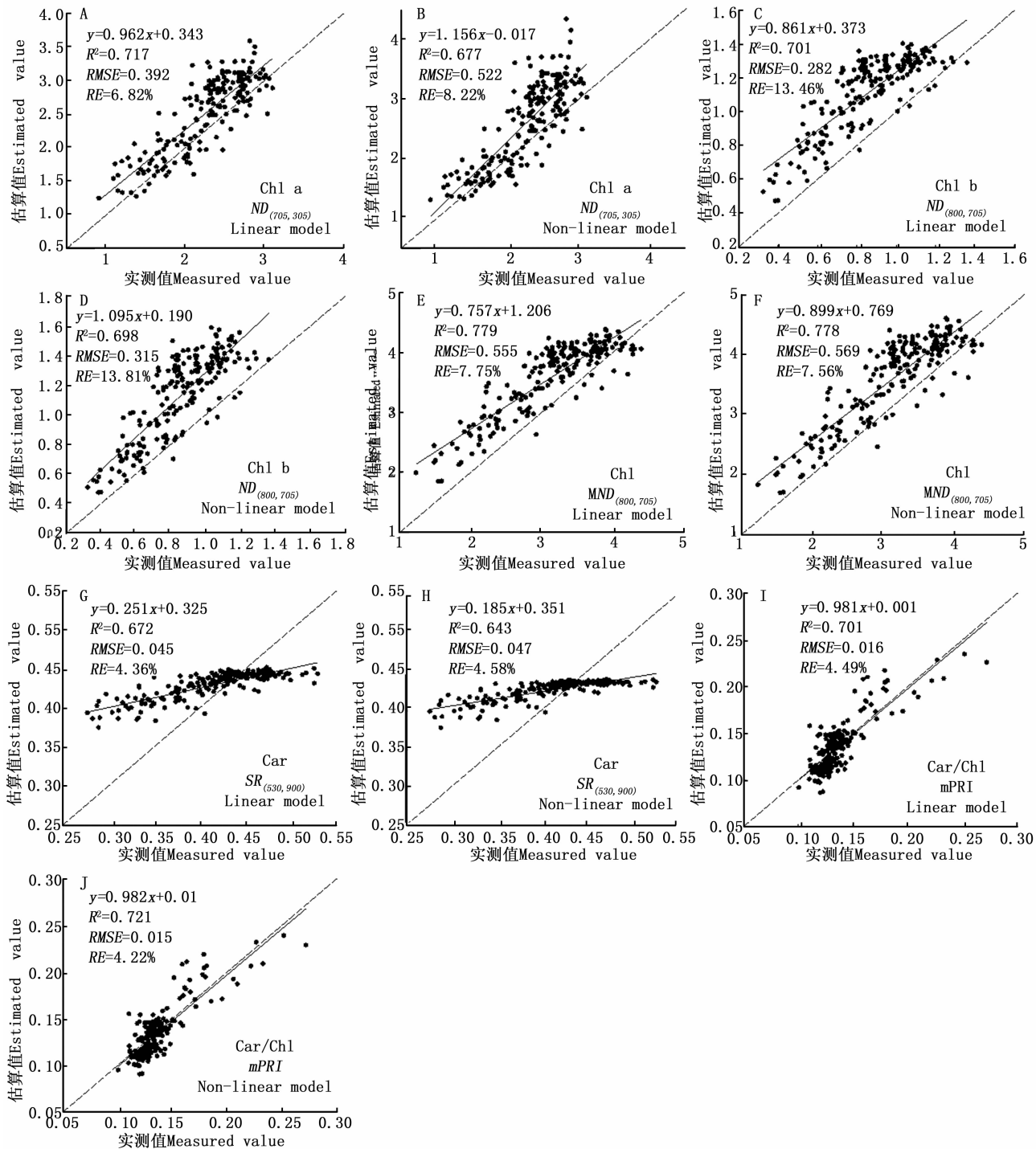


图 5 基于光谱指数的锐齿栎叶片色素含量及比率的实测值与估算值比较 ($n=195$), RE 、 $RMSE$, 同表 3

Fig. 5 Comparison between the predicted and observed leaf pigment content and its ratio based on spectral index ($n=195$). RE 、 $RMSE$, see Table 3

大,影响了短波红外波段作为参考波段的稳定性。

进一步分析了前人在其他植被上提出的相同或不同类型的色素敏感光谱指数在本文中的应用效果(表 3),结果表明, $RARSa$ 对叶片 Chl a 含量的估算精度($E-R^2$)和准确度($Slope$)均较高,估算效果较好,而 $PSSRa$ 和 $PSNDa$ 的估算效果不理想; $PSSRb$ 、 $PSNDb$ 和 $RARSb$ 对叶片 Chl b 含量的 $E-R^2$ 均较高,

但 $PSNDb$ 的 $Slope$ 明显不及 $PSSRb$ 和 $RARSb$;所选光谱指数对叶片 Chl 含量的估算效果除 $NDVI$ 外都比较理想; $PSSRc$ 、 $PSNdc$ 、 $RARSc$ 、 CRI_{500} 、 CRI_{700} 和 $mCRI$ 对锐齿栎叶片 Car 含量的估算效果均较差; PRI 对 Car/Chl 的估算效果明显优于 $PSRI$ 和 $SIPI$ 。前人提出的光谱指数对锐齿栎叶片 Car 含量的估算效果均表现不佳可能是由于这些光谱指数都是基于

一种或几种特定的植被提出来,其植物叶片样本的表层和内部结构可能与锐齿栎叶片存在较大差异;另一可能的原因是植物叶片内的不同光合色素的含量不同,其变化规律及影响因素错综复杂,且 Chl 和 Car 的光谱吸收波段存在交叉重叠,使得 Car 有关的有效光谱信息不易被区分开来。本研究通过有效的色素敏感光谱波段和参考波段的有机组合构建了反射光谱指数,利用 2015 年的试验数据检验表明,除 Car 外,本研究新提出的反射光谱指数对锐齿栎叶片单一色素含量及比率的估算具有良好的准确性和稳定性,这为锐齿栎叶片色素的无损监测及光合生产力评估提供了参考。

本研究在叶片尺度上采用叶夹式探测器配合内置稳定光源测定叶片的反射光谱,且采样具有时间和空间上的异质性,因而所建立的模型具有较好的可靠性,但要提高模型的估测精度仍需进行大量的测试和检验。

4 结论

本研究在 2 个样地进行了 2 年的野外观测试验,在锐齿栎的生长季内同步测定了叶片的光谱反射率和色素含量,分析了反射光谱与叶片色素含量及比率之间的定量关系。研究发现锐齿栎叶片的光谱反射率随叶片光合色素含量呈明显的规律性变化,在可见光的绿光、黄光及红边区域,光谱反射率与 Chl a、Chl b、Chl 和 Car 的含量表现为显著或极显著的负相关性,与 Car/Chl 表现为极显著的正相关性;在近红外和短波红外区域,光谱反射率与色素的相关性不及可见光区。本研究构建的色素敏感光谱指数 $ND_{(705,350)}$ 、 $ND_{(800,705)}$ 、 $mND_{(800,705)}$ 和 $mPRI$ 可以准确地估算锐齿栎叶片的 Chl a、Chl b、Chl 含量和 Car/Chl 比率,独立的试验数据检验表明估算值和实测值的拟合关系较好。此外,由于锐齿栎叶片 Car 含量较低,且 Car 的光谱吸收波段与 Chl 存在交叉重叠,本研究未能开发出相关性高的 Car 光谱指数,因此构造相关性高且稳定的 Car 光谱指数,构建精确度高、普适性好的 Car 估算模型仍需要进一步开展研究。

参考文献:

[1] 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 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2): 337-354.

[2] Chappelle E W, Kim M S, McMurtrey J E. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids in soybean leaves [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 39(3):

239-247.

[3] Demmig-Adams B, Adams W W. The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis [J]. *Trends in Plant Science*, 1996, 1(1): 21-26.

[4] Francisco P, Fernando V. *Functional Plant Ecology*, Second Edition [M]. CRC Press, 2007.

[5] Rouse Jr J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS [J]. *NASA Special Publication*, 1974, 351: 309.

[6] 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.

[7] Gamon J A, Penuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41(1): 35-44.

[8] 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.

[9] Gitelson A A, Zur Y, Chivkunova O B, et al. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2002, 75(3): 272-281.

[10] Gitelson A A, Keydan G P, Merzlyak M N. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(11).

[11] 王福民, 黄敬峰, 王秀珍. 水稻叶片叶绿素, 类胡萝卜素含量估算的归一化色素指数研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(4): 1064-1068.

[12] 杨杰, 田永超, 姚霞, 等. 利用高光谱参数反演水稻叶片类胡萝卜素含量 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(7): 845-854.

[13] 许改平, 吴兴波, 刘芳, 等. 高温胁迫下毛竹叶片色素含量与反射光谱的相关性 [J]. *林业科学*, 2014, 50(5): 41-48.

[14] 史作民, 程瑞梅, 刘世荣. 宝天曼落叶阔叶林种群生态位特征 [J]. *应用生态学报*, 1999, 10(3): 265-269.

[15] 刘玉萃, 吴明作, 郭宗民, 等. 内乡宝天曼自然保护区锐齿栎林生物量和净生产力研究 [J]. *生态学报*, 2001, 21(9): 1450-1456.

[16] 赵世杰, 邹琦. 叶绿体色素的定量测定 [J]. 邹琦. *植物生理学实验指导*. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[17] Peñuelas J, Baret F, Filella I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance [J]. *Photosynthetica*, 1995, 31: 221-230.

[18] Merzlyak M N, Gitelson A A, Chivkunova O B, et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening [J]. *Physiologia Plantarum*, 1999, 106(1): 135-141.

[19] Datt B. Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a + b, and total carotenoid content in eucalyptus leaves [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(2): 111-121.

[20] 唐延林, 王纪华, 黄敬峰, 等. 利用水稻成熟期冠层高光谱数据进行估产研究 [J]. *作物学报*, 2004, 30(8): 739-744.