

基于高光谱遥感的小麦冠层叶片色素密度监测

冯 伟, 朱 艳, 田永超, 马吉锋, 庄 森, 曹卫星*

(南京农业大学江苏省信息农业高新技术研究重点实验室, 农业部作物生长调控重点开放实验室, 南京 210095)

摘要:作物叶片色素状况是评价植株光合效率和营养胁迫的重要指标,冠层叶片色素密度(单位土地面积叶片色素总量)的实时无损监测对作物生长诊断、产量估算及氮素管理具有重要意义。以包括不同品质类型(高蛋白、中蛋白和低蛋白)的多个小麦品种在不同施氮水平下的连续 2a 大田试验为基础,研究了小麦叶片色素密度与冠层高光谱参数的定量关系。结果表明,叶片色素(叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 和类胡萝卜素)密度随施氮水平增加而提高,不施氮处理的叶片色素密度随生育进程而下降,施氮处理的叶片色素密度呈单峰曲线,品种间存在明显差异。群体叶片色素密度的敏感波段主要分布在可见光区,而红边区域导数光谱表现更显著。光谱参数 VOG2、VOG3、RVI(810,560)、SRE/SBE 和 SD_r/SD_b 等与叶绿素密度关系较为密切,线性方程决定系数 R^2 均在 0.858 以上,而与类胡萝卜素密度关系减弱,决定系数 R^2 低于 0.780,且参数间差异较小。经独立试验资料的检验表明,VOG2、VOG3、SRE/SBE 和 SD_r/SD_b 对不同色素的估测结果较好,预测相对误差 RE 低于 17.6%,虽然对叶绿素 b 的准确性稍低。总体上,光谱参数 VOG2、VOG3、SRE/SBE 和 SD_r/SD_b 与小麦群体叶片色素密度关系密切,特别是对叶片叶绿素 a 和叶绿素 a+b 的密度可以进行准确可靠的实时监测。

关键词:小麦; 高光谱遥感; 叶绿素密度; 类胡萝卜素密度; 监测模型

文章编号:1000-0933(2008)10-4902-10 中图分类号:Q945, S314, S512.1 文献标识码:A

Monitoring canopy leaf pigment density in wheat with hyperspectral remote sensing

FENG Wei, ZHU Yan, TIAN Yong-Chao, MA Ji-Feng, ZHUANG Sen, CAO Wei-Xing*

Hi-Tech Key Laboratory of Information Agriculture of Jiangsu Province / Key Laboratory of Crop Growth Regulation of Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4902 ~ 4911.

Abstract: Canopy leaf pigment status is a key index for evaluating crop potential photosynthetic efficiency and nutritional stress. Leaf pigment density per unit ground area provides a rapid and non-destructive method to evaluate yield predictions and management of nitrogen applications. This study investigated the quantitative relationships of leaf pigment density to canopy hyperspectral reflectance in wheat (*Triticum aestivum* L.) with two field experiments consisting of different cultivars and nitrogen levels in two growing seasons. On the basis of measured protein content, the cultivars, Yumai 34, Yangmai 12 and Ningmai 9 were considered as high, medium and low protein types, respectively. Four nitrogen rates were applied as 0, 75, 150, 225 kg N hm⁻² in the form of urea in 2004—2005, and 0, 90, 180, 270 kg N hm⁻² in the form of urea in 2005

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30671215, 30400278);江苏省自然科学基金资助项目(BK2005212, BK2003079)

收稿日期:2007-07-08; **修订日期:**2008-03-25

作者简介:冯伟(1976~),男,河南人,博士,主要从事信息生态学和作物遥感监测研究. E-mail: Fengwei78@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caow@njau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30671215, 30400278) and Jiangsu Province Natural Science Foundation (No. BK2005212, BK2003079)

Received date: 2007-07-08; **Accepted date:** 2008-03-25

Biography: FENG Wei, Ph. D. mainly engaged in information ecology and monitoring and diagnosis of remote sensing in crops. E-mail: Fengwei78@126.com

—2006. Canopy hyperspectral reflectance over 350—2500 nm was measured, and the density of chlorophyll a (Chl a), chlorophyll b (Chl b), chlorophyll a + b (Chl a + b), and carotenoid (Car) were determined for leaves in the wheat canopies. The densities of the different pigments (Chl a, Chl b, Chl a + b, Car) in wheat leaves increased with increasing nitrogen application rates. With respect to plant development, the densities of the different pigments (Chl a, Chl b, Chl a + b, Car) initially increased and then decreased after jointing with differences between the cultivars, while gradually decreasing in the non-nitrogen treatment. The sensitive wavebands for pigment density occurred mostly within the visible light range, and a close correlation existed between the first derivatives of reflectance in the red-edge region (680—760 nm) and leaf pigment density. The analyses between 21 vegetation indices and leaf pigment density indicated that the pigment densities were highly correlated to all these 21 vegetation indices. The correlations of leaf chlorophyll density to the following five vegetation indices, were higher than for the other spectral parameters, with the coefficients of determination (R^2) for linear correlations above 0.858. These five vegetation indices were Vogelmann indices 2 (Vog2), Vogelmann indices 3 (Vog3), the ratio vegetation index of 810 to 560 nm (RVI(810,560)), the ratio of the red-edge (680—760 nm) slope to the blue-edge (490—530 nm) slope (SRE/SBE), and the ratio of the integral of the first derivative on the red-edge region to that on the blue-edge region (SDr/SDb). All the values of R^2 between Car density and the different spectral indices were below 0.780. Testing of the derived regression equations with independent datasets indicated that Vog2, Vog3, SRE/SBE and SDr/SDb were the best to predict leaf pigment density with a relative error (RE, (simulated value - observed value)/observed value) below 17.6%. The R^2 associated with the Chl b density was below 0.804, lower than that of other pigment densities. The overall results suggested that the Vog2, Vog3, SRE/SBE and SDr/SDb indices have stable relationships with the pigment density in wheat leaves, especially the densities of leaf Chl a and Chl a + b.

Key Words: wheat; hyperspectral remote sensing; chlorophyll density; carotenoid density; monitoring model

光合作用中吸收光能的植物色素有叶绿素和类胡萝卜素,其中叶绿素是主要的吸收光能物质,此外类胡萝卜素具有保护叶绿素的功能,因此,色素是植物与外界进行物质能量交换的物质基础。叶片色素密度是单位土地面积绿叶色素的总量,它既反映植株个体叶片色素含量的信息,又包含植被群体盖度等特征。改善作物氮素营养,提高叶片色素含量,增加群体盖度,在冠层叶片色素总量水平上反映得更为明显,从而增强作物群体的光合作用机能,充分反映作物的生长状况和生产能力。因此,叶绿素状况是植物营养胁迫、光合能力和衰老进程各阶段的良好指示剂^[1,2],叶绿素密度更能反映冠层潜在的光合能力^[3],实时掌握作物叶片色素状况及冠层色素密度的动态变化,就可以对作物群体光合能力及营养状况进行有效监测,在作物生长与产量预测以及精确诊断与动态调控中具有重要意义。绿色植物典型的光谱特征,在可见光范围内主要受色素影响,而在近红外区域主要受叶片内部结构、生物量和含水量等影响。因此,可以基于遥感技术,利用植被光谱信息来估算色素含量^[4~6]。冠层光谱为众多地物混合光谱,反映作物群体面状信息,能够有效表征作物群体特征,通过包络线等技术可以很好地识别不同长势的作物群体^[7]。Gitelson 等^[8]通过 $R_{440 \sim 480}$ 、 $R_{520 \sim 555}$ 和 $R_{695 \sim 725}$ 组合对叶绿素密度进行估测。Sampson 等^[9]研究指出, R_{750}/R_{710} 可以监测森林叶绿素密度季节性变化。Yoder 等^[10]认为 550nm 和 730nm 波段对叶绿素反应敏感。刘伟东等^[11]研究表明,水稻 740~760nm 导数光谱和红边位置与叶绿素密度密切相关。为了估算植被的光合色素状况,人们提出了一系列光谱指数,如 PRI、SIPI、PSRI、PSND、CARI、MCARI、RARS、PSSR、NPQI、NPCI、CCII、ND705 以及 mND705 等。已有的许多研究表明,光谱法估测植株色素状况是可行的,但用来估算的适宜特征光谱及参数随不同作物及不同生育期而有所差异。有关小麦叶片色素状况的监测研究,近年来也取得了一些有意义的结果^[12~14],但主要基于单年试验数据、单个生育期、单项色素,且建立的色素估算模型易饱和,因而模型的可靠性和适用性需要进一步加强。与此同时,植物的高光谱反射率在较宽波谱范围内具有连续、精细的光谱信息,有助于获得丰富的波段组合及参数类型,增强植株生物理化参数探测的手段和能力^[15,16]。而有关小麦冠层高光谱反射特征与叶片不同形态色素

密度的定量关系,目前尚少有报道。本研究目的是以不同年份、品种类型、施氮水平的田间试验为基础,综合分析小麦叶片色素密度与冠层高光谱参数的定量关系,比较分析多种高光谱参数估算叶片色素密度的效果,以期确立小麦叶片色素密度的定量监测模型。预期结果将为遥感技术在小麦光合能力评价和氮素营养诊断的可能应用提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究进行了2个田间试验,涉及不同年份、品种类型及施氮水平。

(1) 试验1 2004~2005年在江苏省农科院进行。供试品种为宁麦9号(简称N9,低蛋白含量,约10.5%),扬麦12号(简称Y12,中蛋白含量,约12.5%),豫麦34(简称Y34,高蛋白含量,约15%)。土壤有机质2.09%,全氮0.18%,速效氮 $150.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $140.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $113.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。前茬为水稻。试验设4个施氮水平,分别为0(N0)、75(N1)、150(N2)和225(N3) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 纯氮,各处理配施 $80\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ P}_2\text{O}_5$ 和 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ K}_2\text{O}$,磷钾肥全部用作基肥。各处理氮肥50%用作基肥,50%为拔节期追肥。试验随机排列,3次重复,小区面积 $4\times4.5=18\text{ m}^2$,基本苗 $1.5\times10^6\cdot\text{hm}^{-2}$,行距25 cm。其他栽培管理措施同一般高产麦田。田间光谱测试和采样日期分别为:起身期、拔节期、孕穗期和花后20d(DAA20),该试验资料用于监测模型的检验。

(2) 试验2 2005~2006年在江苏省南京市农林局江宁试验站进行。供试品种为宁麦9号(简称N9,低蛋白含量,约10.5%),豫麦34(简称Y34,高蛋白含量,约15%)。土壤有机质1.43%,全氮0.11%,速效氮 $62.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $10.36\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $82.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。前茬为水稻。试验设4个施氮水平,分别为0(N0)、90(N1)、180(N2)和270(N3) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 纯氮。各处理配施 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ P}_2\text{O}_5$ 和 $210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ K}_2\text{O}$,磷钾肥全部用作基肥,各处理氮肥50%用作基肥,50%为拔节期追肥。试验随机排列,3次重复,小区面积 $5\times5.5=27.5\text{ m}^2$,基本苗 $1.8\times10^6\cdot\text{hm}^{-2}$,行距25 cm。其他栽培管理措施同一般高产麦田。田间光谱测试和采样日期分别为:拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期、花后9d(DAA9)、花后13d(DAA13)和花后20d(DAA20),该试验资料用于监测模型的构建。

1.2 测定方法

1.2.1 光谱数据测定

小麦冠层光谱测量采用美国 Analytical Spectral Device(ASD)公司生产的 FieldSpec Pro FR2500 型背挂式野外高光谱辐射仪。波段值为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。冠层光谱测定选择在天气晴朗、无风或风速很小时进行,时间范围为10:00~14:00。测量时传感器探头垂直向下,光谱仪视场角为 25° ,距冠层顶垂直高度约1.0 m,地面视场范围直径为0.44 m。以10个光谱为一采样光谱,每个观测点记录10个采样光谱,以其平均值作为该观测点的光谱反射值。测量过程中,及时对每组目标的观测前后进行标准白板校正(标准白板反射率为1,因此所得目标物光谱为无量纲的相对反射率)。

1.2.2 叶片色素含量测定及色素密度计算

与光谱测量同步,每小区取小麦植株6株,将绿色叶片按照不同叶位分离,各叶位叶片立即称重,并放于保鲜袋中,经液氮处理带回实验室,在低温冰柜(-29°C)中保存。叶绿素含量测定时,取叶片中部0.100g剪成细丝,采用无水乙醇和丙酮1:1混合液暗处提取,用日立(HITACHI)U-2800型紫外可见分光光度计测定在470nm、645nm和663nm处吸光度,然后以 Lichtenthaler 法^[17]计算不同叶位叶片叶绿素a(Chl a)、叶绿素b(Chl b)、叶绿素a+b(Chl a+b)和类胡萝卜素(Car)的含量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)。并乘以叶片鲜重(Leaf fresh weight, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\text{soil}$),获得单位土地面积绿叶所含色素的总量,作为冠层叶片色素密度(Canopy leaf pigment density, CLPD),单位为 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\text{soil}$,具体计算见如下公式:

$$\text{CLPD} = 1\text{stLD} \times 1\text{stLPC} \times 2\text{ndLD} \times 2\text{ndLPC} \times 3\text{rdLD} \times 3\text{rdLPC} + A$$

这里 1stLD、2ndLD 和 3rdLD 等分别为顶部第 1 张叶片重、第 2 张叶片重和第 3 张叶片重,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ soil FW, 1stLPC、2ndLPC 和 3rdLPC 等分别为顶部第 1 张叶片色素含量、第 2 张叶片色素含量和第 3 张叶片色素含量,单位为 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW。

1.3 数据分析与利用

在资料分析中,综合了已有光谱参数的不同算法,并在 MATLAB 语言环境下编程实现。以试验 2 资料为基础,对小麦冠层多个光谱参数与群体叶片色素密度进行相关分析,选择与叶片色素密度显著相关的敏感波段及光谱参数,通过回归分析建立小麦叶片色素密度监测模型,利用估计标准误差(SE)和拟合决定系数(R^2)优化方程。然后利用试验 1 资料对所筛选建立的模型进行测试和检验,采用通用的均方根差(RMSE)、相对误差(RE)、精度(R^2)和准确度(Slope)4 个指标进行综合评定,并绘制观察值与预测值之间 1:1 关系图。经相关回归分析后,优选出 21 个表现较好的高光谱参数及其定义见表 1。

表 1 本文采用的高光谱参数列表

Table 1 Summary of different hyperspectral parameters used in this study

类型 Type	参数 Parameter	定义及出处 Definition and source	参考文献 References
模拟宽光谱波段组合 Combination of wide spectra band simulated	SAVI2	$R_{\text{NIR}} / (R_{\text{RED}} + b/a)$ $a = 1.3681, b = 1.4735$	[18]
	SARVI(MSS)	$\text{Band4} / (\text{Band2} + b/a)$ $a = 0.96916, b = 0.084726$	[19]
	TC3(MSS)	$-0.829 \times \text{Band1} + 0.522 \times \text{Band2} - 0.039 \times \text{Band3} + 0.194 \times \text{Band4}$	[20]
窄光谱波段组合 Combination of narrow spectra band		$(R_{750 \sim 800} / R_{695 \sim 740}) - 1$	[8]
	PSSRa	R_{800} / R_{680}	[3]
	PSSRb	R_{800} / R_{635}	[3]
	PSSRc	R_{800} / R_{470}	[3]
	mSR(800, 670)	$\{ (R_{800} / R_{670}) - 1 \} / \{ (R_{800} / R_{670})^{0.5} + 1 \}$	[21]
	RVI(810, 560)	R_{810} / R_{560}	[22]
	GM1	R_{750} / R_{550}	[23]
	mSR705	$(R_{750} - R_{445}) / (R_{705} + R_{445})$	[24]
	SRPI	R_{430} / R_{680}	[25]
	NPCI	$(R_{430} - R_{680}) / (R_{430} + R_{680})$	[26]
红边区域内波段组合 Combination of red edge spectra band	VOG1	R_{740} / R_{720}	[27]
	VOG2	$(R_{734} - R_{747}) / (R_{715} + R_{726})$	[28]
	VOG3	$(R_{734} - R_{747}) / R_{715} + R_{720}$	[28]
	SR705	R_{750} / R_{705}	[29]
	TVI2	R_{750} / R_{680}	[30]
微分及衍生参数 The first derivatives and derivatives	SRE/SBE	红边内最大一阶微分与蓝边内最大一阶微分的比值 Ratio of the red-edge differential maximum to the blue-edge differential maximum	
	SDr/SDb	红边内一阶微分总和与兰边内一阶微分总和的比值 Ratio of the red-edge integral area to the blue-edge integral area	
	FD755	755 nm 处一阶微分光谱值 The first derivative value at 755 nm	

2 结果与分析

2.1 小麦叶片色素密度与原始光谱及一阶导数的相关性

将试验 2 不同生育时期的叶片叶绿素及类胡萝卜素密度与对应的冠层光谱反射率及其一阶微分光谱数据($n = 168$)进行总体相关分析(图 1)。由图 1A 可知,叶绿素和类胡萝卜素与冠层光谱反射率的关系两者相似,叶绿素表现更好,但差异不大。729 nm 附近为转折点,波长小于 729 nm 时光谱反射率与叶片色素密度呈负相关;波长大于 729 nm 时两者呈正相关,其中在 500 ~ 710 nm 间相关系数存在一个较低的波谷, $r < -0.74$,且类胡萝卜素的波谷相对较浅。在 770 ~ 1100 nm 间,相关系数存在一个较高的平台,叶绿素 $r > 0.80$,类胡萝卜素 $r > 0.77$,该区域光谱对叶面积和生物量反应敏感,因此与色素密度关系密切。自 710 nm

和 750 nm 沿波长向 729 nm 附近移动,相关性均迅速降低。

叶片色素密度与一阶微分光谱之间的相关系数图(图 1B)表明,通过求微分光谱,可以明显改善与色素密度的关系。叶绿素和类胡萝卜素与一阶微分光谱的关系两者相似,比较而言,叶绿素表现稍好。以叶绿素为例,除 640 ~ 673 nm 区域外,698 nm 以前呈负相关,其中在 484 ~ 509 nm 和 537 ~ 563 nm 区域相关性稳定且达较高水平。在 698 ~ 870 nm 区域呈正相关,红边区域 714 ~ 774 nm 间表现最好(757 ~ 760 nm 为水和氧的强吸收谷例外),最大相关系数的波长位于 745 ~ 756 nm 区域,达极显著水平($r=0.92$)。在 690 ~ 710 nm 区域,随波长移动,相关系数迅速变化,且有质的转化,698 nm 附近相关系数迅速接近于零,在此区域向长波方向移动,色素对光能的吸收开始减弱,而细胞结构对光的反射逐步增强。

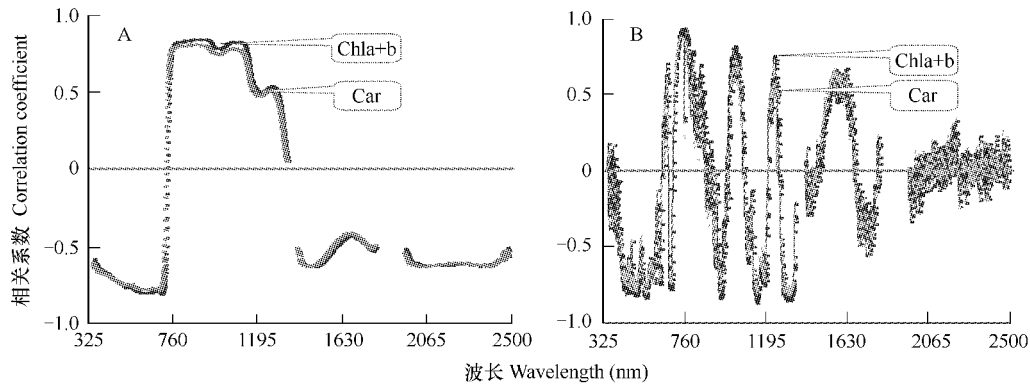


图 1 小麦叶片色素密度与冠层光谱反射率(A)及一阶微分光谱数据(B)的相关性($n=168$)

Fig. 1 Correlation of leaf pigment density to canopy spectral reflectance (A) and its first derivative spectra (B) in wheat

2.2 小麦叶片色素密度与高光谱参数的定量关系

本研究以特征光谱及波段和已见报道的植被指数共计 239 个光谱参数为基础,综合不同年份和不同时期的小麦叶片色素密度与冠层光谱参数进行相关回归分析,表 2 列出表现较好的 21 个参数、方程拟合的决定系数及标准误差。总体上,类胡萝卜素与叶绿素关系密切,通常与叶绿素关系较好的光谱参数与类胡萝卜素建立的回归关系也较好,但类胡萝卜素具有特有的生理规律,尤其在生育后期表现更明显,同时类胡萝卜素含量较低,因而估算类胡萝卜素密度效果相对较差(表 2)。叶绿素 a、叶绿素 b 与叶绿素 a+b 关系密切,可以使用统一参数来表达与三者的定量关系。通过多波段组合构造植被指数,可减少背景等噪音的影响,且包括不同波段的信息,明显提高对生化参数的预测效果。选用的波段多为色素吸收的特征敏感波段,如 800 nm、750 nm、700 nm、680 nm、550 nm 和 430 nm 等。对类胡萝卜素密度而言,RVI(810,560)、PSSRc、mSR705 和 GM1 等参数能较好地表达两者间的关系。对叶绿素密度进行拟合,光谱参数 VOG2、VOG3、RVI(810,560) 和 GM1 等表现最优。通过对光谱进行微分处理,可以去除部分线性或接近线性的背景噪音对目标光谱的影响。表 2 显示,基于光谱微分参数均很好表达与叶绿素密度的关系,类胡萝卜素表现相对较差。

图 2 展示表现较好且具代表性的回归方程拟合效果图。可以看出,光谱参数 VOG2 和 SDR/SDb 与叶片色素密度的关系非常密切,VOG2 与 Chla、Chlb、Chla+b 和 Car 间方程拟合精度分别为 0.858、0.866、0.862 和 0.745,标准误差分别为 0.219、0.076、0.292 和 0.065,SDR/SDb 与 Chla、Chlb、Chla+b 和 Car 间方程拟合精度分别为 0.865、0.861、0.866 和 0.757,标准误差分别为 0.213、0.078、0.288 和 0.064。以类胡萝卜素回归方程拟合效果最差,尤其在 Car 密度较高(大于 $0.28 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 时散点图呈现出更加分散的趋势,经分析可知,图中所示比较分散的数据点主要为中高氮处理(N2 和 N3),且分布于除拔节期外所有生育时期。究其原因,植株营养充足,群体叶绿素密度较高,冠层光谱的变化特征受叶绿素的影响更大,相反,Car 密度与冠层光谱信息相关性降低。

表 2 小麦叶片色素密度(y)与不同光谱参数(x)线性相关的决定系数(R^2)和估计标准误(SE)($n=168$)

Table 2 Coefficients of determination (R^2) and estimation errors (SE) for linear correlations of leaf pigment density (y) to individual spectral parameters (x) in wheat

参数类型 Type	光谱参数 Parameter	Chl a		Chl b		Chl a + b		Car	
		R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE
模拟宽光谱波段组合 Combination of wide spectra band simulated	SAVI2	0.842	0.230	0.852	0.080	0.847	0.308	0.736	0.066
	SARVI(MSS)	0.858	0.219	0.852	0.080	0.859	0.296	0.762	0.063
	TC3(MSS)	0.834	0.236	0.804	0.092	0.828	0.326	0.747	0.065
	$(R_{750-800}/R_{695-740})-1$	0.851	0.224	0.850	0.081	0.853	0.301	0.748	0.065
窄光谱波段组合 Combination of narrow spectra band	PSSRa	0.844	0.229	0.841	0.083	0.845	0.309	0.752	0.064
	PSSRb	0.854	0.222	0.842	0.083	0.853	0.302	0.769	0.062
	PSSRc	0.828	0.241	0.801	0.093	0.830	0.331	0.777	0.061
	mSR(800, 670)	0.836	0.235	0.822	0.088	0.835	0.320	0.757	0.064
	RVI(810, 560)	0.868	0.211	0.862	0.077	0.869	0.285	0.774	0.061
	GM1	0.861	0.216	0.844	0.082	0.859	0.295	0.780	0.061
	mSR705	0.848	0.226	0.828	0.086	0.845	0.310	0.775	0.061
	SRPI	0.821	0.246	0.831	0.086	0.826	0.329	0.683	0.073
	NPCI	0.816	0.249	0.815	0.090	0.818	0.336	0.694	0.072
	VOG1	0.849	0.225	0.835	0.085	0.848	0.307	0.758	0.064
红边区域内波段组合 Combination of red edge spectra band	VOG2	0.858	0.219	0.866	0.076	0.862	0.292	0.745	0.065
	VOG3	0.861	0.216	0.870	0.075	0.866	0.288	0.746	0.065
	SR705	0.860	0.217	0.846	0.082	0.859	0.296	0.770	0.062
	TVI2	0.836	0.235	0.825	0.087	0.836	0.319	0.757	0.064
微分及衍生参数 The first derivatives and derivatives	SRE/SBE	0.863	0.215	0.866	0.076	0.866	0.288	0.745	0.065
	SDr/SDb	0.865	0.213	0.861	0.078	0.866	0.288	0.757	0.064
	FD755	0.854	0.222	0.865	0.076	0.859	0.295	0.740	0.066

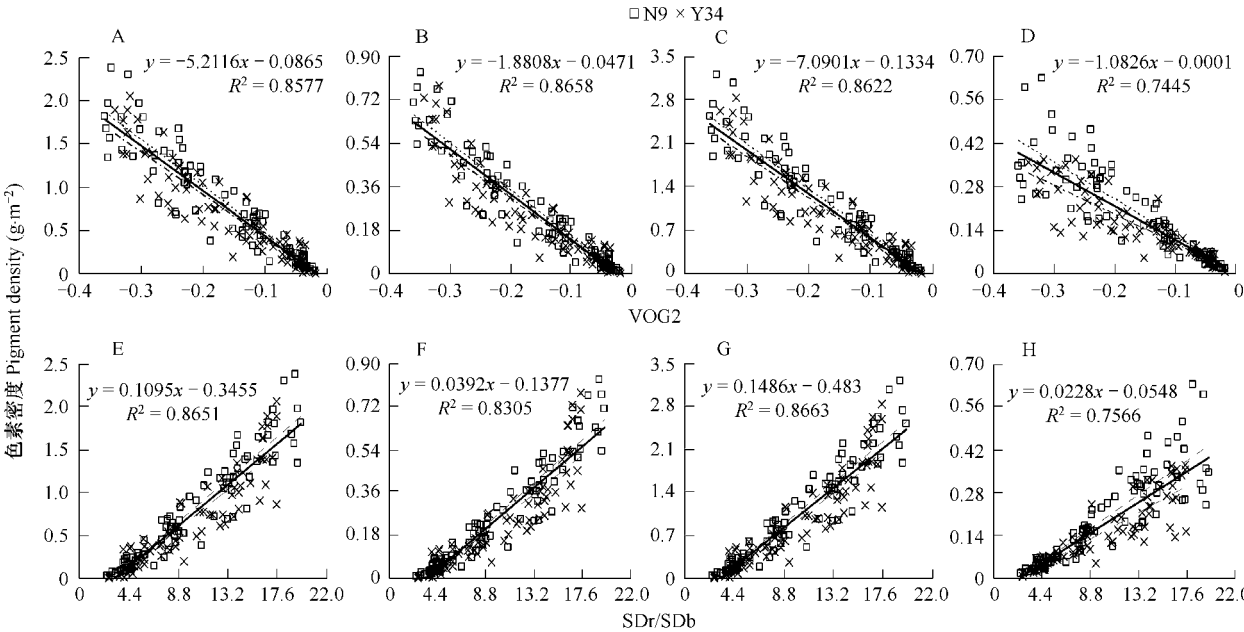


图 2 小麦叶片色素密度与 VOG2 和 SDr/SDb 的定量关系

Fig. 2 Quantitative relationships of leaf pigment density to VOG2 and SDr/SDb in wheat

A & E: Chla; B & F: Chlb; C & G: Chla + b; D & H: Car, $n=168$

2.3 模型的测试与检验

为了考察模型的可靠性和普适性,利用 2004 ~ 2005 年度独立试验数据(试验 1, $n=123$)对上述基于光谱参数的监测方程分别进行测试,采用 RMSE、RE、 R^2 和 Slope 4 个指标进行检验。综合考察不同光谱参数与叶

片色素密度的拟合效果及模型检验结果,将 8 个表现较好参数的测试结果列于表 3。色素间比较而言,Chl a 和 Chl a + b 的预测效果较好,Chl b 的准确性偏低,而 Car 也给出较好的测试结果。表明,由于 Chl b 和 Car 密度变化相对复杂,年度间也存在差异,从而模型在年度间的重演性相对较差。从不同参数来看,光谱参数 VOG2、VOG3、SRE/SBE、SDr/SDb 和 $(R_{750 \sim 800}/R_{695 \sim 740}) - 1$ 给出较好的检验结果。因此,综合考虑不同光谱参数在建模中的表现,利用 VOG2、VOG3、SRE/SBE 和 SDr/SDb 为变量,可以对不同形态的色素密度进行有效的估测。

表 3 小麦叶片色素密度模型预测能力的检验($n = 123$)

Table 3 Performance of the model for predicting leaf pigment density in wheat

色素 Pigment	项目 Item	SRE/SBE	SDr/SDb	VOG2	VOG3	VOG1	RVI (810,560)	GM1	$(R_{750 \sim 800}/R_{695 \sim 740}) - 1$
Chl a	R^2	0.823	0.851	0.845	0.845	0.829	0.840	0.836	0.850
	RMSE	0.175	0.180	0.183	0.191	0.198	0.185	0.188	0.170
	RE	0.133	0.167	0.153	0.154	0.173	0.171	0.172	0.157
	Slope	0.980	1.048	1.057	1.069	1.077	1.049	1.066	1.039
Chl b	R^2	0.754	0.804	0.766	0.764	0.740	0.785	0.771	0.783
	RMSE	0.063	0.062	0.077	0.081	0.076	0.073	0.071	0.064
	RE	0.151	0.155	0.169	0.176	0.191	0.179	0.187	0.171
	Slope	1.008	1.082	1.088	1.099	1.105	1.079	1.095	1.071
Chl a + b	R^2	0.820	0.848	0.848	0.847	0.825	0.846	0.838	0.855
	RMSE	0.219	0.239	0.245	0.258	0.269	0.259	0.255	0.225
	RE	0.143	0.162	0.159	0.161	0.195	0.178	0.193	0.168
	Slope	1.008	1.078	1.089	1.102	1.107	1.080	1.097	1.069
Car	R^2	0.832	0.832	0.788	0.793	0.828	0.776	0.806	0.787
	RMSE	0.051	0.036	0.042	0.042	0.036	0.045	0.038	0.041
	RE	0.130	0.127	0.146	0.131	0.144	0.150	0.141	0.148
	Slope	0.885	0.944	0.946	0.955	0.974	0.945	0.965	0.934

以 VOG2 和 SDr/SDb 为例,将监测模型的检验效果以 1:1 关系图进行直观展示(图 3)。其中,以 VOG2 为变量,模型对 Chl a、Chl b、Chl a + b 和 Car 预测的精度分别为 0.845、0.766、0.848 和 0.788, RMSE 分别为 0.183、0.077、0.245 和 0.042; 以 SDr/SDb 为变量,模型对 Chl a、Chl b、Chl a + b 和 Car 预测的精度分别为 0.851、0.804、0.848 和 0.832, RMSE 分别为 0.180、0.062、0.239 和 0.036。以上两个参数模型预测的相对误差均低于 17.0%, 预测准确度为 0.944 ~ 1.089, 比较接近理论值。这些结果表明,可以利用关键的光谱参数对小麦叶片不同形态的色素密度进行准确可靠的监测和诊断,其中以对 Chl a 和 Chl a + b 密度的估算效果最好。这些光谱参数对冠层叶片不同色素密度(CLPD, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \text{soil}$)的具体预测方程见表 4。

3 结论与讨论

色素密度是反映植被群体光合作用强弱、植被长势的重要参量,研究者很早就开始了利用光谱估算色素状况的研究,但模型预测精度和稳定性依然存在矛盾。本研究基于不同年份、氮素水平和小麦品种下的大田试验资料,系统比较了不同形式光谱参数对叶片色素密度的模拟效果,其中以 VOG2、VOG3、RVI(810,560)、SRE/SBE 和 SDr/SDb 表现较好,对叶绿素密度的线性方程决定系数 R^2 变化范围为 0.858 ~ 0.869, 而类胡萝卜素密度的 R^2 显著降低,变化范围为 0.745 ~ 0.774。经过独立数据检验模型预测能力,提出了光谱参数 VOG2、VOG3、SRE/SBE 和 SDr/SDb 可以较好地监测小麦叶片色素密度,预测精度 R^2 为 0.754 ~ 0.851, 预测误差 RE 为 12.7% ~ 17.6%, 其中以叶绿素 a 和叶绿素 a + b 表现最好。这一结果对小麦植株的光合能力评价、产量潜力预测、生长状况监测及氮素营养调控等具有参考价值,为遥感技术特别是高光谱遥感在精确农业中的应用提供了关键技术支撑。

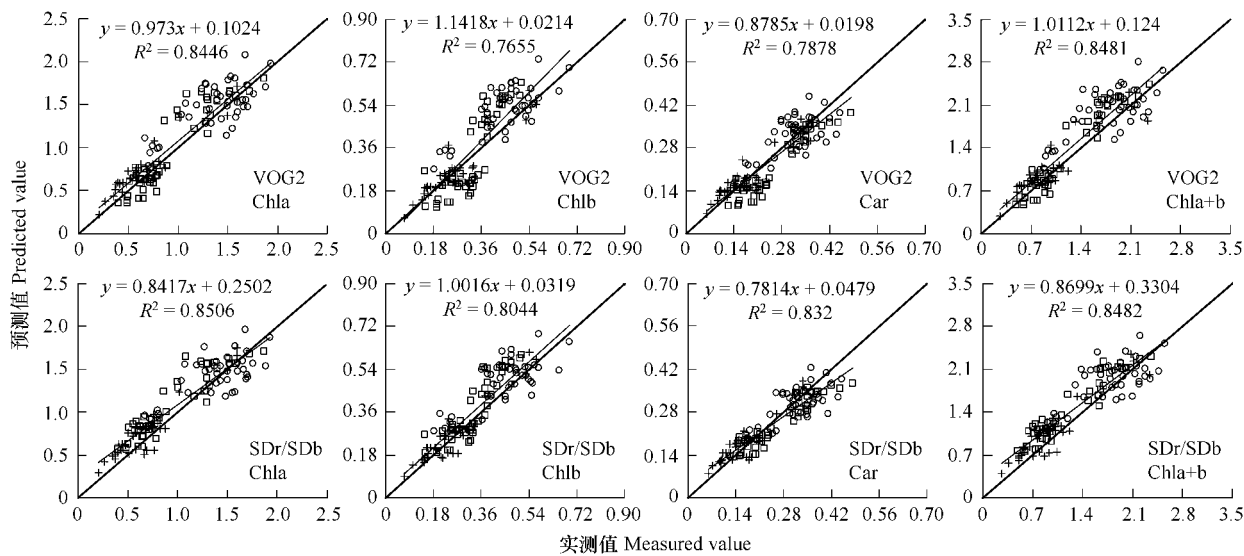


图3 小麦叶片色素密度预测值与实测值之间的比较[上排为 VOG2,下排为 SDr/SDb,n=123]
Fig.3 Comparison of estimated with measured leaf pigment density in wheat (upper: VOG2, lower: SDr/SDb, n=123)

表4 小麦叶片色素密度预测模型

	VOG2(<i>x</i>)	VOG3(<i>x</i>)	SRE/SBE(<i>x</i>)	SDr/SDb(<i>x</i>)
CLPD _{Chla} (<i>y</i>)	<i>y</i> = -5.2116 <i>x</i> - 0.0865	<i>y</i> = -4.4321 <i>x</i> - 0.0536	<i>y</i> = 0.2266 <i>x</i> - 0.4209	<i>y</i> = 0.1095 <i>x</i> - 0.3455
CLPD _{Chlb} (<i>y</i>)	<i>y</i> = -1.8808 <i>x</i> - 0.0471	<i>y</i> = -1.6004 <i>x</i> - 0.0354	<i>y</i> = 0.0816 <i>x</i> - 0.1667	<i>y</i> = 0.0392 <i>x</i> - 0.1377
CLPD _{Car} (<i>y</i>)	<i>y</i> = -1.0826 <i>x</i> - 0.0001	<i>y</i> = -0.9201 <i>x</i> + 0.0068	<i>y</i> = 0.047 <i>x</i> - 0.069	<i>y</i> = 0.0228 <i>x</i> - 0.0548
CLPD _{Chla+b} (<i>y</i>)	<i>y</i> = -7.0901 <i>x</i> - 0.1334	<i>y</i> = -6.0305 <i>x</i> - 0.0889	<i>y</i> = 0.3081 <i>x</i> - 0.5873	<i>y</i> = 0.1486 <i>x</i> - 0.483

绿色植被在 800nm 附近的反射率基本代表近红外波段的反射率水平,而 680nm、635nm 和 470nm 处则分别是 Chla、Chlb 和 Car 强吸收波段。据此,Blackburn 等^[3]构造了光谱指数 PSSR 和 PSND 系列,用来预测不同色素含量。Peñuelas 等^[2]研究表明,550nm 较 680nm 附近反射率对叶绿素更敏感。本文充分利用以上研究成果,所选用波段主要为 800nm、700nm、635nm、550 和 430nm 等特征波段附近反射率,方程拟合效果好。其中,参数 RVI(810,560)对不同色素密度的拟合及测试结果均较好,但比值植被指数与生物物理参数的相关性易受氮素水平的影响^[31]。729nm 附近一般可认为红边特殊位点,在此波长位置附近两侧光谱反射率与叶绿素的关系呈异质性,通过构造比值等不同形式的光谱参数可以较好表达与叶绿素的关系。为此,Gupta 等^[32]提出 RI_{1dB}、RI_{2dB}、RI_{3dB} 和 RI_{half} 参数,Gitelson 等^[29]和 Sims 等^[24]研究表明,估测叶绿素的波段是偏于 550nm 和 700nm 附近,并构造植被指数 SR705 和 mSR705,赵德华等^[33]研究表明该参数与类胡萝卜素密度密切相关。以上参数在本研究建模中均得到了很好的应用。Zarco-Tejada 等^[28]通过对红边区域信息进一步挖掘,提出了 VOG2 和 VOG3 等参数,方程拟合及模型检验均很好,可以用于对不同色素密度的预测。微分光谱技术可以减少低频背景噪音影响和提高重叠光谱分辨率,本研究表明,一阶导数可以明显改善与色素密度的关系,750~755nm 附近导数光谱表现突出,两年结果一致。浦瑞良等^[34]利用“三边”面积评价美国巨杉冠层叶片营养状况,王秀珍等^[35]发现 SDr/SDb 与水稻叶绿素含量间具有较好的相关性,由于 SDr 和 SDb 分别包含红光和蓝光波段的信息,由此构造的参数对植株生化组分的估测具有较高能力。本研究利用红蓝边斜率比(SRE/SBE)和红蓝边面积比(SDr/SDb)参数,方程拟合精度高,模型测试效果好。

不同色素组分对氮素因子的响应存在差异,不同类型品种色素含量的变化具有特异的变化动态。类胡萝卜素含量随生育进程变化较复杂,品种间存在显著差异,同时,类胡萝卜素含量较低,且吸收光谱与 Chlb 重叠,因此,建立 Car 估测模型仍需进一步加强研究^[36, 37]。在植株受到营养胁迫或衰老时叶绿素较类胡萝卜素

下降迅速,其辐射的光合利用效率也同时下降,为此,研究者通过提取光谱信息估算 Car/Chl 比值用于评价辐射的光合效率和植被健康状况^[1,37]。小麦冠层下部叶片首先变黄,上部叶片叶绿素降解较慢,尤其在植株生长旺盛时,Car 信息更加集中在冠层下部,而冠层光谱特征主要是由上部叶片决定的,尤其在群体较大时,下部叶片的色素信息很少在冠层光谱上得到反映,因此,通过冠层光谱估算 Car 状况较叶绿素困难更大^[36],本研究结果充分表明这一点。由于冠层光谱主要由色素状况决定,尤其在生长旺盛时,Chla 和 Chlb 的变化共同主导了冠层光谱特征,因此,光谱参数与 Chl a 和 Chl b 回归方程拟合精度均较高。Chl b 较 Chl a 受氮素促进效应差,而在中后期降解速度更快,但 Chl a 受氮素促进效应明显,且降解相对缓慢。此外,氮素、生育时期及品种等因子对 Chl b 的复合效应在年度间存在显著差异。因此,利用冠层光谱估算 Chl a 年度间重演性好,而 Chl b 状况年度间重演性明显降低,严重影响了 Chl b 监测模型在实践中的应用,有关提取对 Chl b 敏感且特征适宜的光谱指标仍需深入研究。为此,目前色素状况的光谱监测主要针对 Chl a 或 Chl a + b 进行的,且以叶绿素预测效果好于其它色素,与前人研究一致^[6,14,24]。Chl a 和 Chl b 间存在良好的线性关系,可以使用统一光谱参数对叶绿素进行监测^[6],本研究结果充分表明这一点。尽管 Car 与 Chl 间存在生理差异,提取 Car 特征敏感的冠层光谱参数比较困难,本研究利用对 Chl 敏感的光谱参数用来监测 Car 信息也取得了不错的效果,但预测方程仍需进一步优化。

有关小麦叶片色素状况的光谱估测,前人也开展了不少有意义的工作。Hu 等^[12]利用 CASI 数据构建 CCII 指数对小麦叶绿素密度进行估算。Jago 等^[13]同时利用地面和高空光谱数据求得红边位置(原始定义求得),对叶绿素含量的拟合取得了不错的效果,但存在饱和性。Broge 等^[14]比较了多种光谱指数与叶绿素冠层密度的关系,在较低水平时红边位置(拉格朗日模型求得)预测效果较好,而密度较高时以 SAVI2 预测为好。以上研究结果基于单年数据,参与建模的生育期较少,缺乏对不同色素的比较分析,且建立的模型易饱和。本文试验资料的变异主要靠氮素因子来驱动,同时,该资料中也包含不同品质类型品种,不同品种色素对氮素因子的响应存在差异,不同生育时期对色素密度的影响显著。经系统分析,在上述不同条件下提取了对色素积累量及其动态变化敏感的光谱参数,选用的拟合方程经过独立年份实测数据的检验,重演性好,因此,建立的模型能够很好地对该生态区不同年份、不同蛋白质含量品种及不同氮素条件下的色素密度进行反演。叶片色素包括多种组分,不同组分具有特有的变化规律,不同组分及状态表示方式与光谱参数的关系也存在差异,需要进一步系统阐明。不同植被指数有不同的特点及适用范围,因此,利用高光谱数据选择敏感适用的波段组合及特征参数仍需进一步研究。此外,本文中的小麦色素监测模型是在一个生态区两年大田试验资料上构建和测试的,若今后能通过不同生态区、不同生产系统、更多品种类型的广泛检验并不断完善,实现模型的估测精度和普适性的有效统一,将在小麦光合效率评价、健康状况监测及氮素营养管理中具有更大的应用价值。

References:

- [1] Merzlyak M N, Gitelson A A, Chivkunova O B, *et al.* Nondestructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 1999, 106: 135–141.
- [2] Peñuelas J, Filella I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science*, 1998, 3 (4): 151–156.
- [3] Blackburn G A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: An evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66: 273–285.
- [4] Curran P J, Dungan J L, Macleer B A, *et al.* The effect of a red leaf pigment on the relationship between red edge and chlorophyll concentration. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 35: 69–76.
- [5] Gitelson A A, Merzlyak M N. Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research*, 1998, 22(5): 689–692.
- [6] Datt B. Remote sensing of chlorophylla, chlorophyllb, chlorophylla + b, and total carotenoid content in eucalyptus leaves. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66: 111–121.
- [7] Zhao D H, Li J, Song Z, *et al.* Difference of canopy spectral reflectance to nitrogen nutrient in cotton with different nitrogen applications. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(11): 1169–1172.
- [8] Gitelson A A, Gritz Y, Merzlyak M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160: 271–282.
- [9] Sampson P H, Zarco-Tejada P J, Mohammed G H, *et al.* Hyperspectral remote sensing of forest condition: Estimating chlorophyll content in tolerant hardwoods. *Forest Science*, 2003, 49(3): 381–391.

- [10] Yoder B J, Pettigrew-Crosby R E. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400—2500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 53: 199—211.
- [11] Liu W D, Xiang Y Q, Zheng L F, *et al.* Relationships between rice LAI, CHL D and hyperspectral data. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(4): 279—283. (in Chinese)
- [12] Hu B X, Qian S E, Haboudane D, *et al.* Retrieval of crop chlorophyll content and leaf area index from decompressed hyperspectral data: the effects of data compression. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92: 139—152.
- [13] Jago R A, Cutler M E J, Curran P J. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68: 217—224.
- [14] Broge N H, Mortensen J V. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81: 45—57.
- [15] Thenkabail P S, Smith R B, Pauw E D. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71: 158—182.
- [16] Ayala-Silva T, Beyl C A. Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency. *Advances in Space Research*, 2005, 35: 305—317.
- [17] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids, the pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*. San Diego, CA: Academic Press, 1987. 148: 350—382.
- [18] Major D J, Baret F, Guyot G. A ratio vegetation index adjusted for soil brightness. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11: 727—740.
- [19] Lyon J G, Yuan D, Lunetta R S, *et al.* A change detection experiment using vegetation indices. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1998, 64: 143—150.
- [20] Kauth R J, Thomas G S. The tasseled cap — a graphic description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, West Lafayette, IN: LARS, 1976, 41—51.
- [21] Chen J. Evaluation of vegetation indices and modified simple ratio for boreal applications. *Canada Journal of Remote Sensing*, 1996, 22: 229—242.
- [22] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, *et al.* Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA. 1974, 1—371.
- [23] Gitelson A A, Merzlyak M N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *Internal Journal of Remote Sensing*, 1997, 18: 2691—2697.
- [24] 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: 337—354.
- [25] Peñuelas J, Filella I, Lloret P, *et al.* Reflectance assessment of mite effects on apple trees. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16: 2727—2733.
- [26] Peñuelas J, Gamon J A, Fredeen A L, *et al.* Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48: 135—146.
- [27] Vogelmann J E, Rock B N, Moss D M. Red-edge spectral measurements from Sugar Maple leaves. *Internal Journal of Remote Sensing*, 1993, 14: 1563—1575.
- [28] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Noland T L, *et al.* Scaling-up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(7): 1491—1507.
- [29] Gitelson A A, Merzlyak M N. Quantitative estimation of chlorophyll a using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 1994, 22: 247—252.
- [30] Broge N H, Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 76: 156—172.
- [31] Zhao D H, Li J L, Song Z J. Hyperspectral remote sensing for estimating biochemical variables of canopy. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 30(11): 1169—1172.
- [32] Gupta R K, Vijayan D, Prasad T S. Comparative analysis of red edge hyperspectral indices. *Advance in Space Research*, 2003, 32(11): 2217—2222.
- [33] Zhao D H, Li J L. Detection of leaf carotenoid information of different crops from hyperspectral reflectance. *Remote Sensing Information*, 2004, 3: 13—17.
- [34] Pu R L, Gong P. *Hyperspectral remote sensing and its applications*. Beijing: Higher Education Press, 2000. 205—227.
- [35] Wang X Z, Huang J F, Li Y M, *et al.* Correlation between chemical contents of leaves and characteristic variables of hyperspectra on rice field. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(2): 144—148.
- [36] Blackburn G A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. *Internal Journal of Remote Sensing*, 1998, 19: 657—675.
- [37] Gitelson A A, Zur Y, Chivkunova O B, *et al.* Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. *Photochemistry and Photobiology*, 2002, 75: 272—281.

参考文献:

- [7] 赵德华, 李建龙, 宋子健, 等. 不同施氮水平下棉花群体反射光谱的差异性分析. *作物学报*, 2004, 30(11): 1169—1172.
- [11] 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. *遥感学报*, 2000, 4(4): 279—283.
- [31] 赵德华, 李建龙, 宋子健. 高光谱技术提取植被生化参数机理与方法研究进展. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 94—99.
- [33] 赵德华, 李建龙. 高光谱技术提取不同作物叶片类胡萝卜素信息. *遥感信息*, 2004, 3: 13—17.
- [34] 浦瑞良, 宫鹏. *高光谱遥感及其应用*. 北京: 高等教育出版社, 2000: 204—227.
- [35] 王秀珍, 黄敬峰, 李云梅, 等. 水稻生物化学参数与高光谱遥感特征参数的相关分析. *农业工程学报*, 2003, 19(2): 144—148.