

## 利用高光谱参数预测水稻叶片叶绿素和籽粒蛋白质含量

孙雪梅 周启发 何秋霞

(浙江大学生命科学院植物生理与生物化学国家重点实验室, 浙江杭州 310029)

**摘要:** 通过温室水培试验, 测定 2 个品种、4 个供氮水平的水稻剑叶在抽穗期后不同生育期的高光谱反射率, 及对应叶片的叶绿素、全氮以及籽粒蛋白等生化组分的含量。结合水稻光谱曲线特征以及氮素营养胁迫特点, 利用统计相关分析法, 研究了 9 个植被指数和 8 个微分参数与叶片叶绿素、全氮含量的相关性, 结果表明这些相关性均达到正显著水平。尤其是利用绿峰 550 nm 附近的反射率构建的植被指数 GNDVI 与叶绿素含量、R850/R550 与全氮含量之间的相关性最好, 相关系数分别为  $r=0.8761$ ,  $r=0.8881$  ( $n=16$ )。微分参数中, 以红谷面积 SR<sub>0</sub> 与叶绿素含量、差值归一化指数 EGFN 与全氮含量之间相关性最好, 相关系数分别为  $r=0.8544$ ,  $r=0.8584$  ( $n=16$ )。利用基于“秀水 110”构建的相关模型, 可以较为准确地预测“丙 9914”叶片叶绿素、全氮含量。其中利用 GNDVI 和 SR<sub>0</sub> 参与构建的相关模型可以较为准确地预测“丙 9914”在收获期籽粒蛋白含量, 预测值与实测值之间具有较好的相关性, 拟合度分别为 0.9914 和 0.9942 ( $n=4$ )。说明用高光谱参数预测水稻叶片叶绿素含量及籽粒蛋白质含量是可行的。

**关键词:** 水稻; 高光谱参数; 叶绿素; 蛋白质; 相关分析

中图分类号: S511

## Hyperspectral Variables in Predicting Leaf Chlorophyll Content and Grain Protein Content in Rice

SUN Xue-Mei, ZHOU Qi-Fa, HE Qiu-Xia

(The State Key Laboratory of Plant Physiology and Biochemistry, College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, Zhejiang, China)

**Abstract:** A green house experiment was conducted to investigate the relationships between the flag leaf hyperspectral reflectance and the leaf chlorophyll content as well as the grain protein content in solution-cultured rice. Two rice cultivars (“Xiushui 110” and “Bing 9914”) were grown under four nitrogen levels during period of July 2003 to October 2003. The flag leaf hyperspectral reflectance was measured under laboratory conditions with an ASD FieldSpec Pro FR<sup>TM</sup> at four different developmental stages after heading. The contents of chlorophyll and total nitrogen in the leaves, and the grain protein content were determined. The relationships between nine existing vegetation index and eight first derivatives and the chlorophyll content as well as the total nitrogen content in leaves were analyzed using statistical models. As a result, the hyperspectral variables were significantly correlated with the chlorophyll content and the total nitrogen content. GNDVI was correlated significantly with the leaf chlorophyll content and R800/R553 with the leaf total nitrogen content,  $r=0.8761$  and  $r=0.8881$  ( $n=16$ ), respectively. The correlations between SR<sub>0</sub> and the chlorophyll content and that between EGFN and the total nitrogen content were the highest,  $r=0.8544$  and  $r=0.8584$  ( $n=16$ ), respectively, as the first derivatives were correlated with the leaf chlorophyll and total nitrogen content. The mathematical model based on “Xiushui 110” could successfully be used in the prediction of the leaf chlorophyll and total nitrogen content in “Bing 9914” leaves. Based on the established model, GNDVI and SR<sub>0</sub> could be used to predict the grain protein content in “Bing 9914” at the harvesting stage,  $R^2=0.9914$  and  $R^2=0.9942$  ( $n=4$ ), respectively. The results suggested that the hyperspectral variables could be used to estimate the leaf chlorophyll content, the leaf total nitrogen content and the grain protein content in the solution-cultured rice.

**Key words:** Rice; Hyperspectral variables; Chlorophyll; Protein; Regression analysis

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40271076)和国家“863”计划项目(2002AA243012)资助。

作者简介: 孙雪梅(1980-), 女, 硕士研究生, 主要从事农业遥感与信息技术应用方面的研究。Tel: (0571) 86971381; E-mail: qifaz@zju.edu.cn; Zqifa2002@yahoo.com

Received(收稿日期): 2004-07-05, Accepted(接受日期): 2004-11-16.

光合作用过程中起吸收光能作用的色素有叶绿素[叶绿素 a(Chl a)和叶绿素 b(Chl b)]与类胡萝卜素(Cars),其中叶绿素是主要的吸收光能物质,直接影响植被光合作用的光能利用。而绿色植物明显的光谱特征,就是由其中的叶绿素等色素和液态水引起的<sup>[1]</sup>。其中对可见光波段影响最大的是叶绿素含量,而近红外波段主要受叶片的含水量以及叶片结构的影响。高光谱遥感的快速发展使得定量估测植被叶绿素含量成为可能。高光谱遥感技术所提供的遥感信息,能够准确地用于估测植被的生理状况,划分植被类型,预测植被生产能力<sup>[2]</sup>。

通常,利用高光谱遥感数据预测植被叶绿素含量一般采用两种方法,一是通过多元回归方法建立光谱数据或由此衍生的植被指数与植被叶绿素含量之间的关系<sup>[3~11]</sup>;二是运用微分技术寻找对叶绿素变化敏感的微分参数<sup>[12~14]</sup>。这些高光谱参数往往是基于特定植物类型的试验结果而定义的,当用于预测不同植物类型的叶绿素含量时效果相对较差<sup>[15]</sup>。近十多年来,已新定义了多个高光谱参数用于预测多种植物类型的叶绿素含量(见表 1),并发现新定义参数比引用的先前发表的参数,与色素含量的相关性更高<sup>[5,6,9~11]</sup>。

氮在植物体内容易移动和进行再分配。在正常情况下,植物体内氮含量与叶绿素含量之间高度相关,而且不同器官间氮含量也存在良好的相关性。

在本研究中,以水培稻为研究对象,试图根据叶片光谱—叶片叶绿素含量—叶片氮含量—籽粒蛋白含量这一技术路线,建立水稻叶片光谱与籽粒蛋白含量之间的数量联系,分析比较近十多年来新定义的高光谱参数与水稻叶片叶绿素含量的相关性,找出相关性最好的高光谱参数,并建立用这些参数预测籽粒蛋白含量的模型,从而为水稻品质的遥感监测奠定技术基础。

## 1 试验设计与数据采集

### 1.1 试验材料及设计

选取直链淀粉含量不同的 2 个晚稻“秀水 110”和“丙 9914”,于 2003 年 6 月 19 日播种,7 月 5 日移栽。试验区设在浙江大学华家池校区的智能化控制温室中(东经 120°10′,北纬 30°14′)。试验采用水培方式,培养液采用国际水稻所配方。氮素营养分为 4 个水平,即氮素正常(40 mg/L)、氮素过量(2 × 40 mg/L)、氮素缺乏(1/4 × 40 mg/L)和有机氮(40 mg/L

谷氨酸钠),设 6 次重复。每桶种植 3 丛,每丛 2 株水稻。每只培养桶装营养液 17 L,1 周调一次 pH 值,每隔 30 d 更换一次营养液。

### 1.2 光谱数据测量

测量仪器为美国 ASD 公司生产的 ASD Field-Spec Pro FR™光谱仪,波段值范围为 350~2 500 nm,其中,350~1 000 nm 光谱采样间隔为 1.4 nm,光谱分辨率为 3 nm;1 000~2 500 nm 光谱采样间隔为 2 nm,光谱分辨率为 10 nm。

叶片光谱的测定从抽穗期开始,每隔 10 d 左右,依次测灌浆期、乳熟期、蜡熟期。测量时,采集具有代表性的水稻植株,选择 6~8 片主茎上的第一完全展开叶片,将叶片平放在反射率近似零的黑色橡胶上,用三角架固定光谱仪探头垂直向下,正对待测叶片正中部,光谱仪视场角为 8°,距样品表面 0.10 m(视场直径约 1.4 cm,略小于叶片宽度)。光谱仪电源为 50 W 卤化灯,距样品表面 0.45 m,方位角(与样品表面的夹角)70°。每次数据采集前都进行标准白板校正,并定时进行系统优化,以 10 个光谱为一采样光谱,每次记录 10 个采样光谱然后求平均,即得该点的光谱反射率数据。所得数据经接口直接输入计算机进行数据处理。测定部位为叶片中部,每次测定部位尽量保持一致。因为所测光谱为室内光谱,因此与天气情况无关,但为了使数据之间具有可比性,测定时间选在下午 14:00 左右。

### 1.3 生理生化参数测量

每次测完光谱后,立即剪取测过光谱的叶片放在保鲜袋中,放回本实验室的柜式冰箱中,用于叶绿素、全氮含量的测定。叶绿素含量的测定,对应测光谱的叶片中部取 0.100 g 剪成细丝,用混合液(丙酮无水乙醇 蒸馏水 = 4.5 4.5 1)提取法,提取色素<sup>[16]</sup>,用 UV-1201 型分光光度计比色,分别测定 663 nm 和 645 nm 处光密度值,计算叶绿素含量,以 mg/g 鲜重计。用凯氏定氮法测水稻叶片中全氮含量<sup>[17]</sup>。采集收获期水稻穗,用凯氏定氮法测籽粒蛋白质含量。

## 2 结果与分析

广泛使用的绿色植被指数是由红光波段和近红外波段反射光谱组成的。本文采用的植被指数大多是对前人所得结果的总结和整理。微分光谱在消除背景信息的影响和对混合光谱的分解方面起到很好的作用,在遥感领域具有广阔的应用前景。采用光

谱归一化微分分析技术,对反射光谱进行一阶微分(差分),其近似计算公式为  $(i) = [ (i + 1) - (i - 1)] / 2$ ,式中  $i$  为每个波段的波长;

为波长  $i$  处的一阶微分光谱; 为波长  $i - 1$  到  $i$  的间隔,视波段波长而定。不同类型的比值植被指数以及从一阶微分光谱数值中提取的不同类型的光谱微分(差分)参数,列于表1。

表1 植被指数、微分参数列表

Table 1 Summary of the vegetation index and the first derivatives		
植被指数 Vegetation index	定义 Definition	出处 Source
NDVI	$(R800 - R680) / (R800 + R680)$	Lichtenthaler <i>et al.</i> , 1996
GNDVI	$(R750 - R550) / (R750 + R550)$	Gtelson <i>et al.</i> , 1996a
PSSRa	R800/ R680	Blackburn <i>et al.</i> , 1998
PSSRb	R800/ R635	Blackburn <i>et al.</i> , 1998
Rch	$(R640 - R673) / R673$	Gupta <i>et al.</i> , 2001
PSNda	$(R800 - R680) / (R800 + R680)$	Blackburn <i>et al.</i> , 1998
PSNdb	$(R800 - R635) / (R800 + R635)$	Blackburn <i>et al.</i> , 1998
PSNdb	$R672 / (R550 \times R708)$	Datt, 1998
	R850/ R550	Schepers <i>et al.</i> , 1996
微分参数 The first derivatives	定义 Definition	描述 Description
Db	蓝边斜率	蓝边覆盖 490 ~ 530 nm, Db 是蓝边内 35 个一阶微分波段中最大波段值
Sdb	蓝边面积	蓝边范围内 35 个一阶微分波段值的总和
Dr	红边斜率	红边覆盖 680 ~ 750 nm, Dr 是红边内 65 个一阶微分波段中最大波段值
r	红边位置	r 是 Dr 对应的波长位置
Rg	绿峰反射率	Rg 是波长 510 ~ 560 nm 范围内最大的波段反射率
Ro	红谷反射率	Ro 是波长 640 ~ 680 nm 范围内最小的波段反射率
SRo	红谷面积	红谷范围内 35 个一阶微分波段值的总和
Rg - Ro	绿峰与红谷差值	绿边内最大的一阶微分 Rg 与红谷反射率 Ro 的差值
EGFN	$(Dr - Rg) / (Dr + Rg)$	红边内最大的一阶微分 Dr 与绿边内最大的一阶微分 Rg 的归一化

2.1 叶片叶绿素、全氮含量间的相关性分析

表2 “秀水 110”叶绿素、全氮含量间的相关性分析 (n = 16)  
Table 2 The correlation analysis between the chlorophyll content and the total nitrogen content in leaves of “Xiushui 110” (n = 16)

	Chl a	Chl b	Chl a + b	TN
Chl a	1			
Chl b	0.980 **	1		
Chl a + b	0.998 **	0.990 **	1	
TN	0.857 **	0.845 **	0.857 **	1

注: \*\*表示相关达  $P < 0.01$  显著水平。  
Note: \*\* significant at  $P < 0.01$  levels.

由表2可以看出,“秀水 110”叶片中叶绿素含量与叶片全氮含量间相关达正显著水平,即叶片中的氮素含量与叶绿素含量变化趋势相似,所以可通过测定叶绿素含量来监测植株氮素营养,这也是遥感技术应用于植株氮素监测的一个生理基础。

2.2 高光谱参数与叶片叶绿素、全氮含量间相关性分析

2.2.1 叶片植被指数与叶片叶绿素、全氮含量间相关性分析 由表3可知,在“秀水 110”的整个生育期内,所列出的植被指数与叶片中叶绿素含量间均达正显著相关。而所有的植被指数与叶片中全氮含量之间的相关性都达正显著水平。这主要是叶片中

叶绿素含量与氮素含量之间存在较强相关性的结果(见表2),并可发现,植被指数与叶片中全氮含量之间的相关系数总是高于植被指数与叶绿素含量之间的相关系数。这可能是因为叶片中全氮含量是用单位干重叶片中的氮含量来表示的,不受叶片含水量的影响,且较叶绿素含量高得多<sup>[18]</sup>。除 Rch 与叶片的叶绿素、全氮含量之间呈极显著负相关外,其他植被指数与叶片叶绿素、全氮含量之间均呈极显著正相关。因此,可以通过这些植被指数来预测叶片叶绿素和全氮含量,其中相关性最好的指数为 R850/ R550 和 Gtelson 等(1996)提出的“Green”NDVI,它们都是利用绿峰 550 nm 附近的反射率来代替传统的红光区反射率。这一结果也与其他试验结果相符,例如, Mariotti *et al.* (1996)发现在不同铁处理下生长的玉米和向日葵植株的叶片中 555 nm 处的反射与叶绿素 a 含量高度相关<sup>[19]</sup>; Filella *et al.* (1995)研究不同施肥条件下的冬小麦冠层光谱,发现 550 nm 处的反射率与 Chl a 含量具曲线相关关系<sup>[20]</sup>。图1为“Green”NDVI 与叶绿素含量之间的相关性曲线,图2为 R850/ R550 与叶片全氮含量之间的相关性曲线。

表 3 “秀水 110”叶片植被指数与叶片叶绿素、全氮含量间相关性分析( n = 16)  
Table 3 The correlation analysis between the vegetation indices and the chlorophyll content, total nitrogen content in leaves of “Xiushui 110” ( n = 16)

生化指标 Biochemical index	植被指数 Vegetation index								
	NDVI	GNDVI	PSSRa	PSSRb	Rch	PSNDa	PSNDb	R850/ R550	R672/ (R550 ×R708)
Chl a	0.712 **	0.830 **	0.678 **	0.776 **	- 0.792 **	0.712 **	0.788 **	0.834 **	0.656 **
Chl b	0.685 **	0.814 **	0.668 **	0.766 **	- 0.784 **	0.685 **	0.759 **	0.832 **	0.656 **
Chl a + b	0.707 **	0.829 **	0.678 **	0.776 **	- 0.793 **	0.707 **	0.783 **	0.837 **	0.659 **
TN	0.832 **	0.854 **	0.831 **	0.858 **	- 0.719 **	0.832 **	0.836 **	0.888 **	0.684 **

注: \*\*分别表示相关达  $P < 0.01$  显著水平。  
Note: \*\* significant at  $P < 0.01$  level.

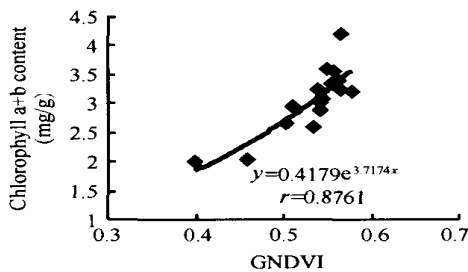


图 1 叶绿素含量与 GNDVI 之间的相关性  
Fig.1 The correlation between the leaf chlorophyll content and GNDVI

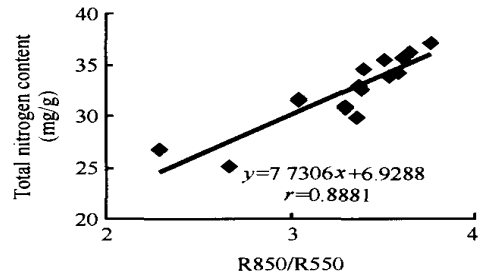


图 2 全氮含量与 R850/ R550 之间的相关性  
Fig.2 The correlation between the leaf total nitrogen content and R850/ R550

2.2.2 叶片微分参数与叶片叶绿素、全氮含量间的相关性分析 由表 4 可知,所列出的微分参数与叶片中的叶绿素、全氮含量都达到了显著水平,其中蓝边斜率 Db、蓝边面积 SDb、红边斜率 Dr、绿峰反射率 Rg、绿峰与红谷差值 Rg - Ro 与叶片叶绿素、全氮含量间均呈极显著负相关;红边位置 r、红谷反射率 Ro、红谷面积 SRo、归一化值 EGFN 与叶片叶绿素、

全氮含量间均呈极显著正相关。表明可用这些微分参数预测叶片中叶绿素、全氮含量。其中红谷面积 SRo 与叶绿素含量之间相关性最好,归一化指数 EGFN 与叶片中全氮含量相关性最好,图 3 为红谷面积 SRo 与叶绿素含量之间的相关性曲线。图 4 为归一化指数 EGFN 与全氮含量之间的相关性曲线。

表 4 “秀水 110”叶片微分参数与叶片叶绿素、全氮含量间的相关性分析( n = 16)  
Table 4 The correlation analysis between the first derivatives and the chlorophyll, total content in leaves of “Xiushui 110” ( n = 16)

生化指标 Biochemical index	微分参数 The first derivatives								
	Db	SDb	r	Dr	Rg	Ro	SRo	Rg - Ro	EGFN
Chl a	- 0.696 **	- 0.623 **	0.651 **	- 0.561 *	- 0.696 **	0.771 **	0.807 **	- 0.730 **	0.756 **
Chl b	- 0.702 **	- 0.570 **	0.590 **	- 0.589 *	- 0.702 **	0.751 **	0.756 **	- 0.727 **	0.735 **
Chl a + b	- 0.701 **	- 0.609 *	0.635 **	- 0.572 *	- 0.701 **	0.768 **	0.795 **	- 0.733 **	0.753 **
TN	- 0.776 **	- 0.685 **	0.675 **	- 0.631 *	- 0.776 **	0.793 **	0.789 **	- 0.791 **	0.858 **

注: \*, \*\*分别表示相关达  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  显著水平。  
Note: \*, \*\* significant at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$  levels, respectively.

### 2.3 利用基于“秀水 110”构建的相关模型反演“丙 9914”叶片叶绿素、全氮含量

将“丙 9914”所得的一组数据( n = 16)作为一个校正组,来检验这些高光谱参数反演叶片中叶绿素、全氮含量的准确性和可靠性。结果表明,所有的高光谱参数对叶绿素、全氮含量的预测值与实测值之

间的相关性都达到了正显著性水平(数据没有列出)。其中用来预测叶绿素含量最好的高光谱参数是“Green”NDVI 和红谷面积 SRo,拟合度分别为 0.7755 和 0.7809(图 5)。用来预测叶片中全氮含量最好的高光谱参数是 R850/ R550 和差值归一化指数 EGFN,拟合度分别为 0.8598 和 0.8633(图 6)。

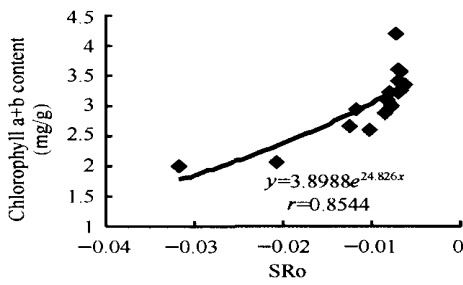


图3 叶绿素含量与红谷面积 SRo 间相关性

Fig.3 The correlation between the leaf chlorophyll a + b content and SRo

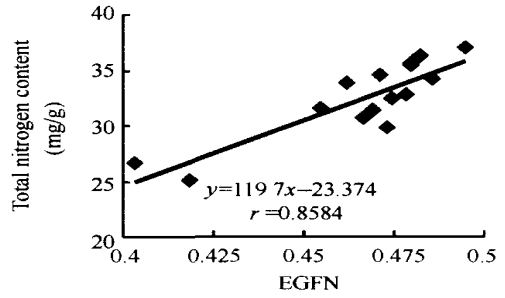


图4 全氮含量与归一化差值 EGFN 间相关性

Fig.4 The correlation between the leaf total nitrogen content and EGFN

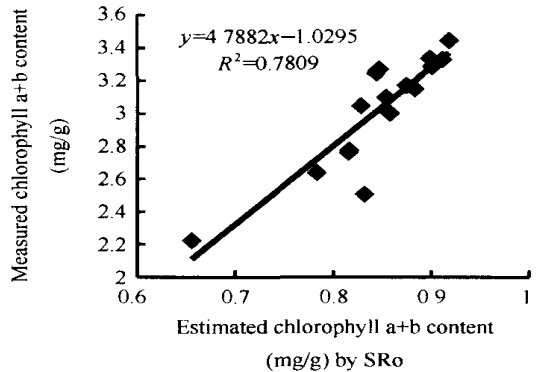
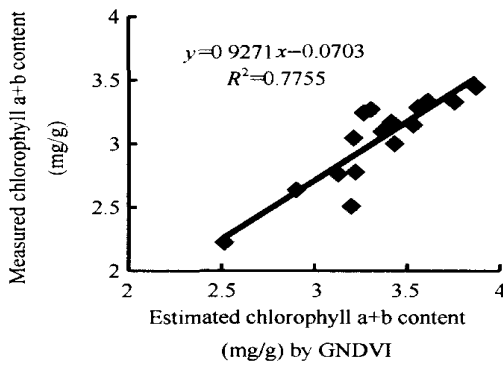


图5 GNDVI(左图)、SRo(右图)对“丙9914”叶片叶绿素含量预测值与实测值之间的相关性

Fig.5 The correlation between estimated chlorophyll content by GNDVI (left figure), SRo (right figure) and the measured chlorophyll content in leaves of “Bing 9914”

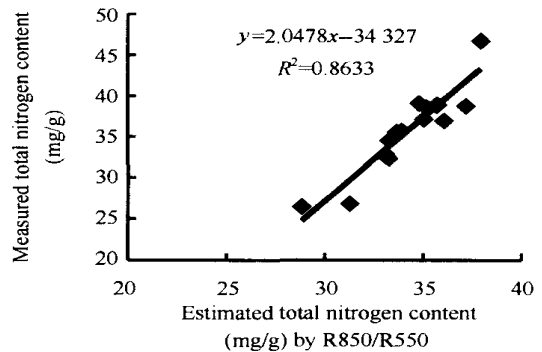
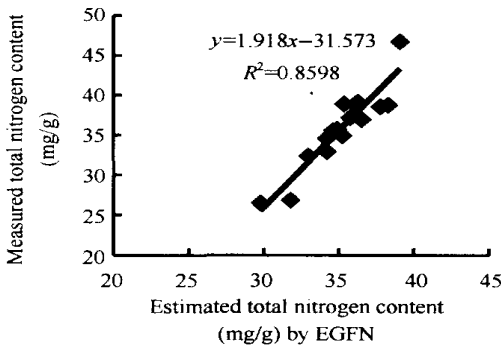


图6 EGFN、R850/ R550 对“丙9914”叶片全氮含量预测值与实测值之间的相关性

Fig.6 The correlation between estimated total nitrogen content by EGFN (left figure), R850/ R550 (right figure) and the measured total nitrogen content in leaves of “Bing 9914”

### 2.4 利用基于“秀水110”构建的相关模型预测水稻籽粒蛋白含量

氮素在植物体内容易移动和再分配,成熟期“秀水110”叶片中的叶绿素含量与收获后水稻籽粒中蛋白含量具有较高的线性相关,相关性方程为

$$\text{Pr \%} = 11.73 \times \text{Chl} + 112.79 \quad (1)$$

( $r = 0.8911, n = 12$ )

而从上文中已经知道“秀水110”叶片中叶绿素含量与高光谱参数 GNDVI、红谷面积 SRo 之间相关性均达到了 0.01 显著水平。它们之间建立的回归方程为

$$\text{Chl} = 0.4179 \times e^{3.7174 \times \text{GNDVI}} \quad (r = 0.8761, n = 16) \quad (2)$$

$$\text{Chl} = 3.8988 \times e^{24.826 \times \text{SRo}} \quad (r = 0.8544, n = 16) \quad (3)$$

所建立的回归方程具有较高的预测准确性和可靠性

(见图 5,图 6)。将方程 (1) 和 (2)、(1) 和 (3) 联系起来建立 GNDVI、红谷面积 SR<sub>0</sub> 与水稻籽粒蛋白含量间新的回归方程:

$$\text{Pr \%} = 4.902 \times e^{3.7174 * \text{GNDVI}} + 112.79 \quad (4)$$

$$\text{Pr \%} = 45.73 \times e^{24.826 * \text{SR}_0} + 112.79 \quad (5)$$

从图 7 可以看出,用这两个回归方程计算出的

“丙 9914”收获后籽粒蛋白含量的预测值与实测值间的相关性很好,拟合度分别为 0.991 4 和 0.9942 ( $n = 4$ ),相关性达正显著水平。结果表明,利用遥感方法反演水稻籽粒蛋白含量进而估测水稻品质是可行的。

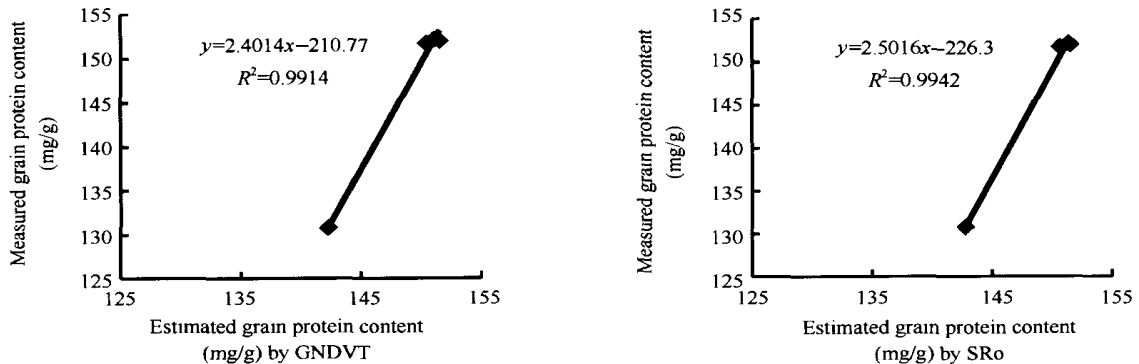


图 7 GNDVI、SR<sub>0</sub> 对“丙 9914”籽粒中蛋白含量预测值与实测值之间的相关性

Fig. 7 The correlation between estimated grain protein content by GNDVI, SR<sub>0</sub> and the measured grain protein content in leaves of “Bing9914”

### 3 结论与讨论

叶绿素作为光合作用的主要色素,其含量的高低既反映水稻生长状况,又表征水稻的生产能力,直接影响着水稻经济产量的高低。通过遥感的光谱数据研究高光谱参数和叶绿素浓度之间的关系,是目前遥感领域内的一个热点。

本文在前人研究的基础上,整理出多个常用的植被指数以及采用光谱归一化微分分析技术对原始光谱进行一阶微分处理提取出包括红边参数在内的多个微分参数。将这些基于其他植物类型定义的植被指数、微分参数与“秀水 110”叶片叶绿素、全氮含量之间进行相关性分析,结果发现它们之间的相关性均达到极显著水平。其中 GNDVI、SR<sub>0</sub> 与“秀水 110”叶片叶绿素含量;R850/R550、EGFN 与叶片全氮含量之间建立的回归方程具有较高的相关系数。当用所建立的回归方程预测“丙 9914”叶片中叶绿素、全氮含量时,预测值与实测值之间的相关系数很高,达正显著水平。说明可以利用这些植被指数、微分参数预测水稻的叶绿素含量,从而实现运用高光谱遥感资料监测水稻的生长状况。但是,当运用红谷面积 SR<sub>0</sub> 建立的回归方程预测“丙 9914”叶片中叶绿素含量时,尽管预测值与实测值之间的相关系数很

高,并达正显著水平,但却存在较大的系统误差,这可能是样本数目偏少的缘故,可以通过增加样本数目进行系统校正。

水稻叶片的叶绿素含量与收获期水稻蛋白含量之间具有较强的相关性。因此,本文建立了高光谱参数 GNDVI、SR<sub>0</sub> 与“秀水 110”水稻收获期籽粒蛋白含量之间的数量关系。并用建立的回归方程,预测“丙 9914”籽粒蛋白含量,预测值与实测值之间的相关性达到正显著水平。结果表明,利用遥感方法反演水稻籽粒蛋白含量进而估测水稻品质是可行的。由于试验条件的限制,供试样品数目偏少 ( $n = 4$ ),但仍然达到了极显著水平。

### References

- [1] Cheng Y S (程一松), Hu C S (胡春胜), Hao E B (郝二波), Yu G R (于贵瑞). Analysis and extraction of hyperspectral information feature of winter wheat under N stress condition. *Resources Science (资源科学)*, 2003, 25: 86 - 93 (in Chinese with English abstract)
- [2] Blackburn G A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sens Environ*, 1998, 66: 273 - 285
- [3] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, Deering D W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Third ERTS symposium, NASA SP-351, NASA, Washington DC, 1973. 1: 309 - 317
- [4] Lichtenhaler H K, Gitelson A, Lang M. Nondestructive determination

- of chlorophylls content of leaves of a green and an aurea mutant of tobacco by reflectance measurements. *J Plant Physiol*, 1996, **148**:483 - 493
- [5] Chappelle E W, Kim M S, Memurtrey J E. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS) : an algorithm for the remote estimation of the concentration of chlorophyll a, chlorophyll b and the carotenoids in soybean leaves. *Remote Sens Environ*, 1992, **39**:239 - 247
- [6] Gitelson A A, Merzlyak M N, Grits Y. Novel algorithms for remote sensing of chlorophyll content in higher plants. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 1996b, **4**:2 355 - 2 357
- [7] Datt B. Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a + b and total carotenoid content in Eucalyptus leaves. *Remote Sens Environ*, 1998, **66**:111 - 121
- [8] Peñuelas J, Baret F, Filella I. Semi-empirical indices to access carotenoids/ chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 1995, **31**:221 - 230
- [9] Schepers J S, Blackmer T M, Wilhelm W W, Resende M. Transmittance and reflectance measurements of corn leaves from plants with different nitrogen and water supply. *J Plant Physiol*, 1996, **148**:523 - 529
- [10] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens Environ*, 1996a, **58**:289 - 298
- [11] Blackburn G A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. *Int J Remote Sensing*, 1998, **19**(4):657 - 675
- [12] Curran P J, Dungan J L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree Physiology*, 1990, **7**:33 - 38
- [13] Pinar A. Grass chlorophyll and the reflectance red edge. *Int J Remote Sensing*, 1996, **17**(2):351 - 357
- [14] Filella I, Penuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *Int J Remote Sensing*, 1994, **15**:1 459 - 1 470
- [15] 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 Sens Environ*, 2002, **81**: 337 - 354
- [16] Shen W-Q(沈伟其). Extraction of mixed solution for determination of chlorophyll content in rice leaf blade. *Plant Physiology Communications* (植物生理学通讯), 1988, **3**:62 - 64(in Chinese)
- [17] China Standardization Press(中国标准出版社). The Collection of China Agricultural Standardization, Soil and Fertilizer Volume(中国农业标准汇编——土壤肥料卷). Beijing:China Standardization Press, 1998(in Chinese)
- [18] Wang J-H(王纪华), Huang W-J(黄文江), Zhao C-J(赵春江), Yang M-H(杨敏华), Wang Z-J(王之杰). The inversion of leaf biochemical components and grain quality indicators of winter wheat with spectral reflectance. *Journal of Remote Sensing* (遥感学报), 2003, **7**:77 - 84(in Chinese with English abstract)
- [19] Mariotti M, Ercoli L, Masoni A. Spectral properties of iron-deficient corn and sunflower leaves. *Remote Sens Environ*, 1996, **58**: 282 - 288
- [20] Filella I, Serrano L, Serra J, Penuelas J. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. *Crop Sci*, **35**:1 400 - 1 405