

文章编号: 1007-4619 (2003) 04-0277-08

# 利用光谱反射率估算叶片生化组分 和籽粒品质指标研究

王纪华, 黄文江, 赵春江, 杨敏华, 王之杰

(国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089)

**摘要:** 对可见光至短波红外波段(350—2500nm)冬小麦田间冠层光谱反射率与叶片含氮量间的关系进行了相关分析。结果表明, 820—1100nm 波段的光谱反射率与叶片含氮量极显著正相关; 1150—1300nm 波段的光谱反射率与叶片含氮量显著正相关, 以上两波段为叶片全氮的敏感波段。对各生育时期叶片全氮与其他生化组分的关系进行了回归分析, 并建立了相关的回归方程, 显著性检验结果表明, 方程具有较高的可靠性。小麦的叶片含氮量可以估算其它生化组分及干物质指标含量, 开花期叶片含氮量可用来估测籽粒蛋白质和干面筋等品质指标含量。

**关键词:** 高光谱数据; 叶片含氮量; 生化组分; 籽粒品质

**中图分类号:** TP701      **文献标识码:** A

## 1 引言

作物冠层光谱分析属于一种无损测试技术(Non-destructive measurement), 即在不破坏植物组织结构的前提下, 利用光谱仪测得的冠层光谱反射率特征变化对作物的生长、营养状况进行监测, 其在现代农业生产中将发挥越来越重要的作用。20世纪80年代末, 利用遥感估测干叶片蛋白质、淀粉、木质素等组分的含量同利用试验室方法获得的结果已十分相近<sup>1,2</sup>, 但在田间条件下对生长植株冠层系统的研究报道并不多见。使用高光谱分辨率遥感数据估计作物农学参数多采用以下两种方法<sup>3-8</sup>: 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作物农学参量间的关系; 二是通过作物的红边参数, 尤其红边位置, 来描述作物的物候变化及其农学参数, 建立包括生化组分含量的叶片散射和吸收模型。这些方法为遥感技术在农业上的应用提供了理论基础, 虽然遥感在农业上已广泛应用, 但关于遥感品质监测鲜有报道。本文旨在利用统计分析方法建立光谱数据与作物农学参量间的关系, 探讨利用定量遥感技术监测叶片和籽粒生化组分含量的方

法, 为遥感品质监测提供理论依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验设计

试验于2000—2001年在北京市顺义区遥感基地(北纬 $40^{\circ}00'$ — $40^{\circ}21'$ , 东经 $116^{\circ}34'$ — $117^{\circ}00'$ , 海拔高度36m)进行, 供试地块土壤为潮土, 0—20cm土层内养分含量为有机质1.42%—1.48%, 全氮0.081%—0.100%, 碱解氮58.6—68.0mg/kg, 有效磷20.1—55.4mg/kg, 速效钾117.6—129.1mg/kg。供试品种为北京地区推广面积较大的优质小麦品种“8138”。

### 2.2 研究项目与测定方法

**LAI** 采用称重法, 即同一处理或品种取50—100片叶测量面积后, 烘干称重, 再根据被测对象的干重反推叶面积, 用CI-203型激光叶面积仪进行矫正。

**叶片含水量** 采用烘干称重法, 田间取样后用1mg感量天平速称鲜重, 然后用烘干箱 $105^{\circ}\text{C}$ 杀青15min,  $80^{\circ}\text{C}$ 下烘至恒重。

收稿日期: 2001-11-12; 修订日期: 2002-03-07

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(G2000077907)项目和北京市科技项目(H010710010123)资助。

作者简介: 王纪华(1958—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 1995年在中国农业大学获博士学位, 1995—1998年在日本从事博士后研究, 在国内外发表研究论著50多篇/部。现主要从事遥感的农业应用和作物生理生化研究。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

叶绿素含量 采用可见分光光度计法<sup>[9]</sup>。

叶片全氮含量 采用凯氏定氮法,具体测定步骤见文献<sup>[10]</sup>。

可溶性总糖含量 采用蒽酮比色法<sup>[9]</sup>。

淀粉含量 采用淀粉酶法<sup>[9]</sup>。

光谱反射率测定 采用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec 光谱仪进行测定,视场角 25°,光谱反射率经过标准参考板校正,波段范围为 350—2500nm,采样间隔在 350—1000nm 范围内为 1.4nm,在 1000—2500nm 范围内为 2nm,选择晴朗无风天气,在北京时间 10:30—14:00 进行距植冠顶部 50cm 处垂直测定,每点测 20 次左右,取平均值作为该小区的光谱反射率值,各处理测定前、后立即进行标准板校正,光谱测定后,在田间自然条件下同一目标取样测定生化组分。

### 3 结果与分析

#### 3.1 小麦各波段反射率与叶片含氮量的关系

叶绿素为作物光合作用的主要色素,其含量的高低直接影响作物的光合和物质积累能力。通过遥感的光谱数据来研究植被光谱反射率与叶绿素浓度

的关系,国内外学者进行了大量的研究<sup>[1,6,11—14]</sup>。在很多研究中,叶绿素含量测定结果一般用单位重量(鲜重)叶片的叶绿素含量表示,但由于衰老叶片与枯黄叶片之间的含水量相差较大,且叶片鲜重一般 80%以上为水分,单位重量上的枯黄叶片的叶绿素含量测定结果可能比幼嫩叶片还要高,使得叶绿素含量的测定结果准确性降低。叶绿素含量与植株含氮量呈显著的线性相关已经被很多学者所证明<sup>[8,15]</sup>,叶片含氮量一般用单位干重叶片中的氮含量表示,不受叶片含水量的影响,且叶片含氮量在植株中含量较高,探讨叶片含氮量与其光谱反射率的关系,可为通过遥感这一简便、快速监测作物长势的方法提供理论依据。故本研究采取叶片含氮量作为叶片养分含量指标,研究叶片含氮量的光谱反射敏感波段以及叶片含氮量与其它组分含量之间的关系。

由表 1 可知,小麦叶片反射率与全氮含量在可见光波段呈负相关,在近红外波段正相关,在短波红外波段负相关,其中 820—1140nm 和 1141—1300nm 两波段的相关性达极显著水平。经过适当修正小麦能够反映叶片全氮含量的敏感波段为 820—1100nm 和 1150—1300nm,在此基础上建立了小麦叶片含氮量与光谱反射率间的关系方程(表 2)。

表 1 小麦各波段反射率与叶片含氮量的相关系数

Table 1 The correlation coefficient between the leaf nitrogen content and the spectrum reflectance

波长范围/nm	350—670	671—819	820—1140	1141—1300	1301—1700	1700—2100	2100—2500
相关系数( $r$ )	-0.05	-0.03	0.8325**	0.5138*	-0.4518	-0.3215	-0.2047

$$r_{(0.05, 17)} = 0.456 \quad r_{(0.01, 17)} = 0.575$$

表 2 不同生育时期叶片全氮与光谱反射率间的回归方程

Table 2 The regression equations between the leaf nitrogen content and the spectra reflectance

生育时期	波长范围 (820—1140nm)	因变量/%	回归方程	复相关系数( $R^2$ )
返青期	叶片含氮量 ( $x$ , %)	$\rho$	$\rho = 5.8412x + 1.9519$	0.9132
		$1/\rho$	$1/\rho = -0.0049x + 0.0566$	0.7814
		$\ln\rho$	$\ln\rho = 0.1688x + 2.5958$	0.9657
拔节期	叶片含氮量 ( $x$ , %)	$\rho$	$\rho = -1.6081x + 51.022$	0.6154
		$1/\rho$	$1/\rho = 0.0011x + 0.0181$	0.6879
		$\ln\rho$	$\ln\rho = -0.0415x + 3.966$	0.6647
灌浆中期	叶片含氮量 ( $x$ , %)	$\rho$	$\rho = -3.9018x + 54.915$	0.8012
		$1/\rho$	$1/\rho = 0.0038x + 0.0091$	0.7568
		$\ln\rho$	$\ln\rho = -0.1218x + 4.1777$	0.9325
成熟期	叶片含氮量 ( $x$ , %)	$\rho$	$\rho = 6.1315x + 19.793$	0.9789
		$1/\rho$	$1/\rho = -0.0057x + 0.0427$	0.9127
		$\ln\rho$	$\ln\rho = 0.1877x + 3.0916$	0.9345

由表 2 可知, 不同生育时期叶片含氮量与叶片光谱反射率之间的方程不同: 返青期和灌浆中期以光谱反射率的导数形式建立的回归方程最为理想(复相关系数  $R^2$  分别为 0.9657 和 0.9325); 拔节期以光谱反射率的倒数形式建立的回归方程具有较高的复相关系数( $R^2=0.6879$ ), 因而比较可靠; 成熟期以光谱反射率本身建立的回归方程最好, 复相关系数  $R^2$  为 0.9789。因此不同生育时期应选用适当的光谱反射率表现形式来建立与叶片含氮量之间的关系。

### 3.2 不同生育时期叶片生化组分及生物量指标间的相关性

了解不同生育时期各生化组分间的相关性, 对于利用测定某个生化组分指标来推断与其有密切相关的指标的状况具有重要意义, 前人在这方面已经进行了一些研究工作<sup>[11]</sup>, 但仅对各生化组分间的相关性进行了比较, 而没有考虑作物体内不同生化组分的含量在不同生育时期的变化趋势是不同这一实

际。本文将作物不同生育时期的各组分变化规律进行分开讨论, 每个生育时期取自不同的小麦植株样品 97 组, 对测得的各次生化组分指标进行相关分析, 建立回归方程, 为遥感数据的农学反演提供坚实的理论基础, 得出以下结论。

#### 3.2.1 返青期叶片生化组分及生物量指标间的相关性

返青期的肥水管理对冬小麦群体影响很大, 通过及时、大面积地获取该时期作物生长信息至关重要。表 3 列出了返青期各生化组分及生物量指标间的相关系数。由表 3 可知, 返青期叶片全氮与叶片可溶性糖、叶干重和  $LAI$  间相关性达显著或极显著水平; 与其它指标间相关性不显著。在此基础上建立的返青期叶片全氮含量与相关系数大的指标间的回归方程见表 4。由表 4 可以看出, 这些方程都具有较高的复相关系数, 因此可以通过已测定的该时期叶片全氮含量, 以及已建立的返青期叶片全氮与可溶性糖、叶干重和  $LAI$  间的关系方程来估测返青期可溶性糖、叶干重和  $LAI$  状况。

表 3 返青期叶片生化组分及生物量指标间的相关系数

Table 3 The correlation coefficient among the biochemical components and dried biomass indicators at reviving stage

	<i>LTN</i>	<i>LCHL</i>	<i>LSS</i>	<i>LS</i>	<i>LWC</i>	<i>LAI</i>	<i>LDW</i>	<i>SDW</i>	<i>PDW</i>
<i>LTN</i>	1								
<i>LCHL</i>	0.156	1							
<i>LSS</i>	-0.823 **	-0.134	1						
<i>LS</i>	0.196	-0.204	-0.244	1					
<i>LWC</i>	-0.184	-0.331 *	0.087	0.273	1				
<i>LAI</i>	-0.301 *	0.350 *	0.195	0.188	0.099	1			
<i>LDW</i>	-0.508 **	0.152	0.369 **	0.095	0.261	0.936 **	1		
<i>SDW</i>	-0.012	-0.213	-0.323 *	0.496 **	0.512 **	0.533 **	0.533 **	1	
<i>PDW</i>	-2.283	-0.045	0.006	0.349 *	0.448 **	0.827 **	0.862 **	0.888 **	1

*LTN*—叶片全氮; *LCHL*—叶绿素; *LSS*—叶片可溶性糖; *LS*—叶片淀粉; *LWC*—叶片含水量;

*LAI*—叶面积指数; *LDW*—叶干重; *SDW*—茎干重; *PDW*—植株干重(下同)。

$r_{(0.05, 95)}=0.300$   $r_{(0.01, 95)}=0.351$ 。

表 4 返青期叶片全氮与相关系数大的指标间的回归方程

Table 4 The regression equations between the leaf nitrogen content and other indicators at reviving stage

自变量( $x$ , %)	因变量( $y$ , %)	回归方程	复相关系数( $R^2$ )
叶片全氮	可溶性糖	$y = -6.8573x + 50.068 (3.0 \leq x \leq 4.0)$	0.7864
叶片全氮	叶干重	$y = 3.6329x - 7.6274 (3.0 \leq x \leq 4.0)$	0.7584
叶片全氮	叶面积指数	$y = 0.0116x + 0.6714 (3.0 \leq x \leq 4.0)$	0.8864

### 3.2.2 拔节期叶片生化组分及生物量指标间的相关性

小麦拔节期对于小麦的成穗率、穗粒数影响较大,此期管理对小麦的产量形成有重要作用。表 5 为拔节期各生化组分及生物量指标间的相关系数。由表 5 可知,拔节期叶片全氮与可溶性糖、叶片含水量和植株含水量间相关性达极显著水平;叶片全氮

与其它指标间相关性不显著。

拔节期叶片全氮含量与相关系数大的指标间的回归方程见表 6,这些方程都具有较高的复相关系数,尤其是叶片全氮含量与叶片含水量之间方程,因此通过拔节期的叶片全氮含量来估测此期叶片含水量、植株含水量和叶片可溶性糖的含量具有较高的可靠性。

表 5 拔节期叶片生化组分及生物量指标间的相关系数

Table 5 The correlation coefficient among the biochemical components and the dried biomass indicators at jointing stage

	<i>LTN</i>	<i>LCHL</i>	<i>LSS</i>	<i>LS</i>	<i>LWC</i>	<i>LAI</i>	<i>LDW</i>	<i>SDW</i>	<i>PDW</i>
<i>LTN</i>	1								
<i>LCHL</i>	0.238	1							
<i>LSS</i>	0.365 **	0.022	1						
<i>LS</i>	0.026	0.288	-0.212	1					
<i>LWC</i>	0.418 **	-0.199	-0.434 **	0.139	1				
<i>LAI</i>	-0.017	0.186	-0.420 **	0.233	0.397 **	1			
<i>LDW</i>	-0.13	-0.064	-0.189	0.266	0.103	0.259	1		
<i>SDW</i>	-0.096	-0.287	0.012	0.008	0.187	0.29	0.827 **	1	
<i>PDW</i>	-0.121	-0.165	-0.109	0.165	0.144	0.284	0.969 **	0.940 **	1

$r_{(0.05, 95)}=0.300$   $r_{(0.01, 95)}=0.351$ .

表 6 拔节期叶片全氮与相关系数大的指标间的回归方程

Table 6 The regression equations between the leaf nitrogen content and other indicators at jointing stage

自变量( <i>x</i> , %)	因变量( <i>y</i> , %)	回归方程	复相关系数( $R^2$ )
叶片全氮	可溶性糖	$y=2.789x-9.379(4.0 \leq x \leq 5.0)$	0.8025
叶片全氮	叶片含水量	$y=1.7691x+66.98(4.0 \leq x \leq 5.0)$	0.9562
叶片全氮	植株含水量	$y=2.0786x+68.408(4.0 \leq x \leq 5.0)$	0.8421

### 3.2.3 灌浆期叶片生化组分及生物量指标间的相关性

灌浆期是决定小麦粒重的时期,此期适当的肥水管理对于防止小麦早衰、倒伏,提高粒重有重要作用。前人研究表明,灌浆期施用适量的氮肥显著提高籽粒蛋白质含量进而提高籽粒品质<sup>[16, 17]</sup>。表 7 为灌浆中期各生化组分及生物量指标间的相关系数。由表 7 可知,灌浆中期叶片全氮与叶片可溶性糖、植株含水量、叶干重、茎干重和植株干重间相关性达极显著水平,与其它指标间相关性不显著。建立在这些关系基础上的各指标间的回归方程列于表 8,叶片全氮含量与植株干重、茎干重、植株含水量、可溶性糖及叶干重之间方程的复相关系数都较高,说明在灌浆中期可以通过叶片全氮估测植株含水量、可溶性糖、植株干重等。

### 3.2.4 成熟期叶片生化组分及生物量指标间的相关性

成熟期各生化组分及生物量指标间的相关系数及叶片全氮含量与相关系数大的指标间的回归方程分别列于表 9 和表 10。由表 9 可知,成熟期叶片全氮与叶绿素、叶片淀粉、叶片含水量、植株含水量、叶干重和植株干重间相关性达显著或极显著水平,与其它指标间相关性不显著。从表 10 可以看出,成熟期叶片全氮与叶绿素、植株含水量、叶片淀粉、叶片含水量、叶干重和植株干重间关系方程都具有较高的复相关系数,因此可以通过测定此期的叶片全氮量来判定其它组分的含量,其中估测叶绿素、植株含水量的可靠性更高。值得注意的是,在生育前、中期,全氮与叶绿素间的相关虽逐渐增加,但未达到显著标准,直到后期才达到极显著标准。分析其原因,在生育前、中期,由于叶片是生长、

扩张的中心, 含氮量增高时, 叶片鲜嫩、含水率高, 以单位鲜重表示的叶绿素含量难以同步增高; 但到了生育

后期, 叶片老化, 含水率降低, 水分干扰减少, 使叶绿素含量变化与氮素变化接近于同步。

表 7 灌浆期叶片生化组分及生物量指标间的相关系数

Table 7 The correlation coefficient among the biochemical components and the dried biomass indicators at grain filling stage

	<i>LTN</i>	<i>LCHL</i>	<i>LSS</i>	<i>LS</i>	<i>LWC</i>	<i>LAI</i>	<i>LDW</i>	<i>SDW</i>	<i>PDW</i>
<i>LTN</i>	1								
<i>LCHL</i>	0.296	1							
<i>LSS</i>	0.704 **	0.648 **	1						
<i>LS</i>	0.086	0.09	-0.169	1					
<i>LWC</i>	0.393 **	0.502 **	0.415 **	0.075	1				
<i>LAI</i>	0.222	-0.263	-0.144	-0.17	0.066	1			
<i>LDW</i>	0.367 **	-0.078	0.023	-0.115	0.055	0.947 **	1		
<i>SDW</i>	0.314 *	0.083	0.169	-0.287	0.05	0.563 **	0.674 **	1	
<i>PDW</i>	0.351 **	0.044	0.139	-0.258	0.055	0.710 **	0.814 **	0.978 **	1

$r_{(0.05, 95)}=0.300$ ,  $r_{(0.01, 95)}=0.351$ .

表 8 灌浆中期叶片全氮与相关系数大的指标间的回归方程

Table 8 The regression equations between the leaf nitrogen content and other indicators at grain filling stage

自变量 ( <i>x</i> , %)	因变量 ( <i>y</i> )	回归方程	复相关系数 ( $R^2$ )
叶片全氮	可溶性糖 (%)	$y = -1.1723x + 9.8327 (4.0 \leq x \leq 5.0)$	0.7968
叶片全氮	植株含水量 (%)	$y = -10.998x + 134.65 (4.0 \leq x \leq 5.0)$	0.8521
叶片全氮	叶干重 (g)	$y = 3.3532x + 21.324 (4.0 \leq x \leq 5.0)$	0.7968
叶片全氮	茎干重 (g)	$y = 12.535x + 108.21 (4.0 \leq x \leq 5.0)$	0.8567
叶片全氮	植株干重 (g)	$y = 15.888x + 129.6 (4.0 \leq x \leq 5.0)$	0.9124

表 9 成熟期叶片生化组分及生物量指标间的相关系数

Table 9 The correlation coefficient among the biochemical components and the dried biomass indicators at ripening stage

	<i>LTN</i>	<i>LCHL</i>	<i>LSS</i>	<i>LS</i>	<i>LWC</i>	<i>LAI</i>	<i>LDW</i>	<i>SDW</i>	<i>PDW</i>
<i>LTN</i>	1.000								
<i>LCHL</i>	0.592 **	1.000							
<i>LSS</i>	0.126	0.535 **	1.000						
<i>LS</i>	-0.345 *	-0.308 *	-0.314 *	1.000					
<i>LWC</i>	0.576 *	0.510 **	0.616 **	-0.500 **	1.000				
<i>LAI</i>	0.197	-0.212	-0.383 **	0.023	0.066	1.000			
<i>LDW</i>	0.305 *	-0.207	-0.449 **	-0.032 *	0.055	0.947 **	1.000		
<i>SDW</i>	0.274	-0.008	-0.391 **	-0.362 **	0.050	0.563 **	0.674 **	1.000	
<i>PDW</i>	0.302 *	-0.065	-0.435 **	-0.294	0.055	0.710 **	0.814 **	0.978 **	1.000

$r_{(0.05, 95)}=0.300$ ,  $r_{(0.01, 95)}=0.351$ .

表 10 成熟期叶片全氮与相关系数大的指标间的回归方程

Table 10 The regression equations between leaf nitrogen content and the dried biomass indicators at ripening stage

自变量 ( $x$ , %)	因变量 ( $y$ )	回归方程	复相关系数 ( $R^2$ )
叶片全氮	叶绿素/(mg/g)	$y = 1.968x - 2.6886 (1.0 \leq x \leq 3.0)$	0.8120
叶片全氮	叶片淀粉/%	$y = -6.0868x + 27.4481 (1.0 \leq x \leq 3.0)$	0.7687
叶片全氮	叶片含水量/%	$y = 4.4283x + 57.371 (1.0 \leq x \leq 3.0)$	0.7435
叶片全氮	植株含水量/%	$y = 5.204x + 55.324 (1.0 \leq x \leq 3.0)$	0.8432
叶片全氮	叶干重/g	$y = 5.9996x + 14.868 (1.0 \leq x \leq 3.0)$	0.7543
叶片全氮	植株干重/g	$y = 19.511x + 98.616 (1.0 \leq x \leq 3.0)$	0.7612

### 3.3 开花期小麦叶片含氮量与籽粒品质指标间的关系

表征小麦籽粒和面粉品质的主要指标有: 蛋白质含量、面筋含量(本文用干面筋含量)、沉降值、形

成时间、稳定时间等。表 11 为开花期小麦叶片含氮量与以上指标间的相关系数。由表 11 可知, 叶片含氮量与蛋白质含量和干面筋含量之间相关达极显著水平, 而与其它指标相关不显著, 尤其是负相关均很弱, 表明干扰很小。

表 11 开花期小麦叶片含氮量与籽粒品质指标间的相关系数

Table 11 The correlation coefficient between the leaf nitrogen content and grain quality indicators

籽粒品质指标	蛋白质	干面筋	沉降值	形成时间	稳定时间	耐揉指数	断裂时间
叶片含氮量	0.5265 **	0.4940 **	0.2343	-0.0114	-0.1540	-0.0351	-0.1253

$$r_{(0.05, 26)} = 0.374 \quad r_{(0.01, 26)} = 0.478$$

根据以上关系, 我们建立了开花期小麦叶片含氮量( $x$ )与籽粒部分品质指标( $y$ )间的回归方程。小麦叶片含氮量与籽粒蛋白质含量间的方程为:

$$y = 6.3761x - 7.8417 \quad (4 \leq x \leq 5, R^2 = 0.9012)$$

其中,  $x$  为小麦叶片含氮量(%);  $y$  为小麦籽粒蛋白质含量(%). 其关系具体表现显示于图 1。

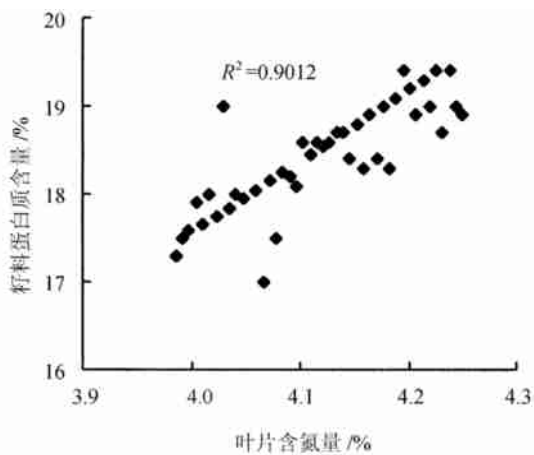


图 1 小麦叶片含氮量与籽粒蛋白质含量关系图

Fig 1 The relationship between leaf nitrogen content and grain protein content

小麦叶片含氮量与籽粒干面筋含量间的方程为:

$$y = 6.8815x - 24.546 \quad (5 \leq x \leq 6, R^2 = 0.8579)$$

其中,  $x$  为小麦叶片含氮量(%);  $y$  为小麦籽粒干面筋含量(%).

从对方程显著性检验的结果可知, 两方程都具有较高的复相关系数, 因此方程具有较高的可靠性。通过方程, 我们对蛋白质含量进行了预测, 模拟值与实测值的相关性见图 2, 由图 2 可知, 籽粒蛋白质模拟值与实测值之间的复相关系数很高( $R^2 = 0.9087$ , 检验样品为 48 个), 也达极显著水平。这些相关性结果表明利用遥感方法反演叶片含氮量进而估测小

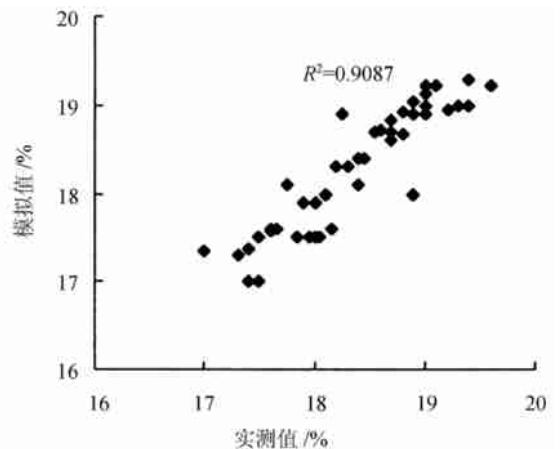


图 2 小麦籽粒蛋白质含量的模拟值与实测值关系

Fig 2 The relationship between the simulation value and the measured value

麦品质是可行的。

## 4 结论与讨论

### 4.1 小麦叶片含氮量与光谱反射率之间的关系

很多学者对用光谱反射率来估测植物生化组分进行了研究<sup>[18, 19]</sup>, 但很多只对生化组分间的关系进行了比较。然而, 由于不同生育阶段各生化组分间及其与干物质之间具有不同的关系, 这就为估测增加了困难。考虑到这种状况, 我们尽量增加了取样数量, 本文的结论是在对大量数据进行分析的基础上得出的, 因此具有较高的可靠性。根据这些结果, 我们认为: 能够反映小麦叶片全氮含量的敏感波段为 820—1100nm 和 1150—1300nm, 在此基础上建立的小麦叶片含氮量与光谱反射率间的回归方程具有较高的复相关系数。但这一结果与前人结论<sup>[20, 21]</sup>有所差异, 哪一个精确性更高, 有待进一步研究。

### 4.2 小麦叶片含氮量与籽粒品质指标间的关系

遥感为大面积、迅速、无破坏地监测小麦生长状况提供了可能。随着空间技术的发展, 遥感在农业上的应用将更加广泛。随着种植业结构的调整, 优质小麦的种植面积增加, 但在优质小麦的生产中存在着一些问题, 种植者投入很大, 并未收到应有的效益。为适应优质小麦种植及加工的要求, 寻求简便、快速、无破坏地监测小麦生长状况的方法, 进而指导小麦生产管理和加工乃当务之急。在本文中我们利用回归分析的方法建立了开花期预测小麦籽粒品质的方程, 并对其可靠性进行了检验, 结果表明, 小麦叶片含氮量与叶片生化组分及籽粒品质组分之间具有很强的相关性, 用叶片含氮量可以预测籽粒蛋白质、干面筋含量等主要品质指标, 为利用遥感技术监测小麦品质提供了理论依据, 也开辟了遥感应用的新途径。从小麦生育规律看, 不同品种在灌浆期叶片氮素含量差异大, 变化集中在顶层且与籽粒品质关系密切, 因而此期进行遥感品质监测预报, 精度可能会进一步提高。当然, 本研究涉及的品种有限, 还需要针对多种类型的品种建立相应的模型, 并且在实际应用中加以验证。

## 参考文献 (References)

- [1] Daughtry C S T, Walthall C I, Kim M S, *et al.* Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(2): 229—239.
- [2] Jacquemoud S, Verdebout J, Schmuck G. Investigation of Leaf Biochemistry by Statistics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54(3): 180—188.
- [3] Shibayama *et al.* Seasonal Visible Near-infrared and Mid-infrared Spectra of Rice Canopies in Relation to LAI and above-ground Dry Phytomass [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1989, 27(2): 119—127.
- [4] Shibayama *et al.* Estimating Grain Yield of Maturing Rice Canopies Using High Spectral Resolution Reflectance Measurements, [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1991, 36(1): 45—53.
- [5] Railyan V Y. Red Edge Structure of Canopy Reflectance Spectra of Triticale [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1993, 46(2): 173—182.
- [6] Filella I, Penuelas J. The Red Edge Position and Shape as Indicators of Plant Chlorophyll Content, Biomass and Hydric Status. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15: 1459—1470.
- [7] Danson F M. Red Edge Response to Leaf Area Index [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1995, 16(1): 186—188.
- [8] Pinar A. Grass Chlorophyll and the Reflectance Red Edge [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1996, 17(2): 351—357.
- [9] Zhang X Z, Cheng F Y, Wang R F. The Experimental Technology of Plant Technology [M]. Liaoning Scientific & Technological Press. [张宪政, 陈凤玉, 王荣富. 植物生理学实验技术[M]. 辽宁科技出版社, 1994.]
- [10] Edited by China Standardization Press. The Collection of China Agricultural Standardization, Soil and Fertilizer Volume [S]. Beijing: China Standardization Press, 1998. [中国标准出版社. 中国农业标准汇编——土壤肥料卷[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.]
- [11] Wu C S, Xiang Y Q, Zheng L F, *et al.* Estimating Chlorophyll Density of Crop Canopies by Using Hyperspectral Data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(3): 228—232. [吴长山, 项月琴, 郑兰芬等. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究[J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 228—232.]
- [12] Curran P J, Dungan J L, Macler B A, *et al.* The Effect of a Red Edge Pigment on the Relationship between Red-edge and Chlorophyll Content [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 35(1): 69—75.
- [13] Munden R, Curran. P. J, Catt. J. A. The Relationship between Red Edge and Chlorophyll Content in the Broadbalk Winter Wheat Experiment at Roth Amsted [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(3): 705—709.
- [14] Jago R A, Cutler M E J, Curran P J. Estimating Canopy Chlorophyll Content from Field and Airborne Spectra [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68(3): 217—224.
- [15] Yoder B J, Pettigrew-Crosby R E. Predicting Nitrogen and Chlorophyll Content and Content from Reflectance Spectra (400-2500nm) at Leaf and Canopy Scales [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 53(3): 199—211.
- [16] Zhang B J, Jiang J Y. Effect of Applying Nitrogen on Grain Protein in Durum Wheat and Common Wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 1996, 5(2): 40—42. [张宝军, 蒋纪芸. 施肥时期对硬粒小麦和普通小麦籽粒蛋白质的影响[J]. 西北农业学报, 1996, 5(2): 40—42.]
- [17] Jing Q, Cao W X, Dai T B. Studies on the Kernel Quality Forming

- Characteristics and the Control Routes [ J ] . *Cultivation and Planting*, 1999, (5): 22—25. [ 荆奇, 曹卫星, 戴延波. 小麦籽粒品质形成特点及调控途径研究进展 [ J ] . 耕作与栽培, 1999, (5): 22—25.]
- [ 18 ] Steudler P, Bowden R, Melillo J M, *et al.* Influence of Nitrogen Fertilization on Methane Uptake in Temperate Forest Soils [ J ] . *Nature*, 1989, **341**: 314—316.
- [ 19 ] Aber J D, Federer C A, A Generalized, Lumped-parameter Model of Photosynthesis, Evapotranspiration and Net Primary Production in Temperate and Boreal Forest Ecosystems [ J ] . *Oecologia*, 1992, **92**: 463—474.
- [ 20 ] Blackmer T M, Schepers J S, Varvel G E, *et al.* Nitrogen Deficiency Detection Using Shortwave Radiation from Irrigated Corn Canopies [ J ] . *Agronomy Journal*, 1996, **88**: 1—5.
- [ 21 ] Kokaly R F. Investigating a Physical Basis for Spectroscopic Estimates of Leaf Nitrogen Content [ J ] . *Remote Sensing of Environment*, 2001, **75**: 153—161.

## The Inversion of Leaf Biochemical Components and Grain Quality Indicators of Winter Wheat with Spectral Reflectance

WANG Ji-hua, HUANG Wen-jiang, ZHAO Chun-jiang, YANG Min-hua, WANG Zhi-jie

(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

**Abstract:** The field spectra reflectance data selected at key growth stages of winter wheat were analyzed. It indicated that the wavelength bands related to leaf nitrogen content selected by regression equation located at 820—1100nm and 1150—1300nm. The proper spectrum reflectance form should be established for donating the spectrum reflectance and leaf nitrogen content at different growth stages. The proper forms were as following: the regression equation of derivative form at reviving stage, and the reciprocal form at booting stage and the basic form at ripening stage. The results showed that there were robust correlations between leaf nitrogen content and other leaf biochemical constituents, dried biomass indicators and grain quality indicators. The regression equations between leaf nitrogen content and other leaf biochemical constituents, dried biomass indicators and grain quality indicators were established. The predictions of soluble sugar content, leaf water content, stem water content, leaf starch content, leaf dried weight, plant dried weight, and LAI etc. by leaf nitrogen content were feasible. It has very significant level among grain protein, dry gluten content and leaf nitrogen content at anthesis stage, and no significant correlation of leaf nitrogen content and other grain quality indicators. So it is feasible for forecasting the grain protein and dry gluten content by leaf nitrogen content data acquired by remote sensing.

**Key words:** hyperspectral data; leaf nitrogen content; biochemical component; grain quality