

## 小麦叶片氮素状况与光谱特性的相关性研究

薛利红 曹卫星\* 罗卫红 张 宪

(南京农业大学农业部作物生长调控重点开放实验室, 南京 210095)

**摘 要** 系统分析了不同时期两个小麦(*Triticum aestivium*)品种叶片含氮量及叶片氮积累量与冠层光谱反射特征的关系。结果表明, 随施氮水平的增加, 小麦冠层在可见光区的反射率逐渐降低, 而近红外波段的反射率逐渐升高。小麦叶片氮素状况与比值指数或归一化指数显著相关, 两个品种表现极为一致, 可以用一个指数方程来拟合。分阶段建模并没有提高模型的精度, 因此可以建立一个适用于整个生育时期的通用氮素诊断方程。叶片含氮量同光谱指数在整个生育期内的关系要优于叶片氮积累量的, 其中, 与叶片含氮量关系最佳的指数为红波段(660 nm)和蓝波段(460 nm)的组合( $R^2 > 0.80$ ); 与叶片氮积累量关系最佳的光谱指数为中红外波段(1 220 nm)与红波段(660 nm)的组合( $R^2 > 0.62$ )。

**关键词** 小麦 叶片氮素状况 光谱特性 比值指数 归一化指数 回归模型

## CORRELATION BETWEEN LEAF NITROGEN STATUS AND CANOPY SPECTRAL CHARACTERISTICS IN WHEAT

XUE Li-Hong CAO Wei-Xing\* LUO Wei-Hong and ZHANG Xian

(Key Laboratory of Crop Growth Regulation, Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract** Non-destructive monitoring and diagnosis of plant nitrogen (N) status is necessary for precision N management. The present study was conducted to determine if canopy reflectance could be used to evaluate leaf N status in wheat (*Triticum aestivium*) of two cultivars, 'Huaimai 18' and 'Xuzhou 26'. Ground-based canopy spectral reflectance, leaf N concentration and leaf N accumulation were measured at seven growth stages (jointing, booting, heading, anthesis, initial filling, mid-filling and late filling) under four different treatments of N fertilization (0, 12, 21 and 30 g N·m<sup>-2</sup>). Analyses were made on the relationships of seasonal canopy spectral reflectance, ratio indices ( $R(\lambda_1, \lambda_2) = \rho_{\lambda_1} / \rho_{\lambda_2}$ ) and normalized difference indices ( $NDI(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{|\rho_{\lambda_1} - \rho_{\lambda_2}|}{\rho_{\lambda_1} + \rho_{\lambda_2}}$ ) to leaf N concentration and N accumulation in wheat under different N treatments at different growth stages and during the whole growing season. The results showed that canopy spectral reflectance in the near infrared increased with increasing N content, whereas reflectance in the visible band decreased. Leaf N status was significantly correlated with the ratio or normalized difference indices in both cultivars. Regression models of leaf N status to spectral indices based on single growth stages did not improve the prediction over whole growth cycle; hence, a single regression model based on the whole growth cycle should be adequate for diagnosing N status in wheat plants. The relationships between leaf N concentration and spectral indices were better than those of leaf N accumulation. The best indices were the combination of a MIR (mid-infrared) band (1 220 nm) and red band (660 nm) for leaf N concentration ( $LNC = 3.8945 \times R(660, 460)^{-1.0287}$ ,  $R^2 = 0.8342$ ;  $LNC = 3.9187 \times e^{-2.1796NDI(660, 460)}$ ,  $R^2 = 0.8352$ ) and the combination of the red band (660 nm) and blue band (460 nm) for leaf N accumulation ( $LNA = 1.55 \times e^{0.1153R(1220, 660)}$ ,  $R^2 = 0.7242$ ;  $LNA = 0.2194 \times e^{4.0914NDI(1220, 660)}$ ,  $R^2 = 0.6299$ ). These results indicate that canopy spectral reflectance can be used to non-destructively monitor leaf N status in wheat plants.

**Key words** Wheat, Leaf nitrogen status, Spectral characteristics, Ratio index, Normalized difference index, Regression model

氮肥是当今农业生产上用量最大且难以准确定量的一种肥料, 也是生产中普遍过量施用而导致成

本上升与环境污染的肥料。为了科学高效施肥, 人们迫切需要一种能准确、快速、方便、经济诊断作物

收稿日期: 2003-03-31 接受日期: 2003-10-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(30030090)和国家 863 计划项目(2002AA243011)

\* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: caow@njau.edu.cn

E-mail: njxueli@163.net

氮素营养水平的方法。早在 1972 年 Thomas 等就发现甜椒叶片含氮量与 550 ~ 675 nm 波长间叶片的反射系数高度相关,实际含量与所预测的含氮量误差小于 7%(Thomas & Oerther, 1972),说明植物光谱分析有可能快速、简便、较精确、非破坏性地监测植物氮素营养。随后人们开始研究小麦氮素营养状况对冠层光谱特性的影响(Hinzman *et al.*, 1986),并探讨了利用叶绿素计和冠层光谱来判断小麦氮素状况的可行性(Reeves *et al.*, 1993; Filella *et al.*, 1995)。Fernandez 等(1994)发现用红光(660 nm)和绿光(545 nm)两波段的线性组合可以预估小麦的氮含量。Stone 等(1996)的研究表明植株氮光谱指数 PNSI (Plant nitrogen spectral index)与小麦叶片氮吸收显著相关,不受生育时期的影响,用 PNSI 来指导施肥能显著改善氮素利用效率,减少因过度施肥对环境造成的污染。近年来,随着高光谱遥感的兴起,越来越多的学者利用微分光谱和红边特性等来预测作物的氮素状况(Munden *et al.*, 1994; 赵春江等, 2001; Broge & Mortensen, 2002)。但植物冠层反射光谱受冠层几何结构、土壤覆盖度等因素的影响。由于不同时空条件下这些影响因子不同,所建立的氮素光谱诊断模型不能用于其建模以外的时空条件(薛利红等 2003a)。迄今为止,仍缺乏一个能准确定量评价小麦氮素状况的非破坏性方法。为此,本文选用株型和叶色不同的两个代表性小麦品种,系统分析了不同时相下小麦叶片含氮量及叶片氮积累量与冠层光谱反射特征的关系,以期建立一个不受生育时期和品种影响的通用小麦叶片氮素诊断模型,为小麦叶片氮素状况的精确诊断提供依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验设计

试验在南京农业大学校内试验站的水泥池中进行。土壤为黄棕壤土,有机质 1.21%,全氮 0.13%,速效氮 29.2 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷 29.5 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 72.3 mg·kg<sup>-1</sup>。选用 2 个代表性小麦(*Triticum aestivum*)品种:徐州 26(叶色较浅,叶片下披)和淮麦 18(叶色较深,叶片上冲);4 个氮肥水平:NO,不施氮肥,N1,12 gN·m<sup>-2</sup>,N2,21 gN·m<sup>-2</sup>,N3,30 gN·m<sup>-2</sup>。小区面积 4 m<sup>2</sup>(2.4 × 1.68 m),两因素随机区组排列,重复 3 次。氮肥的基追比为 1:1,追肥时间为拔节期(3 月 2 日)。磷、钾肥施用量分别为 12 g·m<sup>-2</sup>(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、15 g·m<sup>-2</sup>(K<sub>2</sub>O),全部作基肥。基本苗 150 万·hm<sup>-2</sup>,行距 24.5 cm。其它栽培管理同大田

小麦高产栽培。

### 1.2 光谱数据的测量及农学参数的测定

采用美国 Cropscan 公司生产的 MSR-16 型便携式多光谱辐射仪测量小麦群体光谱。分别在拔节期、孕穗期、齐穗期、开花期、灌浆初期、灌浆中期、灌浆后期进行测量。测量选择在晴朗无云的天气进行,测量时间为 11:00 ~ 14:00。测量时探头垂直向下,距冠层顶部垂直高度约 1 ~ 1.5 m。每小区测量 3 点,每点重复测量 5 次,取平均值作为该小区光谱测量值。

与光谱测量同步,每次每小区取代表性植株 5 ~ 9 株,测定和计算生物量(鲜重、干重)、叶片全氮含量、叶片氮积累量。氮的测定采用凯氏定氮法。叶片氮积累量为单位土地面积上叶片所含的氮素总量,单位为 g·m<sup>-2</sup>,等于叶片含氮量与单位土地面积上叶片干重的乘积。

### 1.3 数据分析

光谱测量和农学参数的测量有时不能同步进行,甚至相隔 3 ~ 4 d 左右。为了修订这种不同步现象,可采用内插函数来计算光谱测量时的农学参数(如叶面积指数等)(Broge & Mortensen, 2002),或者根据光谱反射率或植被指数随生育进程(小麦用播种后天数)的变化方程(为二次曲线方程)来推算农学参数测量日期的光谱反射率或植被指数(Gilbert *et al.*, 1996)。由于叶片含氮量等农学参数的变化难以预测,因此采用第二种方法来解决数据的不同步问题。

传统的比值植被指数和归一化植被指数由于不易受冠层结构等变化的影响而被经常用来预测叶绿素含量,从而判断作物的氮素状况。为了确定能反映小麦体内氮素状况的最佳宽波段光谱指数,本文系统计算了从可见光波段到中红外波段共 16 个波段的所有比值和归一化指数组合,分析其与体内氮素状况指标的相关关系。计算公式如下:

比值指数:  $R(\lambda_1, \lambda_2) = \rho_{\lambda_1} / \rho_{\lambda_2}$ ; 归一化指数:

$$NDI(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{|\rho_{\lambda_1} - \rho_{\lambda_2}|}{\rho_{\lambda_1} + \rho_{\lambda_2}}$$

其中,  $\rho$  表示反射率,  $\lambda$  表示波段。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同小麦品种对氮肥的光谱响应

从图 1 可以看出小麦冠层反射光谱的基本特征,植物在可见光区的光谱特征受色素,主要是叶绿素(还有类胡萝卜素等)的控制,而叶绿素在可见光

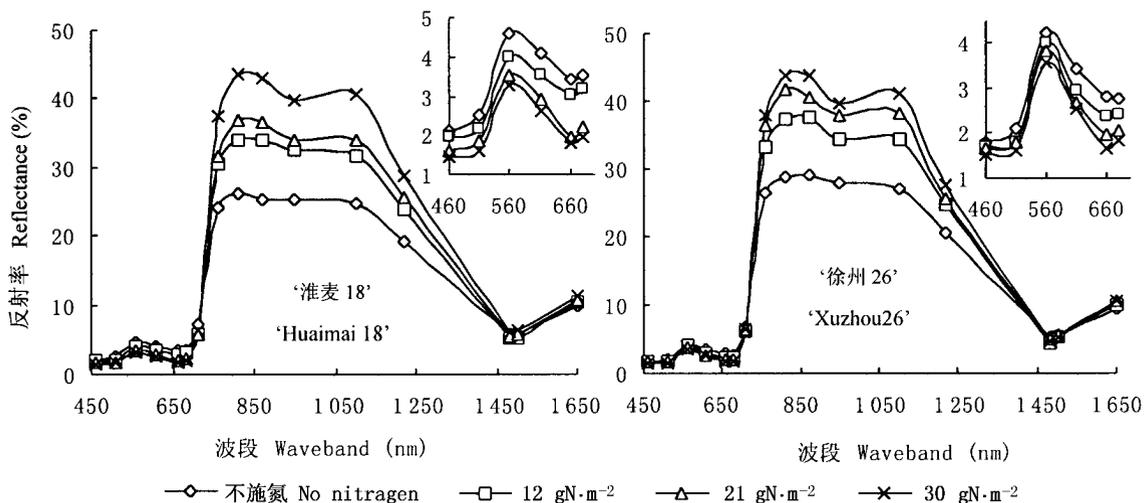


图 1 拔节期不同小麦品种冠层反射光谱对氮肥的响应模式

Fig.1 The response pattern of canopy reflectance spectra of two wheat cultivars under different nitrogen levels at jointing stage

区有很强的吸光能力,主要吸收蓝光和红光。因此在 680 nm 附近的红光区域和 460 nm 的蓝光区有吸收谷,在位于蓝光和红光之间的 550 nm 左右有反射峰存在。在近红外区域由于受叶片结构的影响,使得 810~1 100 nm 波段出现一个较高的反射平台。随施氮水平的增加,小麦冠层反射率在可见光区(460~710 nm)有所降低,而在近红外波段明显升高。两个小麦品种表现一致,其它生育期测量的光谱变化趋势也大体一致。这主要是因为增加施氮量提高了叶片叶绿素含量、生物量和叶面积。叶绿素含量的增加使对可见光波段大部分辐射的吸收增强,反射系数降低。在近红外波段则没有叶片色素的吸收,所以,生物量和叶面积增加会增强散射返回的概率,反射率从而增加。

### 2.2 单波段反射率与小麦叶片氮素状况的关系

#### 2.2.1 与叶片含氮量的关系

对全生育期所有数据的相关分析表明,叶片含氮量与可见光波段(460~710 nm)和中红外波段(1 480~1 650 nm)负相关,与近红外波段(710~1 220 nm)正相关,除了 1 650 nm 波段外,其余波段都达到了显著水平,其中可见光波段的相关系数高于近红外波段(图 2a)。两个品种之间差别不大,在可见光波段‘淮麦 18’的相关系数稍微高于‘徐州 26’,在近红外波段却略低于‘徐州 26’。当把两个品种的数据放在一起分析时,相关系数并没有明显提高,与单个品种的相关系数几乎持平。

对不同生育时期的数据单独进行分析时,发现无论是单个品种还是两个品种,近红外波段的相关性在任一个生育阶段均高于可见光波段的,其中以 610 nm、660 nm、680 nm 及近红外波段(760~1 100

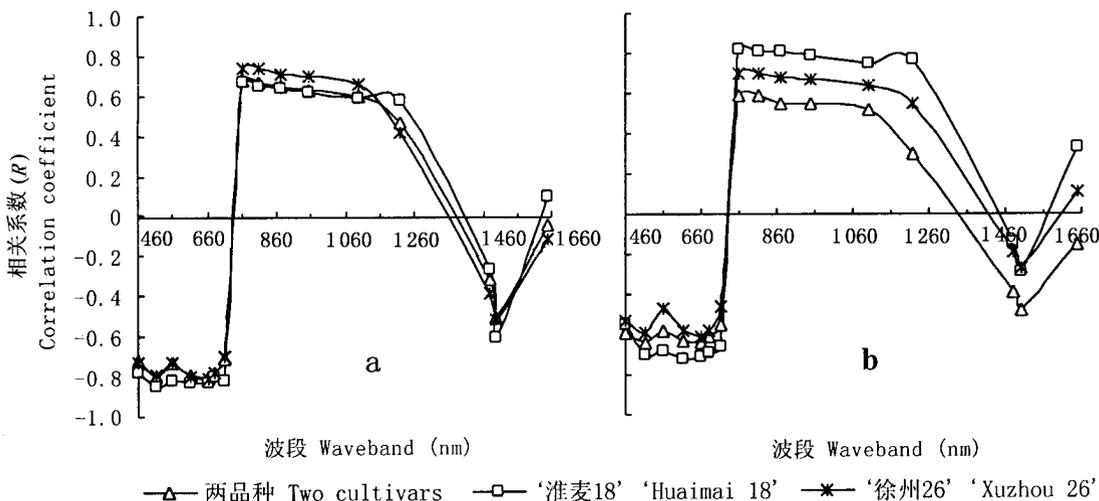


图 2 小麦冠层反射率与叶片含氮量(a)及叶片氮积累量(b)的相关关系图

Fig.2 Correlagram of canopy spectral reflectance to leaf N concentration (a) and leaf N accumulation (b) in wheat

nm)的相关性最高。对‘淮麦 18’而言,除了灌浆中后期和孕穗期外,其余几个生育时期的相关性都较高。而对‘徐州 26’而言,可见光波段的相关性较不稳定,近红外波段以抽穗期最好,相关系数高达 0.80。两个品种混在一起的相关性也以抽穗期最好,其次为孕穗期(数据未列出)。

### 2.2.2 与叶片氮积累量的关系

小麦叶片氮积累量与单波段反射率的关系同小麦叶片含氮量。区别在于‘徐州 26’叶片氮积累量的相关系数在所有波段都低于叶片含氮量,而‘淮麦 18’及两个品种组合叶片氮积累量的相关系数在可见光波段低于叶片含氮量,在近红外波段刚好相反,高于叶片含氮量(图 2b)。

单个生育时期的数据分析结果表明:‘淮麦 18’在大多数波段的相关系数在所有时期均达到了显著水平,而‘徐州 26’在可见光波段的相关系数仅在蜡熟期达到显著水平,在近红外波段除了灌浆中后期外,其余都达到了显著水平。两个品种综合分析的相关系数几乎都低于‘淮麦 18’,但高于‘徐州 26’。其中可见光波段表现不稳定,近红外波段表现较好,在所有时期均达到显著水平,以抽穗期为最佳(数据未列出)。

## 2.3 比值指数及归一化指数与小麦叶片氮素状况的关系

### 2.3.1 与叶片含氮量的关系

在任一生育阶段,叶片含氮量与比值和归一化指数均呈显著的正相关关系,且两个品种表现极其一致,可以用一个方程来拟合(表 1)。其中开花期表现最好,决定系数在 0.80 以上,其次为黄熟期和抽穗期。此外,与叶片含氮量相关性最好的比值指数和归一化指数具有相同的波段组成。其中,除了灌浆中期(4月29日测)为近红外波段(810 nm)与近红边波段(710 nm)的组合外,其余 6 个时期均为中

红外波段(1 500 nm 和 1 650 nm)与绿光波段(560 nm)或近红外波段(710 nm)的组合。

对全生育期两个品种共 152 对数据综合分析,发现叶片含氮量与比值指数呈显著的幂函数关系,与归一化指数呈显著的指数函数关系(图 3)。比值指数中以  $R(660,460)$ 、 $R(660,510)$ 及近红外波段(760~1 220 nm)与 660 nm 的比值为佳, $R^2$  都在 0.80 以上,其它近红外波段(760~1 220 nm)与可见光波段(460 nm、510 nm、560 nm、610 nm 和 710 nm)的比值及 1 650 nm 波段与 510 nm、610 nm、660 nm 和 680 nm 波段的比值组合也都达到了极显著水平, $R^2$  都在 0.70 以上。归一化组合中以  $ND(660,460)$ 和  $ND(660,510)$ 最佳( $R^2 > 0.80$ ),其次为 1 650 nm 及近红外波段(760~1 220 nm)与可见光波段(510 nm、560 nm、610 nm、710 nm)的归一化组合、 $ND(660,560)$ 和  $ND(510,460)$ , $R^2$  也都在 0.70 以上,达到了极显著水平。

### 2.3.2 与叶片氮积累量的关系

不同生育时期叶片氮积累量与比值和归一化指数也呈显著的正相关关系,两个品种可以用一个统一的方程来拟合。表 2 列出了最佳的比值和归一化指数与叶片氮积累量的回归方程,可以看出与叶片氮积累量相关性最好的指数和与叶片含氮量相关性好的指数极其类似,也大多为中红外与可见光波段的组合。不同之处在于与叶片氮积累量相关较特殊的指数出现在拔节期,为 710 nm 与 510 nm 波段的组合。

叶片氮积累量与两波段的比值组合与归一化组合显著正相关(图 4)。对全生育期两个品种共 152 对数据一起分析,发现比值组合中,以  $R(1 220,660)$ 最佳( $R^2 = 0.72$ ),其次为近红外波段(760~1 220 nm)与可见光波段(460 nm、510 nm、610 nm、660 nm、680 nm)的比值, $R^2$  也都在 0.65 以上。在所有的归

表 1 不同生育时期两品种叶片含氮量与比值和归一化指数的回归方程

Table 1 The regression equations of leaf nitrogen concentration to ratio or normalized difference (ND) index

生育时期 Growth stage	比值指数 Ratio index	回归方程 Regression equation	决定系数 $R^2$	归一化指数 ND index	回归方程 Regression equation	决定系数 $R^2$
拔节期 Jointing	$R(1 500,560)$	$y = 0.664 5x^{0.530 2}$	0.544 0	$ND(1 500,560)$	$y = 0.014 9x^{1.696 2}$	0.620 0
孕穗期 Booting	$R(1 500,560)$	$y = 0.888 2x^{0.527 6}$	0.597 9	$ND(1 500,560)$	$y = 0.083 6x^{0.908 1}$	0.620 7
抽穗期 Heading	$R(1 500,710)$	$y = 3.254 8x^{1.106 3}$	0.719 0	$ND(1 500,710)$	$y = 7.894 6x + 3.267 7$	0.708 2
开花期 Anthesis	$R(1 650,560)$	$y = 1.262 2x^{0.646 5}$	0.820 5	$ND(1 650,560)$	$y = 0.218 6x^{0.626 7}$	0.822 7
灌浆初期 Initial filling	$R(1 100,710)$	$y = 1.667 1x + 1.881 9$	0.682 9	$ND(1 100,710)$	$y = 0.056 1x + 0.575 4$	0.679 9
灌浆中期 Mid-filling	$R(810,710)$	$y = 2.254 6x - 0.499 4$	0.639 4	$ND(810,710)$	$y = 0.102 8x + 0.412 8$	0.619 1
灌浆末期 Late filling	$R(1 500,510)$	$y = 0.864 6x + 1.161 7$	0.746 1	$ND(1 500,510)$	$y = 0.133 2x + 0.218 6$	0.745 2

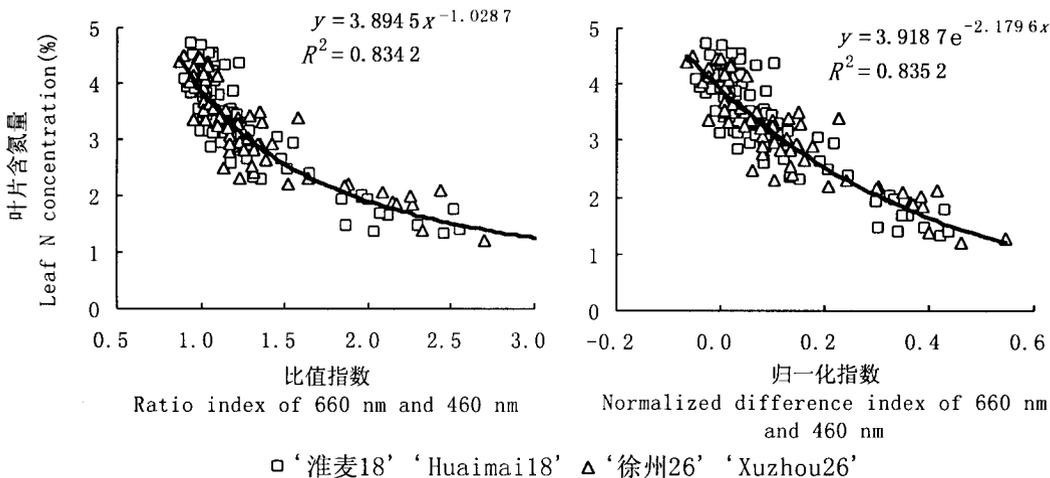


图3 叶片含氮量与比值指数 (R(660/460))及归一化指数 (ND(660/460))的关系  
Fig.3 Relationship of leaf N concentration to ratio index and normalized difference index of 660 nm and 460 nm

表2 不同生育时期叶片氮积累量与比值和归一化指数的相关方程  
Table 2 The regression equations of leaf nitrogen accumulation to ratio or normalized difference (ND) index

生育时期 Growth stage	比值指数 Ratio index	回归方程 Regression equation	决定系数 R <sup>2</sup>	归一化指数 ND index	回归方程 Regression equation	决定系数 R <sup>2</sup>
拔节期 Jointing	R(710/510)	y = 0.054x + 2.7061	0.7831	ND(710/510)	y = 0.0061x + 0.4664	0.7863
孕穗期 Booting	R(1480/510)	y = 0.073x + 2.0382	0.6849	ND(1480/510)	y = 0.0099x + 0.3667	0.6936
抽穗期 Heading	R(1500/610)	y = 1.0661x <sup>2.0011</sup>	0.7356	ND(1500/610)	y = 37.581x <sup>-1.9824</sup>	0.7121
开花期 Anthesis	R(1650/610)	y = 0.4152x <sup>2.1971</sup>	0.6816	ND(1650/610)	y = 43.121x <sup>-3.1277</sup>	0.6537
灌浆初期 Initial-filling	R(1100/680)	y = 0.8716x + 13.991	0.7522	ND(1100/680)	y = 0.0045x + 0.8727	0.7295
灌浆中期 Mid-filling	R(1220/560)	y = 0.3751x + 4.7132	0.5747	ND(1220/560)	y = 0.014x + 0.6625	0.5539
灌浆末期 Late-filling	R(1500/460)	y = 3.1489x <sup>0.195</sup>	0.7525	ND(1500/460)	y = 0.5215x <sup>0.1117</sup>	0.7429

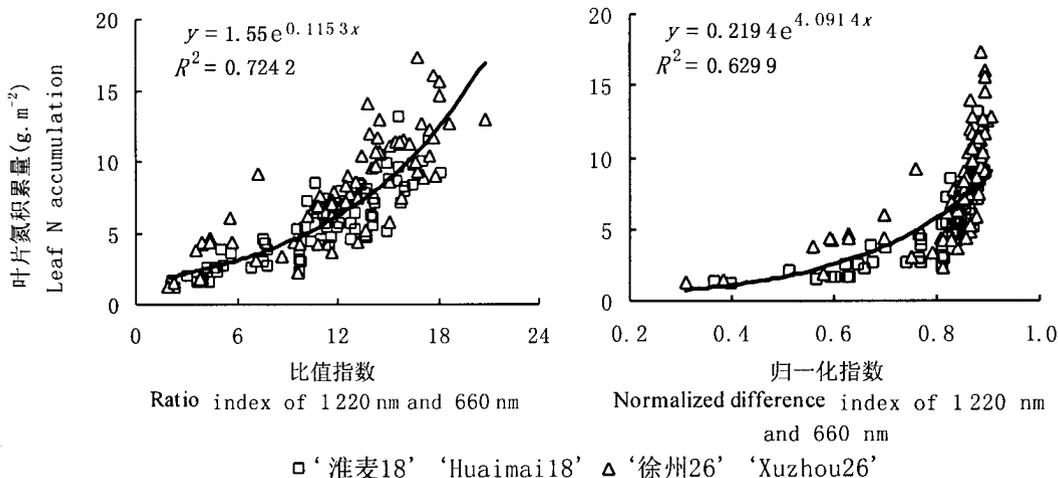


图4 叶片氮积累量与比值指数 (R(1220/660))和归一化指数 (ND(1220/660))的关系  
Fig.4 Relationship of leaf N accumulation to ratio index and normalized difference index of 1220 nm and 660 nm

一化组合中,以 ND(1220/660)与 ND(1220/510)最佳,其次为近红外波段(760~1220 nm)及660 nm波段与460 nm和510 nm的组合,1650 nm波段与510 nm、560 nm、610 nm、660 nm、680 nm波段的组合及

710 nm波段与610 nm和660 nm波段的组合。

### 3 小结与讨论

研究表明,与叶片氮素状况相关性最佳的比

值指数和归一化指数在小麦的不同生育时期具有相同的波段组成,多为一中红外波段与一可见光波段的组合,但与叶片含氮量相关最好的指数不同于与叶片氮积累量的。单个生育时期最佳回归方程的决定系数为 0.82,并不高于全生育期的决定系数,说明分生育时期建立回归模型并没有提高模型的精度。因此,可以建立一个统一的适用于全生育期的小麦氮素监测模型。

全生育期叶片含氮量与比值指数呈极显著的幂函数关系,与归一化组合呈极显著的指数函数关系,两个小麦品种的趋势基本一致,可以用一个方程来拟合(图 3)。且最佳的比值指数和归一化指数都由 660 nm 和 460 nm 两波段组合而成。这两个指数与 Penuelas 等定义的色素简单比值指数 PSR(Pigment simple ratio)和归一化色素指数 NPCI(Normalized difference pigment index)有点类似(原指数中用了 680 nm 和 430 nm 两个波段)(Penuelas *et al.*, 1993; 1994)。当作物缺氮时,体内的叶绿素 a 含量相对降低,而类胡萝卜素含量相对增加,因此类胡萝卜素和叶绿素 a 比值的动态变化能很好地指示作物氮素状况(Penuelas *et al.*, 1993; Young & Britton, 1990)。而 NPCI 和 PSR 与类胡萝卜素和叶绿素 a 比值密切相关(Penuelas *et al.*, 1993; 1994),因此可以间接地来判断叶片氮素状况。

全生育期叶片氮积累量与比值指数和归一化指数显著正相关,最好的比值和归一化指数分别为  $R(1.220, 660)$  和  $ND(1.220, 460)$ 。Hinzman 等(1986)也发现小麦叶片氮积累量与比值植被指数(近红外与红波段的比值)线性正相关,但本文的研究结果表明用指数函数拟合的效果要优于线性函数,决定系数由 0.65 提高到了 0.72。水稻上的研究表明,用叶片氮积累量可以提高冠层光谱指数监测氮素状况的精度(薛利红等, 2003b),但本研究结果却表明,小麦叶片氮积累量与冠层光谱指数的决定系数要低于叶片含氮量。这可能是因为试验中部分处理的小麦在后期出现倒伏,生物量降低,对叶片氮积累量的准确计算有一定的影响。

本研究建立的小麦叶片氮素诊断模型,不仅适用于全生育期,且不受品种的影响。但由于参试品种仅有两个,因此还有待于进一步的验证。总体上看,本研究运用冠层光谱特征特别是比值指数可以较好地监测和诊断小麦叶片氮素状况。

## 参 考 文 献

- Broge, N.H. & J.V. Mortensen. 2002. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, **81**: 45 ~ 57.
- Fernandez, S., D. Vidal, E. Simon & L. Sole-Sugranes. 1994. Radiometric characteristics of *Triticum* cv. Astral under water and nitrogen stress. *International Journal of Remote Sensing*, **15**: 1867 ~ 1884.
- Filella, I., L. Serrano, J. Serra & J. Penuelas. 1995. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. *Crop Science*, **35**: 1400 ~ 1405.
- Gilbert, M.A., S. Gandia & J. Melia. 1996. Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sensing of Environment*, **55**: 11 ~ 20.
- Hinzman, L.D., M.E. Bauer & C.S.T. Daughtry. 1986. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, **19**: 47 ~ 61.
- Munden, R., P. J. Curran & J.A. Catt. 1994. The relationship between red edge and chlorophyll concentration in the broadbalk winter wheat experiment at Rothamsted. *International Journal of Remote Sensing*, **15**: 705 ~ 709.
- Penuelas, J., J.A. Gamon, A.L. Fredeen, J. Merino & C.B. Field. 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, **48**: 135 ~ 146.
- Penuelas, J., J.A. Gamon, K.L. Griffin & C.B. Field. 1993. Assessing community type, plant biomass, pigment composition and photosynthetic efficiency of aquatic vegetation from spectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, **46**: 110 ~ 118.
- Reeves, D.V., P.L. Mask, C.W. Wood & D.P. Delaney. 1993. Determination of wheat nitrogen status with a hand held chlorophyll meter: influences of management practices. *Journal of Plant Nutrition*, **16**: 769 ~ 781.
- Stone, M.L., J.B. Solie, W.R. Raun, R.W. Whitney, S.L. Taylor & J.D. Ringer. 1996. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. *Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineering)*, **39**: 1623 ~ 1631.
- Thomas, J.R. & G.F. Oerther. 1972. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements. *Agronomy Journal*, **64**: 11 ~ 13.
- Xue, L.H. (薛利红), W.H. Luo (罗卫红), W.X. Cao (曹卫星) & Y.C. Tian (田永超). 2003a. Research progress on the water and nitrogen detection using spectral reflectance. *Journal of Remote Sensing (遥感学报)*, **7**: 73 ~ 80. (in Chinese with English abstract)
- Xue, L.H. (薛利红), W.X. Cao (曹卫星), W.H. Luo (罗卫红), D. Jiang (姜东), Y.L. Meng (孟亚利) & Y. Zhu (朱艳). 2003b. Diagnosis of nitrogen status in rice leaves with the canopy spectral reflectance. *Scientia Agricultura Sinica (中国农业科学)*, **36**: 807 ~ 812. (in Chinese with English abstract)
- Young, A. & G. Britton. 1990. Carotenoids and stress. In: Alscher, R.G. & J.R. Cumming eds. *Stress response in plants: adaptation and acclimation mechanisms*. New York: Wiley-Liss, Inc. 87 ~ 112.
- Zhao, C. J. (赵春江), W. J. Huang (黄文江), J. H. Wang (王纪华), M.H. Yang (杨敏华) & X. Z. Xue (薛绪掌). 2001. The red edge parameters of different wheat varieties under different fertilization and irrigation treatments. *Scientia Agricultura Sinica (中国农业科学)*, **35**: 980 ~ 987. (in Chinese with English abstract)