棉花冠层高光谱参数与叶片氮含量的定量关系

吴华兵 朱 艳* 田永超 姚 霞 刘晓军 周治国 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,南京 210095)

摘 要 建立棉花(*Gossypium hirsutum*)氮素状况的光谱监测技术对于棉花营养诊断和长势估测具有重要意义。该研究利用冠层高光谱反射率及演变的多种高光谱参数,分析了不同施氮水平下不同棉花品种叶片氮含量与冠层反射光谱的定量关系,建立了棉花叶片氮含量的敏感光谱参数及预测方程。结果显示,棉花叶片氮含量和冠层高光谱反射率随不同施氮水平呈显著变化。棉花叶片氮含量的敏感光谱波段为 600 ~ 700 nm 的可见光波段和 750 ~ 900 nm 的近红外波段,且叶片氮含量与比值植被指数 RVI [average (760 ~ 850), 700] 有密切的定量关系,4 个品种的平均决定系数在 0.70 左右。进一步分析表明,可以用统一的回归方程来描述不同品种、不同生育时期和不同氮素水平下棉花叶片氮含量随反射光谱参数的变化模式,从而为棉花氮素营养的监测诊断与精确施肥提供技术依据。

关键词 棉花 叶片 氮含量 高光谱 冠层反射率 比值植被指数 定量关系

RELATIONSHIP BETWEEN CANOPY HYPERSPECTRA PARAMETER AND LEAF NITROGEN CONCENTRATION IN COTTON

WU Hua-Bing, ZHU Yan*, TIAN Yong-Chao, YAO Xia, LIU Xiao-Jun, ZHOU Zhi-Guo, and CAO Wei-Xing

Hi-Tech Key Laboratory of Information Agriculture of Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract *Aims* It is very important to develop a nondestructive method for estimating nitrogen status and growth characters in cotton. We carried out two experiments to investigate the quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and the canopy hyperspectral parameter in cotton.

Methods Based on the canopy hyperspectral reflectance and derived hyperspectral parameter, we investigated the quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra in different cotton cultivars under different N rates and put forward the sensitive parameters and monitoring equations for leaf nitrogen concentration. Experiment 1 was conducted with two cultivars (‘Sumian 12’ and ‘Zhongmian 29’) and four N application levels (0, 150, 300 and 450 kg·hm⁻²) in 2004. Experiment 2 included two cultivars (‘Kemian 1’ and ‘Meimian 33B’) with three nitrogen levels (0, 240 and 480 kg·hm⁻²) in 2005.

Important findings Leaf nitrogen concentration and canopy hyperspectral reflectance significantly changed with levels of nitrogen fertilization. The sensitive bands of leaf nitrogen concentration were 600 – 700 nm of visible light and 750 – 900 nm of near infrared light, and the quantitative relationships between leaf nitrogen concentration and ratio vegetation index (RVI) [average (760 – 850), 700] of canopy were significant with an average R^2 of 0.70 in four cultivars. An integrated regression equation could be used for describing the dynamic change pattern of leaf nitrogen concentration with hyperspectral parameters in different varieties, growing stages and nitrogen levels in cotton. These results provide a technical approach for monitoring plant nitrogen status and guiding precision nitrogen management in cotton production.

Key words cotton, leaf, nitrogen concentration, hyperspectrum, canopy reflectance, ratio vegetation index, quantitative relationship

目前,氮肥是棉花(*Gossypium hirsutum*)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。因此适时可靠地监测棉花植株的氮素营养状况从而指

导精确氮肥管理是现代棉花生产中迫切需要解决的问题。长期以来,传统的作物氮素监测方法一般依靠田间植株取样和室内分析测试,虽然结果较为可靠,但在时间和空间尺度上都很难满足实时、快速、

无损氮素监测的要求。近年来,遥感无损监测技术的发展为作物理化参数的监测提供了新的方法和手段。有关作物氮素营养状况的遥感估测,在玉米 (*Zea mays*) [Blackmer *et al.*, 1994, 1996]、水稻 (*Oryza sativa*) [王人潮等, 1993; 周启发和王人潮, 1993; 薛利红等, 2003]、小麦 (*Triticum aestivum*) [Stone *et al.*, 1996; 薛利红等, 2004] 等禾谷类作物上,国内外已有大量的研究报道。而有关棉花氮素营养监测的研究,国内外则相对较少,其中,Thomas 和 Gausman (1977) 通过研究不同氮素营养水平下的棉花叶片光谱特性,发现叶片氮素含量的敏感波段为 530 ~ 560 nm。国内有学者研究表明,棉花叶片氮含量与红边、蓝边和黄边 3 边数值积分面积变量呈显著相关 (王登伟等, 2003; 马亚琴等, 2003)。国外也有学者研究发现,用棉花叶片红边位置与短波近红外的比值可以比较精确地预测叶片氮浓度 (Maas, 1997); 比值植被指数 R_{517}/R_{413} 与叶片氮含量呈显著相关 (Zhao *et al.*, 2005); 绿色植被指数 (Green vegetation index, *GVI*) 和绿度归一化植被指数 (Green normalized difference vegetation index, *GNDVI*) 与叶片氮含量和氮积累量相关性比较好 (Bronson *et al.*, 2003)。为了能够更加系统和深入地探索棉花氮素营养状况与冠层反射光谱之间的关系,本研究以不同施氮水平和不同品种的田间试验为基础,利用高光谱地物光谱仪,综合分析棉花叶片氮含量与冠层高光谱反射特征之间的定量关系,确定叶片氮含量的特征光谱参数与监测方程,从而为棉花氮素营养的无损监测诊断与精确施肥提供技术依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验 1: 2004 年在南京农业大学江浦试验站进行。前茬作物为大豆,土壤为重粘土,土壤有机质含量为 $18.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $1.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量为 $82.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量为 $31.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $157.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试棉花品种为‘中棉 29 (杂交棉)’和‘苏棉 12 (常规棉)’ 4 月 16 日播种,5 月 21 日移栽。设 4 个施氮水平, N_0 (不施氮), N_1 ($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 纯氮), N_2 ($300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 纯氮), N_3 ($450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 纯氮),氮肥运筹为种肥占 20%,第一次花铃肥占 50%,第二次花铃肥占 30%。试验为两因素随机裂区排列,氮肥为主区,品种为副区,各 3 次重复。小区面积为 $6 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,等行距种植,杂交棉的行、株距为 $0.75 \text{ m} \times 0.40 \text{ m}$,常规棉的

行、株距为 $0.75 \text{ m} \times 0.27 \text{ m}$,移栽密度分别为杂交棉 $33\ 000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,常规棉 $49\ 500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。同时各处理配施 P_2O_5 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 磷、钾运筹为种肥占 50%,第一花铃肥占 50%。全生育期化学调控,其它管理措施按高产要求进行。

试验 2: 2005 年在江苏省淮安市宝应湖农场进行。前茬作物为大豆,土壤为黄棕壤土,土壤有机质含量为 $37.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $2.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量为 $151.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量为 $63.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $253.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试品种为‘科棉 1 号 (杂交棉)’、‘美棉 33B (杂交棉)’ 4 月 26 日播种,5 月 25 日移栽。设 3 个施氮水平, N_0 (不施氮), N_1 ($240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 纯氮), N_2 ($480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 纯氮),氮肥运筹为基肥 50%、盛蕾初花期施肥 50%。试验为两因素随机裂区排列,氮肥为主区,品种为副区,各 3 次重复。小区面积为 $7.6 \text{ m} \times 5.4 \text{ m}$,等行距种植,行、株距为 $0.90 \text{ m} \times 0.30 \text{ m}$,移栽密度为 $37\ 500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。同时各处理配 P_2O_5 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, KCl $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 均作为基肥施入。全生育期化学调控,其它管理措施按高产要求进行。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 冠层高光谱反射率

在试验期间,采用美国 ASD 公司生产的 Field-Spec Pro FR 光谱仪定期测定不同处理各小区的冠层高光谱反射率。仪器视场角为 25° ,波段范围为 350 ~ 2 500 nm,其中 350 ~ 1 050 nm 范围内的光谱分辨率为 3 nm,1 000 ~ 2 500 nm 范围内的光谱分辨率为 10 nm。于棉花封行后开始,每两周测定一次。测量选择在晴朗无云或少云的天气进行,测量时间为 10:00 ~ 14:00 (太阳高度角大于 45°)。测量时探头垂直向下,距冠层垂直高度约 1 m。每次采集目标光谱前后都进行参考板校正。每小区重复测量 5 次,取平均值作为该小区的光谱测量值。

1.2.2 叶片氮含量

与光谱测量同步进行破坏性植株取样,每小区选取代表性植株 2 株,将叶片分离、烘干,称重粉碎后,采用凯氏定氮法测定叶片全氮含量。

1.3 数据分析与利用

本研究首先在分析叶片氮含量与单波段反射率相关性的基础上,确立棉花叶片氮含量的敏感光谱波段范围,进而在敏感光谱波段范围内参考前人的研究结果,计算由敏感光谱波段组成的光谱参数 (表 1),并通过分析光谱参数与棉花叶片氮含量的相关关系,筛选出对棉花叶片氮含量敏感的最佳光谱参

数,然后建立相应的回归方程。其中相关性分析及光谱参数的计算,是在 *MATLAB*(李强和赵伟,2001)语言环境下通过自己编程实现的。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平下的叶片氮含量

表 2 列出了两年试验中各个主要生育时期的棉

花叶片氮含量。分析表明,各品种叶片氮含量在不同氮肥处理间表现出了显著差异($F > F_{0.05}$),总体上呈现随施氮水平而上升的趋势。其中,部分氮素处理之间的差异不是很明显,可能是由于每小区植株取样数较少而加大了试验误差所致(如 2004 年),或者可能是由于土壤基础肥力比较高所引起的(如 2005 年)。试验中不同生育时期叶片氮含量的变化

表 1 高光谱参数计算方法
Table 1 Algorithm of different hyperspectral parameters

高光谱参数 Hyperspectral parameter	计算公式 Algorithm formula	文献 Reference
吸收谷深度 Depth of absorption valley (VD_i)	$VD_i = 1 - \frac{R_{Ci}}{R_{Si} + (R_{Ei} - R_{Si}) * (\lambda_{Ci} - \lambda_{Si}) / (\lambda_{Ei} - \lambda_{Si})}$	Baret <i>et al.</i> (1989)
吸收谷特征面积 Feature area of absorption valley ($V\text{-}Area_i$)	$V\text{-}Area_i = \int_{\lambda_{Si}}^{\lambda_{Ei}} (R_{lim}(\lambda) - R(\lambda)) d\lambda$ $= \int_{\lambda_{Si}}^{\lambda_{Ei}} ((R_{Si} + \frac{R_{Ei} - R_{Si}}{\lambda_{Ei} - \lambda_{Si}} * (\lambda - \lambda_{Si})) - R(\lambda)) d\lambda$	Baret <i>et al.</i> (1989)
归一化吸收深度 Normalized depth of valley (NVD_i)	$NVD_i = VD_i / V\text{-}Area_i$	Baret <i>et al.</i> (1989)
比值植被指数 Ratio vegetation index (RVI)	$RVI = IR / R$	Pearson & Miller (1972)
光化学反射指数 Photochemical reflectance index (PRI)	$PRI = (R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531})$	Peñuelas <i>et al.</i> (1995)
绿度归一化差值植被指数 Green normalized difference vegetation index ($GNDVI$)	$GNDVI = (R_{750} - R_{550}) / (R_{750} + R_{550})$	Gitelson & Merzlyak (1996)

R_{Ci} 、 R_{Si} 、 R_{Ei} 分别为反射特征中心点、起点和结束点处的光谱反射率 R_{Ci} , R_{Si} , R_{Ei} are the spectrum reflectance at the center point , start point and end point of reflecting characteristics , respectively λ_{Ci} 、 λ_{Si} 、 λ_{Ei} 分别为反射特征中心点、起点和结束点处的波长 λ_{Ci} , λ_{Si} , λ_{Ei} are the wavelengths at the center point , start point and end point of reflecting characteristics , respectively

表 2 不同品种和施氮水平下棉花开花、盛花、始絮、吐絮、盛絮期的叶片氮含量
Table 2 Leaf nitrogen concentrations of different cotton varieties at flowering , full-blossoming , early opening boll , opening boll and full opening boll stages under different N rates

年份 Year	品种 Variety	施氮水平 N rate (kg N·hm ⁻²)	代号 Code	叶片氮含量 Leaf nitrogen concentration (mg·g ⁻¹)				
				开花 Flowering	盛花 Full-blossoming	始絮 Early opening boll	吐絮 Opening boll	盛絮 Full opening boll
2004	‘ 苏棉 12 ’ ‘ Sumian 12 ’	0	N ₀	20.50	24.52	22.95	22.61	21.70
		150	N ₁	24.65	30.97	29.74	28.44	23.47
		300	N ₂	27.16	33.67	32.46	29.51	29.10
		450	N ₃	32.82	34.88	31.72	31.91	30.37
		<i>F</i> 值 <i>F</i> Value		53.07 **	17.45 *	9.20	24.82 *	38.91 **
	‘ 中棉 29 ’ ‘ Zhongmian 29 ’	0	N ₀	21.17	25.94	24.01	24.52	16.95
		150	N ₁	25.04	30.04	27.27	25.37	23.70
		300	N ₂	28.46	34.75	31.62	27.99	28.62
		450	N ₃	30.59	33.70	33.37	31.19	29.92
		<i>F</i> 值 <i>F</i> Value		9.44 *	14.80 *	22.50 *	98.66 **	19.01 *
2005	‘ 科棉 1 号 ’ ‘ Kemian 1 ’	0	N ₀	—	26.38	23.00	23.92	22.16
		240	N ₄	—	33.65	30.37	28.46	27.74
		480	N ₅	—	35.34	33.16	34.16	32.18
		<i>F</i> 值 <i>F</i> Value		—	40.43 *	223.45 **	47.85 *	45.57 *
	‘ 美棉 33B ’ ‘ Meimian 33B ’	0	N ₀	—	25.39	21.48	23.25	23.90
		240	N ₄	—	33.57	30.73	27.95	25.54
		480	N ₅	—	37.50	36.82	36.35	28.64
		<i>F</i> 值 <i>F</i> Value		—	28.55 *	169.91 **	222.30 **	22.82 *

* :表示 0.05 水平上差异显著 Indicate 0.05 significant level ** :表示 0.01 水平上差异显著 Indicate 0.01 significant level

趋势是盛花期达到最高,以后就逐渐下降。叶片氮含量的这些变化模式在不同品种间基本一致。

2.2 冠层高光谱反射率对施氮水平的响应

以 2005 年试验中‘科棉 1 号’在 3 个施氮水平下盛花期冠层高光谱反射率为例,说明不同施氮水平下棉花冠层高光谱反射率对氮素水平的响应模式(图 1)。从图 1 可以看出,在 350~650 nm 范围内,冠层高光谱反射率随施氮水平的提高而下降,虽然不同施氮水平之间的差异不是很大;同时冠层高光谱反射率随波长的增加呈单峰曲线,且 550 nm 左右反射率最大,这是由于植被在 400~700 nm 波段范围内的反射光谱主要由叶绿素和其它色素所决定(Gitelson *et al.*, 2002)。近红外平台(720~1 300 nm)的反射率则随施氮水平的提高而上升,不同氮素处理间的光谱反射率差异显著,这是由于近红外波段的反射光谱主要受叶片的细胞排列方式和植被结构的影响(Mutanga *et al.*, 2003),因而与施氮水平密切相关。另外,总体结果表明,不同棉花品种、不同生育时期的冠层高光谱反射率均表现出相似的氮素响应规律。

图 1 不同施氮水平下棉花(‘科棉 1 号’)冠层高光谱反射率(2005 年)
Fig.1 Hyperspectral reflectance of cotton canopy under different N rates(‘Kemian 1’, 2005)
N₀、N₄、N₅:见表 2 See Table 2

2.3 叶片氮含量与冠层高光谱反射率的关系

图 2 显示了不同棉花品种在整个生育期内叶片氮含量与冠层高光谱反射率的相关关系(4 个品种样本数均为 50)。可以看出,在 600~700 nm 波段范围内,叶片氮含量与冠层高光谱反射率呈显著负相关(平均相关系数为 -0.482)。其中,640 nm 波段附近和 700 nm 波段附近的光谱反射率与叶片氮含量的负相关最密切(最大为 -0.65;美棉 33B)。这两个区域正是叶绿素的吸收区域,叶绿素强烈吸收红光引起红光波段反射率降低;同时由于氮素和叶

绿素密切相关,使得叶片氮素敏感波段也接近叶绿素的敏感区域,因此该区域可以视作氮素敏感区域来监测叶片氮素营养。在 730~1 350 nm(近红外)尤其是 750~900 nm 波段范围内,光谱反射率与叶片氮含量呈显著正相关(平均相关系数为 0.351)。近红外区域相对高的反射率是由于叶片内部结构多次散射的结果,而叶片内部结构与氮素间密切相关,因此该区域光谱反射率与氮素营养也有良好的相关性。另外,图中‘苏棉 12’在各个敏感波段的相关性均低于其它 3 个品种,可能是因为‘苏棉 12’属常规棉,个体较小,在光谱测量时受土地背景影响的程度大一些,而其它 3 个品种都是杂交棉,个体较大,冠层高光谱相对较为稳定。不过,总体上 4 个品种叶片氮含量与光谱反射率的相关趋势基本一致。

图 2 不同棉花品种的叶片氮含量与冠层高光谱反射率的相关性 ($r_{(0.05, 50)} = 0.273$)
Fig.2 Correlation of leaf nitrogen concentration to canopy hyperspectral reflectance with different cotton cultivars

2.4 叶片氮含量与高光谱参数的关系

表 3 列出了与叶片氮含量密切相关的高光谱参数及定量方程。可以看出,与叶片氮含量相关较好的高光谱参数所包含的光谱波段主要集中在 550~700 和 760~850 nm,这与从叶片氮含量和高光谱反射率相关中得出的氮素敏感波段基本相吻合。这些高光谱参数与叶片氮含量的决定系数基本上接近 0.7,最高达到 0.8 以上,比原始高光谱反射率与叶片氮含量的决定系数要高得多,主要是因为构成高光谱参数的红光波段和近红外波段既包含了叶片中叶绿素的信息,又包含了叶片组织机构方面的信息。综合图 2 和表 3 可以看出,不同棉花品种叶片氮含量与冠层高光谱反射率的相关性在 700 nm 附

近达到最大负相关和在 760 nm 附近达到最大正相关,而基于这两个波段建立的高光谱参数 $RVI[average(760 \sim 850), 700]$ 与叶片氮含量相关的决定系数在各个品种中均比较高,达到 0.54 以上(图 3)。但其它高光谱参数对叶片氮含量的估测能力则随不同年份与不同品种而有所差异。

进一步分析发现,通过综合不同类型棉花品种

叶片氮含量(LNC)与 $RVI[average(760 \sim 850), 700]$ 的关系,可以建立统一的线性方程,其决定系数仍然高达 0.567(图 4)。所以对于(760 ~ 850 nm)与 700 nm 反射率所构成的 RVI ,可以采用统一的回归方程来估测不同类型棉花品种的叶片氮含量。

$$LNC = 0.214 \times RVI[average(760 - 850), 700] - 1.338$$

$$R^2 = 0.567 \quad 1.69\% \leq LNC \leq 3.75\% \quad (1)$$

表 3 不同棉花品种叶片氮含量(y)与主要高光谱参数(x)的定量关系

Table 3 Quantitative relationships of leaf nitrogen concentration(y) to main hyperspectral parameter(x) in different cotton cultivars

品种类型 Cultivar type	高光谱参数 Hyperspectral parameter	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2	样本数 n
‘科棉 1 号’ ‘Kemian 1’	Average(760 ~ 850) / R_{700}	$y = 0.2344x - 1.2081$	0.807**	24
	Average(760 ~ 850) / R_{550}	$y = 0.1626x + 1.0367$	0.761**	24
	$NVD672$	$y = 0.0194x - 0.2657$	0.760**	24
	Average(760 ~ 850) / Average(510 ~ 560)	$y = 0.1959x + 1.342$	0.749**	24
	PRI	$y = -0.0031x + 0.0845$	0.724**	24
	$GNDVI$	$y = 0.0074x + 0.4702$	0.723**	24
‘美棉 33B’ ‘Meimian 33B’	Average(760 ~ 850) / R_{700}	$y = 0.2x - 0.1079$	0.804**	23
	PRI	$y = -0.0026x + 0.0691$	0.772**	23
	$NVD672$	$y = 0.0159x - 0.2071$	0.750**	23
	Average(760 ~ 850) / Average(510 ~ 560)	$y = 0.1684x + 2.2289$	0.737**	23
	Average(760 ~ 850) / R_{550}	$y = 0.1363x + 1.9122$	0.734**	23
	$GNDVI$	$y = 0.0058x + 0.5178$	0.659**	23
‘中棉 29’ ‘Zhongmian 29’	$NVD672$	$y = 0.0214x - 0.2799$	0.614**	50
	Average(760 ~ 850) / R_{700}	$y = 0.1608x - 0.3471$	0.544**	50
	PRI	$y = -0.0036x + 0.121$	0.528**	49
‘苏棉 12’ ‘Sumian 12’	PRI	$y = -0.0045x + 0.1454$	0.679**	39
	$NVD672$	$y = -0.0001x + 0.0115$	0.626**	39
	Average(760 ~ 850) / R_{700}	$y = 0.2316x - 2.1157$	0.616**	39

Average(a - b): 表示在 a 和 b nm 之间的所有波段的反射率的平均值

Means average reflectance of all bands from a to b nm

** 表示 0.01 水平显著

Indicate 0.01 significant level

PRI 、 $GNDVI$ 、 NVD :见表 1

See Table 1

3 小结与讨论

通过分析不同施氮水平下棉花叶片氮含量与冠层高光谱反射率及植被指数之间的关系,得出如下结论:1)不同棉花品种叶片氮含量的敏感光谱波段基本一致,主要表现在 600 ~ 700 nm 的可见光波段和 750 ~ 900 nm 的近红外波段。2)相对于冠层单波段反射率而言,棉花冠层高光谱植被指数与叶片氮含量的相关性更好。3)虽然不同棉花品种叶片氮含量的最佳植被指数不尽相同,但 $RVI[average(760 \sim 850), 700]$ 可以作为共同的植被指数来反演棉花叶片氮含量。

本研究利用不同试验条件下冠层高光谱反射率及演变的多种高光谱参数,采用回归分析方法,建立

了棉花叶片氮含量与冠层反射光谱的定量关系,初步提出了棉花叶片氮素状况的敏感高光谱参数及预测方程。结果显示,不同棉花品种叶片氮含量的敏感光谱波段基本一致,主要表现在 600 ~ 700 nm 的可见光波段和 750 ~ 900 nm 的近红外波段,这与蒋桂英等(2002)得出的棉花叶片敏感波段(630 ~ 690 , 760 ~ 900 nm)比较接近。同时发现,棉花冠层高光谱参数与叶片氮含量高度相关,且比值植被指数 $RVI[average(760 \sim 850), 700]$ 可以作为不同品种共同的高光谱参数来反演棉花叶片的氮含量。这些研究结果是对已有文献中有关棉花叶片光谱特性与叶片氮含量关系的补充和发展,为棉花植株氮素营养的无损监测、精确诊断及管理调控提供了便捷的技术途径。

图 3 不同棉花品种叶片氮含量与比值植被指数 (RVI [average (760-850), 700]) 的关系

Fig.3 Relationships of leaf nitrogen concentration to ratio vegetation index (RVI [average (760-850), 700]) of hyperspectral index with different cotton cultivars
A : ‘苏棉 12’ ‘Sumian 12’ B : ‘中棉 29’ ‘Zhongmian 29’ C : ‘科棉 1 号’ ‘Kemian 1’ D : ‘美棉 33B’ ‘Meimian 33B’

图 4 基于品种组合的棉花叶片氮含量与比值植被指数 (RVI [average (760-850), 700]) 的关系

Fig.4 Relationships of leaf nitrogen concentration to ratio vegetation index (RVI [average (760-850), 700]) of hyperspectral index with combined cotton cultivars

应当指出 本试验中 4 个棉花品种都只有一年的试验数据 数据量较少 且容易受试验地区的气候条件及耕作栽培方式的影响 今后将利用不同生态

点、不同品种和不同年份的试验资料 对本研究结果做进一步的检验 以提高监测模型的精确度和可靠性。

参 考 文 献

Baret F, Guyot G, Major DJ (1989). *TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation*. In: *Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'89*. Geoscience and Remote Sensing Society of Institute of Electrical and Electronics Engineers, Vancouver, Canada, 3, 1355-1358.

Blackmer TM, Schepers JS, Meyer GE (1994). *Remote sensing to detect nitrogen deficiency in corn*. In: Robert PC, Rust RH, Larson WE eds. *Proceedings of the Second International Conference on Site-specific Management for Agricultural Systems*. ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI, 505-512.

Blackmer TM, Schepers JS, Varvel GE, Walter-Shea EA (1996). *Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies*. *Agronomy Journal*, 88, 1-5.

Bronson KF, Chua TT, Booker JD, Keeling JW, Lascano RJ (2003). *In-season nitrogen status sensing in irrigated cotton*. II.

- Leaf nitrogen and biomass. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 1439 – 1448.
- Gitelson AA, Kaufman YJ, Stark R, Rundquist D (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80, 76 – 87.
- Gitelson AA, Merzlyak MN (1996). Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *Journal of Plant Physiology*, 148, 494 – 500.
- Jiang GY (蒋桂英), Li SK (李少昆), Wang DW (王登伟), Chen YF (陈永芳), Lei YW (雷永雯) (2002). Studies and advances on application of remote sensing technique to cotton. *Journal of Xinjiang Agricultural University* (新疆农业大学学报), 25(3), 76 – 79. (in Chinese with English abstract)
- Li Q (李强), Zhao W (赵伟) (2001). *Date Processing and Application in MATLAB* (MATLAB 数据处理与应用). National Defense Industry Press, Beijing, 1.
- Maas SJ (1997). Structure and reflectance of irrigated cotton leaf canopies. *Agronomy Journal*, 89, 54 – 59.
- Ma YQ (马亚琴), Bao AM (包安明), Wang DW (王登伟), Sun L (孙莉), Huang CY (黄春燕), Feng XW (冯宪伟), Xiao CH (肖春华), Yang XJ (杨新军) (2003). Estimating of the total nitrogen content (TN) in cotton canopy by using hyperspectral remote sensing under water stress. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 4, 26 – 30. (in Chinese with English abstract)
- Mutanga O, Skidmore AK, van Wieren S (2003). Discriminating tropical grass (*Cenchrus ciliaris*) canopies grown under different nitrogen treatments using spectroradiometry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 263 – 272.
- Pearson RL, Miller DL (1972). Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie, Pawnee national grasslands, Colorado. In: *Proceeding of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Environment Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, 1357 – 1381.
- Peñuelas J, Filella I, Gamon JA (1995). Assessment of photosynthetic radiation-use-efficiency with spectral reflectance. *New Phytologist*, 131, 291 – 296.
- Stone ML, Solie JB, Raun WR, Whitney RW, Taylor SL, Ringer JD (1996). Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 39, 1623 – 1631.
- Thomas JR, Gausman HW (1977). Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentration for eight crops. *Agronomy Journal*, 69, 799 – 802.
- Wang DW (王登伟), Li SK (李少昆), Tian QJ (田庆玖), Huang CY (黄春燕), Cao LP (曹连莆), Xiao CH (肖春华), Ma YQ (马亚琴), Yang XJ (杨新军) (2003). Estimating of main cultivation physiology parameters of cotton by using hyperspectral remote sensing. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 36, 770 – 774 (in Chinese with English abstract)
- Wang RC (王人潮), Chen MZ (陈铭臻), Jiang HX (蒋亨显) (1993). Studies on agronomic mechanism of the rice yield estimation by remote sensing. I. The rice reflectance characteristics of different nitrogen levels and the selection of their sensitive bands. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)* (浙江农业大学学报(农业与生命科学版)), 19(Suppl.), 7 – 14. (in Chinese with English abstract)
- Xue LH (薛利红), Cao WX (曹卫星), Luo WH (罗卫红), Jiang D (姜东), Meng YL (孟亚利), Zhu Y (朱艳) (2003). 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)
- Xue LH (薛利红), Cao WX (曹卫星), Luo WH (罗卫红), Zhang X (张宪) (2004). Correlation between leaf nitrogen status and canopy spectral characteristics in wheat. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 28, 172 – 177. (in Chinese with English abstract)
- Zhao DL, Reddy KR, Kakani VG, Read JJ, Koti S (2005). Selection of optimum reflectance ratios for estimating leaf nitrogen and chlorophyll concentrations of field-grown cotton. *Agronomy Journal*, 97, 89 – 98.
- Zhou QF (周启发), Wang RC (王人潮) (1993). A preliminary study on the relationship between the nitrogen levels and the spectral characteristics of early rice leaves. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)* (浙江农业大学学报(农业与生命科学版)), 19(Suppl.), 40 – 46. (in Chinese with English abstract)