

棉花功能叶片色素含量与高光谱参数的相关性研究

姚霞, 吴华兵, 朱艳, 田永超, 周治国, 曹卫星*

(南京农业大学/江苏省信息农业高技术研究重点实验室, 南京 210095)

摘要:叶片色素状况是评价植株光合能力、监测生长状况和预测产量潜力的重要指标,高光谱遥感技术为快速无损监测作物叶片色素提供了有效手段。本研究以4个棉花品种在3个施氮水平下的2年田间试验为基础,通过测定棉花(*Gossypium hirsutum*)功能叶片的高光谱反射率及对应的色素(叶绿素a、叶绿素b、叶绿素a+b、类胡萝卜素)含量,定量分析了叶片高光谱参数与色素含量之间的相关关系。结果表明,与棉花功能叶片各色素指标相关性比较好的高光谱波段主要分布在500~700 nm;由敏感波段构建的光谱指数与各色素指标的相关性均在0.50以上;且红边最小值(Lo)可以作为共同的高光谱指数来估测不同棉花品种不同氮素水平下功能叶片的叶绿素总量(组合品种的 R^2 为0.67)。因此,通过高光谱参数来估算棉花功能叶片色素含量是可行的。

关键词:棉花;功能叶片;色素含量;高光谱;光谱指数

中图分类号:S562.01 **文献标识码:**A

文章编号:1002-7807(2007)04-0267-06

Relationship between Pigment Concentrations and Hyperspectral Parameters in Functional Leaves of Cotton

YAO Xia, WU Hua-bing, ZHU Yan, TIAN Yong-chao, ZHOU Zhi-guo, CAO Wei-xing*

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

Abstract: Hyperspectral remote sensing is a powerful tool for non-destructively obtaining physiological and biochemical information in field crops. A vegetation index (VI) based on hyperspectral reflectance measures has been proposed as a reliable non-destructive method for quickly estimating pigment concentrations in cotton. To determine the best hyperspectral vegetation index for estimating pigment concentrations in cotton, canopy spectral reflectance (350~2500 nm) data of functional leaves at different growth stages of four cotton cultivars under three nitrogen levels were recorded with FieldSpec Pro FR radiometer in two field experiments, and the corresponding measures were taken on the concentrations of different pigments (chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+b, and total carotenoid) in the functional leaves. Then the relationships of pigment concentrations to characteristics of hyperspectral reflectance in functional leaves were analyzed quantitatively. The results showed that the sensitive hyperspectral wavebands of leaf pigment concentrations in cotton were 550~700 nm. Vegetation indices composed of the sensitive wavebands were significantly correlated to the pigment concentrations in functional leaves, with the best vegetation index as the minimum value of red edge (Lo), R^2 value of 0.67 for all cultivars combined. Relationships of pigment concentrations to Lo can be potentially used for non-destructive and real-time monitoring of pigment concentrations in cotton leaves.

Key words: cotton; functional leaf; pigment concentration; hyperspectra; spectral index

作物叶片中叶绿素含量的多少,既显示作物的生长状况,又是作物与环境发生物质能量交换的重要条件。叶片色素含量与植株光合能力、发育阶段和氮素状况密切相关,已经成为评价植物长势的一种有效手段^[1-2]。因此,实时监测作物叶片中色素含量的变化,对于作物长势监测和产量估算具有重要意义^[3]。近年来,遥感技术的发展为作物诊断的无损监测提供了新的方法。利用作物的反射光谱来估测叶片叶绿素含量已经成为监测作物长势的一种重要手段。由于植被和叶片反射光谱在可见光范围主要受植被色素(叶绿素和类胡萝卜素)的影响,在近红外区域则主要受叶片内部结构、生物量、蛋白质、纤维素等的影响^[4-5],因而用植被冠层和叶片的反射光谱来估算色素含量既有理论基础,又有应用前景^[6-8]。然而,有关棉花叶片色素含量光谱监测的研究甚少,已有的报道初步表明 700~750 nm 红边范围内的两波段组合与叶绿素密度相关性较好^[9],但有关棉花叶片高光谱反射特征与叶片色素含量的定量关系有待于进一步探索和阐明。为了寻求能更好估测棉花叶片叶绿素含量的植被指数,基于不同年份、品种类型、施氮水平的田间试验,研究了棉花功能叶片高光谱参数与叶片色素含量的定量关系,以期为高光谱遥感技术在棉花长势监测中的应用提供理论依据。

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 $1.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $82.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $31.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $157.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试品种为中棉所 29(杂交棉)和苏棉 12(常规棉),4 月 16 日播种,5 月 21 日移栽。设 3 个施氮水平,分别为 N_0 (不施 N), N_1 ($300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 纯氮), N_2 ($450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 纯氮),氮肥运筹为基肥:第 1 次花铃肥:第 2 次花铃肥=2:5:3。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 $6 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 30 \text{ m}^2$,等行距种植,杂交棉的行、株距为 0.75 m 和 0.40 m,常规棉的行、株距为 0.75 m 和 0.27 m,移栽密度分别为杂交棉 $3.3 \times 10^4 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,常规棉 $4.95 \times 10^4 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。同时各处理配施 P_2O_5 $225 \text{ kg} \cdot$

hm^{-2} , K_2O $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;磷、钾运筹为种肥占 50%,第 1 花铃肥占 50%。全生育期化学调控,其它管理措施按当地高产要求进行。

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 $2.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $151.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $63.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $253.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试品种为科棉 1 号(杂交棉)和美棉 33 B(杂交棉),4 月 26 日播种,5 月 25 日移栽。设 3 个施氮水平,分别为 N_0 (不施 N), 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,N 肥为主区,品种为副区,各 3 次重复。小区面积为 $7.6 \text{ m} \times 5.4 \text{ m} = 41.04 \text{ m}^2$,等行距种植,行、株距为 0.90 m 和 0.30 m,移栽密度为 $3.75 \times 10^4 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。同时各处理配施 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,其它管理措施按当地高产要求进行。

1.2 功能叶片光谱测定

在试验期间,采用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec Pro FR 光谱仪定期测定不同处理各小区的冠层光谱反射率。仪器视场角为 25° ,波段范围为 350~2500 nm,其中 350~1050 nm 范围内的光谱分辨率为 3 nm,光谱采样间隔为 1.4 nm;1050~2500 nm 范围内的光谱分辨率为 10 nm,光谱采样间隔为 2 nm。于棉花封行后开始,每 2 周测定 1 次。测量选择在晴朗无云(少云)、无风(少风)的天气进行,测量时间为 10:00—14:00(太阳高度角大于 45°)。每次从各小区选取有代表性的植株 3~5 株,取完全展开第一果枝第一果节功能叶 8~10 片测其高光谱反射率。测量时样品置于反射率近似为零的黑色布料上,并完全展开铺平,探头垂直向下,距样品表面垂直高度约 0.1 m,每个样品快速测定 3 次反射光谱,取其平均值作为该小区的叶片光谱测量值。每次采集目标光谱前后都进行参考板校正。

应当指出,测量植物叶片反射光谱的方法和仪器有多种选择,理论上最好采用积分球来测定,但积分球测量比较繁琐,影响工作的实效性,因而实际使用较少。本实验室近年来一直使用具有连续精细光谱信息的 ASD 高光谱仪,测定方法比较简洁且结果也较为精确,适用于小区试验中大量

样本的测试工作。

1.3 功能叶片色素测定

获取每次光谱测定后的叶片样品,迅速用液氮速冻处理后带至实验室低温冰柜(-29°C)保存,以供叶片色素含量测定。色素含量测定时用打孔器在鲜样上打孔,取叶片各个部位样品约0.1 g放于试管,加10 mL 1:1的无水丙酮乙醇混合液,密封后放于黑暗处培养24 h,然后用日立(HITACHI)U-2800型紫外可见分光光度计于663 nm/645 nm/470 nm处比色,测得OD值,并按以下公式计算出叶片各色素的含量值^[10]。

$$C_a = 12.21OD_{663} - 2.81OD_{645}$$

$$C_b = 20.13OD_{645} - 5.03OD_{663}$$

$$C_{类} = (1000OD_{470} - 3.27C_a - 104C_b) / 229$$

$$C_{总} = C_a + C_b$$

1.4 观测数据分析

在定量分析叶片各色素含量与单波段反射率相关性的基础上,确定棉花功能叶片各色素含量的敏感光谱波段范围,进而计算由敏感光谱波段组成的相关植被指数(表1),再通过植被指数与叶片各色素含量的相关关系,筛选出对棉花功能叶片各色素含量敏感的最佳植被指数,并建立相应的回归方程。其中相关性分析及植被指数的计算,是在MATLAB语言环境下通过自己编程实现的。

表1 高光谱植被指数的计算方法

Table 1 Algorithm of different hyperspectral vegetation indices

高光谱参数	缩写	计算公式
吸收谷深度	VD _i	$VD_i = 1 - \frac{R_{Gi}}{R_{Si} + (R_{Ei} - R_{Si}) * (\lambda_{Gi} - \lambda_{Si}) / (\lambda_{Ei} - \lambda_{Si})}$
吸收谷特征面积	V_Area _i	$V_Area_i = \int_{\lambda_{Si}}^{\lambda_{Ei}} [R_{iim}(\lambda) - R(\lambda)] d\lambda$ $= \int_{\lambda_{Si}}^{\lambda_{Ei}} \{ [R_{Si} + \frac{R_{Ei} - R_{Si}}{\lambda_{Ei} - \lambda_{Si}} * (\lambda - \lambda_{Si})] - R(\lambda) \} d\lambda$
归一化吸收深度	NVD _i	$NVD_i = VD_i / V_Area_i$
归一化植被指数	NDVI	$NDVI(\lambda_1 - \lambda_2) = (R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}) / (R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2})$
红边位置	-	-
红边最小值	Lo	-

2 结果与分析

2.1 色素含量与原始高光谱反射率的关系

综合2年试验结果,棉花功能叶片的色素含量在不同氮素水平和不同品种中具有明显的差异,这些叶片的高光谱反射率随着色素含量的变化而呈现出规律性的变化特征。相关分析显示,棉花功能叶片各色素含量与原始光谱反射率密切相关,其相关系数在不同波段的分布趋势基本上是“双谷——平台”曲线(图1)。其中,400~500 nm波段是色素的吸收波段,但由于大气的散射,使得该波段的相关性较小。550 nm和700 nm附近是叶绿素的两个吸收峰,因此在550~700 nm区域相关性较好,这与Sims^[5]在不同植物种类上的研究结果基本一致。在近红外平台(720~1300 nm)的相关性比较好也比较稳定,因为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^[11]。此外,各色素指标的相关性分布

也有一定的差异,主要表现为类胡萝卜素在各波段的相关性要小一些,可能因为类胡萝卜素在棉花叶片中的含量要远远低于叶绿素a和叶绿素b,因而提取时比较困难,试验误差也相对偏大,从而使得建立的相关性要低一些。不过,叶片叶绿素总量与光谱反射率的相关性要高于叶绿素a或叶绿素b单独建立的相关关系。总体上,棉花功能叶片色素含量与叶片高光谱反射率间的关系在不同品种中均表现出相似的变化趋势。

2.2 色素含量与高光谱参数的定量关系

表2列出了与各色素含量相关性较好的光谱指数。这些光谱指数所选择的光谱波段集中在500~700 nm,这与从叶片色素含量和原始高光谱反射率相关分析中得出的敏感波段基本吻合。这些高光谱植被指数与叶片各色素含量的相关系数基本上在0.50以上,最高在0.80以上,明显高于原始高光谱反射率与叶片色素含量的相关系数,主要是因为构成植被指数的红光波段和近红

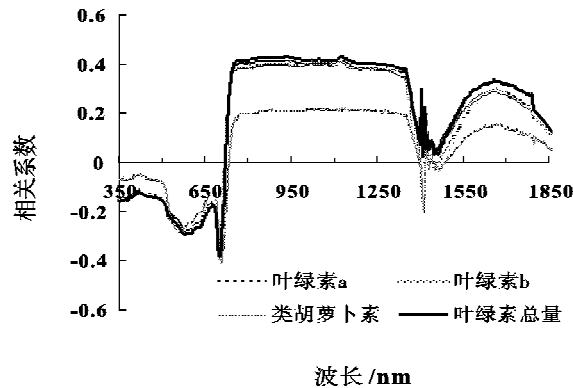


图 1 全生育期功能叶片各色素含量与叶片原始高光谱反射率间的相关性(苏棉 12)

Fig. 1 Correlation of pigment concentrations to hyperspectral reflectance in main functional leaves during the whole growth period (Sumian 12)

表 2 不同棉花品种全生育期与各个色素含量相关性较好的植被指数

Table 2 Hyperspectral vegetation indices well related to pigment concentrations in functional leaves of different cotton cultivars during the whole growth period

品种	色素	光谱指数	相关系数	光谱指数	相关系数	光谱指数	相关系数	样本数
科棉 1 号	叶绿素 a	Lo	0.821**	红边位置	0.701**	NVD672	-0.709**	38
	叶绿素 b	Lo	0.751**	红边位置	0.575**	NVD672	-0.597**	38
	类胡萝卜素	Lo	-0.597**	红边位置	-0.599**			38
	叶绿素 a+b	Lo	0.807**	红边位置	0.660**	NVD672	-0.675**	38
美棉 33B	叶绿素 a	Lo	0.670**	红边位置	0.547**	NVD672	-0.508**	38
	叶绿素 b	Lo	0.566**	NDVI(570,531)	-0.761**			38
	类胡萝卜素	Lo	0.555**	NDVI(570,531)	0.768**			38
	叶绿素 a+b	Lo	0.641**	红边峰值	0.501**			38
苏棉 12	叶绿素 a	Lo	0.623**	红边位置	0.616**	NVD672	-0.680**	44
	叶绿素 b	Lo	0.557**	红边位置	0.503**	NVD672	-0.626**	44
	类胡萝卜素	Lo	0.604**	红边位置	0.580**			44
	叶绿素 a+b	Lo	0.641**	红边位置	0.621**	NVD672	-0.703**	44
中棉所 29	叶绿素 a	Lo	0.716**	红边位置	0.558**	NVD672	-0.697**	48
	叶绿素 b	Lo	0.635**	NVD672	-0.627**			48
	类胡萝卜素	Lo	0.612**	NVD672	-0.560**			48
	叶绿素 a+b	Lo	0.708**	红边位置	0.551**	NVD672	-0.692**	48

注: **表示达极显著水平。

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。另外,不同品种中相同色素指标的敏感光谱指数基本上一致,以红边最小值(Lo)最为稳定。

本研究中,不同品种叶绿素总量与光谱指数Lo之间表现出比较一致的回归关系,其决定系数均在0.45以上。其中,科棉1号和美棉33B叶绿素含量的低端都在 $1.25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上,而苏棉12和中棉所29叶绿素含量的低端在 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右,这可能是因为在2005年试验中科棉和美棉

的土壤肥力和基肥水平均较高,叶片色素含量也相应升高;同时也可能与品种本身的氮素吸收和叶色特征有关。图3为基于4个品种组合所建立的叶绿素总量与Lo的回归关系,其决定系数高达0.67。因此,虽然不同品种单独的回归系数稍有差异,但仍有可能采用统一的回归方程来估测不同棉花品种的叶片叶绿素总量。以同样的方法,可以进一步分析建立叶片类胡萝卜素含量与关键高光谱参数的回归监测方程。

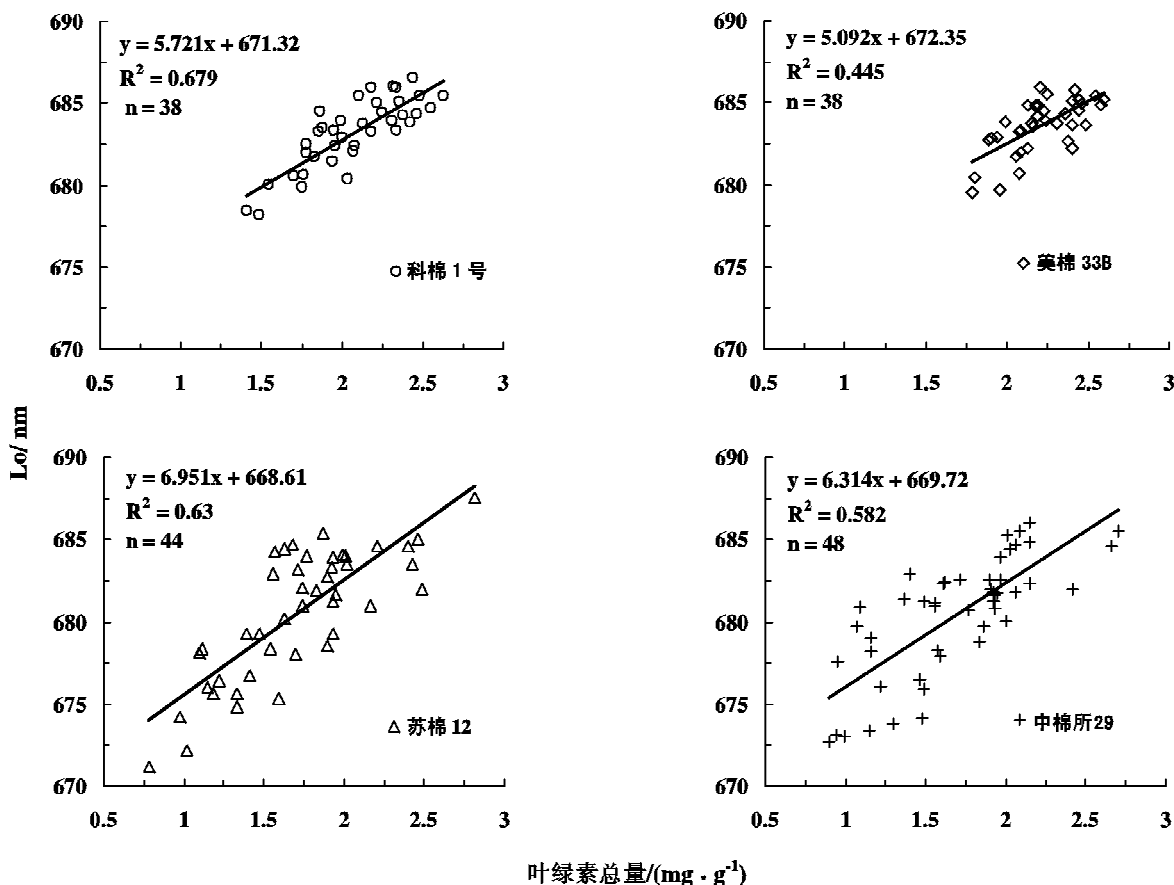


图 2 全生育期不同棉花品种的叶绿素总量与光谱指数 Lo 的关系
 Fig. 2 Correlation of leaf chlorophyll concentrations to vegetation index Lo in different cotton cultivars during the whole growth period

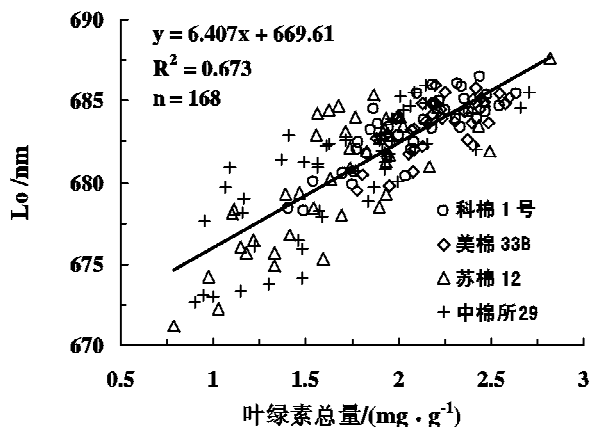


图 3 基于品种组合的棉花功能叶片叶绿素总量与光谱指数 Lo 的关系
 Fig. 3 Correlation of leaf chlorophyll concentration to vegetation index Lo with combined cotton cultivars

3 小结与讨论

随着高光谱遥感技术的发展,越来越多的农作物物理和生化参数可以通过遥感手段进行反演,且精度也日趋提高^[12-13]。叶绿素含量作为植物生长过程中的重要指示器受到了人们极大的关注。本文重点分析了棉花高光谱反射率及其光谱

指数与功能叶片各色素含量之间的相关性,发现与各个色素指标相关性比较好的波段主要分布在 550 nm 和 700 nm 附近以及近红外波段。这与以水稻为研究对象得出的波段范围基本一致^[14],但与棉花叶绿素峰值波段的研究报道^[9]略有不同。本研究还显示,由敏感波段组成的植被指数[Lo、NVD672、红边位置和 NDVI(570, 531)等]与各

个色素指标的相关性均比较好,这与前人在水稻上得出的研究结论有些类似^[13-14]。本研究还明确了Lo可以作为共同的高光谱指数来估测不同棉花品种功能叶片的叶绿素总量,这与前人^[15]相比,准确性更高,普适性更强。

通过棉花反射光谱敏感波段建立的高光谱指数与叶片色素含量各个指标有很强的相关性,说明利用棉花叶片高光谱反射率及其光谱指数反演功能叶片色素含量是可行的。本研究为进一步确立基于冠层反射光谱的棉花叶绿素含量监测技术奠定了理论基础,为利用高光谱遥感技术大面积监测棉花冠层色素含量的空间分布提供了有效途径。应当指出,本研究员有不同年份的试验结果,但所用4个棉花品种的代表性还不够广泛,且容易受试验地区气候生态条件及耕作栽培方式的影响。因此,今后需要利用不同生态点、不同品种和不同年份的棉花试验资料,对本研究结果做进一步的检验和完善,以提高棉花叶绿素监测模型的精确度和适用性。

参考文献:

- [1] FILELLA D, Penuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(7): 1459-1470.
- [2] MINOLTA Co., LTD. Chlorophyll SPAD-502 instruction manual[M]. Osaka: Radiometric Instruments Operations, 1989, 17-21.
- [3] 李云梅,倪绍祥,王秀珍. 线性回归模型估算水稻叶片叶绿素含量的适宜性分析[J]. 遥感学报, 2003(5): 364-371.
- [4] GAUSMAN H W, Allen W A, Cardenas R, et al. Relation of light reflectance to histological and physical evaluations of cotton leaf maturity[J]. Optics Applications, 1970, 9: 545-552.
- [5] 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[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 337-354.
- [6] THOMAS J R, Gausman H W. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops[J]. Agronomy Journal, 1977, 60: 799-802.
- [7] CARD D H, Peterson D L, Matson P A, et al. Prediction of leaf chemistry by the use of visible and near infrared reflectance spectroscopy[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 26: 123-147.
- [8] BLACKBUM G A. Relationships between spectral reflectance and pigment concentrations in stacks of deciduous broad leaves[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70: 224-237.
- [9] 赵德华. 高光谱遥感技术估测棉花农学参数、氮素营养状况和产量的系统研究[D]. 南京: 南京大学, 2004.
- [10] LICHTENTHALER H K. Chlorophylls and carotenoids, pigments of photosynthetic biomembranes [M]// Methods in Enzymology. San Diego, CA: Academic Press, 1987: 350-382.
- [11] MUTANGA O, Skidmore A K, Wieren S. Discrimination tropical grass (*Cenchrus ciliaris*) canopies grown under different nitrogen treatments using spectroradiometry[J]. Journal of Photo Grammetry and Remote Sensing, 2003, 57: 263-272.
- [12] 祁亚琴,王登伟,陈冠文,等. 基于高光谱数据提取作物冠层特征信息的研究进展[J]. 棉花学报, 2005, 17(6): 371-375.
- [13] 陈君颖,田庆久,施润和. 水稻叶片叶绿素含量的光谱反演研究[J]. 遥感信息, 2005(6): 12-16.
- [14] 唐延林,王纪华,黄敬峰. 水稻成熟过程中高光谱与叶绿素、类胡萝卜素的变化规律研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 167-173.
- [15] 唐延林,王秀珍,黄敬峰,等. 棉花高光谱及其红边特征 I [J]. 棉花学报, 2003, 15(3): 146-150.

