

棉花叶绿素密度和叶片氮积累量的高光谱监测研究

黄春燕¹ 王登伟^{1,*} 闫洁² 张煜星² 曹连莆¹ 程诚¹

(¹新疆兵团绿洲生态农业重点实验室/石河子大学农学院;²石河子大学生物工程学院,新疆石河子 832003)

摘要: 利用非成像高光谱仪,获取棉花不同品种、不同密度冠层关键生育时期的反射光谱数据,应用光谱多元统计分析技术,研究表明,棉花冠层叶绿素密度(CH.D)和叶片氮积累量(LNA)分别在反射光谱 762 nm 和 763 nm 处的相关系数达最大值($r_{CH.D} = 0.8845^{**}$ 和 $r_{LNA} = 0.7870^{**}$, $n = 47$);而一阶微分光谱数据对 CH.D、LNA 最敏感的波段均发生在 750 nm 处($r_{CH.D} = 0.9098^{**}$ 和 $r_{LNA} = 0.9164^{**}$, $n = 47$);采用 47 个建模样本的一阶微分光谱 750 nm 处的数值与棉花冠层 CH.D 建立线性相关模型方程,估算 47 个检验样本的棉花冠层 CH.D,再根据 CH.D 与 LNA 建立的线性相关方程估算检验样本的 LNA,47 个检验样本的实测 LNA 与估测 LNA 极显著线性相关($r = 0.8982^{**}$, $n = 94$),模型方程的估算精度达 86.3%,实测值与估算值的 RMSE = 1.0155,相对误差为 0.1380。说明基于高光谱数据的棉花冠层叶绿素密度的遥感估测,可以间接用于棉花冠层叶片氮积累量的监测研究。

关键词: 棉花;高光谱;叶绿素密度;叶片氮积累量

Monitoring of Cotton Canopy Chlorophyll Density and Leaf Nitrogen Accumulation Status by Using Hyperspectral Data

HUANG Chun-Yan¹, WANG Deng-Wei^{1,*}, YAN Jie², ZHANG Yu-Xing², CAO Lian-Pu¹, and CHENG Cheng¹

(¹ Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Bingtuan/College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang; ² Academy of Biological Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China)

Abstract: Chlorophyll and nitrogen contents are important parameters as the indicators of crop photosynthesis productivity, state of growing and nutrition, and optimal diagnosis for crop nitrogenous fertilizer demands. In practical application process, testing nitrogen is more complicated than testing chlorophyll, and using chemicals are liable to pollute environment. Many researches show that chlorophyll content has a positive correlation with nitrogen content, so the status of nitrogen can be indicated by chlorophyll content or its elements. In the meantime, between chlorophyll content and hyperspectral characteristics, a positive correlation still exists, the status of nitrogen can be monitored by chlorophyll remote sensing. Traditionally, the status of chlorophyll density (CH.D) and leaf nitrogen accumulation (LNA) are studied by utilizing hyperspectral data, mainly focused on crops of wheat, rice and corn, mostly establishing a correlation model between hyperspectral data and one variable among CH.D and LNA. But it is scarce for combining CH.D and LNA together in the research, based on hyperspectral data monitoring state of crop canopy nutrition. This paper by utilizing non-imaging hyperspectral spectrometer, 8 cotton cultivars and two of them with 4 level densities planting in north Xinjiang, and multivariate regression analysis method recorded multi-temporal hyperspectral data of canopy at cotton key growing stages and analyzed the correlation between reflectance and cotton canopy CH.D, LNA. The result showed that the maximum correlation coefficients between hyperspectral data and CH.D, LNA occurred at 762 and 763 nm ($r_{CH.D} = 0.8845^{**}$, $r_{LNA} = 0.7870^{**}$, $n = 47$) respectively; the highest correlation coefficients between the first derivative spectral data and CH.D, LNA both occurred at 750 nm ($r_{CH.D} = 0.9098^{**}$, $r_{LNA} = 0.9164^{**}$, $n = 47$). Based on the first derivative data at 750 nm of modeling samples, we established the CH.D linear regression equation and estimated the CH.D of proving samples, then according to the model function between CH.D and LNA, estimated LNA of proving samples, correlation between tested LNA and estimated LNA was significant ($r = 0.8982^{**}$, $\alpha = 1\%$, $n = 94$). The regression function accuracy was 86.2%, the RMSE was 1.0155, RE was 0.1380. The study shows that the status of cotton canopy leaf nitrogen accumulation can be monitored indirectly based on cotton chlorophyll density remote sensing.

Keywords: Cotton; Hyperspectral; Chlorophyll density; Leaf nitrogen accumulation

基金项目: 国家自然科学基金项目(30460060,30060039)

作者简介: 黄春燕(1966-),女,博士生。E-mail: hchy_agr@shzu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 王登伟(1966-),男,副教授。

Received (收稿日期): 2006-08-22; Accepted (接受日期): 2006-11-04.

遥感是探测作物生长状况的有效方法,它可以实时、快捷地获取精准管理作物的关键信息^[1-2]。特别是绿色作物都有其独特的光谱特征,在可见光区的反射率主要由叶绿素等色素的吸收和散射引起的^[3],其差异反映了作物的营养状况,特别是叶片的氮素状况^[4]。许多研究表明,作物生育期内的叶绿素、氮素与其高光谱的特征波段有较好的相关关系^[5-10],利用作物叶绿素、氮素特征波段^[5-6,9,12],可有效监测作物冠层的营养状况和长势。Hansen等^[11]研究小麦高光谱反射率与叶绿素密度、氮密度等变量的相关波段,认为87%的敏感波段集中在红光光谱范围内。Jago等用地表传感器和机载传感器测量出光谱红边位置与草地、小麦叶绿素密度之间有显著的相关性,用它们可以测定地面植被的叶绿素密度^[14];Broge等认为用比值植被指数可较好地预测小麦冠层的叶绿素密度^[15]。Onesimo^[12]等运用连续统去除法定性评价了3种氮素水平草地冠层550~750 nm范围内的光谱差异,认为高氮处理的红光吸收谷较低氮处理的变宽、加深,可以较好地预测草地冠层的氮素状况。Hung等^[2]用偏最小平方回归法建立水稻叶片的氮含量、氮密度等4个变量的回归模型方程, R^2 均在0.79以上,表明模型可以预测水稻叶片的氮素状况。吴长山等通过微分光谱与叶绿素密度的相关分析,找到了反映玉米和水稻冠层叶绿素密度的特征波段^[5];程一松等对不同氮素水平的冬小麦生育期的一阶微分光谱与叶绿素密度的相关分析,表明叶绿素密度在可见光和近红外波段拟合度均好, R^2 在0.5以上^[16]。薛利红等用近红外和绿光波段 R_{910}/R_{550} 的比值与冠层叶片氮积累量建立了线性关系,定量监测了水稻冠层的氮素营养状况^[6]。

叶绿素和氮素等是表征作物光合生产能力、作物长势和营养状况的重要参数,是适时诊断作物需氮的指示器^[13,17]。叶绿素含量与氮素含量有很好的相关性^[3,18,19],氮素状况可以通过叶绿素含量及其组分间接反映出来。在实际应用中氮素较叶绿素测定繁琐费事,使用化学药品又容易造成对环境的污染,而叶绿素含量和叶片光谱特性之间存在很好的相关性^[3,5,10,17],可用叶绿素的定量遥感间接监测作物的氮素营养状况。叶绿素密度和叶片氮积累量分别是表征单位土地面积上的叶绿素含量和氮素含量的关键参数,目前研究主要集中在小麦、水稻、玉米上,但也只建立了高光谱遥感数据与这两个参量之一的关

系,将这两个参量联系起来,用于监测作物群体冠层叶绿素和氮素营养状况的研究较少。本文利用新疆棉花的多时相高光谱数据,通过对棉花叶绿素密度的遥感研究间接监测棉花冠层叶片氮积累量,为高光谱遥感监测棉田氮素营养状况提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2004—2005年在石河子大学农学院田间试验站(44°20'N, 86°3'E)进行,种植面积0.13 hm²,小区面积30 m²,土壤肥力中等,4月中下旬膜上点播,30 cm × 60 cm宽窄行种植。全生育期化控4次,7月15日棉花打顶,其他管理同大田。

(1)品种4水平种植密度的试验,采用裂区设计,品种为主区,密度为副区,供试品种为棉花新陆早6号、8号,种植密度分别为18万株 hm⁻²、22.5万株 hm⁻²、27万株 hm⁻²和31.5万株 hm⁻²; (2)品种比较试验,采用3重复随机区组排列,供试品种为炮台1号(品系)、中棉所36、新陆早4号、6号、7号、8号、10号和13号,种植密度为21万株 hm⁻²。试验(1)和(2)是利用棉花不同品种、不同密度、不同生育时期CH、D、LNA的较大差异,增加反射光谱的响应梯度,以利于高光谱多元统计分析技术的应用。

1.2 测试项目

1.2.1 光谱测试 棉花高光谱数据测量:采用美国ASD Fieldspec FR 2500型野外光谱辐射谱仪,光谱范围350~2500 nm,光谱区的分辨率350~1000 nm为3 nm,1000~2500 nm为10 nm。在晴朗无云的11:30~14:00,选择具有代表性的、均匀的无病虫害的样本点,分别在棉花的盛蕾期、开花期、花铃期、盛铃期、盛铃末期、吐絮期测定冠层光谱,测量前均用白板进行标定,25°视场角,传感器探头向下,距冠层垂直高度1 m,每个处理小区内不同的样点测试10条曲线,设定扫描时间是0.2 s,以其平均值作为该处理冠层的光谱反射值。

1.2.2 生物量的测定 在光谱测定区取棉花样本鲜叶称重(用于计算叶绿素密度),烘干再称干叶重(用于计算冠层叶片氮积累量),并测量样本的占地面积,分别计算单位面积的鲜叶和干叶生物量重,最后用烘干的叶片测定氮含量。

1.2.3 叶绿素含量的测定(chlorophyll content, CHL.C) 打顶前各处理取光谱测定区15株棉花的主茎倒4展开叶,打顶后取15株棉花的倒1展开

叶片,重复3次,用无水乙醇+丙酮各50%浸提叶片24 h,在分光光度计下测定各叶绿素的含量,取平均值计算各处理的棉花叶片总叶绿素含量,并计算叶绿素密度(chlorophyll density, CH.D)。

1.2.4 叶片全氮(total nitrogen, TN)含量测定 将1.2.2中烘干的叶片,采用瑞士 Buchi B-339 凯式定氮仪测定全氮含量,并计算冠层叶片氮积累量(Leaf Nitrogen Accumulation, LNA)。

1.3 计算公式

1.3.1 光谱反射率的一阶微分

$$\rho'(\lambda_i) = [\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})] / 2\Delta\lambda$$

式中 λ_i 为每个波段的波长, $\rho'(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 的一阶微分光谱。 $\Delta\lambda$ 是波长 λ_{i-1} 到 λ_i 的间隔。

1.3.2 叶绿素密度(CH.D, $g\ m^{-2}$) = 叶绿素含量 × 单位土地面积上的鲜叶重

1.3.3 叶片氮积累量(LNA, $g\ m^{-2}$) = 叶片的全氮含量(TN) × 单位土地面积上的干叶重

2 结果与分析

2.1 棉花冠层叶绿素密度和叶片氮积累量的生育期变化规律

由图1及表1可知,棉花苗期至蕾期,冠层叶片数目少,叶面积小,干物质积累量少,棉花冠层叶片

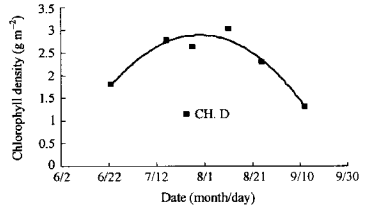


图1 棉花叶绿素密度随生育期变化曲线

Fig.1 The variation curve of cotton canopy chlorophyll density with growth stage

的CH.D和LNA也较低;棉花结铃吐絮期,冠层叶片的养分向棉铃转移,叶片开始衰老枯黄、活性降低、光合作用减弱,冠层叶片的CH.D和LNA也随之降低,北疆8个棉花品种CH.D和LNA在此期的变异系数(CV)分别为36%和39%,在整个生育期中变幅最大,说明不同品种间CH.D和LNA在此期有明显的差异;而在棉花生长旺盛期(开花期和盛铃期),叶片数目多,叶面积增大,叶片的生理活性高,棉花开花期冠层叶片的CH.D和LNA分别比蕾期高51.5%和53.5%,盛铃期的冠层叶片的CH.D和LNA分别比开花期高7.9%和6.7%。棉花整个生育期的CH.D和LNA增减变化趋势基本一致。

表1 北疆8个棉花品种4个生育期叶绿素密度和氮积累量变化

Table 1 The variation of chlorophyll density and leaf nitrogen accumulation of eight cotton cultivars at four growth stages in north Xinjiang

参数 Parameter	盛蕾期 Full squaring stage				开花期 Blooming stage			
	最高值 Max	最低值 Min	平均值 Mean	CV (%)	最高值 Max	最低值 Min	平均值 Mean	CV (%)
叶绿素密度 Chlorophyll density($g\ m^{-2}$)	2.26	1.24	1.67	19.0	3.37	1.95	2.53	19.0
氮积累量 Leaf nitrogen accumulation($g\ m^{-2}$)	7.96	4.74	5.61	18.0	11.1	6.21	8.61	18.0
参数 Parameter	盛铃期 Full boll stage				吐絮期 Boll opening stage			
	最高值 Max	最低值 Min	平均值 Mean	CV (%)	最高值 Max	最低值 Min	平均值 Mean	CV (%)
叶绿素密度 Chlorophyll density($g\ m^{-2}$)	3.42	1.83	2.73	20.0	2.22	0.86	1.45	36.0
氮积累量 Leaf nitrogen accumulation($g\ m^{-2}$)	11.1	7.26	9.19	16.0	9.36	3.89	5.97	39.0

2.2 棉花冠层叶绿素密度和叶片氮积累量的相关性分析

叶绿素密度是反映作物冠层光合生产能力,预测作物产量的重要参量,它不仅包含了单个植株叶片叶绿素含量的信息,还包含了作物冠层群体鲜生物量的信息,是作物氮素亏缺的指示器^[17],可以稳定地监测作物冠层的真实生长状况^[5,8]。

为了建立冠层叶绿素的诊断模型间接监测冠层氮素营养状况,将试验1和试验2测试的棉花各关键生育期冠层叶绿素密度和氮素积累量共94对数

据分为两组,一组作为建模样本,另一组作为检验样本,以便通过建模样本的CH.D与LNA的回归模型,预测检验样本的LNA。由图2可知,建模样本的CH.D和LNA的线性相关性达1%极显著水平($r = 0.9281^{**}$, $n = 47$),表明棉花冠层的叶绿素密度与氮素积累量具有极好的相关性。

2.3 棉花冠层反射光谱及其微分光谱与冠层叶绿素密度、叶片氮积累量的相关分析

浦瑞良等认为,采用逐步回归的分析方法,可以确定对于某种化学成分重要的波长位置,并说明这

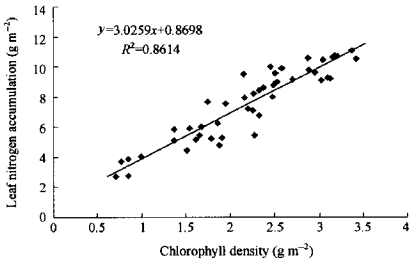


图2 棉花冠层叶片叶绿素密度和氮积累量的相关关系
Fig.2 Correlation between leaf chlorophyll density and leaf nitrogen accumulation of cotton canopy

种波段值和化学成分浓度有较好的相关性,进一步用这些确定的波长位置(波段值)来估计某种化学成分浓度^[9]。

用棉花建模样本的反射光谱数据,分别与 CH.D 和 LNA 进行逐步回归相关分析,确定冠层 CH.D 和 LNA 的敏感波段,分别发生在 762 nm 和 763 nm 波段 ($r_{CH.D} = 0.8845^{**}$ 和 $r_{LNA} = 0.7870^{**}$, $n = 47$), 相关系数的高平台分别发生在 762 ~ 1 347 nm 和 763 ~ 1 353 nm 波段处。图 3 显示的是反射光谱数据与 CH.D 相关关系的变化规律曲线。

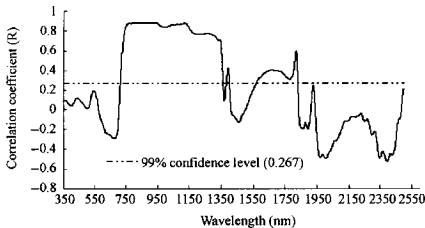


图3 棉花冠层反射光谱与叶绿素密度的相关分析
Fig.3 Correlation analysis between the reflectance spectral data and chlorophyll density of cotton canopy leaves

有研究表明,微分光谱独立于土壤背景,能更好地获取信息,监测冠层的叶绿素含量^[10]。刘伟东^[8]等研究水稻,证明群体微分光谱数据能够改善与 LAI、CH.D 之间的相关性,吴长山等^[3]通过微分光谱数据与叶绿素密度的相关分析,提取了与早播稻、晚播稻和玉米群体叶绿素密度高相关的特征波段,建立了一阶微分光谱与叶绿素密度的线性相关方程。将棉花建模样本的一阶微分光谱数据分别与 CH.D 和 LNA 进行逐步相关性分析,相关性最高的

敏感波段均在 750 nm 处,最大相关系数 ($r_{CH.D} = 0.9098^{**}$ 和 $r_{LNA} = 0.9164^{**}$, $n = 47$) 均达到 1% 的极显著检验水平。因此,750 nm 波段可以作为棉花生育期冠层 CH.D 和 LNA 的光谱特征波段,表明微分光谱数据有利于精确查找、定位与冠层 CH.D 和 LNA 的相关性显著的敏感光谱波段,比反射光谱能更好地监测棉花的生长与营养状况。图 4 为一阶微分光谱数据与叶绿素密度相关关系的变化规律。

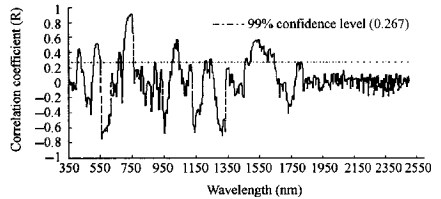


图4 棉花冠层一阶微分光谱与叶绿素密度的相关分析
Fig.4 Correlation analysis between the first derivative spectral data and chlorophyll density of cotton canopy leaves

2.4 基于微分光谱估算冠层叶绿素密度和氮积累量的研究

利用棉花建模样本的一阶微分光谱 750 nm 波段数值与冠层叶绿素密度进行线性相关分析,相关系数达到 1% 极显著检验水平 ($r = 0.9002^{**}$, $n = 47$) (图 5)。

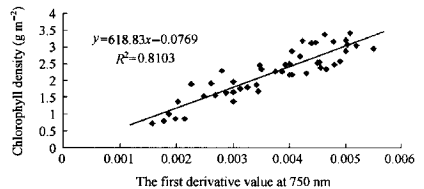


图5 棉花建模样本冠层 750 nm 波段一阶微分光谱值的数值与叶绿素密度的相关分析
Fig.5 Correlation between the first derivative spectra at 750 nm and chlorophyll density of canopy leaves of cotton modeling samples

根据图 5 的线性相关方程,用 47 个棉花检验样本的 750 nm 一阶微分光谱数值计算 CH.D,将 CH.D 作为自变量 (x) 带入图 2 的线性回归方程,进而估算 47 个检验样本的棉花冠层 LNA,表明检验样本的棉花冠层 LNA 的实测值与估测值的线性相关达 1% 的极显著水平 ($r = 0.8982^{**}$, $n = 94$), RMSE 为 1.0155,相对误差为 0.138,模型方程的估算精度为

86.2% (图6)。试验表明,棉花冠层一阶微分光谱估测的棉花冠层叶绿素密度可以间接用于估算棉花冠层的氮积累量。

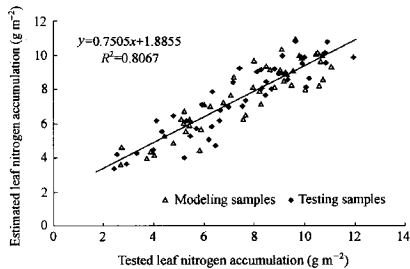


图6 棉花实测叶片氮积累量与估测叶片氮积累量的相关分析
Fig.6 Correlation between the tested nitrogen accumulation and estimated nitrogen accumulation of cotton canopy leaves

3 讨论

基于光谱多元统计分析技术,Johnson等报道,微分光谱752 nm波段可以分别解释俄勒冈州森林冠层LAI、TN和叶绿素含量(CHL.C)参量的81%、76%和67%^[20];Yoder等研究枫树冠层光谱与CH.C、TN相关性达到极显著的波段集中在730~750 nm之间^[3];浦瑞良和宫鹏指出,一阶微分光谱723 nm波段的数值和CH.C的最大相关系数为0.85,能解释湿地松人工林间的叶绿素浓度方差的73%^[9];吴长山等分析了早播稻、晚播稻和玉米的不同季节的CH.D与一阶微分光谱数据的相关性,表明在720~770 nm波段数值与CH.D的相关拟合度达到0.89,建立了762 nm导数光谱数值与CH.D的线性方程,模型估计精度为80.6%^[5]。上述研究表明,光谱多元统计分析技术是一种预测精度较高的光谱分析方法。

以往,利用高光谱数据提取作物冠层营养状况的研究,要么注重高光谱数据与叶绿素密度的研究^[5,7,8,14-15],要么注重高光谱数据与作物氮积累量的研究^[2,6],将两者统一起来加以研究者甚少。本文利用新疆棉花高光谱数据,将叶绿素密度和叶片氮积累量联系起来加以研究,旨在探索了作物营养状况快速、便捷、有效的诊断方法。

高光谱分辨率遥感技术,可以实现对作物冠层快速、有效、非接触、非破坏的田间信息采集与处理,实时监测作物各生育时期的长势长相,今后,如能利

用高光谱遥感建立主要栽培农作物冠层生长期叶绿素密度、叶片氮积累量统一的定量提取模型,将对作物营养状况的精准监测,具有十分重要的意义。

4 结论

棉花冠层反射光谱及其一阶微分光谱与冠层CH.D相关性高的敏感波段分别为762 nm和750 nm,这与许多研究已证明的叶绿素敏感波段在红光区670~770 nm的结果,相一致^[5,9-10,14,18-19]。对于棉花冠层CH.D、LNA,反射光谱的相关性高的波段分别发生在762 nm和763 nm处;而一阶微分光谱数据与冠层CH.D、LNA相关性最高的敏感波段均发生在750 nm处,说明光谱微分技术消除了环境干扰和背景噪声,使提取的棉花营养状况的信息更加精确。

由于氮素主要存在于光合作用的色素蛋白和光合作用碳消耗循环相关的蛋白质中,叶绿素含量及其组分可反映棉花的氮素状况,棉花冠层CH.D和LNA呈极显著的正相关($r = 0.9281^{**}$, $n = 47$),两者生育期的变化趋势一致。因此,本研究将棉花CH.D和LNA联系起来,利用高光谱数据,建立了统一的线性模型方程,经检验,其估算精度达86.3%,实测值与估算值的 $RMSE = 1.0155$,相对误差为0.138。说明通过一阶微分光谱对棉花冠层CH.D差异的光谱响应,应用光谱多元统计分析技术,提取棉花冠层叶绿素密度信息,间接评价棉花冠层叶片氮积累量的状况,具有很好的应用潜力。

References

- [1] Pattey E, Strachan I B, Boisvert J B, Desjardins R L, McLaughlin N B. Detecting effects of nitrogen rate and weather on corn growth using micrometeorological and hyperspectral reflectance measurements. *Agric For Meteorol*, 2001, 108(2): 85-99
- [2] Hung T N, Byun W L. Assessment of rice leaf growth and nitrogen status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regress. *Eur J Agron*, 2006, 24(4): 349-356
- [3] Yoder B J, Pettigrew-Crosby R E. Predicting Nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400-2500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sens Environ*, 1995, 53(3): 199-221
- [4] Sullivan D G, Shaw J N, Mask P L, Rickman D, Luvali J, Wersinger J M. Evaluating corn nitrogen variability via remote-sensed data. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2004, 35(17/18): 2465-2483
- [5] Wu C-S(吴长山), Xiang Y-Q(项月琴), Zheng L-F(郑兰芬), Tong Q-X(童庆禧). Estimating chlorophyll density of crop canopies by using hyperspectral data. *J Remote Sens (遥感学报)*, 2000, 4(3): 228-232(in Chinese with English abstract)
- [6] Xue L-H(薛利红), Cao W-X(曹卫星), Luo W-H(罗卫红), Jiang D(姜东), Meng Y-L(孟亚利), Zhu Y(朱艳). Diagnosis of nitrogen status in rice leaves with the canopy spectral reflectance. *Sci Agric Sin (中国农业科学)*, 2003, 36(7): 807-812(in Chinese with English

- abstract)
- [7] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, Brown D C, McMurtey J E III. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sens Environ*, 2000, 74(2): 229-239
- [8] Liu W-D(刘伟东), Xiang Y-Q(项月琴), Zheng L-F(郑兰芬), Tong Q-X(童庆禧), Wu C-S(吴长山). Relationships between rice LAI, CH₂D and hyperspectra data. *J Remote Sens* (遥感学报), 2000, 4(4): 279-283(in Chinese with English abstract)
- [9] Pu R-L(浦瑞良), Gong P(宫鹏). Hyperspectral Remote Sensing and Its Application(高光谱及其应用). Beijing: Higher Education Press, 2000. pp 185-228(in Chinese)
- [10] Wang D-W(王登伟), Li S-K(李少昆), Tian Q-J(田庆久), Huang C-Y(黄春燕), Cao L-P(曹连莆), Xiao C-H(肖春华), Ma Y-Q(马亚琴), Yang X-J(杨新军). Estimating of main cultivation physiology parameters of cotton by using hyperspectral remote sensing. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2003, 36(7): 770-774(in Chinese with English abstract)
- [11] Niu Z(牛铮), Chen Y-H(陈永华), Sui H-Z(隋洪智), Zhang Q-Y(张庆贞), Zhao C-J(赵春江). Mechanism analysis of leaf biochemical concentration by high hyper remote sensing. *J Remote Sens* (遥感学报), 2000, 4(2): 125-129(in Chinese with English abstract)
- [12] Onisimo M, Andrew K S, Spike V W. Discriminating tropical grass (*Cenchrus ciliaris*) canopies grown under different nitrogen treatments using speccoradiometry. *ISPRS J Photogram Remote Sens*, 2003, 57(4): 263-272
- [13] Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen statue in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sens Environ*, 2003, 86(4): 542-553
- [14] Jago R A, Cutler M E J, Curran P J. Estimate canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra. *Remote Sens Environ*, 1999, 68(3): 217-224
- [15] Broge N H, Mortensen J V. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. *Remote Sens Environ*, 2002, 81(1): 45-57
- [16] 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 hyperspectral information feature of winter wheat under N stress condition. *Resour Sci*, 2003, 25(1): 86-93(in Chinese with English abstract)
- [17] Balasubramanian V, Morales A C, Cruz R T. On-farm adaptation of knowledge-intensive nitrogen management technologies for rice systems. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 1999, 53: 59-69
- [18] Zhao D L, Reddy K R, Kakani V G, Reddy V R. Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum. *Eur J Agron*, 2005, 22(4): 391-403
- [19] Zhang J-H(张金恒), Wang K(王珂), Wang R-C(王人潮). Study on hyperspectral remote sensing in estimate vegetation leaf chlorophyll content. *J Shanghai Jiaotong Univ* (Agric Sci) (上海交通大学学报·农业科学版), 2003, 21(1): 74-80(in Chinese with English abstract)
- [20] Lee F J, Hlavka C A, Peterson D L. Multivariate analysis of AVIRIS data for canopy biochemical estimation along the Oregon transect. *Remote Sens Environ*, 1994, 47(2): 216-230