

基于高光谱数据的棉花冠层 FPAR 和 LAI 的估算研究

赵鹏举, 王登伟*, 黄春燕, 马勤建

(石河子大学新疆兵团绿洲生态农业重点实验室/石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003)

摘要:通过非成像高光谱仪和光量子传感器, 获取了棉花 2 品种 4 水平种植密度冠层关键生育时期的反射光谱数据和光合有效辐射值; 利用光谱多元统计分析技术与微分处理, 分析表明, 反射光谱 813 nm (ρ_{813}) 和 758 nm (ρ_{758}) 处分别是光合有效辐射截获量 (FPAR) 和叶面积指数 (LAI) 的敏感波段。用反射率 ρ_{813} 和 ρ_{758} 分别与 FPAR 和 LAI 建立的线性相关模型方程估测 FPAR 和 LAI, 经检验, 它们的实测值与估测值之间均呈极显著的线性相关 ($r_{\text{FPAR}} = 0.7199^{**}$, $r_{\text{LAI}} = 0.6430^{**}$, $\alpha = 1\%$, $n = 70$), 模型方程的估算精度分别达 96.5%、81.7%; 而一阶微分光谱数据与 FPAR 在 350 ~ 2500 nm 波段范围相关不显著, 与 LAI 的最大相关发生在 734 nm 波段处。基于一阶微分光谱 ρ'_{734} 与棉花冠层 LAI 线性相关的模型方程, 估测 LAI, 实测值与估测值之间呈极显著的线性相关 ($r_{\text{LAI}} = 0.6947^{**}$, $\alpha = 1\%$, $n = 70$), 估算精度为 82.4%, 与反射光谱 758 nm 估测 LAI 的精度接近。结果表明, 棉花冠层光谱数据可以对光合有效辐射截获量 FPAR 和 LAI 进行实时、无损、动态、定量的估算。

关键词:棉花冠层; 高光谱; FPAR; LAI; 估算研究

中图分类号: S562.01 **文献标识码:** A

文章编号: 1002-7807(2009)05-0388-06

Estimating of Cotton Canopy Fraction of Photosynthetically Active Radiation and Leaf Area Index Based on Hyperspectral Remote Sensing Data

ZHAO Peng-ju, WANG Deng-wei*, HUANG Chun-yan, MA Qin-jian

(Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Bingtuan/ College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: Utilizing a quantum sensor and non-imaging hyperspectral spectrometer, 2 cotton cultivars 4 level densities planting, in north Xinjiang, multi-temporal canopy hyperspectral data and photosynthetically active radiation data at cotton key growing stages were recorded, and multivariate regression analysis method was used to analyze the correlated relationship between reflectance and cotton canopy FPAR, LAI, respectively. The results showed that the maximum correlation coefficients between hyperspectral data and FPAR, LAI occurred at 813 nm, 758 nm wavelength, respectively; based on the linear regression equation between reflectance spectrum ρ_{813} and ρ_{758} and FPAR, LAI, respectively, their correlation coefficients were significant between measured FPAR and estimated FPAR, measured LAI and estimated LAI ($r_{\text{FPAR}} = 0.7199^{**}$, $r_{\text{LAI}} = 0.6430^{**}$, $\alpha = 1\%$, $n = 70$). The regression function accuracies were 96.5%, 81.7%, respectively. The maximum value of correlation coefficient between the first derivative spectral data and LAI occurred at 734 nm wavelength, but the correlation coefficient was not significant between the first derivative spectral data and FPAR from 350 nm to 2500 nm wavelength. According to the first derivative spectral value ρ'_{734} estimate for LAI, measured LAI and estimated LAI was significantly relevant ($r_{\text{LAI}} = 0.6947^{**}$, $\alpha = 1\%$, $n = 70$), the regression function accu-

收稿日期: 2008-10-27 作者简介: 赵鹏举(1982-), 男, 硕士; * 通讯作者, wdw_agr@shzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30460060)

racy was 82.4% and was nearly to the prediction precision of the LAI regression modeling at 758 nm wavelength reflectance. The study showed that canopy hyperspectral data can be used for real-time, nondestructive and quantitative estimate of FPAR, LAI.

Key words: cotton canopy; hyperspectral; FPAR; LAI; estimating

遥感技术是监测作物生长状况和进行农业持续发展的有效方法^[1],也是未来精准农业技术体系获取农田数据的主要来源^[2]。它不仅能对目标成像,又能测量目标物的波谱特性。而绿色作物光谱曲线都具有明显的“峰”和“谷”的独特特征,这都与其生长发育阶段、健康状况和物候现象等密切相关^[3]。因此,通过探测绿色植物的精细光谱特征信息,建立绿色作物冠层特征参数的遥感模型,可以实时、快捷地反演作物群体动态生长状况的关键参量信息^[4-5],从而对作物进行无破坏的有效的长势监测。

吸收性光合有效辐射(APAR)是指植物冠层吸收的参与光合生物量累积的光合有效辐射部分,其光合有效辐射截获量(FPAR)为吸收性光合有效辐射(APAR)在光合有效辐射(PAR)中所占的比重,即 $FPAR = APAR / PAR$ 。光合有效辐射截获量(FPAR)和叶面积指数(LAI)是衡量作物生长状况的重要生物物理参数,尤其是作物绿叶面积的大小与作物的光能利用、生长状况、产量和品质形成密切相关。Monsi 等^[6-7]研究植物冠层截获的光概率 FPAR 与 LAI 存在函数关系。Eduardo^[8]研究两种豆科作物的 9 种植被指数与其 FPAR 存在很高的相关性,并估算了灌溉和非灌溉区豆类的吸收辐射函数 FPAR。王培娟等^[9]对冬小麦的 FPAR、LAI 与各植被指数之间的关系进行了研究;Yang 等^[5,10]研究了玉米光谱数据与 FPAR 的相关关系,认为玉米一阶微分光谱数据和植被指数比反射光谱能更有效地估测 FPAR。朴世龙等^[11]研究认为光合有效辐射的吸收比例取决于植被类型和植被覆盖状况。Roujean 等^[12]研究发现光合有效辐射吸收系数与叶面积指数和多种植被指数(VIs)之间存在着很好的相关关系。张佳华等^[13]分析了归一化植被指数(NDVI)、吸收光合有效辐射(APAR)、叶面积指数(LAI)、净光合速率(P_n)等各参数之间的关系,认为 LAI 与 NDVI 及 APAR 均存在负指数相关,NDVI 与 APAR 和 P_n 呈正相关关系,由此可以建立 LAI、NDVI 及 APAR 等为主要参量的遥感生物量估测机理模型。但目前利用光谱数据

对光合有效辐射的研究主要集中在禾本科、豆类等作物上^[7-9,14-15],很少系统地研究分析棉花光谱数据与 FPAR 之间的关系。因此本文采用逐步回归的统计分析方法,建立新疆棉花(2 品种 4 种植密度)的多时相的高光谱数据与棉花 FPAR 和 LAI 二者间的相关关系,以便为更加精确地遥感估算棉花 FPAR 和 LAI 参数,提高棉花冠层光能利用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于 2006—2007 年在新疆石河子大学农学院田间试验站(44°20'N,88°3'E)进行。种植面积 0.13 hm²,小区面积 200 m²。土壤为壤土,肥力中等。采用宽膜一膜 4 行,宽窄行配置 30 cm + 60 cm + 30 cm 种植,4 月 26 日膜上点播,膜下滴灌,重复 3 次。根据棉花各生育期需水、肥特性,将水分和氮肥按比例分次施入。全生育期化控 4 次,7 月 17 日打顶,其余管理同大田。

试验采用裂区设计,品种为主区,密度为副区。供试棉花品种为新陆早 13 号、33 号。4 水平种植密度分别为 21 万株·hm⁻²(密度 1, D₁ 表示)、24 万株·hm⁻²(密度 2, D₂ 表示)、27 万株·hm⁻²(密度 3, D₃ 表示)和 30 万株·hm⁻²(密度 4, D₄ 表示)。用 D₁-13、D₁-33、D₂-13、D₂-33、D₃-13、D₃-33、D₄-13、D₄-33 表示新陆早 13 号、33 号的 4 水平种植密度的各处理。利用棉花 2 个品种的 4 种植密度、不同生育时期 FPAR 和 LAI 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 测定方法

1.2.1 光谱数据测定。采用美国 ASD Fieldspec FR 2500 型野外光谱辐射仪,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。在晴天 11:30—14:00,选择具有代表性的、均匀无病虫害的样本点,分别在棉花的盛花期(7 月 20 日)、花铃期(7 月 30 日)、盛铃期(8 月 10 日)、盛铃末期(8 月 24 日)和初絮期(9 月 4 日)进行 5 次光谱测定。

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 棉花光合有效辐射(PAR, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)数据的测定。与光谱测定同步,在棉花光谱测量样本区,用美国 Li-cor 公司的 LI-190SA 线性光量子传感器于当地时间 8:00—20:00 点每 2 h 观测 1 次,分别测定棉花各处理冠层上方 0.15 m 左右和冠层宽行、窄行垂直于宽窄行位置地表面的光合有效辐射,求其平均值,作为透过冠层到达地表的光合有效辐射,然后分别计算 7 个时段的光合有效辐射截获量并求平均值。每次测定时将探棒感应部分的两端对准行间中央,棒中点对准棉行上方,使水平球尽量居于水平泡的中心,保证线性光量子传感器水平。

1.2.3 叶面积指数的测定。于光谱测定的当日傍晚在没有直射光时,在棉花光谱测量样本区,采用美国 Li-cor 公司生产的 LAI-2000 冠层分析仪测定。每次观测时,先将探头放置于冠层上方,保持探头上水平泡水平,按下测定按钮,听到两声蜂鸣后将探头放入棉花群体内地面上,仍保持水平,按下测定按钮,听到两声蜂鸣声后再选择冠层内地面不同位置测量,重复测量 5 次,然后仪器自动测定出群体叶面积系数 LAI。

1.3 光谱分析技术及算法

1.3.1 光谱微分技术。一阶微分光谱是指对原始光谱反射率求一阶导数得到的微分光谱。光谱微分技术可以去除部分线性和接近线性的背景、噪声等光谱对目标光谱的影响。一阶微分光谱的近似计算方法如下:

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

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^[3]。

1.3.2 光合有效辐射截获量(FPAR)的计算。每次测定 8:00—20:00 点七个时段棉花冠层上方 0.15 m 的光合有效辐射值的 PAR_c 和距地表面的光合有效辐射 PAR_g 值,通过下式计算各时段的 FPAR,然后平均各时段的 FPAR 作为该处理的冠层光合有效辐射截获量。

$$FPAR = \frac{PAR_c - PAR_g}{PAR_c} \quad (2)$$

1.3.3 预测的均方根差(RMSE)。计算公式:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (3)$$

相对误差 $RE = \frac{RMSE}{\bar{X}}$, 估算精度 = 1 - RE。

式(3)中: y_i 和 \hat{y}_i 分别为实测值和估计值, n 为样本数(包括试验样本和检验样本), \bar{X} 为样本变量的平均值。

2 结果与分析

2.1 棉花冠层反射光谱与冠层 FPAR、LAI 的相关分析

利用棉花冠层反射光谱及其一阶微分光谱分别与冠层 FPAR 和 LAI 进行逐步相关性分析,结果表明棉花冠层反射光谱与 FPAR 和 LAI 的相关曲线波形相似(图 1、图 2),确定与冠层 FPAR 和 LAI 的相关最大的波段,分别发生在 813 nm 和 758 nm 处 ($r_{\text{FPAR}} = 0.7199^{**}$, $n = 78$, $r_{\text{LAI}} = 0.6430^{**}$, $n = 70$),相关的高平台分别在 708~1366 nm 波段和 712~1364 nm 波段范围。而棉花冠层一阶微分光谱分别与其冠层 FPAR 和 LAI 的逐步相关,结果显示棉花冠层一阶微分光谱与冠层 FPAR 在 350~2500 nm 波段范围内的相关性较低,均没有达到显著相关,不如反射光谱与冠层 FPAR 的相关性。而一阶微分光谱与 LAI 达到 1% 极显著检验水平的最大正相关性波段在 734 nm,最大负相关波段在 601 nm ($r_{734} = 0.6944^{**}$, $r_{601} = -0.6366^{**}$, $n = 70$)。508~549 nm 波段、697~755 nm 波段、1466~1659 nm 波段为一阶微分光谱与 LAI 达 1% 极显著的正相关区域,553~633 nm 波段、833~846 nm 波段、1269~1345 nm 波段和 1711~1774 nm 波段为一阶微分光谱与 LAI 达 1% 极显著的负相关区域(图 2)。图 1、图 2 分别为反射光谱和一阶微分光谱数据与 FPAR 及 LAI 的相关关系变化规律曲线。

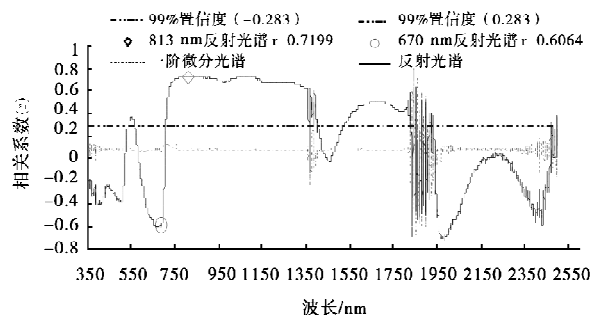


图 1 棉花冠层反射光谱和一阶微分光谱与光合有效辐射分量 FPAR 的相关分析

Fig. 1 Correlation analysis between the reflectance, its first derivation spectral data and the fractional interception of photosynthetically active radiation FPAR of cotton canopy

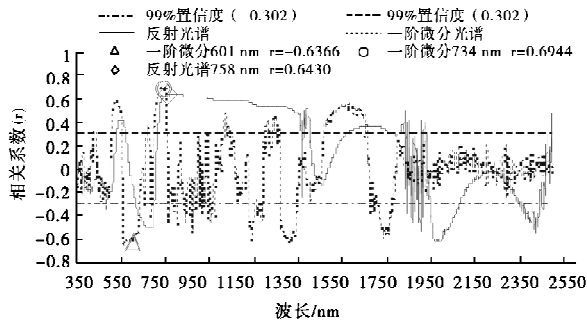


图 2 棉花冠层反射光谱和一阶微分光谱与叶面积指数的相关分析

Fig. 2 Correlation analysis between the reflectance, the first derivation spectral data and leaf area index of cotton canopy

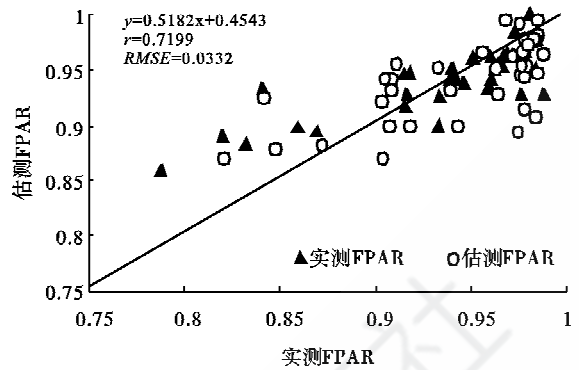


图 3 棉花冠层实测 FPAR 和估测 FPAR 的相关关系

Fig. 3 Correlation analysis between measured FPAR and estimated FPAR in cotton canopy

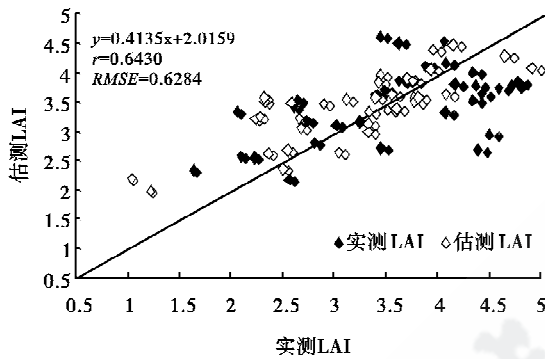


图 4 棉花 758 nm 反射率与 LAI 相关估测的 LAI 与实测 LAI 的相关分析

Fig. 4 The correlation relationship between measured leaf area index and estimated leaf area index from the reflectance value at 758 nm and LAI in cotton canopy

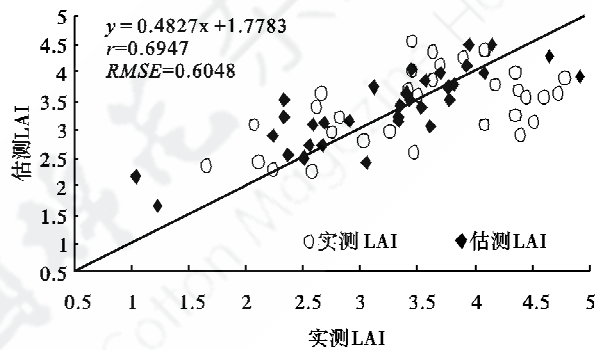


图 5 棉花 734 nm 一阶微分光谱值与 LAI 相关估测的 LAI 与实测 LAI 的相关分析

Fig. 5 The correlation relationship between measured leaf area index and estimated leaf area index from the derivative value at 734 nm and LAI model in cotton canopy

2.2 基于棉花冠层反射光谱估算棉花冠层 FPAR、LAI 的研究

根据图 1 棉花冠层反射光谱与冠层 FPAR 的逐步回归,确定反射光谱与冠层 FPAR 相关最大的波段在 813 nm 处,利用 813 nm 波段的反射率 ρ_{813} 与 FPAR 的线性相关模型方程 $y = 0.3837 \cdot \rho_{813} + 0.7288$ (x 为 ρ_{813} , y 为 FPAR),对冠层 FPAR 进行估算,实测的 FPAR(x)和 813 nm 波段的反射率估算 FPAR(y)的相关系数为 $r = 0.7199^{**}$ ($n = 78$,图 3), $RMSE = 0.0332$,相对误差为 0.0352,估测精度为 96.5%。同样图 2 确定的棉花冠层反射光谱与冠层 LAI 相关最大的波段在 758 nm 处,根据 758 nm 波段的反射率 ρ_{758} 与 LAI 的线性相关模型方程 $y = 6.8834 \cdot x - 0.1768$ (x 为 ρ_{758} , y 为 LAI),对冠层 LAI 进行估算,表明实测的 LAI 和 758 nm 波段的反射率估算 LAI 的相关系数 $r = 0.6430^{**}$ ($n = 70$,图 4), $RMSE = 0.6284$,相对误差为 0.1828,估测精度

为 81.7%。

上述表明,与棉花冠层 FPAR 相关最大的 813 nm 波段的反射率估算 FPAR 的精度高于与棉花冠层 LAI 相关最大的 758 nm 波段的反射率估算 LAI 的精度。

2.3 基于棉花冠层一阶微分光谱估算棉花冠层 LAI 的研究

棉花冠层一阶微分光谱与冠层 FPAR 在 350~2500 nm 波段范围,除在大气窗 1522~1851 nm 波段由于干扰呈极显著相关外,在其它的波段范围均没有达到显著相关,因而利用一阶微分光谱估算棉花的光合有效辐射截获量 (FPAR)效果不理想。而棉花冠层一阶微分光谱数值与 LAI 相关最大的波段在 734 nm 处,利用 734 nm 波段的一阶微分光谱值 ρ'_{734} 与 LAI 的线性相关模型方程 $y = 343.97 \cdot \rho'_{734} + 0.5203$ (x 为 ρ'_{734} , y 为 LAI),对冠层 LAI 进行估算,经检验,实测 LAI(x)与估算 LAI(y)之间的相关系数 $r =$

0.6947** ($n=70$,图5),RMSE=0.6048,模型方程的估测精度为82.4%。相比较棉花冠层一阶微分光谱734 nm波段的数值估算的LAI与棉花冠层反射光谱758 nm波段的反射率估算LAI的精度接近。

3 讨论与结论

棉花冠层反射光谱与冠层FPAR、LAI相关性最高的敏感波段分别在近红外813 nm和758 nm处,利用棉花冠层反射光谱 ρ_{813} 的数值对FPAR进行估算,估测精度为96.5%,较棉花冠层758 nm波段反射率估测LAI的81.7%,精度高。表明棉花冠层反射光谱与棉花群体FPAR和LAI密切相关,而一阶微分光谱与冠层FPAR在350~2500 nm范围无达到极显著相关性的波段,其相关性不如反射光谱与冠层FPAR的。因此,利用一阶微分光谱不能较好地估测FPAR,与Yang Fei等^[10]研究玉米一阶微分光谱数据比反射光谱能更有效地估测FPAR的结论不一致。而反射光谱和一阶微分光谱与冠层LAI相关最大的波段分别发生在近红外758 nm和734 nm处,它们的估算精度分别为82.4%、81.7%,估测LAI的精度接近。采用高光谱数据对作物叶面积指数(LAI)的研究较多,而对FPAR的研究主要在禾本科、豆类等作物上,多采用光谱植被指数^[7-10,14-15],但对棉花FPAR的高光谱遥感研究鲜有报道。因而本文应用光谱多元统计分析技术,确立了敏感波段对棉花冠层光合有效辐射截获量FPAR和群体LAI进行了遥感估算研究,对于评价棉花的生长状况,为探索作物生长监测的快速、便捷、有效的诊断方法提供了科学依据。

参考文献:

- [1] PRASAD A K, Chai L, Singh R P, et al. Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2006(8): 26-33.
- [2] 郑兰芬,王晋年. 成像光谱遥感技术及其图像光谱信息提取的分析研究[J]. *遥感学报*, 1992, 7(1): 49-58.
ZHENG Lan-fen, Wang Jin-nian. A study on imaging spectrometry and its extraction of image spectral information[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1992, 7(1): 49-58.
- [3] 浦瑞良,官鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 185-228.
PU Rui-liang, Gong Peng. *Hyperspectral remote sensing and its application* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 185-228.
- [4] PATTEY E, Strachan I B, Boisvert J B, et al. Detecting effects of nitrogen rate and weather on corn growth using micrometeorological and hyperspectral reflectance measurements [J]. *Agric For Meteorol*, 2001, 108(2): 85-99.
- [5] HUNG T N, Byun W L. Assessment of rice leaf growth and nitrogen status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regress [J]. *Eur J Agron*, 2006, 24(4): 349-356.
- [6] MONSI M, Saeki T. The light factor in plant communities and its significance for dry matter production [J]. *Japanese Journal of Botany*, 1953, 14: 22-52.
- [7] CASANOVA D, Epema G F, Goudriaan J. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI [J]. *Field Crops Research*, 1998, 55(1-2): 83-92.
- [8] EDUARDO R, Jose R C, Minguez M I. Estimating FAPAR from nine vegetation indices for irrigated and nonirrigated Faba bean and semileafless Pea canopies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1): 87-100.
- [9] 王培娟,朱启疆,吴门新,等. 冬小麦冠层的FAPAR、LAI、VIs之间关系的研究 [J]. *遥感信息*, 2003(3): 19-22.
WANG Pei-juan, Zhu Qi-jiang, Wu Men-xin, et al. Research on the relationship among FAPAR, LAI, VIs in the winter wheat canopy [J]. *Remote Sensing Information*, 2003(3): 19-22.
- [10] YANG Fei, Zhang Bi, Song Kai-shan, et al. Hyperspectral estimation of corn fraction of photosynthetically active radiation [J]. *Agricultural Sci in China*, 2007, 6(10): 1173-1181.
- [11] 朴世龙,方精云,郭庆华. 利用CASA模型估算我国植被净第一性生产力 [J]. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 603-608.
PIAO Shi-long, Fang Jing-yun, Guo Qing-hua. Application of CASA Model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity [J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2001, 25(5): 603-608.
- [12] ROUJEAN J L, Breon F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(3): 375-384.

- [13] 张佳华,符淙斌. 生物量估测模型中遥感信息与植被光合参数的关系研究[J]. 测绘学报, 1999, 28(2): 128-132.
ZHANG Jia-hua, Fu Cong-bin. A study on relationships between remote sensing information and plant photosynthetic parameters in estimating biomass model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28(2): 128-132.
- [14] 金仲辉,张建军. 由光谱反射率估算玉米植冠的 APAR [J]. 北京农业大学学报, 1994, 20(1): 47-51.
JIN Zhong-hui, Zhang Jian-jun. Estimation of APAR from spectral reflectance in corn canopies[J]. Acta Agriculturae Universitatis Pekingensis, 1994, 20(1): 47-51.
- [15] 金仲辉,黄新寿. 由光谱植被指数估算小麦截取光合有效辐射的数量[J]. 遥感技术与应用, 1994, 9(2): 13-19.
JIN Zhong-hui, Huang Xin-shou. Intercept photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance in wheat [J]. Remote Sens Technology and Application, 1994, 9(2): 13-19.
- [16] 唐延林,王秀珍,李建龙,等. 棉花高光谱及其红边特征(II) [J]. 棉花学报, 2003, 15(4): 215-220.
TANG Yan-lin, Wang Xiu-zhen, Li Jian-long, et al. The hyperspectral and their red edge characteristics of cotton(II)[J]. Cotton Science, 2003, 15(4): 215-220.
- [17] 王登伟,黄春燕,张伟,等. 高光谱数据与棉花叶绿素含量和叶绿素密度的相关分析 [J]. 棉花学报, 2008, 20(5): 368-371.
WANG Deng-wei, Huang Chun-yan, Zhang Wei, et al. Relationships analysis between cotton chlorophyll content, chlorophyll density and hyperspectral data [J]. Cotton Science, 2008, 20(5): 368-371. ●

