

基于不同植被指数的棉花光合有效辐射吸收分量估算研究

金秀良¹, 李少昆^{1,2*}, 王克如^{1,2}, 肖春华¹, 王方永¹, 陈兵³, 陈江鲁¹, 吕银亮¹, 刁万英¹

(1. 新疆兵团绿洲生态农业重点开放实验室 / 石河子大学, 新疆 石河子 832003; 2. 中国农业科学院作物科学研究所 / 农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 北京 100081; 3. 新疆农垦科学院棉花研究所, 新疆 石河子 832003)

摘要:通过开展小区棉花密度和水分对比试验,分析不同密度和水分处理的棉花整个生育期光合有效辐射吸收分量(FPAR)与光谱反射率的相关关系,建立棉花 FPAR 光谱估算模型。结果表明,棉花 FPAR 与选取的所有植被指数均呈极显著相关,其中绿度植被指数(GREENNDVI)和反射率比值(GMI)与 FPAR 的相关性最好,相关系数(r)分别为 0.794 和 0.765。分别用 GREENNDVI 和 GMI 建立棉花 FPAR 的估算模型,其决定系数(r^2)分别为 0.657 和 0.633,均方根误差(RMSE)分别为 0.089 和 0.093。研究表明,利用光谱特征参数可以有效地估算棉花整个生育期的 FPAR。

关键词:棉花;光合有效辐射吸收分量;植被指数;估算模型

中图分类号:S562.127 **文献标志码:**A

文章编号:1002-7807(2011)05-0447-07

Estimating Cotton FPAR Based on the Different Vegetation Indexes

JIN Xiu-liang^{1,2}, LI Shao-kun^{1,2*}, WANG Ke-ru^{1,2}, XIAO Chun-hua^{1,2}, WANG Fang-yong^{1,2}, CHEN bing^{1,2,3}, CHEN Jiang-lu^{1,2}, LÜ Yin-liang^{1,2}, DIAO Wan-ying^{1,2}

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Construction Crops, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. The Chinese Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Crop Physiology and Production Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 3. Institute of Cotton, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: Two field experiments were conducted with different densities and waters, the relationship was analyzed between spectral reflectance and the fraction absorption of photosynthetically active radiation(FPAR), and the estimating models were established for FPAR in the whole growth stages of cotton. The results indicated that it was significant correlations among the FPAR with all the vegetation indexes, the green normalized difference vegetation index(GREENNDVI) and the reflectance ratio (GMI) was better, theirs correlations coefficient (r) were 0.794 and 0.765, respectively, the estimated models of FPAR were established, and the determination coefficients (r^2) were 0.657 and 0.633, the root mean square errors (RMSE) were 0.089 and 0.093, respectively. The results suggested that the FPAR can be effectively estimate by spectral parameters during growth stages of cotton.

Key words: cotton; fraction of absorbed photosynthetically active radiation(FPAR); vegetation index; estimating models

光合有效辐射吸收分量(Fraction of absorbed photosynthetically active radiation, FPAR) 是植被水分、能量及碳循环平衡的重要检测指标^[1],它表示了植被冠层能量的吸收能力,是描述植被结构以及与之相关的物质与能量交换过程的基本生理变量。因此,FPAR 与作物产量更有直接的关系,也是大量作物生长模型的基础,利用该参数可

以实现作物产量的预测^[2]。国际上主要通过辐射传输模型和植被指数经验模型进行植被 FPAR 的估算。目前国内外关于 FPAR 的有关研究多集中在其与各植被指数之间的关系方面^[3-8]。Daughtry 等^[9]对玉米和大豆冠层光谱研究表明,FPAR 与植被指数呈显著的指数关系。Goward 等^[9]利用 SAIL 模型研究了植被指数和 FPAR 的关系

收稿日期:2011-02-14

作者简介:金秀良,(1985-),男,硕士,jinxiuxiuliang@126.com;* 通讯联系人,lishk@mail.caas.net.cn

基金项目:国家自然科学基金(30860139)、国家科技支撑项目(2007BAH12B02)、国家“863”计划(2006AA10A302) 共同资助

后认为,在太阳天顶角小于 60° 和叶面积指数(Leaf area index, LAI)为 $0.05\sim 2.00$ 范围内时,FPAR与归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)间呈显著的线性相关。金钟辉等^[10]利用 Hipps 等通过小麦抽穗前后的冠层叶面积指数(LAI)与光合有效辐射吸收分量(FPAR)线性方程的方法^[11],估测了小麦的 FPAR,结果表明垂直植被指数(Perpendicular vegetation index, PVI)与 FPAR 存在最好的相关关系。Friedl 等^[12]通过仿真模型研究表明,植被的 FPAR 与 NDVI 呈近线性相关。杨飞等^[13]对玉米和大豆冠层的研究表明 FPAR 与植被指数呈对数关系。光合有效辐射吸收分量主要是叶片用于光合作用的可见光部分,因此光合有效辐射吸收分量与光谱反射率之间有较为直接的关系。综上所述,前人主要是对小麦、玉米、大豆等作物 FPAR 与植被指数关系的研究,而对于与此类作物生理生态有明显差异的棉花研究较少。棉花作为新疆最主要的经济作物,具有区别于其它作物的冠层结构特性,其 FPAR 的估算模型比较复杂。本文通过遥感方法建立棉花 FPAR 估算模型,实时准确获取棉花 FPAR 信息。

1 材料与与方法

1.1 材料与实验设计

试验于 2009—2010 年在石河子大学农学实验站(N 44.3221° , E 86.0628°)进行。试验田土壤为灰漠土,质地为壤土,有机质含量 $19.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $1.17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $2.31\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $92.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $320\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。供试棉花品种为新陆早 33 号(XLZ-33),采用 $15\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ 宽窄行种植,灌溉采用膜下滴灌。试验包括密度和水分 2 组独立试验。各 4 个处理,每个处理重复 3 次,小区面积为 300 m^2 。密度试验设 4 个处理,分别为 $7\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ (D_0)、 $14\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ (D_1)、 $21\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ (D_2)、 $28\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ (D_3);根据新疆棉花大田生产实际,水分试验设 4 个处理的分别为严重干旱(灌溉量为 $1500\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, W_0)、干旱(灌溉量 $3000\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, W_1)、正常灌溉(灌溉量为 $4500\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, W_2)和超量灌溉(灌溉量为 $10000\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, W_3)。用水表控制灌量,密

度试验和水分试验均滴灌出苗水,灌水量为 $120\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。剩下的水量按时期分配:蕾期灌溉 2 次,占总灌量的 25%;花铃期灌溉 7 次,占总灌量的 60%;吐絮期灌溉 1 次,占生育期总灌量的 15%。其它管理措施按大田高产栽培模式进行。

1.2 光谱测试

分别在棉花的苗期(5月25日)、蕾期(6月19日)、花期(7月11日)、铃期(7月29日)、吐絮期(9月15日)进行光谱测定。光谱测定采用美国 ASD Fieldspec FR2500 型野外光谱辐射谱仪,光谱范围 $350\sim 2500\text{ nm}$,其 $350\sim 1000\text{ nm}$ 光谱区的分辨率为 1.4 nm , $1000\sim 2500\text{ nm}$ 为 2 nm ,光谱重采样间隔为 1 nm 。在晴朗无云、北京时间 $10:00\sim 14:00$,选择具代表性、生长均匀、无病虫害的植株进行光谱测定,测定前用白板标定仪器,测定时传感器探头向下,距冠层垂直高度 1.5 m ,传感器视场角为 25° 。每个样点采集 10 条光谱曲线,设定测量扫描时间为 0.2 s ,取其平均值作为该样点冠层的光谱数据。

1.3 光合有效辐射测试

用美国 LI-COR 公司生产的 LI-191SA 线性光量子传感器与光谱测定同步进行光合有效辐射测定,该仪器光量子感应面积为 $1\text{ m}\times 12.7\text{ mm}$,感应波长为 $400\sim 700\text{ nm}$,测量结果为感应面积范围内的空间光合有效辐射的平均值,输出单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

与光谱测定同一位置测量光合有效辐射 4 个分量:光合有效辐射冠层上入射(PARci)、反射量(PARcr)及冠层下入射(PARgi)、反射量(PAR-gr)。测量冠层上方分量时使线性光量子传感器距离冠层上方约 0.5 m ,测量冠层下方各分量时传感器放入冠层内距地面 0.15 m 左右,测量时保持传感器处于水平位置。

1.4 光合有效辐射分量的计算

作物光合作用吸收的主要是 $400\sim 700\text{ nm}$ 波长的辐射,同时考虑到 $700\sim 1350\text{ nm}$ 波长的近红外光谱对作物健康状态有较敏感响应,而光合作用吸收与植物的健康状态也有关,故本文选择 $350\sim 1350\text{ nm}$ 波段的反射率数据进行分析。光合有效辐射在传输过程中部分被植被冠层吸收,部分被直接反射和穿过冠层后被冠层反射

回大气,部分被土壤吸收。因此,植被吸收的部分 = 总光合有效辐射 - 被反射回大气的光合有效辐射 - 土壤吸收的光合有效辐射; 计算光合有效辐射吸收分量的公式为:

$$FPAR = [PAR_{ci} - PAR_{cr} - (PAR_{gi} - PAR_{gr})] / PAR_{ci} \quad (1)$$

式中, PAR_{ci} 为光合有效辐射冠层上方入射量, PAR_{cr} 为冠层反射光合有效辐射量, PAR_{gi} 为冠层透射光合有效辐射量, PAR_{gr} 为土壤反射光合有效辐射量。 $FPAR$ 的大小反映棉花群体的对光能截获的多少; 值越大说明对光能截获越多, 反之, 则小。

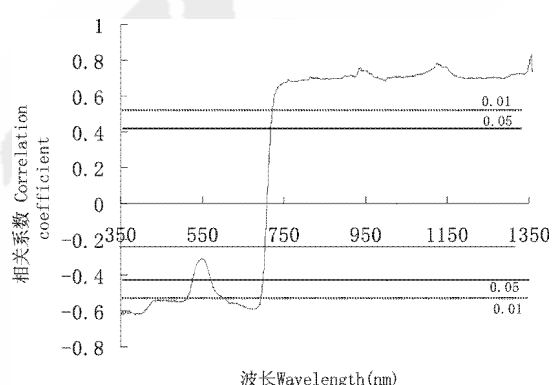
1.5 数据处理与分析方法

采用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 软件。

2 结果与分析

2.1 棉花 FPAR 的敏感波段及其光谱特征参量选择

本文选用棉花整个生育期数据 ($n=36$), 对不同密度和水分处理棉花 FPAR 与其光谱反射率的相关分析表明(图 1), 棉花 FPAR 与可见光波段反射率呈负相关, 在 550 nm 处的相关系数最小, 绝对值 0.3288; 与近红外波段反射率呈显著正相关, 750~1350 nm 的相关系数均高于 0.6884, 在 934 nm 处出现第一个相关系数峰值, 相关系数 0.7436, 在 1128 nm 处出现相关系数最大值 0.7778。



0.05 和 0.01 分别表示达 5% 和 1% 显著水平

5% and 1% is significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

图 1 棉花 FPAR 与反射率的相关关系分析

Fig. 1 Correlation between FPAR and reflectance of cotton

本文依据文献及与 FPAR 显著相关的波段选择了 14 个光谱特征参数(表 1), 分别为比值植被指数(Ratio vegetation index, RVI)、结构敏感色素指数(Structure insensitive pigment index, SIPI)、土壤调整比值植被指数 (Soil-adjusted vegetation index, SAVI)、反射率比值 (Reflectance ratio, GMI)、最优土壤调节植被指数 (Optimize soil atmosphere adjust vegetation index, OSAVI)、差值植被指数(Difference vegetation index, DVI)、NDVI、绿度植被指数 (Green normalized difference vegetation index, GREENNDVI)、吸收谷深度(Absorption valley depth, VD672)、转换叶绿素吸收反射指数 (Transfer chlorophyll absorbed reflectance index, TCARI)、叶绿素含量指数(Chlorophyll content index, CCII)、红边光谱比值植被指数(Red edge ratio vegetation index, VOG2)、1280 nm 处的高度(Height[1280])和 1190 nm 处的面积(Area [1190])。通过进一步分析这些参数与 FPAR 间的相关关系, 建立棉花冠层 FPAR 估算模型。

2.2 光谱特征参量与 FPAR 的相关性

对不同密度和水分处理的棉花 FPAR 与植被指数分别进行相关分析(表 2), 结果表明, FPAR 与所有植数相关均达显著水平, 其中与 SIPI, TCARI 和 CCII 呈极显著负相关, 其中与 CCII 的相关系数最大, 为 -0.7550。其余皆为正相关, 其中与 GREENNDVI 的相关系数最大, 为 0.794。从所有植被指数与 FPAR 的相关性看, GREENNDVI 和 GMI 与 FPAR 的相关系数最高, 分别为 0.794 和 0.765。说明用 GREENNDVI 和 GMI 能最好综合反映棉花 FPAR。

2.3 棉花 FPAR 的高光谱估测

用 2009 年 164 个样本的数据建立基于 GREENNDVI 和 GMI 的 FPAR 回归模型。结果表明(图 2), 模型的确定系数均达极显著水平, 即所建模型能够对 FPAR 进行估测。其中, 基于 GREENNDVI 的 FPAR 估算模型以指数形式估算效果最好, 模型的确定系数(r^2)为 0.6566, 标准误差为 0.089; 而基于 GMI 的 FPAR 估算模型以幂函数拟合效果最好, 模型确定系数 (r^2)为 0.6334, 标准误差为 0.093。

表 1 选取的 14 个植被指数及算法
Table 1 Fourteen vegetation indexes used in this paper

植被指数 Vegetation indexes	算法 Algorithms	参考文献 References
比值植被指数 RVI	$RVI=R_{890}/R_{670}$	Pearson et al (1) ^[14]
结构敏感色素指数 SIPI	$SIPI=(R_{800}-R_{445})/(R_{800}-R_{680})$	Penuelas et al (2) ^[15]
土壤调整比值植被指数 SAVI	$SARVI=MSS7/(MSS5+b/a)$	Lyon et al (3) ^[16]
反射率比值 GMI	$GMI=R_{750}/R_{550}$	Gitelson et al (4) ^[17]
最优土壤调节植被指数 OSAVI	$OSAVI=1.16 \times (R_{800}-R_{670}) / (R_{800}-R_{670}+0.16)$	Rondeaux et al (5) ^[18]
差值植被指数 DVI	$DVI=R_{890}-R_{670}$	Jordan (6) ^[19]
归一化差值植被指数 NDVI	$NDVI=(R_{890}-R_{670}) / (R_{890}+R_{670})$	Rouse et al (7) ^[20]
绿度植被指数 GREENNDVI	$GREENNDVI=(R_{750}-R_{550}) / (R_{750}+R_{550})$	Baret et al (8) ^[21]
吸收谷深度 VD672	$VD672=1-[R_C/R_{Si}+(R_{Ei}-R_{Si}) \times (\lambda_{Ci}-\lambda_{Si}) / (\lambda_{Ei}-\lambda_{Si})]$	Baret et al (9) ^[21]
转换叶绿素吸收反射指数 TCARI	$TCARI=3 \times [(R_{710}-R_{680})-0.2 \times (R_{700}-R_{560})(R_{710}/R_{680})]$	Daughtry et al (10) ^[22]
叶绿素含量指数 CCII	$CCII=(3 \times (R_{700}-0.2 \times (R_{700}-R_{550}) \times R_{700} / R_{670})) / (1.16 \times (R_{800}-R_{670}) / (R_{800}+R_{670}+0.16))$	Driss (11) ^[23]
红边光谱比值植被指数 VOG2	$VOG2=(R_{734}-R_{747}) / (R_{715}+R_{726})$	ZarcoTejada et al (12) ^[24]
1280 nm 处的高度 Height[1280]	$NPHi=1-\frac{(R_{Si}+(R_{Ei}-R_{Si}) \times (\lambda_{Ci}-\lambda_{Si}) / (\lambda_{Ei}-\lambda_{Si}))}{R_{Ci}}$	Baret et al (13) ^[21]
1190 nm 处的面积 Area[1190]	$V Areai=\int_{\lambda_{a}}^{\lambda_{b}} (R line(\lambda)-R(\lambda))d\lambda$	Baret et al (14) ^[21]

表 2 棉花 FPAR 与植被指数的相关性
Table 2 Correlation of cotton FPAR with the spectral indexes

植被指数 Vegetation indexes	模拟方程 Simulated equations	相关系数 Correlation coefficient(r)
RVI	$y = 0.2175x^{0.5159}$	0.625**
SIPI	$y = 0.9293x^{-8.9047}$	-0.547**
SAVI	$y = 0.9293x^{-8.9047}$	0.606**
GMI	$y = 0.1354x^{1.0055}$	0.765**
OSAVI	$y = 1.3553x^{1.7843}$	0.630**
DVI	$y = 1.4598x^{0.7672}$	0.497**
NDVI	$y = 1.2344x^{2.509}$	0.737**
GREENNDVI	$y = 0.0575e^{3.7381x}$	0.794**
VD672	$y = 0.8122e^{0.0682x}$	0.632**
TCARI	$y = 1.8403e^{-3.2872x}$	-0.695**
CCII	$y = 1.4977e^{-1.8209x}$	-0.755**
VOG2	$y = 0.0312e^{4.1304x}$	0.616**
Height[1280]	$y = 44.335x^{2.9839}$	0.773**
Area[1190]	$y = 0.0546x^{1.0251}$	0.729**

注:样本量为 164; ** 表示达 1%显著水平。Note: Volume=164; **, correlation coefficients significant at P=0.01.

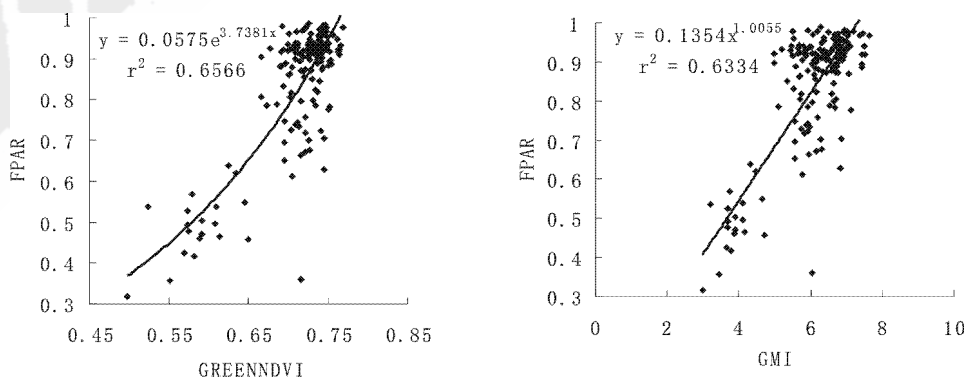


图 2 棉花 FPAR 与 GREENNDVI 和 GMI 的定量关系

Fig. 2 Quantitative relationships of the FPAR to GREENNDVI and GMI in cotton

利用 2010 年的 136 个样本对所建估算模型进行了精度检验,采用模型估算值与测定值间的均方根误差 (RMSE) 和相对误差 (RE) 进行模型估测精度的评价。结果表明(表 3),基于 GMI 的估测模型, RMSE 为 0.093, 即 GMI 每变化一个单位,引起 FPAR 的变化是 0.093;对 FPAR 估测的相对误差为 12.78%;基于 GREENNDVI 的模型的 RMSE 为 0.089, 对 FPAR 估测的相对误差为 11.29%。

表 3 棉花 FPAR 估测能力的检验(n=136)

植被指数 Vegetation indexes	GREENNDVI	GMI
r^2	0.6566	0.6334
RMSE	0.0887	0.0925
RE	0.1129	0.1278

3 结果与讨论

光合有效辐射吸收分量 (FPAR) 是生态系统生产力模型、作物生长模型、净初级生产力模型、大气模型、生物地理化学模型、生态模型、作物估产模型等的重要参数,因此大面积快速准确获取 FPAR 具有非常重要意义^[25-30]。由于植被指数能够在增强植被信息的同时,减少其它噪声的干扰,因此研究中大多选用各种植被指数来估算 FPAR 等生物物理参数。植被光合作用吸收的光合有效辐射主要集中在可见光部分,特别是红、蓝紫光波段吸收作用较强,致使此波段范围植被反射率较低,因此 FPAR 与光谱反射率有直接且紧密的联系。Eduardo 等^[31]用九种植被指数建立与 FPAR 之间的关系,用 80 组数据得出 SAVI2 与 FPAR 相关性最好 $r^2=0.806$; North^[32]研究用 NDVI 估测了 fAPAR 具有较好的相关性;杨飞等^[33]研究玉米表明以近、短波红外波段较以可见光、近红外波段计算植被指数估算 FPAR 效果好 ($r^2=0.895$)。本文研究结果与前人研究结果一致, GREENNDVI 和 GMI 与 FPAR 相关性较好,而本文的 r^2 比前人研究精度要低些,可能是由于研究的作物不同,不同作物冠层空间异质性等对 FPAR 变化有一定的影响;也可能是本研究建立模型样本数据比前人的多,导致 r^2 降低。杨晓华等^[34]研究水稻时用基于支持向量机 (SVM) 的水

稻叶面积指数高光谱估算模型研究,结果表明基于 TCARI/OSAVI 的 POLY 和 SVM 具有最高的估算精度,可以提高 LAI 估算的精度,由于 LAI 与 FPAR 之间有显著的线性关系, FPAR 与高植被指数也有线性或近线性关系。对于棉花而言,利用 SVM 算法是否可以提高 FPAR 的估算精度,该结论是否成立,还有待进一步讨论。

利用棉花群体光谱和光合有效辐射吸收分量的实测数据,综合前人研究进展,结合棉花光谱特征,构造了植被指数进行光合有效辐射吸收分量估算,经分析得出以下结论。

(1) 本文选取 14 个植被指数与 FPAR 均呈极显著相关,其中 GREENNDVI 和 GMI 与 FPAR 的相关系数最高,分别为 0.794 和 0.765。

(2) 利用植被指数 GREENNDVI 和 GMI 与 FPAR 建立回归模型 $y=0.0575e^{3.7381x}$ 和 $y=0.1354x^{1.0055}$ 可以较为准确地估算光合有效辐射吸收分量。

本实验在新疆地区,利用四个密度处理和四个水分处理对棉花的 FPAR 进行研究,结果仍需在在大田以及不同生态区条件下加以验证和完善。今后研究内容的重点是通过数学方法对植被指数算法的优化,提高对 FPAR 估测精度及卫星影像上的精度验证。

参考文献:

- [1] CHURKINA G, Running S W. Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global, terrestrial biomes[J]. *Ecosystems*, 1998, 1: 206-215.
- [2] 吴炳方, 曾源, 黄进良. 遥感提取植物生理参数 LAI/FPAR 的研究进展与应用[J]. *地球科学进展*, 2004(4): 585-590.
WU Bing-fang, Zeng Yuan, Huang Jin-liang. Overview of LAI/FPAR retrieval from remotely sensed data[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004(4): 585-590.
- [3] ASRAR G, Fuchs M, Kanemasu E T, et al. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat[J]. *Agronomy Journal*, 1984, 76: 300-306.
- [4] DANGHTRY C S, Gallo K P, Gowd S N, et al. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 39: 141-152.
- [5] PINTER P J. Solar angle independence in the relationship between absorbed PAR and remotely sensed data[J]. *Remote Sens-*

- ing of Environment, 1993, 46: 19-25.
- [6] 周晓东,朱启疆,王锦地,等. 夏玉米冠层内 PAR 截获及 FPAR 与 LAI 的关系[J]. 自然资源学报,2002,17(1):110-116.
ZHOU Xiao-dong, Zhu Qi-jiang, Wang Jin-di, et al. Interception of PAR,relationship between FPAR and LAI in summer maize canopy[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(1): 110-116.
- [7] 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 relationships among FAPAR,LAI and VIS in the winter wheat canopy[J]. Remote Sensing Information, 2003(3): 19-22.
- [8] 高彦华,陈良富,柳钦火,等. 叶绿素吸收的光合有效辐射比率的遥感估算模型研究[J]. 遥感学报,2006,10(5):798-803.
GAO Yan-hua, Chen Liang-fu, Liu Qin-huo, et al. Research on remote sensing model for frar absorbed by chlorophyll[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(5): 798-803.
- [9] GOWARD S N, Huemmrich K F. Vegetation canopy PAR absorptance and NADI: An assessment for ten tree species with the SAIL model[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 39: 119-140.
- [10] 金仲辉,黄新寿. 由光谱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 Science Technology and Application, 1994, 9 (2): 13-19.
- [11] HIPPS L E, Asrar G, Kanemasu E T. Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat [J]. Agricultural Meteorology, 1983, 28: 246-253.
- [12] FRIEDL M A, Davis F W, Michaelsen J, et al. Scaling and uncertainty in the relationship between the NDVI and land surface biophysical variables: An analysis using a scene simulation model and data from FIFE[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 54: 233-246.
- [13] 杨飞,张柏,宋开山,等. 玉米和大豆光合有效辐射吸收比例与植被指数和叶面积指数的关系[J]. 作物学报,2008,34(11):2046-2052.
YANG Fei, Zhang Bai, Song Kai-shan, et al. Relationship between fraction of photosynthetically active radiation and vegetation indices,leaf area index of corn and soybean[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(11): 2046-2052.
- [14] PEARSON R L, Miller D L. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie[C]. Proceedings of the English International Sysposium on Remote Sensing of Environment, 1972, 2: 1375-1381.
- [15] PENUELAS J, Baret F, Filella I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance[J]. Photosynthetica, 1995, 31: 221-230.
- [16] LYON J G, Yuan D, Lunetta R S,et al. A change detection experiment using vegetation indices[J]. Photo-grammetric Engineering & Remote Sensing, 1998, 64(2): 143-150.
- [17] GITELSON A A, Merzlyak M. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of asculus hippocastanum and acer platanoides leaves,spectral features and relation to chlorophyll estimation [J]. Journal Plant Physiology, 1994, 143: 286-292.
- [18] RONDEAUX G, Steven M, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55: 95-107.
- [19] JORDAN C F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor[J]. Ecology, 1969, 50: 663-666.
- [20] ROUSE J W,Haas R H,Schell J A,et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS[C]. Third Erts Symposium, 1973, 1: 309-317.
- [21] BARET E,and Guyot G.Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35: 161-173
- [22] DAUGHTRY C T,Walthall C L,Kim M S,et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(2): 229-239.
- [23] DRISS H,John R M,Nicoals T,et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2/3): 416-423.
- [24] ZARCO-TEJADA P J, Miller J R, Mohammed T L. Scaling-up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(7): 1491-1507.
- [25] SELLERS P J, Collatz G J. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. 1. Model formulation[J]. Journal Climate, 1996, 9: 676-705.
- [26] LOBELL, David B, Asner C B, et al. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties[J]. Agriculture, Ecosystems, and Environment, 2003(94): 205-220.
- [27] LIU J, Chen J M, Chen J, et al. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs [J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62: 158-175.
- [28] CRAMER W, Kicklighter D W, Bondeau A, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results[J]. Global Changing Biology, 1999, 5 (Supp.1): 1-5.
- [29] REICH P B, Turner D P, Bolstad P. An approach to spatially distributed modeling of net primary production (NPP) at landscape scales and its application in validation of EOS NPP prod-

- ucts[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70: 69-81.
- [30] 任建强, 陈仲新, 唐华俊, 等. 基于植物净初级生产力模型的区域冬小麦估产研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 111-117.
- REN Jian-qiang, Chen Zhong-xin, Tang Hua-jun, et al. Regional yield estimation for winter wheat base on net primary production model[J]. Transaction of the CSAE, 2006, 22(5): 111-117.
- [31] EDUARDO R, Jose R C, Ines M M. Estimating Fapar from nine vegetation indices for irrigated and nonirrigated faba bean and semileafless pea canopies[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66: 87-100.
- [32] NORTH P R J. Estimation of fAPAR, LAI and vegetation fractional cover from ATSR-2 imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 114-121.
- [33] 杨 飞, 张 柏, 刘志明, 等. 玉米冠层 FPAR 的高光谱遥感估算研究 - 基于 PCA 方法及近、短波红外波段[J]. 国土资源遥感, 2008, 78(4): 9-13.
- YANG-Fei, Zhang-Bai, Liu Zhi-Ming, et al. A study of corn FPAR estimation from hyperspectral data based on PCA approach and near-infrared shortwave bands [J]. Remote Sensing for Land&Resources, 2008, 78(4): 9-13.
- [34] 杨晓华, 黄敬峰, 王秀珍, 等. 基于支持向量机的水稻叶面积指数高光谱估算模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(8): 1837-1841.
- YANG Xiao-hua, Huang Jing-feng, Wang Xiu-zhen, et al. The estimation model of rice leaf area index using hyperspectral data based on support vector machine[J]. Spectroscopy and Spectral Analys, 2008, 28(8): 1837-1841. ●

中国棉花
China Cotton Magazine

