

农作物LAI和生物量的高光谱法测定^{*}

唐延林^{1,2}, 王秀珍³, 王福民¹, 王人潮¹

(1 浙江大学 农业遥感与信息技术应用研究所, 浙江 杭州 310029; 2 贵州大学 物理系, 贵州 贵阳 550025;

3 浙江省气象科学研究所, 浙江 杭州 310029)

[摘 要] 通过田间小区试验, 测定了水稻、玉米、棉花3种共6个品种作物冠层不同生育期的高光谱反射率及对应叶面积指数和地上生物量, 分析了其高光谱变量和红边参数与叶面积指数、地上生物量及叶重量的相关性。结果表明: 3种作物冠层高光谱反射率与其生育期有关, 其反射率最大值的比较结果是棉花> 玉米> 水稻。3种作物的叶面积指数、叶鲜重、叶干重与其冠层光谱变量 ρ_{990}/ρ_{550} , ρ_{800}/ρ_{550} , ρ_{750}/ρ_{550} , ρ_{800}/ρ_{680} 及冠层红边参数 λ_r , $D\lambda_r$ 之间均极显著相关, 但地上鲜生物量和地上干生物量与上述光谱变量和红边参数之间相关性较差, 说明可通过高光谱遥感方法估测水稻、玉米、棉花的叶面积指数、地上鲜生物量、叶鲜重和叶干重。

[关键词] 农作物; 高光谱反射率; 叶面积指数; 生物量; 相关分析

[中图分类号] S311

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)11-0100-05

通过监测农作物生育期内的光谱变化, 研究农作物的反射光谱与叶面积指数、地上生物量、叶鲜重、叶绿素和类胡萝卜素含量等农学参数之间的关系, 为作物遥感长势监测和遥感估产提供了依据^[1]。由于植被和叶片反射光谱在可见光范围内主要受植被色素(叶绿素和类胡萝卜素)和覆盖度的影响, 在近红外区域则主要受冠层和叶片结构、地上生物量、蛋白质、纤维素等的影响^[2], 因此, 可以用农作物的冠层反射光谱及其变量估算农作物的农学参数, 如叶面积指数LAI、地上生物量和叶重量。近年来, 随着高光谱分辨率遥感的应用, 使遥感可以在光谱维上展开, 能直接对地面作物进行微弱光谱差异的定量分析, 在植被遥感研究与应用中表现出强大的优势^[3]。在定量遥感中, 常常利用农作物冠层光谱的敏感波段来构建植被指数, 以及采用微分技术寻找某些关键波段(如“红边”、“绿峰”等^[4~6])的特征参数(如红边参数)来估测农作物的生物量、叶绿素含量和氮素营养状况等, 已经成为农作物长势监测和估产的一种重要手段^[7,8]。用棉花反射光谱数据估测其光合有效辐射、长势和叶绿素含量等^[9,10], 用玉米反射光谱数据估测其光合有效辐射系数、氮素状况等的报道较多^[11~13], 但同时利用冠层光谱特征和红边特征来研究水稻、玉米、棉花的叶面积指数、地上生物量等还少有报道。本研究结合水稻、玉米和棉花的

生长发育规律, 对其冠层高光谱反射率和生物物理参数进行测定, 分析叶面积指数、地上生物量与冠层光谱变量和红边参数的相关性, 为农作物遥感长势监测和估产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1.1.1 水稻 水稻品种为秀水110(记为S1)和协优9308(记为S2), 06-02播种, 06-25移栽。试验小区面积476m×468m, 株行距为0.13m×0.17m, 单本插, 4个重复, 随机排列。氮素设0, 120, 240 kg/hm² N 3个水平, 依次记为N₀, N₁, N₂。氮肥(尿素)分3次施入, 分别为基肥50%, 分蘖肥35%, 穗肥15%。另外, 施用过磷酸钙533.3 kg/hm²作基肥, 氯化钾300 kg/hm²作穗肥(等量分2次于孕穗始期和抽穗始期均匀施入)。

1.1.2 玉米 玉米品种为掖单13(记为Y1)和苏糯1号(记为Y2), 04-29直播。试验小区面积50m×364m, 实行宽窄行, 每小区4垄, 南北垄向, 垄间沟宽0.30m, 每垄两行, 株行距为0.28m×0.30m, 3个重复, 随机排列。1个肥料水平, 05-24施第1次肥料(尿素), 施氮量150 kg/hm²; 06-08施第2次肥料(尿素), 施氮量150 kg/hm², 另施芬兰产复合肥600 kg/hm²。

^{*} [收稿日期] 2003-09-10

[基金项目] 国家“863”资助项目(2002AA243011); 国家自然科学基金资助项目(40271078, 40171065)

[作者简介] 唐延林(1964-), 男, 湖南祁阳人, 教授, 博士, 主要从事农作物高光谱遥感研究。E-mail: tyl_zju@163.com

1.1.3 棉花 棉花品种为杂交棉湘杂 2 号(记为 M1)和普通棉苏棉 12(记为 M2), 04-29 直播。杂交棉 M1 试验小区面积为 $5.0\text{ m} \times 3.88\text{ m}$, 普通棉 M2 试验小区面积为 $5.0\text{ m} \times 3.7\text{ m}$, 实行垄间宽窄行, 垄内均匀行, 垄间沟宽 0.30 m 。M1 株行距 $0.42\text{ m} \times 0.80\text{ m}$, M2 株行距 $0.36\text{ m} \times 0.40\text{ m}$, 每品种 3 个重复, 随机排列, 每小区 2 垄, 南北垄向。1 个肥料水平, 06-27 施第 1 次混合肥料(尿素 氯化钾 过磷酸钙 = 1 1 1), 标准为 $260\text{ kg}/\text{hm}^2$; 07-10 施第 2 次肥料, 施芬兰产复合肥 $140\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

试验于 2002 年在浙江大学试验场内(东经 $120^\circ 10'$, 北纬 $30^\circ 14'$)进行。供试土壤为砂壤土, 土壤全氮 $0.95\text{ g}/\text{kg}$, 速效氮 $148.5\text{ mg}/\text{kg}$, 全磷 $1.21\text{ g}/\text{kg}$, 全钾 $72.7\text{ mg}/\text{kg}$, 有机质 $9.96\text{ g}/\text{kg}$, pH 6.78。3 种作物的田间管理按一般大田作物的田间管理规程实施, 水稻从移栽后至乳熟小区均保持 $5\sim 15\text{ cm}$ 水深, 玉米和棉花除自然降雨外均未灌水。

1.2 测量方法

1.2.1 测量仪器 光谱仪选用美国 ASD 公司产 FieldSpec Pro FRTM 光谱仪, 数据分析软件为 SPSS 10.0。

1.2.2 冠层光谱测定 分别在水稻分蘖期(07-23)、拔节期(08-05)、孕穗期(8-22)、抽穗期(08-31)、灌浆期(09-11)、乳熟期(09-28)和成熟期(10-04), 玉米七叶期(05-24)、拔节期(06-09)、开花期(06-18)和乳熟期(07-12), 棉花五真叶期(06-08)、现蕾期(07-12)、开花期(07-23)、开花盛期

(08-15)、裂铃期(09-02)、吐絮期(09-15)、吐絮盛期(10-01)和吐絮末期(10-25), 选择晴朗无云无风天气, 于当天 10:00~14:00 测定冠层光谱反射率。测量时, 传感器探头向下, 距冠层顶垂直高度约 0.7 m 。每小区选 1 个固定位置, 每次记录 10 个光谱, 以其平均值作为该小区的光谱反射值, 测量时及时进行标准白板校正(标准白板反射率可视为 1, 这样所测得的目标物光谱是无量纲的相对反射率)。冠层光谱数据测定后, 于相应位置取样测定作物的生物物理参数。采样后按器官分离, 测鲜生物量, 然后置于 105°C 烘箱中杀青 $20\sim 30\text{ min}$, 70°C 恒温烘干至恒重, 测干生物量。水稻叶面积指数采用长宽法测量(分蘖前和抽穗后乘系数 0.75 , 其他时期乘系数 0.83), 玉米和棉花叶面积指数采用复印扫描和干重混合测量法测定。

1.2.3 光谱变量 为消除背景影响及测量误差, 优化 LAI、生物量与反射率的相关关系, 根据农作物冠层光谱的特征, 本研究选用比值光谱变量 ρ_{990}/ρ_{550} , ρ_{800}/ρ_{550} , ρ_{750}/ρ_{550} , ρ_{800}/ρ_{680} 和红边参数(红边位置 λ_r 为红光 $680\sim 760\text{ nm}$ 内一阶导数光谱最大值所对应的波长, nm; 红边幅值 $D\lambda_r$ 为 $680\sim 760\text{ nm}$ 内一阶导数光谱的最大值, nm^{-1})作为研究光谱参数。本文一阶导数采用差分计算, $D\lambda = \frac{R_{i+1} - R_{i-1}}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}$ 。

2 结果与分析

2.1 水稻、玉米和棉花冠层光谱的比较

水稻、玉米和棉花冠层光谱的比较见图 1。

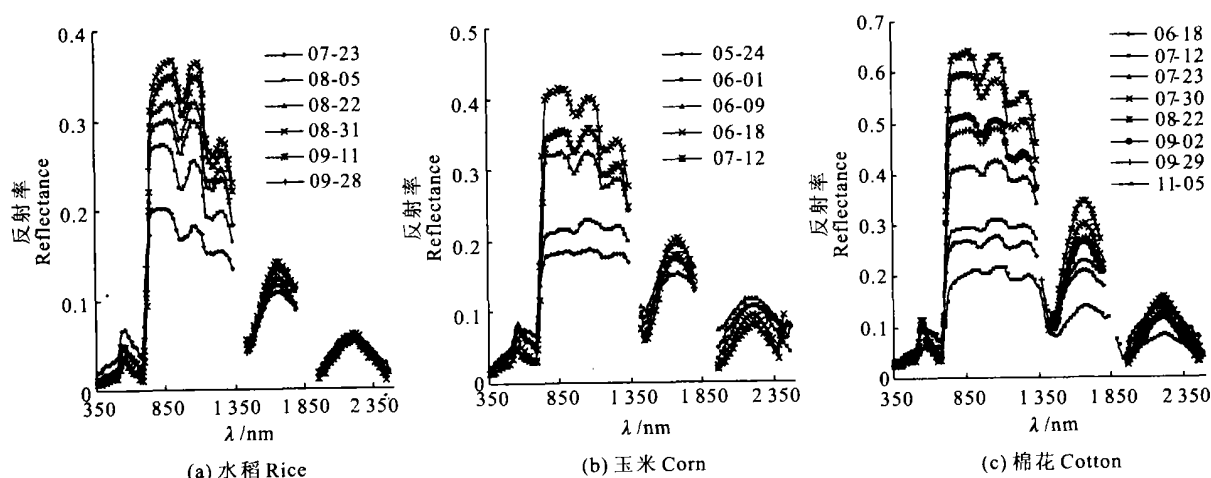


图 1 水稻、玉米、棉花不同生育期的冠层光谱

Fig 1 The canopies spectra of rice, corn and cotton at different growth stages

由图 1 可知, 3 种作物冠层反射光谱的形状及其随发育期推移的变化趋势是相同的。随生育期推

移,冠层光谱反射率在可见光范围降低,在近红外区域增高,到某一生育期(水稻孕穗末期、玉米开花期、棉花开花盛期),两者差异达到最大,之后反射率在近红外区域降低,在可见光范围增高。另外,试验发现同一种作物 2 个品种的冠层光谱反射率值也略有不同。3 种作物冠层光谱最大反射率的变化趋势与其叶面积指数的变化趋势是一致的,其反射率最大值为棉花> 玉米> 水稻。

2.2 叶面积指数、地上生物量和叶重与光谱变量的相关性分析

分别计算叶面积指数(LAI)、地上鲜生物量(AFM)、地上干生物量(ADM)、叶鲜重(FLM)和叶

干重(DLM)与冠层光谱变量 ρ_{990}/ρ_{550} , ρ_{800}/ρ_{550} , ρ_{750}/ρ_{550} 和 ρ_{800}/ρ_{680} 之间的相关系数,结果见表 1。由表 1 可见,水稻、玉米的上述 4 个光谱变量与 LAI, AFM, ADM, FLM 和 DLM 之间,棉花的 4 个光谱变量与 LAI, FLM 和 DLM 之间均达极显著水平($P < 0.01$),且棉花的 AFM 与 4 个光谱变量之间达显著水平($P < 0.05$),但棉花地上干生物量 ADM 与 4 个光谱变量之间的相关性较差。原因可能是棉花生长后期棉铃对冠层光谱贡献较少而对地上干生物量贡献较大。因此,可以用光谱变量 ρ_{990}/ρ_{550} , ρ_{800}/ρ_{550} , ρ_{750}/ρ_{550} 和 ρ_{800}/ρ_{680} 来估测水稻、玉米的 LAI、地上生物量及叶重和棉花的 LAI 及叶重。

表 1 叶面积指数、地上生物量和叶重与冠层光谱变量的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between the spectral variables of canopy and leaf area index, above ground matter and leaf mass

作物 Crop	样本数 Number of sample	光谱变量 Spectral variables	LAI	AFM	ADM	FLM	DLM
水稻 Rice	156	ρ_{990}/ρ_{550}	0.700**	0.528**	0.273**	0.711**	0.645**
		ρ_{800}/ρ_{550}	0.672**	0.491**	0.228**	0.685**	0.613**
		ρ_{750}/ρ_{550}	0.682**	0.498**	0.238**	0.688**	0.616**
		ρ_{800}/ρ_{680}	0.566**	0.330**	0.166*	0.544**	0.452**
玉米 Corn	30	ρ_{990}/ρ_{550}	0.815**	0.847**	0.842**	0.722**	0.843**
		ρ_{800}/ρ_{550}	0.829**	0.853**	0.840**	0.745**	0.854**
		ρ_{750}/ρ_{550}	0.858**	0.872**	0.843**	0.791**	0.878**
		ρ_{800}/ρ_{680}	0.820**	0.813**	0.735**	0.825**	0.833**
棉花 Cotton	48	ρ_{990}/ρ_{550}	0.700**	0.519**	0.353*	0.680**	0.655**
		ρ_{800}/ρ_{550}	0.713**	0.500*	0.300*	0.701**	0.666**
		ρ_{750}/ρ_{550}	0.721**	0.492**	0.282	0.703**	0.667**
		ρ_{800}/ρ_{680}	0.697**	0.358*	0.075	0.676**	0.607**

注:*,** 分别表示达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平,下同。

Note: *, ** stands for significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively. It is the same in the following table.

本试验发现,3 种作物的冠层光谱反射率随 LAI,地上鲜生物量的增加都存在饱和现象。考虑到这种饱和特性,以光谱变量 ρ_{990}/ρ_{550} 为例, LAI, AFM 和 FLM 的估测回归方程见表 2。

表 2 3 种作物叶面积指数、地上生物量和叶重对冠层光谱变量的回归方程

Table 2 Regression equations relating to the vegetation indices of canopy spectra to LAI, above biomass and leaf mass in three crops

作物 Crop	回归方程 Regression equation	决定系数(R^2) Determination coefficient (R^2)
水稻 Rice	$LAI = 0.9007x^{0.9261}$	0.6465
	$AFM = 36.343x^{1.0202}$	0.4624
	$FLM = 10.756x^{0.9576}$	0.6479
玉米 Corn	$LAI = 0.0593x^{2.5163}$	0.6752
	$AFM = 0.7289x^{3.6743}$	0.8187
	$FLM = 0.8832x^{2.8516}$	0.7438
棉花 Cotton	$LAI = 0.1084x^{2.362}$	0.5802
	$AFM = 0.3719x^{4.3071}$	0.6427
	$FLM = 0.3411x^{3.5913}$	0.7164

注: x 表示光谱变量 ρ_{990}/ρ_{550} 。

Notes: x Significant spectral variable ρ_{990}/ρ_{550} .

2 3 叶面积指数、地上生物量和叶重与红边参数的相关性分析

分别计算冠层光谱红边参数 $\lambda_r, D\lambda_r$ 与叶面积指数、地上鲜生物量、地上干生物量、叶鲜重和叶干重之间的相关系数, 结果见表 3。由表 3 可知, 水稻、玉米的红边参数与叶面积指数、地上鲜生物量、地上干生物量、叶鲜重和叶干重之间, 棉花的红边参数与

叶面积指数、叶鲜重及和叶干重之间均达极显著水平 ($P < 0.01$), 而棉花地上鲜生物量、地上干生物量与红边参数之间的相关性较差。因此, 可以用水稻、玉米反射光谱的红边参数 $\lambda_r, D\lambda_r$ 估算其叶面积指数、地上生物量和叶重; 用棉花冠层的红边参数 $\lambda_r, D\lambda_r$ 估算其叶面积指数和叶重。以红边位置 λ_r 和 LAI、叶鲜重为例, 估测的回归方程如表 4 所示。

表 3 叶面积指数、地上生物量和叶重与冠层光谱红边参数的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between the parameters of red edge of canopy spectra and leaf area index, above ground matter and leaf mass

作物 Crop	样本数 Number of sample	红边参数 Parameters of red edge	LAI	AFM	ADM	FLM	DLM
水稻 Rice	156	λ_r	0.708**	0.551**	0.345**	0.635**	0.606**
		$D\lambda_r$	0.616**	0.606**	0.155**	0.553**	0.538**
玉米 Corn	30	λ_r	0.812**	0.774**	0.731**	0.754**	0.742**
		$D\lambda_r$	0.814**	0.729**	0.553**	0.914**	0.899**
棉花 Cotton	48	λ_r	0.635**	0.389**	0.086	0.531**	0.519**
		$D\lambda_r$	0.511**	0.276	-0.020	0.436**	0.430**

表 4 3 种作物叶面积指数和叶鲜重对冠层光谱红边位置的回归方程

Table 4 Regression equations relating to the position of red edge of canopy spectra to leaf area index and leaf fresh mass in three crops

作物 Crop	回归方程 Regression equation	
	$LAI \sim \lambda_r$	$FLM \sim \lambda_r$
水稻 Rice	$LAI = 0.146\lambda_r - 101.513$	$FLM = 1.928\lambda_r - 1338.657$
玉米 Corn	$LAI = 0.188\lambda_r - 133.081$	$FLM = 5.850\lambda_r - 4136.764$
棉花 Cotton	$LAI = 0.205\lambda_r - 141.382$	$FLM = 3.681\lambda_r - 2546.850$

3 讨论与结论

1) 水稻、玉米、棉花冠层反射光谱的形状是相同的, 反射率大小与生长发育期有关。随生育期推移, 冠层光谱反射率在可见光范围降低, 在近红外区域增高; 到某一生育期(水稻孕穗末期、玉米开花期、棉花开花盛期)时两者差异最大; 以后, 3 种作物冠层光谱在近红外区域反射率降低, 具有绿色植物光谱的共性, 这与前人的研究结果一致^[5, 8]。3 种作物冠层光谱反射率最大值的比较结果是, 棉花 > 玉米 > 水稻。

2) 水稻、玉米、棉花的叶面积指数、鲜叶重和干叶重与冠层光谱变量 ρ_{990}/ρ_{550} , ρ_{800}/ρ_{550} , ρ_{750}/ρ_{550} , ρ_{800}/ρ_{680} 之间存在极显著相关, 其地上鲜生物量与上述 4 个光谱变量之间显著相关, 但棉花地上干生物

量与这 4 个光谱变量的相关性较差。原因可能是棉花生长后期棉铃较大且颜色失绿, 使其对可见光反射加强、近红外光反射减弱。

3) 水稻、玉米、棉花的叶面积指数、叶鲜重和叶干重与其冠层光谱的红边参数 $\lambda_r, D\lambda_r$ 之间, 水稻、玉米的地上鲜生物量、地上干生物量与其冠层光谱的红边参数 $\lambda_r, D\lambda_r$ 之间均存在极显著相关, 这与前人的研究结果^[1, 6, 7]一致。而棉花地上鲜生物量、地上干生物量与其红边参数 $\lambda_r, D\lambda_r$ 之间未达显著水平。原因可能是重量大、含水率高的棉铃表面积较小, 对冠层光谱的反射率贡献也较小, 但深层机理还有待于进一步研究。本研究结果表明, 可以用水稻、玉米反射光谱的红边参数 $\lambda_r, D\lambda_r$ 估算其叶面积指数、地上生物量和叶重, 用棉花冠层的红边参数 $\lambda_r, D\lambda_r$ 估算其叶面积指数、叶鲜重和叶干重等参数。

[参考文献]

[1] Shibayama M, Akiyama T. Seasonal visible, near-infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground

- dry phytomass[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 27: 119- 127.
- [2] Gausman H W, Allen W A, Cardenas R. Relation of light reflectance to histological and physical evaluations of cotton leaf maturity[J]. *Application of Optics*, 1970, 9: 545- 552
- [3] Vane G. Terrestrial imaging spectrometry: current status, future trends[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 44(2): 109- 127.
- [4] Curran P J, Dungan J L, Gholz H L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine[J]. *Tree Physiology*, 1990, 7: 33- 48
- [5] Miller J R. Season patterns in leaf reflectance red edge characteristics[J]. *Internal Journal of Remote Sensing*, 1991, 12: 1509- 1523
- [6] Filella D, Penuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status[J]. *Internal Journal of Remote Sensing*, 1994, 15: 1459- 1470
- [7] 王秀珍, 王人潮, 黄敬峰. 微分光谱遥感及其在水稻农学参数测定上的应用研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(1): 9- 13
- [8] Shibayama M, Akiyama T. Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 36: 45- 53
- [9] 潘学标, 张立桢, 王延琴, 等. 不同遗传型棉花品种光谱反射特性研究[J]. *棉花学报*, 1998, 10(2): 107- 110
- [10] Dalezis N R, Domenikotis C, Tzortzis S T, et al. Cotton yield estimation based on NOAA/AVHRR produced NDVI I[J]. *Physics and Chemistry of Earth (B)*, 2001, 26(3): 247- 251
- [11] 金仲辉, 张建军. 由光谱反射率估算玉米植冠的 A PAR[J]. *北京农业大学学报*, 1994, 20(1): 47- 51
- [12] 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]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 85- 99
- [13] Thenkabail P S, Smith R B, Pauw E D. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71: 158- 182

Study on the determination of LAI and biomass of crop by hyperspectral

TANG Yan-lin^{1,2}, WANG Xiu-zhen³, WANG Fu-min¹, WANG Ren-chao¹

(1 Institute of Agriculture Remote Sensing and Information System Application, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310029, China;

2 Physics Department, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

3 Institute of Meteorological Science of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310029, China)

Abstract: The canopy hyperspectral reflectances of six varieties in three crops (rice, corn and cotton) were measured in field experiment plots in different stages. The leaf area indices (LAI) and above ground biomass corresponding to the spectra were determined. The correlation between their hyperspectral variables and red edge parameters and the leaf area indices, above ground biomass and leaf mass were analyzed. The results showed that the canopy hyperspectral reflectance of three crops were relating to their growing stages. The maximum value of canopy spectral reflectance was the biggest for cotton and the smallest for rice. Their leaf area indices, fresh leaf mass and dry leaf mass were very significantly correlative to the hyperspectral variables ρ_{990}/ρ_{550} , ρ_{800}/ρ_{550} , ρ_{750}/ρ_{550} , ρ_{800}/ρ_{680} and the red edge parameters λ and $D\lambda$ of their canopy spectra, but the correlation between above ground fresh biomass, above ground dry biomass and above hyperspectral variables and red edge parameters were different. This indicated that it is feasible for estimating LAI, above ground fresh biomass, fresh leaf mass and dry leaf mass of rice, corn and cotton by hyperspectral remote sensing.

Key words: crop; hyperspectral reflectance; leaf area index; biomass; regression analysis