

遥感估算水稻产量

II. 用光谱数据和陆地卫星图像估算水稻产量*

田国良 项月琴

(中国科学院遥感应用研究所) (中国科学院地理研究所)

1987年12月20日收稿

摘 要

本文介绍了采用更系统的生物学方法,根据水稻在整个生长期的叶面积指数轨线,按叶面积指数的一次测量值,结合气象和光谱数据及陆地卫星 MSS 图像,估算大面积水稻产量的方法。

在产量与总截获的关系中,叶面积指数是最重要的参量之一。文中重点分析了由水稻在 MSS 波段内的光谱数据构成的绿度指数和 Suits 模式估算叶面积指数的结果。表明,用 Suits 模式计算的叶面积指数有较高的相关系数和较低的剩余标准差。并用这个方法计算了不同田块的叶面积指数,再根据这些数据和 MSS 图像建立关系。本文比较了卫星数据和多种绿度指数的关系,认为垂直植被指数 (PVI) 是估算叶面积指数的最好参量,因为它消除了土壤背景的影响,并用它求出了大面积水稻的叶面积指数分布。再根据已建立的叶面积指数轨线和作物截获的有效光合辐射 (TIPAR) 关系,计算了 TIPAR, 编制了产量分布图。文章分析了计算结果,并以 1983 年的例子进一步讨论了该方法的适用性。结果表明,预测的水稻产量和实测产量间的相关系数为 0.9 左右。

关键词 遥感水稻估产 叶面积指数 光谱模型

一、前 言

目前的研究表明,遥感光谱反射比数据能够用来确定叶面积指数和农作物的辐射截获^[1-4]。遥感技术提供了一种估算潜在的生产力的可能手段。如果我们已知农作物在生长季截获的光合有效辐射,总的干物质就可得到,从而就能估算出谷物的产量。但是,这个方法有实际的困难。因为若用卫星在生长季频繁地测量截获的光合有效辐射是很昂贵的,有时还受云的影响。

用卫星和航空遥感数据估算作物产量,通常是根据冠层反射比的一次测量和后来的产量建立关系^[5,6]。一般将反射比变换为植被指数,如比值、标准化差、“穗帽”、垂直植被指数等。这种方法一般只适用于特定的地方和季节,没有考虑气象条件,往往不能预测当年的产量。即使在前一年建立了植被指数和产量的关系,用它来推算新的一年产量,往往由于天气和管理条件的变化而引起误差。

本研究目的是用更系统的生物学方法,把气象资料和光谱数据结合起来,用卫星图像大面积估算作物的产量。我们在上篇文章中^[7],已给出了一个水稻估产模式。通过水稻开花前不久测得的一个叶面积指数值 LAI,利用本模式提供的叶面积指数轨线和光合有

* 作者在工作中得到了 D. L. B. Jupp (CSIRO) 博士的具体指导和帮助, P. Hutton 参加了野外工作,特此致谢。

效辐射日截获率与 LAI 间的关系,推算水稻从开花到生理成熟期间截获的总光合有效辐射 $TIPAR$,进而根据 $TIPAR$ 与籽粒产量间的转换效率进行估产。上篇文章论述了建造模式的原理和方法,本文将讨论如何利用陆地卫星资料来估算水稻产量。

二、遥感资料的获取

如前所述,如果有了开花前不久各地的叶面积指数值,便可利用本模式进行估产。为获得研究区域 Murrumbidgee 不同田块的叶面积指数,我们研究了光谱反射比和叶面积指数的关系。

根据水稻不同生长状况,选择了 8 个田块进行了光谱反射比测量和农学参量的收集。测量时间是 1985 年 1 月 13 日—30 日。

使用二台 EXOTCH 100-AX 型辐射计测量水稻及其背景在多光谱扫描仪 MSS 波段内的反射比。带有 2π 散射帽的那台辐射计,朝上测量太阳直接和散射辐照度;具有 15° 视场角的辐射计,以和水平面成 32.5° 角指向冠层,并与太阳入射方向成 90° 测量水稻的反射辐射。在每个测点上采用垂直于太阳入射方向的左和右的平衡方式获得读数。倾斜测量保证了观察较大面积的作物,而不必把辐射计架得更高,并且减少了视场内阴影和太阳高度较高时垂直测量对辐照度引起的干扰。倾斜 32.5° 测量正好是它的读数与叶子角分布变化无关,但有利于用光谱数据测量叶面积指数的研究。

在水稻的每个田块测量了 10 个不同位置的辐射度,然后又重测了 5 个田块。在每个田块测量后,选择 3 个测点分别收割两个 0.5 平方米的水稻,用于叶面积指数 (LAI) 和生物量等的测量。选择的原则是根据 $MSS7/MSS5$ 比值的低、中、高值。在田里测量了植株高度和密度。用叶面积指数仪在实验室测量了叶面积指数,同时测量了干物质重。在 5 块稻田里测量了叶簇倾角。

用校准系数^[8],按冠层辐照度和冠层上的半球辐照度比值,计算了冠层反射比。共获得 95 组反射比数据和 39 组叶面积指数数据。

在测量期间正好有 4 号和 5 号陆地卫星通过。我们选择晴朗无云的 1 月 21 日的 5 号陆地卫星的 MSS 图像,作为估算叶面积指数和产量的基本资料。

三、利用遥感资料估算水稻产量

1. 叶面积指数 LAI 的估算

在产量与总的截获辐射关系的研究中,最重要的参量是叶面积指数。因此,如何利用光谱数据估算叶面积指数是本研究的主要任务之一。

常规的叶面积指数测量十分费时费力,多为破坏性的。Jordan^[9] 首次用近红外和红外波段反射率的比值估算了叶面积指数。Tucker^[10], Wiegand 等^[11]和 Patel 等^[11]曾分别用比值和标准化差等光谱数据构成的植被指数估算 LAI 和作物的产量。Richardson 等^[12] Bennett 等^[13], Wardley 等^[12]和 Hatfield 等^[14]则分别用 Kauth-Thamson 变换和垂直植被指数估算了 LAI , 作物对光的截获和产量。而 Kanemasu 等^[14]则用陆地卫星 MSS

数据的线性组合大面积估算了小麦的叶面积指数。

如前所述, 每个田块测量了 10 次光谱反射比, 但仅测了 3 次 LAI , 其余 7 个点的 LAI 值可以通过植被指数来求得。图 1 和图 2 示出了测量的光谱数据的比值 $R_{75}(MSS7/MSS5)$ 和标准化差 $ND(MSS7 - MSS5)/(MSS7 + MSS5)$ 与 LAI 的关系。

Suits^[4] 在 1972 年建立了植物冠层反射率计算模式。该模式根据光在植物冠层内的传输特性, 考虑了太阳角度的影响及冠层几何结构的特征和有关的农学参量。我们可以用 Suits 模式来反演叶面积指数。

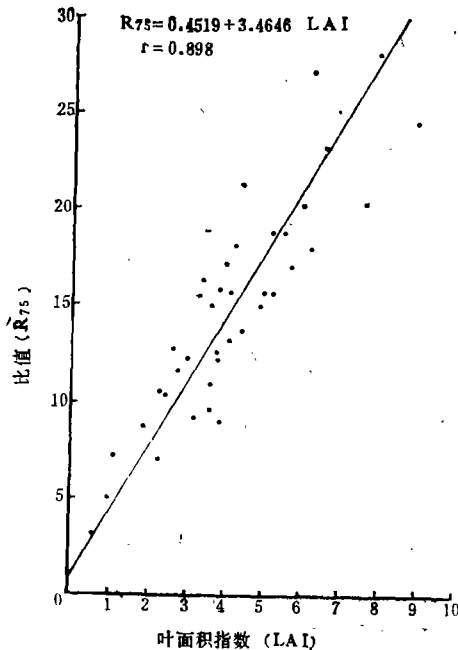


图 1 比值 R_{75} 和水稻叶面积指数 LAI 的关系
Fig. 1 Relationship between ratio of R_{75} and leaf area index (LAI) of rice

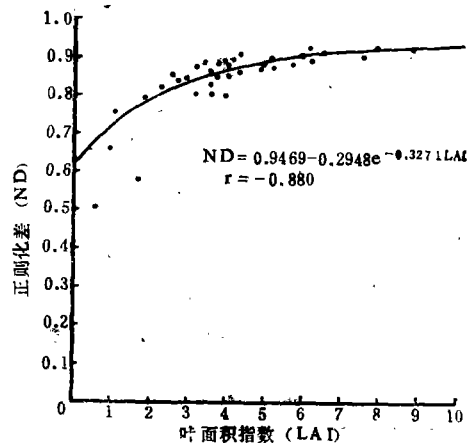


图 2 标准化差 ND 和水稻叶面积指数 LAI 的关系
Fig. 2 Relationship between normalized difference (ND) and leaf area index (LAI) of rice

对于入射到冠层的辐射, Suits 使用了向上、向下和镜面的辐射通量, 根据能量守恒, 建立了三个分立的模型。波长为 λ 的向上散射、向下散射和镜面通量分别用 $E_1(+d, i, x)$, $E_1(-d, i, x)$ 和 $E_1(S, i, x)$ 表示。从顶层到 i 层的 x 平面内的通量变化为:

$$dE_1(+d, i, x)/dx = -a_i E_1(-d, i, x) + b_i E_1(+d, i, x) + C_i E_1(S, i, x) \quad (1)$$

$$dE_1(-d, i, x)/dx = a_i E_1(-d, i, x) - b_i E_1(+d, i, x) - C_i E_1(S, i, x) \quad (2)$$

$$dE_1(s, i, x)/dx = K_i E_1(s, i, x) \quad (3)$$

式中 a_i , b_i , C_i , C'_i 和 K_i 是第 i 层的叶子有关的几何和光学参量, 它们可以计算出来。上述方程可以结合初始条件和边界条件求解。

这些方程在叶绿素吸收区可以近似表达为:

$$R(LAI) = R_{\infty}(1 - e^{-KLAI}) + R_s e^{-KLAI} = R_{\infty} + (R_s - R_{\infty})e^{-KLAI} \quad (4)$$

式中 $R(LAI)$ 为某波长下叶面积指数为 LAI 的冠层反射比; R_{∞} 为冠层的最大反射比;

R_s 为土壤背景的反射比; K 为冠层的消光系数, 它与太阳高度角、叶角分布和测量角度等有关。

我们可以根据测量的冠层反射比和叶面积指数的数据, 用拟合的办法求出 R_{∞} , R_s , R_{∞} 和 K 值, 然后再将 7 个点测量的光谱数据代入上式, 即可求出叶面积指数 LAI 。

(4) 式也可变换为:

$$LAI = \frac{1}{K} \ln \left[\frac{R_{\infty} - R_s}{R_{\infty} - R(LAI)} \right] \quad (5)$$

其中 K 可根据测量时的太阳天顶角, 叶角分布计算获得。 R_s 和 R_{∞} 可以测量, 其中 R_{∞} 可按 Alen 和 Richardson^[16] 建议的叶子堆积模拟技术来确定。即把植物冠层部分拔下, 在裸地上堆成密集的一堆, 测量其反射比。

图 3 是用 Suits 模式计算的叶面积指数和测量值的比较。表 1 比较了利用 Suits 模式和植被指数计算 LAI 的结果。

表 1 说明, 虽然这些估算在 $\alpha = 0.01$ 条件下都是显著的, 但用 Suits 模式计算 LAI 却有较高的相关系数和较低的剩余标准差。因此, 我们采用这种方法求出了每个田块的 10 次

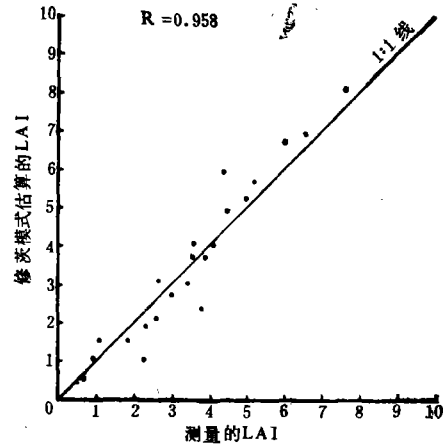


图 3 用 Suits 模式计算的 LAI 和测量值的比较

Fig. 3 Comparison of LAI calculated by Suits method to the measured one

平均的叶面积指数。

表 1 植被指数和 Suits 模式计算 LAI 的相关系数 R 和剩余标准差 $S(n = 39)^*$
Table 1 Correlation coefficient, R , and standard deviation, $S(N = 39)$, between vegetation index and LAI calculated from Suits's method

	R_{75}	LR_{75}	ND	TVI	Suits 模式
R	0.885	-0.883	-0.880	-0.880	0.958
S	0.877	0.894	0.892	0.882	0.778

* $R_{75} = MSS7/MSS5$, $LR_{75} = 0.5 \ln R_{75}$,

$ND = (MSS7 - MSS5)/(MSS7 + MSS5)$, $TVI = \sqrt{ND + 0.5}$

由于每个田块很大, 故可以在 1985 年 1 月 21 日的陆地卫星 MSS 图像上找到, 所以可将每个田块平均 LAI 值和数字磁带数据及其变换建立关系。表 2 给出了利用陆地卫星数据构造的 9 个植被指数¹⁾和叶面积指数的相关系数, F 值和剩余标准差等。

表 2 所给出的植被指数和 LAI 的关系有两种类型, 一种是线性的(如图 1), 另一种是指数形式的(如图 2)。表 2 的结果说明, 陆地卫星 MSS 数据的波段组合构成的植被指数(如垂直植被指数 PVI , 第二主成分 $PC2$, 第二典型变量 $CV2$, $K-T$ 变换的绿度 GVI 等)要比波段的比值构成的 VI , (如 B_{75} , LB_{75} , ND 和 TVI 等)要好。 PVI 和 PVI

1) 田国良: 植被指数在农业遥感中的应用, 全国农业遥感第二次学术讨论会论文集。

表 2 陆地卫星数据的植被指数 (VI_i) 和叶面积指数 LAI 的相关系数 R, F 值及剩余标准差 S
Table 2 Correlation coefficient, R, F-value, F, and standard deviation, S, between vegetation index (VI_i) from Landsat images and leaf area index (LAI)

VI _i	B _{7s}	LB _{7s}	ND	TVI	PVI	PC ₂	CV ₂	GVI	PVI+TVI
R	0.910	-0.926	-0.930	-0.931	0.974	0.928	0.954	0.968	0.985
F*	28.86	38.61	38.61	39.18	112.0	37.48	60.70	88.76	80.15
S	1.388	1.263	1.227	1.219	0.754	1.243	1.003	0.842	0.637

* 所有回归在 α = 0.01 条件下都显著。

及 TVI 的线性组合更好些,但后者的 F 值却减小了。这说明 PVI 是最好的回归子集。这是由于 PVI 消除了土壤背景对冠层反射辐射的影响。因为在该地区水稻的百分比覆盖率为 57—99%,比值构成的植被指数也受背景的影响。

根据上述分析,我们可用陆地卫星数据构成的垂直植被指数 PVI 来估算水稻的叶面积指数,其回归方程为:

$$LAI = -3.496 + 0.195PVI \quad (6)$$

根据卫星 MSS 数据变换可得到 PVI:

$$PVI = 0.7046MSS7 - 0.7096MSS5 - 6.5936 \quad (7)$$

这样我们就得到该地区水稻叶面积指数的分布图。

2. 总的截获光合有效辐射 TIPAR 和产量 Yield 的估算

在获得水稻大面积 LAI 分布图后,根据叶面积指数轨线和气象资料及截获的光合有效辐射的关系^[7],可用下式计算水稻总的截获光合有效辐射。

$$TIPAR = 535.98(1 - e^{-0.4422LAI})(\text{兆焦耳/米}^2) \quad (8)$$

再根据 TIPAR 和 水稻转换效率的关系计算水稻的产量:

$$Yield = 11.256(1 - e^{-0.4422LAI})(\text{吨/公顷}) \quad (9)$$

将用卫星图像求得的 LAI 值代入上式,就得到研究区的产量分布图。

四、结果和讨论

表 3 是已知的 5 个田块的产量和用上述方法估算的产量比较,相对误差不超过 6%,说明这种方法是可行的。

由于产量和叶面积指数成指数关系,对于高 LAI 值呈饱和状态,即 LAI 变化很大,但产量相差不大。例如,第 7 个田块的 LAI = 10.26,第 8 个田块的 LAI = 6.75,而产量仅差 0.46 吨/公顷。这种方法对 LAI < 7 的情况下变化比较敏感。

为了进一步验证这种方法的可行性,我们用 Suits 模式和 1983 年 1 月 16 日的陆地卫星磁带数据,计算了 33 个田块的叶面积指数,再按上述方法,利用 1983 年的气象资料估算了产量。图 4 是用上述方法计算的产量和 1983 年实际产量的比较。有两个水稻品

表3 实际产量和估算的产量(吨/公顷)
Table 3 Harvested yield and estimated one (t/ha)

田块编号	2	3	4	7	8
实际产量	9.71	9.39	6.92	11.27	10.13
估算产量	10.23	9.79	6.69	11.13	10.67
相对误差(%)	5.4	4.3	3.3	1.2	5.3

种: Calrose 和 Inga, 它们的转换效率分别为 0.0231 和 0.0214 (吨/公顷/兆焦耳/米²)。

图 4 表明, 这种方法估算的产量和实际产量的相关系数达 0.92, 证明这种方法是可行的。

对于不同品种, 其光合转换效率是不同的。在大面积估产时, 一般选用统一的光合转换效率。图 5 表示两种不同品种的水稻用统一的转换效率(0.0223)估算的产量和实际产量比较。

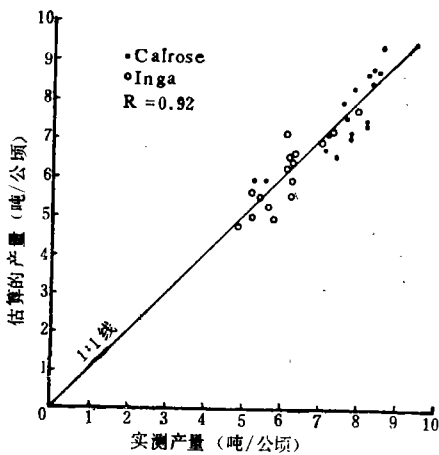


图 4 估算的产量和实际产量的比较(1983)

Fig. 4 Comparison of the estimated yield to the harvested one (1983)

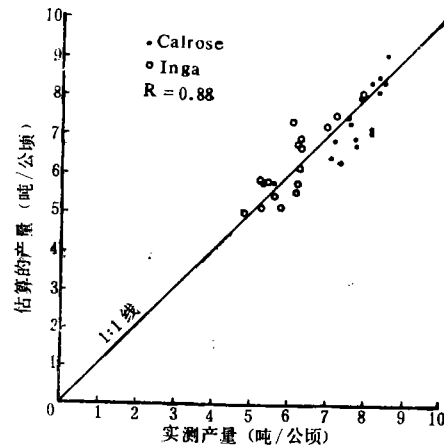


图 5 用统一的光合转换效率估算的产量和实际产量比较(1983)

Fig. 5 Comparison of yield estimated using one converted efficiency to the harvested one (1983)

由图 5 可知, 用统一的光合转换效率估算产量和实际产量的相关系数要比图 4 所示的低。这是因为对于高转换效率的品种用统一的转换效率计算出的产量偏低, 反之却偏高, 如果它们的光合转换效率相差很大, 这种现象将会更为严重。例如 1985 年第 1 个和第 5 个田块, 由于转换效率约为 0.016, 比其它田块低很多, 所以用统一的转换效率(0.021)估算的产量分别偏高 2.72 和 2.12 (吨/公顷)。因此, 在由总的截获的光合有效辐射计算产量时, 对于转换效率相差较大的不同品种的作物, 最好用不同的转换效率值。

在对 1985 年的水稻产量估算中, 从开花到成熟期, 气温大于 15° 的积温为 379 度日, 成熟期为 4 月 23 日。这是因为 1985 年气温偏低, 故其累积度日要达到 379 必须持续较长时期。而在 1983 年的产量估算中, 如果从开花到成熟期的累积度日仍保持 379, 那么

预测的成熟期为 3 月 10 日,比实际情况提前半个月左右。为此按实际情况取 45 天,累积度日为 468。图 4 就是按此值计算的。因此,在使用该方法估算产量时,要考虑温度的影响。

五、结 论

(1) 该方法利用生物学的方法,以叶面积指数生长轨线为主线,辅以气象资料、光谱数据和卫星资料,可进行大面积产量估算。

(2) 叶面积指数是监测作物长势以及产量预报模式中的重要参量,它可以通过植被指数来估算。但在本研究中,用测量的光谱数据和 Suits 模式计算叶面积指数效果更好。

(3) 在用本方法由截获的光合有效辐射求产量时,对于不同品种的水稻最好用不同的光合转换效率,对光合转换效率相差不大的作物,可用它们的平均值进行估产。关于作物的光合转换效率,因为现有资料很少,还须进一步研究。

(4) 由于气温和辐射变化的影响,如低温使得作物生长较正常年景慢,从开花到成熟期的积温应按实际的天数进行计算。

参 考 文 献

- [1] Wiegand, C. L. and Richardson, A. J., Leaf area, light interception and yield estimates from spectral, components analysis, *Agron. J.*, 76: 543—548, 1984.
- [2] Wardley, N. W. and Curran, P. J., The estimation of green-leaf-area index from remotely sensed airborne multispectral scanner data, *Int. Remote Sensing*, 5(4): 671—679, 1984.
- [3] Hatfield J. L., Asrar, G. and Kanemasu, E. T., Intercepted photosynthetically active radiation by spectral reflectance, *Remote Sensing of Environment*, 14: 65—75, 1984.
- [4] Hatfield J. L. et al, Leaf area estimates from Spectral measurements over various planting dates of Wheat, *Int. J. Remote Sensing*, 46(5): 651—656, 1985.
- [5] Tucker, C. J., Asymptotic nature of grass canopy spectral reflectance, *Appl. Optics*, 16: 1151—1157, 1977.
- [6] 田国良、郭世忠,水稻的光谱特性, *自然资源*, (2), 73—82, 1982.
- [7] 项月琴、田国良,遥感估算水稻产量: I. 产量与辐射截获量间关系的研究, *环境遥感*, 3(4), 1988 年.
- [8] Jupp D. B. L., Tian, G. L. and Hutton, P. G., Reflectance Standard vs an irradiance radiometer—or How do you standardize field spectra? CSIRO Division of water and land resources technical Memorandum, 1986.
- [9] Jordan C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on forest floor, *Ecology*, 50(5): 663—666, 1969.
- [10] Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 8: 127—150, 1979.
- [11] Patel N. K., Singh T. P. and Patel M. S., Spectral response of rice crop and its relation to yield and yield attribute, *Int. J. Remote Sensing* 6(5): 657—664, 1985.
- [12] Richardson A. J. and Wiegand C. L., Distinguishing vegetation from soil background information. *Photograph, Eng. Remote Sen.*, 43(12): 1541—1552, 1977.
- [13] Barnett T. L. and Thompson D. R., Large area relation of Landsat MSS and NOAA-6 AVHRR spectral data to wheat yield, *Remote Sensing of Environment*, 13: 277—290, 1983.
- [14] Kanemasu E. T., Heilman J. L., Bagley J. O. and Powers W. L. Using Landsat data to estimate evapotranspiration of Winte Wheat, *Environ. Management*, 1: 515—520, 1977.
- [15] Suits C. H. The calculation of the directional reflectance of a vegetation canopy, *Remote Sensing of Environment*, 2: 117—125, 1972.
- [16] Alen W. A. and Richardson A. J., *J. opt. soc. Am*, 58: 219, 1968.

Estimation of Rice Yield from Remotely Sensed Data —II. Based on Spectral Reflectance and Landsat Images

Tian Guoliang

(Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences)

Xiang Yueqin

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

The purpose of this study is to present a method of estimating rice yield from remotely sensed data, which offers a biological based. The principle and technique of the method were described in the former paper (No. 4, Vol. 3, 1988. "Remote sensing of Environment CHINA"). The technique of estimating rice yield with Landsat images is presented here. Firstly, the values of leaf area index (*LAI*) at ten sites in each experimental field are estimated with the data of MSS spectral reflectance using the Suits method, and the mean value of leaf area index (*LAI*) of each field (about 20—40 ha.) is obtained. Secondly, a relationship between PVI obtained from Landsat images and *LAI* is derived. The leaf area index (*LAI*) of each field in whole study region is estimated using this relation. Thirdly, the rice yield can be estimated from the *LAI* of each field using the method presented in the former paper. At the end, some aspects of effecting the accuracy of the estimated yield from this method are discussed.

Key words Estimation of rice yield by remote sensing Leaf area index Spectral model