

文章编号: 1007-4619(2005)01-0100-06

基于冠层反射光谱的水稻产量预测模型

薛利红, 曹卫星, 罗卫红

(南京农业大学 江苏省信息农业高技术研究重点实验室 农业部作物生长调控重点开放实验室 南京 210095)

摘 要: 基于地面实测的水稻冠层反射光谱, 计算了常用的 8 个植被指数, 并在产量形成生理特征的基础上, 系统分析了水稻籽粒产量及其构成因素与各植被指数之间的关系。结果表明, 通过单一生育时期或某个生育阶段的光谱植被指数来直接估测产量精度较低。发现叶面积氮指数(叶片氮百分含量与叶面积指数的乘积)的变化趋势很好地反映了产量的形成过程, 且与光谱植被指数极显著正相关, 基于此建立了水稻的光谱植被指数-累积叶面积氮指数-产量估测模型(VI-CLANI-Yield Model), 并将其与 LAD-产量模型、多生育期复合估产模型进行了比较, 表明本模型预测精度最高。

关键词: 水稻; 光谱植被指数; 叶面积氮指数; 产量; 产量构成; 预测模型

中图分类号: TP79 文献标识码: A

1 引 言

目前农作物估产主要有产量抽样调查、产量气象预报、农学预报、模拟模型和遥感估产等几种途径。抽样调查费时费财费工, 气象预报模型和农学预报模型预报精度较高, 但缺乏长势监测和面积资料; 模拟模型机理明确, 但模型参数确定较困难, 难以大面积应用。而遥感估产费用低、宏观性强、获取资料全面, 具有客观、定量、准确的优点, 因此是近年来各国研究的重点。其中, 作物种植面积和作物单位面积产量的精确估测是遥感估产成功的关键。而关于作物遥感单产估测模型的研究, 国内外已做了较多的工作。Moran 等 1997 年对目前的遥感估产工作进行了归纳总结, 认为主要有两种途径^[1]。第一种途径是利用某一生育时期或多个生育时期的光谱植被指数如归一化植被指数等和产量直接回归来估产^[2-8], 有些还考虑到环境因子如积温、降水对产量的影响, 把环境因子变量和植被指数一同与产量进行多元回归^[9, 10]。相对比较简单, 经验性较强; 第二种是用植被指数估算出冠层截获的光合有效辐射量或叶面积指数, 然后作为作物生长和农业气象模型的输入从而间接地估计产量^[11-16], 机理性较强, 预测精度较高, 是目前国内

外研究的热点。尽管这两种途径都在一定程度上取得了较为满意的结果, 但前者没有充分考虑作物生长与产量形成的生理学机制, 后者输入参数过多, 使用不方便, 因而存在着一定的局限性与经验性。

水稻产量的形成是一个复杂的生物学过程, 受许多因素的影响, 其过程表现为不确定的随机动态特征。因此, 运用遥感信息估算产量时, 首先必须透彻研究产量形成的生物学机理, 抓住影响和形成产量的主要因子, 弄清这些因子发生作用的主要时段, 在此基础上建立遥感信息与这些因子之间的动态关系, 这样的遥感估产模型才有可能真正具备普遍意义和实用价值。为此, 本研究基于作物生长发育特征, 从产量三要素(亩穗数、穗粒数、千粒重)的形成过程出发, 分析了冠层光谱特征与产量构成因素及产量的相关关系, 在综合考虑产量形成生理机制的基础上, 最终建立了较为可靠的光谱植被指数-累积叶面积氮指数-产量估测模式。

2 材料与方法

2.1 试验设计

于 2001 年在江苏省农业科学院试验站进行, 供

收稿日期: 2003-06-02 修订日期: 2003-09-15

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(30030090)和国家 863 计划资助项目(2002AA243011)

作者简介: 薛利红(1977—), 女, 2003 年在南京农业大学获博士学位, 现为中科院南京土壤所博士后, 在国内外已发表(含接受)论文 9 篇。现主要从事农业信息技术和作物生长遥感监测方面的研究。

试水稻品种为武香粳 9 号。土壤类型为黄棕壤土, 有机质含量 1.67%, 全氮 0.088%, 速效氮 $64.91\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $43.85\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $80.22\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。设 4 个施氮(纯 N)水平, $N_0:0\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, $N_1:13.5\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, $N_2:27\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, $N_3:40.5\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 小区面积 12m^2 ($3\text{m}\times 4\text{m}$), 随机区组排列, 重复 3 次。氮肥分 3 次施用, 基施 55%, 穗肥和粒肥分别占 20% 和 25%。磷、钾肥施用量分别为 $\text{P}_2\text{O}_5 135\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O} 210\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 全部作基肥。栽插规格为 $25\text{cm}\times 15\text{cm}$, 每穴 2 苗。其它管理同水稻高产栽培。

2.2 光谱数据测量及农学参数测定

采用美国 Cropscan 公司生产的 MSR-16 型便携式多光谱辐射仪(仪器视场角为 31.1°) 在水稻的主要生育时期测量水稻群体反射光谱。测量选择在晴

朗无云的天气进行, 测量时间为 11:00—14:00。测量时探头垂直向下, 距冠层顶部垂直高度约 1.5m。每小区固定测量 3 点, 每点重复测量 5 次, 取平均值作为该小区光谱测量值。

光谱测量的同时每小区破坏性取样 3—5 穴, 进行叶面积指数、生物量、含氮量等的测定分析。氮的测定采用微量凯氏定氮法(以干重为基础, 单位为%)。叶面积指数的计算采用干重法。在成熟期, 分别在各处理的各小区未取样处取 1m 双行普查亩穗数, 并从每小区取 20 个单茎作室内考种。收获面积 1m^2 , 脱粒、测产。

2.3 植被指数的计算

计算了常见的光谱植被指数, 其中, 近红外波段用 810nm 的反射率, 红光波段用 680nm 反射率, 绿光波段用 560nm 反射率, 具体计算公式见表 1。

表 1 植被指数的计算

Table 1 Calculation of different vegetation indices

缩写	名字	计算公式	文献
<i>RVI</i>	比值植被指数 Ratio vegetation index	$RVI = \rho_{\text{NIR}} / \rho_{\text{Red}}$	[17]
<i>NDVI</i>	归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	$NDVI = (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}})$	[18]
<i>PVI</i>	垂直植被指数 Perpendicular vegetation index	$PVI = (\rho_{\text{NIR}} - a\rho_{\text{Red}} - b) / \sqrt{1 + a^2}$	[19]
<i>DVI</i>	差值植被指数 Difference vegetation index	$DVI = \rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}$	[20]
<i>SAVI</i>	土壤调节植被指数 Soil-adjusted vegetation index	$SAVI = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}} + L} (1 + L), L = 0.5$	[21]
<i>RDVI</i>	再归一化植被指数 Renormalized difference vegetation index	$RDVI = \sqrt{NDVI \times DVI}$	[22]
<i>NIR/G</i>	R_{810} / R_{560}	$NIR/G = \rho_{810} / \rho_{560}$	[23]
<i>GNDVI</i>	绿色归一化植被指数 Green normalized difference vegetation index	$GNDVI = (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Green}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Green}})$	[24]

3 结果与分析

3.1 光谱植被指数与产量构成及产量的关系

水稻亩穗数与各植被指数呈正相关关系。在拔节期、孕穗期和灌浆初期达到显著水平, 其中以拔节期最好, 最佳的植被指数为 *RVI* 或 *GNDVI* (表 2)。用拔节至孕穗或抽穗时的植被指数累加值并没有提

高相关系数。

穗粒数的多少取决于拔节至灌浆初期植株的生长状况, 因为这一时期是水稻幼穗分化到花粉粒形成阶段, 直接影响颖花发育与结实。相关分析表明, 水稻单穗粒数与各植被指数呈正相关, 以拔节到灌浆初期的数据相关较好, 但不同的生育时期其最佳的植被指数也不相同。拔节期以 *PVI* 最佳, 孕穗期为 *NDVI*, 抽穗期为 *RVI* 和 *SAVI*, 而灌浆期则为 *PVI* 和 *RVI*。用拔节至抽穗或灌浆期的植被指数累加值

并没有提高两者的相关性。综合分析各个生育时期各植被指数的表现,发现灌浆初期的 *PVI* 表现最好,与单穗粒数的相关性高达 0.70 左右(表 2)。

水稻千粒重与各植被指数呈负相关关系,其中拔节期、孕穗期、灌浆初期关系较好,达到极显著水平。用拔节-孕穗/抽穗时的植被指数累加值可明显提高两者的相关性,其中用拔节-孕穗阶段的 *RVI* 或 *SAVI* 的累加值最好,相关系数分别为 -0.82 和 -0.806。(表 2)。

水稻产量与植被指数呈正相关关系,拔节期和孕穗期的相关性相对较好,达到了极显著水平,其次为灌浆初期,部分植被指数达到了显著水平。尽管某个生育时期某些植被指数与产量相关显著,但最高的相关系数仅为 0.8 左右(表 2)。这就说明直接用某个生育时期的某个光谱特征参数来直接预测水稻的最终籽粒产量还存在着一定的困难。

表 2 水稻产量构成及产量与最佳植被指数的相关性

Table 2 Correlation coefficient of best vegetation for yield and yield forecasting in rice

产量指标	生育时期	植被指数	相关系数
穗数/($10^4/\text{hm}^2$)	拔节期	<i>GNDVI</i> 或 <i>RVI</i>	0.83(0.831)
穗粒数	灌浆初期	<i>PVI</i>	0.698
千粒重/g	拔节-孕穗阶段	<i>RVI</i>	-0.82
产量/(kg/hm^2)	孕穗期	<i>GNDVI</i>	0.814

3.2 叶面积氮指数与产量形成的关系

叶片是作物的主要光合器官,叶面积的大小及含氮量的高低与光合作用密切相关。将叶面积指数

与叶片含氮量的乘积定义为叶面积氮指数(Leaf Area Nitrogen Index, 简称为 *LANI*)。发现水稻穗数与分蘖期的 *LANI* 显著正相关($r = 0.8353^{**}$)。每穗粒数与最大叶面积指数(抽穗时)呈显著的二次曲线关系,说明抽穗期的叶面积指数过高或过低,都不利于颖花的分化。抽穗时的叶片含氮量与每穗粒数显著正相关,说明抽穗时叶片含氮量越高,越有利于减少小花的退化。而抽穗时的 *LANI* 与每穗粒数也呈极显著的二次曲线关系,随 *LANI* 增加,每穗粒数也相应增加,当到达一定值以后,每穗粒数不再随着 *LANI* 的增加而增加。千粒重与开花后的 *LANI* 显著负相关。水稻籽粒产量与拔节期以后的 *LANI* 极显著正相关,尤其是孕穗以后,决定系数都在 0.82 以上,其中以孕穗期关系最好,回归方程为 $y = 1736.55\ln(x) + 2751.3$ ($R^2 = 0.921$), y 为产量(kg/hm^2), x 为 *LANI*, \ln 为自然对数(图 1)。这说明 *LANI* 和产量形成密切相关,可以作为预测水稻产量的指标。

3.3 叶面积氮指数(*LANI*)与光谱植被指数的关系

对水稻 *LANI* 与光谱植被指数之间的关系分析表明,*LANI* 与光谱植被指数存在着显著的正相关关系,不受氮肥水平和生育时期的影响,可以建立一个适用于全生育期的回归模型。其与 *RVI* 和 *NIR/G* 的关系用直线拟合较好,而与 *NDVI* 等其他植被指数,则用指数函数拟合较佳,相关回归方程见表 3。从表中数据可以看出,水稻 *LANI* 可以用光谱植被指数来预测,以 *RDVI* 为佳。由于 *LANI* 与水稻产量及其结构密切相关,因此通过光谱植被指数反演 *LANI*,从而间接地估测产量从理论上讲是可行的。

表 3 水稻叶面积氮指数对植被指数的回归方程

Table 3 Regression equations of *LANI* to vegetation indices in rice

植被指数	回归方程	决定系数 R^2	植被指数	回归方程	决定系数 R^2
<i>RVI</i>	$y = 0.4296x + 3.3976$	0.6713	<i>PVI</i>	$y = 9.9024e^{0.2196x}$	0.7778
<i>NIR/G</i>	$y = 1.2341x + 0.7712$	0.7609	<i>DVI</i>	$y = 1.4587e^{0.0579x}$	0.8657
<i>NDVI</i>	$y = 0.8464e^{3.0006x}$	0.8184	<i>RDVI</i>	$y = 1.1133e^{0.4229x}$	0.9124
<i>GNDVI</i>	$y = 0.9647e^{3.1777x}$	0.8453	<i>SAVI</i>	$y = 0.8542e^{2.0191x}$	0.8212

3.4 植被指数-累积叶面积氮指数-产量 (VI-CLANI-Yield)模型的组建

遥感估产的特点之一是基于遥感信息数据建立模型来预测产量。由于 *LANI* 和光谱植被指数有较好的相关性,而光谱植被指数可通过遥感方法获得,

因此,可以用光谱植被指数取代 *LANI*,与单产建立回归模型。然而,作物的产量形成是一个动态变化的过程,不仅受前期作物生长状况的影响,而且后期的影响也十分显著,尤其是开花和灌浆期是水稻经济产量形成的关键时期。在此期间如遇不良外界因素影响,作物的光合能力、光合时间以及光合产物的

消耗、运输和贮藏都将会受到影响,从而影响最终的籽粒产量。因此,对于一个较好的遥感光谱估产模型,所用的遥感参数应能反映出作物在整个生长过程中的光合生产动态。

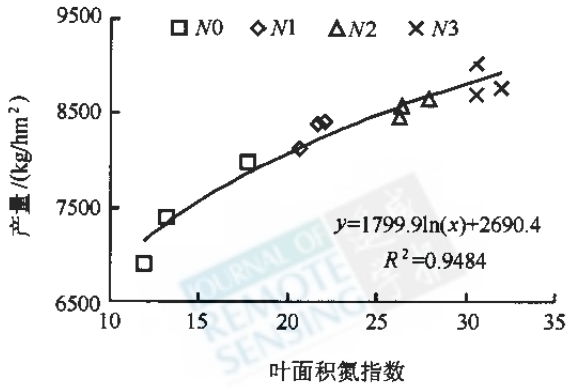


图 1 孕穗期叶面积氮指数与水稻产量的关系
Fig.1 Relationship of leaf area nitrogen index to yield in rice at booting stage

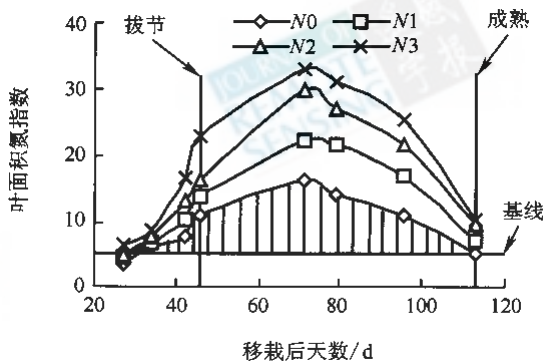


图 2 水稻叶面积氮指数随时间的变化曲线
Fig.2 Dynamic curves of leaf area nitrogen index over growth period in rice

图 2 为水稻生长期间 LANI 随移栽后天数变动的曲线。可以看出,不同氮肥处理的 LANI 截然不同,但都在孕穗期即移栽后 73d 左右达到最大值,此后随着叶片的慢慢枯黄而逐渐降低。LANI 曲线下面的面积代表了水稻该阶段的光合生产能力,不仅具有叶片光合面积的信息,还具有氮素含量等方面的信息。外界因素的影响也能从 LANI 的变化部分

地反应出来。此外,为了消除植被指数和光合能力不相关的问题,以无氮田块成熟时的 LANI(为 5)为基线,低于基线的光合能力可以忽略不计。图 2 中阴影部分面积即为不施氮条件下的有效 LANI 的累积值(Cumulative Leaf Area Nitrogen Index, CLANI),可通过积分计算获得,即将阴影面积分为若干个梯形,分别计算面积再求和。计算公式(设时间步长为 1d)如下:

$$CLANI_{(A-B)} = \int_j^n (LANI - 5) dt$$

$$= \sum_{i=j}^n \frac{1}{2} (LANI_{i+1} + LANI_i - 10) \quad (1)$$

(1) 式中, $CLANI_{(A-B)}$ 为水稻拔节到成熟时的 LANI 累积值, j 和 n 分别为水稻拔节和成熟时的日期,以移栽后天数表示($j = 46, n = 113$), $LANI_{i+1}$ 和 $LANI_i$ 为移栽后 $(i + 1)$ d 和移栽后 i d 时的 LANI。

为了最终组建遥感光谱估产模型(1)式中的 $LANI_{i+1}$ 和 $LANI_i$ 分别由遥感光谱植被指数替代,替代公式如下:

$$LANI = 1.1133 \times \exp(0.4229 \times RDVI) \quad (2)$$

把(2)式代入(1)式中,即可得到水稻 LANI 的光谱计算公式,如下:

$$CLANI_{rice} = \sum_{i=46}^{113} 0.5567 \times [\exp(0.4229 \times RDVI_{i+1}) + \exp(0.4229 \times RDVI_i) - 10] \quad (3)$$

最后将水稻 CLANI 分别与单产组建回归模型,即得最后的 VI-CLANI-Yield 模型。

$$Y_{rice} = 3902.6 \times \exp(0.0081 \times CLANI_{rice}) \quad R^2 = 0.884 \quad (4)$$

3.5 不同光谱估产模型的预测性比较

在已有的水稻估产模型中,多生育期光谱复合估产模型^[4]及基于群体经济产量与叶面积系数基础上的叶面积持续期-产量模型(LAD-Yield Model)^[6]等是较为成功的遥感估产方法。为了进一步比较本研究提出的模型与其他模型的预测精度,利用本试验的资料进行了比较分析,结果见表 4。可以看出,尽管 LAD-Yield 模型和复合估产模型的估测结果也不错,最大相对误差不超过 10%,平均相对误差分别为 0.12 和 -0.39,但本研究提出的模型表现出更高的预测精度(最大相对误差仅为 5%左右,平均相对误差为 0.075)。说明 VI-CLANI-Yield 模型具有较好的估产效果和应用价值。

表 4 不同光谱估产模型估测水稻单产值和实测值的比较

Table 4 Comparison of measured with estimated yields from different yield forecasting models in rice (10³kg hm⁻²)

模型		1N0	2N0	3N0	1N1	2N1	3N1	1N2	2N2	3N2	1N3	2N3	3N3
VI-CLANI- 产量模型	实测值 <i>OV</i>	6.91	7.99	7.41	8.39	8.13	8.70	8.57	8.45	8.66	8.41	9.02	8.78
	预测值 <i>EV</i>	7.16	7.93	7.44	8.10	8.15	8.27	8.70	8.47	8.48	8.83	8.98	8.94
LAD-产量模型	相对误差 <i>RE</i>	3.59	-0.81	0.43	-3.45	0.17	-5.03	1.46	0.24	-2.06	4.97	-0.41	1.80
	预测值 <i>EV</i>	7.46	7.45	7.86	8.59	8.39	8.54	8.72	8.41	8.39	8.60	8.14	8.76
复合估产模型	相对误差 <i>RE</i>	7.93	-6.77	6.18	2.46	3.13	-1.92	1.76	-0.54	-3.08	2.24	-9.80	-0.18
	预测值 <i>EV</i>	7.60	7.44	7.53	8.30	8.41	8.25	8.66	8.50	8.46	8.74	8.80	8.12
	相对误差 <i>RE</i>	9.90	-6.83	1.67	-1.01	3.44	-5.18	1.00	0.58	-2.35	3.98	-2.39	-7.45

注: *OV*, Observed value; *EV*, Estimated value; *RE*, Relative error

4 结论与讨论

穗数、每穗粒数和粒重是禾谷类作物产量的 3 个构成因素,三者之间互相依赖,互相影响,贯穿作物生育进程,共同决定着最终的产量。因此估产模型建立要综合考虑整个生育时期的作物生长状况。本研究通过单一生育时期或某个生育阶段的光谱植被指数来直接估测水稻产量精度较低。光谱植被指数与叶面积氮指数 *LANI*(叶面积指数与叶片含氮量的乘积)极显著相关,*LANI*的变化规律与产量的形成过程密切相关。在此基础上,建立了水稻拔节后累积叶面积氮指数-光谱植被指数-产量模型(VI-CLANI-Yield Model),与前人提出的多生育期复合估产模型^[2-4]和叶面积持续期-产量模型(LAD-Yield Model)^[5]比较表明,本模型的预测精度最高,最大相对误差仅为 5%左右,平均相对误差为 0.075,因而为水稻单产的精确估测奠定了理论基础。

与单生育期光谱估产模型相比,多生育期复合估产模型^[2-4]增加了作物的信息,精度有所提高。但由于其仅包含几个生育时期的作物信息,并没有反映出作物生长变化的动态趋势,因此或多或少漏掉了某些信息,只能是相对静态的估产模式。LAD-Yield Model^[5]虽然考虑了生育后期光合方面的信息,但仍缺少光合速率(与灌浆强度有关)的信息。此外对前期作物生长的信息量体现不足。从产量形成的生理基础来看,前期的光谱值决定了营养生长的好坏,中期光谱值可反映营养生长向生殖生长转化的情况,后期光谱值可反映水稻是青秆黄熟、贪青徒长还是早衰。而本研究提出的 VI-CLANI-Yield Model 综合考虑了从拔节到成熟期的作物生长动态变化趋势,以及植被指数和光合能力的间接关系。*LANI*不仅包含了叶面积指数的动态变化信息,还包

括了叶片含氮量的信息,而抽穗以后叶片含氮量的变化能很好地体现灌浆速率的变化趋势。可见,本模型有效地弥补了上述两种模型的缺点,因此预测精度较高。

应当指出,本试验结果虽是在田间试验中获取,但影响因子相对比较单一。而实际大田生产中,各地的肥力条件、熟制、管理技术等不尽相同,可能会影响水稻的光谱特性,对 *LANI* 的估测有一定的干扰。因此,需根据不同条件下水稻冠层和叶片的光谱分析结果而建立一套不同条件下的修正方法。

参 考 文 献 (References)

- [1] Moran M S, Inoue Y, Barnes E M. Opportunities and Limitations for Image-based Remote Sensing in Precision Crop Management[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **61**: 319-346.
- [2] Patel N K, Sahal T P, Patel M S. Spectral Response of Rice Crop and Its Relations to Yield and Yield Attributes[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, **6**(5): 657-664.
- [3] Shibayama M, Akiyama T. Estimating Grain Yield of Maturing Rice Canopies Using High Spectral Resolution Reflectance Measurement [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, **36**: 45-53.
- [4] Wang Y Y. The Relationship between Vegetation Index and Rice Growth and Rice Yield Components [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 1996 (27): 55-59. [王延颀. 植被指数与水稻长势及产量结构要素关系的研究[J]. 国土资源遥感, 1996, (27) 55-59.]
- [5] Ji S Q, Chen P S, Zhang Y S. A Method of the Remote Sensing Techniques of Rice Yield Estimation [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1997 **36**(4): 509-512. [吉书琴 陈鹏狮 张玉书. 水稻遥感估产的一种方法[J]. 应用气象学报, 1997 **8**(4) 509-512.]
- [6] Zhang X Y, Li R D, Chen S J, et al. A Practical Model for Rice Yield Estimating [A]. *Corpus of Research on Yield Estimating Technology with Remote Sensing of Wheat, Corn and Rice* [C]. Beijing: Science and Technology Press, 1993. [张晓阳 李仁东 陈世俭 等. 水稻遥感单产估算实用化模型 [A]. 小麦、玉米和水稻遥感估产技术试验研究文集 [C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.]
- [7] Aparicio N, Villegas D, Casadesus J, et al. Spectral Vegetation

- Indices as Nondestructive Tools for Determining Durum Wheat Yield [J]. *Agronomy Journal* ,2000 ,**92** : 83—91 .
- [8] Serrano L , Filella I , Penuelas J . Remote Sensing of Biomass and Yield of Winter Wheat under Different Nitrogen Supplies [J]. *Crop Science* ,2000 **40** :723—731 .
- [9] Hou Y Y , Wang S L . Study on the Model of Crop Yield Estimating Based on *NDVI* and Temperature [J]. *Geography and Territorial Research* ,2002 ,**18**(3) :105—107 . [侯英雨 , 王石立 . 基于作物植被指数和温度的产量估算模型研究 [J]. 地理学与国土研究 2002 ,**18**(3) :105—107 .]
- [10] Rudorff B F T , Batista G T . Spectral Response of Wheat and Its Relationship to Agronomic Variables in the Tropical Region [J]. *Remote Sensing of Environment* . 1990 ,**31** :53—63 .
- [11] Yang X W , Xue Z P . Study on Dynamic Monitoring of Rice Yield with Remote Sensing [J]. *Remote Sensing Information* ,1995 ,**1** :19—22 . [杨星卫 , 薛正平 . 水稻遥感动力估产模拟初探 [J]. 遥感信息 . 1995 ,**1** :19—22 .]
- [12] Wang R C , Wang K , Shen Z Q , *et al* . A Study on Modeling of Rice Yield Estimation by Remote Sensing [J]. *Journal of Remote Sensing* , 1998 **2**(2) :119—124 . [王人潮 , 王柯 , 沈掌泉等 . 水稻单产遥感估测建模研究 [J]. 遥感学报 , 1998 **2**(2) :119—124 .]
- [13] Wang R C , Huang J F . Rice Yield Estimating with Remote Sensing Data [M]. Beijing : China Agriculture Press , 2002 . [王人潮 , 黄敬峰 . 水稻遥感估产 [M]. 北京 : 中国农业出版社 , 2002 .]
- [14] Inoue Y , Susan Moran S , Takeshi H . Analysis of Spectral Measurements in Paddy Field for Predicting Rice Growth and Yield Based on a Simple Crop Simulation Model [J]. *Plant Production Science* ,1998 ,**1**(4) :269—279 .
- [15] Clevers J G P W , Buker C , Van Leeuwen H J C , *et al* . A Framework for Monitoring Crop Growth by Combining Directional and Spectral Remote Sensing Information [J]. *Remote Sensing of Environment* ,1994 **50** :161—170 .
- [16] Clevers J G P W . A Simplified Approach for Yield Prediction of Sugar Beet Based on Optical Remote Sensing Data [J]. *Remote Sensing of Environment* ,1997 ,**61** :221—228 .
- [17] Pearson R L , Miller D L . Remote Mapping of Standing Crop Biomass for Estimation of the Productivity of the Short - grass Prairie [A]. Pawnee National Grasslands [C]. Colorado . Ann Arbor . MI : ERIM . 1972 , 1357—1381 .
- [18] Rouse J W , Haas R H , Schell J A , *et al* . Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation of Natural Vegetation [R]. NASA/CSFC , Type III , Final Report , Greenbelt , MD , USA , 1974 , 1—371 .
- [19] Richardson A J , Wiegand C L . Distinguishing Vegetation from Soil Background Information [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* ,1977 . **43** :1541—1552 .
- [20] Jordan C F . Derivation of Leaf Area Index from Quality of Light on the Forest Floor [J]. *Ecology* ,1969 ,**50** :663—666 .
- [21] Huete A R . A Soil - adjusted Vegetation Index (SAVI) [J]. *Remote Sensing of Environment* , 1988 ,**25** :295—309 .
- [22] Reu Jean J L , Breon F M . Estimating PAR Absorbed by Vegetation from Bidirectional Reflectance Measurement [J]. *Remote Sensing of Environment* ,1995 ,**51** :375—384 .
- [23] Shibayama M , Akiyama T . Seasonal Visible , Near - Infrared and Mid - Infrared Spectra of Rice Canopies in Relation to LAI and Above - ground Dry Phytomas [J]. *Remote Sensing of Environment* , 1989 ,**27** :119—127 .
- [24] Gitelson A , Kaufman Y J , Merzlyak M N . Use of a Green Channel in Remote Sensing of Global Vegetation from EOS - MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment* ,1996 ,**58** :289—298 .

Rice Yield Forecasting Model with Canopy Reflectance Spectra

XUE Li-hong , CAO Wei-xing , LUO Wei-hong

(Hi-tech key Laboratory of Information Agriculture of Jiangsu Province ,

Key Laboratory of Crop Growth Regulation , MOA , Nanjing Agricultural University , Nanjing 210095 , China)

Abstract : Spectral reflectance of rice canopies with different nitrogen treatment was measured over an entire growing season and eight spectral indices such as *RVI* , *NDVI* , *PVI* etc were calculated . Based on the biological mechanism of yield formation , relationships of these vegetation indices to yield and its components were analyzed . The results showed that it was limited to predict yield with vegetation index from single or multiple developing stages . However , the dynamic curve of Leaf Area Nitrogen Index (product of *LAI* by leaf nitrogen content on dry weight basis) can well track the process of yield formation . Due to the close relationship with the vegetation index , Cumulative Leaf Area Nitrogen Index (*CLANI* , the area below the curve) was used to derive a model named VI-*CLANI*-Yield model for rice yield estimation . The comparison of the present model with the *LAD*-Yield model and complex VI-Yield model indicated that the yield estimation accuracy was best for VI-*CLANI*-Yield model with average relative error of 0.075 . This suggests that VI-*CLANI*-Yield model would be a practical and effective approach for rice yield forecasting .

Key words : rice ; vegetation index ; leaf area nitrogen index (*LANI*) ; yield ; yield components ; forecasting model