

水稻遥感动力估产模拟初探

杨星卫 薛正平 陆 贤

(上海市气象科学研究所 上海 200030)

摘 要 将遥感手段和动力估产模型相结合,即通过 NOAA 卫星获得有效绿度模式;通过绿度-叶面积关系式,估算水稻群体叶面积指数;依据水稻生物量分配规律及环境条件对其影响,估算水稻各器官的干重,取得了较好的模拟效果。

关键词 水稻,遥感估产,动力模拟

1 引言

作物动力估产模式研究也称作作物生长模拟模式的研究,在荷兰、美国等已开展多年^[1],国内也从 80 年代中开始起步^[2]。其基本思路是利用作物生物学观测与平行的气象观测资料,运用数学函数定量描述其能量转换与物质分配过程,经计算机模拟调试参数后,构成比较完整的动力估产模式。这类模式从理论上阐明了作物生长发育及产量形成的内在机理,但由于其资料不易获取、误差源由复杂等因素,目前大多处于理论研究阶段,难以大范围推广使用。

近年发展的大面积气象卫星遥感估产技术,依据卫星探测到的作物光谱信息,估算其长势和产量,由于气象卫星信息时间频率高、空间覆盖面广、资料易于获取,使其与传统估产方法相比,能提供更为详细的产量空间分布细节,目前正日益得到广泛的重视。

本研究将遥感与动力估产方法相结合,即通过气象卫星获得不同生育期的绿度值,通过绿度值-叶面积对应关系估算水稻群体叶面积指数;结合叶片比叶重的变化估算叶片干物重;通过水稻干物重累积过程中的物质分配规律和环境条件的影响,估算水稻总干物质重和产量。作者借助遥感手段为水稻动力估产模式的推广应用作了初步尝试,取得了较好的模拟结果。

2 资料来源及处理

2.1 气象卫星资料

气象卫星资料处理按下述流程:从 NOAA 接收系统中采集 1B 数据;进行投影变换和太阳高度角、临边变暗订正;选区并进行适当的双线性放大;采用二次多项式方法将影像与本底图(上海以乡为边界的行政区域图)进行几何配准;分乡统计平均值。

收稿日期:1994 年 2 月 28 日;收到修改稿日期:1994 年 5 月 17 日。

鉴于水稻叶片在可见光波段 (0.58—0.68 μm) 吸收了大部分照射其上的辐射, 有一吸收峰与作物光合作用有关。在近红外波段 (0.725—1.10 μm) 叶片具有高的反射率和透射率, 导致了冠层内的多层反射现象, 使其在近红外波段的反射率与整个冠层高度内的叶面积变化有较好的关系。采用第一通道反射率值 (CH1) 与第二通道近红外通道反射率值 (CH2) 的差值来估计水稻群体的叶面积指数。为了减少地面目标的非朗伯体性质造成的卫星测值资料的振荡, 作者选取了 1992、1993 年水稻生长季内 6 个时相的上海区 NOAA/AVHRR 的晴空、卫星过测站顶 (即星下点) 资料作为建模的基础资料。

由于建模所需资料必须在晴空少云天气状况下获得, 因此它是随机的, 不连续的, 难以完全与地面观测资料相匹配。为了资料分析的同步性, 根据水稻生长季内差值绿度指数呈抛物线变化规律 (图 1), 求得与地面叶面积观测同步的绿度值。其中图 1 的时间坐标 D 起始日为 6 月 1 日。

水稻生长季内绿度随时间变化规律可定量描述如下:

$$G(t) = a + bt + ct^2 \quad (1)$$

其中 $G(t)$ 为绿度值的时间变化函数, t 为移栽后天数, a 、 b 、 c 为回归参数。

2.2 田间试验资料

试验样区选择在上海市松江县天马乡, 样区总面积为 60.43 平方公里, 耕地面积占 29.26 平方公里, 水稻面积占 26.85 平方公里, 水稻占耕地面积比为 91.8%, 1988 年至 1992 年这 5 年水稻平均单产为 501 公斤/亩, 1992 年单产 509 公斤/亩, 单产在上海市属中等偏上水平。

在试验样区选单产好、中、差 3 个类型的田块各 2 块, 进行水稻长势和产量测定。长势除了对常规的苗情和生育期观测外, 对水稻分蘖高峰、幼穗分化、孕穗、齐穗、乳熟 5 个关键生育期进行叶面积系数和干物重测定。干重包括绿叶重、黄叶重、茎鞘重、穗重。在齐穗至成熟期每隔 10 天增加穗重测定。产量测定包括每亩有效穗、每穗粒数、空秕率、千粒重、理论产量及田块的实收产量。

供试验品种为 88122、8961, 栽种方式以底膜育秧的移栽稻为主, 水稻生长季从 6 月上旬—10 月下旬。

2.3 气象资料

气象资料由松江县气象站提供。

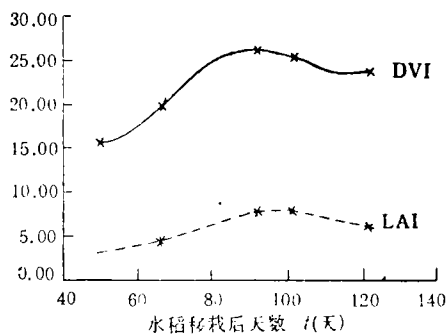


图 1 叶面积指数随差值植被指数的变化

Fig. 1 Variations of LAI and DVI

3 建模方法

水稻遥感动力估产模型的建模流程如图 2 所示。

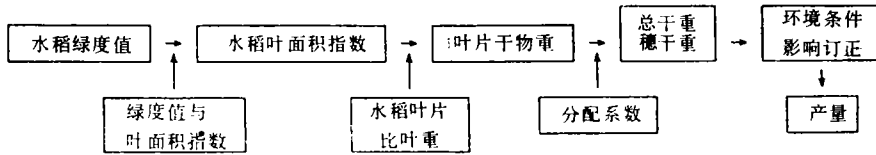


图 2 建模流程图

Fig. 2 Scheme of Simulated Model

3.1 绿度值与叶面积指数的关系式

图 1 中的虚线反映了水稻全生育期叶面积指数呈抛物线变化规律，它与前人的许多试验结果相吻合^[3]。如图所示，从移栽至抽穗阶段叶面积呈不断增加的趋势，但增长速率由快至慢；进入灌浆后期至成熟，叶面积逐渐枯黄衰落，呈减少趋势。大量试验、研究表明，叶面积变化是水稻生长状况的综合反映，它既反映了水稻的长势，也反映了群体的密度变化，到后期则可反映灌浆期的长短。前面已经提及，本文选用的遥感差值绿度指数 (*DVI*)，作为监测群体叶面积变化的主要指标，它利用水稻在可见光通道的光谱吸收特性和近红外通道的多层反射特性所形成的叠加效应。图 3 显示的绿度-叶面积呈非线性相关(相关系数达 0.98)，也证实了运用 *DVI* 指数预测群体叶面积指数的可行性。本文选用非线性内插后的同步的 *DVI* 和 *LAI* 参数各 10 个样本建立了 *DVI* 和 *LAI* 的统计回归关系，它的表达式为：

$$DVI(t) = a_2 + b_2 \ln LAI(t) \quad (2)$$

式中 $DVI(t)$ 为绿度值的时间变化函数， $LAI(t)$ 为 t 时刻的叶面积指数， a_2 、 b_2 为回归参数。

3.2 水稻叶面积比叶重的动态变化模式

水稻从播种出苗到灌浆成熟，叶片除了表面积有上述的变化规律外，大量的研究成果表明，叶片的厚度也有其自身的变化规律，其随时间的变化可用如下的不对称抛物线拟合：

$$Q(t) = a_0 + (a_f - a_0) \times \exp[-C \times (d - t)^2 / t^2] \quad (3)$$

式中 $Q(t)$ 为叶片比叶重的时间函数式， a_0 、 a_f 分别为移栽初期及齐穗期的比叶重， c 、 d 为回归参数。根据观测资料，并对(3)式作适当变换，即可得到参数 c 、 d 。 c 、 d 值随作物品种而变， c 的大小反映 $Q(t)$ 变化的幅度， d 则指示 $Q(t)$ 值最大值点的时间坐标。

3.3 叶片干物重的模拟

有了叶面积指数、叶片比叶重的计算，可运用下式得到叶片干物重的模拟表达式：

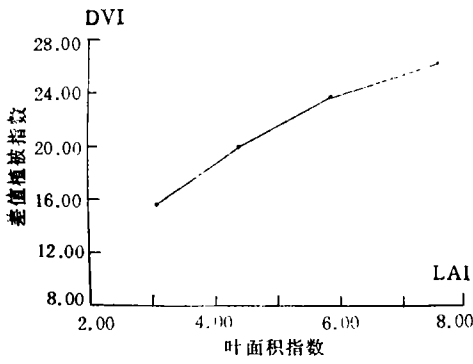


图 3 叶面积指数和绿度的关系
Fig. 3 Correlation of leaf area index and green ness.

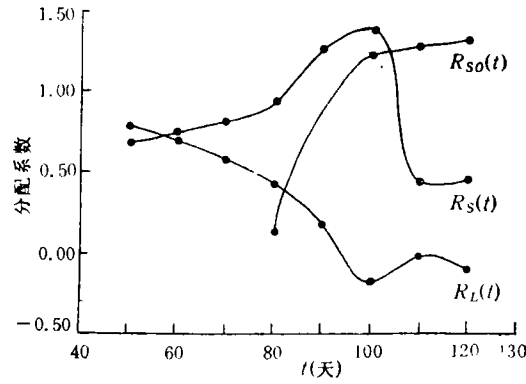


图 4 水稻分配系数的时间变化
Fig. 4 Variations of rice distributive coefficient

$$\hat{W}_L(t) = H \times LAI(t) / Q(t) \tag{4}$$

其中 $H = 667$ ，即为亩与米²的转换系数， $\hat{W}_L(t)$ 即为叶片干物重的模拟值， $F(G)$ 、 $Q(t)$ 由(2)(3)式得到。公式的物理意义是 t 时刻的每亩叶干重 $\hat{W}_L(t)$ 等于 t 时刻的群体叶面积指数 $LAI(t)$ 除以单位叶面积的叶干重 $Q(t)$ ，再乘上亩与米²的转换系数 H 。

3.4 分配系数及总干物重、茎鞘、穗重增长的模拟

作物干物质在各器官的分配，涉及到光合产物向叶片、茎鞘、穗的运输与转化，其过程相当复杂，且机理尚待研究，本工作对此作了很大的简化，以突出方法的合理性及结果的可验证性。为此，作者把叶片、茎鞘、穗的分配系数由以下一组方程加以描述和计算：

$$\begin{aligned} R_L(t) &= (W_L(t+1) - W_L(t)) / (W(t+1) - W(t)) \\ R_S(t) &= (W_S(t+1) - W_S(t)) / (W(t+1) - W(t)) \\ R_{SO}(t) &= (W_{SO}(t+1) - W_{SO}(t)) / (W(t+1) - W(t)) \\ R_L(t) + R_S(t) + R_{SO}(t) &= 1 \end{aligned} \tag{5}$$

式中 $R_L(t)$ 、 $R_S(t)$ 、 $R_{SO}(t)$ 、为 t 时刻叶、茎鞘、穗的分配系数， $W_L(t)$ 、 $W_S(t)$ 、 $W_{SO}(t)$ 、为 t 时刻叶、茎鞘、穗的干重实测值， $W(t)$ 为总干重的实测值。

(5)式中前 3 个方程表示在时间间隔为 1 的情况下，叶、茎鞘、穗干重的增长量占总干物质增长量的比例，试验资料证明，总干物质的增长在水稻生长全过程内均为正值，即 $W(t+1) - W(t)$ 大于零。其它分器官则不然，例如叶片，在齐穗期前一般为正值，之后则为负值，正值表明光合产物向叶片运输、贮藏；而负值则表明叶片营养成分向穗等部位转移。第 4 个方程是一个质量守恒约束，这里我们忽略了地下部分根的生长变化，据试验观测，根的变化，尤其是中、后期，远不及叶和穗的变化迅速。

依据 (5) 式计算得到的分配系数，在总体变化趋势上与以往研究是相吻合的^[3] (图 4)。

3.4.1 总干物重增长的模拟

有了叶片分配系数,总干物重的模拟式如下:

$$\hat{W}(t) = (\hat{W}_L(t) - \hat{W}_L(t-1)) / R_L(t) \quad (6)$$

$$\hat{W}_L(t) - \hat{W}_L(t-1)$$

为 t 到 $t-1$ 时刻叶片干物重的增量, $R_L(t)$ 为 t 时刻叶的分配系数。

3.4.2 茎鞘干物重的模拟

茎鞘干物重模拟可写成

$$\hat{W}_s(t) = (\hat{W}(t) - \hat{W}(t-1)) \times R_s(t) \quad (7)$$

式中 $W(t)$ 、 $R_s(t)$ 同(5)式。

3.4.3 穗干物重的模拟

与(7)式相类似,穗干物重的模拟表达式为

$$\hat{W}_{so}(t) = (\hat{W}(t) - \hat{W}(t-1)) \times R_{so}(t) \quad (8)$$

式中 $\hat{W}(t)$ 、 $R_{so}(t)$ 同(5)式。

4 模拟结果分析

4.1 叶片干物重的模拟结果

综合(2)、(3)、(4)式即为叶片干物重的模拟结果输出式。模拟值与实测值相比,1992、1993年的平均相对误差达10.1%,进一步分析发现,其误差在时间上的分布,具有一定的规律性。其较大误差的出现时段与该时段较少的日照时数相对应,即误差值的大小与日照时数呈负相关关系。从生物学意义上可解释为:当日照时数小于(大于)常年平均值时,抽穗前叶片干物质增长速率下降(上升)。抽穗后叶片干物质转移速率下降(上升)。误差与日照时数的相关式可表示为

$$\Delta \hat{W}_L = a_3 + b_3 \Sigma S \quad (9)$$

$\Delta \hat{W}_L$ 为一旬叶片干物质实际值与模拟值的差, ΣS 为对应旬的日照时数, a_3 、 b_3 为回归参数。相关系数 $R = -0.8442$, 置信度 $\alpha = 0.05$, $n = 8$ 。组合(6)、(9)式,得到经过日照时数订正的叶面干物重模拟结果,即

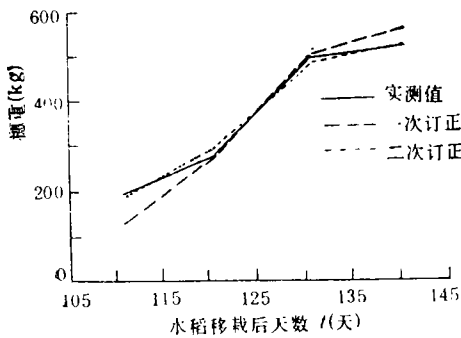


图 5 穗重的时间变化

Fig. 5 Variation of the tassel

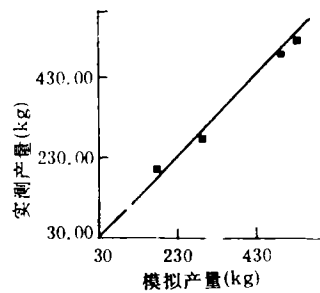


图 6 模拟产量与实测值的比较

Fig. 6 Comparison between simulating results and true yield

$$W_L^*(t) = \Delta \hat{W}_L + W_L(t) \quad (10)$$

(10)式的模拟结果有较大改进,平均相对误差由原来的 10.1%降到 6.5%。

4.2 总干重的模拟结果

(6)式输出的总干物重结果,跟叶片情况相似与实测值存在一定误差,样本点平均相对误差为 25.3%,其误差的大小也与该时段日照时数多少有密切关系,故其误差订正仍用(9)式相同方法:

$$\Delta \hat{W} = a_4 + b_4 \Sigma S \quad (11)$$

$\Delta \hat{W}$ 为一旬总干物重实际值的差, ΣS 意义上同(9)式,相关系数 $R = -0.8055$,置信度 $\alpha = 0.05$, $n = 8$,至此总干物重的模拟式:

$$W^*(t) = W(t) + \Delta \hat{W} \quad (12)$$

经过上述订正后结果有很大改观,平均相对误差由原来的 25.3%,降至 8.1%。

4.3 穗干物重的模拟

穗干物重增长过程模拟是整个研究工作的最终归属,(8)式的直接输出结果如图 5 所示,穗增长前期模拟值低于实测值,而后期则偏高于实测值,平均相对误差达 11.35%,分析 1992、1993 年水稻生长期的天气状况都是前期多雨、低温、寡日照,水稻分蘖发棵差,有效穗数偏少,后期特别是灌浆成熟期,温度正常,日照较常年偏多,对水稻个体发育较有利,普遍表现为大穗、千粒重饱满,故我们仍沿用日照因子订正穗重增长的模拟结果。

$$\Delta \hat{W}_{s0} = a_5 + b_5 \Sigma S + C(\Sigma S)^2 \quad (13)$$

$\Delta \hat{W}_{s0}$ 为一旬穗重实际值与模拟值的差, ΣS 意义上同(9)式,相关系数 $R = 0.97$,置信度 $\alpha = 0.01$, $n = 5$,至此,穗重的最终表达式为

$$W_{s0}^* = \Delta \hat{W}_{s0} + W_{s0}(t) \quad (14)$$

1992 年因实测样本太少未做二次订正,1993 年由 10.5%降至 3.4%。

5 讨论

本研究利用遥感手段预测水稻群体叶面积;通过叶面积估算水稻总干重;然后依据生物学分配规律和环境条件对其影响估算各器官的干物重,取得了较好的模拟效果(图 6)。

表 1 1992、1993 年模拟结果与实测值比较

Table 1 Comparison between Simulated and measured values in 1992 and 1993.

项 目	平均相对误差(%)	
	1992 年	1993 年
总干重	8.10	3.70
穗 重	12.20	3.40
叶 重	12.10	0.80

作者认为将遥感监测与动力估产相结合有二方面的优势,一方面可以克服动力估产

模式资料不易获取、误差源由复杂等缺陷,而有利于动力估产模式的推广应用,另一方面将遥感与动力估产相结合,可解决遥感所监测到的生物学产量高不一定经济产量高的矛盾,它与后期天气条件对物质分配规律的影响有关。本文只提出一种遥感估产的思路,在具体应用时需注意一是遥感植被指数的纯化问题,尤其对于作物布局复杂的地区,要先进行混合像元分解;二是模式订正时气象因子的选择要依据各地的实际情况,选择影响水稻后期产量形成的主要限制因子。

参 考 文 献

- [1] Penning de vries, F. W. T. et al., Simulation of plant growth and crop production. 1982: 王馥棠,王石立等译,植物生长与作物生产的模拟,科学出版社,1988,102-155.
- [2] 徐希孺等,环境监测与作物估产的遥感研究论文集,北京:北京大学出版社,1991,40-51.
- [3] 冯定原,夏海峰,我国粮食产量气象预测预报研究. 北京:气象出版社,1989,128-135.

A Preliminary Study on Remote Sensing Dynamic Simulation for Estimating Rice Yield

Yang Xinwei Xue Zhenping Lu Xian
(Shanghai Meteorological Institute)

Abstract In this paper, the authors combine the remote sensing technique with dynamic estimating yield model, e.g. to acquire effective green index through NOAA satellite data, estimate the index of leaf area in a certain rice unit through the relationship between green and leaf area, and estimate dried weight of each rice organ on the basis of distributive law of rice biological quantity and the input of surrounding conditions. A satisfactory simulatory effect is obtained.

Key words Rice, Estimating Yield, Remote Sensing Dynamic Simulation