

水稻叶面积指数的普适增长模型*

于强 傅抱璞

(南京大学大气科学系, 南京 210008)

姚克敏

(南京气象学院应用气象系)

摘要 Logistic模型仅以时间为自变量。本文发展了一个模拟叶面积指数动态变化的扩充的Logistic模型。它以生育期和干物重为预报因子,是模拟叶面积指数随地理位置和生育期变化的统一模型。用长沙、岳阳的水稻地理分期播种资料进行了拟合。结果表明,该模式可解释同一品种LAI随地理位置、播种期和生育期变异的95.5%。这种多因子复合的Logistic模型可作为受环境因子影响的重复试验的统一模型。

关键词: 水稻 叶面积指数 模型

1 问题的提出

叶面积指数模式是作物生长模拟的子模式。LAI随生育期改变。在营养生长期,水稻的LAI逐渐增大,约在孕穗期至抽穗期达最高值,在生殖生长后期,随着叶片成熟、衰老,LAI减小。研究表明^[1,2],这一过程可用Logistic模型或其修正形式很好地表达。一般

$$LAI = f(t) \quad (1)$$

t为生育期参数。

LAI还与气象条件密切相关。在不同地区或播期,水稻LAI存在很大差异,有的最大LAI在5~7左右,有的则达到10。而在一些作物生长模拟中,叶面积指数模式往往只注重其生育期的变化,而忽视地理和播期的差别,即使用式(1)。

叶面积是形成干物重的基础。但是干物重形成的多少反过来也影响叶片的增长和比叶重的增加。比如在同一生育期,在干物重大的情况下,对应的叶面积也较大。所以在一段时期内,若气候等条件适宜,干物重增加快,那么叶面积也会随之有较大的增加。因而

$$LAI = f(DM, t) \quad (2)$$

DM为干物重。

干物重是叶面光合作用的产物。作物生长模拟是以物质生产的模拟为根本途径。本

文将对经典的Logistic模型予以扩充,建立一个以生育期和干物重为预报因子的叶面积指数增长模型,即式(2),以便更好地应用于作物生长模拟。

2 模型

2.1 叶面积指数随生育期的变化

Logistic模型首先用于描述细菌种群的增长,表示种群相对增长率与种群密度呈线性关系。即:

$$\frac{dx}{xdt} = a + bx \quad (3)$$

其积分形式为:

$$x = \frac{x_m}{1 + \exp(a' + b't)} \quad (4)$$

其中:x为种群密度,相当于本文LAI;a'、b'、x_m为参数。

作物叶面积指数随生育期的变化,在抽穗前符合经典Logistic曲线,达最大值后在灌浆成熟期降低。王信理(1986)据此提出修正模型:

$$\frac{dx}{xdt} = (a + bx)(c + dt) \quad (5)$$

其积分形式为:

$$x = \frac{x_m}{1 + \exp(a_1 + a_2t + a_3t^2)} \quad (6)$$

* 收稿日期:1994-01-27

使用(6)式,可准确模拟叶面积指数与生育期的关系(图1)。

$$LAI = \frac{11.6}{1 + \exp(4.11 - 13.9t + 9.9t^2)} \quad (7)$$

$n=10, R=0.986^{***}$, ***表示通过信度0.01的显著性检验,时间 t 变化于0~1之间。

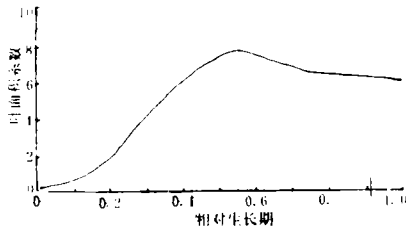


图1 叶面积指数随生育期的变化
(长沙,10次播期平均,1980)

2.2 叶面积指数与干物重

在多次播期的同一生育期,叶面积指数与地上部干物重满足 Michaelis-Menten 关系。图2表示长沙10次分期播种试验,齐穗期叶面积指数与干物重的关系。可见,当干物重较大时,对应叶面积指数也较高。当干物重超过一定界限,叶面积指数则趋于稳定。为便于比较,干物重用相对值表示,即以某一播期为标准,相对干物重为实际值与同期标准值之比(RDM)。

$$RDM(t) = DM(t)/DM_0(t) \quad (8)$$

$$DM_0 = \frac{2400}{1 + \exp(8 - 12.9t + 9.0t^2)} \text{ (g/m}^2\text{)} \quad (9)$$

时间 t 表示发育阶段,以生育期开始为0,结束为1。图2中叶面积指数与相对干物重的关系为:

$$LAI(t) = \frac{P \cdot RDM(t)}{1 + Q \cdot RDM(t)} \quad (10)$$

变换(10)式为线性关系:

$$\frac{1}{LAI(t)} = \frac{1}{P \cdot RDM(t)} + \frac{Q}{P} \quad (11)$$

用最小二乘法统计 $LAI(t)^{-1}$ 与 $RDM(t)^{-1}$ 的线性关系,并对参数进行变换,可求得待定参数 P, Q 值^[1]。结果如下:

$$LAI = \frac{0.09 \cdot RDM}{1 + 1.33 \cdot RDM} \quad (12)$$

$n=10, R=0.83^{**}$, 通过信度0.05的检验。

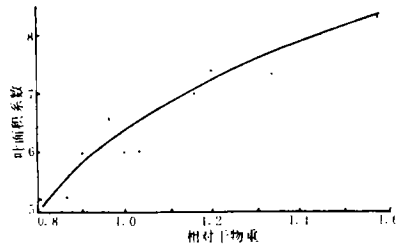


图2 同一生育期叶面积指数与地上部干物重的关系(长沙,10次播期,1980)

2.3 普适模型

作物生育期长度随播种期变化。统一模型必须首先统一时间尺度。这里使水稻大田生长期0~1化。即移栽期为0,成熟期为1。设大田生长期为 n_0 ,某生育期距移栽期天数 n ,则该生育期0~1化时间尺度为:

$$t = n/n_0$$

叶片干物重等于叶面积指数与比叶重之积。在某一播种期,如果干物重较大,对应的叶面积指数和干物重均较大。据(2)式用分离变量法得:

$$LAI = f(DM) \cdot f(t) \quad (13)$$

综合(6)、(8)、(10)、(13)式有

$$LAI(DM, t) = \frac{P' \cdot DM(t)/DM_0(t)}{1 + Q' \cdot DM(t)/DM_0(t)} \cdot \frac{LAI_m}{1 + \exp(a_1 + a_2t + a_3t^2)} \quad (14)$$

式中 $P', Q', LAI_m, a_1, a_2, a_3$ 为参数。

$$f(DM) = \frac{P' \cdot RDM(t)}{1 + Q' \cdot RDM(t)}$$

$f(DM)$ 满足边界条件:

$$DM=0; \quad f(DM)=0;$$

$$DM=DM_0; \quad f(DM)=1;$$

即当干物重等于标准干物重时,干物重对叶面积指数的订正系数 $f(DM)$ 等于1。这时 $P'=1+Q'$,因而(14)式变为:

$$LAI = \frac{(1+Q') \cdot DM(t)/DM_0(t)}{1 + Q' \cdot DM(t)/DM_0(t)} \cdot \frac{LAI_m}{1 + \exp(a_1 + a_2t + a_3t^2)} \quad (15)$$

此式即为叶面积随生育期及干物重变化的统

一模型。可见, $f(t)$ 部分为修正的 Logistic 模型, $f(DM)$ 部分为干物重订正因子。

当 $Q' = 0$ 时, (15) 式为:

$$LAI(t) = \frac{DM(t)}{DM_0(t)} \cdot \frac{LAI_m}{1 + \exp(a_1 + a_2 + a_3 t^2)} \quad (16)$$

表明叶面积指数与干物重为线性关系, 比叶重不变。

当 $Q' \rightarrow \infty$ 时, $f(DM) = 1$, (15) 式退化为单纯的 Logistic 模型。即用多次播期的资料拟合一个模型, 而不进行干物重订正。

3 实例

3.1 资料来源

采用全国杂交水稻气象科研协作组试验资料, 统一种子来源和肥水管理措施。品种为汕优 6 号。地点为长沙、岳阳站 (1980~1981)。

3.2 拟合方法

Logistic 模型需变换成多元线性关系, 进行拟合。很多学者提出了多种方法^[4~7]。其中最简便的为“试射法”。即把 (6) 式变为

$$\ln\left(\frac{x_m}{x} - 1\right) = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 \quad (17)$$

先确定 x_m 值, 拟合上式左边与时间 t 、 t^2 的关系。调整 x_m 值, 直到取得最佳拟合效果, 即得方程 (17)。本文也采用这种方法, 只是需同时确定 (15) 式中 LAI_m 和 Q 值, 对其进行适当调整, 直到满意为止。具体方法是, 变换 (15) 式:

$$\ln\left[\frac{LAI_m \cdot f(DM)}{LAI(t)} - 1\right] = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 \quad (18)$$

用多元线性回归方法, 拟合 (18) 式左边与 t 、 t^2 之线性关系。在某一给定的 Q 、 LAI_m 值时, 有较好的拟合效果, 即得到方程 (14)。

3.3 结果

使用长沙、岳阳 1980、1981 年地理分期播种资料, 用逐步回归方法拟合, 结果为:

$$LAI(t) = \frac{2.5 \cdot DM(t)/DM_0(t)}{1 + 1.5 \cdot DM(t)/DM_0(t)} \cdot \frac{18}{1 + \exp(4.60 - 12.65t + 9.02t^2)} \quad (19)$$

$n = 90, R = 0.977^{***}$, *** 表示通过信度 0.01 显著性检验。

可见此式表达了在某一生育期, 叶面积与地上部干物重的 Michaelis-Menten 关系, 以及在同一播种期, 叶面积随生育期的 Logistic 曲线关系。

4 讨论

水稻叶面积的干物重和生育期复合模式, 将不同播期的叶面积动态统一起来, 因而较一个播期的 Logistic 模型适应性广。同任何其它经验模型一样, (18) 式有其适宜区域。因为叶面积与温度有密切关系, 高温地区叶片伸展快, 叶片大而薄, 低温地区叶片短而厚。因此对于气候条件差异不大的地区, 同一地点的不同播期, 叶面积动态可以用统一模式表达, 否则不可能建立令人满意的统一模式。环境对叶面积的影响, 有干物质积累和展叶速度两个方面, 进一步的研究应是考虑温度对展叶速度的影响, 可参阅文献 [8]。

经典 Logistic 模型仅以时间为自变量。本模式可看作 Logistic 模型在生态因子范畴的拓展, 对于受环境因子影响的重复试验, 可以建立起包含生态因子的 Logistic 统一模型。

参考文献

- 1 崔启武. 生物种群增长的营养动力学模型. 北京: 科学出版社, 1992. 40~260
- 2 王信理. 在作物干物质积累的动态模拟中如何合理运用 Logistic 方程. 农业气象, 1986, 7(1): 14~19
- 3 薛正平. 水稻群体密度增长模型探讨——一种具有时迟效应的 Logistic 模型. 中国农业气象, 1989, 10(5): 1~4
- 4 万昌秀. 逻辑斯谛曲线的一种拟合方法. 生态学报, 1983, 3(3): 288~296
- 5 王振中. 逻辑斯谛曲线 R 值的四点平均值估计法. 生态学报, 1987, 7(3): 193~197
- 6 王莽莽. 用麦夸方法最优拟合逻辑斯谛曲线. 生态学报, 1986, 6(2): 142~147
- 7 王寿松. 单种群生长的广义 Logistic 模型. 生物数学学报, 1990, 5(1): 21~25
- 8 汪永钦等. 冬小麦生长和产量形成与气象条件关系及其动态模拟的研究. 气象学报, 1991, 49(2): 205~214