

# 作物产量预报的气象生物学模式

李湘阁 张明霞\*

## 提 要

本文在产量预报经验统计模式基础上,考虑了各个阶段气象条件对作物产量形成的作用。以单季晚稻为例,运用剩余法建立了产量预报的气象生物学模式。用此模式可以分段进行单季晚稻的产量预报,逐步逼近实际产量。

## 一、引 言

至今,为农作物产量预报建立的各种农业气象模式种类繁多,诸如大气环流、海温—作物产量模式<sup>[1]</sup>、作物生长动态模式<sup>[2]</sup>、作物产量预报结构模式和 Fuzzy 模式<sup>[3]</sup>等等。概括起来,我国仍以经验统计模式为多。至于作物—天气分析模式和作物生长模拟模式<sup>[4]</sup>,限于试验及专用计算机设备条件,应用并不普遍。

本文所建立的预报模式虽属于经验统计模式的范畴,但有它自己的特点。首先,根据单季晚稻的生长发育特性,将相对气象产量 $Y_R$ (实际产量 $Y$ 与趋势产量 $Y_t$ 之比)表示为亩穗数形成期相对气象产量 $Y_{R1}$ 、穗粒数形成期相对气象产量 $Y_{R2}$ 及粒重增长期相对气象产量 $Y_{R3}$ 交互影响的多重函数。这样可以分别考虑各生育阶段气象条件对产量形成的影响,建立气象生物学模式进行分段预报,以逐步逼近实际产量。

本文所用的单季晚稻有关资料,来自昆山县气象站昆稻二号分期播种观测(1978—83年),其它农业方面的资料抄自昆山县农业局的农业生产统计资料汇编;气象资料由昆山县气象站提供。

## 二、气象生物学模式的建立

从昆山县单季晚稻产量变化曲线(图1)可见,总的趋势是随时间推移不断上升的。通过三年滑动平均、分段直线拟合、分段正交多项式及S型曲线拟合,提取趋势产量 $Y_t$ ,发现以分段直线拟合

1985年3月4日收到,5月13日收到修改稿

\* 本院农业气象专业1984届毕业生

$$Y_t = \begin{cases} 469.3 & (1949-1961) \\ 601.4 + 9.2t & (1962-1981) \end{cases}$$

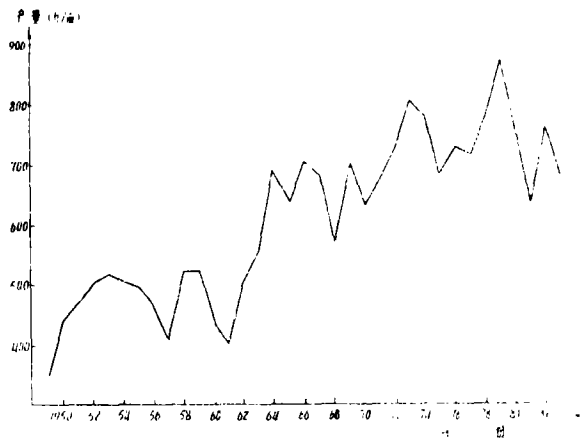


图 1 昆山县单季晚稻产量变化

效果最好，剩余方差最小。用此法提取的  $Y_t$ ，分别与农用拖拉机  $x_1$ 、灌溉动力  $x_2$ 、机耕面积  $x_3$ 、化肥用量  $x_4$  等因子进行相关分析，均达到了非常显著的水平，见表 1 所示。

表 1  $Y_t$  与生产力各因子的关系

| 因 子         | 关 系 式                                      | 相关系数  | 信度   |
|-------------|--|-------|------|
| $x_1$ (马力)* | $Y_t = 626.11 + 0.058207x_1$               | 0.737 | 0.01 |
| $x_2$ (马力)* | $Y_t = 538.90 + 3.70956 \times 10^{-3}x_2$ | 0.940 | 0.01 |
| $x_3$ (万亩)  | $Y_t = 640.35 + 1.6527x_3$                 | 0.870 | 0.01 |
| $x_4$ (吨)   | $Y_t = 628.42 + 1.4963 \times 10^{-3}x_4$  | 0.913 | 0.01 |

这说明分段直线拟合所提取的趋势产量  $Y_t$  确实反映了生产力水平提高对产量的影响。于是实际产量  $Y$  可表示为

$$Y = Y_t \cdot Y_R \quad (1)$$

而相对气象产量  $Y_R$  指的是天气气候条件对单季晚稻产量形成的作用部分。当  $Y_R > 1$  时， $Y > Y_t$ ，说明当年天气气候条件对单季晚稻产量形成有利；当  $Y_R < 1$  时， $Y < Y_t$ ，说明当年的天气气候条件对单季晚稻产量形成不利；当  $Y_R = 1$  时， $Y = Y_t$ ，说明天气气候条件利弊相当。

对某一年来说，相对气象产量  $Y_R$  为单季晚稻全生育期内气象条件综合作用的结果。如将  $Y_R$  表示为每亩穗数形成期相对气象产量  $Y_{R1}$ ，每穗实粒数形成期相对气象产量  $Y_{R2}$ ，粒重形成期相对气象产量  $Y_{R3}$  交互影响的多重函数，有

$$Y_R = f(Y_{R1}, Y_{R2}, Y_{R3}) \quad (2)$$

一种简单的情况是

\* 1 [米制] 马力 = 735.5 瓦

$$Y_R = Y_{R1} \cdot Y_{R2} \cdot Y_{R3} \quad (3)$$

$Y_{R1}$ 、 $Y_{R2}$ 及 $Y_{R3}$ 又可视各生育阶段中气象条件效应的累积, 于是有

$$\begin{cases} Y_{R1} = f_1(Y_{Ra1} + Y_{Ra2} + \dots + Y_{Ran}) \\ Y_{R2} = f_2(Y_{Rb1} + Y_{Rb2} + \dots + Y_{Rbn}) \\ Y_{R3} = f_3(Y_{Rc1} + Y_{Rc2} + \dots + Y_{Rcn}) \end{cases} \quad (4)$$

根据单季晚稻的生物学特性和农业气象要素, 按对相对气象产量 $Y_{R1}$ 、 $Y_{R2}$ 和 $Y_{R3}$ 影响权重的大小, 挑选相关气象因子, 运用剩余法<sup>[5]</sup>逐个引入, 以建立 $Y_{R1}$ 、 $Y_{R2}$ 和 $Y_{R3}$ 三个子模式。例如建立 $Y_{R1}$ 子模式时, 将 $a_1$ (6月下旬平均温度)当作自变量,  $Y_R$ 作为因变量, 建立方程确定 $\hat{Y}_{Ra1}$ , 再将 $a_2$ (6月下旬日照时数)作为自变量,  $Y_R - \hat{Y}_{Ra1}$ 为因变量,

$$\text{建立方程确定 } \hat{Y}_{Ra2}, \text{ 由此可得 } \hat{Y}_{R1} = \hat{Y}_{Ra1} + \hat{Y}_{Ra2}$$

$$\text{依此类推, 若有 } n \text{ 个自变量, 则有 } \hat{Y}_{R1} = \hat{Y}_{Ra1} + \hat{Y}_{Ra2} + \dots + \hat{Y}_{Ran}$$

同样可建立 $\hat{Y}_{R2}$ 、 $\hat{Y}_{R3}$ 子模式。当然, 在确定 $\hat{Y}_{Rb1}$ 时, 因变量为 $Y_R / \hat{Y}_{R1}$ ; 在确定 $\hat{Y}_{Rc1}$ 时, 因变量为 $Y_R / \hat{Y}_{R1} \cdot \hat{Y}_{R2}$ 。根据实际资料求得

$$\hat{Y}_{Ra1} = 4 \times 10^{-4} + 71 \times 10^{-3} a_1 - 1.2 \times 10^{-3} a_1^2 \quad (5)$$

$$\hat{Y}_{Ra2} = -424 \times 10^{-4} + 8 \times 10^{-4} a_2 \quad (6)$$

$$\hat{Y}_{Rb1} = 8845 \times 10^{-4} + 4 \times 10^{-4} b_1 \quad (7)$$

$$\hat{Y}_{Rb2} = 3315 \times 10^{-4} - 134 \times 10^{-4} b_2 \quad (8)$$

$$\hat{Y}_{Rc1} = 7085 \times 10^{-4} + 10 \times 10^{-4} c_1 \quad (9)$$

$$\hat{Y}_{Rc2} = -5013 \times 10^{-4} + 252 \times 10^{-4} c_2 \quad (10)$$

其中 $a_1$ 和 $a_2$ 为6月下旬的平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )和日照时数(小时);  $b_1$ 和 $b_2$ 为8月中旬到9月中旬的总日照时数(小时)和8月下旬到9月中旬的平均气温( $^{\circ}\text{C}$ );  $c_1$ 和 $c_2$ 为9月上旬到10月中旬总日照时数(小时)和9月中旬到10月中旬的平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )。

(5)式表明6月下旬(单季晚稻移栽后10到20天)是单季晚稻分蘖增长最快的时期, 这一时期的平均温度与每亩穗数形成期的相对气象产量 $\hat{Y}_{R1}$ 呈上凸抛物线关系, 温度高, 分蘖多, 有效穗也就多, 但当温度达到一定数值后, 分蘖达到高峰, 田间小气候条件变得恶劣, 后生分蘖会因群体光照条件差, 营养不足而使有效分蘖率大大降低。(6)式表明6月下旬日照时数与 $\hat{Y}_{R1}$ 呈线性关系。一般说, 这一时期日照充足, 光合产物就多, 分蘖成穗能顺利完成。

(7)和(8)式表明8月中下旬到9月中旬日照时数、平均气温与每穗实粒数形成期的相对气象产量 $\hat{Y}_{R2}$ 呈线性关系。实粒数决定于每穗颖花数和结实率, 这一时期的日照多, 雨日少对减少颖花退化和顺利进行授粉扬花, 提高结实率有利; 此期温度偏低则可延长枝梗和颖花分化期, 从而增加每穗颖花数, 形成大穗。(8)式中 $b_2$ 与 $Y_{R2}$ 呈负相关关系正好说明了这一点。

(9)和(10)式表明, 在单季晚稻第二次枝梗分化期到颖花分化终期, 日照和温度条件好, 可促使谷壳增大, 而灌浆期日照充足, 有利于提高稻株群体的光合量, 增加粒重。

综上所述, 无疑日照和温度对单季晚稻气象产量的形成是重要的。根据(4)式, 由(5)一(10)式可得

$$\hat{Y}_{R1} = \hat{Y}_{Ra1} + \hat{Y}_{Ra2} \quad \hat{Y}_{R2} = \hat{Y}_{Rb1} + \hat{Y}_{Rb2} \quad \hat{Y}_{R3} = \hat{Y}_{Rc1} + \hat{Y}_{Rc2}$$

于是(3)式可改写为

$$\hat{Y}_R = (\hat{Y}_{Ra1} + \hat{Y}_{Ra2}) \cdot (\hat{Y}_{Rb1} + \hat{Y}_{Rb2}) \cdot (\hat{Y}_{Rc1} + \hat{Y}_{Rc2})$$

这样, 可由(1)式得到预报单季晚稻产量的气象生物学模式

$$\begin{aligned} \hat{Y} &= \hat{Y}_t \cdot (\hat{Y}_{Ra1} + \hat{Y}_{Ra2}) \cdot (\hat{Y}_{Rb1} + \hat{Y}_{Rb2}) \cdot (\hat{Y}_{Rc1} + \hat{Y}_{Rc2}) \\ &= (601.4 + 9.2t) \cdot (4 \times 10^{-4} + 71 \times 10^{-3}a_1 - 1.2 \times 10^{-3}a_1^2 - 424 \times 10^{-4} \\ &\quad + 8 \times 10^{-4}a_2) \cdot (8845 \times 10^{-4} + 4 \times 10^{-4}b_1 + 3315 \times 10^{-4} - 134 \times 10^{-4}b_2) \\ &\quad \cdot (7085 \times 10^{-4} + 10 \times 10^{-4}c_1 - 5013 \times 10^{-4} + 252 \times 10^{-4}c_2) \end{aligned} \quad (11)$$

表 2 (11)式计算结果及相对误差

| 年    | Y   | $\hat{Y}_t$ | $\hat{Y}_{R1}$ | $\hat{Y}_1$ | 误差<br>% | $\hat{Y}_{R2}$ | $\hat{Y}_2$ | 误差<br>% | $\hat{Y}_{R3}$ | $\hat{Y}_3$ | 误差<br>% |
|------|-----|-------------|----------------|-------------|---------|----------------|-------------|---------|----------------|-------------|---------|
| 1962 | 511 | 610.6       | 1.0019         | 611.8       | 19.73   | 0.9914         | 606.5       | 18.69   | 0.9484         | 575.2       | 12.56   |
| 1963 | 560 | 619.7       | 0.9983         | 618.7       | 10.48   | 0.9734         | 602.2       | 7.54    | 0.9938         | 598.1       | 6.86    |
| 1964 | 692 | 628.9       | 0.9851         | 619.5       | 10.48   | 1.0015         | 620.4       | 10.35   | 1.0301         | 639.1       | 7.64    |
| 1965 | 634 | 638.1       | 0.9955         | 635.2       | 0.19    | 1.0062         | 639.1       | 0.80    | 0.9853         | 629.8       | 0.66    |
| 1966 | 709 | 647.3       | 1.0253         | 663.7       | 6.39    | 1.0100         | 670.4       | 5.44    | 1.0501         | 704.0       | 0.71    |
| 1967 | 683 | 656.4       | 1.0059         | 660.3       | 3.32    | 1.0142         | 669.6       | 1.96    | 1.0404         | 696.7       | 2.01    |
| 1968 | 568 | 665.6       | 0.9583         | 637.8       | 12.29   | 0.9915         | 632.4       | 11.34   | 0.9349         | 591.2       | 4.08    |
| 1969 | 706 | 671.8       | 1.0053         | 678.4       | 3.91    | 0.9921         | 673.1       | 4.66    | 1.0521         | 708.3       | 0.33    |
| 1970 | 635 | 684.0       | 0.9762         | 667.7       | 5.15    | 0.9726         | 649.5       | 2.28    | 0.9342         | 606.7       | 4.46    |
| 1971 | 682 | 693.1       | 1.0315         | 714.9       | 4.82    | 1.0038         | 717.6       | 5.22    | 0.9281         | 666.0       | 2.35    |
| 1972 | 733 | 702.3       | 0.9700         | 681.2       | 7.07    | 1.0033         | 684.4       | 6.63    | 1.0334         | 706.2       | 3.66    |
| 1973 | 807 | 711.5       | 0.9978         | 710.0       | 12.02   | 1.0006         | 710.4       | 11.97   | 0.9382         | 666.5       | 17.41   |
| 1974 | 782 | 720.7       | 0.9790         | 705.5       | 9.78    | 1.0274         | 724.9       | 7.30    | 0.9948         | 721.1       | 7.79    |
| 1975 | 683 | 729.8       | 0.9535         | 695.8       | 1.87    | 0.9987         | 695.0       | 1.76    | 1.0437         | 725.4       | 6.21    |
| 1976 | 733 | 739.0       | 0.9880         | 730.1       | 0.40    | 1.0222         | 746.4       | 1.83    | 1.0272         | 766.7       | 4.60    |
| 1977 | 720 | 748.2       | 0.9690         | 725.0       | 0.69    | 0.9827         | 712.5       | 1.04    | 1.0241         | 729.6       | 1.33    |
| 1978 | 781 | 757.4       | 1.0343         | 783.4       | 0.31    | 1.0158         | 795.7       | 1.88    | 1.0391         | 826.8       | 5.86    |
| 1979 | 873 | 766.6       | 0.9850         | 755.1       | 13.51   | 0.9955         | 751.7       | 13.89   | 1.0973         | 824.9       | 5.51    |
| 1980 | 754 | 775.8       | 1.0095         | 783.1       | 3.86    | 0.9896         | 775.0       | 2.79    | 0.9966         | 772.4       | 2.44    |
| 1981 | 637 | 785.0       | 1.0061         | 789.8       | 23.99   | 1.0098         | 797.6       | 25.21   | 0.9011         | 718.7       | 12.83   |
| 平均   |     |             |                |             | 7.51    |                |             | 7.13    |                |             | 4.93    |

其中  $t$  为年序号 1, 2, …, 从 1962 年算起。利用此式在不同的生育阶段, 可以作出不同精度的产量预测。在有效分蘖终止期, 假定此后的天气气候条件正常, 其  $\hat{Y}_{R2} = 1$ ,  $\hat{Y}_{R3} = 1$ 。那么, 由已出现的气象条件, 在单季晚稻生育的前期报出第一次产量预报值  $\hat{Y}_1 = \hat{Y}_t \cdot \hat{Y}_{R1}$  来, 以后还可以进行两次订正预报, 分别求得  $\hat{Y}_2 = \hat{Y}_t \cdot (\hat{Y}_{R1} \cdot \hat{Y}_{R2})$  和  $\hat{Y}_3 = \hat{Y}_t \cdot (\hat{Y}_{R1} \cdot \hat{Y}_{R2} \cdot \hat{Y}_{R3})$ 。表 2 列出根据实际资料算出的结果。可见, 利用 (11) 式计算的三次预报值  $\hat{Y}_1$ 、 $\hat{Y}_2$ 、 $\hat{Y}_3$  与实际产量  $Y$  比较, 产生的平均相对误差分别为 7.51%、7.13% 和 4.93%, 越来越小。这样分段预报, 可以为农业生产部门鉴定单季晚稻前期的生长条件, 加强后期管理提供依据。

### 三、讨 论

由于气象生物学模式比一般的经验统计模式生物学含义较为明确, 可以分段作预报, 逐步逼近实际产量, 因而是一种比较好的预报方法。我们认为从理论上讲, 这种建模方法适用于其它作物; 在气象生物学模式组建过程中, 因子引入的先后顺序是很重要的, 因而要求客观分析各个因子对相对气象产量  $Y_R$  影响的权重, 决定进入方程的顺序; 本文建立的模式仅考虑了三个时段的划分, 似乎有些粗糙, 若时段划分得更细, 气象生物学模式在刻画气象条件于不同生育阶段对气象产量形成的作用方面也会更细致, 使用起来也将更方便。

作者认为, 为配合气象生物学模式的应用, 根据水稻产量构成理论<sup>[6]</sup>, 单季晚稻的

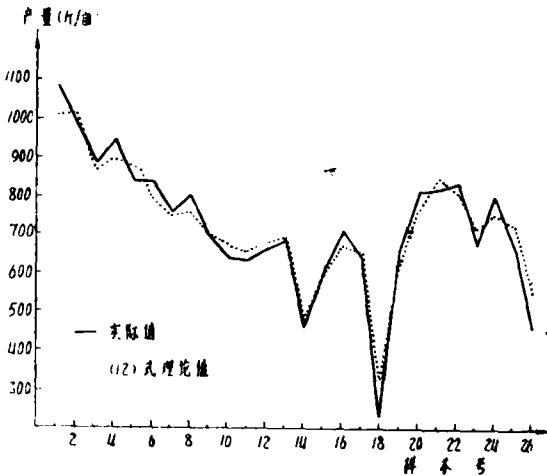


图 2 昆稻二号实际产值与理论值比较

产量可以看作每亩有效穗数、每穗实粒数和千粒重三个因子构成的。若分别用气象要素拟合这三个产量构成因子, 形成三个子模式, 而后再综合成一个模式预报产量, 这种思路也是可行的。此外, 如果直接用观测到的每亩有效穗数  $Z_1$ , 每穗实粒数  $Z_2$  和千粒重  $Z_3$  建立多元回归分析的产量预报结构模式

$$\hat{Y} = (\alpha_1 + \alpha_2 Z_1) \cdot (\alpha_3 + \alpha_4 Z_2) \cdot (\alpha_5 + \alpha_6 Z_3) \cdot \frac{1}{50}$$

也是可以的。经过整理, 上式为

$$\hat{Y} = (\beta_0 + \beta_1 Z_1 Z_2 Z_3 + \beta_2 Z_1 Z_2 + \beta_3 Z_1 Z_3 + \beta_4 Z_2 Z_3 + \beta_5 Z_1 + \beta_6 Z_2 + \beta_7 Z_3) \cdot \frac{1}{50}$$

利用昆稻二号实测资料计算, 有

\* 1/50 为换算系数。万穗/亩 × 粒/穗 × 克/千粒 = 斤/亩 × (1/50)

$$\hat{Y} = (5164.96 - 1.4582Z_1Z_2Z_3 + 44.523Z_1Z_2 + 88.903Z_1Z_3 + 15.2901Z_2Z_3 - 688.945Z_1 - 305.528Z_2 - 572.836Z_3) \cdot \frac{1}{50} \quad (12)$$

用此式求得的产量和实际产量的误差基本上在50斤/亩以内, 剩余均方差 $S_1=39.3$ 斤/亩如图2所示。由于昆稻二号分期播种资料来自气象站附近的大田上, 其生产水平代表了一般大田的情况, 因而(12)式便于实际应用。当然, 这种资料年度间栽培管理水平还是有差异的, 而且仅有六年, 这不可避免地会产生误差, 有待进一步研究。不管怎样, 建立这样结构模式和气象生物学模式一起综合使用不是无益的。

### 参 考 文 献

- [1] 赵四强, 欧亚大气环流和准太平洋海温与我国粮食产量, 农业气象, 4卷, 3期, 1—5, 1983。
- [2] 孙玉亭等, 大豆产量预报的生长动态模式, 气象, 1984, 5, 24—26。
- [3] 侯贻生, 气象因子与早稻产量, 气象学报, 42卷, 1期, 88—98, 1984。
- [4] W. 贝尔等著, 王毓棠译, 作物—天气模式及其在产量预测中的应用, 93—118, 224—231, 科学出版社, 1980。
- [5] A. P. 康斯坦丁诺夫著, 刘树泽、开文福译, 天气—土壤—冬小麦产量, 37页, 农业出版社, 1982。
- [6] 浙江农业大学等, 实用水稻栽培学, 144页, 上海科学技术出版社, 1981。