

## 水稻发育进程动态模拟<sup>†</sup>

冯定原 邱新法 孙 娴

(南京气象学院应用气象学系, 南京 210044)

**摘 要** 以水稻的生物学特性为依据, 利用田间试验实测资料, 建立了水稻发育进程动态模拟模式。实践表明, 在其他条件均适宜的情况下, 本模式能够较好地反映天气气候条件对水稻发育进程的影响, 可用来预测水稻发育期, 以指导大田生产管理。

**关键词** 水稻, 发育进程, 动态模拟

**分类号** S165.27

模拟作物发育进程, 预测作物发育期或发育速度, 对于指导大田生产管理, 具有较强的实践意义, 故一直为人们所重视, 并先后研制了众多预测模式。其中比较有代表性的当数经典的积温模式、布朗的抛物线模式、沈国权的非线性模式以及高亮之的水稻钟模型等<sup>[1~3]</sup>。综观这些模式, 或者由于考虑不够全面, 或者由于资料处理欠妥, 或者由于参数的主观设定等原因, 使模式的精度受到限制, 实际预测效果均不十分理想。本文拟在总结前人经验基础上, 以水稻的生物学特性为依据, 利用田间试验实测资料, 建立一个新的水稻发育进程动态模拟模式, 供讨论参考。

### 1 资料来源和处理

生物和气象资料取自1979~1981年全国杂交水稻气象条件研究协作组进行的“联合试验”和1989~1992年在南京气象学院农业气象试验站进行的“晚稻生长模拟试验”观测资料。

上述两个试验, 共有38个试验站点, 遍布了我国南方主要稻区, 涉及的地域为南起广东陵水, 北至江苏徐州, 西自云南建水, 东至浙江宁波。海拔高度则从广东南海的1 m到云南曲靖的1 862.9 m。整个试验按照统一设计的方案, 采用自然分期播种和地理分期播种的方法进行, 从而克服了因试验设计、观测标准不一致而带来的误差, 具有较好的代表性和可比性。本文利用了全部5个供试品种的发育期资料和相应的气象资料, 建立了数据库, 以便管理和调用。文中利用的各地各季节从天亮到天黑的“日长”资料, 取自《实用气象手册》, 并经过内插订正。

### 2 模式的建立

水稻原产于热带和亚热带的沼泽地区, 属于典型的喜温短日性作物, 具有一定的感温性和感光性。不同品种因感温性和感光性不同, 从播种发芽到抽穗开花的生育期天数差别很大, 详见表1。

<sup>†</sup> 国家自然科学基金资助项目

收稿日期: 1994-03-31; 改回日期: 1994-09-20

表 1 各供试品种的最长和最短生育期天数

Table 1 Maximum and minimum duration of experimental cultivars d

| 供试品种               | 最长生育期天数 | 最短生育期天数 |
|--------------------|---------|---------|
| 南梗 34 <sup>#</sup> | 101     | 56      |
| 国际 26 <sup>#</sup> | 93      | 49      |
| 泗优 2 <sup>#</sup>  | 100     | 54      |
| 南优 3 <sup>#</sup>  | 93      | 45      |
| 汕优 6 <sup>#</sup>  | 95      | 47      |

植物生理学研究表明,作物体发育速度对温度的响应与作物体内酶促反应速度对温度的响应,具有严格的相似性<sup>[4,5]</sup>。作物发育速度实际是作物体内酶促反应速度在外观上的体现。由于温度是影响作物体内酶促反应速度的主要环境因子,因此温度对作物发育速度的影响,实质是对作物体内酶促反应速度的影响。温度对作物体内酶促反应速度影响的一般规律为:在较低的温度下,因酶的活性微弱,故酶促反应速度缓慢;当温度升高时,酶的活性逐渐增强,酶促反应速度加快;但当温度升得过高时,因酶系统受到破坏,酶促反应亦要抑制,故酶促反应速度随温度升到一定高度后即迅速减慢以至降为零。温度对作物发育速度的影响,也有类似规律,而且两者的关系相当一致<sup>[6]</sup>。

水稻的感光性,主要是夜晚暗期的作用。如果将日长缩短而夜晚延长,则作物体内的红光吸收型光敏激素浓度增大,促使作物体幼穗提前开始分化;反之,作物体幼穗开始分化的时间将推后。

为了比较准确地阐明温度、日长等气象因子与水稻生育期天数之间的相互关系,我们在考虑最高、最低和最适等三基点温度对水稻发育速度的非线性影响,并兼顾水稻生理上的感光性等前提下,以发育期间的平均气温和平均日长为主要环境影响因子进行模拟,建立水稻发育进程的温度、光照动态模拟模式。

据研究<sup>[7]</sup>,水稻的感温性和感光性主要表现在移栽至抽穗这一时期内,故本模式亦主要讨论这一生育期,具体表达形式为

$$\frac{1}{N} = K(T - B)^{1+P}(M - T)^{1+Q}e^{G(\bar{D}-D')} \tag{1}$$

式中,  $N$  为待定发育期的天数(d);  $T$  为该发育期间的平均温度(℃);  $B$  为发育的下限温度(℃);  $M$  为发育的上限温度(℃);  $\bar{D}$  为该发育期间的平均日长(h);  $D'$  为临界日长(一般公认为 13 h),当  $\bar{D} \leq D'$  时,取  $\bar{D} = D'$ ;  $K, P, Q, G$  为模型参数。

(1)式是针对整个水稻生育期而言的,如就某一具体发育期或发育阶段来说,则情况又各不相同。根据试验实测资料,水稻在移栽至抽穗期间的温度范围为 19.4~30.2℃。根据文献[3]研究,水稻发育的最适温度为 28~30℃,所以(1)式中的高温抑制项  $(M - T)^{1+Q}$  可以忽略不计,于是(1)式可简化为

$$\frac{1}{N} = K(T - B)^{1+P}e^{G(\bar{D}-D')} \tag{2}$$

按照规定,当  $T \leq B$  时,取  $T = B$ ; 当  $\bar{D} \leq D'$  时,取  $\bar{D} = D'$ 。在非线性模式中,当实际温度  $T$  等于发育下限温度  $B$  和上限温度  $M$  时,发育速度  $1/N$  均视为零。

由(1)式对温度求导得

$$\frac{1}{N} = K e^{G(D-D')} [(M - T)^Q (T - B)^P (1 + P)(M - T) - (1 - Q)(T - B)] \quad (3)$$

显然,存在着最适温度

$$T_0 = \frac{(1 + P)M + (1 + Q)B}{2 + P + Q} \quad (4)$$

将其代入一阶导数,  $1/N = 0$ ; 代入二阶导数,  $1/N < 0$ 。说明发育速度  $1/N$  具有极大值。这样,水稻的基本营养生长期(指在适宜其发育的高温短日条件下,水稻从播种发芽至抽穗开花所需经历的天数)为

$$\frac{1}{y_0} = K(T_0 - B)^{1+P}(M - T_0)^{1+Q} \quad (5)$$

式中,  $y_0$  为基本营养生长期(d);  $T_0$  为最适发育温度( $^{\circ}\text{C}$ )。吴光南(1983)称基本营养生长期为高温短日生育期<sup>[8]</sup>。水稻的基本营养生长期对于保证不同品种水稻的引种成功和在一定环境条件下决定水稻发育进程上,具有重要的指导意义。

据高亮之等研究,在不考虑高温抑制的情况下,水稻移栽至抽穗期间的最适发育温度  $T_0$  为  $28\sim 30^{\circ}\text{C}$ , 本文取为  $28^{\circ}\text{C}$ , 于是(5)式可进一步简化为

$$\frac{1}{y_0} = K(28 - B)^{1+P} \quad (6)$$

3 模式参数的确定及其计算

利用 1979~1981 年杂交稻气象条件研究“联合试验”和 1989~1992 年晚稻生长“模拟试验”资料,对模式(2)中的各个参数,在微机上进行调试计算。具体计算中,对各种非线性参数采用 MARQT 方法进行求解<sup>[9]</sup>。

当模式参数确定后,再将有关参数代入(6)式,即可求得各个品种水稻从移栽到抽穗的基本营养生长期  $y_0$ 。

4 结果分析

按照上述过程进行计算,5 个品种供试水稻的  $K$ 、 $P$ 、 $G$ 、 $B$  等参数和基本营养生长期  $y_0$  列于表 2。

表 2 各供试水稻品种的模式参数和基本营养生长期

Table 2 Model parameters and basic vegetative period for rice species under study

| 供试品种               | $K$   | $P$     | $G$     | $B$    | $y_0$ | $R$   | 样本个数 | 模拟误差 |
|--------------------|-------|---------|---------|--------|-------|-------|------|------|
| 南粳 34 <sup>#</sup> | 0.004 | - 0.439 | - 0.054 | 13.789 | 60.2  | 0.902 | 12   | 2.12 |
| 国际 26 <sup>#</sup> | 0.004 | - 0.436 | - 0.052 | 13.622 | 59.6  | 0.901 | 49   | 2.32 |
| 泗优 2 <sup>#</sup>  | 0.004 | - 0.407 | - 0.115 | 12.391 | 49.2  | 0.835 | 327  | 2.43 |
| 南优 3 <sup>#</sup>  | 0.004 | - 0.411 | - 0.123 | 12.134 | 48.6  | 0.853 | 124  | 2.85 |
| 汕优 6 <sup>#</sup>  | 0.004 | - 0.403 | - 0.111 | 12.606 | 51.3  | 0.835 | 355  | 2.62 |
| 平 均                |       |         |         | 12.900 |       |       |      | 2.47 |

从表中可以看出,南粳 34<sup>#</sup>、国际 26<sup>#</sup> 的感温性较强,泗优 2<sup>#</sup>、南优 3<sup>#</sup> 和汕优 6<sup>#</sup> 同属中等。感光性则以南优 3<sup>#</sup>、泗优 2<sup>#</sup> 和汕优 6<sup>#</sup> 同属中等,南粳 34<sup>#</sup> 和国际 26<sup>#</sup> 极弱。这和人研究认为泗优 2<sup>#</sup>、南优 3<sup>#</sup>、汕优 6<sup>#</sup> 的感温性、感光性同属中等,南粳 34<sup>#</sup> 和国际 26<sup>#</sup> 的感温性较

强、感光性极弱、对 12 h 的短日照有微感等结论完全一致<sup>[10,11]</sup>。从基本营养生长期来看,前人的研究表明<sup>[12]</sup>:我国种植的所有水稻品种,高温短日基本营养生长期最长为 88 d,最短为 42 d。本文模拟结果为 48.6~60.2 d,均在规范范围内。说明本模式是可信的。

关于水稻发育的下限温度,模拟结果表明,常规稻南粳 34<sup>#</sup>和国际 26<sup>#</sup>为 13.6~13.8℃,稍稍偏高;杂交稻泗优 2<sup>#</sup>、南优 3<sup>#</sup>和汕优 6<sup>#</sup>为 12.1~12.6℃,略微偏低;但若取其均值  $\bar{B} = 12.9^\circ\text{C}$ ,则也和前人研究为 13.0℃的结论相当一致。可见本模式的生物学意义较明显,实用价值较高。在高亮之研究建立的水稻钟模型中,杂交稻发育的下限温度为 13.0℃,我们认为这对整个杂交稻来讲虽然是可以的,但对杂交稻中的各个不同品种,其发育的下限温度则是不完全相同的,因此统统取为 13.0℃,并不能完全反映出不同品种间的差异和特性。

本模式模拟的水稻发育速度和实测水稻发育速度之间的相关系数均较高,全部通过信度  $\alpha = 0.001$  的  $F$  检验,说明模拟结果比较符合客观情况。

通过对模式预测效果的检验,估算上述 5 个品种供试水稻从移栽到抽穗发育天数,得到的平均误差为 2.47 d,这说明本模式精度较高,完全足够生产实践的要求。

生产实践和科学研究一致证明,对某一地区天气气候等自然环境条件来说,水稻等禾本科作物从抽穗到成熟的发育天数,相对比较稳定,随温度和日长变化不大<sup>[13]</sup>。限于篇幅,这里不再展开详细讨论。

## 5 结束语

本文以水稻生物学特性为依据,按照植物生理学的有关理论,利用田间试验实测资料,模拟建立了水稻发育进行动态模式。模式充分考虑了水稻的感温和感光等特性,具有明确的生物学意义。

由模式模拟确定的常规稻南粳 34<sup>#</sup>、国际 26<sup>#</sup>和杂交稻泗优 2<sup>#</sup>、南优 3<sup>#</sup>、汕优 6<sup>#</sup>等品种的生物学参数,与前人研究结果吻合很好。

用模式估算的水稻移栽至抽穗的发育天数与实测误差为 2.12~2.85 d,平均为 2.47 d。完全足够生产实践要求,具有较好的生产指导意义。

受试验观测资料限制,以下两个方面尚有待今后进一步探讨。

(1)本文在水稻发育期的划分上较为粗略,倘若将发育期进行更细致的划分和模拟,则有可能深入了解水稻感温性和感光性的生物学机理。

(2)扩大模拟品种的类型,在广泛研究不同品种水稻生物学参数基础上,可以建立起水稻发育进程动态模拟和预测系统,以便更好地指导大田生产管理实践。

## 参 考 文 献

- 1 Robersoe C T 著. 估算作物发育速率的天气—数学模式. 冯燕华译. 农业气象科学, 1984, (1): 33~38
- 2 沈国权. 影响作物发育速度的非线性温度模式. 气象, 1980, (6): 11~18
- 3 高亮之. 水稻计算机模拟模型及其应用之一. 中国农业气象, 1989, (3): 16~26
- 4 Mayer B S. 植物生理学导论. 黎盛隆译. 北京: 农业出版社, 1973. 44~49
- 5 北京农业大学主编. 植物生理学. 北京: 农业出版社, 1973. 51~55
- 6 蒋德隆. 水稻生产与气象. 北京: 气象出版社, 1983. 17~22
- 7 雁 伍. 水稻的光温特性. 农业气象, 1980, (3): 23~28
- 8 吴光南. 水稻的基本营养生长期研究. 中国农业科学, 1983, (3): 14~23
- 9 刘德贵. FORTRAN 算法汇编(第二分册). 北京: 国防工业出版社, 1983. 188~195

- 10 全国杂交水稻气象科研协作组. 杂交水稻制种花期相迁的积温稳定性研究. 气象, 1981, (6): 33~38
- 11 黄 策. 水稻群体物质生产过程的计算机模拟. 作物学报, 1986, (1): 54~62
- 12 全国杂交水稻气象科研协作组. 杂交水稻光温特性反应简报. 气象, 1980, (9): 41~46
- 13 杨立炯. 江苏稻作学. 南京: 江苏科技出版社, 1988. 133~138

## DYNAMIC SIMULATION OF PADDY RICE GROWTH

Feng Dingyuan Qiu Xinfu Sun Xian

(Department of Applied Meteorology, NIM, Nanjing 210044)

**Abstract** Established is a dynamic model of paddy rice growth based on rice biology with the aid of field observations. Practice demonstrates that, other things being suitable, the model has such ability to better simulate the effect on the growth of weather/climate conditions as to be used to predict the development stage and thus to carry out field management.

**Keywords** rice, rice growth, dynamic simulation