

## 我国水稻生育期的生态规律及其区划<sup>†</sup>

高永刚 张凌云 姚克敏<sup>†\*</sup>

(南京气象学院应用气象学系, 南京 210044)

**摘要** 在总结水稻生育期生态规律研究成果的基础上, 提出了一个水稻发育速度的优化模式。该模式综合考虑了温度和日长对水稻发育速度的影响, 经回代检验, 预报效果良好。以模式为依据, 用全国主要稻区165站1951~1980年的光温资料求算早、中、晚稻的生育期, 并绘出生育期日数的距平百分率空间分布图, 据图分析我国水稻生育期的时空变化规律并解释其生态原因。

**关键词** 发育速度模式, 生态规律, 生育期区划

**分类号** S219

水稻生育期在产量形成过程中是决定群体光合积累的时间特征值, 它同时表示水稻发育速度的快慢。生育期在种植区划中是确定水稻熟制和品种类型布局的依据。组成水稻生育期的各个发育期指示了生长对环境的具体要求, 也指示了对产量形成过程的不同作用和贡献。水稻生育期同时也是发展水稻高产栽培技术的依据。

水稻在其悠久的种植历史和辽阔的种植区域内已经形成了包括早(中)晚季群、籼粳亚种、水陆稻型等生态类型, 拥有总数5万以上的品种, 水稻生育期的生态规律已经变得十分复杂。有关水稻生育期的研究大体上可以分为两个阶段: 早期的研究侧重于不同类型品种的感光性和感温性, 根据实验数据测定其感温指数、感光指数、临界光长和高温短日生育期<sup>[1-6]</sup>; 后期由于计算机的应用, 着重于研究生育期的生态模型。显然, 生育期生态模型研究的成果促进和推动了诸如作物生长模拟、水稻制种、品种布局、杂交育种、区域引种、地区品种更迭以及北种南繁等方面的理论研究和生产实践的发展。

水稻生育期的生态模型大体可以划分成三类: 温度线性模型、温度非线性模型和光温综合模型<sup>[7-12]</sup>。本文在综合优化水稻生育期生态模型的基础上, 提出一个综合考虑光温因子的水稻发育速度的模拟模式。用全国10个省市14个试验点共71个播期资料验证模型效果, 求算模型参数值, 进而用全国165个气象台站1951~1980年的光温资料模拟出各地早、中、晚稻的生育期日数, 讨论我国各稻区水稻生育期时空变化规律, 并用聚类分析的方法, 对不同季节的水稻生育期进行区划。

<sup>†</sup> 国家863生物领域“二系杂交稻中试开发”项目资助

<sup>††</sup> 本文系1997届毕业论文, 初稿由张凌云执笔

收稿日期: 1997-09-23; 改回日期: 1997-12-15

第一作者简介: 高永刚, 男, 1969年5月生, 硕士, 现在伊春市气象局工作

# 1 水稻发育速度优化模式

## 1.1 模式

水稻发育速度( $\frac{dM}{dt}$ )依赖于温度和日长,其一般形式为:

$$\frac{dM}{dt} = K_0 f(T) f(DL) \quad (1)$$

或

$$\frac{dM}{dt} = K_0 + f(T) + f(DL) \quad (2)$$

根据不同感光类型的水稻发育速度与日长呈指数关系,有

$$\frac{1}{N} = a \cdot \text{EXP}[-b(DL - DL_0)] \quad (3)$$

由泰勒级数可知,当  $b$  为一定小时,上式可以表达成线性关系,因而指数形式是一种普遍形式。

综合上述分析,本文提出的水稻发育速度模式为:

$$\frac{dM}{dt} = a_0 + a_1 \text{EXP}[-G(DL - DL_0)] + a_2 \left[ \left( \frac{T - T_{\min}}{T_0 - T_{\min}} \right) \left( \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_0} \right) \frac{T_{\max} - T_0}{T_0 - T_{\min}} \right]^\alpha \quad (4)$$

(1)~(4)式中,  $T_{\min}$ 、 $T_0$ 、 $T_{\max}$  分别为水稻发育速度的下限、最适、上限温度,  $T$ 、 $DL$  为温度和日长,  $DL_0$  为临界日长,  $G$ 、 $\alpha$  为感光系数和感温系数,  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  为待定参数。

## 1.2 模式的生物学意义

(4)式明确体现了水稻发育速度的三基点温度以及水稻的感温性和感光性的影响,根据

(4)式,求  $\frac{dM}{dt}$  对  $T$  的一阶偏导:

$$\frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{dM}{dt} \right) = \left( \frac{dM}{dt} \right) = \alpha a_2 \left[ \frac{1}{T - T_{\min}} - \frac{T_{\max} - T_0}{(T_0 - T_{\min})(T_{\max} - T)} \right] \quad (5)$$

(5)式表明,  $\left( \frac{dM}{dt} \right)$  衡量了水稻发育速度对温度反应的灵敏度。参数  $\alpha$  是反应品种感温的特征

系数,  $\alpha$  越大,品种的感温性越强;反之,品种的感温性越弱。当  $T = T_0$  时,  $\left( \frac{dM}{dt} \right) = 0$ , 此时,水稻的发育速度达到最大,表明  $T_0$  是水稻发育的最适温度,与最大发育速度相对应。(4)式中,当

$T = T_{\min}$ 、 $T = T_{\max}$ 、或  $DL = DL_0$  时,水稻的发育速度达到最小值,即  $\frac{dM}{dt} = a_0$ 。参数  $G$  是反应品种

感光特征系数,  $G$  越大,品种的感光性越强;反之,品种的感光性越弱。

## 1.3 模型参数的确定与生育期模拟

### 1.3.1 模型参数的确定

假设水稻生育期为  $n$  天,对模型逐日积分可得:

$$dM = 1 = n a_0 + a_1 \sum_{j=1}^n \text{EXP}[-G(DL_j - DL_0)] + a_2 \sum_{j=1}^n \left[ \left( \frac{T_j - T_{\min}}{T_0 - T_{\min}} \right) \left( \frac{T_{\max} - T_j}{T_{\max} - T_0} \right) \frac{T_{\max} - T_0}{T_0 - T_{\min}} \right]^\alpha \quad (6)$$

在给定参数  $G$ 、 $\alpha$  时,用多元线性回归法可以拟合  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(DL_i)$ 、 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(T_i)$  与  $\frac{1}{n}$  关系。得出参

数  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  的值,对  $G$ 、 $\alpha$  进行调整,使得

$$S = \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{1}{n_j} - \left[ \frac{a_1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} f(DL_i) + \frac{a_2}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} f(T_i) \right] \right\}^2 \quad (7)$$

趋于最小,即达到最优拟合效果。其中,  $j$  为播期序号,  $i$  为生育期日序。

参考文献报道,本文选用的三基点温度分别为 13.0、30.0 和 40.0, 临界光长为

13.0 h。理论日长( $DL$ ) 采用(8)式计算

$$\sin \frac{t}{2} = \frac{\sin(45^\circ + (\varphi - \delta + \gamma)/2) \sin(45^\circ - (\varphi - \delta - \gamma)/2)}{\cos \varphi \cos \delta} \quad (8)$$

(8)式中, $t$ 为时角(每15为1 h,即 $DL = t/15$ ), $\varphi$ 是纬度, $\delta$ 是太阳赤纬, $\gamma$ 为太阳上部边缘在地平线上看到的曲折率,取34。

### 1.3.2 生育期模拟

生育期模拟的资料采用全国杂交水稻科研协作组研究的1980年自然分期播种资料。供试品种为汕优6号、南优3号和泗优2号。样本包括广州、湛江、柳州、长沙、漳州、尤溪(汤川)、进贤、杭州、孝感、温江、安顺和云南建水等14个站共71个播期。气象资料来源于相应的气象台站。用上述资料模拟出苗-抽穗的天数结果见表1。

表1 三个水稻品种出苗-抽穗时段的模式参数、系数及其检验

Table 1 Values of parameters and coefficients and test of the model from emergence to heading for three rice varieties

| 品 种  | $G$  | $\alpha$ | $a_0$                  | $a_1$                  | $a_2$                  | $R$      | $n$ | 平均误差( $d$ ) |
|------|------|----------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|-----|-------------|
| 汕优6号 | 2.86 | 1.81     | $3.984 \times 10^{-3}$ | $1.057 \times 10^{-3}$ | $8.336 \times 10^{-3}$ | 0.917 0* | 81  | 3.7         |
| 南优3号 | 2.78 | 1.61     | $3.521 \times 10^{-3}$ | $1.907 \times 10^{-3}$ | $8.437 \times 10^{-3}$ | 0.925 3* | 84  | 3.4         |
| 泗优2号 | 2.75 | 1.60     | $3.693 \times 10^{-3}$ | $1.649 \times 10^{-3}$ | $8.575 \times 10^{-3}$ | 0.919 5* | 82  | 3.5         |

注: \* 为通过信度0.01的显著性检验

由表1可以看出,汕优6号、南优3号和泗优2号的 $G$ 和 $\alpha$ 相差不大,感光性和感温性同属中等,与前人的研究成果完全一致<sup>[6,11]</sup>。

## 2 我国水稻生育期的生态规律

水稻的感光性和感温性是水稻的基本生理生态特性,水稻生长地的光温条件是影响水稻的生长发育进程的主要生态因子。因此可以根据水稻发育速度模型,用水稻种植地的光温生态条件来计算水稻生育期的长度并用不同季别的水稻生育期的时空分布规律来讨论我国水稻生育期日数的生态规律。为了便于比较,本文按以下标准统一不同季别水稻的开始播种期。

早季稻: 日平均气温 12 的初日。

中季稻: 云贵高原及淮河流域地区5月1日, 长江流域5月10日, 华南5月20日。

晚季稻: 单季晚稻用安全齐穗期推算。安全期标准籼稻为5日平均温度22 , 粳稻为5日平均温度18~20 。

用于生育期计算的气候资料包括18省165站\* 1951~1980年的旬平均气温。日长由公式(8)计算。

\* 供生育生态分析的165站为: 上海、赣榆、徐州、射阳、淮阴、东台、南通、南京、吴县、杭州、定海、嵊县、石浦、衢县、丽水、温州、缙县、宿州、蚌埠、合肥、霍山、安庆、芜湖、歙县、屯溪、浦城、建阳、福鼎、南屏、福州、永安、长汀、德化、平潭、漳州、厦门、九江、景德镇、修水、玉水、南昌、吉安、广昌、寻乌、遂川、赣州、鄱县、老河口、钟祥、巴东、宜昌、武汉、荆州、恩施、黄石、来凤、岳阳、常德、沅陵、长沙、芷江、邵阳、衡阳、武冈、零陵、郴州、韶关、连县、梅县、河源、汕头、广州、海丰、深圳、台山、阳江、湛江、桂林、河池、梧州、蒙山、都安、百色、桂平、南宁、玉林、龙州、钦州、东新、北海、海口、三亚、琼海、陵水、东方、平武、万源、巴中、绵阳、南充、万县、成都、遂宁、雅安、内江、重庆、乐山、彭水、南川、泸州、酉阳、宜宾、雷波、西昌、会理、德钦、昭通、临沧、会泽、泸水、大理、沾益、腾冲、楚雄、昆明、卢西、玉溪、广南、耿马、元江、蒙自、思茅、澜沧、河口、景洪、铜梓、湄潭、遵义、思南、铜仁、毕节、威宁、凯里、榕江、安顺、独山、罗甸、贵阳、盘县、兴仁、德州、莱阳、淄博、潍坊、济南、泰安、青岛、菏泽、信阳、南阳、驻马店、天津、营口、大连、丹东

考虑到分析结果的普遍性,对生育期生态规律的分析采用生育期日数的距平百分率来表示地区间和季节间差异。同时采用聚类分析方法对不同类别的水稻生育期作出相应的区划和生态原因解释。

## 2.1 我国水稻的生育期变化规律

### 2.1.1 早稻生育期变化规律

#### (1) 全生育期(图1)

我国早稻的全生育期日数平均值为151.1 d。除云贵高原外,均自北向南递减。两条零等值线呈经向分别位于110°E、120°E的两侧,云贵高原以东、东部海岸线附近以西均处于负距平区(-10%~0),负距平的低值区位于20°N附近的海南岛(-10%),负距平中心达-15.9%。其他负距平区在-5%以内。正距平区位于云贵高原、辽东半岛、山东半岛以及四川盆地。辽东半岛距平百分率在5%以上,云贵最高可达23.8%。南方丘陵山区最高距平百分率可达24.4%。四川盆地处于0~10%水平。

#### (2) 本田期

早稻本田期日数平均值为112.2 d,距平百分率分布图与全生育期相似。其低中心在华南,海南最低负距平为-10%,其他负距平处于-5%~0之间。云贵高原、辽东半岛、四川盆地和东部沿海附近为正距平区。云贵高中心在云南西北部地区,最高达25%,辽东半岛距平在10%以上,最高达15%。南方丘陵山区最高可达27.5%,四川盆地自东向西递减,其中川西地区距平百分率约为10%。

### 2.1.2 中稻生育期变化规律

#### (1) 全生育期(图2)

我国一季中稻的全生育期平均值为134.2 d,比早稻平均缩短17 d,其变化规律与早稻相似。零等值线沿云贵高原边缘延伸到四川与湖北交界地区,再经安徽中部、苏南、东南沿海海岸线附近地区,闭合于海南。云贵高原、四川盆地、山东、河北和辽东半岛为正距平区,华南、东南及长江中下游地区为负距平区。云贵高中心在云南西北

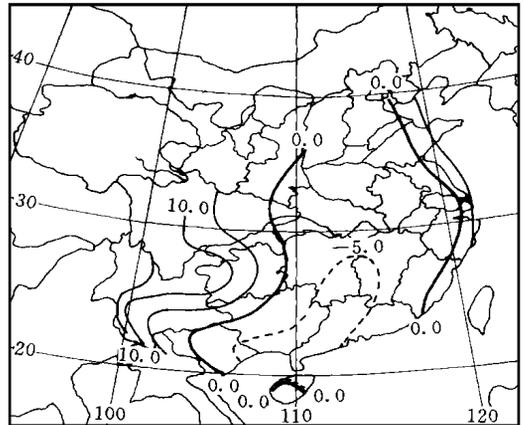


图1 早稻全生育期日数距平百分率分布图

Fig. 1 Regional distribution of relative deviation from the average of growth duration of early-season rice

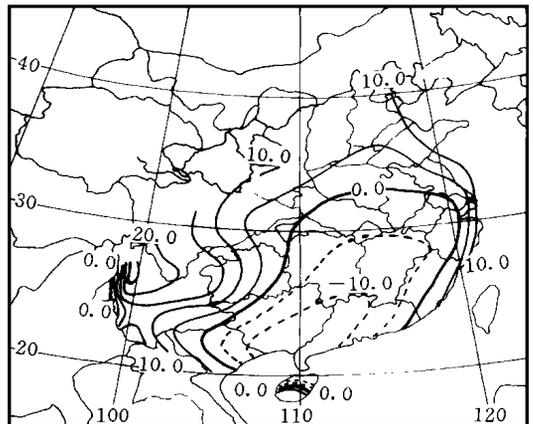


图2 中稻全生育期日数距平百分率分布图

Fig. 2 Regional distribution of relative deviation from the average of growth duration of middle-season rice

部(25%), 辽东半岛高距平中心百分率约为25%, 苏北、淮北约在0~5%距平水平。低中心在华南地区, 距平百分率在-10%以下, 海南岛约为-15%, 最低可达-18.8%。四川盆地自东向西呈递减趋势。

## (2) 本田期

我国中稻本田期平均值为102.7 d, 比早稻平均缩短约10 d。零等值线走向与全生育期相同。正距平区主要分布于云贵高原、四川盆地、淮北和苏北以及东南沿海地区, 其他地区为负距平区。云贵高原的距平百分率在10%以上, 中心在云南西北部(25%), 辽东半岛的距平百分率在15%以上, 最高可达25%, 东南沿海地区的距平在0~5%。四川盆地的距平百分率也有自东向西呈递减的趋势, 主要低值区(-5%)分布于106~119 E、19~30 N之间, 中心位于华南(-10%), 海南岛最低可达-15%。

## 2.1.3 晚稻生育期变化规律

### (1) 全生育期(图3)

我国晚稻主要分布于32°N以南, 云贵高原仅在西部边境地区可种植晚稻。晚稻的全生育期平均值为125.9 d。其空间分布趋势是由北到南递减。零等值线的走向为由海南经云贵高原东部边缘在28°N附近向东, 经湖南中部、江西北部、浙江南部, 最后闭合于海南。因此, 全生育期的负距平区主要包括华南地区、湖南南部、江西大部(除北部外)、浙江南部部分地区和福建。正距平区分布于云南南部边境地区、四川盆地、淮河流域、长江中下游地区和浙江北部, 距平百分率在5%~10%之间。云南南部地区高中心和淮河流域高中心距平百分率可达10%, 四川南部与云南交界地区有一高中心(10%), 川东南部分地区、湖南北部、江西北部、浙江中部和福建东南沿海地区距平百分率在0~5%之间。负距平区主要分布于零等值线所闭合的华南地区(-5%), 低中心在海南岛(-10%)。广西北部、广东东部、湖南南部、江西(除部分地区外)、福建和浙江南部的距平百分率处于-5%水平。

### (2) 本田期

晚稻本田期的平均值为98.8 d, 在云贵高原以东, 随纬度的增加而递增。负距平区主要分布于华南、湖南南部、江西大部(除北部外)、浙江南部和福建(除东南沿海外)。正距平区主要分布于云南南部、四川盆地、湖南北部、江西北部部分地区和浙江(除南部部分地区外)。正距平区的高值区位于云南南部、四川盆地、长江中下游以及浙江沿海地区, 距平百分率在5%以上。云南南部高中心、四川盆地高中心、淮河流域高中心、浙江沿海高中心以及四川与云南交界地区高中心的距平百分率均可达10%, 长江中下游和浙江北部地区距平在5%~10%。湖南北部、江西北部部分地区、浙江中部和福建东部沿海附近地区处于0~5%距平水平。负距平

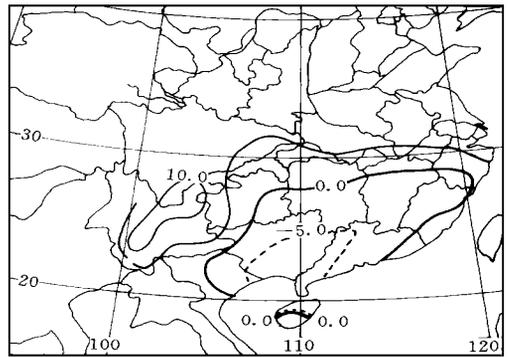


图3 晚稻全生育期日数距平百分率分布图

Fig. 3 Regional distribution of relative deviation from the average of growth duration of late-season rice

的低值区位于华南地区,距平百分率在 $-5\%$ 以下,其低中心位于海南( $-10\%$ )。广西北部、湖南南部、江西南部、浙江南部和福建(除东南沿海外),距平百分率处于 $-5\% \sim 0\%$ 水平。

## 2.2 我国水稻生育期变化的生态原因

(1) 早稻属于感温性强、感光性弱的品种,气候适应性很强,可广泛种植于全国各稻区。热量条件是影响早稻生育期变化的最主要因素。华南及长江流域一带,热量资源丰富,10℃积温在海南岛南端全年可达到9000h,而云贵高原、四川盆地、辽东半岛及南方丘陵山区热量条件相对短缺,日照时数也为全国的低值区。因此,早稻的生育期形成了华南负距平区、江淮流域零等值线、云贵川、辽东半岛及南方丘陵山区处于正距平高值区的分布规律。此外,东部地区热量资源呈纬向分布的地带性明显,由南向北光热随纬度的增高而递减,造成早稻生育期有随纬度的增高而递增。

(2) 中稻的感光性和感温性同属中等,但高温短日生育期比早稻长,作一季中稻栽培时,温度仍是影响其生育期长短的主要因素,因而生育期的变化规律与早稻相似,只是生育期的稳定性比早稻要好。云贵高原由于热量条件呈立体性分布的差异显著,因此,该区的水稻生育期随高度的变化较随纬度的变化大。

(3) 晚稻的感光性和感温性都很强,因此,晚稻只适合于栽培在光温条件适合的低纬地区。辽东半岛、云贵高原(除云南南部外)等地区由于秋季短日期热量不足而不适合晚稻的栽培。对晚稻生育期来说,华南是晚稻生育期的负距平区,这是由于华南晚稻生长期间的热量条件较湖北、湖南、江西等省好,平均气温高,但两区域距平百分率相差也只有5个百分点左右,差异已不显著。

## 3 我国水稻的生育期区划

根据我国稻区165站早、中、晚稻生育期的时空分布数据,用聚类分析的方法,可对我国的水稻种植区作生育期区划。本文以移栽-抽穗期的距平百分率值作出早、中、晚稻的生育期区划,并列示区划结果及区划图,这些区划结果对进一步的熟制分析将具有重要参考价值。

### 3.1 早季稻生育期区划

我国早季稻的生育期可划分为4个相似区域,其中Ⅰ、Ⅱ区分别含二个不同的地域亚区,结果见图4。

### 3.2 中稻生育期区划

中季稻生育期的聚类分析结果与早季稻基本相似,差别在于Ⅰ区内的鄂湘西部地区,因气温升高,归入Ⅱ区,Ⅱ区向南扩大至江苏中部、安徽中部、河南及湖北北部,结果见表2。

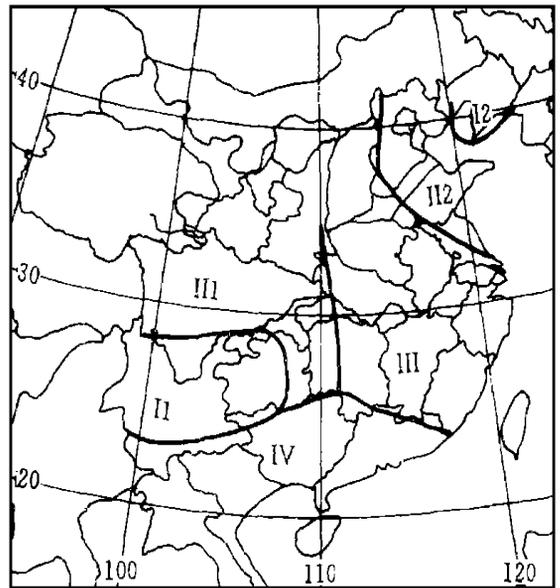


图4 早稻生育期区划图

Fig. 4 Growing period regionalization of early-season rice

表2 中稻生育期区划结果

Table 2 Regiolization results of the growing period for middle-season rice

| 区 | 亚 区 | 距平值(%)          | 区 域 范 围                  |
|---|-----|-----------------|--------------------------|
|   | 1   | 16.7 ~ 46.0     | 滇北、川南、黔西                 |
|   | 2   |                 | 辽吉东北部、黑东南部               |
|   | 1   | - 2.6 ~ 16.8    | 川中北部、黔东                  |
|   | 2   |                 | 苏中北部、皖北、鄂北、鲁、<br>豫、冀、津、京 |
|   |     | - 12.3 ~ - 2.7  | 闽、浙、苏南、豫南、皖、鄂、湘、赣        |
|   |     | - 18.2 ~ - 12.4 | 粤、桂、琼、滇南                 |

### 3.3 晚季稻生育期区划

晚季稻生育期可划分为三个区域, 其中 区包括二个地域亚区, 结果见表3。

表3 晚稻生育期区划结果

Table 3 Regiolization results of the growing period for late-season rice

| 区 | 亚 区 | 距平值(%)         | 区 域 范 围      |
|---|-----|----------------|--------------|
|   | 1   | 6.2 ~ 21.5     | 滇中           |
|   | 2   |                | 苏、皖、鄂北       |
|   |     | - 3.7 ~ 6.3    | 川东、鄂南、湘北、赣北  |
|   |     | - 16.0 ~ - 3.8 | 粤、桂、琼及闽、湘、赣南 |

## 4 结 语

本文在总结水稻发育速度研究成果的基础上, 提出了水稻发育速度的优化气象模式, 并以此估算全国165个站不同稻季的生育期, 分析了我国水稻生育期的生态规律及其原因, 并对生育期作出了区划。这些结果全面系统地提供了我国稻区水稻生育期的数量变化特征, 对进一步揭示水稻产量形成规律, 充分发挥地域气候资源潜力, 合理安排水稻熟制和品种布局, 以及建立与气候特征相适应的高产栽培模式等均有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 汤圣祥. 水稻与感光性(综述). 水稻文摘, 1991, 10(6): 1~4
- 2 唐锡华, 倪彭寿, 董本仙, 等. 在控制条件下对不同稻种日长和温度反应发育特性的研究. 植物生理学报. 1978, 4(2): 153~168
- 3 唐锡华, 李文安. 水稻光照发育阶段的研究. 水稻光照阶段发育的开始与结束. 植物学报. 1964, 12(2): 166~189
- 4 刘振宇. 水稻品种光温生态研究. 华南农业大学学报, 1989, 10(3): 24~33
- 5 田中明. 水稻生理生态. 上海: 上海科技出版社, 1981
- 6 水稻光温生态协作组. 中国水稻光温生态研究. 北京: 科学出版社, 1978
- 7 利思 H. 主编. 物候学与季节模式的建立. 颜邦侗等译. 北京: 科学出版社, 1984
- 8 Roberson C T. 估算作物发育速率的天气—数学模式. 农业气象科学, 1984, 4(1): 39~51
- 9 沈国权. 影响作物发育速度的非线性温度模式. 气象, 1980, 6(6): 9~11
- 10 殷新佑. 水稻发育温度效应的非线性模型及其应用. 作物学报, 1994, 20(6): 692~698
- 11 高亮之, 金之庆, 黄 耀, 等. 水稻计算机模拟模型及其应用之一—水稻钟模型: 水稻发育动态的计算机模型. 中国农业气象, 1989, 10(4): 1~6
- 12 蓝鸿第. 水稻光温问题的研究. 北京: 气象出版社, 1982

# REGULARITY OF ECOLOGICAL IMPACT ON GROWING PERIOD OF RICE AND ITS REGIONALIZATION IN CHINA

Gao Yonggang Zhang Linyun Yao Kem in

(Department of Applied Meteorology, NIM, Nanjing 210044)

**Abstract** An optimal model was presented for rice developing rate by means of generalizing concerned research findings. The model, involving the integral impact of temperature and day-length on rice developing rate, was tested and gave good predictions. The growing period was outputted from the model for early-, middle- and late-season rice respectively for 165 stations throughout the country with temperature data collected from 1951 to 1980. The relative mean deviation from the averaged growth duration over the time and then the stations was indicated for each station on a regional map, from which temporal and regional variations of the growing period were ecologically explained.

**Keywords** developing rate model, regularity of ecological impact, growing-period regionalization