

作物光温生产力模型及南方水稻适宜 生长期的数值分析*

于 强

(中国科学院地理研究所禹城试验站 北京 100101)

陆佩玲

(北京林业大学森林资源与环境学院 北京 100083)

刘建栋

(山东农业大学农学系 泰安 271018)

傅抱璞

(南京大学大气科学系 南京 210093)

姚克敏

(南京气象学院应用气象系 南京 210044)

提 要 发展了一个具有生物学基础的、兼具实用性和理论性的水稻生长模拟模型。它是在水肥适宜的条件下,以光、温因子模拟作物生长过程。其空间尺度是叶面水平的,时间尺度是逐时的,并且具有模拟冠层瞬时光合作用的能力。该模型由发育阶段、冠层光分布、冠层光合速率和叶面积指数增长等子模型组成。使用地理分期播种资料进行了检验,该模型可以解释在不同气候区域水稻干物质积累随生育期和播种期变化的 92.5%~95.8%。使用常规气象资料,用数值方法研究了南京、长沙、广州和贵阳等地杂交水稻的气候生态适应性。模拟结果表明,贵阳气温低、生育期长,其中稻生育期内温度适中、光照较强,干物质生产力高。广州气温高,中稻、早稻生育期短,产量较低,因受低温的影响小,是晚稻的高产区。南京和长沙以在生长中后期能避开盛夏高温并能正常抽穗扬花的适播晚稻干物质产量较高。

关键词 水稻 光合作用 温度 光照 生产力

分 类 中图法 S162.5

目前作物生长模型有数百种之多^[1-3]。由于作物种类和生态类型的多样性,尚没有完全普适的生长模型。较有影响的模型有美国 CERES 模型、荷兰 BACROS 模型和 ARID CROP 模型等。国内有黄策和王天铎的水稻生长模型^[4],高亮之等人的水稻栽培计算机模拟优化决策系统^[5]。

本文提出了以光温因子为基础的水稻生长模型。因为作物光合作用对光温的响应曲线多已明确,冠层辐射传输方程也已相当成熟。它可以作为作物生长模拟的基础性框架模型。而对于水分、营养等因子的作用,可以叶片水平的模型为基础进一步发展。

1 模 型

1.1 气象数据处理模型

作物的光合作用随温度和太阳辐射有明显的日变化。对于以较短时间尺度为步长的作物生长模拟,需要对若干时次的气象观测资料进行差值,以获取逐时气象要素值。太阳辐射

* 本文得到国家自然科学基金“九五”重大项目(49890330)和中国科学院重大项目(KZT950401)的资助。

收稿日期:1998-06-09;修回日期 1998-12-02。

的日变化按照天文辐射的规律进行差值。具体方法见文献6。温度的逐时值用三次样条函数根据02、08、14、20时的观测值和日最高最低温度进行差值,具体方法见文献7。

1.2 发育阶段模型

水稻发育模型往往是分段模型:如播种至移栽;移栽至抽穗;抽穗至成熟。因为水稻的感光阶段在移栽至抽穗期。在作物生长模拟中,发育阶段是系统控制的函数,叶面积指数是一个输入变量,要求在整个生育期(移栽至成熟)是一个连续变化的量。因而需要做一个全生育期的统一模型。综合前人的研究^[8],提出发育速度(V)的模型如下:

$$V = \frac{d DVS}{d t} = a_0 + a_1 \text{EXP}[-b(DL - DL_0) + a_2(T - T_{\min})^{1+p}(T_{\max} - T)^{1+q}]$$

DVS 为发育阶段,设移栽期为0,成熟期为1。对于逐日平均的模拟模型, T 为日平均温度, DL 为日长。对于从移栽至成熟的模拟,当抽穗以后感光性为0,令 $DL = DL_0$ 。据有关研究,水稻抽穗之前, $T_{\max} = 40$, $T_{\min} = 12$;此后,分别为41和14。 p 、 q 为参数。

对于逐日模拟可写为离散形式:

$$DVS = \sum_1^{n(t)} V(t)$$

模拟结果是各发育期对应的 DVS 是稳定的。如抽穗期的发育阶段为: $DVS_s = 0.65$ 。

1.3 冠层光分布模型

将冠层按叶面积指数划分为若干层次(每0.25一层)。在同一层次中,将叶片位置划分为8个方位和6个倾斜角,分别考虑太阳直接辐射和散射辐射在冠层中的传输。依据太阳位置和冠层结构,用 R_{oss} 的辐射传输模型计算其消光系数和叶面上的太阳辐射照度模型^[6]。具体形式已由文献6中给出,并进行了检验。

1.4 光合作用、呼吸作用模型

单叶光合作用的光响应曲线用非直角双曲线模型。然后对整个冠层积分,得出冠层的光合作用速率。具体公式见文献6。净光合作用速率为:

$$P_n = P_g - R_d$$

其中 P_g 是总光合速率, R_d 是暗呼吸速率,分别为生长呼吸和维持呼吸两部分($R_d = R_g + R_m$)。 R_g 与光合作用有关, R_m 与植株干重及温度有关。

$$R_g = r_g P_g$$

生长呼吸系数 r_g 取值为0.05。

维持呼吸强度与温度的关系一般用温度函数 Q_{10} 表示,即

$$R_m = Q_{10} \cdot r_{m0} \cdot DM$$

其中 $Q_{10} = 2$, r_{m0} 为 $0.001 \text{gCO}_2/\text{g} \cdot \text{h}$ 。

作物的光合作用有最低(T_{\min})、最适(T_{op})和最高(T_{\max})的三基点温度。对于光温影响的光合作用模型的一般形式为:

$$P_g(Q_{PAR}, T) = F(T) F(Q_{PAR})$$

其中 $F(T)$ 为温度函数,取以下形式:

$$F(T) = \begin{cases} \text{EXP}[-K_t(T_{op} - T)^2 / (T - T_{\min})(T_{\max} - T)] & T_{\min} < T < T_{\max} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

三基点温度随生育阶段变化,对于杂交水稻,一般 T_{min} 在 10~12 , T_{op} 在 24.5~26.5 , T_{max} 在 40~44 。

1.5 叶面积指数模型

在营养生长期,水稻叶面积指数逐渐增大,约在孕穗至抽穗期达到最大。在生殖生长期,随着叶片成熟、衰老,叶面积指数减少。这一过程可以用 Logistic 模型或其修正形式很好地表达。然而叶面积指数还与环境条件密切相关。地上部干物重或叶干重是叶面积增长的物质基础,也是生态因子对作物影响的综合反映。我们提出了叶面积指数随生育期和干物重变化的统一模型^[9]。

$$LAI(t) = \frac{(1+B) DM(t) / DM_0(t)}{1+B \cdot DM(t) / DM_0(t)} \cdot \frac{LAI_m}{1 + \text{EXP}(c_1 + c_2 t + c_3 t^2)}$$

其中 $LAI(t)$ 、 $DM(t)$ 、 $DM_0(t)$ 分别是生育期 t 时叶面积指数、实际干物质重和标准干物质重^[9]。其它为拟合参数。 LAI_m 的意义是标准情况下的可能最大叶面积指数。此式表达了叶面积指数随生育阶段变化的 Logistic 曲线关系,以及在某一播期叶面积指数与地上部干物重的 Michaelis-Menten 关系。

1.6 干物质转换分配模型和衰老模型

光合产物转化为植物干重的转换系数(CVF)随生育期变化^[10]。即

$$CVF = 0.7 \quad \text{当 } DVS < 0.65$$

$$CVF = 0.67 \quad \text{当 } DVS > 0.65$$

水稻营养生长期内,根冠比为 0.08~0.12。

$$r_{rs} = 0.1 \quad DVS < 0.65$$

$$r_{rs} = 0.05 \quad DVS > 0.65$$

当日地上部的干物质增量为:

$$DM_s = CVF \cdot P_c / (1 + r_{rs})$$

植株叶片的衰老表现为蛋白质的降解,叶绿素减少,RNA 含量下降,最后原生质膜的选透性丧失。植物生长的 S 曲线大体也反映出后期的衰老,可以用 Gompertz 方程描述。

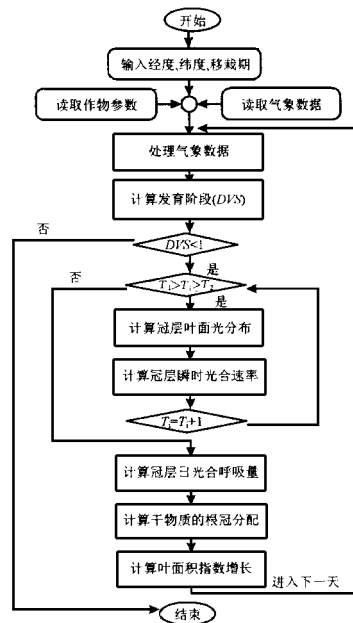
$$\frac{1}{W} \frac{dW}{dt} = \mu_0 \text{EXP}(-st)$$

其中, W 为干物重; μ_0 为 $t=0$ 时的相对生长率 (RGR_0); s 为经验描述相对生长率的逐渐降低的参数。 RGR 的降低在营养生长期可归因于生存竞争,在生殖生长期可归因于衰老。

从生理学角度看,衰老过程存在于整个生命期,叶片表现得最明显。营养生长期新叶的伸展与老叶的衰亡同时发生。生殖生长期衰老过程表现得更加明显。因此在生殖生长期考虑作物的衰老。即

$$W = W_0 \text{EXP}(-st)$$

类似地,



注: T_1 、 T_2 分别为日落前和日出后的整点时间
图 1 中国南方稻区水稻生长模拟流程图

Fig.1 Flow chart of simulation for rice productivity in southern China

$$P_d = P_{gd} \cdot \text{EXP}[-s(DVS - DVS_0)]$$

P_d 为考虑衰老后的冠层日干物质增长量。

2 水稻光温生产力的区域特征

使用实验资料对模型进行了验证。模拟的流程见图 1。

图 2 给出了各气候区域不同播种期(从移栽到成熟)干物质积累过程的数值模拟。

2.1 早稻

图 2 中,贵阳的第一、二播期,南京和长沙的第一、二播期,广州的第一、二、三播期为早稻。由于初夏南北温差仍较大,广州受高温短日的作用明显,生育期自南向北,自低海拔向高海拔增加。水稻本田期广州约有 90 天,长江流域 90~95 天,贵阳 100 天。在 4~6 月太阳辐射自北向南递减的形势下,早稻干物质积累亦随之递减。虽然早稻生长后期(7 月)广州太阳辐射已较强,高温亦使干物质积累缓慢。杂交早稻的气候生产力特点是,贵阳生育期较长,中后期作物生长率较高,干物质产量最大。广州由于生育期短,生长率低,干物质产量最低。南京和长沙居中。

2.2 中稻

图 2 中,广州的第四播期,南京和长沙的第三、四播期,贵阳的第三播期为中稻。杂交稻作一季中稻栽培时,其生育期缩短,地区变化规律与早稻基本相似。本田期贵阳 95~100 天,南京约 90 天,长沙约 80~85 天。

中稻的气候生产力以贵阳最高,广州最低,长沙次低,南京次高。中稻生长期在全年的高温阶段,高温对生长的抑制作用表现明显。作物气候生产力与温度表现为相反的趋势。这期间太阳辐射一般较高,不会成为限制因素。

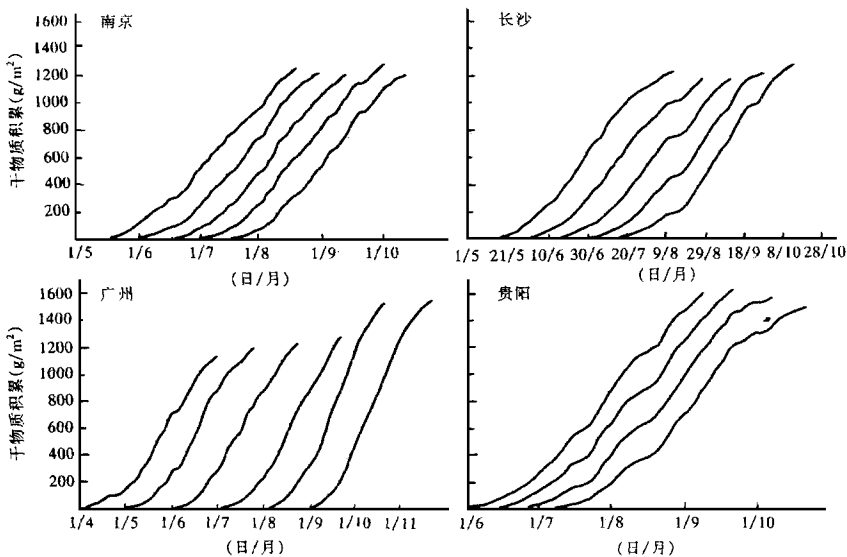


图 2 不同移栽期水稻干物质积累的模拟(南京、长沙、广州、贵阳,1980年)

Fig. 2 Simulation of dry matter accumulation of rice in different transplanting date (Nanjing, Changsha, Guangzhou, and Guiyang, 1980)

2.3 晚 稻

图 2 中,广州的第五、六播期,南京和长沙的第五播期为晚稻。贵阳由于温度较低不适宜种植。杂交晚稻由于气温低日照长,生育期较中稻长。广州约 85~90 天,长沙 90 天左右,南京 95 天左右。杂交晚稻气候生产力自北向南增加,与早中稻相反。

在这一季节光照条件一般较好,晚稻的主要气候问题仍然是热量条件问题。秋季热量条件好,气候生产力也较好。广州秋季的热量条件明显优于南京和长沙。在温暖的东部地区,以晚稻产量较高。在同一地区又以生殖生长期能避过盛夏高温或早秋低温者为高^[11]。在温度较低的贵阳,以中、早稻产量较高。晚稻不宜种植或产量较低。

3 讨 论

本文是从作物的光合作用量着眼,来分析作物气候生态条件。对于经济产量,干物质重和收获指数是它的两个决定因素。而收获指数的区域差异也是很大的^[11],影响因素及机理很复杂。作物的最适播期要看光合生产力与收获指数的综合影响。如晚稻适播期则主要考虑避免抽穗扬花期遇到的秋季低温,以免空瘪粒增多,收获指数下降。

本模型与过去的生产力模型相比,其特点是发展了一个对作物株型有高分辨率的光分布模型^[4],在光合模型中引入了作物的衰老因素。

参考文献

- 1 Passioura J B. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering? *Agron J*, 1996, 88: 690~694
- 2 Sinclair T R, N G Seligman. Crop modeling: from infancy to maturity. *Agron J*, 1996, 88: 698~704
- 3 Boote K J, J W Jones, N B Pickering. Potential uses and limitations of crop models. *Agron J*, 1996, 88: 704~716
- 4 黄策,王天铎. 水稻群体物质生产过程的计算机模拟. *作物学报*, 1988, 14(1): 1~8
- 5 高亮之,金之庆,黄耀等. 水稻栽培计算机模拟优化决策系统. 北京:中国农业出版社, 1992
- 6 于强,王天铎. 作物株型与群体光合作用的数学模拟研究 I. 模型与验证. *作物学报*, 1998, 24(1): 7~15
- 7 于强,傅抱璞. 模拟温度日变化的三次样条函数法. 见:傅抱璞主编. 气候资源与开发利用. 北京:气象出版社, 1995. 52~56
- 8 GAO Liangzhi. Rice clock model—a computer model to simulate rice development. *Agr Forest Meteorol*, 1992, 60: 1~16
- 9 于强,傅抱璞. 水稻叶面积指数增长的模拟. *中国农业气象*, 1995, 16(5): 6~8
- 10 户 义次主编(薛德榕译). 作物的光合作用与物质生产. 北京:科学出版社, 1979
- 11 姚克敏,张恒云,王志南. 气象条件与杂交稻干物质积累及其分配规律的研究(三). *农业气象*, 1986, 8(1): 22~26

CROP PHOTO-TEMPERATURE PRODUCTIVITY MODEL AND NUMERICAL ANALYSIS OF SUITABLE GROWTH SEASON OF RICE IN SOUTHERN CHINA

YU Qiang

(*Yucheng Comprehensive Experimental Station, Institute of Geography, CAS, Beijing 100101*)

LU Pei-ling

(*Beijing Forestry University, Beijing 100083*)

LIU Jian-dong

(*Department of Agronomy, Shandong Agricultural University, Taian 271018*)

FU Bao-pu

(*Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093*)

YAO Ke-min

(*Department of Applied Meteorology, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

Abstract A biologically based model of both practical and theoretical significance was developed to simulate rice growth. On conditions with suitable water and fertilizers, the crop growth processes were simulated by considering solar radiation and temperature. Its spatial scale is leaf level, and temporal scale is hourly. The model can simulate instantaneous canopy photosynthesis. The model was validated using data from geographically sowing experiment. It is showed that the model can interpret 92.5% - 95.8% of the changes of dry matter accumulation with developmental stage and sowing date in different climatic areas. Using regular meteorological data, including solar radiation, we studied ecological acclimation of hybrid rice numerically in the north, middle, and south subtropical zones and Yunnan-Guizhou Plateau. The result shows that Yunnan-Guizhou Plateau is a high dry matter production area for middle rice, because of higher radiation, lower temperature and longer growth period. In the south of China, the early and middle rice is low productive, because of higher temperature and shorter growth period, but it is a high productive area in late rice. Also in Changjiang River Valley, the suitable sowed late rice has higher productivity provided the high temperature in summer and low temperature in autumn in its middle and late period of growth can be avoided.

Key words rice, productivity, solar radiation, temperature

第一作者简介

于强,男,1962年10月生。1984年南京气象学院农业气象专业学士,1987年北京农业大学农业气象专业硕士,1994年南京大学气候学专业博士,1994~1996年中科院上海植物生理研究所光合作用研究室博士后。1997年任中科院大气物理所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室副研究员。入选1997年度中科院“百人计划”项目,现任中科院地理所禹城综合试验站研究员、业务副站长。