

水稻发育期模型研究进展

张 帅,陶福禄

(中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘 要:物候是气候变化的重要指示物。随着全球变化研究的开展,已经有越来越多的研究表明,随着气象条件的变化,植物的物候期发生了明显的变化,因此,对物候的精准模拟可以帮助我们准确理解作物对全球变化的响应机制,强大的物候模型已经逐渐成为提高植物对气候变化响应的模拟精度的一个关键工具。同时作物物候的模拟也是作物模型的一个重要组成部分。水稻是最重要的粮食作物之一,水稻发育期模型研究对水稻生长模型有着重要的意义。本文对国内外水稻发育模型的发展进行了综述,并提出了目前水稻发育期模型研究中存在的问题以及发展的方向,以期后续的水稻发育期模型乃至作物模型的研究提供借鉴。

关键词:水稻;物候;发育期;模型

1 引言

植物物候是气候变化的指示物之一^[1-5],是衡量生态系统对气候变化响应的指标^[5-10]。从20世纪70年代开始,全球气候发生了明显的变化,植物物候也随之变化^[11-14]。植物物候期的变化主要表现在开花期提前、落叶期推迟^[14-18]和发育期延长^[17,19-20]。

在大量观测基础上发展的作物模型已经成为研究植物对气候变化响应的主要工具^[5,21-22],作物发育期模拟是作物模型的重要组成部分^[23-24]。作物发育期控制着作物生长模型在不同发育阶段的生长参数。因此,对发育期模拟的精度将直接影响作物模型的模拟结果^[25-27]。

水稻是世界上最重要的粮食作物之一,尤其是在亚洲、非洲和拉丁美洲^[28-29]。而中国是世界上最大的水稻生产国,自20世纪70年代以来,中国的水稻播种面积占到世界水稻播种面积的1/4,水稻产量占世界水稻总产量的1/3^[30]。在全球变暖的背景下,水稻生产也面临着巨大的挑战。气候变化对水稻生产影响^[31-33]的研究成为全球变化研究中的一项重要课题,并且水稻发育期模型研究更是其中的关键环节。

2 水稻发育期模型的发展

2.1 水稻发育期模型的理论基础

作物发育期受温度及光周期的显著影响^[34],在一定的温度范围内作物的发育速率随着温度的上升明显加快^[35]。这是当前作物发育模型的基本理论,也是水稻发育期模型发展的理论基础。

在最早的作物发育期模型中,影响作物发育期的参数是积温GDD(Growing Degree Day)^[36]。当温度达到基温(base temperature)时,GDD开始累加;当温度低于基温的时候,作物发育率为0;当温度达到高温限制时,作物发育速率保持恒定^[34]或者线性降低。

采用GDD衡量作物发育速率的模型无论在准确性还是易操作性方面都十分出色^[37]。但是在随后的理论研究中,许多学者发现当温度超过最高温度限制时,作物的发育速率并不是线性下降,其中,Lehenbauer^[38]对玉米播种期的研究证实了这一结论,他的研究也得到了众多研究者的支持^[39-40]。基于这一发现,许多物候模型在处理温度超过高温限制时采用了不同形式。如Gilmore和Rogers^[39]采用双线性模型(BLM)订正原有模型的发育期速率。

收稿日期:2012-03; 修订日期:2012-07.

基金项目:国家973项目课题(2010CB950902)。

作者简介:张帅(1982-),女,博士研究生,主要研究方向为农业气象。E-mail: zhangshuai@lreis.ac.cn

通讯作者:陶福禄(1970-),男,研究员,主要研究方向为全球变化生态学和农林气象学。E-mail: taofl@igsrr.ac.cn

Robert 和 Summerfield^[35]、Garcia-Huidobro 等^[41]则采用其他形式描述发育期速率。

经过改进的物候期模型被广泛的应用于作物模型中^[42-45]。但是用非线性形式描述大于最高温度时的作物发育速率也存在一些问题。如在 Kiniry 和 Keener^[37]的研究中, BLM 模型的模拟精度低于 GDD 模型的模拟精度。最终在大量试验的基础上, 研究者发现指数模型^[46]或者 logistic 模型^[47]更适合描述作物的发育期速率。

综上所述, 作物发育期模型的理论发展经历了由积温模型到非线性模型的发展。现有的水稻发育期模型也基本上从以上两个理论发展而来。

2.2 国外水稻发育期模型的发展

作物发育期模型是作物模型的重要组成部分, 作物发育期模型的研制也伴随着作物模型的发展而日趋成熟。美国 and 荷兰是作物模型发展比较发达的两个国家。荷兰最早于 20 世纪 60 年代开始研制作物模型。de Wit 和 Penning de Vries 首先建立了光合作用模型, 在此基础上发展了 ELCROS 模型^[48-49] 和 BACROS 模型^[50]。70 年代美国学者 Ritchie^[2,34,51]开始研制适于多种单叶植物的 CERES 系列作物生长模型^[52-54]。在作物生长模型发展的基础上, 水稻生长模型的发展取得了一定的进步。1993-1994 年荷兰瓦赫宁根大学推出了水稻生长模拟模型 ORYZA。ORYZA2000 是 ORYZA 模型的发展, 由国际水稻所与荷兰瓦赫宁根大学联合研制^[55]。经过多年的发展 CERES 系列作物生长模型 (CERES-Rice, CERES-Maize, CERES-Wheat 等) 也得到了广泛的应用。目前国际上广泛用于模拟作物发育期和作物生长的模型是 ORYZA2000 和 CERES 系列作物生长模型。

2.3 我国水稻发育期模型的发展

与国外相比, 我国作物模型研究起步较晚, 国内在作物发育期模型方面的研究主要是对国外模型的应用^[56-57]及国外模型参数本地化, 同时自主开发了一系列的作物发育期模型。研究的作物主要集中在水稻^[58-59]、小麦^[60]、棉花^[61]等。我国最早的发育期模型是沈国权^[62]提出的“非线性温度模式”。江西农业大学戚昌瀚等应用“系统动力学”原理, 成功研制了水稻生长日历模型 (RICAM)^[58, 63]。

20 世纪 90 年代以来, 我国的作物发育期模拟研究有了很大的进展。高亮之等提出的钟模型^[64], 殷新佑等发表了水稻发育温度效应的非线性模

型^[65]以及曹卫星等^[66-68]提出的以生理发育时间为尺度预测作物发育进程的方法体系, 进一步推动了水稻生育期模拟与预测研究的发展。

3 水稻发育期模型的分类

3.1 积温法模型

Reaumur 在 1735 年创立了积温学说, 又称作“度日”法。该方法认为作物完成某一阶段发育过程所需要的积温为一常数, 因此可以用积温的总量来衡量作物的发育期是否完成。经过研究发现, 这个积温常数并不稳定, 这是因为在发育期内过高或者过低的温度都会影响作物的生长, 因此将临界温度^[69]引入发育期模型。将日平均温度高于上限温度和低于下限温度部分剔除, 计算出有效积温, 用于判断作物的发育期是否完成。

3.2 温度非线性模型

王尚明等^[70]基于温度对作物生长发育是非线性影响的理论, 提出了“温度非线性模型”。付荣等^[71]用平均温度与最适温度的积温比值作为温强系数代入发育期模型中, 从而计算作物的生长发育速率。这类模型的代表有: 沈国权的“非线性温度模式”^[62]。

3.3 光温共同作用模型

此类模型在作物生长发育期内除了考虑温度的影响外, 还考虑光照条件对作物发育的影响。Robertson^[72]在 1973 年提出生物气象时间尺度 (BMTS) 模型, 考虑了每日光周期、日最高温度、日最低温度。Ritchie 等^[53]于 1985 年以积温法为基础, 考虑了品种对春化和光周期反应的遗传特性研制了模型。Gao 等^[64]综合考虑温、光的共同作用, 研制了模拟水稻发育动态的“水稻钟”模型。

4 国内外主要的水稻发育期模型

4.1 ORYZA2000

ORYZA2000 是由国际水稻所的 Bounman 与其他两位学者在 ORYZA 模型系列基础上改进而成的^[55]。ORYZA2000 已经在国外多个国家进行的大田试验中得到了验证^[73-74]。

ORYZA2000 模型假定作物生长发育的三基点温度, 根据一个余弦函数, 输入日最高温度和日最低温度, 计算出一天之内每个小时的温度。根据假

设的积温与平均温度之间的函数关系,逐渐累积每天的积温值,当积温值达到一定阈值时,模型进入下一个生育期。计算公式如下^[55]:

$$DTU = \sum_{h=1}^{24} (HD) \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_d \leq T_{base}, T_d \geq T_{high}: HD = 0 \\ T_{base} < T_d \leq T_{opt}: HD = (T_d - T_{base})/24 \\ T_{opt} < T_d < T_{high}: \\ HD = [T_{opt} - (T_d - T_{opt}) \times (T_{opt} - T_{base}) / (T_{high} - T_{opt})] / 24 \end{cases} \quad (2)$$

$$T_d = (T_{min} + T_{max})/2 + (T_{max} - T_{min}) \cos[0.2618(h - 14)]/2 \quad (3)$$

式中: HD 是每小时的积温($^{\circ}\text{C}$); DTU 是将 HD 进行 24 小时累加后得到的逐日积温值($^{\circ}\text{C}$); T_d 是每小时的温度($^{\circ}\text{C}$); T_{base} 是作物生长的最低温度($^{\circ}\text{C}$); T_{high} 是作物生长的最高温度($^{\circ}\text{C}$); T_{opt} 是作物生长的最佳温度($^{\circ}\text{C}$); T_{min} 和 T_{max} 分别是日最低温度和最高温度($^{\circ}\text{C}$); h 是一天内的第几个小时。

在光敏感期, ORYZA2000 模型中水稻发育速率对日长的响应(EFP, effect of day length)的表达式如下:

$$EFP = 1 - (DL_K - DL_c) \times PPSE \quad (4)$$

式中: DL_K 是每天的平均日长(h); DL_c 是临界日长(h); $PPSE$ 是光敏感系数。

4.2 CERES-Rice

作物—环境—资源综合系统 CERES 系列模型是由密西根州立大学 Ritchie 教授等在 20 世纪 80 年代初建立的谷类作物模拟模型^[53]。该模型中对发育期的模拟采用了热时(Daily Thermal Time, DTT)的概念。计算出每日的热时,然后进行逐日累加,当累加值达到了临界值时,表示一个发育阶段结束,下一个发育阶段开始,而临界值由品种的遗传参数决定。

每天的热时 DDT_i ($^{\circ}\text{C}$) 计算如下:

作物的发育速率与在 T_{base} 和 T_{opt} 之间的平均温度成正比例,当 $T_{max} < T_{base}$, $DDT_i = 0$; $T_{max} > T_{opt}$ 或者 $T_{min} < T_{base}$, 通过在 T_{max} 和 T_{min} 之间进行正弦波内插得到的每小时温度 T_d :

$$T_d = (T_{min} + T_{max})/2 + (T_{max} - T_{min}) \cdot \sin[3.14/(12h)/2] \quad (5)$$

$$\begin{cases} T_{base} < T_d \leq T_{opt}: DDT_i = (T_d - T_{base})/24 \\ T_d < T_{base}, T_d > T_{high}: DDT_i = 0 \\ T_{opt} < T_d < T_{high}: DDT_i = [T_{opt} - (T_d - T_{opt}) - T_{base}]/24 \end{cases} \quad (6)$$

在光敏感期, CERES-Rice 模型中水稻发育速

率对日长的响应表达如下:

$$EFP = 1 - P2R/136 \times ((DL_K - DL_c)^{-1}) \quad (7)$$

式中: $P2R$ 为光敏感系数。

4.3 水稻钟模型

Gao 等^[64]发展的水稻钟模型根据逐日气温和日长资料,模拟出水稻的发育、叶龄、分蘖、茎伸长、穗分化和根系发展等日进程。此后基于水稻钟模型的原理,发展了一批作物发育期模型^[60,75-76]。该模型利用生育期内的发育速率(DR, development rate)来表达水稻的生长发育,其计算公式如下:

$$DR = \exp(k) \left(\frac{T - T_{base}}{T_{opt} - T_{base}} \right)^P \left(\frac{T_{high} - T}{T_{high} - T_{opt}} \right)^Q \exp[G(DL_K - DL_c)] \quad (8)$$

$$\begin{cases} T < T_{base}: T = T_{base} \\ T > T_{high}: T = T_{high} \end{cases} \quad (9)$$

$$DL_K - DL_c, DL_K - DL_c \quad (10)$$

式中: T 是每天的平均温度($^{\circ}\text{C}$); k 、 P 、 Q 为经验常数。在该模型中引入了三基点温度和临界日长,对温度的感温性和感光性都有考虑,但是不足之处是模型中有两个感温性参数,增加了参数调试难度。

4.4 Beta 模型

Yin^[65]改进了水稻钟模型,把非线性 β 函数应用在水稻发育的模拟中。

$$DR = \exp(\mu)(T - T_{base})^\alpha (T_{high} - T)^\beta \quad (11)$$

当水稻在光敏感期时,水稻的发育速率为:

$$DR = \exp(\mu)(T - T_{base})^\alpha (T_{high} - T)^\beta \cdot DL_K^\delta (24 - DL_K)^\epsilon \quad (12)$$

式中: μ 、 α 、 β 、 δ 、 ϵ 都是经验常数。与水稻钟模型相比,该模型减少了 T_{opt} 这个参数,并且水稻最大的发育速率发生在最适温度。

5 研究展望

(1) 灾害对作物发育期影响研究

目前的水稻发育期模拟预测已经发展到了联合考虑温、光、水、氮的综合系统,但是现有模型对病虫害、自然灾害等因素对作物发育期的影响并未考虑。而灾害的发生却是影响作物发育期长短及产量的重要因子。灾害对作物发育期影响的研究及模拟工作应当是作物发育期模型研究的下一个目标。

(2) 二氧化碳浓度增加对作物发育期影响研究
全球变化的内容不仅仅是气温上升,也包括二氧化碳浓度的增加。二氧化碳的浓度增加是给作物实施了增肥效果,现有物候模型并没有考虑二氧化碳浓度变化对物候生育期长短的影响。如何改变模型结构,将二氧化碳增肥影响增加到模型中是发育期模型的重要研究内容之一。

(3) 模型参数的校正及验证

现有物候模型中涉及到一些关键且通用的参数,如三基点温度等。这些参数往往在不同区域、不同品种应当选用不同取值。尤其是中国幅员广阔,水稻品种较多的情况下,只有分区域,分品种校正模型参数,才能大幅提高模拟精度。

(4) 加强未来气候情景下水稻发育期变化研究

开展在未来情景下水稻发育期的变化的研究,可以帮助我们准确理解作物对全球变化的响应机制,并在未来的粮食生产中起到积极的指示作用。

参考文献

- [1] Ahas R, Jaagus J, Aasa A. The phenological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44(4): 159-166.
- [2] Badeck F W, Bondeau A, Bottcher K, et al. Responses of spring phenology to climate change. *New Phytologist*, 2004, 162(2): 295-309.
- [3] McBratney A B, Mendonça Santos M L, Minasny B. On digital soil mapping. *Geoderma*, 2003, 117(1-2): 3-52.
- [4] Menzel A, Sparks T H, Estrella N, et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 2006, 12(10): 1969-1976.
- [5] White M A, Thornton P E, Running S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(2): 217-234.
- [6] Menzel A and Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397(6721): 659-659.
- [7] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [8] Tao F L, Yokozawa M, Zhang Z, et al. Land surface phenology dynamics and climate variations in the North East China Transect (NECT), 1982-2000. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(19): 5461-5478.
- [9] White M A, de Beurs K M, Didan K, et al. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Global Change Biology*, 2009, 15(10): 2335-2359.
- [10] Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology*, 2004, 10(7): 1133-1145.
- [11] Sacks W J, Kucharik C J. Crop management and phenology trends in the U.S. Corn Belt: Impacts on yields, evapotranspiration and energy balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 882-894.
- [12] Shimono H. Earlier rice phenology as a result of climate change can increase the risk of cold damage during reproductive growth in northern Japan. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 144(1): 201-207.
- [13] Siebert S. and Ewert F. Spatio-temporal patterns of phenological development in Germany in relation to temperature and day length. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 152(15): 44-57.
- [14] Vitasse Y, Francois C, Delpierre N, et al. Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 969-980.
- [15] Karlsen S R, Hogda K A, Wielgolaski F E, et al. Growing-season trends in Fennoscandia 1982-2006, determined from satellite and phenology data. *Climate Research*, 2009, 39(3): 275-286.
- [16] Morin X, Roy J, Sonie L, et al. Changes in leaf phenology of three European oak species in response to experimental climate change. *New Phytologist*, 2010, 186(4): 900-910.
- [17] Fitter A H. and Fitter R S R. Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, 2002, 296(5573): 1689-1691.
- [18] Garcia-Mozo H, Mestre A, Galan C, et al. Phenological trends in southern Spain: A response to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(4): 575-580.
- [19] Menzel A, Estrella N, Fabian P. Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global Change Biology*, 2001, 7(6): 657-666.
- [20] Sparks T H and Carey P D. The responses of species to climate over two centuries: An analysis of the Marsham phenological record, 1736-1947. *Journal of Ecology*,

- 1995, 83(2): 321-329.
- [21] Chuine I, Cambon G, Comtois P. Scaling phenology from the local to the regional level: advances from species-specific phenological models. *Global Change Biology*, 2000, 6(8): 943-952.
- [22] van Oort P A J, Zhang T Y, de Vries M E, et al. Correlation between temperature and phenology prediction error in rice (*Oryza sativa* L.). *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1545-1555.
- [23] Chuine I, Cour P, Rousseau D D. Selecting models to predict the timing of flowering of temperate trees: implications for tree phenology modelling. *Plant Cell and Environment*, 1999, 22(1): 1-13.
- [24] Streck N A, de Paula F L M, Bisognin D A, et al. Simulating the development of field grown potato (*Solanum tuberosum* L.). *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142(1): 1-11.
- [25] Andrej C, Zalika C, Lucka K, et al. The simulation of phenological development in dynamic crop model: The Bayesian comparison of different methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(1): 101-115.
- [26] Chmielewski F M, Rotzer T. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(2): 101-112.
- [27] Zhang T Y, Zhu J, Yang X G. Non-stationary thermal time accumulation reduces the predictability of climate change effects on agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1412-1418.
- [28] Kimura M and Minami K. Dynamics of methane in rice fields: Emissions to the atmosphere in Japan and Thailand//Peng S, Ingram K T, Neue H U et al. *Climate Change and Rice*. Berlin: Springer-Verlag, 1995: 30-45.
- [29] Yoshida S. *Fundamentals of Rice Crop Science*. Los Banos, Philippines: International Rice Research Institute, 1981: 269.
- [30] FAO. FAOSTAT database 2010 [DB/OL]. 2010-09-20 [2011-02-13]. <http://www.fao.org>
- [31] Horie T, Centeno G S, Nakagawa H, et al. Effect of elevated carbon dioxide and climate change on rice production in East and Southeast Asia//Oshima Y. *Proceedings of the International Scientific Symposium on Asian Paddy Fields*. Saskatchewan, Canada: University of Saskatchewan, 1997: 913-967.
- [32] Kropff M J, Centeno G S, Bachelet D, et al. Predicting the impact of CO₂ and temperature on rice production//IRRI Seminar Series on Climate Change and Rice. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, 1993.
- [33] Matthews R B, Kropff M J, Horie T, et al. Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adaptation. *Agricultural Systems*, 1997, 54(3): 399-425.
- [34] Alocilja E C, and Ritchie J T. A model for the phenology of rice//Hodges T. *Predicting Crop Phenology*. Boca Raton: CRC Press, 1991: 181-189.
- [35] Roberts E H, Summerville R J. Measurement and prediction of flowering in annual crops//Atherton J G. *Manipulation of Flowering*. London: Butterworths, 1987: 17-50.
- [36] Tollenaar M, Daynard T B, Hunter R B. Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. *Crop Science*, 1979, 19(3): 363-366.
- [37] Kiniry J R, Keener M E. An enzyme kinetic equation to estimate maize development rates. *Agronomy Journal*, 1982, 74(1): 115-119.
- [38] Lehenbauer P A. Growth of maize seedlings in relation to temperature. *Physiological Research*, 1914, 1(5): 247-288.
- [39] Gilmore E C and Rogers J S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. *Agronomy Journal*, 1958, 50(10): 611-615.
- [40] Coelho D T, Dale R F. An energy-crop growth variable and temperature function for predicting corn growth and development: Planting to silking. *Agronomy Journal*, 1980, 72(3): 503-510.
- [41] Garcia-Huidobro J, Monteith J L, Squire G R. Time, temperature and germination of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. and H.). I. Constant temperature. *Journal of Experimental Biology*, 1982, 33(2): 288-296.
- [42] Ferguson J H A. Empirical estimation of thermoreaction curves for the rate of development. *Euphytica*, 1958, 7(2): 140-146.
- [43] Orchard T J. Calculating constant temperature equivalents. *Agricultural Meteorology*, 1975, 15(3): 405-418.
- [44] Tyldesley J B. A method of evaluating the effect of temperature on an organism when the response is nonlinear. *Agricultural Meteorology*, 1978, 19(2): 137-153.
- [45] Johnson I R, Thomley J H M. Temperature dependence of plant and crop processes. *Annals of Botany*, 1985, 55(1): 1-24.
- [46] Angus J F, Mackenzie D H, Morton R, et al. Phasic development in field crops. II: Thermal and photoperiodic responses of spring wheat. *Field Crops Research*, 1981, 4(3): 269-283.
- [47] Horie T, Nakagawa H. Modelling and prediction of devel-

- opment process in rice. I: Structure and method of parameter estimation of a model for simulating development process toward heading. *Japan Journal of Crop Science*, 1990, 59(4): 687-695.
- [48] Brounwer R, Wit C T. A simulation model of plant growth with special attention to root growth and its consequences//Whittington N W J. *Root growth*. London: Butterworths, 1969: 222-224.
- [49] Duncan W G, Baker D N. Simulation of growth and yield in cotton: II. A computer analysis of the nutritional theory. *Proceedings of the Beltwide Cotton Conference*, Memphis, TN: National Cotton Council, 1971: 45-61.
- [50] de Wit C T, Goudriaan J, Van Laar H H, et al. *Simulation of Assimilation, Respiration and Transpiration of Crops*. Wageningen, Netherlands: Pudoc., 1978: 140.
- [51] McMaster G S, Morgan J S, Wilhelm W W. Simulating winter wheat spikes development and growth. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, 60(3): 193-220.
- [52] Penning de Vries F W T, Van Laar H H. *Simulation of Growth Processes and the Model BACROS*//Penning de Vries F W T, Van Laar H H. *Simulation of Plant Growth and Crop Production*. Wageningen, Netherlands: Pudoc., 1982: 114-135.
- [53] Ritchie J T, Otter S. Description and performance of CERES-Wheat: A user oriented wheat yield model. *US-DAARS: ARS38*, 1985: 159-175..
- [54] 曹永华. 美国 CERES 作物模拟模型及其应用. *世界农业*, 1991(9): 52-55.
- [55] Bouman B A M, Kropff M J, Tuong T P. *ORYZA2000: Modeling lowland rice*. Los Banos: IRRI and Wageningen University, 2001: 235.
- [56] 何英彬, 陈佑启, 唐华俊. 基于 MODIS 反演逐日 LAI 及 SIMRIW 模型的冷害对水稻单产的影响研究. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 188-194.
- [57] 李亚龙, 崔远来, 李远华. 水—氮联合限制条件下对水稻生产模型 ORYZA2000 的验证与评价. *灌溉排水学报*, 2005, 24(1): 28-32, 44.
- [58] 戚昌瀚, 殷新佑, 刘桃菊, 等. 水稻生长日历模拟模型 (RICAM) 的调控决策系统 (RICOS) 研究. *江西农业大学学报*, 1994, 16(4): 323-327.
- [59] 郑国清. 浅论对水稻发育期模型的认识. *中国农业气象*, 1999, 20(2): 31-34.
- [60] 冯利平, 高亮之, 金之庆, 等. 小麦发育期动态模拟模型的研究. *作物学报*, 1997, 23(4): 418-424.
- [61] 潘学标, 韩湘玲, 石元春. COTGROW: 棉花生长发育模拟模型. *棉花学报*, 1996, 8(4): 180-188.
- [62] 沈国权. 影响作物发育速度的非线性温度模式. *气象*, 1980(6): 9-11.
- [63] 戚昌瀚, 殷新佑, 谢华蔼. 水稻产量形成的生长日历模拟模型的初步研究. *江西农业大学学报*, 1991(专刊2): 29-43.
- [64] Gao L Z, Jin Z Q, Huang Y, et al. Rice clock model: A computer model to simulate rice development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, 60(1-2): 1-16.
- [65] Yin X Y. A nonlinear model to quantify temperature effect on rice phenology and its application. *Acta Agronomica Sinica*, 1994, 20(6): 692-700.
- [66] Meng Y L, Cao W X, Zhou Z G. A Process-based Model for Simulation Phasic Development and Phenology in Rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(11): 1362-1367.
- [67] Yan M C, Cao W X, Li C D, et al. Validation and evaluation of a mechanistic model of phasic and phenological development of wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(2): 43-50.
- [68] Yan M C, Cao W Y, Luo W. A mechanistic model of phasic and phenological development of wheat. I: Assumption and description of the model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 355-359.
- [69] 陈小虎, 曾习农, 黄江青, 等. 粳型水稻生长发育实效积温的确定及相关性研究. *作物研究*, 2005, 19(3): 143-146.
- [70] 王尚明, 张崇华, 胡逢喜, 等. 空气温度对水稻生长影响的数学模拟. *江西农业学报*, 2007, 19(10): 16-18.
- [71] 付荣, 段有, 高全. 春小麦播种出苗期当量积温的计算及应用分析. *吉林气象*, 2005(2): 23, 30.
- [72] Robertson G W. Development of simplified agroclimatic procedures for assessing temperature effects on crop development//Slatyer R O. *Plant Response to Climatic Factors*. Paris: UNESCO, Philippine Weather Bureau, 1973: 327-343.
- [73] Bouman B A M, Van Laar H H. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. *Agricultural Systems*, 2006, 87(3): 249-273.
- [74] Das L, Lohar D, Sadhukhan I, et al. Evaluation of the performance of ORYZA2000 and assessing the impact of climate change on rice production in Gangetic West Bengal. *Journal of Agrometeorology*, 2007, 9(1): 1-10.
- [75] 陈华, 张立中, 方娟. 小麦发育动态模拟模型的初步研究. *中国农业气象*, 1995, 16(1): 1-4.
- [76] 郑国清, 高亮之. 玉米发育期动态模拟模型. *江苏农业学报*, 2000, 16(1): 15-21.

Review of Research on Rice Phenology Models

ZHANG Shuai, TAO Fulu

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Phenology, the study of biological events and how they are influenced by seasonal and interannual variations in climate change, is an important indicator of climate change, as more and more studies suggest that plant phenology goes through dramatic change in response to climate change. Thus an accurate phenology model is needed for us to accurately understand the mechanism of how crops respond to global climate change. Phenological sub-models are being widely used in the models such as ecosystem productivity models, land surface process models and crop simulation models, because phenology provides important data. A good phenology model improves the accuracy of the simulation of energy exchange between the earth and its atmosphere and the accuracy of carbon assessment. A robust phenology model has gradually become a critical tool for improving the accuracy of the simulation of the changes of crops in response to climate change, and the simulation of crop phenology in turn is an important part of crop model. Rice is one of the most important crops in the world and is the major food crop in China. This paper reviews research progress on rice phenology models abroad and at home, discusses the categories of the models and uses several models as examples. The current issues and future trends are suggested as well. This review can serve as a reference for research on rice phenology models and crop models.

Key words: rice; phenology; developmental stage; model

本文引用格式:

张帅, 陶福禄. 水稻发育期模型研究进展. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1485-1491.