

基于生理生态过程的大麦顶端发育和 物候期模拟模型检验

邹 薇^{1,5}, 刘铁梅², 姚 娟³, 潘永龙², 蔡 剑¹, 庄恒扬⁴, 郭华春⁵, 曹卫星^{1,*}

(1. 南京农业大学江苏省信息农业高新技术研究重点实验室, 南京 210095; 2. 华中农业大学植物科技学院, 武汉 430070;

3. 华中农业大学理学院, 武汉 430070; 4. 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 扬州 225009;

5. 云南农业大学农学与生物技术学院, 昆明 650201)

摘要:为测试研究 I 模型 BarleyGrow, 采用 4 个生态区(南京、扬州、武汉、昆明)、10 个大麦品种在不同播期下的顶端发育和物候期资料, 对 BarleyGrow、YDmodel 和 SUCROS 模型进行对比检验和评价。利用遗传-模拟退火算法确定各品种的遗传参数, 提高了应用程序求算参数的精度。从模型的整体预测效果来看, BarleyGrow 对不同地区、不同播期、不同品种的各项顶端发育和物候期预测准确而稳定, 均方差 RMSE 在 1.06 ~ 7.94d 之间, 而 YDmodel 为 6.26 ~ 13.35d, SUCROS 为 11.22 ~ 20.28d。各参试品种对 BarleyGrow 中灌浆期基点温度、生理春化时间、临界日长、最短苗穗期 4 参数反应敏感。经改进的生理发育时间(PDT)模拟模型(BarleyGrow)对中国广大地区不同温光条件下的大麦顶端发育和物候发育均具有较好的预测效果, 尤其对药隔期、二裂期、毛状期、抽穗期、灌浆期、成熟期的模拟精度高而稳定, 表现出较强的机理性以及较好的预测性。

关键词:大麦; 阶段发育; 生理发育时间; 模型检验

文章编号: 1000-0933(2009)03-1309-11 中图分类号: Q945, S274 文献标识码: A

A process-based simulation model on apical and phenological stages in barley: Model validation

ZOU Wei^{1,5}, LIU Tie-Mei², YAO Juan³, PAN Yong-Long², CAI Jian¹, ZHUANG Heng-Yang⁴, GUO Hua-Chun⁵, CAO Wei-Xing^{1,*}

1 Hi-tech Key Laboratory of Information Agriculture of Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2 College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

3 College of Science, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

4 Key Laboratory for Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou 225009 China

5 College of Agronomy and Biological Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201 China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1309 ~ 1319.

Abstract: To test BarleyGrow model reported in the study I, 14 barley cultivars were grown at different sowing dates in 4 ecological areas (Nanjing, Yangzhou, Wuhan and Kunming). Apical and phenological stages of different cultivars were observed to validate the BarleyGrow model which is compared with YDmodel and SUCROS. The optimum values of the model parameters were obtained through genetic-simulated annealing algorithms. As a whole, BarleyGrow model had an accurate and stable estimation. The root mean square error (RMSE) with the BarleyGrow model was ranged between 1.06 and 8.13 days for various cultivars, compared to 6.26 and 13.35 days with YDmodel, and 8.84 and 20.28 days with SUCROS. BarleyGrow model was quite sensitive to basic temperature in grain filling time, physiological vernalization time, critical daylength and minimum time from emergence to heading. The improved model gave good predictions of apical and phenological development for a diverse range of temperature and photoperiod conditions across China. Especially, effects in

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60673052); 国家 863 计划资助项目(2006AA10A303, 2006AA10Z219)

收稿日期:2007-07-10; **修订日期:**2008-12-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caow@njau.edu.cn

anther separation, pollen mother cells, tetrad, heading, grain filling and maturity stages were better predicted.

Key Words: Barley; Phasic development; physiological development time; model validation

目前国内外建立基于过程的大麦发育模拟模型还较少^[1~8]。陈杰等采用 MACROS 模型^[1]模拟中国的大麦生长发育时,发现模型对单个播期的大麦发育的模拟效果较好^[2],但未对模型做多个地点多个播期的联合测试。Yan W 和 Hunt L A 给出了适用于玉米、大豆、小麦、大麦、高粱等作物的热效应方程^[3],该模型将基点温度设为 0℃,将最大发育速率、发育最适温度和发育最高温度作为参数,但一个公式中存在过多的参数会在一定程度上影响模型的预测效果。殷新佑等建立了以热效应和光周期效应为基础的大麦开花期模拟模型^[4],预测了荷兰 94 个品系及其亲本的开花期,通过 QTL 定位技术对模型中的光周期起点、光周期终点、最适条件下的播种到抽穗的最少日数、光周期敏感系数 4 参数进行定位分析,发现 QTL 信息可以成功地替代所测量的参数^[5],但模型本身由于未考虑春化作用对发育的影响等原因导致模型对开花期的预测精度偏低。Mirschel W 等建立了大麦和黑麦基于部分“灰箱模拟”的发育期模型,引入 16 个参数参与模拟运算,对大麦和黑麦的抽穗和成熟等阶段的预测误差在 ± 5 d 左右,但对分蘖期、返青期的预测不准^[6]。徐寿军等建立了基于生理发育时间^[7~10]的大麦顶端发育和物候期模拟模型^[11],可较全面地预测大麦生长的顶端发育和物候发育的各个时期。但该模型采用线性函数模拟大麦的热效应、春化效应和光周期效应,未考虑不同大麦品种的光周期期间的差异,与国内外的光温控制试验结果有一定的差距^[3,12~15],并且对发育期模型的验证还不够全面,有待于改进算法及充分检验。

本项研究曾在徐寿军等建立的模型(YDmodel)基础上^[11],结合国内外的研究成果^[1~10,12~15]对春化作用、光周期效应和热效应等方面进行了改善。但模型的建立只是作物模型的第一步,它将作物生理生态过程及生育规律进行了初步的定量化。由于生态系统复杂多样,根据大麦生育期有限资料的一般规律所建立的模型,只能在对大麦总体动态规律的一般理解与概括的基础上,对变量和自变量间的函数关系进行探索性的综合反映。因此,在对不同地域、不同气候条件下的大麦发育进行预测应用时,必然存在着局限性和误差,而其在统计概率上是否影响预测价值及应用,就需进行代表性的地区(不同的地理纬度和气候条件)和品种(不同遗传特性)的有效性检验,从而为进一步修正、完善与应用模型提供信息。本文旨在采用国内多个地点、多个品种类型、多播期、多年的数据对本研究 I 建立的大麦顶端发育和物候发育期机理模型进行校正和检验,以测试模型的预测性和可靠性,为模型投入实际应用奠定基础,为农业系统决策服务。

1 材料与方法

试验 I:播期试验于 2005~2006 年在扬州大学实验农场进行。土壤全氮含量 1.32 g kg^{-1} ,碱解氮 158.2 mg kg^{-1} ,速效磷 39.02 mg kg^{-1} ,速效钾 62.50 mg kg^{-1} ,有机质 24.15 g kg^{-1} 。试验为随机区组设计,小区面积 15 m^2 ,3 次重复。供试品种为扬饲麦 2(YS2)、扬农啤 2(YN2)、Frankin 和港啤麦(GM)。设 5 个播期,分别于 10 月 20 日、11 月 2 日、11 月 17 日、12 月 2 日播种。施尿素(含 N 46%) 326 kg hm^{-2} ,分 2 次施用,基追比为 7:3。另基施过磷酸钙(含 P_2O_5 38%) 375 kg hm^{-2} ,氯化钾(含 K_2O 60%) 120 kg hm^{-2} 。系统观察记载各处理的主要生育期和顶端发育阶段。

扬州(32.4°N , 119.42°E)处于江淮平原南端,受季风环影响明显,四季分明,气候温和,年平均气温为 14.8°C ,最冷月为 1 月份,月平均气温 1.8°C ,最热月为 7 月份,月平均气温 27.5°C 。全年无霜期平均 220 d,全年平均日照时数 2140 h,全年平均降水量 1020 mm。

试验 II:试验于 2006~2007 年在武汉华中农业大学试验基地进行。供试土壤质地为黄壤,含有机质 22.0 g kg^{-1} 、碱解氮 121.1 mg kg^{-1} 、全氮 160.0 mg kg^{-1} 、全磷 13.0 mg kg^{-1} 、速效钾 157.0 mg kg^{-1} ,前作为水稻。采用随机区组试验设计,供试品种为矮啤大麦 S500 和华大麦 6 号(HD6),分别于 11 月 5 日和 11 月 15 日播种,3 次重复,行距 0.20m,小区面积 5 m^2 。施尿素(含 N 46%) 300 kg hm^{-2} ,基追比为 6:4,分别于播种前

和拔节期施入。另基施过磷酸钙(含 P_2O_5 38%) 300 kg hm^{-2} , 氯化钾(含 K_2O 60%) 150 kg hm^{-2} 。田间其他管理同高产大田管理, 观察记载主要生育期。

武汉(30.52°N , 114.32°E)属北亚热带季风性(湿润)气候, 具有常年雨量丰沛、热量充足、雨热同季、光热同季、冬冷夏热、四季分明等特点。年平均气温 $15.8 \sim 17.5^\circ\text{C}$, 极端最高气温 41.3°C , 极端最低气温 -18.1°C 。年无霜期一般为 $211 \sim 272 \text{ d}$, 年日照总时数 $1810 \sim 2100 \text{ h}$, 年总辐射 $(104 \sim 113) \times 4.18 \text{ kJ cm}^{-2}$, 年降水量 $1150 \sim 1450 \text{ mm}$, 降雨集中在 $6 \sim 8$ 月份, 约占全年降雨量的 40% 左右。

试验Ⅲ: 试验于 2004 ~ 2005 年在云南农业大学试验农场进行。采用裂区试验设计(A 为主区因素), 重复 3 次。供试品种为单二(Dan2)、苏俾 3(Su3)、ST20、如东 7 号(RuD7)。分别于 10 月 20 日(A1)、10 月 30 日(A2)、11 月 9 日(A3)播种。小区面积 9 m^2 , 行距 25 cm , 基本苗 225 万/hm^2 。试验地施尿素(含 N 46%) 225 kg hm^{-2} , 基追比为 7:3, 分别于播种前和拔节期施入, 另基施普钙(含有效磷 14% ~ 20%) 750 kg hm^{-2} 、氯化钾(含 K_2O 60%) 60 kg hm^{-2} 、复合肥(N:P₂O₅:K₂O = 15:15:15) 40 kg hm^{-2} 。其他田间管理同高产大田管理, 系统观察记载各处理的主要生育期。

昆明(25.05°N , 102.73°E)地处云贵高原中部, 属于低纬度高原山地季风气候, 日照长、霜期短, 年平均气温 15°C , 最热时月平均气温 19°C , 最冷时月平均气温 7.6°C 。干、湿季分明, 冬干夏雨, 年降水量为 $910 \sim 1040 \text{ mm}$, 5 至 10 月份为雨季, 而降雨多集中在每年的 7、8 月, 11 月份至翌年 4 月份为干季, 雨雪量少, 天晴日暖, 光能充足。

试验Ⅳ: 试验于 2004 ~ 2005 年在南京江苏省农科院进行。前茬为水稻, 试验点土壤含有机质 26.0 g kg^{-1} , 全氮 322.7 mg kg^{-1} , 碱解氮 98.4 mg kg^{-1} , 速效磷 49.7 mg kg^{-1} , 速效钾 153.0 mg kg^{-1} 。供试品种为单二(Dan2)和苏俾 3(Su3)。试验设置 5 个氮肥水平: 0(N1)、75(N2)、150(N3)、225(N4)、300(N5) kg hm^{-2} , 基追比为 7:3, 分别于播种前和拔节期施入。供试氮肥为尿素。另基施过磷酸钙(含 P_2O_5 38%) 450 kg hm^{-2} , 氯化钾(含 K_2O 60%) 120 kg hm^{-2} 。试验为随机区组设计, 小区面积 9 m^2 , 重复 3 次。11 月 8 日播种, 播种量 112.5 kg hm^{-2} , 其他管理同高产大田管理。观察记载主要生育期。

南京(32.05°N , 118.78°E)属北亚热带季风气候, 四季分明, 冬夏长而春秋短, 雨水充沛, 光能资源充足。年平均气温 16°C , 夏季最高气温 38°C , 冬季最低气温 -8°C , 年平均降雨 117 d , 降雨量 1106.5 mm , 年平均无霜期 239 d , 每年 6 月下旬到 7 月中旬为梅雨季节。

各试验点气象资料均来源于当地农业气象站。各试验中观测资料均用于确定不同品种的遗传参数, 并分析模型对各品种观测资料的预测效果。

2 模型检验

2.1 模型检验方法

采用一些基本的统计方法(平均值、标准差、偏差)和一些指数(RMSE、RRMSE、EF 和 CRM)对模型进行检验和评价^[7-10,16]。

$$\begin{aligned} \text{RRMSE} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2}{n}} \times \frac{100}{O} & \text{EF} &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \\ \text{CRM} &= \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} & \text{RMSE} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \end{aligned}$$

式中, O_i 为实际观测值, 也就是达到某个生育时期的天数, P_i 为模型模拟值, n 为样本容量。RRMSE (percent relative root mean square error) 取值范围 $0 \sim +\infty$, 0 为最好。EF (modeling efficiency) 取值范围 $-\infty \sim 1$, 1 表示模拟精度最好。CRM (coefficient of residual mass) 可为正值或负值, 正值表示对观测值模拟偏低, 负

值表示对观测值模拟偏高,0 表示模拟精度最好。RMSE (root mean square error)取值范围 $0 \sim +\infty$,0 为最好。

敏感性分析用来评价模型中每一个参数对模拟效果的影响。固定其它参数不变,将某一待测参数取值在一个小的范围内($\theta \times (1 \pm 10\%)$), θ 为某一大麦品种待测参数的最适值)变化,对比观测值与预测值的差异,采用 RMSE 来定量参数的数值变化对模型输出结果的影响。

2.2 模型参数的求算方法

本模型中运用了武汉、昆明、南京和扬州 4 个地理位置和气候相差较大的地区,3a 的实测数据进行检验。采用 3 个模型——经典的 SUCROS 模型^[1]、近期发表的 YDmodel^[11]及本模型(BarleyGrow)进行比较分析。由于 SUCROS 模型中发育进程基本由积温决定,不涉及品种、光照等遗传参数,无需进行模型参数寻求,所以只对 YDmodel 和 BarleyGrow 的遗传参数进行模拟寻优。

BarleyGrow 模型中的 7 个遗传参数分别为播种出苗期所需的有效积温(GDD_0)、灌浆期基点温度(Tb_{max})、生理春化时间(PVT)、临界日长(DLc)、光周期反应起始点(PPs)、最短苗穗期(EH_{min})和最短灌浆期(FD_{min}),各参数取值范围分别为 $60 \sim 135^{\circ}\text{C}$ 、 $5 \sim 7^{\circ}\text{C}$ 、 $0 \sim 60\text{d}$ 、 $7 \sim 14\text{h}$ 、 $0 \sim 5.6\text{d}$ 、 $0.5 \sim 2$ 和 $0.5 \sim 2$,采用遗传算法^[16,17]与模拟退火算法^[18]相结合的随机搜索方法确定模型的遗传参数,代入发育程序中得到各物候发育和顶端发育阶段的预测值,然后选出与观测值间 RMSE 最小的结果得到各遗传参数的终值。同样用遗传模拟退火算法确定 YDmodel 模型中的 3 个遗传参数^[11](生理春化时间、基本早熟性、灌浆期因子),其中基本早熟性和灌浆期因子与 BarleyGrow 模型中的最短苗穗期(EH_{min})和最短灌浆期(FD_{min})意义相同。与前人所用试错法^[7~11]相比,充分利用计算机作为计算工具,可以获得相对唯一的最优解,消除了人为求参操作中的主观性和不确定性。

2.3 模型检验与评价

2.3.1 模型预测效果的对比检验和评价

采用 BarleyGrow 和 YDmodel 模型预测试验 I ~ IV 中不同大麦品种的顶端发育和物候发育所得参数和模拟效果见表 1。从中可以看出,不同模型所得的品种遗传参数取值不同。从参数取值上来看,BarleyGrow 模型中不同大麦品种的 7 个参数的取值差异较大,充分体现了不同大麦品种在出苗、春化、光周期、苗穗期及灌浆期长短上的不同反应。从模型的整体预测效果来看,BarleyGrow 模型对不同播期不同品种的整体预测效果较好,CRM 和 RMSE 的范围分别在 $-0.0070 \sim 0.0082$ 和 $1.06 \sim 7.94\text{d}$ 之间,而 YDmodel 模型的预测误差较大,CRM 和 RMSE 的范围分别在 $-0.0246 \sim 0.0624$ 和 $6.26 \sim 13.35\text{d}$ 之间。BarleyGrow 模型对 4 个品种预测值略高于观测值($\text{CRM} < 0$),YDmodel 对 4 个品种的预测值高于观测值。对两模型模拟结果的 RMSE 进行方差分析,结果表明差异极显著($***P = 0.0002$)。

采用 SUCROS 模型预测试验 I ~ IV 中不同大麦品种的抽穗期和成熟期的模拟效果见表 2。可以看出,对不同品种的模拟误差 RMSE 在 $11.22 \sim 20.28\text{d}$ 之间,CRM 在 $-0.1534 \sim 0.0441$,模型对大部分参试品种的预测值均大于观测值,存在着较大的误差。

对试验 I 的 4 个品种不同播期条件下各顶端发育和物候发育的观测值和预测值分别求取 RRMSE 见表 3。可以看出,BarleyGrow 模型对不同播期不同品种的 6 个顶端发育阶段的预测效果优于 YDmodel,各品种顶端发育预测的 RRMSE 平均值介于 $3.93 \sim 21.74$ 之间,YDmodel 预测的各品种顶端发育 RRMSE 平均值介于 $6.19 \sim 39.69$ 之间。BarleyGrow 对主要物候发育阶段如拔节、抽穗、灌浆、成熟期的预测效果均明显优于 YDmodel 模型,RRMSE 在 $0.97 \sim 5.21$ 之间,YDmodel 预测的各品种主要物候发育阶段的 RRMSE 平均值介于 $4.45 \sim 7.11$ 之间。

采用经典的 SUCROS 模型、BarleyGrow 和 YDmodel 模型对试验 II 武汉地区 2 个品种和试验 III 昆明地区 4 个品种的不同播期处理的主要物候期进行了对比预测(观测值-模拟值的结果见表 4),结果表明,BarleyGrow 模型对各个时期的预测误差都很小,预测误差基本保持在 $\pm 3\text{d}$ 之内。而 SUCROS 和 YDmodel 模型的预测误差分别在 $-1 \sim -35\text{d}$ 和 $-20 \sim +19\text{d}$ 之内。

表 1 不同模型下的各品种的遗传参数及整体预测误差

Table 1 Simulated genetic parameters and predicted errors of each cultivar with different models

模型 Model	品种 Cultivar	播种出苗期 有效积温	灌浆期 基点温度	生理春化 时间	临界 日长	光周期反应 起始点	最短苗 穗期	最短 灌浆期	CRM	RMSE
		GDD_0	T_{bmax}	PVT	DLc	PPs	$EHmin$	$FDmin$		
BarleyGrow	扬饲麦 2	84.31	5.16	15.17	8.87	5.466	0.703	0.841	-0.0070	6.22
	扬农啤 2	90.51	5.45	3.53	10.24	5.536	0.888	0.785	0.0020	6.94
	港麦	81.44	5.04	15.25	10.09	5.580	1.214	0.660	0.0005	7.94
	Frankin	107.04	5.42	0.37	9.74	2.144	0.626	0.372	0.0101	7.27
	华大麦 6	116.24	6.70	10.99	10.35	4.469	1.168	0.883	-0.0012	1.06
	S500	122.75	6.78	6.49	9.76	0.067	0.921	0.965	-0.0034	1.17
	单二	133.30	6.42	16.35	9.86	2.267	1.701	1.149	0.0042	2.35
	如东 7 号	126.21	5.43	16.08	10.53	2.577	1.414	0.890	-0.0010	2.22
	苏啤 3	134.93	5.21	16.65	10.98	2.795	1.958	0.877	0.0031	1.89
	ST20	133.83	5.70	16.49	9.94	2.417	1.526	0.953	0.0082	1.87
YDmodel	扬饲麦 2			6.69			0.502	0.730	0.0469	8.60
	扬农啤 2			5.10			0.534	0.745	-0.0087	6.26
	港麦			5.43			0.564	0.776	-0.0073	7.00
	Frankin			12.37			0.501	0.655	0.0610	13.35
	华大麦 6			14.49			0.503	0.880	0.0442	8.12
	S500			14.34			0.503	0.814	0.0624	9.71
	单二			7.05			0.742	0.929	-0.0291	9.42
	如东 7 号			7.54			0.892	0.827	0.0031	8.26
	苏啤 3			8.16			0.881	0.805	0.0041	9.58
	ST20			5.87			0.715	0.865	-0.0246	9.35

播种出苗期有效积温 GDD_0 Effective accumulated temperature from sowing to emergence; 灌浆期基点温度 T_{bmax} Basic temperature in filling time; 生理春化时间 PVT Physiological vernalization time; 临界日长 DLc Critical daylength; 光周期反应起始点 PPs Physiological development time for the start of the photoperiod-sensitive phase; 最短苗穗期 $EHmin$ Minimum time from emergence to heading under optimum temperature and photoperiod; 最短灌浆期 $FDmin$ Minimum time from heading to maturity under optimum temperature; CRM Coefficient of residual mass; RMSE Root mean square error; 扬饲麦 2 YS2; 扬农啤 2 YN2; 港麦 GM; 华大麦 6 HD6; 单二 Dan2; 如东 7 号 RuD7; 苏啤 3 Su3; 下同 the same as below

表 2 SUCROS 模型下的各品种的整体预测误差

Table 2 Predicted errors of each cultivar with SUCROS model

	扬饲麦 2	扬农啤 2	Frankin	港麦	华大麦 6	如东 7 号	单二	S500	苏啤 3
CRM	-0.0446	-0.0341	0.0441	-0.0436	-0.0905	-0.1456	-0.1534	-0.0580	-0.1227
RMSE	11.22	12.56	13.42	12.53	17.87	19.46	20.28	14.47	17.10

表 3 BarleyGrow 和 YDmodel 模型对扬州地区不同播期、不同品种大麦顶端发育阶段和物候期的 RRMSE

Table 3 Prediction RRMSE of apical and phenological development stages of different cultivars at different sowing dates in 2004 ~ 2005 in Yangzhou region by using BarleyGrow and YDmodel models

品种 Cultivars	模型 Model											
	单棱期		二棱期		雌雄蕊		药隔期		二裂期		毛状期	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
扬饲麦 2	11.02	23.47	15.63	16.72	6.11	7.27	2.48	5.88	3.28	8.56	5.03	4.83
扬农啤 2	33.33	42.98	24.02	28.87	13.90	9.88	7.64	2.92	3.02	3.02	4.03	1.93
港麦	26.37	47.16	17.45	32.80	15.47	11.32	0.99	4.61	4.89	3.51	8.88	2.19
Frankin	23.79	21.02	22.70	31.22	5.66	13.26	4.73	9.97	4.87	11.58	6.27	9.07
平均 Average	23.63	33.66	19.95	27.40	10.29	10.43	3.96	5.85	4.02	6.67	6.05	4.51
品种 Cultivars	模型 Model											
	出苗期		拔节期		抽穗		灌浆期		成熟期			
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
扬饲麦 2	27.25	7.94	2.48	5.88	1.93	6.97	2.27	7.50	0.43	0.74		
扬农啤 2	23.83	7.94	7.64	2.92	3.48	3.84	1.99	4.48	0.43	0.53		
港麦	27.75	7.94	0.99	4.61	3.84	4.40	5.91	5.36	1.58	0.31		
Frankin	15.49	7.94	4.73	9.97	1.08	10.99	2.35	9.43	0.97	2.61		
平均 Average	23.58	7.94	3.96	5.85	2.58	6.55	3.13	6.69	0.85	1.05		

I; BarleyGrow; II; YDmodel; 出苗期 Emergence stage; 单棱期 Single ridge stage; 二棱期 Double ridge stage; 雌雄蕊原基分化期 Stamen and pistil initiation stage; 药隔形成期 Anther separation stage; 雌蕊柱头二裂分叉期 Pollen mother cells stage; 雌蕊柱头毛状突起期 Tetrad stage; 抽穗 Heading stage; 灌浆期 Grain filling stage; 成熟期 Maturity stage; 扬饲麦 2 YS2; 扬农啤 2 YN2; 港麦 GM; RRMSE Percent relative root mean square error

表 4 三模型对武汉和昆明地区不同播期、不同品种大麦物候期的预测误差(d)

Table 4 Prediction errors for apical and phenological development stages of different cultivars at different sowing dates in Wuhan and Kunming regions with three models

地区 Area	品种 Cultivar	播期 Sowing date	模型 Model											
			出苗 Emergence			拔节 Jointing			抽穗 Heading			成熟 Maturity		
			I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
武汉 Wuhan	华大麦 6 号 HD6	06-11-05		0	0		0	+5	-1	2	+6	-29	-2	-4
		06-11-05		0	0		0	+19	-6	0	+9	-20	+1	+3
	S500	06-11-05		-2	-2		-1	+14	+5	-1	+9	-22	+2	0
		06-11-05		0	+4		0	+17	-2	0	+13	-18	-1	0
昆明 Kunmin	如东 7 号 RuD 7	04-10-20		-1	-1		+2	-17	-9	0	-10	-18	-4	-6
		04-10-30		+3	+3		+1	-3	-11	-1	+3	-33	-1	-1
		04-11-09		+1	0		-1	+6	-16	-3	+14	-20	+3	+6
	单二 Dan 2	04-10-20		0	-1		+2	-18	-10	-1	-12	-19	-5	-6
		04-10-30		+4	+3		0	-5	-11	-2	+2	-34	-2	-1
		04-11-09		+1	0		+2	+10	-17	0	+18	-21	+1	+6
	S500	04-10-20		-1	-1		+1	-20	-12	0	-14	-18	-3	-6
		04-10-30		+3	+3		0	-7	-13	0	0	-35	0	-2
		04-11-09		0	0		+2	-1	-19	+3	+13	-22	+3	+7
	苏啤 3 Su3	04-10-20		-1	-1		+1	-20	-9	-2	-16	-15	-3	-6
		04-10-30		+3	+3		0	-7	-10	-1	-1	-31	-1	-2
		04-11-09		0	0		+2	+8	-10	+2	+11	-17	+3	+6

I : SUCROS; II : BarleyGrow; III : YDmodel

采用 BarleyGrow 和 YDmodel 模型对试验Ⅳ南京地区单二品种在不同施 N 水平下的主要物候发育期进行对比预测(表 5)。可以看出, BarleyGrow 对各物候期的预测误差均小于 YDmodel 模型, 观测值与预测值间的偏差在 -1 ~ 2d 之间, YDmodel 模型的误差在 -5 ~ -4d 之间, 苏啤 3 品种也有类似的预测效果。模型对出苗期的预测在不同 N 肥水平下没有差异, 主要是由于模型在出苗前没有运行 N 素和水分模型, 而 BarleyGrow 模型中的参数 GDD_0 减小了模型对出苗期的预测误差。

表 5 BarleyGrow 和 YDmodel 模型对南京地区不同施氮水平下单二品种物候期的预测误差(d)

Table 5 Prediction errors for phenological development stages of Dan2 with different nitrogen application in Nanjing area by using BarleyGrow and YDmodel

N 肥水平 N levels	模型 Model							
	出苗 Emergence		拔节 Jointing		抽穗 Heading		成熟 Maturity	
	I	II	I	II	I	II	I	II
N1	-1	-5	-1	+2	+1	-4	+2	-2
N2	-1	-5	-1	0	+1	-5	+2	0
N3	-1	-5	+1	+1	+1	-4	+2	+1
N4	-1	-5	+1	+2	0	-6	+1	-2
N5	-1	-5	0	+3	-1	-7	+1	-4

2.3.2 模型参数敏感性分析

在表 1 中, 对两个模型共有的参数生理春化时间(PVT)、最短苗穗期(基本早熟性, EH_{min})以及最短灌浆期(灌浆期因子, FD_{min})进行敏感性分析。固定其它参数在各品种的最适值, 然后将某一待测参数取值在一个小的范围内($\theta \times (1 \pm 10\%)$), θ 为某一大麦品种待测参数的最适值)变化, 通过考查不同品种预测值的变化(RMSE)比较 2 个模型的预测效果(图 1)。从图中可以看出, 改变生理春化时间的数值会使模型产生两种变化, 一种是 PVT 较小时, 两模型的输出结果没有变化, 当 PVT 较大时, 一定范围内的 PVT 变化导致 BarleyGrow 模型的较大变化, 而对 YDmodel 影响不大, 说明 BarleyGrow 模型对 PVT 的变化较敏感, 而 Ydmodel 较钝感。

最短苗穗期 (EH_{min}) 是决定大麦出苗后到抽穗期间的多个顶端发育和物候发育期的决定因子之一, 在 BarleyGrow 模型中 EH_{min} 在测试范围内变化时, 各品种的预测值均呈以最适值为中心的开口向上的抛物线形变化, 而 YDmodel 中部分品种的预测值基本呈线性增长, 在稳定性和精确度上不如 BarleyGrow 模型。最短灌浆期 (FD_{min}) 是决定灌浆、成熟期的预测精度的主要影响因子, 由于主要在抽穗后起作用, 因此, 模型对该因子不会有太大的敏感性, 从图中可以看出, 两模型均表现出同样的效果, 但 BarleyGrow 模型预测效果优于 YDmodel。

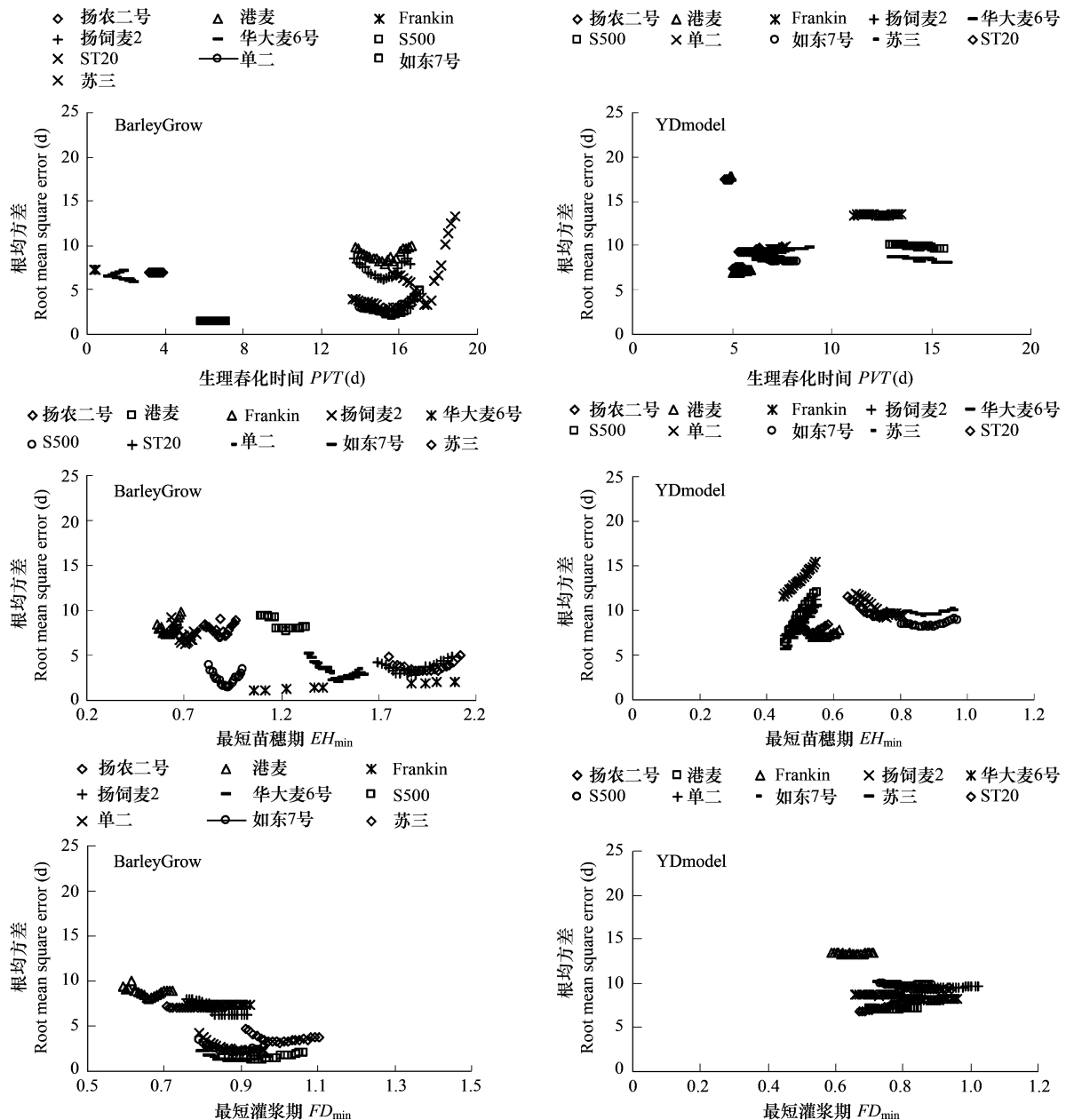


图1 两模型(BarleyGrow 和 YDmodel)共有的参数变化对模型的影响

Fig. 1 Influence of the variation of three parameters on the prediction of the BarleyGrow model and YDmodel

对 BarleyGrow 模型中临界日长、灌浆期基点温度、播种出苗期有效积温和光周期反应起始点 4 个参数做敏感性分析(图 2)。从图中可以看出, 不同品种对临界日长的敏感性不同, 扬州地区的扬农 2 号、港麦和 Franklin 等 3 品种和武汉地区华大麦 6 号对临界日长反应很敏感, RMSE 在 1.06 ~ 24.94d 范围内变化, 而扬州地区的扬饲麦 2 号和武汉地区的 S500 预测值保持了较好的稳定性, RMSE 在 1.37 ~ 7.38d 之间。不同品种

对灌浆期基点温度的变化反应均呈抛物线形变化,各品种的 RMSE 在 1.37 ~ 10.15d 之间变化。不同品种对光周期反应起始点和播种出苗期有效积温反应相对不敏感,各品种的 RMSE 分别在 1.06 ~ 9.43d 和 1.06 ~ 8.62d 之间。

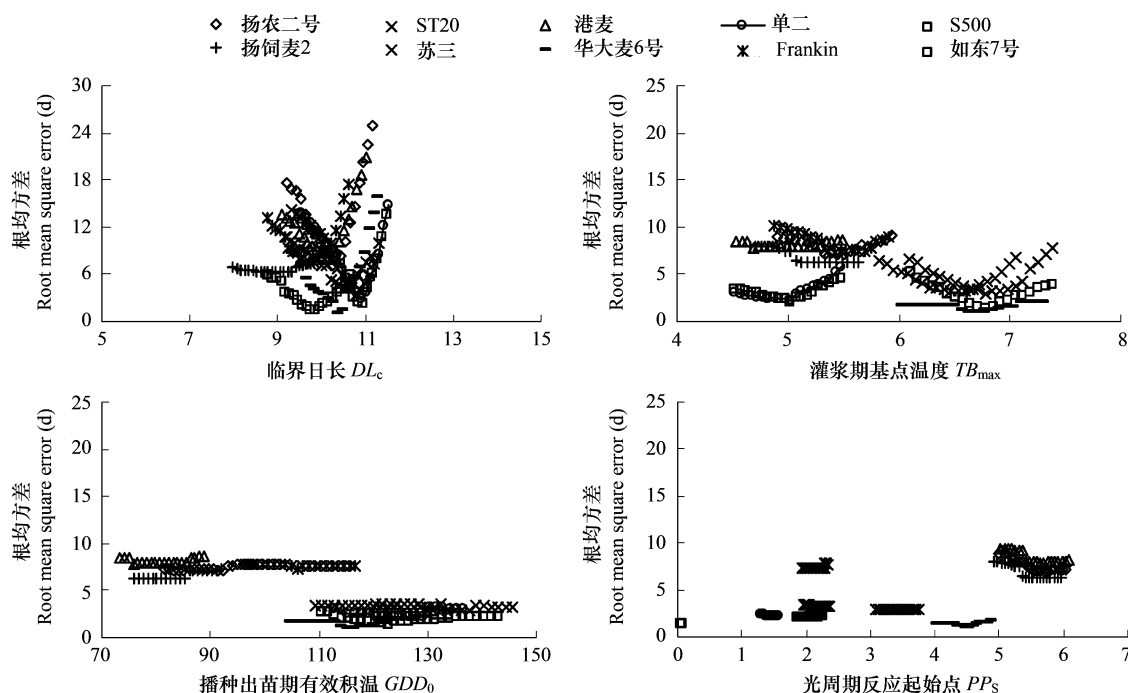


图2 BarleyGrow 模型中不同品种的 4 个参数的 RMSE

Fig. 2 RMSE for the four parameters of the BarleyGrow model fitted to data for all cultivars

3 讨论

3.1 有关模型稳定性方面的探讨

为了研究本模型的稳定性,分别去掉 2 个参数(将播种出苗期有效积温和光周期反应起始点分别定在 135℃ 和 5.6d)和 1 个参数(将播种出苗期有效积温定为 135℃),其模拟效果见表 6 和表 7。去掉 2 个参数时,对扬州地区的不同播期条件下的各大麦品种的顶端发育和物候发育的模拟效果无影响,对武汉地区 2 品种 2 播期的影响不大,但对昆明地区的 4 品种 3 播期条件下的主要物候发育期有较大的影响,由 7 个参数时 RMSE 在 1.87 ~ 2.35d 增加到 6.19 ~ 6.82d。将 5 个参数的模型与 7 个参数的模型对 10 个品种模拟的结果(RMSE)进行方差分析,差异显著($P < 0.05$)。去掉 GDD_0 这个参数时对各地区的各品种的模拟精度与 7 个参数的模型类似,对 6 个参数模型所得结果与 7 个参数的模型 RMSE 进行方差分析,差异不显著。说明在适当删减模型的参数条件下,本模型仍具有较高的稳定性。

3.2 有关光周期反应起始点的问题

本文根据国内外对光周期反应方面的研究成果,将光周期反应起始点作为品种遗传参数,但在模型研制过程中我们也探讨了可否将光周期反应起始点作为不同品种共同的一个常量来考虑的问题,结果发现如果将光周期反应起始点设为 0 时,会引起较大的模拟误差,而将其设为 5.6d(即二棱期所对应的生理发育时间)时,部分地区(扬州、武汉、南京)模拟效果与表 1 中的结果具有相似的精确度(表 6)。这也侧面验证了春化作用和光周期反应不是同时进行的,而是有一定的先后次序的。因此,可以考虑将光周期反应起始点设为常量的解决办法,减少模型的参数,而保持较好的预测效果,但为什么光周期反应起始点设为二棱期所对应的生理发育时间时,可以显著提高模型的预测效果还有待于光温控制试验来进行有效的验证。

3.3 模型构建

本模型 BarleyGrow 充分考虑了各种环境条件对大麦发育的影响以及大麦遗传特性对发育的控制,在光周

期、春化作用和热效应等现象的模拟上进行了有效的改善,引入 7 个品种遗传参数调控大麦的发育,即播种出苗所需有效积温、灌浆期基点温度、生理春化时间、光周期反应起始点、临界日长、最短苗穗期、最短灌浆期,各参数均具有明确的生物学意义,充分考虑了大麦对不同光温条件的适应。采用 4 个生态地区(扬州、武汉、昆明、南京)的 10 个大麦品种多个播期试验数据对本模型进行了较为全面的检验,并同时将本模型与荷兰 SUCROS 模型以及 YDmodel 模型进行对比验证。结果表明,本模型模拟精度高,误差小,反映了该模型对大麦顶端发育和物候发育的内在机理的定量描述具有更好的科学性和普适性。

表 6 5 个参数的 BarleyGrow 模型的模拟预测误差

Table 6 Simulated errors of each cultivar with BarleyGrow model of five parameters

品种 Cultivar	灌浆期基点温度 <i>T_{bmax}</i>	生理春化时间 <i>PVT</i>	临界日长 <i>DL_c</i>	最短苗穗期 <i>EH_{min}</i>	最短灌浆期 <i>FD_{min}</i>	RMSE
扬饲麦 2	5.02	20.23	10.60	0.671	0.895	7.29
扬农啤 2	5.05	15.08	10.65	0.998	0.701	7.38
港麦	5.02	9.50	10.64	0.983	0.729	7.80
Frankin	5.15	17.50	10.35	0.539	0.955	7.78
华大麦 6	5.09	3.33	10.69	0.786	0.903	3.39
S500	6.35	22.20	10.71	0.875	0.914	2.15
单二	5.01	7.35	10.56	1.009	0.965	6.65
如东 7 号	5.48	31.90	10.64	1.186	0.979	6.63
苏啤 3	6.07	15.91	10.82	1.506	1.018	6.82
ST20	5.57	44.07	10.70	1.227	0.978	6.19

表 7 6 个参数的 BarleyGrow 模型的模拟预测误差

Table 7 Simulated errors of each cultivar with BarleyGrow model of six parameters

品种 Cultivar	灌浆期基点温度 <i>T_{bmax}</i>	生理春化时间 <i>PVT</i>	临界日长 <i>DL_c</i>	光周期反应 起始点 <i>PPs</i>	最短苗穗期 <i>EH_{min}</i>	最短灌浆期 <i>FD_{min}</i>	RMSE
扬饲麦 2	5.04	1.78	10.34	5.48	0.721	0.857	6.81
扬农啤 2	5.04	2.45	10.44	5.57	1.012	0.708	7.43
港麦	5.02	0.81	10.75	5.58	1.466	0.689	8.24
Frankin	5.32	3.10	9.44	1.65	0.602	0.872	7.60
华大麦 6	5.55	11.01	10.46	4.96	0.978	0.905	1.27
S500	5.58	7.37	9.90	1.44	0.878	0.928	1.62
单二	5.22	15.64	10.21	1.28	1.225	0.949	2.36
如东 7 号	5.37	16.90	10.32	2.37	1.536	0.881	2.02
苏啤 3 Su3	5.02	16.31	10.55	0.65	1.442	0.842	1.61
ST20	5.87	16.96	10.26	1.92	1.536	0.971	2.04

荷兰的 SURCOS 模型^[5]采用积温法来计算发育进程,没有考虑品种遗传参数、光周期和春化作用对发育进程影响,仅预测了抽穗和成熟 2 个物候期,在生产应用中受到了较大限制,而且对于中国地区不同播期条件下大麦的物候期预测效果较差,预测值大于观测值。但用有效积温法预测作物发育具有简单、易操作的特点,在实际生产中,在适宜的播期范围内,特别是大田作物生产中环境温度处于作物最适宜温度以下时(此时作物发育与温度呈线性关系),有效积温法仍不失为行之有效的预测作物生育期的方法^[10]。

YDmodel 在模拟大麦顶端发育和物候发育过程中,仅引入了 3 个遗传参数,生理春化时间、基本早熟性、灌浆期因子,对于栽培区域广泛、生境多样的具有很强适应性的大麦作物而言,没有完全反映出大麦在不同的地域条件下对光照、温度的基本要求的变异。因此,在对扬州地区不同品种不同播期处理各项顶端发育和物候发育的预测方面存在着一定的误差(表 3),而采用不同地域的多品种多播期试验资料对其进行验证时,发现其预测误差较大(表 4)。关于不同 N 素水平对大麦发育的影响,采用南京地区不同 N 肥处理的大麦生育期

资料对 BarleyGrow 和 YDmodel 模型进行对比分析,发现 BarleyGrow 对不同氮肥水平下的大麦主要生育期均具有较高而稳定的预测效果,但模型在这一方面的模拟检验仍有待于进一步的深入。

对两模型共有的 3 个参数(生理春化时间、最短苗穗期、最短灌浆期)进行敏感性分析发现,BarleyGrow 模型对较大的生理春化时间和最短苗穗期较敏感,Ydmodel 对最短苗穗期较敏感,两模型对最短灌浆期表现钝感。在灌浆期基点温度、临界日长、播种出苗有效积温和最短灌浆期等 4 个参数中,BarleyGrow 模型对临界日长和灌浆期基点温度较敏感。不同品种对各参数的敏感性表现不同。

此外,本模型首次将遗传算法和模拟退火算法相结合(SAGA 算法)求参数,SAGA 算法进行优化计算的基本思路是:在模拟退火算法的恒温阶段融入遗传算法的进化思想,进行迭代求解。这种方法可以解方程、方程组、定积分、线性规划、非线性规划等,应用广泛。SAGA 算法特别适用于没有完善的理论求解方法的一些问题,如非线性规划、复杂方程的定积分等。较之以前的试错法求参数是一个很大的改进,避免了人为因素的影响,增加了模型预测精度,降低了对应用模型的人员要求,有利于模型的应用推广。

References:

- [1] Goudriaan J, Van Laar H H. Modelling potential crop growth processes. Kluwer Academic Publishers, 1994. 197—206.
- [2] Cheng J, Yang J P, Wang Z Q. Simulation of growth and development of barley. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 1999, 15(4): 262—265.
- [3] Yan W, Hunt L A. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. Annals of Botany, 1999, 84: 607—614.
- [4] Yin X, Struik P C, Tang J, *et al.* Model analysis of flowering phenology in recombinant inbred lines of barley. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(413): 959—965.
- [5] Yin X Y, Tang J J, Lui T J, *et al.* A preliminary study on the QTL mapping of physiological parameters in a crop phenology model for predicting the development duration in barley. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2003, 25(6): 839—843.
- [6] Mirschel W, Wenkel K O, Schultz A, *et al.* Dynamic phenological model for winter rye and winter barley. Europ. J. Agronomy, 2005, 23: 123—135.
- [7] Yan M C, Cao W X, Luo W H, *et al.* 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.
- [8] Liu T M, Cao W X, Luo W H, *et al.* Calculation of physiological development time and prediction of development stages after heading. Journal of Triticeae Crops, 2000, 20(3): 29—34.
- [9] Ma F Y, Cao W X, Zhang L Z, *et al.* A physiological development time-based simulation model for cotton development stages and square and boll formation. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(4): 626—630.
- [10] Ni J H, Lou W H, Li Y X, *et al.* Simulation of the development of tomato in greenhouse. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(6): 1219—1225.
- [11] Xu S J, Gu X L, Zhuang H Y, *et al.* Modelling apical and phonological development stages in barley. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(3): 123—127.
- [12] Yin X, Kropff M J, McLaren G, *et al.* A nonlinear model for crop development as a function of temperature. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77: 1—16.
- [13] Wu Y, Long W W, Hu W H. Studies on physiological parameters of barley development model- Effect of different daylight length on barley development. Journal of Jinggangshan Normal College, 2004, 25(5): 5—7.
- [14] Lui T J, Li H, Tang J J, *et al.* Studies on physiological parameters of barley development model I. Effect of daylight on barley development. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2003, 25(1): 1—4.
- [15] Tang J J, Lui T J, Li H, *et al.* Studies on physiological parameters of barley development model II. Studies on physiological parameters of photoperiodically sensitive and insensitive phases of preflowering development in barley. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2004, 26(6): 863—866.
- [16] Amaducci S, Colauzzi M, Bellocchi G, *et al.* Modelling post-emergent hemp phenology (*Cannabis sativa* L.): Theory and evaluation. European

Journal of Agronomy, 2008, 28(2): 90—102.

- [17] Edwards D, Hamson M. Guide to Mathematical Modeling. BocaRaton, Florida, US: CRC Press, Inc., 1990.
- [18] Back T, Schwefel H P. An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization. Evolutionary Computation, 1993, (1): 1—23
- [19] Cardoso M F, Salcedo R L, De Azevedo S F. The simplex-simulated annealing approach to continuous non-linear optimization. Comp & Chem Eng, 1996, 20(9): 15—29.

参考文献:

- [2] 陈杰, 杨京平. 大麦生长发育的模拟研究. 农业系统科学与综合研究, 1999, 15(4): 262~265.
- [7] 严美春, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦发育过程及生育期机理模型的研究 I. 建模的基本设想与模型的描述. 应用生态学报, 2000, 11(3): 355~359.
- [8] 刘铁梅, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦抽穗后生理发育时间的计算与生育期的预测. 麦类作物学报, 2000, 20(3): 29~34.
- [9] 马富裕, 曹卫星, 张立桢, 等. 棉花生育时期及蕾铃发生发育模拟模型研究. 应用生态学报, 2005, 16(4): 626~630.
- [10] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄发育模拟模型研究. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1219~1225.
- [11] 徐寿军, 顾小莉, 庄恒扬, 等. 大麦顶端发育和物候期的模拟. 麦类作物学报, 2006, 26(3): 123~127.
- [13] 吴杨, 龙婉婉, 胡文海. 大麦发育模型的生理参数研究——不同光照长度对大麦生长发育的影响. 井冈山师范学院学报, 2004, 25(5): 5~7.
- [14] 刘桃菊, 李晖, 唐建军, 等. 大麦发育模型的生理参数研究 I. 光照对大麦发育的影响. 江西农业大学学报, 2003, 25(1): 1~4.
- [15] 唐建军, 刘桃菊, 李晖, 等. 大麦发育模型的生理参数研究 II. 大麦花前光周期敏感与钝感阶段的生理参数研究. 江西农业大学学报, 2004, 26(6): 863~866.