

油菜发育动态模拟模型*

刘 洪 金之庆

(江苏省农业科学院,南京 210014)

摘 要

根据油菜生理生态理论及油菜阶段发育与环境因子之间的数量关系,在借鉴 WCSODS 小麦“钟模型”与 CERES-Wheat 春化模型的基础上,构建了油菜发育动态模拟模型。利用在江淮地区广泛收集到的油菜发育期资料,分别调试,确定了2种不同品种类型有代表性品种的发育参数,并将模拟结果与积温法进行了比较。结果表明:本文提交的模型对不同生育阶段的模拟平均误差在1 d之内,对全生育期的模拟绝对误差平均不超过2 d。其模拟精度要明显好于传统的积温法。

关键词:油菜 发育 模拟模型

引 言

20世纪60年代以来,作物模拟技术发展极快。国外学者已相继研制成数以百计的作物模拟模型,一些国家还成功地将其与专家系统、3S技术、可视化技术、网络技术等集合,并应用于作物长势监测、遥感估产、精确农作、全球气候变化影响评价等研究领域^[1-3]。我国学者在吸收、发展国外先进技术的基础上,先后研制成水稻^[4,5]、小麦^[6]、玉米^[7]、大豆^[8]和棉花^[9]等作物模拟模型。其中,高亮之、金之庆等^[4,6]研制的稻/麦模拟优化决策系统(R/WCSODS)将作物模拟技术与稻麦栽培优化原理相结合,在生产上已大面积应用推广。但对于油菜生长模型,国内外都研究得较少,目前尚未见相关报道。

油菜是我国江淮地区主要的越冬作物之一。近些年来,随着种植结构的调整,研究区域小麦种植面积已大幅度压减,油菜的重要地位日益凸现。据有关专家分析,加入WTO之后,我国油菜生产仍有较大发展空间。但目前,研究区域的油菜生产还普遍存在着品质欠佳、产量不高、灾害频繁(暖冬、倒春寒、阴雨寡照、渍害)等问题,油菜生长模型的研制将有益于解决这些问题。

本研究拟在国内外模型研究的基础上,通过查阅有关文献,并根据作者对油菜发育问题的理解,首先构建油菜发育动态模拟模型;之后,通过田间试验和广泛收集到的生育期资料,调试和确定模型参数;最后,采用研究区域与建模资料相独立的油菜生育期资料,对模型进行可靠性检验。本研究对预测江淮地区油菜的生育期进程,确定不同品种类型的

* 本文由国家科技部“十五”攻关计划“农林重大病虫害和农业气象灾害的预警及控制技术研究”之“农业气象灾害预警技术研究”(2001BA509B-13)课题和国家自然科学基金重点项目(30030090)资助。

2003-07-06 收到,2003-08-21 收到修改稿。

气候适应性,制定油菜栽培的各项优化措施以及安排当地种植制度等都具有重要的理论与实用价值。同时,也为下一步研制油菜栽培模拟优化决策系统(RACSODS),进而在油菜渍害的预警业务中发挥作用奠定了良好基础。

1 资料来源

油菜生育期资料取自江苏省农业科学院经济作物研究所 1997~2000 年在江苏省淮阴、扬州、镇江、苏州、东台、吴江、通州、沭阳和南京 9 个试点进行的油菜品种区域试验。本研究取其中 2 个对照品种宁油 10 号(常规)和宁杂 1 号(杂交)的部分资料对模型参数进行调试确定;其余的则用于对模型的检验。以上各试点均采用统一试验方案实施,即:小区面积 20 m²,土壤肥力中上等,完全随机区组排列,三次重复;播种日期 9 月 15~28 日,由北向南推迟;育苗移栽,苗床与大田比例 1:5,移栽密度 12 万~15 万株/hm²;按当地中上等水平进行田间管理,及时防治病虫害;观测项目主要为物候观测,收获时按小区称量实产。其中,淮阴、沭阳、南京 3 个试点的前茬为旱作,其余 6 个试点为水稻;淮阴、镇江、扬州、苏州和南京 5 个试点还在试验地一侧增设病害鉴定圃,开展病害调查。

气象资料包括上述 9 个试点与作物资料同期(1997~2000)的逐日平均气温,由中国气象局国家气候中心提供。逐日日长是根据各试点所在的纬度,按 R/WCSODS 的方法^[4,5],由天文公式自动生成的。

2 油菜发育动态模型的构建

2.1 油菜发育指数

根据江淮地区油菜的生长特性,全生育期可划分为 4 个发育阶段,即①播种→出苗,②出苗→抽薹,③抽薹→开花(结角),④花角→成熟。本文采用发育指数(I_D)来表征油菜的各发育阶段(表 1)。由表 1 可见: I_D 与各发育阶段是有序对应的。在模拟油菜发育进程时,发育速度是按不同发育阶段的动态模拟模型(见 2.3 节)逐日计算并累加的,一旦达到某个发育指数值,即表示相应的发育阶段已完成,下一个发育阶段随即开始。例如,当发育速度的累加值达到 1.0 时,即表示阶段①已告结束,阶段②随即开始,余类推。

2.2 油菜发育速度

拟采用下式来描述油菜的发育速度:

$$V_j = \frac{d M_j}{dt} = \frac{1}{N_j} \quad (1)$$

对 V_j 积分,可得到发育进程的表达式:

$$M_j = \int V_j \cdot dt = \int \frac{1}{N_j} dt = \sum_{t=1}^N \frac{1}{N_j} = 1 \quad (2)$$

式中: M_j 为第 j 个发育阶段($j=1, 2, 3, 4$)的发育进程; V_j 为第 j 个阶段的发育速度,它等于 M_j 的时间(t)导数,用完成该发育阶段所需要天数(N_j)的倒数来表示。应强调的是,不同发育阶段具有不同的模型形式,这主要是因为,影响各阶段 V_j 的主要环境因子

各不相同。具体地说,在上述阶段①,温度和土壤水分是影响 V_j 的主要因子;在阶段②,温光条件和低温对春化作用的满足程度共同对 V_j 产生影响;在阶段③, V_j 只受温光条件影响;在阶段④, V_j 只与温度有关。

2.3 油菜发育动态模型

影响油菜全生育期进程的主要因子有品种遗传特性以及温度(包括日平均气温和春化作用所需要的低温)土壤水分、日长等。本文借鉴 WCSODS 的原理和方法^[6],分别建立了油菜不同发育阶段的发育动态模拟模型,现分述如下:

(1) 播种→出苗 本阶段油菜的发育速度主要受气温和土壤湿度影响,根据文献^[10],油菜出苗时 0~10 cm 土层的适宜湿度为 17%~18%,当土壤湿度大于 22%时,就会严重影响油菜的发育进程。因此建立了以下模拟模型:

$$M_1 = e^{K_1} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{T_i}{20}\right)^{P_1} \cdot f_{SM} = 1 \quad (3)$$

$$\text{当} \begin{cases} W_i \leq 12\% \\ 12\% \leq W_i < 15\% \\ 15\% \leq W_i < 17\% \\ 17\% \leq W_i < 22\% \\ W_i \geq 22\% \end{cases} \text{时, } f_{SM} = \begin{cases} 0 \\ K_{WT} \cdot e^{(15/W_i)} \\ 1 \\ K_{WT} \cdot e^{(17/W_i)} \\ 0 \end{cases}$$

式(3)中, T_i 为第 i 日平均气温(°C); 20 为油菜出苗期最适日平均气温(°C); f_{SM} 为土壤湿度订正因子(其值在 0~1 之间变化); W_i 为第 i 日 0~10 cm 土壤湿度(%); K_1 、 P_1 、 K_{WT} 为模型参数,其中下标“1”表示第一阶段,下同。

(2) 出苗→抽薹 本阶段包含油菜春化阶段和温光反应阶段。本文假定:油菜必须完成春化作用后,才能进入温光反应阶段。因此,在模拟时需首先调用春化模型,直到春化阶段结束后再调用发育动态模型,并同时考虑温光的影响。

油菜春化模型参照美国的 CERES-Wheat 模型^[11],即:

$$M_{21} = e^{K_{21}} \cdot \sum_{i=1}^N (V_E)^C = 1 \quad (4)$$

式(4)中, K_{21} 、 C 为春化作用模型参数; V_E 为春化作用因子,其计算方法或取值随品种类型和温度条件而变化,当 V_E 累积到一定春化量(AVD)时,油菜即完成春化阶段。

油菜属喜凉作物。在苗期, -3~-5 °C 时叶片开始受冻, 0~5 °C 为春化作用最适温度^[12,13], V_E 可按下式求算:

$$\text{当} \begin{cases} T_i < -3\text{ }^\circ\text{C} \\ -3\text{ }^\circ\text{C} \leq T_i < 0\text{ }^\circ\text{C} \\ 0\text{ }^\circ\text{C} \leq T_i \leq 5\text{ }^\circ\text{C} \\ 5\text{ }^\circ\text{C} < T_i \leq 8\text{ }^\circ\text{C} \\ T_i > 8\text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \text{时, } V_E = \begin{cases} 0 \\ (T_i + 3)/3 \\ 1 \\ (8 - T_i)/3 \\ 0 \end{cases} \quad (5)$$

冬性油菜品种的 AVD 为 30~40,半冬性品种的 AVD 为 15~30。

当春化阶段完成后,油菜发育进入温光反应阶段,其发育期模型为:

表 1 油菜各发育阶段的生育期指数

序号	生育阶段	生育期指数 I_D
1	播种→出苗	1.0
2	出苗→抽薹	2.0
3	抽薹→花角	3.0
4	花角→成熟	4.0

$$M_{22} = e^{K_{22}} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{T_i - T_L}{T_O - T_L} \right)^{P_{22}} \cdot e^{|D_i - D_O| Q_{22}} = 1 \quad (6)$$

当 $\begin{cases} T_i < T_L \\ D_i > D_O \end{cases}$ 时, 令 $\begin{cases} T_i = T_L \\ D_i = D_O \end{cases}$

式(6)中, T_L 和 T_O 分别为油菜发育的下限和最适温度, 本文取 $T_L = 5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_O = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; D_i 为第 i 日日长(h); D_O 为油菜发育的最适日长, 本文取 $D_O = 18 \text{ h}^{[13]}$; K_{22} 、 P_{22} 、 Q_{22} 为模型参数。式(6)的生物学意义是: 当温光条件最适时 ($T_i \geq T_O$, $D_i \geq D_O$), 油菜发育最快。这符合作物生理学理论。

(3) 抽薹→花角 油菜开花 结角阶段, 主要受温光条件影响, 因此, 该阶段模拟模型同式(6), 本阶段取 $T_L = 5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_O = 18 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_O = 18 \text{ h}$ 。

(4) 花角→成熟 油菜成熟期, 发育进程只受温度的影响, 故有:

$$M_4 = e^{K_4} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{T_i - T_L}{T_O - T_L} \right)^{P_4} = 1 \quad (7)$$

本阶段取 $T_O = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_L = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, 并假定当 $T_O > 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 令 $T_O = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; 当 $T_L < 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 令 $T_L = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

综合式(1)~(7), 油菜全生育期的发育模型有以下通用形式:

$$M_j = \sum_{i=1}^N e^{K_j} \cdot \left| \frac{T_i - T_L}{T_O - T_L} \right|^P \cdot f_{SM} \cdot (V_E)^C \cdot e^{(D_i - D_O)^Q} = 1 \quad (8)$$

式(8)中各符号意义同前。不过应强调的是, 不同发育阶段都有其特殊性, 应区别对待。例如, 阶段 2(出苗—抽薹)和阶段 3(抽薹—花角)需考虑温光环境对发育的共同影响, 而其余阶段由于发育对日长钝感, 可令 $Q = 0$ 。在阶段 1(播种—出苗), 除考虑温度的影响外, 尚需考虑土壤湿度对出苗的影响 (f_{SM}), 而其他阶段, 可令 $f_{SM} = 1$, 等等。不同的生育阶段, 温度的最适值和下限值也有所不同。同样, 模型参数 K 、 P 、 Q 等值亦因不同生育阶段和品种而异。

3 模型参数的确定

调试并确定模型参数 K 、 P 、 Q 的值, 是件复杂而细致的工作, 也是模型应用的关键

表 2 油菜不同品种各生育阶段的模型参数值

品种	生育阶段	模型参数				
		K	P	Q	K_{WT}	C
宁油 10 号	播种—出苗	- 1.904	0.92	-	0.3665	
	出苗—抽薹	- 3.729*				0.996*
	抽薹—花角	- 2.569	1.622	3.902		
	花角—成熟	- 3.039	0.005	0.08		
宁杂 1 号	播种—出苗	- 4.002	0.009	-		
	播种—出苗	- 1.741	1.525	-	0.3672	
	出苗—抽薹	- 3.703*				0.991*
	抽薹—花角	- 2.334	1.413	3.961		
	抽薹—花角	- 2.789	0.196	0.09		
	花角—成熟	- 3.985	0.007	-		

* 春化模型参数。

所在。一般多采用手动方法调试参数,即先调试其中一项参数并固定其他参数,进而比较模拟值与实测值的差值,直至模拟值与观测值的误差达到最小时为止;然后,将这项参数固定下来,再用同样的方法逐一调试其他参数。这种方法不仅费时、费力,而且难免有人为主观性。本研究在调试参数的过程中,根据上述“试错”原理,编写了相关循环模块和判断模块,最终实现了在计算机上对特定品种参数的自动寻优。这较之手动方法大大提高了工作效率。表2给出了2个供试品种不同发育阶段的各项参数值。

4 模型的检验

利用与调试品种参数相独立的另一套数据,对模型进行了可靠性检验,图1、图2给出了全生育期模拟值和实测值及二者间的相关系数,并将模拟结果与有效积温法($\geq 5^{\circ}\text{C}$)计算的结果进行了比较(表3)。由表3可见,在播种→出苗阶段,发育动态模型与有效积温法计算的结果比较接近。这主要是因为,两者都考虑了温度对出苗的影响,而土壤水分对出苗的影响在实测资料中反映不明显。在出苗→抽薹阶段,发育动态模型对宁油10号和宁杂1号两个品种的模拟误差,最大分别为8d和6d,平均为0.1d和0.8d;而有效积温法的计算误差最大可达105d和87d,平均为48.6d和14.5d。这说明有效积温法效果很差;而发育动态模型综合考虑了温、光因子及春化作用对油菜发育的影响,因而模拟效果较好。抽薹→花角阶段,发育动态模型的模拟误差,最大为5d,平均0.7d和1.0d,而有效积温法的误差,最大为12d和18d,平均为1.6d和4.4d。由于本阶段日长对油菜发育仍有影响^[11,12],而有效积温法无法对此进行考虑,因此误差较大。在花角→成熟阶段,由于油菜发育进程只受温度因子影响,因而发育动态模型和有效积温法的计算误差都较小。总之,就越冬油菜而言,有效积温法在预测生育期上很不理想,而本文提交的油菜发育动态模型可以较好地模拟逐日平均气温、日长、春化阶段低温和土壤水分对不同阶段油菜发育进程的影响。

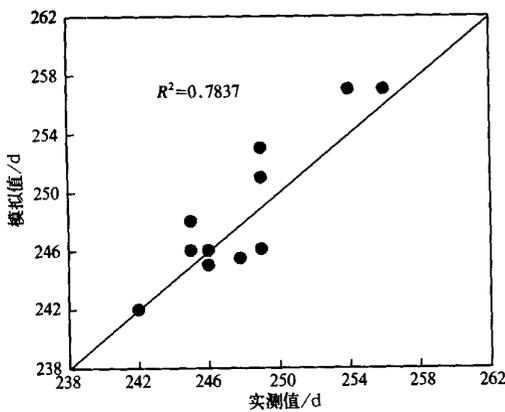


图1 宁油10号全生育期模拟值与实测值相关图

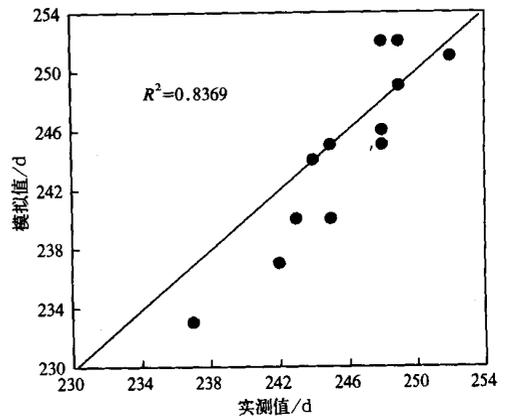


图2 宁杂1号全生育期模拟值与实测值相关图

表 3 两个油菜品种各生育期天数的模拟值与实测值的比较

d

品种	地点年份	播种—出苗			出苗—抽薹			抽薹—花角			花角—成熟			全生育期		
		实测	模拟1	模拟2	实测	模拟1	模拟2	实测	模拟1	模拟2	实测	模拟1	模拟2	实测	模拟1	模拟2
宁油 10号	南京1998	5	6	5	149	152	64	30	25	33	62	62	59	246	245	237
	南京1999	6	6	6	165	165	170	21	21	16	54	54	51	245	246	243
	淮阴1997	5	6	6	173	165	147	23	23	28	54	59	52	255	253	256
	淮阴1998	5	6	4	161	166	56	29	28	36	61	57	56	256	257	242
	淮阴1999	5	6	5	176	176	173	19	20	17	54	55	53	254	257	252
	苏州1999	6	6	6	166	165	72	20	21	20	54	54	53	246	246	237
	东台1998	8	7	6	151	153	91	24	24	35	65	62	58	248	246	246
	东台1999	7	6	5	148	148	173	31	30	19	63	67	53	249	251	250
	南通1999	4	6	5	154	154	60	24	23	31	68	64	62	250	247	238
	平均值	5.7	6.1	5.3	160.3	160.4	111.8	24.6	23.9	26.1	59.4	59.3	55.2	249.9	249.8	244.6
平均误差		0.44	-0.33		0.11	-48.56		-0.67	1.56		-0.11	-4.22		-0.11	-5.33	
标准差		1.0	1.1		3.6	49.5		1.8	7.1		3.2	3.0		2.0	5.7	
宁杂 1号	南京1998	5	5	5	143	143	85	33	28	29	64	64	64	245	240	237
	南京1999	5	5	6	161	161	174	22	21	12	55	53	51	243	240	243
	南通1998	4	5	5	151	152	64	28	24	27	65	65	67	248	246	239
	南通1999	4	5	5	165	165	174	16	19	13	59	55	54	244	244	246
	淮阴1999	5	5	5	176	174	181	19	19	13	48	54	53	248	252	253
	苏州1997	7	6	6	144	140	142	23	23	23	63	64	61	237	233	234
	东台1998	8	6	5	150	151	122	23	23	30	67	65	63	248	245	246
	东台1999	7	5	5	148	146	180	31	30	13	63	68	53	249	249	251
	平均值	5.6	5.3	5.3	154.8	154.0	140.3	24.4	23.4	20.0	60.5	61.0	58.3	245.3	243.6	243.6
	平均误差		-0.38	-0.38		-0.75	14.50		-1.00	-4.38		0.50	-2.25		-1.63	-1.63
标准差		1.2	1.5		1.8	40.2		2.5	7.4		3.5	4.6		2.9	4.9	

注:模拟1表示油菜模型模拟值,模拟2表示有效积温法模拟值;利用有效积温法时,因为出苗—抽薹阶段的计算误差较大,为避免该误差影响后面生育阶段(抽薹—成熟)计算结果,采用两种计算方法,一是根据各生育期的开始日期分别计算不同生育期天数,二是根据播种期计算全生育期天数,因此各生育期数据与全生育期数据不同。

5 讨 论

(1) 对出苗—抽薹阶段发育模拟效果的好坏在很大程度上决定了油菜发育动态模型的模拟精度。这一方面是因为,该阶段持续时间最长,约占全生育期天数的2/3;另一方面,影响该阶段发育的环境因子较多,除日平均气温外,还有日长和春化作用所要求的低温条件。由于积温法无法全面考虑这些因子,因此误差较大。

(2) 江淮地区的冬性和半冬性油菜多属于感光性不敏感类型,日长变化对油菜发育进程的影响并不十分明显。但另一方面,春化作用对发育进程的影响却很大^[12],在构建油菜发育动态模拟模型时应特别关注春化作用。

(3) 油菜发育动态模拟模型是建立 RACSODS 的基础工作之一。因为在 RACSODS 中,群体光合作用模型、叶面积动态模型、角果面积动态模型及其参数等都是随着不同生育阶段而变化的:或取不同的模型形式,或模型形式相同但取值不同的模型参数。因此,油菜发育动态模拟模型将起着“时标”作用,控制着 RACSODS 何时调用何种模型或模型参数。

(4) 油菜发育动态模拟模型与区域性气候模式嵌套,或依据当地天气预报,可用来预测油菜的发育进程,但它却无法用来预测油菜的长势、产量或估算渍害对油菜产量的影响。后者必须通过建立 RACSODS 才能实现。这是作者下一步将要深入研究的问题。

参考文献

- 1 James W H, James W J. Scaling-up Crop Models for Climate Prediction Applications. *Agricultural Systems* (In Press). 1999.8.
- 2 Hutchinson J F. Climatic analysis in data sparse regions, climatic risk in crop production. C. A. B. International, Wallingford, Oxon, UK. 1992.
- 3 Montieth J L, Virmanl S M. Quantifying climatic risk in the semiarid tropics, climatic risk in production. C. A. B. International, Wallingford, Oxon, UK. 1992.
- 4 Gao L Z, Jin Z Q, Haung Y, et al. Rice clock model ——a computer model to simulate rice development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, **60**:1~16.
- 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(RCSODS).北京:中国科技出版社,1992.
- 6 高亮之,金之庆,等.小麦栽培计算机模拟优化决策系统(WCSODS).江苏农业学报,2000, **16**(2):65~72.
- 7 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.
- 8 张敬涛,周丰锁,褚宏艳,等.大豆生育阶段动态模型的研究.大豆科学,2002, **21**(3):203~207.
- 9 潘学标,韩湘玲,石元春. COTGROW:棉花生长发育模拟模型.棉花学,1996, **8**(4):180~188.
- 10 贺维农.农业常用数据资料.北京:农业出版社,1980.
- 11 John H, Ritchie J T. (ed). *Modeling Plant and Soil Systems*. Madison, Wisconsin, USA,1991.
- 12 傅寿仲,朱耕如,等.江苏油作科学.南京:江苏科学技术出版社,1995.
- 13 刘后利.实用油菜栽培学.上海:上海科学技术出版社,1985.

A PHENOLOGICAL MODEL TO SIMULATE RAPE DEVELOPMENT

Liu Hong Jin Zhiqing

(*Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014*)

Abstract

A dynamic simulation model for rape phenological development is established according to rape physiological and ecological theories and the quantitative relationship between rape phenological development and the environmental factors. The "wheat clock model" in WCSODS and the vernalization model in CERES-Wheat are used for reference. A three-year experimental data set is partially used for modification and determination of the genetic parameters for 2 cultivars and partially for validation of the model. The simulated errors are then compared with the accumulated temperature method. The results show that the average errors are within 1 days for different development period, and the standard errors are within 2 days for whole developmental duration.

Key word: Rape Phenological development Simulation model