

文章编号: 1005-0906(2008)06-0090-06

作物高产群体干物质积累动态模型的构建及生长特性分析

侯玉虹¹, 陈传永², 郭志强¹, 侯立白¹, 董志强¹, 赵 明²

(1. 沈阳农业大学研究生院, 沈阳 110161; 2. 中国农科院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 利用归一化的方法分别将最大干物质积累(DMA)以及出苗至成熟生长天数设定为 1, 以相对 DMA(0 ~ 1)和相对时间(0 ~ 1)为参数进行动态模拟, 得到不同春玉米品种的相对化通用干物质积累模型。通过模型筛选, 建立了春玉米高产群体的相对化 DMA 模型: $y=a/(1+be^{-x})$, 并建立了不同品种的相对化 DMA 动态变化模型: 四密 25: $y=1.065\ 0/(1+71.588\ 3e^{-6.697\ 2x})$; 郑单 958: $y=1.062\ 9/(1+90.424\ 9e^{-7.0640\ x})$; 先玉 335: $y=1.051\ 9/(1+132.982\ 1e^{-7.798\ 4x})$ 。3 个品种的相关性均在 0.98 以上, 并达到极显著水平。通过其它作物对模型验证, 早、晚稻以及冬小麦的相对化干物质积累动态变化趋势同样符合 Logistic 模型, 且复相关系数均在 0.96 以上, 说明相对化的干物质积累模型 $y=a/(1+be^{-x})$ 可作为作物群体干物质积累动态模拟的共性模型。该模型为“三合结构”理论所建立的产量性能等式方程 $(MLAI \cdot D \cdot MNAR \cdot HI = EN \cdot GN \cdot GW)$ 的数量化、模式化和指标化提供了理论基础。

关键词: 高产群体; 干物质积累; 模拟模型; 生长特性

中图分类号: S513.04

文献标识码: A

Establishment of Dry Matter Accumulation Dynamic Simulation Model and Analysis of Growth Characteristic for High-yielding Population of Spring Maize

HOU Yu-hong¹, CHEN Chuan-yong², GUO Zhi-qiang¹, HOU Li-bai¹, DONG Zhi-qiang¹, ZHAO ming²

(1. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161;

2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The parameters of dry matter accumulation(DMA) simulation model varied with plant varieties, plant density and sowing date. Systematic research was conducted on DMA at the city of Huadian of Jilin directed with the above question. The max DMA and the durations from seeding to mature stage of spring maize(*Zea mays* L.) were both normalized as 1, and the relative DMA dynamic simulation model of high yield spring maize were screened and established. The relative DMA dynamic simulation model was screened, $y=a/(1+be^{-x})$, $x \in [0, 1]$. Then the specific normalized models for different varieties of spring maize were established, which were Simi 25: $y=1.065\ 0/(1+71.588\ 3e^{-6.697\ 2x})$, $r=0.990\ 6^{**}$. Zhengdan 958: $y=1.062\ 9/(1+90.424\ 9e^{-7.0640\ x})$, $r=0.993\ 2^{**}$. Xianyu 335: $y=1.051\ 9/(1+132.982\ 1e^{-7.798\ 4x})$, $r=0.997\ 0^{**}$. Tested with others data, the change trends of DMA for early rice, late rice and winter wheat were Logistic models and multiple correlation coefficients were over 0.96. The results showed that normalized DMA dynamic model could be the general model for the crop. The model of DMA provided the theoretical basis for the yield property equation $(MLAI \cdot D \cdot MNAR \cdot HI = EN \cdot GN \cdot GW)$ established according to the “three combination construction”.

Key words: High-yielding population; Dry matter accumulation; Simulation model; Growth characteristic

收稿日期: 2008-06-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2006AA10Z272)、国家支撑计划项目(2006BAD02A13)、
农业结构调整重大技术研究专项(06-03-02B)

作者简介: 侯玉虹(1981-), 博士, 从事作物超高产模拟模型研究。E-mail: hyuhong2008@163.com

赵 明为本文通讯作者。E-mail: zhaomingcau@163.net

在作物生长分析中选择匹配的数学模型已引起广泛的重视。不同生长模型具有各自的模型参数,利用参数可解释作物生长发育特征。干物质积累是衡量作物生长发育的重要指标之一,国内外学者已对其模型做了大量的研究。国外的 Penning de vries (1988)建立的 MACROS 模型以及 Jones C. A.(1989)建立的 CERES 模型,对作物干物质的积累、分配与转移进行了系统的分析研究,并探讨了外界环境对模型的影响及其变化规律。在 Richards、Logistic、Compertz 等生长模型中, Causton(1981)研究认为, Richards 模型模拟玉米、小麦等作物的总生长量效果更好,同时 Logistic 生长模型是 Richards 模型的特殊表达形式。但干物质积累模型的参数随着品种、种植密度以及播期变化幅度较大,出现每个地区甚至相同地区的同一品种,其模型参数也不相同,大大降低了模型的通用性。针对以上问题,利用归一化的方法将最大干物质积累量以及生长天数设定为 1,建立以相对时间为变量的相对化干物质积累模型,缩小了品种间不同处理方式的参数变化幅度。在相对化干物质积累归一化模型建立之后,将各品种最大干物质积累量以及生长天数带入模型即可获得作物实际干物质积累模型。本研究以东北地区春玉米为对象,进一步对春玉米群体相对化干物质积累进行模拟,并利用其特征参数更深入地分析作物的生长特征,明确玉米高产、超高产栽培的干物质积累变化规律,并为挖掘作物生产潜力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况介绍

试验于 2006 年在吉林省桦甸市试验地进行,该地纬度 43°08',经度 126°47',海拔 270.2 m。试验土壤基础肥力有机质含量 2.53%,碱解氮 156.9 mg/kg,全氮 0.14%,速效钾 110.60 mg/kg,速效磷 39.91 mg/kg,pH 值 6.5。

生育期内积温 2 673.8℃·d,总降雨量 499.28 mm,日照时数 1 027.1 h,日最高平均温度 25.31℃,日最低平均温度 13.82℃。

1.2 试验设计

试验设计密度和种植方式试验。密度试验品种为先玉 335,设 45 000、60 000、75 000、90 000、95 000 株/hm² 5 种植密度,随机区组设计,3 次重复。5 月 12 日出苗,9 月 23 日成熟;种植方式设计为大垄双行覆膜、大垄双行直播、等行起垄种植,密度 75 000 株/hm²,试验品种为郑单 958 和四密 25。随机区组

设计,3 次重复。5 月 12 日出苗,9 月 19 日成熟。在苗期、拔节期、大喇叭口期、吐丝期、灌浆期、乳熟期、蜡熟期和完熟期取样进行测定。

1.3 测定方法和内容

(1)干物质积累。将植株测完叶面积后,按茎、叶片、鞘、苞叶、雌穗、雄穗分别在 105℃ 下杀青 0.5 h,在 80℃ 下烘干至恒重,测定其干物质,以计各时期植株各器官和总体干物重。

(2)室内考种。在灌浆末期、乳熟期、蜡熟期、完熟期分别取穗进行室内考种,测定穗长、穗粗、秃尖长、穗行数、行粒数、单穗重和子粒干重。

(3)产量。3 个品种分别按实际产量计产。

1.4 数据归一化处理

对数据进行归一化处理,令 DMA_{max} 和出苗至成熟的天数(T)分别视为 1,相对 DMA(DMA_R)与相对 T(T_R)的计算方法如下:

$$DMA_R = DMA_M / DMA_{max}$$

DMA_M 为实测 DMA, DMA_{max} 为实测最大 DMA。

$$T_R = (T_i - T_0) / T_i$$

T_i-T₀ 为播种至 T_i 时的天数, T_i 为总生育天数。

利用 Curve Expert 1.38 以及 Originpro 7.5 软件进行拟合,通过筛选和验证建立具有生物学意义的 DMA 动态模型。

2 结果与分析

2.1 春玉米群体干物质积累(DMA)变化规律

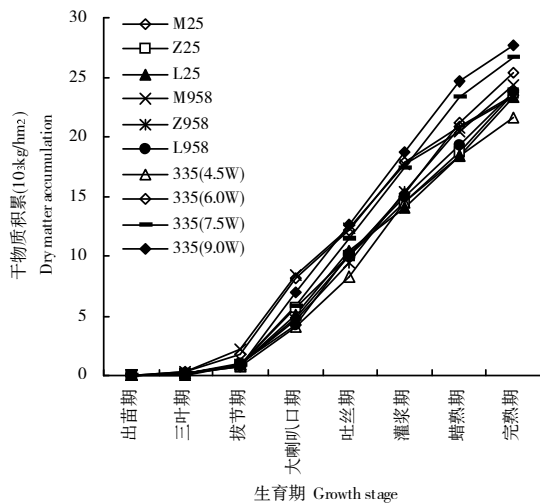


图 1 春玉米高产群体 DMA 动态变化趋势

Fig.1 Dynamic change of DMA for high-yielding population of spring maize

从图 1 可以看出,不同处理春玉米群体在生育期内 DMA 变化趋势基本一致。出苗至拔节期为缓

慢增长阶段, 玉米生长缓慢, 群体叶面积小, 干物质积累量与叶面积成正比, 此阶段占最终生物产量的 2%~5%; 拔节至灌浆后期为快速增长阶段, 时间大约为 2 个月, 群体叶面积迅速增大, 此阶段占最终生物产量的 65%~75%; 蜡熟期至收获期 DMA 增长减缓同时达到最高值阶段, 此期大约维持 1 个月左右, 占最终生物量的 20%~23%。不同品种 DMA 高值以及达到高值的时间不同, 郑单 958 以及四密 25 在苗后 129 d 达到最大, 高值分别为 23 789.25 kg/hm² 和 23 660.25 kg/hm²; 而先玉 335 在苗后 131 d 达到

高值, 为 27 672.30 kg/hm²。

2.2 作物相对化 DMA 动态模型的建立

2.2.1 相对化 DMA 模型的筛选

以归一化处理后的 T_R 为自变量, DMA_R 为因变量, 利用 Curve Expert 1.38 软件对 DMA_R 和 T_R 进行模拟, 得到了包括 MMF model、余弦曲线、三次方程、logistic、有理方程等在内的 11 个模拟方程。取其中模拟效果较好的前 5 个方程, 按其相关系数大小列于表 1。

表 1 春玉米群体的相对化 DMA 模型
Table 1 Normalized DMA dynamic models of spring maize

模拟模型 Simulated model	参 数 Parameter				相关系数 <i>r</i>	标准差 <i>SD</i>
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>		
$y=(ab+cx^d)/(b+x^d)$	-0.003 9	0.274 5	1.275 6	3.478 3	0.037 4	0.995 2**
$y=a+b\cos(cx+d)$	0.509 8	0.531 5	3.109 2	2.790 4	0.038 6	0.994 9**
$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0.013 0	-0.792 6	3.878 0	-2.092 7	0.039 8	0.994 5**
$y=a/(1+be^{-cx})$	1.056 0	97.566 0	7.246 5		0.042 9	0.993 6**
$y=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$	-0.035 9	0.305 2	-1.728 8	0.999 7	0.044 4	0.993 2**

表 1 可以看出, MMF model、余弦曲线、三次方程、logistic、有理方程的模拟效果较好, 相关系数分别为 0.995 2、0.994 9、0.994 5、0.993 6、0.993 2, 其中

MMF model、余弦曲线、三次方程的相关系数均高于 logistic 模型, 对其生物学意义进行鉴定(图 2)。

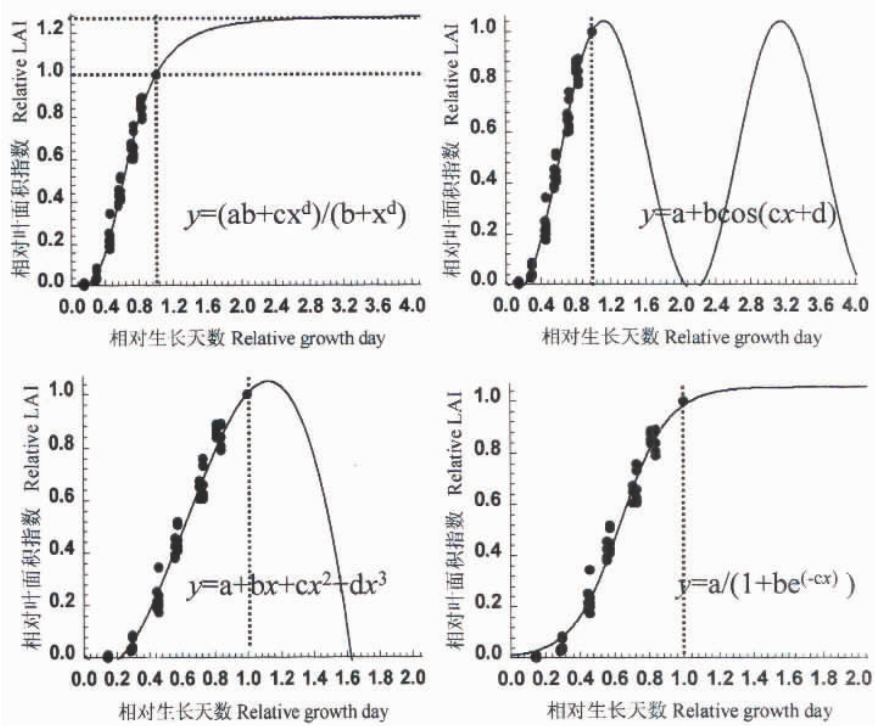


图 2 相对干物质积累动态变化模拟模型
Fig.2 Relative DMA dynamic change simulated model

从图 2 看出, 在 MMF model 中, $x \rightarrow \infty$ 时, $y \rightarrow$ 1.3, 与数据处理最大 DMA 为 1 的设定相矛盾; 在余

弦曲线模型中, $x \rightarrow \infty$ 时, y 值在 $[0,1]$ 区间内变化,三次方程模拟模型, $x \rightarrow \infty$ 时, $y \rightarrow 0$,不符合干物质积累变化规律;在 Logistic 模拟模型中, $x \rightarrow \infty$ 时, $y \rightarrow 1$,在干物质积累达到最高值后将维持高值不变,并与设定的 DMA 最高值 1 一致。因此,选择 Logistic 方程作为相对化 DMA 的动态模拟方程,其通式为:

$$y=a/(1+be^{-cx}) \tag{1}$$

在公式中, y 为某一时刻相对 DMA 值; x 为相对时间; a 、 b 、 c 为常数,其中 a 为作物相对潜在最大干物质质量,相对值即为 1; b 是与干物质积累量 y 有关的阻滞系数,即是对于干物质增长率 c 所施加的“干扰”; c 是相对干物质的增长率。当 $x \rightarrow \infty$ 时, $y \rightarrow 1$,说明 Logistic 方程能够对春玉米群体干物质积累变化做出合理的解释,通过该方程可以计算出任意相对生育时间的相对 DMA 值。

2.2.2 相对化 DMA 模型的建立

因为 Logistic 方程只能反映某一品种的生长曲线,不能概括不同熟性品种生长过程的特点,因此建立春玉米不同品种的 Logistic 模拟模型:

四密 25: $y=1.065\ 0/(1+71.588\ 3e^{-6.697\ 2x})$, $x \in [0,1]$,

$r=0.990\ 6^{**} \tag{2}$

郑单 958: $y=1.062\ 9/(1+90.424\ 9e^{-7.064\ 0x})$, $x \in [0,1]$,
 $r=0.993\ 2^{**} \tag{3}$

先玉 335: $y=1.051\ 9/(1+132.982\ 1e^{-7.798\ 4x})$, $x \in [0,1]$,
 $r=0.997\ 0^{**} \tag{4}$

从公式(2)、(3)、(4)可以看出,不同品种的干物质积累模型参数变化特征。在归一化之后,3 个品种的相对潜在最大干物质质量(a)均约为 1,差异不大;相对干物质增长率(c)表现为先玉 335> 郑单 958> 四密 25;阻滞系数(b)为先玉 335> 郑单 958> 四密 25,说明干物质增长率越高,外界对于干物质增长率所施加的干扰也越大。

表 2 显示,由春玉米品种、栽培方式以及密度处理得到的模拟模型,其相关系数也都在 0.99 以上,且各模拟方程的相应系数间差异不大。将不同品种动态模型中的各参数分别与表 2 中的相应参数进行显著性检验,所得 t 值均大于 $t_{0.05}$,与总体参数无显著差异,说明得到的不同品种相对化 DMA 动态方程能够准确模拟 DMA 变化过程。其模型曲线如图 3 所示。

表 2 不同春玉米处理间群体的 DMA 模拟方程参数值
Table 2 Parameters of DMA simulation model on different treatments

品 种 Variety	密度(10 ⁴ /hm ²) Density	产 量(kg/hm ²) Yield	最大 DMA DMA _{max}	生育期(d) Growth stage	参 数 Parameter			相关系数 <i>r</i>
					<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
四密 25	M	12 654.60	23 496.00	127	1.020 7	73.897 9	7.533 7	0.997 9
	Z	13 320.65	23 660.25	127	1.111 7	75.080 3	6.344 9	0.996 0
	L	13 172.25	23 316.00	127	1.104 4	75.269 4	6.376 8	0.994 3
郑单 958	M	11 553.40	24 291.75	127	1.025 3	80.214 1	6.875 9	0.996 6
	Z	12 257.60	23 307.75	127	1.067 6	102.478 8	7.794 2	0.998 5
	L	11 805.40	23 789.25	127	1.104 4	95.269 4	6.376 8	0.994 3
先玉 335	4.5	12 599.60	21 642.30	131	1.076 9	124.147 6	7.378 9	0.999 4
	6.0	13 405.80	25 290.00	131	1.039 7	124.465 9	7.796 4	0.997 6
	7.5	14 577.90	26 733.75	131	1.050 8	128.690 2	7.860 3	0.997 7
	9.0	15 499.86	27 672.30	131	1.040 9	138.432 0	8.330 7	0.997 0

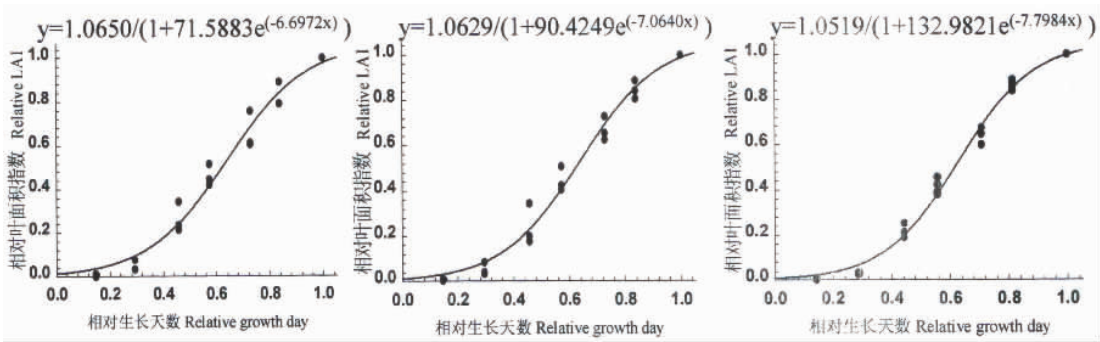


图 3 不同春玉米品种相对化 DMA 变化曲线

Fig.3 Normalize DMA simulated curve on different spring maize varieties

2.3 相对化 DMA 动态模型的检验

根据 2006 年试验建立春玉米群体 DMA 动态变化模拟模型,利用 DMA 模型分别对 2007 年吉林省桦甸四密 25、郑单 958 以及 2005 年先玉 335 品种进行检验(表 3)。将模拟值与实测值进行比较,结果表明:各个品种的模拟值与实测值较接近,相关系

数均在 0.98 以上,且各品种的模拟值与实测值相关性达到极显著水平。以上分析表明干物质积累模型:四密 25: $y=1.065\ 0/(1+71.588\ 3e^{-6.697\ 2x})$;郑单 958: $y=1.062\ 9/(1+90.424\ 9e^{-7.064\ 0x})$;先玉 335: $y=1.051\ 9/(1+132.982\ 1e^{-7.798\ 4x})$ 能够较准确的模拟 3 个春玉米品种群体的干物质积累动态变化规律。

表 3 各个品种 DMA 模拟值与实测值比较
Table 3 Comparison to the DMA_S and DMA_M for different varieties

生育时期 Growth stage	四密 25		郑单 958		先玉 335	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值
	DMA _M	DMA _S	NAR _M	DMA _S	NAR _M	DMA _S
出苗期	0.000 0	0.014 7	0.000 0	0.011 6	0.000 0	0.007 9
拔节期	0.046 9	0.066 8	0.043 1	0.058 0	0.030 0	0.011 6
大口期	0.184 1	0.160 0	0.149 0	0.147 3	0.040 0	0.023 1
吐丝期	0.420 4	0.459 9	0.433 1	0.455 2	0.300 0	0.284 8
乳熟期	0.692 4	0.685 2	0.682 6	0.691 7	0.700 0	0.671 6
蜡熟期	0.848 7	0.872 0	0.842 3	0.883 0	0.920 0	0.954 7
完熟期	1.000 0	0.978 5	1.000 0	0.9866	1.000 0	0.997 5
相关系数 r	0.998 2**		0.999 1**		0.995 5**	

2.4 相对化 DMA 动态模型的生长特性分析

Logistic 方程实际上是描述 DMA 随时间的延长而增加、且向最大相对值“1”渐近的一组曲线。

对(1)式 $y=a/(1+be^{-cx})$ 进行相对时间求导,即:

$$dy/dx=a \times b \times c \times \exp^{-cx}/(1+b \times \exp^{-cx})^2$$
 (5)

(5)式为干物质积累速率变化方程,将 3 个品种的干物质积累速率作图 4。

从图 4 中看出,不同品种干物质积累速率快慢不同。将干物质积累速率分为 3 个阶段,在相对时间 [0,0.4] 范围内为干物质积累速率增加阶段,[0.4,0.8] 为干物质积累速率高值持续阶段,[0.8,1] 为干物质积累速率下降阶段。在积累速率增加阶段,干物质积累速率顺序为四密 25> 郑单 958> 先玉 335;在高值持续阶段:先玉 335> 郑单 958> 四密 25;在积累速率下降阶段:四密 25> 郑单 958> 先玉 335。从总体上看,先玉 335 在生长前期干物质积累上升速度较慢,但在中期积累速率迅速上升,后期积累速率下降较快的特点;四密 25 表现出前、后期干物质积累速率较高,但中期积累速率相对较低的特点;郑单 958 各个阶段的积累速率均处于先玉 335 和郑单 958 之间。

对春玉米群体干物质积累模拟方程求二阶导数,并令其为 0,得出干物质积累速率的特征参数,可知干物质积累直线增长期和最大速率相应特

征值。

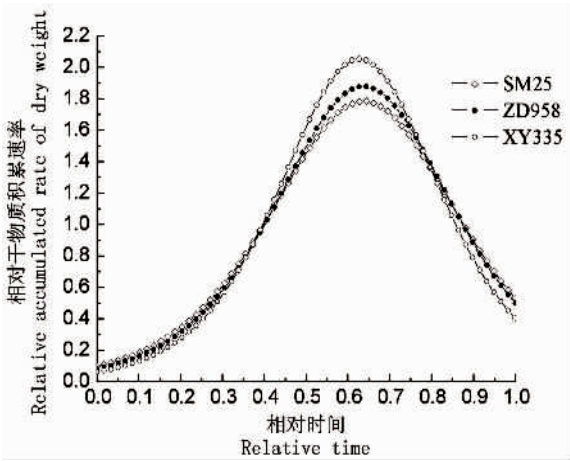


图 4 不同春玉米品种群体干物质积累速率
Fig.4 Accumulated rate of dry weight of different spring maize varieties population

不同品种的直线增长期出现时间以及结束时间不同(表 4)。四密 25 以及郑单 958 的直线增长期出现在苗后 51 d,结束于苗后 111 d;先玉 335 则于苗后 52 d 进入直线增长期,并于苗后 112 d 结束。在直线增长期内先玉 335 的最大速率明显高于其它两个品种,因此在直线增长期内先玉 335 的干物质积累量占总干物质质量的 75.28%, 分别比四密 25 和郑单 958 高 4.70%和 2.62%。

表 4 不同品种春玉米干物质积累速率特征参数

Table 4 Characteristic parameter of rate of different varieties of spring maize

品 种 Variety	直线增长 Linear increase				最大速率 Maximum rate		直线干物质积累量 Linear dry matter accumulation	
	始 期		末 期		出现天数		最大速率	干重比例(%)
	相对值	绝对值	相对值	绝对值	相对值	绝对值		
四密 25	0.40	50.74	0.88	111.24	0.64	80.77	1.78	70.58
郑单 958	0.40	50.93	0.87	111.04	0.64	81.03	1.88	72.66
先玉 335	0.40	51.95	0.86	112.35	0.63	79.63	2.05	75.28

3 结论与讨论

将春玉米群体最大 DMA 和出苗至成熟天数设为 1,对归一化处理后的相对 DMA 和相对时间进行动态模拟,建立了春玉米群体的相对化 DMA 共性模型: $y=a/(1+be^{-cx})$ 。因为春玉米群体干物质积累具有品种特性,因此建立了不同品种的具体相对化 DMA 动态变化模型:四密 25: $y=1.065\ 0/(1+71.588\ 3e^{-6.697\ 2x})$;郑单 958: $y=1.062\ 9/(1+90.424\ 9e^{-7.064\ 0x})$;先玉 335: $y=1.051\ 9/(1+132.982\ 1e^{-7.798\ 4x})$,通过验证 3 个品种的相关性均在 0.98 以上,相关程度达到了极显著水平,说明 3 个品种的模拟模型可靠性均比较高。在该模型中,只需将实际测量的 DMA 最高值以及生育天数带入相对化模型即可获得不同品种春玉米群体 DMA 实际动态变化模型。

归一化的干物质积累模型也适用于早、晚稻以及冬小麦的干物质积累动态变化趋势,可以将 $y=a/(1+be^{-cx})$ 作为作物群体干物质积累动态模拟的共性模型。

在归一化干物质积累模型中,没有考虑农田生态因子对干物质积累的影响,因作物的生长发育时间基本上能反映积温的变化,且模拟的准确性较高,将生长天数作为衡量玉米生长发育过程中的时间标尺比其它生态因子更具有代表性。作物群体干物质积累也会因密度以及栽培管理措施而变化。先玉 335 群体密度在 45 000 ~ 90 000 株 /hm² 范围内,相对干物质增长率随着密度的增加而增加,处于 7.378 9 ~ 8.330 7,阻滞系数也随着密度的增加而增加,在 124.147 6 ~ 138.432 0。四密 25 在 75 000 株 /hm² 的密度条件下,采用不同种植方式,其干物质增长率以及阻滞系数亦不相同。因此,需利用当地多年的高产

群体数据资料,建立适用于本地区高产作物群体的相对化干物质积累动态模型,对作物高产实践进行指导。同时,归一化方法能够缩小作物间以及品种间干物质积累的差距,是研究作物模拟模型发展的重要方向。

参考文献:

[1] 曹永华. 美国 CERES 作物模拟模型及应用[J]. 世界农业,1991 (9):11-15 .

[2] 刑黎峰. 生物生长的 Richards 模型[J]. 生物数学学报,1998,13 (2):348-353 .

[3] 于 强. 包容生态因子的广义 LOGISTIC 模型[J]. 生态学报,1998, 16(3):289-294 .

[4] 王信理. 在作物干物质积累的动态模拟中如何运用 LOGISTIC 方程[J]. 中国农业气象,1989,10(4):22-26 .

[5] Rama,Tv 等. 描述玉米栽培种干物质和果穗生长的数学模型[J]. 国外农学 - 杂粮作物,1993(1):22-26 .

[6] 姚运生. 玉米生长的动力学模式研究[J]. 玉米科学,1997,5(3): 54-57.

[7] 张大光. 玉米群体全生育期干物质积累特性的数学分析[J]. 吉林农业科学,1999,24(3):1-16 .

[8] 张 宾,赵 明,董志强,等. 作物高产群体 LAI 动态模拟模型的建立与检验[J]. 作物学报,2007,33(4):612-619 .

[9] 赵 明,王树安,李少昆,等. 论作物产量研究的“三合结构”模式 [J]. 北京农业大学学报,1995,21(4):359-363 .

[10] 赵 明,李少昆. 作物产量研究“三合理论”及其应用与发展[J]. 北京农业大学学报,1995,21(增刊):70-75 .

[11] 李义珍,黄育民,庄占龙,等. 杂交稻高产群体干物质积累运转 II. 碳水化合物积累运转[J]. 福建农科院学报,1996,11(2): 1-6 .

[12] 康定明,魏 琳,王 莉. 播期对冬小麦干物质积累和产量形成的影响[J]. 石河子农学院学报,1993(1):1-9 .

[13] 吕 新,胡昌浩. 生态因素对玉米生长发育影响及气候生态模型与评价系统建立的研究[D]. 山东农业大学博士论文,2006 .

(责任编辑:朴红梅)