

基于有效积温的玉米自交系叶片发育动态模拟研究

王明山¹, 许海涛², 韩春叶¹, 王芳³, 冯晓曦², 许波²,
张军刚², 郭海斌², 王友华²

(1. 河南农业职业学院, 河南 中牟 451450; 2. 驻马店市农业科学院, 河南 驻马店 463000; 3. 商丘市乡村产业发展中心, 河南 商丘 476000)

摘要: 以玉米自交系 H025B、K4321 为试验材料, 2023 年春播、夏播两季试验, 采用 Linear 模型、Logistic 模型、Exponential 模型拟合春夏播基于有效积温的玉米自交系叶龄、叶长、叶宽、叶面积、叶干物质动态方程, 且利用实测值与拟合曲线定量分析春夏播玉米自交系叶片动态发育特征。结果表明, 基于有效积温构建的 Linear 模型、Logistic 模型、Exponential 模型能精确模拟叶龄生长过程, 决定系数(R^2)均达到 0.97 以上, 实测值与 Linear、Logistic、Exponential 方程动态模拟无显著差异, 实测值和模拟值具有较高拟合度。相关分析表明, 春夏播玉米自交系 H025B、K4321 叶龄、叶长、叶宽、叶面积、叶干物质与有效积温呈正相关关系, 相关性达极显著水平, 相关程度整体表现为叶龄>叶宽>叶长>叶面积>叶干物质。

关键词: 玉米; 叶片; 有效积温; Linear 模型; Logistic 模型; Exponential 模型

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Dynamic Simulation of Leaf Development in Maize Inbred Lines Based on Effective Accumulated Temperature

WANG Ming-shan¹, XU Hai-tao², HAN Chun-ye¹, WANG Fang³, FENG Xiao-xi², XU Bo²,
ZHANG Jun-gang², GUO Hai-bin², WANG You-hua²

(1. Henan Vocational College of Agriculture, Zhongmou 451450; 2. Zhumadian Academy of Agricultural Science, Zhumadian 463000; 3. Shangqiu Rural Industry Development Center, Shangqiu 476000, China)

Abstract: To develop a dynamic prediction model and its characteristic parameters of leaf age, leaf length, leaf width, leaf area, and leaf dry matter of maize inbred lines based on effective accumulated temperature, this study aims to provide a theoretical technical support for quantitatively simulate the leaf development dynamics. Maize inbred lines H025B and K4321 were used as experimental materials, and spring and summer sowing experiment was conducted in 2023. Linear model, Logistic model, and Exponential model were used to fit the dynamic equations of leaf age, leaf length, leaf width, leaf area, and leaf dry matter of maize inbred lines in spring and summer sowing based on effective accumulated temperature, the dynamic development characteristics of leaves of maize inbred lines in spring and summer sowing were quantitatively analyzed by using fitting curves and measured values. The results showed that the Linear model, Logistic model, and Exponential model constructed based on effective accumulated temperature could accurately simulate the leaf age growth process, and the coefficients of determination(R^2) were all above 0.97. The correlation analysis showed that there were a positive correlation between leaf age, leaf length, leaf width, leaf area, and leaf dry matter of spring and summer maize inbred lines H025B and K4321 and effective accumulated temperature, with extremely significant correlation level. The overall correlation degree was as follows: leaf age>leaf width>leaf length>leaf area>leaf dry matter.

Key words: Maize; Leaf; Effective accumulated temperature; Linear model; Logistic model; Exponential model

录用日期: 2024-05-27

基金项目: 国家农业农村部农业专项计划项目(19200174, 19210340)、河南省重大科技攻关项目(1721021100156)、河南省科技攻关项目(242102111168)、河南省玉米产业技术体系驻马店综合试验站项目(HARS-23-02-Z6)

作者简介: 王明山(1978-), 河南尉氏人, 主要从事作物栽培及农业信息技术研究。Tel: 13838321260 E-mail: hnwms007@126.com

许海涛为共同第一作者。E-mail: xuht0101@126.com

王芳为本文通信作者。Tel: 13837003595 E-mail: wangfang261@sina.com

热资源是玉米生育必需的关键环境因素之一,决定且影响着玉米生物体的重要生活机能。温度作为玉米生育最重要生态环境因素,对玉米生育进程起决定性作用^[1-2]。积温作为表征玉米生育期间热量资源累积参数,因其方便使用,积温法成为玉米生育过程中模拟应用较普遍的常用方法^[3]。积温也是—定生态区热量资源评价的重要指标,作为玉米生长发育 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温的温度指数,反映了生态区热量资源的高低和玉米生育期的长短,国内常被广泛应用于玉米生育研究^[4]。玉米生长发育过程显著受有效积温调控,温度变化会延长或降低玉米生育进程的完成时间,进一步影响到热量等气候资源在不同生育阶段内的分配^[5]。玉米生长发育完成一定阶段或全生育期所需要的有效积温相对比较稳定,通过有效积温衡量玉米生育进程相比生育日数更加准确可靠^[6]。叶片是玉米光合作用的重要场所,也是干物质累积的主要器官,对玉米整个生长过程与最终产量形成产生显著影响^[7]。采用模拟方法对玉米发育进行动态模拟与定量研究的同时,也可对玉米长势起到预测作用,在解决玉米生产具体问题时有较强针对性与应用性^[8]。国内外研究者借助计算机模拟技术对玉米生长发育进程中生长因子与不同性状指标进行数字化模拟,产生系列数学模型,以便精准描述玉米生理生长过程^[9]。

关于玉米发育和热量关系前人已多角度进行研究,在一定程度上探明了玉米内在生物学特征。郑国清等^[10]建立了玉米叶龄动态发育模拟模型用于预测玉米生长发育,利用玉米生育期MDSM模拟模型、叶龄动态发育MLSM模拟模型、器官形成MOSM模型,能够模拟叶龄动态发育、器官分化及建成动态、生育进程。Warrington等^[11]通过一元四次方程模拟了温度和玉米叶片发育速率的关系。何维勋等^[12]对温度与玉米叶龄通过指数函数较好模拟了二者定量关系。张银锁等利用Logistic模型在研究出苗后有效积温和出叶速率关系基础上,定量分析了玉米叶龄和积温间的定量关系。陈祥兰等^[13]采用贝塔分布函数法、Logistic生长曲线法和经验法模拟了春播玉米从出苗到抽雄间叶片生长规律。前人以有效积温的相对值作为自变量,运用Logistic修正方程,构建了玉米叶面积指数(LAI)估算通用模型,适用大部分玉米品种LAI动态模拟^[14]。也有学者基于不同有效积温构建了Logistic模型与归一化模拟模型,并对模型通过实测数据进一步验证^[15]。Logistic模型能模拟玉米单株干物质积累量的动态变化,Logistic归一化模型可对区域玉米精确模拟干物质的增长。

Logistic模型在玉米生长发育模拟过程中具有较高精确性,在不同生态区域环境下,模型参数值结论不一,采用有效积温构建的Logistic模型,由于积温类型各异而使模型精度存有差异^[15]。目前,已知研究中多集中在玉米杂交种基于有效积温条件下玉米模拟生长发育研究,有关玉米自交系叶龄、叶长、叶宽、叶面积、叶干物质累积报道较少,特别是玉米单个叶片发育所需热量的试验研究很少。国内外学者使用单一模型研究玉米发育与积温的关系较多,缺少同时利用多种模型进行模拟研究。因此,本文以玉米自交系H025B、K4321为试验材料,通过春、夏播以有效积温替代生育日数为步长单位,进而挖掘玉米自交系叶片发育模拟模型的特征,构建基于有效积温玉米自交系叶片动态发育模型,模拟玉米自交系叶片发育规律,为玉米品种选育与光热资源高效利用、发掘品种高产潜力提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于河南南部驻马店现代农业试验示范基地服务中心(驿城区,114°2'31"E,33°0'36"N,海拔为89.8 m),该试验区热量、光照资源充沛,属于大陆型半湿润季风性气候。砂姜黑土类型土壤,地下水资源丰富,排水和灌溉设备齐全,肥力一致均匀。2023年春播、夏播两季进行试验。试验田间利用Elitech RC-4HC温度记录仪实测最高气温和最低气温。2023年,春播5月6日至8月28日期间最低气温为10~29℃,最高气温为19~36℃,有效积温为1 852.0℃·d;夏播2023年6月13日至9月28日期间最低气温为14~29℃,最高气温为19~36℃,有效积温为1 765.5℃·d。春播有效积温比夏播增加86.5℃·d(图1)。

1.2 供试材料

以H025B、K4321玉米自交系为试验材料,由河南省农业科学院驻马店分院选育,H025B、K4321配合力高、耐密、抗南方锈病。

1.3 试验设计

试验小区行长6 m,行距60 cm,6行区,小区试验面积21.6 m²,3次重复,试验小区共6个,周围保护行种植4行玉米。试验地旋耕前撒施湖北富来地金润肥业公司生产的园林牌复合肥1 125 kg/hm²,养分含量N-P₂O₅-K₂O=28:6:6,总养分含量 $\geq 40\%$,一次性底施。春播2023年5月4日旋耕,5月6日通过人工开沟、点种,每穴播种2粒,播种深度3~4 cm,5月17日出苗,8月25~26日成熟;夏播2023年6月

13日人工开沟、点种,每穴播种2粒,3~4 cm播深,6月20日出苗,9月27-28日成熟。试验小区春、夏

播留苗密度为7.5万株/hm²,试验管理水平和本地玉米大田一致。

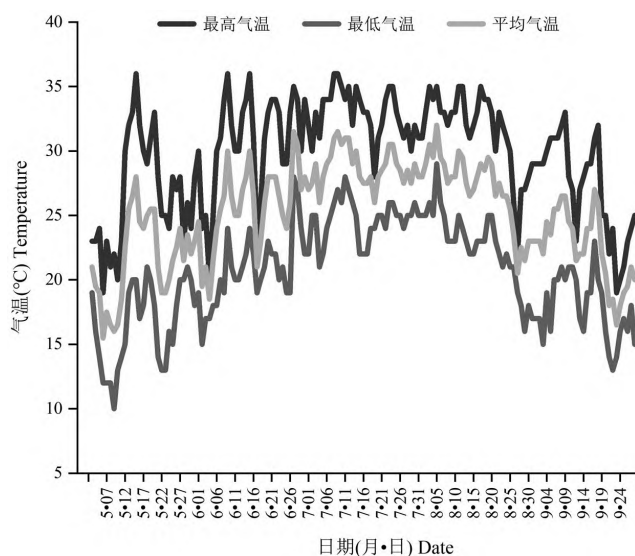


图1 2023年春、夏播玉米自交系生育期间最高气温、最低气温与平均气温

Fig.1 Maximum temperature, minimum temperature, and average temperature during the growth and development period of spring and summer sowing maize inbred lines in 2023

1.4 测定项目与方法

叶龄测定:每个小区2叶期即第2片叶片完全展开时,选择生长势基本相同且具有一定代表性的5株植株,挂牌进行定株标记观测,从下至上标记植株展开叶片序号,记录展开叶片数,自2叶期始每隔3 d测定1次,直至雄穗抽出叶片全部展开。从下位叶鞘中叶片完全伸展露出即为叶片展开。

叶长、叶宽测定:观测叶龄的同时测定每片叶的叶长、叶宽,用卷尺测量叶尖至叶底之间的长度即为叶长、叶片中间最宽处即为叶宽,每次求其完全展开叶的叶长、叶宽平均值。

叶片平均长度计算公式:

$$L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i$$

式中, L_i 为展开叶长度; n 为展开叶数。

叶片平均宽度计算公式:

$$W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i$$

式中, W_i 为展开叶宽度; n 为展开叶数。

叶面积测定:参照文献^[17]长宽系数法计算叶面积,叶面积为每片完全展开叶的叶面积之和。

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \times W_i \times 0.75$$

式中, L_i 为展开叶长度; W_i 为展开叶宽度; n 为展开叶数; S 为全部展开叶的叶面积之和。

叶干物质测定:5叶期每个小区选择生长势基

本相同、植株健壮且具有一定代表性植株,连续从植株茎基部截取5株,挂吊牌标记选取样株日期,每隔10 d取样1次,剥取所有叶片(不含叶鞘)于电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9243BS-Ⅲ型)内105℃环境条件下杀青30 min,再80℃环境条件下烘干到恒重,测定叶片干物质重,求单株叶片干物质平均值。

1.5 气象指标与生长模型

利用Elitech RC-4HC温度记录仪实测试验田间最高气温和最低气温。参照张书萍等方法计算有效积温,以生长度日GDD(℃·d)表示,其计算公式如下:

$$T_{GDD} = \sum \left(\frac{T_{\max_i} + T_{\min_i}}{2} - T_{base_i} \right)$$

式中, T_{GDD} 为有效积温(℃·d); $T_{\max_i}$ 为日最高气温(℃); $T_{\min_i}$ 为日最低气温(℃); T_{base_i} 为生物学零度(℃),玉米生物学零度为10℃;10℃以上温度为玉米生育有效温度,从播种日开始计算。

线型模型(Linear)、生长模型(Logistic)、指数模型(Exponential)方程通式如下:

$$\text{Linear模型: } y = ax + b$$

式中, y 为玉米自交系生长指标; a 为斜率系数; b 为截距系数; x 为有效积温。

$$\text{Logistic模型: } y = \frac{a}{1 + be^{-kx}}$$

式中, y 为玉米自交系生长指标; a 为指标生长上限; b 为截距系数; e 为自然对数底; k 为生长速率系数; x 为有效积温。

Exponential模型: $y = y_0 + ae^{bx}$

式中, y 为玉米自交系生长指标; y_0 、 a 为拟合参数; e 为自然对数底; b 为生长速率系数; x 为有效积温。

以 R^2 (决定系数)、SSE(剩余平方和)、 F 值、MSE[均方误(残)差]和 $Pr>F$ (检验概率)作为模型有效性检验标准。

1.6 数据处理与分析

采用 SPSS Statistics 19 对试验数据进行统计与方差分析,采用 Origin 2021 进行拟合与作图。

2 结果与分析

2.1 基于有效积温的玉米自交系叶龄动态模拟

由表 1 可知,春播自交系 H025B 拟合方程决定系数 R^2 为 0.992 3~0.998 1, Linear、Logistic、Exponential 方程均达极显著水平, Logistic 方程 R^2 、 F 值最大, MSE 最小,其模拟效果优于 Linear、Exponential 方程,表明基于有效积温构建的 Logistic 模型能够精

准模拟春播玉米自交系 H025B 叶龄生长动态过程。春播自交系 K4321 模拟 Linear、Exponential 方程 R^2 相近,大于 Logistic 方程 R^2 。Linear 方程 F 值最大, SSE 最小, MSE 较低,且达极显著水平,其模拟效果优于 Logistic、Exponential 方程,可用于模拟春播自交系 K4321 叶龄生长的动态过程。夏播自交系 H025B Exponential 方程 R^2 大于 Linear、Logistic 方程 R^2 , MSE 最低, SSE 较小,且达极显著水平,模拟效果较好, Exponential 模型能够模拟夏播自交系 H025B 叶龄生长的动态过程。夏播自交系 K4321 Exponential 方程 R^2 最大, SSE、MSE 较低,且达极显著水平,比 Linear、Logistic 方程更精准模拟夏播自交系 K4321 叶龄生长的动态过程。由图 2 可知,春、夏播自交系 H025B、K4321 叶龄实测值与 Linear、Logistic、Exponential 方程动态模拟无显著差异,均呈直线型,实测值分布于模拟线的两侧且接近模拟线,表明实测值和模拟值具有较高拟合度,表明春、夏播不同有效积温条件下模拟趋势基本无显著变化。

表 1 基于有效积温的玉米自交系叶龄动态模拟参数

Table 1 Dynamic simulation parameters of leaf age in maize inbred lines based on effective accumulated temperature

播 季 Sowing season	自交系 Inbred line	模型种类 Model type	模型表达式 Model expression	R^2	SSE	MSE	F 值 F value	$Pr>F$
春 播	H025B	Linear	$y=0.020\ 5x-0.638\ 9$	0.992\ 3	557.58	0.288\ 8	1\ 930.53	<0.000\ 1
		Logistic	$y = \frac{21.687\ 5}{1 + 13.380\ 4e^{-0.004\ 7x}}$	0.998\ 1	2628.86	0.076\ 5	11\ 448.31	<0.000\ 1
		Exponential	$y = 65.862\ 7 - 67.667\ 0e^{-0.000\ 4x}$	0.994\ 9	559.04	0.205\ 2	1\ 362.27	<0.000\ 1
	K4321	Linear	$y=0.018\ 0x-0.151\ 3$	0.997\ 0	425.95	0.086\ 4	4\ 931.92	<0.000\ 1
		Logistic	$y = \frac{20.536\ 8}{1 + 10.501\ 7e^{-0.004\ 1x}}$	0.992\ 3	2\ 139.97	0.236\ 5	3\ 015.90	<0.000\ 1
		Exponential	$y = 73.287\ 7 - 74.196\ 1e^{-0.000\ 3x}$	0.998\ 3	426.53	0.050\ 6	4\ 217.48	<0.000\ 1
夏 播	H025B	Linear	$y=0.018\ 6x-0.423\ 3$	0.989\ 0	408.56	0.349\ 1	1\ 170.24	<0.000\ 1
		Logistic	$y = \frac{19.799\ 7}{1 + 11.844\ 2e^{-0.004\ 5x}}$	0.988\ 0	1878.30	0.412\ 6	1\ 517.29	<0.000\ 1
		Exponential	$y = 57.729\ 0 - 59.186\ 6e^{-0.000\ 4x}$	0.991\ 2	409.46	0.303\ 6	674.24	<0.000\ 1
	K4321	Linear	$y=0.017\ 4x-0.352\ 2$	0.981\ 7	359.64	0.514\ 9	698.44	<0.000\ 1
		Logistic	$y = \frac{19.326\ 1}{1 + 11.199\ 7e^{-0.004\ 2x}}$	0.978\ 3	1\ 665.06	0.661\ 7	838.84	<0.000\ 1
		Exponential	$y = 92.940\ 2 - 95.762\ 5e^{-0.000\ 2x}$	0.982\ 3	359.85	0.540\ 5	332.91	<0.000\ 1

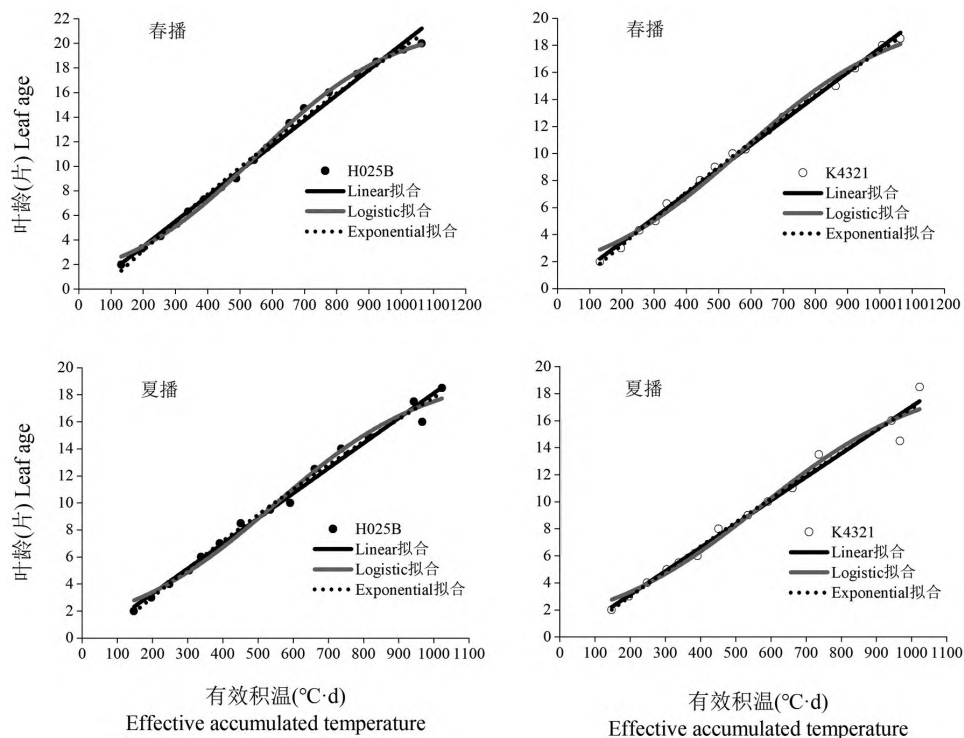


图2 基于有效积温的玉米自交系叶龄实测值与动态模拟

Fig.2 Measured values and dynamic simulation of leaf age in maize inbred lines based on effective accumulated temperature

2.2 基于有效积温的玉米自交系叶长动态模拟

表 2 基于有效积温的玉米自交系叶长动态模拟参数

播 季	自交系	模型种类	模型表达式	R^2	SSE	MSE	F 值	$Pr>F$
Sowing season	Inbred line	Model type	Model expression				F value	
春 播	H025B	Linear	$y=0.063\ 0x-4.303\ 3$	0.939\ 5	4\ 168.07	20.663\ 5	201.71	<0.000\ 1
		Logistic	$y=\frac{55.385\ 3}{1+25.060\ 0e^{-0.006\ 5x}}$	0.973\ 7	17\ 748.30	9.708\ 1	609.40	<0.000\ 1
		Exponential	$y=105.543\ 6-117.443\ 5e^{-0.000\ 8x}$	0.951\ 5	4\ 221.55	17.928\ 7	117.73	<0.000\ 1
	K4321	Linear	$y=0.053\ 3x-3.339\ 3$	0.958\ 5	3\ 712.59	11.487\ 8	323.18	<0.000\ 1
		Logistic	$y=\frac{49.845\ 2}{1+24.295\ 6e^{-0.006\ 2x}}$	0.991\ 9	15\ 841.03	2.414\ 9	2186.61	<0.000\ 1
		Exponential	$y=95.549\ 7-105.597\ 9e^{-0.000\ 8x}$	0.970\ 6	3\ 759.70	8.747\ 4	214.90	<0.000\ 1
夏 播	H025B	Linear	$y=0.046\ 9x+1.030\ 3$	0.977\ 6	1\ 931.39	4.020\ 5	480.39	<0.000\ 1
		Logistic	$y=\frac{48.918\ 5}{1+10.634\ 6e^{-0.004\ 8x}}$	0.993\ 3	12\ 909.21	1.333\ 2	3227.73	<0.000\ 1
		Exponential	$y=77.587\ 9-84.551\ 4e^{-0.000\ 9x}$	0.990\ 6	1\ 957.10	1.852\ 3	528.29	<0.000\ 1
	K4321	Linear	$y=0.051\ 2x-3.353\ 6$	0.982\ 4	2\ 303.31	3.751\ 0	614.05	<0.000\ 1
		Logistic	$y=\frac{48.665\ 2}{1+16.898\ 6e^{-0.005\ 3x}}$	0.992\ 0	11\ 951.40	1.871\ 0	2129.30	<0.000\ 1
		Exponential	$y=89.607\ 5-100.159\ 3e^{-0.000\ 8x}$	0.991\ 7	2\ 325.13	1.944\ 6	597.84	<0.000\ 1

由表2可知,春播自交系 H025B 拟合方程决定系数 R^2 为 0.939 5 ~ 0.973 7, Logistic 方程 > Exponential 方程 > Linear 方程, Logistic 方程 MSE 最小、 F 值最大,且达极显著水平,玉米自交系生长过程中叶长随有效积温的动态变化过程符合 Logistic 方程拟合曲线的动态变化,其拟合度优于 Linear 方程、Exponential 方程。春播自交系 K4321 决定系数 R^2 高于 H025B,为 0.958 5 ~ 0.991 9,其拟合方程决定系数 R^2 超过 0.95,达到极显著水平,Logistic 方程 R^2 最大, F 值最高,MSE 最低,其模拟拟合度高于 Linear 方程、Exponential 方程,Logistic 方程能够模拟春播自交系 K4321 叶长生长的动态过程。夏播自交系 H025B Logistic 方程决定系数 R^2 大于 Linear 方程、Exponential

方程,达 0.99 以上,达极显著水平, F 值最大,MSE 最小,其模型拟合更接近于叶长生长动态。夏播自交系 K4321 决定系数为 0.982 4 ~ 0.992 0,Logistic 方程决定系数 R^2 最大,超过 0.99, F 值最高,MSE 最低,能够精确模拟春播自交系 K4321 叶长生长的动态过程,其拟合度显著高于 Linear 方程、Exponential 方程。由图3可知,春、夏播自交系 H025B、K4321 叶长实测值与 Linear、Logistic、Exponential 方程动态模拟存在显著差异,Logistic 方程基本呈“S”形曲线,Linear、Exponential 方程整体呈直线形曲线,实测值分布于模拟线的两侧但更接近 Logistic 方程模拟线,表明实测值和 Logistic 方程模拟值具有较高的拟合度。

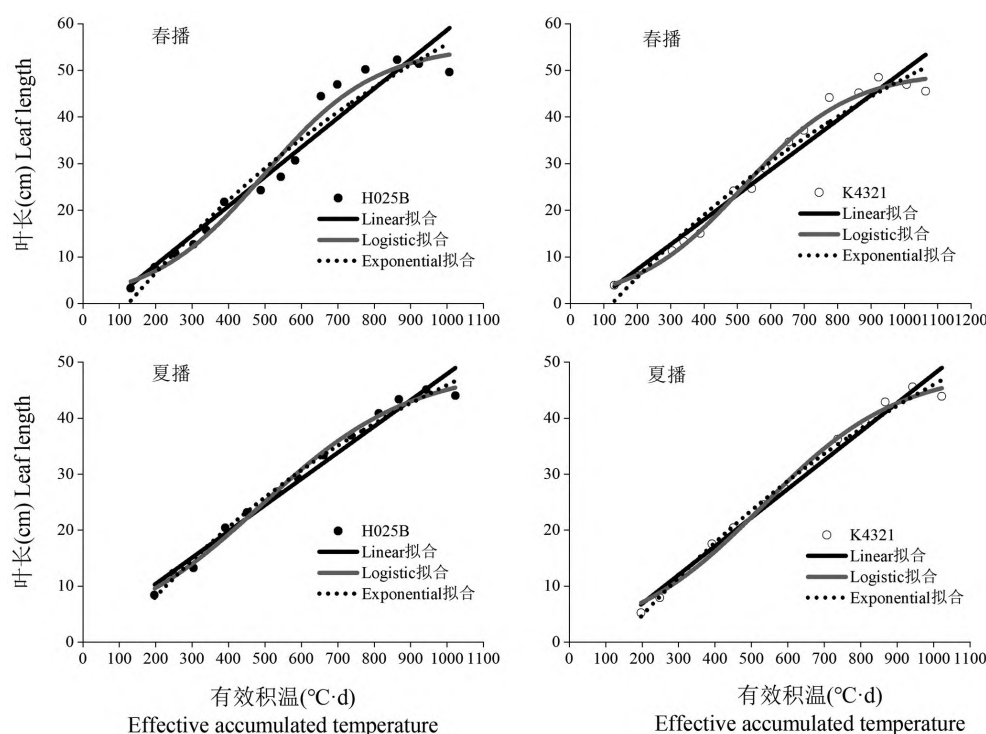


图3 基于有效积温的玉米自交系叶长实测值与动态模拟

Fig.3 Measured values and dynamic simulation of leaf length in maize inbred lines based on effective accumulated temperature

2.3 基于有效积温的玉米自交系叶宽动态模拟

由表3可知,春播自交系 H025B 拟合方程决定系数 R^2 为 0.957 9 ~ 0.975 5, Logistic 方程 R^2 最大,其次为 Linear 方程、Exponential 方程, Logistic 方程 MSE 最小、 F 值最大,且达极显著水平,玉米自交系叶宽随有效积温的动态变化过程符合 Logistic 方程拟合曲线的动态变化,其拟合度大于 Linear 方程、Exponential 方程。春播自交系 K4321 拟合方程决定系数 R^2 高于 H025B,其在 0.960 2 ~ 0.979 8 范围内,拟合方程决定系数 R^2 超过 0.96,达极显著水平,Logistic 方程 R^2 最大;其次为 Exponential 方程、Linear 方程;

Logistic 方程 F 值最大,MSE 最小,其拟合度高于 Linear 方程、Exponential 方程, Logistic 方程能够模拟春播自交系 K4321 叶宽生长的动态过程。夏播自交系 H025B Logistic 方程决定系数 R^2 大于 Linear 方程、Exponential 方程,达 0.98 以上,达极显著水平, F 值最大,MSE 最小,其模型拟合更接近于叶宽生长动态。夏播自交系 K4321 决定系数为 0.984 6 ~ 0.993 0, Logistic 方程决定系数 R^2 最大且超过 0.99, F 值最高,MSE 最低,能够精确模拟春播自交系 K4321 叶宽生长的动态过程,其拟合度显著高于 Linear 方程、Exponential 方程。由图4可知,春、夏播自交系 H025B、

表 3 基于有效积温的玉米自交系叶宽动态模拟参数
Table 3 Dynamic simulation parameters of leaf width in maize inbred lines based on effective accumulated temperature

播 季 Sowing season	自交系 Inbred line	模型种类 Model type	模型表达式 Model expression	R^2	SSE	MSE	F 值 F value	Pr>F
春 播	H025B	Linear	$y = 0.006\ 2x + 0.092\ 0$	0.958\ 0	40.10	0.135\ 3	296.47	<0.000\ 1
		Logistic	$y = \frac{6.820\ 7}{1 + 10.591\ 6e^{-0.004\ 4x}}$	0.975\ 5	219.23	0.085\ 4	855.93	<0.000\ 1
		Exponential	$y = -397.264\ 8 + 397.368\ 8e^{0.000\ 02x}$	0.957\ 9	40.09	0.146\ 7	136.63	<0.000\ 1
	K4321	Linear	$y = 0.004\ 7x + 0.262\ 8$	0.960\ 2	28.54	0.084\ 6	337.52	<0.000\ 1
		Logistic	$y = \frac{6.245\ 2}{1 + 8.295\ 6e^{-0.006\ 2x}}$	0.979\ 8	169.02	0.046\ 3	1217.36	<0.000\ 1
		Exponential	$y = 40.241 - 40.060\ 7e^{-0.000\ 1x}$	0.960\ 5	28.55	0.090\ 4	157.98	<0.000\ 1
夏 播	H025B	Linear	$y = 0.004\ 8x + 0.521\ 6$	0.983\ 5	20.04	0.030\ 6	655.85	<0.000\ 1
		Logistic	$y = \frac{5.589\ 7}{1 + 7.035\ 2e^{-0.004\ 2x}}$	0.996\ 8	168.15	0.006\ 5	8622.05	<0.000\ 1
		Exponential	$y = 8.854\ 5 - 9.053\ 1e^{-0.000\ 9x}$	0.994\ 0	20.25	0.012\ 2	833.43	<0.000\ 1
	K4321	Linear	$y = 0.004\ 6x + 0.248\ 4$	0.984\ 7	18.77	0.026\ 5	707.33	<0.000\ 1
		Logistic	$y = \frac{5.578\ 4}{1 + 8.071\ 7e^{-0.003\ 8x}}$	0.993\ 0	136.53	0.013\ 4	3389.57	<0.000\ 1
		Exponential	$y = -548.609\ 0 + 548.863\ 3e^{0.000\ 008x}$	0.984\ 6	18.77	0.029\ 3	320.06	<0.000\ 1

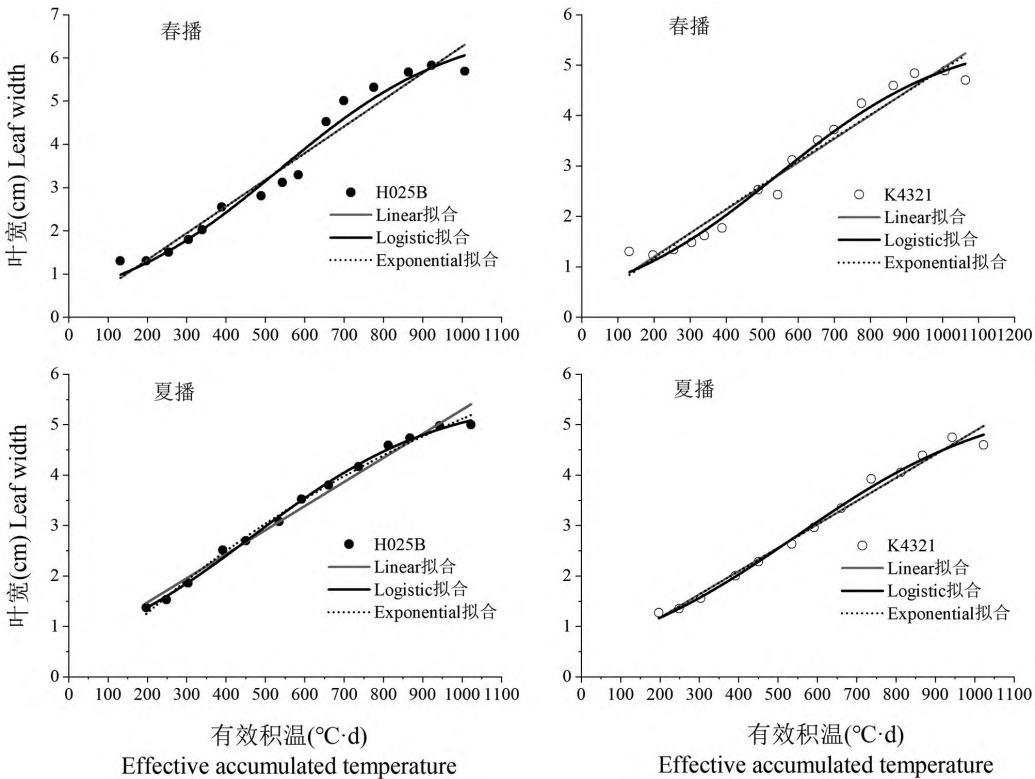


图 4 基于有效积温的玉米自交系叶宽实测值与动态模拟
Fig.4 Measured values and dynamic simulation of leaf width in maize inbred lines based on effective accumulated temperature

K4321 叶宽实测值与 Linear、Logistic、Exponential 方程动态模拟存在显著差异, Logistic 方程和 Linear、Exponential 方程基本呈“S”形、直线形曲线, 实测值分布于模拟线的两侧更接近 Logistic 方程模拟线, 表明实测值和 Logistic 方程模拟值具有更高的拟合度。

2.4 基于有效积温的玉米自交系叶面积动态模拟

由表 4 可知, 春播自交系 H025B 的 Logistic 拟合方程决定系数 R^2 显著大于 Exponential 方程、Linear 方程, F 值最大, 其 MSE 分别是 Linear 方程、Exponential 方程的 3.58%、5.40%。Logistic 拟合方程决定系数 R^2 越高, 表明其拟合方程模拟效果越优; MSE 越低, 表明模拟与实测值越接近, 模拟效果更优。玉米自交系叶面积随有效积温的动态变化过程符合 Logistic 方程拟合曲线的动态变化, 其拟合度优于 Linear 方程、Exponential 方程。春播自交系 K4321 拟合方程决定系数 R^2 为 0.906 8 ~ 0.993 9, 其拟合方程决定系数 R^2 超过 0.90, 达到极显著水平, Logistic 方程 R^2 最大, 其次为 Exponential 方程、Linear 方程, Logistic 方程 F 值最大, MSE 分别是 Linear 方程、Exponential 方程的 7.02%、9.99%, Logistic 方程拟合度高于 Linear 方程、Exponential 方程, Logistic 方程能够模拟春播自交系 K4321 叶面积生长的动态过程。夏播自

交系 H025B 拟合方程决定系数 R^2 表现为 Logistic 方程 > Exponential 方程 > Linear 方程, Logistic 方程 F 值显著高于 Exponential 方程、Linear 方程, MSE 远低于 Exponential 方程、Linear 方程, MSE 分别是 Exponential 方程、Linear 方程的 8.96%、19.54%, Logistic 方程拟合度显著高于 Linear 方程、Exponential 方程, Logistic 方程能够模拟夏播自交系 H025B 叶面积生长的动态过程。夏播自交系 K4321 拟合方程决定系数 R^2 为 0.916 6 ~ 0.992 9, 其拟合方程决定系数 R^2 超过 0.91, 达极显著水平, Logistic 方程 F 值最大, MSE 最低, 分别是 Linear 方程、Exponential 方程的 7.02%、9.99%, Logistic 方程拟合度显著高于 Linear 方程、Exponential 方程, Logistic 方程能够模拟夏播自交系 K4321 叶面积生长的动态过程。由图 5 可知, 春夏播自交系 H025B、K4321 叶面积实测值与 Linear 方程、Logistic 方程、Exponential 方程曲线间差异显著, Linear 方程、Exponential 方程基本呈直线型, 叶面积实测值分布于直线的两侧, 距离模拟曲线较远, Logistic 方程呈典型“S”形曲线, 实测值分布于模拟线的两侧更接近 Logistic 方程模拟曲线, 表明实测值与 Logistic 方程拟合度更高。

表 4 基于有效积温的玉米自交系叶面积动态模拟参数								
Table 4 Dynamic simulation parameters of leaf area in maize inbred lines based on effective accumulated temperature								
播季	自交系	模型种类	模型表达式	R^2	SSE	MSE	F 值	$Pr>F$
Sowing season	Inbred line	Model type	Model expression				F value	
春 播	H025B	Linear	$y = 6.206\ 1x - 1\ 743.710\ 3$	0.897 3	4.05×10^7	356 685.924 4	113.58	<0.000 1
		Logistic	$y = \frac{4\ 529.511\ 1}{1 + 6\ 308.184\ 4e^{-0.0132x}}$	0.996 6	8.49×10^7	12 770.937 2	2215.12	<0.000 1
		Exponential	$y = -2\ 468.363\ 9 + 1\ 617.772\ 4e^{0.001\ 5x}$	0.937 1	4.23×10^7	236 613.728 6	89.41	<0.000 1
	K4321	Linear	$y = 4.234\ 5x - 1\ 209.97$	0.906 8	2.34×10^7	171 825.282 8	136.25	<0.000 1
		Logistic	$y = \frac{3\ 396.70}{1 + 1\ 808.336\ 1e^{-0.0106x}}$	0.993 9	4.99×10^7	12 061.047 3	1378.03	<0.000 1
		Exponential	$y = -2\ 024.488\ 1 + 1\ 429.327\ 1e^{0.001\ 3x}$	0.939 2	2.42×10^7	120 684.470 4	100.46	<0.000 1
夏 播	H025B	Linear	$y = 4.173\ 9x - 1\ 252.094\ 7$	0.936 9	1.53×10^7	93 823.927 5	163.25	<0.000 1
		Logistic	$y = \frac{3\ 595.191\ 6}{1 + 318.304\ 9e^{-0.007\ 7x}}$	0.994 9	3.63×10^7	8 410.005 9	1437.35	<0.000 1
		Exponential	$y = -1\ 455.786\ 3 + 954.737\ 0e^{0.001\ 6x}$	0.973 7	1.59×10^7	43 042.847 1	184.91	<0.000 1
	K4321	Linear	$y = 3.925\ 4x - 1\ 234.69$	0.916 6	1.35×10^7	11 2067.312 2	120.89	<0.000 1
		Logistic	$y = \frac{3\ 516.445\ 3}{1 + 451.151\ 0e^{-0.007\ 9x}}$	0.992 9	3.07×10^7	10 566.299 8	967.67	<0.000 1
		Exponential	$y = -955.722\ 6 + 549.564\ 4e^{0.002\ 0x}$	0.972 5	1.44×10^7	40 617.191 9	176.95	<0.000 1

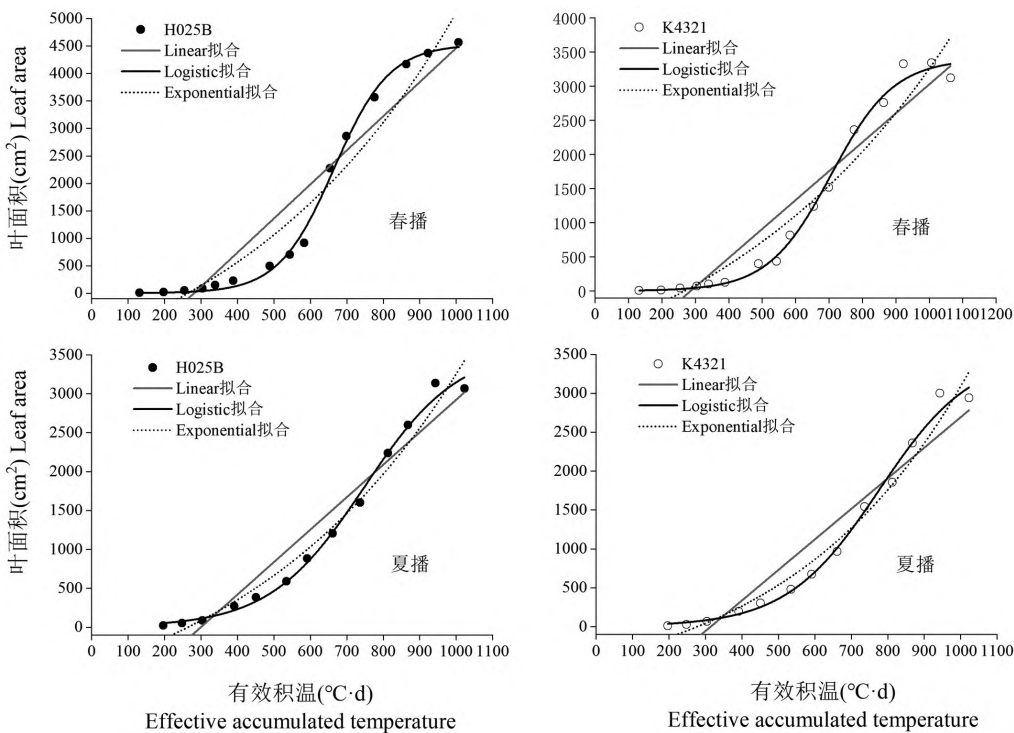


图5 基于有效积温的玉米自交系叶面积实测值与动态模拟

Fig.5 Measured values and dynamic simulation of leaf area in maize inbred lines based on effective accumulated temperature

2.5 基于有效积温的玉米自交系叶片干物质动态模拟

表5 基于有效积温的玉米自交系叶片干物质动态模拟参数

Table 5 Dynamic simulation parameters of leaf dry matter in maize inbred lines based on effective accumulated temperature

播 季 Sowing season	自交系 Inbred line	模型种类 Model type	模型表达式 Model expression	R^2	SSE	MSE	F 值 F value	Pr>F
春 播	H025B	Linear	$y = 0.018\ 3x - 0.319\ 2$	0.798\ 9	1\ 013.94	28.356\ 3	35.76	>0.000\ 1
		Logistic	$y = \frac{27.796\ 6}{1 + 163.313\ 2e^{-0.007\ 7x}}$	0.982\ 7	5\ 127.37	2.863\ 8	596.80	<0.000\ 1
		Exponential	$y = 32.305\ 4 - 54.327\ 6e^{-0.001\ 7x}$	0.966\ 7	1\ 278.74	5.499\ 2	116.27	<0.000\ 1
	K4321	Linear	$y = 0.020\ 1x - 2.624\ 3$	0.811\ 5	1\ 214.98	31.358\ 2	38.75	>0.000\ 1
		Logistic	$y = \frac{28.282\ 3}{1 + 344.550\ 0e^{-0.007\ 8x}}$	0.971\ 4	4\ 918.65	5.352\ 5	306.32	<0.000\ 1
		Exponential	$y = -27\ 890.081\ 4 + 27\ 887.465\ 4e^{7.19 \times 10^{-7}x}$	0.811\ 4	1\ 214.83	35.296\ 6	17.21	>0.000\ 1
	H025B	Linear	$y = 0.017\ 5x - 3.560\ 1$	0.876\ 3	699.88	12.352\ 7	56.66	<0.000\ 1
		Logistic	$y = \frac{23.005\ 8}{1 + 247.025\ 6e^{-0.006\ 9x}}$	0.958\ 2	3\ 202.99	4.767\ 1	223.96	<0.000\ 1
		Exponential	$y = -11\ 232.945\ 6 + 11\ 229.400\ 9e^{1.55 \times 10^{-6}x}$	0.876\ 1	699.76	14.134\ 8	24.75	>0.000\ 1
夏 播	K4321	Linear	$y = 0.014\ 7x - 1.471\ 1$	0.763\ 9	495.78	19.158\ 4	25.80	>0.000\ 1
		Logistic	$y = \frac{20.590\ 1}{1 + 1\ 502.192\ 2e^{-0.009\ 7x}}$	0.966\ 6	2\ 778.29	3.097\ 5	298.98	<0.000\ 1
		Exponential	$y = 24.104\ 4 - 43.721\ 9e^{-0.001\ 7x}$	0.886\ 2	575.16	10.555\ 6	27.24	>0.000\ 1

由表5可知,春播自交系 H025B 的 Linear 方程决定系数 R^2 最小, F 值最低, MSE 最高, 实测值与模拟值离散程度最大, 检验概率 ($P_r > F$) 大于 0.000 1, 模拟获得的 Linear 方程没有实际生物学意义。Logistic 方程、Exponential 方程决定系数 R^2 达 0.96 以上, 达极显著水平, 可以模拟叶片干物质增长动态, Logistic 方程 R^2 最大, MSE 最小, F 值最高, 玉米自交系叶片干物质随有效积温的动态变化过程符合 Logistic 方程拟合曲线的动态变化, 其拟合度高于 Exponential 方程。春播自交系 K4321 的 Linear 方程、Exponential 方程决定系数 R^2 显著低于 Logistic 方程, F 值较低, MSE 相对较高, 实测值与模拟值离散程度最大, 检验概率 ($P_r > F$) 大于 0.000 1, 模拟获得的 Linear 方程、Exponential 方程没有实际生物学意义。Logistic 方程决定系数 R^2 达 0.97 以上, MSE 最低, F 值最大, 达极显著水平, 可较好模拟叶片干物质增长动态过程。夏播自交系 H025B 的 Exponential 方程决定系数 R^2 最小, MSE 最高, F 值最低, 检验概率 ($P_r > F$) 大于 0.000 1, 模拟获得的 Exponential 方程没有实际生物

学意义。Linear 方程检验概率 ($P_r > F$) 虽小于 0.000 1, 但 R^2 相对较小, 表明实测值与模拟值相关程度低, 且 MSE 较高, F 值较小, Logistic 方程决定系数 R^2 最大, MSE 最小, F 值最大, 可较好模拟叶干物质增长动态过程。夏播自交系 K4321 的 Linear 方程、Exponential 方程决定系数 R^2 显著低于 Logistic 方程, F 值显著较低, MSE 相对较高, 实测值与模拟值离散程度较大, 检验概率 ($P_r > F$) 大于 0.000 1, 模拟获得的 Linear 方程、Exponential 方程没有实际生物学意义。Logistic 方程决定系数 R^2 达 0.96 以上, MSE 最低, F 值最大, 达极显著水平, 可较好模拟叶片干物质增长动态过程。由图6可知, 春、夏播自交系 H025B、K4321 叶片干物质实测值与 Linear 方程、Logistic 方程、Exponential 方程曲线间存在显著差异, Linear 方程、Exponential 方程拟合曲线相近, 叶片干物质实测值分布于曲线的两侧, 距离模拟曲线距离较远, Logistic 方程呈典型“S”形曲线, 实测值分布于模拟线的两侧但更接近 Logistic 方程模拟曲线, 表明叶片干物质实测值与 Logistic 方程拟合度更高。

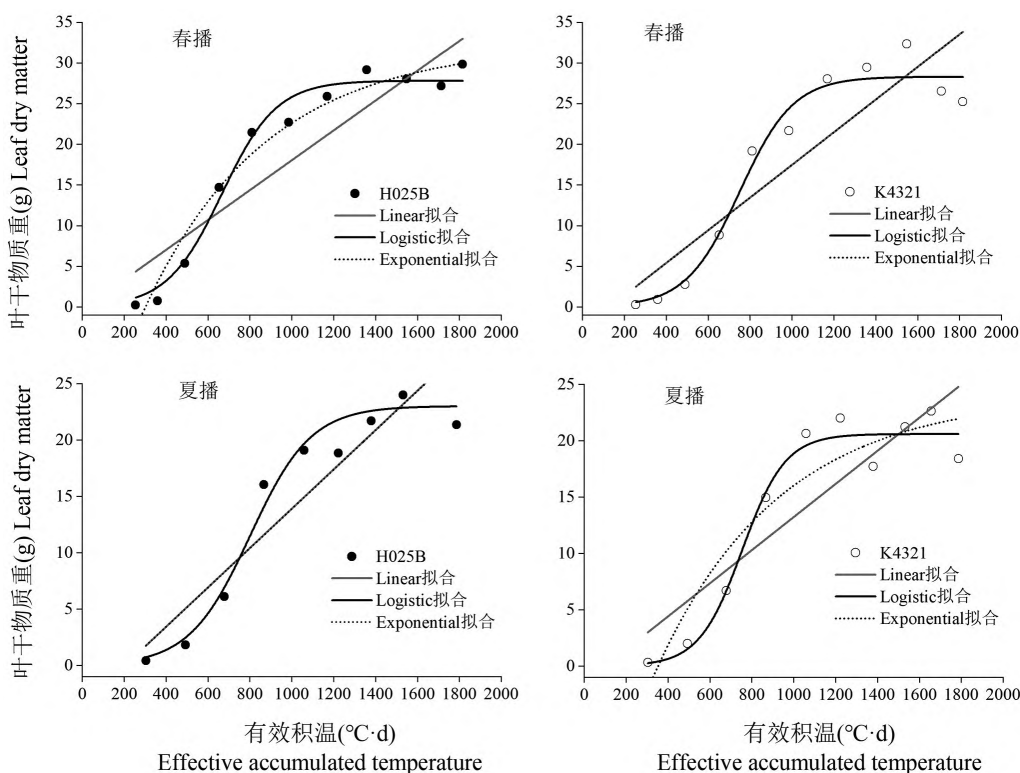


图6 基于有效积温的玉米自交系叶片干物质实测值与动态模拟

Fig.6 Measured values and dynamic simulation of leaf dry matter in maize inbred lines based on effective accumulated temperature

2.6 玉米自交系叶龄、叶长、叶宽、叶面积、叶片干物质与有效积温的相关性分析

由表6可知,春、夏播玉米自交系 H025B、K4321 叶龄、叶长、叶宽、叶面积、叶片干物质与有效积温间

呈正相关关系,相关性达极显著水平。春播自交系 H025B、K4321 与有效积温的相关程度依次为叶龄>叶宽>叶长>叶面积>叶片干物质;夏播自交系 H025B 与有效积温的相关程度依次为叶龄>叶宽>

叶长>叶面积>叶片干物质;夏播自交系 K4321 与有效积温的相关程度依次为叶龄>叶长、叶宽>叶面积>叶片干物质,春、夏播自交系 H025B、K4321 叶片干

物质与有效积温的相关程度显著低于叶龄、叶长、叶宽、叶面积。

表 6 玉米自交系叶龄、叶长、叶宽、叶面积、叶片干物质与有效积温的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between effective accumulated temperature and leaf age, leaf length, leaf width, leaf area, and leaf dry matter of maize inbred lines based on effective accumulated temperature

播 季	自交系	性 状	叶 龄	叶 长	叶 宽	叶面积	叶片干物质
Sowing season	Inbred line	Trait	Leaf age	Leaf length	Leaf width	Leaf area	Leaf dry matter
春 播	H025B	有效积温	0.996**	0.969**	0.979**	0.947**	0.843**
	K4321	有效积温	0.998**	0.979**	0.980**	0.952**	0.836**
夏 播	H025B	有效积温	0.994**	0.989**	0.992**	0.968**	0.726**
	K4321	有效积温	0.991**	0.991**	0.992**	0.957**	0.874**

注:“**”表示在0.01水平上极显著相关。

Note: ** indicates a extremely significant correlation at the 0.01 level.

3 结论与讨论

玉米自交系春、夏播叶龄基于有效积温构建的 Linear 模型、Logistic 模型、Exponential 模型能够精确模拟叶龄生长过程。叶龄实测值与 Linear、Logistic、Exponential 方程动态模拟无显著差异,均呈直线型,实测值和模拟值具有较高拟合度。

Logistic 方程能够模拟春夏播自交系叶长、叶宽、叶面积、叶片干物质生长的动态过程,Logistic 方程基本呈“S”形曲线,Linear、Exponential 方程整体呈直线形曲线,实测值分布于模拟线的两侧但更接近 Logistic 方程模拟线,实测值和 Logistic 方程模拟值具有较高的拟合度。春、夏播玉米自交系 H025B、K4321 叶龄、叶长、叶宽、叶面积、叶片干物质与有效积温间呈正相关关系,相关性达极显著水平;春、夏播自交系 H025B、K4321 与有效积温的相关程度整体上依次表现为叶龄>叶宽>叶长>叶面积>叶片干物质,春、夏播自交系 H025B、K4321 叶片干物质与有效积温的相关程度显著低于叶龄、叶长、叶宽、叶面积。

叶龄是评价玉米生命活动长短的重要参考标尺,叶龄及叶片发育状态良好与否,将对玉米光合特性和光合作用产生直接性影响^[18]。聂景芳等^[19]研究认为,温度作为玉米叶片发育的重要影响气象因子,玉米叶龄增长与积温密切相关。本研究表明,基于有效积温的玉米自交系春、夏播叶龄生长动态模拟模型决定系数 R^2 均达到 0.97 以上,模型的拟合效果较好。春播自交系 H025B 的 Logistic 方程、K4321 的 Linear 方程以及夏播自交 H025B、K4321 的 Exponential 方程 F 值最大,SSE 最小,MSE 较低,可用于模拟

叶龄生长的动态过程。叶龄实测值与 Linear、Logistic、Exponential 方程动态模拟无显著差异,均呈直线型,实测值和模拟值具有较高拟合度。

叶片形态影响玉米自交系的光合效率,对玉米株型也产生直接决定性作用,叶长是株型结构的主要构成因素,也是决定玉米自交系叶片形态最直接因子^[20]。有学者^[21]研究了氮素施用量不同的条件下玉米各生育时期叶长变化特征,建立了有关玉米叶长尺度的拟合模型,对玉米叶长发育模拟过程具有较好解释性与预测性。本研究基于有效积温构建的 Linear 模型、Logistic 模型、Exponential 模型能够精确模拟叶长的生长过程,模型拟合度较高。Logistic 方程基本呈“S”形曲线,Linear、Exponential 方程整体呈直线形曲线,实测值分布于模拟线的两侧但更接近 Logistic 方程模拟线,实测值和 Logistic 方程模拟值具有较高的拟合度,表明 Logistic 方程可以较好描述有效积温与叶长发育的拟合关系。通过春夏播玉米自交系田间试验,基于有效积温建立的叶长发育动态模拟模型,可为玉米育种自交系株型选择决策提供一种新途径。

叶宽是玉米叶面积构成因素中核心组成因子,在光捕获过程中起着决定性作用,是决定玉米株型影响密度的主要农艺性状^[22-23]。本研究发现,基于有效积温的玉米自交系春、夏播叶宽生长动态模拟模型决定系数 R^2 均达到 0.95 以上,构建的 Linear 模型、Logistic 模型、Exponential 模型能够精确模拟叶宽生长动态过程。本研究筛选出模拟的最优模型,通过拟合方程获得特征参数,探索自交系叶宽与有效积温的定量化数量关系,在自交系理想叶宽株型选育过程中提供一种模拟模型及定量化分析研究手

段,有利于自交系适宜叶宽的选育。

叶面积是玉米生育进程中主要动态指标,表征玉米横向扩展特性,与玉米干物质及产量联系密切^[24]。玉米叶面积生长发育模拟模型的创建和发展为量化精确研究玉米叶面积动态变化与预测产量变化提供可靠方法和支撑。麻雪艳等^[25]利用修正 Logistic 模拟了春玉米从播种到叶面积指数最高时玉米叶面积动态发育变化,提出相应积温要求指标,拟合模型效果能够解释 94% 以上的叶面积指数实际变化,拟合度较高。罗新兰等^[26]以有效积温相对值为自变量,构建相对叶面积指数的 Logistic 模型,决定系数(R^2)、标准误差(SE)分别达到 0.98、0.21,可较好预测东北玉米叶面积指数不同生育时期内的动态发育变化。

本研究表明,春夏播玉米自交系叶干物质随有效积温的动态变化过程符合 Logistic 方程拟合曲线的动态变化,可较好模拟叶片干物质增长动态过程,Linear 方程、Exponential 方程拟合曲线相近,叶片干物质实测值分布于曲线的两侧,距离模拟曲线距离较远,Logistic 方程呈典型“S”形曲线,实测值分布于模拟线的两侧更接近 Logistic 方程模拟曲线,表明叶片干物质实测值与 Logistic 方程拟合度更高^[27]。春、夏播玉米自交系 H025B、K4321 叶龄、叶长、叶宽、叶面积、叶片干物质与有效积温间呈正相关关系,相关性达极显著水平,春、夏播自交系 H025B、K4321 与有效积温的相关程度整体上依次表现为叶龄>叶宽>叶长>叶面积>叶片干物质,春、夏播自交系 H025B、K4321 叶片干物质与有效积温的相关程度显著低于叶龄、叶长、叶宽、叶面积。育种实践也表明,在有效积温相对稳定的环境下,通过叶片发育模型可预测玉米自交系理想株型生长,选育适宜当地种植的玉米杂交种。

参考文献:

- [1] 张银锁,宇振荣,Driessen P M. 夏玉米植株及叶片生长发育热量需求的试验与模拟研究[J]. 应用生态学报,2001(4):561-565.
ZHANG Y S, YU Z R, DRIESSEN P M. Growing degree-days requirements for plant and leaf development of summer maize(*Zea mays*)—An experimental and simulation study[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001(4): 561-565. (in Chinese)
- [2] 陈 杨. 有效积温与夏玉米生长发育和氮磷钾积累定量研究[D]. 北京:中国农业科学院,2021.
- [3] 陈 静,任佰朝,赵 斌,等. 基于品种生育期有效积温确定夏玉米适宜播期[J]. 中国农业科学,2021,54(17):3632-3646.
CHEN J, REN B Z, ZHAO B, et al. Determination on suitable sowing date of summer maize hybrids based on effective accumulated temperature in growth period[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(17): 3632-3646. (in Chinese)
- [4] 钱春荣,王荣煊,于 洋,等. 生态区对不同熟期玉米品种生长发育与有效积温生产效率的影响[J]. 黑龙江农业科学,2020(9):1-8.
QIAN C R, WANG R H, YU Y, et al. Effects of ecological zone on growth and development and effective accumulated temperature production efficiency of maize varieties differing in maturity[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2020(9): 1-8. (in Chinese)
- [5] HE H, HU Q, LI R, et al. Regional gap in maize production, climate and resource utilization in China[J]. Field Crops Research, 2020, 254: 107830.
- [6] 陈 杨,徐孟泽,王玉红,等. 有效积温与不同供氮水平夏玉米干物质和氮素积累定量研究[J]. 中国农业科学,2022,55(15):2973-2987.
CHEN Y, XU M Z, WANG Y H, et al. Quantitative study on effective accumulated temperature and dry matter and nitrogen accumulation of summer maize under different nitrogen supply levels[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(15): 2973-2987. (in Chinese)
- [7] 李忠辉,郭春明,袁福香. 吉林西部春玉米的叶面积与有效积温的相关性[J]. 贵州农业科学,2018,46(1):130-132.
LI Z H, GUO C M, YUAN F X. Correlation between leaf area of spring maize and effective accumulated temperature in western Jilin province[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2018, 46(1): 130-132. (in Chinese)
- [8] 张书萍,王延波,赵海岩,等. 东北春玉米区温度条件与玉米生长发育及产量形成的量化分析[J]. 玉米科学,2022,30(3):54-62.
ZHANG S P, WANG Y B, ZHAO H Y, et al. Quantitative analysis of temperature conditions and maize growth and yield formation in spring maize region of northeast China[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(3): 54-62. (in Chinese)
- [9] 朱 艳,汤 亮,刘蕾蕾,等. 作物生长模型(CropGrow)研究进展[J]. 中国农业科学,2020,53(16):3235-3256.
ZHU Y, TANG L, LIU L L, et al. Research progress on the crop growth model crop grow[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(16): 3235-3256. (in Chinese)
- [10] 郑国清,段韶芬,阎书波,等. 玉米叶龄与器官发育模拟模型[J]. 玉米科学,2003,11(4):63-66.
ZHENG G Q, DUAN S F, YAN S B, et al. Simulation models of the development of leaf age and organs in maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2003, 11(4): 63-66. (in Chinese)
- [11] WARRINGTON I J, KANEMASU E T. Corn growth response to temperature and photo period I. Seedling emergence, tassel initiation, and anthesis[J]. Agronomy Journal, 1983, 75(5): 749-754.
- [12] 何维勋,曹永华. 玉米展开叶增加速率与温度和叶龄的关系[J]. 中国农业气象,1990(3):30-33,41.
HE W X, CAO Y H. The relationship between the rate of maize leaf expansion and temperature and leaf age[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1990(3): 30-33, 41. (in Chinese)
- [13] 陈祥兰,罗新兰,姚运生,等. 东北春玉米出苗至抽雄发育速率模拟方法的研究[J]. 沈阳农业大学学报,2011,42(2):136-141.
CHEN X L, LUO X L, YAO Y S. Simulation methods of development of spring maize from seeding to tassel stage in northeast china [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(2): 136-141. (in Chinese)

- [14] 栾青,郭建平,马雅丽,等.玉米叶面积指数估算通用模型[J].中国农业气象,2020,41(8):506-519.
LUAN Q, GUO J P, MA Y L, et al. A general model for estimating leaf area index of maize[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2020, 41(8): 506-519. (in Chinese)
- [15] 蔡甲冰,常宏芳,陈鹤,等.基于不同有效积温的玉米干物质积累量模拟[J].农业机械学报,2020,51(5):263-271.
CAI J B, CHANG H F, CHEN H, et al. Simulation of maize dry matter accumulation in normalized logistic model with different effective accumulated temperatures in field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural, 2020, 51(5): 263-271. (in Chinese)
- [16] 张军旗.有效积温数值在玉米选育生产上的修订与应用[J].现代农业科技,2017(10):190-191.
ZHANG J Q. Revision and application of effective accumulated temperature values in maize breeding and production[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2017(10): 190-191. (in Chinese)
- [17] 许海涛,冯晓曦,许波,等.夏玉米干物质生产、形态特征及光合特性对行株距变化的响应[J].江苏农业科学,2022,50(6):53-59.
XU H T, FENG X X, XU B, et al. Study on row and plant spacing change effects of dry matter production, morphological characteristics and photosynthetic characteristics of summer maize[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(6): 53-59. (in Chinese)
- [18] 李力,张祥星,郑睿,等.夏玉米光合特性及光响应曲线拟合[J].植物生态学报,2016,40(12):1310-1318.
LI L, ZHANG X X, ZHENG R, Photosynthetic characteristics and photosynthesis-light response curve models of summer maize[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(12): 1310-1318. (in Chinese)
- [19] 聂景芳,邓根云,李健.玉米叶的生长进程和积温的关系[J].北京农业科学,1983(3):16-20.
NIE J F, DENG G Y, LI J. The relationship between the growth process of corn leaves and accumulated temperature[J]. Beijing Agricultural Sciences, 1983(3): 16-20. (in Chinese)
- [20] 曹焕福.玉米株型性状的QTL定位及遗传分析[D].沈阳:沈阳农业大学,2023.
- [21] 段萌,张宝忠,魏征,等.不同施氮量对玉米器官形态指标的影响分析与定量模拟[J].农业机械学报,2022,53(10):284-292.
DUAN M, ZHANG B Z, WEI Z, et al. Effects of different nitrogen application rates on morphological indices of maize organs and quantitative simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural, 2022, 53(10): 284-292. (in Chinese)
- [22] 张旷野.玉米叶宽相关基因ZmLWI的精细定位和候选基因发掘[D].沈阳:沈阳农业大学,2021.
- [23] 郭书磊,鲁晓民,齐建双,等.利用RNA-Seq发掘玉米叶片形态建成相关的调控基因[J].中国农业科学,2020,53(1):1-17.
GUO S L, LU X M, QI J S, Explore regulatory genes related to maize leaf morphogenesis using RNA-Seq[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(1): 1-17. (in Chinese)
- [24] 魏湜.玉米生态基础[M].北京:中国农业出版社,2010.
- [25] 麻雪艳,周广胜.春玉米最大叶面积指数的确定方法及其应用[J].生态学报,2013,33(8):2596-2603.
MA X Y, ZHOU G S. Method of determining the maximum leaf area index of spring maize and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2596-2603.
- [26] 罗新兰,陈祥兰,姚运生,等.东北玉米叶面积指数动态模拟模型研究[J].江苏农业科学,2012,40(1):91-94.
LUO X L, CHEN X L, YAO Y S, et al. Research on dynamic simulation model of northeast maize leaf area index[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(1): 91-94. (in Chinese)
- [27] 王存凯,陈鹏飞,陶洪斌,等.玉米产量潜力及超高产物质积累途径优化分析方法[J].中国生态农业学报,2014,22(12):1414-1423.
WANG C K, CHEN P F, TAO H B, et al. Optimized FAO-AEZ model for estimation of maize yield potential and dry matter accumulation for super-high yield cultivation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(12): 1414-1423. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)