

# 半干旱农田生态系统春玉米 叶面积及叶生物量模拟的比较研究\*

王瑞军<sup>1</sup> 李世清<sup>1,2\*\*</sup> 王全九<sup>1</sup> 郑纪勇<sup>1</sup> 樊 军<sup>1</sup> 李生秀<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地  
农业国家重点实验室 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100)

**摘 要** 采用 Modified Logistic 模型、Log Normal 模型和 Modified Gaussian 模型, 分别对半干旱农田生态系统露地和覆膜春玉米叶面积及叶生物量动态变化进行了模拟研究。结果表明: 3 种模型均可用于模拟露地和覆膜春玉米全生育期叶面积及叶生物量的动态变化, 但模拟效果和精度有所不同, Modified Logistic 模型能够很好地模拟露地玉米叶面积及露地和覆膜玉米叶生物量的动态变化, 但对覆膜条件下叶面积动态变化的模拟效果较差; Log Normal 模型和 Modified Gaussian 模型能够很好地模拟露地和覆膜条件下春玉米叶面积和叶生物量的动态变化过程, 模拟值与实际观察值非常接近, 但 Log Normal 模型因其参数少和参数生物学意义明确, 更具适用性。Modified Logistic 模型已普遍应用于生物领域, 用以描述生物量的增长过程, 而 Log Normal 模型和 Modified Gaussian 模型是模拟叶面积和叶生物量动态变化的初次尝试, 为叶面积和叶生物量的动态变化模拟提供了可选途径。

**关键词** 生长模型 春玉米 叶面积 生物量 地膜覆盖

中图分类号: S343.1 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2008)01-0139-06

## Evaluation of simulation models of spring-maize leaf area and biomass in semiarid agro-ecosystems

WANG Rui-Jun<sup>1</sup>, LI Shi-Qing<sup>1,2</sup>, WANG Quan-Jiu<sup>1</sup>, ZHENG Ji-Yong<sup>1</sup>, FAN Jun<sup>1</sup>, LI Sheng-Xiu<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on Loess Plateau, Northwest A & F University, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;  
2. College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

**Abstract** By using the Modified Logistic, Log Normal and Modified Gaussian simulation models, dynamic changes in spring-maize leaf area and biomass in semiarid ecosystems under field and film mulching were evaluated. The results show that the models can simulate dynamic changes in spring-maize leaf area and biomass for both field and film mulching in the entire development stage. However, the effects and precisions of the simulations are different. The Modified Logistic model is suitable for leaf area and leaf biomass simulation under field planting, and only leaf biomass under film mulching, but not suitable for dynamic changes in leaf area under film mulching conditions. The Log Normal and Modified Gaussian models can commendably simulate dynamic changes in leaf area and leaf biomass under field planting and film mulching conditions; their predicted values are similar to observed values, but the Log Normal model is more useful because of its fewer parameters and specific biological meaning. Modified Logistic model has been widely applied to biological domain, which describes dynamic biomass processes. But Log Normal and Modified Gaussian models primarily simulate leaf area and leaf biomass, which offer optional approaches for simulating dynamic changes in leaf area and biomass.

**Key words** Growth model, Spring-maize, Leaf area, Biomass, Film mulching

(Received July 24, 2006; accepted Oct. 8, 2006)

\* 国家自然科学基金项目(30571116, 30230230)、中国科学院百人计划项目和西北农林科技大学创新团队项目资助

\*\* 通讯作者, E-mail: sqli@ms.iswc.ac.cn

王瑞军(1975~), 男, 硕士, 主要进行植物营养生理生态方面的研究工作。E-mail: ruijun\_wang@msn.com

收稿日期: 2006-07-24 接受日期: 2006-10-08

叶片是玉米形成同化产物的关键库,叶面积大小直接影响生物学和籽粒产量的高低。在玉米生长期叶面积大小不断发生变化,在分析叶面积时,应重点研究其动态变化规律,其原因是叶面积的消长动态变化对产量的影响比研究一个适宜的叶面积系数更为重要。叶面积大小和空间分布随生育期推进而改变<sup>[1]</sup>,其变化特征除受遗传特性决定外,还受栽培措施影响。春玉米叶面积变化大体上可分为缓慢增长期(出苗后至拔节)、快速增长期(拔节至抽雄吐丝)、相对平稳期(抽雄吐丝至乳熟)和衰退期(乳熟至蜡熟期)4个阶段:在第2个阶段叶面积增长最快,在吐丝期叶面积达最大值;在第3阶段叶面积相对稳定,后期略有下降;在第4阶段叶面积下降较快。玉米叶面积时段变化经历长短受栽培模式影响较明显,如覆膜后春玉米叶面积变化,特别在生长前期和后期的变化远比露地玉米剧烈,表现为前期增长快,后期下降也快,因此用过去常用的 Logistic 模型及其扩展模型、三次多项式模型<sup>[2-8]</sup>和指数模型<sup>[6]</sup>等难以较准确进行描述,需寻找和发展新的模型,以更具普遍性和同时适用于露地和覆膜处理玉米叶面积和叶生物量的变化。本文根据笔者所测春玉米叶面积和叶生物量,以 Modified Logistic 模型为对照,选择 Log Normal 模型和 Modified Gaussian 模型,建立描述露地和覆膜栽培条件下春玉米叶面积和叶生物量动态变化的曲线模型,研究结果对将 Log Normal 模型和 Modified Gaussian 模型用于叶面积和叶生物量的变化模拟具有一定科学意义。

## 1 研究区域概况与研究方法

田间试验于2004年4~9月在中国科学院水利部水土保持研究所陕北神木生态试验站进行,该地为中温带半干旱气候,年均气温8.4℃,月均最低气温-9.7℃(1月),最高气温23.7℃(7月),≥10℃年积温3232℃,年际年内降雨变化剧烈,冬春干旱少雨,夏秋多雨且多暴雨,年均降雨量437.4 mm,其中6~9月份降雨量占全年77.4%,年均蒸发量785.4 mm,干燥度为1.8,年无霜期169 d,地面温度(0 cm)年均11.4℃,7月最高,平均30.2℃,1月最低,平均-10.6℃,属典型半干旱地区(平均干燥度1.5~3.49),作物种植1年1熟。供试土壤为干湿砂质新成土(Ust-Sandiic Entisols),基本性质见表1。

露地与覆膜栽培均采用平畦,4月21日每小区灌底水40 mm,次日播种,覆膜小区播种后当天覆盖聚乙烯无色透明地膜。小区随机区组排列,小区面积25.0 m<sup>2</sup>(3.7 m×6.75 m),每公顷施

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量为12%的粒状过磷酸钙750 kg为底肥,氮肥用含N量46%的尿素,2种肥料均在播种前均匀撒施后,翻入0~20 cm土壤。以春玉米“陕单911”为供试作物,4月22日播种,5月15日间苗,9月14日收获,种植密度为6万株·hm<sup>-2</sup>,行距为0.5 m,株距0.33 m。全生育期分2次灌溉,拔节期(6月25日)灌30 mm/60 mm,灌浆初期(7月25日)灌50 mm/100 mm(低量/高量)。玉米出苗后大体上每隔15 d在不同生育期采取作物地上和地下部分(表2),地上部分又可分为不同器官,本论文主要涉及叶面积及叶生物量的测定结果。叶面积采用系数法计算,即单叶面积=叶片中脉长度(cm)×叶片最大宽度(cm)×系数(0.75)。文中的叶面积均指具有光合能力的绿叶面积,生物量指所有叶片(包括衰老叶片)干重。

表1 供试土壤的基本性质  
Tab. 1 Basic properties of experimental soil

土层 Layer (cm)	全氮 Total N (g·kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg·kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质 Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )
0~20	0.43	8.97	10.01	5.2
20~40	0.41	7.27	4.88	4.6
40~60	0.26	6.91	3.54	3.1
60~80	0.23	7.14	2.29	2.5
80~100	0.20	7.13	1.79	2.3

本研究根据实际试验情况选用符合叶片动态变化趋势的3种数学模型,即修正的逻辑斯谛(Logistic)模型、对数正态(Log Normal)模型和修正的高斯(Modified Gaussian)模型。经典的 Logistic 模型很好地符合抽雄吐丝前叶面积的曲线变化,不符合后期变化规律,必须经过修正才可用于叶面积变化的动态模拟。王信理<sup>[4]</sup>对此提出了修正模型,林忠辉和王玲等<sup>[5,6]</sup>将修改后的模型应用于叶面积指数动态变化模拟,均获得了很好的拟合效果。本文亦选用 Logistic 修正模型对叶面积动态变化进行了模拟,模型见方程1,其中 $y$ 表示叶面积, $x$ 表示播种后的天数, $y_0$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 表示待定参数。使用计算机软件 DPS3.11,采用麦夸特法拟合方程。

3参数的 Log Normal 单峰曲线模型见方程2。模型中 $a$ 、 $b$ 、 $x_0$ 为待定参数,其中参数 $a$ 表示叶面积或叶干重最大值, $x_0$ 表示叶面积或叶干重达到最大值时播种后的天数。参数 $a$ 与 $x_0$ 的意义推导如下:方程2右式的指数为负值,因此指数有最大值0,指数幂有最大值1。即 $\ln(x/x_0)=0$ 时,方程有最大值 $a$ ,也就是当 $x=x_0$ 时, $y$ 的最大值为 $a$ 。同理,方程4

同样在  $x = x_0$  时,  $y$  的最大值为  $a$ 。

由德国数学家 Gaussian 建立的 3 参数单峰曲线模型见方程 3, 经修正后变为 4 参数单峰曲线模型, 即 Modified Gaussian 模型(方程 4)。模型中  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $x_0$  为待定参数, 其中参数  $a$  表示叶面积或叶干重最大值,  $x_0$  表示叶面积或叶干重达到最大值时播种后的天数。这两个模型均用计算机软件 Sigma-plot 9.0 模拟。

$$y = \frac{y_0}{1 + e^{(a+bx+cx^2)}} \quad (1)$$

$$y = ae^{\left[-0.5\left(\frac{\ln(\frac{x}{x_0})}{b}\right)^2\right]} \quad (2)$$

$$y = ae^{\left[-0.5\left(\frac{x-x_0}{b}\right)^2\right]} \quad (3)$$

$$y = ae^{\left[-0.5\left(\frac{x-x_0}{b}\right)^2\right]} \quad (4)$$

## 2 结果与分析

观测结果表明(表 2), 覆膜能促进早出苗(观察发现覆膜比露地早出苗 8 d)和苗期生长。覆膜与露地春玉米生育期存在明显差异: 覆膜后生育期特别是生长前期和中期显著提前; 地膜覆盖虽然使作物提早出苗, 生育进程提前<sup>[9]</sup>, 但同时因覆膜后作物生长前期土壤水分和养分耗竭严重, 后期会出现严重的脱水、脱肥现象<sup>[9,10]</sup>, 从而导致叶片早衰, 使覆膜作物叶面积和叶生物量的动态变化过程与露地栽培间存在一定差异, 两者的模拟模型及其参数也会产生差别。

表 2 覆膜对春玉米生育期的影响

Tab. 2 Effects of film mulching on growth period of spring maize

项目 Item	日期(月-日) Date(month-day)										
	04-22	04-30	05-07	05-22	06-06	06-22	07-06	07-21	08-05	08-22	09-03
播种后天数 Days after sowing(d)	0	8	15	30	45	61	75	90	105	122	134
露地栽培 Field planting	播种	—	出苗	4 叶	8 叶	12 叶 拔节期	14 叶 拔节期	开花 吐丝	灌浆初期	乳熟期	蜡熟期
覆膜栽培 Film mulching planting	播种覆膜	出苗	2 叶	6 叶	10 叶 拔节初期	14 叶 拔节期	15 叶 抽雄初期	灌浆初期	灌浆期	乳熟期	蜡熟期

### 2.1 Modified Logistic 模型的应用

利用 Modified Logistic 模型模拟露地和覆膜条件下春玉米叶面积的动态变化(表 3), 获得的模拟方程见方程 5 和方程 6。露地模拟方程的  $R^2$  为 0.998 7 ( $P < 0.000 1$ ), 覆膜模拟方程的  $R^2$  为 0.969 7 ( $P = 0.001 7$ ), 在露地和覆膜条件下其方程均达极显著水

平, 说明在两种情况下的方程均具一定应用价值, 并且露地模拟方程拟合效果优于覆膜方程。

$$y = \frac{46\,416.872\,2}{1 + e^{(17.115\,8 - 0.389\,427x + 0.001\,947x^2)}} \quad (5)$$

$$y = \frac{42\,015.754\,4}{1 + e^{(16.280\,1 - 0.414\,344x + 0.002\,228x^2)}} \quad (6)$$

表 3 Modified Logistic 模型春玉米叶面积拟合结果

Tab. 3 Simulated results of Modified Logistic in spring maize leaf area

参数 Parameter	露地栽培 Field planting			覆膜栽培 Film mulching planting		
	参数值 Parameter value	SE	P	参数值 Parameter value	SE	P
$y_0$	46 416.87	1 845.32	0.000 01	42 015.75	4 393.73	0.000 7
$a$	17.115 8	1.690 5	0.000 5	16.280 1	5.048 3	0.032 1
$b$	-0.389 4	0.040 8	0.000 7	-0.414 3	0.130 6	0.033 8
$c$	0.002 0	0.000 2	0.000 7	0.002 2	0.000 7	0.033 0

Modified Logistic 模拟的露地和覆膜春玉米叶面积拟合值与实测值的对比分别见图 1a 和图 1b。由图 1 可知, 在露地栽培条件下, 春玉米全生育期方程拟合值与实际结果吻合程度很高; 但覆膜栽培对春玉米生长发育, 特别是对叶面积变化有极显著影响, 表现为在生长发育中后期覆膜春玉米叶面积

变化较露地剧烈, 且达到最大叶面积后稳定期较短, 因此拟合值与实测结果相差较大, 拟合的最大叶面积值比实际值小。用 Modified Logistic 模型拟合露地和覆膜春玉米叶生物量动态变化过程其结果分别见表 4、图 2a 和图 2b。露地和覆膜栽培春玉米叶干物质累积动态拟合方程的  $R^2$  分别为 0.9951

和 0.9913, 方程均达极显著水平 ( $P < 0.001$ ), 表明无论覆膜与否均可用此方程模拟叶干重的动态变化过程, 且露地栽培模拟效果优于覆膜栽培。但总

体上看, 用 Modified Logistic 模型对露地与覆膜栽培条件下, 特别是在覆膜条件下对叶生物量的模拟效果优于对叶面积的模拟效果。

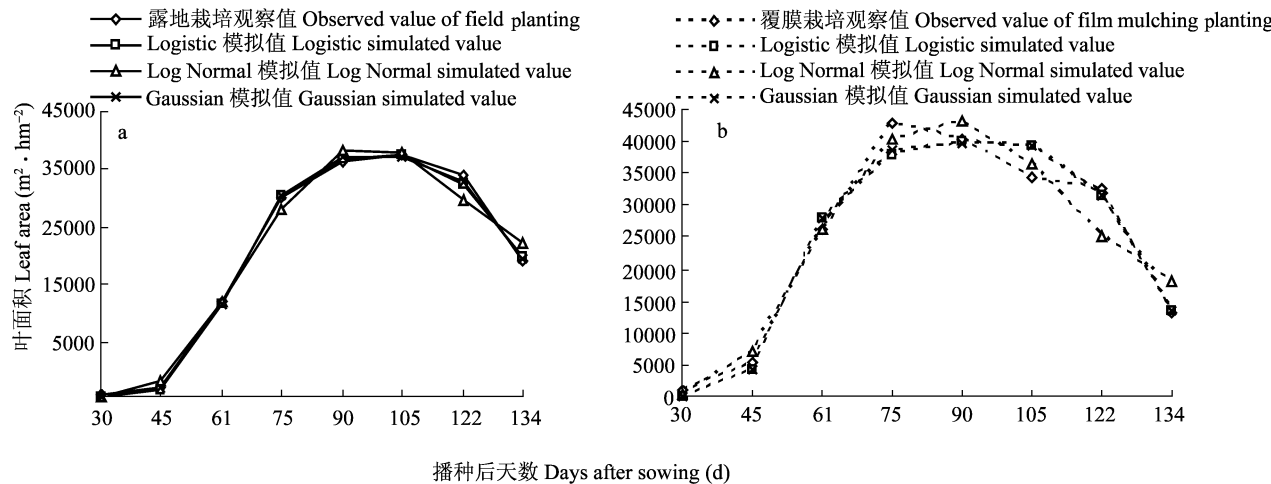


图 1 露地和覆膜栽培春玉米叶面积 3 模型模拟值与实测值比较

Fig. 1 Comparison between the simulated and the observed values of the three models of spring maize leaf area for field and film mulching planting

表 4 Modified Logistic 模型春玉米叶生物量拟合结果

Tab. 4 Simulated results of Modified Logistic in spring maize leaf biomass

参数 Parameter	露地栽培 Field planting			覆膜栽培 Film mulching planting		
	参数值 Parameter value	SE	P	参数值 Parameter value	SE	P
$\gamma_0$	4 179.41	209.302 0	0.000 04	4 156.07	192.543 6	0.000 03
$a$	18.253 1	3.132 2	0.004 3	15.021 3	3.384 3	0.011 4
$b$	-0.392 7	0.070 9	0.005 2	-0.361 4	0.083 1	0.012 2
$c$	0.001 8	0.000 3	0.006 3	0.001 8	0.000 4	0.014 2

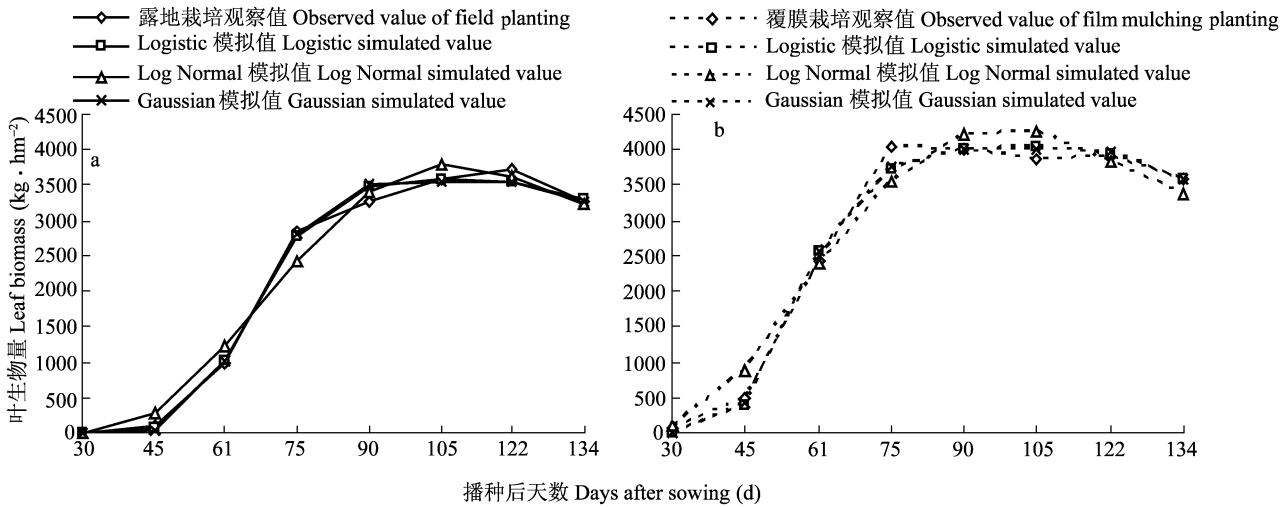


图 2 露地和覆膜栽培春玉米叶生物量 3 模型模拟值与实测值比较

Fig. 2 Comparison between the simulated and the observed values of the three models of spring maize leaf biomass for field and film mulching planting

## 2.2 Log Normal 模型的应用

春玉米叶面积动态呈典型的 S 型曲线,因其变化与 Log Normal 模型规律相似,将 Log Normal 模型引入春玉米叶面积的模拟研究,模拟结果见表 5。露地

春玉米叶面积模拟方程的  $R^2$  为 0.981 8 ( $P < 0.000 1$ ),覆膜春玉米叶面积模拟方程的  $R^2$  为 0.943 8 ( $P = 0.000 7$ ),方程均达极显著水平,各参数也均达显著水平,说明该模型可用于叶面积动态变化模拟。

表 5 Log Normal 模型春玉米叶面积拟合结果

Tab. 5 Simulated results of Log Normal in spring maize leaf area

参数 Parameter	露地栽培 Field planting			覆膜栽培 Film mulching planting		
	参数值 Parameter value	SE	P	参数值 Parameter value	SE	P
$a$	44 201.76	1 891.64	<0.000 1	43 714.21	3 132.98	<0.000 1
$b$	0.328 9	0.022 5	<0.000 1	0.336 4	0.033 6	0.000 2
$x_0$	96.535 8	1.683 3	<0.000 1	85.577 0	2.452 8	<0.000 1

Log Normal 模型的参数  $a$  可直接反映春玉米叶面积的预测峰值, $x_0$  可反映预测到达峰值的时间,并具有参数较少的特点。Log Normal 模型拟合春玉米叶面积值与实测值的对比见图 1。由图 1 可知,在露地和覆膜栽培条件下,Log Normal 模型均可较好地拟合叶面积动态,特别是符合覆膜春玉米叶面积的变化趋势,拟合的峰值与实测值吻合较好,整体模拟效果优于 Modified Logistic 模型,说明 Log Normal 模型在模拟玉米叶面积和生物量变化方面具有较好的应用前景。

Log Normal 模型拟合露地和覆膜春玉米叶生物量动态变化分别见表 6、图 2a 和图 2b。结果表明,在露地和覆膜条件下拟合结果均很好, $R^2$  分别为 0.979 0 和 0.965 1,方程均达极显著水平 ( $P < 0.001$ ),各参数也达极显著水平。与对叶面积的模拟效果相同,无论在覆膜条件下,还是在露地条件下,用 Log Normal 的模拟结果与实测结果非常吻合,同样说明 Log Normal 模型在模拟玉米叶生物量变化方面也具有一定应用前景。

表 6 Log Normal 模型春玉米叶生物量拟合结果

Tab. 6 Simulated results of Log Normal in spring maize leaf biomass

参数 Parameter	露地栽培 Field planting			覆膜栽培 Film mulching planting		
	参数值 Parameter value	SE	P	参数值 Parameter value	SE	P
$a$	4 240.464 4	189.781 5	<0.000 1	4 295.666 6	220.579 1	<0.000 1
$b$	0.379 1	0.039 0	0.000 2	0.443 1	0.048 4	0.000 3
$x_0$	107.790 5	3.547 4	<0.000 1	98.681 1	3.723 0	<0.000 1

## 2.3 Modified Gaussian 模型的应用

与实测结果比较发现,Modified Gaussian 模型也符合叶面积变化规律。本文尝试利用这一模型模拟春玉米叶面积的变化动态,模拟结果见表 7。结果表明,露地春玉米叶面积模拟方程的  $R^2$  为

0.999 2 ( $P < 0.000 1$ ),覆膜春玉米叶面积模拟方程的  $R^2$  为 0.971 6 ( $P = 0.001 5$ ),方程均达极显著水平,各参数也均达极显著水平,说明该模型可用于对叶面积动态变化的模拟。

表 7 Modified Gaussian 模型春玉米叶面积拟合结果

Tab. 7 Simulated results of Modified Gaussian in spring maize leaf area

参数 Parameter	露地栽培 Field planting			覆膜栽培 Film mulching planting		
	参数值 Parameter value	SE	P	参数值 Parameter value	SE	P
$a$	41 979.95	468.387 1	<0.000 1	39 531.22	2 262.268	<0.000 1
$b$	33.030 5	0.396 3	<0.000 1	34.624 1	1.977 4	<0.000 1
$c$	3.699 2	0.206 9	<0.000 1	4.534 9	1.138 1	0.016 3
$x_0$	100.150 4	0.295 6	<0.000 1	93.031 3	1.415 9	<0.000 1



Modified Gaussian 模型同样具有模拟春玉米叶面积的实用性,各参数意义明显,但局限性是参数较多。由参数可知,在播种之后  $x_0$  天春玉米叶面积达最大值  $a$ ,如在播种后第 93 d 覆膜春玉米叶面积达最大值  $39\ 531.22\ \text{m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,比露地提前 7 d 达到叶面积最大值。模型拟合曲线与实测值的对比分别见图 1a 和图 1b。在与 Modified Logistic 和 Log Normal 拟合曲线比较后发现,露地栽培条件下 Modified Gaussian 模型与 Modified Logistic 模型和 Log Normal 模型的模拟效果相当,曲线变化趋势极为相似,说明对露地玉米,这 3 个模型在模拟叶面积动态方面的功能相近;在覆膜栽培条件下,Log Normal 模型和 Modified Gaussian 模型

的模拟效果远远优于 Modified Logistic 模型,因此 Log Normal 模型和 Modified Gaussian 模型在应用上更具普遍性。

Modified Gaussian 模型拟合露地和覆膜春玉米叶生物量动态变化的结果分别见表 8、图 2a 和图 2b。露地与覆膜栽培拟合方程的  $R^2$  分别为 0.993 9 和 0.993 5,方程均达极显著水平 ( $P < 0.001$ )。表明无论覆膜与否,Modified Gaussian 模型可以模拟叶干重的动态变化过程。Modified Gaussian 模型对叶片生物量变化的模拟与对叶面积变化的模拟效果相同。通过 3 种模型对叶片生物量的模拟结果比较发现,3 种模型均能很好地模拟叶片生物量的动态变化,这与对叶面积的模拟有所不同。

表 8 Modified Gaussian 模型春玉米叶生物量拟合结果

Tab. 8 Simulated results of Modified Gaussian in spring maize leaf biomass

参数 Parameter	露地栽培 Field planting			覆膜栽培 Film mulching planting		
	参数值 Parameter value	SE	P	参数值 Parameter value	SE	P
$a$	3 963.064 9	114.906 7	<0.000 1	4 003.790 0	100.369 3	<0.000 1
$b$	38.421 5	2.215 8	<0.000 1	42.496 4	1.831 4	<0.000 1
$c$	4.682 1	0.768 9	0.003 7	4.954 3	0.662 5	0.001 7
$x_0$	107.842 7	2.097 9	<0.000 1	102.595 9	1.710 1	<0.000 1

### 3 小 结

Modified Logistic 模型能很好模拟露地玉米叶面积及露地和覆膜玉米叶生物量动态变化,但对覆膜栽培条件下叶面积动态变化的模拟效果较差。

Log Normal 模型和 Modified Gaussian 模型能很好地模拟露地和覆膜栽培条件下春玉米叶面积和叶生物量的动态变化过程,模拟值和实际观察值非常接近,但因 Log Normal 模型参数少和参数生物学意义明确,更具适用性。

Log Normal 模型和 Modified Gaussian 模型在模拟叶面积和叶生物量动态变化中是初次尝试,为模拟叶面积动态变化提供了可选途径。

### 参考文献

- [1] 于强,傅抱璞,姚克敏. 水稻叶面积指数的普适增长模型[J]. 中国农业气象,1995,16(2):6-8
- [2] 王寿松. 单种群生长的广义 Logistic 模型[J]. 生物数学学报,1990,5(1):21-25
- [3] Darroch B. A., Baker R. J. Grain filling in three spring wheat genotypes: Statistical analysis[J]. Crop Sci., 1995, 30(3):525-529
- [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]. 农业气象,1986,7(1):14-19
- [5] 王玲,谢德体,刘海隆,等. 玉米叶面积指数的普适增长模型[J]. 西南农业大学学报,2004,26(3):303-306, 311
- [6] 林忠辉,项月琴,莫兴国,等. 夏玉米叶面积指数增长模型的研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(4):69-72
- [7] 陈集贤. 青海高原春小麦生态[M]. 北京:科学出版社,1994
- [8] Gebeyehou G. Rate and duration of grain filling in durum wheat cultivars[J]. Crop Sci., 1982,22(2):337-340
- [9] Li F. M., Guo A. H., Wei H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat[J]. Field Crops Res., 1999,63(1):79-86
- [10] Zaongo C. G. L., Wendt C. W., Lascano R. J., et al. Interactions of water, mulch and nitrogen on sorghum in Niger[J]. Plant and Soil, 1997,197(1):119-126