

文章编号: 1005-0906(2005)01-0119-04

# 基于气象因子的玉米生长模型拟合研究

王道波,张广录

(中国科学院农业资源研究中心,石家庄 050021)

**摘要:** 选取玉米的地上部鲜重作为玉米生物量的指标,通过相关分析,发现玉米生物量的积累与积温、日均水气压、相对湿度、蒸发量、日照时数、降水量的相关性都达到了 0.01 显著水平。然后分别以这些气象因子为自变量,对玉米的生物量进行 logistic 方程拟合分析,定量地表述了玉米生长与主要气象因子之间的关系。最后采用多元微分回归方程,将各个气象因子对玉米生长的共同作用进行研究,拟合结果较好地表达了玉米生长与气象因子之间的关系。

**关键词:** 玉米;气象因子;多元回归;生长模型;logistic 方程

**中图分类号:** S162.5;S513

**文献标识码:** A

## Meteorological Factors-based Corn Grow Simulation Model Research

WANG Dao-bo, ZHANG Guang-lu

*(The Research Central of Agriculture Resource, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China)*

**Abstract:** In this paper, we chose corn's up ground weight as the index of Biomass. Through the correlation analysis, we found that the accumulation of corn biomass is related with temperature, hydrosphere press, relative humidity, vaporization, sunlight and precipitation. After that, we thought these meteorological factors as independent variable, and regress analysis the corn biomass by logistic model. The regress model expresses quantificational the relationship between corn growth and every meteorological factor. At last, by the help of muti-variables regression, we searched the relationship between corn growth and all meteorological factors. The result successfully expresses their relationship.

**Key words:** Corn; Meteorological factors; Muti-variable regression; Muti-factors growth model; Logistic model

在同一个地区,影响玉米生长的主要因素有人为因素(玉米品种的选择、施肥、灌溉、田间管理等技术)、土壤因素和气象因素。人为因素是可以控制的,土壤肥力相对稳定,而影响玉米生长的气象因素变化大。不同地区玉米的生长状况差异很大程度上与气象因素有关,而农业气象因子是多方面的<sup>[1]</sup>。为此,本文根据中国科学院栾城农田生态系统实验站的玉米生物量积累情况及每天气象资料定位观测的结果,对玉米的生长全过程进行数据采集,并选择合

理的区间进行模拟。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区选取

太行山山前平原地区土地肥沃,玉米长势好,产量高,是华北地区乃至全国玉米高产地区之一。本文依托中国科学院栾城农田生态系统实验站,将研究区选在石家庄市东南,栾城县东部偏北,属于华北平原典型代表区,肥力中等,栽培管理水平一致。试验区面积为 25 km<sup>2</sup>。

### 1.2 调查方法和内容

在研究区内均匀布设 5 个调查样方,样方大小 667 m<sup>2</sup>,每个样方内均匀选取 5 棵长势相对平均的玉米植株。该地区为小麦套种玉米,等小麦收获以后,玉米已经部分出苗。根据本地物候及其玉米生长实际,玉米的调查从 6 月 28 日苗期开始,至玉米收获前结束,每 5 天调查一次生育期及地上部鲜重(在

收稿日期: 2004-04-30; 修回日期: 2004-11-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-313-03-02)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-SW-317-03-01)和中国科学院农业资源研究中心创新方向性项目(华北平原农业节水宏观调控对策研究)共同资助

作者简介: 王道波(1978-),江苏灌云人,理学硕士,主要从事 3S 和数学模型在农业和生态环境方面的应用研究工作。

Tel: 0311-5871747

张广录为本文通讯作者, E-mail: glzhang@ms.sjziam.ac.cn

大田就地测量),如遇阴雨,则推迟一天。取平均单株重为当次玉米的生物量。

农业气象资料的采集借助中国科学院栾城农田生态系统实验站的观测点。主要的气象指标在8~20点每2h观测一次,其它时间每4h观测一次。取温度、水气压和相对湿度的数学期望值为该天的记录值;降水量、水面蒸发量和日照时数为观测数据之和。

### 1.3 研究方法

因为生物量为累加值,为了便于分析生物量与气象因子之间的关系,将气象因子依次叠加,对叠加后的数据进行分析。同时,为了减少不同数据单位引起的差异,首先对数据进行极大值变换预处理,即各个数据同除以该类数据的极大值。

#### 1.3.1 单因素植物生长模型

在自然条件下,植物的增长率随着影响因素的变化而改变,经典的植物生长模型为logistic方程,本文对该方程进行改进。由于数据进行了极大值变换处理,所以生长极限K为1。则植物的生物量增长率p的方程为:

$$\frac{dp}{dt} = rp(1-p) \quad (1)$$

其中:t为某一气象要素,p(t<sub>0</sub>)=p<sub>0</sub>,t<sub>0</sub>为该气象要素的初始值,p<sub>0</sub>为t<sub>0</sub>对应植物的生物量比率<sup>[2-4]</sup>。

解方程(1),求出p的方程为:

$$p = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{p_0} - 1\right)e^{-r(t-t_0)}} \quad (2)$$

令:a=rt<sub>0</sub>+ln(1/p<sub>0</sub>-1),b=-r,则模型(2)可以转化为:

$$p = \frac{1}{1 + e^{a+tb}} \quad (3)$$

对于模型(3),通常转化为ln(1/p-1)=a+tb,令p<sub>1</sub>=ln(1/p-1),便可利用最小二乘法对其进行回归,求出参数a和b。若生长极限为P<sub>sup</sub>,则单因素生长模型为:

$$p = \frac{P_{sup}}{1 + e^{\frac{a+t}{l_{sup}} - b}} \quad (4)$$

对于生物量生长率的模型(1)及其求导并结合模型(4),可知当t=-a/b,p=0.5时,相对生长率取得极大值-a/4<sup>[5-6]</sup>。

#### 1.3.2 多因素植物生长模型

在实际情况下,植物生长不仅仅是受单一因素控制的,而是多种因子共同作用的结果。本文假设各气象因子之间相互独立,采用多元回归和logistic方程相集成的方法来加以实现。

对于生长率模型(1),若T为多因素组成的n维行向量,则B为系数矩阵(n维列向量)。同样的道理,可以解出多因素生长模型为:

$$p = \frac{1}{1 + e^{a+TB}} \quad (5)$$

令:p<sub>1</sub>=ln(1/p-1),利用最小二乘法进行多元回归计算,求出参数a和b。则多因素生长模型为:

$$p = \frac{P_{sup}}{1 + e^{a+(T \oplus T_{sup})B}} \quad (6)$$

T⊕T<sub>sup</sub>是一种矩阵运算,它表示对应两个矩阵对应的元素相除。

用T<sub>i</sub>表示第i个气象要素,对于该要素,植物生长率为:dp/dt<sub>i</sub>=r<sub>i</sub>p(1-p),该模型与单因素的生长模型相一致。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验结果及其预处理

试验区玉米为2003年6月15日播种,20日基本出苗,7月8日左右开始拔节,7月29日左右进入大喇叭口期,8月3日左右开始抽穗,8月8日左右进入开花期,8月13日盛花期,8月18日开始灌浆,9月19日左右进入蜡熟期,9月22日收获。生育期100d左右。根据观测,玉米的地上部生物量在9月8日左右达到极大值(表1)。

表1 玉米生物量值及主要农业气象指标

日期 (月·日)	生物量 (g)	积温 (°C·d)	水气压 (pa)	相对湿度 (%)	蒸发量 (mm)	日照时数 (h)	降水量 (mm)
6·28	33.11	152.125	174.125	513.25	83.90	56.9	4.6
7·03	118.60	225.675	274.450	841.00	110.73	74.1	7.5
7·08	346.58	300.875	382.725	1194.75	135.53	104.0	32.2
7·13	760.04	374.100	489.500	1547.00	161.63	128.3	33.6
7·18	1417.42	439.325	609.500	1976.25	177.83	134.1	35.3
7·23	2106.86	516.675	745.700	2398.25	199.93	138.7	48.4
7·29	2914.30	621.475	934.525	2915.75	222.43	158.4	84.3
8·03	3452.38	700.995	1078.775	3350.25	238.63	162.5	182.4
8·08	3950.32	781.395	1218.250	3768.00	259.93	189.1	198.4
8·13	4514.55	854.795	1337.750	4156.25	286.43	217.6	201.9
8·18	4992.51	915.320	1448.900	4578.00	309.13	245.5	206.3

续表 1

日期 (月·日)	生物量 (g)	积温 (°C·d)	水气压 (pa)	相对湿度 (%)	蒸发量 (mm)	日照时数 (h)	降水量 (mm)
8·23	5 335.82	991.320	1 584.600	5 003.25	327.43	257.5	241.7
8·28	5 559.18	1 057.520	1 708.575	5 439.75	343.63	267.4	256.4
9·03	5 842.76	1 114.295	1 819.175	5 931.25	361.43	279.5	261.6
9·08	5 945.94	1 169.700	1 928.800	6 277.50	376.53	289.3	266.7
9·13	5 843.20	1 224.320	2 020.300	6 654.50	402.03	332.1	266.7
9·19	5 699.86	1 292.670	2 147.125	7 151.00	420.63	338.1	280.3

注:各个日期对应的数据为该指标从6月20日起的数据累加值。玉米的生物学零度为10℃,所以积温为大于10℃的温度。

## 2.2 相关分析

本文主要研究玉米生长模型,研究区间选择在6月20日至9月8日。通过相关分析模型,分别求玉米地上部生物量与各气象因子的相关性(表2)。

表2 玉米生物量与各气象因子之间的相关性

气象因子	积温	水气压	相对湿度	蒸发量	日照时数	降水量
相关系数	0.994 0	0.993 7	0.989 8	0.989 7	0.978 6	0.977 5

查表可知,当自由度为 $n-2=13$ ,1%显著水平相关系数的显著值为0.641<sup>[7]</sup>。所以本文选取的气象因子与玉米生长呈显著的正相关,其相关性依次为:积温、水气压、相对湿度、蒸发量、日照时数和降水量。

## 2.3 单因素植物生长模型模拟

### 2.3.1 积温与玉米生物量积累模型模拟

根据表1数据及其植物生长模型(3),可以得出: $a=5.365 9$ , $b=-9.338 8$ 。其中 $R^2=0.962 9$ ,达到极显著水平 $[R(f=n-1=14,0.01)=0.623]^{[7]}$ 。带入模型(4),可知玉米关于积温的生物量积累模型为:

$$p = \frac{5\,945.94}{1 + e^{5.365\,9 - 0.007\,984t_1}} \quad (R^2=0.962\,9)$$

生物量生长变化率为: $dp=9.338\,8p(1-p)dt$ 。当积温达到 $672.09^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 时,即7月31日到8月1日左右,玉米的相对生长率达到最大值2.334 7。

### 2.3.2 水气压与玉米生物量积累模型模拟

根据表1数据及其植物生长模型(3),可以得出: $a=4.733 2$ , $b=-8.852 2$ 。其中 $R^2=0.953 5$ ,达到极显著水平 $[R(f=n-1=14,0.01)=0.623]^{[7]}$ 。带入模型(4),可知玉米关于水气压的生物量积累模型为:

$$p = \frac{5\,945.94}{1 + e^{4.733\,2 - 0.004\,589t_2}} \quad (R^2=0.953\,5)$$

生物量生长变化率为: $dp=8.852\,2p(1-p)dt$ 。当水气压累积达到1 031.31时,即8月1日到8月2日左右,玉米的相对生长率达到最大值2.213 05。

### 2.3.3 相对湿度与玉米生物量积累模型模拟

根据表1数据及其植物生长模型(3),可以得出: $a=4.683 7$ , $b=-9.020 7$ 。其中 $R^2=0.958 7$ ,达到极显著水平 $[R(f=n-1=14,0.01)=0.623]^{[7]}$ 。带入模型(4),可知

玉米关于相对湿度的生物量积累模型为:

$$p = \frac{5\,945.94}{1 + e^{4.683\,7 - 0.001\,437t_3}} \quad (R^2=0.958\,7)$$

生物量生长变化率为: $dp=9.020\,7p(1-p)dt$ 。当相对湿度累积达到3 259.38时,即8月1日到8月2日左右,玉米的相对生长率达到最大值2.255 175。

### 2.3.4 蒸发量与玉米生物量积累模型模拟

根据表1数据及其植物生长模型(3),可以得出: $a=6.814 2$ , $b=-10.821$ 。其中 $R^2=0.973 7$ ,达到极显著水平 $[R(f=n-1=14,0.01)=0.623]^{[7]}$ 。带入模型(4),可知玉米关于蒸发量的生物量积累模型为:

$$p = \frac{5\,945.94}{1 + e^{6.814\,2 - 0.028\,74t_4}} \quad (R^2=0.973\,7)$$

生物量生长变化率为: $dp=10.821p(1-p)dt$ 。当蒸发量累积达到237.11时,即8月2日到8月3日左右,玉米的相对生长率达到最大值2.705 25。

### 2.3.5 日照时数与玉米生物量积累模型模拟

根据表1数据及其植物生长模型(3),可以得出: $a=6.230 4$ , $b=-10.107$ 。其中 $R^2=0.949 5$ ,达到极显著水平 $[R(f=n-1=14,0.01)=0.623]^{[7]}$ 。带入模型(4),可知玉米关于日照时数的生物量积累模型为:

$$p = \frac{5\,945.94}{1 + e^{6.230\,4 - 0.034\,94t_5}} \quad (R^2=0.949\,5)$$

生物量生长变化率为: $dp=10.107p(1-p)dt$ 。当日照时数累积达到178.34时,即8月5日到8月6日左右,玉米的相对生长率达到最大值2.526 75。

### 2.3.6 降水量与玉米生物量积累模型模拟

根据表1数据及其植物生长模型(3),可以得出: $a=3.252 7$ , $b=-6.336 5$ 。其中 $R^2=0.849 7$ ,达到极显著水平 $[R(f=n-1=14,0.01)=0.623]^{[7]}$ 。带入模型(4),可知玉米关于降水量的生物量积累模型为:

$$p = \frac{5\,945.94}{1 + e^{3.252\,7 - 0.023\,76t_6}} \quad (R^2=0.849\,7)$$

生物量生长变化率为: $dp=6.336\,5p(1-p)dt$ 。当降水量累积达到136.90时,即7月31日左右,玉米的相对生长率达到最大值1.584 125。

根据以上植物生长模型模拟研究发现,玉米在

7月31日至8月6日左右,即大喇叭口期—抽穗期—开花期,各种主要气象因子对玉米生物量积累的变化率相继达到最大值。此时玉米生长快,对光、温、水等需求较多,如遇天气晴朗、气温较高,加以适当的灌溉,可以有效的促进玉米的生长发育,为玉米的高产奠定基础。

#### 2.4 多因素植物生长模型模拟

根据表1数据及其多因素植物生长模型(5),可以得出: $a=6.6046, b=[-91.9550, 107.2627, -47.9002, 18.5943, 2.8281, 0.5978]$ 。其中 $R^2=0.9974$ ,达到显著水平。代入模型(6),可以求出多因素植物生长模型:

$$P = \frac{5.945.94}{1 + e^{6.6046 - 0.007861t_1 + 0.055611t_2 - 0.00763t_3 + 0.04938t_4 + 0.009776t_5 + 0.002241t_6}} \quad (7)$$

( $R^2=0.9974$ )

气象因子随着时间的推移,产生相应的变化。根据表1,以时间为自变量,主要气象因子为因变量,进行线性回归(表3)。

表3 主要气象因子随时间变化线性回归

气象因子	线性回归方程	$R^2$
积温	$y=14.561X+29.665$	0.9972**
$\Sigma$ 水气压	$y=25.382X-86.392$	0.9978**
$\Sigma$ 相对湿度	$y=82.033X-343.6$	0.9993**
$\Sigma$ 蒸发量	$y=4.0679X+57.704$	0.9964**
$\Sigma$ 日照时数	$y=3.2715X+33.847$	0.9826**
$\Sigma$ 降水量	$y=4.3406X-56.749$	0.9344**

注: $R(f=n-1=14, 0.01)=0.623$ ,以上线性回归达到了显著水平。

对多因素植物生长模型(7)求一阶导数和二阶导数,当 $p''=0, p'>0$ 时取得极大值。此时, $X=44.18635$ ,即8月2~3日左右,玉米的相对生长率达到最大值。7月28日到8月10日左右,玉米增长迅速,产量积累迅速。

经比较,采用多因素植物生长模型模拟的精度比直接利用气象因素模拟的精度高<sup>[8-10]</sup>。

### 3 结论与讨论

(1)通过相关性分析,发现即使在水资源缺乏的华北平原地区,玉米生物量的积累与积温的相关性仍然最大,达到0.9940,可见温度对玉米的正常生长发育起到关键性的作用<sup>[5-6]</sup>。降水对玉米生物量积累的相关系数为0.9775,如果某年降水偏少,为了保证玉米的正常生长发育,应该适时适量的灌溉,尤其在玉米生长率较大时期。

(2)根据模型模拟可知,当玉米由营养生长转化为生殖生长时,即大喇叭口期—抽穗期—开花期,玉米对各种气象因子的需求达到最大,尤其对水分的

需求达到临界期。本文的模型模拟结果与农业生产实际相一致。如果条件许可,此时适当的灌溉有助于玉米发育,为玉米的高产稳产奠定坚实的基础。

(3)根据模型模拟可知,从6月20日玉米出苗到7月8日玉米拔节开始,玉米生物量的增加缓慢;从7月8日到8月2日玉米的抽穗期玉米生物量积累迅速,并且增长率逐渐增加,并在8月2日左右达到最大值;从8月2~23日玉米的灌浆期,玉米生物量积累迅速,增长率逐渐降低;8月23日到9月8日玉米收获,玉米的生物量积累缓慢,以后便维持在该水平。其结果基本上与玉米的生长情况一致,只是9月8日以后,玉米逐渐衰老,部分营养和水分开始转移到果实,叶片和秸秆开始失水。由此可见,生长模型只适用于植物的正常生长发育阶段,衰老、病虫害或人为破坏情况时还需要对模型进一步改进。

(4)多因素微分方程回归时,玉米的生长率在8月2日达到最大,与单因素拟合值相比存在着细微的变化,原因为:2003年玉米的生长前期积温高,7月30日左右降水偏多,日照时数相对不足,这种情况有利于玉米的营养生长。

(5)基于气象因子的多要素微分回归植物生长模型,其精度高于直接多元线性回归预测模型,从而为粮食估产提供更有力的保证。该模型具有通用性,可以推广到对其它农作物生长的模拟。通过气象因子的预测值,对农作物的长势情况有大致地了解,可以更好的确定农时,指导农业生产,甚至进行种植业结构的调整。

#### 参考文献:

- [1] Alexandrov V A, Hoogenboom G. The impact of climate variability and change on major crops in Bulgaria [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 104(4): 315-327.
- [2] 沈亨理. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [3] Boote K J, Jones J W, Pickering N B. Potential uses and limitations of crop models[J]. Agronomy Journal. 1996, 88: 704-716.
- [4] Sinclair T R, N G Seligman. Crop modeling: from infancy to maturity [J]. Agronomy Journal, 1996, 88: 698-704.
- [5] 姜丽霞, 王育光, 孙孟梅. 黑龙江省玉米产量预报模式的研究[J]. 中国农业气象, 2004, 25(1): 13-16.
- [6] 李英年, 周华坤, 沈振西. 高寒草甸牧草产量形成过程及与气象因子的关联分析[J]. 草地学报, 2001, 9(3): 232-238.
- [7] 盖钧镒. 试验统计方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 193-209, 376.
- [8] 陈建忠, 肖荷霞. 黑龙江流域气象生态因子对夏玉米穗粒数的影响[J]. 河北农业科学, 2000, 4(3): 23-27.
- [9] 陈建忠, 肖荷霞, 席国成. 黑龙江流域气象生态因子对夏玉米粒重的影响[J]. 中国农业气象, 1999, 20(3): 19-23.
- [10] 赵振邦, 李猛, 武德传. 气象因素对淮东北地区夏玉米生产的影响和对策[J]. 安徽农业科学, 2001, 29(4): 462-464.