黄土区夏玉米叶面积指数变化规律的研究*

张旭东,蔡焕杰*,付玉娟,王 健
(西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:通过对连续4a夏玉米叶面积指数的研究,建立了夏玉米叶面积指数与积温之间的归一化模型,提出了精确的且唯一确定的归一化方法。多年的叶面积动态变化用同一方程式表达,提高了方程的可信度,可用于作物生长模拟和作物生长监测和遥感估产。

关键词:叶面积指数;模拟;夏玉米;作物普适生长函数
中图分类号:S513 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-7601(2006)02-0025-05

小麦、稻谷、玉米三大作物是世界范围内粮食的主要构成。2000～2004年世界小麦、稻谷、玉米的年平均产量分别为5.86亿t、5.93亿t和6.31亿t(世界粮农组织粮农统计数据库)。2000～2003年我国玉米年产量为1.14亿t,年播种面积为2401.0万hm^2。2003年我国北方玉米占全国玉米产量的78.75%,播种面积占75.56%(中国农业部种植业数据库)。黄土区是我国北方主要旱作农业区域,本地区玉米播种面积190万hm^2,占粮食作物面积的17.9%,总产91.4亿kg,占粮食总产的30.8%左右,是黄土高原主要的粮食作物之一。玉米实际单位面积产量4 812 kg/hm^2,居于黄土高原地区禾谷类作物单产之首[1]。

玉米叶面积指数是群体结构的重要指标,是计算作物蒸发蒸腾量和干物质积累的最重要的生理参数,且能反映遥感数据与作物生长状况之间的关系,因此研究玉米叶面积的动态变化有重要的理论和应用价值[2]。本文以修正的作物普适生长函数为基础,结合叶面积和积温之间的关系,建立适用于黄土区作物生长模拟的夏玉米叶面积增长的模型,并确定了相关参数。

1 材料与方法

试验于2001年～2004年在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室的灌溉试验站(东经108°24′,北纬34°20′,海拔521 m)进行。土壤质地为中壤土,1 m土层的平均田间持水量为23%～25%,凋萎含水量为8.5%(以上均为重量含水量),平均干容重为1.44 g/cm^3。该站属渭河三道台塬地区,地下水埋藏较深,其向上补给量可以忽略不计。年平均降水量在400～600 mm之间。日均气温采用试验站内设的县级气象站2:00、8:00、14:00和20:00四次观测的平均值。

本试验在充分供水的条件下进行,供试作物为夏玉米,其基本数据如表1所示。夏玉米叶面积的测定方法是,在试验处理小区选取长势均匀,有代表性的3～5株夏玉米进行定期观测,先利用钢尺测定每株各叶片的叶长(L_{ij})和最大叶宽(B_{ij}),叶面积指数由式(1)求得:

$$y = 0.75\rho_{种}\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(L_{ij}\times B_{ij})}{m} \quad (1)$$

式中,n为第j株玉米的总叶片数;m为测定株数;$\rho_{种}$为夏玉米种植密度[3]。测算结果见表2。

2 结果与分析

Logistic方程源自于理论生态学,它用来描述特定系统中细菌(或其它)种群密度的增长过程。王信理详细讨论了将它应用于农业气象学中的问题,提出了Logistic方程的修正形式,即作物普适生长函数(General growth function of crop),该修正式不仅能较好地描述作物生长的许多过程,而且精度也较高[4]。此后,它被常用作为叶面积指数随生育期变化和干物重变化的统一模型[5]。本研究以该模型为基础,叶面积指数随出苗后天数的变化可用以下模型描述:

* 收稿日期:2005-09-20
基金项目:高等学校博士点基金(20020712020);高校青年教师奖资助项目。
作者简介:张旭东(1979-),男,河南巩义人,硕士,研究方向为节水灌溉理论与新技术。E-mail:zxxddd@126.com
通讯作者:蔡焕杰(1962-),河北藁城人,教授,博士生导师,主要从事节水理论与技术研究。E-mail:huanjie@tom.com

中国知网 http://www.cnki.net

$$y = \frac{a}{1 + e^{(b+ct+dt^2)}} \quad (2)$$

式中，y 为叶面积指数，t 为玉米出苗后天数(d)，a、b、c、d 均为参数。研究表明，参数$d>0$，当$t\to\infty$时，$y\to 0$，这与实际情况符合。但当$t=0$时，$y=a/(1+e^b)\neq 0$，故t 的取值范围是从测定叶面积指数最早的一天到最晚的一天。本文先把2002～2004年的资料用此式拟合，得到了一组实测值和拟合值相关关系很高的方程(见图1)。说明此式能很好地描述叶面积指数(y)随天数(t)的动态变化过程。本文的拟合方法是先赋初值，再采用Matlab6.1工具箱里的非线性优化工具逐次优化，得到最小二乘意义上的最优解。其参数见表3，拟合效果见图1。 m^2 m^2 m^2 m^2

表1 供试夏玉米基本资料

Table 1 Description data of the summer maize in experimentation

年 份 Years	品种 Varieties	播种日期(月-日) Seeding time(M-d)	成熟日期(月-日) Maturing time(M-d)	种植密度(株/hm) Density(plant/hm^2)
2001	陕单9号 Shaandan 9	06-14	09-30	70000
2002	陕单9号 Shaandan 9	06-11	09-21	90000
2003	沈单16号 Shendan 16	06-15	10-08	90000
2004	沈单16号 Shendan 16	06-16	10-05	42500

表2 2001～2004年实测的叶面积指数

Table 2 Observed leaf area index in 2001～2004

出苗后天数(d) Days after Sprouting	2001年叶面积指数 LAI of 2001	出苗后天数(d) Days after Sprouting	2002年叶面积指数 LAI of 2002	出苗后天数(d) Days after Sprouting	2003年叶面积指数 LAI of 2003	出苗后天数(d) Days after Sprouting	2004年叶面积指数 LAI of 2004
14	0.18	31	2.19	21	0.3	24	0.37
17	0.33	38	2.55	29	0.8	31	0.64
28	0.79	45	3.46	37	1.74	37	1.43
33	1.42	52	4.21	43	3.21	44	2.46
44	3.39	59	4.98	57	4.89	56	2.97
48	4.65	66	4.27	64	5.14	71	3.16
51	5.03	73	4.07	86	4.74	80	3.39
						89	2.86
						107	2.16

从图1中可以看出，因为夏玉米的品种、播种日期和种植密度不同，反映夏玉米叶面积指数动态变化的曲线也不同。这会引起两个方面的问题，一是上年测定的数据不能为下年预测所用，二是每年测定的叶面积指数的次数有限，且有定苗和观测引起的误差，不能真实反映整个生育期内叶面积指数的动态变化。 (英文摘要下转第158页)

表3 夏玉米叶面积指数用作物普适生长函数拟合时的参数

Table 3 Parameters of LAI of summer maize in General Growth Function of Crop

年 份 Year	方程参数 Equation parameters				相关系数 Correlation	最大值点t_z值 t at max.	最大值点y_{max}值 y at max.	拐点t_g 值 t at inflexion
	a	b	c	d				
2002	1998.6931	9.6527	−0.1171	0.00095	0.9716	61.63	4.7290	38.66
2003	6.5074	8.7247	−0.2880	0.0020	0.9981	72.00	5.4535	39.41
2004	3.3726	9.2937	−0.3257	0.0022	0.9918	74.02	3.1720	36.56

除作物品种自身的遗传特性外，一般认为，夏玉米出苗前的发育进程主要受土壤温度和水分制约，出苗以后叶片的出生速率主要受温度和光周期的影响，对多数田间栽培条件下的玉米品种而言，温度对叶片的生长及枯死的影响远大于其它环境因子[6,7]。林忠辉[2]等提出了以积温(℃/d)表示的生育阶段和叶面积指数之间的模型，但该模型中的积温的计算并没有考虑温度过高或过低时对玉米生长无效的影响，同时模型的建立必须在夏玉米的吐丝期观测到叶面积指数。为此，本文采用张银锁在文献[6]中推荐的有较强生物学意义和普适性的积温计算方法，同时为了不受在吐丝期观测叶面积的限制，我们认为可以采用叶面积生长曲线的最大值和拐点来解决这一问题。假设每株玉米的叶面积变化是同步的，为了

中国知网 https://www.cnki.net

减小定苗测量引起的叶面积指数数据年际之间的变异性,可考虑用拟合式(2)求得曲线的最大值点和拐点。它们都是反映叶面积动态变化的重要转折

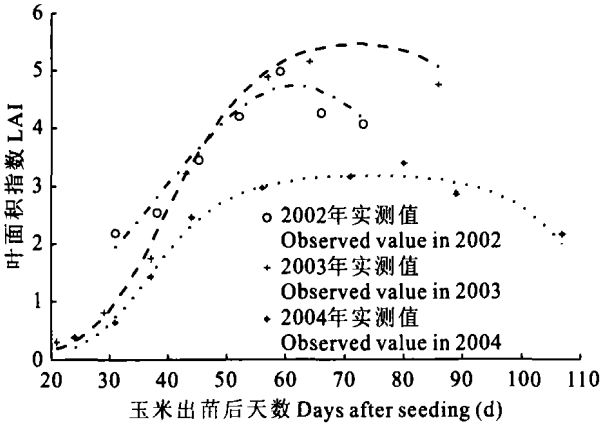

图 1　2002～2004 年夏玉米叶面积指数与播种后天数之间的关系

Fig. 1　Relation between LAI of summer maize and the days after seeding in 2002～2004

点,并且在数学上是唯一的。最大值点反映了叶面积指数从增加到减少的时刻,拐点反映了叶面积指数的增长速度从增加到减少的时刻。令(2)式对 t 求一阶和二阶导数,并分别令它们为零,可求得叶面积指数在最大值处和拐点处的 t 值,分别用 t_z 和 t_g 表示(表3)。可用最大值点和拐点把从出苗到成熟的生育期长度划分为 3 个阶段,每个阶段的积温可用下式表示:

$$\begin{cases} T_{a1} = \sum_{i=1}^{t_g} \text{特} T_i \\ T_{a2} = \sum_{i=t_g}^{t_z} \text{特} T_i \\ T_{a3} = \sum_{i=t_z}^{t_q} \text{特} T_i \end{cases} \quad (3)$$

式中,T_{a1} 表示叶面积增加且增加速度为正这一时段的积温;T_{a2} 表示叶面积增加但增加速度为负这一时段的积温;T_{a3} 表示叶面积减少这一时段的积温;t_q 为夏玉米从出苗到成熟的天数;t_z、t_g 若不为整数,则该点处的温度用线性插值法求得;特T_i 为出苗后每天温度对作物生长发育的贡献值,用下式求得:

$$\text{特} T_t = \begin{cases} T_i - T_l & T_i \geqslant T_l \text{ 且 } T_i \leqslant T_h \\ 0 & T_i < T_l \\ T_h - T_l & T_i > T_h \end{cases} \quad (4)$$

式中,T_i 为日均气温;T_l 为作物生长发育的温度下限;T_h 为作物生长发育的温度上限,对夏玉米参考文献[6],可分别取10℃和30℃;据此,我们对玉米生长期的积温进行了归一化处理:

$$DS_t = \begin{cases} \dfrac{T_{jt}}{T_{al}} & T_{jt} \leqslant T_{al} \\ 1 + \dfrac{T_{jt} - T_{a1}}{T_{a2}} & T_{al} < T_{jt} \leqslant T_{a2} \\ 2 + \dfrac{T_{jt} - T_{a1} - T_{a2}}{T_{a3}} & T_{a2} < T_{jt} \leqslant T_{a3} \end{cases} \quad (5)$$

式中,T_{jt} 为出苗后 t 天的积温,用下式计算:

$$T_{jt} = \sum_{i=1}^{t} \text{特} T_i \quad (6)$$

DS_t 为第 t 天归一化后的生长期数值,3 个阶段的 DS_t 的取值范围分别为 0～1,1～2 和 2～3。为了降低数据点在 y 轴上的离散程度,玉米第 t 天的叶面积指数可用相对叶面积指数表示:

$$y_R = \frac{y_t}{y_{\max}} \quad (7)$$

式中,y_R 为玉米叶面积归一化后的值,是相对叶面积指数;y_t 为玉米播后第 t 天的叶面积指数;$y_{\max}$ 为整个生育期的最大叶面积指数,可由拟合后的式(2)求出(见表3)。归一化后的相对叶面积指数和生育期长度见表 4。

表 4　2002～2004 年夏玉米相对叶面积指数和生育期长度

Table 4　Relative leaf area index and length of development periods of summer maize in 2002～2004

日期 Date(y-m-d)	生育期长度 Period of development	相对叶面积指数 Relative LAI	日期 Date(y-m-d)	生育期长度 Period of development	相对叶面积指数 Relative LAI	日期 Date(y-m-d)	生育期长度 Period of development	相对叶面积指数 Relative LAI
2002-07-16	0.8006	0.4631	2002-07-16	0.5249	0.0552	2004-07-14	0.6884	0.1175
2002-07-23	0.9852	0.5392	2002-07-23	0.6846	0.1474	2004-07-21	0.8404	0.2016
2002-07-30	1.2682	0.7317	2002-07-30	0.9265	0.3193	2004-07-27	1.0134	0.4495
2002-08-06	1.6512	0.8903	2002-08-06	1.152	0.5895	2004-08-03	1.2061	0.7745
2002-08-13	1.9049	1.0531	2002-08-13	1.549	0.8958	2004-08-15	1.5655	0.9339
2002-08-20	2.1261	0.9029	2002-08-20	1.7591	0.9432	2004-08-30	1.9148	0.9962
2002-08-27	2.3639	0.8606	2002-08-27	2.4131	0.8701	2004-09-08	2.2256	1.0686
						2004-09-17	2.5370	0.9026
						2004-10-05	3.0000	0.6796

中国知网　https://www.cnki.net

把3年归一化后的生育期长度和相对叶面积指数绘于同一图中，数据点离散程度大大下降，仿照(2)式的关系建立积温生育期长度(DS)和相对叶面积指数(y_R)之间的关系，用上文提出的方法拟合一条曲线，见图2，其测定值和拟合值之间的相关系数为0.9737，残差图如图3所示，发现其相当离散，说明拟合效果较好，拟合所得方程为：

$$y_R = \frac{1.0930}{1 + e^{(6.4307 - 8.157 \times DS + 1.9596 \times DS^2)}} \quad (8)$$

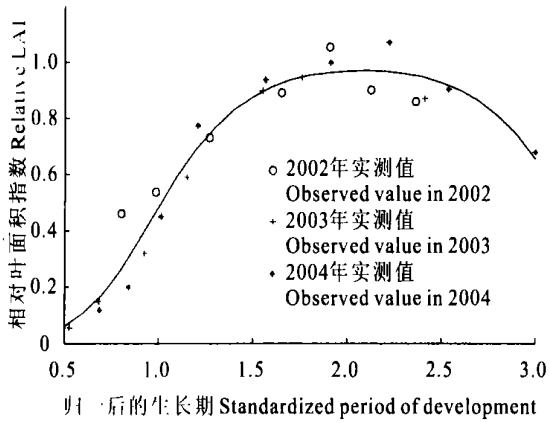

图2 2002～2004年夏玉米相对叶面积指数的动态变化

Fig.2 Changes of relative leaf area index of summer maize in 2002～2004

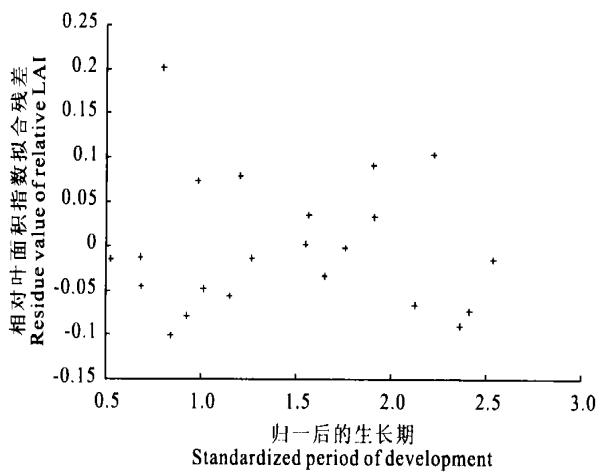

图3 2002～2004年夏玉米相对叶面积拟合残差

Fig.3 Residue value of relative LAI of summer maize in 2002～2004

3 模型的运用与检验

应用考虑高温和低温限制的平均气温计算积温的方法，容易算得常年的T_{a1}、T_{a2}、T_{a3}值分别为622.98℃/d，423.08℃/d，345.62℃/d，因此，只要在玉米出苗以后随机测定1次夏玉米的叶面积指数(为了提高预测精度，可多测几次)，再根据每天平均气温的实测值或预报值，就可应用此曲线计算出当年的最大叶面积指数，进而模拟或预测出整个生育期内叶面积指数的动态变化。以2001年为例，先用其中2次(第2、3次)的测定值计算出最大叶面积指数平均值为5.0256，然后再用(8)式和(7)式的逆运算进行时间步长为1 d的模拟(见图4)。模拟值和实测值的相关系数为0.9795，在以模拟值为x轴实测值为y轴的点图中，可知点均匀分布在$x=y$直线的两侧，认为具有较好的模拟效果，表明该曲线可以较好地模拟黄土区夏玉米叶面积指数的动态变化。

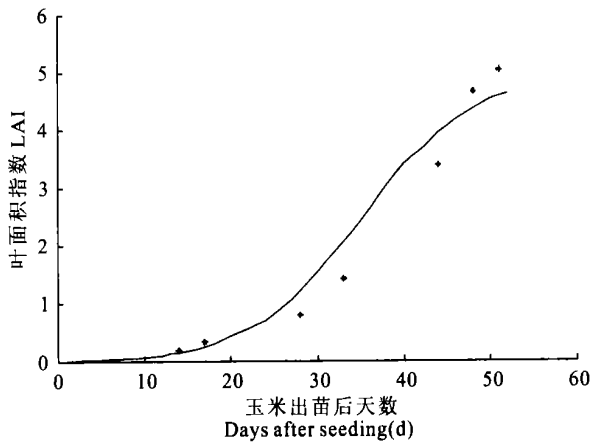

图4 2001年夏玉米叶面积指数模拟结果

Fig.4 Simulation result of LAI of summer maize in 2001

4 结 论

以归一化后的积温为变量，采用修正后的作物普适生长函数，根据2002～2004年不同品种、不同种植密度的实测值，拟合出了相对叶面积指数与生长期之间的关系。根据2001年叶面积的实测值和拟合值的相关分析表明相关系数较高，且没有明显的偏大或偏小的现象，说明该方法有广泛的适用性，可以模拟黄土区的夏玉米叶面积动态变化。本文建立的夏玉米叶面积指数于积温之间的归一化模型，可望在作物生长模拟、作物生长监测、遥感估产等方面得到应用。

应用本文给出的方法和确定的有关参数，只要随机测定几次(一般3次即可，如果测定误差小，可少测)玉米的叶面积指数，就可较为准确的模拟出每天叶面积指数的动态变化，而作物普适生长函数只能描述某特定年份的天数和叶面积指数之间的关系。

本文所提出的生育期长度的划分用式(2)的拐点和最大值点，具有确切的物理意义，比观察法更确

中国知网 https://www.cnki.net

切和更易操作。采用本文的方法,如果实测年份越多,建立的模型(8)就越可靠。

参 考 文 献:

[1] 李　军,王力祥,邵明安,等. 黄土高原地区玉米生产潜力模型研究[J]. 作物学报,2002,28(4):555－560.

[2] 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.

[3] 王　健,蔡焕杰,陈　凤,等. 夏玉米田蒸发蒸腾量与棵间蒸发的试验研究[J]. 水利学报,2004,11:108－113.

[4] 王信理. 在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] 傅迎军. 玉米牡单10干物质积累与分配规律的研究[J]. 玉米科学,2001,9(2):68－69.

[6] 张银锁,宇振荣,M Driessen. 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,2001,12(4):561－565.

[7] 孙孟梅,姜丽霞,于荣环,等. 玉米生育期热量指标及其不同品种栽培北界的研究[J]. 中国农业气象,1998,19(4):8－12.

Study on leaf area index of summer maize in loess areas

ZHANG Xu-dong, CAI Huan-jie, FU Yu-juan, WANG Jian

(*College of Hydraulic and Architectural Engineer, Northwest A &F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Based on the experiment data of summer maize in Irrigation Experimental Station of Northwest A &F University during 2001～2004, a normalized model between leaf area index (LAI) and accumulated temperature was developed. By using the data of LAI in 3 years, the equation is greatly authentic. It may provide an accurate technique for monitoring the growth of crops and estimating the yields in loess areas.

Key words: leaf area index; simulation; summer maize; general growth function of crop

(上接第21页)

Primary agronomic properties and breeding process of new lines of salt-tolerant wheat in Xinjiang

LUO Ting-bin, REN Wei, LI Yan, WANG Bao-jun

(*Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi, Xinjiang* 830011, *China*)

Abstract: The 54 new lines of salt tolerant wheat have been bred since 1997 by means of sexual crossing and systemic selecting. There are genotypes that are adaptable to the native saline field. The new lines of salt-tolerant wheat can develop well in the soil with a salinity 0.5‰～0.9‰. The primary agronomic properties of new lines of salt-tolerant wheat are low stalk, long spike, large amount of spikelets and per spike grains, and big grain, etc.

Key words: salt-tolerant wheat; new lines; breeding; agronomic properties

中国知网　https://www.cnki.net