

玉米叶面积指数动态模拟的最适 野外观测资料*

麻雪艳 周广胜**

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要 基于锦州农田生态系统野外观测站 2005—2011 年多个品种的玉米大田试验资料, 结合已经建立的玉米叶面积指数动态普适模型, 探讨了准确模拟玉米叶面积指数动态所需的最适野外观测资料. 结果表明: 准确模拟玉米叶面积指数动态至少需要 3 年的野外观测数据, 且每年在生育期内至少需要进行 4 次观测. 玉米生育期内的理想观测应为在出苗后 20 d 左右进行第 1 次观测, 此后每月观测 1 次.

关键词 玉米 叶面积指数 最适野外观测资料

文章编号 1001-9332(2013)06-1579-07 **中图分类号** S164 **文献标识码** A

Optimum field observation data for simulating maize leaf area index. MA Xue-yan, ZHOU Guang-sheng (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(6): 1579–1585.

Abstract: Leaf area index is a key indicator of leaf area change of crop population, and also, an important parameter for studying crop photosynthesis, transpiration, and biomass formation, etc. How to establish an optimum leaf area index (LAI) dynamic model with the minimum field observation data is of great significance for accurately simulating crop growth and yield. Based on the field experiment data of various spring maize varieties from the Jinzhou Agricultural Ecosystem Research Station in Northeast China in 2005–2011, in combination with the universal maize LAI dynamic model, this paper discussed the optimum field observation data for accurately simulating the dynamics of maize LAI. It was suggested that for the accurate simulation of the dynamics of maize LAI, the field observation should be no less than 3 years, with at least 4 times observation during the growth period each year. The proper four observation times during maize growth period were suggested as about 20 d after seedling emergence for the first observation, and monthly thereafter for the other three observations. This study could provide reference for conducting an effective observation on leaf area index and its dynamic modeling.

Key words: maize; leaf area index; optimum field observation data.

叶片是作物与环境进行物质和能量交换的主要场所^[1]. 作物通过叶片吸收光能和二氧化碳, 进行光合作用, 并通过叶片的蒸腾作用产生拉力, 促进水分和矿物质在体内的运输. 叶片的大小及分布直接影响植物对光能的截获^[2], 进而影响作物生产力^[3–5]. 叶片的动态变化是作物生长模拟研究的重要内容^[5–7]. 叶面积指数(LAI)是反映植物群体叶面积变化的重要指标, 已经成为土壤-植被-大气交换

(如光合、蒸腾等)^[8–11]和植物生物量形成^[12–14]研究的重要参数.

玉米叶面积指数的变化通常要经历缓慢增长期、迅速增长期、相对稳定期和缓慢下降期^[15–16], 其动态可采用二次多项式^[17]、Ratio 模型^[18–19]、修正的 Gaussian 模型^[20]、对数正态模型^[21]、Beta 方程^[22]、Logistic 方程^[23]及修正的 Logistic 方程^[24]等进行模拟. 其中, 修正的 Logistic 方程具有较强的生态学意义, 可基于相对叶面积指数和由不同生育阶段积温归一化得到的标准化生育期, 实现对不同播种期^[25]、品种及种植密度的玉米叶面积指数动态的统

* 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951303)、农业公益性行业科研专项(200903003)和中国气象局地面观测经费资助.

** 通讯作者. E-mail: gszhou@cams.cma.gov.cn

2012-09-25 收稿, 2013-03-21 接受.

一模拟,且具有很高的拟合精度^[15-16,26],已成为模拟玉米叶面积指数动态的常用方法^[12-13].但是,由于现有研究多采用具体的生育期(如抽雄期^[27]、吐丝期^[15-16]等)作为玉米生育阶段的划分依据,需要确定该生育时期的日期及叶面积指数,而田间观测的不连续性使得所需生育期的准确日期和相应的叶面积指数难以获得^[27-29],制约了叶面积指数动态模拟的准确性.不同研究所用玉米叶面积指数资料的观测年数、生育期内观测次数及观测时期不一致^[15-16,26-27],也会影响资料的代表性,进而可能导致模拟结果的普适性不足.

本研究利用锦州农田生态系统野外观测站2005—2011年玉米大田试验资料,根据玉米叶面积指数动态普适模型(由修正的 Logistic 方程与基于积温的玉米最大叶面积指数确定方法发展而来),探讨了准确模拟玉米叶面积指数动态所需的最适观测资料,为有效开展叶面积指数的野外观测提供依据.

1 材料与方法

1.1 资料来源

研究地点位于锦州农田生态系统野外观测站(41°9' N,121°12' E,海拔 17.0 m).该区属暖温带季风性气候,年均气温 9.1 ℃,年均降水量 568.8 mm,年无霜期 180 d,全年≥10 ℃活动积温 3700 ℃·d^[30].主要作物为玉米.本研究资料包括2005—2011年玉米叶面积指数观测资料和日均气温.各年玉米品种及主要生育期见表 1.

1.2 研究方法

1.2.1 叶面积指数的计算 玉米生育期内,在锦州农田生态系统野外观测站的玉米样地随机选取 3 个取样点,每个取样点选取 3 个 1 m×1 m 样方测定玉

米密度,同时选取 1~2 株玉米标准株,利用直尺量取每株玉米全部叶片的长和宽,利用下式计算玉米叶面积指数(LAI)^[31]:

$$LAI = 0.75\rho \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n L_{ij} \times W_{ij}}{m} \tag{1}$$

式中:0.75 为玉米叶面积的校正系数; ρ 为植株密度; m 为测量株数; n 为第 i 株的叶片数; L_{ij} 和 W_{ij} 分别为第 i 株玉米、第 j 片叶片的长度和最大宽度.

1.2.2 叶面积指数动态普适模型 研究表明,玉米从出苗至叶面积指数达到最大时,≥10 ℃有效积温基本恒定在 1010.4 ℃·d 左右^[30].因此,可以采用玉米叶面积指数达到最大这一能够准确估计的时间点对玉米生育阶段进行划分,从而避免具体生育期日期观测的限制.据此,笔者^[30]结合修正的 Logistic 方程发展了玉米叶面积指数动态普适模型:

$$RLAI_i = \frac{a}{1 + \exp(b + c \times DS + d \times DS^2)} \tag{2}$$

$$RLAI_i = LAI_i / LAI_{max} \tag{3}$$

$$DS_i = \begin{cases} \sum_{i=1}^i \Delta T_i / 1010.4 & (i \leq I_{max}) \\ 1 + \sum_{i=I_{max}+1}^i \Delta T_i / \sum_{i=I_{max}+1}^{I_{end}} \Delta T_i & (i > I_{max}) \end{cases} \tag{4}$$

$$\Delta T_i = \begin{cases} T_i - 10 & (T_i \geq 10) \\ 0 & (T_i < 10) \end{cases} \tag{5}$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 均为参数; $RLAI_i$ 和 LAI_i 分别为出苗后第 i 天的相对叶面积指数和叶面积指数; LAI_{max} 为当年玉米的最大叶面积指数,可通过查询具体品种的资料或对逐日叶面积指数动态 Logistic 方程求导而得,本文采用后者; DS_i 为出苗后第 i 天的标准化生育期,其中,第一阶段的 DS_i 值为 0~1,第二阶段的 DS_i 值为 1~2; I_{max} 为叶面积指数达到最大时的天数; I_{end} 为成熟期天数; ΔT_i 为≥10 ℃有效温度; T_i 为日均气温.由于锦州地区日均温度极少高于 30 ℃,所以上式没有考虑对无效高温的订正^[32-33].

1.2.3 模拟效果评价 利用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、距离相关分析和单因素方差分析(one-way ANOVA)进行模拟效果的检验和评价.

R^2 反映了模拟值与实测值的相关程度. R^2 值越大,说明拟合方程对实测值的解释率越高,模拟效果越好.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \tag{6}$$

表 1 供试玉米品种及主要生育期

Table 1 Maize varieties and their main growth periods

年份	玉米品种	播种日期	出苗日期	成熟日期
Year	Maize varieties	Seeding date	Emergence date	Mature date
2005	运科 1 号 Yunke No. 1	05-01	05-14	09-26
2006	润科 206 Runke 206	05-07	05-24	10-04
2007	华丹 4 号 Huadan No. 4	05-03	05-10	09-24
2008	新科 10 号 Xinke No. 10	04-27	05-13	09-25
2009	中科 10 号 Zhongke No. 10	04-27	05-10	09-22
2010	象玉 268 Xiangyu 268	05-02	05-17	09-28
2011	丹玉 42 Danyu 42	05-03	05-15	09-26

式中： x_i 为实测值； y_i 为模拟值； n 为样本数； \bar{x} 和 \bar{y} 分别为实测值与模拟值的平均值。

RMSE 反映了模拟值与实测值的平均近似程度。RMSE 值越小，表明模拟值与实测值越接近，模拟效果越好。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

(7)

距离相关分析用于考察模拟值的拟合优度，包括不相似性和相似性。以两变量差值平方和的平方根为距离 (Euclidean distance) 度量模拟值与实测值的不相似性，所得值越大，说明模拟值与实测值的不一致性越显著，即模拟效果越差；以 Pearson 相关系数为距离 (Pearson correlation) 度量模拟值与实测值的相似性，所得值越大，说明模拟值与实测值越接近，即模拟效果越好。

Euclidean 距离公式：

$$D = \sqrt{(x_i - x_j)^2}$$

(8)

Pearson 相关系数公式：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

(9)

单因素方差分析 (one-way ANOVA) 可用于考察各拟合方程之间的差异。F 统计量越大 ($F = \frac{S_A/(s-1)}{S_E/(n-s)} \geq F_{\alpha}(s-1, n-s)$ 或 $P < \alpha$ 时)，说明组间方差是主要方差来源，即各拟合方程差异越显著；反之，说明随机方差是主要方差来源，即各拟合方程差异越不显著^[18]。

$$F = \frac{S_A/(s-1)}{S_E/(n-s)}$$

(10)

$$S_A = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{X}_j)^2$$

(11)

$$S_E = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{X}_j)^2$$

(12)

式中： S_A 为组间方差 (亦称效应平方和)； S_E 为组内方差 (亦称误差平方和)； s 为拟合方程个数； n 为拟合方程得到的模拟值； α 为显著性水平，本文取 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 玉米叶面积指数动态模拟的最适观测资料年数
分别利用单年、2 年、3 年、4 年和 7 年的数据，按照式 (2) 进行模拟。考虑到实际研究中多采用连续年份的数据，故 2 年及以上的数据基本采用连续

年份数据拟合，同时考虑到由于数据获取的限制及大田试验的不连续性造成研究数据的不连续性，也相应设计了利用不连续年份数据进行拟合 (表 2)。

利用不同时间长度数据得到玉米叶面积指数动态方程的模拟结果 (表 3)。其中，距离相关分析中的相似性 (不相似性) 值为该时间长度各方程模拟值与实测值相似性 (不相似性) 的平均值，结果表明，随着观测资料年数的增加，各模拟结果与实测值的不相似性呈减小趋势，而相似性呈增加趋势，3 年和

表 2 不同时间长度数据的叶面积指数动态模拟结果
Table 2 Leaf area index simulation results of different time span data

年数 Time span	年份 Year	方程参数 Parameters				R^2
		a	b	c	d	
单年 Single year	2005	1.14	4.38	-10.42	4.09	0.94
	2006	1.00	6.17	-22.29	9.94	0.80
	2007	0.96	6.83	-17.85	7.23	0.94
	2008	1.19	5.47	-14.90	7.77	0.70
	2009	1.78	8.23	-17.41	8.90	0.71
	2010	0.95	12.04	-35.88	15.90	0.81
2 年 2 year	2011	1.40	6.00	-14.11	6.95	0.75
	2005—2006	1.09	4.06	-10.74	4.31	0.94
	2006—2007	1.05	4.49	-12.26	5.02	0.94
	2007—2008	1.01	5.42	-14.35	5.84	0.94
	2008—2010	1.00	5.84	-16.30	7.09	0.90
	2009—2010	0.97	7.25	-17.73	7.42	0.91
3 年 3 year	2009—2011	1.35	6.91	-15.57	7.60	0.75
	2010—2011	0.94	9.08	-25.63	11.17	0.87
	2005—2007	1.06	4.52	-11.79	4.76	0.94
	2006—2008	1.03	4.95	-13.42	5.50	0.94
	2007, 2008, 2010	1.02	5.22	-13.85	5.75	0.94
	2008, 2010, 2011	0.98	6.15	-17.04	7.39	0.90
4 年 4 year	2009—2011	0.96	6.97	-17.46	7.36	0.92
	2005—2008	1.05	4.77	-12.57	5.08	0.94
	2006—2008, 2010	1.03	4.96	-13.46	5.60	0.94
	2007, 2008, 2010, 2011	0.99	5.57	-14.88	6.170	0.94
	2008—2011	0.99	5.85	-15.23	6.50	0.92
	2005—2011	1.00	5.23	-13.63	5.53	0.95
7 年						

表 3 不同时间长度数据的玉米叶面积指数动态模拟效果
Table 3 Leaf area index simulation effect of different time span data

数据类型 Data type	距离相关分析 Distance correlation analysis		单因素方差分析 One-way ANOVA analysis	
	不相似性 Dissimilarity	相似性 Similarity	F	P
单年 Single-year	1.40	0.90	2.51	0.02
2 年 Two-year	0.93	0.95	1.38	0.22
3 年 Three-year	0.76	0.96	0.54	0.71
4 年 Four-year	0.70	0.97	0.31	0.82
7 年 Seven-year	0.63	0.97	—	—

4 年资料的模拟效果远优于单年和 2 年资料的模拟效果,且与 7 年资料的模拟效果比较接近。

各时间长度的模拟结果均通过 0.05 水平的方差齐性检验,因此,可进一步进行方差分析,考察同一时间长度各拟合方程模拟结果的差异,从而了解该时间长度数据模拟效果的稳定性.由表 3 可以看出,利用单年数据得到的各模拟结果差异显著($F>F_{\alpha}(6.329)=2.10, P<0.05$),而利用 2 年及更多年份资料得到的各模拟结果则差异不显著。

根据上述分析结果,并结合图 1 可以看出,构建玉米叶面积指数动态普适模型至少需要 3 年的观测资料。

2.2 叶面积指数动态模拟的最适年内观测资料

2005—2011 年,每年都有 5 次以上的玉米叶面积指数观测数据.在进行叶面积指数野外观测时,至少需要进行多少次测定才能反映玉米整个生育期的叶面积指数变化特征呢?

玉米叶面积指数的变化需经历缓慢增长期、迅速增长期、相对稳定期和缓慢下降期,理论上在各个变化阶段至少需要 1 次观测;其次,叶面积指数的变化符合修正的 Logistic 方程,而该方程有 4 个参数,从方程拟合角度考虑,至少需要进行 4 次观测。

以 2005—2008 年的实际观测资料为例,对上述推论进行分析(图 2),虽然 2005、2007 和 2008 年各有 9 次观测数据,但仅 2005 和 2007 年的拟合曲线与 2005—2011 年的拟合曲线比较接近,而 2008 年

的拟合曲线则与 2005—2011 年相差较大.进一步分析可知,2005 和 2007 年在 4 个关键变化期都有观测数据,而 2008 年的观测主要集中在缓慢生长期、迅速生长期和稳定生长期,在缓慢下降期没有观测,因此不能反映整个生育期内的叶面积指数变化特征.2006 年虽然只有 5 次观测数据,但由于在每个关键变化期均有观测,故拟合结果能较好地反映整个生育期内的叶面积指数变化特征.说明叶面积指数的观测时期非常重要.在进行实际观测时,可在玉米出苗后 20 d 左右进行第 1 次观测,此后每月进行 1 次观测,即可保证在 4 个关键期均有观测。

为进一步验证该结论,从 2005—2007 年每年的 4 个关键变化期分别选择 1 个观测值(即最少的数据)进行拟合,将所得结果与利用这 3 年的全部数据及 2005—2011 年数据拟合的结果比较发现(表 4,图 3),3 组数据的拟合结果差异非常小,证实了

表 4 叶面积指数模拟的最适野外观测资料
Table 4 Optimum field observation data for leaf area index simulation

年份 Year		决定系数 R^2	均方根误差 RMSE (%)	距离相关分析 Distance correlations	
				不相似性 Dissimilarity	相似性 Similarity
2005—2007	I	0.94	10.1	0.70	0.97
	II	0.94	9.6	0.67	0.97
2005—2011	II	0.95	9.0	0.63	0.97

I: 最少数据 Minimum data, 每年的 4 个关键变化期分别选择 1 个观测值 One observation was selected in 4 key change periods during 2005—2007, respectively; II: 全部数据 Total data.

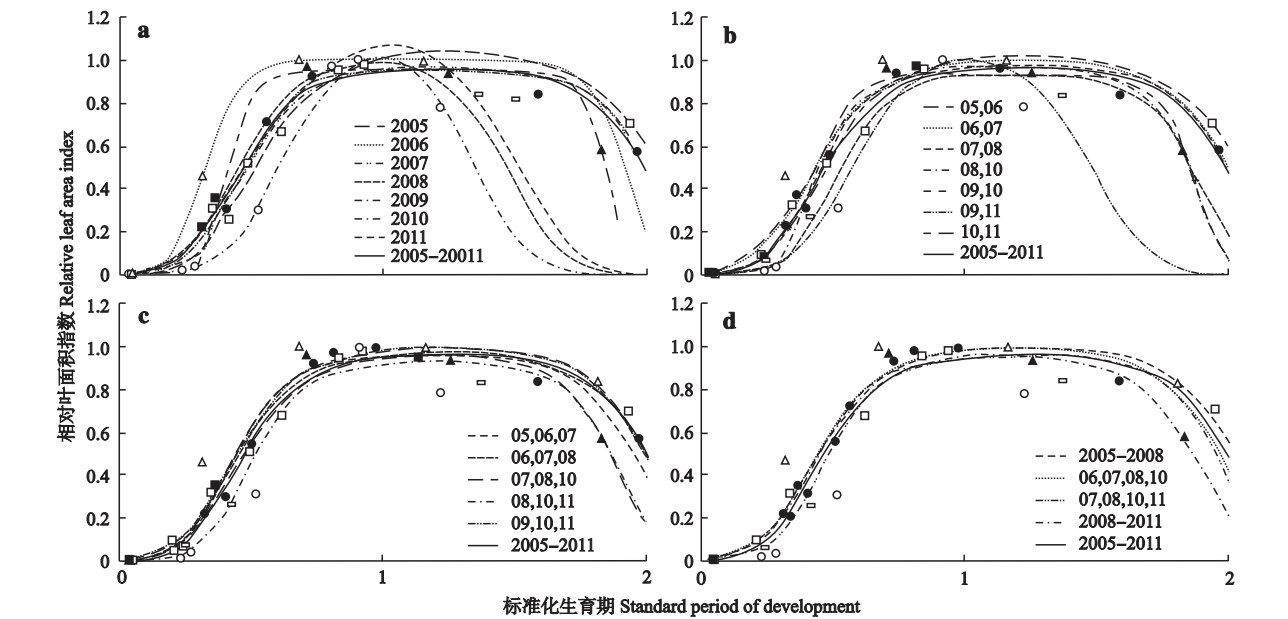


图 1 不同时间长度数据的玉米叶面积指数动态模拟结果
Fig. 1 Leaf area index simulation results of different time span data.
a) 单年 Single-year; b) 2 年 Two-year; c) 3 年 Three-year; d) 4 年 Four-year.

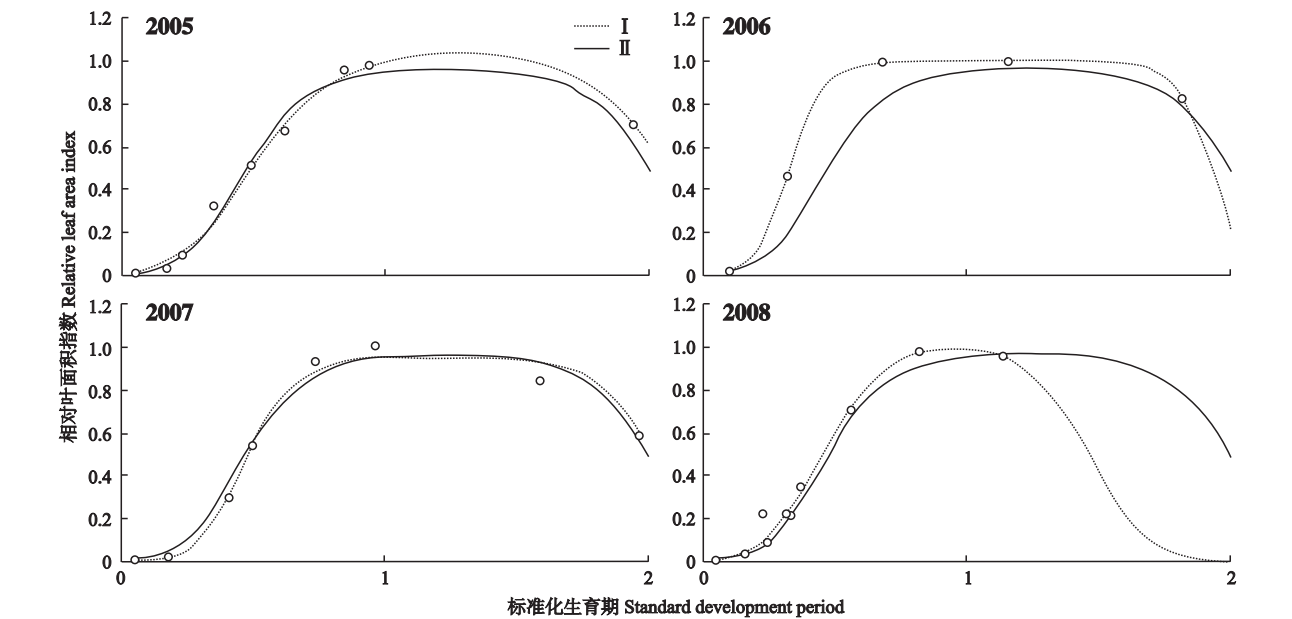


图2 观测时期对叶面积指数模拟结果的影响
Fig.2 Influence of observation time on leaf area index simulation result.
○: 观测值 Observation; I :拟合曲线 Simulation; II :2005–2011.

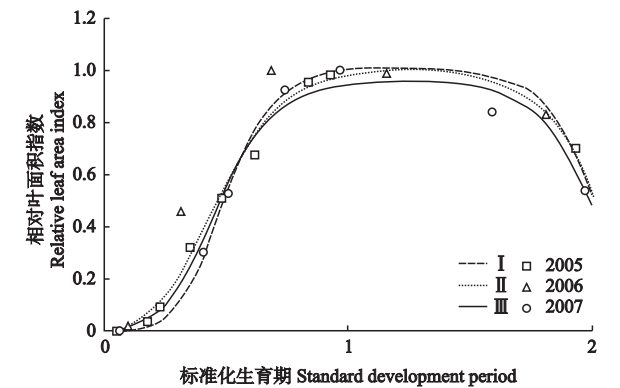


图3 叶面积指数模拟的最适野外观测资料
Fig.3 Optimum field observation data for leaf area index simulation.
I :2005—2007 年最少数据 2005–2007 minimum data; II : 2005—2007 年全部数据 2005–2007 total data; III : 2005—2011 年全部数据 2005–2011 total data.

只要进行 4 次有效观测,就能反映整个生育期的玉米叶面积指数变化特征,并且利用 3 年的观测数据就可以得到较理想的叶面积指数动态普适模型。

3 讨 论

叶面积指数是反映作物群体叶面积变化的重要指标,也是作物光合、蒸腾及生物量形成等研究的重要参数,准确描述叶面积指数动态对作物生长与产量的模拟具有重要意义.修正的 Logistic 方程具有较强的生态学意义且具有很高的拟合精度,已成为模拟玉米叶面积指数动态的常用方法.但是,受玉米品

种、播种期、种植密度、定苗和观测误差等影响,模拟结果可能无法真实地反映生育期内叶面积指数的动态变化.并且不同研究所用玉米叶面积指数资料的时间长度、观测次数和观测时期不同,所得叶面积指数动态可能存在较大差异,使拟合方程不具备普适性.为此,本文以麻雪艳等^[30]提出的叶面积指数动态普适模型为基础,利用不同年数、年内不同观测次数及观测时期的资料对其进行参数化,通过对参数化的效果进行分析比较,探讨了准确模拟玉米叶面积指数动态所需的最适野外观测资料.该模型基于修正的 Logistic 方程,采用了相对叶面积指数和基于积温的标准化生育期来反映叶面积指数的大小和发育进程,可以有效地消除或减小玉米品种、播种期、种植密度等的影响^[26,30].与已有研究相比,该模型采用叶面积指数达到最大作为玉米生育阶段的划分标准,而非具体的生育期(如抽雄期、吐丝期等).因为叶面积指数达到最大后,光合产物基本停止向营养器官分配,是玉米进入生殖生长的标志^[29–30].以此为转折点将玉米生育期划分为两个阶段,通过各阶段的积温归一化得到标准化生育期,既可以清楚地体现玉米在不同生育阶段的叶面积变化规律,同时也避免了具体生育期日期观测的限制.

通过分析发现,利用修正的 Logistic 方程建立玉米叶面积指数动态普适模型至少需要 3 年的观测数据,且每年至少进行 4 次观测,理想观测时期应该为:在出苗后 20 d 左右进行第 1 次观测,此后每月

进行 1 次观测。

本研究结论虽然是基于锦州一个地点的观测资料所得,但所用资料的时间较长,涉及了多个玉米品种,且在不同时间尺度上进行了分析,因此具有一定的普遍意义,可以为玉米叶面积指数的模拟及观测研究提供参考。

致谢 感谢中国科学院植物研究所全球变化与陆地生态系统研究组及中国气象局锦州农业气象试验站提供相关资料。

参考文献

- [1] Huang M (黄 玫), Ji J-J (季劲钧). The spatial-temporal distribution of leaf area index in China: A comparison between ecosystem modeling and remote sensing reversion. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(11): 3057–3064 (in Chinese)
- [2] Nagler PL, Glenn EP, Thompson TL, *et al.* Leaf area index and normalized difference vegetation index as predictors of canopy characteristics and light interception by riparian species on the Lower Colorado River Lewis Thompson. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **125**: 1–17
- [3] Hao M-B (郝梦波), Wang K-J (王空军), Dong S-T (董树亭), *et al.* Leaf redundancy of high-yielding maize (*Zea mays* L.) and its effects on maize yield and photosynthesis. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(2): 344–350 (in Chinese)
- [4] Wang X-Q (王希群), Ma L-Y (马履一), Jia Z-K (贾忠奎), *et al.* Research and application advances in leaf area index (LAI). *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2005, **24**(5): 537–541 (in Chinese)
- [5] Liu T-M (刘铁梅), Cao W-X (曹卫星), Luo W-H (罗卫红), *et al.* Simulation on leaf area index in wheat. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2001, **21**(2): 38–41 (in Chinese)
- [6] Lizaso JJ, Batchelor WD, Westgate ME. A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves. *Field Crops Research*, 2003, **80**: 1–17
- [7] Dong Y-Y (董永义), Li G (李 刚), An D-S (安东升), *et al.* Simulation model for predicting the effects of substrate water potential on leaf area of cut lily. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2012, **28**(3): 191–196 (in Chinese)
- [8] Li Y-D (李艳大), Tang L (汤 亮), Zhang Y-P (张玉屏), *et al.* Relationship of PAR interception of canopy to leaf area and yield in rice. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2010, **43**(16): 3296–3305 (in Chinese)
- [9] Yu Q (于 强), Wang T-D (王天铎), Liu J-D (刘建栋), *et al.* A mathematical study on crop architecture and canopy photosynthesis: 1. Model. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 1998, **24**(1): 7–15 (in Chinese)
- [10] Steduto P, Hsiao TC. Maize canopies under two soil water regimes: II. Seasonal trends of evapotranspiration, carbon dioxide assimilation and canopy conductance, and as related to leaf area index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, **89**: 185–200
- [11] Barr AG, Black TA, Hogg EH, *et al.* Inter-annual variability in the leaf area index of a boreal aspen-hazelnut forest in relation to net ecosystem production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **121**: 237–255
- [12] González-Sanpedro MC, Toan TL, Moreno J, *et al.* Seasonal variations of leaf area index of agricultural fields retrieved from Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**: 810–824
- [13] Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, *et al.* Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **121**: 19–35
- [14] Bunce JA. Growth rate, photosynthesis and respiration in relation to leaf area index. *Annals of Botany*, 1989, **63**: 459–463
- [15] Wang L (王 玲), Xie D-T (谢德体), Liu H-L (刘海隆), *et al.* A universal growth model for maize leaf area index. *Journal of Southwest Agricultural University* (Natural Science) (西南农业大学学报·自然科学版), 2004, **26**(3): 303–306 (in Chinese)
- [16] Lin Z-H (林忠辉), Xiang Y-Q (项月琴), Mo X-G (莫兴国), *et al.* Normalized leaf area index model for summer maize. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2003, **11**(4): 74–77 (in Chinese)
- [17] Cheng Y-N (程延年), Tong P-Y (佟屏亚). Study on leaf area dynamic growth of maize in different plant types. *Beijing Agricultural Sciences* (北京农业科学), 1994, **12**(6): 1–4 (in Chinese)
- [18] Hou Y-H (侯玉虹), Chen C-Y (陈传永), Guo Z-Q (郭志强), *et al.* Dynamic characteristics of leaf area index and allocation characteristics of ecological resources for different yielding spring maize populations. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(1): 135–142 (in Chinese)
- [19] Li X-L (李向岭), Zhao M (赵 明), Li C-F (李从锋), *et al.* Dynamic characteristics of leaf area index in maize and its model establishment based on accumulated temperature. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2011, **37**(2): 321–330 (in Chinese)
- [20] Tong P-Y (佟屏亚), Ling B-Y (凌碧莹), Guan Y-X (关义新). Summer maize dry matter accumulation dynamic simulation. *Beijing Agricultural Sciences* (北京农业科学), 1996, **14**(5): 22–25 (in Chinese)
- [21] Wang R-J (王瑞军), Li S-Q (李世清), Wang J-Q (王九全), *et al.* Evaluation of simulation models of spring-maize leaf area and biomass in semi arid agroecosystems. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2008, **16**(1): 139–144 (in Chinese)
- [22] Yin XY, Kropff MJ, McLaren G, *et al.* A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, **77**: 1–16

[23] Zhan X-M (战秀梅), Yang X-R (杨晓日), Yang J-F (杨劲峰), *et al.* Dynamics changes of dry matter accumulation of maize as affected by different quantity of nitrogen and phosphorus and potassium. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2007, **38**(3): 495-499 (in Chinese)

[24] Wang X-L (王信理). How to use the logistic equation reasonably in the stimulation of dry matter accumulation of crops. *Chinese Journal of Agrometeorology* (农业气象), 1986(1): 14-19 (in Chinese)

[25] Luo X-L (罗新兰), Chen X-L (陈祥兰), Yao Y-S (姚运生), *et al.* Study on dynamic simulation model of leaf area index of maize in Northeast China. *Jiangsu Agricultural Sciences* (江苏农业科学), 2012, **40**(1): 91-94 (in Chinese)

[26] Zhang X-D (张旭东), Cai H-J (蔡焕杰), Fu Y-J (付玉娟), *et al.* Study on leaf area index of summer maize in loess areas. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2006, **24**(2): 25-29 (in Chinese)

[27] Ping X-Y (平晓燕), Zhou G-S (周广胜), Sun J-S (孙敬松), *et al.* Dynamic simulation of photosynthate allocation in maize organs based on functional equilibrium hypothesis. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(1): 129-135 (in Chinese)

[28] Zheng G-Q (郑国清), Zhang R-L (张瑞玲), Gao L-Z (高亮之). Progress and perspective in maize growth simulation mode in China. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2003, **11**(2): 66-70 (in Chinese)

[29] Tong P-Y (佟屏亚), Cheng Y-N (程延年). *Maize Growth and Yield Model*. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1997 (in Chinese)

[30] Ma X-Y (麻雪艳), Zhou G-S (周广胜). Method of determining the maximum leaf area index of spring maize and its application. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(8): 2596-2603 (in Chinese)

[31] Qi H-Y (祁红彦), Zhou G-S (周广胜), Xu Z-Z (许振柱). Vertical distribution characteristics of photosynthetically active radiation in maize canopy and its controlling factors. *Journal of Meteorology and Environment* (气象与环境学报), 2008, **24**(1): 22-26 (in Chinese)

[32] Zhang Y-S (张银锁), Yu Z-R (宇振荣), Driessen PM. Growing degree-days requirement for plant and leaf development of maize (*Zea mays* L.): An experimental and simulation study. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(4): 561-565 (in Chinese)

[33] Sheng J (盛聚), Xie S-Q (谢式千), Pan C-Y (潘承毅). *Probability Theory and Mathematical Statistics*. Beijing: Higher Education Press, 2007 (in Chinese)

作者简介 麻雪艳,女,1988年生,硕士研究生.主要从事农业气象研究,发表论文1篇.E-mail: Maxueyan88@126.com

责任编辑 杨弘