

夏玉米叶面积指数模型适用性及误差分析

彭记永^{1,2}, 李军玲^{1,2}, 张志红^{1,2}

(1.河南省气象科学研究所,河南 郑州 450003;2.中国气象局农业气象保障与应用技术重点实验室,河南 郑州 450003)

摘要:为了研究叶面积指数模型的适用性,利用郑州农业气象试验站 2009—2013 年夏玉米观测资料和气象资料,建立修正的 Logistic 叶面积指数模型,并通过 2014—2017 年的数据对模型进行了检验。为了进一步研究模型在不同地区的适用性,分别于 2014 年、2015 年在鹤壁、黄泛区、驻马店、郑州 4 个站点进行 4 个品种的分期播种试验,利用 4 个站点 2 a 的分期播种数据进行模型验证。结果表明:叶面积指数实测值与模拟值变化趋势基本一致,三叶期、七叶期平均绝对误差为 0.01~0.23,平均相对误差为 0%~12%,拔节期、抽雄期、抽雄后 10d 绝对误差为 0~1.11,相对误差为 0%~62%。模拟值与实测值之间平均绝对误差为 0.06~0.32,平均相对误差为 4%~18%。总体上,修正的 Logistic 叶面积指数模型在不同地区不同年份,均表现出一定的适用性,可用于夏玉米正常生长条件下叶面积指数的模拟,为修正的 Logistic 叶面积指数模型的推广应用提供数据支持。

关键字:叶面积指数;Logistic 模型;夏玉米;适用性;河南

中图分类号:S513;S11 **文献标志码:**A

Applicability and error analysis of leaf area index model of summer maize

PENG Ji-yong^{1,2}, LI Jun-ling^{1,2}, ZHANG Zhi-hong^{1,2}

(1. Henan Institute of Meteorological Science, Zhengzhou, Henan 450003, China;

2. Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, China Meteorological Administration, Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: In order to study the applicability of Logistics model for leaf area index (LAI), summer maize data and meteorological data from Zhengzhou agricultural meteorological station from 2009 to 2013 were used to establish Logistic LAI model. The model was verified by four years data from 2014 to 2017. To further explore applicability of the model in different regions, four summer maize varieties were sown by four stages in 2014 and 2015 in four stations (Hebi, Yellow river flooded area, Zhumadian and Zhengzhou). The model was verified by 4 stations data in 2 years. The results showed that the trend of measured values was basically the same as that of simulated values. The mean absolute error of three leaf stage and seven leaf stage was between 0.01~0.23, the average relative error was 0%~12%. The absolute error of jointing stage, male pumping stage, and 10 d after tassel was 0~1.11, and relative error was 0%~62%. Mean absolute error between simulated values and measured values was 0.06~0.32, and the average relative error was 4%~18%. On the whole, the model showed good applicability in different years and in different regions. It can be used for the simulation leaf area index under the condition of normal growth of summer maize, which provided reliable data support for the promotion and application of Logistic leaf area index model.

Keywords: LAI; Logistic model; summer maize; applicability; Henan Province

河南属于我国玉米种植面积最大的区域——黄淮平原夏玉米种植区^[1-2],夏玉米是河南省仅次

于小麦的主要粮食作物^[3]。叶片是作物进行光合作用与外界进行水、气交换的主要器官,合理的叶

收稿日期:2018-11-16

修回日期:2019-08-17

项目资助:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406026);中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放研究基金(AMF201609)

作者简介:彭记永(1981-),男,河南汝南人,高级工程师,硕士,主要从事农业气象研究。E-mail:ppeng345@163.com

通信作者:李军玲(1979-),女,河南修武人,正研级高级工程师,博士,主要从事遥感和农业气象研究。E-mail:ljl8843@126.com

面积是充分利用光能、保证作物高产优质的一个重要指标^[4]。叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)用来反映植物叶面积数量、冠层结构变化、植物群落生命活力及其环境效应,是广泛应用于作物生长模型、冠层反射模型、能量平衡模型、气候模型等诸多方面的重要生物学参数^[5-9]。因此进行夏玉米叶面积指数的模拟研究,为河南省及黄淮地区夏玉米叶面积指数模型的普适应用提供理论依据具有重要意义。

为了模拟叶面积指数的变化规律,国内外一些学者建立了多种叶面积指数模拟模型,包括叶面积指数有理方程^[10-11]、修正的 Gaussian 模型^[12]、Logistic 方程^[13]及修正的 Logistic 方程^[14]等。其中,修正的 Logistic 方程具有较强的生态学意义,应用最为广泛。林忠辉、王玲等^[15-16]把夏玉米生长分成2个阶段,以积温指标表示的生育阶段为自变量,扩展了 Logistic 叶面积生长模型,取得了较好的模拟效果。张旭东等^[17]建立了夏玉米叶面积指数与积温之间的归一化模型,提出了精确且唯一确定的 Logistic 归一化方法。孔德胤等^[18]以河套灌区玉米为研究对象,采用修正的 Logistic 方程,构建了玉米相对叶面积指数动态普适模型。麻雪燕等^[19-20]提出了春玉米叶面积指数达到最大时的积温指标,采用修正的 Logistic 方程构建了春玉米相对叶面积指数动态普适模型,并确定了构建玉米叶面积指数模型所需的最适野外观测资料。以上研究,大多是在单一站点针对少数年份进行的模拟。利用不同品种在不同站点进行联合试验来检验模型的适用性研究还不多见。因此建立统一的生长模型,模拟多站点夏玉米叶面积指数变化特征,并检验模型在不同地区不同年份的适用性,有待于进一步研究。

本文利用郑州农业气象试验站 2009—2013 年夏玉米观测资料和气象资料,首先构建修正的 Logistic 叶面积指数模型,并通过 2014—2017 年的

数据对模型进行检验。利用 2014 年和 2015 年在郑州、鹤壁、黄泛区、驻马店 4 个站点 4 个品种的分期播种试验对模型在不同地区的普遍适用性进行进一步验证和误差分析。

1 材料和方法

1.1 数据来源

1.1.1 气象数据来源 试验站点所在的国家气象观测站气象数据从河南省气象局大气探测中心数据库中提取。选取日平均气温进行归一化处理。

1.1.2 郑州农业气象试验站数据 郑州农业气象试验站紧邻郑州国家气象观测站,常年进行夏玉米生长发育的连续观测,地块固定,田间管理水平一致,试验选取 2009—2017 年的农业气象资料(表 1)。

夏玉米 LAI 观测按照《中国气象局农业气象观测规范(上卷)》^[21]进行,地段分 4 个小区,分别于三叶期、七叶期、拔节期、抽雄期、乳熟期测量叶面积。在田间每个区连续量出 10 株高度,按高度比例取 5 株进行 LAI 测量,叶面积测量方法采用长宽系数法进行:

$$S_i = \sum_{i=1}^n L_i \times D_i \times k \quad (1)$$

式中, S_i 为单株叶面积(cm^2); L_i 为叶长(cm), D_i 为叶宽(cm)。k 为叶面积校正系数,取 0.70。

1.1.3 试验数据 选取 4 个站点:鹤壁、郑州、黄泛区、驻马店,南北大致相差 3 个纬度,全部在平原地区种植,代表河南省南北玉米种植制度以及气候水平变化的差异。

试验地在研究区尽量均匀分布,排灌方便,地势平坦,地力均匀一致,代表当地平均水平。试验采用裂区设计,每个品种重复 4 次,共 16 个小区。平均种植密度为:60 000 株· hm^{-2} ,代表河南省夏玉米平均种植密度。发育期及气象信息详见表 2,叶面积指数测定方法同 1.1.2。

表 1 郑州农业气象试验站 2009—2017 年玉米品种及主要生育期

Table 1 Maize varieties and main growth periods in Zhengzhou agricultural meteorological station in 2009—2017

年份 Year	品种 Variety	播种日期(月-日) Sowing date (m-d)	成熟日期(月-日) Maturity date(m-d)	最大叶面积指数 Maximum LAI	积温 Accumulated temperature /($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)
2009	郑单 958 Zhengdan 958	06-05	09-08	4.3	2573.3
2010	浚单 20 Xundan 20	06-07	09-14	4.0	2696.9
2011	浚单 20 Xundan 20	06-04	09-20	3.5	2804.0
2012	郑单 958 Zhengdan 958	06-09	09-16	4.4	2655.6
2013	浚单 20 Xundan 20	06-03	09-10	4.3	2806.0
2014	浚单 20 Xundan 20	06-04	09-18	3.2	2778.0
2015	浚单 20 Xundan 20	06-03	09-20	3.6	2859.4
2016	浚单 20 Xundan 20	06-02	09-12	4.8	2839.0
2017	浚单 20 Xundan 20	06-04	09-22	4.0	3017.4

表 2 2014—2015 年黄泛区、鹤壁、驻马店和郑州站点夏玉米发育期及气象信息
Table 2 Summer maize development stages and meteorological information in Yellow river flooded area, Hebi, Zhumadian and Zhengzhou stations in 2014—2015

年份 Year	站点 Station	品种 Variety	播种日期(月-日) Sowing date(m-d)	抽雄后 10 d 日期 (月-日) Date of 10 d after tassel(m-d)	成熟日期 (月-日) Maturity date (m-d)	积温 Accumulated temperature ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	最大 LAI Maximum LAI
2014	黄泛区 Yellow river flooded area	浚单 20 Xundan 20	06-05	08-05	09-20	2689.6	3.58
		浚单 29 Xundan 29		08-05		2689.6	3.99
		浚单 509 Xundan 509		08-07		2689.6	3.94
		浚单 3136 Xundan 3136		08-08		2689.6	4.14
	鹤壁 Hebi	浚单 20 Xundan 20	06-09	08-09	09-28	2698.2	4.15
		浚单 29 Xundan 29		08-09		2698.2	4.28
		浚单 509 Xundan 509		08-13		2698.2	4.47
		浚单 3136 Xundan 3136		08-13		2698.2	4.14
	驻马店 Zhumadian	浚单 20 Xundan 20	06-04	08-04	09-22	2667.1	4.16
		浚单 29 Xundan 29		08-05		2667.1	4.02
		浚单 509 Xundan 509		08-05		2667.1	3.87
		浚单 3136 Xundan 3136		08-05		2667.1	3.93
郑州 Zhengzhou	浚单 20 Xundan 20	05-30	08-07	09-22	2903.1	3.51	
	浚单 29 Xundan 29		08-07		2967.7	3.46	
	浚单 509 Xundan 509		08-07		2989.7	4.09	
	浚单 3136 Xundan 3136		08-01		2945.4	3.87	
2015	黄泛区 Yellow river flooded area	浚单 20 Xundan 20	06-05	08-10	09-16	2607.2	3.99
		浚单 29 Xundan 29		08-09		2586.0	3.11
		浚单 509 Xundan 509		08-10		2607.2	3.33
		浚单 3136 Xundan 3136		08-10		2586.0	3.30
	鹤壁 Hebi	浚单 20 Xundan 20	06-09	08-09	09-28	2672.5	4.27
		浚单 29 Xundan 29		08-11		2672.5	4.29
		浚单 509 Xundan 509		08-11		2672.5	4.31
		浚单 3136 Xundan 3136		08-10		2672.5	4.49
	驻马店 Zhumadian	浚单 20 Xundan 20	06-01	08-05	09-23	2810.6	4.12
		浚单 29 Xundan 29		08-07		2810.6	3.81
		浚单 509 Xundan 509		08-07		3019.2	3.84
		浚单 3136 Xundan 3136		08-07		3019.2	3.90
郑州 Zhengzhou	浚单 20 Xundan 20	05-31	08-06	10-06	3284.0	3.36	
	浚单 29 Xundan 29		08-06		3284.0	3.46	
	浚单 509 Xundan 509		08-06		3284.0	3.28	
	浚单 3136 Xundan 3136		08-06		3284.0	3.52	

1.2 Logistic 模型

Logistic 模型是描述种群在有限空间呈 S 型增长的数学模型, 有两种形式, 分别为微分式和积分式:

$$\frac{dN}{dt} = rN\left(1 - \frac{N}{K}\right) \quad (2)$$

$$N = \frac{K}{1 + \exp(a - rt)} \quad (3)$$

式中, N 为生物增长量, t 为时间序列, r 为内禀自然增长率, K 为环境最大容量, a 为常数。

$N = K/2$ 为生长曲线的拐点, 即最佳生长期。

Logistic 曲线为 S 型曲线, 不能表述种群衰退期生物量下降过程, 而王信理^[14] 提出修正的 Logistic 模型较好地描述了种群密度随时间的变化过程:

$$\frac{dX}{dt} = (a_1 + b_1X) \cdot X \cdot (a_2 + b_2t) \quad (4)$$

$$X = \frac{X_m}{1 + \exp(a_1t^2 + b_1t + c)} \quad (5)$$

式中, X 为生物增长量, t 为时间序列, X_m 为环境最大容量, a 、 b 、 c 为常数。

选取郑州农业气象试验站 2009—2013 年的农业气象资料, 利用 Matlab2014a 拟合修正的 Logistic 模型参数, 并利用 2014—2017 年的数据进行模型检验。

$$LAIL = \frac{LAI_{\max}}{1 + e^{(a+b \times DS + c \times DS^2)}} \quad (6)$$

式中, $LAIL$ 为模拟叶面积指数, LAI_{\max} 为最大叶面积指数, DS 为归一化积温, a 、 b 、 c 为拟合参数。

以吐丝日为界将整个生育期分为 2 个阶段, 出苗-吐丝前 1 d 为第 1 阶段, 积温用 AT1 表示, 吐丝日-成熟期为第 2 阶段, 积温用 AT2 表示:

$$\begin{cases} AT1 = \sum_{i=1}^{n-1} T_i \\ AT2 = \sum_{i=n}^m T_i \end{cases} \quad (7)$$

玉米生育期积温归一化公式为:

$$DS_i = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^{n-1} T_i}{AT1} \\ 1 + \frac{\sum_{i=n}^m T_i}{AT2} \end{cases} \quad (8)$$

式(7)和式(8)中 n 和 m 分别为玉米出苗—吐丝日、吐丝日—成熟期天数, T_i 为逐日平均气温, DS_i 为积温归一化后数值。第一阶段 DS_i 取值范围为 0 ~ 1, 第二阶段其取值范围为 1 ~ 2。

1.3 误差分析方法

利用绝对误差 (Absolute Error, AE) 和相对误差 (Relative Error, RE) 对模型进行评价, 误差越小, 表明模拟精度越高。

$$AE = |S_i - O_i| \quad (9)$$

$$RE = \frac{|S_i - O_i|}{\bar{O}_i} \times 100\% \quad (10)$$

式中, AE 为绝对相对误差; RE 为相对误差; S_i 为第 i 个模拟值; O_i 为第 i 个观测值; \bar{O}_i 为平均观测值。

2 结果与分析

2.1 模型的建立

结合修正的 Logistic 方程^[15], 以吐丝日为界将整个生育期分为 2 个阶段, 把积温和叶面积进行归一化处理, 以抽雄期 LAI 为最大 LAI_{max} 。利用 Matlab2014a 拟合 Logistic 模型参数 (表 3), 模型系数均通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验, 决定系数 (R^2) 为 0.9902, 说明曲线拟合度较好。均方根误差 (RMSE) 为 0.0523, 残差平方和 (SSE) 为 0.0110, 建立的模型具有较好的拟合效果。

模型检验表明, 叶面积指数模拟值与实测值吻合性较好 (图 1), 变化趋势较一致。误差分析表明 (表 4), 除 2015 年七叶期、拔节期绝对误差为 0.36、0.65, 相对误差为 20%、37%; 2016 年七叶期、乳熟期绝对误差为 0.34、0.41, 相对误差为 16%、19%之外, 其他年份和生育阶段, 绝对误差 ≤ 0.19 , 相对误差 $\leq 10\%$ 。总体上, 平均绝对误差为 0.16, 平均相对误差为 9%, 模拟值与实测值变化趋势较为一致。

表 3 模型参数统计分析

Table 3 Statistical analysis of model parameters

年份 Year	模型系数 Model coefficient			残差平方和 SSE	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE
	a	b	c			
	2009-2013	12.26	-24.95			

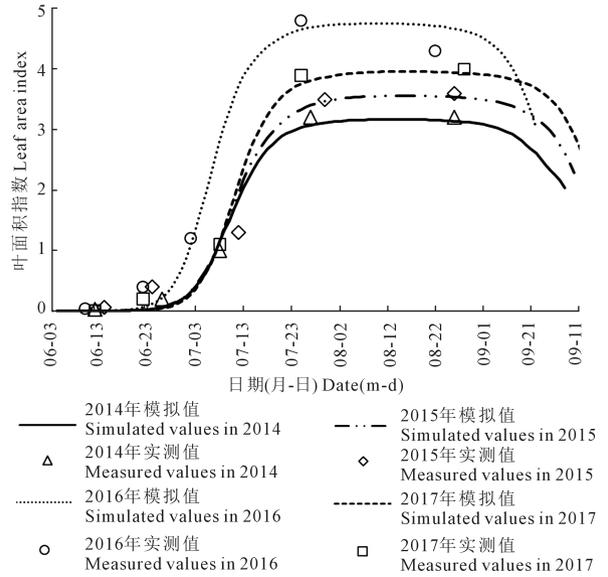


图 1 叶面积指数实测值与模拟值拟合曲线

Fig.1 The fitting of leaf area index measured value and simulated value

表 4 2014—2016 年郑州农业气象试验站夏玉米叶面积指数模型误差分析

Table 4 Model error analysis of leaf area index in Zhengzhou agricultural meteorological station 2014-2016

生育期 Growth stage	绝对误差 Absolute error				相对误差 Relative error/%			
	2014	2015	2016	2017	2014	2015	2016	2017
三叶期 Three-leaf stage	-0.03	-0.06	-0.04	-0.01	2	3	2	1
七叶期 Seven-leaf stage	-0.14	-0.36	-0.34	-0.19	9	20	16	10
拔节期 Jointing stage	0.14	0.65	-0.10	0.05	9	37	5	2
抽雄期 Tasseling stage	-0.13	-0.03	-0.15	-0.15	9	2	7	8
乳熟期 Milk stage	-0.06	-0.06	0.41	-0.07	4	3	19	4

2.2 模型的适用性及误差分析

为了进一步研究模型在不同地区的适用性, 利用 2014 年和 2015 年在郑州、鹤壁、黄泛区、驻马店 4 个站点进行 4 个品种的分期播种试验进行模型的验证, 模拟结果见图 2。从图上可以看出, 实测叶面积指数与模拟叶面积指数一致性较好, 实测值在拟

合曲线附近。三叶期、七叶期拟合效果较好,拔节期、抽雄期、抽雄后 10 d 实测值变化较大。

绝对误差分析表明(表 5),夏玉米三叶期-七叶期,2014 年绝对误差 ≤ 0.23 ,2015 年绝对误差 ≤ 0.15 。拔节期夏玉米生长较快,绝对误差较大,其中

驻马店 2014 年和 2015 年浚单 20 拔节期绝对误差较大,为 1.11 和 0.97。抽雄期误差较小为 0.00~0.45,其中 2015 年郑州浚单 20 误差最大为 0.45。抽雄后 10 d 绝对误差均小于 0.50,郑州地区 2014 年浚单 20 误差最大为 0.48。平均绝对误差为 0.06~0.32。

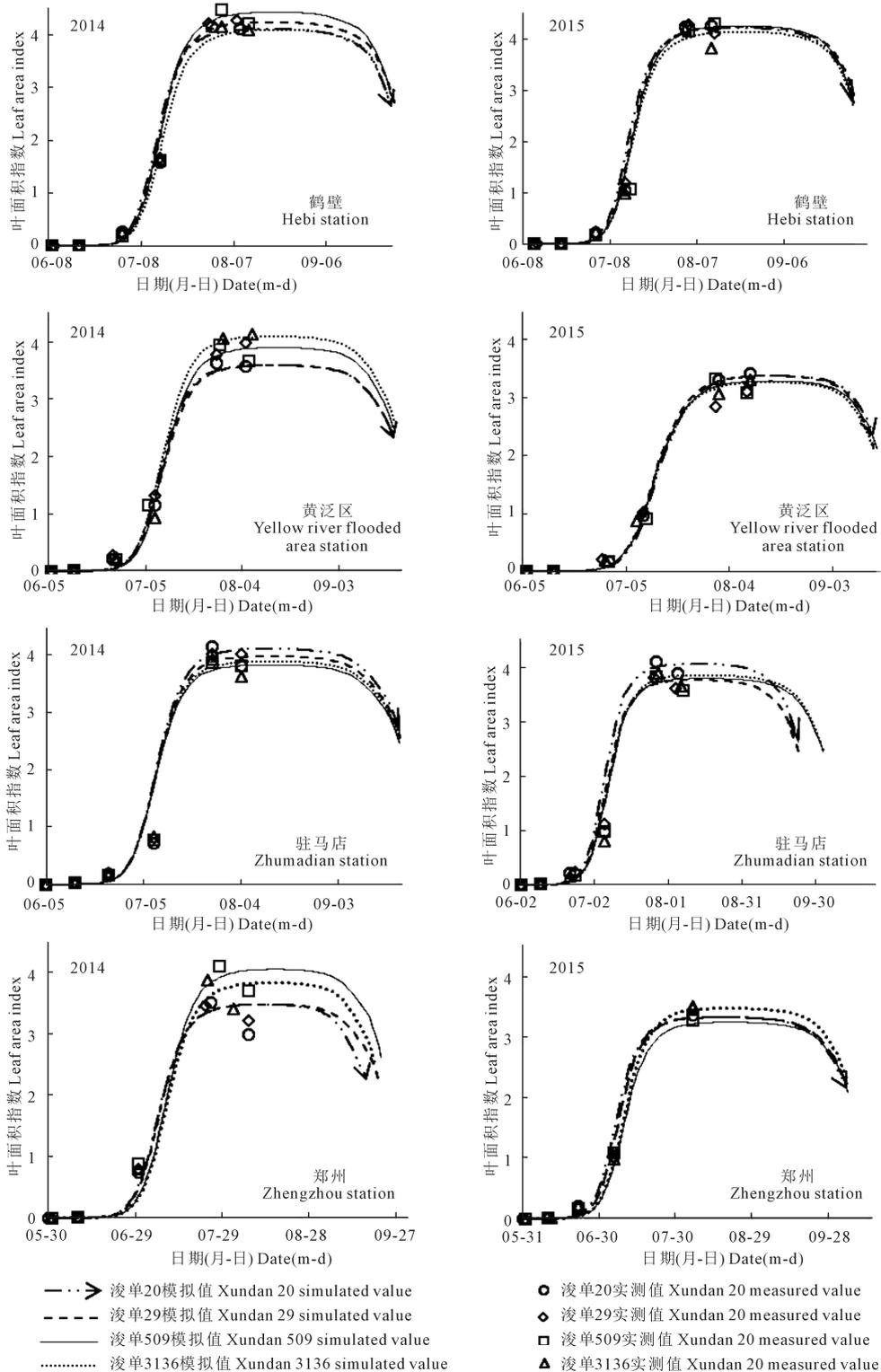


图 2 2014 年、2015 年叶面积指数模拟值与实测值对比分析

Fig.2 Comparative analysis of leaf area index simulated values and measured values in 2014 and 2015

表 5 黄泛区、鹤壁、驻马店和郑州站点叶面积指数绝对误差分析

Table 5 Absolute error analysis of leaf area index in Yellow river flooded area station, Hebi station, Zhumadian station and Zhengzhou station

年份 Year	站点 Station	品种 Variety	三叶期 Three-leaf stage	七叶期 Seven-leaf stage	拔节期 Jointing stage	抽雄期 Tasseling stage	抽雄后 10 d 10 d after tassel	平均值 Average
2014	黄泛区 Yellow river flooded area	浚单 20 Xundan 20	0.02	0.03	0.23	0.13	0.00	0.08
		浚单 29 Xundan 29	0.02	0.23	0.11	0.31	0.41	0.22
		浚单 509 Xundan 509	0.01	0.16	0.36	0.16	0.22	0.18
		浚单 3136 Xundan 3136	0.01	0.18	0.50	0.06	0.05	0.16
	鹤壁 Hebi	浚单 20 Xundan 20	0.01	0.10	0.66	0.14	0.01	0.18
		浚单 29 Xundan 29	0.01	0.12	0.39	0.13	0.07	0.14
		浚单 509 Xundan 509	0.01	0.05	0.41	0.14	0.21	0.16
		浚单 3136 Xundan 3136	0.01	0.13	0.11	0.14	0.01	0.08
	驻马店 Zhumadian	浚单 20 Xundan 20	0.02	0.13	1.11	0.15	0.18	0.32
		浚单 29 Xundan 29	0.03	0.14	0.96	0.13	0.05	0.26
		浚单 509 Xundan 509	0.02	0.10	0.92	0.14	0.00	0.24
		浚单 3136 Xundan 3136	0.03	0.10	0.90	0.14	0.25	0.28
	郑州 Zhengzhou	浚单 20 Xundan 20	0.02	—	0.21	0.14	0.48	0.21
		浚单 29 Xundan 29	0.02	—	0.32	0.13	0.26	0.18
		浚单 509 Xundan 509	0.02	—	0.53	0.18	0.33	0.27
		浚单 3136 Xundan 3136	0.02	—	0.46	0.28	0.38	0.29
2015	黄泛区 Yellow river flooded area	浚单 20 Xundan 20	0.01	0.10	0.10	0.05	0.04	0.06
		浚单 29 Xundan 29	0.01	0.15	0.04	0.42	0.26	0.18
		浚单 509 Xundan 509	0.01	0.08	0.22	0.14	0.19	0.13
		浚单 3136 Xundan 3136	0.01	0.13	0.22	0.13	0.04	0.11
	鹤壁 Hebi	浚单 20 Xundan 20	0.01	0.09	0.61	0.11	0.06	0.18
		浚单 29 Xundan 29	0.01	0.13	0.22	0.14	0.11	0.12
		浚单 509 Xundan 509	0.01	0.07	0.80	0.00	0.06	0.19
		浚单 3136 Xundan 3136	0.01	0.13	0.33	0.17	0.31	0.19
	驻马店 Zhumadian	浚单 20 Xundan 20	0.01	0.14	0.97	0.10	0.17	0.28
		浚单 29 Xundan 29	0.02	0.12	0.52	0.12	0.15	0.19
		浚单 509 Xundan 509	0.01	0.08	0.51	0.12	0.20	0.18
		浚单 3136 Xundan 3136	0.01	0.11	0.70	0.11	0.19	0.22
	郑州 Zhengzhou	浚单 20 Xundan 20	0.02	—	0.12	0.45	0.04	0.16
		浚单 29 Xundan 29	0.02	—	0.15	0.29	0.15	0.15
		浚单 509 Xundan 509	0.01	—	0.13	0.17	0.06	0.09
		浚单 3136 Xundan 3136	0.01	—	0.16	0.01	0.07	0.06

相对误差分析表明(表 6),三叶期-七叶期叶面积指数较小,三叶期相对误差 $\leq 2\%$,七叶期相对误差 $\leq 12\%$ 。拔节期相对误差变化较大为 $3\% \sim 62\%$ 之间,其中驻马店误差最大,两个年度相对误差均 $\geq 30\%$ 。抽雄期相对误差在 $0\% \sim 39\%$ 之间,其中 2015 年郑州浚单 20 最大为 39% ,其余站点均小于 30% 。抽雄后 10 d 相对误差在 $0\% \sim 26\%$ 之间,其中 2014 年郑州浚单 20 最大为 26% ,其次是 2014 年黄泛区浚单 29 为 22% ,其余站点和年份均 $< 20\%$ 。平均相对误差为 $4\% \sim 18\%$ 。

3 讨论

吕新等^[22]认为用积温作为衡量玉米生长发育过程的时间标尺比用天数更具有代表性,能更好地反映玉米的生长状况。麻雪燕等^[19]研究认为利用修正的 Logistic 方程建立玉米叶面积指数动态普适

模型至少需要 3 a 的观测数据,且每年至少进行 4 次观测。本研究利用郑州农业气象试验站 5 a 的田间试验数据,对积温和 LAI 进行归一化处理,建立 Logistic 叶面积指数普适模型,较好地模拟了夏玉米叶面积指数变化规律。

模型误差产生的原因,有以下 3 个方面:进行 LAI 观测时,由于人工取样和观测误差^[23],而且不同的生长阶段和不同叶位的叶面积系数 k 并非一个定值^[24],而是表现出一定的时间和空间变异性,实际观测值存在一定程度上的误差;夏玉米进入拔节期,植株生长旺盛,玉米叶片生长受自然条件影响较大^[25-27],不良外界环境条件是夏玉米 LAI 误差较大的原因之一;抽雄开花期之后,受气象灾害和病虫害的影响,以及农田管理水平和地块间土壤肥力差异,造成玉米叶片衰老速度不同^[28-31],对模型模拟精度有一定的影响。

表 6 黄泛区、鹤壁、驻马店和郑州站点叶面积指数相对误差分析/%
Table 6 Relative error analysis of leaf area index in Yellow river flooded area station,
Hebi station, Zhumadian station and Zhengzhou station

年份 Year	站点 Station	品种 Variety	三叶期 Three-leaf stage	七叶期 Seven-leaf stage	拔节期 Jointing stage	抽雄期 Tasseling stage	抽雄后 10 d 10 d after tassel	平均值/% Average	
2014	黄泛区 Yellow river flooded area	浚单 20 Xundan 20	1	2	13	8	0	5	
		浚单 29 Xundan 29	1	12	6	16	22	11	
		浚单 509 Xundan 509	1	9	20	9	12	10	
		浚单 3136 Xundan 3136	1	10	27	3	3	9	
	鹤壁 Hebi	浚单 20 Xundan 20	0	5	33	7	0	9	
		浚单 29 Xundan 29	0	6	19	6	3	7	
		浚单 509 Xundan 509	0	2	20	7	10	8	
		浚单 3136 Xundan 3136	0	6	5	7	0	4	
	驻马店 Zhumadian	浚单 20 Xundan 20	1	7	63	8	10	18	
		浚单 29 Xundan 29	2	8	53	7	3	14	
		浚单 509 Xundan 509	1	6	53	8	0	14	
		浚单 3136 Xundan 3136	2	6	52	8	15	17	
	郑州 Zhengzhou	浚单 20 Xundan 20	1	—	12	8	26	12	
		浚单 29 Xundan 29	1	—	17	7	14	10	
		浚单 509 Xundan 509	1	—	24	8	15	12	
		浚单 3136 Xundan 3136	1	—	23	14	19	14	
	2015	黄泛区 Yellow river flooded area	浚单 20 Xundan 20	1	6	6	3	3	4
			浚单 29 Xundan 29	1	10	3	29	18	12
			浚单 509 Xundan 509	1	5	15	9	13	9
			浚单 3136 Xundan 3136	1	9	15	9	3	7
鹤壁 Hebi		浚单 20 Xundan 20	1	5	31	6	3	9	
		浚单 29 Xundan 29	1	7	11	7	6	6	
		浚单 509 Xundan 509	1	4	41	0	3	10	
		浚单 3136 Xundan 3136	1	7	18	9	17	10	
驻马店 Zhumadian		浚单 20 Xundan 20	1	8	53	5	9	15	
		浚单 29 Xundan 29	1	7	30	7	9	11	
		浚单 509 Xundan 509	1	5	30	7	12	11	
		浚单 3136 Xundan 3136	1	6	41	6	11	13	
郑州 Zhengzhou		浚单 20 Xundan 20	2	—	10	39	3	14	
		浚单 29 Xundan 29	2	—	13	25	13	13	
		浚单 509 Xundan 509	1	—	11	15	5	8	
		浚单 3136 Xundan 3136	1	—	14	1	6	5	

修正的 Logistic 叶面积指数模型,其普遍适用性在不同地区得到了验证分析^[15-19],但不同作者建立的模型系数并不相同,因此在模型的应用过程中需要参数的本地化处理,对模型进行验证分析,尽量考虑不同种植密度、天气、水肥亏缺以及病虫害害的影响。

4 结 论

利用郑州农业气象试验站 5 a 的田间试验数据,建立修正的 Logistic 叶面积指数普适模型,模型系数均通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,决定系数(R^2)为 0.9902,均方误差根(RMSE)为 0.0523,残差平方和(SSE)为 0.0110,模型具有较好的拟合效果。检验表明,平均绝对误差为 0.16,平均相对误差为 9%,模型较好地模拟了郑州农业气象试验站夏玉米叶面积指数变化规律。在河南省 4 个站点进行模型

的适用性验证分析,平均绝对误差为 0.06~0.32,平均相对误差为 4%~18%。除个别站点个别发育期模拟误差稍大之外,其余站点和玉米品种均达到较好的模拟效果。

本研究利用 4 个站点进行了 2 a 的试验研究,涉及 4 个玉米品种,在不同时间和空间尺度上进行了分析,模型能够较为精确地计算任一生长阶段的群体平均 LAI,表明模型具有广泛的适用性,研究结果具有一定的普遍意义。模型可为黄淮地区夏玉米正常生长发育情况、正常播种密度条件叶面积指数的模拟及观测研究提供参考,为实现基于 LAI 的作物模型的准确计算和遥感估产提供依据。

参 考 文 献:

- [1] 余卫东,陈怀亮.河南省夏玉米精细化农业气候区划研究[J].气象与环境科学,2010,33(2):14-19.