

# 宁夏灌区春小麦叶面积指数的动态模拟

张学艺<sup>1,2</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 黄峰<sup>1</sup>, 刘静<sup>1</sup>, 马国飞<sup>1</sup>

(1.宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏银川 750002; 2.南京信息工程大学, 江苏南京 210044)

**摘要:**为实现宁夏春小麦产量动态预报技术的业务化,需获得 LAI(Leaf Area Index, 叶面积指数)这一关键参数,依据 1994~2009 年宁夏永宁国家一级农业试验站大田观测数据,研究了宁夏引黄灌区春小麦的 LAI 变化规律。对比分析了 3 个指标(生理日数、有效积温和日照时数)、3 个阶段(三叶~抽穗、抽穗~乳熟、三叶~乳熟)、不同函数模拟宁夏春小麦 LAI 的动态变化过程。结果表明,对 LAI 和各指标变量归一化后,三叶~乳熟期用生理日数为指标变量的  $y = (a + bx)/(1 + cx + dx^2)$  模拟效果最好,常用的  $y = a/[1 + \exp(b + cx + dx^2)]$  及 Richard 方程模拟效果并不理想;分阶段后的三叶~抽穗期模拟精度比三叶~乳熟期有明显提高,决定系数  $R^2$  从 0.90795 提高到 0.95796,均方根误差从 0.10359 提高到 0.07612,精确度从 0.9156 提高到 0.93351,准确度从 0.9717 提高到 0.9848,且相关性都达到极显著水平( $\alpha = 0.001$ ),这表明该方法可以很好地获得春小麦的 LAI。

**关键词:**春小麦;叶面积指数;气象要素;动态模拟;归一化处理

**中图分类号:** S512.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)01-0193-04

叶面积指数是描述作物群体质量的重要指标,对群体的光分布、光能利用、作物蒸腾蒸发、干物质积累及产量构成有显著影响,而且还是估算作物生长模型的重要生理参数<sup>[1]</sup>。根据目前国内小麦叶面积指数动态模拟的研究现状,大致可分为三类:一类是基于作物模型原理的,如国外作物模型 WOFOST、DSSAT、GCM 等,国内的 WCSODS 等<sup>[2]</sup>。如熊伟等<sup>[3]</sup>分析了 CERES - Wheat 模型在我国麦区应用的效果及误差来源,石春林等<sup>[4]</sup>用 WCSODS 模型研究了小麦渍害模型及其在灾害预警上的应用,孙成明等<sup>[5]</sup>基于 FACE 试验的水稻叶面积指数动态模拟研究。此类模型模拟时需输入大量的参数,区域性强,运行环境复杂。第二类是基于地统计学和相关分析法的叶面积指数动态模拟,主要以生理日数或气象要素为指标,建立各指标与小麦 LAI 的线性统计或者其他的回归分析。如李福生等<sup>[6]</sup>建立的 LAI 与气象要素的地统计模型。此类方法虽然简单,但缺乏一定的生物学意义。第三类是基于 Logistic 作物生长曲线或其修正形式的模拟,王信里<sup>[7]</sup>详细讨论了将它应用于农业气象学中存在的问题,并提出了 Logistic 方程的修正形式,该修正形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,常被用作叶面积指数模拟模型。此类方法不但具备一定的生物学意义,且引入的指标少,一般为生理日数、积温等,模拟效果好,适宜于业务推广使用。如涂修亮等<sup>[8]</sup>以生理日数为指标,分 3 个阶段模拟了 LAI 的动态变

化;张宾等<sup>[9]</sup>也以生理日数为指标,模拟了冬小麦三叶至成熟期 LAI 的动态变化;刘战东等<sup>[1]</sup>以有效积温为指标,分 2 个阶段模拟了 LAI 的动态变化。此类研究都是从某一个指标、某一个发育过程(阶段)或某一函数进行模拟。对麦类作物而言,尤其是北方麦区,除生理日数和积温是有效的影响因子外,日照时数也是比较重要的影响因子<sup>[2]</sup>,而模拟中到底用哪一个指标更为合适?这方面的对比研究较少。另外,除了  $y = a/(1 + \exp(b + cx + dx^2))$  及 Richard 这两种常用的 Logistic 修正形式外,是否还有其他更为适合的修正形式?除此之外,常见研究用资料的时长一般不超过 4 a,那么长时间序列资料(16 a)的模拟效果会如何?

本文以永宁国家一级农业试验站 1994~2009 年共 16 a 同一品种(永良 4 号)的大田观测资料为依据,分析了不同指标、不同阶段、不同函数的模拟情况,试图为回答上面的问题提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 观测点基本情况

大田观测点位于宁夏引黄灌区中部的永宁县杨河乡王太村,地理位置为东经 106°15', 北纬 38°14', 海拔 1 116.7 m,大田面积为 20~100 hm<sup>2</sup>,昼夜温差大、日照时间长,土地肥沃、灌溉便利。品种为永良 4 号,属中晚熟种,是近 10 a 来宁夏主要的春小麦品种,种植面积大,在整个灌区具有代表性。种植方式

收稿日期:2010-03-12

基金项目:中国气象局气象行业科研专项(GYHY200806022);科技部农业科技成果转化资金项目(2006GB24160429);中国气象局重点支持省所科研项目(CMATG2007S06)

作者简介:张学艺(1978—),男,河南漯河人,硕士生,主要从事农业气象及生态遥感应用。E-mail: yifei\_lzu@sohu.com。

为套作条播,播量 375 kg/hm<sup>2</sup>,播种时条播机施磷酸二铵 150 kg/hm<sup>2</sup>、复合肥料 300 kg/hm<sup>2</sup>,其他时段人工撒施尿素 300 kg/hm<sup>2</sup>,黄河水自流灌溉,灌溉量 0.06 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>。

1.2 数据整理

1.2.1 农业气象观测数据 农业气象观测数据为 1994~2009 年观测点春小麦发育期、物候期及叶面积指数数据,观测要求参照《农业气象观测规范》<sup>[10]</sup>,叶面积指数 LAI 公式为:

$$LAI = \rho \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (L_{ij} \times B_{ij} \times k)}{m} \quad (1)$$

式中,  $n$  为第  $j$  个茎蘖春小麦总叶片数;  $m$  为测定的总茎蘖数;  $k$  为叶面积订正系数,宁夏地区取 0.83<sup>[10]</sup>;  $\rho$  为群体密度。

根据王信理等<sup>[7]</sup>的研究,生理日数是模拟叶面积指数动态变化的一个较好的因子,生理日数(PD, Physical Days)定义为出苗至观测时的天数。

1.2.2 气象数据整理 气象数据为 1994~2009 年春小麦观测时段宁夏永宁县气象局观测的逐日平均气温和逐日日照时数。根据潘学标<sup>[2]</sup>的研究,温带气候条件下积温是影响小麦发育的主要因子。另外,李福生等<sup>[6]</sup>研究宁夏地区春小麦日照时数与 LAI 也呈显著正相关。而宁夏引黄灌区春小麦发育期水分条件充足,因此可以不考虑降水影响。故这里整理了对应时段的有效积温(EAT, Effective Accumulated Temperature)、累积日照时数(ASH, Accumulated Sunshine Hours)。

1.2.3 数据归一化处理 由于试验数据为 1994~2009 年共 16 a 的观测值,数据量庞大且变化范围大,不利于建模,故需对数据进行归一化处理。归一化叶面积指数(NLAI, Normalized Leaf Area Index)、归一化生理日数(NPD, Normalized Physical Days)、归一化有效积温(NEAT, Normalized Effective Accumulated

Temperature)、归一化日照时数(NSH, Normalized Sunshine Hours)分别定义为:

$$NLAI = \frac{LAI_{ij}}{LAI_{max}}, \quad NPD = \frac{t_2 - t_1}{PD_{max}},$$

$$NEAT = \frac{\int_{t_1}^{t_2} T dt}{EAT_{max}}, \quad NSH = \frac{\int_{t_1}^{t_2} S dt}{SH_{max}} \quad (2)$$

式中,  $LAI_{ij}$  为某一年份某一发育期叶面积指数测定值;  $t_1$  为出苗日期;  $t_2$  为测定日期;  $T$  为日平均气温;  $S$  为日照时数;  $LAI_{max}$ 、 $PD_{max}$ 、 $EAT_{max}$ 、 $SH_{max}$  分别为观测当年出苗~成熟期最大叶面积指数、最长生理日数、最大有效积温和最大累计日照时数。

1.3 数据分析

采用 EXCEL 进行基础数据的输入及转换,运用 SPSS 13.0、origin 8.0 分析软件对数据进行相关性分析、曲线估计及各函数模拟。

1.4 模型检验

模型检验采用决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)<sup>[11]</sup>、精确度和准确度的概念<sup>[12]</sup>,对春小麦 LAI 的模型模拟值和实测值之间的符合度进行检验。均方根误差定义为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - y'_i)]^2}{N}} \quad (3)$$

式中,  $y_i$ 、 $y'_i$  分别为观测值与模拟值;  $N$  为样本数。

2 结果与分析

2.1 春小麦群体 LAI 动态变化规律

作 1994~2009 年 16 a 三叶~乳熟期 PD、EAT、ASH 与对应 LAI 的散点图(图 1),可以看出,3 种情况下 LAI 的变化趋势一致, LAI 随生育进程呈抛物线型变化。以抽穗期为拐点,叶面积指数经历三叶~拔节期缓慢增长的营养生长阶段、拔节~抽穗期营养生长和生殖生长并行的快速增长阶段、抽穗~乳熟期快速下降的生殖生长阶段。

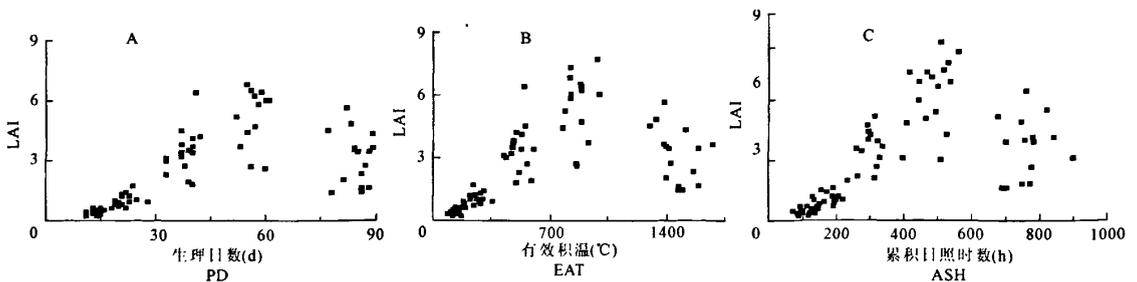


图 1 三叶~乳熟期 16 a 生理日数(A)、有效积温(B)、累积日照时数(C)与 LAI 动态变化散点图

Fig.1 Dynamic scatter diagrams of the LAI and the indexes of the PD(A), EAT(B), ASH(C)

2.2 归一化后 NLAI 的动态变化模拟

对 NPD、NEAT、NSH 与其对应的 NLAI 进行统计分析,得到各类线性及非线性方程,取其中模拟效果最好的作为模拟方程,具体见下表 1。可看出,三叶~乳熟期 3 个指标中模拟效果最好的是 NEAT,其次是 NSH,最后是 NPD,且都以  $y = (a + bx)/(1 + cx + dx^2)$  的 Logistic 修正方程形式模拟效果最好,  $R^2$  都在 0.87 以上。与张宾等<sup>[9]</sup>在水稻、玉米和冬小麦的研究结果一致,模型好于经典的 Logistic 曲线及其他修正形式,也好于指数或幂函数模拟,用 NEAT 为指标的  $y = (a + bx)/(1 + cx + dx^2)$  形式模拟 NLAI,模

拟结果见图 2。

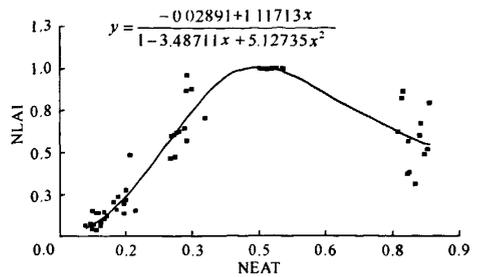


图 2 三叶~乳熟期 NLAI 动态模拟

Fig.2 NLAI dynamic simulation from 3-leaf to maturity

表 1 不同生育期不同指标 NLAI 动态模拟最优函数及表达式

Table 1 NLAI dynamic simulation optimal function and expression at different growth stages and indexes

发育期 Growth period	指标 Index	模拟模型 Simulated model	参数 Parameters				决定系数 $R^2$	F 值 F Value
			a	b	c	d		
三叶~乳熟 3-leaf to maturity	NPD	$y = (a + bx)/(1 + cx + dx^2)$	-0.02817	0.56802	-3.14677	3.35495	0.8756	351.6487
	NEAT	$y = (a + bx)/(1 + cx + dx^2)$	-0.02891	1.11713	-3.48711	5.12735	0.9080	480.1520
	NSH	$y = (a + bx)/(1 + cx + dx^2)$	-0.02988	0.69301	-3.27393	3.79848	0.8936	413.4540
三叶~抽穗 3-leaf to heading	NPD	$y = a / \{1 + \exp[-b \times (x - c)]\}$	1.04481	12.38177	0.3372		0.9356	627.5951
	NEAT	$y = a / \{1 + \exp[-b \times (x - c)]\}$	1.0305	15.01866	0.23772		0.9580	970.0751
	NSH	$y = a / \{1 + \exp[-b \times (x - c)]\}$	1.03693	13.45335	0.30346		0.9431	712.7376

分阶段后,三叶~抽穗期模拟效果明显好于不分阶段的三叶~乳熟期模拟效果(表 1),同样是归一化有效积温(NEAT)模拟效果最好,其次是 NSH,最后是 NPD,与三叶~乳熟期结论一致,但是最优模拟方程为修正型的  $y = a / \{1 + \exp[-b \times (x - c)]\}$  形式,与见到的研究所用的修正模型形式不同,且效果好于其他模型。说明在抽穗期前的春小麦叶面积指数变化符合经典的 Logistic 作物生长曲线规律,且 3 个指标模拟时都有极高的相关性,决定系数  $R^2$  都大于 0.93,且通过  $\alpha = 0.001$  的极显著性检验,与涂修亮等<sup>[8]</sup>研究结论相似。用 NEAT 为指标的  $y = a / \{1 + \exp[-b \times (x - c)]\}$  形式模拟的 NLAI 结果见图 3。

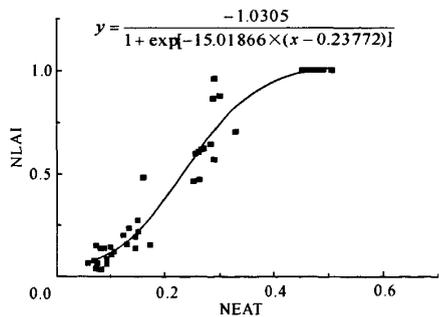


图 3 三叶~抽穗期 NLAI 动态模拟

Fig.3 NLAI dynamic simulation from 3-leaf to heading

表 2 不同生育期 NLAI 的模型检验结果

Table 2 NLAI model test results at different growth stages

项目 Items	三叶~乳熟 3-leaf to maturity			三叶~抽穗 3-leaf to heading		
	NPD	NEAT	NSH	NPD	NEAT	NSH
决定系数 $R^2$	0.8760	0.9080	0.8936	0.9356	0.9580	0.9431
均方根误差 RMSE	0.1200	0.1036	0.1113	0.0943	0.0761	0.0896
精确度 Accuracy	0.8988	0.9156	0.9003	0.9226	0.9335	0.9703
准确度 Slope	0.9617	0.9717	0.9672	0.9767	0.9848	0.9794

分阶段后的抽穗至乳熟期各指标与叶面积指数相关性较差,不能通过显著性检验。

2.3 NLAI 预测模型的构建

一个最优的模型不仅应该具有较高的  $R^2$ ,还应具有较小的 RMSE 和较高的精确度和准确度<sup>[13]</sup>,本文综合采用这 4 个统计量对叶面积指数的预测效果进行综合评价(表 2)。结果显示,三叶~抽穗期、三叶~乳熟期 NEAT 和 NLAI 的  $R^2$  最高、预测精确度和准确度最大,估计的 RMSE 最小,预测效果最好。

为获得宁夏灌区春小麦 NLAI 动态变化的最优模拟,要综合模型检验效果和最优指标进行分段函数模拟。三叶~抽穗期可以选择以 NEAT 为指标的  $y = (a + bx)/(1 + cx + dx^2)$  进行模拟,抽穗~乳熟期可以用三叶~乳熟期进行代替,故全生育期的叶面积指数动态模拟可表达为:

$$y = \frac{\frac{1.0305}{1 + \exp[-15.01866 \times (x_1 - 0.23772)] - 0.02891 + 1.11713x_2}}{1 - 3.48711x_2 + 5.12735x_2^2} \quad (4)$$

式中,  $y$  为 NLAI;  $x_1$  为三叶~抽穗期的 NEAT 值;  $x_2$  为抽穗~乳熟期的 NEAT 值。

#### 2.4 预测模型的检验

为了检验所建立的春小麦 LAI 预测模型的可靠性,选用没有参加模型建立的 1995、1999、2005、2009 年的春小麦试验数据作为检验样本,对建立的估算模型进行精度分析。结果显示,除乳熟期模拟值与实测值之间误差较大外,其他检验样本的模拟值和实测值之间的  $R^2$  为 0.9404,估算的 RMSE 为 0.08911,精确度为 0.9208,准确度为 1.0297(图 4)。因此,本文构建的回归模型对宁夏河套灌区的春小麦 LAI 具有较好的预测性和广泛的适用性。

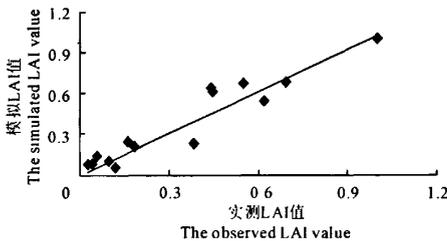


图 4 春小麦 LAI 实测值与模拟值的相关关系

Fig. 4 Relationship between simulated LAI value and observed LAI value

### 3 结果与讨论

与以往研究相比,本文主要综合对比分析了不同指标、不同函数模拟形式、不同发育阶段情况下的 LAI 模拟研究,主要得出了以下几个结论:

1) 宁夏灌区春小麦叶面积指数动态变化模拟时,春小麦发育期分阶段和不分阶段情况下都是用有效积温作指标模拟效果最好,累积日照时数次之,生理天数最差。

2) 以抽穗期为拐点,分生育阶段模拟叶面积指数动态变化时,抽穗前期模拟精度比抽穗后期有明显改进,但是抽穗后期叶面积指数几乎无法模拟,说明这一阶段的叶面积指数动态变化并不符合作物发

育经典模拟。

3) 用有效积温作指标模拟叶面积指数动态变化时,常用的 Logistic、Richard 方程显然不能胜任。

4) 要想得到春小麦全生育期最好的模拟模型,应用分段函数进行模拟。

实际上春小麦叶面积的动态变化过程是受多种指标的制约,单用某一指标是不可能完全准确地模拟出其动态的变化。文中所建立的模型没有考虑水、肥亏缺以及病虫害的影响,必然存在一定的误差,尚待进一步的研究和完善。

#### 参考文献:

- [1] 刘战东,段爱旺,高阳,等.河南新乡地区冬小麦叶面积指数的动态模型研究[J].麦类作物学报,2008,28(4):680—685.
- [2] 潘学标.作物模型原理[M].北京:气象出版社,2003:12—16.
- [3] 熊伟.CERES-Wheat 模型在我国小麦区的应用效果及误差来源[J].应用气象学报,2009,20(1):88—94.
- [4] 石春林,金之庆.基于 WCSODS 的小麦渍害模型及其在灾害预警上的应用[J].应用气象学报,2003,14(4):462—468.
- [5] 孙成明,庄恒扬,杨连新,等.FACE 水稻叶面积指数的模拟研究[J].农业环境科学学报,2007,26(3):1003—1007.
- [6] 李福生,官景得,吕巡均.宁夏灌区春小麦叶面积变化的气象条件分析[J].现代农业科技,2009,(21):238—240.
- [7] 王信理.在作物干物质积累的动态模拟中如何合理运用 Logistic 方程[J].农业气象,1986,7(1):14—19.
- [8] 涂修亮,胡秉民,程功煌,等.小麦叶面积指数变化的模拟[J].作物研究,1999,(1):13—14.
- [9] 张宾,赵明,董志强,等.作物高产群体 LAI 动态模拟模型的建立与检验[J].作物学报,2007,33(4):612—619.
- [10] 国家气象局.农业气象观测规范(上卷)[J].北京:气象出版社,1993:28—30.
- [11] Hunt L A, Pararajasingham S. CROPSIM-WHEAT: A model describing the growth and development of wheat[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1995, 75: 619—632.
- [12] Massart D L, Vandeginste B C M, Deming S M, et al. Chemometrics: A Textbook[M]. Amsterdam: Elsevier, 1988.
- [13] 谭昌伟,黄义德,黄文江,等.夏玉米叶面积指数的高光谱遥感植被指数法研究[J].安徽农业大学学报,2004,31(4):392—397.
- [14] 刘铁梅,曹卫星,罗卫红,等.小麦叶面积指数的模拟模型研究[J].麦类作物学报,2001,21(2):38—41.
- [15] 刘布春,王石立,马玉平.国外作物模型区域应用研究进展[J].气象科技,2002,30(4):193—203.
- [16] 杨勤,许吟隆,林而达,等.应用 DSSAT 模型预测宁夏春小麦产量演变趋势[J].干旱地区农业研究,2009,27(2):41—48.
- [17] 曹宏鑫,金之庆,石春林,等.中国作物模型系列的研究与应用[J].农业网络信息,2006,(5):45—49.
- [18] 罗毅,郭伟.作物模型研究与应用中存在的问题[J].农业工程学报,2008,24(5):307—312.

## Effects of different maize population structure on photosynthetic characteristics in wheat/maize intercropping

HE Hai-jun

(Crop Institute of Gansu Academy of Agricultural Science, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** The relationship between leaf area index, photosynthetic rate and yield with different maize populations in the wheat/maize intercropping was studied. The results showed that the curves of LAI and  $P_n$  of different maize populations were parabolas, and the correlation between  $P_n$  and LAI was significantly positive. So improvement of the photosynthetic rate could increase maize yield. In two intercroppings, the average photosynthetic rate and the maize yield in A1D3 was the largest, while those in A2D2 was the second.

**Keywords:** intercropping; maize; photosynthetic rate; yield

(上接第 196 页)

## Dynamic simulation of spring wheat leaf area index in Ningxia irrigable area

ZHANG Xue-yi<sup>1,2</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, HUANG Feng<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>, MA Guo-fei<sup>1</sup>

(1. Ningxia Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, China;

2. Nanjing University of Information Engineering, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In order to realize the prediction of dynamic yield of spring wheat in Ningxia, it is necessary to obtain the key parameters of LAI. Based on the field observation data of 1994 ~ 2009 from the Ningxia Yongning agricultural experiment station, the LAI dynamical law of spring wheat was studied. Three indexes and three stages and different functions were contrasted and analyzed. The results indicated that the formula  $y = (a + bx)/(1 + cx + dx^2)$  was the best form to simulate the LAI in 3-leaf stage to heading stage, in which the physical day was used as the argument after LAI and these indexes were normalized. But the simulated results from the  $y = a/[1 + \exp(b + cx + dx^2)]$  and Richard formulas were not ideal. The simulating accuracy of 3-leaf to heading was noticeably higher than that of 3-leaf to maturity after the growth processes were divided into three stages.  $R^2$  was changed from 0.90795 to 0.95796, RMSE from 0.10359 to 0.07612, the accuracy from 0.9156 to 0.93351, the degree of accuracy from 0.9717 to 0.9848, and the  $\alpha < 0.001$ , which indicated that this mean could better obtain spring wheat LAI, which provided a powerful method for the prediction of spring wheat yield in Ningxia irrigable area.

**Keywords:** spring wheat; LAI; meteorological elements; dynamic simulation; normalization