王展,刘荣花,薛明,等.基于气候适宜度的夏玉米发育期模拟模型.气象科学,2015,35(1):77-82.
WANG Zhan,LIU Ronghua,XUE Ming, et al.Simulation model of summer maize phenology based on climatic suitability.Journal of the Meteorological Sciences, 2015,35(1):77-82. doi:10.3969/2013jms.0050

基于气候适宜度的夏玉米发育期模拟模型

王展[1] 刘荣花[2,3] 薛明[4] 李树岩[2,3]
(1 泰州市气象局,江苏泰州 225300; 2 中国气象局 河南省农业气象保障与应用技术重点实验室,郑州 450003;
3 河南省气象科学研究所,郑州 450003; 4 湖南省通道县气象局,湖南通道 418500)

摘要 结合前人气候适宜度的研究成果,以作物生理生态发育过程为基础,构建了夏玉米发育期预报模型。模型中分别建立了夏玉米温度、降水、日照时数适宜度函数,并结合河南省19个农业气象试验站的夏玉米发育期资料,运用通径分析法确定各个生育期温度、降水和日照的影响权重系数,计算出综合适宜度,用来预测夏玉米生育期。结果表明,模型能够较好地预测各个发育期(出苗、七叶、拔节、抽雄、乳熟和成熟)。建模资料的模拟值与观测值比较的均方根误差分别为1.5、3.1、3.4、2.9、4.0、4.5 d。运用独立资料对模型所作预测值的均方根误差在1.0~4.6 d之间。

关键词 夏玉米; 适宜度; 生育期; 预报模型
分类号: S165.24 **doi**:10.3969/2013jms.0050 **文献标识码**: A

Simulation model of summer maize phenology based on climatic suitability

WANG Zhan[1] **LIU Ronghua**[2,3] **XUE Ming**[4] **LI Shuyan**[2,3]
(1 *Taizhou Meteorological Bureau, Jiangsu Taizhou* 225300, *China*;
2 *CMA·Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou* 450003, *China*;
3 *Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou* 450003, *China*;
4 *Tongdao Meteorological Bureau, Hunan Tongdao* 418500, *China*)

Abstract Based on the crop eco-physiological development process and foundings of previous study on the climatic suitability, a simulation model of summer maize phenology was found. Firstly, the suitability functions such as temperature, precipitation and sunshine duration were established respectively. Then, by combining the above suitability function with summer maize data from 19 agrometeorological sites in Henan province, the affecting weight coefficients for temperature, precipitation and sunshine duration at different development stages were determined with path analysis. Finally, the combined suitability was calculated to predict the summer maize growth. Results showed that the model could predict various development stages (emergence, seven-leaf, jointing, tasseling, milk stage and maturation) quite well. The root mean square errors between the simulated and observed values of the building data were 1.5, 3.1, 3.4, 2.9, 4.0 and 4.5 days respectively. When the independent data was used to test the model, the root mean square errors ranged from 1.0-4.6 days.

Key words Summer maize; Suitability; Development stages; Simulation model

收稿日期(Received):2013-04-23;**修改稿日期**(Revised):2013-05-25; **网络出版日期**(Published on-line):2014-10-24
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/2013jms.0050.html
基金项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906021)
通信作者(Corresponding author):王展(WANG Zhan).wangzhan19880202@126.com

引 言

河南省地处北亚热带向暖温带过渡地带,是中国重要的粮食生产基地。夏玉米播种面积达到全省秋粮面积的60%以上。由于受到季风气候的影响,在夏玉米生长期间,初夏旱、连阴雨和倒伏等多种农业气象灾害频繁发生。准确及时的发育期预报对于提前做好防灾、减灾工作,合理安排各发育阶段的田间管理极其重要。

1960s 国内外学者相继研制出多种作物模拟模型[1]。这些模型中常用的发育指标主要有积温和生理发育时间两种。积温法认为作物在完成某一发育阶段所需要的活动积温是一固定常数,该方法至今仍被广泛应用[2]。生理发育时间理论是指对于某一特定基因型品种,在最适合温光条件下,作物完成某一生育阶段所需的时间基本恒定,该模型考虑了热效应、光周期效应和不同品种生育期的差异性,具有一定的机理性[3]。目前,采用生理发育时间为尺度,预测作物生育时间在大田作物和温室作物中得到了广泛的应用[4],但是该模型没有考虑降水对作物的影响。有研究表明,降水也是影响夏玉米生长发育的主要气象因子之一[5-6]。气候适宜度是综合反映光、温、水等气候资源对作物生长发育和产量形成的气候适应程度的指标,主要应用于作物生育期内的气候资源[7-8]、生态气候适应性[9-10]、产量[11]和病虫害预报[12]等方面研究。近几年,一些学者基于气候适宜度的算法,先后构建了冬小麦和春玉米生育期模拟模型,对作物生育期时间预测效果较好,这些模型不仅考虑了水分对作物发育速率的影响,而且模型参数较少而易获取,具有实际应用价值[13]。

本文在前人工作的基础上,对已有的生育期模型进行改进和补充。假设某一特定的玉米品种完成某一生育阶段的综合适宜度(S_{phe})是一常数,当日综合适宜度累积达到这一恒定值,夏玉米发育期就进入下一阶段。根据改进后的计算方法,对河南省夏玉米生育期内温度、降水和光照综合反应的规律分析,建立了夏玉米的发育期模拟模型。并用研究区域内与建模资料相对独立的生育期资料,对模型进行检验。本研究以期为作物发育期模型的研究提供一个较好的思路。

1 资料与方法

1.1 数据

历史气象资料为河南省气象局所提供的19个农业气象试验站(图1)的逐日气温(℃)、降水量(mm)和光照时数(h)。

夏玉米物候观测项目包括品种熟性、发育始期、发育普遍期、高度等。所用资料是发育普遍期,来自河南省19个农业气象试验站。各个站点的初始观测年份不一致,最早的始于1980年,最迟的1994年,截止于2010年,其中2008—2010年资料用于预报检验。河南省夏玉米都是中熟品种,所以不考虑不同品种生育期的差异性。为了减小观测记录中的错情对模型模拟产生的误差,选定各个站点各生育期持续时间大于±2倍标准差的为异常值,并剔除。

1.2 模型建立与检验

1.2.1 模型的建立

将夏玉米全生育期划分为6个发育阶段(播种-出苗期,出苗-七叶期,七叶-拔节期,拔节-抽雄期,抽雄-乳熟期,乳熟-成熟期),以逐日气象要素值为基础,建立了夏玉米逐日平均温度、降水和光照适宜度函数。在此基础上,分析各个气象要素的适宜度对夏玉米不同生育期内生长发育的影响程度,分别确定温度、降水和光照适宜度的权重系数,然后加权平均计算出综合适宜度,预测夏玉米的发育期时间。

(1)夏玉米温度适宜度函数

根据马树庆的研究[14],夏玉米生长对温度条件的反应函数可用下式计算

$$S_t=\begin{cases}\dfrac{(t-t_l)(t_h-t)^B}{(t_o-t_l)(t_h-t_o)^B}, & t_l\leqslant t\leqslant t_h\\ 0, & t>t_l \text{ 或 } t<t_h\end{cases},\quad (1)$$

$$B=(t_h-t_o)/(t_o-t_l),\quad (2)$$

上式中,t 是日平均气温,t_h、t_l、t_o 分别为该日夏玉米所在发育期内上限、下限和最适宜温度。t_o 参照河南省气象科学研究所的农业气象指标查询系统,t_h、

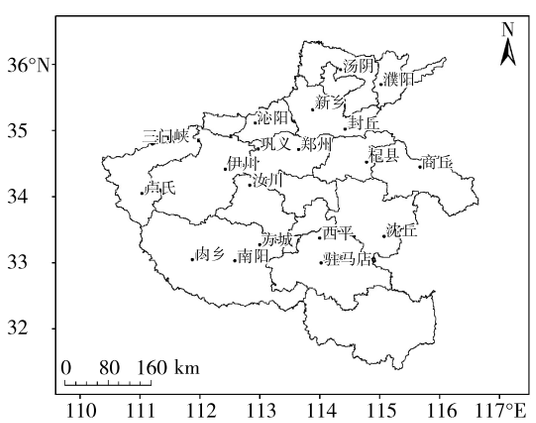


图1 河南省19个农业气象试验站点地理分布

Fig. 1 Spatial distribution of 19 agrometeorological sites in Henan province

t_l 分别参照河南省夏玉米产区各市的历年平均值(表 1)。S_t 是由实际温度和三基点温度决定的温度适宜度,假设 $t<t_l$ 或者 $t>t_h$ 时,$S_t=0$;当 $t=t_o$ 时,$S_t=1$。因此 S_t 是一个在 0~1 之间变化的不对称抛物线函数(如图 2),它反应了温度条件从不适宜到适宜及从适宜到不适宜的连续变化过程。

表 1　夏玉米各生育期的三基点温度及作物需水量

Table 1　Critical temperatures and rainfall demand at different growth stages of summer maize

生育期	t_o/℃	t_l/℃	t_h/℃	R_o/mm
播种-出苗期	25	14	32	2.0
出苗-七叶期	26	14	35	3.3
七叶-拔节期	27	17	35	3.3
拔节-抽雄期	27	17	34	5.3
抽雄-乳熟期	26	15	34	3.3
乳熟-成熟期	23	10	32	2.8

(2)夏玉米降水适宜度函数

当前,大多数对作物产量和生育期预报的研究采用乘积开方法来确定综合适宜度[12-13]。考虑到某一生育期内的日降水适宜度可能会持续为 0,对综合适宜度产生较大的影响,采用这一计算方法对于作物生育期模拟模型不是很适用。

相关研究表明,无论灌溉与否,降水都是夏玉米耗水的最主要来源之一[6]。降水是一个连续的过程,前一个生长阶段利用剩余的降水通过土壤调节径流后可以为下一生长阶段继续使用,所以在对日降水影响作物生长发育的理解上不能简单地定义为"适宜"或"不适宜",当降水量由小变大,作物的适宜性出现由不适宜到适宜再到不适宜的动态变化。因此,夏玉米降水适宜度函数表达式为

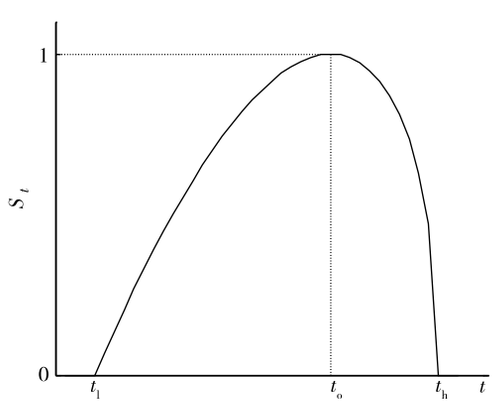


图 2　夏玉米温度适宜度变化规律

Fig.2　Change law in temperature suitability of summer maize

$$S_R=\begin{cases}1, & R_l \leqslant R \leqslant R_h\\ R/R_l, & R < R_l\\ R_h/R, & R > R_h\end{cases}, \qquad (3)$$

式中,R_e、R_h 分别为生育期内下限、上限需水量;R 为当日有效降水量(R_a)与前期过量降水(R_e)之和,R_e 是从第 2 天开始到当日(n)前 1 天 R_a 大于作物需水量(R_o)部分的累计值,计算方式如下:

$$R_{e(n)}=\sum_{i=2}^{n}(R_{ai}-R_o),\ R_a > R_o\ , \qquad (4)$$

河南省与河北省同属黄淮海夏玉米种植区,本文参考河北省夏玉米旱、涝指标[15],降水量与需水量之比<70%为轻旱,>150%为轻涝,因此,定义 $R_l=0.7R_o$,$R_h=1.5R_o$,R_o 为夏玉米不同生育期日平均需水量。R_o 指标参考曹云者等[6]的研究,见表 1。

(3)夏玉米日照时数适宜度函数

作物每日的光照时数不得短于维持生长发育所需的光合作用时间,因此,以日照时数达到可照时数的 70%为临界点[16],即认为当日照百分率达到 70%及以上,夏玉米对光照时间的反应达到适宜状态。基于这种理解,光照适宜度函数可用下式表示:

$$S_S=\begin{cases}S/S_o, & S < S_o\\ 1, & S \geqslant S_o\end{cases}, \qquad (5)$$

式中,S 表示实际日照时数,且满足条件日照百分率大于等于 70%;$S_o=0.7\ L_o$,L_o 为可照时数,其计算式如下

$$L_o=24\,\frac{2\cos^{-1}(-\tan\alpha\,\tan\lambda)}{360}\ , \qquad (6)$$

$$\lambda=23.5\,\sin(6.283\,2(284+K)/365)\ , \qquad (7)$$

式中,α 为纬度;λ 为太阳倾角;K 为日序,从每年 1 月 1 日起编号。

(4)夏玉米气候适宜度综合模型

温度、降水和日照对夏玉米生长发育时间的影响程度并不一致,考虑到气象因子间存在相关性,只有在各气象因子相互独立时,才能反映其对生育期的影响程度。因而,采用直接通径法确定各权重系数[17]。首先计算出夏玉米各生育期温度、降水、日照适宜度,并对各气象因子进行无量纲处理[18],以各气象因子的适宜度为自变量,以生育期天数为因变量,建立逐步回归方程,得出各气象要素适宜度对发育期天数的通径系数[19](E_j),从而求出各要素适宜度的影响权重系数(P_j),求算方法如下

$$P_j=\frac{|E_j|}{\sum_{j=1}^{m}|E_j|}\ , \qquad (8)$$

其中 $j=1,2,\cdots,m$，m 为气象因子数。

根据以上计算的气象因子适宜度和权重系数，每日综合适宜度可以用公式(9)计算

$$S_{\mathrm{com}} = \sum_{j=1}^{m} P_j \times S_j \ , \qquad (9)$$

某一发育期内的综合适宜度 S_{phe} 为每日综合适宜度 S_{com} 的累积，可以用公式(10)计算

$$S_{\mathrm{phe}} = \sum_{i=1}^{n} S_{\mathrm{com}i} \ . \qquad (10)$$

1.2.2 模型检验方法

采用均方根误差作为评估模拟精度指标。均方根误差值越小，模拟值与观测值的一致性越好，即模型的模拟结果越准确。

2 结果与分析

采用公式(1)~(7)分别计算各发育期内温度、降水和光照的适宜度。运用 SPSS13.0 软件求算各气象因子的直接通径系数，保证其偏回归系数的显著性均小于 0.05，通过式(8)计算得到影响权重系数。将权重系数代入式(9)计算出逐日的综合适宜度，运用式(10)求出每个发育期内的综合适宜度并代入模型，直至模拟值与观测值的误差达到最小为止，此时的 S_{phe} 为夏玉米达到某一生育期所需要的综合适宜度。

2.1 拟合结果

利用上述方法所建立的模型，对河南省 19 个站点夏玉米播种-出苗、出苗-七叶、七叶-拔节、拔节-抽雄、抽雄-乳熟、乳熟-成熟各发育阶段的持续天数进行模拟，模拟平均误差为 1.5、3.1、3.4、2.9、4.0、4.5 d。模拟天数与实测天数的关系见图 3。可以看出，19 个地区各发育阶段模拟天数与实际天数具有较好的一致性，说明各区域的不同发育阶段持续天数的预报模型总体模拟效果较好。

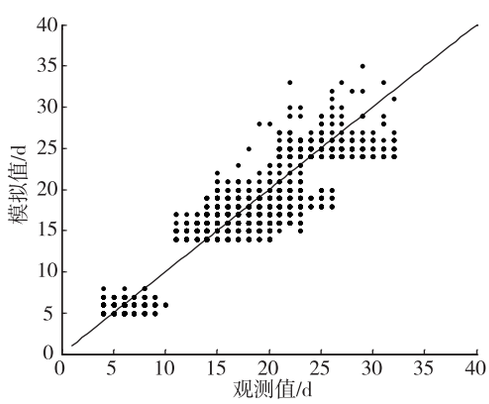


图 3 夏玉米各生育期持续天数模拟值与观测值的比较(单位:d)

Fig.3 Comparison between the simulated and measured values of duration at different development stages of summer maize(unit:d)

2.2 权重系数和综合适宜度

表 2 是夏玉米各生育期气象因子权重系数和综合适宜度，可以看出在整个生长过程中，温度对生育期天数的影响最大，其次是降水和光照。并且分析表明，6 阶段的生育期天数与日平均温度都呈负相关，而且后 3 阶段(拔节-抽雄期、抽雄-乳熟期、乳熟-成熟期)达到 0.01 显著性水平。

表 2 夏玉米各生育期气象因子权重系数和综合适宜度

Table 2 Weight coefficients and combined suitability for each meteorological factor at different development stages of summer maize

生育期	播种-出苗	出苗-七叶	七叶-拔节	拔节-抽雄	抽雄-乳熟	乳熟-成熟
S_{t}	0.85	1.00	1.00	1.00	0.94	0.87
S_{r}	0.08	0	0	0	0.06	0.08
S_{s}	0.07	0	0	0	0	0.05
S_{phe}	5.50	15.80	13.90	16.60	22.30	17.40

特别地，出苗-七叶，七叶-拔节两阶段的温度影响权重系数为 1，与实际情况不符。李荣平等[20]研究表明：玉米出苗至七叶期与水分的相关性都很强，尤其是七叶期，需要根系的吸水来满足光合作用。由于缺乏部分土壤水分资料，本文夏玉米水分适宜度函数仅考虑了降水因子，未考虑其他水源的补充，对于权重系数的估算可能造成了一定的影响。

2.3 模型的检验

选择均匀分布的 5 个代表站(南阳、驻马店、郑州、商丘、濮阳)2008—2010 年独立的发育期资料($N=15$)对模型进行检验。结果(图 4)表明，模型对不同生育阶段的预测性都较好，均方根误差在达到出苗、七叶、拔节、抽雄、乳熟和成熟生育时期时分别为 1.0、4.6、3.9、3.2、3.1、3.9 d(表 3)。

2.4 两种模型预测效果比较

对 5 个检验的代表站点资料采用有效积温法对夏玉米发育期进行预测(如表 4)，均方根误差在达到出苗、七叶、拔节、抽雄、乳熟和成熟生育时期时分别为 1.0、4.4、4.2、3.6、3.3、4.7 d。通过与气候适宜度方法模拟结果(1.0、4.6、3.9、3.2、3.1、3.9 d)相比较，可以看出，除了七叶期，有效积温法整体预测误差大于气候适宜度，尤其成熟期效果极为明显。

气候适宜度模型对七叶期预测误差偏大，除了对水分因素的考虑不全面之外，还因建立模型的过程中没有进行分区研究，跨生态区所产生种植环境

表 3　综合模型(有效积温法)对夏玉米各生育期持续天数的预测误差 (单位:d)

Table 3　Prediction errors of duration at different development stages of summer maize (unit:d)

站点	播期	出苗	七叶	拔节	抽雄	乳熟	成熟
	2008-06-08	2(1)	-3(-3)	5(5)	-1(1)	-3(-4)	4(3)
驻马店	2009-06-07	1(-1)	4(-2)	1(-2)	-1(-4)	3(2)	-5(-10)
	2010-06-12	1(1)	-2(-1)	4(4)	-2(-4)	2(-3)	0(-2)
	2008-06-02	-1(-1)	1(-1)	-2(-3)	-2(-1)	2(0)	4(1)
郑州	2009-06-05	0(-1)	8(5)	3(-5)	-1(-2)	1(-1)	-2(-6)
	2010-06-07	-1(-1)	5(-2)	7(3)	-5(-5)	6(1)	-5(-7)
	2008-06-02	0(1)	-1(0)	-4(-4)	3(6)	1(3)	-2(-3)
商丘	2009-06-11	2(1)	1(-1)	0(0)	2(3)	-1(1)	-2(-2)
	2010-06-10	0(0)	1(-2)	-4(-6)	7(4)	4(-2)	-5(-6)
	2008-06-01	-1(-1)	-6(-5)	-9(-10)	5(4)	0(0)	-6(-6)
南阳	2009-06-06	0(0)	3(0)	0(-2)	3(2)	-3(6)	4(0)
	2010-06-13	1(-2)	1(-3)	2(1)	2(0)	3(-4)	2(1)
	2008-05-20	0(0)	—(—)	0(1)	2(5)	-2(-2)	-4(-5)
濮阳	2009-05-31	0(-1)	-8(-8)	2(2)	3(5)	-6(-5)	-4(-2)
	2010-06-03	-1(1)	-8(-9)	-2(-3)	2(0)	3(6)	-4(-4)
均方根误差		1.0(1.0)	4.6(4.4)	3.9(4.2)	3.2(3.6)	3.1(3.3)	3.9(4.7)

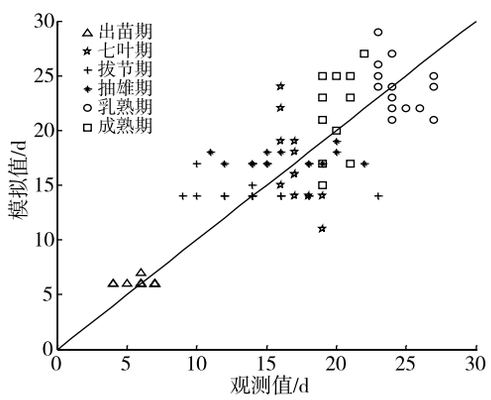


图 4　夏玉米各生育期持续天数模拟值与观测值的比较(单位:d)

Fig.4　Comparison between the simulated and measured values of duration at different developmental stages of summer maize(unit:d)

的变化不可避免地对模拟精度造成一定的影响。

3　结论与讨论

利用综合适宜度作为定量作物发育进程的尺度,建立夏玉米生育期模拟模型。模型相比有效积温法,在发育期预测精度上有一定的提高,并具有一定的机理性。为气候适宜度在作物生育期预报方面的应用提供了一定的参考。主要结论如下:

(1)采用加权平均多指标评价方法计算综合适宜度,与同类研究计算思路大体一致,但不会因为某一因子缺省而对综合适宜度值产生极端影响,为模型进一步完善和推广提供了参考依据。

(2)相比其他生育期,模型对七叶期的预测误差较大,并且出苗-七叶、七叶-拔节两阶段的温度影响权重系数为 1,与实际情况不符。其可能原因之一在于夏玉米水分适宜度函数仅考虑了降水因子,而未考虑其他水源的补充。若要进一步提高模型对夏玉米发育的预测精度,还需考虑土壤湿度、水分蒸发等因素的影响。

(3)建模过程中未能进行分区研究,跨生态区的种植环境变化不可避免地对模拟精度造成一定的影响。因此,要提高模型对大范围内作物发育期的预测精度,还需进一步研究不同区域之间作物生育期的影响因子并比较其差异,从而来完善模型对不同种植环境的普适性。

上述不足之处,有待在以后的工作中进一步改进并完善。

参　考　文　献

[1]　林忠辉, 莫兴国, 项月琴.作物生长模型研究综述.作物学报,

2003, 29(5): 750-758.
LIN Zhonghui, MO Xingguo, XIANG Yueqin. Research advances on crop growth models. Acta Agronomica Sinica (in Chinese), 2003, 29(5): 750-758.

[2] LU H, LU C, CHAN L, et al. Seasonal variation in linear increase of taro harvest index explained by growing degree days. Agron. J., 2001, 93(5): 1136-1141.

[3] CAO W, Moss D N. Modelling phasic development in wheat: a conceptual integration of physiological components. J. Agri. Sci., 1997, 129(2): 163-172.

[4] 李永秀, 罗卫红, 倪纪恒, 等.温室黄瓜生育期模拟模型的研究.南京气象学院学报, 2008, 31(2): 257-263.
LI Yongxiu, LUO Weihong, NI Jiheng, et al. Simulation of development stages of greenhouse cucumber. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 2008, 31(2): 257-263.

[5] 毕建杰,刘建栋,叶宝兴,等.干旱胁迫对夏玉米叶片光合及叶绿素荧光的影响.气象与环境科学,2008, 31(1):10-15.
BI Jianjie, LIU Jiandong, YE Baoxing, et al. Efects of Drought Stress on Photosynthesis and Chlorophyll Flu0rescence of the Summer Maize Leaf. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 2008,31(1):10-15.

[6] 曹云者, 宇振荣, 赵同科.夏玉米需水及耗水规律的研究.华北农学报, 2003, 18(2): 47-50.
CAO Yunzhe, YU Zhenrong, ZHAO Tongke. Study of water demand and consumption rules in summer maize. Acta Agriculturae Boreali-Sinica (in Chinese), 2003, 18(2): 47-50.

[7] 余卫东,陈怀亮.河南省夏玉米精细化农业气候区划研究.气象与环境科学,2010,33(2): 14-19.
YU Weidong, CHEN Huailiang. Study on Precise Comprehensive Agricultural Climate Regional Planning of Summer Maize in Henan Province. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 2010,33(2):14-19.

[8] 马兴祥, 邓振镛, 李栋梁, 等.甘肃省春小麦生态气候适宜度在适生种植区划中的应用.应用气象学报, 2005, 16(6): 820-827.
MA Xingxiang, DENG Zhenyong, LI Dongliang, et al. Study on eco-climate applicability of spring wheat for condign planting division in Gansu province. Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 2005, 16(6): 820-827.

[9] 魏瑞江, 李春强, 姚树然.农作物气候适宜度实时判定系统.气象科技, 2006, 34(2): 229-232.
WEI Ruijiang, LI Chunqiang, YAO Shuran. A real-time analysis system of crop-climatic suitability based on fuzzy mathematics. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2006, 34(2): 229-232.

[10] 王建英,韩相斌,王超,等. 豫东北主要农作物对气候变暖的响应.气象与环境科学,2009,32(1):43-46.
WANG Jianying, HAN Xiangbin, WANG Chao, et al. Crop Changes the Warm Response to the Climate in Northeast of Henan. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 2009, 32(1):43-46.

[11] 刘伟昌, 陈怀亮, 余卫东, 等.基于气候适宜度指数的冬小麦动态产量预报技术研究.气象与环境科学, 2008, 31(2): 21-24.
LIU Weichang, CHEN Huailiang, YU Weidong, et al. Dynamic output forecast research for winter wheat based on climatic suitability index. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 2008, 31(2): 21-24.

[12] 易雪, 王建林, 宋迎波.气候适宜指数在早稻产量动态预报上的应用.气象, 2010, 36(6): 85-89.
YI Xue, WANG Jianlin, SONG Yingbo. Application of climatic suitability index to dynamical prediction of early rice yield. Meteorological Monthly (in Chinese), 2010, 36(6): 85-89.

[13] 侯英雨, 王良宇, 毛留喜, 等.基于气候适宜度的东北地区春玉米发育期模拟模型.生态学杂志, 2012, 31(9): 2431-2436.
HOU Yingyu, WANG Liangyu, MAO Liuxi, et al. Simulation model of spring maize developmental stages in Northeast China based on climatic suitability. Chinese Journal of Ecology (in Chinese), 2012, 31(9): 2431-2436.

[14] 马树庆.吉林省农业气候研究,北京,气象出版社,1994:31-180.
MA Shuqing. Agricultural climate in Jilin Provice. Beijing: China Meteorological press (in Chinese), 1994:31-180.

[15] 魏瑞江, 姚树然, 王云秀.河北省主要农作物农业气象灾害灾损评估方法.中国农业气象, 2000, 21(1): 27-31.
WEI Ruijiang, YAO Shuran, WANG Yunxiu. Loss assessment of staple crops caused by major agrometeorological disasters in Hebei province. Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese), 2000, 21(1): 27-31.

[16] 黄璜.中国红黄壤地区作物生产的气候生态适应性研究.自然资源学报, 1996, 11(4): 340-346.
HUANG Huang. A study on the climatic ecology adaptability of the crop production in the red and yellow soils region of China. Journal of Natural Resources (in Chinese), 1996, 11(4): 340-346.

[17] 杜家菊, 陈志伟.使用SPSS线性回归实现通径分析的方法.生物学通报, 2010, 45(2): 4-6.
DU Jiaju, CHEN Zhiwei. Method of path analysis with SPSS linear regression. Bulletin of Biology (in Chinese), 2010, 45(2): 4-6.

[18] 王纯枝, 郭安红, 王玉玲, 等.华北地区杨树烂皮病发生发展气象适宜度预报模型.中国农业气象, 2011, 32(1): 139-143.
WANG Chunzhi, GUO Anhong, WANG Yuling, et al. Forecasting model of meteorological suitability for occurrence and development of valsa sordida nits in North China. Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese), 2011, 32(1): 139-143.

[19] 米娜, 姚克敏.我国主要水稻雄性不育系的光温特性研究.南京气象学院学报, 2005, 28(1): 108-116.
MI Na, YAO Kemin. Study on photoperiod and temperature characteristics of main genic male sterile (GMS) rice lines in China. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 2005, 28(1): 108-116.

[20] 李荣平,周广胜,刘景利,等.基于水热因子的玉米物候模拟.气象环境学报,2009,27(3):19-23.
LI Rongping, ZHOU Guangsheng, LIU Jingli, et al. Phenological simulation of maize based on hydro-thermal factors. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 2009, 25(3):19-23.