



基于气候适宜度指数的吉林省大豆单产动态预报研究

邱美娟¹, 郭春明¹, 王冬妮¹, 慕臣英², 穆佳¹, 曲思邈¹, 袁福香¹, 王琪¹

(1. 吉林省气象科学研究所, 吉林 长春 130062; 2. 沈阳市气象局, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:为及时、准确地进行大豆产量预报,给相关部门提供可靠依据保障吉林省粮食安全,利用吉林省 1980–2016 年大豆产量、生育期、逐日气象数据,基于大豆生长发育的生物学特性(最适温度、上限温度、下限温度、需水量、需光性等),构建大豆生长季逐旬温度、降水、日照时数及综合气候适宜度模型,通过与相对气象产量进行相关和回归分析,建立基于气候适宜度指数的 7–8 月逐旬产量动态预报模型,对吉林省大豆产量进行动态预报。结果表明:各时段建立的产量预报模型均通过 0.05 水平的有效性检验,能够客观反映大豆生长期气象要素状况;各预报模型的历史回代检验平均准确率均大于 85.0%,均方根误差小于 20.0%;历史回代拟合的气象产量与实际气象产量在年际变化上具有较好的一致性,两者相关性通过 0.05 水平的显著性检验;在 1981–2014 共 34 年中各旬单产趋势预报准确的年份均在 24 年以上。各时段预报模型对 2015–2016 年的外推预报准确率分别在 92.0% 和 81.4% 以上,趋势预报不稳定,可能与模型没有考虑灾害影响有关。总体上,构建的产量预报模型可为吉林省大豆产量预报提供参考依据。

关键词:大豆;气象产量;气候适宜度;准确率;农业气象

Study of Soybean Yield Forecast in Jilin Province Based on Climate Suitability Index Method

QIU Mei-juan¹, GUO Chun-ming¹, WANG Dong-ni¹, MU Chen-ying², MU Jia¹, QU Si-miao¹, YUAN Fu-xiang¹, WANG Qi¹

(1. Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062, China; 2. Shenyang Meteorological Administration, Shenyang 110168, China)

Abstract: In order to forecast the yield of soybean in time# and accurately and provide reliable basis for the relevant departments to ensure the food security of Jilin province, the temperature, precipitation, sunshine and comprehensive climatic suitability models of each ten-day in growth stages of soybean were constructed by using the yield material, developmental stages and daily meteorological data, from 1980 to 2016, and considering the upper limit temperature, the lower temperature, the optimal temperature, the water and sunshine demand for the growth and development of soybean. And *via* the correlation and regression analysis with meteorological yield, dynamic yield forecast model based on climate suitability index of each ten-day during July to August were established to predict the soybean yield of Jilin province dynamically. The results showed that the yield forecast models in different periods all passed the validity test of 0.05 level, and could reflect the status of meteorological factors in growing stages of soybean objectively. The mean accuracy rate of the yield dynamic prediction model for historical fitting test was all above 85.0%, and the nonmalized root mean square error n-RMSE was less than 20.0%. Inter-annual variation between actual relative meteorological yield and relative meteorological yield fit by yield dynamic prediction model had good consistency, and the correlation passed the significant test of 0.05 level. In the 34 years from 1981 to 2014, the accurate yield tendency forecast of each ten-day was all above 24 years. The extrapolation forecast accuracy of 2015–2016 in each period was above 92.0% and 81.4% respectively and the tendency prediction was unstable. It may be for the reason that the influence of disaster was not considered in the model. Generally, the production forecast model was set up to provide important basis for agricultural meteorological yield forecast of Jilin province.

Keywords: Soybean; Meteorological yield; Climatic suitability; Accuracy rate; Agricultural meteorology

收稿日期: 2017-12-18

基金项目: 中国气象局沈阳大气环境研究所 2016 年开放基金课题(2016SYIAE02); 吉林省任务下达式课题(2015020)。

第一作者简介: 邱美娟(1987–), 女, 硕士, 工程师, 主要从事农业气象及灾害研究。E-mail: qmjcam@163.com。

通讯作者: 郭春明(1962–), 男, 高级工程师, 主要从事农业气象研究。E-mail: Gch8188@sina.com。

农业气象产量预报是农业气象预报业务的重要部分,更是政府部门制定农业生产决策和粮食生产计划所依靠的重要信息,是气象为农服务的重要服务产品之一^[1]。农业气象产量预报信息的及时、准确,可为粮食安全和农业生产决策提供重要的科技信息服务,是一项重要的研究内容。

气象部门自 20 世纪 80 年代以来,已经开展了大量农业气象产量预报研究^[2-5],并已逐步建立起一套农业气象业务服务体系,为政府决策机构提供了大量的产量预报信息。农业气象产量预报最开始以农学预报方法和统计模型预报方法为主^[6-7],近几年,随着农业气象业务的迅速发展,一些学者深入研究了作物产量的动态的跟踪预报技术,并提出了一系列农业气象产量动态预报方法,如气候适宜指数法^[8-9]、关键气象因子影响指数法^[10-12]、产量历史丰歉气象影响指数法^[13-15]等。与此同时,相关学者应用遥感和数学模拟等现代化技术手段对作物产量预报进行一系列深入系统的研究探讨^[16]。发展到目前,作物生长模拟模型成为最新的主要研究方向之一^[17-19]。这些产量预报方法都是在一定的科学理论基础之上建立起来的,预测的准确率较高。其中,基于气候适宜度指数的产量预报方法近几年被广泛应用^[20-21]。气候适宜度是把温度、光照、降水等气候因子的数量变化,利用隶属函数的方法将其转化成对作物的生长发育和产量形成的适宜程度^[22-23]。国内不少学者^[24-27]建立了适合当地作物的气候适宜度模型,并将其运用到作物产量动态预报中。如刘伟昌等^[24]和李树岩等^[25]分别建立了河南省冬小麦、夏玉米产量的气候适宜度指数动态预报模型;魏瑞江等^[26]建立了河北省 8 个市夏玉米不同时段的气候适宜度产量预报模型;李曼华等^[27]利用山东省主产区冬小麦资料,基于气候适宜度指数方法构建了全省冬小麦产量动态预报模型;帅细强等^[28]利用早稻产量和不同时段的气候适宜指数的关系建立了湖南省早稻产量动态预报模型。以上这些研究均取得了较好的研究成果。但是,在吉林省作物产量预报方法研究中,基于气候适宜度指数的研究尚不多见。并且,气候适宜度的评价指标和模型由于地理、气候等条件的差异具有很大的区域适用性。因此,尝试利用气候适宜度指数方法对不同地区的主要农作物建立产量预报模型,以提升农业气象产量预报的水平非常有必要。

吉林省地处季风气候区,气象灾害发生频繁^[29-30]。农业生产受不利气候影响十分严重,加之近年来全球变化导致的极端天气气候事件不断增加,进一步加剧了农业生产的不稳定性。而吉林省

近几年响应国家粮食供给侧改革,大豆面积在逐年增加,大豆产量在粮食总产中占有重要地位。因此,从农业气象角度出发,对吉林省大豆进行准确可靠的农业气象产量预测,及时、准确、动态地开展大豆产量预报工作,及时评价气象条件变化对产量影响,对吉林省乃至全国粮食安全具有重要意义。研究利用吉林省大豆生长期内的气象数据(温度、降水和日照时数等),基于大豆生长发育的生理生态特性,建立基于气候适宜度指数的大豆产量预报模型,有助于更好地满足当地政府等有关部门的需求,保证农业气象产量预报工作顺利进行。

1 材料与方法

1.1 资料处理

研究资料包括 1980 - 2016 年吉林省大豆种植面积(hm²)、总产量(kg)、单产(kg·hm⁻²)、代表站点生育期(d)的观测数据;1980 - 2016 年吉林省 50 个气象站点(图 1)记录的逐日最高气温(℃)、最低气温(℃)、降水量(mm)、日照时数(h)。大豆产量资料来源于吉林省统计局,气象资料来源于吉林省气象局。

为了分析气象条件变化对产量的影响,对大豆单产作如下处理,即:

$$\Delta Y_i = (Y_i - Y_{i-1}) / Y_{i-1} \times 100 \tag{1}$$

式中,*i* 代表第 *i* 年,而 *i* - 1 则代表的第 *i* 年的前一年,Δ*Y_i* 为第 *i* 年相对于第 *i* - 1 年大豆单产丰歉值(即相对气象产量),*Y_i*、*Y_{i-1}* 分别为第 *i* 年和第 *i* - 1 年大豆单产。

1.2 适宜度模型的建立

1.2.1 温度适宜度 公式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} F(t_{ij}) &= \frac{(t_{ij} - t_l)(t_h - t_{ij})^B}{(t_o - t_{ij})(t_h - t_o)} \\ B &= \frac{t_h - t_o}{t_o - t_l} \\ F(t_{ik}) &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F(t_{ij}) \\ F(t_k) &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m F(t_{ik}) \end{aligned} \right. \tag{2}$$

式中,*j* 为日序,*i* 为站序, *k* 为旬序(大豆播种日所在的旬为第 1 旬),*t_o*、*t_l*、*t_h* 分别为大豆某发育期内所需的最适温度(℃)、最低温度(℃)、最高温度(℃)^[31],*t_{ij}* 为第 *i* 站在第 *j* 日的日平均气温(℃),*F* (*t_{ij}*) 为第 *i* 站在第 *j* 日温度适宜度,*n* 为每一旬所包含的天数,为 8,9,10 或 11,*F* (*t_{ik}*) 为第 *i* 站在第 *k* 旬的温度适宜度,*m* 为全省所包含的站点数,*F* (*t_k*) 为全省第 *k* 旬的温度适宜度。当温度适宜度计算值为负值时,赋值零。

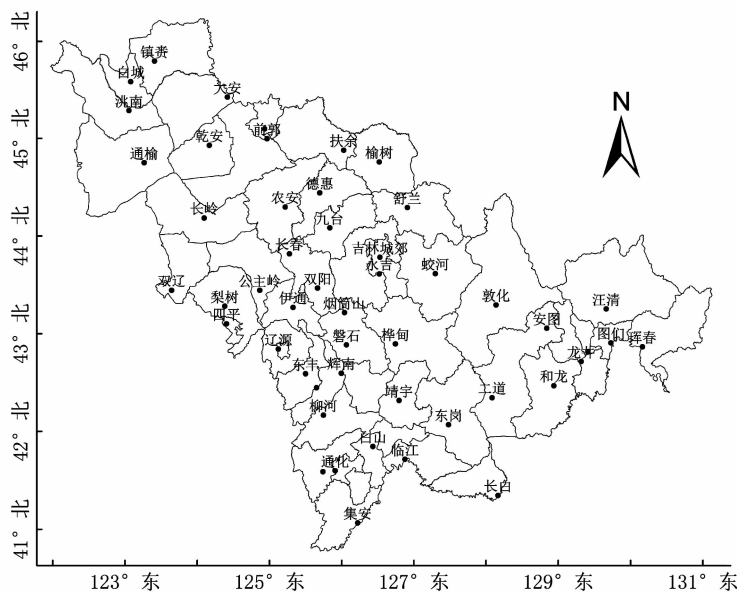


图1 气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations

1.2.2 日照时数适宜度 公式如下:

$$F(s_k) = \begin{cases} 1 & s \geq H \\ s/H & s < H \end{cases} \tag{3}$$

式中, s 是全省第 k 旬的日照时数(h), $F(s_k)$ 为全省第 k 旬的日照适宜度, H 是全省旬多年(1981 – 2010 年共 30 年)日照时数平均值(h)。

1.2.3 降水适宜度 公式如下:

$$F(p_k) = \begin{cases} 1 & -30\% \leq (p - pa)/pa \times 100 \leq 30\% \\ p/pa & (p - pa)/pa \times 100 < -30\% \\ pa/p & (p - pa)/pa \times 100 > 30\% \end{cases} \tag{4}$$

式中, p 是全省某旬的降水量(mm), $F(p_k)$ 为全省第 k 旬的降水适宜度, pa 为全省相应旬多年(1981 – 2010 年)降水量平均值(mm)。

1.2.4 气候适宜度 第 k 旬大豆综合气候适宜度 $F(c_k)$ 为

$$F(c_k) = \sqrt[3]{F(t_k) \times F(m_k) \times F(p_k)} \tag{5}$$

1.2.5 气候适宜度指数 气候适宜度指数是由自大豆播种开始至某一时段的逐旬气候适宜度加权集成构成。其中,各旬权重系数的大小是通过计算大豆相对气象产量与各个旬气候适宜度之间的相关系数的大小来确定,各旬的权重系数 K_i 如下:

$$K_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \tag{6}$$

式中, n 为大豆从播种至某一发育阶段期间的旬数(若不足一句,按一句计算), R_i 为大豆气象产量与各旬的气候适宜度的相关系数。气候适宜度指数的表达式为:

$$FI(c_i) = \sum_{i=1}^n (K_i \times F(c_i)) \tag{7}$$

其中, $F(c_i)$ 是第 i 旬的气候适宜度, K_i 是第 i 旬的权重系数, $FI(c_i)$ 是气候适宜度指数。

1.3 数据分析

研究采用相关系数法对气候适宜度指数进行检验,利用 Fortran 计算机编程语言进行相关系数的计算和产量动态预报模型算法的编写和结果的运算。利用 Excel 2010 进行要素的制图。

2 结果与分析

2.1 气候适宜度指数的检验

将 1981 – 2014 年吉林省大豆相对气象产量和大豆不同生育时段的气候适宜度指数作相关分析,限于文章篇幅,仅以 7 上旬 – 8 月中旬各旬为例。结果表明,各预报时段两者的相关性均通过了 0.05 水平的显著检验,即气候越适宜,相对气象产量越高(表 1)。说明本研究建立的气候适宜度指数可以客观反映大豆生长期的气象要素的适宜程度和变化情况。图 2 是播种至 7 月下旬和 8 月中旬气候适宜度指数与大豆相对气象产量的年际变化图,可以看出不同时段的气候适宜度指数和大豆相对气象产量的年际变化上有较高的一致性。

利用大豆相对气象产量、各生育时段的气候适宜度指数建立大豆产量动态预报模型:

$$\Delta Y = a \times CI + b \tag{8}$$

式中, ΔY 为相对气象产量, CI 为播种至某一时段的气候适宜度指数, a 、 b 为拟合系数。

表1 大豆播种至不同生育时段气候适宜度指数和相对气象产量的相关系数

Table1 Correlation coefficient of relative meteorological yield and climatic suitability index in sowing to different developmental stages of soybean

	相关系数 Correlation coefficient	样本长度 Sample length	检验结果 Result of test
7月上旬 E-Jul	0.390	34	$>P(0.05)=0.339$
7月中旬 M-Jul	0.412	34	$>P(0.05)=0.339$
7月下旬 L-Jul	0.460	34	$>P(0.05)=0.339$
8月上旬 E-Aug	0.570	34	$>P(0.05)=0.339$
8月中旬 M-Aug	0.571	34	$>P(0.05)=0.339$

E表示的是上旬;M表示的是中旬;L表示的是下旬。下同。
E is the early ten days of a month; L is the last ten days of a month; M is the middle ten days of a month. The same as below.

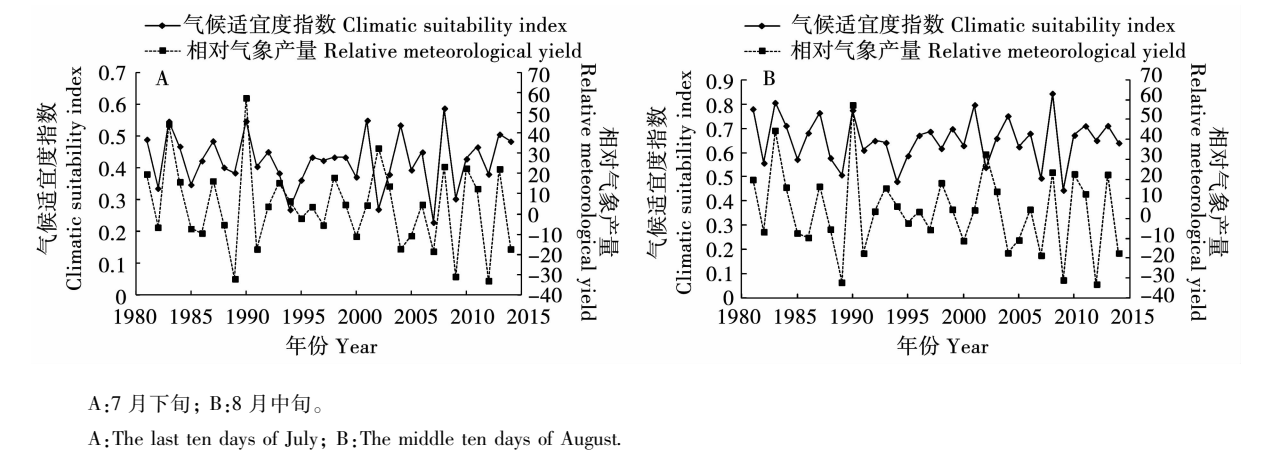


图2 吉林省大豆播种至不同时段气候适宜度指数与相对气象产量的年际变化

Fig. 2 Year vibration of climatic suitability and relative meteorological yield in sowing to different periods of soybean in Jilin province

2.2 产量动态预报模型的建立

利用1981-2014年气温、降水、日照以及大豆产量资料构建的不同时段气候适宜度指数,建立吉林省大豆从播种至任意旬止的产量动态预报模型。根据公式(1)可得,产量预测值 $Y_i=(1+\frac{\Delta Y_i}{100})\times Y_{i-1}$,其中 Y_i 、 Y_{i-1} 和 ΔY_i 含义同上。农业气象产量

预报业务要求在7月15日进行趋势预报、8月25日进行定量预报,限于篇幅,本文仅列出7月上旬至8月中旬逐旬产量动态预报模型(表2)。由表2可见,不同时段的预报模型均通过了0.05水平的有效性检验。说明建立的模型可以客观反映大豆生长期内的气象要素变化状况。

表2 基于气候适宜度指数(CI)的不同时段产量预报模型

预报时间 Forecast time	产量预报模型 Yield forecast model	F值 F value	样本长度 Sample length	检验结果 Result of test
7月上旬 E-Jul	$\Delta Y=121.679\times CI-35.422$	5.252	34	$\text{Sig}=0.029<0.05$
7月中旬 M-Jul	$\Delta Y=126.483\times CI-21.920$	5.815	34	$\text{Sig}=0.022<0.05$
7月下旬 L-Jul	$\Delta Y=121.841\times CI-46.051$	7.626	34	$\text{Sig}=0.009<0.05$
8月上旬 E-Aug	$\Delta Y=125.329\times CI-77.253$	13.890	34	$\text{Sig}=0.001<0.05$
8月中旬 M-Aug	$\Delta Y=125.625\times CI-80.160$	13.884	34	$\text{Sig}=0.001<0.05$

ΔY 为相对气象产量; CI 为播种至某一时段的气候适宜度指数。
 ΔY is relative meteorological yield; CI is climatic suitability index from sowing to a certain times.

2.3 产量预报模型的检验和应用

2.3.1 单产预报历史回代检验 将历年资料(1981-2014 年)代入所建立的产量动态预报模型,对历年大豆单产进行历史回代统计检验。多年平均准确率为各年准确率平均值,而单年预报准确率为 $[1 - (\text{预报单产} - \text{实际单产})/\text{实际单产}] \times 100\%$ 。则模型历史回代拟合检验的平均准确率不同时段均大于 85.0%,其中,准确率 $\geq 90\%$ 的占 48.2%,80%~90% 的占 29.4%,70%~80% 的占 11.8%,<70% 的仅占 10.6%,各旬预报准确率平

均值为 86.6%。在 1981-2014 年共 34 年中各旬单产预报趋势准确的年份均在 24 年以上。从模型历史拟合的归一化均方根误差 n-RMSE 来看,均小于 20.0%(表 3)。说明模型的模拟性能总体上较好。通过对不同生育时段产量预报模型的历史拟合气象产量与实际气象产量做相关分析可以看到,两者相关性较好,均通过了 0.05 水平的显著性检验(表 4)。模型拟合的气象产量与实际气象产量在年际变化上个别年份有差异,但基本相一致(图 3)。

表 3 1981-2014 年不同生育时段产量预报模型历史回代检验

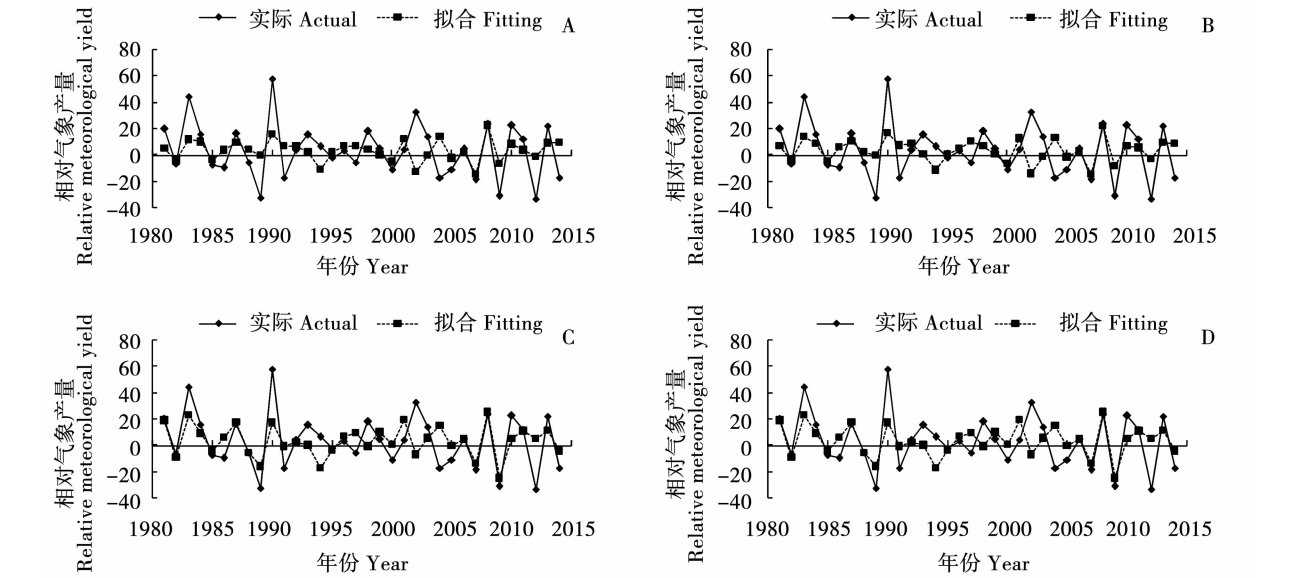
Table 3 History fitting test of yield forecast models in different periods during 1981-2014(%)

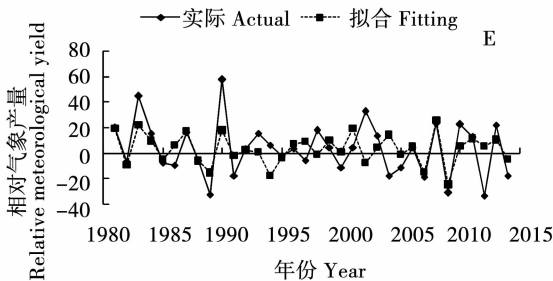
预报时间 Forecast time	趋势预报准确年数 Number of years with correct tendency	平均准确率 Average accuracy	归一化均方根误差 n-RMSE
7 月上旬 E-Jul	24	85.0	19.40
7 月中旬 M-Jul	24	85.3	19.18
7 月下旬 L-Jul	27	87.5	19.19
8 月上旬 E-Aug	26	87.5	17.89
8 月中旬 M-Aug	26	87.6	17.84

表 4 不同生育时段产量预报模型历史拟合相对气象产量与实际相对气象产量的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between relative meteorological yield fit by yield prediction model and actual relative meteorological yield in different periods

预报时间 Forecast time	相关系数 Correlation coefficient	样本长度 Sample length	检验结果 Result of test
7 月上旬 E-Jul	0.390	34	$>P(0.05) = 0.339$
7 月中旬 M-Jul	0.412	34	$>P(0.05) = 0.339$
7 月下旬 L-Jul	0.460	34	$>P(0.05) = 0.339$
8 月上旬 E-Aug	0.570	34	$>P(0.05) = 0.339$
8 月中旬 M-Aug	0.571	34	$>P(0.05) = 0.339$





A:7月上旬;B:7月中旬;C:7月下旬;D:8月上旬;E:8月中旬。

A;E-Jul;B;M-Jul;C;L-Jul;D;E-Aug;E;M-Aug.

图3 不同时段产量预报模型历史拟合相对气象产量与实际相对气象产量的年际变化
Fig. 3 Year vibration of actual relative meteorological yield and relative meteorological yield fit by yield prediction model in different periods

2.3.2 单产动态预报 利用建立的不同预报时段的产量动态预报模型对2015–2016年吉林省大豆单产进行外推预报(表5)。2015年各时段预报准确率较高,普遍在92.0%以上,2016年各时段预报

准确率为81.4%~91.4%。从趋势预报结果上看,2015年各时段趋势预报均准确,而2016年的趋势预报只有7月中旬准确,其它预报时段不准确。

表5 2015–2016年不同时段产量预报模型外推预报

Table 5 Extrapolation prediction of yield prediction models in different periods during 2015-2016

		7月上旬 E-Jul	7月中旬 M-Jul	7月下旬 L-Jul	8月上旬 E-Aug	8月中旬 M-Aug
单产预报准确率 Yield forecast accuracy/%	2015	97.7	99.2	96	92.4	92.0
	2016	89.7	91.4	89.7	81.7	81.4
趋势预报 Tendency forecast	2015	√	√	√	√	√
	2016	×	√	×	×	×

“√”表示趋势预报准确;“×”表示趋势预报不准确。
‘√’ represents that tendency forecast is accurate; ‘×’ represents that tendency forecast is inaccurate.

3 结论与讨论

本研究探讨了气候适宜度指数方法在吉林省大豆单产预报中的应用。结果表明,构建的气候适宜度指数与相对气象产量的相关系数均通过了0.05水平的显著性检验,说明构建的气候适宜度指数可以客观反映出大豆生长期气候要素的适宜程度和变化情况。

建立的产量动态预报模型均通过了0.05水平的有效性检验。各旬模型历史回代检验平均准确率在85%以上;在1981–2014年共34年中各旬单产趋势预报准确的年份均在24年以上;均方根误差n-RMSE均小于20.0%;不同时段模型历史拟合相对气象产量与实际相对气象产量之间存在较高的相关性,均通过了0.05水平的显著性检验。2015–2016年外推预报准确率分别在92.0%和81.4%以上,趋势预报不稳定。该研究结果可为吉林省产量预报提供重要的参考信息,但是由于模型中仅考虑常规的较易获取的温度、降水和日照时数等要素,没有考虑到影响作物产量的全部气象要素,并且模

型中也没有考虑到发生干旱、洪涝以及其它重大气象灾害情况,这可能是造成模型预报结果不稳定的一个重要因素。

近几年基于气候适宜度指数的产量预报方法在山东、河北、湖南、河南等多个国内省级农业气象产量预报业务服务中得到广泛应用,也取得了一定的成果。但是在吉林省农业气象产量预报业务服务中还未见开展该方法的应用研究。因此,本研究初步尝试利用气候适宜度指数方法建立吉林省大豆产量预报模型。研究结果显示,该方法在吉林省大豆产量预报服务中比较适用,但是存在一定的不稳定性,因此,下一步工作需要结合以上问题进一步深入研究。

参考文献

[1] 庄立伟,王馥棠,王石立. 农业气象产量预测业务系统的研制[J]. 应用气象学报,1996,7(3):294-299. (Zhuang L W, Wang F T, Wang S L. Development of agrometeorological yield forecasting operational system[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1996,7(3):294-299.)
[2] 郑昌玲,王建林,宋迎波,等. 大豆产量动态预报模型研究

- [J]. 大豆科学, 2008, 27(6): 943-948. (Zheng C L, Wang J L, Song Y B, et al. Dynamic prediction model of soybean yield per unit[J]. Soybean Science, 2008, 27(6): 943-948.)
- [3] 李树岩, 刘伟昌. 基于关键气象因子的河南省夏玉米产量预报研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 223-227. (Li S Y, Liu W C. Research on the yield prediction of summer maize in Henan province based on meteorological key factors [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(5): 223-227.)
- [4] 王雪姣, 潘学标, 王森, 等. 基于 COSIM 模型的新疆棉花产量动态预报方法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 160-165. (Wang X J, Pan X B, Wang S, et al. Dynamic prediction method for cotton yield based on COSIM model in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(8): 160-165.)
- [5] 邱美娟, 宋迎波, 王建林, 等. 耦合土壤墒情的气候适宜度指数在山东省冬小麦产量动态预报中的应用[J]. 中国农业气象, 2015, 36(2): 187-194. (Qiu M J, Song Y B, Wang J L, et al. Application of climate suitability index coupling soil moisture in dynamic yield prediction of winter wheat in Shandong province [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(2): 187-194.)
- [6] 姜丽霞, 那济海, 朱海霞, 等. 基于 Logistic 方程的大豆产量预报方法[J]. 大豆科学, 2008, 27(3): 414-419. (Jiang L X, Na Q H, Zhu H X, et al. Method for forecasting soybean yield based on Logistic equation[J]. Soybean Science, 2008, 27(3): 414-419.)
- [7] 王书裕. 作物产量的预报方法[J]. 气象学报, 1984, 42(3): 349-355. (Wang S Y. A statistical forecasting method of crop yield [J]. Acta Meteorological Sinica, 1984, 42(3): 349-355.)
- [8] 邱美娟, 宋迎波, 王建林, 等. 新型统计检验聚类方法在精细化农业气象产量预报中的应用[J]. 中国农业气象, 2014, 35(2): 187-194. (Qiu M J, Song Y B, Wang J L, et al. Application of newly developed cluster analysis of statistical test in fine argometeorological yield prediction[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(2): 187-194.)
- [9] 代立芹, 李春强, 康熙言, 等. 基于气候和土壤水分综合适宜度指数的冬小麦产量动态预报模型[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 519-526. (Dai L Q, Li C Q, Kang X Y, et al. Dynamic forecast model of winter wheat yield based on climate and soil moisture suitability [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 519-526.)
- [10] 朱海霞, 赵慧颖, 李秀芬, 等. 黑龙江省大豆主产地产量动态预报系统的建立[J]. 大豆科学, 2017, 36(6): 950-957. (Zhu H X, Zhao H Y, Li X F, et al. System development of dynamic forecast on soybean yield of main areas in heilongjiang province[J]. Soybean Science, 2017, 36(6): 950-957.)
- [11] 宋迎波, 王建林, 陈晖, 等. 中国油菜产量动态预报方法研究[J]. 气象, 2008, 34(3): 93-99. (Song Y B, Wang J L, Chen H, et al. Methodology on dynamical prediction of rape yield in China [J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(3): 93-99.)
- [12] 易雪, 王建林, 宋迎波, 等. 早稻产量动态集成预报方法研究[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(3): 307-313. (Yi X, Wang J L, Song Y B, et al. Study on dynamic integrated prediction of early rice yield [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, 25(3): 307-313.)
- [13] 王建林, 太华杰. 影响中国棉花产量丰歉的气象指标[J]. 应用气象学报, 1995, 6(S): 96-101. (Wang J L, Tai H J. The meteorological index influencing bumper or poor harvest of cotton in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1995, 6(S): 96-101.)
- [14] 刘伟昌, 张雪芬, 王世涛, 等. 棉花生育期关键气象因子及单产丰歉评估指标[J]. 气象科技, 2005, 33(S): 141-143. (Li W C, Zhang X F, Wang S T, et al. Key meteorological factors in growth stage and yield estimate index for cotton [J]. Meteorological Science and Technology, 2005, 33(S): 141-143.)
- [15] 唐余学, 罗孳孳, 范莉, 等. 基于关键气象因子的中稻单产动态预报[J]. 中国农业气象, 2011, 32(S1): 140-143. (Tang Y X, Luo Z Z, Fan L, et al. The dynamic prediction of mid-season rice yield based on key meteorological factors [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(S1): 140-143.)
- [16] 张建华. 作物估产的遥感—数值模拟方法[J]. 干旱地区资源与环境, 2000, 14(2): 82-86. (Zhang J H. Imitation methods of remote sensing-numerical value for estimating yield of crops [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, 14(2): 82-86.)
- [17] 蔡承智, 莫洪兰, 梁颖. 基于 ARIMA 模型的我国大豆单产预测分析[J]. 大豆科学, 2017, 36(5): 789-795. (Cai C Z, Mo H L, Liang Y. Prediction on Chinese soybean yield based on ARIMA model [J]. Soybean Science, 2017, 36(5): 789-795.)
- [18] Boogaard H, Wolf J, Supit I, et al. A regional implementation of WOFOST for calculating yield gaps of autumn-sown wheat across the European Union [J]. Field Crops Research, 2013, 143: 130-142.
- [19] Ma G N, Huang J X, Wu W B, et al. Assimilation of MODIS-LAI into the WOFOST model for forecasting regional winter wheat yield [J]. Mathematical and computer modeling, 2013, 58: 634-643.
- [20] 邱美娟. 基于动力与统计相结合的精细化冬小麦产量动态预报集成技术研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014. (Qiu M J. Research on integrated technology of fine yield dynamic prediction of winter wheat based on the combination of impetus and statistics [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2014.)
- [21] 帅细强, 陆魁东, 黄晚华. 不同方法在湖南早稻产量动态预报中的比较[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 103-111. (Shuai X Q, Lu K D, Huang W H. A comparative study on dynamic forecasting of early rice yield by using different methods in Hunan province [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(1): 103-111.)
- [22] 李树岩, 陈怀亮. 河南省夏玉米气候适宜度评价[J]. 干旱气象, 2014, 32(5): 751-759. (Li S Y, Chen H L. Evaluation studies on climate suitability of summer maize in Henan province [J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(5): 751-759.)
- [23] 史本林, 朱新玉, 胡云川, 等. 夏玉米气候适宜度对全球气候变暖的响应—以商丘地区为例[J]. 地理科学, 2013, 33(10): 1277-1284. (Shi B L, Zhu X Y, Hu Y C, et al. Influence of climate change on climate suitability of summer maize in central plain of China: A case study of Shangqiu [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(10): 1277-1284.)
- [24] 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[J]. 气象与环境科学, 2008, 31(2): 21-24. (Liu W C, Chen H L, Yu W D, et al. Dynamic output forecast research for winter wheat based on climatic suitability index [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2008, 31(2): 21-24.)