

基于气候适宜度预报内蒙古大豆发育期及产量

金林雪¹, 李云鹏^{1*}, 吴瑞芬¹, 李丹¹, 王佳²

(1. 内蒙古自治区生态与农业气象中心, 内蒙古 呼和浩特, 010050;

2. 天津市滨海新区气象局, 天津, 300457)

摘要:开展作物发育期及产量预报对农业生产和粮食安全具有重要意义。本文选取1981–2012年大豆生长季气象数据和发育期资料,结合生理指标,构建大豆气候适宜度模型,建立适用于内蒙古地区的发育期预报模型及以旬为步长的产量预报模型,并应用2013–2015年资料进行预报检验。基于气候适宜度的大豆各发育期持续天数预报模型均通过0.01极显著水平,准确率除鼓粒一成熟期稍低外,其余均在90%以上,模型预报精度较高;产量动态预报模型大部分时段均通过显著性检验,基于气候适宜度法的10个代表站预报平均准确率为87.6%。文章基于气候适宜度法建立的发育期及产量预报模型均能满足业务服务的需求,可供其他大豆主产区的发育期及产量预报方法研究借鉴。

关键词:发育期;产量;预报模型;大豆;内蒙古

中图分类号:S165+.2

文献标识码:A

文章编号:1007-9084(2020)05-0903-08

Forecast method of growth stage and yield of soybean based on climate suitability in Inner Mongolia

JIN Lin-xue¹, LI Yun-peng^{1*}, WU Rui-fen¹, LI Dan¹, WANG Jia²

(1. Center of Ecology and Agricultural Meteorology of Inner Mongolia, Hohhot 010050, China;

2. Meteorological Berau of Binhai New Area, Tianjin 300457, China)

Abstract: It is of great significance to forecast the growth stage and yield for agricultural production and food security. The observed data, including weather and development stage from 1981 to 2012 during soybean growth season in Inner Mongolia were used to this paper. Based on the physiological characteristics of soybean, the climate suitability model was built, the growth stage and yield forecasting models by step of 10 days were established. At last the forecasting accuracy rates were tested using the data from 2013 to 2015. The model for each growth stage forecasting of soybean passed significance test ($P < 0.01$) based on climate suitability method, and the average accuracy of different stages were more than 90%, except for the stage from filling to mature. It is proved that the growth stage model has high forecasting precision. The model for yield forecasting of soybean passed significance test ($P < 0.05$) most time, the average accuracy of the actual yield based on climate suitability was 87.6%. The growth stage and yield prediction model has high prediction accuracy and can satisfy the needs of operational services, it also provides reference for forecasting method research of soybean in other soybean areas.

Key words: growth stage; yield; forecasting model; soybean; Inner Mongolia

气象条件对作物发育速度和产量形成有显著影响,在很大程度上决定了粮食收成丰歉、品质优劣和成本高低。利用气象因素对作物发育期及产量进行预报一直是气象部门和农业部门的共同研

究领域^[1,2]。国内外相关研究已有多年历史,许多国家都已将其列入日常业务范围,所采用的方法种类很多^[3–10]。近年来,气候适宜度法预测精度逐步提高,且模型参数获取便利,使其在农用天气预报中

收稿日期:2019-11-15

基金项目:内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0005-0103);内蒙古自治区自然科学基金(2018MS04005);干旱气象科学研究基金(IAM201808);内蒙古自治区科技计划(2019GG016);中国气象局气候变化专项(CCSF202025);内蒙古自治区科技计划(2020GG0117)

作者简介:金林雪(1986–),女,硕士,工程师,主要从事农业气象方面的研究,E-mail: jinlinxue324@126.com

* 通讯作者:李云鹏(1974–),男,硕士,正研级高工,主要从事应用气象方面的研究,E-mail: lyp5230@163.com

得以应用。已经有众多学者采用该方法研制适合不同区域的作物发育期及产量预报模型。如康西言等^[11]以光、温、水气象因子为基础,分析其与冬小麦发育速率之间的关系,探讨了河北冬小麦发育期预报方法;李树岩等^[12]建立了河南夏玉米预报模型;魏瑞江等^[13]建立了玉米产量动态预报模型;邱美娟等^[14]采用加权方法,开展了基于动态集成预报技术的冬小麦产量预报方法研究。上述预报方法主要集中在小麦、玉米等粮食作物的研究,取得了较为显著的成果,而对大豆相关研究成果较少。

大豆是世界上种植面积仅次于玉米、小麦、水稻的第四大作物。内蒙古大豆主要分布在东部区,该区农业设施不完善,还摆脱不了靠天吃饭的局面,是典型的气候变化敏感区和脆弱区^[15,16]。根据农业部《全国种植业结构调整规划(2016–2020年)》,《全国大宗油料作物生产发展规划(2016–2020年)》,在内蒙古东北部培育大豆优势产区,保障国家粮食安全和大豆的有效供给。基于此,探讨大豆发育期、产量与气象条件的关系,研究引起其波动的主要气象因子,建立精细化的大豆发育期、产量预报模型,有助于加强区域大豆动态监测,对当地的农业生产具有重要的指导意义。

1 资料与方法

1.1 研究区概况与资料来源

内蒙古大豆主要分布在东部区,包括呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市(图1),该区属中、寒温

带大陆性季风气候,年平均气温 $-5.0\sim 7.0^{\circ}\text{C}$,日照时数 $2500\sim 3100\text{ h}$,年降水量 $350.0\sim 450.0\text{ mm}$;大部分农田属于浅山丘陵区,农业灌溉设施不完善,抗旱能力相对较差,是典型的气候变化敏感区和脆弱区。东部区大豆累计种植面积占内蒙古大豆总面积的97%,种植面积位于全国前列,因此研究的代表站点选择上述4个盟市中近5年播种面积大于 500 hm^2 、总产大于 $5\times 10^5\text{ kg}$ 的10个站点作为产量预报研究的代表站:呼伦贝尔市鄂伦春旗、阿荣旗,兴安盟索伦镇索伦县、科尔沁右翼中旗,通辽科尔沁左翼中旗、开鲁县、扎鲁特旗,赤峰市敖汉旗、翁牛特旗、巴林左旗。考虑资料的完整性、连续性,以扎兰屯农业气象试验站作为发育期预报研究的代表站。

大豆产量预报研究代表站点的单产、总产量及播种面积数据来源于内蒙古统计年鉴,11个代表站大豆生长季(5–9月)逐日最高气温($^{\circ}\text{C}$)、最低气温($^{\circ}\text{C}$)、平均气温($^{\circ}\text{C}$)、降水量(mm)和日照时数(h)等气象要素来源于内蒙古气象局,发育期资料来源于扎兰屯农业气象观测站大豆农业气象观测数据及农业部门大豆品种试验数据,扎兰屯农业气象试验站的大豆发育期资料用来建立发育期预报模型;上述资料的时间序列均为1981–2015年。参考前人研究,并结合内蒙古地区精细化农业气候区划项目的研究成果,最终确定了适合内蒙古地区大豆各发育阶段的三基点温度(适宜温度、下限温度、上限温度)、需水量及最适日照时数(表1)。

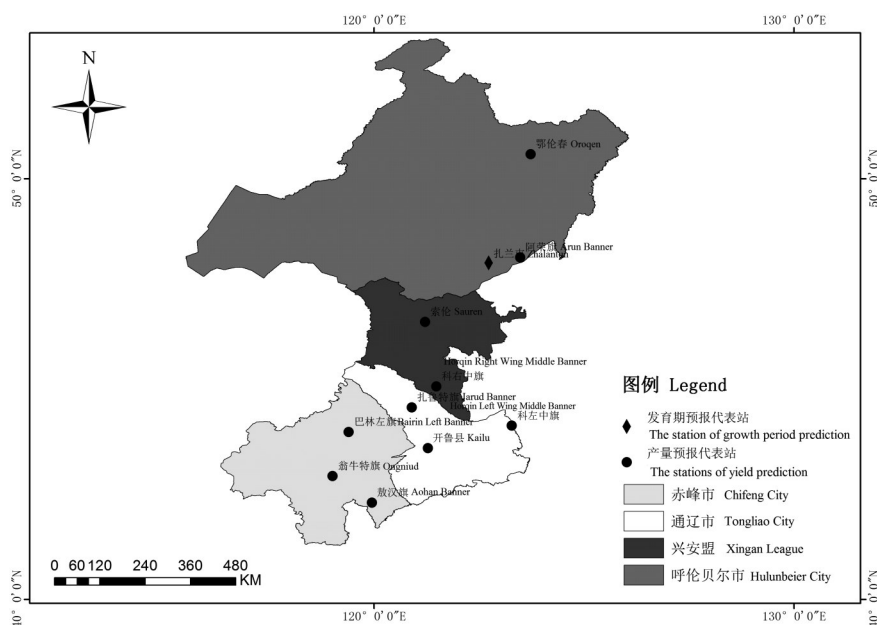


图1 研究区域及代表站点分布

Fig. 1 Study area and the distribution of stations in Inner Mongolia

表1 大豆各发育阶段生理指标及参数

Table 1 Critical value of climatic suitability index of each growth stage of soybean

发育期 Growth stage	最低温度 Min temp./°C	适宜温度 Optimal temp./°C	上限温度 Max temp./°C	温度适宜度 参数B Constant B	日最适日照时数 Optimal sunshine hours/h	日照适宜度 参数b Constant b	需水量 Water require- ments/mm
播种—出苗 Sowing-seedling	7.5	18.5	26	0.7	9.37	5.05	27.5
出苗—分枝 Seedling-branching	10.5	23.5	30	0.5	9.03	4.87	61.6
分枝—开花 Branching-flowing	14	27	32	0.4	8.75	4.72	47.3
开花—鼓粒 Flowing-filling	13	25	30.5	0.5	8.31	4.48	266.8
鼓粒—成熟 Filling-mature	10	18	30	1.5	7.75	4.18	146.9

1.2 方法

1.2.1 发育期资料处理 根据扎兰屯农业气象观测站大豆农业气象观测数据及农业部门大豆品种试验数据,计算其多年平均值用来确定10个产量预报代表站点的发育期(根据地理位置相近原则);主要用来判断某日(旬)大豆所处的发育阶段。大豆发育期划分为播种—出苗、出苗—分枝、分枝—开花、开花—鼓粒、鼓粒—成熟5个时期。以扎兰屯农

业气象试验站作为发育期预报研究的代表站,相邻两个发育期之间的持续天数,由后一个发育期的日期减去前一个发育期的日期求得。在预报出不同发育期间的持续天数后,加上前一个发育期的具体日期,就是后一个发育期的预报日期。

1.2.2 气候适宜度计算 参照马树庆^[17]的研究,将温度适宜度函数定义为:

表2 内蒙古大豆发育期

Table 2 Growth period of soybean in Inner Mongolia

站点 Stations	播种—出苗 Sowing-seedling	出苗—分枝 Seedling-branching	分枝—开花 Branching-flowing	开花—鼓粒 Flowing-filling	鼓粒—成熟 Filling-mature
科尔沁右翼中旗、科尔沁左翼中旗、开鲁县、扎鲁特旗、敖汉旗、翁牛特旗 Horqin Right Wing Middle Banner, Horqin Left Wing Middle Banner, Kailu, Jarud Banner, Aohan Banner, Ongniud	5月中旬 Middle May	5月下旬-6月中旬 Late May-Middle June	6月下旬 Late June	7月上旬-8月下旬 Early July-Late August	9月上旬-9月中旬 Early-Middle September
巴林左旗 Bairin Left Banner	5月中旬 Middle May	5月下旬-6月中旬 Late May- Middle June	6月下旬 Late June	7月上旬-8月中旬 Early July- Middle August	8月下旬-9月上旬 Late August - Early September
鄂伦春旗 Oroqen	5月下旬-6月上旬 Late May- Early June	6月中旬-7月上旬 Middle June- Early July	7月中旬 Middly July	7月下旬-8月下旬 Late July- Late August	9月上旬-下旬 Early - Late September
索伦镇 Sauren	6月上旬 Early June	6月中旬-7月上旬 Middle June- Early July	7月中旬 Middly July	7月下旬-8月下旬 Late July- Late August	9月上旬-中旬 Early - Middle September
阿荣旗 Arun Banner	5月上旬-5月中旬 Early May- Middle May	5月下旬-6月中旬 Late May- Middle June	6月下旬 Late June	7月上旬-8月中旬 Early July- Middle August	8月下旬-9月中旬 Late August - Middle September

$$F(T)_i = \frac{(T_i - T_L)(T_H - T_i)^B}{(T_0 - T_L)(T_H - T_0)^B} \quad (1)$$

$$B = \frac{T_H - T_0}{T_0 - T_L}$$

式(1)中, $F(T)_i$ 为大豆生长发育期间逐日温度适宜度, T_i 为大豆生长发育期间逐日气温; T_L 、 T_H 、 T_0 分别为大豆不同发育期间的下限气温、上限气温、适宜气温。B 为温度适宜度参数。

根据前人研究成果^[17, 18], 结合内蒙古实际情况, 大豆生育期降水适宜度模型定义为:

$$F(R)_i = \begin{cases} R/R_0 & R < 0.7R_0 \\ 1 & 0.7R_0 \leq R \leq 1.3R_0 \\ R_0/R & R > 1.3R_0 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $F(R)_i$ 为大豆生长发育期间逐日降水适宜度, R 为大豆生育期间每日降水量, R_0 为大豆生育期间每日需水量。

大豆日照适宜度^[19]的计算方法如下:

$$F(S)_i = \begin{cases} e^{-(S - S_0)/b} & S < S_0 \\ 1 & S \geq S_0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $F(S)_i$ 为大豆生育期第 i 日的日照适宜度, S 为实际日照时数; S_0 为适宜日照时数下限值; b 为常数, 随发育日数而变化。

根据加权平均法建立每日气候适宜度评价模型, 并根据前人研究采用通径分析方法确定各气象要素权重系数^[12]:

$$F(C)_i = aF(T)_i + bF(R)_i + cF(S)_i \quad (4)$$

式(4)中, $F(T)_i$ 、 $F(R)_i$ 和 $F(S)_i$ 分别为生育期第 i 日温度、降水和日照适宜度; 其中, a 、 b 、 c 分别为各生育期每日温度、降水和日照适宜度对于气候适宜度的权重系数, 采用层次分析法(AHP)计算并进行了归一化处理。

全生育期气候适宜度为各生育期平均气候适宜度的加权平均, 公式如下:

$$F(C) = \sum_j m_j F(C)_j \quad (5)$$

式(5)中, $F(C)$ 为全生育期气候适宜度, $F(C)_j$ 和 m_j 为各生育期气候适宜度及权重系数, 见表3。

2 结果与分析

2.1 大豆发育期预报

2.1.1 发育期持续天数预报模型建立 以综合气候适宜度模型为基础, 利用扎兰屯 1981–2012 年气象资料计算历年各发育阶段逐日气候适宜度, 相邻两个发育期间的发育日数由对应时段内的逐日气

表3 大豆各发育期气象要素适宜度的权重系数
Table 3 Weight coefficients of temperature suitability, precipitation suitability and sunlight suitability at each growth stage of soybean

发育期 Growth stage	$m_j (j=1-5)$	a	b	c
播种—出苗 Sowing-seedling	0.08	0.47	0.47	0.07
出苗—分枝 Seedling-branching	0.14	0.41	0.5	0.09
分枝—开花 Branching-flowing	0.22	0.12	0.76	0.12
开花—鼓粒 Flowing-filling	0.5	0.23	0.62	0.15
鼓粒—成熟 Filling-mature	0.05	0.63	0.26	0.11

候适宜度累加求得。利用扎兰屯不同发育阶段的发育日数(X)和发育期间的实际天数(Y), 建立不同发育阶段持续天数的预报模型, $Y=aX+b$, 具体模型详见表4。

表4 大豆发育期持续天数预报模型

Table 4 Prediction model of soybean growth period

发育期持续天数 Growth-lasting days	预报模型 Prediction models	R	$SigF$
播种—出苗 Sowing-seedling	$Y=1.7552X+1.6454$	0.93	0.01
出苗—分枝 Seedling-branching	$Y=1.441X+9.2202$	0.88	0.01
分枝—开花 Branching-flowing	$Y=1.8977X+0.0911$	0.97	0.01
开花—鼓粒 Flowing-filling	$Y=1.7168X+2.8206$	0.96	0.01
鼓粒—成熟 Filling-mature	$Y=1.102X+13.308$	0.81	0.01

2.1.2 发育期持续天数预报模型验证 利用建立的发育期持续天数预报模型, 对 1994–2012 年大豆各发育期持续天数进行回代检验(表5), 大豆不同发育期持续天数回代检验平均准确率均在 90% 以上, 平均误差除鼓粒—成熟期为 2 d, 其余发育期误差均在 2 d 内; 用 2013–2015 年光温水气象数据进行预报检验(表6), 鼓粒—成熟期平均误差天数较多(4 d)、准确率为 86.8%, 其余发育期误差均在 2 d 左右、准确率均在 90% 以上, 回代检验及预报检验结果均较理想, 能够满足业务服务需求。

2.2 大豆产量预报

2.2.1 产量预报模型建立 内蒙古地区大豆播种

表 5 1994—2012 年大豆发育期持续天数预报模型回代检验
Table 5 Return test of soybean growth period prediction from 1994 to 2012

年份 Year	播种—出苗		出苗—分枝		分枝—开花		开花—鼓粒		鼓粒—成熟	
	Sowing-seedling		Seedling-branching		Branching-flowing		Flowing-filling		Filling-mature	
	误差天数	准确率	误差天数	准确率	误差天数	准确率	误差天数	准确率	误差天数	准确率
	Error days	Precision	Error days	Precision	Error days	Precision	Error days	Precision	Error days	Precision
	/d	/%	/d	/%	/d	/%	/d	/%	/d	/%
1994	2.1	91.4	1.0	97.8	0.6	85.7	1.3	96.3	1.0	96.7
1995	1.2	93.4	0.7	98.7	0.4	94.9	0.2	99.4	1.5	94.4
1996	1.3	92.1	0.7	98.2	0.6	92.3	0.5	98.4	3.1	90.6
1997	1.1	96.2	3.5	90.4	0.4	96.4	0.0	100.0	7.0	79.5
1998	0.4	97.7	6.3	86.4	1.2	87.0	1.6	95.5	1.3	95.7
1999	2.3	89.3	0.2	99.5	0.3	95.9	0.8	98.3	1.0	95.7
2000	0.4	96.8	2.4	93.8	0.6	86.0	2.5	93.5	2.1	94.6
2001	0.2	98.9	0.8	97.8	0.2	99.0	0.9	96.2	1.4	96.1
2002	0.9	93.0	1.9	95.8	0.3	94.4	1.9	94.4	0.7	97.7
2003	3.4	83.6	1.1	97.3	0.1	98.5	3.1	92.9	2.0	92.4
2004	1.0	95.1	0.7	98.3	0.1	98.9	2.3	93.8	1.4	95.3
2005	2.2	85.5	0.0	100.0	0.4	96.5	0.8	97.5	0.2	99.3
2006	0.9	95.9	2.1	95.0	2.2	81.5	0.1	99.6	0.5	98.1
2007	0.6	96.7	0.8	98.2	0.5	94.3	1.6	95.2	1.8	93.7
2008	0.3	98.3	3.9	92.3	0.9	91.4	1.6	94.9	4.2	81.6
2009	1.4	94.9	2.3	94.8	0.3	95.6	1.1	96.7	2.3	91.2
2010	1.8	86.1	1.2	96.8	0.5	94.1	1.6	95.6	1.9	92.9
2011	2.6	86.1	1.9	95.2	0.7	82.1	0.9	97.4	2.2	91.0
2012	2.9	83.7	2.6	92.8	0.2	95.9	1.2	96.8	2.0	92.3
平均 Average	1.4	92.4	1.8	95.8	0.5	92.7	1.3	96.4	2.0	93.1

表 6 2013—2015 年大豆发育期持续天数预报检验
Table 6 Test of soybean growth period forecasting from 2013 to 2015

发育期	实际持续天数	预报持续天数	绝对误差天数	准确率
Growth stage	Actual lasting days /d	Prediction lasting days /d	Absolute error days /d	Precision /%
播种—出苗	16	16.4	0.4	97.7
Sowing-seedling				
出苗—分枝	38	36	2.0	94.5
Seedling-branching				
分枝—开花	12	11.8	0.2	98
Branching-flowing				
开花—鼓粒	33	35.2	2.2	91.2
Flowing-filling				
鼓粒—成熟	26	30	4.0	86.8
Filling-mature				

时间在5月中旬至6月上旬,本研究拟从7月上旬开始进行逐句动态的预报(1至10日为上旬,预报时间为11日;11至20日为中旬,预报时间为21日;21至30或31日为下旬,预报时间为下月1日)。将10个代表站1981—2012年气候适宜度指数与对应单产做相关分析;计算播种至相应起报旬的综合适宜度指数,建立各起报旬综合适宜度指数与单产的回归模

型,进行大豆产量动态预报(表7)。X为相应起报时刻的综合适宜度指数,Y为预报所得产量。经检验,大部站点的旬产量预报方程均通过0.05置信检验,其中一半以上的预报方程通过0.01置信检验,具有显著的统计意义,可用来预报大豆产量;但预报时段前三旬的预报方程未通过检验概率较大。

2.2.2 产量预报模型检验 利用建立的产量预报

表 7 大豆产量预报模型

Table 7 Prediction model of soybean yield

代表站 Station	预报模型及相关系数 Prediction model and related coefficient		预报时间 Prediction time						
			7月11日 July 11	7月21日 July 21	8月1日 August 1	8月11日 August 11	8月21日 August 21	9月1日 September 1	9月11日 September 11
鄂伦春	Model		-	-	-	Y=159.05X-119.09	Y=235.21X-169.77	Y=274.53X-193.54	Y=279.3X-196.36
Oroqen	r		-	-	-	0.39(SigF=0.05)	0.50(SigF=0.05)	0.61(SigF=0.01)	0.60(SigF=0.01)
阿荣旗	Model		-	Y=220.68X-146.06	Y=267.24X-174.74	Y=228.7X-153.6	Y=302.01X-197.71	Y=311.14X-204.22	Y=357.92X-234.8
Arun Banner	r		-	0.44(SigF=0.05)	0.5(SigF=0.05)	0.47(SigF=0.05)	0.55(SigF=0.01)	0.55(SigF=0.01)	0.58(SigF=0.01)
索伦镇	Model		-	Y=155.6X-119.9	Y=202.07X-152.43	Y=241.88X-179.9	Y=304.93X-216.46	Y=287.48X-201.59	Y=298.48X-209.09
Sauren	r		-	0.42(SigF=0.05)	0.48(SigF=0.05)	0.51(SigF=0.01)	0.61(SigF=0.01)	0.55(SigF=0.01)	0.56(SigF=0.01)
科左中旗	Model		Y=246.74X-178.68	Y=325.07X-236.9	Y=318.59X-233.83	Y=380.14X-279.4	Y=393.47X-285.89	Y=316.42X-228.28	Y=324.4X-234.42
Horqin Left Wing Middle Banner	r		0.48(SigF=0.05)	0.59(SigF=0.01)	0.55(SigF=0.01)	0.57(SigF=0.01)	0.55(SigF=0.01)	0.44(SigF=0.05)	0.43(SigF=0.05)
科右中旗	Model		-	Y=309.23X-237.22	Y=302.18X-229.87	Y=385.08X-290.86	Y=401.71X-301.03	Y=426.86X-313	Y=441.76X-323.94
Horqin Right Wing Middle Banner	r		-	0.46(SigF=0.05)	0.48(SigF=0.05)	0.52(SigF=0.01)	0.5(SigF=0.05)	0.5(SigF=0.05)	0.54(SigF=0.01)
开鲁	Model		-	-	-	-	-	Y=166.03X-116.39	Y=179.95X-126.26
Kailu	r		-	-	-	-	-	0.4(SigF=0.05)	0.41(SigF=0.05)
扎鲁特旗	Model		-	-	-	Y=325.22X-230.19	Y=330.9X-229.52	-	-
Jarud Banner	r		-	-	-	0.38(SigF=0.05)	0.38(SigF=0.05)	-	-
敖汉旗	Model		-	-	-	Y=209.54X-162.74	Y=249.87X-189.8	Y=275.74X-204.7	Y=282.61X-210.13
Aohan Banner	r		-	-	-	0.39(SigF=0.05)	0.43(SigF=0.05)	0.44(SigF=0.05)	0.44(SigF=0.05)
翁牛特	Model		-	-	-	-	-	Y=314.56X-213.23	Y=332.15X-225.81
Ongniud	r		-	-	-	-	-	0.42(SigF=0.05)	0.43(SigF=0.05)
巴林左旗	Model		Y=157.64X-102.26	Y=202.17X-134.45	Y=229.5X-151.9	Y=297.39X-197.31	Y=342.25X-223.04	Y=347.57X-227.58	Y=359.02X-236.28
Bairin Left Banner	r		0.41(SigF=0.05)	0.47(SigF=0.05)	0.5(SigF=0.05)	0.57(SigF=0.01)	0.61(SigF=0.01)	0.61(SigF=0.01)	0.61(SigF=0.01)

注:“-”代表预报方程未通过0.05显著性检验

Note:“-”represent correlation of prediction model not significant

表 8 1994–2012 年大豆单产预报回代检验平均准确率 / %

Table 8 Accuracy rate of return test of soybean yield from 1994 to 2012

代表站 Stations	7月11日 July 11	7月21日 July 21	8月1日 August 1	8月11日 August 11	8月21日 August 21	9月1日 September 1	9月11日 September 11	平均 Average
鄂伦春 Oroqen	—	—	—	88.3	88.9	90.1	89.9	89.3
阿荣旗 Arun Banner	—	89	89.4	88.9	89.8	89.8	89.7	89.4
索伦镇 Sauren	—	84.7	85	85	85.9	84.2	84.3	84.9
科左中旗 Horqin Left Wing Middle Banner	86.4	86.4	86.2	86.3	86.9	87.3	87.3	86.7
科右中旗 Horqin Right Wing Middle Banner	—	84.7	84.1	83.2	82.6	—	—	83.7
开鲁 Kailu	—	—	—	—	—	93.5	93.6	93.6
扎鲁特旗 Jarud Banner	—	—	—	85.2	85.7	—	—	—
敖汉旗 Aohan Banner	—	—	—	76.3	77.9	100	77.7	83
翁牛特 Ongniud	—	—	—	—	—	82	82	82
巴林左旗 Bairin Left Banner	86.5	85.6	85.6	86.1	87.4	87.5	87.4	86.6

注:“—”代表预报方程未通过 0.05 显著性检验

Note: “—” represent correlation of prediction model not significant

模型,对 1994–2012 年各代表站大豆产量进行回代检验(表 8),平均准确率均在 80% 以上,为 82%~93.6%;用 2013–2015 年数据进行预报检验并计算预报准确率,各代表站预报检验平均准确率(表 9):在 75.9%~94.6%,鄂伦春、索伦、科左中旗、科右中旗、扎鲁特旗、巴林左旗各旬平均准确率均在 85% 以上,10 个代表站平均准确率为 87.6%,能基本满足业务服务需求。

表 9 2013–2015 年大豆单产预报平均准确率

Table 9 Average accuracy of soybean yield forecasting from 2013 to 2015

代表站 Stations	准确率 Precision / %
鄂伦春 Oroqen	94.6
阿荣旗 Arun Banner	80
索伦镇 Sauren	93.3
科左中旗 Horqin Left Wing Middle Banner	89.1
科右中旗 Horqin Right Wing Middle Banner	88.8
开鲁 Kailu	75.9
扎鲁特旗 Jarud Banner	93.2
敖汉旗 Aohan Banner	85.9
翁牛特 Ongniud	82.8
巴林左旗 Bairin Left Banner	91.9

3 结论与讨论

在对影响大豆发育速率的气象因素进行分析的基础上,建立了基于气候适宜度的大豆发育期持续天数预报模型,并对模型的预报效果进行检验,各发育阶段持续天数预报值与观测值呈极显著相关,预报值与实际观测值的拟合程度较好,除鼓粒—成熟期绝对误差天数较多、准确率稍低外,其余

发育期绝对误差基本在 2 d 左右、准确率均在 90% 以上,其中分枝—开花期模拟精度最高(0.2 d)。

在计算历年气候适宜度模型基础上,建立了以旬为尺度的大豆产量动态预报模型,预报模型均通过 0.05 置信检验,其中一半以上的预报方程通过 0.01 置信检验,具有显著的统计意义;对 1994–2012 年各代表站大豆单产进行回代检验,各代表站平均准确率均达 80% 以上;对 2013–2015 年的大豆产量进行预报检验,3 年不同时段平均准确率在 75.9%~94.6%,鄂伦春、索伦、科左中旗、科右中旗、扎鲁特旗、巴林左旗各旬平均准确率均在 85% 以上,10 个代表站平均准确率为 87.6%;模型检验效果较好,能够满足业务服务需要。

本研究初步建立了内蒙古地区大豆发育期及产量预报模型,准确率较高,基本满足业务化需求,预报模型参数少、易于使用,对于气象服务行业数据易获取、可操作性强,便于快速掌握大豆发育状况和产量情况,为政府职能部门指导提供农业生产管理的基本数据。建立的发育期预报模型中,鼓粒—成熟期的预测误差相对较大,其可能原因在于该阶段是大豆需水最多的时期,而本文建立的水分关键因子及降水适宜度模型均只考虑了降水因子,而未考虑灌溉等其他水源的补充,且前期降水也有一定的滞后效应。另外,由于人力、时间限制,以及大豆观测资料较少,没有考虑大豆的品种特性,所以在今后工作中对模型需进一步优化。

参考文献:

[1] 董占强. 地市级主要农作物发育期、产量预测模式研

- 究[A]. 中国气象学会年会"农业气象与生态环境"分会[C], 2003. 160-164.
- [2] 王彦平, 侯琼, 宋卫士, 等. 气候适宜度在内蒙古东北部马铃薯发育期预报中的应用[J]. 中国农学通报, 2015, 31(3): 216-220.
- [3] Kiniry J R, Sanderson M A, Williams J R, et al. Simulating alamo switchgrass with the ALMANAC model[J]. Agron J, 1996, 88 (4): 602-606. DOI: 10.2134/agronj1996.00021962008800040018x.
- [4] 沈国权. 影响作物发育速度的非线性温度模式[J]. 气象, 1980, 6(6): 1-9.
- [5] 潘学标. 作物模型原理[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [6] 施泽平, 郭世荣, 康云艳, 等. 基于生长度日的温室甜瓜发育模拟模型的研究[J]. 南京农业大学学报, 2005, 28 (2): 129-132. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-2030.2005.02.028.
- [7] 钱拴, 陈晖, 王良宇. 全国棉花发育期业务预报方法研究[J]. 应用气象学报, 2007, 18(4): 539-547. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2007.04.015.
- [8] 侯英雨, 王建林. 利用气象卫星资料估算全球作物总产研究[J]. 气象, 2005, 31(8): 18-21. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0526.2005.08.004.
- [9] 杨霏云, 王建林. 晚稻单产动态预测方法研究[J]. 气象科技, 2005, 33 (5): 433-436. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6345.2005.05.011.
- [10] 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 Crop Res, 2013, 143: 130-142. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.11.005.
- [11] 康西言, 董航宇, 姚树然. 基于气象因子的冬小麦发育期预报模型[J]. 中国农业气象, 2015, 36(4): 465-471. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2015.04.010.
- [12] 李树岩, 彭记永, 刘荣花. 基于气候适宜度的河南夏玉米发育期预报模型[J]. 中国农业气象, 2013, 34(5): 576-581. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2013.05.012.
- [13] 魏瑞江, 宋迎波, 王鑫. 基于气候适宜度的玉米产量动态预报方法[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 622-627. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2009.05.014.
- [14] 邱美娟, 宋迎波, 王建林, 等. 山东省冬小麦产量动态集成预报方法[J]. 应用气象学报, 2016, 27(2): 191-200. DOI: 10.11898/1001-7313.20160207.
- [15] 郑昌玲, 杨霏云, 王建林, 等. 早稻产量动态预报模型[J]. 中国农业气象, 2007, 28(4): 412-416, 452. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2007.04.016.
- [16] 侯琼, 李杨, 包松林. 内蒙古东部区粮食产量对气候变化的响应[J]. 中国农业气象, 2011, 32(S1): 113-117.
- [17] 马树庆. 气候变化对东北粮食产量的模拟研究[J]. 资源科学, 1994, 16(1): 34-40.
- [18] 赵峰, 千怀遂, 焦士兴. 农作物气候适宜度模型研究: 以河南省冬小麦为例[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 77-82. DOI: 10.3321/j.issn: 1007-7588.2003.06.013.
- [19] 姜丽霞, 王育光, 孙孟梅, 等. 黑龙江省玉米产量预报模式的研究[J]. 中国农业气象, 2004, 25(1): 13-16. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2004.01.004.

(责任编辑:王丽芳)