

基于 Logistic 方程的大豆产量预报方法

姜丽霞,那济海,朱海霞,韩俊杰,纪仰慧,闫平,王萍,王晨轶,李秀芬

(黑龙江省气象科学研究所,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:基于 Logistic 方程建立大豆干物质累积曲线用来描述大豆干物质累积过程,由于气候条件处于非理想状态,因此对其干物质累积过程进行气象条件订正,并分析干物质累积量与气候产量的关系。在以上分析的基础上,建立大豆农业气象产量预测模式。通过计算分析温度和水分订正系数发现:在不同热量带、不同年份、不同发育时段,温度和水分订正系数不同,说明温度和水分条件是影响大豆生长发育和产量形成的重要限制因子。利用大豆主产区 2004~2006 年的气象和产量资料进行预报,预报精确度在 95.9% 左右,且预测产量与实际产量相关性较好, R^2 在 0.903~0.948 之间,通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,说明模型预测的产量比较准确,模型可用。

关键词:大豆产量;气象条件;干物质累积量;预报方法

中图分类号: **文献标识码:**A **文章编号:**1000-9841(2008)03-0414-06

Method for Forecasting Soybean Yield Based on Logistic Equation

JIANG Li-xia, NA Ji-hai, ZHU Hai-xia, HAN Jun-jie, JI Yang-hui, YAN Ping, WANG Ping, WANG Chen-yi, LI Xiu-fen

(Heilongjiang Provincial Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030, Heilongjiang, China)

Abstract: The curve of soybean dry matter accumulation was founded to describe the process of soybean dry matter accumulation based on Logistic Equation. The climatic factors weren't generally optimum state, so correct meteorological conditions to the process of soybean dry matter accumulation, and analyze the relationship between the accumulated quantity of crop dry matter and climatic yield. Base on above analysis to establish Agro-meteorological Yield Forecasted model. It was found that the correction coefficient of temperature and water varied with heat zones, years and developing stages, which indicate that temperature and water are both important limited factors affecting soybean growth as well as final yield. By using meteorological and yield data during 2004 to 2006 in main soybean production areas, the accuracy of forecasting reached 95.9%, and correlation between forecasted yield and official yield was well, which indicate that the forecasted yield of the model is accurate, and the model can be put into use.

Key words: Soybean yield; Climate conditions; Dry matter accumulation; Forecast model

大豆是黑龙江省四大主栽作物之一,20 世纪 80 年代以来,大豆种植面积均在 $2 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 以上,尤其近几年其种植面积处于四大作物之首,占黑龙江省粮食作物总播种面积的 36%~43%,占全国大豆种植面积的 30%~43%,可见大豆在黑龙江省乃至全国农业生产中都占有极为重要的地位。近几年黑龙江省大豆的总产量均在 $55 \times 10^8 \text{ kg}$ 以上,占黑龙江省粮豆薯总产的 20% 左右,因此大豆产量的变动直接影响到全省粮食产量的波动,进而影响全国商品粮的供给及油料出口供应。近年气候极端事件频发,对粮食生产造成巨大的负面影响,在此种情况

下,是否能够准确预测大豆产量,为政府部门决策农业生产、调整农业对策及合理布局作物种植结构提供科学可靠的依据,从而保障粮食生产的安全进行和农业经济的可持续发展,成为当前及今后一个迫切需要解决的重要问题。

目前,我国在作物产量预报方面研究较多,采用的方法也不同,比如遥感估产^[1-2]、主成分分析方法^[3]、产量分离法^[4]等等。在作物方面,对水稻和小麦研究较多^[5-7],但在大豆产量跟踪预报技术方面还没有重要的突破。国外对此研究较早,苏联、美国等国家在农业气象预报方面的研究已取得了明显

收稿日期:2007-11-02

基金项目:黑龙江省气象局重点项目资助项目(ZD2006-03);中国气象局 2007 年多轨道业务建设资助项目。

作者简介:姜丽霞(1972-),女,高级工程师,硕士,研究方向主要为应用气象和气候资源研究。E-mail:jianglixia0326@yahoo.com.cn。

成果^[8-10]。基于 Logistic 方程建立干物质累积曲线,并用来描述干物质累积过程。由于气候条件不可能完全处于作物生长发育所需的理想状态,因此对其干物质累积过程进行气象条件的订正,在此基础上建立农业气象产量预测模式,预测大豆产量。

1 资料与方法

1.1 资料来源

气象资料为 2001~2006 年的作物生育期间(6月上旬至 10月上旬)旬平均气温、旬降水、春季第一次土壤测墒的土壤有效水分储存量、逐日蒸发,旬数据采用五日滑动平均方法进行计算。大豆实际单产、总产和播种面积资料来源于黑龙江省统计局的公布数据。

黑龙江省是农业大省,大部分地区为农业县(市),主要选取黑河市、嫩江、讷河、北安、克山、克东、依安、海伦、绥棱、同江、抚远、富锦、绥化市、庆安、巴彦、依兰、桦南、宝清、勃利、林口、虎林、密山、宁安等 30 个黑龙江省大豆主产区作为研究站点,这些县(市)具有一定的代表性,能够较好反映出黑龙江省各地区的生产特点和气候特征。

1.2 产量预报模型

1.2.1 标准干物质累积曲线 作物在其生长过程中,干物质的累积主要由两个因素决定:一是生长季的长短;二是干物质的增长速度,干物质增长速度又受生物学规律和环境条件的制约。干物质累积过程可用自然生长曲线即 Logistic 曲线来描述^[9]:

$$W_i = \frac{W_0}{1 + e^{a+bk}} \quad (1)$$

式中 W_i 为 i 时刻的干物质累积量, W_0 为生育过程中最大干物质累积量, a 、 b 为系数, k 为时间表达式,采用生长季 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温表示。对上式标准化处理(采用相对干物质累积量和积温相对值表示)后进行微分,即可得到干物质累积速度又称生长率的数学表达式:

$$Y_{0i} = \frac{d\left(\frac{W_i}{W_0}\right)}{d\left(\sum t_i\right)} = \frac{-db \exp\left(\frac{b \sum t_i}{\sum t_{\max}}\right)}{\left[1 + a \exp\left(\frac{b \sum t_i}{\sum t_{\max}}\right)\right]^2} \cdot \frac{W_0}{\sum t_{\max}} \quad (2)$$

式中 Y_{0i} 为任意时刻干物质累积速度,即作物某一发育时段内单位时间(以每度积温表示)的干物质累

积量, $\sum t_i$ 为作物发育阶段内 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温, $\sum t_{\max}$ 为作物成熟所需积温, a 、 b 根据分期播种干物质测定和分析得出, $a = 212.25$, $b = -8.92$ 。最终干物质累积量可以写成: $Y = \int Y_{0i} \cdot dt$, 如果用差分形式则表示为: $Y = \sum (Y_{0i} \cdot \Delta t)$, 式中 Y 是干物质累积量, Δt 为选定时间步长的积温。如果换算成籽粒产量需乘一换算系数,而 Y_{0i} 为作物任意时刻的干物质累积速度,在作物成熟阶段,从理论上讲, Y_{0i} 可以用作物气候潜在产量、作物发育阶段内 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的温度的累积值以及作物成熟所需 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温来计算,这样就可以计算出任一发育时段的最大干物质累积速度,根据上式即可计算出干物质累积量。

在一定的温度和水分条件下所形成的产量为作物的气候可能产量。由于气候条件不能完全满足作物的需求,因此气候可能产量与潜在产量之间必有较大的差异,气候可能产量可以写成:

$$Y_n = Y_0 F(t) F(r) \quad (3)$$

式中 Y_n 为特定的气候条件下的干物质累积速度, Y_0 为最佳气候条件下的最佳干物质累积速度, $F(t)$ 为温度对最佳气候条件下干物质累积的影响订正函数, $F(r)$ 为水分供应条件对最佳气候条件下干物质累积的影响订正函数。

这样最终的产量数学表达式可以写成:

$$Y = \sum (Y_0 \cdot F(t) \cdot F(r) \cdot \Delta t) \quad (4)$$

Δt 为以积温表示的时间步长,取积温 100°C 。由此可见,产量计算的关键在于求算温度订正系数和水分订正系数。

1.2.2 温度订正系数 温度的影响函数可以表达为:

$$F(t) = \exp\left[-\frac{a_0(t-t_0)}{10}\right]^2 \quad (5)$$

式中 t 为逐时温度, t_0 为作物光合作用最适温度, a_0 为温度敏感系数。逐时温度可利用逐日最高温度和逐日最低温度采用谐波分析方法进行模拟,利用纬度和太阳赤纬求出日出、日落时间,再求出日出到日落时间间隔内逐时温度订正值,求其平均值作为日平均值,再将日平均温度订正值进行累加,即可得到时段平均订正值。但由于资料量大并且索取预报当年的日最高温度和日最低温度有很大的困难,为了简化起见,分析全省不同地区、不同年份、不同生育阶段的平均温度与温度订正系数的关系,得到下述经验公式:

$$F(t) = -0.175 + 0.051t' \quad (6)$$

式中 t' 为时段平均温度。在实际预报时,用时段平均温度求出温度订正系数,这样就大大的减少了工作量。

表 1 给出了 2002 年大豆主产区黑河等 5 个市县的发育时段(以温度累积 100°C 为一发育时段)的温度订正系数。从表中可以看到在不同地区、不同发育时段,温度订正系数不同。从南到北,

表 1 不同热量带大豆各发育时段的温度订正系数

Table 1 Temperature correction coefficients of each development stage in different heat areas

地区 Region	时段 Stage												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
黑河 Heihe	0.449	0.653	0.586	0.572	0.707	0.741	0.753	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800
北安 Beian	0.447	0.622	0.608	0.579	0.679	0.678	0.672	0.8	0.800	0.8	0.800	0.800	0.800
海伦 Hailun	0.457	0.628	0.698	0.624	0.660	0.740	0.794	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800
绥化 Suihua	0.450	0.640	0.735	0.688	0.661	0.745	0.741	0.693	0.792	0.800	0.800	0.800	0.800
巴彦 Bayan	0.478	0.677	0.707	0.687	0.649	0.715	0.754	0.697	0.741	0.800	0.800	0.800	0.800
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
黑河 Heihe	0.800	0.800	0.800	0.773	0.754	0.728	0.694	0.649					
北安 Beian	0.800	0.800	0.809	0.780	0.765	0.755	0.730	0.659	0.582				
海伦 Hailun	0.800	0.800	0.800	0.800	0.816	0.814	0.797	0.765	0.728	0.679	0.613		
绥化 Suihua	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.817	0.798	0.759	0.707	0.612	0.552	
巴彦 Bayan	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.804	0.806	0.789	0.757	0.704	0.617	0.529	0.534

1.2.3 水分订正系数 由于在作物生长季内降水分布不均匀,因此在同一地区,在作物不同发育期水分对作物的满足程度也是不同的。在作物生育过程中不同发育时段(以温度累积 100°C 为一发育时段),用通常采用的土壤有效水分储存量与田间持水量之比作为水分满足程度的标志,即:

$$aa_i = \frac{W_i}{Wh} \quad (7)$$

式中 $W_i = W_{i-1} + RR_i - E_i$, W_{i-1} 为作物某一发育时段开始时(前一发育时段结束时)的土壤有效水分储存量(第一发育时段开始时的土壤有效水分储存量取每年的第一次土壤测墒的土壤有效水分储存量), RR_i 为该时段的降水, E_i 为该时段的实际总蒸发, Wh 为田间持水量。 RR_i 采用有效降水,当实际日降水量小于 20 mm 时,为有效降水,不进行径流订正。如果实际日降水量大于 20 mm,采用美国农业部土壤保护局建立的计算径流方法,表达式为:

$$RR_i = \sum \left[R_i - \frac{\left(\frac{R_i}{25.4} - 0.2S \right)^2}{\frac{R_i}{25.4} + 0.8S} \times 25.4 \right] \quad (8)$$

S 是地貌参数,考虑该省大部分地区是平地垆作,因此取值 4, R_i 是作物发育阶段内的实际日降水量。在土层 30 cm 以下,黑龙江省土壤水分年变化过程

随着纬度增加温度订正系数越来越小,发育时段同时缩短,说明温度的满足程度越来越小,温度强度是影响地区大豆产量的一个重要因素。随着大豆由营养生长向生殖生长转换,温度订正系数增大,后又减小,这说明在大豆生长盛期,温度强度对大豆生长发育仍是一个限制因子。

比较稳定,因此未考虑土壤渗漏。

某一发育时段开始(前一发育时段结束)时的土壤有效水分储存量可以表达为: $W_{i-1} = W_{i-2} + RR_{i-1} - E_{i-1}$, 式中 W_{i-2} 为前一发育时段开始时的土壤有效水分储存量, RR_{i-1} 为前一发育时段的降水, E_{i-1} 为前一发育时段的实际总蒸发。

总蒸发包括作物蒸腾耗水和土壤蒸发耗水。作物蒸腾耗水是农田水分循环的重要部分,与天气条件、作物长势、作物发育状况和土壤湿度有关,比较难于直接测定^[11]。目前,已有不少学者对此进行了大量的研究^[12-14]。从作物蒸腾耗水与作物的需水特征有关的角度出发,作物耗水量随叶面积指数增大和干物重的增加而增加,则蒸腾耗水曲线可用下式表示:

$$fra_i = \frac{db \exp\left(b \frac{\sum t_i}{\sum t_{\max}}\right)}{1 + a \exp\left(b \frac{\sum t_i}{\sum t_{\max}}\right)} \cdot E_0 \cdot rk \quad (9)$$

a 、 b 、 $\sum t_i$ 、 $\sum t_{\max}$ 同上, E_0 为作物发育阶段内蒸发力, rk 为作物需水特征参数,大豆取 0.9。

土壤蒸发耗水是作物生育过程中的时间函数,在土壤裸露情况下,土壤蒸发不受植被限制;作物出苗以后,在生长过程中,随着叶面积指数的增大,土壤蒸发所占的比例逐渐缩小,当植株衰老时,作物蒸

腾所占比例逐渐缩小,而土壤蒸发所占比例又逐渐增大,因此土壤蒸发是随干物质增长而变化的一个时间函数,可用下式表示为:

$$f b_i = \left\{ 1 - \frac{1}{c} \exp \left[- \frac{\left(\sum t_i - d \right)^2}{\sum t_{\max} z} \right] \right\} E_0 \quad (10)$$

式中 $c = 1.185, d = 0.7, z = 0.25$ 。

由此得到作物某一发育阶段内的总耗水量为: $E A_i = f r a_i + f b_i$ 。在计算时考虑土壤含水量对作物耗水的影响,则某一时段的实际总蒸发可表达为: $E_i = a a_i \cdot E A_i$ 。这样某一发育时段开始时的土壤有效水分储存量即可写为: $W_{i-1} = W_{i-2} + R R_{i-1} - E A_{i-1} \cdot a a_{i-1}$, 式中 $E A_{i-1}$ 为潜在耗水量, $a a_{i-1}$ 的意义与前述相同。

由于不同作物对水分需求的敏感程度不同,诸如玉米抗旱性较强,大豆是喜湿作物,虽然同样的水分供应状况,但对产量的影响程度差异很大,因此,引进一个作物对水分的敏感系数 aaa , 大豆取值 2.0。为便于作物间进行对比,根据不同作物实际产量及模拟方程,通过迭代法,模拟出作物对水分的敏感系数。这样水分订正系数即可写成:

$$F(r)_i = \exp(-aaa \cdot (1 - aa_i)^2) \quad (11)$$

根据以上分析,计算主产区依兰 2001 年和 2006 年大豆各发育时段(以温度累积 100°C 为一发育时段)的水分订正系数(表 2),从表中可以看到,在大豆生长期,2001 年与 2006 年的水分供应状况差别较大,在多数发育时段内 2006 年水分订正系数高于 2001 年。回顾依兰 2006 年和 2001 年的生长季水分状况和产量情况,2006 年生长季水分条件较好,降水量为 492 mm,比常年多 6%;而 2001 年生长季降水量仅为 263 mm,比常年少 43%,比 2006 年少 47%。2006 年依兰大豆实际单产为 $2325 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,2001 年大豆实际单产为 $1752 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,单产减少了 25%,这充分反映了水分条件对大豆最终产量的影响程度和减产原因。在同一年份、不同发育时段水分供应系数也不同,2001 年大豆旺盛生长时期的水分供应系数相对其他时段小很多,在 0.25 ~ 0.46 之间,此时期依兰出现了历史少见的干旱,水分供应不足,植株生长不良,导致大豆单产下降,说明水分条件也是限制大豆生长发育及产量形成的重要因子之一。

表 2 依兰 2001 和 2006 年大豆各发育时段水分订正系数

Table 2 Water correction coefficients of each developmental stage in 2001 and 2006 of Yilan

年代 Year	时段 Stage												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2001	0.98	1.00	1.00	0.96	0.82	0.67	0.55	0.46	0.40	0.34	0.30	0.27	0.26
2006	0.98	1.00	0.96	0.81	0.64	0.59	0.76	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.68
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
2001	0.26	0.25	0.32	0.43	0.56	0.75	0.75	0.54	0.41	0.47	0.50	0.51	
2006	0.37	0.56	0.87	0.82	0.58	0.46	0.47	0.63	0.90	1.00	1.00	0.94	

1.2.4 产量预报模型建立 综合以上分析,采用相对产量值方法,将预报年的产量与比较年的产量相比较,用数学表达式可以写成:

$$A = \frac{Y_i}{Y_j} = \frac{\sum (Y_0 \cdot F(t)_i \cdot F(r)_i \cdot \Delta t)}{\sum (Y_0 \cdot F(t)_j \cdot F(r)_j \cdot \Delta t)} \quad (12)$$

式中 A 为预报年与比较年的产量相比的增(减)百分率, Y_i 为预报年的预测产量, Y_j 为比较年的实际产量,则根据从黑龙江省统计局获得的比较年的实际产量资料即可求得预报年的预测产量。

2 结果与分析

2.1 模型计算及预报效果检验

利用 2004 ~ 2006 年每年气象资料及由黑龙江省统计局获得的 2004 ~ 2006 年大豆主产区实际单产资料,计算求得黑龙江省大豆主产区各年的预测单产(表 3),从表中可以看到,计算的预测产量与实际产量比较接近,预报精确度 $\left[(1 - \left| \frac{\text{预报值} - \text{实际值}}{\text{实际值}} \right|) \times 100\% \right]$ 在 86.5% ~ 99.9% 之间,预报效果比较理想。

表 3 2004 ~ 2006 年大豆主产区代表市县预测产量与实际产量比较

Table 3 Comparison of forecasted yield and official yield of main soybean planting areas from 2004 to 2006 (kg · hm⁻²)

县(市) County (City)	2004 实际值 Official yield in 2004	2004 预测值 Forecasted yield in 2004	精确度 Accuracy /%	2005 实际值 Official yield in 2005	2005 预测值 Forecasted yield in 2005	精确度 Accuracy /%	2006 实际值 Official yield in 2006	2006 预测值 Forecasted yield in 2006	精确度 Accuracy /%
黑河 Heihe	1820	1825	99.7	1850	1886	98.1	1400	1706	78.2
嫩江 Nenjiang	1931	1926	99.7	2322	2385	97.3	2206	2194	99.5
讷河 Nehe	2371	2360	99.5	2310	2250	97.4	2118	2107	99.5
北安 Beian	1984	1981	99.8	2142	2274	93.9	1640	1808	89.8
克山 Keshan	2085	2248	92.2	2475	2571	96.1	2310	2552	89.5
克东 Kedong	1914	1920	99.7	1953	2002	97.5	1845	1836	99.5
依安 Yian	1725	1925	88.4	2079	2232	92.6	1522	1561	97.4
海伦 Hailun	1756	1764	99.5	2100	2053	97.8	2101	2150	97.6
绥棱 Suiling	1764	1760	99.8	1843	1940	94.7	1852	1898	97.5
同江 Tongjiang	1363	1353	99.3	1813	1895	95.5	1700	1695	99.7
抚远 Fuyuan	1050	1046	99.6	1701	1580	92.9	1498	1507	99.4
富锦 Fujin	2640	2621	99.3	2649	2785	94.9	2292	2307	99.3
绥化 Suihua	2260	2442	91.9	2426	2509	96.6	2293	2276	99.2
庆安 Qingan	2044	2319	86.5	2027	2030	99.9	1875	1855	98.9
巴彦 Bayan	2440	2420	99.2	2277	2442	92.7	2385	2375	99.6
桦南 Huanan	1624	1628	99.8	2590	2649	97.7	2250	2220	98.7
宝清 Baoqing	2152	2157	99.8	2313	2191	94.7	2348	2343	99.8
勃利 Boli	2115	1707	80.7	2132	1994	93.5	2235	2228	99.7
林口 Linkou	1472	1342	91.2	2244	2351	95.2	2353	2334	99.2
虎林 Hulin	1950	1769	90.7	1899	2032	93.0	1972	1962	99.5
密山 Mishan	2025	2030	99.8	2325	2230	95.9	2221	2230	99.6
宁安 Ningan	1861	1856	99.7	2231	2274	98.1	2240	2233	99.7

2.2 产量预报模型检验

分析预测产量与当年的实际产量的关系如图 1 (a ~ c), 由图中可以看到, 2004 ~ 2006 年大豆的实

际产量与预测产量具有较好的相关关系, R^2 在 0.903 ~ 0.948 之间, 其中 2006 年相关关系最好, R^2 为 0.948, 2004 年和 2005 年次之, R^2 为 0.903 和

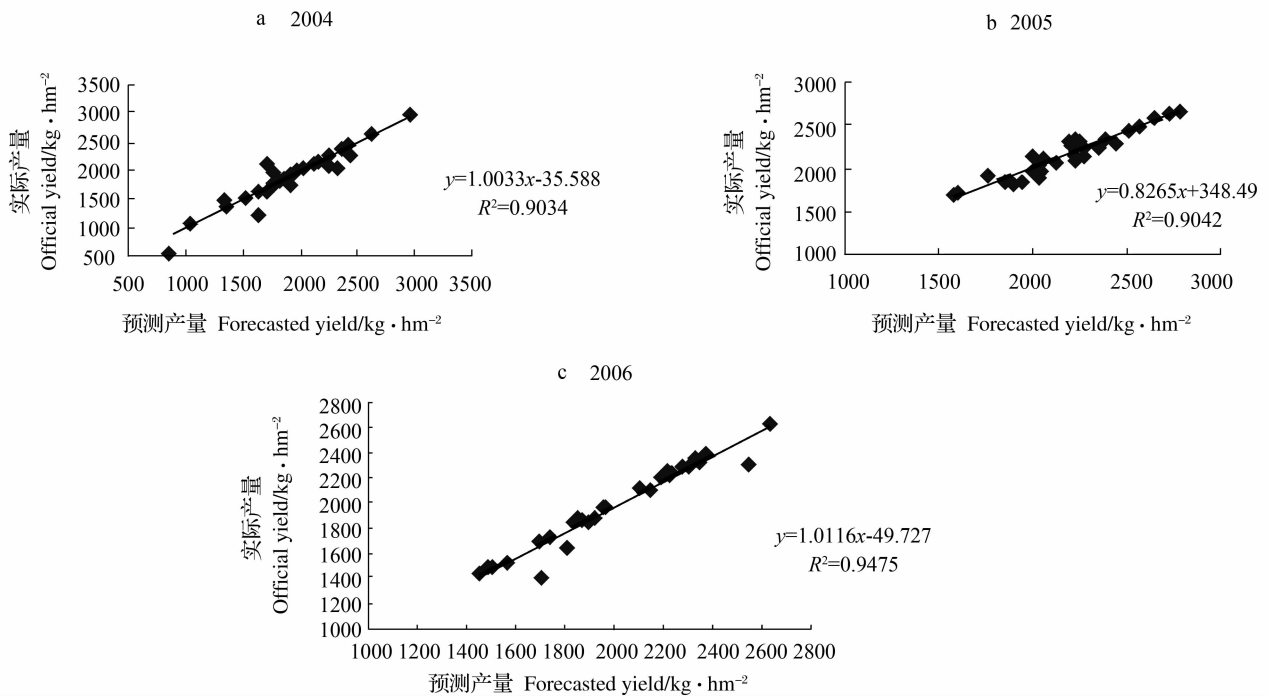


图 1 2004 ~ 2006 年黑龙江省大豆主产区预测产量与实际产量相关图
Fig. 1 Correlation between forecasted yield and official yield in main soybean planting areas of Heilongjiang province from 2004 to 2006

0.904, 2004~2006年的 t 值分别为16.18、16.25、22.46, 均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验, 说明模型预报结果较为准确, 模型可用。

3 结论与讨论

采用作物生长动态模型, 克服了一般统计预报中趋势产量计算的不准确, 尤其是对预报年趋势产量估算的误差。模型生物学意义明确, 模型中的温度订正系数及水分订正系数能很好的反映出作物整个生育期及不同发育期热量和水分的满足程度, 对评价不同时期气候条件的满足程度具有很重要的作用, 能清楚说明增(减)产的原因, 由模型对2004~2006年黑龙江省大豆产量预测的结果表明, 平均预测精确度为95.9%, 3年的产量预报值和实际值的平均 R^2 为0.918, 通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验, 说明模型预报准确率较高, 预测效果好, 模型可用。模型中的作物温度敏感系数和水分敏感系数是经验模拟参数, 如何通过实验获取还需进一步研究, 同时模型中未考虑作物前期生长状况对籽粒干物质累积的影响, 对作物生育时段的考虑不够全面, 此部分工作有待于在今后进一步分析研究。

参考文献

- [1] 李剑萍. 气象卫星作物长势监测及产量预报系统[J]. 气象科技, 2002, 30(2): 108-111. (Li J P. Meteorological satellite crop growing situation monitoring and yield forecast system[J]. Meteorological Science and Technology, 2002, 30(2): 108-111.)
- [2] 李郁竹, 谭凯琰. 华北地区玉米遥感估产方法的初步研究[J]. 应用气象学报, 1995, 6(增): 33-41. (Li Y Z, Tan K Y. A Preliminary study on the method for corn yeild estimation by remote for corn yield estimation by remote sensing in North China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1995, 6 (Append): 33-41.)
- [3] 韩永翔, 葛秉钧. 甘肃省玉米产量的主成分分析[J]. 应用气象学报, 1995, 6(2): 252-256. (Han Y X, Ge B J. The principal component analysis for corn yield in Gansu Province[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1995, 6(2): 252-256.)
- [4] 王建林, 王宪彬, 太华杰. 中国粮食总产量预测方法研究[J]. 气象学报, 2000, 58(6): 738-744. (Wang J L, Wang X B, Tai H J. Study on the method of predicting food total output in China [J]. Actameteorologica Sinica, 2000, 58(6): 738-744.)
- [5] 邹永林, 胡萌夫, 高金成, 等. 镇江市小麦产量预报方法的研究——Baier- Robertsons 模型的一种改进型[J]. 气象, 1988, 14(1): 28-31. (Zou Y L, Hu M F, Gao J C, et al. Study on method of wheat yield forecast in Zhenjiang City—an improved mold of Baier- Robertsons Mold [J]. Meteorological Monthly, 1988, 14 (1): 28-31.)
- [6] 顾本文, 吉文娟. 灰色关联度分析在云南小春作物产量预报中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 45-48. (Gu B W, Ji W J. Application of grey relational analysis in yield forecast of spring crop in Yunnan Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(3): 45-48.)
- [7] 张宇, 王石立, 王馥棠. 气候变化对我国小麦发育及产量可能影响的模拟研究[J]. 应用气象学报, 2000, 11(3): 264-270. (Zhang Y, Wang S L, Wang F T. Research on the possible effects of climate change on growth and yield of wheat in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2000, 11(3): 264-270.)
- [8] 赵四强. 日本作物产量预报简介[J]. 气象, 1985, 11(3): 25-26. (Zhao S Q. Brief introduction of crop yield forecast in Japan [J]. Meteorological Monthly, 1985, 11(3): 25-26.)
- [9] Graybiu J S, Cox W J, Otis D J. Yield and quality of forage maize as influence by hybrid, planting date, and plant fensity [J]. Agronomy Journal, 1991, 83(3): 559-563.
- [10] Otto J. Helweg. Function of crop yield from applied water [J]. Agronomy Journal, 1991, 83(4): 769-773.
- [11] 陈立亭, 孙玉亭, 胡传第, 等. 黑龙江省气候与农业 [M]. 北京: 气象出版社, 2000: 76-77. (Cheng L T, Sun Y T, Hu C, et al. Climate and agriculture of Heilongjiang province [M]. Beijing: Meteorological Publishing Company, 2000: 76-77.)
- [12] 徐为根, 申双和, 姚克敏, 等. 不同水分处理下南京地区冬小麦耗水量特征及其模拟 [J]. 气象科学, 2002, 22(2): 191-196. (Xu W G, Shen S H, Yao K M, et al. The character and simulation study of water consumption of winter wheat in Nanjing area In different soil water disposal [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2002, 22(2): 191-196.)
- [13] 陆葆跃. 春玉米耗水量及其抗旱决策 [J]. 南京气象学院学报, 1994, (增刊): 9-11. (Lu B Y. Water consumption of spring corn and drought-relief measures [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1994 (Append): 9-11.)
- [14] 陈玉民. 估算冬小麦旬平均日耗水量模型的初步研究 [J]. 水利学报, 1999(12): 49-54. (Chen Y M. Study on daily water consumption per ten-days mold of winter wheat [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989(12): 49-54.)
- [15] 朱自玺. 棉花耗水规律与灌溉随机控制 [J]. 应用气象学报, 1998, 9(4): 417-424. (Zhu Y X. Water consumption and stochastic control of orrigation for cotton [J]. Quarterly Applied Meteorology, 1998, 9(4): 417-424.)