

基于积分回归法的寒地玉米产量动态评估

宫丽娟, 王 萍, 李秀芬, 姜蓝齐, 姜丽霞

(黑龙江省气象科学研究所/中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室, 哈尔滨 150030)

摘要:利用黑龙江省1981~2014年80个站点气象资料、44个县市的玉米产量资料和31个农业气象站玉米生育期资料,通过气象要素膨化处理,应用积分回归建立5~7月以旬为时间尺度的玉米产量动态评估模型。根据业务需求将全省划分为4个区域,用1981~2010年资料进行模型准确率回代检验,并用2011~2014年资料进行预估。结果表明,全省平均回代准确率为87.4%,II区最高为89.9%,I区和IV区次之,分别为89.5%和87.8%,III区最低为82.5%;预估平均准确率也达到87.4%,I区和II区模型评估准确率分别为91.5%和92.0%,均好于III区和IV区。

关键词:玉米;影响效应;积分回归;动态评估

中图分类号:S162.5

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2022)05-0102-05

Research on Dynamic Assessment of Maize Yield Based on An Integral Regression Method in Cold Region

GONG Lijuan, WANG Ping, LI Xiufen, JIANG Lanqi, JIANG Lixia

(Heilongjiang Province Institute of Meteorological Science/Innovation and Opening Laboratory of Regional Eco-Meteorology in Northeast, China Meteorological Administration, Harbin 150030, China)

Abstract: Based on meteorological data of 80 representative meteorological stations, maize yield of 44 counties and maize growth period of 31 agrometeorological stations in Heilongjiang Province from 1981 to 2014. Methods for dynamic prediction of maize in the period of ten days of March to July were established according to principles of integral regression through the expansion of meteorological data. The province was divided into 4 regions as needed. The results showed that: the average accuracy of the back tests was 87.4%. The last in III region was 82.5%. The model average prediction accuracy rates were also 87.4%. The accuracy in I region and II region were 91.5% and 92.0% separately, moreover they were performing better in the two regions than in III region and IV region.

Key words: Maize; Influential effect; Integral regression; Dynamic forecast

黑龙江省地处我国的高纬高寒地区,受全球气候变化的影响,气温升高趋势明显,是近20年增温幅度显著的区域之一^[1-2],且该趋势在今后一段时期仍将持续,对黑龙江省农业气候资源的影响显著^[3-4]。作为黑龙江省三大主栽作物之一的玉米,其种植面积、产量和商品率均居全国前列。黑龙江省玉米产量的安全与国家粮食安全息息相关。玉米是一种对气候变化较为敏感的作物^[5-6],气候变化通过生育进程、产量结构和适宜种植区

等对玉米的最终产量产生影响^[7]。因此,科学、准确的玉米产量评估信息可为农业生产管理和粮食安全保障提供重要的数据支持。

作物产量评估的研究始于20世纪80年代,主要分为两类:一是基于统计学原理的评估方法,如魏瑞江等^[8]、李树岩等^[9]根据作物生长特性,基于气候适宜度指数构建了玉米和水稻产量评估模型;李树岩等^[10]通过相关分析找出影响河南省玉米产量的关键气象因子,并在此基础上建立玉米产量评估模型;杜春英等^[11]根据作物产量丰歉影响指数建立的黑龙省水稻产量评估模型。此方法简单灵活,评估准确率较高,应用较为广泛。二是基于作物生长模型模拟的评估方法,如帅细强等^[12]基于水稻生长模型(ORYZA2000)建立了水稻相对气象产量与作物生长模型模拟生物量间的统计模型,实现了江南双季稻产量动态评估;靳

收稿日期:2019-10-21

基金项目:中国气象局沈阳大气环境研究所、辽宁省农业气象灾害重点实验室联合开放基金项目(2019SYIAE04);黑龙江省自然科学基金(LH2022D024);黑龙江省气象科学技术研究项目(HQZD2017006)

作者简介:宫丽娟(1982-),女,高级工程师,硕士,主要从事气候变化对农业生产的影响研究。

华安等^[13]基于作物模型和遥感数据进行玉米产量同化估产,结合遥感估算的种植得到吉林省榆树市玉米总产;2009年黄晚华等^[14]对该方法发展历史、应用情况和未来发展趋势进行了系统总结,基于作物生长机理在作物产量评估中取得了较好效果,但由于作物生长是一个较复杂的过程,该方法在应用中仍有待进一步研究和完善。近年来,研究人员又基于统计方法和作物生长模型模拟等集成,建立产量评估动态模型,亦取得了较好成果^[15]。

本文对黑龙江省1981~2014年玉米产量与气候特征进行分析,从气象条件对玉米各生育阶段的影响效应角度出发^[16-17],采用积分回归法^[18]建立旬尺度的黑龙江省玉米产量动态评估,以期实现对黑龙江省玉米产量动态、连续的评估服务。

1 资料与方法

1.1 资料来源

选取黑龙江省1981~2014年80个气象站气温、降水、日照数据,31个农业气象观测站的玉米发育期观测资料和44个县市的玉米产量资料。对于部分没有玉米发育期资料的气象站点,采取就近原则,以临近农业气象站的玉米发育期数据为准(表1),气象和玉米发育期资料来源于黑龙江省气象局、玉米产量资料源于《黑龙江省统计年鉴》。

本文根据业务需求和气候特点将全省分为4个玉米产区^[19],分别为高产稳产区(I)、高产区(II)、稳产区(III)、低产不稳产区(IV)(图1)。

表1 各区玉米平均发育期

区域	播种	出苗期	三叶期	拔节期	开花期	乳熟期	成熟期
I	5月上旬	5月中旬	5月下旬	7月上旬	7月下旬	8月下旬	9月下旬
II	5月上旬	5月下旬	5月下旬	7月上旬	7月下旬	8月下旬	9月下旬
III	5月上旬	5月中旬	5月下旬	7月上旬	7月下旬	8月下旬	9月下旬
IV	5月中旬	6月上旬	6月上旬	7月上旬	7月下旬	8月中旬	9月中旬

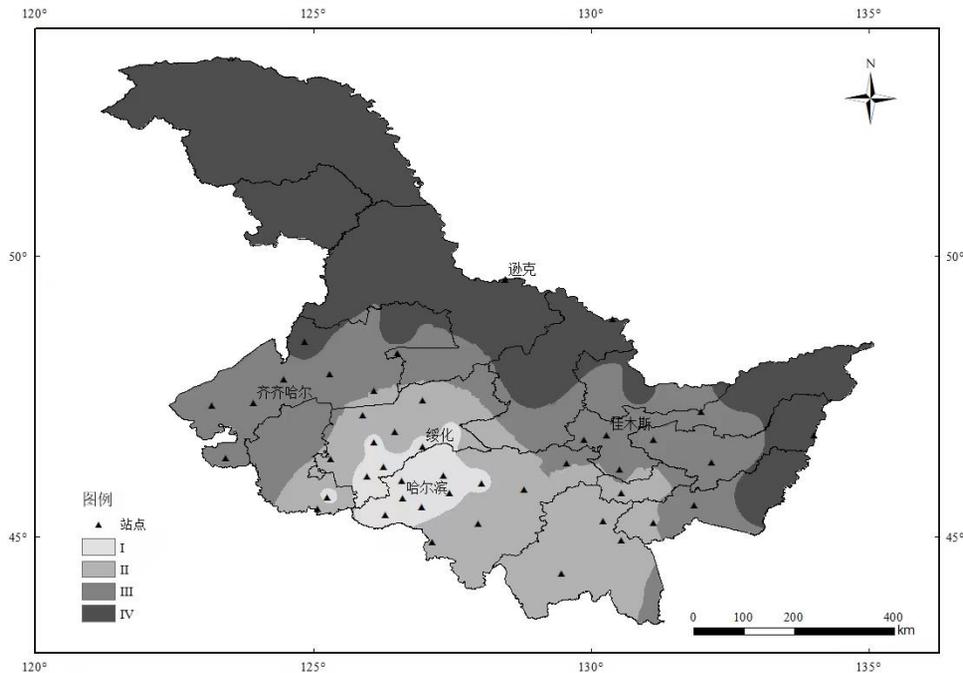


图1 研究区域气象站点分布

1.2 研究方法

1.2.1 产量资料处理

实际产量的逐年变化不但受到气候波动的影响,而且还受到水肥条件、品种以及技术水平等因素的制约,因此,要搞清楚逐年的气象条件对产量的变化有多大影响,必须将生产水平变化等因素造成的产量变化趋势从实际产量中分离出

来,即作物气象产量 Y_w 可分解为实际产量 Y 与趋势产量 Y_t 的差值。本文选用正交多项式回归分析方法,提取作物的趋势产量计算气象产量。利用1981~2010年玉米单产的数据建立各区玉米趋势产量评估模型,如表2所示,其中 Y_t 为趋势产量, $\Phi_k(X_t)$ 是年序号为 t 的各正交函数($k=0,1,2,\dots,5$),可通过查正交多项式表得到^[20]。

表2 各区玉米趋势产量拟合方程

区域	方程	显著性
I	$Y_i = 6098.52 + 90.34\Phi_1(x_i)$	0.000
II	$Y_i = 5333.62 + 92.18\Phi_1(x_i)$	0.000
III	$Y_i = 3583.33 + 62.20\Phi_1(x_i)$	0.000
IV	$Y_i = 4182.92 + 73.95\Phi_1(x_i)$	0.000

1.2.2 气候分析模式的建立

将各区 1981~2010 年玉米生长季(5~9月)气象资料按旬分成 15 个生物时段(n=15),然后将作物生物时段做膨化处理,根据积分回归原理及正交函数的性质,产量评估模型建立至生物时段 n=7 为止,即 7 月下旬止。以生物时段第一序列(n=15)阐述其方法,其余建模方法类同^[17]。膨化处理,如生物时段编序为:

$L_1, L_2, L_3, \dots, L_{15}, (n = 15), L_1 + L_2, L_2 + L_3, \dots, L_{14} + L_{15}, (n = 14), L_1 + L_2 + L_3, L_2 + L_3 + L_4, \dots, L_{13} + L_{14} + L_{15}, (n = 13)$, 以此类推。 L_i 为某旬气象要素值, $i=15$ 。设气温为 T, 降水为 R, 日照时数为 S($k=3$), $a_i(t)$ 均取 5 次项($m=5$)。气象产量与气象要素直接做逐步回归模型,表中 n 代表膨化处理后的生物时段个数。积分回归法是利用正交多项式,即常用切比雪夫多项式,把原来较多自变量化为较少数自变量。然后用一般多元回归分析法求出新变量回归模型,最后再根据其基本原理求出原自变量的回归参数,用于分析自变量与因变量之间相关性质和相关程度。

$$Y_w = C + \sum_{i=0}^k \int_0^1 a_i(t)x_i(t)dt \dots\dots\dots (1)$$

其中 Y_w 为玉米气象产量; k 为气象要素个数; $a_i(t)$ 为 $t + \Delta t$ 时刻的第 i 个气象要素每变化一个单位时,对玉米产量的影响系数; $x_i(t)$ 为 $t + \Delta t$ 时刻的第 i 个气象要素值($i = 1, 2, 3, \dots, k$); C 为常数项。

在实际工作中, $a_i(t)$ 的时间正交多项式函数展开式为:

$$a_i(t) = \sum_{j=0}^m a_{ij}\varphi_j(t) \dots\dots\dots (2)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, k; j = 0, 1, 2, \dots, m$ 其中 m 为展开项次; $\varphi_j(t)$ 为时间的正交多项式。则(1)式可写为:

$$Y_w = C + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \rho_{ij} a_{ij}(t) \dots\dots\dots (3)$$

在实际工作中, ρ_{ij} 的计算公式为:

$$\rho_{ij} = \sum_{t=1}^n \rho_j(t)x_i(t) \dots\dots\dots (4)$$

式中 n 为生物时段 $t = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

气象要素通过膨化处理,组成不同生物时段的要素组合,通过各生物时段气象要素与气象产量的积分回归分析,建立不同时期的积分回归方程。

2 结果与分析

2.1 气候条件与玉米产量的定量关系

公式(2)中的 $a_i(t)$ 为偏回归系数,表示某一生物时段气象要素变化一个单位,作物气象产量增减的产量, $a_i(t)$ 的绝对值越大,表明其对作物产量的影响越大。4 个区气温、降水和日照各旬时间分布与玉米产量的影响变率 $a_i(t)$ 见表 3。 $a_i(t) [a_T(t), a_R(t), a_S(t) \in a_i(t)]$, 其中, U_{q_i} 分别指 1 个单位的气温、降水量、日照。以 I 区为例,选取生长季 5 月上旬至 9 月下旬逐旬的气温(a_T)、降水(a_R)和日照(a_S)因子,分析气象因子与玉米产量的定量关系。

1981~2010 年 I 区逐旬光温水对玉米气象产量的影响系数呈波动变化,气温对玉米气象产量影响较大,降水和日照对其影响相对较小。气温对 I 区玉米气象产量的影响系数呈两谷一峰的“W”形,波峰出现在玉米开花期前,期间气温升高对玉米气象产量为正效应;波谷出现在三叶期和乳熟期前后,此阶段气温升高对气象产量影响为负效应。

I 区玉米播种集中在 5 月上旬,此时气温升高对玉米产量的影响为正效应,播种后至七叶期前后(5月中旬~6月中旬),气温对玉米气象产量的影响为负效应,峰值出现在 5 月下旬,此阶段气温在历年平均基础上每增加 1 个气象单位(U_{q_i}),气象产量减少约 $58.2 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,主要由于气温升高易造成玉米旺长,不利于蹲苗。拔节至抽雄前后(6月下旬~8月上旬)气温对玉米气象产量的影响为正效应,峰值出现在 7 月中旬,影响系数是 $50.7 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,气温升高有利于玉米的抽雄开花,为后期生殖生长打下良好基础。气温升高对乳熟期影响为负效应,峰值出现在 9 月上旬,气温较历年平均升高 1 个气象单位,对气象产量的影响为 $-58.2 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

I 区的降水量增加对玉米产量的影响大部分时段为正效应,5 月上旬玉米播种期影响系数最大,即每增加 1 个气象单位,对气象产量的影响系数为 $19.3 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$,说明在播种期降水增加有利于土壤增墒,促进玉米出苗;此后随着时间推移,影响系数逐渐变小,9 月上旬开始影响系数由正转负,此阶段为玉米的乳熟-成熟期,玉米籽粒

表3 气温、降水、日照时间分布与玉米产量的影响变率 $a_i(t)$ kg/(hm²·U_{eq})

区	生长	5月	5月	5月	6月	6月	6月	7月	7月	7月	8月	8月	8月	9月	9月	9月
域	阶段	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
I	$a_T(t)$	67.1	-28.7	-58.2	-47.2	-16.7	16.8	41.6	50.7	41.6	16.8	-16.7	-47.2	-58.2	-28.7	67.1
	$a_R(t)$	19.3	13.7	9.7	7.0	5.3	4.4	4.1	4.0	3.9	3.5	2.6	1.0	-1.7	-5.7	-11.3
	$a_S(t)$	-5.0	2.1	4.3	3.5	1.2	-1.3	-3.1	-3.8	-3.1	-1.3	1.2	3.5	4.3	2.1	-5.0
II	$a_T(t)$	-13.8	-32.3	-19.8	9.2	42.6	71.2	88.3	89.9	74.7	44.0	1.8	-45.2	-87.8	-113.9	-108.9
	$a_R(t)$	21.6	16.5	12.1	8.3	5.1	2.5	0.5	-0.8	-1.5	-1.6	-1.1	0.1	1.9	4.3	7.3
	$a_S(t)$	9.6	5.5	2.0	-0.8	-3.0	-4.6	-5.6	-5.9	-5.6	-4.6	-3.0	-0.8	2.0	5.5	9.6
III	$a_T(t)$	7.0	17.1	24.7	29.6	32.0	31.9	29.2	23.9	16.1	5.7	-7.3	-22.8	-40.9	-61.5	-84.7
	$a_R(t)$	9.0	-10.3	-8.8	-0.4	6.8	9.0	6.1	0.0	-6.1	-9.0	-6.8	0.4	8.8	10.3	-9.0
	$a_S(t)$	31.0	-1.7	-5.6	0.8	6.6	6.9	1.4	-7.2	-14.8	-17.1	-11.4	1.9	17.9	25.8	7.0
IV	$a_T(t)$	77.6	38.3	12.0	-3.4	-10.2	-10.4	-6.3	0.0	6.3	10.4	10.2	3.4	-12.0	-38.3	-77.6
	$a_R(t)$	3.0	3.3	1.3	-1.6	-4.1	-5.6	-5.5	-3.8	-0.7	3.1	6.6	8.6	7.4	1.0	-13.0
	$a_S(t)$	-9.6	-8.2	-6.8	-5.5	-4.1	-2.7	-1.4	0	1.4	2.7	4.1	5.5	6.8	8.2	9.6

灌浆趋于结束,进入脱水黄熟阶段,降水量的增加不利于籽粒脱水。

日照对玉米气象产量的影响系数与气温呈相反的“M”型,播种期后影响系数由负转正,出苗-七叶期影响系数为正,峰值出现在5月下旬,此期间日照时数增加可促进叶片面积和数量生长,每增加1个气象单位,对气象产量的影响系数为4.3 kg/(hm²·h);拔节-抽雄期日照对玉米生长为负效应,峰值出现在7月中旬,影响系数为-3.8 kg/(hm²·h);8月中旬后影响系数由负转正,峰值在9月上旬,影响系数为4.3 kg/(hm²·h),此阶段为玉米的乳熟-成熟期,充足的日照利于玉米灌浆籽粒脱水。

2.2 玉米气象产量模式评估及检验

基于玉米产量评估业务需求,利用1981~2010年气象要素和玉米气象产量分别建立5月上旬至7月下旬4个区域评估模型,共模拟36组模型,其中3个模型通过了 $P<0.01$ 的显著性检验,21个模型通过了 $0.01<P<0.05$ 的显著性检验,其他未通过显著性检验。生物时段将模拟得到的玉米气象产量加上趋势产量,得到玉米模拟产量,再与实际产量相比较,用准确率进行模型评估效果检验(表4)。

$$\text{准确率} = \left(1 - \frac{|\text{模拟产量} - \text{实际产量}|}{\text{实际产量}} \right) \times 100\%$$

将1981~2010年的气象资料回代模型,计算各区域不同时段玉米气象产量,并计算回代准确率。表4列出了I区玉米气象产量评估模型及准确率,其他区略。从各区的回代准确率来看,II区模型回代准确率最高,各旬在89.3%、90.5%,平均为89.9%,I区和IV区次之,平均分别为89.5%和87.8%,III区最低,各旬在80.5%、83.9%,平均为

82.5%,其中5月上旬的回代准确率仅80.5%,效果较差。全省各旬平均回代准确率为86.8%、88.1%,平均为87.4%。

利用2011~2014年资料,对各区不同起报时段玉米产量进行预估。4个区平均预估准确率分别为91.5%、92.0%、78.2%和87.8%,III区和IV区准确率小于I区和II区,全省平均准确率为87.4%,从各旬的评估情况看,五月上旬产量预估准确率最高,达到93.2%,其他时段之间差异不大。对比1981~2010年的历史回代和2011~2014年的预估准确率,III区最低,其他区评估准确率较好,普遍在85.0%以上。

由上可知,全省平均不同生物时段的历史回代准确率相差不大,但从各区的平均回代准确率上看,III区明显小于其他区域。从2011~2014年的玉米产量预估看,在生物时段 $n=15$ 时全省平均预估准确率最高,达到93.2%,此后逐渐回落至85.0%左右,同时III区的预估准确率与回代准确率相似,仍为4个区域中最低,平均为78.2%。

3 结论与讨论

气温对黑龙江省玉米气象产量的影响较大,降水和日照的影响相对较小。拔节-开花期气温升高对玉米产量的影响基本为正效应,苗期和玉米营养生长期降水量增加对玉米产量的影响基本为正效应,苗期和成熟期日照对玉米产量影响为正效应。利用积分回归法建立的玉米气象产量评估模型在各区表现不一,但准确率基本可以满足业务需求,可为产量评估、预估和年景评估等提供技术服务。

表4 I区玉米气象产量评估模型及准确率

生物时段 n	评估模型	R	回代率(%)	预估率(%)
15	$Y_w = -1877.128 + 0.067\rho_{4T} + 3.970\rho_{0R} - 1.507\rho_{1R} - 0.052\rho_{3R} - 0.005\rho_{4S}$	0.600*	88.9	93.7
14	$Y_w = -3104.653 - 1.388\rho_{2T} + 0.395\rho_{4T} + 3.461\rho_{0R} - 0.278\rho_{1R} + 0.424\rho_{2R} - 0.050\rho_{4S}$	0.639*	89.8	88.7
13	$Y_w = -2225.540 + 0.642\rho_{4T} + 2.937\rho_{0R} - 0.777\rho_{1R} + 0.304\rho_{2R} - 0.338\rho_{3R} - 0.086\rho_{4S}$	0.691*	90.5	84.6
12	$Y_w = -1193.470 + 1.614\rho_{3T} + 0.848\rho_{4T} + 1.774\rho_{5T} + 1.442\rho_{0R} - 0.112\rho_{1R} + 0.069\rho_{2R} + 0.048\rho_{2S}$	0.664*	90.2	90.4
11	$Y_w = -109.010 + 7.761\rho_{4T} + 0.186\rho_{2S}$	0.428	89.1	95.1
10	$Y_w = -4079.578 - 6.719\rho_{2T} + 1.296\rho_{0R} - 0.205\rho_{1R} + 0.744\rho_{2R} - 0.413\rho_{4S}$	0.689**	90.3	92.0
9	$Y_w = -141.467 - 10.108\rho_{5T} - 0.525\rho_{5R} - 0.334\rho_{4S}$	0.547*	90.1	93.6
8	$Y_w = -29.689 + 7.898\rho_{3T} + 0.688\rho_{2S}$	0.460*	88.5	92.2
7	$Y_w = -1069.528 + 20.121\rho_{5T} - 0.632\rho_{4R}$	0.472*	88.2	93.4
平均	-	-	89.5	91.5

注：“*”和“**”分别表示通过了0.05和0.01水平的显著性检验

玉米产量波动受气候条件的影响明显,对生长季光温水条件敏感,这与李辉等^[5]研究相一致^[5]。对于纬度相对较高的IV区,春季回暖早,气温升高,利于玉米播种期提前,可延长生育期提高产量。本研究将全省产量评估降级到各分区评估,实现了在玉米播种后至成熟期前任意时段的精细化动态滚动评估,评估效果较好。但研究中仅考虑气象因子,存在一定的局限性,对于影响玉米产量的人工栽培、田间管理措施和作物本身对不利气象条件的自适应过程未做分析^[21-22];同时玉米生长季逐旬的气象因子受评估精度所限,将不同程度地影响评估效果;在分区评估时,III区和IV区玉米产量数据和农事站点少,分布不均,导致两个区评估效果不够理想,因此在这几方面仍需不断改进完善,逐步提高业务水平和服务能力。

参考文献:

- [1] 贺伟,布仁仓,熊在平,等. 1961-2005年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531.
- [2] 王萍,李秀芬,姜丽霞,等. 气候变化背景下黑龙江省主粮作物稳产类型区划[J]. 东北农业科学, 2019, 44(4): 85-88.
- [3] 宫丽娟,李宇光,王萍,等. 黑龙江省玉米气候适宜度变化分析[J]. 吉林农业科学, 2012, 37(5): 75-80.
- [4] 杜春英,宫丽娟,张志国,等. 黑龙江省热量资源变化及其对作物生产的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 242-252.
- [5] 李辉,姚凤梅,张佳华,等. 东北地区玉米气候产量变化及其对气候变化的敏感性分析[J]. 中国农业气象, 2014, 35(4): 423-428.
- [6] 孙宁,孟祥盟,边少锋,等. 吉林省湿润区不同玉米品种产量及农艺性状比较研究[J]. 东北农业科学, 2017, 42(1): 5-7.
- [7] 成林,马志红,李树岩. 气候变化对河南省夏玉米单产的

影响分析[J]. 玉米科学, 2016, 24(1): 88-95.

- [8] 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.
- [9] 李树岩,余卫东. 基于气候适宜度的河南省夏玉米产量预报研究[J]. 河南农业大学学报, 2015, 49(1): 27-34.
- [10] 李树岩,刘伟昌. 基于气象关键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): 221-227.
- [11] 杜春英,李帅,王晾晾,等. 基于历史产量丰歉影响指数的黑龙江省水稻产量动态预报[J]. 中国农业气象, 2010, 31(3): 427-430.
- [12] 帅细强,王石立,马玉平,等. 基于水稻生长模型的气象影响评价和产量动态预测[J]. 应用气象学报, 2008, 19(1): 71-81.
- [13] 新华安,王锦地,柏延臣,等. 基于作物生长模型和遥感数据同化的区域玉米产量估算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 162-173.
- [14] 黄晚华,薛昌颖,李忠辉,等. 基于作物生长模拟模型的产量预报方法研究进展[J]. 中国农业气象, 2009, 30(S1): 140-143.
- [15] 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.
- [16] 李思慧,赵慧颖,赵春亮,等. 河套灌区玉米生长农业气候条件适应性研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(18): 194-199.
- [17] 赵慧颖. 内蒙古东北部天然牧草生态气候适应性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(5): 164-169.
- [18] 贾建英,刘一锋,彭妮,等. 基于积分回归法甘肃省冬小麦产量动态预报[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(2): 100-105.
- [19] 陈立亭. 黑龙江省气候与农业[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 64-70.
- [20] 李湘阁. 实用气象统计方法[M]. 北京: 气象出版社, 2015: 153-159.
- [21] 王秀玲,阎旭东,徐玉鹏,等. 不同耕作方式对春玉米土壤水分、温度及产量的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(3): 87-93.
- [22] 罗洋,郑洪兵,李瑞平,等. 行距配置对春玉米种植区土壤含水量的影响[J]. 东北农业科学, 2017, 42(4): 1-4.

(责任编辑:王丝语)