

温度导致的我国东北三省玉米产量波动模拟

张建平^{1,2}, 王春乙³, 杨晓光¹, 赵艳霞³, 王 靖¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147; 3. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 东北三省处在我国高纬度地区, 一直以来玉米生长季由温度导致的低温冷害是影响东北三省玉米生产波动的主要农业气象灾害; 作物模式能对作物重要生理生态过程及其与气象、土壤等环境条件的关系进行数值模拟, 人为再现农作物生长发育过程。借助 WOFOST 作物模型在东北三省玉米生产适应性验证的基础上, 对该三省区近 46a 来 (1961 ~ 2006 年) 因温度导致的玉米产量波动情况进行了模拟分析。结果显示, 黑龙江、吉林、辽宁三省区的玉米产量波动趋势基本相一致, 且随着年份的增加产量波动有减小的趋势, 产量波动最大的是黑龙江省, 波动范围 -20% ~ 12%; 产量波动最小的是辽宁省, 波动范围 -15% ~ 8%。

关键词: 波动; WOFOST 模型; 模拟; 中国东北

文章编号: 1000-0933(2009)10-5516-07 中图分类号: Q142, S181, S314 文献标识码: A

Simulation of yields fluctuation caused by the temperature in Northeast China

ZHANG Jian-Ping^{1,2}, WANG Chun-Yi³, YANG Xiao-Guang¹, ZHAO Yan-Xia³, WANG Jing¹

1 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2 Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5516 ~ 5522.

Abstract: Northeast China is one of the highest latitude areas in China, so the low temperature disaster during the maize growing season was the main agro-meteorological disasters which affected the maize production in Northeast China. Crop models can numerically simulate the relations between the important physiological and ecological processes of the crops and meteorology and soil, and reproduce crop growth processes. Therefore, based on the suitability test of WOFOST model in simulating the growth of maize in Northeast China, the paper analyzed the influence of the fluctuation of temperature on maize yields in recent 46 years in Northeast China, results showed that there was the same trends in the fluctuation of maize yields in Heilongjiang, Jilin and Liaoning, the fluctuation decreases with the increase in years, the largest fluctuation occurred in Heilongjiang province, with the value ranging between -20% - 12%, and smallest fluctuation occurred in Liaoning province, with the value ranging about -15% - 8%.

Key Words: fluctuation; WOFOST model; simulation; Northeast China

粮食生产不仅关系到国计民生, 而且也是国家发展和社会稳定的基础^[1,2]。东北三省作为我国玉米的主产区和重要的商品粮基地^[3], 探讨其玉米产量的波动问题, 对我国的粮食安全具有重要的现实意义。

粮食产量波动作为一个客观存在的现象, 一直以来是许多专家和学者研究的热点问题之一^[4~10]。不同学者研究的侧重点不尽相同, 有的侧重于以粮食产量为时间序列, 对其波动特征进行研究; 有的根据波动的特点, 在此基础上分析其波动成因; 还有的根据多年粮食产量资料进行建模并对未来产量进行预测和预警。但大多是以统计分析为主, 既缺乏与时空结合的系统研究, 也缺少对客观问题的系统分析。鉴于此, 本文拟在引

基金项目: 国家科技支撑计划课题资助项目 (2006BAD04B09); 公益性行业 (气象) 科研专项资助项目 (GYHY200806008)

收稿日期: 2008-12-01; 修订日期: 2009-02-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jeepjohn@163.com

进 WOFOST 作物模型^[11-13],在模型参数调整、区域化及其适宜性分析的基础上,拟研制一套适合我国东北三省玉米产量波动的评估方法,以便为各级政府、生产决策部门提供定量化依据。

1 资料和方法

1.1 研究资料

研究所需的资料主要有作物资料、气象资料和土壤资料等。作物资料主要包括作物品种及熟性、发育期观测资料、作物产量因素及产量结构、农业气象灾害及病虫害调查情况(灾害调查日期、灾害名称、受害期及受害部位、受害程度及对产量影响情况,灾害综合评定),来源于农业气象试验站、农业气象观测站以及农业气象观测记录报表(农气表-1)^①,时间序列是 1981~2006 年;气象资料包括最高气温、最低气温、辐射($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)、水汽压(kPa)、风速和降雨量(均为日值)^②,时间序列是 1961~2006 年;土壤资料有土壤质地类型、酸碱度及养分含量、不同深度土壤湿度及水分含量、不同深度田间持水量(0~50cm)、土壤容重及凋萎湿度,来源于农业气象观测记录报表(农气表-2)^③。

1.2 研究方法

选取东北地区 46a(1961~2006 年)的平均气温驱动下的模拟产量作为正常年份的产量水平,而每年实际气温驱动下的模拟产量作为实际产量水平,通过二者之间相比来确定东北玉米产量的波动情况,定义如下公式:

$$I_t = \frac{Y_t - \bar{Y}_t}{\bar{Y}_t} \times 100\%$$

式中, I_t 为 t 年的波动系数(%); Y_t 为 t 年实际气温驱动下的模拟产量(kg/hm^2); $\bar{Y}_t$ 为 t 年平均气温驱动下的模拟产量(kg/hm^2)

2 作物模式简介

WOFOST 作物模型由荷兰瓦赫宁根大学开发,起源于世界粮食研究中心(CWFS)组织,是一个根据气象和土壤条件模拟作物根、茎、叶和穗生物量以及土壤水分的动态模型。模型的主要用途有:①作物产量的预测与评估;②土地资源的定量评价;③气候变化影响的量化评估;④风险分析和年际间产量变化等。模型中两个主要的子模型是发育子模型及土壤水分平衡子模型^[13]。

3 模型参数的确定及检验

3.1 播种期的确定

根据罗新兰等人的研究^[14],黑龙江、辽宁的玉米从播种至出苗期的发育速度与温度的关系:

黑龙江	$1/n = -0.07695 + 0.01053t$	$r = 0.94$
辽宁	$1/n = -0.0809 + 0.0106t$	$r = 0.96$

式中, n 为发育期间隔日数, t 为发育期内的平均温度,当发育速度 $1/n$ 为零时的温度,可认为是玉米萌发的生物学下限温度。由上述 2 个式子求出生物学下限温度分别为 7.3°C 和 7.6°C 。一般地认为 8°C 是东北三

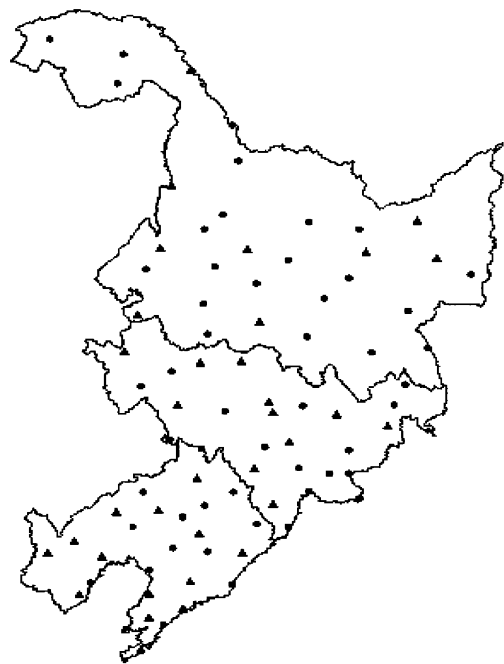


图1 研究站点分布图

Fig. 1 Distribution chart of study stations

“●”代表只要气象资料的站点 Stations with meteorological date only, “▲”代表作物资料、气象资料和土壤资料皆有的站点 Stations with crop data, meteorological date and soil data

① 摘自国家气象信息中心气象资料室

② 来源于国家气象中心农业气象研究室

③ 摘自国家气象信息中心气象资料室

省春玉米萌发的生物学下限温度,因此,本文选择稳定通过 8℃ 的初日作为东北玉米模型的播种期(图 2)。

可以看出,随着纬度的增加,东北玉米播种期从南到北有逐渐推迟的现象,适宜播种期从每年的 4 月 8 号(或 7 号)一直延续到 5 月 2 号(或 1 号)。

3.2 玉米品种熟性的划分

有效积温法划分品种熟性,利用东北三省 81 个气象站点 1971~2006 年的逐日气象数据及玉米分期播种资料(30 个站点 102 期次)来计算玉米发育阶段的平均有效积温(表 1)。

3.3 作物参数的确定及区域化

采取“试错法”,根据东北三省玉米多年的发育期观测资料来确定区域玉米的各阶段发育参数,其它的作物参数来源于多年试验观测以及国内外玉米的研究成果。

区域化的基本原则是在整个区域尺度上,首先进行分区,然后以各分区的代表样点来调试模型参数;

区域化的基本原理:假设在农作物种植区域尺度上,所有作物品种都同属一种生态型;

调整方案是以区域为空间尺度,使用多点同期的面上产量资料进行调试。表 2 列出了模型区域化后的主要作物生长参数(TSUM 取值均是多年数据的平均值)。

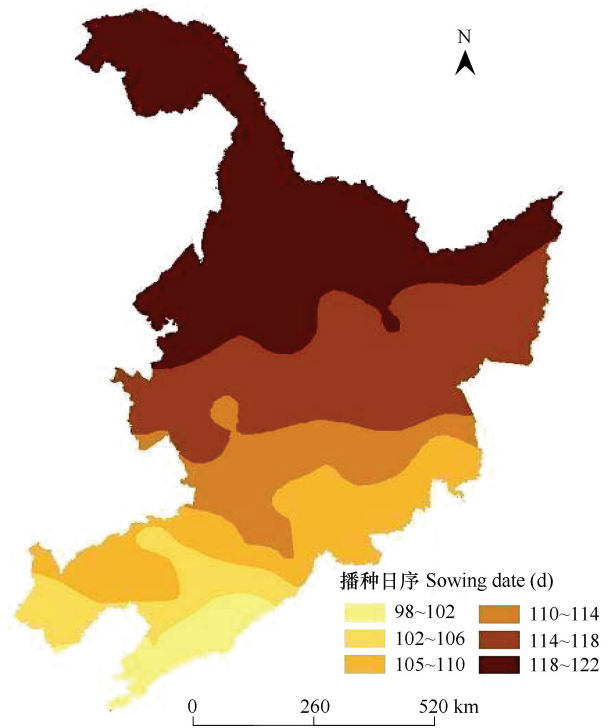


图2 东北玉米适宜播种期日序

Fig.2 The proper sowing date of maize in Northeast China

表 1 玉米各发育阶段的有效积温

Table 1 Temperature sum at different growth stages of maize

发育期阶段 Development stage	积温(℃·d) Accumulated temperature	计算的下限温度(℃) Low threshold temperature for calculation
播种到出苗 From sowing to emergence	103.5	8
出苗到开花 From emergence to anthesis	752.5	10
开花到成熟 From anthesis to maturity	685.5	10
出苗到成熟 From sowing to maturity	1438	10

表 2 模型区域化后的主要作物参数

Table 2 The main crop parameters of the model

参数 Parameter	意义 Meaning	取值 Value
TSUM0	播种-出苗需要的总热量单位 temperature sum from sowing to emergence(℃ d)	162 (晚熟, Late-mature)
		149 (中熟, Medium-mature)
TSUM1	出苗-开花需要的总热量单位 temperature sum from emergence to anthesis(℃ d)	1021 (晚熟, Late-mature),
		943 (中熟, Medium-mature)
TSUM2	开花-成熟需要的总热量单位 temperature sum from anthesis to maturity(℃ d)	969 (晚熟, Late-mature),
		880 (中熟, Medium-mature)
TDWI	初始总干物重 initial total crop dry weight(kg hm ⁻²)	7.74 (晚熟, Late-mature)
		10.6 (中熟, Medium-mature)
EFFTB	单叶初始光能利用率 Initial light-use efficiency(J m ⁻² s ⁻¹)	0.5 (0℃ 时)
		0.5 (40℃ 时)
TBASEM	保证出苗的下限温度 Low threshold temperature for emergence(℃)	10 (晚熟, Late-mature),
		8 (中熟, Medium-mature)
TEFFMX	保证出苗的上限温度 Maximum effective temperature for emergence(℃)	30

3.4 模拟检验

3.4.1 区域上点对点的检验

选取时间序列为 1996 ~ 2005 年。

选取条件 玉米主要生长区、代表性强,站点的分布相对比较均匀,且有历年实测产量,共选取 10 个站点来进行验证(图 3)。其中黑龙江省区选取 3 个站点,分别是哈尔滨、勃利和五常;考虑到吉林省是东北玉米的主产区,因此在该区选取 4 个站点,分别是梅河口、长岭、桦甸和通化;辽宁省区选取 3 个站点,分别是瓦房店、新民和本溪。

从模拟趋势来看,东北三省 10 站点的模拟值和实测值基本相一致,10 个站点模拟的误差总体统计情况是:模拟误差小于 5% 的占 55%,误差在 5% ~ 10% 的占 39%,误差在 10% ~ 15% 的占 6%,平均模拟误差是 5.38%,这个值在模型允许的范围之内,说明调整后的模型能够很好地反应东北三省玉米的生产。

表 3 模拟验证站点及误差
Table 3 The tested stations and error of simulation

站名 Stations	纬度 Latitude	经度 Longitude	高度(m) Altitude	误差范围(%) Range of errors	平均误差(%) Average error
哈尔滨 Haerbin	45°45'	126°46'	142.3	-4.35 ~ 10.82	5.17
勃利 Boli	45°45'	130°33'	217.2	-5.31 ~ 7.17	3.67
五常 Wuchang	44°54'	127°09'	194.6	-5.30 ~ 6.82	3.52
梅河口 Meihekou	44°32'	125°38'	339.9	-9.10 ~ 14.58	7.58
长岭 Changling	44°15'	123°58'	189.3	-12.83 ~ 8.05	7.60
桦甸 Huadian	42°59'	126°45'	263.3	-4.88 ~ 6.21	4.21
通化 Tonghua	41°40'	125°45'	372.5	-5.81 ~ 6.09	4.32
新民 Xinmin	41°59'	122°48'	30.7	-12.25 ~ 8.11	7.26
瓦房店 Wafangdian	39°44'	121°45'	29.3	-5.47 ~ 4.45	3.55
本溪 Benxi	41°18'	124°17'	204.9	-9.83 ~ 9.86	7.02

3.4.2 区域上历年低温年份的检验

由于本文研究的是温度导致的东北玉米产量波动情况,因此就要针对研究区域历年因温度制约玉米生产而受到影响的年份进行验证与检验。而东北三省处在我国纬度较高的地区,一直以来玉米生长季低温产生的冷害是制约该地区玉米产量形成的主要因素之一,因此本文根据我国农气台站对历年发生过低温灾害的记载情况对区域模型进行了验证。我国农业气象资料记录最早始于 1981 年,而东北地区从 20 世纪 80 年代后基本上未发生区域性的低温冷害灾害,因此给模型在区域上典型年份的检验造成了极大的困难。但在不同地区的不同年份低温事件发生仍较多。据我国农业气象观测记录报表统计,黑龙江省、吉林省和辽宁省三省区历年发生过低温冷害的台站分别有 5、6 个和 7 个,本文利用调试好的区域模型分别对这些台站进行了模拟验证(表 4 ~ 表 6)。

表 4 黑龙江省青冈站低温年份的检验结果
Table 4 The tested results of the low temperature years at the Qinggang station in Heilongjiang Province

年份 Years	平均气温下的 模拟产量(kg/hm ²) Simulated yields under average temperature	实际气温下的 模拟产量(kg/hm ²) Simulated yields under actual temperature	实测产量(kg/hm ²) Observed yields	波动系数(%) Fluctuated coefficient	模拟误差(%) Simulated error
1983	4313	4228	4578	-2.0	-7.6
1987	4380	4161	4324	-5.0	-3.8
1991	8250	7482	8141	-9.3	-8.1
1992	5625	5300	5762	-5.7	-8.0
1994	5630	5508	5870	-2.2	-6.2

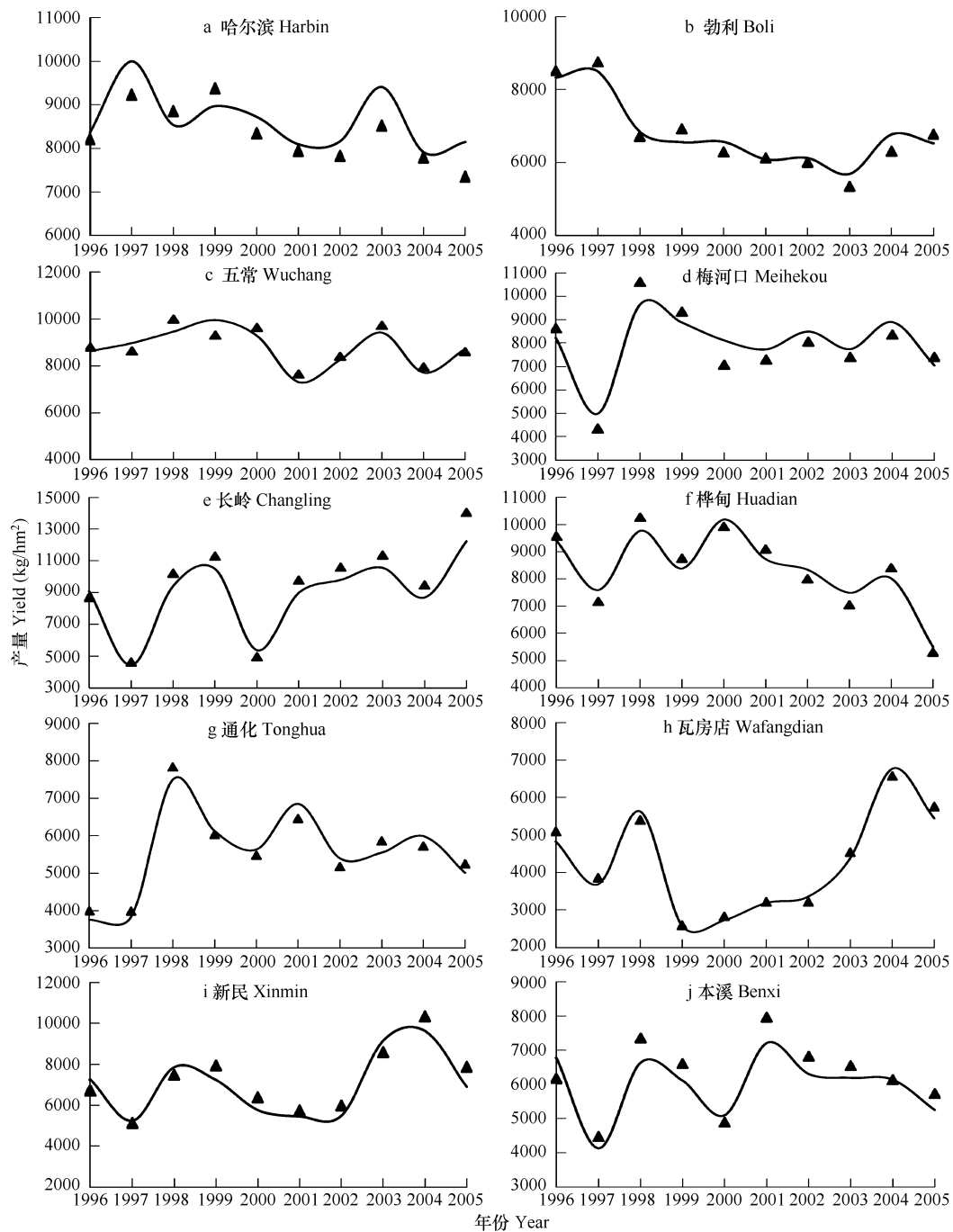


图3 区域上点对点的检验结果

Fig. 3 The tested results at points of the whole area

▲ 实测产量 Observed yields; — 模拟产量 Simulated yields

从表4~表6可以看出,虽然东北三省自20世纪80年代以来没有发生过典型的低温灾害年份,但从整体模拟趋势来看,波动系数均为负值,说明大多数低温年份都能很好的有所反应,而且模拟误差也较小,进一步验证了模型在评价东北三省玉米生产的适应性。

4 结果与分析

保持模型中其他气象条件(如辐射、降水等)不变,仅把模型中的温度以玉米生长季(5~9月份)46a的逐日平均气温来代替实际气温重新运行模型。为了便于问题的研究,本文有代表性的选取东北三省30个站点

(每个省各取 10 个站点),对东北三省近 46a(1961 ~ 2006 年)的产量波动情况进行了模拟分析,结果见图 4 (图中数据分别用每个省 10 个站点的平均值来代表全省)。

从模拟的历年产量波动情况来看,东北黑龙江、吉林、辽宁三省的产量波动趋势基本相一致,且随着年份的增加产量波动有减小的趋势。产量波动最大的是黑龙江省,波动范围在 -20% ~ 12% 之间;产量波动最小的是辽宁省,波动范围在 -15% ~ 8% 之间。三省区同步发生的几次比较大的波动年份分别是 1969 年、1972 年和 1976 年,这一结果正好符合该地区历史上曾经发生过的典型低温冷害年份。

表 5 吉林省低温年份的检验结果
Table 5 The tested results of the low temperature years in Jilin Province

年份 Years	台站 Stations	平均气温下的 模拟产量(kg/hm ²) Simulated yields under average temperature	实际气温下的 模拟产量(kg/hm ²) Simulated yields under actual temperature	实测产量(kg/hm ²) Observed yields	波动系数(%) Fluctuated coefficient	模拟误差(%) Simulated error
1981	敦化 Dunhua	4412	4235	4058	-4.0	+4.4
1985	敦化 Dunhua	4385	4018	4405	-8.4	-8.8
1986	榆树 Yushu	4874	4618	4936	-5.3	-6.4
1987	白城 Baicheng	5331	5032	5464	-5.6	-7.9
1992	舒兰 Shulan	6924	6695	7141	-3.3	-6.2
1994	桦甸 Huadian	9801	8870	9987	-9.5	-11.2

表 6 辽宁省低温年份的检验结果
Table 6 The tested results of the low temperature years in Liaoning Province

年份 Years	台站 Stations	平均气温下的 模拟产量(kg/hm ²) Simulated yields under average temperature	实际气温下的 模拟产量(kg/hm ²) Simulated yields under actual temperature	实测产量(kg/hm ²) Observed yields	波动系数(%) Fluctuated coefficient	模拟误差(%) Simulated error
1981	岫岩 Xiuyan	3897	3768	3960	-3.3	-4.8
1994	阜新 Fuxin	5804	5735	5514	-1.2	+4.0
2001	朝阳 Chaoyang	3208	3099	3257	-3.4	-4.9
2002	建平 Jianping	5492	5094	4549	-7.2	+12.0
2003	朝阳 Chaoyang	4449	4256	4002	-4.3	+6.3
2005	昌图 Changtu	5910	5854	5458	-1.0	+7.2
2006	本溪 Benxi	5091	4987	5216	-2.0	-4.4

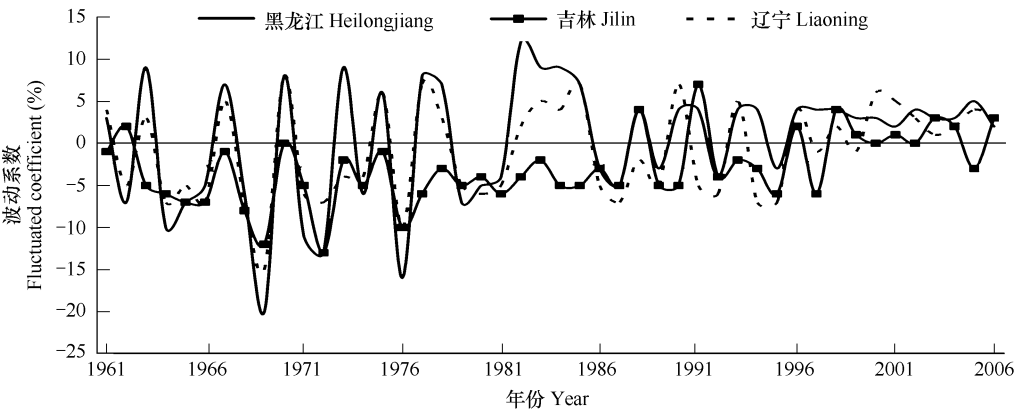


图 4 东北地区由温度变化引起的产量波动模拟
Fig. 4 Simulation of yields fluctuation caused by the temperature in Northeast China

5 结论

借助 WOFOST 作物模型在东北三省玉米适应性验证的基础,尝试性的人为模拟了近 46a 来(1961 ~ 2006

年)由温度导致的东北地区玉米产量波动情况。模拟结果表明:随着年份的增加,黑龙江、吉林、辽宁三省的产量波动系数有减小的趋势,说明近些年来,随着全球气候变暖,我国东北三省发生低温冷害的频率与范围都相应减少;20 世纪 80 年代以前,发生的比较大的低温冷害年份分别是 1969 年、1972 年和 1976 年,这一结果正好符合该地区历史上发生过的低温冷害年份,进一步验证了模型在东北三省春玉米种植区的适应性,从而为三省区因温度导致的玉米产量波动的定量化评估提供了一种新的技术和思路。

References:

- [1] Liu H Y, Lin Z S, Zhang M Y. Analysis on the fluctuation of grain output in China and its causes at multi-time scale based on empirical mode decomposition method. *Journal of Natural Resources*, 2005,20(5):745—751.
- [2] Dang A R, Yan S Y. Research on the scheduling change of Per Hektare Yield of Crops in China since our state-founded. *China Rural Survey*, 1998(3):7—11.
- [3] Zhang Y J, Wang J. Analysis on the fluctuation of grain yields in Jilin Province. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2007(3):74—79.
- [4] Zhang F N, Xing P. Studies on the regional differences and counter measures for regions with fluctuating grain yield per unit area. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2004,25(3):16—19.
- [5] Li G X, Chen J S. Grain yields reduce and Grain security. *Chinese Rural Economy*, 2001(4):4—10.
- [6] Liu M L, Chen B M. The analysis on grain yield fluctuation and its relation with agricultural natural disasters in China in the recent years. *Journal of Cata Strophology*, 2000,15(4):78—85.
- [7] Wang Y B, Jiang J M. The fluctuation of grain yields and comparison on the regional differences in China. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2007(6):23—28.
- [8] Sun H, Shi X Q. Discovery of grain productions long waves and role of institutional changes. *China Rural Survey*, 2000(1):37—46.
- [9] Lin Y, Yu L. A study on the fluctuation of China's grain yield. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2006,28(3):346—350.
- [10] Wu Y C, Wang D L. Status Analysis and Mid-long Term Forecasting of Per Hektare Yield of Major Crops in China. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2002,23(1):20—25.
- [11] Zhang J P, Zhao Y X, Wang C Y. Simulation of maize production under climate change scenario in Northeast China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008,16(6):1448—1452.
- [12] Liu B C. Study on a Scaling-Up Maize Dynamic model applying to Low Temperature Damage Prediction in EN, China. MS. Dissertation. Beijing: China Agricultural University, 2003.
- [13] Chen Z L, Zhang J P, Wang C Y. Application of WOFOST model in simulation of integrated impacts on low temperature and drought on maize yield. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007,28(4):440—442.
- [14] Luo X L, Guo L, Liu X A. Heat index of maize growth and development and distribution of variety types in Northeast China. In: Wang C Y, Guo J P. ed. *Research on comprehensive defense technique of low temperature damage on crops*. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 75—81.

参考文献:

- [1] 刘会玉,林振山,张明阳. 基于 EMD 的我国粮食产量波动及其成因多尺度分析. *自然资源学报*, 2005,20(5):745—751.
- [2] 党安荣,阎守邕. 建国以来我国粮食单产的时序变化研究. *中国农村观察*, 1998(3):7—11.
- [3] 张越杰,王军. 吉林省粮食产量波动分析. *农业技术经济*, 2007(3):74—79.
- [4] 钟甫宁,邢鹏. 粮食单产波动的地区性差异及对策研究. *中国农业资源与区划*, 2004,25(3):16—19.
- [5] 李国洋,陈劲松. 粮食减产与粮食安全. *中国农村经济*, 2001(4):4—10.
- [6] 刘明亮,陈百明. 我国近期粮食生产的波动性及其与农业自然灾害发生状况的相关分析. *灾害学*, 2000,15(4):78—85.
- [7] 王玉斌,蒋俊朋. 我国粮食产量波动及地区差异比较. *农业技术经济*, 2007(6):23—28.
- [8] 孙鹤,施锡铨. 制度变迁与粮食生产的长波. *中国农村观察*, 2000(1):37—46.
- [9] 林燕,于冷. 中国粮食产量波动分析. *吉林农业大学学报*, 2006,28(3):346—350.
- [10] 吴永常,王道龙. 中国主要粮食作物单产变化趋势及中长期预测. *中国农业资源与区划*, 2002,23(1):20—25.
- [11] 张建平,赵艳霞,王春乙,等. 气候变化情景下东北地区玉米产量变化模拟. *中国生态农业学报*, 2008,16(6):113—118.
- [12] 刘布春. 应用低温冷害预报的东北玉米区域动力模型的研究. 硕士学位论文. 北京:中国农业大学, 2003.
- [13] 陈振林,张建平,王春乙,等. 应用 WOFOST 模型模拟低温与干旱对玉米产量的综合影响. *中国农业气象*, 2007,28(4):440—442.
- [14] 罗新兰,国力,刘新安,等. 东北三省玉米生育热量指标与品种熟型分布研究. 见:王春乙,郭建平主编. *农作物低温冷害综合防御技术研究*. 北京:气象出版社, 1999. 75—81.