

# 东北地区活动积温和极端持续低温的时空分布特征及其对粮食产量的影响

王艳华<sup>1</sup>,任传友<sup>1</sup>,韩亚东<sup>1</sup>,张菁<sup>2</sup>,张文忠<sup>1\*</sup>,黄瑞冬<sup>1</sup>

(1.沈阳农业大学农学院,沈阳 110866 2.沈阳市气象局,沈阳 110168)

**摘要**:低温冷害是制约东北地区粮食产量的主要气象因素,了解低温冷害的演变规律及其对粮食产量的影响对于防灾减灾、合理搭配农作物品种熟期具有重要的指导意义。应用东北地区 73 个气象站 1960—2004 年温度资料以及 ArcGIS 地理信息系统技术和谐波分析方法,分析了  $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  活动积温和持续低温指数的时空分布特征,评价了其对于粮食和水稻产量的影响。结果表明,活动积温表现出由南向北、由西向东减少的趋势,持续低温指数表现出由南向北、由西向东增加的趋势。谐波分析表明,东北地区活动积温存在着明显的 2.5~4 a 的周期振荡,持续低温指数主要表现为 2.5~5 a 和 10 a 左右的周期振荡。粮食产量的波动带有明显的活动积温和持续低温指数的信息,纬度越高,粮食产量受活动积温的影响越大,受持续低温指数的影响越小。活动积温是制约东北地区粮食和水稻产量的最主要因素,但持续低温指数的影响也不容忽视,持续低温指数每增加 1 d,会导致辽宁、吉林、黑龙江水稻平均单产分别下降 6.2%、5.8% 和 2.1%。

**关键词**:持续低温指数;活动积温;粮食产量

中图分类号:X16 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)09-1742-07

## The Tempo-spatial Patterns of Active Accumulated and Consecutive Extreme Low Temperature and Their Impacts on Grain Crop Yield in Northeast China

WANG Yan-hua<sup>1</sup>, REN Chuan-you<sup>1</sup>, HAN Ya-dong<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>2</sup>, ZHANG Wen-zhong<sup>1\*</sup>, HUANG Rui-dong<sup>1</sup>

(1.College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2.Shenyang Municipal Meteorological Bureau, Shenyang 110168, China)

**Abstract**: Chilling damage is the main meteorological disaster affecting the grain crop yield in Northeast China. In recent years, grain crop production reduced severely, which mainly was due to planting late maturity crop blindly. So it is important to understand the tempo-spatial patterns of chilling damage and their impacts on grain crop yield for disaster prevention and reduction, and proper variety arrangement. In this paper, the routine meteorological data (73 stations, 45 years) in Northeast China were used to analyze the tempo-spatial characteristics of active accumulated temperature (AAT) and consecutive cold day index (CCDI), by means of geographical information system technique (ArcGIS9.2, ESRI Co., Ltd) and harmonics analysis method. The results showed that the AAT decreased from southwest to northeast, but the CCDI had the inversed patterns, the AAT showed 2.5~4 a oscillations clearly, and the CCDI's were 2.5~5 a and 10 a oscillation periods in recent 45 a. Correlation analysis showed that the grain crop yield varied with AAT and CCDI, the grain crop yield depended on AAT closely at higher altitude region, but the relationships between yield and CCDI were closer at lower altitude region. The AAT was the main factor affecting the grain crop rice yields, but the impacts of CCDI could not be neglected. The rice yield would decreased by 6.2%, 5.8% and 1.2% in Liaoning, Jilin and Heilongjiang by one day increase of CCDI, respectively.

**Keywords**: consecutive cold day index; active accumulated temperature; grain crop yield

收稿日期:2011-03-19

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903003);国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD16B14);辽宁省科技攻关重大专项(2009201102)

作者简介:王艳华(1974—),女,博士研究生,主要从事农业气象灾害研究。E-mail: yanhuawang999@sina.com.cn

\* 通讯作者:张文忠 E-mail: zwzhong@126.com

农作物产量受社会因素、物质投入、科学技术水平和自然因素等诸方面的影响,在其他因素保持相对稳定的情况下,自然因素特别是气候条件是影响粮食产量的重要因素<sup>[1]</sup>。东北三省是我国主要的粮食生产基地,由于该区热量条件的年际波动较大,低温冷害发生的频率较高,粮食生产受到低温冷害的制约<sup>[2]</sup>。自20世纪70年代以来,特别是“九五”期间,对东北地区低温冷害发生规律及时空分布特征的研究已取得很多成果。这些研究定义的低温冷害指标多是从5月到9月的积温、5月到9月平均气温或5月到9月月平均气温之和入手,分析它们的年际变化与作物产量的关系<sup>[3]</sup>。但积温和平均气温等并不是影响作物产量的唯一热量指标,短时段的剧烈降温也是一个不容忽视的因素,例如2001年,辽宁、吉林生长季短时段的剧烈降温导致水稻平均单产分别比上一年减产15.6%和15.7%。因此,研究生长季短时段剧烈降温对粮食产量的影响,因地制宜地采取防范措施,对东北地区粮食稳产,保障粮食安全,具有重要的意义。

本文应用东北地区气象资料(73个站,1960—2004年资料),分析了近45 a活动积温和持续低温指数(CCDI, Consecutive cold day index)的时空变化特征,并评价了其对于粮食产量的影响。

## 1 材料与方法

东北地区73个站1960—2004年的日平均、最低气温来自于国家气象局。持续低温指数定义为一年中(或某一个时段,例如5—9月)至少连续3 d日最低温度低于该日多年日最低温度平均值 $5^{\circ}\text{C}$ 的总日数。假定 $T_{ij}$ 为第 $j$ 年第 $i$  d的日最低温度, $T_i$ 平均为第 $i$  d 1971—2000年日最低温度平均值年序列的5 d滑动值,则CCDI为某段时间至少连续出现3 d  $T_{ij} < T_i$ ,平均 $-5^{\circ}\text{C}$ 的总日数。活动积温为 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温,定义为日平均气温稳定通过 $10^{\circ}\text{C}$ 期间的日平均气温之和。东北地区分省统计的粮食与水稻播种面积和产量数据来自于国家统计局(<http://www.stats.gov.cn/tjgb/>),其中粮食作物播种面积和产量资料年代为1978—2004年,水稻为1995—2004年。

应用ArcGIS9.2空间分析扩展模块,使用Kriging插值方法将东北地区73个站的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温和持续低温指数进行插值处理,得到东北地区活动积温和持续低温指数的数字化栅格分布图。以气象站点作为不规则三角形网的三角形顶点,以不规则三角网的偶图Theisen多边形的面积作为各气象站点的代

表面积,各省的平均活动积温和持续低温指数以各气象站点所在的Theisen多边形面积为权重因子,采用加权平均求得。各省粮食单产根据国家统计局分省的粮食总产量和播种面积求平均得到。采用Spss11.5软件(Spss Inc., USA)进行回归和相关分析,谐波分析和功率谱分析方法<sup>[4]</sup>应用Fortran语言实现。

## 2 结果与讨论

### 2.1 活动积温和持续低温指数的分布及其变化特征

图1为东北地区1960—2004年45 a平均的活动积温和持续低温指数的空间分布图。活动积温表现出从西向东、从南向北减少的趋势,大、小兴安岭和长白山地区活动积温明显小于同纬度的平原地区。持续低温指数以黑龙江北部和辽宁东北部最高,年平均在13 d以上,辽东半岛、辽西、吉林西部、吉林东北部和黑龙江东南部地区最小,年平均多在7 d以下。活动积温和低温持续指数分布形势基本一致,活动积温较低的地区也是冷害发生比较频繁的地区。只是在吉林东南部和辽宁东北部例外。吉林东南部积温较少,以长白山天池为中心表现出明显的随海拔高度递减的分布特征,但持续低温指数并未表现出明显的高值。辽宁东北部积温处于中等水平,但持续低温指数表现出明显的高值,表明该地区低温冷害频繁发生。

近45 a,东北地区活动积温呈增加趋势( $P < 0.01$ ),纬度越高,增温趋势越明显,从南部的辽宁到北部的黑龙江活动积温的气候变率变异范围为 $44.3 \sim 65.3^{\circ}\text{C} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。相反,持续低温指数总体上呈下降趋势( $P < 0.01$ ),在活动积温增加较多的地区,这种下降趋势越发明显,速率为 $0.52 \sim 0.75 \text{ d} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ (图2)。谐波分析和功率谱分析表明东北地区的活动积温存在着2.5~4 a的周期振荡( $P < 0.10$ ),其中以3.3 a的周期最为明显,与赤道太平洋海温的周期振荡基本一致。众多研究表明,东北夏季气温异常与赤道太平洋海温关系密切<sup>[5]</sup>,因此东北地区活动积温的年际变化可能也带有明显的El Nino/La Nina的信息,卜宪云和徐军的分析结果也证实了这一点<sup>[6]</sup>。

辽宁5—9月持续低温指数以5 a周期最为明显( $P < 0.05$ ),其次为10 a左右的周期( $P < 0.10$ ),两个周期可以解释28.92%的持续低温指数的变化。长期趋势和周期项可以解释辽宁5—9月持续低温指数49.2%的变化。吉林5—9月持续低温指数5 a周期最为明显( $P < 0.05$ ),其次为10 a左右和2.5~4 a的周期( $P < 0.10$ ),这些周期可以解释45.37%的持续低温指

数的变化。黑龙江5—9月持续低温指数周期振荡与吉林的基本相同,以6a周期最为明显( $P < 0.10$ ),其次为2.5~4a和10a左右的周期( $P < 0.10$ ),这些周期可以解释43.56%的持续低温指数的变化。东北地区的持续低温指数除受到El Nino/La Nina的影响外,可能

还带有中高纬度大气环流年际变化的信息<sup>[7]</sup>。将东北地区作为一个整体看待,持续低温指数存在2.5~4a的周期振荡。下降趋势和周期振荡可以解释东北地区55.07%的持续低温指数的变化,图3为持续低温指数原值与模拟值的对比。

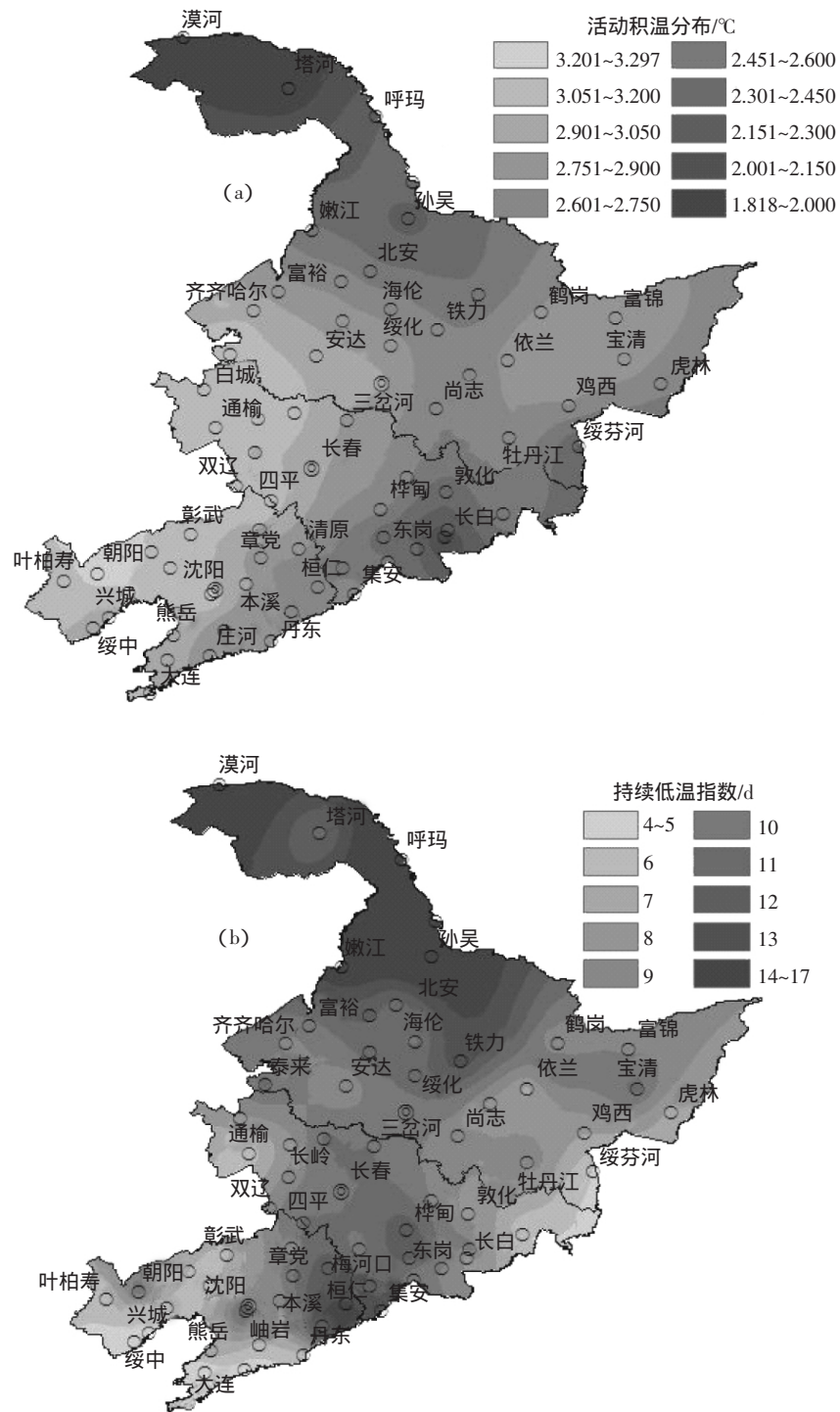


图1 东北地区活动积温(a)和持续低温指数(b)分布图  
Figure 1 AAT(a) and CCDI(b) distributions in Northeast China

2.2 活动积温和持续低温指数对东北地区粮食产量的影响分析

应用 1978—2004 年分省粮食作物产量和播种

面积数据,得到辽宁、吉林、黑龙江粮食单产数据( $t \cdot hm^{-2}$ )。分析表明,各省粮食单产均存在着明显的线性变化趋势,去除掉线性趋势项,得到各省粮食产量波

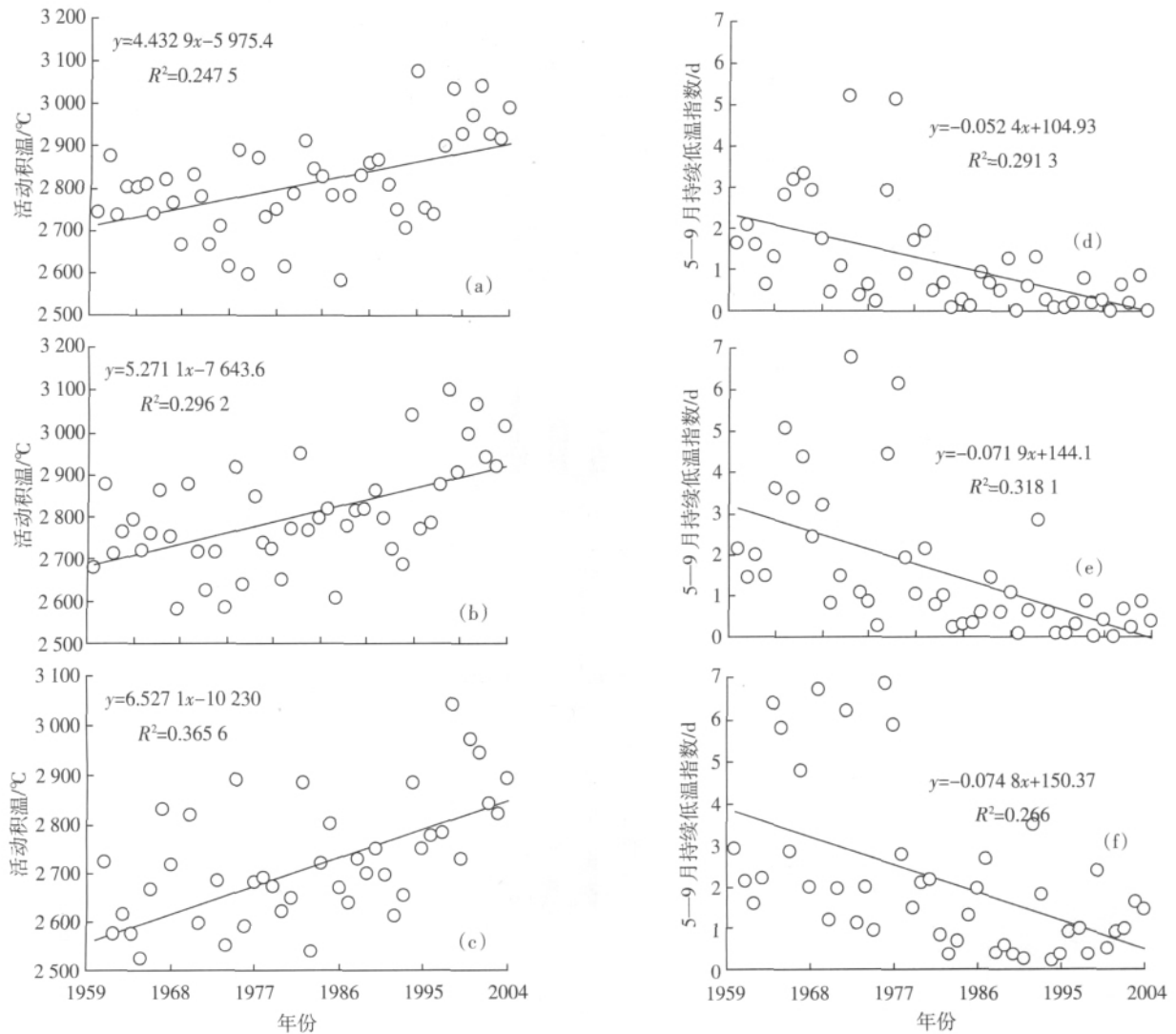


图2 东北地区近 45 a 来活动积温(辽宁(a)、吉林(b)、黑龙江(c))和持续低温指数(辽宁(d)、吉林(e)、黑龙江(f))的变化趋势  
Figure 2 Change trends of AAT(Liaoning(a), Jilin(b), Heilongjiang(c)) and CCDI in Northeast China in recent 45 a (Liaoning(d), Jilin(e), Heilongjiang(f))

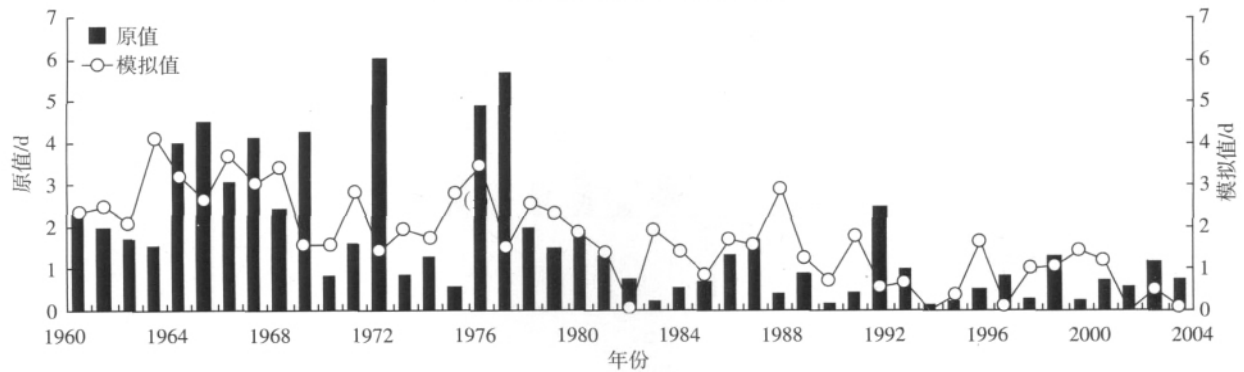


图3 5—9月持续低温指数原值与模拟值的对比  
Figure 3 Comparison between CCDI and its simulated value from May to September

动数据,这里称之为气候产量(即除掉气候的长期变化、新技术、新方法、新品种引进等因素对粮食产量影响之后的产量)。辽宁省粮食作物气候产量存在着明显的4 a左右的周期波动( $P < 0.05$ ),其次还存在着3 a左右的周期( $P < 0.10$ ),带有明显的积温和持续低温指数变化的信息,吉林省粮食产量存在着27 a( $P < 0.01$ ),4 a( $P < 0.05$ )左右的周期,黑龙江省粮食产量波动存在着27 a( $P < 0.01$ )和10 a( $P < 0.05$ )左右的周期。周期波动可以分别解释辽宁、吉林和黑龙江粮食作物气候产量变化的82.7%、57.39%和64.81%。图4~图6为三省粮食作物气候产量与应用周期波动进行模拟的模拟

值对比,可以看出,模拟值与原值的变化趋势基本一致。

根据上面的分析可以得到,东北地区各省粮食作物气候产量的周期波动与活动积温和持续低温指数的周期波动基本相同,表明二者属于同一振荡系统,气候产量具有明显的活动积温和持续低温指数的信息。

长期线性趋势和周期振荡可以解释辽宁、吉林和黑龙江粮食产量变化的90.3%、91.2%和91.8%。图7为三省平均粮食单产( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )原值与应用线性趋势和周期振荡进行模拟的模拟值对比,可以看出,三者直线的斜率均在0.99以上。说明东北地区粮食产量明

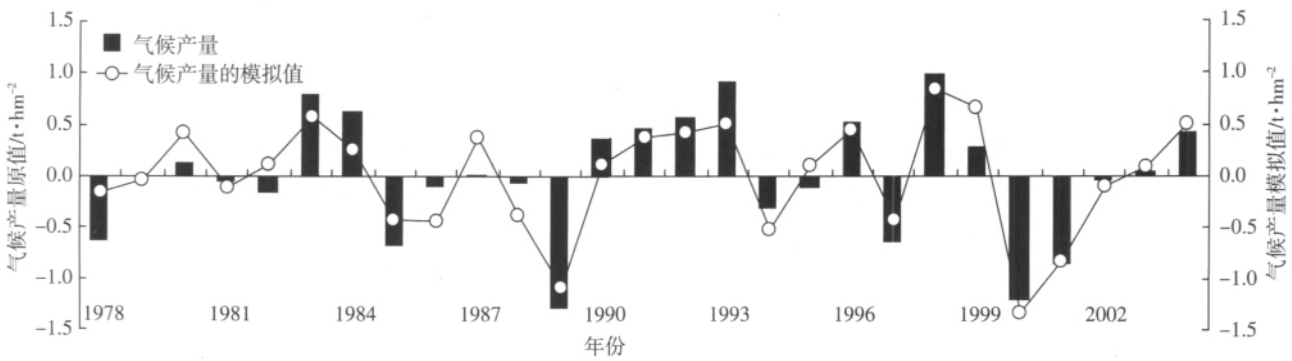


图4 辽宁省粮食作物气候产量原值与模拟值的对比

Figure 4 Comparison between climatic grain crop yield and its simulated value in Liaoning Province

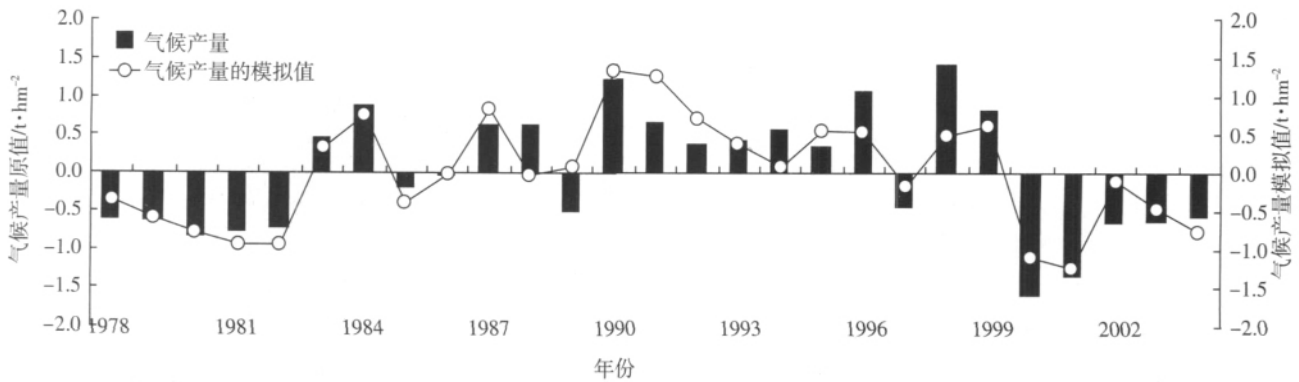


图5 吉林省粮食作物气候产量原值与模拟值的对比

Figure 5 Comparison between climatic grain crop yield and its simulated value in Jilin Province

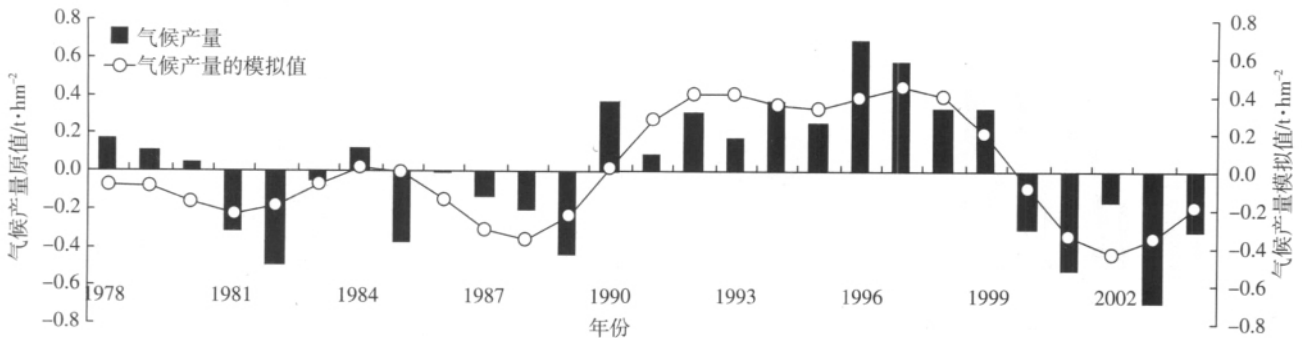


图6 黑龙江省粮食作物气候产量原值与模拟值的对比

Figure 6 Comparison between climatic grain crop yield and its simulated value in Heilongjiang Province

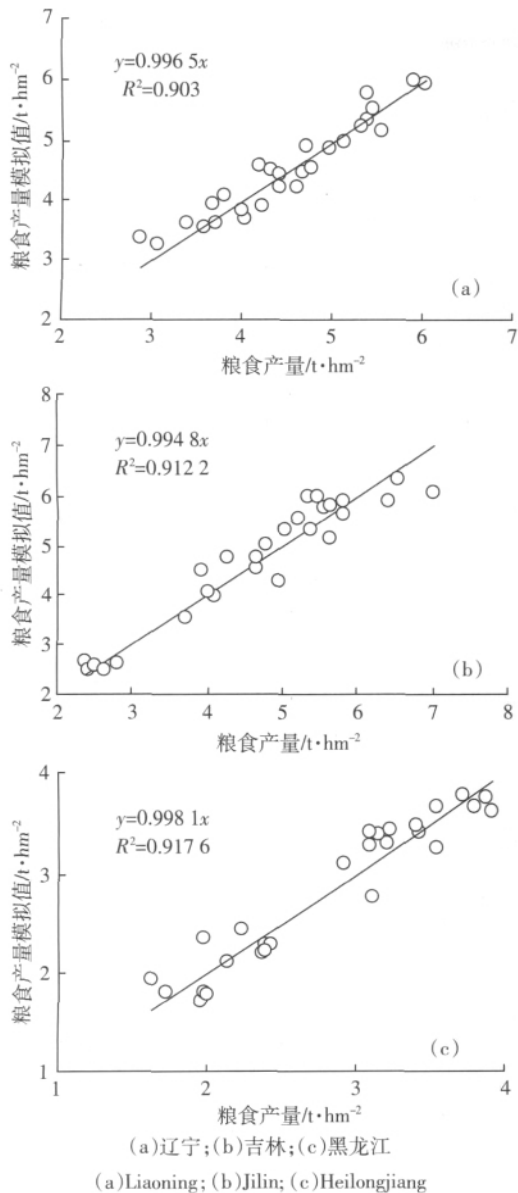


图7 东北地区粮食产量原值与模拟值的对比

Figure 7 Comparisons between grain crop yield and its simulated value in Northeast China

显受到气候的长期趋势和气候波动的影响。

### 2.3 活动积温和持续低温指数对东北地区粮食产量的影响

积温是作物产量形成的最重要因素之一。由于全球气候变暖,温度升高,东北地区的活动积温也呈现明显升高的态势,因此近年来东北地区粮食产量升高的部分原因应归结于温度的升高。正是基于此,在下面讨论活动积温与粮食单产的关系时,并没有去除掉二者的长期趋势。而持续低温指数则是在粮食产量本底值基础上,对其产生一定的波动,本文认为粮食产量的年际变化主要归结于除活动积温外的其他热量

表1 活动积温和持续低温指数与粮食单产的相关系数

Table 1 Correlations of AAT and CCDI with grain crop yield

要素	辽宁	吉林	黑龙江
活动积温	0.322 3*	0.453 8**	0.457 4**
持续低温指数	-0.447 3**	-0.473 2**	-0.193 7

注:\*\*达到0.02的信度水平,\*达到0.10的信度水平。

Note:\*\*Reliability of 0.02,\*Reliability of 0.10.

条件的限制,因此表1中探讨持续低温指数与粮食产量的关系时,实际上是探讨持续低温指数与气候产量的关系。表1为活动积温和持续低温指数与粮食单产的相关系数,可以看出,东北地区粮食单产与活动积温具有很强的正相关关系,产量随着积温的增加而增加,与持续低温指数则呈负相关关系。

上述的粮食产量与热量指标的关系并没有排除降水的影响。水稻是需要人工灌溉的作物,降水量的多少对水稻的影响可以忽略,其产量的形成主要受热量要素的影响。1995—2004年东北地区辽宁和吉林的水稻平均单产存在着明显的3次曲线的形式,从1995年到1999年产量呈上升趋势,之后产量下降,2004年产量又略有回升,而黑龙江从1995年到2004年则表现为线性增长趋势(图8)。

三省的水稻产量的变化形式与1995—2004年三省的活动积温变化形式基本一致,表明1995—2004年东北地区水稻的产量变化趋势主要由活动积温引起。从水稻产量中除掉长期趋势,称其为波动产量,波动产量与辽宁、吉林和黑龙江省的持续低温指数的相关系数分别为-0.467 5、-0.548 8、-0.470 9 ( $P < 0.20$ )。持续低温指数增加均可引起三省水稻产量下降,持续低温指数每增加1 d,可引起辽宁、吉林和黑龙江水稻产量分别下降0.45、0.41  $t \cdot hm^{-2}$ 和0.13  $t \cdot hm^{-2}$ ,约占当地水稻平均单产的6.2%、5.8%和2.1%。由此可见,虽然纬度较低的地方热量条件较好,但极端持续低温造成减产的幅度更大。

### 3 结论

本文根据东北地区73站1960—2004年气温和1978—2004年分省粮食产量数据,分析评价活动积温和持续低温指数的时空变化特征及其对粮食产量的影响,得出以下几点结论。

(1)活动积温表现出从西向东、从南向北减少的趋势,山区的活动积温明显地小于同纬度的平原地区。持续低温指数以黑龙江北部和辽宁东北部最高,辽东半岛、辽西、吉林西部、吉林东北部和黑龙江东南

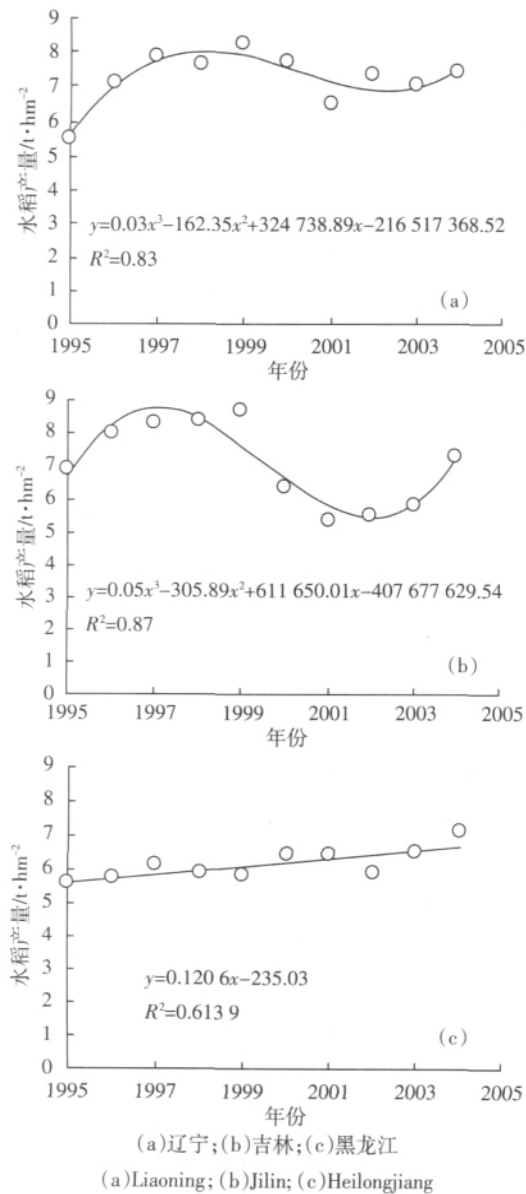


图8 东北地区1995—2004年水稻产量变化趋势

Figure 8 Trends of rice yield in Northeast China from 1995 to 2004

部地区最小。

(2)近45 a,东北地区活动积温呈增加趋势( $P<0.01$ ) 纬度越高,增温趋势越明显,平均每10 a增加44.3~65.3℃。而持续低温指数总体上呈减少趋势( $P<0.01$ ) 纬度越高,减少趋势越明显,平均每10 a减少0.52~0.75 d。东北地区的活动积温存在着明显的2.5~4 a的周期振荡( $P<0.10$ ) 5—9月持续低温指数总体上以5~6 a和10 a左右的周期最为典型,约可解释28.92%~45.37%的持续低温指数的变化。

(3)东北地区粮食产量存在着明显的长期趋势和

年际振荡,低纬度地区以3~4 a的周期为主,高纬度地区则以27 a和10 a左右的周期为主。长期趋势和周期振荡可以解释东北地区粮食产量90.3%以上的变化。

(4)相关分析表明,东北地区活动积温与粮食产量呈正相关关系,而与持续低温指数呈负相关关系。水稻的产量主要受活动积温的影响,其变化趋势与活动积温的变化趋势基本一致,但其波动产量带有明显的持续低温指数的信息( $P<0.20$ ) 持续低温指数每增加1 d,可分别导致辽宁、吉林和黑龙江水稻产量下降6.2%、5.8%和2.1%。

参考文献:

- [1] 吉书琴,张玉书,关德新,等. 辽宁地区低温冷害的遥感监测和气象预报[J]. 沈阳农业大学学报, 1998, 29(1): 16-20.  
JI Shu-qin, ZHANG Yu-shu, GUAN De-xin, et al. Remote sensing monitoring on crop chilling damage and meteorological prediction[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1998, 29(1): 16-20.
- [2] 王春乙,毛飞. 东北地区低温冷害的分布特征[C]//王春乙,郭建平. 农作物低温冷害综合防御技术研究. 北京:气象出版社, 1999: 9-15.  
WANG Chun-yi, MAO Fei. Study on distribution features of chilling damage in northeast China[C]//Wang C Y, Guo J P. Study on comprehensive defending technique to chilling damage for grain crop. Beijing: Meteorology Press, 1999: 9-15.
- [3] 王春乙,郭建平. 农作物低温冷害综合防御技术研究[M]. 北京:气象出版社, 1999.  
WANG Chun-yi, GUO Jina-ping. Study on comprehensive defending technique to chilling damage for grain crop[M]. Beijing: Meteorology Press, 1999.
- [4] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京:气象出版社, 2004.  
Huang Jia-you. Statistical analysis and forecast methods on meteorology [M]. Beijing: Meteorology press, 2004.
- [5] 李菲,李辑,管兆勇. 我国东北夏季气温年代际变化特征及与太平洋海温异常关系的研究[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(3): 19-26.  
LI Fei, LI Ji, GUAN Zhao-yong. Inter-decadal variations of summer temperature in Northeast China and relationships with Pacific SSTA[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2010, 26(3): 19-26.
- [6] 卜宪云,徐军. 沈阳地区低温冷害浅析[J]. 辽宁气象, 2002(3): 17-18.  
BU Xian-yun, XU Jun. Analysis of chilling damage in Shenyang region[J]. *Meteorology in Liaoning*, 2002(3): 17-18.
- [7] 孙建奇,王会军. 东北夏季气温变异的区域差异及其与大气环流和海表温度的关系[J]. 地球物理学报, 2006, 49(3): 662-671.  
SUN Jian-qi, WANG Hui-jun. Regional difference of summer air temperature anomalies in Northeast China and its relationship to atmospheric general circulation and sea surface temperature[J]. *Chinese J Geophys*, 2006, 49(3): 662-671.