

文章编号: 1004 - 4574(2011)06 - 0074 - 07

## 东北地区玉米低温冷害规律研究

李祎君<sup>1</sup>, 王远皓<sup>1</sup>, 张雪芬<sup>2</sup>, 王春乙<sup>1</sup>

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

**摘 要:** 以东北地区 10 km × 10 km 的气象要素插值资料以及作物发育期资料为基础, 通过计算每个网格点上热量指数和热量指数临界值, 得到每个网格点上低温冷害指标值。在此基础上对低温冷害指标进行经验正交分解和小波分析, 得到其时空变化规律及多时间尺度特征。玉米冷害 3 个空间分布型时间系数的分析表明, 东北地区玉米低温冷害存在如下规律: 第 1 模态在 1971 - 1992 年, 呈现准 8 a 的周期变化规律, 第 2 模态没有呈现很好的周期性规律, 第 3 模态在 1963 - 1974 年, 呈现准 2a 的周期变化规律。热量指数变异系数低值区主要分布在平原地区, 中值区和高值区主要分布在大兴安岭、小兴安岭、长白山地区以及吉林省白城市沙地, 山地和沙地的变异系数要高于平原地区。

**关键词:** 玉米; 低温冷害; 时空分布

中图分类号: S16

文献标志码: A

## Research on chilling damage of maize in northeast China

LI Yi-jun<sup>1</sup>, WANG Yuan-hao<sup>1</sup>, ZHANG Xue-fen<sup>2</sup>, WANG Chun-yi<sup>1</sup>

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Meteorological Observation Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** This study was based on 10 km × 10 km data of meteorological factors and corn growth phases, and via calculating critical heat indices on every grid point, obtained the chilling damage indices on the grid points. By experience orthogonal resolution and wavelet analysis of chilling damage indices, the spatial-temporal variation regularity and multiple-time-scale characteristics were obtained. The time coefficient analysis of spatial distribution mode of maize chilling damage shows that the first mode presents a quasi-8 years periodic variation regularity, the second mode does not presents regular periodicity and the third mode presents a quasi-2 years periodic variation regularity. In relation to heat index variation coefficient, the region with low value distributes mainly in plain area, the region with middle and high values distributes mainly in Daxing'an Mountain, Xiaoxing'an Mountain, Changbai Mountain areas and sandland of Baicheng City of Jilin Province. The variation coefficient in mountain land and sandland is larger than that in plain area.

**Key words:** maize; low temperature chilling damage; spatiotemporal distribution

农业气象灾害不同于一般的气象灾害, 低温冷害是一种北方地区常见的农业气象灾害, 一般是指农作物在生长季遭受低于其生长发育所需的环境温度(但仍在 0 °C 以上, 有时甚至在 20 °C 左右), 导致农作物减产的自然灾害, 它是影响我国农业生产的主要气象灾害之一<sup>[1-2]</sup>。同时也是影响玉米生长发育、造成减产的主

收稿日期: 2010 - 04 - 30; 修回日期: 2010 - 09 - 25

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAD04B09); 国家自然科学基金资助项目(30771248)

作者简介: 李祎君(1978 -), 女, 博士, 主要从事农业气象灾害研究. E-mail: liyj@cma.gov.cn

通讯作者: 王春乙(1960 -), 男, 研究员, 主要从事农业气象灾害、气候变化对农业影响的研究. E-mail: wcy@cma.gov.cn

要气象灾害。据统计,每3~4 a发生1次,平均减产约13%~35%。东北地区是我国重要的粮食生产基地之一,该地区纬度较高,农作物生长期短,且农作物生长期热量条件不稳定,年际变化大,因而该地区农业气候上的最大缺点是容易遭遇低温冷害,致使高温年增产,低温年歉收。所以,夏季低温就成为东北地区粮食生产的主要气象灾害。其中,1969,1972,1976年3 a的严重低温冷害均使东北地区粮食总产量比上年减产50亿kg左右。

我国低温冷害研究的主要对象为东北的玉米、水稻和新疆的棉花等。目前,低温冷害指标主要有六大类,分别为生长季温度距平指标、生长季积温指标、生长发育关键期冷积温指标、作物发育期距平指标、热量指数指标和玉米低温冷害综合指标。这些指标分别在冷害预测、监测、评估中起着重要作用。纯粹气候意义的低温冷害指标在当前仍占据主导地位,一些与农作物相结合的低温冷害指标也在涌现。本文应用现有的延迟型低温冷害指标,分析了东北低温冷害的时空分布规律,有助于今后进一步改进指标和开展其它研究。

## 1. 资料与方法

### 1.1 资料与处理

本研究收集到东北地区81个基本气象站1961-2006年历年逐日气象要素(最高温度、最低温度、风速、水汽压、日照、降雨量和降雨天数)资料。其中,黑龙江省37站,吉林省28站,辽宁省16站。玉米发育期资料共收集到东北地区74个农业气象观测站点,近20 a(1980-2000年)的数据。

为了得到全区10 km × 10 km 网格点上的气象要素,首先利用薄板光顺样条插值法<sup>[3]</sup>把温度资料插值到网格点上,得出各个网格点上的温度,其理论统计模型为:

$$q_i = f(x_i) + \sum_j \beta_j \Psi_j(x_i) + \varepsilon_i \quad (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, p). \quad (1)$$

其中  $q_i$  是位于空间  $i$  点的因变量;  $x_i$  通常代表二维或三维几何空间坐标;  $f$  是要估算的未知光顺函数;  $\beta_j$  是要估算的未知参数组,是一组由  $p$  个值构成的局部协变量函数;  $\varepsilon_i$  是自变量随机误差。函数  $f$  和  $\beta_j$  的估计通过最小二乘法估计来确定。

薄板光顺样条插值法比其他空间数据插值法比较,最大的优势就是考虑了地形因素的影响,体现了地形效应,可以将海拔高度变化对要素的影响剔除。插值的地形效应和空间尺度是通过与 DEM 结合来实现的。采用 ANUSPLIN 程序来实现插值,把温度变量的曲面拟合三元局部薄板光顺样条函数。以经纬度为样条函数自变量建立温度沿垂直高度变化的模型。把插值曲面参数文件和 DEM 结合在一起,生成分辨率为 10km 的网格点温度资料。插值纬度范围为 38.3°N - 54.0°N,经度范围为 117.7°E - 135.4°E 的区域上,网格点数为 158 × 178。经气象站点观测的温度资料验证,温度插值结果与实际观测结果十分吻合,插值结果可靠。篇幅所限本文仅给出 45 年 5 月 1 日的平均温度分布状况(图 1)。

### 1.2 冷害指标的确定

#### 1.2.1 热量指数

郭建平<sup>[4]</sup>提出热量指数作为低温冷害指标,并应用该种指标判定了东北三省低温冷害,认为当热量指数小于 0.836(辽宁地区),或热量指数小于 0.714(吉林地区),或热量指数小于 0.604(黑龙江地区),则发生低温冷害。热量指数计算方法如下<sup>[4]</sup>:

$$B = (T_2 - T_0) / (T_0 - T_1), \quad (2)$$

$$F(T) = [(T - T_1) - (T_2 - T)^B] / [(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B]. \quad (3)$$

式中  $T, T_2, T_0, T_1$  分别为某日平均温度和某日所处发育时段的三基点温度(最高、最适和最低温度)。表 1 给出了玉米各发育时段的三基点温度。应用上述方法得到东北地区的热量分布情况,以 1961-2006 年平均热量状况来看(图 2),大体上大兴安岭、小兴安岭和长白山地区的热量平均较低,而平原地区的热量平均比较高。

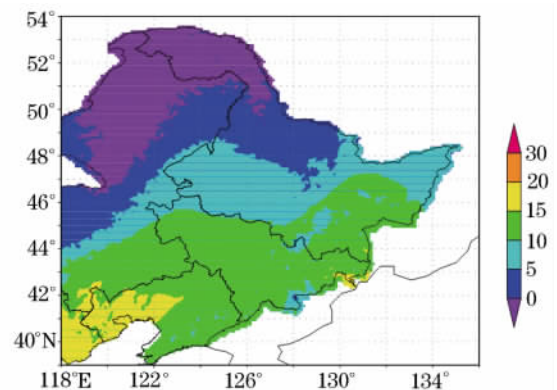


图1 插值后1961-2006年5月1日平均气温  
Fig. 1 Interpolated average air temperature on May 1 during 1961-2006

表 1 玉米各发育时段的三基点温度<sup>[4]</sup>

Table 1 Tribasic temperatures of maize in its each growing periods

玉米生长发育期	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
苗 期	20.0	8.0	27.0
营养生长期	24.5	11.5	30.0
营养、生殖并进期	27.0	14.0	33.0
开花灌浆期	25.5	14.0	32.0
灌浆成熟期	19.0	10.0	30.0

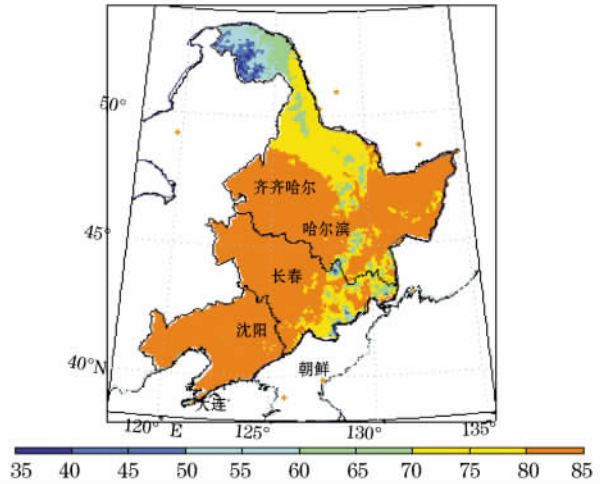


图 2 东北地区 1961 - 2006 年平均热量指数

Fig. 2 Average heat index of northeastChina during 1961 - 2006

事实上, 该方法较为笼统, 一个省往往跨数个纬度, 仅用一个指标必然无法准确描述出一个省区内不同地区的热量差异。本文针对该指标的不足, 在其基础上加以改进, 确定了新的冷害指标。具有方法如图 3 所示。

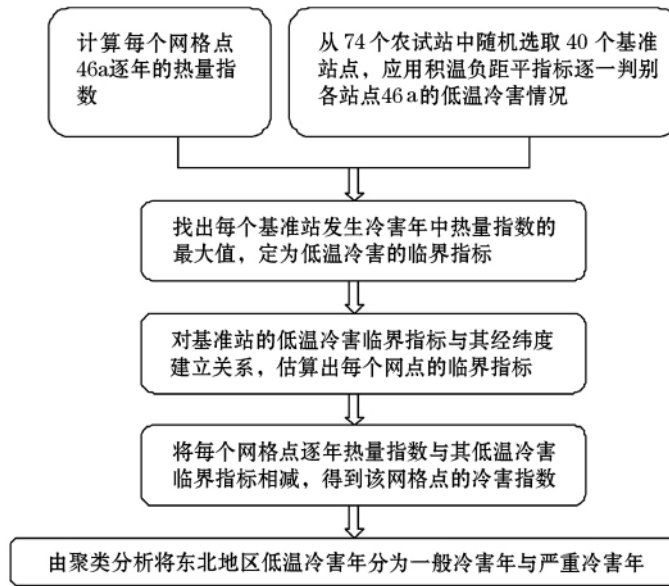


图 3 构建东北地区低温冷害指标的示意图

Fig. 3 Sketch of establishment of chilling damage indices for northeast China

### 1.2.2 低温冷害年的判别

东北地区, 地域广阔, 低温冷害是威胁该地区农业生产的主要自然灾害。尽管低温冷害研究已有很多, 但多数研究是针对某一地区或者某区域的研究, 而这些地区多是研究所需资料丰富, 对于那些没有气象资料与作物资料的地区, 低温冷害的判别仍十分困难。本研究主要目的就是想要解决此问题, 给出东北全区各个网格点上的低温冷害指标, 由此来判别各地的冷害情况。

某地低温冷害指标的确定, 首先必须要获得该地历史上低温冷害发生信息, 实际上, 我们不可能收集到历史上所有网格点是否发生冷害的信息。为了获取上述信息, 我们从 74 个农业气象观测站中均匀地随机选取 40 个站作为基准站, 应用当前使用较为广泛的积温负距平指标对基准站点依次进行逐年冷害发生与否的判别。将基准站低温冷年中热量指数的最大值定为各站冷害临界指标。冷害临界指标是判别某地区是否发生冷害的关键指标。将临界指标分别于经纬度建立关系, 得到东北全区各网格点冷害临界指标。在计算

中,我们发现冷害临界指标与经度的相关性远好于与纬度的相关性,这说明地形因素的影响远大于热量带纬向分布的影响,未很好的描述出海拔高度变化对临界指标的影响。因此,我们对冷害临界指标进行海拔高度订正。结果表明,在玉米种植区冷害临界指标与经纬度的相关性,特别是纬度与临界指标的关系得到明显的改善。为了进一步确定是否仍包含海拔高度变化对临界指标的影响,我们选取纬度变化带与经度变化带,比较经纬度的变化对于临界指标的影响情况。纬度变化带,选取的纬度范围为  $47.18 - 40.72^{\circ}\text{N}$ ,其中经度的变化为  $1.79^{\circ}\text{E}$ ,共 21 个站点;经度变化带选取的经度范围为  $131.18 - 122.82^{\circ}\text{E}$ ,其中纬度变化为  $1.65^{\circ}\text{N}$ ,共 21 个站点。分别分析了冷害临界指标与经度、纬度变化的相关性,表明经过海拔订正之后,经度的变化对临界指标的影响已经明显变弱,纬度依然是影响东北地区冷害临界指标的主要地理要素。

### 1.2.3 冷害指数

将东北地区每个网格点的热量指数减去该网格点的冷害临界值定义为冷害指数,表达式如下:

$$A_{ij} = H_{ij} - Y_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, 158; j = 1, 2, \dots, 178), \quad (5)$$

$A_{ij}$ 表示各网格点上低温冷害指数值,  $H_{ij}$ 表示各网格点上热量指数值,  $Y_{ij}$ 表示各网格点上热量指数临界值。本文所用资料在前面的分析中均已考虑了海拔高度,故此处不再考虑海拔高度的影响。冷害指数与冷害临界指标比较,前者可以反映冷害程度,而后者仅可以反映出冷害发生与否,因而,冷害指数的确立是确定冷害指标的主要前提。

### 1.3 低温冷害年型的判别

应用聚类分析方法,依据前述确定的 40 个基准站点历年冷害指数确定一般冷害年和严重冷害年两类年型。聚类分析是研究样本或变量指标分类问题的一种统计分析方法,其聚类目标是使相同类中的对象尽可能相似,不同类中的对象差别尽可能大。在气象学中,例如降水量气温的分类、相似年的确定都可以用聚类分析方法解决。 $k$ -means 聚类法是应用较为广泛的一种算法。本文选用 SPSS 中  $k$ -means 聚类法进行计算,在算法运行前确定其聚类的数量  $k$ ,并从样本中随机抽取  $k$  个聚类中心,再根据欧氏距离把每个点分配到距离其均值最近的类中,最后计算被分配到每个类的点的均值向量,作为新的中心进行递归。具体的步骤主要分为:

#### (1) 初始化聚类中心

- 1) 根据具体问题,从样本集中选出  $k$  个比较合适的样本作为初始聚类中心。
- 2) 用前  $k$  个样本作为初始聚类中心。
- 3) 将全部样本随机地分成  $k$  类,计算每类的样本均值,将样本均值作为初始聚类中心。

#### (2) 初始聚类

- 1) 按就近原则将样本归入各聚类中心所代表的类中。
- 2) 取一样本,将其归入与其最近的聚类中心的那一类中,重新计算样本均值,更新聚类中心。然后取下一样本,重复操作,直至所有样本归入相应类中。

#### (3) 判断聚类是否合理

采用误差平方和准则函数判断聚类是否合理,不合理则修改分类。循环进行判断、修改直至达到算法终止条件。

通过聚类分析把 40 个基准站点冷害指数的平均值为负值的年份分成 2 类,分类阈值为  $-0.1$ ,冷害指数小于 0 大于  $-0.1$  的为一般低温冷害年,冷害指数小于  $-0.1$  的为严重冷害年。由此,我们得到了东北地区的一般低温冷害指标与严重低温冷害指标。

## 2 东北地区玉米冷害规律

EOF(经验正交函数分解法)和小波分析是当前分析气象灾害时空分布重要而又有效的两种方法(或手段)。EOF 分析的主要目的是浓缩信息,并试图用极少数几项特征向量概括大范围的趋势分布状况。这种方法最早由统计学家 Pearson 于 1902 年提出, Lorenz 并于 20 世纪中期将其引入大气科学的研究。20 世纪 70 年代中后期,随着计算机技术的迅速发展, EOF 分解技术在气候分析中得以充分发展和广泛应用。近 10a 来, EOF 逐渐成为的大气科学领域分析变量场特征的重要工具,科学家用其进行计算并解释各种现象,取得了一系列丰硕的研究成果。小波分析是 20 世纪 90 年代发展起来的一种数学分析工具,由于其对信号处理

的特殊优势,很快被应用于气象和气候序列的时频结构分析<sup>[5-7]</sup>。小波分析不仅可以将隐含在时间序列中各种随时间变化的周期震荡清楚地显现出来,也可以反映变化趋势,并对其未来的演变趋势进行定性估计,在众多非线性科学领域得到广泛应用。这种分析不仅可以给出气候序列变化的尺度,还可以明显地显现出时间位相的变化,因此小波分析对于气候预测十分有用。

本研究应用 EOF 分析和小波分析对东北地区玉米冷害发生的时空分布规律进行研究,在确定发生不同等级冷害的敏感区域,并提取玉米冷害发生的时间系数后,进一步研究了东北玉米冷害的周期性震荡特征,对加强认识东北玉米冷害震荡规律和准确预测东北冷害的未来演变趋势提供了有力的科学支撑,为预防和应对玉米冷害的发生提供了重要的科学依据。

### 2.1 东北地区玉米冷害时空分布的 EOF 分析

对东北地区冷害指数矩阵进行经验正交分解,得到它的不同模态,本章仅分析方差贡献较大的前 3 个模态。前 3 个模态对应的时间系数序列分别为 PC1、PC2、PC3,前 3 个特征根  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 。  $\lambda_1 = 242.9396, \lambda_2 = 68.5371, \lambda_3 = 26.6144, \sum \lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{46} = 372.5612$ 。根据方差贡献公式:

$$Q_i = \lambda_i / \sum \lambda \quad (\sum \lambda \text{ 为特征根的总和}) \quad (6)$$

前 3 个模态的方差贡献为 90.7%,基本能反映低温冷害的分布状况。表明 EOF 展开收敛速度快, EOF 展开是成功的。由此,年冷害指数序列的特征向量,方差贡献越大,越能反映年平均冷害指数在 46 a 中的空间分布特征。每一模态的极大值中心就是冷暖异常变化的最敏感区域。由于特征向量相互正交,因此,第 1 特征向量反应了冷害指数场的平均状态,其余特征向量反映了冷害指数的不同尺度的变化平均状态,相应的时间系数作为特征向量的权重反映了不同年份对这种分布的贡献大小。

#### 2.1.1 第 1 模态及时间系数分析

第 1 模态的方差贡献为 65.2%,是方差贡献最大的一个模态,反映的是我国东北地区发生冷害的多年平均状况,说明东北地区冷害的发生规律主要是呈第 1 模态分布形式,如图 4 所示。第 1 模态的特征向量均为正值,表示冷害指数在东北区域变化趋势基本一致。东北地区中部,包括哈尔滨、蛟河、敦河、牡丹江等地的值较大,表明这些地区是冷害最敏感的地区。第 1 模态代表了东北地区冷暖的最主要分布特征,称这一模态为全区一致型。

第 1 模态的时间系数表明该分布类型大概为 2 a 一遇(图 5)。时间系数序列代表东北地区玉米生长季热量年际变化趋势,由于极大值中心是正值,正值数值大的年份表示该年热量较高的,代表暖温年的出现。负值时间系数绝对值大的年份表示该年热量比较低的,代表冷害年的出现。第 1 模态对应的时间系数呈现了明显的年代际变化,从时间系数的趋势线上可以明显看到 2000 年前后正负异常变化反相。

#### 2.1.2 第 2 模态及时间系数分析

第 2 模态的方差贡献为 18.4%,说明冷害发生程度除主要以第 1 模态分布外,还呈第 2 模态分布。第 2 模态特征向量各分量呈正、负相间的分布,该特征向量代表了两种分布类型(图略)。大小兴安岭和长白山

表 2 东北冷害空间分布前 3 个模态的方差贡献  
Table 2 Variance contribution of first 3 modes in spatial distribution of chilling damage in northeast China

模态	1	2	3
方差贡献/%	65.2	18.4	7.1
累积方差/%	65.2	83.6	90.7

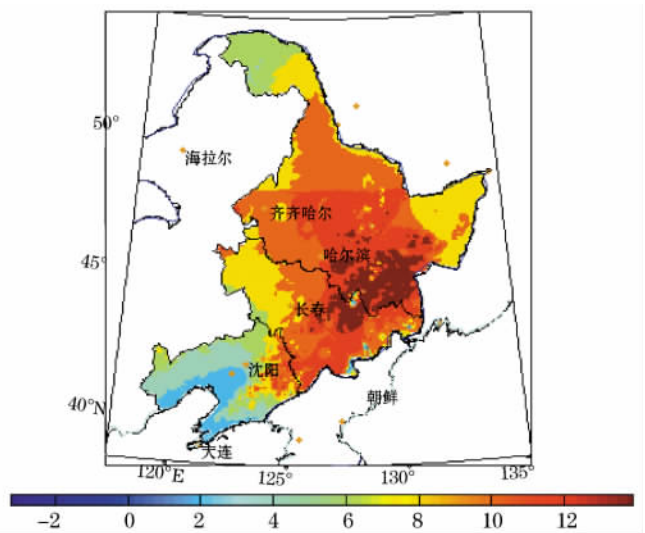


图 4 1961 - 2006 年东北冷害空间分布第 1 模态  
Fig. 4 First mode of spatial distribution of chilling damage in northeast China during 1961 - 2006

模地区为负值,东北西南部为正值,表明大小兴安岭和长白山地区与东北西南部呈相反的冷害分布型。也就是说,大小兴安岭和长白山地区发生冷害时,东北西南部偏暖。负值区最大绝对值位于大兴安岭地区,辽宁西部是个大的正值区,这两个极大值中心是东北地区冷暖敏感区。这种分布特征是东北地区冷害的另一种重要分布形式,称该模态为西南—东北相反型。

第2模态的时间系数有正有负波动均比较大,正值多于负值,正值与负值表示两种相反冷害分布型(图略)。第2模态空间模的极大值中心为负值,表示时间系数与冷害指数呈负相关,时间系数越大,则该区域冷害越严重,1964年达到正的最大值,表明该冷害分布型越,其后波动比较大。2000年达到负的最大值,波动也比较大。其时间系数为典型的典型年还有1967年,1976年,1983年和2003年等,负值的典型年还有1988年,1997年和2001年等。

### 2.1.3 第3模态及时间系数分析

第3模态的方差贡献为7.1%,说明东北玉米冷害除主要以第1、第2模态分布外,还呈第3模态分布形式。吉林东南部为大的正值区,黑龙江北部、吉林西部为大的负值区,正值和负值的绝对值大值区是这一模态的敏感区域,这种分布特征是东北地区冷害分布的又一重要分布类型,称该模态为西北—东南相反型(图略)。第3模态的时间系数负值多于正值,波动比较大(图略)。1970年达到正的最大值,1984年达到负的最大值。其时间系数为典型的典型年还有1975年,1982年,2001年和2003年等,东北地区西北部发生冷害,东南部偏暖;负值的典型年还有1966年,1969年和1986年等,呈现与正值典型年相反的冷害分布型。空间模态中极大值的中心是指易发生冷害和暖温的地区。空间模的极大值中心为负值,表示时间系数与冷害指数呈负相关,时间系数越大,该区域冷害越重,时间系数越小,该区域越暖。如极大值中心为正值,则都反之。

由上述的3个模态分析可见,我国东北地区玉米冷害的分布主要呈全区一致型,另外还有西南—东北相反型与西北—东南相反型等分布类型。

## 2.2 东北地区玉米冷害空间分布型时间系数的小波分析

### 2.2.1 第1模态时间系数小波分析

第1模态时间系数的小波局地变化功率谱如图6,通过0.1显著性水平白噪声检验的大值区有两个,其中一个大值区出现在1993—2000年,周期为3a左右;另一个大值区出现在1971—1992年,周期为8a左右。由全局小波图(图7)也可看出,局部周期在年代际上的变化情况:8a处有一峰值,且通过了显著性检验;在准3a处,峰值不明显,未通过检验,说明该时间周期受到了边界条件的影响。由此,东北全区性低温冷害,在整个研究时间段内均有发生,且发生周期约为8a,是东北地区比较常见的低温冷害分布型。利用此结果可以进一步分析1971—1999年期间的气候特点和东北玉米发育情况,对今后开展冷害预测和防御能够起一定的参考作用。

### 2.2.2 第2模态时间系数小波分析

第2模态时间系数的小波局地变化功率谱(图略),通过0.1显著性水平白噪声检验的大值区只有一个,出现在1998—2004年,周期为4a左右。其全局小波图(图略)在准4a处,峰值不明显,没有通过检验,说明该时间周期受到了边界条件的影响。总的来说,东北地区低温冷害的西南—东北相反型分布比较少见,主要可能出现在20世纪90年代后期,且没有明显的周期性。

### 2.2.3 第3模态时间系数小波分析

第3模态时间系数的小波局地变化功率谱(图略),通过0.1显著性水平白噪声检验的大值区也只有一个,出现在1963—1974年,周期为2a左右。其全局小波图(图略)在准2a处有一峰值,通过了显著性检验。反映了东北地区低温冷害西北—东南相反型分布主要出现在20世纪60年代与70年代初,且周期为2a一遇。

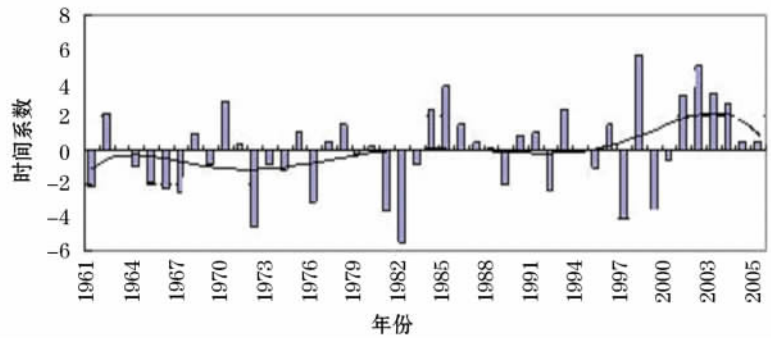


图5 东北冷害空间分布第1模态时间系数

Fig. 5 Time coefficients of first mode in spatial distribution of chilling damage in northeast China

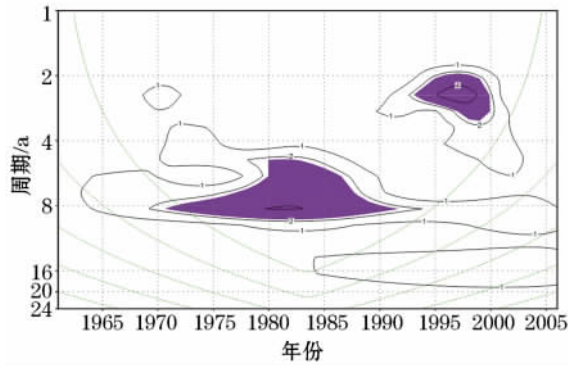


图 6 东北玉米冷害第 1 模态时间系数局部小波  
Fig. 6 Partial wavelet of time coefficient for first mode of chilling damage of maize in northeast China

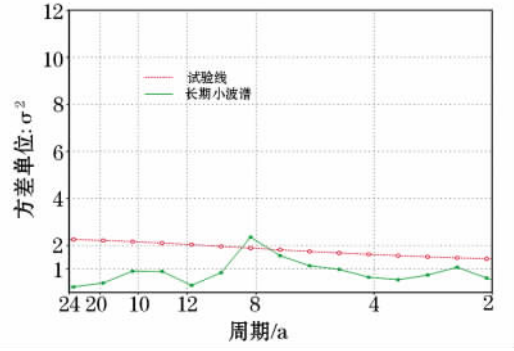


图 7 东北玉米冷害第 1 模态时间系数全局小波  
Fig. 7 Whole wavelet of time coefficient for first mode of chilling damage of maize in northeast China

### 3 结论

本文用 EOF 统计方法分析了东北地区玉米低温冷害时空分布特征,用小波方法分析了冷害发生的时频结构。结果表明:

(1) 东北地区玉米低温冷害空间分布主要有 3 种类型: 全区一致型, 该种分布型的最敏感区域为吉林延边市和黑龙江牡丹江市; 西南—东北相反型, 大、小兴安岭地区, 为东北地区冷害的另一敏感区; 西北—东南相反型, 黑龙江西北部, 吉林东部长白山区, 这两个区域冷暖呈相反的趋势, 都是东北地区玉米冷害的敏感区。这与王春乙等<sup>[11]</sup>的分析基本是一致的。

(2) 3 个玉米冷害空间分布型时间系数的分析表明: 东北地区玉米低温冷害存在如下规律, 全区一致型低温冷害分布, 表现出了准 8 a 的周期变化规律, 西南—东北相反型分布并没有呈现很好的周期性规律, 西北—东南相反型分布在 1963 - 1974 年之间, 表现出了准 2 a 的周期变化规律。

(3) 从我国东北地区发生冷害的趋势分布, 可以看出东北地区的低温冷害是由多年平均加上不同形式的扰动两部分组成。而从时间系数的趋势线上可以明显看到 2000 年前后正负异常变化反相。这可能与全球气候变化, 年平均温度在逐步升高, 发生低温冷害的概率降低, 而极端低温事件发生的可能性增加有关。所以, 研究东北地区低温冷害, 应该进一步探讨在全球气候变化的大背景下, 冷害呈现的新特点, 这样对预测和防御东北地区低温冷害更具有时效性和现实性。

### 参考文献:

[1] 徐祥德, 王龋棠, 萧永生, 等. 农业气象防灾调控工程与技术系统[M]. 北京: 气象出版社, 2002.  
 [2] 王书裕. 农作物冷害的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1983.  
 [3] 阎洪. 薄板光顺样条插值与中国气候空间模拟[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 163 - 169.  
 [4] 郭建平, 高素华. 东北地区农作物热量年型的划分及指标的确定[M]//王春乙, 郭建平. 农作物低温冷害防御技术. 北京: 气象出版社, 1999: 158 - 164.  
 [5] 张雪芬, 郑有飞, 王春乙, 等. 河南省冬小麦晚霜冻害时空分布与多时间尺度变化规律分析[C]//中国气象学会年会论文集, 2006.  
 [6] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.  
 [7] 陈怀亮, 邹春辉, 付祥建, 等. 河南省小麦干热风发生规律分析[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 59 - 64.  
 [8] 施能. 气象科研与预报中的多元分析方法[M]. 北京: 气象出版社, 2002.  
 [9] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998: 92 - 99.  
 [10] 林湘宁, 刘沛, 程时杰, 等. 小波分析基础理论及其在电力系统中的应用: 小波及其时频局部化特长[J]. 电力系统自动化, 1997(10): 66 - 68.  
 [11] 王春乙, 毛飞. 东北地区低温冷害分布特征[M]//王春乙, 郭建平. 农作物低温冷害防御技术. 北京: 气象出版社, 1999: 9 - 15.