

朱萌, 周沫, 乌兰, 等. 吉林省东部水稻延迟型冷害时空分布特征分析[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 223-228. [Zhu Meng, Zhang Jiquan, Wu Lan, et al. Spatial-temporal characteristics analysis of prolong-type rice chilling damage in eastern Jilin Province [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 223-228.]

## 吉林省东部水稻延迟型冷害时空分布特征分析\*

朱萌, 周沫, 乌兰, 王永芳, 乌日娜, 马齐云, 张继权

(东北师范大学 环境学院自然灾害研究所, 吉林 长春 130024)

**摘要:** 利用吉林省东部10个气象站点1961-2010年的逐日气温资料和水稻种植资料, 以中国气象局2013年发布的《水稻冷害评估技术规范(QX/T182—2013)》行业标准中东北地区不同热量区域5-9月平均气温之和的距平值为指标, 利用空间插值、EOF、小波分析、趋势分析的方法对吉林省东部水稻延迟型冷害的时空特征进行了分析。结果表明, 吉林省东部地区水稻延迟型冷害平均发生频率在30%~40%之间, 大体上由东向西平均发生频率逐渐降低, 1980年代的平均发生频率最高; 吉林省东部地区水稻延迟型重度冷害、中度冷害发生的次数多, 冷害的强度大, 平均强度的空间分布大体上由中间向南向北强度逐渐减弱。特别是1970年代冷害发生的强度最强。通过EOF分析, 吉林省东部低温特征的空间变率, 大体上具有东北-西南向的变化特征, 东北部的温度距平变率较低, 向西南部逐渐增加, 再向西有略微递减的趋势。通过小波分析法对吉林省东部温度距平百分率第一主特征向量的时间系数进行分析, 1969、1976、1980、1993、1995年为典型低温年, 1980-1990年温度距平百分率的东北-西南向的变化特征具有明显的6~7年的周期性, 2000年以后周期性不明显。

**关键词:** 水稻; 延迟型冷害; 时空分布; 吉林省东部

**中图分类号:** S42; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)03-0223-06

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.03.041

水稻是我国第一大口粮作物, 同时也是中国最重要的粮食作物之一, 其生产状况直接关系到我国的粮食安全<sup>[1]</sup>。吉林省是我国水稻的主要产区之一, 主要种植粳稻, 口感好, 品质高, 深受人们的喜爱, 消费需求量大。特别是吉林省东部, 它是吉林省水稻的主要栽种地区。在自然灾害的影响下水稻的品质和产量都呈现下降趋势。虽然近几十年来, 吉林省水稻生长季平均温度明显升高, 积温增加, 热量条件得到改善, 为中晚熟品种的种植区域扩大增产创造了良好的条件, 但全球气候变暖也给水稻气象灾害的发生带来了不确定性, 区域性、阶段性的低温冷害时有发生, 吉林省东部地区是低温冷害的最频发区之一。根据吉林省气象灾害统计年鉴数据显示, 1969、1971、1972、1976、1986、1993、1995年吉林省东部地区发生比较严重的水稻延迟型冷害和障碍型冷害。因此, 防御水稻低温冷害, 保障粮食品质和增产增收具有重要的现实意义。关于水稻低温冷害发生规律与特征的文献较多, 例如袭祝香

等<sup>[2]</sup>采用东北地区101个气象站点60年的逐日气温资料, 采用累积距平、相关系数、气候倾向率、趋势系数等方法分析了东北地区的水稻延迟型冷害时空变化特征及其对气候变化的响应。王冬妮等<sup>[3]</sup>对吉林省延迟型冷害进行了风险评价与区划。冯喜媛等<sup>[4]</sup>基于水稻灌浆程度对东北地区延迟型冷害气候变化特征进行了分析, 以建立的水稻生长发育和产量形成气象影响模式, 模拟计算出水稻灌浆完成百分率, 以灌浆程度小于85%为延迟型冷害的指标。并把发生冷害的站点与其所在省份参与统计的观测站总数的比值反映受灾范围的大小。余会康等<sup>[5]</sup>分析了气候变化背景下东北水稻冷害时空分布规律。以往的研究中, 水稻冷害指标的选取不同, 采取的方法不同, 得出的结果也多种多样, 不利于对冷害特征的分析。另一方面, 对水稻冷害发生的周期性研究较少。本文采用中国气象局2013年发布的《水稻冷害评估技术规范(QX/T182—2013)》<sup>[6]</sup>行业标准中东北地区不同热量区域5-9月平均气温之和的距平值为指标,

\* 收稿日期: 2014-12-19 修回日期: 2015-02-11

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题(2011BAD32B00-04)

作者简介: 朱萌(1990-), 女, 河北秦皇岛人, 硕士研究生, 主要研究方向为气象灾害风险评价。E-mail: zhum121@nenu.edu.cn

通讯作者: 张继权(1965-), 男, 吉林九台人, 教授, 博士生导师, 主要从事区域灾害与生态环境风险评价、预警与应急管理研究。E-mail: zhangjq022@nenu.edu.cn

将延迟型冷害致灾等级分为轻度、中度、重度三级。采用小波变换法对吉林省东部水稻延迟型冷害的发生的周期性进行了分析。利用空间插值和 EOF 对水稻延迟型冷害的时空特征进行了分析。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

本文所研究的吉林省东部地区包括延边朝鲜族自治州、白山市、通化市三个地市级行政单位。经纬度范围大致在  $41^{\circ} \sim 45^{\circ}N$ ,  $124.5^{\circ} \sim 131^{\circ}E$  之间。吉林省东部主要位于长白山区,有海拔较高的山峰、山地,也存在着少量河流谷地,海拔高度大致在  $2 \sim 2667$  m 之间。本文气象资料采用的是 1961-2010 年 5-9 月研究区 10 个气象站逐日的气温数据,站点的选择考虑到尽可能分布均匀和水稻种植的典型区域。研究区地形地势特征和站点分布见图 1。

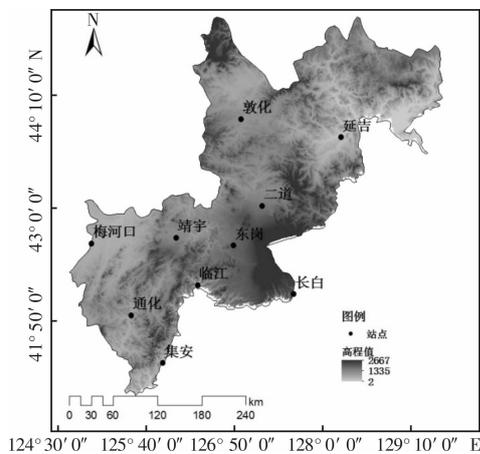


图 1 研究区概况

### 1.2 水稻延迟型冷害的指标选取

采用 2013 年 1 月 4 日发布的气象行业标准《水稻冷害评估技术规范(QX/T182-2013)》<sup>[6]</sup> 中的水稻延迟型冷害指标。该标准以东北不同热量区域的水稻延迟型冷害年 5-9 月水稻生长季内平均气温之和的距平值为指标,将延迟型冷害的级别分为轻度、中度、重度三个级别<sup>[6]</sup>(表 1)。表中  $\Delta T_{5-9}$  为 5-9 月平均气温之和的距平值,以此作为

判定延迟型冷害的级别。 $\sum T_{5-9}$  为 5-9 月平均气温之和的多年平均值,以该指标划分不同的热量区域。对水稻延迟型冷害的平均发生频率和平均强度进行分析,并运用 EOF 和小波变换的方法对吉林省东部水稻延迟型冷害的时空分布规律进行分析。

通过水稻减产率来验证延迟型冷害发生指标的阈值,在吉林省东部的各站点的识别中,正确率达到 70% 以上,说明表 1 所示的水稻延迟型冷害的指标是科学的、准确的<sup>[2]</sup>。

### 1.3 研究方法

采用 EOF 正交分解法对吉林省东部水稻延迟型冷害空间分布特征进行分析,其计算原理与方法如下。

利用 EOF 法对吉林省东部 10 个气象站点 1961-2010 年生长季内气温距平百分率进行自然正交展开,本文所研究的向量场  $N$  可以看成是时间和空间的函数,它的矩阵形式为:

$$N = N_{ij} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1j} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{i1} & n_{i2} & \dots & n_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $i$  是格点数,选取 10 个站点, $i$  取 10; $j$  为时间长度,选取 50 年生长季内气温距平百分率, $j$  取 50。因此水稻延迟型冷害的向量场( $N$ ) 为  $i \times j$  阶矩阵时空场,经过 EOF 分解得到空间函数矩阵  $S$  和时间函数矩阵  $T$ :

$$N = S \cdot T \quad (2)$$

其中:

$$S = (S_{im}) = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1m} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{i1} & s_{i2} & \dots & s_{im} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T = (T_{mj}) = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1j} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{m1} & t_{m2} & \dots & t_{mj} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $m$  为分解得到的模态数,利用  $m$  个相互正交的模态重新构建相空间,重新得到新的空间场和时间系数来表征原始场的所有特征,其中前几项大值分量能够表征原始场的大部分特征<sup>[7]</sup>。

为了进一步分析吉林省东部水稻延迟型冷害

表 1 水稻延迟型冷害指标<sup>[6]</sup>

延迟型冷害级别	$\sum T_{5-9}/^{\circ}C$					
	(0,83]	(83,88]	(88,93]	(93,98]	(98,103]	(103, + ∞)
轻度冷害 $\Delta T_{5-9}/^{\circ}C$	-1.0 ~ -1.5	-1.1 ~ -1.8	-1.3 ~ -2.0	-1.7 ~ -2.5	-2.4 ~ -3.0	-2.8 ~ -3.5
中度冷害 $\Delta T_{5-9}/^{\circ}C$	-1.5 ~ -2.0	-1.8 ~ -2.2	-2.0 ~ -2.6	-2.5 ~ -3.2	-3.0 ~ -3.8	-3.4 ~ -4.2
重度冷害 $\Delta T_{5-9}/^{\circ}C$	< -2.0	< -2.2	< -2.6	< -3.2	< -3.8	< -4.2

注: $\sum T_{5-9}$  为 5-9 月平均气温之和的多年平均值, $\Delta T_{5-9}$  为 5-9 月平均气温之和的距平值。

特征的时空规律,对生长季内延迟型冷害进行空间上的小波变换,进行小波变换尺度对应于相应的空间尺度。小波变换采用的是 Morlet 函数,简化后的傅里叶变换数学式为:

$$\Psi_f = e^{\frac{(-u-f)^2}{2}} \quad (5)$$

Morlet 小波的构成分为两部分,一部分是实部,另一部分是虚部,其数学定义式为:

$$\Psi_r(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} \cos ft; \quad (6)$$

$$\Psi_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} \sin ft. \quad (7)$$

式中: $f$ 为一常数,是 Morlet 小波中心频率。

## 2 结果与分析

### 2.1 吉林省东部水稻延迟型冷害分布特征分析

#### 2.1.1 平均发生频率

平均发生频率( $P$ )为某气象站出现延迟型冷害的年数与统计年数的比值。图 2 是这 50 年以来吉林省东部水稻延迟型冷害的平均发生频率,从图 2 可以看出,吉林省东部集安、东岗、二道的平均发生频率较低,大致在 30%~34%之间,主要是因为这些地区纬度位置相对最低,海拔较低,夏季的来自黄海渤海的部分暖湿气流可能对其夏季的增温有一定的帮助。其次是梅河口、通化、临江、延吉等地发生延迟型冷害的频率大致在 36%~39%之间,延吉地区主要是由于纬度位置偏高,特别是 5 月份和 9 月份温度较低,太阳辐射量相对较少,导致冷害的发生频率较高,靖宇、梅河口地区大致位于同一纬度,但是靖宇的海拔高度远高于梅河口地区,冷害发生的频率也相对较高。敦化和长白地区是水稻延迟型冷害发生的频率最高的地区,发生的频率大致在 40%~44%之间。敦化地区纬度位置最高,热量条件相对最少,发生冷害的频率高,长白地区海拔高度最高,冷害发生的频率也高。

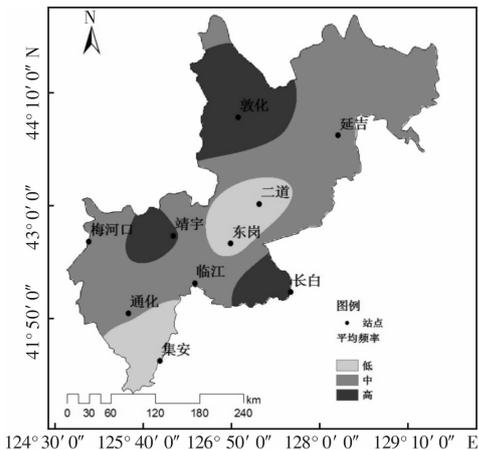


图 2 水稻延迟型冷害平均发生频率

图 3 所示为 1960 年代、1970 年代、1980 年代

1990 年代吉林省东部发生冷害的平均频率。2000 年以后只有 2009 年延吉发生轻度的水稻延迟型冷害;1960 年代水稻延迟型冷害在吉林省东部总体上发生的频率是较高的。发生频率较高的地区是敦化、靖宇、二道、东岗、梅河口。其余地区水稻延迟型冷害发生频率较少,全部站点累计冷害发生频次 45 次。1970 年代发生延迟型冷害的频率高于 1960 年代,频繁发生冷害的范围较大,全部站点累计冷害发生频次 49 次,这与灾害大典(吉林卷)<sup>[8]</sup>的描述相符合,特别是 1972 年、1976 年吉林省东部大部分地区都发生了严重的水稻延迟型冷害,春冷、夏寒、秋凉,在前期延迟水稻生育,后期延迟出穗成熟,降低水稻的成熟度。1960 年代、1970 年代水稻延迟型冷害平均发生频率在空间上分布的规律基本一致,大体上都是沿东南向西北增加的趋势。1980 年代水稻延迟型冷害在该地区总体上发生的频率最高,10 个站点从 1980-1989 年冷害发生累计 59 次,尤其是长白和通化地区这 10 年间发生冷害的次数很多与其它站点冷害发生的次数差别很大;1990 年代水稻延迟型冷害总体上发生的频率最低,全部站点累计冷害发生频次 31 次,这与全球气候变暖有关。1960 年代、1970 年代水稻延迟型冷害平均发生频率在空间上分布的规律基本一致,呈现从东北向西南增加的趋势,与 1980 年代、1990 年代空间上分布的规律相反。参考吉林省灾害大典与吉林省水稻物候期资料后认为,这可能与 1980 年代、1990 年代长白、通化、临江,部分地区品种引用不当有关。

#### 2.1.2 平均发生强度

在分析吉林省东部水稻延迟型冷害发生的平均强度时,我们可以对识别出的不同延迟型冷害级别分别赋值,轻度冷害赋值为 1,中度冷害赋值为 2,重度冷害赋值为 3。赋值后的值均为正值,在一定程度上可以表示延迟型冷害发生的强度,数值越大,延迟型冷害发生的强度越大。延迟型冷害发生的平均强度等于不同等级冷害值与冷害发生次数相乘求和再比上该地发生延迟型冷害的总次数。图 4 是 50 年以来吉林省东部水稻延迟型冷害的平均发生强度,从图可以看出,敦化、东岗、二道、长白地区的平均冷害强度最强,强度值为 2.64~2.81,重度延迟型冷害发生的年份比较多。其次是靖宇,强度值为 2.55。最低的是通化、梅河口、集安、延吉、临江,强度值为 2.2~2.5。

图 5 所示为不同年代吉林省东部水稻延迟型冷害发生的平均强度。1960 年代水稻延迟型冷害平均强度依次从强到弱依次是二道、敦化、东岗、长白、靖宇、梅河口、延吉、通化、临江、集安。1970 年代水稻延迟型冷害发生的平均强度最强,发生强度最大的地区是敦化、二道、东岗、长白,其余依次为靖宇、通化、集安、延吉、梅河口、

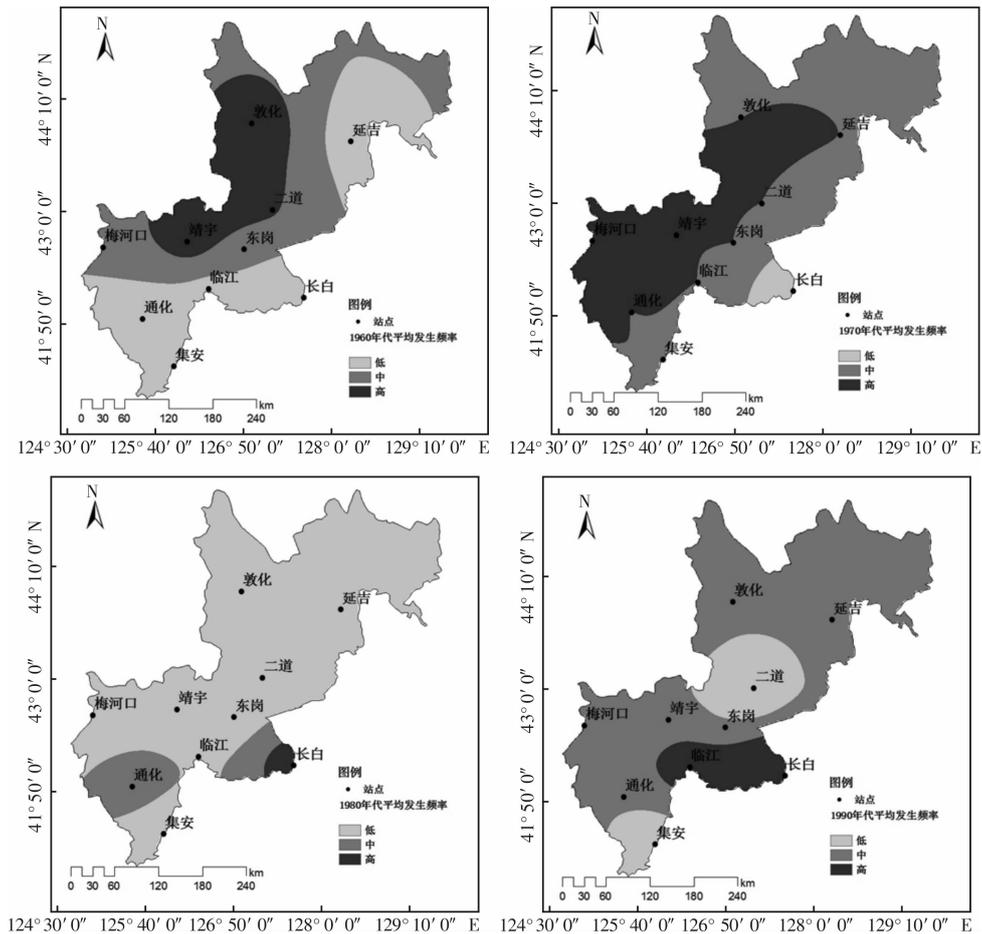


图3 1960年代-1990年代水稻延迟型冷害平均发生频率

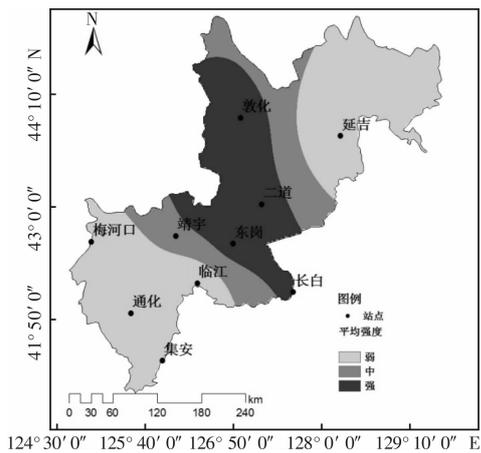


图4 水稻延迟型冷害平均发生强度

临江。虽然 1980 年代在吉林省东部 10 站点水稻延迟型冷害平均发生频率最高，但是平均发生强度最弱。强度顺序从强到弱依次为长白、敦化、东岗、靖宇、二道、临江、集安、延吉、梅河口、通化。1990 年代，水稻延迟型冷害平均强度从强到弱依次为敦化、二道、通化、集安、东岗、梅河口、长白、延吉、靖宇、临江。1960 - 1980 年代，冷害强度的空间规律基本一致，大致从中部向南北两侧强度渐弱。1990 年代的空间分布规律略有不同，南端和中间强度比较强，这与气候变

化背景下，气温的波动规律性越来越弱、气候变化的不确定性增强有关。

### 2.2 基于 EOF 和小波变换的吉林省东部水稻延迟型冷害时空分布规律分析

利用 EOF，对吉林省东部各站点的温度距平百分率数据进行分析，以便得到吉林省东部水稻延迟型冷害的时空分布特征，EOF 是一种空间上的主成分分析 (PCA) 法，可将气象要素分解为时间空间两个正交函数的组合，空间部分由特征向量表示分布特点，时间上用时间系数表征空间分布的时间变化特征。以吉林省东部各气象站点坐标为空间数据，各气象站历年温度距平百分率为时间数据进行经验正交分解<sup>[9]</sup>，以分析吉林省东部延迟型冷害的空间分布特征，结合小波分析与趋势分析，以确定空间特征的时间变化规律。通过 EOF 分解以后，第一模态的方差贡献率已经达到 85.56%，表明第一模态主成分向量足以表征该地区的延迟型冷害的分布特征和变化情况。

从图 6 分析可知，吉林省东部低温特征的空间变率，大体上在空间分布上具有东北—西南向的变化特征，东北部的温度距平变率较低，向西南部逐渐增加，再向西有略微递减的趋势。

在分析低温时间变化系数时发现，近 50 年以来吉林省东部温度总体上是上升的，低温的时间变率在 1990 年代以后，有明显的波动性增强的趋

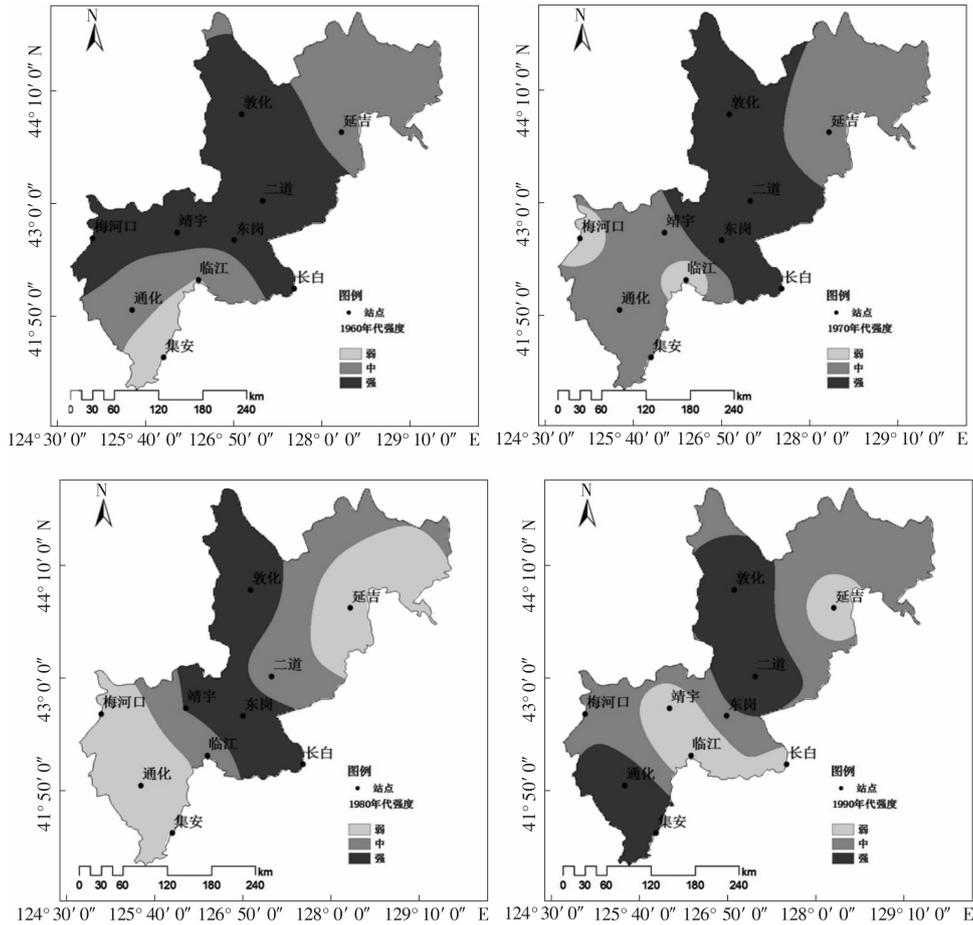


图5 1960年代-1990年代水稻延迟型冷害平均发生强度

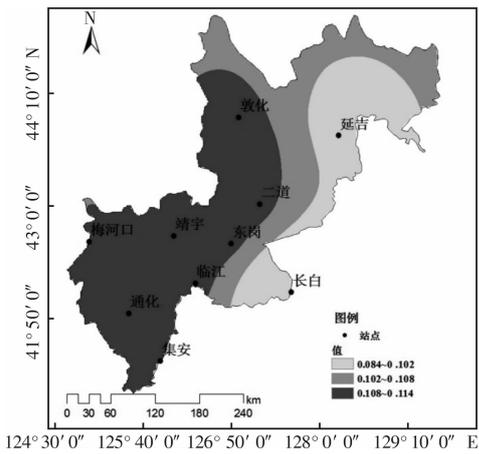


图6 吉林省东部第一特征向量场

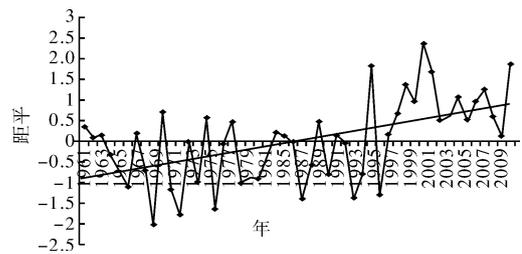


图7 吉林省东部温度距平百分率时间系数的长期变化趋势

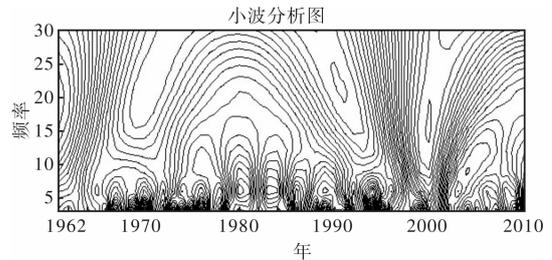


图8 吉林省东部温度距平百分率时间系数小波分析图

势, 表明, 随着全球气候变暖, 气候极端事件发生的概率在逐渐地增大, 气候的不稳定性增强。延迟型冷害在小范围, 阶段性时间内还是时有发生(图7)。

为了进一步揭示吉林省东部地区延迟型冷害的空间分布特征的时间变化规律, 对吉林省东部温度距平百分率第一主特征向量的时间系数进行空间小波分析。如图8所示, 1969、1976、1980、1993、1995年为典型中心, 1966-1978年, 该特征变化具有2~4年的震荡周期, 1980-1990年该特征变化具有明显的6~7年的震荡周期, 1990-

1996年该特征变化具有1~2年的震荡周期, 2000年以后周期性特征不明显。

### 3 结论与讨论

本文采用东北水稻生长季节(5-9月)热量条件的3个指标识别吉林省东部1961-2010年吉林

省东部水稻延迟型冷害,并对冷害的程度进行分等定级。采用新的冷害的识别标准,使得评估的结果更加准确统一。分析了吉林省东部地区的水稻延迟型冷害的平均发生频率大致在30%~40%之间,这与袭祝香等<sup>[10]</sup>《东北低温冷害风险评估及区划》中的结论、马树庆等<sup>[11]</sup>《东北区玉米低温气候和经济损失分区》中的结论基本一致,而且都认为长白山地区是水稻延迟型冷害频发的地区。对不同年代吉林省东部水稻延迟型冷害发生的频率进行分析,得出不同年代冷害发生频率的时空分布特点。1970年代和1980年代是该地区冷害发生次数最多的年代,这与灾害大典的统计结果一致。本文除了对吉林省东部水稻延迟型冷害平均发生频率进行了研究,还对冷害发生的平均强度的空间分布规律进行了分析,得出敦化、东岗、二道、长白的平均强度最大。这与这些地区海拔较高有着最直接的关联。对不同年代吉林省东部水稻延迟型冷害的平均强度进行分析,既揭示了空间规律,又分析了时间特征,吉林省东部水稻延迟型冷害发生最严重的年代主要在1970年代,1980年代虽然冷害发生的次数多,但强度较弱。为进一步分析吉林省水稻延迟型冷害的时空变换规律,采用EOF、小波分析等方法对温度距平变率的空间分布特征和时间系数特征进行分析,分析温度距平百分率空间分布特征下的时间变化的周期性。这与余会康<sup>[5]</sup>《气候变化背景下东北水稻时空变化》中的结论基本一致。采用EOF、小波分析法可以更清楚地分析,温度变化的时间波动趋势和变化的周期特点。1990年、2000年以后,在全球气温普遍增高的趋势下,温度波动的变率越来越大,

阶段性、区域性的低温冷害时有发生。因此,不能盲目地将需要热量条件较高的水稻品种种植界限向北推移,一旦冷害发生,水稻的经济损失会更加严重。因此,采取科学合理的水稻种植管理制度十分重要。

## 参考文献:

- [1] 章福秀,王丹英,方福平,等.中国粮食安全和水稻生产[J].农业现代化研究,2005,26(2):85-88.
- [2] 袭祝香,马树庆,纪玲玲.东北地区水稻延迟型冷害时空特征及其与气候变暖的关系[J].地理研究,2014,33(7):1373-1382.
- [3] 王冬妮,郭春明,刘实,等.吉林省水稻延迟型低温冷害气候风险评估与区划[J].气象与环境学报,2013,29(1):103-107.
- [4] 冯喜媛,郭春明,涂钢,等.基于水稻灌浆程度的东北地区水稻延迟型冷害气候变化特征[J].吉林气象,2014,(1):38-40.
- [5] 余会康,郭建平.气候变化下东北水稻冷害时空分布变化[J].中国生态农业学报,2014,22(5):594-601.
- [6] 中国气象局.QX/T182-2013水稻冷害评估技术规范[S].北京:气象出版社,2013:1-2.
- [7] 鲁坦.1971-2011年河南省冬小麦晚霜冻的特征分析[J].河南农业大学学报,2013,47(4):393-399.
- [8] 中国气象灾害大典编委会.中国气象灾害大典吉林卷[M].北京:气象出版社,2008.
- [9] 王栋,谭桂容,耿新.1960年以来山西秋季连阴雨的气候特征分析[J].灾害学,2015,30(1):75-81.
- [10] 袭祝香,马树庆,王琪.东北低温冷害风险评估及区划[J].自然灾害学报,2003,12(2):98-102.
- [11] 马树庆,王琪,王春乙,等.东北地区水稻冷害气候风险度和经济脆弱度及其分区研究[J].地理研究,2011,30(5):931-938.

## Spatial-temporal Characteristics Analysis of Prolong-type Rice Chilling Damage in Eastern Jilin Province

Zhu Meng, Zhou Mo, Wu Lan, Wang Yongfang, Wu Rina, Ma Qiyun and Zhang Jiquan  
(College of Environmental Science, Northeast Normal University, Nature Disaster Research Institute,  
Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

**Abstract:** Using the daily temperature data and information on rice cultivation from 1961 to 2010 of ten meteorological stations in eastern Jilin Province, taking the average temperature of the anomaly from May to September in the Northeast region of the different heat of China as index that was from a "rice chilling assess the technical specifications (QX/T182-2013)" industry standard of China that was issued by China Meteorological Administration in 2013, Methods by the spatial interpolation, EOF, wavelet analysis, trend analysis analyzed spatial and temporal characteristics of prolong-type rice chilling damage in eastern Jilin province. The results show that the average frequency of prolong-type rice chilling damage in eastern Jilin Province between 30% to 40%, generally, decreased from east to west, Highest frequency occurrence in the 1980s, severe and moderate prolong-type rice chilling damage in eastern Jilin province occurred many times, intensity is large, Spatial distribution of the average intensity gradually weakened, generally, from the middle to both sides. Highest Intensity occurrence in the 1970s. Analyzed by the EOF method that Low-temperature characteristics of spatial variability in eastern Jilin Province generally showed a northeast - southwest direction characteristics change, Temperature anomalies variability in the northeastern is small, that increased gradually from northeast to southwest, then west slightly decreasing trend. Analyzed by the wavelet analysis method temperature anomaly percentage of the first main the feature vector time coefficient, the results shows that 1969, 1976, 1980, 1993, 1995 is a typical low-temperature year. From 1980 to 1990, the spatial variation of temperature anomalies percentage has obvious 6 to 7 years periodic characteristics, after 2000, cyclical characteristics are not obvious.

**Key words:** Eastern Jilin Province; prolong-type rice chilling damage; EOF; wavelet analysis