

# 寒地水稻障碍型冷害指数构建及应用 ——以辽宁省为例

纪瑞鹏,于文颖,冯 锐,武晋雯,张玉书

(中国气象局沈阳大气环境研究所,沈阳 110166)

**摘 要:**东北地区水稻障碍型冷害常规评估多采用温度和低温持续天数2个指标,为实现量化评估和预报,需构建一种基于多因素的综合性障碍型冷害指数。本文基于水稻温度适宜度模型,以温度和低温持续天数为基础,综合考虑三基点温度对水稻生长发育过程的影响,利用辽宁省近50年的日平均温度和水稻发育期数据,构建水稻障碍型冷害指数(RSCDI),并利用该指数对辽宁省水稻障碍型冷害变化规律进行分析和试预报。结果表明:①1961–2010年的50年间,有20年发生了局部轻度冷害,14年发生了局部中度冷害,10年发生了局部重度冷害,未发生区域性及大范围冷害。②冷害发生频率最高的年代为1971–1980年,1981–2000年发生频率呈下降趋势,发生频率最低的年代为1991–2000年,2001年以后发生频率上升,且范围呈现扩大趋势;冷害发生范围主要分布在辽宁西部和东北部地区。随着气候变暖,冷害发生频率和范围虽有一定程度的下降,但辽宁省水稻障碍型冷害发生的不确定性仍存在。③利用RSCDI对2011–2014年辽宁省水稻障碍型冷害进行试预报,结果仅建平县2012年和2014年在开花期发生中度冷害,其他地区无冷害发生。

**关键词:**水稻;障碍型冷害;指数;变化规律;辽宁省

## 1 引言

水稻障碍型冷害是指在水稻生殖生长阶段,短时间异常的相对强低温,破坏了颖花的生理功能而造成颖花不育,形成大量空壳导致水稻减产(曲辉辉等, 2011);障碍型冷害主要发生在水稻孕穗期和开花期,一旦发生将造成严重减产(陈书强等, 2012)。水稻属于喜温作物,在生长发育过程中受温度条件的制约,在低温频发的北方高纬度地区和南方低纬度中高海拔地区容易发生障碍型冷害(阮仁超等, 2007)。

国内外针对水稻障碍型冷害的机制、生理、影响和模拟等方面已有较多研究。对水稻障碍型冷害研究最多的国家是日本,研究主要集中在障碍型

冷害的敏感阶段、品种耐冷性、冷害引起的不育性等方面(引自姜丽霞等, 2009); Shimono(2011)发现日本水稻抽穗期每10年提前0.7~1.9天,孕穗期平均气温每10年下降0.18℃。国内研究发现,孕穗期出现低于临界温度的低温,将发生大量的不孕粒(丁士晟, 1980),开花期遭遇低温,将使花粉活性下降,空秕率增加(胡春丽等, 2014);刘晓菲等(2012)检测出近年来黑龙江省水稻抽穗开花期障碍型冷害呈波动增加趋势。障碍型冷害指标研究中多以日平均温度或日最低温度是否超过阈值以及持续的日数等作为冷害指标,如郭建平等(2009)确定北方粳稻孕穗期障碍型冷害的温度指标是日平均气温连续2天以上低于17℃,抽穗开花期的指标是日平均气温连续2天以上低于19℃;中国气象局

收稿日期:2016-09;修订日期:2016-11。

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306036);辽宁省科学技术厅农业攻关及成果产业化项目(2014210003)

[Foundation: China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest, No. GYHY201306036; Project of Agricultural Research and Industrialization, Department of Science and Technology in Liaoning Province, No. 2014210003]。

作者简介:纪瑞鹏(1972-),男,辽宁北票人,正研级高工,主要从事农业气象研究,E-mail: jiruipeng@163.com。

通讯作者:张玉书(1963-),女,辽宁黑山人,正研级高工,主要从事农业气象研究,E-mail: yushuzhang@126.com。

引用格式:纪瑞鹏,于文颖,冯锐,等. 2017. 寒地水稻障碍型冷害指数构建及应用: 以辽宁省为例[J]. 地理科学进展, 36(4): 437-445. [Ji R P, Yu W Y, Feng R, et al. 2017. Construction and application of Rice Sterile-type Cold Damage Index in cold area: A case study of Liaoning Province[J]. Progress in Geography, 36(4): 437-445.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.04.005

(2013)以日平均气温连续天数以及低于某日平均温度的阈值为指标确定不同地区水稻障碍型冷害程度;王艳华等(2013)定义了持续低温指数,统计年内至少连续3天日最低温度低于该日多年日最低温度3℃的总日数作为低温冷害指标。

以往对水稻障碍型冷害的研究多集中在分布规律、评价指标、致灾原因、对水稻产量的影响、风险区划和损失评估等方面,而利用气象指标对水稻障碍型冷害进行预报的研究较少,导致对障碍型冷害的预测预报较为困难(冯喜媛等, 2013)。另外,随着气候变化和水稻品种的不断更新换代,原有的一些冷害评价指标已不完全适用(姜丽霞,季太生等, 2010)。

低温冷害是影响中国东北地区水稻生产安全的主要农业气象灾害,研究认为虽然气候变暖使得东北地区热量资源增加,但夏季障碍型冷害频发的可能性仍然很大(姜丽霞,李帅等, 2010)。姜丽霞等(2009)研究认为,虽然未来气候呈变暖趋势,但孕穗期障碍型冷害在未来任何年份都有可能发生。近几十年来,针对中国东北地区障碍型冷害建立了多种评估指标,温度和低温持续天数是东北地区水稻障碍型冷害评估的常用指标,但该指标未考虑低温对作物不同发育期的影响程度和不同低温对作物的持续伤害程度,同时持续天数指标也不利于障碍型低温冷害的定量预报。因此,应构建一个综合考虑多种因素的定量指标。如何利用温度、低温持续天数和水稻不同发育期三基点温度理论构建适用于辽宁省水稻障碍型冷害的指标,并实现量化综合性评估和预报成为当务之急。本文以辽宁省为例,以障碍型冷害发生的温度和低温持续天数为基础,综合考虑水稻不同发育期三基点温度对生长发育过程的影响,基于温度适宜度概念,利用辽宁省近50年日平均温度和水稻发育期数据,构建水稻障碍型冷害指数(rice sterile-type cold damage index, *RSCDI*),并运用该指数对辽宁省水稻障碍型冷害时空规律进行分析和试预报。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

辽宁省50个气象站(图1)1961–2014年7–8月日平均气温数据和1961–2014年逐年水稻发育期数据来源于辽宁省气象档案馆;地理信息数据(经度、

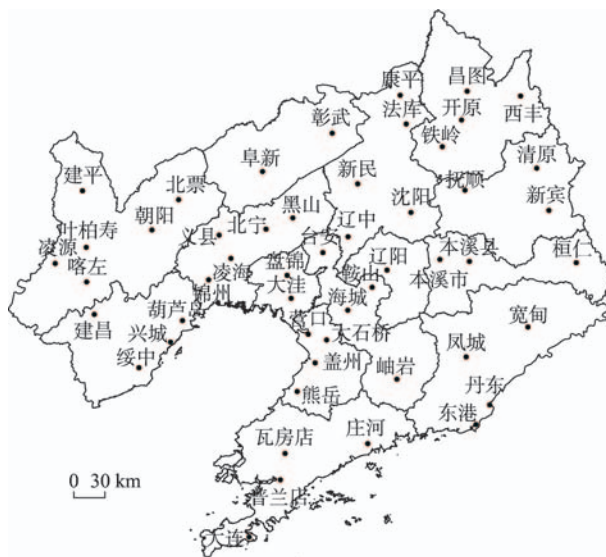


图1 辽宁省50个气象站点位置分布

Fig.1 Location of the 50 meteorological stations in Liaoning Province

纬度及行政边界等)来源于国家测绘地理信息局,比例尺为1:250 000。

利用Excel 2010和SPSS 11.0软件对所有气温和产量数据进行处理并制图;基于ArcGIS 9.3软件对不同年代际水稻障碍型冷害发生频率空间变化进行制图分析。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 时空变化规律

水稻障碍型冷害发生规律的分析主要从时间变化和空间分布两方面展开。分析不同等级(轻度、中度、重度)冷害的时间变化规律时,用某年冷害发生站数与评估总站数的比值(*IOC*)来表示该年冷害出现范围的大小;分析不同等级冷害的空间分布时,用某一时段出现冷害的年数与该时段总年数的百分比来表示某一站该时段冷害的发生频率(*P*)。

根据冷害发生站数(或面积)比率将水稻冷害分为局部冷害、区域冷害和大范围冷害3级:

(1) 局部冷害。评估区域内冷害发生站数(或面积)百分率在20%以下。

(2) 区域性冷害。评估区域内冷害发生站数(或面积)百分率在20.1%~50%。

(3) 大范围冷害。评估区域内冷害发生站数(或面积)百分率在50.1%以上。

#### 2.2.2 K-means聚类分析法

采用K-means聚类分析法确定障碍型冷害等级

阈值。 $K$ -means 算法的原理为: 首先随机选择  $k$  个对象, 每个对象代表一个簇的初始平均值, 计算剩余各个对象到这些簇中心的距离, 并将它分配到最相似的聚类中; 然后重新计算每个簇的新均值, 重复上述过程, 直到准则函数收敛。 $K$ -means 算法的准则函数为:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in C_i} |p - m|^2 \quad (1)$$

式中:  $E$  为数据集中所有对象的误差平方和,  $p$  为指定对象,  $m$  为聚类簇  $C_i$  的平均值;  $i$  为第  $i$  个簇。

利用 SPSS11.0 软件进行  $K$ -means 法的运算。

### 3 水稻障碍型冷害指数

#### 3.1 温度适宜度模型

温度适宜度可用下式进行计算(郭建平等, 2004):

$$S(t) = \frac{(T - T_1)(T_2 - T)^B}{(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B} \quad (2)$$

$$B = (T_2 - T_0) / (T_0 - T_1) \quad (3)$$

式中:  $S(t)$  为实际气温和三基点温度决定的某一日温度适宜度。 $T$  为某日的实际平均气温;  $T_2$ 、 $T_1$ 、 $T_0$  分别代表所处水稻发育期对应的三基点温度, 即最高、最低和最适气温。表 1 给出了水稻不同发育期三基点温度。当  $T \leq T_1$  或  $T \geq T_2$  时, 令  $S(t) = 0$ , 当  $T = T_0$  时,  $S(t) = 1$ 。其中, 不同发育期数据为历年各站发育时期的平均值。

#### 3.2 $RSCDI$ 模型构建

研究表明(中国气象局, 2013), 东北地区日平均气温连续 3 天低于  $19^\circ\text{C}$ , 会发生轻度障碍型低温冷害, 而日平均气温高于  $19^\circ\text{C}$  不会发生障碍型低温冷害。计算发现, 当日平均气温等于  $19^\circ\text{C}$  时, 辽宁省水稻孕穗期和开花期的温度适宜度  $S(t)$  值为 0.54, 以连续 3 天  $S(t) < 0.54$  为判断依据, 对辽宁省 50 个气象站 1961–2010 年孕穗期(7 月 11–31 日)和开花期(8 月 1–20 日)障碍型冷害进行诊断, 发现 7 月 11–31 日

时段无冷害发生。胡春丽等(2014)研究认为, 辽宁大部水稻孕穗期未受冷害威胁, 但局部地区抽穗期冷害呈增加趋势, 这与本文结果基本一致。

抽穗期冷害利用辽宁 50 个气象站 1961–2010 年 8 月 1–20 日的日平均气温和发育期数据, 逐日计算温度适宜度, 将  $S(t) < 0.54$  作为持续日数( $SD$ )的判断依据, 确定出 50 年辽宁各站该时段  $S(t) < 0.54$  的低温持续日数  $SD$ 。

当  $S(t) \geq 0.54$  或  $SD < 3$  时, 令标准化温度适宜度  $ST = 1$ ,  $RSCDI = 1$ ;

当有连续 3 天或 3 天以上的  $S(t) < 0.54$  时, 将  $S(t)$  作标准化处理, 令  $ST = \frac{S(t)}{0.54}$ ;

根据标准化的温度适宜度( $ST$ )与低于某一适宜度阈值的持续日数( $SD$ )构建水稻障碍型冷害指数, 如式(4)所示:

$$RSCDI = \frac{\sum_{i=1}^n ST}{SD} \quad (4)$$

式中:  $RSCDI$  为水稻障碍型冷害指数, 值域范围  $\in [0, 1]$ ;  $ST$  为标准化温度适宜度,  $SD$  为  $S(t) < 0.54$  的持续日数,  $i$  为日数,  $n = SD$ 。

#### 3.3 $RSCDI$ 等级的划分

计算辽宁省 50 个气象站 1961–2010 年开花期水稻障碍型冷害指数( $RSCDI$ ), 利用指数序列值诊断冷害发生日期, 将 50 年间冷害日的  $RSCDI$  利用  $K$ -means 聚类分析法进行划分。首先确定将障碍型冷害分轻度、中度、重度 3 个等级, 聚类数设置为 3, 输入对应  $RSCDI$  序列; 然后, 利用  $K$ -means 算法进行聚类, 根据距离最小的原则, 不断迭代计算每类中各个变量的均值, 直到聚类中心不再变化, 聚类过程结束,  $RSCDI$  序列被划分为 3 簇数据。将上述 3 簇数据的起始数值分别作为 3 个冷害等级对应的  $RSCDI$  数值范围, 得到下列结果:

当  $0 \leq RSCDI < 0.44$  时, 为重度冷害;

当  $0.44 \leq RSCDI < 0.70$  时, 为中度冷害;

当  $0.70 \leq RSCDI < 1$  时, 为轻度冷害。

### 4 水稻障碍型冷害指数的应用

#### 4.1 障碍型冷害时空变化特征

利用辽宁省 1961–2010 年 50 个气象站点的水稻障碍型冷害指数( $RSCDI$ )值和等级划分结果, 分析 1961–2010 年辽宁省水稻障碍型冷害评估结果的

表 1 高产条件下的水稻各发育期的  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_0$  值/ $^\circ\text{C}$

Tab.1  $T_1$ ,  $T_2$  and  $T_0$  values of rice development period under high yield/ $^\circ\text{C}$

生长发育 时期	苗期	营养 生长期	营养、生殖 并进期	开花 灌浆期	灌浆 成熟期
$T_1$	9.0	12.5	15.0	15.0	10.5
$T_2$	28.0	32.0	33.0	33.0	30.0
$T_0$	21.0	25.0	27.8	26.3	19.3



时空变化特征。

#### 4.1.1 时间变化规律

基于所得出的辽宁省1961–2010年50个气象站点的障碍型冷害等级,统计逐年不同等级冷害发生站数,利用IOC分析轻度、中度、重度障碍型冷害的时间变化规律,分析结果见图2。

1961–2010年的50年间,轻度冷害IOC最大值(0.16)出现在1977年,次大值出现在1972、1984和2005年,IOC值均为0.1。50年中,有20年发生了局部轻度冷害,其他30年未发生轻度冷害(图2a)。

1961–2010年的50年间,中度冷害IOC最大值(0.14)也出现在1977年,次大值(0.06)出现在1972年和1981年。50年中,有14年发生了局部中度冷害;其余36年未发生中度冷害(图2b)。

1961–2010年的50年间,重度冷害IOC最大值(0.20)也出现在1977年,次大值(0.06)出现在1972年;50年中,有10年发生了局部重度冷害;其余40年未发生重度冷害(图2c)。

#### 4.1.2 空间变化规律

基于RSCDI计算结果,统计1961–2010年辽宁省50个气象站5个年代际(1961–1970、1971–1980、1981–1990、1991–2000、2001–2010年)的轻度、中度和重度水稻障碍型冷害发生频率,利用ArcGIS对冷害发生频率的空间变化进行分析,结果见图3。

1961–1970年间,轻度冷害发生频率大于10%的只有建平站,其他49个站发生频率均较低(0%~10%);50个站的中度和重度冷害发生频率均较低(0%~10%)。

1971–1980年间,轻度冷害发生频率大于10%的只有凌源站,其他49个站发生频率均较低(0%~10%);中度冷害发生频率大于10%的只有建平站,其他49个站发生频率低(0%~10%);重度冷害发生频率为10%~20%的有西丰、清原、新宾3个站,发生频率大于20%的只有建平站,其他46个站发生频率均较低(0%~10%)。

1981–1990年间,轻度冷害发生频率均较低(0%~10%);中度冷害发生频率为10%~20%的有西丰、新宾2个站,其他48个站发生频率均较低(0%~10%);重度冷害发生频率为10%~20%和大于20%的只有建平站,其他49个站发生频率均较低(0%~10%)。

1991–2000年间,轻度冷害发生频率为10%~20%和大于20%的均只有建平站,其他49个站发生频率均较低(0%~10%);中度冷害发生频率为10%~20%的只有建平站,其他49个站发生频率均较低(0%~10%);50个站的重度冷害发生频率均较低(0%~10%)。

2001–2010年间,轻度冷害发生频率为10%~20%的只有新宾站,其他49个站发生频率均较低(0%~10%);50个站的中度冷害发生频率均较低(0%~10%);重度冷害发生频率为10%~20%和大于20%的均只有建平站,其他49个站发生频率均较低(0%~10%)。

5个年代际中,辽宁省50个站点平均轻度、中度和重度障碍型冷害发生频率最高的年代均为1971–1980年,平均轻度和中度障碍型冷害发生频率最低的年代为1991–2000年,平均重度障碍型冷害发生频率最低的为1961–1970年。水稻障碍型冷害发生范围主要分布在辽宁西部和东北部地区,其他大部地区冷害发生频率均较低。

冯喜媛等(2013)研究认为,东北地区孕穗期障碍型冷害存在明显阶段性变化,而辽宁省的阶段性变化不明显。本文通过对5个年代际辽宁省50个气象站发生水稻障碍型冷害的平均频率分析发现(图4),1971–1980年水稻障碍型冷害发生频率最高,1981–2000年呈现下降趋势,但2001年以后发生频率上升、且范围又呈现扩大趋势,障碍型冷害发生存在着不确定性。

#### 4.2 障碍型冷害发生规律的气候变化事实

对辽宁省气候变化事实进行分析发现,近50年

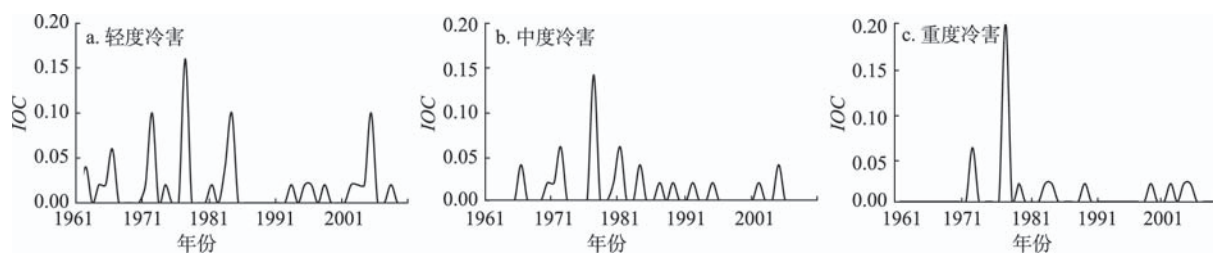


图2 不同等级水稻冷害IOC变化曲线

Fig. 2 IOC change curve of rice cold damage in different grades

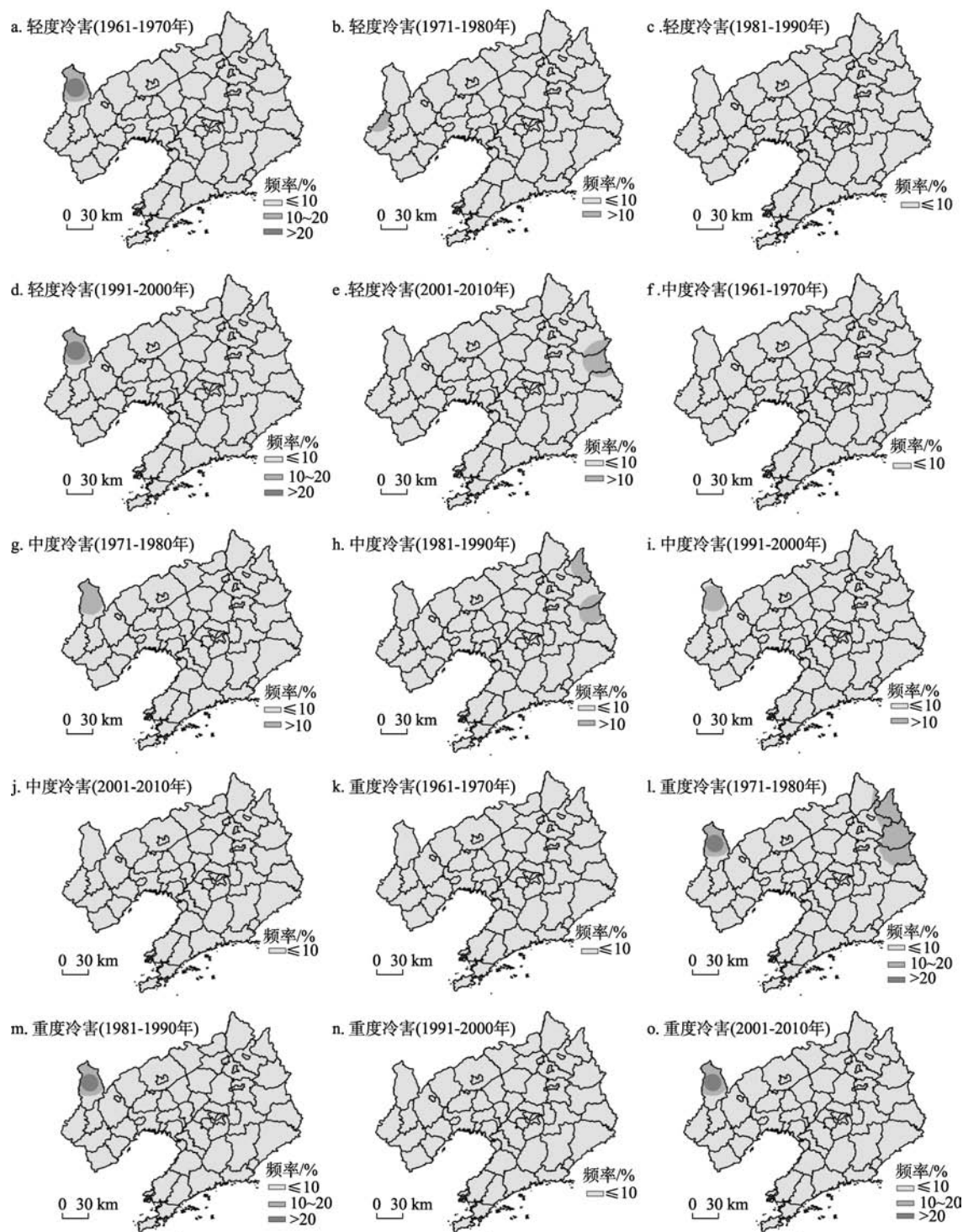


图3 不同年代际水稻冷害发生频率空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the occurrence frequency of rice cold damage in different decades

来辽宁省年平均气温以 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率上升(龚强等, 2013), 20世纪90年代年平均气温升幅达 $0.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ (纪瑞鹏等, 2007); 气候变暖的同时, 夏季低温冷害现象仍时有发生, 2006、2007年连续两年7月和2009年8月出现了大面积低温现象(龚强等,

2013)。统计1961–2010年5–9月辽宁省平均气温和(图5, 表2), 发现5个年代际中, 1971–1980年的5–9月平均气温和最低, 为 $100.0^{\circ}\text{C}$ ; 这与1971–1980年水稻障碍型冷害发生频率最高的结论一致。1981年以后, 随着时间变化5–9月平均气温和呈现

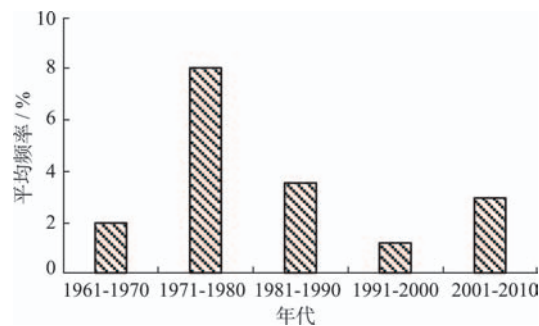


图4 1961–2010年水稻冷害发生频率  
Fig.4 Occurrence frequency of rice cold damage  
from 1961 to 2010

增加趋势,1991–2000年增温趋势最显著,相对应水稻障碍型冷害发生频率最低;2001–2010年5–9月平均气温和最高,达105.2℃,但该年代由于夏季发生了大面积低温事件,导致障碍型冷害的发生频率和范围增加。

4.3 RSCDI在预报中的应用

利用辽宁50个气象站2011–2014年8月1–20日的逐日平均气温作为预报初始量,模拟预报RSCDI及其低温冷害等级。根据预报值划分水稻

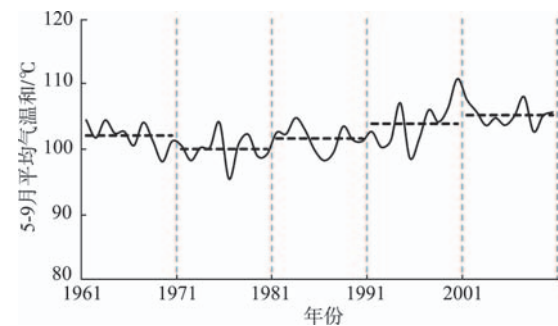


图5 5–9月平均气温和的年代际变化  
Fig.5 Decadal change of mean monthly temperature from  
May to September

表2 不同年代际5-9月平均气温和/℃  
Tab.2 Decadal mean monthly temperature from May to  
September/℃

年代际	1961– 1970年	1971– 1980年	1981– 1990年	1991– 2000年	2001– 2010年
5-9月平均 气温和	102.1	100.0	101.6	103.9	105.2

障碍型低温冷害等级,辽宁省仅建平县在2012年和2014年水稻开花期发生中度障碍型冷害(表3)。

表3 2011–2014年开花期RSCDI预报值(以建平县为例)  
Tab.3 Rice RSCDI predictive values and grades in flowering stages from 2011 to 2014  
(using Jianping County as an example)

日期	$S(t)$	SD	RSCDI	日期	$S(t)$	SD	RSCDI	日期	$S(t)$	SD	RSCDI	日期	$S(t)$	SD	RSCDI
2011/8/1	0.91	0	1	2012/8/1	0.39	1	1	2013/8/1	0.99	0	1	2014/8/1	1.00	0	1
2011/8/2	0.78	0	1	2012/8/2	0.38	2	1	2013/8/2	0.98	0	1	2014/8/2	1.00	0	1
2011/8/3	0.83	0	1	2012/8/3	0.73	0	1	2013/8/3	0.98	0	1	2014/8/3	0.98	0	1
2011/8/4	0.90	0	1	2012/8/4	0.61	0	1	2013/8/4	1.00	0	1	2014/8/4	0.47	1	1
2011/8/5	0.93	0	1	2012/8/5	0.70	0	1	2013/8/5	0.98	0	1	2014/8/5	0.59	0	1
2011/8/6	0.83	0	1	2012/8/6	0.82	0	1	2013/8/6	1.00	0	1	2014/8/6	0.68	0	1
2011/8/7	0.87	0	1	2012/8/7	0.94	0	1	2013/8/7	0.98	0	1	2014/8/7	0.59	0	1
2011/8/8	0.86	0	1	2012/8/8	0.85	0	1	2013/8/8	0.95	0	1	2014/8/8	0.75	0	1
2011/8/9	0.97	0	1	2012/8/9	0.80	0	1	2013/8/9	0.89	0	1	2014/8/9	0.87	0	1
2011/8/10	0.80	0	1	2012/8/10	0.93	0	1	2013/8/10	0.94	0	1	2014/8/10	0.82	0	1
2011/8/11	0.95	0	1	2012/8/11	0.75	0	1	2013/8/11	1.00	0	1	2014/8/11	0.72	0	1
2011/8/12	0.95	0	1	2012/8/12	0.23	1	1	2013/8/12	0.91	0	1	2014/8/12	0.49	1	1
2011/8/13	0.90	0	1	2012/8/13	0.30	2	1	2013/8/13	0.94	0	1	2014/8/13	0.20	2	1
2011/8/14	0.76	0	1	2012/8/14	0.34	3	0.53	2013/8/14	0.99	0	1	2014/8/14	0.40	3	0.67
2011/8/15	0.27	1	1	2012/8/15	0.60	0	1	2013/8/15	1.00	0	1	2014/8/15	0.48	4	0.73
2011/8/16	0.68	0	1	2012/8/16	0.67	0	1	2013/8/16	0.98	0	1	2014/8/16	0.59	0	1
2011/8/17	0.65	0	1	2012/8/17	0.85	0	1	2013/8/17	0.99	0	1	2014/8/17	0.50	1	1
2011/8/18	0.56	0	1	2012/8/18	0.85	0	1	2013/8/18	0.70	0	1	2014/8/18	0.27	2	1
2011/8/19	0.56	0	1	2012/8/19	0.69	0	1	2013/8/19	0.59	0	1	2014/8/19	0.67	0	1
2011/8/20	0.78	0	1	2012/8/20	0.69	0	1	2013/8/20	0.58	0	1	2014/8/20	0.89	0	1



## 5 结论与讨论

利用 *RSCDI* 分析辽宁省 1961–2010 年水稻障碍冷害的时间变化规律,发现:1961–2010 年 50 年间,有 20 年发生了局部轻度冷害,14 年发生了局部中度冷害,10 年发生了局部重度冷害。利用 *RSCDI* 分析辽宁省 1961–2010 年水稻障碍冷害的空间变化规律,发现:5 个年代际中,辽宁省 50 个站点的轻度、中度和重度障碍型冷害发生频率最高的年代均为 1971–1980 年,轻度和中度障碍型冷害发生频率最低的年代为 1991–2000 年,重度障碍型冷害发生频率最低的年代为 1961–1970 年。水稻障碍型冷害发生范围主要分布在辽宁西部和东北部地区。利用 *RSCDI* 预报辽宁省 2011–2014 年水稻障碍型低温冷害等级,发现仅建平县在 2012 年和 2014 年水稻开花期发生了中度障碍型冷害。

5 个年代际中,水稻障碍型冷害发生频率随着 5–9 月平均气温和的增加呈降低趋势。1971–1980 年 5–9 月平均气温和最低,水稻障碍型冷害发生频率最高;1991–2000 年 5–9 月平均气温和增加显著,水稻障碍型冷害发生频率最低;2001–2010 年间,尽管 5–9 月平均气温和为 5 个年代际中最高,但由于夏季发生了大面积低温事件,水稻障碍型冷害却呈现出发生频率上升和范围扩大的趋势,使得两者的变化趋势与其他年代际不一致。随着气候变暖,冷害发生的频率和范围虽有一定程度的下降,但由于低温异常事件的出现,辽宁省水稻障碍型冷害的发生仍存在着不确定性。

第五次 IPCC 报告指出,1880–2012 年全球地表平均温度大约升高了  $0.85^{\circ}\text{C}$ ,1983–2012 年是过去 1400 年来最热的 30 年,中国气候变暖趋势与全球一致。1913 年以来,中国地表平均温度上升了  $0.91^{\circ}\text{C}$ ,21 世纪前 10 年是近百年来最暖的 10 年;其中,最大增温区在华北和东北地区。目前,气候变化对水稻生产影响的研究已成为全球变化研究中的重要课题之一(张帅等, 2012)。气候变暖使低温事件发生的频率降低,冷害的影响也相应地降低(方修琦等, 2005);东北水稻大范围延迟型冷害发生频率降低,但由于气候异常事件频发,今后仍然会出现水稻生长季偏冷的阶段和年份(袁祝香等, 2014),水稻障碍型冷害呈现频繁而且严重的趋势(马树庆, 2011)。相对于气候平均状况,极端气候对作物的影响更大(郝志新等, 2011)。因此,针对水稻

障碍型冷害指数的研究应随气候变化和种植品种、区域的改变进行相应调整。

以往在监测和预警低温冷害时,通常采用不同程度冷害等级对应的温度和持续天数指标,很少有定量描述,而且水稻生育期及原有监测指标的阈值可能随气候变暖发生变化(王品等, 2014)。因此,建立一个能定量描述低温冷害的动态监测指标对于农业气象灾害的预警预报有着十分重要的意义。王艳华等(2013)定义了持续低温指数(CCDI),表述为统计年内(一年或一个季节年)至少连续 3 天日最低温度低于该日多年日最低温度平均值  $3^{\circ}\text{C}$  的总日数,考虑了用温度和持续天数评价低温事件,认为东北地区 1961–2005 年的年、季 CCDI 均呈减少趋势,但不同季节降低幅度不同,其中冬季降低幅度最大,夏季最小;而在 2001–2005 年,年、季 CCDI 均有所升高,这与本文得出的“夏季水稻障碍型冷害的发生存在着不确定性,在 2001–2010 年呈现上升趋势”的结论具有一致性。但 CCDI 是描述季节内或年内是否发生极端低温事件的指标,并未具体考虑到农作物生长发育特性,不能用作水稻障碍型冷害预报和评估的指标。本文基于温度适宜度,综合考虑日平均温度、低温持续日数、三基点温度对水稻生长发育的影响,构建的水稻障碍型冷害指数,具有可量化评估和可预报性的特点。考虑到水稻障碍型冷害指数的适用性,大范围应用还需要从指数等级划分和阈值范围等方面进一步验证。

## 参考文献(References)

- 陈书强, 杨丽敏, 赵海新, 等. 2012. 寒地水稻低温冷害防御技术研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 43(6): 693–698. [Chen S Q, Yang L M, Zhao H X, et al. 2012. Advances in prevention and control technique of low temperature injury of rice in cold region[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 43(6): 693–698.]
- 丁士晟. 1980. 东北地区夏季低温的气候分析及其对农业生产的影响[J]. 气象学报, 38(3): 234–242. [Ding S S. 1980. The climatic analysis of low temperature in summer over the Northeast China and influence for agricultural product [J]. Acta Meteorologica Sinica, 38(3): 234–242.]
- 方修琦, 王媛, 朱晓禧. 2005. 气候变暖的适应行为与黑龙江省夏季低温冷害的变化[J]. 地理研究, 24(5): 664–672. [Fang X Q, Wang Y, Zhu X X. 2005. Change of cool summer hazard under an adaptation behavior to the climate warming in Heilongjiang Province, Northeast China[J].

- Geographical Research, 24(5): 664-672.]
- 冯喜媛, 郭春明, 陈长胜, 等. 2013. 基于气象模型分析东北三省近50年水稻孕穗期障碍型低温冷害时空变化特征[J]. 中国农业气象, 34(4): 462-467. [Feng X Y, Guo C M, Chen C S, et al. 2013. Spatial-temporal variation of sterile-type chilling damages at rice booting stage in Northeast China in last 50 years based on meteorological model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 34(4): 462-467.]
- 龚强, 汪宏宇, 张运福, 等. 2013. 辽宁省气候变化及其对极端天气气候的影响[J]. 生态学杂志, 32(6): 1525-1531. [Gong Q, Wang H Y, Zhang Y F, et al. 2013. Climate change and its impacts on extreme climate events in Liaoning Province of Northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 32(6): 1525-1531.]
- 郭建平, 马树庆. 2009. 农作物低温冷害监测预测理论和实践[M]. 北京: 气象出版社, 38-39. [Guo J P, Ma S Q. 2009. Nongzuowu diwen lenghai jiance yuce lilun he shijian [M]. Beijing: Meteorological Press, 38-39.]
- 郭建平, 田志会, 左旭. 2004. 东北地区水稻热量指数预测模型[J]. 自然灾害学报, 13(3): 138-145. [Guo J P, Tian Z H, Zuo X. 2004. Forecasting models of heat index for rice in Northeast China[J]. Journal of Natural Disasters, 13(3): 138-145.]
- 郝志新, 郑景云, 葛全胜, 等. 2011. 中国南方过去400年的极端冷冬变化[J]. 地理学报, 66(11): 1479-1485. [Hao Z X, Zheng J Y, Ge Q S, et al. 2011. Variations of extreme cold winter events in Southern China in the past 400 years[J]. Acta Geographica Sinica, 66(11): 1479-1485.]
- 胡春丽, 李辑, 林蓉, 等. 2014. 东北水稻障碍型低温冷害变化特征及其与关键生育期温度的关系[J]. 中国农业气象, 35(3): 323-329. [Hu C L, Li J, Lin R, et al. 2014. Characters of sterile-type chilling damage in rice and its relationship with temperature at key growth stage in Northeast China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 35(3): 323-329.]
- 纪瑞鹏, 张玉书, 冯锐, 等. 2007. 辽宁省农业气候资源变化特征分析[J]. 资源科学, 29(2): 74-82. [Ji R P, Zhang Y S, Feng R, et al. 2007. Analyzing the changing characteristics of agricultural climate resources in Liaoning Province[J]. Resources Science, 29(2): 74-82.]
- 姜丽霞, 季生太, 李帅, 等. 2010. 黑龙江省水稻空壳率与孕穗期低温的关系[J]. 应用生态学报, 21(7): 1725 - 1730. [Jiang L X, Ji S T, Li S, et al. 2010. Relationships between rice empty grain rate and low temperature at booting stage in Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 21(7): 1725 - 1730.]
- 姜丽霞, 李帅, 申双和, 等. 2010. 近46 a黑龙江水稻障碍型冷害及其与气候生产力的关系[J]. 大气科学学报, 33(3): 315-320. [Jiang L X, Li S, Shen S H, et al. 2010. Sterile-type cool injury on rice and its relationship with climate productivity in Heilongjiang Province from 1961 to 2006 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 33(3): 315-320.]
- 姜丽霞, 李帅, 闫平, 等. 2009. 黑龙江水稻孕穗期障碍型冷害及其对产量的影响[J]. 中国农业气象, 30(3): 463-468. [Jiang L X, Li S, Yan P, et al. 2009. Sterile type cool injury of rice during booting stage and its impacts on rice yield in Heilongjiang Province [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 30(3): 463-468.]
- 刘晓菲, 张朝, 帅嘉冰, 等. 2012. 黑龙江省冷害对水稻产量的影响[J]. 地理学报, 67(9): 1223-1232. [Liu X F, Zhang Z, Shuai J B, et al. 2012. Effect of chilling injury on rice yield in Heilongjiang Province[J]. Acta Geographica Sinica, 67(9): 1223-1232.]
- 马树庆, 王琪, 王春乙, 等. 2011. 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, 30(5): 931-938. [Ma S Q, Wang Q, Wang C Y, et al. 2011. Climate risk and economy vulnerability of rice chilling damage and division in Northeast China[J]. Geographical Research, 30(5): 931-938.]
- 曲辉辉, 姜丽霞, 朱海霞, 等. 2011. 孕穗期低温对黑龙江省主栽水稻品种空壳率的影响[J]. 生态学杂志, 30(3): 489-493. [Qu H H, Jiang L X, Zhu H X, et al. 2011. Effects of low temperature at booting stage on the percentage of unfilled grains of major rice varieties in Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 30(3): 489-493.]
- 阮仁超, 陈惠查, 游俊梅, 等. 2007. 籼型杂交水稻低温障碍型耐冷性研究[J]. 西南农业学报, 20(6): 1157-1161. [Ru-an R C, Chen H C, You J M, et al. 2007. Characteristics of cold tolerance in Indica hybrid rice varieties with low temperature obstruction[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 20(6): 1157-1161.]
- 王品, 魏星, 张朝, 等. 2014. 气候变暖背景下水稻低温冷害和高温热害的研究进展[J]. 资源科学, 36(11): 2316-2326. [Wang P, Wei X, Zhang Z, et al. 2014. A review of cold injury and heat damage to rice growth under global warming[J]. Resources Science, 36(11): 2316-2326.]
- 王艳华, 任传友, 刘刚, 等. 2013. 东北地区不同季节持续低温指数时空变化特征及其对区域温暖化的响应[J]. 资源科学, 35(5): 1016-1023. [Wang Y H, Ren C Y, Liu G, et al. 2013. The consecutive cold day index and its response to regional warming in Northeastern China[J]. Resources Sci-



- ence, 35(5): 1016-1023.]
- 袭祝香, 马树庆, 纪玲玲. 2014. 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, 33(7): 1373-1382. [Xi Z X, Ma S Q, Ji L L. 2014. Spatial-temporal characteristics of prolong-type rice chilling damage and its relationship with climate change in Northeast China[J]. Geographical Research, 33(7): 1373-1382.]
- 张帅, 陶福禄. 2012. 水稻发育期模型研究进展[J]. 地理科学进展, 31(11): 1485-1491. [Zhang S, Tao F L. 2012. Review of research on rice phenology models[J]. Progress in Geography, 31(11): 1485-1491.]
- 中国气象局. 2013. QX/T 182-2013 水稻冷害评估技术规范[S]. 北京: 气象出版社. [China Meteorological Administration. 2013. QX/T 182-2013 technical specifications for evaluation of rice cool damage[S]. Beijing: China Meteorological Press.]
- Shimono H. 2011. Earlier rice phenology as a result of climate change can increase the risk of cold damage during reproductive growth in northern Japan[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 144(1): 201-207.

## Construction and application of Rice Sterile-type Cold Damage Index in cold area: A case study of Liaoning Province

Ji Ruipeng, YU Wenying, FENG Rui, WU Jinwen, ZHANG Yushu

(Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110166, China)

**Abstract:** Temperature and consecutive cold days are commonly used to evaluate rice sterile-type cold damage in Northeast China. In order to realize quantitative evaluation and prediction, it is necessary to construct a comprehensive index of sterile-type cold damage using multiple factors. Based on a temperature suitability model, temperature and consecutive cold days, and considering the effects of three fundamental points temperature on rice's growing process, this study constructed the rice sterile-type cold damage index (RSCDI) by using the data of daily mean temperature and rice growth period in recent 50 years in Liaoning Province. It then analyzed the occurrence tendency of rice sterile-type cold damage, and forecast cold damage in Liaoning Province with RSCDI. The results are as follows: (1) During the 50 years from 1961 to 2010, local light cold damage happened in 20 years, local moderate cold damage occurred in 14 years, local severe cold damage occurred in 10 years, and there was no occurrence of regional and large scale cold damage; (2) The highest frequency of cold damage was in the 1970s. The frequency decreased from 1981 to 2000, and the lowest frequency of cold damage was in the 1990s. But there was an increasing trend after 2001. Cold damage mainly occurred in the western and northeastern parts of Liaoning Province. With climate warming, the frequency decreased to some extent, but the occurrence of rice sterile-type cold damage was uncertain in Liaoning Province; (3) The forecast of rice sterile-type cold damage in Liaoning Province from 2011 to 2014 using RSCDI shows that cold damage will not appear in most areas, but in Jianping County moderate damage may occur in the flowering period in 2012 and 2014.

**Key words:** rice; sterile-type cold damage; index; variation; Liaoning Province