

马树庆, 袁祝香, 马力文, 等. 2015. 北方水稻低温冷害指标持续适用性检验与比较. 气象, 41(6): 778-785.

# 北方水稻低温冷害指标持续适用性 检验与比较<sup>\*1</sup>

马树庆<sup>1</sup> 袁祝香<sup>1</sup> 马力文<sup>2</sup> 李秀芬<sup>3</sup> 陈淑华<sup>4</sup> 王 琪<sup>5</sup> 张淑杰<sup>6</sup>

1 吉林省气象台, 长春 130062

2 宁夏回族自治区气象科学研究所, 银川 750004

3 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150010

4 内蒙古自治区气象科学研究所, 呼和浩特 010000

5 吉林省气象科学研究所, 长春 130062

6 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016

**提 要:** 农业气象指标的可持续适用性检验与比较, 对提升农业气象业务能力意义重大。应用北方地区代表县(市)1960—2010年逐日气温资料和历年水稻产量资料, 计算冷害温度指标界定水稻冷害发生的正确率, 对中国北方水稻延迟型冷害和障碍型冷害常用的指标进行应用效果检验, 并比较适用性差异。结果表明, 界定水稻延迟型冷害的5—9月气温指标稳定适用, 正确率达到78%左右, 可持续性好; 积温差额指标也比较稳定, 可以继续应用; 但是积温距平指标判定冷害的正确率较低, 多数地方不宜继续使用。界定水稻障碍型冷害的日平均气温、日最低气温及其持续时间指标比较稳定可靠, 多数县(市)可以继续应用, 但少数县市应暂停使用; 日最低气温指标界定冷害的正确率略高于日平均气温指标。多年来, 这些指标尽管要素和原理不变, 但在适用性及可持续性方面存在一定的年代和区域差异, 应选择使用并及时修订过时的指标, 以适应气候变化和水稻栽培。

**关键词:** 粳稻, 冷害指标, 可持续适用性, 检验与比较, 北方地区

**中图分类号:** P456

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.06.013

## Test and Comparison of Sustainable Suitability of Meteorological Indicators for Rice Cold Damages in the North of China

MA Shuqing<sup>1</sup> XI Zhuxiang<sup>1</sup> MA Liwen<sup>2</sup> LI Xiufen<sup>3</sup> CHEN Shuhua<sup>4</sup>  
WANG Qi<sup>5</sup> ZHANG Shujie<sup>6</sup>

1 Jilin Meteorological Observatory, Changchun 130062

2 Institute of Meteorological Science of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750004

3 Institute of Meteorological Science of Heilongjiang Province, Harbin 150010

4 Institute of Meteorological Science of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010000

5 Institute of Meteorological Science of Jilin Province, Changchun 130062

6 Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016

**Abstract:** The test and comparison of sustainability and suitability of agricultural meteorological index is very meaningful for improving agricultural meteorological operations. This paper counts the accuracy of defining rice cold damage with meteorological indicators in different ages by using the daily air temperature data in 1960—2010 and rice yield data from representative stations in the north of China. The application

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306036)资助

2014年5月20日收稿; 2014年11月9日收修定稿

第一作者: 马树庆, 主要从事农业气象研究和决策气象业务工作. Email: jlmassq@aliyun.com

effect of rice cold damage indicators for elayed growth-type and sterile-type is tested, and their differences are compared. The results show that the accuracy of May to September temperature indexes for defining the delay growth-type cold damage is around 78%, and the index is stable, showing good sustainability, and the accumulated temperature difference index is stable too, able to continue to apply. However, the accuracy of accumulated temperature anomaly index of elayed-type cold damage significantly is lower, not suitable to continue to use in most regions. For most of the representative counties, the indicators of daily average temperature, daily lowest temperature and its duration when defining the sterile-type cold damage are applicable at the present stage, but the accuracy is low in a few counties and they should susped using, but the accuracy of lowest temperature indicator is slightly higher than the daily average temperature indicator. The elements and mechanism of these indicators have not changed, but their stability and sustainability have differences in regions and ages, so the indicators should be used selectively and revised timely to adapt to climate change and rice cultivation.

**Key words:** japonica rice, cold damage indicators, sustainable suitability, test and comparison, the north of China

## 引 言

我国北方水稻为单季粳稻,主产区在东北三省和西北宁夏灌区,内蒙古和新疆也有小范围种植。这些稻区具备生长季光照充足、雨热同季和灌浆期长等有利条件,但常年气温不高,积温不足,易发生水稻低温冷害(王颖等,2013)。水稻生长季出现持续性低温,生长发育和灌浆成熟缓慢,则发生延迟型冷害;生殖生长期出现短期强低温天气,生殖生长活动受阻,结实率下降,则发生障碍型冷害。由于水稻生长发育和产量形成对温度条件反应敏感,因此北方水稻冷害减产幅度较大,严重冷害年减产 15% 以上,部分县(市)产量损失过半(马树庆等,2011)。

水稻冷害指标是用温度条件界定水稻是否发生冷害及其冷害程度的量化指标。该类指标是基于水稻生长和结实对环境温度反应原理,通过试验研究和历史数据统计分析提炼出来的,是水稻气象服务最基本的科学依据。国内外在水稻低温生理和冷害指标等方面的研究已有多年历史。内导立郎(1980)、Hayase(1976)、Satake(1976)自 20 世纪 70 年代初较为系统地研究了低温对水稻幼穗分化、开花和结实的影响,初步揭示了低温影响水稻结实的原理和关键时期(孕穗期和开花期),为水稻冷害指标研究奠定了基础。我国学者在 20 世纪 70 年代末也开始了水稻低温生理、冷害指标及其应用研究,其中,何维勋等(1979)、丁士晟(1980)、胡芬(1981)、孙玉亭等(1983)、李达模等(1986)和王书裕(1995)等老一代农业气象专家在 20 世纪 80 年代前后通过试

验研究和历史产量-温度数据的统计分析,揭示了气温、积温等热量条件与水稻生长、结实和产量的关系,总结出的水稻延迟性冷害 5—9 月温度指标和障碍型冷害日平均气温指标至今仍被部分的采用,或作为冷害指标的基本要素。近十多年来, Tokita 等(1995)、Hiroyuki 等(2005)、Nakazono 等(2001)、王连敏等(2004)、郭建平等(2009)、马树庆等(2000; 2003)、姜丽霞等(2009)、许莹等(2014)、李霞等(2006)和张全武等(2003)分别采用人工低温控制试验和统计及模拟等方法进一步开展了水稻低温反应和冷害气象指标的研究,并建立了低温对水稻结实影响的评估模式;霍治国等(2009)、马树庆等(2013)对传统水稻冷害指标进行了改进,界定了水稻早、中、晚熟品种区域的冷害指标,编制了水稻冷害等级和损失评估气象行业标准。崔锦等(2007)分析了作物冷害形成的天气气候和环流条件,认为东北水稻冷害和夏季低温与极涡、副热带高压和下垫面有关。

尽管水稻冷害的低温生理机制、冷害指标和冷害区域格局在一定年代内具有相对稳定性,但经过年代际的时间演变后,在全球气候变化和现代农业背景下,低温对水稻生长、结实的影响参数会有明显的变化,水稻冷害指标的适用性也会相应地发生改变,因此需要每隔 5~10 年对水稻冷害指标的适用性进行检验,分析各类冷害指标的适用性变化和效果差异,为及时修订指标、完善指标体系和选用适宜指标提供依据,进而提升水稻生产气象服务能力和冷害防御能力。本文通过统计分析,检验北方稻区几种常用冷害指标的持续适用性,并研讨提升冷害认定准确率途径。

# 1 资料与方法

## 1.1 研究区域概况

研究区域包括东北三省、内蒙古自治区和宁夏回族自治区中北部灌区,隶属于大陆性温带季风气候区,区域内无霜期和水稻主要生长季的温度等条件相近(表 1), $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温  $2900^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  左右,无霜期 145 d 左右,热量条件决定当地水稻为一熟制。水稻栽培均采用塑料棚育苗、机械或人工插秧、水渠灌溉,施肥和病虫害防控等管理措施也相同,各地都存在延迟型和障碍型水稻冷害。

## 1.2 代表点选择及资料

采用水稻种植面积比例较大、冷害较频繁、且产量序列相对较长的 19 个县(市)为代表(见表 5)。因水稻主产县(市)不集中,因此代表点地理分布并不均匀,吉林省和黑龙江省东部水稻主产县(市)较多,且冷害较重,水稻品种类型多样,因此选点较多;黑龙江省北部和内蒙古中西部水稻种植面积小、产量序列短,辽宁西南部无水稻冷害(马树庆等,2011;王书裕,1995),因此这些区域没有选点;辽宁选择北部两个市代表晚熟品种区,内蒙古选择东部两个旗代表中熟和早熟区;宁夏水稻产区在中北部黄灌区,地理范围较小、各县(市)水稻生产条件相同,因此仅选择永宁一个县。采用代表地气象站的气温和统计局单产资料,其中东北三省和宁夏资料年限为 1960—2010 年,内蒙古水稻栽培历史较短,年限为 1990—2010 年。

## 1.3 检验方法

根据水稻实际单产( $y_a$ )计算代表县(旗、市)水稻的趋势单产( $y_b$ )、气象单产( $y_c$ )和产量变率( $y_d$ , 单位:%)。  $y_c = y_a - y_b$ ,  $y_d = y_c / y_b \times 100$ 。根据各地水稻产量序列变化特征,用滑动平均或多项式方法计算趋势产量。北方水稻栽培采用水利灌溉,自

然光照充足,因此水稻产量丰歉以及是否发生冷害主要取决于生长季温度条件。根据相关文献(郭建平,2009)和标准(马树庆等,2013),规定产量变率  $y_d \geq -5\%$  为非冷害年,  $-5\% > y_d \geq -10\%$  为轻度冷害,  $-10\% > y_d \geq -15\%$  为中度冷害,  $y_d < -15\%$  为严重冷害。气象指标界定的冷害与实际对比,统计用冷害指标界定冷害发生与否的正确率( $f$ ),  $f = \text{正确年数} / \text{总年数} \times 100$ 。用典型冷害年温度和产量变率数据检验用冷害等级指标界定冷害发生等级的效果。 $f$  值越大,表明冷害指标比较客观和科学,可以延续使用;反之,冷害指标不易继续使用,应废止或修订。

## 1.4 冷害指标

待检验指标为研究区域多年常用的几种水稻延迟型和障碍型冷害指标。这些指标多是近十多年来在传统的冷害指标基础上修订或改进而成。这些冷害指标明确了水稻品种区域差异,使一套指标可适用于不同农业气候区域;明确了前期冷害和全生长季冷害的指标差异;冷害等级由一般冷害和严重冷害 2 级修订为轻、中、重度冷害 3 级。

### 1.4.1 延迟型冷害指标

5—9 月温度指标( $\Delta T_{5-9}$ )即是 5—9 月各月平均气温之和的距平值,为水稻全生长季延迟型冷害界定指标之一,  $\Delta T_{5-9} = \sum T_i - K_{5-9}$ ,  $\sum T_i$  是 5—9 月各月平均气温之和,  $K_{5-9}$  是其多年平均值(取 30 年平均,下同)。待检验的  $\Delta T_{5-9}$  指标见表 2。

$\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温距平( $\Delta T_{10}$ )即是当年  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温与其多年平均值的差值,也是水稻全生长季延长型冷害年的界定指标。马树庆等(2011;2013)根据生长季积温与水稻成熟和产量的关系,确定当年  $\Delta T_{10} < -70^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  为水稻冷害发生阈值,其冷害等级界定标准为:轻度冷害:  $-70^{\circ}\text{C}\cdot\text{d} > \Delta T_{10} \geq -100^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ; 中度冷害:  $-100^{\circ}\text{C}\cdot\text{d} > \Delta T_{10} \geq$

表 1 北方水稻主要生长时期、温度条件及水稻品种类型

Table 1 The main rice growth period, temperature and planting variety type in North China

省(区)	播种 普遍期	移栽 普遍期	抽穗 普遍期	成熟 普遍期	年平均气温 / $^{\circ}\text{C}$	$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动 积温/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$	无霜期 /d	水稻品种 熟型
黑龙江	4月15—22日	5月18—28日	8月3—4日	9月17—22日	2~5	2100~2900	120~150	早熟、中熟
吉林	4月12—20日	5月15—28日	8月3—5日	9月17—24日	2~6	2100~3150	120~160	早、中、晚熟
辽宁	4月15—25日	5月15—25日	8月4—5日	9月18—24日	5~8	3000~3400	150~165	晚熟
内蒙古东部	4月13—23日	5月15—28日	8月3—5日	9月17—22日	2~6	2150~2900	130~150	早、中熟
宁夏灌区	4月15—27日	5月18—30日	8月4—5日	9月18—24日	6~9	2850~3500	150~170	晚熟

表 2 5—9 月温度指标 ( $\Delta T_{5-9}$ , 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )  
Table 2 Indexes of temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) from May to September

品种区域	早熟品种区		中熟品种区		晚熟品种区	
$K_{5-9}$	$\leq 83.0$	83.1~88.0	88.1~93.0	93.1~98.0	98.1~103.0	$\geq 103.0$
轻度冷害	-1.0~-1.4	-1.3~-1.8	-1.6~-2.0	-1.8~-2.5	-2.4~-3.0	-2.8~-3.5
中度冷害	-1.5~-2.0	-1.9~-2.2	-2.1~-2.6	-2.6~-3.2	-3.1~-3.8	-3.6~-4.2
严重冷害	$< -2.0$	$< -2.2$	$< -2.6$	$< -3.2$	$< -3.8$	$< -4.2$

$-120^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ; 严重冷害:  $\Delta T_{10} < -120^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。

$\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温差额 ( $\Delta \sum T_{10}$ ) 即水稻某生长阶段稳定  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温与水稻同期所需的  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温的差值。不同水稻品种区域两个生长时期的  $\Delta \sum T_{10}$  指标见表 3。其中水稻发育期为普遍期, 即 50% 的水稻出现该发育期的日期。

表 3  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温差额指标 ( $\Delta \sum T_{10}$ , 单位:  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ )

Table 3 Indexes of the accumulated temperature difference  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta \sum T_{10}$ , unit:  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ )

生长阶段	轻度冷害			中度冷害			严重冷害		
	晚熟区	中熟区	早熟区	晚熟区	中熟区	早熟区	晚熟区	中熟区	早熟区
移栽—抽穗	-61~-70	-51~-60	-40~-50	-71~-80	-61~-70	-50~-60	$< -80$	$< -70$	$< -60$
移栽—成熟	-71~-80	-61~-70	-50~-60	-81~-90	-71~-80	-60~-70	$< -90$	$< -80$	$< -70$

表 4 障碍型冷害的日平均气温和日最低气温指标

Table 4 Sterile-type cold damage indicators for daily average temperature and daily lowest temperature

指标类型	早熟区		中熟区		晚熟区	
	孕穗期*	开花期*	孕穗期	开花期	孕穗期	开花期
日平均气温	连续 2 d $\leq 16^{\circ}\text{C}$	连续 3 d $\leq 18^{\circ}\text{C}$ , 或连续 2 d $\leq 17^{\circ}\text{C}$	连续 2 d $\leq 17^{\circ}\text{C}$	连续 3 d $\leq 19^{\circ}\text{C}$ , 或连续 2 d $\leq 18^{\circ}\text{C}$	连续 2 d $\leq 17.5^{\circ}\text{C}$	连续 3 d $\leq 19.5^{\circ}\text{C}$ , 或连续 2 d $\leq 18.5^{\circ}\text{C}$
日最低气温	连续 2 d $\leq 14^{\circ}\text{C}$	连续 3 d $\leq 15^{\circ}\text{C}$ , 或连续 2 d $\leq 14^{\circ}\text{C}$	连续 2 d $\leq 15^{\circ}\text{C}$	连续 3 d $\leq 16^{\circ}\text{C}$ , 或连续 2 d $\leq 15^{\circ}\text{C}$	连续 2 d $\leq 15.5^{\circ}\text{C}$	连续 3 d $\leq 16.5^{\circ}\text{C}$ , 或连续 2 d $\leq 16^{\circ}\text{C}$

注: 孕穗期间为抽穗前 20 d 内, 开花期间为抽穗后 10 d 内(马树庆等, 2013)。

## 2 结果与分析

### 2.1 冷害指标界定冷害发生与否的正确率

统计水稻冷害发生与否涉及到水稻发育期。水稻发育期观测数据仅有 20 世纪 90 年代以来的, 年限较短, 本文根据适宜插秧期和成熟期气象指标(王书裕, 1995), 规定日平均气温稳定通过  $13^{\circ}\text{C}$  为插秧期, 日平均气温稳定低于  $14^{\circ}\text{C}$  为成熟期。水稻生长季温度的时间变化规律、水稻生长节律和近 20 多年的观测资料都表明, 早熟品种区水稻移栽晚、成熟早, 晚熟品种区移栽早、成熟晚, 但两者抽穗期差异很小(表 1)。根据相关成果(郭建平等, 2009)和近 20 年观测数据, 本文确定早、中、晚熟品种区水稻普遍抽穗期分别为 8 月 3、4 和 5 日。代表县(市)冷害指标界定水稻冷害发生与否的正确率( $f$ )如表 5, 归纳如下:

### 1.4.2 障碍型冷害指标

水稻障碍型冷害出现在孕穗和开花两个时期, 常用指标有孕穗(开花)期间日平均气温指标和日最低气温指标, 并考虑低温持续时间(表 4)。受资料和冷害年样本限制, 障碍型冷害指标检验仅区分水稻主栽品种区域, 没有考虑冷害等级。

(1) 5—9 月温度指标 ( $\Delta T_{5-9}$ ) 界定延迟型冷害的正确率。前 30 年(1960—1989 年, 下同)各代表县(市)平均为 81.2%, 近 21 年(1990—2010 年, 下同)为 78.3%, 51 年平均为 79.8%, 正确率较高, 且年代变化较小, 说明该指标起码未来 5 年可以延续使用。但该指标界定冷害的正确率存在区域差异, 宁夏永宁、内蒙古索伦和吉林蛟河分别达到 90% 左右, 但宝清、清原、乌兰浩特和前郭等县(市)仅为 75% 左右, 相对较低。

(2)  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温距平 ( $\Delta T_{10}$ ) 界定延迟型冷害的正确率。前 30 年各代表地平均为 76.6%, 近 21 年为 73.5%, 1960—2010 年 51 年平均为 74.4%, 尽管比较稳定, 但总体正确率不高, 各地的正确率较 5—9 月温度指标低 5%, 且泰来、通河、宝清等地正确率不足 70%, 说明多数县市不宜继续使用该指标。其原因主要是气候变化导致北方地区稳定通过  $10^{\circ}\text{C}$  的初日年变率加大, 导致积温年变化不稳定。

表 5 代表县(市)不同年代各类冷害气象指标界定水稻冷害年的正确率(单位:%)

Table 5 Accuracy of defining rice cold damage with meteorological indicators in difference ages in the representative counties/cities (unit: %)

类型		延迟型冷害												障碍型冷害											
		$\Delta T_{5-9}$			$\Delta T_{10}$			$\Delta \sum T_{10}$						孕穗期						开花期					
冷害指标	年代*	A	B	C	A	B	C	移栽—抽穗			移栽—成熟			日平均气温			日最低气温			日平均气温			日最低气温		
		黑龙江	依兰	78	71	83	70	72	69	74	81	72	76	76	76	70	76	69	68	71	66	66	71	62	64
	泰来	70	80	66	68	72	66	72	81	66	72	81	66	76	81	72	76	81	72	78	81	76	76	81	72
	通河	84	81	86	64	62	66	78	81	76	90	86	93	80	86	90	86	86	86	80	81	79	86	90	83
	虎林	78	81	76	68	67	69	71	76	69	76	71	79	76	71	79	72	71	76	76	81	72	73	71	72
	宝清	70	71	71	66	62	76	74	71	79	72	76	72	81	76	86	77	81	72	77	81	76	72	81	76
吉林	九台	81	76	84	81	76	84	72	76	69	72	76	69	72	76	69	79	76	82	72	67	68	81	76	83
	前郭	76	76	76	72	67	76	69	76	66	69	76	66	76	66	70	76	67	93	95	91	70	71	70	78
	蛟河	90	81	98	78	76	80	75	76	75	78	81	75	70	76	65	82	91	78	77	76	78	72	81	64
	梅河口	81	81	81	74	86	68	81	86	77	84	86	81	76	76	76	86	95	77	79	81	80	81	90	72
	永吉	79	81	77	85	81	89	79	81	77	76	81	69	79	81	77	88	81	92	71	77	69	88	81	92
	安图	75	71	79	76	62	87	71	81	62	73	90	57	63	62	64	63	52	74	63	67	60	73	67	79
	龙井	84	76	91	70	67	72	80	81	81	80	86	74	70	67	73	78	67	88	71	76	66	71	71	71
	琿春	83	76	89	74	67	79	70	76	65	74	76	72	74	76	72	76	81	71	69	81	58	69	71	68
	延吉	83	76	88	81	76	84	76	71	80	81	71	90	67	57	77	78	76	79	67	62	72	72	76	68
辽宁	开原	78	76	79	76	81	72	70	71	69	70	71	69	71	71	69	70	71	68	74	76	72	70	71	70
	清原	76	81	72	74	71	76	72	81	66	72	81	66	72	81	66	72	81	66	70	76	66	70	76	65
宁夏	永宁	91	95	85	89	90	89	93	96	91	89	92	90	69	76	64	85	82	87	65	76	59	88	88	88
内蒙古	索伦		86		90			71			86			90			81			71			90		
	乌兰浩特		71		71			70			70			68			67			67			71		
	平均	79.8	78.3	81.2	74.4	73.5	76.6	75.1	78.1	72.9	76.7	79.6	74.3	72.7	74.8	72.6	78.0	78.2	77.9	72.6	74.7	69.6	75.9	78.6	74.1

\* 年代:A: 1960—2010年, B: 1990—2010年, C: 1960—1989年。

(3)  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温差额( $\Delta \sum T_{10}$ )界定生长季延迟型冷害的正确率。移栽至抽穗期积温差额指标的平均正确率,前 30 年为 72.9%,近 21 年为 78.1%。移栽至成熟期积温差额指标平均正确率,前 30 年前后为 74.3%,近 21 年为 79.6%。两类指标均比较稳定,正确率较高,但地区差异较大,永宁和梅河口等县(市)也达到 80%以上,但虎林、宝清等少数县(市)仅达到 70%左右。移栽至成熟积温差额指标的正确率高于插秧至抽穗的,界定延迟型冷害时考虑的时期越长,涵盖的积温和生长信息越多(郭建平, 2009)。但前期冷害监测预警时效好,有利于采取防灾措施,因此这两套指标不能相互代替。该套指标近 21 年正确率较前 30 年提升近 5%,未来 5 年可以持续使用。

(4) 孕穗期障碍型冷害界定的正确率。日均气温指标界定孕穗期冷害,前 30 年和近 21 年正确率分别为 72.6%和 74.8%,平均为 72.7%;日最低气温指标,前 30 年正确率为 77.9%,近 21 年为 78.2%,平均为 78.0%。两类指标都比较稳定,但地区差异也较大,索伦、宝清和通河等县(市)正确率达到 80%以上,多数县(市)在 75%以上,界定冷害效果较好,可以继续使用,但乌兰浩特、安图、依兰等

县(旗、市)仅达到 70%左右,个别县(市)在 65%左右,适用效果不好,应停止使用,及时探究原因和修订。此类指标近 21 年界定冷害正确率较前 30 年略有提升,未来 5 年多数县(市)可以使用。日最低气温指标界定冷害的正确率各阶段都比日均气温指标高 5%左右,判定冷害效果更好,因此开展孕穗期障碍型冷害监测、预警业务易首选日最低气温指标。

(5) 开花期障碍型冷害界定的正确率。日平均气温指标界定花期冷害,前 30 年和近 21 年各代表地正确率平均值分别为 69.6%和 74.7%,历年平均为 72.6%;日最低气温指标,前后两段时期正确率分别为 74.1%和 78.6%,历年平均为 75.9%。两类指标正确率的地区差异都较大,通河、泰来、梅河口等县(市)达到 80%左右,界定冷害效果较好,可以继续使用,但乌兰浩特、延吉、琿春和依兰等县(市)仅为 70%左右,效果不佳,应暂停使用。此类指标在近年修订时考虑到气候变化和品种情况,因此近 21 年正确率较前 30 年有明显提升,多数县(市)未来 5 年可继续使用,其中日最低气温界定花期冷害的正确率比日均气温的高 4%,效果更好。

## 2.2 冷害等级指标适用效果检验

冷害等级检验的标准是,气象等级指标界定的

冷害等级与实际冷害等级相同的为正确,记为 1;两者相差一个级别的为半对,记为 0.5;相差两个级别或相反的为错误,记为 0。代表县市典型冷害年  $\Delta T_{5-9}$  指标界定水稻冷害等级的正确率较高(表 6),各代表地平均为 77.8%。1964、1969、1972 和 1976 年东北地区和宁夏发生大范围严重水稻冷害事件为

冷害年,多数县(市)指标判定结果与实际相符;对于 1995 和 2009 年这样的区域冷害年,正确率有所下降。这表明,用修订后的  $\Delta T_{5-9}$  指标界定水稻冷害等级是稳定可靠的,未来 5 年以上可以继续使用。但是,该指标应用效果的地域差异也是较明显的,珲春、蛟河等县(市)检验效果较差。

表 6 典型年延迟型冷害等级指标 ( $\Delta T_{5-9}$ ) 检验结果

Table 6 Test results of grade indicators of elayed-type cold damage ( $\Delta T_{5-9}$ ) on typical years

县(市)	典型年	1964	1969	1972	1976	1995	2009	正确率/%
依兰	$\Delta T_{5-9}$	-5.1 ***	-7.7 ***	-5.9 ***	-2.6 ***	-0.4 #	0.3 #	91.7
	$y_d\%$	-10 **	-31 ***	-45 ***	-29 ***	10 #	6 #	
	对/错	※	√	√	√	√	√	
通河	$\Delta T_{5-9}$	-3.3 ***	-5.9 ***	-6.9 ***	-4.2 ***	-0.6 #	0.4 #	100
	$y_d\%$	-25 ***	-28 ***	-36 ***	-31 ***	4 #	-3 #	
	对/错	√	√	√	√	√	√	
泰来	$\Delta T_{5-9}$	-2.9 **	-7.5 ***	-5.7 ***	-3.6 **	-1.2 #	1.1 #	83.3
	$y_d\%$	16 #	-37 ***	-26 ***	-12 **	3 #	-3 #	
	对/错	×	√	√	√	√	√	
虎林	$\Delta T_{5-9}$	-5.8 ***	-7.8 ***	-4.9 ***	-2.4 ***	0.2 #	-0.4 #	66.7
	$y_d\%$	-5 *	-19 ***	-7 *	-15 ***	-4 #	-9 *	
	对/错	×	√	※	√	√	※	
宝清	$\Delta T_{5-9}$	-6.1 ***	-7.7 ***	-3.8 ***	-3.2 ***	0.4 #	0 #	83.3
	$y_d\%$	-45 ***	-26 ***	-1 #	-33 ***	31 #	3 #	
	对/错	√	√	×	√	√	√	
九台	$\Delta T_{5-9}$	-2.9 **	-6.6 ***	-7.1 ***	-5.4 ***	-2.1 *	2.2 #	66.7
	$y_d\%$	-5 *	-39 ***	-54 ***	-38 ***	-1 #	-26 ***	
	对/错	※	√	√	√	※	×	
前郭	$\Delta T_{5-9}$	-2.9 ***	-6.6 ***	-6.1 ***	-4.1 ***	-0.1 #	1.4 #	75.0
	$y_d\%$	-3 #	-26 ***	-68 ***	-30 ***	-9 *	-2 #	
	对/错	×	√	√	√	※	√	
蛟河	$\Delta T_{5-9}$	-2.7 **	-5.6 ***	-5.0 ***	-3.7 ***	-3.0 ***	0.6 #	66.7
	$y_d\%$	-7 *	-25 ***	-45 ***	-38 ***	-13 **	-16 ***	
	对/错	※	√	√	√	※	×	
梅河	$\Delta T_{5-9}$	-1.3 *	-6.8 ***	-6.2 ***	-4.8 ***	-3.7 ***	1.0 #	83.3
	$y_d\%$	-7 *	-27 ***	-38 ***	-19 ***	-20 ***	-6 *	
	对/错	√	√	√	√	√	×	
安图	$\Delta T_{5-9}$	-2.3 **	-5.6 ***	-4.5 ***	-4.2 ***	-3.2 ***	-0.7 #	66.7
	$y_d\%$	1 #	-37 ***	-16 ***	-33 ***	-28 ***	-28 ***	
	对/错	×	√	√	√	√	×	
龙井	$\Delta T_{5-9}$	-0.8 #	-3.8 ***	-2.5 **	-2.4 **	-3.7 ***	-0.4 #	75.0
	$y_d\%$	2 #	-21 ***	-16 ***	-10 **	-16 ***	-28 ***	
	对/错	√	√	※	√	√	×	
珲春	$\Delta T_{5-9}$	-1.9 *	-3.4 ***	-2.7 *	-2.0 *	-0.6 #	0.4 #	58.3
	$y_d\%$	7 #	-12 **	-5 *	-9 *	-9 *	-42 ***	
	对/错	※	※	√	√	※	×	
开源	$\Delta T_{5-9}$	-1.2 #	-5.6 ***	-6.1 ***	-7.1 ***	-4.4 ***	1.1 #	91.7
	$y_d\%$	3 #	-29 ***	-35 ***	-12 **	-35 ***	-5 #	
	对/错	√	√	√	※	√	√	
清原	$\Delta T_{5-9}$	-1.2 #	-6.4 ***	-6.0 ***	-4.3 ***	-4.2 ***	1.2 #	91.7
	$y_d\%$	-8 *	-20 ***	-35 ***	-23 ***	-44 ***	-2 #	
	对/错	※	√	√	√	√	√	
永宁	$\Delta T_{5-9}$	-1.2 *	1.7 #	-3.3 ***	-3.8 ***	-4.8 ***	1.9 #	66.7
	$y_d\%$	13 #	-16 ***	-17 ***	-63 ***	-11 **	-1 #	
	对/错	※	×	√	√	※	√	

注:\*\*\*:重冷害,\*\*:中冷害,\* :轻冷害,# :无冷害,√:对,※:半对,×:错。

表 7 典型年延迟型冷害指标 ( $\Delta T_{10}$ ) 检验结果  
 Table 7 Test results of grade indicators of elayed-type cold damage ( $\Delta T_{10}$ ) in typical years

县(市)	典型年	1964	1969	1972	1976	1995	2009	正确率/%
依兰	$\Delta T_{10}$	-133 ***	-496 ***	-376 ***	-43 #	30 #	88 #	75.0
	$y_d\%$	-10 **	-31 ***	-45 ***	-29 ***	10 #	6 #	
	对/错	※	√	√	×	√	√	
通河	$\Delta T_{10}$	-58 *	-318 ***	-353 ***	-77 ***	-155 ***	177 #	66.7
	$y_d\%$	-25 ***	-28 ***	-36 ***	-31 ***	4 #	-3 #	
	对/错	×	√	√	√	×	√	
泰来	$\Delta T_{10}$	10 #	-532 ***	-423 ***	-145 ***	-153 ***	194 #	75.0
	$y_d\%$	16 #	-37 ***	-26 ***	-12 **	3 #	-3 #	
	对/错	√	√	√	※	×	√	
虎林	$\Delta T_{10}$	-154 ***	-477 ***	-314 ***	-77 ***	63 #	177 #	66.7
	$y_d\%$	-5 *	-19 ***	-7 *	-15 ***	-4 #	-9 *	
	对/错	×	√	※	√	√	※	
宝清	$\Delta T_{10}$	-177 ***	-503 ***	-166 ***	-84 ***	59 #	0 #	83.3
	$y_d\%$	-45 ***	-26 ***	-1 #	-33 ***	31 #	3 #	
	对/错	√	√	×	√	√	√	
九台	$\Delta T_{10}$	-205 ***	-247 ***	-531 ***	-283 ***	-147 ***	131 #	50.0
	$y_d\%$	-5 *	-39 ***	-54 ***	-38 ***	-1 #	-26 ***	
	对/错	×	√	√	√	×	×	
前郭	$\Delta T_{10}$	-193 ***	-235 ***	-486 ***	-201 ***	-73 *	135 #	83.3
	$y_d\%$	-3 #	-26 ***	-68 ***	-30 ***	-9 *	-2 #	
	对/错	×	√	√	√	√	√	
蛟河	$\Delta T_{10}$	-18 #	-358 ***	-304 ***	-59 #	-261 ***	179 #	50.0
	$y_d\%$	-7 *	-25 ***	-45 ***	-38 ***	-13 **	-16 ***	
	对/错	※	√	√	×	※	×	
梅河	$\Delta T_{10}$	-101 ***	-490 ***	-461 ***	-179 ***	-143 ***	139 无	66.7
	$y_d\%$	-7 *	-27 ***	-38 ***	-19 ***	-20 ***	-6 *	
	对/错	×	√	√	√	√	×	
安图	$\Delta T_{10}$	-11 #	-468 ***	-205 ***	-19 #	-199 ***	171 #	66.7
	$y_d\%$	1 #	-37 ***	-16 ***	-33 ***	-28 ***	-28 ***	
	对/错	√	√	√	×	√	×	
龙井	$\Delta T_{10}$	-92 ***	-470 ***	-126 ***	-129 ***	-155 ***	99 #	58.3
	$y_d\%$	2 #	-21 ***	-16 ***	-10 **	-16 ***	-28 ***	
	对/错	×	√	√	※	√	×	
珲春	$\Delta T_{10}$	-154 ***	-190 ***	4.7 #	-69 *	-78 **	157 #	41.7
	$y_d\%$	7 #	-12 **	-5 *	-9 *	-9 *	-42 ***	
	对/错	×	※	※	√	※	×	
开源	$\Delta T_{10}$	-111 ***	-291 ***	-562 ***	-422 ***	-302 ***	105 #	75.0
	$y_d\%$	3 #	-29 ***	-35 ***	-12 **	-35 ***	-5 #	
	对/错	×	√	√	※	√	√	
清原	$\Delta T_{10}$	-35 #	-524 ***	-485 ***	-194 ***	-193 ***	107 #	91.7
	$y_d\%$	-8 *	-20 ***	-35 ***	-23 ***	-44 ***	-2 #	
	对/错	※	√	√	√	√	√	
永宁	$\Delta T_{10}$	-32 #	38 #	-87 ***	-174 ***	-147 ***	102 #	75.0
	$y_d\%$	13 无	-16 ***	-17 ***	-63 ***	-11 **	-1 #	
	对/错	√	×	√	√	※	√	

注: \*\*\*: 重冷害, \*\*: 中冷害, \*: 轻冷害, #: 无冷害, √: 对, ※: 半对, ×: 错。

代表县(市)典型冷害年  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温距平指标 ( $\Delta T_{10}$ ) 界定水稻冷害等级的正确率较低(表 7), 各代表地平均为 67.9%, 远低于 5—9 月温度指标, 且有部分县市不足 60%。该指标仅对 1969、1972 和 1976 年这样特别严重的冷害年和多数无冷害年的判定是正确的, 而对于其他年份的判定多是不准确的。这表明, 气候变化背景下, 界定冷害等级的

$\Delta T_{10}$  指标使用效果明显下降, 不宜继续使用, 或需要修订, 在今后一段时期的相关业务科研工作中, 应该使用  $\Delta T_{5-9}$  指标。

### 3 结论与讨论

(1) 两类水稻全生育期延迟型冷害指标适用性

差异较大。1960—2010年 $\Delta T_{5-9}$ 指标判定冷害的正确率为79.8%,效果较好; $\Delta T_{10}$ 指标的正确率为74.4%,应用效果较差。今后在认定全生长季水稻延迟型冷害时,应首选 $\Delta T_{5-9}$ 指标。这两类指标在界定水稻冷害等级时,正确率分别为78%和68%左右,表明随着气候变化,积温距平指标不宜继续使用,今后应采用 $\Delta T_{5-9}$ 指标。

(2) 考虑水稻发育期的延迟型冷害指标都具有持续适用性。移栽—抽穗期和移栽—成熟期积温差额指标界定冷害的平均正确率都在75%以上,且近21年应用效果较1990年前有所提升,因此未来5年可以持续使用。这两个指标时效不同,因此不能相互代替。

(3) 两套障碍型冷害指标多数县市均可继续使用,但少数县(市)应停用。对于孕穗期冷害,日平均气温指标和日最低气温指标的多年平均正确率分别为76.7%和78.2%。对于开花期障碍型冷害,两者分别为72.6%和78.6%。由于指标经过修订,近21年孕穗和开花期障碍型冷害指标应用效果较1990年前略有提升。不论是孕穗期还是开花期,日最低气温指标界定冷害的正确率均比日均气温的高,且最低温度预报值容易通过数值预报获得,因此更适用于冷害预报。

选择适宜的指标是冷害监测评估准确与否的关键。此外,要提升冷害监测评估的精度,还需要注意以下问题:一是积温问题。适当考虑塑料育苗期间低于10℃积温可以提高积温指标的实用性。二是发育期问题。积温差额指标界定水稻冷害需要发育期资料,而发育期观测容易出现误差,因此应严格执行观测规范,且应设固定观测人员。三是水稻品种变化。气候变化可能使当地水稻品种熟区发生改变,因此冷害监测应随着当地主推品种的更换采用不同的指标。四是气象产量分解。各地水稻产量时间序列差异较大,不同气象产量分解方法结果存在较大差异(刘泽良,1982;房世波,2011),因此应根据当地产量序列特征采用合适的趋势产量处理方法。本文采用历史资料进行指标统计检验,因此发育期和品种等问题的处理难以做到十分准确和客观,而在今后水稻冷害监测评估业务中,各地在确定的地点、品种、发育期和生产管理情况下,选用适用性强的冷害指标判定水稻冷害发生与否及其发生等级,其效果必将较上述统计结果明显提升,各类冷害认定正确的概率都可到达80%以上,相关气象服务能力也将明显提升。

## 参考文献

崔锦,李辑,张爱忠,等.2007.东北夏季低温的研究进展.气象,33

(4):3-9.

- 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.气象学报,38(3):234-242.
- 郭建平,马树庆,等.2009.作物低温冷害监测理论与实践.北京:气象出版社,43-53.
- 房世波.2011.分离趋势产量和气候产量的方法探讨.自然灾害学报,20(6):13-18.
- 何维勋,罗中岑,郑俊生.1979.水稻花期低温冷害的模拟试验研究.农业气象,1(1):42-47.
- 胡芬.1981.水稻花期低温冷害的气象指标与机理.中国农业科学,(2):60-64.
- 霍治国,马树庆.2009.QX/T 101-2009:水稻、玉米冷害等级.气象出版社.
- 姜丽霞,李帅,闫平,等.2009.黑龙江省水稻孕穗期障碍型冷害及其对产量的影响.中国农业气象,30(3):463-468.
- 李达模,于新民,王洪春.1986.水稻开花期冷害机理与鉴定指标的研究.中国农业科学,19(2):12-17.
- 李霞,戴传超,程睿,等.2006.不同生育期水稻耐冷性鉴定及耐冷差异的生理机制.作物学报,32(1):76-83.
- 刘泽良.1982.关于产量序列趋势处理问题的探讨.气象,8(12):21-23.
- 马树庆,陈正洪,王琪,等.2013.QX/T 182-2013:水稻冷害评估技术规范.北京:气象出版社.
- 马树庆,王琪,沈享文,等.2003.水稻障碍型冷害损失评估及预测模型研究.气象学报,61(4):507-512.
- 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.地理研究,30(5):931-938.
- 马树庆,王琪,王连敏,等.2000.水稻花期低温不育评估模式试验研究.气象学报,58(增刊):954-960.
- 内岛立郎.1980.低温条件与水稻不育关系的探讨.李泽蜀,译.作物冷害译丛,(1):5-9.
- 孙玉亭,王书裕,杨永歧.1983.东北区作物冷害研究.气象学报,41(3):313-321.
- 王连敏,王立志,王春艳,等.2004.寒地水稻开花期低温对结实的影响.自然灾害学报,13(2):92-95.
- 王书裕.1995.作物低温冷害研究.北京:气象出版社,116-120.
- 王颖,王晓云,江志红,等.2013.中国低温雨雪冰冻灾害危险性评估与区划.气象,39(5):585-591.
- 许莹,马晓群,王晓东,等.2014.安徽省冬小麦春霜冻害气象指标的研究.气象,40(7):852-859.
- 张全武,元伟,耿万成,等.2003.决定宁夏灌区水稻丰歉年的温度关键期及其温度指标.中国农业气象,24(3):21-23.
- Hayase H.1976. Simple method for estimating the most sensitive period to cool-summer damage due to floral impotency of rice. Agr Horticulture, 51(1):641-645.
- Hiroyuki S, Toshihiro H, Masahisa M. 2005. Modeling spikelet sterility induced by low temperature in rice. Agronomy J, 97(6):1524-1536.
- Nakazono K, Inoue K. 2001. Estimation of young panicle length and cool injury of rice [*Oryza sativa*] using cumulative temperature. Japanese J Crop Sci, 70(2):247-254.
- Satake T. 1976. Determination of the most sensitive stage to sterile-type cool injury in rice plants. Res bull Nat Agr Exp Station, 113:1-43.
- Tokita H, Sasaki J, Itou O. 1995. Relation between sterility due to cool-summer damage and standing crop of rice [*Oryza sativa*] plant in 1993. Tohoku J Crop Sci, 38:13-14.