

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

袭祝香, 马树庆, 纪玲玲

(吉林省气象台, 长春 130062)

摘要: 利用水稻延迟型冷害分级指标和1951-2010年东北地区101个气象台站的逐日气温资料,采用累计距平、相关系数、气候倾向率、趋势系数等方法分析东北地区水稻延迟型冷害时空变化特征及其对气候变化的响应。结果表明:蒙东地区西部、吉林东部和黑龙江交界延迟型冷害出现的频率较大,辽宁中南部延迟型冷害出现的频率较小。东北地区严重冷害出现频率高于轻度冷害和中度冷害。轻度、中度、严重延迟型冷害都呈下降的趋势,特别在1994年后延迟型冷害呈快速下降的趋势,东北地区水稻延迟型冷害与气候变暖有着较好的对应关系,5-9月平均气温和延迟型冷害呈明显反相关,5-9月平均气温升高1℃,水稻延迟型冷害减少约45次。

关键词: 东北地区;水稻延迟型冷害;时空特征;气候变暖

DOI: 10.11821/dlj201407016

1 引言

中国东北三省和蒙东地区(以下简称东北地区)是中国水稻主产区之一,稻米品质好,深受消费者欢迎。东北地区光照较充足,水稻主要分布在有灌溉水源的区域,降水和日照对水稻产量影响较小,但水稻生长对温度条件较为敏感,加之东北地区常年气温不高,温度成为水稻生长的主要限制条件,如果生长季持续低温导致积温不足,使水稻生育期延迟,则发生延迟型冷害,产量损失可达到10%以上,1964年、1968年、1972年和1976等严重冷害年份,部分县市水稻单产下降30%以上。因此,水稻冷害的防御是当地农业生产的重要工作,水稻冷害的气候分析是气象为农服务的主要任务之一。

多年来,国内外对水稻冷害已有较多的研究,取得了一些成果。王书裕^[1,2]等于20世纪70-80年代就较系统地研究了低温对水稻的影响,初步建立了水稻冷害指标;沈亨文等建立了水稻孕穗期冷害评估方法^[3];马树庆等分析了水稻冷害的致灾因素^[4-6],建立了新的水稻冷害指标体系和冷害损失评估模式^[7,8];马树庆^[9-11]等开展了东北地区水稻冷害气候风险分析与区划;冯喜媛等^[12]基于气象模型分析了东北三省水稻障碍型冷害的时空变化特征。20世纪80年代以来气候变暖,一些学者对气候变暖背景下水稻低温冷害的影响进行了研究和分析^[13,14]。但对于东北地区在气候变暖背景下水稻低温冷害的变化及响应规律的研究成果较为少见。在气候变暖背景下,主要气候区划界线北移^[15],东北区水稻延迟型低温冷害的分布、变化规律怎样?与气候变暖的关系怎样的?本文在这些方面进行分析和研究,以揭示水稻冷害时空变化规律,以期在气候变化的情况下有的放矢地防御水稻低温冷害、调整农业产业结构提供有力的科学依据。

收稿日期: 2013-11-15; 修订日期: 2014-03-03

基金项目: 公益行业(气象)研究专项(GYHY201306036); 国家标准化项目“北方水稻冷害等级”

作者简介: 袭祝香(1963-),女,高级工程师,主要从事气象灾害评估研究和决策气象业务等工作。

E-mail: xzx6310@126.com

2 资料来源与研究方法

2.1 研究区概况

本文所指的东北地区包括辽宁省、吉林省、黑龙江省三省和蒙东地区（内蒙古自治区的东四盟），大致位于38°~54°N，115°~136°E之间。气象资料采用1951-2010年5-9月研究区域101个气象站逐日气温资料。站点选取考虑到资料连续、资料序列长、站点分布均匀和尽可能有水稻种植等因素。研究区域及站点分布见图1。

2.2 水稻延迟型冷害指标

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）中的水稻延迟型冷害指标^[16]。该指标以5-9月平均和的距平值作为冷害的划分指标，在不同的热量区域（早熟区、中熟区、晚熟区，即表1中5-9月平均气温和的多年平均值所对应的地区），冷害指标不同，具体指标见表1。表中 ΔT_{5-9} 为5-9各月平均气温之和的距平值， $\overline{\sum T_{5-9}}$ 为5-9月平均气温之和的多年平均值。利用该指标，首先根据 $\overline{\sum T_{5-9}}$ ，即5-9月平均气温之和的多年平均值确定早熟区、中熟区、晚熟区，然后再利用 ΔT_{5-9} 确定是否发生轻度、中度、严重冷害或没有冷害。该指标体系以5-9月平均气温高低为基础，将水稻延迟型冷害分为轻度、中度、严重三级，是适应现代水稻种植的延迟型冷害指标。

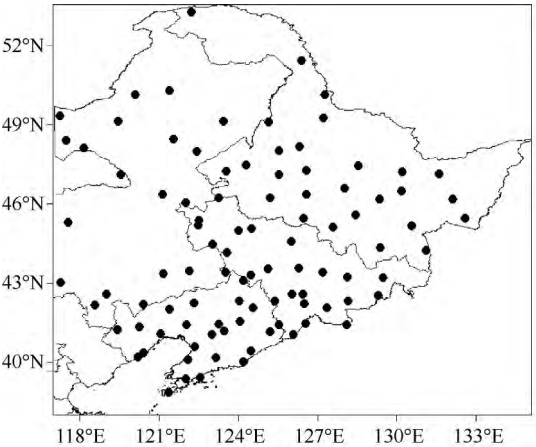


图1 东北地区水稻冷害分析站点分布图
Fig. 1 The site map of rice chilling damage analysis in Northeast China

表1 水稻延迟型冷害指标（℃）
Tab. 1 The index of prolong-type rice chilling damage（℃）

品种	区域	早熟区		中熟区		晚熟区	
$\sum T_{5-9}$	区域	≤83	83.1~88	88.1~93	93.1~98	98.1~103	≥103
轻度冷害指标 ΔT_{5-9}		-1.0~-1.4	-1.3~-1.8	-1.6~-2.0	-1.8~-2.5	-2.4~-3.0	-2.8~-3.5
中度冷害指标 ΔT_{5-9}		-1.5~-2.0	-1.9~-2.2	-2.0~-2.6	-2.5~-3.2	-3.0~-3.8	-3.5~-4.2
严重冷害指标 ΔT_{5-9}		< -2.0	< -2.2	< -2.6	< -3.2	< -3.8	< -4.2

利用研究区域代表站1961-2010年水稻产量资料，对这一冷害指标体系作进一步验证。评判条件是：5-9月平均气温之和的距平达到冷害指标，且实际减产率（即实际产量低于趋势产量的百分率，对于趋势产量一般采用实际产量的直线滑动平均值来计算。由于3年直线滑动平均值能较好地代表东北地区各地水稻的趋势产量，本文趋势产量采用实际产量的三年直线滑动平均值）在5%以上的为正确；5-9月平均气温之和的距平没有达到冷害指标，且产量为平或丰的也为正确；反之为错误。验证结果见表2，各县市验证正确率均在70%以上。实际的水稻生产受温度条件这一主导因素影响外，还与降水量、灌溉条件、病虫害和管理水平等有关，在这种情况下，该冷害指标对水稻减产的概括率大多在75%以上，说明表1水稻延迟型冷害指标是科学、准确的。

2.3 分析方法

水稻冷害与气候变暖的关系研究采用距平累计、相关分析等数理统计方法，进行趋

表2 水稻延迟型冷害指标和实际产量损失的验证正确率 (%)

Tab. 2 The validation accuracy of the index of prolong-type rice chilling damage and the actual yield loss (%)

站点	依兰	通河	虎林	宝清	九台	前郭	蛟河	梅河口
冷害指标检验正确率	78	84	84	70	81	76	90	81
站点	安图	龙井	珲春	延吉	开原	清原	索伦	乌兰浩特
冷害指标检验正确率	70	84	83	83	80	76	86	71

势分析时采用了计算趋势系数和气候倾向率的方法^[17]，具体如下：

要素的趋势变化通常用一元线性回归方程：

$$x_t = a + bt \quad t = 1, 2, \dots, n \text{ 为自然数列} \tag{1}$$

式中： t 表示时间； x_t 表示要素逐年值； b 称为气候倾向率； a 是常数； x_t 和 t 序列的相关系数 r 称为趋势系数，则气候倾向率：

$$b = r \times \sigma_x / \sigma_t \tag{2}$$

式中： σ_x 、 σ_t 分别是 x_t 和 t 序列的均方差。

3 结果分析

3.1 水稻延迟型冷害时空特征

3.1.1 空间分布特征 总的延迟型冷害（含轻度冷害、中度冷害、严重冷害）出现的频率：蒙东地区西部以及吉林东部和黑龙江交界延迟型冷害出现的频率较大，在40%以上，最多出现在蒙东地区的东乌珠穆沁旗，达51%，即基本有一半的年份都会出现延迟型冷害；辽宁中南部延迟型冷害出现的频率较小，在20%以下，最少出现在辽宁的熊岳和黑山，均为15%；辽宁大部、吉林西部大部、蒙东地区南部在20%~30%之间；其他地区在30%~40%之间（图2a）。

轻度延迟型冷害出现的频率：吉林中西部地区大部、蒙东地区东部和吉林西部交界地带在10%以上，最多出现在吉林的长岭，为16%；黑龙江北部、蒙东地区北部、辽宁西北部、吉林东南部在5%以下，吉林的东岗最少，没有出现过轻度延迟型冷害，出现频率为0；其他地区在5%~10%之间（图2b）。

中度延迟型冷害出现的频率：黑龙江北部、蒙东地区南部部分地方在10%以上，最多出现在蒙东地区的开鲁，为12%；黑龙江中部、辽宁大部、蒙东地区中部在5%以下，黑龙江的北安、通河、吉林的白城最少，没有出现过中度延迟型冷害，出现频率为0；其他地区在5%~10%之间（图2c）。

严重延迟型冷害出现的频率：蒙东地区西部、黑龙江中部以及黑龙江的绥芬河、吉林高寒山区的长白、靖宇、敦化等地在30%以上，最多出现在蒙东地区的额尔古纳右旗，为37%；辽宁中南部以及内蒙的开鲁、宝国图等地在10%以下，最少出现在辽宁的瓦房店，出现频率为4%；辽宁大部、吉林大部、蒙东地区南部在10%~20%之间；其他地区在20%~30%之间（图2d）。

从以上分析可以看出，东北地区各地出现的延迟型冷害，以严重延迟型冷害为主。计算严重延迟型冷害和轻、中度延迟型冷害之和的比值，接近80%的地区都在1.0以上，即严重延迟型冷害比轻、中度延迟型冷害之和还多。因此，东北地区如果出现延迟型低温冷害，则严重延迟型低温冷害出现的可能性较大，遭受严重损失的可能性较大，应引

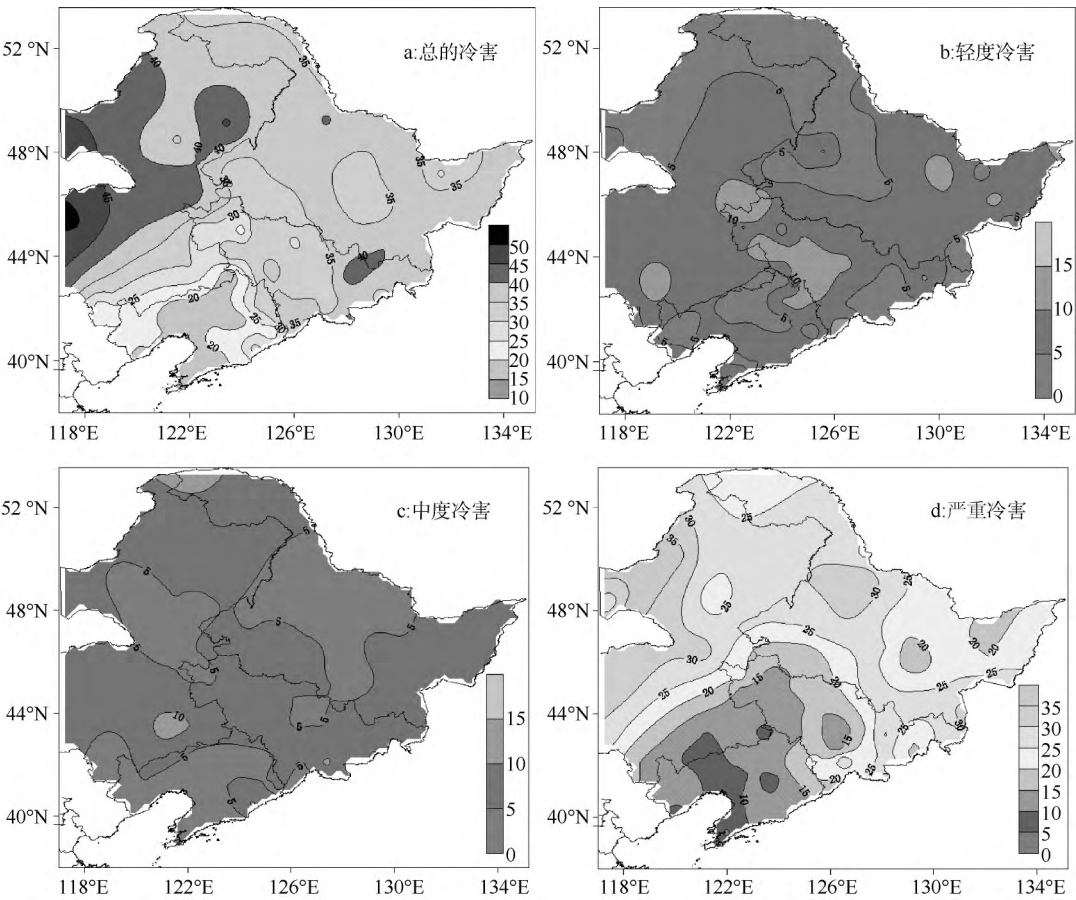


图2 1951-2010年东北地区各级水稻延迟型冷害出现频率（%）
Fig.2 The frequency of all levels prolong-type rice chilling damage during 1951- 2010 in Northeast China (%)

起重视。

3.1.2 时间变化特征

3.1.2.1 延迟型冷害的年代际变化

图3为研究区域内所选站点每年冷害发生次数的年际演变曲线，发现各级水稻延迟型冷害均呈逐年减少的趋势，尤其在1994年之后，减少尤为明显。

计算各级水稻延迟型冷害每年发生次数的气候倾向率和趋势系数（表3）。趋势系数都通过了0.01以上的置信度检验，可见水稻各级延迟型冷害都呈下降的趋势。水稻延迟型冷害每10a下降1.197次，其中严重冷害每10a下降0.91次；中度冷害每10a下降0.15次；轻度冷害每10a下降0.13次。

统计各级水稻延迟型冷害的年代际变化。总的看，水稻延迟型冷害的多发期为20世纪50年代，60年代、70年代和80年代下降。各级冷害发生情况有显著区别，严重冷害发生情况与上述趋势基本一致，但轻、中度冷害在50年代、60年代、70年代、80年代发生程度基本相近。到20世纪90年代后，各级水稻延迟型冷害都明显下降，本世纪10年代基本很少有延迟型冷害发生（表4）。

3.1.2.2 冷害时间变化的区域特征 为了了解东北地区延迟型冷害随时间变化程度的地域差别，计算各站出现延迟型冷害的气候倾向率和趋势系数。可以看出总的延迟型冷害各

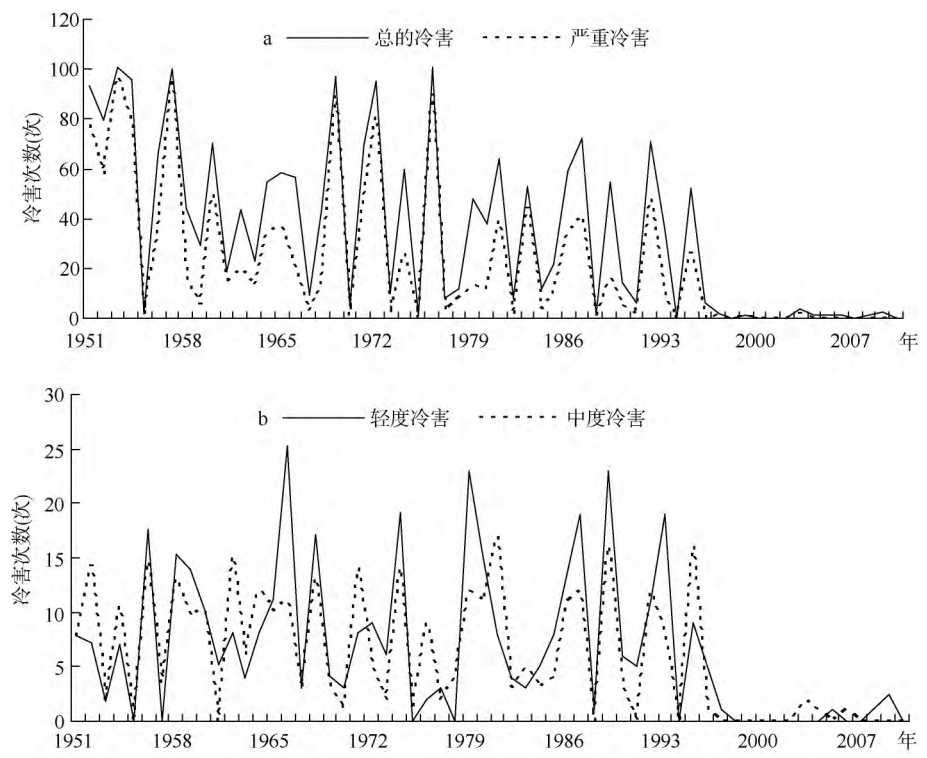


图3 东北地区水稻延迟型冷害的年际变化

Fig.3 Inter-annual variability of prolong-type rice chilling damage in Northeast China

表3 各级水稻延迟型冷害发生次数气候倾向率和趋势系数

	总的冷害	轻度冷害	中度冷害	严重冷害
气候倾向率(次/10a)	-1.197	-0.13	-0.15	-0.91
趋势系数	-0.62	-0.33	-0.46	-0.56
通过的置信度	0.001	0.01	0.001	0.001

表4 各年代各级水稻延迟型冷害平均发生次数（次）

	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010
总的冷害	68.0	40.9	44.2	36.0	17.4	1.1
轻度冷害	8.1	8.9	8.5	9.1	5.0	0.5
中度冷害	8.6	7.5	7.5	7.4	3.7	0.4
严重冷害	51.2	24.6	28.2	19.5	8.7	0.2

地都是下降趋势（图4a）。其中黑龙江中部、蒙东地区西北部下降趋势较大，每10a下降0.15次以上，下降幅度最大出现在蒙东地区的小二沟，每10a下降0.23次；辽宁以及蒙东地区南部、吉林南部、黑龙江北部下降幅度较小，每10a下降0.10次以下，最小出现在辽宁的章党 and 瓦房店，每10a下降0.01次；其他地区每10a下降0.10~0.15次。总的延迟型冷害的趋势系数也较大，绝大部分通过了0.05的置信度检验。

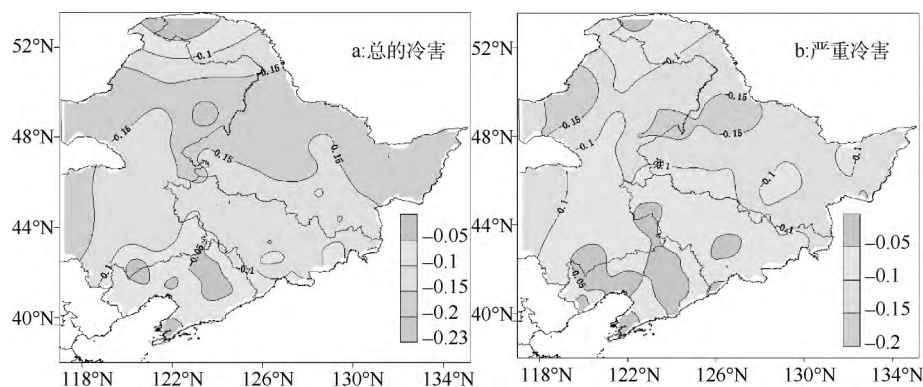


图4 各地延迟型冷害气候倾向率(次/10a)

Fig.4 The climatic trend rate of prolong-type rice chilling damage at various sites (events/10a)

严重延迟型冷害各地都是下降趋势(图4b)。其中黑龙江中部、蒙东地区西北部下降趋势较大,每10a下降0.10次以上,下降幅度最大出现在蒙东地区的额尔古纳右旗,每10a下降0.20次;辽宁大部以及蒙东地区南部、吉林西部和南部、黑龙江北部下降幅度较小,每10a下降0.05次以下,最小出现在辽宁的本溪,每10a下降0.01次;其他地区每10a下降0.05~0.10次。严重延迟型冷害的趋势系数绝大部分也都通过了0.05的置信度检验。

轻、中度延迟型冷害也都是下降的趋势,但下降的趋势较微弱,一般每10a下降0.01~0.05次,而且趋势系数大部分站没有通过0.1的置信度检验。

3.2 水稻延迟型冷害发生与气候变暖的关系

由于温室气体增加等原因,全球气候呈变暖的趋势,目前这一趋势仍然在继续。东北地区变暖较为明显,近100年来东北地区年平均气温增加了2℃,超出了全球和全国的增温幅度,是中国增温最显著的区域之一。冬季增温最为显著,近100年冬季气温上升了3.4℃,远远高于其他季节的增温幅度^[18]。夏季升温趋势达到0.15℃/10a^[19],热量资源增加^[20]。和延迟型冷害的发生关系密切的5-9月变暖趋势是怎样的?和延迟型冷害的减少是否有必然的联系?针对这些问题,以下对延迟型冷害与同期5-9月气温相关性进行探讨,分析延迟型冷害和东北地区气候变暖的关系。

3.2.1 水稻延迟型冷害下降趋势和5-9月气温上升趋势相反,呈明显的反相关 计算东北地区5-9月平均气温的气候倾向率和趋势系数,升温趋势达到0.21℃/10a,和东北地区延迟型冷害呈下降的趋势相对应,趋势系数达到了0.5862,通过0.001的置信度检验。

为了和不同地域延迟型冷害下降趋势对比,计算东北地区各地5-9月平均气温的气候倾向率和趋势系数。蒙东地区大部、黑龙江中部5-9月平均气温上升幅度较大,每10a上升0.30℃以上,蒙东地区的额尔古纳右旗上升幅度最大,达每10a上升0.61℃;辽宁大部、吉林东南部以及黑龙江北部上升幅度较小,每10a上升0.20℃以下,辽宁的章党上升幅度最小,每10a上升0.02℃;其他地区每10a上升0.20℃~0.30℃(图5)。而且绝大部分站点的趋势系数都通过了0.05的置信度检验。

由图5还可以看出,东北地区各地5-9月平均气温和图4延迟型冷害的气候倾向率有着较好的对应关系,延迟型冷害下降幅度大的地区是5-9月平均气温上升幅度大的地区,延迟型冷害下降幅度小的地区也是5-9月平均气温上升幅度小的地区。

计算5-9月平均气温和延迟型冷害发生次数的相关系数,发现无论总的延迟型冷害,

还是轻度、中度、严重冷害都呈明显的反相关(表5),且都通过了0.001的置信度检验。

将总的水稻延迟型冷害发生次数和5-9月平均气温建立一元回归方程,图6表示延迟型冷害随温度升高呈现减少的趋势,即5-9月平均气温升高1℃,水稻延迟型冷害减少约45次。

3.2.2 水稻延迟型冷害的阶段性变化与5-9月气温反位相 利用累计距平曲线来反映5-9月平均气温和延迟型冷害的阶段性变化(图7),可以看出5-9月平均气温和延迟型冷害的阶段性变化呈明显的反位相。从5-9月平均气温累计距平曲线看,1951-1976年为快速下降阶段,为冷期;

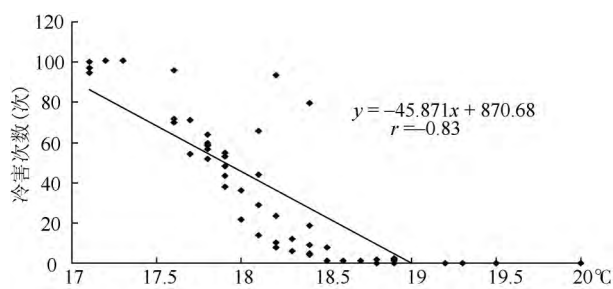


图6 东北地区5-9月平均气温和延迟型冷害的关系

Fig.6 The relationship between the average temperature from May to September and prolong-type rice chilling damage in Northeast China

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 蒙东地区以及吉林东部和黑龙江交界延迟型冷害出现的频率较大,在40%以上;辽宁中南部延迟型冷害出现的频率较小,在20%以下;其他地区在20%~40%之间。

(2) 东北地区轻度、中度、严重延迟型冷害都呈下降的趋势,特别在1994年后延迟型冷害呈急速下降的趋势。黑龙江中部、蒙东地区西北部延迟型冷害下降趋势较大,每10a下降0.15次以上;辽宁以及蒙东地区南部、吉林南部、黑龙江北部下降趋势较小,每10a下降0.10次以下;其他地区每10a

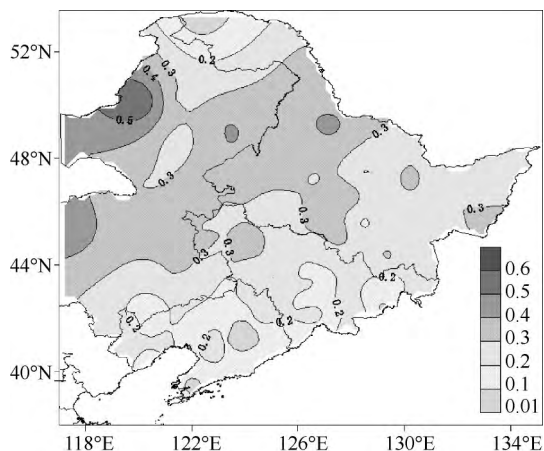


图5 各地5-9月平均气温气候倾向率(℃/10a)

Fig.5 The climatic trend rate of average temperature during 5 to 9 month in various sites(℃/10a)

1977-1993年虽也处于下降阶段,但下降速度趋缓,为冷期到暖期的转换阶段;1994-2010年则处于明显上升阶段,为暖期。从延迟型冷害发生次数累计距平曲线看,1951-1976年为冷害偏多阶段,冷害多发;1977-1993年为波动期,1994-2010年为冷害偏少阶段,冷害发生次数急剧减少。各阶段的平均气温以及冷害发生次数见表6。

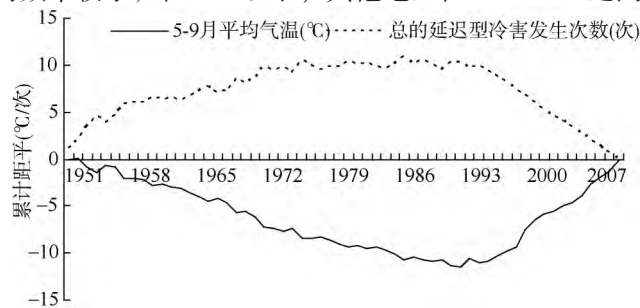


图7 东北地区5-9月平均气温和延迟型冷害累计距平曲线

Fig.7 The accumulative anomaly of the average temperature from May to September and prolong-type rice chilling damage events in Northeast China

表5 各级水稻延迟型冷害发生次数和5-9月平均气温的相关系数
Tab. 5 The correlation coefficient of prolong-type rice chilling damage events at all levels and average temperature from May to September

	总的冷害	轻度冷害	中度冷害	严重冷害
相关系数	-0.8300	-0.5048	-0.6042	-0.7444

表6 各阶段5-9月平均气温与延迟型冷害平均发生次数对比
Tab. 6 The comparison of the average temperature from May to September and the average number of prolong-type rice chilling damage events in different periods

	1951-1976	1977-1993	1994-2010
5-9月平均气温 (℃)	17.0	18.0	18.9
延迟型冷害平均次数 (次)	54.8	33.1	4.2

下降0.10~0.15次。

(3) 东北地区延迟型冷害与气候变暖有着较好的关系，主要表现在5-9月平均气温呈明显的变暖趋势，和延迟型冷害下降的趋势相反；5-9月平均气温和延迟型冷害呈明显的反相关，5-9月平均气温升高1℃，水稻延迟型冷害减少约45次；5-9月平均气温和延迟型冷害的阶段变化表现为明显的反位相。

4.2 讨论

本文采用了分级、分区域的新的水稻延迟型冷害指标体系，首次按照轻、中、重三个级别，分析了东北地区水稻延迟型冷害的时、空变化特征，并分析了延迟性冷害对气候变暖的响应，其部分结果较前人研究有新进展。但关于冷害地理分布的精细化及冷害时间变化的周期性分析尚待深入。

尽管随着气候变暖，东北地区水稻延迟型冷害呈逐年减少的趋势，但是当地水稻冷害以严重冷害为最多，即水稻对温度变化反应明显，一旦发生冷害，减产多是比较严重的，仍然要给予高度重视。近些年农民为了追求效益，水稻种植面积逐年加大，中、晚熟品种向北部和东部延伸的速度也在加快，如遇到低温年，冷害的经济损失将比以往更加严重。此外，气候变化背景下异常气候事件的不断增加，今后仍然会出现水稻生长季偏冷的阶段和年份。因此，虽然气候变暖了，水稻低温冷害仍然是东北地区主要农业气象灾害之一，在应对气候变化的时候，仍然要注意低温冷害的防御。

参考文献(References)

[1] 王书裕. 作物低温冷害研究. 北京: 气象出版社, 1995: 171-177. [Wang Shuyu. The Research Chilling Damages. Beijing: China Meteorological Press, 1995: 171-177.]

[2] 孙玉亭, 王书裕, 杨永歧. 东北区作物冷害研究. 气象学报, 1983, 41(3): 313-321. [Sun Yuting, Wang Shuyu, Yang Yongqi. The studies on cool summer and crop yield in Northeast China. Acta Meteorologica Sinica, 1983, 41(3): 313-321.]

[3] 沈亨文. 水稻减数分裂期冷害减产评估方法初步研究. 吉林气象, 1996, (4): 7-9. [Shen Henwen. Preliminary research on rice chilling injury production evaluation method of meiosis. Jilin Meteorology, 1996, (4): 7-9.]

[4] 马树庆, 王琪, 王连敏, 等. 水稻花期低温不育评估模式试验研究. 气象学报, 2000, 58(增刊): 954-960. [Ma Shuqing, Wang Qi, Wang Lianmin, et al. The experimental study of low temperature infertility evaluation pattern of rice flowering. Acta Meteorologica Sinica, 2000, 58(Supplement): 954-960.]

[5] 马树庆, 袁祝香, 王琪. 中国东北地区玉米低温冷害风险评估研究. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 137-141. [Ma Shuqing, Xi Zhuxiang, Wang Qi. Risk evaluation of cold damage to corn in Northeast China. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(3): 137-141.]

- [6] 马树庆, 王琪, 沈亨文, 等. 水稻障碍型冷害损失评估及预测模型研究. 气象学报, 2003, 61(4): 507-512. [Ma Shuqing, Wang Qi, Shen Henwen, et al. Model study on the evaluation and forecast of loss for sterile-type cool injury in rice plants. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(4): 507-512.]
- [7] 魏喜陆, 郑新峰. 三江平原腹地水稻低温冷害问题分析. 现代化农业, 2003, (3): 15-17. [Wei Xili, Zheng Xinfeng. The analysis of rice chilling damages in Sanjiang plain hinterland. *Modern Agriculture*, 2003, (3): 15-17.]
- [8] 王春乙. 重大农业气象灾害研究进展. 北京: 气象出版社, 2007: 263-277. [Wang Chunyi. *The Research Progress on the Major Agro-meteorological Disasters*. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 263-277.]
- [9] 马树庆, 王琪, 姜丽霞. 东北地区水稻低温冷害气候风险分析. 中国农业气象, 2007, 28(增): 202-204. [Ma Shuqing, Wang Qi, Jiang Lixia. Climate risk of chilling damage on rice in Northeast China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007, 28(Suppl.): 202-204.]
- [10] 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. 地理研究, 2011, 30(5): 931-938. [Ma Shuqing, Wang Qi, Wang Chunyi, et al. Climate risk and economic vulnerability of rice chilling damage and division in Northeast China. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 931-938.]
- [11] 王冬妮, 郭春明, 刘实, 等. 吉林省延迟型低温冷害气候风险评价与区划. 气象与环境学报, 2013, 29(1): 103-107. [Wang Dongni, Guo Chunming, Liu Shi, et al. Evaluation and division on climatic risk of rice delayed cool damage in Jilin province. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013, 29(1): 103-107.]
- [12] 冯喜媛, 郭春明, 陈长胜, 等. 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. 中国农业气象, 2013, 34(4): 462-467. [Feng Xiyuan, Guo Chunming, Chen Changsheng, et al. Spatial-temporal variation of sterile-type chilling damages at rice booting stage in Northeast China in last 50 years based on meteorological model. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(4): 462-467.]
- [13] 方修琦, 王媛, 朱晓禧. 气候变暖的适应行为与黑龙江省夏季低温冷害的变化. 地理研究, 2005, 24(5): 673-680. [Fang Xiuqi, Wang Yuan, Zhu Xiaoxi. Change of cool summer hazard under an adaptation behavior of the climate warming in Heilongjiang Province. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 673-680.]
- [14] 武万里. 气候变暖背景下宁夏水稻低温冷害的变化特征分析. 宁夏农林科技, 2008, (1): 54-59. [Wu Wanli. Analysis of rice chilling damages characteristics under the background of climate warming in Ningxia province. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2008, (1): 54-59.]
- [15] 卞娟娟, 郝志新, 郑景云, 等. 1951-2010年中国主要气候区划界线的移动. 地理研究, 2013, 32(7): 1179-1187. [Bian Juanjuan, Hao Zhixin, Zheng Jinyun, et al. The shift on the boundary of climate regionalization in China from 1951 to 2010. *Geographical Research*, 2013, 32(7): 1179-1187.]
- [16] 马树庆, 陈正洪, 王琪, 等. QX/T182-2013. 水稻冷害评估技术规范. 北京: 中国气象局, 2013. [Ma Shuqing, Chen Zhenghong, Wang Qi, et al. QX/T182-2013. Technical specifications for evaluation of rice cool damage. Beijing: China Meteorological Administration, 2013.]
- [17] 施能. 北半球冬季大气环流遥相关的长期变化及其与我国气候变化的关系. 气象学报, 1996, 54(6): 675-683. [Shi Neng. Secular variation of winter atmospheric teleconnection pattern in the northern hemisphere and its relation with China's climate change. *Acta Meteorologica Sinica*, 1996, 54(6): 675-683.]
- [18] 王江山, 孙风华, 赵春雨, 等. 气候变暖对东北地区农业生产的影响. 安徽农业科学, 2009, 37(19): 9053-9056. [Wang Jiangshan, Sun Fenghua, Zhao Chunyu, et al. Influences of climate warming on the agricultural production in Northeast China. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(19): 9053-9056.]
- [19] 李辑, 龚强. 东北地区夏季气温变化特征分析. 气象与环境学报, 2006, 22(1): 6-10. [Li Ji, Gong Qiang. Characteristics of summer air temperature in Northeast China. *Journal of Meteorology and Environment*, 2006, 22(1): 6-10.]
- [20] 纪瑞鹏, 张玉书, 姜丽霞, 等. 气候变化对东北地区玉米生产的影响. 地理研究, 2012, 31(2): 290-298. [Ji Ruipeng, Zhang Yushu, Jiang Lixia, et al. Effect of climate change on maize production in Northeast China. *Geographical Research*, 2013, 32(7): 1179-1187.]

Spatial-temporal characteristics of prolong-type rice chilling damage and its relationship with climate change in Northeast China

XI Zhuxiang, MA Shuqing, JI Lingling

(Jilin Meteorological Observatory, Changchun 130062, China)

Abstract: Northeast China is one of the major rice producing areas in China, because of the lack of heat, and rice growth is more sensitive to temperature. Temperature becomes the major limitations to local rice growth. Analysis of spatial-temporal characteristics of rice chilling damage in Northeast China under the background of climate warming is of important significance for rice chilling damage defense and its response to climate change.

Spatial-temporal characteristics of prolong-type rice chilling damage and its response to climate change in Northeast China were analyzed based on classification index of prolong-type rice chilling damage and daily temperature data from 101 stations during 1951-2010, and by using the accumulative anomaly, correlation coefficient, and climatic trend rate and tendency coefficient. The results show that the frequency for prolong-type rice chilling damage is larger to the west of eastern Inner Mongolia (Mengdong), the boundary between eastern Jilin Province and Heilongjiang Province, the frequency for this damage is smaller in the southern-central Liaoning Province. The frequency of severe prolong-type rice chilling damage is higher than that of light and medium damages during 1951-2010 in Northeast China. The light, medium and severe prolong-type rice chilling damages show a downward trend, prolong-type rice chilling damage presents a trend of rapid decline particular after 1994. The downward trend is more significant in the central Heilongjiang and the northwest of Mengdong region, and the downward trend of prolong-type rice chilling damage shows no significance in Liaoning, the south of Mengdong region, the south of Jilin and the north of Heilongjiang. Prolong-type rice chilling damage in Northeast China has a better relationship with climate warming. The average temperature from May to September and prolong-type rice chilling damage has obvious anticorrelation, the average temperature from May to September rises by 1°C, and prolong-type rice chilling damage in Northeast China reduces about 45 times. The periodic change of the average temperature from May to September and prolong-type rice chilling damage shows the obvious reverse phase.

Key words: Northeast China; prolong-type rice chilling damage; spatial-temporal characteristics; climate warming