资源科学 Resources Science
第36卷 第11期 2014年11月 2014,36(11):2316-2326 Vol.36,No.11 Nov.,2014

文章编号:1007-7588(2014)11-2316-11

# 气候变暖背景下水稻低温冷害和高温热害的研究进展

王 品[1,2,3],魏 星[1,2,3],张 朝[1,2,3],陈 一[1,2,3],宋 骁[1,2,3],史培军[1,2,3],陶福禄[4]

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875;
2. 北京师范大学减灾与应急管理研究院,北京100875;
3. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室,北京100875;
4. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京100101)

**摘 要**:低温冷害和高温热害是影响我国水稻安全生产的主要气象灾害。气候变暖背景下,我国水稻遭受的极端温度事件趋多趋强,应对冷热害的任务更加紧迫。本文结合国内外研究成果,概述了水稻冷热害研究中所涉及的主要内容:详细阐述了不同类型的低温冷害和高温热害影响水稻生长发育过程和最终产量的作用机理;对比分析了冷热害地面监测技术和遥感监测技术的优缺点;总结了水稻冷热害预警技术的研究现状;归纳了防御水稻冷热害的主要对策;阐明了我国水稻冷热害的空间分布格局和时间变化趋势;对比分析了评估冷热害对水稻产量影响的四种典型方法,包括实验法、历史统计法、作物机理模型模拟法和遥感估算法;探讨了未来气候条件下水稻冷热害的影响状况;最后,展望了水稻冷热害研究的未来发展方向。

**关键词**:气候变暖;水稻;低温冷害;高温热害;研究进展

## 1 引言

农业生产高度依赖天气气候条件,是受气候影响最敏感的行业[1-3]。我国是世界上主要的农业大国,然而不发达的农业水平加之独特的气候特征,亦使其成为了世界上农业气象灾害种类最多且灾情严重的国家之一[4,5]。在我国,洪涝、干旱、低温冷害、高温热害(含干热风)、森林火灾、霜冻等气象灾害平均每年造成粮食产量损失约1 200万t,占农业灾害总损失的60%以上[5]。全球气候变暖背景下[6],过去的50年中我国年平均气温上升幅度约1.2℃,尤其从20世纪80年代开始,全国气候明显变暖,北方比南方增温快,冬季和春季增温尤为明显[7-10]。进入21世纪以来,农业气象灾害的发生频率和强度均呈上升趋势[11-14],应对农业气象灾害的任务更加紧迫。

我国是世界上最大的水稻生产国和消费国[15,16],稻谷产量在我国粮食生产中位居首位,我国60%以上的人口以水稻为主食[17,18]。因此实现水稻产量稳定增长,对于保障我国乃至世界的粮食安全都有十分重要的意义。水稻生长对水分、光照等气象条件都有一定要求,尤其对温度条件非常敏感[8,19]。水稻在各个生长发育阶段都有一定的最低适宜温度和最高临界温度,环境温度过高或过低都不利于干物质的累积[20,21]。尤其在水稻的生殖生长时期,短期(几天甚至仅几个小时)的极端温度胁迫即可严重破坏水稻的生殖器官和生理功能,导致颖花不育、籽粒空瘪,从而降低水稻产量[19,22,23]。我国水稻种植区内极端温度事件频发,冷热害已成为水稻面临的主要气象灾害[11]。近40多年来,东北地区曾出现过8个严重冷害年,其中1969年、1972年和1976年最

收稿日期:2014-03-13;修订日期:2014-09-12
基金项目:北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室项目(编号:2014-ZY-02);国家重大科学研究计划(编号:2012CB955404);教育部-国家外国专家局高等学校创新引智计划(编号:B08008)。
作者简介:王品,女,河南南阳人,博士生,主要从事农业气象灾害风险研究。**E-mail**:wangpinbnu@126.com
通讯作者:张朝,**E-mail**:zhangzhao@bnu.edu.cn

http://www.resci.cn
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为严重,3年平均每年减产578万t,减产率20%[24]。近50年来,我国长江流域发生重大水稻高温热害事件6次,其中,2003年的全流域受灾面积保守估计达3 000万$hm^2$,损失稻谷产量5 180万t[25]。

随着全球气候变暖,我国水稻主产区高温热害发生的频次和强度均显著增加,尤其是长江流域水稻产区,热害已严重影响了当地水稻的安全生产[26];全国大部分地区冷害的频率和强度有所下降,然而阶段性和局地性的冷害仍有可能加重,如东北地区水稻障碍型冷害在近10年间就有抬头之势[27]。现阶段极端温度事件发生频繁且影响严重,加之监测预警和防御技术水平十分有限,冷热害已经成为水稻产量潜力发挥的主要限制因素,并随全球温室效应的加剧对我国粮食安全的威胁进一步扩大[5]。因此,在当前我国人口数量不断增加而耕地面积不断减少的情况下,加强水稻冷热害的监测,深入研究冷热害对水稻产量的作用机制以及影响程度,能为有效地防御和调控冷热害提供科学依据和技术支撑,是保障我国农业可持续发展的重要基础。本文结合当前国内外水稻冷热害的研究现状,从冷热害对水稻的影响机理、水稻冷热害监测预警技术、防御对策、我国水稻冷热害的时空分布格局、评估冷热害对水稻产量影响的研究方法、未来气候变暖背景下的冷热害状况共六个方面进行综述,以期为我国水稻冷热害的后续研究提供参考依据。

## 2 冷热害对水稻的影响机理

冷害俗称“哑巴害”,一般是指农作物在生长发育期间遭受了较长时间的持续性低温寡照天气或者短期的强低温天气(期间日最低气温虽在0℃以上但日平均气温低于作物生长发育的最低适宜温度),作物的生长发育进程或结实过程受到影响,从而导致最终产量降低[27-29]。根据低温对水稻的影响机理,可将冷害分为延迟型冷害、障碍型冷害和混合型冷害3种类型:延迟型冷害是指水稻营养生长期内受到较长时间的持续性低温影响,导致水稻生育期内积温不足,植株生理代谢缓慢,生长量降低,发育期延迟,以致秋霜来临时作物尚不能完全成熟而减产;障碍型冷害是指水稻生殖生长期内的短期异常低温天气会直接损害水稻生殖器官,破坏其生理活动机能,导致颖花不育、子粒空秕而减产[11,30,31];混合型冷害是指以上两种冷害类型在水稻生长发育期内同时发生或者相继发生,以致最终产量降低[32-34]。水稻整个生长季的每个阶段都有可能发生冷害,尤以芽期、苗期、孕穗期和开花灌浆期最为敏感:芽期低温会导致水稻出芽时间延长或烂秧,从而影响水稻的成苗率;苗期低温会使水稻秧苗失绿、枯萎甚至死亡,降低水稻根茎叶的生长和分蘖从而影响后续各生长阶段的时间早晚,是水稻延迟型冷害的关键期;孕穗期低温会导致枝梗及颖花分化不良、每穗粒数减少,且阻碍花粉粒发育、降低花粉萌发能力,从而降低水稻的结实率;开花期低温会阻碍花药正常开裂,以致水稻难以受精结实、产生大量空壳而减产;灌浆过程中遭受低温,会导致植株净光合生产能力下降,进而使稻谷的充实度变差、品质变劣[28,32,35-37]。

高温热害是指环境温度超过水稻适宜温度的上限,对水稻的生长发育造成危害,从而导致产量降低的自然灾害[38]。水稻对高温胁迫的敏感程度因生长阶段而异[8,11,19]:开花期最敏感,灌浆期次之,营养生长期最小[38-40]。相应的影响机理分别为:开花期高温会导致花药开裂困难,花粉量减少、花粉活力下降,且抑制花粉管伸长,影响正常授粉受精过程,以致结实率降低[41-43];灌浆期的持续高温会导致植株早衰、有效灌浆期缩短,使得同化产物积累量下降,这种情况一方面会导致秕谷粒增多、千粒重下降而造成明显减产[44],另一方面会使水稻垩白粒率和垩白面积增大、整精米率下降、米粒疏松,致使稻米品质变劣[45,46]。

## 3 水稻冷热害监测预警技术研究

### 3.1 水稻冷热害的地面监测技术

地面监测方法主要是指利用明确的监测指标来判断冷热害是否发生及其严重程度。根据灾害系统理论[47],冷热害监测指标可分为致灾因子的强度指标和承灾体的灾损指标。其中,前者主要包括三类,分别是生长季或生长发育关键期的平均温度距平指标、热量累积指标和综合指标[48]。第一类指标构建时所需数据易于获取且计算过程较为简便,因而得到广泛应用。国际上,早在1975年Thompson就已经采用温度距平指标(temperature anomalies)来表征冷热害的强度[49]。国内,丁士晟用

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net　http://www.resci.cn

5-9月份的平均温度指标作为东北地区的冷害指标[50,51]。Liu等用水稻生长季内平均温度的距平指标表征黑龙江省水稻遭受的延迟型冷害[35]。这类指标在表征延迟型冷害时较为准确,但在量化障碍型冷害或高温热害的强度时,平均温度法很容易平滑掉温度序列中的极端值,因此难以捕捉重大冷热害事件,可能导致评估强度与实际情况存在偏差。第二类以热量的累积作为指标,国内外多采用积温来描述该类指标。例如,Lobell等采用$GDD_{30}$(即日平均温度超过30℃部分的累积)表征非洲作物遭受的热害强度[52]。潘铁夫等把全年内超过10℃的活动积温距平值作为冷害年的监测指标[53]。此外,一些学者还根据作物各生长发育期需热程度的不同建立了较为复杂的热量指数[54,55]。该类指标充分考虑了作物生育期内的热量累积状况,能够较为准确地刻画极端温度的胁迫强度,在冷热害量化研究中应用较为广泛,但该类指标对冷热害温度阈值的准确性要求很高。第三类为综合指标,常常有主导指标和辅助指标共同组成。我国气象局发布的《水稻、玉米冷害等级(QX/T 101-2009)》[56]、国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会联合发布的《水稻盛夏低温冷害等级(征求意见稿)》1)和《主要农作物高温危害温度指标(GBT 21985-2008)》[57]均采用这类指标。该类指标一般以冷热害发生的临界温度为主导指标、以持续天数为辅导指标来划分不同的冷热害等级,在监测和预警技术中效果明显;但该类指标在划分等级时往往采用轻、中、重等定性描述方式,致使其在定量研究方面有所限制。总体上看,冷热害致灾因子指标构建时所需气温数据比较容易获取,且适用于各种时空尺度的研究,因此被广泛应用于水稻冷热害的监测预警和风险评估中;这类指标利用致灾因子的强度直接反映冷热害程度,其准确性依赖于研究者对研究区内天气气候状况以及水稻种植经验的掌握程度。承灾体的灾损指标是指以极端温度事件作用于承灾体(农作物)的响应结果来衡量冷热害影响程度,常用指标包括水稻发育期距平指标、生物量指标和水稻空壳率指标等。例如,水稻抽穗期的早晚对监测和判断冷害是否发生十分有效[27];水稻空壳率≥20%可作为水稻孕穗期障碍型冷害发生的标准[58]。灾损指标可真实反映冷热害的实际作用结果,因此可直接为冷热害的抗灾减灾工作以及种植业保险提供参考依据;但是灾后评估往往需要通过灾后调研或者利用作物模型模拟来实现,前者需要耗费大量的人力财力,而后者在模型构建过程中需要大量的地方经验参数输入。

### 3.2 水稻冷热害的遥感监测技术

利用传统方法监测大范围冷热害时,通常采用空间差值方法来弥补气象站点分布的不均匀性,然而由于温度数据具有很强的局地性,往往导致监测结果存在较大偏差。相比之下,遥感数据具有多时相、多空间分辨率、多频段、多角度的特点,可获得偏僻区域或遥远无人区的种植信息[59,60]。近年来随着遥感技术的快速发展,越来越多的传感器和遥感数据被应用到灾害监测中。水稻冷热害的遥感监测法是指利用卫星遥感红外通道资料监测地表极端温度的发生、强度以及分布,并根据水稻苗情、长势检测结果,与正常年份对比,来实现对冷热害的动态监测[61]。例如,张丽文利用多平台MODIS地表温度(LST)数据的全天候平均气温遥感估算方法,以全天候8天平均气温时间序列和植被指数时间序列为基础数据,构建了以T5.9距平和相对累积生长度日距平为温度指标的冷害遥感监测指标[62]。低温冷害监测中,延迟型冷害监测效果往往优于障碍型冷害,其监测的主要依据是针对同一时期的绿度特征延迟型冷害年份要比正常年份高。高温热害监测通常是根据作物光谱指标、生理指标、作物水分反演等方式分析确定。然而遥感技术监测在实际运用中还面临一些困难,如遥感热红外资料难以反演非晴空条件下的温度条件,导致温度数据的空间分布不连续[62]。另外,遥感技术只能监测瞬时数据无法反映出极端温度的持续时间,因而难以准确刻画冷热害强度;具体运用中还需要研究者熟悉作物的实际长势和分布区域,这进一步加大了水稻冷热害的监测难度[59]。

### 3.3 水稻冷热害的预警技术

根据超前时段,水稻冷热害预警可分为长期预警和中短期预警:根据天气学原理统计分析冷热害

1)由国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会于2009年发布.

http://www.resci.net
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

气象监测指标与大气环流特征量因子和海温因子之间的关系,筛选出与冷热害显著相关的气候因子,建立冷热害的长期预报模型,并结合水稻敏感发育阶段的出现时期,可进行冷热害长期预警;利用数值天气预报结果进行冷热害气象监测指标的中短期预报,并结合水稻敏感物候期预估冷热害的空间分布和强度,可开展冷热害短期预警[5,61]。例如,郭建平等根据遥相关原理,利用上年7月至当年1月逐月的大气环流资料(包括副高面积指数、副高强度指数、副高脊线、副高北界、极涡指数和环流指数6类)与热量指数进行逐步回归分析,建立了基于东北地区作物生长季热量指数的冷害长期预警模型[63]。阳园燕等从水稻遭受高温热害的生物学角度出发,建立水稻高温累积危害指数,实际运用中可根据未来3天到一周天气预报,在水稻敏感物候期内逐日滚动累积气象因子,计算短期内高温热害累积危害指数,进而发布水稻热害预警[64]。

## 4 水稻冷热害防御对策

水稻遭受低温冷害和高温热害的原因,固然决定于生育期内天气、气候异常等自然因素,但也存在农业生产措施不当等人为方面的原因。目前人们虽不能有效控制气候条件,但充分认识气候规律、合理利用气候资源,进而通过各种防御措施来减轻冷热害损失,是非常必要的。我国稻作区域十分辽阔,各地自然条件、栽培方法、品种类型和稻作制度相差较大,因此在具体选择冷热害防御对策时应根据当地情况确定。归纳起来,根据实施性质,防御措施主要分为工程措施、生物措施、技术措施三类[26,65-67]:①工程措施包括建立水稻生育期监控系统和灾害性天气预警预报机制、兴修水利、加强农田建设,从种植环境上维护水稻的正常生长发育进而提高其抗逆性能;②生物措施包括培育耐冷(热)性强的水稻新品种、研发植物生长调节剂等;③技术措施包括培育壮秧提高秧苗素质、调整播种期确保安全齐穗、科学施肥、以水控温等。其中,防御冷热害最为经济且有效的措施是创造并培育出耐冷(热)性强的水稻新品种。近年来,快速发展的分子生物学带动了水稻耐冷(热)性基因定位研究的发展,一些学者尝试利用分子标记法进行水稻耐冷(热)性的遗传研究,并将克隆的耐冷(热)相关基因导入水稻中以改善水稻品种的耐冷(热)性能、减少因冷(热)害造成的水稻产量损失[68,69]。水稻耐冷(热)性评价的基本方法是首先创造适当的低(高)温胁迫环境,然后根据鉴定指标来区分水稻品种耐冷(热)性的差异。现阶段主要利用人工气候室创造极端温度胁迫环境[70,71];通常采用的耐冷性鉴定指标有芽期存活率、苗期的枯死率、孕穗期结实率、植株内电导率、脯氨酸含量[72,73];耐热性鉴定的两个关键时期是苗期和抽穗灌浆期,其中苗期采用的指标主要是品种的细胞膜透性以及渗透物质含量,抽穗灌浆期的鉴定指标主要是品种的结实率和籽粒品质[74]。

## 5 我国水稻冷热害的时空分布格局

我国稻作区从北到南跨越了寒温带、中温带、暖温带、亚热带和热带五个温度带,分布呈西北部地区少而分散,东南部地区多而集中,西南部垂直分布,从北到南逐渐增多的趋势;从水稻种植制度上看,东北及北方稻作区主要种植一季稻,长江流域兼种一季稻和双季稻(包括早稻和晚稻),而华南大部分地区种植的是双季稻,部分地区(如海南省)甚至可以种植三季稻[75]。其中,东北稻区位于中高纬度地区,大陆季风气候明显,天气气候年际变化较大,热量条件很不稳定,水稻从播种到成熟的各个阶段都有可能遭受低温冷害[28,76]。以“水稻;冷害”为题名关键词查阅我国国家技术文献库(CNKI),超过50%的文献产生于东北地区,突出说明了该地区水稻冷害的严重性。20世纪80年代以来我国气候明显变暖,东北稻区的气象条件也有所改善,这在一定程度上缓解了低温冷害的发生[8,77];但进入21世纪以来,障碍型低温冷害的发生又有抬头之势,情况不容乐观[28,78]。低温冷害是一种全国性的农业气象灾害,不仅发生在东北地区,也经常发生在南方双季稻区。2、3月份是华南稻区早稻播种育秧的季节,此时频频南下的北方冷空气与海上移来的暖湿气流相遇,容易形成急剧降温或持续低温阴雨的天气过程,造成早稻烂秧;此外,晚稻的抽穗开花期正处于秋季冷空气南侵的时候,低温会阻碍水稻开花受精、造成空壳瘪粒,导致减产[63]。华南地区农业气象站的灾害记录显示,1991-2009年间大范围种植区内早稻遭受冷害的次数有所下降,华

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net　http://www.resci.cn

南东部和西南部晚稻遭受冷害的次数有所减少,但华南中部的晚稻种植区内冷害发生却更加频繁[11]。我国长江中下游稻作区属于亚热带和暖温带的过渡带,区域气候环境复杂,易发生极端高温天气。长期以来受到科学研究者的极大关注,其中95%的题名关键词为“水稻;热害”的科技文献都产生于该地区[25]。长江中下游地区在夏季7、8月份受副热带高压控制,持续性高温天气频繁袭击该区水稻[5],加之种植区地处河谷山间盆地,致使高温持续日数延长,因此水稻敏感期内遭遇极端高温的概率较大,热害风险较高[25,79]。在全球气候变暖的大背景下,频繁发生的高温热浪事件将进一步加重长江中下游稻作区的高温热害[77,80]。

## 6 评估冷热害对水稻产量影响的研究方法

目前,除了灾后调查法外,科研工作中评估冷热害对水稻产量影响的常用方法有4种:实验法、历史统计法、作物机理模型模拟法和遥感估算法。这4种方法各有优缺点,使用时需根据不同的研究目标慎重选择研究方法。

### 6.1 实验法

实验方法主要是指在一个封闭的实验室内或完全开放的农田里,通过实验设计人为地控制环境温度的高低,从而研究冷热害对水稻产量的影响。该方法对历史数据和经验积累的要求不高,操作起来较为简便,早期大部分研究都采用这种方法。例如,国际上很多科学家[81-84]利用具有较强模拟能力的FACE(Free Air Concentration Enrichment)实验技术,研究了不同气候变化情景下,平均温度、极端温度的增加以及$CO_2$浓度的提高对农作物光合作用速率、气孔导度、物候期等方面的影响;此外,Matsui T等[85]利用田间开顶式测定箱(field-based open-top chamber)设计了四组实验分别模拟了温度和$CO_2$的升高对于印度水稻颖花不育的影响。国内学者多使用人工气候箱研究极端温度胁迫对水稻生理机制、生物量指标以及最终产量的影响,例如胡芬和谢晓金等的研究[86,87]。实验方法通过人为地设置各种温度环境,可动态追踪水稻受极端温度胁迫后的生长过程,是探讨冷热害作用机理的重要方法;然而受实验设备的限制,该方法很难在大尺度范围或长时间序列上开展。

### 6.2 历史统计法

历史统计法的基本思路是首先确定冷热害监测指标(如第3.1部分所述),随后利用统计方法构建冷热害指标与水稻历史产量之间的定量模型,最终根据模型中的统计量评估冷热害对水稻产量的影响。统计模型多种多样,现阶段最为常用的是多元线性回归模型[35,78],其构建思路主要是:将温度条件对作物产量的影响分为两方面,包括正常温度条件的增产效应和极端温度条件的减产效应[88-92]。例如,Zhang等选取水稻生长季(5-9月)内平均温度的距平指标和敏感发育期(7、8月份)内极端低温的积温指标分别表征延迟型冷害和障碍型冷害,并利用这3个温度指标和历史产量序列构建多元线性回归方程,通过分析回归系数评估冷害对东北三省水稻产量的影响[78]。除了多元线性回归模型外,一些研究者还尝试将正常温度条件和极端温度条件对作物产量的影响分开讨论。例如,Teixeira等在研究热害对全球作物产量的影响时,将产量对温度的敏感系数设定在-1~0之间,当温度低于热害发生的临界温度时,敏感系数为0,高于临界温度低于限制温度时,随着高温强度的上升对产量的减产效应呈线性增加,超过限制温度后,对产量的影响系数为-1[19]。历史统计法对设备要求低、施行更容易,因此适用于各种空间尺度的研究;其构建的定量模型可用来快速评估冷热害损失,为农业部门抗灾救灾工作提供科学的参考依据;然而该方法对观测数据的依赖性较强,一般要求研究数据的时间序列在30年以上,致使该方法在历史数据不足不实的地区难以实行;此外,统计模型往往是基于历史气候状况构建的,因此很难外推历史极端事件之外的情形;该方法无法捕捉到冷热害对水稻生长过程的持续影响,不适用于冷热害作用机理的研究。

### 6.3 作物机理模型模拟法

作物机理模型是指能定量和动态地描述作物生长、发育和产量形成过程及其对环境反应的农业数学模型或计算机模型[93,94]。作物机理模型可以将植物生理、农艺、土壤科学和农业气象的知识整合起来,用数学公式描述生理生态过程(如光合作用、呼吸作用、植物生长和有机质分配、蒸散发、水分和

http://www.resci.net
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

养分的吸收等)以及各种物理化学过程(如叶片气体的扩散、能量流动和土壤化学转换等),动态追踪作物在特定环境条件下的生长过程,从而反映作物对环境和管理因素的响应特点,是IPCC第三次和第四次评估报告中用来估计气候变化对农业生态潜在影响的主要工具[95,96]。20世纪60年代以来,作物机理模型研究获得了很大的发展,荷兰和美国在该领域内起步较早,并且一直以来拥有较高的学术地位[97-99]。其中,荷兰Wageningen研究组开发的模型主要包括LINTUL、SUCROS、MACROS、ORYZA、WOFOST和INTERCOM模型[100];美国农业技术转移决策支持系统DSSAT开发的农作物模型有CERES系列作物生长模型、GROPGRO豆类作物模型系列(大豆和花生)、GROPGRO非豆类作物模型系列(番茄等)、SUBSTOR-potato(马铃薯)模型和CROPSIM-cassava(木薯)模型等[101]。此外,澳大利亚、中国、日本等国的农业决策支持系统都在一定的地区内取得了较好的应用效果[93,97]。目前,国内具有影响力且得到广泛应用的模型主要是高亮之等人推出的作物计算机模拟优化决策系统CCSODS[93,102]。此外,Tao等开发的MCWLA模型也已经成功应用于大尺度区域内气候变化影响作物产量的机理研究和损失评估中[103-106]。

作物机理模型模拟冷热害影响的基本思路是:在作物模型的光合作用、呼吸作用等子模块中引入水稻生长的三基点温度(最低、最适和最高),或者引入极端温度效应因子,来模拟极端温度对水稻生长发育过程和最终产量的影响。1995年,Horie等在SIMRIW模型中加入了极端温度对水稻收获指数的胁迫因子[39],之后Tao等将该胁迫因子引入到MCWLA-Rice模型中,并首次利用作物模型模拟法评估了极端高温对我国东部地区水稻产量的影响[104]。此外,张倩将高温影响系数和温度抛物线函数分别加入到WOFOST模型中的发育速率模拟和光合作用模拟中,从而评估了高温热害对长江中下游地区早稻和中稻产量的影响[80]。作物机理模型模拟法不需要复杂的实验设备,通过选择合适的作物模型即可用于不同时空尺度的研究;不仅能动态追踪当前气候状况下冷热害对水稻生长发育及产量形成过程的影响,还能模拟未来气候变化情景下水稻的生长状况;此外,作物模型还可以通过人为地调控某些因子(如施肥量和灌溉量)来预测特定适应措施下作物的生长状况,从而评价不同措施的实际效果;然而作物模型在刻画一部分机理过程时仍然采用经验关系,且模拟结果对输入的土壤条件、气象和管理等参数均比较敏感,因此作物模型通常有其适应性和针对性,使用时需要结合具体条件进行验证、评价、改进,完成对模型的本地化以后方能应用[94,107]。

### 6.4 遥感估算法

遥感估算法的主要思路是,通过对大量实时遥感资料的分析来确定水稻生长环境的温度指标、识别水稻种植面积和关键生育期、提取水稻受灾面积,并结合其他非遥感资料,为灾害损失评估模型提供参数,然后利用模型运行结果对灾害进行监测和评估。例如,王连喜等以宁夏引黄灌区1995年所发生的水稻低温冷害为例,首先利用遥感数据反演逐日最低温度和平均温度,随后根据积温情况确定冷害等级和灾损等级,进而估算1995年的单产损失,并结合识别出的水稻种植面积分布图推算出水稻总产量损失及其分布情况[108]。近期,张丽文利用遥感技术估算了东北地区水稻冷害损失,评估过程中首先利用遥感技术确定生长季热量指标、识别水稻关键生育期、提取水稻种植面积及受灾区,随后利用灾损评估模型估算冷害年份的水稻减产量[62]。利用遥感技术对水稻种植区进行动态监测,并结合地理信息系统(GIS)的空间分析功能,可以有效评估冷热害造成的大面积产量损失,将逐渐成为水稻冷热害灾损评估的重要技术支撑;然而该方法在前期的遥感监测技术方面仍存在一些问题(如第3.2部分所述),且估算产量损失时采用的评估模型也存在较大的不确定性(如第6.2和6.3部分所述),这些不足之处都加大了该方法在实际运用中的难度。

## 7 未来气候条件下水稻冷热害状况的研究

近年来,随着极端温度事件的增加,水稻冷热害趋多趋强,越来越多的科学家开始关注未来气候变暖背景下冷热害的发展状况。这类研究主要是将气候模式生成的未来气候变化预估数据集和现阶段常用的冷热害损失评估方法相结合来研究未

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net　http://www.resci.cn

来气候条件下的冷热害影响状况[19,88]。大部分的研究表明未来气候变暖将降低水稻遭受低温冷害的风险增加高温热害的风险。例如,国际上,Teixeira等利用GAEZ作物模型研究了A1B情景下2071-2100年全球四种作物高温热害的时空分布规律,结果表明,未来气候条件下水稻、玉米、大豆遭受热害的面积都将有所增加[19],尤其是湿地水稻,热害面积将从 5 700万$hm^2$增加到1.2亿$hm^2$。国内,Zhang等将区域气候模型和统计方法相结合,研究了2020-2040年东北地区的冷害情况,并指出未来20年内该地区的热量条件将明显改善,这将使该地区的粮食产量比现阶段增产1.7%[78]。Tao等利用MCWLA-Rice模型探讨了2020s、2050s和2080s气候变化对我国东部地区水稻产量的影响,研究表明该地区水稻面临的高温热害风险将显著增加[104]。

## 8 结论与展望

(1)根据灾害系统理论,水稻冷热害的监测指标主要包括致灾因子的强度指标和承灾体的灾损指标。其中前者适用于各种时空尺度的研究,广泛应用于水稻冷热害的监测预警和风险评估中;后者主要是通过灾后评估得到,可直接为冷热害的抗灾减灾工作提供参考依据。目前纯粹气候意义上的冷热害监测指标仍占据主流地位,结合水稻生长发育过程并能指示冷热害对水稻产量影响程度的指标较少,因此未来需加强研究结合水稻发育期、受灾机制及受灾损失等多因素的综合指标体系;此外,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,从而难以适用于未来冷热害监测,因此建立针对不同地区不同发育阶段能客观描述冷热害发生规律的动态监测指标体系是目前较为迫切的任务之一。

(2)遥感监测的基本方法是利用卫星遥感红外通道资料监测地表极端温度的发生、强度以及分布,并根据水稻苗情、长势检测结果,与正常年份对比,从而进行冷热害的动态监测。该技术以其范围广、周期短、信息量大的特点,很大程度上弥补了地面监测技术不均匀性和局地性的缺点,被越来越多地应用到大面积水稻冷热害监测中。然而如何提高地表温度的反演精度以及冷热害的监测精度,仍是该领域需要解决的重要问题;此外,为了更好地开展遥感监测评估工作,还需要适时更新遥感源、建立更完备的数据系统。

(3)水稻冷热害预警可分为长期预警和中短期预警,基本方法是结合数值天气预报产品和冷热害评估模型来预测冷热害对水稻种植的影响。目前,预警技术的研究仍处于探索阶段,如何结合地面气象监测、卫星遥感监测和数值模式预报等手段,建立一种既能实时运用、又适合我国不同区域的综合冷热害监测预警系统,以客观准确地将冷热害发生、发展、缓解、结束以及影响程度等决策服务信息及时传递给有关部门,最终实现预警技术的系统化和专业化,是未来的研究热点。

(4)冷热害对水稻产量影响的评估方法中:实验方法是研究冷热害作用机理最为直接、可靠的方法,该方法虽然不需要大量的历史数据积累和经验积淀,但对实验设备等硬件要求较高,需要相关研究部门加大对实验仪器和技术支持的投资;针对统计方法,在选择预测因子时需深入了解天气气候背景、异常气候事件与水稻冷热害之间的关系,设法更多地发现和揭示气候异常变化的物理过程和前兆信号,并充分利用数理统计中不断发展的新方法改进传统的方法建立评估模型,以提高统计方法评估冷热害损失的准确率;针对作物模型法,如何根据极端温度的胁迫机理来优化作物模型中的冷热害模拟模块,是该评估方法的攻关难点;遥感估算法准确率的提高需要综合提升遥感技术、反演精度以及评估模型的准确度。任何一种评估方法都有自身的优缺点,因此综合运用多种评估方法将对冷热害评估精度的提高有显著作用。

(5)从研究的时间段来看,我国大部分的研究还仅限于评估当前气候状况下冷热害对水稻产量的影响,预测未来气候条件下冷热害状况的研究还比较少。鉴于气候变暖背景下极端温度事件趋多趋强的事实,结合IPCC发布的温室气体排放情景探讨未来气候条件下我国水稻冷热害的时空分布规律及其影响程度,可以为现阶段我国制定气候变化适应政策提供科学的参考依据,也将成为该领域今后的研究重点之一。

http://www.resci.net
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 参考文献(References):

[1] Adams R M, Rosenzweig C, Peart R M, et al. Global climate change and US agriculture[J]. *Nature*, 1990, 345: 219-224.

[2] Motha R P, Baier W. Impacts of present and future climate change and climate variability on agriculture in the temperate regions: North America[J]. *Climatic Change*, 2005, doi: 10.1007/1-4020-4166-7_7.

[3] Salinger M J. Climate variability and change: Past, present and future-an overview[J]. *Climatic Change*, 2005, 70(1-2): 9-29.

[4] 丁一汇. 中国气象灾害大典:综合卷[M]. 北京:气象出版社, 2008.

[5] 王春乙. 中国重大农业气象灾害研究[M]. 北京:气象出版社, 2010.

[6] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[7] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.

[8] Sun W, Huang Y. Global warming over the period 1961-2008 did not increase high- temperature stress but did reduce low-temperature stress in irrigated rice across China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(9): 1193-1201.

[9] Zhai P, Sun A, Ren F, et al. Changes of climate extremes in China [J]. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 203-218.

[10] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(Ⅰ):中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.

[11] Tao F, Zhang S, Zhang Z. Changes in rice disasters across China in recent decades and the meteorological and agronomic causes [J]. *Regional Environmental Change*, 2013, 13(4): 743-759.

[12] Zhang Z, Chen Y, Wang P, et al. Spatial and temporal changes of agro-meteorological disasters affecting maize production in China since 1990[J]. *Natural Hazards*, 2014, 71(3): 2087-2100.

[13] Zhang Z, Wang P, Chen Y, et al. Spatial pattern and decadal change of agro- meteorological disasters in the main wheat production area of China during 1991- 2009[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(3): 387-396.

[14] 马建勇,许吟隆,潘婕.东北地区农业气象灾害的趋势变化及其对粮食产量的影响[J]. 中国农业气象, 2012, (2): 283-288.

[15] Wang Y, Xue Y, Li J. Towards molecular breeding and improvement of rice in China[J]. *Trends Plant Science*, 2005, 10(12): 610-614.

[16] Yu Y, Huang Y, Zhang W. Changes in rice yields in China since 1980 associated with cultivar improvement, climate and crop management[J]. *Field Crops Research*, 2012, 136: 65-75.

[17] State Environmental Protection Administration. Progress Report of Trade Liberalization in the Agriculture Sector and the Environment, with Specific Focus on the Rice Sector in China [EB/OL]. http://www.unep.ch/etb/events/Events2003/pdf/Final Draft of China Study.pdf, 2013-10/2014-03-13.

[18] 袁隆平. 发展杂交水稻,保障粮食安全[J]. 杂交水稻, 2010, (S1): 1-2.

[19] Teixeira E I, Fischer G, van Velthuizen H, et al. Global hot-spots of heat stress on agricultural crops due to climate change[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 170: 206-215.

[20] 潘熙曙,胡定汉,李迎征,等. 水稻低温冷害和高温热害的发生特点及预防措施[J]. 中国稻米, 2007, (6): 52-54.

[21] Challinor A J, Wheeler T R, Craufurd P Q, et al. Simulation of the impact of high temperature stress on annual crop yields[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135(1): 180-189.

[22] Mamun E, Alfred S, Cantrill L, et al. Effects of chilling on male gametophyte development in rice[J]. *Cell Biology International*, 2006, 30(7): 583-591.

[23] Matsui T, Omasa K, Horie T. The difference in sterility due to high temperatures during the flowering period among japonica-rice varieties[J]. *Plant Production Science*, 2001, 4(2): 90-93.

[24] 王春乙. 东北地区农作物低温冷害研究[M]. 北京:气象出版社, 2008.

[25] 田小海,罗海伟,周恒多,等. 中国水稻热害研究历史、进展与展望[J]. 中国农学通报, 2009, (22): 166-168.

[26] 高素华,王培娟. 长江中下游高温热害研究[M]. 北京:气象出版社, 2009.

[27] 王绍武,马树庆,陈莉,等. 低温冷害[M]. 北京:气象出版社, 2009.

[28] 刘民. 水稻低温冷害分析及研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2009, (4): 154-157.

[29] 中国农业百科全书编辑部. 农业气象卷:中国农业百科全书[M]. 北京:中国农业出版社, 1996.

[30] 何英彬,陈佑启,唐华俊. 水稻冷害研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2008, (2): 33-38.

[31] Mavi H, Tupper G J. Agrometeorology: Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture[M]. New York: Food Products Press, 2004.

[32] Jiao J, Xu X, Meng Y. Analysis of rice chilling injury and countermeasures in Heilongjiang province[J]. *Agricultural Meteorology*, 2004, 2: 27-29.

[33] 耿立清,张凤鸣,许显滨,等. 低温冷害对黑龙江水稻生产的影响及防御对策[J]. 中国稻米, 2004, (5): 33-34.

[34] 余集. 日本防御水稻冷害的情况[J]. 新农业, 1979, (12): 23-25.

[35] Liu X, Zhang Z, Shuai J, et al. Impact of chilling injury and global warming on rice yield in Heilongjiang province[J]. *Journal of*

http://www.resci.cn
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

*Geographical Sciences*,2013,23(1):85-97.

[36] Sthapit B R. Chilling injury of rice crop in Nepal: A review[J]. *Journal of the Institute of Agriculture and Animal Science*, 1992, 13:1-32.

[37] 钱前. 水稻分子育种技术指南[M]. 北京:科学出版社,2012.

[38] 霍治国,王石立. 农业和生物气象灾害[M]. 北京:气象出版社,2009.

[39] Horie T, Nakagawa H, Centeno H G S, et al. The Rice Crop Simulation Model SIMRIW and Its Testing[A]. Matthews R B, Kropff M J, Bachelet D. Modeling the Impact of Climate Change on Rice in Asia[M]. Wallington:CAB Inter-national,1995.

[40] 马宝,李茂松,宋吉青,等. 水稻热害研究综述[J]. 中国农业气象,2009,(S1):172-176.

[41] 任昌福,张洪松. 高温对杂交水稻开花结实的影响[J]. 西南农学院学报,1984 ,(1):25-30.

[42] Prasad P V, Boote K J, Allen Jr L H. Adverse high temperature effects on pollen viability, seed-set, seed yield and harvest index of grain-sorghum [ Sorghum bicolor(L.) Moench] are more severe at elevated carbon dioxide due to higher tissue temperatures[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*,2006,139(3):237-251.

[43] 王才林,仲维功. 高温对水稻结实率的影响及其防御对策[J]. 江苏农业科学,2004,(1):15-18.

[44] Kobata T, Uemuki N. High temperatures during the grain-filling period do not reduce the potential grain dry matter increase of rice [J]. *Agronomy Journal*,2004,96(2):406-414.

[45] 黄英金,张宏玉,郭进耀,等.水稻耐高温逼熟的生理机制及育种应用研究初报[J]. 科学技术与工程,2004,(8):655-658.

[46] 况慧云,徐立军,黄英金. 高温热害对水稻的影响及机制的研究现状与进展[J]. 中国稻米,2009,(1):15-17.

[47] 仪垂祥,史培军. 自然灾害系统模型-Ⅰ:理论部分[J]. 自然灾害学报,1995,(3):6-8.

[48] 王远皓,王春乙,张雪芬. 作物低温冷害指标及风险评估研究进展[J]. 气象科技,2008 ,36(3):310-317.

[49] Thompson L M. Weather variability, climatic change, and grain production[J]. *Science*,1975,188(4188):535-541.

[50] 丁士晟. 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,1980,(3):234-242.

[51] 丁士晟. 东北低温冷害和粮食产量[J]. 气象,1980,(5):1-3.

[52] Lobell D B, Banziger M, Magorokosho C, et al. Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials[J]. *Nature Climate Change*,2011,1(1):42-45.

[53] 潘铁夫,方展森,赵洪凯,等. 农作物低温冷害及其防御[M]. 北京:农业出版社,1983.

[54] 王春乙,郭建平.东北地区农作物热量年型的划分及指标的确定农作物低温冷害防御技术[M]. 北京:气象出版社,1999.

[55] 谢志清,杜银,高苹,等. 江淮流域水稻高温热害灾损变化及应对策略[J]. 气象,2013 ,(6):774-781.

[56] 中国气象局. 水稻、玉米冷害等级. 中华人民共和国气象行业标准(QX/T 101-2009)[S]. 北京:气象出版社,2009.

[57] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 主要农作物高温危害温度指标(GBT 21985-2008)[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[58] 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[J]. 中国农业气象,2013,34(4):462-467.

[59] 王连喜,秦其明,张晓煜. 水稻低温冷害遥感监测技术与方法进展[J]. 气象,2003,(10):3-7.

[60] Xiao X M, Boles S, Liu J Y, et al. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi- temporal MODIS images[J]. *Remote Sensing of Environment*,2005,95(4):480-492.

[61] 王建林. 现代农业气象业务[M]. 北京:气象出版社,2010.

[62] 张丽文. 基于GIS和遥感的东北地区水稻冷害风险区划与监测研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.

[63] 郭建平,马树庆. 农作物低温冷害监测预测理论和实践[M]. 北京:气象出版社,2009.

[64] 阳园燕,何永坤,罗孳孳,等. 三峡库区水稻高温热害监测预警技术研究[J]. 西南农业学报,2013,(3):1249-1254.

[65] 王书裕. 农作物冷害的研究[M]. 北京:气象出版社,1995.

[66] 余肇福. 作物冷害[M]. 北京:中国农业出版社,1994.

[67] 郝兴宇,赵海英. 农业气象灾害防御知识问答[M]. 北京:金盾出版社,2011.

[68] 夏新界,赵洋. 一种培育耐热转基因水稻的方法[P]. 中国,CN103131726A,2013-06-05.

[69] 聂元元,蔡耀辉,颜满莲,等. 水稻低温冷害分析研究进展[J]. 江西农业学报,2011,(3):63-66.

[70] 陈庆全,万丙良. 水稻耐热性的人工气候室鉴定方法研究[J]. 安徽农业科学,2009,(14):6350-6360.

[71] 陈慧,高梅,熊方建,等. 水稻耐热性的鉴定方法研究[J]. 四川大学学报(自然科学版),2012,(6):1331-1336.

[72] 李霞,戴传超,程睿,等. 不同生育期水稻耐冷性的鉴定及耐冷性差异的生理机制[J]. 作物学报,2006,32(1):76-83.

[73] 肖国超,徐庆国. 水稻耐冷性的研究与进展[J]. 作物研究,2005,(S1):266-272.

[74] 王志刚,王磊,林海,等. 水稻高温热害及耐热性研究进展[J]. 中国稻米,2013,(1):27-31.

[75] 程式华,李建. 现代中国水稻[M]. 北京:金盾出版社,2007.

[76] 王媛,方修琦,徐锬,等. 气候变暖与东北地区水稻种植的适应行为[J]. 资源科学,2005,(1):121-127.

[77] Zhang Z, Wang P, Chen Y, et al. Global warming over 1960-2009 did increase heat stress and reduce cold stress in the major rice-planting areas across China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2014,59:49-56.

[78] Zhang Z, Liu X, Wang P, et al. The heat deficit index depicts the responses of rice yield to climate change in the northeastern three

http://www.resci.net
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

provinces of China[J]. *Regional Environmental Change*, 2013, DOI:10.1007/s10113-013-0479-6.

[79] 谢晓金,李秉柏,王琳,等. 长江中下游地区高温时空分布及水稻花期的避害对策[J]. 中国农业气象,2010 ,(1):144-150.

[80] 张倩. 长江中下游地区高温热害对水稻的影响评估[D]. 北京:中国气象科学研究院,2010.

[81] Hendrey G R, Lewin K F, Nagy J. Free air carbon dioxide enrichment: development, progress, results[J]. *Vegetatio*, 1993, 104-105(1):17-31.

[82] Kimball B A, Pinter P J, Garcia R L, et al. Productivity and water use of wheat under free-air $CO_2$ enrichment[J]. *Global Change Biology*, 1995, 1(6):429-442.

[83] Kim S, Gitz D C, Sicher R C, et al. Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in maize under elevated $CO_2$[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 61(3): 224-236.

[84] Kim S, Sicher R C, Bae H, et al. Canopy photosynthesis, evapotranspiration, leaf nitrogen, and transcription profiles of maize in response to $CO_2$ enrichment[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(3):588-600.

[85] Matsui T, Namuco O S, Ziska L H, et al. Effects of high temperature and $CO_2$ concentration on spikelet sterility in indica rice[J]. *Field Crops Research*, 1997, 51(3):213-219.

[86] 胡芬. 水稻花期低温冷害的气象指标与机理[J]. 中国农业科学,1981,(2):60-64.

[87] 谢晓金,申双和,李秉柏,等. 抽穗期高温胁迫对水稻开花结实的影响[J]. 中国农业气象,2009,(2):252-256.

[88] Wang P, Zhang Z, Song X, et al. Temperature variations and rice yields in China: Historical contributions and future trends[J]. *Climatic Change*, 2014, 124:777-789.

[89] Butler E E, Huybers P. Adaptation of US maize to temperature variations[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 3(1):68-72.

[90] Lobell D B, Sibley A, Ortiz-Monasterio J I. Extreme heat effects on wheat senescence in India[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(3):186-189.

[91] Schlenker W, Roberts M J. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(37): 15594-15598.

[92] Yin X, Kropff M J, Mclaren G, et al. A nonlinear model for crop development as a function of temperature[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 77(1):1-16.

[93] 潘学标. 作物模型原理[M]. 北京:气象出版社,2003.

[94] 熊伟. 气候变化对中国粮食生产影响的模拟研究[M]. 北京:气象出版社,2009.

[95] Shi W, Tao F, Zhang Z. A review on statistical models for identifying climate contributions to crop yields[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(3):567-576.

[96] Parry M L. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulner-ability: Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[97] 郑业鲁,薛绪掌. 数字农业综论[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2006.

[98] 林忠辉,莫兴国,项月琴. 作物生长模型研究综述[J]. 作物学报,2003 ,(5):750-758.

[99] 曹宏鑫,赵锁劳,葛道阔,等. 作物模型发展探讨[J]. 中国农业科学,2011 (17):3520-3528.

[100] van Ittersum M K, Leffelaar P A, Van Keulen H, et al. On approaches and applications of the Wageningen crop models[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3):201-234.

[101] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18 (3):235-265.

[102] Gao L, Jin Z, Huang Y, et al. Rice clock model-a computer model to simulate rice development[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, 60(1):1-16.

[103] Tao F, Yokozawa M, Zhang Z. Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: A new process-based model development, optimization, and uncertainties analysis[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(5):831-850.

[104] Tao F, Zhang Z. Climate change, high-temperature stress, rice productivity, and water use in Eastern China: A new superensemble- based probabilistic projection[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52(3):531-551.

[105] Tao F, Zhang Z. Climate change, wheat productivity and water use in the North China Plain: A new super- ensemble- based probabilistic projection[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 170:146-165.

[106] Tao F, Zhang Z. Adaptation of maize production to climate change in North China Plain: Quantify the relative contributions of adaptation options[J]. *European Journal of Agronomy*, 2010, 33 (2):103-116.

[107] 秦鹏程,姚凤梅,曹秀霞,等. 利用作物模型研究气候变化对农业影响的发展过程[J]. 中国农业气象,2011,(2):240-245.

[108] 王连喜,秦其明,张晓煜,等. 遥感技术在水稻低温冷害灾损评估中的应用[A]. 中国气象学会.新世纪气象科技创新与大气科学发展-中国气象学会2003年年会"农业气象与生态环境"分会论文集[C]. 北京:气象出版社,2003.

http://www.resci.cn
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

# A Review of Cold Injury and Heat Damage to Rice Growth under Global Warming

WANG Pin[1,2,3], WEI Xing[1,2,3], ZHANG Zhao[1,2,3], CHEN Yi[1,2,3], SONG Xiao[1,2,3], SHI Peijun[1,2,3], TAO Fulu[4]

(*1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*;

*2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*;

*3. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, MOE Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*;

*4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*)

**Abstract**: Cold injury and heat damage are major agro- meteorological disasters seriously hampering rice growth and development in China. Under the background of global warming, increasing extreme temperature events have raised the risk of rice production to cold injury and heat damage. On the basis of researches at home and abroad, we reviewed the status and latest progress on the study of rice cold injury and heat damage from six aspects: (1) impact mechanisms of cold injury (including delayed cool injury and sterile-type chilling injury) and heat damage on rice growth and final yield; (2) the advantages and disadvantages of two common ways to monitor rice cold injury and heat damage, i.e. ground monitoring technique and remote sensing monitoring technique; (3) long-term, medium and short-term early warning methods against cold injury and heat damage; (4) spatial patterns of cold injury and heat damage in major rice-planting areas across China, and temporal trends in different planting areas; (5) four typical methods of assessing the impacts of cold injury and heat damage on rice yield, including experiments, historical statistics, crop model simulation and remote sensing methods; and (6) the impacts of cold injury and heat damage on rice yield under future climate. Finally, the major conclusions are discussed and the prospects of subsequent research on rice cold injury and heat damage are suggested. It is hoped this study will aid the management of rice cold injury and heat damage.

**Key words**: climate warming; rice; cold injury; heat damage; review

http://www.resci.net
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net