

姜丽霞,李帅,申双和,等.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,2010,33(3):315-320.

Jiang Li-xia, Li Shuai, Shen Shuang-he, et al. Sterile-type cool injury on rice and its relationship with climate productivity in Heilongjiang Province from 1961 to 2006[J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33(3): 315-320.

近 46 a 黑龙江水稻障碍型冷害及其与气候生产力的关系

姜丽霞¹,李帅¹,申双和²,闫平¹,韩俊杰¹,朱海霞¹,纪仰慧¹,郭建平³

(1. 黑龙江省气象科学研究所,黑龙江 哈尔滨 150030;

2. 南京信息工程大学 应用气象学院,江苏 南京 210044; 3. 中国气象科学研究院,北京 100081)

摘要:利用黑龙江省稻作区 46 a (1961—2006 年) 每年 7—8 月逐日平均气温、5—9 月逐旬平均气温、降水量资料,采用气候统计方法分析了自然低温下障碍型冷害发生的规律和时空变化特征,基于 logistic 曲线方程模拟粳稻气候生产力,建立起 5 个区域粳稻气候生产力与障碍型冷害期间平均温度和冷害持续时间的关系模型。结果表明,近 46 a 间,20 世纪 70 年代是障碍型冷害高发期,20 世纪 80 年代是障碍型冷害发生频率由多至少的转折期,21 世纪初为低发期。黑龙江省北部稻作区、东部稻作区和中部稻作区为障碍型冷害重发区,南部稻作区为中等发生区,西部稻作区为轻发区。5 个区域障碍型冷害发生期间的平均温度与粳稻气候生产力相关性均不显著,而冷害持续时间对粳稻气候生产力影响显著,并具有明显的地域差异,北部、东部和南部极显著(通过 0.01 信度的显著性检验),冷害持续时间每延长 1 d,北部、东部和南部粳稻气候生产力分别下降 119.89 kg/hm²、213.60 kg/hm²、133.84 kg/hm²,西部和中部影响不显著。

关键词:障碍型冷害;水稻;气候生产力

中图分类号: P49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097(2010)03-0315-06

Sterile-type Cool Injury on Rice and Its Relationship with Climate Productivity in Heilongjiang Province from 1961 to 2006

J IANG Li-xia¹, L I Shuai¹, S HEN Shuang-he², YAN Ping¹, HAN Jun-jie¹,
ZHU Hai-xia¹, J I Yang-hui¹, GUO Jian-ping³

(1. Heilongjiang Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030, China;

2. School of Applied Meteorology, NU IST, Nanjing 210044, China; 3. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: With the average daily temperature from July to August, the ten-day average temperature and precipitation from May to September of rice planting area in Heilongjiang Province during 1961 to 2006, by using the method of climatic statistics based on which the temporal and spatial characteristics of sterile-type cool injuries are analyzed under natural low temperature condition. This paper simulated Japonica Rice climate productivity and established 5 models concerning the relationship between Japonica Rice climate productivity and the average temperature and duration of low temperature in sterile-type cool injuries by using Logistic Curve Equation and linear regression in 5 regions. The results show that in recent 46 years, sterile-type cool injury occurred most frequently in the 1970s and its occurrence gradually reduced in the 1980s and came to a low point at the beginning of the 21st century. As for regional distribution, frequency of sterile-type cool injury is high in the north, east and central areas while its frequency is moderate in the south area and lowest in the west area. Further investigations show

收稿日期: 2009-10-24; 改回日期: 2010-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40705041); 中国气象局行业专项(2009416025); 中国气象局气候变化专项(CCSF-09-13)

作者简介: 姜丽霞(1972—), 女, 吉林德惠人, 高级工程师, 研究方向为农业气象和农业气候资源, jianglixia0326@yahoo.com.cn

that Japonica Rice climate productivity is not significantly correlated to the average temperature. However, it is closely correlated to the duration of low temperature in sterile-type cool injury and presents obvious geographical differences: the relationship between Japonica Rice climate productivity and the duration of low temperature is very significant in the north, east and south areas ($P < 0.01$) but not that significant in the west and central regions. If the sterile-type cool injury prolongs for 1 day, Japonica Rice climate productivity will reduce 119.89 kg/hm^2 , 213.60 kg/hm^2 and 133.84 kg/hm^2 in the north, east and south areas respectively.

Key words: sterile-type cool injury; rice; climate productivity

0 引言

黑龙江省是中国最大的粳稻种植区之一,产量约占全国商品粳稻年产量的 60%,现已成为全球最大的商品粳稻生产基地。由于地处高纬地区,黑龙江省夏季较易发生阶段性低温天气,7—8月粳稻处于孕穗、抽穗期及开花期,若在此时期出现连续 3 d 以上日均气温低于 18°C 的天气,即可发生障碍型冷害,导致粳稻严重减产^[1-3]。

国外对粳稻冷害的研究较多,在障碍型冷害引起的不育性、水稻发生障碍型冷害最敏感阶段等方面取得了显著成果^[4-7]。Hasebe^[8]对夏季低温冷害和水管理时间的关系研究表明:气候波动是影响产量变化的关键因素,水管理在产量波动中起着关键作用。Hiroyuki等^[9]的冷水灌溉试验表明穗温在小穗不育中为主导作用,并指出在小穗不育的预测中,利用平均温度的预测效果好于最低温度。Iizumi等^[10]利用 1993 年 Tochigi 两个相邻地区的夏季低温冷害和水稻产量损失的资料进行分析研究,结果显示有 1.264 t/ha 的产量损失可以通过栽培措施而避免。国内在水稻冷害方面也开展了许多工作^[11-14]。孟昭河等^[15]、徐奎彻等^[16]在障碍型冷害防御的前历深水灌溉方面进行了验证试验研究,提出了障碍型冷害的防御措施。王连敏等^[17]通过低温处理试验发现粳稻结实率随低温强度的加大和持续时间的延长而降低。近期国内外许多专家致力于水稻品种障碍型冷害机制研究、生理研究、模拟模型研究以及水稻冷害防御技术研究等^[18-23],遥感方法和 GIS 手段也已经应用于水稻冷害研究中^[24-25]。

迄今为止,黑龙江省基于自然气象观测数据对障碍型冷害发生规律、发生区域的系统研究仍然较少,障碍型冷害对产量影响的量化分析也不多见,使防灾减灾在缺乏科学依据和参考的前提下出现盲目性、缺少针对性,导致经济损失进一步加重。目前极端气候事件频发,2002 年、2004 年、2006 年黑龙江省局部稻区都出现了不同程度的障碍型冷害,给黑

龙江省水稻生产造成巨大影响,因此不可低估障碍型冷害在未来任何年份发生的可能性,但是气候变暖却可能误导人们对冷害发生的忽略,从而引起决策者和农业相关部门对粳稻障碍型冷害的发生以及防御的延迟和麻痹,进而导致产量大幅下降和经济的巨大损失。本文利用气候统计和多元线性回归等数学方法,分析黑龙江省主要稻作区 46 a 粳稻孕穗、抽穗、开花期间基于自然低温的障碍型冷害发生的时空变化特征,探讨不同区域障碍型冷害对粳稻气候生产力的影响程度,为农业防灾减灾和指导粳稻生产提供决策气象依据,这对推动农业经济可持续发展、促进农民增产增收和打造千亿斤粮食工程具有重要意义。

1 资料与方法

1.1 资料及研究站点

利用的气象观测资料包括 1961—2006 年每年 7—8 月逐日平均气温和 5—9 月逐旬平均气温、降水量资料。

研究区域位于绥化、哈尔滨、佳木斯和鸡西等黑龙江省水稻主产区。考虑该省幅员辽阔,区域气候差异较大,为了更准确地分析障碍型冷害时空变化特征,本文主要选取了讷河、海伦、龙江、泰来、庆安、肇东、五常、绥化、宁安、佳木斯、富锦、密山 12 个气象站作为研究站点,并将其划分为北部、西部、中部、南部和东部 5 个区域。选取站点均匀分布在稻作区,粳稻种植面积较大,具有一定的代表性,能够较好地反映出稻作区的气候特征和生产特点(表 1)。

1.2 障碍型冷害指标及相关概念

粳稻障碍型冷害是指粳稻生殖生长期遭受短期异常低温,使生殖器官生理机能遭到破坏,致使颖花不育,籽粒空瘪。参照已有的研究成果^[26-28],以 7—8 月内连续 3 d 以上日均气温小于等于 18°C 为判定障碍型冷害的指标。

同时,为了更好地分析障碍型冷害对粳稻气候

表 1 研究区站点概况

Table 1 Status of the stations in the study area

站点	纬度 / °N	经度 / °E	划分区域	隶属行政区
海伦	47.43	126.97	北部地区	绥化
讷河	48.48	124.85	北部地区	齐齐哈尔
龙江	47.33	123.18	西部地区	齐齐哈尔
泰来	46.4	123.42	西部地区	齐齐哈尔
佳木斯	46.82	130.28	东部地区	佳木斯
富锦	47.23	131.98	东部地区	佳木斯
密山	45.55	131.87	东部地区	鸡西
宁安	44.33	129.47	东部地区	牡丹江
绥化	46.62	126.97	中部地区	绥化
庆安	46.88	127.48	中部地区	绥化
肇东	46.07	125.97	南部地区	绥化
五常	44.9	127.15	南部地区	哈尔滨

生产力的影响,本文提出以下相关概念。典型冷害年:障碍型冷害发生范围广(全省性或全区性)、低温持续时间在 4 d 以上、冷害期间的日均气温低于 17.5 °C 的年份。一般冷害年:障碍型冷害发生范围小(非全省性或全区性)、低温持续时间在 3~4 d、冷害期间的日均气温在 17.5~18.0 °C 之间的年份。常年:本文指 1961—2006 年共 46 a 的平均状况。冷积温:是指粳稻在生殖生长阶段遭遇低温冷害期间的温度与不受害温度(>18 °C)相比减少的温度之和。

1.3 粳稻气候生产力模拟

气候生产力是作物在一定的气候条件下形成的产量。关于作物气候生产力的模拟方法较多^[29-34],在不考虑品种对产量影响的前提下,利用陈立亭和孙玉亭等^[29]计算粳稻气候生产力的方法,基于 Logistic 曲线方程模拟粳稻干物质累积过程,构建气候生产力模拟模型,由于本文所选研究站点缺乏太阳辐射资料,因此采用文献[29]的技术方法计算各研究站点的旬太阳辐射。文献[29]对此进行了详细的论述,这里不再赘述。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 6.0 处理数据软件,根据障碍型冷害判定指标,对研究区 1961—2006 年 7—8 月日均气温进行处理,采用气候统计方法,计算障碍型冷害期间平均温度

$$\overline{T_{i,n}} = \frac{\sum_{i=1}^{D_{i,n}} (T_{i,n})}{D_{i,n}} \quad (1)$$

其中: $\overline{T_{i,n}}$ 为第 i 年第 n 研究站点障碍型冷害期间平均温度(°C); $T_{i,n}$ 为第 i 年第 n 研究站点障碍型冷害期间逐日平均气温(°C); $D_{i,n}$ 为第 i 年第 n 研究站点障碍型冷害持续日数。

对研究站点障碍型冷害发生频率进行分年代(20 世纪 60 年代、70 年代、80 年代、90 年代和 21 世纪初)统计,可用下式表示

$$P_{i,n} = \sum_{i=1}^m (Y_{i,n}) / m \quad (2)$$

其中: $P_{i,n}$ 为第 i 年代第 n 研究站点障碍型冷害发生频率(%)。当某年 7—8 月出现日均气温连续 3 d 小于等于 18 °C 的天气, $Y_{i,n} = 1$;未出现, $Y_{i,n} = 0$;m 为 10 或 6。累计各年代的冷害发生年数,即可得分年代的障碍型冷害发生频率。计算 12 个站点 46 a 的各年气候生产力,对 5 个区域内的研究站点进行区域的平均处理。同时利用多元线性回归方法分析水稻气候生产力与障碍型冷害期间平均温度和冷害持续时间的关系。

2 结果与分析

2.1 障碍型冷害发生规律及时空变化特征

近 46 a 间,黑龙江省稻作区仅 1994 年和 1997 年未发生障碍型冷害,而其他年份不同地区均有不同程度的发生,共有 44 a。障碍型冷害期间逐日平均气温在 9.8~18.0 °C 之间,低温持续时间大多为 3~15 d,其中持续 15 d 的冷害出现在 1968 年的讷河站,冷害期间的平均温度为 16.6 °C;日均气温 9.8 °C 也出现在讷河站,时间为 1972 年 8 月 31 日。典型冷害年包括 1968、1969、1972、1976、1977 和 2004 年。

从时间变化上看,近 46 a 间,各区域障碍型冷害发生频率总体呈减小趋势,20 世纪 60 年代至 70 年代,除西部地区外,其他区域障碍型冷害的发生出现不同幅度的增加,20 世纪 70 年代是障碍型冷害发生最频的 10 a,80 年代是障碍型冷害由频至少的转折期,至 21 世纪初,障碍型冷害发生频率大幅下降,发生频率与高发期相比降低 30%~55% (图 1)。

从空间分布上看,5 个区域障碍型冷害发生频率呈现由北向南、由中部向东部和西部减少的趋势。由图 1 可以看出,20 世纪 60 年代、70 年代、80 年代、90 年代以及 21 世纪初期,各区域障碍型冷害发生均表现为此种趋势。其中,20 世纪 60 年代,障碍型冷害的发生北部最多,南部最少;20 世纪 70 年

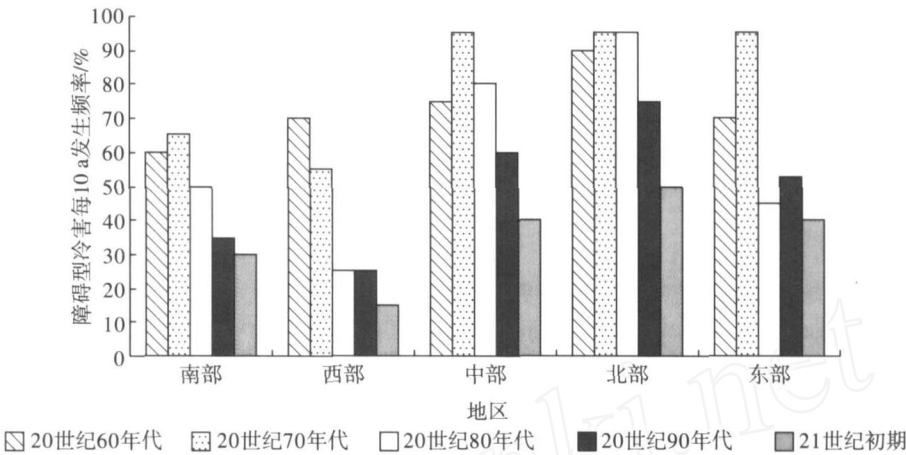


图 1 研究区 1961—2006 年障碍型冷害发生频率
Fig 1 Frequency of sterile-type cool injury in the study area from 1961 to 2006

代,北部、中部和东部发生频率最高,均达 95%,西部最少;其他时间均为北部最多,西部最少。

2.2 障碍型冷害对粳稻气候生产力的影响

2.2.1 典型障碍型冷害年的粳稻气候生产力分析

以典型障碍型冷害年 1969 年为例,比较 1969 年、1974 年(一般障碍型冷害年)、1994 年(未发生障碍型冷害年)及常年的气候生产力。由图 2 可见,5 个区域 1969 年粳稻的气候生产力最低,1994 年最高,1974 年和常年的气候生产力介于其间,各区域 1969 年的气候生产力比 1974 年偏低 15%~25%,比 1994 年偏低 29%~40%,比常年偏低 22%~30%。1969 年研究区生长季(5—9 月)降水量为 300~600 mm,水分充足,能够满足粳稻生长发育的需求;日照时数在 1 100~1 400 h,光照正常,有利于粳稻光合作用。由此可见,影响产量的两大因素即水分和光照条件均较好,而影响粳稻产量的另一重

要因素即是温度,因此在不考虑品种和其他农业气象灾害的影响下,这在某种程度上可以说明 1969 年粳稻气候生产力偏低与障碍型冷害有关。

2.2.2 不同区域障碍型冷害与粳稻气候生产力的关系

采用二元线性回归方法分析 5 个区域 1961—2006 年粳稻气候生产力与障碍型冷害期间平均温度和冷害持续时间的关系(分别剔除各区域未发生障碍型冷害的年份),发现各区域障碍型冷害期间平均温度与粳稻气候生产力的相关关系不显著,而障碍型冷害持续时间对粳稻气候生产力影响显著,能够说明冷积温的效应。统计数据表明,在黑龙江省夏季,自然界温度(日均气温)极大幅度骤降的机率较小,因此,当冷害期间温度相当,则冷害持续时间越长,冷积温积累越多,则对粳稻产量影响越大。由表 2 可见,冷害持续时间对粳稻气候生产力的影

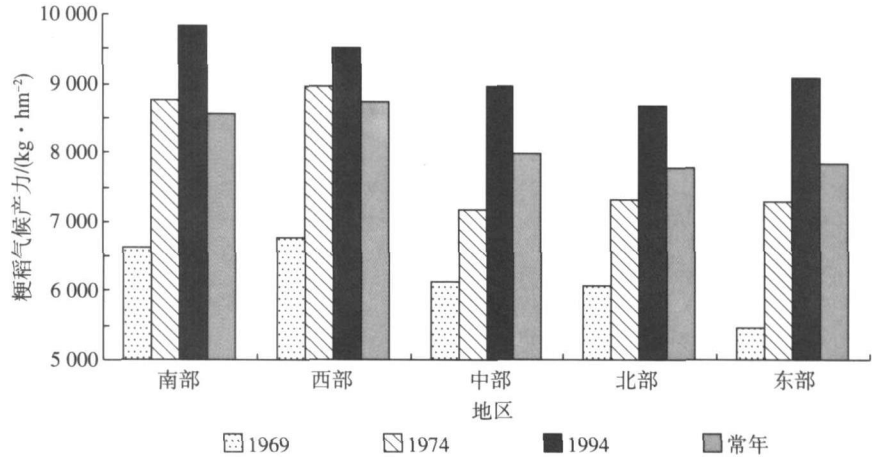


图 2 研究区 1969、1974、1994 年和常年的粳稻气候生产力
Fig 2 Japonica Rice climate productivity in 1969, 1974, 1994 and normal year in the study area

表 2 研究区粳稻气候生产力与障碍型冷害期间平均温度及持续时间的回归分析

Table 2 Regression analysis of Japonica Rice climate productivity and the average temperature and duration of low temperature in sterile-type cool injury in the study area

地区	回归模型	样本数	R	R ₁	R ₂
南部	$Y=6\,957.44+124.46X_1-133.84X_2$	28	0.519 ¹⁾	0.213	-0.505 ²⁾
西部	$Y=5\,208.99+226.82X_1-103.75X_2$	26	0.412	0.305	-0.356
中部	$Y=8\,135.50+9.75X_1-85.54X_2$	37	0.291	0.097	-0.291
北部	$Y=6\,060.29+152.1X_1-119.89X_2$	44	0.460 ²⁾	0.234	-0.443 ²⁾
东部	$Y=6\,314.11+160.31X_1-213.6X_2$	38	0.622 ²⁾	0.264	-0.619 ²⁾

注:Y为粳稻气候生产力,X₁为障碍型冷害期间平均温度,X₂为冷害持续日数,R是回归方程的相关系数,R₁是方程中Y与X₁的相关系数,R₂是方程中Y与X₂的相关系数,¹⁾和²⁾分别为通过0.05和0.01信度的显著性检验。

响还具有明显的区域差异,北部地区、东部地区和南部地区极显著(通过0.01信度的显著性检验),西部和中部则相关不显著。分析其原因,基本与冷害发生规律相符合,也反映了区域气候与产量的相关性,但中部地区为冷害频发重发区,相关却不显著,除考虑地形因素外,其原因仍有待于进一步深入研究。

3 结论与讨论

(1)46 a间,黑龙江省稻作区自然低温下有44 a发生障碍型冷害,障碍型冷害发生呈现减少趋势,20世纪70年代是障碍型冷害高发期,20世纪80年代是障碍型冷害发生由频至少的转折期,20世纪90年代是障碍型冷害发生减少期,21世纪初是障碍型冷害低发期。在地域分布上,北部、东部和中部为重发区,南部次之,西部为轻发区。

(2)研究区障碍型冷害期间平均温度对粳稻气候生产力影响不大,而冷害持续时间则对气候生产力影响显著,并具有明显的地域差异,北部、东部和南部地区影响极显著,冷害持续时间每延长1 d,北部、东部和南部粳稻气候产量分别下降119.89 kg/hm²、213.60 kg/hm²、133.84 kg/hm²,西部和中部影响不明显,说明在自然低温情况下,以连续3 d以上日均气温小于等于18℃为指标判定的障碍型冷害,其持续时间是影响粳稻产量的主要因素,冷害持续时间越长,冷积温积累越多,则对粳稻产量影响越大。

(3)20世纪80年代开始,盛夏障碍型冷害的发生减少,印证了从该时期以来气候变暖显著的事实,但必须注意的是,2002、2004、2006年黑龙江省局部稻区仍出现了比较严重的障碍型冷害,说明障碍型冷害的发生具有一定的不确定性。因此,气候变暖虽导致总热量增加,但并不能确定热量资源的分配、

分布和变化一定向有利于作物生长的方向发展,夏季障碍型冷害频繁发生的可能性仍然很大。

(4)在水稻栽培上要趋利避害,应主要考虑区域的热量条件,不能盲目越区种植,在品种布局上可综合考虑水稻的耐冷性、抗逆性及年度的气候预测情况进行调整。本文在全文中均未考虑品种的情况,并且对粳稻气候生产力进行了全生育期的模拟,而未分别考虑各关键生育期,这在今后的工作中有待于进一步研究。

参考文献:

[1] 徐希德.低温冷害对黑龙江省水稻的影响及其防御对策[J].中国农学通报,2003,19(5):135-136

[2] 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

[3] 矫江,许显滨,孟英.黑龙江省水稻低温冷害及对策研究[J].中国农业气象,2003,25(2):26-27.

[4] Tokita H, Sasaki J, Itou O. Relation between sterility due to cool-summer damage and standing crop of rice[Oryza sativa] plant in 1993[J]. Tohoku Journal of Crop Science, 1995, 38: 13-14.

[5] Satake T. Effect of cool-summer damage due to floral impotency on the male sterility of rice plants[J]. Agriculture and Horticulture, 1972, 47(2): 285-290.

[6] Hayase H. Simple method for estimating the most sensitive period to cool-summer damage due to floral impotency of rice[J]. Agriculture and Horticulture, 1976, 51(1): 641-645.

[7] Satake T. Determination of the most sensitive stage to sterile-type cool injury in rice plants[J]. Research bulletin of the National Agricultural Experiment Station, 1976, 113: 1-43.

[8] Hasebe T. Cool summer damage and water control labor[J]. Tohoku Journal of Agricultural Research, 1994, 44(1/4): 7-14

[9] Hiroyuki S, Toshihiro H, Masahisa M. Modeling spikelet sterility induced by low temperature in rice[J]. Agronomy Journal, 2005, 97(6): 1524-1536.

[10] Iizumi T, Ishida K, Hirako S, et al Resistance to cool-summer damage resulting from level of cultivation practices represented

- by fam household characteristics[J]. Journal of Japanese Agricultural System Society, 2007, 23(1): 1-10.
- [11] 全国杂交稻气象科研协作组. 籼型杂交水稻秋季冷害指标变化规律的分析[J]. 南京气象学院学报, 1981, 4(2): 192-198.
- [12] 秦剑. 气候变化与昆明粮食生产的研究[J]. 南京气象学院学报, 1999, 22(4): 671-679.
- [13] 章基嘉, 周曙光. 我国的主要气候灾害及其对农业生产的影响[J]. 南京气象学院学报, 1990, 13(3): 259-265.
- [14] 蔡佳熙, 管兆勇. 我国南方地区夏季低温变化特征及其成因[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(6): 799-806.
- [15] 孟昭河, 王玉菊, 孙中胜, 等. 水稻障碍型冷害及灌溉技术研究现状[J]. 中国农学通报, 2005, 21(6): 197-201.
- [16] 徐奎彻, 姜妙男, 金熙星, 等. 前历深水灌溉对水稻障碍型冷害的防御效果[J]. 吉林农业科学, 1994, 2: 1-5.
- [17] 王连敏, 王立志, 王春艳, 等. 花期低温对寒地水稻颖花结实的影响[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(2): 92-95.
- [18] 马树庆, 王琪, 沈享文, 等. 水稻障碍型冷害损失评估及预测动态模型研究[J]. 气象学报, 2003, 61(4): 507-512.
- [19] Imai R, Wen J, Sasaki K, et al. Diverse mechanisms of low-temperature stress response in rice. In Rice is life: Scientific perspectives for the 21st century [C] // Proceedings of the World Rice Research Conference. Tokyo, 2005: 54-56.
- [20] Nishiyama I. Fighting against cold-weather damage to rice[J]. Farming Japan, 1995, 29(6): 38-43.
- [21] Im in N, Kerim T, Weinman J J, et al. Low temperature treatment at the young microspore stage induces protein changes in rice anthers[J]. Molecular & Cellular Proteomics, 2006, 5(2): 274-292.
- [22] Bokura T. Technical development against cool summer damage of rice plant in Tohoku district[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 1998, 54(3): 267-274.
- [23] Nakazono K, Inoue K. Estimation of young panicle length and cool injury of rice[Oryza sativa] using cumulative temperature[J]. Japanese Journal of Crop Science, 2001, 70(2): 247-254.
- [24] 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, 29(10): 3-7.
- [25] 何英彬, 陈佑启, 唐华俊. 基于 MODIS 反演逐日 LAI 及 SM-RM 模型的冷害对水稻单产的影响研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 188-194.
- [26] 孙玉亭, 曹英, 祖世亨, 等. 黑龙江省农业气候资源及其利用[M]. 北京: 气象出版社, 1986.
- [27] 赵洪凯. 三江平原水稻低温冷害类型研究[J]. 中国农业气象, 1996, 17(4): 41-46.
- [28] 薛桂莉, 唐文俊, 刘治权, 等. 低温冷害对农作物的危害及防御措施[J]. 农业与技术, 2004, 24(1): 85-92.
- [29] 陈立亭, 孙玉亭. 黑龙江省气候与农业[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 31-98.
- [30] 陈峪, 黄朝迎. 气候变化对东北地区作物生产潜力影响的研究[J]. 应用气象学报, 1998, 9(3): 314-320.
- [31] 於忠祥, 姚建国. 作物最高理论产量计算方法的应用——以合肥地区水稻为例[J]. 生物数学学报, 2000, 15(2): 189-193.
- [32] 张宇, 王馥棠. 气候变暖对我国水稻生产可能影响的数值模拟试验研究[J]. 应用气象学报, 1995, 6(增刊): 19-25.
- [33] 姚克敏, 刘梅, 潘永地, 等. 水稻气候生产力的数值模拟及其应用[J]. 南京气象学院学报, 1999, 22(2): 170-179.
- [34] 张厚喧. 水稻气候生产力对气候变暖的响应问题的模拟计算[J]. 中国农业气象, 1993, 14(1): 35-40.

(责任编辑:张福颖)