中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

西南区域水稻关键生育期界限温度起始期的预测研究

陈超，徐富贤，庞艳梅，李小兰，郭晓艺

引用本文:
陈超, 徐富贤, 庞艳梅, 等. 西南区域水稻关键生育期界限温度起始期的预测研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1172−1182.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180686

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四川省水稻高温热害风险及灾损评估

Assessment of risk and yield loss of rice in Sichuan Province due to heat stress

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(4): 554−562 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180745

基于热害累计指数的四川单季稻高温热害综合风险评价

Risk assessment of hot damages for single−cropping rice based on accumulation index of heat stress in Sichuan

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(9): 1440−1452 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190019

四川稻作区优质稻生产气候生态条件适宜性评价及空间分布

Suitability evaluation of eco−climatic conditions for high quality rice production in Sichuan Province

中国生态农业学报. 2015(4): 506−513 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141208

品种和播期对华北春玉米产量及水分利用效率的影响

Effects of sowing date and cultivar on grain yield and water use efficiency of spring maize in the North China Plain

中国生态农业学报. 2018, 26(6): 837−846 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170786

利用杂交水稻开花比例鉴定耐高温性的方法

Identification method of high temperature resistance of hybrid rice based on flowering rate

中国生态农业学报. 2017, 25(9): 1335−1344 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170156

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180686

陈超, 徐富贤, 庞艳梅, 李小兰, 郭晓艺. 西南区域水稻关键生育期界限温度起始期的预测研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1172−1182
CHEN C, XU F X, PANG Y M, LI X L, GUO X Y. Prediction of threshold temperature start date for rice at critical development stages in Southwest China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(8): 1172−1182

西南区域水稻关键生育期界限温度起始期的预测研究*

陈 超[1,2], 徐富贤[3], 庞艳梅[1**], 李小兰[4], 郭晓艺[3]

(1. 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室 成都 610072; 2. 南方丘区节水农业研究四川省重点实验室 成都 610066; 3. 四川省农业科学院水稻高粱研究所 德阳 618000; 4. 四川省气候中心 成都 610072)

摘 要: 保证作物安全生产是种植制度的根本要求, 也是作物稳产、高产的基础。本文基于西南水稻种植区317个气象台站1961—2015年的日平均气温和最高气温资料, 分析了近55年来该区域不同保证率下水稻安全播种期、水稻开花期高温热害和低温冷害的最早发生期, 并建立了西南区域水稻各关键生育期界限温度起始期预测模型。预测结果表明: 80%~95%保证率下, 云南南部的水稻育秧安全播种期最早, 平均在2月20日左右; 云南北部、四川攀西南部和盆地中部、重庆大部和贵州部分地区在3月10日—4月10日; 而其余大部地区在4月10日—5月20日。80%~95%保证率下中稻开花期高温热害主要发生在四川盆地、重庆、贵州北部和东南部, 大部地区最早出现在7月15日—8月20日。80%~95%保证率下再生稻或晚稻开花期低温冷害最早出现在云南和贵州大部、四川攀西地区, 平均在6月20日—7月15日; 四川盆地西部、贵州东北部平均为8月1—20日; 其余大部地区在8月20日—9月20日。基于纬度、经度和海拔高度建立的西南区域水稻各关键生育期界限温度起始期预测模型, 简单实用, 可为西南水稻安全生产、防灾减灾等提供理论依据。

关键词: 水稻; 关键生育期; 界限温度起始期; 预测模型; 西南区域

中图分类号: S165

文章编号: 2096-6237(2019)08-1172-11 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Prediction of threshold temperature start date for rice at critical development stages in Southwest China*

CHEN Chao[1,2], XU Fuxian[3], PANG Yanmei[1**], LI Xiaolan[4], GUO Xiaoyi[3]

(1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu / Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. Provincial Key Laboratory of Water-Saving Agriculture in Hill Areas of Southern China, Chengdu 610066, China; 3. Institute of Rice and Sorghum, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Deyang 618000, China; 4. Sichuan Provincial Climate Center, Chengdu 610072, China)

Abstract: Ensuring safe production is a fundamental requirement of the cropping system, being an important basis for stable

* 国家重点研发计划重点专项(2017YFD0300400)、高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目(省重实验室 2018-重点-05-01)和中国气象局成都高原气象研究所基本科研费业务项目(BROP201817)资助

** 通信作者: 庞艳梅, 主要从事气候变化对农业的影响评估研究。E-mail: pangyanm@126.com
陈超, 主要从事气候变化影响评价、生物气候模型与信息系统的研究。E-mail: chenchao16306@sina.com

收稿日期: 2018-08-14 接受日期: 2019-02-15

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFD0300400), the Science and Technology Development Fund Project of Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province (Key Laboratory of Sichuan Province-2018-Key-05-01) and the Basic Business Project of Institute of Plateau Meteorology, Chinese Meteorological Administration, Chengdu (BROP201817).

** Corresponding author, E-mail: pangyanm@126.com

Received Aug. 14, 2018; accepted Feb. 15, 2019

and high yield of crops. Based on the daily average and maximum temperatures from 1961–2015 in 317 meteorological stations in the rice growing areas of southwestern China, the study analyzed safe sowing dates of rice under different guarantee rates (80%–95%) using the mean variance method. The earliest date of heat stress and chilling injury at rice flowering stage under different guarantee rates were analyzed too. A prediction model of the threshold temperature start date for rice at critical development stages in southwestern China was constructed using the stepwise regression method. At the 80%–95% guarantee rate, the earliest safe sowing date for rice was discovered in southern Yunnan, which was around February 20. The safe sowing dates in northern Yunnan, southwestern Sichuan, central Sichuan basin, most parts of Chongqing and parts of Guizhou were from March 10 to April 10. The safe sowing dates in the rest of southwestern China were from April 10 to May 20. At the 80%–95% guarantee rate, heat stress at flowering stage of middle-season rice occurred mainly in the Sichuan basin, Chongqing, northern and southeastern Guizhou, and the earliest occurrence dates were from July 15 to August 20. The earliest occurrence dates of chilling damage at ratooning or late rice flowering stage in most of Yunnan and Guizhou, and southwestern Sichuan were from June 20 to July 15. Meanwhile, the earliest occurrence dates of chilling damage in western Sichuan basin and northeastern Guizhou were from August 1 to August 20, and from August 20 to September 20 in the remaining areas. Based on the latitude, longitude and altitude, a model for predicting the threshold temperature initiation period for rice at critical development stages in southwestern China was established, which was simple and practical. In addition, using Hejiang of Sichuan and Meitan of Guizhou as the case study, the differences between the actual values and the simulated values of threshold temperature start date for rice were analyzed. The relative error between the actual values and the simulated values of threshold temperature start date for rice was less than 5.0%, which indicated that the model had a good simulation effect. In summary, the prediction of threshold temperature start date for rice at critical development stages can provide a theoretical basis for safe production, disaster prevention and mitigation options in rice production in southwestern China. On the one hand, according to the safe sowing period, the actual sowing period of rice can be adjusted in time, which is necessary to avoid hazards of meteorological disasters. On the other hand, the local major rice varieties can be selected through probabilistic decision-making, to ensure stable and high yield in rice production.

Keywords: Rice; Critical development stage; Start date of threshold temperature; Prediction model; Southwestern China

充分利用光温资源和保证作物安全生产是种植制度的基本要求。西南地区水稻(*Oryza sativa*)生长期的光合辐射强度低于华北、东北、西北等地，但生长季节相对较长，雨量充沛。因而，延长生长季节内的光合时间是西南地区水稻增产的有效途径[1-2]。但是，西南区域是典型的气候脆弱区，干旱、高温热害、低温冷害等一直都是西南地区的主要自然灾害之一，也是限制西南地区农业持续稳定发展的主要气象灾害[3-4]。早稻播期如果太早，将不能安全出苗，如果太迟，又将缩短有效生长期从而影响最终产量。全球气候变化背景下，西南区域沿江河谷和低海拔平坝丘陵区水稻抽穗开花期的高温热害将影响水稻正常开花结实，致使水稻千粒重下降，最终导致水稻不同程度减产[5]。同时，南方地区一季中稻及双季晚稻种植区的水稻生产中容易遭遇障碍型冷害，即在开花受精阶段的低温易造成花粉发育不良、花药不能正常开裂而难以完成正常受精[6-7]。因此，及时、准确的农业气象灾害预测预警将有助于生产部门采取有效措施，以保证农业生产的持续发展。

当前，农业气象灾害预测预警技术已从静态、单一方法向动态多方法集成转变，预测时效、精度显著提高[8]。主要的方法包括数理统计预报法、农业气象模式与气候(天气)模式结合法2种。首先，数理统计方法是目前使用最多的农业气象灾害预报方法，前人基于灾害指标，采用时间序列分析、多元回归分析、韵律和相似等方法建立了干旱[9-12]、高温热害[13-15]、低温冷害[16-18]等农业气象灾害预报模型。该方法计算较为简单，但对作物机理考虑不足。其次，利用农业气象模式与气候(天气)模式结合法预测农业气象灾害的研究也已有不少，如张光智等[19]采用农田水分平衡方程和气象要素的逐日预报值预报了小麦(*Triticum aestivum*)干旱出现日期和灌溉量，赵艳霞等[20]采用冬小麦发育模式构建冬小麦干旱识别与预测模型，刘建栋等[21]构建的小麦生长模型提出了以相对蒸腾比累积值代表农业干旱预警指数的概念，刘布春等[22]构建的修正热量单位发育模型与区域气候模式结果相结合可开展东北玉米(*Zea mays*)冷害预报试验，王雪姣等[23]采用COSIM模型可对新疆棉花(*Gossypium* spp.)冷害发生、程度和范围进行预测。该方法机理性强，是未来农业气象灾害预测预警技术的发展方向，但模型所需参数多，且需要利用观测数据对模型进行验证，在区域尺度应用时模拟的准确性还有待提高。

水稻是西南地区最重要的粮食作物，主要分布在四川、重庆、云南和贵州。据统计，2014年西南水稻种植面积和总产量分别为450.81万hm^{2}和3 099.03万t，分别占西南区域粮食总面积和总产量的27.56%和41.22%，其中以一季中稻的种植为主[24]。另外，四川盆地南部、重庆是我国再生稻主产区，种植面积占全国80%以上，再生稻的种植不仅能充分利用有限的光温热资源提高单产，在机械化难以推广的西南丘陵山区，蓄留再生稻还具有雨养农业区冬季蓄水抵御干旱的重要功能[24]。前人对西南水稻高、低温灾害的研究表明[3-4,25-26]，水稻生长过程中遇到农业气象灾害时，不同发育期的水稻对气象灾害的敏感程度及所受的影响均有差异，而且气象灾害对不同品种作物的影响也不同[27]。然而，由于对西南区域水稻关键生育期界限温度发生期的预测研究还存在很多不足，针对安全生产的理论指导也很有限，因此，西南水稻生产的安全性和产量的稳定性已引起相关部门的高度关注。鉴于此，本研究基于西南水稻种植区317个气象台站1961—2015年逐年日平均温度和最高气温资料，结合西南区域水稻关键生育期界限温度指标，采用均方差和逐步回归等统计方法分析近55年来该区域不同保证率下露地湿润育秧安全播种期、地膜旱育秧安全播种期、地膜湿润育秧安全播种期、中稻开花期高温热害最早发生期、再生稻或晚稻开花期低温冷害最早发生期，并建立西南区域水稻各关键生育期界限温度起始期预测模型，以期为预测该区域低温冷害或高温热害发生时间，使水稻关键生育期错过灾害高发时段，有针对性地调整播期、合理选用品种以及选择种植方式等提供依据与指导。

1 材料与方法

1.1 数据来源

气象资料来源于国家气象科学数据共享服务平台，包括1961—2015年西南地区四川省(84个)、云南省(120个)、贵州省(80个)、重庆市(33个)共317个地面气象台站的逐日最高气温(T_{max})和平均气温(T_d)资料。研究区域气象站点分布及海拔见图1。

1.2 水稻关键生育期界限温度起始期的确定

根据试验分析和前人的研究结果[28-29]，西南地区水稻关键生育期界限温度如表1所示。采用5日滑动平均法[30]对各气象台站逐日平均温度进行处理，当日平均气温稳定通过播种期的界限温度时，以第1个5日中最先一个日均温大于等于该界限温度的日期为水稻的安全播种期。当持续3 d及以上日平均气温≥30 ℃或日最高气温≥35 ℃，中稻开花期发生高温热害[31]，以第 1 个高温过程中的第一天作为中稻开花期高温热害的最早发生期。当持续 3 d 及以上日平均气温≤22 ℃，再生稻或晚稻开花期发生低温冷害，以第 1 个低温过程中的第一天作为再生稻或晚稻低温冷害的最早发生期[32-33]。

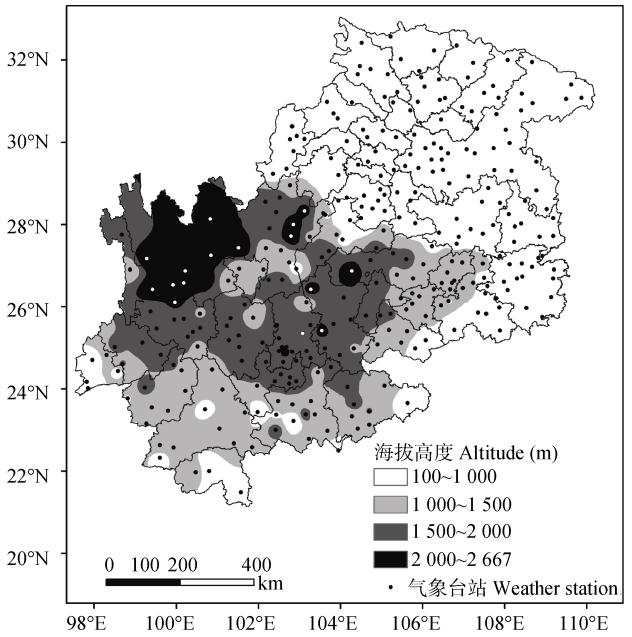

图 1 研究区域气象站点分布及海拔

Fig. 1 Distribution of weather stations and altitude in study region

1.3 不同安全保证率下水稻关键生育期界限温度起始期的确定

基于1961—2015年西南地区317个气象站点水稻关键生育期界限温度起始期的年值，利用均方差法计算安全保证率[27]分别为80%、85%、90%、95%条件下，各气象站点界限温度的起始日期，日期格式采用日序表示：如3月6日记为65，7月15日记为196。

1.4 水稻关键生育期界限温度起始期预测模型的建立

以各气象站点所处地理位置的纬度(x_1)、经度(x_2)、海拔高度(x_3)为自变量，以不同保证率下水稻各关键生育期界限温度的起始期为因变量(y)，采用逐步回归的方法建立水稻关键生育期界限温度起始期的预测模型。

2 结果与分析

2.1 西南区域水稻关键生育期界限温度起始期的空间分布特征

2.1.1 水稻露地湿润育秧安全播种期

由图 2 可知，1961—2015 年，80%保证率下水稻

表 1　西南区域水稻关键生育期界限温度

Table 1　Threshold temperature of critical development stages of rice in Southwest China

项目 Item	界限温度 Critical temperature (℃)
露地湿润育秧安全播种期日平均气温 Daily mean temperature (T_d) of the safe sowing date of rice seedlings without film-mulching in watered nursery	≥12
地膜旱育秧安全播种期日平均气温 Daily mean temperature (T_d) of the safe sowing date of rice seedlings with film-mulching in dry nursery	≥9.7
地膜湿润育秧安全播种期日平均气温 Daily mean temperature (T_d) of the safe sowing date of rice seedlings with film-mulching in watered nursery	≥10.4
中稻开花期高温热害日平均气温 Daily mean temperature (T_d) of heat damage at flowering stage of middle-season rice	≥30
中稻开花期高温热害日最高气温 Daily maximum temperature (T_{max}) of heat damage at flowering stage of middle-season rice	≥35
再生稻或晚稻开花期低温冷害日平均气温 Daily mean temperature (T_d) of chilling damage at flowering stage of ratooning or late rice	≤22

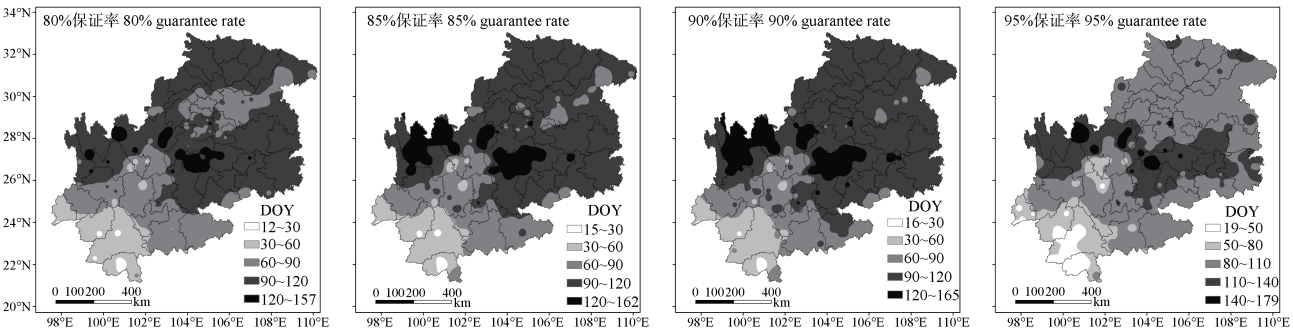

图 2　1961—2015 年不同保证率下西南区域水稻露地湿润育秧安全播种期(日序, DOY)的空间分布

Fig. 2　Distribution of the safe sowing date (Julian day, DOY) of rice seedlings without film-mulching in watered nursery under different guarantee rates in Southwest China from 1961 to 2015

露地湿润育秧安全播种期在云南南部最早，平均为2月10日左右，云南北部、四川攀西地区南部和盆地中部、重庆大部平均为3月1日—4月1日，云南西北和东北部、四川攀西北部平均为5月1—30日，而西南其余地区在4月1—30日。85%和90%保证率下水稻露地湿润育秧安全播种期的空间分布特征类似，云南南部最早，平均在2月10日左右，云南北部、四川攀西南部平均为3月1日—4月1日，云南西北和东北部、四川攀西北部平均为5月1—30日，而西南其余地区在4月1—30日。95%保证率下水稻露地湿润育秧安全播种期在云南南部最早，平均为3月1日左右，云南西北和东北部、四川攀西北部、贵州中西部平均为4月20日—5月20日，个别地区为5月20—6月20日，而西南其余地区在3月20日—4月20日。西南区域水稻露地湿润育秧安全播种期的分布特征与春季平均气温的分布特征类似，即热量条件越好的地区安全播种期越早。

2.1.2　水稻地膜旱育秧安全播种期

由图3可知，1961—2015年，80%保证率下水稻地膜旱育秧安全播种期在云南中、南部和四川攀西南部最早，平均为2月10日左右，云南西北部、四川攀西北部和贵州中东部平均为4月1—30日，个别地区为5月1—30日，而西南其余地区在3月1日—4月1日。85%保证率下水稻地膜旱育秧安全播种期的空间分布特征与80%保证率类似，云南中、南部和四川攀西南部最早，平均为2月10日左右，云南西北部、四川攀西北部和贵州大部平均为4月1—30日，个别地区为5月1日之后，而西南其余地区在3月1日—4月1日。90%保证率下水稻地膜旱育秧安全播种期在云南中、南部和四川攀西南部最早，平均为3月10日以前，云南西北部、四川攀西北部和贵州中西部平均为4月10日—5月10日，个别地区为5月10日之后，而西南其余地区在3月10日—4月10日。95%保证率下水稻地膜旱育秧安全播种期在云南大部和四川攀西南部最早，平均为3月1日左右，云南东北部、四川攀西北部、贵州西部个别地区平均为5月1日—6月10日，而西南其余地区在3月20日—4月30日。西南区域水稻地膜旱育秧安全播种期的分布特征与春季平均气温的分布特征类似，即热量条件越好的地区安全播种期越早。

2.1.3　水稻地膜湿润育秧安全播种期

由图4可知，1961—2015年，80%保证率下水稻

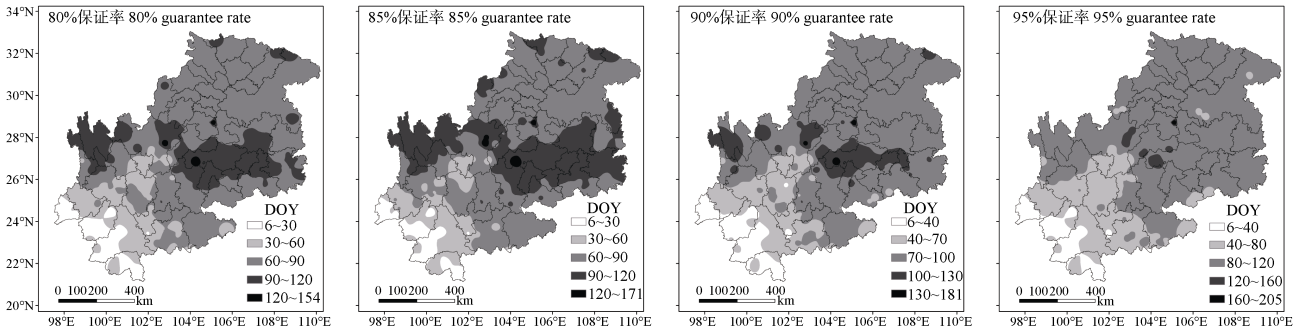

图 3 1961—2015 年不同保证率下西南区域水稻地膜旱育秧安全播种期(日序, DOY)的空间分布

Fig. 3 Distribution of the safe sowing date (Julian day, DOY) of rice seedlings with film-mulching in dry nursery under different guarantee rates in Southwest China from 1961 to 2015

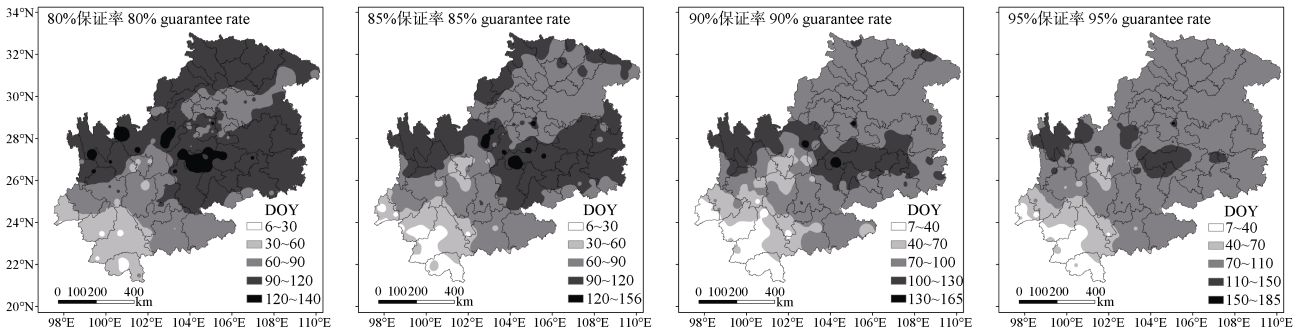

图 4 1961—2015 年不同保证率下西南区域水稻地膜湿润育秧安全播种期(日序, DOY)的空间分布

Fig. 4 Distribution of the safe sowing date (Julian day, DOY) of rice seedlings with film-mulching in watered nursery under different guarantee rates in Southwest China from 1961 to 2015

地膜湿润育秧安全播种期在云南南部最早, 平均为2月10日左右, 云南北部和东部、四川攀西南部和盆地中部、重庆大部平均为3月1日—4月1日, 云南西北和东北、四川攀西北部个别地区平均为5月1—20日, 而西南其余地区在4月1—30日。85%保证率下水稻地膜湿润育秧安全播种期在云南南部最早, 平均为3月1日以前, 云南西北部、四川攀西北部和贵州大部平均为4月1—30日, 个别地区为5月1日—6月5日, 而西南其余地区在3月1日—4月1日。90%保证率下水稻地膜湿润育秧安全播种期在云南中、南部和四川攀西南部最早, 平均为2月10日左右, 云南西北部、四川攀西北部和贵州中西部平均为4月10日—5月10日, 个别地区为5月10日—6月15日, 而西南其余地区在3月10日—4月10日。95%保证率下水稻地膜湿润育秧安全播种期在云南南部最早, 平均为3月1日左右, 云南东北部和西北部、四川攀西北部、贵州个别地区平均为4月20日—5月20日, 个别地区为5月20日之后, 而西南其余地区在3月10日—4月20日。西南区域水稻地膜湿润育秧安全播种期的分布特征与春季平均气温的分布特征类似, 即热量条件越好的地区安全播种期越早。

2.1.4 中稻开花期高温热害最早发生期

由图5可知, 利用持续3 d及以上日平均气温≥30 ℃作为判别指标来分析西南中稻开花期高温热害最早发生期。结果显示: 1961—2015年, 中稻开花期高温热害主要发生在四川盆地、重庆、贵州北部和东南部。80%和85%保证率下大部地区中稻开花期高温热害最早发生期出现在7月20日—8月10日, 仅四川盆地西部、贵州东北部等地出现在8月10—25日。90%保证率下大部地区中稻开花期高温热害最早发生期出现在7月20日—8月20日, 仅四川盆地西部、贵州东北部等地出现在8月20—30日。95%保证率下大部地区中稻开花期高温热害最早发生期出现在7月25日—8月25日, 仅四川盆地西部、贵州东北部等地出现在8月25日—9月5日。

利用持续3 d及以上日最高气温≥35 ℃作为判别指标来分析西南中稻开花期高温热害最早发生期。结果显示: 1961—2015年, 中稻开花期高温热害主要发生在四川盆地、重庆、贵州北部和东南部。80%、85%、90%、95%保证率下大部地区

中稻开花期高温热害最早发生期分别出现在7月15日—8月8日、7月15日—8月10日、7月15日—8月10日、7月20日—8月20日，仅四川盆地西部、贵州东北部等地分别出现在8月8—21日、8月10—25日、8月10—26日、8月20—30日(图6)。西南区域中稻开花期高温热害最早发生期的分布特征与夏季气温的分布特征类似，即夏季气温越高的地区越早发生高温热害。

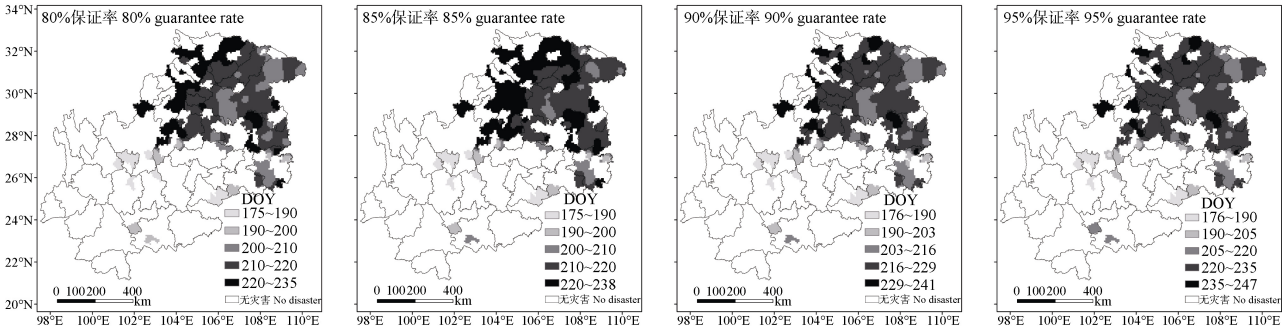

图 5　1961—2015 年不同保证率下西南区域中稻开花期高温热害(日平均气温≥30 ℃)最早发生期(日序, DOY)的空间分布

Fig. 5　Distribution of the earliest occurrence date (Julian day, DOY) of heat damage (daily average temperature ≥ 30 ℃) at flowering stage of middle-season rice under different guarantee rates in Southwest China from 1961 to 2015

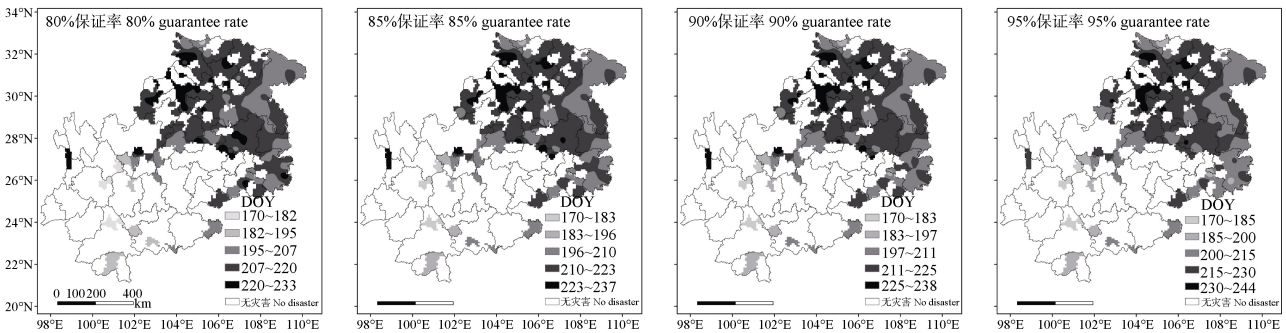

图 6　1961—2015 年不同保证率下西南区域中稻开花期高温热害(日最高气温≥35 ℃)最早发生期(日序, DOY)的空间分布

Fig. 6　Distribution of the earliest occurrence date (Julian day, DOY) of heat damage (daily maximum temperature≥ 35 ℃) at flowering stage of middle-season rice under different guarantee rates in Southwest China from 1961 to 2015

2.1.5　再生稻或晚稻开花期低温冷害最早发生期

再生稻开花期低温冷害最早发生期的研究主要针对四川盆地的南部和重庆地区，而其他地区的研究对象为晚稻。由图7可知，1961—2015年，80%保证率下开花期低温冷害最早出现在云南北部、贵州西南部及四川攀西地区大部，平均为6月20日—7月15日，云南南部、贵州北部和东南部、四川盆地西部和攀枝花地区平均为7月15—31日，四川盆地西部、贵州东北部平均为8月1—15日，而四川盆地其余地区和重庆大部在8月15日—9月15日。85%保证率下开花期低温冷害最早出现在云南和贵州大部、四川攀西地区，平均为6月20日—7月20日，四川盆地西部、贵州东北部平均为7月20日—8月10日，而四川盆地其余地区和重庆大部在8月10日—9月20日。90%保证率下开花期低温冷害最早出现在云南北部、贵州中部和西南部、四川攀西地区大部，平均为6月20日—7月10日，云南南部、贵州北部和东南部、四川盆地西部和攀枝花地区平均为7月10—31日，四川盆地西部、贵州东北部平均为8月1—20日，而四川盆地其余地区和重庆大部在8月20日—9月25日。95%保证率下开花期低温冷害最早出现在云南北部、贵州中部和西南部、四川攀西地区大部，平均为6月20日—7月10日，云南南部、贵州北部和东南部、四川盆地西部和攀枝花地区平均为7月10—31日，四川盆地西部、贵州东北部平均为8月1—25日，而四川盆地其余地区和重庆大部在8月25日—9月30日。西南区域再生稻或晚稻开花期低温冷害最早发生期的分布特征与6—9月气温的分布特征类似，即平均气温越低的地区越早发生低温热害。

2.2　西南区域水稻关键生育期界限温度起始期预测模型

采用逐步回归的方法建立西南区域水稻关键生育期界限温度起始期(y)的预测模型，即根据各站点

所处地理位置的纬度(x_1)、经度(x_2)和海拔高度(x_3)可推算不同保证率下(80%、85%、90%、95%)水稻安全播种期、中稻开花期高温热害最早发生期、再生稻或晚稻开花期低温冷害的最早发生期。由表2可知，露地湿润育秧安全播种期、地膜旱育秧安全播种期、地膜湿润育秧安全播种期、再生稻或晚稻开花期低温冷害的最早发生期由各站点纬度(x_1)、经度(x_2)和海拔高度(x_3)计算得到，而中稻开花期高温热害的最早发生期由各站点纬度(x_1)和海拔高度(x_3)计算得到。

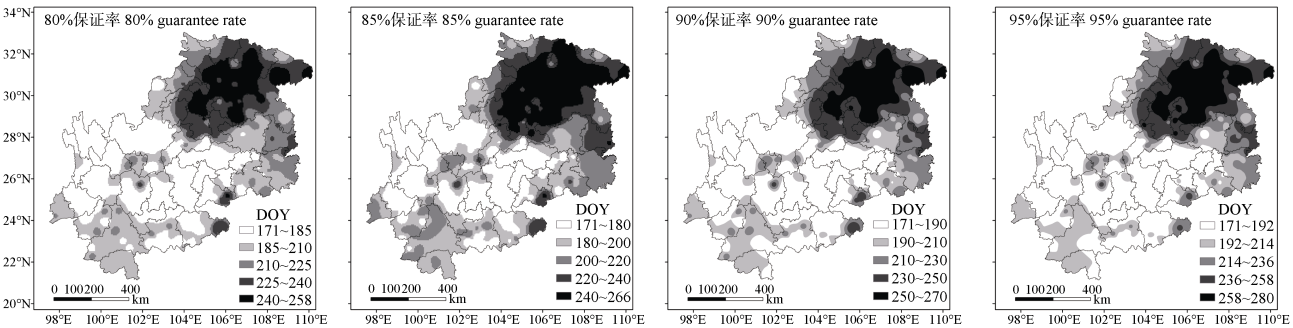

图 7　1961—2015 年不同保证率下西南区域再生稻或晚稻开花期低温冷害最早发生期(日序, DOY)的空间分布

Fig. 7　Distribution of the earliest occurrence date (Julian day, DOY) of chilling damage at flowering stage of ratooning or late rice under different guarantee rates in Southwest China from 1961 to 2015

表 2　西南区域水稻关键生育期界限温度起始期预测模型

Table 2　Prediction models of threshold temperature start dates of critical development stages of rice in Southwest China

项目 Item	模型 Model			
	80%保证率 80% guarantee rate	85%保证率 85% guarantee rate	90%保证率 90% guarantee rate	95%保证率 95% guarantee rate
露地湿润育秧安全播种期 Safe sowing date of rice seedlings without film-mulching in watered nursery	y=4.792x_1+5.462x_2+0.033x_3−644.664 (r^2=0.705)	y=4.700x_1+5.408x_2+0.033x_3−633.109 (r^2=0.695)	y=4.663x_1+5.380x_2+0.033x_3−627.569 (r^2=0.692)	y=4.541x_1+5.303x_2+0.034x_3−611.902 (r^2=0.672)
地膜旱育秧安全播种期 Safe sowing date of rice seedlings with film-mulching in dry nursery	y=4.164x_1+5.966x_2+0.028x_3−690.688 (r^2=0.712)	y=4.151x_1+5.950x_2+0.029x_3−685.266 (r^2=0.697)	y=4.153x_1+5.935x_2+0.029x_3−681.978 (r^2=0.688)	y=4.135x_1+5.907x_2+0.030x_3−674.388 (r^2=0.662)
地膜湿润育秧安全播种期 Safe sowing date of rice seedlings with film-mulching in watered nursery	y=4.567x_1+5.940x_2+0.030x_3−696.638 (r^2=0.723)	y=4.569x_1+5.888x_2+0.031x_3−687.993 (r^2=0.713)	y=4.541x_1+5.889x_2+0.031x_3−685.693 (r^2=0.706)	y=4.518x_1+5.830x_2+0.032x_3−674.693 (r^2=0.685)
中稻开花期高温热害的最早发生期(日平均气温指标) Earliest occurrence date of heat damage (based on daily average temperature) at flowering stage of middle-season rice	y=3.206x_1+119.623 (r^2=0.267)	y=3.247x_1−0.008x_3+126.121 (r^2=0.309)	y=3.310x_1−0.010x_3+126.806 (r^2=0.316)	y=3.516x_1−0.013x_3+127.023 (r^2=0.337)
中稻开花期高温热害的最早发生期(日最高气温指标) Earliest occurrence date of heat damage (based on daily maximum temperature) at flowering stage of middle-season rice	y=1.855x_1+156.723 (r^2=0.140)	y=2.146x_1+150.706 (r^2=0.176)	y=2.306x_1+147.282 (r^2=0.196)	y=2.446x_1−0.006x_3+149.670 (r^2=0.246)
再生稻或晚稻开花期低温冷害的最早发生期 Earliest occurrence date of chilling damage at flowering stage of ratooning or late rice	y=2.535x_1−1.199x_2−0.036x_3+295.772 (r^2=0.780)	y=3.036x_1−1.230x_2−0.039x_3+290.503 (r^2=0.780)	y=3.286x_1−1.241x_2−0.040x_3+287.483 (r^2=0.779)	y=3.914x_1−1.283x_2−0.044x_3+281.367 (r^2=0.772)

y 为水稻各关键生育期界限温度的起始期; x_1 为纬度; x_2 为经度; x_3 为海拔高度; r^2 为决定系数。y is the critical temperature occurrence period for rice at critical stages of development. x_1 is the latitude. x_2 is the longitude. x_3 is the altitude. r^2 is the determination coefficient.

由于篇幅所限，本文以四川合江和贵州湄潭2个站点为例，对比分析水稻关键生育期界限温度起始期实际值与模拟值的差异，由结果可知二者之间的相对误差绝对值都小于5%(表3)，说明预测模型的模拟效果较好。

3　讨论

本文在分析了1961—2015年西南区域不同保证率下水稻育秧安全播种期、水稻开花期高低温最早发生期的基础上，建立了水稻关键生育期界限温度起始期的预测模型。总体来看，西南区域水稻各关键生育期界限温度起始期的空间分布特征与对应时段平均气温的分布特征一致。建立的预测模型简单实用，仅需要定位水稻种植点所处地理位置的纬度、经度和海拔高度，便可以根据回归方程计算出该种植点水稻各关键生育期界限温度的起始期，这一方法有利于开展农业气象业务服务工作。露地湿润育秧安全播种期、地膜旱育秧安全播种期和地膜

表 3　西南区域典型站点水稻关键生育期界限温度起始期预测模型的验证

Table 3　Prediction model verification of critical temperature occurrence period of critical development stages of rice at typical sites in Southwest China

站点 Station	保证率 Guarantee rate (%)		*S*1	*S*2	*S*3	*S*4	*S*5	*S*6
四川合江 Hejiang of Sichuan	80	实际值(日序) Actual value (Julian day)	85	70	74	212	207	235
		模拟值(日序) Simulated value (Julian day)	83	68	72	211	210	232
		相对误差绝对值 Absolute value of the relative error (%)	2.4	2.3	2. 9	0.1	1.5	1.0
	85	实际值(日序) Actual value (Julian day)	88	74	77	216	210	245
		模拟值(日序) Simulated value (Julian day)	85	72	75	217	212	237
		相对误差绝对值 Absolute value of the relative error (%)	3.5	2.7	2.2	0.6	1.2	3.4
	90	实际值(日序) Actual value (Julian day)	90	76	79	218	212	250
		模拟值(日序) Simulated value (Julian day)	87	74	77	219	214	242
		相对误差绝对值 Absolute value of the relative error (%)	3.3	2.9	2.6	0.6	0.8	3.2
	95	实际值(日序) Actual value (Julian day)	94	81	83	223	217	262
		模拟值(日序) Simulated value (Julian day)	91	78	81	225	218	252
		相对误差绝对值 Absolute value of the relative error (%)	3.2	3.5	2.0	0.7	0.6	3.8
贵州湄潭 Meitan of Guizhou	80	实际值(日序) Actual value (Julian day)	106	92	97	219	218	202
		模拟值(日序) Simulated value (Julian day)	102	88	92	209	208	209
		相对误差绝对值 Absolute value of the relative error (%)	4.2	4.0	4.8	4.7	4.5	3.4
	85	实际值(日序) Actual value (Julian day)	110	97	101	225	219	204
		模拟值(日序) Simulated value (Julian day)	105	92	96	215	210	212
		相对误差绝对值 Absolute value of the relative error (%)	4.8	4.7	4.7	4.4	4.0	3.8
	90	实际值(日序) Actual value (Julian day)	112	99	103	226	219	205
		模拟值(日序) Simulated value (Julian day)	107	94	98	216	211	214
		相对误差绝对值 Absolute value of the relative error (%)	4.5	4.9	5.0	4.4	3.5	4.2
	95	实际值(日序) Actual value (Julian day)	116	102	107	227	221	207
		模拟值(日序) Simulated value (Julian day)	111	99	103	218	213	217
		相对误差绝对值 Absolute value of the relative error (%)	4.2	2.9	4.0	4.0	3.7	5.0

*S*1 为露地湿润育秧安全播种期; *S*2 为地膜旱育秧安全播种期; *S*3 为地膜湿润育秧安全播种期; *S*4 为中稻开花期高温热害的最早发生期(日平均气温指标); *S*5 为中稻开花期高温热害的最早发生期(日最高气温指标); *S*6 为再生稻或晚稻开花期低温冷害的最早发生期。*S*1 is the safe sowing date of rice seedlings without film-mulching in watered nursery. *S*2 is the safe sowing date of rice seedlings with film-mulching in dry nursery. *S*3 is the safe sowing date of rice seedlings with film-mulching in watered nursery. *S*4 is the earliest occurrence date of heat damage (based on daily average temperature) at flowering stage of middle-season rice. *S*5 is the earliest occurrence date of heat damage (based on daily maximum temperature) at flowering stage of middle-season rice. *S*6 is the earliest occurrence date of chilling damage at flowering stage of ratooning or late rice.

湿润育秧安全播种期的预测可保障水稻的正常播种。中稻开花期高温热害最早发生期、再生稻或晚稻开花期低温冷害最早发生期的预测保证了水稻遇高低温灾害时可提前采取防御措施, 以达到防灾减灾的目的。

本研究建立的预测模型尚有一些需要改进的方面。首先, 构建的预测模型自变量即预测因子的个数较少, 可能较难保证模型具有较高的预测准确率[34]。比如, 高温对水稻产量的影响与相对湿度有密切的关系, 相关报道较多[4,14,35]。但目前关于温度影响水稻生产相关模型评估方面较少考虑相对湿度的影响, 本文建立的预测模型基于纬度、经度和海拔高度的影响, 未来将考虑加入相对湿度等变量进行模型评估和预测。其次, 本研究基于西南区域317个气象站点的资料构建了水稻各关键生育期界限温度起始期的预测模型。然而, 西南地区种植制度复杂, 轮作作物多样, 据研究, 1961—2010年四川省和贵州省的水稻种植面积呈现略微减小的趋势, 而云南省基本不变, 西南冬小麦种植面积先增后减, 玉米种植面积总体呈增加趋势[36]; 加之西南不同区域间地形地貌、气候特点差异显著, 未来将考虑将西南划分为不同区域建立预测模型, 以提高预测的针对性和准确率。

农业界限温度是指作物、牲畜等生长发育或某农业活动、物候现象的起始、终止及转折的温度[28]。农业界限温度起始期或终止期预报的特点在于紧密结合农业生产对象, 可为作物安全播种及防灾减灾提供依据与指导。目前, 数理统计模型和作物生理

生态模型是确定农业界限温度发生期，特别是农业气象灾害预报的主要方法。当然，任何一种方法都有其不足的地方，数理统计方法解释性较差且预报效果不很稳定，作物生理生态模拟在由田间尺度扩展至区域尺度时的误差较大。因而，农业气象学和动力气候学、天气气候学等学科的结合，数理统计模型和生理生态动力模型的结合，卫星遥感动态监测和预警模式的综合集成将是农业气象预报的有效方法[8]。

无论是基于数理统计方法还是作物生理生态模型的模拟方法都应该以农业气象指标的研究作为前提。本文根据试验分析和前人的研究结果确定了西南地区水稻关键生育期的界限温度指标，然而，各类指标都具有一定的时间与空间尺度范围，还不能综合反映西南不同地区的自然条件、作物品种、下垫面、人类活动等要素的影响。因此，指标的确定还要充分考虑作物不同生育阶段对界限温度的敏感程度差异、各种气象要素对作物生长发育的综合影响，并结合作物生长发育过程、生理特征及受害的影响，以不断提高评估和预报的准确性[37]。

4 结论

在中国西南区域，80%~95%保证率下，云南南部的水稻育秧安全播种期最早，云南北部、四川攀西南部和盆地中部、重庆大部和贵州部分地区次之，而其余地区最晚。80%~95%保证率下中稻开花期高温热害主要发生在四川盆地、重庆、贵州北部和东南部。80%~95%保证率下再生稻或晚稻开花期低温冷害最早出现在云南和贵州大部、四川攀西地区，四川盆地西部、贵州东北部次之，其余地区偏晚。基于纬度、经度和海拔高度建立的西南区域水稻各关键生育期界限温度起始期预测模型，简单实用，且模拟效果较好。

研究结论可为西南水稻安全生产、防灾减灾等提供理论依据。首先，根据安全播种期适时调整水稻实际播种期，使水稻关键生育期错过灾害高发时段，趋利避害。其次，通过概率决策选择能充分利用当地热量资源并能获得最大经济效益的水稻品种作为主栽品种，可确保水稻生产的稳产与高产[38]。

参考文献 References

[1] 高亮之, 郭鹏, 张立中, 等. 中国水稻的光温资源与生产力[J]. 中国农业科学, 1984, 17(1): 17–23
GAO L Z, GUO P, ZHANG L Z, et al. Light and heat resources and potential productivity of rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1984, 17(1): 17–23

[2] 代姝玮, 杨晓光, 赵孟, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化Ⅱ. 西南地区农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 442–452
DAI S W, YANG X G, ZHAO M, et al. Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change. Ⅱ. Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in Southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2): 442–452

[3] 庞艳梅, 刘佳, 陈超. 四川省单季稻高低温致灾因子危险性分析[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2017, 39(8): 9–16
PANG Y M, LIU J, CHEN C. Analysis of high and low temperature hazard risks for single cropping rice in Sichuan[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2017, 39(8): 9–16

[4] 刘佳, 陈超, 张玉芳, 等. 四川单季稻抽穗扬花期和灌浆结实期高温热害时空特征[J]. 中国农业气象, 2018, 39(1): 46–58
LIU J, CHEN C, ZHANG Y F, et al. Space-time distribution of high temperature disasters on single-cropping rice during heading-flowering stage and filling-harvest stage in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(1): 46–58

[5] 熊洪, 徐富贤, 张林, 等. 西南稻区水稻高温缓解技术研究[J]. 中国稻米, 2016, 22(5): 15–19
XIONG H, XU F X, ZHANG L, et al. Study on high temperature mitigation measures of rice in Southwest China[J]. China Rice, 2016, 22(5): 15–19

[6] 杨仕华, 余常水, 程本义. 孕穗期自然低温对籼型杂交水稻的影响分析[J]. 杂交水稻, 2003, 18(6): 51–54
YANG S H, YU C S, CHENG B Y. The effect of natural low temperature in booting stage on Indica hybrid rice[J]. Hybrid Rice, 2003, 18(6): 51–54

[7] 阮仁超, 陈惠查, 游俊梅, 等. 籼型杂交水稻低温障碍型耐冷性研究[J]. 西南农业学报, 2007, 20(6): 1157–1161
RUAN R C, CHEN H C, YOU J M, et al. Characteristics of cold tolerance in Indica hybrid rice varieties with low temperature obstruction[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2007, 20(6): 1157–1161

[8] 郭建平. 农业气象灾害监测预测技术研究进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5): 620–630
GUO J P. Research progress on agricultural meteorological disaster monitoring and forecasting[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(5): 620–630

[9] BOKEN V K. Improving a drought early warning model for an arid region using a soil-moisture index[J]. Applied Geography, 2009, 29(3): 402–408

[10] PAULO A A, FERREIRA E, COELHO C, et al. Drought class transition analysis through Markov and Loglinear models, an approach to early warning[J]. Agricultural Water Management, 2005, 77(1/2): 59–81

[11] 魏风英, 张京江. 华北地区干旱的气候背景及其前兆强信号[J]. 气象学报, 2003, 61(3): 354–363
WEI F Y, ZHANG J J. Climatological background and previous stronger signal of anomaly drought over North China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(3): 354–363

[12] 康西言, 顾光芹, 史印山, 等. 冬小麦干旱指标及干旱预测模型研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 860–865
KANG X Y, GU G Q, SHI Y S, et al. Drought indices and prediction models for winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 860–865

[13] LOBELL D B, BÄNZIGER 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

[14] 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, 26(3): 1249–1254
YANG Y Y, HE Y K, LUO Z Z, et al. Study on monitoring and early warning technology of rice heat injury in the three gorges reservoir area[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(3): 1249–1254

[15] 何亮, 吴门新, 侯英雨, 等. 基于极值概率分布函数的中国早稻高温热害时空分布统计特征[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(11): 1601–1612
HE L, WU M X, HOU Y Y, et al. Statistical characteristics of heat stress in early rice based on extreme value distribution in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(11): 1601–1612

[16] 那家风. 基于均生函数水稻扬花低温冷害程度的 EOF 预测模型[J]. 中国农业气象, 1998, 19(4): 50–52
NA J F. EOF analysis and forecast model based on periodic function of rice chilling damage weather[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1998, 19(4): 50–52

[17] 余会康, 郭建平. 气候变化下东北水稻冷害时空分布变化[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(5): 594–601
YU H K, GUO J P. Variation in spatial and temporal distribution of chilling injury of rice under climate change in Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(5): 594–601

[18] 马玉平, 王石立, 李维京. 基于作物生长模型的东北玉米冷害监测预测[J]. 作物学报, 2001, 37(10): 1868–1878
MA Y P, WANG S L, LI W J. Monitoring and predicting of maize chilling damage based on crop growth model in Northeast China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 37(10): 1868–1878

[19] 张光智, 徐祥德, 毛飞, 等. 气候模式-农业气象模式集成系统的小麦灌溉管理新途径[J]. 应用气象学报, 2001, 12(3): 307–316
ZHANG G Z, XU X D, MAO F, et al. A new approach of irrigation management for winter wheat by the climatic-agrometeorological model consensus system[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2001, 12(3): 307–316

[20] 赵艳霞, 王馥棠, 裘国旺. 冬小麦干旱识别和预测模型研究[J]. 应用气象学报, 2001, 12(2): 234–241
ZHAO Y X, WANG F T, QIU G W. A study of assessing and forecasting models of drought in agriculture[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2001, 12(2): 234–241

[21] 刘建栋, 王馥棠, 于强, 等. 华北地区农业干旱预测模型及其应用研究[J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 593–604
LIU J D, WANG F T, YU Q, et al. A drought prediction model in North China Plain and its application[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(5): 593–604

[22] 刘布春, 王石立, 庄立伟, 等. 基于东北玉米区域动力模型的低温冷害预报应用研究[J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 616–625
LIU B C, WANG S L, ZHUANG L W, et al, Study of low temperature damage prediction applications in EN, China based on a scaling-up maize dynamic model[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(5): 616–625

[23] 王雪姣, 潘学标, 陈超, 等. 基于 COSIM 模型的棉花冷害预测研究[J]. 棉花学报, 2012, 24(1): 52–61
WANG X J, PAN X B, CHEN C, et al. Forecasting cotton chilling damage based on COSIM[J]. Cotton Science, 2012, 24(1): 52–61

[24] 徐春春, 纪龙, 方福平, 等. 西南地区水稻产业发展现状及存在问题与对策[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(7): 142–146
XU C C, JI L, FANG F P, et al. Rice industry actuality, existing problems and solutions in southwest China[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2016, 44(7): 142–146

[25] 何永坤, 范莉, 阳园燕. 近 50 年来四川盆地东部水稻高温热害发生规律研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2011, 33(12): 39–43
HE Y K, FAN L, YANG Y Y. Study on the occurrence of high temperature-induced heat damage in rice in the east of Sichuan Basin in the past 50 years[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2011, 33(12): 39–43

[26] 罗孳孳, 阳园燕, 唐余学, 等. 气候变化背景下重庆水稻高温热害发生规律研究[J]. 西南农业学报, 2011, 24(6): 2185–2189
LUO Z Z, YANG Y Y, TANG Y X, et al. Study on characteristics of heat damage on rice in Chongqing in context of climatic change[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(6): 2185–2189

[27] 张桂莲, 陈立云, 雷东阳, 等. 水稻耐热性研究进展[J]. 杂交水稻, 2005, 20(1): 1–5
ZHANG G L, CHEN L Y, LEI D Y, et al. Progresses in research on heat tolerance in rice[J]. Hybrid Rice, 2005, 20(1): 1–5

[28] 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. GB/T 21985—2008 主要农作物高温危害温度指标[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 21985–2008 Temperature Index of High Temperature Harm for Main Crops[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008

[29] 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. GB/T 27959—2011 南方水稻、油菜和柑桔低温灾害[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 27959–2011 Low Temperature Disaster of Southern Rice, Rapeseed and Orange[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012

[30] 曲曼丽. 农业气候实习指导[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1991: 1–8

QU M L. Agricultural Climate Practice Instruction[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1991: 1–8

[31] SATAKE T, YOSHIDA S. High temperature-induced sterility in indica rices at flowering[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1978, 47(1): 6–17

[32] 高亮之, 李林, 金之庆. 中国水稻的气候资源与气候生态研究[J]. 农业科技通讯, 1986, (4): 5–8
GAO L Z, LI L, JIN Z Q. Climatic resources and climatic ecology research of Chinese rice[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 1986, (4): 5–8

[33] 高亮之, 李林. 水稻气象生态[M]. 北京: 农业出版社, 1992
GAO L Z, LI L. Rice Meteorological Ecology[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1992

[34] 吴立, 霍治国, 杨建莹, 等. 南方双季稻低温灾害等级预测[J]. 生态学杂志, 2016, 35(4): 925–933
WU L, HUO Z G, YANG J Y, et al. Prediction of levels of low temperature disaster to double cropping rice in southern China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(4): 925–933

[35] 谢晓金, 李秉柏, 李映雪, 等. 抽穗期高温胁迫对水稻产量构成要素和品质的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(3): 411–415
XIE X J, LI B B, LI Y X, et al. Effects of high temperature stress on yield components and grain quality during heading stage[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(3): 411–415

[36] 矫梅燕, 周广胜, 陈振林. 气候变化对中国农业影响评估报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2014
JIAO M Y, ZHOU G S, CHEN Z L. Assessment Report of Climatic Change Impacts on Agriculture in China[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2014

[37] 王石立, 郭建平, 马玉平. 从东北玉米冷害预测模型展望农业气象灾害预测技术的发展[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(1): 45–50
WANG S L, GUO J P, MA Y P. Advance in agrometeorological disasters' prediction as a case study on prediction models of cold injury in Northeast China[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2006, 22(1): 45–50

[38] 王春乙, 王石立, 霍治国, 等. 近 10 年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究进展[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 659–671
WANG C Y, WANG S L, HUO Z G, et al. Progress in research of agro-meteorological disasters in China in recent decade[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(5): 659–671