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

四川省水稻高温热害风险及灾损评估

陈超，庞艳梅，刘佳

引用本文:
陈超, 庞艳梅, 刘佳. 四川省水稻高温热害风险及灾损评估[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(4): 554–562.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180745

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

西南区域水稻关键生育期界限温度起始期的预测研究

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

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(8): 1172–1182 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180686

淮北平原夏玉米花期高温热害综合气候指标研究

Use of integrated climatic index to determine high temperature damage to summer maize at florescence in the Huaibei Plain

中国生态农业学报. 2015(8): 1035–1044 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150061

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

Statistical characteristics of heat stress in early rice based on extreme value distribution in China

中国生态农业学报. 2018, 26(11): 1601–1612 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180269

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

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 4 月 第 27 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2019, 27(4): 554−562

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180745

陈超, 庞艳梅, 刘佳. 四川省水稻高温热害风险及灾损评估[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(4): 554−562
CHEN C, PANG Y M, LIU J. Assessment of risk and yield loss of rice in Sichuan Province due to heat stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(4): 554−562

四川省水稻高温热害风险及灾损评估*

陈 超[1,2], 庞艳梅[1**], 刘 佳[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. 四川省气候中心 成都 610072)

摘 要: 高温热害是四川省最主要的农业气象灾害之一, 研究高温热害对水稻的影响对于四川省农业可持续发展、保障水稻的安全生产具有重要意义。本文以 1981—2015 年四川省 84 个气象台站的逐日气象资料、农业气象观测站水稻生育期资料和县级水稻产量资料为基础, 利用水稻高温热害指数, 构建四川省水稻关键生育期和全生育期综合高温热害风险模型; 分离水稻气象产量, 建立高温热害影响下水稻气象产量与高温热害指数间的统计模型, 开展 1981—2015 年四川省水稻高温热害风险和灾损评估。研究结果表明: 四川省水稻抽穗扬花期, 高温热害较高风险区和高风险区主要集中在盆地东北大部和盆地南部的个别地区, 其中达州、广安和泸州的部分地区为高风险区。而低风险区主要分布在盆地西部、南部和川西南的大部地区。灌浆结实期, 水稻高温热害较高风险区和高风险区主要集中在盆地东北和盆地南部的大部分地区, 其中泸州大部、南充和宜宾的个别地区为高风险区。而低风险区主要分布在盆地北部、西部和川西南的大部地区。水稻全生育阶段高温热害较高风险区和高风险区主要集中在盆地东北和盆地南部的大部分地区, 其中泸州、南充和达州的部分地区为高风险区。而低风险区主要分布在盆地北部、西部和川西南的大部地区。构建的水稻高温热害灾损评估模型简单实用, 验证结果表明高温热害年水稻统计产量与模拟产量间的相对误差绝对值都小于 1.5%, 建立的模型能反映四川省高温热害对水稻产量的影响, 同时能够较好地评估高温热害下四川省水稻的产量损失。进一步的灾损评估结果表明, 高温热害危害下代表站点水稻的减产率为 5.6%~10.2%。

关键词: 水稻; 高温热害; 风险; 灾损; 四川省

中图分类号: S166 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-6237(2019)04-0554-09

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

CHEN Chao[1,2], PANG Yanmei[1**], LIU Jia[3]

(1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration / Key Laboratory of Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. Provincial Key Laboratory of Water-Saving Agriculture in Hilly Areas of Southern China, Chengdu 610066, China; 3. Sichuan Provincial Climate Centre, Chengdu 610072, China)

* 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”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)、中国气象局西南区域重大科研业务项目(2014-08)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: 2018-08-07 接受日期: 2018-10-21

* This study was supported by the Key Special Project of National Key Research and Development Program of China “Food Production Enhancement and Efficiency Innovation” (2017YFD0300400), the Science and Technology Development Project of Sichuan Province Key Laboratory of Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin (2018-key-05-01), the Southwest Regional Major Scientific and Operational Projects of China Meteorological Administration (2014-08) and the Basic Business Project of Institute of Plateau Meteorology, Chinese Meteorological Administration (BROP201817).

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

Received Aug. 7, 2018; accepted Oct. 21, 2018

Abstract: Under global climate change, agricultural meteorological disasters have been increasing. Heat stress has been one of the most important agrometeorological disasters in Sichuan Province, the affected area, frequency and intensity of heat stress have significantly changed. Therefore, research on the impact of heat stress on rice is critical for sustainable agricultural development and safe production in Sichuan Province. In this study, the following data were used to evaluate the risk of cultivation and yield loss of rice in Sichuan Province due to heat stress: 1) daily climate variables (average temperature, maximum temperature and relative humidity) from 84 meteorological stations in Sichuan Province for the period 1981–2015; 2) developmental stages (from heading to flowering, and from grain-filling to harvest) of rice in 84 agro-meteorological observation stations in Sichuan Province for the period 1981–2015; 3) rice yields for the 84 stations in Sichuan Province during the period 1981–2015. The hazard index of heat stress at different rice developmental stages were calculated based on the Chinese National Standard, GB/T 21985—2008 Temperature Index of High Temperature Harm for Main Crops. The meteorological yield of rice was separated from actual yield. And then the risk evaluation model for rice in Sichuan Province due to heat stress was constructed by using rice hazard index for the critical development stages and the whole growth period, and rice yield loss due to heat stress was evaluated. The results showed the average hazard index of heat stress in the period 1981–2015 was highest (6.0) for grain-filling to harvest growth stage, medium (5.0) for the whole growth period and lowest (4.0) for heading to flowering growth stage in Sichuan Province. For the heading-flowering stage, most of the northeast basin and parts of the southern basin were under high or sub-high-risk of heat stress. Dazhou, Guang'an and Luzhou were under high-risk. The western basin, southern basin and southwest Sichuan were under low-risk. For the filling to harvest stage, most of the northeast basin and the southern basin were under high or sub-high-risk of heat stress. Luzhou, part of Nanchong and Yibin were high-risk areas. Most of the western basin, northern basin and southwest Sichuan were low-risk areas. For the whole growth period, most of the northeast basin and southern basin were under high or sub-high-risk. Luzhou, Nanchong and Dazhou were high-risk areas. Most of the western basin, northern basin and southwest Sichuan were low-risk areas. The statistical model for rice yield loss due to heat stress was simple and practicable. Using Yanjiang, Yingshan, Longchang, Yanting and Dazhu as the case study, the differences in historical statistical yields and simulated yields of rice for the years of heat stress were analyzed. The relative error between the statistical yield and the simulated yield of rice affected by heat stress was less than 1.5%. The verification results showed that the model was synthetically reflective of the impact of heat stress on rice yield and that it highly accurately evaluated rice yield loss. The assessment showed that the range of yield loss of rice in typical areas of Sichuan due to heat stress was 5.6%–10.2%.

Keywords: Rice; Heat stress; Risk; Yield loss; Sichuan Province

高温热害是四川省水稻(*Oryza sativa*)生长过程中面临的主要农业气象灾害之一，尤其在四川省盆地东部和南部地区，发生的概率较高。1961—2017年，四川省最高气温≥35 ℃的高温日数呈显著增多趋势，平均每 10 年增多 1.3 d，以 20 世纪 90 年代中期以后增多更为明显，其中四川省盆地平均每 10 年增多 1.6 d。而水稻对于高温胁迫的敏感程度又因发育阶段的不同而有差异[1-3]，开花期和灌浆期是水稻最易受到高温热害危害的时期[4-5]。

IPCC第5次评估报告指出：气候变暖是非常明确的，而且比原来认识到的更加严重[6]。因此，未来气候变暖背景下，水稻生产面临的高温热害风险将更加严峻。有研究指出，到2030年代，全球水稻种植区中约16%的区域内水稻在生殖生长阶段可能遭遇5 d以上的高温危害，受灾面积也可能从2000年代的8%急剧上升到2050年代的27%[7]。由此可见，研究气候变化背景下高温热害风险及对水稻产量的可能影响，对防灾减灾、作物稳产增产意义重大[8]。前人采用历史统计、作物模型模拟等方法在农业气象灾害风险评估和作物产量灾损评价方面开展了大量研究。有学者从危险性指数方面开展了灾害风险评估，Wu等[9]、姚凤梅等[10]、谢志清等[11]分别利用作物特异性干旱指数和标准化降水指数、相对极端高温事件发生的频率和强度、高温持续日数和危害积温研究了作物干旱、高温等灾害的发生风险。该计算方法较为简单，但未考虑灾害的暴露性、脆弱性和防灾减灾能力。还有学者采用数学模型开展了灾害风险评估的研究，霍治国等[12]、ZHANG等[13]和ZOU等[14]、黄崇福[15]、杨平等[16]、张海萍等[17]分别采用理论概率分布函数、模糊数学、信息扩散原理等研究了作物干旱、洪涝等灾害风险和灾损风险度，该方法数学理论性较强，但对作物产量和灾害资料的长度和完整性要求较高。近几年来，很多学者开始从灾害发生的危险性、脆弱性、暴露性和防灾减灾等4个方面综合评估灾害风险，HAN等[18]、王春乙等[19]、张蕾等[20]分别从以上4个方面开展了中国西南干旱风险区划、长江中下游双季早稻高温热害风险区划以及海南岛冬季瓜菜寒害风险区划的研究，该方法从自然灾害形成机制的角度构建了风险评价模型，效果较好。另外，还有学者利用作物模型开展灾害风险评估，王春乙等[21]、张倩等[22]、李勇等[23]分别利用WOFOST和Oryza2000作物机理模型评估了作物

生长过程中的农业气象灾害风险，该方法机理性强，但模型所需参数较多，且需要试验数据对模型有效性进行验证。总体来看，目前农业气象灾害风险和灾损研究还未形成完善的评估理论与方法体系，模型的建立还在不断探索中。由于每种方法各有利弊，实际研究中还需根据资料的完整程度选择适合的评估方法。

四川省水稻高温热害风险评估及对产量影响方面的研究目前仍很薄弱，尤其缺乏水稻统计或观测数据对评估模型有效性的验证，目前的工作还不能满足四川省水稻安全生产及防灾减灾的需求。鉴于此，本文在前人研究的基础上，以气象资料、农业气象观测站水稻生育期资料和县级水稻产量资料为基础，选择影响水稻品质和产量的主要气象要素建立水稻高温热害指数，构建四川省水稻热害关键生育阶段风险指数模型，并建立高温热害影响下水稻气象产量与高温热害指数间的统计模型，开展四川省水稻高温热害风险评估和灾损评价。研究可为气候变化背景下四川省水稻安全生产提供依据。

1 资料与方法

1.1 研究区域和数据来源

四川省水稻以一季中稻为主，种植区主要分布在四川盆地、凉山彝族自治州和攀枝花。根据农业气候特征和地形特点，并结合《全国水稻高产创建技术规范模式图》，将四川省水稻种植区划分为 6 个区域(图 1)，包括盆西平丘区、盆中浅丘区、盆南丘陵区、盆东平行岭谷区、盆周边缘山地区、川西南山地区。研究发现每个种植区域内水稻生育期基本一致，且水稻单位面积产量差异不大，而不同种植区域间水稻生育期和产量差异明显[24]。

气象资料来自四川省气象探测数据中心，包括四川省水稻种植区 84 个气象台站 1961—2015 年的逐日平均气温、最高气温、相对湿度等。1981—2015 年水稻生育期资料来自四川省气象探测数据中心农业气象观测报表。1981—2015 年县级水稻产量资料来自四川省农业统计年鉴。

由于水稻对高温胁迫的敏感程度在不同发育阶段有差异[1-3]，其中开花期最敏感，灌浆期次之[4-5]。因而，本文重点考虑高温对水稻抽穗扬花和灌浆结实的影响。另外，由于各区域作物品种熟型、气候特征等存在差异，根据 1981—2015 年农业气象观测站水稻生育期观测资料，划分了四川省各稻区水稻的抽穗扬花期和灌浆结实期(表 1)。

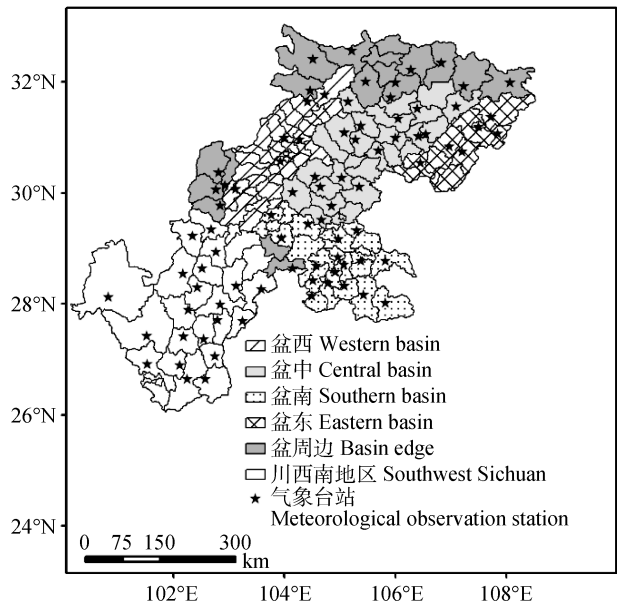

图 1 四川省水稻种植区划及气象台站的分布

Fig. 1 Regionalization of the rice-growing areas and meteorological stations in Sichuan Province

表 1 四川省水稻种植区不同区域抽穗扬花期和灌浆结实期的划分

Table 1 Division of heading-flowing and filling-harvest stages in different regions of rice-growing area in Sichuan Province

区域名称 Region name	抽穗—扬花期(月-日) Heading–flowering (month-day)	灌浆—结实期(月-日) Filling–harvest (month-day)
盆西平丘区 Plain and hill areas of western basin	08-01—08-10	08-11—09-11
盆中浅丘区 Hilly area of central basin	07-21—07-31	08-01—09-11
盆南丘陵区 Hilly area of southern basin	07-01—07-10	07-11—08-10
盆东平行岭谷区 Equal ridge-valley region of eastern basin	08-01—08-10	08-11—08-31
盆周边缘山地区 Mountain area around basin	08-11—08-20	08-21—09-30
川西南山地区 Southwest Sichuan	08-01—08-10	08-11—09-10

1.2 水稻高温热害指数构建

根据《主要农作物高温危害温度指标》[25]国家标准，定义日最高气温 35 ℃为水稻抽穗扬花期高温热害发生的界限温度，并考虑空气相对湿度和气温对水稻的综合影响[24]，水稻抽穗扬花期高温热害指数的计算公式为:

$$I_{\mathrm{HSf}}=\sum_{i=1}^{n}\left[D_{\mathrm{f}i}\cdot\left(\frac{T_{i\max}-T_{\mathrm{D}\max}}{T_{\max}-T_{\mathrm{D}\max}}+\frac{\mathrm{RH}_i-\mathrm{RH}_{\mathrm{D}}}{\mathrm{RH}_{\min}-\mathrm{RH}_{\mathrm{D}}}\right)\right] \quad (1)$$

$$D_{\mathrm{f}i}=\frac{n-i}{n} \quad (2)$$

式中: I_{HSf}为抽穗扬花期高温热害指数; $T_{i\max}$和 RH_i分别为抽穗扬花期第 i 天的日最高气温(℃)和相对湿度; $T_{\mathrm{D}\max}$和 RH_{D}分别为作物致害的最高气温(℃)和空气相对湿度(%), 本研究分别取值 35 ℃和 70%[26]; $T_{\max}$ 和 $\mathrm{RH}_{\min}$ 分别为历年抽穗扬花期的极端最高气温(℃)和极端最低相对湿度(%); $D_{\mathrm{f}i}$ 为抽穗扬花期第 i 天高温热害的权重系数; n 为抽穗扬花期的总天数。

根据《主要农作物高温危害温度指标》[25]国家标准, 综合考虑日最高气温和日较差对水稻灌浆结实的影响, 建立的水稻灌浆结实期高温热害指数为:

$$G_{\mathrm{HSf}}=\sum_{i=1}^{n}\left[D_{\mathrm{g}i}\cdot\left(\frac{T_{i\max}-T_{\mathrm{D}\max}}{T_{\max}-T_{\mathrm{D}\max}}+\frac{T_i-T_{\mathrm{D}}}{T_{\mathrm{av}\min}-T_{\mathrm{D}}}\right)\right] \quad (3)$$

$$D_{\mathrm{g}i}=\begin{cases}1 & (i<n/2)\\ \dfrac{n-1}{n} & (i\geqslant n/2)\end{cases} \quad (4)$$

式中: G_{HSf}为灌浆结实期高温热害指数; $T_{i\max}$为灌浆结实期第 i 天的日最高气温(℃); $T_{\mathrm{D}\max}$和 T_{D}分别为作物致害的最高气温和日平均气温, 本研究分别取值 35 ℃和 30 ℃; T_i为日平均气温(℃); $T_{\max}$和 $T_{\mathrm{av}\max}$分别为历年灌浆结实期的极端最高气温和日平均气温的最大值(℃); $D_{\mathrm{g}i}$为灌浆结实期第 i 天高温热害的权重系数; n 为灌浆结实期的总天数。

考虑抽穗扬花期和灌浆结实期高温热害对水稻生长的不利影响, 在综合两个阶段的热害指数, 获得全生育期综合热害指数, 计算公式为:

$$G_{\mathrm{HSf}}=I_{\mathrm{HSf}}\cdot a_{\mathrm{x}}+G_{\mathrm{HSf}}\cdot b_{\mathrm{y}} \quad (5)$$

式中: C_{HSf} 为全生育期综合热害指数; I_{HSf} 为抽穗扬花期高温热害指数; G_{HSf} 为灌浆结实期高温热害指数; a_{x}和 b_{y}为权重系数, 本文均取值 0.5。

为了研究四川省高温热害对水稻不同生育阶段的危害, 根据水稻高温热害指数的计算公式, 并结合刘佳等[24]对四川省水稻高温热害典型年的验证结果, 划分了四川省水稻抽穗开花期、灌浆结实期以及全生育期轻、中、重 3 个等级的高温热害指数(表 2)。由表 2 可知, 轻度高温热害危害下, 1981—2015 年四川省水稻抽穗开花期、灌浆结实期及全生育期的高温热害指数都小于 2.0, 热害强度为 1; 中度高温热害危害下, 水稻抽穗开花期、灌浆结实期及全生育期的高温热害指数分别在 2.0~4.0、2.0~6.0 和 2.0~5.0, 热害强度为 2; 重度高温热害危害下, 水稻抽穗开花期、灌浆结实期及全生育期的高温热害指数分别大于 4.0、6.0 和 5.0, 热害强度为 3。

表 2　四川省水稻不同生育阶段高温热害指数

Table 2　Heat stress index of rice at different developmental stages in Sichuan Province

高温热害等级 Level of heat stress	抽穗开花期 Heading–flowering stage	灌浆结实期 Filling–harvest stage	全生育期 Whole growth period	高温热害强度 Intensity of heat damage
轻度 Mild	$0\leqslant I_{\mathrm{HSf}}<2.0$	$0\leqslant G_{\mathrm{HSf}}<2.0$	$0\leqslant C_{\mathrm{HSf}}<2.0$	1
中度 Moderate	$2.0\leqslant I_{\mathrm{HSf}}<4.0$	$2.0\leqslant G_{\mathrm{HSf}}<6.0$	$2.0\leqslant C_{\mathrm{HSf}}<5.0$	2
重度 Severe	$4.0\leqslant I_{\mathrm{HSf}}$	$6.0\leqslant G_{\mathrm{HSf}}$	$5.0\leqslant C_{\mathrm{HSf}}$	3

I_{HSf}、G_{HSf}和 C_{HSf} 分别为抽穗开花期、灌浆结实期、全生育期综合高温热害指数。I_{HSf}, G_{HSf} and C_{HSf} are heat stress indexes of rice at heading-flowering stage, filling-harvest stage and whole growth season.

1.3　水稻高温热害风险指数

考虑水稻关键生育期高温热害频率与平均高温热害强度, 水稻高温热害的风险指数[27]为:

$$A'=F_{\mathrm{a}}\times T_{\mathrm{a}} \quad (6)$$

$$A=\frac{A'-A'_{\min}}{A'_{\max}-A'_{\min}} \quad (7)$$

式中: A'为某站点水稻高温热害风险指数, F_{a}为某站点水稻高温热害频率, T_{a} 为某站点水稻平均高温热害强度, A 为标准化后的某站点水稻高温热害风险指数, $A'_{\min}$和 $A'_{\max}$分别为全部站点中水稻高温热害风险指数的最小值和最大值。

利用水稻各生育阶段高温热害的指数, 统计水稻各生育阶段某站点的高温热害发生频率与高温热害强度, 公式为:

$$F_{\mathrm{a}}=G/N\times 100\% \quad (8)$$

$$T_{\mathrm{a}}=E/N \quad (9)$$

式中: F_{a}为某站点水稻某生育阶段的高温热害频率; G为水稻发生高温热害的年数; N为总年数; T_{a}表示水稻多年平均高温热害强度, 根据高温热害指数的级别, 定义轻度高温强度为1, 中度高温强度为2, 重度高温强度为3(划分标准见表2); E为多年高温热害强度之和。

基于水稻高温热害风险指数的计算方法, 依据《中国气象灾害大典》(四川卷)[28]中四川省水稻种植

区的灾情资料，确定了四川省水稻抽穗扬花期、灌浆结实期和全生育期综合高温热害风险等级(表3)，将四川省水稻高温热害风险划分为低风险区、中风险区、较高风险区和高风险区4个等级。

表 3 四川省水稻不同生育阶段高温热害不同风险等级的风险指数

Table 3 Risk indexes of different risk levels of heat stress of rice at different developmental stages in Sichuan Province

生育阶段 Developmental stage	风险等级 Risk level			
	低风险区 Low risk	中风险区 Medium risk	较高风险区 Sub-high risk	高风险区 High risk
抽穗扬花期 Heading–flowering stage	≤0.12	0.12~0.25	0.25~0.50	≥0.50
灌浆结实期 Filling–harvest stage	≤0.25	0.25~0.50	0.50~0.80	≥0.80
全生育期 Whole growth period	≤0.18	0.18~0.36	0.36~0.54	≥0.54

1.4 水稻气象产量的分离

将历史统计产量分离成趋势产量和气象产量之和[29]，即：

$$Y = Y_{\mathrm{i}} + Y_{\mathrm{s}} + \varepsilon \tag{10}$$

式中：Y为历史统计产量(kg·hm^{-2})；Y_{i}为趋势产量(kg·hm^{-2})；Y_{s}为气象产量(kg·hm^{-2})；ε着为随机误差，本研究中忽略不计。因此，水稻气象产量的计算公式为：

$$Y_{\mathrm{s}} = Y - Y_{\mathrm{i}} \tag{11}$$

1.5 水稻高温热害评估模型

1.5.1 水稻不同生育阶段高温热害指数与气象产量的统计模型

本文重点考虑高温对水稻抽穗扬花和灌浆结实的影响，建立水稻抽穗扬花期和灌浆结实期高温热害指数与气象产量的统计模型：

$$Y_{\mathrm{s}} = A \times P_{\mathrm{HSf}} + B \times Q_{\mathrm{HSf}} + C \tag{12}$$

式中：Y_{s}为气象产量(kg·hm^{-2})，P_{HSf}为标准化后的抽穗扬花期高温热害指数，Q_{HSf}为标准化后的灌浆结实期高温热害指数，A、B为系数；C为常数。标准化的计算方法[30]如下：

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \tag{13}$$

式中：X_{ij}为标准化后第i个对象的第j项指标值；x_{ij}为第i个对象的第j项指标值；$x_{j\min}$为第j项指标的最小值；$x_{j\max}$为第j项指标的最大值。

1.5.2 水稻高温热害灾损评估模型

发生高温热害后的水稻实际产量比未受灾的正常预测产量的减产百分比为：

$$Y_{\mathrm{d}} = \left(Y_{\mathrm{P}} - Y\right) / Y_{\mathrm{P}} \times 100\% \tag{14}$$

式中：Y_{d}为高温热害造成的水稻产量损失占不受灾下正常投入应得产量的百分比，Y_{p}为未受高温热害的正常预计产量，Y为发生高温热害后的实测产量。

$$Y_{\mathrm{p}} = Y_{\mathrm{i}} + Y_{\mathrm{s}} \tag{15}$$

式中：Y_{i}为趋势产量(kg·hm^{-2})，对统计产量进行正交多项式分离获得趋势产量；Y_{s}为气象产量(kg·hm^{-2})，式(12)中各生育阶段高温热害指数标准化指数取0。

2 结果与分析

2.1 水稻高温热害发生风险的空间分布

1981—2015年四川省水稻抽穗扬花期、灌浆结实期的高温热害风险分布见图2。抽穗扬花期(图2a)，水稻高温热害较高风险区和高风险区主要集中在盆地东北大部和盆地南部的个别地区，其中达州、广安和泸州的部分地区为高风险区。而低风险区主要分布在盆地西部、南部和川西南的大部地区。灌浆结实期(图2b)，水稻高温热害较高风险区和高风险区主要集中在盆地东北和盆地南部的大部分地区，其中泸州大部、南充和宜宾的个别地区为高风险区。而低风险区主要分布在盆地北部、西部和川西南的大部地区。水稻全生育阶段(图2c)，综合高温热害较高风险区和高风险区主要集中在盆地东北和盆地南部的大部分地区，其中泸州、南充和达州的部分地区为高风险区。而低风险区主要分布在盆地北部、西部和川西南的大部地区。

2.2 水稻趋势产量和气象产量的统计模型

水稻历史统计产量是趋势产量和气象产量之和。本研究对统计产量进行正交多项式分离以获得趋势产量，不同种植区域水稻趋势产量的统计模型如表4。

依据式(12)，建立水稻抽穗扬花期、灌浆结实期高温热害指数与气象产量的关系。不同种植区域水稻气象产量与高温热害指数的统计模型如表5。

2.3 水稻高温热害灾损评估

由于篇幅所限，本文以雁江、营山、隆昌、盐亭和大竹5个站点为例，对比分析各站点高温热害年水稻历史统计产量与模拟产量的差异，由结果可知二者之间的相对误差绝对值都小于1.5%(表6)，建立的模型能够反映不同生育阶段高温热害对水稻产量的影响，同时能够较好地评估高温热害下四川省水稻的产量损失。依据水稻高温热害灾损评估

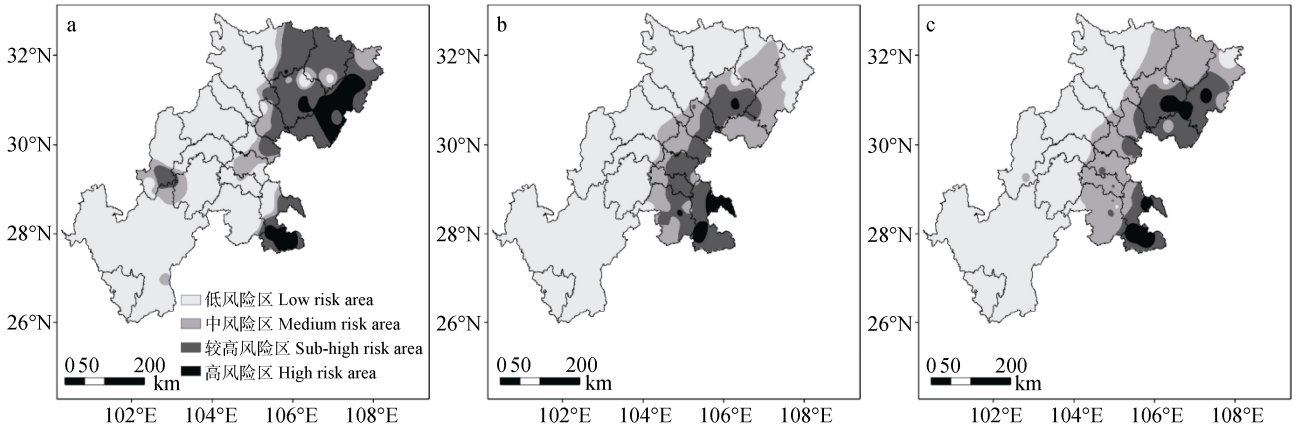

图 2　四川省水稻抽穗扬花期(a)、灌浆结实期(b)和全生育期(c)高温热害风险分布

Fig. 2　Risk of heat stress of rice during heading-flowering stage (a), filling-harvest stage (b) and whole growth period (c) in Sichuan Province

表 4　四川省水稻种植区不同区域水稻趋势产量的统计模型

Table 4　Statistical models of rice trend yield in different regions of rice-growing area in Sichuan Province

区域名称 Region name	统计模型 Statistical model
盆西平丘区 Plain and hill areas of western basin	$Y_i=0.219t^3-12.26t^2+222.61t+6\ 179.2$ ($R^2=0.279$, $P<0.01$)
盆中浅丘区 Hilly area of central basin	$Y_i=0.201t^3-12.39t^2+217.73t+6\ 298.9$ ($R^2=0.322$, $P<0.01$)
盆南丘陵区 Hilly area of southern basin	$Y_i=0.064t^3-5.93t^3+228.25t+4\ 523.2$ ($R^2=0.925$, $P<0.01$)
盆东平行岭谷区 Equal ridge-valley region of eastern basin	$Y_i=0.112t^3-10.45t^2+278.13t+5\ 178.1$ ($R^2=0.636$, $P<0.01$)
盆周边缘山地区 Mountain area around basin	$Y_i=0.459t^3-25.01t^2+459.16t+4\ 602.7$ ($R^2=0.833$, $P<0.01$)
川西南山地区 Southwest Sichuan	$Y_i=0.036t^3-4.41t^2+161.61t+5\ 446.1$ ($R^2=0.827$, $P<0.01$)

Y_i 为趋势产量(kg·hm^{-2}); t 为年序(1981 年, t=1); P 是显著性检验的概率。Y_i is the trend yield of rice (kg·hm^{-2}). t is the order of the year (for 1981, t=1). P is probability.

表 5　四川省水稻种植区不同区域水稻气象产量与高温热害指数关系的统计模型

Table 5　Statistical models for relationship between rice meteorological yield and heat stress index in different regions of rice-growing area in Sichuan Province

区域名称 Region name	统计模型 Statistical model
盆西平丘区 Plain and hill areas of western basin	$Y_s=29.705+21.659P_{HSf}-187.316Q_{HSf}$ (P=0.048)
盆中浅丘区 Hilly area of central basin	$Y_s=57.657+5.531P_{HSf}-339.921Q_{HSf}$ (P=0.023)
盆南丘陵区 Hilly area of southern basin	$Y_s=-1.825-198.307P_{HSf}+96.953Q_{HSf}$ (P=0.034)
盆东平行岭谷区 Equal ridge-valley region of eastern basin	$Y_s=120.456-402.165P_{HSf}-105.568Q_{HSf}$ (P=0.027)
盆周边缘山地区 Mountain area around basin	$Y_s=43.242-200.706P_{HSf}+140.014Q_{HSf}$ (P=0.046)
川西南山地区 Southwest Sichuan	$Y_s=-28.175+131.314P_{HSf}+29.165Q_{HSf}$ (P=0.039)

Y_s 为气象产量(kg·hm^{-2}); P_{HSf} 为标准化后的抽穗扬花期高温热害指数; Q_{HSf} 为标准化后的灌浆结实期高温热害指数; P 是显著性检验的概率。Y_s is the meteorological yield of rice (kg·hm^{-2}). P_{HSf} is the standardized heat stress index at heading-flowering stage. Q_{HSf} is the standardized heat stress index at filling-harvest stage. P is probability.

表 6　四川省典型站点高温热害年水稻统计产量与模拟产量的比较

Table 6　Comparison of statistical and simulated annual yield of rice in years with heat stress in typical station of Sichuan Province

站点 Station	高温热害年 Year of heat stress	统计产量 Statistical yield (kg·hm^{-2})	模拟产量 Simulated yield (kg·hm^{-2})	相对误差绝对值 Absolute relative error (%)
雁江 Yanjiang	1994	6 783	6 846	0.9
营山 Yingshan	2001	7 449	7 463	0.2
隆昌 Longchang	2006	7 356	7 421	0.9
盐亭 Yanting	2006	6 510	6 605	1.3
大竹 Dazhu	2007	6 874	6 980	1.5

模型，计算各站点发生高温热害后的历史统计产量比关键生育期未受灾的正常产量的减产率(表7)，由结果可知，高温热害下各站点水稻的减产率为5.6%~10.2%。

表 7 四川省典型站点高温热害年水稻的灾损评估

Table 7 Assessment on yield loss of rice caused by heat stress in typical stations of Sichuan Province

站点 Station	高温热害年 Year of heat stress	气象产量 Meteorological yield ($kg·hm^{-2}$)	趋势产量 Trend yield ($kg·hm^{-2}$)	统计产量 Statistical yield ($kg·hm^{-2}$)	正常投入的产量 Normal yield ($kg·hm^{-2}$)	减产率 Yield loss (%)
雁江 Yanjiang	1994	–394	7 240	6 783	7 553	10.2
营山 Yingshan	2001	–320	7 783	7 449	7 890	5.6
隆昌 Longchang	2006	–364	7 785	7 356	7 865	6.5
盐亭 Yanting	2006	–373	6 978	6 510	7 008	7.1
大竹 Dazhu	2007	–128	7 108	6 874	7 405	7.2

3 讨论

高温热害是四川省水稻开花、灌浆期最主要的灾害性天气之一，对水稻产量形成影响很大。冯明等[25]制订了国家标准《主要农作物高温危害温度指标》，本研究在此基础上，结合四川省稻区实际情况，提出高温热害累积指数的概念，构建了四川省水稻关键生育期的高温热害指标。刘佳等[24]利用四川省实际灾情资料对热害指数进行了验证，效果较好。由此可见，本文利用该指数进一步分析水稻高温热害风险及灾损，可信度较高。

本研究在计算水稻高温热害风险指数时，因高温热害频率和强度具有不同量纲，为了消除不同量纲对结果的影响，采用标准化方法[30]对风险指数进行处理，区划结果能较好地反映抽穗扬花和灌浆结实阶段高温热害对四川省稻区影响的空间差异。对于水稻高温热害高风险区的川东北大部和川南部分地区而言，需要选育高产优质抗逆性强的作物品种，或采取高效的栽培管理措施，以降低高温热害对水稻产量形成的不利影响[12]。本研究结论与何永坤等[31]的结果在分布范围上有少许差异，但分布规律总体一致，原因主要是站点和数据长度的选取有所不同。当然，本研究仅从危险性的角度分析了水稻高温热害风险，相比王春乙等[19]对长江中下游双季早稻高温热害的风险区划，没有考虑灾害的暴露性、脆弱性和防灾减灾能力。从自然灾害形成机制的角度来看，未来需综合考虑以上4个方面来构建四川省水稻高温热害风险评估模型，拟取得更贴近实际的评估效果。

本文对于水稻高温热害灾损评估的建模方法与赵俊芳等[32]基于干热风危害指数的黄淮海地区冬小麦(*Triticum aestivum*)干热风灾损评估方法类似，方法的合理性得到了验证。研究首先分离作物气象产量，然后构建灾害影响下作物气象产量与灾害危险指数间的统计模型，从而进行作物灾损评估。并以代表站点为例得出了分析结果，模拟效果总体较好。本文开展的四川省水稻高温热害灾损评估研究，对四川省高效防御高温危害、水稻安全生产及农业可持续发展等具有重要意义。

随着作物育种技术与栽培管理水平的不断提高，水稻高温热害指标和等级可能有所调整，且在不同种植区存在空间差异，这也可能影响灾害风险评估和灾损评价的结果，因此，在今后的研究中应该有所考虑。另外，高温热害过程常伴随干旱的发生，高温热害年通常也是干旱多发年。有研究指出，如果高温和干旱胁迫同时出现，水稻遭受的危害将高于两个单一灾害的累加[33]。同时，高温、高湿条件下病虫害的发生也会加剧[34]。因此，在分离高温热害年水稻气象产量时往往很难避免其中干旱、病虫害等其他因素对产量的影响，这可能导致分析结果被高估，今后的研究中应寻找更优的方法对产量进行分离，以提高评估的准确性。其次，研究结果的准确性与所用数据的准确性和客观性紧密相关。当前，在各省的农业气象观测中仍然以简单器测、报表记录和纸质存档等方式为主，这就造成观测数据准确性不高，加上对于农业气象灾害的田间观测不足，也造成研究结果存在较大不确定性。因此，今后随着田间观测资料的不断完善与指标研究的不断提高，研究当中的不确定性也会逐步下降[32]。

4 结论

根据水稻高温热害风险评估模型分析指出，1981—2015年，四川省水稻抽穗扬花期、灌浆结实期和全生育期高温热害较高风险区和高风险区主要集中在盆地东北大部和盆地南部的部分地区，其中达州、南充、宜宾、泸州的部分地区为高风险区，而

低风险区主要分布在盆地西部、北部和川西南的大部地区。风险区划结果可为四川省水稻防灾减灾提供科学指导。

通过建立水稻高温热害指数与气象产量的统计模型，评估高温热害导致的水稻产量减产率。以雁江、营山、隆昌、盐亭和大竹的结果为例，高温热害年水稻统计产量与模拟产量间的相对误差绝对值都小于1.5%，说明评估模型能较好反映四川省高温热害对水稻产量的影响。高温热害灾损评估分析指出，1981—2015年高温热害危害下各站点水稻的减产率为5.6%~10.2%。研究可为气候变化背景下四川省水稻安全生产提供科学依据。

参考文献 References

[1] 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

[2] TAO F L, 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

[3] 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

[4] 霍治国, 王石立. 农业和生物气象灾害[M]. 北京: 气象出版社, 2009
HUO Z G, WANG S L. Agricultural and Biological Meteorological Disasters[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009

[5] 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, 30(S1): 172–176
MA B, LI M S, SONG J Q, et al. Review on high-temperature stress to rice[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(S1): 172–176

[6] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group Ⅰ to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013

[7] GOURDJI S M, SIBLEY A M, LOBELL D B. Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: Historical trends and future projections[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(2): 2441

[8] 熊伟, 冯灵芝, 居辉, 等. 未来气候变化背景下高温热害对中国水稻产量的可能影响分析[J]. 地球科学进展, 2016, 31(5): 515–528
XIONG W, FENG L Z, JU H, et al. Possible impacts of high temperatures on China's rice yield under climate change[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(5): 515–528

[9] WU H, HUBBARD K G, WILHITE D A. An agricultural drought risk-assessment model for corn and soybeans[J]. International Journal of Climatology, 2004, 24(6): 723–741

[10] 姚凤梅, 张佳华. 1981—2000 年水稻生长季相对极端高温事件及其气候风险的变化[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(4): 37–42
YAO F M, ZHANG J H. Change of relative extreme high temperature events and climate risk in rice growing period in China from 1981 to 2000[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(4): 37–42

[11] 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, 39(6): 774–781
XIE Z Q, DU Y, GAO P, et al. Impact of high-temperature on single cropping rice over Yangtze-Huaihe River valley and response measures[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(6): 774–781

[12] 霍治国, 李世奎, 王素艳, 等. 主要农业气象灾害风险评估技术及其应用研究[J]. 自然资源学报, 2003, 18(6): 692–703
HUO Z G, LI S K, WANG S Y, et al. Study on the risk evaluation technologies of main agrometeorological disasters and their application[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(6): 692–703

[13] ZHANG D, WANG G L, ZHOU H C. Assessment on agricultural drought risk based on variable fuzzy sets model[J]. Chinese Geographical Science, 2011, 21(2): 167–175

[14] ZOU Q, ZHOU J Z, ZHOU C, et al. Comprehensive flood risk assessment based on set pair analysis-variable fuzzy sets model and fuzzy AHP[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(2): 525–546

[15] 黄崇福. 自然灾害风险分析与管理[M]. 北京: 科学出版社, 2012
HUANG C F. Risk Analysis and Management of Natural Disasters[M]. Beijing: Science Press, 2012

[16] 杨平, 张丽娟, 赵艳霞, 等. 黄淮海地区夏玉米干旱风险评估与区划[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1): 110–118
YANG P, ZHANG L J, ZHAO Y X, et al. Risk assessment and zoning of drought for summer maize in the Huang-Huai-Hai Region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(1): 110–118

[17] 张海萍, 陈利顶, 王晓燕, 等. 气候波动对海伦市粮食产量影响的风险分析[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1345–1350
ZHANG H P, CHEN L D, WANG X Y, et al. Risk analysis of climate variability on food production in Hailun, Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(6): 1345–1350

[18] HAN L Y, ZHANG Q, MA P L, et al. The spatial distribution characteristics of a comprehensive drought risk index in southwestern China and underlying causes[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 124(3/4): 517–528

[19] 王春乙, 姚蓬娟, 张继权, 等. 长江中下游地区双季早稻冷害、热害综合风险评价[J]. 中国农业科学, 2016, 49(13): 2469–2483
WANG C Y, YAO P J, ZHANG J Q, et al. Risk assessment of cold and hot damages for double-cropping early rice (DCER) in lower-middle reaches of the Yangtze river basin[J]. Scien-

tia Agricultura Sinica, 2016, 49(13): 2469–2483

[20] 张蕾, 霍治国, 黄大鹏, 等. 海南冬季主要瓜菜寒害风险区划[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(10): 1240–1251
ZHANG L, HUO Z G, HUANG D P, et al. Winter chilling damage risk zoning for watermelon and vegetables in the Hainan Island[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(10): 1240–1251

[21] 王春乙, 张雪芬, 赵艳霞. 农业气象灾害影响评估与风险评价[M]. 北京: 气象出版社, 2010
WANG C Y, ZHANG X F, ZHAO Y X. Impact Evaluation and Risk Assessment of Agrometeorological Disasters[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2010

[22] 张倩, 赵艳霞, 王春乙. 长江中下游地区高温热害对水稻的影响[J]. 灾害学, 2011, 26(4): 57–62
ZHANG Q, ZHAO Y X, WANG C Y. Study on the impact of high temperature damage to rice in the lower and middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4): 57–62

[23] 李勇, 杨晓光, 叶清, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 Ⅸ. 长江中下游地区单双季稻高低温灾害风险及其产量影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(19): 3997–4006
LI Y, YANG X G, YE Q, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China Ⅸ. The risk of high and low temperature disasters for single and double rice and its impacts on rice yield in the middle-lower Yangtze Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(19): 3997–4006

[24] 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

[25] 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

[26] 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

[27] 陈晓艺, 马晓群, 孙秀邦. 安徽省冬小麦发育期农业干旱发生风险分析[J]. 中国农业气象, 2008, 29(4): 472–476
CHEN X Y, MA X Q, SUN X B. Risk analysis of agricultural drought for winter wheat during growing period in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(4): 472–476

[28] 温克刚, 詹兆渝. 中国气象灾害大典(四川卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2006
WEN K G, ZHAN Z Y. China Meteorological Disasters Encyclopaedia (Sichuan)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006

[29] 刘静, 马力文, 张晓煜, 等. 春小麦干热风灾害监测指标与损失评估模型方法探讨——以宁夏引黄灌区为例[J]. 应用气象学报, 2004, 15(2): 217–225
LIU J, MA L W, ZHANG X Y, et al. A method for monitoring dry-hot wind of spring wheat and estimating its yield losses: An example in irrigated areas of Ningxia[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2004, 15(2): 217–225

[30] 中国气象局. QX/T 383—2017 玉米干旱灾害风险评价方法[S]. 北京: 中国气象出版社, 2017
China Meteorological Administration. QX/T 383—2017 Assessment Method for Maize Drought Disaster Risk[S]. Beijing: China Meteorological Press, 2017

[31] 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

[32] 赵俊芳, 赵艳霞, 郭建平, 等. 基于干热风危害指数的黄淮海地区冬小麦干热风灾损评估[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5287–5293
ZHAO J F, ZHAO Y X, GUO J P, et al. Assessment of the yield loss of winter wheat caused by dry-hot wind in Huanghuaihai Plain based on the hazard index of dry-hot wind[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5287–5293

[33] 梁嘉荧, 蔡一霞. 高温干旱对水稻产量、品质及剑叶生理特性影响研究综述[J]. 中国农学通报, 2013, 29(27): 1–6
LIANG J Y, CAI Y X. Review on the effects of high temperature and drought on yield, grain quality and the physiological characteristic of flag leaves in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(27): 1–6

[34] 李淑华. 气候变暖对我国农作物病虫害发生、流行的可能影响及发生趋势展望[J]. 中国农业气象, 1992, 13(2): 46–49
LI S H. The possible impact of climate warming on the occurrence and prevalence of crop pests and diseases in China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1992, 13(2): 46–49