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

基于热害累计指数的四川单季稻高温热害综合风险评价

刘佳，卿清涛，陈超，张玉芳，邹雨伽

引用本文:
刘佳, 卿清涛, 陈超, 等. 基于热害累计指数的四川单季稻高温热害综合风险评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1440−1452.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190019

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

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

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

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

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

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190019

刘佳, 卿清涛, 陈超, 张玉芳, 邹雨伽. 基于热害累计指数的四川单季稻高温热害综合风险评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1440−1452
LIU J, QING Q T, CHEN C, ZHANG Y F, ZOU Y J. Risk assessment of hot damages for single-cropping rice based on accumulation index of heat stress in Sichuan[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(9): 1440−1452

基于热害累计指数的四川单季稻高温热害综合风险评价*

刘 佳[1,2], 卿清涛[1,2**], 陈 超[2,4**], 张玉芳[3], 邹雨伽[3]

(1. 四川省气候中心 成都 610072; 2. 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; 3. 四川省农业气象中心 成都 610072; 4. 南方丘区节水农业研究四川省重点实验室 成都 610066)

摘 要: 高温热害是四川主要农业气象灾害之一, 研究高温热害对水稻的风险区划, 对保障水稻产量及农业可持续发展有重要意义。本文利用四川单季稻种植区 1986—2015 年气象观测资料、农业气象观测资料、社会统计资料以及基础地理信息资料, 以单季稻生育敏感期(抽穗扬花期和灌浆结实期)为研究时段, 选取热害累积指数、地形、产量变异度、农村经济等因子, 分别构建了危险性、脆弱性、暴露性和防灾减灾能力 4 个风险因子, 利用灰色关联度方法构建了四川单季稻高温热害“四因子”风险评价模型并对种植区进行风险区划。结果显示, 高风险区主要分布在盆东平行岭谷区、盆中浅丘区、盆周边缘山地区的西部, 以及盆南丘陵区的南部, 该类型区域地势平缓, 高温热害频繁。中等风险区主要集中在盆西平丘区和川西南中山山地区, 该类型区域灌溉条件优越, 社会经济水平发达, 应对高温热害风险水平较高。低风险区主要集中在川西南中山宽谷区以及盆周边缘山地区, 该类型区域地形较复杂, 水稻种植较少, 受高温热害影响偏小。四川盆地单季稻高温热害风险存在显著地区差异, 应根据各自区域的风险特征选用适合的品种和方式提高防灾减灾能力。

关键词: 四川盆地; 单季稻; 高温热害累积指数; 风险评价

中图分类号: S166

文章编号: 2096-6237(2019)09-1440-13 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

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

LIU Jia[1,2], QING Qingtao[1,2**], CHEN Chao[2,4**], ZHANG Yufang[3], ZOU Yujia[3]

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

* 四川省科技厅应用基础研究项目(2018JY0643, 2018JY0341)、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, 省重实验室 2018-重点-05-12)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: 卿清涛, 主要从事应用气象、气候风险区划的研究, E-mail: qingqt79531@foxmail.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
刘佳, 主要从事气候变化影响评价。E-mail: liujia851229@163.com

收稿日期: 2019-01-07 接受日期: 2019-05-28

* This study was supported by the Scientific and Technological Commission of Sichuan Science and Technology Agency (2018JY0643, 2018JY0341), 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, 2018-key-05-12) and the Basic Business Project of Institute of Plateau Meteorology, Chinese Meteorological Administration (BROP201817).

** Corresponding authors: QING Qingtao, E-mail: qingqt79531@foxmail.com; CHEN Chao, E-mail: chenchao16306@sina.com

Received Jan. 7, 2019; accepted May 28, 2019

Abstract: Under global climate change, agricultural meteorological disasters have been increasing. Heat stress has been one of the most important agro-meteorological disasters in Sichuan Province, and the affected area and frequency and intensity of heat stress have significantly changed. Therefore, research on the effect of heat stress on rice is critical for sustainable agricultural development and safe production in Sichuan Province. Heat damage risk of single-cropping rice in Sichuan was studied using meteorological, agricultural meteorological, statistical, and geographic data during 1986–2015. Four factors, which were hazard, sensitivity, exposure, and disaster prevention and mitigation capacity, were created with the cumulative high temperature-induced damage index, topography, yield variation, and rural economy as the basic indexes to evaluate heat damage risk during the sensitive stages of heading, flowering, and filling. A "Four Factors" multi-risk assessment index system of heat injury for single-cropping rice in Sichuan Province was established by using the Grey Correlation method, and used in the risk regionalization of single-cropping rice of the study area. The results of the multi-risk assessment model were valuable for making decisions to relieve disaster risk. The assessment results showed that the parallel ridge-valley region of the eastern basin, the shallow hilly area of the central basin, the west part of mountain area around the basin, and the southern hilly area of the southern basin were divided into high-risk areas with gentle topography and frequent heat damage. Plain and hill areas of the western basin and mountain area of southwest Sichuan were roughly divided into medium risk areas with good irrigation conditions, higher socioeconomic developmental levels, and good coping abilities. The wide valley area of Southwest Sichuan and mountain area around the basin were roughly divided into low risk areas where the regional topography is complex, and less rice is planted. In summary, there were clear differences in heat damage risks on single-cropping rice in different regions in Sichuan. Reasonable varieties and cultivation modes should be chosen to raise prevention and reduction ability based on different regional risk characteristics.

Keywords: Sichuan basin; Single-cropping rice; Accumulation index of heat stress; Risk assessment

气象灾害风险指气象灾害发生可能性的状态及对人类社会产生损失的估计, 具有自然和社会两种属性。2009年中国自然灾害共造成约5亿人(次)受灾, 直接经济损失约2 500亿元, 超过80%由气象及其次生灾害造成。中国大部分粮食生产地区都属于气象灾害高发区, 因此进行气象灾害风险评估, 并利用防灾减灾技术减少灾害影响, 是农业结构调整及经济建设的基础。中国是全球最大的水稻(*Oryza sativa*)生产国, 四川省作为全国13个粮食主产区之一, 水稻产量占粮食总产的42.6%[1]。由于复杂地形和大气环流的综合影响, 四川单季稻易受高温、冷害、干旱、洪涝等多种气象灾害的影响。其中, 四川单季稻受高温热害影响较严重, 因为单季稻生长关键期为7—9月, 在全球变暖的背景下, 这一时期极端高温频率增加, 单季稻遭受高温热害的概率也随之加大。

Peng等[2]研究发现, 在水稻生长期, 若平均夜晚最低温度增加1 ℃, 水稻产量下降约10%; 崔读昌[3]研究发现, 在不同的气象条件下, 温度每增加1 ℃, 我国水稻生育期平均将缩短7~8 d。20世纪70年代以来, 国内外对水稻高温热害指标进行了大量研究, 普遍认为日最高气温34~35 ℃对水稻开花期危害最大, 乳熟期前后日均温度超过30 ℃将对水稻产量造成不良影响[4]。刘佳等[5]研究四川盆地水稻高温热害时空变化规律发现: 近54年高温热害总次数呈显著上升趋势, 尤以2000年后增幅显著; 根据周期特征分析, 2015年后高温热害事件将继续增多, 在气候变暖的背景下, 高温热害的频率和范围呈现从平原向山地扩大的趋势。

国外对灾害风险的研究起步较早, 主要基于灾害模型和灾害损失模型的分析[6]。Maskrey[7]建议用"易损性+危险性"评估灾害风险度, Yamoah等[8]利用标准化降水指数(SPI)对美国内布拉斯加的玉米(*Zea mays*)进行干旱风险评估。中国农业气象灾害风险评估的研究始于20世纪80年代, 主要针对低温、干旱、洪涝等。近年来随着气候变暖, 我国水稻高温热害风险评估已成为新的研究热点。前人对高温热害影响水稻品质和产量及避抗方法等方面进行了探讨, 取得了相应的研究成果[9-10]。当前, 水稻高温热害风险评估方法可大致总结为3类: 基于数据的概率评估方法、基于指标的综合评估方法以及基于模型模拟的评估方法[11]。沙修竹等[12]揭示了长江中下游地区单季稻高温热害发生规律, 并利用作物模型计算灾损率, 完成灾害风险区划。张菡等[13]选取灾害频率、地形、经济等因子作为评估指标建立四川盆地水稻高温热害风险评估模型。但以往的研究主要利用日最高气温连续3 d≥35 ℃作为高温热害指标, 且缺少地形差异的评估, 研究范围也主要集中在长江中下游地区, 而四川盆地单季稻高温热害的研究较少。

笔者在前人研究的基础上, 引用高温热害累积指数概念, 综合考虑高温、日较差、相对湿度的共

同作用，改进传统高温指标，利用动态监测，结合四川地形特征，依据灾害风险理论，以单季稻生育敏感期(抽穗—结实期)为研究时段，从自然灾害形成机制的角度，分别对四川单季稻高温热害的危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力进行构建和探讨，并采用灰色关联度法建立单季稻高温热害综合风险评估模型及区划，为四川单季稻的防灾减损和种植制度调整提供科学依据。

1 研究资料与方法

1.1 研究区域概况

四川单季稻种植区位于 26°~33°N，100°~109°E，包括平行岭谷区、盆南丘陵低山区、盆地丘陵区、盆北山区、川西南山地干热河谷区、川西高原半湿润区和成都平原区(图 1)。四川盆地属于亚热带纬向性气候，盆地周围山区的垂直气候类型占主导地位。山地温带占相当面积，西缘山区有山地寒带出现，川西南山地以垂直气候为主，河谷与山间盆地地带为亚热带气候。种植区内年平均温度在 16~20 ℃，日均温≥10 ℃积温为 4 000~7 000 ℃·d，热量资源丰富，无霜期长，区域水资源较丰富，年降水量 950 mm 以上。

1.2 研究资料

气象观测资料：1986—2015 年四川水稻种植区域内 84 个国家级地面气象观测站日平均气温、最高气温、相对湿度等数据。

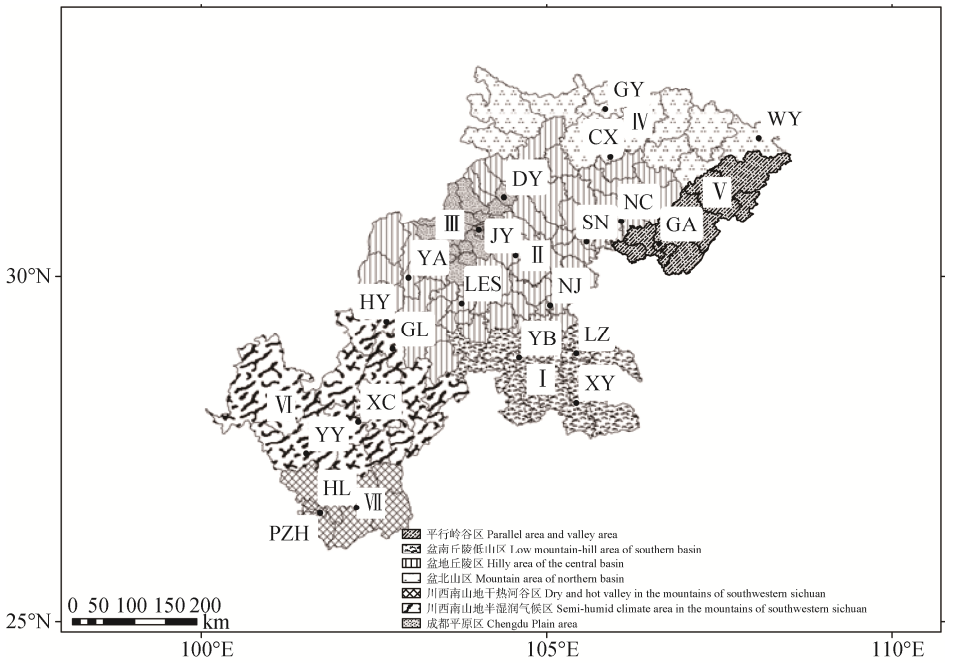

图 1 四川水稻种植区划分(7 个子区)及 84 个农业气象站的分布(GY: 广元; WY: 万源; CX: 苍溪; DY: 德阳; NC: 南充; SN: 遂宁; GA: 广安; YA: 雅安; JY: 简阳; LES: 乐山; NJ: 内江; HY: 汉源; GL: 甘洛; YB: 宜宾; LZ: 泸州; XY: 叙永; YY: 盐源; XC: 西昌; HL: 会理; PZH: 攀枝花)

Fig. 1 Distribution of the 7 rice-growing subareas and 84 meteorological stations in Sichuan Province (GY: Guangyuan; WY: Wanyuan; CX: Cangxi; DY: Deyang; NC: Nanchong; SN: Suining; GA: Guang'an; YA: Ya'an; JY: Jianyang; LES: Leshan; NJ: Neijiang; HY: Hanyuan; GL: Ganluo; YB: Yibin; LZ: Luzhou; XY: Xuyong; YY: Yanyuan; XC: Xichang; HL: Huili; PZH: Panzhihua)

农业气象观测资料：选用区域内 46 个农业气象观测站 1986—2015 年单季稻的发育资料(播种、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、乳熟、成熟期)、水稻空壳率及农业气象站所在县的平均产量资料。由于各区气候特点和水稻品种熟型有一定区别，因此，根据 1986—2015 年水稻生育期观测资料统计各区单季水稻的抽穗扬花和灌浆结实期，结果见表 1。

统计资料：四川省 1986—2016 年《统计年鉴》资料，《中国气象灾害大典(四川卷)》。

基础地理信息资料：DEM 地形高程数据资料由国家气候中心提供，空间分辨率为 30 m。

1.3 数据处理

1.3.1 热害指数

参考刘佳等[5]研究，利用单季稻抽穗扬花期高温热害累积指数(HIS_f)和灌浆结实期高温热害累积指数(HIS_g)表征逐年各站单季稻高温热害。HIS_f 计算公式如下:

$$HIS_f = \sum_{i=1}^{n}\left[D_{fi}\times\left(\frac{T_{i\max}-T_{D\max}}{T_{\max}-T_{D\max}}+\frac{RH_i-RH_D}{RH_{\min}-RH_D}\right)\right] \quad (1)$$

表 1　1986—2015 年四川盆地各水稻种植区单季稻抽穗扬花期和灌浆期统计

Table 1　Date of heading-flowering stage and filling-harvest stage of rice in each rice-growing subarea in Sichuan during 1986 to 2015

子区代码 Subarea code	区域名称 Subarea name	抽穗扬花期(月-日) Heading-flowing stage (month-day)	灌浆结实期(月-日) Filling-harvest stage (month-day)
Ⅰ	盆南丘陵区 Hilly area of southern basin	07-01—07-10	07-11—08-10
Ⅱ	盆中浅丘区 Hilly area of central basin	07-21—07-31	08-01—09-11
Ⅲ	盆西平丘区 Plain and hill areas of western basin	08-01—08-10	08-11—09-11
Ⅳ	盆周边缘山地区 Mountain area around basin	08-11—08-20	08-21—09-30
Ⅴ	盆东平行岭谷区 Equal ridge-valley region of eastern basin	08-01—08-10	08-11—08-31
Ⅵ	川西南中山山地区 Mountain area of southwestern Sichuan	08-01—08-10	08-11—09-10
Ⅶ	川西南中山宽谷区 Wide valley area of southwestern Sichuan	08-01—08-10	08-11—09-10

$$D_{fi}=\frac{n-i}{n} \tag{2}$$

式中: T_{Dmax}=35 ℃为致害最高气温, $\mathrm{RH_D}$=70%为空气相对湿度, $T_{i\mathrm{max}}$、RH_i为单季稻抽穗扬花期第 i 天的日最高气温和对应的空气相对湿度, T_{max} 为各年抽穗扬花期极端最高气温, $\mathrm{RH_{min}}$为各年极端最低相对湿度, n 为抽穗扬花期天数, D_{fi}为抽穗扬花期第 i 天高温危害权重系数。

$\mathrm{HIS_g}$计算公式为:

$$\mathrm{HIS_g}=\sum_{i=1}^{n}\left[D_{\mathrm{g}i}\times\left(\frac{T_{i\mathrm{max}}-T_{\mathrm{Dmax}}}{T_{\mathrm{max}}-T_{\mathrm{Dmax}}}+\frac{T_i-T_{\mathrm{D}}}{T_{\mathrm{avmax}}-T_{\mathrm{D}}}\right)\right] \tag{3}$$

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

式中: T_{Dmax}=35 ℃为致害最高气温, T_{D}=30 ℃为致害日平均气温, $T_{i\mathrm{max}}$为水稻灌浆结实期第 i 天日最高气温, T_i为第 i 天日平均气温, T_{max}为各年灌浆结实期极端最高气温, T_{avmax}为各年灌浆结实期日平均气温的最大值, n 为水稻灌浆结实期天数, $D_{\mathrm{g}i}$为灌浆结实期第 i 天高温热害危害权重系数[5]。

统计 1980—2014 年单季稻抽穗扬花和灌浆结实期典型高温年热害指数与空壳率的相关系数, 发现抽穗扬花期二者相关系数达 0.785, 灌浆结实期二者相关系数达 0.703, 均通过了 0.01 显著性检验。结合水稻空壳率确定单季稻高温热害监测指数等级划分标准(表 2)[5]。

1.3.2　极差标准化

由于各气象灾害风险区划指标具有不同的量纲, 因此首先须对初始值进行标准化归一, 以便参与最终区域风险度的计算。

表 2　基于高温热害累积指数(HIS)的水稻抽穗开花期和灌浆结实期高温热害等级

Table 2　Grading of hot damage at heading-flowering and filing-harvest stages according to the cumulative high temperature-induced damage index (HIS) for rice

热害等级 Grade of hot damage	抽穗开花期热害等级阈值 Threshold of hot damage at heading-flowering stage	灌浆结实期等级阈值 Threshold of hot damage at filling-harvest stage
轻度 Mild	$0\leq\mathrm{HIS_f}<2.0$	$0\leq\mathrm{HIS_g}<2.0$
中度 Moderate	$2.0\leq\mathrm{HIS_f}<4.0$	$2.0\leq\mathrm{HIS_g}<6.0$
重度 Severe	$4.0\leq\mathrm{HIS_f}$	$6.0\leq\mathrm{HIS_g}$

对于正向指标:

$$Y_{ij}=0.5+0.5\times\frac{X_{ij}-X_{ij\min}}{X_{ij\max}-X_{ij\min}} \tag{5}$$

对于负向指标:

$$Y_{ij}=0.5+0.5\times\frac{X_{ij\max}-X_{ij}}{X_{ij\max}-X_{ij\min}} \tag{6}$$

式中: Y_{ij}是第 i 站的第 j 指数的归一化值, X_{ij}是第 i 站的第 j 指数的初始值, $X_{ij\min}$和 $X_{ij\max}$分别是第 i 站的第 j 指标初始值中的最小值和最大值。

1.3.3　灰色关联度方法求权重

参考崔杰等[14]对灰色关联度权重方法的改进, 从专家对指标权重的经验值判断出发, 借鉴灰色相近关联度思路, 以最大专家经验判断值为参照序列, 利用下式计算指标的权重:

$$X=(X_1,X_2,\cdots,X_n)^T \tag{7}$$

$$X=\begin{bmatrix}x_1(1) & x_1(2)\cdots & x_1(m)\\ x_2(1) & x_2(2)\cdots & x_2(m)\\ \vdots & \ddots\ \ \cdots & \iddots\\ x_n(1) & x_n(2)\cdots & x_n(m)\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中: X 为每个指数权重的经验判断数据列, n 为评

价指标个数, m 为专家个数。

$$X_0=[x_0(1), x_0(2), \cdots, x_0(m)] \tag{9}$$

$$D_{0i}=\sum_{k=1}^{m}[x_0(k)-x_i(k)]^2 \tag{10}$$

从 X 中挑选一个最大的权重值作为“通用参考权重值”, 该值分配给各个专家的参考权重值, 形成参考数列 X_0。D_{0i} 为各指标序列 X_1, X_2, …, X_n 与参考数据 X_0 之间的距离。

$$w_i=\frac{1}{1+D_{0i}} \tag{11}$$

利用公式(11)计算权重。该方法独立于决策者的主观因素, 充分利用专家经验的主观信息, 同时利用数学模型进行指标权重的客观计算, 所得权重在反映主观程度的同时, 能够充分反映客观程度。

1.4 风险评价模型

1.4.1 危险性评价模型

$$G=\sum_{i=1}^{n} w_i \times P_i \tag{12}$$

式中: G 为不同生育期高温热害危险性; n=1, 2, 3 分别表示轻度、中度和重度高温热害; $w_i=\frac{\bar{d}_I}{\bar{\bar{d}}}$, 表示相应的不同热害等级权重, $\bar{d}_i$ 为不同等级热害发生的平均数, $\bar{\bar{d}}$ 为热害发生的平均数; P_i 表示相应不同等级热害发生频率。

$$H=\sum_{j=1}^{m} w_j \times G_j=\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} w_j \times w_i \times P_i \tag{13}$$

式中: H 为危险性指数; w_i 为生育期(j)高温热害权重。公式(13)定量反映四川单季稻种植区域高温热害发生的危险度。

1.4.2 脆弱性评价模型

脆弱性指某一潜在风险因素对承灾体产生的可能伤害程度。在相同灾害强度下, 承灾体的脆弱性越大, 灾害造成的破坏越严重, 灾害的风险也越大。水稻的脆弱性包括对外部压力的敏感性和适应性[15]。四川水稻种植区的高温热害主要发生在盆地中部的浅丘区和东北部的盆东平行岭谷区。由于受坡度、坡向、遮蔽等地形条件的影响, 高温热害在空间上存在较大差异。海拔越高, 河网越密集, 供水越方便, 高温热害的影响越小。因此本文选择海拔高程、坡度坡向、水系密度以及产量变异程度指标作为承灾体脆弱性的影响因子。

1)海拔的影响

利用四川地理信息数据提取出表征海拔高度的高程数据, 根据四川地形地貌特点基于地势越低, 高温热害风险性越大的原则将海拔高度分别按照<300 m、300~500 m、500~1 000 m、>1 000 m 进行 4 级划分, 利用高程标准差表示地形变化。高程越低、高程标准差越小, 越易形成高温热害, 地形高程及高程标准差的组合赋值见表 3。水系因子利用河网密度指数表示。

表 3 用于水稻高温热害脆弱性评价的地形高程及高程标准差的组合赋值

Table 3 Portfolio assignment of the terrain elevation and elevation standard deviation used for evaluation of hot damage vulnerability of rice

高程 Elevation	地形高程标准差 Elevation standard deviation		
	1 级 Level 1 (≤1 m)	2 级 Level 2 (1~10 m)	3 级 Level 3 (≥10 m)
1 级 Level 1(≤300 m)	0.9	0.8	0.7
2 级 Level 2(300~500 m)	0.8	0.7	0.6
3 级 Level 3 (500~1 000 m)	0.7	0.6	0.5
4 级 Level 4(≥1 000 m)	0.6	0.5	0.4

2)坡度坡向的影响

为了反映坡度坡向对孕灾环境的作用, 本研究将坡度和坡向相结合, 综合讨论地形因子对高温热害孕灾敏感性的影响。首先利用四川地理信息数据提取出坡度及坡向数据, 并组合进行赋值如表 4。

表 4 用于水稻高温热害脆弱性评价的地形坡度及坡向的组合赋值

Table 4 Portfolio assignment of the gradient and slope direction used for evaluation of hot damage vulnerability of rice

坡向 Slope direction	坡度 Gradient			
	1 级 (5°~10°) Level 1	2 级 (10°~15°) Level 2	3 级 (15°~20°) Level 3	4 级 (≥20°) Level 4
1 级 Level 1 (315°~45°)	0.4	0.3	0.2	0.1
2 级 Level 2 (225°~315°)	0.6	0.7	0.6	0.5
3 级 Level 3 (45°~135°)	0.5	0.4	0.6	0.2
4 级 Level 4 (135°~225°)	0.9	0.8	0.7	0.6

3)产量变异程度

从作物敏感性的角度选用产量变异程度表示单季稻脆弱性, 产量变异程度(P)的计算公式为:

$$P=\frac{1}{Y_{\max}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})^2}{n-1}} \tag{14}$$

式中: Y_i为第 i 年单季稻产量, $Y_{\max}$为数年产量最大值, n 为总年数。

本研究利用海拔高程、坡度坡向、水系密度以及产量变异程度指标作为因子, 利用层次分析法构建脆弱性评价模型:

$$V = w_{v1} \times A + w_{v2} \times S + w_{v3} \times N + w_{v4} \times P \quad (15)$$

式中: V 为脆弱性指数; A 为海拔高程影响指数, S 为坡度坡向影响指数, N 为水系密度影响指数, P 为产量变异程度指标; w_{v1}、w_{v2}、w_{v3}、w_{v4} 分别为对应的权重。

1.4.3 暴露性评价模型

暴露性指单季稻受到风险因素威胁的可能程度, 暴露性越高, 潜在损失越大, 风险越高。本研究利用四川单季稻种植面积与耕地面积的比值建立单季稻暴露性(E)评估模型。

$$E = \frac{S_{\mathrm{DCER}}}{S_{\mathrm{all}}} \quad (16)$$

式中: S_{DCER} 为区域内单季稻种植面积, S_{all} 为对应区域的耕地面积。

1.4.4 防灾减灾能力评价模型

防灾减灾能力是指人类利用防灾减损措施减少灾害损失的能力, 包括应急管理能力、减灾投入能力、资源准备能力等[16], 一般为主观因素。防止和减轻高温热害灾害的主要措施包括: 田间灌溉, 降低穗间温度, 调整水稻后期追肥, 投资改良耐高温品种, 加强对受影响农田的后期管理[17]。本研究从四川省 2016 年年鉴中选取能反映防灾减灾能力的农业机械总动力、农民人均纯收入和化肥施用量作为因子, 利用层次分析法构建防灾减灾评价模型:

$$R = w_{\mathrm{r1}} \times I + w_{\mathrm{r2}} \times M + w_{\mathrm{r3}} \times F \quad (17)$$

式中: R 为防灾减灾能力; I 为农民人均纯收入, M 为农业机械总动力, F 为农业化肥施用量; w_{r1}、w_{r2}、w_{r3} 分别为对应的权重。

1.4.5 高温热害风险评价模型

基于自然灾害风险理论, 建立四川单季稻高温热害风险评估“四因子”模型。4 因子中, 危险性、脆弱性、暴露性与风险生成的作用一致, 而防灾减灾能力作用相反[18], 充分考虑四川单季稻实际情况, 构建高温热害风险评估模型, 公式为:

$$A = G^{w_{\mathrm{g}}} \times E^{w_{\mathrm{e}}} \times V^{w_{\mathrm{v}}} \times (1-R)^{w_{\mathrm{r}}} \quad (18)$$

式中: A 表示单季稻高温热害风险指数; G、E、V、R 分别为危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力; w_{g}、w_{e}、w_{v}、w_{r} 分别为对应的权重, 采用灰色关联度改进方法计算权重。得到高温热害风险指数, 通过自然断点法划分风险等级[19], 分析单季稻高温热害风险区划。

2　结果与分析

2.1　四川单季稻高温热害危险性评价

统计研究区域内 84 个气象站点不同等级不同生育期的高温热害累积指数, 根据公式(8)计算各站点危险性, 见图 2。从图 2a 可见, 1986—2015 年四川单季稻抽穗扬花期高温热害危险区主要分为中等危险区和低等危险区, 其中中等危险区主要集中在盆地丘陵区, 高值区主要分布在川西高原半湿润区北部部分地区, 以中部的甘洛、石棉及雷波最高, 危险度达 0.8 以上; 其余地区为低等危险区。灌浆结实期(图 2b)危险度的空间分布图显示, 盆地丘陵区中东部为高危险性区域, 以中东部的蓬安、营山和安岳危险度均在 0.9 以上; 中等危险区主要集中在平行岭谷区、盆北山区、盆南丘陵低山区及盆地丘陵区东部大部区域; 低等危险区同样集中在川西南山地干热河谷区和川西高原半湿润区的大部分地区。进一步分析区域整体危险性, 由图 2c 可见, 高危险区主要集中在盆地丘陵区中东部, 其中蓬安、营山和安岳危险度最高, 均在 0.9 以上; 中等危险度区域主要集中在平行岭谷区、盆北山区、盆南丘陵低山区及盆地丘陵区东部大部区域, 其中以安县、犍为、雷波等地为代表, 危险度均为 0.6~0.8; 低等危险区主要集中在川西南山地干热河谷区和川西高原半湿润区的大部分地区。

2.2　四川单季稻高温热害脆弱性评价

充分考虑到种植区域孕灾环境中地形(包括海拔、坡度和坡向)、水系以及水稻产量变异程度对高温热害的影响程度, 综合多方专家的意见, 利用层次分析法, 将这 3 个因子分别赋权重值为 0.367(其中海拔、坡度和坡向的权重分别为 0.183、0.184)、0.233、0.400。利用 GIS 中自然断点分级法, 将孕灾环境敏感性指数按 3 个等级分区划分(高敏感区、中等敏感区和低敏感区), 基于 GIS 绘制出四川单季稻孕灾环境敏感性指数区划图(图 3)。

1986—2015 年单季稻高温热害脆弱性高值区为盆北山区西北部, 包括北川、平武, 以及盆南丘陵低山区南部和盆西高原半湿润区的东部区域, 包括德阳、资阳、内江, 其脆弱性均高于 0.75, 以上地区的地形平缓, 海拔多在 500 m 以下, 河网密度较低, 水稻产量变异程度偏高, 使得这些站点单季稻产量对灾害发生的适应性较差, 敏感性较高, 因此该地区脆弱性偏高; 而低值区主要位于盆地丘陵区中部、平行岭谷区南部以及川西南山地干热河谷区, 其中平行岭谷区和川西南山地干热河谷区水稻种植偏少, 产量变异程度偏低, 同时平行岭谷区和盆地丘陵区中部水系较发达, 海拔偏高, 受高温热害影响较小; 中等敏感区较分散, 主要包括盆地丘陵区西部和成都平原区, 包括简阳、仁寿、安岳等, 脆弱度较低,

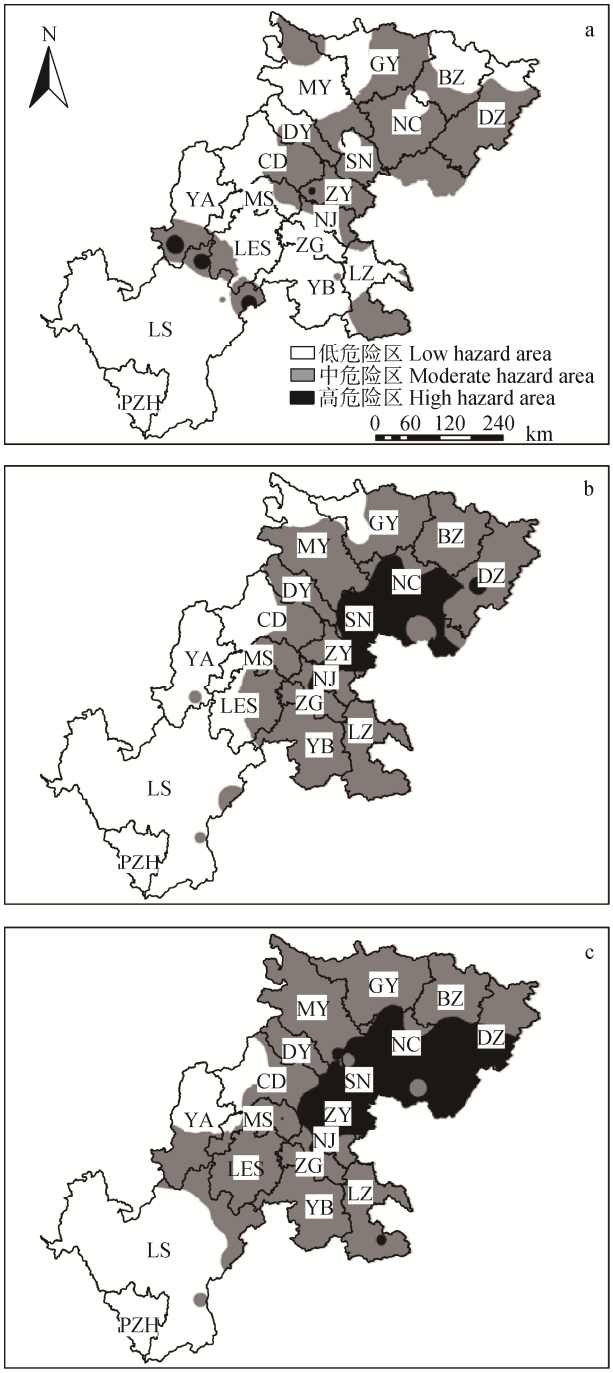

图 2 1986—2015 年四川单季稻抽穗扬花期(a)、灌浆结实期(b)和全生育期(c)高温热害危险性空间分布(GY: 广元; BZ: 巴中; MY: 绵阳; DY: 德阳; NC: 南充; DZ: 达州; CD: 成都; SN: 遂宁; MS: 眉山; YA: 雅安; ZY: 资阳; NJ: 内江; LES: 乐山; ZG: 自贡; YB: 宜宾; LZ: 泸州; LS: 凉山; PZH: 攀枝花)

Fig. 2 Spatial distribution of hazard of hot damage during heading-flowering stage (a), filling-harvest stage (b) and whole growing period (c) of single-cropping rice in Sichuan during 1986–2015 (GY: Guangyuan; BZ: Bazhong; MY: Mianyang; DY: Deyang; NC: Nanchong; DZ: Dazhou; CD: Chengdu; SN: Suining; MS: Meishan; YA: Ya'an; ZY: Ziyang; NJ: Neijiang; LES: Leshan; ZG: Zigong; YB: Yibin; LZ: Luzhou; LS: Liangshan; PZH: Panzhihua)

均在 0.75 以下，这些区域种植条件较好，农业经济发展水平较高，单季稻适应性较强，因此在灾害天气条件下，单季稻产量受到的影响较小。

2.3 四川单季稻高温热害暴露性评价

通过 1986—2016 年四川省统计年鉴统计各市县单季稻种植面积及耕地面积数据，根据公式(16)计算得到四川单季稻高温热害暴露性。由图 4 可见，单季稻高温热害暴露性较高区域主要集中在平行岭谷区大部、盆北山区西部以及盆南丘陵低山区东南部部分区域，其中 0.75 以上的高值区在盆北山区西部和平行岭谷区呈现片状分布，包括达县、万源、安县、平武，以及盆南丘陵区的威远、隆昌、叙永及古蔺。中等暴露性区域分布面积较广，主要集中在川西高原半湿润区、川西南山地干热河谷区、盆北山区东部和南部以及盆地丘陵区以北的部分地区。以上区域在热害发生严重时，较高的暴露度会导致严重的减产。而在成都平原区和盆地丘陵区中部和南部的大部分地区，单季稻暴露度相对偏低，基本在 0.6 以下，相应地区单季稻受到高温热害影响的潜在损失可能性较小。

2.4 四川单季稻高温热害防灾减灾能力评价

图 5a 为四川单季稻种植区单位面积农业机械总动力空间分布图。由图可见，种植区南北农业机械投入差异较大，其中盆地西北部的成都平原区机械总动力最高，包括成都、绵阳、广元等地，该地区单位面积农业机械总动力均在 260 万 kWh 以上，农业现代化水平较高，因此抗灾能力较强，减灾作业较及时。此外川西高原半湿润区的部分地区农业机械总动力也偏高，这与凉山州实施的农机购置补贴有密切关系，该政策极大地促进了凉山州农机拥有量和农机总动力的增加，从而提高了该区域农村劳动生产率，减轻了农业灾害的影响。而在盆地丘陵区的部分地区，盆北山区及川西南山地干热河谷区，农业机械总动力较小，均在 100 万 kWh 以下，农业现代化水平相对落后，防灾减灾能力较差。

农民人均纯收入是抗灾能力的另一个体现。由图 5b 可见，盆北山区以及南部的凉山州自治区农民人均纯收入处于中低等水平，为 6 000~8 000 元；盆地中部及西部的盆地丘陵区及成都平原区，川西南山地干热河谷区的部分区域，农民人均纯收入较高，均在 10 000 元以上，其在支配资金优化防灾减灾措施方面，具有明显优势。其余大部地区农民人均纯收入处于中等水平。

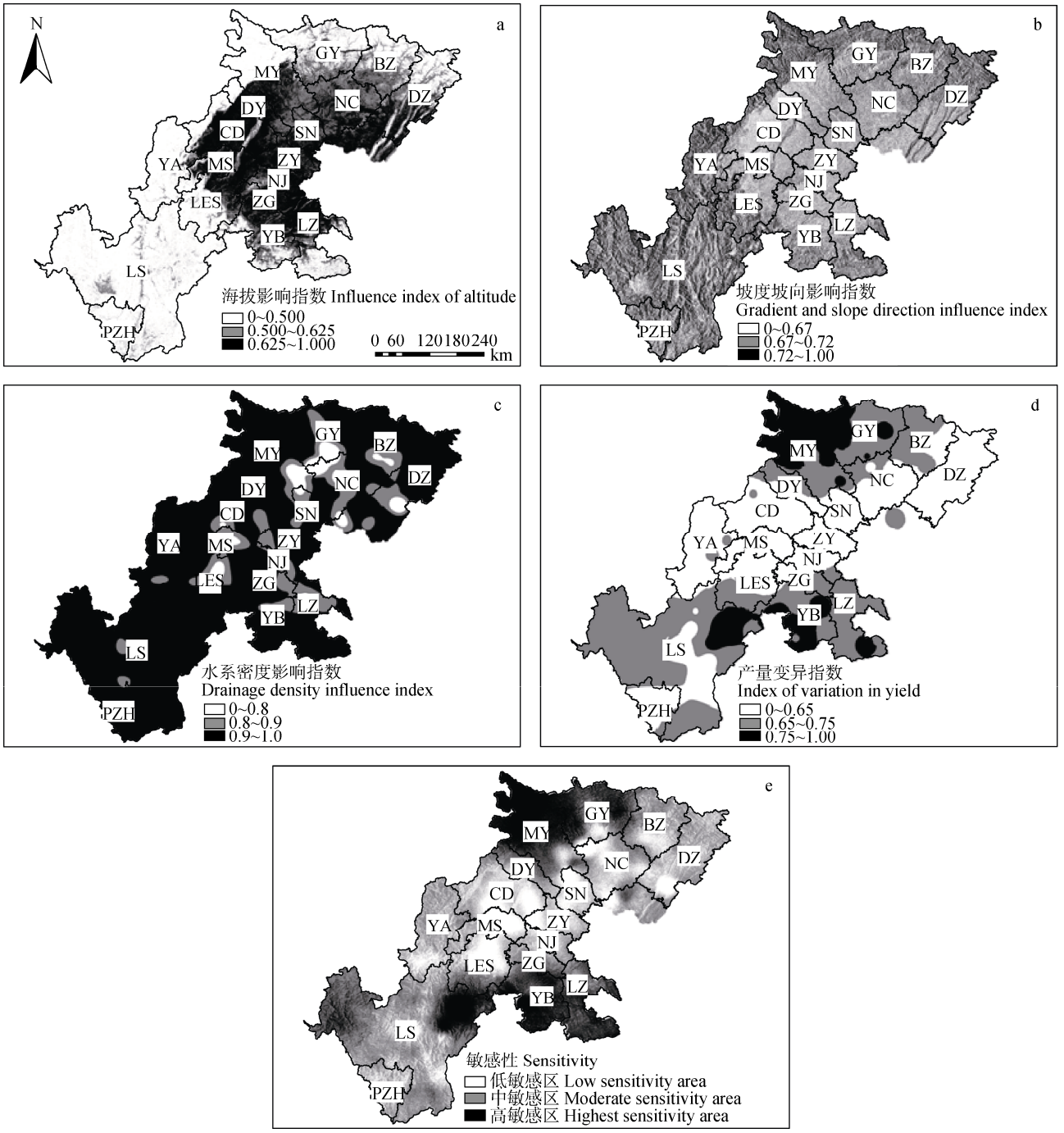

图 3　1986—2015 年四川单季稻高温热害脆弱性评价指标(a, b, c, d)以及脆弱性(e)的空间分布(GY: 广元; BZ: 巴中; MY: 绵阳; DY: 德阳; NC: 南充; DZ: 达州; CD: 成都; SN: 遂宁; MS: 眉山; YA: 雅安; ZY: 资阳; NJ: 内江; LES: 乐山; ZG: 自贡; YB: 宜宾; LZ: 泸州; LS: 凉山; PZH: 攀枝花)

Fig. 3　Spatial distribution of evaluation indexes of sensitivity (a, b, c, d) and sensitivity (e) to hot damage of single-cropping rice in Sichuan during 1986–2015 (GY: Guangyuan; BZ: Bazhong; MY: Mianyang; DY: Deyang; NC: Nanchong; DZ: Dazhou; CD: Chengdu; SN: Suining; MS: Meishan; YA: Ya'an; ZY: Ziyang; NJ: Neijiang; LES: Leshan; ZG: Zigong; YB: Yibin; LZ: Luzhou; LS: Liangshan; PZH: Panzhihua)

图 5c 为种植区域农业化肥施用量空间分布。种植区域南北投入化肥量差异显著, 总体呈现北多南少的分布趋势, 其中盆北山区和平行岭谷区农药化肥施用量较高, 包括南充、达州、绵阳等地, 投入化肥量均高于 20 万 t, 表明以上区域以化肥改善作物生长进而提升其抗灾能力的措施比较完备; 而川西南山地干热河谷区, 化肥施用量较低, 用量低于 5 万 t。

图 5d 为有效灌溉率的空间分布。由图可见全省水稻种植区有效灌溉率呈现成都平原区多, 而盆北山区及川西高原半湿润区少的分布趋势。

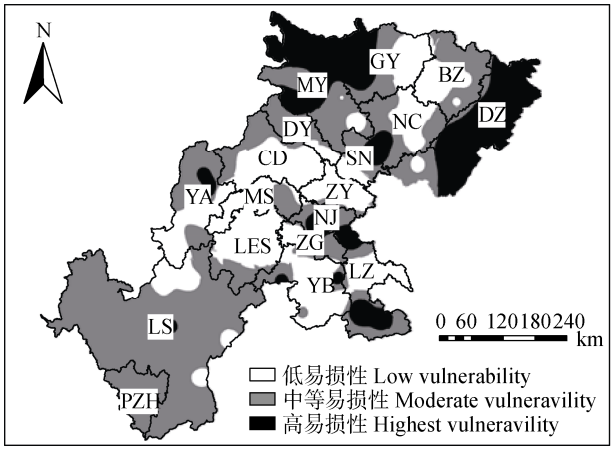

图 4 1986—2015 年四川单季稻高温热害暴露性空间分布(GY: 广元; BZ: 巴中; MY: 绵阳; DY: 德阳; NC: 南充; DZ: 达州; CD: 成都; SN: 遂宁; MS: 眉山; YA: 雅安; ZY: 资阳; NJ: 内江; LES: 乐山; ZG: 自贡; YB: 宜宾; LZ: 泸州; LS: 凉山; PZH: 攀枝花)

Fig. 4 Spatial distribution of exposure to hot damage of single-cropping rice in Sichuan during 1986–2015 (GY: Guangyuan; BZ: Bazhong; MY: Mianyang; DY: Deyang; NC: Nanchong; DZ: Dazhou; CD: Chengdu; SN: Suining; MS: Meishan; YA: Ya'an; ZY: Ziyang; NJ: Neijiang; LES: Leshan; ZG: Zigong; YB: Yibin; LZ: Luzhou; LS: Liangshan; PZH: Panzhihua)

综合以上 4 个防灾减灾能力评价因子, 利用层次分析法对各项指标进行权重赋值, 并对四川单季稻防灾减灾能力进行评价, 如图 5e 所示。防灾减灾能力较强区域主要集中在成都平原区, 其中防灾减灾能力在 0.75 以上的市县包括安县、广汉、双流、都江堰等地, 这些地区在应对高温热害时, 能及时采取行动降低灾害影响。防灾减灾能力最低的区域位于盆北山区、平行岭谷区、盆南丘陵区、川西高原半湿润区大部及川西南山地干热河谷区, 这些地区以山区为主, 经济水平较差, 在应对高温热害时的抗灾能力不足, 需要重点扶持。其余大部分地区防灾减灾能力为中等水平。

2.5 四川单季稻高温热害风险评价

四川单季稻高温热害风险是综合考虑灾害灾情构成、孕灾环境、社会抗灾能力等诸多因素, 结合水稻作物生育期指标对高温热害致害性进行分析, 利用灰色关联度法分别确定致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性、抗灾能力 4 个评估因子的权重为 0.41、0.25、0.18、0.16; 在此基础上利用四川单季稻高温热害风险评价模型, 计算高温热害风险指数以及风险区划, 如图 6 所示。高风险区主要分布在平行岭谷区、盆地丘陵区东部、盆北山区的西部, 以及盆南丘陵低山区的东南部, 尤其在平行岭谷区及盆地丘陵区中部受高温热害风险最为严重, 包括达州、广安、南充、遂宁、绵阳以及内江。这些区域地势平缓, 接壤重庆高温区[13], 其中盆地丘陵区中部东部、平行岭谷区及盆南丘陵低山区南部均为水稻抽穗扬花期轻度高温热害和灌浆结实期中度高温热害的高发区, 频率分别为 4~5 年一遇和 1~2 年一遇[5], 高温热害频繁。中等风险区主要集中在盆北山区东部、盆地丘陵区及盆南丘陵低山区西部; 低风险区主要集中在成都平原区、川西高原半湿润区、川西南山地干热河谷区, 其中成都平原区地势平坦, 灌溉条件优越, 社会经济水平发达, 应对高温热害风险水平较高。川西高原半湿润区、川西南山地干热河谷区地形较复杂, 水稻种植较少, 受高温热害影响偏小。

3 讨论

高温热害是四川省水稻主要的气象灾害性之一, 对产量影响很大。本文采用刘佳等[5]的高温热害累积指数(HIS), 并根据灾害大典结合水稻空壳率划分了高温热害危险性等级标准。该高温热害等级可以在大部分高温过程中较好地判断出高温事件的严重程度, 符合灾害大典中的记载。该指数在危险性分析上采用了高温热害累积指数 HIS, 实现致灾因子评价的定量化、动态化、精细化转变[20], 比以往热害的危险性研究更具针对性。刘佳等[5]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。因此本文利用该指数进一步分析水稻高温热害危险性区划, 可信度较高。危险性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。危险性评估结论与罗孳孳等[21]研究结果基本一致, 但本研究未采用遥感监测数据, 有待在今后的工作中融合多种观测数据, 建立综合的高温热害监测模型。

水稻的脆弱性包括对外部压力的敏感性和适应性。通过文献调研[22]我们发现, 土壤养分、土壤侵蚀、水文径流以及许多其他的因素都会随海拔、坡度、坡向等的不同而产生空间变异, 而这些因素对水稻产量都有直接或间接的影响。四川水稻种植区的高温热害主要发生在盆地中部的浅丘区和东北部的盆东平行岭谷区。由于受坡度、坡向、遮蔽等地形条件的影响, 高温热害在空间上存在较大差异。不同坡度的温度差异主要由太阳辐射引起。因此对于脆弱性研究, 不同于张菡等[13]仅利用海拔高度和水系探讨模型建立, 本研究同时考虑了海拔高度、坡度坡向、水系及灾年产量损失严重地区的脆弱度, 研究结果在分布范围上更加精细, 更符合四川盆地

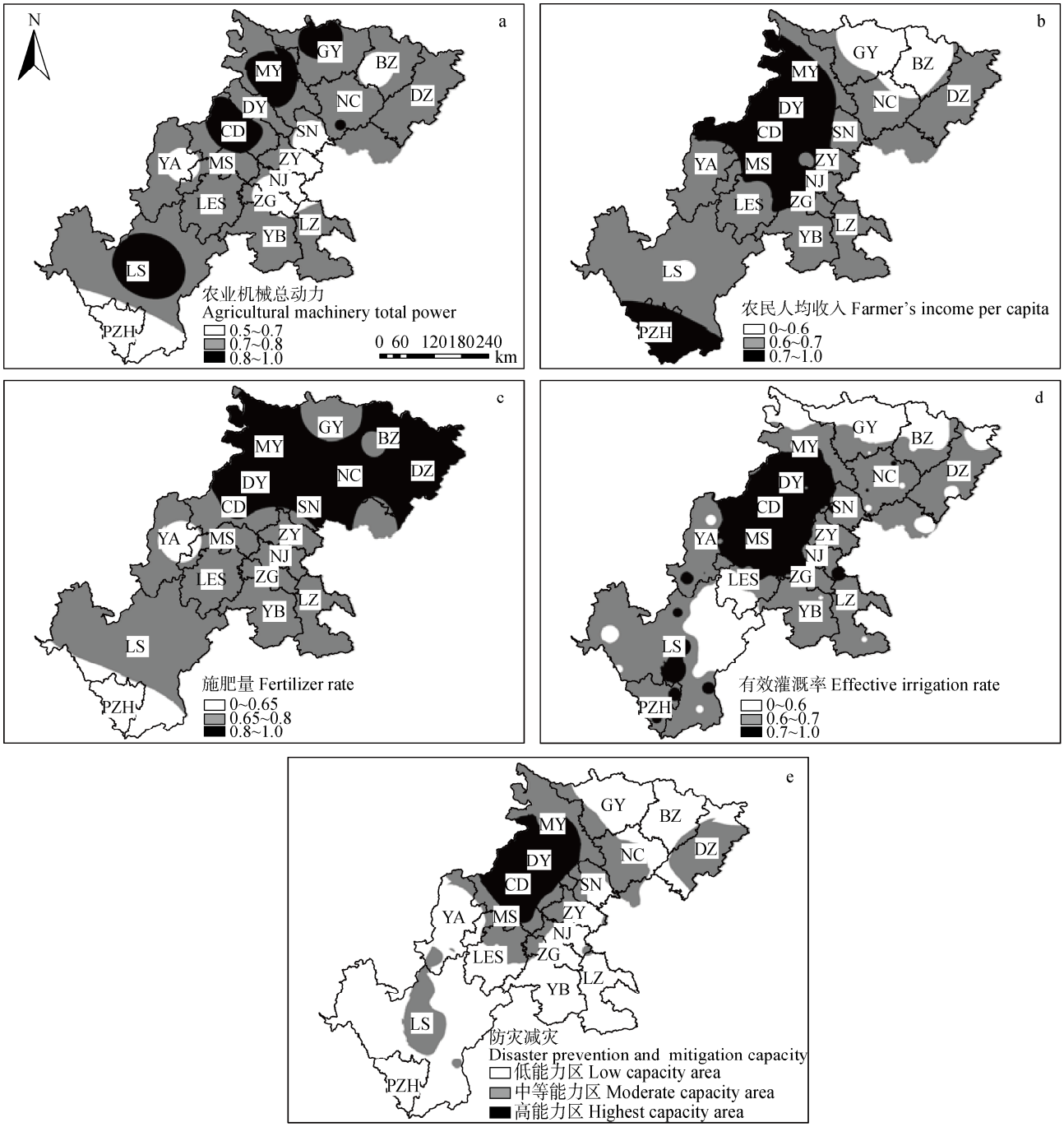

图 5　1986—2015 年四川单季稻高温热害防灾减灾能力评价指标(a, b, c, d)和防灾减灾能力(e)的空间分布(GY: 广元; BZ: 巴中; MY: 绵阳; DY: 德阳; NC: 南充; DZ: 达州; CD: 成都; SN: 遂宁; MS: 眉山; YA: 雅安; ZY: 资阳; NJ: 内江; LES: 乐山; ZG: 自贡; YB: 宜宾; LZ: 泸州; LS: 凉山; PZH: 攀枝花)

Fig. 5　Spatial distribution of evaluation indexes of disaster prevention and mitigation capacity (a, b, c, d) and disaster prevention and mitigation capacity (e) of hot damage of single cropping rice in Sichuan during 1986–2015 (GY: Guangyuan; BZ: Bazhong; MY: Mianyang; DY: Deyang; NC: Nanchong; DZ: Dazhou; CD: Chengdu; SN: Suining; MS: Meishan; YA: Ya'an; ZY: Ziyang; NJ: Neijiang; LES: Leshan; ZG: Zigong; YB: Yibin; LZ: Luzhou; LS: Liangshan; PZH: Panzhihua)

单季稻灾损实际。

本文在风险评估模型建立中考虑了防灾减灾能力的"四因子"风险评价, 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, 没有考虑防灾减灾能力。本研究从高温热害形成机制的角度入手, 综合考虑危险性、脆弱性、易损性和防灾减灾能力 4 个方面来构建四川省水稻高温热害风险评估模型, 评估效果更贴近实际。但本研究的防灾减灾能力指标体现的是理论上的能力, 可能与实际水稻热害的减灾意愿和能力不一致, 如何更切实地定量农户的

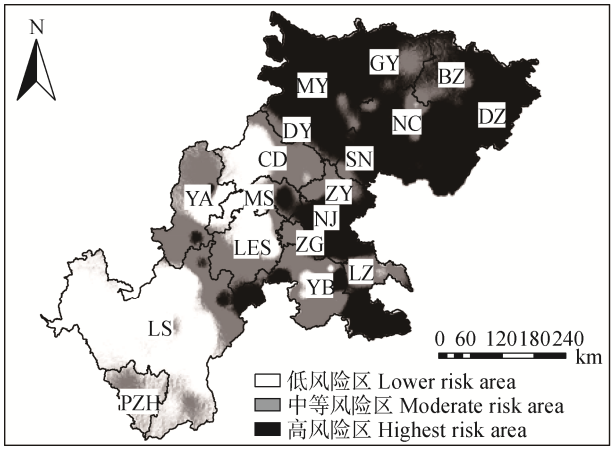

图 6 四川单季稻高温热害风险空间分布(GY: 广元; BZ: 巴中; MY: 绵阳; DY: 德阳; NC: 南充; DZ: 达州; CD: 成都; SN: 遂宁; MS: 眉山; YA: 雅安; ZY: 资阳; NJ: 内江; LES: 乐山; ZG: 自贡; YB: 宜宾; LZ: 泸州; LS: 凉山; PZH: 攀枝花)

Fig. 6 Spatial distribution of risk of hot damage for single-cropping rice in Sichuan Province (GY: Guangyuan; BZ: Bazhong; MY: Mianyang; DY: Deyang; NC: Nanchong; DZ: Dazhou; CD: Chengdu; SN: Suining; MS: Meishan; YA: Ya'an; ZY: Ziyang; NJ: Neijiang; LES: Leshan; ZG: Zigong; YB: Yibin; LZ: Luzhou; LS: Liangshan; PZH: Panzhihua)

减灾行动能力仍需进一步探讨。

四川区域并非仅发生一种农业气象灾害，可能同时存在多种灾害，并且相互作用。同时，不同类型水稻以及不同品种水稻的抗高温能力也存在明显差异[23-24]。但目前四川省水稻高温热害风险评估及对产量影响方面的研究仍很薄弱，尤其缺乏水稻统计或观测数据对评估模型有效性的验证，现阶段工作还不能满足四川省水稻安全生产的需求。且在实际的生产中，高温和干旱往往都是协同作用的[25]，高温高湿条件下病虫害会加剧[26]。基于以上研究，我们从作物敏感性的角度选用产量变异程度表示单季稻脆弱性因子之一，但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[27]，今后的研究中应寻找更优的产量分离方法，提高评估的准确性。同时也应逐步将其他气象条件的影响引入风险分析中，开展更加全面的风险研究工作，并进一步考虑作物因素及社会因素对风险的影响。

4 结论

本文以四川单季稻抽穗扬花期和灌浆结实期的高温热害为研究对象，从致灾因子的危险性、承灾体脆弱性、承灾体暴露性和防灾减灾能力 4 个方面入手，构建四川盆地单季稻高温热害风险评价指标体系和模型，主要结论如下:

1985—2015 年四川单季稻抽穗扬花期高温热害高风险区主要分布在平行岭谷区、盆地丘陵区东部、盆北山区的西部，以及盆南丘陵低山区的东南部，尤其在平行岭谷区及盆地丘陵区中部受高温热害风险最为严重，包括达州、广安、南充、遂宁、绵阳以及内江。这些区域地势平缓，接壤重庆高温区[13]，其中盆地丘陵区中部东部、平行岭谷区及盆南丘陵低山区南部均为水稻抽穗扬花期轻度高温热害和灌浆结实期中度高温热害的高发区；中等风险区主要集中在盆北山区东部、盆地丘陵区及盆南丘陵低山区西部；低风险区主要集中在成都平原区、川西高原半湿润区、川西南山地干热河谷区，其中成都平原区地势平坦，灌溉条件优越，社会经济水平发达，应对高温热害风险水平较高，而川西高原半湿润区、川西南山地干热河谷区地形较复杂，水稻种植较少，受高温热害影响偏小。该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。根据该研究，建议追肥应采取分期次施，并配合使用磷、钾、锌肥，生育中期施足长穗肥，生育后期补给氮素营养，做到均衡供氧，确保穗株长势平稳，提高稻株抗热能力；同时通过灌水改善稻田小气候，减轻高温对水稻花器和光合器官的直接损害；加大政府投资、调整产业机构、选育单季稻抗灾品种、减小高温热害的影响，提高防灾减灾能力。从而使四川盆地单季稻种植不仅是受气候影响，更能主动适应环境。

参考文献 References

[1] 程勇翔, 王秀珍, 郭建平, 等. 中国水稻生产的时空动态分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(17): 3473–3485
CHENG Y X, WANG X Z, GUO J P, et al. The temporal-spatial dynamic analysis of China rice production[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(17): 3473–3485

[2] PENG S B, HUANG J L, SHEEHY J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(27): 9971–9975

[3] 崔读昌. 气候变暖对水稻生育期影响的情景分析[J]. 应用气象学报, 1995, 6(3): 361–365
CUI D C. The scenario analysis of possible effect of warming climate on rice growing period[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1995, 6(3): 361–365

[4] 袁隆平. 杂交水稻简明教程[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1985
YUAN L P. A Concise Course in Hybrid Rice[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1985

[5] 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

[6] 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

[7] MASKREY A. Disaster Mitigation: A Community Based Approach[M]. Oxford: Oxfam, 1989

[8] YAMOAH C F, WALTERS D T, SHAPIRO C A, et al. Standardized precipitation index and nitrogen rate effects on crop yields and risk distribution in maize[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2000, 80(1/2): 113–120

[9] 盛婧, 陶红娟, 陈留根. 灌浆结实期不同时段温度对水稻结实与稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(4): 396–402
SHENG J, TAO H J, CHEN L G. Response of seed-setting and grain quality of rice to temperature at different time during grain filling period[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2007, 21(4): 396–402

[10] 段骅, 俞正华, 徐云姬, 等. 灌溉方式对减轻水稻高温危害的作用[J]. 作物学报, 2012, 38(1): 107–120
DUAN H, YU Z H, XU Y J, et al. Role of irrigation patterns in reducing harms of high temperature to rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(1): 107–120

[11] 杨舒畅, 申双和. 水稻高温热害及其风险评估的研究进展[J]. 农学学报, 2016, 6(2): 122–125
YANG S C, SHEN S H. Research progress of high temperature injury of rice and its risk accessment[J]. Journal of Agriculture, 2016, 6(2): 122–125

[12] 沙修竹, 申双和, 陶苏林. 长江中下游地区一季稻高温热害风险评估与区划[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(5): 1053–1059
SHA X Z, SHEN S H, TAO S L. Risk assessment and regionalization of heat injury for single-season rice in Middle and Lower Yangtze River[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2015, 31(5): 1053–1059

[13] 张菡, 郑昊, 李媛媛, 等. 针对水稻的四川盆地高温热害风险评估[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(12): 406–409
ZHANG H, ZHENG H, LI Y Y, et al. Study on risk assessment of high temperature damage for rice in Sichuan Basin[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(12): 406–409

[14] 崔杰, 党耀国, 刘思峰. 基于灰色关联度求解指标权重的改进方法[J]. 中国管理科学, 2008, 16(5): 141–145
CUI J, DANG Y G, LIU S F. An improved approach for determining weights of attributes in decision making based on grey incidence[J]. Chinese Journal of Management Science, 2008, 16(5): 141–145

[15] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 1–44

[16] 张继权, 李宁. 主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2007: 33
ZHANG J Q, LI N. Quantitative Methods and Applications of Risk Assessment and Management on Main Meteorological Disasters[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2007: 33

[17] 孟林. 长江中下游一季稻高温热害风险评价[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2016: 1–58
MENG L. Risk assessment of heat injury for single-cropping rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2016: 1–58

[18] 王春乙, 蔡菁菁, 张继权. 基于自然灾害风险理论的东北地区玉米干旱、冷害风险评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 238–245
WANG C Y, CAI J J, ZHANG J Q. Risk assessment of drought and chilling injury of maize in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 238–245

[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]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(13): 2469–2483

[20] 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

[21] 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

[22] 王姣. 低山丘陵区水稻产量的地形影响因素研究——以重庆市綦江区为例[J]. 广东农业科学, 2015, 42(2): 6–10
WANG J. Influence of terrain factors on rice yield in hilly area — Taking Qijiang County of Chongqing as a case[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(2): 6–10

[23] 郑建初, 张彬, 陈留根, 等. 抽穗期高温对水稻产量构成要素和稻米品质的影响及其基因型差异[J]. 江苏农业学报, 2005,

21(4): 249–254
ZHENG J C, ZHANG B, CHEN L G, et al. Genotypic differences in effects of high air temperature in field on rice yield components and grain quality during heading stage[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2005, 21(4): 249–254

[24] 从夕汉, 施伏芝, 阮新民, 等. 抽穗期高温与干旱对不同籼型水稻品种产量和品质的影响[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(6): 667–673
CONG X H, SHI F Z, RUAN X M, et al. Effect of high temperature and drought on yield and grain quality of different indica rice varieties during heading periods[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2014, 48(6): 667–673

[25] 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

[26] 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

[27] 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