DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180269

何亮, 吴门新, 侯英雨, 赵刚, 靳宁, 于强. 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, ZHAO G, JIN N, YU Q. 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

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^{*}

何亮¹,吴门新¹,侯英雨¹,赵 刚²,靳 宁³,于 强^{3,4}

(1. 国家气象中心 北京 100081; 2. 拜耳公司数字农业部 朗根费尔德 40764; 3. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与
 旱地农业国家重点实验室 杨凌 712100; 4. 澳大利亚悉尼科技大学生命科学学院 悉尼 2007)

摘 要:揭示水稻高温热害风险特征对农业适应气候变化具有重要意义。本研究以中国早稻种植区为研究区域,基于早稻种植区 214 个气象站 1971—2015 年的数据,利用 Mann-Kendall 非参数趋势检验方法和极值概率 分布理论,探究中国早稻高温热害的时空变化趋势和极值概率分布规律。研究发现:1)反映早稻高温热害的两 个指标即高温热害累计天数(ADHS, accumulated days of heat stress)和热害有害积温(HDD, heat stress degree days)的均值在湖南中南部、江西中部、浙江和福建中部较大,表明这些区域的早稻遭受高温热害的风险较大; 从 Mann-Kenall 趋势检验看,两个指标在超过 1/3 的站点都呈显著增加的趋势,说明高温热害风险在这些站点 显著增加,尤其 20 世纪 90 年代以后超过 1/2 的站点两个指标都呈显著增加的趋势。2)超过 1/2 以上的站点的 高温热害累计天数和高温有害积温都满足极值概率函数分布。对于高温热害累计天数,56 个站点满足耿贝尔 分布(Gumbel),82 个站点满足广义极值分布(GEV);对于热害有害积温,61 个站点满足耿贝尔分布,58 个站点 满足广义极值分布。3)两个高温热害指标的 10 年、50 年、100 年重现期的空间分布规律和 2 个指标的均值空 间分布类似,即均值较大的区域,其 10 年、50 年、100 年重现期对应的重现期水平(return level)也较大;重现 期水平与经度、纬度和海拔无明显相关关系。研究结果有助提升对早稻高温热害时空趋势和概率分布规律的 认识,可为农业适应气候变化和农业天气指数保险设计等方面提供理论参考。 关键词: 早稻; 高温热害累计天数; 热害有害积温; 时空分布; 极值概率分布

中图分类号: S161.2 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2018)11-1601-12

Statistical characteristics of heat stress in early rice based on extreme value distribution in China^{*}

HE Liang¹, WU Menxin¹, HOU Yingyu¹, ZHAO Gang², JIN Ning³, YU Qiang^{3,4}

 National Meteorological Center, Beijing 100081, China; 2. Bayer AG, Digital Farming, Langenfeld 40764, Germany;
 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4. School of Life Sciences, University of Technology Sydney, Sydney 2007, Australia)

Abstract: Rice is one of the most important staple foods globally, eaten by more than half the world population. China is the largest producer of rice, accounting for 18.5% of the rice planted area globally and 28% of the global rice production. Rice is easily exposed

* 国家自然科学基金项目(41705095)资助 何亮,主要从事作物模型、农业气象和全球变化研究。E-mail: heliang_hello@163.com 收稿时间: 2018-03-15 接受日期: 2018-06-07

^{*} This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41705095). Corresponding author, HE Liang, E-mail: heliang_hello@163.com Received Mar. 15, 2018; accepted Jun. 7, 2018

to heat stress because of highly frequent heat-stress events in recent climate warming. Heat-stress is one of the main meteorological disasters causing yield loss in agriculture. Thus, it is essential to explore spatial and temporal characteristics along with extreme heat-wave distribution in early rice so as to develop measures for agricultural adaptation to climate change and to prevent and reduce natural disasters. Studies on heat-stress in rice have mainly focused on spatial and/or temporal distributions of heat-stress at provincial or catchment scales and on the relationship between heat-stress and yield production. However, spatial and temporal distributions of heat-stress at national scale and extreme heat-wave distribution have remained rarely explored. Extreme-value (outlier) theory is a branch of statistical deviation of median probability distribution, which is widely used in structural engineering, hydrology and traffic prediction. Here, we introduced extreme-value theory to analyze heat-stress in early rice and hypothesized that heat-stress in rice obeyed specific outlier distribution. Thus, using 214 meteorological data on early rice region in China, we studied spatial and temporal characteristics along with extreme-value distribution of heat-stress in early rice. Non-parametric methods (such as the Mann-Kendal trend test and extreme-value distribution) were used in this study. We found that: 1) mean values of two heat-stress indices — ADHS (cumulative heat-stress days) and HDD (heat-stress degree days) — used to determine the extent of heat-stress were larger in the south and central Hunan Province, central Jiangxi Province, central Zhejiang and Fujian Provinces than that in other areas. This indicated that there were more severe heat-stress events in these areas. The two heat-stress indices significantly increased in more than a third of the investigated site (more than half of the sites in 1990–2015). This further indicated that early rice at these sites suffered from worsening heat-stress. 2) ADHS and HDD at more than half of the sites satisfied the extreme-value (outlier) distribution. ADHS at 56 sites obeyed the Gumbel distribution and at 82 sites satisfied the General extreme-value (outlier) distribution. HDD at 61 sites obeyed Gumbel distribution and at 58 sites satisfied the general extreme-value distribution. 3) The spatial distributions of the 10-, 50- and 100-year return periods of the two heat indices were similar to their mean values. It then meant that regions with larger mean values of the two heat-stress indices also had larger return periods. Furthermore, the return periods of the two heat-stress indices were not significantly correlated with longitude, latitude and altitude. The results improved our understanding of spatial and temporal distributions along with extreme-value (outlier) distributions of heat-stress in rice. It provided the scientific basis for adaptation to climate change and agricultural weather index insurance.

Keywords: Early rice; Accumulated days of heat stress; Heat stress degree days; Spatial and temporal distribution; Extreme-value distribution

水稻(Oryza sativa)是世界上最主要的粮食作物 之一, 全球超过 50%以上的人口以大米为主食。水 稻主要在亚洲、拉丁美洲种植、近年来在非洲等地 的种植面积也逐渐增加^[1]。中国是水稻生产的大国、 其种植面积占世界总种植面积的 18.5%、产量占世 界水稻总产的 28%^[2-3]。由于水稻主要种植在亚热带 区域, 生长季极易遭受高温热害, 从而造成水稻产 量损失^[4]。据研究,过去 30 年高温热害造成中国水 稻产量减少1.5%~9.7%^[2,5]、仅2003年的水稻扬花期 高温热害就造成了长江中下游水稻受灾 40.5 万 hm^{2[6-7]}。高温热害不仅仅造成水稻产量下降、还可能 降低稻米直链淀粉含量、影响稻米品质^[8]。一些模型 模拟的结果也指出、由于气候变化、尤其是温度升 高造成中国水稻产量的波动性可能会更大^[9]。伴随 着气候变暖和极端高温灾害的频发^[10-11]、高温热害 已经成为水稻生产的一大威胁^[12],加强水稻高温热 害研究对农业适应气候变化和农业防灾减灾具有重 要意义。

揭示水稻高温热害的时空分布规律,开展高温 热害影响水稻产量的研究是农业适应气候变化的前 提。目前关于水稻高温热害发生规律的研究主要集 中在高温热害的时空分布、趋势变化、利用统计或 者作物模型方法分析高温热害对产量的影响。在水 稻高温热害时空分布特征方面,万素琴等[13]分析了 1961—2005 年湖北的水稻高温热害时空分布规律、 认为 20 世纪 60 年代是一季稻高温热害发生最严重 的时期、在地域上表现为湖北东部多于西部、且 20%以上高温热害年份造成了3%以上的减产。于堃 等^[14] 分 析 了 江 苏 水 稻 高 温 热 害 时 空 规 律 发 现 2001-2007 年为江苏高温热害最严重时段、且主要 发生在淮河以南地区。杨太明等[15]探究了皖浙地区 水稻高温热害发生规律、发现 20 世纪 80 年代中期 以前高温热害的发生日数和次数均呈减少趋势,其 后则呈增多趋势。Shi 等^[2]研究了全国一季稻和双季 早稻的高温热害分布规律、发现长江中下游南部和 中北部为高温热害最严重区域。谭诗琪等[16]对长江 中下游的高温热害分布研究也得出了类似的结论。 在水稻高温热害发生的趋势研究方面, Shi 等^[2]的研 究认为从 1981 年到 2010 年、大部分地区的高温热 害有显著增加的趋势、尤其在中国双季早稻区域的 东部。此外, Huang 等^[17]发现江西超过 80%的站点高 温热害都有显著增加的趋势。无论是利用统计分析

或者模型模拟方法,高温热害对中国水稻产量都有 不同程度的减产作用^[18],例如任义方等^[19]表明日最 高温度≥35℃的日数与水稻穗粒数显著相关,杨太 明等^[15]发现高温热害与穗结实粒数和千粒重明显的 负相关。由于气候变暖,未来气候变化下中国水稻 区域高温热害发生概率更高^[20],在不采取适应措施 的情况下中国水稻产量可能下降^[21-22]。

以上研究从省级尺度或者区域尺度揭示了历史 水稻高温热害的发生规律及时空特征,分析了产量 与高温热害的关系。研究表明,高温热害属于一种 极端天气现象^[10,23],类似于极端降水^[24-25]、极端气 温^[26-28]一样也可能满足一定的概率分布,在此提出 我们的科学假设:是否水稻的高温热害也满足极值 概率分布特征?揭示高温热害这种极端事件的概率 分布特征对我们进一步认识高温热害发生规律有重 要帮助,尤其是对高温热害天气保险指数研制^[29]具 有重要意义。然而,目前关于水稻高温热害的极值 概率分布规律尚不清楚。 本文在总结其他学者关于水稻高温热害时空分布 的研究基础上,以中国早稻种植区为研究区域,以趋 势检验和极值概率分布统计理论为基础,分析早稻区 域历史高温热害空间分布和时间趋势特征,探讨水稻 高温热害极值概率分布规律,以期为水稻生产适应气 候变化和农业防灾减灾提供理论支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区域和数据来源

根据国家气象中心农业气象中心的农业气象业 务指南^[30],中国早稻主要分布在江南和华南区域(图 1)。本研究选择早稻种植区域的 214 个气象站点作 为研究站点,气象数据来源于中国气象局国家气象 中心气象数据库。计算早稻高温热害主要需要日最 高气温和平均气温,气象数据从 1971 到 2015 年,共 45 年。考虑到部分气象站点缺少 1971 年前的观测 数据,因此统一设定各站点的研究时段从 1971 年开 始,确保早稻区域尽量多的站点参与计算。



图 1 早稻区域气象站点分布 Fig. 1 Meteorological sites in the early rice area of China investigated in this study

1.2 水稻高温热害指标

根据国家水稻高温热害指标^[31]和相关文献^[12], 选择生长季内日连续3 d 最高温度≥35 ℃或平均温 度≥30 ℃天数,即高温热害累计天数(ADHS, accumulated days of heat stress)和热害有害积温 (HDD, heat stress degree days, 超出 35 ℃部分的累 计值)作为水稻高温热害的两个指标。热害有害积温 计算公式为:

$$HDD = \sum_{h}^{m} HD_{i}$$
(1)

$$HD_{i} = \begin{cases} 0 & (T_{\max i} < 35) \\ T_{\max i} - 35 & (T_{\max i} \ge 35) \end{cases}$$
(2)

式中: h 为高温热害计算开始日, m 为高温热害计 算终止日, HD_i 为日有害积温, T_{maxi} 为日最高气温。 由于水稻高温热害主要发生在抽穗、开花和灌浆 乳熟期, 根据常年水稻生育期特征, 由于缺乏长 时间的具体早稻生育期观测数据, 在本研究中计 算高温热害不考虑具体站点的发育期, 仅从不同 区域抽穗扬花灌浆的大致时间计算, 具体为: 江 南地区的站点高温热害计算时间从 6 月 10 日至 7 月 10 日, 华南的站点计算时间从 5 月 21 日至 7 月 10 日。

1.3 Mann-Kendall 趋势检验方法

采用 Mann-Kendall (MK)方法分析水稻高温热 害的时间趋势。MK 检验是一种非参数检验方法^[32], 广泛用于降水、气温、水文等方面的趋势分析和显 著性检验研究^[33-34]。Mann-Kendall 的统计特征 *S* 值 计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_j - x_i)$$
(3)

式中: *n* 为数据序列长度, *x_i、x_j*分别为时间 *i* 和 *j* 的 值, sgn(*x_i*-*x_i*)为符号函数, 公式为:

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & (x_j - x_i > 0) \\ 0 & (x_j - x_i = 0) \\ -1 & (x_j - x_i < 0) \end{cases}$$
(4)

方差计算公式为:

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$$
(5)

式中: *n* 为数据序列长度。标准正态统计量 Z 值计算 公式为:

$$Z_{s} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases}$$
(6)

式中: Z_s 为趋势性大小的衡量标准。 $Z_s>0$ 和 $Z_s<0$ 分 别说明有增大趋势和减小趋势, $|Z_s|$ 越大,则趋势越 明显。当给定显著性水平 α 后,可在正态分布表中 查得临界值 $Z_{a/2}$, 若 $|Z|>Z_{a/2}$,即说明序列的趋势性 显著。本研究选定的显著性水平 α =0.05, Z/2=Z_{0.05/2}=1.96,所以当 $Z_s>1.96$ 时表明有显著增加 趋势,当 $Z_s<-1.96$ 时则表明有显著减少趋势。

根据前人的相关研究表明, 直到 1990 年代以后 南方大部夏季气温增暖才变得突出^[15-16], 为了探究 不同时段的时间趋势, 本研究对 1971—2015 年的全 时段和 1971—1990 年、1990—2015 年 2 个分时段的 趋势分别进行了相关趋势检验。

1.4 极值概率分布函数选择与参数估计

本文选择国内外广泛应用于极端气象事件的统 计分布模型^[35]: 广义极值分布(generalized extreme value, GEV)拟合高温热害序列,函数如下所示:

$$f(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \exp\left[-(1+kz)^{-1/k}\right] (1+kz)^{-1-1/k} & (k \neq 0) \\ \frac{1}{\sigma} \exp\left[-z - \exp(-z)\right] & (k = 0) \end{cases}$$
(7)

式中: $z=(x-\mu)/\sigma$, k、 σ 和 μ 分别为 GEV 分布函数的 形状参数、尺度参数和位置参数。其中尺度参数 $\sigma>0$ 。GEV 的分布范围取决于形状参数 k,不同的形 状参数产生不同的极值分布类型: k=0 为极值 型, 也就是耿贝尔分布(Gumbel)分布; k>0 为极值 型, 也就是 Fréchet 分布; k<0 为极值 型, 即为逆威尔布 分布(reversed Weibull)。

极值分布的不同重现期(return period)估算公 式为:

$$x_{T} = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{k} \left\{ 1 - \left[-\log(1 - 1/T) \right]^{-k} \right\} & (k \neq 0) \\ \mu - \sigma \log\left[-\log(1 - 1/T) \right] & (k = 0) \end{cases}$$
(8)

式中: *x_T*为重现期的水平(return level); *T* 为重现期, 例如 10 年、50 年、100 年。(8)式其他变量如(7)式。

参数估计方法采用极大似然法(maximum likelihood method),同时利用 Kolmogorov-Smirnov (K-S)检验法来比较数据分布形式与已知分布是否一致,即对模拟拟合优度检验。

K-S 检验方法简单介绍如下:假设待检验的理 论分布为 F(x),原假设为: H_0 : $F(x)=F_n(x)$,根据样本 数据计算出样本的累计频率 $F_n(x)$,然后计算出检验 统计量 $D=\max|F(x)-F_n(x)|$ 。若 $D < D_\alpha(n)$ [$D_\alpha(n)$ 为显著 性水平 α 下,样本量 n 时的 K-S 检验临界值,可以通 过查表获得],则认为理论分布 F(x)与样本数据的经 验分布拟合较好,在显著性水平 α 下,无显著差异。 所有的统计分析和概率拟合程序都由 R 语言 (https://www.r-project.org/)编程完成。 2 结果与分析

2.1 早稻高温热害时空分布和趋势特征

2.1.1 早稻高温热害的空间分布

分别计算 214 个气象站点 1971—2015 年高温热 害天数(ADHS)和热害有害积温(HDD),统计每个站 点的高温热害累计天数和热害有害积温的均值、最 大值、标准差,然后利用空间反距离加权方法插值 得到空间分布,结果如图 2 所示。

从图 2 可知, 平均高温热害累计天数为 1~13 d, 湖南西部和广西北部、广东和广西的沿海地区平均 值较小,仅 1~3 d, 主要是海拔较高或者靠近海洋的 缘故。高温热害累计天数平均值较大区域分布在湖 南中南部、江西中部、福建和浙江中部、海南北部 等地(图 2a)。高温热害累计天数最大值(图 2b)范围 在 1~39 d, 对比图 2 a, 均值较小的区域其最大值也 较小,最大天数主要分布在福建中部、浙江中部和 海南北部,多达 30~39 d。高温热害累计天数的标准 差(图 2c)也与均值和最大值的空间分布类似,高温 热害累计天数标准差较大的区域为江西中部、浙江 中部、海南北部等地。

热害有害积温均值在 1~20 ℃·d(图 2d),均值较 大的区域和高温热害累计天数较大区域对应,主要 分布在浙江中部和福建中部,其值为 11~20 ℃·d。最 大热害有害积温较高区域分布在浙江、福建、江西 北部、海南北部,达 33~63 ℃·d(图 2e)。同时,这些 区域的热害有害积温标准差也较大。

由上可知,高温热害累计天数和热害有害积温 的均值、最大值、标准差的空间分布具有相似性,两 个指标反映的早稻高温热害空间分布特征具有一 致性。



图 2 早稻区域早稻高温热害累计天数和热害有害积温的均值、最大值、标准差

Fig. 2 Mean, maximum, standard variance of heat stress days and heat stress degree days of early rice in the early rice area

2.1.2 早稻高温热害的时间趋势

图 3 是利用 Mann-Kendall 趋势检验方法检验高 温热害累计天数和热害有害积温的时间趋势。从图 3a 可知,从全时段 1971—2015 年看,大部分站点的 高温热害累计天数增加或减少的趋势并不明显。具有 显著增加趋势的 81 个站点,零散分布在江南中部和 北部以及华南中部等地。同时,大部分站点的热害有 害积温也无明显的时间趋势(图 3d),其中有 88 个站 点的热害有害积温呈现显著增加趋势。显著增加的点 空间分布和高温累计天数分布并不完全重叠。

从分阶段的趋势来看,20世纪90年代以前(图 3b,e),大部分站点的高温热害累计天数和热害有害

积温都无显著的时间趋势;但是 90 年代后(图 3c, f), 积温都呈显著增加趋势,说明 90 年代后高温热害越超过 1/2 以上的站点高温热害累计天数和热害有害 来越严重。



图 3 1971-2015 年(a, d)、1971-1990 年(b, e)和 1990-2015 年(c, f)早稻区域早稻高温热害累计天数(a, b, c)和热害有 害积温(d, e, f)Mann-kendall 趋势分段趋势检验

Fig. 3 Mann-Kendall tests of accumulated days of heat stress (a, b, c) and heat stress degree days (d, e, f) of early rice during 1971–2015 (a, d), 1971–1990 (b, e) and 1990–2015 (c, f) in the early rice area

2.2 高温热害序列的极值分布

2.2.1 最优分布

根据 K-S 检验方法计算广义极值分布(GEV)、耿 贝尔分布(Gumbel)的 K-S 统计值,然后选择该站点的 最优分布。表 1为 214 个站点最优分布的拟合统计情 况,对于高温热害累计天数(ADHS),56 个站点的最 优分布是 Gumbel 分布,82 个站点的最优分布是 GEV 分布,此外 76 个站点没有通过显著性检验,即不符 合 GEV 或者 Gumbel 分布,占所有站点的 36%。对于 热害有害积温(HDD),61 个站点的最优分布为 Gumbel 分布,58 个站点的最优分布为 GEV 分布,95 个站点没有通过显著性检验,占所有站点的 44%。

图 4 给出了浙江丽水站的高温热害累计天数和 热害有害积温的观测概率密度和极值分布函数的拟 合曲线。从图 4 可知, GEV 分布很好地拟合了浙江 丽水站的高温日数分布情况,而 GEV 分布和 Gumbel 分布都没有很好地拟合热害有害积温的分 布。由图 5a 和图 6a 给出的不同站点的最优分布情 况可以看出,不同站点的最优分布没有明显的空间

分布规律。

表 1 早稻高温热害指标时间序列的最优分布的站点数 Table 1 Number of meteorological sites with the optimal distribution models for time-serials of heat stress indices of

	early fice		
高温热害指标 Heat stress index	耿贝尔 分布 Gumbel distribution	广义极值 分布 GEV distribution	不显著 No significant
高温热害累计天数 Accumulated days of heat stress	56	82	76
热害有害积温 Heat stress degree davs	61	58	95

2.2.2 重现期空间分布特征

根据确定的各站点最优极值分布,计算了高温 热害累计天数(ADHS)和热害有害积温(HDD)在重现 期水平为 10 年、50 年、100 年时的高温热害累计天 数和热害有害积温(不计算没有通过显著性检验的 站点),然后通过反距离权重方法插值得到空间分布 (图 5,图 6)。





Fig. 4 Observed density and functions fitted probability of accumulated days of heat stress (ADHS) and heat stress degree days (HDD) at Lishui Station, Zhejiang Province (GEV: generalized extreme value; Gumbel: Gumbel distribution; Observed: observed serials)



图 5 早稻区早稻高温热害累计天数的最优模型分布(NO:无;GEV:广义极值分布;Gumbel:耿贝尔分布)和 10年、 50年、100年重现期分布

Fig. 5 Accumulative heat stress days of early rice according to distribution of optimal model (NO: no model; GEV: generalized extreme value; Gumbel: Gumbel distribution) and under return periods of 10, 50 and 100 years in the early rice area

不同重现期水平下高温热害累计天数的分布类 (((图 5)。高温热害累计天数的重现期水平较大的值 集中在湖南中南部和江西中西部、浙江中部、福建 中东部和海南大部地区(图 5)。这与高温热害累计天 数均值的分布(图 2 a)类似。热害有害积温也有类似 的规律(图 6),不同的重现期水平下分布类似,且与 热害有害积温的均值空间分布类似(图 2 d)。高温热 害累计天数和热害有害积温不同重现期水平的分布 虽然不完全一致,但趋势基本一致,即高温热害累 计天数重现期水平高的地方,热害有害积温的重现 期水平也高。

从浙江丽水站在不同极值概率分布重现期水平 与观测的高温热害累计天数和热害有害积温对比可 知(图 7), GEV 模型估计的高温热害累计天数和观测 值拟合较好、说明 GEV 模型能较好地拟合浙江丽水 的高温热害日数分布(图 4)。而热害有害积温的 GEV 和 Gumbel 函数无显著差异。

图 8 为高温热害累计天数和热害有害积温的 10



年、50年、100年重现期水平与经度、纬度和海拔的 关系。从散点图和线性拟合的 R²来看, 重现期水平和 经度、纬度以及海拔没有显著关系。同样、热害有害 积温的重现期水平与经度、纬度和海拔也无显著关系。

b10年一遇热害有害积温强度 Return period of 10 years in heat stress degree days ($^{\circ}C \cdot d$)



c50年一遇热害有害积温强度 Return period of 50 years in heat stress degree days (°C·d)

d100年一遇热害有害积温强度 Return period of 100 years in heat stress degree days ($^{\circ}C \cdot d$)







图 7 浙江丽水站在不同最优模型分布下的重现期对应的高温热害指标与观测值的对比(GEV: 广义极值分布; Gumbel: 耿贝尔分布; Observed: 观测)

Fig. 7 Comparisons of heat stress indices between observed values and predicted values by different probability models at Lishui Station, Zhejiang Province under different return periods (GEV: generalized extreme value; Gumbel: Gumbel distribution; Observed: observed serials)

- 3 讨论
- 3.1 高温热害趋势和时空分布 本研究的结果显示无论是高温热害累计天数

(ADHS)还是热害有害积温(HDD),虽然大部分站点 无统计显著性的增加趋势,但依然有超过 1/3 的站 点(分别是 81 个、88 个站点)在 1971-2015 年期间

1608



图 8 不同重现期下的高温热害累计天数和热害有害积温回归水平与经度、纬度和海拔的关系 Fig. 8 Relationships between return level of accumulative heat stress days (ADHS), heat stress degree days (HDD) and longitude, latitude, and altitude under different return periods

有显著增加的趋势、这和全球变暖大背景下极端温 度事件增多的趋势是一致的^[10-11]。Shen 等^[10]关于 1960-2011年的中国极端气温的趋势变化研究指出 超过 90 分位数以上的极端高温天数在过去 50 年增 加了 2.49 d。此外, 前人研究表明过去 30 年的高温 热害趋势更加明显。Zhang 等^[12]的研究指出中国双 季早稻的热害有害积温的趋势在过去 30 年区域平 均增加了 4.42 ℃, Shi 等^[2]的研究也表明过去 30 年高 温热害累计天数平均增加了 1.2 d·(10a)⁻¹。本研究表 明中国早稻区大部分站点的高温热害未显示显著增 加趋势、究其原因:其一、本研究选择了中国早稻 区所有的国家级气象站点,站点数较上述研究多, 有些站点可能在海拔较高的地段、高温热害不明显; 其二、本研究选择的时间段较先前部分研究选择的 时间段长,而高温热害增加在近 20 年比过去严重; 其三, Zhang 等^[12]和 Shi 等^[2]的研究中, 计算高温热 害均从农业气象站点入手,详细考虑水稻发育期, 而本研究由于缺乏长时间的水稻生育期观测、选择 了固定的时间段作为统计时段、统计时间长度超过 实际敏感期、计算出的热害天数可能会超过实际发 生天数、从而导致了趋势的差异。相比先前省际尺 度的高温热害时空分布的研究结果^[13,17,19,36-38],本

文从全国尺度的研究也基本反映了省际尺度的时空 分布规律,高温热害主要集中在长江中下游海拔较 低的区域。从分时间段的趋势统计看,20世纪90年 代以前大部分站点的高温热害无明显的时间趋势, 但是90年代后高温热害1/2以上的站点呈显著增加 趋势。说明随着气候变化,水稻高温热害潜在气候 风险越来越高,这与杨太明等^[15]和朱珠等^[38]相关省 级的分段趋势检验相符合。

3.2 高温热害极值概率分布

利用极值概率分布函数对 214 个站点的水稻高 温热害累计天数(ADHS)、热害有害积温(HDD)拟合 结果表明, 64%的站点可以用 GEV 或者 Gumbel 概 率分布来描述高温热害日数的分布规律, 而对于热 害有害积温, 56%的站点满足 GEV 或 Gumbel 的概 率分布。这基本验证了我们在引言提出的假设, 超 过 1/2 以上站点的水稻高温热害指标满足极值概率 分布函数的规律。这说明水稻高温热害指标与极端 高温^[26-28]、极端降水^[24-25]一样, 基本满足极值概率 分布规律。

高温热害的回归周期水平反映不同高温热害风 险程度。本研究结果表明,无论是10年、50年、100 年一遇的回归周期都具有明显的空间异质性,而这 种异质性基本与历史的平均高温热害风险一致(对 比图 2 和图 5、图 6)。这也充分说明高温热害回归 周期的计算依赖于历史资料的观测。当这些极值概 率风险函数应用到农业天气保险^[29]时,需要充分考 虑历史资料的长度,并不断补充更新的资料。此外, 高温热害回归周期与经度、纬度、海拔的相关关系 不明显,也侧面反映高温热害回归周期的地带性分 布规律不明显。

本文仅用高温热害累计天数或者热害有害积温 的极值概率分布函数来拟合早稻高温热害的概率分 布特征。相比而言,水稻高温热害不仅受到温度单 因子的影响,同时还与其他气象因子,如降水,也 有关系,考虑其他因子并利用多因子的联合概率分 布函数(如 Copula 函数)^[25]来揭示高温热害与其他因 子的相互关系,是将来研究需要扩展的方向。

4 结论

本研究利用中国早稻种植区域 214 个气象站 1971—2015年的数据、结合 Mann-Kendal 非参数趋 势检验方法和极值概率函数、分析了早稻高温热害 的时空统计特征变化规律、得到的主要结论如下: 1)反映早稻高温热害的高温热害累计天数(ADHS)和 热害有害积温(HDD)的均值在湖南中南部、江西中 部、浙江和福建中部较大,表明这些区域的早稻高 温热害风险较大;从 Mann-Kenall 趋势检验看,两个 指标在超过 1/3 的站点都呈显著增加趋势、说明高 温热害风险在这些站点显著增加、尤其 20 世纪 90 年代以后超过 1/2 的站点两个指标都有显著增加的 趋势。2)超过 1/2 站点的高温热害累计天数和热害有 害积温都满足极值概率函数分布。对于高温热害累 计天数(ADHS), 56个站点满足 Gumbel 分布, 82个站 点满足 GEV 分布; 对于热害有害积温, 61 个站点满 足 Gumbel 分布, 58 个满足 GEV 分布。3)两个高温 热害指标的 10 年、50 年、100 年重现期的空间分布 规律和两个指标均值的空间分布类似、即均值较大 的区域,其10年、50年、100年的重现期对应的水 平也较大; 重现期的水平与经度、纬度和海拔没有 明显的相关关系。

参考文献 References

- JAGADISH S V K, MURTY M V R, QUICK W P. Rice responses to rising temperatures — Challenges, perspectives and future directions[J]. Plant, Cell & Environment, 2014, 38(9): 1686–1698
- [2] SHI P H, TANG L, WANG L H, et al. Post-heading heat stress in rice of South China during 1981–2010[J]. PLoS One, 2015,

10(6): e0130642

- [3] 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
- [4] JAGADISH S V K, CRAUFURD P Q, WHEELER T R. High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(7): 1627–1635
- [5] ZHANG S, TAO F L, ZHANG Z. Changes in extreme temperatures and their impacts on rice yields in southern China from 1981 to 2009[J]. Field Crops Research, 2016, 189: 43–50
- [6] 黄义德,曹流俭,武立权,等. 2003 年安徽省中稻花期高温 热害的调查与分析[J]. 安徽农业大学学报, 2004, 31(4): 385-388
 HUANG Y D, CAO L J, WU L Q, et al. Investigation and analysis of heat damage on rice at blossoming stage in Anhui

Province in 2003[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2004, 31(4): 385–388

- [7] 谢晓金,申双和,李映雪,等.高温胁迫下水稻红边特征及 SPAD 和 LAI 的监测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 183-190
 XIE X J, SHEN S H, LI Y X, et al. Red edge characteristics and monitoring SPAD and LAI for rice with high temperature stress[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 183-190
- [8] 高焕晔, 王三根, 宗学凤, 等. 灌浆结实期高温干旱复合胁 迫对稻米直链淀粉及蛋白质含量的影响[J]. 中国生态农业 学报, 2012, 20(1): 40-47 GAO H Y, WANG S G, ZONG X F, et al. Effects of combined high temperature and drought stress on amylose and protein contents at rice grain-filling stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(1): 40-47
- [9] YAO F M, XU Y L, LIN E D, et al. Assessing the impacts of climate change on rice yields in the main rice areas of China[J]. Climatic Change, 2007, 80(3/4): 395–409
- [10] SHEN X J, LIU B H, LU X G, et al. Spatial and temporal changes in daily temperature extremes in China during 1960–2011[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 130(3/4): 933–943
- [11] SUN Y, ZHANG X B, ZWIERS F W, et al. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China[J]. Nature Climate Change, 2014, 4(12): 1082–1085
- [12] ZHANG Z, WANG P, CHEN Y, et al. Global warming over 1960–2009 did increase heat stress and reduce cold stress in the major rice-planting areas across China[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 59: 49–56
- [13] 万素琴,陈晨,刘志雄,等. 气候变化背景下湖北省水稻高 温热害时空分布[J]. 中国农业气象, 2009, 30(S2): 316-319
 WAN S Q, CHEN C, LIU Z X, et al. Space-time distribution of heat injury on rice in Hubei Province under climate change[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(S2): 316-319
- [14] 于堃, 宋静, 高苹. 江苏水稻高温热害的发生规律与特征[J].

气象科学, 2010, 30(4): 530-533

YU K, SONG J, GAO P. Characteristics of heat damage for rice in Jiangsu Province[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2010, 30(4): 530–533

[15] 杨太明,陈金华,金志凤,等. 皖浙地区早稻高温热害发生
 规律及其对产量结构的影响研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(27): 97–104

YANG T M, CHEN J H, JIN Z F, et al. Study on the law of rice high temperature induced heat damage and its relationship with rice yield structure in Anhui and Zhejiang Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(27): 97–104

- [16] 谭诗琪, 申双和. 长江中下游地区近 32 年水稻高温热害分布规律[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(8): 97-101
 TAN S Q, SHEN S H. Distribution of high thermal damage to rice in middle and lower reaches of the Yangtze River in recent 32 years[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(8): 97-101
- [17] HUANG J, ZHANG F M, XUE Y, et al. Recent changes of rice heat stress in Jiangxi Province, southeast China[J]. International Journal of Biometeorology, 2017, 61(4): 623–633
- [18] WANG P, ZHANG Z, CHEN Y, et al. How much yield loss has been caused by extreme temperature stress to the irrigated rice production in China?[J]. Climatic Change, 2016, 134(4): 635–650
- [19] 任义方,高苹,王春乙. 江苏高温热害对水稻的影响及成因分析[J]. 自然灾害学报,2010,19(5):101-107
 REN Y F, GAO P, WANG C Y. High temperature damage to paddy rice in Jiangsu Province and its cause analysis[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(5): 101-107
- [20] 冯灵芝, 熊伟, 居辉, 等. RCP 情景下长江中下游地区水稻 生育期内高温事件的变化特征[J]. 中国农业气象, 2015, 36(4): 383-392
 FENG L Z, XIONG W, JU H, et al. Changes of high

temperature events during rice growth period in MLRYR under RCP Scenarios[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(4): 383–392

- [21] 李琪,任景全,王连喜.未来气候变化情景下江苏水稻高 温热害模拟研究 :评估孕穗—抽穗期高温热害对水稻产 量的影响[J].中国农业气象,2014,35(1):91–96
 LI Q, REN J Q, WANG L X. Simulation of the heat injury on rice production in Jiangsu Province under the climate change scenarios : Impact assessment of the heat injury on rice yield from booting to heading stage[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(1):91–96
- [22] 王连喜,任景全,李琪. 未来气候变化情景下江苏水稻高 温热害模拟研究 : 孕穗—抽穗期水稻对高温热害的适应 性分析[J]. 中国农业气象, 2014, 35(2): 206-213
 WANG L X, REN J Q, LI Q. Simulation of the heat injury on rice production in Jiangsu Province under the climate change scenarios : Adaptability analysis of the rice to heat injury from booting to heading stage[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(2): 206-213
- [23] JIANG Z H, SONG J, LI L, et al. Extreme climate events in

China: IPCC-AR4 model evaluation and projection[J]. Climatic Change, 2012, 110(1/2): 385-401

- [24] 佘敦先,夏军,张永勇,等.近50年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征[J].地理学报,2011,66(9):1200–1210
 SHE D X, XIA J, ZHANG Y Y, et al. The trend analysis and statistical distribution of extreme rainfall events in the Huaihe River Basin in the past 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9): 1200–1210
- [25] 张强,李剑锋,陈晓宏,等.基于 Copula 函数的新疆极端 降水概率时空变化特征[J].地理学报,2011,66(1):3-12
 ZHANG Q, LI J F, CHEN X H, et al. Spatial variability of probability distribution of extreme precipitation in Xinjiang[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 3-12
- [26] 程炳岩,丁裕国,何卷雄.全球变暖对区域极端气温出现概率的影响[J]. 热带气象学报, 2003, 19(4): 429–435
 CHENG B Y, DING Y G, HE J X. The influence of the global warming on probabilities of regional extreme temperatures[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2003, 19(4): 429–435
- [27] 林晶,陈惠,陈家金,等. 福建省年极端低温的分布及其参数估计[J]. 中国农业气象, 2011, 32(S1): 24-27
 LIN J, CHEN H, CHEN J J, et al. The distributions of yearly minimum temperature and parameter estimation in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(S1): 24-27
- [28] 刘军臣,千怀遂. 黄淮地区月极端气温概率模型[J]. 河南 大学学报: 自然科学版, 2000, 30(2): 84-87
 LIU J C, QIAN H S. A study on the probability model of monthly extreme temperature in Huanghuai area[J]. Journal of Henan University: Natural Science, 2000, 30(2): 84-87
- [29] 陈雅子, 申双和. 江苏省水稻高温热害保险的天气指数研制[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 461-464
 CHEN Y Z, SHEN S H. Design of weather index of high temperature thermal damage insurance for rice in Jiangsu Province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(10): 461-464
- [30] 毛留喜,魏丽.大宗作物气象服务手册[M].北京:气象出版社,2015:96-97
 MAO L X, WEI L. Handbook of Meteorological Service for Staple Crops[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2015: 96-97
- [31] 武汉区域气候中心. 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
 Regional Climate Center of Wuhan. GB/T 21985—2008
 Temperature Index of High Temperature Harm for Main Crops[S]. Beijing: China Standards Press, 2008
- [32] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 69-70
 WEI F Y. Modern Technology of Statistics, Diagnosis and Forecast for Climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 69-70
- [33] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. Global and Planetary Change, 2013, 100: 172–182
- [34] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J].

Econometrica, 1945, 13(3): 245-259

- [35] COLES S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values[M]. London: Springer, 2001: 54-59
- [36] 陈升孛, 刘安国, 张亚杰, 等. 气候变化背景下湖北省水稻 高温热害变化规律研究[J]. 气象与减灾研究, 2013, 36(2): 51 - 56

CHEN S B, LIU A G, ZHANG Y J, et al. Dynamic variations of heat injury on rice in Hubei Province under climate change[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2013, 36(2): 51-56

[37] 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

[38] 朱珠、陶福禄、娄运生。1980—2009 年江苏省气温变化特 征及水稻高温热害变化规律[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(6): 311-315

ZHU Z, TAO F L, LOU Y S. Temperature variation characteristics and high temperature damage of rice in Jiangsu Province from 1980 to 2009[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(6): 311-315

欢迎订阅 2019 年《中国生态农业学报》

《中国生态农业学报》由中国科学院遗传与发育生物学研究所和中国生态经济学学会主办、中国科学院主管、科学 出版社出版。系中国期刊方阵双效期刊、中国科技精品期刊、百种中国杰出学术期刊、中文核心期刊、RCCSE 中国权 威学术期刊,为中国学术期刊综合评价数据库、中国期刊全文数据库、中国学术期刊文摘、中国科学引文数据库、中国 科技论文与引文数据库、CNKI中国期刊全文数据库源刊,并被国际农业生物学文摘(CABI)、美国化学文摘(CA)、哥白 尼索引(IC)、美国乌利希国际期刊指南等国际数据库及检索单位收录。荣获第三届、四届全国农业优秀期刊一等奖和首 届北方优秀期刊奖,中国北方优秀期刊,连续多届获得河北省优秀期刊奖。

《中国生态农业学报》主要报道全球环境变化与农业、农业生态系统与生态农业理论基础、农田生态系统与农业资 源、生态农业模式和技术体系、农业生态经济学、农业环境质量及环境保护、农业有害生物的综合防治等领域创新性 研究成果。适于从事农业生态学、生态学、生态经济学以及环境保护等领域科技人员、高等院校有关专业师生、农业 及环境管理工作者和基层从事生态农业建设的技术人员阅读与投稿。

据《中国科技期刊引证报告》(核心版) 2017 年影响因子为 1.462, 学科排名第 3。据 CNKI 《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术)·2017 版》期刊复合影响因子为 2.457, 期 刊综合影响因子为 1.617。

《中国生态农业学报》国内外公开发行,国内刊号 CN13-1315/S,国际刊号 ISSN1671-3990。月刊,国际标准大16开本,160页,每期定价35元,全年420元。邮发代号:82-973,全 国各地邮局均可订阅。漏订者可直接汇款至编辑部补订(需另加邮资 50.00 元/年)。

地址: (050022) 河北省石家庄市槐中路 286 号中科院遗传发育所农业资源研究中心《中国 生态农业学报》编辑部

公众微信号 : zestnyxh

电话: (0311) 85818007 传真: (0311) 85815093 网址: http://www.ecoagri.ac.cn E-mail: editor@sjziam.ac.cn

