



张方潇, 陈脩, 黄娜, 毕朋帅, 高日平, 门靖宇, 黄占蕊, 杨荣到, 潘志华. 长江流域单季稻关键生育期高温、干旱及其复合事件时空分布特征[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(04): 1-14.

ZHANG Fangxiao, CHEN Xiao, HUANG Na, BI Pengshuai, GAO Riping, MEN Jingyu, HUANG Zhanrui, YANG Rongdao, PAN Zhihua. Spatio-temporal distribution of high-temperature, drought and their compound events during the critical fertility stages of single-season rice in the Yangtze River Basin [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(04): 1-14.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.04.01

长江流域单季稻关键生育期高温、干旱及其复合事件 时空分布特征

张方潇^{1,2} 陈脩^{1,2} 黄娜^{1,2} 毕朋帅^{1,2} 高日平^{1,2} 门靖宇^{1,2} 黄占蕊^{1,2}
杨荣到^{1,2} 潘志华^{1,2*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

2. 中国气象局-中国农业大学农业应对气候变化联合实验室, 北京 100193)

摘 要 为了解全球气候变化背景下长江流域单季稻关键生育期主要气象灾害时空分布特征, 基于1981—2020年长江流域139个气象站点的逐日气象观测资料, 计算单季稻关键生育期的危害热积温(Ha)和作物水分亏缺距平指数(CWDIa), 进而分析高温、干旱及高温干旱复合事件发生的站次比、强度和频率, 以揭示长江流域单季稻关键生育期高温、干旱及高温干旱复合事件的时空变化特征。结果表明: 1) 1981—2020年长江流域单季稻关键生育期高温事件站次比和强度均显著上升($P < 0.05$); 空间上, 抽穗扬花期(HF)高温事件高频发生区集中在四川东北部、重庆、湖北、湖南、江西, 发生频率50%~97%; 灌浆结实期(GF)集中在湖南、江西, 发生频率58%~95%; 2) 干旱事件发生站次比和干旱强度在HF呈下降趋势, GF呈上升趋势; 空间上, HF干旱事件高频发生区集中在贵州北部、重庆、湖北、安徽和江浙沪地区, 发生频率26%~50%; GF集中在湖北、江西, 发生频率19%~50%。3) 2001—2020年单季稻关键生育期高温干旱复合事件的站次比相较于基准期(1981—2000年)增加, 高温与重旱及以上同时发生的情况增加最多。空间上, 1981—2020年单季稻HF复合事件高频发生区集中在湖南, 发生频率9%~20%; GF高频发生区集中在四川、江西, 发生频率9%~15%。本研究结果明确了长江流域单季稻关键生育期主要气象灾害特征, 可为长江流域地区制定单季稻防灾减灾政策提供依据。

关键词 长江流域; 单季稻; 高温; 干旱; 复合事件; 时空分布

中图分类号 S166

文章编号 1007-4333(2025)04-0001-14

文献标志码 A

Spatio-temporal distribution of high-temperature, drought and their compound events during the critical fertility stages of single-season rice in the Yangtze River Basin

ZHANG Fangxiao^{1,2}, CHEN Xiao^{1,2}, HUANG Na^{1,2}, BI Pengshuai^{1,2}, GAO Riping^{1,2},
MEN Jingyu^{1,2}, HUANG Zhanrui^{1,2}, YANG Rongdao^{1,2}, PAN Zhihua^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. CMA-CAU Joint Laboratory of Agriculture Addressing Climate Change, Beijing 100193, China)

Abstract This study aimed to explore the spatio-temporal characteristics of main disasters during the

收稿日期: 2024-08-02

基金项目: 国家重点研发计划地球系统与全球变化专项(2023YFF0805703); 中国气象局气候变化专题项目(QBZ202401)

第一作者: 张方潇(ORCID:0009-0003-2165-8565), 硕士研究生, E-mail: zfx010510@163.com

通讯作者: 潘志华(ORCID:0000-0002-8187-1574), 教授, 主要从事气候变化影响与适应、旱地农业可持续发展研究, E-mail: panzhihua@cau.edu.cn

critical fertility stages of single-season rice in the Yangtze River Basin. Based on the day-by-day meteorological data of 139 meteorological stations in the Yangtze River Basin from 1981 to 2020, the accumulated hot damage temperature (Ha) and the crop water deficit abnormal index (CWDIa) during the critical fertility stages of single-season rice were determined. The station ratio, intensity, and frequency of high-temperature, drought, and their compound events were analyzed to reveal the spatio-temporal characteristics of these events. The results showed that: 1) From 1981 to 2020, the station ratio and the intensity of high-temperature events increased significantly ($P < 0.05$) during the critical fertility stages of single-season rice. Spatially, high-value areas of high-temperature frequency during the heading to flowering stage (HF) were in the northeastern of Sichuan, Chongqing, Hubei, Hunan, and Jiangxi, with the range from 50% to 97%. During the grain to filling stage (GF), high-value areas of high-temperature frequency were in Hunan and Jiangxi, within the range from 58% to 95%. 2) The station ratio and intensity of drought events showed a decreasing trend during HF but an increasing trend during GF. Spatially, high-frequency areas of drought during HF are concentrated in northern Guizhou, Chongqing, Hubei, Anhui, and the Jiangsu-Zhejiang-Shanghai region, with frequencies ranging from 26% to 50%. During GF, high-frequency areas of drought are concentrated in Hubei and Jiangxi, with frequency ranging from 19% to 50%. 3) Compared to the baseline period (1981 to 2000), the station ratio of compound high-temperature and drought events during the critical fertility stages increased from 2001 to 2020, especially the incidence of concurrent high temperatures and severe droughts. From 1981 to 2020, high-frequency areas of compound events during the HF were in Hunan, within the range from 9% to 20%. The areas with high-frequency occurrences of GF are concentrated in Sichuan and Jiangxi, within the range from 9% to 15%. In conclusion, the results clarify the characteristics of the main meteorological disasters during the critical fertility stages of single-season rice in the Yangtze River Basin and provide a scientific basis for formulating disaster prevention and mitigation policies for single-season rice in this region.

Keywords Yangtze River Basin; single-season rice; high-temperature; drought; compound events; spatio-temporal distribution

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告综合报告显示^[1]:与1850—1900年相比,2011—2020年全球地表温度升高了1.1℃,估测全球温升将于近期(2021—2040年)突破1.5℃。全球温度升高使得极端天气和气候事件趋多趋强^[2],导致高温、干旱、高温干旱复合事件等气象灾害发生频率、强度和区域分布变得更加复杂和难以把握,对农业生产构成了更加严重的威胁。

水稻生产在我国粮食生产中占据重要地位。2022年我国水稻播种面积为2945万 hm^2 ,占粮食作物播种总面积的24.9%;总产量2.085亿t,占粮食总产量的30.5%^[3]。长江流域处于亚热带季风气候区,光温资源丰富,降水资源充沛,为水稻生产提供了良好的生长环境、该区域常年水稻总产量约占全国的70%,是我国水稻生产的主要和关键区域。近些年来,该地区水稻以单季稻为主^[4]。

高温和干旱发生在水稻不同的生育时期对其生理性状有不同的影响,制约了产量和品质的不同方面。对于单季稻而言,抽穗扬花期(Heading-

Flowering stage, HF)和灌浆结实期(Grain-Filling stage, GF)正值高温和干旱事件频发、重发的时段^[5]。HF遇到高温,会使开花期提前^[6],致使花药开裂不良、花粉萌发率低和花粉活力下降,最终造成水稻籽粒败育^[7]。同时,HF需水量大,抗旱能力较弱,若遇干旱则会导致不实和白穗增多,降低穗粒数^[8]。GF遇到高温,会缩短灌浆期,阻碍籽粒充实,增加空瘪粒使千粒重降低^[9]。同时,GF抗旱能力较弱,缺水会影响水稻的光合作用,使秕粒增加、粒重降低^[10],进而影响最终单季稻的产量和品质。

罗孳孳等^[11]选取连续3d日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$,与连续3d日平均气温 $\geq 30^\circ\text{C}$,分别作为水稻抽穗扬花期与灌浆结实期高温的气象指标;杨炳玉等^[12]将日平均气温 $\geq 30^\circ\text{C}$ 、日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 且日平均相对湿度 $\leq 70\%$ 持续3d及以上定义为该年该日为一个高温事件;杨建莹等^[13]选取连续3d及以上日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 作为早稻高温发生的气象环境条件,结合发生的持续日数和不同等级,分析了江西早稻高温发生时间分布特征。对于干旱的研究,金

垚等^[14]选取水分亏缺指数(I)并将其分为轻旱、中旱、重旱、特旱4个等级作为水稻干旱识别指标;邢愿等^[15]选取作物水分亏缺指数(CWDI)对贵州省水稻生长期干旱特征进行分析;李闯等^[16]采用作物水分亏缺指数(CWDI)对昆明市水稻生长季干旱进行分析。

综合来看,不同研究采用的指标存在差异,多数基于温度高于35℃的天数来进行高温等级划分。然而,高温事件对水稻的影响不只取决于温度,还取决于高温的持续时间和强度,即危害热积温指数(Accumulated hot damage temperature, Ha),通过计算当连续高温日数达3 d及以上时,日最高气温高于35℃的累积量,能更全面地反映高温事件的特征^[17]对于干旱事件的识别,作物水分亏缺指数(CWDI)能较好地反映土壤、作物和气象三要素的综合影响,还能反映出作物需水量和降水量之间的匹配关系。但由于研究区域范围广,蒸散差别大,难以用统一的标准表达各区域水分亏缺程度^[18]。作物水分亏缺距平指数(Crop Water Deficit abnormal Index, CWDIa)是归一化作物水分亏缺指数与其平均值之差,可以消除这种区域差异^[18]。

已有对单季稻高温、干旱的研究主要集中在单个极端事件^[19-21]且研究区域多集中在我国西南^[22-23]及两湖地区^[24-25],而少有针对单季稻高温、干旱及其复合事件发生规律的研究。近年来长江流域高温和干旱同时发生的几率逐年增加^[26],对水稻生产的影响程度更强,相比于单一事件^[27-28],高温干旱复合事件的定义和指标选取更为复杂,对于高温干旱复合事件的研究目前尚少。

因此,为在当前气候背景下,明确长江流域单季稻关键生育期内高温、干旱及其复合事件的时空分布特征。本研究参考GB/T 37744—2019《水稻热害气象等级》^[17]标准和GB/T 32136—2015《农业干旱等级》^[18]标准,拟选用危害热积温指数和作物水分亏缺距平指数作为单季稻高温指标和干旱识别指标,识别1981—2020年长江流域单季稻关键生育期(抽穗扬花期、灌浆结实期)的高温、干旱事件,并基于Ha和CWDIa,进一步探究单季稻同一生育期内高温和干旱同时发生时的高温干旱复合事件的发生规律,分析高温、干旱以及高温干旱复合事件发生的时空演变特征,以期为提高长江流域单季稻增强防灾减灾能力提供支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区域及数据来源

1.1.1 研究区域

长江流域(90°33'E~122°25'E, 24°30'N~35°45'N)是世界第三大流域,流域总面积180万km²,干流自西而东横贯中国中部,流经青海、西藏、四川、云南、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海等11个省、自治区、直辖市。本研究基于ChinaCropPhen 1 km数据集^[29]确定长江流域单季稻种植分布区域,如图1所示。

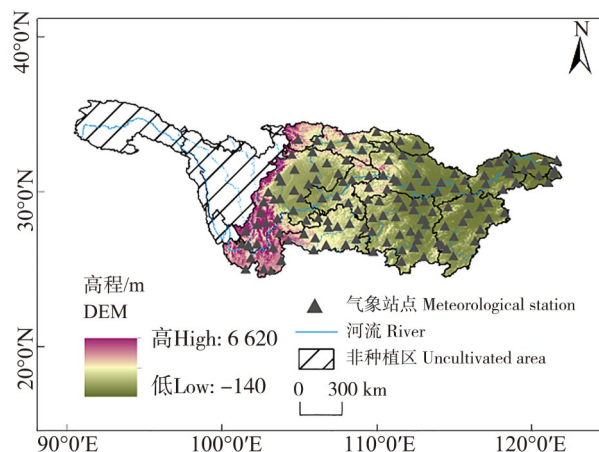


图1 长江流域单季稻种植区及气象站点分布图

Fig.1 Distribution of single-season rice planting areas and meteorological stations in the Yangtze River Basin

1.1.2 数据来源

1)气象数据。通过筛选,本研究使用1981—2020年长江流域内139个气象站点的实际观测数据,站点分布见图1。源于中国地面气候资料日值数据集(V3.0, <http://data.cma.cn/>),包括逐日平均气温、最高气温、相对湿度、降水量、日照时数、平均风速等。

2)单季稻生育期数据:基于ChinaCropPhen 1 km数据集^[29]遥感反演及已有文献中的相关实验数据^[30-34]等多源数据,确定1981—2020年长江流域单季稻生长季和不同生育期。同时参考已有单季稻气象灾害相关研究^[30-36],将长江流域单季稻种植区划分为8个区域,单季稻受高温干旱影响的关键生育期定为抽穗扬花期(HF)和灌浆结实期(GF),并确定了单季稻2个关键生育期的时间,详见表1。

表1 长江流域单季稻种植区域单季稻关键生育期

Table 1 The key growth stages of single-season rice in different regions of the Yangtze River Basin

关键生育期 Key growth stage	江浙沪 Jiangsu、 Zhejiang、 Shanghai	安徽 Anhui	江西 Jiangxi	湖北 Hubei	湖南 Hunan	重庆 Chongqing	四川 Sichuan	贵州 Guizhou	云南 Yunnan
抽穗扬花期 Heading to flowering stage	8月下旬 —9月中 旬	8月下旬 —9月上 旬	7月下旬 —8月上 旬	7月下旬 —8月上 旬	7月中旬 —7月下 旬	8月中旬 —8月下 旬	7月下旬 —8月上 旬	8月上旬 —8月下 旬	8月上旬 —8月下 旬
灌浆结实期 Grain to filling stage	9月下旬 —10月上 旬	9月中旬 —9月下 旬	8月中旬 —9月上 旬	8月中旬 —9月上 旬	8月上旬 —9月上 旬	9月上旬 —9月中 旬	8月中旬 —9月下 旬	9月上旬 —9月下 旬	9月上旬 —9月中 旬

1.2 研究方法

1.2.1 危害热积温

本研究危害热积温定义为单季稻HF、GF连续高温日数达3 d及以上时,日最高气温高于35℃的累积量,计算公式如下:

$$Ha = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} f(T_h^{ij}) \quad (1)$$

$$f(T_h^{ij}) = \begin{cases} T_h^{ij} - 35.0 & 35.0 \leq T_h^{ij} < 40.0 \\ 3 \times (T_h^{ij} - 40) + 5 & T_h^{ij} \geq 40.0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:Ha为危害热积温,℃·d; m 为评价时间段内水稻热害过程的总次数; j 为多次水稻热害过程的序号, $j=1,2,\dots,m$; n_j 为第 j 个水稻热害过程中总高温日数($n_j \geq 3$); d ; i 为第 j 个水稻热害过程中每天的序号, $i=1,2,\dots,n_j$; $f(T_h^{ij})$ 为单日积热,℃; T_h^{ij} 为第 j 个水稻热害过程中第 i 天的日最高气温,℃。最终,基于危害热积温的数值,将高温划分为轻度、中度、重度3个等级^[17], $0 < Ha \leq 15$ 为发生轻度高温, $15 < Ha \leq 30$ 为发生中度高温, $Ha > 30$ 为发生重度高温。

1.2.2 作物水分亏缺距平指数

作物水分亏缺距平指数定义为外界水分不能满足作物需水量的部分占作物需水量的比例,将其

$$CWDI_a = \begin{cases} \frac{CWDI - \overline{CWDI}}{100 - \overline{CWDI}} \times 100 & \overline{CWDI} > 0 \\ CWDI & \overline{CWDI} \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $CWDI$ 为某时段作物水分亏缺指数,%; $\overline{CWDI}$ 为计算时段同期作物水分亏缺指数1981—2020年的平均值, %。由于每个生育期涉及多旬,

归一化后与平均值之差^[18]。计算公式如下:

1)逐日水分亏缺指数:

$$CWDI = a \times CWDI_j + b \times CWDI_{j-1} + c \times CWDI_{j-2} + d \times CWDI_{j-3} + e \times CWDI_{j-4} \quad (3)$$

式中: $CWDI$ 为某时段作物水分亏缺指数,%; $CWDI_j$ 、 $CWDI_{j-1}$ 、 $CWDI_{j-2}$ 、 $CWDI_{j-3}$ 、 $CWDI_{j-4}$ 分别为第 j 、 $j-1$ 、 $j-2$ 、 $j-3$ 、 $j-4$ 时间单位的水分亏缺指数,%; a 、 b 、 c 、 d 、 e 分别为各单位水分亏缺指数的权重系数,根据GB/T 32136—2015《农业干旱等级》^[18]中的经验值设定,分别为0.3、0.25、0.2、0.15、0.1。其中,以10 d为一个时间单位。

其中:

$$CWDI_j = (1 - \frac{P_j}{ETc_j}) \quad (4)$$

$$ETc_j = K_c \times ET_0 \quad (5)$$

式中: P_j 为某10 d的累计降水量,mm; ETc_j 为某10 d的潜在蒸散量,mm。 K_c 为某10 d作物所处发育阶段的作物系数,具体数值参考GB/T 32136—2015《农业干旱等级》^[18],详见表2; ET_0 为某10 d的参考作物蒸散量,采用联合国粮农组织推荐的Penman-Monteith公式^[37]计算。

2)作物水分亏缺距平指数($CWDI_a$):

使用多旬中 $CWDI_a$ 的最大值作来进行该生育期的干旱等级划分。不同生育期按照不同阈值来划分干旱等级(表3),最终将干旱强度划分为轻旱、中

表 2 长江流域单季稻各月份作物系数 ^[18]					
Table 2 Monthly crop coefficient (Kc) for single-season rice in the Yangtze River Basin ^[18]					
区域 Region	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September
江浙沪、安徽 Jiangsu、Zhejiang、Shanghai、Anhui	1. 02	1. 165	1. 275	1. 325	1. 175
江西、湖北、湖南 Jiangxi、Hubei、Hunan	1. 35	1. 5	1. 4	0. 94	1. 24
重庆、四川 Chongqing、Sichuan	1. 15	1. 3	1. 4	1. 5	1. 3
贵州、云南 Guizhou、Yunnan	1. 3	1. 5	1. 7	1. 8	1. 5

旱、重旱、特旱共 4 个等级。

1.2.3 高温干旱复合事件

基于高温和干旱事件的识别,本研究在识别高温和干旱事件时保留同一生育期内多旬的 Ha 和

CWDIa 的最大值。基于高温和干旱事件的多个阈值,本研究利用累积分布函数,识别了不同阈值下同一生育期内高温和干旱同时发生的高温干旱复合事件发生的概率分布。对不同等级高温干旱复合事件的定义及其阈值划分如表 4 所示。

1.3 特征分析方法

灾害站次比:为某一时间尺度研究区域内发生灾害的站点数占全部站点数的比例,用于表征灾害影响范围的大小,记作 R_j ,计算公式如下:

$$R_j=\frac{m}{M}\times 100\%$$

(7)

式中: m 为发生灾害的站点数; M 为研究区域内总站点数;下标 j 为不同年份。

灾害强度:用于评估某站点发生灾害的严重程度,记作 S 。

对于高温事件,灾害强度 S 计算公式如下:

$$S_{ij}(\text{高温})=\frac{\sum_{i=1}^m Ha_i}{M}$$

(8)

表 3 单季稻干旱等级划分 ^[18]		
Table 3 Classification of drought levels for single-season rice ^[18]		
干旱等级 Grade of drought	作物水分亏缺距平指数 CWDIa	
	抽穗扬花期 Heading to flowering stage	灌浆结实期 Grain to filling stage
轻旱 Light	$0.35<CWDIa\leqslant 0.5$	$0.40<CWDIa\leqslant 0.55$
中旱 Moderate	$0.5<CWDIa\leqslant 0.65$	$0.55<CWDIa\leqslant 0.70$
重旱 Severe	$0.65<CWDIa\leqslant 0.80$	$0.70<CWDIa\leqslant 0.85$
特旱 Extreme	$CWDIa>0.80$	$CWDIa>0.85$

表 4 单季稻高温干旱复合事件等级划分		
Table 4 Classification of high-temperature and drought compound events for single-season rice		
类型 Type	阈值等级 Threshold level	
高温干旱 High-temperature and drought	$Ha>0 \ \& \ CWDIa>0.35$	
高温且重旱及以上 High-temperature and severe drought and above	$Ha>0 \ \& \ CWDIa>0.65$	
重度高温且干旱 Severe high-temperature and drought	$Ha>30 \ \& \ CWDIa>0.35$	
重度高温且重旱及以上 Severe high-temperature and severe drought and above	$Ha>30 \ \& \ CWDIa>0.65$	

式中:下标 i 为不同站点;下标 j 为不同年份; m 为发生高温事件的站点数; Ha_i 为 i 站发生高温事件时 Ha 值; M 为研究区域内总站点数($M=139$)。

对于干旱,灾害强度 S 计算公式如下:

$$S_{ij}(\text{干旱}) = \frac{\sum_{i=1}^m \text{CWDIa}}{M} \quad (9)$$

式中:下标 i 为不同站点;下标 j 为不同年份; m 为发生干旱的站点数; M 为研究区域内总站点数($M=139$)。

灾害频率:用于评判某站点灾害发生的频繁程度,用 F_i 表示。计算公式如下:

$$F_i = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (10)$$

式中:下标 i 为不同站点; n 为该站发生灾害的年数; N 为该站被统计的总年数。

累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF):是描述随机变量的概率分布的函数。对于给定的随机变量(R),其 CDF $F(R)$ 表示随机变量取值小于或等于某个特定值(R)的概率。计算公式如下:

$$F(R) = \frac{\sum_{i=1}^N I(R_i \leq R)}{N} \quad (11)$$

式中: R_i 为第 i 年的复合事件站次比; N 为该时段总年份数($N=20$)。 $I(\cdot)$ 为指示函数,当括号内的条件为真时取值为 1,否则取值为 0。

气候倾向率:用于表示某一特征量在某段时间内的变化趋势。

$$Y = a \times t + b \quad (12)$$

式中: Y 为对应的气候要素; t 为相对应的时间序列; a ; b 为截距; a 为线性回归函数的斜率值,以 $10a$ 作为气候倾向率。采用 F 检验法对拟合的回归方程进行显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 单季稻关键生育期高温事件时空特征

统计 1981—2020 年长江流域单季稻抽穗扬花期和灌浆结实期不同等级高温发生站次比和强度,结果如图 2 所示。由图 2(a)可见:1981—2020 年长江流域单季稻 HF 高温事件发生的站次比和强度均显著增加 ($5.0\%/10a$ 和 $1.55 (^\circ\text{C} \cdot \text{d})/10a$, $P < 0.05$)。站次比年代平均值从 20 世纪 80 年代的

33.1% 增加到 21 世纪 10 年代的 48.2%,高温强度平均值从 $3.49 ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 增加到 $8.41 ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。2003 年发生高温站点最多且强度最大,分别为 57.9% 和 $17.4 ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。

由图 2(b)可见:1981—2020 年长江流域单季稻 GF 高温事件站次比和强度均显著增加 ($5.7\%/10a$ 和 $1.2 (^\circ\text{C} \cdot \text{d})/10a$, $P < 0.05$)。站次比年代平均值从 20 世纪 80 年代的 21.1% 增加到 21 世纪 10 年代的 36.5%,高温强度平均值从 $1.7 ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 增加到 $5.3 ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。2006 年高温发生站点最多,2013 年高温强度最大,分别为 52.9% 和 $11.2 ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。

统计 1981—2020 年长江流域单季稻抽穗扬花期和灌浆结实期不同等级高温发生频率,结果如图 3 所示。1981—2020 年期间,长江流域单季稻关键生育期高温事件发生频次总体均呈西北向东南递增的特征。由图 3(a)可见:HF 高温事件高频发生区集中在四川东北部、重庆中部、湖北东部、湖南大部分地区和江西,发生频率 50%~97%。发生轻度高温地区主要集中在四川东北部、湖北、湖南、江西,发生频率 41%~67%;发生中度高温地区主要集中在江西,发生频率 28%~47%;发生重度高温地区主要集中在重庆,发生频率 28%~47%。

由图 3(b)可见:GF 高温事件高频发生区集中在湖南、江西,发生频率 58%~95%。发生轻度高温地区主要集中在湖北东部、湖南、江西,发生频率 36%~70%;发生中度高温地区主要集中在重庆、湖南、江西,发生频率 16%~30%;发生重度高温地区主要集中在重庆交界地区、湖南,发生频率 4%~12%。

2.2 单季稻关键生育期干旱事件时空特征

统计 1981—2020 年长江流域单季稻抽穗扬花期和灌浆结实期不同等级干旱发生站次比和强度,结果如图 4 所示。由图 4(a)可见:1981—2020 年长江流域单季稻 HF 干旱事件发生的站次比和强度均下降 ($-1.1\%/10a$ 和 $-0.28\%/10a$)。站次比和干旱强度最高年代平均值均为 21 世纪 00 年代,为 19.6% 和 $10.2\%/10a$,最低年代平均值均为 20 世纪 90 年代,为 13.9% 和 $7.4\%/10a$ 。2013 年发生干旱站点最多且强度最大,分别为 39.6% 和 22.6%。

由图 4(b)可见:1981—2020 年长江流域单季稻 GF 干旱发生站次比和强度均上升 ($2.2\%/10a$ 和 $1.3\%/10a$)。年代平均值从 20 世纪 80 年代的 13.2% 增加到 21 世

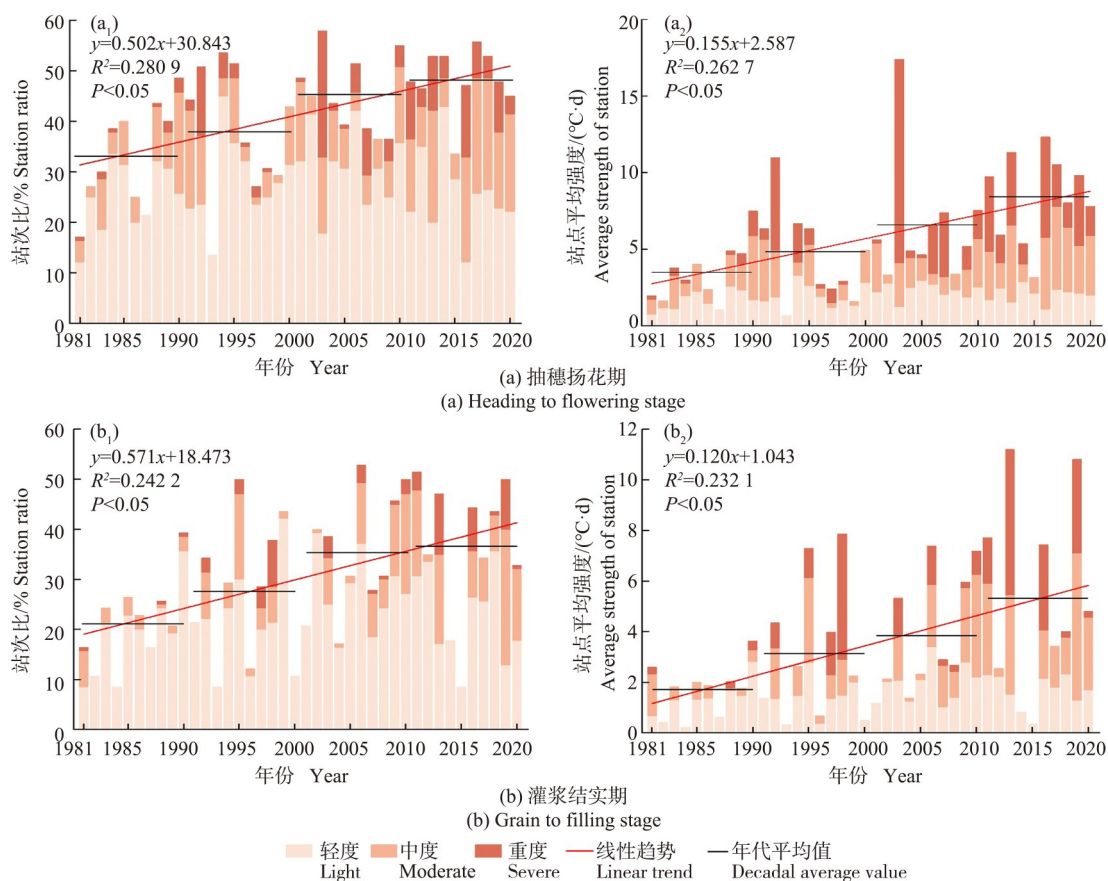


图 2 长江流域单季稻关键生育期不同等级高温发生站次比和发生强度时间变化

Fig.2 Temporal changes in the station ratio and intensity of different levels high-temperature events during the critical fertility stages of single-season rice in the Yangtze River Basin

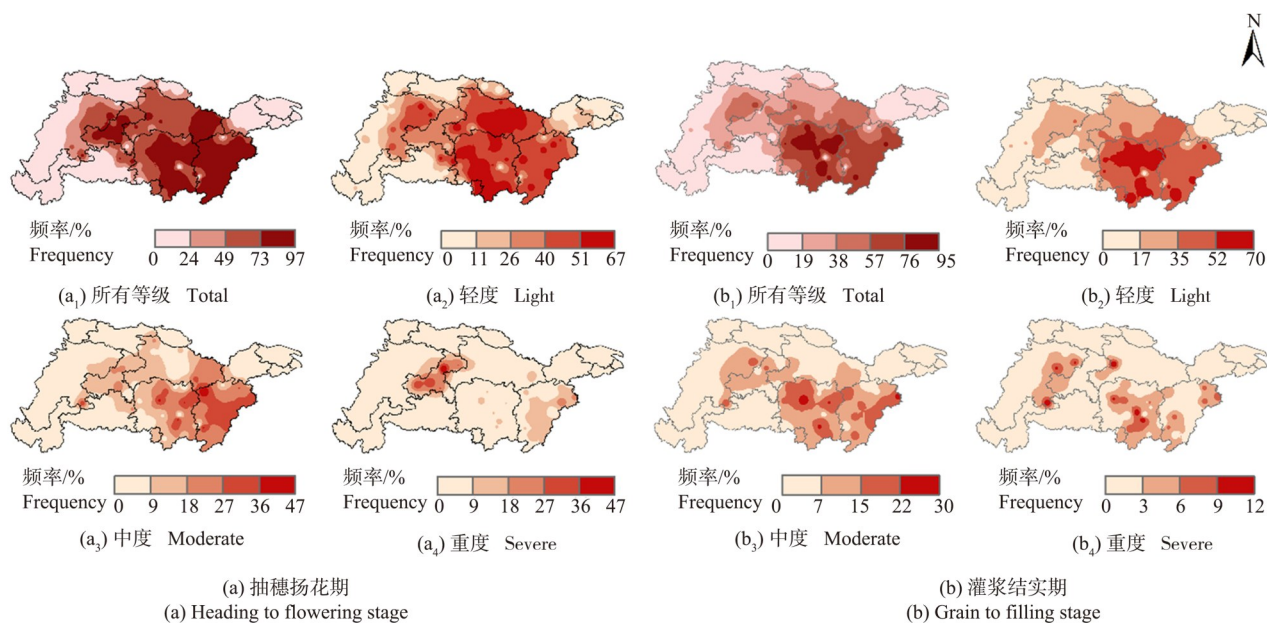


图 3 长江流域单季稻关键生育期不同等级高温发生频率空间变化

Fig.3 Spatial variation in the frequency of different levels high-temperature events during the critical fertility stages of single-season rice in the Yangtze River Basin

纪10年代的19.9%;年代间干旱强度无明显变化趋势,最高年代平均值出现在20世纪10年代,为10.5%,最低

出现在19世纪90年代,为6.4%。2006年发生干旱站点数最多且强度最大,分别为38.8%和20.7%。

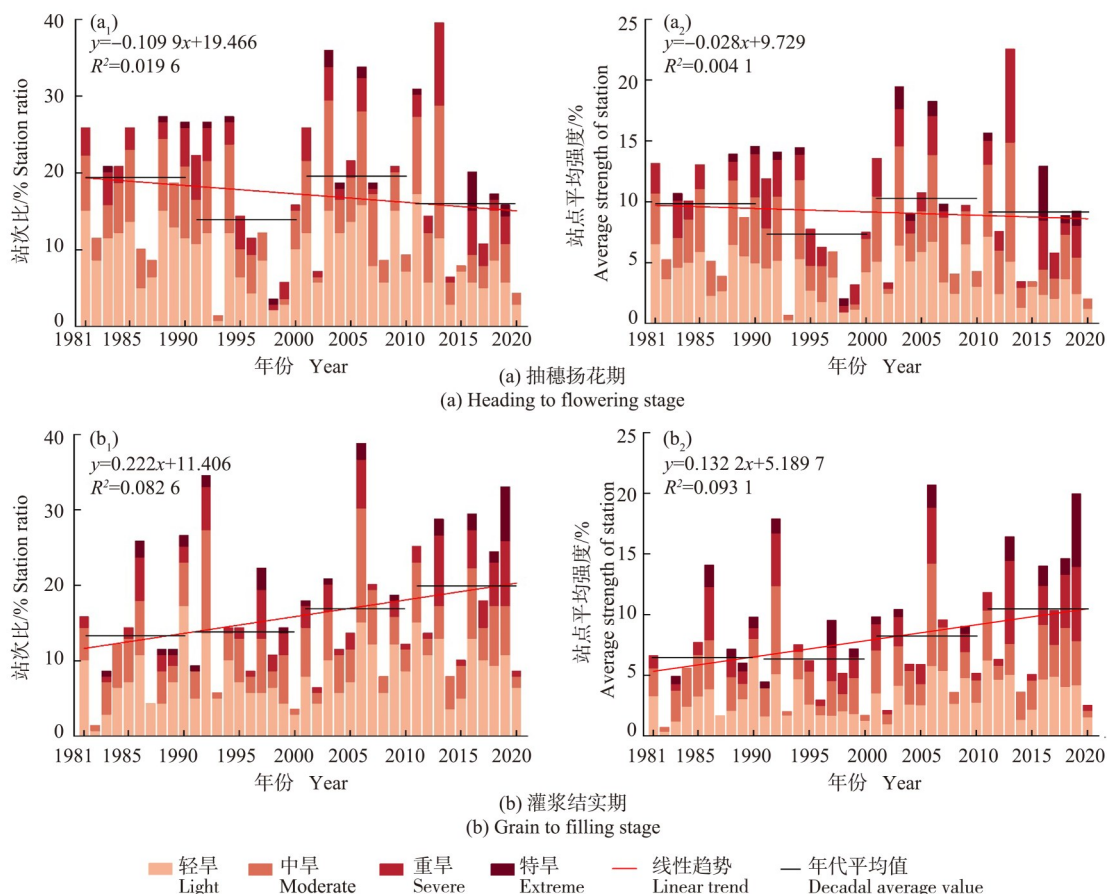


图4 长江流域单季稻关键生育期不同等级干旱发生站次比和发生强度时间变化

Fig.4 Temporal changes in the station ratio and intensity of different levels drought events during the critical fertility stages of single-season rice in the Yangtze River Basin

统计1981—2020年长江流域单季稻抽穗扬花期和灌浆结实期不同等级干旱发生频率,结果如图5所示。由图5(a)可见:1981—2020年期间,长江流域单季稻抽穗扬花期干旱事件高频发生区集中在贵州北部、重庆、湖南西北部、安徽和江浙沪地区,发生频率26%~50%。发生轻旱地区主要集中在贵州北部、湖南西部、江浙沪地区,发生频率16%~32%;发生中旱地区主要集中在重庆、湖南、安徽、江浙沪地区,发生频率7%~25%;发生重旱地区主要集中在重庆、安徽、江浙沪地区,发生频率5%~15%;发生特旱地区主要集中在江西南部、江浙沪地区,发生频率3%~7%。

由图5(b)可见:1981—2020年期间,长江流域单季稻灌浆结实期干旱事件高频发生区集中在湖

北、江西,发生频率19%~50%。发生各等级干旱地区均集中在湖北、江西,发生频率6%~27%。

2.3 单季稻关键生育期高温干旱复合事件时空特征

2.3.1 基于站次比的高温干旱复合事件的时间变化

本研究将1981—2020年分为1981—2000年(基准期)和2001—2020年共2个时间段,通过累积分布函数法分析同时发生的高温干旱复合事件在这2个时段的发生概率,结果如图6所示。

由图6(a)可见:长江流域单季稻抽穗扬花期在2001—2020年有22.3%的站点同时发生高温干旱,相较于基准期站点数增加了5.7%;有6.5%的站点发生高温同时发生了重旱及以上的干旱,相较于基

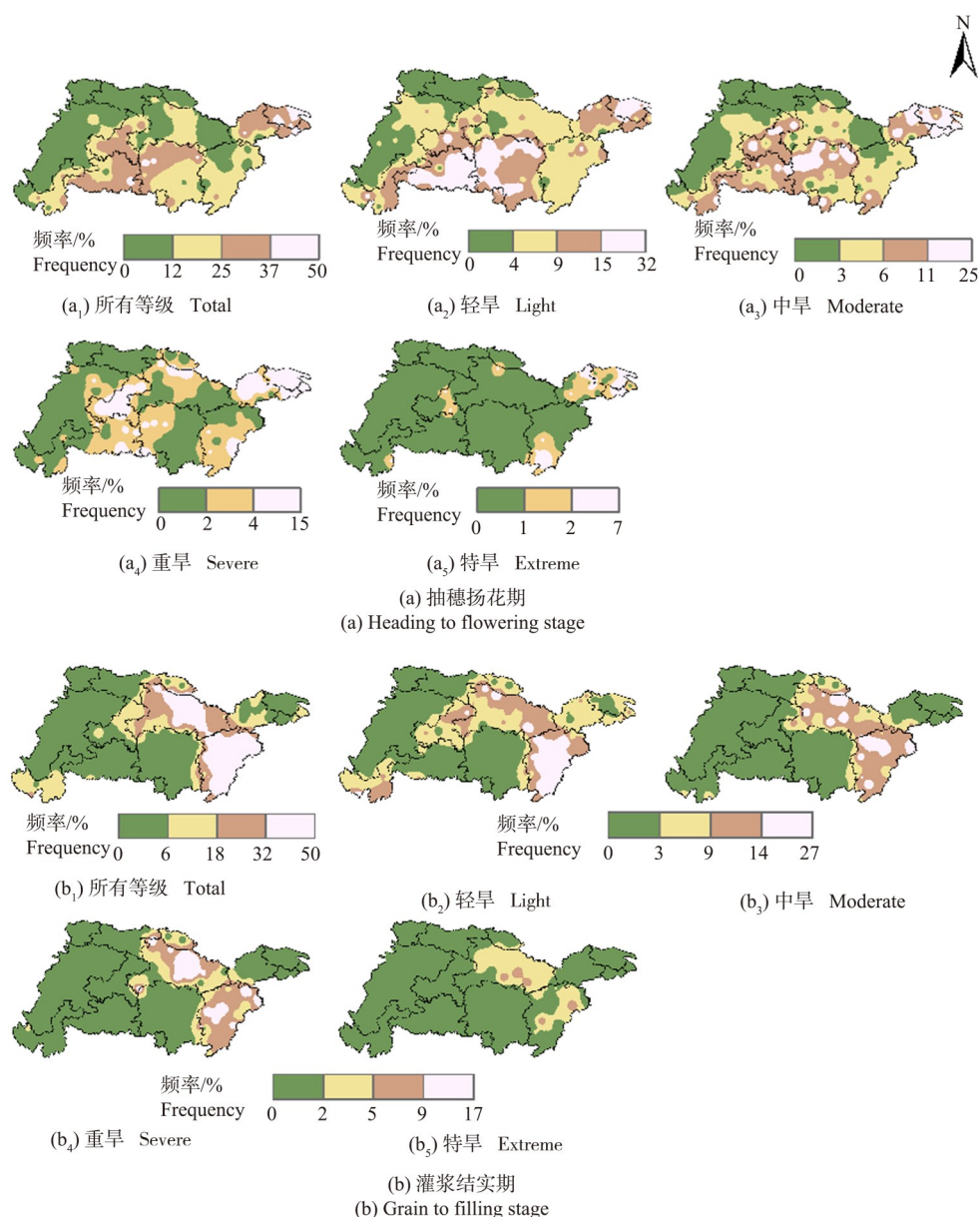


图5 1981—2020年长江流域单季稻关键生育期不同等级干旱发生频率的空间变化

Fig.5 Spatial variation in the frequency of different levels drought events during the critical fertility stages of single-season rice in the Yangtze River Basin from 1981 to 2020

准期站点数增加了1.5%。有11.5%的站点发生重度及以上高温同时发生了干旱,相较于基准期站点数增加了7.2%;有3.6%的站点发生重度及以上高温同时发生了重旱及以上的干旱,相较于基准期站点数增加了2.2%。

由图6(b)可见:2001—2020年长江流域单季稻灌浆结实期有27.3%的站点同时发生高温干旱,相较于基准期站点比例增加了10.8%;有15.1%的站点发生高温同时发生了重旱及以上的干旱,相较于基准期站点数增加了7.9%。有8.6%的站点发生

重度高温同时发生了干旱,相较于基准期站点比例增加了3.6%;有3.6%的站点发生重度高温同时发生了重旱及以上的干旱,相较于基准期站点比例增加了0.7%。

2.3.2 高温干旱复合事件发生频率的空间变化

统计1981—2020年长江流域单季稻抽穗扬花期和灌浆结实期不同等级高温干旱复合事件发生频率,结果如图7所示。由图7(a)可见:1981—2020年长江流域单季稻抽穗扬花期高温干旱事件($H_a > 0, CWDI_a > 0.35$)主要出现在湖南,发生频率

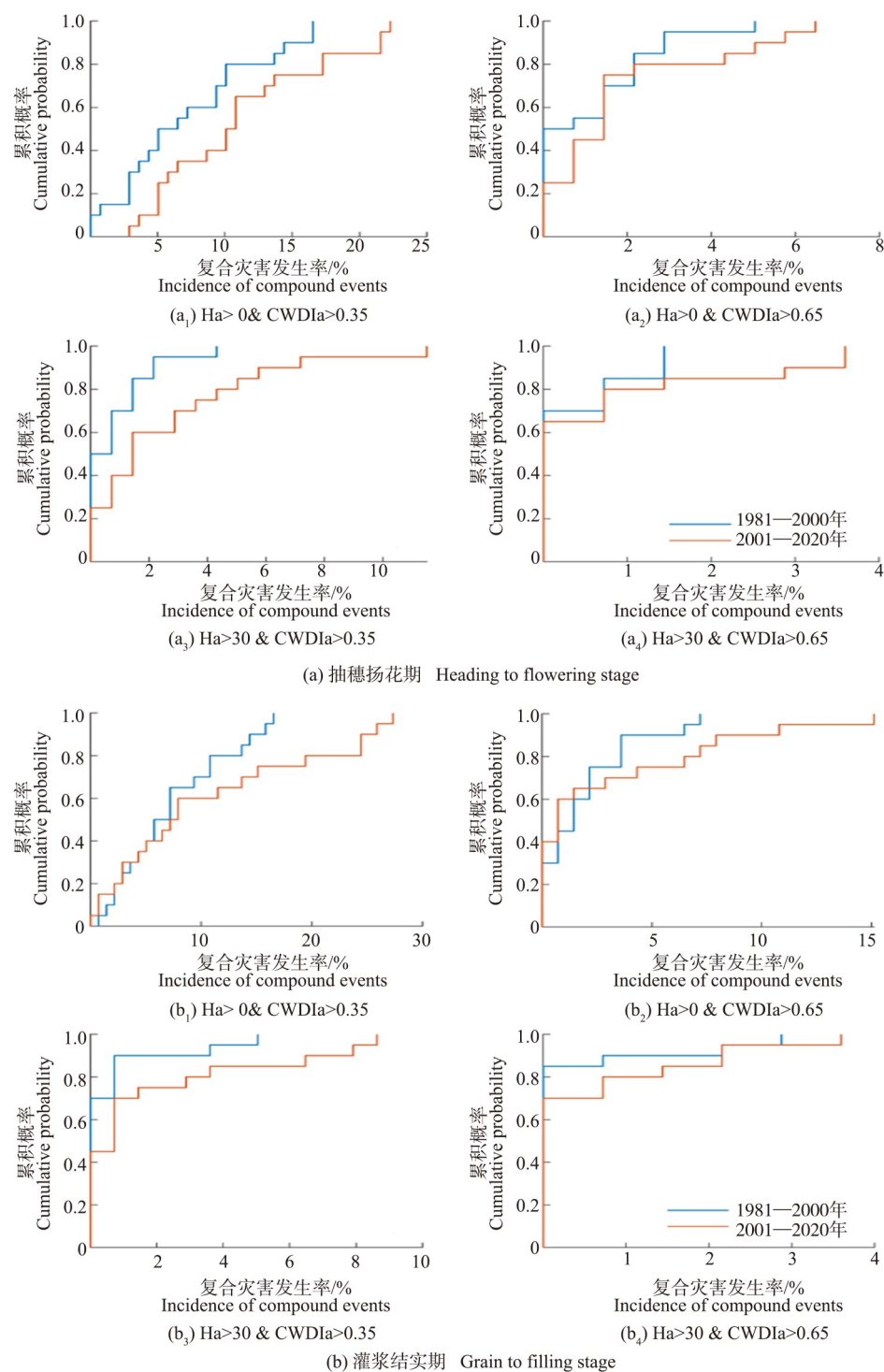


图6 长江流域单季稻关键生育期 1981—2000 年和 2001—2020 年不同等级高温干旱复合事件累积分布

Fig.6 Cumulative distribution functions of different levels of high-temperature and drought compound events during the critical fertility stages of single-season rice in the Yangtze River Basin for the periods 1981-2000 and 2001-2020

9%~20%;发生高温同时发生重度干旱及以上的干旱事件($H_a > 0, CWDI_a > 0.65$)地区集中在重庆中部、湖北中部、湖南西北部,发生频率4%~8%;发

生重度高温同时发生干旱事件($H_a > 30, CWDI_a > 0.35$)地区集中在重庆、湖南东部,发生频率4%~10%;发生重度高温同时发生了重旱及以上的干旱

事件($Ha > 30, CWDIa > 0.65$)地区集中在重庆, 发生频率5%~8%。

由图7(b)可见: 单季稻灌浆结实期高温干旱复合事件($Ha > 0, CWDIa > 0.35$)集中出现在四川东北部、湖北西部、江西, 发生频率8%~15%; 发生高温同时发生重度干旱及以上的干旱事件($Ha > 0,$

$CWDIa > 0.65$)地区集中在湖北、江西, 发生频率6%~10%; 发生重度高温同时发生干旱事件($Ha > 30, CWDIa > 0.35$)地区集中在湖南, 发生频率6%~10%; 发生重度高温同时发生重旱及以上的干旱事件($Ha > 30, CWDIa > 0.65$)地区集中在四川东部、江西, 发生频率4%~6%。

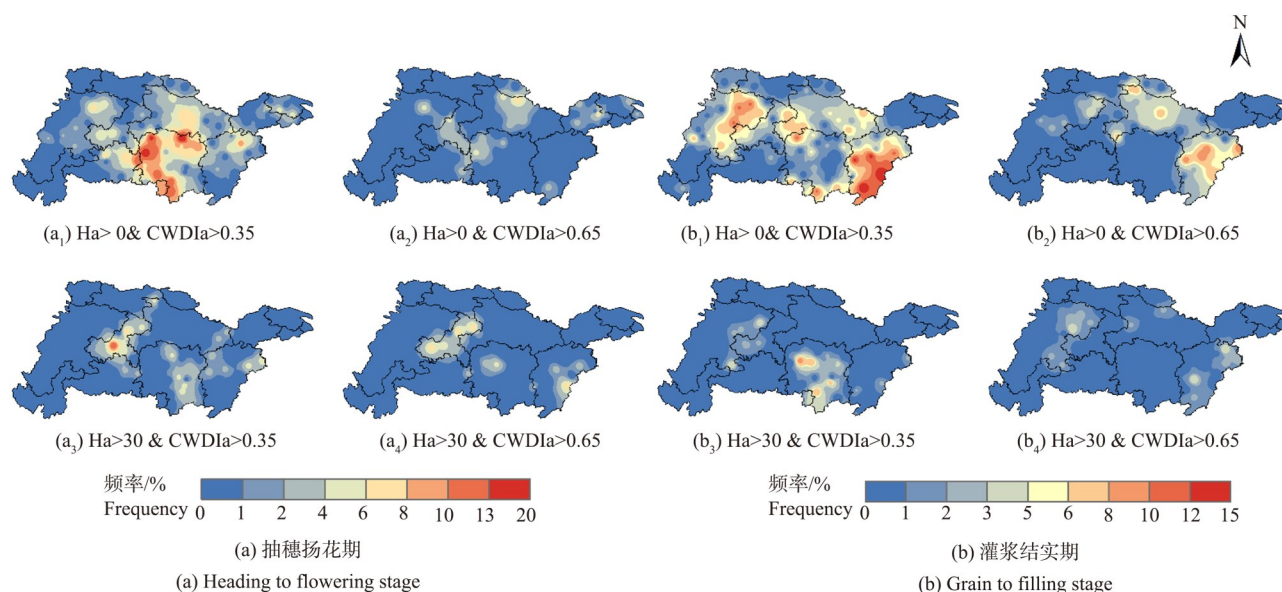


图7 1981—2020年长江流域单季稻关键生育期不同等级高温干旱复合灾害发生频率空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the frequency of different levels of high-temperature and drought compound events during the key growth stages of single-season rice in the Yangtze River Basin from 1981 to 2020

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究通过危害热积温(Ha)和作物水分亏缺距平指数($CWDIa$)识别单季稻高温、干旱事件, 计算其发生的站次比、强度、频率。结果表明, 1981—2020年长江流域单季稻关键生育期高温事件发生范围和强度均呈显著上升趋势, 抽穗扬花期干旱事件发生范围和强度均呈下降趋势。已有研究表明, 长江流域各地区高温以及高温干旱复合事件的发生呈增多、增强趋势^[38-41], 本研究结果与其基本一致。值得注意的是, 过往有研究表明长江流域干旱面积呈扩大趋势^[42-43], 这与本研究结果不一致。可能的原因是本研究采用 $CWDIa$ 进行干旱识别, 而前人多选用其他指标进行干旱研究, 如黄涛^[43]采用帕尔默干旱指数($PDSI$)得出结果表明1951—2015年长江流域发生季节性干旱的面积整体呈扩大趋势。本研究结果得出1981—2020年长江流域单季

稻HF干旱事件站次比和强度呈下降趋势, 很大可能的原因是由降水量导致的。对该地区降水量数据进行统计分析, 结果发现, 1981—2020年HF站点平均降水量倾向率为2.76 mm/10 a, 呈增加趋势, 这很大程度上解释了干旱发生下降的原因。此外, 本研究采用指标识别干旱为旬尺度, 前人研究采用指标多为月尺度, 前人未能对短时间内干旱事件进行分析^[44]。

水稻高温、干旱及复合灾害的发生是一个相对复杂的过程, 尤其是高温干旱复合灾害。本研究虽然进行了单季稻高温干旱及复合事件时空特征规律的分析, 但仍具有局限性。对于高温事件, 不同的水稻品种其高温阈值可能不同, 本研究根据前人研究, 用35℃作为水稻的高温阈值^[17, 45], 而并没有考虑品种间的差异, 因此, 针对高温事件对不同品种水稻的影响程度以及阈值的界定需进一步深入研究。此外, 本研究采用作物水分亏缺距平指数($CWDIa$)进行干旱识别, 但只采用GB/T 32136—

2015《农业干旱等级》^[18]提供的单个数值代表整个省份1981—2020年单季稻的作物系数。而实际上,由于时间跨度大,作物系数Kc由于作物品种、土壤环境、管理措施等因素发生变化而存在差异。在后续研究中应加强对作物系数的订正,以更准确识别不同地区、不同水稻品种干旱事件。对于本研究中单季稻生育期划分,尽管参考了ChinaCropPhen 1 km数据集及已有文献中的相关试验数据。而已有文献和数据集记录的单季稻生育期均为近些年各区域生育期时间,有关品种的相关记录较少,同时有的地区已经针对气候变化采取了相应的调整措施,分时段进行生育期划分难度较大,存在一定主观性。同时,在今后应进一步探究单季稻干旱事件的发生机理,以期能够更好地为长江流域单季稻生产防灾减灾政策的制定提供理论依据。

3.2 结论

为了解全球气候变化背景下长江流域单季稻关键生育期主要气象灾害特征,本研究利用长江流域139个气象站点1981—2020年逐日气象资料,基于站次比、强度和频率等指标,分析了单季稻抽穗扬花期和灌浆结实期高温、干旱及其复合事件的时空变化特征。主要结论如下:

1) 1981—2020年长江流域单季稻关键生育期高温发生站次比和强度均显著上升(HF:5.0%/10 a和1.55℃·d/10 a;GF:5.7%/10 a和1.2℃·d/10 a)。而干旱的站次比和强度在HF均下降(-1.1%/10 a和-0.28%/10 a),GF均上升(2.2%/10 a和1.3%/10 a)。

2) 高温发生频率空间变化在流域内由东南向西北递减;HF重庆发生重度高温事件频率高,最高达47%,安徽、江浙沪地区干旱事件发生频率高,最高达50%;GF江西发生高温、干旱事件频率高,最高达95%、50%。

3) 2001—2020年长江流域单季稻关键生育期高温干旱复合事件的站点相较于基准期(1981—2000年)增加,高温与重旱及以上同时发生的情况增加最多,相较于基准期站点数增加了7.2%(HF)和3.6%(GF)。HF在湖南、GF在江西和四川东北部同时发生高温干旱事件频率高,最高达20%(HF)和15%(GF)。

参考文献 References

[1] IPCC. Synthesis report of the Sixth Assessment Report[R/OL]. [2024-07-30]. <https://www.ipcc.ch/ar6-syr/>

[2] 中国气象局.《中国气候变化蓝皮书(2022)》发布[J]. 中国环境监察, 2022(8): 4
China Blue Book on Climate Change (2022) Released [J]. *China Environmental Monitor*, 2022(8): 4 (in Chinese)

[3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023 (in Chinese)

[4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020 (in Chinese)

[5] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 王亚梁. 中国水稻栽培技术与展望[J]. 中国稻米, 2021, 27(4): 45-49
Zhu D F, Zhang Y P, Chen H Z, Wang Y L. Development and the prospect of cultivation technology of rice in China[J]. *China Rice*, 2021, 27(4): 45-49 (in Chinese)

[6] 萧炜鹏, 龚建周, 崔海山, 胡月明. 水稻抽穗扬花期极端高温发生时空特征及热害风险区识别: 以南充市为例[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(02): 198-207
Xiao W P, Gong J Z, Cui H S, Hu Y M. Spatio-temporal characteristics of extremely high temperature occurrences on rice during heading-flowering stage and identification of high-temperature disaster areas: An example of Nanchong City [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(2): 198-207 (in Chinese)

[7] 许用强, 姜宁, 奉保华, 肖晶晶, 陶龙兴, 符冠富. 水稻开花期高温热害响应机理及其调控技术研究进展[J]. 中国水稻科学, 2024, 38(2): 111-126
Xu Y Q, Jiang N, Feng B H, Xiao J J, Tao L X, Fu G F. Research progress in mechanism behind heat damage and its regulatory techniques during flowering in rice [J]. *Chinese Journal of Rice Science*. 2024, 38(2): 111-126 (in Chinese)

[8] Barnabás B, Jäger K, Fehér A. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals[J]. *Plant, Cell Environment*, 2008, 31(1): 11-38

[9] Jagadish S V K, Cairns J, Lafitte R, Wheeler T R, Price A H, Craufurd P Q. Genetic analysis of heat tolerance at anthesis in rice [J]. *Crop Science*, 2010, 50(5): 1633-1641

[10] 吴梦寅, 蔡炜, 钟笑涵, 杨建昌, 刘立军, 张伟杨. 高温胁迫对水稻籽粒灌浆与稻米品质影响及其机理研究进展[J]. 中国稻米, 2024, 30(3): 10-17
Wu M Y, Cai W, Zhong X H, Yang J C, Liu L J, Zhang W Y. Research advances in high temperature stress on the grain-filling and quality of rice and its mechanism [J]. *China Rice*, 2024, 30(3): 10-17 (in Chinese)

[11] 罗苹苹, 阳园燕, 唐余学, 范莉. 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, Fan L. 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 (in Chinese)

[12] 杨炳玉, 申双和, 陶苏林, 李倩, 邹学智. 江西省水稻高温热害发生规律研究[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 615-622
Yang B Y, Shen S H, Tao S L, Li Q, Zou X Z. Spatial and temporal pattern of rice heat injury in Jiangxi [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(4): 615-622 (in Chinese)

[13] 杨建莹, 霍治国, 王培娟, 郭定荣. 江西早稻高温热害等级动态识别及时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 199-207
Yang J Y, Huo Z G, Wang P J, Wu D R. Dynamic identification of

- double-early rice heat and its spatiotemporal characteristics in Jiangxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 199-207 (in Chinese)
- [14] 金焱, 王锐婷, 邹雨伽, 杨德胜. 基于水分亏缺指数的四川省水稻干旱灾害综合风险评价[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2022, 44(11): 51-61
Jin Y, Wang R T, Zou Y J, Yang D S. Comprehensive risk assessment of rice drought disaster in Sichuan Province based on crop water deficit index [J]. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2022, 44(11): 51-61 (in Chinese)
- [15] 邢愿, 贺中华. 基于水分亏缺指数的贵州省水稻干旱特征分析[J]. 作物杂志, 2021(2): 191-199
Xing Y, He Z H. Analysis of characteristics of rice drought in Guizhou Province based on water deficit index[J]. *Crops*, 2021(2): 191-199 (in Chinese)
- [16] 李闯, 刘艳伟, 符娜, 杨启良, 刘小刚. 基于作物水分盈亏指数的昆明水稻生长季干旱特征及成因分析[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(3): 186-192
Li C, Liu Y W, Fu N, Yang Q L, Liu X G. Cause analysis and drought characteristics during rice growing season in Kunming based on crop water deficit index[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(3): 186-192 (in Chinese)
- [17] GB/T 37744—2019, 水稻热害气象等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019
GB/T 37744—2019, Meteorological grades of hot damage to rice [S]. Beijing: China Standard Press, 2019 (in Chinese)
- [18] GB/T 32136—2015, 农业干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015
GB/T 32136—2015, Grade of agricultural drought [S]. Beijing: China Standard Press, 2015 (in Chinese)
- [19] Liu E H, Zhou G S, Wu B Y, Song L Y, He Q J, Lv X M, Zhou M Z. Response and adaptation of single-cropping rice growth periods to sowing date, cultivar shift and extreme temperatures in China from 1981 to 2010 [J]. *International Journal of Plant Production*, 2022, 16(4): 627-638
- [20] 陈砚涛, 霍延凤. 安徽省江淮地区水稻高温热害发生规律及其对产量结构的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(19): 190-194.
Chen Y T, Huo Y F. Occurrence regularity of high temperature heat injury in rice and its effects on yield structure in Jianghuai region of Anhui Province [J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(19): 190-194 (in Chinese)
- [21] 张文龙, 时红, 才硕, 郭巧玲, 许小华, 王海媛, 唐晓晓, 万绍媛. 水稻干旱时空演变规律及其补偿效应研究进展[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(12): 8-17.
Zhang W L, Shi H, Cai S, Guo Q L, Xu X H, Wang H Y, Tang X X, Wan S Y. Research progress on the spatial and temporal evolution of rice drought and its compensatory effect [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(12): 8-17 (in Chinese)
- [22] 曾晓珊, 冯利平, 高嘉辰, 余卫东, 伍露, 王春雷, 闫锦涛, 李亦卓. 1960—2015年西南水稻干旱的空间分布和时间演变特征[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(6): 20-29
Zeng X S, Feng L P, Gao J C, Yu W D, Wu L, Wang C L, Yan J T, Li Y Z. Spatial distribution and temporal variation characteristics of rice drought in Southwest China in 1960-2015 [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2021, 44(6): 20-29 (in Chinese)
- [23] 范莉, 何永坤, 雷婷, 唐余学. 西南地区中稻高温热害时空分布规律研究[J]. 西南农业学报, 2013, 26(6): 2316-2322
Fan L, He Y K, Lei T, Tang Y X. Spatial and temporal pattern of rice high temperature damage in South-West China [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(6): 2316-2322 (in Chinese)
- [24] 李世刚, 王东仙, 刘可群, 刘志雄. 基于灾害风险理论的湖北水稻高温热害风险分析及区划[J]. 气象科技, 2024, 52(2): 288-296
Li S G, Wang D X, Liu K Q, Liu Z X. Risk analysis and zoning of high-temperature heat damage in rice in Hubei based on disaster risk theory [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2024, 52(2): 288-296 (in Chinese)
- [25] 许航, 张鑫臻, 李俭梅, 赖雨莎, 杨字金, 王德, 杨娟, 吴金水, 邹应斌, 施婉菊. 近60年湖南省夏季高温时空分布及水稻热害变化规律[J]. 分子植物育种, 2022, 20(12): 4153-4161
Xu H, Zhang X Z, Li J M, Lai Y S, Yang Z J, Wang D, Yang J, Wu J S, Zou Y B, Shi W J. Spatio-temporal distribution of heat in summer and variation law of rice heat damage in Hunan Province in recent 60 years
- [26] 韦还和, 马唯一, 左博源, 汪璐璐, 朱旺, 耿孝宇, 张翔, 孟天瑶, 陈英龙, 高平磊, 许轲, 霍中洋, 戴其根. 盐、干旱及其复合胁迫对水稻产量和品质形成影响的研究进展[J]. 中国水稻科学, 2024, 38(4): 350-363
Wei Y H, Ma B Y, Zuo B Y, Zhu W, Geng X Y, Zhang X, Meng T Y, Chen Y L, Gao P L, Xu K, Huo Z Y, Dai Q G. Research progress in the effects of salinity, drought, and their combined stresses on rice yield and quality formation [J]. *Chinese Journal of Rice Sciences*, 2024, 38(4): 350-363 (in Chinese)
- [27] 张建亚. 重庆市高温灾害风险评估研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2015
Zhang J Y. Research on high temperature disaster risk assessment in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2015 (in Chinese)
- [28] 曾波. 湖南省农业干旱空间分布研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014
Zeng B. Study on spatial distribution of agricultural drought in Hunan Province [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2014 (in Chinese)
- [29] 骆玉川, 张朝. 2000—2019年全国三大粮食作物1 km 物候数据集[DB/OL]. 国家生态科学数据中心, 2022. <https://www.nesdc.org.cn/sdo/detail?id=627dfc4b7e28172589c2deaa>
Luo Y C, Zhang C. National 1km phenology dataset of three major grain crops from 2000-2019 [DB/OL]. *National Ecological Science Data Centre*, 2022. <https://www.nesdc.org.cn/sdo/detail?id=627dfc4b7e28172589c2deaa> (in Chinese)
- [30] Yao J Q, Qu L L, Chen Y N, Mao W Y, Chen J. Hydro-climatological drivers of the unprecedented flooding in August 2022 along the Tarim River, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 639: 131630
- [31] Li X H, Zhang L, Chen N, Huang Y W, Tan F Y, Li S, Shi Y W. Potential dynamic changes of single-season rice planting suitability across China [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2023, 67(5): 875-886
- [32] 陈超, 庞艳梅, 张玉芳, 马振峰. 四川单季稻产量对气候变化的敏感性和脆弱性研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(2): 331-342
Chen C, Pang Y M, Zhang Y F, Ma Z F. Study on the sensitivity and vulnerability of single cropping rice yield to climate change in Sichuan [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(2): 331-342 (in Chinese)
- [33] 孙莉娟, 徐阳, 鲁德金, 黄进. 江苏省单季稻生育期内极端气候事件的分区变化[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(1): 299-303
Sun L J, Xu Y, Lu D J, Huang J. Changes of climate extremes in different sub-regions of Jiangsu Province during growing-period of single-crop rice [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(1): 299-303 (in Chinese)
- [34] 郭建茂, 白玛仁增, 梁卫敏, 申双和, 江晓东. 两湖地区水稻抽穗开花期高温热害时空分布[J]. 中国农业气象, 2019, 40(1): 51-61
Guo J M, Pema R Z, Liang W M, Shen S H, Jiang X D. Temporal and spatial distribution of heat damage during heading and flowering stage of rice in Hubei and Hunan Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(1): 51-61 (in Chinese)

- [35] 许莹,王猛,杨太明,高超,王晓东.安徽省一季稻高温热害致灾指标研究[J].气象,2020,46(6):857-862
- Xu Y, Wang M, Yang T M, Gao C, Wang X D. Research on disaster-causing index of single-season-rice heat injury in Anhui Province[J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(6): 857-862 (in Chinese)
- [36] 李建,江晓东,杨沈斌,田欣雨.长江中下游地区水稻生长季节内农业气候资源变化[J].江苏农业学报,2020,36(1):99-107
- Li J, Jiang X D, Yang S B, Tian X Y. Changes of agricultural climate resources during rice growing season in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(1): 99-107 (in Chinese)
- [37] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirement*[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998
- [38] 郑有飞,丁雪松,吴荣军,尹继福.近50年江苏省夏季高温热浪的时空分布特征分析[J].自然灾害学报,2012,21(2):43-50
- Zheng Y F, Ding X S, Wu R J, Yin J F. Temporal and spatial feature analyses of summer high temperature and heat wave in Jiangsu Province in past 50 years[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(2): 43-50 (in Chinese)
- [39] 李琪,苏欢,史雨涵,王连喜,吴东丽.1961—2010年江浙沪地区夏季高温热浪时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2016,25(3):506-513
- Li Q, Su H, Shi Y H, Wang L X, Wu D L. Temporal-spatial change characteristics of summer heatwaves in Jiangsu-Zhejiang-Shanghai region during 1961-2010[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(3): 506-513 (in Chinese)
- [40] Zeng J N, Li H X, Sun B, Chen H P, Wang H J, Zhou B T, Duan M K. Summertime compound heat wave and drought events in China: Interregional and subseasonal characteristics, and the associated driving factors[J]. *Environmental Research Letters*, 2024, 19(7): 074046
- [41] Tian R K, Li J H, Zheng J H, Liu L, Han W Q, Liu Y J. The impact of compound drought and heatwave events from 1982 to 2022 on the phenology of Central Asian grasslands[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 365: 121624
- [42] 刘小龙,虞美秀.中国近60年干旱演变特征分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(12):177-183
- Liu X L, Yu M X. Investigation into drought evolution characteristics of China in 60 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(12): 177-183 (in Chinese)
- [43] 黄涛,徐力刚,范宏翔,孟元可.长江流域干旱时空变化特征及演变趋势[J].环境科学研究,2018,31(10):1677-1684
- Huang T, Xu L G, Fan H X, Meng Y K. Temporal and spatial variation characteristics and the evolution trends of droughts in the Yangtze River Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(10): 1677-1684 (in Chinese)
- [44] 聂俊峰.我国北方干旱灾害性分析及减灾对策研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2005
- Nie J F. The analysis of the disasters caused by drought in northern China and the research of countermeasures to reducing the loss [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2005 (in Chinese)
- [45] 杨舒畅,申双和,陶苏林.长江中下游地区一季稻高温热害时空变化及其风险评估[J].自然灾害学报,2016,25(2):78-85
- Yang S C, Shen S H, Tao S L. Spatiotemporal variation and risk assessment of single-harvest rice heat injury along the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(2): 78-85 (in Chinese)

责任编辑:杨爱东



第一作者简介:张方潇,中国农业大学资源与环境学院农业气象系专业硕士研究生。2019—2023年本科就读于青岛农业大学农业资源与环境专业,获山东省优秀毕业生以及校级优秀学生干部等荣誉称号,获得校级二等、三等学业奖学金。参与中国气象局气候变化专题项目(QBZ202401)。参加国际华人青年水科学协会第十二届夏季会议并做大会报告。



通讯作者简介:潘志华,博士,中国农业大学资源与环境学院二级教授,博士生导师,中国气象局-中国农业大学农业应对气候变化联合实验室主任。全国气象科教融合创新联盟委员会委员,全国农业气象服务专家组成员,中国气象学会常务理事,中国农学会理事,国家农业气象标准化技术委员会委员,中国农业绿色发展研究会防灾减灾专业委员会副主任,中国自然资源学会资源利用与减灾专业委员会委员,北京市气象标准化技术委员会委员,中国农业大学知名教授科普宣讲团专家,中国农业大学本科生学业咨询师。主要研究领域为气候变化影响与适应、地气相互作用与气候变化、农业与生态气象。主持和主要参加国家重点研发计划、国家科技支撑计划、国家重点基础研究973计划、国家自然科学基金等科研项目20余项,发表论文160余篇,获省部级奖励4项。