

高温约束下长江流域骤旱条件概率分析

朱 焯¹,胥冰威¹,刘 懿²,史锐光²,张欣雨²

(1.南京信息工程大学水文与水资源工程学院,江苏 南京 210044; 2.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:基于地面气象站点观测和陆面再分析资料识别长江流域 1950—2021 年骤旱和高温事件,分析了两种极端事件的时空分布特征,结合 Copula 函数构建了高温与骤旱联合概率分布及条件概率分布函数,推求了不同气温条件下土壤含水量分位数达到中旱、重旱、极旱和特旱的初始历时。结果表明:1990 年后骤旱频次与高温天数呈显著上升趋势,干旱初始历时与日最高气温呈显著负相关关系,气温越高,干旱初始历时越短,骤旱越容易发生;2006 年、2011 年、2013 年典型极端气候事件中云南、四川、重庆、贵州、湖北等流域中上游地区高温与骤旱联合概率较下游地区高;在低温条件下,长江流域源头区域干旱初始历时较中下游地区约长 1 倍,随着气温升高,流域源头和上游地区干旱初始历时缩短,当日最高气温超过 30℃ 时,干旱初始历时的空间分布由上游长、下游短的格局转变为上游短、下游长的格局。

关键词:骤旱;高温事件;复合极端事件;干旱初始历时;Copula 函数;条件概率;长江流域

中图分类号:P339 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0115-08

Conditional probability analysis of flash droughts in the Yangtze River Basin under high temperatures//ZHU Ye¹, XU Bingwei¹, LIU Yi², SHI Ruiguang², ZHANG Xinyu²(1. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on ground meteorological observations and land surface reanalysis data, flash drought and high temperature events in the Yangtze River Basin from 1950 to 2021 were identified, and the spatiotemporal distribution characteristics of these two extreme events were analyzed. Combined with the Copula function, the joint probability distribution and conditional probability distribution functions of high temperature and flash drought were constructed, and the onset time periods when the soil moisture content percentile reached moderate, severe, extreme, and excessively extreme droughts under different temperature conditions were estimated. The results show that the times of occurrence of flash droughts and days of high temperature have significantly increased since 1990. The onset time period of droughts is significantly negatively correlated with daily maximum temperature, and shortens as the temperature increases, indicating the higher likelihood of flash drought occurrence at higher temperatures. The joint probability of high temperature and flash drought in the upper and middle reaches of the Yangtze River Basin, including Yunnan, Sichuan, Chongqing, Guizhou, and Hubei, is higher than that in the downstream areas in typical events in 2006, 2011, and 2013. Under low temperature conditions, the onset time period of droughts in the source region of the Yangtze River Basin is twofold of that in the middle and lower reaches. With the rising temperatures, the onset time period of droughts in the source region and the upper reaches shortens. When the daily maximum temperature exceeds 30℃, the development of droughts shows a spatial pattern of rapid onset in the upstream and delayed onset in the downstream.

Key words: flash drought; high temperature events; compound extreme events; onset time period of droughts; Copula function; conditional probability; the Yangtze River Basin

全球变暖导致大气、陆地、海洋温度急剧升高,全球能量平衡和水循环系统也因此发生显著变化,高温热浪、干旱、洪水等极端事件的频次、强度和影响范围均呈增强态势^[1-3]。尤其 2022 年夏季,全球

大部分地区均经历了高温热浪事件。例如:西班牙、法国部分地区 7 月气温升高至 45℃;美国 9 月出现有观测记录以来的最高气温,高达 53℃;我国也遭受极端高温事件的影响,以长江流域最为典型,40℃

基金项目:国家自然科学基金项目(42171021)
作者简介:朱焯(1987—),女,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zhuye396@163.com
通信作者:刘懿(1988—),男,教授,博士,主要从事干旱监测与模拟研究。E-mail:liuyihhdx@126.com

以上高温天气持续近 50 d,多站气温突破有记录以来最大值^[4-6]。极端高温环境为干旱、山火等灾害事件提供了孕育条件,极易引发复合型极端事件。

IPCC 第六次评估报告指出未来升温加剧背景下,全球及区域性复合极端事件的风险将进一步加大^[7-9],严重威胁自然和社会系统,高温干旱复合事件成为近年来最受关注的复合极端事件之一^[10]。姜雨彤等^[11]分析了长江、黄河流域夏季高温干旱复合事件的时空变化规律,发现两大流域高温干旱复合事件的频率呈显著上升趋势,其中黄河流域复合事件影响范围的占比大于长江流域;郝增超等^[12]基于降水和气温指标,发现长江流域 2022 年夏季发生了自 1979 年以来覆盖范围最广的高温干旱复合事件。高温干旱复合事件的特殊性不仅体现在频率和危害上,更重要的是二者互为驱动,形成级联效应,如骤旱即为高温背景下引发干旱的典型^[13-15]。熊立华等^[16]研究发现,长江流域骤旱的发生频率、持续时间和强度均显著增加,且在空间上呈现出从上游向下游传递的态势。在极端高温少雨背景下,植被蒸散能力急速增强,土壤含水量快速减少,陆-气系统的水分支出与消耗加快,通常在不足 1 月的短时间内即可形成严重甚至极端干旱。高温导致全球及区域骤旱的频率、强度不断升高^[17-18],干旱初始历时逐渐缩减,旱情发展速度越来越快,对骤旱的监测已经超过传统基于月尺度干旱监测模拟技术的能力范围^[19],给干旱监测预警工作带来极大挑战。现有研究主要集中于高温干旱复合事件,而对高温骤旱复合事件的研究相对较少,尤其是以下关键科学问题未得到有效解决:①高温骤旱复合事件的时空演变规律;②高温与骤旱联合概率分布特征;③特定气温条件下干旱初始历时变化。

基于此,本文以长江流域为研究区,利用地面实测气象数据和欧洲中期天气预报中心 ERA5-Land 再分析土壤含水量数据,在日尺度上识别 1950—2021 年流域内高温与骤旱事件。通过分析干旱初始历时与极端高温的时空演变规律,构建高温与骤旱联合概率分布及条件概率分布函数,推求特定气温条件下的干旱初始历时,以期为流域旱情监测预警及水资源适应性管理提供科学依据。

1 数据来源

长江流域(24°30'N~35°45'N,90°33'E~122°25'E)横跨我国西南、华中和华东 3 大区,流域面积约 180 万 km²,约占我国国土面积的 18.8%,流域内地势自西向东递减,呈多级阶梯状分布(图 1)。本文采用的数据包括日最高气温、土壤含水量、实际

旱情资料。气温数据来自中国气象局国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)发布的 2 496 个气象站逐日观测资料,时间为 1961—2021 年。利用地形-高程协同克里金方法^[20-21]将站点气象资料插值成空间分辨率为 0.25°的网格数据。土壤含水量数据来自 ERA5-Land 再分析数据集^[22],时间序列为 1950—2021 年。与前一代 ERA-Interim 数据模式相比,ERA5-Land 数据集在输出要素多样性、时空分辨率、估算精度等方面均有显著改善^[22],提供了深度为 0~7 cm、>7~28 cm、>28~100 cm、>100~289 cm 的土壤含水量数据。本文主要关注骤旱,其与根区土壤含水量密切相关,因此将 ERA5-Land 前 3 层土壤含水量在日尺度上平均处理,得到土层厚度为 1 m 的土壤含水量,并将其空间分辨率重采样为 0.25°。此外,基于《水旱灾害公报》(<http://www.mwr.gov.cn>)及相关统计年鉴,搜集了历史典型干旱事件初现时间、发展过程等文字和图片记录资料。

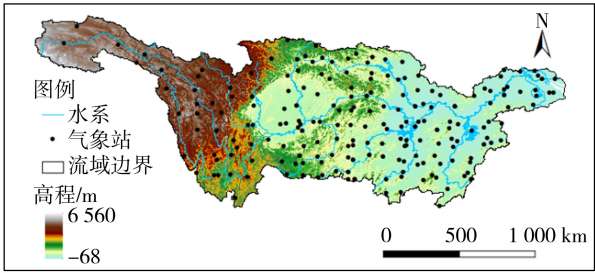


图 1 长江流域高程及气象观测站点分布

Fig. 1 Elevation and spatial distribution of meteorological observation sites in the Yangtze River Basin

2 研究方法

2.1 干旱指数计算

考虑到土壤水显著的季节和区域分异特征,参考标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)^[23]的构建方法,将 ERA5-Land 再分析数据中土壤含水量数据转化为土壤含水量分位数(S_{per})。具体步骤为:①将各网格连续的日尺度土壤含水量序列(1950—2021 年,共计 26 298 d)按照 1、2、…、12 月拆分为 12 个子序列,记为 $S_i(i=1, 2, \dots, 12)$,每个子序列样本长度为 $nd_i(d_i$ 为第 i 月天数, $n=72$ a);②将 S_i 序列作为一个随机变量,分析其概率分布特征,结合 Kolmogorov-Smirnov 和 Anderson-Darling 拟合优度检验,以经验累积概率为参考,从概率密度函数库的伽马(Gamma)分布、对数逻辑分布、广义极值分布等 15 种理论分布函数中筛选出通过置信水平且拟合度最佳的函数作为 S_i 的概率密度函数,采用极大似然估计方法估计概率密度函数参数,计算累积概率,记为 S_{peri} ;③按日历时序将

S_{peri} 序列重组还原,生成日尺度土壤含水量分位数序列。参考 GB/T 20481—2017《气象干旱等级》及相关研究^[24],将干旱划分为轻旱、中旱、重旱、极旱和特旱 5 个等级,对应 S_{per} 的阈值分别为 40%、20%、10%、5%和 2%。

2.2 骤旱事件及干旱初始历时特征识别

以宜昌站 2019 年 8—9 月夏季干旱为例,采用游程理论识别干旱事件、骤旱事件及干旱初始历时(图 2)。

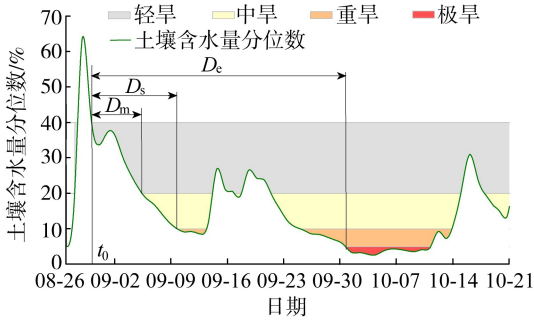


图 2 宜昌站 2019 年 8—9 月土壤含水量分位数变化及干旱初始历时

Fig. 2 Variation of soil moisture percentile and onset time period of droughts from August to September in 2019 at Yichang site

a. 逐网格分析土壤含水量分位数日序列。参考相关研究^[25],基于以下阈值条件定义骤旱事件:①任一时刻土壤含水量不高于 40%分位数;②一场干旱事件中,至少有一个时刻的土壤含水量低于 20%分位数,以确保识别的干旱事件真正进入干旱状态;③从土壤含水量 40%分位数降低至 20%分位数的时间不超过 20 d;④考虑到短历时干旱事件的影响规模较小,对农业生产、生态环境等负面影响十分有限,干旱历时不足 7 d 的短历时干旱事件不予考虑。

b. 定义干旱初始历时。如图 2 所示,以土壤含水量 40%分位数为界,高于 40%分位数表示土壤含水量处于正常或湿润状态,当土壤含水量首次低于 40%分位数时干旱发生(图 2 中 t_0),随后土壤水分仍以较快速度下降,旱情持续,当土壤含水量上升至 40%分位数以上时表示旱情结束。本文将干旱初始历时定义为从 t_0 到中旱、重旱、极旱和特旱所需要的时间,分别记为 D_m 、 D_s 、 D_e 和 D_{ee} 。 t_0 时刻通过局部极大值方法求得^[26]

c. 提取干旱初始历时内的气象异常特征(主要为干旱初始历时内的日最高气温的均值)构建联合概率模型。

2.3 联合概率分布和条件概率分布函数构建

构建高温与骤旱联合概率分布函数,进一步

推求条件概率分布函数,分析特定极端高温条件下的干旱初始历时。

a. 进行单变量边缘概率分布优选。采用极值分布、伽马分布、广义极值分布、广义帕累托(Pareto)分布、逻辑分布、对数逻辑分布、对数正态分布、正态分布、韦布尔(Weibull)分布等 9 种概率分布函数对日最高气温和干旱初始历时进行概率拟合,并结合 Kolmogorov-Smirnov 检验及均方根误差(RMSE)结果,筛选出各网格日最高气温和干旱初始历时的最优分布。结果显示,广义极值分布函数在全流域约 70%的网格拟合效果最优。

b. 构建高温与骤旱联合概率分布函数。在检验二者相依性结构的基础上,对于日最高气温 X 和干旱初始历时 Y 两个随机变量,建立边缘概率分布 $F(X)$ 和 $F(Y)$ 的二维 Copula 函数。考虑到椭圆高斯 Copula 函数能够模拟随机变量间正相关和负相关关系等多种情况,本文选取该函数构建高温与骤旱联合概率分布函数:

$$C(u_1, u_2) = \varphi[\varphi^{-1}(u_1), \varphi^{-1}(u_2)] = \int_{-\infty}^{\varphi^{-1}(u_1)} \int_{-\infty}^{\varphi^{-1}(u_2)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} \exp \frac{t^2 - 2\rho st + s^2}{2(1-\rho^2)} ds dt \quad (1)$$

其中 $u_1 = F(X)$ $u_2 = F(Y)$ 式中: φ 为标准正态分布累积概率密度函数; ρ 为高斯 Copula 函数参数; s, t 为相应的积分变量。

c. 基于椭圆高斯 Copula 函数,进一步推求 $X > x$ 条件下 $Y \leq y$ 的条件概率函数:

$$P(Y \leq y | X > x) = \frac{P(Y \leq y, X > x)}{1 - P(X \leq x)} = \frac{P(Y \leq y) - C(u_1, u_2)}{1 - P(X \leq x)} \quad (2)$$

采用随机均匀采样方法,在日最高气温为 0~10℃、>10~20℃、>20~30℃、>30~40℃、>40~45℃ 范围内,任意各抽取 1000 组样本(>30~40℃、>40~45℃ 两个范围主要用于模拟 2022 年长江流域极端高温条件),结合条件概率分布函数,推求特定相应气温条件下达到中旱、重旱、极旱和特旱的初始历时 D_m 、 D_s 、 D_e 和 D_{ee} 。

3 结果与分析

3.1 骤旱时空分布规律

图 3 和图 4 分别为长江流域 1950—2021 年骤旱事件频次和频率空间分布以及分别达到中旱、重旱、极旱和特旱多场次事件初始历时的平均值。总体来看,骤旱频次在流域中上游重庆、贵州和四川东

部等地区较高,长江流域源头、北部地区相对较低。流域大部分地区骤旱频率为 20%~30%,这一结果与 Wang 等^[27]的研究结果相似。从干旱平均初始历时来看,全流域从正常或偏涝达到中旱的 D_m 为 10~15 d,达到重旱的 D_s 为 10~25 d,达到极旱的 D_e 更长。位于长江流域中游云南、贵州、四川、湖北 4 省交界的少部分区域,其干旱初始历时远小于其他区域(图 4)。图 5 为长江流域 1950—2021 年骤旱频次和干旱初始历时逐年变化。从骤旱频次变化来看,骤旱年平均发生约 3.5 次,其中 20 世纪 80 年代和 90 年代频次相对较低,大多在 1.5~3 a⁻¹ 之间波动,2000 年后频次升高至 3.5~5 a⁻¹。干旱初始历时整体呈缩短趋势,其中 D_e 减少最显著。

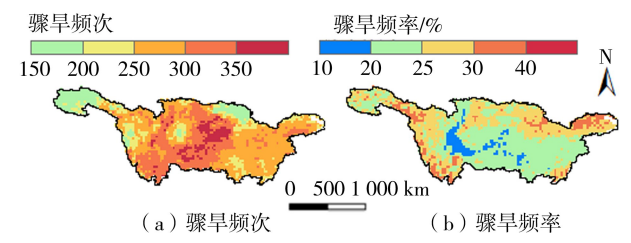


图 3 骤旱事件频次和频率空间分布
Fig. 3 Spatial distributions of times of occurrence and frequency of flash droughts

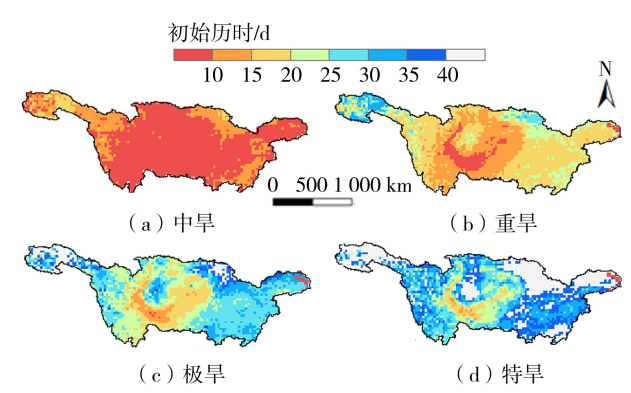


图 4 不同干旱等级初始历时空分布
Fig. 4 Spatial distributions of onset time period of droughts at different levels

骤旱事件时间特征与日最高气温时空分布具有一定的相关关系。图 6 和图 7 分别为长江流域 1950—2021 年日最高气温超过 30℃ 和 35℃ 天数的空间分布和逐年变化。从空间分布可以看出,高温天数从上游到下游呈递增的趋势,长江流域源头及上游地区年均日最高气温超过 30℃ 和 35℃ 的天数分别小于 10 天和 5 天,下游地区尤其是东南部地区日最高气温超过 30℃ 和 35℃ 的天数分别大于 100 天和约为 30 天。从时程变化来看,1950—1990 年日最高气温超过 30℃ 和 35℃ 的天数呈微弱减少趋势,1990—2021 年则呈上升趋势。这一变化趋势与图 5 骤旱频次基本一致。

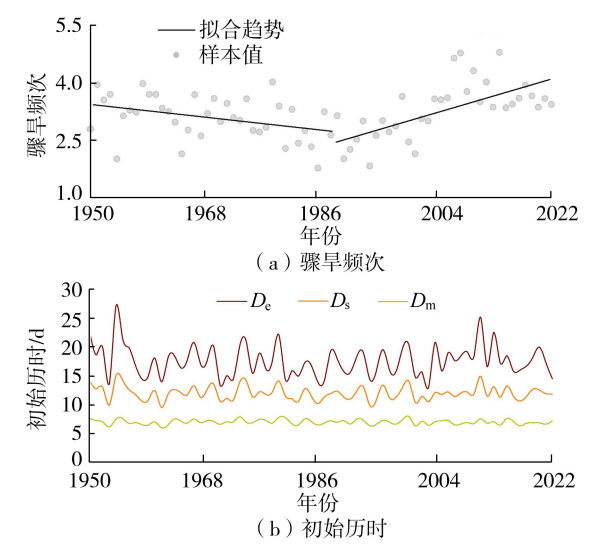


图 5 骤旱频次和干旱初始历时逐年变化
Fig. 5 Annual variations of times of occurrence of flash droughts and onset time period of droughts

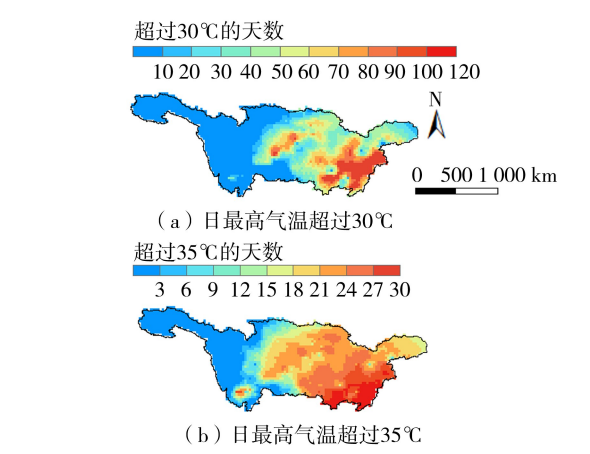


图 6 年均日最高气温超过 30℃ 和 35℃ 天数的空间分布
Fig. 6 Spatial distributions of annual average number of days with maximum daily temperature exceeding 30℃ and 35℃

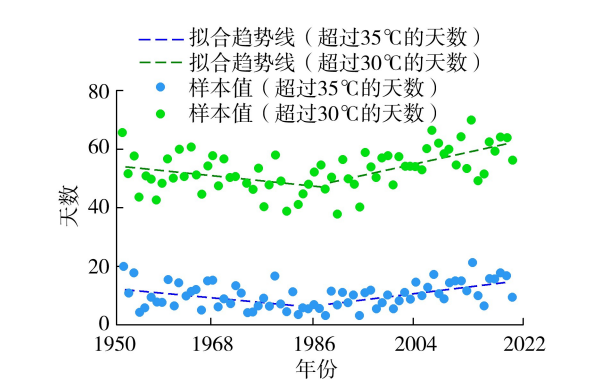


图 7 日最高气温超过 30℃ 和 35℃ 天数的时间序列
Fig. 7 Annual series of days with maximum daily temperature exceeding 30℃ and 35℃

3.2 高温与骤旱联合概率分布函数
图 8 为长江流域 1950—2021 年骤旱事件在不同日最高气温条件下 D_m 的概率分布。从图 8 可以

看出,随着气温不断升高,峰值对应的 D_m 逐渐减少,从 0~5℃ 条件下平均 12 d(10%~90%分位数为 6~28 d)下降至 30~40℃ 条件下平均 3.2 d(10%~90%分位数为 3~10 d),也就是说,当流域日最高气温超过 30℃ 时,流域达到中旱平均初始历时仅为 3.2 d,超过 90%的干旱事件达到中旱不足 10 d。

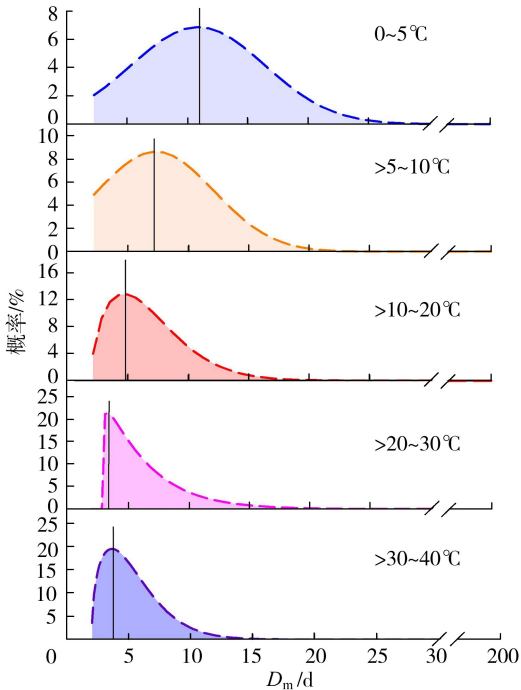


图 8 不同日最高气温条件下 D_m 的概率分布

Fig. 8 Probability distributions of D_m under different maximum daily temperatures

基于椭圆高斯 Copula 函数,进一步建立了日最高气温与 D_m 的联合概率分布函数(图 9)。从边缘概率分布函数来看,日最高气温超越概率分布变化相对平缓,10℃、20℃、30℃、35℃ 的超越概率均值分别为 0.92、0.65、0.12 和 0.02; D_m 为 10、20、30、60 d 的累积概率分别为 0.60、0.95、0.97 和 0.99。从联合概率分布来看,日最高气温与 D_m 呈显著负相关关系,当日最高气温超越概率不超过 0.2(即高温条件), D_m 累积概率为 0.1~0.2(即初始历时较短情形)时,二者联合概率大于 0.8。日最高气温与 D_s 、 D_e 和 D_{ee} 的联合概率分布与 D_m 情况类似,限于篇幅此处不再展示。

3.3 典型事件联合概率分布及不同气温情景模拟

2000 年以来长江流域有记录的大规模干旱事件主要发生在 2006 年、2011 年和 2013 年,从事件发展进程来看,属于较为典型的骤旱。图 10 列举了 3 场干旱事件日最高气温与 D_s 的边缘概率和联合概率的空间分布。2006 年日最高气温超越概率呈现长江流域源头区域及中上游低、下游高的空间分布; D_s 累积概率与日最高气温超越概率有所差异,

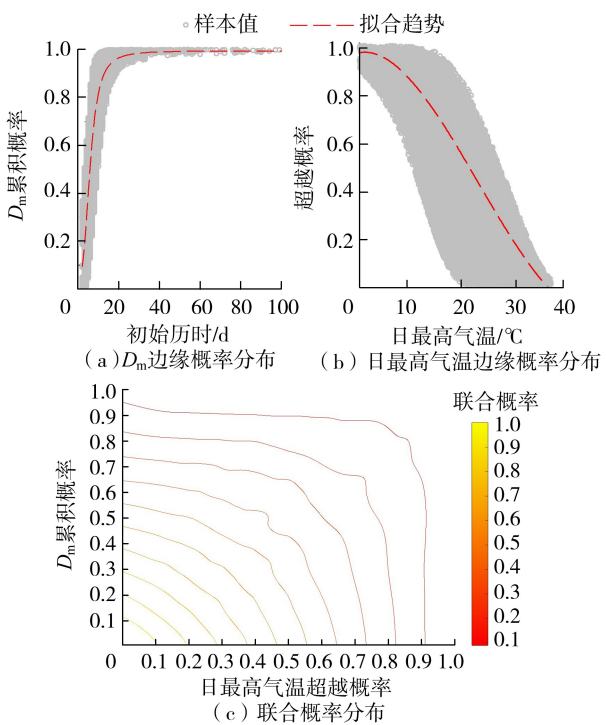


图 9 日最高气温与 D_m 的边缘概率分布和联合概率分布

Fig. 9 Marginal probability distributions for daily maximum temperatures and D_m and their joint probability distribution

呈现中游低、流域源头区域和下游偏高的空间分布;联合概率在日最高气温和干旱初始历时共同作用下呈现中上游偏高,逐渐向下游降低的空间分布。2011 年和 2013 年亦具有类似规律。2013 年高温席卷整个长江流域,大部分地区日最高气温超越概率不超过 0.4, D_s 累积概率在贵州、重庆等地较低,相应地联合概率偏高;下游地区 D_s 累积概率较高,联合概率偏低。通过联合概率比较可以发现,2006 年云南、贵州、四川、重庆等长江中上游地区复合型高温骤旱的严重程度较其他区域更高,2011 年复合型高温骤旱集中在贵州、重庆、湖北等中游地区,2013 年集中在贵州、重庆和四川西北部。

为进一步探索不同气温条件下的干旱初始历时,基于条件概率模型,计算不同干旱等级 1000 组样本的 D_m 、 D_s 、 D_e 和 D_{ee} 。以宜昌站为例,分别在日最高气温 0~10℃、>10~20℃、>20~30℃、>30~40℃、>40~45℃ 范围内采样,计算相应的干旱初始历时。从图 11 可以看出,随着气温升高,干旱初始历时呈缩短趋势,初始历时缩短的幅度与温度上升的速度呈显著正相关关系。尤其是跨越 20℃、40℃ 等温度线时, D_e 和 D_{ee} 减少 30%~50%,也就是说,上述区域在超越 20℃、40℃ 日最高气温线时,极易爆发骤旱事件。

图 12 进一步给出了上述 5 个日最高气温采样

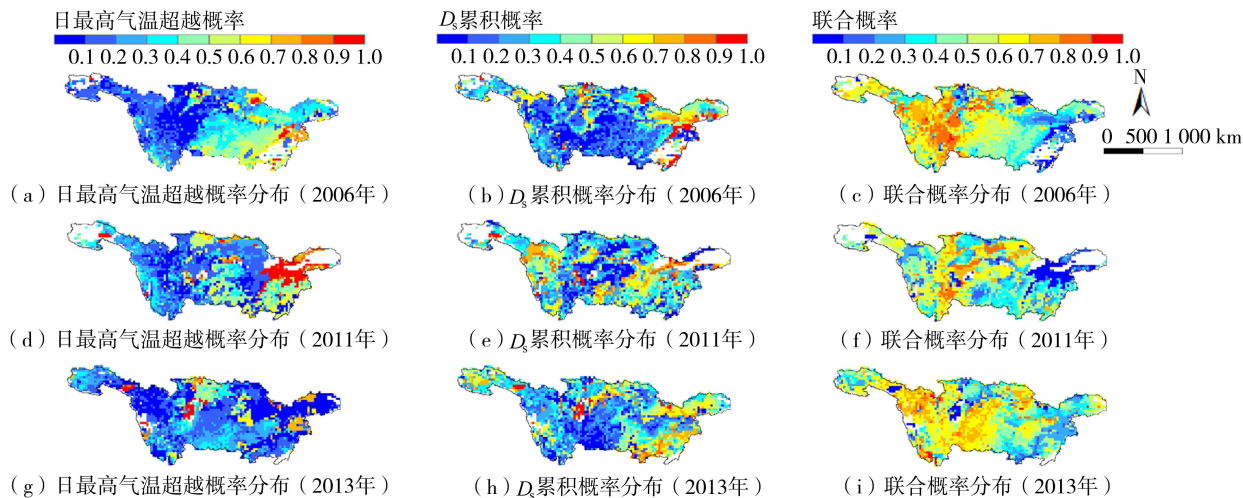


图 10 典型年骤旱事件日最高气温与 D_s 边缘概率和联合概率空间分布

Fig. 10 Spatial distributions of marginal probability of daily maximum temperature and D_s and their joint probability during typical flash drought events

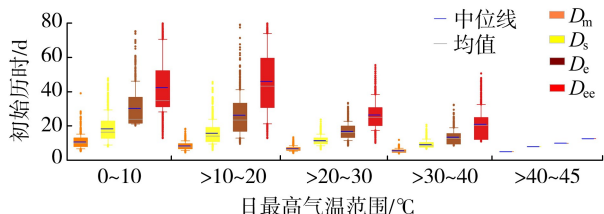


图 11 宜昌站不同气温条件下初始历时的箱线图

Fig. 11 Boxplots of onset time duration of droughts under different temperatures at Yichang site

范围下不同等级干旱初始历时的空间分布。可以看出,在 $0\sim 10^{\circ}\text{C}$ 范围内,长江流域源头区域 D_m 、 D_s 、 D_e 和 D_{cc} 分别约为 20、30、50、70 d,相较于长江中下游地区,干旱的初始历时约增加 1 倍;当日最高气温为 $>10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 时,流域源头区域以及云南、贵州、四川、重庆、湖北等中上游地区干旱初始历时显著缩短,减少 30%~50%。随着气温不断升高,流域源头和上游地区干旱初始历时缩短的速度远超过长江中下游地区,尤其当日最高气温为 $>30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 和 $>40\sim 45^{\circ}\text{C}$ 时,初始历时空分布由上游长、下游短的格局转变为下游长、上游短的格局,流域源头和上游地区初始历时为 5~10 d,下游地区为 20~30 d。由此可见,流域源头和上游地区是极端高温的敏感区域,需要重点关注。2022 年长江流域大旱,高温持续天数超 30 d,多地平均日最高气温超过 35°C ,局部地区甚至超过 40°C 。实际旱情记录显示,长江流域 7 月以来在持续高温少雨作用下遭受严重气象干旱;8 月 6 日鄱阳湖星子站水位退至 11.99 m,提前 100 d 进入枯水期;8 月中旬土壤龟裂,多条河流断流,嘉陵江主干河道出现大面积滩涂^[28]。从时程推算,此次干旱事件从气象干旱到水文干旱持续时间不超过 40 d,根区土壤含水量达到特旱状态不足 30 d,这一结

果与图 12 较为相似。在日最高气温为 $>30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 和 $>40\sim 45^{\circ}\text{C}$ 条件下,流域大部分区域达到极旱的初始历时不超过 15 d、达到特旱的初始历时为 20~25 d。

4 结 论

a. 1950—2021 年长江流域骤旱事件频次的均值为 3.5 a^{-1} ,大部分地区骤旱频率为 20%~30%。空间上骤旱频次呈现流域源头低、中游高的分布格局,时程上 1990 年后显著上升;空间上高温事件的天数从流域源头到下游呈逐渐增加的分布格局,时程上与骤旱事件的频次特征相似,1990 年后显著上升。

b. 干旱初始历时与日最高气温呈显著负相关关系,气温越高,干旱初始历时越短,越容易发生骤旱;从边缘概率分布函数来看,干旱初始历时的累积概率分布变化较陡,日最高气温的超越概率分布变化相对平缓,干旱初始历时与日最高气温联合概率分布能够综合考虑两种边缘概率分布的特征。

c. 从 2006 年、2011 年、2013 年 3 场典型骤旱事件来看,云南、四川、重庆、贵州、湖北等流域中上游地区高温与骤旱联合概率较高,表明出现了高风险的高温骤旱复合事件,流域下游地区联合概率较低,表明遭受高温骤旱复合事件的可能性较小。

d. 在低温条件下,长江流域源头区域达到中旱、重旱、极旱和特旱的初始历时分别约为 20、30、50、70 d,较中下游地区干旱初始历时约长 1 倍;随着气温升高,流域源头和上游地区干旱初始历时显著缩短,尤其是气温超过 30°C 时,初始历时的空间分布由上游长、下游短的格局转变为下游长、上游短的格局,流域源头和上游地区是高温的敏感区域,极易引发骤旱。

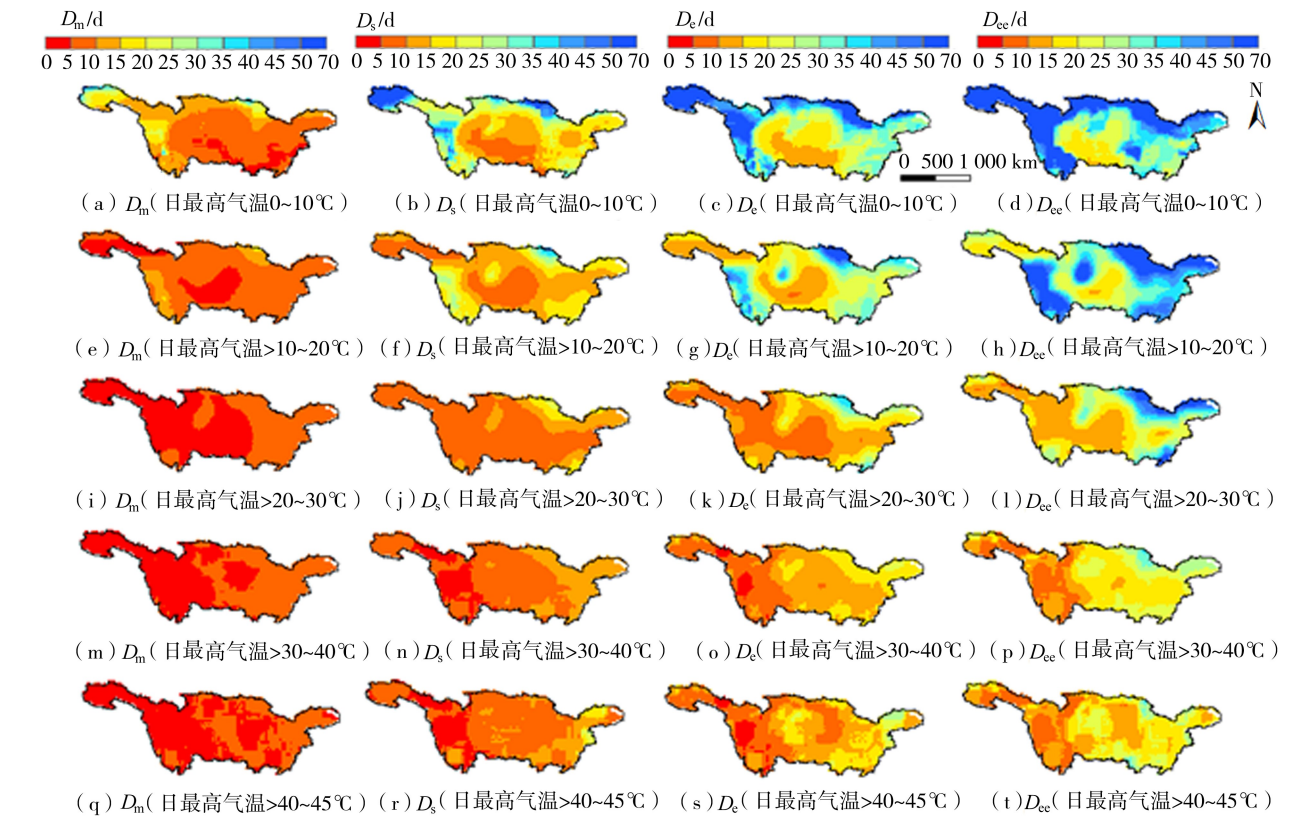


图 12 长江流域不同日最高气温条件下干旱初始历时的空间分布

Fig. 12 Spatial distributions of onset time duration of droughts under different daily maximum temperatures in the Yangtze River Basin

e. 当日最高气温为 $>30 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 、 $>40 \sim 45^{\circ}\text{C}$ (2022 年极端高温条件) 时, 流域源头和上游地区干旱初始历时为 5~10 d, 下游地区干旱初始历时为 20~30 d, 与长江流域 2022 年 7—8 月大旱记录基本一致。

参考文献:

[1] CHEN Jilong, HE Lei, YANG Hong, et al. Empirical models for estimating monthly global solar radiation: a most comprehensive review and comparative case study in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 108: 91-111.

[2] HAUMANN F A, GRUBER N, MÜNNICH M. Sea-ice induced southern ocean subsurface warming and surface cooling in a warming climate[J]. AGU Advances, 2020, 1 (2): e2019AV000132.

[3] 丁明虎, 效存德, 秦大河. 2022 年南极 3·18 爆发性增温事件及其可能原因[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18 (3): 384-388. (DING Minghu, XIAO Cunde, QIN Dahe. Explosive warming event in Antarctica on 18 March 2022 and its possible causes[J]. Climate Change Research, 2022, 18(3): 384-388. (in Chinese))

[4] 邹旭恺, 高荣, 陈鲜艳, 等. 2022 年长江流域夏伏旱监测评估[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(10): 12-16. (ZOU

Xukai, GAO Rong, CHEN Xianyan, et al. Monitoring and assessment of summer drought in the Yangtze River Basin in 2022[J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(10): 12-16. (in Chinese))

[5] 陈茜茜, 屈艳萍, 吕娟, 等. 长江流域干旱灾害风险分布特征分析[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(10): 17-22. (CHEN Xixi, QU Yanping, LYU Juan, et al. Study on the spatial and temporal distribution characteristics of drought disasters in the Yangtze River Basin[J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(10): 17-22. (in Chinese))

[6] 夏军, 陈进, 余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J]. 水利学报, 2022, 53(10): 1143-1153. (XIA Jun, CHEN Jin, SHE Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(10): 1143-1153. (in Chinese))

[7] 周波涛, 钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718. (ZHOU Botao, QIAN Jin. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713-718. (in Chinese))

[8] HAO Zengchao, HAO Fanghua, SINGH V P, et al. Changes in the severity of compound drought and hot extremes over global land areas[J]. Environmental

- Research Letters,2018,13(12):124022.
- [9] 余荣,翟盘茂. 关于复合型极端事件的新认识和启示[J]. 大气科学学报,2021,44(5):645-649. (YU Rong, ZHAI Panmao. Advances in scientific understanding on compound extreme events[J]. Transactions of Atmospheric Sciences,2021,44(5):645-649. (in Chinese))
- [10] 程玉佳,张珂,晁丽君. 青藏高原复合干热事件及其对植被的影响[J]. 水资源保护,2023,39(4):52-58. (CHENG Yujia, ZHANG Ke, CHAO Lijun. Compound dry-hot events on Qinghai-Tibet Plateau and their effects on vegetation[J]. Water Resources Protection,2023,39(4):52-58. (in Chinese))
- [11] 姜雨彤,郝增超,冯思芳,等. 长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征[J]. 水资源保护,2023,39(2):70-77. (JIANG Yutong, HAO Zengchao, FENG Sifang, et al. Spatiotemporal evolution characteristics in compound hot-dry events in Yangtze River and Yellow River basins[J]. Water Resources Protection,2023,39(2):70-77. (in Chinese))
- [12] 郝增超,张璇,郝芳华,等. 2022 年夏季长江流域复合高温干旱事件的影响及应对[J]. 水资源保护,2023,39(6):46-52. (HAO Zengchao, ZHANG Xuan, HAO Fanghua, et al. Impacts and coping strategies of compound hot extremes and droughts during summer of 2022 in the Yangtze River Basin[J]. Water Resources Protection,2023,39(6):46-52. (in Chinese))
- [13] MO K C, LETTENMAIER D P. Heat wave flash droughts in decline[J]. Geophysical Research Letters,2015,42(8):2823-2829.
- [14] PENDERGRASS A G, MEEHL G A, PULWARTY R, et al. Flash droughts present a new challenge for subseasonal-to-seasonal prediction[J]. Nature Climate Change,2020,10(3):191-199.
- [15] OTKIN J A, SVOBODA M, HUNT E D, et al. Flash droughts: a review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2018,99(5):911-919.
- [16] 熊立华,李姝仪,查悉尼. 基于多源数据的长江流域 1982—2022 年骤旱事件时空演变[J]. 水科学进展,2024,35(1):24-37. (XIONG Lihua, LI Shuyi, ZHA Xini. Temporal and spatial evolution of flash drought events in the Yangtze River Basin from 1982 to 2022 based on multi-source data[J]. Advances in Water Science,2024,35(1):24-37. (in Chinese))
- [17] 张翔,陈能成,胡楚丽,等. 1983—2015 年我国农业区域三类骤旱时空分布特征分析[J]. 地球科学进展,2018,33(10):1048-1057. (ZHANG Xiang, CHEN Nengcheng, HU Chuli, et al. Spatio-temporal distribution of three kinds of flash droughts over agricultural land in China from 1983 to 2015[J]. Advances in Earth Science,2018,33(10):1048-1057. (in Chinese))
- [18] 朱烨,刘懿,王文,等. 基于土壤含水率的骤发干旱和缓慢干旱时空特征分析[J]. 农业工程学报,2021,37(2):114-122. (ZHU Ye, LIU Yi, WANG Wen, et al. Analysis of spatio-temporal characteristics of flash drought and slowly-evolving drought using soil moisture percentile[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2021,37(2):114-122. (in Chinese))
- [19] LIU Yi, ZHU Ye, ZHANG Linqi, et al. Flash droughts characterization over China: from a perspective of the rapid intensification rate[J]. Science of the Total Environment,2020,704:135373.
- [20] MYERS D E. MATRIX formulation of co-kriging[J]. Journal of the International Association for Mathematical Geology,1982,14(3):249-257.
- [21] ROYLE J A, BERLINER L M. A hierarchical approach to multivariate spatial modeling and prediction[J]. Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics,1999,4(1):29-56.
- [22] MUÑOZ-SABATER J, DUTRA E, AGUSTÍ-PANAREDA A, et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications[J]. Earth System Science Data,2021,13(9):4349-4383.
- [23] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim:[s. n.],1993:179-183.
- [24] SVOBODA M, LECOMTE D, HAYES M, et al. The drought monitor[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2002,83(8):1181-1190.
- [25] FORD T W, LABOSIER C F. Meteorological conditions associated with the onset of flash drought in the eastern United States[J]. Agricultural and forest meteorology,2017,247:414-423.
- [26] 刘懿,朱烨,张林齐,等. 骤发干旱前期气象驱动条件及可模拟性分析[J]. 水科学进展,2021,32(4):497-507. (LIU Yi, ZHU Ye, ZHANG Linqi, et al. Precedent meteorological driving forces of flash drought and their feasibility for flash drought simulation[J]. Advances in Water Science,2021,32(4):497-507. (in Chinese))
- [27] WANG Linying, YUAN Xing, XIE Zhenghui, et al. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus[J]. Scientific reports,2016,6(1):30571.
- [28] 官学文,曾明. 2022 年长江流域枯水特征分析与启示[J]. 人民长江,2022,53(12):1-5. (GUAN Xuewen, ZENG Ming. Characteristics and enlightenment of low water in Changjiang River Basin in 2022[J]. Yangtze River,2022,53(12):1-5. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-14 编辑:施业)