

嘉陵江流域骤发干旱时空演变特征分析

孟长青¹, 董子娇¹, 刘柯莹¹, 王远坤¹, 张验科¹, 钟德钰²

(1. 华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206; 2. 清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084)

摘要:为探究嘉陵江流域骤发干旱可识别特性与时空演变特征,基于标准化蒸发胁迫比研究了1980—2020年嘉陵江流域骤发干旱的时空分布特征,通过密度聚类算法提取骤发干旱斑块分析了斑块质心的轨迹变化,并探讨了骤发干旱暴发初期气象要素的异常情况。结果表明:流域西北部骤发干旱强度更高且发展速度更快,流域南部骤发干旱持续时间更长;流域骤发干旱事件主要发生在4—11月,且骤发干旱事件的质心主要沿东北和西北方向迁移;嘉陵江流域的骤发干旱主要由高温和降水共同主导。

关键词:骤发干旱;标准化蒸发胁迫比;密度聚类算法;质心迁移;时空演变;嘉陵江流域

中图分类号:P467

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)04-0023-08

Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of flash droughts in Jialing River Basin//MENG Changqing¹, DONG Zijiao¹, LIU Keying¹, WANG Yuankun¹, ZHANG Yanke¹, ZHONG Deyu² (1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To explore the identifiable characteristics and spatiotemporal evolution features of flash droughts in the Jialing River Basin, the spatiotemporal distribution characteristics of flash drought in the basin from 1980 to 2020 was analyzed based on the standardized evaporative stress ratio. Utilizing a density-based clustering algorithm, flash drought patches were extracted and the trajectory changes of the centroids were analyzed. In addition, the abnormal changes of meteorological elements during the outbreak of flash drought were explored by combining meteorological data. The results show that in the northwestern region of the Jialing River Basin, flash droughts exhibit higher intensity and faster development rates, while longer durations exist in the southern part of the basin. The main occurrence of flash drought in the Jialing River Basin is from April to November. The centroids of flash drought events in the basin predominantly migrate towards the northeast and northwest directions. The flash drought in the Jialing River Basin is primarily dominated by a combination of high temperature and precipitation.

Key words: flash drought; standardized evaporative stress ratio; density-based clustering algorithm; centroid migration; spatial and temporal evolution; Jialing River Basin

骤发干旱是一种在极端气候环境下发生迅速、难以监测、危害程度大、严重影响人类生产生活且复杂多变的新型干旱^[1]。现有的研究主要从两方面对骤发干旱进行监测与识别,一是由实测与模拟土壤含水量为主的骤发干旱监测与识别。例如:Ford等^[2]基于实测土壤含水量对2000—2013年俄克拉何马州骤发干旱进行了分析;Mozny等^[3]根据0~0.9 m土壤含水量观测资料研究了捷克共和国骤发干旱变化,认为能够提前3周做出有效预报。由于实测土壤含水量数据的观测站点稀疏,一些学者用分布式水文模型模拟土壤含水量来识别骤发干

旱^[4-5]。但分布式水文模型计算量大,需要获取大量的参数描述地形、土地利用和土壤属性等,在一些偏远、无资料地区很难使用。二是以蒸发数据为主的骤发干旱监测与识别。例如:蒸发需求干旱指数(evaporative demand drought index, EDDI)、蒸发应力指数(evaporative stress index, ESI)在骤发干旱识别中具有良好的应用前景^[6-7],这类指数往往不依赖于先前的降水数据,适用于各种下垫面类型,与其他方法结合使用预测效果更好;Christian等^[8]基于蒸发数据,建立了候尺度的标准化蒸发胁迫比(standardized evaporative stress ratio, SESR)来识别骤发干旱,与基

基金项目:国家自然科学基金项目(41901028, 52279064)

作者简介:孟长青(1989—),女,讲师,博士,主要从事区域水文模拟研究。E-mail:els_meng@ncepu.edu.cn

通信作者:王远坤(1981—),男,教授,博士,主要从事水文水资源及生态水文学研究。E-mail:yuankunw@ncepu.edu.cn

于土壤含水量的方法相比较,SESR 对于骤发干旱的发展更加敏感,便于比较不同气候区域蒸发胁迫情况,具有显著的骤发干旱识别能力^[9]。

骤发干旱作为一种区域性现象,具有明显的时空三维结构,其发生、发展和恢复过程在时间和空间维度均表现出持续的动态特征^[10]。然而,以往的研究大多将其复杂的形态和演化过程降维处理,将干旱强度、历时和频次等特征简化到低阶子空间内(一维或二维),只考虑了干旱强度、历时和频次在时间维度的变化,或者某一时段内干旱特征的空间分布^[11-12],很难表征干旱的实际严重程度。2005 年,Andreadis 等^[13]引入密度聚类算法识别干旱空间范围和特征,Loyd-Hughes^[14]将这种算法进行了拓展,以便更全面描述干旱事件的时空特征。

目前,三维干旱识别方法在干旱事件的识别与特征分析中得到了广泛应用。Hosseini 等^[15]将 S-TRACK 方法应用于伊朗干旱事件动态监测中,并跟踪了干旱事件的空间范围。Ling 等^[16]研究了海河流域干旱事件的时间变化和干旱重心的迁移规律,发现干旱重心主要分布在河北平原。冯凯等^[17]基于三维干旱识别方法分析了黑河流域 1961—2014 年干旱事件的时空连续动态演变。Han 等^[18]利用干旱质心的迁移轨迹探索黄土高原农业干旱事件的时空动态演变过程,并进一步分析了农业干旱的影响因素。这些方法能够较好地识别干旱连续时空动态发展过程,有助于更全面地理解三维干旱事件的演化规律,为制定有效的区域干旱管理与应对策略提供科学依据。

2013 年夏季,长江流域在不到 1 月的时间里经历了严重干旱,超过 200 万 hm^2 农作物受损,数百万人饮水困难。研究表明,由于全球变暖,未来中国干旱频率、持续时间和严重程度将增加^[19-22]。为此,本文采用全球陆地蒸散发阿姆斯特丹模型(global land surface evaporation Amsterdam model, GLEAM)产品数据,基于 SESR 识别了 1980—2020 年嘉陵江流域的骤发干旱事件,分析了骤发干旱事件在时间和空间上的演变特征,并结合密度聚类算法追踪骤发干旱事件的三维时空迁移变化轨迹,探讨气象要素对骤发干旱的影响。

1 研究区概况和研究数据

1.1 嘉陵江流域概况

嘉陵江发源于陕西省凤县秦岭南麓,地跨北纬 $29^{\circ}20' \sim 34^{\circ}30'$ 、东经 $102^{\circ}45' \sim 108^{\circ}55'$,流域总面积约 16 万 km^2 ,是长江流域面积最大的子流域^[23]。流域内水资源丰富,多年平均径流量 657.4 亿 m^3 。

河道上陡下缓,总体地势呈现出西北高、东南低的特点。嘉陵江流域位于亚热带季风性湿润气候区,流域内气候空间差异明显,有北干南湿、北温南热的气候特色,多年平均气温 15.4°C 。多年平均降水量为 921.4 mm,年内有明显的季节性,5—9 月降水量占全年的 77.3%,10 月到次年 4 月为枯水期。图 1 为嘉陵江流域概况。

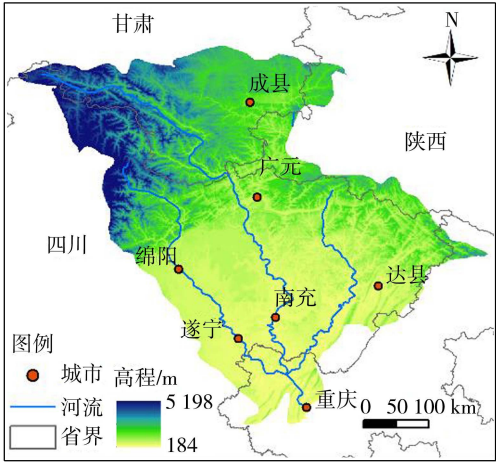


图 1 嘉陵江流域概况

1.2 数据获取与处理

1.2.1 GLEAM 蒸散发产品

GLEAM 是由英国布里斯托大学地理科学学院的 Miralles 博士研发的,该模型基于物理过程的 Priestley-Taylor 公式,利用卫星多源遥感数据,以实测降水、表层土壤含水量及植被含水率作为地表蒸散发的控制条件,反演了全球地表蒸散发^[24]。GLEAM 产品中的蒸散发数据包括植被蒸腾、冠层截留蒸发、裸土蒸发、雪升华和水面蒸发,模型中间输出产品有潜在蒸散发、表层土壤含水量、根区土壤含水量和蒸发胁迫指数。GLEAM 产品考虑了土壤水分对蒸发的约束,适用于大尺度多年蒸散发研究。本文选用 GLEAM v3.5 a 产品中 1980—2020 年的实际蒸散发和潜在蒸散发逐日数据,这些数据具有 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的空间分辨率,可以通过网站(<https://www.gleam.eu>)获取。

1.2.2 ERA5 再分析资料

嘉陵江流域实测站点的气象数据稀缺且获取困难,本文使用 ERA5 再分析资料替代。ERA5 是第五代欧洲中期天气预报中心(The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)推出的高分辨率全球气象要素数据集,具有较高的时空分辨率。本文采用了 1980—2020 年的降水、潜在蒸散发、气温、气压、相对湿度、风速以及位势高度(500 hPa)等气象要素数据,其中降水、潜在蒸散发、气温、气压、相对湿度和风速来自 ERA5 的迭代产品

ERA5-Land,时间分辨率为1 h,空间分辨率为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$,而位势高度来自 ERA5 的逐小时压力水平数据,时间分辨率为1 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。为消除各气象要素在变异程度上的差异,对上述7个气象要素数据进行标准化处理(减去均值后除以标准差),以便研究各气象要素在骤发干旱暴发初期的异常情况。

2 研究方法

2.1 骤发干旱定义与识别

本文采用 GLEAM 产品中的实际蒸散发和潜在蒸散发数据来分析嘉陵江流域骤发干旱时空演变特征。Christian 等^[8]将实际蒸散发和潜在蒸散发的比值定义为蒸发胁迫比(evaporative stress ratio, ESR),通过标准化后的 SESR 和 SESR 变化值(Δ SESR)来识别骤发干旱,具体计算步骤可见文献[8]。

本文采用标准 I、II、III、IV 共4个标准来确定骤发干旱事件,前两个标准侧重于骤发干旱对实际环境的影响,后两个标准则强调了骤发干旱迅速加剧的特征。当 SESR 和 Δ SESR 同时符合这4个标准时,骤发干旱事件发生。

- a. 标准 I:骤发干旱至少持续 32 d(4 个时间步长,一个时间步长为 8 d)。
- b. 标准 II:快速强化期结束时 SESR 必须低于 20th(表示“第 20”,下同)百分位数,这个条件保证本场事件进入真正干旱状态。如果 SESR 恢复到 20th 百分位数以上,则骤发干旱结束。
- c. 标准 III:各个时间步长之间的 Δ SESR 要小于或等于 40th 百分位数,且在 40th 百分位数以上的 Δ SESR 不能超过一个。
- d. 标准 IV:骤发干旱快速强化期 Δ SESR 的平均变化值须小于 25th 百分位数。

标准 I 的最小持续时间选择为 32 d 是依据 Otkin 等^[25-26]对骤发干旱的定义确定的。标准 II 在快速强化期结束时 SESR 必须低于 20th 百分位数的基础上,增加了一个骤发干旱结束条件,即在骤发干旱的快速强化期结束以后干旱应持续一段时间,直到 SESR 恢复到 20th 百分位数以上时,骤发干旱结束。标准 III 和标准 IV 与 Christian 等^[8]的标准一致。

为了研究不同等级骤发干旱事件在嘉陵江流域的发生情况,本文根据骤发干旱快速强化期 Δ SESR 的百分位数将骤发干旱分为 4 个等级,分别为轻度(20th~25th 百分位数)、中度(15th~<20th 百分位数)、重度(10th~<15th 百分位数)和极端(<10th 百分位数)骤发干旱。图 2 为一次骤发干旱识别过程,此次骤发干旱开始于 4 月 16 日, Δ SESR 位于

8th 百分位数,到 4 月 24 日 Δ SESR 位于 42th 百分位数,视为调节期,此后 Δ SESR 都低于 40th 百分位数,这符合标准 III 在 40th 百分位数以上的 Δ SESR 不能超过一个要求,因为一旦超过 1 个,传统干旱就有可能被认为是骤发干旱。快速强化期 Δ SESR 的平均变化值位于 12th 百分位数,符合标准 IV 的要求,这一时期骤发干旱迅速加剧。5 月 10 日 SESR 低于 20th 百分位数,快速强化期结束,进入真正的干旱状态。之后骤发干旱又持续了 2 个时间步长,到 5 月 26 日 SESR 再次回到 20th 百分位数以上,表明骤发干旱结束,此次骤发干旱共持续了 40 d。

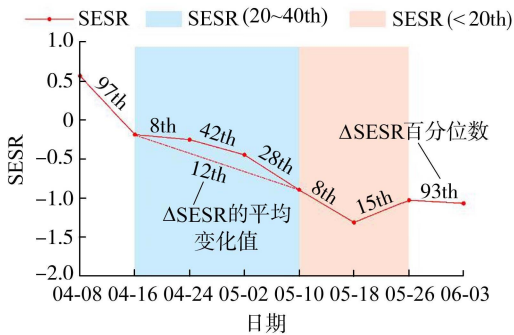


图 2 骤发干旱识别标准的时间序列示意图

2.2 三维骤发干旱识别

本文从时空三维角度出发,通过质心迁移轨迹特征对骤发干旱的起止消亡过程进行分析。骤发干旱事件三维识别过程可以分为以下 4 个步骤:

步骤 1 识别格点骤发干旱。根据 4 个骤发干旱标准,识别嘉陵江流域内部每个格点在时间序列上的骤发干旱情况,当格点处于骤发干旱状态时用 1 表示,否则用 0 表示。

步骤 2 通过密度聚类算法^[27]识别空间维度上骤发干旱事件。①在空间尺度上,通过密度聚类算法,确定每个时间步长最大的骤发干旱斑块。由于骤发干旱是可以长期覆盖大面积区域的区域性现象,除强度、频次、持续时间之外,骤发干旱的覆盖面积也是一个同样重要的特征,本文选取嘉陵江流域面积的 1.6% 作为识别骤发干旱斑块的面积阈值^[28-29]。②时间连接。为保证前后两个骤发干旱斑块在时间维度上属于同一场干旱事件,要求每个骤发干旱斑块都与前一时间步长形成的斑块空间重叠的范围在 50% 以上。

步骤 3 确定质心位置。每个格点上 SESR 不同,代表骤发干旱斑块的权重也不同,可以用质心表示骤发干旱事件的几何中心。

步骤 4 记录骤发干旱事件具体特征。确定了连续的三维骤发干旱事件以后,采用迁移距离、迁移方向和斑块覆盖面积 3 个变量来描述每场骤发干旱

事件的特征。骤发干旱事件的迁移距离是指骤发干旱开始时斑块质心点到结束时斑块质心点的空间直线距离,可以通过两点经纬度坐标得出;迁移方向定义为骤发干旱事件结束时斑块质心点位于开始时斑块质心点的相对方位角度;骤发干旱斑块覆盖面积反映了每场骤发干旱事件最大的影响区域范围。

3 结果与分析

3.1 骤发干旱基本分布特征

图 3 为研究期内嘉陵江流域不同等级骤发干旱发生频次年际变化趋势,轻度、中度、重度和极端骤发干旱发生频次的多年平均占比分别为 38.5%、30.2%、20.4%和 10.9%。在一些年份,如 1980 年、1981 年、1986 年、1996 年、2001 年、2006 年和 2019 年,重度和极端骤发干旱的总体占比较高,表明嘉陵江流域部分地区骤发干旱发展迅速,给干旱监测带来困难。

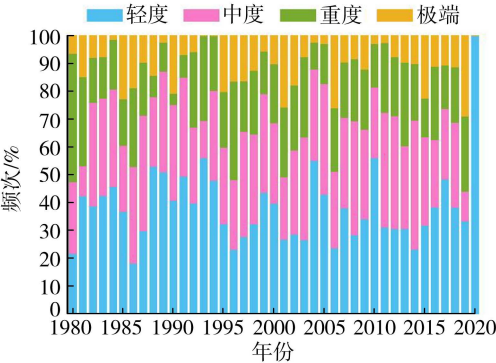


图 3 嘉陵江流域不同等级骤发干旱发生频次年际变化

图 4 为嘉陵江流域骤发干旱发生频次、平均历时和平均强度的空间分布。强度为 SESR 累加后的绝对值,SESR 累加值越大表示强度越大。由

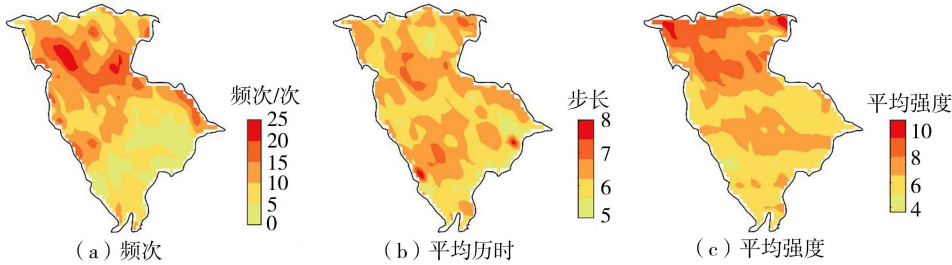


图 4 嘉陵江流域骤发干旱发生频次、平均历时、平均强度空间分布

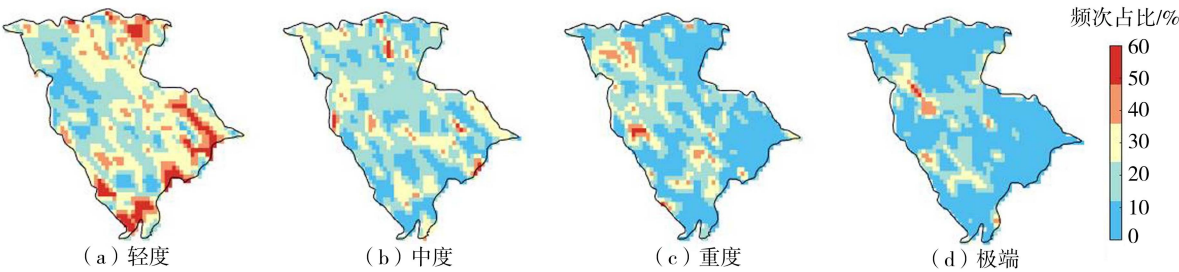


图 5 嘉陵江流域不同等级骤发干旱发生频次占比的空间分布

图 4(a)可知,研究期内嘉陵江流域骤发干旱发生频次在 1~28 次之间。在流域的北部和西北部,骤发干旱的发生频次较高,在流域的东南部发生频次较低。流域骤发干旱的平均历时为 6.3 个时间步长(50.4 d)(图 4(b)),在流域大部分区域骤发干旱的历时与发生频次具有相反的空间分布格局,骤发干旱频次高的区域,其平均历时较短。相对来说,在南充、遂宁和广元等地骤发干旱历时较长。由图 4(c)可以看出,流域北部地区的骤发干旱平均强度较高,在 8~11 之间。在骤发干旱发生频次较高的地区,干旱强度也更大。

图 5 为嘉陵江流域不同等级骤发干旱发生频次占比的空间分布,可以看出,轻度骤发干旱分布范围最广,尤其在嘉陵江流域的东北部、东部以及西南部占比相对较高。相比之下,中度骤发干旱的空间分布较为离散,只在少数地区发生频次占比超过了 60%。重度和极端骤发干旱发生频次占比较低,主要分布在流域西北部以及南部。图 6 为骤发干旱暴发初期 500 hPa 位势高度的异常变化情况。在骤发干旱暴发初期,嘉陵江流域西北部以及南部的位势高度存在明显的正异常。位势高度的异常变化直接影响了大气环流模式,导致了在副热带高压影响下,温度大幅升高,进而导致蒸发增加,使得土壤含水量下降,加剧了干旱的严重程度和发展进程^[30-31]。因此,在大气环流的影响下,流域西北部 and 南部干旱状况进一步恶化,重度和极端骤发干旱发生频次占比较高。

3.2 骤发干旱空间迁移特征

基于 1980—2020 年嘉陵江流域 SESR 数据,共识别出 48 场时空连续的三维骤发干旱事件。表 1 给出了面积最大的 8 场骤发干旱事件的基本特征,

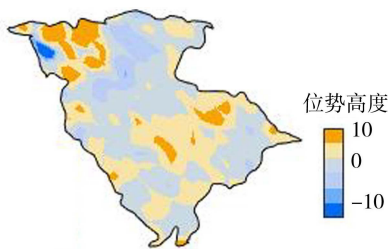


图6 嘉陵江流域骤发干旱暴发初期 500 hPa 位势高度异常变化

同时与《中国气象灾害大典：四川卷》（2000 年以前）和《中国气象灾害年鉴》（2003—2018 年）记录的干旱事件进行了比较。总体来看，这 8 场骤发干旱事件与历史记录的干旱事件存在高度的一致性，但也有个别干旱事件存在差异。需要特别指出的是，2006 年识别到的骤发干旱事件发生时间早于历史记录中的干旱事件，这可能是因为 SESR 数据对环境变量更为敏感，从而能够更早地探测到干旱事件的发生。综合来说，本文方法能够有效地识别骤发干旱事件的发生，可为骤发干旱事件的监测与应对提供参考。

由于骤发干旱事件的发展过程通常比较复杂，采用斑块质心迁移轨迹表示骤发干旱事件的时空演变情况。图 7 为 48 场骤发干旱事件的迁移特征玫瑰图。如图 7(a) 所示，4—11 月是嘉陵江流域骤发干旱事件发生的主要月份，占全年的 85% 以上。嘉陵江流域骤发干旱事件夏季发生频次较高，37.5%

的骤发干旱事件发生在 6—8 月，冬季骤发干旱发生频次较低，但对冬季作物如冬小麦等仍会产生一定的影响。从迁移方向来看，嘉陵江流域骤发干旱事件在东北和西北方向发生频次较高（图 7(b)）。从迁移距离来看，骤发干旱事件在不同方向的迁移距离也有所不同（图 7(c)），在正南方向迁移距离最长，其次是在东北方向迁移距离相对较长，斑块质心平均移动了 120 km。综合来看，西北方向骤发干旱事件发生频次较高，但迁移距离相对较短，说明西北方向的骤发干旱事件更为集中。

图 8 为嘉陵江流域骤发干旱事件斑块的质心分布情况，不同颜色表示干旱斑块的覆盖面积大小。在研究期间，只有两个骤发干旱事件的斑块覆盖面积超过流域总面积的 40%，斑块质心位于四川广元附近；有 76.8% 的骤发干旱事件的斑块覆盖面积小于流域总面积的 10%，这些干旱斑块主要分布在流域中部和北部；而流域南部骤发干旱事件斑块的覆盖面积在 10%~40% 之间。

3.3 骤发干旱暴发初期气象要素异常分析

图 9 为骤发干旱暴发初期气象要素异常变化情况，其中降水和相对湿度的均值和峰值主要表现为负异常，而与大气能量需求有关的气象要素，例如平均气温、潜在蒸散发、气压和风速则呈现为正异常。在骤发干旱暴发初期，潜在蒸散发和降水峰值变化显著，分别高于同期 0.86 和 0.48 个标准差，这与

表 1 嘉陵江流域面积最大的 8 场识别干旱事件与历史记录的干旱事件

开始时间	结束时间	历时/d	迁移距离/km	强度/ 10^3	影响面积/万 km^2	历史记录的干旱事件主要发生地
2006-04-23	2006-08-29	128	99.30	2.52	3.6	2006 年夏季四川、重庆
1997-06-25	1997-08-12	48	58.6	1.86	2.9	1997 年秋季四川盆地
2009-08-29	2009-12-03	96	61.7	2.86	2.1	2009 年秋冬西南五省
1998-08-05	1998-10-16	72	104.4	1.64	2.1	1998 年秋冬四川达州
2002-08-15	2002-11-11	88	163.9	1.39	1.6	无资料
1996-05-25	1996-07-20	56	59.4	1.24	1.4	1996 年夏季四川广元
2008-02-15	2008-04-11	56	37.7	1.11	1.3	2008 年春季四川、重庆
2013-05-17	2013-08-21	96	72.6	1.04	1.3	2013 年夏季云南、四川

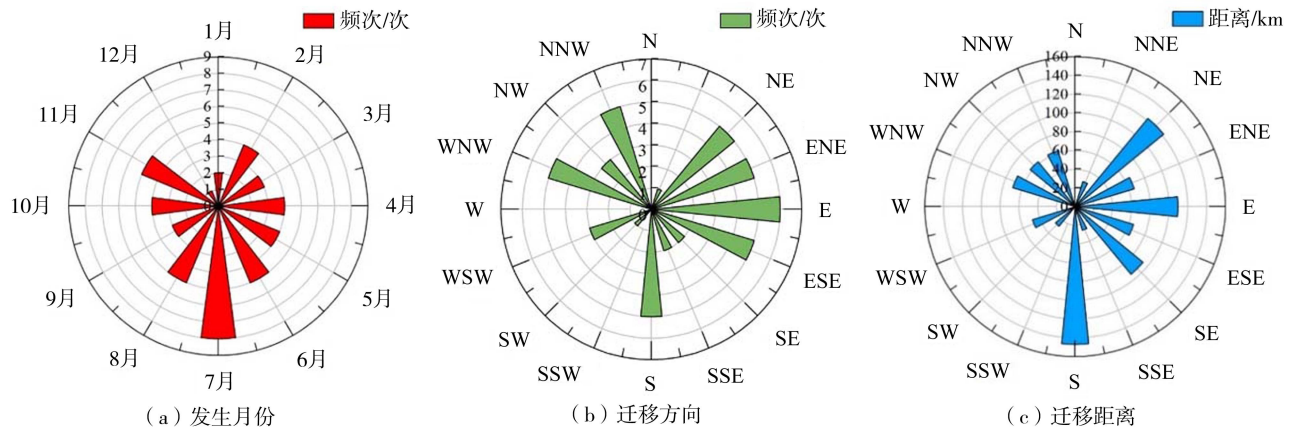


图7 嘉陵江流域三维骤发干旱事件迁移特征

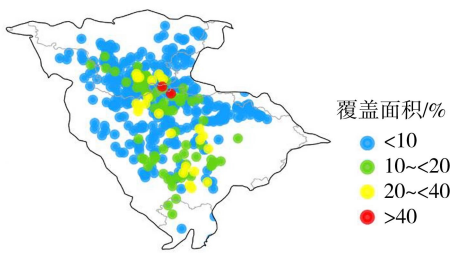


图8 嘉陵江流域骤发干旱事件斑块质心分布

Ford 等^[32]的研究结果一致,他们强调在美国骤发干旱暴发初期,骤发干旱的形成与潜在蒸散发的相关性最为密切。由于降水持续减少,空气中水汽含量严重不足,加上强风和高温影响,导致植被蒸散能力增强,这些气象要素的异常变化为骤发干旱的发生提供了有利条件,促进了骤发干旱的形成^[33]。

图10为所有骤发干旱暴发初期气象要素异常值峰值空间分布情况,相对湿度与降水异常值峰值的空间分布类似,都在流域西北部表现出了较高的负异常峰值,而相对湿度负异常峰值的绝对值更大,

例如在四川绵阳、广元等地降水异常值峰值在-2~-1之间,而该地区的相对湿度异常值峰值低于-2。平均气温和潜在蒸散发在流域西北部表现出较高的异常值峰值,这种现象可能与嘉陵江独特的地理气候因素有关,嘉陵江流域位于我国的湿润与半湿润区,流域西北部的降水较少、相对湿度小,具有较高的温度和潜在蒸散发异常值峰值,因而更容易形成骤发干旱;此外,较高的气压和风速也推动了骤发干旱的形成和演变,这与前面分析的嘉陵江流域骤发干旱发生频次和强度空间分布较为一致。

骤发干旱包括高温热浪和降水亏缺两种不同类型触发机制。Mo 等^[34]将由于温度急剧升高和蒸散发能力加强导致土壤含水量下降这一类型的骤发干旱称为高温热浪型骤发干旱。降水亏缺型骤发干旱^[35]是由于前期降水不足,导致土壤含水量降低和实际蒸散发能力减弱,而蒸散发的减少引发温度升高,土壤含水量进一步下降,最终形成的骤发干旱。

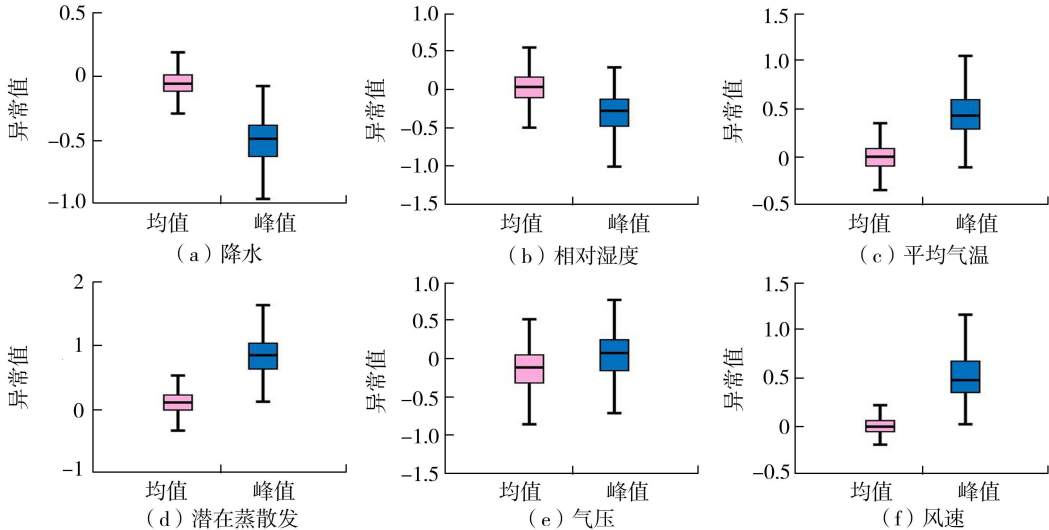


图9 嘉陵江流域骤发干旱暴发初期气象要素异常变化

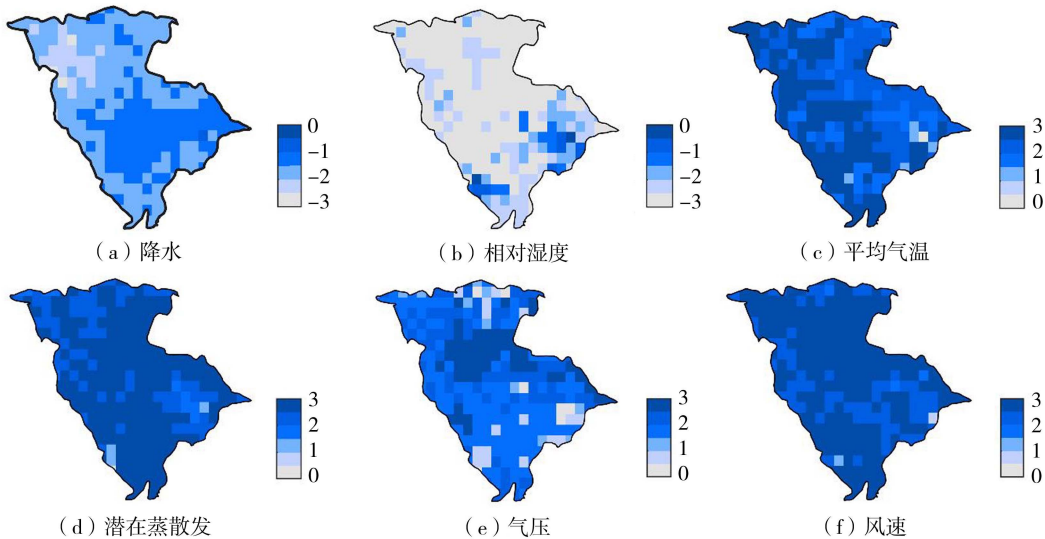


图10 嘉陵江流域骤发干旱暴发初期气象要素异常值峰值空间分布

图 11 为不同驱动类型骤发干旱空间分布情况。嘉陵江流域气候湿润,雨热同期,两种类型的骤发干旱均有发生。高温热浪型骤发干旱(图 11(a))在流域东部以及南部发生频次较高。与高温热浪型骤发干旱相比,降水亏缺型骤发干旱具有大致相反的空间格局。如图 11(b)所示,降水亏缺型骤发干旱主要发生在嘉陵江流域的西南部和西北部,绵阳、遂宁等地是降水亏缺型骤发干旱频发区。越往东南,高温和降水共同作用引起的骤发干旱发生频次占比越大(图 11(c))。总体来看,嘉陵江流域骤发干旱主要由高温和降水共同主导。

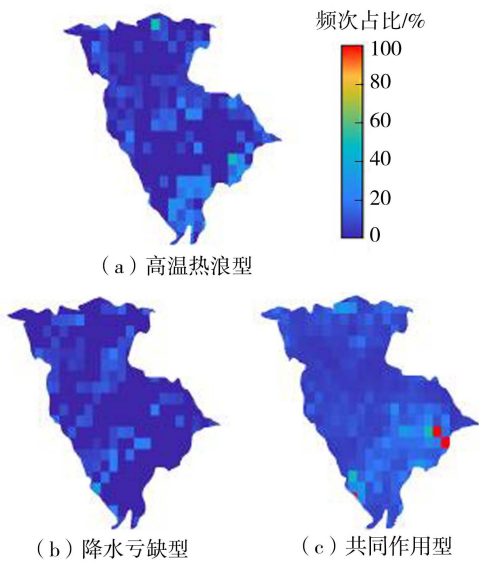


图 11 嘉陵江流域不同类型骤发干旱发生频次占比空间分布

4 讨 论

区别于传统干旱,骤发干旱的两个关键特征是其“突发性”和“难预见性”,本文基于 SESR 骤发干旱识别方法和标准确定了干旱的快速强化期和持续时间。Christian 等^[8]采用这种方法识别了美国大陆的骤发干旱,结果表明 SESR 识别结果与 ESI 识别结果较为一致;和美国干旱监测仪相比,SESR 能够早两周识别出骤发干旱事件。此外,SESR 计算简单方便,只需要获得可靠的实际蒸散发和潜在蒸散发数据,就可以应用于更大空间尺度上的骤发干旱监测与识别。本文研究结果表明,嘉陵江流域西北部降水量偏低、气温昼夜变化大,更容易发生骤发干旱;嘉陵江流域骤发干旱平均历时约 50 d,这一结果稍高于 Yuan 等^[36]根据土壤湿度调查的中国 1961—2015 年的骤发干旱持续时间。

由于干旱是区域性事件,仅用时间或空间上的骤发干旱特征不足以描述一次完整干旱事件的动态变化过程,因此,本文在骤发干旱研究中突出了其时

空演变特征,从三维角度分析了区域骤发干旱的发展演变,深化了骤发干旱在高维度的识别与研究。在三维干旱识别过程中,密度聚类算法阈值的选择是一个关键因素,不同区域干旱演变特征不同,阈值的选择也不同,一些学者将研究区域面积的 1.6% 作为最小干旱斑块面积阈值,但对于中小流域尺度的研究,阈值的选择应有更多的尝试。此外,三维骤发干旱事件在空间连续区域干旱识别过程中仍存在局限性,后续研究应集中于如何确定相邻两个空间斑块重叠区域的阈值,并评估其在时空维度连续性识别中的敏感度。

本文在划分骤发干旱强度等级时侧重于骤发干旱发展速度这一特征,对骤发干旱最终的严重程度考虑较少,需进一步完善骤发干旱强度等级的划分,综合考虑其发展速度和最终严重程度,未来也将深入研究气象要素在骤发干旱形成中的综合作用,并量化不同气象要素对骤发干旱形成的贡献以及影响机制。

5 结 论

a. 嘉陵江流域西北部骤发干旱更为频繁,强度更高且发展速度更快;流域骤发干旱平均历时约 50 d,流域南部骤发干旱持续时间更长。

b. 4—11 月是嘉陵江流域骤发干旱事件发生的主要月份,占全年骤发干旱事件的 85% 以上,嘉陵江流域骤发干旱事件主要沿东北和西北方向迁移,向西北方向迁移的骤发干旱事件覆盖面积和强度更为集中。

c. 骤发干旱暴发初期降水和潜在蒸散发的异常值峰值变化显著,嘉陵江流域西北部各气象要素异常值峰值高于东南部。嘉陵江流域骤发干旱主要由高温和降水共同主导。

参考文献:

[1] 袁星,王钰森,张苗,等. 关于骤发干旱研究的一些思考 [J]. 大气科学学报,2020,43(6):1086-1095. (YUAN Xing,WANG Yumiao,ZHANG Miao,et al. 2020. A few thoughts on the study of flash drought [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43 (6): 1086-1095. (in Chinese))

[2] FORD T W,MCROBERTS D B,QUIRING S M,et al. On the utility of in situ soil moisture observations for flash drought early warning in Oklahoma,USA[J]. Geophysical Research Letters,2015,42:9790-9798.

[3] MOZNY M,TRNKA M,ZALUD Z,et al. Use of a soil moisture network for drought monitoring in the Czech Republic[J]. Theoretical and Applied Climatology,2012, 107(1):99-111.

- [4] WANG Yumiao, YUAN Xing. Anthropogenic speeding up of south China flash droughts as exemplified by the 2019 summer-autumn transition season [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48: e2020GL091901.
- [5] ZHANG Yuqing, YOU Qinglong, CHEN Changchun, et al. Evaluation of downscaled CMIP5 coupled with VIC model for flash drought simulation in a humid subtropical basin, China [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31: 1075-1090.
- [6] MCEVOY D J. Physically based evaporative demand as a drought metric: historical analysis and seasonal prediction [D]. Reno: University of Nevada, 2015.
- [7] YAO Ning, LI Yi, LEI Tianjie, et al. Drought evolution, severity and trends in Chinese mainland over 1961-2013 [J]. *Science of Total Environment*, 2018, 616-617: 73-89.
- [8] CHRISTIAN J I, BASARA J B, OTKIN J A, et al. A methodology for flash drought identification: application of flash drought frequency across the United States [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20(5): 833-846.
- [9] YU Xiaohan, ZENG Xiankui, GUI Dongwei, et al. Projection of flash droughts in the headstream area of Tarim River Basin under climate change through Bayesian uncertainty analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023, 128(6): e2022JD037634.
- [10] MISHRA A K, SINGH V P. Drought modeling: a review [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 403(1): 157-175.
- [11] 李斌, 解建仓, 胡彦华, 等. 基于标准化降水指数的陕西省干旱时空变化特征分析 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 113-119. (LI Bin, XIE Jiancang, HU Yanhua, et al. Analysis of spatiotemporal variation of drought in Shaanxi Province based on standardized precipitation index [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2017, 33(17): 113-119. (in Chinese))
- [12] 陶然, 张珂. 基于 PDSI 的 1982—2015 年我国气象干旱特征及时空变化分析 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(5): 50-56. (TAO Ran, ZHANG Ke. Analysis of the timely air change of meteorological drought characteristics in China from 1982 to 2015 based on PDSI [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(5): 50-56. (in Chinese))
- [13] ANDREADIS K M, CLARK E A, WOOD A W, et al. Twentieth-century drought in the conterminous United States [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(6): 985-1001.
- [14] LOYD-HUGHES B. A spatio-temporal structure-based approach to drought characterization [J]. *International Journal of Climatology*, 2012, 32(3): 406-418.
- [15] HOSSEINI A, GHAVIDEL Y, FARAJZADEH M. Characterization of drought dynamics in Iran by using S-TRACK method [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 145(1/2): 661-671.
- [16] LING Minhua, GUO Xiaomin, SHI Xiaolin, et al. Temporal and spatial evolution of drought in Haihe River Basin from 1960 to 2020 [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108809.
- [17] 冯凯, 栗晓玲. 基于三维视角的农业干旱对气象干旱的时空响应关系 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(8): 103-113. (FENG Kai, SU Xiaoling. Spatiotemporal response characteristics of agricultural drought to meteorological drought from a three-dimensional perspective [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2020, 36(8): 103-113. (in Chinese))
- [18] HAN Zhiming, HUANG Qiang, HUANG Shengzhi, et al. Spatial-temporal dynamics of agricultural drought in the Loess Plateau under a changing environment: characteristics and potential influencing factors [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 244: 106540.
- [19] 金菊良, 宋占智, 周玉良, 等. 水旱灾害风险评估方法体系及其实证研究 [J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(5): 142-151. (JIN Juliang, SONG Zhazhi, ZHOU Yuliang, et al. Risk assessment method system for flood and drought disasters and its application [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(5): 142-151. (in Chinese))
- [20] 曹永强, 李可欣, 任博, 等. 基于 SPEI 的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析 [J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(5): 28-36. (CAO Yongqiang, LI Kexin, REN Bo, et al. Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(5): 28-36. (in Chinese))
- [21] 杨肖丽, 马慧君, 吴凡, 等. 基于 CMIP6 的全球及干旱带干旱时空演变 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 40-49. (YANG Xiaoli, MA Huijun, WU Fan, et al. Spatiotemporal evolution of global and arid zone drought based on CMIP6 [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 40-49. (in Chinese))
- [22] 吴志勇, 白博宇, 何海, 等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(1): 1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(1): 1-9. (in Chinese))
- [23] 杨昊, 倪福全, 邓玉, 等. 基于 SWAT 模型分析嘉陵江流域蓝、绿水资源量的时空变化特征 [J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(2): 18-26. (YANG Hao, NI Fuquan, DENG Yu, et al. Temporal and spatial variation characteristics of blue and green water resources in Jialing River Basin based on SWAT model [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(2): 18-26. (in Chinese))

(下转第 58 页)

- balance [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):10-18. (in Chinese))
- [23] CHANG L C, CHANG F J. Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system [J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1/2): 12-20.
- [24] 冯平,白粟,张婷,等. 径流变异对漳沱河流域水库生态调度的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 99-108. (FENG Ping, BAI Su, ZHANG Ting, et al. Impacts of runoff change on ecological operation of reservoirs in the Hutuo River Basin[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5):99-108. (in Chinese))
- [25] 黄显峰,钱骏,颜山凯,等. 基于改进灰狼算法的梯级电站中长期优化调度[J]. 水力发电, 2022, 48(12): 70-73. (HUANG Xianfeng, QIAN Jun, YAN Shankai, et al. Joint medium and long-term optimal scheduling of cascade hydropower stations based on improved gray wolf algorithm [J]. Water Power, 2022, 48(12): 70-73. (in Chinese))
- [26] 蔡卓森,戴凌全,刘海波,等. 基于支配强度的 NSGA-Ⅱ改进算法在水库多目标优化调度中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(11): 999-1007. (CAI Zhuosen, DAI Lingquan, LIU Hai-bo, et al. Application of improved NSGA-Ⅱ algorithm based on dominance strength in multi-objective operation of cascade reservoirs [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(11): 999-1007. (in Chinese))
- [27] 马川惠,李瑛,黄强,等. 基于 Spark 的水库群多目标调度粒子群并行化算法[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(3): 309-313. (MA Chuanhui, LI Ying, HUANG Qiang, et al. Parallel particle swarm optimization algorithm based on spark multi-objective optimal scheduling of reservoir group [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(3): 309-313. (in Chinese))
- [28] 明波,黄强,王义民,等. 基于改进布谷鸟算法的梯级水库优化调度研究[J]. 水利学报, 2015, 46(3): 341-349. (MING Bo, HUANG Qiang, WANG Yimin, et al. Cascade reservoir operation optimization based-on improved Cuckoo Search [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(3): 341-349. (in Chinese))
- [29] 蒋浩,唐欢容,郑金华. 一种基于快速排序的快速多目标遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(30): 46-48. (JIANG Hao, TANG Huanrong, ZHENG Jinhua. A fast multi-objective genetic algorithm based on quick sort [J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(30): 46-48. (in Chinese))

(收稿日期:2023 - 06 - 20 编辑:俞云利)

(上接第 30 页)

- [24] MARTENS B, MIRALLES D G, LIEVENS H, et al. GLEAM v3:satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture [J]. Geoscientific Model Development, 2017, 10:1903-1925.
- [25] OTKIN J A, ANDERSON M C, HAIN C, et al. Examining rapid onset drought development using the thermal infrared-based evaporative stress index [J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(4): 1057-1074.
- [26] OTKIN J A, ZHONG Y, HUNT E D, et al. Development of a flash drought intensity index [J]. Atmosphere, 2021, 12(6): 741.
- [27] DIAZ V, CORZO-PÉREZ G A, VAN LANEN H A J, et al. An approach to characterise spatio-temporal drought dynamics [J]. Advances in Water Resources, 2020, 137: 103512.
- [28] WANG A, LETTENMAIER D P, SHEFFIELD J. Soil moisture drought in China, 1950-2006 [J]. American Meteorological Society, 2011, 24(13): 3257-3271.
- [29] XU Kai, YANG Dawen, YANG Hanbo. et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961-2012: a climatic perspective [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 253-264.
- [30] ZHANG Yuqing, YOU Qinglong, MAO Guangxiong, et al. Flash drought characteristics by different severities in humid subtropical basins: a case study in the Gan River Basin, China [J]. Journal of Climate, 2021, 34(18): 7337-7357.
- [31] CHOU C, NEELIN J D, CHEN C, et al. Evaluating the “rich-get-richer” mechanism in tropical precipitation change under global warming [J]. Journal of Climate, 2009, 22(8): 1982-2005.
- [32] 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.
- [33] 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))
- [34] MO K C, LETTENMAIER D P. Heat wave flash droughts in decline [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(8): 2823-2829.
- [35] MO K C, LETTENMAIER D P. Precipitation deficit flash droughts over the United States [J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(4): 1169-1184.
- [36] YUAN Xing, WANG Linying, WU Peili, et al. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4661.

(收稿日期:2023 - 05 - 31 编辑:熊水斌)