

两类阈值法识别的东江流域水文干旱形成与演化过程差异

吴杰峰^{1,2,3}, 王国庆¹, 陈晓宏⁴, 陈兴伟⁵

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院, 江苏 南京 210044; 3. 南京信息工程大学水利部水文气象灾害机理与预警重点实验室, 江苏 南京 210044; 4. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 519000; 5. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350117)

摘要: 基于东江流域上、下游控制断面龙川站和博罗站 1956—2010 年逐月流量及流域内枫树坝、新丰江和白盆珠水库逐月入库和出库流量数据, 采用水库调控流量还原法, 结合动态阈值法和固定阈值法识别水文干旱, 系统分析了两类阈值法识别的水文干旱形成与演化过程的差异及其对大型水库调控的响应规律。结果表明: 两类阈值法针对的干旱本底概念不同, 识别的水文干旱年内分布和干旱开始、峰值和终止月份差异显著; 动态阈值法识别的水文干旱在年内各月均匀分布, 固定阈值法识别的水文干旱集中分布在枯水季(10月至次年3月), 干旱峰值多出现在11月至次年2月, 干旱终止月份以汛前期3、4月为主, 干旱开始、峰值和终止月份与研究区水文丰枯转换月份较吻合; 两类阈值法均能较好地表征水文干旱的发展和恢复过程及其对大型水库调控的响应特征, 即水库调控在缩短干旱历时、降低干旱烈度、延后水文干旱开始和峰值月份以及提前干旱终止月份等方面发挥重要作用。

关键词: 水文干旱; 演化过程; 阈值法; 大型水库; 东江流域

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)03-0052-09

Differences in hydrological drought formation and evolution processes identified by two threshold methods in the Dongjiang River Basin // WU Jiefeng^{1,2,3}, WANG Guoqing¹, CHEN Xiaohong⁴, CHEN Xingwei⁵ (1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Key Laboratory of Hydrometeorological Disaster Mechanism and Warning of Ministry of Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 4. Center of Water Resources and Environment, Sun Yat-sun University, Guangzhou 519000, China; 5. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

Abstract: Monthly flow data from the Longchuan and Boluo stations, representing upstream and downstream control sections of the Dongjiang River Basin, as well as monthly inflow and outflow data from the Fengshuba, Xinfengjiang, and Baipenzhu reservoirs within the basin for the period 1956-2010 were used. The reservoir regulation flow reconstruction method was employed, along with the variable drought threshold (VDT) and fixed drought threshold (FDT) methods, to identify hydrological drought events. Furthermore, the study analyzed the disparities in the formation, evolution process, and response to large reservoir regulation between hydrological droughts identified by the two threshold methods. The results reveal that, due to the different target drought background concepts for the VDT and FDT methods, the evolution processes, such as the start, peak intensity, and end months and the distribution within a year of hydrological droughts identified by the two methods are significantly different. Moreover, hydrological droughts identified by the VDT method are evenly distributed in each month of a year, while those identified by the FDT method are concentrated in dry season (from October to March of the following year) in the Dongjiang River Basin. The FDT method typically identifies the peak intensity of hydrological droughts, occurring from December to February of the next year, with the majority of droughts ending in pre-

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK20210652); 国家自然科学基金项目 (52379013, U2243228); 中国博士后科学基金项目 (2023M741770); 水灾害防御全国重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目 (2022nkzd01)

作者简介: 吴杰峰 (1991—), 男, 教授, 博士, 主要从事流域水文水资源及水环境研究。E-mail: wujf27@nuist.edu.cn

通信作者: 王国庆 (1971—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事气候变化及水文过程模拟研究。E-mail: gqwang@nhri.cn

flood season, specifically in March and April. The utilization of the FDT method ensures that the start, peak intensity, and end months of hydrological droughts align well with the dryness/wetness characteristics of the Dongjiang River Basin. Both the VDT and FDT methods are able to characterize the development and recovery patterns of hydrological droughts. The changes in the evolution characteristics of hydrological droughts identified by the two methods and their responses to reservoir regulation are similar. In particular, both methods can reflect the effects of large reservoir regulation in shortening drought duration, reducing drought severity, delaying the start and peak intensity months of hydrological droughts, and advancing the end month of droughts.

Key words: hydrological drought; evolutionary processes; threshold method; large reservoir; Dongjiang River Basin

变化环境下水文干旱演化过程复杂多变^[1-2],其过程常伴随着地表地下水水位下降、水资源短缺、水生态环境恶化及城市供水不足等一系列问题^[3-5],通常采用地表径流或河道流量短缺表征^[5]。准确有效评估并追踪水文干旱的演化过程,对优化水资源配置、减少干旱灾害损失及保障区域水资源水生态安全具有重要的实际意义。

水文干旱演化过程包括其形成、发展和恢复过程,其特征变量包括历时、烈度、发生频率以及开始和结束时间等^[3]。动态阈值(variable drought threshold, VDT)法和固定阈值(fixed drought threshold, FDT)法是识别水文干旱演化过程及其特征变量的两类主要方法^[4]。VDT法通常将年内不同时期的干旱发生频率默认为等同状态,根据该时期(如月份)变量的状态特征,分别确定干旱阈值以识别干旱^[6-7]。FDT法将指标变量的整个时间序列看作一个整体,采用某个具有特殊意义的固定阈值(如控制断面的生态保障流量)识别水文干旱^[4,8]。两类方法概念不同,揭示的水文干旱演化过程结果也不同,探讨两类阈值法的差异与适用性,可为变化环境下选择合理的水文干旱评估方法提供参考依据,以进一步丰富干旱理论研究。

近年来,受气候变化和人类活动耦合作用的影响,我国局部地区季节性缺水问题日益严重^[9-12],干旱发生频率增加,干旱加重趋势明显^[13]。如2009—2010年西南大旱、2013年南方13省(市、自治区)发生的大面积干旱、2020—2021年珠江流域发生1960年以来最严重的秋冬春联旱,以及2022年夏季由高温少雨造成的长江流域大范围严重干旱^[14]等。大型水库调控是调节季节性缺水问题及防旱减灾的主要手段之一^[15]。围绕大型水库调控影响下的水文干旱演化阈值及风险演变,尽管已开展了系列科学试验和相关研究工作^[8,10,15],但以往研究主要基于干旱相对概念的识别方法进行水文干旱形成阈值(如气象干旱向水文干旱传递阈值)及特征变量的关联性分析等^[7,16-20],采用标准化径流指数(standardized runoff index, SRI)^[6]和标准化流量指数(standardized streamflow index, SSI)^[7]进行水文干旱演变及风险演变分析居多^[3,11,15-16],以河流主要

控制断面的最小流量管理目标作为固定阈值识别水文干旱并探讨其缺水效应也有所涉及^[8,10],而基于两类阈值法的水文干旱演化全过程(开始、发展和恢复过程)差异及其对大型水库调控的响应研究则鲜有报道。

本文以东江流域为研究对象,应用水库调控流量还原法还原无水库调控流量序列^[8],揭示VDT和FDT法识别的水文干旱形成与演化过程差异及其对大型水库调控的响应规律,可为变化环境下防旱减灾及水资源优化配置提供参考。

1 研究区概况与数据来源

东江流域集水面积35 340 km²(图1),处于22°20'N~25°12'N、113°47'E~115°52'E,占广东境内珠江流域面积的24.3%。流域气候属亚热带湿润季风气候区,总体雨量充沛,但时空分布不均^[21-22],空间上呈西南多、东北少,季节性差异明显,4—9月降水量约占年降水量的80%,枯水季节10月至次年3月降水量较少,仅占全年降水量的20%;流域季节性缺水问题严重^[9],水文干旱频发^[8,10]。为了保障粤港澳大湾区供水安全,流域内建设超过896处水利设施,使流域控制断面博罗站以上1.17万km²集水面积的来水得到调控^[21-22]。其中枫树坝水库、新丰江水库和白盆珠水

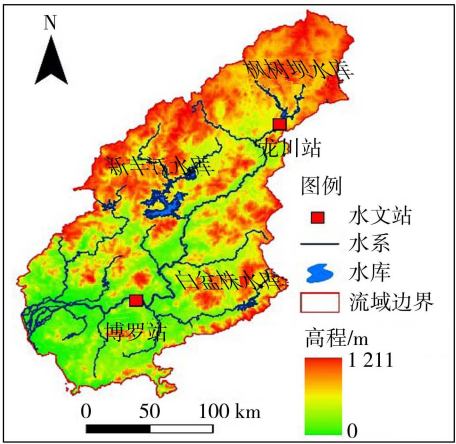


图1 东江流域水库和水文站分布
Fig. 1 Distribution of reservoirs and hydrological stations in the Dongjiang River Basin

库是流域内 3 个大(一)型水库,分别于 1974 年、1961 年和 1986 年开始运行。3 个水库总库容达 209.7 亿 m^3 ,新丰江水库(总库容 178 亿 m^3)以发电为主,结合防洪、航运等功能;枫树坝水库(总库容 19.5 亿 m^3)为不完全年调节水库,以航运为主,结合发电、防洪等功能;白盆珠水库(总库容 12.2 亿 m^3)具有不完全多年调节功能,以防洪、灌溉为主,结合发电、航运等功能。

本文收集了 3 个大型水库运行以来至 2010 年的逐月入库和出库流量数据,以及流域上、下游控制断面站点龙川站和博罗站 1956—2010 年逐月实测流量数据,其中流域上游龙川站受枫树坝水库的影响,下游博罗站同时受 3 个大型水库的影响。

2 研究方法

东江流域干流的水文过程受水库调控扰动,其水文序列发生显著变异^[10,21]。本文采用水库调控流量还原法^[8],还原无水库调控流量序列,并基于无水库调控的流量序列确定水文干旱识别阈值。需要指出的是,通过水库调控流量还原法还原的流量序列为无水库调控流量序列,并非传统意义上的天然流量序列。在此基础上,分别对比分析两类阈值法在识别有无水库调控情景下的水文干旱演化过程差异,揭示大型水库调控对水文干旱演化过程的影响。

2.1 水库调控流量还原法

基于东江流域上、下游控制断面龙川站和博罗站 1956 年 1 月至 2010 年 12 月共 55 个水文年的实测逐月流量数据,根据流域内 3 个大型水库运行以来至 2010 年 12 月的逐月入库和出库流量数据,计算 3 个大型水库调控的月流量(入库-出库),进一步计算博罗站实测的逐月流量与 3 个水库调控的流量之和,即得到博罗站无水库调控(还原)流量序列;根据枫树坝水库调控的流量可获取龙川站无水库调控流量序列。

2.2 基于两类阈值法的水文干旱及其特征识别

2.2.1 FDT 法

基于国内外常用的 SSI 各干旱等级频率,如轻旱、中旱、重旱和极旱发生频率分别为 34.1%、9.2%、4.4% 和 2.3%^[6-7],FDT 法以无水库调控流量的整体序列计算流量过程累计频率(由低到高排序),并采用等频率转换方法,以各干旱等级发生频率对应的月流量值作为判断是否发生水文干旱的阈值(图 2(a))。通过每月流量与各干旱等级阈值对比,可判断该月的水文干旱等级。FDT 法获取的水文干旱指数序列为

$$F_{ij} = x_{ij} - x_T \tag{1}$$

式中: F_{ij} 为 FDT 法获取的第 i 年 第 j 月水文干旱指数序列值, $F_{ij} \leq 0$ 表示发生水文干旱, $F_{ij} > 0$ 表示未发生水文干旱; x_{ij} 为第 i 年 第 j 月的流量; x_T 为水文干旱轻旱阈值。

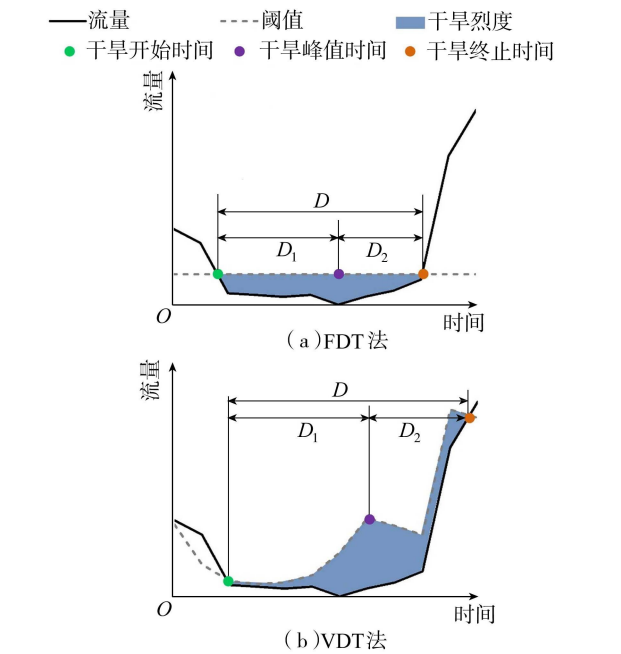


图 2 基于 FDT 和 VDT 法的水文干旱演化过程及其特征
Fig. 2 Evolution processes and characteristics of hydrological droughts based on FDT and VDT methods

2.2.2 VDT 法

VDT 法以年内各月无水库调控流量序列计算各月流量过程累计频率(由低到高排序),采用 SSI 各干旱等级发生频率对应的月流量值作为判断该月发生水文干旱强度的阈值^[4,22-23],形成年内 12 个不同的阈值(图 2(b))。通过对比每月流量与该月对应的各干旱等级阈值,判断该月的水文干旱等级。VDT 法获取的水文干旱指数序列为

$$V_{ij} = x_{ij} - x_{Rj} \tag{2}$$

式中: V_{ij} 为 VDT 法获取的第 i 年 第 j 月水文干旱指数序列值, $V_{ij} \leq 0$ 表示发生水文干旱, $V_{ij} > 0$ 表示未发生干旱; x_{Rj} 为第 j 月对应的轻旱等级阈值。

2.3 水文干旱演化过程特征变量及对水库调控的响应

根据识别的水文干旱指数序列,结合图 2 中的水文干旱演化过程识别方法,可进一步提取水文干旱演化过程特征变量,即当流量低于设定的干旱阈值(如将轻旱等级对应的流量值作为水文干旱识别的阈值),可获取干旱历时(D)和烈度(M)特征变量,将干旱历时内所有低于干旱阈值的流量序列与阈值差值累积值的绝对值定义为干旱烈度^[24]。

图 2(a)(b)分别显示了利用 VDT 和 FDT 法提取的水文干旱开始、峰值和终止时间。基于水文干

旱演化过程原理^[3],提取水文干旱发展和恢复过程特征变量以及干旱开始、峰值和终止时间,统计各时间点在不同月份的累计频次可判断研究区水文干旱演化过程在年内各月的分布情况,如水文干旱开始、峰值和终止时间主要分布月份等。以水文干旱中最大缺水时刻为分割点,将水文干旱演化过程进一步划分为发展过程(水文干旱开始至峰值时刻)和恢复过程(水文干旱峰值至终止时刻),对应的各阶段历时分别为 D_1 和 D_2 , $D=D_1+D_2$ 。为了便于统计分析水文干旱的发展和恢复过程规律,参考已有研究^[3,25],仅提取历时不低于3月的水文干旱。最后,通过对比有无水库调控情景下,水文干旱演化过程特征变量的变化量,获取两类阈值法识别的水文干旱演化过程对大型水库调控的响应规律。

3 结果与分析

3.1 水文干旱特征变量及对水库调控的响应

3.1.1 两类阈值法识别的水文干旱时间序列

图3和图4分别为利用VDT和FDT法识别的博罗站和龙川站有无水库调控情景下水文干旱等级分布。结果表明:①两类阈值法识别的同一个控制断面站点的水文干旱变量时间序列差异明显。在无水库调控情景下,VDT法识别的水文干旱在年内所

有月份均有发生;而FDT法识别的干旱月份,除了1963年、1991年、2003—2004年极端和重旱年之外,多数集中于10月至次年3月的枯水期。②大型水库调控对水文干旱的影响明显。相较于无水库调控情景,大型水库调控下,VDT和FDT法识别的水文干旱月份明显减少,且干旱等级降低显著,如历史记录的1963年特大干旱年,无水库调控情景下,博罗站多数月份为极旱或重旱等级,但水库调控后,其极端干旱月份明显减少,且多数极端干旱月份降至中旱或轻旱级别,龙川站和博罗站的结果类似。

3.1.2 两类阈值法识别的水文干旱特征

基于图3和图4结果,可提取水文干旱特征变量,如表1所示。无水库调控情景下,VDT和FDT法识别的博罗站(龙川站)水文干旱数量分别为78场(52场)和52场(42场);水库调控情景下分别为59场(34场)和29场(30场)。在相同时间序列下,VDT法识别的水文干旱烈度平均值大于FDT法,但FDT法识别的平均历时较VDT法长。整体而言,水库调控情景下水文干旱数量、平均历时和烈度均明显降低,VDT法识别的博罗站(龙川站)水文干旱平均历时和烈度分别降低了12.99%(8.97%)和17.51%(12.81%),而FDT法则分别降低了38.78%(9.93%)和22.56%(10.24%)。

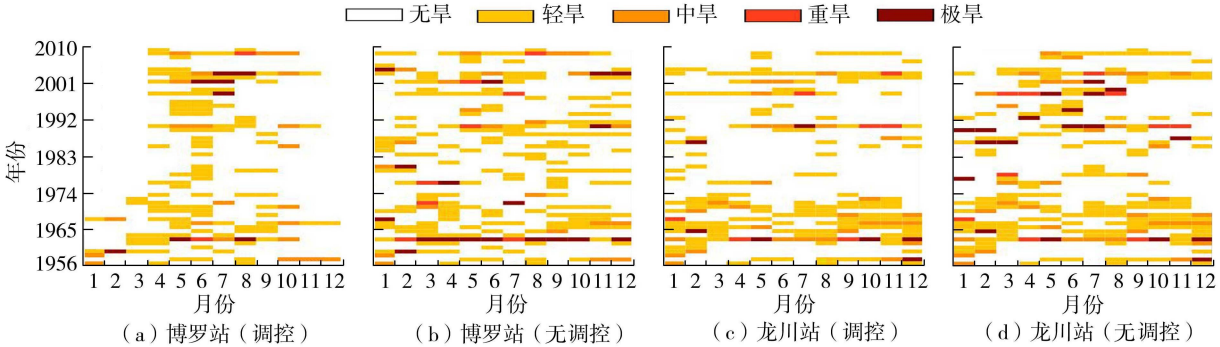


图3 VDT法识别的不同站点水文干旱等级分布

Fig.3 Distribution of hydrological drought levels at different stations identified by VDT method

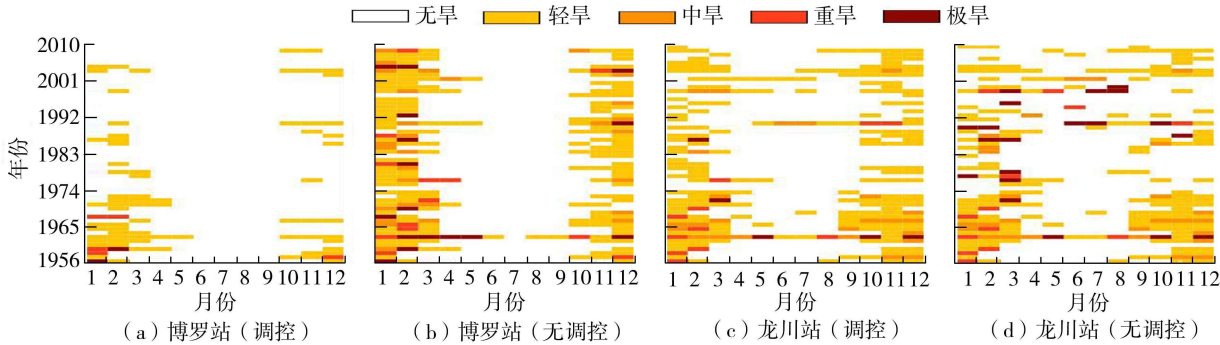


图4 FDT法识别的不同站点水文干旱等级分布

Fig.4 Distribution of hydrological drought levels at different stations identified by FDT method

表 1 VDT 和 FDT 法识别的水文干旱特征变量

Table 1 Characteristic variables of hydrological droughts identified by VDT and FDT methods

水文站	方法	平均历时/月		平均烈度/(m^3/s)	
		调控	无调控	调控	无调控
龙川站	VDT 法	2.13	2.34	131.09	150.36
	FDT 法	2.63	2.92	121.25	135.08
博罗站	VDT 法	2.01	2.31	335.35	406.55
	FDT 法	2.21	3.61	305.91	395.01

3.1.3 两类阈值法识别的水文干旱历时和烈度相关性

图 5 为两类阈值法识别的水文干旱历时和烈度的关系。可以看出,水文干旱历时和烈度具有较好的正向响应关系(拟合关系通过 0.01 显著性检验)。随着干旱历时的增加,干旱烈度也随之加大,体现了干旱烈度与干旱历时的相关性^[26]。水库调控后水文干旱历时和烈度相关性略低于无水库调控情景下的相关性,说明水库调控对水文干旱演化过

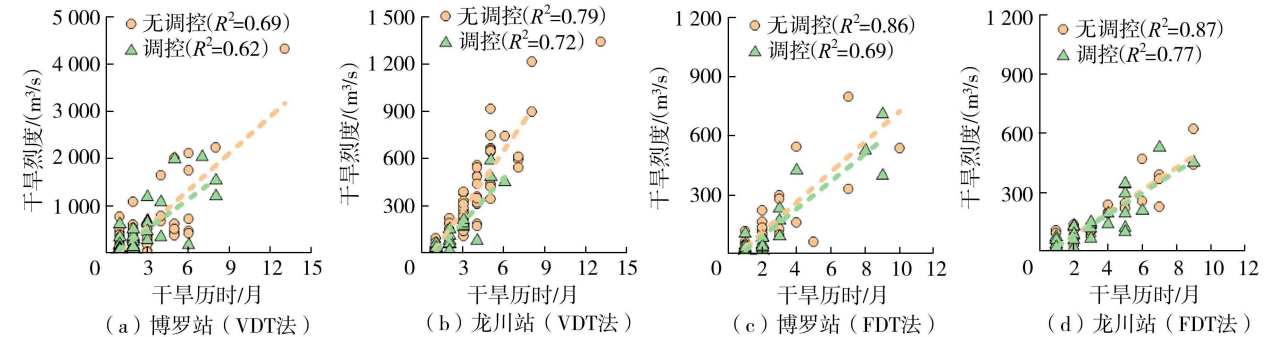


图 5 VDT 和 FDT 法识别的水文干旱特征变量关系

Fig.5 Relationship between characteristic variables of hydrological droughts identified by VDT and FDT methods

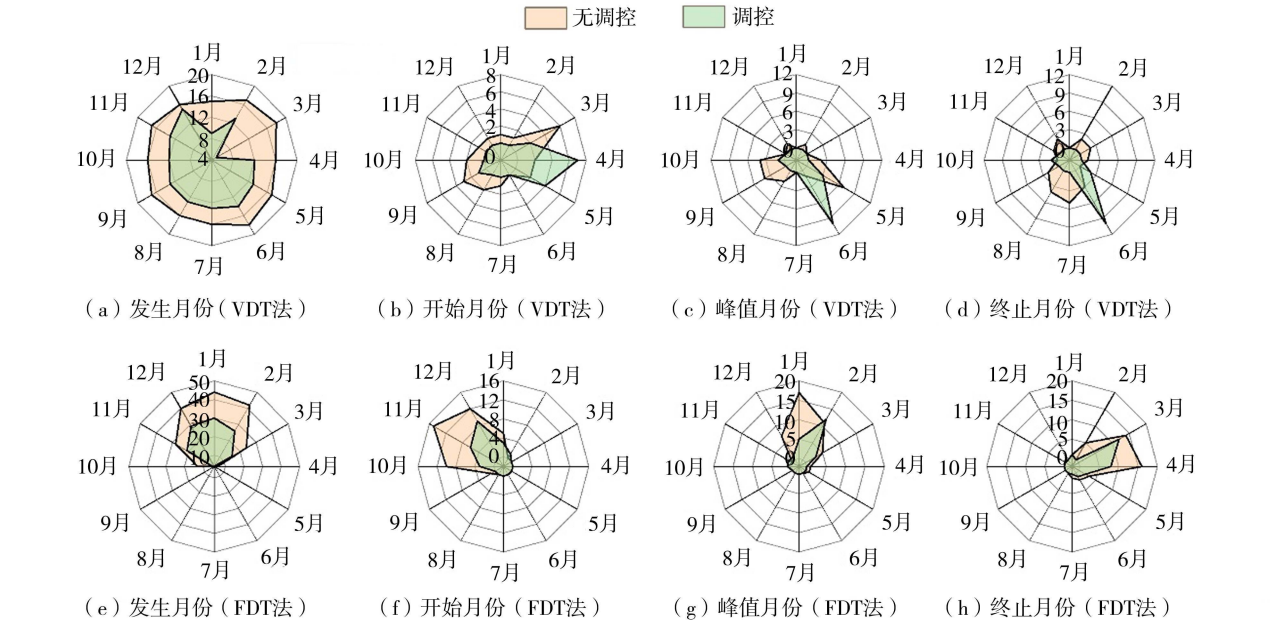


图 6 VDT 和 FDT 法识别的博罗站水文干旱年内各月累计频次分布

Fig.6 Intra-annual cumulative frequency distributions of hydrological droughts in different months identified by VDT and FDT methods at Boluo Station

程特征变量关系产生了一定的影响,但未改变水文干旱特征变量之间原有的正向相关性。

3.2 水文干旱演化过程及对水库调控的响应

3.2.1 水文干旱年内分布

VDT 和 FDT 法识别的东江流域博罗站(图 6(a)(e))和龙川站(图 7(a)(e))水文干旱年内各月出现的累计频率不同。无水库调控情景下,VDT 法识别的水文干旱年内各月分布较均匀;FDT 法识别的水文干旱主要集中在 10 月至次年 3 月,其中 12 月至次年 2 月干旱发生频率最高,但 FDT 法在丰水季节基本未识别出水文干旱。

图 6(b)(f)和图 7(b)(f)分别给出了有无水库调控情景下两类阈值法识别的博罗站和龙川站水文干旱的开始时间年内各月累计频率。可以看出,VDT 法识别的博罗站(图 6(b))水文干旱开始月份为年内各月,无水库调控情景下开始月份多集中在 3 月,水库调控情景下水文干旱开始月份多集中在

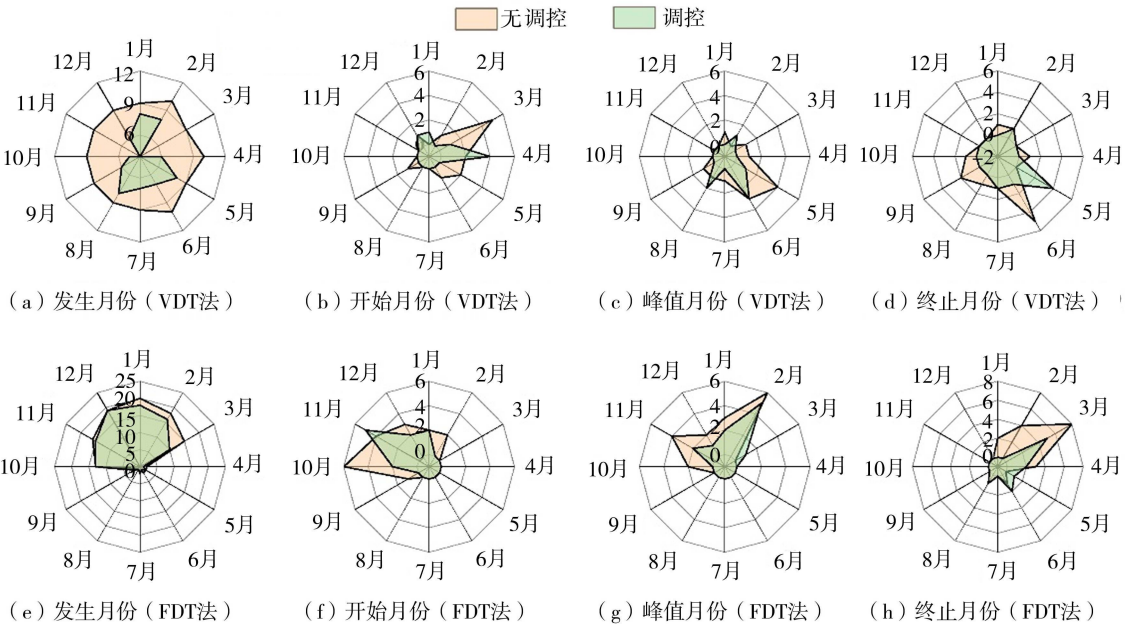


图7 VDT和FDT法识别的龙川站水文干旱年内各月累计频次分布

Fig.7 Intra-annual cumulative frequency distributions of hydrological droughts in different months identified by VDT and FDT methods at Longchuan Station

4、5月;无水库调控情景下,FDT法识别的博罗站(图6(f))水文干旱开始月份集中在10—12月,水库调控情景下开始月份以11、12月居多。无水库调控情景下,VDT法识别的龙川站(图7(b))水文干旱开始月份多数为3月,水库调控情景下则以4月居多;无水库调控情景下,FDT法识别的龙川站(图7(f))水文干旱开始月份多集中在10—12月,以10月出现的频次最多,而水库调控情景下以11月出现的频次最多。可见,水库调控使水文干旱形成时间延后1~2月。

从图6(c)(g)和图7(c)(g)可以看出,博罗站和龙川站水文干旱峰值出现时间多在水文干旱形成后的2~4月之内。无水库调控情景下,VDT法识别的博罗站(图6(c))水文干旱峰值多集中在5月,水库调控情景下峰值整体延后1月,多出现在6月;无水库调控情景下,FDT法识别的博罗站(图6(g))水文干旱峰值多出现在12月至次年2月,其中1月出现的频次最高,水库调控情景下峰值主要集中在2月,其他月份出现干旱峰值频次较低。无水库调控情景下,VDT法识别的龙川站(图7(c))水文干旱峰值出现月份集中在5、6月,其中5月出现的频次最高,水库调控情景下以6月和8月出现的峰值频次较高;FDT法识别的龙川站(图7(g))水文干旱峰值在有无水库调控的情景下未发生明显变化。整体而言,水库调控使水文干旱峰值出现时间延后。

图6(d)(h)和图7(d)(h)分别为博罗站和龙

川站水文干旱终止时间年内各月累计频率。无水库调控情景下,VDT法识别的博罗站(图6(d))水文干旱终止月份多出现在7、8月,水库调控情景下终止月份多出现在5、6月;无水库调控情景下,FDT法识别的博罗站(图6(h))水文干旱终止月份多出现在汛前的3、4月,水库调控情景下多集中在3月。无水库调控情景下,VDT法识别的龙川站(图7(d))水文干旱终止月份多出现在6月,水库调控情景下终止月份出现频次最高为5月;无水库调控情景下,FDT法识别的龙川站(图7(h))水文干旱终止月份多出现在2、3月,水库调控情景下终止月份出现频次最高为3月。可见,水库调控可提前终止水文干旱。

3.2.2 水文干旱发展和恢复历时

图8给出了两类阈值法识别不低于3月历时的水文干旱发展和恢复历时及其对水库调控的响应。可以看出,水文干旱的平均发展历时长于平均恢复历时,水库调控情景下水文干旱平均发展和恢复历时均短于无水库调控情景下的结果。水库调控情景下,VDT法识别的博罗站(龙川站)水文干旱平均发展和恢复历时相较于无水库调控情景分别缩短了7.86%(9.25%)和3.50%(3.85%),FDT法识别的博罗站(龙川站)水文干旱平均发展和恢复历时则分别缩短了10.45%(6.92%)和1.42%(2.91%)。因此,两类阈值法均可反映水文干旱的发展和恢复过程规律,即缓慢发展和快速恢复,且水库调控对水文干旱发展过程的影响大于对其恢复过程的影响,

本文得到的水文干旱发展和恢复过程规律与已有的研究结果类似^[3,18]。

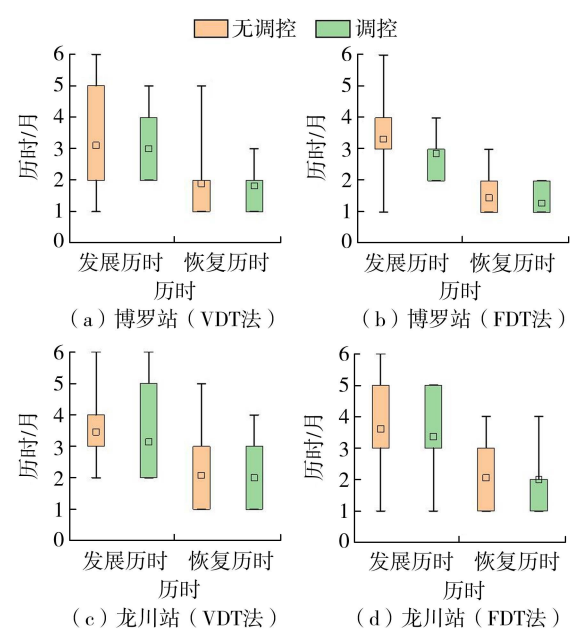


图8 水文干旱发展和恢复历时统计值

Fig. 8 Statistical values of hydrological drought development and recovery durations

3.3 讨论

两类阈值法识别的水文干旱演化过程存在显著差异,这与两类阈值法阈值选取的本底概念差异有关。VDT法的原理是将水文干旱看作是相对概念,即指某时期水量相对亏缺的现象,其识别的丰枯时期水文干旱发生频率接近一致。实际上,诸如国内外常用的SRI^[6]和SSI^[7],以及基于该类指数进一步发展的时变水文干旱指数^[27]、新型综合性干旱指数^[28]和标准水资源指数^[29]等也均采用干旱的相对概念作为本底,将每个干旱等级在固定时期内(如某个月份)看作等频率^[7]。对于丰枯特征差异显著的南方湿润地区,相对干旱概念及其阈值的选择可能会造成干旱预测失准及干旱防御过度,例如将丰水期原本未发生水文干旱的月份诊断为水文干旱月份,必然会造成水文干旱的无效预警。FDT法将水文干旱指标时间序列看作一个整体,采用某个具有特殊含义的固定阈值识别水文干旱,该方法的本底概念是将水文干旱看作是绝对概念。VDT法识别的水文干旱平均烈度大于FDT法,但识别的水文干旱平均历时短于FDT法,这主要是由于在相同阈值情况下,VDT法可以识别丰水期水文干旱,丰水期流量相对于枯水期流量更大,其识别的丰水期水文干旱烈度相对于枯水期更大,因而导致该结果的出现^[30-31]。在丰枯特征差异较为明显的南方湿润地区,其年内流量变差系数较大,由FDT法识别的水

文干旱集中分布于枯水期,但该方法阈值的合理选取对水文干旱的识别结果影响较大,针对不同的干旱本底概念形成的多种干旱指数差异及适用性亟须深化研究。水库调度规则十分复杂,尤其在出现水库干涸等极端情况下,如何综合平衡各个方面用水需求以减少干旱灾害损失,需要进一步结合社会、生态、环境等要素全面分析。

涂新军等^[32]针对东江流域的研究表明,流域旱转涝主要发生在前汛期的4—5月,而涝转旱发生在后汛期结束后的10—11月比例较高。基于干湿指数识别的广东省气象干旱季节性分布特征也表明,广东省秋冬季发生干旱频率最大,其次为春季,夏季则较少发生干旱^[33-34]。整体上看,由于FDT法考虑了研究区水文属性的丰枯特征差异,所识别的水文干旱与利用旱涝急转指标^[32]和干湿指数^[33-34]识别的区域干旱发生时间较吻合。

4 结论

a. VDT法识别的水文干旱年内各月累计频率分布基本一致,FDT法识别的水文干旱发生月份主要在枯水季节。VDT法高估了丰水期水文干旱烈度,可能造成水文干旱预报预警及防旱减灾策略失效;FDT法识别的水文干旱平均烈度低于VDT法,但识别的水文干旱平均历时长于VDT法。FDT法识别的水文干旱开始、峰值和终止月份更符合东江流域的丰枯水文特征。

b. 两类阈值法识别的水文干旱演化过程及其特征变量相关关系均能体现大型水库调控的蓄洪补枯效应,东江流域大型水库的蓄洪补枯在缩短水文干旱历时、降低干旱烈度、延迟水文干旱开始和峰值月份等方面发挥了一定的作用。在水库调控情景下,VDT法识别的博罗站(龙川站)水文干旱平均历时和烈度分别降低12.99%(8.97%)和17.51%(12.81%),FDT法则分别降低38.78%(9.93%)和22.56%(10.24%)。

c. 两类阈值法均能较好地反映水文干旱的发展和恢复过程规律及其对大型水库调控响应特征,表现为大型水库调控对水文干旱发展过程的影响大于对其恢复过程的影响。水库调控情景下,VDT法识别的博罗站(龙川站)水文干旱平均发展和恢复历时相较于无水库调控情景分别缩短了7.86%(9.25%)和3.50%(3.85%),FDT法识别的博罗站(龙川站)水文干旱平均发展和恢复历时则分别缩短了10.45%(6.92%)和1.42%(2.91%)。

参考文献:

[1] 任立良,沈鸿仁,袁飞,等.变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析[J].水科学进展,2016,27(4):492-500. (REN Liliang, SHEN Hongren, YUAN Fei, et al. Hydrological drought characteristics in the Weihe catchment in a changing environment [J]. Advances in Water Science, 2016, 27 (4) : 492-500. (in Chinese))

[2] 董前进,谢平.水文干旱研究进展[J].水文,2014,34(4):1-7. (DONG Qianjin, XIE Ping. Advances in hydrological drought research [J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34 (4) : 1-7. (in Chinese))

[3] WU Jiefeng, CHEN Xiaohong, YAO Huaxia, et al. Hydrological drought instantaneous propagation speed based on the variable motion relationship of speed-time process [J]. Water Resources Research, 2018, 54 (11) : 9549-9565.

[4] VAN LOON A F. Hydrological drought explained [J]. WIREs Water, 2015, 2 (4) : 359-392.

[5] MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391 (1/2) : 202-216.

[6] SHUKLA S, WOOD A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35 (2) : L02405.

[7] VICENTE-SERRANO S M, LÓPEZ-MORENO J I, BEGUERÍA S, et al. Accurate computation of a streamflow drought index [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17 (2) : 318-332.

[8] 涂新军,杜晓霞,杜奕良,等.水文干旱多变量联合设计及水库影响评估[J].湖泊科学,2018,30(2):509-518. (TU Xinjun, DU Xiaoxia, DU Yiliang, et al. Multivariate joint design of hydrological drought and impact of water reservoirs [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30 (2) : 509-518. (in Chinese))

[9] 陈晓宏,陈永勤,赖国友.东江流域水资源优化配置研究[J].自然资源学报,2002,17(3):366-372. (CHEN Xiaohong, CHEN Yongqin, LAI Guoyou. Optimal allocation of water resources in Dongjiang River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17 (3) : 366-372. (in Chinese))

[10] 涂新军,陈晓宏,赵勇,等.变化环境下东江流域水文干旱特征及缺水响应[J].水科学进展,2016,27(6):810-821. (TU Xinjun, CHEN Xiaohong, ZHAO Yong, et al. Responses of hydrological drought properties and water shortage under changing environments in Dongjiang River Basin [J]. Advances in Water Science, 2016, 27 (6) : 810-821. (in Chinese))

[11] 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))

[12] 肖祖香,朱双,罗显刚,等.三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (6) : 515-520. (in Chinese))

[13] LENG Guoyong, TANG Qihong, RAYBURG S. Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China [J]. Global and Planetary Change, 2015, 126 : 23-34.

[14] 姜雨彤,侯爱中,郝增超,等.长江流域2022年高温干旱事件演变及历史对比[J].水力发电学报,2023,42(8):1-9. (JIANG Yutong, HOU Aizhong, HAO Zengchao, et al. Evolution and historical comparison of hot droughts in Yangtze River Basin in 2022 [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42 (8) : 1-9. (in Chinese))

[15] WU Jiefeng, LIU Zhiyong, YAO Huaxia, et al. Impacts of reservoir operations on multi-scale correlations between hydrological drought and meteorological drought [J]. Journal of Hydrology, 2018, 563 : 726-736.

[16] 吴杰峰,陈兴伟,高路.水文干旱对气象干旱的响应及其临界条件[J].灾害学,2017,32(1):199-204. (WU Jiefeng, CHEN Xingwei, GAO Lu. Response of hydrological drought to meteorological drought and its critical conditions [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32 (1) : 199-204. (in Chinese))

[17] 石朋,唐汉,瞿思敏,等.西南地区气象干旱向水文干旱传播的特征[J].水资源保护,2023,39(1):49-56. (SHI Peng, TANG Han, QU Simin, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in Southwest China [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1) : 49-56. (in Chinese))

[18] 薛联青,白青月,刘远洪.人类活动影响下塔里木河流域气象干旱向水文干旱传播的规律[J].水资源保护,2023,39(1):57-62. (XUE Lianqing, BAI Qingyue, LIU Yuanhong. Propagation law from meteorological drought to hydrological drought in the Tarim River Basin under the impact of human activities [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1) : 57-62. (in Chinese))

[19] 杨少康,刘冀,张特,等.汉江上游气象-水文干旱特征变量响应概率研究[J].水资源保护,2023,39(5):143-

151. (YANG Shaokang, LIU Ji, ZHANG Te, et al. Study on meteorological-hydrological drought characteristic variable response probability in upper reaches of the Hanjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 143-151. (in Chinese))
- [20] 石朋, 詹慧婕, 瞿思敏, 等. 黄河源区气象干旱与水文干旱关联性分析 [J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 80-86. (SHI Peng, ZHAN Huijie, QU Simin, et al. Correlation analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 80-86. (in Chinese))
- [21] 张正浩, 张强, 邓晓宇, 等. 东江流域水利工程对流域地表水文过程影响模拟研究 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(4): 684-695. (ZHANG Zhenghao, ZHANG Qiang, DENG Xiaoyu, et al. Hydrological effects of water reservoirs on fluvial hydrological processes for the East River Basin using statistical modeling technique [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(4): 684-695. (in Chinese))
- [22] WU Jiefeng, CHEN Xiaohong, YUAN Xing, et al. The interactions between hydrological drought evolution and precipitation-streamflow relationship [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126210.
- [23] RANGECROFT S, VAN LOON A F, MAUREIRA H, et al. An observation-based method to quantify the human influence on hydrological drought: upstream-downstream comparison [J]. Hydrological Sciences Journal, 2019, 64(3): 276-287.
- [24] YEYJEVICH V. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts [R]. Fort Collins: Colorado State University, 1967.
- [25] PARRY S, PRUDHOMME C, WILBY R L, et al. Drought termination: concept and characterisation [J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2016, 40(6): 743-767.
- [26] 宋松柏, 聂荣. 基于非对称阿基米德 Copula 的多变量水文干旱联合概率研究 [J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 20-29. (SONG Songbai, NIE Rong. Asymmetric Archimedean Copulas for multivariate hydrological drought frequency analysis [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(4): 20-29. (in Chinese))
- [27] 李敏, 李建柱, 冯平, 等. 变化环境下时变标准化径流指数的构建与应用 [J]. 水利学报, 2018, 49(11): 1386-1395. (LI Min, LI Jianzhu, FENG Ping, et al. Construction of time-dependent drought index under changing environment and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(11): 1386-1395. (in Chinese))
- [28] 张迎, 黄生志, 黄强, 等. 基于 Copula 函数的新型综合干旱指数构建与应用 [J]. 水利学报, 2018, 49(6): 703-714. (ZHANG Ying, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Construction and application of a new comprehensive drought index based on Copula function [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(6): 703-714. (in Chinese))
- [29] 翟家齐, 蒋桂芹, 裴源生, 等. 基于标准水资源指数 (SWRI) 的流域水文干旱评估: 以海河北系为例 [J]. 水利学报, 2015, 46(6): 687-698. (ZHAI Jiaqi, JIANG Guiqin, PEI Yuansheng, et al. Hydrological drought assessment in the river basin based on standard water resources index (SWRI): a case study on the northern Haihe River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6): 687-698. (in Chinese))
- [30] HAMMOND J C, SIMEONE C, HECHT J S, et al. Going beyond low flows: streamflow drought deficit and duration illuminate distinct spatiotemporal drought patterns and trends in the U. S. during the last century [J]. Water Resources Research, 2022, 58(9): e2022WR031930.
- [31] WU Jiefeng, WANG Guoqing, CHEN Xiaohong, et al. Hydrological drought characterization considering onset, maximum streamflow deficit, and termination [J]. Advances in Water Resources, 2024, 184: 104613.
- [32] 涂新军, 庞万宁, 陈晓宏, 等. 传统旱涝急转评估指数的局限和改进 [J]. 水科学进展, 2022, 33(4): 592-601. (TU Xinjun, PANG Wanning, CHEN Xiaohong, et al. Limitations and improvement of the traditional assessment index for drought-wetness abrupt alternation [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(4): 592-601. (in Chinese))
- [33] 郑彬, 林爱兰. 广东省干旱趋势变化和空间分布特征 [J]. 地理科学, 2011, 31(6): 715-720. (ZHENG Bin, LIN Ailan. Trend and spatial features of drought in Guangdong [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(6): 715-720. (in Chinese))
- [34] 王水寒, 邱建秀, 王大刚. 1960—2014 年广东省干旱时空演变特征 [J]. 热带地理, 2020, 40(2): 357-366. (WANG Shuihai, QIU Jianxiu, WANG Dagang. Spatio-temporal variation of drought in Guangdong province from 1960 to 2014 [J]. Tropical Geography, 2020, 40(2): 357-366. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-09-03 编辑: 施业)

