

三峡水库影响下长江中下游水文干旱演变及对气象干旱的响应*

李峥嵘¹, 彭涛^{1,2**}, 林青霞^{1,2}, 董晓华^{1,2}, 刘冀^{1,2}, 常文娟^{1,2}, 喻丹^{1,2}, 王高旭³

(1: 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002)

(2: 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002)

(3: 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029)

摘要: 利用 1960—2016 年长江流域 183 个气象站逐月气温和降水数据以及干流 3 个水文站逐月径流资料, 采用标准化降水蒸散指数 (SPEI) 和标准化径流指数 (SRI) 分析三峡水库蓄水运行前后长江中下游宜昌、汉口和大通站水文干旱的多时间尺度演变以及对气象干旱的响应特征. 结果表明: (1) 三峡水库运行后下游各站冬春季旱情明显趋缓, 而秋季干旱状况略有加重; 水库蓄水后各站中旱和重旱发生频率均呈减少趋势, 其中中旱减幅明显, 而特旱发生频率则总体表现为增加趋势; (2) 三峡水库蓄水后 3 个站平均干旱历时的变幅相对较小, 而干旱烈度和烈度峰值的均值增幅较大; 同时, 各站短时间尺度 (1 和 3 个月) 干旱特征变量的变幅总体呈现沿程递增趋势, 而长时间尺度 (6 和 12 个月) 干旱特征变量的变幅整体表现为沿程递减趋势; (3) 水库蓄水后各站短时间尺度 SRI 与 SPEI 的相关性减小, 但相关性随时间尺度增加而迅速增强, 12 个月时间尺度的相关系数达到最大并略高于蓄水前; 在年内相关性上, 蓄水后各站短时间尺度 SRI 与 SPEI 的相关系数明显减小, 冬季表现尤为突出, 而长时间尺度的相关系数则略有增加; (4) 水库影响下不同时间尺度宜昌站水文干旱滞后于气象干旱平均天数有增有减, 而汉口和大通站的滞后天数均呈显著增加趋势, 且总体表现为沿程递增趋势. 研究结果可为变化环境下水文干旱预警与水库优化调度提供参考.

关键词: 水文干旱; 水库调节; 气象干旱; 三峡水库; 响应关系; 长江中下游

Hydrological drought evolution and its response to meteorological drought in the middle-lower reach of the Yangtze River triggered by Three Gorges Reservoir*

Li Zhengrong¹, Peng Tao^{1,2**}, Lin Qingxia^{1,2}, Dong Xiaohua^{1,2}, Liu Ji^{1,2}, Chang Wenjuan^{1,2}, Yu Dan^{1,2} & Wang Gaoxu³

(1: College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China)

(2: Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang 443002, P.R.China)

(3: State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P.R.China)

Abstract: Based on monthly temperature and precipitation data from 183 meteorological stations in the Yangtze River (YZR) Basin and monthly runoff data from three hydrological stations in the mainstream of the YZR during 1960–2016, this study, using the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardized runoff index (SRI), analyzed the multiple timescales evolution of hydrological drought and its response to meteorological drought at Yichang, Hankou, and Datong stations in the middle-lower reach of the YZR before and after the operation of the Three Gorges Reservoir (TGR). The results showed that with the operation of TGR, drought situations at the downstream hydrological stations in winter and spring were significantly reduced, while drought conditions were slightly aggravated in autumn. The occurrence frequency of moderate and severe drought at each hydrologi-

* 2021-11-28 收稿; 2022-02-09 收修改稿.

国家自然科学基金项目 (52009065)、湖北省水利重点科研项目 (HBSLKY202109) 和宜昌市自然科学研究项目 (A21-3-004) 联合资助.

** 通信作者; E-mail: pengtao306@163.com.

cal station showed a declining trend in the post-TGR period, particularly for the moderate drought. The frequency of extreme drought demonstrated an increasing trend in general. With the TGR was impounded, the average drought duration of three hydrological stations showed relatively mild variations, whereas the average drought severity and peak exhibited a significant upward trend. Furthermore, the variation amplitude of drought characteristic variables at the short-term timescale (1 and 3 months) from three hydrological stations displayed an increasing trend along the middle-lower reach of the YZR, while decreasing trend happened at the long-term timescale (6 and 12 months). The correlation between *SRI* and *SPEI* series from three hydrological stations at short-term timescale decreased significantly, but the correlation increased rapidly with timescale increase. Correlation coefficient between the *SRI* and *SPEI* series reached the maximum at 12-month timescale and were slightly higher than that in the pre-TGR period. Meanwhile, the intra-annual correlation coefficients between the *SRI* and *SPEI* series at the short-term timescale declined evidently in the post-TGR period, particularly in winter. However, the correlation coefficients of the *SRI* and *SPEI* series at long-term timescale increased slightly. With the impacts of the TGR, average day number that hydrological drought lagged behind meteorological drought at Yichang station at different timescales increased or decreased, while the number of lagged days at Hankou and Datong stations increased significantly, and had an increasing trend along the middle-lower reach of the YZR. These results can provide reference for hydrological drought warning and optimal operation of reservoir under the changing environment.

Keywords: Hydrological drought; reservoir regulation; meteorological drought; Three Gorges Reservoir; response relationship; the middle-lower reach of the Yangtze River

干旱是对人类社会影响最广泛、最严重的自然灾害之一^[1-2]. 变化环境下频繁发生的极端干旱更是人类面临的严峻挑战,已成为影响自然生态系统健康和经济社会可持续发展的重要制约因素^[3]. 美国气象学会将干旱分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱^[4]. 水文干旱是气象干旱和农业干旱的发展和延续,是联系气象干旱、农业干旱和社会经济干旱的纽带^[5]. 近几十年来,全球气候变化,尤其是土地利用变化、水库修建、跨流域调水等人类活动导致水文极值过程呈现显著变化^[6],直接影响气象干旱向水文干旱的传播以及水文干旱形成和发展过程,使得水文干旱演变呈现出新特征^[7-9]. 因此,高强度人类活动影响下水文干旱形成与演变研究正成为当前水文学的国际前沿和热点领域^[10-12].

水库通过调蓄作用显著地改变了下游河川径流时程分配过程,导致自然条件下的干旱传播机制及水文干旱特征发生显著变化. 目前,国内外学者在水库修建对下游水文干旱影响方面开展了一些研究,但是尚无统一的认识. 水库通过蓄洪补枯,增加旱季下游河道的径流量,有利于缓解水库下游水文干旱影响. 如 Wen 等^[13] 研究发现澳大利亚 Murrumbidgee 流域水库调控作用减轻了紧邻大坝下游地区的水文干旱程度,但这种水库调蓄效应随着距离的增加而减弱. Rangecroft 等^[14] 分析了智利 Santa Juana 大坝对下游水文干旱的影响,表明水库径流调节作用明显降低了下游水文干旱发生的频率、持续时间和强度,但无法缓解持续数年的严重干旱事件. Zhang 等^[15] 分析了沙颍河流域梯级水库调控下的水文干旱演变特征,发现水库运行减少了下游水文干旱发生的频率,但增加了干旱历时及水文干旱对气象干旱的响应时间. Wu 等^[16] 对水库影响下水文干旱演变特征的研究也发现,水库运行使得下游水文干旱的平均历时和烈度明显降低. 涂新军等^[11] 发现东江流域水库调蓄作用对于缓解水文干旱效果显著,联合超越重现期越小,水库对联合设计值的影响程度越大. 同时也有一些研究表明,水库修建可能会给下游水文干旱带来明显负面影响. López-Moreno 等^[17] 研究表明,欧洲 Alcántara 大坝运行后下游的水文干旱持续时间和强度更为严重. Wang 等^[18] 在滦河流域的研究也有类似发现,水利工程影响下滦河下游水文干旱发生频率、持续时间和严重程度均呈增加趋势. 因此,水库径流调节下的水文干旱情势研究已引起国内外学者的广泛关注,其演变规律与作用机制研究仍是亟待解决的重要科学问题.

三峡水库在防洪、发电、航运和供水等方面发挥了巨大综合效益,同时三峡水库影响下的长江中下游水文效应已引起学者的高度关注^[19]. 如 Li 等^[20] 采用两参数水量平衡模型模拟了三峡水库运行影响下宜昌站的径流过程,认为三峡水库蓄水运行导致下游宜昌站的水文干旱略有加重,但并非水文干旱加剧的主要因素; Zhang 等^[21] 研究发现由于长江来水减少使得 2003 年以来鄱阳湖夏、秋两季干旱有明显增加趋势; Yu 等^[22] 以寸滩站为参考分析了宜昌站水文干旱变化特征,发现 2003 年以后汛末期宜昌站水文干旱强度有所增加. 上述研究深化了人们对三峡水库蓄水运行下长江中下游水文情势变化的认识,但对水库影响下水文

干旱多时间尺度时空演变特征及其对气象干旱响应关系的关注仍显不足. 为此, 本文选用标准化蒸散指数 (*SPEI*) 和标准化径流指数 (*SRI*) 分别表征气象干旱和水文干旱, 分析三峡水库运行前后长江中下游宜昌、汉口和大通站水文干旱多时间尺度的演变规律, 探究水库调节下水文干旱对气象干旱的响应特征, 为区域水文干旱监测预警及水库抗旱调度提供参考.

1 研究区域概况和数据来源

长江流域总面积 180 万 km^2 , 大部分地区属于亚热带季风气候, 降水时间分配不均, 年内降水 60% 以上集中在 6—8 月, 且降水年际变化大. 长江流域地形复杂, 降水空间分布极不均匀, 多年平均降水量从西北部 290 mm 到东南部 2300 mm. 长江中下游地区地处东亚季风区, 降水时空变化很大, 旱涝灾害发生十分频繁. 同时, 该区域人口密集, 工农业发达, 取用水量逐年增加, 导致水资源的供需不平衡问题逐渐凸显. 近年来, 在全球气候变暖背景下, 长江中下游地区干旱呈现发生频率高、持续时间长、影响范围广的特点. 21 世纪以来, 长江中下游地区在 2001、2004、2006—2007、2011 和 2013 年发生了严重干旱事件^[23], 对区域经济社会可持续发展 and 生态安全产生了重要影响. 长江流域地理位置和气象水文站点分布如图 1 所示.

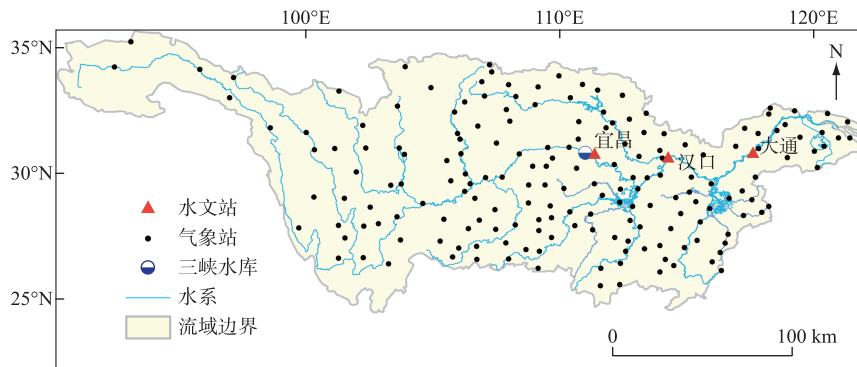


图 1 长江流域地理位置、气象和水文站点分布

Fig.1 Geographical location and distribution of meteorological and hydrological stations in the Yangtze River Basin

本文选用 1960—2016 年长江流域 183 个气象站的气温和降水资料, 气象数据来源于中国气象局科学数据共享服务网 (<http://www.cma.gov.cn/>). 面平均降水量和面平均潜在蒸散发量采用泰森多边形法计算. 1960—2016 年长江中下游宜昌、汉口和大通水文控制站的逐月流量数据来源于长江水利委员会水文局. 2005—2016 年三峡水库逐日出库、入库流量资料来自湖北省水文水资源局.

2 研究方法

2.1 标准化降水蒸散指数

Vicente-Serrano 等^[24] 在标准化降水指数 (*SPI*)^[25] 的基础上提出 *SPEI*, *SPEI* 是对降水量与潜在蒸散量的差值序列的累积概率值进行正态标准化后的指数. *SPEI* 计算步骤如下: (1) 采用 Thornthwaite 方法计算逐月潜在蒸散发量; (2) 计算逐月降水与蒸散量的差值, 构建不同时间尺度的累积序列; (3) 采用 Log-logistic 分布对时间序列进行拟合, 并对序列进行标准化转化, 获得不同时间尺度的 *SPEI* 指数. 本文以 1、3、6 和 12 个月时间尺度的 *SPEI* 指数分别表征月、季节、半年和年尺度的气象干旱变化, 利用泰森多边形方法计算宜昌、汉口和大通水文站控制流域的面平均降水量、潜在蒸散发量和 *SPEI* 值. 采用气象干旱等级国家标准^[26] 进行基于 *SPEI* 的干旱等级划分, 如表 1 所示.

2.2 标准化径流指数

Shukla 和 Wood^[27] 提出的 *SRI* 是以 *SPI* 为理论依据, 计算过程与 *SPI* 类似, 但 *SRI* 等级阈值的选取应考虑径流量的实际情况. 为此, 本文采用径流量距平百分率 (I_t) 的 2 种分类方法^[28-29] 对实测径流量进行丰枯

等级划分(表2),以便准确描述区域水文干旱情况. 基于SRI的水文干旱等级划分的步骤如下^[30]: (1) 利用2种分类方法计算不同时间尺度下各丰枯等级的径流量距平百分率以及平均百分率; (2) 选择枯水最低百分率为特旱概率, 枯水平均百分率中其余部分为重旱概率, 偏枯最低百分率为中旱概率, 偏枯平均百分率中其余部分为轻旱概率, 除此之外则为无旱概率, 由此计算得到特旱、重旱、中旱、轻旱和无旱各等级的出现概率分别为1%、5%、15%、5%和74%; (3) 采用伽马分布对SRI序列的频率分布进行拟合, 并绘制累积频率曲线, 最终得到基于SRI的水文干旱等级划分阈值(表1).

表1 干旱等级划分标准
Tab.1 Classification of drought grades

等级	类型	SPEI 值	SRI 值
1	无旱	$SPEI > -0.5$	$SRI > -0.67$
2	轻旱	$-1.0 < SPEI \leq -0.5$	$-0.84 < SRI \leq -0.67$
3	中旱	$-1.5 < SPEI \leq -1.0$	$-1.61 < SRI \leq -0.84$
4	重旱	$-2.0 < SPEI \leq -1.5$	$-2.32 < SRI \leq -1.61$
5	特旱	$SPEI \leq -2.0$	$SRI \leq -2.32$

表2 基于径流量的丰枯等级划分
Tab.2 Classification of wetness-dryness grades of runoff

分类方法	丰枯等级				
	丰水	偏丰	正常	偏枯	枯水
方法1	$I_r > 20\%$	$10\% < I_r \leq 20\%$	$-10\% \leq I_r \leq 10\%$	$-20\% \leq I_r < -10\%$	$I_r < -20\%$
方法2	$I_r > 30\%$	$10\% < I_r \leq 30\%$	$-10\% \leq I_r \leq 10\%$	$-30\% \leq I_r < -10\%$	$I_r < -30\%$

2.3 游程理论

采用游程理论^[31]识别气象和水文干旱事件, 确定每一场干旱发生的干旱特征变量, 如干旱历时、干旱烈度和烈度峰值等. 其中, 干旱历时指单次干旱所持续的时间, 干旱烈度指单次干旱事件中指标值与临界值差值的累积和, 烈度峰值指单次干旱事件中指标值与临界值差值的最大值. 在对于干旱过程的识别中, 需要对小干旱事件进行过滤以及多个干旱事件进行合并, 具体过程如下: (1) 设定3个临界值 R_0 、 R_1 和 R_2 (R_0 、 R_1 和 R_2 分别取0、-0.3 和 -0.5), 当干旱指标值 R 小于 R_1 时, 则初步认为此月为干旱月; (2) 若某干旱事件干旱历时为1且 R 大于 R_2 时, 则此月为小干旱事件, 可认为没有发生干旱, 将其剔除; (3) 若2次干旱过程间隔仅为1个月, 且间隔期的 R 值小于 R_0 , 则可以将二者合一, 看作1次干旱事件, 干旱历时为第1次事件开始至第2次事件结束(包括间隔期), 干旱烈度为两次干旱事件的烈度之和, 烈度峰值为两次干旱事件的烈度峰值最大值, 否则为2次独立干旱过程.

3 结果与讨论

3.1 水文干旱时间变化

通常时间尺度越小, 干旱指数随时间变化越显著, 波动幅度就越大. 12个月时间尺度的SRI变化相对稳定, 反映了水文干旱的年度变化特征. 由图2可知, 1960—2016年宜昌、汉口和大通站分别发生14、15和13次, 其中2003—2016年间分别发生7、4和5次, 3个站最大干旱历时分别为13、13和26个月, 分别出现在2006年8月—2007年8月、2006年9月—2007年9月和2006年9月—2008年10月. 总的来看, 3个站均在2006—2007年发生严重的干旱事件, 其中以宜昌站旱情最重, 其次是汉口站. 1979年较2006—2007年的旱情次之, 该年以汉口站旱情最为严重, 为特旱, 宜昌和大通站也在该年发生较为严重的干旱, 旱情均为重旱. 据相关文献报道^[32-33], 2006年6—8月, 长江上游出现极端高温干旱, 降水较常年同期偏少30%~50%, 导致长江上游来水量大幅下降; 8—10月洞庭湖和鄱阳湖水系持续近3个月干旱少雨, 较常年同期偏少40%~50%, 导致长江中下游水位持续走低, 宜昌和汉口站出现水文资料记录以来的历史最低值和次低值. Li等^[20]

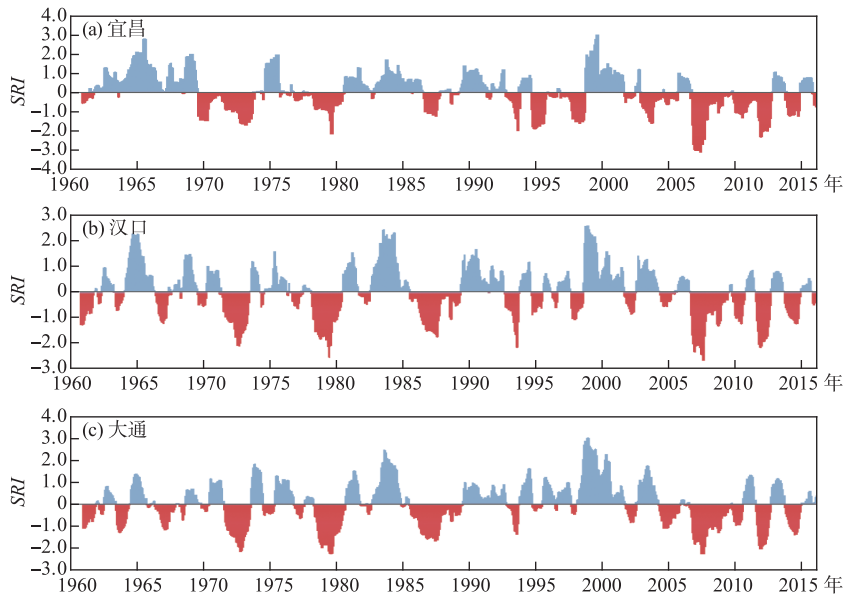


图2 宜昌(a)、汉口(b)和大通(c)水文站 12 个月时间尺度 *SRI* 的时间变化

Fig.2 Temporal variation of *SRI* series at the 12-month timescale for Yichang (a), Hankou (b) and Datong (c) hydrological stations

研究表明宜昌站与三峡水库入库控制站寸滩站的水文干旱指数序列呈现显著的正相关关系,认为降水异常偏少是造成 2006—2007 年长江中下游极端干旱事件的主要原因。

1 个月尺度 *SRI* 能反映水文干旱的年内变化特征。由图 3 来看,在 2003 年特别是 2009 年以后 3 个水文站冬季和春季各月 *SRI* 的绿色或黄色区域呈现明显增加趋势,而秋季各月 *SRI* 的红色区域呈小幅增加趋势,其中宜昌站表现尤为显著。枯水期三峡水库通过增加下泄流量减缓下游旱情,如 2009 年长江中下游地区遭遇严重旱情,三峡水库 10 月份停止试验性蓄水过程,加大出库流量,有效缓解了长江中下游的旱情。同时,汛后水库蓄水期(9 月中下旬至 10 月末)减少出库流量,有可能使长江中下游提前进入枯水季节。2003 年以来三峡水库采取分期蓄水运行方式^[34],2003 年 6 月—2006 年 9 月为围堰蓄水期,库水位为 135 (汛期)~139 m (非汛期);2006 年 9 月—2008 年 8 月为初期运行期,库水位为 143.9~156 m,2008 年汛末开始 175 m 试验性蓄水运用,因受 2009 年旱情影响,2010 年 10 月底才蓄至 175 m。总之,三峡水库蓄水运行后长江中下游控制站冬春季旱情明显趋缓,而秋季各站干旱状况略有加重。Lin 等^[35]研究表明,水库运行调控对郁江和红水河冬春季旱情的缓解作用显著,但秋季干旱状况明显加重,其中 9 月和 10 月红水河干旱烈度分别增加 41.9% 和 160.9%。

3.2 水库影响下水文干旱演变特征

3.2.1 水文干旱特征变量 为分析三峡水库影响下长江中下游控制站水文干旱演变特征,分别绘制三峡水库蓄水前后宜昌、汉口和大通站不同时间尺度水文干旱特征变量的箱线图(图 4)。由图 4 可以看出,蓄水前后 3 个水文站不同时间尺度水文干旱特征变量的变化虽然不完全趋于一致,但蓄水后各站干旱烈度和烈度峰值的均值总体呈增加趋势,干旱历时则表现为有增有减。就干旱历时而言,蓄水前后 3 个站干旱历时均值相对变幅总体较小,其中宜昌站 1 和 3 个月、汉口站 12 个月以及大通站 6 个月时间尺度的干旱历时平均值有所减少,3 个站其他时间尺度的干旱历时均值则呈增加趋势;从干旱烈度来看,除了大通站 6 和 12 个月尺度的干旱烈度均值略有减少以外,蓄水后各站其他时间尺度的干旱烈度均值总体呈现明显增加趋势,其中大通站 1 和 3 个月尺度干旱烈度均值的增幅明显高于宜昌和汉口站,而宜昌和汉口站 6 和 12 个月尺度干旱烈度均值的相对变幅则高于大通站;就烈度峰值而言,蓄水后 3 个站不同时间尺度的烈度峰值均值整体表现

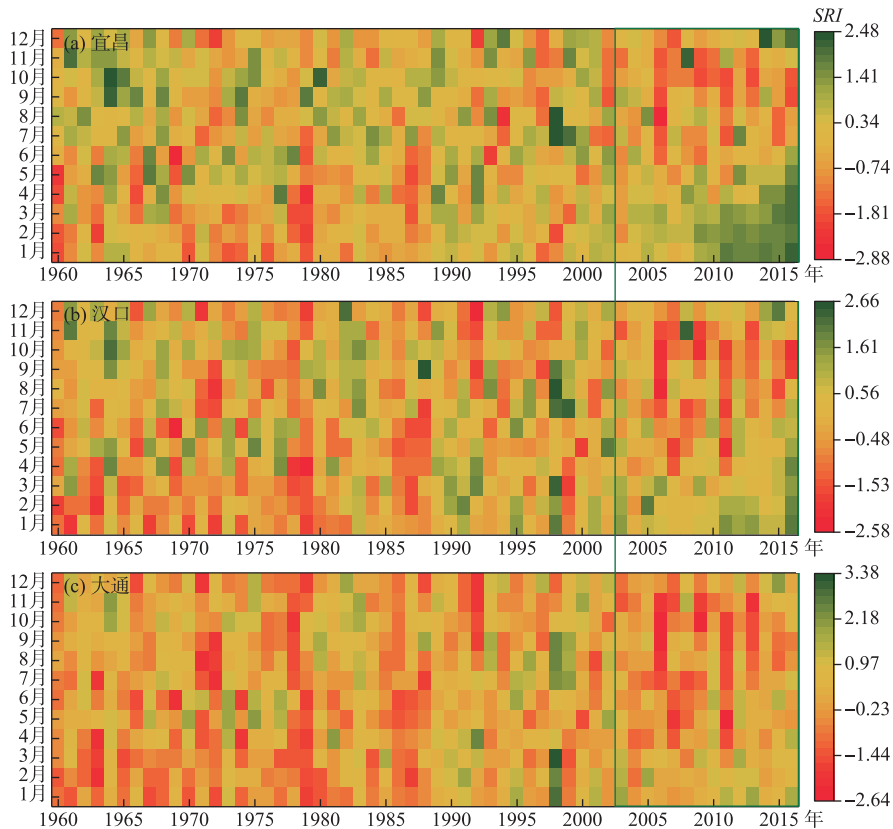


图3 宜昌(a)、汉口(b)和大通(c)水文站1个月时间尺度 SRI 热点图
(颜色条表示 SRI 值,绿色和黄色表示无旱或轻旱,红色表示重旱或特旱)

Fig.3 Heatmap of the monthly SRI series at Yichang (a), Hankou (b) and Datong (c) hydrological stations

为增加趋势,仅汉口站12个月时间尺度的烈度峰值均值小幅减少。

总体而言,蓄水后3个站干旱烈度和烈度峰值的平均值整体明显增加,如蓄水前6个月时间尺度宜昌站干旱烈度和烈度峰值的均值分别为1.92和0.64,蓄水后宜昌站干旱烈度和烈度峰值的均值分别增至3.74和0.90,增幅分别为94.8%和40.6%;蓄水前6个月尺度汉口站干旱烈度和烈度峰值的均值分别为1.89和0.53,蓄水后汉口站干旱烈度和烈度峰值的均值分别增至4.08和0.87,增幅分别为115.9%和64.2%,说明水库蓄水后干早期下游河道缺水总量和最大缺水增加,这可能叠加了极端降水事件增加和人类活动干扰(如水库径流调节、河道外取水等)的共同影响。另外,从蓄水前后3个站干旱特征变量的空间演变趋势来看,短时间尺度(1和3个月)干旱历时、烈度和烈度峰值的变幅总体呈现沿程增加趋势,而长时间尺度(6和12个月)干旱特征变量的变幅整体表现为沿程减少趋势。

3.2.2 水文干旱发生频率 从图5可知,1、3和6个月时间尺度上,蓄水后宜昌、汉口和大通站轻旱、中旱和重旱发生频率均有所减少,其中中旱发生频率的减幅最大,其次为轻旱;同时,蓄水后3个站3和6个月时间尺度特旱发生频率则略有增加;12个月时间尺度上,蓄水后宜昌站轻旱和特旱发生频率增加,中旱和重旱发生频率减少;汉口站轻旱、中旱和重旱发生频率均有下降,特旱发生频率略有增加;大通与汉口站类似,轻旱、中旱和重旱发生频率均有下降,特旱发生频率不变。总的来说,三峡水库蓄水后3个站中旱和重旱发生频率均呈减少趋势,其中中旱减幅明显,而特旱发生频率则总体表现为小幅增加趋势。Li等^[20]和Yu等^[22]的研究结果显示,三峡水库蓄水后宜昌站特旱发生频率整体表现为增加趋势,这可能主要与流域降水异常偏少有关。

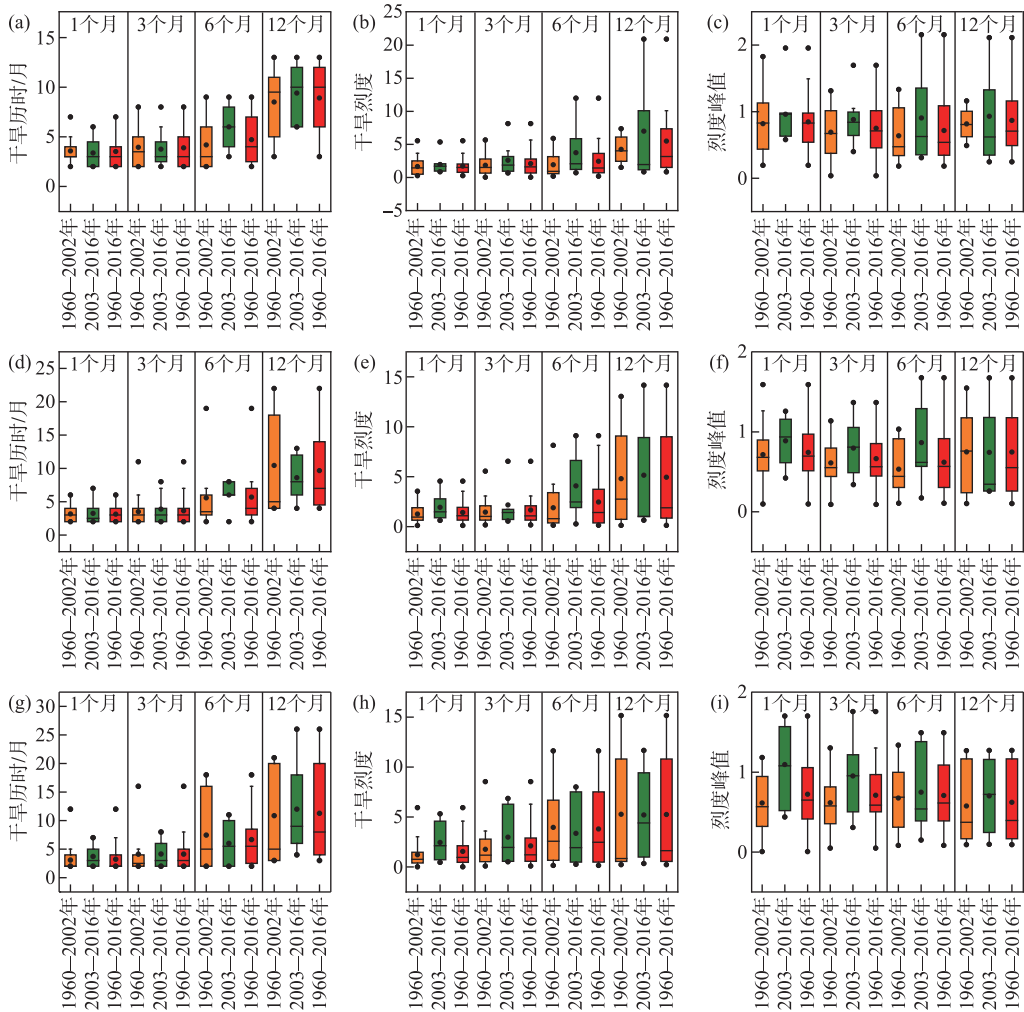


图4 三峡水库运行影响前后宜昌(a~c)、汉口(d~f)和大通(g~i)水文站的水文干旱特征变量箱线图

Fig.4 Box-plots of hydrological drought variables at Yichang (a~c), Hankou (d~f) and Datong (g~i) hydrological stations before and after the operation of the Three Gorges Reservoir (TGR)

3.3 水库影响下水文干旱对气象干旱的响应

3.3.1 水文干旱与气象干旱的相关性 由图6可知,随着时间尺度的增加,三峡水库蓄水后宜昌、汉口和大通站 SRI 与 $SPEI$ 的相关系数均表现为增加趋势,12个月时间尺度的相关系数达到最高,宜昌、汉口和大通站分别为0.85、0.80和0.79,均通过0.01显著性水平检验,说明长时间尺度(12个月)水文干旱对气象干旱的响应较为敏感.已有研究表明^[36],1个月尺度的干旱指数能够准确反映该时期土壤含水量的变化情况,而12个月尺度的干旱指数则能很好地反映河川径流量、地下水含水量和湖库蓄水量状况.从三峡水库蓄水前后 SRI 与 $SPEI$ 相关系数的变化趋势来看,蓄水后各站1和3个月时间尺度的相关性明显减小,但随着时间尺度的增加而相关性迅速增大,3个站12个月时间尺度的相关系数均略高于蓄水前,说明水库调节作用导致下游河道径流对降水变化的响应关系发生明显变化,并且不同时间尺度上的响应敏感性存在差异.

由图7可知,1960—2016年长江中下游宜昌、汉口和大通站 SRI 和 $SPEI$ 的相关系数呈现较为明显的年内变化,其中短时间尺度(1、3个月)的年内变化较为显著,且汛期(5—9月)的相关系数总体高于非汛期(10—4月),这可能与汛期集中降水相关,使得汛期径流对降水的响应通常明显快于非汛期;而长时间尺度

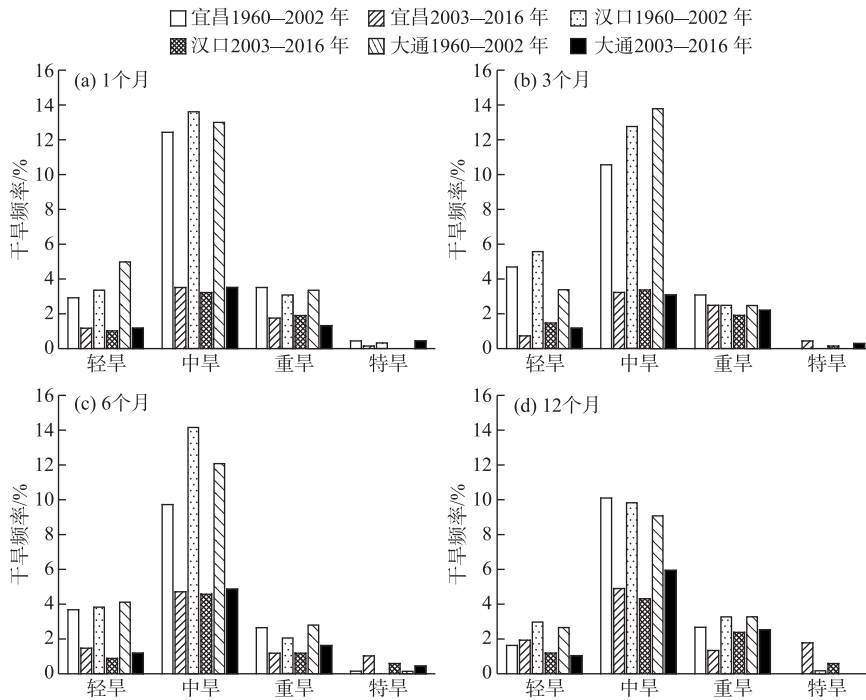


图5 三峡水库运行前后宜昌、汉口和大通水文站不同时间尺度水文干旱发生频率
Fig.5 Hydrological drought frequency at different timescales at Yichang, Hankou and Datong hydrological stations during the pre-TGR and the post-TGR periods

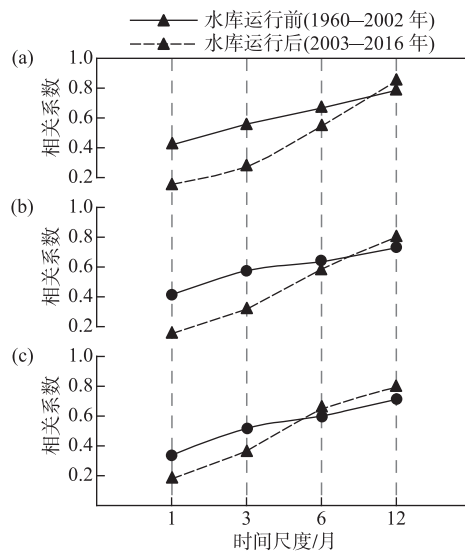


图6 三峡水库蓄水前后宜昌(a)、汉口(b)和大通(c)水文站 SRI 与 SPEI 的相关系数
Fig.6 Correlation coefficients between SRI and SPEI series at Yichang (a), Hankou (b) and Datong (c) hydrological stations during the pre-TGR and the post-TGR periods

(6、12个月)尤其是12个月尺度的年内变化相对较小,且相关系数总体大于短时间尺度.从蓄水前后各站点 *SRI* 和 *SPEI* 的年内相关系数的变化来看,蓄水后各站的短时间尺度 *SRI* 和 *SPEI* 相关系数明显减小,冬季表现尤为显著,而长时间尺度的变化不大或略有增加,这可能是由于随时间尺度的增加,干旱历时延长,水库的径流调节效应逐渐减弱,使得气象干旱转化为水文干旱的可能性增加. Wu 等^[16] 研究表明,新丰江水库蓄水后东江中游河源站 1、3 个月尺度水文干旱和气象干旱相关性显著降低.

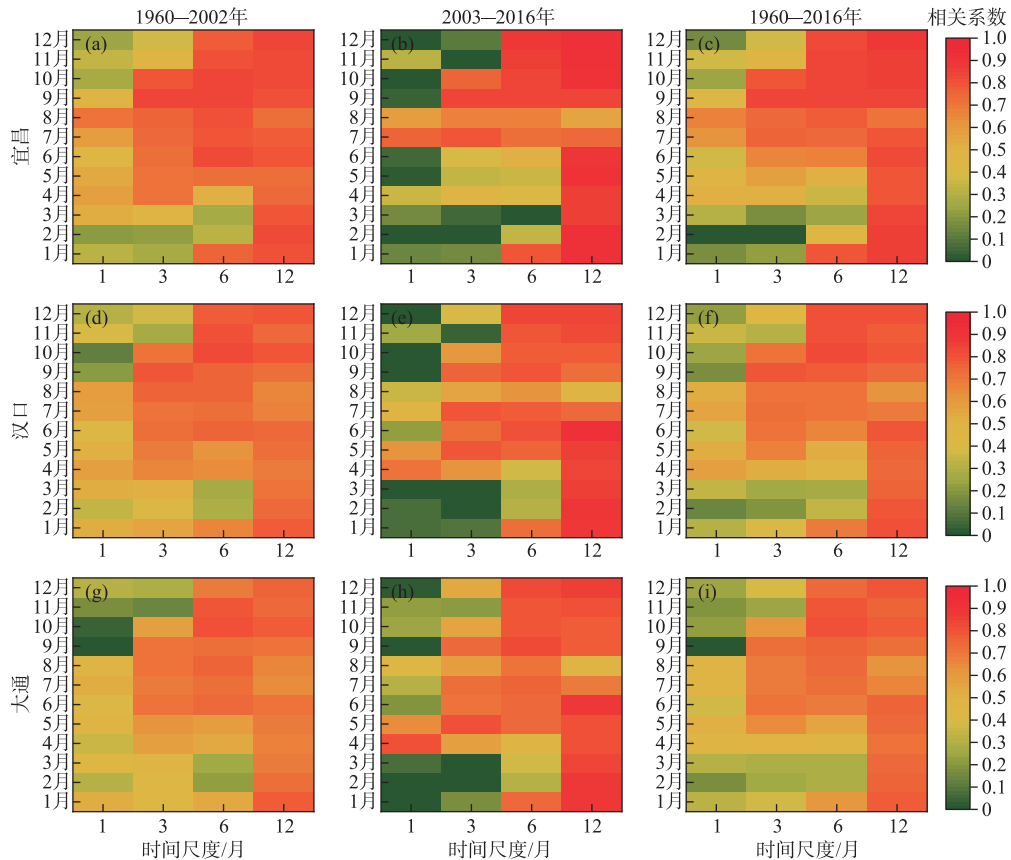


图7 三峡水库蓄水前后宜昌(a~c)、汉口(d~f)和大通站(g~i)水文站不同时间尺度 *SRI* 与 *SPEI* 年内相关系数

Fig.7 Intra-annual correlation coefficients between *SRI* and *SPEI* series at different timescales for Yichang (a~c), Hankou (d~f) and Datong (g~i) hydrological stations during the pre-TGR and the post-TGR periods

3.3.2 水文干旱对气象干旱响应的时滞性 通常,气象干旱与水文干旱二者并不同时发生,存在一定的滞后现象.从图8可以看出,3个月尺度下3个站水文干旱滞后于气象干旱的平均天数有增有减,蓄水前宜昌、汉口和大通站的平均滞后天数分别为33、29和33 d,蓄水后3个站的平均滞后天数分别为26、38和48 d,说明水库影响下宜昌站滞后天数有所减少,汉口和大通站滞后天数则呈现较明显增加;6个月尺度下各站的平均滞后天数均显著增加,其中汉口和大通站增幅尤为明显,分别从蓄水前的8、10 d增加到蓄水后的73和132 d;12个月尺度下宜昌站的平均滞后天数略有减少,汉口和大通站的平均滞后天数均明显增加.总的来看,宜昌站水文干旱滞后于气象干旱天数的变幅相对较小,而汉口和大通站的滞后天数则显著增加,说明三峡水库蓄水运行对径流过程的影响沿程逐渐减弱,使得下游各站水文干旱的响应时间逐渐延长.一般而言,气象干旱发展和结束较快,水文干旱则是气象干旱进一步发展的结果,延迟时间不仅受气象因子影响,还取决于流域下垫面条件和人类活动的干扰. Zhang 等^[15] 研究显示,由于淮河流域沙河上游昭平台水库的调蓄影响,

水库下游水文干旱滞后于气象干旱的时间从建库前不到1个月延长到6~7个月。

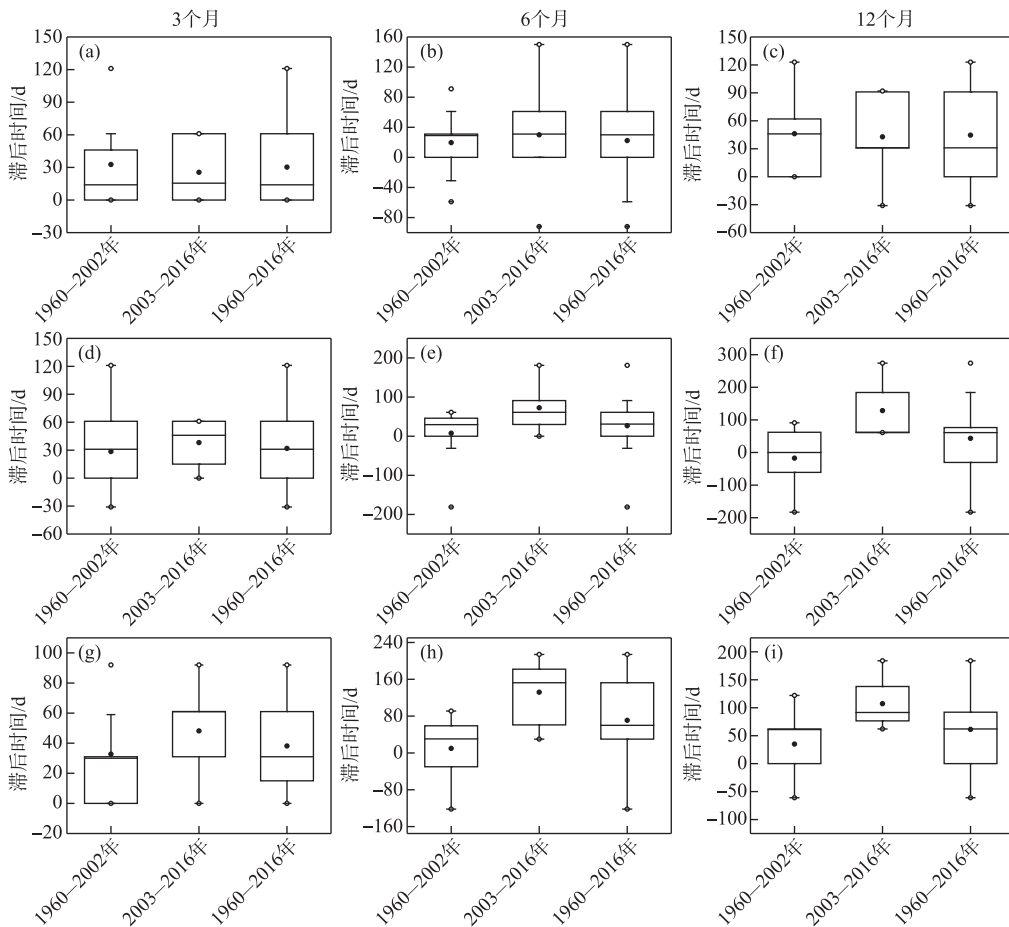


图8 三峡水库蓄水前后宜昌(a~c)、汉口(d~f)和大通(g~i)水文站不同时间尺度水文干旱滞后于气象干旱的平均天数

Fig.8 The average days of hydrological drought lagging behind meteorological drought at Yichang (a~c), Hankou (d~f) and Datong (g~i) hydrological stations at different timescales during the pre-TGR and the post-TGR periods

3.4 讨论

为进一步探究三峡水库蓄水运行对下游水文干旱的影响,利用2006年8月—2012年6月三峡水库月平均出、入库流量及相应时段宜昌站 *SRI* 值进行比较,如图9所示。2006年8月—2007年8月长江流域发生严重干旱事件,2006年8月宜昌站 *SRI* 值达-1.71,达到重旱水平,2006年9—11月实施初期蓄水方案,三峡水库月平均入库流量大于出库流量,宜昌站的旱情有所加重,11月后入库和出库流量基本达到平衡。随着长江中下游旱情持续加剧,2007年2—3月宜昌站旱情达到特旱水平,三峡水库实施应急补水调度,增加水库下泄流量,有效缓解了水库下游的旱情。自2008年三峡水库启动175 m试验性蓄水以来,每年水库水位在145~175 m之间变动,5月下旬—6月中旬库水位由155 m降至汛限水位145 m,出库流量增加,实施腾空库容预泄调度;7—8月水库按防洪限制水位145 m运行,维持出、入库流量平衡,仅在发生较大洪水时削峰调洪,洪峰过后再降至145 m,实施防洪补偿调度;9月中旬—10月下旬库水位从145 m逐渐升高至正常蓄水位175 m,出库流量减少,实施蓄水运行调度;12月—次年3月库水位从175 m逐渐下降至155 m,持续增加出库

流量,实施枯期补水调度,以满足下游供水、航运和生态需求.由此来看,三峡水库运行能减少蓄水期和汛末径流量,增加枯水期径流量,即通过蓄洪补枯作用可以减轻冬春出现的旱情,但也有可能因汛末蓄水减少河道径流量,加重下游水文干旱程度,使得洞庭湖和鄱阳湖枯水期提前^[19,37],加剧汛末蓄水和下游抗旱补水的矛盾,因此选择三峡水库合理的汛末蓄水时机有利于充分发挥水库的整体效益.

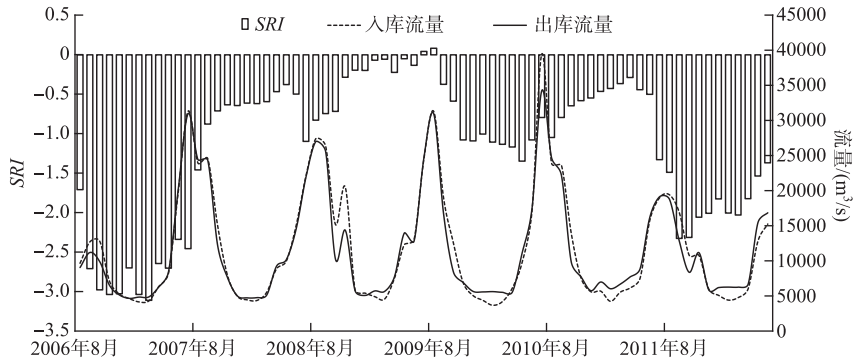


图9 2006年8月—2012年6月三峡水库月平均出、入库流量及宜昌站SRI的时间变化

Fig.9 Monthly average inflow and outflow of the TGR and temporal variation in SRI series at Yichang station from August 2006 to June 2012

由图10可知,在干旱期(发生干旱的月份),三峡水库月平均入库流量、出库流量及宜昌站月平均流量分别为10715、10801和10767 m^3/s ,三峡水库出库流量大于入库流量,水库下游宜昌站月平均流量高于水库入库流量,即在水库的调蓄作用下,一定程度减缓了宜昌站的水文干旱状况.在非干旱期(未发生干旱的月份),三峡水库月平均入库流量、出库流量及宜昌站月平流量分别为13514、13354和13411 m^3/s ,三峡水库入库流量大于出库流量,即水库在丰水时期合理蓄水以应对枯水期水库下游的干旱缺水问题.

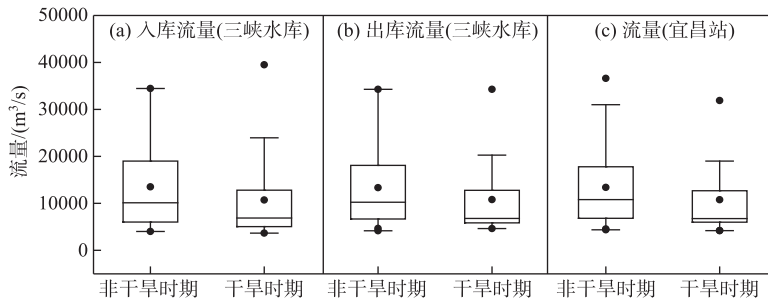


图10 2005—2016年干旱期和非干旱期三峡水库月平均出、入库流量及宜昌站月平均流量

Fig.10 Monthly average inflow and outflow of the TGR and monthly average streamflow of Yichang station during drought and non-drought periods from 2005 to 2016

总的来说,水库通过径流调节来增加干旱期可供水量,对缓解旱情具有重要作用,但是受水库运行方式、流域水资源供需矛盾等因素的影响,水库运行对下游水文干旱的负面影响不容忽视.如流域上游地区通过水库径流调节作用来满足区域用水需求,使得河道径流量减少,将加重下游地区的水文干旱程度,导致干旱强度与影响在空间上发生转移^[9].因此,加强水利工程规划与运行管理对于变化环境下干旱风险应对十分必要,避免过度依赖水库而增加供水系统脆弱性,从而增加极端干旱造成的潜在损失^[38].

4 结论

采用SPEI和SRI分别表征气象干旱和水文干旱,分析了三峡水库蓄水运行前后长江中下游宜昌、汉口

和大通站的水文干旱演变特征,探讨了水文干旱与气象干旱的相关性及滞后效应,得到以下主要结论:

1) 三峡水库运行改变了长江中下游水文干旱情势,冬春季旱情明显趋缓,而秋季干旱状况略有加重;蓄水前后3个站干旱历时变幅相对较小,而干旱烈度和烈度峰值增幅较大,反映了干旱时期下游河道缺水量和最大缺水量明显增加.同时,各站短时间尺度(1、3个月)干旱特征变量的变幅总体呈现沿程递增趋势,而长时间尺度(6、12个月)的变幅整体表现为沿程递减趋势.

2) 三峡水库蓄水后各站 *SRI* 与 *SPEI* 的相关性减小,但随时间尺度的增加而相关性明显增大,12个月时间尺度的相关系数达到最大并略高于蓄水前;年内相关性上,短时间尺度的年内相关系数明显减小,冬季表现尤为突出,而长时间尺度的变化不大或略有增加,说明随着时间尺度的增加,水库的径流调节效应逐渐减弱,使得气象干旱转化为水文干旱的可能性增加.

3) 三峡水库影响下宜昌站水文干旱滞后于气象干旱天数的变幅不大,而汉口和大通站的滞后天数则显著增加,且滞后天数整体表现为沿程递增趋势,说明水库蓄水运行对下游径流过程的影响沿程逐渐降低,导致水文干旱对气象干旱的响应时间沿程自上而下有所延长.

4) 三峡水库通过蓄丰补枯有效缓解了长江中下游冬春季旱情,但有可能加重汛末蓄水和下游抗旱供水的矛盾,建议加强水库运行管理及优化调度,充分发挥三峡水库的综合效益.

水文干旱受气候变化和人类活动双重驱动的影响.气候变化通过改变区域气温、降水、蒸散发等要素导致气象干旱发生,进而影响下垫面水分收支状况,引发流域水文干旱.而水库修建、跨流域调水、土地利用与覆被变化(LUCC)等人类活动对水循环过程产生深刻影响,从而影响水文干旱的形成和发展.本文仅分析大型水库蓄水运行影响下水文干旱演变特征,今后还需要进一步定量研究各驱动因素对水文干旱演变的作用机制及贡献率.

5 参考文献

- [1] Ault TR. On the essentials of drought in a changing climate. *Science*, 2020, **368**(6488): 256-260. DOI: 10.1126/science.aaz5492.
- [2] Su BD, Huang JL, Fischer T *et al.* Drought losses in China might double between the 1.5°C and 2.0°C warming. *PNAS*, 2018, **115**(42): 10600-10605. DOI: 10.1073/pnas.1802129115.
- [3] AghaKouchak A, Mirchi A, Madani K *et al.* Anthropogenic drought: Definition, challenges, and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 2021, **59**(2): 1-23. DOI: 10.1029/2019rg000683.
- [4] Mishra AK, Singh VP. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 2010, **391**(1/2): 202-216. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- [5] Ding YB, Gong XL, Xing ZX *et al.* Attribution of meteorological, hydrological and agricultural drought propagation in different climatic regions of China. *Agricultural Water Management*, 2021, **255**: 106996. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106996.
- [6] Milly PCD, Betancourt J, Falkenmark M *et al.* Climate change. Stationarity is dead: Whither water management?. *Science*, 2008, **319**(5863): 573-574. DOI: 10.1126/science.1151915.
- [7] Wang YX, Duan LM, Liu TX *et al.* A Non-stationary Standardized Streamflow Index for hydrological drought using climate and human-induced indices as covariates. *Science of the Total Environment*, 2020, **699**: 134278. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134278.
- [8] Li M, Li JZ, Feng P *et al.* Construction of time-dependent drought index under changing environment and its application. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, **49**(11): 1386-1395. [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. 水利学报, 2018, **49**(11): 1386-1395.]
- [9] Wang W, Wang JS, Tao YY *et al.* Review of human impacts on formation and development of hydrologic drought. *Journal of China Hydrology*, 2020, **40**(3): 1-8. [王文, 王靖娟, 陶奕源等. 人类活动对水文干旱形成与发展的影响研究进展. 水文, 2020, **40**(3): 1-8.]
- [10] He XG, Wada Y, Wanders N *et al.* Intensification of hydrological drought in California by human water management. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(4): 1777-1785. DOI: 10.1002/2016gl071665.
- [11] Tu XJ, Du XX, Du YL *et al.* Multivariate joint design of hydrological drought and impact of water reservoirs. *J Lake Sci*,

- 2018, **30**(2): 509-518. DOI: 10.18307/2018.0222. [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. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 509-518.]
- [12] Wu JF, Chen XH, Yu ZX *et al.* Assessing the impact of human regulations on hydrological drought development and recovery based on a ‘simulated-observed’ comparison of the SWAT model. *Journal of Hydrology*, 2019, **577**: 123990. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.123990.
- [13] Wen L, Rogers K, Ling J *et al.* The impacts of river regulation and water diversion on the hydrological drought characteristics in the Lower Murrumbidgee River, Australia. *Journal of Hydrology*, 2011, **405**(3/4): 382-391. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.05.037.
- [14] Rangelroft S, Van loon AF, Maureira H *et al.* Multi-method assessment of reservoir effects on hydrological droughts in an arid region. *Earth System Dynamics Discussions*, 2016: 1-32. DOI: 10.5194/esd-2016-57.
- [15] Zhang RR, Chen X, Zhang ZC *et al.* Evolution of hydrological drought under the regulation of two reservoirs in the headwater basin of the Huaihe River, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, **29**(2): 487-499. DOI: 10.1007/s00477-014-0987-z.
- [16] Wu JF, Liu ZY, Yao HX *et al.* Impacts of reservoir operations on multi-scale correlations between hydrological drought and meteorological drought. *Journal of Hydrology*, 2018, **563**: 726-736. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.06.053.
- [17] López-Moreno JI, Vicente-Serrano SM, Beguería S *et al.* Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: The Lower River Tagus, Spain and Portugal. *Water Resources Research*, 2009, **45**(2): W02405. DOI: 10.1029/2008wr007198.
- [18] Wang YX, Li JZ, Zhang T *et al.* Changes in drought propagation under the regulation of reservoirs and water diversion. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, **138**(1/2): 701-711. DOI: 10.1007/s00704-019-02839-3.
- [19] Zhou JJ, Zhang M. Effect of dams on the regime of the mid-Lower Yangtze River runoff and countermeasures. *J Lake Sci*, 2018, **30**(6): 1471-1488. DOI: 10.18307/2018.0601. [周建军, 张曼. 近年长江中下游径流节律变化、效应与修复对策. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1471-1488.]
- [20] Li S, Xiong LH, Dong LH *et al.* Effects of the Three Gorges Reservoir on the hydrological droughts at the downstream Yichang Station during 2003–2011. *Hydrological Processes*, 2013, **27**(26): 3981-3993. DOI: 10.1002/hyp.9541.
- [21] Zhang D, Zhang Q, Qiu JM *et al.* Intensification of hydrological drought due to human activity in the middle reaches of the Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 2018, **637/638**: 1432-1442. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.121.
- [22] Yu MX, Liu XL, Li QF. Impacts of the Three Gorges Reservoir on its immediate downstream hydrological drought regime during 1950–2016. *Natural Hazards*, 2019, **96**(1): 413-430. DOI: 10.1007/s11069-018-3549-8.
- [23] Deng CL, She DX, Zhang LP *et al.* Characteristics of drought events using three-dimensional graph connectedness recognition method in the Yangtze River Basin, China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, **37**(11): 131-139. [邓翠玲, 余敦先, 张利平等. 基于图像三维连通性识别方法的长江流域干旱事件特征. 农业工程学报, 2021, **37**(11): 131-139.]
- [24] Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, **23**(7): 1696-1718. DOI: 10.1175/2009jcli2909.1.
- [25] McKeen TB, Doesken NJ, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA: American Meteorological Society, 1993: 179-184.
- [26] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, Standardization Administration of People’s Republic of China eds. Grades of meteorological drought (GB/T 20481–2006). Beijing: Standards Press of China, 2006. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级 (GB/T 20481—2006). 北京: 中国标准出版社, 2006.]
- [27] Shukla S, Wood AW. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(2): L02405. DOI: 10.1029/2007gl032487.
- [28] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, Standardization Administration of People’s Republic of China eds. Standard for hydrological information and hydrological forecasting (GB/T 22482-2008). Beijing: Standards Press of China, 2008. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水文情报预报规范 (GB/T 22482—2008). 北京: 中国标准出版社, 2008.]

- [29] Wang JS, Guo JY, Zhou YW *et al.* Progress and prospect on drought indices research. *Arid Land Geography*, 2007, **30**(1): 60-65. [王劲松, 郭江勇, 周跃武等. 干旱指标研究的进展与展望. 干旱区地理, 2007, **30**(1): 60-65.]
- [30] Zhang XM, Su XL, Zhang GX. Classifying drought in Heihe Basin using SRI index and Copula function. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, **38**(5): 107-113. [张向明, 粟晓玲, 张更喜. 基于 SRI 与 Copula 函数的黑河流域水文干旱等级划分及特征分析. 灌溉排水学报, 2019, **38**(5): 107-113.]
- [31] Yevjevich V. Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts [Dissertation]. Fort Collins: Colorado State University, 1967.
- [32] Peng JB, Zhang QY, Bueh CL. On the characteristics and possible causes of a severe drought and heat wave in the Sichuan-Chongqing Region in 2006. *Climatic and Environmental Research*, 2007, **12**(3): 464-474. [彭京备, 张庆云, 布和朝鲁. 2006 年川渝地区高温干旱特征及其成因分析. 气候与环境研究, 2007, **12**(3): 464-474.]
- [33] Zhu JR, Wu H, Li L *et al.* Saltwater intrusion in the Changjiang Estuary in the extremely drought hydrological year 2006. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2010, (4): 1-6, 25. [朱建荣, 吴辉, 李路等. 极端干旱水文年(2006)中长江河口的盐水入侵. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2010, (4): 1-6, 25.]
- [34] Hu CH, Fang CM. Research on sediment problem solutions for the Three Gorges Project and its operational effects. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, **47**(8): 832-844. DOI: 10.1360/N092017-00098. [胡春宏, 方春明. 三峡工程泥沙问题解决途径与运行效果研究. 中国科学: 技术科学, 2017, **47**(8): 832-844.]
- [35] Lin QX, Wu ZY, Singh VP *et al.* Correlation between hydrological drought, climatic factors, reservoir operation, and vegetation cover in the Xijiang Basin, South China. *Journal of Hydrology*, 2017, **549**: 512-524. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.04.020.
- [36] Hayes M, Svoboda M, Wall N *et al.* The Lincoln declaration on drought indices: Universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, **92**(4): 485-488. DOI: 10.1175/2010bams3103.1.
- [37] Lai XJ, Jiang JH, Huang Q. Pattern of impoundment effects and influencing mechanism of Three Gorges Project on water regime of Lake Dongting. *J Lake Sci*, 2012, **24**(2): 178-184. DOI: 10.18307/2012.0202. [赖锡军, 姜加虎, 黄群. 三峡工程蓄水对洞庭湖水情的影响格局及其作用机制. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 178-184.]
- [38] Di Baldassarre G, Wanders N, AghaKouchak A *et al.* Water shortages worsened by reservoir effects. *Nature Sustainability*, 2018, **1**(11): 617-622. DOI: 10.1038/s41893-018-0159-0.