J. Lake Sci.(湖泊科学),2023,**35**(2):696-708
DOI 10.18307/2023.0226

三峡水库运行前后长江中下游干流及两湖的径流过程变化*

周建银[1,2**],高 菲[3],元 媛[1,2],黄仁勇[1,2],闫 霞[1,2]
(1:长江水利委员会长江科学院,武汉 430010)
(2:水利部长江中下游河湖治理与防洪重点实验室,武汉 430010)
(3:长江生态环保集团有限公司,武汉 430064)

摘 要:为探索三峡水库运行前后长江中下游干流及两湖径流过程的变化及其驱动因素,利用宜昌、监利、大通、七里山、湖口共5个水文站的流量资料,分析了各站径流过程的变化特征及其成因。结论:(1)各站年径流量均减少,但除七里山站之外,其它各站减少比例均小于10%且变化不显著;(2)干流各站月径流量最大减幅发生在10月,而七里山站、湖口站分别发生在7月、4月;(3)干流各站月径流量最大增幅发生在3月,而七里山站、湖口站分别发生在1月、6月;(4)宜昌站,1-4月径流量增加是三峡水库入库径流增加和水库调度的共同作用结果,6-8月径流量减少的主因是三峡水库入库径流量减少,5、9、10月径流量变化的主因是三峡水库调度;(5)监利站,径流量的变化与宜昌站表现出高度的一致性,但冬季各月径流量的增幅均大于宜昌站;(6)大通站,4-6月径流量变化方向与湖口站一致,其它月份变化方向均与宜昌站一致。(7)七里山站,7月径流量减少的主因是洞庭湖流域来水减少,9、10月径流量减少的主要原因是荆江分流减少,但洞庭湖流域来水减少也是重要原因。(8)湖口站,4、5月径流量减少的主因是流域降水减少,9、10月径流量减少的主要原因是鄱阳湖汛期水位降低、低水位提前、蓄水量减少。
关键词:三峡水库;长江中下游;径流量;江湖关系;气候变化

Runoff variation in the middle and lower branches of Yangtze River and the two lakes (Dongting and Poyang Lake) before and after Three Gorges Reservoir's operation*

Zhou Jianyin[1,2**], Gao Fei[3], Yuan Yuan[1,2], Huang Renyong[1,2] & Yan Xia[1,2]
(1: *Changjiang River Scientific Research Institute*, *Changjiang Water Resources Commission*, *Wuhan* 430010, *P.R.China*)
(2: *Key Laboratory of River Regulation and Flood Control in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River of Ministry of Water Resources*, *Wuhan* 430010, *P. R.China*)
(3: *Yangtze Ecology and Environment Co.*, *Ltd.*, *Wuhan* 430064, *P.R.China*)

Abstract: To explore and explain the changes of runoff process in the middle and lower Yangtze River mainstream and the two lakes of Dongting and Poyang before and after the operation of the Three Gorges Reservoir (TGR), the runoff data of five hydrological stations, which are Yichang, Jianli, Datong, Qilishan, and Hukou, were used. The stations of Yichang, Jianli, and Datong locate along the mainstream of the Yangtze River, while the other two stations locate at the exit of the Dongting and Poyang Lake, respectively. The runoff changes at each station before and after the TGR's operation and its causes were analyzed. Conclusions include: (1) The annual runoff at each station decreased, except at Qilishan Station, the reduction ratio of runoff at other stations was less than 10% and their changes were not significant; (2) The maximum decrease in monthly runoff at each mainstream station occurred in October, except that at Qilishan Station and Hukou Station it occurred in July and April, respectively; (3) The maximum increase in monthly runoff at each mainstream station occurred in March, while at Qilishan Station and Hukou Station it occurred in January and June, respectively; (4) At Yichang Station, the increase of monthly runoff from January to April resulted from both the inflow increment of the TGR and its operation. The main reason for the decrease in monthly runoff from June to Au-

* 2022-08-01 收稿;2022-11-21 收修改稿。
国家自然科学基金项目(52130903)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CKSF2021439/HL)和水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室开放基金项目(2021SS01)联合资助。
** 通信作者;E-mail:zhoujianyin@mail.crsri.cn。

gust was the decrease in the inflow of the TGR. The main reason for the runoff change in May, September and October was the operation of the TGR; (5) At Jianli Station, the change of runoff was highly consistent with that at Yichang Station, but the increase of runoff at Jianli Station in each month in winter was greater than that at Yichang Station; (6) At Datong Station, from April to June the change direction of monthly runoff was the same as that at Hukou Station, and the change direction of other months was the same as that at Yichang Station. (7) At Qilishan Station, the main reason for the runoff reductions in July was the reduction of rainfall in Lake Dongting basin, and while the reduction of the diversion from Jingjiang River is the main cause to the runoff reduction in September and October, the reduction of rainfall in Lake Dongting basin also played an important role; (8) At Hukou Station, the decreases in runoff in April and May resulted from the reduction of rainfall in Lake Poyang basin, while the main reason for the runoff decreases in September and October was the reduction of water level in Lake Poyang during the previous months, which led to the early low water level season and the reduction of water storage.

Keywords: Three Gorges Reservoir; middle and lower reaches of the Yangtze River; runoff; river-lake relationship; climate change

自然和人为因素均可能改变河流的径流过程。由于三峡水库巨大的调节能力、持续整年的调度过程、特殊的地理位置,其运用极大地改变了长江中下游的水文节律[1-2]。

以径流量为例,三峡水库拦洪蓄水时,长江干流流量比天然减少,引发了鄱阳湖、洞庭湖出流量的增加[2-3]、荆江分流减少[4]、长江倒灌鄱阳湖水量减少[5]等现象;反之,三峡水库补水下泄时,下泄流量比天然增加,可引发鄱阳湖、洞庭湖出流量减少[3,6]以及荆江分流量增加[7]等现象。对长江下游而言,三峡水库下泄径流量和两湖径流量之间的流量互补关系,可使得下游径流量变化幅度远小于三峡水库运用所产生的直接影响[2]。

在水位方面,三峡水库运行的影响也同样显著,且更为复杂。三峡水库运行后,由于枯水河槽冲刷,长江中下游同流量下枯水位下降,但由于三峡水库枯季补水,长江中下游年最小流量增大、最低水位升高;而洪水时相同流量下水位有所升高,但由于三峡水库防洪调度,长江中下游年最大洪峰流量减小、最高洪水位降低[8-9]。与流量变化相应,三峡水库运行后,通江湖泊水位变幅减小:三峡水库蓄水期,通江湖泊出口水位降低,湖泊蓄水量减少;三峡水库补水期,当流量增大对水位升高的影响超过河槽冲刷的影响,通江湖泊出口水位升高,湖泊蓄水量增大[5,10-11]。

长江中下游水文特征不仅受到三峡水库水沙调度的直接影响,还受到河床调整、江湖关系等间接因素影响,以及气候、流域下垫面等其它因素的影响。在总结现象规律之外,前人也对长江中下游水文特征变化的细节和影响机制进行了探索。柴元方等[9]定量分析了河道冲淤、下游控制水位及河床综合糙率等变化对分级流量—水位变化的影响程度,认为河道冲刷是引起同流量下枯水位下降的主控因素,河床综合糙率增大是同流量下洪水位抬升的主控因素。许继军与陈进[12]认为三峡水库汛末蓄水(10－11 月份)将降低湖口水位,而其它月份三峡水库运行对鄱阳湖影响较少。赵军凯等[13]分析了长江中下游的河湖水量交换关系,认为长江干流径流量的大小是河湖水量交换过程的主控因素。赵贵章等[14]分析了两湖水文变化的规律和影响因素,认为鄱阳湖水情(主要是水位)变化的敏感程度要强于洞庭湖,对长江干流的补水期洞庭湖为 4－10 月,鄱阳湖为 3－8 月。

长江中下游水文过程的影响因素和机制是复杂且变化的。随着三峡水库运行时间的增长,三峡水库运行对长江中下游尤其是通江湖泊的影响效应逐渐清晰。水文实测资料的不断积累,为进一步揭示三峡水库调度等因素对长江中下游水文过程的影响提供了有利的条件。本文将利用三峡水库运行前后长江中下游干流及两湖控制性水文站的实测径流资料,分析径流过程的变化特征,探索其驱动因素,从而为更好地应对三峡水库运行后长江中下游的水文过程变化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 水文统计站的选取

长江干流选取了宜昌、监利、大通 3 个水文统计站。宜昌站是长江中游的入口控制站,大通站是长江下游的控制站,大通站径流量最大的 3 个来源分别是长江上游、洞庭湖流域、鄱阳湖流域。选取监利站以代表

洞庭湖入汇前的长江干流。洞庭湖、鄱阳湖分别选择了位于湖泊出口的七里山(城陵矶)水文站、湖口水文站为统计站(图1)。

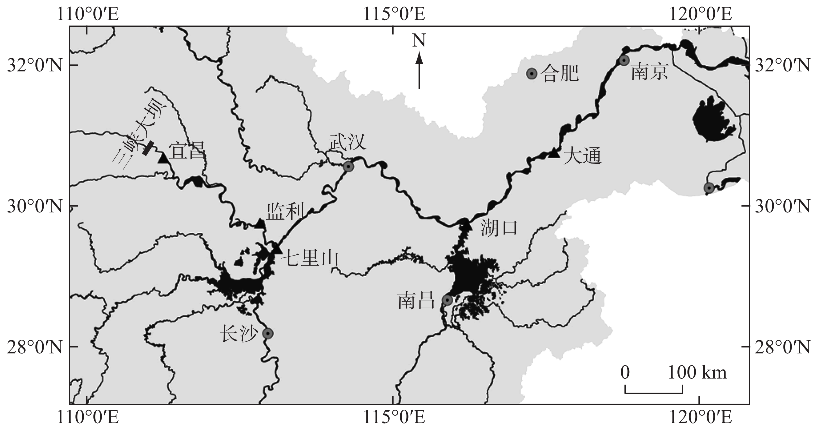

图1 长江中下游水系概况及所选取的水文统计站的位置

Fig.1 River system in the middle and lower Yangtze River basin and locations of the selected hydrological stations

1.2 径流数据统计方法

选取了5个站1975－2018年逐日流量数据(如图2所示)。据此,计算了各站的各月径流量和年径流量。三峡蓄水前,之所以未选取早于1975年的数据,有2个原因:(1)未能收集到完整的1975年以前的监利站径流量,而监利站径流量对于分析七里山站径流量变化成因不可缺少;(2)七里山站径流量,在1970s前后发生了显著的变化,而其它各站年径流量未发生显著变化。七里山站1951－1974年平均年径流量为3250亿 m^3,而1975－2002年平均年径流量为2724亿 m^3,2个时期年径流量系列在 $\alpha=0.05$ 显著性检验中差异显著性水平的 P 值为0.001,表明差异极显著。统计表明,1959－2018年间洞庭湖流域"四水"径流量无趋势性变化[15],而两次下荆江裁弯(1967、1972年)之后,荆江"三口"分流比由裁弯前的25%~30%左右大幅下降到15%左右[16]。可见,七里山站径流量在1970s前后发生显著变化的原因是荆江分流量的大幅减少。在进行统计分析时,将整个时段划分为三峡水库运行前和运行后两个时期,分别进行统计。根据三峡水库运行情况,为减少三峡水库初次蓄水对径流量统计的影响,将1975－2002年划为运行前、2004－2018年划为运行后。

在进行三峡运行前后径流量变化显著性分析时,采用Excel分析工具库中的单因素方差分析功能,进行 $\alpha=0.05$ 显著性检验。计算得到的差异显著性水平 P 值如果大于0.05则表示无显著差异,如果介于0.01~0.05则表示差异显著,如果小于0.01则表示差异极其显著。差异显著性水平衡量的是相对变化,不同月份差异显著性水平的高低并不能说明差异幅度的大小。

在计算月径流量相关关系时,采用Excel软件中的CORREL函数,其计算结果范围为[-1,1]。相关关系值的绝对值越大,相关性越强。一般认为,相关系数小于0.3为弱相关或不相关,大于0.7或0.8为强相关。

2 三峡水库运行前后各站年径流量分析

三峡水库运行前后,各水文统计站(及不同站相加减,下同)多年平均年径流量如表1所示。可见,三峡水库运行以来,各站年径流量(指多年平均值,下同)均有不同幅度的减少,但只有七里山站(及监利站+七里山站)径流量的变化差异达到显著水平。七里山站年径流量减少最多,其它各站年径流量减小幅度不超过10%。由图2也可见,从1950s以来的总体变化来看,宜昌站径流量略有减少趋势,而大通站和湖口站无明显变化趋势。

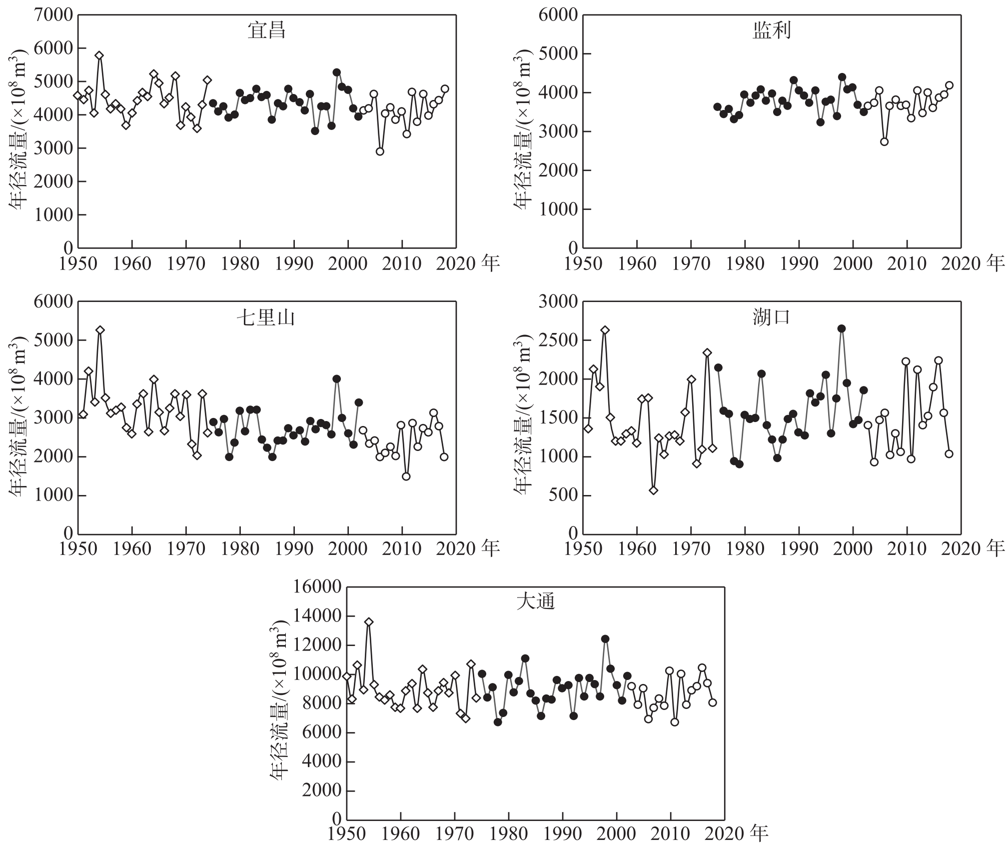

图 2 长江中下游干流及两湖若干水文站历年径流量(不同时段采用了不同的标记符号)

Fig.2 The annual runoff at five hydrological stations at the middle and lower Yangtze River and the two lakes of Dongting and Poyang (Different symbols are used for different time periods)

七里山站年径流量在三峡水库运行后比运行前减少了约 343 亿 m^3(表 1)。基于三峡水库运行前后宜昌站与监利站的年径流量,并假定两站之间其它支流入汇的径流量不变,可以大致推算出荆江“三口”年均分流量在三峡水库运行后比运行前减少约 151 亿 m^3,占七里山站年径流量减少量的 44%。据相关研究统计[16],三峡水库运行后 2003-2014 年期间荆江三口年均分流量 490 亿 m^3,较 1986-2002 年期间年均分流量减少 145 亿 m^3,较 1968-1985 年期间减少 390 亿 m^3,荆江主汛期(6-9 月)分流量减少占全年减少的 76.6%。可见,荆江分流的减少是七里山站径流量减少的重要原因。

考虑到其它各控制站(宜昌、大通、湖口)在三峡水库运行后年径流量普遍减少略超 5%,说明统计期气候变化可能造成了长江流域普遍的降水减少。按此比例,七里山站年径流量相应减少超过 136 亿 m^3,占七里山站年径流量减少量的 40%,仅次于荆江“三口”分流量。

洞庭湖流域 1960-2013 年期间降雨的统计表明[17]:流域平均年降雨量以-5.6 mm/10 a 的速率下降,且其中夏季和冬季降雨量上升,春季和秋季下降。另有统计表明[18]:洞庭湖流域 2003-2011 年的平均年降水量为 1269.9 mm,比多年平均年降水量减少了 102.9 mm,减少比例达 7.5%(按照年降水量和湘资沅澧“四水”年径流量的比例计算,约对应 140 亿 m^3 径流量)。湘资沅澧“四水”径流量的统计表明[15]:2003-2011 年“四水”径流量较多年平均减少,但未达到 $\alpha=0.05$ 显著性检验的临界值。可见,洞庭湖流域降水减少使得“四水”径流量减少,也是七里山站年径流量减少的主要原因之一。

综合以上分析可见,荆江分流减少和洞庭湖流域降水减少导致“四水”径流量减少是三峡水库运行前后

七里山站年径流量减少的 2 个主要原因。

表 1 三峡水库运行前后长江中下游各水文统计站年径流量

Tab.1 The average annual runoff of the hydrological stations in the middle and lower Yangtze River basin before and since the operation of the TGR

统计站	三峡水库运行前年径流量/(亿 m^3)	三峡水库运行后年径流量/(亿 m^3)	变化幅度/(亿 m^3)	变化比例/%	差异显著性水平 P 值
宜昌	4318	4090	-228	-5.30	0.11
监利	3788	3712	-76	-2.00	0.46
七里山	2724	2381	-343	-12.60	0.02
监利+七里山	6512	6092	-420	-6.40	0.05
湖口	1572	1486	-86	-5.50	0.51
大通	9049	8558	-491	-5.40	0.21
大通-(监利+七里山+湖口)	965	980	15	1.50	0.91

3 三峡水库运行前后各站月径流量分析

3.1 各站多年平均月径流量的变化值与显著性

图 3 展示了各水文统计站在三峡水库运行前后多年平均月径流量的分布。并进一步计算了三峡水库运行后相对于运行前的各站各月多年平均月径流量的变化值与差异显著性水平 P 值,如表 2 和图 3 所示。从中可观察到如下变化特征:

1)从最大变幅来看,干流各站月径流量最大减幅发生在 10 月,而七里山站、湖口站分别发生在 7 月、4 月;干流各站月径流量最大增幅发生在 3 月,而七里山站、湖口站发生在 1、6 月。

2)宜昌站,1－5、9－10 月的径流量在三峡运用前后差异显著,其中 1－5 月径流量增加、9－10 月径流量减少,7－8 月尽管统计的多年平均月径流量减幅较大,但差异未达到显著水平。

3)监利站,变化规律与宜昌站基本一致,1－5 月径流量显著增加、9－10 月径流量显著减少,但 12 月径流量也呈显著增加,另外 7 月径流量的差异(减少)也接近显著水平。

4)七里山站,年径流量及 7－10 月的月径流量存在显著差异,8 月径流量差异也接近显著水平,且这些月份的变化全部为减少。

5)监利站+七里山站,1－3 月径流量显著增加,显然主要是受监利站径流量的影响;7－10 月的变化应是同时受到监利站和七里山站的影响,7、9、10 月径流量显著减少,8 月径流量也大幅减少但尚未达到显著水平;而年径流量显著减少,则主要是受七里山站年径流量减少的影响。

6)湖口站,4 月径流量显著减少,另外 10 月径流量差异(减少)也接近显著水平。

7)大通站,9、10 月径流量显著减少,另外,1、2 月径流量增加的差异水平接近显著,7、11 月径流量减少也接近显著水平,8 月径流量减少幅度较大但差异不显著。

3.2 宜昌、监利、大通站月径流量变化原因分析

宜昌站,冬、春两季各月径流量增加,其中 1－5 月变化达到显著水平,与三峡水库运行前相比,最大增加比例达 48.7%(2 月);夏、秋两季径流量减少,其中 9－10 月变化达到显著水平(图 4)。由于宜昌站紧邻三峡大坝,其径流量几乎等于三峡水库下泄径流量,因此,宜昌径流量的影响因素,可分为三峡入库径流量的变化及三峡水库的调度。

据有关研究统计,三峡水库入库年径流量多年来(1956－2020 年)变化不大[19-20],但2003－2018 年入库径流量出现了汛期减少,非汛期增加的“坦化”现象,不过变化并不显著[20]。根据统计结果计算[20],2003－2018 年多年平均三峡各月入库径流量相比于 1956－2002 年的多年平均值,1－4 月分别增加 23 亿、16 亿、31 亿、19 亿 m^3,而 5－10 月分别减少 35 亿、81 亿、58 亿、103 亿、11 亿、34 亿 m^3,11、12 月各减少不到 1 亿 m^3。虽然文献[20]与本文统计期不完全一致,但考虑到三峡水库入库年径流量多年来变化不大,因此文献

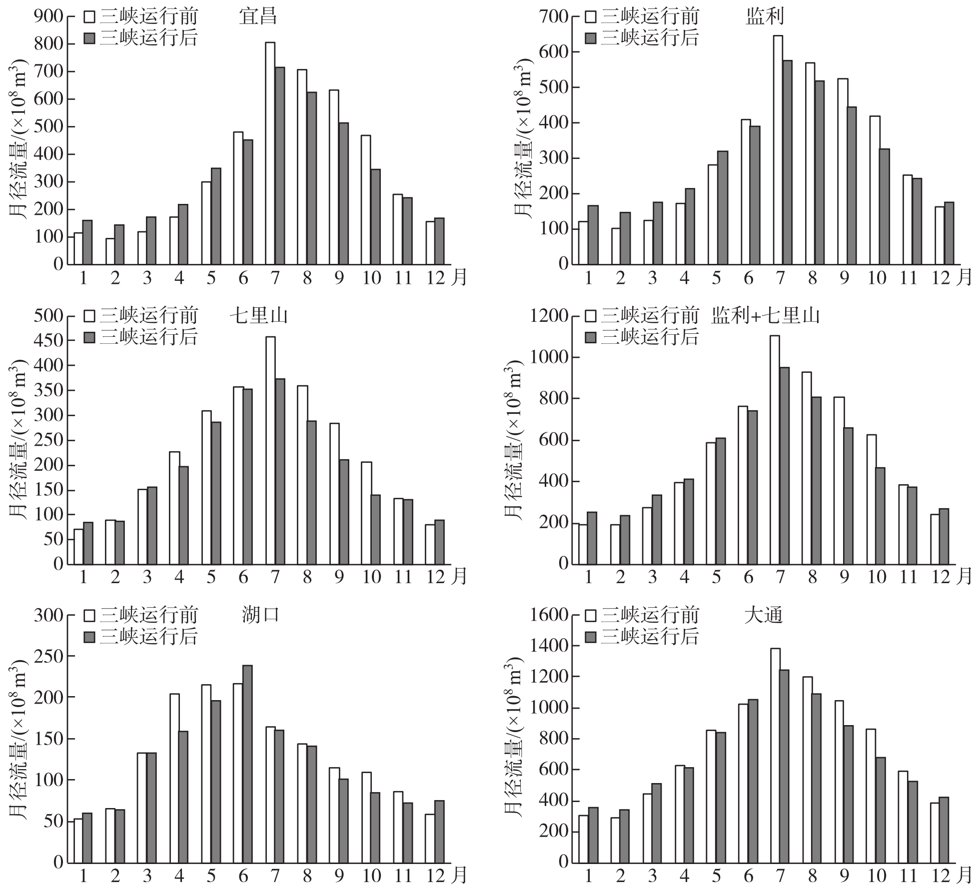

图 3 三峡水库运行前后长江中下游水文统计站月径流量的对比

Fig.3 The average monthly runoff of the hydrological stations in the middle and lower Yangtze River basin over the years before and since the operation of the TGR

[20]统计的三峡水库运行前后各月入库径流量的变化,可以借鉴用于分析本文统计的宜昌站各月径流量变化的成因。

从文献[20]统计的三峡水库运行前后入库径流量的变化与本文统计的宜昌站径流量的变化可知,三峡水库向下游补水期的 1—4 月,入库径流量的增量在宜昌站月径流量的增量中占 50% 左右,但 5 月份三峡入库径流量减少,而宜昌站径流量增加,因此三峡水库的补水调度对于宜昌站 5 月径流量增幅的贡献超过了 100%。而在 6—8 月份,三峡水库入库径流量的减少量,达到宜昌站径流量减少值的 60% ~270%,可见三峡入库径流量减少是 6—8 月份宜昌站径流量减少的主因。不过,6—8 月宜昌站径流量和三峡入库径流量的变化均不显著。9—10 月,三峡入库径流量减少,但其减少量只占宜昌径流量减幅的 10% ~25%,因此,三峡水库的蓄水才是 9—10 月份宜昌站径流量显著减少的主因。

监利站径流量的变化与宜昌站表现出高度的一致性(图 4)。由于宜昌站与监利站之间没有大的支流出入(最大支流为清江、沮漳河),而三峡水库运行后荆江分流量、分流比减少[4,10,15],监利站流量与宜昌站流量的一致性自然进一步提高。值得一提的是,12 月份监利站径流量呈显著增加,且增幅比宜昌站大 3.6 亿 m^3,而宜昌站 12 月径流量变化未达到显著水平。而且,整个冬季(12—2 月)监利站径流量的增幅均大于宜昌站径流量的增幅。可见,冬季宜昌站与监利站之间,要么区间来流增加,要么“三口”分流量减少,或者二者并存。

大通站径流量的变化,除了 4—6 月,其它月份变化方向均与宜昌站及“监利+七里山”一致(图 4)。4—

表 2 三峡水库运行后相对于运行前各站多年平均月径流量的变幅及差异显著性水平($\times 10^8\ m^3$)

Tab.2 The variation amplitude and significance level of the average monthly runoff of each station over the years since the operation of the TGR compared to that before the operation ($\times 10^8\ m^3$)

统计期		宜昌		监利		七里山		监利+七里山		湖口		大通	
		变幅	P 值	变幅	P 值	变幅	P 值	变幅	P 值	变幅	P 值	变幅	P 值
冬季	12 月	10.2	0.12	13.8	0.02	9.6	0.50	23.4	0.17	15.2	0.27	30.1	0.33
	1 月	42.0	0	44.9	0	13.6	0.28	58.5	0	6.4	0.61	53.4	0.06
	2 月	46.5	0	47.7	0	−3.8	0.76	43.9	0	−2.2	0.86	48.7	0.07
春季	3 月	52.0	0	52.8	0	2.6	0.90	55.4	0.02	−0.6	0.98	68.1	0.11
	4 月	42.9	0.01	42.1	0	−30.4	0.15	11.7	0.70	−45.6	0.03	−13.8	0.74
	5 月	50.0	0.02	41.1	0.02	−24.5	0.49	16.6	0.72	−19.5	0.45	−17.0	0.80
夏季	6 月	−30.2	0.20	−18.8	0.27	−5.5	0.83	−24.3	0.49	21.2	0.45	19.1	0.73
	7 月	−92.7	0.10	−69.9	0.07	−86.4	0.05	−156.3	0.02	−4.9	0.88	−144.8	0.09
	8 月	−87.4	0.17	−51.6	0.24	−72.4	0.08	−123.9	0.10	−3.5	0.88	−109.2	0.21
秋季	9 月	−119.9	0.02	−77.3	0.04	−75.8	0.04	−153.1	0.02	−13.6	0.53	−168.5	0.04
	10 月	−128.9	0	−92.3	0	−65.9	0	−158.2	0	−25.1	0.08	−186.8	0
	11 月	−11.7	0.44	−8.8	0.51	−4.2	0.82	−13.0	0.65	−14.6	0.28	−70.6	0.09
全年		−227.4	0.11	−76.3	0.46	−343.1	0.02	−419.4	0.05	−86.7	0.51	−491.3	0.21

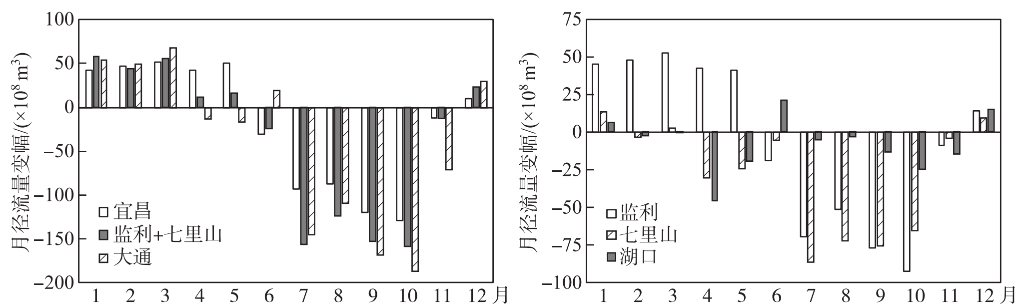

图 4 三峡水库运行后相对于运行前各站多年平均月径流量的变幅

Fig.4 The variation of the average monthly runoff of each station over the years since the operation of the TGR compared to that before the operation

6 月,大通站径流量变化方向与湖口站一致,显然是受到湖口站径流量变化的主导,但变化不显著。鄱阳湖流域汛期较早,4—6 月为鄱阳湖"五河"径流主汛期,也是湖口站径流量最大的月份(但各月径流量均少于七里山站),而"监利+七里山"径流量的高峰期要晚约 2 个月。

3.3 七里山站月径流量变化原因分析

七里山站,径流量受洞庭湖流域来水及江湖关系的双重影响,其季节变化规律与宜昌站并不完全对应。从三峡水库运行前后的多年均值来看,七里山站,除了 12、1、3 月径流量稍增加,其它各月径流量均减少,但只有 7、9、10 月径流量变化达到显著水平,8 月份径流量变化接近显著水平。

如前节所述,荆江分流减少和洞庭湖流域降水减少导致"四水"径流量减少是七里山站年径流量减少的主要原因。以宜昌站径流量减去监利站径流量代表荆江分流量,由表 2 的数据可以计算出:三峡运行前后,7、8、9、10 月份,荆江分流量的减少量占七里山站径流量的减少量的比例分别为 26.4%、49.4%、56.2%、55.5%。可见,七里山站 7 月份径流量减少的主因不是荆江分流减少,而是洞庭湖流域来水减少;而七里山站 9、10 月份径流量减少的原因中,其主要原因是荆江分流减少的贡献将近或超过 50%,同时洞庭湖流域来水减少的贡献也超过 40%。

3.4 湖口站月径流量变化原因分析

从三峡水库运行前后的多年均值来看,湖口站春、秋季径流量减少,冬、夏季径流量有增有减。其中,1、2、3、7、8 月径流量基本不变,12 月径流量增加,6 月份径流量增幅较大,其它月份径流量减少,尤以 4 月、10 月减少最多。从变化的显著性来看,仅 4 月径流量显著减少,10 月径流量减少接近显著水平,其它各月变化并不显著。

前面已经指出,4－6 月为鄱阳湖“五河”径流主汛期,也是湖口站径流量最大的月份。4－6 月,湖口站径流量变化方向与“监利+七里山”径流量变化方向完全相反。说明,其主要原因有可能是江湖顶托作用的变化[14],但考虑到前述的洞庭湖流域不同季节的降雨变化,鄱阳湖流域可能也存在类似的春季降雨减少、夏季降雨增加的变化,因此也可能是造成湖口站径流变化的原因之一。江湖顶托作用和气候两个因素的主次,4.4 节将进一步分析。

湖口站 9－11 月径流量减少,与七里山站径流量变化方向相同。鄱阳湖不存在长江分流,秋季三峡水库蓄水长江干流流量减少,江湖顶托作用减弱,无法解释湖口站径流量的变化。本文作者未能查到鄱阳湖流域秋季降水量减少的资料,但文献[21]对鄱阳湖流域 1961－2017 年干湿变化分析后认为,鄱阳湖流域呈现显著湿润化趋势($P<0.05$),四季均存在变湿趋势,且夏季、冬季变湿显著($P<0.05$)。因此,湖口站秋季径流量的显著减少,可能是由于汛期鄱阳湖水位降低、低水位提前、蓄水量减少[22],导致 9－11 月长江干流水位下降的时期,流向长江干流的水量较三峡运行前减少。4.4 节将对这个可能原因进一步分析。值得补充说明的是,这个可能原因并不适用于七里山站,因为洞庭湖入汇时江湖径流量之比远小于鄱阳湖入汇时的江湖径流量之比,换言之,长江干流对洞庭湖泄流的顶托能力远不如对鄱阳湖。相关性统计也没有发现七里山站月径流量与上一个月的监利站或者“监利+七里山”的径流量有强相关关系。

4 三峡水库运行前后各站月径流量相关关系变化分析

4.1 三峡水库运行前后各站之间月径流量的相关系数

2 个水文站多年月径流量序列的相关系数,表达的是 2 个站月径流量年际变化规律的相似性。相关系数越大,说明年际变化规律越相似。数据序列的平均值,不影响相关系数。三峡水库运行前后,各水文站月径流量多年平均值的变化幅度对于月径流量相关系数没有影响,只有其年际变化规律才会影响相关系数。

表 3 统计了三峡水库运行前后水文统计站月径流量之间的相关系数。此处主要分析相关系数大于 0.7(年际变化规律具有较强相似性)或相关系数在三峡水库运行前后的变化大于 0.3 的情况(年际变化规律的相似性发生较大变化)。

水文统计站径流量受到许多因素的影响,包括:流域气候(主要是降雨)、水库调度、江湖关系等。其中,三峡水库调度主要作用是汛末蓄水、枯季补水下泄。在汛期,三峡水库调度,将坦化洪峰过程,但不至于大幅改变月径流量。前文已分析,宜昌站 6－8 月径流量变化并不显著,且主要原因是三峡入库径流量的减少。而在枯季,虽然枯季三峡水库的补给下泄总量是基本确定的(正常蓄水位库容),但不同年份不同月份的补给量会受到天然月径流量的影响,补给的最终结果会使得枯季不同年份、不同月份的径流量差别减少,即发生年际和年内坦化,尤其是三峡水库平均下泄补给量较大的月份。因此,三峡水库运行后,不会导致汛期宜昌站与其它站月径流量相关系数大幅变化,但很可能会导致三峡水库补水期(1－5 月)宜昌站与其它站月径流量相关系数的减小。

4.2 宜昌、监利站月径流量相关系数变化分析

由宜昌—监利月径流量的相关系数可见,三峡水库运行前后宜昌站与监利站的径流相关系数值均非常高,尤是夏、秋、冬三个季节。这是因为宜昌站径流量与监利站径流量之间,存在由水量守恒定律所决定的较强的因果关系:“宜昌站径流量≈监利站径流量+三口分流量”(中间其它支流相对较小)。三峡水库运行后,宜昌站与监利站径流量之间的相关系数进一步提升,平均相关系数达到 0.98,说明宜昌与监利之间的流量守恒约束进一步增强,而其主因则是荆江“三口”分流比的减少。

4.3 七里山月径流量相关系数变化分析

从宜昌—七里山月径流量相关系数值可见,宜昌站与七里山站月径流量相关关系总体不强,三峡水库运

表 3 三峡水库运行前后各站月径流量相关系数

Tab.3 Correlation coefficients of monthly runoff among the hydrological stations before and since the operation of the TGR

统计月份	宜昌—监利		宜昌—七里山		宜昌—湖口		七里山—湖口		(监利+七里山)—湖口	
	运行前	运行后	运行前	运行后	运行前	运行后	运行前	运行后	运行前	运行后
12	0.96	0.94	0.33	0.42	0.12	0.34	0.83	0.89	0.74	0.83
1	0.85	0.97	0.16	0.59	0.10	0.54	0.93	0.89	0.89	0.80
2	0.81	0.97	0.15	−0.05	−0.06	0.05	0.78	0.76	0.72	0.67
3	0.97	0.97	0.41	0.34	−0.03	0.09	0.84	0.13	0.7	0.14
4	0.99	0.99	0.54	0.30	−0.01	0.02	0.44	0.87	0.29	0.66
5	0.97	0.98	0.40	0.58	−0.03	0.27	0.60	0.82	0.43	0.69
6	0.96	0.96	0.51	0.34	0.01	−0.07	0.54	0.72	0.36	0.47
7	0.98	0.99	0.40	−0.01	−0.17	−0.37	0.33	0.45	0.06	0.09
8	0.99	0.99	0.67	0.30	−0.17	−0.46	0.23	0.44	0.01	−0.14
9	0.99	1.00	0.57	0.80	−0.36	−0.13	0.23	0.24	−0.05	0.02
10	0.97	0.99	0.56	0.53	−0.03	−0.02	0.36	0.3	0.18	0.14
11	0.97	0.99	0.45	0.73	0.02	0.31	0.69	0.62	0.45	0.54

行前后相关系数变化总体规律不明显。容易理解,这是因为宜昌站和七里山站的主要径流量分别来源于气候和地理条件差异很大的流域。尽管宜昌—七里山月径流量相关系数总体不大,但是相关系数值的变化,仍可能提示影响因素的变化。

由前面分析可知,三峡水库调度将坦化 1－5 月宜昌站的径流量的年际变化,因此,可能导致宜昌站与其它站月径流量相关系数的减小。宜昌—七里山月径流量相关系数在 2－4 月均减少,但 1 月和 5 月,相关系数不仅没有减小,反而增大,尤其是 1 月份相关系数增大了 0.43。这说明三峡水库运行不是影响宜昌站与七里山站 1－5 月径流量相关系数变化的主要原因。由 3.1 节中表 2 的统计数据可见:1－5 月份宜昌站月径流量出现显著增加,而同期七里山站月径流量有增有减,1 月虽然相对增加较多,但变化并不显著。图 5 展示了三峡水库运行前后宜昌站与七里山站 1 月份的月径流量,可见,三峡水库运行后,2 个站都呈现出径流量增加的趋势,但七里山站径流量增加的趋势不如宜昌站显著。

7、8 月宜昌—七里山月径流量相关系数在三峡水库运行后比运行前减小较多,其中 7 月相关关系更是减小到约等于 0 的负值,这说明,三峡水库运行后,宜昌站和七里山站月径流量的年际变化规律的相似性大大减弱,甚至失去相关性。从图 5 也可以看到,除 1990s 之外,三峡水库运行前后,宜昌站与七里山站 7 月径流量年际变化相似性均较差。3.2 节分析可见:三峡入库径流量减少是宜昌站 6－8 月径流减少的主因,而七里山站 7 月径流量减少的主因是洞庭湖流域来水减少,8 月径流量减少的主因是荆江分流减少和洞庭湖流域来水减少。以宜昌站径流量减去监利站径流量,代表荆江分流量,计算表明:7 月份,三峡运行前、后,荆江分流量分别占七里山站径流量的 35.4%、37.5%;8 月份,分别是 38.9%、36.2%。可见,荆江分流量在七里山径流量中的占比变化不大,且不超过 40%。因此,7、8 月宜昌—七里山月径流量相关系数减小,其原因主要是气候的变化,也就是说长江上游流域和洞庭湖流域降水量的年际变化规律的相似性下降。

9 月宜昌—七里山月径流量相关系数达到了 0.80,这说明三峡水库运行后二者的年际变化规律存在较强的相似性。同期,9、10 月宜昌站与七里山站径流量均呈显著减少,但 10 月径流量相关系数却基本未变。由图 5 可见,三峡水库运行后,宜昌、七里山站 9 月径流量均呈减少趋势,且年际波动规律在 2005 年以后高度相似。如前面分析:9、10 月份宜昌站径流量减少的控制性因素是三峡水库的蓄水;而同期七里山站径流量减少的重要原因包括荆江分流量的减少和洞庭湖流域来水减少。据历年数据统计,1975－2002 年,荆江分流量(以宜昌站径流量减去监利站径流量代表)平均占七里站 9 月份径流量的 41.5%,而 2003－2018 年这一比例为 31.7%。荆江分流量在七里山站径流量中占比的大幅减少,理论上应该使得宜昌站与七里山站月径流量的年际波动规律的相似性降低,与图 5 展示的现象不同。图 6 进一步对比了历年来 9 月份荆江分流

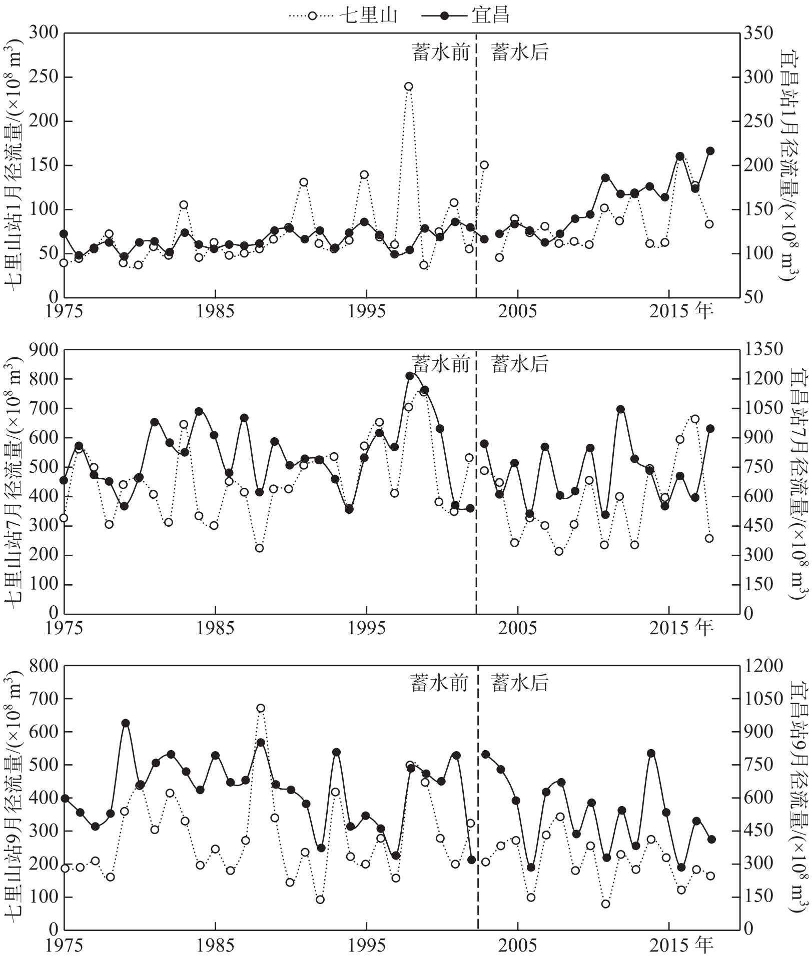

图 5 历年来 1、7、9 月宜昌与七里山站月径流量

Fig.5 Monthly runoff of Yichang and Qilishan Stations in January, July, September over the years

量(以宜昌站径流量减去监利站径流量代表)与七里山站径流量。由图 6 可见,三峡运行后,尽管荆江分流量在七里山站径流量中的占比减少,但年际波动规律却高度相似,相似程度远大于三峡运行前。可见,三峡水库运行后,9 月份七里山站月径流量与宜昌站月径流量的年际波动规律高度相似这一现象,只能归结于洞庭湖流域和长江上游流域的降水量的年际波动规律的趋同,这与 7、8 月份的情况正好相反。

4.4 湖口站月径流量相关系数变化分析

前面分析可知,湖口站 4 月径流量显著减少,10 月径流量减少接近显著水平。4－6 月,湖口站径流量变化方向与“监利+七里山”径流量变化方向完全相反,其原因可能是三峡水库调度导致的江湖顶托作用的变化,也可能是由于气候变化。如果江湖顶托是湖口 4－6 径流量与“监利+七里山”径流量变化相反的主导原因,那么三峡水库运行后江湖顶托作用增强,其相关关系必将减小;反之将增大。而如果气候变化是主导因素,那么相关关系可能不会出现规律性变化。

由表 3 可见,三峡水库运行后 4、5、6 月“监利+七里山”－湖口月径流量相关系数分别由 0.29 增大到 0.66、0.43 增大到 0.69、0.36 增大到 0.47。在“监利+七里山”径流量增大的 4、5 月,相关系数不仅没有减小,反而增大。可见,湖口站 4、5 月径流量显著减少的原因不是江湖顶托作用增强,应该是气候变化所致。此外,三峡水库运用后,七里山站与湖口站 4－6 月径流量相关系数均增大,且分别达到 0.87、0.82、0.72,说明

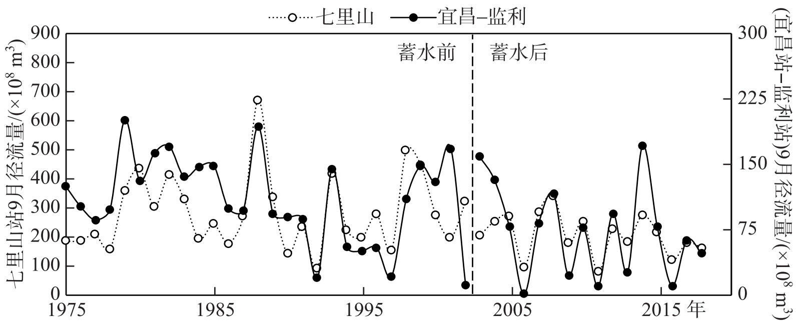

图 6 历年来 9 月份荆江分流量(以“宜昌—监利”近似)与七里山站月径流量

Fig.6 Monthly runoff of Qilishan Stations and diversion from Jingjiang River to Dongting Lake (represented by the difference of runoff between Yichang Station and Jianli Station) in September over the years

二者相关性强。4、5 月份七里山站径流量虽然未显著减少,但是减幅与湖口站相当,远大于同期“三口”分流量的可能减幅,也应是由气候变化导致春季降水量减少所致[16-17]。可见,流域降水减少才是七里山站、湖口站 4—5 月径流量减少的主因。

湖口站 9—11 月径流量减少,其中 10 月减幅最大,其变化接近显著水平(差异显著性水平 $P=0.08$)。3.4 节分析认为,其最可能的原因是汛期鄱阳湖水位降低、低水位提前、蓄水量减少。如果确实如此,那么 10 月湖口站径流量应该受到 9 月湖口站水位的影响,而湖口水位即长江干流水位,又与同期大通站径流量直接相关。因此,10 月湖口站径流量应该与 9 月大通站径流量具有较强的相关关系。同时,由于三峡水库运行后,长江干流中高流量下的水位流量关系变化不大[23],因此汛期各月,这种错月径流量相关关系在三峡水库运行前后也应当变化不大。为此,本研究统计了湖口站与大通站的月径流量相关关系,如表 4 所示。可见,三峡水库运行前后,湖口站 10 月径流量与大通站 9 月径流量相关系数均超过了 0.7,均明显大于其与大通站 10 月的相关系数。湖口站 8、9 月的情形也相似。而 11 月及之后,则湖口站径流量与同月大通站径流量相关关系更大。可见,三峡水库运行前后,8—10 月,湖口站径流量均与前一个月的大通站径流量,也即湖口水位,具有很强的相关性,而与当月的湖口水位相关性反而不强。由此可见,湖口站 9—10 月径流量减少的主要原因确实是,三峡水库运行后,鄱阳湖汛期水位降低、低水位提前、蓄水量减少。

表 4 不同条件下湖口站与大通站月径流量相关系数

Tab.4 Correlation coefficients of the monthly runoff between Hukou and Datong stations under different conditions

相关系数计算条件		湖口站月径流量					
		7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
三峡运行前	大通站与湖口站同月	0.36	0.37	0.47	0.57	0.81	0.89
	大通站提前湖口站 1 个月	0.43	0.65	0.78	0.81	0.48	0.26
三峡运行后	大通站与湖口站同月	0.48	0.37	0.35	0.44	0.71	0.92
	大通站提前湖口站 1 个月	0.49	0.74	0.61	0.74	0.22	0.46

5 结论

与三峡水库运行前(1975—2002 年)相比,三峡水库运用以来(2004—2018 年),宜昌、监利、大通、七里山、湖口各水文站多年平均年径流量均有不同幅度的减少。除七里山站之外,其它各站年径流量减小幅度不超过 10%,变化并不显著。荆江分流减少和洞庭湖流域降水减少导致“四水”径流量减少是三峡水库运行前后七里山站年径流量减少的两个主要原因。

从变化幅度来看:干流各站月径流量最大减幅发生在 10 月,而七里山站、湖口站分别发生在 7 月、4 月;干流各站月径流量最大增幅发生在 3 月,而七里山站、湖口站分别发生在 1 月、6 月。$\alpha=0.05$ 显著性检验结果表明:宜昌站 1－5 月径流量显著增加、9－10 月径流量显著减少;监利站,变化规律与宜昌站基本一致,但 12 月径流量也显著增加;七里山站,年径流量及 7、9、10 月径流量显著减少;湖口站,4 月径流量显著减少;大通站,9、10 月径流量显著减少。

宜昌站:1－4 月径流量增加的来源是入库径流量增加和三峡水库补水调度;5 月径流量增量全部由三峡水库补水调度贡献;6－8 月份径流量减少的主因是三峡水库入库径流量减少;9－10 月份径流量显著减少的主因是三峡水库的蓄水。监利站,径流量的变化与宜昌站表现出高度的一致性,但冬季各月监利站径流量的增幅均大于宜昌站径流量的增幅,可能原因包括区间来流增加、荆江分流减少。大通站,4－6 月,径流量变化方向与湖口站一致,其它月份变化方向均与宜昌站一致。七里山站,7 月径流量减少的主因是洞庭湖流域来水减少;9、10 月径流量减少的主要原因是荆江分流减少,但洞庭湖流域来水减少也是重要原因。湖口站,4、5 月径流量减少的主因是鄱阳湖流域降水减少;9－10 月径流量减少的主要原因是,三峡水库运行后,鄱阳湖汛期水位降低、低水位提前、蓄水量减少。

6 参考文献

[1] Liu WB, Yang T, Du MY *et al*. Impact of the Three Gorges Dam on the hydrology mechanism of typical hydrologic stations in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2018, **3**(3): 8-15. [刘文彬, 杨涛, 杜牧野等. 三峡水库运行对长江中下游典型水文站水文机制的影响. 三峡生态环境监测, 2018, **3**(3): 8-15.]

[2] Guo H. Effects of the Three Gorges Dam on Yangtze River flow and river interaction with Poyang Lake, China: 2003-2008. *Journal of Hydrology*, 2012, **416/417**: 19-27. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.11.027.

[3] Fang CM, Cao WH, Mao JX *et al*. Relationship between Poyang Lake and Yangtze River and influence of Three Georges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, **43**(2): 175-181. [方春明, 曹文洪, 毛继新等. 鄱阳湖与长江关系及三峡蓄水的影响. 水利学报, 2012, **43**(2): 175-181.]

[4] Ge YX, Li YT, Deng JY *et al*. Processes of the three outlets along the Jingjiang River before and after the impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2022, **47**(2): 36-42. [格宇轩, 李义天, 邓金运等. 三峡水库蓄水后荆江三口分流变化机理分析. 泥沙研究, 2022, **47**(2): 36-42.]

[5] Bing JP, Deng PX, Zhang DD *et al*. Influence of Three Gorges Reservoir operation on hydrological regime of Poyang Lake. *Yangtze River*, 2020, **51**(3): 87-93. [邴建平, 邓鹏鑫, 张冬冬等. 三峡水库运行对鄱阳湖江湖水文情势的影响. 人民长江, 2020, **51**(3): 87-93.]

[6] Mao BP, Wu ZM, Mei JY *et al*. Confluence relationship changes of Yangtze River and Dongting Lake since impoundment of Three Gorges project. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, **32**(5): 48-57. [毛北平, 吴忠明, 梅军亚等. 三峡工程蓄水以来长江与洞庭湖汇流关系变化. 水力发电学报, 2013, **32**(5): 48-57.]

[7] Zhao QX, Fu X, Sun ZH. Evaluation of the impact of Three Gorges Reservoir on three outlets of Jingjiang River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, **37**(2): 7-14. [赵秋湘, 付湘, 孙昭华. 三峡水库运行对荆江三口分流的影响评估. 长江科学院院报, 2020, **37**(2): 7-14.]

[8] Yang YP, Zhang MJ, Zhu LL *et al*. Influence of large reservoir operation on water-levels and flows in reaches below dam: Case study of the Three Gorges Reservoir. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 15640. DOI: 10.1038/s41598-017-15677-y.

[9] Chai YF, Deng JY, Yang YP *et al*. Evolution characteristics and driving factors of the water level at the same discharge in the Jingjiang reach of Yangtze River. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(1): 101-113. [柴元方, 邓金运, 杨云平等. 长江中游荆江河段同流量——水位演化特征及驱动成因. 地理学报, 2021, **76**(1): 101-113.]

[10] Gao Y, Xie YH, Zou DS. Hydrological regime changes in the three outlets of Jingjiang River before and after the operation of the Three Gorges project. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(2): 479-487. [高耶, 谢永宏, 邹冬生. 三峡工程运行前后荆江三口水文情势的变化. 长江流域资源与环境, 2020, **29**(2): 479-487.]

[11] Deng JY, Fan SY, Pang CN *et al*. Adjustment of regulation and storage capacity of lakes in the middle Yangtze River Basin during impoundment of Three Gorges reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, **35**(5): 147-152. [邓金运, 范少英, 庞灿楠等. 三峡水库蓄水期长江中游湖泊调蓄能力变化. 长江科学院院报, 2018, **35**(5): 147-152.]

[12] Xu JJ, Chen J. Study on the impact of Three Gorges Reservoir on Poyang Lake and some proposals. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(7): 757-763. [许继军, 陈进. 三峡水库运行对鄱阳湖影响及对策研究. 水利学报, 2013, **44**(7): 757-763.]

[13] Zhao JK, Li JF, Jiang CJ *et al*. Water exchange between river and lake in the middle and lower reach of Changjiang River. *Advances in Water Science*, 2013, **24**(6): 759-770. [赵军凯, 李九发, 蒋陈娟等. 长江中下游河湖水量交换过程. 水科学进展, 2013, **24**(6):

759-770.]

[14] Zhao GZ, Dong R, Wang HS *et al*. Hydrological variations and attribution analysis of Poyang Lake and Dongting Lake in the past 30 years. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, **18**(5): 74-83. [赵贵章, 董锐, 王赫生等. 近30年鄱阳湖与洞庭湖水文变化与归因. 南水北调与水利科技: 中英文, 2020, **18**(5): 74-83.]

[15] Xiong Y, Yuan HP, He L. Analysis on the variation characteristics and influencing factors of inflow runoff in Dongting Lake four rivers watershed. *Water Conservancy Construction and Management*, 2021, **41**(3): 5-8, 50. [熊鹰, 袁海平, 何力. 洞庭湖四水流域入湖径流量变化特征及影响因素分析. 水利建设与管理, 2021, **41**(3): 5-8, 50.]

[16] Zhu LL, Xu QX, Dai ML. Runoff diverted from the Jingjiang reach to the Dongting Lake and the effect of Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2016, **27**(6): 822-831. [朱玲玲, 许全喜, 戴明龙. 荆江三口分流变化及三峡水库蓄水影响. 水科学进展, 2016, **27**(6): 822-831.]

[17] Zhang XY, Liu MX. Spatial-temperal variation and risks of precipitation extremes in Dongting Lake catchment. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2016, **39**(2): 10-15. [张晓艳, 刘梅先. 洞庭湖流域降雨和降雨极值时空分布及风险变化研究. 湖南师范大学自然科学学报, 2016, **39**(2): 10-15.]

[18] Xu WH, Ge DX, Li N *et al*. Characteristics of precipitation variations in the Dongting Lake Basin during 1961-2011. *Wetland Science*, 2016, **14**(1): 108-112. [徐卫红, 葛德祥, 李娜等. 1960-2011年洞庭湖流域降水量变化特征. 湿地科学, 2016, **14**(1): 108-112.]

[19] Guo S, Zhou M, Hu T *et al*. An analysis of the variation process and causes of water and sediment to the Three Gorges Reservoir in recent years. *China Rural Water and Hydropower*, 2022,(8): 35-40, 49. [郭率, 周曼, 胡挺等. 近年来三峡水库水沙通量变化过程及原因分析. 中国农村水利水电, 2022,(8): 35-40, 49.]

[20] Shan ME, Li ZJ, Zhou YJ *et al*. Variations and driving factors of water flow and sediment transport in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2022, **47**(2): 29-35. [单敏尔, 李志晶, 周银军等. 三峡水库入库水沙变化规律及驱动因素分析. 泥沙研究, 2022, **47**(2): 29-35.]

[21] Xie K, Ding MJ, Zhang HM *et al*. Spatiotemporal variation of drought in Poyang Lake Basin in recent sixty years based on SPEI. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(8): 2015-2027. [谢坤, 丁明军, 张华敏等. 基于SPEI指数的鄱阳湖流域近60 a干旱时空变化特征. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(8): 2015-2027.]

[22] Hu ZP, Fu J. Quantitative study on hydrology relationship between the Yangtze River and Poyang Lake and its changes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, **49**(5): 570-579. [胡振鹏, 傅静. 长江与鄱阳湖水文关系及其演变的定量分析. 水利学报, 2018, **49**(5): 570-579.]

[23] Han JQ, Sun ZH, Yang YP. Flood and low stage adjustment in the middle Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR). *J Lake Sci*, 2017, **29**(5): 1217-1226. DOI:10.18307/2017.0520.[韩剑桥, 孙昭华, 杨云平. 三峡水库运行后长江中游洪、枯水位变化特征. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1217-1226.]