

1956—2020 年荆江三口径流变化特征及水库补水效果^{*}

张冬冬, 戴明龙^{**}, 李妍清, 王含

(长江水利委员会水文局, 武汉 430010)

摘要: 荆江三口的分流对于洞庭湖区的水资源、河湖生态系统安全等均具有重要的影响。受到人类活动和气候变化双重影响, 荆江三口分流发生显著变化, 亟需明确其变化特征及适应性对策。基于实测数据分析了荆江三口径流变化特征, 采用数值模拟评估了水库不同下泄方案对推迟荆江三口断流的影响。结果表明: 荆江三口年径流量呈递减趋势, 2003 年以后分流比没有趋势性变化; 相比 1981—2002 年, 2003—2020 年荆江三口径流汛期和退水期径流分别减少 26% 和 40%, 枯水期和涨水期分别增加了 194% 和 17%。2003 年以后, 沙道观站长断流(历时 > 60 d)持续时间和短断流(历时 ≤ 60 d)发生频次均有所增加; 弥陀寺站长断流时间有所减少, 而短断流时间和频次显著增加; 康家岗和管家铺站在长断流时间有所增加, 短断流时间有所增加, 频率有所减少。在枯水年情况下, 水库增加下泄时间与推迟三口断流时间比不超过 1.2, 补水效率不超过 0.28%, 因此不推荐通过水库增加下泄流量方法推迟弥陀寺和管家铺站断流。

关键词: 荆江三口; 径流变化; 水动力模型; 补水; 水库

Characteristics of runoff in the three outlets along Jingjiang River and the influence of water supplement by the reservoirs during 1956–2020^{*}

Zhang Dongdong, Dai Minglong^{**}, Li Yanqing & Wang Han

(Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R.China)

Abstract: The runoff in the three outlets of Jingjiang River had an important impact on water resources and river and lake ecosystem security in Lake Dongting area. Due to the influence of human activities and climate change, the runoff in the three outlets of Jingjiang River had changed significantly. Based on the observed hydrological data, the characteristics of runoff in the three outlets along Jingjiang River was analyzed, and the influence of water supplement of the reservoir on the cutoff in the three outlets along Jingjiang River was evaluated by numerical simulation. The results indicated that the annual runoff in the three outlets along Jingjiang River showed a decreasing trend from 1981 to 2020, whereas the diversion ratio showed no significant change after 2003. Compared with 1981 to 2002, the runoff of the three outlets of Jingjiang River from 2003 to 2020 decreased by 26% and 40% in the flood period and the decreasing stage period, respectively, while that of the dry period and the rising stage period increased by 194% and 17%, respectively. The number of days of long-break and the frequency of short-break both increased for Shadaoguan station after 2003. For Mituosi station, the number of long-break days decreased but that of short-break increased. The number of days of long-break for Kangjiagang and Guanjiapu stations increased although the number of days of short-break increased with decreased frequency. In the dry year, the number of days with increasing discharge was only 1.2 times of the days which were influenced by the replenishment, with the replenishment efficiency no more than 0.28%. Hence, we do not recommend to postpone the cutoff of Maituosi and Guanjiapu stations by increasing the discharge of the reservoirs.

Keywords: Three outlets along Jingjiang River; change of runoff; hydrodynamic model; water supplement; reservoir

荆江三口是连接荆江与洞庭湖区的纽带(图 1), 包括松滋、太平、藕池三口(调弦口 1958 年封堵), 荆江三口的水文情势变化对长江与洞庭湖江湖关系影响重大。根据实测资料统计, 1956—2020 年荆江三口多年

* 2021-06-07 收稿; 2021-10-25 收修改稿。

中国长江三峡集团有限公司科研项目(0799243)和长江科学院开放研究基金项目(CKWV2021866/KY)联合资助。

** 通信作者; E-mail: daiminglong@163.com.

平均径流量约占城陵矶出湖总水量的 29%, 荆南四河区域过境水资源量对于保障区域的人民生活供水安全、促进当地工农业生产以及维持洞庭湖区生态水位意义重大^[1-2]. 然而, 该区域枯水期受到荆江三口洪道断流影响, 输水、引水、提水等工程难以发挥作用, 区域内存在资源性和工程性缺水的问题^[3], 如何通过工程手段解决以上问题, 已成为目前研究的热点.

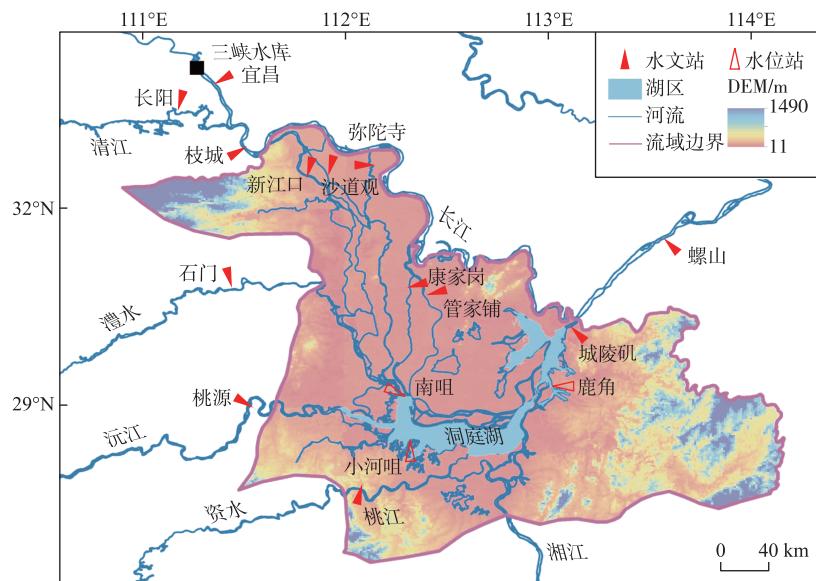


图 1 荆南四河水系区域以及水文站网分布

Fig.1 Distribution of the four rivers system in Jingnan area and gauge stations

1950s 以来, 荆江河段经历了下荆江裁弯、葛洲坝水利枢纽截流、三峡水库蓄水等重要人类活动影响, 原有的水沙平衡发生扰动, 江湖关系随之进一步调整^[4-5]. 在荆江三口径流演变规律及影响因素方面, 许全喜等^[6]、朱玲玲等^[7]、徐长江等^[8]以实测数据为基础分析了荆江三口分流量年际以及年内多时段变化规律, 研究表明三口分流量和分流比均呈现减少特征, 但不同时段的影响因子有所不同. 三峡水库蓄水后, 荆江三口枯水期径流特征以及断流天数变化也受到广泛关注, 李景保等^[9]采用 M-K 检验以及数理统计模型, 指出三峡水库蓄水后荆江三口断流天数增加但趋势不明显; 徐照明等^[10]分析了不同典型年三峡水库调度对荆江三口分流的影响, 指出不同典型年 8—11 月三口分流受上游水库调蓄影响减少了约 40 亿~85 亿 m³; 赵秋湘等^[11]评估了三峡水库运行对荆江三口断流的影响, 指出枯水期松滋口和藕池口在无三峡水库情况下每年分别平均少断流 30.4、6.8 d, 太平口每年平均多断流 30.9 d. 王冬等^[12]通过分析枝城同流量下荆江三口分流比和分流量的特征, 结论认为三口分流比和分流量在三峡水库蓄水前后变化不大, 三口分流量减少与上游来水偏枯有关. 以上研究主要集中在对荆江三口径流以及断流时间变化特征分析方面, 而对于长江上游梯级水库不同波动下泄方案增加三口枯水期流量以及缓解三口断流效果的研究较少.

本文首先基于实测资料分析荆江三口径流的年际与年内变化特征, 并在此基础上, 通过多情景数值模拟的方法, 定量评估了三峡水库短时间波动下泄调度对于荆江三口补充水量的效果, 研究成果可以为三峡水库群科学制定蓄水、供水等联合调度方案提供技术参考.

1 数据与方法

本次研究首先以荆江三口主要控制站沙道观、新江口、弥陀寺、康家岗和管家铺站的 1956—2020 年实测水文数据为基础, 通过趋势分析以及 M-K 突变检验^[13], 分析荆江三口径流年际以及年内变化特征; 其次, 构建长江与洞庭湖一、二维耦合水动力学模型, 采用多情景数值模拟方法, 分析三峡水库下泄补水效果.

1.1 Mann-Kendall 突变检验

对于具有 n 个样本量的时间序列 X , 构造一秩序列如下:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i, r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (1)$$

式中, x_j, x_i 分别为第 i, j 时刻的时间序列, s_k 为第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累积数.

假设序列随机独立条件下, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{var}(s_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中, $UF_1 = 0$, $E(s_k)$ 、 $\text{var}(s_k)$ 分别为累积数 s_k 的均值和方差, 计算公式为:

$$E(s_k) = \frac{n(n-4)}{4}, \quad \text{var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (3)$$

UF 和 UB 分别是按照时间序列 x 正序和逆序计算出来的值, 如果两者出现交点, 且交点在临界线之间, 那么交点对应的时刻为突变开始时间.

1.2 一、二维耦合水动力学数学模型

Mike 模型是丹麦水利研究所开发并用于河流、湖泊等模拟研究的水动力演算模型^[14], 本研究基于 Mike 模型构建长江与洞庭湖一、二维耦合水动力学模型, 其中长江干流、荆江三口洪道以及洞庭湖尾闾均采用一维模型构建, 洞庭湖湖区采用二维模型构建, 耦合模式采用标准连接形式, 图 2 为模型示意图.

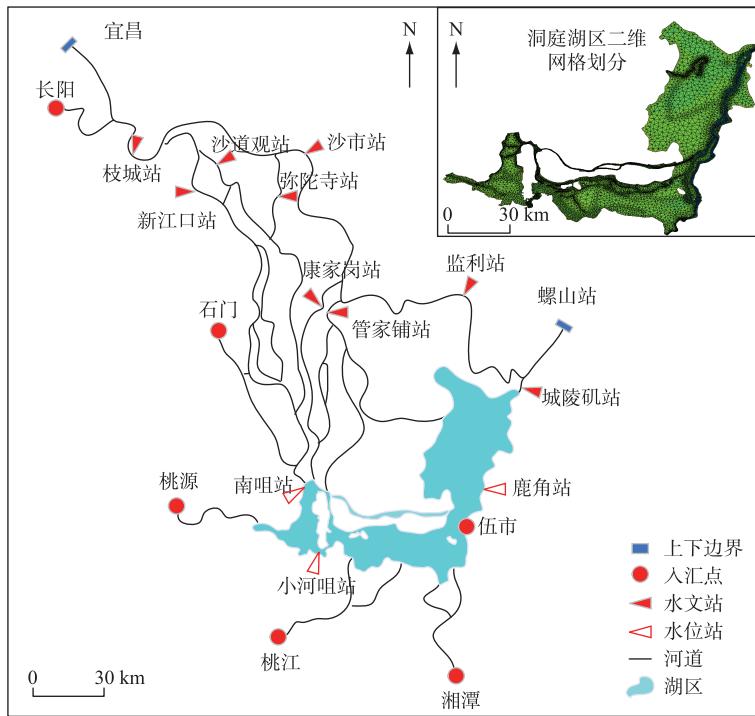


图 2 长江与洞庭湖一、二维耦合水动力学模型示意图

Fig.2 Sketch map of the coupling hydrodynamics model of Yangtze River and Lake Dongting

模型上边界为宜昌站流量, 下边界为根据 2008—2018 年螺山站实测流量成果点汇的水位流量关系综合线, 洞庭四水、汨罗江及清江主要控制水文站的流量作为点源汇入模型^[15-16]. 湖区内的降雨径流过程, 采用降雨产流模块进行模拟. 模块中降水输入数据为湖区鹿角、南咀、小河咀、营田以及自治局 5 个雨量站的逐

日降水数据,采用泰森多边形的方法插值形成湖面的逐日降水,蒸发采用湖区的逐月潜在蒸散发资料。地形资料为2011年长江干流河道和洞庭湖区实测地形。以上数据均由长江水利委员会水文局提供。

1.3 模型率定与验证

对于长江中游荆江和洞庭湖区,不同的来水组成、量级及水位涨落率均会对水流阻力产生影响,因此进行糙率率定时必须选择具有一定代表性的典型来水过程。对宜昌站1956—2020年的年径流量进行排频计算,分别选取2012、2014和2011年作为丰水典型年($P=20\%$)、平水典型年($P=50\%$)和枯水典型年($P=97\%$),根据不同来水年对模型进行率定,其中,2011年属于该区域典型的枯水年份,洪水主要出现在长江干流区域,年最大流量也仅有 $28100 \text{ m}^3/\text{s}$,三口分流量急剧降低,同时四水来流量也比同期偏少,洪水过程具有历时短、洪量小、水位低的特点。2012年洪水为长江中游区域性洪水,特点是洪水涨势迅猛、消退亦快,长江干流宜昌洪水与洞庭湖四水合成洪水多次发生洪水过程遭遇,致使螺山水位持续走高。2014年为平水年,长江干流宜昌站径流量与多年均值接近,洞庭四水来水量较多年均值偏丰7%。在对河道及湖泊特性分析的基础上,将长江中游干流河段、洞庭湖区、三口洪道及四水尾闾河段3个部分分别按照河道高程进行糙率率定(表1)。

根据率定期选择的参数,选择荆江三口各站点2015—2018年的流量过程作为验证(图3),为量化评估模型的模拟精度,采用Nash-Sutcliffe系数 E_{NS} 和相对误差 E_R 两个指标评价流量过程的模拟精度^[17],参考Moriasi等^[18]研究中采用的模型精度评价等级标准(表2),定量评价本模型的模拟精度。模型模拟评价成果见表3,除管家铺站为良好外,其他各个站点模拟流量过程与实测过程拟合程度均为优秀,满足模型模拟精度要求。

表1 模型糙率率定成果

Tab.1 Manning roughness coefficients in the coupled model

区域	糙率		
	深槽	浅滩	边滩
洞庭湖区	0.021~0.034	0.032~0.059	—
长江干流	0.018~0.035	—	0.025~0.046
三口洪道及四水尾闾	0.019~0.033	—	0.023~0.042

表2 模型模拟效果评价指标等级

Tab.2 Evaluation index for the model simulation

等级	E_{NS}	$E_R/\%$
优秀	$0.75 < E_{NS} \leq 1.00$	$ E_R < 10$
良好	$0.65 < E_{NS} \leq 0.75$	$10 \leq E_R < 15$
合格	$0.50 < E_{NS} \leq 0.65$	$15 \leq E_R < 25$
不合格	$E_{NS} \leq 0.50$	$ E_R \geq 25$

表3 各站点模拟效果评价

Tab.3 Evaluation index for each station

项目	沙道观	弥陀寺	新江口	管家铺	康家岗
E_{NS}	0.96	0.96	0.95	0.93	0.93
$E_R/\%$	3.22	3.08	4.12	11.08	-6.68
评价	优秀	优秀	优秀	良好	优秀

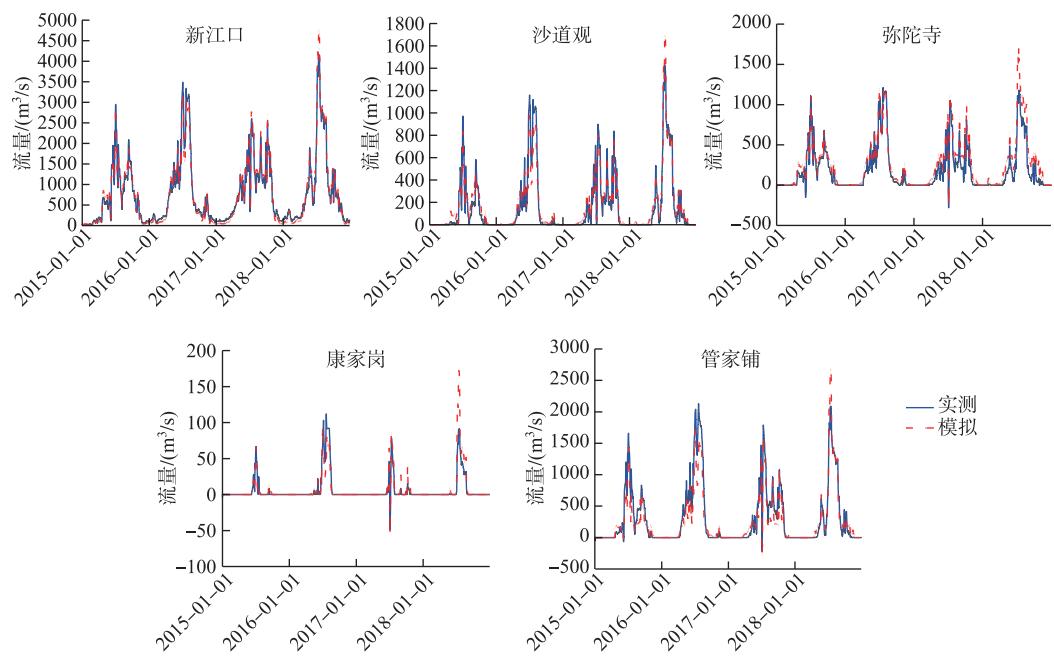


图3 荆江三口各站实测与模拟流量过程对比

Fig.3 Comparison of measured and simulated discharge in three outlets of Jingjiang River

2 荆江三口径流变化特征

2.1 荆江三口径流年际变化特征

1950s以来,受到荆江河床冲刷下切、同流量下水位下降、三口分流水道河床淤积以及三口口门段河势调整等因素影响,荆江三口分流能力一直处于衰减状态,分流量呈显著减少的趋势^[19]。由表4可以看出,1956—1966年荆江三口年均分流量为1331.6亿m³;1967—1972年下荆江裁弯期间,年均分流量为1021.4亿m³;1973—1980年为下荆江裁弯后期间,年均分流量为834.3亿m³;1981—2002年葛洲坝水利枢纽修建后到三峡水库蓄水前,年均分流量为685.3亿m³;三峡工程蓄水后的2003—2020年,年均分流量为497.8亿m³。

表4 荆江三口不同时段分流量和分流比变化特征

Tab.4 Annual flow and flow diversion ratio of the three outlets along Jingjiang River in different periods

起止时间	枝城	径流量/(亿m ³)					三口年均分流量/(亿m ³)	变化速率/(亿m ³ /a)	三口分流比/%			
		松滋口		太平口		藕池口						
		新江口	沙道观	弥陀寺	康家岗							
1956—1966年	4515	322.6	162.5	209.7	48.8	588	1331.6	-18	29			
1967—1972年	4302	321.5	123.9	185.8	21.4	368.8	1021.4	-106	24			
1973—1980年	4441	322.7	104.8	159.9	11.3	235.6	834.3	-1.2	19			
1981—2002年	4429	291.8	79.1	132	10	172.4	685.3	-13	15			
2003—2020年	4265	249.3	56.5	81	3.8	107.2	497.8	-4	11.7			

2003—2020年与1981—2002年相比,长江干流枝城站来水量减少了164亿m³,减幅为3.7%;三口分流量减小了187.5亿m³,减幅为27.4%,分流比也由15%减小至11.7%。其中,分流量减幅最大的为藕池口,其

分流量减少了 71.4 亿 m^3 , 减幅为 40%, 其分流比则由 4.1% 减小至 2.6%; 松滋口分流量减少了 65.1 亿 m^3 , 减幅为 17.6%, 其分流比由 8.4% 减小至 7.2%; 太平口分流量减少了 51 亿 m^3 , 减幅为 38.6%, 其分流比则由 3.0% 减小至 1.9%.

荆江三口分流量和分流比年际变化见图 4, 受下荆江裁弯和洞庭湖区淤积等多重因素的影响, 在 1956—2020 年期间荆江三口分流量和分流比均呈递减趋势, 分流量变化速度最大的时段发生在 1967—1972 年, 三峡水库蓄水运用以后, 尽管三口分流量进一步减少, 但减少速率明显较之前阶段放缓, 除枝城站 2006、2011 年为来水偏枯导致三口分流比减小幅度较大外, 其他年份三口分流比略有减小, 但未出现趋势性的变化.

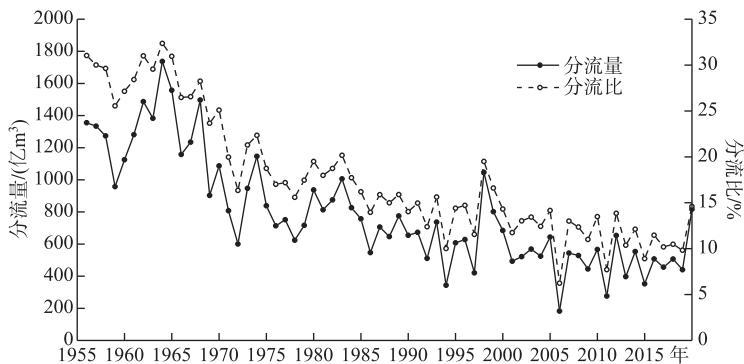


图 4 荆江三口分流量和分流比年际变化

Fig.4 Annual flow andflow ratio of the three outlets along Jingjiang River

采用 M-K 突变检验对荆江三口主要控制站点年径流量进行分析, 结果见图 5. 由松滋口和太平口 1956—2020 年历年平均流量序列 M-K 检验统计变化可知, 两者年平均流量只有一个交叉点, 出现在 1986 年左右. 蒿池口也仅有一个交叉点, 出现在 1978 年左右, 荆江三口合成流量也仅有一个交叉点, 出现在 1978 年左右. 除松滋口以外, 其他交叉点均在临界线之外, 因此本次交叉点出现年份仅作为突变分析的参考.

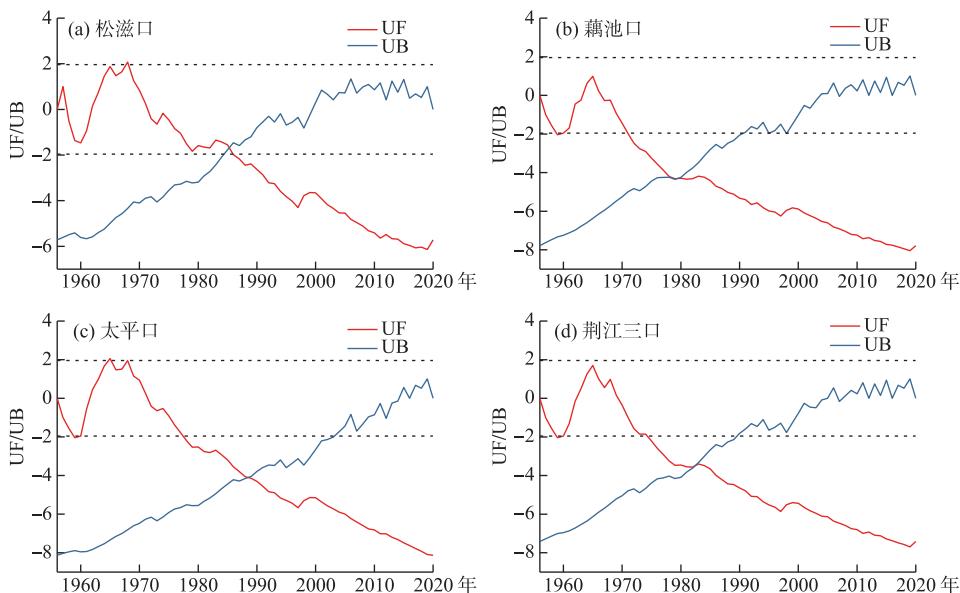


图 5 荆江三口实测年平均流量 M-K 检验

Fig.5 M-K checkout of the annual runoff of the three outlets along Jingjiang River

诱发荆江三口分流量突变的因素主要是以水利工程为代表的人类活动,文献[20]指出人类活动影响多存在4~6年的趋势性调整期,如1972年荆江裁弯后的6年,藕池口分流量发生变化,且这种变化对整个三口分流量也产生影响。1981年葛洲坝建成对松滋口和太平口也有所影响,影响的过渡期为5年,因此松滋口和太平口分流量出现变化。本结果基本可以反映不同人类活动对荆江三口年径流影响的程度以及突变的年份。

2.2 荆江三口径流年内变化特征

图6分析了荆江三口径流不同时段的年内分布特性,包括1956年以来枯水期(12月至次年3月)、涨水期(4—5月)、汛期(6—9月)和退水期(10—11月)共4个阶段分流量的变化过程。可以看出,各站汛期、枯水期的流量变幅较大,与1981—2002年相比,2003—2020年汛期荆江三口径流量减少了26%;在枯水期和涨水期,三峡水库向下游补水,一定程度上增加了荆江三口的径流量,与1981—2002年相比,2003—2020年枯水期和涨水期荆江三口径流量分别增加了194%和17%;退水期水库蓄水导致下游径流量减少,与1981—2002年相比,2003—2020年退水期荆江三口径流量减少了40%。

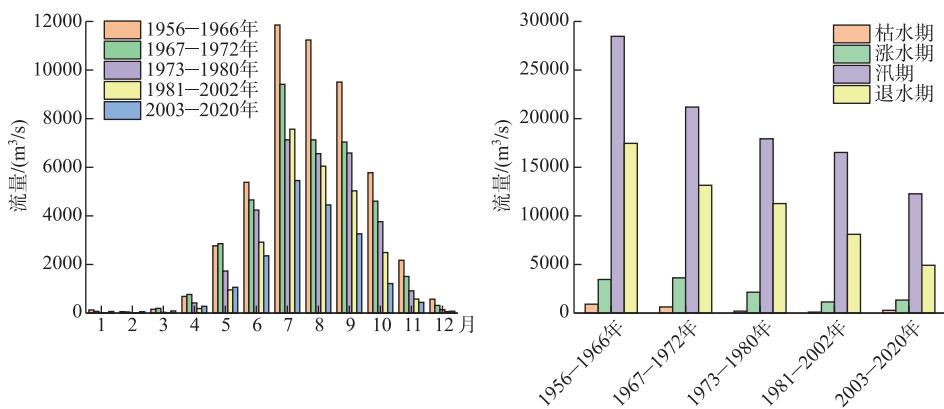


图6 荆江三口不同时段逐月径流分配特征

Fig.6 Monthly flow of the three outlets along Jingjiang River

2.3 荆江三口枯水期断流特征

受三口洪道淤积、长江干流来水丰枯波动变化影响,1956年以来,荆江三口洪道出现洪道断流,其中:藕池河西支每年均有断流;藕池河东支1960s出现间歇性年份断流,1960s末开始每年有断流;虎渡河自1970s中期开始出现断流;松滋口东支自1974年出现断流,且此后每年均有断流,三口通流对应枝城来水流量变大。考虑水文观测资料的统一性和观测成果的同步性,本文采用荆江三口日均断流发生时同日枝城站日平均流量(下文简称断流流量)以及通流发生时同日枝城站日平均流量(下文简称通流流量)作为评价参数来分析荆江三口断流时间的变化。

三口五站中,除了新江口站外,均有断流发生,且断流时间长短不同。以往研究多以整体进行研究^[21],由于长、短断流发生特征以及影响因素不同,本次根据沙道观、弥陀寺、康家岗、管家铺的1956—2020年历年各次断流对应的天数进行了经验频率计算,选取4个站50%频率断流时间平均值60 d为分界点,即长断流(>60 d)和短断流(≤60 d),分析荆江三口4个水文站不同时段出现长、短断流时间的年均累积天数以及对应的枝城站流量特征。

2.2.1 长断流特征分析 根据历年观测资料统计,三口各站1981—2002年以及2003—2020年2个时间段长断流天数变化情况见图7。由图7可以看出,沙道观站1981—2002年断流平均开始日期为11月20日,对应枝城站平均断流流量为8210 m³/s,断流平均结束日期为4月30日,对应枝城站通流流量为9920 m³/s,平均断流时间为162 d;2003年以后,断流平均开始日期进一步提前,为11月5日,对应枝城站平均断流流量为9510 m³/s,断流平均结束日期也有一定提前,为4月18日,对应枝城站平均通流流量为11700 m³/s,平均断

流时间为 165 d, 断流时间略有增加。

弥陀寺站 1981—2002 年断流平均开始日期为 11 月 20 日, 对应枝城站平均断流流量为 $7400 \text{ m}^3/\text{s}$, 断流平均结束日期为 4 月 12 日, 对应枝城站通流流量为 $7780 \text{ m}^3/\text{s}$, 平均断流时间为 147 d; 2003 年以后, 断流平均开始日期进一步提前, 为 11 月 16 日, 对应枝城站平均断流流量为 $7020 \text{ m}^3/\text{s}$, 断流平均结束日期也有一定提前, 为 3 月 12 日, 对应枝城站平均通流流量为 $8400 \text{ m}^3/\text{s}$, 平均断流时间为 120 d, 断流天数明显减少。

康家岗站 1981—2002 年断流平均开始日期为 10 月 19 日, 对应枝城站平均断流流量为 $15900 \text{ m}^3/\text{s}$, 断流平均结束日期为 6 月 16 日, 对应枝城站通流流量为 $20200 \text{ m}^3/\text{s}$, 平均断流时间为 240 d; 2003 年以后, 断流平均开始日期进一步提前, 为 9 月 28 日, 对应枝城站平均断流流量为 $15500 \text{ m}^3/\text{s}$, 断流平均结束日期也有一定提前, 为 6 月 6 日, 对应枝城站平均通流流量为 $18100 \text{ m}^3/\text{s}$, 平均断流时间为 251 d, 断流时间略有增加, 通流对应枝城流量明显减少。

管家铺站 1981—2002 年断流平均开始日期为 11 月 22 日, 对应枝城站平均断流流量为 $8450 \text{ m}^3/\text{s}$, 断流平均结束日期为 4 月 29 日, 对应枝城站通流流量为 $7780 \text{ m}^3/\text{s}$, 平均断流时间为 158 d; 2003 年以后, 断流平均开始日期进一步提前, 为 11 月 12 日, 对应枝城站平均断流流量为 $8860 \text{ m}^3/\text{s}$, 断流平均结束日期有一定延后, 为 5 月 1 日, 对应枝城站平均通流流量为 $11600 \text{ m}^3/\text{s}$, 平均断流时间为 170 d, 断流天数明显增加。

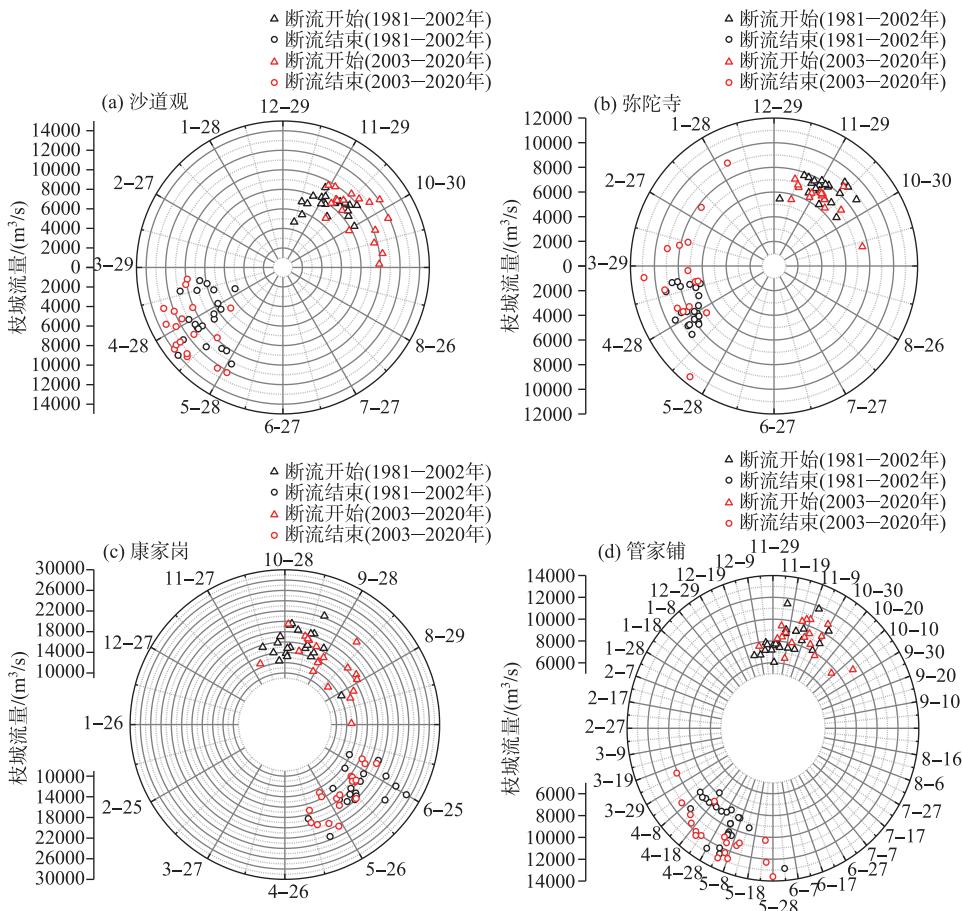


图 7 荆江三口不同时段长断流时间及枝城流量变化

Fig.7 Days of long-break and the flow of Zhicheng in the three outlets along Jingjiang River in different periods

总体而言, 2003—2020 年相比 1981—2002 年, 四站中除弥陀寺断流持续时间呈现减少变化特征外, 其

他三站断流持续时间均呈现增加的变化特征,其中管家铺站断流天数增加明显;从通流条件下的枝城流量变化来看,管家铺站的通流条件有所改善,对应枝城站的通流流量有所降低,其他三站通流时对应枝城站流量均有增加。

2.2.2 短断流特征分析 三峡水库运行后,沙道观小于60 d的断流时间基本没有变化,其他3个站点小于60 d的断流时间略有增加(表5)。短断流对应的枝城断流和通流流量基本呈现增加的特征,由于短断流量出现时间较为零散,受到影响因素较为复杂,规律性不强,因此本次研究并未对短断流出现时间进行统计规律分析。

表5 不同时段出现短断流的时间、频次以及对应的枝城站流量统计

Tab.5 Days of short-break and the flow of Zhicheng in the three outlets along Jingjiang River in different periods

站点	时段	平均断流流量/ (m ³ /s)	平均通流流量/ (m ³ /s)	年均断流时间/ d	发生频次/ (次/a)
沙道观	1981—2002年	8760	9640	8	1.09
	2003—2020年	10000	11500	10	1.61
弥陀寺	1981—2002年	6790	7510	7	1.00
	2003—2020年	7120	8150	16	1.22
康家岗	1981—2002年	15600	17600	6	1.55
	2003—2020年	16100	19800	13	1.22
管家铺	1981—2002年	7950	9460	6.38	0.95
	2003—2020年	9450	11900	12	0.67

3 补水效果分析

3.1 三峡水库不同时段恒定增加下泄效果分析

为了进一步分析三峡水库波动下泄调度对于荆江三口补充水量的效果,本次基于构建的长江与洞庭湖一、二维水动力学模型,选取三峡蓄水后来水偏枯的2011年作为典型年,假定每个月(不含汛期)上旬三峡水库在实测流量的基础上每日多下泄1000 m³/s的情况(以1月份为例,情景设置见图8),分析荆江三口各个站点可以额外补充的水量。

三峡水库不同时段恒定增加下泄计算成果见表6。由表可以看出,在假定三峡水库每个月上旬(1—10日)均增加86400万m³下泄水量情况下,受到干流水位以

及三口门水位的影响,各个月份的荆江三口各站补水效果是不同的。增加下泄流量后,相应的三口增加水量与三峡下泄水量的比例(以下简称补水比例)范围为2.96%~54.69%,其中11月上旬三峡水库下泄补水,实测平均流量较大,河道底水较高,补水效果优于其他月份,而1月份补水效果最差。对于枯水期1—3月,补水比例仅为2.96%~3.16%,并且水量仅能补充到松滋河,对虎渡河和藕池河基本没有效果。需要指出的是,本次采用的是典型年情况分析,由于不同年份来水情况存在差别,补水比例可能会有一定的差别。

3.2 水库增加下泄流量推迟弥陀寺站断流效果分析

通过3.1节分析,三峡水库增加下泄水量对于康家岗站影响不大,而沙道观站断流时间相对其他3个站短,本次分析推迟三口断流的方案将重点分析弥陀寺和管家铺站。

本次选取三峡水库运行后弥陀寺站长断流出现最早的时间(2013年10月12日)对应的流量过程,分析三峡增加下泄流量对推迟弥陀寺站断流的效果。2013年10月6日—2013年10月21日宜昌和弥陀寺站实测流量过程见图9。本次根据下泄量大小设计了2种增加下泄流量的方案,各个方案增加下泄时间均一致,增加下泄量不同,维持下泄的流量分别参考弥陀寺站断流前1天和前2天对应的宜昌站的日平均流量,分别

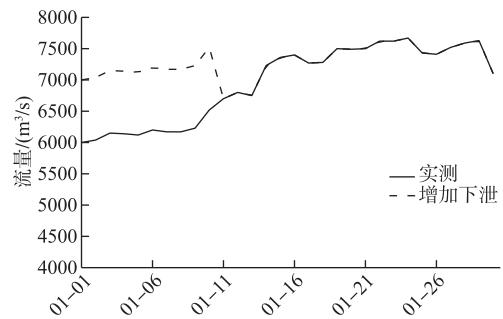


图8 2011年1月份情景模拟设置

Fig.8 Scenario simulation for January, 2011

表 6 三峡水库不同月份补水效果分析

Tab.6 Effect of water supplement in different months of the Three Gorges Reservoir

时间	宜昌平均流量/(m ³ /s)	补充水量/(万 m ³)	荆江三口增加水量/(万 m ³)					补水比例/%	
			新江口	沙道观	弥陀寺	康家岗	管家铺		
1月上旬	6170	86400	2559	0	0	0	0	2559	2.96
2月上旬	5850	86400	2044	684	0	0	0	2728	3.16
3月上旬	5870	86400	2032	685	0	0	0	2717	3.14
4月上旬	7330	86400	4646	594	615	0	1428	7283	8.43
9月上旬	10400	86400	16451	0	7697	0	8384	32532	37.7
10月上旬	7860	86400	10684	458	2464	0	5156	18762	21.7
11月上旬	15200	86400	20691	4819	9003	645	12094	47252	54.7
12月上旬	6340	86400	7584	0	0	0	954	8538	9.88

设定为 8000 和 8500 m³/s, 维持下泄流量的时间均为 10 d, 两种方案分别向下游增加水量为 6 亿和 10 亿 m³.

从补水效果(表 7)来看, 方案 1 中维持宜昌下泄流量为 8000 m³/s 条件下, 弥陀寺站断流时间没有变化, 补充水量为 0; 方案 2 中维持宜昌下泄流量为 8500 m³/s 条件下, 弥陀寺站断流推迟时间跟水库增加下泄时间一致, 均为 10 d, 补充水量为 0.028 亿 m³.

从可行性角度来讲, 可以在弥陀寺站断流时将宜昌站流量增加到断流前 2 天时的流量, 通过以上方法可以推迟弥陀寺站的断流时间, 推迟断流时间与水库增加下泄时间一致. 然而以上方法补水效果较差, 补水率仅为 0.28%, 在非必要条件下, 不推荐通过水库增加下泄流量方法推迟弥陀寺站的断流时间.

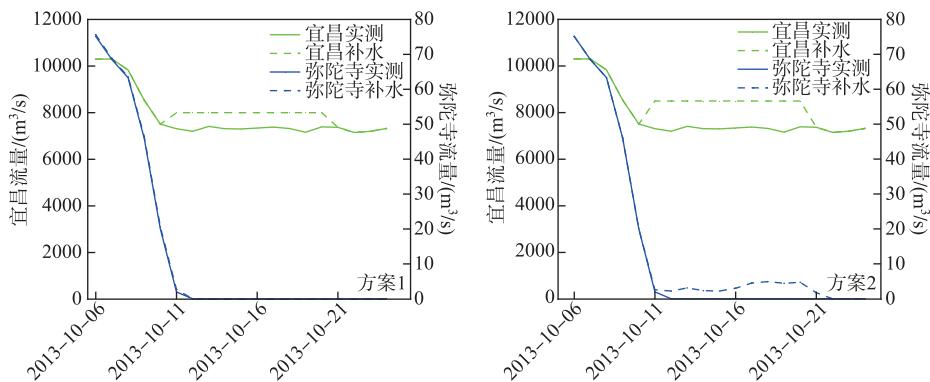


图 9 宜昌和弥陀寺站流量过程及补水效果

Fig.9 Flow for Yichang and Mituozi stations and effect of delaying the cut-off for Mituozi station

表 7 弥陀寺站不同补水方案及效果统计

Tab.7 Different plans and effect of delaying the cut-off for Mituozi station

方案	增加下泄 起止日期	维持宜昌流量/ (m ³ /s)	增加宜昌下泄水量/ (亿 m ³)	补充弥陀寺水量/ (亿 m ³)	推迟弥陀寺 断流时间/d
方案 1	10-11—10-20	8000	6	0	0
方案 2	10-11—10-20	8500	10	0.028	10

3.3 水库增加下泄流量推迟管家铺站断流效果分析

本次选取管家铺站长断流出现最早的时间(2009 年 10 月 5 日)对应的流量过程, 分析三峡增加下泄流量对推迟管家铺站断流的效果. 2009 年 9 月 30 日—10 月 24 日宜昌和管家铺站实测流量过程见图 10.

本次根据下泄量大小设计了2种增加下泄流量的方案(表8),维持下泄的流量分别参考管家铺站断流前1天和前2天对应的宜昌站的日平均流量,分别为8600和9040 m³/s,维持下泄流量的时间为10 d,两种方案分别向下游增加水量4亿和8亿m³.

由表8可以看出,在宜昌站不同量级条件下进行补水,效果也有不同.方案1中维持宜昌下泄流量为8600 m³/s的条件下,管家铺站断流推迟了12 d,补充水量为0.072亿m³;方案2中维持宜昌下泄流量为9040 m³/s的条件下,管家铺站断流推迟了12 d,补充水量为0.14亿m³.

从可行性角度来讲,可以在管家铺站断流时将宜昌站流量增加到断流前1天时的流量,通过以上方法可以推迟管家铺站的断流,推迟断流时间约为水库增加下泄时间的1.2倍.然而以上方法补水效果较差,补水率仅为0.18%,在非必要条件下,不推荐通过水库增加下泄流量方法推迟管家铺站断流.

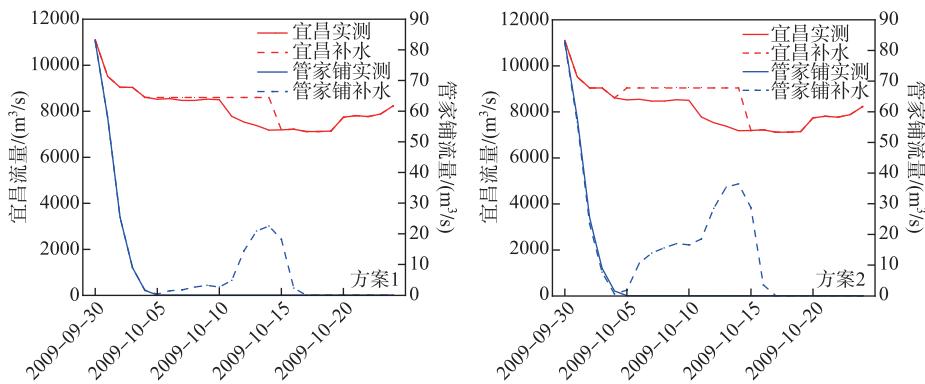


图10 宜昌和管家铺站流量过程及补水效果

Fig.10 Flow for Yichang and Guanjiapu stations and effect of delaying the cut-off for Guanjiapu station

表8 管家铺站不同补水方案及效果统计

Tab.8 Different plans and effect of delaying the cut-off for Guanjiapu station

方案	增加下泄 起止日期	维持宜昌 流量/ (m ³ /s)	增加宜昌 下泄水量/ (亿 m ³)	补充 管家铺水量/ (亿 m ³)	推迟管家铺 断流时间/d
方案 1	10-5—10-14	8600	4	0.072	12
方案 2	10-5—10-14	9040	8	0.14	12

4 结论

1)受人类活动以及天然来水减少的双重影响,荆江三口年均径流量和分流量持续减少,三峡水库运行后荆江三口分流量和分流量没有趋势性变化.相比1981—2002年,2003—2020年荆江三口汛期和退水期径流分别减少26%和40%,枯水期和涨水期径流分别增加了194%和17%.三口年均径流量在1978年发生突变,主要诱发因素是人类活动.

2)三峡蓄水以后,弥陀寺站断流持续时间有一定减少,其他三站断流持续时间均呈现增加的变化特征,其中管家铺站断流时间增加明显;管家铺站的通流条件有所改善,对应枝城站的通流流量均有所降低,其他三站通流时对应枝城站流量均有增加.

3)在假定三峡水库每个月上旬均增加8640万m³下泄水量情况下,相应的三口增加水量与三峡下泄水量的比例范围在2.96%~54.7%,其中11月补水效果优于其他月份,而1月份补水效果最差.对于枯水期1—3月,补水比例仅为2.96%~3.16%,并且补充的水量仅能补充到松滋河,对虎渡河和藕池河基本没有效果.

4)在枯水年情况下,水库将流量保持在弥陀寺站断流前2天对应宜昌站的流量,可推迟弥陀寺站断流

时间与水库维持增加下泄时间一致;水库将流量保持在管家铺站断流前1天对应宜昌站的流量,可推迟管家铺断流时间约为水库增加下泄时间的1.2倍。以上补水效果均较差,在非必要条件下,不推荐通过水库增加下泄流量方法推迟弥陀寺和管家铺站断流。本次通过数值模拟手段量化水库下泄补水的效果,对梯级水库科学制定蓄水、供水等联合调度方案提供科学参考。

5 参考文献

- [1] Liu CM, Li ZL, Wang ZG et al. Key scientific issues and research directions of the interconnected river system network. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(3): 505-512. [刘昌明, 李宗礼, 王中根等. 河湖水系连通的关键科学问题与研究方向. 地理学报, 2021, **76**(3): 505-512.]
- [2] Huang Q, Sun ZD, Jiang JH. Impacts of the operation of the Three Gorges Reservoir on the lake water level of Lake-Dongting. *J Lake Sci.*, 2011, **23**(3): 424-428. DOI: 10.18307/2011.0316. [黄群, 孙占东, 姜加虎. 三峡水库运行对洞庭湖水位影响分析. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 424-428.]
- [3] Li JB, Zhong YW, Zhou YQ et al. Impacts of the operation of Three Gorges Reservoir on the development and utilization of water resources of northern Dongting Lake area. *Journal of Natural Resources*, 2013, **28**(9): 1583-1593. [李景保, 钟苇, 周永强等. 三峡水库运行对洞庭湖北部地区水资源开发利用的影响. 自然资源学报, 2013, **28**(9): 1583-1593.]
- [4] Fan YY, Hu CY, Chen MF. Response of bed evolution in Jingjiang River to water and sediment process before and after operation of Three Gorges Reservoir. *Yangtze River*, 2020, **51**(10): 1-6. [樊咏阳, 胡春燕, 陈莫非. 三峡水库蓄水前后荆江河段冲淤与水沙过程响应. 人民长江, 2020, **51**(10): 1-6.]
- [5] Fang CM, Hu CH, Chen XJ. Impacts of Three Gorges Reservoir's operation on outflow of the three outlets of Jingjiang River and Dongting Lake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, **45**(1): 36-41. [方春明, 胡春宏, 陈绪坚. 三峡水库运用对荆江三口分流及洞庭湖的影响. 水利学报, 2014, **45**(1): 36-41.]
- [6] Xu QX, Hu GY, Yuan J. Research on the flow and sediment diversion in the three outlets along Jingjiang River in recent 50 years. *Journal of Sediment Research*, 2009, (5): 1-8. [许全喜, 胡功宇, 袁晶. 近50年来荆江三口分流分沙变化研究. 泥沙研究, 2009, (5): 1-8.]
- [7] Zhu LL, Chen JC, Yuan J et al. Study on variation trends of flow diversion from Jingjiang River to Dongting Lake. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, **34**(2): 103-111. [朱玲玲, 陈剑池, 袁晶等. 基于时段控制因子的荆江三口分流变化趋势研究. 水力发电学报, 2015, **34**(2): 103-111.]
- [8] Xu CJ, Liu DY, Zhang DD et al. Research on flow and sediment diversion in three outlets along Jingjiang River. *Yangtze River*, 2020, **51**(12): 203-209. [徐长江, 刘冬英, 张冬冬等. 2020年荆江三口分流分沙变化研究. 人民长江, 2020, **51**(12): 203-209.]
- [9] Li JB, He X, Yang B et al. Temporal evolution of dried up days and the influencing mechanisms at three outlets along Jingjiang in the middle reach of Yangtze River. *Journal of Natural Resources*, 2016, **31**(10): 1713-1725. DOI: 10.11849/zrzyxb.20151021. [李景保, 何霞, 杨波等. 长江中游荆南三口断流时间演变特征及其影响机制. 自然资源学报, 2016, **31**(10): 1713-1725.]
- [10] Xu ZM, Yao W, Ma Q et al. Influence of upstream reservoirs regulation on flow diversion of three distributaries along Jingjiang River. *Yangtze River*, 2018, **49**(13): 79-83, 103. [徐照明, 要威, 马强等. 三峡等上游水库水量调度对荆江三口分流的影响. 人民长江, 2018, **49**(13): 79-83, 103.]
- [11] 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. DOI: 10.11988/ckyyb.20181020. [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.]
- [12] Wang D, Fang JJ, Li YT et al. Changes in three diversion of Jingjiang River after Three Gorges Reservoir operation and its causes. *Water Resources and Power*, 2017, **35**(12): 74-77. [王冬, 方娟娟, 李义天等. 三峡水库蓄水后荆江三口分流变化及原因. 水电能源科学, 2017, **35**(12): 74-77.]
- [13] Hamed KH. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 2008, **349**(3/4): 350-363. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.11.009.
- [14] Hraniciuc TA, Craciun I, Giurma I. Flood mapping with mike flood model for a flood event reconstitution. *Journal of Envi-*

- ronmental Protection and Ecology, 2012, **13**(2) : 756-763.
- [15] Zhang DD, Dai ML, Xu GH et al. Research on change of the outflow of Dongting Lake during the refill period of the Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2019, **30**(5) : 613-622. [张冬冬, 戴明龙, 徐高洪等. 三峡水库蓄水期洞庭湖出湖水量变化. 水科学进展, 2019, **30**(5) : 613-622.]
- [16] Xu CJ, Xu GH, Dai ML et al. Study on hydrological regime variation in Dongting Lake during water storage period of Three Gorges Reservoir. *Yangtze River*, 2019, **50**(2) : 6-12. [徐长江, 徐高洪, 戴明龙等. 三峡水库蓄水期洞庭湖区水文情势变化研究. 人民长江, 2019, **50**(2) : 6-12.]
- [17] Dole WP, Jackson DL, Rosenblatt JI et al. Relative error and variability in blood flow measurements with radiolabeled microspheres. *The American Journal of Physiology*, 1982, **243**(3) : 371-378. DOI: 10.1152/ajpheart.1982.243.3.H371.
- [18] Moriasi DN, Arnold JG, Liew MWV et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, **50**(3) : 885-900. DOI: 10.13031/2013.23153.
- [19] 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.]
- [20] 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.]
- [21] Li JB, Zhou YQ, Ou CM et al. Evolution of water exchange ability between Dongting Lake and Yangtze River and its response to the operation of the Three Gorges Reservoir. *Acta Geographica Sinica*, 2013, **68**(1) : 108-117. [李景保, 周永强, 欧朝敏等. 洞庭湖与长江水体交换能力演变及对三峡水库运行的响应. 地理学报, 2013, **68**(1) : 108-117.]