

1955 年以来入洞庭湖的荆江三口分流变化*

朱博渊^{1,2**}, 徐琪^{1,2}, 朱玲玲³, 李义天⁴

(1: 长沙理工大学水利与环境工程学院, 长沙 410114)

(2: 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 长沙 410114)

(3: 长江水利委员会水文局, 武汉 430010)

(4: 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 近 70 年来荆江三口分流持续减少, 为分析各历史阶段三口分流变化的驱动因素, 根据 1955—2021 年干流水文、地形实测资料开展研究, 并基于控制变量法识别各驱动因素贡献比例。结果表明: 三口分流阶段性减少, 且集中在 5—11 月。长江上游降雨减少导致的干流来流偏枯以及下荆江裁弯、葛洲坝拦沙造成的干流河道冲刷和三口口门淤积对三口分流减少促进作用明显, 调弦口堵口对三口分流影响不大, 三峡水库蓄水后干流河道与三口口门同步冲刷, 三口分流变化不大。长江上游汛期降雨减少明显, 对 5—11 月三口分流减少影响较大, 且三口分流主要发生于汛期干流中洪水位时, 导致在下荆江裁弯期干流河床大幅下切条件下 5—11 月分流显著减少; 葛洲坝调度、三峡水库初期调度和试验性蓄水调度也集中于 5—11 月, 使得 5—11 月三口分流量分别减小 0.4×10^8 、 12.5×10^8 和 $38.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。调弦口堵口对三口分流的增大作用远小于降雨的减小作用, 贡献比例为负值; 下荆江裁弯对三口分流减少的贡献比例达 85%; 水库运用期降雨对三口分流减少的贡献最大, 贡献比例大于 50%, 葛洲坝调度几乎不产生贡献、下游河道调整贡献比例为 21%, 三峡水库初期调度贡献比例增大至 7%、下游河道调整贡献比例为 10%, 试验性蓄水期则分别上升至 23% 和 19%。长江上游降雨减少至少持续到本世纪末, 三口分流量年均值将长期呈减少趋势, 而荆江干流与三口口门同步冲刷, 干流同流量下三口分流仍将变化不大。

关键词: 荆江河段; 三口; 分流变化; 驱动因素; 贡献比例; 洞庭湖

Variations in water diversion at three outlets to Lake Dongting from Jingjiang River based on the identification of multiple factor contributions since 1955*

Zhu Boyuan^{1,2**}, Xu Qi^{1,2}, Zhu Lingling³ & Li Yitian⁴

(1: *School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P.R. China*)

(2: *Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, P.R. China*)

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

(4: *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R. China*)

Abstract: Over the past 70 years, the water diversion at the three outlets of the Jingjiang River has been continuously decreasing. In order to investigate the driving factors at different historical stages, this study used the measured hydrological data of the hydrology and topographic features of the mainstream and tributaries from 1955 to 2021, and identified the contributions of the factors based on the variable control approach. The results showed that the water diversion had gradually decreased, and the decrease had

* 2022-11-28 收稿; 2023-01-27 收修改稿。

湖南省自然科学基金项目(2021JJ40607)、流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目(IWHR-SKL-KF202211)、国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2240224)和湖南省教育厅科学研究重点项目(20A011)联合资助。

** 通信作者; E-mail: boyuan@csust.edu.cn。

mainly occurred from May to November. The decrease in water diversion was greatly aggravated by the reduced mainstream inflow due to the decrease in precipitation in the upper Yangtze, and the erosion of the mainstream bed and deposition at the three outlets caused by the dam projects in the lower Jingjiang River and the sediment trap in the Gezhouba. However, the Tiaoxiankou dam had little effect on water diversion. Since the damming of the Three Gorges Reservoir (TGR), the mainstream and the three tributaries had experienced synchronous riverbed erosion, resulting in an imperceptible change in water diversion. The reduction in rainfall had been concentrated in the rainy season, which had had a major impact on the reduction in water diversion from May to November. Meanwhile, water diversion was mainly concentrated in the rainy season when the mainstream was at flood level, resulting in a large decrease in water diversion from May to November, while the Lower Jingjiang Cutoff Projects triggered a large lowering of the mainstream riverbed. In addition, the operation of Gezhouba, the initial damming of TGR and the experimental damming of TGR were mainly carried out from May to November, reducing water diversion by $0.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, $12.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $38.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. The enabling effect of the Tiaoxiankou dam on water diversion was far less than the constraining effect of rainfall reduction, resulting in a negative contribution ratio for the dam. In comparison, the contribution ratio of the lower Jingjiang dam projects reached 85%. In the post-dam period, precipitation dominated water diversion reduction with a contribution ratio of more than 50%, while Gezhouba operation hardly played a role and its downstream riverbed adjustment produced a contribution ratio of 21%. During the initial and experimental damming of the TGR, the contribution ratios of its operation increased to 7% and 23%, respectively, while those of its downstream riverbed adjustment were 10% and 19%. As the precipitation decline in the upper Yangtze will continue at least until the end of this century, the annual water diversion will show a long-term downward trend, while the water diversion at a given mainstream flow will change little due to synchronous riverbed erosion between the mainstream and the three outlets.

Keywords: Jingjiang River; three outlets; water diversion change; driving factor; contribution ratio; Lake Dongting

荆江三口包括长江荆江河段南岸松滋口、太平口和藕池口,是连接长江与洞庭湖的纽带^[1-4](图1)。历史上还有调弦口分荆江干流水沙入洞庭湖,但该口门于1958年冬建闸控制^[5]。受自然条件和人类活动影响,近70年来荆江三口分流持续减少,对江湖关系调整产生直接作用^[2-4,6-8]。

1950s开始,长江上游降雨偏少^[9-10],使得长江中游干流年径流量减小,荆江三口分流相应减少。1960s以后,下荆江裁弯增大河道水面比降、葛洲坝拦沙和长江上游水土保持工程减少荆江河段来沙量,荆江河段总体冲刷^[11-15],至三峡水库蓄水前10年左右,冲刷趋势已明显减弱;三峡水库蓄水后,下泄水流含沙量大幅减小,下游河道再次出现显著冲刷^[15-20]。三峡水库蓄水前,荆江干流与三口洪道冲淤性质相反,干流冲刷、三口洪道淤积,干流与三口口门水位差减小,导致三口分流持续减少^[11-15,19-23];三峡水库蓄水后,三口分流变化不大,原因为荆江干流与三口洪道均表现为冲刷,干支流水位均下降,缓解了分流减少趋势,但三口分流年内过程受三峡水库调蓄径流的影响重新分配^[19-20,24-29]。关于三口分流变化趋势,现有认识为分流量年均值取决于干流来水量,但干流同流量下分流变化不大^[19-22,25]。

基于控制变量法,现有研究重点识别了三峡水库运用对荆江三口分流变化的影响。如2003—2014年三峡水库汛前枯水补偿调度使得三口分流量年均增加 $8 \times 10^8 \text{ m}^3$,汛后蓄水使得三口分流量年均减小 $29 \times 10^8 \text{ m}^3$,对三口分流量综合影响为年均减小 $21 \times 10^8 \text{ m}^3$,占同期三口年均分流量的4.29%^[20];降雨、水库调度和河道调整在水库运行初期(2003—2008年)和优化调度后(2009—2015年)对三口分流量减小的贡献比例分别为76.19%、10.32%、13.49%和66.05%、19.75%、14.20%^[26];三峡水库优化调度后(2008—2017年),水库调度在汛前消落期、汛期、汛末蓄水和枯水期分别使得三口多年平均分流量变化23.94%、-3.54%、-37.18%和5.61%,河道调整在以上4个时期分别使得三口多年平均分流量变化-15.37%、2.32%、-2.92%和-20.24%^[27]。

当前,关于三口分流减少过程、机制和变化趋势的研究成果已较为丰富,其中对于驱动因素贡献比例的定量识别集中于三峡水库不同调度期。而三口分流变化的历史过程受降雨变化、调弦口堵口、下荆江裁弯、葛洲坝运用和三峡水库运用等多因素驱动作用,目前对各因素影响的系统性研究尚显不足,特别是对各因素贡献比例的量化,据此开展相关研究工作将有助于实时确定江湖关系演变的控导因素,科学调整治理对策。本文根据长江干流和三口洪道1955—2021年实测水文、地形资料分析三口分流变化过程和原因,采用控制变量法量化不同历史阶段各驱动因素贡献,为三口分流变化趋势和荆江—洞庭湖区规划整治提供参考。

1 三口分流时序变化特点

1.1 各阶段年均变化特点

如图 1 所示,松滋口分流量以新江口站和沙道观站代表,太平口分流量以弥陀寺站代表,藕池口分流量以康家岗站和管家铺站代表,各口门分流比则是对应分流量在枝城站来流量中的占比。

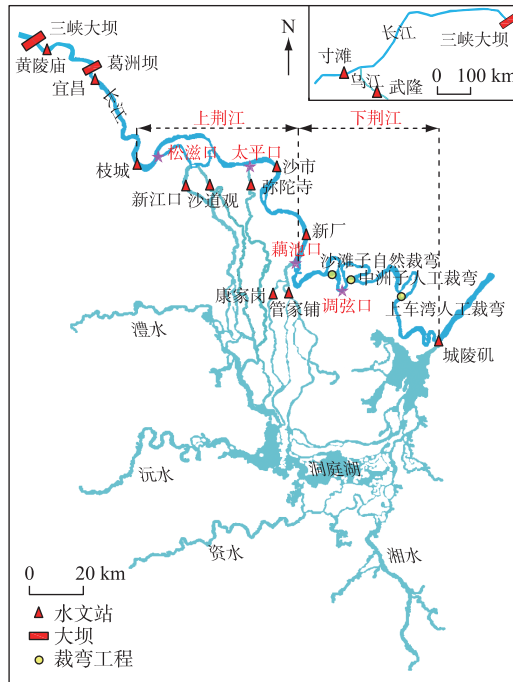


图 1 荆江—洞庭湖分汇关系与水利工程、水文站位置

Fig.1 Connection between Jingjiang River and Lake Dongting, and locations of water conservancy projects and hydrological stations

三口分流变化分为 6 个阶段(图 2):调弦口堵口前(1955—1958 年),三口分流量和分流比年均值分别为 $1348 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 31%;调弦口堵口至下荆江裁弯前(1959—1966 年),三口分流量和分流比年均值分别为 $1298 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 29%,较上一阶段分别减小 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 2%;下荆江裁弯至葛洲坝运用前(1967—1980 年),三口分流量和分流比年均值分别为 $880 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 20%,较上一阶段分别减小 $418 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 9%;葛洲坝运用至三峡水库初期蓄水前(1981—2002 年),三口分流量和分流比年均值分别为 $664 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 15%,较上一阶段分别减小 $216 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 5%;三峡水库初期蓄水至试验性蓄水前(2003—2008 年),三口分流量和分流比年均值分别为 $475 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 12%,较上一阶段分别减小 $189 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 3%;三峡水库试验性蓄水后(2009—2021 年),三口分流量年均值为 $493 \times 10^8 \text{ m}^3$,较上一阶段略有增大,增大值为 $18 \times 10^8 \text{ m}^3$,三口分流比年均值与上一阶段相同。

1.2 各阶段 5—11 月变化特点

荆江三口分流减少集中在 5—11 月(表 1)。1959—1966 年与 1955—1958 年相比,5—11 月三口分流量减小 $41 \times 10^8 \text{ m}^3$,三口分流比减小 3%;1967—1980 年与 1959—1966 年相比,5—11 月三口分流量减小 $386 \times 10^8 \text{ m}^3$,三口分流比减小 9%;1981—2002 年与 1967—1980 年相比,5—11 月三口分流量减小 $210 \times 10^8 \text{ m}^3$,三口分流比减小 7%;2003—2008 年与 1981—2002 年相比,5—11 月三口分流量减小 $178 \times 10^8 \text{ m}^3$,三口分流比减小 2%,其中 10 月为蓄水期,分流比减小幅度最大,减小值为 4.7%;2009—2021 年与 2003—2008 年相比,5—11 月三口分流量和分流比均略有增大,增大值分别为 $7.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 0.2%。以上各阶段 5—11 月三口分

流量减小值的平均值为 $169 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、占年均减小值的 98%，分流比减小值的平均值为 4%。12 月至次年 4 月，三口分流量和分流比减小值均很小，各阶段减小值的平均值分别为 $4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 1%。

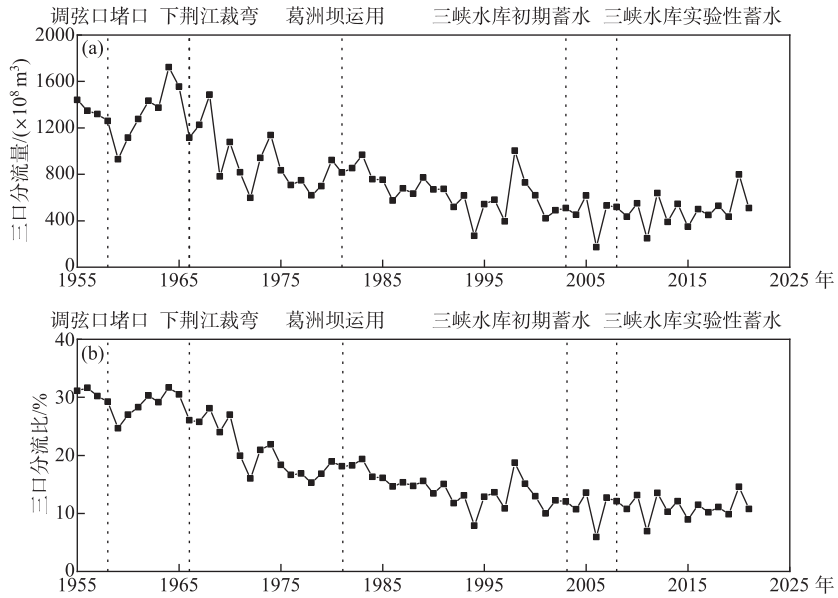


图 2 三口分流量(a)和分流比(b)各阶段变化

Fig.2 Stage change in water diversion volume (a) and ratio (b) at the three outlets

表 1 各阶段三口月均分流量与分流比

Tab.1 Monthly water diversion volume and ratio at the three outlets for each stage

月份	分流量/($\times 10^8 \text{ m}^3$)					分流比/%						
	1955—1958 年	1959—1966 年	1967—1980 年	1981—2002 年	2003—2008 年	2009—2021 年	1955—1958 年	1959—1966 年	1967—1980 年	1981—2002 年	2003—2008 年	2009—2021 年
1	4.2	3.2	2.2	2.6	0.1	2.5	3.8	2.9	2.0	2.1	0.0	1.3
2	2.2	1.4	3.3	7.3	0.0	1.7	2.3	1.4	3.6	2.2	0.0	0.9
3	3.2	5.0	5.7	6.5	0.1	2.9	3.0	4.1	4.8	3.3	0.1	1.5
4	15.9	18.8	17.6	10.6	3.8	9.0	9.8	11.0	9.3	6.0	2.0	3.6
5	73.3	66.1	60.1	27.8	17.3	30.1	22.5	21.6	17.0	9.3	6.0	8.3
6	161.3	129.4	110.5	71.8	59.0	61.0	34.0	28.3	21.9	15.0	13.3	13.0
7	352.3	286.8	204.2	192.0	127.0	143.5	42.6	36.9	27.4	21.9	18.5	20.0
8	338.5	263.4	171.4	158.1	110.6	114.2	43.5	36.0	25.4	20.8	18.1	17.9
9	216.0	259.8	166.1	128.4	114.8	79.4	38.2	36.2	24.8	19.4	18.4	15.0
10	122.7	167.1	107.9	51.9	21.9	31.0	30.4	32.1	21.3	10.9	6.2	8.7
11	49.9	63.7	30.0	10.5	11.1	9.7	22.1	21.9	11.4	4.1	4.6	3.8
12	13.3	15.6	7.2	1.2	0.6	2.3	8.5	9.6	3.8	0.7	0.4	1.0

2 三口分流变化驱动因素

2.1 各阶段年均变化及原因

导致荆江三口分流量年均值持续减少的自然因素主要为降雨减少引发的干流来流偏枯。如图 3 所示, 长江上游降雨量在 1970 年以后多数低于多年平均值, 且枝城站年径流量随上游年降雨量同步减小关系较好,

使得三口年分流量相应减小。统计结果表明, 1955—1958、1959—1966、1967—1980、1981—2002、2003—2008 和 2009—2021 年 6 个阶段长江上游降雨量多年平均值分别为 981、933、820、808、801 和 841 mm。

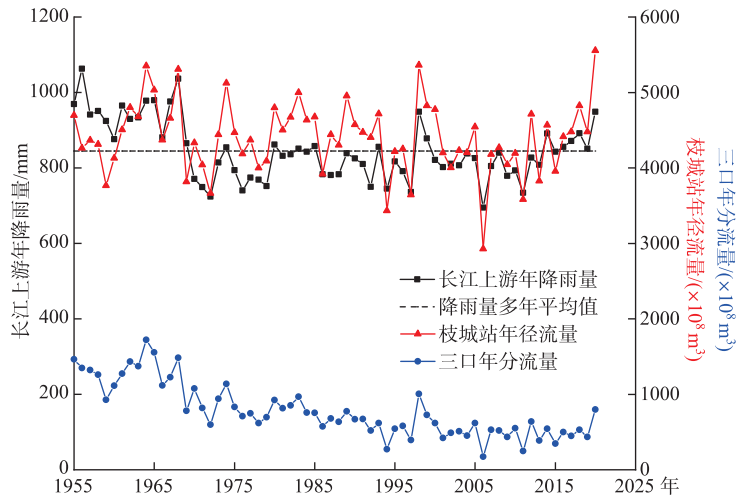


图 3 长江上游年降雨量、枝城站年径流量和三口年分流量变化

Fig.3 Variation in yearly precipitation of upper Yangtze, yearly water discharge at Zhicheng station and yearly water diversion volume at the three outlets

人类活动影响主要体现在三口分流阶段性变化上:

1) 调弦口堵口前(1955—1958年): 枝城站同水位下流量变化不大(图 4a1), 说明荆江河段冲淤平衡。以图 1 中枝城站、沙市站、新厂站水位近似代表三口口门水位, 松滋口、太平口口门同水位下分流流量变化不大(图 4b1), 说明口门冲淤变化不大; 藕池口口门 35 和 37 m 水位下分流流量略有减小(图 4b1), 说明口门略有淤积。以上对干支流水位差影响不大, 该阶段三口分流随降雨减少(图 3)。

2) 调弦口堵口至下荆江裁弯前(1959—1966年): 枝城站同水位下流量变化不大, 略有增加(图 4a1), 说明荆江河段基本冲淤平衡, 略有冲刷。松滋口、太平口口门同水位下分流流量变化不大(图 4b1), 说明口门冲淤变化不大; 藕池口口门同水位下分流流量减小较上一阶段明显(图 4b1), 说明口门淤积。以上使得干流水位差变小, 促进该阶段三口分流减少。调弦口堵口应利于三口分流增加, 但由于调弦口堵口前年均分流量仅 $120 \times 10^8 \text{ m}^3$ [30], 占枝城站年径流量 3%, 因而对三口分流促进作用不明显。

3) 下荆江裁弯至葛洲坝运用前(1967—1980年): 干流河道缩短, 水面比降和河道流速明显增大, 河床下切, 枝城站 38.00、42.00 和 46.00 m 水位下流量平均值分别较裁弯前增大 148、1399 和 1732 m^3/s (图 4a1)。松滋口、太平口和藕池口口门相同水位下分流流量均减小(图 4b1), 说明口门均表现为淤积, 其中藕池口口门淤积幅度最大。具体而言, 松滋口口门 39.00、43.00 和 47.00 m 水位下分流流量平均值分别较裁弯前减小 62.94 和 217 m^3/s , 太平口口门 35.00、37.00 和 40.00 m 水位下分流流量平均值分别较裁弯前减小 10、6 和 44 m^3/s , 藕池口口门 33.00、35.00 和 37.00 m 水位下分流流量平均值分别较裁弯前减小 207、721 和 1218 m^3/s 。以上使得干支流水位差相比于上一阶段减小幅度显著增加, 导致三口分流明显少于上一阶段。

4) 葛洲坝运用至三峡水库运用前(1981—2002年): 干流河床继续下切, 枝城站以上各水位对应流量平均值分别较上一阶段增大 1019、1972 和 1063 m^3/s (图 4a1)。松滋口、太平口、藕池口口门同水位下分流流量均减小(图 4b1), 说明口门仍整体表现为淤积, 但松滋口、藕池口口门在 1998 年洪水后由淤转冲(图 4b1), 太平口口门中枯水河槽 1990 年以后由淤转冲(图 4b1)。具体而言, 松滋口口门 39.00、43.00 和 47.00 m 水位下分流流量平均值分别较裁弯期减小 51、136 和 267 m^3/s ; 太平口口门 35.00、37.00 和 40.00 m 水位下分流流量平均值分别较裁弯期减小 81、61 和 144 m^3/s ; 藕池口口门 33.00、35.00 和 37.00 m 水位下分流流量平均值分别较裁弯期减小 125、452 和 1510 m^3/s 。以上使得干支流水位差相比于上一阶段进一步减小, 导

致该阶段三口分流继续减少,但1998年以后同水位下分流减少速率趋缓。

5) 三峡水库运用后(2003—2021年):三口附近干流河床冲淤并存、以冲刷为主,深泓最大下切幅度在2.6~8.2 m之间(图4a2~a7)。松滋口、太平口、藕池口口门也表现为冲刷,其中松滋口口门冲刷幅度最大,藕池口口门次之,太平口口门冲刷幅度最小,深泓最大下切幅度在0.8~8.7 m之间(图4b2~b4)。干流河床与三口口门断面同步冲刷,水位差相比于上一阶段增大,有助于缓解三口分流减少趋势。故该阶段三口分流相比于上一阶段减幅变小,且阶段内无明显变化。2003—2008年至2009—2021年三口分流略有增大的原因为后一阶段长江上游降雨量偏大,导致枝城站年径流量偏大(图3)。

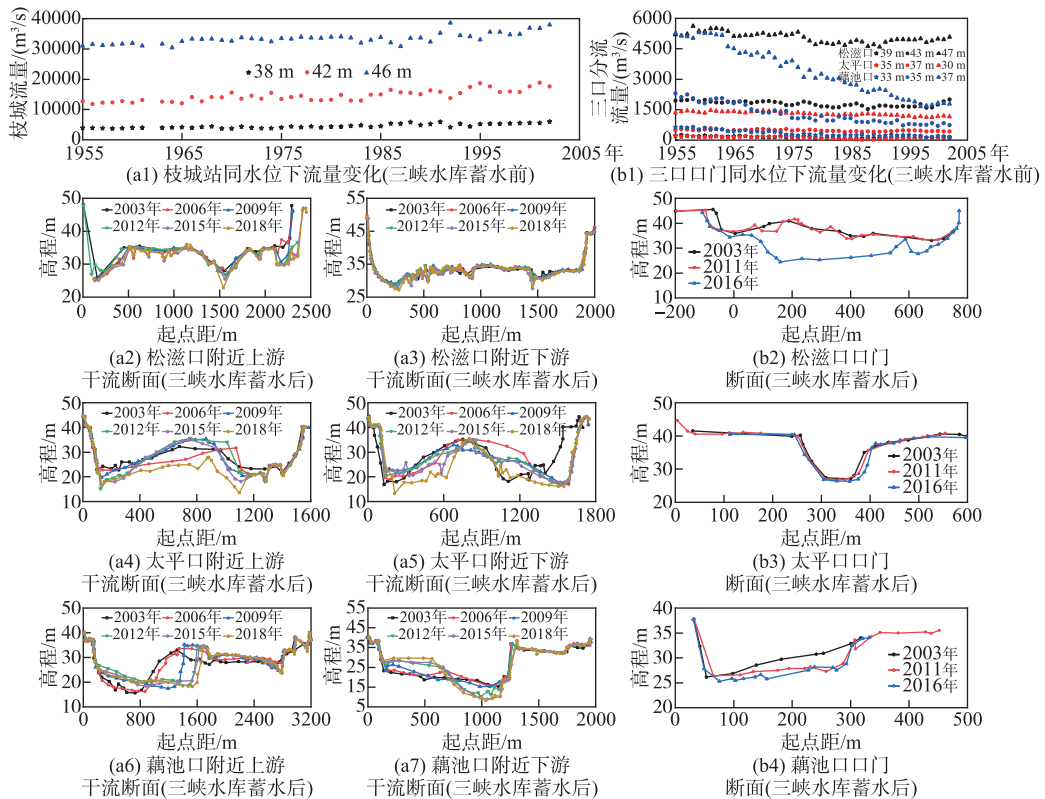


图4 荆江干流及三口口门冲淤变化

Fig.4 Erosion-deposition at Jingjiang River and the three outlets

2.2 各阶段5—11月变化及原因

长江上游降雨减少主要集中在汛期,枯期减少不显著^[10,31],故汛期降雨减少对各阶段5—11月三口分流持续减少作用明显。各阶段人类活动对5—11月三口分流减少的影响分析如下:

1) 调弦口堵口前(1955—1958年):人类活动不显著,5—11月三口分流减少主要受降雨减少影响。

2) 调弦口堵口至下荆江裁弯前(1959—1966年):根据调弦口闸运行方式^[32],5—11月基本不开闸,故对该时期三口分流应是促进作用,遇长江干流发生大洪水需要承担分洪任务时,最大分洪流量应控制在华容河泄流能力 $980 \text{ m}^3/\text{s}$ 以内^[5],仅占枝城站同期流量5%,故对5—11月三口分流减少的影响很小。

3) 下荆江裁弯至葛洲坝运用前(1967—1980年):裁弯造成干流河道大幅下切,由于三口分流主要与干流中洪水位有关^[19-20],故汛期5—11月河床下切造成的三口分流减少幅度更大^[20,23]。前文统计结果显示,三口年均分流该阶段相比上一阶段减小 $418 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中5—11月减小 $386 \times 10^8 \text{ m}^3$,占比92%,且该阶段相比上一阶段年均分流比与5—11月分流比的减小值相同。

水库蓄水后,为分析水库调度对三口分流月均值的影响,对无水库调度时枝城站月均流量按下式还原:

$$Q_{\text{还原}} = Q_{\text{实测}} + Q_{\text{入库}} - Q_{\text{出库}} \quad (1)$$

式中, $Q_{\text{还原}}$ 为枝城站还原月均流量 (m^3/s); $Q_{\text{实测}}$ 为枝城站实测月均流量 (m^3/s); $Q_{\text{入库}}$ 、 $Q_{\text{出库}}$ 分别代表水库入、出库月均流量 (m^3/s)。三峡水库入库流量为干流寸滩站与支流武隆站流量之和, 出库流量代表站为黄陵庙站, 葛洲坝入、出库流量代表站分别为黄陵庙站和宜昌站, 各水文站位置见图 1。

4) 葛洲坝运用至三峡水库运用前 (1981—2002 年)、三峡水库初期蓄水期 (2003—2008 年) 和三峡水库试验性蓄水以来 (2009—2021 年) 的 $Q_{\text{还原}}$ 分别见附表 I、附表 II 和附表 III。

干流向三口口门分流的过程类比堰流模式^[33], 分流流量大小主要取决于荆江干流与三口洪道水位 (或三口口门河底高程) 差^[19-20, 22, 34], 通常可借助多项式或幂函数建立分流流量与该差值或与干流流量 (水位) 较好的相关关系^[22, 26-27, 29]。经统计, 本文各历史阶段采用一元二次多项式拟合荆江三口与枝城站实测月均流量关系的相关系数整体最大, 故应用于定量研究中。各水库调度阶段的拟合关系见图 5。

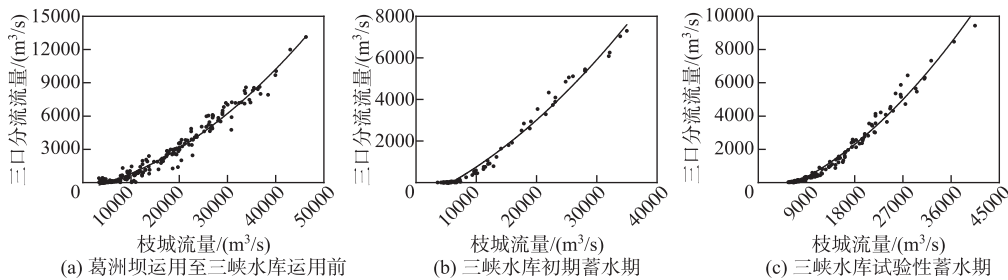


图 5 各水库调度阶段荆江三口与枝城站实测月均流量拟合关系

Fig.5 Fitting curve of monthly discharges between the three outlets and Zhicheng station at each stage of reservoir operation

5) 葛洲坝运用至三峡水库运用前 (1981—2002 年): 图 5(a) 中三口与枝城站实测月均流量拟合关系式为:

$$q_{\text{实测}} = 4 \times 10^{-6} Q_{\text{实测}}^2 + 0.098 Q_{\text{实测}} - 594 \quad (R^2 = 0.97) \quad (2)$$

式中, $q_{\text{实测}}$ 为三口实测月均流量 (m^3/s); R 为相关系数。

将附表 I 中 $Q_{\text{实测}}$ 和 $Q_{\text{还原}}$ 代入式(2), 得到三口实测和还原月均流量 $q'_{\text{实测}}$ 和 $q_{\text{还原}}$ 的计算值, 进一步比较 $q'_{\text{实测}}$ 与 $q_{\text{还原}}$, 可得到葛洲坝调度造成的三口各月分流流量变化。根据附表 I 中 $q'_{\text{实测}} - q_{\text{还原}}$ 结果可知, 葛洲坝调度使得 5—11 月三口分流流量减小 $0.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 12 月至次年 4 月分流流量减小 $0.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年均分流流量整体减小 $0.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

6) 三峡水库初期蓄水期 (2003—2008 年): 三口与枝城站实测月均流量拟合关系式 (图 5(b)) 为:

$$q_{\text{实测}} = 3 \times 10^{-6} Q_{\text{实测}}^2 + 0.129 Q_{\text{实测}} - 864 \quad (R^2 = 0.99) \quad (3)$$

将附表 II 中 $Q_{\text{实测}}$ 和 $Q_{\text{还原}}$ 代入式(3), 同理得到三峡水库初期蓄水期调度造成的三口各月分流流量变化。根据附表 II 中 $q'_{\text{实测}}$ 和 $-q_{\text{还原}}$ 结果可知, 三峡水库初期蓄水期调度使得 5—11 月三口分流流量减小 $12.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 12 月至次年 4 月分流流量增大 $0.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年均分流流量整体减小 $12.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

7) 三峡水库试验性蓄水以来 (2009—2021 年), 三口与枝城站实测月均流量拟合 (图 5(c)) 关系式为:

$$q_{\text{实测}} = 6 \times 10^{-6} Q_{\text{实测}}^2 + 0.065 Q_{\text{实测}} - 715 \quad (R^2 = 0.98) \quad (4)$$

将附表 III 中 $Q_{\text{实测}}$ 和 $Q_{\text{还原}}$ 代入式(4), 同理得到三峡水库试验性蓄水期调度造成的三口各月分流流量变化。根据附表 III 中 $q'_{\text{实测}} - q_{\text{还原}}$ 结果可知, 三峡水库试验性蓄水期调度使得 5—11 月三口分流流量减小 $38.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 12 月至次年 4 月分流流量增大 $1.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年均分流流量整体减小 $37.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

因此, 葛洲坝和三峡水库调度造成的季节和年均三口分流减小量中, 5—11 月减小量占主要部分, 对表 1 中对应阶段的 5—11 月三口分流减少具有促进作用。此外, 5—11 月是水库拦蓄泥沙的主要时期, 拦沙造

成干流河床冲刷,也利于该时期三口分流减少。

3 多驱动因素对三口分流时序变化的各自贡献比例

葛洲坝运用至三峡水库运用前(1981—2002年)、三峡水库初期蓄水期(2003—2008年)和三峡水库试验性蓄水期(2009—2021年)荆江三口月均分流流量与枝城站月均流量的拟合关系见图5和式(2)~(4),调弦口堵口前(1955—1958年)、调弦口堵口至下荆江裁弯前(1959—1966年)和下荆江裁弯至葛洲坝运用前(1967—1980年)各阶段拟合关系见图6和式(5)~(7)。

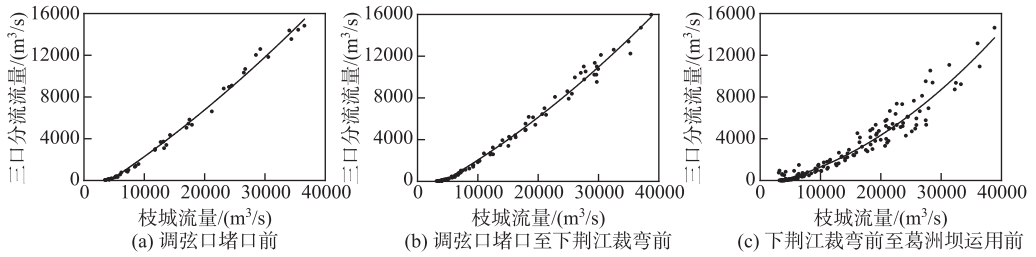


图6 水库调度前各阶段荆江三口与枝城站实测月均流量拟合关系

Fig.6 Fitting curve of monthly discharges between the three outlets and Zhicheng station at each stage before reservoir operation

$$q_{\text{实测}} = 3 \times 10^{-6} Q_{\text{实测}}^2 + 0.361 Q_{\text{实测}} - 1612 \quad (R^2 = 0.99) \quad (1955-1958 \text{ 年}) \quad (5)$$

$$q_{\text{实测}} = 4 \times 10^{-6} Q_{\text{实测}}^2 + 0.303 Q_{\text{实测}} - 1343 \quad (R^2 = 0.99) \quad (1959-1966 \text{ 年}) \quad (6)$$

$$q_{\text{实测}} = 4 \times 10^{-6} Q_{\text{实测}}^2 + 0.107 Q_{\text{实测}} - 443 \quad (R^2 = 0.94) \quad (1967-1980 \text{ 年}) \quad (7)$$

3.1 调弦口堵口和下荆江裁弯

调弦口堵口和下荆江裁弯对三口分流变化的贡献计算如下:

$$\Delta q_{\text{年均-工程}} = \sum_{i=1}^{12} [f_{\text{工程后}}(Q_{\text{实测-工程后}}) - f_{\text{工程前}}(Q_{\text{实测-工程后}})] \quad (8)$$

式中, $\Delta q_{\text{年均-工程}}$ 代表堵口或裁弯造成的三口年均分流流量变化(m^3/s); $f_{\text{工程前}}$ 代表堵口或裁弯前三口月均分流流量与枝城站月均流量的拟合关系,即式(5)或式(6); $f_{\text{工程后}}$ 代表堵口或裁弯后的拟合关系,即式(6)或式(7); $Q_{\text{实测-工程后}}$ 代表堵口或裁弯后的枝城站实测月均流量(m^3/s)。

调弦口堵口或下荆江裁弯前后三口分流流量总变化为:

$$\Delta q_{\text{年均-全}} = q_{\text{年均-工程后}} - q_{\text{年均-工程前}} \quad (9)$$

式中, $q_{\text{年均-工程后}}$ 代表堵口或裁弯后三口实测年均分流流量(m^3/s); $q_{\text{年均-工程前}}$ 代表堵口或裁弯前三口实测年均分流流量(m^3/s)。

则调弦口堵口或下荆江裁弯前后降雨变化引起的三口年均分流流量变化为:

$$\Delta q_{\text{年均-降雨}} = \Delta q_{\text{年均-全}} - \Delta q_{\text{年均-工程}} \quad (10)$$

因此,调弦口堵口/下荆江裁弯和降雨变化对三口分流变化的贡献比例分别为:

$$P_{\text{堵口}} = \frac{\Delta q_{\text{年均-工程}}}{\Delta q_{\text{年均-全}}} \times 100\% \quad (11)$$

$$P_{\text{降雨}} = \frac{\Delta q_{\text{年均-降雨}}}{\Delta q_{\text{年均-全}}} \times 100\% \quad (12)$$

3.2 水库运用

葛洲坝和三峡水库运用后,水库调度和水库下游河道调整均引起三口分流变化,对三口分流的影响可分别计算如下:

$$\Delta q_{\text{年均-调度}} = \overline{q'_{\text{实测}}} - q_{\text{还原}} \quad (13)$$

式中, $\Delta q_{\text{年均-调度}}$ 为水库调蓄下泄径流过程造成的三口年均分流流量变化 (m^3/s); $\overline{q'_{\text{实测}} - q_{\text{还原}}}$ 为附表 I、附表 II 和附表 III 中 $q'_{\text{实测}} - q_{\text{还原}}$ 的平均值 (m^3/s)。

$$\Delta q_{\text{年均-河道调整}} = \sum_{i=1}^{12} [f_{\text{蓄水后}}(Q_{\text{实测-蓄水后}}) - f_{\text{蓄水前}}(Q_{\text{实测-蓄水后}})] \quad (14)$$

式中, $\Delta q_{\text{年均-河道调整}}$ 代表水库下游河道调整造成的三口年均分流流量变化 (m^3/s); $f_{\text{蓄水前}}$ 、 $f_{\text{蓄水后}}$ 分别代表蓄水前和蓄水后三口月均分流流量和枝城站月均流量的拟合关系, 葛洲坝运用前后分别为式(7)和式(2), 三峡水库初期蓄水运用前后分别为式(2)和式(3), 三峡水库试验性蓄水运用前后分别为式(3)和式(4); $Q_{\text{实测-蓄水后}}$ 代表蓄水后枝城站实测月均流量 (m^3/s)。

水库运用前后, 三口分流流量总变化为:

$$\Delta q'_{\text{年均-全}} = q_{\text{年均-蓄水后}} - q_{\text{年均-蓄水前}} \quad (15)$$

式中, $q_{\text{年均-蓄水后}}$ 、 $q_{\text{年均-蓄水前}}$ 分别代表蓄水后和蓄水前三口实测年均分流流量 (m^3/s)。

则水库运用前后降雨变化引起的分流流量变化为:

$$\Delta q'_{\text{年均-降雨}} = \Delta q'_{\text{年均-全}} - \Delta q_{\text{年均-调度}} - \Delta q_{\text{年均-河道调整}} \quad (16)$$

因此, 水库调度、下游河道调整和降雨变化对三口分流变化的贡献比例分别为:

$$P_{\text{调度}} = \frac{\Delta q_{\text{年均-调度}}}{\Delta q'_{\text{年均-全}}} \times 100\% \quad (17)$$

$$P_{\text{河道调整}} = \frac{\Delta q_{\text{年均-河道调整}}}{\Delta q'_{\text{年均-全}}} \times 100\% \quad (18)$$

$$P'_{\text{降雨}} = \frac{\Delta q'_{\text{年均-降雨}}}{\Delta q'_{\text{年均-全}}} \times 100\% \quad (19)$$

根据式(8)~(19)计算得到各驱动因素贡献比例(表2), 可以看出: 调弦口堵口促使三口分流增大, 贡献比例为35%, 但在降雨减少背景下, 无法遏制三口分流减少趋势。下荆江裁弯对三口分流贡献比例很大, 远超该时期降雨减少的影响。葛洲坝和三峡水库蓄水以来, 降雨减少的影响最为显著, 贡献比例大于50%, 水库调度和下游河道调整的影响居于次要地位; 葛洲坝为低水头径流式电站, 对径流过程的调蓄能力很小, 基本不影响三口分流, 但该时期下游河道延续了下荆江裁弯期的冲刷过程, 利于三口分流减少; 三峡水库初期蓄水与葛洲坝相比, 对径流过程的调蓄能力明显增大, 对三口分流减少产生一定贡献, 但略小于该阶段下游河道调整的影响; 三峡水库试验性蓄水以来, 对径流过程的调蓄能力进一步增大, 相比于葛洲坝调度, 对三口分流减少的贡献明显高于初期蓄水期(由7%上升至23%), 且超过该时期下游河道调整的影响, 说明试验性蓄水期水库的调蓄能力显著增强; 三峡水库试验性蓄水期与初期蓄水期相比, 降雨增大使得三口分流略有增大, 其影响超过了水库调度和下游河道调整对三口分流减少的促进, 故后两种驱动因素的贡献比例为负值。这些结果与已有研究^[20,26-27]对应时段的成果基本吻合。

根据表2计算结果, 后三峡时期降雨变化是三口分流变化的控导因素。现有研究成果表明, 长江上游降雨减少趋势将至少持续到本世纪末^[35-36], 导致天然来流偏枯, 因此, 三口分流年均值将长期呈减少趋势。而荆江干流与三口口门近期均处于冲刷状态, 且冲刷速率相当(图4), 且对三口分流影响较大的干流中洪水水位变化不大^[19-22,37], 使得干流与三口水位差基本稳定, 干流同流量下三口分流仍将维持当前水平。

4 结论

本文采用1955—2021年长系列水文、地形实测资料和控制变量法, 系统分析了各驱动因素对荆江三口分流变化的影响, 并识别了贡献比例, 是对现有研究成果的重要补充, 主要结论如下:

1) 调弦口堵口、下荆江裁弯、葛洲坝运用和三峡水库初期蓄水前后, 荆江三口年均分流量分别减小 50×10^8 、 418×10^8 、 216×10^8 和 $189 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年均分流比分别减小2%、9%、5%和3%, 三峡水库试验性蓄水前后三口年均分流量增大 $18 \times 10^8 \text{ m}^3$, 与长江上游降雨增多有关, 年均分流比不变。三口分流减少集中在5—11月, 占年均减少值的98%。

2) 长江上游降雨减少导致三口分流长期减少, 调弦口堵口对三口分流促进作用不明显, 未改变三口分

表2 各驱动因素对三口分流贡献比例*

Tab.2 Contribution ratios of the driving factors on water diversion at the three outlets

比较时段	A	B	C	D	E	F
$\Delta q_{\text{年均一全}} / (\text{m}^3/\text{s})$	-157	-1321				
$\Delta q'_{\text{年均一全}} / (\text{m}^3/\text{s})$			-700	-596	67	-529
$\Delta q_{\text{年均一堵口}} / (\text{m}^3/\text{s})$	56					
$\Delta q_{\text{年均一裁弯}} / (\text{m}^3/\text{s})$		-1117				
$\Delta q_{\text{年均一调度}} / (\text{m}^3/\text{s})$			-2	-41	-120	-120
$\Delta q_{\text{年均一河道调整}} / (\text{m}^3/\text{s})$			-146	-62	-24	-98
$\Delta q_{\text{年均一降雨}} / (\text{m}^3/\text{s})$	-213	-204				
$\Delta q'_{\text{年均一降雨}} / (\text{m}^3/\text{s})$			-552	-493	211	-311
$P_{\text{堵口}} / \%$	-35					
$P_{\text{裁弯}} / \%$		85				
$P_{\text{调度}} / \%$			0	7	-179	23
$P_{\text{河道调整}} / \%$			21	10	-36	19
$P_{\text{降雨}} / \%$	135	15				
$P'_{\text{降雨}} / \%$			79	83	315	58

* A: 1959—1966年与1955—1958年相比; B: 1967—1980年与1959—1966年相比; C: 1981—2002年与1967—1980年相比; D: 2003—2008年与1981—2002年相比; E: 2009—2021年与2003—2008年相比; F: 2009—2021年与1981—2002年相比。

流减少过程,下荆江裁弯和葛洲坝拦沙造成的干流河床冲刷及三口口门淤积加速三口分流减少态势,三峡水库蓄水以来干流和三口口门同步冲刷,三口分流变化不大。

3)调弦口堵口和葛洲坝调度对三口分流年均和5—11月变化影响均很小,下荆江裁弯造成干流河床大幅下切,使得三口分流年均和5—11月显著减少,贡献比例达85%,其余时段长江上游降雨减少为控导因素,贡献比例在58%以上,三峡水库初期蓄水和试验性蓄水调度贡献比例分别为7%和23%,葛洲坝调度和三峡水库上述两个调度期下游河道调整贡献比例分别为21%、10%和19%。未来长江上游降雨持续减少和荆江干流与三口洪道同步冲刷条件下,三口分流年均将继续减小,同干流流量下三口分流能力变化不大。

洞庭湖环境与生态问题突出,近期正在实施北部供水工程和规划湖区生态疏浚,后期还将开展四口水系综合整治,本文研究成果可为湖区工程治理提供参考。长江与洞庭湖关系处于动态调整中,建议开展长期跟踪研究。

5 附录

附表 I ~ III 见电子版 (DOI: 10.18307/2023.0545)。

6 参考文献

- [1] Ou C, Li J, Zhou Y *et al.* Evolution characters of water exchange abilities between Dongting Lake and Yangtze River. *J Geog Sci*, 2014, **24** (4): 731-745. DOI: 10.1007/s11442-014-1116-0.
- [2] Zhang DD, Dai ML, Li YQ *et al.* Characteristics of runoff in the three outlets along Jingjiang River and the influence of water supplement by the reservoirs during 1956–2020. *J Lake Sci*, 2022, **34**(3): 945-957. DOI: 10.18307/2022.0319. [张冬冬, 戴明龙, 李妍清等. 1956—2020年荆江三口径流变化特征及水库补水效果. 湖泊科学, 2022, **34**(3): 945-957.]
- [3] Zhu B, Qin J, Li Y *et al.* Impact of water-sediment diversion and afflux on erosion-deposition in the Luoshan-Hankou reach, middle Yangtze River, China. *J Hydrol*, 2022, **612**: 128110. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128110.
- [4] Li YY, Li B, Yang GS *et al.* Characteristics of flow change in dry season and countermeasures of Songzikou River, a river-lake connected channel of Lake Dongting since 1960. *J Lake Sci*, 2021, **33**(6): 1885-1897. DOI: 10.18307/2021.0622. [李彦彦, 李冰, 杨桂山等. 1960年以来洞庭湖江湖连通河道松滋口枯水期分流变化特征及应对策略. 湖泊科学, 2021, **33**(6): 1885-1897.]
- [5] 刘晓群, 向朝晖. 调弦口分洪和华容河防洪问题模拟与分析. 安徽农业科学, 2018, **46**(27): 186-188.

- [6] Zhang YC, Zhang YG, Song QL *et al.* The history and future of the relationship between the Yangtze River and connected lakes. *J Hydraulic Eng*, 2021, **52**(10): 1183-1192. [张云昌, 张业刚, 宋秋龄等. 江湖关系的历史和未来. 水利学报, 2021, **52**(10): 1183-1192.]
- [7] Sun Z, Huang Q, Opp C *et al.* Impacts and implications of major changes caused by the Three Gorges Dam in the middle reaches of the Yangtze River, China. *Water Resources Management*, 2012, **26**(12): 3367-3378. DOI: 10.1007/s11269-012-0076-3.
- [8] Wang RR, Yang GS, Wang XL *et al.* Progress of research on the relationship between the Yangtze River and its connected lakes in the middle reaches. *J Lake Sci*, 2014, **26**(1): 1-8. DOI:10.18307/2014.0101. [万荣荣, 杨桂山, 王晓龙等. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 1-8.]
- [9] Zhang Y, Wang M, Chen J *et al.* Multiscale attribution analysis for assessing effects of changing environment on runoff: Case study of the Upstream Yangtze River in China. *J Water and Climate Change*, 2021, **12**(2): 627-646. DOI: 10.2166/wcc.2020.155.
- [10] Li CL, Zhang FW, Zi L *et al.* Analysis on variation features of multi-years precipitation in Yangtze River Basin. *Yangtze River*, 2013, **44**(15): 11-13, 18. [李春龙, 张方伟, 訾丽等. 长江流域降水多年变化特征分析. 人民长江, 2013, **44**(15): 11-13, 18.]
- [11] Wang H, Zhu Y, Jin Y *et al.* Quantitative assessment of hydrological alteration over multiple periods caused by human activities at the Jingjiang Three Outlets, China. *Water Supply*, 2022, **22**(1): 264-277. DOI: 10.2166/ws.2021.271.
- [12] Fang CM, Cao WH, Lu W *et al.* The analysis of Ouchi River's heavy deposit and rapid reduction of discharge and sediment caused by Jingjiang truncation. *J Sed Res*, 2002, (2): 40-45. [方春明, 曹文洪, 鲁文等. 荆江裁弯造成藕池河急剧淤积与分流分沙减少分析. 泥沙研究, 2002, (2): 40-45.]
- [13] Lu JY. Study on the variation law of diverting sediment in three Jingjiang Estuary. *J Sed Res*, 1996, (4): 55-62. [卢金友. 荆江三口分流分沙变化规律研究. 泥沙研究, 1996, (4): 55-62.]
- [14] Qin HY, Zou DS, Li F. Characteristics of runoff and sediment discharge of Three Channels from Jingjiang River in 1956 through 2009. *J Sed Res*, 2013, (3): 27-33. [覃红燕, 邹冬生, 李峰. 近 50 余年荆江三口水沙变化特征及驱动力分析. 泥沙研究, 2013, (3): 27-33.]
- [15] Qin K, Peng YM, Chen JH. Analysis on change of flow diversion capacity of three channels of Jingjiang River. *Yangtze River*, 2015, **46**(18): 34-38. [秦凯, 彭玉明, 陈俭煌. 荆江三口分流能力变化分析. 人民长江, 2015, **46**(18): 34-38.]
- [16] Hu GW, Mao DH, Li ZZ *et al.* Characteristics and driving factors of runoff and sediment changes fluxes into the Dongting Lake from Three Outlets in Jingjiang River during past 60 years. *J Nat Res*, 2014, **29**(1): 129-142. [胡光伟, 毛德华, 李正最等. 荆江三口 60a 来入湖水沙变化规律及其驱动力分析. 自然资源学报, 2014, **29**(1): 129-142.]
- [17] Hang XB, Lu JY, Wang M *et al.* Preliminary study on flow and sediment changing and influence on Dongting Lake after the Three Gorges Project operation. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(6): 640-643. [张细兵, 卢金友, 王敏等. 三峡工程运用后洞庭湖水沙情势变化及其影响初步分析. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(6): 640-643.]
- [18] Xu QX, Hu GY, Yuan J. Research on the flow and sediment diversion in the three outlets along Jingjiang River in recent 50 years. *J Sed Res*, 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.]
- [19] Zhu LL, Chen JL, Yuan J *et al.* Study on variation trends of flow diversion from Jingjiang River to Dongting Lake. *J Hydraulic Eng*, 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.]
- [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] Guo XL, Li YT, Liu Y. Analysis of flow and sediment diversion at three outlets along Jingjiang River. *J Sed Res*, 2014, (1): 53-60. [郭小虎, 李义天, 刘亚. 近期荆江三口分流分沙比变化特性分析. 泥沙研究, 2014, (1): 53-60.]
- [22] Li YT, Guo XH, Tang JW *et al.* Changes on runoff diversion from Jingjiang Reach of the Yangtze River to Dongting Lake after the operation of Three Gorges Reservoir. *J Basic Sci Eng*, 2009, **17**(1): 21-31. [李义天, 郭小虎, 唐金武等. 三峡建库后荆江三口分流的变化. 应用基础与工程科学学报, 2009, **17**(1): 21-31.]
- [23] 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.]
- [24] Fang CM, Hu CH, Chen XJ. Impacts of Three Georges 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.]
- [25] 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.]
- [26] Chen MF, Yao W, Li YT *et al.* Contribution rete for the change of diversion through the Three Outlets and its response to the Three Gorges Reservoir Operation. *China Rural Water and Hydropower*, 2018, (12): 116-120, 125. [陈莫非, 姚威, 李义天等. 荆江三口分流变化贡

- 献率及其对三峡水库调度响应. 中国农村水利水电, 2018, (12): 116-120, 125.]
- [27] Fu X, Zhao QX, Sun ZH. Effects of 175 m experimental operation of the Three Gorges Reservoir on the storage capacity of Lake Dongting. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1713-1725. DOI: 10.18307/2019.0603. [付湘, 赵秋湘, 孙昭华. 三峡水库 175 m 试验性蓄水期调度运行对洞庭湖蓄水量变化的影响. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1713-1725.]
- [28] 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. *J Sed Res*, 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.]
- [29] Zhao QX, Fu X, Sun ZH. Evaluation of the impact of Three Gorges Reservoir on three outlets of Jingjiang River. *J Yangtze River Sci Res Inst*, 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.]
- [30] Lu JY, He GS. Discussion on regulation scheme of Xiaoxiankou in lower Jingjiang River of middle reaches of Yangtze River. *J Yangtze River ScRes Inst*, 2009, **26**(3): 1-4. [卢金友, 何广水. 长江中游下荆江调弦口治理方案探讨. 长江科学院院报, 2009, **26**(3): 1-4.]
- [31] Shen HY, Sun JX, Wang L. Analysis on characteristics of regional areal mean rainfall in Changjiang River Basin. *Yangtze River*, 2021, **52**(9): 79-85. [沈许英, 孙嘉翔, 王乐. 长江流域分区面雨量特征分析. 人民长江, 2021, **52**(9): 79-85.]
- [32] Li QC. Study on Huarong River management scheme and operation scheduling. *Yangtze River*, 2009, **40**(14): 50-51. [黎前查. 华容河治理方案与运用调度研究. 人民长江, 2009, **40**(14): 50-51.]
- [33] Zhu YH, Qu G, Guo XH. Modeling method of flow diversion of the three outlets in Jingjiang Reach under unsteady flow conditions. *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2011, **28**(6): 82-86. [朱勇辉, 渠庚, 郭小虎. 非恒定流条件下荆江三口分流模拟控制方式研究. 长江科学院院报, 2011, **28**(6): 82-86.]
- [34] Wei QQ, Cong ZT, Zhu DJ *et al.* Channel evolution of river system in Dongting Lake after Three Gorges dam based on flow-sediment model. *J Hydroelectric Eng*, 2022, **41**(7): 116-128. DOI: 10.11660/slfdbx.20200712. [魏强强, 丛振涛, 朱德军等. 基于洞庭湖水沙模型的荆南三河冲淤变化研究. 水力发电学报, 2022, **41**(7): 116-128.]
- [35] Zeng X, Kundzewicz ZW, Zhou J *et al.* Discharge projection in the Yangtze River basin under different emission scenarios based on the artificial neural networks. *Quat Int*, 2012, **282**: 113-121. DOI: 10.1016/j.quaint.2011.06.009.
- [36] Wang Y, Liao W, Ding Y *et al.* Water resource spatiotemporal pattern evaluation of the upstream Yangtze River corresponding to climate changes. *Quat Int*, 2015, **380**: 187-196. DOI: 10.1016/j.quaint.2015.02.023.
- [37] 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: 10.18039/2017.0520. [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.]

附表 I 葛洲坝调度对三口分流影响

Appendix Tab. I Influence of Gezhouba operation on water diversion at the three outlets

月份	$Q_{\text{实测}}$ / (m ³ /s)	$Q_{\text{入库}}$ / (m ³ /s)	$Q_{\text{出库}}$ / (m ³ /s)	$Q_{\text{还原}}$ / (m ³ /s)	$q_{\text{实测}}$ / (m ³ /s)	$q_{\text{还原}}$ / (m ³ /s)	$q_{\text{实测}}-q_{\text{还原}}$ / (m ³ /s)
1	4593	4513	4478	4628	0	0	0
2	4245	4076	4040	4281	0	0	0
3	4718	4659	4618	4759	0	0	0
4	6624	6697	6700	6621	229	229	0
5	11654	11165	11458	11361	1089	1033	56
6	19595	18972	19230	19337	2858	2793	65
7	33970	33295	33014	34251	7344	7448	-104
8	29345	29118	29085	29378	5720	5731	-11
9	22370	22375	22301	22444	3595	3616	-21
10	15472	15341	15374	15439	1877	1869	8
11	9748	9854	9809	9793	739	747	-8
12	5721	5769	5730	5760	96	102	-6

附表 II 三峡水库初期蓄水期调度对三口分流影响

Appendix Tab. II Influence of initial operation of TGR on water diversion at the three outlets

调度阶段	月份	$Q_{\text{实测}}$ / (m ³ /s)	$Q_{\text{入库}}$ / (m ³ /s)	$Q_{\text{出库}}$ / (m ³ /s)	$Q_{\text{还原}}$ / (m ³ /s)	$q_{\text{实测}}$ / (m ³ /s)	$q_{\text{还原}}$ / (m ³ /s)	$q_{\text{实测}}-q_{\text{还原}}$ / (m ³ /s)
枯水期补水	12	5954	5623	5577	6000	12	18	-6
	1	4888	4595	4509	4974	0	0	0
	2	4649	4193	4254	4588	0	0	0
	3	5503	5174	5051	5626	0	0	0
	4	7427	6845	6882	7390	262	254	8
汛期削峰	5	11145	10914	10765	11294	949	978	-29
	6	17176	16688	16723	17141	2240	2232	8
	7	26515	26663	26392	26786	4671	4749	-78
汛后蓄水	8	23569	23237	23247	23559	3848	3845	3
	9	24051	24517	24030	24538	3979	4113	-134
	10	13710	14524	13691	14543	1471	1649	-178
	11	9406	9705	9299	9812	617	693	-76

附表 III 三峡水库试验性蓄水期调度对三口分流影响

Appendix Tab. III Influence of experimental operation of TGR on water diversion at the three outlets

调度阶段	月份	$Q_{\text{实测}}$ / (m ³ /s)	$Q_{\text{入库}}$ / (m ³ /s)	$Q_{\text{出库}}$ / (m ³ /s)	$Q_{\text{还原}}$ / (m ³ /s)	$q_{\text{实测}}$ / (m ³ /s)	$q_{\text{还原}}$ / (m ³ /s)	$q_{\text{实测}}-q_{\text{还原}}$ / (m ³ /s)
枯水期补水	12	6563	5960	6226	6297	0	0	0
	1	6373	5919	6221	6071	0	0	0
	2	6281	5120	6104	5297	0	0	0
	3	6514	5603	6246	5871	0	0	0
	4	8519	7364	7672	8211	271	221	50
汛期削峰	5	13008	11504	12560	11952	1142	916	226
	6	16849	16680	16461	17068	2079	2138	-59
	7	27954	27530	26955	28529	5784	6016	-232
汛后蓄水	8	24031	23115	23103	24043	4306	4310	-4
	9	20924	21471	19680	22715	3267	3852	-585
	10	11548	13828	10886	14490	832	1483	-651
	11	9625	9635	8565	10695	476	663	-187