

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.010

荆江河段地形变化对洞庭湖水文情势的影响

张冬冬¹, 戴明龙¹, 陈 玺², 邓鹏鑫¹, 章晓梦³

(1. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010; 2. 中国长江电力股份有限公司智慧长江与水电科学湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443000; 3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:基于实测数据分析了荆江河段冲淤变化特征,采用数值模拟方法定量分析了三峡水库建库前后荆江河段地形变化对2008—2018年8—11月洞庭湖水文情势的影响。结果表明:荆江河道地形变化导致洞庭湖区8—11月水位下降,地形变化对洞庭湖区水位的影响程度随着与城陵矶距离增加而减弱;荆江河段和三口洪道冲刷下切削弱了长江与洞庭湖的水力联系,导致同样来水条件下荆南四河入湖和城陵矶出湖水量减少,从而间接降低了洞庭湖的调蓄能力;在枝城站来水一定的条件下,荆南四河分流量减少导致沙市—螺山河段的流量增加,同流量下螺山站中低水水位有一定的抬高。

关键词:水文情势;地形变化;数值模拟;荆江河段;洞庭湖

中图分类号:TV147 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0071-10

Influences of topographical change of Jingjiang reach on hydrological situation of Dongting Lake // ZHANG Dongdong¹, DAI Minglong¹, CHEN Xi², DENG Pengxin¹, ZHANG Xiaomeng³ (1. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze and Hydroelectric Science, China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on observed data, the erosion and deposition characteristics of Jingjiang reach of the Yangtze River were analyzed, and the influence of topographical change of Jingjiang reach after the construction of the Three Gorges Reservoir on the hydrological situation of Dongting Lake from August to November, 2008 to 2018 was analyzed using the numerical simulation method. The results indicated that the topographical change of Jingjiang reach led to the decrease of water level of Dongting Lake from August to November, and the influence on the water level of Dongting Lake decreased with the increase of the distance from Chenglingji station. The erosion in Jingjiang reach and flood diversion channels of three outlets weakened the hydraulic connection between the main stream of the Yangtze River and Dongting Lake, leading to the decreases of water flowing into the lake from Jingjiang reach and flowing out of the lake through Chenglingji station, thus indirectly weakening the regulation ability of Dongting Lake. With a certain amount of water inflow at Zhicheng station, the decrease of water diversion to Jingjiang reach led to the flow increase in the reach from Shashi to Luoshan, and the water level with low and medium water inflow at Luoshan station rose to a certain extent under the same discharge.

Key words: hydrological situation; topographical change; numerical simulation; Jingjiang reach; Dongting Lake

荆江河段作为长江流域最为重要的险工河段,其冲淤变化特征对于江湖关系的影响显著。三峡水库建库前,荆江河段受调弦口封堵、下荆江裁弯、葛洲坝水利枢纽截流等影响,江湖关系经历多次变化与调整,宜昌—湖口河段1975—1998年总体表现为淤积,1998—2002年表现为冲刷^[1]。三峡水库建库

后,长江中游水文泥沙情势显著调整,坝下游宜昌—湖口河段总体冲刷,其中枯水河槽冲刷量约占91%^[2]。干流径流的年内分配改变以及沙量的大幅减少导致洞庭湖入出湖水沙发生一定变化,进而使得荆江河段与洞庭湖的江湖关系进入新一轮变化与调整过程^[3-4]。

基金项目:中国长江三峡集团有限公司科研项目(0799239);智慧长江与水电科学湖北省重点实验室2020年度开放研究基金(ZH2002000106)

作者简介:张冬冬(1986—),男,高级工程师,博士,主要从事水文分析计算研究。E-mail:www123qe@126.com

通信作者:陈玺(1986—),男,高级工程师,博士,主要从事水文分析计算研究。E-mail:chenx@cjh.com.cn

众多学者从不同角度探讨了三峡水库建库后荆江河段地形变化及其引起江湖关系的变化,韩其等为^[5-6]等通过数学模型预测了荆江河段冲刷深度为2.0~5.3 m;董炳江等^[7-8]基于实测水沙资料指出,宜昌—湖口河段2012—2016年平均冲刷量比2002—2012年增长了1倍;宫平等^[9]通过水沙模型预测了2032年宜昌—沙市河段槽蓄量将增加10亿~14亿m³。清水下泄导致同流量下干流河道水位下降,同时天然来水偏少以及蓄水期水库蓄水进一步导致下游水沙减少,多重因素影响导致三峡水库蓄水期荆江入洞庭湖水沙减少^[10],湖区泥沙淤积减缓以及水位降低^[11],江湖关系变化对洞庭湖防洪和水资源保护产生了新的影响。针对水库蓄水对洞庭湖水文情势影响,孙思瑞等^[12-14]等采用数理统计方法分析了三峡水库不同调度方式对洞庭湖区典型年水文情势的影响,徐长江等^[15-16]通过数值模拟分析了三峡水库不同调度方式对洞庭湖水文情势的影响。以上研究对三峡水库蓄水导致荆江三口分流减少以及洞庭湖区水位下降的结论基本一致,而对于荆江河道地形变化对江湖关系影响的研究偏少,且多集中于入湖水沙变化特性分析^[17-18],如何定量评估三峡水库建库前后荆江河段地形变化对洞庭湖水文情势的影响目前还处于探索阶段。

本文在已有研究基础上,分别构建三峡水库建库前后两套地形条件下长江干流与洞庭湖一、二维耦合水动力学模型,通过固定来水条件,模拟不同地形条件下洞庭湖区水位以及入出湖水量并进行对比分析,从而定量评估荆江河段地形变化对洞庭湖水文情势的影响,为三峡水库优化调度提供参考。

1 研究区概况与计算方法

1.1 研究区概况

研究区域为长江干流枝城—螺山河段以及洞庭湖区。荆江三口由松滋口、太平口与藕池口组成,荆江自松滋河、虎渡河与藕池河分流汇入洞庭湖。洞庭湖是吞吐长江的通江湖泊,南纳湘、资、沅、澧四水来水,北承荆江松滋、太平、藕池三口分流,入湖径流通过湖区调蓄后,由城陵矶注入长江,构成复杂的江湖系统。研究区域见图1。

1.2 水动力学模型

本文构建了三峡水库建库前后两套地形条件下长江干流与洞庭湖一、二维耦合水动力学模型,其中,长江干流、荆江三口洪道及洞庭四水尾间均采用一维水动力学模型,洞庭湖区采用二维水动力学模型,耦合模型涉及的一维河道和二维湖区采用标准连接形式,建库前后模型概化如图2所示。

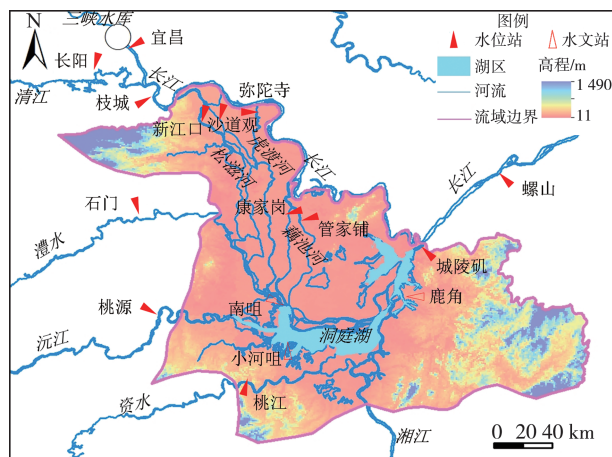
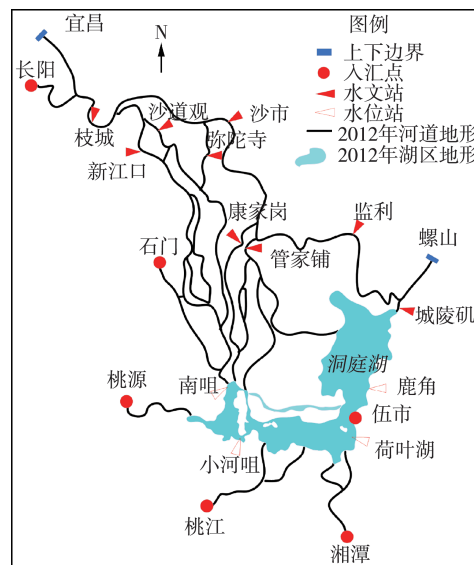
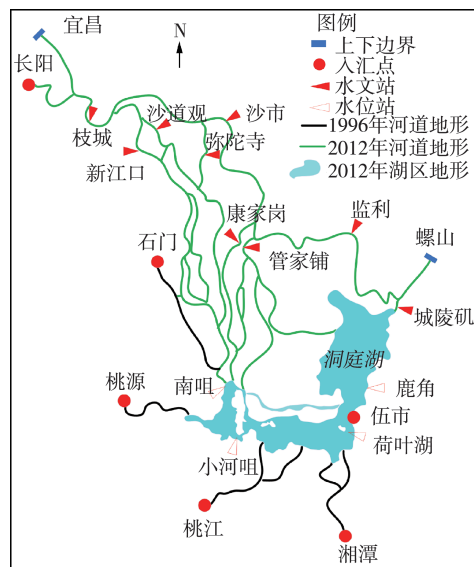


图1 研究区概况

Fig.1 Sketch of study area



(a) 建库后



(b) 建库前

图2 长江干流与洞庭湖一、二维耦合水动力模型概化

Fig.2 Generalization of one- and two-dimensional coupled hydrodynamic model of the Yangtze River and Dongting Lake

本文采用的水文数据包括长江干流和洞庭湖主要控制站水位和流量数据,建库前后长江干流和荆江三口洪道地形分别采用 1996 年和 2012 年地形数据,考虑到洞庭湖数据限制,洞庭湖和四水尾闾地形采用 2012 年地形,以上数据由长江水利委员会水文局提供。选择 1996 年建库前地形的主要原因是 1996 年荆江河段断面冲淤变化不大,年内汛前以及汛后冲淤基本平衡,可以较好地反映建库前荆江河道地形特征;选择 2012 年建库后地形的主要原因是三峡水库建库后 10 年内长江中游河道冲淤变化较为显著,可以反映三峡水库建库后的荆江河道变化特征。

模型上边界为宜昌站逐日实测或还原流量,下边界分别为三峡建库前后螺山站水位流量关系综合线,并将洞庭四水、汨罗江及清江主要控制站的逐日流量作为模型的入汇点源。湖区内的降雨径流过程采用降雨产流模块进行模拟,蒸发量采用湖区逐月潜在蒸散发资料。为准确模拟洞庭湖区的水动力变化过程,模型采用三角形网格对湖区进行网格划分,网格总数为 23 436 个,重要地区、河道及其他地形变化剧烈区域,如荆江三口洪道、草尾河和洞庭湖出口区域,计算网格适当加密。

1.3 模型率定

本文构建的地形模型中仅建库后的地形与实际情况相符,建库前模型属假设情景。模型率定的思路是以建库后地形参数为准,假定建库前模型中不同高程对应的糙率没有发生重大改变,与建库后地形参数基本保持一致。

对于长江中游荆江河段和洞庭湖区,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。本文以干流来水量作为典型年选取的依据,通过对宜昌站 1950—2018 年年径流量的排频计算,在 2008—2018 年中选取 2012 年作为丰水典型年,2014 年作为平水典型年,2011 年作为枯水典型年,根据不同来水年对模型进行了率定。

由于计算区域内河道和湖区的河床边界组成差异较大,在对河道及湖泊特性分析的基础上,对长江中游干流河段、洞庭湖区、荆江三口洪道及四水尾闾河段 3 个部分,按照模拟与实际水深差的相对误差进行糙率率定,结果见表 1。

1.4 精度评价

为量化评估模型的模拟精度,采用纳什系数 $E_{NS}^{[19]}$ 和相对误差 E_R 两个指标评价流量过程的模拟精度。参考 Moriasi 等^[20]研究中采用的模型精度评价等级标准(表 2),定量评价本文模型的模拟精度。

表 1 模型糙率率定结果

Table 1 Manning roughness coefficients in coupled model

区域	深槽	浅滩	边滩
长江干流	0.018 ~ 0.035		0.025 ~ 0.046
洞庭湖区	0.021 ~ 0.034	0.032 ~ 0.059	
荆江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

Table 2 Classification of evaluation indices for model simulation effect

等级	E_{NS}	$ E_R /\%$
优秀	(0.75, 1.00]	< 10
良好	(0.65, 0.75]	[10, 15)
合格	(0.50, 0.65]	[15, 25)
不合格	≤ 0.50	≥ 25

根据率定的参数,模拟 2015—2018 年荆江河段、洞庭湖区及出口各站点的逐月流量和水位过程,并与实测流量和水位过程进行对比,模拟结果见图 3 和表 3。由表 3 可以看出,除管家铺站为良好外,其他各水文站模拟流量过程与实测过程拟合等级均为优秀,满足模型模拟精度要求。鹿角、荷叶湖和南咀站平均水位模拟误差分别为 0.06 m、0.03 m 和 0.03 m,最高水位模拟误差分别为 0.57 m、0.39 m 和 0.45 m,最低水位模拟误差分别为 -0.51 m、-0.68 m 和 -0.27 m。

表 3 各水文站流量模拟效果评价

Table 3 Evaluation of simulation results of discharge at different hydrological stations

水文站	E_{NS}		$ E_R /\%$	
	全年	8—11 月	全年	8—11 月
枝 城	0.99	0.99	0.19	0.21
沙 市	0.99	0.97	0.48	0.51
城陵矶	0.97	0.95	1.95	2.23
沙道观	0.97	0.96	3.11	3.65
弥陀寺	0.97	0.96	2.98	3.42
新江口	0.95	0.96	4.22	5.14
管家铺	0.93	0.93	10.00	9.54
康家岗	0.93	0.92	6.12	7.88

1.5 径流还原方法

采用径流还原方法,将宜昌站实测流量还原至三峡水库建库前的状态。还原计算中主要根据三峡水库坝前水位、水库库容曲线以及出库流量,采用水量平衡法反推入库流量,并采用马斯京根法将入库流量过程由清溪场演算到宜昌站,得到宜昌站还原流量过程,如图 4 所示。三峡水库调度一定程度改变了宜昌站径流的年内分配,其中,9—11 月为水库蓄水期,实测月平均流量较还原情况减小 0.4% ~ 25%,10 月变化幅度最大;12 月至次年 3 月为枯水期,实测月平均流量较还原情况增大 9% ~ 26%,枯

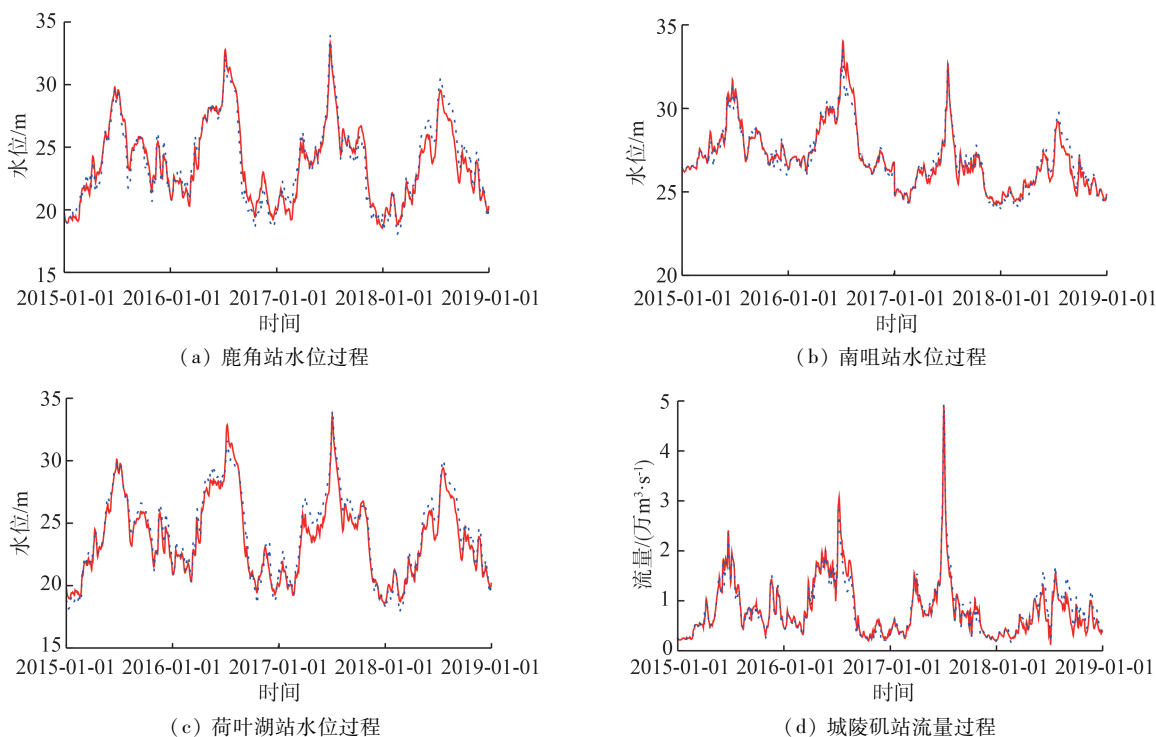


图3 各站点水位及流量过程模拟和比较

Fig.3 Simulation and comparison of water level and discharge processes at different stations

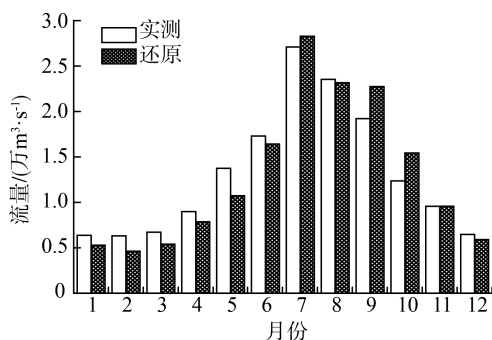


图4 宜昌站2008—2018年实测与还原月平均流量

Fig.4 Measured and restored average monthly discharges at Yichang station from 2008 to 2018

水期三峡水库加大了下泄流量,减缓了河道冲刷对枯水位的影响。

2 三峡水库建库后荆江河段冲淤变化特征

2.1 荆江河段

三峡水库建库后宜昌—城陵矶河段河道泥沙冲刷情况如表4所示。2003—2018年荆江河段平滩河槽冲刷11.38亿 m^3 ,年均冲刷强度为20.0万 m^3/km 。从冲淤量时间分布来看,荆江河段河道冲刷主要集中在三峡水库建库后的前3年,2003—2005年平滩河槽冲刷量为3.02亿 m^3 ,年均冲刷强度为29.0万 m^3/km ,占建库以来该河段平滩河槽总冲刷量的27%;2008—2018年平滩河槽冲刷量为7.05亿 m^3 ,年均冲刷强度为18.5万 m^3/km ,占建库以来该河段平滩

河槽总冲刷量的62%。从河道冲刷沿程分布来看,上荆江和下荆江河段冲刷量分别为6.79亿 m^3 和4.59亿 m^3 ,分别占荆江河段冲刷量的60%和40%,年均冲刷强度分别为24.0万 m^3/km 和16.3万 m^3/km 。

表4 三峡水库建库后宜昌—城陵矶河段河道泥沙冲刷量 单位:万 m^3

Table 4 Sediment erosion in river channel from Yichang to Chenglingji after construction of

Three Gorges Reservoir				unit: 10 ⁴ m ³			
年份	枯水河槽	基本河槽	平摊河槽	年份	枯水河槽	基本河槽	平摊河槽
2003 年	6 400	7 300	9 820	2011 年	7 943	7 706	7 543
2004 年	9 000	10 700	12 979	2012 年	4 050	4 750	4 942
2005 年	6 380	6 600	7 369	2013 年	7 529	7 530	7 660
2006 年	1 866	1 902	2 662	2014 年	7 658	8 293	9 220
2007 年	4 901	4 713	3 395	2015 年	4 568	4 352	4 182
2008 年	685	751	174	2016 年	10 510	10 473	10 604
2009 年	7 608	7 717	8 251	2017 年	10 682	10 953	11 302
2010 年	4 929	4 819	4 983	2018 年	7 766	8 335	8 728

2.2 荆江三口洪道

三峡水库建库后,荆江三口洪道表现为冲刷,2013—2018年洪水河槽总冲刷量为17845万 m^3 ,其中,松滋河、虎渡河、松虎洪道、藕池河冲刷量分别占三口洪道总冲刷量59%、12%、9%和20%,如表5所示。相同水位条件下,荆江三口洪道4个控制断面过水面积变化如表6所示,相较建库前,建库后新江口、沙道观和康家岗站在相同水位下过水面积有

表5 三峡水库建库后荆江三口洪道泥沙冲刷量
单位:万 m³

Table 5 Sediment erosion in flood diversion channels of three outlets of Jingjiang reach after construction of Three Gorges Reservoir unit: 10 ⁴ m ³			
河道	枯水河槽	平滩河槽	洪水河槽
松滋河	7981	9871	10512
虎渡河	803	1535	2116
松虎洪道	1570	1852	1575
藕池河	2372	2903	3642
三口洪道	12726	16161	17845

表6 三峡水库建库前后荆江三口洪道不同水位过水面积
Table 6 Discharge areas of different cross-sections in flood
diversion channels of three outlets of Jingjiang reach under
different water levels before and after construction of
Three Gorges Reservoir

水文站	水位/m	过水面积/m ²		过水面积 变幅/%
		1996 年	2012 年	
新江口	36	840	766	-8.8
	38	1 347	1 271	-5.6
	40	1 872	1 795	-4.1
沙道观	36	398	340	-14.6
	38	648	558	-13.9
	40	916	803	-12.3
康家岗	34	52	52	-0.2
	36	224	118	-47.3
	38	537	310	-42.3
管家铺	32	665	770	15.8
	35	1 341	1 314	-2.0
	38	2 211	2 024	-8.5

一定减小;管家铺站在低水位情况下过水面积有一定增大,中高水位情况下过水面积减小。

3 荆江河段地形变化对洞庭湖水文情势的影响

以宜昌站实测或还原流量过程作为模型上边界条件,在其他边界条件一致的情况下,分别模拟三峡水库建库前(1996 年)和建库后(2012 年)两套地形条件下洞庭湖区水位、入出湖水量的变化特征。本次模拟涉及 4 种情景(表 7)。为了与《三峡(正常运行期)—葛洲坝水利枢纽梯级调度规程》(2019 年修订版)中提出的中小洪水调度方式相协调,本次模拟在蓄水期 9—11 月的基础上将研究时段扩展至 8—11 月各旬。

3.1 洞庭湖区水位

将 4 种模拟情景下洞庭湖区水位数据进行对比,分析 2008—2018 年洞庭湖区鹿角、荷叶湖及南咀站 8—11 月逐旬水位以及水位受地形影响的变化特征,结果如图 5 和图 6 所示。

三峡水库建库后,荆江河段河床持续冲刷,同流

表7 情景设置
Table 7 Scenario design

情景	上边界条件	下边界条件	地形条件
情景 1	宜昌站实测流量	建库前螺山站 水位流量综合线	建库前地形
情景 2	宜昌站实测流量	建库后螺山站 水位流量综合线	建库后地形
情景 3	宜昌站还原流量	建库前螺山站 水位流量综合线	建库前地形
情景 4	宜昌站还原流量	建库后螺山站 水位流量综合线	建库后地形

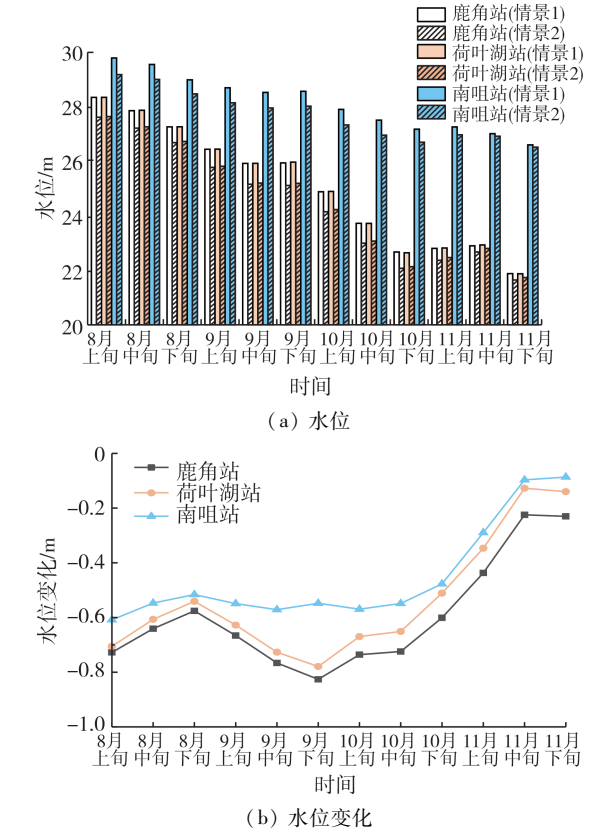
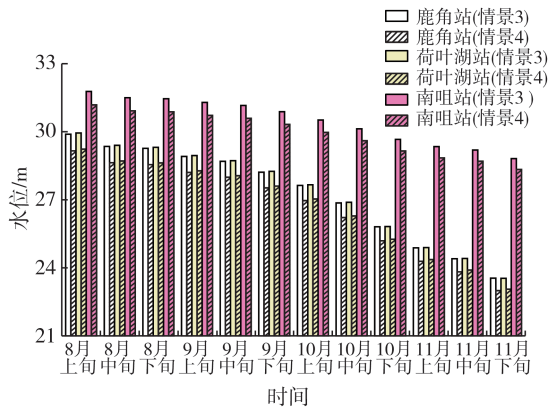


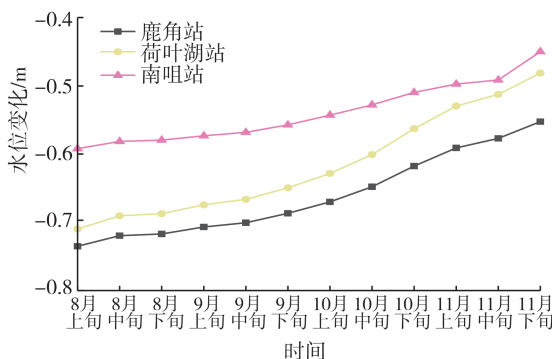
图5 实测来水条件下洞庭湖区8—11月
旬平均水位特征及变化

Fig. 5 Characteristics and variations of average water level
of every 10 days of Dongting Lake area from August to
November under condition of measured water inflow

量条件下河道水位下降,进而导致荆江三口分流进一步减少,洞庭湖区水位进一步下降。从图 5 可以看出,在宜昌站实测来水条件下,地形变化导致鹿角站 8—11 月水位降低,荷叶湖站水位变化幅度略小于鹿角站,南咀站水位变化幅度最小。从各旬水位变化幅度来看,鹿角站、荷叶湖站 9 月下旬变化幅度最大,11 月中旬变化幅度最小;南咀站变化幅度总体趋势与其他两站大致相同。图 6 为宜昌站还原来水条件下的计算结果,地形变化导致湖区水位下降 0.45~0.74 m,下降幅度在实测来水条件范围内,且 8 月上旬下降幅度最大,11 月下旬下降幅度最小。从空间变化特征来看,靠近洞庭湖出湖的站点变化



(a) 水位



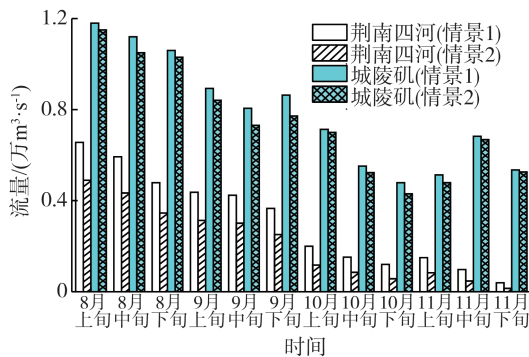
(b) 水位变化

图6 还原来水条件下洞庭湖区8—11月旬平均水位特征及变化

Fig. 6 Characteristics and variations of average water level of every 10 days of Dongting Lake area from August to November under condition of restored water inflow

幅度大于湖区内的站点,可以认为荆江河段地形变化对洞庭湖区水位的影响程度随着与城陵矶距离增加而减弱。

为了进一步验证计算结果的合理性,选取鹿角站、南咀站(荷叶湖站水位系列较短,不纳入统计)1981—2002年和2008—2018年8—11月实测水位数据,分析两个时段的水位变化特征,结果如表8所示。与1981—2002年相比,2008—2018年8—11月鹿角站各月实测平均水位分别降低0.78 m、1.73 m、



(a) 流量

2.11 m和0.45 m,地形变化引起鹿角站各月平均水位分别降低0.65 m、0.75 m、0.69 m和0.32 m;南咀站各月实测平均水位分别降低0.87 m、1.13 m、1.10 m和0.30 m,地形变化引起南咀站各月平均水位分别降低0.56 m、0.55 m、0.53 m和0.16 m。两站实测水位变化由水库调蓄、天然来水变化、干流和湖区地形变化以及当地取水等多种要素引起,从模型计算结果可以得出,鹿角站和南咀站干流地形变化引起的各月水位变化占总水位变化的比例分别为0.33~0.83和0.48~0.64,两站地形变化引起的水位变化均小于两站实测水位变化,计算结果基本合理,可以认为荆江河段地形变化是导致洞庭湖区两个水位站8—11月水位下降的主要因素。

表8 鹿角和南咀站计算与实测水位变化比较

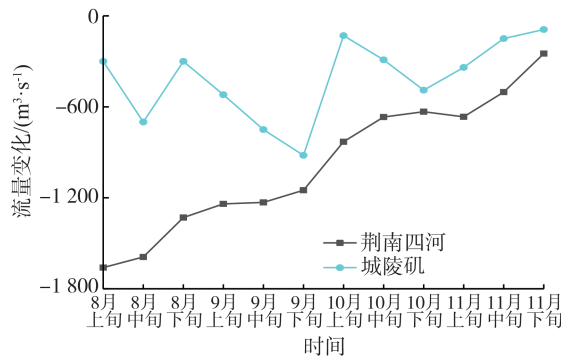
Table 8 Comparison of calculated and measured water level variations at Lujiao and Nanzui stations

水文站	月份	实测水位/m		平均水位变化/m	地形变化影响	
		1981—2002年	2008—2018年		平均水位变化/m	水位变化占比
鹿角	8月	27.96	27.18	-0.78	-0.65	0.83
	9月	27.08	25.35	-1.73	-0.75	0.43
	10月	25.18	23.07	-2.11	-0.69	0.33
	11月	22.68	22.23	-0.45	-0.30	0.67
南咀	8月	30.10	29.23	-0.87	-0.56	0.64
	9月	29.52	28.39	-1.13	-0.56	0.50
	10月	28.44	27.34	-1.10	-0.53	0.48
	11月	27.44	27.14	-0.30	-0.16	0.53

3.2 洞庭湖入出湖水量

4种模拟情景下洞庭四水入湖水量一致,因此,荆江河段地形变化仅对荆南四河入湖水量和城陵矶出湖水量有影响,以松滋河新江口站和沙道观站、虎渡河弥陀寺站、藕池河康家岗站和管家铺站合成流量代表荆南四河入湖水量,荆南四河和城陵矶8—11月逐旬流量及其受地形影响的变化特征如图7和图8所示。

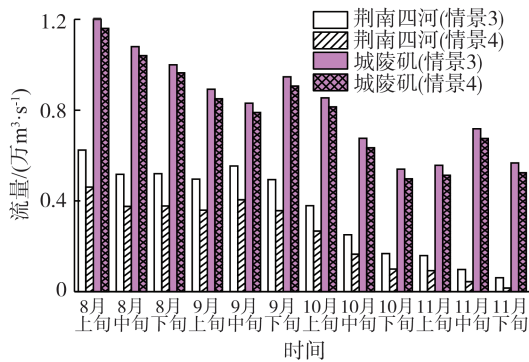
三峡水库建库后,荆江河段河床持续冲刷,荆南



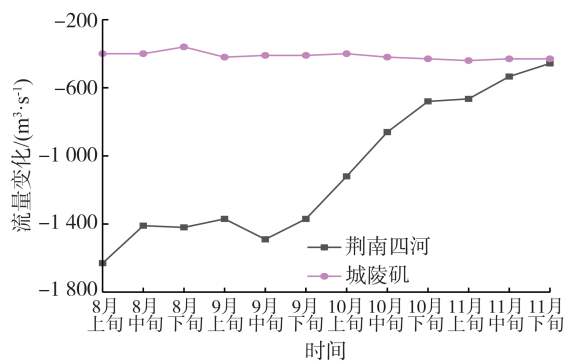
(b) 流量变化

图7 实测来水条件下洞庭湖区8—11月旬平均入出湖流量特征及变化

Fig. 7 Characteristics and variations of average inflow and outflow of every 10 days of Dongting Lake area from August to November under condition of measured water inflow



(a) 流量



(b) 流量变化

图8 还原来水条件下洞庭湖区8—11月旬平均入出湖流量特征及变化

Fig.8 Characteristics and variations of average inflow and outflow of every 10 days of Dongting Lake area from August to November under condition of restored water inflow

四河入湖水量持续减少。从图7可以看出,在宜昌站实测来水条件下,荆南四河8—11月多年旬平均入湖流量减小249~1660 m³/s;受湖区调蓄作用影响,出湖流量减小幅度小于入湖流量,出湖流量减少90~920 m³/s。从各旬变幅来看,荆南四河入湖流量变幅较大的时段集中在8月上旬,而11月中下旬变化幅度较小;出湖流量变幅较大的时段集中在9月下旬,而11月中下旬变化幅度较小。从图8可以看出,在宜昌站还原来水条件下,荆南四河8—11月多年旬平均入湖流量减小457~1630 m³/s;受湖区调蓄作用影响,出湖流量减小幅度小于入湖流量,出湖流量减小360~440 m³/s。从各旬变幅来看,建库前后荆南四河入湖、城陵矶出湖流量变幅较大的时段集中在8月上旬,而11月中下旬变化幅度较小。

3.3 枝城—螺山河段水文情势变化特征

表9统计了宜昌站实测和还原来水情景下,2008—2018年地形变化引起的枝城—螺山河段各关键控制节点8—11月平均水位和流量变化特征。实测来水条件下,受荆江河道冲刷下切的影响,在来水一定的情况下,荆江干流河道水位进一步下降,枝城站受河道冲刷影响最为明显,8—11月平均水位下降了1.22 m。荆江三口分流减少导致干流的沙市和监利站流量分别增加570 m³/s和980 m³/s,但由于流量增加导致的水位抬升值小于河道冲刷导致的水位下降值,综合影响下沙市和监利两站平均水位分别下降了1.54 m和0.82 m。荆江三口洪道入湖水量减少导致洞庭湖区各站平均水位下降0.53~0.62 m,且距离城陵矶越近,下降幅度越大,但下降幅度小于干流各控制站。受到洞庭湖调蓄的影响,城陵矶出湖流量减小值小于荆南四河入湖流量减小值,螺山站在干流来水增加和洞庭湖出水减少的综合影响下,流量增加了560 m³/s,水位略有下降,变化不明显。还原来水条件下,由于没有受到水库蓄

表9 枝城—螺山河段8—11月平均水位和流量受地形影响变化模拟结果

Table 9 Variations of water level and discharge for reach from Zhicheng to Luoshan from August to November under topographical influence

站 点	水位变化/m		流量变化/(m ³ ·s ⁻¹)	
	实测来水条件	还原来水条件	实测来水条件	还原来水条件
枝 城	-1.22	-1.12	0	0
沙 市	-1.54	-1.52	570	590
监 利	-0.82	-0.80	980	980
螺 山	-0.04	0.02	560	570
新江口	-0.51	-0.51	-150	-150
沙道观	-0.24	-1.41	-90	-330
弥陀寺	-1.41	-0.26	-330	-80
康家岗	-0.44	-0.44	-30	-30
管家铺	-0.81	-0.80	-380	-360
城陵矶	-0.62	-0.60	-420	-410
南 咀	-0.53	-0.48		
荷叶湖	-0.54	-0.52		
鹿 角	-0.60	-0.58		

水影响,来水量较实测情况增加,因而各控制站水文情势变化幅度小于实测来水情况,空间变化规律与实测来水情况基本一致。

在枝城站来水一定的条件下,地形变化对荆江三口分流量的影响见表10。可以看出,枝城站在流

表10 地形变化前后荆江三口分流能力变化

Table 10 Distributary capacity of three outlets of Jingjiang reach before and after topographical change

年份	流量/(万 m ³ ·s ⁻¹)	分流能力/(m ³ ·s ⁻¹)					分流比/%
		新江口	沙道观	弥陀寺	管家铺	康家岗	
1996 年	4	3 728	2 051	2 084	3 070	356	28.2
	3	2 795	1 297	1 538	2 144	188	26.5
	2	1 573	337	861	1 204	35	20.1
	1	482	0	318	143	0	9.4
2012 年	4	3 852	1 285	1 474	2 049	117	21.9
	3	2 736	866	1 027	1 410	61	20.3
	2	1 445	292	445	637	8	14.1
	1	304	0	41	10	0	3.6

量为 1 万 ~ 4 万 m^3/s 时,2012 年地形条件下荆江三口分流比相较 1996 年地形条件下减小了 5.8% ~ 6.3%,且流量越大,变化幅度越大。从各口门变化幅度来看,藕池口变化幅度最大,太平口次之,松滋口变化幅度最小。

4 讨论

本文分析了荆江河段河道地形改变后洞庭湖水文情势的变化及其对荆江河段的反馈作用,结果表明,在假定来水一定的条件下,对于中低水情况下,地形变化导致荆江三口分流量进一步减少,枝城站流量与荆江三口分流量减少量存在显著相关关系(图 9),两者在枝城站流量约为 1.1 万 m^3/s 时有过渡区,且流量越小分流量减少幅度越大。洞庭湖分泄长江干流水量减少,降低了洞庭湖的调蓄能力,使得同样来水条件下长江干流沙市—螺山河段的流量增加。研究表明,河道地形改变条件下,沙市、监利以及螺山站的水位受流量增加和河道冲刷减少的综合影响,对于沙市和监利站,流量增加导致的水位抬升值小于河道冲刷导致的水位下降值,因此河道冲刷对于以上河段防洪形势有利。螺山站由于河道冲刷不明显,还原来水条件下流量增加导致的水位抬升值略大于河道冲刷导致的水位下降值,同流量下螺山站中低水水位有一定的抬高,当来水量较大时螺山站的防洪形势值得关注。李世强等^[21]基于螺山站实测水位和流量分析指出,三峡水库运行后,螺山站在同流量下中低水水位抬高较多,高水水位抬高减少,与本文研究的结果基本一致,可以认为河道地形改变是造成以上变化的原因之一。需要指出的是,洞庭湖的调蓄能力不仅与荆江三口分流量有关,还与自身的湖泊面积、洞庭四水来水以及出湖段长

江干流顶托影响关系密切,未来研究中需要结合各要素变化与洞庭湖调蓄间的响应关系,进一步分析洞庭湖调蓄对长江中下游防洪总体布局的影响。

本文计算采用不同地形作为模型输入,分析不同地形变化对长江中下游以及洞庭湖水文情势影响,仅改变了长江干流的地形,而没有反映洞庭湖以及四水尾间地形变化对湖区水位的影响。朱玲玲等^[22]研究表明,洞庭湖区 1995—2003 年以淤积为主,平均淤积厚度约为 3.7 cm;2003—2011 年由淤转冲,湖区平均冲刷深度约为 10.9 cm;近年洞庭湖冲淤基本平衡,湖区冲淤变化对水位影响不大。未来工作中将进一步完善湖区地形变化对洞庭湖水文情势影响的研究。

5 结论

a. 三峡水库建库以来,荆江干流和三口洪道均处于冲刷状态,干流河道冲刷主要集中在建库后的前 3 年,该时段年平均冲刷强度为建库后的 1.45 倍;三口洪道冲刷主要集中在松滋河和藕池河,分别占总冲刷量的 59% 和 20%。

b. 受地形变化影响,在实测和还原来水条件下,洞庭湖区 8—11 月多年平均水位分别下降 0.09 ~ 0.83 m 和 0.45 ~ 0.74 m,两种来水条件下水位变幅最大分别在 9 月下旬和 8 月上旬,地形变化对洞庭湖区水位的影响程度随着与城陵矶距离增加而减弱。

c. 受地形变化影响,荆南四河和城陵矶 8—11 月多年平均流量分别减少 249 ~ 1 660 m^3/s 和 90 ~ 920 m^3/s ,地形变化削弱了长江干流与洞庭湖的水力联系,导致同样来水条件下荆南四河入湖水量减少,进而间接削弱了洞庭湖调蓄能力。地形变化导致荆江三口分流减少了 5.8% ~ 6.3%,且干流流量越大,变化幅度越大。

d. 在枝城站来水一定的条件下,地形变化导致荆江三口分流量减少,且来水越少分流量减少幅度越大,进而导致沙市—螺山河段的流量增加,同流量下螺山站中低水水位有一定的抬高。

参考文献:

[1] 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[J]. 地理学报,2013,68(1): 108-117. (LI Jingbao, ZHOU Yongqiang, OU Chaomin, et al. Evolution of water exchange ability between Dongting Lake and Yangtze River and its response to the operation of the Three Gorges Reservoir [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(1): 108-117. (in Chinese))

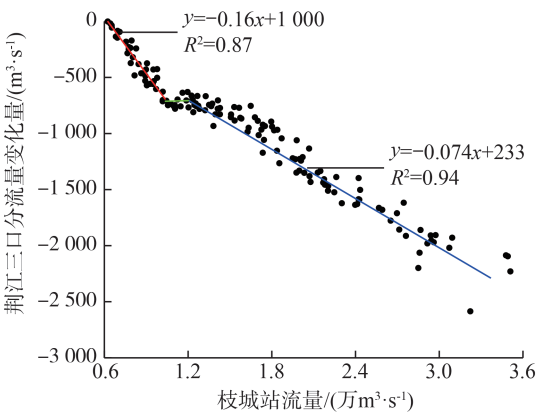


图 9 地形影响下枝城站流量与荆江三口分流量变化的相关关系

Fig. 9 Relationship between discharge at Zhicheng station and water diversion change of three outlets of Jingjiang reach under topographical influence

- [2] 许全喜,李思璇,袁晶,等.三峡水库蓄水运用以来长江中下游沙量平衡分析[J].湖泊科学,2021,33(3):806-818. (XU Quanxi, LI Sixuan, YUAN Jing, et al. Analysis of equilibrium sediment transport in the middle and lower reaches of the Yangtze River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3):806-818. (in Chinese))
- [3] 代稳,王金凤,陕振沛,等.荆南三口流域水系连通性变化对水资源开发利用的影响[J].水资源保护,2021,37(6):114-120. (DAI Wen, WANG Jinfeng, SHAN Zhenpei, et al. Influence of water system connectivity variation on water resources development and utilization in the Three Outlets Basin of Southern Jingjiang River[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6):114-120. (in Chinese))
- [4] 袁瑞强,钟钰翔,龙西亭.洞庭湖上游平原浅层地下水水质综合评价[J].水资源保护,2021,37(6):121-127. (YUAN Ruiqiang, ZHONG Yuxiang, LONG Xiting. Comprehensive evaluation of shallow groundwater quality in upper plain of Dongting Lake [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6):121-127. (in Chinese))
- [5] 韩其为,何明民.三峡水库修建后下游长江冲刷及其对防洪的影响[J].水力发电学报,1995,14(3):34-46. (HAN Qiwei, HE Mingmin. Erosion of river reach downstream Three Gorge Reservoir and its influence on flood prevention [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1995, 14(3):34-46. (in Chinese))
- [6] 卢金友,黄悦,宫平.三峡工程运用后长江中下游冲淤变化[J].人民长江,2006,37(9):55-57. (LU Jinyou, HUANG Yue, GONG Ping. Scouring and silting variation in middle and lower channel of the Yangtze River after TGP [J]. Yangtze River, 2006, 37(9):55-57. (in Chinese))
- [7] 董炳江,许全喜,袁晶,等.近年来三峡水库坝下游河道强烈冲刷机理分析[J].泥沙研究,2019,44(5):41-46. (DONG Bingjiang, XU Quanxi, YUAN Jing, et al. Mechanism of serious scour along the downstream of Three Gorges Reservoir in recent years[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(5):41-46. (in Chinese))
- [8] 许全喜.三峡水库蓄水以来水库淤积和坝下冲刷研究[J].人民长江,2012,43(7):1-6. (XU Quanxi. Research on reservoir sedimentation and downstream channel erosion of dam after impoundment of Three Gorges Reservoir [J]. Yangtze River, 2012, 43(7):1-6. (in Chinese))
- [9] 宫平,杨文俊.三峡水库建成后对长江中下游江湖水沙关系变化趋势初探:II.江湖关系及槽蓄影响初步研究[J].水力发电学报,2009,28(6):120-125. (GONG Ping, YANG Wenjun. Preliminary study of river-lake evolution effect due to Three Gorges project: Part 2. the effect on river-lake relation and channel storage [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(6):120-125. (in Chinese))
- [10] 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[J].水科学进展,2016,27(6):822-831. (ZHU Lingling, XU Quanxi, DAI Minglong. Runoff diverted from the Jingjiang reach to Dongting Lake and the effect of Three Gorges Reservoir [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6):822-831. (in Chinese))
- [11] 班璇,姜刘志,曾小辉,等.三峡水库蓄水后长江中游水沙时空变化的定量评估[J].水科学进展,2014,25(5):650-657. (BAN Xuan, JIANG Liuzhi, ZENG Xiaohui, et al. Quantifying the spatio-temporal variation of flow and sediment in the middle Yangtze River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5):650-657. (in Chinese))
- [12] 孙思瑞,谢平,陈柯兵,等.三峡水库蓄水期不同调度方案对洞庭湖出口水位的影响[J].长江流域资源与环境,2018,27(8):1819-1826. (SUN Sirui, XIE Ping, CHEN Keping, et al. Impact of different refill operation rules of the Three Gorges Reservoir on the water level of the outlet of Dongting Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(8):1819-1826. (in Chinese))
- [13] 刘晓群,戴斌祥.三峡水库运行以来洞庭湖水文条件变化与对策[J].水利水电科技进展,2017,37(6):25-31. (LIU Xiaoqun, DAI Binxiang. Variation of hydrological conditions of Dongting Lake and corresponding countermeasure analysis after operation of the Three Gorges Reservoir [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(6):25-31. (in Chinese))
- [14] 王鸿翔,查胡飞,李越,等.三峡水库对洞庭湖水文情势影响评估[J].水力发电,2019,45(11):14-18. (WANG Hongxiang, ZHA Hufei, LI Yue, et al. Impact assessment of the Three Gorges Reservoir on the hydrological regime in Dongting Lake area [J]. Water Power, 2019, 45(11):14-18. (in Chinese))
- [15] 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[J].人民长江,2019,50(2):6-12. (XU Changjiang, XU Gaohong, DAI Minglong, et al. Study on hydrological regime variation in Dongting Lake during water storage period of Three Gorges Reservoir [J]. Yangtze River, 2019, 50(2):6-12. (in Chinese))
- [16] 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[J].水科学进展,2019,30(5):613-622. (ZHANG Dongdong, DAI Minglong, XU Gaohong, et al. Research on change of the outflow of Dongting Lake during the refill period of the Three Gorges Reservoir [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5):613-622. (in Chinese))
- [17] 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[J]. 人民长江,2020,51(10):1-6. (FAN Yongyang, HU Chunyan, CHEN Mofei. Response of bed evolution in Jingjiang River to water and sediment process before and after operation of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River, 2020, 51(10): 1-6. (in Chinese))
- [18] 徐长江,刘冬英,张冬冬,等. 2020 年荆江三口分流分沙变化研究[J]. 人民长江,2020,51(12):203-209. (XU Changjiang, LIU Dongying, ZHANG Dongdong, et al. Research on flow and sediment diversion in three outlets along Jingjiang River[J]. Yangtze River, 2020, 51(12): 203-209. (in Chinese))
- [19] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models; Part I. a discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [20] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
- [21] 李世强,邹红梅. 长江中游螺山站水位流量关系分析[J]. 人民长江,2011,42(6):87-89. (LI Shiqiang, ZOU Hongmei. Analysis on water level-discharge relation of Luoshan hydrologic station in middle reaches of Yangtze River[J]. Yangtze River, 2011, 42(6): 87-89. (in Chinese))
- [22] 朱玲玲,陈剑池,袁晶,等. 洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响[J]. 水科学进展,2014,25(3):348-357. (ZHU Lingling, CHEN Jianchi, YUAN Jing, et al. Sediment erosion and deposition in two lakes connected with the middle Yangtze River and the impact of Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 348-357. (in Chinese))
- (收稿日期:2021-09-15 编辑:施业)

(上接第 55 页)

- [11] 宫永伟,刘伟勋,于磊,等. 合流制溢流控制系统的多目标优化[J]. 环境工程,2020,38(4):128-133. (GUAN Yongwei, LIU Weixun, YU Lei, et al. Multi-objective optimization of combined sewer overflow control system[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(4): 128-133. (in Chinese))
- [12] 彭晨蕊. 基于海绵城市理念的雨水系统规划设计优化研究[D]. 天津:天津大学,2017.
- [13] BELL C, WOLFAND J, PANOS C, et al. Stormwater control impacts on runoff volume and peak flow; a meta-analysis of watershed modelling studies[J]. Hydrological Processes, 2020, 34(14): 3134-3152.
- [14] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J]. 给水排水, 2009, 45(11): 213-217. (LIU Xingpo. Parameter calibration method for urban rainfall-runoff model based on runoff coefficient[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 45(11): 213-217. (in Chinese))
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计规范:GB50014-2006(2016 年版)[S]. 北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2016.
- [16] 周毅,余明辉,陈永祥. SWMM 子汇水区域宽度参数的估算方法介绍[J]. 中国给水排水,2014,30(22):61-64. (ZHOU Yi, YU Minghui, CHEN Yongxiang. Estimation of sub-catchment width in SWMM[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(22): 61-64. (in Chinese))
- [17] GIACOMONI M H, JOSEPH J. Multi-objective evolutionary optimization and Monte Carlo simulation for placement of low impact development in the catchment scale[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2017, 143(9): 1394-1405.
- [18] 宋文圣. 滇池多层次排水系统雨水调蓄池功效研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- [19] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展,2020,31(5):713-724. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 713-724. (in Chinese))
- (收稿日期:2021-09-06 编辑:王芳)

