J. Lake Sci.(湖泊科学), 2022, **34**(3): 935-944
DOI 10.18307/2022.0318
© 2022 by *Journal of Lake Sciences*

长江全流域大洪水下三峡水库对洞庭湖区防洪贡献分析*

徐卫红[1,2**], 张双虎[1], 李　娜[1,2], 蒋云钟[1]
(1:中国水利水电科学研究院,北京 100038)
(2:水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心,北京 100038)

摘　要: 基于长江中下游一、二维耦合水动力学模型,以 1954 和 1998 年洪水为典型,模拟了三峡水库调蓄前后洞庭湖区的洪水过程,定量分析了三峡水库对洞庭湖区防洪的贡献. 结果表明:在长江发生 1954 和 1998 年全流域大洪水期间,三峡水库实施兼顾对城陵矶河段的防洪补偿调度,可有效缓解荆南三口河系及湖区的防洪压力,减少荆南三口 1.58% 和 0.61% 的分洪量,削减荆南三河 24.6% 和 18.4% 的洪峰流量. 洞庭湖区最高水位降低 0.50~0.93 和 0.51~0.82 m,削减值空间上呈现北强南弱、东高西低的分布格局. 遇 1954 年长江中下游防御型大洪水,三峡水库调蓄后洞庭湖区超额洪量可减少 43.2 亿 m^3,但仍存在大量的超额洪量需要妥善处理.
关键词: 防洪作用;全流域大洪水;水动力模型;三峡水库;洞庭湖区

Analysis on flood control contribution of the Three Georges Reservoir for the Lake Dongting area under basin-wide severe floods of Yangtze River*

Xu Weihong[1,2**], Zhang Shuanghu[1], Li Na[1,2] & Jiang Yunzhong[1]
(1: *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *P.R.China*)
(2: *Research Center on Flood & Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources*, *Beijing* 100038, *P.R.China*)

Abstract: Based on the one- and two-dimensional coupled hydrodynamic model of middle and lower reaches of the Yangtze River, taking 1954 and 1998 flood as the typical floods, the flood processes of the Lake Dongting area before and after the flood control operation of the Three Gorges Reservoir were simulated. Quantitative analysis was carried out for the flood control contribution of the Three Georges Reservoir for the Lake Dongting area. The results indicate that, during the basin-wide severe flood period of the Yangtze River such as 1954 and 1998 floods, after the operation of the Three Gorges reservoir, the flood control pressure of the three rivers in southern of Jingjiang River and the Lake Dongting area was effectively alleviated. About 1.58% and 0.61% of the flood diversion volume and 24.6% and 18.4% of the peak discharge of the three rivers in southern of Jingjiang River could be reduced; in addition, 0.50-0.93 and 0.51-0.82 m of the maximum water level of the Lake Dongting area could be reduced. From the perspective of spatial distribution, the decrease value shows a pattern that the north and east was stronger than the south and west. Under the extreme floods the Yangtze River such as 1954 flood, the flood volume in the Lake Dongting area could be decreased by 4.32 billion m^3 after the Three Gorges Reservoir operation, whereas excessive floods still should be handled properly.
Keywords: Flood control effects; basin-wide severe floods; hydrodynamic model; Three Georges Reservoir; Lake Dongting area

长江中游枝城至城陵矶河段称为荆江河段,洞庭湖位于荆江以南,北有松滋河、虎渡河以及藕池河(简称三口河系)分泄长江来水,南纳澧水、沅江、资水以及湘江(简称四水河道)入汇,经洞庭湖调蓄于城陵矶汇入长江. 泥沙淤积、洪涝灾害、水污染与环境退化是洞庭湖区三大水安全问题,学者们对洞庭湖区水文情势[1-5]、泥沙条件[6]、洪灾损失[7]、水环境[8-10]与水生态[11]等方面开展了众多研究. 受自然地理与气候条件的影响,洪涝灾害已成为当前湖区人民最大的威胁[12],且洞庭湖区大洪水发生的频次呈现逐渐加密之势[13].

* 2021-05-10 收稿;2021-09-10 收修改稿.
国家重点研发计划项目(2018YFC1508003)资助.
** 通信作者;E-mail:xwh_1018@163.com.

洞庭湖区的洪水主要来自荆南三河和湖南四水,从历史洪灾来看,洞庭湖区是长江中下游遭受洪灾最严重的区域之一,在长江流域防洪治理中具有显著地位[14]. 三峡水库的运用对保障长江中下游的防洪安全发挥了巨大作用,洪峰的削减直接减小了三口河系的分洪量,同时,清水下泄打破了坝下河道原有的冲淤平衡状态[15],驱动着长江中下游江湖关系的新一轮调整. 研究表明,三峡水库蓄水运用后,螺山河段枯水期同流量下水位下降,但汛期大流量下的水位却有所抬升[16],直接导致洞庭湖出口洪水的宣泄不畅.

三峡工程运行以来,长江中下游江湖关系的变化受到学者们广泛关注,研究方法从 1970s 的水文学模型[17]、1980s 的一维水动力学模型[18],发展到荆江—洞庭湖一、二维耦合的水动力学模型[19-20],后续又将模型的下边界延长至下游大通,形成长江中下游水动力学模型[21]. 受洪水涨落、下游顶托等影响,螺山的水位流量关系较复杂[22],以水位流量关系较好的大通站作为出流边界,能更为精确地反映长江洪水与洞庭湖出流之间复杂的交互关系,且在长江中下游整体防洪布局之下,才能合理计算城陵矶附近超额洪量的变化. 目前,长江中下游水动力学模型大多应用于长江中下游整体问题的研究[23-24],针对洞庭湖区水文情势方面的研究,大多采用以螺山站为下边界的水动力学模型[4,25]或水文模型[5,26]. 目前,利用长江中下游整体水动力学模型探讨三峡水库对洞庭湖区防洪作用的研究较少,比如,顾庆福等[5]利用水文模型分析了三峡水库不同调度方式对洞庭湖区的防洪作用;黄昌林等[27]从数据对比出发分析了三峡水库运行后洞庭湖区防洪工程的抗洪能力;Lai 等[28]虽然以长江中下游整体水动力学模型为基础,分析了 1998、2010 年洪水经三峡水库调蓄后洞庭湖区洪水位的变化,但未考虑滨湖区间降雨形成的径流汇入.

本文在长江中下游江湖关系和防洪布局下,构建了考虑区间径流的长江中下游整体水动力学模型,重演了中华人民共和国成立以来长江最大的两场全流域型大洪水,从荆南三口分洪量、洞庭湖出湖洪量、湖区最高水位、超额洪量变化这几方面,定量分析了三峡水库防洪调度对减轻洞庭湖区防洪压力的贡献,为今后洞庭湖区进一步改善综合防洪体系、提高防洪能力提供支撑.

1 研究方法

1.1 模型构建

洞庭湖区水系主要包括松滋河、虎渡河、藕池河三口河系,湘江、资水、沅江、澧水四水尾闾,以及洞庭湖湖区[29]. 该区域属于复杂平原河网地区,河网纵横交错,汊点密布,江、河、湖互相串通,水流相互作用与制约,流向往复不定. 本文构建了长江中下游一、二维耦合的水动力学模型,模拟范围为长江干流枝城至大通站、洞庭湖四水尾闾入湖控制站、鄱阳湖五河尾闾入湖控制站以及长江支流入江控制站所围成的区域(图 1).

模拟范围内的河道概化为一维水动力学模型,共设置 1919 个河道断面,平均间距 1~2 km,变化复杂的河道适当加密;湖泊概化为二维水动力学模型,共划分约 58000 个三角形网格,平均面积 0.11 km^2. 河道和湖泊之间互为上下游关系,二维模型将 n 时步的水深传递给一维模型,一维模型将 $n+1/2$ 时步的流量传递给二维模型,二维模型再将 $n+1$ 时步的水深传递给一维模型,依此交替传递实现耦合. 长江枝城—螺山段采用 2006 年实测地形,洞庭湖区采用 2003 年实测地形,长江螺山—大通段、鄱阳湖区采用 1998 年实测地形. 入流边界包括长江枝城站、洞庭湖四水尾闾和鄱阳湖五河尾闾入湖控制站以及长江中下游陆水、汉江等支流入江控制站(图 1)的流量过程,下边界采用大通站实测水位过程或水位—流量关系.

洞庭湖区的滨湖区间面积较大,其降雨产流形成的区间径流不可忽略. 区间径流最理想的计算方法是构建分布式水文模型,并通过与一、二维水动力学模型耦合,汇入河道或湖泊,但这种方法参数率定难度较大,且计算效率较低. 本文采用径流合成法推算典型年的区间径流,并以旁侧入流的方式加入到水动力学模型中,计算方法如公式(1)和(2)所示:

$$Q_{水} = A_{水}(P_{水} - E_{水})/86.4 \tag{1}$$

$$Q_{陆} = A_{陆} \cdot P_{陆} \cdot r/86.4 \tag{2}$$

式中,$Q_{水}$和$Q_{陆}$为湖面和陆面的日平均流量,m^3/s;$A_{水}$和$A_{陆}$为湖面和陆面面积,km^2;$P_{水}$和$P_{陆}$为湖面和陆面日平均降水量,mm;$E_{水}$为湖面日平均蒸发量,mm;r 为产流系数.

利用该方法计算的 1954 和 1998 年洞庭湖区的区间径流如表 1 所示,其中,东区是指汨罗江和新墙河流

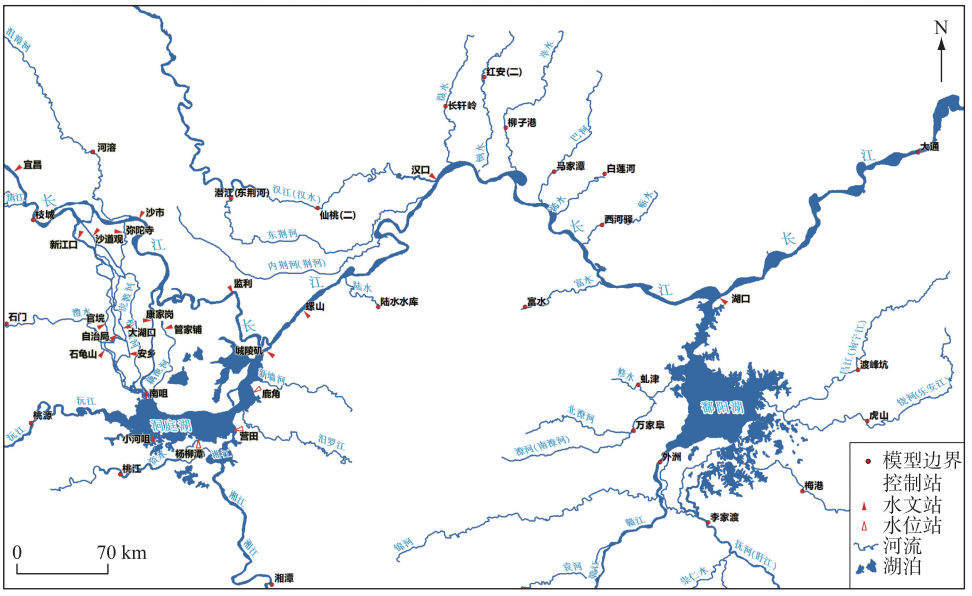


图 1 模拟范围及水文站分布

Fig.1 Simulation range and location of gauge stations

域,南区是指湘江湘潭站和资水桃江站下游区域,西区包括沅江桃源站和澧水石门站下游区域,湖区包括湖泊和荆南三口以南的滨湖陆面.

表 1 洞庭湖区间径流

Tab.1 Interval runoff of the Lake Dongting

时段	径流/(亿 m^3)			
	西区	南区	东区	湖区
1954 年 6 月 12 日—9 月 10 日	48.5	99.7	26.2	46.3
1998 年 6 月 12 日—9 月 10 日	46.6	61.0	32.9	65.0

1.2 模型验证

三峡水库建成初期,洞庭湖区汛期来水,除了 2006 年偏少之外,其余年份差异不大. 选择与建模采用的地形测量年份较为接近的 2007 年洪水以及三峡水库建成以前的 1998 年洪水进行率定和验证. 两个年份枝城站洪峰流量分别为 48700 和 65800 m^3/s,5—10 月长江向洞庭湖分水量为 532 亿和 1038 亿 m^3,湖南四水入洞庭湖水量为 930 亿和 1324 亿 m^3. 由于模型覆盖范围较广,河底床面与岸壁形态差异较大,水流阻力各不相同. 本文在分析河网及湖区特性的基础上,针对不同河段的深槽、浅滩或边滩分级设置糙率逐级率定,如图 2 所示. 结果显示,长江中下游干流糙率为 0.016~0.031,三口河系糙率为 0.018~0.032,洞庭湖和鄱阳湖糙率为 0.021~0.035.

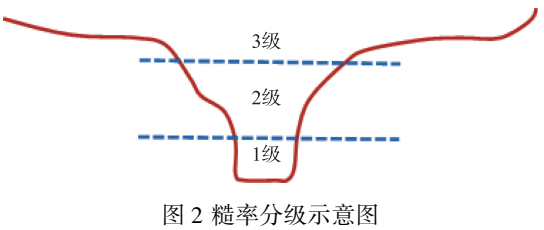


图 2 糙率分级示意图

Fig.2 Sketch map on the grade of roughness coefficient

通过纳什系数(Nash-Sutcliffe efficiency,*NSE*)[30]来衡量计算与实测洪水过程的吻合程度,利用洪峰流量

相对误差 E[31] 和最高水位绝对误差 ΔZ 来评定洪峰模拟精度. 1998 年流量和水位过程验证结果如图 3 所示(85 国家高程基准),计算与实测的水位和流量过程相位吻合,拟合程度较好. 利用 Moriasi 等[32] 采用的模拟效果评价标准(表 2)对模型精度进行评价,各站模拟效果如表 3 所示. 从表 3 中可以看出,洪水过程拟合程度除石龟山站 *NSE* 低于 0.75 为良好外,其他均为优秀;洪峰流量相对误差除官垸站为10.55% 外,其他各站均控制在 10% 以内;最高水位模拟误差除弥陀寺站、康家岗站、官垸站、小河咀站外,其他各站均控制在 30 cm 以内,满足模拟精度要求.

表 2 模拟效果评价等级

Tab.2 Evaluation grade for simulation

等级	*NSE*	$\lvert m\rvert$/%
优秀	$0.75<NSE\leqslant 1.00$	$\lvert m\rvert<10$
良好	$0.65<NSE\leqslant 0.75$	$10\leqslant\lvert m\rvert<15$
合格	$0.50<NSE\leqslant 0.65$	$15\leqslant\lvert m\rvert<25$
不合格	$NSE\leqslant 0.50$	$\lvert m\rvert\geqslant 25$

表 3 各站模拟效果

Tab.3 Simulation results for each station

水文站	*NSE*	*E*	ΔZ/m	水文站	*NSE*	*E*	ΔZ/m
沙市	0.988	−1.69%	0.04	自治局	0.840	7.58%	−0.09
监利	0.993	0.58%	−0.21	官垸	0.842	10.55%	−0.39
螺山	0.926	2.48%	0.28	安乡	0.897	5.80%	−0.28
城陵矶	0.798	−2.70%	0.03	石龟山	0.733	8.70%	−0.14
新江口	0.985	0.90%	0.17	南咀	0.922	8.99%	−0.19
沙道观	0.974	3.44%	0.20	小河咀	0.866	−1.88%	−0.32
弥陀寺	0.942	3.80%	0.33	杨柳潭	0.791	—	−0.18
管家铺	0.893	−8.32%	−0.27	营田	0.880	—	0.01
康家岗	0.888	5.01%	−0.37	鹿角	0.960	—	−0.03

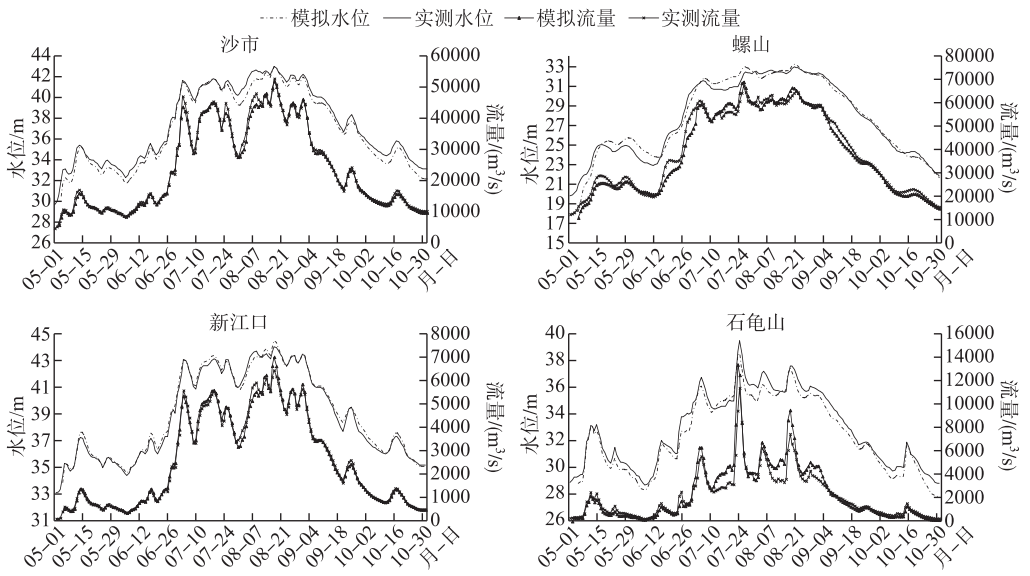


图 3 1998 年洪水流量和水位模拟与实测过程

Fig.3 Simulation and observation process of discharge and water level on 1998 flood

1.3 典型洪水

洞庭湖区位于长江流域中游区域. 长江中下游洪水由于洪源众多,同一场洪水在不同控制站、同一控制站从不同历时洪量、洪峰流量来评定,频率往往各不相同,很难给定一套整体的设计洪水. 长江大洪水通常

可分为区域性大洪水和全流域型大洪水,前者主要是指由子流域暴雨形成的长江干流部分河段或支流的洪水,后者是指长江上、中、下游干支流大面积暴雨形成的洪量大、持续时间长的洪水.

1954 年洪水和 1998 年洪水是中华人民共和国成立以来长江发生的最大和第二大全流域型洪水. 长江宜昌站(图 1)为中游的起点,以此作为控制站,从洪峰流量来看,1954、1998 年洪水重现期仅为 10 年、6~8 年,但从 30 天洪量来看,1954、1998 年洪水重现期约为 100 年. 基于现代水文观测数据,重现期超过 50 年的洪水被称为特大洪水[33]. 这两个年份洞庭湖湘、资、沅、澧四水及洞庭湖一带均发生连续性强降雨过程,加上长江分洪入湖洪水以及湖区出口长江高水位的顶托,洞庭湖区遭受了罕见的洪涝灾害. 本文选择 1954 和 1998 年这两场洪水作为典型洪水开展研究,计算时段均为 6 月 12 日—9 月 10 日,洞庭湖区入湖洪水特征如表 4 所示.

表 4 洞庭湖区入湖洪水特征*

Tab.4 Flood characteristics of inflow of Lake Dongting area

站名	1954 年			1998 年		
	洪峰流量/(m^3/s)	出现时间(月-日)	洪量/(亿 m^3)	洪峰流量/(m^3/s)	出现时间(月-日)	洪量/(亿 m^3)
枝城(长江)	70300	08-07	3261	65800	08-17	3330
石门(澧水)	11700	06-25	169.6	17300	07-23	136.0
桃源(沅江)	23000	07-30	557.7	22100	07-24	387.5
桃江(资水)	9930	07-25	182.6	8880	06-14	133.7
湘潭(湘江)	18300	06-30	304.4	15200	06-27	219.6

* 表中流量为日均流量.

1.4 三峡水库调蓄

为了识别三峡水库对洞庭湖区防洪的贡献,本文在维持初始条件、区间径流、其他入流边界不变的情况下,输入三峡水库不调蓄和调蓄情景下的枝城站流量过程,计算并分析两种情景下洞庭湖区洪水特征的变化. 根据《三峡水库优化调度方案(2009)》,三峡水库防洪调度按照洪水大小采取分级补偿的调度方式,针对长江上游发生大洪水的情况,采用对荆江河段防洪补偿的调度方式,当长江上游洪水不大而城陵矶水位将超过设计水位时,在保障荆江河段防洪安全的前提下,采用兼顾对城陵矶河段防洪补偿的调度方式(下文简称"兼顾城陵矶补偿").

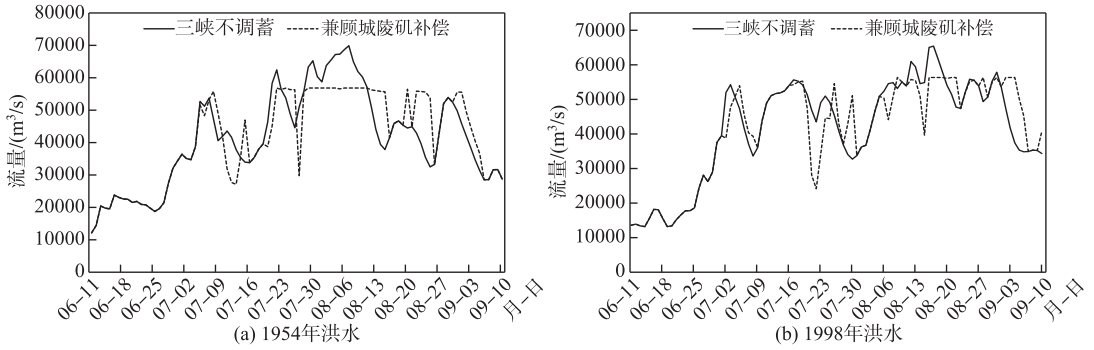
对荆江河段防洪补偿的调度方式,是在保障三峡大坝安全的前提下,以沙市站水位为控制条件进行调蓄. 当长江遇 100 年一遇以下洪水,控制沙市站水位不超过 44.5 m(冻结吴淞高程),当长江洪水在 100 年至 1000 年一遇时,控制枝城站流量不超过 80000 m^3/s,在分蓄洪措施的配合下,控制沙市站水位不高于 45.0 m(冻结吴淞高程). 兼顾对城陵矶河段防洪补偿的调度方式,是指在三峡水库水位不高于 155.0 m 时,按城陵矶站水位 34.4 m(冻结吴淞高程)进行补偿调节,当三峡水库水位高于 155.0 m 后,转为对荆江河段进行防洪补偿调度.

本文基于兼顾对城陵矶河段防洪补偿的调度方式,构建基于防洪规则的水库调度模型,分别对 1954 和 1998 年洪水进行调蓄,并将出库流量与宜昌站—枝城站区间的入汇流量演算至枝城站,结果如图 4. 根据计算结果,两种防洪调度方式均具有巨大的防洪作用,洪水枝城洪峰流量均被削减为 56700 m^3/s,削减比例如表 5 所示.

2 结果与分析

2.1 荆南三口分洪量与城陵矶出湖洪量变化

松滋河的新江口站和沙道观站、虎渡河的弥陀寺站、藕池河的康家岗站和管家铺站的分洪之和为洞庭湖区荆南三口分洪量(水文站位置如图 1 所示). 三峡水库调蓄前后,荆南三河分洪量计算成果如表 6 所示. 从表 6 可以看出,1954 和 1998 年长江洪水经三峡水库调蓄后,荆南三口洪峰流量削减了 24.6% 和 18.4%,洪



(a) 1954年洪水 (b) 1998年洪水

图 4 三峡水库调蓄后枝城流量过程

Fig.4 Discharge process of Zhicheng station after impoundment of the Three Gorges Reservoir

表 5 三峡水库调蓄前后枝城站洪水特征

Tab.5 Flood characteristics of Zhicheng station after impoundment of the Three Gorges Reservoir

三峡防洪调度方式	1954 年			1998 年		
	洪峰流量/(m^3/s)	削减比例/%	拦蓄洪量/(亿 m^3)	洪峰流量/(m^3/s)	削减比例/%	拦蓄洪量/(亿 m^3)
三峡不调蓄	70300	—	—	65800	—	—
兼顾城陵矶补偿	56700	19.3	186.8	56700	13.8	137.4

量减少了 1.58% 和 0.61%.

如表 6 所示,在三峡水库不调蓄情景下,1954 年洪水期间汇入洞庭湖的总洪量为 2058.6 亿 m^3,荆南三河分洪量和湘、资、沅、澧四水及滨湖区间入湖洪量比例约为 4∶6,城陵矶出湖洪量为 1938.5 亿 m^3,洪水期之后洞庭湖区增加了 340.8 亿 m^3水量. 1954 年长江洪水经三峡水库调蓄后,荆南三口分洪量减少,洞庭湖出湖洪量也有所减少,洪水期之后湖区依然有大量入湖洪水滞留. 1998 年洪水期间,荆南三河的分洪量与 1954 年相当,但 1998 年湘、资、沅、澧四水及滨湖区间入湖洪量比 1954 年减少 352.7 亿 m^3,1998 年洪水经三峡水库调蓄后,洪水期之后湖区增加了 226.1 亿 m^3水量.

表 6 荆南三河分洪量变化

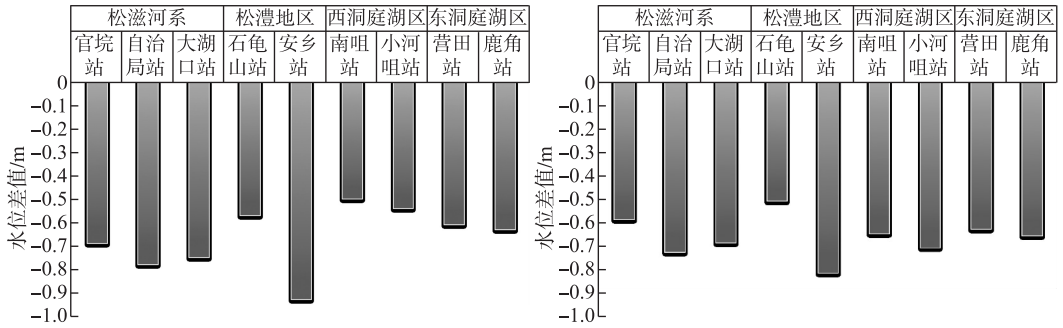
Tab.6 Flood diversion variation volume of the three rivers in southern of Jingjiang River

洪水年份	计算方案	荆南三口洪峰流量/(m^3/s)		荆南三口分洪量/(亿 m^3)		四水及滨湖区间入湖洪量/(亿 m^3)	出湖洪量/(亿 m^3)	
		计算值	差值	计算值	差值		计算值	差值
1954 年	三峡不调蓄	21900	—	844.3	—	1435.0	1938.5	—
	兼顾城陵矶补偿	16500	−5380	831.0	−13.3		1915.3	−23.2
1998 年	三峡不调蓄	18900	—	836.6	—	1082.3	1710.7	—
	兼顾城陵矶补偿	15400	−3480	831.5	−5.1		1687.7	−23

2.2 洞庭湖区最高水位变化及分布特征

三峡水库调蓄前后,洞庭湖区主要水文站最高水位变化如图 5 所示(水文站位置如图 1 所示). 从图中可以看出,1954 和 1998 年洪水经三峡水库调蓄后,各站最高水位降低了 0.50~0.93 和 0.51~0.82 m. 在本文采用的地形条件下,1954 和 1998 年洪水松滋河的洪峰流量占三口最大分流量的 44%~49%,三峡水库调蓄后松滋河系水位削减较明显,降低了 0.69~0.78 和 0.59~0.73 m. 以松滋河和澧水为主要洪水来源的松澧地

区,最高水位也有效降低. 1954 和 1998 年洪水松滋河与虎渡河的洪峰流量之和占三口最大分流量的 58%~65%,安乡站承接了这两条河的分洪,三峡水库调蓄后水位降低最显著,高达 0.93 和 0.82 m. 湖区坦化了荆南三河分洪减小的作用,最高水位削减程度比荆南三口河系稍弱,1954 和 1998 年洪水期间湖区最高水位降低了 0.50~0.63 和 0.63~0.71 m. 从整个洞庭湖区来看,最高水位削减值呈现北强南弱、东高西低的格局.



(a) 1954年洪水　　(b) 1998年洪水

图 5 各站水位变化

Fig.5 Water level change of each station

2.3 洞庭湖区超额洪量变化

超额洪量是指超过安全泄量部分的水量. 长江中下游地区总体防御对象为 1954 年洪水,根据《长江流域综合利用规划简要报告(1990 年修订)》,三峡水库不调蓄 1954 年洪水情况下,荆江地区和城陵矶地区规划分蓄的超额洪量为 54 亿和 320 亿 m^3,其中,洞庭湖承担 160 亿 m^3超额洪量的分蓄任务. 该规划采用的螺山站水位流量关系是经过修正之后的单一曲线,各水位对应的泄洪能力是理想值,并非实际过流能力. 洪水实际发生时,实测流量含有下游顶托影响,螺山站的实际过流能力与规划值并不相同[34],加之,近几十年来,江湖关系发生了较大变化[14],三峡水库不调蓄情景下城陵矶地区的超额洪量也随之改变.

为了体现三峡水库调蓄后洞庭湖区超额洪量的变化,本文基于 21 世纪初期荆江与洞庭湖区的地形,利用出流边界下延至大通的水动力学模型,重新计算 1954 年洪水在三峡水库不调蓄情景下城陵矶地区的超额洪量,并与三峡水库调蓄情景下的超额洪量对比,以此识别三峡工程调蓄对减少洞庭湖区超额洪量的贡献,结果如表 7 所示. 从表中可以看出,1954 洪水经三峡水库拦蓄之后,城陵矶地区超额洪量减少了 86.4 亿 m^3,洞庭湖超额洪量减少了 43.2 亿 m^3.

表 7 遇 1954 年洪水长江中下游超额洪量*

Tab.7 Excess flood volume in the middle and lower reaches of the Yangtze River on 1954 flood

三峡调度情景	荆江地区		城陵矶地区	
	分洪运用水位/m	超额洪量/(亿 m^3)	分洪运用水位/m	超额洪量/(亿 m^3)
三峡不调蓄	45.0(沙市水位)	14.20	34.4(城陵矶水位)	477.2
兼顾城陵矶补偿调度		0		390.8

* 表中水位高程基准为冻结吴淞高程.

3 结论

本文构建了考虑区间产流的长江中下游一、二维耦合水动力学模型,计算了 1954 和 1998 年长江洪水经三峡水库调蓄后的枝城洪水过程,定量分析了三峡水库实施兼顾对城陵矶河段防洪补偿调度对洞庭湖区的防洪贡献,结果表明:

1) 1954 和 1998 年长江全流域型大洪水经三峡水库调蓄后,洞庭湖区荆南三口洪峰流量被削减 24.6%

和 18.4%,分洪量减少了 1.58% 和 0.61%,有效缓解了荆南三口河系及湖区的防洪压力.

2)在长江发生 1954 和 1998 年全流域型大洪水期间,三峡水库实施防洪调度后,洞庭湖区最高水位降低了 0.50~0.93 和 0.51~0.82 m,从空间来看,削减值呈北强南弱、东高西低的分布格局.

3)遇 1954 年长江中下游防御型大洪水,三峡水库实施兼顾城陵矶补偿防洪调度后,城陵矶地区超额洪量减少了 86.4 亿 m^3,洞庭湖区超额洪量减少了 43.2 亿 m^3,但仍存在大量超额洪量需妥善处理,尚不能完全解除湖区的洪水威胁.

4 参考文献

[1] Lai X, 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.]

[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] Wang HX, Zha HF, Li Y *et al*. Impact assessment of the Three Gorges reservoir on the hydrological regime in Dongting Lake area. *Water Power*, 2019, **45**(11): 14-18,44. [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. 水力发电, 2019, **45**(11): 14-18,44.]

[4] 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.]

[5] Gu QF, Wang JJ. Analysis on the flood control role of the Three Gorges Project for typical floods of the Dongting Lake. *Yangtze River*, 2004, **35**(2): 9-10, 18-51. [顾庆福, 王建家. 三峡工程对洞庭湖典型洪水的防洪作用分析. 人民长江, 2004, **35**(2): 9-10, 18-51.]

[6] Ran XY, Zhu DJ, Li DX. Variations in flow and sediment in Dongting Lake and its influencing factors after operation of Three Gorges Dam. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, **40**(3): 30-38. [冉雪嫣, 朱德军, 李丹勋. 三峡水库运行后洞庭湖水沙变化及影响因素. 水力发电学报, 2021, **40**(3): 30-38.]

[7] Ou CM, Zhuang W. Flood-control and disaster-reduction contribution of the flood-control dispatch of the Three Gorges Reservoir in the Dongting Lake area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(11): 1382-1388. [欧朝敏, 庄伟. 三峡水库防洪调度运行对洞庭湖区防洪减灾的贡献. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(11): 1382-1388.]

[8] Zhang GG, Wang CM, Tian Q. Changes of water quality in Lake Dongting before and after Three Gorges Project operation. *J Lake Sci*, 2016, **28**(4): 734-742. DOI: 10.18307/2016.0406. [张光贵, 王丑明, 田琪. 三峡工程运行前后洞庭湖水质变化分析. 湖泊科学, 2016, **28**(4): 734-742.]

[9] Shuai H, Li HY, Li S *et al*. Water environmental quality of Dongting Lake caused by impoundment of the Three Gorges Project. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(6): 1315-1323. [帅红, 李辉艳, 李赛等. 三峡工程对洞庭湖水环境质量的影响. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(6): 1315-1323.]

[10] Wang Q, Ou FP, Zhang L *et al*. Changes of water environment in Dongting Lake and its impact analysis after the Three Gorges project operation. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(11): 1843-1849. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201511006. [王琦, 欧伏平, 张雷等. 三峡工程运行后洞庭湖水环境变化及影响分析. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(11): 1843-1849.]

[11] Huang YY, Yu MH, Lu J *et al*. Suitable ecological water level of the East Lake Dongting after the Three Gorges Project operation. *J Lake Sci*, 2020, **32**(2): 417-427. DOI: 10.18307/2020.0211. [黄宇云, 余明辉, 陆晶等. 三峡建库后东洞庭湖适宜生态水位需求分析. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 417-427.]

[12] Xie P, Sun SR, Zhao JY *et al*. Perspective of research on the alteration regulations and security evaluation of floods control under changing environments in the Dongting Lake region. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power*, 2017, **38**(3): 1-8. [谢平, 孙思瑞, 赵江艳等. 变化环境下洞庭湖洪水变异规律及防洪安全评价研究展望. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2017, **38**(3): 1-8.]

[13] Shi YF, Jiang T, Su BD *et al*. Preliminary analysis on the relation between the evolution of heavy floods in the Yangtze

River catchment and the climate changes since 1840. *J Lake Sci*, 2004, **16**(4): 289-297. DOI: 10.18307/2004.0401. [施雅风, 姜彤, 苏布达等. 1840 年以来长江大洪水演变与气候变化关系初探. 湖泊科学, 2004, **16**(4): 289-297.]

[14] Wan 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.]

[15] Xu QX, Li SX, Yuan J *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 Lake Sci*, 2021, **33**(3): 806-818. DOI: 10.18307/2021.0316. [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. 湖泊科学, 2021, **33**(3): 806-818.]

[16] Yao JZ, Xia JQ, Deng SS *et al*. Variation in flood-discharge capacity of Chenglingji-Hankou reach in the middle Yangtze River and analysis of influencing factors since the onset of the Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2021, **33**(3): 830-841. DOI: 10.18307/2021.0322. [姚记卓, 夏军强, 邓珊珊等. 三峡工程蓄水后长江中游城陵矶-汉口河段过流能力变化及影响因素分析. 湖泊科学, 2021, **33**(3): 830-841.]

[17] Zhong ZY, Xu CL, Hu WZ. Study on hydrology modeling of flood routing from the middle and lower valley of the Yangtze River. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 1998, (10): 12-15. [仲志余, 徐承隆, 胡维忠. 长江中下游洪水演进水文学方法模型研究. 水利水电快报, 1998, (10): 12-15.]

[18] Editor committee of "Research of the Yangtze River flood prevention system's real-time flood operation" ed. Research of the Yangtze River flood prevention system's real-time flood operation. Beijing: China Water Power Press, 1997. [《长江防洪系统实时调度研究》编辑委员会. 长江防洪系统实时调度研究. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.]

[19] Tan WY, Hu SY, Wang YT *et al*. Flow modelling of the middle Yangtze River Dongting Lake flood control system Ⅰ. Modelling procedures and basic algorithms. *Advances in Water Science*, 1996, **7**(4): 336-345. [谭维炎, 胡四一, 王银堂等. 长江中游洞庭湖防洪系统水流模拟——Ⅰ.建模思路和基本算法. 水科学进展, 1996, **7**(4): 336-345.]

[20] Hu SY, Wang YT, Tan WY *et al*. Flow modelling of the middle Yangtze River Dongting Lake flood control system Ⅱ model building, calibration and verification. *Advances in Water Science*, 1996, **7**(4): 346-353. [胡四一, 王银堂, 谭维炎等. 长江中游洞庭湖防洪系统水流模拟——Ⅱ.模型实现和率定检验. 水科学进展, 1996, **7**(4): 346-353.]

[21] Hu SY, Shi Y, Wang YT *et al*. Numerical modeling of flood routing for the middle-lower Yangtze River system. *Advances in Water Science*, 2002, **13**(3): 278-286. [胡四一, 施勇, 王银堂等. 长江中下游河湖洪水演进的数值模拟. 水科学进展, 2002, **13**(3): 278-286.]

[22] Li SQ, Zou HM. Analysis on water level-discharge relation of Luoshan hydrologic station in middle reaches of Yangtze River. *Yangtze River*, 2011, **42**(6): 87-89. [李世强, 邹红梅. 长江中游螺山站水位流量关系分析. 人民长江, 2011, **42**(6): 87-89.]

[23] Shi Y, Luan ZY, Chen LG *et al*. Numerical study of the evolution trend in the river-lake relationship in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2010, **21**(6): 832-839. [施勇, 栾震宇, 陈炼钢等. 长江中下游江湖关系演变趋势数值模拟. 水科学进展, 2010, **21**(6): 832-839.]

[24] Zhou JJ. Situation of the mid-Yangtze flood after the commencement of the Three Gorges Project and the countermeasures (I). *Science & Technology Review*, 2010, **28**(22): 60-68. [周建军. 三峡工程建成后长江中游的防洪形势和解决方案(I). 科技导报, 2010, **28**(22): 60-68.]

[25] 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.]

[26] Hayashi S, Murakami S, Xu KQ *et al*. Effect of the Three Gorges Dam Project on flood control in the Dongting Lake area, China, in a 1998-type flood. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2008, **2**(3): 148-163. DOI: 10.1016/j.jher.2008.10.002.

[27] Huang CL, Nie FR, Liu SQ *et al*. Discussion on strategies of flood control and disaster mitigation in the Dongting Lake area after operation of TGP. *Yangtze River*, 2009, **40**(14): 68-70. [黄昌林, 聂芳容, 刘世奇等. 三峡工程运行后洞庭湖区防洪减灾策略探讨. 人民长江, 2009, **40**(14): 68-70.]

[28] Lai XJ, Wang ZM. Flood management of Dongting Lake after operation of Three Gorges Dam. *Water Science and Engineer-*

ing, 2017, **10**(4): 303-310. DOI: 10.1016/j.wse.2017.12.005.

[29] Xu WH, Zhang SH, Jiang YZ *et al*. Research on flood region composition and encountered regulation in Dongting Lake Area. In: Chen XD, Zhang Q, Lin KR *et al* eds. Water cycle and water security on basin: Proceedings of the 11th China Water Forum. Beijng: China Water Power Press, 2013: 481-487. [徐卫红, 张双虎, 蒋云钟等. 洞庭湖区洪水组成及遭遇规律研究. 见:陈晓宏, 张强, 林凯荣等编. 流域水循环与水安全: 第十一届中国水论坛论文集. 北京: 中国水利水电科学出版社, 2013: 481-487.]

[30] Nash JE, Sutcliffe JV. River flow forecasting through conceptual models part Ⅰ—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, **10**(3): 282-290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

[31] 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): H371-H378. DOI: 10.1152/ajpheart.1982.243.3.H371.

[32] 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.

[33] Yu G, Guo Y, Liao MN. Probe on attributions of extreme floods responding to the climate changes in Lake Taihu catchment. *J Lake Sci*, 2013, **25**(5): 765-774. DOI: 10.18307/2013.0520. [于革, 郭娅, 廖梦娜. 气候变暖下太湖极端洪水的归因探讨. 湖泊科学, 2013, **25**(5): 765-774.]

[34] Ning L. History of flood control situation in the midstream and downstream of Yangtze River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, **35**(6): 1-5, 18. DOI: 10.11988/ckyyb.20180298. [宁磊. 长江中下游防洪形势变化历程分析. 长江科学院院报, 2018, **35**(6): 1-5, 18.]