

梯级水库蓄水对长江中下游水位影响分析

张冬冬, 戴明龙, 李妍清, 陈 玺, 王 含

长江水利委员会水文局, 湖北 武汉
Email: www123qe@126.com

收稿日期: 2020年12月3日; 录用日期: 2021年1月28日; 发布日期: 2021年2月23日

摘 要

长江上游梯级水库运行使得长江中下游水文情势发生了变化。基于长江中下游2012年河道实测资料, 构建宜昌至大通的一维水动力模型, 分析了蓄水期溪洛渡、向家坝和三峡水库联合调度对中下游控制站点水位的影响。结果表明: 蓄水期上游梯级水库运行一定程度上降低了下游各个站点的水位, 溪洛渡、向家坝两座水库运行对长江中下游干流的水文情势影响主要集中在9月份, 以宜昌站为例, 两座水库运行对宜昌站9月份旬水位影响的贡献率在27.5%~88.4%, 两座水库运行对干流10月份和11月份的水文情势影响较小。三峡水库运行对长江中下游干流水文情势影响主要集中在9月下旬和10月份, 三峡水库对干流11月份水库影响较小。

关键词

梯级水库蓄水, 长江中下游, 控制断面水位, 影响分析

Influence of Upstream Cascade Reservoir Impoundment on the Water Level in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

Dongdong Zhang, Minglong Dai, Yanqing Li, Xi Chen, Han Wang

Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei
Email: www123qe@126.com

Received: Dec. 3rd, 2020; accepted: Jan. 28th, 2021; published: Feb. 23rd, 2021

Abstract

The upstream cascade reservoirs have changed the hydrological regime in the middle and lower

作者简介: 张冬冬(1986-), 男, 辽宁沈阳人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事水文分析计算研究。

文章引用: 张冬冬, 戴明龙, 李妍清, 陈玺, 王含. 梯级水库蓄水对长江中下游水位影响分析[J]. 水资源研究, 2021, 10(1): 74-82. DOI: 10.12677/jwrr.2021.101008

reaches of the Yangtze River. Based on the 2012 terrain data of the river, the one-dimensional hydrodynamic model was used to analyze the influence of combined operations of the Xiangjiaba, Xiluodu reservoirs and the Three Gorges Reservoir (TGR) on the downstream water levels. The results show that: the water level of each station in the middle and lower reaches of the Yangtze River was dropped due to the impoundment of the upstream cascade reservoirs during the storage period. The water level changed most in September and less in October and November because of impound operation of the Xiangjiaba and Xiluodu reservoirs. For example, the contribution rate of descending water level is 27.5%~88.4% due to the impounding of the two reservoirs. The water level of each station in the middle and lower reaches of the Yangtze River dropped with maximum change in October and minimum change in November due to the operation of TGR.

Keywords

Cascade Reservoir Impoundment, Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Water Level, Influence Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大型水利工程的建造一方面可以充分利用流域水能资源,减轻下游防洪的压力,另一方面却改变了局部空间尺度上的水循环演变规律,对下游的水文情势造成了一定的影响[1] [2]。近几十年来,随着经济社会发展,长江流域水资源开发利用程度逐步加大,溪洛渡、向家坝和三峡水库是长江干流控制性工程,调蓄能力巨大,对长江中下游河道及两湖水文情势造成了一定的影响[3] [4] [5]。另外,随着近年来气候变化造成的局部地区干旱灾害严重,长江流域多次遭遇上下游同枯的流域性枯水水情,蓄水期上游梯级水库群联合蓄水可能会对长江中下游的供水产生一定的影响[6] [7]。因此,为了充分发挥上游梯级水库群的综合利用效益,需全面了解上游梯级水库群蓄水期蓄水对长江中下游水文情势影响程度。

长江上游梯级水库群,尤其是三峡水库运行对下游河段的水文情势造成的影响备受学术界的关注。对于梯级水库群调度运行对下游水文情势影响研究主要分为三类:第一类是基于观测水文资料的研究,主要采用统计分析方法,对比三峡运行前后干流主要控制站点的水文情势变化情况,Zhang等[8]采用统计检验法分析了长江中下游的水沙变化情况,得出三峡工程修建使得中下游水文序列产生突变。李长春等[9]分析了蓄水期长江干流和两湖地区水文情势特征,认为少数年份存在蓄水期长江干流来水与两湖本身来水遭遇枯水的情况,使得三峡水库的蓄水形势更为严峻。第二类是采用 Range of Variability Approach (RVA)指标分析方法,通过定义能够反映水沙时空变化的分析指标,定量评估三峡大坝对长江中下游水文情势的影响。班璇等[10]通过定义 32 个具有生态学意义的指标,评估了三峡蓄水后中游水沙时空分布特征。第三类方法为数值模拟法,通过构建水动力学模型,定量评估三峡蓄水对于下游的影响。王俊等[11]结合 2009 年三峡水库蓄水情况,揭示了三峡工程运行使得蓄水期下游水位下降了 2~3 m。目前,数值模拟研究多集中在通过还原流量计算三峡工程对于下游水位影响,研究多集中在三峡工程对于长江中下游河段水文情势的影响,2014 年后,溪洛渡、向家坝水库先后蓄水,长江中下游水文情势将进一步变化,三个水库联合蓄水对于中下游影响程度目前还未有研究。

本研究拟构建长江中下游一维水动力演算模型,利用水库运行资料对模型上边界宜昌站的流量进行还原,

选取溪洛渡、向家坝两座水库正常蓄水时期(2014~2015年)作为分析时段,定量评估溪洛渡、向家坝、三峡水库联合蓄水对中下游干流水位的影响,并重点分析溪洛渡、向家坝的影响,为减轻上游梯级水库群蓄水对长江中下游生产、生活、生态、航运等用水的影响提供可靠的技术支撑。

2. 计算方法及验证

2.1. 模型方法

研究模拟范围包括长江干流宜昌至大通河段,支流包括清江、湘江、资水、沅江、澧水、洞庭湖区、汉江、鄱阳湖区、饶河、信江、抚河、赣江、修水、昌江等一级支流,三口松滋河、虎渡河、藕池河等分流口及其二级支流,河网水系概化见图1。干流河道长1095 km,采用2012年的实测河道断面资料,一共设置了744个断面,断面平均间距为2 km。根据河网概化结果,模型边界一共有25个,其中宜昌水文站为上边界,大通站为下边界,区间有洞庭湖四水、鄱阳湖五河、清江、汉江、鄂东等23个控制站作为区间点源入流。

采用长江中下游一维水动力学模型,分析梯级水库蓄水对长江中下游水位的影响。其数学表达式为。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gn^2 Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0$$

式中: x 、 t 分别为计算点空间和时间的坐标, A 为过水断面面积, Q 为过流流量, h 为水位, q 为旁侧入流流量, R 为水力半径, α 为动量校正系数, g 为重力加速度。

2.2. 模型率定

利用长江中下游干支流河道断面数据及主要控制站2003~2015年实测水位、流量资料,采用2003~2007年的水文资料进行率定,根据各河段的河道形态及水位流量实测资料,针对不同水位分三段对曼宁糙率系数进行率定[12][13],例如对于宜昌水文站,水位低于40 m时曼宁系数 n 为0.028,在40 m与49 m之间时曼宁系数 n 为0.025,高于49 m时曼宁系数 n 为0.020,其他河段的率定结果见表1。

Table 1. Manning roughness coefficients in the coupled model

表1. 曼宁糙率系数率定成果表

区域	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
三口洪道及四水尾閘	0.019~0.033	-	0.023~0.042

2.3. 模型验证

选取2003~2007年作为模型参数率定期,2008~2015年作为模型参数的验证期。根据率定期选择的参数,模拟2008~2015年干流各个站点的逐日流量过程,并与实测流量进行对比,结果见图2。由图可以看出,各个站点模拟流量过程与实测过程拟合程度较好。干流各站的Nash系数和平均相对误差统计结果见表2,可以看出,各站的Nash系数均在0.91以上,平均相对误差均在0.1%之内,拟合程度较好。根据表2模型模拟效果评价指标等级,所有站点Nash系数和平均相对误差都达到优秀级别。本模型拟合效果较好,可用于梯级水库群调度对下游水文情势的影响的评估[14]。

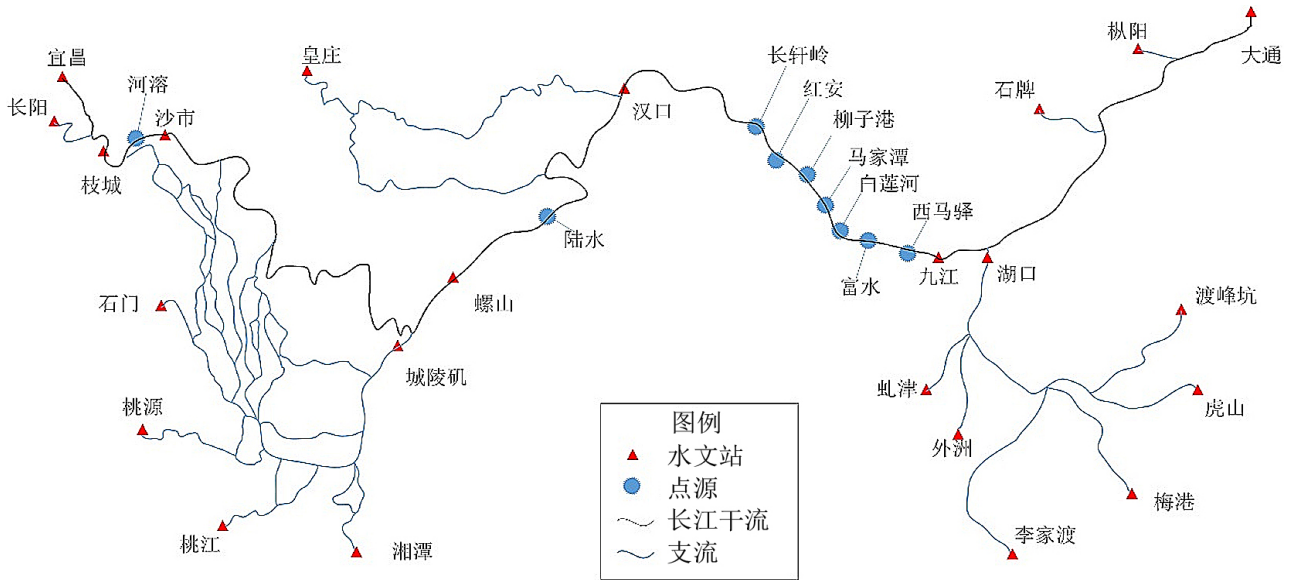


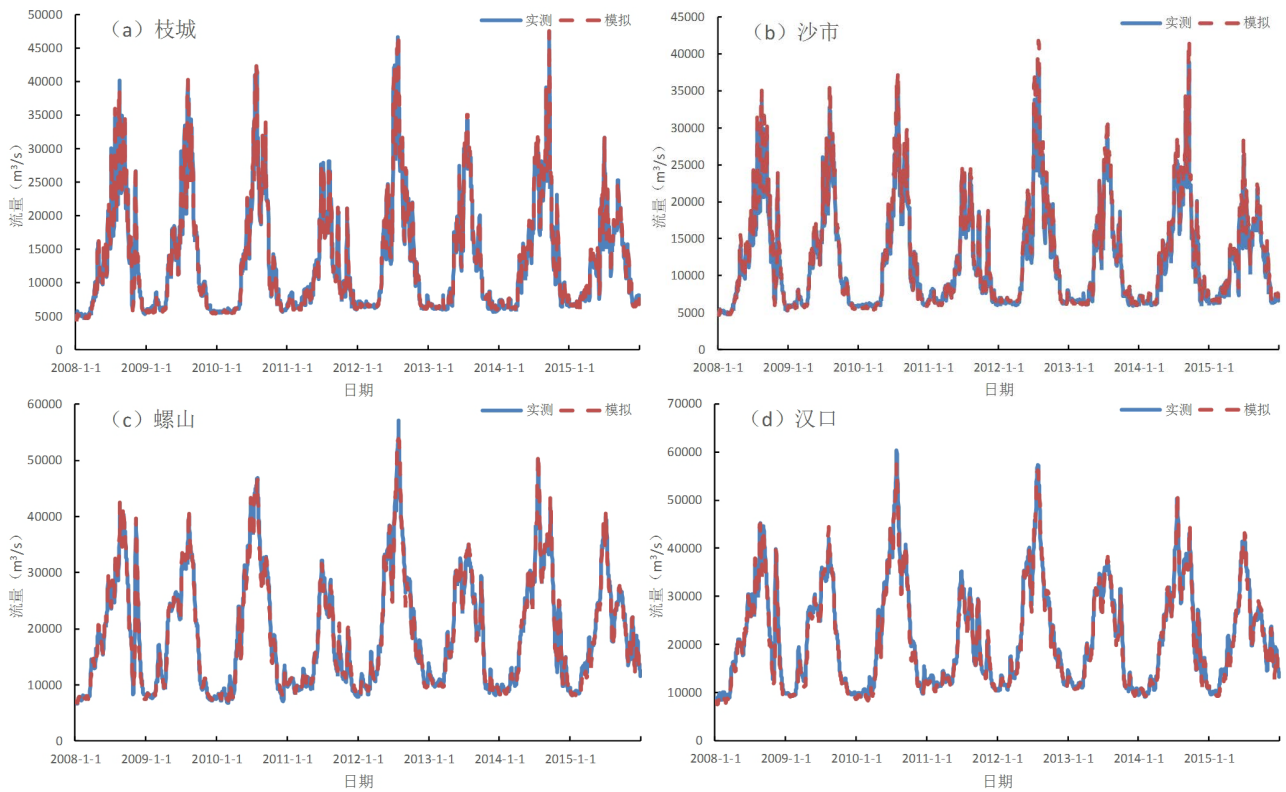
Figure 1. Conceptual sketch of network of waterway in the middle and lower reaches of the Yangtze River

图 1. 长江中下游河网水系概化示意图

Table 2. Checkout of water level fitting degree of each station in the middle and lower reaches of the Yangtze River

表 2. 长江中下游各站水位拟合程度检验

站点	枝城	沙市	螺山	汉口	九江	大通
Nash 效率系数	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.95
相对误差(%)	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.05



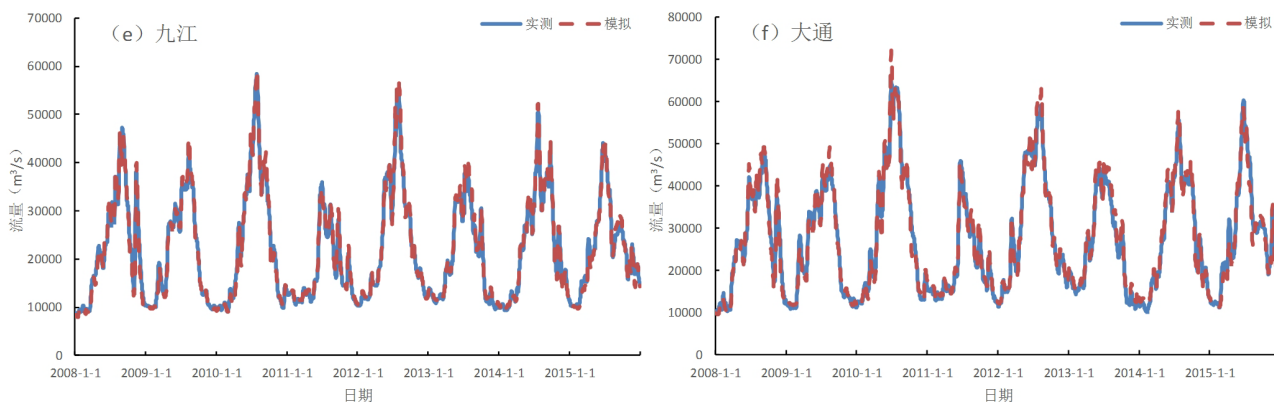


Figure 2. Model simulation and verification flow hydrographs for each station

图 2. 模型各站模拟验证流量过程图

3. 溪洛渡和向家坝水库蓄水对三峡入库流量影响

根据溪洛渡和向家坝水库 2014~2015 年的实际运行资料,采用水量平衡法分别还原得到各水库的 6h 入库流量,考虑水流传播时间,采用马斯京根演算方法将入库流量演算到下游控制点与区间水量叠加,推求得到屏山站 2014~2015 年的还原后 6 h 流量过程。将屏山站还原后的流量过程演算到三峡水库入库点清溪场,与屏山~清溪场区间水量过程叠加,得到考虑溪洛渡、向家坝水库还原的三峡天然入库流量过程。

将还原得到的三峡水库的入库流量与实测的三峡入库流量进行对比,如表 3。由表可以看出,溪洛渡、向家坝 9 月份蓄水一定程度上减少了三峡水库的入库流量。2014 年 9 月,两座水库蓄水使得三峡入库各旬平均流量均减少 1300 m³/s, 2015 年 9 月两座水库蓄水使得三峡入库各旬平均流量分别减少 1800 m³/s、1500 m³/s 以及 1700 m³/s。10 月份,两座水库对三峡入库流量影响较小,仅 2015 年下旬三峡入库的旬平均流量增加 1000 m³/s,其他时间段旬平均流量变化不明显。11 月份,两座水库运行一定程度增加了三峡水库的入库流量,表现为 2014 年三峡 11 月上、中旬平均流量均增加了 400 m³/s, 2015 年三峡 11 月上、中旬流量分别增加 1100 m³/s 和 600 m³/s,而下旬流量减少 500 m³/s。

Table 3. Analysis of impounding impact of the Xiluodu and Xiangjiaba reservoirs on TGR (unit: m³/s)

表 3. 溪洛渡和向家坝水库蓄水对三峡入库流量影响分析表(单位: m³/s)

年份	项目	9 月			10 月			11 月		
		上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
2014 年	①	32,200	40,600	27,000	19,800	13,800	14,600	11,600	7600	7300
	②	30,900	39,300	25,700	19,900	13,800	14,500	12,000	8000	7300
	②~①	-1300	-1300	-1300	100	0	-100	400	400	0
2015 年	①	23,200	28,000	24,200	19,200	15,400	11,300	9300	7100	6600
	②	21,400	26,500	22,500	19,200	15,300	12,300	10,400	7700	6100
	②~①	-1800	-1500	-1700	0	-100	1000	1100	600	-500

注: ① 表示考虑上游溪洛渡和向家坝水库蓄水影响的三峡入库流量; ② 未考虑上游溪洛渡和向家坝水库蓄水影响的三峡入库流量。

4. 水库联合蓄水对干流水位的影响

4.1. 研究工况

本次共设置 3 种情景,各情景区别主要是模型上边界宜昌站的流量过程,其他边界条件不变,得到 3 种

情景下的中下游各站水文过程。将各站考虑水库联合蓄水的还原水位(流量)与实测水位(流量)进行比较,以此分析水库联合蓄水对中下游水位(流量)的影响。将各站考虑水库联合蓄水的天然水位(流量)与仅考虑三峡蓄水天然水位(流量)进行比较,以此分析溪洛渡、向家坝蓄水对中下游水位(流量)的影响,具体的技术路线见图3。

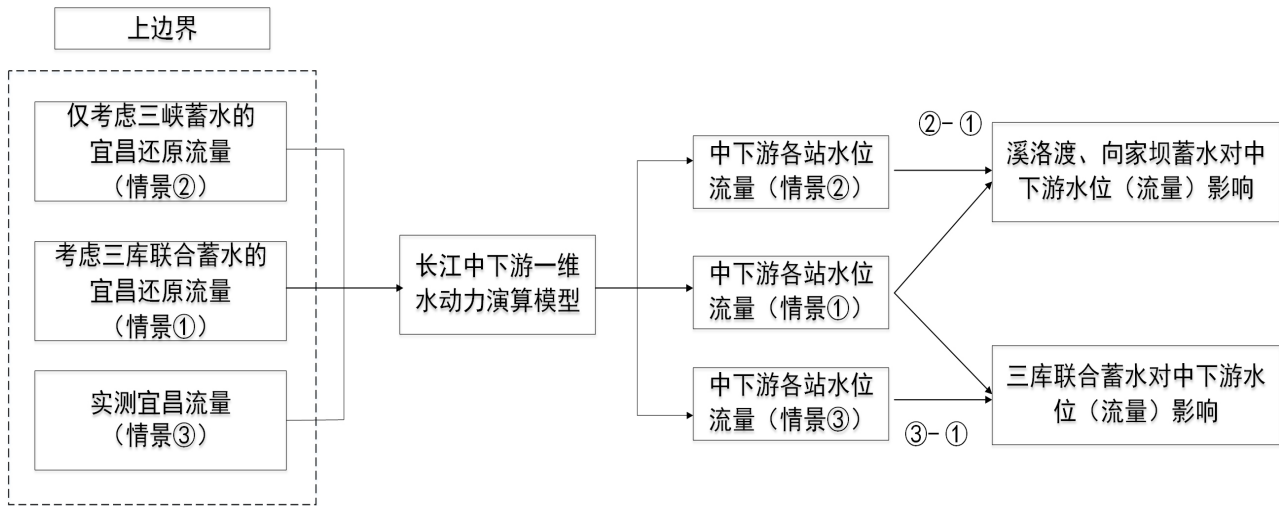


Figure3. Mind map of the analysis of techniques
图3. 分析技术路线图

4.2. 对宜昌站水位影响

将考虑水库联合蓄水的还原水位、仅考虑三峡蓄水的还原水位以及实测水位进行对比,如表4。

可以看出,2014年9月,宜昌站各旬平均水位分别下降1.09 m、0.43 m以及0.76 m,其中溪洛渡、向家坝水库蓄水使宜昌站各旬平均水位分别下降0.35 m、0.38 m以及0.35 m,三峡水库蓄水使宜昌站各旬平均水位分别下降0.74 m、0.05 m以及0.41 m,溪洛渡和向家坝联合蓄水对宜昌站各旬水位下降的贡献率分别为32.1%、88.4%以及46.1%。2015年9月,宜昌站各旬平均水位分别下降0.84 m、1.60 m以及1.71 m,其中溪洛渡、向家坝水库蓄水使宜昌站各旬平均水位分别下降0.58 m、0.44 m以及0.53 m,三峡水库蓄水使宜昌站各旬平均水位分别下降0.26 m、1.17 m以及1.18 m,溪洛渡和向家坝联合蓄水对于宜昌站各旬水位下降的贡献率分别为69.0%、27.5%以及31.0%。

2014年10月,宜昌站各旬平均水位分别下降1.33 m、0.51 m以及0.15 m,其中溪洛渡、向家坝水库维持在正常蓄水位附近运行,对宜昌站水位影响较小,仅2015年10月下旬使宜昌站水位上升0.40 m。宜昌站10月份水位主要受三峡水库蓄水的影响。

2014年11月,宜昌站上旬平均水位上升0.72 m,中旬和下旬水位下降0.05 m以及0.16 m,其中溪洛渡、向家坝水库运行使宜昌站11月各旬平均水位略有上升。2015年11月,宜昌站上旬和中旬水位上升0.87以及0.99m,下旬水位下降0.22 m,其中溪洛渡、向家坝水库运行使宜昌站11月上中旬平均水位上升0.50 m、0.31 m,下旬水位下降0.27 m,三峡水库运行使宜昌站11月各旬平均水位分别上升0.37 m、0.68 m以及0.05 m。11月份宜昌站水位受三库蓄水影响程度较小。

可以看出,溪洛渡、向家坝两座水库运行对宜昌站的水位的影响主要集中在9月份,两座水库运行对宜昌站10月份和11月份的水位影响较小。三峡水库运行对宜昌站影响主要集中在9月下旬和10月份,三峡水库对宜昌站11月份水位影响较小。

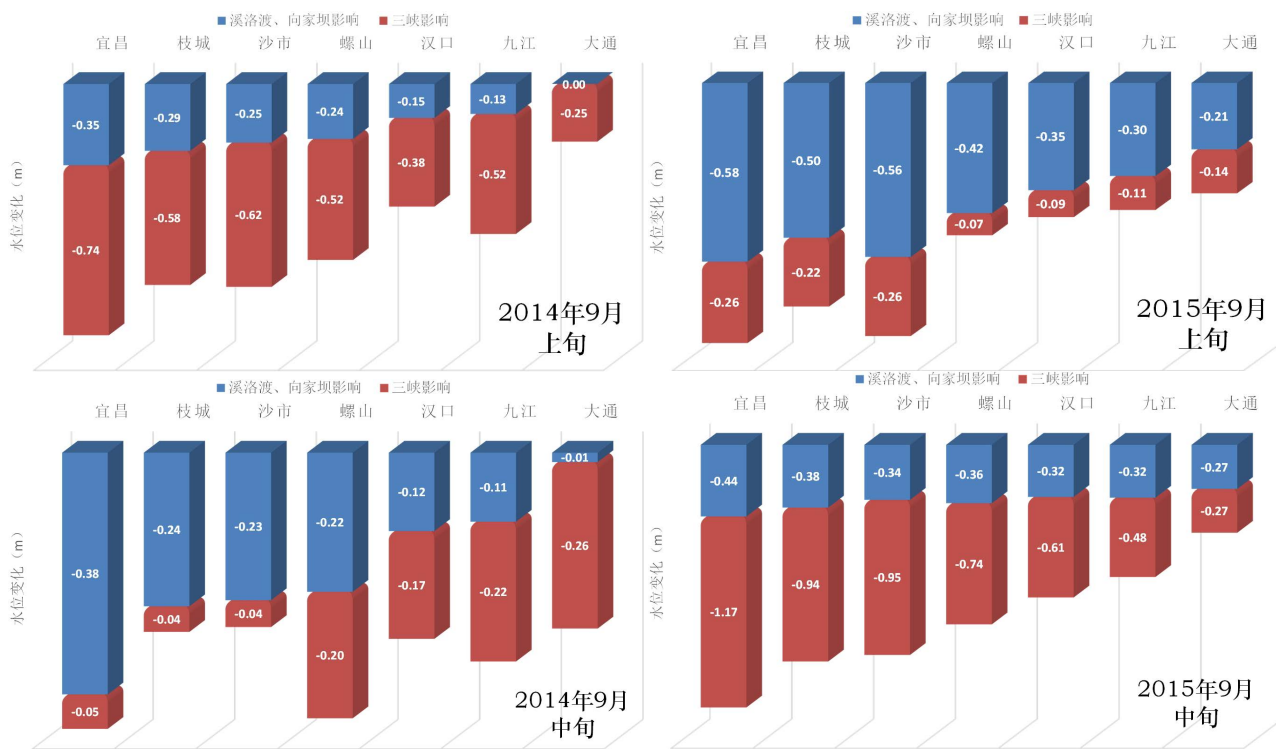
Table 4. Impact of the Xiluodu and Xiangjiaba reservoirs impoundment on water level at the Yichang hydrological station (unit: m)
表 4. 溪洛渡和向家坝水库蓄水对宜昌站水位影响分析表(单位: m)

年份	项目	9月			10月			11月		
		上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
2014	①	47.42	47.96	46.69	43.88	41.12	40.97	40.74	38.49	37.96
	②	47.07	47.58	46.34	43.91	41.09	40.94	40.90	38.68	38.01
	③	46.34	47.53	45.93	42.55	40.62	40.82	41.46	38.44	37.79
	②~①	-0.35	-0.38	-0.35	0.03	-0.04	-0.04	0.16	0.20	0.05
	③~①	-1.09	-0.43	-0.76	-1.33	-0.51	-0.15	0.72	-0.05	-0.16
2015	①	44.04	45.73	45.04	43.33	41.82	40.01	39.39	38.18	37.79
	②	43.46	45.30	44.51	43.30	41.77	40.42	39.89	38.49	37.52
	③	43.20	44.13	43.33	41.98	41.01	40.26	40.26	39.17	37.58
	②~①	-0.58	-0.44	-0.53	-0.03	-0.05	0.40	0.50	0.31	-0.27
	③~①	-0.84	-1.60	-1.71	-1.35	-0.81	0.24	0.87	0.99	-0.22

注: ① 表示考虑上游溪洛渡和向家坝水库蓄水的还原水位; ② 未考虑上游溪洛渡和向家坝水库蓄水的还原水位; ③ 实测水位。

4.3. 对下游控制站水位的影响

根据分析, 溪洛渡、向家坝两座水库运行对长江中下游干流的水位和流量影响主要集中在 9 月份, 两座水库运行对干流 10 月份和 11 月份的水位变化影响较小。以 2014~2015 年为例, 进一步分析 9 月份各旬溪洛渡、向家坝水库, 以及三峡水库对长江中下游干流水位的影响影响程度, 见图 4。



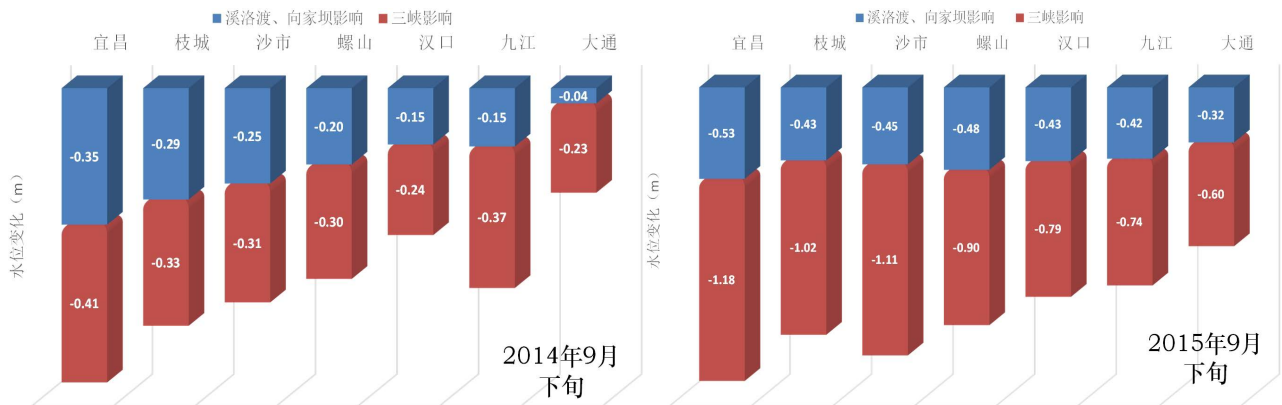


Figure 4. Influence diagram of joint impoundment of three reservoirs on the average ten-day water levels in the main stream of the Yangtze River between September 2014 and September 2015

图 4. 水库联合蓄水对长江干流各站 2014~2015 年 9 月各旬平均水位影响图

由图 4 可以看出, 2014 年 9 月上旬, 溪洛渡、向家坝水库对于下游各个站点水位影响幅度要小于三峡水库, 两座水库蓄水使中下游干流各站水位下降的幅度在 0.00~0.35 m, 三峡工程蓄水使干流各站水位下降幅度在 0.25~0.74 m; 2014 年 9 月中旬, 对宜昌、枝城、沙市以及螺山站, 溪洛渡和向家坝水库对于这些站点水位影响幅度要大于三峡水库, 对于汉口、九江以及大通站点, 溪洛渡和向家坝水库对于这些站点水位影响幅度要小于三峡水库; 溪洛渡、向家坝两座水库蓄水使中下游干流各站水位下降的幅度在 0.01~0.38 m, 三峡工程蓄水使干流各站水位下降幅度在 0.05~0.26 m。2014 年 9 月下旬, 溪洛渡和向家坝水库对于各个站点水位影响幅度要小于三峡水库; 长江干流各站水位变化主要受三峡影响, 溪洛渡、向家坝两座水库蓄水使中下游干流各站水位下降的幅度在 0.04~0.35 m, 三峡工程蓄水使干流各站水位下降幅度在 0.23~0.41 m。

2015 年 9 月上旬, 溪洛渡、向家坝水库对于下游各个站点水位影响幅度要大于三峡水库, 两座水库蓄水使中下游干流各站水位下降的幅度在 0.21~0.56 m, 三峡工程蓄水使干流各站水位下降幅度在 0.07~0.26 m; 2015 年 9 月中下旬, 溪洛渡和向家坝水库对于这些站点水位影响幅度要小于三峡水库; 2015 年 9 月中旬, 溪洛渡、向家坝两座水库蓄水使中下游干流各站水位下降的幅度在 0.27~0.44 m, 三峡工程蓄水使干流各站水位下降幅度在 0.27~1.17 m。2015 年 9 月下旬, 溪洛渡、向家坝两座水库蓄水使中下游干流各站水位下降的幅度在 0.32~0.53 m, 三峡工程蓄水使干流各站水位下降幅度在 0.60~1.18 m。

5. 结论

1) 基于 mike 模型构建了长江中游宜昌至大通的一维水动力演算模型, 分析了溪洛渡、向家坝以及三峡水库联合蓄水对于下游河道水位的影响, 模型模拟精度较高, 得到了实测资料良好验证。

2) 根据分析, 三个水库联合蓄水一定程度上降低了蓄水期下游各站点水位。溪洛渡、向家坝两座水库运行对长江中下游干流的水位的影响主要集中在 9 月份, 两座水库运行对干流 10 月份和 11 月份的水位影响较小。以宜昌站为例, 两座水库运行对宜昌站 9 月份旬水位的贡献率在 27.5%~88.4%, 三峡水库运行对长江中下游干流水位影响主要集中在 9 月下旬和 10 月份, 三峡水库对干流 11 月份水位影响较小。

3) 以 2014~2015 年为例, 分析了水库了联合蓄水对于中下游各个站点水位的影响。2014 年 9 月溪洛渡、向家坝水库对中下游干流水位影响最大的是中旬, 溪洛渡、向家坝两座水库蓄水使中下游干流各站水位下降的幅度在 0.01~0.38 m, 三峡工程蓄水使干流各站水位下降幅度在 0.04~0.26 m。2015 年 9 月溪洛渡、向家坝水库对中下游干流水位影响最大的是上旬, 溪洛渡、向家坝两座水库蓄水使中下游干流各站水位下降的幅度在 0.21~0.58 m, 三峡工程蓄水使干流各站水位下降幅度在 0.07~0.26 m。

基金项目

中国长江三峡集团有限公司资助(0704169); 国家重点研发计划项目(2017YFC0405302)。

参考文献

- [1] DOMINGUES, R. B., BARBOSA, A. B., SOMMER, U., *et al.* Phytoplankton composition, growth and production in the Guadiana estuary (SW Iberia): Unraveling changes induced after dam construction. *Science of the Total Environment*, 2012, 416: 300-313.
- [2] 张康, 杨明祥, 梁藉, 等. 长江上游水库群联合调度下的河流水文情势研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(2): 107-114.
ZHANG Kang, YANG Mingxiang, LIANG Ji, *et al.* Study on river hydrology regime under joint operation of cascade reservoirs in upper Yangtze River. *Yangtze River*, 2019, 50(2): 107-114. (in Chinese)
- [3] 王鸿翔, 陈鼎新, 李越, 等. 三峡水库对坝下河流水文情势影响研究[J]. *水生态学杂志*, 2018, 39(5): 1-6.
WANG Hongxiang, CHEN Dingxin, LI Yue, *et al.* Impact of Three Gorges Reservoir on the downstream hydrology of Yangtze River. *Journal of Hydroecology*, 2018, 39(5): 1-6. (in Chinese)
- [4] 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. *Yangtze River*, 2019, 50(2): 6-12. (in Chinese)
- [5] 邴建平, 邓鹏鑫, 张冬冬, 等. 三峡水库运行对鄱阳湖江湖水文情势的影响[J]. *人民长江*, 2020, 51(3): 87-93.
BING Jianping, DENG Pengxin, ZHANG Dongdong, *et al.* Influence of Three Gorges Reservoir operation on hydrological regime of Poyang Lake. *Yangtze River*, 2020, 51(3): 87-93. (in Chinese)
- [6] 徐俊杰, 何青, 刘红, 等. 2006 年长江特枯径流特征及其原因初探[J]. *长江资源与环境*, 2008, 17(5): 716-722.
XU Junjie, HE Qing, LIU Hong, *et al.* Preliminary analysis of characteristics of the exceptional low discharge and its cause over the Yangtze River, 2006. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(5): 716-722. (in Chinese)
- [7] 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[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 178-184.
LAI Xijun, JIANG Jiahu and HUANG Qun. Pattern of impoundment effects and influencing mechanism of Three Gorges Project on water regime of Lake Dongting. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(2): 178-184. (in Chinese)
- [8] ZHANG, Q., XU, C. Y., SINGH, V. P., *et al.* Multiscale variability of sediment load and streamflow of the lower Yangtze River basin: Possible causes and implications. *Journal of Hydrology*, 2009, 368(1): 96-104.
- [9] 李长春, 喻杉, 丁毅, 等. 三峡水库蓄水期径流特性分析[J]. *水电与新能源*, 2015(12): 25-29.
LI Changchun, YU Shan, DING Yi, *et al.* Analysis on runoff characteristics of the Three Gorges Reservoir in impounding period. *Hydropower and New Energy*, 2015(12): 25-29. (in Chinese)
- [10] 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. *Advances in Water Science*, 2014, 25(5): 650-657. (in Chinese)
- [11] 王俊, 程海云. 三峡水库蓄水期长江中下游水文情势变化及对策[J]. *中国水利*, 2010(19): 15-17.
WANG Jun, CHENG Haiyun. Water regime variation of the middle and low reaches of Yangtze River during the water storage period of Three Gorges Reservoir and its countermeasures. *China Water Resources*, 2010 (19): 15-17. (in Chinese)
- [12] 黄悦, 姚仕明, 卢金友. 三峡水库运用对坝下游干流河道水文情势的影响研究[J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(7): 76-81.
HUANG Yue, YAO Shiming and LU Jinyou. Impact of TGP Operation on the hydrologic regime in the downstream main channel of the dam. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011, 28(7): 76-81. (in Chinese)
- [13] ZHANG, Q., SINGH, V. P. and CHEN, X. Influence of Three Gorges Dam on streamflow and sediment load of the middle Yangtze River, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, 26(4): 569-579.
- [14] 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. *Advances in Water Science*, 2019, 30(5): 613-622. (in Chinese)