

# Impact of Cascade Reservoirs in the Upper Yangtze River on Water Resources in Dongting Lake

Ziling Gui<sup>1</sup>, Jun Li<sup>2</sup>, Pan Liu<sup>1\*</sup>, Youlun Wu<sup>3</sup>, Xiaojun Tang<sup>4</sup>, Xiaoqun Liu<sup>3</sup>, Wenting Gong<sup>1</sup>, Aili Xie<sup>1</sup>, Zhuowei Shen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Wuhan Hubei

<sup>3</sup>Hunan Water Resources and Hydropower Research Institute, Changsha Hunan

<sup>4</sup>Dongting Lake Hydraulic Engineering Authority, Changsha Hunan

Email: \*liupan@whu.edu.cn

Received: Sep. 16<sup>th</sup>, 2018; accepted: Oct. 7<sup>th</sup>, 2018; published: Oct. 17<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The Yangtze River exerts an influence on the hydrologic regime of Dongting Lake through the diversion at the three outlets and the backwater effect at the lake outlet. Firstly, a multi-reservoir regulation model is established based on 21 reservoirs in the upper Yangtze River, and discharge at Yichang station can be calculated. Then, an empirical correlation model is developed to forecast the water level at Lujiao station and the discharge at Chenglingji station from the discharges at Yichang and Sishui, based on the backwater effect by the Yangtze River. With the discharges at Yichang station under natural conditions and multi-reservoir regulation taken as input respectively, the effects of multi-reservoir regulation on the hydrological regime in Dongting Lake are analyzed by comparing the output results. Results show that: 1) the average water level at Lujiao station decreases by 0.75 m and 1.25 m, and the average discharge at Chenglingji station decreases by 1060 m<sup>3</sup>/s and 1029 m<sup>3</sup>/s in September and October, respectively; 2) during the water storage period in the normal flow year, the average water level at Jianli and Lujiao station decreases by 2.2 m and 1.9 m, respectively, the discharge at Chenglingji station increases first and then decreases, and the average rate decreases by 2207 m<sup>3</sup>/s. It is demonstrated that the multi-reservoir regulation has a great impact on the water resources in Dongting Lake, and the degree of impact during the storage period depends on the minimum outflow discharge of the Three Gorges reservoir.

## Keywords

Dongting Lake, Yangtze River, Multi-Reservoir Regulation, Hydrological Regime, Water Resources

---

作者简介: 刘攀, 教授, 研究方向: 水文水资源。

\*通讯作者。

文章引用: 桂梓玲, 李军, 刘攀, 伍佑伦, 汤小俊, 刘晓群, 龚文婷, 谢艾利, 沈卓伟. 长江上游梯级水库群对洞庭湖水资源影响研究[J]. 水资源研究, 2018, 7(5): 445-455. DOI: 10.12677/jwrr.2018.75050

# 长江上游梯级水库群对洞庭湖水资源影响研究

桂梓玲<sup>1</sup>, 李 军<sup>2</sup>, 刘 攀<sup>1\*</sup>, 伍佑伦<sup>3</sup>, 汤小俊<sup>4</sup>, 刘晓群<sup>3</sup>, 龚文婷<sup>1</sup>, 谢艾利<sup>1</sup>, 沈卓伟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

<sup>2</sup>湖北省水利水电规划勘测设计院, 湖北 武汉

<sup>3</sup>湖南省水利水电科学研究院, 湖南 长沙

<sup>4</sup>湖南省洞庭湖水利工程管理局, 湖南 长沙

Email: \*liupan@whu.edu.cn

收稿日期: 2018年9月16日; 录用日期: 2018年10月7日; 发布日期: 2018年10月17日

## 摘 要

长江干流通过三口分流和湖泊出口顶托两个方面对洞庭湖水文情势施加影响。本文首先建立了三峡等长江上游21座梯级水库群的调度模型, 得到经水库群调度后的宜昌流量过程; 然后基于长江干流对洞庭湖的顶托作用, 建立了以宜昌和四水流量作为输入、洞庭湖区鹿角水位和城陵矶流量作为输出的洞庭湖水文模拟模型; 最后, 分别将自然情况下和水库群调度后的宜昌流量作为输入, 通过对比鹿角水位、城陵矶流量分析长江上游梯级水库群调度对洞庭湖水文情势的影响。计算结果表明: 1) 9月、10月和11月鹿角平均水位分别降低了0.75、1.25和0.70 m、城陵矶平均流量分别减少了1060、1029和472 m<sup>3</sup>/s; 2) 平水年9月~11月, 水库群蓄水导致长江干流平均水位降低2.2 m, 洞庭湖平均水位降低1.9 m, 城陵矶流量在9月增大而在10~11月减小、平均流量减少2207 m<sup>3</sup>/s。可见水库群调度对洞庭湖水资源产生了较大的影响, 蓄水期影响的程度取决于三峡水库最小下泄流量需求。

## 关键词

洞庭湖, 长江, 水库群调度, 水文情势, 水资源

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

洞庭湖是长江中游重要的调蓄湖泊, 长江干流通过三口分流和湖泊出口顶托两个方面对洞庭湖水文情势施加影响, 形成复杂的江湖关系。近年来, 随着三峡等长江上游梯级水库群集中蓄水, 宜昌流量减少, 增大了长江干流和洞庭湖内的水位差、加快了湖水泄入长江, 产生了一定的“拉空”效应, 导致洞庭湖出现了枯水期提前且水位持续偏低的现象, 由此引发了一系列的生态环境问题。因此, 定量分析水库群蓄水对洞庭湖水资源的影响, 能为洞庭湖的生态环境保护及水库群的合理调度提供科技支撑和有效指导[1] [2] [3]。

目前的研究, 侧重点在于分析和预测三峡水库运行调度对洞庭湖水文情势的影响[4] [5] [6] [7], 而考虑长江上游梯级水库群的研究则较少。目前, 分析三峡水库调度对洞庭湖的影响, 主要通过实测资料统计分析、水动力模型、基于 BP 神经网络模型等手段实现。由于洞庭湖水位影响因素较多, 采用资料分析法[8] [9]无法剔除其

他因素的影响而定量识别水库蓄水的影响。基于物理过程的水动力模型虽为定量分析提供了可行的手段[10][11],但需以大量的实测数据作为参数校准基础,而洞庭湖地区地形和河网复杂,在建模上存在一定困难,且存在计算量大、耗时长等问题[12]。此外,基于数据驱动和统计学习的方法,如BP神经网络模型[13]和支持向量回归[14]等,不考虑江湖水量交换的物理过程且依赖于参数训练,不利用推广应用。因此,本文采用水文学方法构建洞庭湖模拟模型,研究三峡等长江上游梯级水库群调度下洞庭湖水位及出流的变化。

## 2. 长江上游梯级水库群调度模型

### 2.1. 长江上游水库群基本资料

长江上游根据其水系构成,可大致分为金沙江干流水系、雅砻江水系、岷江水系、嘉陵江水系、乌江水系五大板块(如图1所示)。

在金沙江干流水系选取了梨园、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉、观音岩、溪洛渡和向家坝水库,共8座水库作为代表性水库,总库容为246.5亿m<sup>3</sup>。在雅砻江水系选取了锦屏一级和二滩水库,共2座水库作为代表性水库,

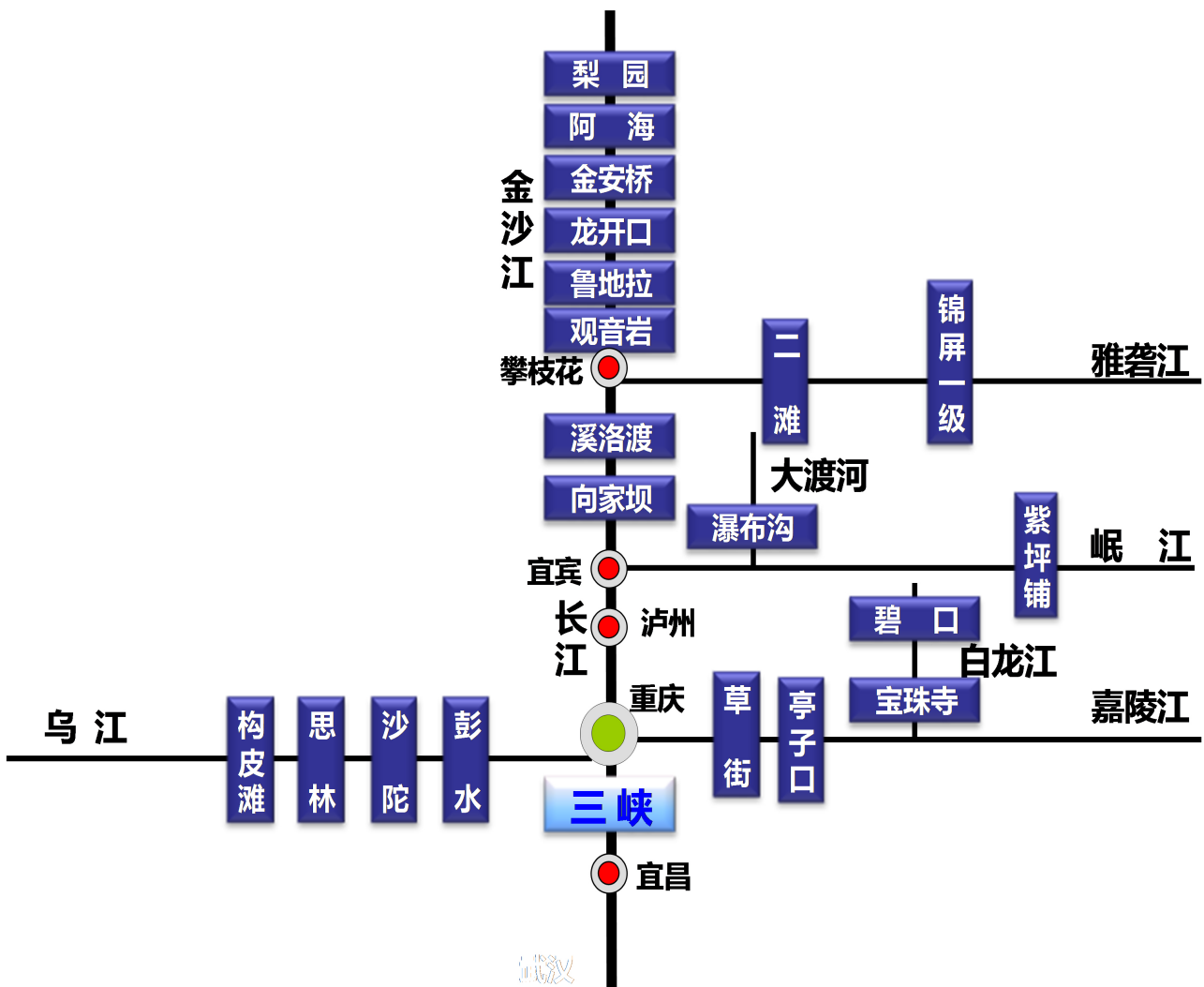


Figure 1. Sketch map of reservoirs in the upper Yangtze River

图 1. 长江上游水库群关系图

总库容为 135.6 亿 m<sup>3</sup>。在岷江水系选取了紫坪铺和瀑布沟水库，共 2 座水库作为代表性水库，总库容为 65 亿 m<sup>3</sup>。在嘉陵江水系选取了碧口、宝珠寺、亭子口和草街水库，共 2 座水库作为代表性水库，总库容为 95.9 亿 m<sup>3</sup>。在乌江水系选取了构皮滩、思林、沙陀和彭水水库，共 4 座水库为代表性水库，总库容为 90.9 亿 m<sup>3</sup>。

金沙江干流水库群、雅砻江水库群、岷江水库群、嘉陵江水库群、乌江水库群和长江中游的三峡水库构成了长江上中游巨型水库群。该水库群包含 21 座大型水库，总库容达到了 1026.5 亿 m<sup>3</sup>，如表 1 所示。

## 2.2. 调度模型约束条件及运行规则

### 2.2.1. 调度模型约束条件及运行规则

1) 水量平衡方程

$$V_{i+1,j} = V_{i,j} + (I_{i,j} - Q_{i,j}) \cdot \Delta t \quad (1)$$

式中： $V_{i,j}$  和  $V_{i+1,j}$  分别为第  $j$  个水库在第  $i$  时段的初始库容和末库容。 $I_{i,j}$  和  $Q_{i,j}$  分别为第  $j$  个水库在第  $i$  时段的水库入流和出流。

2) 水库库容约束

$$VL_{i,j} \leq V_{i,j} \leq VU_{i,j} \quad (2)$$

式中： $VL_{i,j}$  和  $VU_{i,j}$  分别为第  $j$  个水库在第  $i$  时段允许的最小库容和最大库容。 $VL_{i,j}$  通常为水库的死库容， $VU_{i,j}$  在水库汛期通常为汛限水位对应的水库库容，在非汛期一般为正常高水位对应的水库库容。

3) 水库泄流约束

$$QL_{i,j} \leq Q_{i,j} \leq QU_{i,j} \quad (3)$$

式中： $QL_{i,j}$  和  $QU_{i,j}$  分别为第  $j$  个水库在第  $i$  时段允许的最小出流和最大出流。水库最小出流往往受限制于下游灌溉、供水以及生态需水的要求，水库最大出流与水库防洪目标和泄流能力有关。

4) 水库出力约束

$$PL_{i,j} \leq P_{i,j} \leq PU_{i,j} \quad (4)$$

式中： $PL_{i,j}$  和  $PU_{i,j}$  分别为第  $j$  个水库在第  $i$  时段允许的最小出力和最大出力。

5) 区间入流计算

$$I_{i,j+1} = Q_{i,j} + q_{i,j} \quad (5)$$

式中： $q_{i,j}$  为第  $j$  个水库和第  $j + 1$  个水库之间的区间入流。

6) 水库初末水位约束

$$Z_{ini,j} = Z_{end,j} \quad (6)$$

式中： $Z_{ini,j}$  和  $Z_{end,j}$  分别为第  $j$  个水库的初水位和末水位。

### 2.2.2. 水库运行规则

水库采用简化运行策略进行运行调度。简化运行策略是一种行之有效的水库调度规则，在实际水库调度中有着广泛的应用。对于单个水库，简化运行策略可以表示为：

$$W_{ot} = \begin{cases} W_t & , W_t \leq T_t \\ T_t & , T_t < W_t \leq T_t + V_e \\ W_t - V_e & , W_t \geq T_t + V_e \end{cases} \quad (7)$$

$$P_i = \begin{cases} P_{i,max} & Q_{i,out} = Q_{i,in}, P_{i,max} < P_{i,firm} \\ P_{i,firm} & Q_{i,out} = \frac{P_{i,firm}}{KH_i}, P_{i,max} \geq P_{i,firm} \quad WL_i < WL_{i,lim} \\ P_{i,max} & Q_{i,out} = \frac{P_{i,max}}{KH_i}, P_{i,max} \geq P_{i,firm} \quad WL_i \geq WL_{i,lim} \end{cases} \quad (8)$$

$$P_{i,max} = KH_i Q_{i,in} \quad (9)$$

式中： $P_i$ 为水库出力， $P_{i,firm}$ 为水库保证出力， $P_{i,max}$ 为水库第*i*个时段的最大出力，水库最大出力与当前时段的水头 $H_i$ 和水库入流 $Q_{i,in}$ 有关， $Q_{i,out}$ 为第*i*个时段水库出流。 $K$ 为水库综合发电系数。

### 3. 洞庭湖水文模拟模型

洞庭湖与长江干流水量交换关系复杂，城陵矶流量除了受洞庭湖水位涨落的影响外，还受到长江干流顶托的影响。因此，洞庭湖水文模型框架构建的基本思想[15]是：1) 根据洞庭湖当前水位和长江干流来水对城陵矶的顶托作用，建立当前时刻的城陵矶流量计算模型；2) 针对洞庭湖进行水量平衡计算，得到下一时刻洞庭湖的水位；3) 重复步骤1)和2)，得到城陵矶流量和洞庭湖水位序列。

模型首先建立了长江干流宜昌 - 枝城、枝城 - 监利流量的经验相关关系，推求枝城和监利流量；再由枝城流量按分流比推求三口分流量。其次，利用鹿角水位 - 螺山流量相关关系[16]推求螺山流量；根据监利流量 - 水位关系[17]推求监利水位，根据螺山站流量 - 水位关系[18]推求螺山水位；根据洞庭湖区鹿角水位以及长江干流监利站和螺山站的顶托作用[19] [20] [21]，推求城陵矶流量。最后，将三口和四水入湖水量之和作为入湖水量、城陵矶流量为出湖水量，针对洞庭湖进行水量平衡计算[22]，则可滚动模拟下一时刻的鹿角水位和城陵矶流量。

根据我国《水情预报规范》(SL250-2000) [23]，采用以下两个指标进行精度评定：1) 确定性系数  $NSE$ ；2) 径流总量相对误差  $RE$ 。 $NSE$  表示模拟过程与实测过程的拟合程度，该值越大，表示拟合程度越好； $RE$  代表模拟与实测径流总量之间的差值相对于实测总量的比值， $RE$  绝对值越小，表示二者偏差越小，模型拟合效果越好。

**Table 1.** Storage capacity of reservoirs in the upper Yangtze River (100 million m<sup>3</sup>)

**表 1.** 长江上游水库群概况(单位：亿 m<sup>3</sup>)

水系名称	水库名称	所在河流	总库容	水系名称	水库名称	所在河流	总库容
长江干流	梨园	金沙江	7.3	岷江	紫坪铺	干流	11.1
	阿海		8.8		瀑布沟	大渡河	53.9
	金安桥		9.1		构皮滩		64.5
	龙开口		5.1	乌江	思林	干流	12.1
	鲁地拉		17.2		沙陀		9.1
	观音岩		20.7		彭水		5.2
	溪洛渡		126.7		碧口		白龙江
	向家坝		51.6	嘉陵江	宝珠寺	干流	25.5
	三峡		393		亭子口		40.7
	锦屏一级		77.6		草街		24.1
雅砻江	二滩	干流	58				

## 4. 结果分析

### 4.1. 长江上游梯级水库群调度结果

各水库依据简化运行策略进行调度,将收集整理的 21 座水库群,1956~2010 年天然径流资料输入到长江上中游水库群调度模型中,得到了各水库的运行调度结果。选取三峡水库的调度结果,作为水库群调度下的宜昌站流量进行分析。

宜昌站天然径流与三峡水库入出流对比如图 2 所示。由图可知,三峡等长江上游梯级水库群对径流的调节作用较为显著,径流年内分配改变程度较大。在枯水期的 1、2、3 月份宜昌站多年平均天然径流量较枯,长江上游梯级水库群基本按照下游最小生态流量进行下泄,水库多年平均出库流量大于宜昌站天然径流量,提高了下游枯季径流量。在 4、5 月份,三峡水库多年平均入库流量和出库流量都小于宜昌站天然径流量,说明在 4、5 月份水库运行方式为提高水库的运行水位,充分利用水资源。6 月份时,宜昌站多年平均天然径流量大于三峡水库入流,说明长江上游水库群仍在维持较高水位运行。因三峡水库 5 月时需将正常蓄水位 155 m 回落至 145 m,所以此时三峡水库出流大于水库入流。7、8 月份长江上游水库群和三峡水库迎来防洪任务,水库水位保持在防洪限制水位,三峡水库入流基本等于出流,月末长江上游部分水库在开始蓄水。9 月 10 日,三峡水库开始进入蓄水期,长江上游梯级水库群水库也集中进入蓄水期,三峡水库多年平均出库流量小于宜昌站天然径流量。11、12 月份三峡等上游梯级水库群水位已抬升至正常蓄水位,水库进入兴利期,三峡水库多年平均入库流量和出库流量基本大于宜昌站天然径流量。

### 4.2. 洞庭湖水文模拟结果

采用 1956~2010 年还原后的宜昌日流量资料,取鹿角初始水位为 22.85 m 进行模拟,得到城陵矶流量模拟确定性系数为 88.6%,径流总量相对误差为-3%;鹿角水位模拟确定性系数为 82.4%,径流总量相对误差为-9%。由结果可知,洞庭湖水文模拟精度较高,流量和水位模拟效率系数均在 80%以上,相对误差均在 10%以内,表明模型计算结果与实测资料比较基本合理可靠。

城陵矶站流量模拟过程如图 3 所示,流量模拟过程与实测过程总体吻合较好,无明显滞时现象。

### 4.3. 洞庭湖水文模拟结果

用经过长江上游梯级水库群调度后的径流过程替代天然情况宜昌站流量,作为模型输入,得到城陵矶流量

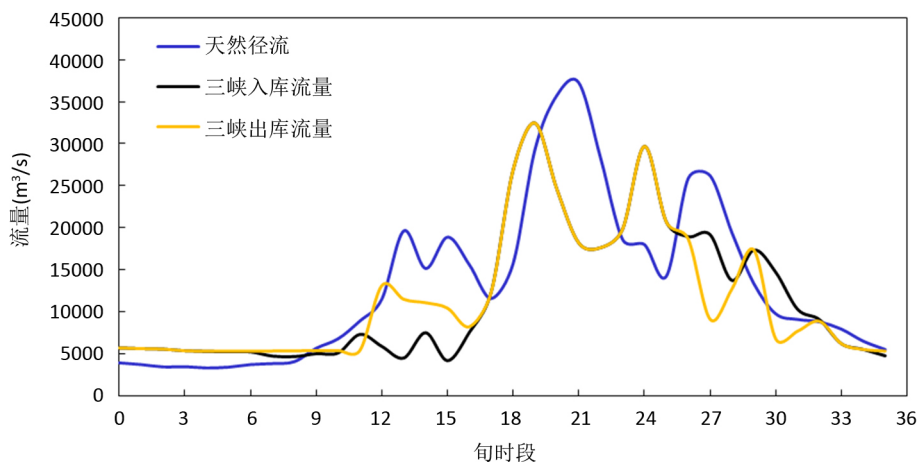


Figure 2. Comparison of natural runoff and regulated outflow of Three Gorges reservoir

图 2. 天然径流与三峡水库调度结果比较



模拟结果如图 4 所示。与自然情况相比,经三峡等长江上游梯级水库群调度后,城陵矶径流量发生了明显变化,主要表现为调度后在消落期流量增加,而在蓄水期流量减少。

经三峡水库和长江上游梯级水库群调度后,1956~2010 年 9 月~11 月江湖水文情势的平均变化量如表 2 所示。与自然情况相比,随着水库群蓄水,宜昌站流量减少,则长江干流监利站和螺山站的流量减少、水位降低;由于三口分流量减少,洞庭湖水位降低、面积减少;城陵矶流量减少,但由于城陵矶流量受监利-鹿角水位差、鹿角-螺山水位差等多个因素的影响,城陵矶流量比其他变量变化规律更复杂。

选取丰水年 1964 年、平水年 1970 年和枯水年 2006 年宜昌流量、鹿角水位和城陵矶流量变化过程如图 5~图 7 所示。

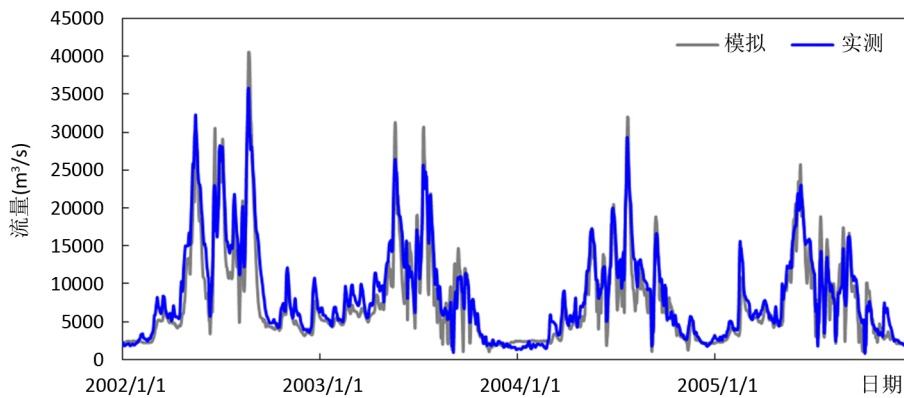


Figure 3. Comparison of the observed and simulated discharges at Chenglingji station  
图 3. 城陵矶站实测与模拟径流比较

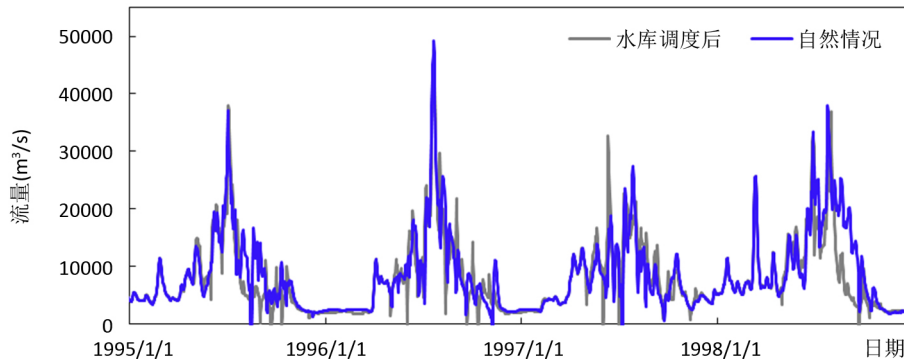


Figure 4. Comparison of natural and regulated flow at Chenglingji station  
图 4. 自然情况下与水库调度后城陵矶站径流比较

Table 2. Changes of average discharge/water level after multi-reservoir regulation during 1956~2010  
表 2. 1956~2010 年水库群调度后江湖水文情势的平均变化量

变化量	时段	9 月	10 月	11 月
宜昌 $\Delta Q$ ( $m^3/s$ )		-2781	-3780	-2905
监利 $\Delta Z$ (m)		-0.79	-1.39	-1.29
螺山 $\Delta Z$ (m)		-0.79	-1.33	-0.65
鹿角 $\Delta Z$ (m)		-0.75	-1.25	-0.70
洞庭湖面积 $\Delta A$ ( $km^2$ )		-162	-169	-37
城陵矶 $\Delta Q$ ( $m^3/s$ )		-1060	-1029	-472

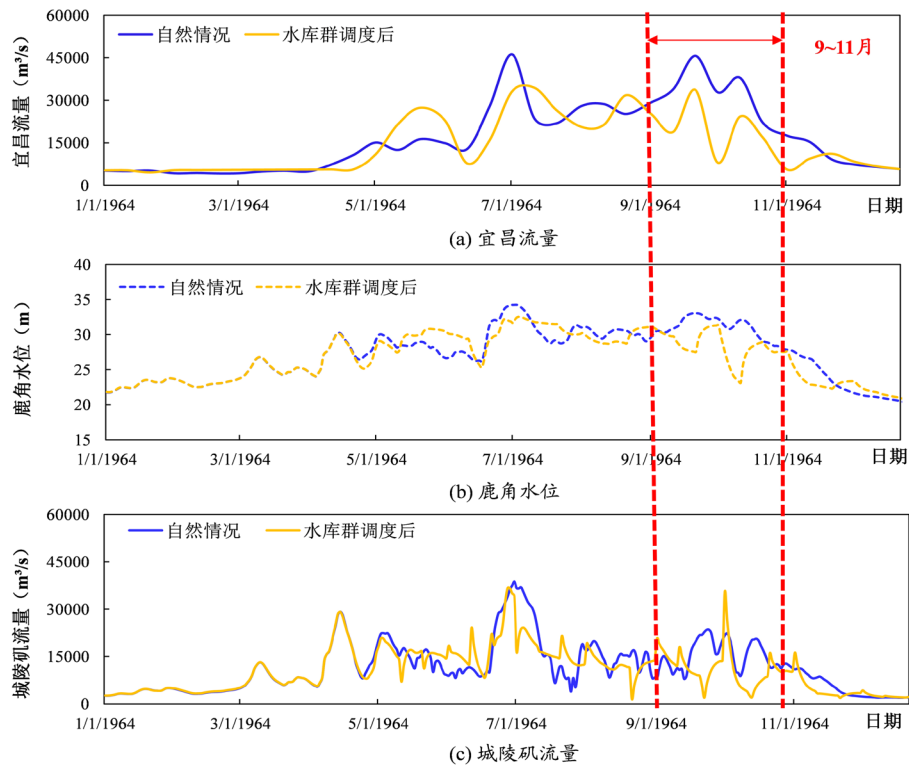


Figure 5. Comparison of natural and regulated flow discharges and water levels in wet year (1964)  
 图 5. 丰水年(1964年)自然情况与水库群调度后江湖水位流量变化

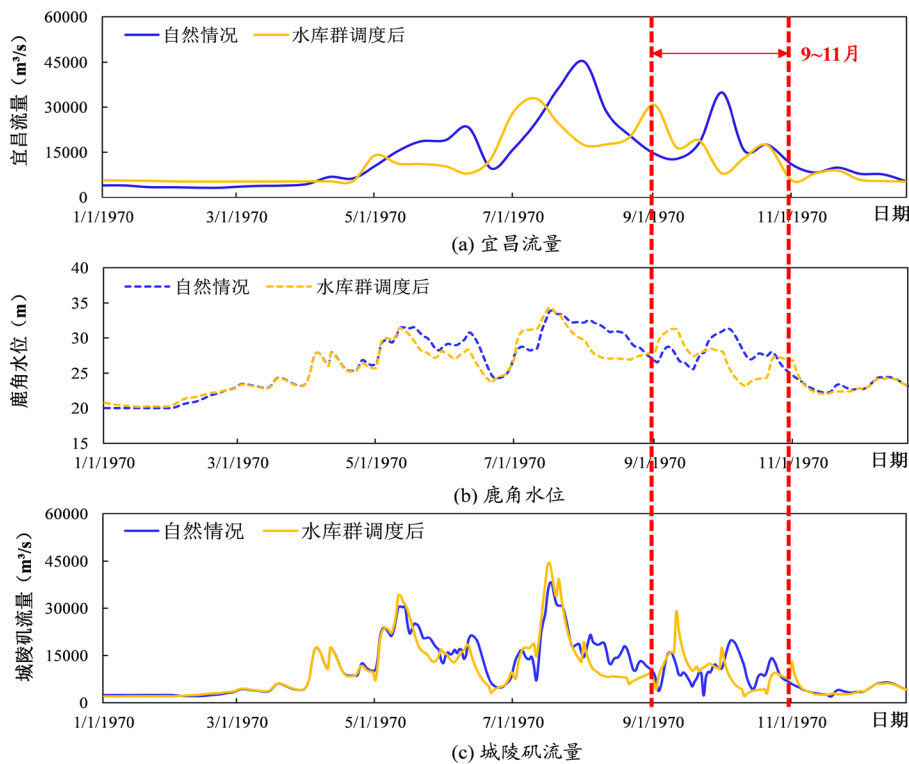
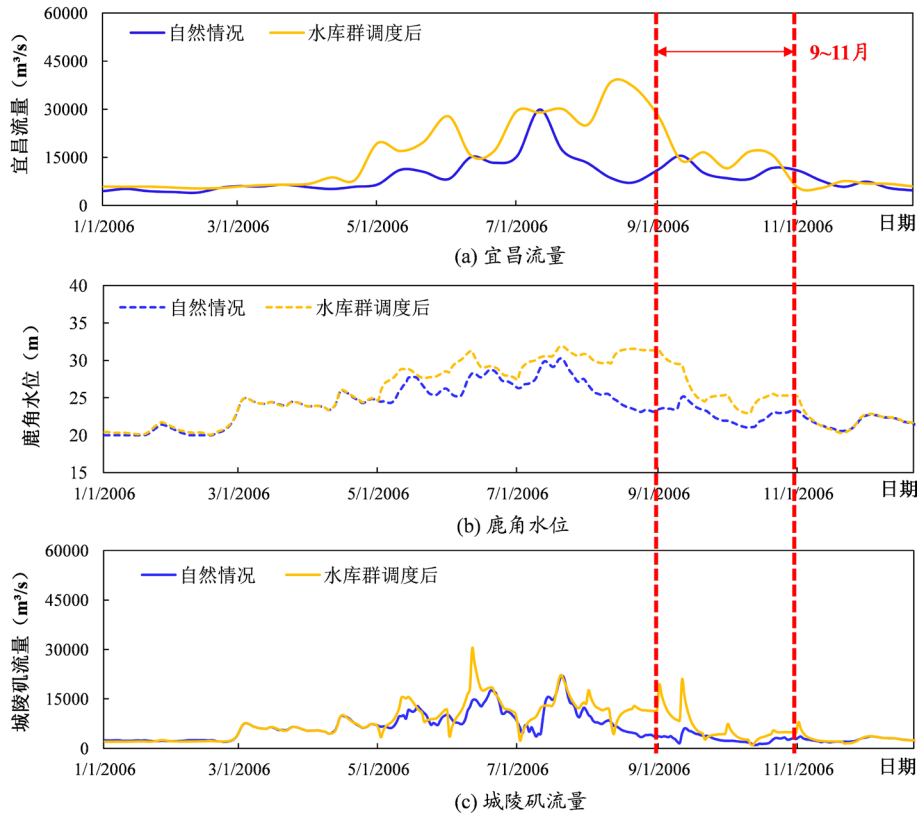


Figure 6. Comparison of natural and regulated discharges and water level in normal year (1970)  
 图 6. 平水年(1970年)自然情况与水库群调度后江湖水位流量变化





**Figure 7.** Comparison of natural and regulated discharges and water level in dry year (2006)  
**图 7.** 枯水年(2006 年)自然情况与水库群调度后江湖水位流量变化

与自然情况相比,丰水年(1964 年)蓄水期间,宜昌平均流量减少 11,571 m<sup>3</sup>/s,长江干流平均水位降低 2.8 m,洞庭湖平均水位降低 2.5 m、湖区平均面积减少 669 km<sup>2</sup>,城陵矶出流减少 3852 m<sup>3</sup>/s;蓄水前 15 天,长江干流和洞庭湖平均水位分别下降 2.1 m 和 0.6 m,导致洞庭湖与长江干流水位差增大,洞庭湖平均出流增加 4132 m<sup>3</sup>/s;蓄水后期,长江干流和洞庭湖平均水位均下降 3.0 m,洞庭湖平均出流减少 6181 m<sup>3</sup>/s。

与自然情况相比,平水年(1970 年)蓄水期间,宜昌平均流量减少 5721 m<sup>3</sup>/s,长江干流平均水位降低 2.2 m,洞庭湖平均水位降低 1.9 m、湖区平均面积减少 292 km<sup>2</sup>,城陵矶出流减少 2207 m<sup>3</sup>/s;蓄水前 10 天,长江干流和洞庭湖平均水位分别下降 3.8 m 和 1.8 m,导致洞庭湖与长江干流水位差增大,洞庭湖平均出流增加 2292 m<sup>3</sup>/s;蓄水后期,长江干流和洞庭湖平均水位分别下降 1.68 m 和 1.85 m,水位差变化较小,洞庭湖平均出流减少 3384 m<sup>3</sup>/s。

与自然情况相比,枯水年(2006 年)蓄水期间,宜昌平均流量减少 2066 m<sup>3</sup>/s,长江干流平均水位降低 0.9 m,洞庭湖平均水位上升 0.2 m、湖区平均面积基本不变,城陵矶出流增加 697 m<sup>3</sup>/s;蓄水前 10 天,长江干流平均水位降低 1.2 m,洞庭湖平均水位上升 0.6 m,导致洞庭湖与长江干流水位差增大,洞庭湖平均出流增加 1238 m<sup>3</sup>/s;蓄水后期,长江干流和洞庭湖平均水位分别下降 0.54 m 和 0.16 m,洞庭湖与长江干流水位差略增大,洞庭湖平均出流增加 157 m<sup>3</sup>/s。

在各种水平年下,与自然情况相比,蓄水期经水库调度后宜昌站流量显著降低,长江干流水位和洞庭湖水位随之降低;由于洞庭湖的调蓄作用,洞庭湖区水位的降低较长江干流略迟缓,则洞庭湖与长江干流的水位差先变大、后基本不变。城陵矶流量受洞庭湖水位、长江干流与洞庭湖水位差等因素的影响,变化规律如下:在枯水年,蓄水期间洞庭湖水位降低较少,则洞庭湖与长江干流水位差增大占主导地位,因此城陵矶流量整体增

大。而在其他水平年,蓄水期城陵矶流量整体减少。蓄水前期,由于洞庭湖与长江干流水位差显著增大,而洞庭湖水位下降较少,则城陵矶流量增大;蓄水后期,由于洞庭湖与长江干流水位下降程度相当,而洞庭湖水位下降较多,则城陵矶流量减少。

## 5. 小结

本文首先建立了三峡等长江上游 21 座梯级水库群的调度模型,得到经水库群调度后的宜昌流量过程;然后基于长江干流对洞庭湖的顶托作用,建立了经验相关的洞庭湖水文模拟模型,根据宜昌和四水流量推求鹿角水位和城陵矶流量,两者确定性系数均超过 0.8;最后,通过对比将自然情况下和水库群调度后的宜昌流量作为输入得到的鹿角水位、城陵矶流量模拟结果,定量分析了长江上游梯级水库群调度对洞庭湖水资源的影响。研究表明,水库群调度对洞庭湖水资源产生了较大的影响:9 月、10 月和 11 月鹿角平均水位分别降低 0.75 m、1.25 m 和 0.70 m、城陵矶平均流量分别减少 1060 m<sup>3</sup>/s、1029 m<sup>3</sup>/s 和 472 m<sup>3</sup>/s。应该看到,洞庭湖水位和出流变化对泥沙、湖泊湿地植被演替等也有深层次的影响,需进一步研究。

## 基金项目

本论文由中国湖南省水利科技项目(DGJ-KY-2017-001)和国家自然科学基金项目(51579180)资助。

## 参考文献

- [1] JIANG, J. H., LAI, X. J., and HUANG, Q. The characteristics of flood responses to the restoration of polders on Dongting Lake, China. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 2007, 52(4): 671-685.
- [2] DU, Y., XUE, H. P., WU, S. J., et al. Lake area changes in the middle Yangtze region of China over the 20th century. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(4): 1248-1255.
- [3] YUAN, Y. J., ZENG, G. M., LIANG, J., et al. Variation of water level in Dongting Lake over a 50-year period: implications for the impacts of anthropogenic and climatic factors. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 450-456.
- [4] 黄群, 孙占东, 姜加虎. 三峡水库运行对洞庭湖水位影响分析[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(3): 424-428.  
HUANG Qun, SUN Zhandong, and JIANG Jiahu. Impacts of the operation of the Three Gorges Reservoir on the lake water level of Lake Dongting. *Journal of Lake Science*, 2011, 23(3): 424-428. (in Chinese)
- [5] 王冬, 李义天, 邓金运, 等. 三峡水库蓄水期洞庭湖水力要素变化初步分析[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(2): 26-32.  
WANG Dong, LI Yitian, DENG Jinyun, et al. Preliminary analysis of changes in hydraulic elements of Dongting Lake in storage period of Three Gorges reservoir. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(2): 26-32. (in Chinese)
- [6] 王冬, 方娟娟, 李义天, 等. 三峡水库调度方式对洞庭湖入流的影响研究[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(12): 10-16.  
WANG Dong, FANG Juanjuan, LI Yitian, et al. Influence of Three Gorges Reservoir operation on inlet flow of Dongting Lake. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(12): 10-16. (in Chinese)
- [7] 陈虞平. 三峡水库运用后长江与洞庭湖水沙交换的变化及响应[D]. 硕士学位论文, 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016.  
CHEN Yuping. The variations and response of water and sediment exchange between Yangtze River and Dongting Lake after the Three Gorges Reservoir impoundment. Master's Thesis, Beijing: China Institution of Water Resources & Hydropower Research, 2016. (in Chinese)
- [8] 丛振涛, 肖鹏, 章诞武, 等. 三峡工程运行前后城陵矶水位变化及其原因分析[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(3): 23-28.  
CONG Zhen tao, XIAO Peng, ZHANG Danwu, et al. Water stage at Chenglingji before and after the Three Gorges project. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(3): 23-28. (in Chinese)
- [9] 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[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(6): 640-643.  
ZHANG Xibing, LU Jinyou, WANG Min, 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. (in Chinese)
- [10] CHEN, Y. C., WANG, Z. Y., LIU, Z. W., et al. 1D-2D coupled numerical model for shallow-water flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(2): 122-132.
- [11] LAI, X. J., LIANG, Q. H., JIANG, J. H., et al. Impoundment effects of the Three-Gorges-Damon flow regimes in two China's largest fresh water lakes. *Water Resources Management*, 2014, 28(14): 5111-5124.

- [12] 马乐宽, 邱瑀, 赵越, 等. 基于改进的神经网络与支持向量机的小流域日径流量预测研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5): 23-27.  
MA Lekuan, QIU Yu, ZHAO Yue, et al. Prediction of daily runoff in a small watershed based on improved neural network and support vector machine (SVM). *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2016, 27(5): 23-27. (in Chinese)
- [13] 孙占东, 黄群, 姜加虎, 等. 洞庭湖近年干旱与三峡蓄水影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(2): 251-256.  
SUN Zhandong, HUANG Qun, JIANG Jiahu, et al. Recent Hydrological droughts in Dongting Lake and its association with the operation of Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(2): 251-256. (in Chinese)
- [14] 王蒙蒙, 戴凌全, 戴会超, 等. 基于支持向量回归的洞庭湖水水位快速预测[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(11): 954-961.  
WANG Mengmeng, DAI Lingquan, DAI Huichao, et al. Support vector regression based model for predicting water level of Dongting Lake. *Journal of drainage and irrigation machinery engineering*, 2017, 35(11): 954-961. (in Chinese)
- [15] 桂梓玲, 刘攀, 伍佑伦, 等. 基于经验相关的城陵矶日流量模拟模型研究[J]. 中国农村水利水电, 2018.  
GUI Ziling, LIU Pan, WU Youlun, et al. Research on daily flow simulation at the Chenglingji station based on empirical correlations. *China Rural Water and Hydropower*, 2018. (in Chinese)
- [16] 毛北平, 吴忠明, 梅军亚, 等. 三峡工程蓄水以来长江与洞庭湖汇流关系变化[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5): 48-57.  
MAO Beiping, WU Zhongming, MEI Junya, et al. Confluence relationship changes of Yangtze River and Dongting Lake since impoundment of Three Gorges project. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(5): 48-57. (in Chinese)
- [17] 刘鹏飞, 李一兵. 三峡工程蓄水前后监利站水沙变化分析[J]. 水道港口, 2011, 32(6): 408-412.  
LIU Pengfei, LI Yibing. Analysis on flow and sediment changes at Jianli hydrologic station before and after impoundment of the Three Gorges reservoir. *Journal of Waterway and Harbor*, 2011, 32(6): 408-412. (in Chinese)
- [18] 郭希望, 陈剑池, 邹宁, 等. 长江中下游主要水文站水位流量关系研究[J]. 人民长江, 2006, 37(9): 68-71.  
GUO Xiwang, CHEN Jianchi, ZOU Ning, et al. Research on Stage-Discharge Relation of main hydrological stations in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Yangtze River*, 2006, 37(9): 68-71. (in Chinese)
- [19] 谢作涛, 张小峰, 谈广鸣. 洞庭湖城陵矶流量逐日预报研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(2): 5-7.  
XIE Zuotao, ZHANG Xiaofeng, and TAN Guangming. Research on forecast of daily discharge of Dongting Lake at Chenglingji hydrologic station. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2004, 37(2): 5-7. (in Chinese)
- [20] 沈艳, 刘攀, 刘玥. 三峡水库调蓄后长江中游径流演变趋势分析[J]. 人民长江, 2013, 44(4): 25-27.  
SHEN Yan, LIU Pan, and LIU Yue. Analysis on runoff evolution trend of middle Yangtze River after impoundment of Three Gorges Reservoir. *Yangtze River*, 2013, 44(4): 25-27. (in Chinese)
- [21] 施修端, 夏薇, 杨彬. 城陵矶站水沙及水位流量关系变化分析[J]. 人民长江, 2000(3): 35-36.  
SHI Xiuduan, XIA Wei, and YANG Bin. Change of water, sediment and stage-discharge relation at Chenglingji station. *Yangtze River*, 2000(3): 35-36. (in Chinese)
- [22] 宋求明, 熊立华, 肖义, 等. 基于 MODIS 遥感影像的洞庭湖面积与水位关系研究[J]. 节水灌溉, 2011(6): 20-23.  
SONG Qiuming, XIONG Lihua, XIAO Yi, et al. Study on relationship between lake area and water level of Dongting Lake based on MODIS images. *Water Saving Irrigation*, 2011(6): 20-23. (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国水利部. 水文情报预报规范 SL250-2000 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Forecasting norm for hydrology intelligence SL250-2000. Beijing: China Water Power Press, 2000. (in Chinese)