



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.010

刘强, 钟平安, 徐斌, 等. 三峡及金沙江下游梯级水库群蓄水期联合调度策略[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 62-70. LIU Qiang, ZHONG Ping an, XU Bin, et al. Joint operation strategy of water impoundment period of Three Gorges Jinsha River lower reach cascade reservoirs[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 62-70. (in Chinese)

# 三峡及金沙江下游梯级水库群蓄水期 联合调度策略

刘 强<sup>1</sup>, 钟平安<sup>1</sup>, 徐 斌<sup>1</sup>, 郭 乐<sup>2</sup>, 陈宇婷<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 中国长江三峡集团公司, 湖北 宜昌 443133)

**摘要:** 针对三峡及金沙江下游梯级水库群汛后竞争性蓄水矛盾, 以溪洛渡、向家坝、三峡、葛洲坝梯级四库系统为研究对象, 采用不同来水年型、蓄水时间和起调水位构建蓄水情景集; 以蓄水期期望发电量最大为目标, 建立蓄水期多目标联合随机优化调度模型, 生成各蓄水情景下的最优蓄水方案; 基于蓄满率、梯级期望弃水量、梯级平均期望出力对各方案进行评价, 推荐丰水年溪洛渡、向家坝9月11日起蓄、三峡9月10日起蓄, 平水年溪洛渡、向家坝9月11日起蓄、三峡9月1日起蓄, 枯水年溪洛渡、向家坝9月1日起蓄、三峡8月21日起蓄。

**关键词:** 三峡梯级水库群; 汛后蓄水; 联合调度; 情景分析

中图分类号: TV697.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2016)05-0062-09

## Joint operation strategy of water impoundment period of Three Gorges Jinsha River lower reach cascade reservoirs

LIU Qiang<sup>1</sup>, ZHONG Ping an<sup>1</sup>, XU Bin<sup>1</sup>, GUO Le<sup>2</sup>, CHEN Yu ting<sup>1</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, China)

**Abstract:** Aiming at the competitively impounding contradiction of Three Gorges Jinsha River lower reach cascade reservoirs in flood recession period, taking Xiluodu, Xiangjiaba, Three Gorges, Gezhouba cascade reservoir group system as research object, scenario sets were established with different hydrological year types, beginning impounding times and beginning water levels; taking maximum expected generated energy as target, multi objective stochastic optimal joint operation model was built for water impounding period, and optimal scheme of each impoundment scenario was generated; considering the flood risk and the benefit, on the basis of fill storage rate, cascade expected surplus water and cascade expected power output, Xiluodu reservoir and Xiangjiaba reservoir were recommended to begin impounding on September 11, Three Gorges reservoir on September 10 in high flow years, Xiluodu reservoir and Xiangjiaba reservoir were recommended to begin impounding on September 11, Three Gorges reservoir on September 1 in mean flow years, Xiluodu reservoir and Xiangjiaba reservoir were recommended to begin impounding on September 1, Three Gorges reservoir on August 21 in low flow years.

**Key words:** Three Gorges cascade reservoirs; water impoundment after flood season; joint operation; scenario analysis

收稿日期: 2015-12-15 修回日期: 2016-05-17 网络出版时间: 2016-08-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160818.2126.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51179044; 51579068); 国家重点基础研究发展计划(973计划项目)(2013CB036406)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51179044; 51579068); The National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB036406)

作者简介: 刘 强(1992-), 男, 江苏南通人, 主要从事水资源规划与管理方面研究。E-mail: 895712610@qq.com

通讯作者: 钟平安(1962-), 男, 安徽无为, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源规划与管理方面研究。E-mail: pazhong@hhu.edu.cn

随着金沙江下游溪洛渡、向家坝相继投入运行,与长江干流三峡、葛洲坝组成梯级水库群,三峡及金沙江下游梯级四库的总装机容量、总调节库容在长江上游水库群中占据压倒性优势,其汛末的调度策略对整个长江中下游地区影响深远,研究三峡及金沙江下游梯级水库群汛后蓄水期的联合调度策略,对提高洪水资源利用率,减轻水库群蓄水对长江中下游供水、航运、生态等影响,具有重要意义。

近年来,随着三峡上游水库群的修建,针对长江上游水库群联合蓄水的研究陆续展开,关于三峡水库蓄水策略的研究已经取得了一系列成果<sup>[1-16]</sup>;丁毅等<sup>[17]</sup>初步探究了长江上游梯级水库群的蓄水调度模式、各水库的蓄泄关系,提出了长江上游梯级水库群蓄水调度的建议方案;欧阳硕等<sup>[18]</sup>提出将流域蓄水原则与 $K$ 值判别法相结合的策略来判定流域梯级各水库蓄水时机及次序;黄草等<sup>[19]</sup>依托多目标优化调度模型,逐年分析了长江上游若干座多目标混联水库的蓄水起止时间,总结了出现概率最大的水库群蓄水次序;王冬等<sup>[20]</sup>采用基于圣维南方程组的径流调度模型,利用多年实测资料,得出溪洛渡、向家坝、三峡最优蓄水时间方案。已有的研究在判定长江上游水库群蓄水次序、蓄水时间方面取得了较多成果,但专门针对三峡及金沙江下游梯级四库的研究较少,而且研究方法多集中于对确定性来水的模拟。但在实际调度中,由于受到入库径流预报水平的限制,基于确定性来水的优化调度方案具有较大的不确定性,实际指导意义不强。而基于传统的随机优化模型的期望调度方案,不能反映不同来水大小的差异。

鉴于此,本文以溪洛渡、向家坝、三峡和葛洲坝梯级四库系统作为研究对象,通过对蓄水期来水按大小分组反映来水大小的区别;通过建立蓄水期多目标联合随机优化调度模型,反映来水的随机性影响;通过多情景优化模拟和多指标方案评估,推荐三峡及金沙江下游梯级在不同来水条件下的期望蓄水方案。

## 1 梯级水库群蓄水场景构造

### 1.1 研究对象

本文研究溪洛渡、向家坝、三峡和葛洲坝四座水库组成的梯级水库群(见图1),溪洛渡、向家坝、三峡等为不完全年调节水库,葛洲坝为日调节水库。溪洛渡、向家坝开发任务以发电为主,兼顾防洪、拦沙和改善下游航运等,溪洛渡水库调节库容64.6亿 $m^3$ ,装机容量12 600 MW,汛限水位560 m;向家坝水库是金沙江干流最下游梯级电站,对溪洛渡具有

反调节作用,调节库容9.03亿 $m^3$ 装机容量6 000 MW,汛限水位370 m。三峡水库具有防洪、发电、改善航道等综合任务,调节库容165亿 $m^3$ (枯期消落低水位155 m至正常高水位175 m之间库容),装机容量22 500 MW;葛洲坝是三峡水库的反调节水库,电站装机容量2 950 MW。

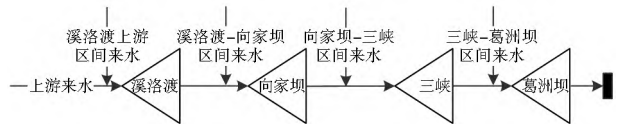


图1 三峡梯级四库关系概化图

Fig. 1 The generalized map of Three Gorges cascade reservoirs

### 1.2 来水年组划分

根据金沙江屏山站径流系列资料,按水文比拟法生成溪洛渡、向家坝水库的入库径流系列,将向家坝与溪洛渡的入库径流系列相减得到溪洛渡-向家坝区间来水系列;以宜昌站径流系列资料,按水文比拟法生成三峡、葛洲坝水库径流系列,将葛洲坝和三峡的入库径流系列相减得到三峡-葛洲坝区间的径流系列;以三峡和向家坝的入库径流系列确定向家坝-三峡区间径流系列。为了取得梯级错时蓄水方案,本文约定11月30日为蓄水最后时间(三峡水库12月1日进入消落期),8月21日为最早允许蓄水时间,依据三峡水库1940年-2013年8月21日至11月30日入库径流资料,将蓄水期来水分为丰(频率0%~33%)、平(频率33%~67%)、枯(频率67%~100%)三个年组。

### 1.3 蓄水时间方案拟定

根据现有调度规程,溪洛渡水库和向家坝水库9月11日由汛限水位开始蓄水,9月底蓄满;三峡水库9月上旬水位由汛限水位逐渐回升,9月10日从控制起蓄水位155 m开始回蓄,9月底蓄至165 m,10月底蓄满;葛洲坝为径流式水库,无汛后蓄水问题。

梯级水库群汛末蓄水期部分与汛期重叠,不宜过分提前,本文对三峡水库共设置8月21日、8月26日、9月1日、9月6日、9月10日5种起蓄时间方案;由于泥沙问题制约溪洛渡蓄水时间无法大幅提前,故对溪洛渡设置9月1日、9月11日两种起蓄时间方案;向家坝调节库容远小于溪洛渡与三峡调节库容,蓄水影响相对较小,因此设置向家坝与溪洛渡同时起蓄。

### 1.4 回蓄期起蓄水位

根据各水库调度规程,设定溪洛渡水库回蓄期的起蓄水位为560 m;向家坝水库为370 m;三峡水

库起蓄水位 155 m。

## 1.5 蓄水情景方案集

综合 3 种来水年型, 10 种组合起蓄时间方案(溪洛渡、向家坝 2 种, 三峡 5 种), 1 种起蓄水位组合, 共构成  $3 \times 10 \times 1 = 30$  组蓄水情景。

## 2 多目标随机优化模型

三峡及金沙江下游梯级水库群是一个具有发电、防洪、供水、生态、航运等多目标的梯级水库群系统, 本文将梯级四库期望总发电量最大作为目标, 将防洪、供水、生态、航运等目标转为约束条件, 变多目标问题为单目标问题。由于蓄水期调度为长期调度, 调度过程中难以对来水进行准确预报, 来水情形存在随机性。因此本文将不同来水年组中的时段来水作为随机取值, 建立随机优化模型对水库群蓄水期调度进行模拟。

### 2.1 目标函数

梯级水库群蓄水期发电量期望值最大:

$$\max E = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \left[ \frac{1}{m_j} \sum_{j=1}^m N(q_{i,t}(Q_j), H_{i,t}(Q_j)) \right] \cdot T_t \quad (1)$$

式中:  $n$  为梯级电站数, 本文为 4;  $T_t$  为时段小时数, 由于越接近汛期, 水库来水的不均匀程度越显著, 若选取时段过长, 不均匀的来水受到均化, 则造成计算的期望弃水量偏小, 期望发电量偏大, 因此本文采用变时段长, 8 月 21 日- 9 月 15 日取日, 9 月 16 日- 10 月 31 日取候(5 日), 其余取月;  $T$  为调度期时段数, 本文共有 36 个时段;  $m$  为随机来水的状态数, 即某来水年组包含的年数, 本文丰水年组 25 年, 平水年组 25 年, 枯水年组为 24 年;  $N(q_{i,t}(Q_j), H_{i,t}(Q_j))$ ,  $q_{i,t}(Q_j)$  和  $H_{i,t}(Q_j)$ , 分别为第  $i$  水电站第  $t$  时段相应入流为  $Q_j$  时的出力、发电流量、发电水头。

### 2.2 约束条件

(1) 水量平衡约束。

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + (Q_{i,t} - qf_{i,t} - J_{i,t} - S_{i,t}) \cdot T_t \quad (2)$$

式中:  $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t-1}$  为第  $i$  库第  $t$  时段末、初水库蓄水量;  $Q_{i,t}$ 、 $qf_{i,t}$ 、 $J_{i,t}$  和  $S_{i,t}$  分别为第  $i$  库第  $t$  时段入库流量、发电流量、弃水流量、损失流量。

(2) 上、下限水位约束及水位变幅约束。

$$\underline{Z}_{i,t} \leq Z_{i,t} \leq \overline{Z}_{i,t} \quad (3)$$

$$|Z_{i,t+1} - Z_{i,t}| \leq \Delta Z_i \quad (4)$$

式中:  $Z_{i,t}$ 、 $\underline{Z}_{i,t}$ 、 $\overline{Z}_{i,t}$  分别为第  $i$  库第  $t$  时刻计算水位、下限水位、上限水位;  $\Delta Z_i$  为第  $i$  库允许水位变幅。

(3) 最大、最小流量约束及流量变幅约束。

$$q_{i,\min} \leq qf_{i,t} \leq qf_{i,\max} \quad (5)$$

$$|q_{i,t+1} - q_{i,t}| < \Delta q_i \quad (6)$$

式中:  $q_{i,\min}$  为第  $i$  库满足下游航运、生态、供水等综合利用的最小流量;  $qf_{i,\max}$  为第  $i$  库水轮机组最大过水能力;  $q_{i,t}$ 、 $q_{i,t+1}$  分别为第  $i$  库第  $t$  时段始末出库流量(包括发电流量和弃水流量);  $\Delta q_i$  为第  $i$  库允许下泄流量变幅。

(4) 负荷约束。

$$\underline{N}_{i,t} \leq N_{i,t} \leq N Y_i \quad (7)$$

式中:  $N_{i,t}$ 、 $\underline{N}_{i,t}$  为第  $i$  电站第  $t$  时段的计算出力、电网对电站的最小负荷要求;  $N Y_i$  为第  $i$  电站装机容量。

(5) 调度期末控制水位约束。

$$Z_{i^*} = Z_{i^e}^* \quad (8)$$

式中:  $Z_{i^*}$ 、 $Z_{i^e}^*$  为第  $i$  库调度期末计算水位、期末控制水位。

### 2.3 求解方法

本文水库群采用轮库迭代法, 单库采用离散随机动态规划法。其计算流程见图 2。

### 2.4 评价指标

三峡及金沙江下游梯级水库群蓄水期调度方案的选择, 是以保证汛后蓄满和不增加防洪风险为前提, 并综合考虑蓄水期中下游最小下泄量要求和蓄水期梯级发电量等因素。本文选取蓄满率、期望弃水量、蓄水期期望出力等三个指标对多情景方案进行评价。由于是蓄水期, 蓄满率是第一指标; 由于蓄水期与汛期部分重叠, 蓄水时间越提前, 对防洪安全的影响越大, 其表现为蓄水过程中产生大量的弃水, 因此本文选择蓄水期弃水量指标反映防洪风险大小; 蓄水期梯级发电量大小也是衡量蓄水方案优劣的重要指标, 由于不同情景的蓄水期长短不同, 为了满足可比性要求, 本文选择蓄水期平均出力反映蓄水对发电的影响。方案筛选的方法为, 将不同指标的特征值标准化, 由于水库蓄水、防洪、发电在蓄水期的重要性依次递减, 对蓄满率、期望弃水量、平均期望出力三个指标赋以不同的权重, 得到每个方案的综合评价, 针对不同来水年组, 选择综合指标值最优的蓄水时间方案为该来水年型的推荐方案。

## 3 结果分析

### 3.1 设计蓄水期联合调度效果分析

采用调度规程中的起蓄时间和起蓄水位, 采用单库随机优化调度和四库联合随机优化调度的蓄水期梯级期望发电量、梯级期望弃水量的计算结果见表 1, 供水保证率的计算结果见表 2。

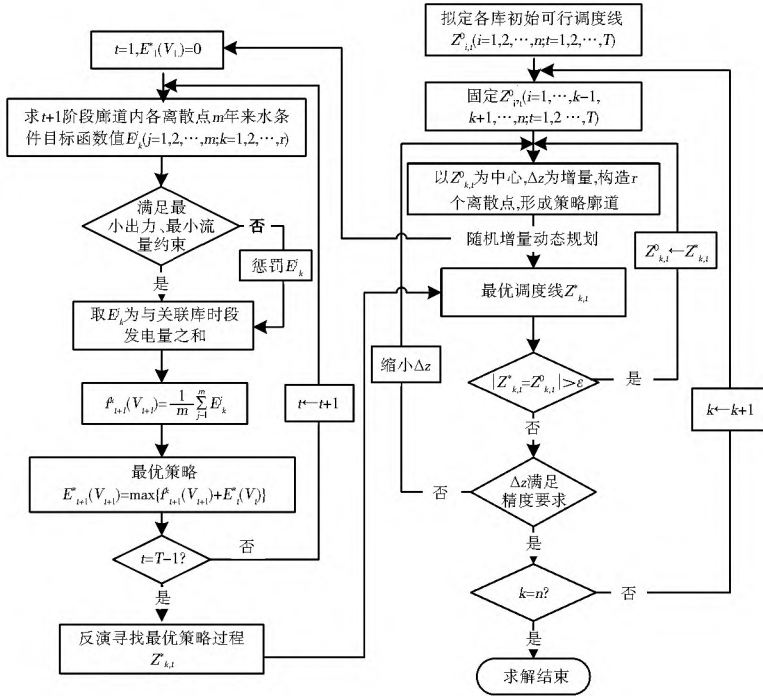


图 2 水库群随机优化模型求解方法流程

Fig. 2 Solving method flow chart for stochastic optimization model of reservoir group

表 1 不同来水情形不同调度模式梯级期望  
发电量、梯级期望弃水量对比

Tab. 1 Comparison of expected generated energy and cascade expected surplus water under different inflow situations and in different operation modes

来水年型	调度模式	梯级期望发电量 / 亿 (kW · h)	梯级期望弃水量 / 亿 m <sup>3</sup>
丰水年	单库模式	636.59	223.57
	库群模式	637.67	206.14
	增量	1.08	- 17.43
平水年	单库模式	573.73	82.24
	库群模式	574.28	71.91
	增量	0.55	- 10.33
枯水年	单库模式	470.48	22.44
	库群模式	470.68	17.05
	增量	0.2	- 5.39

表 2 不同来水情形不同调度模式梯级供水保证率对比

Tab. 2 Comparison of water supply guarantee rate under different inflow situations and in different operation modes

来水年型	调度模式	溪洛渡	向家坝	三峡	葛洲坝
丰水年	单库模式	100	100	100	100
	库群模式	100	100	100	100
平水年	单库模式	100	100	100	100
	库群模式	100	100	100	100
枯水年	单库模式	100	100	90.24	90.24
	库群模式	100	100	100	100

优化调度期望发电量之和); 梯级联合调度的期望弃水量小于单库模式; 梯级联合调度的供水期的供水保证率(满足最小下泄流量)高于单库模式。

图 3、图 4、图 5 给出了两种调度模式三种不同来水情形下溪洛渡、向家坝、三峡蓄水期优化水位过程线。

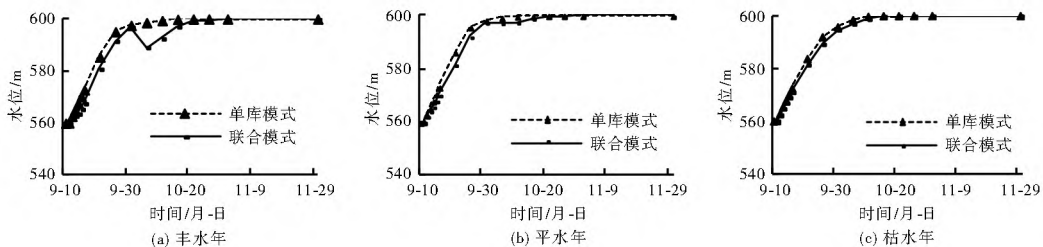


图 3 不同来水情形不同调度模式下溪洛渡优化水位过程线

Fig. 3 Optimal water level process line of Xiluodu reservoir under different inflow situations and in different operation modes

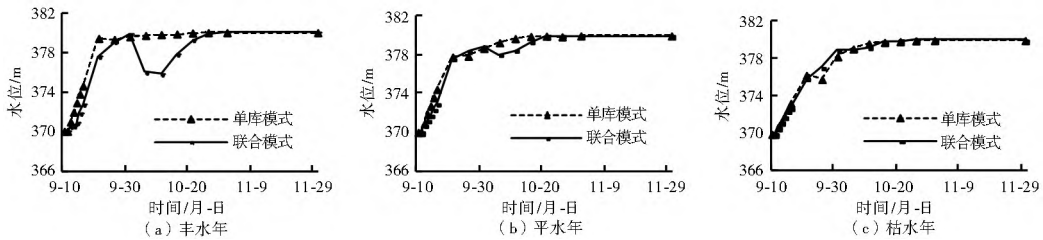


图 4 不同来水情形不同调度模式下向家坝优化水位过程线

Fig. 4 Optimal water level process line of Xiangjiaba reservoir under different inflow situations and in different operation modes

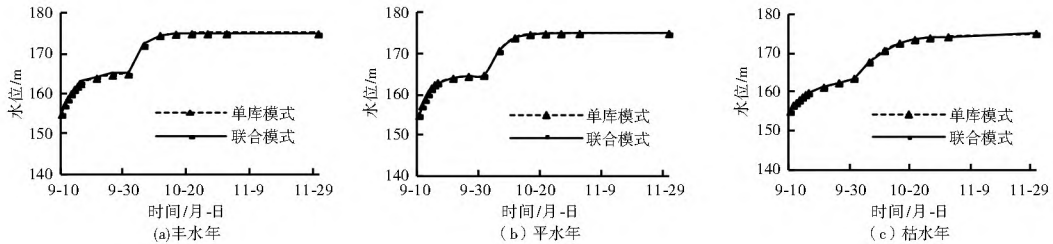


图 5 不同来水情形不同调度模式下三峡优化水位过程线

Fig. 5 Optimal water level process line of Three Gorges reservoir under different inflow situations and in different operation modes

由图 3、图 4 和图 5 可以看出如下结果。

(1) 向家坝与溪洛渡的蓄水策略基本一致, 这主要是由于溪洛渡到向家坝区间较小, 向家坝的入流绝大部分来自于溪洛渡的出库, 而且向家坝的调节能力较小, 两者较易实现同步蓄水。

(2) 两种调度模式下, 三峡蓄水过程基本一致, 由于受 9 月底 165 m 限制, 三峡水库蓄水呈

现明显的两阶段特征, 各蓄水阶段前期回蓄快, 后期回蓄慢, 前期快速回蓄有利于尽快提高发电水头, 后期减缓回蓄有利于减少弃水同时增大发电流量。

图 6、图 7、图 8 分别给出了两种调度模式三种不同来水情形下三峡入库流量、出库流量、葛洲坝弃水流量过程。

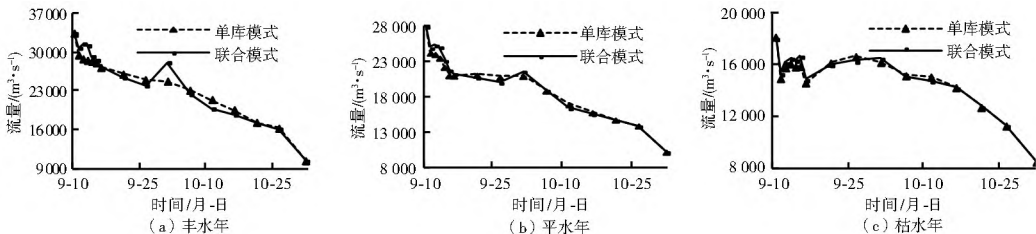


图 6 不同来水情形三峡水库入库流量过程线

Fig. 6 Inflow discharge process line of Three Gorges reservoir under different inflow situations

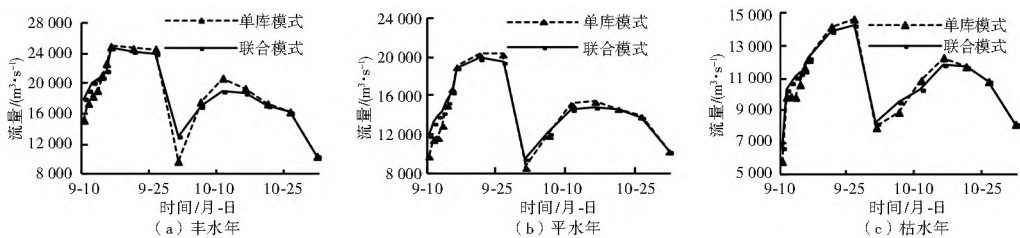


图 7 不同来水情形三峡水库出库流量过程线

Fig. 7 Outflow discharge process line of Three Gorges reservoir under different inflow situations

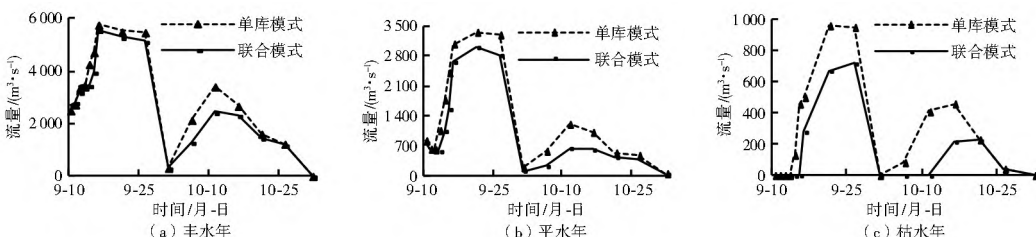


图 8 不同来水情形葛洲坝水库弃水流量过程线

Fig. 8 Surplus water discharge process line of Gezhouba reservoir under different inflow situations

由图 6 可见,联合优化调度模式下,由于溪洛渡、向家坝水库的调配,三峡水库在两个蓄水阶段快速蓄水期入库流量较单库模式大,缓慢蓄水期入库流量较单库模式小,使得三峡水库的出库流量过程相对更为均匀(见图 7)。葛洲坝水库自身没有调节能力,并且三峡至葛洲坝区间很小,三峡的出库流量近似为葛洲坝的入库流量,因此联合调度模式下葛洲坝的期望弃水量大大减少(见图 8),进而使得期望发电量显著增加。

### 3.2 最优起蓄时机选择

#### (1) 蓄满率。

在丰水年、平水年两种来水情形下,梯级各水库以不同蓄水时间方案起蓄,至调度规程规定蓄满的时间(溪洛渡、向家坝 9 月底、三峡 10 月底)均能蓄满,表 3 给出了枯水年梯级各水库在规定蓄满时间的蓄满率。

表 3 枯水年不同蓄水时间方案蓄满率情况

Tab.3 Fill storage rate of different beginning impounding time schemes in low flow years

起蓄时间	溪洛渡、向家坝										
	9 11	9 11	9 11	9 11	9 11	9 11	9 1	9 1	9 1	9 1	
三峡	9 10	9 6	9 1	8 26	8 21	9 10	9 6	9 1	8 26	8 21	
蓄满率 (%)	溪洛渡	95.8	95.8	95.8	95.8	95.8	100	100	100	100	
	向家坝	91.7	91.7	91.7	91.7	91.7	100	100	100	100	
	三峡	87.5	87.5	95.8	100	100	87.5	87.5	95.8	100	100

由表 3 可见:a.溪洛渡、向家坝 9 月 11 日起蓄,有部分年份不能在规定蓄满的时间蓄满,当起蓄时间提前至 9 月 1 日,则能在规定蓄满的时间使得蓄满率达到 100%;b.遇特枯年份,提前溪洛渡、向家坝的起蓄时间至 9 月 1 日,三峡水库仍然无法在规定蓄满的时间蓄满,大幅提前自身的起蓄时间至 8 月 26 日,才能使得三峡水库的蓄满率达到 100%。

#### (2) 期望弃水量。

表 4、表 5、表 6 分别给出了不同起蓄时间方案在三种来水年型下梯级期望弃水量的计算结果,为避免蓄水期之前水库调度过程对统计结果的不必要影响,设定各水库的统计时段为该水库起蓄时间至调度期末(11 月 30 日),葛洲坝的统计时间同三峡,梯级的期望弃水量为各水库期望弃水量之和。

由表 4、表 5、表 6 可见:a.由于葛洲坝水库调节能力弱并且受到三峡出库流量的直接影响,因此葛洲坝的期望弃水量与三峡的期望弃水量总体呈现正

表 4 不同起蓄时间方案梯级期望弃水量计算结果(丰水年)

Tab.4 Calculation results of Cascade expected surplus water of different beginning impounding time schemes (high flow years)

起蓄时间		期望弃水量/亿 m <sup>3</sup>					梯级
溪洛渡、向家坝	三峡	溪洛渡	向家坝	三峡	葛洲坝		
9 11	9 10	47.41	67.50	14.17	77.06	206.14	
9 11	9 6	48.40	68.22	14.38	104.50	235.50	
9 11	9 1	50.45	69.51	31.14	135.27	286.37	
9 11	8 26	50.44	69.55	58.75	176.18	354.93	
9 11	8 21	50.45	69.57	75.82	208.43	404.27	
9 1	9 10	90.06	118.95	16.09	88.70	313.80	
9 1	9 6	90.99	119.69	19.01	109.97	339.66	
9 1	9 1	92.22	120.79	28.57	136.48	378.06	
9 1	8 26	96.72	124.76	51.41	177.10	449.99	
9 1	8 21	97.60	125.20	69.46	208.73	500.99	

表 5 不同起蓄时间方案梯级期望弃水量计算结果(平水年)

Tab.5 Calculation results of Cascade expected surplus water of different beginning impounding time schemes (mean flow years)

起蓄时间		期望弃水量/亿 m <sup>3</sup>					梯级
溪洛渡、向家坝	三峡	溪洛渡	向家坝	三峡	葛洲坝		
9 11	9 10	17.77	28.68	0.00	25.46	71.91	
9 11	9 6	18.86	28.86	0.00	36.29	84.02	
9 11	9 1	19.53	29.81	0.01	52.66	102.01	
9 11	8 26	19.57	29.99	3.63	73.01	126.20	
9 11	8 21	19.58	30.00	8.05	95.63	153.26	
9 1	9 10	41.02	60.01	0.00	28.82	129.85	
9 1	9 6	41.53	60.49	0.00	41.17	143.19	
9 1	9 1	41.95	60.91	0.01	54.85	157.71	
9 1	8 26	43.73	62.43	3.91	76.31	186.38	
9 1	8 21	45.13	63.32	5.46	97.13	211.04	

表 6 不同起蓄时间方案梯级期望弃水量计算结果(枯水年)

Tab.6 Calculation results of Cascade expected surplus water of different beginning impounding time schemes (low flow years)

起蓄时间		期望弃水量/亿 m <sup>3</sup>					梯级
溪洛渡、向家坝	三峡	溪洛渡	向家坝	三峡	葛洲坝		
9 11	9 10	3.37	8.96	0.00	4.72	17.05	
9 11	9 6	3.39	9.01	0.00	8.36	20.76	
9 11	9 1	3.54	9.21	0.00	8.36	21.10	
9 11	8 26	3.55	9.49	0.00	16.69	29.73	
9 11	8 21	3.67	9.25	0.00	19.75	32.67	
9 1	9 10	5.09	13.70	0.00	4.01	22.8	
9 1	9 6	5.19	14.03	0.00	5.94	25.16	
9 1	9 1	5.31	14.19	0.00	9.17	28.67	
9 1	8 26	5.44	14.27	0.00	16.20	35.91	
9 1	8 21	5.44	14.55	0.00	21.25	41.24	

相关,并且由于葛洲坝满发流量小于三峡的满发流量,因此葛洲坝的期望弃水量比三峡的期望弃水量大;b.三峡起蓄越早,三峡和葛洲坝的期望弃水量越多,一方面是由于起蓄越早,来水量基数越大,另一方面,越接近主汛期来水流量越大,水库不能调节的水量越多;溪洛渡、向家坝起蓄时间提前具有与三峡水库类似的规律。

### (3) 梯级平均期望出力。

表 7、表 8、表 9 给出了三种来水年型不同起蓄时间方案梯级平均期望出力的计算结果,表中各水库的平均期望出力统计时段长与梯级期望弃水量的统计时段长相同,梯级的平均期望出力为各水库平均期望出力之和。

由表 7、表 8、表 9 可见,溪洛渡、向家坝提前蓄水,自身平均期望出力显著增加,三峡水库提前蓄水,三峡和葛洲坝的平均期望出力均会显著增加。

### (4) 方案优选。

表 7 不同起蓄时间方案梯级平均期望出力计算结果(丰水年)

Tab. 7 Calculation results of Cascade expected power output of different beginning impounding time schemes (high flow years)

起蓄时间		蓄水期平均期望出力/MW					
溪洛渡、向家坝	三峡	溪洛渡	向家坝	三峡	葛洲坝	梯级	
9 11	9 10	10110	5080	15040	2570	32800	
9 11	9 6	10100	5070	15830	2590	33590	
9 11	9 1	10100	5080	16440	2630	34250	
9 11	8 26	10100	5080	16950	2650	34780	
9 11	8 21	10100	5080	17350	2680	35210	
9 1	9 10	10420	5190	15500	2580	33690	
9 1	9 6	10420	5190	15980	2600	34190	
9 1	9 1	10420	5180	16450	2630	34680	
9 1	8 26	10420	5190	16970	2650	35230	
9 1	8 21	10420	5190	17370	2680	35660	

表 8 不同起蓄时间方案梯级平均期望出力计算结果(平水年)

Tab. 8 Calculation results of Cascade expected power output of different beginning impounding time schemes (mean flow years)

起蓄时间		蓄水期平均期望出力/MW					
溪洛渡、向家坝	三峡	溪洛渡	向家坝	三峡	葛洲坝	梯级	
9 11	9 10	9470	4860	12800	2410	29540	
9 11	9 6	9460	4850	13480	2460	30250	
9 11	9 1	9460	4860	14120	2500	30940	
9 11	8 26	9460	4860	14750	2550	31620	
9 11	8 21	9460	4860	15210	2570	32100	
9 1	9 10	9890	5020	13190	2450	30550	
9 1	9 6	9890	5020	13690	2470	31070	
9 1	9 1	9880	5020	14120	2490	31510	
9 1	8 26	9880	5020	14750	2540	32190	
9 1	8 21	9880	5020	15250	2570	32720	

表 9 不同起蓄时间方案梯级平均期望出力计算结果(枯水年)

Tab. 9 Calculation results of Cascade expected power output of different beginning impounding time schemes (low flow years)

起蓄时间		蓄水期平均期望出力(MW)					
溪洛渡、向家坝	三峡	溪洛渡	向家坝	三峡	葛洲坝	梯级	
9 11	9 10	8110	4210	9860	2030	24210	
9 11	9 6	8100	4210	9950	2070	24330	
9 11	9 1	8100	4210	10460	2120	24890	
9 11	8 26	8100	4200	10950	2150	25400	
9 11	8 21	8100	4200	11440	2220	25960	
9 1	9 10	8580	4450	9890	2080	25000	
9 1	9 6	8580	4450	10160	2100	25290	
9 1	9 1	8570	4450	10450	2120	25590	
9 1	8 26	8570	4450	10930	2150	26100	
9 1	8 21	8570	4450	11440	2210	26670	

以各水库蓄满率的均值反映梯级蓄满率,将 30 组不同蓄水情景的梯级蓄满率、梯级期望弃水量、梯级平均期望出力标准化。根据蓄满率、梯级期望弃水量、梯级平均期望出力三个指标的重要性不同,采用 AHP 法给出三个指标的标准化权重为{0.42, 0.34, 0.24},进而得到三种不同来水年型不同起蓄时间组合的综合评价值,丰水年 10 种起蓄时间组合(表 4 至表 9 中由上至下依次所列的 10 组起蓄时间组合)的综合评价值为{0.81, 0.8, 0.78, 0.75, 0.72, 0.75, 0.74, 0.73, 0.69, 0.66},第一种起蓄时间组合(溪洛渡、向家坝 9 月 11 日起蓄,三峡 9 月 10 日起蓄)的综合评价值最大,平水年为{0.83, 0.84, 0.85, 0.84, 0.83, 0.82, 0.82, 0.82, 0.81, 0.8},第三种起蓄时间组合(溪洛渡、向家坝 9 月 11 日起蓄,三峡 9 月 1 日起蓄)的综合评价值最大,枯水年为{0.34, 0.35, 0.5, 0.57, 0.58, 0.57, 0.57, 0.72, 0.79, 0.8},第十种起蓄时间组合(溪洛渡、向家坝 9 月 1 日起蓄,三峡 8 月 21 日起蓄)的综合评价值最大。

综上所述,得到三峡及金沙江下游梯级水库群不同来水年型下汛末最优起蓄时间,即丰水年溪洛渡和向家坝 9 月 11 日起蓄、三峡 9 月 10 日起蓄,即维持设计起蓄时间起蓄;平水年溪洛渡、向家坝 9 月 11 日起蓄、三峡 9 月 1 日起蓄;枯水年溪洛渡、向家坝 9 月 1 日起蓄、三峡 8 月 21 日起蓄。可以发现,推荐蓄水时间方案梯级各水库的汛后蓄满率均为 100%,与设计蓄水期优化结果(见表 8、表 9)相比,平水年、枯水年,推荐蓄水时间方案的梯级平均期望出力分别增加 4.74%、10.16%。

## 4 结论

针对三峡及金沙江下游梯级水库群汛末竞争性

蓄水引发的诸多矛盾,以梯级四库系统作为研究对象,以不同来水年型、蓄水时间和蓄水期初水位构建梯级蓄水情景集;以蓄水期期望发电量最大为目标,建立蓄水期多目标联合随机优化调度模型,生成各蓄水情景下的最优蓄水方案。分析设计蓄水期联合优化调度结果得出结论:联合优化调度更有利于减少蓄水期期望弃水量,提高梯级期望发电量和供水保证率;综合考虑防洪风险与兴利效益,基于蓄满率、梯级期望弃水量、梯级平均期望出力对各方案进行评价,推荐丰水年溪洛渡、向家坝9月11日起蓄、三峡9月10日起蓄,平水年溪洛渡、向家坝9月11日起蓄、三峡9月1日起蓄,枯水年溪洛渡、向家坝9月1日起蓄、三峡8月21日起蓄。

本文研究结果对于改善三峡及金沙江下游梯级水库群蓄水期近期调度策略以及长期运行规划具有参考价值。

#### 参考文献(References):

- [1] 丁胜祥,王俊,沈燕舟,等.长江上游大型水库运用对三峡水库汛末蓄水影响的初步分析[J].水文,2012,32(1):32-38. (DING Sheng-xiang, WANG Jun, SHEN Yan-zhou, et al. Impact of large reservoir operation in upper Yangtze Reach on Three Gorges Reservoir storage at end of flood period[J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(1): 32-38. (in Chinese))
- [2] 钱锐.提前蓄水对三峡水库影响研究[J].中国水运:学术版,2007,7(9):54-55. (QIAN Rui. Study on the effect of impounding in advance on the Three Gorges Reservoir[J]. China Water Transport: Academic Edition, 2007, 7(9): 54-55. (in Chinese))
- [3] 张继顺,张雅琪,张慧.新形势下三峡水库汛末蓄水方式研究[J].水利水电技术,2011,42(11):102-106. (ZHANG Ji-shun, ZHANG Ya-qi, ZHANG Hui. Study on impoundment mode of Three Gorges Reservoir during end of flood season under new circumstances[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(11): 102-106. (in Chinese))
- [4] 刘攀,郭生练,庞博,等.三峡水库运行初期蓄水调度函数的神经网络模型研究及改进[J].水力发电学报,2006,25(2):83-89. (LIU Pan, GUO Sheng-lian, PANG Bo, et al. A modified approach for deriving storage operating rules of the Three Gorges reservoir with artificial neural network[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(2): 83-89. (in Chinese))
- [5] 李义天,甘富万,邓金运.三峡水库9月分旬控制蓄水初步研究[J].水力发电学报,2006,25(1):61-66. (LI Yi-tian, GAN Fu-wan, DENG Jin-yun. Preliminary study on impounding water of Three Gorges Project in September[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(1): 61-66. (in Chinese))
- [6] 刘攀,郭生练,王才君,等.三峡水库动态汛限水位与蓄水时机选定的优化设计[J].水利学报,2004(7):86-91. (LIU Pan, GUO Sheng-lian, WANG Cai-jun, et al. Optimization of limited water level in flood season and impounding scheme for reservoir in Three Gorges Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(7): 86-91. (in Chinese))
- [7] 彭杨,李义天,谢葆玲,等.三峡水库汛后提前蓄水方案研究[J].水力发电学报,2002(3):12-20. (PENG Yang, LI Yi-tian, XIE Bao-ling, et al. Study on an ahead of schedule impounding scheme of the Three Gorges Project (TGP) in the flood recession period[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002(3): 12-20. (in Chinese))
- [8] 石涛,胡铁松,曾祥,等.三峡水库汛末蓄水调度线优化研究[J].水力发电,2014,40(5):62-65,94. (SHI Tao, HU Tie-song, ZENG Xiang, et al. Study on the optimal impounding line of Three Gorges Reservoir in flood recession period[J]. Water Power, 2014, 40(5): 62-65, 94. (in Chinese))
- [9] 刘宇,王玉华,周保红.梯级水库调度系统及其在三峡初期蓄水中的应用[J].水力发电,2003,12(29):24-26. (LIU Yu, WANG Yu-hua, ZHOU Bao-hong. The cascade reservoir dispatching system and its application to the initial impoundment of Three Gorges Reservoir[J]. Water Power, 2003, 12(29): 24-26. (in Chinese))
- [10] 安申义.关于三峡水库提前蓄水研究[J].红水河,2011,30(3):42-45,58. (AN Shen-yi. Study on advanced impoundment of Three Gorges Reservoir[J]. Hongshui River, 2011, 30(3): 42-45, 58. (in Chinese))
- [11] 李雨,郭生练,郭海晋,等.三峡水库提前蓄水的防洪风险与效益分析[J].长江科学院院报,2013,30(1):8-14. (LI Yu, GUO Sheng-lian, GUO Hai-jin, et al. Flood control risk and benefit of impounding water in advance for the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Yangtze River Science Research Institute, 2013, 30(1): 8-14. (in Chinese))
- [12] 彭杨,李义天,张红武.三峡水库汛末蓄水时间与目标决策研究[J].水科学进展,2003,14(6):682-689. (PENG Yang, LI Yi-tian, ZHANG Hong-wu. Study on the impounding time and objective decision of the Three Gorges Project at the end of flood period[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 682-689. (in Chinese))
- [13] 刘心愿,郭生练,刘攀,等.考虑综合利用要求的三峡水库提前蓄水方案[J].水科学进展,2009,20(6):851-856. (LIU Xin-yuan, GUO Sheng-lian, LIU Pan, et al. Scheme of impounding in advance for the Three Gorges Reservoir by considering the comprehensive utilization benefits [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6): 851-856. (in Chinese))
- [14] 王儒述.三峡工程与生态环境保护[J].南水北调与水利科技,2008,6(5):83-89. (WANG Ru-shu. The Three Gorge Project and ecological environment protection [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(5): 83-89. (in Chinese))
- [15] 张金福,杨敏,张少济,等.向家坝工程坝面隔墙水动力特性及体型优选研究[J].南水北调与水利科技,2011,9(6):105-109. (ZHANG Jin-fu, YANG Min, ZHANG Shao-ji, et al. Study on the hydrodynamic characteristics and shape optimization of the dividing wall of Xiangjiaba project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 105-109. (in Chinese))
- [16] 刘荣华,魏加华,李想.电站枢纽综合出力系数计算及对调度过程模拟的影响[J].南水北调与水利科技,2012,10(1):14



17. (LIU Rong hua, WEI Jia hua, LI Xiang. Calculation of comprehensive power output coefficient of a hydropower station and its effects on simulating the regulation process[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 14-17. (in Chinese))
- [17] 丁毅,傅巧萍. 长江上游梯级水库群蓄水方式初步研究[J]. 人民长江, 2013, 44(10): 72-75. (DING Yi, FU Qiao ping. Preliminary research on water storage mode of cascade reservoirs in upper Yangtze River[J]. Yangtze River, 2013, 44(10): 72-75. (in Chinese))
- [18] 欧阳硕,周建中,周超,等. 金沙江下游梯级与三峡梯级枢纽联合蓄放水调度研究[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 435-443. (OUYANG Shuo, ZHOU Jian zhong, ZHOU Chao, et al. Research on impounding dispatch for the lower cascade reservoir in Jinsha River and Three Gorges cascade[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4): 435-443. (in Chinese))
- [19] 黄草,王忠静,鲁军,等. 长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究: 水库群调度规则及蓄放次序[J]. 水利学报, 2014, 45(10): 1175-1183. (HUANG Cao, WANG Zhong jing, LU Jun, et al. A multi reservoir operation optimization model and application in the upper Yangtze River Basin: Operation rules and water releasing/storing sequences [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(10): 1175-1183. (in Chinese))
- [20] 王冬,李义天,邓金运,等. 长江上游梯级水库蓄水优化初步研究[J]. 泥沙研究, 2014(2): 62-67. (WANG Dong, LI Yitian, DENG Jiyun, et al. Preliminary study of impounding optimization of cascade reservoir in upper Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 2014(2): 62-67. (in Chinese))

## (上接第 48 页)

- [8] GUO H, HU Q, ZHANG Q, et al. Effects of the Three Gorges Dam on Yangtze River flow and river interaction with Poyang Lake, China: 2003-2008 [J]. Journal of Hydrology, 2012, 416-417: 19-27.
- [9] YE X, ZHANG Q, LIU J, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China [J]. Journal of Hydrology, 2013, 494: 83-95.
- [10] 许云锋,左其亭. 气候变化对水资源影响的研究现状与展望 [J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(5): 383-386. (XU Yun feng, ZUO Qiting. Research on the effects of climate change on water resources present situation and prospect [J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(5): 383-386. (in Chinese))
- [11] 郭家力,郭生练,李天元,等. 鄱阳湖未控区间流域水量平衡分析及校验 [J]. 水电能源科学. 2012, 30(9): 30-32, 58. (GUO Jiali, GUO Shenglian, LI Tianyuan, et al. Water Balance analysis and verification of Poyang Lake Intervening Basin [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(9): 30-32, 58. (in Chinese))
- [12] 郭华,苏布达,王艳君. 鄱阳湖流域 1955-2002 年径流系数变化趋势及其与气候因子的关系 [J]. 湖泊科学, 2007, 19(2): 163-169. (GUO Hua, SU Bu da, WANG Yan jun. Runoff coefficients change and the analysis of the relationship between climate change factors and runoff coefficients in Poyang Lake Basin (China): 1955-2002 [J]. Journal of Lake Science, 2007, 19(2): 163-169. (in Chinese))
- [13] 罗蔚,张翔,邓志民,等. 近 50 年鄱阳湖流域入湖总水量变化与旱涝急转规律分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(5): 845-855. (LUO Wei, ZHANG Xiang, DENG Zhimin, et al. Variation of total runoff into Poyang Lake and drought flood abrupt alteration during the past 50 years [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(5): 845-855. (in Chinese))
- [14] 郭家力,郭生练,郭靖,等. 鄱阳湖流域未来降水变化预测分析 [J]. 长江科学院院报, 2010, 27(8): 20-24. (GUO Jiali, GUO Shenglian, GUO Jing, et al. Prediction of precipitation Change in Poyang Lake Basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(8): 20-24. (in Chinese))
- [15] 陈华,郭家力,郭生练,等. 统计降尺度方法及其评价指标比较研究 [J]. 水利学报, 2012, 43(8): 891-897. (CHEN Hua, GUO Jiali, GUO Shenglian, et al. Comparison of different statistical downscaling methods and evaluation indicators in climate change impact on runoff [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(8): 891-897. (in Chinese))
- [16] 徐若兰,陈华,郭靖. 气候变化对汉江流域上游水文极值事件的影响 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 383-386. (XU Ruolan, CHEN Hua, GUO Jing. Impact of climate change on hydrological extreme events in upper reaches of the Hangjiang River basin [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2010, 46(3): 383-386. (in Chinese))
- [17] Merz R, Parajka J, Blöchl G. Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses [J]. Water Resources Research, 2011, 47: W02531. DOI: 10.1029/2010WR009505
- [18] 李云良,张奇,李相虎,等. 鄱阳湖流域水文效应对气候变化的响应 [J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(10): 1339-1347. (LI Yunliang, ZHANG Qi, LI Xianghu, et al. Hydrological effects of Poyang Lake catchment in response to climate changes [J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2013, 22(10): 1339-1347. (in Chinese))
- [19] 郭生练,郭家力,侯雨坤,等. 基于 Budyko 假设预测长江流域未来径流量变化 [J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 151-160. (GUO Shenglian, GUO Jiali, HOU Yunkun, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in the Yangtze River Basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 151-160. (in Chinese))
- [20] 郭华,张奇. 近 50 年来长江与鄱阳湖水文相互作用的变化 [J]. 地理学报, 2011, 66(5): 609-618. (GUO Hua, ZHANG Qi. Changes in the Hydrological interaction of the Yangtze River and Poyang Lake during the last 50 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 609-618. (in Chinese))