

文章编号:1001-4179(2013)04-0008-05

# 不影响三峡水库蓄水的上游水库群蓄水方法研究

付 湘<sup>1</sup>, 李安强<sup>2</sup>, 石 萍<sup>1</sup>

(1. 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 430072; 2. 长江勘测规划设计研究院 规划处, 湖北 武汉 430010)

**摘要:**三峡水库汛末能否顺利蓄水至正常蓄水位关系到长江中下游的用水安全, 意义重大。由于三峡上游众多梯级水库也是从汛末开始蓄水, 将与三峡水库产生竞争性蓄水问题。为了使三峡水库顺利蓄水和最大程度保证上游各梯级电站的经济效益, 在分析长江上游干支流水库汛末蓄水对三峡水库蓄水影响的基础上, 根据水能价值原理, 提出了不影响三峡水库蓄满的上游水库群蓄水分配方法。所提出的方法可为制订三峡水库及上游水库群汛末蓄水方案提供参考。

**关键词:**竞争性蓄水; 水能价值; 蓄水分配方法; 长江上游; 三峡水库

**中图分类号:** TV697 **文献标志码:** A

长江上游干支流正在建设的大批控制性水利枢纽完成后, 将使汛后长江上游干支流水库与三峡水库之间出现竞争性蓄水问题。此外, 长江上游用水量不断增加以及降水、蒸发等气候因素的变化, 明显削减了三峡水库的来水量<sup>[1-4]</sup>。三峡工程是长江开发治理的关键工程, 水库的科学调度运用对我国经济社会的发展影响巨大, 如果三峡水库蓄不满水, 不仅影响水库兴利目标的实现, 而且影响流域抗旱、水污染事故应急处理和生态等公益性调度能力<sup>[5]</sup>。因此, 为了保证三峡水库蓄水不受上游水库影响, 合理安排汛末上游各水库的蓄水配置方案(包括各水库提前蓄水的时间以及蓄水量), 成为长江流域水资源综合管理十分重要和迫切的任务。

## 1 三峡水库需要上游水库群补充的水量

选取长江上游二滩、溪洛渡、向家坝、紫坪铺、瀑布沟、亭子口和构皮滩共7个水库作为研究对象, 分析其蓄水对三峡水库蓄水的影响。7座水库的电站总装机容量相当于2个三峡水电站的装机容量, 总调节库容与三峡水库相当。由于水库群组成复杂, 采用简化办法, 只考虑两站之间水流的传播时间, 然后对径流过程进行简单平移, 每一级水库的入库流量为其上游水

库平移后的下泄量加上区间流量(图1), 各水库按各自承担的综合利用任务和调度要求运行调度。资料分析计算期为47 a(1960~2006年), 步长为旬, 目标函数为在不影响三峡水库汛末蓄水条件下, 各水库发电量最大。

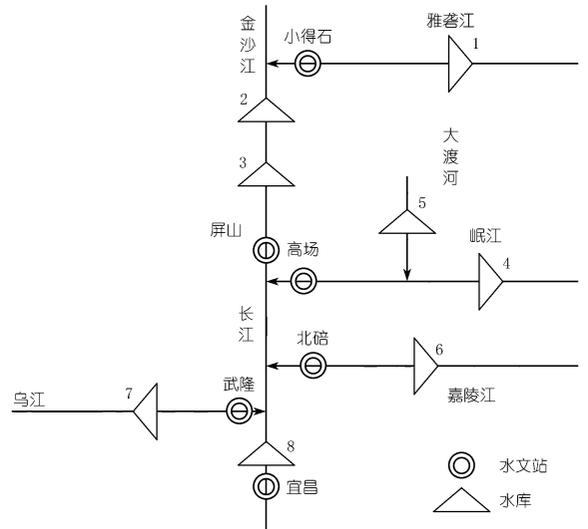


图1 长江上游干支流水库分布示意

上游水库的运行对三峡水库汛末蓄水期径流具有明显的影响。为分析上游水库群蓄水运行对三峡水库

收稿日期:2012-10-11

作者简介:付 湘,女,教授,主要从事水文水资源方面的研究工作。E-mail:xfu@whu.edu.cn

蓄水的影响,首先要选取三峡水库单独优化调度时汛末水库可以蓄满,而与上游联合调度时三峡水库不能蓄满的水文年。在 47 a 的水文资料系列中,选择三峡水库枯季频率为 98% 的年份进行分析。该年三峡水库来水量位于 47 a 实测系列中的倒数第一,亭子口水电站为倒数第二,二滩、溪洛渡、向家坝、紫坪铺、瀑布沟、构皮滩水库均为倒数第一。

将上游梯级水库联合调度得出的三峡水库蓄水量过程与三峡水库单独优化调度的水库蓄水量过程相减,可得出三峡水库需要上游水库补充的水量见表 1。

表 1 三峡水库需要上游 7 库补充的水量  $m^3/s$

时段	三峡水库单独调度	8 库联合调度	差值
9 月下旬	24425.0	21041.6	3383.4
10 月上旬	30340.7	25701.6	4639.1
10 月中旬	38289.0	33228.6	5060.4
10 月下旬	44887.6	39656.7	5230.9

## 2 水电站的水能价值计算

### 2.1 直接水能价值

根据三峡水库及其上游水库群联合调度的优化结果,可确定上游各水库单位流量的直接利润率,即直接水能价值。

$$\xi_{it} = P_{it}E_{it}/R_{it} = \eta P_{it}H_{it}/3\ 600 \quad (1)$$

式中,  $\xi_{it}$  为  $i$  电站  $t$  时段的直接水能价值,元/ $m^3$ ;  $P_{it}$ 、 $E_{it}$  和  $R_{it}$  分别为  $i$  电站  $t$  时段的电价[元/( $kW \cdot h$ )]、发电量( $kW \cdot h$ )和发电用水量( $m^3$ );  $\eta$  为出力系数;  $H_{it}$  为发电水头,  $m$ ; 3 600 为时间换算系数。各水电站的直接水能价值如图 2 所示。

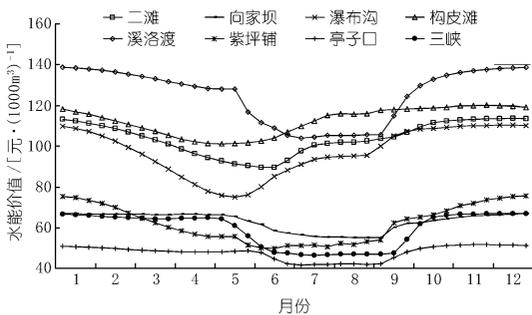


图 2 上游水库群直接水能价值均值

电站水能价值与平均水头有关,汛期,水库维持在汛限水位运行,故水能价值明显低于非汛期。二滩水电站汛期(5~8月)平均每 1 000  $m^3$  的水能价值为 96.1 元,而非汛期(1~4月和 9~12月)为 107.9 元。在上游梯级水库中,溪洛渡水电站的平均水头最高(204 m),故直接水能价值最大,每 1 000  $m^3$  为 125.3

元;亭子口水电站平均水头最低(78 m),平均直接水能价值最小,每 1 000  $m^3$  为 47.9 元。

### 2.2 水能总价值

由于水库的下泄水流能够被下游水库利用,各水电站总的水能价值为本水电站直接水能价值与下游水电站间接水能价值之和。计算公式为

$$\mu_{up} = \xi_{up} + \xi_{down} \quad (2)$$

式中,  $\mu_{up}$  为水电站总的水能价值;  $\xi_{up}$  和  $\xi_{down}$  分别为本级电站、下游水电站直接水能价值。

三峡上游水库群的总价值计算公式见表 2。

表 2 图 1 中三峡上游电站的总价值计算公式

序号	水电站	总价值	序号	水电站	总价值
1	二滩	$\mu_1 = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_8$	5	瀑布沟	$\mu_5 = \xi_5 + \xi_8$
2	溪洛渡	$\mu_2 = \xi_2 + \xi_3 + \xi_8$	6	亭子口	$\mu_6 = \xi_6 + \xi_8$
3	向家坝	$\mu_3 = \xi_3 + \xi_8$	7	构皮滩	$\mu_7 = \xi_7 + \xi_8$
4	紫坪铺	$\mu_4 = \xi_4 + \xi_8$			

利用表 2 中的公式,可计算三峡上游各电站总价值均值,如图 3 所示。从图 3 可以看出,二滩水电站的总价值最大(326.3 元/1 000  $m^3$ ),这是因为其发电水流能够被溪洛渡、向家坝和三峡水库利用;亭子口水电站的总价值最小(99.7 元/1 000  $m^3$ )。

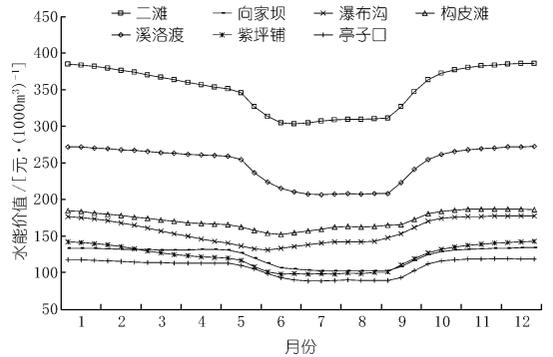


图 3 上游水库群总水能价值均值

## 3 上游水库群提前蓄水量的合理配置

### 3.1 提前蓄水量配置研究

以各水电站总价值与全梯级水电站总价值比值,计算三峡水库需要上游各水库增发水的蓄水分配率,计算结果见表 3。

$$\lambda_{it} = \frac{\mu_{it}}{\sum_{i=1}^I \mu_{it}}, \quad i = 1, 2, \dots, I, t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

式中,  $\mu_{it}$  为第  $i$  个水电站  $t$  时段总水能价值的均值;  $I$  为三峡水库上游水电站总数;  $T$  为时段总数。

各水电站  $t$  时段需要增加的发电水量为

$$\Delta R_{it} = \lambda_{it} F_{it} \quad (4)$$

式中,  $\Delta R_{it}$  为  $t$  时段三峡水库需要上游第  $i$  个水电站补充的水量;  $F_{it}$  为  $t$  时段三峡水库需要上游补充的水量(其值见表 1)。

表 3 三峡水库需要上游 7 个水电站增加发电水量的分配率

时段 (旬)	三峡水库 缺水量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	分配率/%						
		二滩	溪洛渡	向家坝	紫坪铺	瀑布沟	亭子口	构皮滩
9 月下旬	3383.4	27.6	19.1	9.2	9.4	12.8	8.1	13.7
10 月上旬	4639.2	27.3	19.1	9.3	9.5	12.8	8.4	13.5
10 月中旬	5060.4	27.3	19.1	9.4	9.6	12.7	8.5	13.4
10 月下旬	5230.9	27.2	19.1	9.4	9.7	12.6	8.5	13.4

在不影响三峡水库蓄满的情况下,上游第  $i$  个水电站需要放水量为

$$D_{it} = R_{it} + \sum_{j=1}^{U_i} \Delta R_{jt} + L_{i,t+1} \quad (5)$$

式中,  $D_{it}$  为  $t$  时段三峡水库需要上游第  $i$  个水电站放水量,  $m^3$ ;  $R_{it}$  为水库群联合调度时  $t$  时段第  $i$  个水电站的出库流量,  $m^3/s$ ;  $U_i$  是第  $i$  个水电站以上参与蓄水期安排的电站的座数(含  $i$  电站);  $L_{i,t+1}$  为第  $i$  个水电站  $t+1$  时段的补水不足量。

式(5)的含义为:在联合调度情况下为保证三峡水库蓄满,需要上游水库提前蓄水以增加的补水量。此式为理论计算公式,采用逆时序推导,当后一个时段因实际来水量过少导致补水不足时,其补水不足量累计到本时段,以确保考虑水量的需要。

水电站实际的放水量为

$$\begin{cases} S_{it} = \min(V_{i,t-1} + I_{i,t}\Delta t, R_{it}^{\max}) & V_{i,t-1} + I_{i,t}\Delta t < D_{it} \\ S_{it} = \min(D_{it}, R_{it}^{\max}) & V_{i,t-1} + I_{i,t}\Delta t \geq D_{it} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $V_{i,t-1}$ 、 $I_{i,t}$  分别为第  $i$  个水库  $t$  时段初的蓄水量与  $t$  时段的入库流量,因此,  $V_{i,t-1} + I_{i,t}\Delta t < D_{it}$  为第  $i$  个水库  $t$  时段的可用水量。当可用水量小于需水量  $D_{it}$  时,水电站实际的下泄量为可用水量,但不能超过最大过水能力  $R_{it}^{\max}$ ;当可用水量大于需水量时,实际泄量为需水量与最大过水能力的最小值。

从上面的分析可知,当可用水量较少时,会出现供不应求的情况,其缺水量即为式(5)中的补水不足量  $L_{i,t+1}$ 。为了保证所有水库汛末蓄满,采用逆时序法计算各水电站补水不足量  $L_{i,t+1}$ ,计算公式为

$$\begin{cases} L_{i,t+1} = D_{i,t+1} - S_{i,t+1} & t = 1, 2, \dots, T-1 \\ L_{i,t+1} = 0 & t = T \end{cases} \quad (7)$$

因此,式(5)在计算  $t$  时段需要上游第  $i$  个水电站补水

量时,考虑了  $t+1$  时段的补水不足量,可逆时序递推出提前蓄水的时机及蓄水量。

### 3.2 提前蓄水的开始时机

根据水库水量平衡方程,假定汛末水库蓄满,可逆时序推导出水库蓄水初时段的蓄水量为

$$\begin{cases} V_{i,T-1} = V_{i,T} - (I_{i,T} - Q_{i,T})\Delta t \\ \vdots \\ V_{i,t-1} = V_{i,t} - (I_{i,t} - Q_{i,t})\Delta t \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $Q_{it}$  为第  $i$  个水库  $t$  时段出库流量( $Q_{it} = S_{it}/\Delta t$ )。

水库蓄水期是从防洪限制水位开始,蓄至正常蓄水位止。按公式(8)逆时序计算,  $V_{i,T} = V_{i,\text{正}}$ ,  $V_{i,\text{正}}$  为第  $i$  个水库正常蓄水位对应的库容,  $V_{i,\text{汛}}$  为第  $i$  个水库防洪限制水位对应的库容,当  $V_{i,t-1} > V_{i,\text{汛}}$  时,继续向前推导;当  $V_{i,t-1} \leq V_{i,\text{汛}}$  时,则计算结束,该计算时段初即为蓄水开始时间。

## 4 计算结果的检验

选取以下 3 种具有一定代表性的调度运用方案进行分析比较。

(1) 方案 1。梯级间接从上游至下游依次对水库进行联合优化调度。

(2) 方案 2。基于水能价值对各水库的蓄水进行分配,然后根据蓄水量计算调度结果。

(3) 方案 3。根据方案 2 计算出的提前蓄水时间,建立优化调度模型,目标函数为发电量最大。

各方案计算结果见表 4。由于是特枯年份,亭子口水库、构皮滩水库及三峡分别有 7 个旬、6 个旬和 2 个旬的发电出力低于保证出力,且在 3 种方案下破坏程度相同。汛末蓄水时各方案下水库的发电量计算结果表明,各方案的发电量差异不大,说明基于水能价值对各水库的蓄水分配方法合理可行。

表 4 汛末蓄水时各方案下水库的发电量

序号	水库名	来水 频率/%	发电破坏 的旬数	发电量/(亿 kW·h)		
				方案 1	方案 2	方案 3
1	二滩	98.0	0	42.7	42.7	42.7
2	溪洛渡	98.0	0	151.3	156.6	157.4
3	向家坝	98.0	0	74.3	76.8	77.5
4	紫坪铺	93.9	0	6.8	6.8	6.8
5	瀑布沟	98.0	0	35.8	35.8	35.8
6	亭子口	95.9	7	2.8	2.8	2.8
7	构皮滩	98.0	6	8.9	8.9	8.9
8	三峡	98.0	2	126.1	120	121.1
合计				448.6	450.3	453

3 种调度方案下汛末水库的蓄水开始与结束时间见表 5。按方案 1 进行联合调度时,二滩、紫坪铺、瀑

布沟水库在 9 月中旬末水库已经蓄满,而三峡水库在 9 月中旬末开始蓄水,所以对三峡水库的蓄满没有影响。亭子口水库由于来水少,蓄水时期有 7 个时段发电受到影响,到汛末本身不能蓄满;构皮滩水库虽然在 10 月下旬能够蓄满,但在蓄水过程中有 6 个时段发电。因此,在研究不影响三峡水库蓄水时,不考虑亭子口水库和构皮滩水库。三峡水库按方案 1 进行调度时,到 10 月下旬末水库不能蓄满。

表 5 各方案下汛末水库的蓄水开始与结束时间

水库名	来水 频率/%	蓄水开始时间		蓄满时间		
		方案 1	方案 2、3	方案 1	方案 2	方案 3
二滩	98.0	9 月上旬	9 月上旬	9 月中末	9 月中末	9 月中末
溪洛渡	98.0	9 月中旬	8 月下旬	9 月下旬	9 月中末	9 月中末
向家坝	98.0	9 月中旬	8 月中旬	10 月上旬	9 月上旬	8 月中末
紫坪铺	93.9	9 月中旬	9 月中旬	9 月中末	9 月中末	9 月中末
瀑布沟	98.0	9 月上旬	9 月上旬	9 月中末	9 月中末	9 月中末
亭子口	95.9	9 月中旬	9 月中旬	未蓄满	未蓄满	未蓄满
构皮滩	98.0	7 月下旬	7 月下旬	10 月下旬	10 月下旬	10 月下旬
三峡	98.0	9 月下旬	9 月下旬	未蓄满	10 月下旬	10 月下旬

根据以上分析,参与蓄水分配的上游水库为溪洛渡和向家坝水库。由表 3 可以看出,三峡水库需要上游 2 个水电站增加发电水量的分配率分别为 2/3 和 1/3。运用上游水库群提前蓄水量的合理配置方法,溪洛渡和向家坝水库提前蓄水量和蓄水时间见图 4 和图 5。

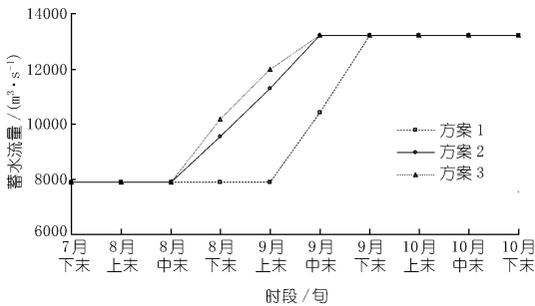


图 4 汛末溪洛渡水库蓄水过程

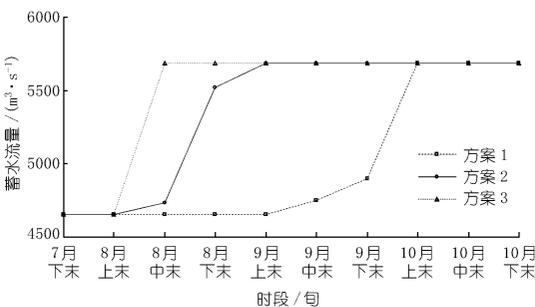


图 5 汛末向家坝水库蓄水过程

从图 4 可以看出,方案 1 为晚蓄方案,方案 3 为早蓄方案,方案 2 介于两者之间。为了保证三峡水库汛

末蓄满,溪洛渡水库需提前 2 个旬开始蓄水,即从原来的 9 月中旬旬初蓄水(方案 1)提前至 8 月下旬旬初(方案 2 和方案 3),蓄满时间也较方案 1 提前 1 旬。溪洛渡水库按方案 2 进行调度,与方案 3 的蓄满时间相同,而对应的蓄水位较方案 3 要低,有利于防洪,因此,基于水能价值的溪洛渡水库提前蓄水方案,在提前 2 旬蓄水的条件下,可保证三峡水库汛末蓄满。

图 5 为向家坝水库的蓄水过程,方案 1 为晚蓄方案,方案 3 为早蓄方案,方案 2 介于两者之间。为了满足三峡水库汛末蓄满,向家坝水库需提前 3 个旬开始蓄水,即从原来的 9 月中旬旬初蓄水(方案 1)提前至 8 月中旬旬初(方案 2 和方案 3)。向家坝水库按方案 2 调度时蓄满时间较方案 1 提前了 3 旬,而按方案 3 调度时,蓄满时间较方案 1 提前了 4 旬,按方案 2 进行调度时,较方案 3 的蓄满时间提前了 1 旬,而同时对应的蓄水位较方案 3 要低,有利于防洪。因此,依据水能价值分析,向家坝水库提前 3 旬蓄水分配,可确保三峡水库汛末蓄满。

三峡水库按 3 种调度方案计算出的汛末水库蓄水过程见图 6。由图 6 可知,方案 2 与方案 3 的蓄满时间相同,而同时对应的蓄水位较方案 3 要低,有利于防洪,因此,为了保证三峡水库 10 月下旬末蓄满,溪洛渡水库需提前 2 个旬开始蓄水(见图 4),向家坝水库需提前 3 个旬开始蓄水(见图 5),三峡水库蓄水开始时间不需要提前,以防防洪安全。

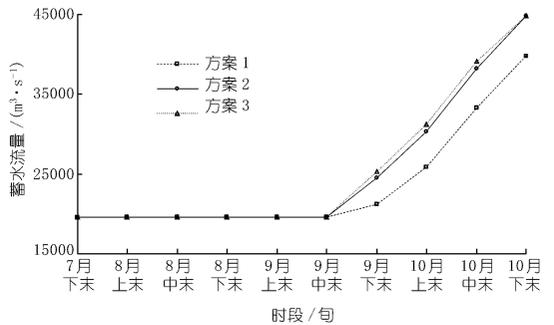


图 6 汛末三峡水库蓄水过程

### 5 结语

针对同一流域水文同步性导致水库之间出现竞争性蓄水问题,本文提出了不影响三峡水库蓄水的上游水库群蓄水分配方法,得出如下结论。

(1) 三峡水库遭遇特枯水年份是由于上游金沙江和各支流均出现枯水而共同造成的,梯级间按从上游至下游依次对水库进行单独优化调度,每一级水库的入库流量为其上级水库调蓄后的下泄量加上区间流量,各水库按各自承担的综合利用任务和调度要求运

行调度,求得三峡水库受上游水库的影响的汛末水库蓄水过程。

(2) 根据三峡水库及其上游水库群联合调度结果,确定上游各水库单位流量的直接利润率,即直接水能价值。水电站各旬的直接水能价值与平均水头是一致的,由于汛期水库维持在汛限水位运行,水库汛期的水能价值明显低于水库非汛期的水能价值。

(3) 由于上游水库的泄流量还可被下游水库利用,各水电站总的水能价值为该水电站直接水能价值与下游有水力联系的水电站的直接水能价值之和。从各水库的总价值均值来看,二滩水电站的总价值最大,亭子口水电站的总价值最小。由于水库汛期的入库流量变化幅度大,水电站汛期的总价值方差系数大于水库非汛期的,总的来说,各水电站的水能价值方差系数均较小,最大值为 0.11。

(4) 由于各水电站的水能价值方差系数均较小,可以忽略水能价值变化的影响,以其均值作为蓄水分配的依据,运用各水电厂总价值与全梯级总价值的比值,作为各水电站发电流量的分配率,确定各水库蓄水

的时间分配过程。水库联合调度结果表明,该分配方法是合理、有效的。

水库汛末提前蓄水问题涉及面广,影响因素多,是一个复杂的多目标动态控制问题,如何利用流域洪水资料、洪水预报信息动态控制汛末蓄水水位,最大程度地减少水库群防洪风险,还有待进一步系统深入的研究。

#### 参考文献:

- [1] 张金锋,刘联兵,冯雄波.浅谈极端气候条件下长江流域水资源配置[J].人民长江,2011,42(18).
- [2] 张远东,魏加华.长江上游径流变化及其对三峡工程的影响研究[J].地学前沿,2010,17(6).
- [3] 王渺林.长江上游流域径流变化[J].水土保持研究,2007,14(5).
- [4] 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).
- [5] 陈进.长江流域大型水库群统一蓄水问题探讨[J].中国水利,2010,8.

(编辑:常汉生)

## Analysis on water storage plan of upstream reservoir group on the premise of ensuring impoundment of Three Gorges Reservoir

FU Xiang<sup>1</sup>, LI Anqiang<sup>2</sup>, SHI Ping<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Department of Planning and Design, Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The smooth impoundment of Three Gorges Reservoir at the end of flood season has important significance for the water use safety in the mid-lower Yangtze River. Because a lot of cascade reservoirs in the upstream of Three Gorges Reservoir also begin to store water at the end of flood season, the competitive water storage with Three Gorges Reservoir appears. In order to guarantee the smooth impoundment of Three Gorges Reservoir and the largest power generation benefit of upstream hydropower stations, on the basis of analyzing the influence of water storage of upstream reservoirs at the end of flood season on the impoundment of Three Gorges Reservoir and according to the principle of hydro-energy value, on the premise of ensuring the impoundment of Three Gorges Reservoir, the water storage method of upstream reservoirs at the end of flood season is put forward.

**Key words:** competitive water storage; hydro-energy value; stored water allocation method; upper Yangtze River; Three Gorges Reservoir

· 简 讯 ·

### 第五届“长江委重大成就奖”揭晓

长江水利委员会重大成就奖设立于2003年,分为专业技术和经营管理两个类别,每两年评选一次,重点奖励为治江事业和长江委经济发展作出重大贡献的委属单位专业技术人才和经营管理人才。为贯彻落实党的“十八大”精神和国家中长期人才发展规划纲要精神,深入推进实施科技兴委、人才强委战略,积极营造尊重劳动、尊重知识、尊重人才、尊重创造的良好

氛围,根据《长江水利委员会治江高级人才计划》的规定,长江委于2012年底开展了第五届“长江委重大成就奖”评选活动。经单位推荐、评审委员会评审、长江委党组研究,授予汪在芹、陈肃利、万成炎、何晓东、郭照灵、熊文、周少林等7位同志“长江水利委员会重大成就奖”荣誉称号。

(长江)