

文章编号:1001-4179(2018)03-0015-08

三峡水库洪水资源利用 I :调度方式和效益分析

胡向阳¹, 邹强¹, 周曼²

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 中国长江三峡集团公司 三峡枢纽管理局, 湖北 宜昌 443133)

摘要:三峡水库试验性蓄水以来的调度运行实践表明,汛期对中小洪水实施滞洪调度,既减轻长江中下游防洪压力,又提升了三峡水库洪水资源利用水平。为了提升三峡水库洪水资源利用水平,针对30 000~55 000 m³/s的水库来水进行了洪水资源利用研究。通过研究,提出了洪水资源利用的基本原则和控制条件,分析了洪水资源利用启动时机和预报预泄条件,制定了三峡水库洪水资源利用调度规则,分析了洪水资源利用的防洪影响和发电效益。同时考虑到洪水预报误差、预见期、上游水库调蓄作用的影响,开展了2012年洪水资源利用实例分析。研究还定量明确了三峡水库洪水资源利用的调度方式和效益分析,研究结果对于发挥三峡水库综合利用效益具有重要的理论意义和良好的推广应用价值。

关键词:洪水资源利用;调度方式;预报预泄;效益分析;三峡水库

中图法分类号:TV697.12

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.03.003

1 研究背景

三峡工程是治理和开发长江的关键性骨干工程,具有防洪、发电、航运、供水、生态等巨大综合效益。但近年来长江上游径流量出现减少的现象,2003~2016年,宜昌站多年平均年径流量为4 020亿m³,相较于初步设计采用的多年(1877~1990年)平均年径流量4 510亿m³,减少了490亿m³,约占10.9%。同时,随着上游水库的兴建,径流来水过程也发生了较大的变化,虽然枯期的流量有所增加,但受上游水库汛末或汛后蓄水的影响,9~10月减少径流量占同期径流量的20%以上。而宜昌汛期的径流量占年径流量的70%,且多以洪水形式出现,在其余月份则较少^[1]。因此,三峡水库汛期利用洪水资源,不仅能充分发挥工程的综合效益,而且对长江流域水资源配置可以发挥更大的作用^[2]。当然,目前也出现了一些有利于三峡水库利用洪水资源的条件,即:①受上游水库拦蓄、水土保持、河道采砂以及降雨的影响,入库泥沙大幅减少;②

水文预报精度水平提高,水库调度技术提升;③上游控制性水库群基本形成,配合三峡水库对长江中下游进行防洪,增强了三峡水库防洪调度的灵活性^[1]。

以三峡工程初设报告为基础^[3],在三峡水库优化调度方案编制和三峡水库科学调度研究的过程中,针对三峡水库洪水资源利用方式进行了系列研究,主要包括:汛期运行水位上浮、中小洪水调度和汛末提前蓄水等方面的内容^[4]。针对汛期运行水位上浮和汛末提前蓄水,相关研究给出了详细和定量的调度方式^[4-5],但是对于中小洪水调度的调度规则、调度效果以及调度风险等尚需开展具有针对性的定量分析。为此,本次洪水资源利用方式主要是针对中小洪水的调度开展研究。

中小洪水通常为20 a一遇以下的洪水,但是具体流量标准需要结合相应的工程实际来确定。一般来说,根据荆江防洪安全和水电站的满发流量,三峡水库的中小洪水量级界定为30 000~55 000 m³/s^[6]。针对三峡水库中小洪水的调度,不同研究学者开展了具

收稿日期:2017-10-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402202;2016YFC0402209)

作者简介:胡向阳,男,教授级高级工程师,主要从事长江流域综合规划研究。E-mail:huxiangyang@cjwsjy.com.cn

通讯作者:邹强,男,高级工程师,博士,主要从事水库优化调度与洪灾风险分析研究工作。Email:zouqianghust@163.com

体研究。Li X 等研究了三峡水库来水的不确定性^[7]；周新春等基于水文气象预报和水库泄量条件，研究了预报预泄水位控制指标，提出了水库启动预泄的条件以确保防洪安全^[8]；陈桂亚等就三峡水库中小洪水动态控制调度的可行性、必备条件、实施步骤和风险控制进行了详细阐述，并开展了实例研究^[9]；陈炯宏、周研来、刘攀等建立了三峡水库和清江梯级实时动态调度模块，开展了三峡梯级与清江梯级水库群中小洪水实时动态调度研究^[10-12]；周曼、鲍正风等总结了三峡水库优化调度、泥沙优化调度、生态调度和通航能力优化调度的多目标调度，在此基础上，开展了 2008 ~ 2012 年中小洪水调度效益分析^[13-14]；刘攀等研究了三峡水库汛期洪水的分期特性及对洪水资源利用方式的影响^[15]；胡挺等以三峡水库调度方式和特征水位流量分析为基础，拟定了三峡水库中小洪水分级调度规则^[16]；郑守仁探讨了三峡水库洪水资源利用的方式，并就中小洪水调度开展了风险分析和风险对策研究^[5-6]；周建中等针对 25 000 ~ 55 000 m³/s 的入库洪水，构建了面向航运和发电的三峡梯级汛期综合运用模型^[17]。整体来看，上述研究针对三峡水库中小洪水调度的控制指标、综合效益、风险分析进行了一定的研究，奠定了较好的理论基础且提供了技术支撑，但是长江中下游的安全泄量、中下游水的防洪影响等相关数量指标仍值得进一步确定，特别是考虑预报预泄的洪水资源利用调度规则的提取、调度控制条件选定等值得重点关注，考虑上游水库调蓄作用的综合效益需进行全面梳理，而且洪水资源利用的实例分析及其风险分析有必要开展系统的定量研究。

2 特征水位及流量分析

2.1 洪水资源利用控制水位

依据三峡水库优化调度方案^[2]，三峡水库兼顾对城陵矶站的防洪补偿调度按照库水位 155 m 控制，可对城陵矶地区发挥减灾作用，该部分库容的确定综合协调了各个方面的影响因素，比较安全稳妥^[18]。因此，三峡水库对中小洪水进行滞洪调度的最高蓄水位，一般按照不超库水位 155 m 进行控制。

2.2 洪水资源利用控制流量

三峡水库中小洪水的调度目标是控制中游沿线控制站的水位不超警戒水位。沙市站和城陵矶（莲花塘）站的警戒水位分别为 43.00 m 和 32.50 m，保证水位分别为 45.00 m 和 34.40 m。当城陵矶站水位在 32.50 m 时，对应沙市站 43.00 m 的沙市流量约为 42 200 m³/s。通过水位流量关系及近年来的实际调

度，当三峡水库的下泄流量控制在 40 000 ~ 45 000 m³/s 之间时，下游沙市站的水位可以不超警戒水位，城陵矶站的防洪压力也会大大减轻^[16]。当然，中游地区的来水组成复杂、水情多变，为稳妥起见和留有安全裕度，应在警戒水位以下留有一定的空间，三峡水库出库的控制流量一般按不超出 42 000 m³/s 考虑。

2.3 其他因素

（1）预见期。一般来说，对于长江上游 1 ~ 3 d、长江中下游 3 ~ 5 d 预见期的预报具有较高的精度，可为调度提供保障服务。结合目前服务于三峡水库汛期调度的水文预报水平，本次研究主要考虑的是 3 d 的预见期，并适当考虑 5 d 的预见期，同时对不同预见期可能对洪水资源利用产生的影响进行了分析。

（2）预报误差。在实际调度中，水文预报存在着预报误差，会出现预报流量大于或小于实际来水量的情况，这样势必会影响到防洪安全^[19]。依据《水文情报预报规范》（SL250-2000），预报误差的评定标准有确定性系数和许可误差等，且规定洪峰流量的许可误差取实测值的 20%。为了充分考虑到三峡水库入库流量的预报误差，本次研究考虑的预报误差为偏小 20% ~ 偏大 20%。

（3）上游水库调蓄作用。根据金沙江溪洛渡、向家坝水库与三峡水库联合调度的研究成果^[20]，溪洛渡、向家坝水库群配合三峡水库拦蓄洪水，可进一步减少长江中下游分洪量和蓄滞洪区的使用机率，对城陵矶站的防洪补偿控制水位可由 155 m 提高到 158 m。本次也将针对控制水位 158 m 开展具体的研究。

3 三峡水库洪水资源利用调度方式研究

3.1 洪水资源利用调度规则研究

三峡水库洪水资源利用，是以确保防洪安全为前提，科学运用库容，合理有效地利用洪水资源。

（1）洪水资源利用原则^[6,18]。通过近年来的调度实践，认为三峡水库洪水资源利用应当满足以下条件：① 根据实时雨水情和预测预报，尚不需要对荆江或城陵矶进行防洪补偿调度时开展。② 确保枢纽安全，不增加中下游的防洪压力。③ 大洪水来临之前将库水位预泄至 145 m。④ 需根据防洪形势预判，相机机动控制。以上条件体现了洪水资源利用的 4 个属性，即启动条件、防洪风险、预报预泄和相机调度。

（2）洪水资源利用控制条件。① 荆江和城陵矶站的水位。汛期洪水资源利用，需在大流量洪水到来前实施预泄，将库水位降至 145 m。水库预泄将抬高下游荆江和城陵矶站的水位，为了不增加下游的防洪

压力,需在下游水位位于警戒水位以下时实施。② 三峡水库当前水位。若前期洪水资源利用已蓄水,或前期因防洪要求蓄水,库水位高于 145 m,面临大洪水前需预泄降低库水位至 145 m。库水位越高,需预泄水量越大,预泄将抬高下游水位、增加下游的防洪压力。为控制防洪风险,需充分考虑水库当前水位的防洪安全影响。③ 预见期内三峡水库来水。预报期的来水量将影响大洪水来临前的预泄空间。只有在预报期内三峡水库来水较小,在下泄流量控制范围内将高于 145 m 的水量安全下泄时,方可实施洪水资源的利用调度。

3.2 洪水资源利用启动时机和预报预泄

通过特征水位及流量分析,拟定洪水资源利用的调度理念为:当沙市及城陵矶站水位低于警戒水位时,三峡水库可在预见期以内将来水量和水库汛限水位以上的水量在安全泄量以内下泄时,方可实施洪水资源利用调度;当预报预见期内来水量和水库汛限水位以上的水量将超过安全泄量时,在安全泄量以内加泄水量,将水位降至汛限水位。

3.2.1 启动时机

沙市及城陵矶站低于警戒水位是实施洪水资源利用调度的前提条件。当预报沙市或城陵矶站水位高于警戒水位时,停止实施洪水资源利用,并在控制沙市及城陵矶站水位不超警戒水位的情况下加大泄水量。亦即当沙市及城陵矶站水位在警戒水位以下时,预见期内的三峡水库来水量与水库高于汛限水位水量之和,其在预见期内的平均流量 Q_{ave} 小于判别流量 Q_{dis} ,方可开始实施洪水资源利用调度。

(1) 预见期的平均流量 Q_{ave} 。预见期的平均流量是指预见期内,三峡水库来水流量的平均值与水库高于汛限水位的水量按预见期预泄至汛限水位的流量,即平均的来水流量和预泄流量之和。为此,预见期平均流量的计算方法为

$$Q_{ave} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Q_t + \frac{1}{T} V/86400 \tag{1}$$

式中, T 为预见期的天数, d ; V 为汛限水位以上的库容,亿 m^3 ; Q_t 为预见期第 t 天的三峡水库入库流量, m^3/s 。

(2) 判别流量 Q_{dis} 。洪水资源利用的设定流量,当预见期的平均流量大于其值时,三峡水库按控制流量出库。判别流量需根据三峡水库的来水情势、中下游防洪形势来综合选取,是洪水资源有效利用的“决策流量”或“目标流量”,在洪水资源利用过程中至关重要,决定着洪水资源有效利用的成败。

(3) 控制流量 Q_{con} 。当预见期的平均流量大于判别流量时,三峡水库洪水资源利用过程中指定的出库流量,也即下游不超警戒水位的安全流量。

3.2.2 预报预泄调度参数

当 Q_{ave} 不小于 Q_{dis} 时,水库需加泄水量以降低库水位,按 Q_{con} 下泄。

3.3 洪水资源利用调度规则

根据洪水资源利用的启动时机和预报预泄措施,结合控制沙市站、城陵矶站水位不超警戒水位的控制条件以及三峡工程运行的控制数据,拟定的三峡水库洪水资源利用调度规则如下。

(1) 当水库水位不高于 155 m 且下游水位位于警戒水位以下时:① 如果预见期内平均流量不超机组满发流量,若此时库水位在 145 m,则按入库流量下泄;若此时库水位高于 145 m,则可按机组最大过流能力下泄。② 如果预见期内平均流量大于机组满发流量但不超过判别流量,按机组满发流量下泄。③ 如果预见期内的平均流量大于判别流量,则按照控制流量下泄。

(2) 当水库水位高于 155 m 或来水量大于 55 000 m^3/s 或下游水位将超警戒水位时,则停止实施洪水资源利用调度,转入防洪调度。

3.4 洪水资源利用方案拟定

三峡水库洪水资源利用调度规则如图 1 所述。根据拟定的汛期洪水资源利用启动条件和预报预泄措施,结合预见期、判别流量和控制流量,分别拟定了洪水资源利用方案,如表 1 所列。

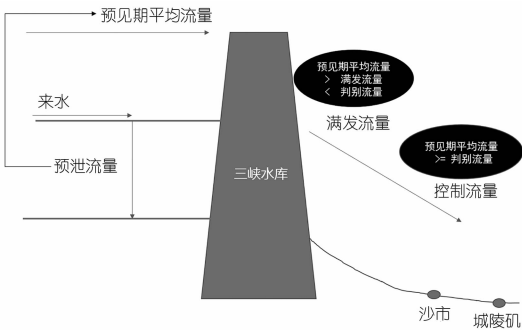


图 1 三峡水库洪水资源利用调度规则示意

Fig.1 Sketch map of flood resources utilization scheduling of TGR

各方案详细描述如下。

(1) a1 为初步设计调度方式。具体为:当入库流量小于 55 000 m^3/s 时,按入库流量下泄;当入库流量大于等于 55 000 m^3/s 时,则按 55 000 m^3/s 下泄。

(2) a2 为不考虑预报预泄的调度方式。具体为:

在库水位不高于 155 m 时,下泄流量按不超 42 000 m³/s 控泄;当入库流量小于 42 000 m³/s 时,按入库流量下泄;当入库流量大于等于 42 000 m³/s 时,按 42 000 m³/s 下泄;在库水位高于 155 m 时,则转入防洪调度。

(3) b1~b7 为三峡水库洪水资源利用调度方式。具体为:考虑三峡水库的预见期,根据洪水资源利用调度规则实施调度。不同方案的区别在于判别流量和控制流量的不同。即:对于 b1,① 在 3 d 预见期内的平均流量不超 30 000 m³/s 的情况下,若此时库水位在 145 m,按入库流量下泄;若此时库水位高于 145 m,可按机组的最大过流能力下泄。② 若 3 d 预见期内的平均流量大于 30 000 m³/s 但不超过 42 000 m³/s,则按 30 000 m³/s 下泄。③ 若 3 d 预见期内的平均流量大于 42 000 m³/s,则按 42 000 m³/s 下泄。

当然,在实时调度中水情、雨情、工情等各种信息复杂多变,在防洪会商决策中通常会穿插拟定 b1~b7 的组合方案,这样就能更体现出中小洪水调度的相机性、机动性。为方便方案的比较,本次在汛期长系列模拟计算中暂且还是采用单一的方案。

表 1 三峡水库洪水资源利用方案

Tab.1 Flood resources utilization schemes of TGR

方案	预见期 $\Delta T/d$	判别流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	控制流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)
a1	初步设计调度方式		
a2	不考虑预报预泄条件的分级控泄方式		
b1	3	42000	42000
b2	3	38000	42000
b3	3	40000	40000
b4	3	40000	42000
b5	3	40000	45000
b6	3	42000	40000
b7	3	45000	45000

4 三峡水库洪水资源利用综合效益分析

4.1 不同洪水资源利用方案的效益分析

基于 1877~2014 年共 138 a 的三峡来水过程,对 6 月 10 日至 9 月 10 日实施洪水资源利用调度,不同洪水资源利用方案的计算结果如表 2 所列。

4.1.1 防洪影响分析

(1) 从表 2 可知:b1~b7 相比 a1、a2,均充分利用了 145~155 m 之间库容的调蓄作用,多年平均发电量分别增加了 3.3 亿~7.6 亿 kW·h 和 1.8 亿~6 亿 kW·h,弃水量减小了 38.1 亿~57.6 亿 m³ 和 32.4 亿~51.8 亿 m³。当然,由于缺乏历年中下游水位过程、区间洪水资料,下面将针对 2012 年进行深入的防洪影响分析。

b1 相比于 a1 和 a2,多年平均发电量分别增加了 1.69% 和 1.26%,弃水量减少了 23.69% 和 21.62%,库水位超过 155 m 的年数没有增加,也没有明显增加下泄流量超过 42 000 m³/s 的洪量,表明因采取了有效的预报预泄措施,均在大洪水来临之前将水位预泄至 145 m,从而避免了对防洪产生影响。b1 最高水位超过 155 m 的年份为 1896,1898,1908,1909,1917,1919,1921,1922,1926,1931,1937,1938,1945,1949,1954,1966,1981 年和 1998 年共 18 a,可以对这些年份的来水过程总结经验、分类评价,在水文预报中一旦出现相似洪水特征时,可事先做出预判并停止洪水资源利用调度,转入防洪调度,以确保防洪安全。

表 2 不同方案发电效益及防洪影响分析

Tab.2 Power benefits and flood control effects under different schemes

方案	平均发电量/ (亿 kW·h)	平均弃水量/ (亿 m ³)	年均下泄流量 超 42000m ³ /s 的洪量/(亿 m ³)	水位超过 155m 年数/ a	年平均 最高水位/ m	最高水位/ m
a1	364.33	217.43	44.85	1	145.78	157.57(1954 年)
a2	365.85	211.67	11.15	18	149.80	165.20(1954 年)
b1	370.48	165.91	11.84	18	151.71	165.20(1954 年)
b2	368.18	179.29	11.17	18	150.83	165.20(1954 年)
b3	370.79	168.25	14.39	21	151.97	165.20(1954 年)
b4	369.29	172.37	11.30	18	151.31	165.20(1954 年)
b5	367.62	176.31	34.14	11	150.54	163.95(1954 年)
b6	371.89	161.00	15.20	27	152.37	165.20(1954 年)
b7	371.05	159.88	36.15	13	151.84	164.68(1954 年)

注:括号中为最高水位所对应的年份。

(2) 由于 b1~b7 的判别流量和控制流量不尽相同,所以防洪影响和发电效益也不尽相同。具体而言:如果判别流量相同,控制流量越大,则表明降低库水位越多,水库的平均最高水位越低,多年调洪超过 155 m 的年份越少,而此时弃水量增加,发电量减少。

如果控制流量相同,判别流量越大,则意味着在预见期内流量操作的空间更大,能更好地利用平均流量在 30 000 m³/s 到判别流量之内的洪水,发电量增加、弃水量减少,多年调洪超过 155 m 的年份不变,均为 18 次,在对防洪具有充分把握的情况下适当拦蓄一定量级的洪水,这在实际调度过程中是具有意义的。

4.1.2 发电效益分析

(1) b1~b7 与 a1 相比,发电量增加的原因如下:较好地利用了 30 000~55 000 m³/s 这部分中小洪水,抬高了三峡水库的水位,增加了发电水头,充分利用了洪水资源。

(2) b1~b7 与 a2 相比,发电量增加的原因如下:① 在没有防洪需求时,充分利用了三峡水库 155 m 以下库容对可能的弃水进行调节,增加了发电流量;②

在洪水资源利用调度的过程中,由于调蓄弃水流量抬高了三峡水库的水位,增加了发电水头,使预想出力增加,因而发电量增加。

4.2 考虑预报误差

(1) 预报流量偏大。表 3 列出了预报流量偏大 20% 和 10% 的调度结果。分析表明:若预报流量偏大,库水位会提前预泄,多年平均最高水位会降低,但也会导致平均发电量减少,发电效益变小,所以精确的水文预报对于增加洪水资源利用的效益非常重要。

表 3 预报流量偏大 20% 和偏大 10% 时的调度结果
Tab.3 Scheduling results when the forecast flow error is 20% and 10% larger

方案	平均发电量/ (亿 kW · h)	平均弃水量/ 亿 m ³	年均下泄流量 超 42000m ³ /s 的洪量/亿 m ³	水位超过 155m 年数/ a	平均最高水位/ m
a1	364.33	217.43	44.85	1	145.78
a2	365.85	211.67	11.15	18	149.80
b1	367.28/368.52	186.01/175.05	11.15/11.17	18/18	150.45/150.95
b2	366.44/367.22	199.22/188.98	11.17/11.17	18/18	150.06/150.37
b3	368.13/369.10	188.53/177.97	13.98/13.98	19/19	151.00/151.34
b4	366.91/367.62	192.70/182.64	11.17/11.17	18/18	150.22/150.66
b5	365.64/366.24	197.22/186.61	28.38/29.38	11/11	149.19/149.70
b6	368.75/369.96	181.16/171.16	13.98/14.06	26/26	151.21/151.68
b7	366.71/368.74	180.66/168.69	31.02/34.76	11/11	150.00/150.93

注:“/”前后分别表示偏大 20% 和偏大 10%。

(2) 预报流量偏小。基于控制防洪风险的角度,以下着重分析预报流量偏小的影响。表 4 分别列出了预报流量偏小 20% 和偏小 10% 时的计算结果。

通过比较表 4 和表 2 可以看出,随着误差的增大,平均发电量会增加,但下泄流量超过 42 000 m³/s 的洪量也会随之增加,调洪水位超过 155 m 的年数也增加,防洪风险增大,而且预报流量偏小 20% 时的防洪风险更大。为此,综合考虑到预报误差对不同方案的影响,需要在安全流量以下预留一定的裕度,以降低防洪的影响。正如 b2,其判别流量为 38 000 m³/s 和控制流量为 42 000 m³/s,即在预判平均流量超过 38 000 m³/s 时就按照 42 000 m³/s 的预泄来消落库水位,可以降低库水位超过 155 m 的风险,也不致增加中下游防洪的影响。当然,此时还需要视下游的防洪形势而定,如果沙市站、城陵矶站的水位已较高,则应通过其下游的沙市站和城陵矶站的水位预报及区间洪水预报,根据预报误差及预见期的不同,甚至可以取判别流量为 35 000 m³/s 来进行机动控制。

(3) 风险控制措施。为减小预报误差对洪水资源利用调度的不利影响,除了在调度过程中实时滚动预报,尽量提高预报精度,并逐步修正预报误差对调度带来的影响以外,在设定判别流量和控制流量时,可以针

对不同的水情适当降低判别流量、提高控制流量,使洪水资源利用的调度方式对预报误差具有更好容错性。

表 4 预报流量偏小 20% 和偏小 10% 时的调度结果
Tab.4 Scheduling results when the forecast flow error is 20% and 10% smaller

方案	平均发电量/ (亿 kW · h)	平均弃水量/ 亿 m ³	年均下泄流量 超 42000m ³ /s 的洪量/亿 m ³	水位超过 155m 年数/ a	平均最高水位/ m
a1	364.33	217.43	44.85	1	145.78
a2	365.85	211.67	11.15	18	149.80
b1	374.60/372.66	149.83/157.29	15.66/13.15	23/21	153.29/152.58
b2	372.27/370.15	161.21/169.43	13.10/16.02	21/22	152.43/152.68
b3	374.35/372.65	152.14/159.76	18/16.02	26/22	153.34/152.68
b4	373.61/371.58	154.67/162.63	14.31/12.57	22/20	152.99/152.19
b5	372.40/369.94	158.53/167.04	36.45/36.94	14/11	152.42/151.39
b6	375.38/373.79	146.93/153.12	19.22/16.86	46/33	153.70/153.12
b7	375.52/373.51	145.51/151.85	35.74/35.64	20/15	153.68/152.84

注:“/”前后分别表示偏小 20% 和偏小 10%。

4.3 考虑预见期

应用 1877 ~ 2014 年共 138 a 的三峡水库来水过程,对 6 月 10 日至 9 月 10 日实施洪水资源利用调度,给出了考虑 5 d 预见期的不同洪水资源利用方案的计算结果,见表 5。

通过比较表 2 与表 5 可知,c1 ~ c7 相比 b1 ~ b7,多年平均最高水位略高,水位超过 155 m 的次数基本相同(在 c7 相比 b7 中,超过 155 m 的年数少),在控制水位 155 m 内没有增加防洪影响,而且 c1 ~ c7 的发电效益均优于 b1 ~ b7。这就表明:提高水文预报预见期对提高水库洪水资源利用效益是有益的,且预见期越长,预报精度提高,对三峡入库和中下游防洪形势预判更具有充分的把握,能够更加灵活地应用到中小洪水的相机调度。

表 5 考虑 5 d 预见期的方案拟定及其调度结果
Tab.5 Scheduling results by considering 5 - day foreseen period

方案	预见期/ d	判别流量/ (m ³ · s ⁻¹)	控制流量/ (m ³ · s ⁻¹)	平均发电量/ (亿 kW · h)	平均弃水量/ 亿 m ³	年均下泄流量 超过 42000m ³ /s 的洪量/亿 m ³	水位超过 155m 的 年数/a	平均最 高水位/ m
a1		初步设计调度方式		364.33	217.43	44.85	1	145.78
a2		不考虑预报预泄条件		365.85	211.67	11.15	18	149.80
c1	5	42000	42000	375.57	145.74	11.66	18	153.28
c2	5	38000	42000	372.49	161.72	11.17	18	151.97
c3	5	40000	40000	375.10	149.98	14.30	21	153.02
c4	5	40000	42000	374.19	152.71	11.17	18	152.69
c5	5	40000	45000	372.89	156.12	30.34	11	152.17
c6	5	42000	40000	376.49	143.21	15.30	27	153.64
c7	5	45000	45000	375.51	143.63	32.31	12	153.92

5 2012 年洪水资源利用调度实例分析

为全面分析洪水资源利用调度的防洪风险,而且

考虑到数据的获取性、完备性,本文以 2012 年的汛期洪水为实例进行研究。

5.1 2012 年三峡水库洪水资源利用效益分析

图 2 和图 3 分别给出了 a1、a2 和 b1 三峡水库的水位过程和流量过程。整体来看,b1 是针对 30 000 ~ 42 000 m³/s 和大于 42 000 m³/s 的入库流量都进行了有效拦蓄,且在不影响中下游防洪的情况下增加了发电量。

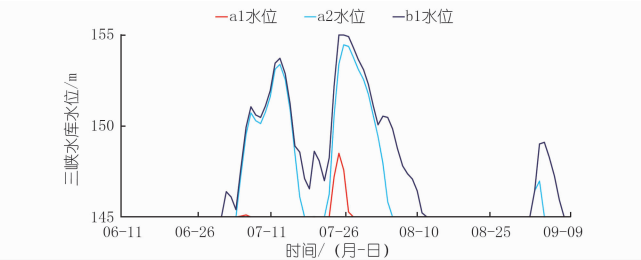


图 2 2012 年三峡水库不同方案的水位过程
Fig. 2 The water level of different schemes of TGR in 2012

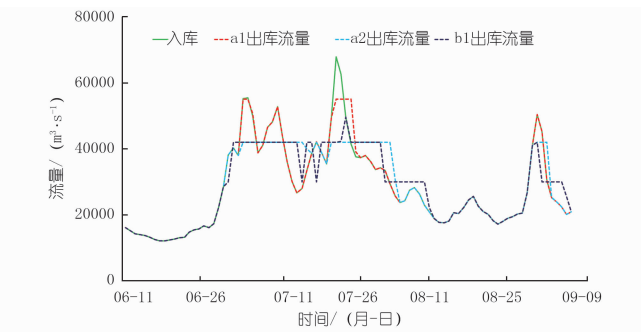


图 3 2012 年三峡水库不同方案的流量过程
Fig. 3 The flow process of different schemes of TGR in 2012

2012 年洪水资源利用调度的计算结果见图 4、5 和表 6,根据计算结果,可以得出如下结论。

(1) 防洪影响方面。a1 的沙市站、城陵矶站的最高水位分别为 43.74 m 和 33.47 m,与 b1 ~ b7 相比,a1 均有所降低。

(2) 发电效益方面。与 a1、a2 相比,b1 ~ b7 的发电量均得到了增加,弃水量均有所减小。

(3) 风险对策措施。2012 年 b1 ~ b7 均降低了沙市站和城陵矶站的水位,但也出现了略高于警戒水位的情况,如 2012 年 b3 和 b6 方案中沙市站超过了警戒水位。分析表明,当遭遇上下游来水均较大且持续时间较长时,应密切关注防洪风险。在实际调度方案拟定时,应兼顾到水库和中下游的防洪形势,在预报有把握的情况下可相机调整风险的对策措施,既不加重当前的防洪风险,也要对后续的防洪风险做出预判。

当然,实际洪水资源利用均不是在整个汛期,而是有条件地相机调度,因此应提早进行风险防范,以防洪安全为首。具体而言,在实际调度过程中,应结合防洪

形势来相机调整相应的判别流量和控制流量,当预报沙市站或城陵矶站的水位高于警戒水位时,或预见期内的平均流量大于判别流量时,应停止实施洪水资源的利用,并在控制沙市站及城陵矶站的水位不超警戒水位的前提下,适时增加泄水量以降低水位,在大洪水来临之前,则应尽早将水位预泄至 145 m,避免对防洪产生影响。

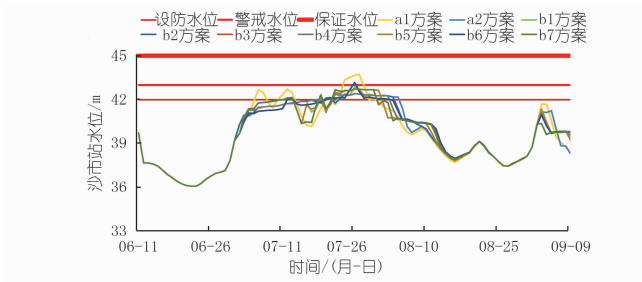


图 4 不同方案下沙市站 2012 年水位过程
Fig. 4 The water level process of different schemes at Shashi station in 2012

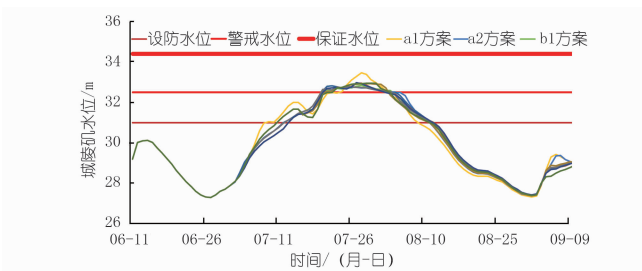


图 5 不同方案下城陵矶站 2012 年水位过程
Fig. 5 The water level process of different schemes at Chenglingji station in 2012

表 6 2012 年洪水资源利用分析结果

Tab. 6 Results of flood resources utilization in 2012

方案	发电量/ (亿 kW·h)	弃水量/ 亿 m ³	下泄流量超过 42000m ³ /s 的洪量/亿 m ³	最高库 水位/m	最大下泄 流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	沙市站 最高水位/ m	城陵矶站 最高水位/ m
a1	366.93	381.54	111.46	148.49	55000	43.74	33.47
a2	372.21	372.73	0	154.46	42000	42.41	32.83
b1	378.62	327.38	6.74	155.00	49600	42.85	32.86
b2	377.01	341.11	0	154.46	42000	42.41	32.83
b3	381.13	322.45	20.57	155.00	49600	43.18	32.96
b4	378.63	378.63	0	154.82	42000	42.41	32.77
b5	378.63	328.49	0	154.82	42000	42.73	32.93
b6	381.46	321.24	20.57	155.18	49600	43.18	32.97
b7	378.84	317.52	59.62	153.67	45000	42.73	32.94

5.2 考虑预报误差的 2012 年洪水资源利用

表 7 为 2012 年预报误差偏小 20% ~ 偏大 20% 时的计算结果,与长系列计算分析的表 3 和表 4 的结论基本一致。其中较特别的是若预报流量偏小 20%,虽然发电效益增加,但此时水库的最高水位会超 155 m,沙市站的最高水位为 43.39 m(超过警戒水位 0.39

m),城陵矶站的最高水位为 33.04 m(超过警戒水位 0.54 m),会对防洪产生不利的影响。

风险对策措施。要尽量提高预报精度,并逐步修正预报误差对调度带来的影响,在设定判别流量和控制流量时,可针对不同防洪形势进行相机调度,适当降低判别流量值,以使洪水资源利用调度方式对预报误差具有更好的容错性。

表 7 考虑预报误差的 2012 年洪水资源利用

Tab.7 Results of flood resources utilization by considering the forecast flow errors in 2012

方案	发电量/ (亿 kW·h)	弃水量/ (亿 m ³)	水库最高 水位/m	最大出库流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	沙市站最高 水位/m	城陵矶站 最高水位/m
a1	366.93	381.54	148.49	55000	43.74	33.47
a2	372.21	372.73	154.46	42000	42.41	32.83
b1	378.62	327.38	155.00	49600	42.85	32.86
b1(偏小 10%)	384.09	297.05	155.00	49600	42.87	32.89
b1(偏小 20%)	385.40	290.48	155.97	55000	43.39	33.04
b1(偏大 10%)	379.23	330.74	154.46	42000	42.41	32.83
b1(偏大 20%)	375.20	351.48	154.46	42000	42.41	32.83

5.3 考虑上游调蓄的 2012 年洪水资源利用

考虑到溪洛渡、向家坝上游水库调蓄的影响,三峡水库对城陵矶站的防洪补偿调度控制水位可由 155 m 提高至 158 m^[20]。本文考虑到上游水库,开展对 2012 年的洪水资源利用计算,即洪水资源利用控制水位为 158 m,预见期为 5 d,而判别流量和控制流量仍然与 b1 一致,取为 42 000 m³/s,方案号为 d1。不同计算方案的 2012 年洪水资源利用计算结果见表 8,不同方案下的沙市站、城陵矶站水位过程分别见图 6 和图 7。

表 8 考虑上游调蓄作用的 2012 年洪水资源利用

Tab.8 Results of flood resources utilization by considering upstream reservoirs in 2012

方案	发电量/ (亿 kW·h)	弃水量/ (亿 m ³)	水库最高 水位/m	最大出库流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	沙市站最高 水位/m	城陵矶站 最高水位/m
a1	366.93	381.54	148.49	55000	43.74	33.47
a2	372.21	372.73	154.46	42000	42.41	32.83
b1	378.62	327.38	155.00	49600	42.85	32.86
d1	389.14	282.01	155.69	42000	42.41	32.76

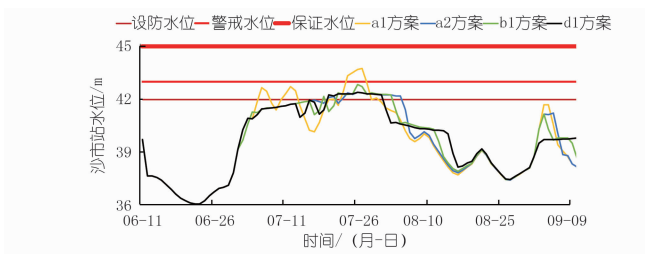


图 6 考虑上游调蓄的沙市站 2012 年水位过程

Fig.6 The water level process of Shashi station in 2012 by considering upstream reservoirs regulation

分析结果表明,考虑到上游水库调蓄时,与 155 m 相比,控制水位在 158 m 时发电效益更好,而且在一定程度上降低了沙市站和城陵矶站的最高水位,这对长江中下游的防洪非常有利。

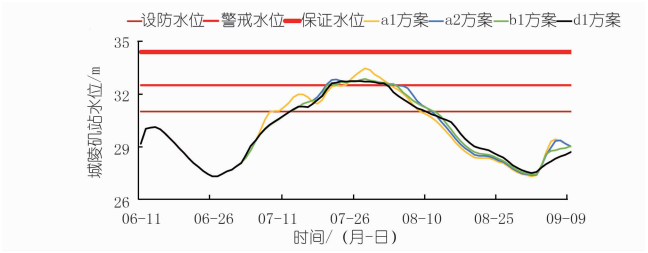


图 7 考虑上游调蓄的城陵矶站 2012 年水位过程

Fig.7 The water level process of Chenglingji station in 2012 by considering upstream reservoirs regulation

6 结论

本文开展了三峡水库洪水资源利用调度方式和效益分析研究,探究了洪水资源利用控制条件,分析了洪水资源利用启动时机和预报预泄措施,制定了洪水资源利用调度规则,即考虑到预报预泄条件的分级控制方式。与以往研究的不同点主要表现在以下几个方面。

(1) 提出了以“判别流量”作为洪水资源利用调度判别条件,即根据水库来水情势、中下游防洪形势进行综合选取的“决策流量”或“目标流量”,是有效控制洪水资源利用调度风险的关键措施。

(2) 以 1877~2014 年长系列三峡水库来水资料为基础,开展了洪水资源利用的防洪影响和发电效益分析。

(3) 开展了延长水文预报预见期、提高水文预报精度和考虑上游调蓄作用的洪水资源利用效益分析,对于三峡水库防洪安全和发挥水库综合利用效益非常有利。

(4) 开展了 2012 年三峡水库洪水资源利用实例研究,并针对防洪影响开展了定量计算和分析比较。

当然,本文通过中小洪水调度探索性的研究,试图为合理利用洪水资源提供一些新的认识,同时也说明还需在实践中不断检验和调整,以适应变化条件下三峡水库综合利用效益的最优发挥。另外,三峡水库洪水资源利用风险是多方面的,包括水文预报误差、上下游防洪形势、洪水资源利用后遇大洪水等方面的防洪风险,以及下游堤防、航运、库区移民、泥沙等风险,本文下篇将针对各项风险进行综合研究,并提出行之有效的风险对策措施。

参考文献:

[1] 长江勘测规划设计研究院. 长江流域洪水资源利用及其减小风险

- 的对策[R]. 武汉:长江勘测规划设计研究院,2015.
- [2] 邹强,鲁军,喻杉,等. 长江流域洪水资源利用评价研究[J]. 水资源研究,2015,4(5):432-442.
- [3] 长江水利委员会. 长江三峡水利枢纽初步设计报告[R]. 武汉:长江水利委员会,1992.
- [4] 长江水利委员会. 三峡水库优化调度方案[R]. 武汉:长江水利委员会,2009.
- [5] 郑守仁. 三峡工程利用洪水资源与发挥综合效益问题探讨[J]. 人民长江,2013,15(8):1-6.
- [6] 郑守仁. 三峡水库实施中小洪水调度风险分析及对策探讨[J]. 人民长江,2015,46(5):7-12.
- [7] Xiang Li, Shenglian Guo, Pan Liu, et al. Dynamic control of flood limited water level for reservoir operation by considering inflow uncertainty[J]. Journal of Hydrology, 2010(391):124-132.
- [8] 周新春,闵要武,冯宝飞,等. 大型水库中小洪水实时预报调度技术在三峡水库中的应用[J]. 水文,2011,31(S1):180-184.
- [9] 陈桂亚,郭生练. 水库汛期中小洪水动态调度方法与实践[J]. 水力发电学报,2012,31(4):22-27.
- [10] Jionghong Chen, Shenglian Guo, Yu Li, et al. Joint operation and dynamic control of flood limiting water levels for cascade reservoirs[J]. Water Resource Manage, 2013(27):749-763.
- [11] 周研来,郭生练,刘德地,等. 三峡梯级与清江梯级水库群中小洪水实时动态调度[J]. 水力发电学报,2013,32(3):20-26,46.
- [12] Yanlai Zhou, Shenglian Guo, Pan Liu, et al. Joint operation and dynamic control of flood limiting water levels for mixed cascade reservoir systems[J]. Journal of Hydrology, 2014(519):248-257.
- [13] 周曼,徐涛. 三峡水利枢纽多目标优化调度及其综合效益分析[J]. 水力发电学报,2014,33(3):55-60.
- [14] 鲍正风,李长春,王祥. 长江上游流域水文条件变化下的三峡水库综合运用[J]. 水利水电技术,2016,47(4):98-103.
- [15] Pan Liu, Liping Li, Shenglian Guo, et al. Optimal design of seasonal flood limited water levels and its application for the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydrology, 2015(527):1045-1053.
- [16] 胡挺,周曼,王海,等. 三峡水库中小洪水分级调度规则研究[J]. 水力发电学报,2015,34(4):1-7.
- [17] 周建中,李纯龙,陈芳,等. 面向航运和发电的三峡梯级汛期综合运用[J]. 水利学报,2017,48(1):31-40.
- [18] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 三峡水库汛期中小洪水滞洪调度预案[R]. 武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司,2011.
- [19] Baowei Yan, Shenglian Guo, Lu Chen. Estimation of reservoir flood control operation risks with considering inflow forecasting errors[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014,28(2):359-368.
- [20] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 金沙江溪洛渡、向家坝水库与三峡水库联合调度研究[R]. 武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司,2015.
- [21] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 三峡水库运用对中游超额洪量及蓄滞洪区运用机率影响研究[R]. 武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司,2014.

(编辑:赵秋云)

Scheduling and benefit analysis on flood resources utilization of Three Gorges Reservoir

HU Xiangyang¹, ZOU Qiang¹, ZHOU Man²

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China; 2. China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, China)

Abstract: The scheduling operation practices since the trial water impoundment of the Three Gorges Reservoir show that, implementing schedule for medium and small-sized floods during flood season not only release the flood control pressure to the lower reaches, but also improve flood utilization level of TGR. To promote the utilization of flood resources, a comprehensive research was conducted on the utilization scheduling of flood resources for inflows between 30000 ~ 55000 m³/s in 2012. Firstly, the basic principles and control conditions of flood resources utilization were studied; then the starting time and the pre-discharge conditions were analyzed; next, the scheduling rules were formulated and its impact on the flood control and generation were analyzed. Finally, by considering the influences of flood forecasting errors, forecasting period and the regulation effect of upstream reservoirs, we carry out a case analysis for the TGR in 2012. The study quantifies the scheduling and benefit of flood resources utilization of TGR.

Key words: flood resources utilization; reservoir scheduling; forecast and pre-discharge; benefit analysis; Three Gorges Reservoir