

Review of Reservoirs Impounding Operation in Middle and Upper Yangtze River

Yinghai Li^{1,2,3}, Qi Zhang¹, Xiaohua Dong^{1,2*}, Jiali Guo^{1,2,3}, Wei Lin¹

¹College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang Hubei

²Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan Hubei

³Hubei Key Laboratory of Cascaded Hydropower Stations Operation & Control, China Three Gorges University, Yichang Hubei

Email: liyinghai@ctgu.edu.cn, *xhdong@ctgu.edu.cn

Received: Oct. 1st, 2016; accepted: Oct. 23rd, 2016; published: Oct. 26th, 2016

Copyright © 2016 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

Abstract

With the development and utilization of water resources in the middle and upper reaches of Yangtze River, the number of large reservoirs is increasing, and the hydraulic connection between reservoirs becomes more closely. Therefore, the conflicts of water resources utilization and control of Yangtze River basin in the impounding recession period become increasingly prominent. This paper summarizes the current status of Yangtze River basin's reservoirs construction, analyzes related problems of reservoirs impounding operation in flood season period, reviews and prospects related research results and fields. This paper can provide references for further study of the reservoirs joint operation of Yangtze River.

Keywords

Reservoirs in the Middle and Upper Reaches of Yangtze River, Three Gorges Reservoir, Impounding in Flood Recession Period, Joint Operation

长江中上游水库群汛末蓄水调度研究综述

李英海^{1,2,3}, 张琪¹, 董晓华^{1,2*}, 郭家力^{1,2,3}, 林伟¹

¹三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌

作者简介: 李英海(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 流域水资源优化配置。

*通讯作者。

²水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉

³三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌

Email: liyinghai@ctgu.edu.cn, *xhdong@ctgu.edu.cn

收稿日期: 2016年10月1日; 录用日期: 2016年10月23日; 发布日期: 2016年10月26日

摘要

随着长江中上游流域水资源的不断开发利用, 大型水库数量逐渐增多, 水库间联系日益密切, 汛末蓄水期流域水资源调控与利用矛盾日益突出。本文总结了当前长江中上游流域水库群建设情况, 分析了水库群汛末集中蓄水带来的相关问题, 综述并展望了以三峡水库为核心的长江中上游水库群汛末蓄水调度相关研究成果与方向, 以期对长江中上游流域水库群联合调度的进一步深入研究提供参考。

关键词

长江中上游水库群, 三峡水库, 汛末蓄水, 联合调度

1. 引言

近年来, 随着长江流域水资源的持续开发利用, 长江中上游水利工程不断兴建, 大型水库数量逐年增加。为保证汛期防洪安全, 各水库必须在汛前腾空库容, 按汛限水位运行, 以备有足够的空间来抵御汛期洪水; 而在汛后枯水期, 为了满足兴利要求, 各水库又必须在汛末完成从汛限水位到正常蓄水位的蓄水任务[1], 从而导致各水库竞争性蓄水, 下游水库来水量减少, 水库无法蓄满的机率增加, 各水库在蓄水期内水资源利用矛盾突出。此外, 三峡水库作为长江上游水资源调控的关键工程, 如果三峡水库长期无法实现蓄满, 不仅影响水库自身兴利目标的实现, 而且还会影响长江中下游地区的抗旱补水、航运和生态等方面的正常需求。因此, 为了长江中上游水库群充分发挥其综合运行效益, 更加合理有效的利用长江水资源, 流域管理部门和各水库运行机构应共同制定出合理、统一的流域水库群汛末蓄水联合调度方案, 使得水库群以及控制的长江中下游流域获得最大的综合效益。

2. 长江中上游水库群建设及调度运行概况

2.1. 长江中上游大型水库群建设

长江流域水资源丰富, 中上游水库群共同承担着防洪、发电、航运、灌溉和工业与城镇供水以及渔业、生态环境、排冲砂、旅游等多重任务[2]。目前, 长江中上游主要干支流的大型水库已建 23 座, 在建 17 座, 拟建 63 座, 主要控制性水库如表 1 所示, 它们之间以串联、并联或混联的方式相互联系, 各河段、各水库间水力联系紧密, 上游干、支流水库的蓄放水时机和调度方式将直接对下游水库正常运行有控制性作用。例如, 位于长江中上游的金沙江干流, 乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝四座水库组成的梯级水库群调节能力巨大, 其运行方式在很大程度上影响其下游水库的径流大小和来水分布[3]。另外, 长江中游的第一大支流清江流域水资源总量丰富, 其中水布垭、隔河岩两座水库分属多年调节和年调节水库, 如果能够配合长江上游干流水库群联合调度, 在枯水期将进一步对长江中下游用水起到积极作用, 也在很大程度上提高了长江流域水资源的利用效率[4]。因此为降低上游水库对下游水库蓄水和长江中下游水资源利用的影响, 以及合理、有效利用流域水资源, 各水库应考虑在防洪、兴利目标实现的基础上, 从全流域出发, 根据水库群调度原则, 制定出合理、有效、统一的水库群联合蓄水调度方案。

长江中上游部分大型水库分布图, 如图 1 所示。

Table 1. The construction of control reservoirs in the middle and upper reaches of the Yangtze River
表 1. 长江中上游控制性水库建设情况

水系名称	水库名称	正常蓄水位 H/m	兴利库容 $V_{兴}/$ 亿 m^3	防洪库容 $V_{防洪}/$ 亿 m^3	总库容 $V_{总}/$ 亿 m^3	开发任务	建设情况
雅砻江	锦屏一级	1880	49.10	16	77.65	发电、防洪	已建
	二滩	1200	33.70	9	58	发电	已建
金沙江	乌东德	975	26	14.5	76	发电、防洪	在建
	白鹤滩	820	104	75	206	发电、防洪	在建
	溪洛渡	600	64.60	46.50	126.70	发电、防洪	已建
	向家坝	380	9.03	9.03	51.63	发电、防洪	已建
岷江 (含大渡河)	瀑布沟	850	38.82	10.56	53.90	发电、防洪	已建
	紫坪铺	877	7.740	1.67	11.12	发电、防洪、灌溉、供水	已建
嘉陵江	宝珠寺	588	13.40	2.80	25.50	发电、防洪	已建
	亭子口	458	17.50	10.60	41.16	发电、防洪、灌溉、供水	已建
	洪家渡	1140	33.61		49.47	发电	已建
乌江	乌江渡	760	13.50		21.40	发电	已建
	构皮滩	630	29.02	4	64.54	发电	已建
干流	三峡	175	165	221.50	393	发电、防洪、航运	已建
	葛洲坝	66	7.11		15.80	发电	已建
	水布垭	400	43.12	5	45.80	发电、防洪、航运	已建
清江	隔河岩	200	22	5	37.7	发电、防洪、航运	已建
	高坝洲	80			4.30	发电、航运	已建
合计			677.25	431.16	1359.67		

2.2. 长江中上游水库群调度运行方式

水库群联合调度是指各个相互联系的水库，为共同实现防洪和兴利目标，对各水库运行调度方案进行统一规划[5]。在进行水库群联合调度时，除了满足各水库单独承担的任务外，还应综合考虑流域水文特征及各个水库间的相互关系[6]，在运行过程中能够充分配合，使得水库群系统获得最大效益。长江中上游水库群主要考虑以下运行调度方式。

1) 防洪调度[7]-[9]。长江中下游地区是长江流域防护任务的核心地区，三峡水库投入运行后，长江中下游地区的防洪能力有了极大提高。长江流域的汛期一般在 6~9 月，根据长江流域各水库以及中下游河段防洪设计标准，汛期上游梯级水库群应预留适当的防洪库容，一方面保证自身的防洪安全，另一方面配合三峡水库防洪调度，减少三峡水库的入库流量，为其减少防洪压力，并分担长江中下游地区的防洪任务。

2) 发电调度[10]。长江中上游控制性水库在满足流域防洪任务的基础上，还需满足发电要求。一般而言，水库遵循汛期水位控制在汛限水位，汛后水位回蓄至正常蓄水位，由于汛期来水量大，为了保证流域防洪安全，水库产生大量弃水，造成电能损失。据统计，三峡水电站平均每年由于弃水损失电量 31.9 亿 kw.h，长江上游水库群年均总损失电量估算约为 870 亿 kw.h [11]。因此，为增加发电效益，应在保证防洪安全的前提下，上下游水库群之间协调蓄放水次序，使得水电站群尽可能少弃水多发电。在枯水期，考虑到长江中下游航运、供水和

生态需求, 梯级水库群可在保障负荷要求的条件下, 采用耗能最小的方式进行水库群联合调度, 满足梯级水库群在运行过程中总水头最大化。

3) 航运调度[12]。长江流域水库群的修建, 阻断了天然航道, 对长江航运有着重大影响。长江干支流通航里程达 6.7 万 km, 是主要的航运路线, 2005 年长江流域航道货运量达到 14.6 亿吨[13], 可见长江航运事业发展迅速。特别地, 流域上游水库群在汛末蓄水期大量蓄水, 使得下游来水量明显减少, 为了满足下游航运正常运行, 上游各水库应在枯水期增加下泄流量, 改善航运条件。

4) 供水调度[14]。长江中上游水库群实施联合调度, 统一管理, 需考虑下游枯水期水位、流量以满足灌溉和生活、工业用水要求。长江中上游水库群应在 1~2 月适当增加下泄流量, 及时对长江下游地区进行补偿调节, 缓解下游水量不足的状态; 9~10 月汛末蓄水期间, 应适当延长蓄水时间, 保证下泄流量, 避免由于水库群集中蓄水对长江中下游供水造成的破坏。目前三峡水库调度运行按 9 月最小下泄流量不低于 8000~10000 m³/s, 10 月上旬、中旬和下旬分别不低于 8000 m³/s、7000 m³/s、6500 m³/s 进行控制[15]。

5) 生态调度[16]。生态调度是以实现人和自然和谐发展为宗旨, 在满足水库及下游防洪安全的前提下, 既考虑水(电)资源合理充分利用、又维护流域生态环境健康的要求, 进而达到社会效益和生态效益总体最优为目标的综合调度方式。为了保护长江流域生态环境, 在进行水库群联合调度规划时, 应将生态环境因素增加到水库调度方式中, 创造适合水生动植物生存和自然环境恢复的水文条件, 尽量保留自然流态。如乌江洪家渡水库在进行水库调度方式规划时, 考虑到下游航运和流域生态环境要求, 使得下泄流量不小于 75 m³/s [17]; 三峡水库为了保护四大家鱼繁殖所需的水环境, 对其生态调度过程进行研究, 并采取“先蓄后泄”的调度方式, 以加快水流流速和增加水流流量, 刺激四大家鱼产卵[18]。

3. 长江中上游水库群汛末蓄水调度研究概述

回顾水库调度领域国内外研究的历史, 从产生到发展迄今已有 60 多年, 经历了常规调度和优化调度两个阶段, 研究对象也从单一水库的单目标调度发展到水库群联合多目标调度。在调度理论、调度模型、求解方法等方面取得了大量成果, 形成了一套较为完整的研究体系, 成为水文学及水资源学科的重要研究方向之一。长江中上游水库群汛末蓄水调度作为水库群在特定时段内的特殊调度方式, 研究对象复杂, 涉及汛末蓄水、防洪、发电、生态、下游抗旱补水、航运调度等诸多方面, 其相关研究现状总结如下。

3.1. 三峡水库汛末蓄水调度研究

三峡水库是长江中上游水资源调控的核心工程。对于三峡水库汛末蓄水调度问题, 成果主要集中于三峡水

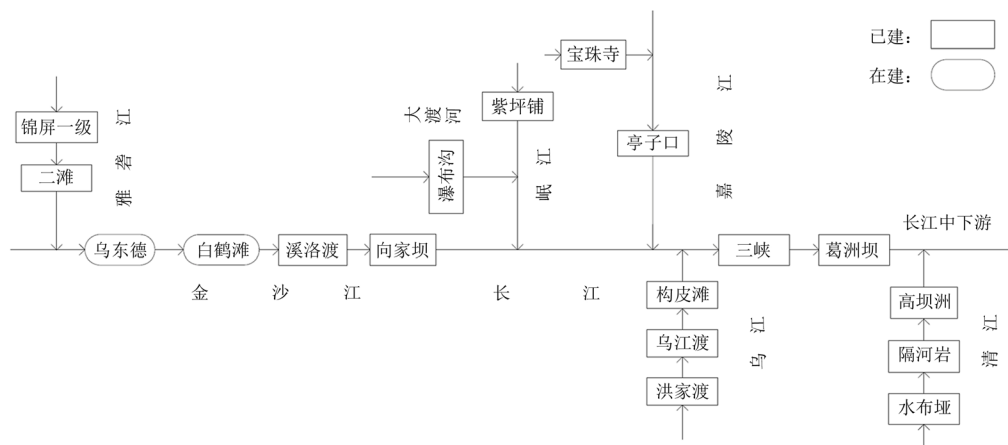


Figure 1. Distribution of large reservoirs in the middle and upper Yangtze River Basin
图 1. 长江中上游部分大型水库分布图

库提前蓄水方案的制定及其对防洪风险与发电、航运、汛末蓄满率等综合效益的影响方面。彭杨、石涛等[19][20]研究了水库提前蓄水对防洪、发电、航运方面的影响,并对水库蓄水时间和蓄水进度进行优化计算,得出提前蓄水不会影响水库防洪安全,对发电效益、下游航运都有利。李义天等[21]在探讨三峡9月份特大洪水发生可能性的基础上,提出了9月分旬控制蓄水以解决提前蓄水带来的防洪问题,并对9月分旬控制蓄水与连续蓄水的发电效益进行了比较。刘攀等[22]从防洪、发电、航运角度出发建立三峡水库的调度模型,并采用遗传算法,得到水库最佳汛限水位和蓄水时机。刘心愿等[23]通过建立基于上下游防洪、发电、航运、汛末蓄满率的水库多目标蓄水调度模型,采用“优化-模拟-检验”算法流程,得到了三峡水库优化蓄水调度图。刘志武等[24]分析比较了不同汛末提前蓄水方式下综合发电、防洪、航运、电网运行要求的优化设计方案。阎要武等[25]提出了在保证水库来水保证率和防洪安全的前提下三峡水库分阶段蓄水调度图计算方法。李雨等[26]主要从风险率和风险损失率两方面分析了三峡水库在不同提前蓄水方案下的下游防洪风险,并对提前蓄水方案的综合效益进行了分析计算。李英海等[27]针对长江中下游抗旱补水问题,提出了基于改进调度图的三峡水库汛末蓄水调度方案。

3.2. 长江中上游水库群汛末联合蓄水调度研究

长江中上游水库群因其研究对象的复杂性和调度目标的多样性而使得问题异常复杂。陈进[28]根据长江流域特性、大型水库建设和运行情况,分析了水库竞争性蓄水产生的问题,在讨论水库蓄水面临的主要技术和管理问题基础上,提出长江大型水库统一蓄水原则和方案的建议。丁胜祥等[29]通过对三峡水库按既定蓄水规则模拟蓄水计算,分析了不同水平年三峡水库的蓄水受上游大型水库蓄水的影响程度。何小聪等[30]实现长江流域水库群汛期防洪联合调度,提出了基于等比例蓄水的溪洛渡、向家坝、三峡水库联合防洪调度策略。付湘等[31]针对三峡上游水库群汛末竞争性蓄水矛盾,根据水能价值原理,提出上游水库群提前蓄水方案,确定了上游水库群蓄水时间及水库提前蓄水量。丁毅等[32]根据各水库自身的蓄水调度原则和方式,采用常规调度方法,对长江中上游各水库的蓄水调度方案和调度模型进行了初步研究,为进一步探索梯级水库群汛末蓄水优化调度提出了相关建议。欧阳硕[33]、黄草[34][35]、王冬[36]、周研来[37]等以金沙江梯级水库和三峡梯级水库为研究对象,针对梯级水库汛末集中蓄水造成的水资源短缺问题,在保证防洪安全的前提下,根据梯级水库群蓄水调度的不同原则和优化方法,提出各水库的最佳蓄水策略。

3.3. 研究展望

综上所述,目前关于长江中上游水库群汛末联合蓄水调度问题的研究更多集中于单一的三峡水库提前蓄水调度及其对防洪风险与综合效益的影响,以及干流梯级水库群防洪和竞争性蓄水问题的解决方法方面,在以下几个方面还有待进一步研究。

面向下游抗旱补水需求的汛末蓄水调度研究。由于气候变化和下垫面变化的双重影响,长江流域特别是中下游流域干旱灾害的发生频率呈上升趋势。然而,目前为止,关于长江中上游水库群联合抗旱调度问题更多的是从定性角度进行研究,还没有一套完整的汛末蓄水调度理论和方法用于指导长江中上游干支流控制性混联水库群联合运行,来应对长江中下游干旱水情的发生。

面向流域生态环境保护的汛末蓄水调度研究。长江中上游水库群在联合调度过程中,更多的是考虑水库群防洪、兴利目标的实现,对维持河流生态需水、改善流域水环境、补偿水利工程建设运行对生态环境影响等方面考虑较少。因此,在水库群汛末联合蓄水调度研究发展中,应从全流域出发,综合考虑各个因素,重视竞争性蓄水对生态环境带来的影响,维护河流健康和促进可持续发展。

面向复杂长江中上游水库群系统的联合调度研究。长江中上游干支流水库数量众多,水力联系复杂,调节能力差异巨大,调度目标不尽相同。由于技术限制,目前汛末蓄水调度更多考虑的是金沙江下游梯级和三峡梯级水库群,对于如此复杂的长江中上游巨型水库群系统联合蓄水调度还有待进一步深入研究。

三峡下游支流水库群对上游水库群的补偿调节研究。以三峡为核心的上游水库群调度对长江中下游的影响

毕竟有限,难以完全满足中下游对水量的时空再分配需求。如何充分利用三峡水库下游支流水库群的调节库容(例如清江梯级),对三峡下泄流量进行补偿调节,发挥错峰补枯、稳定流量的作用,将有利于进一步提高中上游水库群联合调度效益的发挥。

4. 结语

长江中上游水库群的修建在改变长江干支流天然径流的情况下必然带来全流域水资源调控与利用的失衡。尤其是在汛末蓄水期,各水库之间竞争性蓄水、上游水库群与长江中下游地区水资源利用矛盾等问题更加突出。这就要求我们从流域整体角度出发,充分认识汛末蓄水期长江流域不同区域水文变化规律和特点,结合干支流各个水库特性和调节能力,以及长江中下游用水需求过程,综合考虑,制定出合理、统一的水库群联合蓄水调度方案,实现水库群的防洪、兴利、生态目标,保障长江流域的健康、可持续发展。

基金项目

国家自然科学基金项目(51409152, 51509141); 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金(2013KJX05, 2015KJX02)。

参考文献 (References)

- [1] 郑守仁. 三峡工程设计水位 175 m 试验性蓄水运行的相关问题思考[J]. 人民长江, 2011, 42(13): 1-7.
ZHENG Shouren. Some considerations on related problems in pilot impoundment of TGP at design water level of 175 m. Yangtze River, 2011, 42(13): 1-7. (in Chinese)
- [2] 曹广晶. 三峡水库综合优化调度研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
CAO Guangjing. Research on optimal operation of Three Gorges Reservoir. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)
- [3] 杨春花, 许继军, 董玲燕. 金沙江下游梯级水库配合三峡水库联合防洪调度效果分析[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(10): 5-9.
YANG Chunhua, XU Jijun and DONG Linyan. Effect of flood control joint operation of Jinshajiang Downstream Cascade Reservoirs and Three Gorges Reservoir. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(10): 5-9. (in Chinese)
- [4] 陈进. 三峡水库抗旱调度问题的探讨[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(5): 19-23.
CHEN Jin. Approach on drought defying operation of Three Gorges Reservoir. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(5): 19-23. (in Chinese)
- [5] 许继军, 陈进, 陈广才. 长江上游大型水电站群联合调度发展战略研究[J]. 中国水利, 2011.
XU Jijun, CHEN Jin, CHEN Guangcai. Development strategy study on combined management of large hydropower stations on the upper Yangtze River. China Water Resources, 2011. (in Chinese)
- [6] 金勇, 周建军, 黄国鲜. 长江上游大型水库运行对长江上游水文过程的影响[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 93-101.
JIN Yong, ZHOU Jianjun and HUANG Guoxian. Impact of large reservoirs operation on the hydrological process in the upper Yangtze reaches. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 93-101. (in Chinese)
- [7] 李安强, 张建云, 仲志余, 等. 长江流域上游控制性水库群联合防洪调度研究[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 59-66.
LI Anqiang, ZHANG Jianyun, ZHONG Zhiyu, et al. Study on joint flood control operation for leading reservoirs in the upper Changjiang River. Shuili Xuebao, 2013, 44(1): 59-66. (in Chinese)
- [8] 高似春, 陈惠源, 戚晨, 等. 长江防洪系统联合调度研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(4): 64-67.
GAO Sichun, CHEN Huiyuan, QI Chen, et al. Study of optimal operation for flood control system of Yangtze River. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1998, 31(4): 64-67. (in Chinese)
- [9] 陈进. 三峡水库建成后长江中下游防洪战略思考[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 745-751.
CHEN Jin. An approach on flood control strategy in middle and lower reaches of Yangtze River after the completion of the Three Gorges Dam Project. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 745-751. (in Chinese)
- [10] 杨春花, 许继军. 金沙江下游梯级与三峡梯级水库联合发电调度[J]. 水电能源科学, 2011, 29(5): 142-144.
YANG Chunhua, XU Jijun. Joint operation of cascade Three Gorges plants and cascade reservoirs in lower reaches of Jinsha River. Water Resources and Power, 2011, 29(5): 142-144. (in Chinese)
- [11] 金勇, 唐新华. 南水北调西线工程对长江上游水库发电的影响[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 118-127, 139.
JIN Yong, TANG Xinhua. Impact of the west route South to North Water Transfer Project on energy generation of reservoirs in

- the upper Yangtze reaches. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(4): 118-127, 139. (in Chinese)
- [12] 丁毅, 李安强, 何小聪. 以三峡水库为核心的长江干支流控制性水库群综合调度研究[J]. *中国水利*, 2013.
DING Yi, LI Anqiang and HE Xiacong. Integrated regulation of grouped reservoirs at Yangtze mainstream and tributaries with Three Gorges Dam as a core. *China Water Resources*, 2013. (in Chinese)
- [13] 陈进. 长江大型水库群联合调度问题探讨[J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(10): 30-36.
CHEN Jin. Joint regulation of large reservoir groups on Yangtze River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011, 28(10): 30-36. (in Chinese)
- [14] 郭旭宁, 胡铁松, 方洪斌, 等. 水库群联合供水调度规则形式研究进展[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(1): 23-28.
GUO Xuning, HU Tiesong, FANG Hongbin, et al. Advances in research using joint operating rule for multi-reservoirs water supply. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(1): 23-28. (in Chinese)
- [15] 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 Jishun, ZHANG Yaqi and ZHANG Hui. Study on impoundment mode of Three Gorges Reservoir during end of flood season under new circumstances. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011, 42(11): 102-106. (in Chinese)
- [16] 徐杨, 常福宣, 陈进, 等. 水库生态调度研究综述[J]. *长江科学院院报*, 2008, 25(6): 33-37.
XU Yang, CHANG Fuxuan, CHEN Jin, et al. Review of research on ecological operation of reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2008, 25(6): 33-37. (in Chinese)
- [17] 夏豪, 金泽华, 邹建国, 等. 乌江干流梯级电站生态调度现状分析[J]. *四川环境*, 2010, 29(5): 14-18.
XIA Hao, JIN Zehua, ZOU Jianguo, et al. Present situation of ecological operation of Wujiang River cascade hydropower stations. *Sichuan Environment*, 2010, 29(5): 14-18. (in Chinese)
- [18] 戴会超, 张培培, 董坤, 等. 面向四大家鱼繁殖需求的水库生态调控模拟研究[J]. *水利水电技术*, 2014, 45(8): 130-133.
DAI Huichao, ZHANG Peipei, DONG Kun, et al. Study on simulation of reservoir eco-regulation for reproduction demand of four major Chinese carps. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2014, 45(8): 130-133. (in Chinese)
- [19] 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 Yitian, XIE Baoling, et al. Study on an ahead of schedule impounding scheme of the Three Gorges Project (TGP) in the flood recession period. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2002(3): 12-20. (in Chinese)
- [20] 石涛, 胡铁松, 曾祥, 等. 三峡水库汛末蓄水调度线优化研究[J]. *水力发电学报*, 2014, 40(5): 62-65, 94.
SHI Tao, HU Tiesong, ZENG Xiang, et al. Study on the optimal impounding line of Three Gorges Reservoir in flood recession period. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 40(5): 62-65, 94. (in Chinese)
- [21] 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 Yitian, GAN Fuwan and DENG Jinyun. Preliminary study on impounding water of Three Gorges Project in September. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2006, 25(1): 61-66. (in Chinese)
- [22] 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 Shenglian, WANG Caijun, et al. Optimization of limited water level in flood season and impounding scheme for reservoir in Three Gorges Project. *Shuili Xuebao*, 2004(7): 86-91. (in Chinese)
- [23] 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研究[J]. *水科学进展*, 2009, 20(6): 851-856.
LIU Xinyuan, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Scheme of impounding in advance for the Three Gorges Reservoir by considering the comprehensive utilization benefits. *Advances in Waterscience*, 2009, 20(6): 851-856. (in Chinese)
- [24] 刘志武, 张继顺, 鲍正风. 三峡水库蓄水方式的优化设计研究[J]. *水力发电*, 2009, 35(12): 61-63.
LIU Zhiwu, ZHANG Jishun and BAO Zhengfeng. Optimization on water storage scheme of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 35(12): 61-63. (in Chinese)
- [25] 阎要武, 张俊, 邹红梅. 基于来水保证率的三峡水库蓄水调度图研究[J]. *水文*, 2011, 31(3): 27-30.
MIN Yaowu, ZHANG Jun and ZOU Hongmei. Research on impounding schemes for the Three Gorges Reservoir based on inflow guaranteed frequency. *Journal of China Hydrology*, 2011, 31(3): 27-30. (in Chinese)
- [26] 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 Shenglian, GUO Haijin, et al. Flood control risk and benefit of impounding water in advance for the Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, 30(1): 8-14. (in Chinese)
- [27] 李英海, 刘冀, 彭涛. 三峡水库汛末抗旱蓄水方式优化设计[J]. *水利水电技术*, 2015, 46(1): 82-86.
LI Yinghai, LIU Ji and PENG Tao. Optimized design of impounding mode of Three Gorges Reservoir for drought relief during flood recession period. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2015, 46(1): 82-86. (in Chinese)
- [28] 陈进. 长江流域大型水库群统一蓄水问题的探讨[J]. *中国水利*, 2010(8): 10-14.
CHEN Jin. Discussion on the unified water storage of the reservoirs in Yangtze River basin. *China Water Resources*, 2010(8): 10-14. (in Chinese)
- [29] 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 Shengxiang, WANG Jun, SHEN Yanzhou, et al. Impact of large reservoir operation in upper yangtze reach on Three Gorges reservoir storage at end of flood period. *Journal of China Hydrology*, 2012, 32(1): 32-38. (in Chinese)
- [30] 何小聪, 丁毅, 李书飞. 基于等比例蓄水的长江中上游三座水库群联合防洪调度策略[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(4): 38-41.
HE Xiacong, DING Yi and LI Shufei. Joint flood control operation strategy of Three Reservoirs in middle and upper reaches of Yangtze River based on equal proportion water storage. *Water Resources and Power*, 2013, 31(4): 38-41. (in Chinese)
- [31] 付湘, 李安强, 石萍. 不影响三峡水库蓄水的上游水库群蓄水方法研究[J]. *人民长江*, 2013, 44(4): 8-12.
FU Xiang, LI Anqiang and SHI Ping. Analysis on water storage plan of upstream reservoir group on the premise of ensuring impoundment of Three Gorges Reservoir. *Yangtze River*, 2013, 44(4): 8-12. (in Chinese)
- [32] 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 Qiaoping. Preliminary research on water storage mode of cascade reservoirs in upper Yangtze River. *Yangtze River*, 2013, 44(10): 72-75. (in Chinese)
- [33] 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 Jianzhong, ZHOU Chao, et al. Research on impounding dispatch for the lower cascade reservoir in Jinsha River and Three Gorges cascade. *Shuili Xuebao*, 2013, 44(4): 435-443. (in Chinese)
- [34] 黄草, 王忠静, 李书飞, 等. 长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究(I)模型原理及求解[J]. *水利学报*, 2014, 45(9): 1009-1018.
HUANG Cao, WANG Zhongjing, LI Shufei, et al. A multi-reservoir in the upper Yangtze operation optimization model and application River Basin I. Principle and solution of the model. *Shuili Xuebao*, 2014, 45(9): 1009-1018. (in Chinese)
- [35] 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(II)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 Zhongjing, LU Jun, et al. A multi-reservoir operation optimization model and application in the upper Yangtze River Basin II. Operation rules and water releasing/storing sequences. *Shuili Xuebao*, 2014, 45(10): 1175-1183. (in Chinese)
- [36] 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 Jinyun, et al. Preliminary study of impounding optimization of cascade reservoirs in upper Yangtze River. *Journal of Sediment Research*, 2014(2): 62-67. (in Chinese)
- [37] 周研来, 郭生练, 陈进. 溪洛渡 - 向家坝 - 三峡梯级水库联合蓄水方案与多目标决策研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(10): 1135-1144.
ZHOU Yanlai, GUO Shenglian and CHEN Jin. Multi-objective decision and joint refill schemes of Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges cascade reservoirs. *Shuili Xuebao*, 2015, 46(10): 1135-1144. (in Chinese)