

Optimal Control of Flood Water Resources for the Danjiangkou Reservoir

Shenglian Guo, Yun Wang, Yanlai Zhou, Jiabo Yin

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: slguo@whu.edu.cn

Received: Jan. 12th, 2015; accepted: Jan. 26th, 2015; published: Feb. 4th, 2015

Copyright © 2015 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

The Danjiangkou Reservoir is both a key flood control project for the middle and lower reaches of the Han River and water source of the South-to-North Water Diversion Project in China. It is a multi-purpose reservoir, including flood control, water supply, hydropower generation, navigation, etc. The hydrological data series were extended to 2014 and the design flood values were re-checked. The flood seasonal identification, dynamic control of water levels during flood season and early refill of reservoir were studied. Results show that with 1 - 5 d forecasting information, dynamic control bounds of water level during summer flood season (Jun. 21 - Aug. 20) and autumn flood season (Sep. 1 - Oct. 10) are 160.0 - 162.9 m and 163.5 - 165.7 m respectively without decreasing flood protection standards, which can increase 3.16 - 4.998 billion m³ storage water or 9.96 - 100.21 MkW·h hydropower generation annually. It is also shown that reservoir's early refill starts on Sep. 15 with the maximum water level limited to 166 m during September; the full storage rate can increase from 4 years to 12 years, and the storage water increases 0.898 billion m³ annually.

Keywords

Flood Water Utilization, Flood Seasonality, Water Level, Dynamic Control, Early Refill, The Danjiangkou Reservoir

丹江口水库洪水资源调控技术研究

郭生练, 汪 芸, 周研来, 尹家波

*作者简介: 郭生练(1957-), 男, 二级教授, 主要从事水文水资源分析计算工作。

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
Email: slguo@whu.edu.cn

收稿日期: 2015年1月12日; 录用日期: 2015年1月26日; 发布日期: 2015年2月4日

摘要

丹江口水库既是汉江中下游地区的控制性防洪工程, 又是南水北调中线工程的水源地, 承担着防洪、供水、发电、航运等重要功能。本文把资料系列延长至2014年并进行设计洪水复核, 开展汛期分期、运行水位动态控制和提前蓄水研究。结果表明: 在不降低防洪标准的前提下, 利用1~5 d预见期信息, 夏汛期(6月21日至8月20日)和秋汛期(9月1日到10月10日)的运行水位分别在160.0~162.9 m和163.5~165.7 m区间浮动, 年均可增加蓄水量31.6~49.98亿 m^3 , 或增加发电量9.96~100.21 M kW·h; 汛末提前蓄水时间为9月15日, 蓄水水位上限值为166 m, 与原设计方案相比, 水库蓄满年份从4年增加到12年, 年均多蓄水8.98亿 m^3 。

关键词

洪水资源化, 汛期分期, 汛期水位, 动态控制, 提前蓄水, 丹江口水库

1. 引言

丹江口水利枢纽位于湖北省丹江口市, 汉江与其支流丹江汇合口下游 800 m 处, 大坝以上控制流域面积 95,200 km^2 , 坝顶高程 176.6 m。丹江口水库既是汉江流域中下游防洪的控制性工程, 又是南水北调中线工程的水源地, 承担着防洪、供水、发电、航运等重要功能; 正常蓄水位 170 m, 相应库容 290.5 亿 m^3 , 预留防洪库容 110~81.2 亿 m^3 。

汉江流域多年平均降水量 897.2 mm, 由上游向下游增大, 暴雨集中发生在 7~9 月, 尤以 7、9 月居多, 5~10 月径流量占全年的 80%。汉江洪水由暴雨形成, 集中在夏、秋两季。夏季主要雨区在白河以下至中游地区, 如 1935 年型暴雨洪水; 秋季主要雨区在白河以上及全流域, 如 1964 年型暴雨洪水。汉江上游洪水主要由暴雨形成, 由于流域内山高坡陡, 洪水汇流速度快, 洪水具有猛涨猛落, 峰型尖瘦的特点。

汛限水位是水库在汛期允许兴利蓄水的上限水位。目前我国水库设计中, 汛限水位就已根据防洪需要经水库调节设计洪水过程线确定下来, 在以后的实际运行中, 汛期水库维持在汛限水位以下运行, 腾空库容以调蓄汛期可能发生的洪水。洪水的发生为随机事件, 并不是每年都有大洪水发生, 特别是人们所关心的稀遇洪水, 往往是几十年甚至更长时间才发生一次。许多研究表明: 按我国现行的水库汛限水位设计和调度方式, 不可避免的造成了中小洪水资源的浪费。丹江口水库已经建成运行 61 年, 原设计方案仅有 4 年能够蓄满。

因此, 本文通过延长洪水资料系列并进行设计洪水复核, 开展汛期分期研究, 推求分期设计洪水和控制水位, 应用预报预泄法和风险分析模型分别计算汛期运行水位动态控制域, 建立提前蓄水模型, 推荐优化蓄水方案, 进行综合利用效益分析。由于篇幅有限, 下面仅给出一些主要成果和结论。

2. 设计洪水复核结果分析

1) 把丹江口水库的水文资料序列延长至 2014 年并进行设计洪水复核。本次参与设计洪水复核计算

的丹江口水库历史洪峰系列为 1583 年、1867 年、1852 年、1832 年、1693 年和 1921 年(其中 1867 年、1852 年、1832 年为秋季洪水), 实测系列为 1954 年~2014 年的连续系列; 洪量系列为 1954 年~2014 年的连续系列。与初级规模设计成果相比, 径流系列延长至 2014 年后, 丹江口水库设计洪水的年、秋季洪峰均比原成果偏小, 洪量与原成果接近。对于年设计成果: 洪峰流量均值减小 2%, 频率小于 2% 的设计洪峰减少 14%~22%, 频率大于 2% 的设计洪峰减少不超过 11%; 7 天洪量均值减少不超过 8%, 7 天设计洪量减少不超过 11%, 15 天洪峰均值减少 4%, 15 天设计洪量减少不超过 1%。对于秋季设计成果: 洪峰流量均值减少 15%, 设计洪峰减少 16%~29%; 7 天洪量、15 天洪量均值减少约 11%, 设计洪量减少不超过 9%。

整体而言, 原设计成果偏于安全, 同时考虑到该成果已被广泛采用, 因此洪峰、洪量设计值均采用初设阶段的审定成果。

2) 水库下游丹江口至碾盘山区间采用 1929 年~1978 年的实测系列进行设计洪水复核。本次复核丹-碾区间洪水采样原则按“区间洪水最大”独立采样, 由于丹江口至碾盘山区间的未控面积较大, 并且主要支流南河、唐白河流域暴雨洪水特性亦非完全同步, 区间控制站放大叠加法误差较大。因此, 主要依据干流黄家港与碾盘山(皇庄)实测洪水资料, 推求丹-碾区间洪水过程, 即将黄家港与碾盘山(皇庄)实测洪水过程相减, 即得丹-碾区间出流过程, 然后从中摘取洪峰流量、1d、7d 洪量。

复核结果是年设计洪水比原成果偏小, 秋季设计值与原成果一致, 因此仍采用初设成果。

3. 丹江口水库汛期分期

选择丹江口水库 1929 年~2014 年洪峰系列、1954 年~2014 年的日流量资料和丹江口水库流域 1956~2010 年的日雨深资料为实验数据, 采用天气系统成因分析、数理统计分析、矢量统计、变点分析等方法[1]-[5], 研究丹江口水库的汛期分期方式。表 1 列出各种方法的计算结果。经综合分析比较, 7 月是汉江中上游特大洪水的多发期, 暴雨集中, 洪量较大, 8 月上旬以后洪峰流量的量级比前期洪水要小一些, 9 月至 10 月上旬会发生秋汛, 一些洪水也较大。考虑到偏于安全和习惯, 更好地反映汉江流域夏秋两汛的特性, 建议将丹江口水库的汛期分为二期: 6 月 21 日至 8 月 20 日为夏汛期, 9 月 1 日到 10 月 10 日为秋汛期, 8 月 21 日至 8 月 31 日为过渡期。

4. 分期设计洪水和控制水位

鉴于过渡期内仅在 1956 年 8 月 23 日、1993 年 8 月 27 日、1976 年 8 月 28 日发生了三场较小洪水,

Table 1. Comparison of flood seasonality results for the Danjiangkou Reservoir

表 1. 丹江口水库汛期分期计算结果比较表

分期方法	夏汛期	过渡期	后汛期	
天气系统成因分析法	6 月下旬~7 月下旬	8 月上旬~8 月中旬	8 月下旬~10 月上旬	
降雨统计分析	6 月下旬~7 月下旬	8 月	9 月上旬~10 月上旬	
数理统计分析法	洪水年内分布	6 月下旬~7 月下旬	8 月	9 月上旬~10 月上旬
	径流统计分析	6 月下旬~7 月下旬	8 月	9 月上旬~10 月上旬
年最大洪峰洪量	6 月下旬~8 月中旬	8 月下旬	9 月上旬~10 月上旬	
矢量统计分析	6 月 21 日~8 月 20 日	8 月 21 日~8 月 31 日	9 月 1 日~10 月 10 日	
均值变点分析	6 月 21 日~8 月 12 日	8 月 13 日~8 月 31 日	9 月 1 日~10 月 10 日	
概率变点分析	6 月 21 日~7 月 20 日	7 月 21 日~8 月 31 日	9 月 1 日~10 月 10 日	

同时按照习惯且保证设计洪水取样,将丹江口水库的过渡期与秋汛期合并,将8月21日至10月10日作为秋汛期样本。分别统计夏汛期、秋汛期内最大洪峰流量、7d、15d洪量序列。

按照《水利水电工程设计洪水计算规范》[6],采用矩法计算样本统计特征值,求得参数初始值,通过目估适线法确定P-III型分布参数,从而推求分期设计洪水,结果见表2。

通过分期设计洪水与年最大设计洪水进行比较,可以得出以下结论:夏汛期、秋汛期的设计洪水均小于初期规模的设计洪水;夏汛期洪水的洪峰设计值大于秋汛期,但是7天和15天洪量的设计值均小于秋汛期,说明了秋季洪水相对于夏季洪水,具有峰小量大的特点。因此,从防洪安全的角度出发,夏汛期采用年最大设计洪水值,秋汛期则采用分期最大洪水系列的设计值。

选择1935年作为夏汛期典型年,选择1964年作为秋汛期典型年,采用同频率放大方法推求设计洪水过程线。对丹江口水库各分期以不同汛限水位为起调条件,根据不同标准的分期设计洪水过程线,进行多方案防洪调度演算,经比较、论证提出合理可行的汛限水位分期控制调度方案,分析丹江口水库在防洪错峰中的作用,并验证分期汛限水位的可行性和合理性,最终得出了各汛期运行水位补偿调度方案。即夏汛期(6月21日~8月20日)汛限水位为160.0m;秋汛期(9月1日~10月10日)汛限水位为163.5m。

5. 推求汛期运行水位动态控制域

预报预泄法是在洪水调度中充分考虑降雨及洪水预报信息,提前泄流,为即将入库的洪水腾出防洪库容,其基本思想是:在洪水预见期内有多大泄流能力,就把汛期运行水位向上浮动多少。水库汛期运行水位上浮值的影响因素包括:面临时刻的水情、雨情、工情;入库洪水预报和降雨预报的预见期、预见期内的预报入库量及误差分布;预见期内预泄能力;下游河道允许预泄的流量;决策等信息传递的稳定性、速度及闸门操作时间等[7]。

丹江口水库现有的1977~2013年153次有效洪水作业预报进行精度统计可知,洪峰预报平均精度92.0%,洪量预报平均精度93.7%,过程预报平均精度86.13%,预见期17.8小时。故分别假定丹江口水库多年来1~5d平均相对预报误差分别为8%,10%,15%,20%和25%。对不同预见期,将夏汛期和秋汛期的平均入库流量加大相应预报误差,采用预报预泄法计算丹江口水库汛期运行水位动态控制域的上限,结果见表3。

采用风险分析模型[8],依据丹江口水库汛期不同时段来水量级不同,分别选取最大下泄流量和设计

Table 2. Results of seasonal design floods for the Danjiangkou Reservoir
表 2. 丹江口分期设计洪水成果表

时段	季别	统计参数			设计值						
		均值	C_v	C_s/C_v	0.01%	0.10%	1%	2%	5%	10%	20%
Q_m (m ³ /s)	年(初期)	15,700	\	\	98,400	79,000	54,000	52,500	37,100	31,200	25,300
	夏	10,443	0.73	2.5	70,071	53,707	37,222	32,220	25,562	20,474	15,315
	秋	10,169	0.80	2	69,701	53,860	37,730	32,780	26,130	20,980	15,662
W_{7d} (亿 m ³)	年(初期)	50	0.58	2	234	188	141	126	105	89	71
	夏	35	0.61	2.5	186	147	106	93	76	63	49
	秋	36	0.73	2	220	172	123	108	87	71	54
W_{15d} (亿 m ³)	年(初期)	75	0.54	2	324	263	200	179	151	129	105
	夏	57	0.54	2.5	264	211	156	139	116	98	79
	秋	54	0.7	2	316	249	179	158	128	105	81

水位为控制指标, 采用拟定的分期防洪调度规则, 取洪水有效预见期长度为 1 d、2 d、3 d、4 d 和 5 d, 以降低原设计防洪标准为原则, 得到综合的丹江口水库汛期运行水位动态控制域, 结果见表 3。

分析表 3 的结果可知, 预报预泄法确定的汛期运行水位动态控制域上限值均大于风险分析模型。预报预泄法只给出汛期运行水位能够提高到多少, 而没有解决水库遭遇大洪水时, 水库水位能否在洪水预报期内回落至汛限水位的问题; 风险分析模型法从数学上给出了答案。因此, 丹江口水库汛期运行水位动态控制方案以风险分析法得到的结果作为推荐方案。经简化经济效益分析, 若考虑 1~5 d 的预见期, 汛期可增加发电量 9.96~100.21 M kW·h, 或增加蓄水量 31.6~49.98 亿 m³, 经济效益十分显著。

为避免汛期水位突然大幅度降低引起的弃水, 以 8 月 21 日~8 月 31 日为夏汛期向秋汛期的过渡期, 得到丹江口水库汛期运行水位动态控制如图 1 所示。因汛期运行水位动态控制域设计, 属于规划设计阶段工作, 而水库汛期水位实时动态控制属于实时调度和管理运行阶段的工作, 建议用 3 d 预见期的汛期运行水位动态控制域, 在实时调度阶段用 5 d 预见期来进行预泄, 以控制预泄流量增加的幅度, 作为降

Table 3. Dynamic control bounds of water level during flood seasons for the Danjiangkou Reservoir
表 3. 丹江口水库汛期运行水位动态控制域

汛期(时间)	汛期运行水位下限(m)	有效预见期(d)	预报预泄法推求的汛期运行水位上限(m)	风险分析模型推求的汛期运行水位上限(m)
夏汛(6月21日~8月20日)	160.0	1	160.6	160.3
		2	161.3	160.7
		3	161.9	161.4
		4	162.3	162.1
		5	162.8	162.9
秋汛(9月1日~10月10日)	163.5	1	164.3	163.7
		2	165.1	164.1
		3	165.8	164.4
		4	166.5	164.9
		5	167.2	165.7

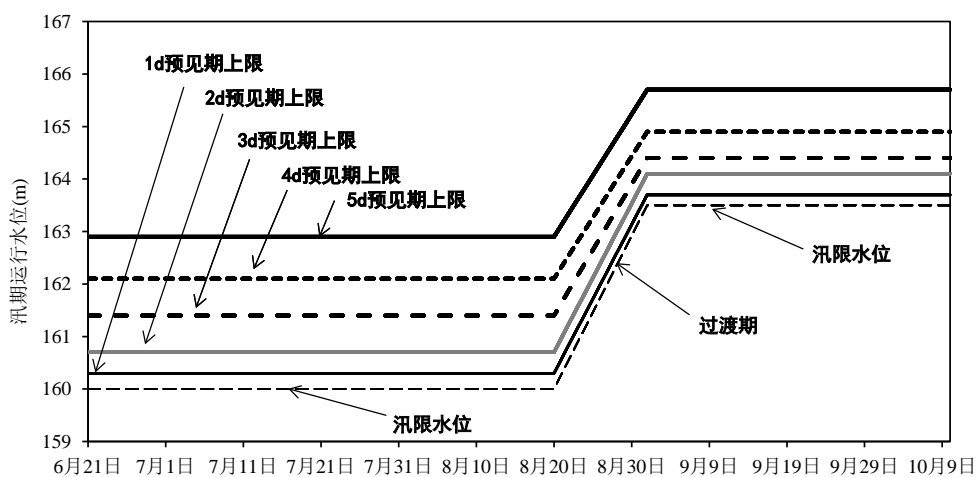


Figure 1. Sketch curves of dynamic control of water level during flood seasons for the Danjiangkou Reservoir

图 1. 丹江口水库汛期运行水位动态控制示意图

低汛期运行水位动态控制风险的一种非工程措施。

6. 提前蓄水模型和优化方案

丹江口水库提前蓄水方案研究。根据长系列水文资料、近期来水预报、实际运行统计资料等，结合丹江口水利枢纽加高工程进展情况，研究原设计等水位蓄水方案、简化蓄水方案、提前蓄水方案、提前蓄水优化方案和分阶段提前蓄水方案，为丹江口水库汛末提前蓄水运行调度提供科技支撑。

6.1. 提前蓄水的必要性

1) 丹江口水库若按初设方案从 10 月 1 日开始蓄水，由于 11 月和 12 月来水较小，水库的蓄水任务则主要集中在 10 月，但 10 月上旬水库仍然处于秋汛时期，需要预留一定的防洪库容，导致水库只能在 10 月中下旬集中蓄水，这样的蓄水方式一方面不仅对汉江中下游水资源条件的改变过于剧烈，对中下游生态环境影响较大，而且水库的蓄满保证率也很低。

2) 丹江口水库大坝加高后，水库蓄满的需水量从 31.30 亿 m^3 提高到 67.95 亿 m^3 。在天然来水相同的情况下，大坝加高后的蓄满率会大幅度降低，直接影响了水库的调水和发电效益。

3) 丹江口水库大坝加高后，向北方调水成为水库的第二要务。但据资料显示，近十年来汉江来水偏枯，1998~2010 年入库水量较规划的多年平均水量减少了约 3%(近 10 亿 m^3)。若这种趋势持续，将对中线一期工程可调水量造成影响。

综上，在当前条件下，丹江口水库仍按初设方案的蓄水原则进行蓄水，蓄满率将明显降低，不利于水库综合效益的充分发挥。提前蓄水是解决这个问题的一個有效方法，迫切需要丹江口水库在确保防洪安全的前提下提前蓄水，避免在来水偏枯年份造成供水能力的不足，提高受水区生产生活用水的保证率。

6.2. 提前蓄水的可行性

1) 根据 1953~2011 年丹江口水库坝址全年最大洪峰流量系列可知，9 月 15 日之后发生年最大洪峰的次数为 14 次，其中遭遇五年一遇及以下洪水的次数为 10 次，五年一遇以上十年一遇及以下的次数为 2 次，十年一遇以上二十年一遇及以下的次数为 2 次，未发生过二十年一遇以上的洪水。鉴于提前蓄水主要对象是百年一遇及以下的中小洪水，故拟定的起蓄时间为 9 月 15 日的最优方案是合理可行的。

2) 丹江口水库大坝加高后，预留防洪库容由初期的 77.2~55 亿 m^3 提高至 110~81.2 亿 m^3 ，有较大幅度的提高，为提前蓄水创造了条件。

3) 分析丹江口汛期多年旬平均降水量可知，7 月份的降水量最大，9 月中旬及以后降雨明显减少，防洪压力相对降低，通过降雨年内分布规律分析，可以认为丹江口水库从 9 月中旬实施提前蓄水是可行性的[9]。

6.3. 提前蓄水的效益

1) 分别拟定 8 月 21 日、8 月 25 日、9 月 1 日、9 月 5 日、9 月 10 日、9 月 15 日、9 月 20 日和 9 月 25 日作为起蓄时间，按照原设计等水位和简化蓄水方式蓄水，随着起蓄时间的提前，水库的发电量增多、蓄水率提高。

2) 综合考虑蓄水、防洪、发电、航运等多方面的因素，通过设定秋汛期蓄水水位上限将防洪与兴利结合[10]，建立水库多目标蓄水优化调度模型和“优化 - 模拟 - 检验”的算法流程，采用 POA 优化算法得到丹江口水库的蓄水优化调度图，结果表明最优起蓄时间为 9 月 15 日，秋汛期蓄水水位上限值为 166 m，将优化方案与原设计方案相比，蓄满年份从 4 年增加到 12 年，年均多蓄水 8.98 亿 m^3 。

3) 为了进一步细化蓄水优化调度方案，实施提前蓄水期的分阶段蓄水优化调度。时间以 5 天为步长，

水位以 0.5 m 为步长, 将 9 月 15 日到 10 月 1 日分为四个阶段, 共计 15 种方案。各个方案经过比较, 得出如下方案的水资源利用率最高, 即从 9 月 15 日起蓄, 起调水位为 163.5 m, 控制 9 月 15 日~9 月 19 日的蓄水位不超过 164.5 m, 9 月 20 日~9 月 24 日的蓄水位不超过 165 m, 9 月 25 日~9 月 29 日的蓄水位不超过 165.5 m, 9 月 30 日~10 月 1 日的蓄水位不超过 166 m。

7. 结论

综合上述的研究内容和成果, 可以得到以下几条主要结论:

1) 分别采用成因分析、洪水年内分布、径流和年最大洪峰统计、矢量统计, 变点分析等多种方法, 对丹江口水库流域进行汛期分期计算。综合多种方法的分析结果, 建议丹江口水库的汛期分期方式: 6 月 21 日至 8 月 20 日为夏汛期; 8 月 21 日至 8 月 31 日为过渡期; 9 月 1 日到 10 月 10 日为秋汛期。

2) 本次复核的丹江口水库设计洪水的年、秋季洪峰均比设计成果偏小, 洪量与原成果接近; 夏汛期、秋汛期的设计洪水均小于原设计洪水。考虑到原成果已被广泛采用, 因此洪峰、洪量设计值均采用原设计成果。采用调洪演算法确定各分期的汛限水位分别为: 夏汛期 160.0 m、秋汛期 163.5 m。

3) 利用 1~5 d 有效预见期信息, 由风险分析法推求出丹江口水库汛期运行水位动态控制域上限: 夏汛期为 160.3~162.9 m; 秋汛期为 163.7~165.7 m; 年均可增加蓄水量 31.6~49.98 亿 m^3 , 或增加发电量 9.96~100.21 M kW·h。

4) 建立了水库多目标蓄水优化调度模型和“优化-模拟-检验”的算法流程, 采用 POA 优化算法得到丹江口水库的蓄水优化调度图。最优起蓄时间为 9 月 15 日, 秋汛期蓄水水位上限值为 166 m, 将优化方案与原设计蓄水方案相比, 蓄满年份从 4 年增加到 12 年, 年均蓄水率从 76.42% 增加到 81.91%, 年均多蓄水 8.98 亿 m^3 。

5) 推荐丹江口水库提前分阶段蓄水方案为: 从 9 月 15 日起蓄, 起调水位为 163.5 m, 控制 9 月 15 日~9 月 19 日的蓄水位不超过 164.5 m, 9 月 20 日~9 月 24 日的蓄水位不超过 165 m, 9 月 25 日~9 月 29 日的蓄水位不超过 165.5 m, 9 月 30 日~10 月 1 日的蓄水位不超过 166 m。

参考文献 (References)

- [1] 刘攀, 郭生练, 王才君, 张洪刚. 三峡水库汛期分期的变点分析方法研究[J]. 水文, 2005, 25(1): 18-23.
LIU Pan, GUO Shenglian, WANG Caijun and ZHANG Honggang. Flood season staged for three gorges reservoir based on the change-point approach. Journal of China Hydrology, 2005, 25(1): 18-23. (in Chinese)
- [2] 刘攀, 郭生练, 方彬, 喻婷. 汛期分期变点分析方法的原理及验证[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(6): 27-31.
LIU Pan, GUO Shenglian, FANG Bin and YU Ting. Change point analysis methods for flood seasonality determination. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(6): 27-31. (in Chinese)
- [3] 喻婷, 郭生练, 刘攀, 等. 水库汛期分期方法研究及其应用[J]. 中国农村水利水电, 2006, 8: 24-56.
YU Ting, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Study on method and application of reservoir flood season staging. China Rural Water and Hydropower, 2006, 8: 24-56. (in Chinese)
- [4] 方彬, 郭生练, 郭富强, 等. 汛期分期的圆形分布法研究[J]. 水文, 2007, 27(5): 7-11.
FANG Bin, GUO Shenglian, GUO Fuqiang, et al. Identification of flood seasonality by circular distribution method. Journal of China Hydrology, 2007, 27(5): 7-11. (in Chinese)
- [5] 方彬, 郭生练, 刘攀, 等. 分期设计洪水研究进展和评价[J]. 水力发电, 2007, 33(7): 71-75.
FANG Bin, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Advance and assessment of seasonal design flood methods. Water Power, 2007, 33(7): 71-75. (in Chinese)
- [6] 水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范 SL44-2006[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
Ministry of Water Conservancy of the People's Republic of China. Regulation for calculating design flood of water resources and hydropower projects (SL 2006). Beijing: China Water Resources & Hydropower Press, 2006. (in Chinese)
- [7] 李响, 郭生练, 刘攀, 刘心愿. 三峡水库汛期水位控制运用方案研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 102-107.

- LI Xiang, GUO Shenglian, LIU Pan and LIU Xinyuan. Schemes of storage level control of Three Gorges reservoir during flood seasons. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(2): 102-107. (in Chinese)
- [8] 李响, 郭生练, 刘攀, 万民, 刘心愿. 考虑入库洪水不确定性的三峡水库汛限水位动态控制域研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(3): 49-55.
LI Xiang, GUO Shenglian, LIU Pan, WAN Ming and LIU Xinyuan. The dynamic control bound of flood limited water level considering inflow uncertainty in Three Gorges Reservoir. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 42(3): 49-55. (in Chinese)
- [9] 汪芸, 郭生练, 李天元. 丹江口水库提前蓄水方案[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2014, 47(4): 433-439.
WANG Yun, GUO Shenglian and LI Tianyuan. Study of scheme of impounding in advance for Danjiangkou Reservoir. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2014, 47(4): 433-439. (in Chinese)
- [10] 刘心愿, 郭生练, 刘攀, 李响. 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 and LI Xiang. Scheme of impounding in advance for the Three Gorges Reservoir by considering the comprehensive utilization benefits. *Advances in Water Science*, 2009, 20(6): 851-856. (in Chinese)