

金沙江下游梯级水库防洪库容分配方式研究

王 玮¹, 鞠 彬², 王鹏飞¹, 欧阳秋平¹

(1. 中国三峡建工(集团)有限公司, 四川 成都 610095;

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要:为实现金沙江下游梯级水库综合效益的最大化发挥,研究联合防洪调度运用方式十分必要。为此,采用以金沙江来水为主和以岷江来水为主的不同地区组成洪水过程,运用相关数学分析方法,开展金沙江下游梯级水库调洪计算、防洪作用分析、防洪库容运用和梯级电站发电效益计算等,研究了以满足川江防洪为目标的金沙江下游梯级水库防洪水量分配方式。研究表明,在满足下游川江防洪要求的前提下,从充分利用洪水资源、增加梯级电站整体发电效益角度考虑,在防洪水量分配运用调度中,建议金沙江下游梯级水库防洪库容运用的顺序依次为乌东德水库、溪洛渡水库、白鹤滩水库。研究结果可为金沙江下游及类似流域梯级水库合理、科学的防洪调度提供参考。

关键词:金沙江下游; 梯级水库; 防洪库容分配方式; 联合防洪调度

中图分类号: TV697.12

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)09-0048-03

1 概况

金沙江为长江的上游河段^[1],金沙江干流全长 3 481 km,流域面积 $47.32 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。金沙江下游河段规划建设乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 座梯级水电站,其中向家坝、溪洛渡、乌东德电站已建成投运,白鹤滩电站已进入蓄水发电阶段。图 1 为金沙江下游河段概化示意图,表 1 为金

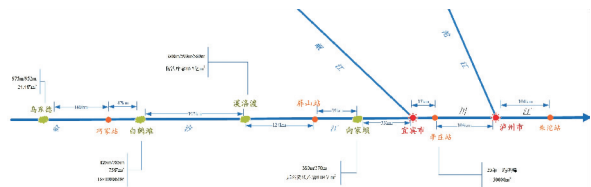


图 1 金沙江下游河段概化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the lower reaches of the Jinsha River

表 1 金沙江下游河段各梯级水电站主要指标参数

Tab. 1 Main index parameters of each cascade hydropower station in the lower reaches of the Jinsha River

电站名称	正常蓄水位/m	防洪限制水位/m	死水位/m	防洪库容/ 10^8 m^3	装机容量/MW
乌东德	975	952	945	24.4	10 200
白鹤滩	825	785	765	75.0	16 000
溪洛渡	600	560	540	46.5	12 600
向家坝	380	370	370	9.03	6 000

沙江下游河段各梯级水电站主要指标参数。金沙江下游梯级 4 座水库的防洪特点和防洪任务具有一致性,且 4 个梯级水库间区间来水不大,梯级成库后,梯级水库首尾相连,水力学联系紧密,金沙江下游 4 个梯级水库具备联合运用的条件^[2]。金沙江下游 4 座梯级水库防洪库容共 $154.93 \times 10^8 \text{ m}^3$,根据相关防洪研究成果,向家坝水库预留的防洪库容 $9.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ 一般作为后备防洪库容,主要任务是配合三峡水库运用,缓解长江中下游遭遇特大洪水时的危急状况,或在川江和长江中下游洪水遭遇恶劣组合才动用^[3]。因此,科学合理地选择梯级水库拦蓄洪水的先后顺序、动用预留防洪库容的时机对提高流域梯级水库群实际调度管理水平、挖掘水库防洪和兴利综合效益具有重要意义和应用价值^[4]。目前,关于梯级水库防洪调度理论和方法方面的研究已较多,且侧重于调度理论和模型^[5]、模型求解算法^[6]和调度成果应用技术^[7],而较少涉及梯级水库防洪库容分配方式的研究。事实上,由于梯级水库之间的上下游水力联系,在实际防洪调度中,可以以流域整体为例,将流域内已建水库视为一个防洪调度系统,根据洪水预报结果可有效分配不同水库防洪库容并达到相同的防洪效果,最大程度发挥防洪、兴利效益^[8]。为此,本文以金沙江下游梯级

收稿日期: 2022-08-20,修回日期: 2022-09-21

作者简介: 王玮(1973-),男,副高级工程师,研究方向为水利水电工程项目管理等,E-mail:276243297@qq.com

水库群为例,运用相关数学分析方法,开展不同地区组成洪水下的梯级水库防洪水量分配方式研究,提出更注重实用和机理、调度灵活的水库防洪库容运用方式,研究结果可为金沙江下游梯级及国内类似流域的水库防洪调度决策提供科学指导和借鉴依据。

2 研究方案

2.1 地区洪水组成分析

金沙江流域范围广,各区域暴雨特性、河道特性差异明显,因此干流与支流之间、支流与支流之间洪水遭遇情况较为复杂。本文梯级水库防洪水量分配调度方式重点以川江河段防洪为目标,以李庄水文站作为防洪控制代表站。

通过分析屏山、高场、李庄等水文站的历史洪水系列,李庄站洪水组成中金沙江洪水主要起垫底作用,影响李庄站洪量,且时段越长,影响越深刻,而李庄站洪峰则主要受岷江来水影响,岷江来水对李庄站洪水有较大的造峰作用。

经过长系列水文洪水资料分析,实况洪水过程中除 1966 年李庄站达到 50 年一遇外,其他场次洪水均较小,因此考虑选择不同地区组成典型洪水按同频率法分别计算以金沙江来水为主、岷江相应洪水和以岷江来水为主、金沙江相应洪水的李庄 100 年一遇设计洪水地区组成。典型洪水主要特性见表 2。

表 2 典型洪水过程主要特征统计

Tab. 2 Statistics on the main characteristics of typical flood processes

项目	控制流域面积 /10 ⁴ km ²	金沙江来水为主 (1966 年为典型)		岷江来水为主 (1961 年为典型)	
		洪峰流量 /(m ³ ·s ⁻¹)	洪量 W _{30d} /10 ⁸ m ³	洪峰流量 /(m ³ ·s ⁻¹)	洪量 W _{30d} /10 ⁸ m ³
乌东德坝址	40.61	28 800	519	28 907	412
白鹤滩坝址	43.03	31 100	550	30 630	437
溪洛渡坝址	45.44	34 800	611	31 819	454
向家坝坝址	45.88	34 800	611	32 036	457
李庄水文站	61.24	60 600	886	60 600	886

2.2 梯级水库防洪水量分配方式

根据梯级水库防洪库容启用先后顺序,拟定以下 4 种梯级水库防洪水量分配方式:①方式 1。乌东德水库 24.4×10⁸ m³ 防洪库容先拦蓄运用,再依次考虑运用白鹤滩水库、溪洛渡水库的防洪库容;②方式 2。白鹤滩水库 75.0×10⁸ m³ 防洪库容先拦蓄运用,再依次考虑运行溪洛渡水库、乌东德水库防洪库容;③方式 3。溪洛渡 46.5×10⁸ m³ 防洪库容先拦蓄运用,再依次考虑运用乌

东德水库、白鹤滩水库防洪库容。④方式 4。乌东德(24.4×10⁸ m³)、白鹤滩(75×10⁸ m³)、溪洛渡(46.5×10⁸ m³)按照等比例蓄水原则同步进行防洪库容运用。

3 结果与分析

3.1 对川江防洪作用分析

分别对金沙江来水为主的 100 年一遇设计洪水、以岷江来水为主的 100 年一遇设计洪水进行调洪演算,4 种梯级水库防洪水量分配运用方式下川江河段宜宾(李庄)的防洪效果见表 3。由表 3 可知,对以金沙江来水为主的 100 年一遇设计洪水,金沙江下游梯级水库不同防洪水量分配运用方式对川江河段宜宾的防洪作用基本一致,通过金沙江下游梯级水库的联合调度,4 种防洪水量分配方式均可使李庄 100 年一遇洪水削减为 20 年一遇左右,削减洪峰可达 10 118~10 693 m³/s。4 种防洪水量分配运用方式下梯级水库削减洪峰产生差异的主要原因是乌东德、白鹤滩、溪洛渡低水位下泄流能力有限,会产生一定的被动蓄水量导致梯级水库蓄水量总量超过拟定的调度流量要求;而溪洛渡防洪库容先运用方式下溪洛渡蓄水量可考虑上游乌东德、白鹤滩被动蓄水因素,并按拟定的调度流量要求进行蓄水,因此削峰幅度相对略小。对以岷江来水为主的 100 年一遇设计洪水,金沙江下游不同梯级水库防洪水量分配方式对川江河段宜宾的防洪作用相同,通过金沙江下游梯级水库的联合调度,4 种防洪水量分配方式均可使李庄 100 年一遇洪水削减至 30 年一遇左右,削减洪峰 7 704 m³/s。可见对以岷江来水为主的典型洪水,仅依靠金沙江下游梯级水库尚无法使宜宾市的 100 年一遇洪水完全削减为 20 年一遇,尚需配合其他措施,方可使川江的防洪能力从目前的 20 年一遇提高至 100 年一遇。

表 3 川江河段防洪效果分析

Tab. 3 Analysis of flood control effects in the Chuanjiang River

梯级水库 防洪库容 运用方式	李庄站洪水流量 (调洪前,天然)		李庄站洪水流量 (调洪后,以金沙江来水为主 的 100 年一遇设计洪水)			李庄站洪水流量(调洪 后,以岷江来水为主的 100 年一遇设计洪水)		
	洪峰	相应频率/%	洪峰	相应频率/%	削减 洪峰	洪峰	相应频率/%	削减 洪峰
方式 1	60 600	1	50 169	5	10 431	52 896	3	7 704
方式 2	60 600	1	50 169	5	10 431	52 896	3	7 704
方式 3	60 600	1	50 482	5	10 118	52 896	3	7 704
方式 4	60 600	1	49 907	5	10 693	52 896	3	7 704

注:表中李庄站 P=3%、5% 洪峰流量均为设计洪水频率的流量接近值;洪峰、削减洪峰单位均为 m³/s。

3.2 梯级水库防洪库容运用分析

金沙江下游梯级水库在控制李庄站洪水后,4种梯级水库防洪水量分配调度方式均剩余较大的防洪库容用于承担长江中下游及川江其他城市防洪任务。由于乌东德、白鹤滩、溪洛渡水库泄流能力均相对有限,故百年一遇设计洪水过程下各方案退水时间均较长,其中以方式1退水时间最长,对后续防洪较不利。各防洪水量分配方式下的梯级水库防洪库容运用情况见表4。由表4可知,当发生以金沙江来水为主的100年一遇设计洪水过程时,按李庄站作为防洪控制代表站进行洪水调度后,4种防洪水量分配方式下,以方式1防洪库容运用最大,方式3的防洪库容运用最小。当发生以岷江来水为主的100年一遇设计洪水过程时,按李庄站作为防洪控制代表站进行洪水调度后,4种防洪水量分配方式下,以方式3的防洪库容运用最小,意味着该方式可有更多的防洪库容用于长江中下游防洪需要。

表4 金沙江下游梯级水库防洪库容运用情况
Tab.4 Flood control reservoir capacity of cascade reservoir in the lower reaches of the Jinsha River

洪水方案	梯级水库	项目	梯级水库防洪水量分配运用方式				
			方式1	方式2	方式3	方式4	
			(乌东德防洪库容先运用)	(白鹤滩防洪库容先运用)	(溪洛渡防洪库容先运用)	(梯级水库防洪库容等比例运用)	
以金沙江来水为主的100年一遇设计洪水过程	乌东德	防洪库容运用/ 10^8 m^3	24.4	9.2	24.4	17.8	
		时段末库水位/m	952.0	952.0	952.0	952.0	
	白鹤滩	防洪库容运用/ 10^8 m^3	75.0	75.0	31.6	51.6	
		时段末库水位/m	803.5	785.0	785.0	785.0	
	溪洛渡	防洪库容运用/ 10^8 m^3	6.2	18.7	46.5	34.5	
		时段末库水位/m	566.0	560.0	560.0	560.0	
	向家坝	防洪库容运用/ 10^8 m^3	2.2	2.2	2.2	2.2	
		时段末库水位/m	372.5	370.0	370.0	370.0	
			总剩余防洪库容/ 10^8 m^3	47.13	49.83	50.23	48.83
	以岷江来水为主的100年一遇设计洪水过程	乌东德	防洪库容运用/ 10^8 m^3	24.4	10.8	24.4	16.5
时段末库水位/m			952.0	952.0	952.0	952.0	
白鹤滩		防洪库容运用/ 10^8 m^3	75.0	75.0	21.4	48.2	
		时段末库水位/m	819.7	799.0	785.6	790.0	
溪洛渡		防洪库容运用/ 10^8 m^3	3.6	17.3	46.5	32.2	
		时段末库水位/m	563.5	574.4	580.4	577.9	
向家坝		防洪库容运用/ 10^8 m^3	2.2	2.2	2.2	2.2	
		时段末库水位/m	372.5	372.5	372.5	372.5	
		总剩余防洪库容/ 10^8 m^3	49.73	49.63	60.43	55.83	

3.3 梯级电站发电效益分析

对不同梯级水库防洪水量分配运用方式,分别对以金沙江来水为主、以岷江来水为主的100年一遇设计洪水调蓄过程中的发电效益分析计算,结果见表5。由表5可知:①各防洪水量分配方式中,以方式1的梯级电站整体发电效益最好,主要原因在于一方面乌东德水库消落深度较其他两个水库要小,相同的蓄水量乌东德水库水位更易上涨,以实现高水位运行,提高电站运行水头;另一方面是退水段乌东德和白鹤滩水库受溪洛渡

表5 金沙江下游梯级水库整场洪水过程发电量
Tab.5 Power generation scale of the entire flood process of cascade reservoirs in the lower reaches of the Jinsha River

梯级电站	以金沙江来水为主				以岷江来水为主			
	方式1	方式2	方式3	方式4	方式1	方式2	方式3	方式4
	(乌东德防洪库容先运用)	(白鹤滩防洪库容先运用)	(溪洛渡防洪库容先运用)	(梯级水库防洪库容比例运用)	(乌东德防洪库容先运用)	(白鹤滩防洪库容先运用)	(溪洛渡防洪库容先运用)	(梯级水库防洪库容比例运用)
乌东德	58.99	52.37	55.77	54.62	52.78	51.58	53.04	52.50
白鹤滩	108.55	99.56	90.21	94.54	95.49	89.75	85.47	87.26
溪洛渡	78.03	76.75	86.74	83.27	74.56	72.04	77.82	75.14
向家坝	38.86	35.91	35.86	35.88	39.16	36.56	35.44	35.78
合计	284.43	264.59	268.58	268.31	261.99	249.93	251.76	250.69

水库泄流能力限制而维持较长时间的高水位运行。②各防洪水量分配方式中,以方式2的梯级电站整体发电效益最差,主要是由于白鹤滩水库的库容特性所致,即每增加 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 蓄水量提高的水位值相对较小。

3.4 梯级水库防洪运用实施操作灵活度分析

从梯级水库防洪库容运用实施操作灵活角度分析,由于乌东德、白鹤滩、溪洛渡水库泄流能力相对均有限(相对于入库洪水流量),蓄水期会出现不同程度的被动蓄水情况,因此若以乌东德水库先防洪运用的防洪水量分配方式,其防洪蓄水量包含了被动蓄水量,自上而下进行梯级水库调度实施操作相对较为简单;而若以白鹤滩或溪洛渡水库先运用的防洪水量分配方式,其蓄水量受上游水库被动蓄水量决定,实施操作相对较为复杂些,同时考虑下游水库先蓄满后再利用上游梯级开始防洪库容运用的转换,实施起来有一定难度。因此,从梯级水库防洪库容运用实施操作灵活角度分析,乌东德水库先防洪运用的水量分配方式更有利。

4 结论

a. 本文考虑4种梯级水库防洪水量分配方式,从防洪效果、防洪库容运用、梯级水库发电效益和调度灵活性等角度探讨了金沙江下游梯级水库的防洪水量分配方式。

b. 在满足下游川江和长江中下游防洪要求的前提下,从利用洪水资源、增加梯级电站整体发电效益角度,在防洪水量分配运用调度中,建议考虑防洪库容运用的顺序依次为乌东德水库、溪洛渡水库、白鹤滩水库。

参考文献:

[1] 胡向阳,丁毅,邹强,等.面向多区域防洪的长江上游水库群协同调度模型[J].人民长江,2020,51(1):56-63,79.

参考文献:

[1] 徐宗学,程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础——城市水文学研究进展 [J]. 水利学报, 2019, 50(1): 53-61.

[2] 夏军,张印,梁昌梅,等. 城市雨洪模型研究综述 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(2): 95-105.

[3] 刘勇,张韶月,柳林,等. 智慧城市视角下城市洪涝模拟研究综述 [J]. 地理科学进展, 2015, 34(4): 494-504.

[4] 周宏,刘俊,高成,等. 考虑有效不透水下垫面的

城市雨洪模拟模型——II. 雨洪模拟及水文响应分析 [J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 485-494.

[5] 周文琦,俞芳琴,刘俊,等. LID 措施对城南河流域水质改善效果研究 [J]. 江苏水利, 2021(1): 39-44.

[6] 曾照洋,王兆礼,吴旭树,等. 基于 SWMM 和 LISFLOOD 模型的暴雨内涝模拟研究 [J]. 水力发电学报, 2017, 36(5): 68-77.

[7] 李鹏,徐宗学,赵刚,等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型的城市暴雨内涝模拟——以济南市为例 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(6): 1083-1092.

Low-impact Development Design and Evaluation of Residential Areas Based on SWMM and LISFLOOD-FP Models

HU Jin-hui^{a,b}, HAN Ming-yang^{a,b}, WU Ze-xin^{a,b}, XU Mo-ran^{a,b}, SUN Ying-na^{a,b}

(a. School of Hydraulic and Electric Power; b. Sino-Russian Cold Region Hydrology and Hydraulic Engineering Joint Laboratory, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to solve the problem that the one-dimensional SWMM model is difficult to visually display the submerged depth and range of the study area, taking a residential area in Brighton as an example, the SWMM model coupled with the LISFLOOD-FP two-dimensional hydrodynamic model has a low impact on the residential area. The waterlogging situation before the development and renovation was analyzed and the inundation range and water depth map were made, and three different low-impact development (LID) schemes (single green roof scheme, single permeable pavement scheme, and combination scheme) were designed to transform the residential area. The results show that the inundation range is consistent with the actual waterlogging points, which shows that the two-dimensional coupling model has high reliability, and the three low-impact development schemes can effectively eliminate overflow nodes, reduce runoff peaks, and delay peak occurrence time and water receding time, which is of great significance to improve urban drainage and reconstruction technology.

Key words: SWMM; LISFLOOD-FP; low impact development; coupled model; waterlogging



(上接第 50 页)

[2] 水利部长江水利委员会. 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[R]. 武汉:水利部长江水利委员会, 2011.

[3] 李书飞,陈肃利,何小聪. 水库群联合防洪调度系统建设关键技术:以金沙江下游梯级和长江三峡水库为例[J]. 水电与新能源, 2014(2):1-5.

[4] 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]. 长江科学院报, 2010, 27(10):5-9.

[5] 贾本有,钟平安,陈娟,等. 复杂防洪系统联合优化调度模型[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 560-571.

[6] 冯仲恺,廖胜利,牛文静,等. 改进量子粒子群算法在水电站群优化调度中的应用[J]. 水科学进展, 2015, 26(3):413-422.

[7] 文小浩,张勇传,钮新强,等. 溪洛渡,向家坝水库配合三峡水库对城陵矶防洪调度优化研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(6):71-74.

[8] 陈芳. 金沙江下游梯级水库群优化调度研究及应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.

Research on Flood Control Storage Capacity Distribution Method of Cascade Reservoirs in the Lower Reaches of the Jinsha River

WANG Wei¹, JU Bin², WANG Peng-fei¹, OUYANG Qiu-ping¹

(1. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610095, China;

2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: In order to maximize the comprehensive benefits of cascade reservoirs in the lower reaches of the Jinsha River, it is necessary to study the application mode of joint flood control scheduling. Adopting the flood process in different areas with the incoming water from the Jinsha River and the Minjiang River as the mainstay, the flood regulation calculation, flood control analysis, flood control storage capacity utilization, and cascade power generation benefit calculation of the cascade reservoirs in the downstream of the Jinsha River were studied by using relevant mathematical analysis methods. The flood control distribution method of the cascade reservoirs in the lower reaches of the Jinsha River to meet the goal of flood prevention in the Chuanjiang River was studied. The research results show that on the premise of meeting the flood control requirements of the downstream Chuanjiang River, from the perspective of making full use of flood resources and increasing the overall power generation benefits of cascade power stations, in the distribution and dispatching of flood control, it is recommended that the order of flood control storage capacity utilization of cascade reservoirs downstream of the Jinsha River is as follows: Wudongde Reservoir, Xiluodu Reservoir, Baihetan Reservoir. The research results can provide references for rational and scientific flood control operation of cascade reservoirs in the lower reaches of the Jinsha River and similar basins.

Key words: the lower reaches of Jinsha River; cascade reservoirs; flood control storage capacity distribution method; joint flood control operation