



大型水库群蓄水后下游河道枯水期 流量增幅估算*

李家世¹, 邓 涯^{2,3}, 何 熙¹, 马爱兴^{2,3}, 贾国珍¹

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017;

2. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 南京水利科学研究院, 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 随着流域上游大型水库群建设, 由于“蓄丰补枯”的调节方式, 下游河道枯水期流量增幅明显, 对航道条件改善具有重要意义。在金沙江下游控制性水文站历年水文资料的基础上, 对不同时期水库群建设后河道枯水期流量变化进行分析, 提出一套基于水库群调节库容的下游河道枯水期不同保证率流量增幅的理论计算方法, 并定量预测了乌东德、白鹤滩运行后向家坝站 95% 保证率流量为 $2\,172\text{ m}^3/\text{s}$, 与实际统计的 $2\,007\text{ m}^3/\text{s}$ 较为接近。此理论计算方法可为其他河流梯级水库群建设后, 下游航道枯水期流量的估算提供借鉴。

关键词: 水库群; 调节库容; 流量增幅; 估算方法

中图分类号: U 617.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S1-0068-07

Estimation of downstream river discharge amplification in dry season after upstream large reservoir group construction

LI Jia-shi¹, DENG Ya^{2,3}, HE Xi¹, MA Ai-xing^{2,3}, JIA Guo-zhen¹

(1. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Key Laboratory of Port, Waterway & Sedimentation Engineering Ministry of Communications,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: As large reservoir groups are constructed in the upstream of the watershed, the downstream river discharge increases significantly in the dry season due to the mode of storing water in the wet season and supplying water in the dry season, which is of great significance to improve waterway conditions. Based on hydrological data of the downstream control hydrologic stations of Jinsha River over previous years, we analyze river discharge variations in the dry season during different periods of reservoir group construction and put forward a theoretical method for calculating downstream river discharge amplification under different guarantee rates in the dry season based on reservoir capacity adjustment of reservoir groups. Then we predict quantitatively that the river discharge of Xiangjiaba station under a guarantee rate of 95% is $2\,172\text{ m}^3/\text{s}$ after two reservoirs are constructed in Wudongde and Baihetan. The value approximates the actual statistic value of $2\,007\text{ m}^3/\text{s}$. Therefore, the proposed theoretical method can provide references for estimating downstream river discharge in the dry season after cascade reservoir groups are built in other rivers.

Keywords: reservoir group; reservoir capacity adjustment; river discharge amplification; estimation method

收稿日期: 2022-06-13

*基金项目: 四川省科技计划项目(2022YFS0467); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y220011、Y221012、Y221013、Y222011)

作者简介: 李家世(1981—), 男, 高级工程师, 从事内河港口与航道工程设计与研究。

西南地区是我国重要的水电能源基地, 长江流域上游的金沙江、雅砻江、岷江和大渡河等干支河道已建设有近 10 座大型水电站。流域上游水库群修建后, 由于其不同的运行方式, 下游河道的水文情势与天然状态将有所差异^[1], 尤其是具有较大调节库容的水库。整体来说, 大型枢纽修建后以其“蓄丰补枯”的年内调节方式, 下游河道枯期流量将会明显增加^[2-4]。

流域水库群建设后对下游河道水文情势的影响, 也一直是河流动力学、水利水电工程相关学者研究的重点^[5-6]。水库群不同的调节库容对径流调节能力也有所差异, 多年调节能力水库对下游河道径流的影响将会是年际的, 而季调节水库主要是对径流的年内分布有所调整, 年际差异不大^[7-8], 调节能力最差的日调节水库, 基本为径流式电站^[9-10]。

对于航运相关部门而言, 其更为关心的是河道枯水期流量变化, 尤其是接近航道设计标准的保证率流量、河道流量低于设计最小通航流量等均可能造成不同程度的碍航出浅, 影响航运效益的发挥。然而, 目前关于流域水库群蓄水后对河道枯水期流量的研究, 多为揭示蓄水前后月均流量变化规律, 缺乏对于未来流域规划水库群蓄水后下游河道枯水期流量增幅计算方法的研究。

本文基于 1956—2020 年金沙江下游长系列径流资料, 采用理论分析与统计学原理相结合的方法, 提出一套基于水库群调节库容的下游河道枯期不同保证率流量增幅的理论计算方法, 并对近期水库群运行后枯水期径流实际增幅进行检验, 估算了流域总调节库容增加后枯水期不同保证率的流量。研究成果可为水库群修建后下游航道条件的变化预测提供技术支撑。

1 河段概况

金沙江是长江干流的上游河段, 发源于青海省唐古拉山主峰格拉丹冬雪山西南侧的沱沱河, 其中青海玉树以上称为通天河, 玉树—宜宾称金沙江, 全长 2 136 km, 流域面积 47.32 万 km², 河

道平均比降 0.96‰。金沙江水量丰富, 主要来源于降水和融雪, 下游控制性水文站原为水富港上游约 30 km 处屏山水文站, 后在 2012 年由向家坝电站下游的向家坝水文站取代, 为金沙江下游的控制站。根据屏山站和向家坝站 1956—2020 年的资料统计分析, 多年平均流量为 4 483 m³/s, 整体上年平均流量变化不大, 但径流年内分布不均, 洪水期(7—10 月)径流量占年径流量的 65.1%, 而 12 月—次年 4 月为枯水期, 径流量占全年的 14.6%。洪峰多出现在每年的 7—9 月, 最小流量出现在每年的 1—3 月。

金沙江下游水库群主要包括乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝等 4 座大型水电站, 总库容 458.68 亿 m³, 防洪库容 154.93 亿 m³, 以及雅砻江上二滩、锦屏一级、两河口水电站, 见表 1。

表 1 主要水库情况

水系	枢纽	蓄水运行年份	调节库容/亿 m ³	水库调节能力
金沙江	向家坝	2014	9.03	日调节
	溪洛渡	2014	64.62	不完全年调节
	白鹤滩	2021	104.36	年调节
	乌东德	2021	30.20	季调节
	二滩	2000	33.93	季调节
雅砻江	锦屏一级	2014	49.11	年调节
	两河口	2023	65.60	多年调节

乌东德水电站位于云南省禄劝县和四川省会东县交界的金沙江干流上, 是金沙江下游梯级水库群的第 1 座枢纽, 为 I 等大(1)型工程, 枢纽工程主体建筑物由挡水建筑物、泄水建筑物、引水发电建筑物等组成。乌东德水电站正常蓄水位 975 m 下库容 58.63 亿 m³, 死水位 945 m 下库容 28.43 亿 m³, 调节库容 30.20 亿 m³, 属于季调节水库。2015 年 12 月, 乌东德水电站全面开工; 2020 年 5 月, 工程第二阶段蓄水至 945 m 顺利通过验收; 2020 年 5 月, 乌东德水电站已全面进入 945 m 蓄水阶段。

白鹤滩水电站位于金沙江干流下游河段, 是金沙江下游梯级枢纽群的第 2 级, 距宁南县城约 22 km。白鹤滩电站为 I 等大(1)型工程, 枢纽工程由拦河坝、泄洪消能设施、引水发电系统等主要建筑物组成。白鹤滩电站正常蓄水位 825 m 下库

容 190.06 亿 m³，死水位 765 m 下库容 85.70 亿 m³，调节库容 104.36 亿 m³，属于年调节水库。2013 年白鹤滩水电站主体工程正式开工，2021 年 4 月正式下闸蓄水，2021 年 6 月首批机组发电，2022 年工程完工。

溪洛渡水电站位于四川省雷波县和云南省永善县接壤的金沙江峡谷段，总装机容量 13.86 GW，仅次于三峡和巴西伊泰普水电站，是金沙江下游梯级枢纽群的第 3 级。溪洛渡水电站枢纽由拦河坝、泄洪、引水、发电等建筑物组成，正常蓄水位 600 m 下库容 115.74 亿 m³，死水位 540 m 下库容 51.12 亿 m³，调节库容 64.62 亿 m³，属于不完全年调节水库。2007 年 4 月，溪洛渡电站大坝主体工程开工，2007 年 11 月，启动截流工程，2013 年 5 月开始第一阶段蓄水，2013 年 7 月正式投产发电运行。

向家坝水电站是金沙江下游梯级开发中最末的梯级，坝址位于四川、云南两省交界的水富港

以上 3 km，上距溪洛渡电站坝址 157 km，下距水富县城区 1.5 km、宜宾市区 33 km。向家坝电站正常蓄水位 380 m 下库容 49.77 亿 m³，死水位 370 m 下库容 40.74 亿 m³，调节库容 9.03 亿 m³，属于日调节水库。向家坝电站工程于 2006 年 11 月正式开工建设，2012 年 11 月首台机组投产，2014 年 7 月全面投产。

2 水库群蓄水对向家坝(屏山站)水文站流量的影响

2.1 月均流量变化情况

在 2000 年二滩水电站蓄水运行后，金沙江下游枯期 12 月一次年 4 月的月均流量增幅在 12~424 m³/s，其中最大增幅出现在 3 月，见表 2。2014 年锦屏一级、溪洛渡和向家坝蓄水运行后，枯水期月均流量增幅为 185~1 254 m³/s。同样汛期 6—9 月月均流量大幅减少，2000 年二滩运行后减小 158~465 m³/s，2014 年溪洛渡等运行后减小 547~1 574 m³/s。

表 2 金沙江多年月均流量变化

月份	天然情况月均流量 (1956—1999 年)/(m ³ ·s ⁻¹)	水库建成后月均流量/(m ³ ·s ⁻¹)		流量增幅/(m ³ ·s ⁻¹)	
		二滩运行 (2000—2013 年)	溪洛渡等运行 (2014—2020 年)	二滩运行 (2000—2013 年)	溪洛渡等运行 (2014—2020 年)
1	1 621	1 951	2 393	330	772
2	1 395	1 720	2 212	325	817
3	1 292	1 716	2 546	424	1 254
4	1 484	1 760	2 597	276	1 113
5	2 203	2 375	2 967	172	764
6	4 683	4 690	4 136	7	-547
7	9 321	9 163	7 747	-158	-1 574
8	10 029	9 645	8 676	-384	-1 353
9	9 610	9 792	8 829	182	-781
10	6 397	5 932	6 402	-465	5
11	3 363	3 294	3 548	-69	185
12	2 141	2 153	2 356	12	215

2.2 枯水期流量变化

通过统计 1956—2020 年金沙江下游控制性水文站屏山站和向家坝站历史水文资料，采用多年历时保证率法，对天然情况、二滩水电站运行后(2000—2013 年)、溪洛渡等枢纽运行后(2014—2020 年)等不同时期枯水期不同保证率流量进行统计，见表 3 和图 1。

表 3 金沙江(向家坝站)不同时期不同保证率流量 m³/s

保证率/%	天然情况 (1956—1999 年)	二滩运行 (2000—2013 年)	溪洛渡等运行 (2014—2020 年)	相比天然情况的流量增幅
70	1 656	1 956	2 421	765
75	1 536	1 877	2 275	739
80	1 444	1 797	2 133	689
85	1 370	1 713	2 002	632
90	1 299	1 597	1 888	589
95	1 222	1 462	1 749	527
98	1 164	1 329	1 699	535

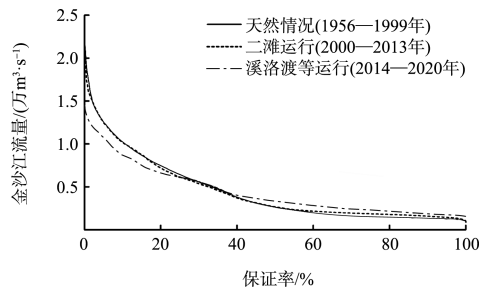


图1 金沙江(向家坝站)枯期流量保证率曲线

根据二滩水电站运行前的 1956—1999 年金沙江屏山站日均流量资料,在天然情况金沙江 70%~98%保证率下枯期流量在 1 164~1 656 m³/s,其中 95%保证率的枯期流量为 1 222 m³/s。

二滩水电站于 2000 年投产运行,调节库容 33.93 亿 m³,属于季调节水库。因此,在 2000 年至下游新的大型水库运行前,2000—2013 年枯期流量保证率 70%~98%为 1 329~1 956 m³/s,其中 95%保证率的枯期流量为 1 462 m³/s,相比天然状况下增加 298 m³/s。

2014 年金沙江下游梯级枢纽溪洛渡、向家坝正式蓄水运行,总调节库容 122.76 亿 m³,加上二滩水电站则上游水库群总调节库容为 156.69 亿 m³。因此,在溪洛渡等枢纽运行后,2014—2020 年枯期流量保证率 70%~98%为 1 699~2 421 m³/s,其中 95%保证率的枯期流量为 1 749 m³/s,相比天然状况下增加 527 m³/s,增幅明显,其他保证率 90%和 80%的流量分别为 1 888 和 2 133 m³/s。

3 水库蓄水后河道枯期流量增幅计算方法

3.1 分析框架

金沙江流域大型水库的功能定位基本为防洪第一、供水与发电、生态次之,在每年汛期(6—9 月上旬)的运行方式主要为洪水削峰,在汛前 5 月主要为腾库备洪,在 9 月下旬—10 月进入回蓄期,而后的 11 月—次年 4 月的枯期主要为蓄水发电与兼顾供水、生态。由此可见,从水库的自身运行调度方式上分析,在汛期由于拦蓄削峰的作用,下游河道流量将会减小;而在枯期由于发电、供水和生态的方面考虑,下游河道流量将有所增加;在汛前水库腾库备洪的方式,也会使 5 月的流量

有所增加,而汛末的回蓄使河道流量减小。

水库蓄水后对下游河道枯期流量的影响主要取决于水库的调节库容,而水库具体的下泄流量则与上游来流、调度目标有关,所以补水期各月份的流量增幅也将有所差异。因此,计算未来水库群新增调节库容下,下游河道枯期不同保证率流量增幅的主要思路见图 2。

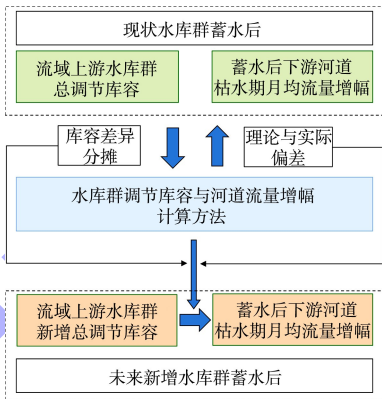


图2 水库蓄水后河道枯期流量增幅计算方法框架

枯期不同保证率流量增幅计算方法的具体思路为:1)对实际已发生的水库蓄水后年内各月份月均流量的变化进行统计,计算最枯月份流量增幅在整个补水期的占比;2)根据上述比值,将实际已蓄水运行水库的调节库容折减后,摊入最枯月份,计算最枯月份月均流量的理论增幅,并与实际增幅进行比较,得到相关系数;3)采用同样的库容折减比,将未来新增调节库容摊入最枯月份,计算月均流量理论增幅,并根据已发生的理论与实际相关系数,再进一步折减;4)根据实际枯期各保证率流量增幅与最枯月份月均流量增幅的比例,计算相应保证率下流量增幅,最终得到未来枢纽运行后枯期不同保证率流量。

3.2 计算步骤

1)根据实际已发生的上游枢纽蓄水后下游河道年内月均流量变化情况,计算最枯月份月均流量相比枢纽运行前的实际增幅 $\Delta Q_{0\text{枯月}}$ 在年内所有补水期月均流量总增幅 $\sum \Delta Q_{0\text{枯期}}$ 中的比值,即:

$$\Delta Q_{0\text{枯月}} / \sum \Delta Q_{0\text{枯期}} \circ$$

2)根据 $\Delta Q_{0\text{枯月}} / \sum \Delta Q_{0\text{枯期}}$ 将上游水库群的可

调节总库容 $\sum V_{0\text{调节}}$ 摊入最枯月份计算月均流量增幅理论值 $\Delta Q_{1\text{枯月}}$ ，即：

$$\Delta Q_{1\text{枯月}} = (\Delta Q_{0\text{枯月}} / \sum \Delta Q_{0\text{枯期}}) \sum V_{0\text{调节}} / (D_{\text{最枯月}} \times 24 \times 3\,600) \tag{1}$$

式中： $D_{\text{最枯月}}$ 为最枯月份总时间(d)。

进而计算年内最枯月份流量增幅理论值与增幅实际值的偏差，即：

$$\text{Dev}_0 = (\Delta Q_{1\text{枯月}} - \Delta Q_{0\text{枯月}}) / \Delta Q_{0\text{枯月}} \tag{2}$$

3) 根据式(1)中最枯月份流量增幅理论值的计算方法，计算未来枢纽蓄水后最枯月份月均流量增幅理论值 $\Delta Q_{2\text{枯月}}$ ，即：

$$\Delta Q_{2\text{枯月}} = (\Delta Q_{0\text{枯月}} / \sum \Delta Q_{0\text{枯期}}) \sum V_{\text{未来调节}} / (D_{\text{枯月}} \times 24 \times 3\,600) \tag{3}$$

式中： $\sum V_{\text{未来调节}}$ 为未来枢纽修建后增加的可调节库容总量。

根据式(2)计算的 Dev_0 ，对未来增幅理论值 $\Delta Q_{2\text{枯月}}$ 进行修正，计算未来最枯月份月均流量增幅 $\Delta Q_{\text{未来枯月}}$ ，即：

$$\Delta Q_{\text{未来枯月}} = \Delta Q_{2\text{枯月}} (1 - \text{Dev}_0) \tag{4}$$

4) 对实际发生的枢纽蓄水后枯期保证率流量增幅 $\Delta Q_{0\text{保证率}}$ 与最枯月份月均流量增幅 $\Delta Q_{0\text{枯月}}$ 的比值进行计算，即： $\Delta Q_{0\text{保证率}} / \Delta Q_{0\text{枯月}}$ 。进而根据此比值和未来最枯月份月均流量增幅 $\Delta Q_{\text{未来枯月}}$ ，计算未来某保证率流量增幅 $\Delta Q_{1\text{保证率}}$ ，即：

$$\Delta Q_{1\text{保证率}} = \Delta Q_{\text{未来枯月}} (\Delta Q_{0\text{保证率}} / \Delta Q_{0\text{枯月}}) \tag{5}$$

5) 根据现状下枯期某保证率流量大小 $Q_{0\text{保证率}}$ 和未来此保证率流量增幅 $\Delta Q_{1\text{保证率}}$ ，计算未来枢纽蓄水后枯期该保证率流量 $Q_{1\text{保证率}}$ ，即：

$$Q_{1\text{保证率}} = Q_{0\text{保证率}} + \Delta Q_{1\text{保证率}} \tag{6}$$

4 金沙江(向家坝站)不同保证率流量预测与验证

4.1 不同保证率流量预测

基于水库蓄水后河道枯期流量增幅计算方法，对未来金沙江、雅砻江流域枢纽建设后枯期不同保证率流量进行初步分析。

2021 年金沙江流域新增投入运行的枢纽主要为乌东德和白鹤滩，总计调节库容 134.56 亿 m^3 。根据二滩运行后(2000—2013 年,调节库容 33.93 亿 m^3)和

溪洛渡+锦屏一级+向家坝运行后(2014—2020 年,总计调节库容 156.69 亿 m^3)，月均流量增加情况见表 2 和图 3。可知上游枢纽运行后对 11 月一次年 5 月流量有所增加，但各月份增加幅度明显不同，其中 1—5 月流量增幅在 764~1 253 m^3/s ，占比共 92%。

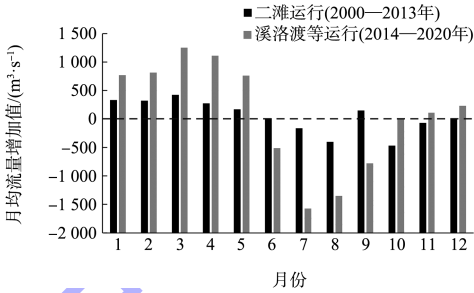


图3 不同时期金沙江向家坝站月均流量变化

不同阶段年内各月月均流量统计见表 2 和图 4。可以看出，在天然情况下(1956—1999 年)，最枯月份为 3 月(1 292 m^3/s)，其次为 2 月(1 395 m^3/s)；在二滩水电站运行后(2000—2013 年)，最枯月份为 3 月(1 720 m^3/s)，其次为 2 月(1 716 m^3/s)，两者已基本接近。

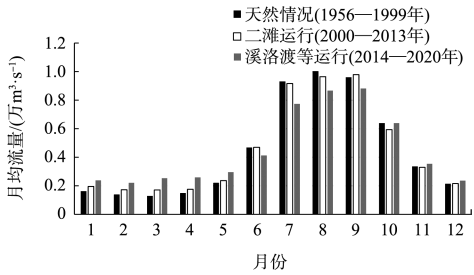


图4 金沙江向家坝站径流量年内分布

在溪洛渡等运行后的近期(2014—2020 年)，最枯月份为 2 月(2 212 m^3/s)，其次为 12 月(2 375 m^3/s)。由上可见，自 2000 年后 2 月基本为年内最枯月份，不满足或接近保证率 95% 的流量也可能多出现在此月份。

自溪洛渡等枢纽运行后(2014—2020 年)，最枯月份 2 月的月均流量增幅为 817 m^3/s ，占补水期(1—5 月和 11、12 月)全部增加流量(5 125 m^3/s)的 16%。因此，式(1)中可将 2014 年后溪洛渡等枢纽调节库容的 16%摊入 2 月份，而后计算 2 月份流量增幅的理论值，即：156.69 亿 $\text{m}^3 \times 16\% /$

(28 d×24 h×3 600 s)=1 036 m³/s。

与实际增幅 817 m³/s 相比, 偏差系数为 26.8%。采用相同方法对 2021 年白鹤滩乌东德枢纽运行后的 2 月流量增幅进行计算, 扣除偏差 26.8% 后为 651 m³/s, 见表 4。同时考虑到 95%、90% 和 80% 保证率流量虽大概率出现在每年 2 月, 但其与月均流量仍有差异, 因此参照现状枢纽运行后 95%、

90%、80% 保证率流量增幅与 2 月的月均流量增幅 817 m³/s 的比值(分别为 0.65、0.72、0.84), 对 2 月份月均流量增幅进行相应折减, 进而得到 2021 年后不同保证率枯期流量的增幅为 423、469、547 m³/s, 见表 5。所以未来枢纽运行后, 金沙江 95%、90%、80% 保证率枯期流量为 2 172、2 357、2 680 m³/s。

表 4 金沙江流域枢纽建设对下游河道流量增加情况

水库名称	调节库容/亿 m ³	2 月月均流量增幅理论值/(m ³ ·s ⁻¹)	偏差系数/%
二滩+溪洛渡+锦屏一级+向家坝	156.69	1 036	26.8
乌东德+白鹤滩(2021 年)	134.56	651	-

注: 偏差系数是指计算的流量增幅与实际流量增幅的差异比值。

表 5 乌东德和白鹤滩枢纽运行后不同保证率流量变化情况

现状(2014—2020 年)				未来(2021 年后)	
保证率/%	枯期流量/(m ³ ·s ⁻¹)	相比天然情况增幅/(m ³ ·s ⁻¹)	保证率流量增幅与 2 月份月均流量增幅比值	保证率流量理论增加值/(m ³ ·s ⁻¹)	枯期流量/(m ³ ·s ⁻¹)
95	1 749	527	0.65	423	2 172
90	1 888	589	0.72	469	2 357
80	2 133	689	0.84	547	2 680

4.2 保证率流量预测验证

为了验证提出的流域水库群运行后下游河道枯水期流量理论计算方法的合理性, 收集了向家坝水文站 2021 年 6 月—2022 年 5 月实测资料, 并对月均流量和不同保证率流量进行统计, 分别见表 6、7。

通过对于理论预测值与实际值可知, 乌东德与白鹤滩运行后理论预测值与实际统计值较为接近, 误差在 10% 以内, 误差产生的原因可能为上述两个水库调节库容尚未充分运用, 以及坝址与向家坝水文站间沿程河道调蓄有关。

表 6 乌东德和白鹤滩运行后金沙江向家坝水文站月均流量变化

月份	月均流量/(m ³ ·s ⁻¹)		流量差值/(m ³ ·s ⁻¹)
	乌东德和白鹤滩运行后(2021—2022 年)	乌东德和白鹤滩运行前(2014—2020 年)	
1	2 559	2 393	166
2	2 586	2 212	374
3	2 628	2 546	82
4	3 382	2 597	785
5	4 060	2 967	1 093
6	3 005	4 136	-1 131
7	6 375	7 747	-1 372
8	5 307	8 676	-3 369
9	8 122	8 829	-707
10	6 032	6 402	-370
11	4 034	3 548	486
12	2 904	2 356	548

表 7 乌东德和白鹤滩运行后(2021—2022 年)金沙江向家坝水文站不同保证率流量变化情况

保证率/%	流量/(m ³ ·s ⁻¹)					误差/%
	天然情况(1956—1999 年)	二滩运行(2000—2013 年)	溪洛渡等运行(2014—2020 年)	预测值(2021—2022 年)	实际统计值(2021—2022 年)	
80	1 444	1 797	2 133	2 680	2 700	-0.7
90	1 299	1 597	1 888	2 357	2 166	8.8
95	1 222	1 462	1 749	2 172	2 007	8.2

5 结语

1) 现状(2020 年)下金沙江上游流域总调节库容

达到 156.69 亿 m³, 95% 保证率流量为 1 749 m³/s, 相比天然状况下增加 527 m³/s。

2) 本文提出一套基于流域调节库容折减和保证率流量与月均流量增幅差异的水库蓄水后河道枯水期流量增幅计算方法, 可为水库群修建后下游航道条件的变化预测提供技术支撑。

3) 在 2021 年乌东德与白鹤滩水库运行后, 流域总调节库容增加 134.56 亿 m^3 , 向家坝站 95% 保证率流量理论预测值为 2 172 m^3/s , 与实际统计值 2 007 m^3/s 较为接近。

参考文献:

[1] 刘文彬, 杨涛, 杜牧野, 等. 三峡水库运行对长江中下游典型水文站水文机制的影响[J]. 三峡生态环境监测, 2018, 3(3): 8-15.

[2] 方神光, 崔丽琴. 枯季西江中游梯级水库调度对梧州流量影响初探[J]. 中国农村水利水电, 2017(8): 65-69.

[3] 戴明龙. 长江上游巨型水库群运行对流域水文情势影响研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.

[4] 李家世, 刘晓帆. 梯级水库建设对岷江下游航道通航流量的影响[J]. 水运工程, 2021(6): 164-170, 193.

[5] 尹小玲, 王光谦, 李铁键, 等. 枯季梧州流量对龙滩水库泄流量的响应关系[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38(10): 118-122, 129.

[6] 翁文林, 刘尧成, 周新春. 长江上游水库群兴建对水沙情势的影响分析[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(5): 1-4.

[7] 钟玉华. 三峡大坝建成前后下游水文气象序列的变异分析[J]. 水利科技与经济, 2016, 22(8): 75-77.

[8] 段唯鑫, 郭生练, 王俊. 长江上游大型水库群对宜昌站水文情势影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(1): 120-130.

[9] 杨景元. 大中型水库枯季流量计算问题[J]. 东北水利水电, 1993(5): 17-21, 32.

[10] 王秀颖. 辽宁省典型河流水利工程对流域水文特征的影响[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(2): 60-65.

(本文编辑 王璁)

(上接第 67 页)

5 结论

1) 在龙溪口航电枢纽工程淤积的施工明渠中局部疏浚形成临时航道, 数模结果显示除局部位位置横向流速超过 0.3 m/s 外, 临时航道内水深、流速、流态满足船舶安全航行的要求。

2) 实船试验结果表明: 1 000 t 及 300 t 船舶装载和空载上下行通过施工明渠临时航道, 其实测的通航水力指标(流速、比降等)以及船舶航行参数(舵角、漂角、航速等)均没有超过限值要求, 临时航道具有良好的通航条件。

3) 大型枢纽工程施工过程复杂, 尤其对于不能断航的河段, 须兼顾泄洪与通航的双重条件; 受各种环境因素影响, 造成通航水域泥沙淤积不可避免。在枢纽建设过程中采用数学模型能快速有效地分析工程区通航水流条件, 同时实船试验可为此段航道的正式通航及制定船舶驾驶操作方法提供依据。

参考文献:

[1] 刘文骞. 岷江龙溪口枢纽明渠布置及通航条件模拟研

究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.

[2] 中水东北勘察设计研究有限责任公司. 水利水电工程施工组织设计规范: SL 303—2017[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.

[3] 张绪进, 刘亚辉, 张湛, 等. 四川省岷江龙溪口航电枢纽工程(施工图阶段)施工导流与通航水工模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2019.

[4] 张信伟, 孙保虎, 胡峰军, 等. 汉江雅口航运枢纽工程施工期通航研究[J]. 水运工程, 2020(12): 155-160, 171.

[5] 孟雪峰. 云南水富港二期扩建工程通航研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.

[6] 宋禹辰. 温中坝河段卵石输移规律与航道治理对策研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.

[7] 周舟. 黄河中卫段航道整治参数的确定及数值模拟[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.

[8] 杨忠超, 陈明栋, 陈明. 水富港靠泊安全及进出港航行条件实船试验[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 19-23.

[9] 四川省交通勘察设计研究院有限公司. 龙溪口航电枢纽临时航道实船试验咨询报告[R]. 四川: 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 2021.

(本文编辑 武亚庆)