瀑布沟及下游泥沙优化调度实施与效果分析

杨冬梅， 熊灿林， 张自航
（国家能源大渡河流域生产指挥中心，四川 成都 610041）

摘 要：通过建立一维水沙数学模型，分析不同水位和流量级下瀑布沟－龚嘴－铜街子联合调度方案排沙效果。结果表明：利用瀑布沟－龚嘴－铜街子三库联合调度造峰排沙效果优于龚、铜两库独立调度排沙。适当抬高库区运行水位有助于提高发电效益，降低运行水位有助于提高排沙效果。从兼顾梯级水库联合排沙效果，适当提高龚、铜运行水位的经济运行方面综合考虑，采取龚、铜两库优化方案2联合瀑布沟水库造峰4 500 m^3/s的排沙方案效果最为适宜。

关键词：瀑布沟；淤积现状；调度方案；排沙效果
中图分类号：[TM622]；TV145；TV697.1＋2 **文献标识码**： B **文章编号**：1001-2184(2021)01-0113-05

Study on Practice and Performance of Optimized Sediment Scheduling over Pubugou and Downstream Reservoirs

YANG Dongmei, XIONG Canling, ZHANG Zihang
(Dadu River Production Command Center, CHN Energy Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610041)

Abstract: Through establishing one-dimensional mathematical model for water and sediment, this paper analyzes sediment removal performance of joint scheduling scheme of Pubugou-Gongzui-Tongjiezi reservoirs under different water and flow levels. The study shows that joint scheduling of Pubugou-Gongzui-Tongjiezi reservoirs is better than independent scheduling schemes of Gongzui and Tongjiezi reservoirs. Appropriate raising of operating water level of reservoir improves generation efficiency, and lowering operating water level improves the sediment removal performance. Taking into account joint sediment removal performance of cascade reservoir and economic operation owning to appropriate increase of operating water level of Gongzui and Tongjiezi reservoirs, joint scheduling of the optimized sediment removal scheme No. 2 of Gongzui and Tongjiezi reservoirs and that of Pubugou reservoir when peaking 4500 m3/s is adopted.

Key words: Pubugou reservoir; sedimentation situation; scheduling scheme; sediment removal performance

0 引 言

水库泥沙淤积与否的主要因素是水库运行方式及来水来沙条件[1]，因此，优化水库运行方式，控制汛期坝前水位及持续时间可有效减少泥沙淤积[2,3]。大渡河下游龚嘴、铜街子两库分别于1971年、1992年投产运行至今，泥沙淤积问题突出[4]。自2010年瀑布沟水库投运后，经瀑布沟－龚嘴－铜街子联合调度排沙，龚嘴和铜街子的总淤积量分别减少了9%和17.9%，为龚嘴、铜街子的泥沙优化调度提供了有利条件，本研究探析不同优化调度方案的排沙效果。

1 大渡河流域概况及泥沙淤积现状

1.1 流域概况

大渡河发源于青海省果洛山南麓，东西两源在双江口汇合，始称大渡河，经汉源、峨边、沙湾等地于乐山市注入岷江，干流全长1 062 km，流域面积77 400 km^2。瀑布沟是大渡河中游控制性水库。瀑布沟及下游梯级水库（电站），总装机容量6 798 MW，总库容54.75亿 m^3，总调节库容39.88亿 m^3，年发电量280.36亿kWh，图1为瀑布沟下游梯级水库（电站）位置示意图。

1.2 泥沙淤积现状

大渡河流域产沙区分三部分：泸定以上为上游产沙区，属色达－松潘板块，整体性良好，现代活动性弱。河谷地形开阔，河床宽坦，水流平缓，植被覆盖率70～80%以上，人类活动影响小，水土流失不严重。泸定水文站悬移质多年平均年输

收稿日期：2020-08-18

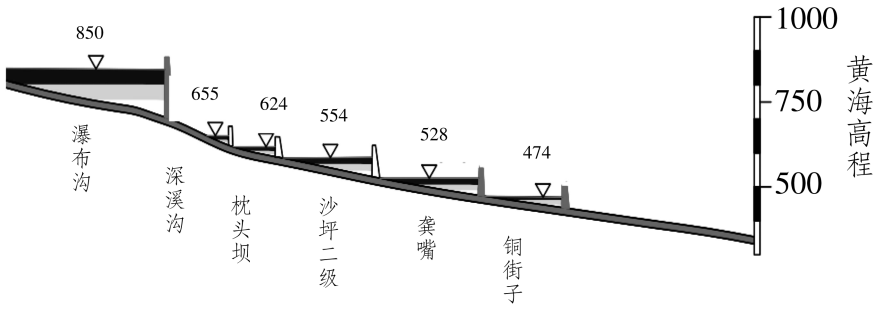

图 1　瀑布沟以下水库位置示意图

沙模数仅 173 t/ km^2,多年平均含沙量 360 g/ m^3,属微度侵蚀;泸定以下至峨边为中游产沙区,泸定至石棉段位于三个区域性断裂带交汇处,岩石易风化,汛期多暴雨,山洪暴涨,以田湾河、南桠河、流沙河、尼日河等支流较严重。植被覆盖率低于 40%,多年平均输沙模数达 1 670 t/(km^2 × a),是主要产沙区;峨边以下为下游产沙区,低山向丘陵宽谷过渡,岩体完整性好,植被条件良好。瀑布沟投运前,泥沙输至龚嘴和铜街子库区,龚、铜两库总淤积量分别达 25 018 万 m^3 和 13 218 万 m^3,占原始库容的 66.95%和 62.44%。

2　模型的建立和验证

2.1　模型的建立

建立瀑布沟以下河段一维非恒定输沙数学模型,分析不同方案下游河道冲淤变化规律,基本方程如下:

水流连续方程:

$$Q = BHU \tag{1}$$

水流运动方程:

$$\frac{dZ}{dX} = \frac{Q^2}{K^2} + \frac{U}{g}\frac{\partial U}{\partial x} \tag{2}$$

泥沙连续方程:

$$\frac{\partial (QS)}{\partial X} = -(g_x - g_s)B \tag{3}$$

河床变形方程:

$$\frac{\partial G}{\partial X} + \gamma_s' \frac{\partial AF}{\partial t} = 0 \tag{4}$$

式中　Q 为流量,B 为河宽,H 为平均水深,U 为平均流速,Z 为水位,$\bar{K}$ 为河段平均流量模数,S 为含沙量,G 为全沙输沙率,AF 为断面冲淤面积,X 为距离,tv 时间,g 为重力加速度。

2.2　模型验证

采用沙坪水文站 2003～2007 年的逐日平均流量、含沙量作为上边界,坝前逐日平均水位实测值作为下边界,对水库冲淤计算程序进行验证,参数取值范围:流速 0.41～1.79 m/s,水深 3.34～18.6 m,含沙量小于 2.72 kg/m^3,粒径 0.01～1.0 mm。验证计算的冲淤过程基本反映了龚嘴及铜街子两水库的冲淤过程,与实测情况基本一致(图 2),模型中选用的计算公式及算法能基本反映实际水库的冲淤变化过程。

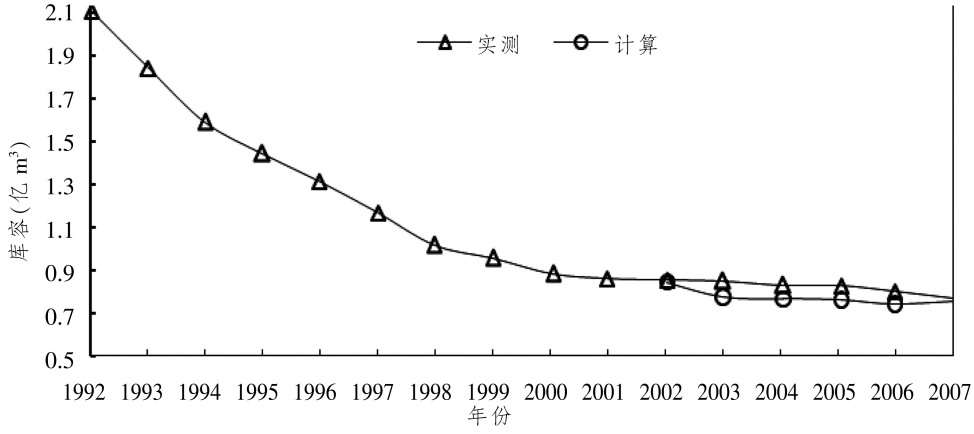

图 2　龚嘴水库 2003～2007 年实测与验证计算的剩余库容

3　优化联合调度方案

3.1　现行方案

龚、铜库容小，只具备日调节能力，需与上游瀑布沟联合排沙。瀑布沟对下游的调、蓄以不影响本身防洪发电任务为原则，利用汛期弃水从汛限水位 841 m 向下预泄造峰，再利用尾洪将坝前水位回蓄至 841 m。这样，未损失电量，不占用防洪库容，又可造峰排沙。龚嘴及铜街子水库运行调度方式如表 1：

3.2　优化方案

表 1　龚嘴及铜街子现行水库调度方案

方案	瀑布沟水库		龚嘴水库		铜街子水库	
	调峰入库流量 /$m^3 \cdot s^{-1}$	坝前水位 /m	调峰入库流量 /$m^3 \cdot s^{-1}$	坝前水位 /m	调峰入库流量 /$m^3 \cdot s^{-1}$	坝前水位 /m
方案 1	≥2 200	840.3－841	4 000	520	4 000	469
方案 2	≥2 200	840.1－841	4 500	520	4 500	469

多年实践经验表明，大渡河流域输沙量集中在 6～9 月，当入库小于分级流量，抬高运行水位，让泥沙淤积；当入库大于分级流量，降低运行水位，利于水库排沙[5]。龚嘴水库死水位 520m，汛期防洪限制水位 526 m，铜街子水库死水位 469 m，汛期防洪限制水位 472 m，综合考虑汛期水位调度运用区间，现拟瀑－龚－铜三库联合运行优化方案如表 2。

表 2　龚嘴及铜街子水库汛期 6～9 月水库运行水位优化方案表

方案	龚嘴水库		铜街子水库	
	入库流量＜5 000 /$m^3 \cdot s^{-1}$	入库流量＞5 000 /$m^3 \cdot s^{-1}$	入库流量＜5 000 /$m^3 \cdot s^{-1}$	入库流量＞5 000 /$m^3 \cdot s^{-1}$
优化方案 1	抬高 1 m	维持 520 m	抬高 1 m	维持 469 m
优化方案 2	抬高 2 m	维持 520 m	抬高 2 m	维持 469 m
优化方案 3	抬高 3 m	维持 520 m	抬高 3 m	维持 469 m

4　瀑布沟及下游水库联合排沙的效果

4.1　联合调度的排沙效果分析

与现行方案相比，龚嘴两个联合调度方案的最大累计冲沙量分别增大 106 万 m^3 及 247 万 m^3，增大 7.4%及 17.2%。铜街子两个联合调度方案的最大累计冲沙量分别增大 51 万 m^3 及 103 万 m^3，增大 4.8%及 9.7%。图 3 中累计冲淤量为正数表示累计淤积，负数表示累计冲刷。各方案在 15 年内均处于累计冲刷。铜街子两个联合调度方案的累计冲沙量在运行初期，因龚嘴水库相应联合调度方案出库沙量的增加，其累计冲沙量略小于现行方案，随着运行年限的增加，两个联合调度方案的累计冲沙量与现行水库运行方式的差值加大。水库运行 12 年后，两个联合调度方案的累计冲沙量基本不再回淤。第 20 年，铜街子水库 2 个联合调度方案与现行水库运行方案累计冲沙量的差值达 332 万 m^3 及 372 万 m^3。瀑布沟在建成后的前几年迅速冲沙，最大冲沙量达 1 060 万 m^3。

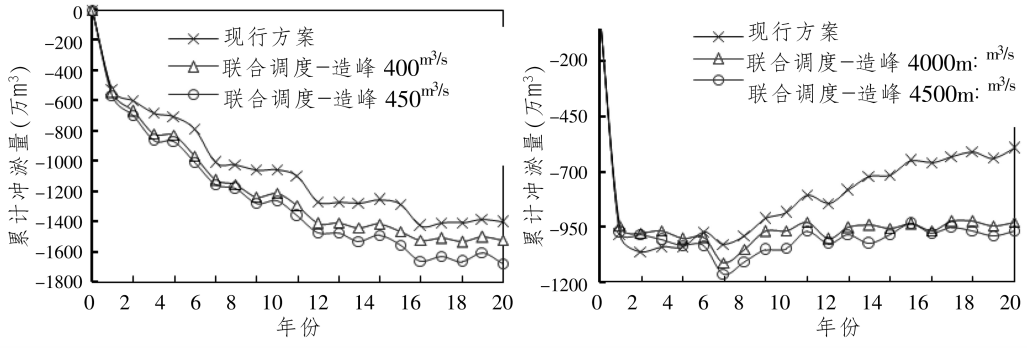

图 3　龚嘴（左）和铜街子（右）水库现行水库运行方式与两个联合调度方案的库区累计冲沙效果

4.2　优化方案的排沙效果分析

龚嘴水库优化方案 1 及优化方案 2 最大累计冲沙量分别为 894 万 m^3 及 404 万 m^3,水位升高对减弱库区的冲刷较明显,当优化方案 3 将汛坝前运行水位抬高 3m 后,龚嘴水库水库已处于微淤,最大淤积量约为 300 万 m^3。铜街子水库各优化方案均产生了不同程度的冲刷,库区最大冲刷在 650 万 m^3～819 万 m^3 之间,3 个优化方案的最大库区冲刷量相差不大。优化方案 3 因上游龚嘴水库相应优化方案的淤积,其最大冲刷量反而比优化方案 2 略有增加。所拟铜街子水库各优化方案表现出与现行水库运行方案类似的冲淤特性,即瀑布沟水库建成后前几年产生累计冲刷,后恢复缓慢淤积。各方案回淤特点各异,优化方案 2 及优化方案 3 的水库回淤速度快于优化方案 1。20 年后,优化方案 2 及优化方案 3 的库区累计冲刷量分别减少至 188 万 m^3 及 110 万 m^3,已接近至瀑布沟拦沙初期的水库淤积态(图 4)。

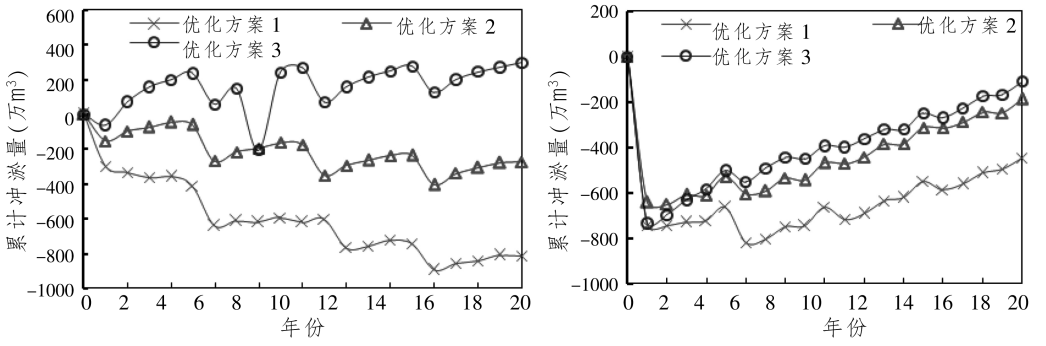

图 4　龚嘴(左)和铜街子(右)水库现优化方案的库区累计冲沙效果

4.3　优化方案下联合调度的排沙效果分析

按龚嘴水库优化方案 2 与联合调度方案 2 进行模拟,龚嘴库区最大冲刷量为 894 万 m^3,较优化方案 2 多冲刷 121%,冲刷减淤效果较好。运行约 16 年不再产生累计性冲刷并达到冲淤平衡。铜街子水库优化方案 2 实施联合调度后,其库区最大冲刷量为 923 万 m^3,较优化方案 2 多冲刷 42%,冲沙效果好且回淤速度减缓。水库运行 20 年后,联合调度的累计冲刷量为 622 万 m^3,优于优化方案 2。

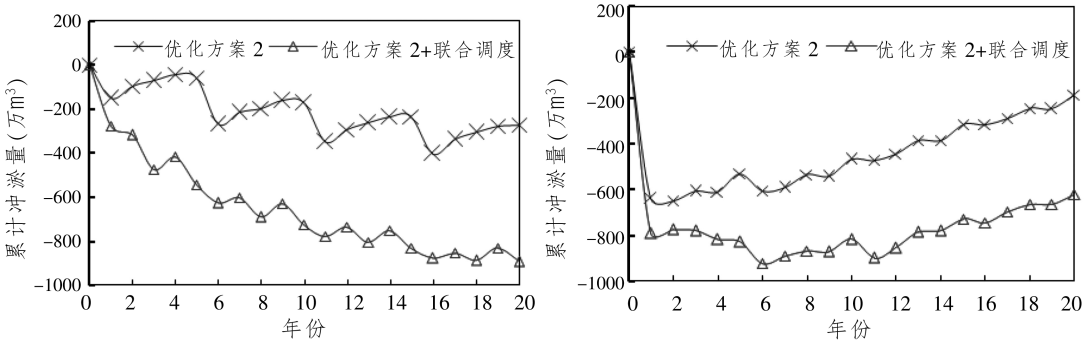

图 5　龚嘴(左)和铜街子(右)水库现优化方案联合调度的库区累计冲沙效果

4.4　优化方案下联合调度的泥沙级配

龚嘴水库冲刷出库的最大粒径为 20 mm,淤积物粒径范围基本在 0.1～10 mm 之间。随着时间增加,出库泥沙逐渐细化(图 6)。铜街子水库冲刷出库的最大粒径为 10 mm,被冲刷出库的泥沙大部分为粒径小于 0.25 mm,0.25 mm 以上的入库泥沙大部分淤积在铜街子水库中(图 7)。模结果表明,铜街子水库的出库级配基本趋势是逐渐细化。随着水库逐渐回淤,5 年后出库级配基本不变。

5　结　论

本研究分析大渡河流域瀑布沟－龚嘴－铜街子不同水位和流量级下的联合调度方案排沙效果,模拟分析结论如下:

(1)利用瀑布沟－龚嘴－铜街子三库联合调度造峰排沙效果优于龚、铜两库独立调度排沙。

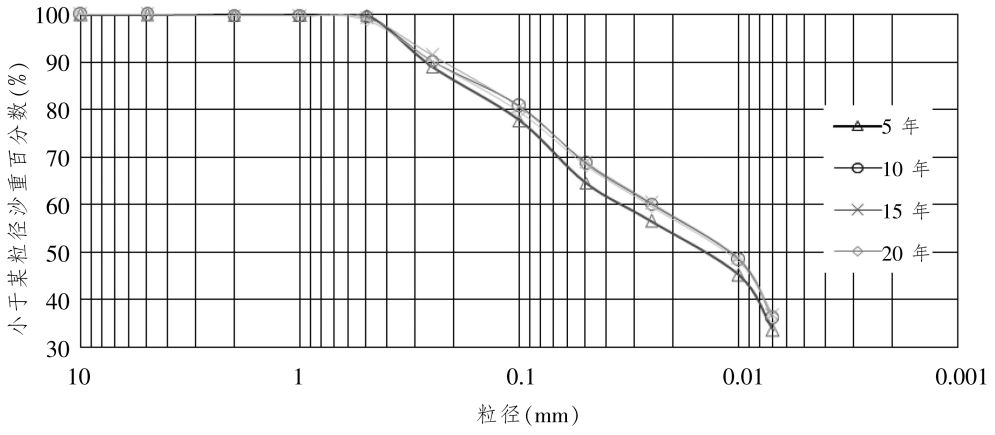

图 6　龚嘴水库优化方案 2 联合调度运行 5～20 年冲刷出库泥沙级配

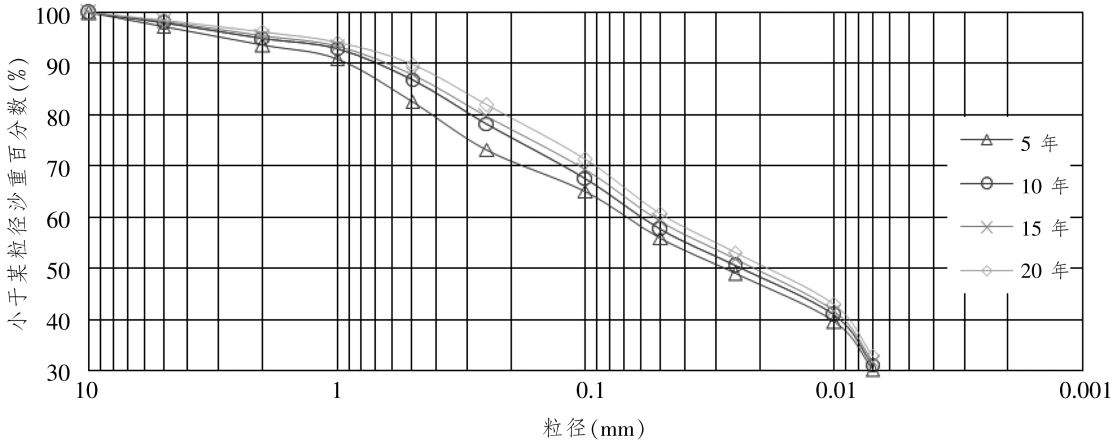

图 7　铜街子水库优化方案 2 联合调度运行 5～20 年冲刷出库泥沙级配

从库区累计冲刷效果来看，瀑布沟－龚嘴－铜街子联合调度排沙造峰 4 500 m^3/s 的方案优于联合调度造峰 4 000 m^3/s 的方案。

(2)适当抬高库区运行水位有助于提高发电效益，降低运行水位有助于提高排沙效果。从提高经济运行角度分析抬高运行水位 1 m 对水位的抬高不足，从控制水库的淤积与冲刷来看，提高运行水位 3 m 的水位抬高偏大，故以提高运行水位 2 m 为宜。

(3)从兼顾梯级水库联合排沙效果，适当提高龚、铜运行水位的经济运行方面综合考虑，采取龚、铜两库优化方案 2 联合瀑布沟水库造峰 4 500 m^3/s 的排沙方案效果最为适宜。龚、铜两库出库泥沙级配出现逐渐细化的趋势。

参考文献：

[1]　李　巍. 水库调度运行方式对水库泥沙淤积的影响[J]. 水利建设与管理，2017，37(09)：65－67.

[2]　朱鉴远. 水库泥沙调度——控制泥沙淤积的主要措施[C]. 水利水电工程泥沙设计.：中国水力发电工程学会，2010：357－363.

[3]　陈建，李义天，孙东坡，邓金运. 水库调度方式对三峡水库泥沙淤积的影响[J]. 武汉大学学报(工学版)，2008(05)：18－22.

[4]　张祥金. 龚嘴水库泥沙淤积发展浅析[J]. 四川水力发电，1998(01)：17－19＋95.

[5]　陶春华，杨忠伟，贺玉彬等. 大渡河瀑布沟以下梯级水库水沙联合调度研究[J]. 水力发电，2012(10)：73－75

作者简介：

杨冬梅(1975-)，女，四川井研人，工程师，经济运行处主管，从事梯级电站水库调度和经济运行工作；

熊灿林(1974-)，男，贵州大方人，工程师，经济运行处主管，从事梯级电站水库调度和经济运行工作；

张自航(1992-)，男，安徽芜湖人，硕士，助理工程师，经济运行处水情水调专责，从事梯级电站水库调度工作.

(责任编辑：卓政昌)