

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.013

# 澜沧江乌弄龙水库泥沙淤积及排沙运行方式

刘娜<sup>1</sup>, 李仲钰<sup>2</sup>, 杜志水<sup>1</sup>, 王盼<sup>1</sup>, 何洋<sup>1</sup>

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 华能澜沧江水电股份有限公司 乌弄龙里底水电工程建设管理局, 云南 迪庆藏族自治州 674606)

**摘要:** 由于乌弄龙电站上游梯级水库未如期开发, 乌弄龙水电站入库沙量较设计时明显增加, 淤积床面抬高, 回水淹没范围增大。为保证水库运行安全, 充分发挥电站效益, 结合上游梯级建设时序变化的情况, 拟定不同汛期排沙水位, 采用泥沙冲淤数值模型, 计算各排沙水位方案的水库泥沙淤积及回水, 对水库淹没范围以及发电量进行影响分析, 综合比选, 推荐合适的排沙运行水位, 为电站建成后的运行方式提供依据。

**关键词:** 水库泥沙淤积; 一维恒定非均匀沙全沙数学模型; 水库排沙运行方式

**中图分类号:** TV213.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2020)03-0357-05

## Preliminary study on sediment deposition and operation mode of Wunonglong Reservoir on Lancang River

LIU Na<sup>1</sup>, LI Zhongyu<sup>2</sup>, Du Zhishui<sup>1</sup>, WANG Pan<sup>1</sup>, HE Yang<sup>1</sup>

(1. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 2. Wunonglong Hydropower Engineering Construction Administration, Huaneng Lancang River Hydropower INC., Diqing Tibetan Autonomous Prefecture 674606, China)

**Abstract:** Since the upstream hydropower station of Wulonglong Hydropower is not developed as scheduled, the sediment quantity of Wulonglong Hydropower is obviously increased compared with the design results, and the backwater influenced area is enlarged with the deposited surface raising. In order to ensure the safety of reservoir operation and bring the full benefits of power stations, combined with the new sequence of the upstream hydropower station, to calculate the deposited sedimentation and backwater for the different sediment delivery water levels using the sediment deposition in the numerical model. the influence of the backwater area and the generating capacity is analyzed, with the suitable sediment delivery water level in flood season for providing the basis for the operation mode of the Wulonglong Hydropower recommended.

**Key words:** reservoir sedimentation; one-dimensional mathematical model of constant non-uniform sediment; operation mode of reservoir sediment discharge

目前国内学者在水库水沙问题上进行较多研究<sup>[1-4]</sup>, 水库运行方式与水库泥沙淤积<sup>[5]</sup>密切相关<sup>[6-9]</sup>, 影响着电站发电效益。本文采用一维恒定非均匀沙全沙数学模型<sup>[10]</sup>, 研究不同排沙水位对电站效益的影响<sup>[11]</sup>, 经济比较推荐合适的电站运行方式, 为电站运行提供依据。

## 1 概况

乌弄龙水电站坝址位于云南省迪庆州维西县巴迪乡境内, 坝址控制流域面积 85 860 km<sup>2</sup>, 是澜沧江

上游河段梯级开发的第二级电站, 其上一级电站为古水水电站, 下游与里底水电站水库回水衔接。

乌弄龙水电站正常蓄水位为 1 906 m, 相应库容为 2.65 亿 m<sup>3</sup>, 库区天然河道平均比降 2.5‰, 水库长约 43 km。天然情况下乌弄龙坝址多年平均悬移质输沙量为 1 922 万 t, 多年平均含沙量为 0.820 kg/m<sup>3</sup>。主汛期 6~9 月悬移质输沙量为 1 783 万 t, 占年输沙量的 92.7%, 平均含沙量为 1.13 kg/m<sup>3</sup>。多年平均推移质输沙量为 96.1 万 t。正常蓄水位以下库沙比为 16.9。

乌弄龙设计时, 考虑上游梯级电站拦沙作用, 乌

收稿日期: 2020-09-04; 网络出版日期: 2020-09-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200928.1138.008.html>

第一作者: 刘娜, 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水水泥沙。E-mail: 66771752@qq.com

弄龙水电站坝址年输沙量为 277 万 t,较天然减少了 85.3%,年入库推移质沙量减为 10.1 万 t,库沙比为 121,工程泥沙问题不严重,水库按电站日调节运行,不设汛期排沙水位。

2019 年乌弄龙水电站 4 台机组全部投产发电。由于古水梯级水库建设规模发生较大变化,且建设时序推后,乌弄龙水库入库水沙条件较原设计发生较大变化,仍按原设计泥沙调度运行方式运行,水库泥沙淤积床面及水库回水位将较设计值有所抬高,库区淹没范围将可能扩大,影响库区周边耕地、居民点。为保证水库运行安全,充分发挥电站效益,有必要结合当前上游梯级建设时序变化的情况,对乌弄龙水电站水库排沙运行方式进行研究。

## 2 数学模型

水库泥沙冲淤计算采用一维恒定非均匀沙全沙数学模型计算,该模型经过大型水库原型实测资料验证,在国内大、中、小河流中的水利水电工程的研究、设计中得到广泛应用。

$$r' \frac{\partial E_m P_k}{\partial t} + \frac{\partial(QS_k)}{\partial x} + \frac{\partial G_k}{\partial x} + \epsilon_1 [\epsilon_2 P_{0k} + (1 - \epsilon_2) P_k] \left( \frac{\partial Z_s}{\partial t} - \frac{\partial E_m}{\partial t} \right) = 0 \quad (7)$$

阻力公式:

$$J_f = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}} \quad (8)$$

水流挟沙力公式:

$$S_* = K \left( \frac{U^3}{gh\bar{\omega}} \right)^m \quad (9)$$

式中:  $Q$  为流量;  $A$  为过流面积;  $A_s$  为河床变形面积;  $Z$  为水位;  $J_f$  为能坡;  $q_i$  为横向单位河长入流量;  $r'$  为泥沙干密度;  $k$  为非均匀沙分组序号;  $S_k$  和  $S_{*k}$  分别为分组  $k$  悬移质的含沙量和水流挟沙力,  $S = \sum_k S_k$ 、 $S_* = \sum_k S_{*k}$ ;  $G_k$  和  $G_{*k}$  分别分组  $k$  推移质的输沙率和有效输沙率,  $G = \sum_k G_k$ 、 $G_* = \sum_k G_{*k}$ ;  $B$  为河宽;  $\tau\omega_k$  为分组  $k$  的沙沉速;  $\alpha$  为恢复饱和系数;  $K_k$  为分组  $k$  推移质的恢复饱和系数;  $P_k$  为分组  $k$  混合层的床沙组成;  $P_{0k}$  为分组  $k$  天然河床床沙组成;  $Z_s$  为床面高程;  $E_m$  为混合层厚度;  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  均为标记,纯淤积计算时  $\epsilon_1 = 0$ , 否则  $\epsilon_1 = 1$ , 当混合层下边界波及到原始河床时  $\epsilon_2 = 1$ , 否则  $\epsilon_2 = 0$ ;  $n$  为糙率;  $R$  为水力半径;  $K$ 、

模型采用的基本方程见下面。

水流连续方程:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = q_i \quad (1)$$

水流运动方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + GA \frac{\partial Z}{\partial x} + g J_f = 0 \quad (2)$$

泥沙连续方程:

$$r' \frac{\partial A_s}{\partial x} + \frac{\partial(QS)}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

分组  $k$  悬移质不平衡计算模式:

$$\frac{\partial(QS_k)}{\partial x} = -\alpha \tau\omega_k B(S_k - S_{*k}) \quad (4)$$

分组  $k$  推移质平衡计算模式:

$$G_k = G_{*k} \quad (5)$$

分组  $k$  推移质不平衡计算模式:

$$\frac{\partial G_k}{\partial x} = -K_k (G_k - G_{*k}) \quad (6)$$

分组  $k$  床沙组成方程:

$m$  均为系数;  $U$  为断面平均流速;  $h$  为平均水深;  $g$  为重力加速度;  $\bar{\omega}$  为粒径沉速。

## 3 计算条件

1) 库区纵、横断面资料

乌弄龙水电站开展设计时,水库泥沙淤积及回水计算采用的库区纵、横断面为 2004 年实测结果,库区共测横断面 35 个,断面平均间距约 1.5 km。

乌弄龙电站 2018 年 12 月首台机组发电,2018 年 11 月开展了水库本底测量工作,库区实测纵断面长约 46 km,共测横断面 38 个,断面平均间距 1.24 km。

2) 水沙代表系列

代表系列按照系列的年平均输沙量、含沙量接近多年平均值,汛期沙量比例与多年平均值接近,并包含丰水丰沙、平水平沙、枯水枯沙年的原则来选择。经溜筒江水文站实测水沙系列综合分析,选择 1979—1988 年作为泥沙淤积计算的系列,代表系列水沙特征值见表 1,其中,1980 年为丰水丰沙年,1982 年为平水平沙年,1986 年为枯水枯沙年。

表 1 代表系列水沙特征值

Tab. 1 Characteristic values of the representative series of runoff and sediment

年份	年平均流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	6~10月水量占比/%	年沙量/万 t	6~10月沙量占比/%
1979—1988	679	75.5	1 643	96.5

3) 泥沙颗粒级配

悬移质泥沙颗粒级配采用旧州站悬移质泥沙颗粒级配分析结果(见表2),其平均粒径为0.068 mm,中

数粒径为0.015 mm,最大粒径为2 mm。推移质泥沙级配采用河段床沙取样分析结果,其平均粒径65 mm,中数粒径25 mm,最大粒径300 mm。

表2 旧州站悬移质泥沙颗粒级配结果

Tab.2 Distributions of the suspended particle size at Jiuzhou Station

粒径/mm	0.005	0.01	0.05	0.10	0.25	0.5	1	2
小于某粒径沙重百分数/%	27.2	42.2	70.0	80.6	94.1	99.2	99.9	100

4) 悬移质挟沙力系数  $K$ 、 $m$  值

水库泥沙淤积计算模型中,悬移质泥沙挟沙力公式采用武水张瑞瑾公式。昆明院在小湾水电站设计时用戛旧站实测水沙资料分析后,采用  $K=0.2$ ,  $m=1.0$ 。在金沙江上曾用石鼓和攀枝花站平沙、丰沙年实测资料分析,两站挟沙力公式  $K$  值在0.03~0.14之间, $m$  值在0.9~1.1之间。在金安桥、观音岩电站设计中,经过分析取  $K$  值为0.18, $m$  值为1.05。成勘院曾用龚嘴水库实测资料率定的  $K$  值为0.18, $m$  值为1.05,在金沙江溪洛渡电站可研设计中也采用此值。

水库泥沙淤积计算考虑两种情况:①电站设计时,考虑上游梯级水库的拦沙作用,按代表系列统计的沙量进行缩放,组成不同时段的入库泥沙系列进行水库泥沙淤积计算;②电站建成后,不考虑上游电站拦沙作用,入库沙量为天然情况下入库沙量,直接采用选择的代表系列入库泥沙进行水库泥沙淤积计算。

4 计算结果及分析

4.1 水库泥沙淤积计算

乌弄龙设计时,考虑上游梯级电站拦沙作用,入库沙量较天然情况减少85.3%。乌弄龙建成后,上游水库推迟建设,入库泥沙将较原可研设计大幅增加。根据2018年11月库区纵、横断面资料,采用天然情况下入库沙量对水库泥沙淤积及回水进行复核,结果见表3。

根据类比分析,乌弄龙水库泥沙淤积计算取  $K$  值为0.18, $m$  值为1.05。

5) 恢复饱和系数

泥沙淤积时取0.25,冲刷时取1.0。

6) 入库沙量

表3 乌弄龙水库淤积及回水计算结果

Tab.3 Calculation results of sedimentation and backwater of Wunonglong Reservoir

正常蓄水位/m	水库总淤积量/(万 m <sup>3</sup> )	库容损失率/%	WK13断面淤积高程/m	WK19断面淤积高程/m	WK13断面回水位/m	WK19断面回水位/m	备注
1 906	4 284	16.2	1 878.5	1 887.6	1 906.12	1 911.34	设计结果
	11 800	44.5	1 890.4	1 892.9	1 911.84	1 917.34	复核结果

正常蓄水位1906 m方案原设计和复核淤积床面对比见图1,水库20年一遇洪水复核回水位与设计回水位对比见图2。

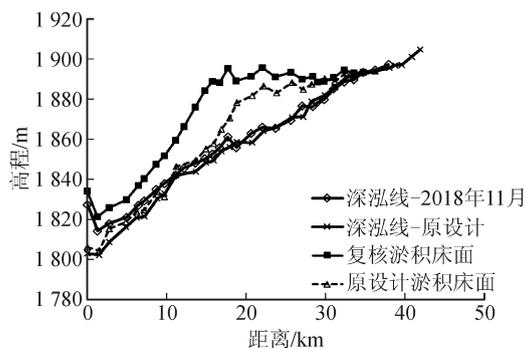


图1 原设计和复核淤积床面对比图

Fig.1 Comparison of the deposited surface between designed and reviewed surface

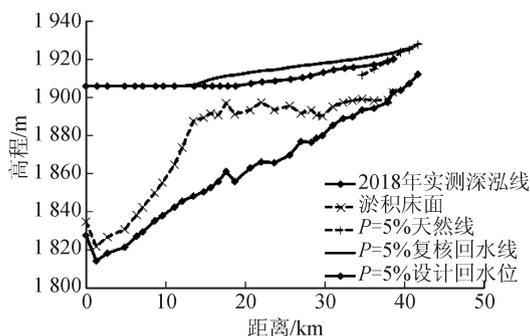


图2 水库复核回水与设计回水位对比图

Fig.2 Comparison of the backwater level between designed and reviewed level

计算结果表明如下结论。

1) 不考虑上游电站的拦沙作用,入库沙量大幅增加,淤积量也随着增加,20年水库总淤积量是原设计20年水库总淤积量的2.75倍;复核20年淤

积床面较原设计床面明显抬高,“WK13”断面(距坝 18.8 km)至“WK19”断面(距坝 28.3 km)的床面抬高幅度范围为 5.3~12.4 m。

2) 由于淤积床面较原设计淤积床面抬高较多,20 年一遇洪水复核回水位较原设计回水位不同程度抬高 0.01~6.53 m。

3) 经复核,回水位较原设计回水位有所抬高,库区淹没影响范围有所增加。因此,需要研究排沙运行方式,控制淤积床面,降低水库回水位。

#### 4.2 水库排沙运行方式研究

一般水库为了控制泥沙淤积床面,减小水库回水的淹没范围,采用汛期降低水位,设置排沙运行水位。乌弄龙入库泥沙主要集中于主汛期 6~9 月,主汛期悬移质输沙量为 1 748 万 t,占年输沙量的 92.9%,汛期降至排沙水位运行,以利于水库排沙,减少泥沙淤积量,降低水库泥沙淤积床面,控制水库回水淹没范围。

为了研究排沙水位对淤积床面以及水库回水的影响,以每降低 1 m 为一个方案,开展汛期排沙水位 1 905 m、1 904 m、1 903 m、1 902 m、1 901 m 五个排沙水位方案水库泥沙淤积计算,并在相应的淤积床面上进行水库回水计算。

主汛期(6~9 月)水库回水与排沙运行控制水位密切相关,排沙运行控制水位越低,三角洲淤积床面越低,相应回水位也越低;非汛期水库回水成果相差不大;由于汛期和非汛期相应频率洪水差别相对较大,虽然随着排沙运行控制水位不断降低,坝前水位有所降低,但库中及库尾河段回水位还是受主汛期相应频率洪水控制。各排沙水位方案汛期 20 年一遇洪水水库回水位在距坝 15~40 km 范围内较正常蓄水位 1 906 m 方案回水位的降低幅度随着排沙水位的减低,回水位减低幅度逐渐增大,回水淹没影响的范围越小。不同排沙水位方案较正常蓄水位方案回水位降低结果见表 4。

表 4 不同排沙水位方案较正常蓄水位方案回水位降低值

Tab. 4 Drawdown of the water level of desilting water level schemes compared with normal supply level scheme

方案	不同排沙水位方案汛期 20 年一遇洪峰流量回水位降低值/m				
	$H_{\text{排沙}}=1\ 905\ \text{m}$	$H_{\text{排沙}}=1\ 904\ \text{m}$	$H_{\text{排沙}}=1\ 903\ \text{m}$	$H_{\text{排沙}}=1\ 902\ \text{m}$	$H_{\text{排沙}}=1\ 901\ \text{m}$
最低值	0.26	0.93	1.53	1.90	2.31
最高值	0.78	1.54	2.25	3.12	3.93

#### 4.3 不同排沙方案对电站发电量影响分析

乌弄龙为日调节水电站,水库水位变幅较小,机组最大、最小水头变化不大,机组运行较稳定。本次考虑乌弄龙水电站单独运行,采用乌弄龙电站坝址

5%、25%、50%、75%和 95%五个代表年日径流系列结果进行径流调节计算,不同排沙水位方案最大受阻容量及电量损失见表 5。

表 5 不同排沙水位方案最大受阻容量及电量损失

Tab. 5 Maximum blocked capacity and power loss by the different desilting water level schemes

排沙运行控制水位/m	1 905	1 904	1 903	1 902	1 901
最大受阻容量/MW	0	0	0	11	42
电量损失/(亿 kWh)	0.296	0.592	0.888	1.184	1.480
占设计年发电量/%	0.72	1.44	2.16	2.88	3.60

当排沙运行控制水位越低时,其最大受阻容量和电量损失越大,当排沙运行控制水位降至 1 903 m 时,电站容量不受阻,电量损失为 0.888 亿 kWh,约占乌弄龙水电站设计年发电量的 2.16%(单独运行)。

#### 4.4 不同排沙方案对电站效益影响分析

根据正常蓄水位 1 906 m 水库回水复核结果,水库淹没新增影响涉及人口 6 户 24 人,专业项目涉及等级公路主要在石底村下游 500 m 至禹功河电站上游 500 m 路段。根据不同排沙运行控制水位

方案分析,计算不同排沙水位的匡算补偿费用、电量损失及补充单位电度投资。结果除排沙水位由 1 904 m 降低至 1 903 m 不影响禹功河电站补充电度投资略大外,其余方案均小于电站单位电度投资 1.82 元/kWh,说明从经济角度考虑,乌弄龙电站进一步降低排沙运行控制水位的经济性较差。

从经济角度考虑,乌弄龙电站进一步降低排沙运行控制水位的经济性较差;若乌弄龙库区新增建设征地移民安置难度不大,推荐乌弄龙电站不降低

排沙水位运行,即全年维持 1 906 m 方案运行,以充分发挥电站效益,但需增加一定库区补偿费用。

## 5 结 论

1) 水库排沙比、淤积量及淤积床面与排沙运行控制水位密切相关。排沙运行控制水位降低,水库排沙比相应增大,库区淤积量相应减少;排沙运行控制水位越低,三角洲淤积段床面相应越低。

2) 主汛期(6~9月)水库回水与排沙运行控制水位密切相关,排沙运行控制水位越低,三角洲淤积床面越低,相应回水位也越低;随着排沙运行控制水位不断降低,坝前水位有所降低,但库中及库尾河段回水位还是受主汛期相应频率洪水控制。

3) 当排沙运行控制水位越低时,其最大受阻容量和电量损失越大,当排沙运行控制水位降至 1 903 m 时,电站容量不受阻,电量损失为 0.888 亿 kWh,约占乌弄龙水电站设计年发电量的 2.16%(单独运行)。

4) 从经济角度考虑,推荐乌弄龙电站不降低排沙水位运行,即全年维持 1 906 m 方案运行,以充分发挥电站效益,但需增加一定库区补偿费用。

### 参考文献:

- [1] 韩其为. 非均匀沙不平衡输沙的理论研究[J]. 水利水电技术,2007,38(1):14-23.  
HAN Qiwei. Theoretical study of nonequilibrium transportation of nonuniform suspended load[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(1): 14-23.
- [2] 韩其为,何明民. 水库淤积与河床演变的(一维)数学模型[J]. 泥沙研究,1987(3):16-31.
- [3] 关见朝,韩其为,方春明. 非均匀悬移质输沙过程概化模型[J]. 泥沙研究,2010(6):68-72.  
GUAN Jianzhao, HAN Qiwei, FANG Chunming. General model of non-uniform suspended load transport[J]. Journal of Sediment Research, 2010(6): 68-72.
- [4] 朱春耀,薛金平,李春雨. 汾河水库泥沙冲淤计算数学模型[J]. 水利水电技术,1999,30(10):34-36.  
ZHU Chunyao, XUE Jinping, LI Chunyu. Mathematic model of sand scouring and accretion calculation for Fenhe Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower

Engineering, 1999, 30(10): 34-36.

- [5] 丁金凤. 水库泥沙淤积问题研究[J]. 吉林水利,2009(9):11-12,15.  
DING Jinfeng. The study on the reservoir sedimentation [J]. Jilin Water Resources, 2009(9): 11-12, 15.
- [6] 曲少军,丁六逸,缪风举,等. 小浪底水库运用后三门峡水库运用方式的初步研究[J]. 泥沙研究,2001(2):29-32.  
QU Shaojun, DING Liuyi, MIAO Fengju, et al. Preliminary study on operation of Sanmenxia Reservoir after completion of Xiaolangdi Project[J]. Journal of Sediment Research, 2001(2): 29-32.
- [7] 郭庆超,胡春宏,陆琴,等. 三门峡水库不同运用方式对降低潼关高程作用的研究[J]. 泥沙研究,2003(1):1-9.  
GUO Qingchao, HU Chunhong, LU Qing, et al. Effect of different operation of Sanmenxia Reservoir on water level at Tongguan[J]. Journal of Sediment Research, 2003(1): 1-9.
- [8] 金文. 基于泥沙冲淤数值模拟的水库调度方案研究[J]. 水利水电技术,2016,47(4):83-87.  
JIN Wen. Numerical simulation of sediment scouring-based study on reservoir operation scheme[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(4): 83-87.
- [9] 李舍梅. 水库泥沙淤积数模分析[J]. 东北水利水电,2009,27(11):28-31.  
LI Shemei. Mathematical model analysis of reservoir sedimentation[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2009, 27(11): 28-31.
- [10] 吴伟明. 一维、平面二维及其嵌套泥沙数学模型的研究与应用[D]. 武汉:武汉水利电力学院,1991.  
WU Weiming. Research and application of one-dimensional, two-dimensional and nested sediment mathematical models [D]. Wuhan: Wuhan University of water resources and electric power, 1991.
- [11] 黄华忻,赵克玉. 陕南山区水库排沙运用[J]. 泥沙研究,2000(1):77-80.  
HUANG Huaxin, ZHAO Keyu. Sediment management of the small-and-medium-sized reservoirs in the mountainous regions in south of Shaanxi Province[J]. Journal of Sediment Research, 2000(1): 77-80.

(责任编辑 王绪迪,卢秀)