

doi:10.11988/ckyyb.20250323

2026,43(5):17-22,41

乌东德水库蓄水运用后主汛期排沙特性模拟

黄仁勇^{1,2},高宇^{3,4},王敏^{1,2},元媛^{1,2}

(1.长江科学院 河流研究所,武汉 430010; 2.长江科学院 水利部长江重点实验室,武汉 430010;
3.中国长江三峡集团有限公司,武汉 430010; 4.高坝大库运行安全湖北省重点实验室,湖北 宜昌 443133)

摘要:为支撑乌东德水库实际调度排沙,建立乌东德水库干支流河道一维非恒定流水沙数学模型,利用蓄水后实测资料验证模型的可行性,继而模拟乌东德水库蓄水运用初期典型水沙过程的排沙特性。结果表明:7—8月份,乌东德水库在入库水量较大时均具有较强的排沙能力,水库具备利用大水排沙的有利条件;受入库沙量大幅减小影响,7—8月份乌东德水库变动回水区泥沙淤积量及占比均相对较小,水库具备开展优化调度的有利条件;汛期(7月份),来水较大时库水位>965 m后,变动回水区淤积占比开始逐步增加但淤积量很小,来水较小时变动回水区淤积规律类似,但对应临界库水位为960 m;蓄水期(8月份),来水较大时起蓄水位抬高对变动回水区淤积量及占比影响很小,来水较小时变动回水区淤积占比会随起蓄水位抬高而相应增大,但淤积量仍较小。研究成果可为水库优化调度提供参考。

关键词:水沙数学模型;排沙特性;优化调度;模型验证;乌东德水库

中图分类号:TV145

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2026)05-0017-06

Simulation of Sediment Discharge Characteristics of Wudongde Reservoir in Main Flood Season after Impoundment

HUANG Ren-yong^{1,2}, GAO Yu^{3,4}, WANG Min^{1,2}, YUAN Yuan^{1,2}

(1.River Research Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;
2.Key Laboratory of Changjiang River of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3.China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China;
4.Hubei Key Laboratory of Operation Safety of High Dam and Large Reservoir, Yichang 443133, China)

Abstract: [Objective] The Wudongde Reservoir is the uppermost cascade reservoir among the Wudongde, Baihetan, Xiluodu, and Xiangjiaba cascade reservoirs in the lower reaches of the Jinsha River. To support the operation scheduling of sediment discharge in the Wudongde Reservoir, a one-dimensional unsteady flow and sediment mathematical model for the mainstream and tributaries of the Wudongde Reservoir is established. The feasibility of the model is verified using measured data after impoundment, and then the sediment discharge characteristics of typical water and sediment processes during the initial impounding period of the Wudongde Reservoir are simulated. [Methods] The water and sediment processes in July and August of 2020, 2022, and 2023 were selected as typical water and sediment processes for model calculation. Among them, 2020 was a high-flow year, while 2022 and 2023 were low-flow years. [Results] 1) During July and August, the Wudongde Reservoir had strong sediment discharge capacity when the inflow volume was large. In July 2020, due to large inflow volume, the sediment discharge ratio corresponding to a water level of 945–975 m reached 32%–14%. During the impounding period in August, the impact of initial water level on sediment discharge capacity was not significant. In August 2020, due to large inflow volume, the sediment discharge ratio corresponding to an initial water level of 952–975 m was relatively large, ranging from 24.8% to 18.8%. During July and August, the Wudongde Reservoir could utilize high water for sedi-

收稿日期:2025-04-10;修回日期:2025-06-25;接受日期:2025-07-09

基金项目:国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2240206,U2240224);中国长江三峡集团有限公司科研项目(0704209);国家重点研发计划项目(2021YFC3200305);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2023313/HL)

作者简介:黄仁勇(1979-),男,湖北襄阳人,正高级工程师,博士,主要从事河流数值模拟研究。E-mail:renyonghuang@163.com

ment discharge. 2) Due to significant reduction in sediment inflow, the siltation volume and proportion in the fluctuating backwater area of the Wudongde Reservoir during July and August were relatively small, providing favorable conditions for optimal operation of the reservoir. During the flood season in July, when the inflow volume was large and reservoir water level was >965 m, the siltation proportion in the fluctuating backwater area gradually increased but the siltation amount was small. When the inflow volume was small, the siltation pattern in the fluctuating backwater area was similar but the corresponding reservoir water level was 960 m. 3) At the beginning of August during the impounding period, when the initial water level was raised and the inflow volume was large, the impact on the siltation volume and proportion in the fluctuating backwater area was small. When inflow volume was small, the siltation proportion in the fluctuating backwater area increased correspondingly with the rise of the initial water level, but the siltation volume remained small. When the inflow sediment volume was relatively small, the inflow water volume was the main factor affecting the siltation proportion in the fluctuating backwater area in July. When the inflow sediment volume was relatively large, the inflow sediment volume was the main factor affecting the siltation proportion in the fluctuating backwater area in August. When the inflow sediment volume was relatively small, the inflow water volume was the main factor affecting the siltation proportion in the fluctuating backwater area in August.

[**Conclusion**] With the significant reduction in inflow sediment volume after the impounding of the Wudongde Reservoir, even though the siltation proportion in the fluctuating backwater area increases, the increase in siltation volume in the fluctuating backwater area remains small, indicating room for further optimization of reservoir operation. Therefore, when studying the optimal operation of the Wudongde Reservoir, it is not sufficient to only consider relative indicators such as the sediment discharge ratio and the siltation proportion in the fluctuating backwater area. It is also necessary to consider absolute indicators such as the outflow sediment volume, the total siltation volume in the reservoir area, and the siltation volume in the fluctuating backwater area. This requires further long-term scouring and deposition calculations based on typical series years. Further in-depth research is needed on the optimization space for reservoir operation and specific regulation indicators under the permissible siltation principles of the Wudongde Reservoir.

Key words: flow and sediment mathematical model; sediment discharge characteristics; optimal operation; model validation; Wudongde Reservoir

0 引 言

乌东德水电站位于四川会东县和云南禄劝县交界的金沙江河道上,其坝址位于乌东德峡谷,是金沙江下游干流乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝等梯级电站中的最上游梯级。乌东德水电站正常蓄水位、防洪限制水位、死水位分别为 975、952、945 m,相应库容分别为 58.63 亿、34.20 亿、28.43 亿 m^3 。乌东德水电站 2019 年 10 月 2 日导流洞下闸开始蓄水,2020 年 1 月 30 日坝前水位蓄至 895 m,12 月底水位蓄至 970.76 m。

乌东德水库规划设计运用方式^[1]:7 月份按防洪限制水位 952 m 运行;8 月初采用逐步蓄水方式开始蓄水,8 月底水库蓄水至正常蓄水位;9 月份以后由高水位逐步消落,次年 6 月底水位消落至防洪限制水位或死水位。与可研阶段研究成果^[1]相比,乌东德水库蓄水运用后入库沙量、库区淤积速度、水库排沙比均

大幅减小。根据长江水利委员会水文局统计结果^[2],建库后 2020 年 5 月—2023 年 10 月,考虑区间来沙后乌东德水库年均入库悬沙 0.187 亿 t,仅为初步设计阶段前 10 a 年均入库沙量的 34%;乌东德水库实测排沙比 12.6%,库区年均淤积泥沙 0.164 亿 t;由淤积体积看,乌东德库区共淤积泥沙 0.519 亿 m^3 ,年均淤积 0.130 亿 m^3 。

受上游梯级水库蓄水拦沙及水土保持减沙等因素影响,乌东德水库蓄水运用后入库沙量大幅减少,库区淤积速度随之减缓,这为水库开展调度方式优化提供了良好契机。乌东德水库泥沙研究成果主要集中在可研和水库蓄水前阶段^[1,3-6],至今水库蓄水运用时间较短,排沙模拟研究成果尚不多见^[7]。本文建立乌东德水库干支流河道一维非恒定流水沙数学模型,选取典型水沙过程,开展不同入库水沙及运行水位条件下乌东德水库排沙特性模拟,研究成果可为乌东德水库优化调度提供参考。

1 模型建立与验证

1.1 模型方法与验证计算条件

建立乌东德水库干支流河道一维非恒定流水沙数学模型,模型控制方程及求解方法等参见文献[8]、文献[9]。乌东德水库区间流量过程采用一维水动力模型反算得到^[10],并依据各入库小支流多年平均流量占比计算各入库小支流流量。模型计算范围为干流银江坝址—乌东德坝址,长约204 km,同时考虑雅砻江、龙川江、勐果河、普隆河、鲮鱼河共5条入库支流的水沙量(见图1)。受资料所限,本文模型验证和后续计算所采用地形均为2023年底库区干支流实测大断面地形,这有可能在一定程度上影响模型计算精度,但考虑到本文所用水沙资料为2020—2023年资料,与2023年地形在时间上较为接近,因此,计算成果仍具有一定的参考价值。模型进口边界采用干流攀枝花水文站、支流雅砻江桐子林水文站计算时段内实测逐日平均流量和含沙量过程,模型出口边界采用计算时段内坝前实测日均水位过程。攀枝花水文站位于银江水电站坝址上游约10 km处,银江水电站于2024年底第一台机组开始投产发电,本研究用攀枝花水文站资料至2023年,基本不受银江水电站运行影响。



图1 乌东德库区干支流河道及水文站位置

Fig.1 Location of mainstream and tributaries and hydrological stations in Wudongde Reservoir area

乌东德库尾干流三堆子水文站位于支流雅砻江与干流金沙江汇口以下,可作为乌东德水库干流入库水沙特性分析的代表水文站。2020—2023年三堆子水文站年均输沙量仅0.084亿t,较乌东德水库

可研阶段采用的1961—1970年典型系列库尾入库天然沙量0.894亿t(库尾干流攀枝花水文站与支流雅砻江来沙量之和)减小了91%;2020—2023年乌东德水库年均入库沙量0.187亿t,较可研阶段采用的前10a年均入库沙量0.544亿t减小了66%。乌东德水库蓄水运用后主要入库水量仍来源于三堆子水文站以上流域,但受库尾干流来沙量大幅减小影响,三堆子水文站以下区间来沙量已成为入库沙量的主要来源。从实测资料及已有研究成果^[2,11]可知,较乌东德水库可研阶段采用的1961—1970年典型系列区间来沙量,乌东德水库蓄水运用后区间来沙量出现一定程度减小,但减小幅度明显小于干流。本文采用的乌东德水库入出库沙量及排沙比等均考虑了区间来沙量,其取值来源于长江水利委员会水文局和中国长江三峡集团有限公司研究成果^[2],已知区间来沙量后按照各入库小支流年均沙量占比计算各入库小支流年均沙量。

1.2 水位流量过程验证

2020年乌东德水库初期蓄水,库水位抬升幅度巨大,且该年度实测资料掌握不全,故仅能根据现有有限实测资料进行模型验证。选取乌东德库区沿程三堆子、拉鲊、龙街、热水塘、皎平渡、海子尾巴水文(位)站、下游乌东德水文站(位于坝址下游约5 km处),2021—2023年实测水位流量资料进行模型验证。本研究主要侧重于采用蓄水后实测典型入库水沙过程,分析不同调度方案下的库区淤积及排沙特性。因此,本文没有按常规做法将3年的实测资料划分为率定和验证两个时段,而是将率定和验证两时段进行合并。典型测站的验证结果表明(如图2所示),模型计算的沿程洪水演进过程及水位变化过程与实测情况基本一致,最高洪峰水位出现时间基本同步;水位最大误差为30 cm,出现在库尾测站的洪峰时刻,距坝址越近误差越小、越靠近库尾误差越大,枯水期误差小(<10 cm)、汛期误差大(≤30 cm);模型验证结果与实测值吻合较好。

1.3 水库淤积量及排沙比验证

基于输沙量法得到的乌东德水库库区淤积量及排沙比实测结果^[2]显示,乌东德库区地形测次范围及时间均有限,采用地形法进行模型验证尚难以实现;目前本研究仅掌握乌东德水库2023年底实测大断面资料,采用历次库区实测断面资料通过断面套绘进行基于断面法的模型验证也难以实现;加之乌东德水库基于断面法的库区淤积量被限定为975 m高程以下干流及部分支流河口段的淤积量^[2],且包含人类活动影响,该资料难以用于模型验证。综上,

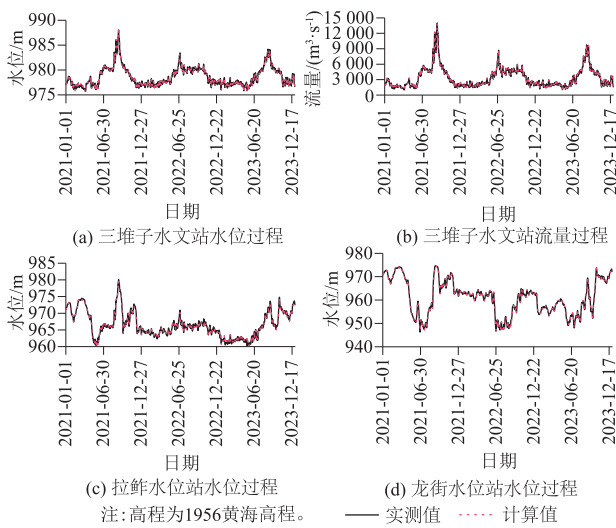


图2 典型水文站水位流量过程验证

Fig.2 Verification of water level and discharge processes at typical stations

本文采用输沙量法对模型模拟的水库淤积量和排沙比进行验证,如表1—表3所示。

表1 淤积量验证

Table 1 Verification of siltation volume

时段	实测值/ (万 t)	计算值/ (万 t)	绝对误差/ (万 t)	相对误差/ %
2021 年	1 220	1 228	8	0.7
2022 年	1 196	1 203	7	0.6
2023 年	2 242	2 274	32	1.4
2021—2023 年	4 658	4 705	47	1.0

表2 年排沙比验证

Table 2 Verification of annual sediment discharge ratio

时段	实测入库 沙量/(万 t)	出库沙量/(万 t)		排沙比/%	
		实测值	计算值	实测值	计算值
2021 年	1 446	226	218	15.6	15.1
2022 年	1 342	146	140	10.9	10.4
2023 年	2 405	163	172	6.8	7.2
2021—2023 年	5 193	535	530	10.3	10.2

表3 5—10月份排沙比验证

Table 3 Verification of sediment discharge ratio from

May to October %

时段	5 月份		6 月份		7 月份	
	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值
2021 年	22.5	20.6	19.1	18.1	21.4	20.2
2022 年	3.4	1.8	5.4	8.0	17.3	20.3
2023 年	4.1	2.2	5.6	3.4	11.9	9.6
时段	8 月份		9 月份		10 月份	
	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值
2021 年	7.5	8.6	23.8	25.8	23.4	21.8
2022 年	17.2	15.9	10.5	9.6	14.3	16.7
2023 年	5.2	7.3	5.2	7.4	22.5	20.5

由表1可知,2021—2023年乌东德水库实测淤积量为4 658万t,模型计算值为4 705万t,计算值偏大47万t,相对误差1.0%,误差较小;各年淤积量误差也均较小,相对误差最大为1.4%。

由表2可知,2021—2023年乌东德水库实测总排沙比为10.3%,模型计算值为10.2%,两者仅差0.1%;各年排沙比验证误差亦均较小,各年排沙比最大相差0.5%。由表3可知,5—10月份月均排沙比验证误差<3%。

上述验证结果表明,模型计算淤积量及排沙比与实测值吻合较好,建立的干支流河道一维非恒定流水沙数学模型可用于研究乌东德水库蓄水运用初期排沙特性。

2 水库排沙特性计算

2.1 计算方案

根据水利部批复的《2024年长江流域水工程联合调度运用计划》,乌东德水库7月份防洪限制水位952 m,7月上旬库水位可按 ≤ 954.5 m浮动控制,7月中下旬可根据城陵矶(莲花塘)水位及洞庭湖水系短中期降雨预报情况逐步浮动库水位;8月1日开始可基于前期运行水位逐步蓄水,8月中下旬,可逐步蓄水至正常蓄水位975 m。7—8月份已成为目前乌东德水库优化调度的主要时期,故开展7—8月份不同入库水沙、调度方式下水库排沙特性计算,分析汛期和蓄水期乌东德水库泥沙冲淤与排沙比变化规律。

乌东德水库蓄水运用时间较短,仅选取2020年、2022年、2023年的7—8月份水沙过程作为模型计算的典型水沙过程,其中,2020年为大水年,2022年和2023年为枯水年。库尾三堆子水文站7—8月份实测入库水沙过程见图3。

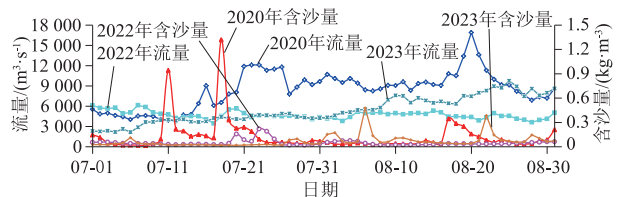


图3 乌东德水库库尾三堆子水文站7—8月份入库水沙过程

Fig.3 Inflow water and sediment processes of Sanduizi Station at tail of Wudongde Reservoir from July to August

各计算方案组合条件:①进口边界为2020年、2022年、2023年的7月份实测入库水沙过程,坝前水位分别为945、950、952、954.5、960、965、970、975 m;②进口边界为2020年、2022年、2023年的8月份实测入库水沙过程,坝前水位由8月1日起蓄水位952、954.5、960、965、970、975 m开始均匀抬升至8月31日正常蓄水位975 m。

2.2 计算结果分析

表4为乌东德库尾三堆子水文站7月份和8月

份的水沙特征值,表 5 为含区间沙量的乌东德水库 7 月份和 8 月份入库沙量,乌东德入库水量主要来自三堆子水文站数据。2020 年、2022 年、2023 年三堆子水文站沙量分别为 1 520 万、553 万、434 万 t,三堆子水文站至乌东德坝址之间区间沙量分别为 774 万、789 万、1 971 万 t^[2]。依据三堆子水文站相应实测沙量过程,将年区间沙量按同比例缩放计算日区间沙量过程,再将日区间沙量过程按照各入库小支流年均沙量占比计算各入库小支流沙量。图 4 为 2020 年、2022 年、2023 年 7 月份、8 月份乌东德水库不同库水位、起蓄水位对应的排沙比计算结果。图 5 为 2020 年、2022 年、2023 年 7 月份、8 月份乌东德水库变动回水区淤积量及占比。

表 4 三堆子水文站水沙特征值

Table 4 Characteristic values of runoff and sediment at Sanduizi Station

时段	水量/ (亿 m ³)	沙量/ (万 t)	最大洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	最大含沙量/ (kg·m ⁻³)
2020 年 7 月	193	306	12 100	1.320
2022 年 7 月	130	73	6 140	0.219
2023 年 7 月	102	35	4 920	0.112
2020 年 8 月	258	236	16 900	0.346
2022 年 8 月	122	51	5 330	0.076
2023 年 8 月	188	189	9 750	0.477

表 5 乌东德水库 7 月份和 8 月份入库沙量(含区间沙量)

Table 5 Sediment inflow of Wudongde Reservoir in July and August (including intervening sediment)

时段	入库沙量/(万 t)	
	7 月份	8 月份
2020 年	450	361
2022 年	178	123
2023 年	193	1 077

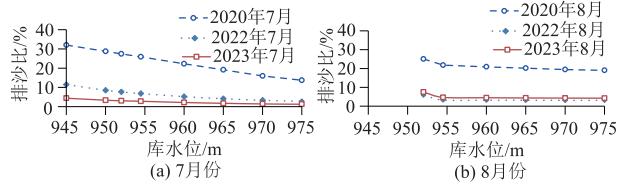


图 4 不同月份排沙比计算结果

Fig.4 Comparison of calculation results of sediment discharge ratio between July and August

2.2.1 入库水沙的影响

对于汛期(7 月份),2020 年由于入库水量较大,库水位 945~975 m 对应的水库排沙比较大,为 32%~14%;2022 年和 2023 年由于入库水量较小,库水位 945~975 m 对应的水库排沙比较小,为 11%~1%。可见,汛期(7 月份)入库水量越大,排沙比越大,乌东德水库可利用此时段大水排沙。2020 年入库水量比较大,库水位≤965 m 时变动回水区淤积量及占比均很小,库水位>965 m 后变动回水区淤积占比逐步增加

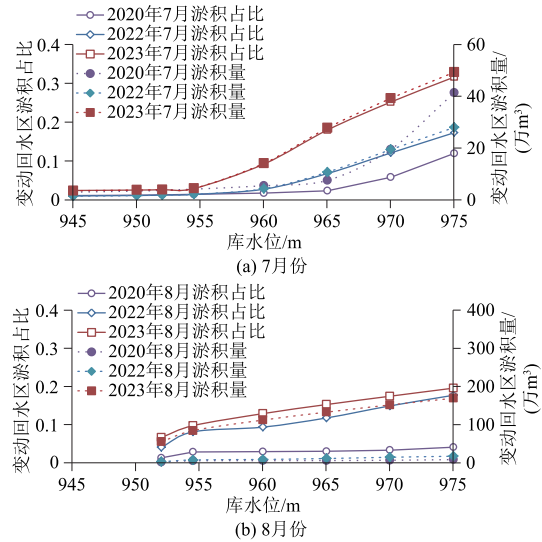


图 5 不同月份变动回水区淤积占比及淤积量

Fig.5 Siltation proportion and volume in fluctuating backwater area in July and August

但淤积量仍很小。2022 年和 2023 年入库水量较小,变动回水区淤积量及占比变化规律与 2020 年大水过程基本一致,仅临界库水位由 965 m 降至 960 m。可见,入库沙量较小时入库水量是影响 7 月份变动回水区淤积占比的主要因素,入库水量越大,水流输沙能力越强,变动回水区淤积占比越小。

对于蓄水期(8 月份),2020 年入库水量较大,起蓄水位 952~975 m 对应的水库排沙比较大,为 24.8%~18.8%;2022 年和 2023 年入库水量较小,起蓄水位 952~975 m 对应的排沙比较小,为 7.3%~2.9%。可见,蓄水期(8 月份)入库水量越大,排沙比越大,同样,乌东德水库亦可利用此时段大水排沙。随着 8 月 1 日起蓄水位的不断抬高,来沙较大的 2023 年和来水来沙较小的 2022 年变动回水区淤积占比均有一个相对较大的提高,但淤积量较小,来水较大来沙较小的 2020 年变动回水区淤积量及占比均很小。可见,入库沙量较大时入库沙量是影响 8 月份变动回水区淤积占比的主要因素,入库沙量较小时入库水量是影响 8 月份变动回水区淤积占比的主要因素,入库水量越小或者入库沙量越大,变动回水区淤积占比越大。

2.2.2 坝前水位的影响

对于汛期(7 月份),2020 年入库水量比较大,库水位越高,水库排沙比越小。2022 年和 2023 年入库水量比较小,库水位 945~954.5 m,库水位越高,水库排沙比越小;当库水位>954.5 m,库水位继续抬高对水库排沙比影响很小。汛期(7 月份)库水位抬高会增大变动回水区淤积量及占比,但变动回水区淤积量较小。

对于蓄水期(8月份),2020年入库水量比较大,起蓄水水位越高,排沙比越小。2022年和2023年入库水量比较小,起蓄水位945~954.5 m,起蓄水位越高,水库排沙比越小;当起蓄水位>954.5 m,起蓄水位继续抬高对水库排沙比影响很小。来水较大时8月份起蓄水水位抬高对变动回水区淤积量及占比影响很小,来水较小时变动回水区淤积占比会随8月份起蓄水位抬高而增大,但淤积量较小。

需要说明的是,乌东德水库蓄水运用后入库沙量大幅减少,即使变动回水区淤积占比增加,变动回水区淤积增加量仍很小,水库仍有进一步优化调度的空间。因此,研究乌东德水库优化调度空间,仅看排沙比和变动回水区淤积占比等相对性指标是不够的,更重要的是还要看出库沙量、库区总淤积量、变动回水区淤积量、特征库容淤损量、库区淤积速度等绝对性指标,因此需进一步开展基于典型系列年的长期冲淤计算。

3 结 论

本文建立了乌东德水库干支流河道一维非恒定流水沙数学模型,采用建库后实测资料进行了模型验证,并选取典型水沙过程进行了乌东德水库蓄水运用初期主汛期排沙特性计算研究。主要结论如下:

(1)7—8月份,乌东德水库在入库水量较大时具有较强的排沙能力。蓄水期(8月份),起蓄水位对水库排沙能力影响不大。7—8月份乌东德水库可利用大水排沙。

(2)受建库后入库沙量大幅减小影响,7—8月份,乌东德水库变动回水区泥沙淤积量及占比均相对较小,有利于水库优化调度。汛期(7月份),当乌东德水库来水较大时,库水位低于965 m时变动回水区淤积量及占比均很小,库水位高于965 m后变动回水区淤积占比逐步增加但淤积量仍然很小;来水较小时变化规律与大水时类似,但对应临界库水位降低为960 m。蓄水期(8月份),水库来水较大时起蓄水位抬高对变动回水区淤积量及占比影响很小,水库来水较小时变动回水区淤积占比会随起蓄水位抬高而增大,但淤积量较小。

为支撑乌东德水库调度排沙,本文在乌东德水库蓄水运用初期主汛期排沙特性研究方面作了初步尝试。但仅用典型水沙过程进行了研究,尚缺乏基于长系列水沙资料的计算研究,今后在乌东德水库泥沙淤积可许原则下的优化调度空间和具体调控指标方面仍有待作进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] 傅巧萍,胡 滢,柳林云,等.金沙江乌东德水电站可行性研究报告[R].武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司,2015.(Fu Qiao-ping, Hu Ying, Liu Lin-yun, *et al.* Feasibility Study Report of Wudongde Hydropower Station on Jinsha River [R]. Wuhan: Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, 2015. (in Chinese))
- [2] 李思璇,肖 潇,李 昶,等.金沙江下游水沙特性、梯级水电站库区和坝下游河道冲淤分析(2023年度)[R].武汉:长江水利委员会水文局,中国长江三峡集团有限公司,2024.(Li Si-xuan, Xiao Xiao, Li Chang, *et al.* Analysis of Water and Sediment Characteristics in the Lower Reaches of Jinsha River, Scouring and Silting in the Reservoir Area of Cascade Hydropower Stations and the River Channel Downstream of the Dam (2023) [R]. Wuhan: Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission and China Three Gorges Corporation, 2024. (in Chinese))
- [3] 李丹勋.三峡水库上游来水来沙变化趋势研究[M].北京:科学出版社,2010.(Li Dan-xun. Study on Variation Trend of Incoming Water and Sediment in the upper Teaches of Three Gorges Reservoir [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [4] 卢金友,赵瑾琼.长江流域梯级枢纽泥沙调控关键技术[J].长江科学院院报,2021,38(1):1-7,26.(Lu Jin-you, Zhao Jin-qiong. Key Technologies of Sediment Regulation for Cascade Reservoirs in Yangtze River Basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(1): 1-7, 26. (in Chinese))
- [5] 朱玲玲,陈翠华,张继顺.金沙江下游水沙变异及其宏观效应研究[J].泥沙研究,2016,41(5):20-27.(Zhu Ling-ling, Chen Cui-hua, Zhang Ji-shun. Study on Variations of Runoff and Sediment and Effect to the Lower Jinsha River [J]. Journal of Sediment Research, 2016, 41(5): 20-27. (in Chinese))
- [6] 朱玲玲,董先勇,陈泽方.金沙江下游梯级水库淤积及其对三峡水库影响研究[J].长江科学院院报,2017,34(3):1-7.(Zhu Ling-ling, Dong Xian-yong, Chen Ze-fang. Sediment Deposition of Cascade Reservoirs in the Lower Jinsha River and Its Impact on Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(3): 1-7. (in Chinese))
- [7] 杨成刚,李圣伟,王伟,等.上游水库群运行后金沙江下游梯级水库与三峡水库联合减淤调度研究[R].武汉:长江水利委员会水文局,2020.(Yang Cheng-gang, Li Sheng-wei, Wang Wei, *et al.* Study on Joint Sediment Reduction Operation of Cascade Reservoirs in The Lower Reaches of Jinsha River and Three Gorges Reservoir After Operation of Upstream Reservoirs [R]. Wuhan: Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission, 2020. (in Chinese))

(下转第41页)

- [10] Luo D, Yang X, Xie L, *et al.* Propagation Characteristics of Meteorological Drought to Hydrological Drought in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 656: 133023.
- [11] Zhang Z, Zhang L, Liu Y, *et al.* Responses of Annual Streamflow Variability to Annual Precipitation, Extreme Climate Events and Large-scale Climate Phenomena in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 632: 130969.
- [12] 朱玲慧, 关颖慧. 金沙江流域降水结构演变及非平稳性特征[J]. *长江科学院院报*, 2025, 42(3): 50-58. (Zhu Ling-hui, Guan Ying-hui. Evolution and Non-stationarity of Precipitation Structure in the Jinsha River Basin[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2025, 42(3): 50-58. (in Chinese))
- [13] 叶许春, 袁燕萍, 刘婷婷, 等. 鄱阳湖流域气象干旱的区域性特征及干旱过程演变[J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(9): 19-26, 34. (Ye Xu-chun, Yuan Yan-ping, Liu Ting-ting, *et al.* Regional Characteristics and Evolution of Meteorological Droughts in Poyang Lake Basin[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2024, 41(9): 19-26, 34. (in Chinese))
- [14] 严昌盛, 王 鹏, 靳莉君, 等. 1961—2020年黄河源区降水时空变化特征研究[J]. *水文*, 2024, 44(5): 84-91. (Yan Chang-sheng, Wang Peng, Jin Li-jun, *et al.* Research on the Temporal and Spatial Variation Characteristics of Precipitation in the Source Region of the Yellow River from 1961 to 2020[J]. *Journal of China Hydrology*, 2024, 44(5): 84-91. (in Chinese))
- [15] 杨肖丽, 张佳乐, 黄星怡, 等. 气候变化和人类活动对长江流域极端径流的影响[J]. *水资源保护*, 2025, 41(4): 1-9. (Yang Xiao-li, Zhang Jia-Le, Huang Xing-yi, *et al.* Impacts of Climate Change and Human Activities on Extreme Runoff in the Yangtze River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(4): 1-9. (in Chinese))
- [16] 姜 瑶, 徐宗学, 王 静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J]. *水利学报*, 2020, 51(7): 845-857. (Jiang Yao, Xu Zong-xue, Wang Jing. Comparison among Five Methods of Trend Detection for Annual Runoff Series[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(7): 845-857. (in Chinese))
- [17] 孙可可, 姚立强, 许继军, 等. 基于用水效益函数的城市干旱损失评估方法[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(11): 11-17. (Sun Ke-ke, Yao Li-qiang, Xu Ji-jun, *et al.* Evaluating Urban Drought Loss Based on Water Use Benefit Function[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(11): 11-17. (in Chinese))
- [18] 熊立华, 郭生练, 付小平, 等. 两参数月水量平衡模型的研制和应用[J]. *水科学进展*, 1996, 7(增刊1): 80-86. (Xiong Li-hua, Guo Sheng-lian, Fu Xiao-ping, *et al.* Two-parameter Monthly Water Balance Model and Its Application[J]. *Advances in Water Science*, 1996, 7(Supp. 1): 80-86. (in Chinese))
- [19] 陆桂华, 闫桂霞, 吴志勇, 等. 基于 Copula 函数的区域干旱分析方法[J]. *水科学进展*, 2010, 21(2): 188-193. (Lu Gui-hua, Yan Gui-xia, Wu Zhi-yong, *et al.* Regional Drought Analysis Approach Based on Copula Function[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 188-193. (in Chinese))

(编辑:刘运飞)

(上接第22页)

- [8] 黄仁勇, 黄 悦. 三峡水库干支流河道一维非恒定水沙数学模型初步研究[J]. *长江科学院院报*, 2009, 26(2): 9-13. (Huang Ren-yong, Huang Yue. Preliminary Study on 1-D Numerical Simulation of Unsteady Flow and Sediment Transport in Mainstream and Tributaries of Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2009, 26(2): 9-13. (in Chinese))
- [9] 黄仁勇, 李 飞, 张细兵. 三峡水库运用初期库区水沙输移数值模拟[J]. *长江科学院院报*, 2012, 29(1): 7-12. (Huang Ren-yong, Li Fei, Zhang Xi-bing. Numerical Simulation of Flow and Sediment Transport in the Early Stage of Three Gorges Reservoir Operation[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(1): 7-12. (in Chinese))
- [10] 黄仁勇, 王 敏, 张细兵, 等. 三峡水库区间入流过程计算[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(6): 67-69, 80. (Huang Ren-yong, Wang Min, Zhang Xi-bing, *et al.* Calculation of Local Inflow Process of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(6): 67-69, 80. (in Chinese))
- [11] 谢益芹, 邓安军, 董先勇, 等. 金沙江下游流域水沙格局变化研究[J]. *水利学报*, 2023, 54(11): 1309-1322. (Xie Yi-qin, Deng An-jun, Dong Xian-yong, *et al.* Study on the Spatial-temporal Variations of Runoff and Sediment in the Lower Reach of Jinsha River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(11): 1309-1322. (in Chinese))

(编辑:任坤杰)