

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.009

梯级水库拦沙条件下水库排沙比公式修正

张国帅^{1,2}, 金中武^{1,2}, 李志晶^{1,2}, 陈 鹏^{1,2}, 周其航^{1,2}

(1. 长江科学院河流研究所; 2. 水利部长江重点实验室)

摘要:为解决梯级水库长期运行中因有效库容持续衰减、入库水沙条件显著改变而导致排沙比经验公式计算精度偏低的问题,通过设计金沙江下游梯级水库未来 100 a 的区间来水来沙过程,分别采用一维水沙模型、水库排沙比 Siyami 经验公式计算梯级水库排沙比,分析了两种方法计算梯级水库排沙比结果的量化关系,并对水库排沙比 Siyami 经验公式进行了修正。结果表明:一维水沙模型计算排沙比的波动性大于 Siyami 经验公式的计算结果,并且随着梯级水库运行时间增加,一维水沙模型计算排沙比的增长速率明显大于 Siyami 经验公式的计算结果;修正的 Siyami 经验公式在乌东德水库、白鹤滩水库、溪洛渡水库、向家坝水库的拟合优度 R^2 分别为 0.95、0.96、0.87、0.86,说明修正公式精度较高。

关键词:金沙江下游梯级水库;泥沙数学模型;水库排沙比;经验公式修正

Correction of sediment discharge ratio formula for cascade reservoirs under sediment interception conditions

Zhang Guoshuai^{1,2}, Jin Zhongwu^{1,2}, Li Zhijing^{1,2}, Chen Peng^{1,2}, Zhou Qihang^{1,2}

(1. River Research Department of Changjiang River Scientific Research Institute;
2. Key Laboratory of Changjiang River of Ministry of Water Resources)

Abstract: To address the problem of low accuracy in empirical sediment discharge ratio formulas caused by the continuous decline in effective reservoir capacity and significant changes in inflow water and sediment conditions during long-term operation of cascade reservoirs, the inflow water and sediment processes in the cascade reservoirs of the lower reaches of the Jinsha River over the next 100 years were designed. The sediment discharge ratios of the cascade reservoirs were calculated using both a one-dimensional water-sediment model and the Siyami empirical formula for sediment discharge ratio. The quantitative relationship between the results obtained by the two methods was analyzed, and the Siyami empirical formula for sediment discharge ratio was subsequently corrected. The results show that the sediment discharge ratio calculated by the one-dimensional water-sediment model exhibits greater volatility than that calculated by the Siyami empirical formula. Moreover, as the operation time of the cascade reservoirs increases, the growth rate of the sediment discharge ratio calculated by the one-dimensional water-sediment model is significantly higher than that calculated by the Siyami empirical formula. The coefficient of determination of the corrected Siyami empirical formula for the Wudongde, Baihetan, Xiluodu, and Xiangjiaba reservoirs is 0.95, 0.96, 0.87, and 0.86, respectively, indicating that the corrected formula has high accuracy.

Key words: cascade reservoir of the lower reaches of the Jinsha River; mathematical model of sediment; sediment discharge ratio of reservoir; empirical formula correction

随着国内大量水利枢纽建成并投入使用,水库淤积已成为影响水库群长期有效运行的关键问题^[1-4]。水库排沙比定义为出库沙量与入库沙量之比,是定量表征水库排沙效率与淤积演变规律的核心指标^[5-7]。研究水库运行方式对排沙比的影响,可揭示水库对流域水沙时空分布的调控效应,为水库泥沙调度与管理提供理论支撑^[8-11]。水库排沙比受入库水沙条件、水库运行方式及梯级水库组合格局等多重因素共同影响,其在不同时间尺度下的变化规律仍有待系统阐明^[12-14]。在梯级水库长期运行过程中,上游水库拦沙作用显著削减了下游河道来沙量,水沙沿程补给与交换对水库排沙比的影响愈发突出;同时,库区泥沙持续淤积导致河床比降减小,水库拦沙能力随淤积进程逐步减弱。考虑梯级水库间水沙沿程传递与反馈关系,入库水沙条件与

基金项目: 中央公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CKSF2026340/HL);国家自然科学基金项目(52595702,52479058)

作者简介: 张国帅(1995—),男,工程师,博士,主要从事水利枢纽泥沙治理研究。E-mail:18514430909@163.com

通信作者: 金中武(1976—),男,正高级工程师,博士,主要从事水利枢纽泥沙治理研究。E-mail:zhongwuji@163.com

库区淤积形态之间存在显著的互馈机制^[14-16]。因此梯级水库排沙比具有影响因素繁多、演变机理复杂、时空尺度耦合紧密等特征^[17-19],亟须对现有梯级水库排沙比经验公式进行改进与完善,以支撑水库淤积防控及梯级水库泥沙联合调控技术的提升与发展。

水库排沙比受出入库水量、入库沙量、入库水流含沙量(以下简称“入库含沙量”)、水库库容、坝前运行水位及库区地形等多种因素共同影响。目前主要采用 3 类方法计算梯级水库排沙比^[20-21]:泥沙物理模型、泥沙数学模型、经验公式法,其中泥沙物理模型依据水沙相似比尺,通过试验模拟测量水库淤积情况及排沙效果;泥沙数学模型则利用圣维南方程、水流挟沙力公式、河床变形方程等控制方程组,通过离散微分方程计算梯级水库淤积进程;经验公式法则基于水库运行过程中的水沙观测资料,分析水库排沙比与各变量的量化关系。泥沙物理模型与河道水沙输移的物理机制相同,试验结果相对可靠、准确性较高,但泥沙物理模型的试验材料及时间成本消耗巨大,不适于长序列水库淤积进程论证;泥沙数学模型具有完备的控制方程组,可以准确计算梯级水库泥沙输移的时空分布特性,但泥沙数学模型对河道地形资料要求较高,并且模型运算速度与网格划分精度直接相关,在缺少充分水沙、地形资料的条件下,泥沙数学模型的参数难以率定;经验公式法兼具计算成本较小、观测资料要求较少、计算速度快、工程应用广泛等优点,但是受限于梯级水库排沙的复杂机制,经验公式对长序列梯级水库排沙比的计算精度较低^[22-24]。

国内外学者根据众多水库运行的观测资料,研究了水库排沙比与各变量的相关性 & 量化关系,发现水库排沙比与滞留时间(水库总库容与入库水量比值)满足 Brune 曲线关系。虽然 Moragoda 等^[25-28]发展出了不同函数形式的 Brune 曲线公式,但这些公式均是研究单个水库排沙比的变化规律,对于新水沙情势下梯级水库的排沙比变化规律有待论证。本文根据金沙江下游水沙变化周期,设计未来 100a 梯级水库区间水沙补给过程,分别运用一维水沙模型及 Siyami 经验公式计算梯级水库排沙比变化过程,通过分析出入库含沙量系数比值与滞留时间的理论关系,修正梯级水库排沙比 Siyami 经验公式。

1 研究区概况

金沙江流域位于我国横断山脉区域,研究范围主要为金沙江下游流域攀枝花水文站至屏山或向家坝水文站区间,区间集水面积 14.70 万 km²。金沙江下游流域是长江三峡水库重要泥沙来源,随着金沙江下游梯级水库陆续建成运行,乌东德-白鹤滩-溪洛渡-向家坝梯级水库对长江上游减沙效应发挥关键作用。自然条件下金沙江年均输沙量为 2.55 亿 t,约占长江上游来沙量的 50%,在梯级水库拦沙作用下,下游出口年输沙量锐减至 0.015 亿 t。金沙江下游干流河道沿程控制性水文站分布为攀枝花、三堆子、乌东德、乌东德(二)、白鹤滩(或华弹)、溪洛渡、向家坝(或屏山)水文站,其中向家坝水文站为金沙江流域控制站,控制流域面积为 458 592 km²。金沙江下游梯级水库级联排沙关系如图 1 所示,梯级水库拦沙条件下金沙江下游沿程水沙传递关系由上库排沙量、库区区间来沙共同决定。由于上水库拦沙导致下水库入库水沙条件显著变化,下水库排沙比受入库水沙条件及水库淤积进程影响较大。

为模拟梯级水库长期运行条件下坝区淤积对水库排沙比的影响,给定金沙江下游梯级水库运行 100 年入库水沙条件,用于计算分析梯级水库多年淤积进程及水库排沙比。金沙江下游梯级水库在 2012—2020 年陆续建成运行,因此设计水沙序列为 2013—2120 年梯级水库库区来水来沙。根据自然条件下金沙江下游来水来沙条件及金沙江下游水沙变化周期(28 a)^[29],制定长系列(100 a)入库水沙过程如图 2 所示。2013—2120 年乌东德库区区间年均来水量 1 198.58 亿 m³,年均来沙量 3 961.71 万 t;白鹤滩库区区间年均来水量 75.94 亿 m³,年均来沙量 4 524.03 万 t;溪洛渡库区区间年均来水量 47.33 亿 m³,年均来沙量 3 204.51 万 t;向家坝库区区间年均来水量 21.50 亿 m³,年均来沙量 119.61 万 t。

2 水库排沙比计算方法

2.1 一维水沙模型

基于非均匀不平衡输沙理论建立梯级水库淤积计算的一维水沙模型(式(1)~(5)),包括水流连续方程、水流运动方程、水流挟沙力方程、推移质输沙率方程、河床变形方程。通过计算梯级水库长系列淤积进程,分析梯级水库拦沙条件下水库排沙比变化规律。

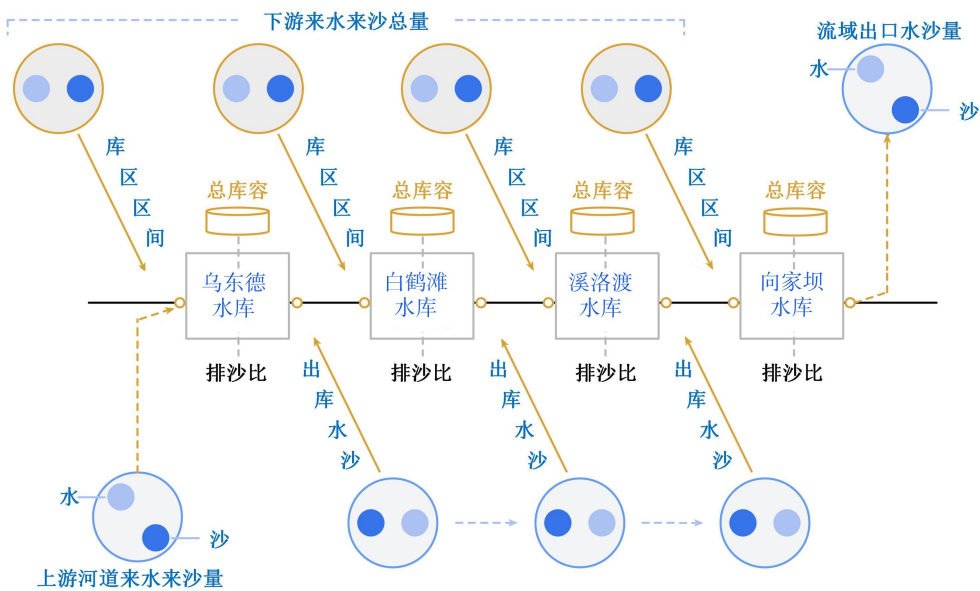


图 1 金沙江下游梯级水库级联排沙关系

Fig. 1 Cascade sediment discharge relationship of cascade reservoirs of the lower reaches of the Jinsha River

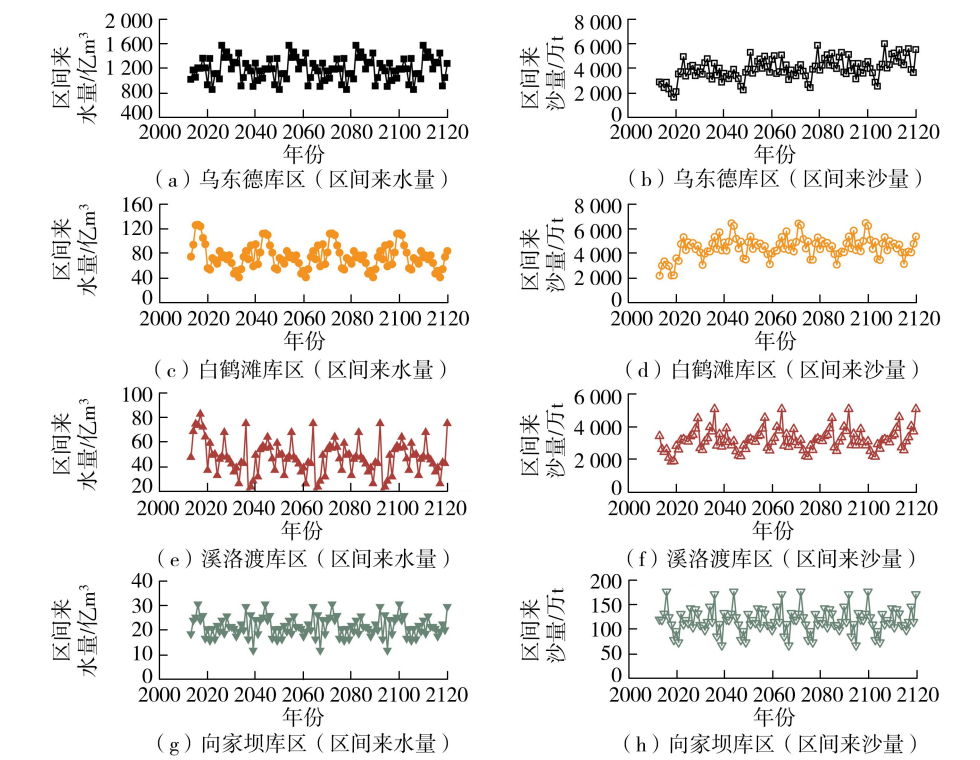


图 2 金沙江下游梯级水库设计入库水沙过程

Fig. 2 Designed inflow water and sediment processes for cascade reservoirs of the lower reaches of the Jinsha River

$$\frac{\partial q}{\partial x} + B \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial t} \tag{1}$$

$$J = \frac{q^2 n^2}{B^2 h^{10/3}} + \frac{1}{2g} \frac{\partial V^2}{\partial x} \tag{2}$$

$$S^* = k \left(\frac{V^3}{gh\omega} \right)^m \tag{3}$$

$$q_b = \rho_s d \omega K_b \left(\frac{V_b}{\omega} \right)^{m_b} \tag{4}$$

$$\frac{dS}{dx} = - \frac{\alpha \omega}{q} (S - S^*)$$

(5)

式中: q 为流量; x 为河道纵向迁移距离; B 为河道宽度; h 为水位; J 为水力比降; n 为河道糙率; g 为重力加速度; V 为河流平均流速; S^* 为水流挟沙力; ω 为泥沙沉速; k 为水流挟沙力系数; m 为水流挟沙力指数; q_b 为河流推移质的输沙率; d 为推移质泥沙粒径; ρ_s 为泥沙密度; V_b 为河流摩阻流速; K_b 、 m_b 分别为推移质输沙率公式的系数和指数; S 为河道悬移质含沙量; α 为悬移质沿程恢复饱和系数。

2.2 一维水沙模型验证

运用一维水沙模型计算 2013—2020 年金沙江下游溪洛渡、向家坝水库淤积进程,并与两水库实际淤积情况进行对比验证,结果如图 3 所示。2013—2020 年溪洛渡、向家坝水库年均淤积量的模型计算结果分别为 1.05 亿、252.57 万 t,年均淤积量实际观测值为 1.08 亿、230.57 万 t,两水库淤积量计算结果与观测值的线性拟合度为 0.97,说明模型的计算精度较高,可以用于计算梯级水库未来淤积量。

2.3 水库排沙比经验公式

水库排沙比与水库滞留时间满足 Brune 曲线关系。Tan 等^[30-32]研究发现,Siyami 经验公式(式(6))在金沙江流域水库排沙比的计算中具有最优的适用性。

$$\eta_{it} = 1 - e^{-0.0079(Q_{in,it}/V_{e,it})}$$

(6)

其中

$$Q_{in,it} = Q_{out,(i-1)t} + Q_{z,it}$$

式中: η_{it} 为水库 i 在第 t 年的排沙比; $V_{e,it}$ 为水库 i 在第 t 年水库有效库容; $Q_{in,it}$ 为水库 i 在第 t 年的入库年径流量; $Q_{out,(i-1)t}$ 为水库 $i-1$ 在第 t 年出库水量; $Q_{z,it}$ 为水库 i 在第 t 年的库区补水量。

3 水库排沙比经验公式修正

3.1 水库排沙比计算结果对比

分别采用一维水沙模型与 Siyami 经验公式,计算金沙江下游梯级水库运行 100 年的淤积进程,结果如图 4 所示。一维水沙模型计算结果表明,2021—2120 年金沙江下游梯级水库累积淤积量为 130.14 亿 t,总库容淤损率为 25.79%,其中乌东德水库年均淤积量 3 712.30 万 t,白鹤滩水库年均淤积量 5 434.48 万 t,溪洛渡水库年均淤积量 3 630.76 万 t,向家坝水库年均淤积量 356.83 万 t。未来 100 a 内梯级水库库容淤损率速度从大到小排序结果为:乌东德水库、溪洛渡水库、白鹤滩水库、向家坝水库。截至 2120 年乌东德水库累积淤损率为 45.29%,白鹤滩水库累积淤损率为 23.66%,溪洛渡水库累积淤损率为 25.86%,向家坝水库累积淤损率为 6.18%。水库排沙比 Siyami 经验公式计算结果表明,2021—2120 年金沙江下游梯级水库累积淤积 126.55 亿 t,总库容淤损率为 24.76%。截至 2120 年,乌东德水库年均淤积量 3 450.86 万 t,库容淤损率为 42.05%;白鹤滩水库年均淤积量 5 007.45 万 t,库容淤损率为 21.80%;溪洛渡水库年均淤积量 3 214.91 万 t,库容淤损率为 26.68%;向家坝水库年均淤积量 363.53 万 t,库容淤损率为

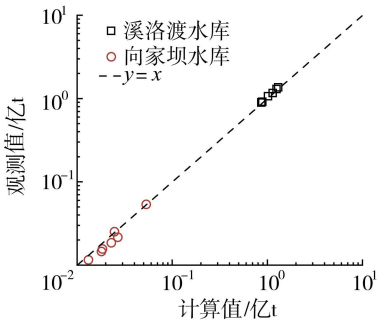


图 3 一维水沙模型计算水库淤积量验证

Fig.3 Verification of reservoir sedimentation volume calculated by one-dimensional water-sediment model

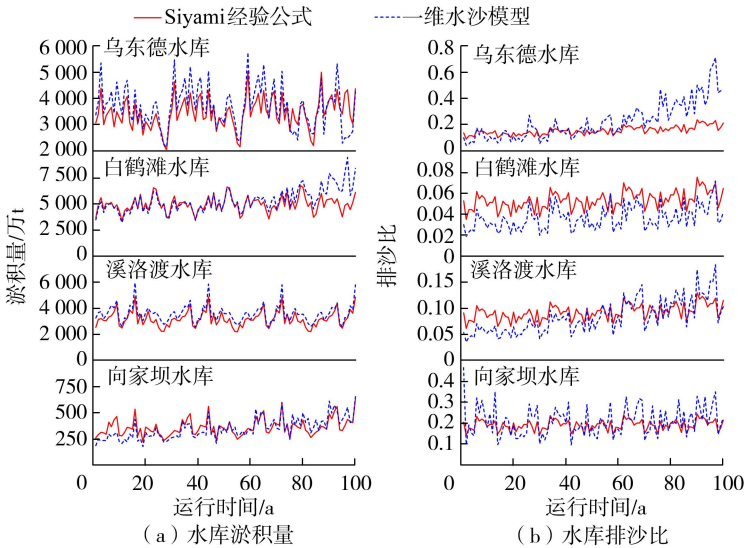


图 4 梯级水库淤积进程计算结果对比

Fig.4 Comparison of calculated sedimentation processes for cascade reservoirs of the lower reaches of the Jinsha River

7.11%。

由图4可知,Siyami经验公式与一维水沙模型的计算结果总体保持一致,说明梯级水库淤积的预测结果相对可靠。两种计算结果在淤积总量预测和淤积空间分布均十分接近。淤积总量方面,Siyami经验公式与一维水沙模型计算结果的比值为0.97;淤积空间分布方面,两种计算方法在乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝水库的计算结果比值,分别为0.93、0.92、0.89、1.02。分析两种计算结果的主要差异,一维水沙模型计算排沙比的波动性大于Siyami经验公式计算结果,并且随着梯级水库运行时间增加,一维水沙模型计算排沙比的增长速率明显大于Siyami经验公式计算结果,主要是因为不同水库的年入库水沙条件、水库库容存在差异。由于金沙江下游存在显著的水沙异源现象,从三堆子站至向家坝站年径流量沿程变化较小,各水库年入库水量基本持平,而年入库沙量在上游拦沙条件下以库区来沙为主。以金沙江下游梯级水库入库含沙量表征入库水沙条件,结合水库排沙比定义式(7)可知,当入库含沙量与出库含沙量越接近时水库排沙比越大,即入库含沙量越小时,悬移质粒径越小,水库排沙能力越强。

$$\eta_{it} = \frac{Q_{out,it}}{Q_{in,it}} \frac{S_{out,it}}{S_{in,it}}$$

(7)

其中

$$S_{in,it} = 0.1 W_{S,it} / Q_{in,it}$$

式中: $W_{S,it}$ 为水库*i*在第*t*年的入库沙量; $S_{in,it}$ 、 $S_{out,it}$ 分别为水库*i*在第*t*年的入库、出库水流含沙量。

3.2 Siyami经验公式理论基础

由水库排沙比定义可知,水库排沙比为出入库水量系数与出入库含沙量系数的乘积。2021—2120年乌东德水库、白鹤滩水库、溪洛渡水库、向家坝水库年均入库含沙量分别为0.34、0.37、0.25、0.01 kg/m³。利用梯级水库库区含沙量表征水库拦沙能力,出库含沙量与库区含沙量正相关,因此库区含沙量越大出库含沙量越大,水库排沙比越大:

$$S_{r,it} \propto S_{out,it}$$

(8)

$$\frac{S_{r,it}}{S_{in,it}} = \frac{W_{S,it}/V_{e,it}}{W_{S,it}/Q_{in,it}} = \frac{Q_{in,it}}{V_{e,it}}$$

(9)

式中: $S_{r,it}$ 为库区含沙量。由于库区含沙量与入库含沙量的比值与出入库含沙量系数为正相关关系,通过化简得到出入库含沙量系数的关键影响因子为水库滞留时间,滞留时间越大,水库对入库水流的拦蓄作用越大,水库排沙比越小。由图5可知,2021—2120年乌东德水库、白鹤滩水库、溪洛渡水库、向家坝水库年均滞留时间分别为0.048、0.147、0.082、0.038。结合梯级水库年均排沙比变化过程验证滞留时间为控制变量的合理性,Siyami经验公式与一维水沙模型的水库排沙比计算结果表明,乌东德水库与向家坝水库的滞留时间均明显小于中间两级水库,而两水库排沙比大于中间两级水库,说明水库排沙比经验公式中水库排沙比与滞留时间存在稳定的量化关系,具备相应的理论依据。

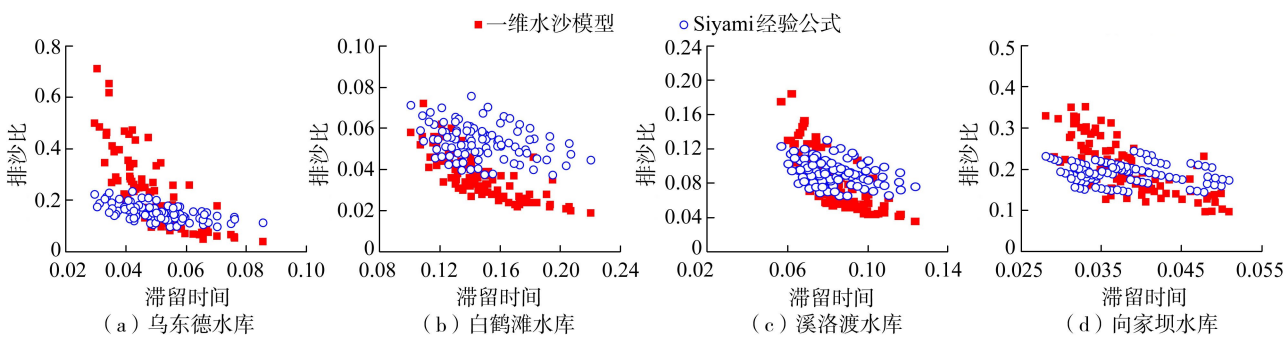


图5 排沙比与滞留时间关系

Fig.5 Relationship between sediment discharge ratio and retention time

3.3 Siyami经验公式修正

结合水库运行方式可知,多年尺度下出入库流量系数接近于1,因此两种水库排沙比计算结果的差异来自出入库含沙量系数。水库排沙比Siyami经验公式假设年内出入库水沙过程存在一致性,即出入库含沙量系数与出入库流量系数同步变化;而一维水沙模型则基于梯级水库的年内坝前水位变化、水沙输移规律计算年排沙比,考虑到了汛期与非汛期坝前水位变化对出入库流量系数、含沙量系数一致性变化的影响。利用水

库排沙比修正系数,改进金沙江下游梯级水库排沙比 Siyami 经验公式:

$$\eta_{m,i} = k_1 \eta_{f,i}$$

(10)

式中: $\eta_{m,i}$ 为一维水沙模型计算的水库 i 在第 t 年的排沙比; $\eta_{f,i}$ 为 Siyami 经验公式计算的水库 i 在第 t 年的水库排沙比; k_1 为水库排沙比修正系数。将一维水沙模型计算的水库排沙比作为基准值,改进现有水库排沙比 Siyami 经验公式。对比分析水库排沙比修正系数与各影响因素的量化关系,发现修正系数与水库排沙比基准值显著相关,两者量化关系如图 6 所示。金沙江下游梯级水库排沙比修正系数与排沙比基准值满足幂函数关系:

$$k_1 = a\eta_{m,i}^b$$

(11)

式中: a 、 b 分别为幂函数系数、指数。图 6 中水库排沙比修正系数随水库排沙比基准值增大而增大,说明当水库实际排沙比较大时 Siyami 经验公式计算排沙比偏小,并且随着水库逐步趋于冲淤平衡,水库排沙比增加会导致两种计算结果的差异性变大。式(11)构建了水库排沙比修正系数的自适应模型,解释了水库淤积对年排沙比经验公式计算准确性的影响,即随着运行时间增加水库逐步趋于冲淤平衡状态,水库排沙比修正系数为增加趋势。

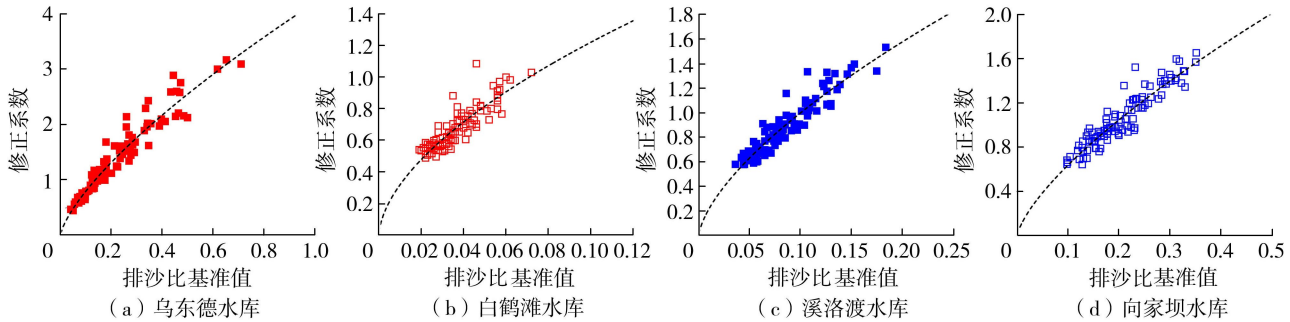


图 6 排沙比修正系数与排沙比基准值的关系

Fig. 6 Relationship between correction coefficient and benchmark value of sediment discharge ratio

运用式(11)分别拟合金沙江下游梯级水库排沙比修正系数的相关参数,结果见表 1。金沙江下游梯级水库排沙比修正系数公式的拟合优度 R^2 分别为 0.95、0.96、0.87、0.86,说明公式精度较高。

联合式(10)(11),得到水库年排沙比出入库含沙量修正系数 a 的自适应模型。

$$\eta_{m,i} = (a\eta_{f,i})^{1/(1-b)}$$

(12)

结合式(6)推导水库排沙比 Siyami 经验公式的修正形式:

$$\eta_{ii} = (a - ae^{-0.0079Q_{in,i}/V_{e,i}})^{1/(1-b)}$$

(13)

4 结 论

- a. 基于一维水沙模型,2021—2120 年金沙江下游梯级水库累积淤积量为 130.14 亿 t,四库总库容淤损率为 25.79%,其中乌东德水库年均淤积量 3712.30 万 t,白鹤滩水库年均淤积量 5434.48 万 t,溪洛渡水库年均淤积量 3630.76 万 t,向家坝水库年均淤积量 356.83 万 t。
- b. 水库排沙比 Siyami 经验公式与一维水沙模型的梯级水库淤积总量计算结果总体保持一致,两者比值为 0.97,说明梯级水库淤积的预测结果相对可靠。随着梯级水库运行时间增加,一维水沙模型计算排沙比的增长速率明显大于经验公式计算结果。
- c. 通过修正出入库含沙量系数修正了的水库排沙比 Siyami 经验公式,修正后公式在金沙江下游梯级水库排沙比的拟合优度为 0.76~0.93,说明修正的梯级水库排沙比公式计算精度较高。

参考文献:

[1] Wang Zhaoyin, Hu Chunhong. Strategies for managing reservoir sedimentation[J]. International Journal of Sediment Research,

2009,24(4):369-384.

[2] 吴腾,申孙平,李涛,等. 三盛公水库运用对下游河道输沙的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):401-405. (Wu Teng,Shen Sunping,Li Tao,et al. Influence of operation of Sanshenggong Reservoir on sediment transport in the downstream river[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021,49(5):401-405. (in Chinese))

[3] Yan Haochen,Zhang Xiaofeng,Xu Quanxi. Variation of runoff and sediment inflows to the Three Gorges Reservoir: impact of upstream cascade reservoirs[J]. Journal of Hydrology,2021,603:126875.

[4] 黄德春,朱宇昂,张修忠,等. 基于多理论视角的我国现代化水库运行管理矩阵建设研究[J]. 水利经济,2025,43(3):84-93. (Huang Dechun,Zhu Yuang,Zhang Xiuzhong, et al. Research on the construction of modern reservoir operation and management matrix in China from multiple theoretical perspectives[J]. Journal of Economics of Water Resources,2025,43(3): 84-93. (in Chinese))

[5] Michalec B. Evaluation of an empirical reservoir shape function to define sediment distributions in small reservoirs[J]. Water, 2015,7(8):4409-4426.

[6] 任实,高宇,吕超楠,等. 三峡水库汛期排沙规律研究[J]. 湖泊科学,2024,36(5):1562-1571. (Ren Shi,Gao Yu,Lyu Chaonan,et al. Sediment discharge characteristics of the Three Gorges Reservoir during flood seasons[J]. Journal of Lake Sciences,2024,36(5):1562-1571. (in Chinese))

[7] 郑珊,张晓丽,吴保生,等. 小浪底水库水沙异步运动与排沙比[J]. 泥沙研究,2021,46(6):1-8. (Zheng Shan,Zhang Xiaoli, Wu Baosheng,et al. Asynchronous movement of water-sediment and the sediment delivery ratio of the Xiaolangdi Reservoir[J]. Journal of Sediment Research,2021,46(6):1-8. (in Chinese))

[8] 邓安军,陈建国,胡海华,等. 我国水库淤损情势分析[J]. 水利学报,2022,53(3):325-332. (Deng Anjun,Chen Jianguo,Hu Haihua,et al. Analysis of reservoir siltation in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 325-332. (in Chinese))

[9] Salas J D, Shin H S. Uncertainty analysis of reservoir sedimentation[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1999,125(4):339-350.

[10] 张国帅,邓安军,陈建国,等. 金沙江下游水库拦沙效应研究[J]. 泥沙研究,2024,49(5):50-57. (Zhang Guoshuai,Deng Anjun,Chen Jianguo,et al. Study on the sediment interception by reservoirs in the lower Jinsha River Basin[J]. Journal of Sediment Research,2024,49(5):50-57. (in Chinese))

[11] Kondolf G M, Gao Yongxuan, Annandale G W, et al. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents[J]. Earth's Future,2014,2(5):256-280.

[12] 陈建国,邓安军,胡海华. 水库年平均淤损率影响因素分析[J]. 泥沙研究,2019,44(4):1-5. (Chen Jianguo,Deng Anjun, Hu Haihua. Analysis of factors affecting the annual average deposition rate of reservoirs[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(4):1-5. (in Chinese))

[13] Huang Yifan, Wang Jinsheng, Yang Mei. Unexpected sedimentation patterns upstream and downstream of the Three Gorges Reservoir: Future risks[J]. International Journal of Sediment Research,2019,34(2):108-117.

[14] Lique C,Canals M,Ludwig W, et al. Sediment discharge of the rivers of Catalonia, NE Spain, and the influence of human impacts[J]. Journal of Hydrology,2009,366(1/2/3/4):76-88.

[15] 陈建国,周文浩,孙高虎. 论黄河小浪底水库拦沙后期的运用及水沙调控[J]. 泥沙研究,2016,41(4):1-8. (Chen Jianguo, Zhou Wenhao,Sun Gaohu. Studies on operation scheme and water-sediment regulation of Xiaolangdi Reservoir[J]. Journal of Sediment Research,2016,41(4):1-8. (in Chinese))

[16] Ren Shi,Zhang Bangwen,Wang Weijie, et al. Sedimentation and its response to management strategies of the Three Gorges Reservoir, Yangtze River, China[J]. Catena,2021,199:105096.

[17] Tang Xiaoya,Tong Sichen,Huang Guoxian, et al. Characteristics of sedimentation and channel adjustment linked to the Three Gorges Reservoir[J]. International Journal of Sediment Research,2021,36(2):177-189.

[18] Kumm M,Lu X X,Wang J J, et al. Basin-wide sediment trapping efficiency of emerging reservoirs along the Mekong[J]. Geomorphology, 2010,119(3/4): 181-197.

[19] 张金良,刘继祥,鲁俊,等. 黄河泥沙工程控制理论与实践[J]. 泥沙研究,2023,48(2):1-8. (Zhang Jinliang,Liu Jixiang,Lu Jun,et al. Theories and practices of sediment engineering control in the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research,2023,48 (2):1-8. (in Chinese))

[20] 程亦菲,夏军强,周美蓉,等. 黄河下游不同河段分组悬沙输移对河床冲淤的影响[J]. 水科学进展,2022,33(3):506-517. (Cheng Yifei,Xia Junqiang,Zhou Meirong,et al. Effects of grouped suspended sediment transport on channel evolution in the

Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science,2022,33(3):506-517. (in Chinese))

[21] Sedláček J,Bábek O,Grygar T M,et al. A closer look at sedimentation processes in two dam reservoirs[J]. Journal of Hydrology, 2022,605:127397.

[22] Chen Peng,Deng Jinyun,Tan Guangming,et al. Prediction research on sedimentation balance of Three Gorges Reservoir under new conditions of water and sediment[J]. Scientific Reports,2021,11(1):19005.

[23] Yang Yunping,Zheng Jinhai,Zhu Lingling,et al. Influence of the Three Gorges Dam on the transport and sorting of coarse and fine sediments downstream of the dam[J]. Journal of Hydrology,2022,615:128654.

[24] 张金良,胡春宏,刘继祥. 多沙河流水库“蓄清调浑”运用方式及其设计技术[J]. 水利学报,2022,53(1):1-10. (Zhang Jinliang,Hu Chunhong,Liu Jixiang. Operation mode and design technology of “storing clean water and regulating muddy flow” of reservoirs in sediment-laden river[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(1):1-10. (in Chinese))

[25] Moragoda N,Cohen S,Gardner J,et al. Modeling and analysis of sediment trapping efficiency of large dams using remote sensing [J]. Water Resources Research,2023,59(6):e2022WR033296.

[26] 黄志鸿,董增川,周涛,等. 面向生态友好的水库群调度模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):202-208. (Huang Zhihong,Dong Zengchuan,Zhou Tao,et al. Group operation model for ecological friendly reservoir[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(3):202-208. (in Chinese))

[27] Li Zhe,Lu Lunhui,Lyu Pingyu,et al. Imbalanced stoichiometric reservoir sedimentation regulates methane accumulation in China’s Three Gorges Reservoir[J]. Water Resources Research,2020,56(9):e2019WR026447.

[28] 张金良. 多沙河流水库淤积形态与库容分布耦合设计[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):45-50. (Zhang Jinliang. Coupling design for sedimentation pattern and storage capacity distribution of reservoirs in sediment-laden rivers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(4):45-50. (in Chinese))

[29] Zhang Guoshuai,Deng Anjun,Lu Qin,et al. Analyzing the adjustment mechanism of daily sediment content under large reservoir operations[J]. Science of the Total Environment,2024,947:174729.

[30] Tan Guangming,Chen Peng,Deng Jinyun,et al. Review and improvement of conventional models for reservoir sediment trapping efficiency[J]. Heliyon,2019,5(9):e02458.

[31] Siyam A M,Kantoush S A, Saad A S. Development of a computational procedure for optimum sediment removal: application to case of roseires hydropower intakes[J]. FES Journal of Engineering Sciences,2021,10(1):28-36.

[32] Zhang Guoshuai,Deng Anjun,Chen Jianguo,et al. Impacts of climate change and human activities on sediment load in Longchuan River Basin, China[J]. Journal of Hydrology,2024,51:101613.

(收稿日期:2024 - 10 - 18 编辑:刘晓艳)

(上接第 59 页)

[29] 俞亮亮,陈可锋,陆培东,等. 海平面上升背景下辐射沙脊风暴潮增水研究[J]. 水利水运工程学报,2014(6):52-57. (Yu Liangliang,Chen Kefeng,Lu Peidong,et al. A study of storm surge in radial sand ridges under sea level rising [J]. Journal of Waterway and Harbor Engineering,2014(6):52-57. (in Chinese))

[30] Huang Mingfeng,Wang Qing,Liu Maofeng,et al. Increasing typhoon impact and economic losses due to anthropogenic warming in Southeast China[J]. Scientific Reports,2022,12(1):14048.

[31] 张蔚,严以新,郑金海,等. 珠江三角洲年际潮差长期变化趋势[J]. 水科学进展,2010,21(1):77-83. (Zhang Wei,Yan Yixin,Zheng Jinhai,et al. Interannual tidal range trend in Pearl River Delta [J]. Advances in Water Science,2010,21(1):77-83. (in Chinese))

[32] 谢平,陈广才,雷红富. 西北江三角洲马口站和三水站水文泥沙序列变异分析[J]. 水电能源科学,2006,24(3):18-22. (Xie Ping,Chen Guangcai,Lei Hongfu. Variation analysis of hydrological and sediment series in North River and West River Delta:case study of Makou Station and Sanshui Station [J]. Water Power and Energy Science,2006,24(3):18-22. (in Chinese))

[33] 乔煜,季小梅,张蔚. 台风事件下的雨潮复合灾害风险研究[J]. 地理科学进展,2023,42(6):1153-1161. (Qiao Yu, Ji Xiaomei,Zhang Wei. Compound flood risk of rainfall and storm surges during typhoon events [J]. Progress in Geography,2023, 42(6):1153-1161. (in Chinese))

[34] 袁竹,高亮,张文生,等. 风暴潮与极端暴雨叠加作用下九龙半岛内涝防控方法[J]. 水资源保护,2024,40(4):56-64. (Yuan Zhu,Gao Liang,Zhang Wensheng,et al. Waterlogging prevention and control methods in Kowloon Peninsula under superimposed effect of storm surge and extreme rainstorm[J]. Water Resources Protection,2024,40(4):56-64. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 01 - 09 编辑:刘晓艳)