

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.03.028

红柳沟水库泥沙冲淤及回水分析计算

史娟,张瑞晞,李静思

(陕西省水利电力勘测设计研究院(集团)有限公司,陕西西安710001)

摘要:针对红柳沟水库泥沙淤积及回水问题,通过水文比拟法与输沙模数法测算水库多年平均输沙量,结合地质资料确定塌岸量预测水库运行30年和50年的总淤积量,并判别水库淤积形态,通过试摆法确定30年和50年坝前淤积高程,采用明渠恒定非均匀流能量方程推求不同洪水标准下的回水水面线。结果表明:水库多年平均输沙量为23.84万t(折合17万 m^3);水库运行30年、50年的总淤积量分别为585万 m^3 和925万 m^3 ;水库运行30年和50年坝前淤积高程分别为1047m和1051m,库容损失率分别达67%和79%;推求的回水水面线发现20年一遇与5年一遇洪水回水尖灭点均位于距坝址4.61km的H10断面,明确了库区天然与建库后回水水位。水库前期淤积速率较快,需通过优化拦沙一排沙协同调度、加强水土保持及生态修复措施减缓库容损失以便延长水库使用寿命。

关键词:泥沙淤积;库容修正;椎体形态;回水计算

中图分类号:TV145

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2025)03-0203-05

Sedimentation and Backwater Analysis of Hongliugou Reservoir

SHI Juan, ZHANG Ruixi, LI Jingsi

(Shaanxi Water Resources and Hydropower Survey and Design Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710001, China)

Abstract: To address the issues of sediment deposition and backwater in the Hongliugou Reservoir, the multi-year average sediment load of the reservoir was calculated using the hydrological analogy method and sediment transport modulus method. Geological data were incorporated to predict bank collapse volume and estimate the total sediment accumulation over 30 and 50 years of operation. The reservoir's sedimentation pattern was analyzed, and the deposition elevations at the dam front for 30 and 50 years were determined via a trial method. The energy equation of steady non-uniform flow in open channels was applied to derive backwater profiles under different flood standards. The results show that: The multi-year average sediment load is 238 400 t (equivalent to 170 000 m^3); The total sediment accumulation over 30 and 50 years reaches 5.85 million m^3 and 9.25 million m^3 , respectively; After 30 and 50 years, the deposition elevations at the dam front are 1 047 m and 1 051 m, with reservoir capacity loss rates of 67% and 79%, respectively; The backwater profiles indicate that the termination points for both 20 year and 5 year flood backwaters are located at cross-section H10, 4.61 km from the dam site, clarifying the natural and post-impoundment backwater levels. The early-stage sedimentation rate is high, necessitating optimized sediment trapping and discharge coordination, enhanced soil conservation, and ecological restoration measures to mitigate capacity loss and prolong the reservoir's service life.

Keywords: sediment deposition; reservoir capacity modification; cone-shaped morphology; backwater calculation

水库作为水资源调控的重要工程设施,在供水、灌溉及防洪等方面发挥着重要作用。然而,在多沙河流上修建水库往往面临泥沙淤积这一难题,其引

发的库容损失、回水上延、枢纽建筑物及水轮机的磨损等问题,不仅影响大坝水库正常效益的发挥,同时威胁工程安全运行,且加剧库区淹没风险^[1-3]。拟

收稿日期:2024-11-23

修稿日期:2025-02-26

基金项目:陕西省神木市项目“陕西省神木市红柳沟水库工程可行性研究”(JS2020-GH-05)

作者简介:史娟(1984—),女,工程师,主要从事水利水电工程规划等方面工作。E-mail:2753601973@qq.com

修建的红柳沟水库库区两岸地层岩性主要为第四系松散堆积层的粉细沙及粉土,库区支沟较发育,雨季及洪水期携带悬移泥沙含量较大且工程段位于红柳沟的中下游段,易形成淤积滩地,因此系统开展红柳沟水库泥沙冲淤与回水计算研究,明确水库淤积速度和水库运行的有效年限,对优化工程设计与延长水库寿命具有重要理论与现实意义^[4-6]。

郭荣福等^[1]采用变态模型进行了泥沙物理模型设计,开展阿尔塔什水库库内泥沙淤积演变的过程、淤积形态以及淤积量等试验研究,结果表明,水库淤积呈现三角洲状貌,并不断向拦河坝坝前发展,当运行时间达到 50 年时,库容明显减少,且泥沙淤积沿程演变情况与库尾淤积高度等与汛期时拦河坝坝前水位紧密相关,汛期时,维持低水位运行对水库的排沙减淤发挥着至关重要的作用;姜乃森^[3]系统分析了水库泥沙淤积的内容及其严重性,且明确了水库淤积形态,亦即淤积物的分布,与入库水沙条件、库区地形、水库泄流排沙工程及运用方式等有关;丛梅^[5]采用 PC1500 水文分析计算集成应用软件计算清河水库泥沙淤积量,根据辽宁省水利科研所等单位提出纵向淤积形态的经验判别式判断水库泥沙淤积形态。目前针对水库的泥沙淤积研究多聚焦于单一地质条件,而对红柳沟这类兼具风沙区与沟壑区复合输沙特征的小型水库长期淤积演化规律及回水影响的分析缺乏系统解析。

本文以红柳沟水库为研究对象,针对其复杂泥沙来源与淤积风险,基于水文比拟法与输沙模数法测算风沙区与沟壑区的差异来沙量,结合淤积形态判别公式明确其纵向淤积特征及 30 年和 50 年淤积情景下的库容曲线;基于明渠恒定非均匀流能量方程计算水库回水水位,从而量化淤积对库容与淹没的影响,为拟定防护迁移方案及水库运行管理等提供科学依据。

1 工程概况

红柳沟水库坝址位于红柳沟下游段高家堡镇炭窑湾村,距神木市区约 55 km,坝址以上流域面积为 218 km²,干流长 30.4 km,河道平均比降 7.6‰。红柳沟水库正常蓄水位为 1 051 m,最大坝高 34.5 m,总库容为 876.3 万 m³,为小(1)型水库,工程建设主要以清水工业园区供水为主,兼顾水库下游瑶湾、草湾沟、玄路塔等 3 个村庄的农业灌溉用水。水库位

置示意图见图 1。



图 1 水库位置示意图

2 水库泥沙冲淤分析

2.1 基础资料

红柳沟水库坝址以上输沙量为风沙区沙量与沟壑区沙量叠加而成,本次计算采用水文比拟和输沙模数法测算水库来沙量。

风沙区沙量计算方法:秃尾河风沙区仅有 1991 年实测的乌鸡滩断面 1 年悬移质输沙量资料,故风沙区按乌鸡滩 1991 年实测资料进行估算。分析计算 1991 年实测乌鸡滩断面的年输沙量为 10.2 万 t。

沟壑区沙量计算方法:根据高家堡站 1967—2000 年实测资料统计,高家堡以上黄土沟壑区平均悬移质输沙量为 581.4 万 t,控制流域面积为 780 km²,故输沙模数为 7 450 t/km²,据此求得红柳沟水库以上 28 km² 黄土沟壑区的输沙量为 20.86 万 t。

红柳沟水库多年平均输沙量为风沙区沙量与沟壑区沙量之和,即为 23.84 万 t,折合 17 万 m³ (干容重采用 1.40 t/m³)。

水库的泥沙淤积量一般由塌岸量和流域来沙量组成。根据地质资料推荐坝址高程 1 051 m 以下的塌岸量为 75 万 m³,考虑水库蓄水拦沙的运行方式,水库运用 30 年,坝址的流域来沙总量为 510 万 m³,塌岸量为 75 万 m³,水库来沙总量为 585 万 m³;水库运用 50 年,推荐坝址的流域来沙总量为 850 万 m³,塌岸量为 75 万 m³,水库来沙总量为 925 万 m³。

2.2 分析方法

2.2.1 水库淤积形态判别

水库泥沙淤积按空间形态可分为横向淤积和纵向淤积,纵向淤积形态大致可分为三类,即三角洲、

锥体及带状^[7]。

红柳沟水库坝址处库内水深较大,且河道整个断面因泥沙淤积而淤高,横向淤积按不分滩槽计算,因此只需进行纵向淤积分布计算。按照陕西省水利科学研究所河渠研究室和清华大学水利工程系泥沙研究室合编《水库泥沙》淤积形态判别公式确定纵向淤积形态^[8]:

$$a' = \frac{V}{W_s J_0} \quad (1)$$

式中: a' 为淤积形态判别系数, $a' < 2.2$ 为锥体淤积, $a' > 2.2$ 为三角洲或带状淤积; V 为淤积库容, m^3 ,对长时期的淤积而言,用总库容; W_s 为入库沙量, m^3 ,对长期淤积而言,指多年平均入库沙量; J_0 为库区原河道比降,以万分率计。

将红柳沟水库 $V = 876.3$ 万 m^3 , $W_s = 17$ 万 m^3 , $J_0 = 76\text{‰}$ 代入式(1),得到 $a' = 0.68 < 2.2$,故水库为锥体淤积形态,水库锥体淤积纵剖面示意图如图2所示。

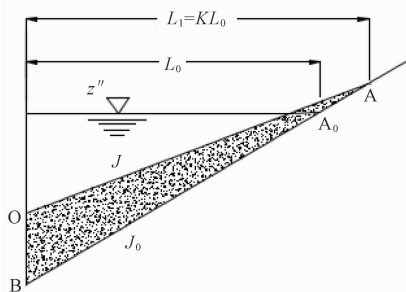


图2 水库锥体淤积纵剖面示意图

2.2.2 水库淤积的纵向分布分析方法

决定锥体淤积部位的三个要素是:坝前淤积面高程点O、淤积比降 J 和淤积末端位置点A,此三要素中只要确定一个要素,在淤积量已定的情况下,坝前淤积高程和淤积比降均随滞洪壅水淤积量变化过大而不易确定,而淤积末端位置可由以下公式确定:

$$L_1 = KL_0 \quad (2)$$

式中: L_1 为淤积末端点A距坝址的距离,km; K 为经验系数;一般 $K = 1.0 \sim 1.3$; L_0 为水库校核水位与原库底的交点 A_0 到坝址距离,km; L_1 、 L_0 标见图2。

红柳沟水库校核洪水位 1 054.53 m 与原库底交点 A_0 到坝址的距离 L_0 为 4.428 km, K 值的大小与来水来沙、滞洪水位及其持续时间和淤积量的大小有关,来沙量大、滞洪水位高及其持续时间长,淤积量大,则 K 值就大,反之, K 值就小。三门峡水库

和官厅水库均为大型水库, K 取值分别为 1.1 及 1.04^[8],红柳沟水库为小(1)型水库,多年平均输沙量为 17 万 m^3 ,相对于大型水库来沙量较小,因此选取 $K = 1.0$,即点 A 与 A_0 重合, $L_1 = L_0$ 。

根据水库运行 30 年和 50 年时限的淤积量及河道横纵断面数值,并依据淤积末端位置点 A,通过改变淤积高程等参数拟定不同的试算方案,经软件模型计算后,进行多方案综合比选分析,当试算淤积量与实际淤积量接近时,初步确定坝前淤积高程。

2.2.3 水库泥沙淤积结果分析

根据红柳沟水库库区 1:2000 地形图所剖的河道纵横断面,从淤积末端点 A 出发,拟定不同的坝前淤积高程,通过试算,当坝前淤积高程为 1 047 m 时,淤积总量为 584.4 万 m^3 ,与水库运用 30 年淤积量 585 万 m^3 基本一致,因此认为其淤积 AO 线为所求淤积范围。

水库运用 50 年后淤积总量为 925 万 m^3 ,正常蓄水位 1 051 m 对应原始库容为 591.5 万 m^3 ,水库按蓄水拦沙方式运行,运用 50 年后正常蓄水位以下库容淤满泥沙,水库下游无防洪要求,泄洪采用开敞式溢洪道泄洪,溢洪道堰顶高程 1051.0 m,因此水库运用 50 年后坝前淤积高程为 1 051 m,由 1 051 m 高程作淤积纵剖面线,认为其淤积 AO_1 线为所求淤积范围,总淤积量为 696.0 万 m^3 。

通过上述分析,红柳沟水库坝址 30 年、50 年淤积后,水库淤积形态分布如图 3 所示。

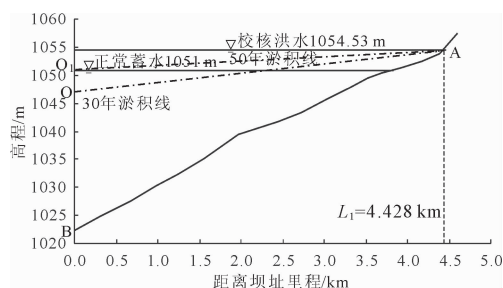


图3 红柳沟水库 30 年、50 年淤积纵向分布图

3 水库库容曲线修正及分析

根据红柳沟水库淤积形态分析成果,对水库运行 30 年和 50 年库容曲线进行修正,采用 30 年淤积库容曲线作为水库调节计算依据,并根据 30 年坝前淤积高程确定放水塔及塔内闸门等建筑物位置,运用 50 年淤积库容曲线进行洪水调节计算,确定建库后水面线起始水位,红柳沟水库库容成果如图 4 所示。

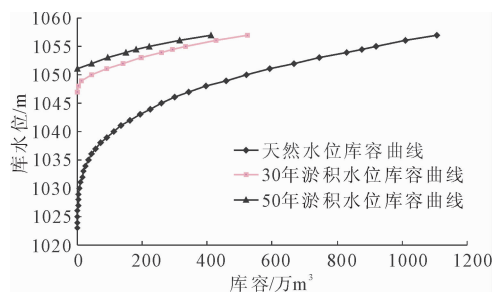


图 4 红柳沟水库库容曲线

通过分析修正后的库容曲线知,水库运行 30 年后,淤积量达到 585 万 m^3 ,校核洪水位以下库容降低到 291.58 万 m^3 ,减少了 67%。运行 50 年后,淤积量达到 696 万 m^3 ,库容降低到 696 万 m^3 ,减少了 79%,由此得到该水库运行 50 年内库容的损失速度较快,平均每年损失库容 14 万 m^3 。因此在水库后期运行过程中应采取必要的防治措施,拦减水库上游来沙,且做好上游的水土保持工作^[9],可在来沙多的汛期(或主汛期)水库降低水位冲刷排沙,避免低水位小流量冲刷排沙;在来沙少的调节期抬高水位蓄水拦沙,避免淤积末端上延,延长水库使用年限。

4 水库回水水面线计算

水库兴建后,库区沿程水位壅高,流速变小,水流挟沙力下降,河床会淤积,淤积引起的回水抬高与上延使得水库的回水常常超出原来的移民范围,因此需要进行水库回水计算^[10-11]。提供不同淹没标准的库区天然及淤积后回水沿程水位变化和回水末端位置,以确定淹没范围和淹没损失,拟定库区防护迁移方案等。

红柳沟水库库区淹没对象主要为农村居民点和部分耕地,根据《水利水电工程建设征地移民安置规划设计规范》(SL290—2009)要求,农村居民点、一般城镇及工矿区按 20 年一遇洪水标准;耕地及园地按 5 年一遇洪水标准,对库区的天然河道水面线以及水库运行 30 年后的水面线进行了计算。

4.1 计算方法

红柳沟水库属于自由表面流,采用明渠恒定非均匀流能量守恒方程,以坝址断面为起始断面向上游推算,用直接迭代法求解,计算回水水面线^[12]。

计算公式为^[13]:

$$Z_2 - Z_1 = \frac{(\alpha + \xi)Q^2}{2g} \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right) + \frac{\Delta s Q^2}{2} \left(\frac{1}{K_1^2} + \frac{1}{K_2^2} \right) \quad (3)$$

式中: Z_2 、 Z_1 分别为上、下游断面水位,m; α 为断面

的动能修正系数; ξ 为局部水头损失; Q 为断面流量, m^3/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; A_2 、 A_1 分别为上、下游断面过水面积, m^2 ; Δs 为上、下游断面间距, m ; K_2 、 K_1 分别为上、下游断面流量模数, m^3/s 。

4.2 计算条件

4.2.1 计算断面

根据红柳沟水库库区实测 1:2000 地形图,从下游至上游共布设 23 个横断面,在河道弯曲复杂处加布断面,断面之间的距离为 84 m~488 m,平均间距约为 247 m,可基本控制坝址以上河段的河道形态及河势变化,并满足本次回水水面线推求的要求,各横断面分布情况见图 5。

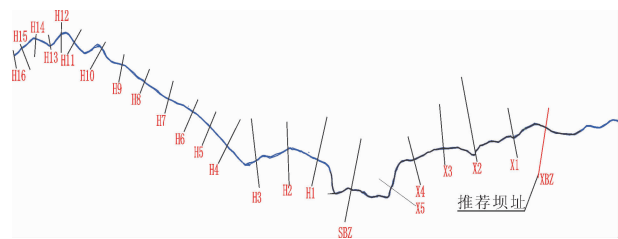


图 5 红柳沟水库横断面分布图

4.2.2 计算参数

(1) 局部水头损失和断面的动能修正系数:对渐变流, $\xi = 0, \alpha = 1$ 。

(2) 断面流量模数:

$$K = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} A \sqrt{R} \quad (4)$$

式中: n 为糙率; R 为水力半径; A 为过水断面面积。

n 的取值,根据河床组成、床面及河道岩壁特性等河道情况对比分析率定合理的糙率^[5],综合分析确定红柳沟水库库区的天然河道综合糙率为 0.04;水库修建后,因库区的泥沙淤积导致河床淤积细化,糙率随之降低,所以库区的河道综合糙率取 0.035。

(3) 断面流量:根据不同淹没对象的相应设计洪水标准,红柳沟水库回水水面线分两种流量级分别计算:20 年一遇洪水,流量为 295 m^3/s ;5 年一遇洪水,流量为 96 m^3/s 。

(4) 起始水位:利用曼宁公式计算起始断面坝址处的水位流量关系,确定天然水面线的起始水位,20 年一遇洪水位为 1 027.49 m,5 年一遇洪水位为 1 025.24 m;根据调洪分析计算建库后水面线起始水位,20 年一遇洪水位为 1 052.44 m,5 年一遇洪水位为 1 051.55 m。

4.3 计算结果

库区各流量级回水水面线计算结果如图 6 所

示。由分析知,汛期20年一遇和5年一遇洪水回水尖灭点均位于H10断面处,距离坝址4.61 km,且同一流量天然及淤积后回水水位随着距离坝址里程的增加,两者的水位差值逐渐减小,在靠近坝址时,淤积后的水位变化平缓,在远离坝址端,水位变化较大。而不同流量同一断面处的天然及淤积后的回水水位差值规律为流量越小两者的差值越大,流量越大与天然水位逼近的趋势越缓,基本符合水库回水的一般规律。

红柳沟水库回水水面线成果明确了不同淹没标准的库区天然及30年淤积后回水沿程水位变化和回水末端位置,为确定库区淹没范围、淹没损失及拟定防护迁移方案等提供必要的的数据支撑。

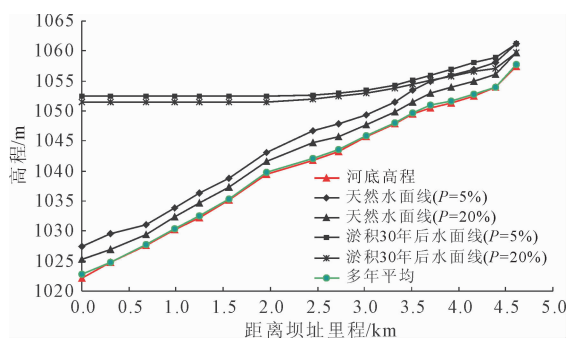


图6 红柳沟水库各流量级回水水面线

5 结论

针对红柳沟水库泥沙淤积及回水问题进行了深入分析,系统介绍了计算过程中采用的方法和步骤,主要结论如下:

(1) 水库运行50年内库容损失较大,且泥沙淤积对库容的侵蚀速度在前期尤为显著,30年、50年累计损失率分别为67%和79%。未来需持续监测水库泥沙动态,优化拦沙-排沙协同调度机制,并结

合生态修复措施(如植被缓冲带)减少入库泥沙,以提升水库综合效益与可持续性。

(2) 推算的库区天然及建库30年后20年、5年一遇洪水回水水面线,明确了库区天然与建库后回水水位及末端位置,可为确定库区淹没范围、淹没损失评估及防护迁移方案制定提供参考。

参考文献:

- [1] 郭荣福,梁幸福,朱浩天,等.阿尔塔什水库泥沙淤积规律研究[J].水利规划与设计,2022(12):46-52.
- [2] 杨辉辉.二滩水库泥沙淤积及库容状况分析[D].北京:清华大学,2017.
- [3] 姜乃森.水库泥沙问题[C]//会议,南京,1983-10-16,中国仪器仪表学会、中国海洋学会气象、水文、海洋仪器学会,1983:65-66.
- [4] 孙和平.小型水库泥沙淤积成因分析及淤积量的初步估算[J].地下水,2005,6(27):37-40.
- [5] 丛梅.清河水库泥沙淤积与回水计算[J].陕西水利,2017(2):93-96.
- [6] 吴伟,李援农,魏小抗.中小型淤地坝泥沙淤积量计算方法初探[J].人民黄河,2010(6):80-81.
- [7] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1983.
- [8] 陕西省水利科学研究所河渠研究室,清华大学水利工程泥沙研究室合编.水库泥沙[M].北京:水利电力出版社,1979.
- [9] 谢金明,吴保生,刘孝盈.水库泥沙淤积管理综述[J].泥沙研究,2013(3):71-80.
- [10] 索丽生,刘宁,等.水工设计手册[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
- [11] 韩其为.水库淤积[M].北京:科学出版社,2003.
- [12] 水电工程回水计算规范:NB/T 35093—2017[S].北京:中国电力出版社,2017.
- [13] 赵振兴,何建京.水力学[M].第2版.北京:清华大学出版社,2010.

(上接第194页)

- [9] Winter G, Nilson A H, Urquhart L C. Design of Concrete Structures[M]. 14th Edition. New York: Mc Graw Hill Education, 2015.
- [10] Standards Association of Australia, 3600-2018. Australian standard for concrete structures[S]. Sydney: Standards Australia Limited, 2018.
- [11] 周献祥,徐俊广.混凝土结构设计规范若干问题的讨论[J].建筑结构,2005,35(4):3-27.

- [12] 程懋堃,周算.对《混凝土结构设计规范若干问题的讨论》的讨论[J].建筑结构,2005,35(10):92.
- [13] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土原理和分析[M].北京:清华大学出版社,2003:201-209.
- [14] 顾祥林,金贤玉,周勇.混凝土结构基本原理[M].上海:同济大学出版社,2015:19-35.
- [15] 朱聘儒.混凝土结构设计:实践与探索[M].成都:西南交通大学出版社,2002:208-209.