

黄河小浪底水库汛期调控运用方式研究

王振凡¹, 王忠强¹, 陈翠霞², 吴默溪²

(1. 黄河水利水电开发集团有限公司, 河南 济源 454681; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:【目的】分析小浪底水库汛期调控效果并提出适应变化条件下的汛期水位运用模式, 为水库优化调度和综合效益协调发挥提供科学支撑。【方法】基于黄河水沙变化、水库和下游河道边界条件变化以及中下游生态保护和高质量发展需求, 利用水库-河道水沙数学模型计算分析黄河不同来沙量情景下小浪底水库汛期运用方式及效果, 并开展效果评价。【结果】①与逐步抬高汛限水位运用相比, 小浪底水库从现状汛限水位一次抬高到设计汛限水位, 水库运用水位高, 可取得较高的发电、供水、灌溉效益, 但水库排沙机会少, 拦沙期运用时间较短, 拦沙减淤效果相对较差, 长期来看黄河下游河道淤积量较多。②根据评价结果, 黄河来沙量在 3 亿 t 以上时, 小浪底水库逐步抬高汛限水位运用方案较优; 来沙量在 3 亿 t 及以下时, 水库汛期一次抬高汛限水位运用方案较优。【结论】未来来沙量较大时, 推荐小浪底水库仍以水库和河道减淤运用为主, 汛期逐步抬高汛限水位; 未来黄河来沙量较小时, 水库汛期可一次抬高到设计汛限水位运用。

关键词:运用方式; 汛期调控; 小浪底水库; 黄河下游

中图分类号:TV145

文献标识码:A

文章编号:2096-6792(2026)05-0032-08

目前, 我国水资源短缺态势严峻, 黄河流域尤为严重, 长期存在水少沙多、水资源匮乏、供需矛盾突出等问题^[1-2], 制约了流域生态保护和高质量发展。水库优化调度是调节径流、开发利用水资源的有效措施, 可最大化发挥防洪、减淤、兴利等效益^[3-4]。汛期水库运用方式直接关系到防洪减淤与兴利效益的协调发挥。对于黄河而言, 泥沙问题突出、水沙关系复杂, 水库汛期运用面临更高的调控难度。多沙河流域水库拦沙期内汛期运用一般有两种方式: 一种是视水库来水来沙条件和库区淤积状况, 汛限水位逐年或间隔几年向上抬高, 即逐步抬高汛限水位运用; 另一种是汛期直接按设计汛限水位控制运用, 即一次抬高汛限水位运用, 通过抬高水库汛限水位, 在满足原设计防洪安全的前提下, 增加水能资源利用量^[5]。前者汛期控制运用水位相对较低, 有利于减缓库区泥沙淤积速率, 但兴利效益不如后者。

黄河小浪底水利枢纽工程在黄河治理开发中具有极其重要的战略地位, 是解决下游洪水防御、

泥沙淤积、水资源短缺等问题的关键工程。在工程规划设计阶段, 水库汛期采取“逐步抬高水位, 拦粗排细”的运用方式, 以减缓水库淤积, 长期发挥拦沙减淤作用。水库投入运用以来, 国内诸多学者围绕小浪底水库的拦沙初期运用方式^[6]、拦沙后期运用方式^[7-8]开展了大量研究工作并提出了水库拦沙后期“逐步抬高汛限水位, 多年调节泥沙, 相机降低水位冲刷, 拦沙和调水调沙”的运用方式, 使相同边界条件下的汛限水位有所提高, 提升了水库综合利用效益。这些成果为小浪底水库实际调度运用提供了技术支撑。

来水来沙条件和水库、河道边界条件是影响水库运用的重要因素^[9-10]。20 世纪 80 年代, 在小浪底水库规划设计阶段, 基于当时黄河的来沙量, 曾提出水库拦沙期为 15 年, 即 1999 年小浪底水库下闸蓄水后至 2014 年, 75.5 亿 m³ 水库拦沙库容将被淤满。水库实际运用以来, 黄河来沙量锐减, 水库淤积速度也明显减缓^[11], 截至 2024 年, 水库累计淤积量为 34.2 亿 m³, 占设计拦沙量的 45.3%; 下

收稿日期/Received: 2025-01-16

修回日期/Revised: 2025-05-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3208603); 国家自然科学基金项目(U22A20237)。

第一作者: 王振凡(1971—), 男, 正高级工程师, 从事水利水电工程建设及运行管理方面的研究。E-mail: wangzfxld@163.com。

通信作者: 陈翠霞(1987—), 女, 高级工程师, 硕士, 从事水库调度方面的研究。E-mail: 516367418@qq.com。

游河道全程冲刷,防洪减淤形势缓解,水库、河道边界条件和来水来沙形势均发生了很大变化^[12]。因此,研究变化条件下小浪底水库汛期运用方式,对充分发挥水库综合利用效益具有重要意义。

本文基于黄河水沙变化和现状水库、河道边界条件,研究黄河来沙量减少、水库淤积减缓和下游河道冲刷等变化条件下小浪底水库汛期运用方式,计算分析小浪底水库在不同运用方式下的减淤、防凌、供水灌溉、改善生态和发电等的调控效果,评价并对比不同汛限水位方案的水库综合效益,提出变

化条件下充分发挥综合利用效益的水库运用模式,以为小浪底水库调度提供参考。

1 研究区域、方法及数据

1.1 研究区域

本文以小浪底水库为研究对象,重点分析其汛期运用方式及综合调控效益对小浪底库区和黄河下游河道防洪、减淤及兴利目标的影响。研究区域如图 1 所示。



图 1 研究区域示意图
Fig. 1 Schematic diagram of study area

小浪底水库的任务是以防洪(防凌)、减淤为主,兼顾供水、灌溉、发电,其运用对下游河道防洪、减淤、兴利等具有重要作用。水库大坝位于黄河中游最后一个峡谷河段,下距花园口站 128 km。坝址控制流域面积 69.4 万 km²,占黄河全流域面积的 92.3%。水库设计总库容 126.5 亿 m³,正常运用期设计汛限水位 254 m。水库 1999 年投入运用至 2024 年 4 月,库区累计淤积量为 34.2 亿 m³,占设计拦沙量 75.5 亿 m³ 的 45%,拦沙库容尚有较大富余,水库运用处于拦沙后期。水库 1999 年 10 月下闸蓄水时初始运行汛限水位为 215 m,随着库区泥沙淤积变化,汛限水位逐步抬高。小浪底水库运用以来汛限水位运行情况见表 1。

表 1 小浪底水库运用以来汛限水位运行情况
Tab. 1 Operation of flood-limit water level since operation of Xiaolangdi Reservoir m

时段	汛限水位			差值	
	前汛期	后汛期	设计值	①-③	②-③
	①	②	③		
2000 年	215	215	254	-39	-39
2001 年	220	235	254	-34	-19
2002—2012 年	225	248	254	-29	-6
2013—2018 年	230	248	254	-24	-6
2019 年至今	235	248	254	-19	-6

由于黄河水沙关系不协调,历史上大量的泥沙淤积在下游河道,使河道日益高悬,小浪底水库运用前,下游河道年均淤积泥沙约 2 亿 t。小浪底水库运用以来,受水库拦沙和调水调沙运用的影响,下游河道河床全线冲刷,其中河槽河床平均冲刷深度降低 3.1 m,河槽过流能力由 2002 年汛前的最小平滩流量 1 800 m³/s 增加至 2024 年汛前的 4 600 m³/s。

1.2 研究方法

1.2.1 水库、河道泥沙冲淤计算方法

采用水库-河道水沙数学模型模拟水库和河道的水流泥沙演进及冲淤过程,计算水库坝前运用水位、出库流量、水库淤积量、水库拦沙年限、下游河道淤积量、主槽最小平滩流量和水库发电量。该模型为自主研发的水库-河道一维水沙数学模型,其原理及控制方程见文献[13]。模型中,小浪底水库计算模块中的参数采用水库 1999 年下闸蓄水运用以来的实测入出库水沙、断面地形及泥沙冲淤资料,累计淤积量验证结果如图 2 所示;下游河道计算模块中的参数采用 1960 年以来黄河下游实测水沙过程、泥沙冲淤及断面地形资料,淤积量验证结果如图 3 所示。验证结果表明,实测与计算的淤积量误差小于 10%,模拟精度满足需求。

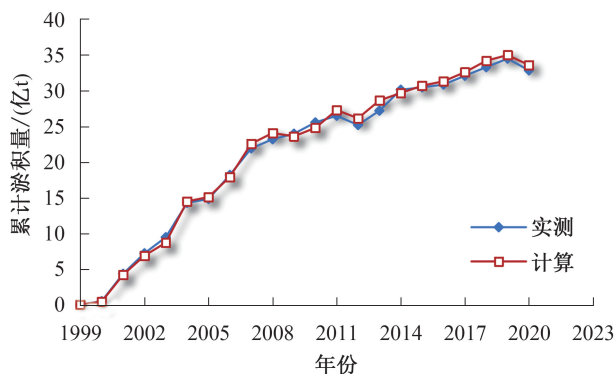


图 2 小浪底水库验证淤积量

Fig. 2 Verification of sedimentation in Xiaolangdi Reservoir

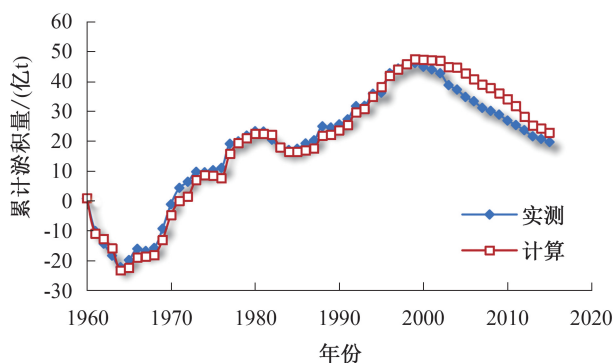


图 3 黄河下游河道验证淤积量

Fig. 3 Verification of sedimentation in river channels of lower reaches of Yellow River

1.2.2 水库调度效果评价方法

模糊优选方法^[14]是一种适用于决策要素具有模糊性的优选决策方法,主要通过模糊推理实现定性分析与定量计算相结合的系统评价与方案优选。其数学表达式如下:

表 2 水库多目标调控评价指标

Tab. 2 Multi-objective evaluation indicators of reservoir regulation

总目标	一级指标 (调控目标)	二级指标 (评价类别)	三级指标(调控指标)	
			评价指标	类型
小浪底 水库综 合利用 多目标 调控	减淤	水库	拦沙年限	效益型
		下游河道	淤积量	成本型
			最小平滩流量	效益型
	防凌	下游河道	利津站 12 月至来年 2 月封河流量	区间型
	供水灌溉 改善生态	下游河道	不满足供水灌溉生态需求的天数	成本型
	发电	水库 枢纽电站	坝前运用水位 发电量	效益型(限制运用水位范围内) 效益型

1.3 数据来源

黄河来水来沙量是研究水库运用的重要数据,也是计算水库和河道冲淤演变的基本条件。受气

$$\mu_{gh} = 1 / \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m (W_i (1 - r_{ij}))^2}{\sum_{i=1}^m (W_i \cdot r_{ij})^2} \right] \quad (1)$$

式中: μ_{gh} 为决策集综合相对优属度; W_i 为第 i 个指标的综合权重; r_{ij} 为决策 j 指标 i 的相对优属度。

相对优属度权重是利用基于误差反馈的人工神经网络模型(Back Propagation-Artificial Neural Network, BP-ANN)强大的非线性模拟能力,通过网络训练获得^[15-16]。根据模糊优选理论,在不同目标体系与最优相对优属度之间建立一种非线性映射关系,组成训练样本,利用 BP-ANN 进行模拟训练。训练过程中以模拟精度和迭代次数进行控制,达到相应误差和迭代次数要求后,即可确定相应的网络结构和相对优属度权重。

根据小浪底水库开发任务及下游河道需求,以水库综合利用多目标调控效果最优为总目标,按减淤、防凌、供水灌溉、发电、改善生态等评价类别(本文考虑防洪运用方式相同,不需要评价),构建水库多目标调控评价指标,结果见表 2。供水灌溉生态水量不能全额满足时,按照同比例打折供给各个目标,可用出库流量不能全额满足需求的天数这个指标来评价。在表 2 中,三级指标数值越大且对较优方案贡献度越高的目标,称为效益型目标,如水库拦沙年限、发电量等;三级指标数值越小且对较优方案贡献度越高的目标,称为成本型目标,如河道淤积量、不满足供水灌溉生态需求的天数;三级指标数值介于某区间且对较优方案贡献度越高的目标,称为区间型目标,如利津站 12 月至来年 2 月封河流量。

候变化和人类活动影响,2000 年以来黄河来水来沙量明显减少,潼关水文站 2000—2023 年实测多年平均水、沙量分别为 255.86 亿 m^3 、2.29 亿 t,较

1960—2000 年的分别减少 28.3%和 78.8%。未来黄河水沙量变化既受自然气候因素的影响^[17-18],又与流域水利工程、水土保持生态建设工程和经济社会发展等人类活动密切相关^[19],总体来看,未来水沙量将有较大幅度的减少。目前,对未来黄河输沙量的认识范围一般为 3 亿~8 亿 t,具体数字尚有分歧。因此,根据当前对黄河未来输沙量的研究成果^[20-21],本研究拟选取黄河来沙量 8 亿、6 亿、3 亿 t 3 种情景,相应的年来水量分别为 272.3 亿、262.3 亿、246.4 亿 m³,计算小浪底水库汛期不同运用方式的调控效果,计算系列长度为 50 年。小浪底水库入库水沙量见表 3。

表 3 小浪底水库入库水沙量
Tab. 3 Incoming water and sediment load into Xiaolangdi Reservoir

情景 方案	径流量/(亿 m ³)			输沙量/(亿 t)		
	汛期	非汛期	全年	汛期	非汛期	全年
来沙量 8 亿 t	140.0	132.3	272.3	7.1	0.9	8.0
来沙量 6 亿 t	134.9	127.4	262.3	5.3	0.7	6.0
来沙量 3 亿 t	115.5	130.9	246.4	2.6	0.4	3.0

2 结果分析

2.1 汛期运用方案

针对黄河不同的来沙情景,从充分发挥水库综

合利用效益的角度出发,拟定小浪底水库现状逐步抬高汛限水位运用(简称“逐步抬高汛限水位”)和在现状边界条件下一一次性抬高汛限水位至设计汛限水位 254 m 运用(简称“一次抬高汛限水位”)方案,论证不同来水来沙条件下两方案的水库调控效果。两方案水库运行方式的不同主要在主汛期 7 月 11 日至 8 月 31 日时段内,具体调度方式见表 4。

逐步抬高汛限水位的方案为:①7 月 11 日至 8 月 31 日,当水库蓄水加区间河道来水大于 13 亿 m³ 时,水库启动蓄满造峰调度,下泄至少 5 d 进入花园口站且流量在 3 700 m³/s 以上的大流量过程;②当水库蓄水大于 6 亿 m³ 且预报平均入库流量大于 2 600 m³/s 时,启动凑泄造峰调度,凑泄至少 5 d 进入花园口站且流量在 3 700 m³/s 以上的大流量过程;③当预报入库流量大于 2 600 m³/s 且含沙量大于 200 kg/m³ 时,启动高含沙洪水调度,进行提前 2 d 预泄或蓄水至 3 亿 m³ 后按进出库平衡运用;④水库进入拦沙后期第二阶段(淤积量超过 42 亿 m³)且预报入库平均流量大于 2 600 m³/s,水库启动降水冲刷调度,降低水位运用以冲刷水库库区泥沙。

一次抬高汛限水位的方案为:7 月 11 日至 8 月 31 日,水库启动蓄满造峰调度的条件为坝前水位达到设计汛限水位 254 m,为维持下游河道适宜的河槽规模,水库仍保留凑泄造峰的调度方式,但不再执行高含沙洪水调度和降水冲刷调度,仅进行兴利调节,即出库流量满足水库下泄最小流量需求。

表 4 小浪底水库汛期运用方案调度方式
Tab. 4 Scheduling modes of Xiaolangdi Reservoir operation schemes during flood season

运用方案		蓄满造峰调度	凑泄造峰调度	高含沙洪水调度	降水冲刷调度
逐步抬高 汛限水位	启动条件	$W_{\text{可调}} \geq 13 \text{ 亿 m}^3$	$Q_{\text{入库}} \geq 2\,600 \text{ m}^3/\text{s}$ $W_{\text{可调}} \geq 6 \text{ 亿 m}^3$	$Q_{\text{入库}} \geq 2\,600 \text{ m}^3/\text{s}$ $S_{\text{入库}} \geq 200 \text{ kg/m}^3$	$Q_{\text{入库}} \geq 2\,600 \text{ m}^3/\text{s}$ $\Delta Y_s \geq 42 \text{ 亿 m}^3$
	调度指令	$Q_{\text{花园口}} \geq 3\,700 \text{ m}^3/\text{s}$ $T \geq 5 \text{ d}$	$Q_{\text{花园口}} \geq 3\,700 \text{ m}^3/\text{s}$ $T \geq 5 \text{ d}$	提前 2 d 预泄或蓄水至 3 亿 m ³ , $Q_{\text{出库}} = Q_{\text{入库}}$	提前 2 d $Q_{\text{花园口}} = 4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$,直至 $Q_{\text{入库}} < 2\,600 \text{ m}^3/\text{s}$
一次抬高 汛限水位	启动条件	$Z_{\text{小浪底}} \geq 254 \text{ m}$	同逐步抬高汛限水位	—	—
	调度指令	$Q_{\text{花园口}} \geq 3\,700 \text{ m}^3/\text{s}$ $T \geq 5 \text{ d}$	同逐步抬高汛限水位	$Q_{\text{出库}} = \min(Q_{\text{out}})$	$Q_{\text{出库}} = \min(Q_{\text{out}})$

注: $W_{\text{可调}}$ 为水量,即水库来水量和死水位以上蓄水量,亿 m³; $Q_{\text{入库}}$ 、 $Q_{\text{出库}}$ 、 $Q_{\text{花园口}}$ 为小浪底水库入库流量、出库流量和黄河下游花园口站流量, m³/s; $S_{\text{入库}}$ 为入库水流含沙量, kg/m³; ΔY_s 为小浪底水库累计淤积量, 亿 m³; T 为时间, d; $Z_{\text{小浪底}}$ 为坝前运用水位, m; Q_{out} 为满足水库兴利调节要求的出库流量, m³/s。

2.2 调控效果

对逐步抬高汛限水位运用和一次抬高汛限水位运用进行水库多目标调控模拟计算。各来沙情

景下,相比逐步抬高汛限水位运用方案,一次抬高汛限水位运用方案下的小浪底水库运用水位高,发电量,供水灌溉保证率更高,但水库排沙机会少,

库区泥沙淤积快,拦沙期短。在一次抬高汛限水位运用方案下,虽然在水库拦沙期内能更多地减少下游河道的淤积量,但拦沙期结束后水库即开始回淤,长期来看河道的淤积量较多,拦沙减淤效果相对较差。

2.2.1 黄河来沙量 8 亿 t 情景

水库调控效果见表 5。相比逐步抬高汛限水

位运用方案,一次抬高汛限水位运用方案下的水库平均水位高,年均发电量多 0.91 亿 kW·h,不满足供水灌溉生态需求的年均天数少 0.64 d,但库区淤积快,拦沙期少 4 年,计算期 50 年内下游河道年均淤积量多 0.07 亿 t,计算期末最小平滩流量少 260 m³/s。由此可知,按一次抬高汛限水位运用,水库发挥的兴利效益较好,但拦沙减淤效果较差。

表 5 变化水沙条件下小浪底水库多目标调控效果

Tab.5 Multi-objective regulation effects of Xiaolangdi Reservoir under changing water and sediment conditions

情景	方案	小浪底 水库剩 余拦沙 年限/年	下游河道			不满足 供水灌溉 生态需求 的年均天 数/d	小浪底水 库主汛期 7—8 月平 均水位/ m	电站年均 发电量/ (亿 kW·h)
			拦沙期内河 道年均淤 积量/(亿 t)	计算期 50 年内 河道年均淤 积量/(亿 t)	计算期末最 小平滩流量/ (m ³ /s)			
来沙量 8 亿 t	逐步抬高汛限水位①	13	0.46	1.63	2 760	5.48	242.26	58.97
	一次抬高汛限水位②	9	0.13	1.70	2 500	4.84	249.05	59.88
	差值(②-①)	-4	-0.33	0.07	-260	-0.64	6.79	0.91
来沙量 6 亿 t	逐步抬高汛限水位①	20	0.23	0.87	3 100	5.98	241.83	54.97
	一次抬高汛限水位②	14	0.01	0.91	2 900	5.22	248.81	56.02
	差值(②-①)	-6	-0.22	0.04	-200	-0.76	6.98	1.05
来沙量 3 亿 t	逐步抬高汛限水位①	43	-0.22	-0.11	4 450	9.02	239.70	53.36
	一次抬高汛限水位②	30	-0.38	-0.13	4 560	6.86	248.05	55.33
	差值(②-①)	-13	-0.16	-0.02	-110	-2.16	8.35	1.97

2.2.2 黄河来沙量 6 亿 t 情景

相比逐步抬高汛限水位运用方案,一次抬高汛限水位运用方案下的水库平均水位高,年均发电量多 1.05 亿 kW·h,不满足供水灌溉生态需求的年均天数少 0.76 d,但库区淤积快,拦沙期少 6 年,计算期 50 年内下游河道年均淤积量多 0.04 亿 t,计算期末最小平滩流量少 200 m³/s。由此可知,按一次抬高汛限水位运用,水库发挥的兴利效益较好,但拦沙减淤效果较差。

2.2.3 黄河来沙量 3 亿 t 情景

相比逐步抬高汛限水位运用方案,一次抬高汛限水位运用方案下的水库平均水位高,年均发电量多 1.97 亿 kW·h,不满足供水灌溉生态需求的年均天数少 2.16 d,水库发挥的兴利效益较好。虽然库区泥沙淤积快,拦沙期少 13 年,但由于来沙量少,计算期 50 年末下游河道仍然处于冲刷状态。

2.3 效果评价

根据小浪底水库综合利用多目标调控需求,以水库拦沙年限最长、计算期末下游河道淤积量最小、计算期末最小平滩流量最大、不满足供水灌溉生态需求的天数最少、主汛期平均水位最高、多年平均发电量最大为目标,利用水库多目标调控评价模型对各来沙情景下不同汛限水位运用方案进行评价。

在黄河来沙量 8 亿 t 情景下,计算得到水库逐步抬高汛限水位和一次抬高汛限水位两种方案的训练样本列表,见表 6。对目标特征值矩阵规格化处理后的相对优属度矩阵 X 如下式所示:

$$X = \begin{bmatrix} 13 & 9 \\ 1.63 & 1.70 \\ 2\,760 & 2\,500 \\ 5.48 & 4.84 \\ 242.26 & 249.05 \\ 58.97 & 59.88 \end{bmatrix} \rightarrow X = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.692 \\ 1.000 & 0.959 \\ 1.000 & 0.906 \\ 0.883 & 1.000 \\ 0.973 & 1.000 \\ 0.985 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据模糊优选理论,从待优化方案的相对优属度矩阵中,抽取最优、最劣、中间方案的相对优属度向量 $g = (1.000, 1.000, 1.000, 1.000, 1.000, 1.000)$ 、 $b = (0.692, 0.959, 0.906, 0.883, 0.973, 0.985)$ 、 $m = (0.846, 0.979, 0.953, 0.942, 0.986, 0.992)$,其对最优的相对优属度值分别设定为 1.0、0.0、0.5。该训练样本,采用权重自适应的方法进行网络训练,结果见表 6。模拟误差显示,训练后的 BP-ANN 网络具有较好的模拟能力。将待优化方案的多目标相对优属度代入训练后的 ANN 网络,得到待优化方案对最优方案的相应优属度值,见表 7。

由表 7 可知:在黄河来沙量 8 亿 t 情景下,对方

案进行最优排序,逐步抬高汛限水位运用对最优方案的相对优属度值为 0.904,高于一次抬高汛限水位运用对最优方案的相对优属度值 0.594,说明黄河来沙量 8 亿 t 情景下,小浪底水库汛期按逐步抬高汛限水位运用取得的综合利用效益较高。

对黄河来沙量 6 亿 t 和 3 亿 t 两个情景进行同样的评价。由表 7 还可知:黄河来沙量 6 亿 t 时,小浪底水库逐步抬高汛限水位运用对最优方案的相对优属度值为 0.894,高于一次抬高汛限水位运用的 0.593,汛期按逐步抬高汛限水位运用取得的综合利用效益较高;黄河来沙量 3 亿 t 时,逐步抬高汛限水位运用对最优方案的相对优属度值为 0.475,低于一次抬高汛限水位运用的 0.827,按逐

步抬高汛限水位运用取得的综合利用效益不如一次抬高汛限水位运用的。

表 6 BP-ANN 训练样本列表
Tab. 6 BP-ANN training sample list

方案	样本输入	样本输出	计算输出	模拟误差
最优	(1.000,1.000,1.000,1.000,1.000,1.000)	1.0	1.0	0.000
中间	(0.846,0.979,0.953,0.942,0.986,0.992)	0.5	0.5	0.000
最劣	(0.692,0.959,0.906,0.883,0.973,0.985)	0.0	0.0	0.000

表 7 待优化运用方案多目标评价结果
Tab. 7 Multi-objective evaluation results of operation schemes to be optimized

情景	方案	目标特征值规格化后的方案输入	对最优方案的相对优属度值	排序
来沙量 8 亿 t	逐步抬高汛限水位	(1.000,1.000,1.000,0.883,0.973,0.985)	0.904	1
	一次抬高汛限水位	(0.692,0.959,0.906,1.000,1.000,1.000)	0.594	2
来沙量 6 亿 t	逐步抬高汛限水位	(1.000,1.000,1.000,0.873,0.972,0.981)	0.894	1
	一次抬高汛限水位	(0.700,0.956,0.935,1.000,1.000,1.000)	0.593	2
来沙量 3 亿 t	逐步抬高汛限水位	(1.000,0.846,1.000,0.761,0.966,0.964)	0.475	2
	一次抬高汛限水位	(0.698,1.000,0.976,1.000,1.000,1.000)	0.827	1

2.4 方案推荐

小浪底水利枢纽是保障黄淮海平原防洪安全和生态安全的关键工程。随着经济社会的发展,流域及相关地区的防洪保安和高质量发展对水库减淤兴利的综合利用要求越来越高,水库的运用应妥善决策近期效益与长期效益的关系。综上,当未来黄河来沙量在 3 亿 t 以上时,推荐小浪底水库仍以水库和河道减淤运用为主,汛期逐步抬高汛限水位;当未来黄河来沙量在 3 亿 t 及以下时,由于计算期 50 年末下游河道仍然处于冲刷状态,水库汛期可尝试由现状的前汛期汛限水位、后汛期汛限水位一次抬高到设计汛限水位,以取得更大的综合利用效益。在变化条件下,小浪底水库可研究实施汛期运用水位动态控制,一般水沙条件下抬高汛期运用水位,提高水库综合利用效益。

3 结论

基于黄河水沙变化、水库和下游河道边界条件变化等新情势,研究了黄河不同来沙量情景下小浪底水库汛期运用方式及调控效果,评价并提出了综合利用效益最优的水库运用模式,得到以下结论:

1)综观水库汛期运用方案,相比逐步抬高汛限

水位运用方案,一次抬高汛限水位运用方案的小浪底水库运用水位高,发电量大,不满足供水灌溉生态需求的天数较少;但水库排沙机会少,拦沙期运用时间较短,拦沙减淤效果相对较差,长期来看黄河下游河道淤积量较多。

2)当黄河来沙量 8 亿 t 时,逐步抬高汛限水位运用方案相较一次抬高汛限水位运用方案,年均发电量少 0.91 亿 kW·h,但水库拦沙期长 4 年,计算期 50 年内下游河道年均淤积量少 0.07 亿 t,计算期末最小平滩流量大 260 m³/s,取得的综合利用效益较高。当黄河来沙量 6 亿 t 时,逐步抬高汛限水位运用方案相较一次抬高汛限水位运用方案,年均发电量少 1.05 亿 kW·h,但水库拦沙期长 6 年,计算期 50 年内下游河道年均淤积量少 0.04 亿 t,计算期末最小平滩流量大 200 m³/s,取得的综合利用效益较高。当黄河来沙量 3 亿 t 时,一次抬高汛限水位运用方案与逐步抬高汛限水位运用方案相比,年均发电量多 1.97 亿 kW·h,水库拦沙期少 13 年,由于来沙量较少,计算期 50 年内下游河道仍表现为冲刷,该沙量条件下可尝试将现状汛限水位一次抬高到设计汛限水位。

3)小浪底水库的运用涉及到防洪、减淤、兴利

等多目标决策,要妥善决策近期效益与长期效益的关系。为充分发挥小浪底水库的作用,可研究实施汛期动态控制运用水位,通过科学调度拦蓄洪水资源,提高水库对有限水资源的调节能力,更好地支撑流域生态保护和高质量发展。

参 考 文 献

- [1] 郭生练,谢雨祚,钟斯睿. 流域水库群运行水位优化设计与多目标联合调控[J]. 水利学报, 2026, 57(1): 103-113, 167. [Guo Shenglian, Xie Yuzuo, Zhong Sirui. Optimal design of water levels and multi-objective coordinated operation for basin-wide reservoir groups[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2026, 57(1): 103-113, 167.]
- [2] Zhang Xiaopei, Ta Wanquan, Zhang Xiaohua, et al. Contribution of hyper-concentrated flows from deserts in the Loess Plateau to downstream channel siltation in the lower Yellow River[J]. Environmental Earth Sciences, 2026(85): 193.
- [3] 徐长江,熊丰,戴明龙,等. 梯级水库运行期设计洪水及水位联合优化调控变革与启示[J]. 中国水利, 2024(12): 13-17. [Xu Changjiang, Xiong Feng, Dai Minglong, et al. Changes and implications of joint optimal regulation of design floods and water levels during the operational period of cascade reservoirs[J]. China Water Resources, 2024(12): 13-17.]
- [4] 白涛,阙艳彬,畅建霞,等. 水库群泥沙调控的单-多目标调度模型及其应用[J]. 水科学进展, 2016, 27(1): 116-127. [Bai Tao, Kan Yanbin, Chang Jianxia, et al. Single-multi-objective operation models and its application on the regulation of water and sediment by cascade reservoirs[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(1): 116-127.]
- [5] 周如瑞,卢迪,王本德,等. 基于贝叶斯定理与洪水预报误差抬高水库汛限水位的风险分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 135-141. [Zhou Rurui, Lu Di, Wang Bende, et al. Risk analysis of raising reservoir flood limited water level based on Bayes theorem and flood forecast error[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(3): 135-141.]
- [6] 刘继祥,安新代,安催花,等. 黄河小浪底水利枢纽规划设计丛书: 水库运用方式研究与实践[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008. [Liu Jixiang, An Xindai, An Cuihua, et al. The planning and design series of the Xiaolangdi Water Conservancy Project on the Yellow River: research and practice on the utilization mode of reservoirs[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2008.]
- [7] 李文学,安催花,付健. 小浪底水库高滩深槽塑造及支流库容利用研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2015. [Li Wenxue, An Cuihua, Fu Jian. Research on the shaping of high beach and deep channel of Xiaolangdi Reservoir and the utilization of reservoir capacity of its tributaries[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2015.]
- [8] 陈建国,周文浩,韩闪闪. 黄河小浪底水库拦沙后期运用方式的思考与建议[J]. 水利学报, 2015, 46(5): 574-583. [Chen Jianguo, Zhou Wenhao, Han Shanshan. Ponderations and suggestion on operation mode of Xiaolangdi Reservoir in its second stage of sediment retaining[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(5): 574-583.]
- [9] 薛博文,张向萍,许琳娟,等. 黄河下游河道泥沙粒径变化对小浪底水库调水调沙的响应规律[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 55-62. [Xue Bowen, Zhang Xiangping, Xu Linjuan, et al. Response law of sediment diameter change in the lower Yellow River to water and sediment regulation in Xiaolangdi Reservoir[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(2): 55-62.]
- [10] 孙东坡,吴默溪. 黄河小浪底水库运用以来的泥沙淤积特征分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 74-79. [Sun Dongpo, Wu Moxi. Analysis of characteristics of sediment in Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 74-79.]
- [11] 刘法贵,周苗苗. 黄河小浪底—花园口段泥沙沿程淤积与溯源淤积模型仿真分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(5): 74-81. [Liu Fagui, Zhou Miaomiao. Simulation analysis of siltation along the Xiaolangdi to Huayuankou section of the Yellow River and the traceable siltation model[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(5): 74-81.]
- [12] Wang Dangwei, Ma Yuanxu, Liu Xiaofang, et al. The fluvio-deltaic interaction on river channel morphodynamical equilibrium in the lower Yellow River[J]. Geomorphology, 2025, 474(11): 109643.
- [13] 张金良,罗秋实,陈翠霞,等. 黄河中下游水库群—河道水沙联合动态调控[J]. 水科学进展, 2021, 32(5): 649-658. [Zhang Jinliang, Luo Qiushi, Chen Cuixia, et al. Research on joint dynamic control of reservoir groups and river channel in the middle and lower Yellow River[J]. Advances in Water science, 2021, 32(5): 649-658.]
- [14] 张金良,鲁俊,高兴,等. 增强小浪底调水调沙后续动力的三门峡水库水位方案优选[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 60-67. [Zhang Jinliang, Lu Jun, Gao Xing, et al. Optimal strategy for water level of Sanmenxia Reservoir to enhance follow-up power of water and sediment regulation of Xiaolangdi Reservoir[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(15): 60-67.]
- [15] Nimkar M, Tripathy A K, Rana K, et al. Machine learning-based early detection of diabetic retinopathy: a comparative study using BP-ANN and SVM[J]. International Journal of Environmental Sciences, 2025, 11(5): 2522-2530.

- [16] Li Jinna, Yang Jianqiang, Shi Sulan, et al. Initial geostress in underground cavities obtained by in situ measurements and BP-ANN inversion [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2024, 42: 1049–1062.
- [17] Jin Tiantian, Gong Jie, Xu Tianyu, et al. Runoff trends in the Yellow River Basin (1960–2020): Budyko-based attribution to climate and human impacts [J]. *Earth Systems and Environment*, 2026, 10: 3203–3225.
- [18] Wang Lei, Li Yi, Biswas A, et al. Assessing climate change and human impacts on runoff and hydrological droughts in the Yellow River Basin using a machine learning-enhanced hydrological modelling approach [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 380: 125091.
- [19] Ma Lianjing, Liu Zhao, Zhao Baofeng, et al. Variations of runoff and sediment and their response to human activities in the source region of the Yellow River, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80: 552.
- [20] 胡春宏, 张晓明, 于坤霞, 等. 黄河流域水沙变化趋势多模型预测及其集合评估 [J]. *水利学报*, 2023, 54(7): 763–774. [Hu Chunhong, Zhang Xiaoming, Yu Kunxia, et al. Multi-model prediction and its ensemble evaluation of runoff and sediment change trend in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(7): 763–774.]
- [21] 刘晓燕, 王鹏, 党素珍. 黄河水沙变化: 历史、现状与未来 [J]. *水利学报*, 2024, 55(10): 1135–1145. [Liu Xiaoyan, Wang Peng, Dang Suzhen. Variations in water and sediment of the Yellow River: historical perspectives, current status, and future outlook [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(10): 1135–1145.]

Study on Regulation and Operation Modes of Xiaolangdi Reservoir on Yellow River during Flood Season

WANG Zhenfan¹, WANG Zhongqiang¹, CHEN Cuixia², WU Moxi²

(1. Yellow River Hydropower Development Corporation, Jiyuan 454681, China;

2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: **[Objective]** This study aims to analyze the regulation effects of different flood-season operation modes of the Xiaolangdi Reservoir, and to propose a flood-season water level operation mode adapted to changing conditions, thereby providing scientific support for reservoir optimal operation and coordinated realization of comprehensive benefits. **[Methods]** Based on changes in the water and sediment conditions of the Yellow River, variations in the boundary conditions of the reservoir and the downstream channel, and the demands for ecological protection and high-quality development in the middle and lower reaches, a reservoir-channel water and sediment mathematical model was used to calculate and analyze the flood-season operation modes and the effects of the Xiaolangdi Reservoir under different incoming sediment load scenarios, and the effects were evaluated. **[Results]** (1) Compared with gradually raising the flood-limit water level, when the flood-limit water level of the Xiaolangdi Reservoir was raised in one step from the current level to the design level, the reservoir operated at a higher water level and could achieve greater benefits in power generation, water supply, and irrigation. However, opportunities for sediment discharge were reduced, the sediment retention period was shortened, and the sediment retention and reduction effect was relatively weak, leading to greater sediment deposition in the lower reaches of the Yellow River in the long term. (2) According to the evaluation results, when the incoming sediment load of the Yellow River exceeded 300 million tons, the operation scheme of gradually raising the flood-limit water level of the Xiaolangdi Reservoir performed better. When the incoming sediment load was 300 million tons or less, the scheme of raising the flood-limit water level in one step during the flood season performed better. **[Conclusions]** When the incoming sediment load is relatively large in the future, it is recommended that Xiaolangdi Reservoir continue to focus on sediment reduction in the reservoir and river channel, with the flood-limit water level gradually increased during the flood season. When the incoming sediment load of the Yellow River is relatively small, the reservoir can raise the flood-limit water level in one step to the design flood-limit water level during the flood season.

Keywords: operation mode; flood-season regulation; Xiaolangdi Reservoir; lower reaches of Yellow River

(编辑:乔翠平)