

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

张金良, 鲁俊*, 高兴, 赵梦龙

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 450003;

2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 郑州 450003)

摘 要: 小浪底水库调水调沙后续动力不足, 在不新建水利工程的前提下充分挖掘三门峡水库等现有工程的潜力, 可为小浪底水库调水调沙提供后续动力, 具有研究价值。该研究分析三门峡水库通过改建底孔形成双泥沙侵蚀基准面条件下的可能边界条件, 考虑三门峡水库工程运用条件和入库洪水分期特点, 分析拟定了三门峡汛期、非汛期抬高水位的方案, 利用构建的三门峡水库泥沙冲淤数学模型和模糊优选评价模型进行方案计算分析与评价, 提出了三门峡水库在降低侵蚀基准面的情况下最优运用水位方案, 即按照前汛期运用水位 308 m、后汛期运用水位 312 m、非汛期最高水位 321 m 运行的方案, 该方案与现状运用方案相比, 2 600 m³/s 以上增泄水量增加 42%, 电站发电量累计增加 9%, 湿地面积增加 73%, 评价的综合效益最优。研究成果对增强小浪底水库调水调沙后续动力、三门峡水库充分发挥综合效益具有重要意义。

关键词: 水库管理; 数学模型; 水沙调控; 三门峡水库; 小浪底水库; 双泥沙侵蚀基准面; 模糊优选评价模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.15.008

中图分类号: TV213.9; TV882.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-15-0060-08

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.15.008 http://www.tcsae.org

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 (Transactions of the CSAE), 2021, 37(15): 60-67. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.15.008 http://www.tcsae.org

0 引 言

黄河小浪底水库是黄河水沙调控体系的重要组成部分, 以小浪底水库为核心的黄河调水调沙实践取得了巨大成功。然而由于黄河水沙调控体系不完善, 自 2000 年以来, 黄河中游水沙条件变化, 小浪底水库入库大流量过程减少, 调水调沙在调水阶段泄放大流量之后, 水库排沙、下游河道输沙入海所需的后续水流动力不足^[1], 水沙调控体系的整体合力无法充分发挥。现阶段, 完善水沙调控机制, 充分挖掘现状水库工程潜力, 为小浪底调水调沙提供后续动力非常迫切^[2], 亟需开展相关研究。

小浪底水库是黄河水沙调控体系的骨干工程之一^[3], 是黄河中下游开展调水调沙^[4]、保障黄河下游防洪安全的关键性工程^[5]。目前已有围绕小浪底水库调水调沙开展的大量研究成果, 包括调水调沙模式及指标^[1-2]、排沙调度实践及效益^[6-8]等方面的研究。小浪底调水调沙后续动力不足的问题引起了广泛关注, 王煜等^[9-10]研究了小浪底补充后续动力的可能途径, 张金良等^[1,11]解析了后续动力不足的原因, 明确提出了建设古贤水库为小浪底水库调水调沙补充后续动力, 但古贤水库目前尚未开工建设, 如

何利用三门峡水库等现状工程为小浪底调水调沙补充后续动力有待深入研究。模糊神经网络是模糊理论与神经网络结合的产物, 因具有模糊系统对不确定信息的处理能力和神经网络较强的学习能力, 被广泛应用于智能决策、方案比选等领域。喻圣等^[12]结合电力短期负荷的特点, 将模糊神经网络应用于电力短期负荷预测。聂相田等^[13]将模糊优选理论与神经网络理论相结合, 建立了模糊优选误差反向传播(Back Propagation, BP)网络权重调整模型, 用于评价水利工程建设管理的绩效。乔卫亮等^[14]提出了一种基于模糊神经网络的风险评估模型, 应用于沿海航行船舶的沉船事故风险评估, 模型在自我优化、使用便捷性和动态适用性方面优势明显。岳炯等^[15]利用模糊系统和 BP 神经网络的组合模型来进行电子部件的性能评价, 通过实例仿真试验, 改进后的模糊 BP 神经网络对导引头的性能评价更精准、适用性更强。基于以上应用特性, 本文拟采用模糊神经网络优选三门峡水库运用方案。

研究三门峡水库运用方案是为小浪底水库调水调沙补充后续动力的重要课题, 也是创新黄河水沙调控机制的重要途径。本文拟开展增强小浪底调水调沙后续动力的三门峡水库水位分析, 构建水库泥沙冲淤数学模型、基于人工神经网络法的模糊优选评价模型, 计算评价不同运用方案在控制水库淤积(潼关高程)、补充小浪底水库调水调沙后续动力和提高发电效益、改善生态等方面的作用, 得出三门峡水库运用优选方案, 以期增强小浪底水库调水调沙后续动力提供重要参考。

收稿日期: 2021-02-20 修订日期: 2021-06-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402503, 2018YFC1508404)

作者简介: 张金良, 博士, 高级工程师(教授级), 博士生导师, 研究方向为黄河流域重大水工程与水沙调控。Email: jlzhangyrec@126.com

✉通信作者: 鲁俊, 高级工程师, 研究方向为水沙研究与规划设计。

Email: 393956425@qq.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三门峡水库位于河南省陕县(右岸)和山西省平陆县(左岸)交界处,水库大坝与下游小浪底水库大坝距离为 130 km(图 1),是黄河中游干流上修建的第一座以防洪为主,兼顾防凌、灌溉、发电、供水等综合利用的大型水利枢纽工程。水库于 1960 年 9 月下闸蓄水,运用初期由于坝前水位高,库区泥沙淤积严重,导致潼关高程急剧抬升,渭河下游防洪问题突显^[16],工程经过了两次改建,运用方式先后经历了“蓄水拦沙”“滞洪排沙”“蓄清排浑”三个运用阶段^[17]。自水库“蓄清排浑”运用以来,采取了一系列措施治理潼关河段,阻止了潼关高程继续抬升,但仍居高不下,稳定在 328 m 左右^[18]。目前,三门峡水库 335 m 高程以下库容约 58 亿 m³,但汛期控制水位 305 m 以下库容仅 0.5 亿 m³,该水位条件下库区已形成了较为稳定的侵蚀基准面,库区很难再发生强烈的溯源冲刷,库容太小导致水库综合运用效益未能充分发挥,也难以以为小浪底水库调水调沙提供充足的后续动力(下泄的大流量过程少)。通过工程改建降低排沙底孔高程,形成双泥沙侵蚀基准面^[19],增大库区排沙运用时的临时纵比降,强化溯源冲刷效率,为多沙河流水库恢复保持库容提供了一种解决方案,已经在陕西省东庄水利枢纽工程中应用,这种技术给三门峡水库抬高水位增加蓄水量为小浪底水库调水调沙提供后续动力以及控制水库淤积提供了可能性,值得深入研究。

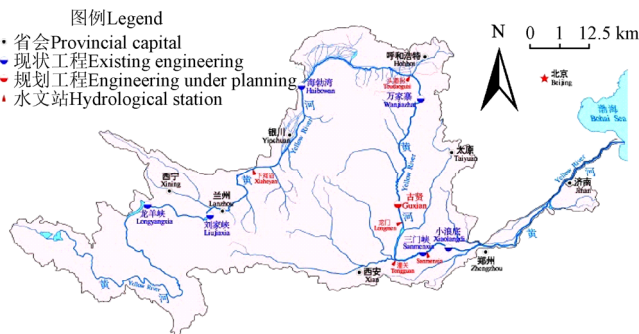


图 1 三门峡水库位置
Fig.1 Location of Sanmenxia Reservoir

1.2 数据来源

进入三门峡水库的水沙量主要来自黄河干流,潼关水文站为三门峡水库的入库站(图 1),三门峡站为水库的出库站。两个站均观测有流量、输沙率、含沙量、水位、径流量、输沙量等资料,观测资料经黄河水利委员会水文局整编,每年刊印《中国人民共和国水文年鉴》,两个站 1919 年以来的水文资料基本完整。同时三门峡库区管理单位每年对库区地形进行大断面测量,整编了库区冲淤、库容变化等资料。本文收集了 1973 年以来潼关水文站、三门峡站以上资料作为研究数据。

1.3 研究方法

1.3.1 库区泥沙淤积数学模型

1) 水流运动控制方程

一维非恒定流模型控制方程如下:

水流连续方程:

$$B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (1)$$

水流运动方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2 \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{BQ^2}{A^2} \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_z = -gA \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{gn^2 |Q|Q}{A(A/B)^{4/3}} \quad (2)$$

式中 x 表示沿流向的坐标, m; t 表示时间, s; Q 表示流量, m³/s; z 表示水位, m; A 表示断面过水面积, m²; B 表示河宽, m; q_l 为单位河长汇入(流出)的流量, m²/s; n 为糙率, 无量纲; g 表示重力加速度, m/s²。

2) 悬移质不平衡输沙方程

将悬移质泥沙分为 M 组, 以 S_k 表示第 k 组泥沙的含沙量(kg/m³), 可得悬移质泥沙的不平衡输沙方程为

$$\frac{\partial(AS_k)}{\partial t} + \frac{\partial(QS_k)}{\partial x} = -\alpha\omega_k B(S_k - S_{*k}) + q_{ls} \quad (3)$$

式中 α 表示恢复饱和系数, 无量纲; ω_k 表示第 k 组泥沙颗粒的沉速, m/s; S_{*k} 表示第 k 组泥沙挟沙力, kg/m³; q_{ls} 表示单位时间单位河长汇入(流出)的沙量, kg/(m·s)。

水流挟沙力采用张红武公式^[20], 对高含沙洪水适应性好, 在黄河上应用广泛, 计算公式如下:

$$S_* = K \left[\frac{(0.0022 + S_v)}{\kappa \frac{\lambda_s - \lambda_m}{\lambda_m} gh\omega_m} \ln \left(\frac{h}{6D_{50}} \right) \right]^{m_0} \quad (4)$$

式中 S_* 为水流挟沙力, kg/m³; λ_s 、 λ_m 分别为泥沙和浑水的密度, kg/m³; κ 为卡门常数, 采用 0.4; U 为断面平均流速, m/s; h 为水深, m; S_v 为体积含沙量, 无量纲; ω_m 为混合沙挟沙力的代表沉速, m/s; D_{50} 为床沙的中值粒径, m; K 、 m_0 分别为挟沙力系数和指数, 无量纲, 取值 $K=2.5$ 、 $m_0=0.62$ ^[20]。

3) 河床变形方程

河床变形方程:

$$\gamma' \frac{\partial A}{\partial t} = \sum_{k=1}^M \alpha\omega_k B(S_k - S_{*k}) \quad (5)$$

式中 γ' 为泥沙干容重, kg/m³。

1.3.2 发电量计算方程

水电站发电量计算方程如下:

$$N = A_0 QH_{\text{净}} \quad (6)$$

$$W_{\text{电量}} = NT \quad (7)$$

式中 N 为电站出力, kW; A_0 为出力系数, 无量纲, 结合三门峡水库电站规模, 取值 8.5; $H_{\text{净}}$ 为水头损失的净水头, m; T 为发电时间, h; $W_{\text{电量}}$ 为发电量, kW·h。

1.3.3 库区最大湿地面积、库区淹没人口

库区最大湿地面积、库区淹没人口分别根据泥沙冲淤模型计算得到的水库水位, 按表 1 插值得到。

表 1 库区水位下湿地面积和淹没人口

Table 1 Wetland area and flooded population under water levels in reservoir areas

项目 Item	水位 Water level/m						
	305	310	315	318	320	325	330
湿地面积 Wetland area/km ²	14	38	93	185	275	455	575
淹没人口 Flooded population/人	0	0	0	0	259	1 444	8 710

1.3.4 方案评价模型

采用库区泥沙冲淤数学模型,可以得到水库水位、流量、含沙量、冲淤等特征值,但需要选取有代表性的特征值,构建评价指标体系,并选择一定的评价方法进行方案的优选。本文采用基于人工神经网络法的模糊优选评价模型进行方案评价。

1) 模糊优选理论

根据多目标优选理论^[21],设有考虑 m 个目标值的 p 个方案组成的待优选样本集,其特征值矩阵 X 为

$$X = (x_{ij})_{m \times p} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mp} \end{bmatrix} \quad (8)$$

因 m 个目标值的量纲及数值范围并不一致,因此将待优选方案特征值矩阵 X 进行归一化处理,确定其相对隶属度矩阵 R 。对于期望值越大对较优方案贡献度越高的目标,称之为效益型目标,采用如下方法进行归一化处理:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_j(x_{ij})} \quad (9)$$

式中 r_{ij} 为归一化的相对隶属度值; $\max_j(x_{ij})$ 代表样本范围内第 i 个目标的最大值,要求 $\max_j(x_{ij}) \neq 0$ 。

对于期望值越小对较优方案贡献度越高的目标,称之为成本型目标,采用如下方法进行归一化处理:

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{\min_j(x_{ij})}{x_{ij}}, & \min_j(x_{ij}) \neq 0 \\ 1 - \frac{x_{ij}}{\max_j(x_{ij})}, & \min_j(x_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\min_j(x_{ij})$ 代表样本范围内第 i 个目标的最小值。

由此,经归一化处理可以得到待优选方案特征值矩阵 X 的相对隶属度矩阵 R 为

$$R = (r_{ij})_{m \times p} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mp} \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据相对隶属度矩阵 R 可得,最优方案的相对隶属度向量为 $gg = (gg_1, gg_2, \cdots, gg_m)$, 其中第 i 个目标相对隶属度为 $gg_i = \max_j(r_{ij})$; 最劣方案的相对隶属度向量为 $b = (b_1, b_2, \cdots, b_m)$, 其中第 i 个目标相对隶属度为

$b_i = \min_j(r_{ij})$ 。将靠近最优方案 gg 作为较优的衡量标准,则根据模糊优选理论^[22-23],第 j 个方案相对于最优方案的相对隶属度 u_j 为

$$u_j = \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^m [w_i \cdot (gg_i - r_{ij})]^2}{\sum_{i=1}^m [w_i \cdot (r_{ij} - b_i)]^2} \right)^{-1} \quad (12)$$

式中 w_i 为权重向量,满足 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。根据 p 个方案相对于最优方案的相对隶属度 u_j 进行排序,即可进行优劣决策。因此,权重向量的确定至关重要。本文采用人工神经网络模型进行权重训练模拟。

2) 基于误差反馈的人工神经网络

基于误差反馈的人工神经网络 (Back Propagation Artificial Neural Network, BP-ANN) 模型由输入层、输出层和隐含层组成,通过对一定容量样本的学习与训练,确定网络有关参数,其工作过程包括信息正向传播和误差反向传播两个反复交替的过程。信息正向传播的过程可以由第 k_0 层第 d 个神经元的输入输出关系^[24]简单表示为

$$y_d^{k_0} = f_d^{k_0} \left(\sum_{c=1}^{v_{k_0-l}} w_{cd}^{(k_0-l)} \cdot y_c^{(k_0-l)} - \theta_d^{k_0} \right), \quad (13)$$

$$d = 1, 2, \cdots, v_{k_0}; k_0 = 1, 2, \cdots, M_0$$

式中 $y_d^{k_0}$ 为第 k_0 层第 d 个神经元的输出; M_0 为神经网络的层数; $w_{cd}^{(k_0-l)}$ 为第 (k_0-l) 层第 c 个神经元到第 k_0 层第 d 个神经元的连接权重; $\theta_d^{k_0}$ 为该神经元上的阈值; v_{k_0-l} 为第 (k_0-l) 层神经元的数目; $f(\cdot)$ 称为激活函数,一般可以采用 Sigmoid 函数^[22]。

BP 算法通过计算误差,沿输出层向输入层方向修改网络参数。学习的目标是使网络的误差 E 最小或小于一个允许值。权重 w 通常采取下式^[22]进行修正:

$$w(tt+1) = w(tt) - \eta \left(\frac{\partial E}{\partial w} \right)_{w=w(tt)} \quad (14)$$

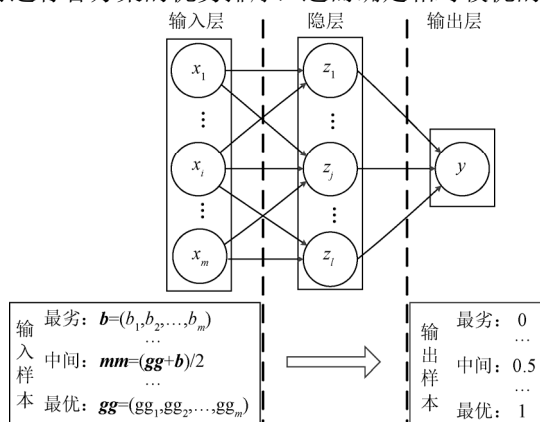
式中 $w(tt)$ 为第 tt 个神经元的权重; η 为学习率。

3) 基于模糊优选及 BP-ANN 的多目标评价

基于模糊优选及 BP-ANN 的多目标评价基本思路为,利用 BP-ANN 强大的非线性模拟能力,通过网络训练获得相对隶属度权重,进行多目标评价。根据模糊优选理论^[23],设待选方案中各目标的最优值组成的方案为最优,其对最优的相对隶属度为 1; 设待选方案中各目标的最劣值组成的方案为最劣,其对最优的相对隶属度为 0; 线性插值最优和最劣目标值得到介于最优方案和最劣方案标的中间方案,其对最优的相对隶属度为 0.5。由此,可在不同的目标体系与对最优的相对隶属度之间建立一种非线性映射关系。这种复杂的非线性关系可用 BP-ANN 进行模拟训练,则最优方案、最劣方案和中间方案与其对最优的相对隶属度为可组成训练样本进行模拟训练,见图 2。在训练过程中,以模拟精度和迭代计算次数进行控制,达到相应误差或迭代次数要求后,即可确定相应

的网络结构。

BP-ANN 网络结构确定以后，将各方案的相对隶属度向量代入，通过 BP-ANN 网络计算后的输出，即为各方案对最优的相对隶属度。利用此相对隶属度进行排序，即可进行各方案的优劣排序，进而确定相对较优的方案。



注： x_i 为第 i 个输入层节点； z_j 为第 j 个隐层节点； y 为输出层节点； b 为最劣方案的相对隶属度向量； mm 为中间方案的相对隶属度向量； gg 为最优方案的相对隶属度向量。

Note: x_i means input layer node i ; z_j means hidden layer node j ; y means output layer node; b means relative membership vector of the worst scheme; mm means relative membership vector of middle scheme; gg means relative membership vector of the best scheme.

图 2 模糊优化样本及网络训练示意图

Fig.2 Diagram of fuzzy optimization samples and network training

1.4 方案设置

1.4.1 水位方案

三门峡水库大坝为混凝土重力坝，在泄流坝段高程 280 m（大沽高程，下同）设 12 个施工导流底孔，在 300 m 设 12 个深水孔，在 290 m 的左岸增建 2 条隧洞^[25]。水电站为坝后式，设有 7 台机组和 1 条泄流钢管。2002 年 11 月原型试验以来，三门峡水库运用方式为：非汛期坝前最高水位不超过 318 m，平均水位为 315 m 左右，汛期洪水时敞泄（入库流量大于 1 500 m³/s 时敞泄）。一般情况下，汛期排沙运用的最低水位是 295 m，相应泄流规模是 2 265 m³/s（不含机组）。通过改建底孔设施，使进口高程由 300 m 降低至 290 m，排沙运用时水位降低至 290 m。

该工程运用条件下，考虑尽可能增强小浪底水库调水调沙后续动力，需抬高水库水位，在合适时机泄增更多的大流量过程。但水位抬高过多将影响水库排沙，不利于有效库容保持和潼关高程稳定控制，同时带来移民淹没问题。方案 1 是水库现状运用方案，前汛期、后汛期水位 305 m，非汛期最高水位不超 318 m；根据分析三门峡水库汛期水位在 312 m 以下时，水库排沙效率较高，考虑采用了双泥沙侵蚀基准面，水库排沙效率有一定提高，方案设置时最高上浮到 315 m 控制，进一步考虑到三门峡水库汛期洪水具有分期特点，分期点为 9 月 1 日，按照前汛期（7—8 月）、后汛期（9—10 月）设置了方案 2~方案 9 的汛期水位方案；结合三门峡水库非汛期回水淹没特点，以及 1973 年以来的最高运用水位，非汛期最高水位的方案按不超 326 m 控制，设置了方案 2~

方案 9 的非汛期最高水位^[16]。组合方案情况见表 2。

表 2 方案设置表

Table 2 Scheme setting table

m

工程条件 Engineering condition	方案 Scheme	汛期水位 Flood season water level		非汛期最高水位 Maximum water level in non-flood season
		前汛期 Pre flood season	后汛期 Post flood season	
		前汛期 Pre flood season	后汛期 Post flood season	
现状条件 Current conditions	1	305	305	318
降低泥沙侵蚀基 准面条件 Reduce sediment erosion base level conditions	2	305	312	318
	3	308	312	318
	4	308	312	321
	5	308	312	324
	6	308	312	326
	7	310	312	318
	8	312	312	318
	9	312	315	318

注：前汛期 7—8 月，后汛期 9—10 月。

Note: The pre flood season is from July to August, and the Post flood season is from September to October.

1.4.2 模型边界

泥沙冲淤数学模型边界条件采用三门峡库区 2020 年 4 月实测地形，计算初始时刻是 2020 年，终止时刻根据计算系列的长度确定，本文设定的计算系列长度是 10 a，模拟计算时按日为步长进行计算。考虑潼关高程计算分析需要，边界范围向上游扩大，范围包括渭河下游（咸阳~渭河口）、小北干流（黄淤 68~潼关）、三门峡库区（潼关~黄淤 1），以四站（龙门、河津、华县、状头）为进口，三门峡站为出口，潼关作为中间断面。模型建模范围见图 3。

1.4.3 水沙条件

考虑黄河水沙变化影响因素复杂，对于未来水沙变化趋势的认识当前仍有争议。研究采用的水沙系列在龙羊峡、刘家峡等大型水库投入运用后的实测水沙系列中选取，暂不考虑上游古贤水库运用（规划 2030 年建成）影响，设计水沙系列长度采用 10 a，选取 1991—2000 年系列。结合未来黄河径流和泥沙的预估^[1]，按照未来黄河来水量 272.0 亿 m³、来沙量 8 亿 t，对实测水沙过程进行同倍比缩放，得到计算采用的设计系列，水沙量特征值见表 3。该设计系列中游干流龙门站和支流渭河华县站、汾河河津站、北洛河状头站四站的年均水量 272.05 亿 m³，年均沙量 8.00 亿 t，多年平均含沙量 29.4 kg/m³。潼关站的水沙过程根据上游干支流河道冲淤计算后得到。

表 3 设计水沙系列水沙特征值

Table 3 Water and sediment characteristic values of designed water and sediment series

测站 Station	水量 Runoff/10 ⁸ m ³		沙量 Incoming sediment/(10 ⁸ t)		含沙量 Sediment concentration/ (kg·m ⁻³)	
	汛期 Flood season	全年 Annual	汛期 Flood season	全年 Annual	汛期 Flood season	全年 Annual
	汛期 Flood season	全年 Annual	汛期 Flood season	全年 Annual	汛期 Flood season	全年 Annual
龙门 Longmen	104.28	213.72	4.17	4.86	39.9	22.7
华县 Huaxian	28.50	45.62	2.41	2.59	84.6	56.7
河津 Hejin	4.56	7.91	0.10	0.11	22.3	13.7
状头 Zhuangtou	2.91	4.81	0.43	0.45	146.4	93.5
合计 Total	140.24	272.05	7.10	8.00	50.6	29.4

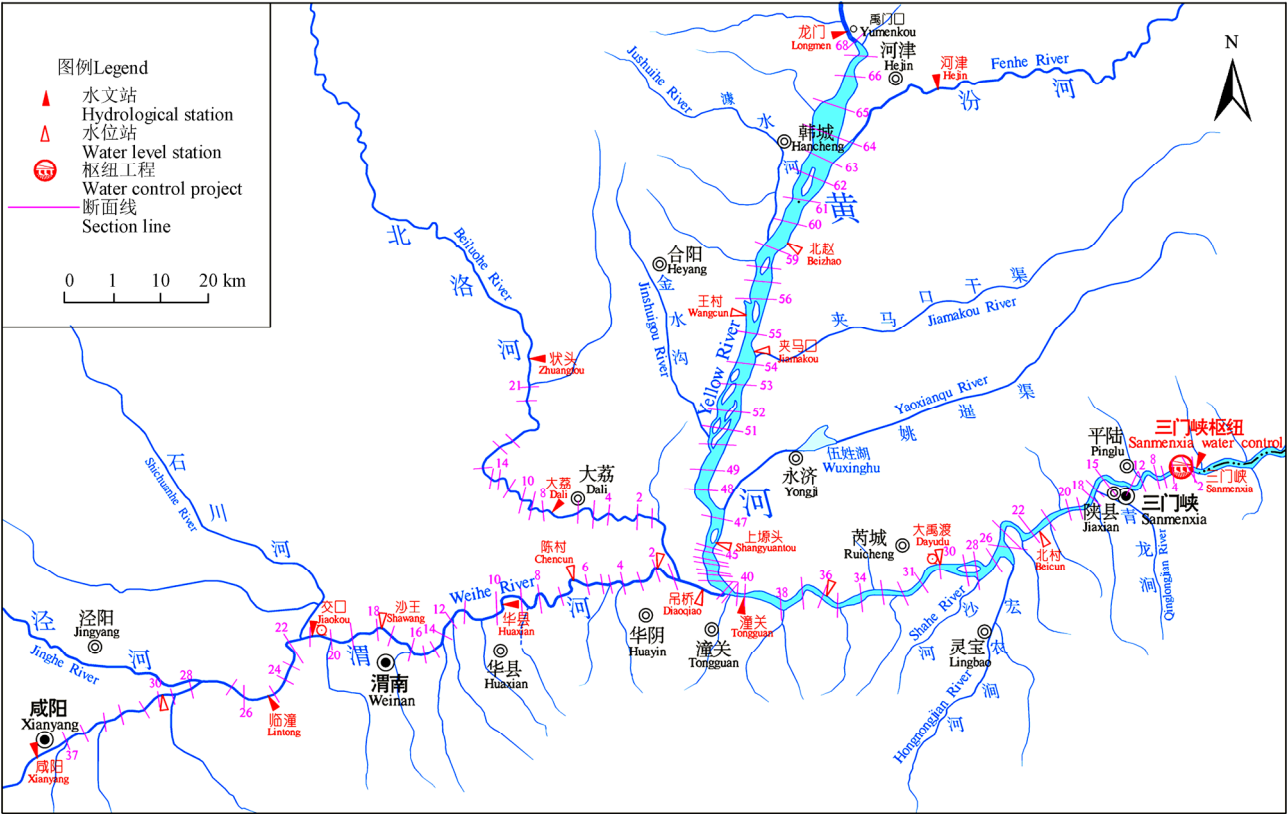


图3 泥沙冲淤数学模型空间范围

Fig.3 Spatial range of sediment erosion and deposition mathematical model

2 结果与分析

1) 库区泥沙冲淤数学模型验证计算

采用 1973 年 7 月 1 日—2019 年 6 月 30 日龙门、河津、华县和状头站的逐日水沙资料对库区泥沙冲淤数学模型进行验证计算,边界条件采用 1973 年汛前河道地形。悬移质级配按 0.01、0.025、0.05、0.1、0.25 和 1.0 mm 共 6 个分界值分为 6 组,按照上述四站实测悬移质级配进行插值。初始时刻床沙级配采用计算范围内河道实测床沙级配资料。

表 4 给出了计算范围内冲淤量计算值与实测值的对比,数学模型计算冲淤量和实测结果相对误差基本在 5% 以下,黄淤~坝前河段多年累计冲淤较小,故相对误差较大,总体吻合较好,可以开展方案计算。

表 4 1973—2018 年计算河段累计冲淤量验证成果

Table 4 Validation results of cumulative erosion and deposition of calculated reaches from 1973 to 2018

河段 Reach	实测值 Measured value/10 ⁸ t	计算值 Calculated value/10 ⁸ t	相对误差 Relative error/%	绝对误差 Absolute error/10 ⁸ t
黄淤 68~黄淤 41 Huangyu 68~Huangyu 41	4.970	5.008	0.76	0.038
黄淤 41~坝前 Huangyu 41~Dam front	0.053	0.077	45.28	0.017
渭河下游 Lower reaches of Weihe River	2.000	2.064	3.20	0.064

注:黄淤 41~坝前累计冲淤量实测值与计算值较小,绝对误差很小,但实际数值波动范围较大(-1 000~1 000),不宜用相对误差来衡量,故未列出相对误差。

Note: The measured and calculated value of cumulative erosion and deposition of Huangyu 41-Dam front are small, and the absolute error is very small, but the actual value fluctuates in a large range (-1 000-1 000), which is not suitable to be measured by relative error, so the relative error is not listed.

2) 方案计算结果

利用泥沙冲淤数学模型计算不同方案的库区累计冲淤量、潼关高程累计抬升值、电站累计发电量、水库出库水量过程。根据模型计算得到水库出库流量、水位,按照公式(6)和公式(7)计算得到发电量。

由于 2 600 m³/s 以上的流量过程对补充小浪底水库排沙、下游河道输沙入海的动力最为有效^[7],根据模型计算出库流量过程,将统计水库年均下泄 2 600 m³/s 以上的水量大小,作为衡量三门峡水库为小浪底补充后续动力多少的标尺。不同水位方案计算结果见表 5。

从计算结果来看,与现状运用水位方案(方案 1)相比,其他方案随着水库汛限水位和非汛期最高运用水位的抬升,电站发电量和库区湿地面积呈增加趋势,水库下泄 2 600 m³/s 以上的水量也呈增加趋势,小浪底水库后续动力得到不同程度的增强,但是库区淤积量也在不断变化。与现状运用方案相比,由于设置了双泥沙侵蚀基准面,水库运用水位抬升在一定范围内,库区淤积量比现状运用水位方案略小,进一步抬升水位后库区淤积量比现状运用方案略大。从不同汛限水位抬升方案看,方案 2、方案 3、方案 7 库区累计淤积量为 0.89~1.02 亿 t,小于现状运用方案淤积量,潼关高程与现状运用方案持平;方案 8、方案 9 库区累计淤积量分别为 1.09、1.16 亿 t,大于现状运用方案淤积量,潼关高程抬升大于现状运用方案,相比抬高了 0.10、0.12 m。从不同非汛期最高运用水位方案看,方案 3~方案 6 库区累计淤积量为 0.93~2.45 亿 t,大于现状运用方案淤积量,潼关高程抬升大于现状运用方案,相比抬高了 0.01~0.44 m。

表 5 不同水位方案计算结果
Table 5 Calculation results of different water level schemes

方案 Scheme	库区累计冲淤量 Accumulated erosion and siltation in the reservoir areas/10 ⁴ t	潼关高程累计抬升 Cumulative increase of Tongguan elevation/m	累计发电量 Cumulative power generation/(10 ⁸ kW·h)	年均下泄 2 600 m ³ ·s ⁻¹ 以上水量 Annual average water discharge more than 2 600 m ³ ·s ⁻¹ /10 ⁸ m ³	库区湿地面积 Wetland area in reservoir areas/km ²	库区淹没人口 Flooded population in reservoir areas/人
1	1.04	0.18	146.01	21.76	185	0
2	0.89	0.18	152.75	24.68	185	0
3	0.93	0.18	154.81	30.25	185	0
4	1.47	0.19	159.75	30.91	320	338
5	2.15	0.47	160.96	33.99	320	1 038
6	2.45	0.62	163.16	33.60	455	1 963
7	1.02	0.22	155.80	31.97	185	0
8	1.09	0.28	160.15	33.70	185	0
9	1.16	0.40	160.71	34.40	185	0

3) 方案评价

潼关高程是渭河下游和小北干流的侵蚀基准面，它的升降直接影响渭河下游防洪形势，保持潼关高程稳定十分重要。考虑三门峡水库库区淹没情况，以潼关高程抬升不超过 0.5 m 作为方案评价选取的限制条件。方案 6 潼关高程抬升 0.62 m，淹没人口 1 963 人，排除在评价范围外。对方案 1、2、3、4、5、7、8、9 采用模糊优选评价模型进行综合评价。

水库年均下泄大于 2 600 m³/s 的水量，代表了三门峡水库为小浪底补充后续动力的能力，其值越大越好；发电量、湿地面积都是正向指标，其值越大越好；库区淤积量和潼关高程是约束性指标，其值越小越好。根据模糊优选评价模型，选取库区淤积量最小、潼关高程最低、水库年均下泄大于 2 600 m³/s 的水量最大、年发电量最大、湿地面积最大为水库调度最优评价目标。BP-ANN 采用三层结构，其中输入层节点数取为目标个数 5，输出层节点数为 1，隐层节点数根据试算比较确定。

根据公式 (8) 计算各方案的目标特征值矩阵如下：

$$X = \begin{bmatrix} 1.04 & 0.89 & 0.93 & 1.47 & 2.15 & 1.02 & 1.09 & 1.16 \\ 0.18 & 0.22 & 0.22 & 0.24 & 3.11 & 0.99 & 1.22 & 2.45 \\ 21.76 & 24.68 & 30.25 & 30.91 & 33.99 & 31.97 & 33.70 & 34.40 \\ 146.01 & 152.75 & 154.81 & 159.75 & 160.96 & 155.80 & 160.15 & 160.71 \\ 199.00 & 245.00 & 245.00 & 380.00 & 380.00 & 245.00 & 245.00 & 245.00 \end{bmatrix}$$

由公式 (9) - (11) 求得其相对隶属度矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} 0.85 & 1.00 & 0.96 & 0.61 & 0.42 & 0.87 & 0.82 & 0.77 \\ 1.00 & 0.84 & 0.83 & 0.77 & 0.06 & 0.18 & 0.15 & 0.07 \\ 0.63 & 0.72 & 0.88 & 0.90 & 0.99 & 0.93 & 0.98 & 1.00 \\ 0.91 & 0.95 & 0.96 & 0.99 & 1.00 & 0.97 & 0.99 & 1.00 \\ 0.52 & 0.64 & 0.64 & 1.00 & 1.00 & 0.64 & 0.64 & 0.64 \end{bmatrix}$$

根据模糊优选理论，从待优化方案的相对隶属度矩阵中，抽取最优方案的相对隶属度向量，为 $gg=(1.00,1.00,1.00,1.00,1.00)$ ，其对最优的相对隶属度值设定为 1；最劣方案的相对隶属度向量 $b=(0.42,0.06,0.63,0.91,0.52)$ ，其对最优的相对隶属度值设定为 0；中间方案的相对隶属度向量为 $mm=(0.71,0.53,0.82,0.95,0.76)$ ，其对最优的相对隶属度值设定为 0.5。由此得到 BP-ANN 训练样本（样本的 5 个

值分别为 5 个目标的相对隶属度值；样本输出为模型参数训练的期望输出值，计算输出为模型参数训练的实际输出值），通过网络训练获得相对隶属度权重，训练结果见表 6。由 6 表可以看出，训练后的该 BP-ANN 网络对不同方案与其对最优的相对隶属度值具有较好的模拟能力。

将研究方案的多目标相对隶属度代入训练后的 ANN 网络，得到待优化方案对最优的相应隶属度值，见表 7。

由表 7 排序结果可知，方案 4 在各评价方案中最优，即三门峡水库按照前汛期运用水位 308 m、后汛期运用水位 312 m、非汛期最高水位 321 m 运行的调度方案最优。与现状运用方案相比，该方案潼关高程抬升值基本一致，但比现状方案下泄 2 600 m³/s 以上的水量多了 42%，有效地为小浪底水库调水调沙增加了后续动力，电站发电量累计增加了 9%，湿地面积增加了 73%，综合效益最优。但由于水库水位抬升，可能对潼关高程产生影响，增加库区塌岸风险，在将来运用时要及时观测，制定风险应对的预案。

表 6 BP-ANN (基于反馈误差的人工神经网络) 训练样本列表
Table 6 BP-ANN (Back Propagation Artificial Neural Network) training sample list

方案 Scheme	样本输入 Sample input	样本输出 Sample output	计算输出 Calculation output	模拟误差 Simulation error
最优 Optimal	(1.00,1.00,1.00,1.00,1.00)	1	1.000 307	0.000 307
中间 Intermediate	(0.71,0.53,0.82,0.95,0.76)	0.5	0.500 114	0.000 114
最劣 Worst	(0.42,0.06,0.63,0.91,0.52)	0	-0.000 006	0.000 006

注：样本输入为 5 个评价目标的相对隶属度值；样本输出为模型参数训练的期望输出值；计算输出为模型参数训练的实际输出值。

Note: Sample input means relative membership value of 5 evaluation objectives; sample output means expected output value of model parameter training; calculation output means actual output value of model parameter training.

表 7 待优化汛限水位方案多目标评价成果表
Table 7 Multi-objective evaluation result table of flood limit water level schemes to be optimized

方案 Scheme	方案输入 Scheme input	对最优相对隶属度值 Relative membership value of optimization	排序 Sort
1	(0.85,1,0.63,0.91,0.52)	0.39	8
2	(1,0.84,0.72,0.95,0.64)	0.51	4
3	(0.96,0.83,0.88,0.96,0.64)	0.50	5
4	(0.61,0.77,0.9,0.99,1)	0.89	1
5	(0.42,0.06,0.99,1,1)	0.68	2
7	(0.87,0.18,0.93,0.97,0.64)	0.45	7
8	(0.82,0.15,0.98,0.99,0.64)	0.55	3
9	(0.77,0.07,1,1,0.64)	0.49	6

三门峡水库位于上游古贤水库与小浪底水库的中间,处于承上启下的关键位置,在古贤水库投运前,通过工程改建形成双泥沙侵蚀基准面,优化调整三门峡水库运用水位,适当抬高水位为增强小浪底水库后续动力提供了可能。未来古贤水库投运后,进入三门峡库区的泥沙量将大幅减少,潼关高程下降,可为三门峡水库进一步抬高水位增强小浪底水库后续动力提供条件。

3 结 论

1) 当前小浪底水库调水调沙后续动力不足,三门峡水库汛限水位以下库容有限,现状工程条件下难以为小浪底补充后续动力。通过改建底孔、降低泥沙侵蚀基准面,可提高水库排沙效率,为提高三门峡水库运用水位提供了可能性。考虑三门峡水库工程运用条件和入库洪水分期特点,研究提出了三门峡汛期、非汛期抬高水位的方案。

2) 构建三门峡水库泥沙冲淤数学模型,可以对各种水位方案三门峡水库库区泥沙淤积、潼关高程变化、下泄大流量天数进行模拟。利用模糊优选评价模型对三门峡水库不同水位方案进行方案评价,提出了三门峡水库在降低侵蚀基准面的情况下最优运用水位方案,即按照前汛期运用水位 308 m、后汛期运用水位 312 m、非汛期最高水位 321 m 运行的方案,综合效益最优。但是具体实施时要考虑可能的风险,密切跟踪监测研究水位抬高对潼关高程的不利影响,观测库区崩岸风险,并采取必要措施。

参 考 文 献

- [1] 张金良, 鲁俊, 韦诗涛, 等. 小浪底水库调水调沙后续动力不足原因和对策[J]. 人民黄河, 2021, 43(1): 5-9.
Zhang Jinliang, Lu Jun, Wei Shitao, et al. Causes and countermeasures for insufficient follow-up power of water and sediment regulation in Xiaolangdi Reservoir[J]. Yellow River, 2021, 43(1): 5-9. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张金良. 黄河流域生态保护和高质量发展水战略思考[J]. 人民黄河, 2020, 42(4): 1-6.
Zhang Jinliang. Water strategy for ecological protection and high quality development in the yellow river basin[J]. Yellow River, 2020, 42(4): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [3] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域综合规划(2012—2030年)[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2013: 49-58.
- [4] 陈翠霞, 安催花, 罗秋实, 等. 黄河水沙调控现状与效果[J]. 泥沙研究, 2019, 44(2): 69-74.
Chen Cuixia, An Cuihua, Luo Qiushi, et al. Study on the effect of the water and sediment regulation in the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(2): 69-74. (in Chinese with English abstract)
- [5] 胡春宏. 黄河水沙变化与治理方略研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(10): 1-11.
Hu Chunhong. Changes in runoff and sediment loads of the Yellow River and its management strategies[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(10): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李国英, 盛连喜. 黄河调水调沙的模式及其效果[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(6): 826-832.
Li Guoying, Sheng Lianxi. Model of water-sediment regulation in Yellow River and its effect[J]. Science China Technology Science, 2011, 41(6): 826-832. (in Chinese with English abstract)
- [7] 万占伟, 罗秋实, 闫朝晖, 等. 黄河调水调沙调控指标及运行模式研究[J]. 人民黄河, 2013, 35(5): 1-4.
Wan Zhanwei, Luo Qiushi, Yan Zhaozhui, et al. Research on regulation index and operation mode of water and sediment regulation of the yellow river[J]. Yellow River, 2013, 35(5): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘树君, 董泽亮, 张荣凤. 小浪底水库水沙联合调度实践及思考[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(6): 51-53.
Liu Shujun, Dong Zeliang, Zhang Rongfeng. Practice and thinking of water and sediment joint operation in Xiaolangdi reservoir[J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(6): 51-53. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王煜, 安催花, 李海荣, 等. 黄河水沙调控体系规划关键问题研究[J]. 人民黄河, 2013, 35(10): 23-25, 32.
Wang Yu, An Cuihua, Li Hairong, et al. Research on the key problems of the Yellow River Water and Sediment Regulation and Control System[J]. Yellow River, 2016, 35(10): 23-25, 32. (in Chinese with English abstract)
- [10] 万占伟, 刘继祥, 李福生. 古贤水库与小浪底水库联合运用研究[J]. 人民黄河, 2013, 35(10): 36-39.
Wan Zhanwei, Liu Jixiang, Li Fusheng. Research of joint operation method of Guxian and Xiaolangdi reservoirs[J]. Yellow River, 2013, 35(10): 36-39. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张俊华, 李涛, 马怀宝. 小浪底水库调水调沙研究新进展[J]. 泥沙研究, 2016(2): 68-75.
Zhang Junhua, Li Tao, Ma Huaibao. New progress in research on water and sediment regulation in Xiaolangdi reservoir[J]. Journal of Sediment Research, 2016(2): 68-75. (in Chinese with English abstract)
- [12] 喻圣, 邹红波, 余凡, 等. 模糊神经网络在电力系统短期负荷预测中的应用[J]. 电网分析与研究, 2018, 46(11): 88-91, 97.
Yu Sheng, Zou Hongbo, Yu Fan, et al. Application of fuzzy neural network in power short-term load forecasting[J]. Power Grid Analysis & Study, 2018, 46(11): 88-91, 97. (in Chinese with English abstract)
- [13] 聂相田, 宋雅静, 段文凤. 基于模糊优选 BP 网络的水利工程建设项目绩效评价[J]. 水电能源科学, 2013, 31(4): 116, 136-138.
Nie Xiangtian, Song Yajing, Duan Wenfeng. Water conservancy construction management performance evaluation based on fuzzy optimization BP network[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(4): 116, 136-138. (in Chinese with English abstract)
- [14] 乔卫亮, 刘阳, 周群, 等. 基于模糊人工神经网络的安全风险评估模型[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(4): 1405-1411.
Qiao Weiliang, Liu Yang, Zhou Qun, et al. Safety risk assessment model based on fuzzy artificial neural network[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(4): 1405-1411. (in Chinese with English abstract)
- [15] 岳炯, 吕卫民, 胡文林. 基于模糊 BP 神经网络雷达导引头的性能评价[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49(7): 1296-1301.
Yue Jiong, Lv Weimin, Hu Wenlin. Performance evaluation of radar seeker based on fuzzy artificial neural network[J]. Computer and Digital Engineering, 2021, 49(7): 1296-1301. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王兆印, 李昌志, 王费新. 潼关高程对渭河河床演变的影响[J]. 水利学报, 2004(9): 1-8.
Wang Zhao Yin, Li Changzhi, Wang Feixin. Effect of Tongguan's elevation on the fluvial process of the Lower Weihe River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(9): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [17] 钱意颖, 程秀文, 华正本, 等. 三门峡水库蓄清排浑运行与泥沙问题的总结[J]. 水利水电技术, 1988(8): 1-7.

- Qian Yiying, Cheng Xiuwen, Hua Zhengben, et al. Summary of the operation and sedimentation problems of Sanmenxia Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Technology, 1988(8): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [18] 周建军, 林秉南. 从三门峡水库的运行看潼关高程的变化[J]. 水力发电学报, 2003(3): 59-67.
Zhou Jianjun, Lin Bingnan. Stages at tongguan and operation of sanmenxia reservoir[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003(3): 59-67. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张金良. 多沙河流水利枢纽工程泥沙设计理论与关键技术[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2019: 272-282.
- [20] 张红武, 张清. 黄河水流挟沙力的计算公式[J]. 人民黄河, 1992(11): 7-9, 61.
- [21] 张金良. 黄河水库水沙联合调度问题研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
Zhang Jinliang. Research on the Yellow River Reservoir Water and Sediment Joint Operation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王国利, 周惠成, 张文国. 含水层易污染性评价的模糊优选方法[J]. 水利学报, 2000(12): 72-76.
Wang Guoli, Zhou Huicheng, Zhang Wenguo. Multi-objective fuzzy optimization method for aquifer vulnerability assessment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(12): 72-76. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张保祥, 万力, 余成, 等. 基于熵权与 GIS 耦合的 DRASTIC 地下水脆弱性模糊优选评价[J]. 现代地质, 2009, 23(1): 150-156.
Zhang Baoxiang, Wan Li, Yu Cheng, et al. Fuzzy optimization assessment of DRASTIC Groundwater vulnerability based on Entropy Weight and GIS[J]. Geoscience, 2009, 23(1): 150-156. (in Chinese with English abstract)
- [24] 庞博, 郭生练, 熊立华, 等. 丹江口库周区人工神经网络洪水预报模型研究[J]. 人民长江, 2004, 35(4): 30-31.
- [25] 王大勇, 韩左雷, 张中原. 三门峡水利枢纽泄流工程二期改建的效果与启示[A].//中国水利学会地基与基础工程专业委员会.黄河三门峡工程泥沙问题研讨会论文集[C].中国水利学会地基与基础工程专业委员会: 中国水利学会, 2006: 3.

Optimal strategy for water level of Sanmenxia Reservoir to enhance follow-up power of water and sediment regulation of Xiaolangdi Reservoir

Zhang Jinliang, Lu Jun^{*}, Gao Xing, Zhao Menglong

(1. Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources (under construction), Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The follow-up power is still lacking for the water and sediment regulation in the Xiaolangdi Reservoir. The follow-up power of flow is required for the reservoir to discharge the sediment and the lower river channel, finally to transport the sediment into the sea, as the large flow of water is released during the water regulation stage with the reduction of large flow into the reservoir. It is necessary to fully explore the potential of the Sanmenxia Reservoir, providing the follow-up power for water and sediment regulation in the Xiaolangdi Reservoir. In this study, the possible boundary conditions were analyzed with the formation of a double sediment erosion base level via rebuilding the bottom hole of the Sanmenxia reservoir. The restricted operation water level of 305-312 m was also set in several flood seasons, according to the early flood season during July to August, and the later flood season during September to October. Several operation water levels of 318-326 m were set in the non-flood season, and nine schemes were combined with different water levels in flood season and non-flood season, considering the scouring and silting characteristics of the Sanmenxia Reservoir area. A mathematical model was constructed for the sediment erosion and siltation in the Sanmenxia Reservoir. The measured data from July 1, 1973, to June 30, 2019, were utilized to calibrate the parameters of the model. The calculation error of reservoir siltation was controlled within 5%. After that, the schemes were calculated using the verified mathematical model. The boundary conditions were that: in the Xiaolangdi Reservoir area in April 2020, the future inflow of 27.205 billion m³ and the incoming sediment of 800 million tons of reservoir, from the accumulated erosion and siltation in the reservoir area, the accumulated increase in the elevation value of Tongguan (erosion base level of the lower Weihe River), the accumulated power generation of the power station, the average annual discharge over 2 600 m³/s in the reservoir, the largest wetland area in the reservoir area and the change of inundated population in the reservoir area. Nine schemes were evaluated using the fuzzy optimization model, and then the optimal water level scheme of the Sanmenxia Reservoir was proposed under the condition of reducing the erosion base level. The optimal water level was 308 m in the early flood period during July to August, 312 m in the later flood period during September to October, and the highest water level was 321 m in the non-flood period. The optimal scheme presented an increase of 42% in the discharge above 2 600 m³/s, a cumulative increase of 9% in power generation capacity, and a 73% increase in the wetland area. The possible impact was analyzed for the rising of water level, particularly on the elevation of Tongguan, the risk increase of eroding bank in the reservoir area, where the observation during specific implementation in time and formulating risk response plans. The findings can provide a promising application to enhance the follow-up power of water and sediment regulation in the Xiaolangdi Reservoir, thereby improving the comprehensive benefits of the Sanmenxia Reservoir.

Keywords: reservoir management; mathematical models; water and sediment regulation; Sanmenxia Reservoir; Xiaolangdi Reservoir; double sediment erosion base level; fuzzy optimal evaluation model