

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.01.010

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:牟琳辉,白涛,加沙尔·蒙古拜,梁宇航. 荒漠区平原水库多目标生态调度能力与潜力分析[J]. 西安理工大学学报, 2023,39(1):96-104.

MOU Linhui, BAI Tao, MENGGUBAI Jiashaer, LIANG Yuhang. Multi-objective ecological operation capacity and potential analysis of plain reservoir in desert area[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(1): 96-104.

# 荒漠区平原水库多目标生态调度能力与潜力分析

牟琳辉<sup>1</sup>, 白涛<sup>1</sup>, 加沙尔·蒙古拜<sup>2</sup>, 梁宇航<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州伊犁水文勘测局, 新疆 伊犁 835000)

**摘要:** 针对干旱荒漠区水资源匮乏、区域水资源分配不均等问题,提出一种优化调度方案。本文以塔里木河为例,建立水库多目标生态调度模型,采用融入人工经验的自迭代模拟优化算法求解。通过水库多目标生态调度能力与优化潜力的对比分析,最大程度地满足了枯水期河道内、河道外生态流量以及补湖水量,挖掘了荒漠区平原水库显著的生态调度潜力。结果表明:①优化后大西海子水库多年下泄水量变化较实测值更加均匀;②实测的大西海子下游3年断流,优化后仅有1年断流,枯水期断流天数大幅减少;③在胡杨漂种的关键生态期,河道外可供生态水量较实测值提高了66%;④补湖水量较实测值减少了289.5万m<sup>3</sup>,有效控制了台特玛湖补湖水量及其变化过程。研究结果优化了季节性河流的河道内、河道外以及入湖等多要素生态供水过程,对于干旱荒漠区内陆水资源的集约利用、河岸植被的生态保护与修复具有重要的理论意义和应用价值。

**关键词:** 河道内、河道外生态流量; 补湖水量; 融入人工经验; 生态调度潜力; 耗散型河段

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)01-0096-09

## Multi-objective ecological operation capacity and potential analysis of plain reservoir in desert area

MOU Linhui<sup>1</sup>, BAI Tao<sup>1</sup>, MENGGUBAI Jiashaer<sup>2</sup>, LIANG Yuhang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. Kazak Autonomous Prefecture of Xinjiang Uygur Autonomous

Ili Region Bureau of Hydrology Investigation, Ili 835000, China)

**Abstract:** Aiming at the shortage of water resources and the uneven distribution of regional water resources in arid desert areas, an optimal scheduling scheme is proposed. In this paper, taking Tarim River as an example, a reservoir multi-objective ecological operation model is established and solved by a self iterative simulation optimization algorithm incorporating human experience. Through the comparative analysis of multi-objective ecological regulation capacity and optimization potential of the reservoir, the ecological flow in and out of the river channel and the water volume for lake replenishment in the dry season are met to the greatest extent, with the significant ecological regulation potential of plain reservoirs in the desert area exploited. The results show that: ①after optimization, the variation of drainage quantity in Daxihaizi Reservoir is more uniform than the measured value; ②The measured flow was cut off for 3 years in the lower rea-

收稿日期: 2022-04-14; 网络首发日期: 2022-11-02

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20221102.0923.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52179025, 51879213); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JLM-52, 2021JLM-44); 中国博士后科学基金资助项目(2019T120933, 2017M623332XB)

第一作者: 牟琳辉, 男, 硕士生, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: 2283792418@qq.com

通信作者: 白涛, 男, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为水资源系统工程。E-mail: baitao@xaut.edu.cn

ches of Daxihaizi, but only for 1 year after optimization; ③In the critical ecological period of populus euphratica drifting species, the ecological water available outside the channel increased by 66% compared with the measured value; ④Compared with the measured value, the amount of lake water supplementing decreased by  $2.89 \times 10^6 \text{ m}^3$ , which effectively controlled the amount of lake water supplementing and its changing process of Tetma Lake. The research results optimize the multi-factor ecological water supply processes of seasonal rivers, such as in and out of the river and into the lake, which is of theoretical significance and application value for the intensive utilization of water resources in inland rivers and the ecological protection and restoration of riparian vegetation in arid desert areas.

**Key words:** ecological flow in and out of river course; lake water recharge; incorporate artificial experience; ecological operation potential; dissipative reach

水资源是人类社会经济和生态向前发展不可或缺的基础资源<sup>[1]</sup>。随着如何实现生态系统的保护与修复成为热点问题,许多学者针对塔里木河流域(简称“塔河”)生态保护与修复开展了深入研究。邓铭江等<sup>[2]</sup>结合塔里木河下游生态输水的特点及方式、生态输水后的生态环境变化,对塔河下游生态调度策略与模式进行了初步探讨。王光焰等<sup>[3]</sup>指出塔河流域内用水存在大面积超载,导致中下游水量严重减少,引起生态问题,并提出了生态调度、水权配置和生态补偿、跨流域调水等未来生态修复方向。李丽琴等<sup>[4]</sup>针对内陆干旱区城市发展和生态环境保护的强烈互斥性,在整体识别内陆干旱区水循环与生态演变耦合作用机理的基础上,以塔河为例,构建了基于生态水文阈值调控的水资源多维均衡配置模型。李均力等<sup>[5]</sup>利用 Landsat 8 OLI、Sentinel-2A 等遥感数据,分析了 2013—2018 年荒漠河岸带植被的时空变化特征,并结合地下水位数据分析了荒漠河岸带植被对生态输水的响应。Zhang 等<sup>[6]</sup>利用生态系统服务价值(ESV)评价模型和灰色关联度,揭示了新疆生态系统服务价值的时空变化特征及其与人类活动的相互作用。白涛等<sup>[7]</sup>基于荒漠区耐旱性植被胡杨特殊的生物节律,提出了汉渗轮灌的灌溉理念,搭建了汉渗轮灌的基本框架。Xin 等<sup>[8]</sup>计算了近 30 年来台特玛湖水域周边的植被覆盖率,分析了生态输水前后植被覆盖率与湖区的演变和驱动因素。

综合以往塔河流域生态保护的研究成果,主要侧重于是否满足“大西海子水库年均下泄水量达到 3.5 亿  $\text{m}^3$ 、有水到达台特玛湖(简称台湖)”的目标,而对于如何高效利用生态水资源研究不足,缺乏在水量刚性约束下对下游生态水资源的集约利用,无法充分发挥大西海子水库对下游河道内生态流量、河道外生态补水、补湖水量等多项用水的联合调控作用,导致事先制定的水库调节体系难以应对水库下游生态环境新形势,生态系统的脆弱性无法得到

根本性的改变。因此,本文以塔河流域为研究对象,结合干旱荒漠区自然属性,改变传统以单因子调度为主的思维定式,构建面向生态系统的多保护对象的水库中长期生态优化调度模型,采用融入人工经验的自迭代模拟优化算法求解,通过水库实测调度能力与优化潜力的对比分析,最大限度地满足枯水期河道内、河道外的生态流量以及补湖水量,创建一种新型集约调度模式,充分挖掘塔河下游显著的生态调度潜力。研究结果对干旱荒漠区耗散型河段的水资源集约利用、河岸植被的生态保护与修复具有一定的指导意义。

## 1 研究区域概况

西北干旱区具有降水稀少、蒸发强烈、有水就有绿洲、无水皆为荒漠的典型干旱特征,资源性缺水与生态环境的脆弱性使得流域生态环境保护面临严峻挑战<sup>[9,10]</sup>。塔河是我国最长的内陆河流,全长 2 486 km,流域面积为 25.86 万  $\text{km}^2$ <sup>[10,11]</sup>。自 1972 年大西海子水库投运以来,下游 350 km 河道断流近 30 年,塔里木河也成为中国乃至世界生态最为脆弱的流域之一<sup>[7,10,12]</sup>。研究区位于东经  $39.45^\circ \sim 40.55^\circ$ ,北纬  $87.54^\circ \sim 88.42^\circ$  之间,如图 1 所示。

为遏制塔河下游生态环境恶化,保障阻隔两大沙漠合拢的塔河下游生态防护体系,自 2000—2021 年,向大西海子水库下游河道实施了 22 次生态输水<sup>[13,14]</sup>。生态输水后,随着地下水位的抬升,天然植被得到拯救和恢复,植被的响应范围也逐渐扩大,但距实现保护塔河下游绿色走廊的目标尚有很大差距<sup>[7]</sup>。河道枯水期的季节性断流和粗犷的调度方式导致下游河道内生态流量的年际变化过大,生态系统碎片化严重;生态供水过程无法满足植被需水要求,导致在关键生态期无法为胡杨漂种、着床提供充足的生态水;缺乏水库、生态闸等控制性水利设施,导致大量生态水注入尾间湖台湖,蒸发耗散严重,区域水资源分配严重不均<sup>[7,15]</sup>。塔河下游生态保护与修复任重道远。

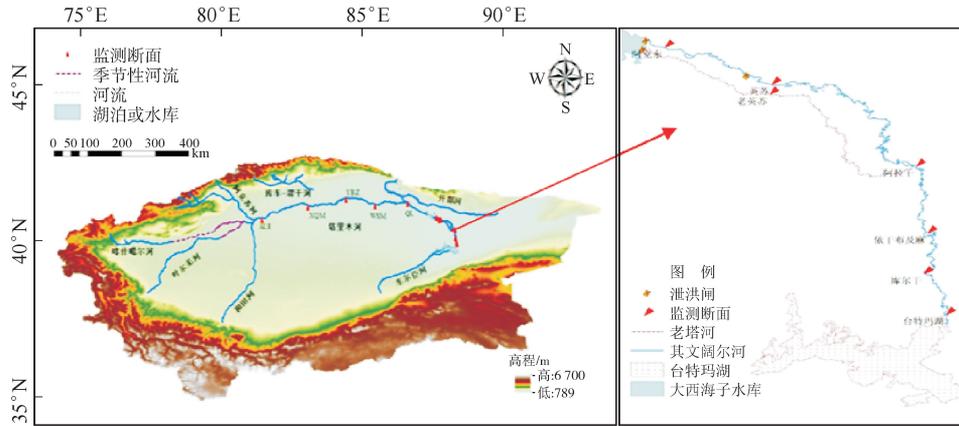


图1 塔里木河下游研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the lower Tarim River study area

鉴于此,为优化区域水资源配置,实现旱区水资源集约利用,亟待创建一种新型水库优化调度模式。通过发挥大西海子水库对下游河道内生态流量、河道外生态补水、补湖水量等多项用水的联合调控作用,将水库生态调度与河道外保护性植被的生长节律相结合,构建水库新型集约调度模式,优化水库调度潜力,将生态水资源最大限度用于河道外植被生长、发育,减少补湖水量,提高河道内生态流量的保证程度,以最大效率合理利用塔河下游宝贵的生态水资源。

## 2 生态调度模型的建立

因塔河下游生态环境脆弱,多次放水实践证实,在没有水库调节的情况下,天然来水难以顺利流达台特玛湖,大西海子水库成为了一座专门用于生态供水的水库(无农业灌溉供水需求)。由于大西海子水库入库的资料较少,本文基于恰拉水文站不同保证率的年径流量成果,借用阿拉尔水文站到恰拉水文站区间单位长度河道衰减率,将恰拉水文站不同保证率的设计年径流量推算至大西海子水库断面<sup>[16]</sup>。结果表明,受冰川融雪洪水影响,塔河下游的大西海子水库来水从每年4月开始,5月中下旬至6月下旬出现季节性断流,到7月下旬来水陡增,至9月中、下旬达到峰值,11月中下旬以后来水急剧减少,随后进入季节性断流时段。由此可见,大西海子水库来水主要集中在每年7~10月。同时,10月份为胡杨和怪柳的集中落种繁育期<sup>[17]</sup>。从生态保护与修复的角度看,生态调度输水时段应与天然植物落种时间相契合<sup>[18]</sup>,因此,本文以10月作为河道外胡杨林生态保护的关键期。

根据塔河一期规划,大西海子水库年平均下泄水量不得低于3.5亿 $m^3$ ,但由于塔河干流缺水严重,在连续枯水年无法保证3.5亿 $m^3$ 的生态补水,

需要到丰水年再对其补充,以保证年均下泄水量达3.5亿 $m^3$ 。本文将通过对长系列水文资料的计算,制定精细化的水库调度方案,最大限度保证每年的下泄水量更均衡,水资源分配更加合理。

### 2.1 目标函数

1) 由于塔河为季节性河流,没有生态基流,本文将有水到达台特玛湖的下泄流量作为河道内生态流量,以提高河道内生态流量保证程度为目标,最大限度减少河道断流时间,避免周围生态环境遭到不可恢复的破坏。

$$\left| \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T (q''_{i,j} \Delta t) - W_s \right| \leq \epsilon \quad (1)$$

式中: $N$ 为调度期年数; $T$ 为一年内总月份; $q''_{i,j}$ 为调度期内第 $i$ 年第 $j$ 月河道内生态流量, $m^3/s$ ;  $W_s$ 为允许的河道内最小生态需水量,亿 $m^3$ ;  $\Delta t$ 为月时段差; $\epsilon$ 为计算精度,本文取0.01亿 $m^3$ 。

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \geq P \quad (2)$$

式中: $P_i$ 为第 $i$ 年河道内生态流量保证程度,%; $P$ 为允许的河道内最小生态流量保证程度,%。

2) 在合理的湖面面积条件下,保证合适的入湖水量,避免因湖面面积过大而无效蒸发。

$$0 \leq \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T (q'_{i,j} \Delta t) \leq W_1 \quad (3)$$

式中: $q'_{i,j}$ 为第 $i$ 年第 $j$ 月入湖流量, $m^3/s$ ;  $W_1$ 为允许的最小多年平均入湖水量,亿 $m^3$ 。

3) 将节约的水资源最大限度地应用于河道外生态屏障的构筑,增加胡杨灌溉面积。

$$\max W = \sum_{i=1}^N W_i (1 \leq i \leq n) \quad (4)$$

式中: $W$ 为河道外可供生态水量,亿 $m^3$ ;  $W_i$ 为第 $i$ 年调度期内河道外可供生态水量,亿 $m^3$ 。

## 2.2 约束条件

### 1) 水库水量平衡约束

$$V_t = V_{t-1} + \frac{I_t + I_{t-1}}{2} \Delta t - \frac{q_t + q_{t-1}}{2} \Delta t \quad (5)$$

式中:  $V_t$  为  $t$  时刻水库库容, 亿  $\text{m}^3$ ;  $I_t$  为  $t$  时刻入库流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $q_t$  为  $t$  时刻下泄流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\Delta t$  为  $t$  时刻、 $t-1$  时刻的时段长。

### 2) 库容约束

$$V_{\min} \leq V_t \leq V_{\max} \quad (6)$$

式中:  $V_{\min}$  为死库容, 亿  $\text{m}^3$ ;  $V_{\max}$  为兴利库容, 亿  $\text{m}^3$ 。

### 3) 水位约束

$$Z_{\min} \leq Z_t \leq Z_{\max} \quad (7)$$

式中:  $Z_{\min}$  为死水位,  $\text{m}$ ;  $Z_{\max}$  为正常蓄水位,  $\text{m}$ 。

### 4) 下泄流量约束

$$Q_t^{\min} \leq Q_t \leq Q_t^{\max} \quad (8)$$

式中:  $Q_t$  为第  $t$  时刻流量;  $Q_t^{\min}$  和  $Q_t^{\max}$  为水库第  $t$  时刻的最小、最大限制流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

### 5) 下泄总水量约束

$$\frac{1}{NT} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T (q_{i,j} \Delta t) \geq W_e \quad (9)$$

式中:  $q_{i,j}$  为第  $i$  年第  $j$  月下泄生态流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $W_e$  为允许的最小多年平均下泄生态水量, 亿  $\text{m}^3$ 。

### 6) 变量非负约束等。

## 3 模型求解

### 3.1 模型处理

一般来说, 处理水库多目标生态调度主要有两种方法: 一种是通过确定最重要的目标, 将多个目标转化为一个主目标, 然后将剩余的子目标作为约束条件<sup>[19]</sup>; 另一种则是将各子目标合并为一个总体目标, 一般通过子目标的权重系数<sup>[20]</sup>进行合并。求解子目标权重值的方法有很多, 如层次分析法<sup>[21-22]</sup>、交互式多目标决策方法<sup>[23-24]</sup>等。

本文选用第一种方法求解多目标模型。以河道外生态水量最大为主目标, 将式(1)中的  $W_s$  转化为河道内生态水量约束, 将式(2)中的  $P$  转化为生态流量保证程度约束, 将式(3)中的  $W_1$  转换为补湖水量约束, 从而将多目标问题转化为单目标问题, 并在模型中融入人工经验, 对关键问题进行求解。由于塔里木河存在季节性断流, 水资源匮乏严重, 本文将最大限度满足目标约束, 以输出最优调度结果。

### 3.2 融入人工经验的调度规则

大西海子水库为年调节水库, 本文以月为调度时段, 年为调度周期, 进行长系列调度模拟。塔河属于季节性河流, 大西海子水库无法保证全年 12 个月

放水, 其调度规则如下:

1) 水库于当年 4 月起调, 在蓄水过程中保证下泄水量不低于最小生态流量, 若来水过小, 无法满足下泄要求, 则停止下泄;

2) 7 月下旬起来水陡增, 水库蓄水至正常蓄水位, 若来水过小, 无法保证水库于 10 月蓄满, 则停止下泄; 若水量较大, 则保证下泄流量不低于河道内最小生态流量;

3) 生态关键期 10 月, 水库以最大生态调度流量集中下泄, 以实现 10 月河道外生态输水最大化以及输水入台湖的目标;

4) 若水库蓄水较多, 生态关键期 10 月水库未放至死水位, 则多余水量在 11 月至来年 3 月(枯水期)以最小生态流量均匀下泄至死水位, 尽可能保证枯水期河道不断流, 维系塔河下游生态系统的完整性。

### 3.3 约束条件值的确定

1) 汛期为每年 8 月 1 日至 9 月 30 日, 控制水位不超过 849.25m, 水库在 10 月集中下泄至合理水位 846.61m(见表 1)。

表 1 水库特征水位及库容

Tab. 1 Characteristic water level and storage capacity of reservoir

特征水位	特征值/ $\text{m}$	特征库容	特征值/( $\text{万 m}^3$ )
死水位	846.61	死库容	660
正常蓄水位	849.25	兴利库容	8 031.12
汛限水位	848.60	防洪库容	5 870.30
设计洪水位	849.57	拦洪库容	9 696.76
校核洪水位	849.60	调洪库容	9 870

2) 根据塔河一期综合治理规划, 大西海子水库年均下泄水量不得小于 3.5 亿  $\text{m}^3$ 。

3) 根据下游河道实测断面, 运用曼宁公式计算得到塔河下游最大生态调度流量为 40  $\text{m}^3/\text{s}$ , 结合历年生态输水流量, 保证塔河一期规划有水到达台特玛湖, 据此确定塔河下游河道内最小生态流量为 15  $\text{m}^3/\text{s}$ <sup>[2]</sup>。

4) 年均河道内最小生态调度流量保证程度为 85%。

5) 多目标生态需水量: 河道内年最小生态需水量为 2.04  $\times 10^8$   $\text{m}^3$ <sup>[2]</sup>, 两河区间年生态需水量为 1.39  $\times 10^8$   $\text{m}^3$ <sup>[2]</sup>, 维系台湖适宜湖面面积的生态需水量约为 3  $\times 10^7$   $\text{m}^3$ <sup>[2]</sup>。

### 3.4 求解步骤

本文采用自迭代模拟优化算法, 在优化模型中融入人工经验进行求解, 算法技术路线如图 2, 求解步骤如下:

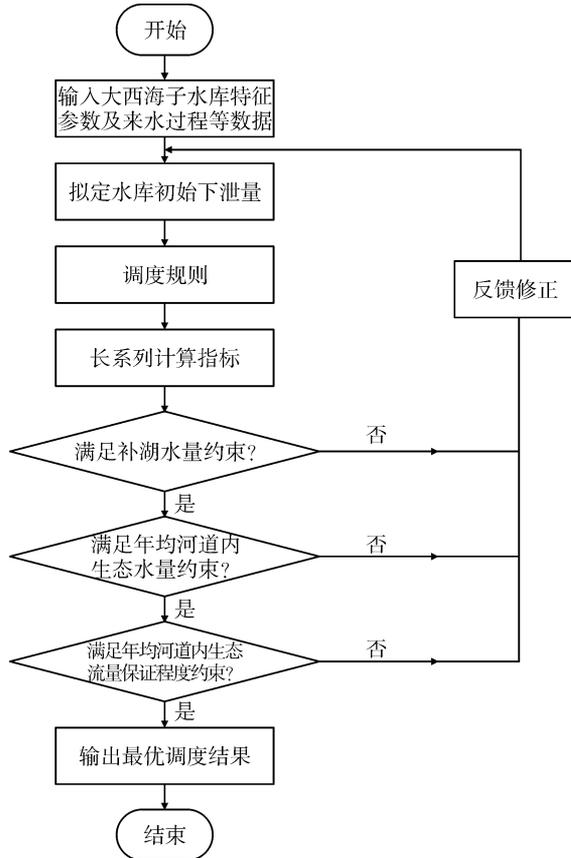


图 2 模型求解步骤  
Fig. 2 Model solving step

Step1: 输入基本资料, 包括大西海子水库特征参数及来水过程等数据;

Step2: 拟定初始下泄水量;

Step3: 根据融入人工经验的调度规则, 合理分配下泄水量;

Step4: 根据长系列计算指标及目标函数, 输出计算结果;

Step5: 判断输出是否满足补水水量约束, 若不满足则反馈修正, 重新拟定下泄水量; 若满足, 进入下一步;

Step6: 判断输出是否满足年均河道内水量约束, 若不满足则反馈修正, 重新拟定下泄水量; 若满足, 进入下一步;

Step7: 判断输出结果是否满足年均河道内生态流量保证程度约束, 若不满足则反馈修正, 重新拟定下泄水量; 若满足, 进入下一步;

Step8: 输出最优调度结果, 计算结束。

#### 4 实例应用

##### 4.1 调度范围及周期

本次水库生态调度的范围为从大西海子水库至尾间湖台湖。中长期调度以 2000 年 4 月至 2020 年 3 月共 20 年作为调度期, 以月为计算时段。

##### 4.2 生态输水方式及水库调度网络节点

1) 生态输水方式。①单通道输水, 在来水量较少的情形下, 利用其文阔尔河或老塔里木河其中的一条通道轮换输水; ②双通道输水, 利用其文阔尔河和老塔里木河两条通道同时输水; ③汉河输水, 在主河道输水过程中, 利用两岸自然分布的汉河实施生态输水, 扩大天然植被受水范围; ④面状输水, 在河道上修建壅水坝或节制闸, 营造河水漫溢条件, 扩大河道沿线受水范围<sup>[25]</sup>。

2) 水库调度网络节点。大西海子水库至阿拉干干段, 主河道分为东西两支, 西支为老塔里木河, 东支为其文阔尔河, 它们于阿拉干站汇合。地下水监测断面包括英苏、阿拉干、依干布及麻、台湖等。

结合塔里木河下游耗散型河段水资源开发利用现状, 绘制涵盖大西海子水库、水文站、3 个重要控制断面、河道生态闸和湖泊等节点在内的水库调度网络节点图, 如图 3 所示。通过优化调度, 实现了控制补水水量、保证河道内生态流量、提高两河区间生态供水的多生态目标。

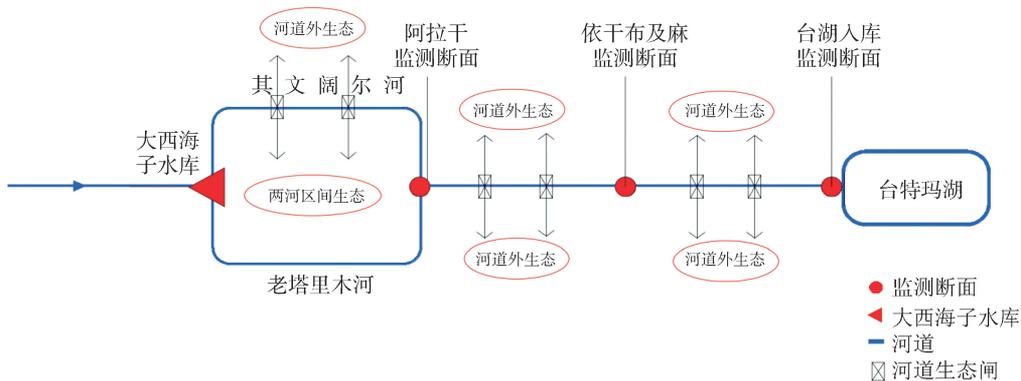


图 3 塔里木河下游大西海子水库生态优化调度节点  
Fig. 3 Ecological optimization scheduling node of Daxihaizi Reservoir in the lower reaches of Tarim River

### 4.3 多目标结果分析

为挖掘荒漠区平原水库的生态调度潜力,本文通过自主研发的漂流浮球勘测下游耗散型河段各断面的生态流量及其流达过程,以20年来大西海子水库生态输水后塔河下游各区域耗水过程作为实测能力,以转变新型调度模式后各区域水量变化过程作为优化潜力值,通过实测值、优化值及目标值三者的对比分析,揭示荒漠区平原水库调度能力和调度潜力之间的量化关系,主要包括水库调度过程分析、河道内外生态流量分析及补水水量分析。

#### 4.3.1 水库调度过程分析

在优化调度分析中,以大西海子水库长系列水位变化过程来验证模型及其算法的合理性。长系列水位变化过程见图4,下泄水量实测、优化调度过程见图5。

1) 经计算,2000年4月至2020年3月共241个月的中长期优化调度过程中,大西海子水库多年平均来水量5.25亿 $m^3$ ,多年出库下泄水量3.87亿 $m^3$ ,

入库、出库水量差额与大西海子水库库容、水位变化一致,蓄放水过程满足水量平衡,验证了优化调度结果的合理性、可靠性。

2) 大西海子水库的水位在死水位846.61m至正常蓄水位849.28m之间波动,符合水位约束条件,多年平均水位为847.99m;20年的中长期优化调度过程中,水库蓄满7次,库满率10.3%,放空33次,库空率46.6%,满足了水库年平均下泄水量3.5亿 $m^3$ 、有水到达台湖的基本目标,且大幅度提高了水库的运行效率。

3) 在水库下泄水量的刚性约束下,实测出库水量3年为零,出库水量变化呈现年内、年际分布极不均匀的特点,且出库水量主要集中在7~10月,导致枯水期河道断流,生态系统呈碎片化状态;从优化调度后出库水量的变化过程来看,水库4月起调,蓄水至10月集中下泄,枯水期均匀下泄,出库水量仅有1年为零,尽最大可能保障了河道内生态流量不为0,实现了年调节水库的“蓄丰补枯”作用。

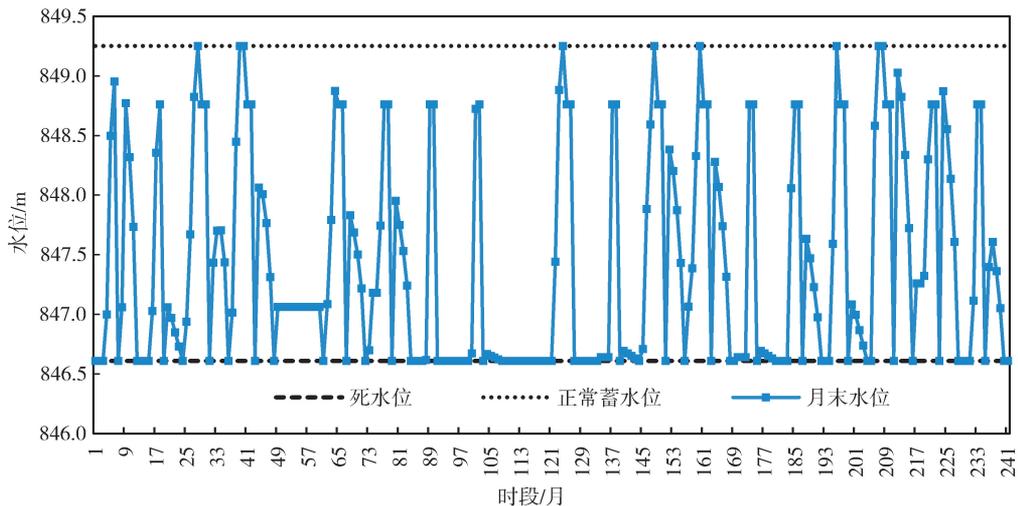


图4 长系列水位变化过程

Fig. 4 Long series of water level changes

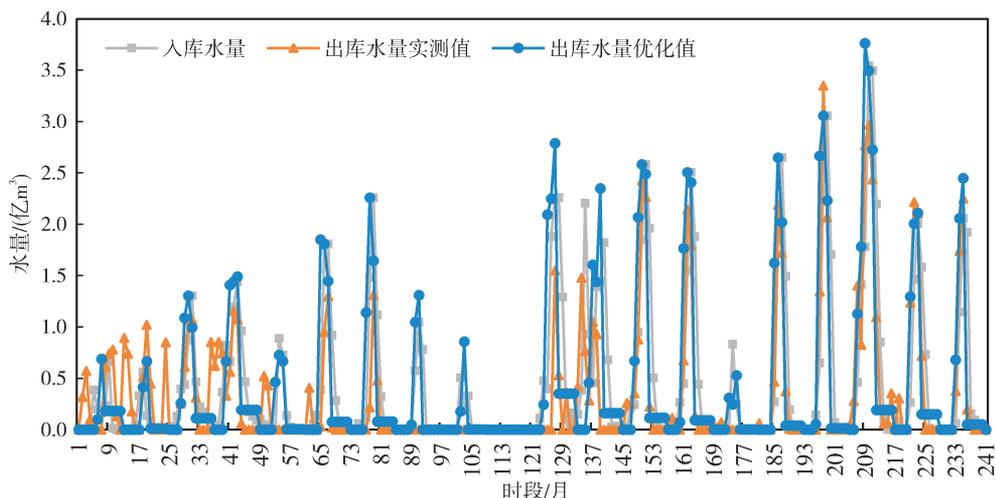


图5 大西海子水库下泄水量优化与实测调度过程对比

Fig. 5 Comparison between optimization of discharge water volume of Daxihaizi Reservoir and actual operation process

### 4.3.2 河道内生态流量分析

针对塔河下游河段耗散性严重、季节性断流且全年无稳定生态流量等实际问题,本文通过调节大西海子水库的调度模式,将塔河下游分为四个区段:

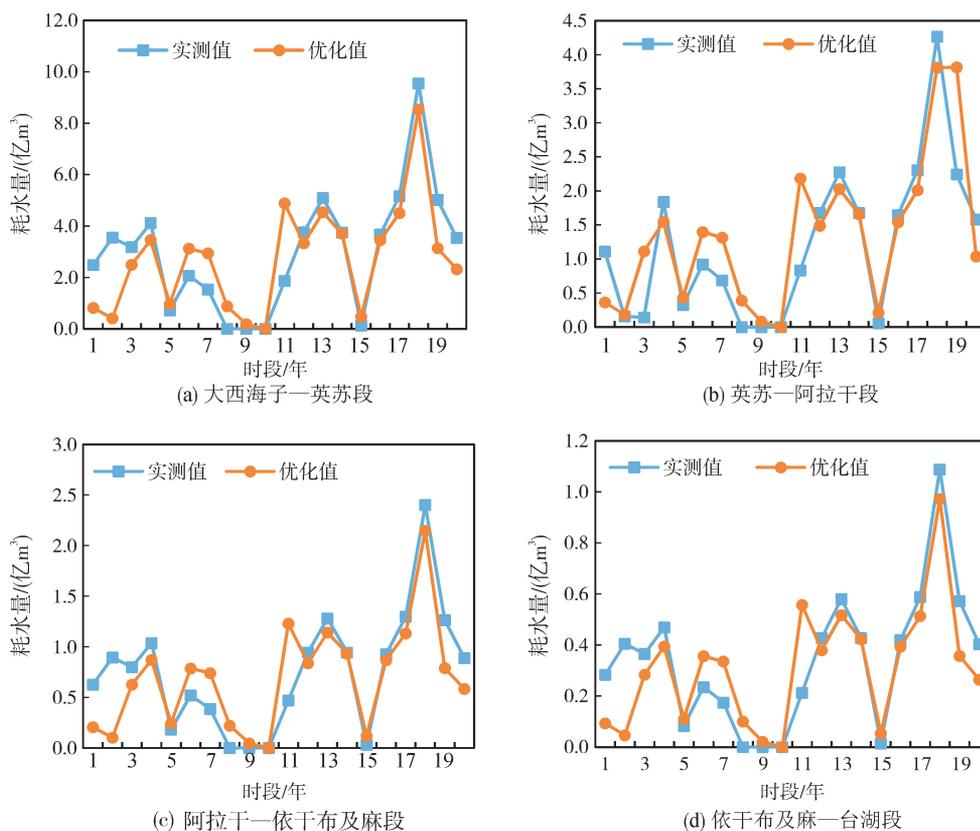


图 6 长系列实测、优化调度下各河段年平均耗水量对比

Fig. 6 Comparison of annual average water consumption of each river section under long-term measured and optimized operation

由图 6 可知。

1) 实测调度满足生态流量的月份占比 50.0%,生态流量不为 0 的年份占比 85.0%,河道内生态流量及不稳定。优化后,满足生态流量的月份占比提高 13.2%,年生态流量保证程度提高 15.0%,减少断流天数超过 1 500 天,且均满足设计保证率要求,验证了本文优化调度模式的有效性,大幅提高了下游河道两岸生态系统的完整性,维护了河岸保护性植被的稳定性。

大西海子—英苏段、英苏—阿拉干段、阿拉干—依干布及麻段、依干布及麻—台湖段。对比实测及优化后各区段年平均耗水量的差异性(见图 6),分析塔河下游各区段耗水过程。

2) 相较实测中大量生态水资源在河道内蒸发耗散的现状,优化后河道内各区段的蒸发损耗水量占比减小,有效保障了河道生态流量不为 0,为两河区间植被的生长发育奠定了坚实的水量基础。

### 4.3.3 补湖水量分析

研究表明,随着台湖面积的持续扩大,将严重危及区域生态环境健康<sup>[7]</sup>。因此,本节将通过优化调度,使台湖面积控制在合理区间。计算长系列优化调度前后的补湖水量过程,如图 7 所示。

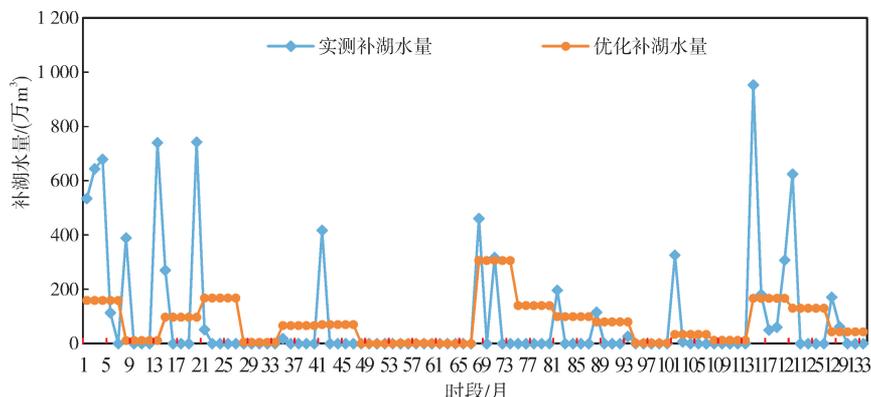


图 7 长系列台湖补湖水量的实测、优化调度过程

Fig. 7 Actual measurement and optimal operation process of lake rechargewater volume of the long series of Taihu Lake

1) 实测补湖水量多年平均 3 376 万  $\text{m}^3$ , 优化后补湖水量多年平均 3 086.45 万  $\text{m}^3$ , 较实测值减少了 289.5 万  $\text{m}^3$ , 有效控制了台湖面积, 减少了塔河下游生态水资源的无效蒸发。

2) 实测台湖补湖水量在 148 万  $\text{m}^3 \sim 10\ 882$  万  $\text{m}^3$  之间波动, 且连续 3 年补湖水量为 0, 补湖水量变化极不均匀。优化后补湖水量趋于均匀化, 补湖水量于 2002—2003 年出现最低值, 为 698 万  $\text{m}^3$ , 2010—2011 年出现最高值, 为 7 239 万  $\text{m}^3$ , 仅一年入湖水量为零, 在节省了大量生态水资源的同时, 大大提升了补湖水量的稳定性, 为稳定台湖周边生态

环境提供了有力保证。

#### 4.3.4 河道外生态水量分析

由 4.3.3 节可知, 优化调度后补湖水量减少至一定范围有利于保障台湖周边生态稳定性。将可供水量最大限度应用于河道外生态修复, 发挥塔河下游生态水资源的最大价值。

综合考虑河岸保护性植被的生长节律, 选定胡杨漂种的生态关键期 10 月令水库集中下泄, 尽可能保障胡杨等保护性植被的飘种、着床、萌发、生长与发育。优化调度前后每年 10 月两河区间的供水过程如图 8 所示。

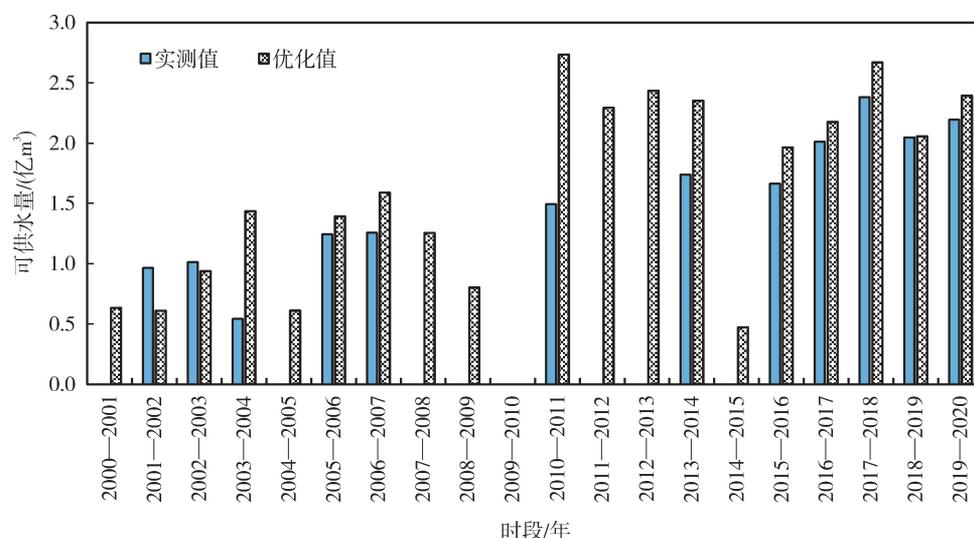


图 8 10 月河道外可供水量对比图

Fig. 8 Comparison map for available water supply outside river in October

1) 在胡杨漂种的关键生态期, 实测两河区间可供水量多年平均为 9 277 万  $\text{m}^3$ , 优化后两河区间可供水量平均增加 6 127 万  $\text{m}^3$ , 较实测值提高了 66%。大幅提高了河岸保护性植被的受水面积, 抬高了两河区间地下水位, 为建立“地下生态水银行”打下了坚实的水量基础。

2) 实测河道外供水变化明显, 且连续 3 年可供水量为 0。优化后供水变化趋于稳定, 在 3 年无入库水量的情况下, 仅 1 年无法供水, 为重建两河区间生态系统提供了重要保障。

综上所述, 通过采用新型调度模式, 水库优化潜力较实测能力得到显著提高, 最大限度满足了塔河下游多目标生态要求, 有效缓解了塔河下游区域水资源供需矛盾, 验证了大西海子水库显著的生态调度潜力。在水资源刚性约束下, 有效提高了生态水资源的集约利用效率, 提高了河道周边植被多样性和群落稳定性; 减少补湖水量, 重构区域水资源配置关系。

## 5 结 论

1) 以河道外可供生态水量最大为目标函数, 建立塔河下游多目标生态调度模型, 采用自迭代模拟优化算法并融入人工经验进行求解, 获得了水库中长期优化调度计算结果, 验证了模型的合理性、可靠性。

2) 在满足塔河一期综合治理规划目标的前提下, 结合耗散型河段的时空演变规律, 综合考虑两河区间生态系统变化的响应关系, 通过构建新型集约调度模式, 优化了塔河下游水资源配置, 保证在水资源刚性约束下实现塔河下游的生态效益最大化, 验证了荒漠区平原水库显著的生态调度潜力。

3) 量化了水库调度运行中耦合径流过程与生态系统变化的响应关系, 在采用新型调度模式后, 优化调度结果满足了两河区间植被生态需水、补湖水量、河道内生态流量保证程度的要求, 体现了干旱荒漠区水资源集约利用的治水方针。

本文仅考虑了塔河下游大西海子水库调度下的生态水资源优化配置,下一步将考虑补湖水量与河道外生态水量的胁迫关系,以寻求适宜的台湖面积对应的入湖水量与河道外最大生态供水量的阈值关系,从而进一步提高水资源集约利用效率,助力塔河生态体系修复。

#### 参考文献:

- [1] 刘哲杰,白涛,高凡,等. 面向生态系统多对象保护与修复的水库优化调度[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 410-418.  
LIU Zhejie, BAI Tao, GAO Fan, et al. Optimization of reservoir operation for multi-object protection and ecosystem restoration[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2):410-418.
- [2] 邓铭江,周海鹰,徐海量,等. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究[J]. 中国科学:技术科学, 2016, 46(8): 864-876.  
DENG Mingjiang, ZHOU Haiying, XU Hailiang, et al. Research on the ecological operation in the lower reaches of Tarim River based on water conveyance[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2016, 46(8):864-876.
- [3] 王光焰,王远见,桂东伟. 塔里木河流域水资源研究进展[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6):1151-1159.  
WANG Guangyan, WANG Yuanjian, GUI Dongwei. A review on water resources research in Tarim River Basin[J]. Arid Land Geography, 2018,41(6):1151-1159.
- [4] 李丽琴,王志璋,贺华翔,等. 基于生态水文阈值调控的内陆干旱区水资源多维均衡配置研究[J]. 水利学报, 2019,50(3):377-387.  
LI Liqin, WANG Zhizhang, HE Huaxiang, et al. Research of water resources multi-dimensional equilibrium allocation based on eco-hydrological threshold regulation in inland arid region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3):377-387.
- [5] 李均力,肖昊,沈占锋,等. 2013—2018 年塔里木河下游植被动态变化及其对生态输水的响应[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4):985-992.  
LI Junli, XIAO Hao, SHEN Zhanfeng, et al. Vegetation changes during the 2013-2018 period and its response to ecological water transport in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 985-992.
- [6] ZHANG Z, XIA F, YANG D, et al. Spatiotemporal characteristics in ecosystem service value and its interaction with human activities in Xinjiang, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 110: 105826.
- [7] 白涛,姬宏伟,邓铭江,等. 注重荒漠区胡杨林生态保护与修复的汉渗轮灌研究[J]. 水利学报, 2022, 53(1): 31-42.  
BAI Tao, JI Hongwei, DENG Mingjiang, et al. Study on the ditch rotation irrigation for ecological protection and restoration of populus euphratica forests in the desert area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(1): 31-42.
- [8] XIN D A, XM B, TH C, et al. Assessment of the environmental effects of ecological water conveyance over 31 years for a terminal lake in Central Asia[J]. CATENA, 2022, 208: 105725.
- [9] “十四五”水安全保障规划[J]. 中国水利, 2022(2): 11-24.
- [10] 徐海量,樊自立,杨鹏年,等. 塔里木河近期治理评估及对编制流域综合规划的建议[J]. 干旱区研究, 2016, 33(2):223-229.  
XU Hailiang, FAN Zili, YANG Pengnian, et al. Evaluation on the management of Tarim River and advices for the future planning of the Tarim River basin [J]. Arid Zone Research, 2016, 33(2):223-229.
- [11] 中国科学院新疆生态与地理研究所在塔里木河流域研究方面取得新进展[J]. 干旱区地理, 2006, 29(3):387.
- [12] CHEN Y, LI W, XU C, et al. Desert riparian vegetation and groundwater in the lower reaches of the Tarim River basin[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(2):547-558
- [13] 新疆维吾尔自治区人民政府. 塔里木河流域近期综合治理规划报告[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2002:1-5.
- [14] 王万瑞,艾克热木·阿布拉,陈亚宁,等. 塔里木河下游生态输水对地下水补给量研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 670-680.  
WANG Wanrui, AIKEREMU Abula, CHEN Yaning, et al. Groundwater recharge during ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3):670-680.
- [15] 樊自立,徐海量,傅蓁仪,等. 台特玛湖湿地保护研究[J]. 第四纪研究, 2013, 33(3):594-602.  
FAN Zili, XU Hailiang, FU Jinyi. Study on protection of wet land of Taitema Lake [J]. Quaternary Sciences, 2013, 33(3):594-602.
- [16] 魏召才. 塔里木河流域大西海子水库年径流分析[J]. 黑龙江水利科技, 2019, 47(7): 37,143.  
WEI Zhaocai. Annual runoff analysis of Daxihaizi Reservoir in Tarim River Basin[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2019, 47(7): 37,143.

- 40-49.
- XIONG Zhongming, CHEN Xuan, ZHONG Yaqiong, et al. Damage analysis and evaluation of frame structure spanning over ground fissure under seismic load[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(8): 40-49.
- [9] XIONG Zhongming, YANG Shuai, ZHANG Chao, et al. Shaking table test and numerical analysis of a new method for disaster control and reinforcement of frame structure crossing ground fissures[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 560(1): 012096.
- [10] 郭宏超,张博明,李晓蕾,等. 西安火车站东配楼复杂连体结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2022, 43(6):155-164.
- GUO Hongchao, ZHANG Boming, LI Xiaolei, et al. Shaking table test on complex connected structure of east annex building of Xi'an Railway Station[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(6):155-164.
- [11] 慕焕东. 地裂缝场地地震放大效应研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- MU Huandong. Study on theseismic amplification effect on site with ground fissure[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [12] 曹海韵,潘鹏,叶列平. 基于推覆分析混凝土框架摇摆墙结构抗震性能研究[J]. 振动与冲击,2011,30(11): 240-244.
- CAO Haiyun, PAN Peng, YE Lieping. Pushover analysis of RC frame rocking wall structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 240-244.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2015.
- [14] 郭宏超,雷天奇,蔡玉军,等. 西安火车站东配楼复杂连体结构振动台试验及数值模拟[J]. 振动与冲击, 2021,40 (17):76-84, 105.
- GUO Hongchao, LEI Tianqi, CAI Yujun, et al. Shaking table tests and numerical simulation for complex conjoined structure of east building of Xi'an Railway Station[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40 (17): 76-84, 105.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2016.

(责任编辑 周 蓓)

(上接第 104 页)

- [17] 买尔燕古丽·阿不都热合曼,艾里西尔·库尔班,阿迪力·阿不来提,等. 塔里木河下游胡杨物候特征观测[J]. 干旱区研究, 2008, 25(4):525-530.
- MARYAMGUL Abdurahman, ALISHIR Kurban, ADIL Ablat, et al. Study on phenological characters of populus euphratica oliv in the lower reaches of the Tarim River [J]. Arid Zone Research, 2008, 25 (4): 525-530.
- [18] 叶茂,徐海量,任铭. 塔里木河下游生态输水的合理时间初探[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 907-912.
- YE Mao, XU Hailiang, REN Ming. Primary study on the rational time of ecological water conveyance to lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(5): 907-912.
- [19] 白涛,阚艳彬,畅建霞,等. 水库群水沙调控的单-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.
- [20] BAI T, CHANG J X, HUANG F J, et al. Synergistic gains from the multi-objective optimal operation of cascade reservoirs in the upper Yellow River basin[J]. Journal of Hydrology, 2015, 523:758-767.
- [21] MOHAMMAD A A, MOHAMMAD E B, AMIN S C, et al. Evolving artificial neural network and imperialist competitive algorithm for prediction oil flow rate of the reservoir[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13 (2):1085-1098.
- [22] SAATY T L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. International Journal of Services Sciences, 2008, 1(1): 83-98.
- [23] SINHA A, KORHONEN P, WALLENIUS J, et al. An interactive evolutionary multi-objective optimization algorithm with a limited number of decision maker calls [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 233(3):674-688.
- [24] DEB K, KUMAR A. Interactive evolutionary multi-objective optimization and decision-making using reference direction method[J]. ACM, 2007: 781-788.
- [25] 邓铭江,黄强,畅建霞,等. 大尺度生态调度研究与实践[J]. 水利学报, 2020, 51(7):757-773.
- DENG Mingjiang, HUANG Qiang, CHANG Jianxia, et al. Large-scale ecological operation research and practice[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7):757-773.

(责任编辑 周 蓓)