

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.021

# 塔里木河“二源一干”生态供水潜力研究

白涛<sup>1</sup>, 洪良鹏<sup>1</sup>, 李江<sup>2</sup>, 刘东<sup>1</sup>, 巨驰<sup>1</sup>, 王光焰<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048;  
2. 新疆水利水电规划设计管理局, 新疆 乌鲁木齐 830099;  
3. 新疆塔里木河流域干流管理局, 新疆 乌鲁木齐 830018)

**摘要:**为解决塔里木河干流水资源短缺、流域损失水量过大、用水效率低下、农业灌溉用水挤占生态用水等问题,基于“节水优先”的治水方针,以塔里木河二源流(阿克苏河、叶尔羌河)及其干流(“二源一干”)的山区水库群和平原水库群为研究对象,兼顾塔里木河干流的农业灌溉用水、生态用水、工业用水、生活用水等多目标,构建并求解了现状水平年和远景规划年的山区与平原水库群联合调度优化模型,分析了塔里木河干流的生态供水潜力和山区水库群联合调度的贡献。结果表明:仅通过干流平原水库群联合调度,农业灌溉用水和生态用水的供水保证率难以满足设计要求;通过山区与平原水库群优化调度,在远景规划年各行业均满足设计保证率要求,体现了山区水库群显著的调控性能和“节水优先”治水方针的合理性和可靠性;远景规划年塔里木河干流的生态供水潜力为2.84亿m<sup>3</sup>,可为塔里木河下游生态保护与修复提供了坚实的水量基础。

**关键词:**生态供水潜力;水资源调配;山区与平原水库群;节水优先;塔里木河流域

**中图分类号:**TV697.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0158-08

**Study on ecological water supply potential in two source streams and one main stream of the Tarim River** // BAI Tao<sup>1</sup>, HONG Liangpeng<sup>1</sup>, LI Jiang<sup>2</sup>, LIU Dong<sup>1</sup>, JU Chi<sup>1</sup>, WANG Guangyan<sup>3</sup> (1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Planning and Design Administration, Urumqi 830099, China; 3. Xinjiang Tarim River Basin Authority, Urumqi 830018, China)

**Abstract:** In order to solve the problems such as water resources shortage, excessive water loss, low water use efficiency, agricultural irrigation water squeezes ecological water, based on the water control policy of "water conservation priority", the mountainous reservoirs and plain reservoirs in the two source streams of the Tarim River (Aksu River, Yeerqiang River) and its main stream ("two source streams and one main stream") are taken as the research objects. Considering the multiple objectives of agricultural irrigation water, ecological water, industrial water and domestic water in the mainstream of Tarim River, an optimization model for joint operation of reservoirs in mountainous areas and plains in the current level year and the long-term planning year is constructed and solved, and the ecological water supply potential of the mainstream of Tarim River and the contribution of joint operation of reservoirs in mountainous areas are analyzed. The results show that the guarantee rate of agricultural irrigation and ecological water supply cannot meet the design requirements only through the joint operation of reservoirs in the mainstream plain. Through the optimal operation of reservoir groups in mountainous areas and plain areas, all industries meet the design assurance rate requirements in the long-term planning year, reflecting the remarkable regulation performance of reservoirs in mountainous areas and the rationality and reliability of the water control policy of "water saving first". The ecological water supply potential of the mainstream of Tarim River in the long-term planning year is 284 million m<sup>3</sup>, which can provide a solid water volume basis for ecological protection and restoration in the lower reaches of the Tarim River.

**Key words:** water supply potential; water resources allocation; mountain area and plain reservoir group; water saving priority; Tarim River Basin

**基金项目:**国家自然科学基金(52179025);新疆维吾尔自治区水利厅规设局项目(403-1005-YBN-FT61)

**作者简介:**白涛(1983—),男,副教授,博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: baitao@xaut.edu.cn

随着社会经济的快速发展和世界人口的不断增长,以及人类对水资源不合理的开发利用,引起诸如河道断流、河岸植被萎缩、农业用水挤占生态用水及生态环境恶化等问题<sup>[1]</sup>。同时,干旱荒漠区大量平原水库的修建,导致河道内沿程及库区的蒸发渗漏损失过大,水资源供需矛盾进一步加大,农业灌溉用水挤占生态用水形势严峻,加剧了流域尺度内的生态环境恶化。面对我国水资源刚性约束紧张的形式,需坚持节水优先,充分挖掘节水潜力,以实现水资源节约集约利用和流域生态保护与修复<sup>[2]</sup>。因此,在水资源集约利用、流域生态保护与高质量发展的背景下,如何开展基于节水优先和重大工程布局规划的生态调度,充分利用流域水资源的供水潜力,是目前国内外学者研究的焦点问题之一。

生态调度是在兼顾水库调度的社会效益、经济效益的基础上,重点考虑生态因素的水库调度新模式<sup>[3-4]</sup>。国外做了大量研究,Steinschneider等<sup>[5]</sup>开发了大尺度优化调度模型,探索了大型水电站优化运行管理对生态效益的贡献;TSAI等<sup>[6]</sup>利用人工智能技术量化了河流生态系统需求,制定了适当的流量控制制度,通过优化水库的调度过程达到保护生态的目的;Murphy等<sup>[8]</sup>研究了水库出库的水温和水质变化对下游水生生物群落的影响,为制定水库生态调度策略提供了理论支撑。国内相关研究起步较晚,但发展迅速。王立明等<sup>[9]</sup>根据干旱风沙河道生态修复目标,结合水库的防洪、兴利、生态调度,建立了多目标水库生态调度模型,研究了漳河岳城水库的生态调度;黄志鸿等<sup>[10]</sup>基于大系统分解协调技术和DP求解了以生态缺水率和综合缺水率为目标的水库群生态调度模型;金菊良等<sup>[11]</sup>为定量分析评价水资源空间均衡状况和空间差异,采用联系数和耦合协调度相结合的方法对区域水资源空间均衡进行评价;白涛等<sup>[12]</sup>建立并求解了以生态缺水量和社会经济缺水量最小为目标的水库群生态优化调度模型。

20世纪以来,我国针对塔里木河生态做了许多研究。孟丽红等<sup>[13]</sup>开展了新疆塔里木河流域水资源承载力评价研究,认为该流域水资源供需矛盾突出,水资源承载能力已接近极限;黄强等<sup>[14]</sup>建立了以缺水量最小为目标的水资源优化配置模型,对塔里木河干流及叶尔羌河的近远期水资源配置提出了建议;魏光辉等<sup>[15]</sup>对塔里木河“四源一干”可承载灌溉面积做了研究,为流域水资源配置及区域可持续发展提供理论依据;廖淑敏等<sup>[16]</sup>分析了输水前后塔里木河下游地下水埋深和夏季归一化差异植被指数(NDVI)的时空变化,揭示了塔里木河下游对生态

输水的累积生态响应规律;李东林等<sup>[17]</sup>基于Nerlove方法,以区域农业用水收益最大为目标,构建了塔里木河流域农业水资源优化配置模型;白涛等<sup>[18]</sup>基于荒漠区耐旱性植被胡杨特殊的生物节律,提出汉渗轮灌的灌溉理念,构建了汉渗轮灌系统和灌溉模式,搭建了汉渗轮灌的基本框架。

目前,塔里木河的研究多集中于水资源承载力、水资源配置、塔里木河生态输水的影响等方面,缺少关于生态供水潜力的研究;而水库生态调度也多以个别水库和局部河段为研究对象,分析不同调度目标、模型以及求解方法对生态调度结果的影响,缺少基于节水优先的大流域、长系列、大规模水库群生态调度的研究。鉴于此,本文在水资源综合利用的原则指导下,基于节水优先和重大工程布局规划,以塔里木河二源流(阿克苏河、叶尔羌河)及其干流(“二源一干”)的山区水库群和平原水库群为研究对象,开展基于生态保护和修复的塔里木河流域水资源调配研究,旨在揭示流域生态供水潜力,为流域水资源的科学管理提供参考。

## 1 研究区概况

塔里木河是世界第五大内陆河,是中国第一长内陆河,也是南疆各族人民赖以生存、繁衍和发展的“生命河”“母亲河”,具有自然资源相对丰富和生态环境极端脆弱双重特性。图1为塔里木河概况,流域总面积102.7 km<sup>2</sup>,其国内100.27 km<sup>2</sup>,国外2.44 km<sup>2</sup>,占我国国土总面积的9.41%,由47%的山区、22%的平原和31%的沙漠组成,流域年均降水量仅为60 mm,年均蒸发量3 000 mm以上<sup>[19]</sup>。流域分源流区和干流区,干流不产流,水量来自源流,流域地表水年内分配极不均衡,春秋水量小,夏季偏丰,冬季最小,6—9月水量占全年70%~80%<sup>[20]</sup>。由于人类活动与气候变化的影响,目前源流中只有阿克苏河、叶尔羌河、和田河有水汇入塔里木河干流上



图1 塔里木河流域概况

Fig. 1 Overview of the Tarim River Basin

游。塔里木河下游的胡杨林是天山东南部连接昆仑山的“绿色走廊”，是区域社会经济持续发展的最基本物质基础<sup>[20]</sup>。

a. 灌溉工程布局规划。2019 现状水平年，干流高效节水灌溉面积共 8 267 hm<sup>2</sup>，综合灌溉水利用系数 0.39，农业灌溉总需水量 10.35 亿 m<sup>3</sup>。2035 远景规划水平年，高效节水灌溉面积达到 38 667 hm<sup>2</sup>，三级渠道防渗基本完成，综合灌溉水利用系数达到 0.55，农业灌溉总需水量 6.18 亿 m<sup>3</sup>，比现状水平年减少 4.17 亿 m<sup>3</sup>。

b. 水利工程布局规划。2019 现状水平年，研究区域已建的大型山区水库有叶尔羌河的 AETS 水库。2035 远景规划水平年，研究区域新增的大型山区水库有阿克苏河的 DSX 水库和 AK 水库。在不同规划水平年，干流区平原水库群规模均维持不变，总调节库容为 2.00 亿 m<sup>3</sup>。干流平原水库主要包括结然力克、大寨、其满、帕满、喀尔曲尕和塔里木等水库。

塔里木河地处欧亚大陆腹地，远离海洋，是典型的极端干旱沙漠气候，具有降水稀少、蒸发强烈等特点。流域径流主要靠冰川融雪和山区降水补给，水资源总体较为匮乏，且存在时空分布不均的问题。随着塔里木河流域经济社会的不断发展，对塔里木河流域水资源的开发力度与规模也在不断加大。目前，塔里木河流域山区水库较少，对流域中下游的水资源调蓄能力较差，且塔河干流蒸发渗漏水量损失较大，导致流域中下游常出现断流甚至干涸现象。塔里木河流域农业灌溉用水量较大，流域高效节水工程建设规模较小，农业灌溉仍以常规灌溉为主，存在水资源开发利用程度低、综合效益差等问题。因此，亟需在塔里木河流域山区修建调蓄水库，加强对水资源的调配，在实现农业高效节水灌溉的同时，最大限度地减少干流蒸发渗漏损失，改善和修复流域生态系统，维持河道和湿地的生态健康。

## 2 水资源调配模型

### 2.1 流域系统网络节点图构建

根据流域内重点控制性水利工程的布局调整原则，确定了塔里木河干流水库群联合调配格局，绘制了塔里木河水资源调配网络节点，如图 2 所示。

### 2.2 调配依据

调配依据包括：①满足水资源综合利用原则，严格控制水资源开发总量；②水库应按照工业生活、生态基流、农业灌溉、河道外生态等供水优先次序供水，并保证工业生活、生态基流、农业灌溉、河道外生态等供水保证率分别为 95%、90%、75%、50%；③满足大西海子多年平均下泄 3.5 亿 m<sup>3</sup> 设计要求。中长期调配以 1958 年 5 月至 2019 年 4 月为调配期，以月为计算时段。

### 2.3 调配模型的建立与求解

在满足流域水资源综合利用的原则下，兼顾工业生活、农业灌溉、河道内生态基流及河道外生态供水等目标，建立塔里木河“二源一干”水库群中长期模拟和优化调配模型。

#### 2.3.1 模拟模型

以流域内水量平衡为原则，建立兼顾工业生活、农业灌溉、河道内生态基流、河道外生态供水等综合利用目标的中长期多目标模拟调配模型，旨在获得各综合利用目标合理的供水量及其供水保证率。水资源调配的模拟模型是以流域水量平衡方程为基础：

$$\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T W_{Cnt} + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T W_{Rmt} = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T W_{Git} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T W_{outjt} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \Delta W_{jt} + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \Delta V_{nt} \quad (1)$$

式中： $W_{Cnt}$ 、 $W_{Rmt}$ 、 $W_{Git}$ 、 $W_{outjt}$ 、 $\Delta W_{jt}$ 、 $\Delta V_{nt}$  分别为

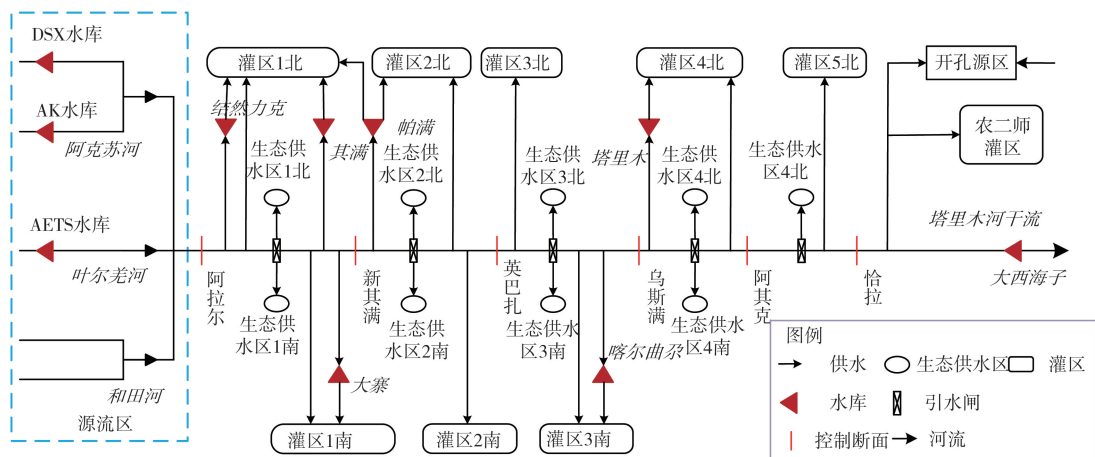


图 2 塔里木河流域水资源调配网络节点

Fig. 2 Network node of water resources allocation in the Tarim River Basin



水库出库水量、支流来水量、各行业的供水量、断面下泄水量、河段损失水量和水库蓄放水量, 亿  $m^3$ ;  $n$  为水库编号;  $m$  为支流编号;  $i$  为用水单元编号;  $j$  为断面编号;  $t$  为调配时段编号。

约束条件包括水库水量平衡约束、库容约束、供水约束(各用水行业约束和生态基流约束)、出力约束以及变量非负约束(工业生活、农业灌溉、河道外生态供水量、河道内入流量均为非负值), 计算公式为

$$W_{Lnt} = W_{Gnt} \pm W_{XFnt} + W_{Snt} \quad (2)$$

$$V_{nmin} \leq V_{nt} \leq V_{nmax} \quad (3)$$

$$Q_{Git} \leq Q_{Xit} \quad (4)$$

$$Q_{GSi} \leq Q_{XS_i} \quad (5)$$

$$N_{nmin} \leq k_{elen} Q_{elent} H_{elent} \leq N_{nmax} \quad (6)$$

式中:  $W_L$ 、 $W_G$ 、 $W_{XF}$ 、 $W_S$  分别为水库来水量、供水量、蓄放水量和水库损失水量, 亿  $m^3$ ;  $V_{nmin}$ 、 $V_{nmax}$  分别为水库的最小库容和最大库容, 亿  $m^3$ ;  $Q_G$ 、 $Q_X$  分别为供水量、需水量, 亿  $m^3$ ;  $k_{ele}$ 、 $Q_{ele}$ 、 $H_{ele}$  分别为水电站出力系数、发电流量、发电水头;  $N_{min}$  和  $N_{max}$  分别为水电站出力的下限和上限。

按照水资源调配依据, 采取人机对话模拟优化算法求解<sup>[21]</sup>模型。算法的技术路线见图 3。

### 2.3.2 优化模型

以流域内节水量最大为目标函数, 建立兼顾工业生活、农业灌溉、河道内生态基流、河道外生态供水等综合利用目标的中长期多目标优化调配模型如下:

$$\max(\Delta W_{lo} + \Delta V_{st}) = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T W_{Rmt} - \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T Q_{Git} \Delta t + \sum_{n=1}^3 \sum_{t=1}^T \Delta V_{nt} \quad (7)$$

式中:  $\Delta W_{lo}$ 、 $\Delta V_{st}$  分别为干流损失水量的减少量和源流区水库群蓄水量的增加量。优化模型的约束条件与模拟模型一致。

该模型是一个单目标优化模型, 所涉及的水库数目多、时间尺度长, 属于大规模、多约束、非线性的

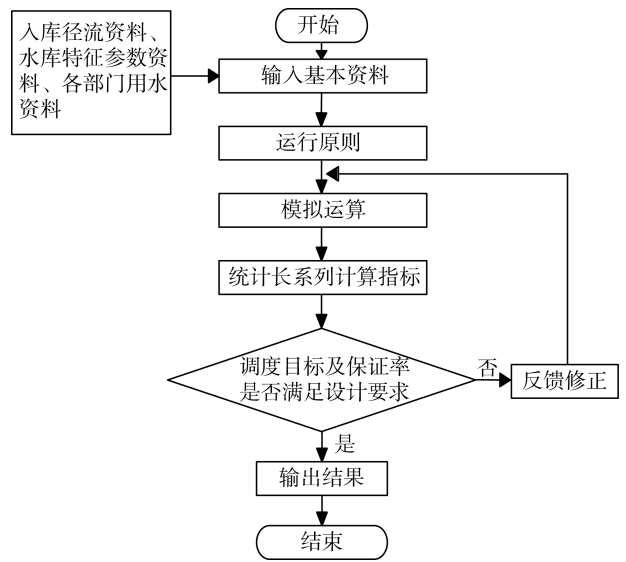


图 3 人机对话模拟优化算法求解流程

Fig. 3 Solution flow of man-machine simulation optimization algorithm

复杂优化问题。因此采用人工智能算法中应用较为广泛的遗传算法<sup>[22-23]</sup>求解水库群长系列优化调配模型, 种群数量为 200, 迭代次数为 300, 交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.1。

## 3 方案设置

### 3.1 基本资料与参数

本文所需资料主要有径流资料、需水资料以及工程资料。径流资料由塔里木河流域管理局提供, 包括阿克苏河协和拉、沙里桂兰克、叶尔羌河喀群、伊尔列黑、库鲁克栏干、玉孜门勒克(江卡)等站点 1958—2019 年的月尺度径流资料。需水资料包括 2019 现状水平年和 2035 远景规划水平年的工业生活、农业灌溉、河道外生态及生态基流的需水资料, 各水平年塔河干流区间行业需水情况见表 1。工程资料主要包括 AETS、DSX、AK 等山区水库和结然力克水库、大寨水库、其满水库、帕满水库、喀尔曲尕水库和塔里木水库等干流平原水库等水库特征参数(表 2)。

表 1 各水平年塔里木河干流区间行业需水情况

单位: 亿  $m^3$

Table 1 Industrial water demand in mainstream of the Tarim River in each level year

unit:  $10^8 m^3$

区间	2019 年				2035 年			
	工业生活	生态基流	农业灌溉	河道外生态供水	工业生活	生态基流	农业灌溉	河道外生态供水
阿-新	0.05	16.71	3.44	4.20	0.09	16.71	2.07	4.20
新-英	0.02	12.83	4.49	5.64	0.03	12.83	2.46	5.64
英-乌	0.03	9.04	1.87	3.62	0.34	9.04	1.33	3.62
乌-阿	0.01	5.89	0.28	1.29	0.03	5.89	0.16	1.29
阿-恰	0.01	2.3	0.27	1.51	0.02	2.3	0.16	1.51

注: 阿-新、新-英、英-乌、乌-阿、阿-恰分别指阿拉尔至新其满、新其满至英巴扎、英巴扎至乌斯满、乌斯满至阿其克、阿其克至恰拉。



表2 各水库的起调水位及库容

Table 2 Starting water level and storage capacity of each reservoir

水库	死水位/m	正常蓄水位/m	死库容/亿 m <sup>3</sup>	调节库容/亿 m <sup>3</sup>	总库容/亿 m <sup>3</sup>
AETS	1760	1820	8.69	12.61	22.49
DSX		1700	8.50	5.20	13.70
AK	2406	2465	0.41	6.76	7.73
结然力克			0.09	0.59	0.68
大寨			0.04	0.21	0.25
其满			0.33	0.32	0.65
帕满			0.02	0.46	0.48
喀尔曲尕			0.01	0.17	0.18
塔里木			0.02	0.25	0.27

### 3.2 情景方案

考虑到塔里木河“二源一干”水库群的调蓄能力,本文在2019现状水平年、2035远景规划水平年条件下分别设置3个不同情景的调配方案展开研究。情景1:干流水库群模拟调配。仅考虑干流区平原水库群的调蓄能力,开展中长期长系列模拟调配,获得干流水库群生态调配的本底值。情景2:塔河“二源一干”水库群模拟调配。将阿克苏河和叶尔羌河源流区山区水库群和干流区平原水库群联合,开展中长期长系列模拟调配,获取流域水库群生态调配的能力值。情景3:塔河“二源一干”水库群优化调配。充分调动两源流区山区水库群的调节潜能,并联合干流平原水库群开展中长期长系列优化调配,获取流域水库群生态调配的潜力值。

## 4 结果与分析

### 4.1 长系列调配结果

#### 4.1.1 现状水平年

在现状水平年参与调配的源流区水库仅有叶尔羌河的AETS水库。通过1958—2019年长系列模拟(情景1、情景2)与优化(情景3)调配计算,2019现状水平年干流各行业供水保证率如表3所示,河道外生态供水情况如图4所示。

由表3和图4可见,现状水平年各情景调配结果均不理想,除生活工业供水满足设计要求外,其余

表3 2019现状水平年塔里木河干流各行业供水保证率

Table 3 Water supply assurance rate of various industries in the mainstream of Tarim River in 2019

区间	工业生活用水			生态基流			农业灌溉用水			河道外生态供水		
	情景1	情景2	情景3	情景1	情景2	情景3	情景1	情景2	情景3	情景1	情景2	情景3
阿-新	100	100	100	77	82	82	49	49	51	36	39	41
新-英	100	100	100	87	90	90	36	48	48	39	44	44
英-乌	100	100	100	90	92	90	54	62	66	57	59	59
乌-阿	100	100	100	93	92	90	98	98	98	59	64	64
阿-恰	100	100	100	97	95	93	75	75	75	66	66	66

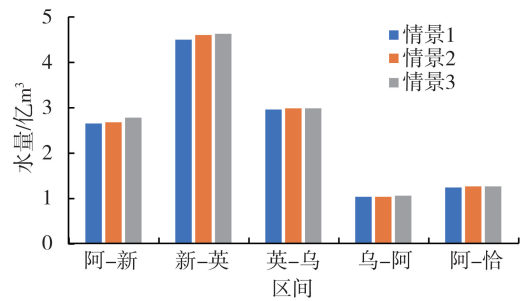


图4 2019年各区间河道外生态供水

Fig. 4 Ecological water supply outside the river in each section in 2019

均有部分区间的生态基流、农业灌溉或河道外生态供水不满足设计要求。情景1、情景2、情景3的干流损失水量分别为17.6亿m<sup>3</sup>、17.28亿m<sup>3</sup>、17.04亿m<sup>3</sup>,大西海子多年平均下泄水量分别为3.86亿m<sup>3</sup>、3.63亿m<sup>3</sup>、3.50亿m<sup>3</sup>。与情景1相比,情景2可改善干流生态调配结果。其中,生态基流保证率提高1%~5%、农业灌溉供水保证率提高0%~12%、河道外生态供水保证率提高0%~5%,河道外生态供水总量增加0.14亿m<sup>3</sup>,大西海子下泄水量减少0.23亿m<sup>3</sup>,干流河道损失水量减少0.32亿m<sup>3</sup>。与情景2相比,情景3的干流生态调配结果更好。其中,农业灌溉供水保证率提高0%~4%、河道外生态供水保证率提高0%~2%,河道外生态供水总量增加0.16亿m<sup>3</sup>,恰拉下泄水量减少0.13亿m<sup>3</sup>,干流河道损失水量减少0.24亿m<sup>3</sup>。在现状水平年中,情景3调度结果最好,情景2次之,情景1最差,主要原因是情景3有源流区AETS水库参与优化调配,而情景2有源流区AETS水库参与的模拟调配,情景1只有干流平原水库群参与的模拟调配;各情景中除工业生活供水和大西海子多年平均下泄水量满足设计要求外,其余行业均不满足设计保证率要求,主要原因是在现状水平年塔河干流农业灌溉用水量过多,严重挤占生态用水,且现状水平年塔河源流区水库群总调节库容较小,对于干流来水的调节能力有限。

#### 4.1.2 远景规划水平年

考虑到塔河流域的重大工程布局调整,即增加

单位: %

unit: %

高效节水灌溉面积,增加源流区水库(DSX、AK 水库)参与调配。通过 1958—2019 年长系列模拟(情景 1、情景 2)与优化(情景 3)调配计算,2035 远景规划水平年干流各行业供水保证率如表 4 所示,河道外生态供水情况如图 5 所示。

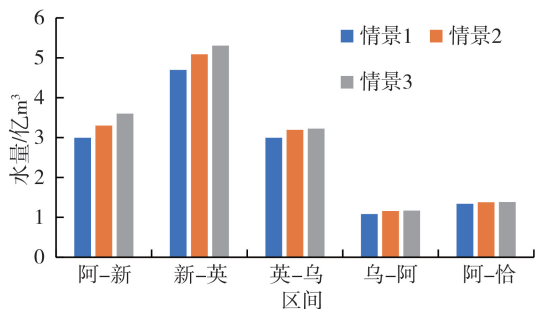


图 5 2035 年各区间河道外生态供水

Fig. 5 Ecological water supply outside the river in each section in 2035

由表 4 和图 5 可见,在远景规划年,情景 3 调配结果均满足各行业设计保证率要求,而情景 1、情景 2 调配结果均有部分区间的生态基流、农业灌溉或河道外生态供水不能够满足设计保证率要求。情景 1、情景 2、情景 3 的大西海子水库多年平均下泄水量分别为 5.05 亿 m<sup>3</sup>、4.10 亿 m<sup>3</sup>、3.73 亿 m<sup>3</sup>,均满足 3.5 亿 m<sup>3</sup> 下泄要求,干流损失水量分别为 20.02 亿 m<sup>3</sup>、18.59 亿 m<sup>3</sup>、18.01 亿 m<sup>3</sup>。与现状年情景 1 相比,在远景规划年,各行业供水保证率均大幅度提高、河道外生态供水总量增加。其中,生态基流保证率提高到 75%~98%、农业灌溉供水保证率提高到 75%~100%、河道外生态供水保证率提高到 44%~72%,河道外生态供水总量增加了 0.67 亿 m<sup>3</sup>。说明农业灌溉节水能有效缓解甚至消除农业灌溉用水

表 4 2035 远景规划水平年塔里木河干流各行业供水保证率

Table 4 Water supply assurance rate of each industry in the mainstream of Tarim River in 2035 long-term planning level year

区间	工业生活用水/%			生态基流/%			农业灌溉用水/%			河道外生态供水/%		
	情景 1	情景 2	情景 3	情景 1	情景 2	情景 3	情景 1	情景 2	情景 3	情景 1	情景 2	情景 3
阿-新	100	100	100	75	89	90	85	92	95	44	52	61
新-英	100	100	100	87	90	90	92	100	97	49	67	70
英-乌	100	100	100	90	90	90	75	82	82	61	67	70
乌-阿	100	100	100	95	93	90	100	100	100	67	75	79
阿-恰	100	100	100	98	97	90	77	87	93	72	80	84

表 5 塔里木河干流多年平均损失水量及其节水量

Table 5 Average annual water loss and water saving in the mainstream of Tarim River

年份	情景 1		情景 2		情景 3		
	损失水量/亿 m <sup>3</sup>	损失水量/亿 m <sup>3</sup>	蓄水量/亿 m <sup>3</sup>	节水量/亿 m <sup>3</sup>	损失水量/亿 m <sup>3</sup>	蓄水量/亿 m <sup>3</sup>	节水量/亿 m <sup>3</sup>
2019	17.6	17.28	0	0.32	17.04	0.03	0.59
2035	20.02	18.59	0.04	1.47	18.01	0.12	2.13

与生态用水之间的矛盾,验证了节水优先治水方针的合理性和可靠性。在现状水平年和远景规划年,各情景干流损失水量均逐渐减少,相比于情景 1,情景 2 分别减少 0.32 亿 m<sup>3</sup>、1.43 亿 m<sup>3</sup>,情景 3 分别减少 0.56 亿 m<sup>3</sup>、2.01 亿 m<sup>3</sup>。说明山区水库的修建与运行,可有效减少干流沿程的河道损失水量和平原水库的损失水量,缓解流域水资源供需矛盾。与现状水平年情景 2、情景 3 相比,远景规划年情景 2、情景 3 中各行业供水保证率均大幅度提高,且河道外生态供水总量增加。其中,情景 2 仅阿-新区间生态基流未满足设计保证率要求,而情景 3 各行业供水保证率均满足设计保证率要求,且情景 2、3 河道外生态供水总量分别增加 1.54 亿 m<sup>3</sup>、1.96 亿 m<sup>3</sup>,体现了修建源流区山区水库的必要性和“节水优先”治水方针的合理性和可靠性。在现状水平年和远景规划年,优化调配模型计算的河道外生态供水、大西海子下泄水量、各行业供水保证率及损失水量等均比模拟模型结果更好,特别是河道外生态供水和大西海子多年平均下泄水量显著提升,其中河道外生态供水总量分别提高 0.16 亿 m<sup>3</sup>、0.56 亿 m<sup>3</sup>;恰拉下泄水量分别减少 0.13 亿 m<sup>3</sup> 和 0.37 亿 m<sup>3</sup>。

#### 4.2 生态供水潜力

通过塔河流域重大工程布局规划、干流农业节水灌溉工程建设增加了干流可供水资源量,缓解了农业用水挤占生态用水的局面。由于塔里木河源流区山区水库群的建设与运行,显著提升了干流水资源的调控能力,使多余水量存蓄在山区水库中,减少了干流沿程的河道和平原水库的水量损失,增加了干流可供水量。二源流水库群调配下塔里木河干流多年平均损失水量及其节水量如表 5 所示。

从表 5 可见,相比于仅干流平原水库群联合调配,“二源一干”水库群模拟和优化调配情景下的塔河干流损失水量均显著下降,且水库群蓄水量增加,表明源流山区水库群联合调配的节水效果突出。随着源流区大型水利工程陆续建成并投入运行,到 2035 远景规划水平年,塔河干流的节水量为 2.13 亿 m<sup>3</sup>,即新增的生态或农业灌溉供水量为 2.13 亿 m<sup>3</sup>。

由于 2035 远景规划水平年农业灌溉保证率远大于设计要求,因此,为充分挖掘塔河干流最大的生态供水潜力,将农业灌溉超出设计保证率的水量按照 50% 的供水破坏深度计算(工业、生活用水量较少,节水潜力可忽略),多余的水量作为生态可供水量。通过农业节水得到的生态可供水量如表 6 所示。

表 6 2035 年塔里木河干流生态可供水量

Table 6 Ecological available water supply in the mainstream of Tarim River in 2035

区间	农业灌溉实际供水量/亿 m <sup>3</sup>	农业灌溉最小供水量/亿 m <sup>3</sup>	农业节水得到的生态可供水量/亿 m <sup>3</sup>
阿-新	2.06	1.82	0.24
新-英	2.46	2.15	0.31
英-乌	1.28	1.16	0.12
乌-阿	0.16	0.14	0.02
阿-恰	0.16	0.14	0.02
总计	6.12	5.41	0.71

由表 6 可知,在 2035 规划水平年,农业灌溉实际供水量为 6.12 亿 m<sup>3</sup>,最小供水量为 5.41 亿 m<sup>3</sup>,生态最大可供水量为 0.71 亿 m<sup>3</sup>。

将表 5 塔河干流的节水量与表 6 的农业灌溉节水量相累加,即为塔河干流的生态供水潜力。相比于 2019 现状水平年仅考虑干流平原水库群的调配结果,在不考虑沿程河道水量损失的情况时,2035 远景规划水平年新增水资源量 2.84 亿 m<sup>3</sup>,量化了源流区山区水库群联合调配对干流节水潜力的贡献。

## 5 结论

a. 在高效节水灌溉工程建设的基础上,仅依靠干流平原水库群的联合调配,农业灌溉和生态的供水保证率难以满足设计要求,说明即使农业实施高效节水灌溉,但平原水库群的调控能力有限,亟须与调节性能好的山区水库群联合运行。

b. 相比于“二源一干”水库群模拟调配,优化调配显著降低了干流损失水量和大西海子下泄水量,增加了农业灌溉供水量和河道内外生态供水量,即通过控制下游台特玛湖的无效蒸发损失,提高了流域水资源利用效率及流域河道外生态修复效果。

c. 通过“二源一干”水库群联合优化调配,在远

景规划年各行业供水保证率均能满足设计要求,且显著提高了河道外生态供水量,缓解了农业灌溉用水与生态用水之间的矛盾,体现了山区水库群显著的调控性能和“节水优先”治水方针的合理性和可靠性。

d. 相比于现状水平年仅考虑干流平原水库群的调配结果,在不考虑水量损失的情况下,远景水平年通过源流区山区水库与干流平原水库联合优化调配,最大新增供水量为 2.84 亿 m<sup>3</sup>,充分挖掘了塔河干流河道外生态供水潜力,为下一步开展塔河下游的河道外生态保护与修复奠定了可靠的水量基础。

## 参考文献:

- [1] 黄强,刘东,魏晓婷,等. 中国筑坝数量世界之最原因分析[J]. 水力发电学报,2021,40(9):35-45. (HUANG Qiang, LIU Dong, WEI Xiaoting, et al. Reasons for China owning largest number of water dams in the world [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(9):35-45. (in Chinese))
- [2] 李佳伟,水淼,左其亭,等. 区域节水潜力计算方法及河南省节水潜力评估[J]. 灌溉排水学报,2021,40(9):141-146. (LI Jiawei, SHUI Miao, ZUO Qiting, et al. A proposed method to evaluate water saving potential at regional scale and its application in Henan Province [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40 (9): 141-146. (in Chinese))
- [3] 董增川,陈牧风,倪效宽,等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(3):233-240. (in Chinese))
- [4] 陈志刚,程琳,陈宇顺. 水库生态调度现状与展望[J]. 人民长江,2020,51(01):94-103. (CHEN Zhigang, CHENG Lin, CHEN Yushun. Current status and future perspectives of reservoirs ecological operation [J]. Yangtze River, 2020,51(1):94-103. (in Chinese))
- [5] STEINSCHNEIDER S, BERNSTEIN A, PALMER R, et al. Reservoir management optimization for basin-wide ecological restoration in the Connecticut River [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 140(9):04014023.
- [6] TSAI W P, CHANG F J, CHANG L C, et al. AI techniques for optimizing multi-objective reservoir operation upon human and riverine ecosystem demands [J]. Journal of Hydrology, 2015, 530: 634-644.
- [7] DAI L, MAO J, WANG Y, et al. Optimal operation of the Three Gorges Reservoir subject to the ecological water



- level of Dongting Lake[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75( 14) : 1-14.
- [ 8 ] MURPHY C A, JOHNSON S L, GERTH W, et al. Unintended consequences of selective water withdrawals from reservoirs alter downstream Macro invertebrate communities [J]. Water Resources Research, 2021, 57 (6):029169.
- [ 9 ] 王立明,徐宁,高金强. 基于干旱河道生态修复的岳城水库生态调度[J]. 水资源保护,2017,33(6):32-37. (WANG Liming, XU Ning, GAO Jinqiang. Ecological operation of Yuecheng Reservoir based on ecological restoration of arid river [J]. Water Resources Protection, 2017,33(6):32-37. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 金菊良,徐新光,周戎星,等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. 水资源保护,2021,37(1):1-6. (JIN Juliang, XU Xinguang, ZHOU Rongxing, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):1-6. (in Chinese))
- [12] 白涛,洪良鹏,喻佳,等. 基于开源和节流的乌伦古河流域水库群生态调度[J]. 水资源保护,2022,38(5):132-140. (BAI Tao, HONG Liangpeng, YU Jia, et al. Ecological operation of reservoir group in the Ulungur River Basin through increasing water sources and reducing water consumption [J]. Water Resources Protection, 2022,38(5):132-140. (in Chinese))
- [13] 孟丽红,陈亚宁,李卫红. 新疆塔里木河流域水资源承载力评价研究[J]. 中国沙漠,2008,28(1):185-190. (MENG Lihong, CHEN Yaning, LI Weihong. Study of water resources carrying capacity in Tarim River Basin of Xinjiang[J]. Journal of Desert Research,2008,28(1):185-190. (in Chinese))
- [14] 黄强,赵冠南,郭志辉,等. 塔里木河干流水资源优化配置研究[J]. 水力发电学报,2015,34(4):38-46. (HUANG Qiang, ZHAO Guannan, GUO Zhihui, et al. Study on optimization of water resources allocation in the Tarim River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(4): 38-46. (in Chinese))
- [15] 魏光辉,桂东伟,赵新风. 不同水平年塔里木河流域“四源一干”可承载灌溉面积研究[J]. 干旱区地理,2018,41(2):230-237. (WEI Guanghui, GUI Dongwei, ZHAO Xinfeng. Irrigation area carrying capacity in Tarim River Basin in different years[J]. Arid Land Geography, 2018,41(2):230-237. (in Chinese))
- [16] 廖淑敏,薛联青,陈佳澄,等. 塔里木河生态输水的累积生态响应[J]. 水资源保护,2019,35(5):120-126. (LIAO Shumin, XUE Lianqing, CHEN Jiacheng, et al. Cumulative ecological response of ecological water transmission in Tarim River [J]. Water Resources Protection,2019,35(5):120-126. (in Chinese))
- [17] 李东林,左其亭,张伟,等. 基于 Nerlove 方法的塔里木河流域农业水资源配置模型[J]. 水资源保护,2021,37(2):75-80. (LI Donglin, ZUO Qiting, ZHANG Wei, et al. Agricultural water resources allocation model in Tarim River Basin based on Nerlove approach [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 ( 2 ) : 75-80. (in Chinese))
- [18] 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谿轮灌研究[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. (in Chinese))
- [19] 邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J]. 地理学报,2018,73(7):1189-1203. (DENG Mingjiang. " Three Water Lines " strategy: its spatial patterns and effects on water resources allocation in northwest China [J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(7):1189-1203. (in Chinese))
- [20] 蔡运济. 塔里木河三源流水库群优化调度[D]. 西安:西安理工大学,2021.
- [21] 黄强,晏毅,范荣生,等. 黄河干流水库联合调度模拟优化模型及人机对话算法[J]. 水利学报,1997(4):57-62. (HUANG Qiang, YAN Yi, FAN Rongsheng, et al. Simulation optimal model for joint operation of reservoirs on Yellow River main stream and the algorithm of man-machine interaction [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1997(4):57-62. (in Chinese))
- [22] 涂启玉,梅亚东. 遗传算法在水库(群)优化调度研究中的应用综述[J]. 水电自动化与大坝监测,2008,32(1):16-18. (TU Qiyu, MEI Yadong. Review on the application of genetic algorithm to reservoirs optimal operation [J]. Hydropower Automation & Dam Monitoring,2008,32(1):16-18. (in Chinese))
- [23] 刘文亮. 遗传算法和蚁群算法在水库优化调度中的联合应用[J]. 科技情报开发与经济,2009,19(14):132-134. (LIU Wenliang. The joint application of genetic algorithm (GA) and ant colony optimization (ACO) in the reservoir's optimal operation [J]. Journal of Library and Information Science, 2009, 19 ( 14 ) : 132-134. (in Chinese))

(收稿日期:2021-11-26 编辑:王芳)