

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.018

基于开源和节流的乌伦古河流域水库群生态调度

白 涛¹,洪良鹏¹,喻 佳¹,黎光和¹,李永兵²,赵 星²,王成良²

(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. 新疆阿勒泰地区水利水电勘测设计院,新疆 阿勒泰 836500)

摘要:针对乌伦古河流域水资源短缺、灌溉挤占生态用水等问题,以生活、工业、灌溉、河道生态基流、河谷林草及补湖生态用水为调度目标,设置开源、节流方案集,建立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调度模型,采用人机对话模拟优化算法求解模型。结果表明:各节流方案的河谷林草和补湖供水保证率能够满足设计要求,缓解了灌溉用水与生态用水间的矛盾,但 2017 现状水平年和 2025 远景水平年需水方案的灌溉保证率未满足设计要求;当开源+节流方案调水量超过 1.0 亿 m³ 时,满足农业灌溉、河谷林草和补湖的供水保证率要求,消除了灌溉用水与生态用水间的矛盾;随着调水量超过 1.0 亿 m³ 且持续增加,对河谷林草、补湖缺水量、破坏深度等影响不大,推荐 1.0 亿 m³ 为最佳调水量。

关键词:生态保护;生态调度;开源;节流;调水;水资源高效利用;乌伦古河流域

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)05-0132-09

Ecological operation of reservoir group in the Ulungur River Basin through increasing water sources and reducing water consumption // BAI Tao¹, HONG Liangpeng¹, YU Jia¹, LI Guanghe¹, LI Yongbing², ZHAO Xing², WANG Chengliang² (1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xinjiang Altay Region Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Altay 836500, China)

Abstract: To solve the problems of water resources shortage and ecological water occupation by irrigation in the Ulungur River Basin, using the domestic water, industrial water, irrigation water, river ecological base flow, and ecological water of river valley grassland and lake replenishment as the operation objectives, an operation scheme set to increase water sources and reduce water consumption was set up. An ecological optimal operation model of the reservoir group was established to minimize the ecological and socio-economic water shortage, and the man-machine dialogue simulation optimization algorithm was used to solve the model. The results show that the guarantee rates of water supply for river valley grassland and lake replenishment and in each water consumption reduction scheme can meet the design requirements and alleviate the contradiction between irrigation water and ecological water. The irrigation guarantee rates of the water demand schemes in 2017 and 2025 do not meet the design requirements. When the transferred water volume in the combined scheme of increasing water sources and reducing water consumption is more than 100 million m³, the water supply guarantee rate requirements of agricultural irrigation, river valley grassland and lake replenishment are met, and the contradiction between irrigation water and ecological water is eliminated. With the increase of the water diversion volume of more than 100 million m³, it has little effect on the water shortage and damage depth of river valley grassland and lake replenishment. It is recommended that 100 million m³ is the best water diversion volume.

Key words: ecological protection; ecological operation; increasing water sources; reducing water consumption; water transfer; efficient utilization of water resources; the Ulungur River Basin

修建水库、蓄水兴利一直是人类开发河流水资源的主要手段。水库的修建运用虽然在很大程度上实现了防洪兴利的目的,但同时也改变了库区及下游河道的水文情势,造成局地生态环境恶化,危及河

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

流健康。我国现行的水库调度方式普遍是依据水库承担的防洪及兴利任务来制定调度规则,对生态要求考虑较少,对库区及下游生态系统造成诸多不利影响^[1-2]。因此,在水库调度中,亟须开展以恢复流域生态、维持水资源持续发展为目标的生态调度。

自 20 世纪 70 年代起,国内外就开始进行面向生态的水库调度研究。Petts 等^[3]系统地分析了水库对河流生态的影响。Hughes 等^[4]在水库模拟模型中加入运行规则确定了河流维护的生态储量,建立了解决人类与环境需水的水库调度模型。Shiau 等^[5-6]以变化范围(range of variability approach, RVA)整体改变度为生态目标,针对台湾地区的水库开展了生态调度的研究。Castelletti 等^[7]考虑经济、社会与环境限制的影响,提出了计算河流最小生态流量的公式,并作为约束条件应用于水库优化调度研究。Tsai 等^[8]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。Dai 等^[9]以洞庭湖生态水头为目标研究了三峡水库的优化调度。傅春等^[10]将生态水利的概念引入到水资源可持续开发利用中,建立了相应的数学模型。董哲仁等^[1]研究了水库生态调度理论及方法。胡和平等^[11]提出了基于生态流量过程线的水库生态调度研究方法。刘烨等^[12]提出了基于多重迭代实现高维模型降维的求解算法。徐淑琴等^[13]考虑水文变异对径流过程的影响,推求了 3 种径流状态下的生态流量,并以此作为下泄流量的约束条件建立了水文变异条件下的水库生态调度模型。王立明等^[14]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。黄强等^[15]综述了水库生态调度新进展。孔波等^[16]以引汉济渭大型复杂跨流域调水工程为实例,考虑调水量、发电量最大和耗能最小 3 个目标,建立了电站-水库-泵站群多目标优化调度模型,研究了跨流域调水过程中多水源、多用户的配置问题。黄志鸿等^[17]基于大系统分解协调技术和动态规划求解了以生态溢缺水率和综合缺水率为目标的浊漳河流域水库群生态调度模型。高玉琴等^[18]基于 NSGA-II 优化算法求解了以河流整体水文改变度最小、广义缺水指数最小为目标的水库调度规则优化模型。董增川等^[19]针对多目标决策中存在的 uncertainty 问题,提出了考虑主客观因素模糊区间的综合赋权方法。高玉琴等^[20]改进了计算生态基流的逐月保证率设定法以适用于南方季节性缺水河流。黄显峰等^[21]针对水库调度图寻优过程中的调度线形态畸变的问题,提出了改

进廊道约束和改进粒子群-逐次逼近法。邓铭江等^[22]阐述了广义生态水利的内涵、定义和发展模式及其过程和维度。

本文针对乌伦古河流域存在的水资源短缺、农业灌溉挤占生态用水、河道断流频发、入湖水量减少等实际问题^[23-25],基于水资源综合利用的原则,以河道生态基流、河谷林草生态用水及补湖用水为调度目标,兼顾生活、工业、农业、生态、补湖等供水目标,设置多种开源、节流调度方案,开展乌伦古河流域水库群生态调度研究,以期为解决乌伦古河流域内水资源短缺及分配不合理等问题提供参考。

1 流域概况及研究数据

1.1 流域概况

乌伦古河位于新疆阿勒泰地区附近,主要由大青河、小青河、查干河、布尔根河、强罕河等 5 大支流汇流而成,流经青河、富蕴、福海等地,最终汇入乌伦古湖^[25]。乌伦古河是阿勒泰地区的第二大河流,全长 821 km,流域面积 3.79 万 km²,多年平均地表径流量 11.02 亿 m³。该河径流补给的季节性很强,径流补给量以降水及季节性积雪融水为主,5—7 月最为集中,占全年径流总量的 65%;径流年际、年内变化较大,丰水年和枯水年水量相差较大,且常出现连续丰水年和连续枯水年的现象。流域内水库分布见图 1。

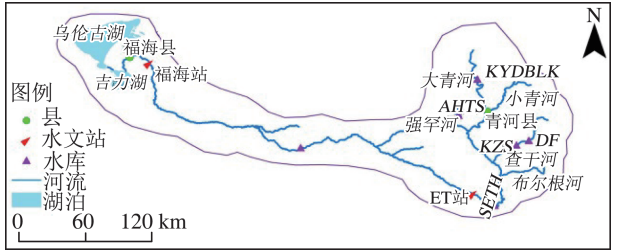


图 1 乌伦古河流域水库分布

Fig.1 Distribution of reservoirs in the Ulungur River Basin

1.2 研究数据

乌伦古河流域水库群多目标调度所需的基本资料有工程资料、径流资料和需水资料。工程资料包括水库特征参数资料,主要是 KYDBLK、AHTS、DF、KZS、SETH 等 5 座水库的水库特征参数(表 1)。

表 1 水库群的特征参数

Table 1 Characteristic parameters of reservoir group					
水库	死水位/m	正常蓄水位/m	死库容/万 m ³	调节库容/万 m ³	总库容/万 m ³
SETH	986	1027	800	23 300	24 100
KYDBLK	1464.5	1493	150	4725	4872
AHTS	1417.5	1421	200	332	532
DF	1214.5	1220.7	126	560	686
KZS			100.6	870.9	971.5

径流资料主要是 KYDBLK、AHTS、DF、KZS、SETH 等 5 座水库从 1960 年 4 月至 2011 年 3 月的逐月入库径流资料。

需水资料包括 2017 现状水平年、2025 近景水平年、2035 远景水平年乌伦古河流域上中下游流域生态、城镇居民供水、工业、农业、河谷林草各类需水资料。

按照流域规划,各用户的供水保证率为:生态基流保证率 100%、生活供水保证率 95%、工业供水保证率 95%、农业灌溉保证率 75%、河谷林草生态供水保证率 50%、补湖供水保证率 50%。

灌区的灌溉回水率为灌溉水量的 18%;水库损失水量为水库来水量的 10%;河道损失水量为河道来水量的 1%;ET 水文站断面生态基流 4—9 月为 $9.99 \text{ m}^3/\text{s}$ 、10—3 月为 $3.33 \text{ m}^3/\text{s}$;出口断面生态基流为 $3.33 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2 水库群生态调度模型的建立与求解

2.1 模型的建立

在满足乌伦古河流域生活供水、工业供水、农业灌溉、河谷林草生态供水及补湖供水等综合用水的前提下,以保障河流健康、河谷生态系统安全为目标,建立面向生态保护的水库群多目标调度模型。由于水库群多目标调度是一个高维、复杂问题,在处理这类问题时,一般将其简化为单目标问题。在本文中,将生活供水、工业供水、农业灌溉、河谷林草生态供水及补湖供水简化为供水保证率约束,然后以缺水最小作为目标函数。

2.1.1 目标函数

以生态缺水量和社会经济缺水量最小作为目标函数,建立乌伦古河流域梯级水库群生态调度模型。

$$\min F(\Delta W_1, \Delta W_2) = \Delta W_1 + \Delta W_2 = \sum_{i=1}^{I_1} \sum_{t=1}^T (Q_{\text{XS}it} - Q_{\text{GS}it}) + \sum_{i=1}^{I_2} \sum_{t=1}^T (Q_{\text{XZ}it} - Q_{\text{GZ}it}) \quad (1)$$

式中: ΔW_1 、 ΔW_2 分别为生态缺水量和社会经济缺水量, 亿 m^3 ; $Q_{\text{XS}it}$ 、 $Q_{\text{XZ}it}$ 分别为生态需水量和各用水部门需水量, 亿 m^3 ; $Q_{\text{GS}it}$ 、 $Q_{\text{GZ}it}$ 分别为生态供水量和各用水部门供水量, 亿 m^3 ; i 为需水部门编号; I_1 、 I_2 分别为生态需水部门总数和水资源综合利用需水部门总数; T 、 t 分别为调度时期内的总时段数及时段编号。

2.1.2 约束条件

约束条件包括全局约束和局部约束,全局约束包括供水保证率约束和水量平衡方程约束,局部约

束包括库容约束、下泄流量约束和供水约束。

a. 供水保证率约束:

$$P_i \geq P_{\text{Si}} \quad (2)$$

式中 P_i 、 P_{Si} 分别为计算和设计供水保证率。

b. 水量平衡方程约束:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T W_{\text{Cnt}} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T W_{\text{Zjt}} = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T W_{\text{G}it} + \sum_{l=1}^L W_{\text{Jl}} + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \Delta W_{\text{mt}} \quad (3)$$

式中: W_{Cnt} 、 W_{Zjt} 、 $W_{\text{G}it}$ 、 W_{Jl} 、 ΔW_{mt} 分别为水库出库水量、支流来水量、各部门的供水量、出区水量和河段损失水量, 万 m^3 ; n 为水库编号; j 为支流编号; m 为河段编号; N 、 J 、 I 、 M 分别为水库、支流、需水部门和河段总数。

c. 库容约束:

$$V_{\text{min}n} \leq V_{\text{nt}} \leq V_{\text{max}n} \quad (4)$$

式中 $V_{\text{min}n}$ 、 $V_{\text{max}n}$ 分别为水库 n 的最小和最大库容, 万 m^3 。

d. 下泄流量约束:

$$q_{\text{min}n} \leq q_{\text{nt}} \leq q_{\text{max}n} \quad (5)$$

式中 $q_{\text{min}n}$ 、 $q_{\text{max}n}$ 分别为最小下泄流量和最大下泄流量, m^3/s 。 $q_{\text{min}n}$ 由生态要求等确定, $q_{\text{max}n}$ 由下游防洪等要求确定。

e. 供水约束,包括生态供水约束和各用水部门供水约束:

$$Q_{\text{GS}it} \leq Q_{\text{XS}it} \quad (i = 1, 2, \dots, I_1) \quad (6)$$

$$Q_{\text{GZ}it} \leq Q_{\text{XZ}it} \quad (i = 1, 2, \dots, I_2) \quad (7)$$

2.2 模型求解

按照水资源综合利用原则和供水优先顺序,采取人机对话模拟优化算法^[26]求解模型。模型求解思路如下:①输入基本资料,包括径流系列,各水库特征参数资料,水资源综合利用资料等;②若来水量满足区间工业、生活和灌溉用水要求,多余水先用于 KYDBLK、AHTS、DF、KZS 水库蓄水,再用于 SETH 水库蓄水,若水库都蓄满,则多余水量用以补湖;③若来水量不能满足区间灌溉用水,则按照水库运行规则有序进行蓄泄;④若当水库下泄水量仍不能满足灌溉需水,则该时段农业灌溉用水发生破坏,根据缺水原则假定农业灌溉供水量;⑤输出长系列统计指标,若农业保证率没有达到要求,则适当改变灌溉供水量,使生态供水和灌溉供水合理分配;⑥输出最终统计值,计算结束。

2.3 边界条件

2.3.1 水库调度水位选取

参与调度的有 SETH、KYDBLK、AHTS、DF、KZS 等 5 座水库,各水库起始水位均为死水位。各水库

的起始水位及库容见表 1。

2.3.2 约束条件值确定

a. 保证率约束。生态基流、生活供水、工业供水、农业灌溉、河谷林草及补湖供水的保证率分别为 100%、95%、95%、75%、50% 和 50%。

b. 库容约束。SETH、KYDBLK、AHTS、DF、KZS 等 5 座水库最小库容分别为 800 万 m³、150 万 m³、200 万 m³、126 万 m³ 和 100.6 万 m³；最大库容分别为 24 100 万 m³、4872 万 m³、532 万 m³、686 万 m³ 和 971.5 万 m³。

c. 水位约束。SETH、KYDBLK、AHTS、DF 等 4 座水库最低水位分别为 986 m、1 464.5 m、1 417.5 m 和 1 214.5 m；最高水位分别为 1 027 m、1 493 m、1 421 m 和 1 220.7 m。

d. 下泄流量约束。ET 水文站断面最小下泄流量 4—9 月为 9.99 m³/s、10—3 月为 3.33 m³/s；出口断面最小下泄流量为 3.33 m³/s。

e. 供水约束。2017 现状水平年生活、工业、灌溉、河谷林草生态需水量分别为 0.15 亿 m³、0.09 亿 m³、7.40 亿 m³ 和 1.63 亿 m³；2025 近景水平年生活、工业、灌溉、河谷林草生态需水量分别为 0.18 亿 m³、0.24 亿 m³、6.17 亿 m³ 和 1.63 亿 m³；2035 远景水平年生活、工业、灌溉、河谷林草生态需水量分别为 0.19 亿 m³、0.33 亿 m³、5.65 亿 m³ 和 1.63 亿 m³。

3 水库群生态调度模型应用与分析

3.1 水库生态调度的依据

乌伦古河流域水库群的生态调度的主要依据包括：①满足水资源综合利用的原则；②KYDBLK、AHTS、DF、KZS 等 4 座年调节水库采取“春蓄夏灌”的运行方式，SETH 水库采取“多蓄少放”的运行方式；③按照流域设计要求的供水优先次序供水，即按照生态基流、生活、工业、灌溉、河谷林草、补湖等优先次序供水，且要保证以上各供水部门的保证率为 100%、95%、95%、75%、50% 和 50%。本次生态调度的调度期是 1960—2011 年，其中 4—9 月为汛期，10—3 月为非汛期，以月为计算时段。

3.2 方案集设置

近几十年来，乌伦古河流域多年平均来水量为 11.02 亿 m³，且年内汛期来水量过多，非汛期水量不足。在现状水平年，流域内有 22 个灌区，灌溉面积 9.36 万 hm²，灌溉需水 7.40 亿 m³，生活工业需水 0.24 亿 m³，河谷林草生态需水 1.63 亿 m³，补湖水量 1.5 亿 m³，流域多年平均损失水量 1.45 亿 m³，总需水量 12.22 亿 m³。

由来水、需水对比分析可知，乌伦古河流域水资源短缺，灌溉用水过多挤占生态用水。因此，本文从开源、节流两方面设置方案集。节流是指通过退耕减少灌溉用水。开源是指从额尔齐斯河干流调水（以下简称“引额调水”）补给乌伦古湖的生态水量。具体方案见表 2。其中，方案 1~3 分别是在 2017 现状水平年、2025 远景水平年和 2035 远景水平年需水情景下的调度方案。方案 4~7 是在 2025 远景水平年情景下改变引额调水量设置的调度方案。

表 2 乌伦古河流域开源、节流调度方案

Table 2 Operation schemes to increase water sources and reduce water consumption in the Ulungur River Basin

方案	灌溉面积/ 万 hm ²	灌溉需水/ 亿 m ³	多年平均调 水量/亿 m ³
1	9.36	7.40	0.0
2	7.79	6.17	0.0
3	7.15	5.66	0.0
4	7.79	6.17	0.8
5	7.79	6.17	1.0
6	7.79	6.17	1.2
7	7.79	6.17	1.5

3.3 合理性验证

本文在长系列计算结果中选取 SETH 水库现状水平年下丰、平、枯典型年（从当年 4 月到次年 3 月）的调度过程，以验证模型及其算法的合理性。由 SETH 水库调度过程（图 2）可知：丰水年水库水位从死水位附近起调至水库接近蓄满；平水年水库水位基本保持不变；枯水年水库水位持续下降至接近死水位，体现了多年调节水库 SETH“蓄丰补枯”的作用；丰、平、枯典型年的入库与出库水量的差额等于 SETH 水库库容的变化量，说明水库蓄放水过程满足水量平衡，验证了模型及其算法的可靠性和准确性。

3.4 生态调度长系列结果与分析

3.4.1 节流方案

通过对 1960—2011 年长系列径流资料进行计算，得到各种节流调度方案（方案 1~3）下 SETH 水库出入库水量及库容变化过程（图 3）及灌溉、河谷林草和补湖水量过程（图 4）。各用水部门需水量、供水保证率、缺水量、破坏深度等特征值见表 3。

由图 3 可知，各方案长系列出入库水量变化过程基本相同，入库水量存在年内、年际分布极不均匀的特点，入库水量大于 2.33 亿 m³ 的次数分别为 50 次、54 次和 54 次；出库水量主要集中在 4—9 月，且远大于其所需水量；从各方案的库容变化过程来看，SETH 水库在丰水年蓄水、水位上升，在枯水年泄水、水位下降，满足多年调节水库的“蓄丰补枯”作用；在节流调度方案中，SETH 水库在调度期内库空

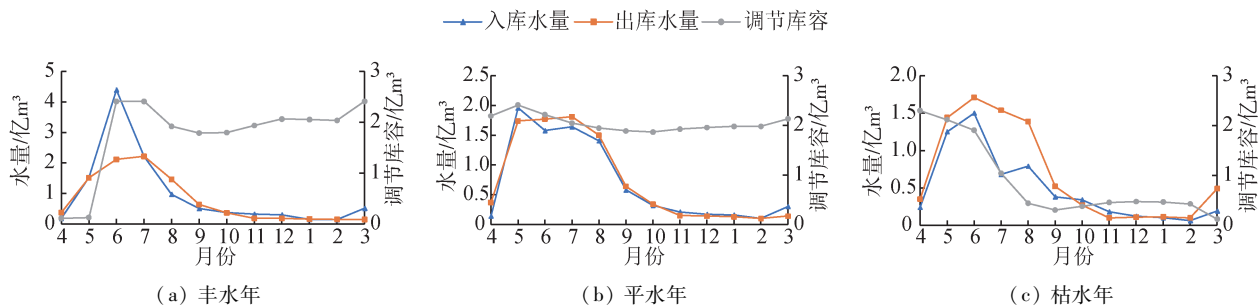


图 2 2017 现状水平年 SETH 水库典型年调度过程

Fig. 2 Typical year operation process in current level year of 2017 in SETH Reservoir

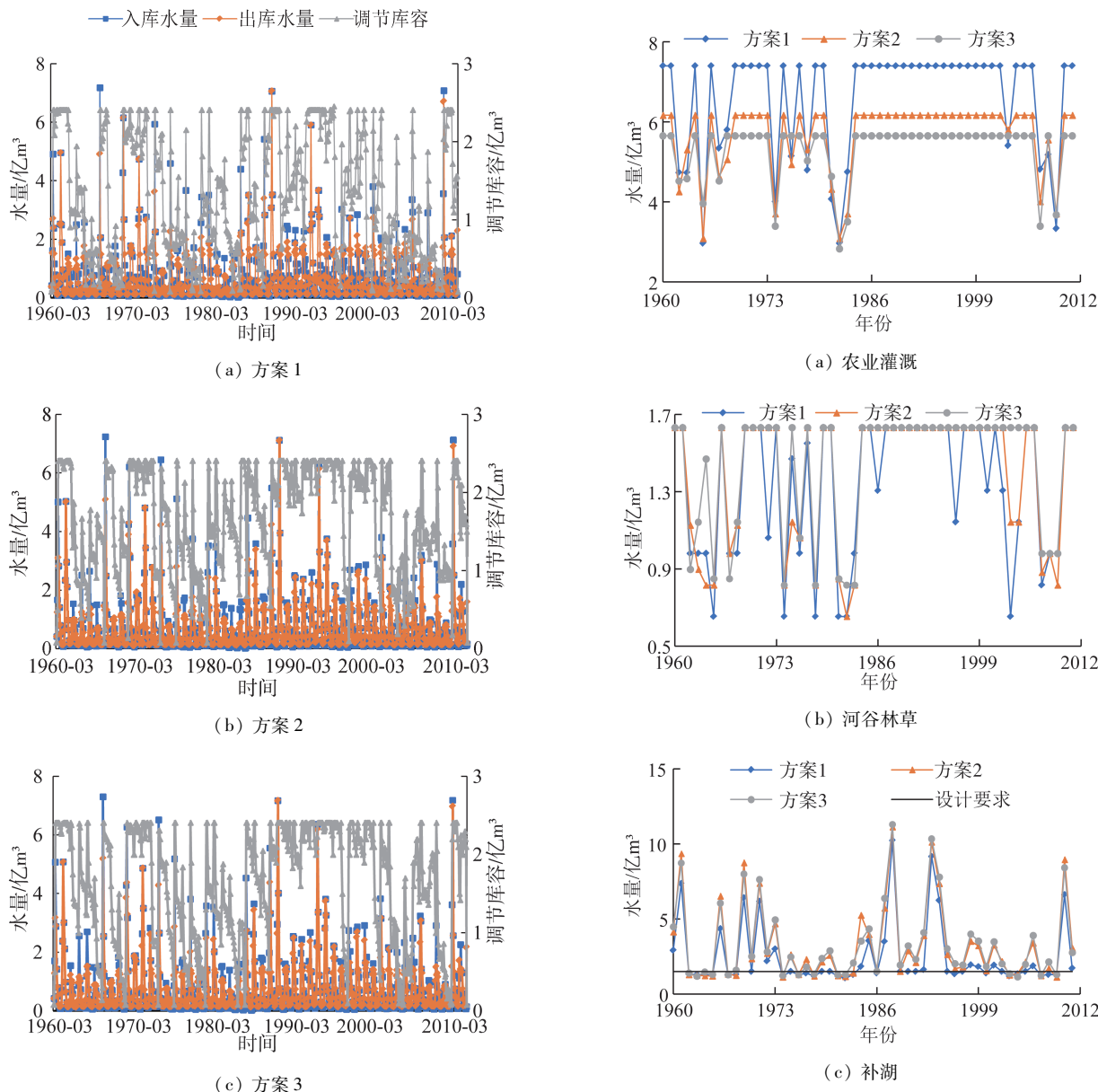


图 3 SETH 水库不同节流方案的长系列调度过程

Fig. 3 Long series operation process in SETH Reservoir under different water consumption reduction schemes

率分别为 44%、17% 和 21%，库满率分别为 63%、67% 和 73%，即随着灌溉水量的减少，SETH 水库库满率逐渐提高，库空率总体下降。

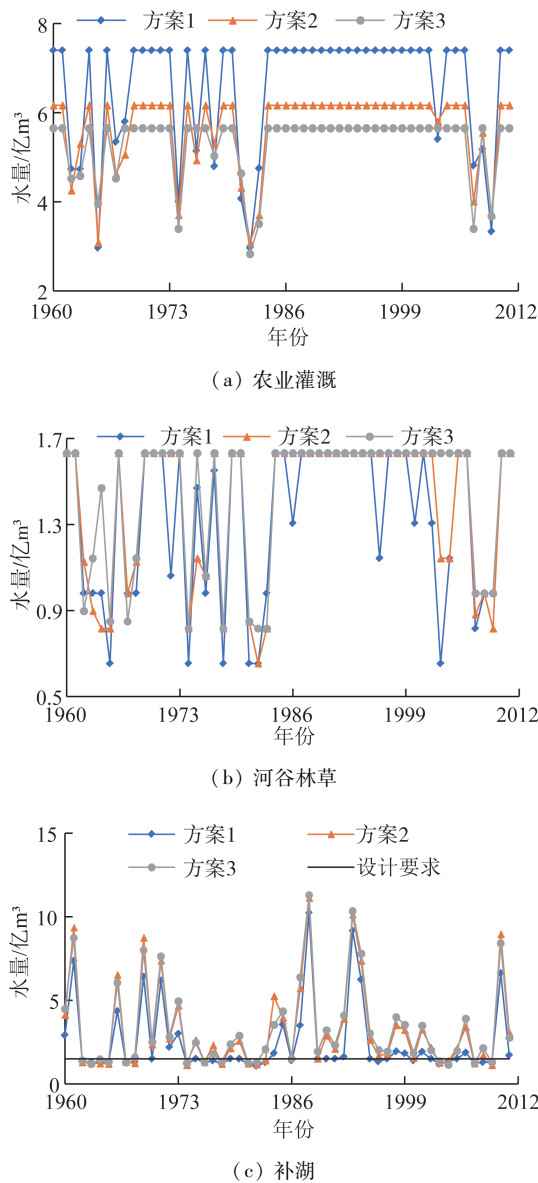


图 4 不同节流方案灌溉、河谷林草、补湖水量的长系列过程

Fig. 4 Long series process of water supply for irrigation, river valley grassland, and lake replenishment under different water consumption reduction schemes

由图 4 可知，各节流方案农业灌溉多年平均缺水水量分别为 0.75 亿 m^3 、0.50 亿 m^3 和 0.35 亿 m^3 ，多年平均破坏深度分别为 10%、8% 和 6%。可见，

表3 不同节流调度方案下各用水部门调度结果

Table 3 Operation results of various water departments under different water consumption reduction schemes							
方案	供水目标	需水量/亿 m ³	供水保证率/%	多年平均缺水量/亿 m ³	破坏深度/%	破坏时间/a	最长连续破坏时间/a
1	农业灌溉	7.40	71	0.75	10.10	15	3
	补 湖	1.50	54	0.11	7.45	22	4
	河谷林草	1.63	58	0.35	21.25	24	5
2	农业灌溉	6.16	71	0.50	8.13	15	3
	补 湖	1.50	65	0.08	5.12	16	4
	河谷林草	1.63	69	0.24	14.73	18	4
3	农业灌溉	5.66	79	0.35	6.17	11	3
	补 湖	1.50	71	0.05	3.48	13	3
	河谷林草	1.63	75	0.19	11.81	15	4

随着农业灌溉需水量的减少,农业灌溉供水的最大破坏深度和多年平均破坏深度均显著降低;各节流方案河谷林草供水的多年平均缺水量分别为0.35 亿 m³、0.24 亿 m³ 和 0.19 亿 m³,破坏时间分别为 24 a、18 a 和 15 a,即农业灌溉水量的减少可显著降低河谷林草缺水量和破坏时间,提高河谷林草供水保证率;各节流方案补湖供水的破坏时间分别为 22 a、16 a 和 13 a,多年补湖总量分别为 128.15 亿 m³、170.56 亿 m³ 和 174.93 亿 m³,即农业灌溉水量的减少可显著降低补湖供水的破坏时间,提高补湖供水保证率,反映出灌溉用水挤占生态用水的问题较为严重。

由表 3 可知,在生态基流、生活供水、工业供水均满足设计保证率的前提下,对比各方案发现,随着灌溉需水量的减少,可有效提高河谷林草、补湖的供水保证率;与方案 1 相比,方案 2 和方案 3 的河谷林草和补湖的供水保证率分别提高了 11% 和 17%,且均满足设计保证率要求,验证了节流方案的有效性;灌溉需水量减少后,方案 3 的灌溉保证率可达到设计保证率,但方案 2 的灌溉保证率仍达不到 75% 的设计要求,说明节流方案具有一定的局限性,证明了进行开源方案的必要性。

3.4.2 开源 + 节流方案

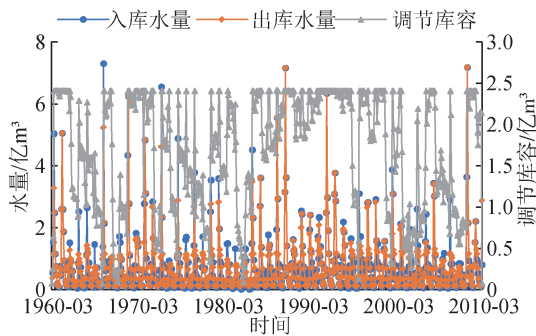
由上文可知,在规划远景水平年仅节流方案 2 的灌溉保证率未能满足设计保证率。因此,本节在方案 2 的基础上兼顾开源策略,对开源 + 节流方案进行长系列计算,得到各用水部门需水、供水保证率、缺水、破坏深度等特征值见表 4,各开源调度方案的 SETH 水库调度过程如图 5 所示,灌溉、河谷林草和补湖水量过程见图 6。

由图 5 可知,与节流方案相比,开源方案中 SETH 水库的库空率降低、库满率上升,即随着调水量的增加,SETH 水库维持较高水位运行;通过调水补给的开源策略,SETH 水库在连续枯水年能够维持较大库容运行,增加了供水保证率。

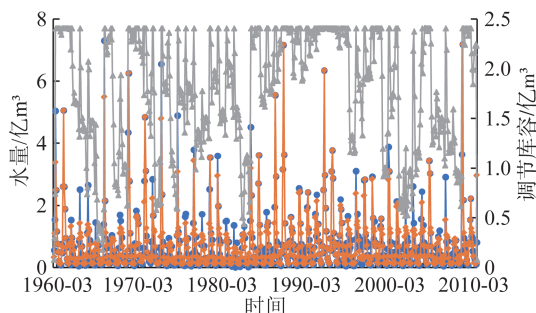
由图 6 和表 4 可知,方案 5、方案 6、方案 7 的开源 + 节流方案农业灌溉保证率分别为 75%、81% 和 85%,即当开源方案的调水量超过 1.0 亿 m³ 时,即可满足乌伦古河流域的灌溉设计保证率,验证了开源 + 节流方案的有效性;与节流方案 2 的结果相比,随着调水量增加到 1.5 亿 m³,方案 7 的农业灌溉、河谷林草及补湖的保证率分别提高了 14%、10% 和 10%,且农业灌溉、补湖与河谷林草的供水保证率均满足设计保证率;与方案 2 相比,各开源 + 节流方案

表4 不同开源 + 节流调度方案下各用水部门调度结果

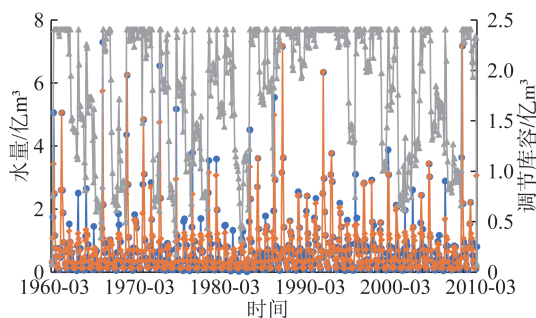
Table 4 Operation results of various water departments under different schemes to increase water sources and reduce water consumption								
方案	用水部门	需水量/亿 m ³	供水量/亿 m ³	多年平均缺水量/亿 m ³	破坏深度/%	破坏时间/a	最长连续破坏时间/a	保证率/%
4	农业灌溉	6.17	5.78	0.39	6.26	14	3	73
	补 湖	1.50	3.55	0.04	2.61	16	3	69
	河谷林草	1.63	1.50	0.13	8.07	16	3	69
5	农业灌溉	6.17	5.82	0.35	5.60	13	3	75
	补 湖	1.50	3.73	0.03	1.95	13	3	71
	河谷林草	1.63	1.50	0.13	8.07	15	3	75
6	农业灌溉	6.17	5.91	0.26	4.20	10	3	81
	补 湖	1.50	3.82	0.03	1.95	12	3	73
	河谷林草	1.63	1.52	0.11	6.63	14	3	77
7	农业灌溉	6.17	6.03	0.13	2.16	8	3	85
	补 湖	1.50	3.99	0.03	1.86	12	3	75
	河谷林草	1.63	1.54	0.09	5.77	13	3	79



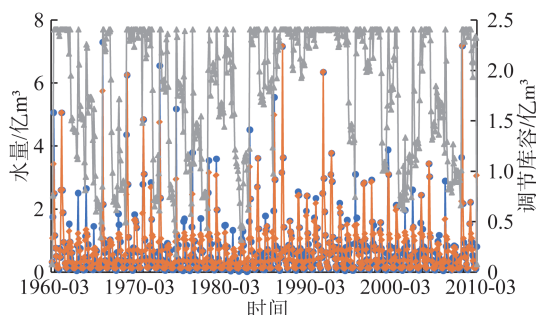
(a) 方案4



(b) 方案5



(c) 方案6

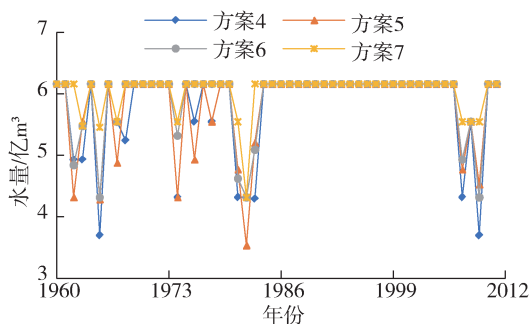


(d) 方案7

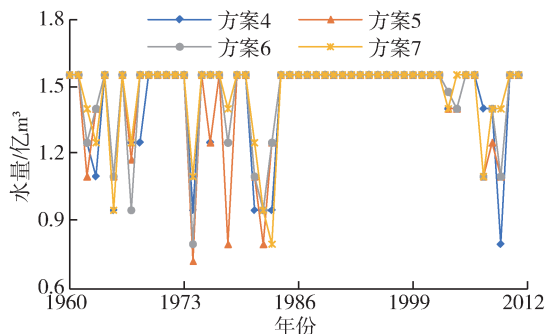
图5 SETH水库不同开源方案的长系列调度过程

Fig.5 Long series operation process in SETH Reservoir under different schemes to increase water sources

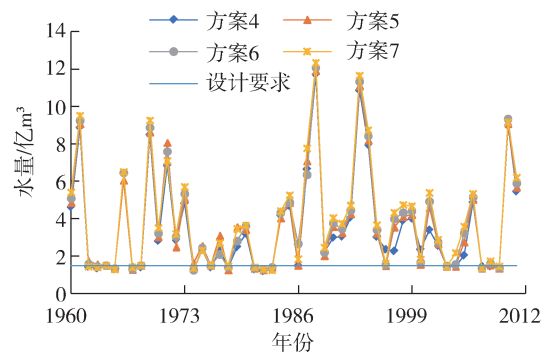
农业灌溉的破坏深度分别减少了1.87%、2.53%、3.93%和5.97%,破坏时间分别减少了1 a、2 a、5 a和7 a,连续破坏时间不变,说明开源+节流方案能够有效减少农业灌溉的破坏深度和年份;随着调水量的增加,可以有效消除农业灌溉用水与生态用水之间的矛盾,提高各用水部门的供水保证率;当外调水量为 1.0 亿 m^3 时,各部门用水保证率均符合设计要求;但随着调水量的持续增加,对于河谷林草和补



(a) 农业灌溉



(b) 河谷林草



(c) 补湖

图6 不同开源方案灌溉、河谷林草、补湖供水量的长系列过程

Fig.6 Long series process of water supply for irrigation, river valley grassland, and lake replenishment under different schemes to increase water sources

湖影响不大。因此,本文推荐 1.0 亿 m^3 为最佳引额调水量。

综上所述,通过减少灌溉面积的节流方案,可有效缓解农业灌溉用水与生态用水之间的矛盾,对于提高生态保证率更为有效,但大部分方案农业灌溉保证率不能满足设计要求;通过增加调水量和减少灌溉面积的开源+节流方案,完全能够满足农业灌溉、河谷林草和补湖的供水保证率需求,消除了农业灌溉用水与生态用水之间的矛盾。开源+节流方案先节水、后开源,体现了乌伦古河流域“节水优先”的治水方针,有效解决了乌伦古河流域的水资源短缺问题。

4 结 论

a. 以生态缺水量和社会经济缺水量最小为目标函数,建立了乌伦古河流域生态调度模型,设置多种开源+节流调度方案,采用人机对话模拟优化算法求解模型,获得了 SETH 水库现状(2017)和近远景水平年(2025 年和 2035 年)的长系列计算结果,选取现状水平年丰、平、枯典型年计算结果,验证了模型及其算法的合理性、可靠性。

b. 各节流方案的补湖和河谷林草供水保证率能够满足设计要求,在一定程度上能够缓解农业灌溉用水与生态用水之间的矛盾,但方案 1、方案 2 的农业灌溉保证率未能满足 75% 的设计要求,体现了节流方案的局限性。

c. 开源+节流方案先节水、后开源,当调水量超过 1.0 亿 m^3 时,开源+节流方案完全能够满足农业灌溉、河谷林草和补湖的供水保证率需求,消除了农业灌溉用水与生态用水之间的矛盾,体现了乌伦古河流域“节水优先”的治水方针。

d. 随着调水量超过 1.0 亿 m^3 并持续增加,各开源+节流调度方案对于减少河谷林草和补湖缺水量、破坏深度、破坏时间、连续破坏时间等影响不大。因此,本文推荐 1.0 亿 m^3 为最佳引额调水量。

参考文献:

[1] 董哲仁,孙东亚,赵进勇. 水库多目标生态调度[J]. 水利水电技术,2007,38(1):28-32. (DONG Zheren, SUN Dongya, ZHAO Jinyong. Multi-objective ecological operation of reservoirs[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(1): 28-32. (in Chinese))

[2] 王远坤,夏自强,王桂华. 水库调度的新阶段:生态调度[J]. 水文,2008,28(1):7-9. (WANG Yuankun, XIA Ziqiang, WANG Guihua. A new phase of reservoir regulation: ecological operation[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(1): 7-9. (in Chinese))

[3] PETTS G E. Impounded rivers: perspectives for ecological management[M]. Chichester: John Wiley, 1984.

[4] HUGHES D A, ZIERVOGEL G. The inclusion of operating rules in a daily reservoir simulation model to determine ecological reserve releases for river maintenance[J]. Water SA, 1998, 24(4): 293-302.

[5] SHIAU J T, WU F C. A dynamic corridor-searching algorithm to seek time-varying instream flow releases for optimal weir operation: comparing three indices of overall hydrologic alteration[J]. River Research and Applications, 2007, 23(1): 35-53.

[6] SHIAU J T, WU F C. Pareto-optimal solutions for

environmental flow schemes incorporating the intra-annual and interannual variability of the natural flow regime[J]. Water Resources Research, 2007, 43(6): w06433.

[7] CASTELLETTI A, PIANOSI F, SONCINI-SESSA R. Water reservoir control under economic, social and environmental constraints[J]. Automatica, 2008, 44(6): 1595-1607.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 傅春,冯尚友. 水资源持续利用(生态水利)原理的探讨[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 436-440. (FU Chun, FENG Shangyou. Study on the principle of the sustainable utilization of water resources (ecological hydraulic engineering) [J]. Advances in Water Science, 2000, 11(4): 436-440. (in Chinese))

[11] 胡和平,刘登峰,田富强,等. 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 325-332. (HU Heping, LIU Dengfeng, TIAN Fuqiang, et al. A method of ecological reservoir reoperation based on ecological flow regime [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 325-332. (in Chinese))

[12] 刘烨,钟平安,郭乐,等. 基于多重迭代算法的梯级水库群调度图优化方法[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(1): 85-88. (LIU Ye, ZHONG Pingan, GUO Le, et al. Operation chart optimization method of cascade reservoirs based on multiple iteration algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1): 85-88. (in Chinese))

[13] 徐淑琴,苏鑫,王莉莉,等. 水文变异条件下水库生态调度研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 146-154. (XU Shuqin, SU Xin, WANG Lili, et al. Reservoir ecological operation under condition of hydrological variability [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 146-154. (in Chinese))

[14] 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))

[15] 黄强,赵梦龙,李瑛. 水库生态调度研究新进展[J]. 水力发电学报, 2017, 36(3): 1-11. (HUANG Qiang, ZHAO Menglong, LI Ying. Advancements in studies on reservoir ecological operation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(3): 1-11. (in Chinese))

- [16] 孔波,付少杰,黄强.大型复杂跨流域调水工程电站-水库-泵站群多目标优化调度[J].水资源保护,2020,36(6):67-72. (KONG Bo, FU Shaojie, HUANG Qiang. Multi-objective optimal operation of hydropower plant-reservoir-pumping station group in large complex inter-basin water transfer projects[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):67-72. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 高玉琴,周桐,马真臻,等.考虑天然水文情势的水库调度图优化[J].水资源保护,2020,36(4):60-67. (GAO Yuqin, ZHOU Tong, MA Zhenzhen, et al. Optimization of reservoir operation chart considering natural hydrological regime[J]. Water Resources Protection,2020,36(4):60-67. (in Chinese))
- [19] 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. Optimal operation decision-making method of reservoir group considering fuzzy interval[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(3):233-240. (in Chinese))
- [20] 高玉琴,刘钺,赵晨程,等.南方季节性缺水河流逐月保证率设定法的改进[J].水资源保护,2021,37(2):95-101. (GAO Yuqin, LIU Yue, ZHAO Chencheng, et al. Improvement on monthly guarantee rate setting method for seasonal water shortage rivers in South China[J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (2): 95-101. (in Chinese))
- [21] 黄显峰,吴志远,李昌平,等.基于改进粒子群逐次逼近法的水库调度图多目标优化[J].水利水电科技进展,2021,41(2):1-7. (HUANG Xianfeng, WU Zhiyuan, LI Changping, et al. Multi-objective optimization of reservoir operation chart based on IPSO-DPSA[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2):1-7. (in Chinese))
- [22] 邓铭江,黄强,畅建霞,等.广义生态水利的内涵及其过程与维度[J].水科学进展,2020,31(5):775-792. (DENG Mingjiang, HUANG Qiang, CHANG Jianxia, et al. Connotation, process and dimensionality of generalized ecological water conservancy[J]. Advances in Water Science,2020,31(5):775-792. (in Chinese))
- [23] 邵芳霞.乌伦古河流域水资源保护和治理措施研究[J].水电与新能源,2019,33(11):48-50. (SHAO Fangxia. On the water resources protection and treatment measures of Ulungur River Basin[J]. Hydropower and New Energy, 2019,33(11):48-50. (in Chinese))
- [24] 努尔兰·哈再孜.乌伦古河流域水文特征[J].干旱区研究,2014,31(5):798-802. (NURERLAN Hazazi. Hydrological characteristics in the Ulungur River Basin[J]. Arid Area Research, 2014, 31 (5): 798-802. (in Chinese))
- [25] 孟古别克·俄布拉依汗,贾尔恒·阿哈提,程艳,等.乌伦古河断流的生态影响及成因分析[J].新疆环境保护,2016,38(2):5-11. (MENG GUBEK Obrahan, JIAERHENG Ahati, CHENG Yan, et al. Influence of the Ulungur River blanking on the ecology and cause analysis[J]. Environmental Protection in Xinjiang,2016,38(2):5-11. (in Chinese))
- [26] 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))

(收稿日期:2021-08-13 编辑:俞云利)

(上接第121页)

- [40] 刘忠方,田立德,姚檀栋,等.中国大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布[J].科学通报,2009,54(6):804-811. (LIU Zhongfang, TIAN Lide, YAO Tandong, et al. Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over China[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54 (6): 804-811. (in Chinese))
- [41] 王帅,饶文波,金可,等.阿拉善地区降水同位素特征与水汽来源[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):411-419. (WANG Shuai, RAO Wenbo, JIN Ke, et al. Hydrogen and oxygen isotopic characteristic and moisture source of precipitation of Alxa Desert Plateau[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5):411-419. (in Chinese))

(收稿日期:2021-07-28 编辑:俞云利)