

哈密市四道沟水库供水 - 生态多目标优化调度

艾合买提·热合曼¹, 吴贞晖², 刘德地^{2*}

¹哈密市伊州区水管总站, 新疆 哈密

²武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年5月9日; 录用日期: 2022年6月10日; 发布日期: 2022年8月31日

摘要

哈密市四道沟水库由于存在资源性缺水, 生活、工业、灌溉、生态等部门之间的用水矛盾日趋紧张, 多部门之间的水量合理分配亟需解决。为了协调经济社会供水(生活 + 工业 + 灌溉)和生态供水之间的关系, 建立了面向经济社会供水和生态供水的多目标水库调度优化模型, 采用多目标遗传算法NSGA-II进行求解, 获得了协调经济社会目标和生态目标的水库调度方案。结果表明, 经济社会供水与生态供水之间存在明显的竞争关系, 通过选择典型的水库调度优化方案, 能较大程度减少缺水量, 提高供水和生态效益, 同时能缓解下游河道的断流情况。该模型和研究结果可为四道沟水库多目标优化调度决策提供技术支持。

关键词

多目标优化, 水库调度, 供水, 生态

Water Supply-Ecology Multi-Objective Optimal Operation of Sidaogou Reservoir in Hami City

Aihemaiti Reheman¹, Zhenhui Wu², Dedi Liu^{2*}

¹Water Conservancy Management Station of Yizhou District, Hami City, Hami Xinjiang

²State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: May 9th, 2022; accepted: Jun. 10th, 2022; published: Aug. 31st, 2022

Abstract

Due to the water shortage of Sidaogou Reservoir in Hami City, a water consumption conflict among domestic water, industrial water, irrigation, and ecological water is becoming sharp. The conflict requires a rational water allocation among different water-use departments. To balance the conflict between socioeconomic water supply (including domestic water, industrial water and irrigation) and ecological water supply, a multi-objective optimal reservoir operation model considering both socioeconomic wa-

作者简介: 艾合买提·热合曼, 男, 1977 年出生, 副高, 主要从事水利工程建设与管理。

*通讯作者 Email: dediliu@whu.edu.cn

文章引用: 艾合买提·热合曼, 吴贞晖, 刘德地. 哈密市四道沟水库供水 - 生态多目标优化调度[J]. 水资源研究, 2022, 11(4): 335-345. DOI: 10.12677/jwrr.2022.114037

ter supply and ecological water supply is established. The NSGA-II algorithm is adopted to solve the model, and then the optimal reservoir operation scheme that coordinates the socioeconomic and ecological water supply benefits is obtained. The results show that there is an obvious conflicting relationship between socioeconomic water supply and ecological water supply. The optimal reservoir operation scheme is able to reduce water shortage, improve social and ecological water supply benefits, and avoid the cut-off of the downstream river. The optimization results based on the multi-objective optimal reservoir operation model can provide technical supports to the operation decision making for Sidaogou Reservoir.

Keywords

Multi-Objective Optimization, Reservoir Operation, Water Supply, Ecology

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

哈密市位于新疆维吾尔自治区的东部，素有新疆东大门之称，是新疆通往内地的门户，也是古丝绸之路北新道的必经之路。哈密是资源性缺水地区，由于地表水资源在地域分布上呈现出点多、分散、量小、线长的特点，造成地表水利用率不高，加剧了水资源供需紧张局面。

四道沟水库是哈密市伊州区都鲁克中型灌区主要骨干控制性枢纽工程之一，具有防洪、灌溉、生活、工业、生态等综合性供水任务。四道沟水库调度涉及经济目标和生态目标，但是这两个目标间存在着矛盾，其中一个目标的改善会引起另一个目标性能的降低。例如，四道沟水库运行一定程度改变了下游河道的水文情势，尤其是在哈密这样的缺水地区，为提高经济效益，只确保农业、生活和工业供水而忽略了防风林、生态林等生态环境保护，导致生态无水可用，易造成生态环境恶化，对农业和生态的可持续发展造成威胁。因此，研究哈密市供水 - 生态多目标调度，通过水库对生活、工业、农业、生态等部门进行水资源优化配置，对维持该地区资源可持续发展具有重要意义。

在供水和生态多目标水库调度方面，目前已有大量研究。最早在 1984 年，方子云等[1]考虑环境因素进行水库调度，针对水库调度给河道带来的环境影响进行了分析，对传统的调度研究提出了生态要求；董哲仁等[2]对水库调度研究的难点进行了研究和探讨，并提出了综合考虑河流生态目标的水库多目标生态调度；Liu 等[3]建立了包含水库调度、咸水入侵、经济分析、河道内生态需水四模块组成的水资源优化模型，通过水量合理配置显著改善了珠江三角洲的供水和水质状况；陈悦云等[4]在以综合效益最佳为优化调度目标的水库调度研究中引入生态目标，并采用多目标粒子群算法进行求解，剖析了不同来水情景下的供水、生态、发电目标之间的竞争关系；吴贞晖等[5]基于“模拟 - 优化”技术，将常规调度图改进为考虑供水 - 生态 - 发电目标的优化调度图，提升了夹岩水库的生态效益和供水效益；刘哲杰等[6]建立了水库中长期生态优化调度模型，从生态水量、河道内生态基流、生态输水、河道外生态供水等多个生态保护对象出发研究塔河的供水过程和生态需水过程，提出了适宜的调度方式；游进军等[7]提出二层结构流域生态调度模型，对水量模拟和水利工程两个层面进行耦合和动态修正，兼顾生态和经济，强调水资源利用和河道水量过程的有机联系；彭安帮等[8]针对丹江口水库生态补水的实际情况，提出考虑补水规则的供水模型，对生态补水、城镇供水、水库弃水等多个目标进行优化协调，明确了生态补水的最佳水量和最佳时机；林俊强等[9]指出应从“驱动力 - 状态 - 响应”链条出发进一步研究基于适应性管理的生态调度。然而，以往的供水 - 生态多目标调度的研究区域多针对于湿润区或半干旱区，生态目标多关注河道内生态需水要求(如水生生物适宜流量)。对于新疆哈密这种典型干旱区来说，当地供水和生态目标之间的竞争程度较湿润区或半干旱区

更为剧烈,生态目标优先考虑对象是河道外生态需水,这与湿润或半干旱区的生态调度目标存在明显不同。目前,在新疆哈密四道沟水库进行兼顾供水效益和生态效益的多目标调度的研究还比较少。

本研究以四道沟水库为研究对象,建立了面向供水和生态的多目标水库优化调度模型,采用多目标遗传算法(NSGA-II)进行模型的求解,分析供水目标和生态目标之间的均衡关系,并以典型方案为例,验证水库调度对供水效益和生态效益的影响,以期得到最优供水方案。

2. 研究区域与数据资料

2.1. 四道沟水库

四道沟水库位于哈密市四道沟沟口,伊州区的都鲁克中型灌区境内,距哈密市 80 公里(见图 1)。主要承担都鲁克中型灌区内农业和生态用水(都鲁克中型灌区面积 4.49 万亩,其中四道沟水库能够满足供水面积 1.32 万亩,其余 3.17 万亩靠大小白杨沟和三道沟地表水,不足部分抽取地下水进行灌溉),二堡镇、五堡镇、德外理乡南戈壁搬迁点共 10,257 户 41,028 人的生活用水,沙尔湖煤电基地工业供水任务的小(I)型水利枢纽工程。水库总库容为 570.47 万 m^3 ,正常蓄水位为 2031.52 m,兴利库容为 332.81 万 m^3 ,死水位为 2013.48 m,死库容为 140.12 万 m^3 ,调洪库容 97.51 万 m^3 。设计洪水标准为 50 年一遇洪峰流量 127 m^3/s ,泄流量为 71.16 m^3/s ,校核洪水标准采用 500 年一遇洪峰流量 295 m^3/s ,泄流量为 158.96 m^3/s 。

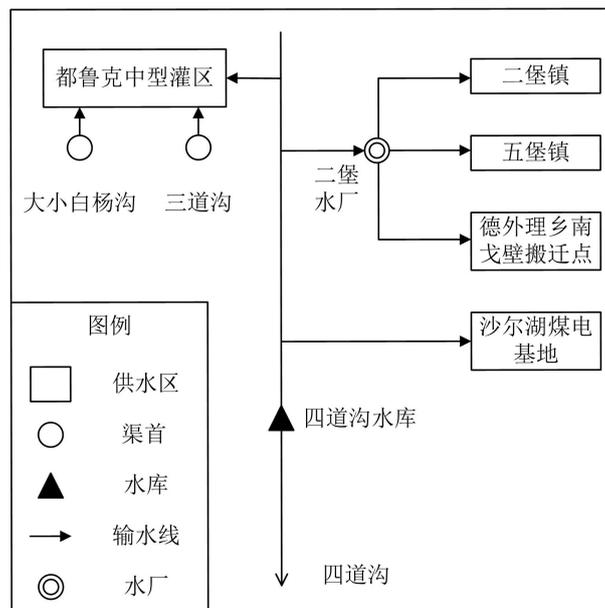


Figure 1. Sketch map of Sidaogou Reservoir and objects of water supply

图 1. 四道沟水库及供水对象概化图

2.2. 气象

四道沟为典型的大陆性干旱气候,降雨稀少,气候干燥,蒸发能力强,夏季炎热,冬季寒冷,气候垂直地带性明显。根据四道沟站仅有的 2000 年 5 月 15 日~31 日,2001 年 4~8 月,2002 年 4~8 月,2003 年 4~8 月的实测气象资料统计,四道沟年均降水 166.3 mm,蒸发 1163.4 mm,实测最高气温 36.6 $^{\circ}\text{C}$ 。年日照时数达 5000 小时以上,最多风向是东风,多年平均最大风速 14 m/s,最大冻土深度 1.5 m。根据参证站五道沟实测资料统计多年平均蒸发量为 2879.5 mm ($\phi 20$ cm 观测值),多年平均降水量为 165 mm。

2.3. 水文

2.3.1. 径流

四道沟流域径流主要由冰雪融水、夏季降雨、地下水组成，径流主要形成在中上游山区。全年径流主要集中在汛期 4~9 月，其中 4~6 月主要为融雪水补给，7~9 月以融冰雪水与夏季降雨补给。每年 10 月至次年 3 月径流量以泉水补给为主，由于补给源相对稳定，夏季的高山积雪融水量与中低山区径流量随着气候干暖、冷湿的变化有一定的互补性。水库坝址处设计年径流量为四道沟专用站断面处不同频率设计年径流量与截潜水量合成值。借用参证站白吉水文站多年实测年径流系列统计参数： $C_v = 0.32$ ， $C_s = 2C_v$ ，和本次研究推算的四道沟多年平均年径流量，求得四道沟不同频率设计年径流量成果见表 1。

Table 1. Annual runoff distributions of Sidaogou Reservoir under different frequencies (10^4 m^3)

表 1. 四道沟水库不同频率年径流年内分配(10^4 m^3)

频率	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
50%	20.96	14.92	16.61	30.96	170.3	718	400.8	195.2	127.6	92.3	55.7	44.75	1888.1
75%	35.24	15.85	29.39	26.16	128.7	306.3	499.6	223.9	144.7	59.71	41.09	28.47	1539.11
85%	24.18	21.02	12.23	62.52	63.89	199.2	236.5	434.6	195.9	67.88	39.43	16.63	1373.98
90%	22.35	19.43	11.3	57.79	59.06	184.2	218.6	401.7	181.1	62.74	36.45	15.37	1270.09
95%	21.04	21.04	21.04	44.18	122	147.3	212.5	306.1	72.59	37.87	28.4	17.88	1051.94

2.3.2. 灌区水利设施现状及用水情况

四道沟水库农业供水乡镇为五堡镇和二堡镇。水库至二堡镇南北方向有输水的四道沟干渠，总长 33.17 km，设计流量 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。干渠末段东西方向各有一条支渠(二堡东支渠及二堡西支渠)，流量分别为 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。四道沟干渠末段往南为五堡分干渠，总长 16.8 km，流量 $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ，主要承担五堡镇农业及生态输水任务。

四道沟水库属于都鲁克中型灌区四个水源之一(大小白杨沟水、四道沟水库水、三道沟水、地下水)，涉及两个乡镇，面积 4.49 万亩，四道沟水库能满足供水面积 1.32 万亩，其中：农业灌溉面积 1.04 万亩、生态林面积 0.277 万亩(见表 2)。根据新疆维吾尔自治区农业灌溉用水定额标准[10]，四道沟供水的 1.32 万亩地农业和生态净灌溉需水量分别为 574.92 万 m^3 、 149.58 万 m^3 。哈密市伊州区 2021 年灌溉水利用系数 0.637 来推算，农业和生态毛水量分别为 902.55 万 m^3 、 234.82 万 m^3 。

Table 2. Statistics of crop planting area of each village in the irrigation area (mu)

表 2. 灌区各乡农作物种植面积统计表(亩)

供水对象	灌溉方式	小麦	棉花	葡萄	大枣	瓜果	玉米	防护林	合计
五堡镇	常规灌	1188		1502	8530	1020	6610	1530	20,380
	滴灌		650						650
	管道灌			774	3526				4300
	小计	1188	650	2276	12,056	1020	6610	1530	25,330
二堡镇	常规灌	202		2410	2720	443	805	1240	7820
	滴灌		8550						8550
	管道灌			3200					3200
	小计	202	8550	5610	2720	443	805	1240	19,570
总计		1390	9200	7886	14,776	1463	7415	2770	44,900

2.3.3. 灌区水利设施现状及用水情况

生活用水方面,二堡水厂供水能力为 3000 m³/日,二堡镇、五堡镇、德外理乡南戈壁搬迁点共 10,257 户 41,028 人的生活用水由此水厂供水。工业用水方面,自 2012 年水库投入运行后,为发展哈密南部工业生产,每年从水库取水量平均 100 万 m³左右。四道沟水库历年农业用水、工业用水、生活用水、生态补水情况见表 3。

Table 3. Water consumptions provided by Sidaogou Reservoir during 2016 to 2020 (10⁴ m³)
表 3. 四道沟水库 2016~2020 年用水情况一览表(10⁴ m³)

年度	农业用水量	工业用水量	生活用水量	生态补水量*	合计
2016	1367.54	63.47	135.46	708.34	2274.81
2017	1400.84	136	125.27	494.44	2156.55
2018	927.18	79.68	131.67	1318.09	2456.62
2019	493.32	68.17	95.71	796.57	1453.76
2020	867.32	120.36	58.16	0	1045.84
2021	1233.3	133.56	57.99	922.4	2347.25
平均	1048.25	100.21	100.71	706.64	1955.81

注: *生态补水量指水库泄洪水量。

2.4. 目前存在问题

四道沟水库调度目前面临以下突出问题。

1) 为保障社会稳定及经济发展,调度过程中首先满足生活用水、农业用水及工业用水,其次考虑生态供水问题。确保生活用水的前提下如何协调农业、工业及生态用水,是四道沟水库调度需要研究的重要问题。

2) 四道沟水库径流年内分布不均匀,丰水年、枯水年径流量相差较大。受库容所限,水库运行过程中缺水与弃水时常交替出现。如何合理利用水库弃水改善下游生态环境,是四道沟水库生态调度中的另一个重要问题。

3. 多目标调度模型建立

本文所建调度模型以经济社会缺水量(包括生活、农业、工业缺水)最小和河道外生态缺水量最小为优化目标,采用 NSGA-II 算法进行多目标优化问题的求解,得到兼顾经济社会需水和生态需水的多目标水资源配置方案。

3.1. 目标函数

1) 经济社会供水目标

$$f_1 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^3 (D_{i,t} - W_{i,t}) \quad (1)$$

式中, f_1 是调度期内的最小生活、生产缺水量; t 为时段编号; T 为计算时段总数; i 为用水部门编号, $i = 1, 2, 3, 4$ 分别代表生活、供水、农业、生态用水部门; $D_{i,t}$ 为第 t 时段第 i 个用水部门的需水量; $W_{i,t}$ 为第 t 时段第 i 个用水部门的供水。

2) 生态目标

由于四道沟水库下游河床坡度较大,土壤透水率高,下游河床基本干枯,生长植被极少。因此本文中所提生态目标为下游灌区防风林以及坝后部分生态林所需的生态水量缺水最少。

$$f_2 = \min \sum_{t=1}^T (D_{4,t} - W_{4,t}) \quad (2)$$

式中, f_2 是调度期内的最小生态缺水量。其他变量意义同前。

3.2. 约束条件

1) 水量平衡方程

$$V_{t+1} = V_t + (I_t - Q_t - q_{ev,t})\Delta t - \sum_{i=1}^4 W_{i,t} \quad (3)$$

式中, V_{t+1} 为 t 时段末水库的库容; V_t 为 t 时段初水库的库容; I_t 为 t 时段的入库流量; Q_t 为 t 时段的出库流量; $q_{ev,t}$ 为 t 时段的渗漏及蒸发损失量; Δt 为单位时段的时段长。

2) 流量约束

$$Q_{t,\min} \leq Q_t \leq Q_{t,\max} \quad (4)$$

式中, $Q_{t,\min}$ 为 t 时段允许的最小下泄流量(如最小生态流量、供水流量等); $Q_{t,\max}$ 为 t 时段允许的最大下泄流量(如泄流能力, 安全泄量等)。

3) 时段水位约束

$$Z_{t,\min} \leq Z_t \leq Z_{t,\max} \quad (5)$$

式中, Z_t 为 t 时段水库的水位; $Z_{t,\min}$, $Z_{t,\max}$ 分别为 t 时段最低限制水位和最高限制水位。

4) 需水约束

$$W_{i,t} \leq D_{i,t} \quad (6)$$

5) 初末水位约束

$$Z_T = Z_0 \quad (7)$$

式中, Z_T , Z_0 分别为计算期初、末水库水位, 一般给定为死水位。

3.3. 求解算法

多目标调度模型以经济社会供水量(包含生活、工业、灌溉供水), 河道外生态供水量, 及水库水位作为决策变量, 以年为调度期, 月为调度时段, 共 $3 \times 12 = 36$ 个决策变量, 采用多目标遗传算法 NSGA-II 进行模型的求解工作。得到经济社会供水量后, 通过供水优先次序(生活用水优先满足, 其次为工业用水, 最后为灌溉用水)可进一步得到生活、工业和灌溉水量。

NSGA-II 算法, 也称带精英策略的非支配排序的遗传算法, 是一种对 NSGA 算法进行改进的多目标遗传算法。该算法在 NSGA 算法的基础上加上了精英策略、拥挤度和拥挤度比较算子和快速非支配排序法三项措施, 其中, 引入精英策略, 可以扩大采样空间, 通过将父代种群与其产生的子代种群进行组合, 共同竞争产生下一代种群, 以保证父代中的优良个体进入下一代, 且不会丢失最佳个体, 达到迅速提高种群水平的目的; 提出拥挤度和拥挤度比较算子, 代替了 NSGA 算法中的指定共享半径的适应度共享策略, 并在快速排序后的同级比较中作为优选标准, 使准 Pareto 域中的个体能均匀分布扩展到整个 Pareto 域, 保证了种群的多样性; 采用快速非支配排序法, 可以降低算法的计算复杂度。具体流程为:

1) 生成初始解群体: 采用可行搜索算法, 生成各部门供水量及四道沟水库的水位, 形成若干个调度决策方案, 每个调度方案也可称为一个解个体;

2) 评价解群体适应性: 考虑相应的约束条件, 并结合放水策略和供水策略, 可以分别计算出社会经济缺水量及生态缺水量, 从而获得每个解对应的目标函数值和适应值, 根据目标值对解个体进行非支配排序, 再利用遗传算法的选择、交叉、变异 3 个基本操作得到第一代子代种群;

3) 解群体的进化: 从第二代开始, 将父代种群与子代种群合并, 进行快速非支配排序, 同时对每个非支配层中的个体进行拥挤度计算, 根据非支配关系以及个体的拥挤度选取合适的个体组成新的父代种群;

4) 通过遗传算法的选择、交叉、变异等基本操作产生新的子代种群: 重复步骤 2)、3), 依此类推, 直到满足程序结束的条件。最终解群体中的非支配解集, 就是四道沟水库多目标生态调度模型的非劣方案集。

4. 结果分析

4.1. 水量平衡计算

以 75% 频率年为例, 采用 2.3 节的径流数据和计算得到的需水数据, 进行四道沟水库水量平衡分析。结果表明(见表 4), 在保证生活和工业用水的前提下, 农业和生态用水在 2, 4, 5, 6, 10 月无法全部满足, 全年总缺水达到 333.8 万 m^3 。虽然哈密市为节约用水制定了用水定额和指标, 但是农业实际用水量远远超过用水定额, 因此不足水量需要开采地下水补充灌溉、或挤用生态用水保证农业生产。因此, 如何协调生活、农业、生态、工业等用水部门需求是亟需解决的问题。

Table 4. Monthly water balance calculation result of Sidaogou irrigation district with $P = 75\%$ design level year ($10^4 m^3$)

表 4. 四道沟灌区 $P = 75\%$ 设计水平年逐月水量平衡计算表(万 m^3)

项目		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
来水量	四道沟	35.2	15.6	29.4	26.2	128.7	306.3	499.6	223.9	144.7	59.7	41.1	28.5	1539.1
	工业用水	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	198.5
	灌溉用水	0.0	0.0	0.0	143.1	119.2	241.1	188.1	107.1	0.0	103.2	0.0	0.0	902.6
需水量	人畜用水	9.98	9.98	9.98	9.98	9.98	9.98	9.98	9.98	9.98	9.98	9.98	9.98	119.8
	生态用水	0.0	0.0	0.0	26.1	26.1	52.2	26.1	52.2	26.1	26.1	0.0	0.0	234.8
	小计	26.5	26.5	26.5	195.8	171.8	320.6	240.7	185.8	52.6	155.8	26.5	26.5	1455.7
供需平衡	余水	8.7	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	258.9	38.1	92.1	0.0	14.6	1.9	417.2
	缺水	0.0	10.7	0.0	169.6	43.1	14.3	0.0	0.0	0.0	96.4	0.0	0.0	333.8

4.2. 多目标水库调度结果

4.2.1. 供水 - 生态目标非劣解集

为均衡社会经济供水目标和生态目标, 建立了如第 3 节所述的多目标水库优化模型。采用 NSGA-II 算法求解模型时, 种群个数设置为 200, 迭代次数设置为 500。采用 MATLAB 中的 gamultiobj 函数进行运算, 非劣解集如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 目标 1 (经济社会缺水量) 和目标 2 (生态缺水量) 呈现明显的竞争关系, 说明防护林生态补水效益的提高需要以牺牲生活、工业和农业等社会经济用水部门的供水效益为代价。四道沟水库在 $P = 75\%$ 频率年下可以完全满足生态需水要求, 但此时经济社会缺水量达到最大(1011.43 万 m^3), 这种方案下的水库调度结果并不推荐; 经济社会部门的缺水量最小值为 160.50 万 m^3 , 此时生态缺水量达到最大(78.27 万 m^3), 合计总缺水量 238.77 万 m^3 。结果表明, 相比简单的水量平衡计算(见表 4), 水库优化调度能通过年内重新分配水量缓解区域的缺水程度(从缺水量 333.76 万 m^3 降至 238.77 万 m^3), 但是依然无法保证所有部门不缺水。这是因为 4~8 月为农业用水高峰期, 而水库 4 月份从死水位起调, 调节能力有限, 导致这几个月的缺水无法避免。选择 Pareto 解集中两端及拐点处的解作为典型方案, 进一步探究水库在三个典型方案下的运行结果。

4.2.2. 典型方案下水库运行指标分析

三个典型方案中，方案 1 为非劣解集中经济社会缺水最少对应的水库调度方案，方案 2 为折衷方案，方案 3 为生态缺水最少对应的水库调度方案，各典型方案下的经济社会部门、生态部门缺水及保证率见表 5。

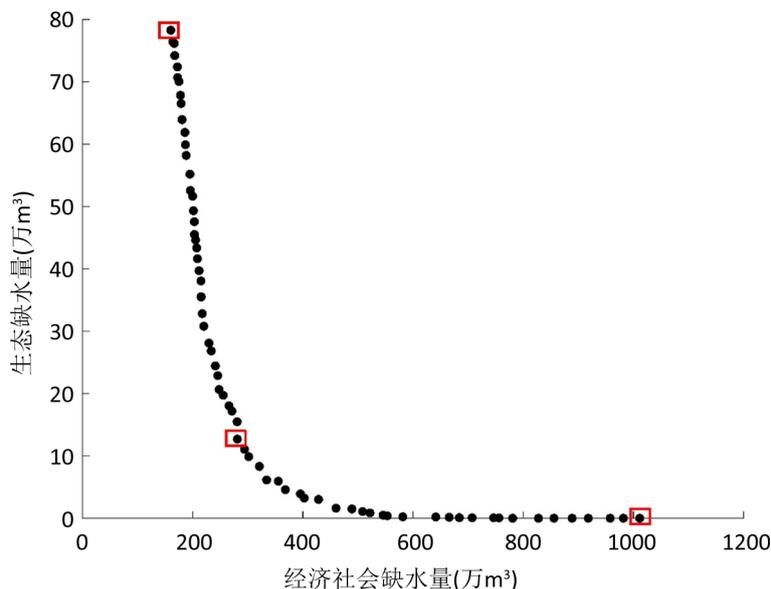


Figure 2. Pareto solution set between economic-social water supply and ecological water supply

图 2. 经济社会供水目标 - 生态目标非劣解集

Table 5. Water shortage and guarantee rate of each water-use department under typical schemes

表 5. 典型方案下各用水部门缺水及保证率

方案	经济社会需水量 (10^4 m^3)	生态需水量 (10^4 m^3)	经济社会供水 (10^4 m^3)	生态供水 (10^4 m^3)	经济社会缺水 (10^4 m^3)	生态缺水 (10^4 m^3)	灌溉保证率(%)	工业保证率(%)	防护林生态保证率(%)
1			1060.37	156.55	160.50	78.27	83.33%	91.67	83.33
2	1220.87	234.82	939.93	222.11	280.94	12.71	50%	41.67	50.00
3			209.44	234.82	1011.43	0	50%	16.67	100.00

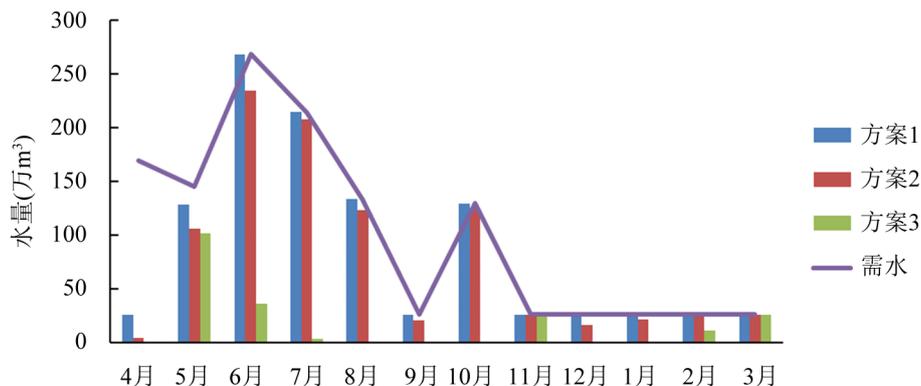


Figure 3. Monthly economic-social water supply (including domestic water, industrial water, and irrigation) processes under different schemes

图 3. 各方案逐月经济社会供水量(包括生活用水 + 工业用水 + 灌溉)

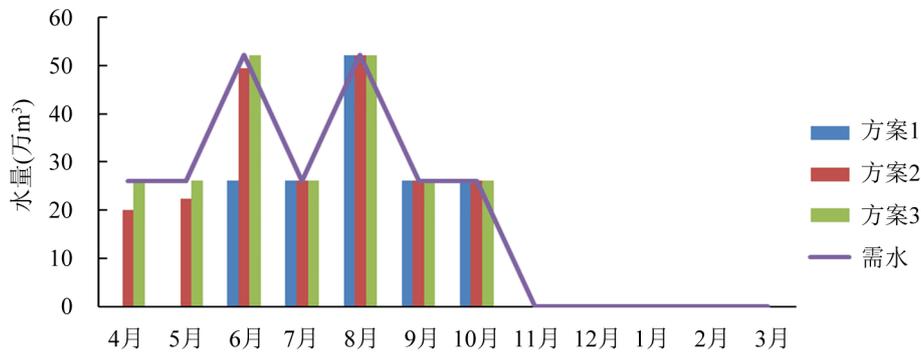


Figure 4. Monthly ecological water supply processes under different schemes

图 4. 各方案下逐月生态供水量

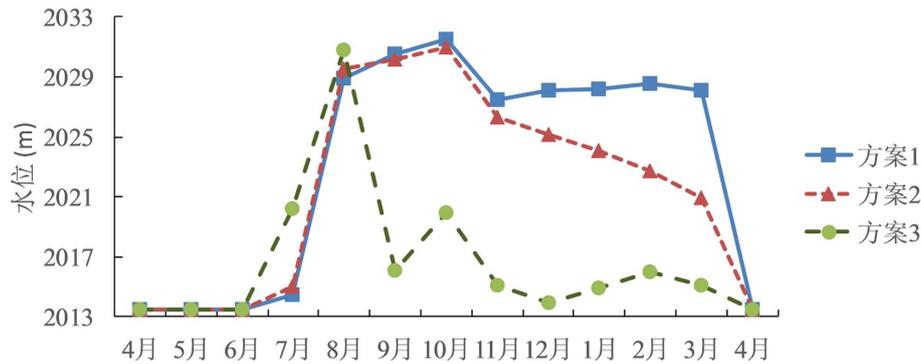


Figure 5. Monthly reservoir water level processes under different schemes

图 5. 各方案下水库水位过程

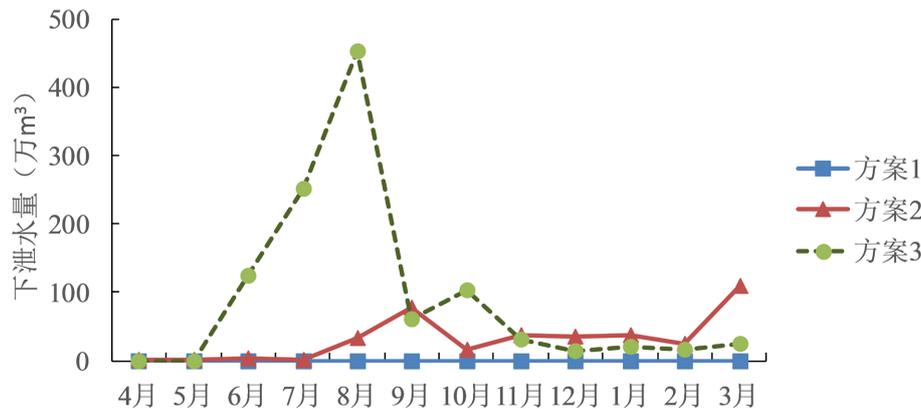


Figure 6. Monthly reservoir discharge processes under different schemes

图 6. 各方案下水库下泄水量过程

在方案 1 下, 灌溉保证率和工业供水保证率能达到 83.3% 和 91.67%, 此时生态保证率为 83.3%; 方案 3 下, 生态保证率达到 100%, 但灌溉保证率降至 50%, 工业保证率降至 16.67%, 缺口较大; 方案 2 的经济社会部门缺水性和生态缺水量在前述两个方案之间, 其中生态保证率与方案 1 相同, 灌溉保证率与方案 3 相同。各方案下供水量逐月分配情况见图 3, 图 4。可以看出, 相较方案 1 和方案 2, 方案 3 下经济社会部门的供水量在 6、7、8、10 月份下降的尤其显著, 这主要是因为水库将这部分水量补偿给了防护林生态供水(见图 4), 考虑到这些时段正处于灌溉期, 方案 3 下的水量配置对农业灌溉的不利影响较大。

各方案下的水库水位过程见图 5。相较其他方案, 方案 1 下水库水位一直处于较高水平, 最高水位为 2031.52

m(正常蓄水位)。这是因为此方案下多余水量更偏向于蓄存在水库中,而不是下泄到下游河道。相应地,方案2下水库下泄水量最少(见图6),几乎为0;方案3下水库下泄水量最大,为1095万m³。

5. 结论及建议

本文针对哈密市四道沟水库,建立了面向经济社会供水(生活、工业、灌溉)和生态供水的多目标水库调度优化模型,采用多目标遗传算法 NSGA-II 进行求解,获得了协调经济社会目标和生态目标的水库调度方案。结果表明,经济社会供水效益的提高是牺牲生态供水效益得到的,这表明两个目标之间存在竞争关系。通过优化水库调度规则,生态缺水量可以降至0,然而生活、工业、灌溉等经济社会用水部门的缺水现象始终存在,部门年最小缺水量为160.50万m³。这是因为8月份为农业用水高峰期,水库4月份从死水位开始起调,调节能力有限,无法满足需水,后续可通过调整水库起调水位,进一步探究不同初始条件下的水库优化调度方式。同时,调整用水定额,促进节约用水也是缓解水量短缺的一个有效途径,如:

- 1) 为减少蒸发渗漏损失,现有输水干支渠进行升级改造为管道,可有效缓解缺水现状;
- 2) 大力推进土地流转、土地整合,科学调整种植结构和灌溉定额;
- 3) 结合输水渠系的升级改造田间渠系进一步推行高效节水;

4) 明确责任,提高运行管理水平。以斗渠口计量点为节点,干支渠系由水管部门负责运行管理。斗渠口下游农民用水者协会或者村民委员会选定人员负责运行管理。

基金项目

本研究由国家重点研发计划项目(2019YFC1510602),国家自然科学基金项目(51879194)和长江勘测规划设计研究有限责任公司开放创新基金项目(CX2020K03)资助。

参考文献

- [1] 方子云,谭培伦. 为改善生态环境进行水库调度的初步研究[J]. 人民长江, 1984(6): 65-67.
FANG Ziyun, TAN Peilun. Preliminary study on reservoir regulation for improving ecological environment. Yangtze River, 1984(6): 65-67. (in Chinese)
- [2] 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(1): 28-32.
DONG Zheren, SUN Dongya and ZHAO Jinyong. Multi-objective ecological operation of reservoirs. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007(1): 28-32. (in Chinese)
- [3] LIU, D., CHEN, X. and LOU, Z. A model for the optimal allocation of water resources in a saltwater intrusion area: A case study in Pearl River Delta in China. Water Resources Management, 2010, 24(1): 63-81.
- [4] 陈悦云,梅亚东,蔡昊,许新发. 面向发电、供水、生态要求的赣江流域水库群优化调度研究[J]. 水利学报, 2018, 49(5): 628-638.
CHEN Yueyun, MEI Yadong, CAI Hao and XU Xinfa. Multi-objective optimal operation of key reservoirs in Ganjiang River oriented to power generation, water supply and ecology. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(5): 628-638. (in Chinese)
- [5] 吴贞晖,梅亚东,李析男,张平俊. 基于“模拟-优化”技术的多目标水库调度图优化[J]. 中国农村水利水电, 2020(7): 216-221.
WU Zhenhui, MEI Yadong, LI Xinan and ZHANG Pingjun. Optimization of multi-objective reservoir operation chart based on simulation-optimization technology. China Rural Water and Hydropower, 2020(7): 216-221. (in Chinese)
- [6] 刘哲杰,白涛,高凡,杨鹏年,王光焰. 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, YANG Pengnian and WANG Guangyan. Optimization of reservoir operation for multi-object protection and ecosystem restoration. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 410-418. (in Chinese)
- [7] 游进军,薛志春,林鹏飞,蒋云钟,魏娜. 二层结构的流域生态调度研究 I: 方法与模型[J]. 水利学报, 2021, 52(12): 1449-1457.
YOU Jinjun, XUE Zhichun, LIN Pengfei, JIANG Yunzhong and WEI Na. Study on the integrated river basin ecological operation based on two-layer structure I: Methodology and model. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(12): 1449-1457. (in Chinese)

Chinese)

- [8] 彭安帮, 马涛, 刘九夫, 黄对, 郑锦涛, 蒋文航. 考虑生态补水目标的丹江口水库供水调度研究[J]. 水文, 2021, 41(3): 82-87.
PENG Anbang, MA Tao, LIU Jiufu, HUANG Dui, ZHENG Jintao and JIANG Wenhong. Study on water supply scheduling of Danjiangkou Reservoir considering ecological replenishment objective. Journal of China Hydrology, 2021, 41(3): 82-87. (in Chinese)
- [9] 林俊强, 李游坤, 刘毅, 彭期冬, 张迪, 靳甜甜. 刺激鱼类自然繁殖的生态调度和适应性管理研究进展[J]. 水利学报, 2022, 53(4): 483-495.
LIN Junqiang, LI Youkun, LIU Yi, PENG Qidong, ZHANG Di and JIN Tiantian. Recent progress in ecological operation and adaptive management for stimulating fish natural spawning. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(4): 483-495. (in Chinese)
- [10] 新疆维吾尔自治区水利管理总站. DB65/3611-2014. 农业灌溉用水定额[S]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区质量技术监督局, 2014.
Xinjiang Uygur Autonomous Region Water Conservancy Management Station. DB65/3611-2014. Agricultural irrigation water quato. Urumqi: Administration of Quality and Technology Supervision of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 2014. (in Chinese)