

黄河中下游水资源多目标利益对古贤水库运行的响应

金文婷¹, 王义民², 畅建霞², 王学斌²

(1. 安康学院旅游与资源环境学院, 陕西 安康 725000;

2. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:为量化未来古贤水库参与黄河中下游梯级水库群联合运行对供水、发电、调水调沙、生态多目标关键利益及非关键利益的影响,设置2030水平年有古贤水库及无古贤水库两种情景,基于梯级水库群多目标协同优化调度理论构建黄河中下游梯级水库群多目标协同优化调度模型,通过求解模型分析了径流减少及未来综合需水增加的背景下,黄河中下游多目标利益对古贤水库参与联合运行的响应关系。结果表明:与无古贤水库情景相比,有古贤水库情景下水库群调度系统总协同度略微增加,供水与发电子系统有序度有所增加,农业关键期、非关键期多年平均缺水水量减少,水库群多年平均发电量增加;除调沙频率略微下降外,有古贤水库情景下输沙、生态目标关键利益及非关键利益均有所提升。

关键词:梯级水库群;协同优化调度;多目标利益;粒子群算法;黄河流域;古贤水库

中图分类号:TV697.1⁺2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)01-0052-08

Response of water resources multi-objective interests in middle-lower Yellow River to Guxian Reservoir operation//JIN Wenting¹, WANG Yimin², CHANG Jianxia², WANG Xuebin² (1. School of Tourism and Environment, Ankang University, Ankang 725000, China; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to quantify the impact of the Guxian Reservoir's participation in the joint operation of cascade reservoirs on key and non-key multi-objective benefits, including water supply, power generation, water-sediment regulation and ecology, in the middle-lower Yellow River, two scenarios with and without the Guxian Reservoir in 2030 were set. Based on the theory of multi-objective synergetic optimal operation of cascade reservoirs, the multi-objective synergetic optimal operation model by cascade reservoirs in the middle-lower Yellow River was constructed and solved. The response of multi-objective benefits in the middle-lower Yellow River to the joint operation of the Guxian Reservoir under the background of runoff reduction and comprehensive water demand growth in the future was analyzed. The results show that, compared with the scenario without the Guxian Reservoir, the total synergetic degree of the reservoir system with the Guxian Reservoir operation increased slightly, the order degree of subsystems of water supply and power generation increased, the average annual water shortage in the critical period and non-critical period of agriculture decreased, the average annual power generation of cascade reservoirs increased. In addition to a slight decrease in the frequency of water-sediment regulation, the key and non-key benefits of ecology and water-sediment regulation increased in the scenario with the Guxian Reservoir.

Key words: cascade reservoirs; synergetic optimal operation; multi-objective benefits; particle swarm optimization; Yellow River Basin; Guxian Reservoir

黄河流域是资源性缺水流域,人均水资源量和单位面积水资源量仅为全国平均水平的23%和15%,流域内生活、生产与生态用水矛盾极为尖锐。近年来,气候变化和人类活动加剧导致黄河径流量显著减少,给流域水资源的可持续开发利用带来了严峻挑战。20世纪80年代以来黄河中游径流量较

之前减少了30%以上,下游花园口水文站2001—2018年实测径流量较1956—1979年减少了41%^[1-2]。在径流减少背景下,黄河梯级水库群供水、发电、输沙、生态、防洪等多个用水目标之间的矛盾竞争关系进一步加剧。为了使黄河流域经济社会用水和生态环境、输沙用水之间实现协同有序,梯级

基金项目:安康学院高层次人才科研启动项目(2022AYQDZR09);陕西省科协青年人才托举计划项目(20230445);国家自然科学基金项目(U1965202, U2003204)

作者简介:金文婷(1990—),女,讲师,博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail:jwt_work@163.com

水库群多目标协同优化调度理论被提出以支撑黄河梯级水库群水资源多目标利用^[3]。该理论基于协同学将用水多目标细化为关键利益(各用水目标中涉及特殊或重要价值的用水需求)和非关键利益(各用水目标中非刚性需求的利益),并选取相应的序参量,量化序参量及各目标子系统有序度,按照多目标协同优化原则进行寻优调控,可在水资源有限情况下优先保障多目标关键利益,实现梯级水库群多目标关键利益与非关键利益的协同有序^[3]。

古贤水库是黄河中游规划的一座控制性水利枢纽工程,先后被列入国务院确定的 172 项和 150 项重大水利工程清单、国家“十四五”规划 102 项重大工程。古贤水库设计总库容为 134.6 亿 m³,其中调水调沙库容 20 亿 m³,拦沙库容 93.42 亿 m³,建成后可与万家寨、小浪底水库进行联合调水调沙,为黄河中下游水沙调控提供有利条件^[4]。近年来国内外学者针对古贤水库参与黄河梯级水库群联合调度开展了相关研究。例如:万占伟等^[5]采用水沙数学模型分析了古贤、小浪底水库联合运行在协调黄河下游水沙关系、减少河道淤积、长期维持中水河槽过流能力等方面的效果,结果表明古贤、小浪底水库联合拦沙和调水调沙可使下游河道长期处于微淤状态,保持中水河槽过流能力 50 a 以上;Castro-Gama 等^[6]针对黄河水库群调度问题构建了多元回归模型,分析了包含古贤水库在内的黄河中下游水库群下泄流量过程与下游花园口以下河段洪水总量、洪峰流量之间的相关关系;林秀芝等^[7]利用 82 场黄河潼关站洪水模拟了古贤水库调水调沙期近似下泄的水沙过程,分析其对三门峡库区河段冲刷、潼关高程降低的效果,并提出了古贤水库适宜下泄的水沙调控指标;Chen 等^[8]提出了一种结合离散微分动态规划、动态规划逐次逼近和大规模系统分解协调的 DDDP-DPSA-LSSDC 联合求解方法,并应用于包含古贤水库在内的黄河梯级水库群“水-沙-能”优化调度,结果表明,在输沙、防洪防凌、供水和生态效益保持不变的情况下联合求解方法的水库群发电效益较 DDDP 算法和粒子群优化算法 (particle swarm optimization algorithm, PSO) 分别提高了 2.31% 和 19.03%;陈翠霞等^[9]对比分析了不同水沙条件下古贤、东庄水库投入运行后黄河下游河道输沙能力较现状水库群调控方式的差异与变化,指出古贤、东庄水库运行后可进一步提高 11%~12% 的输沙能力。

目前尚无针对径流减少背景下黄河中下游梯级水库群多目标利益,特别是各目标的关键利益对古贤水库参与联合运行的响应研究。本文假设 2030

水平年古贤水库建成并投运,基于梯级水库群多目标协同优化调度理论构建黄河中下游梯级水库群多目标协同优化调度模型,设立有古贤水库和无古贤水库两种情景,通过模型求解对比分析两种情景下黄河中下游供水、发电、调水调沙、生态多目标序参量有序度及利益值的差异,量化各目标关键利益与非关键利益对古贤水库参与联合运行的响应,以期将来一定时期内黄河水资源高效利用及维护河流生命健康提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河发源于青藏高原的约古宗列盆地,沿途流经青海、四川、甘肃等 9 省(区),于山东垦利区注入渤海,中游为河口镇至河南郑州桃花峪河段,下游为桃花峪至入海口,中下游河段总长 1 992 km,中下游流域面积为 36.7 万 km²^[10-11]。中下游汇入支流主要有无定河、渭河、伊洛河、汾河、沁河和大汶河等,其中渭河是黄河最大的一级支流,天然径流量、沙量分别为 92.5 亿 m³、4.43 亿 t。黄河中游多数支流均流经水土流失严重的黄土高原地区,河道易形成洪水和大量泥沙,而小浪底以下河段进入平原区,加之气候变化和人类活动影响导致径流量减少,致使黄河下游长达 800 km 的河段泥沙淤积严重,河床比背河地面平均高出 4~6 m,成为“地上悬河”。

黄河从石嘴山断面至下游利津断面的河段中已建有海勃湾、三盛公、万家寨、龙口、天桥、三门峡、小浪底、西霞院等水库,其中万家寨水库为不完全年调节水库,主要任务是供水结合发电调峰,兼顾防洪、防凌、生态等,其余均为日调节或径流式水电站;小浪底水库为不完全年调节水库,总库容 126.5 亿 m³,承担着下游的防洪、减淤、供水、调水调沙等多重任务;三门峡水库为季调节水库,有效库容为 4.39 亿 m³,但由于库区泥沙淤积严重等问题,目前其调节能力非常有限,在本文中不参与黄河中下游梯级水库群的联合调度。因此,本文参与梯级水库群多目标协同优化调度的水库群为万家寨、古贤(有古贤水库情景)、小浪底水库,将海勃湾、三盛公、龙口、天桥、三门峡、西霞院 6 座已建水电站视为径流式电站,统计梯级发电效益;除海勃湾、三盛公两座径流式电站位于上游外,其余均为中下游水库、水电站。

1.2 数据来源

1.2.1 径流资料

收集了黄河干流石嘴山、头道拐、华县、花园口

和利津水文站及黄河重要一级支流入黄监测水文站 1990—2015 年逐月实测径流资料。支流水文站主要有河口镇至龙门区间支流无定河的白家川水文站、窟野河的温家川水文站;龙门至三门峡区间支流渭河的华县水文站、汾河的河津水文站;小浪底至花园口区间支流洛河的黑石关水文站、沁河的武陟水文站;花园口以下支流大汶河的戴村坝水文站。以上径流资料来源于中华人民共和国水文年鉴黄河流域水文资料及黄河水利委员会。

1.2.2 多目标需水资料

需水资料包括河道外综合需水、河道内生态需水和水库群调水调沙需求等。

河道外综合需水包含了工业、农业、生活、河道外生态需水。由水利部黄河水利委员会编制的《黄河流域综合规划(2012—2030 年)》^[12]中的需水预测,获得 2030 规划年各月份黄河下游花园口断面的河道外综合需水,如表 1 所示,总需水量为 103.67 亿 m³。

表 1 2030 规划年花园口断面河道外综合需水

单位:亿 m³

月份	工业、生活、 河道外生态需水	农业 需水	月份	工业、生活、 河道外生态需水	农业 需水
1	1.27	0.01	7	1.27	15.30
2	1.27	0.02	8	1.27	10.81
3	1.27	3.05	9	1.27	4.42
4	1.27	9.38	10	1.27	6.49
5	1.27	15.85	11	1.27	5.57
6	1.27	17.50	12	1.27	0.01

生态需水指维持河流生态系统健康及保持空间连续性、保持水生种群及群落生命过程的可持续性、对抗外来物种的竞争性所需的流量过程^[13]。河道内满足适宜的生态流量是保护河道生态健康,维持河道一定纳污能力的必要条件。此外,5、6 月是成鱼产卵、幼鱼生长的关键时期,此时鱼类对河道内产卵场的流量、流速、水温均有一定要求,需要一定次数的生态脉冲来刺激鱼类繁殖与生长。生态脉冲可由水库、水电站在 5、6 月鱼类繁殖、生长的时期内择机下泄一定次数的高流量过程,模拟天然河流的生态脉冲。基于已有的维持黄河干流水生态系统良性循环的重要断面生态需水成果^[14],本文考虑黄河下游花园口断面的生态流量过程及生态脉冲需求,花园口断面河道内生态需水如表 2 所示。

参考黄河流域梯级水库群调水调沙已有研究成果及小浪底多年调水调沙的已有经验^[15-17],设置下游梯级水库群调水调沙的控制流量范围为 3 500 ~ 4 000 m³/s,调沙历时为 10 ~ 20 d,调沙时机为 6 月下旬至 7 月上旬供水期结束后、主汛期来临前。

表 2 花园口断面河道内生态需水

单位:m³/s

月份	适宜生态 流量	最小生态 流量	月份	适宜生态 流量	最小生态 流量
1	400	200	7	800	200
2	400	200	8	800	200
3	400	200	9	800	200
4	800	200	10	800	200
5	800	200	11	400	200
6	800	200	12	400	200

注:最小生态流量适用于枯水年,其他年份满足适宜生态流量需求;生态脉冲时间为 5、6 月,一年至少一次,一次持续 6 d 以上;生态脉冲适宜生态流量为 1 700 m³/s,最小生态流量为 1 400 m³/s。

2 研究方法

2.1 梯级水库群多目标协同优化调度理论

梯级水库群多目标调度系统是由水文要素、水利工程主体、河道形态、河流生态环境、社会经济需求等诸多要素相互作用而构成的有机整体,具有开放性、非线性、随机性、系统性等复杂系统特征。若将梯级水库群多目标调度系统的各个目标视为子系统,则内部子系统之间具有非线性的相互竞争、相互合作关系。梯级水库群多目标协同优化调度,其实是协调水库群多目标调度系统中供水、发电、输沙、生态子系统的关系,保持子系统之间的动态平衡,使多目标调度系统达到整体、综合、有序的状态,实现水资源高效利用、水资源稳定供应、能源安全保障、河道水沙关系协调、河流生态健康。

黄河流域水资源短缺,综合用水任务繁重,梯级水库群多目标协同优化调度时应对各目标的关键利益和非关键利益有主次、分轻重地制定相应的控制原则。在黄河流域径流减少、多目标水资源利用竞争加剧的背景下,制定梯级水库群多目标协同优化调度的总体原则为:在基本保障各目标关键利益的基础上,通过统筹协调,甚至必要时适度牺牲非关键利益来达到整体水库群多目标调度系统的协同控制。

2.1.1 黄河中下游多目标关键利益与非关键利益识别及序参量选取

供水目标中,工业、生活及河道外生态需水(统称为“河道外非农业用水”)是支撑经济社会发展的基础资源,应视为关键利益;农业用水中,农作物生长周期中对水分敏感且与产量密切相关的某些重要阶段的灌溉用水应视为关键利益;黄河下游引黄灌区的农作物种植结构以冬小麦、玉米等粮食作物为主^[18],冬小麦的关键生育阶段抽穗至灌浆期、灌浆至成熟期分别为 5 月上旬至 5 月下旬、5 月下旬至 6 月上旬;玉米的关键生育阶段拔节至抽雄期、抽雄至灌浆期分别为 7 月下旬至 8 月中旬、8 月中旬至

8月下旬。因此,确定5月上、中、下旬,6月上旬,7月下旬及8月上、中、下旬为下游供水目标中灌溉用水的关键时期(以下称“农业关键期”),该时期的农业用水满足程度即为下游供水目标的关键利益;其他时期的农业用水满足程度视为下游供水目标的非关键利益。生态目标中,河道内生态基流的保障能力及鱼类繁殖生长所需的每年至少一次生态脉冲为关键利益;发电目标中,非枯水期(4—10月)的梯级水库群发电效益是关键利益;输沙目标中,一次调水调沙控制流量与调沙历时为关键利益,长系列调沙频率为非关键利益。表3列出了黄河中下游多目标用水的关键利益与非关键利益序参量。

表3 黄河中下游梯级水库群多目标关键利益与非关键利益序参量

目标	关键利益序参量	非关键利益序参量
供水	河道外非农业用水保证率(P_{w1})、农业关键期的总缺水量(V_1)、农业关键期的最大缺水深度(D)	农业非关键期的供水保证率(P_{w2})、农业非关键期的总缺水量(V_2)
发电	非枯水期水库群发电保证率(P_{e1})、非枯水期水库群平均出力(N_{e1})	枯水期水库群发电保证率(P_{e2})、枯水期水库群平均出力(N_{e2})
输沙	一次调水调沙的平均控制流量(Q_{ws})、一次调沙历时(T_{ws})	长系列调水调沙频率(F_{ws})
生态	生态基流保证率(P_{ec})、5、6月中一次生态脉冲(T_{ec1})	5、6月中超过一次生态脉冲的次数(T_{ec2})

2.1.2 序参量有序度量化

在协同学理论中,序参量对子系统有序演化的贡献程度用序参量有序度表示。本文采用线性功效函数对正指标功效序参量、负指标功效序参量及适度功效序参量3种类型的序参量有序度进行量化^[19],量化公式分别为

$$d_{jnk} = (e_{jnk} - e_{nk\min}) / (e_{nk\max} - e_{nk\min}) \quad (1)$$

$$d_{jnk} = (e_{nk\max} - e_{jnk}) / (e_{nk\max} - e_{nk\min}) \quad (2)$$

$$d_{jnk} = 1 - (e_{jnk} - c) / (e_{nk\max} - e_{nk\min}) \quad (3)$$

式中: n 为子系统编号; k 为子系统中序参量编号; j 为水文年编号; d_{jnk} 为第 j 个水文年第 n 个子系统的第 k 个序参量的有序度; e_{jnk} 为第 j 个水文年第 n 个子系统的第 k 个序参量的取值; $e_{nk\max}$ 、 $e_{nk\min}$ 分别为第 n 个子系统的第 k 个序参量取值的最大、最小值; c 为适度功效序参量有序度达到最大时该序参量的取值。

2.1.3 子系统有序度量化

子系统的有序度用于衡量子系统对总体大系统协同演化的贡献程度。单一水文年子系统有序度大小反映了该子系统对该水文年梯级水库群多目标调度系统的有序度贡献水平。

$$d_{jn} = \sum_{k=1}^K w_{nk} d_{jnk} \quad (4)$$

式中: d_{jn} 为第 j 个水文年第 n 个子系统的有序度; K 为子系统中序参量的总数; w_{nk} 为第 n 个子系统的第 k 个序参量的权重。

2.2 梯级水库群多目标协同优化调度模型

2.2.1 模型构建

在协同学理论中,用整体系统协同度来量化各子系统协同优化的总体程度,梯级水库群多目标调度系统的协同度可由各子系统有序度多年平均值的几何平均求得。因此,本文构建以梯级水库群多目标协同度最大为优化目标的水库群多目标协同控制模型。由于供水、输沙、生态目标关键利益的时间尺度精细到了旬,因此在构建模型时,设置5、6、7、8月的调度尺度为旬,其余调度尺度为月,一个水文年有20个时段。

目标函数为

$$d = \max \sqrt[4]{\prod_{n=1}^4 d_n} \quad (5)$$

其中
$$d_n = \begin{cases} \sum_{j=1}^J d_{jn} / J & n = 1, 2, 4 \\ \lambda_1 \left(\sum_{j=1}^J d_{jn} / J_{ws} \right) + \lambda_2 d_{ws} & n = 3 \end{cases}$$

式中: d 为梯级水库群多目标协同度; J 为长系列调度的总年数; J_{ws} 为长系列总调沙年数; λ_1 、 λ_2 为权重; d_{ws} 为长系列调沙频率有序度; n 为子系统编号, $n=1,2,3,4$ 分别代表供水、发电、输沙、生态子系统;当 $n=1,2,4$ 时, d_n 为总调度期内第 n 个子系统逐年有序度的多年平均值;当 $n=3$ 时, d_n 为仅实施调水调沙年份的输沙子系统有序度的多年平均值与长系列调沙频率 F_{ws} 有序度的加权求和。

模型中需要考虑的约束条件有水量平衡约束、水库水位约束、出库流量约束、电站出力约束、变量非负约束等。

2.2.2 模型求解

本文采用PSO进行模型求解。PSO作为一种高效的寻优算法被用于求解非线性、不可微分的多目标复杂优化问题。由于其原理简单、参数少、搜索速度快,粒子群及其改进算法被广泛应用于水库优化调度问题^[20]。例如:Niu等^[21]提出了一种混合量子粒子群算法(HQPSO)对水库群优化调度问题进行求解,通过与传统调度方法比较,所提方法能够获得电力系统电量损失更少的调度方案,验证了该方法的有效性;Ma等^[22]提出了基于云计算的火花并行粒子群优化算法(SPPSO),以沅江八座梯级水库调度系统为例,对SPPSO的并行性能、精度、效率和稳定性等方面进行了仿真实验;周帅^[23]充分考虑黄

河流域气象和下垫面条件的空间异质性构建了8种概念性集总式水文模型预测黄河流域重要断面未来来水量和农业需水量的时空演变规律,并建立了黄河流域梯级水库群联合调度模型,采用粒子群算法求解变化环境下黄河梯级水库群的适应性调度方案。本文用 PSO 进行模型求解时,优化算法的主要参数如粒子种群规模、最大迭代次数、惯性权重、惯性权重阻尼系数、个体学习系数、群体学习系数分别取 200、1 000、1.0、0.99、1.5、2.0。采用 PSO 进行模型求解时,在粒子种群规模一定并且迭代次数一定的情况下,随机生成的初始种群可能导致计算结果不稳定或收敛于局部最优解,因此需对模型进行多次运算,选择最优的适应度值方案。

3 结果与分析

3.1 两种情景下序参量有序度及利益值对比分析

两种情景下梯级水库群多目标序参量有序度及利益值的多年平均值如表 4 所示,表中情景 1 和情景 2 分别为无古贤水库情景和有古贤水库情景。

表 4 两种情景下序参量有序度及利益值多年平均值

目标	序参量	有序度		利益值	
		情景 1	情景 2	情景 1	情景 2
供水	P_{w1}	0.99	1.00	99.42%	100%
	V_1	0.86	0.87	1.85 亿 m^3	1.64 亿 m^3
	D	0.79	0.83	0.21	0.17
	P_{w2}	0.67	0.69	67.00%	68.59%
	V_2	0.77	0.82	4.08 亿 m^3	3.25 亿 m^3
	P_{e1}	0.94	0.95	93.59%	95.38%
发电	N_{e1}	0.42	0.43	168.78 万 kW	243.56 万 kW
	P_{e2}	0.70	0.75	70.00%	75.38%
	N_{e2}	0.29	0.29	117.75 万 kW	164.54 万 kW
	Q_{ws}	0.52	0.56	3 759.16 m^3/s	3 778.33 m^3/s
输沙	T_{ws}	0.48	0.50	12.73 d	13.00 d
	F_{ws}	0.42	0.36	42.31%	38.46%
	P_{ec}	1.00	1.00	100%	100%
生态	T_{ec1}	1.00	1.00	1	1
	T_{ec2}	0.20	0.23	1	1.15

对比表 4 中两种情景下的多目标序参量有序度可知:有古贤水库情景下,黄河中下游水库群供水子系统的 Q_{ws} 、 T_{ws} 、 F_{ws} 的关键利益 P_{w1} 、 V_1 、 D 的有序度分别为 1.00、0.87、0.83,分别较无古贤水库情景提高了0.01、0.01、0.04;非关键利益 P_{w2} 、 V_2 的有序度分别为 0.69、0.82,分别较无古贤水库情景提高了 0.02、0.05;最终供水子系统有序度为 0.88,较无古贤水库情景增加了 0.02;发电子系统关键利益 P_{e1} 、 N_{e1} 的有序度分别为 0.95、0.43,均较无古贤水库情景增加 0.01,非关键利益 P_{e2} 的有序度为 0.75,较无古贤水库情景增加 0.05,增长明显;最终发电子系统有序度为0.66,较无古贤水库情景增加 0.02;输沙子

系统的关键利益 Q_{ws} 、 T_{ws} 的有序度分别为 0.56、0.50,分别较无古贤水库情景增加了 0.04、0.02;非关键利益 F_{ws} 的有序度为 0.36,较无古贤水库情景减少了0.06;最终输沙子系统有序度为 0.48;生态子系统关键利益有序度均为 1,保障良好;非关键利益 T_{ec2} 的有序度仅为 0.23,较无古贤水库情景略微增加 0.03,最终生态子系统有序度为 0.87;最终有古贤水库情景下的黄河中下游水库群多目标总协同度为 0.70,较无古贤水库情景略微提高 0.01。

对比表 4 中两种情景下的供水目标利益值可知:有古贤水库情景下,黄河中下游供水目标的河道外非农业用水保证率 P_{w1} 为 100.00%,完全满足;农业关键期总缺水量 V_1 多年平均值为 1.64 亿 m^3 ,较无古贤水库情景减少了 0.21 亿 m^3 ,降幅 11.35%;农业关键期最大缺水深度 D 为 0.17,较无古贤水库情景下降了 0.04;农业非关键期的供水保证率 P_{w2} 为 68.59%,较无古贤水库情景提高了 1.59%;农业非关键期总缺水量 V_2 多年平均值为 3.25 亿 m^3 ,较无古贤水库情景减少了 0.83 亿 m^3 ,降幅 20.34%;可见,未来古贤水库的投入运行将有效提高黄河中下游水库群保障供水目标用水利益的能力,特别是明显降低了农业用水的缺水量及缺水深度。

对比表 4 中两种情景下的发电目标利益值可知:有古贤水库情景下梯级水库群非枯水期发电保证率 P_{e1} 为 95.38%,较无古贤水库情景提高了 1.79%;非枯水期平均出力 N_{e1} 为 243.56 万 kW,较无古贤水库情景增加了 74.78 万 kW,增幅44.31%;非关键利益枯水期发电保证率 P_{e2} 为75.38%,较无古贤水库情景增加了5.38%;枯水期平均出力 N_{e2} 为 164.54 万 kW,较无古贤水库情景增加了 46.79 万 kW,增幅 39.74%;可见古贤水库加入中下游梯级水库群联合调度后,中下游水库群的发电保证率及出力均有所提高,其中非枯水期平均出力提升最大。

对比表 4 中两种情景下的输沙目标利益值可知:有古贤水库情景下关键利益单次调沙流量 Q_{ws} 多年平均值为 3 778.33 m^3/s ,较无古贤水库情景略微增加;一次调沙历时 T_{ws} 平均为 13 d,较无古贤水库情景增加了 0.27 d;非关键利益长系列调沙频率 F_{ws} 为 38.46%,即 26 a 中调沙 10 次,平均 2.6 a 调一次,较无古贤水库情景减少 3.85%,说明有古贤水库情景下的调水调沙可持续性略微有所下降,其原因可能是古贤水库的运行主要提高了中下游水库群供水、发电利益,减少了下游缺水量,并提高了一次调水调沙的流量及历时,使得水库群存蓄水量减少,降低了连续调水调沙的能力。

对比表 4 中两种情景下的生态目标利益值可知:两种情景下关键利益均能完全满足;有古贤水库情景下非关键利益多次生态脉冲 T_{ec2} 的多年平均值为 1.15 次,较无古贤水库情景小幅增加了 0.15 次,说明古贤水库运行有利于梯级水库群塑造下游生态脉冲所需的流量过程,但由于多目标用水需求的矛盾激烈,有助于鱼类繁殖和生长的生态脉冲的次数总体而言仍处于较低水平。

3.2 两种情景下利益值长系列变化过程对比分析

图 1 为两种情景下黄河中下游供水目标利益长系列变化过程。由图 1 可知:①有古贤水库情景下,黄河中下游供水目标的农业关键期缺水量 V_1 长系列变化过程中有 14 年不缺水,较无古贤水库情景增加 1 年;仅 1 年的 V_1 超过 10 亿 m^3 ,为 2002 年的 10.41 亿 m^3 ,较无古贤水库情景减少了 1 年;②农业非关键期缺水量 V_2 长系列变化过程中,有古贤水库情景下有 11 年的 V_2 为 0,农业非关键期缺水主要出现在 1999—2009 年,其中有 4 年的 V_2 超过 10 亿 m^3 ,较无古贤水库情景减少了 3 年,说明古贤水库的联合运行减少了农业用水出现较大缺水情况的概率;③农业关键期最大缺水深度 D 变化过程中,有古贤水库情景下有 14 年的 D 为 0;有 4 年的 D 超过 0.5,较无古贤水库情景减少了 1 年;④有古贤水库情景下,共有 9 年的河道外综合用水需求不缺水,占总年数的 34.6%,较无古贤水库情景增加了 3 年;有古贤水库情景下河道外多年平均总缺水量为 4.88 亿 m^3 ,较无古贤水库情景减少了 1.05 亿 m^3 ,减幅明显;可见未来古贤水库的投入与联合运行将有效降低黄河下游河道外综合用水的缺水程度,但由于黄河本身径流不足,资源型缺水导致即使增加具有较大调节性能的水利工程也难以从根本上扭转河道外缺水,特别是农业常年缺水的局面,未来还需要加快实施南水北调西线工程等外流域调水工程以缓解多目标用水矛盾。

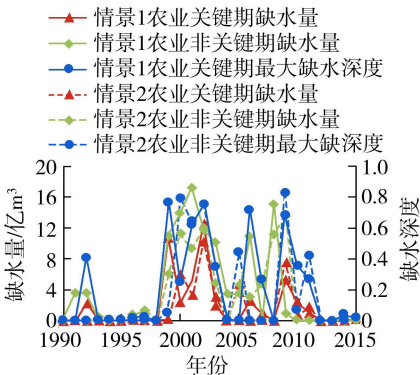


图 1 两种情景下黄河中下游供水目标关键利益与非关键利益变化过程

图 2 为两种情景下黄河中下游发电目标利益变化过程。由图 2 可知:①有古贤水库情景下黄河中下游梯级水库群非枯水期平均出力 N_{e1} 变化范围在 140 万 ~ 330 万 kW 之间,而无古贤水库情景下 N_{e1} 的变化范围下降为 104 万 ~ 235 万 kW 之间,最大值下降了近 95 万 kW;②有古贤水库情景下水库群枯水期平均出力 N_{e2} 的变化范围在 135 万 ~ 193 万 kW 之间,无古贤水库情景下 N_{e2} 的变化范围为 89 万 ~ 135 万 kW 之间,降幅明显;③有古贤水库情景下梯级水库群年发电量变化范围为 122.90 亿 ~ 238.05 亿 kW · h,多年平均值为 171.82 亿 kW · h;无古贤水库情景下年发电量变化范围为 85.66 亿 ~ 169.03 亿 kW · h,最大值下降了 69.02 亿 kW · h,多年平均发电量为 125.57 亿 kW · h,较有古贤水库情景减少了 46.25 亿 kW · h,即古贤水库多年平均发电量低于其设计值 56.45 亿 kW · h。可以看出,在近年来黄河径流减少及电调服从水调的背景下,古贤水库参与联合运行对于梯级水库群年发电量的提升能力低于预期。

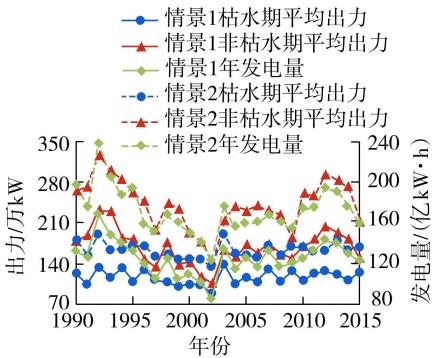


图 2 两种情景下黄河中下游发电目标关键利益与非关键利益变化过程

表 5 为两种情景下梯级水库群输沙目标利益变化过程。由表 5 可知:①两种情景下黄河中下游梯级水库群进行调水调沙年份的来水频率 P 均小于 50%,说明下游实施调沙的年份为丰水年或平水年;②无古贤水库情景下调沙流量 Q_{ws} 取值范围为 3 608.44 ~ 3 957.19 m^3/s ,有古贤水库情景下 Q_{ws} 取值范围为 3 608.21 ~ 3 934.10 m^3/s ,两种情景下的 Q_{ws} 取值范围相近;③有古贤水库中下游梯级水库群共进行了 10 次调水调沙,较无古贤水库情景减少 1 次,减少的原因是 2008 年 6 月下旬时段末小浪底水库水位已降至死水位 230 m,梯级水库群总蓄水量不足,无法达到输沙要求,10 次输沙中有 3 次的调沙历时为 20 d,其余为 10 d;④有古贤水库情景下一次调沙用水量为 30.86 亿 ~ 66.10 亿 m^3 ,平均值为 42.27 亿 m^3 ,较无古贤水库情景下的调沙水量平均值增加了 0.98 亿 m^3 。

表 5 两种情景下梯级水库群输沙目标利益值

年份	来水频率/%	调沙流量/(m ³ /s)		一次调沙历时/d		调沙水量/亿 m ³	
		情景 1	情景 2	情景 1	情景 2	情景 1	情景 2
1992	24.93	3 614.78	3 802.51	20	20	62.46	65.71
1993	22.22	3 879.33	3 825.41	20	20	67.03	66.10
1998	29.63	3 730.19	3 716.87	20	20	64.46	64.23
2003	48.15	3 856.57	3 879.72	10	10	33.32	33.52
2005	7.41	3 867.70	3 691.62	10	10	33.42	31.03
2008	40.74	3 696.96		10		31.94	
2010	37.04	3 572.57	3 873.59	10	10	30.87	33.47
2011	14.81	3 786.82	3 934.10	10	10	32.72	33.99
2012	3.70	3 957.19	3 671.35	10	10	34.19	30.86
2013	44.44	3 780.16	3 608.21	10	10	32.66	31.17
2014	33.33	3 608.44	3 779.91	10	10	31.17	32.66

两种情景下所有年份的花园口断面生态基流保证率 P_{ec} 均为 100%，河道生态基流得到完全满足。图 3 为两种情景下黄河中下游生态脉冲次数变化过程。由图 3 可知：有古贤水库情景下有 9 年的生态脉冲次数为 3 次，较无古贤水库情景下生态脉冲次数为 3 次的年数增加了 1 年；有 12 年的生态脉冲次数为 2 次，较无古贤水库情景下生态脉冲次数为 2 次的年数增加了 2 年；有 5 年的生态脉冲次数仅为 1 次，占总年数的 19.23%。可见，梯级水库群每年 5、6 月塑造的生态脉冲次数主要以 2 次为主，未来加入古贤水库的中下游梯级水库群联合运行将为下游河道更好地塑造多次有利于鱼类繁殖及生长的生态脉冲流量。

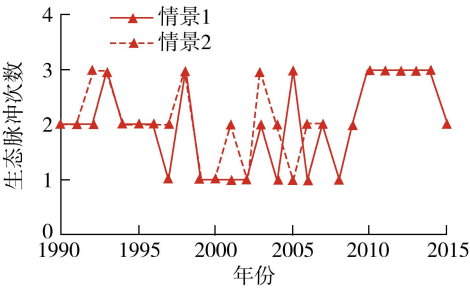


图 3 两种情景下黄河中下游生态目标生态脉冲次数变化过程

4 结 论

a. 有古贤水库情景下黄河中下游水库群多目标调度系统总协同度较无古贤水库情景略微增加，其中供水与生态子系统对水库群调度系统协同演化的贡献程度最高，输沙目标的贡献程度最低。各目标关键利益序参量有序度普遍高于非关键利益，遵循了在基本保障各目标关键利益的基础上，统筹协调，甚至适度牺牲非关键利益来实现水库群多目标协同优化调度的原则。

b. 有古贤水库情景下供水、发电、生态目标的

各关键利益与非关键利益值均较无古贤水库情景有所提升；输沙目标中，有古贤水库情景下除长系列调沙频率略微下降外，黄河中下游水库群一次调水调沙的控制流量及历时均有所提升。

c. 水库群多目标利益长系列变化过程中，有古贤水库情景下河道外综合需水、农业关键期与非关键期的农业需水得到完全满足的年数均较无古贤水库情景增加明显。可见未来古贤水库的投入与联合运行将有效降低黄河下游河道外综合用水的缺水程度，并大幅提高梯级水库群发电能力、调水调沙能力和塑造生态脉冲流量的能力。

参考文献：

[1] 王国庆,管晓祥,王乐扬,等. 气候变化和人类活动对黄河重点区间径流的影响[J]. 人民黄河,2019,41(10): 26-30. (WANG Guoqing, GUAN Xiaoxiang, WANG Yueyang, et al. Impacts of climate change and human activities on stream flow of the key runoff generation areas of the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2019, 41 (10) : 26-30. (in Chinese))

[2] 张建业,王国庆,金君良,等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展,2020,31(2): 153-161. (ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, JIN Junliang, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956-2018 [J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (2) : 153-161. (in Chinese))

[3] 金文婷. 黄河梯级水库群“水-沙-电-生态”多维协同控制与均衡调控研究[D]. 西安:西安理工大学,2021.

[4] 张金良. 黄河古贤水利枢纽的战略地位和作用研究 [J]. 人民黄河, 2016, 38 (10) : 119-121. (ZHANG Jinliang. Research on the strategic position and functions of Yellow River Guxian multipurpose dam project [J]. Yellow River, 2016, 38 (10) : 119-121. (in Chinese))

[5] 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))
- [6] CASTRO-GAMA M E, POPESCU I, LI S, et al. Flood inference simulation using surrogate modelling for the Yellow River multiple reservoir system[J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 55: 250-265.
- [7] 林秀芝, 苏林山, 胡恬, 等. 基于三门峡水库反馈效应的古贤水库调控指标分析[J]. 泥沙研究, 2020, 45(2): 1-7. (LIN Xiuzhi, SU Linshan, HU Tian, et al. Analysis on regulation index of the Guxian Reservoir based on feedback effect of the Sanmenxia Reservoir[J]. Journal of Sediment Research, 2020, 45(2): 1-7. (in Chinese))
- [8] CHEN Lu, HOU Bingqi, ZHAN Ting, et al. Water-sediment-energy joint operation model of large-scale reservoir group for sediment-laden rivers [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 370: 133271.
- [9] 陈翠霞, 刘俊秀, 付健. 基于黄河中游水库群调控的下游河道输沙能力分析[J]. 人民黄河, 2023, 45(6): 37-42. (CHEN Cuixia, LIU Junxiu, FU Jian. Analysis of sediment transport capacity of the lower reaches of the Yellow River based on the regulation of reservoir groups in the middle reaches of the Yellow River[J]. Yellow River, 2023, 45(6): 37-42. (in Chinese))
- [10] 田美荣, 冯朝阳, 王世曦, 等. 近 70 年来黄河流域生态修复历程及系统性修复思考[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(5): 1787-1797. (TIAN Meirong, FENG Chaoyang, WANG Shixi, et al. Ecological restoration of the Yellow River Basin in the last 70 years and systematic restoration thinking [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(5): 1787-1797. (in Chinese))
- [11] 张金良, 仝亮, 王卿, 等. 黄河下游治理方略演变及综合治理前沿技术[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 41-49. (ZHANG Jinliang, TONG Liang, WANG Qing, et al. Evolution of regulation strategy for lower Yellow River and its cutting-edge technology of comprehensive management[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 41-49. (in Chinese))
- [12] 水利部黄河水利委员. 黄河流域综合规划(2012—2030 年)[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2013.
- [13] 高勋, 陈星, 卢娟娟, 等. 台州主城区河道生态需水计算与水量调度[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 55-61, 106. (GAO Xun, CHEN Xing, LU Juanjuan, et al. Ecological water demand calculation and water volume scheduling for river channels in Taizhou's main urban area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 55-61, 106. (in Chinese))
- [14] 张洪波, 王义民, 蒋晓辉, 等. 基于生态流量恢复的黄河干流水库生态调度研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 15-21. (ZHANG Hongbo, WANG Yimin, JIANG Xiaohui, et al. Ecological regulation of reservoirs on the Yellow River mainstream oriented to ecological flow restoration [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(3): 15-21. (in Chinese))
- [15] JIN Wenting, CHANG Jianxia, WANG Yimin, et al. Long-term water-sediment multi-objectives regulation of cascade reservoirs: a case study in the Upper Yellow River, China [J]. Journal of Hydrology, 2019, 577: 123978.
- [16] AN Cuihua, LU Jun, QIAN Yu, et al. The scour-deposition characteristics of sediment fractions in desert aggrading rivers-taking the upper reaches of the Yellow River as an example[J]. Quaternary International, 2019, 523: 54-66.
- [17] 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. (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, 2021, 37(15): 60-67. (in Chinese))
- [18] 刘涛, 尚晓菲, 苏原原, 等. “双碳”目标下黄河下游耕地绿色利用效率、收敛性与影响因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 291-299. (LIU Tao, SHANG Xiaofei, SU Yuanyuan, et al. Green utilization efficiency, convergence, and influencing factors of cultivated land in lower yellow river under “double carbon” target [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 291-299. (in Chinese))
- [19] 赏珂祺. 基于协同学的城市轨道交通与经济协同发展研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [20] CHEN Haitao, WANG Wenchuan, CHEN Xiaonan, et al. Multi-objective reservoir operation using particle swarm optimization with adaptive random inertia weights [J]. Water Science and Engineering, 2020, 13(2): 136-144.
- [21] NIU Wenjing, FENG Zhongkai, CHEN Yubin, et al. Multireservoir system operation optimization by hybrid quantum-behaved particle swarm optimization and heuristic constraint handling technique [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125477.
- [22] MA Yufei, ZHONG Pingan, XU Bin, et al. Spark-based parallel dynamic programming and particle swarm optimization via cloud computing for a large-scale reservoir system[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126444.
- [23] 周帅. 变化环境下黄河干流梯级水库群适应性调度关键问题研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.

(收稿日期: 2023-08-17 编辑: 俞云利)