

黄河上游水沙统一调度的多目标协同/胁迫控制

金文婷¹,牛姿童²,白 涛²,石静涛³,路梦瑶¹

(1. 安康学院化学与环境学院,陕西 安康 725000; 2. 西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 国网陕西省电力有限公司安康水力发电厂,陕西 安康 725000)

摘要:为量化黄河上游水沙统一调度的多目标协同/胁迫关系,构建了以龙羊峡-刘家峡梯级水库为主体的黄河上游多目标协同/胁迫调控模型,对 1996 年 7 月至 2022 年 6 月的径流序列进行了调控。结果表明:长系列调度中多目标胁迫度的多年平均值为 0.36,总体处于初级协调状态;受水库群调蓄作用影响,丰、平、枯典型年多目标协同/胁迫关系年内变化规律基本一致,汛期处于初级协调,防凌期由勉强协调转变为濒临胁迫,非汛期由勉强协调回到初级协调;连续枯水年组前期由于梯级水库大量补水和汛期及时蓄水,多目标协同/胁迫关系与典型年基本一致,但后期由于来水特枯加之水库水位较低,多目标胁迫度大幅提高,防凌期达到严重胁迫等级。

关键词:梯级水库;水沙统一调度;多目标协同;多目标胁迫;黄河上游

中图分类号:TV697.1⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)04-0094-11

Multi-objective synergy/coercion control for unified water-sand dispatching in the upper Yellow River//JIN Wenting¹, NIU Zitong², BAI Tao², SHI Jingtao³, LU Mengyao¹ (1. School of Chemistry and Environment, Ankang University, Ankang 725000, China; 2. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Ankang Hydropower Plant, State Grid Shaanxi Electric Power Company Limited, Ankang 725000, China)

Abstract: To quantify the multi-objective synergy/coercion relationship of unified water-sand dispatching in the upper Yellow River, a multi-objective synergy/coercion regulation model based on the Longyangxia-Liujiaxia cascade reservoirs was constructed, and the runoff sequence from July 1996 to June 2022 was regulated. The results indicate that the multi-year average of multi-objective coercion degree in long-term scheduling is 0.36, and it is generally in a state of primary coordination. Affected by the regulation and storage of the reservoir group, the multi-objective synergy/coercion relationship in typical years of high, normal, and low water is basically consistent throughout the year. During the flood season, it is in the primary coordination stage, while during the ice-flood prevention period, it changes from barely coordination to being on the brink of coercion. During the non-flood season, it returns from barely coordination to primary coordination. In the early stage of the continuous dry year group, due to the large amount of water replenishment in the cascade reservoirs and timely water storage during the flood season, the multi-objective synergy/coercion relationship is basically the same as that of typical years. However, in the later stage, due to the extremely dry incoming water and low water level in the reservoir, the degree of multi-objective coercion increases significantly, and reaches severe coercion in the ice-flood prevention period.

Key words: cascade reservoirs; unified water-sand dispatching; multi-objective synergy; multi-objective coercion; the upper Yellow River

黄河水少沙多,河道内外用水矛盾突出,梯级水库群调度下供水、输沙、发电、生态等用水过程之间存在复杂的竞争与协作关系,协同调度是提升综合效益的重要途径^[1-2]。黄河上游是指河源至内蒙古河口镇河段,60%以上的黄河年径流总量来源于该

河段,其中位于兰州下游的宁蒙河段是典型的沙漠宽谷河段,水沙关系变化复杂,河道形态演变剧烈^[3]。近年来,受河道外综合用水快速增长、径流减少、上游水库拦蓄等因素影响,宁蒙河段水沙关系的不协调问题愈加严重,泥沙淤积导致主槽过流能

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3206704);陕西省教育厅科学研究计划项目(24JK0289);陕西省高校科协青年人才托举计划项目(20230445);安康学院校级科研项目(2022AYQDZR09, 2024AGPY05)
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:2021990085@aku.edu.cn
通信作者:白涛(1983—),男,教授,博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail:baitao@xaut.edu.cn

力下降,易引发洪灾、凌灾,对河道防洪防凌安全带来严峻挑战^[4-5]。在宁蒙河段悬河淤积的情况下,亟须上游梯级水库群开展调水调沙,通过塑造人工洪水冲刷淤积河床。此外,黄河上游建有 16 座梯级电站,包括龙羊峡水电站、拉西瓦水电站、李家峡水电站等,总利用水头达 1 118 m,装机容量高达 1 415.48 万 kW,保证出力 487.22 万 kW,年发电量达 507.93 亿 kW 时,是我国重要的水电基地之一。兰州断面是控制兰州至河口镇区间河道外综合用水的关键断面,其需水量的满足是沿黄人民生活、生产、生态的重要保障。黄河上游保护河流水生态系统的核心是保障宁蒙河段生态健康,维持河道内水体自净功能正常运行及水生生物生长繁殖所需的生态基流量及生态脉冲流量^[6]。在径流减少和悬河泥沙淤积的背景下,多目标之间的矛盾胁迫关系进一步加剧。

针对黄河水沙多目标利用问题,我国学者开展了诸多研究。例如:贾一飞等^[7]建立了在黄河上游水库群的多目标优化调度模型,采用改进的快速非劣排序遗传算法(NSGA-II)对模型进行了求解;Jin 等^[8]提出了一种同时考虑水利枢纽工程流量最大化、发电量和供水量最大化以及各种复杂约束条件的梯级水库多目标运行模型;钟华昱等^[9]提出了一种耦合集合预报信息的水库高效调度方法,能有效应对预报的不确定性,各性能指标较优且计算负担较小;白涛等^[10]改进了花粉算法,在求解长系列调度模型时具有较强的寻优能力和稳定性;方国华等^[11]以供净水效益最大、区域总缺水量最小、COD 排放量最小为目标建立了区域水量水质联合配置多目标模型;Yao 等^[12]提出了一种最先进的大规模多目标进化算法,提高了黄河上游多年调节水库性能;Bai 等^[13]利用改进的 NSGA-II 算法论证了 3 种方案在长期条件下的水和泥沙调节潜力,建议在长时间序列和典型年份的条件下,采用基于可用量的水电发电方式作为最佳运行方式;田世民等^[14]研究了黄河流域水库多目标调度的多维约束,提出了基于多目标协同的黄河干流水库调度约束因子阈值;陈述等^[15]建立了风-水-光多能互补系统生态调度模型,采用多目标进化算法求解,探讨了多能互补系统发电出力、新能源消纳及河流生态保护之间的均衡关系;张验科等^[16]建立了水风光联合发电效益最大模型,求解得到促进风光资源经济消纳的水电站水库优化调度方案;钟加星等^[17]构建了黄河上游梯级水库群发电、供水、防洪、防凌、生态多目标优化调度模型,采用多元线性回归方法、随机森林模型、LightGBM 机器学习模型组合提取了梯级库群多目

标调度规则;方国华等^[18]基于水量平衡原理,提出了耦合径流和负荷双重不确定性的梯级水库弃水风险量化方法;陆中桂等^[19]基于水足迹方法从水量-水质-生态需水综合视角下对黄河流域的水稀缺进行了评估。现有研究多从优化算法改进、预报与调度耦合、多能互补分角度进行分析,黄河上游水资源综合利用是涉及供水、发电、生态、防洪、防凌、输沙等多目标竞争的复杂系统问题,梯级水库群多目标调度是解决这一复杂问题的有效手段。目前,鲜有研究针对黄河上游梯级水库群调度的多目标协同/胁迫关系进行量化分析。鉴于此,本文开展黄河上游水沙统一调度的多目标协同/胁迫理论与框架研究,基于协同学和系统耦合理论,提出黄河上游水沙统一调度的多目标协同/胁迫控制理论和多目标协同/胁迫关系量化方法,构建以龙羊峡-刘家峡(龙-刘)梯级水库为调控主体的、月/旬尺度嵌套的多目标协同/胁迫调控模型,通过对长系列、典型年、连续枯水年组的结果分析,揭示黄河上游水沙统一调度的多目标协同/胁迫规律,以期为黄河上游水库群实际运行提供指导。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河上游具有较大调节能力的梯级水库包括龙羊峡水库(多年调节)和刘家峡水库(年调节),这两座水库肩负着黄河上游的多项重要任务,涵盖防洪、防凌、供水、发电、输沙、生态保护等功能^[20-21]。构建以龙-刘梯级水库为调控主体、月/旬尺度嵌套的黄河上游水沙统一调度多目标协同/胁迫调控模型,将供水、发电、输沙、生态 4 个目标作为水库群协同/胁迫调控的多目标,防洪、防凌目标以水库水位、下泄流量约束。在发电利益计算时统计 15 座龙羊峡-青铜峡区间大中型水电站,包括龙羊峡、拉西瓦、尼那、李家峡、积石峡、直岗拉卡、康扬、公伯峡、苏只、刘家峡、盐锅峡、八盘峡、小峡、大峡、青铜峡。除龙羊峡、刘家峡水库外,其余水电站均为日调节或径流式电站;龙羊峡水库保证出力为 589.8 MW,设计年发电量为 59.24 亿 kW·h;刘家峡水库保证出力为 489.9 MW,设计年发电量为 57.6 亿 kW·h^[22]。

1.2 数据来源

径流资料采用黄河上游干流唐乃亥水文站、支流洮河红旗水文站、大夏河折桥水文站、大通河享堂水文站、湟水民和水文站 1996 年 7 月至 2022 年 6 月的逐月实测资料。多目标需水方面,供水目标采用水利部黄河水利委员会编制的《黄河流域综合规划(2012—2030 年)》中 2020 水平年兰州断面需

水过程,如图 1 所示,其中来水频率大于或等于 75% 的枯水年兰州断面需水取 80%;生态目标采用石嘴山和头道拐断面的生态基流过程以及生态脉冲需求,如表 1 所示;输沙目标设定了黄河上游梯级水库群在调水调沙过程中控制流量的阈值为 2 240~3 000 m³/s,调沙持续时间为 10~30 d,调沙的时机则安排在每年 7 月中旬至 8 月下旬,即支流高含沙洪水期;防凌目标设置刘家峡水库在 11 月至次年 3 月需严格遵循防凌安全流量控制下泄过程,11 月、12 月、1 月、2 月、3 月防凌安全流量分别为 723、480、439、383、421 m³/s。

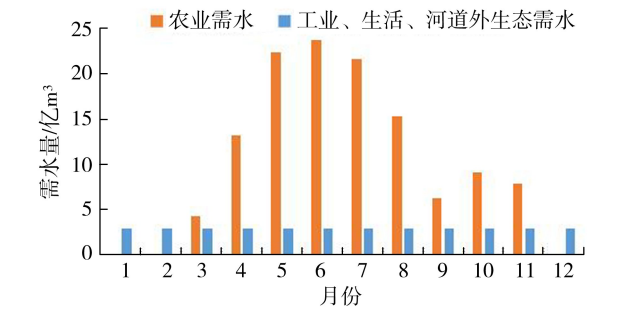


图 1 2020 水平年黄河上游兰州断面河道外需水过程
Fig. 1 Out-of-channel water demand process of the upper Yellow River at Lanzhou Section in 2020 level year

表 1 石嘴山、头道拐断面河道内生态需水
Table 1 In-channel ecological water demand in Shizuishan and Toudaoquan sections

月份	石嘴山流量/(m ³ /s)		头道拐流量/(m ³ /s)	
	适宜生态流量	最小生态流量	适宜生态流量	最小生态流量
1	330	325	250	125
2	330	325	250	125
3	330	325	250	125
4	330	325	250	125
5	330	325	250	125
6	330	325	250	125
7	330	325	300	125
8	330	325	300	125
9	330	325	300	125
10	330	325	300	125
11	330	325	250	125
12	330	325	250	125
生态脉冲	900	400	800	400

注:生态脉冲时间为 5、6 月,每年至少 1 次,一次持续 6 d 以上;枯水年采用最小生态流量需求。

2 研究方法

2.1 多目标协同/胁迫控制理论

基于协同学和系统耦合理论,提出黄河上游水沙统一调度的多目标协同/胁迫控制理论。协同学理论中将决定复杂开放系统状态变化的变量称为序参量,序参量之间的协同效应有利于提升复杂开放系统的有序性。系统耦合理论中用耦合度来衡量两

个或多个系统之间相互作用、彼此影响的关系,在此基础上本文提出复杂开放系统各目标之间胁迫度概念及量化方法。黄河上游水沙统一调度的供水、输沙、发电、生态等多个目标之间相互制约和影响,竞争激烈。为了实现水沙多目标的精细化调度,需要对多目标的刚性用水需求及弹性用水需求进行判别,将各目标的刚性需水视为关键利益,弹性需水视为非关键利益。选取相应的序参量,合理制定多目标协同/胁迫控制原则,通过对多目标的序参量进行协同/胁迫控制,最大化多目标协同度,最小化多目标胁迫度,从而实现黄河上游水沙统一调度的多目标协同/胁迫控制。

黄河上游水沙统一调度的总体目标是通过水库群水量调节优化调度,缓解供水、发电、生态、防洪防凌之间的矛盾,引导多目标利益由胁迫向协同转变,实现多目标关键利益的协同关系最大化及非关键利益胁迫关系最小化。

黄河上游水沙统一调度的多目标协同/胁迫控制的基本原则包括:①在基本保障多目标关键利益的前提下,尽可能提高多目标关键利益之间的协同程度;②对于多目标非关键利益,尽可能降低多目标非关键利益之间的胁迫程度;③当关键利益与非关键利益呈现竞争关系时,可适度牺牲非关键利益。

供水目标中,工业生活用水以及农作物生长周期中对水分敏感并与产量密切相关的关键阶段用水,如玉米的抽雄期和开花期、小麦的拔节期、灌浆期和乳熟期等,应被视为关键利益。相较之下,其他时期的农业用水则应视为非关键利益。生态目标中,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,需要满足特定流量及历时需求的生态脉冲来刺激鱼类繁殖与生长,以保持河流生物种群规模及物种多样性。因此,河道内生态基流及水生生物繁殖生长所需的生态脉冲为关键利益。发电目标中,非防凌期(即 4—10 月)梯级水库的发电效益也应被视为关键利益。输沙目标中,单次调沙控制流量与调沙时长视为关键利益。表 2 为黄河上游水沙统一调度多目标的关键利益与非关键利益序参量及其权重。由表 2 可见,关键利益权重明显大于非关键利益,在基本保障各多目标关键利益的前提下,应尽可能提高多目标关键利益之间的协同程度,尽可能降低多目标非关键利益之间的胁迫程度,在模型寻优过程中优先保障关键利益。

2.2 多目标协同/胁迫关系量化方法

协同学理论中,序参量对目标有序演化的影响程度通过序参量的有序度体现^[23]。序参量的有序

表 2 黄河上游水沙统一调度的多目标关键利益与非关键利益序参量及其权重

Table 2 Multi-objective critical and non-critical interest order parameters and weights for water-sand dispatching in the upper Yellow River

目标	关键利益序参量	关键利益序参量权重	非关键利益序参量	非关键利益序参量权重
供水	河道外非农业用水保证率 P_{w1}	0.312	农业非关键期供水保证率 P_{w2}	0.125
	农业关键期总缺水量 W_1	0.288	农业非关键期总缺水量 W_2	0.082
	农业关键期最大缺水深度 D	0.193		
发电	4—10 月梯级发电保证率 P_{E1}	0.351	防凌期梯级发电保证率 P_{E2}	0.189
	4—10 月梯级平均出力 N_1	0.351	防凌期梯级平均出力 N_2	0.109
输沙	单次调水调沙平均控制流量 Q_s	0.500	长系列调水调沙的频率 F_s	0.300
	单次调水调沙的持续时长 T_s	0.500		
生态	生态基流保证率 P_C	0.538	5、6 月超过 1 次生态脉冲次数 T_2	0.165
	5、6 月中 1 次生态脉冲次数 T_1	0.297		

注:保证率为满足条件的时段数占总时段数的比例;统计长系列输沙目标的有序度时关键利益序参量的权重均取 0.7 倍。

度常通过线性功效函数进行量化,包括正指标功效函数(式(1))、负指标功效函数(式(2))、适度功效函数(式(3))。在此基础上,计算目标的有序度(式(4))、多目标协同度(式(5))和多目标胁迫度(式(6))。

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

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

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

$$h_{nj} = \sum_{k=1}^K w_{nk} d_{nkj} \quad (4)$$

$$H = \left(\prod_{n=1}^4 H_n \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

$$I = 1 - \sqrt[4]{C \sum_{n=1}^4 w_n'' H_n} \quad (6)$$

$$\text{其中 } H_n = \begin{cases} \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J h_{nj} & n = 1, 2, 4 \\ w_1' \frac{1}{J_s} \sum_{j=1}^J h_{nj} + w_2' h_s & n = 3 \end{cases}$$

$$C = \left[\prod_{n=1}^4 H_n / \left(\frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 H_n \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}}$$

式中: n 为目标编号, n 为 1、2、3、4 分别代表供水、发电、输沙、生态目标; k 为目标中序参量编号; K 为目标中序参量数量; j 为水文年编号; J 为水文年数; d_{nkj} 为第 j 个水文年第 n 个目标的第 k 个序参量的有序度; e_{nkj} 为第 j 个水文年第 n 个目标的第 k 个序参量的取值; $e_{nk, \max}$ 、 $e_{nk, \min}$ 分别为第 n 个目标的第 k 个序参量的最大值、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; w_{nk} 为第 n 个目标的第 k 个序参量的权重; h_{nj} 为第 j 个水文年第 n 个目标的有序度,输沙目标中单一水文年的有序度计算仅考虑 Q_s 、 T_s 两个序参量; H 为多目标调度系统总协同度; $n=1, 2, 4$ 时, H_n 为第 n 个目标有序度的多年平均值, $n=3$ 时, H_n 为调水调沙年份的输沙目标有

序度多年平均值与 F_s 的有序度 h_s 以 w_1' 、 w_2' 为权重的加权求和; J_s 为长系列总调沙年数; C 为多目标耦合度,取值范围为 0~1, C 值越大代表多目标各目标间关联性越强; I 为多目标胁迫度,取值范围为 0~1, I 值越大代表多目标之间的胁迫程度越强,反之多目标之间的耦合协调程度越强,根据 I 值进行等级划分,0~0.1 为优质协调,>0.1~0.2 为良好协调,>0.2~0.3 为中度协调,>0.3~0.4 为初级协调,>0.4~0.5 为勉强协调,>0.5~0.6 为濒临胁迫,>0.6~0.7 为轻度胁迫,>0.7~0.8 为中度胁迫,>0.8~0.9 为重度胁迫,>0.9~1 为严重胁迫; w'' 为 H_n 的权重。

在计算得到多目标协同度和多目标胁迫度的基础上,构建多目标协同/胁迫控制模型,包括:① 目标函数,模型的寻优目标函数为多目标胁迫度最小;② 约束条件,模型中需要考虑的约束条件包括水量平衡约束、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;③ 时间尺度,将一个水文年中需要梯级水库群塑造人工洪水过程的输沙及生态脉冲所属月(5—8 月)细化为以旬为调度尺度,其余月(9 月至次年 4 月)以月为调度尺度;④ 粒子群优化算法求解,主要参数粒子种群规模、最大迭代次数、惯性权重、惯性权重阻尼系数、个体学习系数、群体学习系数分别设置为 200、1 000、1.0、0.99、1.5、2.0。

3 结果与分析

3.1 水沙统一调度的多目标协同/胁迫控制结果

采用 1996—2021 年径流序列,对黄河上游水沙统一调度的多目标协同/胁迫控制结果进行分析。结果表明,供水目标中, P_{w1} 多年平均值为 98.84%; W_1 多年平均值为 1.14 亿 m^3 ,较 W_2 的多年平均值少 3.19 亿 m^3 ; D 多年平均值为 0.09,关键利益保障

良好; P_{w_2} 多年平均值为 74.12%, 农业非关键期的用水需求保障欠佳。发电目标中, 关键利益 P_{E1} 多年平均值为 96.15%, 较 P_{E2} 多年平均值高 76.92%; N_1 多年平均值为 610.61 万 kW, 较 N_2 多年平均值高 275.42 万 kW, 可见在多目标竞争激烈的情况下, 发电目标的关键利益保障程度有待提高, 由于防凌流量限制, 梯级水库群的发电利益受到较大影响。输沙目标中, Q_s 的多年平均值为 $2776.26\text{ m}^3/\text{s}$; T_s 多年平均值为 16.71 d; F_s 多年平均值为 26.92%, 即 1996—2021 年共进行调水调沙 7 次, 平均 3.7 次/a, 黄河上游开展调水调沙的频率有待提高。生态目标中, P_c 、 T_1 、 T_2 多年平均值分别为 98.84%、1、4.96, 由于生态利益的优先序最高, 使得黄河上游的生态基流与生态脉冲需求均能得到良好满足。

分析各目标及序参量的有序度, 结果表明, 供水目标中序参量 P_{w1} 、 W_1 、 D 、 P_{w2} 、 W_2 有序度分别为 0.99、0.98、0.91、0.74、0.95, 目标有序度为 0.91; 发电目标中序参量 P_{E1} 、 N_1 、 P_{E2} 、 N_2 有序度分别为 0.96、0.52、0.19、0.29, 目标有序度为 0.54; 输沙目标中序参量 Q_s 、 T_s 、 F_s 有序度分别为 0.71、0.80、0.27, 目标有序度为 0.61; 生态目标中序参量 P_c 、 T_1 、 T_2 有序度分别为 0.99、1、0.99, 目标有序度为 0.99; 总协同度为 0.74, 总胁迫度为 0.36。进一步分析发现, 水沙统一调度的多目标协同度多年平均值为 0.74, 胁迫度多年平均值为 0.36, 属于初级协调状态; 各目标有序度中, 生态目标的有序度最高, 其次是供水目标, 发电目标有序度最低。供水目标中, 关键利益有序度的平均值为 0.96, 非关键利益有序度平均值为 0.85, 较关键利益有序度平均值减少 0.11。发电目标中, 关键利益 P_{E1} 较非关键利益 P_{E2} 的有序度高 0.77, 关键利益 N_1 较非关键利益 N_2 的有序度高 0.23, 可见上游梯级水库群水力发电的非关键利益保障不甚理想。输沙目标中, 关键利益的有序度与非关键利益相差较大, 说明上游梯级水库群长系列调水调沙的频率较低。生态目标中, 关键利益的有序度平均值为 0.99, 关键利益保障良好; 非关键利益 T_2 的有序度为 0.99, 多次生态脉冲得到有效保障。

3.2 典型年水沙统一调度的多目标协同/胁迫过程解析

根据 1996—2021 年黄河上游水沙统一调度的多目标协同/胁迫控制结果, 以唐乃亥水文站年径流量进行来水频率计算, 选取来水频率为 25%、50%、75% 的丰、平、枯典型年进行多目标协同/胁迫关系解析, 结果如图 2、图 3 所示。由图 2 和图 3 可见, 龙-刘梯级水库水沙统一调度过程中, 丰水年、平水

年汛期 7—10 月龙羊峡水库大量拦截入库水量, 抬高水位。丰水年进行了调水调沙, 此时龙羊峡水库的平均出库流量为 $1344\text{ m}^3/\text{s}$, 弃水量为 2.49 亿 m^3 ; 平水年龙、刘梯级水库未进行调水调沙, 未发生弃水。偏枯水年汛期来水较少并满足多目标利用, 龙羊峡水库 7 月拦蓄洪水抬高水位, 8—10 月水位波动下降。偏丰水年调水调沙时期, 刘家峡水库平均入库流量为 $1590\text{ m}^3/\text{s}$, 平均下泄流量为 $2391\text{ m}^3/\text{s}$, 库容减少 14.03 亿 m^3 , 弃水量为 18.0 亿 m^3 , 其余时期刘家峡水库在满足下游需水的基础上尽可能拦蓄水量, 汛末库容达到 32.32 亿 m^3 。平水年、偏枯水年汛期, 刘家峡水库在满足下游综合需水的基础上拦蓄上游来水, 水位在汛末抬高至正常蓄水位 1735 m, 汛期蓄水量增加。防凌期为每年 11 月至次年 3 月, 刘家峡水库严格按照防凌限制流量进行下泄, 并拦蓄上游水库群下泄水量; 龙羊峡水库前期按照保证出力对应的发电流量进行下泄, 随着刘家峡水库水位逐渐上升、调节库容逐渐减少, 龙羊峡水库下泄流量逐渐减少。防凌期控制下泄流量减小, 丰、平、枯典型年龙羊峡水库蓄水量均减少。偏丰水年、平水年的非汛期 4—6 月龙羊峡水库保持中等流量下泄, 这期间龙羊峡水库的水位变化过程中, 偏丰水年水位提高则蓄水量增加, 平水年水位基本稳定, 偏枯水年水位下降则蓄水量减少; 平水年、偏枯水年龙羊峡水库总蓄水量减少。

图 4 为典型年黄河上游各目标的有序度, 图 5 为典型年黄河上游多目标协同度和多目标胁迫度。由图 4、图 5 可见, 丰、平、枯典型年黄河上游水沙统一调度结果显示, 生态目标中, 全年逐月均能保障生态流量, 故生态有序度均为 1; 供水目标中, 仅在 3 月由于刘家峡水库出库流量受防凌流量的限制导致兰州断面需水不能完全满足外, 其余时段均能完全满足, 丰、平、枯典型年 3 月供水有序度分别为 0.82、0.79、0.96 (枯水年需水取 80%), 其余时段供水有序度均为 1; 输沙目标中, 丰水年 7 月下旬、8 月上旬梯级水库进行了调水调沙, 调沙流量分别为 2773 、 $2714\text{ m}^3/\text{s}$, 输沙有序度分别为 0.70、0.62, 平水年、偏枯水年的年末进行调水调沙; 发电目标中, 目标有序度在不同典型年的变化及差异, 最大值出现在汛期, 最小值出现在防凌期, 由 0.94 下降到 0.51。典型年多目标协同/胁迫关系变化过程中, 汛期主要处于初级协调状态; 防凌期由于防凌与发电、供水目标的矛盾加剧, 由勉强协调转变为濒临胁迫; 非汛期由勉强协调转变为初级协调。平水年除个别时段外, 绝大多数时段的供水、生态有序度均为 1,

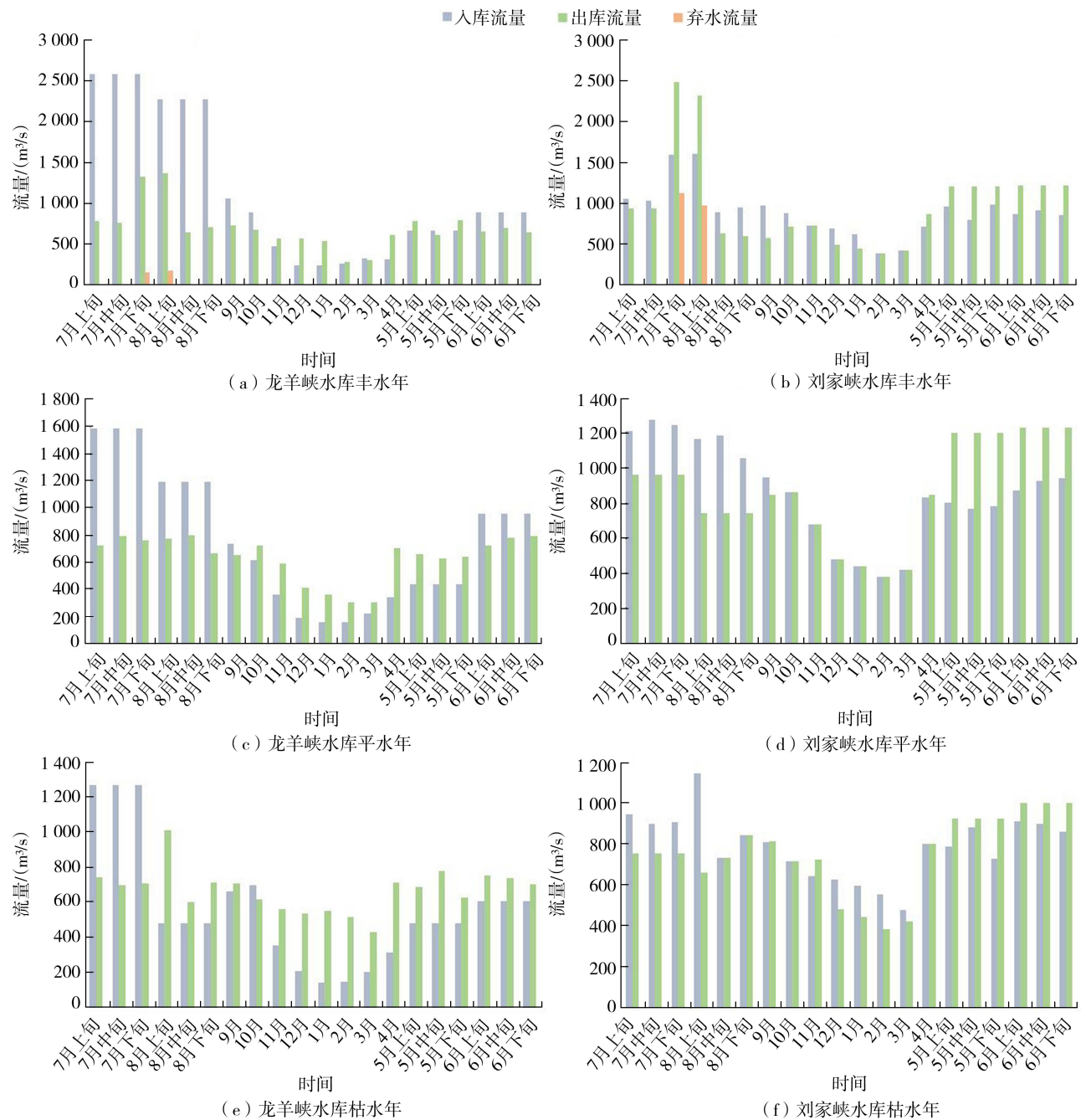


图 2 典型年龙羊峡、刘家峡水库出入库流量

Fig. 2 Inflow and outflow of Longyangxia and Liujiaxia reservoirs in typical years

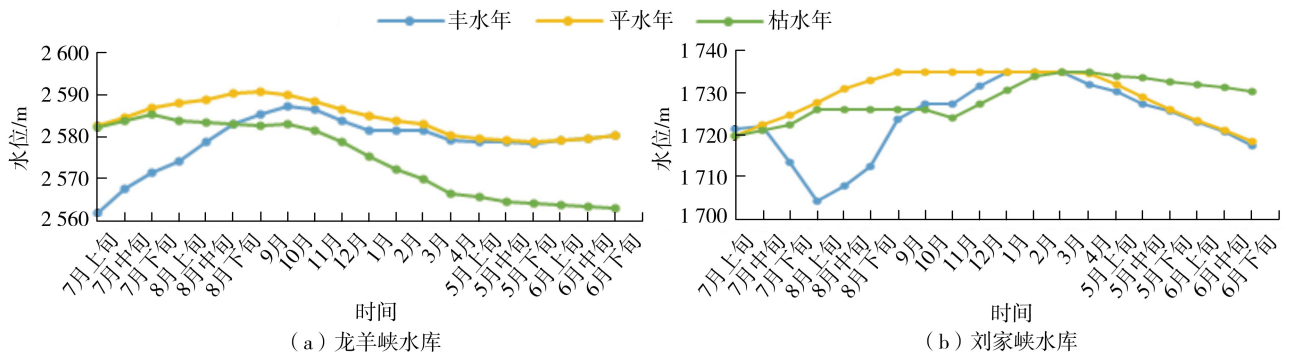


图 3 典型年龙羊峡、刘家峡水库时段末水位

Fig. 3 Water level at end of period of Longyangxia and Liujiaxia reservoirs in typical years

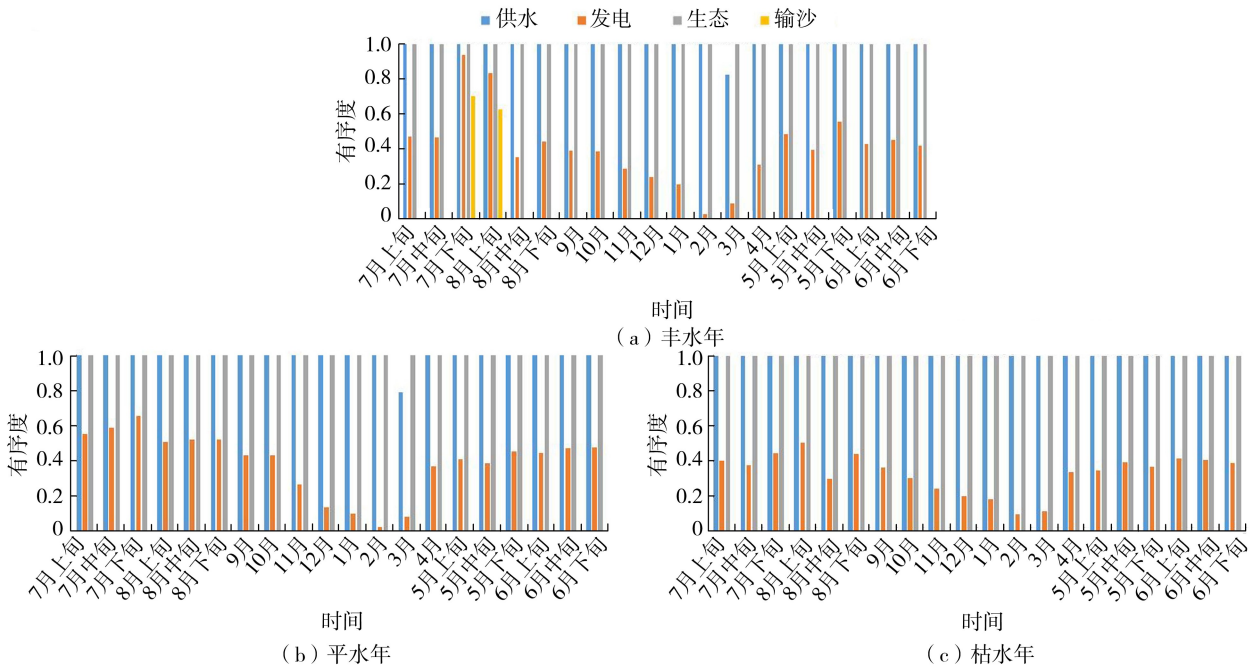


图 4 典型年黄河上游各目标的有序度

Fig. 4 Orderliness of each objective of the upper Yellow River in typical years

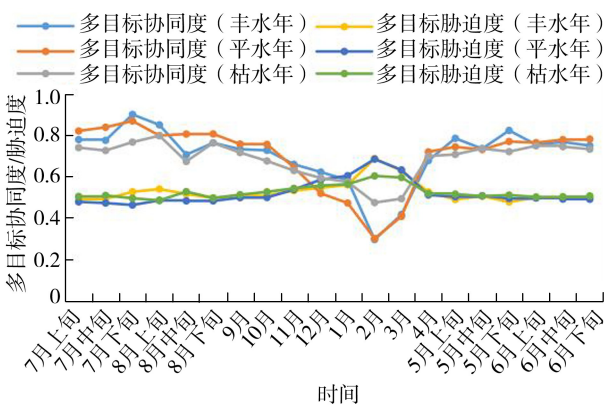


图 5 典型年黄河上游多目标协同度和多目标胁迫度

Fig. 5 Multi objective synergy and multi-objective stress of the upper Yellow River in typical years

且未进行调水调沙,故多目标协同/胁迫关系变化的影响因子主要为梯级水库发电量。偏枯水年非汛期4—6月各时段多目标协同度平均值为0.73,较平水年减少0.02,非汛期4月及5月上旬的多目标胁迫度为勉强协调状态,5月中旬至6月下旬多目标胁迫度随着梯级水库发电量的增加而降低,处于初级协调状态,多目标协同/胁迫关系变化的主要影响因子也为梯级水库发电量。

3.3 连续枯水年组水沙统一调度的多目标协同/胁迫过程解析

黄河上游1996—2002年唐乃亥水文站年径流量逐年来水频率为81.5%、92.6%、40.7%、29.6%、74.1%、88.9%、96.3%,选取该时段作为连续枯水年组,进行黄河上游水沙统一调度的多目标协同/胁迫

过程解析,以月/旬尺度的兰州断面缺水量、梯级水库发电量、生态流量作为时段目标,结果如图6、图7所示。由图6和图7可见,1996年、1997年分别为偏枯、特枯水年,除汛期小幅蓄水外,其余时段龙羊峡水库均在补水以满足综合用水需求,水位由1996年水文年初的2580.21 m波动下降至1997年水文年末的2541.31 m,龙羊峡水库蓄水量减少101.91亿 m^3 。1998年、1999年分别为平水年、偏丰水年,龙羊峡水库汛期大量蓄水,防凌期、非汛期满足综合用水,最终1999年水文年末龙羊峡水位回升至2555.06 m,蓄水量较1997年年末增加30.63亿 m^3 ,增加至105.39亿 m^3 。2000年为偏枯水年,2001年、2002年均为特枯水年,龙羊峡水库在3个枯水年运行过程中持续动用自身蓄水补充下游综合用水,水位波动下降至死水位2530 m,蓄水量较2000年水文年初减少51.96亿 m^3 。连续枯水年组龙羊峡水库总补水123.31亿 m^3 。刘家峡水库与龙羊峡水库形成了反调节,即当连续枯水年龙羊峡水库加大下泄补充用水时,刘家峡水库在满足兰州断面综合用水的基础上尽可能存蓄水量,减少梯级水库的水量损失,刘家峡水库1996年水文年初与1997年水文年末的水位基本持平,均为1720.1 m。1998年、1999年为偏丰水年,龙羊峡水库抓紧时机蓄水时,刘家峡水库进行反调节加大下泄流量,以满足下游综合需水。2000—2002年为连续枯水年,当龙羊峡水库持续补水水位下降至死水位后,为尽可能减少兰州断面缺水量,刘家峡水库也持续补水至

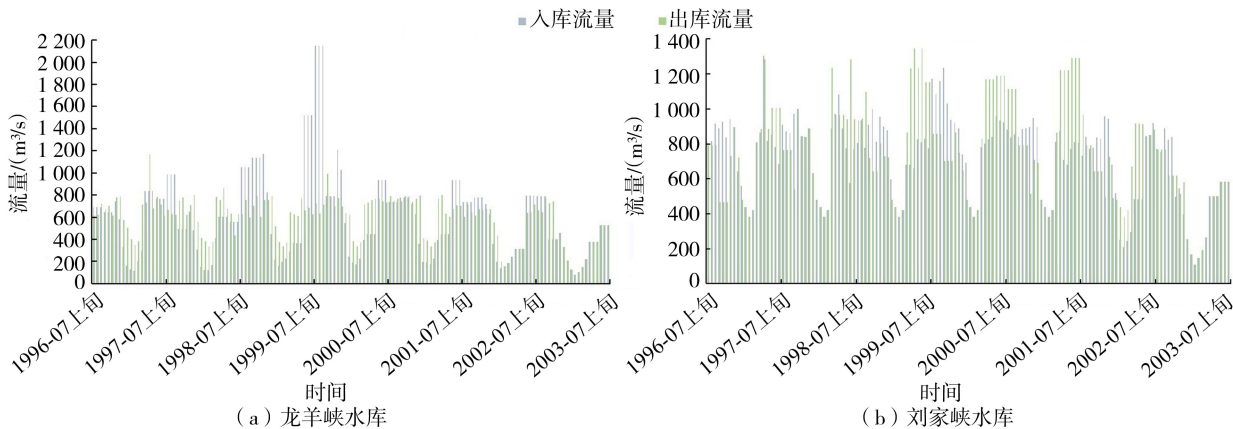


图 6 连续枯水年组龙羊峡、刘家峡水库入出库流量

Fig. 6 Inflow and outflow of Longyangxia and Liujiaxia reservoirs in continuous dry year group

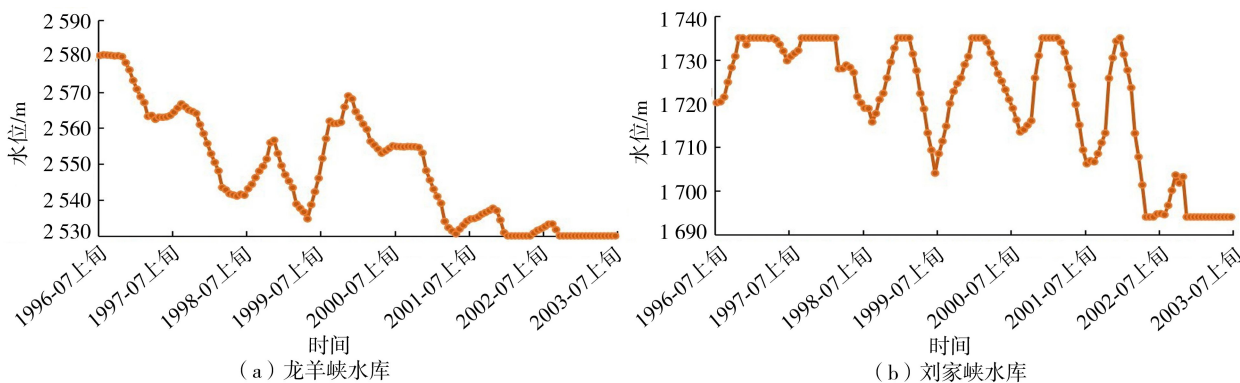


图 7 连续枯水年组龙羊峡、刘家峡水库时段末水位

Fig. 7 Water level at end of period of Longyangxia and Liujiaxia reservoirs in continuous dry year group

水位降至死水位 1694 m。

图 8 为连续枯水年组黄河上游各目标的有序度。由图 8 可见,尽管 1996 年、1997 年是连续枯水年,但由于龙羊峡水库、刘家峡水库调度期初起调水位较高(龙羊峡水库起调水位 2580 m,刘家峡水库起调水位 1720 m),对连续枯水年进行了持续补水,故 1996 年、1997 年各时段的供水目标及生态目标均得到满足,供水、生态有序度均为 1。1998、1999 年分别为平水年、偏丰水年,在防凌期的 3 月由于防凌流量限制产生缺水,平均缺水量 3.00 亿 m^3 ,供水有序度为 0.81,其余时段的供水目标、生态有序度均为 1。2000—2002 年为连续枯水年,前期两水库持续动用自身蓄水量满足多目标用水需求,2000 年、2001 年的时段缺水量较小,2000 年仅 3 月因防凌流量限制导致兰州断面缺水 2.98 亿 m^3 ;2001 年仅 5 月下旬至 6 月中旬共 3 个时段出现了轻微缺水,平均时段缺水水量为 0.20 亿 m^3 ,供水有序度平均值为 0.98;2000 年、2001 年生态目标均得到完全满足,各时段有序度均为 1。2002 年为特枯水年,且两水库水位已接近死水位,使得 2002 年防凌期及 4—6 月共 12 个时段的供水目标均出现缺水,供水有序度平均值仅为 0.58,缺水量

最大值为 4 月的 10.95 亿 m^3 ,总缺水量为 55.34 亿 m^3 ;2002 年 11 月至 2003 年 4 月共 6 个时段无法保证生态流量,生态有序度平均值为 0.72。连续枯水年组梯级水库发电利益受其他目标用水量的变化影响较大,1996—2001 年年内时段发电有序度随着防凌、供水、生态目标的约束呈规律性变化,2002 年当供水、生态也遭到较大破坏时,发电目标有序度则进一步降至最低值。

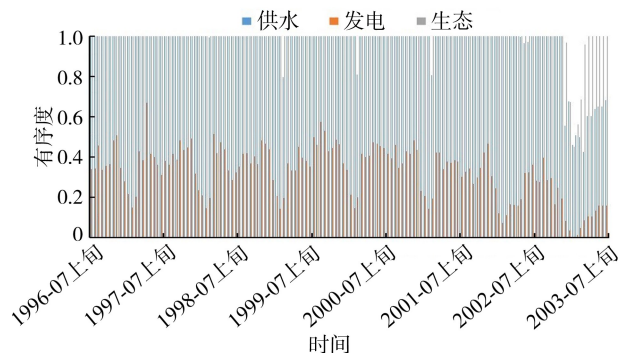


图 8 连续枯水年组黄河上游各目标的有序度

Fig. 8 Orderliness of each objective of the upper Yellow River in continuous dry year group

图 9 为连续枯水年组黄河上游多目标协同度和多目标胁迫度。由图 9 可见,1996—2000 年由于梯

级水库的大量补水和丰水年及时蓄水,黄河上游多目标协同度基本在 0.3~0.6 范围内有规律变化,汛期 7—10 月及非汛期 4—6 月,多目标胁迫度为 0.3~0.4 或 0.4~0.5,多目标呈现初级协调或勉强协调状态;防凌期 11 月至次年 3 月,由于防凌与发电、供水目标的矛盾加剧,使得多目标胁迫度在防凌期前期为 0.4~0.5,后期为 0.5~0.6,防凌期多目标由勉强协调转变为濒临胁迫。2001 年、2002 年由于来水特枯且梯级水库蓄水量严重不足,多目标利益损失严重,多目标胁迫度也随着来水量的减少而提高。具体为 2001 年汛期的多目标胁迫度为 0.4~0.5,多目标呈现勉强协调状态,防凌期 11 月至次年 3 月的多目标胁迫度为 0.6~0.7,即轻度胁迫状态,非汛期 4—6 月随着来水量逐月增大,多目标由濒临胁迫转变为勉强协调;2002 年汛期随着来水量的逐月减少,多目标由勉强协调向濒临胁迫转变,防凌期 11 月至次年 3 月随着来水的减少,多目标胁迫度逐渐增大至 1 月的最大值 1.0(由中度胁迫转变为严重胁迫状态),后随着来水量的逐渐增加多目标胁迫度小幅减小(3 月为重度胁迫状态);非汛期 4—6 月随着来水量逐月增大,多目标胁迫度逐渐减小,由中度胁迫转变为轻度胁迫状态。

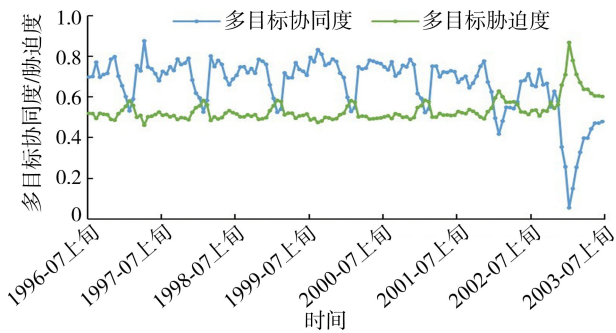


图 9 连续枯水年组黄河上游多目标协同度和多目标胁迫度
Fig. 9 Multi objective synergy and multi-objective stress of the upper Yellow River in continuous dry year group

4 结 论

- a. 基于 1996—2021 年径流序列,对黄河上游水沙统一调度的多目标协同/胁迫控制结果进行分析,结果表明,水沙统一调度属于初级协调状态;各目标有序度中,生态有序度最高,发电有序度最低;生态目标关键利益保障良好,生态基流及多次生态脉冲得到有效保障;供水目标关键利益保障良好,农业非关键期的用水需求保障欠佳;由于防凌流量限制及多目标竞争激烈,梯级水库的发电利益受较大影响,上游梯级水库开展调水调沙的频率有待提高。
- b. 典型年黄河上游多目标协同/胁迫关系分析结果表明,汛期多目标主要处于初级协调状态;防凌

期由于防凌与发电、供水目标的矛盾加剧,多目标由勉强协调转变为濒临胁迫;非汛期随着来水的增加及防凌限制的解除,多目标由勉强协调逐渐回到初级协调状态;平水年及偏枯水年的多目标协同/胁迫关系变化的主要影响因子为梯级水库发电量。丰、平、枯典型年多目标协同/胁迫关系的规律在年内基本一致,原因是龙羊峡为多年调节水库,通过蓄丰补枯减少了不同典型年来水条件下多目标利益满足程度的差异,时段多目标在年内不同时期的满足程度大致相当。多目标由协调转变为胁迫的时期主要是防凌期,原因是当防凌安全流量设置过于保守时,刘家峡水库防凌运用约束了上游水库群的发电用水,加剧了多目标的矛盾与竞争,建议实际应用中通过科学分析及研判,在保证防凌安全的前提下尽可能保持防凌期宁蒙河段大流量封河,提高刘家峡下泄流量,增加梯级水库发电量。

c. 连续枯水年组黄河上游多目标协同/胁迫关系分析结果表明,1996—2000 年(连续枯水年组前期)由于梯级水库水位较高可大量补水,且丰水年及时蓄水,多目标协同/胁迫关系与典型年呈现一致的规律,即随着来水的变化及防凌等限制,汛期、防凌期、非汛期 3 个时期多目标呈现初级协调—勉强协调—濒临胁迫—轻度胁迫—勉强协调—初级协调的转变;2001—2002 年(连续枯水年组后期)由于来水特枯加之梯级水库已接近放空,多目标利益损失严重,多目标胁迫度也随着来水量的减少而提高,汛期、防凌期、非汛期 3 个时期多目标呈现勉强协调—濒临协调—轻度胁迫—中度胁迫—严重胁迫—重度胁迫—中度协调—轻度协调的转变。因此,黄河上游梯级水库水沙统一调度要注意防范连续枯水年组的影响。

参考文献:

[1] 金文婷,王义民,白涛,等. 黄河上游梯级水库联合调水调沙及合理库容研究[J]. 水利水运工程学报,2018(6):19-29. (JIN Wenting, WANG Yimin, BAI Tao, et al. Analysis of joint regulation of water and sediment and reasonable storage of cascade reservoirs of upper Yellow River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(6): 19-29. (in Chinese))

[2] 陈力晖. 黄河上游宁蒙河段水沙变化及河床演变影响因素分析[D]. 邯郸:河北工程大学,2022.

[3] 韩小军,卢书慧,史红玲,等. 黄河上游宁蒙河段平滩流量变化与水沙过程的响应关系[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文),2024,22(4):361-367. (HAN Xiaojun, LU Shuhui, SHI Hongling, et al. Variation of bank-full discharge and its response relationship with flow

- and sediment processes of Ningmeng reach in Upper Yellow River [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22 (4): 361-367. (in Chinese))
- [4] 张晓华,郑艳爽,张防修,等.减缓宁蒙河道泥沙淤积方案及效果研究[J]. 人民黄河, 2022, 44 (4): 20-24. (ZHANG Xiaohua,ZHENG Yanshuang,ZHANG Fangxiu, et al.Reduction schemes research and effect evaluation of sedimentation in Ningmeng reach of the Yellow River[J]. Yellow River, 2022, 44(4): 20-24. (in Chinese))
- [5] 胡春宏,张双虎,张晓明.新形势下黄河水沙调控策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24 (1): 122-130. (HU Chunhong, ZHANG Shuanghu, ZHANG Xiaoming. Research on water and sediment regulation of the Yellow River under new situation [J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2022, 24 (1): 122-130. (in Chinese))
- [6] 赵芬,庞爱萍,李春晖,等.黄河干流与河口湿地生态需水研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41 (15): 6289-6301. (ZHAO Fen,PANG Aiping,LI Chunhui,et al. Progress in ecological water requirements in the mainstream and estuary ecosystem of the Yellow River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (15): 6289-6301. (in Chinese))
- [7] 贾一飞,董增川,卞佳琪,等.黄河上游水库群多目标优化调度研究[J]. 人民黄河, 2019, 41 (1): 41-45. (JIA Yifei,DONG Zengchuan,BIAN Jiaqi, et al. Research on multi-objective optimal operation of the cascade reservoirs of the upper Yellow River [J]. Yellow River, 2019, 41 (1): 41-45. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] 钟华昱,黄强,明波,等.耦合集合预报信息的水库高效调度方法研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(5): 44-55. (ZHANG Huayu, HUANG Qiang, MING Bo, et al. An efficient method for deriving reservoir operating rules by coupling ensemble forecasting information [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40 (5): 44-55. (in Chinese))
- [10] 白涛,喻佳,魏健,等.考虑不同需水过程的三河口水库调度风险研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(8): 12-22. (BAI Tao,YU Jia,WEI Jian,et al. Study on risk analysis of Sanhekou Reservoir operation based on different water demand processes [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(8): 12-22. (in Chinese))
- [11] 方国华,王雪,方应学,等.基于改进粒子群优化算法的区域水量水质联合配置模型[J]. 水资源保护, 2022, 38 (3): 58-64. (FANG Guohua, WANG Xue, FANG Yingxue, et al. Regional water quantity and water quality joint allocation model based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 58-64. (in Chinese))
- [12] YAO Hongyi, DONG Zengchuan, LI Dayong, et al. Long-term optimal reservoir operation with tuning on large-scale multi-objective optimization: case study of cascade reservoirs in the Upper Yellow River Basin [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 40: 101000.
- [13] BAI Tao, YU Jia, JIN Wenting, et al. Multi-objective and multi-scheme research on water and sediment regulation potential of reservoirs in the upper Yellow River [J]. International Journal of Sediment Research, 2023, 38 (2): 203-215.
- [14] 田世民,江恩慧,王远见,等.基于黄河流域系统治理的水库多目标调度约束阈值研究[J]. 水利学报, 2024, 55 (6): 631-642. (TIAN Shimin, JIANG Enhui, WANG Yuanjian, et al. Research on constraint thresholds for multi-objective scheduling of reservoirs based on Yellow River Basin system governance [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55 (6): 631-642. (in Chinese))
- [15] 陈述,陈琼,任康,等.考虑新能源消纳的黄河上游水电站群生态优化调度研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (3): 20-27. (CHEN Shu, CHEN Qiong, REN Kang, et al. Ecological optimal scheduling of hydropower stations on the upper Yellow River considering renewable energy accommodation [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3): 20-27. (in Chinese))
- [16] 张验科,卢垚键,王远坤,等.考虑水风光联合发电效益最大的水电站水库优化调度[J]. 水力发电学报, 2024, 43 (8): 64-75. (ZHANG Yanke, LU Yaojian, WANG Yuankun, et al. Optimal operation of hydropower station reservoirs considering maximum benefits of hydro-wind-solar co-generation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43 (8): 64-75. (in Chinese))
- [17] 钟加星,董增川,孟金玉,等.基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52 (6): 30-37. (ZHONG Jiaxing, DONG Zengchuan, MENG Jinyu, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (6): 30-37. (in Chinese))
- [18] 方国华,王海政,吴承君,等.考虑弃水风险的梯级水库中长期多目标优化调度研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (6): 20-27. (FANG Guohua, WANG Haizheng, WU Chengjun, et al. Study on mid- and long-term multi-objective optimal operation of cascade reservoirs considering water abandonment risk [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (6): 20-27. (in Chinese))
- [19] 陆中桂,康哲,李巍,等.水量-水质-生态需水综合视角下黄河流域水稀缺评估[J]. 水资源保护, 2024, 40

