

赵新磊, 李姝蕾, 尚文绣. 龙羊峡和刘家峡梯级水库生态流量核定与保障[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 473-481. ZHAO X L, LI S L, SHANG W X. Ecological flow assessment and guarantee of Longyangxia and Liujiaxia Cascade Reservoirs[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 473-481. (in Chinese)

龙羊峡和刘家峡梯级水库生态流量核定与保障

赵新磊^{1,2}, 李姝蕾^{1,2}, 尚文绣^{1,2}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 450003; 2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 郑州 450003)

摘要: 针对建设时间早、没有设置生态流量的梯级水库, 提出生态流量核定方法: 根据有关规范对生态流量的要求、水库主要影响河段已批复的流量控制指标和水库已有调度任务下泄需求得到生态流量初值, 通过梯级水库调度模拟模型和历史长系列实测出库径流过程分析水库对生态流量的保障能力, 提出生态流量推荐值。以黄河上游龙羊峡水库和刘家峡水库为研究对象核定生态流量, 结果显示: 龙羊峡水库生态流量 5—6 月为 400 m³/s、其他时段为 200 m³/s, 刘家峡水库生态流量为 285 m³/s, 长期保证率均不低于 90%。龙羊峡水库和刘家峡水库对生态流量均有较好的保障能力, 但是极端枯水条件下龙羊峡水库敏感期生态流量保障仍面临风险。

关键词: 生态流量; 已建水库; 梯级水库; 多任务协调; 龙羊峡水库; 刘家峡水库; 黄河

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0049

水库泄放生态流量是保护河流生态系统的重要途径, 在大量水库调度中得到了实践应用^[1-3]。生态流量一直是国内外研究的热点, 已经形成了数百种研究方法^[4-5]。早期研究中生态流量计算方法以基于长系列径流资料统计的水文学法为主, 由于其方法简单、数据获取难度低, 目前已经在研究和实践中得到最广泛应用^[6-8]。随着研究的发展, 生态流量计算方法趋于复杂, 当前研究前沿是面向湿地、鱼类、鸟类等保护对象需求或面向生物群落维系、生态系统健康整体需求, 考虑生态水文过程的物理机制, 采用栖息地模拟、整体分析等方法研究提出生态流量过程^[9-13]。采用前沿方法提出的生态流量过程一般包含基流、高流量脉冲、洪水等组成部分, 涉及流量大小、变化速率、发生频率等特征值^[14-16]。具有丰枯变化的水文情势对于河流生态健康十分重要^[17], 但是复杂的生态流量过程导致其投入实践应用的难度较大。虽然一些水库开展了泄放高流量脉冲、洪水等生态流量的试验^[18-20], 但我国水量调度实践中以采用年内单一数值的生态流量为主^[21]。例如, 水利部 2020—2023 年印发实施了 4 批重点河

湖生态流量保障目标, 其中大部分断面生态流量采用年内单一数值, 个别断面年内分为 2 个时段分别设置不同的生态流量值^[22-23]。此外, 水利和环保部门已颁布了大量河流断面、水库出库断面生态流量控制指标, 对水量调度实践具有指导和约束效力, 但相关论文研究成果对这些流量控制指标的考虑较少, 导致科研成果与实践存在脱节^[8-9, 24]。如何面向实践需求统筹生态流量过程的科学性和实用性是该领域亟待破解的难题。

我国高度重视水库生态流量泄放工作。2022 年水利部启动了已建水利水电工程生态流量核定与保障先行先试工作, 颁布了纳入该工作的工程名录, 旨在强化已建水利水电工程生态流量管理, 逐步健全生态流量监管体系^[25]。我国一些水库建设时间较早, 工程设计阶段没有开展生态流量泄放相关设计工作, 运行中也没有将泄放生态流量纳入调度任务, 是此次先行先试工作的重点关注对象。本文面向先行先试工作要求, 以纳入工程名录的黄河干流龙羊峡水库和刘家峡水库为研究对象, 建立已建梯级水库生态流量核定方法, 提出生态流量推荐值,

收稿日期: 2024-01-17 修回日期: 2024-04-19 网络出版时间: 2024-05-28

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240524.1844.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2243233)

作者简介: 赵新磊(1985—), 男, 河南开封人, 高级工程师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 137087645@qq.com

通信作者: 尚文绣(1990—), 女, 山东曹县人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wenzhi1191@163.com

分析两水库生态流量保障面临的问题与解决思路。

1 研究区概况

《水利部办公厅关于印发〈已建水利水电工程生态流量核定与保障先行先试河湖名单和工程名录〉的通知》将黄河干流龙羊峡水库和刘家峡水库(简称“龙刘两水库”)列入了先行先试名录。龙刘两水库均位于黄河上游,分别控制黄河流域面积的 16.5% 和 22.9%,坝址处天然年径流量分别为 202.8 亿 m^3 和 272.2 亿 m^3 (1956—2016 年多年平均值)。龙羊峡水库 1977 年开工,1986 年投入运行,调节库容 193.5 亿 m^3 ,具有多年调节能力。刘家峡水库位于龙羊峡水库下游约 330 km,1958 年开工,1969 年投入运行,调节库容 35.0 亿 m^3 ,为不完全年调节水库。

龙刘两水库对下游径流的影响范围很大,但随着其他水利工程调蓄、河道外用水、区间来水等因素的加入,两水库对下游径流的影响沿程逐渐减弱。黄河兰州断面(距离刘家峡水库坝下约 90 km)以上区域产生了 66% 的天然径流量,但地表水取水量仅占全河的 6.7%(2021 年),径流过程主要受龙刘两水库调蓄影响,但兰州断面以下取水量骤增,兰州至头道拐河段地表水取水量占全河的 40.7%(2021 年),相关研究^[26]显示兰州以下河段河道外取水对径流过程的影响逐渐超过了水库调度。因此,本文研究区域为龙羊峡水库至兰州断面区间。龙刘两水库之间水电密集开发,已建成 11 座水电站,均以发电为主要任务,调蓄能力较弱。

国务院 2006 年印发实施的《黄河水量调度条例》

第十八条规定龙刘两水库出库断面分别为贵德断面和小川断面,流域管理实践中也将这两个断面分别作为龙刘两水库出库断面,因此本文将贵德断面和小川断面分别作为龙刘两水库生态流量计算断面。

2 生态流量核定方法与数据来源

2.1 生态流量核定步骤

龙刘两水库建设较早,工程环境影响评估、可行性研究、水资源论证以及其他相关文件中均无生态流量相关规定,实际运行中也没有对泄放生态流量做出要求。本文提出生态流量核定步骤见图 1。首先,采用《水电工程生态流量计算规范》(NB/T 35091—2016)和《河湖生态环境需水计算规范》(SL/T 712—2021)推荐的方法计算生态流量取值范围。然后梳理水库主要影响河段已批复的流量控制指标和水库已有调度任务对下泄流量的需求范围,协调各方需求后提出生态流量初值。接下来通过建立梯级水库调度模拟模型和采用长系列实测出库径流数据 2 种方法,分析水库对下泄生态流量的保障能力,评估生态流量初值的合理性,如不合理需对生态流量进行调整。对于梯级水库,还需要分析上游水库下泄的生态流量是否能满足下游水库生态流量需求,经过协调性分析后最终得到生态流量推荐值。参考水利部颁布的重点河湖生态流量保障目标,生态流量保证率应不小于 90%^[22]。该保证率要求最初指的是在来水频率 90% 的枯水年可完全保障生态基流,即长系列不小于 90% 的年份生态基流达标,但在实践运用中转变为考核期内生态基流达标天数占比不小于 90%。本文采用实践中的保证率考核方法。

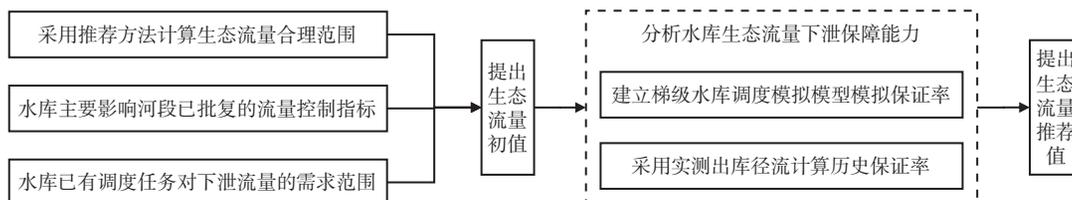


图 1 生态流量核定步骤

Fig. 1 Steps for ecological flow assessment

2.2 生态流量计算方法

采用 Tennant 法和 Q_p 法计算生态流量合理范围,数据采用贵德断面和小川断面 1956—2016 年多年平均天然径流量系列。Tennant 法将一年划分为水量较枯时段和较丰时段,分别取天然径流量的

不同百分比作为生态流量。龙刘两水库所在河段以高山峡谷为主,沿河湿地较少,主要在鱼类集中产卵的 5—6 月(即敏感期)需要提供较大的生态流量,将敏感期与汛期(7—10 月)划分为年内水量较丰时段。选择 Tennant 法“一般”至“优秀”等级作

为生态流量取值范围,即水量较枯时段生态流量取值范围宜控制在多年平均天然流量的10%~40%,水量较丰时段生态流量取值范围宜控制在多年平均天然流量的30%~60%。 Q_p 法对天然月径流系列中每年的最枯月进行排频,选择特定频率下的径流量作为生态流量。本文将90%的频率作为生态流量下限值。

2.3 流量控制指标及已有调度任务下泄流量需求

国家有关部委和青海省环境保护厅已在龙羊峡

至兰州河段4个断面设置了生态流量控制指标,见表1。对于已有调度任务,龙羊峡水库以发电为主要任务,刘家峡水库以发电、防洪、防凌为主要任务。防洪、防凌调度的优先级高于生态调度,因此,生态流量主要需要与已有的发电调度任务协调。随着黄河上游地区风电、光伏等新能源快速发展,龙刘两水库正在承担越来越多的调峰任务,日内发电负荷变化较大,一般要求:龙羊峡水库4台水轮机全部开机,最小发电流量200 m³/s;刘家峡水库至少3台水轮机长期开机,最小发电流量90 m³/s。

表1 龙羊峡至兰州河段已批复的流量控制指标

Tab. 1 Approved flow control indicators for the section from Longyangxia Reservoir to Lanzhou River

断面	流量控制指标	依据
贵德	5—6月400 m ³ /s, 其他时段200 m ³ /s	《青海省引黄济宁工程环境影响报告书》(环审[2022]152号批复)
黄丰水电站出库	200 m ³ /s	《关于青海黄河黄丰水电站工程环境影响报告书的批复》(环审[2006]182号)
大河家水电站出库	125 m ³ /s	《关于黄河大河家水电站环境影响报告书的批复》(青环发[2015]361号)
兰州	350 m ³ /s	《第一批重点河湖生态流量保障目标(试行)》(水资管函[2020]43号)

2.4 梯级水库调度模拟模型

建立龙羊峡至兰州河段梯级水库调度模拟模型模拟龙刘两水库不设置生态流量和设置生态流量2种情景下的调度情况,计算时间尺度为旬(图2)。模型主要遵守以下约束条件:

水库水位约束,表达式为

$$Z_{\min,i} \leq Z_{i,t} \leq Z_{\max,i,t} \quad (1)$$

水库下泄能力约束,表达式为

$$0 \leq R_{i,t} \leq R_{\max,i,t} \quad (2)$$

断面流量控制指标约束,表达式为

$$Q_{\min,j,t} \leq Q_{j,t} \quad (3)$$

式中: t 为计算时段编号; i 为水库编号, $i=1,2,\dots,13$; $Z_{\min,i}$ 为第 i 个水库的死水位, m; $Z_{i,t}$ 和 $Z_{\max,i,t}$ 分别为 t 时段第 i 个水库的蓄水位和最高允许水位,7—10月 $Z_{\max,i,t}$ 为汛限水位,其他时段 $Z_{\max,i,t}$ 为正常蓄水位, m; $R_{i,t}$ 和 $R_{\max,i,t}$ 分别为 t 时段第 i 个水库的下泄流量和最大下泄能力, m³/s; j 是断面编号, $j=1,2,3,4$,分别代表贵德、黄丰水电站出库、大河家水电站出库和兰州4个断面; $Q_{\min,j,t}$ 和 $Q_{j,t}$ 分别为 t 时段第 j 个断面的流量控制指标和流量, m³/s。

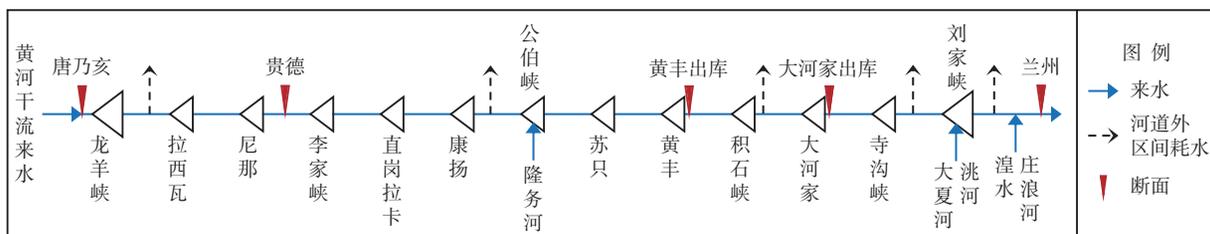


图2 梯级水库调度模拟模型节点

Fig. 2 Node diagram of simulation model for cascade reservoirs operation

龙刘两水库均需要协调防洪、供水、发电、生态等任务。防洪任务优先级最高,通过式(1)以约束条件的方式保障。供水、发电和生态3个任务通过优先序协调,顺序为生态>供水>发电。刘家峡水库11月—次年3月承担防凌任务,需遵循式(4)的约束。龙刘两水库具有联合调度关系,在刘家峡水库

可供水量不足的情况下,由龙羊峡水库增泄补水。

$$R_{13,t} \leq R_{ice,t} \quad (4)$$

式中: $R_{ice,t}$ 为 t 时段刘家峡水库的防凌控泄流量指标, m³/s。

龙刘两水库之间的11座水电站总调节库容仅3.8亿 m³,对径流调节能力较弱,模型中仅考虑发电

任务,蓄泄过程如下:

$$R_{i,t} = \begin{cases} R_{in,i,t} + S_{i,t} / \Delta t, R_{in,i,t} + S_{i,t} / \Delta t \leq E_{max,i,t} \\ E_{max,i,t}, 0 < (R_{in,i,t} + S_{i,t} / \Delta t - E_{max,i,t}) \leq S_{max,i,t} / \Delta t \\ R_{in,i,t} + S_{i,t} / \Delta t - S_{max,i,t} / \Delta t, R_{in,i,t} + S_{i,t} / \Delta t - E_{max,i,t} > S_{max,i,t} / \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

式中: $R_{in,i,t}$ 是 t 时段第 i 个水库的入库流量, m^3/s ; $S_{i,t}$ 是 t 时段第 i 个水库死水位以上蓄水量, 亿 m^3 ; Δt 为时段长度, s ; $E_{max,i,t}$ 是 t 时段第 i 个水库的最大发电流量, m^3/s ; $S_{max,i,t}$ 是 t 时段第 i 个水库死水位以上最大蓄水量, 亿 m^3 。

将研究区域划分为龙羊峡以上、龙羊峡—贵德, 贵德—黄丰, 黄丰—大河家, 大河家—刘家峡, 刘家峡—兰州 6 个区间。考虑来水及水库蓄泄特征, 采用水文年(7月至次年 6 月为 1 个水文年), 模拟时段为 1956—2015 水文年, 通过调算使龙刘两水库模拟时段末水位等于模拟时段初水位。唐乃亥断面天然径流量减去龙羊峡以上区间地表水耗水量得到龙羊峡水库入库流量。支流汇入水量采用把口站天然径流量。

对于河道外地表水耗水量, 黄河“八七”分水方案将全河多年平均天然径流量 580 亿 m^3 中的 370 亿 m^3 分配给河道外, 实际管理中根据天然径流量对河道外分配水量进行调整, 基于 1998—2020 水文年各年天然径流量和分配的可供耗水量, 得到拟合公式见式(6), 通过了显著性水平 1% 的 F 检验。采用式(7)得到各区间逐旬耗水过程。

$$C_m = \begin{cases} 0.3762W_m + 148.6, & W_m < 580 \\ 370, & W_m \geq 580 \end{cases} \quad (6)$$

$$C_{k,t} = \frac{\bar{C}_{k,n}}{\bar{C}} C_m \quad (7)$$

式中: C_m 是第 m 年的黄河河道外可供耗水量, 亿 m^3 ; W_m 是第 m 年的黄河天然径流量, 亿 m^3 ; $C_{k,t}$ 是 t 时段第 k 个河段河道外地表水耗水量, $k=1, 2, \dots, 6$, $t=12(m-1)+n$; n 是年内旬编号; $\bar{C}_{k,n}$ 是第 n 旬第 k 个河段多年平均河道外地表水耗水量, 亿 m^3 ; \bar{C} 是全河多年平均河道外地表水耗水量, 亿 m^3 。

2.5 数据来源

黄河全河与各断面 1956—2015 水文年天然径流量数据采用第三次水资源调查评价成果。1998—2020 水文年全河可供耗水量来自水利部每年批准的《黄河可供耗水量分配及非汛期水量调度计划》, 河道外地表水耗水量来自各年的《黄河水资源公报》, 各河段逐旬河道外地表水耗水量来自取

水口门统计数据。采用 1990—2019 水文年贵德断面和小川断面水文站实测日径流数据计算生态流量历史保证率。

3 生态流量核定结果

3.1 生态流量初值

采用多种方法得到龙刘两水库生态流量取值范围见表 2。对于已批复的流量控制指标: 贵德断面至大河家水电站区间流量沿程增加, 在保障贵德断面生态流量的情况下, 黄丰水电站和大河家水电站生态流量可同时得到保障; 考虑支流汇入和区间耗水, 90% 保证率下刘家峡水库至兰州区间日均流量增加 65 m^3/s , 因此刘家峡水库下泄 285 m^3/s 可满足兰州断面流量控制指标要求。贵德断面 5—6 月已批复的流量控制指标为 400 m^3/s , 略高于采用 Tennant 法得到的生态流量推荐范围上限值, 鉴于 5—6 月是鱼类繁殖集中时期, 选择按照已批复的流量控制指标设置生态流量。根据水库管理单位意见, 倾向于设置较小的生态流量以获得较高的保证率。综上, 提出龙羊峡水库生态流量初值为 5—6 月 400 m^3/s 、7 月—次年 4 月 200 m^3/s , 刘家峡水库生态流量初值为 285 m^3/s 。

表 2 龙刘两水库生态流量取值范围
Tab. 2 The range of ecological flow values for the Longyangxia and Liujiaxia Reservoir 单位: m^3/s

方法或依据	龙羊峡水库	刘家峡水库
Tennant法	190~381(5—10月) 63~254(11月—次年4月)	259~518(5—10月) 86~345(11月—次年4月)
Q_p 法	≥ 127	≥ 197
流量控制指标	≥ 400 (5—6月) ≥ 200 (7月—次年4月)	≥ 285
已有调度任务	≥ 200	≥ 90

3.2 生态流量保证率模拟结果

梯级水库调度模拟结果见表 3。在遵守防洪、防凌约束的情况下, 龙刘两水库设置生态流量不会影响模拟河段河道外地表水耗水量和生态流量控制指标保障, 也不会影响水库常用水轮机组开机。龙羊峡水库正常蓄水位、汛限水位和死水位分别为 2 600、2 594 和 2 530 m, 模拟蓄水位(图 3)显示, 龙羊峡水库长期维持在较高水位运行, 即使在来水持续偏枯的 1990—2002 水文年(入库水量比多年平均值偏低 18.1%), 水库达到的最低蓄水位比死水位

高 43.4 m, 而刘家峡水库每年非汛期都发生降至死水位的情况, 说明主要依靠龙羊峡水库的多年调节能力保障龙刘两水库生态流量下泄。

表 3 梯级水库调度模拟结果

Tab. 3 Simulation results of cascade reservoir operation

龙刘两 水库情景	龙羊峡水库保证率/%		刘家峡水库保证率/%		流量控制指标保证率/%				模拟河段年均河道外 地表水耗水量/亿m ³
	最小发电流量	生态流量	最小发电流量	生态流量	贵德	黄丰水电站	大河家水电站	兰州	
无生态流量	100	—	100	—	100	100	100	100	22.1
有生态流量	100	100	100	100	100	100	100	100	22.1

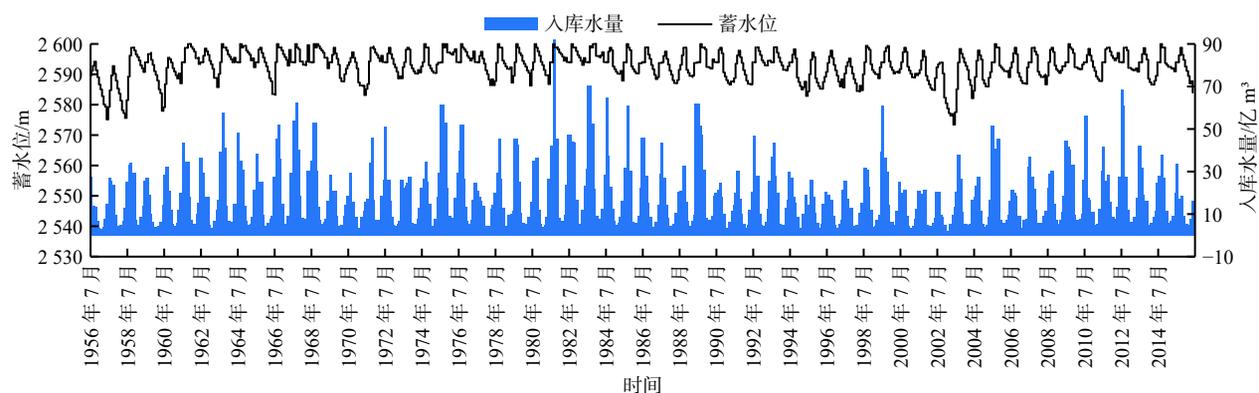


图 3 1956—2015 水文年龙羊峡水库逐月入库水量和模拟月末蓄水位

Fig. 3 Monthly inflow and simulated end of month storage level of Longyangxia Reservoir during 1956-2015 hydrological year

3.3 生态流量历史保证率

龙刘两水库生态流量历史保证率见表 4。贵德断面和小川断面实测日径流数据显示, 在未设置生态流量的历史实际情况下, 1990—2019 水文年及各年代龙刘两水库实测下泄流量已经能够满足生态流量保证率要求。即使在 1990—2002 水文年连续枯水段, 龙刘两水库生态流量保证率也高于 90%。在极端枯水的 2002 水文年, 全河天然径流量偏枯 55%, 龙羊峡水库入库水量比多年平均值偏低 51%, 龙刘两水库生态流量保证率分别降至 81% 和 82%。鉴于水利部对生态流量的要求是长期保证率不低于 90%, 极端枯水年短期生态流量保证率偏低是可接受的。

表 4 龙刘两水库生态流量历史保证率

Tab. 4 Historical guarantee rate of ecological flow of Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir %

断面	1990—2019 水文年				1990—2002 水文年连续枯水段	
	全时段	1990 年代	2000 年代	2010 年代	全时段	最枯年(2002 水文年)
贵德	98	96	97	100	95	81
小川	99	98	98	100	97	82

3.4 生态流量推荐值

实测日径流数据统计结果显示, 龙羊峡水库至

刘家峡水库区间 90% 保证率下日径流增加 78 m³/s。刘家峡水库库区有大夏河和洮河汇入, 根据甘肃省水利厅和水利部已印发实施的生态流量要求, 两条支流汇入黄河干流的把口站生态基流分别为 5 m³/s 和 27 m³/s, 保证率均不低于 90%。因此, 即使在刘家峡水库降至死水位的不利情景下, 龙羊峡水库下泄的生态流量也足以保障刘家峡水库生态流量达标下泄, 说明龙刘两水库生态流量是协调的。

综合考虑生态流量计算结果、水库主要影响河段已批复的流量控制指标、水库已有调度任务、生态流量保障能力和协调性, 提出龙羊峡水库生态流量为 5—6 月 400 m³/s、7 月一次年 4 月 200 m³/s, 刘家峡水库生态流量为 285 m³/s, 长期保证率均不低于 90%。

4 讨论与分析

4.1 龙羊峡水库运行模拟结果与实际差异原因

龙羊峡水库运行模拟结果与实际差异较大, 生态流量保证率模拟结果高于实际情况。造成这一现象主要有两方面原因: 一是龙羊峡水库实际运行初期蓄水较保守; 二是黄河实际调度中存在超计划耗水现象。

龙羊峡水库设计汛限水位 2 594 m, 但实际运用中汛限水位逐步抬高: 1988—1990 年从 2 545 m 逐步抬升至 2 564 m, 1991—2001 年从 2 570 m 逐步抬升至 2 585 m, 2002—2018 年逐步抬升至 2 588 m, 2019—2020 年逐步抬升至 2 592 m, 2021 年后采用设计值。龙羊峡水库运行后不久就遭遇了 1990—2002 水文年连续枯水段, 导致水库持续在较低水位运行。1987—2002 水文年龙羊峡水库实测月末蓄水水位见图 4, 1990 年 6 月末龙羊峡水库死水位以上蓄水量不足 60 亿 m³, 初期蓄水较少导致龙羊峡水库难以有效应对连续枯水段, 其间水位多次降至死水位附近。

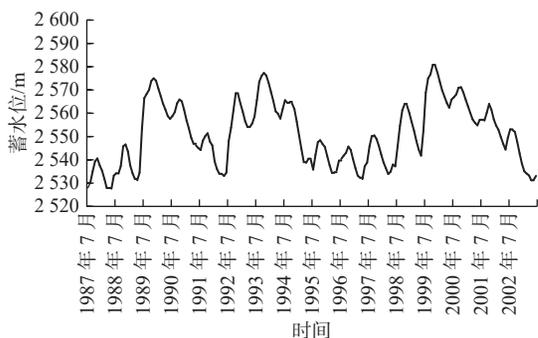


图 4 1987—2002 水文年龙羊峡水库实测月末蓄水位
Fig. 4 The measured end of month storage level of Longyangxia Reservoir during 1987-2002 hydrological year

本文模拟时段为 1956—2015 水文年, 假设有关省区按照黄河“八七”分水方案耗水。但是, 在实际运用中: 1987 年以前黄河无分水方案; 1988—1999 年由于缺少执行手段和保障措施, 分水方案执行效果较差, 例如, 20 世纪 90 年代黄河年均天然径流量 425.5 亿 m³, 对“八七”分水方案丰增枯减得到年均分配河道外耗水量 271.4 亿 m³, 但实际年均河道外耗水量 284.1 亿 m³; 为了有效落实“八七”分水方案, 20 世纪末水利部开始逐年印发《黄河可供水量年度分配及非汛期干流水量调度计划》, 2000 年黄河干流开始实施水量统一调度, 此后黄河用水管控能力显著提升, 但仍存在超计划耗水现象(图 5), 2001—2020 年, 35% 年份的实际耗水量超过年度计划耗水指标(四川省分水指标仅 0.4 亿 m³, 图 5 中不单独列出), 甘肃、宁夏、内蒙古和山东 80% 以上的年份超计划耗水。

4.2 龙刘两水库生态流量保障面临的问题与建议

龙羊峡水库至刘家峡水库区间是多种土著鱼类的重要栖息地, 已经设置了 3 个国家级水产种质资

源保护区。5—6 月是该河段鱼类集中产卵期, 需要较大的流量刺激产卵和形成适宜的产卵场, 保障该时段的生态流量十分重要。龙羊峡水库实测出库流量对本文推荐的生态流量的长期保证率较高, 但年内不同时段保证率有明显差异, 5—6 月保证率低于其他月份, 枯水时段尤为明显(表 5)。未来随着龙羊峡水库生态流量的印发实施, 泄放生态流量将被纳入龙羊峡水库日常调度, 建议届时龙羊峡水库在枯水时段提高敏感期生态流量泄放的优先级, 并充分发挥刘家峡水库的反调节能力, 减少龙羊峡水库泄放生态流量对刘家峡水库以下河段河道外用水的不利影响。

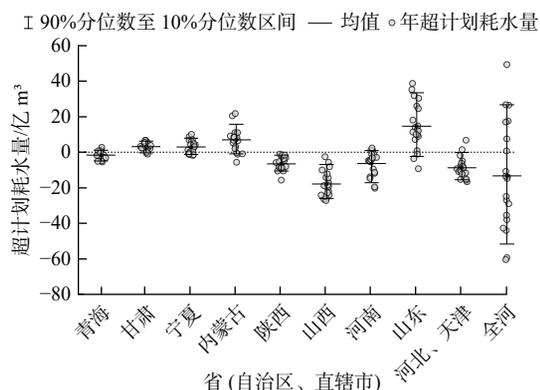


图 5 2001—2020 年黄河及主要省(区)超计划耗水情况
Fig. 5 Over planned water consumption in the Yellow River and major provinces (regions) from 2001 to 2020

表 5 龙羊峡水库年内不同时段生态流量历史保证率
Tab. 5 Historical guarantee rate of ecological flow at different time periods of the year in Longyangxia Reservoir

月份	1990—2019 水文年				1990—2002 水文年连续枯水段	
	全时段	1990 年代	2000 年代	2010 年代	全时段	最枯年(2002 水文年)
5—6 月	92	89	89	98	83	44
其他	99	98	98	100	98	88

龙刘两水库区间的水电站具有改变日径流过程的能力。由于龙刘两水库区间大部分梯级电站建设时间较早, 没有设置生态流量, 建议未来分阶段推进该河段梯级电站生态流量核定工作, 将调蓄库容相对较大的拉西瓦、李家峡、公伯峡、积石峡等水电站作为下阶段生态流量核定对象, 远期扩展到所有水电站。

考虑水库调度能力、水库管理单位执行意愿等因素, 本文仅提出了年内不同时段生态流量, 缺少脉冲、洪水等关键流量事件。希望未来随着生态

流量实施力度的增强、水库调度能力的提升,黄河骨干水库生态流量过程可以得到进一步细化完善。

4.3 面向工程的生态流量核定要点

已建水利水电工程生态流量核定是一项面向实际需求、旨在指导水库调度实践的工作。面向实践的生态流量过程宜尽量简单。水库实际管理运行中需要协调水调和电调,涉及多个部门配合及利益协调。黄河干流水量调度遵循电调服从水调的原则,龙刘两水库均由黄河水利委员会制定和下达水调指令,国家电网公司西北分部西北电力调控分中心和国网甘肃省电力公司根据水调指令,面向发电需求分别制定龙羊峡水库和刘家峡水库的发电计划及调度指令,然后分别下达至两水库中控室执行。简单的生态流量过程可以减少水调和电调的协调难度,减轻水库泄放生态流量的操作难度,提升水库管理单位泄放生态流量的意愿,也便于监管部门监测评估生态流量是否达标泄放。

工程生态流量需要与工程主要影响河段已批复的流量控制指标相协调。流量控制指标一般由水利部门和环保部门批复实施,已批复的流量控制指标是水量调度和管理的重要依据,环保部门批复的流量控制指标还是环保督察的重要内容。生态流量科学研究可以仅考虑保护对象的需求,但是如果以服务实践为目标,必须保证新设置的生态流量与已有流量控制指标不存在冲突,否则难以得到批复实施。

需要做好生态流量与水库已有任务的协调。已建水库一般承担了供水、发电等任务。对于缺水流域/区域,设置生态流量可能会导致供水水量减少、发电效益降低等损失,导致水库管理单位泄放生态流量的意愿较低。为了获得水库管理单位的支持,减少生态流量落实难度,在生态流量核定阶段,需要协调好生态流量泄放与水库已有任务的关系,尽量减轻对已有任务的影响。

5 结论

根据水利部已建水利水电工程生态流量核定与保障先行先试工作需求,以黄河干流龙羊峡水库和刘家峡水库为研究对象,建立了生态流量核定方法,提出了生态流量推荐值,得到主要结论如下:

建立了已建梯级水库生态流量核定方法,根据有关规范对生态流量的要求、水库主要影响河段已批复的流量控制指标和水库已有调度任务下泄需

求,得到生态流量初值。采用情景模拟和历史实测资料分析两种方法检验水库对生态流量的保障能力。

提出龙羊峡水库生态流量推荐值为5—6月 $400\text{ m}^3/\text{s}$ 、其他时段 $200\text{ m}^3/\text{s}$,刘家峡水库生态流量推荐值为 $285\text{ m}^3/\text{s}$,长期保证率均不低于90%。

1956—2015水文年模型模拟结果和实测出库径流过程均反映了龙刘两水库对生态流量的长期保证率满足要求,但实测资料显示龙羊峡水库在枯水时段对敏感期生态流量保证率较低,未来龙羊峡水库在枯水时段需要提高敏感期生态流量泄放的优先级。

龙刘两水库区间水电密集开发,建议未来将区间11座水电站分阶段纳入已建水利水电工程生态流量核定工作范围。

参考文献:

- [1] POFF N L, OLDEN J D. Can dams be designed for sustainability?[J]. *Science*, 2017, 358(6368): 1252-1253. DOI: 10.1126/science.aaq1422.
- [2] 邓铭江, 黄强, 畅建霞, 等. 大尺度生态调度研究与实践[J]. *水利学报*, 2020, 51(7): 757-773. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200326.
- [3] 娄广艳, 葛雷, 黄玉芳, 等. 黄河下游生态调度效果评估研究[J]. *人民黄河*, 2021, 43(7): 100-103. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.07.019.
- [4] 侯俊, 黄喻威, 苗令占, 等. 基于鱼类栖息地需求的雅鲁藏布江中游环境流量计算[J]. *水资源保护*, 2020, 36(4): 8-12, 20. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2020.04.002.
- [5] 吴昌贤, 薄岩, 黄微尘, 等. 黄河干流生态流量赤字及其成因[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(4): 8-16. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0069.
- [6] PRASKIEVICZ S, LUO C, BEARDEN B, et al. Evaluation of low-flow metrics as environmental instream flow standards during long-term average and 2016 drought conditions: Tombigbee River basin, Alabama and Mississippi, USA. [J]. *Water Policy*, 2018, 20(6): 1240-1255. DOI: 10.2166/wp.2018.023.
- [7] 董哲仁, 张晶, 赵进勇. 环境流理论进展述评[J]. *水利学报*, 2017, 48(6): 670-677. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20161056.
- [8] 张丹, 鲍军, 李想, 等. 考虑河流生态需水约束的调水规模研究[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(5): 917-929. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0089.
- [9] 易雨君, 徐嘉欣, 宋劫, 等. 黄河河口区生态需水量及

- 流量过程核算[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 133-140. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.017.
- [10] 南军虎, 刘一安, 陈垚, 等. 裁弯河道内生物栖息地改造及生态流量估算[J]. *水资源保护*, 2022, 38(3): 189-197. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.026.
- [11] THEODOROPOULOS C, SKOULIKIDIS N, RUTSCHMANN P, et al. Ecosystem-based environmental flow assessment in a Greek regulated river with the use of 2D hydrodynamic habitat modelling [J]. *River Research and Applications*, 2018, 34(6): 538-547. DOI: 10.1002/rra.3284.
- [12] VILIAM M, ZUZANA, MARTINA M, et al. Influence of discharge on fish habitat suitability curves in mountain watercourses in IFIM methodology [J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2018, 66: 12-22. DOI: 10.1515/johh-2017-0044.
- [13] 彭文启, 刘晓波, 王雨春, 等. 流域水环境与生态学研究回顾与展望[J]. *水利学报*, 2018, 49(9): 1055-1067. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20180651.
- [14] 尚文绣, 彭少明, 王煜, 等. 面向河流生态完整性的黄河下游生态需水过程研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(3): 367-377. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190784.
- [15] HORNE A, KAUR S, SZEMIS J, et al. Using optimization to develop a "designer" environmental flow regime [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 88: 188-199. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.11.020.
- [16] 王瑞玲, 黄锦辉, 葛雷, 等. 基于黄河鲤鱼栖息地水文-生态响应关系的黄河下游生态流量研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1175-1187. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200184.
- [17] POFF N L. Beyond the natural flow regime? Broadening the hydro-ecological foundation to meet environmental flows challenges in a non-stationary world [J]. *Freshwater Biology*, 2018, 63(8): 1011-1021. DOI: 10.1111/fwb.13038.
- [18] 林俊强, 李游坤, 刘毅, 等. 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. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210774.
- [19] ZHANG H, CHANG J, GAO C, et al. Cascade hydropower plants operation considering comprehensive ecological water demands [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 180: 119-133. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.10.072.
- [20] 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(1): 94-103, 123. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.01.015.
- [21] 陈昂, 吴森, 王鹏远, 等. 中国水电工程生态流量实践主要问题与发展方向[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(7): 33-40. DOI: 10.11988/cjkyb.20171412.
- [22] 张璞, 刘欢, 胡鹏, 等. 全国不同区域河流生态基流达标现状与不达标原因[J]. *水资源保护*, 2022, 38(2): 176-182. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.024.
- [23] 王建华, 胡鹏, 刘庆涛, 等. 我国重点河湖生态流量达标现状及管控建议[J]. *中国水利*, 2022(1): 14-18. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2022.01.012.
- [24] 张文睿, 孙栋元, 曹晓萱, 等. 大通河流域生态流量确定及预警方案研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(1): 100-109. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2023.01.12.
- [25] 张建永, 黄锦辉, 孙翀, 等. 已建水利水电工程生态流量核定与保障思路研究[J]. *水利规划与设计*, 2023(8): 1-4, 9. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2023.08.001.
- [26] 彭少明, 尚文绣, 王煜, 等. 黄河上游梯级水库运行的生态影响研究[J]. *水利学报*, 2018, 49(10): 1187-1198. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20180431.

Ecological flow assessment and guarantee of Longyangxia and Liujiaxia Cascade Reservoirs

ZHAO Xinlei^{1,2}, LI Shulei^{1,2}, SHANG Wenxiu^{1,2}

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin (Under Construction), Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Assessing ecological flow is an important measure to enhance the ecological function of reservoirs and maintain the healthy life of rivers. The ecological flow process proposed using cutting-edge methods generally includes components such as base flow, high flow pulses, and floods. The various flow regime is crucial for the ecological health of rivers, but the complex ecological flow process makes it difficult to put it into practical application. How to face practical needs and coordinate the scientificity and practicality of the ecological flow process is a difficult problem that urgently needs to be solved in this field. In 2022, the Ministry of Water Resources

of the People's Republic of China launched the pilot work of ecological flow assessment and guarantee for constructed water conservancy and hydropower projects, aiming to strengthen the management and supervision of ecological flow. The Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir in the main stream of the Yellow River have been included in the list of pilot projects. Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir were constructed long ago and there is no ecological flow release task in these two reservoirs scheduling currently.

Taking Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir as examples, a method for ecological flow assessment based on practical needs for cascade reservoirs is proposed. Firstly, the Tennant method and Q_p method are used to calculate the reasonable range of ecological flow. When using the Tennant method, the range of ecological flow during periods of low water is chosen as 10% to 40% of the annual average natural flow, while during periods of high water, the range of ecological flow is chosen as 30% to 60% of the annual average natural flow. When using the Q_p method, the frequency is selected as 90%. Then, the flow control indicators in the main affected river sections of cascade reservoirs approved by the government and the demand range for outflow from the existing scheduling tasks of cascade reservoirs are sorted out. After coordinating the needs of all parties, the initial value of ecological flow is proposed. Next, the guarantee capacity of ecological flow is analyzed. By establishing a simulation model for cascade reservoirs operation, the reservoirs' ability to guarantee the ecological flow is simulated. Meanwhile, a long series of measured reservoir outflow data is used to calculate the historical guarantee rate of ecological flow. If the guarantee capacity is insufficient, it is necessary to adjust the ecological flow. For cascade reservoirs, it is also necessary to analyze whether the ecological flow discharged from upstream reservoirs can meet the ecological flow requirements of downstream reservoirs. After coordination analysis, the recommended ecological flow value is finally obtained.

Results show that the ecological flow of Longyangxia Reservoir is $400 \text{ m}^3/\text{s}$ from May to June, $200 \text{ m}^3/\text{s}$ in other time periods. The ecological flow of Liujiaxia Reservoir is $285 \text{ m}^3/\text{s}$. The long-term guarantee rates of two reservoirs are not less than 90%. The Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir both have good ecological flow guarantee capabilities. The simulated guarantee rates are both 100%. The historical guarantee rates during the 1990-2019 hydrological year were 95% and 97%, respectively. However, ecological flow guarantee still faces risks under extreme low water conditions, such as the historical guarantee rates were 81% and 82% in the 2002 hydrological year, respectively.

Implementing ecological flow in Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir will face two prominent issues: ecological flow guarantee during sensitive periods under extreme low water conditions and the impact of interval cascade power stations. May to June (sensitive periods) is the concentrated spawning period for fish in the section from Longyangxia Reservoir to Liujiaxia Reservoir, which requires a large flow to stimulate spawning and form suitable spawning grounds. However, historical guarantee rate in May to June was much lower than other periods, indicating the need to increase the priority of ecological flow release during sensitive periods in the future. There are 11 hydropower stations built between Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir. Although the storage capacity of these hydropower stations are relatively small, it may still affect the daily flow process. It is suggested to promote the ecological flow assessment work of the cascade power stations in this section in the future.

Key words: ecological flow; constructed reservoir; cascade reservoir; multi-task coordination; Longyangxia Reservoir; Liujiaxia Reservoir; Yellow River