DOI:10. 3969/j. issn. 1672 - 1144. 2022. 06. 032

# 考虑水生态目标的月河流域生态联合调度研究

闫　星,马永胜
(陕西省水利电力勘测设计研究院,陕西 西安 710001)

**摘　要:** 基于新时期长江大保护、汉江生态经济带等国家生态文明建设背景,为了从流域尺度厘清汉江主要支流月河现状生态水需求,提出针对性的生态补水方案,复苏月河水生态环境,以月河干流为研究对象,提出流域生态联合调度框架,建立了考虑“良好”或“很好”等级生态水目标的水库群联合调度模型并求解。结果表明:仅靠流域内主要水库泄放既定生态基流,难以满足月河干流较高的生态需求;通过联合生态调度,月河干流生态补水效果明显,可达到河流健康生态环境“良好”标准;从时空规律看,月河中游以上为生态缺水重点区域,1 月—3 月为生态缺水重点时段。研究成果为提升月河干流生态环境质量,优化区域水资源配置格局,支撑月河流域经济社会高质量发展提供技术支撑。

**关键词:** 生态联合调度;流域尺度;水库群;月河流域
**中图分类号:** TV697. 1⁺2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1672—1144(2022)06—0216—07

# Eco-combined Operation in Yue River Basin Considering Water Ecological Objectives

YAN Xing, MA Yongsheng
(*Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi* 710001, *China*)

**Abstract:** Based on the background of national ecological civilization construction in the new period, such as the great protection of the Yangtze River and the ecological economic belt of the Han River, in order to clarify the current ecological water demand of Yue River at the basin scale, the main tributary of Han River, and to propose the targeted ecological water refill scheme to recover the water ecological environment of the Yue River. Taking the main stream of Yue River as the research object, the research flowchart of eco-combined was proposed in basin scale, and the eco-combined model of reservoir group considering the ecological environment objective of different “good” or “very good” grades was established and solved. The results are as follows. It was difficult to meet the high ecological demand of the main stream of Yue River only by discharging the established ecological base flow from the main reservoir in the basin. The quantity of ecological environment water increased significantly under the eco-combined operation, which can meet the standard of “good” ecological environment of the main stream of the Yue River. In terms of temporal and spatial pattern on the ecological water shortage, the middle of the river is the key area, and the period from January to March is the key period. The research results are expected to improve the ecological environment quality of the Yue River trunk stream, optimizing the water resources allocation, and supporting the high-quality development of economy and society in the Yue River basin.

**Keywords: eco-combined operation; basin scale; reservoir group; the Yue River basin**

生态文明是现阶段实现流域经济社会高质量发展的主要内容。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标的建议》中指出,复苏河湖生态环境,达到自我调节和平

**收稿日期:**2022-07-20　　**修稿日期:**2022-08-24
**作者简介:**闫　星(1970—),男,高级工程师,总规划师,主要从事区域水资源统筹管理与水网构建等方面的研究工作。E-mail:596149221@qq. com
**通讯作者:**马永胜(1983—),男,高级工程师,博士,主要从事大型跨流域调水及水资源优化调度方面的研究工作。E-mail:mys931@163. com

衡状态,才能长久地维持和提升流域生态系统的稳定性和质量[1-2]。流域不仅是水、大气、土循环的最小单元,也是人们生产、生活经济活动场所、生物繁衍生息的重要栖息地,应作为生态文明建设的基础单元,突出流域在水生态安全保护与修复的整体与系统性。随着我国生态文明建设不断深入,改善日益恶化的河流生态环境,修复已经被破坏的流域生态系统已经引起了众多学者的广泛关注[3-5]。曹宝等[6]所定义的生态流域是在保持流域生态系统结构和功能健康的前提下,通过制定和实施流域总体规划,使流域内的一切生产及生活活动与流域生态系统的承载力相协调。在此基础上,黄强等[7-8]较为系统的构建了生态流域理论系统,并从 8 个不同维度进行顶层设计,阐述了生态流域的定义和内涵。保障河道生态流量成为流域生态恢复工作的重点内容[9-10]。王浩等[11]分析了生态流量保障在河湖生态环境复苏中的重要作用,提出了河湖生态流量保障路径与措施建议。

考虑到水体自净需要一定的时间周期,仅靠天然河流自身恢复能力难以达到较好的水生态标准。有必要借助流域内的工程措施加速河流水生态复苏。水库作为水资源调配的关键性工程,在传统生产、生活供水任务基础上,也相继拓展了流域生态调度任务,生态调度逐渐成为学界研究的重点问题[12-13]。陈进[14]较早地研究了流域生态调度,提出要利用有调节能力的水库对流域水资源在时空上合理调配,其前提是保障流域内各类生态要素基本需求。邓铭江等[15]建立了水库群多尺度耦合的生态调度多目标模型,并在新疆乌伦古河流域取得了较好的实践效果。许继军等[16]探讨了适应新时期高质量发展和生态文明建设的南水北调水资源配置思路,建议可充分利用东线一期工程现有能力,加大生态补水力度。

当前研究多集中于从水库生态调度单一目标角度分析其生态补水效应,往往将生态调度目标与水库原供水目标割裂甚至对立,未能充分地发挥水资源综合利用价值;此外,以往成果的研究范围多为生态补水河流或流域某一区域,缺乏从整个流域尺度系统研究生态补水问题。而生产、生活、生态用水之间应处于一种动态均衡,更利于生态持续向好发展;水生态问题通常并非孤立存在,其在流域内上、下游相互影响,并且与流域内水文情势条件、调蓄工程布设格局、经济社会发展区位息息相关。因此,有必要开展流域尺度下,既能保障原有供水、又能充分满足新增生态补水的水库群联合生态调度研究。

本文以水资源综合利用为目标,结合月河流域内各支流上已建、规划的主要水源工程,在确保水库原有供水目标与任务不受影响的前提下,开展流域水库群生态优化调度研究,旨在解决月河流域水资源时空分布不均、干流段生态水紧缺等关键问题。研究成果对于提升月河干流生态环境质量,优化区域水资源配置格局,支撑汉江生态经济带高质量发展具有十分重要的理论方法及工程实践意义。

# 1　材料与方法

## 1.1　材料与数据

### 1.1.1　流域及水生态现状

月河位于陕西省安康市中部,发源于秦岭南麓凤凰山主峰铁瓦殿大堰沟,在汉滨区建民许家台汇入汉江,流域面积2 830 km$^2$,全长95.2 km。月河多年平均年降水量 840 mm ~ 900 mm,降水年际变化较大、年内分布不均,4 月—9 月降水量占全年降水量的85%。

月河川道段为安康市经济社会发展核心地带。工业园区的快速发展、人口迅速聚集和工农业用水量增加造成月河干流河道水量减少、河流纳污能力降低;同时,干流川道段又是该区域产业带唯一的废污水承纳与排泄通道,由于缺乏系统性治理与保护措施,使得月河成为汉江上游水生态矛盾较为突出河流[17]。此外,月河流域已建或规划主要水源工程基本建于北岸,其中规模较大的调蓄工程有观音河、洞河、恒河和黄石滩水库,由此构成本文生态联合调度水库群(见表 1)。

**表 1　月河流域主要水库工程特征参数表**

| 水库 | 正常蓄水位/m | 死水位/m | 总库容/(万 m$^3$) | 兴利库容/(万 m$^3$) | 供水对象 |
|---|---|---|---|---|---|
| 观音河 | 463.3 | 444.4 | 1552 | 1026 | 农业 |
| 洞河 | 391.0 | 358.5 | 4616 | 3256 | 城镇、农业 |
| 恒河 | 416.0 | 367.0 | 8951 | 6232 | 城镇、农业、生态 |
| 黄石滩 | 419.0 | 400.0 | 4177 | 2034 | 农业 |

水库工程对月河流域经济社会高速发展发挥了支撑保障作用,同时也带来一定生态问题,已建或规划的众多调蓄工程将月河大部分天然径流拦蓄在主要支流,并且由于历史原因,原有水库未能充分泄放生态流量,造成水库下游及月河干流径流持续减少,加之月河天然径流过程年内变化差异大,造成月河干流径流情势日益恶化,特别是枯水期出现较为严

重的缺水状况,进一步导致干流水体纳污能力降低,中上游部分区段水质变差,威胁到月河沿岸居民生产生活和国家南水北调中线供水安全。

月河干流主要水文控制站点有位于中游的蒲溪水文站和位于月河口段的长枪铺水文站。两座水文站可表征月河流域中、下游区段的水文情势变化规律。如图 1 所示。

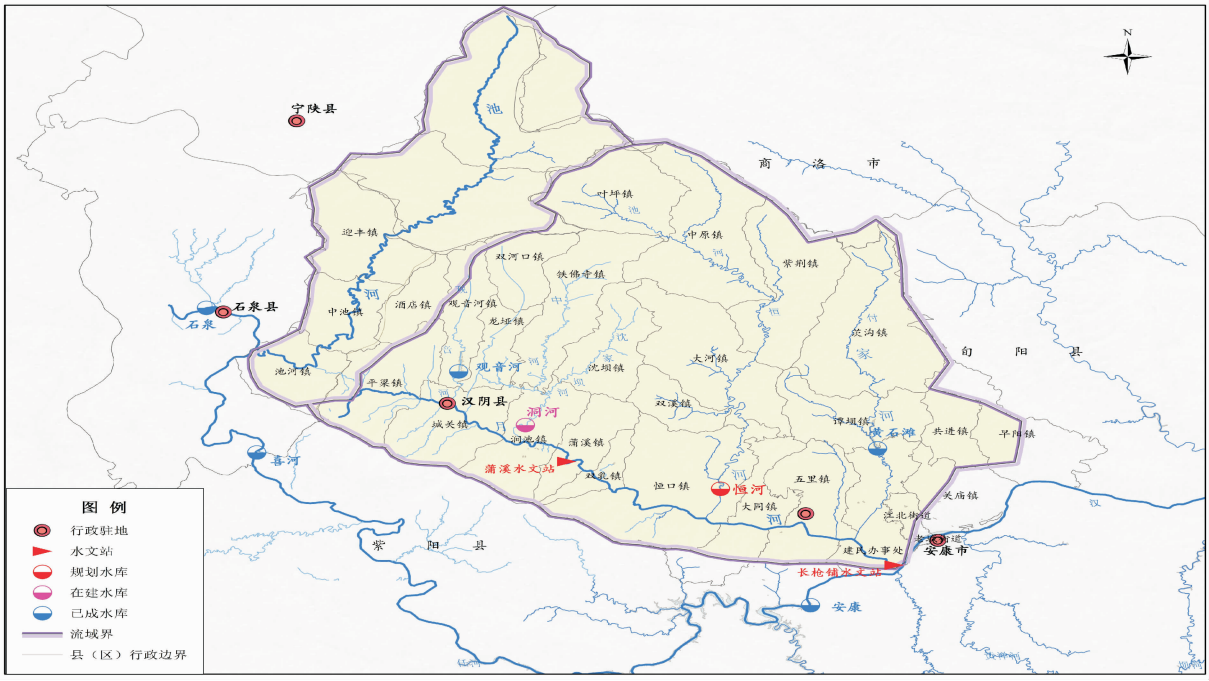


**图 1 月河流域主要水利工程布局图**

### 1.1.2 基本资料

月河流域水库群生态调度采用的资料主要有:四座水库工程设计参数、入库径流资料以及生态调度需水资料等。采用 2000 年 5 月—2019 年 4 月共 10 年径流序列,划定 5 月—10 月为汛期,11 月—次年 4 月为非汛期。

考虑到月河对区域经济社会发展支撑性作用及其水生态现状,应在满足生态基流条件下,进一步提升月河水生态品质。因此,本文推荐《河湖健康评价指南》中划定“良好”与“很好”两个标准,用以确定月河生态需水量[18]。具体采用 Tennant 法计算[19],“良好”标准生态流量年内较枯时段选择多年平均天然流量 20%,较丰时段选择多年平均天然流量 40%;“很好”标准则分别选取相应时段多年平均天然流量 30%、50%,由此计算“良好”与“很好”标准下月河生态环境需水量分别为 2.51 亿 $m^3$ 与 3.35 亿 $m^3$。

## 1.2 月河流域水生态联合调度

### 1.2.1 框架流程

针对水生态联合调度涉及关键环节及主要步骤,提出了流域水生态联合调度流程并搭建其研究框架,如图 2 所示。

如图 2 所示,流域水生态联合调度研究主要四个步骤:

(1) 从时间与空间维度剖析流域水生态现状面临主要问题,确定河湖健康“良好”与“很好”标准下的生态环境需水量。

(2) 构建联合生态调度模型,以保障原对象需求与供水标准为强约束,尽可能充分满足生态需水目标,均衡水库原供水与生态补水效益。

(3) 实施生态联合调度,保障流域内生产、生活、农灌供水基础上,单一水库加大生态下泄量,水库群发挥互补性能,提高联合调度系统水资源综合利用效率。

(4) 评估包含总量与过程两方面的生态补水效果,并评价“良好”与“很好”生态需水满足状况,进而分析流域生态缺水的重点时段与区段。

### 1.2.2 模型建立及求解

月河流域水库群联合生态调度首先应满足水资源综合利用的原则,按照各个水库的供水优先次序进行供水,在确保水库原有供水目标与任务不受影响的前提下,通过优化水库的调度运行方式,加大月

河干流生态水量,从而尽可能满足月河干流河湖健康“良好”或“很好”两个不同等级生态需求。

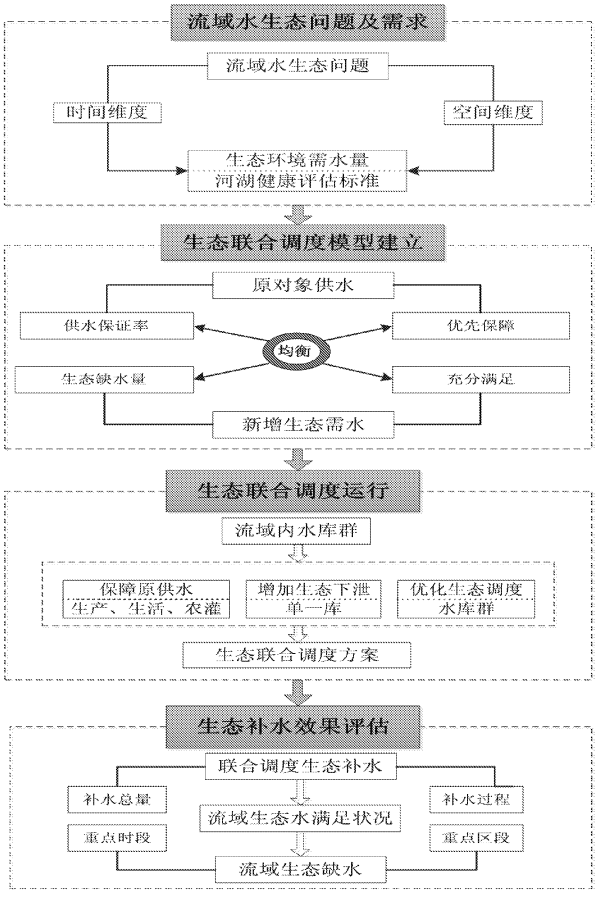


**图 2　流域水生态联合调度研究框架图**

(1) 目标函数。以保障河流生态健康为目标,选取生态缺水量最小作为目标函数,建立面向月河生态补水的水库群联合生态调度模型。

$$\min \Delta W = \sum_{i=1}^{N} \sum_{t=1}^{T} Q_{xs}(i,t) - Q_{gs}(i,t) \tag{1}$$

式中:$\min \Delta W$ 为生态联合调度最小缺水量;$Q_{xs}$ 分别表示为生态需水量,分为“良好”与“很好”两个等级;$Q_{gs}$ 为水库生态联合调度补水量;$T$、$t$ 分别为调度总时段和调度期内不同时段;$N$、$i$ 分别代表联合调度水库群总个数及某一水库。

(2) 约束条件。

1) 原对象供水保障强约束

① 原对象供水保证率约束:

$$P_{gy} \geqslant P_{y} \tag{2}$$

② 实际供水保证率统计:

$$P_{gy} = \frac{N_{gy}^{s}}{N_{gy}^{T}} \times 100\% \tag{3}$$

③ 时段满足供水频次统计:

$$N_{gy}^{s} = \sum_{t=1}^{T} n_{gy}^{t};\ n_{gy}^{t} = \begin{cases} 1, \sum_{i=1}^{N} Q_{gy}(i) = \sum_{i=1}^{N} Q_{xy}(i) \\ 0, \text{else} \end{cases} \tag{4}$$

式中:$P_{gy}$ 与 $P_{y}$ 分别为原对象实际供水保证率与目标保证率要求;$P_{gy}$ 为实际满足供水目标次数 $N_{gy}^{s}$ 与长系列总统计次数 $N_{gy}^{T}$ 之比;在时段 $t$ 内,原对象供水达标判定 $n_{gy}^{t}$ 通过原对象实际供水 $Q_{gy}(i)$ 是否满足目标需水 $Q_{xy}(i)$ 计数,否则为 0。

2) 水库调度运行约束

① 水量平衡约束:

$$V(i,t+1) - V(i,t) = (I(i,t) - Q_{G}(i,t) - Q_{x}(i,t)) \cdot \Delta t \tag{5}$$

② 库容约束:

$$V_{\min} \leqslant V(i,t) \leqslant V_{\max} \tag{6}$$

③ 水位约束:

$$Z_{\min} \leqslant Z(i,t) \leqslant Z_{\max} \tag{7}$$

④ 最大供水量约束:

$$0 \leqslant Q_{G}(i,t) \leqslant Q_{G\max} \tag{8}$$

式中:$V(i,t)$、$I(i,t)$、$Q_{G}(i,t)$、$Q_{x}(i,t)$ 分别表示水库 $i$ 在时段 $t$ 的实时库容、入库流量、原对象供水与生态补水流量、水库下泄流量(在满足生产与生态供水基础上);其中,$V_{\max}$ 与 $V_{\min}$ 分别是指水库在正常运行过程中库容变化范围的上、下限;$Z_{\max}$ 与 $Z_{\min}$ 分别是指水库水位变化范围上、下限,其中最高值为正常蓄水位(汛限水位),最低值为死水位;$Q_{G\max}$ 为水库对于原对象供水与生态补水的最大供水能力。

(3) 模型求解。近年来,随着智能优化算法不断改进,其计算效率日益提高,因此,对于计算模型最值的求解方法也更为成熟[20]。本文选取广泛应用于水资源管理领域的遗传算法,该方法可适用于求解复杂多维非线性规划问题[21]。算法参数选择:种群数目 300 个,变异概率 0.3,交叉概率 0.7,迭代 100 次。

## 2　结果与分析

### 2.1　原对象供水保障状况

对于保障生态环境水用水,应优先挖潜本流域内部水资源,提高本流域水资源科学合理开发,采取统一管理、联合调度等方式尽可能在流域内解决。此外,对于一个闭合流域,通常流域所纳含的水资源总量较为稳定,且该流域内水库工程所具有的调蓄能力也基本确定,在水源条件与调蓄能力均显著提升情况下,联合调度系统内增加新的供水对象,势必

会造成原对象与新增对象之间强竞争关系。本文所提出的流域生态联合调度,应优先确保水库原对象供水,提高水库(群)联合调度效率,均衡原对象与新增对象之间的博弈关系,实现水库多目标共同受益。

据分析计算,维持月河干流生态环境“良好”与“很好”标准的生态需水量为 25 094 万 $m^3$ 与 33 528 万 $m^3$;统计月河干流水库现状下泄生态水量为 21 616 万 $m^3$;因此,对应月河干流生态环境“良好”与“很好”标准的生态缺水分别为:3 478 万 $m^3$ 与 11 912 万 $m^3$,该缺口即为需要生态联合调度逐级满足的目标。

生态联合调度选用了近十年径流系列,完成月河流域水库群旬尺度优化计算,并统计原对象供水保障情况,如表 2 所示。

**表 2 生态联合调度下原对象供水保障统计表**

| 水库 | 生产、生活供水 | | | | 农业灌溉供水 | | | | 生态基流下泄 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 需水量/(万 $m^3$) | 供水量/(万 $m^3$) | 保证率/% | 判定 | 需水量/(万 $m^3$) | 供水量/(万 $m^3$) | 保证率/% | 判定 | 流量/($m^3 \cdot s^{-1}$) | 判定 |
| 观音河 | 510 | 496 | 95.8 | 满足 | 1161 | 795 | 56.7 | 满足 | 0.08 | 达标 |
| 洞河 | 2032 | 1960 | 95.3 | 满足 | 3090 | 2877 | 75.2 | 满足 | 0.12 | 达标 |
| 恒河 | 9300 | 9268 | 95.2 | 满足 | 1271 | 1084 | 75.4 | 满足 | 1.81 | 达标 |
| 黄石滩 | — | — | — | — | 4615 | 4326 | 76.5 | 满足 | 0.34 | 达标 |

由表 2 可见,参与月河流域生态联合调度的四座水库,均应按照各单库原设计批复的生态基流下泄,确保各自满足其生态基流要求;观音河、洞河、恒河水库同时具有生产、生活与农业灌溉供水需求,且其农业灌溉保障标准不完全一样(观音河水库为 50%、其余三座水库为 75%);通过生态联合调度,各水库均能保障其原对象供水要求,即生产、生活供水保证率都满足 95% 标准,农业灌溉供水达到各自不同的保证率要求。遵循上述联合调度运行原则,可保障原对象供水标准不降低、实现联合生态调度模型中水库原对象正常供水强约束。

据统计,在确保水库原设计批复的生态基流前提下,生态联合调度四座水库合计下泄水量为 21 616 万 $m^3$,均低于月河干流生态环境“良好”(25 094 万 $m^3$)与“很好”(33 528 万 $m^3$)标准的生态需水量。因此,仅靠水库生态基流下泄,无法达到月河干流持续向好生态目标。

## 2.2 新增生态目标满足程度

针对月河干流生态联合调度结果,首先从总量分析生态补水效果,水库生态联合调度后补充生态水量合计 26 006 万 $m^3$,表明月河本流域内可最大挖潜生态环境水量约为 4 390 万 $m^3$(长枪铺断面);水库生态联合调度补充生态水量大于“良好”标准生态需水量 25 094 万 $m^3$,而小于“很好”标准生态缺水量 33 528 万 $m^3$。因此,在统一调配管理下,通过水库群生态联合调度月河干流可满足“良好”标准生态目标。

其次,分析联合生态调度过程,绘制生态联合调度长系列逐月过程,为阐明月河流域水库群生态联合调度后的生态补水效果,以“很好”标准生态环境需水为目标,对比于月河干流现状实际生态水运行过程,如图 3 所示。

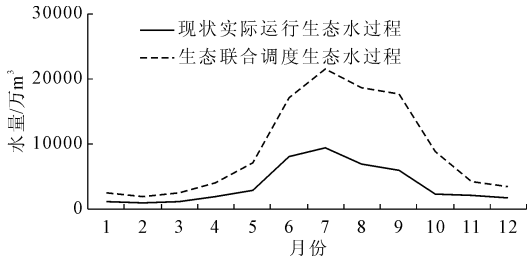


**图 3 月河干流现状实际运行与生态联合调度生态水过程对比图**

如图 3 所示,月河干流生态水量在枯水期总体偏少,特别是 1 月—3 月为全年最低值,随着干流生态水量持续加大,且增幅显著,表明月河干流天然径流年内分配过程差异明显,丰枯期径流量变异性较大,难以维持较为稳定的月河健康生态水要求;通过流域内水库群联合生态调度后,年内各月生态水量均有所增加,生态补水增量与月河天然径流量丰枯状况趋于一致,枯水期生态补水量较少,丰水期增加较多。其原因在于,联合生态调度水源均位于月河主要支流,月河干、支流水文情势相似,丰枯变化基本同步,联合生态调度对月河干流生态流量改善过程基本与干流径流变化规律一致。

为进一步量化说明联合生态调度逐月补水效果,以月河干流下游长枪铺为统计断面,对比分析其与现状运行生态水量之间差异。结果如下:

首先,统计现状运行实际与联合生态调度各自

生态水量,如图 4 所示,联合月河流域健康生态环境“很好”标准需水量为 33 528 万 $m^3$,现状下泄生态水量为21 616 万 $m^3$,水库生态联合调度后补充生态水量合计 26 006 万 $m^3$,生态水增幅达到 20%,改善效果显著;但仍无法完全满足月河健康生态环境“很好”标准需求,主要由于生态联合调度水量源自其骨干支流水库下泄,而月河干、支流径流丰枯变化基本同步,导致支流水库工程对干流生态补水条件有限。

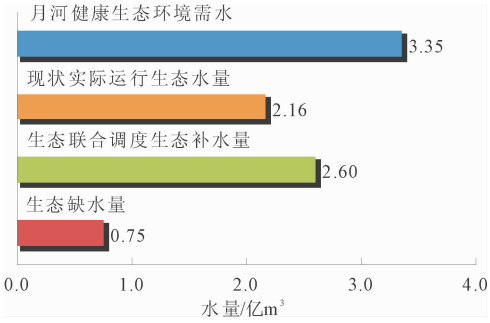


**图 4　月河干流实际运行与联合生态调度生态水量对比图**

其次,联合调度水库群中各水库生态补水能力也有所差异(图 5),下游黄石滩水库生态补水量最大约为 1 875 万 $m^3$,上游观音河水库生态补水量次之为 1 040 万 $m^3$,位于中游的洞河水库与规划恒河水库补水量较小分别为 766 万 $m^3$ 与 709 万 $m^3$。

主要原因有两方面:其一,月河干流上游与下游区生产、生活需水较少,现状用水多集中于农业灌溉等季节性用水,月河源头与汇入口水资源开发利用程度尚低,具备进一步挖潜生态补水的水资源本底条件;其二,近年来新建的洞河水库与规划恒河水库为适应生态文明建设要求,水库设计之初已充分扣除河道生态水量,而观音河与黄石滩水库建设年代较早,鉴于历史原因,当时并未充分考了水库自身生态基流要求,联合调度过程中,按水库下游生态基流要求增加了生态水,使得两水库生态补水增量更为明显。

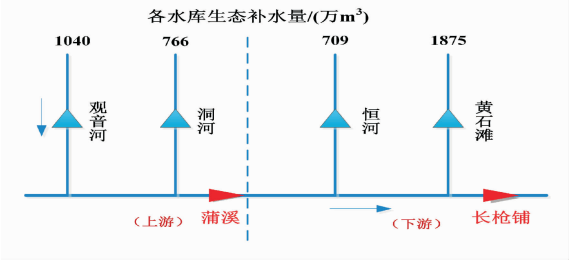


**图 5　月河干流主要水库工程生态补水统计图**

最后,分析联合生态调度后月河干流生态缺水的时空分布(见图 6),从生态补水效果的空间分布看,下游长枪铺断面生态联合调度相比现状运行生态水量增加了 4 390 万 $m^3$,而上游蒲溪断面生态调度增供水量为 1 806 万 $m^3$,月河干流下游段生态联合调度生态增供水量明显高于上游,上游段生态缺口依然更为突出,为生态缺水重点区域;月河干流生态水量仍无法足额满足健康生态环境“很好”标准,相应缺水量达 7 522 万 $m^3$。从生态缺水年内逐月分布过程看,枯水期 1 月—3 月缺水量明显高于其他月份,合计为 2 804 万 $m^3$,约占全年总量四成,其中 3 月份为年缺水最大月份,缺水量约为 1 045 万 $m^3$,为生态缺水重点时段。

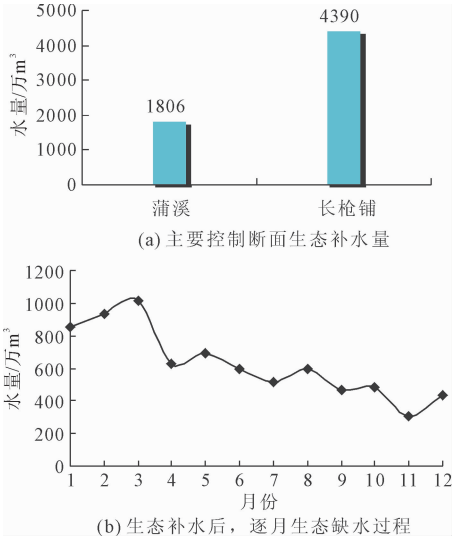


**图 6　月河干流联合生态调度后生态缺水时空分布图**

## 3　结论与建议

(1) 月河流域内四座主要水库在保障其生态基流的运行方式下,实际下泄生态水量合计为 21 616 万 $m^3$,无法达到月河干流健康生态环境“良好”与“很好”标准要求。

(2) 联合生态调度在满足原对象供水要求前提下,采取统一调配管理、优化调度方式,生态供水量合计 26 006 万 $m^3$,增幅达 20%,且可满足月河干流健康生态环境“良好”要求。

(3) 若要满足生态环境“很好”的较高要求,生态缺水量仍有 7 522 万 $m^3$;生态缺水区段主要为中上游区域,缺水时段主要集中于 1 月—3 月。

面对维系国家南水北调核心水源区保护、支撑汉江经济带建设战略推进的新形势,月河水生态亟需提升,流域内主要水源工程生态联合调度的补水

效果较为明显,但由于月河干、支流径流丰、枯情势基本同步,仅靠本流域生态联合调度难以完全解决月河干流生态缺水区段与时段双重困境。下阶段,可在进一步加大月河“生态优先、绿色发展”生态文明建设基础上,提高流域内水资源集约节约利用能力,研究从外流域调水的可能性与可行性。

**参考文献:**


[1] 胡春宏,张双虎. 论长江开发与保护策略[J]. 人民长江,2020,51(1):1-5.

[2] 黄 艳. 面向生态环境保护的三峡水库调度实践与展望[J]. 人民长江,2018,49(13):1-8.

[3] Ma Y S, Chang J X, Guo A J, et al. Conjunctive operation of inter basin transferred water and local water in a multisource diversion-supply-allocation system[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2021, 147(10):05021018.

[4] 骆文广,杨国录,宋云浩,等. 再议水库生态环境调度[J]. 水科学进展,2016,27(2):317-326.

[5] 邱兴春,郭艳娜. 贵州水利工程运行期生态流量下泄过程中存在问题及对策探讨[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(3):6-11.

[6] 曹 宝,罗 宏,吕连宏. 生态流域建设理念与发展模式探讨[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(1):31-35,39.

[7] 黄 强,邓铭江,畅建霞,等. 构建生态流域理论体系支撑流域生态文明建设[J]. 人民黄河,2020,42(9):10-15.

[8] 黄 强,李 沛,冯 刚,等. 渭河生态流域评估[J]. 人民黄河,2022,44(9):51-55,88.

[9] Chang J X, KanY B, Wang Y M, et al. Conjunctive operation of reservoirs and ponds using a simulation-optimization model of irrigation systems[J]. Water Resources Management, 2017,31(3):995-1012.

[10] 贾子烨,杨颖刚,王双银,等. 观音峡水电站最小生态流量分析计算[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(4):6-9.

[11] 王 浩,胡 鹏. 基于二元视角的河湖生态环境复苏与生态流量保障路径[J]. 中国水利,2022(7):11-15.

[12] 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.

[13] 康 玲,黄云燕,杨正祥,等. 水库生态调度模型及其应用[J]. 水利学报,2010,41(2):134-141.

[14] 陈 进. 长江流域水资源调控与水库群调度[J]. 水利学报,2018,49(1): 2-8.

[15] 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.

[16] 许继军,曾子悦. 适应高质量发展的南水北调工程水资源配置思路与对策建议[J]. 长江科学院院报,2021,38(10):27-32,39.

[17] 仇 凯. 基于 GIS 和 SWMM 的汉阴县月河流域降雨径流污染研究[D]. 西安:长安大学,2021.

[18] 李 云,戴江玉,范子武,等. 河湖健康内涵与管理关键问题应对[J]. 中国水利,2020(6):10-13.

[19] 朱敏翔,杨 柳,杨 超,等. Tennant 法在河流生态基流计算中的适用性探讨:以福建省东南沿海地区为例[J]. 人民长江,2020,51(4):59-64.

[20] 康燕楠,降亚楠,苏振辉. 基于 NSGA-Ⅲ和 FloPy 的灌区水资源多目标模拟优化模型[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(3):7-12.

[21] 刘颖聪,程圣东,张妙卿,等. 基于改进遗传算法的工程项目多目标综合优化研究[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(3):6-10.


(上接第 174 页)


[14] 刘曼曼,王 磊,刘亚涛. 粗集料针片状颗粒含量对沥青混凝土性能的影响研究[J]. 科技创新与应用,2022,12(13):80-82,87.

[15] 张 扬. 水工沥青混凝土劈裂特性影响因素分析[J]. 人民珠江,2021,42(4):53-57.

[16] 土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范:SL501—2010[S]. 北京:中国水利水电出版社,2017.

[17] 水工沥青混凝土试验规程:DL/T 5362—2018[S]. 北京:中国电力出版社,2019.

[18] 丁朴荣. 土石坝工程沥青混凝土斜墙配合比试验研究[J]. 水电站设计,1990(3):61-69.

[19] 王晓奇. 水工沥青混凝土配合比的优化及施工质量控制研究[D]. 陕西:西安理工大学,2017.

[20] 彭 波,李文瑛,危拥军. 沥青混合料材料组成与特性[M]. 北京:人民交通出版社,2007.

[21] 刘思峰,等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2017.