

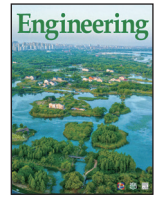


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Watershed Ecology—Article

面向生态的水库群调度——以汉江中下游流域为例

王浩^a, 雷晓辉^{a,*}, 严登华^a, 王旭^a, 吴书悦^b, 尹正杰^c, 万文华^b

^a State Key Laboratory of Simulation and Regulation of the Water Cycle in River Basins, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

^b State Key Laboratory of Hydro-Science and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^c Water Resources Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 December 2017

Revised 26 April 2018

Accepted 5 September 2018

Available online 12 September 2018

关键词

水库群

面向生态的水库调度

生态流量需求

汉江流域

摘要

水库群的建设和调度改变了河流的自然流态,对河流生态系统造成了不利影响。本文提出了一种面向生态的水库群调度策略,将河流内不同生态功能所需的生态流量整合到水库群联合调度中,以实现生态流量需求和人类用水需求之间的均衡。该策略耦合了常规优化调度方案和一系列实时生态调度方案。在人类用水需求与生态流量需求冲突较小的时段,水库群调度在保障河流最小流量的前提下采用常规优化调度方案,最大限度地提高人类用水效益。在水库引发的水文改变对河流关键生态功能产生严重影响的时期,水库群调度采用实时生态调度方案,调整下泄流量,从而满足河流生态流量需求。该策略被应用于位于中国汉江中下游流域的一个大型水库群中。模拟调度结果表明,实时生态调度方案保证了河流关键生态功能的生态流量需求,其对人类用水效益的不利影响可通过常规优化调度方案得到部分补偿。本文提出的面向生态的水库群调度策略丰富了考虑生态流量需求的水库群联合调度的理论应用。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

水库是流域水资源开发和管理最有效的工具之一。截至2017年,世界上的大型水坝已超过58 000座,其中约24 000座位于中国[1]。水库群的联合调度受到了广泛关注[2–4]。水库群联合调度意味着系统内每个水库的放水决策不仅取决于其本身的状态,还取决于系统内其他水库的状态,从而提高了系统整体的调度效益[4]。水库群联合调度研究主要集中在提出调度方法以更好地满足人类用水需求,而较少明确考虑生态流量需求[5]。水库群的建设和调度阻碍了河流的自然流

淌,造成了河流的流态改变,对河流生态系统产生了一系列负面影响[6–8]。

生态流量被定义为维持河流生态系统特定状态所需要的水量及流态变化[9]。水库在实际调度过程中如果考虑生态流量需求,往往仅考虑河流最小流量。最小流量可转化为水库最低下泄流量,并耦合到当前使用的调度规则中[5,10]。然而,这种方法忽略了流态变化在维持河流生态健康中发挥的重要作用。水流流态包括水流的大小、频率、时间、持续时间和变化率等,已被普遍认为是维持河流生态系统结构和功能的主要控制因素[11]。

* Corresponding author.

E-mail address: lxh@iwhr.com (X. Lei).

考虑生态流量需求的水库群调度是恢复河流生态系统的一项有效途径[12]。Richter和Thomas[12]提出了一个概念性框架以调整大坝当前采用的调度方案，从而恢复有利于河流生态系统的水流特征。一些研究致力于提出水库调度方法，使得水库下泄水流更为符合河流的自然流动特征[10]。如Yin等[13]将最小流量耦合进水库现状调度规则中，并对调度规则进行优化，从而最小化下游河道水文改变和人类供水短缺，权衡生态流量需求和人类用水需求。Steinschneider等[14]估算了河流关键节点的生态流量需求，并提出了大型水库群的优化调度模型，分析了优化调度中生态目标与传统水库目标之间的权衡。充分利用水文预报信息已成为提高水库群调度效益的一项有效途径[15, 16]。一些研究已将预报信息纳入水库生态调度中。如Yin等[17]基于不同的水文情势（丰水年、平水年和枯水年）提出了3种生态流量管理策略，并将其整合入现状供水调度策略中。在供水保证率约束下，对调度策略进行优化，以实现水文改变度最小。Wang等[18]提出了一个水库调度决策框架，分析了多种人类用水目标和生态流量需求之间的均衡关系，并对比分析了这一框架基于完美预报径流和预报径流的应用效果。

虽然已有许多研究将生态流量需求纳入水库调度中，但相关研究很少关注流域尺度上河流的关键生态功能，并将其生态流量需求纳入当前使用的水库群调度规则中。本文提出了一种考虑河流关键生态功能所需生态流量的水库群调度策略。该策略结合了常规优化调度方案和一系列实时生态调度方案。该策略被应用于汉江中

下游流域的一个大型水库群中。本文第二部分给出了面向生态的水库群调度策略的概念性描述；第三部分介绍了汉江中下游流域水库群概况；第四和第五部分阐述了汉江中下游流域水库群的常规优化调度方案和实时生态调度方案；第六部分分析了模拟调度结果；第七部分进行了总结。

2. 面向生态的水库群调度策略

面向生态的水库群调度策略量化了河流不同生态功能的生态流量需求，并将其纳入现状水库群调度规则中。为平衡生态流量需求和人类用水需求，根据所处调度时期对水库进行调度（图1）。人类用水需求和生态流量需求之间矛盾相对较小的时期被设定为常规调度期，而水库调度对河流的主要生态功能产生显著负面影响的时期被设定为生态调度期。在每个时期内分别采取相应的调度策略。

在常规调度期，采用常规优化调度方案。通过设置水库最低下泄流量以考虑河流生态流量需求。应用生态水文区划方法识别不同河段的主要生态功能，采用相应的方法估算最小流量。在最低下泄流量的约束下，对现状的水库群常规调度规则进行优化，以最大化人类综合用水效益。在涉及供水、防洪、发电等多种人类用水目标时，采用多目标优化方法分析多种人类用水效益之间的权衡关系。最终根据决策者偏好，得出推荐调度方案。

在生态调度期，实行一系列实时生态调度方案。这

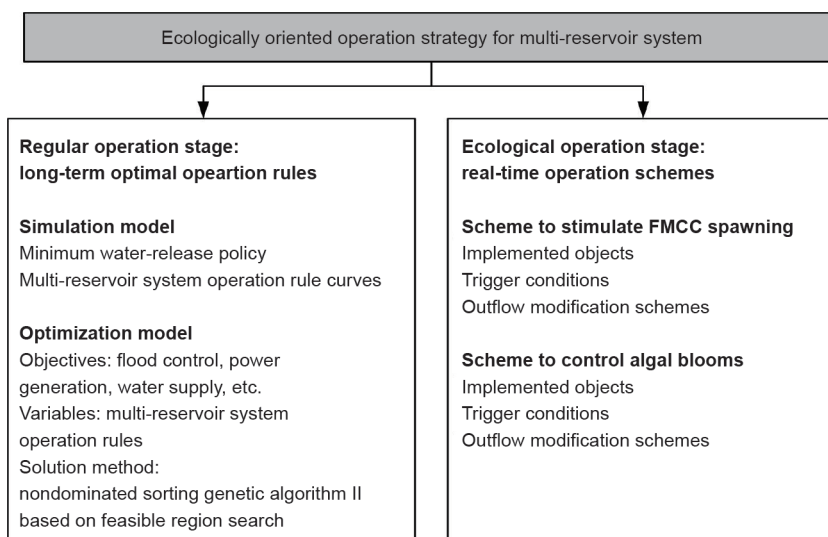


图1. 面向生态的水库群调度策略概念框架。FMCC: 中国四大家鱼。

一时期水库调度的重点是恢复河流的关键生态过程。重点关注那些具有重要生态功能且显著受到水库影响的河流生态过程。利用水文-生态响应相关理论和方法,量化表征水流状态的水文指标与表征河流生态状况的生态指标之间的相关关系。基于水文-生态响应关系,得到生态流量需求。生态流量需求可以是某一水文指标需要被维持的范围,也可以表示为对某一水文指标的阈值限制。设置相应的实时调度方案,对水库放水量进行调整,以满足生态流量需求。采用水文预报信息作为实时调度的启动条件,以保证生态流量事件发生在合适时机,并更好地适应可利用水资源量的不确定性。

因此,在生态调度期,实时生态调度方案保证了河流关键生态功能所需的生态流量。而在长时间尺度上,实时生态调度对人类用水效益的不利影响可以通过常规优化调度方案得到部分补偿。常规优化调度方案和实时生态调度方案采用的主要方法将在第四和第五部分以案例研究的形式加以阐释。

3. 研究区域概况

汉江是长江最大的支流,其干流长度为1577 km,流域面积为 $1.59 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。选择位于汉江中下游流域的16个大中型水电站构成的水库群作为本文的研究对象(图2)。在该水库群中,丹江口水库具有多种功能,包括防洪、供水、发电和航运等。其他水库的主要功能为水力发电,部分水库兼有防洪、供水、航运等功能。系统总装机容量为3071.5 MW。丹江口水库是中国南水北调中线工程的水源地,每年为北京、天津、河北、河南四省市供水 $9.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。引江济汉工程是南水北调中线工程的配套工程,每年从长江上游调水 $3.7 \times 10^9 \text{ m}^3$ 进入汉江兴隆段,补偿南水北调中线工程造成的汉江流域水资源损失。

一些研究已经探讨了水库群对汉江中下游流域生态水文状态的影响。1933—2008年,汉江中下游流域天然来水呈下降趋势,水库群和南水北调中线工程的建设加剧了河流流量的减少[19]。随着河流流量和流速的下降,汉江中下游水质出现恶化,藻华暴发越来越频繁。此外,汉江中下游流域是中国四大家鱼[青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)、鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鳙鱼(*Hypophthalmichthys nobilis*) FMCC]的主要产地之一。FMCC属产漂流性卵鱼类,它们的产卵依赖于河流的水流上涨过程。水

库群的建设 and 调度使得洪水脉冲的大小和持续时间减小,水流上升的速率减小和持续时间缩短,影响鱼类繁殖规模[20]。根据观测资料,汉江中下游流域已有3处FMCC产卵场消失,FMCC的鱼卵量从20世纪70年代的 $5.0 \times 10^8 \text{ ind}$ 减小为2007年的 $3.2 \times 10^7 \text{ ind}$ [21]。

本研究采用的历史水文(水位)数据来源于汉江中下游干流主要控制性水文站,水文记录的时间范围为1929—2016年。汉江中下游FMCC产卵场、FMCC自然繁殖规模数据来自水利部中国科学院水工程生态研究所于1977年、2004年、2006年进行的3次FMCC资源调查监测。藻华暴发监测数据来源于汉江中下游水质监测断面1992—2012年的水质监测数据。

4. 常规优化调度方案

4.1. 常规调度规则

汉江中下游水库群兼有防洪和发电等多种功能,故将其分为两个体系。丹江口水库位于系统上游且具有年调节能力,承担了系统的大部分防洪任务,其防洪目标是丹江口在遭遇100年一遇以下的洪水时保证下游碾盘山的安全。同时,系统内所有水库均有发电功能。系统顶层为丹江口-碾盘山防洪调度网络,底层为16座水电站构成的发电调度网络。在进行模拟调度时,防洪调度模拟以设计洪水为输入,时间步长为6 h,而发电、供水调度以实测径流为输入,时间步长为日。

4.1.1. 人类用水调度规则

汉江中下游水库群常规调度以各水库调度图为依据。水库群调度一共依据10幅调度图,包括陡岭子、松树岭、鄂坪、潘口、黄龙滩、丹江口、三里坪、寺坪等8幅发电调度图,以及丹江口供水调度图与防洪调度图。每幅调度图均由多条调度曲线构成。当前水库水位和调度曲线水位之间的关系决定了水库的放水策略。每条调度曲线均包括连接一系列拐点的折线,故基于调度图的人类用水调度规则可以用所有调度曲线上各个拐点的水位和时间进行参数化。汉江中下游水库群人类用水规则一共可以用162个水位或者时间参数描述。

4.1.2. 最小流量

在综合考虑汉江中下游河道水文情势、河道形态特征、水生生物和人为因素的前提下,对河流进行生态水文区划,主要分成:源头保护河段、开发利用河段、鱼



图2. 汉江中下游水库群和生态节点位置图。

类产卵河段和严重污染河段（图2）。根据4类河段的特征，分别采用不同方法确定最小流量，即河道径流-形态分析法[22]、田纳特法[23]、鱼类生境模拟法[24]、环境功能设定法[25]。汉江中下游河道最小流量被估计为 $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。最小流量被转化为水库群最低下泄流量约束，并耦合入现状人类用水调度规则中。

4.2. 优化模型

4.2.1. 目标函数

汉江中下游水库群常规调度的目标是最大化削峰率 R 、多年平均发电量 E 、中线多年平均可供水量 W 。这一多目标优化问题可以表示如下：

$$\max\{R, E, W\} \quad (1)$$

削峰率 R 采用式（2）计算，代表丹江口水库调蓄洪水对碾盘山产生的防洪效益：

$$R = \left[\sum_{t=1}^{n_f} (Q_{in,t} - Q_{out,t}) \right] / \sum_{t=1}^{n_f} Q_{in,t} \quad (2)$$

式中， $Q_{in,t}$ 与 $Q_{out,t}$ 是丹江口水库时段 t 的入库与出库流

量； n_f 是丹江口入库洪水演进至碾盘山与区间洪水汇流后超过碾盘山控制流量的时段数。

多年平均发电量 E 采用式（3）计算，代表汉江中下游水库群的发电效益：

$$E = \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^Y \sum_{k=1}^T N_{ijk} \right) / Y \quad (3)$$

式中， N_{ijk} 表示第 i 个水库第 j 年第 k 日出力； M 表示水库数； Y 表示年数； T 表示第 j 年的总天数。

南水北调中线工程多年平均可供水量 W 采用式（4）计算，代表中线工程多年平均供水效益：

$$W = \left(\sum_{j=1}^Y \sum_{k=1}^T \text{Sup}_{jk} \right) / Y \quad (4)$$

式中， Sup_{jk} 表示第 j 年第 k 时段中线工程供水量。

4.2.2. 约束条件

汉江中下游水库群常规调度需要受到物理约束和来自调度政策等方面的约束。水库群物理约束包括水库水量平衡约束、库容上下限约束、出力上下限约束以及下

泄流量上下限约束等。在考虑供水的情况下还包括供水能力约束。在水量平衡约束中忽略水库蒸发损耗。除了物理约束, 为保证最小流量, 水库群调度还受到以最小流量为阈值的最低下泄流量的约束。

4.2.3. 求解方法

为了在满足各类约束的前提下最大限度地提高人类用水效益, 需要对调度规则中的162个参数进行优化, 从而确定汉江中下游水库群常规优化调度方案。基于可行域搜索的非支配排序遗传算法II (NSGA-II-FRS) 被用于识别这些决策变量的帕累托最优解集。非支配排序遗传算法是解决多目标优化问题的常用算法, 其基于一种进化算法来寻找帕累托最优解集[26]。可行域搜索方法综合考虑了调度曲线上每个拐点所受的图形约束和调度政策约束, 建立了一种射线扫描公式, 为每个拐点的水位确定寻优的可行空间[27]。可行域搜索方法保证了非支配排序遗传算法的种群生成、交叉和突变都在可行域内进行, 极大地提高了多目标优化效率。

5. 实时调度方案

汉江中下游水库群实时调度方案的目标包括增加FMCC产卵和控制藻华暴发。在调度过程中, 依据实时调度方案, 调整系统内水库的下泄流量, 从而满足这两个生态功能所需要的生态流量。

5.1. 考虑 FMCC 产卵的实时调度方案

5.1.1. 生态流量需求

每年的7~8月是FMCC的主要产卵期, 在这一时期汉江中下游水温普遍高于18℃, 适宜FMCC产卵。在此期间, 洪水引起的流速增加是刺激FMCC产卵的主要因素。涨水过程的规模和持续时间是决定家鱼是否产卵以及产卵规模的两项特征因素。位于鱼产卵河段的沙洋

表1 沙洋站有FMCC产卵记录的实测涨水过程特征

Year	Characteristics of flow increases	
	Flow rising rate ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	Duration (d)
1976	410.0	4
2004	1250	3
	458.6	8
	990.0	3
	393.2	6
2007	393.2	6
	817.0	8

水文站被选为关键生态节点。通过分析1976年、2004年、2007年中6次FMCC产卵过程中沙洋站实测的涨水过程特征(表1), 认为该站满足FMCC产卵繁殖的涨水过程特征为日涨水幅度大于 $390 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 涨水持续3 d以上。

5.1.2. 启动条件

选择丹江口水库作为实施实时生态调度的对象。为分析实时调度的启动条件, 将沙洋站的涨水分解为丹江口下泄流量与丹江口—沙洋站之间的区间支流来水。分析沙洋站有产卵记录的来水过程, 认为区间支流涨水为主导的洪峰过程对刺激FMCC产卵更有利。支流唐白河涨水是丹江口—沙洋区间涨水的主要来源, 与沙洋站涨水幅度大于 $390 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、持续3 d以上涨水事件同频次的唐白河3 d以上涨水幅度为 $230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。因此, 唐白河持续3 d以上的涨水幅度达到 $230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, 丹江口水库启动实时调度, 加大下泄流量, 配合区间涨水, 提高沙洋站的日涨水幅度和持续时间, 促进产漂流性卵鱼类的产卵繁殖。

5.1.3. 调度方案

为了适应可利用水资源量的不确定性, 设置丰水年、平水年和枯水年3种子方案, 并将它们组合构成考虑FMCC产卵的实时调度方案(表2)。这些子方案的选择取决于丹江口水库的水位和水库来流条件。当可利用水资源量丰富时, 启动丰水年对应的“高放水”方案, 下泄更多的水流, 增加FMCC的产卵规模; 当可用水量有限时, 启动枯水年对应的“低放水”方案, 以减少对人类用水效益的潜在影响。

5.2. 针对藻华控制的实时调度方案

5.2.1. 生态流量需求

汉江中下游藻华暴发主要藻集中在1~3月, 暴发范围主要集中在钟祥至汉江河口区间。考虑到引江济汉工程已经建成并于2014年9月通水, 有利于抑制兴隆水库以下干流春季藻华暴发。因此, 以兴隆水库为界, 将汉江中下游干流河段分为上下两段, 兴隆水库以上河段以沙洋水文站为生态节点, 兴隆以下河段以仙桃水文站为生态节点。

根据多年来对汉江藻华的调查, 藻华容易发生在枯水期(1~3月)连续7 d左右的低流速条件下。因此, 选择1992—2012年间的1~3月最小7 d平均流量作为样本,

表2 考虑FMCC产卵的实时调度方案

Sub-schemes	Hydrological year	Water level of the Danjiangkou Reservoir (m)	Reservoir inflow forecast ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Flow increase target at Shayang Hydrological Station ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
“Low” scheme	Dry year	< 160	—	390–700
“Middle” scheme	Normal year	160 (steady or with downtrend)	< 1200	700–1000
“High” scheme	Wet year	160 (with uptrend)	≥ 1200	1000–1250

The flood control level of the Danjiangkou Reservoir is 160 m.

计算不同流量级别下发生藻华的概率，绘制得到沙洋站和仙桃站不发生藻华概率和最小7 d流量之间的关系曲线（图3）。根据关系曲线，认为沙洋站和仙桃站控制藻华暴发的流量阈值分别为 $900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

5.2.2. 启动条件与调度方案

汉江中下游水库针对藻华控制的实时调度方案的启动取决于藻类密度监测数据。对兴隆以上汉江干流江段，若藻类密度累积接近 $1 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ，则认为出现藻华暴发征兆。加大丹江口水库下泄流量，使得沙洋站的流量增加到 $900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，并维持7 d。对江汉兴隆以下汉江干流江段，若藻类密度累积接近 $1 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ，则认为出现藻华暴发征兆。同时增加兴隆水库下泄与引江济汉工程调水，以补充汉江水量使得仙桃站的流量增加到 $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，并持续7 d。

6. 结果

6.1. 常规优化调度方案和现状调度方案模拟调度结果对比

汉江中下游基于常规优化调度方案模拟得到的 R 、 E 、 W 的帕累托前沿见图4。基于决策者偏好得到了推荐的调度方案。推荐方案保证中线工程的多年平均供水不低于现状水平，同时最大限度地提高发电和防洪的综合效益。与基于现状调度方案相比，基于推荐方案 R 提高了4.24%， E 增加了 $1.41 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ， W 增加了 $3.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ （表4）。

6.2. 实时调度方案对于人类用水效益的影响

6.2.1. 考虑 FMCC 产卵的实时调度方案的影响

在汉江中下游水库群常规优化调度模拟的基础上，

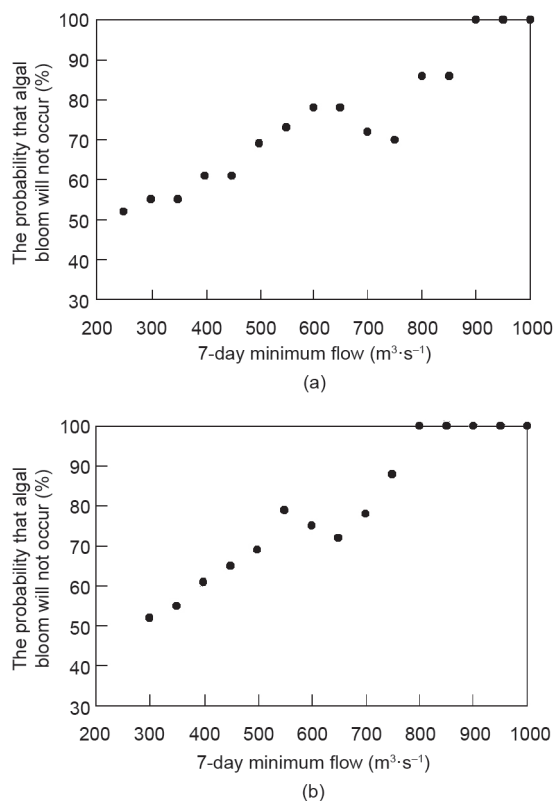


图3. 最小7 d流量与不发生藻华的频率关系图。(a)沙洋站；(b)仙桃站。

选取1968年、1976年和1957年作为丰水年、平水年和枯水年典型年份，开展考虑FMCC产卵的实时调度模拟，并与不考虑实时调度的模拟结果进行对比分析。在丰水年、平水年和枯水年条件下，实时调度分别减少年发电量 $3.05 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 、 $1.69 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 和 $1.03 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ；减少供水 0 m^3 、 $2.69 \text{ m}^3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $7.01 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。一般来说，高放水方案实时调度对发电和供水影响较大。这种影响也受到水库入流的影响。如果水库在开展实时调度后遭遇大量入流（通常发生在丰水年），实时调度造成的人类用水损失也可以得到很好的补偿。

表3 控制藻华暴发的实时调度启动条件及调度方案

River reaches	Algae density ($\text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$)	Discharge target ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Duration target (d)
Above Xinglong (at Shayang Hydrological Station)	1×10^6	≥ 900	≥ 7
Below Xinglong (at Xiantao Hydrological Station)	1×10^6	≥ 800	≥ 7

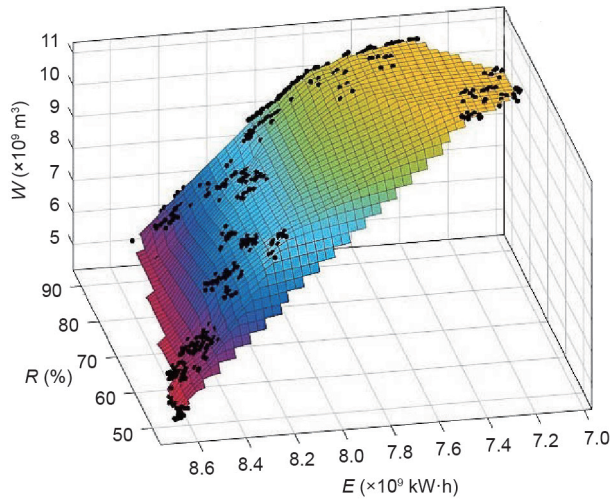


图 4. 基于常规优化调度方案的削峰率 (R)、多年平均发电量 (E)、多年平均供水量 (W) 帕累托前沿。

表 4 推荐调度方案与现状调度方案模拟结果对比

Scenarios	R (%)	E ($\times 10^6$ kW·h)	W ($\times 10^6$ m ³)
Recommended scheme	91.56	7842	9963
Currently used scheme	87.32	7701	9928
Difference	4.24	141	35

6.2.2. 针对藻华控制的实时调度的影响

在汉江中下游水库群常规优化调度模拟的基础上, 选取1992年、1998年、2000年、2008年和2010等发生过藻华的年份作为典型年, 开展丹江口水库针对藻华控制的实时调度模拟, 并与不考虑实时调度的模拟结果进行对比分析。实时调度导致丹江口水库年发电量略有增加, 年发电量平均增加 1.6×10^7 kW·h。但是, 开展实时调度导致年调水量有所减少, 平均减少 1.21×10^8 m³。

6.3. 面向生态的调度策略模拟结果

将常规优化调度方案中的推荐方案、考虑FMCC产卵的实时调度方案的中等放水方案和针对藻华控制的实时调度方案耦合成为一种面向生态的汉江中下游水库群调度策略, 开展调度模拟, 并与现状调度方案模拟结果进行对比分析 (表5)。结果表明, 在年或多年尺度上, 实时调度所造成的发电和供水效益损失可以通过长期的常规优化调度得到部分补偿。面向生态的水库群调度可

表 5 面向生态的调度策略与现状调度方案模拟调度结果对比

Scenarios	E ($\times 10^6$ kW·h)	W ($\times 10^6$ m ³)
Increments achieved by regular optimal operation scheme	141	35
Decrement caused by real-time operation schemes	153	390
Difference between ecologically oriented strategy and currently used scheme	-12	-355

以维持河流重要生态功能所需的生态流量, 同时尽可能减少人类用水效益的潜在损失。

7. 结论

本文提出了一种考虑两种调度时期的面向生态的水库群调度策略。在常规调度期, 将最小流量纳入人类用水调度规则中, 构建常规优化调度方案, 使得人类用水效益最大化。在生态调度期间, 建立实时调度方案, 调整系统中水库的下泄流量, 以满足河流关键生态过程的生态流量需求。该策略整合了常规优化调度方案和实时调度方案, 实现了生态流量需求与人类用水需求之间的协调。

通过汉江中下游流域案例研究论证了该策略在实际应用中的效果。在常规调度期, 和现状调度方案相比, 常规优化调度方案能够保证系统下泄最小流量, 同时增加了发电、防洪、供水等多方面的人类用水效益。在生态调度期, 开展实时调度, 修改系统内关键水库的下泄流量, 以满足鱼类产卵和控制藻华所需的生态流量。在年或多年尺度上, 实时调度造成的发电和供水效益损失可以通过常规优化调度得到部分补偿。案例研究说明了利用该策略平衡生态流量需求和人类用水需求的可行性。

面向生态的水库群调度策略还可以从以下3个方面进行修改: ①该策略对于河流关键生态功能的识别主要基于经验判断, 后续需要耦合更多的生态-水文响应原理, 使这一识别过程更为科学合理; ②该策略包含的实时调度方案以完美预报信息作为启动条件, 后续有必要研究预报不确定性对于面向生态的水库群调度的影响, 在实时调度方案制定过程中考虑这些不确定性因素; ③该策略的实施效果仅以模拟调度的形式进行了展现, 一旦这一策略应用于实际, 有必要对其实施效果进行长期的监测与评估, 并不断进行方案调整。

致谢

本研究由国家重点研发计划 (2016YFC0402208、

2016YFC0401903和2016YFC0400903)、国家自然科学基金(51709276)和流域水循环模拟与调控国家重点实验室(2016CG05)共同资助。

Compliance with ethics guidelines

Hao Wang, Xiaohui Lei, Denghua Yan, Xu Wang, Shuyue Wu, Zhengjie Yin and Wenhua Wan declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Number of dams by country members [Internet]. Paris: ICOLD CIGB. [cited 2018 Apr 16]. Available from: http://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/number-of-dams-by-country-members.
- [2] Labadie JW. Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *J Water Resour Plan Manage* 2004;130(2):93–111.
- [3] Rani D, Moreira MM. Simulation–optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation. *Water Resour Manage* 2010;24(6):1107–38.
- [4] Wang H, Lei X, Guo X, Jiang Y, Zhao T, Wang X. Multi-reservoir system operation theory and practice. In: Wang LK, Yang CT, Wang MHS, editors. *Advances in water resources management. Handbook of environmental engineering*. Cham: Springer; 2016. p. 1–110.
- [5] Chang L, Chang F, Wang K, Dai S. Constrained genetic algorithms for optimizing multi-use reservoir operation. *J Hydrol* 2010;390(1–2):66–74.
- [6] Bunn SE, Arthington AH. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environ Manage* 2002;30(4):492–507.
- [7] Petts GE. Instream flow science for sustainable river management. *J Amer Water Resour Assoc* 2009;45(5):1071–86.
- [8] Wen X, Liu Z, Lei X, Lin R, Fang G, Tan Q, et al. Future changes in Yuan River ecohydrology: individual and cumulative impacts of climates change and cascade hydropower development on runoff and aquatic habitat quality. *Sci Total Environ* 2018;633:1403–17.
- [9] King J, Brown C, Sabet H. A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers. *River Res Appl* 2003;19(5–6):619–39.
- [10] Jager HI, Smith BT. Sustainable reservoir operation: can we generate hydropower and preserve ecosystem values? *River Res Appl* 2008;24(3):340–52.
- [11] Poff NLR, Allan JD, Bain MB, Karr JR, Prestegard KL, Richter BD, et al. The natural flow regime. *Bioscience* 1997;47(11):769–84.
- [12] Richter B, Thomas G. Restoring environmental flows by modifying dam operations. *Ecol Soc* 2007;12(1): art12.
- [13] Yin X, Yang Z, Yang W, Zhao Y, Chen H. Optimized reservoir operation to balance human and riverine ecosystem needs: model development, and a case study for the Tanghe Reservoir, Tang River Basin, China. *Hydrol Processes* 2010;24(4):461–71.
- [14] Steinschneider S, Bernstein A, Palmer R, Polebitski A. Reservoir management optimization for basin-wide ecological restoration in the Connecticut River. *J Water Resour Plan Manage* 2014;140(9):04014023.
- [15] Lei X, Tan Q, Wang X, Wang H, Wen X, Wang C, et al. Stochastic optimal operation of reservoirs based on copula functions. *J Hydrol* 2018;557:265–75.
- [16] Zhao T, Zhao J, Yang D, Wang H. Generalized martingale model of the uncertainty evolution of streamflow forecasts. *Adv Water Resour* 2013;57:41–51.
- [17] Yin X, Yang Z, Petts GE. Reservoir operating rules to sustain environmental flows in regulated rivers. *Water Resour Res* 2011;47(8):W08509.
- [18] Wang H, Brill ED, Ranjithan RS, Sankarasubramanian A. A framework for incorporating ecological releases in single reservoir operation. *Adv Water Resour* 2015;78:9–21.
- [19] Wang Y, Zhang W, Zhao Y, Peng H, Shi Y. Modelling water quality and quantity with the influence of inter-basin water diversion projects and cascade reservoirs in the middle-lower Hanjiang River. *J Hydrol* 2016;541:1348–62.
- [20] Wang Y, Wang D, Wu J. Assessing the impact of Danjiangkou Reservoir on ecohydrological conditions in Hanjiang River, China. *Ecol Eng* 2015;81:41–52.
- [21] Xie W, Huang D, Xie S, Yang H, Yu F, Zhang X, et al. The early evolution of the four major Chinese carps resources in the middle and lower reaches of Hanjiang River after the construction and operation of Danjiangkou Reservoir. *J Hydroecology* 2009;2(2):44–9. Chinese.
- [22] Gippel CJ, Stewardson MJ. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows. *Regul Rivers Res Manage* 1998;14(1):53–67.
- [23] Tennant DL. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries* 1976;1(4):6–10.
- [24] Yang Z, Zhang Y. Comparison of methods for ecological and environmental flow in river channels. *J Hydrodynam* 2003;18(3):294–301. Chinese.
- [25] Wang X, Liu C, Yang Z. Method of resolving lowest environmental water demands in river course (I)—theory. *Acta Scientiae Circumstantiae* 2001;21(5):544–7. Chinese.
- [26] Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans Evol Comput* 2002;6(2):182–97.
- [27] Wang X, Lei X, Jiang Y, Wang H. Reservoir operation chart optimization searching in feasible region based on genetic algorithms. *J Hydraul Eng* 2013;44(1):26–34. Chinese.