

Research on Ecological Operation of Three Gorges Reservoir Considering Larval Abundance

Xiaowen Wei, Changming Ji, Yanke Zhang*, Yingyi Chen

Renewable Energy School, North China Electric Power University, Beijing
Email: *ykzhang2008@163.com

Received: Oct. 9th, 2019; accepted: Nov. 13th, 2019; published: Nov. 20th, 2019

Abstract

In order to reduce the adverse influence of The Three Gorges reservoir operation on larval abundance of the four major Chinese carps, the problem that how to balance the economy and ecology in the multi-objective optimal operation of the reservoir is studied. Based on the existed research and ecological operation experience, three key hydrological indexes are identified from the seven possible hydrological indexes, then find the response relationship between the three indexes and the fry abundance by BP neural networks. Based on the response relationship, a multi-objective reservoir optimal operation model is established with the target of maximizing the hydropower output from the Three Gorges Hydropower Station and maximizing the larval abundance of the four major Chinese carps, then the paper introduces the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm as the optimization algorithm for the operation model. The results indicated that the contradiction between the two targets can be balanced by the optimal operation, and the larval abundance of the four major Chinese carps can be greatly improved when the hydropower output is hardly reduced. The paper provides a new perspective for the current multi-objective optimal operation of reservoirs during the fish reproduction period.

Keywords

Ecological Operation, Multi-Objective, The Four Major Chinese Carps, Fry Abundance

考虑鱼苗丰度的三峡水库生态调度研究

魏晓雯, 纪昌明, 张验科*, 陈颖毅

华北电力大学可再生能源学院, 北京
Email: *ykzhang2008@163.com

收稿日期: 2019年10月9日; 录用日期: 2019年11月13日; 发布日期: 2019年11月20日

作者简介: 张验科(1983-), 男, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为水资源与能源科学。
*通讯作者。

摘要

为解决三峡水库运行后四大家鱼鱼苗丰度减小的问题, 实现兼顾经济与生态的水库多目标优化调度, 依据现有研究成果和生态调度经验, 提出7个相关的水文指标并进行显著性检验, 筛选出3个具有代表性的关键水文指标; 在利用BP神经网络寻求关键水文指标与鱼苗丰度响应关系的基础上, 建立以三峡水库发电量最大和四大家鱼鱼苗丰度最大为目标的优化调度模型, 采用二代非支配排序遗传算法进行多目标优化调度方案求解。算例结果表明, 通过优化调度的方式可以减小发电量最大和鱼苗丰度最大之间的矛盾冲突, 达到在牺牲较少的发电量或几乎不减少发电量时即可大幅度提高鱼苗丰度的目的, 为现阶段鱼类繁衍期的水库多目标优化调度提供了一种新思路。

关键词

生态调度, 多目标, 四大家鱼, 鱼苗丰度

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

三峡工程是治理和开发长江的关键性骨干工程, 具有防洪、发电、航运、供水及生态等综合利用功能。自建成以来, 发挥了巨大的防洪作用, 带来了显著的发电、航运等综合经济效益, 但是, 三峡水库蓄水, 改变了长江的天然水文情势, 使得在繁殖季节需要水流刺激才能正常产卵繁殖的鱼类(如“四大家鱼”)得不到应有的自然水文条件而推迟产卵或者不产卵[1] [2] [3]。因此, 国内外学者针对坝下鱼类保护的生态调度展开了大量研究, Koel [4]等将鱼类的特定需求加入传统水文分析中, 并将分析结果作为大坝的运行标准; 李健等[5]将水力学模型和栖息地模型结合, 计算得到了四大家鱼产卵期的适宜生态流量; Horne [6]等针对特定物种对河道流量的需求给出了推荐流量; 赵越等[7]将生态流组法应用于四大家鱼产卵期的生态水文事件分析中, 推求得到了满足四大家鱼产卵需求的流量过程; 梁鹏腾[8]等基于洪水脉冲理论在水库多目标生态调度模型中加入洪水脉冲历时控制方法, 显著增加了洪水涨落历时。

目前研究成果大多只给出了四大家鱼产卵期的适宜流量过程, 没有进一步将流量过程与产卵情况相结合, 生态效益虽有增加, 但是仍有较大提升空间。因此, 为了实现兼顾发电效益与鱼类资源量的生态调度目标, 仅给出适宜的生态流量过程是不够的, 还需挖掘鱼类资源量与水文指标的内在联系, 建立关键水文指标与四大家鱼鱼苗丰度的量化关系, 为水库实施生态调度提供依据; 此外, 在四大家鱼大规模繁殖的五月至六月, 三峡水库的运行调度可能使四大家鱼产卵所需要的洪水脉冲涨落不明显、次数减少, 四大家鱼鱼苗丰度因而受到影响。因此, 如何在减小影响四大家鱼产卵的情况下尽可能地发挥发电效益[9] [10], 可理解为采用多目标优化方法寻求更为合理的水库调度方案的问题。

本文依据现有研究成果和生态调度经验, 筛选出关键的水文指标, 采用BP神经网络得到了四大家鱼鱼苗丰度与关键水文指标的响应关系, 并采用二代非支配排序遗传算法(NSGA-II 算法)求解, 建立了兼顾四大家鱼鱼苗丰度与发电效益的水库多目标优化调度模型, 为解决三峡下游生态系统健康问题及开展三峡水库生态调度提供理论参考及决策依据。

2. 研究对象概况

三峡水库位于长江流域,地处湖北省宜昌市,距离下游的葛洲坝水库 38 km,是一座同时考虑防洪、发电、航运等多种作用的大型水利工程。三峡水库的正常蓄水位为 175 m,汛限水位 145 m,枯水期消落水位 155 m,总库容为 393 亿 m^3 ,死库容 171.5 亿 m^3 ,防洪库容 221.5 亿 m^3 ,兴利调节库容 165 亿 m^3 。本文选取长江中游宜昌至城陵矶江段的四大家鱼作为研究对象。实际调查显示,有 11 处四大家鱼产卵场分布在长江中游宜昌至城陵矶江段,每年的 5 月至 6 月是四大家鱼的产卵高峰期,长江中游产卵场的产卵量占整个长江总产卵量的近 50% [11][12]。

由于四大家鱼的产卵量与涨水幅度、持续涨水时间成正比[13][14],且适合四大家鱼生长繁殖的生态流量范围在 8000~15,000 m^3/s 之间,因此,一定的下泄流量条件是四大家鱼产卵繁殖的必要条件。由三峡调度规程可知,水库需要在 6 月 10 日将库水位降至防洪限制水位 145 m,因此,五月至六月期间内三峡水库有足够的调节库容实施生态调度,为四大家鱼的繁殖提供有利的水文条件。为了能够刺激四大家鱼产卵,2011 年至今,三峡水库共进行了 10 余次生态调度试验,四大家鱼鱼苗丰度有了明显上升。所以,依照四大家鱼的繁殖特性进行生态调度,人为制造符合其生殖过程的水文条件,对四大家鱼的生长和保护具有十分重要的意义。

3. 模型建立及求解

3.1. 水文指标选取及显著性检验

现有研究成果和生态调度经验表明,四大家鱼的产卵活动一般伴随涨水过程进行,江水涨水持续时间越长,鱼类产卵持续时间相应延长,且卵苗数量与江水涨水持续时间及日上涨率等水文条件密切相关,因此本文提出了 7 个描述四大家鱼产卵期涨水过程的水文指标:5 月日平均流量、6 月日平均流量(1 日~10 日)、日涨幅均值、最大 3 日累计涨水流量、最大 7 日累计涨水流量、涨水持续时间均值、涨水次数。

三峡水库建库运行后,下游的水文情势发生了显著变化,本文重点研究水库运行前后涨水过程在四大家鱼产卵期(5 月 1 日~6 月 10 日)的变化情况,将下游宜昌站 1950~2016 年日流量资料分为三峡水库运行前和运行后两部分,分别计算两部分的 7 个水文指标值作为两个独立的样本,使用 SPSS 对两个独立样本进行 Mann-Whitney U 非参数检验,该检验方法可有效判断两个独立样本是否来自相同分布的总体。检验结果见表 1,从表中可以看出日涨幅均值、涨水持续时间均值和涨水次数这三个指标的渐近显著性(双尾)取值小于 0.05,发生了显著性变化,且其统计值相比于运行前有所减小,说明上述三个指标的样本值在三峡水库运行前后不服从同一分布。上述检验结果说明三峡水库运行后河流水文情势的改变主要发生在涨水的幅度、涨水持续时间以及涨水次数这三个方面。

Table 1. The results of hydrological index test
表 1. 水文指标检验结果

水文指标	Mann-Whitney U 统计资料	渐近显著性(双尾)
5 月日平均流量	31.0	0.1330
6 月日平均流量	27.0	0.0768
日涨幅均值	27.0	0.0251*
最大 3 日累计涨水流量	38.5	0.3031
最大 7 日累计涨水流量	32.0	0.1514
涨水持续时间均值	45.0	0.0130*
涨水次数	27.0	0.0059*

3.2. 关键水文指标与鱼苗丰度响应关系

利用神经网络 BPNN 寻求日涨幅均值、涨水持续时间均值、涨水次数与四大家鱼鱼苗丰度的相应关系。BPNN 共分 3 层，隐含层设置 5 个神经元，传递函数分别为 Sigmoid 和线性函数，训练方法为 Levenberg-Marquardt 反向传播算法。针对水文数据样本量少的问题，引入 Bootstrap 重抽样方法，通过噪声注入，扩充样本量，提高神经网络模型的鲁棒性。为验证神经网络模型拟合效果，将其与多元线性回归 Linear 方法进行对比，通过 5-folds 交叉检验训练样本得出对比结果，见表 2。从表中可以看出，神经网络模型得出的计算值与实测值之间的相关系数明显高于多元线性回归法，标准误差则小于多元线性回归法。因此，神经网络模型的拟合效果要明显优于多元线性回归法。

Table 2. Comparison of fitting effect
表 2. 拟合效果对比

交叉检验	方法	标准误差 MSE	R 平方值
1	神经网络	3.13	0.930
	线性回归	3.23	0.871
2	神经网络	2.55	0.922
	线性回归	3.11	0.782
3	神经网络	1.64	0.893
	线性回归	2.25	0.725
4	神经网络	0.66	0.911
	线性回归	0.85	0.810
5	神经网络	0.37	0.676
	线性回归	0.82	0.432

3.3. 三峡水库多目标优化调度建模

基于四大家鱼鱼苗丰度与关键水文指标的响应关系，建立以调度期内水电站发电量最大和四大家鱼鱼苗丰度最大为目标的三峡水库多目标优化调度模型，优化调度模型如下：

1) 目标函数：

目标 1：三峡水电站发电量 E 最大：

$$E = \max \sum_{t=1}^T KH_t q_t \Delta t \quad (1)$$

式中， E 为总发电量， T 为时段数， K 为电站的出力系数， H_t 为 t 时段的水头， q_t 为电站 t 时段发电引用流量。

目标 2：四大家鱼鱼苗丰度 A 最大：

$$A = \max f(Q_1, Q_2, \dots, Q_T) \quad (2)$$

式中， A 为四大家鱼鱼苗丰度， Q_1, Q_2, \dots, Q_T 为第 1、2... T 时段的下泄流量， f 为鱼苗丰度与各时段流量的函数关系。

2) 约束条件：

水量平衡约束：

$$V_{t+1} = V_t + (I_t - Q_t) \times \Delta t \quad (3)$$

出力约束:

$$N_t^{\min} \leq N_t \leq N_t^{\max} \quad (4)$$

水位约束:

$$Z_t^{\min} \leq Z_t \leq Z_t^{\max} \quad (5)$$

下泄流量约束:

$$Q_t^{\min} \leq Q_t \leq Q_t^{\max} \quad (6)$$

水位日变幅约束:

$$|Z_{t+1} - Z_t| \leq 0.6 \quad (7)$$

其中: V_t 、 V_{t+1} 分别表示水库 t 和 $t + 1$ 时刻的水库蓄水量, I_t 表示 t 时段的入库流量, Q_t 表示 t 时段的出库流量; Z_t^{\min} 、 Z_t^{\max} 分别为电站第 t 个时段的水位约束, N_t^{\min} 、 N_t^{\max} 分别为电站第 t 个时段的出力约束, Q_t^{\min} 、 Q_t^{\max} 分别为电站第 t 个时段的流量约束, 包括生态、航运、供水、泥沙等约束条件, Z_{t+1} 和 Z_t 分别表示水库 t 和 $t + 1$ 时刻的水库水位。

以上模型采用 NSGA-II 算法进行求解, NSGA-II 算法是由 Deb [15] 等提出的一种后验式的多目标进化算法, 采用快速非支配排序过程、精英保留策略和无参数小生境操作算子, 相较于其他多目标优化算法具有运行速度快, 解集收敛性好的优点。本文将 NSGA-II 算法应用在考虑四大家鱼鱼苗丰度与水库发电量的水库多目标优化调度求解中, 采用 C# 编写程序, 种群规模为 20, 最大迭代次数 1000 次, 交叉概率为 0.7, 变异概率 0.01, 计算结果见表 3。

Table 3. Multi-objective optimal operation scheme of the Three Gorges Reservoir
表 3. 三峡水库多目标优化调度方案集

方案	发电量/亿 kw·h	鱼苗丰度/亿尾	方案	发电量/亿 kw·h	鱼苗丰度/亿尾
1	94.746	2.1157	11	94.485	3.0965
2	94.684	2.2666	12	94.182	5.6366
3	94.831	1.8893	13	94.264	4.7313
4	94.067	7.6989	14	94.934	1.7384
5	94.629	2.4929	15	94.155	6.0139
6	94.047	8.3780	16	94.557	2.7444
7	94.021	9.9876	17	94.121	6.4414
8	94.094	7.0450	18	94.421	3.4989
9	94.223	5.1337	19	94.363	4.0019
10	94.308	4.3540	20	94.031	9.1325

4. 优化调度方案分析

从表 3 的 20 个优化调度方案中选取方案 7 (鱼苗丰度最大)、方案 14 (发电量最大) 和方案 10 (中间方案) 作为典型优化方案对三峡水库出库流量进行分析。若水库调度过程中以水电站发电量最大为主要目标时, 应选择方案 14, 发电量可达 94.934 亿 kw·h; 以鱼苗丰度最大为主要目标时, 应选择方案 7, 鱼苗丰度可达 9.9876 亿尾;

若没有特别侧重的目标时,可选择方案 10,发电量为 94.308 亿 kw·h,鱼苗丰度为 4.3540 亿尾。在水库调度过程中,可结合实际情况选择适合的调度方案。

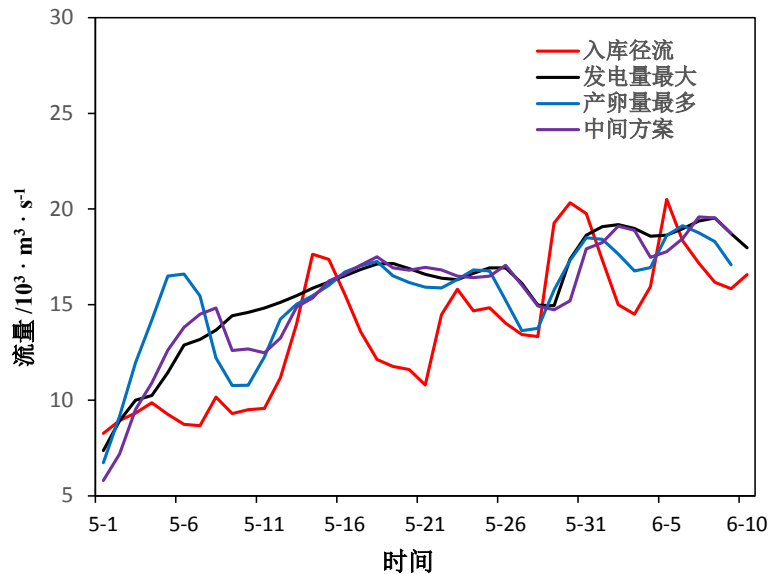


Figure 1. The outflow of the Three Gorges Reservoir under different typical optimal schemes

图 1. 不同典型优化方案下三峡水库下泄流量变化过程

图 1 给出了三峡水库的天然来水过程和三种典型优化方案下三峡水库的下泄流量过程,从图中可以看出,经过水库的调节后,波动较大的入库径流变得较为平缓,洪水脉冲减少,造成四大家鱼的鱼苗丰度减少。对比三个方案可以发现,三个方案的区别主要在于下泄流量的波动幅度不同。方案 7 在 5 月上旬、中旬和 6 月上旬均发生了持续 4 天以上且流量日涨幅超过 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的连续涨水过程,四大家鱼的产卵主要集中在这 3 个涨水过程中,但由于该方案在天然入流增大时加大下泄流量,造成水库长时间以较低水位运行,导致发电量较少;方案 14 的下泄流量过程较为平缓,仅在五月上旬出现了一次持续 4 天以上且流量日涨幅超过 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的连续涨水过程,故方案 14 不利于四大家鱼产卵,鱼苗丰度最小,但该方案在前期放水较少,水库水位下降较慢,故发电量较大。对比方案 14 和方案 7 可以发现,完全优化鱼苗丰度的方案比完全优化发电量的方案鱼苗丰度增加 8.25 亿尾,发电量减小 0.913 亿 kw·h。《长江三峡生态与环境公报》显示 2012 年监利断面的鱼苗丰度为 3.97 亿尾,由表 3 可知,方案 19 的鱼苗丰度最接近当年实际水平,若以该方案发电量为当年实际发电量,对比方案 7 和方案 19 可知,发电量仅减小 0.342 亿 kw·h 鱼苗丰度即可增多至 9.9876 亿尾。因此,优化生态调度只需牺牲较少的发电量或几乎不牺牲发电量即可有效提高鱼苗丰度,增加生态效益。

5. 结论

针对三峡水库建库运行后其下游四大家鱼繁殖规模减小的问题,根据宜昌站径流资料和生态调度经验提出 7 个生态水文指标,并进行指标检验。应用 BP 神经网络建立四大家鱼鱼苗丰度和关键水文指标的响应关系,将该模型嵌入到三峡水库多目标优化调度模型中,并应用 NSGA-II 算法进行了求解。结果表明牺牲较少或几乎不减小发电量即可提高生态效益,本文研究思路可为三峡水库四大家鱼繁殖期的优化调度提供理论依据和参考。但四大家鱼鱼苗丰度除受流量变化的影响外,还受水温、流速、地形、气象等其他要素的影响,因此通过完善指标类型提高 BP 神经网络模型的拟合精度,并基于该模型建立水库多目标优化调度模型,进而提出更加合理的生态调度方案,是下一步需要进行的研究工作。

基金项目

国家自然科学基金(51709105); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2019MS031)。

参考文献

- [1] 王尚玉, 廖文根, 陈大庆, 等. 长江中游四大家鱼产卵场的生态水文特性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2008(6): 892-897.
WANG Shangyu, LIAO Wengen, CHEN Daqin, et al. Analysis of eco-hydrological characteristics of the four Chinese farmed carps' spawning grounds in the middle reach of the Yangtze River. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2008(6): 892-897. (in Chinese)
- [2] 陈永柏, 廖文根, 彭期冬, 等. 四大家鱼产卵水文水动力特性研究综述[J]. 水生态学杂志, 2009, 30(2): 130-133.
CHEN Yongbo, LIAO Wengen, PENG Qidong, et al. A summary of hydrology and hydrodynamics conditions of four Chinese carp's spawning. Journal of Hydro-Ecology, 2009, 30(2): 130-133. (in Chinese)
- [3] 张晓敏, 黄道明, 谢文星, 等. 汉江中下游“四大家鱼”自然繁殖的生态水文特征[J]. 水生态学杂志, 2009, 30(2): 126-129.
ZHANG Xiaomin, HUANG Daoming, XIE Wenxing, et al. Eco-hydrological characteristics of four major Chinese carps on nature spawning conditions in the mid-lower Hanjiang River. Journal of Hydroecology, 2009, 30(2): 126-129. (in Chinese)
- [4] KOEL, T. M., SPARKS, R. E. Historical patterns of river stage and fish communities as criteria for operations of dams on the Illinois river. River Research & Applications, 2010, 18(1): 3-19. <https://doi.org/10.1002/rra.630>
- [5] 李建, 夏自强. 基于物理栖息地模拟的长江中游生态流量研究[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 678-684.
LI Jian, XIA Ziqiang. Study on instream ecological flow of the middle Yangtze River based on physical habitat simulation. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(6): 678-684. (in Chinese)
- [6] HORNE, A., STEWARDSON, M., FREEBAIRN, J., et al. Using an economic framework to inform management of environmental entitlements. River Research & Applications, 2010, 26(6): 779-795. <https://doi.org/10.1002/rra.1275>
- [7] 赵越, 周建中, 许可, 等. 保护四大家鱼产卵的三峡水库生态调度研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(4): 45-50.
ZHAO Yue, ZHOU Jianzhong, XU Ke, et al. Ecological operation of three gorges reservoir for protection of four major Chinese carps spawning. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(4): 45-50. (in Chinese)
- [8] 梁鹏腾, 李继清. 基于洪水脉冲历时的三峡水库生态调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(5): 150-154.
LIANG Pengteng, LI Jiqing. A study of three gorges reservoir ecological operation based on flood pulse duration. China Rural Water and Hydropower, 2017(5): 150-154. (in Chinese)
- [9] 李继伟. 梯级水库群多目标优化调度与决策方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2014.
LI Jiwei. Research on multi-objective optimal operation and decision methods for cascaded reservoirs. Beijing: North China Electric Power University, 2014. (in Chinese)
- [10] 卢有麟, 周建中, 王浩, 等. 三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型及其求解方法[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 780-788.
LU Youlin, ZHOU Jianzhong, WANG Hao, et al. Multi-objective optimization model for ecological operation in Three Gorges cascade hydropower stations and its algorithms. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 780-788. (in Chinese)
- [11] 俞立雄. 长江中游四大家鱼典型产卵场地形及水动力特征研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2018.
YU Lixiong. Study on the topography and hydrodynamic characteristics of the four major Chinese carps' typical spawning grounds in the middle reaches of the Yangtze River. Chongqing: Southwest University, 2018. (in Chinese)
- [12] 李翀, 彭静, 廖文根. 长江中游四大家鱼发江生态水文因子分析及生态水文目标确定[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006(3): 170-176.
LI Chong, PENG Jing and LIAO Wengen. Study on the eco-hydrological factors and flow regime requirement on spawning of four major Chinese carps in the middle reaches of Yangtze River. Journal of China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, 2006(3): 170-176. (in Chinese)
- [13] 陈进, 李青青. 三峡水库试验性运行期生态调度效果评价[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(4): 1-6.
CHEN Jin, LI Qingqing. Assessment of eco-operation effect of Three Gorges Reservoir during trial run period. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(4): 1-6. (in Chinese)
- [14] 陈敏. 长江流域水库生态调度成效与建议[J]. 长江技术经济, 2018, 2(2): 36-40.
CHEN Min. Effectiveness and suggestions of reservoir ecological regulation in the Yangtze River Basin. Technology and Economy of Changjiang, 2018, 2(2): 36-40. (in Chinese)
- [15] DEB, K., PRATAP, A., AGARWAL, S., et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>