

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230453

基于生态流量约束的三峡水库多目标优化研究

蒋定国¹, 柯云², 毛劲乔³, 张培培³, 龚轶青³

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 水利工程的建设与运行, 在发挥巨大经济社会效益的同时, 对上下游不同河段的生态环境会产生影响, 但通过合理优化调配水库蓄放水过程, 开展针对性的水库生态调度, 是调控改善生态环境问题的有效途径。因此, 从生态流量约束的角度出发, 通过资料调研与数据分析, 分别明确了长江干流有利于四大家鱼、中华鲟自然繁殖和控制河口咸潮入侵的流量适宜范围, 然后建立考虑下游生态流量约束的三峡水库优化调度模型, 在三峡水库常规调度的基础上, 重点开展了多目标的水库生态调度模型研究。结果表明, 在典型年丰水季节5~9月期间, 三峡下游的生态流量基本得以保证, 然而其他季节均易出现不同程度的生态缺水状况, 尤以枯水年生态缺水最严重; 优化调度时, 发电量和逐月最大生态流量缺水率呈明显的正比关系, 说明两个调度目标不能同时达到最优, 典型枯水年优化调度的发电量大致处于 $802 \times 10^8 \sim 835 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 之间, 逐月最大生态缺水率大致处于24%~48%之间; 多目标调度所得最优方案能较好地协调生态和发电需求, 在尽量兼顾下游生态流量需求的基础上, 发电效益可比设计目标增加约4.07%。

关键词: 生态流量; 多目标优化; 三峡水库; 生态调度

中图分类号: X143; TV214

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0053-05

1 引言

随着我国社会经济的快速发展, 水电资源作为清洁能源, 越来越受到重视。水利工程的修建满足了防洪、通航、灌溉等需要, 同时也为国民经济发展提供了巨量可持续的电力供应, 给社会带来巨大的经济、社会效益。但大规模水利工程的兴建, 尤其是长江流域上游众多水库大坝的修建, 也会改变江河流域原有的水文、泥沙时空特征, 给库区环境、水生鱼类、下游河道、河口环境等带来一定影响^[1-3]。河湖生态流量是指为了维系河流、湖泊等水生生态系统的结构和功能, 需保留在河湖内符合生态要求的流量(水量、水位)及其过程。保障河流生态流量, 是保护长江流域水生生物的正常生存与繁殖、维持长江水生生态多样性的重要手段^[4]。针对三峡水库, 现有研究分别以长江下游四大家鱼繁殖需求^[5-6]、支流库湾水华防治需求^[7-8]等生态目标进行水库生态调度, 提升了三峡水库综合效益的发挥。然而目前对于四大家鱼、中华鲟自然繁殖和控制河口咸潮入侵的生

态流量适宜范围不明确, 尚缺乏综合考虑三种生态需求的多目标优化调度。鉴此, 本文从生态流量约束的角度出发, 通过资料调研与数据分析, 分别明确了长江干流有利于四大家鱼、中华鲟自然繁殖和控制河口咸潮入侵的适宜生态流量, 然后建立考虑下游生态流量约束的三峡水库优化调度模型, 在三峡水库常规调度的基础上, 重点开展了多目标的水库生态调度模型研究, 采用改进的第二代非支配排序遗传算法 NSGA-II 进行多目标调度求解, 得出下游生态流量缺水率和水库发电量的关系并选择最优方案进行分析, 结果对于保护长江水生生物资源多样性、维持河道新的生态平衡、实现区域环境的可持续发展具有重要意义。

2 长江中下游生态流量约束

从三峡工程对下游河道影响现状及三峡水库调度调节能力出发, 结合已有研究结论, 选取重点水生鱼类繁殖和长江河口盐水入侵因素进行分析。其中, 重点水生鱼类生态因素主要考虑四大家鱼和中华鲟的自然产卵繁殖。

收稿日期: 2023-03-25, **修回日期:** 2023-04-18

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目(202003251); 中国博士后科学基金项目(2021M701049)

作者简介: 蒋定国(1980-), 男, 博士、副教授, 研究方向为水利水电工程生态环境调控, E-mail: jiang_dingguo@ctg.com.cn

通讯作者: 张培培(1990-), 女, 博士、副研究员, 研究方向为水利工程生态调控, E-mail: ppzhang@hhu.edu.cn

2.1 有利于四大家鱼繁殖的适宜生态流量

长江中的四大家鱼一般在每年4月底~7月初的涨水时节产卵繁殖,其中,青鱼和草鱼产卵期在5~7月,鲢鱼产卵期在4~6月,鳙鱼产卵期在5~7月^[9]。在长江汛期涨水时节,当水温升至18℃以上时,进入具有特殊地形产卵场的四大家鱼性成熟亲鱼便能产卵排精。沙市、观音洲、韦源口、宜昌、宜都、监利江段涨水幅度与家鱼繁殖活动监测分析结果表明,江水在涨水过程中的水位、流量、流速的增加,所形成的水流刺激是促使四大家鱼自然繁殖的重要条件。表1为监利江段家鱼繁殖期(5、6月)水位、流量变化与家鱼苗汛统计表。根据宜昌站1950~2001年实测的月平均流量资料统计分析,四大家鱼产卵期(4~6月)流量范围为6 597~17 908 m³/s。结合已有研究结果^[10-11],本文取11 000 m³/s作为适宜四大家鱼繁殖的宜昌下泄流量值。

表1 长江监利江段涨水与家鱼苗汛关系

Tab. 1 Relationship between stream rise and Chinese carps seedling seasons in Jianli section of the Yangtze River

| 年 份 | 涨水日期 | 涨水时间 | 水位范围/m | 涨水幅度 | 流量范围 | 苗汛日期区间 | 鱼苗径流量/万尾 |
|------|-------------|------|-------------|------|---------------|-------------|----------|
| 1997 | 05-09~05-21 | 13 | 27.34~30.51 | 3.17 | 8 850~15 100 | 05-20~05-24 | 156 674 |
| | 06-06~06-15 | 10 | 28.13~31.60 | 3.47 | 9 900~20 200 | 06-11~06-14 | 11 819 |
| 1998 | 05-01~05-15 | 15 | 25.58~30.86 | 5.28 | 5 320~14 800 | 05-14~05-31 | 72 176 |
| | 06-06~06-30 | 25 | 28.69~35.61 | 6.92 | 9 300~24 600 | 06-11~06-27 | 191 527 |
| 1999 | 05-16~05-26 | 11 | 27.67~30.78 | 3.11 | 9 200~14 200 | 05-18~05-31 | 73 131 |
| | 06-06~06-11 | 6 | 29.99~30.72 | 0.73 | 10 400~15 700 | 06-10~06-20 | 34 798 |
| | 06-17~06-30 | 14 | 30.38~34.43 | 4.05 | 13 700~30 600 | 06-23~06-30 | 85 077 |

注:涨水时间单位为d;涨水幅度单位为m;流量范围单位为m³/s。

2.2 考虑中华鲟自然繁殖的适宜生态流量

中华鲟是我国特有鱼类,也是一种江海洄游性鱼类,主要分布在长江干流及长江河口浅海区域。每年4~6月性成熟个体便会从河口浅海区域溯江而上,在10~11月到达长江上游和金沙江下游区域进行产卵繁殖。多年观察结果表明,1983~2004年期间,37次中华鲟产卵时日平均流量范围为7 170~26 000 m³/s,平均为13 908 m³/s;分析得到较适宜中华鲟产卵的流量为14 100 m³/s^[12]。三维水动力数学模型推求大坝泄流关键指标和产卵适合度的关系得出,能使中华鲟产卵场加权面积最大的大坝下泄流量范围为15 000~25 000 m³/s;根据大坝泄流量和中华鲟权重可用栖息地面积关系可知,10月中旬~11月中旬宜昌下游中华鲟产卵场产卵繁殖的适宜流量范围为10 000~20 000 m³/s,最适宜流量约为12 000 m³/s。

2.3 控制长江口咸潮入侵的适宜生态流量

已有研究表明,在枯季基本可用大通流量代表长江入海流量,因此可通过控制大通站流量来

改善咸潮入侵^[13]。综合考虑上游水利枢纽综合效益、长江口咸潮入侵情势和长江口重要饮用水源地取水的要求(取水水域的氯度小于250 ppm)和大通以下区间来水及取用水的情况,提出长江口咸潮入侵适度控制的大通流量需求,即一般年份10、11月大通流量按不小于其多年月平均流量的65%控制,12月~次年4月按不小于月平均最小流量控制。本文按该要求算得的大通站10月~次年4月临界流量见表2(取整处理)。从上游水利工程调度可操作性角度出发,采用表2所列数据作为本文计算所用的大通枯水期临界流量。

表2 考虑控制咸潮入侵的大通站、宜昌站(10月~翌年4月)临界流量

Tab. 2 The critical flow of Datong Station and Yichang Station (October-April next year) considering controlling saltwater intrusion

| 月份 | 大通站 / (m ³ · s ⁻¹) | 宜昌站 / 大通站 / % | 宜昌站 / (m ³ · s ⁻¹) |
|----|---|---------------|---|
| 10 | 21 000 | 58 | 12 180 |
| 11 | 15 000 | 46 | 6 900 |
| 12 | 11 000 | 49 | 5 390 |
| 1 | 11 000 | 40 | 4 400 |
| 2 | 11 000 | 34 | 3 740 |
| 3 | 11 000 | 28 | 3 080 |
| 4 | 11 000 | 28 | 3 080 |

统计分析多年宜昌站和大通站枯季(10月~翌年4月)月平均流量数据,得出宜昌站和大通站多年月平均(10月~翌年4月)流量关系,从而算得减少和控制咸潮入侵影响的宜昌站枯季(10月~翌年4月)月平均流量,见表2。

2.4 长江干流宜昌站适宜生态流量过程

基于1882~1980年实测径流数据,采用逐月频率法计算并考虑四大家鱼、中华鲟繁殖需求及控制长江口咸水入侵的生态流量需求,得出了基于统计规律的宜昌站逐月生态径流量见表3。

表3 宜昌站适宜生态流量过程

Tab. 3 Appropriate ecological flow process of Yichang Station

| 月份 | 逐月频率法 | 咸潮入侵控制 | 四大家鱼繁殖需求 | 中华鲟繁殖需求 | 通航要求 | 综合生态流量 |
|----|--------|--------|----------|---------|-------|--------|
| 1 | 4 989 | 4 400 | | | 5 000 | 5 000 |
| 2 | 4 548 | 3 740 | | | 5 000 | 5 000 |
| 3 | 5 458 | 3 080 | | | 5 000 | 5 458 |
| 4 | 8 613 | 3 080 | 11 000 | | 5 000 | 11 000 |
| 5 | 11 884 | | 11 000 | | 5 000 | 11 884 |
| 6 | 13 570 | | 11 000 | | 5 000 | 13 570 |
| 7 | 22 240 | | 11 000 | | 5 000 | 22 240 |
| 8 | 19 845 | | | | 5 000 | 19 845 |
| 9 | 18 143 | | | | 5 000 | 18 143 |
| 10 | 19 593 | 12 180 | | 12 000 | 5 000 | 19 593 |
| 11 | 10 382 | 6 900 | | 12 000 | 5 000 | 12 000 |
| 12 | 5 970 | 5 390 | | | 5 000 | 5 970 |

3 基于生态流量约束的三峡水库调度模型

3.1 目标函数

多目标优化调度考虑的目标除了以适宜生态流量缺水率为代表的生态效益外,增加了以发电量为代表的经济效益。

逐月下泄流量应满足或最大程度满足逐月生态流量:

$$\min \beta_t = (1 - Q_t / Q_{t, \text{下限}}) \times 100\% \quad (1)$$

其中, β_t 为 t 时段的生态流量缺水率; Q_t 为水库在 t 时段的下泄流量, m^3/s ; $Q_{t, \text{下限}}$ 为 t 时段所需的生态流量, m^3/s 。

发电量 E 最大:

$$E = \max \sum_{t=1}^{12} k Q_{t0} H_t \Delta t \quad (2)$$

式中, k 为电站出力系数,取 8.5; Q_{t0} 为 t 时段发电引用流量, m^3/s ; H_t 为 t 时段发电净水头, m ; Δt 为时段时长, s 。

3.2 约束条件

(1) 水量平衡约束。计算公式为:

$$V_{t+1} = (Q_{t, \text{入}} - Q_{t, \text{出}}) \Delta t + V_t \quad (3)$$

式中, V_{t+1} 为 $t+1$ 时段末水库蓄水量, 10^8m^3 ; $Q_{t, \text{入}}$ 、 $Q_{t, \text{出}}$ 分别为 Δt 时段内水库入库、出库流量; V_t 为 t 时段末水库蓄水量, 10^8m^3 。

(2) 水位(库容)约束。计算公式为:

$$Z_{t, \text{min}} \leq Z_t \leq Z_{t, \text{max}} \quad (4)$$

式中, $Z_{t, \text{min}}$ 、 $Z_{t, \text{max}}$ 分别为水库 t 时段允许的最低、最高水位, m 。

三峡水库水位上下限见表 4。

表 4 三峡水库逐月月初水位限制

Tab. 4 Water level restrictions of Three Gorges Reservoir at the beginning of each month m

| 月份 | 高水位 | 低水位 | 月份 | 高水位 | 低水位 |
|----|-----|-----|----|-----|-----|
| 1 | 175 | 155 | 7 | 145 | 145 |
| 2 | 175 | 155 | 8 | 145 | 145 |
| 3 | 175 | 155 | 9 | 145 | 145 |
| 4 | 175 | 155 | 10 | 145 | 145 |
| 5 | 175 | 155 | 11 | 175 | 155 |
| 6 | 155 | 145 | 12 | 175 | 155 |

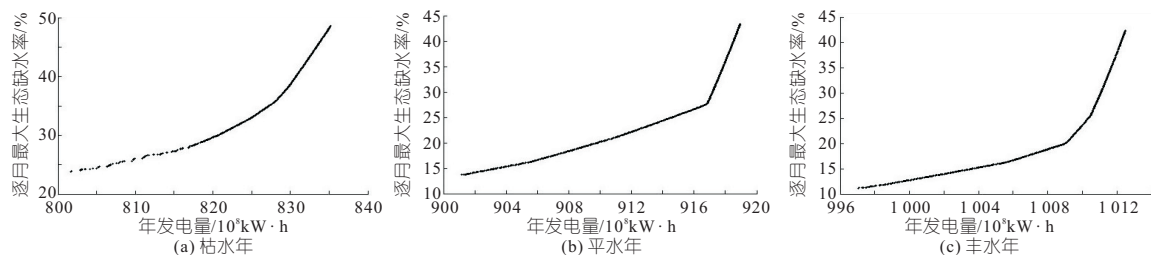


图 1 优化计算非劣解直观图

Fig. 1 Non-inferior solutions of the model optimization

(3) 下泄流量约束。计算公式为:

$$Q_{t, \text{min}} \leq Q_t \leq Q_{t, \text{max}} \quad (5)$$

式中, $Q_{t, \text{min}}$ 、 $Q_{t, \text{max}}$ 分别为水库 t 时段保证最小、最大下泄流量, m^3/s 。

(4) 电站出力约束。计算公式为:

$$N_{\text{min}} \leq k Q_{t0} H_t \leq N_{\text{max}} \quad (6)$$

式中, N_{min} 、 N_{max} 分别为电站允许的最小、最大出力, MW ; k 为电站出力系数,取 8.5; Q_{t0} 为 t 时段发电引用流量, m^3/s ; H_t 为 t 时段发电净水头, m 。

三峡电站地上水轮发电机组 26 台,地下 6 台,不含地下和电源电站的保证出力为 4 990 MW ,包含地下和电源电站的保证出力为 5 300 MW ,本文取 4 990 MW 作为保证出力。

(5) 防洪限制约束。由于本文计算时段较长,取三峡校核洪水时的最大下泄流量 102 500 m^3/s 作为防洪限制约束。

4 基于生态流量约束的多目标优化调度结果与分析

采用第二代非支配排序遗传算法 NSGA-II 对模型进行求解,计算所选种群规模为 600,遗传代数 600,交叉方式选用“sbx”,交叉比率选为 0.9,交叉指数 10,变异方法选用“polynomial”,变异比率 0.125,变异指数 10,经迭代计算总共得到 600 组最优解组成的非劣解集。基于 1954~2000 年共 47 年水文序列资料,选取了频率为 85% 的典型枯水年 1971 年、频率为 50% 的典型平水年 1975 年、频率为 15% 的典型丰水年 1965 年分别进行计算。计算所得结果为 600 组最优解组成的非劣解集,其中,每一组最优解包括逐月最大生态流量缺水率值和发电量值,得出枯水年、平水年、丰水年逐月最大生态流量缺水率与发电量关系,见图 1。

图 1 所得非劣解直观图由 600 组数据组成,为方便分析,根据图 1 中曲线规律沿曲线取 20 组具有代表性的数据进行分析,所取数据见表 5。

表 5 所选枯水年、平水年、丰水年 20 组代表性非劣解

Tab. 5 20 representative non-inferior solutions of the selected dry, normal and wet years

| 方案 编号 | 枯水年 | | 平水年 | | 丰水年 | |
|----------|---------|-----------------|---------|-----------------|----------|-----------------|
| | 发电 量 | 逐月最大生 态缺水率/% | 发电 量 | 逐月最大生 态缺水率/% | 发电 量 | 逐月最大生 态缺水率/% |
| 1 | 801.70 | 23.80 | 901.18 | 13.69 | 997.06 | 11.12 |
| 2 | 807.59 | 25.21 | 902.43 | 14.40 | 999.82 | 12.66 |
| 3 | 812.83 | 26.71 | 903.70 | 15.15 | 1 001.00 | 13.36 |
| 4 | 816.09 | 27.77 | 905.11 | 15.98 | 1 002.30 | 14.14 |
| 5 | 818.46 | 28.81 | 906.42 | 17.00 | 1 003.50 | 14.90 |
| 6 | 820.34 | 29.78 | 907.68 | 18.06 | 1 004.60 | 15.61 |
| 7 | 821.93 | 30.88 | 909.87 | 20.03 | 1 005.80 | 16.41 |
| 8 | 823.33 | 31.81 | 911.10 | 21.19 | 1 006.70 | 17.47 |
| 9 | 824.74 | 32.79 | 912.18 | 22.32 | 1 007.80 | 18.56 |
| 10 | 825.92 | 33.83 | 913.23 | 23.50 | 1 008.70 | 19.59 |
| 11 | 827.22 | 34.99 | 914.37 | 24.74 | 1 009.40 | 21.30 |
| 12 | 828.41 | 36.25 | 915.51 | 26.03 | 1 009.90 | 23.18 |
| 13 | 830.16 | 38.94 | 916.58 | 27.30 | 1 010.40 | 25.28 |
| 14 | 830.90 | 40.31 | 917.09 | 29.39 | 1 010.70 | 27.50 |
| 15 | 831.60 | 41.64 | 917.43 | 31.83 | 1 011.10 | 29.82 |
| 16 | 832.28 | 42.92 | 917.74 | 34.10 | 1 011.30 | 32.09 |
| 17 | 833.03 | 44.38 | 918.07 | 36.51 | 1 011.60 | 34.82 |
| 18 | 833.74 | 45.72 | 918.39 | 38.95 | 1 011.90 | 37.09 |
| 19 | 834.51 | 47.22 | 918.70 | 41.42 | 1 012.20 | 39.87 |
| 20 | 835.19 | 48.56 | 918.94 | 43.36 | 1 012.50 | 42.27 |

注:发电量单位为 $10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$ 。

由图 1、表 5 可知,发电量和逐月最大生态流量缺水率呈明显的正比关系,发电量越大,逐月最大生态流量缺水率也越大,说明两个调度目标不能同时达到最优。对于生态缺水最为严重的枯水年,优化调度得到的发电量大致处于 $802 \times 10^8 \sim 835 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$ 之间,相应地,逐月最大生态缺水率大致处于 $24\% \sim 48\%$ 之间。

三个典型年优化调度结果中,方案 1 均为侧重保障下游生态流量,从而牺牲了可观的发电效益;方案 20 均为侧重发电效益,从而增加了下游的生态缺水量。就发电效益而言,平水年比设计发电量增加约 $2.26\% \sim 4.19\%$,丰水年比设计发电量增加约 $13.04\% \sim 14.74\%$,枯水年达不到设计发电量值。就典型年非劣解直观图来看,枯水年发电量随逐月最大生态流量缺水率增大而增大的幅度逐渐变缓,无明显转折点;平水年和丰水年非劣解直观图则存在明显的转折点,发电量在拐点以下时,随逐月最大生态流量缺水率增大而较快增加,越过拐点后,发电量随最大生态流量缺水率增大而增加的速度变慢。平水年拐点大致与方案 14 一致,发电量约 $917 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$,逐月最大生态流量缺水率约为 29% ;丰水年拐点大致与方案 11 一致,发电量约为 $1 009 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$,逐月最大生态流量缺水率约为 25% 。这说明就调度计算而言,拐点处的调度方案为最能协调满足两个调度目标的方案,因此取平水年和丰水年拐点处方案进行分析。枯水年无明显拐点,为了便于

分析,取图 1(a)上曲线斜率变化最大处的方案进行分析,此处大致与方案 11 一致,发电量约为 $827 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$,逐月最大生态流量缺水率约为 34% 。所取三个典型年最优方案逐月生态流量缺水率见表 6,逐月水库水位和下泄流量见图 2。

表 6 典型年最优方案逐月生态流量缺水率

Tab. 6 Water shortage rates of the monthly ecological flow under the optimal schemes in the typical years %

| 月份 | 枯水年 | 平水年 | 丰水年 | 月份 | 枯水年 | 平水年 | 丰水年 |
|----|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------|
| 1 | 7.57 | 8.20 | 1.00 | 7 | 8.27 | 0 | 0 |
| 2 | 9.03 | 21.00 | 16.20 | 8 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 23.60 | 26.90 | 21.30 | 9 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 34.99 | 29.39 | 21.30 | 10 | 34.97 | 27.64 | 19.98 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 11 | 34.89 | 0 | 10.00 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 12 | 22.23 | 0 | 0 |

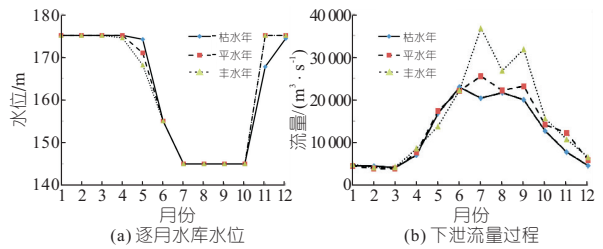


图 2 各典型年最优方案逐月水库水位和下泄流量过程

Fig. 2 Monthly reservoir water level and discharge under the optimal schemes in the typical years

由表 6、图 2 可知,综合考虑发电量与下游生态流量缺水率的三峡水库调度方式与其设计调度方案相似,三个典型年均蓄至正常蓄水位 175m ;平水年和丰水年均在 10 月内蓄水至正常蓄水位 175m ,枯水年至 12 月初才能蓄至 175m ;12 月~次年 4 月初,典型年水位均保持最高水位 175m 左右;4 月初~6 月初,典型年库水位以不同速率均降至 155m ,此后在 6 月以相同速率降至防洪汛限水位 145m 。分析可知,综合考虑发电量与下游生态流量缺水率的三峡水库调度方式,在 4~6 月降低库水位,以增加下泄满足四大家鱼繁殖流量要求,枯水年蓄水周期延长为 2 个月,是为了增加下泄流量以满足中华鲟繁殖流量需求;但同时为了增加发电效益,典型年也采取了枯季抬高库水位的方式以增加出力。根据发电量分析可知,三个典型年平均发电量比三峡水库设计发电量增加约 4.07% 。

5 结论

a. 在典型年丰水季节 5~9 月期间,三峡下游的生态流量基本得以保证,然而其他季节较易出现不同程度的生态缺水状况,尤以枯水年生态缺

水最严重。

b. 两个调度目标生态流量缺水率和发电量不能同时达到最优值,但能找出协调两个调度目标的最优方案;典型枯水年优化调度的发电量大致处于 $802 \times 10^8 \sim 835 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 之间,逐月最大生态缺水率大致处于 $24\% \sim 48\%$ 之间。相较于丰水年和平水年,枯水年水库最优调度方案下水库水位在消落期下降速率和蓄水期的上升速率均较缓慢,但在四大家鱼繁殖期的 4~6 月保持了较大的下泄流量,在 7 月及中华鲟繁殖期和咸潮控制期的 10~12 月水库下泄流量较小,但仍将生态流量缺水率控制在 35% 以内。

c. 多目标调度所得最优方案能较好地协调生态和发电需求,在尽量兼顾下游生态流量需求的基础上,发电效益可比设计目标增加约 4.07% 。

参考文献:

- [1] 钮新强. 三峡工程与可持续发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [2] JOHNSON BRETT M, SAITO LAUREL, ANDERSON MARK A, et al. Effects of climate and dam operations on reservoir thermal structure[J]. Journal of water resources planning and management, 2004, 130(2): 112-122.
- [3] 禹雪中, 杨志峰, 廖文根. 水利工程生态与环境调度初步研究[J]. 水利水电技术, 2005, 36(11): 20-22.
- [4] HUGHES DENIS A, HANNART PAULINE. A desktop model used to provide an initial estimate of

the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa [J]. Journal of hydrology, 2003, 270 (3): 167-181.

- [5] 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.
- [6] 刘瀚, 林俊强, 秦鑫, 等. 基于生物水文响应模型的刺激四大家鱼繁殖生态调度目标量化方法研究——以三峡水库为例[J]. 湖泊科学, 2023, 35 (5): 1741-1751.
- [7] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47 (3): 443-454.
- [8] 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 等. 防控支流库湾水华的三峡水库潮汐式生态调度可行性研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(12): 48-50, 109.
- [9] 长江四大家鱼产卵场调查队. 葛洲坝水利枢纽工程截流后长江四大家鱼产卵场调查[J]. 水产学报, 1982, 6(4): 287-305.
- [10] 陈永柏, 廖文根, 彭期冬, 等. 四大家鱼产卵水文水力特性研究综述[J]. 水生生态学杂志, 2009, 2(2): 130-133.
- [11] 郭文献, 谷红梅, 王鸿翔, 等. 长江中游四大家鱼产卵场物理生境模拟研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(5): 68-78, 79.
- [12] 王煜, 戴会超. 中华鲟产卵场适合度与大坝泄流相关性分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4): 64-70.
- [13] 陈庆江, 徐建益, 朱建荣, 等. 长江口水源地咸潮控制临界流量确定及保障措施[J]. 人民长江, 2011, 42(18): 68-72.

Multi-objective Optimization of Three Gorges Reservoir Based on Ecological Flow Constraints

JIANG Ding-guo¹, KE Yun², MAO Jing-qiao³, ZHANG Pei-pei³, GONG Yi-qing³

(1. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China; 2. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Exerting huge economic and social benefits, the construction and operation of water conservancy projects have an impact on the ecological environment of upstream and downstream reaches. However, it is also an effective way to regulate and improve the ecological environment by rationally optimizing the water storage and release process of the reservoir and carrying out targeted ecological management of the reservoir. From the perspective of ecological flow constraints, through data investigation and analysis, the appropriate flow ranges of the Yangtze River main stream conducive to the natural reproduction of the four major Chinese carps, Chinese sturgeon and the control of estuary salt tide intrusion were determined. Then, the optimal scheduling model of the Three Gorges Reservoir was established considering the downstream ecological flow constraints. Multi-objective reservoir ecological dispatching model is emphasized. The results show that the ecological flow of the lower reaches of the Three Gorges Reservoir was basically guaranteed during the wet season from May to September, but the ecological water shortage was prone to occur in different degrees in other seasons, especially in the dry years. For the optimal scheduling, the power generation and the monthly maximum ecological water shortage rate showed a positive relationship, indicating that the two scheduling objectives could not reach the optimum simultaneously. The power generation of the optimal scheduling in a typical dry year was between 80.2 billion and 83.5 billion $\text{kW} \cdot \text{h}$, and the monthly maximum ecological water shortage rate was between 24% and 48% . The optimal scheme obtained by multi-objective dispatching can basically coordinate the ecological and power generation needs. On the basis of the downstream ecological flow needs, the power generation benefits increases by 4.07% compared to the design scheme.

Key words: ecological flow; multi-objective optimization; Three Gorges Reservoir; ecological operation