

考虑鱼类繁衍需求的三峡水库汛期 调度要求及可行性探讨

马超, 赵明, 孙萧仲, 唐志波, 郭鑫宇
(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 长江中下游鱼卵数量急剧减少, 鱼类繁衍期推迟。针对鱼类繁衍需求, 本文通过总结鱼类繁衍条件, 提出鱼类繁衍期三峡水库泄流要求及生态调度方案, 并计算分析历史径流满足生态调度方案的程度; 通过建立繁衍前期和繁衍期来流关联, 提出天然径流不满足情况下的预蓄调度方案并探讨其可行性。结果表明: 2004-2013年三峡水库入库径流满足生态调度方案的程度较低, 需采取预蓄水量措施; 在实际入库径流情况下, 预蓄水位范围为145.00~159.34 m; 在80%概率入库径流下, 预蓄水位范围为145.00~156.63 m。如按80%概率的入库径流预蓄水量, 当预报预泄期为7天时, 预蓄调度方案不会增加三峡水库的防洪风险。

关键词: 鱼类繁衍; 汛期调度; 预蓄调度; 可行性探讨; 三峡水库

中图分类号: TV697; TV697.4⁺²

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)01-0109-05

Discussion on requirement and feasibility of the Three Gorges Reservoir regulation in flood season considering fish reproduction

MA Chao, ZHAO Ming, SUN Xiaozhong, TANG Zhibo, GUO Xinyu

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The number of fish larval in the middle and lower reaches of the Yangtze River has decreased dramatically, meanwhile the time of fish spawning has delayed. In this study, the discharge requirements and ecological regulation schemes of the Three Gorges Reservoir during fish reproduction period were put forward according to the summarized fish reproduction conditions. And the satisfaction degree, for which the historical runoff met the ecological scheduling schemes, was calculated and analyzed. By establishing the connections between the pre-reproduction and the reproduction periods, discussing the feasibility of the pre-storage scheduling scheme when runoff can't meet the scheme. The results showed that, the inflow runoff of the Three Gorges reservoir from 2004 to 2013 had a low degree to satisfy degree the ecological regulation schemes and needed to take pre-storage measures. The range of pre-storage water levels were 145.00-159.34 m under the actual inflow runoff conditions and 145.00-156.63m under the 80% probability of inflow runoff. If the reservoir pre-store the water at the 80% probability of inflow runoff, the pre-storage scheme would not increase the flood control risk of the Three Gorges Reservoir when using the forecasted 7 day pre-discharge.

Key words: fish reproduction; regulation in flood season; pre-storage scheduling scheme; feasibility discussion; Three Gorges Reservoir

1 研究背景

三峡水利枢纽工程自建成蓄水以来,已在防洪、兴利发电、航运等多方面发挥了不可替代的作用,产

生了巨大的社会和经济效益。近年来,三峡库区的水文情势发生了变化,主要表现为水体富营养化、湿地萎缩、生物栖息地部分丧失、鱼类资源锐减等^[1-2]。研究表明,自2003年以来,长江中游每年

收稿日期:2016-10-31; 修回日期:2016-11-15

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0402203);国家自然科学基金青年基金项目(51109156)

作者简介:马超(1981-),男,天津人,博士,副教授,主要从事水库优化调度研究。

的四大家鱼(青鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼)鱼卵数量已经锐减到不足原来的20%,同时产卵期也由5到6月份推迟到了6月中旬到7月中旬^[3]。针对长江中游四大家鱼繁衍所需条件,国内学者从水温、水位过程(初始水位、水位日增长率)、流量过程(初始流量、流量日增长率、持续时间)等多方面提出了丰富的研究成果^[3-11]。陈永柏等^[9]研究指出天然情况下家鱼在20~24℃产卵活动最为频繁,在27~28℃还能见到家鱼产卵。Zhang Guohua等^[10]研究指出适度的初始水位、初始流量、较大流量日增长率、较高的水位日增长率及较长时间的水位上涨同四大家鱼的产卵行为密切相关,流速提高对刺激产卵和缩短产卵时间有利,并提出了三峡工程下游松滋口的合理起涨流量(约12 000~15 000 m³/s)。Wang Junna等^[3]进一步研究指出三峡水库应在每年的6月15日至7月20日,至少形成一场持续时间大于5天、日增下泄流量在900~3 000 m³/s、最大下泄流量小于30 000 m³/s、水温小于25℃的洪水过程。上述研究成果为指导开展服务于四大家鱼繁衍的调度决策奠定了基础。三峡水库作为长江中下游重要的控制节点,应合理考虑四大家鱼繁衍的水量需求,制定可行的汛期生态调度方案来实现设计功能和改善鱼类繁衍条件的多目标。基于此,本文开展考虑鱼类繁衍需求的三峡水库汛期调度要求及可行性探讨研究。通过总结四大家鱼繁衍所需水文、水动力条件,提出繁衍期三峡水库的泄流要求及生态调度方案,并计算分析历史径流满足生态调度方案的程度;通过关联模型建立繁衍前期和繁衍期流量关系,在此基础上,探讨天然径流不满足条件下预蓄调度方案的可行性;研究成果以期为繁衍期三峡水库调度提供决策支持。

2 研究思路和方法

考虑鱼类繁衍需求的三峡水库汛期调度要求及可行性探讨的研究思路包括:汛期鱼类需水满足程度分析以及考虑径流关联的预蓄调度方案及其可行性分析,具体的研究思路图如图1所示。

首先,进行汛期鱼类需水满足程度分析。根据四大家鱼繁衍所需条件的研究,从新的繁衍时期、流量过程、涨水持续时间等方面综合考虑,提出三峡水库的泄流要求,制定生态调度方案。根据历史径流资料,计算分析历史径流满足生态调度方案的程度。

其次,考虑径流关联的预蓄调度方案及其可行性分析。首先根据繁衍前期与繁衍期径流序列建立关

联模型。采用3种相关系数分析以上两个径流序列的互相关性,若互相关性良好,则采用二元Copula联合分布函数(包括确定型边缘分布、确定Copula参数、拟合检验)及条件概率分布公式(式(1)、(2))确定繁衍期入库流量的概率分布。然后依据生态调度方案及繁衍期入库流量的概率分布判断繁衍期入库径流量的满足程度,若不满足,则拟定预蓄调度方案。最后分析预蓄调度方案与防洪调度的矛盾,考虑不同预报预泄天数下,预蓄调度方案的可行性。

$$P(Q_2 < q_2 | Q_1 < q_1) = \frac{1 - F(q_1) - F(q_2) + F(q_1, q_2)}{1 - F(q_1)} \quad (1)$$

$$P(Q_2 > q_2 | Q_1 < q_1) = 1 - P(Q_2 < q_2 | Q_1 < q_1) \quad (2)$$

式中: Q_1 、 Q_2 分别为繁衍前期与繁衍期的入库径流量, m³/s; q_1 、 q_2 均为选取的某一流量的值, m³/s; $P(Q_2 < q_2 | Q_1 < q_1)$ 表示繁衍前期发生入库径流量小于 q_1 的情况下,繁衍期入库径流量小于 q_2 的概率; $P(Q_2 > q_2 | Q_1 < q_1)$ 表示繁衍前期发生入库径流量小于 q_1 的情况下,繁衍期入库径流量大于 q_2 的概率。

3 汛期鱼类繁衍需水满足程度分析

3.1 汛期鱼类繁衍需求对应的三峡水库生态调度方案

总结长江中游四大家鱼繁衍条件研究成果^[3-11],提出繁衍期三峡水库的泄流要求,具体如下:在四大家鱼繁衍期6月15日至7月20日期间,至少形成一场持续涨水时间大于5 d的涨水过程。初次涨水过程的起涨下泄流量设定为15 000 m³/s,日下泄流量增幅为900~3 000 m³/s,最大下泄流量不超过30 000 m³/s。

根据提出的繁衍期三峡水库泄流要求,按照繁衍期6月15日至7月20日期间均匀实施的方式,制定九组生态调度方案。各组生态调度方案的单日流量增幅、单次持续时间、生态流量过程实施次数均不同,具体如表1所示。考虑随汛期的推进,三峡水库入库径流呈现增加趋势,可通过增加下泄流量来提高下游流速以刺激产卵,因此,连续实施的多次生态流量过程的起涨下泄流量逐次增加,但保证最大日下泄流量不超过30 000 m³/s的上限值。实施2次的方案,第2次起涨下泄流量比第1次增加3 000 m³/s;实施3次的方案,后一次过程的起涨下泄流量比前一次增加2 000 m³/s;实施4次的方案,后一次过程的起涨下泄流量比前一次增加1 500 m³/s。

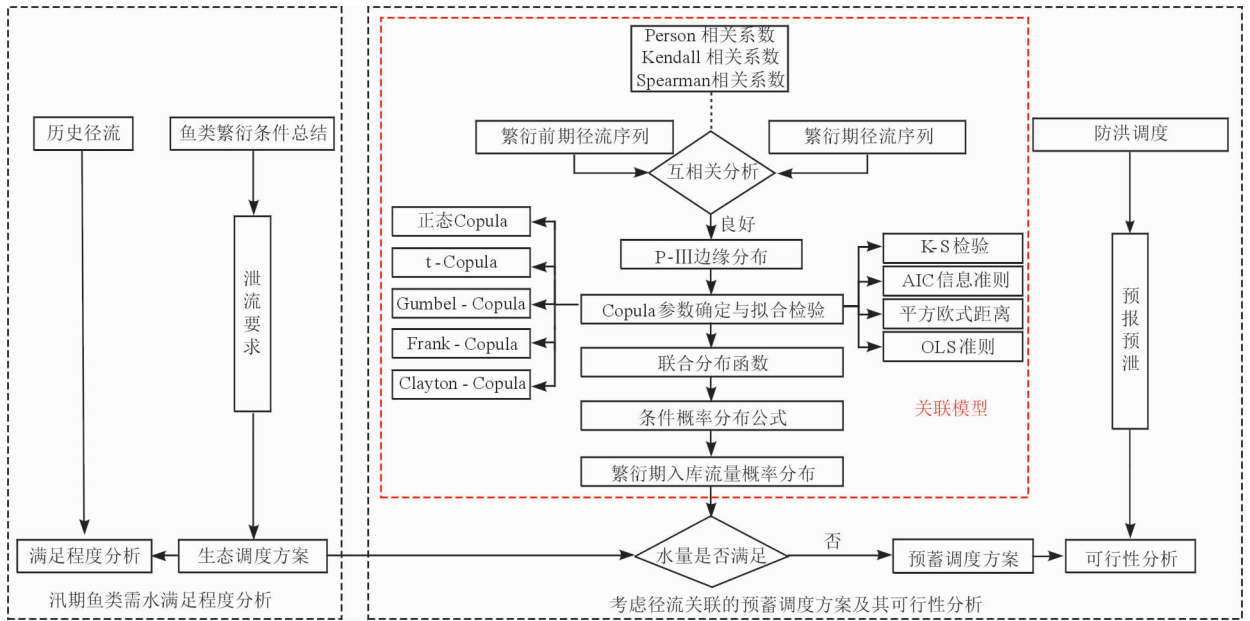


图 1 研究思路图

表 1 生态调度方案表

生态调度方案	单次日流量增幅/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	单次持续时间/d	生态流量过程实施次数	总需水量/ 10^8 m^3
1	2500	5	2	185.76
2	2000	6	2	222.91
3	1500	7	2	254.02
4	2500	5	3	285.12
5	2000	6	3	342.14
6	1500	7	3	390.10
7	2500	5	4	384.48
8	2000	6	4	461.38
9	1500	7	4	526.18

3.2 历史径流条件下的生态调度方案满足程度

根据 1890 - 2013 年鱼类繁衍期三峡水库日径流资料(1942 - 1945 年由于客观原因,资料缺失,所以共 120 a),按照在繁衍期均匀实施上述生态调度方案的方式,

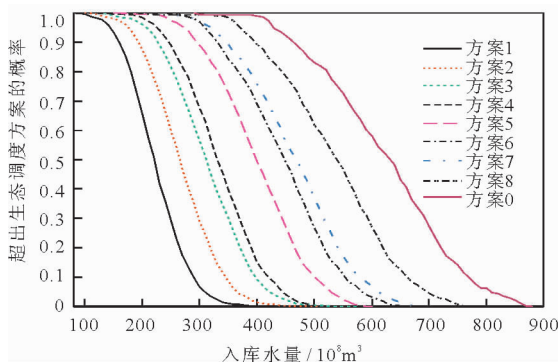


图 2 入库径流量超出概率图

统计对应天数内历史入库径流超过不同水量的次数,并计算得出超出概率,结果如图 2 所示。

由图 2 及计算可知,入库径流满足各生态调度方案的概率均在 75% 以上。

为了反映历史进程中入库径流满足生态调度方案程度的变化,将 120 a 均分为 12 个 10 a 时期,统计每个 10 a 期实际入库径流满足生态调度方案的年数所占的比率,结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出方案 1、2、3 在各个 10 a 期均具有很高的满足率,方案 4 ~ 方案 9 的前 11 个 10 a 期的满足比率很高,而第 12 个 10 a 期(2004 - 2013 年),满足比率极低。

结果表明,随着长江流域的开发和水库群的陆续修建运行,三峡水库的入库径流逐渐难以满足生态调度需求。

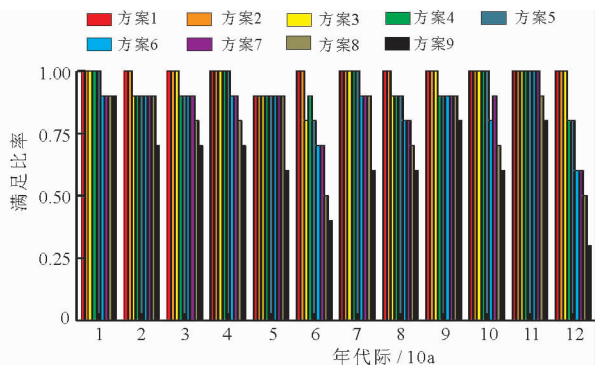


图 3 各年代际生态方案满足程度图

4 考虑径流关联的预蓄调度方案及其可行性分析

4.1 繁衍前期和繁衍期径流关联特征

繁衍期与繁衍前期径流序列的互相关性分析结果如表 2 所示。由表 2 可知, Pearson 相关系数和 Spearman 相关系数在 0.3 以上, 由此可以判断繁衍期与繁衍前期的日径流具有中等相关性。因此, 可以将繁衍期入库径流与繁衍前期入库径流建立关联。

通过拟合检验, Clayton Copula 函数^[12]的各项拟合指标均较好(表 3), 因此选用 Clayton Copula 函数可得繁衍期日径流与繁衍前期日径流的联合分布函数为:

$$F(Q_1, Q_2) = (F(Q_1)^{-0.4368} + F(Q_2)^{-0.4368} - 1)^{-1/0.4368} \quad (3)$$

式中: $F(Q_1, Q_2)$ 为联合分布函数。 $F(Q_1)$ 和 $F(Q_2)$ 为联合分布的边缘分布函数; $F(Q_1, Q_2)$ 的分布函数图如图 4 所示。

结合条件概率公式, 计算当繁衍前期入库径流

量小于某一值时, 繁衍期入库径流量达到某一个流量的概率, 结果如图 5 所示。图 5 表明:

(1) 从整体上看, 当繁衍前期入库径流量越大时, 相同概率下繁衍期对应的入库径流量也越大。

(2) 在 80% 概率下, 即期望入库径流较枯情境, 当繁衍前期入库径流量在 10 000 m³/s 左右时, 繁衍期入库径流量约为 18 800 m³/s; 当繁衍前期入库径流量在 20 000 m³/s 左右时, 繁衍期入库径流量约为 22 760 m³/s。在 40% 概率下, 即期望入库径流较丰情境, 当繁衍前期入库径流量在 10 000 m³/s 左右时, 繁衍期入库径流量约为 23 300 m³/s; 当繁衍前期入库径流量在 20 000 m³/s 左右时, 繁衍期入库径流量约为 27 500 m³/s。

(3) 若要满足所有生态调度方案的需水量, 当繁衍前期入库径流量在 10 000 m³/s 左右时, 繁衍期的入库流量概率需不大于 42%; 当繁衍前期入库径流量在 20 000 m³/s 左右时, 繁衍期的入库流量概率不大于 73%。

表 2 繁衍期与繁衍前期径流序列互相关系数表

名称	Pearson 相关系数	Kendall 相关系数	Spearman 相关系数
相关系数	0.336	0.22	0.319

表 3 Copula 函数的参数确定与拟合检验表

Copula 函数类型	参数	平方欧式距离	D	OLS	AIC
正态 Copula	$\rho = 0.3416$	0.0184	0.0358	0.0124	-477.2798
t - Copula	$\rho = 0.3416, \nu = 69700$	0.0199	0.0297	0.0129	-467.9632
Gumbel - Copula	$\theta = 1.3034$	0.0298	0.0404	0.0158	-419.4766
Frank - Copula	$\theta = 2.1569$	0.0221	0.0322	0.0136	-455.2872
Clayton - Copula	$\theta = 0.4368$	0.0180	0.0350	0.0122	-480.1622

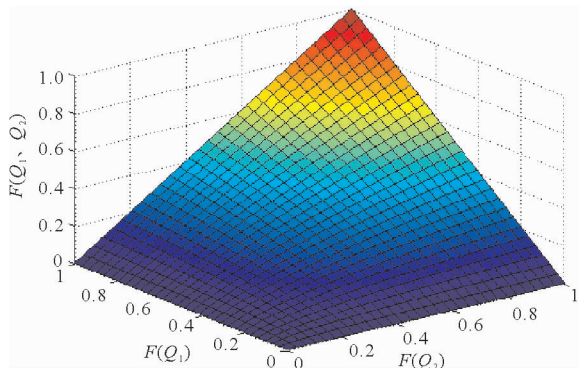


图 4 $F(Q_1, Q_2)$ 的分布函数图

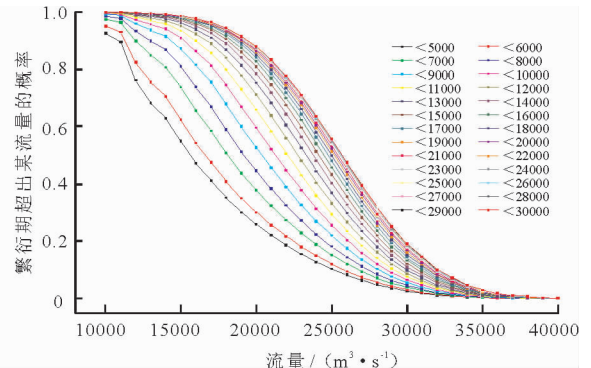


图 5 繁衍期流量概率图

4.2 预蓄调度方案及其可行性

根据 2004 - 2013 年繁衍期实际入库径流量及由繁衍前期通过关联模型计算得到的繁衍期径流量, 分别与生态调度方案总需水量进行差值计算, 计

算入库径流不满足生态调度方案时实际的预蓄水量与繁衍期不同概率下的预蓄水量, 并由三峡水库的库容曲线计算预蓄水位。

在实际入库径流下, 预蓄水量范围为 0 ~ 86.03

$\times 10^8 \text{ m}^3$, 预蓄水位范围为 145.00 ~ 159.34 m; 在 80% 概率的入库径流下, 预蓄水量范围为 0 ~ 67.59 $\times 10^8 \text{ m}^3$, 预蓄水位范围为 145.00 ~ 156.63 m; 在 40% 概率的入库径流下, 不需要蓄水。2011 年是 2004 - 2013 年中入库径流量最少的年份, 繁衍期平均入库径流为 19 783 m^3/s , 80% 概率下的入库径流为 18 991 m^3/s 。若满足生态调度方案, 实际预蓄水量为 51.16 $\times 10^8 \text{ m}^3$, 预蓄水位为 154.14 m; 80% 概率的入库径流下, 预蓄水量为 67.59 $\times 10^8 \text{ m}^3$, 预蓄水位为 156.63 m, 大于实际所需预蓄水位。

由于预蓄水量将产生汛期防洪调度与水量调度的矛盾, 具体表现为: 三峡水库按照生态调度方案预蓄水量, 其汛期库水位将超过 145.00 m, 可能产生防洪风险。如果不预蓄水量, 则可能无法满足鱼类繁衍需水要求, 降低水位补水运行或者降低鱼类繁衍需水量将导致三峡水库发电效益受损或者鱼类繁衍受影响。当考虑预报预泄^[13]时, 考虑下游枝城的防洪安全, 取最大泄流量为 39 900 m^3/s (对应枝城流量为 42 000 m^3/s), 计算洪水预报预泄期内能将水位消落至汛限水位的最大蓄水量及相应水位。当预报预泄期为 3 d 时, 最大蓄水量为 29.09 $\times 10^8 \text{ m}^3$, 相应的水位为 150.67 m; 当预报预泄期为 7 d 时, 最大蓄水量为 67.88 $\times 10^8 \text{ m}^3$, 相应的水位为 156.72 m。如果按照繁衍期 80% 概率的入库径流预蓄水量, 当预报预泄期为 7 d 时, 能够将水库水位消落至防洪限制水位, 从而不增加三峡水库的防洪风险。

5 结 论

(1) 为满足鱼类繁衍需求, 提出三峡水库的泄流要求及生态调度方案, 生态调度方案从新的繁衍时期、流量增幅、起涨流量、最大下泄流量、涨水持续时间、生态流量过程实施次数 6 个方面来满足鱼类的繁衍需求。通过历史径流对生态调度方案满足程度分析, 得出的结果表明历史径流整体满足生态调度方案比率很高, 但 2004 - 2013 年的入库径流满足比率较低, 需采取预蓄水量措施。

(2) 通过建立繁衍前期与繁衍期关联模型, 结果表明: 若要满足所有生态调度方案的需水量, 当繁衍前期入库径流量在 10 000 m^3/s 左右时, 繁衍期的入库流量概率需小于 42%; 当繁衍前期入库径流量在 20 000 m^3/s 左右时, 繁衍期的入库流量概率需小于 73%。2004 - 2013 年在实际入库径流下, 预蓄水量范围为 0 ~ 86.03 $\times 10^8 \text{ m}^3$, 预蓄水位范围为 145 ~ 159.34 m; 在 80% 概率的入库径流下, 预蓄水量范

围为 0 ~ 67.59 $\times 10^8 \text{ m}^3$, 预蓄水位范围为 145 ~ 156.63 m; 在 40% 概率的入库径流下, 不需要预蓄水量。如果按照繁衍期 80% 概率的入库径流预蓄水量, 当预报预泄期为 7 d 时, 能够将水库水位消落至防洪限制水位, 从而不增加三峡水库的防洪风险。

(3) 本文仅从满足、衍角度来制定生态调度方案, 下一步需要从汛期发电、防洪、鱼类繁衍等多方面综合考虑, 开展三峡水库汛期多目标优化调度的研究。

参考文献:

- [1] Mao Zhanpo, Wang Yuchun, Peng Wenqi, et al. Advances in effects of dams on river ecosystem. [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(1): 134 - 140.
- [2] 李建, 夏自强, 戴会超, 等. 三峡初期蓄水对典型鱼类栖息地适宜性的影响[J]. 水利学报, 2013, 44(8): 892 - 900.
- [3] Wang Junna, Li Chong, Duan Xinbin, et al. Variation in the significant environmental factors affecting larval abundance of four major Chinese carp species: fish spawning response to the Three Gorges Dam. Freshwater Biology [J]. 2014, 59(7): 1343 - 1360.
- [4] 张国, 吴朗, 段明, 等. 长江中游不同江段四大家鱼幼鱼孵化日期和早期生长的比较研究[J]. 水生生物学报, 2013, 37(2): 306 - 313.
- [5] 郭文献, 王鸿翔, 徐建新, 等. 三峡水库对下游重要鱼类产卵期生态水文情势影响研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 22 - 26.
- [6] 彭期冬, 廖文根, 李翀, 等. 三峡工程蓄水以来对长江中游四大家鱼自然繁殖影响研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(s2): 228 - 232.
- [7] 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, 4(3): 170 - 176.
- [8] 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): 46 - 50.
- [9] 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, 2009, 2(2): 130 - 133.
- [10] Zhang Guohua, Chang Jianbo, Shu Guanfu. Applications of factor - criteria system reconstruction analysis in the reproduction research on grass carp, black carp, silver carp and bighead in the Yangtze River [J]. International Journal of General Systems, 2000, 29(3): 419 - 428.
- [11] 胡和平, 刘登峰, 田富强, 等. 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 325 - 332.
- [12] 谢中华. MATLAB 统计分析与应用: 40 个案例分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- [13] 郭生练, 李响, 刘心愿, 等. 三峡水库汛限水位动态控制关键技术研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.