

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0033

高志强,丁伟,唐榕,等.耦合水文情势及鱼类需求的生态调度研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(2):14-20. GAO Z Q, DING W, TANG R, et al. Ecological operation study coupling hydrological regime and fish demand[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 14-20. (in Chinese)

# 耦合水文情势及鱼类需求的生态调度研究

高志强,丁伟,唐榕,李昱,张弛

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**针对丰满水库下游鱼类多样性减少的问题,在满足最小生态流量需求的基础上,开展了营造适宜鱼类的水文情势研究。通过筛选改变度大且适宜鱼类的水文情势指标构建生态完整度函数,将此作为生态目标建立水库多目标优化调度模型。调度结果表明,所建立的生态调度模型在满足发电、供水和最小生态需水量的基础上,可将生态完整度至少提高48%,其中,涨水率、高流量脉冲数指标隶属度分别增加了0.112、0.261,且涨水率指标在枯水年改善程度好,高流量脉冲数指标在枯水年改善程度大、丰水年改善程度小。本文所建立的模型显著提高了适宜鱼类水文情势的生态完整度,可为有鱼类修复任务的流域提供参考。

**关键词:**丰满水库;水文情势;鱼类;生态完整度;生态调度

**中图分类号:**TV 697.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1683(2018)02-0014-07

## Ecological operation study coupling hydrological regime and fish demand

GAO Zhiqiang, DING Wei, TANG Rong, LI Yu, ZHANG Chi

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** To solve the problem of the dwindling fish resources in the lower reaches of the Fengman reservoir, we conducted the study on hydrological regime suitable for fishes on the basis of satisfying the minimum ecological water demand. We selected hydrological regime indicators that changed severely and were suitable for fishes, and used them to establish an ecological integrity function. Using the proposed function as the ecological objective, we established a multi-objective optimal scheduling model. Results showed that this model could improve ecological integrity by at least 48%. The memberships of flow rising rate and high flow pulse number increased by 0.112 and 0.261 respectively. The flow rising rate was well improved in dry years. The high flow pulse number was improved greatly in dry years and slightly in wet years. This model can significantly improve the ecological integrity, and can provide a reference for the watershed with fish restoration tasks.

**Key words:** Fengman reservoir; hydrological regime; fish; ecological integrity; reservoir scheduling considering ecology

## 1 研究背景

自然条件下,河流水文情势的丰枯变化维持着水生态系统的稳定<sup>[1]</sup>。然而水库的“蓄丰补枯”调节坦化了天然径流,极大地改变了天然水文情势的变

化,产生了河流连通能力下降、下游湿地萎缩、生物栖息地丧失等一系列的生态问题<sup>[2,3]</sup>,因此在水库调度中必须要考虑生态问题。

目前水库生态调度主要是保证泄流满足最小生态需水量<sup>[4]</sup>,然而这种调度方式没有反映河流天然

收稿日期:2017-05-07 修回日期:2017-10-16 网络出版时间:2018-01-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180112.1654.004.html>

基金项目:国家水利部公益性项目(201401014-2);“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0402203);中国博士后基金(2017M611225)

Funds: Public Welfare Projects of Ministry of Water Resources (201401014-2); National Key Research and Development Program of China during the Thirteenth Five year Plan Period (2016YFC0402203); China Postdoctoral Science Foundation (2017M611225)

作者简介:高志强(1990),男,河南周口人,主要从事水库生态调度方面研究。E-mail: hbsygaoge@163.com

通讯作者:丁伟(1987),女,辽宁大连人,讲师,博士,主要从事水库综合调度方面研究。E-mail: w.eiding@dlut.edu.cn

状态下的峰现时间、洪水脉冲、涨水次数等水文情势信息,对生物的洄游、产卵、生长等过程带来不利影响<sup>[5]</sup>,因此生态调度除了满足水量的需求外,还需营造适宜的水文情势<sup>[6]</sup>。水文情势可通过生态指标量化,在调度时进行调控满足,由于指标众多<sup>[7-11]</sup>,如何合理地筛选关键指标进行控制十分重要。当生态监测资料比较充分时,可以采用数据挖掘法筛选指标,如 Yi Chen E. Yang<sup>[12]</sup>利用 GP 挖掘法筛选了 IHA 指标,并建立了鱼类丰度和 IHA 指标之间的函数关系;当生态监测资料缺乏时,一般按个人经验<sup>[13-16]</sup>和生态指标改变度大小的顺序<sup>[17-18]</sup>进行筛选,如 Suen<sup>[13]</sup>根据个人经验挑选代表石门水库下游生态系统的指标,研究了生态指标改善对兴利目标的影响;杨娜<sup>[17]</sup>通过筛选改变度最大的前 6 个水文情势指标,研究了丹江口水库在水量分配和天然模式两种调度情境下各指标的改善程度。但这两种方法都没有结合流域的生态保护对象筛选指标,可能导致所修复水文情势指标对保护对象的作用并不明显,达不到修复目的。

本文针对第二松花江流域丰满水库下游河段产漂浮性卵洄游鱼类资源严重衰退问题,筛选水文改变度大且适合鱼类需求的生态指标构建生态完整度函数,在保证发电和供水任务的基础上,建立考虑生态完整度的水库多目标优化调度模型,探讨调度结果对发电和供水的影响,分析各生态指标多年平均隶属度的变化情况以及年际变化情况。

## 2 数据与方法

### 2.1 丰满水库特征及流量数据

丰满水库位于我国第二松花江流域,坝址在吉林省吉林市城区上游 24 km 处,是一座以发电为主,兼有防洪、供水、养殖的综合水利枢纽工程,其电站装机为 1 002.5 MW,保证出力为 166 MW;水库下游的主要供水任务包括:长春市引水 11 m<sup>3</sup>/s,下游生态下泄 150 m<sup>3</sup>/s,吉林市区以下灌溉期(5月-6月)取水 350 m<sup>3</sup>/s,且生态下泄水量可兼作为下游的灌溉用水。

丰满水库始建于 1937 年,没有建库前河道的天然水文数据序列,只在 1946 年以后有连续的出库流量资料,为此本文在判别水文指标改变度时,以 1946-1990 年(1991 年丰满水库上游修建了白山水库)反推的入库流量数据序列作为下游河道天然水文数据序列;在水库调节计算时,采用 1946-2009 年丰满水库的入库流量数据。

### 2.2 漂浮性洄游鱼类调查

丰满水库坝址至饮马河口区段是产漂浮性卵的

洄游鱼类如“四大家鱼”的主要产卵区,分布有鳌龙河口、榆树、龙王庙、饮马河口等产卵场,见图 1。根据文献<sup>[9]</sup>,丰满水库下游鱼类多样性不断降低,主要是由于水库修建及调度管理、环境污染、私捕滥捞、河道采砂等造成的,其中水库的调度管理影响较大,对鱼类的洄游产卵、觅食生长过程带来不利影响,为此,丰满水库在满足发电和供水任务的基础上,还急需开展营造适宜鱼类水文情势的研究。

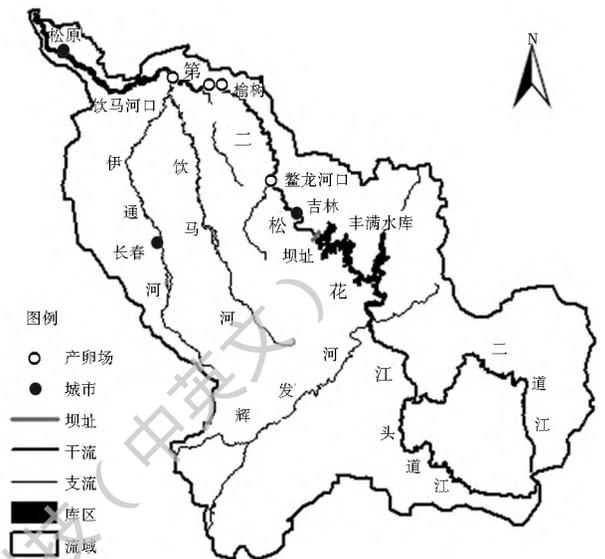


图 1 第二松花江流域及丰满水库下游产卵场分布

Fig. 1 The second Songhua River basin and distribution of spawning grounds in the lower reaches of Fengman Reservoir

### 2.3 生态目标函数确定方法

本文所提出的生态目标确定方法,首先计算生态指标改变度,然后选择改变度大且影响鱼类的指标作为待修复对象,最后利用二元比较法确定生态目标函数。

#### (1) 水文情势指标改变度计算。

首先根据出流过程对水文情势改变程度进行评价,采用 Richer<sup>[7]</sup>所提出的水文变化指标体系(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)来衡量水文情势的变化。为了便于水库实际调度的控制管理,这里定义涨水(落水)率指标的单位为流量,即首先求每次涨水(落水)前后的流量差值,然后将年内各次涨水(落水)前后流量差值的均值作为该年涨水率(落水)率指标。在判断水文情势变化程度时,主要评价调度后各水文情势指标相对于天然状态下的改变程度,本文采用高斯隶属度函数(式(1))反映水文情势指标相对于天然状态的隶属程度<sup>[15]</sup>,采用改变度函数评价各指标的改变程度(式(2))。鉴于丰满水库没有建库前的水文资料,本文以 1946-1990 年反推的入库流量序列作为下游河道天然流量序列。

$$\mu(x_i) = e^{-\frac{(x_i - m_i)^2}{\sigma_i^2}} \quad (1)$$

$$v(x_i) = 1 - \mu(x_i) \quad (2)$$

式中:  $\mu(x_i)$ 、 $v(x_i)$  分别为第  $i$  个水文指标的隶属度函数和改变度函数;  $x_i$  为调度后第  $i$  个水文指标年值;  $m_i$ 、 $\sigma$  分别为天然状态下第  $i$  个水文指标的均值和标准差。

在天然水文情势变化评估时, IHA 指标改变度大于 0.67 的, 认为是高度改变; 在 0.33~0.67 之间, 认为是中度改变; 小于 0.33 的认为是低度改变; 其中高度和中度改变的指标需要修复<sup>[20]</sup>。根据丰满水库各指标的改变程度, 如表 1 所示, 需要修复的指标有 26 个, 说明丰满水库的调度极大地改变了下游的天然水文情势。

表 1 IHA 指标计算结果

Tab. 1 The calculation results of IHA

指标名称	隶属度	改变度	改变度级别
1月平均流量	0.041	0.959	高度
2月平均流量	0.015	0.985	高度
3月平均流量	0.237	0.763	高度
4月平均流量	0.632	0.368	中度
5月平均流量	0.723	0.277	低度
6月平均流量	0.824	0.176	低度
7月平均流量	0.603	0.397	中度
8月平均流量	0.693	0.307	低度
9月平均流量	0.756	0.244	低度
10月平均流量	0.762	0.238	低度
11月平均流量	0.438	0.562	中度
12月平均流量	0.056	0.944	高度
最大1日流量	0.708	0.292	低度
最大3日流量	0.698	0.302	低度
最大7日流量	0.623	0.377	中度
最大30日流量	0.593	0.407	中度
最大90日流量	0.605	0.395	中度
最小1日流量	0.000	1.000	高度
最小3日流量	0.000	1.000	高度
最小7日流量	0.000	1.000	高度
最小30日流量	0.001	0.999	高度
最小90日流量	0.058	0.942	高度
零流量	0.427	0.573	中度
基流指数	0.000	1.000	高度
最大流量出现时间	0.548	0.452	中度
最小流量出现时间	0.446	0.554	中度
高流量脉冲数	0.498	0.502	中度
低流量脉冲数	0.025	0.975	高度
高脉冲持续时间	0.486	0.514	中度
低脉冲持续时间	0.223	0.777	高度
涨水率	0.364	0.636	中度
落水率	0.367	0.633	中度
反转次数	0.000	1.000	高度

## (2) 鱼类需求指标确定。

由于丰满水库坝址至饮马河口区段产漂浮性卵的洄游鱼类处于严重衰退状态, 洄游产卵规模减少, 本文以产漂浮性卵的洄游鱼类为保护对象, 选择水文情势改变度大且对洄游产卵及鱼卵发育有重要作用的指标进行修复。根据洄游产卵以及鱼卵发育时所需要的洪水脉冲、涨落水率以及涨水持续时间等水文情势刺激<sup>[21-22]</sup>, 确定鱼类需求指标如下: a. 高流量脉冲发生次数以及高流量脉冲持续时间指标, 许多鱼类已经适应了在高流量脉冲时节产卵, 高流量脉冲作为鱼类洄游产卵的信号, 决定鱼类产卵的次数与规模; b. 最大 1 日、3 日平均流量指标, 一般完成一次产卵过程需要 2~3 日, 这就要求有足够长时间的高流量阈值来保证产卵的进行; c. 最大流量出现时间指标, 该指标表征了鱼类产卵进入高峰期; d. 涨水率和落水率指标, 鱼类产卵的完成还需要一定的涨、落水率, 涨水时流速加快刺激鱼类排卵, 而排卵后需要一定的落水过程才能使鱼卵顺利漂向下游; e. 6 月-8 月份平均流量指标, 第二松花江流域鱼类的洄游产卵集中在 6 月-8 月份, 产卵后鱼卵的漂浮以及发育都需要一定的流量环境。

据此需求, 可从改变度比较大的 IHA 指标中选择跟鱼类相关的指标: 其中 IHA 高流量脉冲次数指标改变度为 0.502, 高流量脉冲持续时间指标改变度为 0.514, 均为中度改变, 需要修复; 平均最大 1 日、3 日流量指标改变度为 0.292、0.302, 属于低度改变, 不用考虑修复; 最大流量出现时间指标改变度为 0.452, 属中度改变, 需要修复; 涨、落水率指标的改变度分别为 0.636、0.633, 属于中度改变, 需要修复; 6 月-8 月份中只有 7 月平均流量指标改变度为 0.397, 属于中度改变, 需要修复。经以上分析, 按改变度大小排序, 需要修复的指标有落水率、涨水率、高脉冲流量持续时间、高流量脉冲数、最大流量出现时间及 7 月平均流量。

## (3) 生态完整度函数的构建。

由于所要修复的指标比较多, 都作为调度目标难以实现, 为此需要由所筛选的指标构建生态完整度函数(式(3)), 作为水库生态调度的目标。

$$P_e = \sum_{i=1}^n \omega_i \times \mu_i \quad (3)$$

式中:  $P_e$  为年生态完整度;  $\omega_i$  为第  $i$  个生态指标权重;  $\mu_i$  为第  $i$  个生态指标隶属度值。

在确定指标权重时, 目前的研究均按等权重处理<sup>[5-10]</sup>, 但各生态指标值的改变程度不同, 其修复时的重要程度就不同, 在确定生态目标时各指标权重

也应不同。为此,本文根据各指标值多年平均改变度大小的不同,利用二元比较法确定落水率、涨水率、高流量脉冲持续时间、高流量脉冲数、最大流量出现时间及7月平均流量指标的权重 $\omega$ 分别为0.244、0.244、0.163、0.163、0.105及0.081。

## 2.4 水库调度模型构建

### (1) 目标函数。

本文将生态改变度函数作为生态目标加入调度中,由于丰满水库以发电为主,模型考虑以生态完整度多年平均值、多年平均发电量和发电保证率作为调度目标,各目标越大越好:

$$\begin{cases} \max P_e = \frac{\sum_{k=1}^Y P_{ek}}{Y} \\ \max E_p = \frac{\sum_{k=1}^Y \sum_{j=1}^T N_{kj} \times \Delta t_j}{Y} \\ \max P_p = \frac{\sum_{k=1}^Y \sum_{j=1}^T N_{UM}(N_{kj} > N_b)}{Y \times T} \times 100\% \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_e$ 为生态完整度多年平均值; $E_p$ 为多年平均发电量; $P_p$ 为发电保证率; $Y$ 为调度年数; $N_{kj}$ 为第 $k$ 年第 $j$ 旬的平均出力; $\Delta t_j$ 为第 $j$ 旬内的小时数; $N_b$ 为保证出力; $N_{UM}(N_{kj} > N_b)$ 为计数函数,当条件满足时,则记为1,否则为0; $T$ 为一年内时段旬数,为36。

### (2) 约束条件。

水量平衡约束:

$$V_{t+1} = V_t + I_t - D_t - S U_t \quad (5)$$

水位约束:

$$\begin{cases} Z_d \leq Z_t \leq Z_l (\text{汛期}) \\ Z_d \leq Z_t \leq Z_n (\text{汛期}) \end{cases} \quad (6)$$

保证率约束:

$$\begin{cases} P_s = \frac{m}{Y \times T + 1} \times 100\% \geq 95\% \\ P_t = \frac{n}{Y \times T + 1} \times 100\% \geq 95\% \\ P_a = \frac{l}{Y \times T + 1} \times 100\% \geq 75\% \end{cases} \quad (7)$$

式中: $V_{t+1}$ 、 $V_t$ 分别为 $t+1$ 、 $t$ 时段末库容; $I_t$ 、 $D_t$ 、 $S U_t$ 分别为 $t$ 时段入库水量、泄流量、蒸发渗漏损失量; $Z_t$ 为 $t$ 时段的水位; $Z_d$ 为死水位; $Z_l$ 为汛限水位; $Z_n$ 为正常高水位; $m$ 、 $n$ 、 $l$ 为长春市供水、下游生态流量、灌溉不发生破坏的时段数; $P_s$ 、 $P_t$ 、 $P_a$ 分别为长春市供水、下游生态流量、灌溉的保证率。

### (3) 模型求解。

以丰满水库实际调度图作为初始解,调度图中

防弃水线、加大出力线和保证出力线上的水位作为模型优化变量,采用NSGA-II算法对上述多目标优化调度模型进行编程求解。

## 3 结果与讨论

以丰满水库1946–2009年入库流量作为输入资料,通过对模型求解得到108个帕累托(Pareto)解集,即108个生态调度方案,为了便于分析现有调度(实际出流)方案和考虑生态完整度调度方案的结果变化,选出使各目标及供水保证率取得最大值和最小值作为代表性方案,对应结果见表2。

表2 现有调度方案和考虑生态完整度的代表性调度方案运行结果

Tab.2 Results of current scheduling scenario and representative scheduling scenario considering ecological integrity

代表性方案	年均发电量 (亿kW·h)	发电保证率 (%)	生态完整度	供水保证率(%)		
				城市	生态	灌溉
现有调度方案	16.49	80.2	0.437	99.9	99.9	84.1
发电量最大	16.92	75.7	0.651	99.1	95.6	81.7
发电量最小	16.60	76.4	0.685	99.2	95.3	78.4
发电保证率最大	16.83	77.8	0.651	99.1	95.6	76.3
发电保证率最小	16.75	75.1	0.692	99.1	95.7	77.4
生态完整度最大	16.73	75.2	0.698	99.2	95.7	76.5
生态完整度最小	16.84	77.6	0.650	99.3	95.3	76.6
城市保证率最大	16.78	75.2	0.685	99.4	96.4	78.3
城市保证率最小	16.66	76.3	0.683	99.1	95.2	78.2
生态用水保证率最大	16.67	75.3	0.681	99.4	96.7	78.4
生态用水保证率最小	16.82	77.7	0.652	99.3	95.1	76.6
灌溉保证率最大	16.90	75.4	0.657	99.2	95.7	82.3
灌溉保证率最小	16.81	75.3	0.664	99.1	95.8	76.1

与现有调度方案所得结果相比,本文所建立的生态调度模型可将生态完整度由0.437增大到0.650以上,至少提高48%,生态效益改善显著。为使水库泄流的水文情势更贴近天然状态,在非汛期(9月–次年5月),为贴近入流小的情势,与现有调度图中各调度线相比,考虑生态完整度所得的调度图中各条调度线在非汛期比较高,使得泄流减少;在汛期(6月–8月),为贴近汛期入流大的情势,各条调度线比较低,使得泄流增大。调度图变化使发电量增加0.7%~2.6%,这是由于考虑生态完整度的调度线在非汛期3月–5月份比较高,即在较高水位时,水库仍进行限制供水,从而使得水库水位抬高,增加发电量;发电保证率降低2.4%~5.1%,但满足75%的约束,这主要是3月–5月份泄流受到限制,出力减少造成发电保证率降低;供水保证率都满足约束,

但均有所降低: 长春市用水保证率降低 0.5% ~ 0.8%, 最小生态保证率降低 3.2% ~ 4.8%, 灌溉保证率降低 1.8% ~ 8.0%, 同样由于调度图在 3 月-5 月份较高, 泄流受到限制所致。总体来看, 本文所建立的生态调度模型, 在保证发电和供水任务的基础上, 可显著增大生态完整度, 具有可行性。

进一步分析各生态指标多年平均改善程度, 选生态完整度最大的调度方案与现有调度方案相比较, 考虑生态完整度调度方案中的落水率、涨水率、高流量脉冲持续时间、高流量脉冲数、最大流量出现时间、7 月平均流量指标隶属度分别增加 0.083、0.112、0.397、0.261、0.273、0.153, 见图 2。各指标变化及其生态意义如下: (1) 落水率指标隶属度由 0.367 增加到 0.450, 天然状态下落水率为 109.8 m<sup>3</sup>/s, 由现有调度方案的 175 m<sup>3</sup>/s 降低到 124.1 m<sup>3</sup>/s, 减缓了现有调度方案落水过快所导致的鱼卵搁浅问题; (2) 涨水率指标隶属度由 0.364 增加到 0.476, 天然状态下 117.3 m<sup>3</sup>/s, 由现有调度方案的 55.8 m<sup>3</sup>/s 增加到 70.4 m<sup>3</sup>/s, 从而增强了对鱼类产卵刺激, 加大了鱼类的产卵规模; (3) 高脉冲持续时间指标隶属度由 0.486 增加到 0.883, 天然状态下为 9.1 d, 由现有调度方案 6.8 d 增加到 8.7 d, 从而有利于加大鱼类的产卵规模; (4) 高流量脉冲数指标隶属度由 0.498 增加到 0.759, 天然状态下发生 24.7 次, 由现有调度方案 11.9 次增加到 18.5 次, 增加鱼类产卵的可能性; (5) 最大流量出现时间指标隶属度由 0.548 增加到 0.821, 天然状态下出现时间为第 202 d(7 月下旬), 由现有调度方案第 175 d(6 月下旬) 推迟到第 195 d(7 月中旬); (6) 7 月平均流量指标隶属度由 0.603 增加到 0.756, 天然状态

下平均流量为 914.2 m<sup>3</sup>/s, 由现有调度方案下的 539.7 m<sup>3</sup>/s 增加到 778.3 m<sup>3</sup>/s, 为鱼类的产卵以及鱼类的漂浮提供了良好的流量环境。

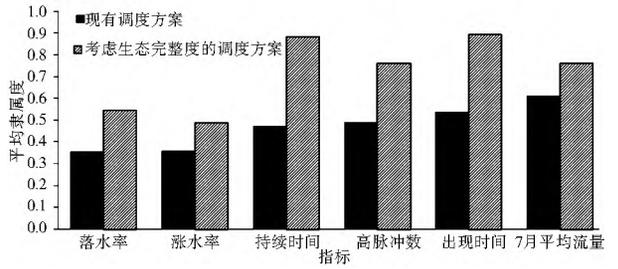


图 2 现有调度方案和考虑生态完整度调度方案下各生态指标隶属度多年平均值

Fig. 2 Mean annual membership of each ecological indicator under current scheduling scenario and proposed scenario

两方案下生态完整度年际变化过程见图 3, 考虑生态完整度调度方案大部分年份的生态完整度比现有调度方案大, 尤其在枯水年及连续枯水年更为显著, 生态完整度增加到 0.4 左右。以下简要分析对鱼类产卵影响最大的涨水率和高流量脉冲数的年际变化过程: (1) 如图 4 所示, 总体上涨水率在丰水年和平水年的隶属度比枯水年大, 需要对枯水年涨水率指标进行改善, 该模型使涨水率在枯水年由现有调度方案下的 10.24 m<sup>3</sup>/s 增加到 31.12 m<sup>3</sup>/s, 使鱼类在枯水年产卵刺激增强, 这是由于考虑生态完整度的调度线在汛期相对较低, 使得泄流更加容易; (2) 由于在汛期调度线比较低, 使得水库弃水量及弃水次数增加, 高流量脉冲次数也随之增加; 但对于汛期来水比较大的丰水年, 见图 5, 在 1954 年、1956 年等特丰水年, 汛期泄流次数多, 使得高流量脉冲次数比天然状态下的次数多, 反而造成其相对于天然状态下的指标隶属度降低。

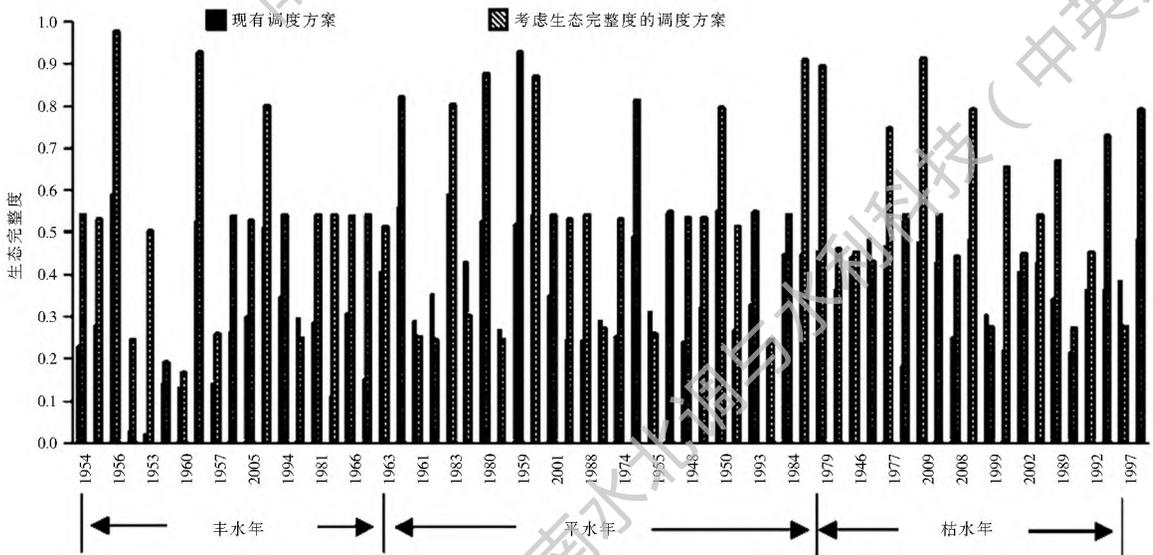


图 3 现有调度方案和考虑生态完整度调度方案下生态完整度年际变化

Fig. 3 Inter-annual variability of ecological integrity for the current scheduling scenario and proposed scenario

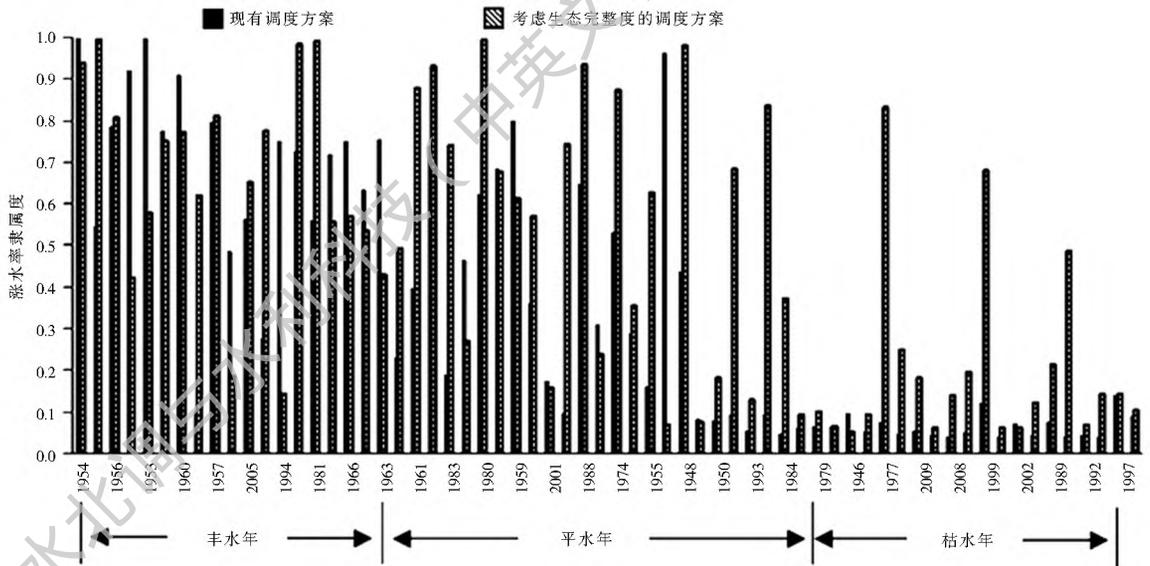


图4 现有调度方案和考虑生态完整度调度方案下涨水率指标隶属度年际变化

Fig. 4 Inter-annual variability of the membership of flow rising rate for current scheduling scenario and proposed scenario

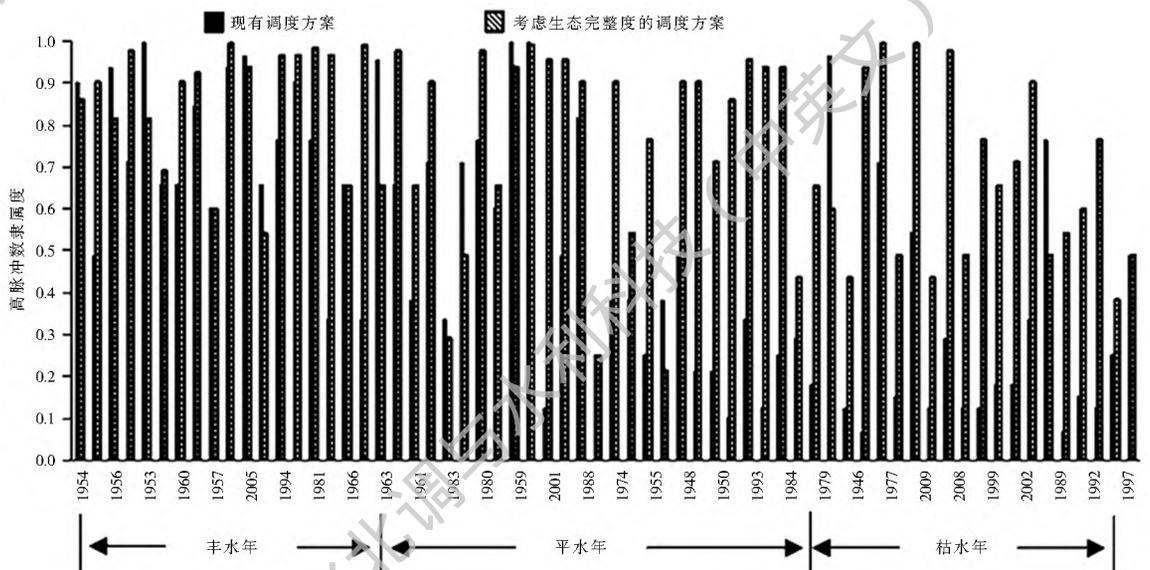


图5 现有调度方案和考虑生态完整度调度方案下高流量脉冲数指标隶属度年际变化

Fig. 5 Inter-annual variability of the membership of high flow pulse number for current scheduling scenario and proposed scenario

## 4 结论

本文主要针对丰满水库下游天然水文情势改变,产漂流性卵洄游鱼类资源衰退问题,在满足发电和供水的基础上,进一步营造了适宜鱼类的水文情势。通过筛选水文情势改变度大且和鱼类洄游产卵相关的指标构建生态完整度函数,建立了考虑生态完整度的水库多目标优化调度模型,探讨了调度结果对发电和供水的影响,分析了各生态指标多年平均隶属度的变化情况以及下游生态流量年际变化情况,主要有以下结论。

(1)丰满水库坝址至饮马河口区段营造适宜水文情势的研究表明,该调度模型在满足发电和用水的基础上,可将下游水文情势的生态完整度提高48%,但会降低发电量以及长春市、下游生态下泄和

灌溉供水保证率。

(2)各指标多年平均隶属度的分析表明,生态完整度中落水率、涨水率、高流量脉冲持续时间、高流量脉冲数、最大流量出现时间、7月平均流量指标隶属度分别增加0.083、0.112、0.397、0.261、0.273、0.153,为鱼类的洄游产卵以及鱼卵发育创造了更有利的条件。

(3)生态完整度和指标隶属度年际变化分析表明,生态完整度在枯水年及连续枯水年改善程度更佳,生态完整度达到0.4左右;涨水率指标在枯水年改善程度比较好,高流量脉冲数指标在枯水年改善程度大、丰水年改善程度小。

由于第二松花江流域的生态资料所限,本文仅从流量角度为下游河段营造适宜的水流下泄模式,后期研究还应进一步考虑水温、营养物质分布等生态要素。

## 参考文献(References):

- [1] 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.(LI C,PENG J,LIAO W G.Study on the eco hydrological factors and flow regime requirement on spawning of four major Chinese carps in the middle reaches of Yangtze River[J].Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2006,4(3):170-176.(in Chinese)) DOI:10.13244/j.cnki.jiwhr.2006.03.002.
- [2] 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.(KANG L,HUANG Y Y,YANG Z X.Reservoir ecological operation model and its application[J].Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(2):134-141.(in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2010.02.008.
- [3] 李清清,覃晖,陈广才,等.长江中游水文情势变化及对鱼类的影响分析[J].人民长江,2012(11):86-89.(LI Q Q,QIN H,CHEN G C.Analysis on hydrologic alteration of middle Yangtze River and its impact on fish[J].Yangtze River,2012,43(11):86-89.(in Chinese)) DOI:10.16232/j.cnki.10014179.2012.11.003.
- [4] 汤洁,余孝云,林年丰,等.生态需水的理论和方法研究进展[J].地理科学,2005,25(3):3367-3373.(TANG J,SHE X Y,LIN N F.Advances in researches on the theories and methods of eco environmental water demand[J].Scientia Geographica Sinica,2005,25(3):3367-3373.(in Chinese))
- [5] 董哲仁,张晶.洪水脉冲的生态效应[J].水利学报,2009,40(3):281-288.(DONG Z R,ZHANG J.Ecological effect of flood pulses[J].Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(3):281-288.(in Chinese))
- [6] 李翀,廖文根.河流生态水文学研究现状[J].中国水利水电科学研究院学报,2009,7(2):301-306.(LI C,LIAO W G.Research status of riverine eco hydrology[J].Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2009,7(2):301-306.(in Chinese)) DOI:10.13244/j.cnki.jiwhr.2009.02.001.
- [7] RICHTER B D,BAUMGARTNER J V,POWELL J,et al.A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J].Conservation Biology,1996,10(4):1163-1174.DOI:10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x.
- [8] GROWNS J,MARSH N.Characterisation of flow in regulated and unregulated streams in eastern Australia[M].Cooperative Research Centre for Freshwater Ecology,2000.
- [9] JIAN-PING S,EDWIN H E,WAYLAND E J.Ecohydrologic indicators for rivers of Northern Taiwan[C].ASCE/EWRI World Water and Environmental Resources Congress,Salt Lake City,U T,USA:ASCE,2004:143-151.
- [10] 徐天宝,彭静,李翀.葛洲坝水利工程对长江中游生态水文特征的影响[J].长江流域资源与环境,2007,16(1):72-75.(XU T B,PEN J,LI C.Influence of Gezhouba dam on the eco hydrological characteristics in the middle reach of the Yangtze River[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2007,16(1):72-75.(in Chinese))
- [11] 张洪波,黄强,彭少明,等.黄河生态水文评估指标体系构建及案例研究[J].水利学报,2012,43(6):675-683.(ZHANG H B,HUANG Q,PENG S M.An eco hydrologic index system and its application on the Yellow River[J].Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(6):675-683.(in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2012.06.005.
- [12] YI-CHEN E. YANG, XIMING C, EDWIN E H. Identification of hydrologic indicators related to fish diversity and abundance: A data mining approach for fish community analysis[J]. Water Resources Research, 2008, 44(4). DOI: 10.1029/2006WR005764.
- [13] SUEN J P, EHEART J W. Reservoir management to balance ecosystem and human needs: Incorporating the paradigm of the ecological flow regime[J]. Water Resources Research, 2006, 42(W034173). DOI: 10.1029/2005WR004314, 2006.
- [14] 杨扬.考虑生态需水分析的水库调度研究[D].大连:大连理工大学,2012.(YANG Y.Research on reservoir operation considering ecological water demand analysis[D].Dalian:Dalian University of Technology,2012.(in Chinese))
- [15] 王海霞.考虑生态目标的水库引水与供水联合调度研究[D].大连:大连理工大学,2015.(WANG H X.Research on the joint operation of water diversion and water supply considering ecological objective[D].Dalian:Dalian University of Technology,2015.(in Chinese))
- [16] 王海霞,张弛,周惠成.引水条件下水库生态调度方法研究[J].水资源与水工程学报,2016,27(1):1-6.(WANG H X,ZHANG C,ZHOU H C.Research on ecological operation method under water diversion condition[J].Journal of Water Resources & Water Engineering,2016,27(1):1-6.(in Chinese)) DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2016.01.01.
- [17] 杨娜,梅亚东,于乐江.考虑天然水流模式的多目标水库优化调度模型及应用[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(1):85-89.(YANG N,MEI Y D,YU L J.Mult-objective reservoir optimal operation model considering natural flow regime and its application[J].Journal of Hohai University(Natural Sciences),2013,41(1):85-89.(in Chinese)) DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.01.016.
- [18] 左其亭,梁士奎.基于水文情势分析的闸控河流生态需水调控模型研究[J].水力发电学报,2016(12):70-76.(ZUO Q T,LIANG S K.Regulation model of ecological water demands by sluice controlled rivers based on hydrological regime analysis[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2016,35(12):70-76.(in Chinese))
- [19] 潘晓健.考虑鱼类多样性的丰满水库生态调度研究[D].大连:大连理工大学,2016.(PAN X J.Study on fengman reservoir ecological operation based on fish diversity[D].Dalian:Dalian University of Technology,2016.(in Chinese))
- [20] 杨娜,梅亚东,尹志伟.建坝对下游河道水文情势影响 RVA 评价方法的改进[J].长江流域资源与环境,2010,19(5):560-565.(YANG N,MEI Y D,YIN Z W.Impact assessment of dams on the flow regime of lower river by improved RVA[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2010,19(5):560-565.(in Chinese))
- [21] 张陵蕾,吴宇雷,张志广,等.基于鱼类栖息地生态水文特征的生态流量过程研究[J].水电能源科学,2015,33(3):10-13.(ZHANG L L,WU Y L,ZHANG Z G,et al.Determination of ecological flow regime based on eco hydrological characteristics of fish habitat[J].Water Resources and Power,2015,33(3):10-13.(in Chinese))
- [22] 骆辉煌,杨青瑞,李倩,等.长江上游珍稀特有鱼类保护区鱼类生境特征初步研究[J].淡水渔业,2014,44(6):44-48.(LUO H H,YANG Q R,LI Q.A preliminary study on fish habitat characteristics in the national nature reserve for the rare and endemic fishes in the upper reaches of the Yangtze River[J].Freshwater Fisheries,2014,44(6):44-48.(in Chinese))