

# 水文变异条件下水库生态调度研究

徐淑琴 苏鑫 王莉莉 路豪杰 景晓彤

(东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为了降低水库调度对河流生态系统的影响, 针对尼尔基水库的生态问题, 结合水文变异诊断系统, 制定了有效的生态调度方案。首先, 利用水文变异诊断分析水文时间序列, 确定人类不同扰动下的时间节点, 并考虑东北地区具有冰封期的特点, 推求了混合时间尺度下的天然、次天然及现状生态径流过程; 其次, 建立以最大发电量为目标、多种生态径流过程为约束的尼尔基水库生态调度模型; 最后, 根据水量平衡方程生成初始种群, 采用归一化方法将变量约束至同一感知半径内, 利用萤火虫算法优化5种约束条件下的调度过程。结果表明, 在现有调度规则下, 河流原有的生态系统得不到有效的保护, 对于来水较多的年份弃水较多, 水量得不到合理的利用; 考虑水文变异的生态调度, 可以在水量不足的年份以降低生态目标的方式为决策者提供较低生态保证程度的调度方案, 减轻对河流生态系统的破坏程度; 水库发电目标与生态目标间的矛盾在枯水期较为明显, 而在丰水期可以得到有效地缓解, 需要决策者在不同时期做出科学的决策。

**关键词:** 水库; 生态调度; 变异点诊断; 混合时间尺度; 水量平衡方程; 萤火虫算法

**中图分类号:** TV697.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0146-09

## Reservoir Ecological Operation under Condition of Hydrological Variability

Xu Shuqin Su Xin Wang Lili Lu Haojie Jing Xiaotong

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In order to reduce the effect of reservoir operation on river ecological system and solve the ecological problems of Nilki reservoir, an effective ecological scheduling scheme was developed combined with the hydrological variation diagnosis system. Firstly, the hydrological time series was analyzed by hydrological diagnosis method to determine the time node of different human disturbances. Meanwhile, considering the icebound season characteristics in Northeast China, the natural ecological, poor natural and current runoff processes under the mixed time scale were calculated. Secondly, the Nilki reservoir ecological scheduling model restrained by multiple ecological runoff process was established aiming at maximizing the power generation capacity. Finally, according to the water balance equation, the initial population was generated by normalized method to restrict the variables to the same perception radius, and the scheduling process under five kinds of constraints was optimized by firefly algorithm. The results showed that the original river ecological system was not protected effectively under the existed dispatching rules, water was not reasonably used in wet year. Considering the hydrological variation of the ecological scheduling, a low ecological assurance level scheduling scheme was provided for decision-makers by reducing ecological objectives in dry year to reduce the damage to the river ecosystem. The contradiction between hydropower generation and ecological objectives was more obvious in dry season, and it was effectively alleviated in wet season. Therefore, decision-makers need to make scientific decisions in different periods.

**Key words:** reservoir; ecological operation; variation points diagnosis; mixing time scale; water balance equation; firefly algorithm

收稿日期: 2015-10-22 修回日期: 2015-11-30

基金项目: 黑龙江省教育厅科研项目(11551044)和东北农业大学农业水土工程创新团队项目

作者简介: 徐淑琴(1964—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源优化利用与管理及水库调度研究, E-mail: 1210569246@qq.com

## 引言

水库优化调度是一个具有强约束、非线性、多阶段等特点的组合优化问题,按其调度目标可以分为防洪调度、兴利调度及综合利用调度,而随着水库生态问题的日益显现<sup>[1]</sup>,生态调度已经成为了一种新型调度目标,被国内外学者广泛研究,如 CASTELLETTI 等介绍了水库调度模型中加入最小生态流量约束条件方程,可以基本实现对河流的生态保护<sup>[2]</sup>;梅亚东等将 Tennant 方法和不同保证率下的流量取值结合起来,求得生态流量需求的最低值约束,并应用到雅砻江下游梯级水库的生态优化调度中,比较分析了不同的最小生态流量取值对水库发电效益的影响<sup>[3]</sup>;PINTHONG 等提出了一种混合遗传神经网络算法来提高水库的水资源管理制度效率<sup>[4]</sup>;康玲等计算了四大家鱼产卵所需的洪水脉冲,以及河道的最小和适宜生态流量,建立了丹江口水库调度模型<sup>[5]</sup>;王煜等构建了考虑中华鲟产卵期需水要求的葛洲坝水库生态调度模型<sup>[6]</sup>。

对于大部分研究而言,生态流量的推求没有细致地考虑生态变异的影响或者仅凭借经验直接选取人类扰动较小的某一时段径流资料,影响结果的可信度,而且在生态调度时也没有考虑多种典型年下的生态调度过程,对于决策者调度方案的制定帮助较小。因此,本文利用水文变异诊断的方法,对水文时间序列进行划分,推求人类不同扰动下的生态径流过程,作为水库生态调度的约束条件,求解5种约束条件下不同典型年的调度结果。对结果进行比较和分析,探究现行调度方案对生态流量的满足程度、不同典型年下的生态调度过程及部分调度结果产生的原因,降低水库调度对河流生态系统的不利影响。

## 1 变异点诊断

水文时间序列是指某种水文特征值随时间变化的一系列观测值。而在一定时期内气候条件、自然地理条件及人类活动等因素的影响下,水文时间序列在某个时间节点前后,统计规律会发生显著变异,这一变化时刻称为水文过程变异点。

如果水文序列存在变异点,可以做出如下假定:当地的生态系统已经适应了变异前的水文状态,变异后的水文变化已影响了当地的生态平衡<sup>[7]</sup>。由此可以推断出,水文序列的变异过程反映了生态系统的变化,即生态变异。变异点的识别需要重点区分变异点的驱动源<sup>[8]</sup>。由于气候条件、自然地理条件及人类活动被认为是生态变异的主要因素,前两者属于自然进化的条件,不应将其引发的变异作为

变异点,而应该将人类扰动作为生态变异的主要驱动源。

为了更好地模拟不同时期人类扰动下的生态水文特征,利用变异点识别的方法,推求不同时期的生态流量。

### 1.1 初步诊断

根据现有资料,选取1951—2010年共60a的年均入库流量资料,采用过程线法、滑动平均法和Hurst系数法对水文序列进行初步诊断。观察诊断结果可知(图1、2),1963年和2000年前后的水文序列均值、年均累积入库流量过程线拟合函数的斜率存在显著变异,初步判断1963年和2000年可能为变异点。

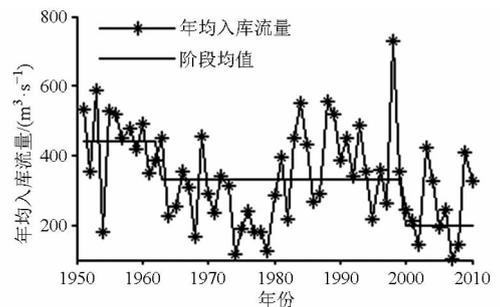


图1 年均入库流量滑动平均过程线

Fig. 1 Moving average process of annual storage volume

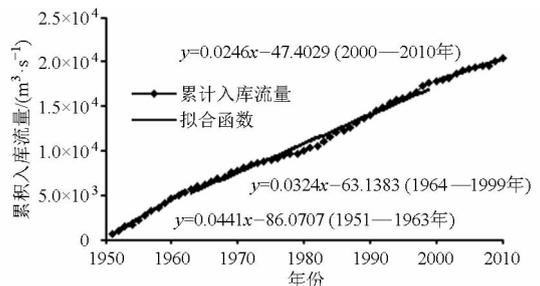


图2 年均入库流量累积过程线

Fig. 2 Cumulative process of annual storage volume

对60a的水文序列进行计算,求得该序列的Hurst系数为0.7056,说明该序列具有正持续性,不是纯随机序列,且发生了变异,分析原因可能是受到了人类活动的影响。

### 1.2 详细诊断

水文序列进行详细诊断时,常采用的趋势和跳跃成分的识别与检验方法主要包括: $F$ 检验法、滑动 $F$ 检验法、 $T$ 检验法、滑动 $T$ 检验法、 $R/S$ 分析法与Hurst指数、Brown-Forsythe检验法、Bayesian变点分析法、秩和检验法、滑动秩和检验法、Mann-Kendall检验法<sup>[9-10]</sup>、有序聚类法、信息二分割法等。雷红富等通过实例分析对上述几种方法的诊断能力进行比较、排序,结果为秩和检验效果最优,其次为有序聚类法、Brown-Forsythe检验法、Bayesian变点

分析法、滑动  $T$  检验法,再次为 Mann-Kendall 检验法、滑动  $F$  检验法,效果最差的为信息二分割法、 $R/S$  分析法<sup>[11]</sup>。据此,选择秩和检验,滑动  $T$  检验法及有序聚类法对 1951—2010 年的入库流量序列进行变异点检验,结果如表 1、图 3、图 4 所示。

表 1 秩和检验法检验结果

Tab.1 Rank summation jump point detection result

水文序列	$Z$	$P$	水文序列	$Z$	$P$
1951—1962 年	-2.983	0.003	1951—1999 年	-2.378	0.017
1963—2010 年			2000—2010 年		

注: $Z$  为秩和检验统计量, $P$  为概率值。

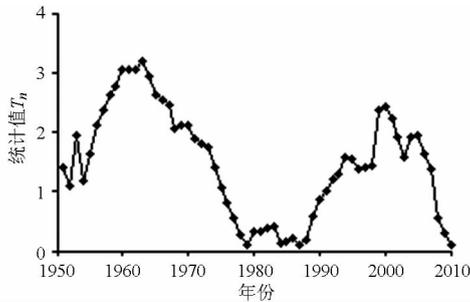


图 3 滑动  $T$  法检验结果

Fig.3 Moving  $T$  method jump point detection result

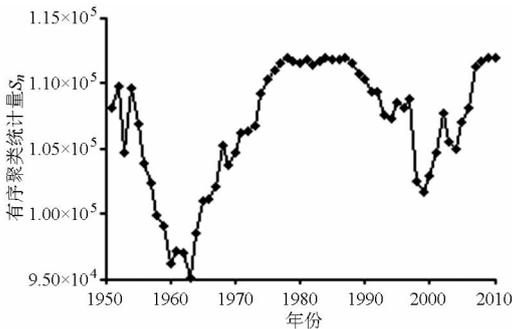


图 4 有序聚类统计结果

Fig.4 Sequential clustering statistic result

由表 1 可知,2 组水文序列的秩和检验结果  $P$  值均小于 0.05,说明在该时间点前后的水文序列存在显著差异,检验结果可以表述为 1963 年和 2000 年为变异点;由图 3 可以看出 1963 年, $T$  统计值最大,可以确定为变异点,而对于 2000 年来说,其  $T$  统计值为局部最高点,也可拟定 2000 年为变异点;由图 4 分析可知,1963 年,对应的有序聚类统计量最小,可将其确定为变异点,而 1999 年所对应的统计量为局部最小值,也可拟定为变异点。综合比较可知,1963 年与 2000 年为变异点。

根据石建军等<sup>[8]</sup>的方法,利用上述的变异点对 1951—2010 年的水文序列进行划分,定义 3 种状态下的水文序列,1951—1962 年的水文序列定义为天然状态下的水文序列,用于求解天然生态流量;1963—1999 年的水文序列定义为弱人类干扰下的

水文序列,用于推求次天然生态流量;2000—2010 年的水文序列定义为强人类干扰状态下的水文序列,用于推求现状生态流量。

## 2 尼尔基水库生态流量推求

### 2.1 生态流量计算

随着越来越多的学者开始重视流域的生态需水问题,使得生态需水量的计算方法大量涌现,从全球范围来看,其数量超过 200 种<sup>[12]</sup>。这些方法大致可分为水文指标方法、水力学方法、生物栖息地法以及整体法。

根据现有资料,选择水文指标法来进行生态流量的推求。水文指标法是生态需水评价中最简单、需要数据最少、并依据历史水文数据确定需水量的方法,其优点为不需要现场测量,易于应用。

李捷等以水文指标法为基础,提出了逐月频率计算法<sup>[13]</sup>,对于我国东三省地区来说,冬季的冰封期通常为 11 月一次年 3 月,这一时段生物,由于低温气候的影响,行动较为缓慢,对生态需求不高,而 4—10 月为非冰封期,这一时期气候回暖,生物开始进行觅食、繁殖等生物行为,会对生态的要求开始提高,考虑到北方气候的特殊性并结合逐月频率计算法提出了一种逐月频率与逐旬频率相结合的计算方法,即在冰封期(11 月一次年 3 月)以逐月频率计算方法确定最大、最小、适宜生态流量,其他时期(4—10 月)以逐旬频率计算方法确定最大、最小、适宜生态流量。计算方法描述如下:

#### (1) 最小(大)生态流量计算

将流量资料划分为逐月流量资料和逐旬流量资料,其中 11 月一次年 3 月为逐月流量资料,4—10 月逐旬流量资料,然后取每个月或旬序列的最小(大)值作为最小(大)生态流量。并引入零值处理机制,解决最小生态流量取零的问题,若遇到零值,则计算该月或旬序列的流量的多年平均值,应用 Tennant 法,取多年平均流量的 10% 来替代零值。

#### (2) 适宜生态流量计算

对逐月和逐旬径流序列进行排频计算,取每个月或旬序列的保证率为 50%,即序列中值作为适宜生态流量。

根据上述方法,计算天然生态流量、次天然生态流量、现状生态流量、不考虑变异的生态流量,并利用 Tennant 法对计算结果进行评价,结果见图 5 及表 2。

观察图 5 可以发现采用新的计算方法推求的生态径流过程,在非冰封期因为时间尺度小,可以更加

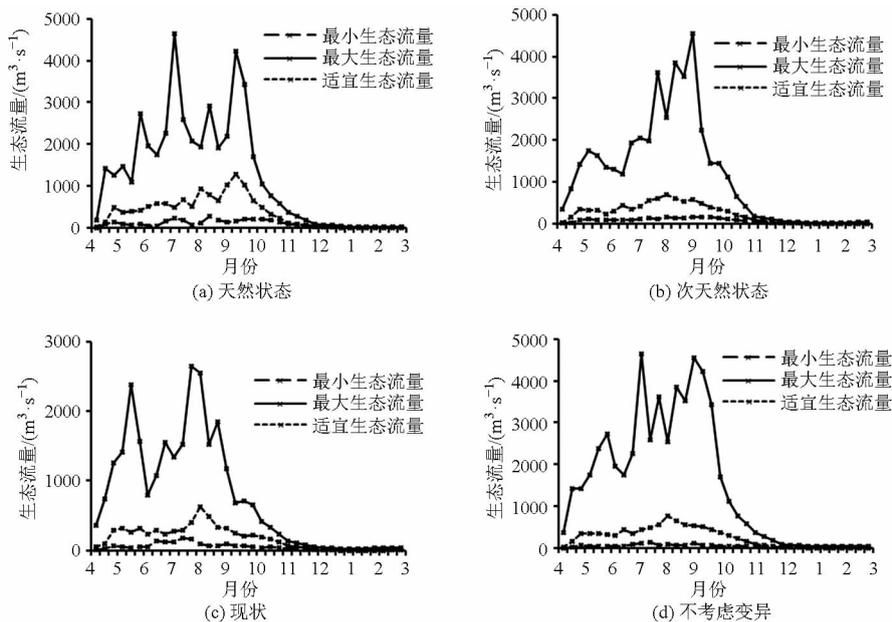


图 5 生态径流过程

Fig. 5 Ecological runoff process

表 2 Tennant 法评价结果

Tab. 2 Evaluation result of Tennant method

径流 条件	占年均流量的比重/%				Tennant 法评价结果			
	最小生态径流		适宜生态径流		最小生态径流		适宜生态径流	
	10月—次年 3月	4—9月	10月—次年 3月	4—9月	10月—次年 3月	4—9月	10月—次年 3月	4—9月
天然状态	15.21	36.45	32.62	178.49	一般	好	好	最大
次天然状态	8.22	30.67	20.35	121.83	严重退化	好	较好	最大
现状	4.25	24.45	15.40	87.27	严重退化	较好	一般	最佳
不考虑变异	4.25	18.58	21.43	124.72	严重退化	一般	较好	最大

精确地反映生态径流的趋势,可对生态径流进行更好模拟。

### 2.2 生态流量结果评价

Tennant 法是水文指标法中应用较广泛的方法,计算简单,有河流生态试验作基础,对生态基流的计算具有很强的适用性,一旦建立了流量与水生生态系统之间的关系,需要的数据就相对较少,也不需要大量的野外工作,可以在生态资料缺乏的地区使用<sup>[14]</sup>。

在 Tennant 法中,以河道内流量占多年平均流量的百分数为基础,将保护水生态和水环境的河流流量推荐值分为最大允许极限值、最佳范围值、极好状态值、很好状态值、良好状态值、一般或较差状态值、差或最小状态值和极差状态值等 1 个高限标准、1 个最佳范围标准和 6 个低限标准。在上述 6 个低限标准中,依据水生生物对环境的季节性要求不同,分为 4—9 月份鱼类产卵育肥期和 10 月—次年 3 月份一般用水期。在进行生态流量评价时,根据计算结果确定该河道内的生态状况所属标准。

Tennant 法的评价结果可以反映河宽、水深和流速对水生生物生长环境的满足程度,评价或估算生态需水量,应用简单方便,容易将计算结果和水资源规划相结合,具有宏观指导意义。

从表 2 可以看出,在人类活动扰动下,河流的生态环境逐步退化,而且在不考虑水文变异的径流条件下,其生态流量的计算值与天然径流条件差别较大,最小生态流量的评价结果也不理想,若水库据此进行生态调度,长此以往,对河流生态系统的保护是不利的。

### 3 尼尔基水库生态调度模型

目前,国内外学者对水库生态调度模型的研究可以归纳为 3 种,分别为生态流量约束型模型、生态流量目标型模型以及生态价值目标型模型<sup>[15]</sup>。考虑到本文的研究目的,选择生态流量约束型模型对尼尔基水库的生态调度进行求解。

#### 3.1 生态调度模型

为了探究在满足不同生态径流约束的条件下,

水库发电量的变化情况,从而制定不同典型年的生态调度方案,选择以最大发电量作为调度目标,目标函数为

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

式中  $E$ ——调度期总的发电量

$T$ ——计算时段总数

$N_t$ ——时段出力  $\Delta t$ ——计算时段

约束条件:

水量平衡约束

$$(I_t - Q_t - S_t - Q_{loss,t}) \Delta t = V_{t+1} - V_t \quad (2)$$

水位约束

$$Z_{\min} \leq Z_t \leq Z_{\max} \quad (3)$$

水轮机最大过机流量约束

$$Q_t \leq Q_{\max} \quad (4)$$

电站出力约束

$$N_{\min} \leq N_t \leq N_{\max} \quad (5)$$

电站出力特性

$$P_t = f_t(H, Q) \quad (6)$$

生态约束

$$Q_{\min,t} \text{ 或 } Q_{\text{fit},t} \leq (Q_t + S_t) \leq Q_{\max,t} \quad (7)$$

非负约束:上述各变量非负。

式中  $V_{t+1}$ 、 $V_t$ —— $t$  时段末和时段初的库容

$I_t$ ——入流量

$Q_t$ 、 $S_t$ ——发电流量和弃水流量

$Q_{loss,t}$ ——水库各时段的蒸发和渗漏损失之和

$Z_{\min}$ 、 $Z_{\max}$ ——水库死水位和水库正常蓄水位  
(或汛限水位)

$Q_t$ 、 $Q_{\max}$ ——水电站时段发电流量和水轮机组的最大过机流量

$N_{\min}$ 、 $N_{\max}$ ——水电站的保证出力值及额定出力值

$Q_{\min,t}$ 、 $Q_{\text{fit},t}$ 、 $Q_{\max,t}$ ——最小生态流量、适宜生态流量和最大生态量

## 3.2 模型求解

### 3.2.1 模型求解方法

根据目标函数以及约束条件,选择萤火虫算法,对生态调度模型进行求解。

萤火虫算法是模拟自然界中萤火虫成虫发光的生物学特性发展而来,也是基于群体搜索的随机优化算法<sup>[16]</sup>。目前,该算法分为 GSO 和 FA 两个版本。GSO 算法由 KRISHNANAND 等提出,用于优化搜索高维空间<sup>[17]</sup>;FA 算法由剑桥学者杨新社提出。这两者的仿生原理相同,但在具体实现方面有一定的差异。

本文选择的萤火虫算法为 GSO 算法。

### 3.2.2 萤火虫算法在水库调度中的应用

仿生智能算法越来越多的被人们应用到水库调度的寻优模型中,如王敬等利用主-从种群混合进化的粒子群算法对限制供水规则与目标蓄水量进行优化求解<sup>[18]</sup>,黄强等利用基于免疫进化的蚁群算法求解调度模型来完成对水库群供水调度操作规线的绘制<sup>[19]</sup>,明波等应用改进的布谷鸟算法进行梯级水库优化调度研究<sup>[20]</sup>。而在智能算法的使用过程中,多数都是给定每一时刻的水位(或库容)约束上下限,通过随机生成多组种群,将其代入适应度函数,在求解过程中加入约束条件,来寻找最优值。可是,由水量平衡方程可知,水库每一时段的水位值之间是有联系的,若按照以往的方法会生成许多无关解,对寻优过程带来不便。因此,本文提出一种利用水量平衡方程来生成初始种群的方法,缩小寻优范围,代替智能算法中的初始种群生成机制。

水量平衡方程及其相关约束为

$$\begin{cases} V_{t+1} = V_t + (I_t - Q_{x,t} - Q_{loss,t}) \Delta t \\ V_{\min,t} \leq V_t \leq V_{\max,t} \end{cases} \quad (8)$$

式中  $Q_{x,t}$ ——下泻流量,包括发电流量和弃水流量

对于年调节水库来说,初始库容为已知量,根据现有调度规则或者生态约束,可知下一时段下泻流量的上下限,若无具体要求,下泻流量上限取水轮机最大过机流量,下限取水的最小下泻流量,由此可以推求下一时段的库容上下限及其库容:

上限

$$V_{\max,t+1} = V_t + (I_t - \min(Q_{x,t}) - Q_{loss,t}) \Delta t \quad (9)$$

下限

$$V_{\min,t+1} = V_t + (I_t - \max(Q_{x,t}) - Q_{loss,t}) \Delta t \quad (10)$$

库容

$$V_{t+1} = V_{\min,t+1} + \text{rand}(V_{\max,t+1} - V_{\min,t+1}) \quad (11)$$

式中 rand——0 与 1 之间的随机数

以此类推,便可获得所需种群数目的每一时段库容,在这一过程中还需加入其他约束条件,具体做法见 3.2.3 节。

GSO 算法在初始阶段需要定义相关参数,其中感知半径及决策半径的取值尤为重要,而对于水库来说,其每一时段的库容上下限并不相同,因此无法定义其感知半径及决策半径,本文采用归一化的方法解决此问题,具体步骤为:根据水位约束条件,可以确定每一时段的水位上下限,将每一组值进行归一化处理,这样就将每一时段的值都约束在 $[-1, 1]$ 范围内,由此可以定义感知半径及决策半径均为 1。

### 3.2.3 模型寻优求解过程

(1)原有调度方案下的水库优化调度过程

为了保证水库调度的实际意义,更好地讨论生

态调度对目标值的影响及现行调度方案的生态满足情况,需要对现行调度方案进行优化处理,获得最优的目标值。

依据原有调度方案,确定冰封期(11月—次年3月)以月为时间尺度,非冰封期(4月—10月)以旬为时间尺度,由此可以确定出总时段数  $T=26$ ,利用3.2.2节所述方法生成初始种群,将现行调度规则作为水库发电流量约束条件,推求最优目标值。求解过程如下①定义GSO算法初始参数及对每一时段水位上下限进行归一化处理。②根据3.2.2节所述方法,推求出所需种群数目的各时段库容,在这一过程中,除了遵循原有调度规则外,还需遵循以下原则:若本时段的库容下限低于死库容,说明按照本时段下泄流量的上限进行泄水,需调用死库容,为保障水库的死库容不被破坏,本时段的库容下限取为死库容;若本时段的库容上限小于死库容,说明该时段已不能满足最小泄流要求,在库容上限推求时取本时段的泄流量为0,下限取为死库容,若该情况发生在8—10月份,根据原有调度规则,本时段的上下限库容均为泄流量为0所对应的库容,即水库蓄水。若本时段的库容下限大于正常蓄水位对应库容  $V_z$ ,则本时段库容上下限均为  $V_z$ ;若本时段的库容上限大于  $V_z$ ,说明按最小流量泄流时,本时段的水位会超过正常蓄水位,不满足约束条件,故本时段的库容上限取为  $V_z$ 。对于某些时段来说还有汛限水位的要求将  $V_z$  改为汛限水位对应的库容即可。③各时段的库容值确定后,由水量平衡方程可以推求出各时段的下泄流量,若所求的下泄流量大于水轮机最大过机流量,则发生弃水,据此求出各时段对应的发电流量与弃水量。④根据发电流量,在尾水位流量关系表中查得对应的下游水位。⑤根据出力及发电量公式,求得相应的出力和发电量,并寻找最大发电量在种群中的位置,以便获取各时段初库容及对应的水位。

#### (2) 满足生态径流约束的水库生态调度过程

水库生态调度的求解过程与上文一致,只是在推求每一时段库容上下限时,需要更改下泄流量的约束条件,根据水库任务,下泄流量要在满足水库原有的供水、防洪、发电、航运任务的基础上兼顾生态需水目标,也就是说,下泄水量要在优先保证其他用水后再用于生态补给。本文的生态约束条件分别为天然生态流量约束、次天然生态流量约束、现状生态流量约束及不考虑变异的生态流量约束,由此确定出所需的流量约束为生态流量约束加各时段的其他用水流量,因为新的约束也是与生态流量有关的约束,故约束上限仍称为最大生态流量,下限称为适宜

或最小生态流量,求解4种状态下的目标值,同时需要注意,每一时段的下泄流量要尽量满足不低于适宜(或最小)生态流量,不超过最大生态流量。

## 4 生态调度应用实例

### 4.1 尼尔基水库概况

尼尔基水利枢纽正常蓄水位为216 m,死水位为195 m,防洪限制水位为213.37 m(6月21日—8月25日),水库总库容为86.10亿  $m^3$ ,其中防洪库容23.68亿  $m^3$ ,兴利库容59.68亿  $m^3$ ,要求枯水年份调度初期水位不低于212 m,其他年份不低于210 m,本文均取为212 m。

### 4.2 尼尔基水库生态调度结果

区间水补给会在一定程度上影响河段的流量,对研究造成干扰,所以为了消除区间水补给的影响,选择尼尔基水库坝下至第一个入水口——讷漠尔河长度为10 km的河段为研究对象,并考虑尼尔基水库原有的供水、防洪、发电、航运任务兼顾生态需水目标进行水库的生态调度。

对1951—2010年的水文序列进行排频计算,确定特枯水年、较枯水年、平水年、较丰水年、特丰水年5种典型水文年,计算结果如表3所示。

表3 典型代表年及其频率

Tab.3 Typical year and its frequency

项目	特枯水年	较枯水年	平水年	较丰水年	特丰水年
年份	1979	1964	1992	1957	1988
频率/%	5	25	50	75	95

根据选择的典型年,并对其水文序列进行修正,即乘以各自的缩放倍比,获得5种典型年各时段的入库水量。利用上述模型,分别对各典型年按照现行调度规则和生态调度规则进行调度。调度结果见表4、表5。将天然生态流量约束下的典型年调度曲线从特枯水年到特丰水年依次记为TKTR、JKTR、PTR、JFTR、TFTR;同理,次天然生态流量约束下依次记为TKCTR、JKCTR、PCTR、JFCTR、TFCTR;现状生态流量约束下依次记为TKXZ、JKXZ、PXZ、JFXZ、TFXZ;不考虑变异的生态流量约束下依次记为TKWB、JKWB、PWB、JFWB、TFWB,由于篇幅有限只列出部分生态约束下的调度结果,见图6。

表4、表5最后一列旨在评价经现有调度方案调度后的下泄流量对不同生态目标的满足状况,可将不同的生态流量约束作为评价标准,观察发现现有调度方案对于生态的满足程度较低,只有在丰水年份才可以满足部分适宜生态流量和最小生态流量的要求,表明水库的修建已经严重影响了当地原有

表4 适宜生态流量约束下的调度结果

Tab.4 Scheduling results under constraints of optimal ecological flow

典型水文年	约束条件	用水量 $W_y$ / 亿 $m^3$	弃水量 / 亿 $m^3$	发电量 / (亿 $kW \cdot h$ )	结果评价	现行调度规则对生态目标的满足结果
特枯水年	现行调度规则	81.77	0	4.04		
	天然生态流量约束	82.69	0	3.55	不满足	不满足
	次天然生态流量约束	82.69	0	3.60	不满足	不满足
	现状生态流量约束	82.69	0	3.69	不满足	不满足
	不考虑生态变异的生态流量约束	82.69	0	3.57	不满足	不满足
较枯水年	现行调度规则	113.89	0	6.32		
	天然生态流量约束	114.08	0	5.26	不满足	不满足
	次天然生态流量约束	114.08	0	5.48	不满足	不满足
	现状生态流量约束	114.08	0	5.75	不满足	不满足
	不考虑生态变异的生态流量约束	114.08	0	5.35	不满足	不满足
平水年	现行调度规则	132.34	0	7.30		
	天然生态流量约束	148.79	0	6.30	不满足	不满足
	次天然生态流量约束	148.07	0	6.40	不满足	不满足
	现状生态流量约束	125.06	0	5.83	不满足	不满足
	不考虑生态变异的生态流量约束	142.23	0	6.50	不满足	不满足
较丰水年	现行调度规则	152.03	0	9.63		
	天然生态流量约束	182.17	0.11	9.77	满足	不满足
	次天然生态流量约束	167.47	0	9.58	满足	不满足
	现状生态流量约束	155.60	0	8.67	满足	不满足
	不考虑生态变异的生态流量约束	178.38	0	9.69	满足	不满足
特丰水年	现行调度规则	168.83	27.65	10.31		
	天然生态流量约束	198.78	4.16	11.38	满足	不满足
	次天然生态流量约束	191.81	0.89	11.03	满足	不满足
	现状生态流量约束	164.60	4.35	9.82	满足	满足
	不考虑生态变异的生态流量约束	186.86	10.31	11.14	满足	满足

表5 最小生态流量约束下的调度结果

Tab.5 Scheduling results under constraints of the minimum ecological flow

典型水文年	约束条件	用水量 $W_m$ / 亿 $m^3$	弃水量 / 亿 $m^3$	发电量 / (亿 $kW \cdot h$ )	结果评价	现行调度规则对不同意生态目标的满足结果
特枯水年	现行调度规则	81.77	0	4.04		
	天然生态流量约束	82.69	0	3.80	不满足	不满足
	次天然生态流量约束	82.69	0	3.87	不满足	不满足
	现状生态流量约束	82.69	0	3.93	不满足	不满足
	不考虑生态变异的生态流量约束	82.69	0	3.80	不满足	不满足
较枯水年	现行调度规则	113.89	0	6.32		
	天然生态流量约束	114.08	0	6.02	不满足	不满足
	次天然生态流量约束	114.05	0	6.17	满足	不满足
	现状生态流量约束	113.06	0	6.10	满足	不满足
	不考虑生态变异的生态流量约束	114.09	0	6.20	不满足	不满足
平水年	现行调度规则	132.34	0	7.30		
	天然生态流量约束	137.63	0	6.78	满足	不满足
	次天然生态流量约束	132.73	0	6.63	满足	不满足
	现状生态流量约束	117.28	0	6.21	满足	不满足
	不考虑生态变异的生态流量约束	134.83	0	6.74	满足	不满足
较丰水年	现行调度规则	152.03	0	9.63		
	天然生态流量约束	162.88	0	9.76	满足	满足
	次天然生态流量约束	155.91	0	9.53	满足	满足
	现状生态流量约束	139.21	0	8.52	满足	满足
	不考虑生态变异的生态流量约束	160.93	0	9.66	满足	满足

续表 5

典型水年	约束条件	用水量 $W_{in}$ / 亿 $m^3$	弃水量 / 亿 $m^3$	发电量 / (亿 $kW \cdot h$ )	结果评价	现行调度规则对不同生态目标的满足结果
特丰水年	现行调度规则	168.83	27.65	10.31		
	天然生态流量约束	185.07	13.87	10.62	满足	满足
	次天然生态流量约束	183.51	20.70	10.46	满足	满足
	现状生态流量约束	158.15	18.12	9.37	满足	满足
	不考虑生态变异的生态流量约束	180.05	23.11	10.43	满足	满足

注：结果评价是评价该年的下泄流量是否满足所对应的生态约束。

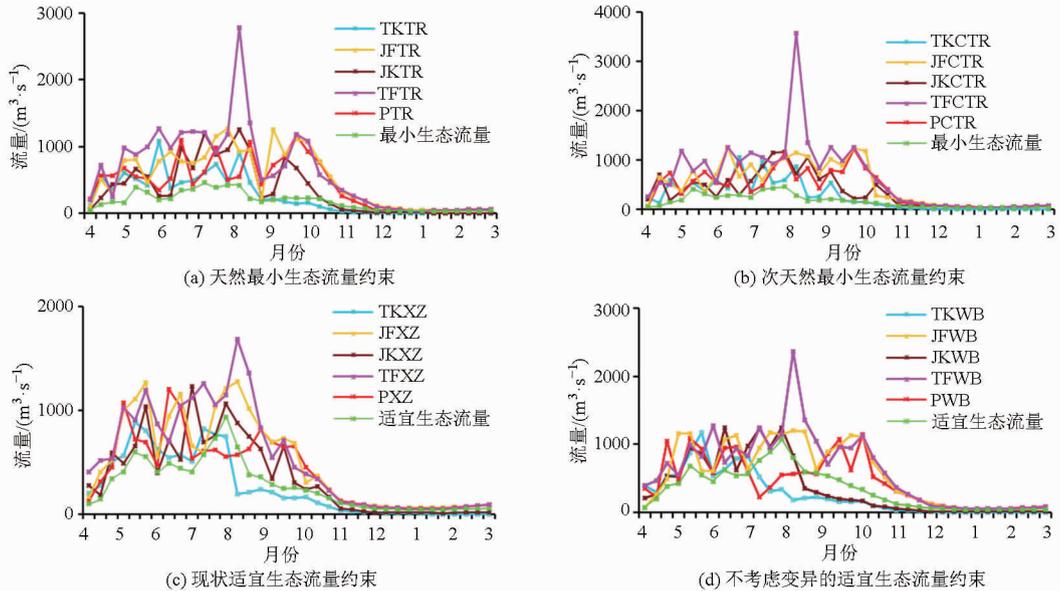


图6 5种典型年的优化调度结果

Fig. 6 Optimal scheduling results for five typical years

的生态系统,现有调度方案在生态保护方面存在不足,需要改进。

由表4可知,在枯水年及平水年均不能满足适宜生态流量的要求,其中枯水年为了满足适宜生态流量连续多个时段直至调度末期水位消落至死水位,而对于平水年来说,观察平水年的调度结果发现,适宜生态流量不能满足的情况多发生在7、8月份,为了满足生态目标,水位也多消落至死水位,而这一时期也是农业用水的高峰期,如何在这一时期缓解其他用水与生态的矛盾,是值得考虑的问题。观察用水量与发电量发现在平水年,现状生态流量约束下的用水量、发电量与其他条件相比变化较大,这是因为现状生态流量对水量的需求较低,水库蓄水较多,观察结果可以看出,其调度末期的水位值比天然生态约束多了12.36 m,比次天然生态约束多了10.84 m,比不考虑变异的生态约束多了6.81 m。在较丰水年中,部分生态流量约束条件的调度结果有弃水产生,这是因为该时段的适宜生态流量大于水轮机最大过机流量,为了满足该时段的生态目标,水库通过弃水来实现。在特丰水年中,原调度方案的弊端是对于水量较多的年份,其调配能力有限,发

生的弃水较多,而生态约束下的水库调度在每一时段对于水量的需求较多,故水量可以得到更加充分的利用。

分析表5中的数据发现,即使是最小生态流量,在特枯水年和较枯水年,调度后的下泄流量也无法全部满足,而且未满足的几种情况下其调度末期的水位均已消落至死水位,所以若想在枯水年份更好地保护生态系统,需要提前预测枯水年份,在枯水年到来之前多存蓄水量,考虑生态变异后,在较枯水年可以制定满足次天然和现状生态流量的调度方案,而在不考虑生态变异时,较枯水年的调度方案无法制定,这对于保护生态系统是不利的。

综合表4、表5来看,水库的发电量与生态目标之间存在较为明显的矛盾,虽然在丰水年可以得到有效缓解,但是用水量明显增加,如何在这两者之间寻找最佳的平衡点,是需要迫切解决的问题。

## 5 结论

(1) 采用混合时间尺度推求生态流量,可以在生物需水高峰期将需水过程细化,更好地模拟生态需水过程。

(2) Tennant 法评价结果说明人类扰动会引起河流生态系统的退化;不考虑变异的生态流量不适合长期作为生态目标,其最小生态流量在 10 月一次年 3 月及 4—9 月的多年平均流量百分数分别较天然径流减小了 10.96%、17.87%,适宜生态流量分别减小了 11.19%、53.77%。

(3) 现行调度方案在生态保护及水量有效利用方面存在弊端,弃水量较天然、次天然、现状、不考虑变异生态流量约束的弃水量分别多了 13.774、6.949 1、9.528 8、4.532 亿  $m^3$ ;在特枯水年份,适宜和最小生态目标均不能满足,需要建立有效的预报机制,在枯水年到来前存蓄充足的水量,在较枯水年

份,次天然和现状下的最小生态流量可以满足,说明考虑水文变异后,可以有效制定兼顾低标准生态目标的调度方案;生态目标和发电目标存在矛盾,需要寻找两者间的平衡点。

(4) 水文变异条件下的生态调度,可以为决策者提供多种调度方案,在有蓄水任务时,可以选择满足现状生态径流的调度方案;在有发电任务时,若水量充足,可以选择满足天然生态径流的调度方案,若水量不足,可以选择满足现状径流的调度方案;若有供水任务时,可以选择不同年度下泻水量最大的调度方案。

### 参 考 文 献

- 1 KAMARIANOS A, KARAMANLIS X, KOUSOURIS TH, et al. Ecological studies on the Kerkini Reservoir(N Greece) [J]. *GeoJournal*, 1993, 29(4): 365 - 370.
- 2 CASTELLETTI A, PIANOSI F, SONCINI-SESSA R. Water reservoir control under economic, social and environmental constraints [J]. *Automatic*, 2008, 44(6): 1595 - 1607.
- 3 梅亚东, 杨娜, 翟丽妮. 雅砻江下游梯级水库生态友好型优化调度[J]. *水科学进展*, 2009, 20(5): 721 - 725.  
MEI Yadong, YANG Na, ZHAI Lini. Optimal ecological sound operation of the cascade reservoirs in the lower Yalongjiang River [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(5): 721 - 725. (in Chinese)
- 4 PINTHONG P, GUPTA A D, BABEL M S, et al. Improved Reservoir operation using hybrid genetic algorithm and neurofuzzy computing[J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(4): 697 - 720.
- 5 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 Ling, HUANG Yunyan, YANG Zhengxiang, et al. Reservoir ecological operation model and its application[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(2): 134 - 141. (in Chinese)
- 6 王煜, 戴会超, 王冰伟, 等. 优化中华鲟产卵生境的水库生态调度研究[J]. *水利学报*, 2013, 44(3): 319 - 326.  
WANG Yu, DAI Huichao, WANG Bingwei, et al. Study of the eco-scheduling for optimization Chinese sturgeon spawning habitats [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(3): 319 - 326. (in Chinese)
- 7 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 等. 水文变异下的黄河流域生态流量[J]. *生态学报*, 2011, 31(17): 4826 - 4834.  
ZHANG Qiang, LI Jianfeng, CHEN Xiaohong, et al. Evaluation of the ecological instream flow in the Yellow River basin with hydrological alterations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17): 4826 - 4834. (in Chinese)
- 8 石建军, 冯民权, 黄强, 等. 水文变异条件下文峪河生态径流过程的推估方法[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(4): 28 - 35.  
SHI Jianjun, FENG Minquan, HUANG Qiang, et al. An approach to estimation of environmental flow process in Wenyu river under hydrological variation conditions[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(4): 28 - 35. (in Chinese)
- 9 邢贞相, 刘美鑫, 付强, 等. 挠力河流域径流变化特征与影响因素分析[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(9): 178 - 187.  
XING Zhenxiang, LIU Meixin, FU Qiang, et al. Analysis of runoff variation and impacting factors in Naoli river basin [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 178 - 187. (in Chinese)
- 10 邢贞相, 闫丹丹, 刘美鑫, 等. 三江平原近 60 年降水量时空变异特征分析[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 337 - 344.  
XING Zhenxiang, YAN Dandan, LIU Meixin, et al. Spatiotemporal variability analysis of annual precipitation in Sanjiang Plain in recent sixty years[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 337 - 344. (in Chinese)
- 11 雷红富, 谢平, 陈广才, 等. 水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J]. *水电能源科学*, 2007, 25(4): 36 - 40.  
LEI Hongfu, XIE Ping, CHEN Guangcai, et al. Comparison and analysis on the performance of hydrological time series change-point testing methods[J]. *Water Resources and Power*, 2007, 25(4): 36 - 40. (in Chinese)
- 12 张强, 崔瑛, 陈永勤. 基于水文学方法的珠江流域生态流量研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1828 - 1837.  
ZHANG Qiang, CUI Ying, CHEN Yongqin. Evaluation of ecological instream flow of the Pearl River basin, south China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(8): 1828 - 1837. (in Chinese)
- 13 李捷, 夏自强, 马广慧, 等. 河流生态径流计算的逐月频率算法[J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2916 - 2921.  
LI Jie, XIA Ziqiang, MA Guanghui, et al. A new monthly frequency computation method for instream ecological flow [J]. *Acta Ecologica*, 2007, 27(7): 2916 - 2921. (in Chinese)
- 14 郑志宏, 张泽中, 黄强, 等. 生态需水量计算 Tennant 法的改进及应用[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2010, 42(2): 34 - 39, 57.  
ZHENG Zhihong, ZHANG Zezhong, HUANG Qiang, et al. Improvement and application on ecological water requirement tennant method [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2010, 42(2): 34 - 39, 57. (in Chinese)

- high-speed spindle behavior[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77(5-8): 1071-1086.
- 12 YUAN Jin, WANG Kesheng, YU Tao, et al. Reliable multi-objective optimization of high-speed WEDM process based on Gaussian process regression[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(1): 47-60.
- 13 CHENG Qiang, ZHAO Hongwei, ZHANG Guoju, et al. An analytical approach for crucial geometric errors identification of multi-axis machine tool based on global sensitivity analysis[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75(1-4): 107-121.
- 14 张家旭,李静.基于遗传算法的汽车ESP液压系统参数辨识[J].*农业机械学报*,2015,46(8):308-313.  
ZHANG Jiaxu, LI Jing. Parameter identification of automotive ESP hydraulic system based on genetic algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 308-313. (in Chinese)
- 15 YAN Pengyu, CHE Ada, YANG Naiding, et al. A tabu search algorithm with solution space partition and repairing procedure for cyclic robotic cell scheduling problem[J]. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(22): 6403-6418.
- 16 LIU Shihao, YE Wenhua, LOU Peihuang, et al. Structural dynamic optimization for carriage of gantry machining center using orthogonal experimental design and response surface method[J]. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 2012, 33(3): 211-219.
- 17 王诗彬,许佳,朱忠奎.瞬态成分参数的最小二乘法辨识及其轴承故障特征提取应用[J].*机械工程学报*,2012,48(7):68-76.  
WANG Shibin, XU Jia, ZHU Zhongkui. LSM-based transient parameter identification and its application in feature extraction of bearing fault[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(7): 68-76. (in Chinese)
- 18 MAMALIS Basilis, PANTZIOU Grammati, Dimitropoulos Georgios, et al. Highly scalable parallelization of standard simplex method on a myrinet-connected cluster platform[J]. *International Journal of Computers and Applications*, 2013, 35(4): 152-161.
- 19 ELRAGAL Hassan Mamdani, TAKAGI-Sugeno. Fuzzy classifier accuracy improvement using enhanced particle swarm optimization [J]. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2014, 26(5): 2445-2457.
- 20 胡启国,张鹏.基于群策层次分析法和模糊聚类理论的改进质量功能展开研究[J].*计算机集成制造系统*,2007,13(7):1374-1380.  
HU Qiguo, ZHANG Peng. Improved QFD based on group decision AHP and fuzzy clustering [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13(7): 1374-1380. (in Chinese)
- 21 ABELE E, ALTINTAS Y, BRECHER C. Machine tool spindle units[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59(2): 781-802.
- 22 WANG Xiang, LI Wenwei, DAI Lin. On inexact Newton methods based on doubling iteration scheme for symmetric algebraic Riccati equations[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2014, 260: 364-374.

~~~~~

(上接第154页)

- 15 陈端,陈求稳,陈进.考虑生态流量的水库优化调度模型研究进展[J].*水力发电学报*,2011,30(5):248-256.  
CHEN Rui, CHEN Qiwen, CHEN Jin. Review on optimization models of reservoir operation with consideration of ecological flow [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(5): 248-256. (in Chinese)
- 16 刘长平,叶春明.一种新颖的仿生群智能优化算法:萤火虫算法[J].*计算机应用研究*,2011,28(9):3295-3297.  
LIU Changping, YE Chunming. Novel bioinspired swarm intelligence optimization algorithm: firefly algorithm [J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(9): 3295-3297. (in Chinese)
- 17 KRISHNANAND K N, GHOSE D. Glowworm swarm optimization for searching higher dimensional spaces[J]. *Innovations in Swarm Intelligence*, 2009, 6(4): 61-75.
- 18 王敬,胡铁松,曾祥,等.基于目标蓄水量的限制供水规则模型研究[J].*华中科技大学学报:自然科学版*,2014,42(9):107-111.  
WANG Jing, HU Tiesong, ZENG Xiang, et al. Simulation and optimization model for hedging rule based on target storage [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2014, 42(9): 107-111. (in Chinese)
- 19 黄强,万芳,邱林,等.水库群供水调度预警系统研究及应用[J].*水利学报*,2011,42(10):1161-1167.  
HUANG Qiang, WANG Fang, QIU Lin, et al. Early warning system of reservoirs for water supply dispatching and its application [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(10): 1161-1167. (in Chinese)
- 20 明波,黄强,王义民,等.基于改进布谷鸟算法的梯级水库优化调度研究[J].*水利学报*,2015,46(3):341-349.  
MING Bo, HUANG Qiang, WANG Yimin, et al. Cascade reservoir operation optimization based-on improved Cuckoo search [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(3): 341-349. (in Chinese)