



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.015

张召, 张伟, 廖卫红, 等. 基于生态流量区间的多目标水库生态调度模型及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 96-101, 123. ZHANG Zhao, ZHANG Wei, LIAO Wei hong, et al. Model of multipurpose reservoir ecological operation based on ecological flow range and its application[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 96-101, 123. (in Chinese)

## 基于生态流量区间的 多目标水库生态调度模型及应用

张 召<sup>1,2,3</sup>, 张 伟<sup>3</sup>, 廖卫红<sup>3</sup>, 王 旭<sup>3</sup>

(1. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 传统的水库调度以兴利调度和防洪调度为主, 常忽视生态环境问题, 导致河流生态水文系统的健康状况不断恶化。相对传统的以水电站年发电量最大, 发电保证率最高为目标函数, 本研究还引入了生态保证率最高的目标函数, 构建基于生态流量区间的多目标水库生态调度模型, 并采用 NSGA-Ⅱ 算法对模型进行优化求解。利用该模型对天生桥一级水库 1956 年-2008 年的来水过程进行优化调度, 结果表明: 经济效益最大的调度方案会对天然径流过程产生显著的改变, 而兼顾经济效益和生态目标的建议调度方案对水库的经济效益产生影响较少的同时能保证生态系统的稳定性。

**关键词:** 水库生态调度; 多目标; 生态流量区间; 生态目标

**中图分类号:** TV 213    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1508291672 1683(2016) 05-0096-06

### Model of multipurpose reservoir ecological operation based on ecological flow range and its application

ZHANG Zhao<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Wei<sup>3</sup>, LIAO Wei hong<sup>3</sup>, WANG Xu<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;  
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Useful operation and flood control operation predominate the traditional reservoir operation, which usually ignores Ecological environmental problems and leads to the continuous deterioration of river Ecological hydrological systems. Comparing with the traditional researches which set hydropower stations' utmost annual energy output and highest power guarantee rate as objective functions, this paper also introduced maximum Ecological guaranteed rate as an objective function to build a model of multipurpose reservoir ecological operation based on ecological flow range, and used NSGA-Ⅱ algorithm to optimize the model. This model was used to optimize the operation of Tianshengqiao No. 1 reservoir's inflow process in 1956~2008, and the results showed that: the operation scheme of utmost economic benefits would significantly change natural runoff process, and the operation scheme of combining both economic benefits and ecological purposes would have little impact on economic benefits while at the same time guarantee the ecosystem's stability.

**Key words:** reservoir ecological operation; multipurpose; ecological flow range; ecological purpose

收稿日期: 2015-08-28    修回日期: 2016-05-11    网络出版时间: 2016-08-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160819.0926.005.html>

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAB05B05); 国家科技重大专项项目(2012ZX07205)

Fund: National Key Technology Support Program(2013BAB05B05); National Science and Technology Major Project(2012ZX07205)

作者简介: 张 召(1992-), 男, 河北辛集人, 主要从事计算水力学研究。E-mail: 15251776205@163.com

通讯作者: 廖卫红(1986-), 女, 湖北监利人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 360422948@qq.com

水库的建设和运行在实现其经济效益的同时,也改变了河流天然径流情势和区域生态系统的稳定性,由此可能会引发一系列的流域生态和环境问题。因此,有必要合理调整水库的调度运行方式,对水库实施

生态调度。水库生态调度就是将生态因素纳入到现行的水库调度中去,作为水库的核心功能,与其他水库功能进行耦合共同指导水库调度实践<sup>[1]</sup>。国内外学者在水库生态调度方法方面的研究可归纳为两类:一类是将生态需求作为模型的约束条件,另一类是将量化的生态因子纳入模型的目标函数中。前者如 Castelletti<sup>[2]</sup>等介绍了以最小生态流量为约束的河流生态保护常用方法; Lencce Barbara J<sup>[3]</sup>等构建了以水库蓄量和发电量为目标、水质条件为约束的水库调度模型,并在加拿大谢尔茅斯水库生态调度中得到应用;胡和平<sup>[4]</sup>等以发电量最大为目标,构建了以生态流量过程线为约束的水库优化调度模型;陈端<sup>[5]</sup>等以裂腹鱼栖息地模型建议的适宜生态流量过程作为约束条件,研究了雅砻江锦屏梯级水库优化调度问题。后者如王加全<sup>[6]</sup>、雍婷<sup>[7]</sup>等分别将生态目标纳入水库综合效益中,构建了以不同权重衡量生态和经济等用水目标的单目标生态调度模型,为生态友好型水库调度理论的应用提供了理论基础;王霞<sup>[8]</sup>等以河道生态需水量为依据,采用分层序列法将多目标模型转化为单目标优化模型,提出了避免各目标相互冲突的水库生态调度最佳方案;叶季平<sup>[9]</sup>等建立了兼顾经济和环境效益的多目标水库优化模型,并应用约束法将多目标转换成多个单目标问题,采用动态规划法分别求解。由此可见,当前的水库生态调度模型大多是将生态需求作为约束条件或将生态目标纳入综合效益中的单目标模型。不过,为突出各目标之间的博弈关系,比较不同调度方案的优劣,将生态需求作为独立目标函数与经济目标共同求解的多目标生态调度模型有待进一步研究。鉴于此,本文引入生态流量区间的概念,将生态保证率作为被量化的生态目标,构建考虑生态的多目标水库优化调度模型,并用于天生桥一级水库予以验证。

## 1 生态流量区间的确定

河流健康需要模拟天然流量组成的自然节律,水库生态调度研究中,河流生态要素对水的需求规律归根于对河道生态流量过程的需求<sup>[10-11]</sup>。生态需水量是一个阈值范围,具有极大值和极小值<sup>[12]</sup>。绝大多数生态调度仅考虑流量的下限值,但是,对于丰水期雨量大、来水多的河流,水库短时间出流过高会对河流生态系统产生不利影响。在枯水期,水库出流高于天然径流状态时,会导致河流生态驱动力的改变,进而影响河道内营养物质的重新分布。特别的,对于多沙河流枯水期流量加大,坝下游河道将发生沿程冲刷,河势会发生不同程度地调整<sup>[4,19]</sup>。因此,有必要确定天然河道生态流量的上限值。各时段生态流量的上、下限值共同构成了生态流量区间。

生态流量的确定有多种方法如水文学方法、水力定额法、栖息地法等,各方法均有其适用条件和范围<sup>[13]</sup>。水文学法仅需利用水文资料中的历史流量数据即可确定河道生态需水。我国大部分地区具有较长的历史流量资料,具备使用该方法的条件<sup>[14]</sup>。考虑到生态径流过程的连续变化特征和过程性,逐月最小生态径流算法为计算河流最小生态径流量的最恰当方法<sup>[15]</sup>。本文采用该方法确定河道生态流量的最小值,即在尽可能长的天然月径流系列中取最小值作为该月的最小生态径流量<sup>[16]</sup>,同理可确定该月最大生态流量。为排除偶然性的影响,河道天然生态流量区间采用逐月次最大流量、次最小流量作为其上、下限值。具体过程:根据电站坝址处多年天然流量资料,将相同月份的多年月径流系列按由大到小排序,从序列中选取次最大值和次最小值,依此类推,最终形成年次最大、次最小生态径流过程。

以天生桥一级水电站为例,根据其 1956 年-2008 年共 53 年的入库流量过程资料,按上述方法,统计计算月平均生态流量区间结果见表 1。当计算时间尺度为旬尺度或日尺度时,采用与月尺度相同的生态流量区间。

表 1 月平均生态流量区间  
Tab. 1 The range of monthly average ecological flow

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
上限流量	374	376	398	381	618	1 181	1 738	2 368	1 699	1 545	857	460
下限流量	350	350	350	350	350	365	442	454	372	360	350	350

## 2 基于生态流量区间的水库生态调度模型

基于生态流量区间的多目标水库生态调度是针

对下游河道的生态环境问题,以生态流量区间为依据,通过水库优化调度提供满足生态环境需求的流过程,从而缓解生态压力,恢复河道的生态功能。

基于生态流量区间的水库调度需要构建多目标水库生态调度模型。

传统的多目标水库调度通常给予每个目标不同的权重值,并将多目标用一个综合目标表示。为了体现各个目标之间的相互博弈关系,本模型设置发电量最大、发电保证率最高、生态保证率最高三个目标函数,并用优化算法求解。

### 2.1 目标函数

(1) 发电量最大。

$$\text{Max } E = \text{Max} \sum_{t=1}^T K Q_t H_t \Delta t, t = 1, 2, \dots, T \quad (1)$$

式中:  $E$  为调度期总发电量;  $T$  为计算时段总数;  $K$  为水电站出力系数;  $Q_t$  为发电流量;  $H_t$  为发电水头;  $\Delta t$  为计算时段历时。

(2) 发电保证率最高。

$$\text{Max } P_{rate} = \text{Max} \frac{\sum_{t=1}^T N(N_t \geq N_{pro})}{T} \cdot 100\%, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

式中:  $P_{rate}$  为调度期发电保证率;  $N(N_t \geq N_{pro})$  为时段出力大于保证出力的时段数;  $N_t$  为水电站时段出力;  $N_{pro}$  为电站保证出力。

(3) 生态保证率最高。

生态保证率是指水库下泄流量满足河道天然生态流量区间的时段数占总时段数的百分比,它能很好地反映河道流量与生态需求之间的关系。

$$\text{Max } E_{rate} = \text{Max} \frac{\sum_{t=1}^T N(Q_{e \min, t} \leq Q_{out, t} \leq Q_{e \max, t})}{T} \cdot 100\%, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

式中:  $E_{rate}$  为调度期生态保证率;  $N(Q_{e \min, t} \leq Q_{out, t} \leq Q_{e \max, t})$  为时段下泄流量介于生态流量区间的时段数;  $Q_{e \min, t}$ 、 $Q_{e \max, t}$  分别为时段生态流量区间上、下限值;  $Q_{out, t}$  时段出库流量。

需要说明的是: 此处生态和发电保证率均为旬保证率。

### 2.2 约束条件

(1) 水库水量平衡约束。

$$V_{t+1} = V_t + (Q_{in, t} - Q_{out, t}) \cdot \Delta t \quad (4)$$

式中:  $V_{t+1}$ 、 $V_t$  分别为时段末、初库容;  $Q_{in, t}$ 、 $Q_{out, t}$  分别为水库时段入、出库流量;  $\Delta t$  为计算时段。

(2) 水库库容约束。

$$V_{t, \min} \leq V_t \leq V_{t, \max} \quad (5)$$

式中:  $V_{t, \min}$ 、 $V_{t, \max}$  分别为水库时段允许最小、最大库容。

(3) 水电站出力约束。

$$0 \leq N_t \leq N_{t, \max} \quad (6)$$

式中:  $N_t$  为水电站时段出力;  $N_{t, \max}$  为  $t$  时段水电站机组在相应水头下的最大出力。

(4) 水轮机过流能力约束。

$$0 \leq Q_t \leq Q_{t, \max} \quad (7)$$

式中:  $Q_t$  为水电站时段的发电流量;  $Q_{t, \max}$  为水电站最大过流能力。

(5) 水位库容关系曲线。

$$Z_t = f(V_t) \quad (8)$$

式中:  $Z_t$  为水库时段水位;  $V_t$  为水库时段初库容。

(6) 尾水位流量关系曲线。

$$Z_{down, t} = f(Q_{out, t}) \quad (9)$$

式中:  $Z_{down, t}$  为时段尾水位;  $Q_{out, t}$  为水库时段出库流量。

(7) 初始条件约束。

$$Z_1 = Z_b; V_1 = V_b \quad (10)$$

式中:  $Z_b$  为水位初值,初始水位根据实际情况设定,为了避免一开始调蓄时就产生弃水,需将第一个月的来水存蓄到水库中,且保证水库刚好没有弃水,由此反算初始水位;  $V_b$  为对应  $Z_b$  的库容。

### 2.3 优化算法

水库生态调度是一个多目标、多约束问题,需要用多目标算法求解。带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA- $\epsilon$ )是一种新型的多目标遗传算法,该算法求得的 pareto 最优解分布均匀,收敛性和鲁棒性好<sup>[17]</sup>,其在水库多目标优化问题中有良好的适应性。因此,本文采用 NSGA- $\epsilon$  算法对模型进行优化求解。NSGA- $\epsilon$  算法计算流程见图 1, NSGA- $\epsilon$  算法详见文献[18]。

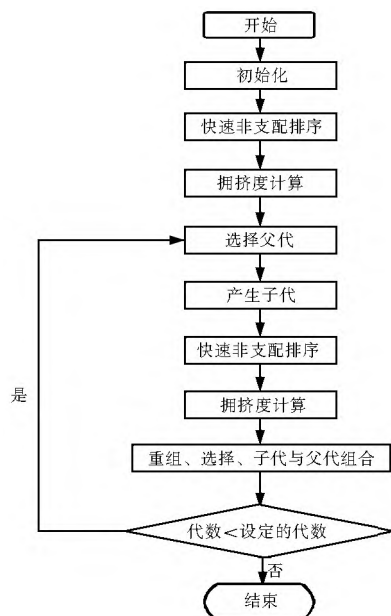


图 1 NSGA- $\epsilon$  算法流程

Fig. 1 The flow chart of NSGA- $\epsilon$  algorithm

### 3 基于生态流量区间的多目标水库生态调度实例

#### 3.1 天生桥一级水库概况

将建立的多目标水库生态调度模型应用于天生桥一级水电站,该电站水库为多年调节水库,总库容 102.6 亿  $\text{m}^3$ ,调节库容 57.96 亿  $\text{m}^3$ ,水库正常蓄水位 780.00 m,汛限制水位 776.40 m(19 旬-27 旬)。天生桥一级水电站是红水河梯级电站的第一级,工程以发电为主,电站装机容量 120 万 kW( $4 \times 30$  万 kW),保证出力 40.52 万 kW,年发电量 52.26 亿( $\text{kW} \cdot \text{h}$ ),水轮机最大过流能力 1 248.00  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

天生桥一级水电站是珠江流域西江上的龙头电站,对其实施生态调度,有助于恢复河流的径流规律以及河流生态驱动力的变化规律<sup>[19]</sup>。这对改善珠江西江流域的生态环境状况,保持生物的栖息环境,减小下游河段河流廊道的生态压力,具有重要的现实意义。

#### 3.2 模型构建

以天生桥一级水库 1956 年-2008 年的入库流量资料为依据,以坝址出流断面为生态流量控制点,计算得到生态流量区间见表 1。以年发电量最大、发电保证率最高、生态保证率最高为目标函数,将电站及水库的相关参数代入模型约束条件中,以时间、水位、出力区系数为三组决策变量,用 NSGA-0 算法对水库调度图进行优化,得到一组最优解。限于篇幅,天生桥一级多目标水库生态调度模型的构建过程不再赘述。

#### 3.3 水库生态调度结果及分析

##### 3.3.1 典型年调度结果

对天生桥一级水库 1956 年-2008 年的年平均入库流量进行频率计算,选取 1969 年、1981 年、1982 年分别作为设计丰水年、平水年、枯水年。为比较不同调度方案对天然来水过程的改变程度,用发电量最大、发电保证率最高、生态保证率最高三个方案分别对三个典型年来水过程进行模拟调度,调度结果见图 2(1969 年)、图 3(1981 年)、图 4(1982 年)。

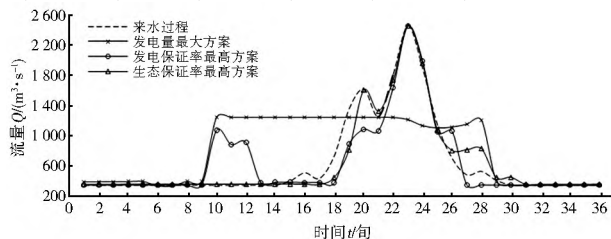


图 2 1969 年(丰水年)调度结果

Fig. 2 The operation results in 1969(high flow year)

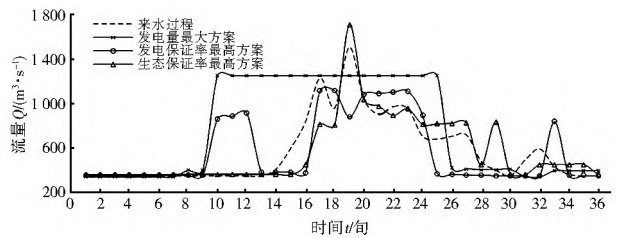


图 3 1981 年(平水年)调度结果

Fig. 3 The operation results in 1981(median flow year)

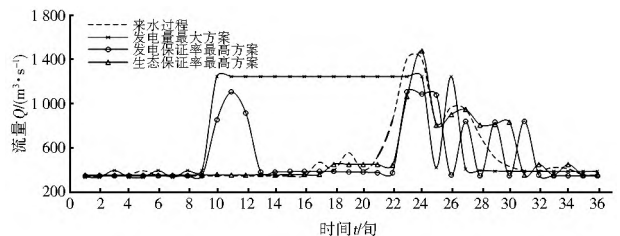


图 4 1982 年(枯水年)调度结果

Fig. 4 The operation results in 1982(low flow year)

不同频率来水过程在不同运行方案下的调度结果表明如下结果。

(1) 经济效益占优的调度方案对天然来水的改变十分显著,特别是发电量最大调度方案,对丰、平、枯三类典型年的径流调节均尤为明显。

(2) 生态保证率最高方案水库出流过程与天然来水过程趋势基本一致,丰枯期流量差异显著。由于丰水年来水较多,水库按照生态流量区间调度的可能性增加。丰水年生态保证率最高方案调度下,出流过程与天然来水过程吻合较好。为提高生态保证率,水电站的出流过程应当趋于天然流量过程。

(3) 发电量最大方案调度下,丰水期基本保持水电站最大引用流量 1 248  $\text{m}^3/\text{s}$  发电;枯水期充分利用水库水位,将出库流量控制在 360  $\text{m}^3/\text{s}$  左右。为增加水电站发电量,在水库调度运行时,会尽量提高枯水期电站的运行水位,同时在丰水期利用较大流量发电。由此,导致水文流量过程均一化,改变了自然水文情势的年内丰枯周期变化规律,这些变化无疑影响了生态过程<sup>[20]</sup>。

(4) 发电保证率最高时,流量过程均存在两个明显的峰值。第一个峰值出现在前汛期开始,第二个峰值出现在主汛期后段。由此分析,为增加水电站处于保证出力区的时段数,在汛期开始前,来水相对较少,此时加大引用流量,可降低汛期水库起调水位。汛期到来时,水库水位升高后仍会稳定在保证出力区。水库在汛期不会盲目加大出力,为提高枯水期发电保证率创造了条件。

(5) 基于生态流量区间的多目标水库调度模型

能够体现不同频率来水的水库调度规律,能够很好地适应有多个目标需求的水库调度。

### 3.3.2 调度结果分析

为了说明各目标函数之间的博弈关系,比较不同调度方案下调度结果的差异,同时为天生桥一级水电站的生态调度提供指导方案,本文选取下列五种调度运行方案结果进行分析比较:(1)设计调度图方案;(2)发电量最大方案;(3)发电保证率最高方案;(4)生态保证率最高方案;(5)建议调

度方案。其中,从 pareto 解集中选择经济目标量值与设计调度图方案相当,且生态保证率较高的方案作为建议调度方案。五种方案的调度结果见表 2,表中调度结果表示按照选定水库调度方案对天生桥一级水电站 1956 年-2008 年的来水过程进行模拟调度得到的多年平均年发电量、发电保证率和生态保证率;变幅表示选定水库调度方案的调度结果相对于设计调度图方案调度结果的改变程度,以百分数表示。

表 2 天生桥一级水库 1956 年-2008 年来水过程不同方案调度结果

Tab. 2 The operation results of different scenarios based on Tianshengqiao N reservoir's inflow process in 1956-2008

水库调度方案	年发电量		发电保证率		生态保证率	
	调度结果/亿(kW·h)	变幅(%)	调度结果(%)	变幅(%)	调度结果(%)	变幅(%)
设计调度图方案	52.26	\	98.58	\	59.22	\
发电量最大方案	66.65	27.54	73.06	-25.89	44.86	24.25
发电保证率最高方案	54.28	3.87	100.00	1.44	81.39	37.44
生态保证率最高方案	50.89	-2.62	99.12	0.55	96.28	62.58
建议调度方案	51.28	-1.88	100.00	1.44	95.70	61.60

不同方案调度结果对比表明:(1)不同调度方案各有侧重,各目标函数呈现此消彼涨的态势,即经济目标的最优化和生态目标的最优化不可能同时实现,需要根据电站的需要选择相应的调度方案;(2)各目标函数间相互制约影响的程度不同,生态保证率对经济目标的变化更为敏感,例如与设计调度图方案相比,生态保证率最高方案在年发电量和发电保证率变幅分别为-2.62%和0.55%的情况下,生态保证率变幅达到了62.58%;(3)从最优解集中选择发电量、发电保证率与设计调度图方案调度结果相差不大的方案作为电站建议调度方案,可以发现建议调度方

案的生态保证率达到了95.70%,远高于设计方案的生态目标量值,由此可见侧重考虑生态需求的调度方案不会对水电站的经济效益产生太大的影响。

生态不满足时段即水电站出流不满足相应生态流量区间的旬时段。在不同的调度方案下,不同月份的生态不满足时段各不相同,并呈现一定的规律性。生态不满足时段统计结果见表3,表中数值表示天生桥一级水电站1956年-2008年共53年来水在相应调度方案下各月份生态不满足时段个数。其最大值为159(53\*3),即完全不满足;最小值0,即完全满足。

表 3 不同调度方案生态不满足时段统计结果

Tab. 3 The statistical results of wistfully ecological period based on different scheduling schemes

水库调度方案	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
设计调度图方案	159	159	99	159	2	0	93	46	8	1	27	9
发电量最大方案	132	132	132	159	159	156	0	1	2	9	90	78
发电保证率最高方案	15	14	3	137	4	0	63	33	10	44	20	12
生态保证率最高方案	11	3	1	4	2	0	24	6	6	3	3	8
建议调度方案	11	1	2	7	2	0	27	8	6	3	8	7

由表3分析可见:(1)设计调度图方案生态不满足时段主要集中枯水期1月-4月和主汛期7月-8月,设计调度图主要考虑电站的发电效益,枯水期出流大部分高于生态流量区间的最大值;(2)发电量最大方案生态不满足时段持续整个非主汛期,这是电站为提高发电量,枯水期出流较天然状态偏高的

必然结果;(3)发电保证率最高方案4月份生态不满足时段最为集中,4月份水库进入前汛期,水库为腾空水库加大出流,为主汛期水库接纳洪水创造条件;(4)生态保证率最高方案和建议调度方案生态不满足时段较少且分布较为平均;(5)在枯水期天然径流过程流量较小,生态流量区间的变化范围也较小,导

致河道枯水期对电站出流变化更为敏感。因此,为了提高水电站的生态保证率,应当尽可能减少其枯水期的生态不满足时段个数。

## 4 结论

本文用生态流量区间反映河流的生态需求,将生态保证率作为目标函数,构建了多目标水库生态调度模型,并用 NSGA-Ⅱ 算法对模型进行优化求解,得到水库调度图最优解集。决策者可以根据电站和流域规划的需要,在解集中有侧重地选择一组调度图用于实际调度。对天生桥一级水库的实例研究表明:(1)经济效益占优的调度方案通常会使得水库出库流量呈现均一化特点,对水文情势改变显著;(2)调度结果与天然状态径流的吻合度随生态保证率的提高而增加,为了减少水库调度对生态环境产生的负面影响,电站实际使用的水库调度方案应尽量提高生态保证率;(3)基于生态流量区间的调度模型可以模拟并验证水库调度的基本规律,能够很好地应用于水库生态优化调度;(4)采取合适的调度方案以实现生态目标的最大化不会对水库的经济效益产生很大影响,因此具有生态要求的水库可适当调整调度运行方案。

### 参考文献(References):

[1] 张洪波,黄强,钱会. 水库生态调度的内涵与模型构建[J]. 武汉大学学报:工学版, 2011, 44(4): 427-433. (ZHANG Hong-bo, HUANG Qiang, QIAN Hui. Connotation of reservoir ecological operation and its model framework[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(4): 427-433. (in Chinese))

[2] Castelletti A, Pianosi F, Soncini Sessa R. Water Reservoir Control under Economic, Social and Environmental Constraints[J]. Automatic, 2008, 44: 1595-1607.

[3] Lence Barbara J, Latheef M, Imran, Bum Donald H. Reservoir Management and Thermal Power Generation[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1992, 118(4): 387-405.

[4] 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. (HU He ping, LIU Deng-feng, TIAN Fu-qiang, et al. A method of ecological reservoir reoperation based on ecological regime[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 325-332. (in Chinese))

[5] Chen D, Chen Q, Li R. Optimization model of reservoir operation under ecological flow constraint: the case of cascade dams on Yalongjiang River, China. Proceedings of the 6th ISEH Conference, Athens, Greece, 2010, 6.

[6] 王加全,马细霞,李艳. 基于水文指标变化范围法的水库生态调度方案评价[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 107-112. (WANG Jia-quan, MA Xi-xia, LI Yan. Evaluation of reservoir ecological operation schedule by range of variability approach[J]. Journal of Hy-

droelectric Engineering, 2013, 32(1): 107-112. (in Chinese))

[7] 雍婷,许银山,梅亚东. 基于生态流量要求的调度图优化及生态库容研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 89-95. (YONG Ting, XU Yi-shan, MEI Ya-dong. Study on optimization of operation curve and ecological storage based on ecological flow demand[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1): 89-95. (in Chinese))

[8] 王霞,郑雄伟,陈志刚. 基于河流生态需水的水库生态调度模型及应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 59-61. (WANG Xia, ZHENG Xiong-wei, CHEN Zhi-gang. Reservoir ecological regulation model based on ecological water need of river and its application[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(6): 59-61. (in Chinese))

[9] 叶季平,王丽萍. 大型水库生态调度模型及算法研究[J]. 武汉大学学报:工学版, 2010, 43(1): 64-67. (YE Ji-ping, WANG Li-ping. On reservoir ecological operation model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(1): 64-67. (in Chinese))

[10] 高宇. 漳河下游的径流趋势分析及生态调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(3): 186-190. (GAO Yu. Trend analysis of runoff and ecological regulation in downstream of Zhanghe River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(3): 186-190. (in Chinese))

[11] 陈朋成,周孝德,靳春燕,等. 黄河上游河道生态需水量研究[J]. 人民黄河, 2008, 30(2): 43-45. (CHEN Peng-cheng, ZHOU Xiao-de, JIN Chun-yan, et al. Study on the ecological water demand in the upper reaches of The Yellow River River[J]. Yellow River, 2008, 30(2): 43-45. (in Chinese))

[12] 顾银燕,朱永华,任立良. 河流生态需水量计算方法的研究进展[EB]. 2008, 北京: 中国科技论文在线. (GU Yi-yan, ZHU Yong-hua, REN Li-liang. Ecological water requirement estimation method and the research advance[EB]. 2008, Beijing, Sciencepaper online. (in Chinese))

[13] 王浩,唐克旺,杨爱民,等. 水生态系统保护与修复理论和实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (WANG Hao, TANG Ke-wang, YANG Ai-min, et al. Water ecosystem protection and restoration theory and practice[M]. Beijing, China WaterPower Press, 2010. (in Chinese))

[14] 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, Yongqin David Chen. Evaluation of ecological instream flow of the Pearl River Basin, South China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(8): 1828-1837. (in Chinese))

[15] 郭利丹,夏自强,李捷. 河流生态径流量常用计算方法的对比[J]. 人民黄河, 2008, 30(4): 28-30. (GUO Li-dan, XIA Zi-qiang, LI Jie. Comparison of river ecological runoff calculation method commonly used[J]. Yellow River, 2008, 30(4): 28-30. (in Chinese))

[16] 于龙娟,夏自强,杜晓舜. 最小生态径流的内涵及计算方法研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2004, 32(1): 18-22. (YU Long-juan, XIA Zi-qiang, DU Xiao-shun. Connotation of minimum ecological runoff and its calculation method[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(1): 18-22. (in Chinese))

(下转第 123 页)

- 蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 93-96. (LIU Guo-bin. Study on soil anti-scourability and its mechanism of grassland on Loess Plateau[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(1): 93-96. (in Chinese))
- [18] 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰. 林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J]. 北京林业大学学报. 2006(05): 67-72. (LIU Xiu ping, CHEN Li hua, SONG Wei feng. Study on the shear strength of forest root loess composite[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006(05): 67-72. (in Chinese))
- [19] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, et al. Root Strength and Root Area Ratio of Forest Species in Lombardy (Northern Italy)[J]. Plant and Soil, 2005, 278(1-2): 11-22.
- [20] Mattia C, Bischetti G B, Gentile F. Biotechnical Characteristics of Root Systems of Typical Mediterranean Species [J]. Plant and Soil, 2005, 278(1-2): 23-32.
- [21] 韩凤朋, 郑纪勇, 张兴昌. 黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. 农业工程学报. 2009, 25(02): 50-55. (HAN Feng peng, ZHENG Ji yong, ZHANG Xing chang. Plant root system distribution and its effect on slope land converted from farmland in the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(02): 50-55. (in Chinese))
- [22] 王阔, 黄晓乐. 根系-土复合体抗剪强度力学模型与实验分析[J]. 山西建筑. 2012, 38(06): 84-85. (WANG Kuo, HUANG Xiao le. Shear resistance mechanic model of root-soil composite and experimental analysis [J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(06): 84-85. (in Chinese))
- [23] 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰, 等. 油松根系抗拉应力与应变全曲线试验研究[J]. 中国水土保持科学. 2006, 4(2): 66-70. (LIU Xiu ping, CHEN Li hua, SONG Wei feng, et al. Experimental on resistance to tensile stress and complete stress-strain curves of root system of Pinus tabulaeformis[J]. Science of Soil and Water Conservation. 2006, 4(2): 66-70. (in Chinese))
- [24] 廖兴其. 根系研究方法评述[J]. 世界农业. 1995(07): 23-24. (LIAO Xing qi. A review of the methods of root [J]. world agriculture, 1995(07): 23-24. (in Chinese))
- [25] 黄瑞冬. 植物根系研究方法的发展[J]. 沈阳农业大学学报. 1991(02): 164-168. (HUANG Rui dong. Development of methods of studying root systems [J]. Journal of Shenyang Agricultural University. 1991(02): 164-168. (in Chinese))
- [26] 李建兴, 何丙辉, 谌芸, 等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报. 2013(10): 144-152. (LI Jian xing, HE Bing hui, CHEN Yun, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2013(10): 144-152. (in Chinese))
- [27] 李勇, 武淑霞, 夏侯国风. 紫色土区刺槐林根系对土壤结构的稳定作用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报. 1989, 4(02): 01-07. (LI Yong, WU Shu xia, XIAHOU Guo feng. Stabilization of soil structure by roots of artificial locust trees in purple soil region [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation. 1989, 4(02): 01-07. (in Chinese))
- [28] Hu X, Brierley G, Zhu H, et al. An exploratory analysis of vegetation strategies to reduce shallow landslide activity on loess hillslopes, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(4): 668-686.
- [29] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系[J]. 农业工程学报. 2009, 25(05): 40-46. (ZHU Hai li, HU Xia song, MAO Xiao qing, et al. Relationship between mechanical characteristics and anatomical structures of slope protection plant root [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(05): 40-46. (in Chinese))
- [30] 赵丽兵, 张宝贵. 紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J]. 农业工程学报. 2007, 23(09): 7-12. (ZHAO Li bing, ZHANG Bao gui. Experimental study on root bio-mechanics and relevant factors of medicago sativa and digitaria sanguinalis [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(09): 7-12. (in Chinese))

## (上接第 101 页)

- [17] 冯士刚, 艾芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 146-151. (FENG Shi gang, AI Qian. Application of fast and elitist non-dominated sorting genetic algorithm in multi-objective reactive power optimization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 146-151. (in Chinese))
- [18] 黄晓敏, 雷晓辉, 王宇晖, 等. 基于 NSGA-II 的水文模型参数多目标优化研究[J]. 人民长江, 2012, 43(2): 16-21. (HUANG Xiao min, LEI Xiao hui, WANG Yu hui, et al. Study of multi-objective optimization of parameters of HYMOD model using NSGA-II algorithm [J]. Yangtze River, 2012, 43(2): 16-21. (in Chinese))
- [19] 金鑫, 王凌河, 赵志轩, 等. 水库生态调度研究的若干思考[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 22-32. (JIN Xin, WANG Ling he, ZHAO Zhi xuan, et al. Reflections on the research of ecological operation of reservoirs [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 22-32. (in Chinese))
- [20] 董哲仁, 孙东亚, 赵金勇. 水库多目标生态调度[J]. 水利水电技术, 2007, 38(1): 28-32. (DONG Zhe ren, SUN Dong ya, ZHAO Jin yong. Multi-objective ecological operation of reservoirs [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(1): 28-32. (in Chinese))