

Multi-Objective Reservoir Operation under Different Ecological Processes

Yanping Ha¹, Tao Bai^{1*}, Fuqiang Qu², Yong Wu³, Yongxiao Liu³

¹State Key Lab Cultivation Base of Northwest Arid Ecology and Hydraulic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi

²State Grid Ankang Hydroelectric Power Company, Ankang Shaanxi

³Construction of Environmental Protection Bureau of Shaanxi Province Xixin District Fengxi New City Administrative Committee, Xianyang Shaanxi

Email: *baitao@xaut.edu.cn

Received: Mar. 24th, 2017; accepted: Apr. 11th, 2017; published: Apr. 14th, 2017

Abstract

Ecological problems, such as poor water quality, lack of self-purification ability and difficulties in ensuring the ecological flow, have been appeared frequently in Hanjiang River Basin. Ankang reservoir, with the largest capacity in the upper reaches of Hanjiang River, was chosen as the case study in this paper. Different ecological flow processes were obtained according to the river base flow, self-purification, sedimentation balance and the biological growth, and were considered as the ecological target of reservoir operation. Single objective models maximized power generation and minimized ecological water shortage and a multi-objective model considering the two objectives were established and solved by Genetic algorithms (GA) and non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II), respectively. It is shown that: 1) Compared with the operation model maximized power generation, the model minimized ecological water shortage reduced power generation by 1% and increased ecological guarantee rate by 5%, by which the present ecological requirements can be satisfied under sacrificed less power generation after taking account into ecological target; 2) Results of the single-objective model fall on the multi-objective Pareto curve, and the segmentation characteristics of the curve demonstrate the accuracy and reliability of the single and multi-objective results; 3) The impact of ecological runoff generation on power generation was evaluated by Loss-benefit ratio of ecology and power generation k , and 200% ecological runoff process was recommended as the ecological flow process under environmental change; 4) The ecological scheduling rules under the condition of ecological control water level are formulated, which provides technical support for intuitively and effectively guiding the ecological dispatching of Ankang reservoir.

Keywords

Multi-Objective Reservoir Operation, Ecological Guarantee Rate, Loss-Benefit Ratio, Control Water Level

不同生态需水过程下水库多目标优化调度

哈燕萍¹, 白涛^{1*}, 瞿富强², 吴勇³, 刘永孝³

作者简介: 哈燕萍(1993-), 女, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要从事水资源系统工程研究。

*通讯作者。

¹西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安

²国家电网安康水力发电公司, 陕西 安康

³陕西省西咸新区沣西新城管委会建设环保局, 陕西 咸阳

Email: *baitao@xaut.edu.cn

收稿日期: 2017年3月24日; 录用日期: 2017年4月11日; 发布日期: 2017年4月14日

摘要

针对汉江干流水质差、自净能力不足、生态流量难以保证等诸多生态问题, 以汉江上游流域内调节性能最好的安康水库为调节手段, 将河道基流、自净、冲淤平衡和生物生长的流量进行耦合得到不同生态径流过程作为生态目标。建立发电量最大、生态缺水量最小和兼顾发电和生态的多目标模型, 分别采用GA和NSGA-II求解结果表明: 1) 生态缺水量最小模型比发电量最大模型发电量减少了1%, 生态保证率提高了5%, 加入生态目标后, 损失较少的发电量即可满足河道生态流量的现状需求; 2) 各单目标模型的结果落在了多目标Pareto曲线上, 曲线的分段性特征论证了单、多目标结果的准确性和可靠性; 3) 以生态发电损益比 k 评价了各生态径流过程对发电的影响, 推荐200%生态径流过程作为未来环境变化下的生态流量过程; 4) 制定了生态控制水位限制条件下的生态调度规则, 为安康水库生态调度提供技术支撑。

关键词

多目标优化调度, 生态保证率, 发电损益比, 控制水位

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 流域河道生态问题逐渐成为水资源学、生态学领域的研究热点[1], 但不同流域河道生态问题不尽相同。汉江作为长江的第一大支流和引汉济渭工程的重要水源地, 具有战略性地位, 保护汉江水生态势在必行[2]。随着人类活动的加剧, 汉江河道水质和水量出现明显恶化: 河道内各类工业和生活污染物大量增加, 水质污染呈逐年加重趋势[3]; 径流量呈现减少趋势, 且水库的建设运行等人类活动对径流的直接影响程度高达 83.8% [4], 流速降低, 水体自净能力随之降低; 河道总体生态水文情势改变较大[5], 整体改变度为 39.21%, 造成河道内调水调沙及行洪能力下降, 以致汉江中游关键物种“四大家鱼”产卵量显著减少[6], 中下游湿地面积减少 64.8 平方公里[7], 严重影响流域内生态系统功能。

面临日趋严峻的生态问题, 应采取更为有效的非工程措施—水库调度, 以恢复和改善河道生态。与传统调度方式相比, 生态调度将生态环境作为主要目标之一, 生成一系列生态径流过程[8]。国外对水库生态调度的系统研究始于 20 世纪 70 年代, 随之我国生态调度[9] [10]研究也陆续出现显著成果, 郭文献[11]基于河流健康初步研究水库生态调度模式; 顾巍巍[12]等人基于解空间差分进化算法研究水电站生态调度, 建立考虑下游生态径流的发电优化调度模型, 实例证明生态调度是一种重要的非工程措施; 高宇[13]建立多目标模型综合考虑水库防洪、供水和生态需求, 结果表明必须进行生态调度才能保证河道不断流; 冯耀龙[14]建立生态-发电优化调度模型, 结果表明在兼顾河道生态需水的基础上, 可明显增加水库的总发电量; 陆延华[15]以下游生态需水为主要约

束, 采用系统仿真模拟计算, 指导水库调控下泄流量等。现有的生态目标往往不能结合流域内多种生态问题, 具有局限性, 且现阶段鲜有生态与发电多目标定量转化规律的研究。

基于此, 本文选取汉江上游河道为研究对象, 以上游调节性能最大的安康水库作为调控手段, 开展水库单-多目标优化调度。耦合不同生态过程作为生态目标, 建立生态、发电的单多目标模型, 运用 GA 及 NSGA-II 求解, 获得单多目标长系列与典型年结果。研究旨在生态与发电目标的量化, 揭示不同生态过程下生态与发电之间的转换规律, 制定直观、简明且易操作的生态调度策略。研究成果对于缓解汉江上游河段河道生态问题、指导安康水库现状与未来环境变化形势下的生态调度, 具有重要的理论意义和应用价值。格式也严格遵守汉斯论

2. 生态径流过程的生成

对于汉江安康段河道现有的生态问题, 生态目标主要包括以下几部分[16] [17]: 1) 河道内必须保持的基本生态需水量; 2) 维持稀释自净能力所需水量; 3) 河道冲淤平衡所需水量用水; 4) 模拟自然水文情势, 为河流重要水生生物生长、繁殖提供有利条件。因此, 本研究主要考虑维持河道基本生态需水量, 河流自净需水量, 河流冲淤平衡需水量, 维持水生生物栖息地所需水量耦合生成生态径流过程。

2.1. 河道内基本生态需水量

河道内基本生态需水量指为维持和保护河流最基本的生态功能不受破坏, 河道内保证的最小水量, 具有优先满足性。采用流量历时曲线法[18]和 90% 保证率法[19]计算基本生态流量, 流量历时曲线法是利用历史流量资料构建各月流量历时曲线, 将某个累积频率相应的流量作为生态流流量。90% 保证率法是历史资料中 90% 保证率最枯月平均流量, 其计算标准及具体使用过程详见参考文献[19]。计算结果分别是 $57.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $68 \text{ m}^3/\text{s}$ 。因基本生态需水流量本质是对河道极端状态的描述, 故河道基本生态流量取最小值 $57.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.2. 河流自净需水量

河流自净需水量指的是通过河流水体对排入河道中的污染物净化来保护和改善河流水质, 在保证水体满足生态环境功能要求下河道中所需要保持的最小流量。采用基于 $7Q_{10}$ [20] [21] 的十年最枯月平均流量法和 90% 保证率法计算河流自净需水量, 基于 $7Q_{10}$ 的十年最枯月平均流量法计算获得每十年最枯月平均流量如表 1 所示。由于近年来, 河道变化, 认为越接近现状年, 河流越能更好地反应纳污能力, 因此, 选用 2005~2015 年最枯月平均流量 $62 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为河流自净所需流量。考虑到 90% 保证率法计算的相应流量为 $68 \text{ m}^3/\text{s}$, 本文河流自净需水量取最小值 $62 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.3. 河流冲淤平衡需水量

对于安康水电站来说, 河流冲淤平衡所需水量较小, 多年平均输沙量为 2540 万 t, 多年最大月平均含沙量为 $6.15 \text{ kg}/\text{m}^3$, 74.7% 集中在 7~9 月, 为提高水资源利用率及输沙效率, 采用在汛期 7~9 月进行输沙。因此, 忽略非汛期较小的输沙量, 通过人工调水调沙手段, 利用汛期较大的洪水量和含沙量来完成输沙要求, 也必将有利于水资源最大限度开发利用。由式(1)可计算河流冲淤平衡所需水量[22], 得出安康水库输沙流量为 $131 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

$$W_{TS} = \alpha \times S_T / C_{\max} \quad (1)$$

式中: Q_{TS} 为输沙需水流量(m^3/s), W_{TS} 为输沙需水量(10^8 m^3), S_T 为多年平均输沙量(10^4 t), C_{\max} 为多年最大月平均含沙量(kg/m^3), α 为单位换算系数, 其值为 31.536×10^{-2} 。

2.4. 维持水生生物栖息地所需水量

水生生物栖息地与湿周有直接联系, 只要保持一定水生生物栖息地的湿周, 就能满足水生生物正常生存的需求。通过建立河道断面湿周与流量之间的关系曲线图, 确定该曲线的拐点, 该拐点对应的流量值就是维持水

生生物栖息地生态需水量[23][24]。由实测断面资料,逐段累加不同水位对应的湿周值,查找相应水位对应的流量,绘制湿周流量关系图如图1。

湿周与流量的曲线方程为:

$$\chi = \chi(Q) = 50.202 \ln(Q) + 62.809 \quad (2)$$

湿周 - 流量关系曲线曲率 k 的计算公式为:

$$k = \left| \frac{\chi(Q)''}{\left(1 + \chi(Q)'^2\right)^{3/2}} \right| \quad (3)$$

为求得曲率最大的一点,需对式(3)求一阶导数,一阶导数值等于0的点即为曲率最大点,其对应的流量值即为河道最小生态流量。即令 $dk/dQ = 0$, 求解出曲率 k 的最大点,其对应的流量值为 $35.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 以此为安康站河道断面的维持生物栖息地需水流量。

根据以上不同生态功能用水流量,结合各典型年来水特点,确定丰、平、枯水年份生态径流过程,分别为:最优生态径流过程、适宜生态径流过程、最小生态径流过程[25]。最优生态径流过程是指在汛期考虑河道冲淤平衡需水量,在供水期考虑河道内基本生态需水和河流自净需水所形成的生态径流过程;适宜生态流量过程是指在汛期考虑冲淤平衡需水,在供水期满足河道基本生态需水和维持水生生物栖息地需水所形成的生态径流过程;最小生态流量过程是指在汛期和供水期都仅考虑维持水生生物栖息、河道基本生态需水所形成的生态径流过程。上述生态径流过程是安康水库兼顾生态时的基本生态目标,调度期内生态目标耦合时取同一时期各生态计算结果的上包线,如表2。

3. 模型构建及求解

3.1. 单目标模型

建立了发电量最大(模型一)和生态缺水量最小(模型二)的单目标模型,运用遗传算法求解。模型一和模型二

Table 1. Average flow of driest month for each decade

表 1. 每十年最枯月平均流量

时段(年)	55~65	65~75	75~85	85~95	95~05	05~15
流量(m^3/s)	86.0	11.3	83.0	61.0	60.0	62.0

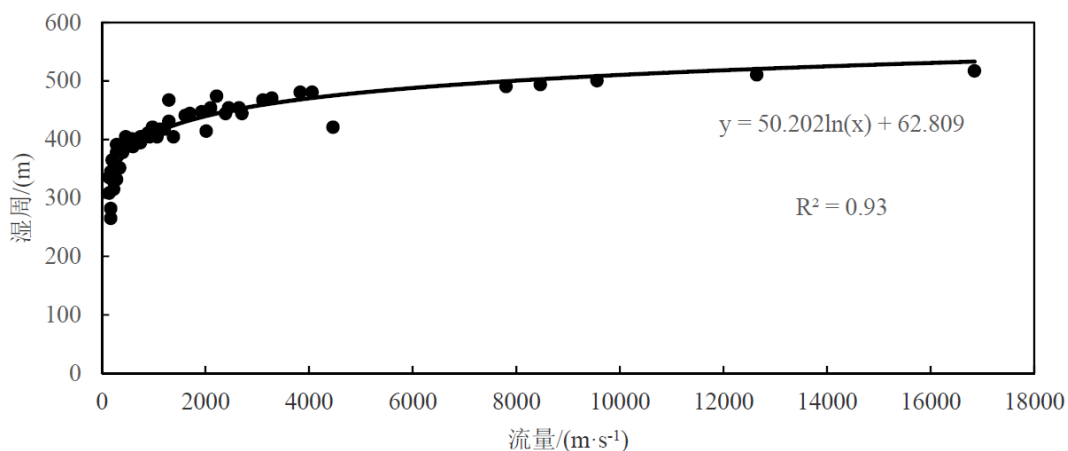


Figure 1. Relationship curve between wetted perimeter and flow

图 1. 湿周 - 流量关系曲线

Table 2. Ecological runoff processes for each typical year
表 2. 各典型年的生态径流过程

典型年	汛期(m ³ /s)	非汛期(m ³ /s)
丰水年(最优生态径流)	131	62
平水年(适宜生态径流)	131	57.3
枯水年(最小生态径流)	57.3	57.3

分别用于模拟安康水库实际调度和制定满足现状生态需求的调度方案。

3.1.1. 发电量最大模型

目标函数为发电量最大：

$$\text{Max}E = \sum_{t=1}^T N(t) \times \Delta t \quad (4)$$

约束条件：

$$s.t. \begin{cases} V(t+1) = V(t) + (Q_I(t) - Q_O(t)) \times \Delta t \\ Q_{O_{need}}(t) \leq Q_O(t) \leq Q_{O_{max}}(t) \\ Z_{min}(t) \leq Z(t) \leq Z_{max}(t) \\ N_{min}(t) \leq N(t) \leq N_{max}(t) \end{cases} \quad (5)$$

3.1.2. 生态缺水量最小模型

目标函数为生态缺水量最小：

$$\text{Min}W = \sum_{t=1}^T Q_S(t) \times \Delta t \quad (6)$$

约束条件：

$$s.t. \begin{cases} V(t+1) = V(t) + (Q_I(t) - Q_O(t)) \times \Delta t \\ Q_{O_{min}}(t) \leq Q_O(t) \leq Q_{O_{max}}(t) \\ Z_{min}(t) \leq Z(t) \leq Z_{max}(t) \\ N_P(t) \leq N(t) \leq N_{max}(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中： E 为调度期内水电站总发电量，亿 kW·h； W 为生态缺水量，亿 m³； t 、 T 分别表示调度时期内的时段编号以及总时段数； $N(t)$ 表示电站第 t 时段的平均出力； $V(t)$ 、 $V(t+1)$ 分别表示第 t 时段的始、末库容； $Q_I(t)$ 、 $Q_O(t)$ 分别表示第 t 时段的入库和出库流量； $Q_{O_{max}}(t)$ 、 $Q_{O_{min}}(t)$ 分别表示出库流量的上下限， $Q_{O_{min}}(t)$ 由生态要求等确定，其中 $Q_{O_{need}}(t)$ 为基本生态径流过程， $Q_{O_{max}}(t)$ 要根据下游防洪等要求确定； $Q_S(t)$ 为各水电站的生态缺水量； $Z_{max}(t)$ 、 $Z_{min}(t)$ 分别表示第 t 时段允许水位的上下限， $Z_{min}(t)$ 一般取死水位， $Z_{max}(t)$ 为正常高水位； $N_{max}(t)$ 、 $N_{min}(t)$ 分别表示第 t 时段允许出力的上下限制， $N_{max}(t)$ 为电站的装机容量。

3.2. 兼顾生态、发电的多目标模型

兼顾生态和发电的多目标调度模型(模型三)，以生态缺水量最小和发电量最大为目标，选择死水位为调度期起调水位，综合考虑各种约束条件，协调缺水量和发电量两个目标，以此确定出库流量过程，得到多目标均衡方案。

发电量最大:

$$\text{Max}E = \sum_{t=1}^T N(t) \times \Delta t \quad (8)$$

生态缺水量最小:

$$\text{Min}W = \sum_{t=1}^T Q_s(t) \times \Delta t \quad (9)$$

式中涉及变量与单目标变量含义相同, 约束条件与式(2)相同。

3.3. 模型求解技术

单目标模型运用遗传算法(GA) [26] [27]求解, 其中种群规模为 300, 遗传操作选择均匀交叉算子、均匀变异算子、均匀排序选择算子, 各算子参数分别为 0.8、0.05、0.5; 终止条件为最大迭代次数 500 代。多目标模型运用 NSGA-II [28]求解, 各参数保持初始设置, 适应度计算后均需非支配排序, 得到 Pareto 曲线, 曲线上各点皆可作为模型的均衡解。

4. 应用实例

安康水库位于汉江上游陕西省境内, 是一座以发电为主, 兼顾防洪、航运等综合利用的大型水利枢纽。1990~2014 年多年平均入库径流量为 160.34 亿 m^3 , 电站装机容量 85 万 kW, 多年平均发电量为 28 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 保证出力为 17 万 kW, 最大发电流量 1216 m^3/s , 出力系数为 8.4。安康水库为不完全年调节水库, 总库容为 32 亿 m^3 。水库死水位为 305 m, 正常蓄水位为 330 m, 防洪限制水位 325 m。

4.1. 单目标结果

4.1.1. 长系列结果

以多年平均发电量和生态保证程度分析长系列计算结果, 以探究生态目标对发电目标的影响。鉴于安康水电站于 1990 年全面投产发电, 本文将长系列过程分为 1950~1989 年和 1990~2014 年, 分别就单目标优化结果与设计值、实际值比较, 如表 3。

表 3 中 1990~2014 年近 25 年长系列的不同模型生态保证程度可由年均生态缺水量和生态保证率两种指标表示。可以看出: 模型二多年平均生态缺水量最小为 0.19 亿 m^3 ; 实际运行生态保证率仅为 78%, 河道生态需要进一步改善; 模型一生态保证率为 90%, 达不到 95% 的设计值; 模型二的生态保证率达到设计值 95%, 比模型一提高了 5%, 比实际值提高了 17%。1950~1989 年系列, 模型一的多年平均发电量为 29.41 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 较设计值 28 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 增加了 5%。1990~2014 年系列, 模型一的多年平均发电量为 24.53 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 较实际值 23.25 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 增加了 6%。模型二的发电量为 24.28 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 较模型一减少 1%, 说明考虑生态需水的出库流量改变了最大发电量出库流量过程, 造成安康水电站发电量的减少。安康水库的实际值与设计值有较大差距, 主要与电站投产发电试运行期效率低以及来水较少等造成的。

4.1.2. 典型年结果

以 1990~2014 年来水资料为准, 选取丰、平、枯水年分别为 2010~2011 年(20%来水频率)、1993~1994 年(50%来水频率)、1994~1995 年(80%来水频率)。本文从水位、出库流量和出力的变化过程, 对比分析单目标模型各典型年的计算结果, 图 2~图 4 中从左到右依次对应为丰、平、枯水年。

图 2 给出了各单目标模型水位的典型年变化过程。可以看出: 1) 模型一与实际运行值相比, 丰水年内水位过程基本一致, 平水年和枯水年内桃汛期水位差异较大, 模型一充分利用前汛期来水抬高水位发电, 而实际过程低水位运行产生较多弃水, 水资源利用率降低。2) 模型二与模型一比较, 丰水年和平水年内水位过程有较小

Table 3. Optimized results of long series data for single objective
表 3. 单目标模型长系列资料的优化结果

模型	年均生态缺水量 /亿 m ³	生态保证率 /%	多年平均发电量	
			1950~1989 年径流系列	
			1950~1989 年径流系列 /亿 kW·h	1990~2014 年径流系列 /亿 kW·h
实际值	1.19	78	28*	23.25
模型一	0.26	90	29.41	24.53
模型二	0.19	95	-	24.28

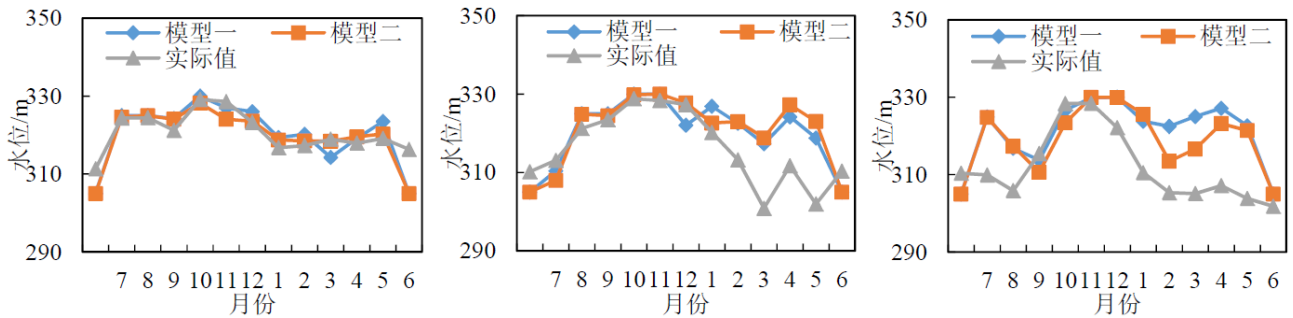


Figure 2. Water level processes during each typical year

图 2. 各典型年水位变化过程

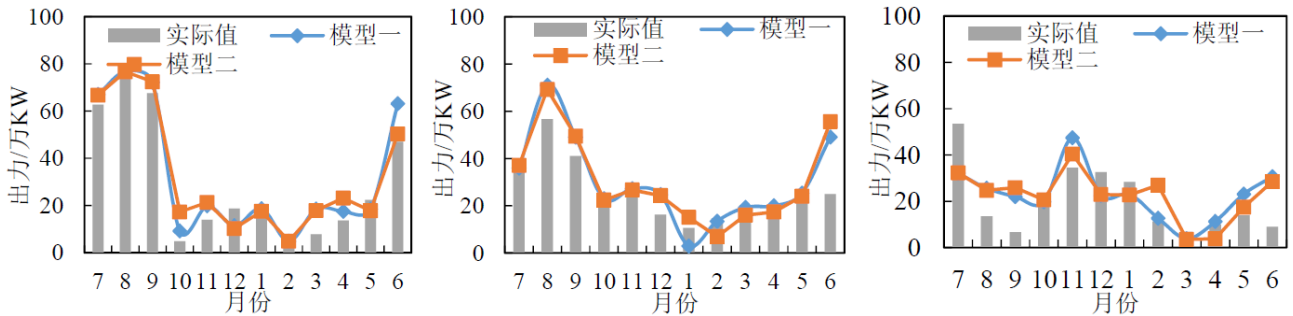


Figure 3. Output process during each typical year

图 3. 各典型年出力变化过程

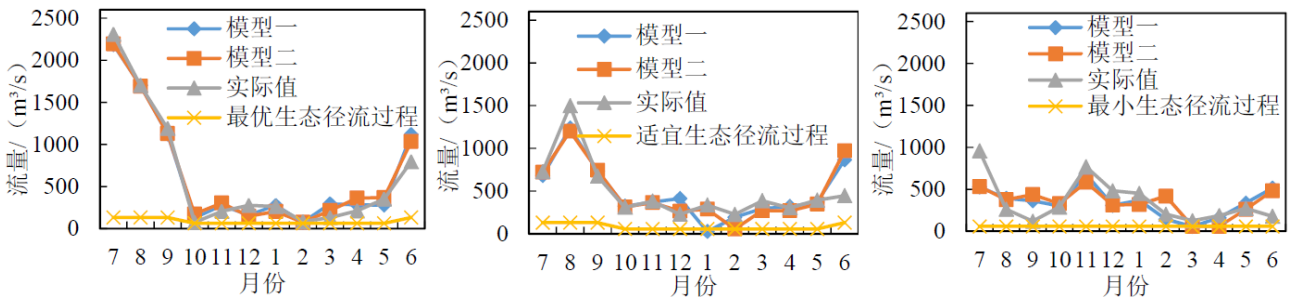


Figure 4. Outflow process during each typical year

图 4. 各典型年出库流量变化过程

差异，模型二在枯水期 12~2 月水位均不同程度降低，枯水年内模型二为满足下游生态需水要求在 2~4 月加大出库，保持低水位运行。

图3给出了各单目标模型发电量的典型年变化过程。可以看出：1) 实际运行中过分追求发电量最大导致各典型年枯水期12~4月平均出力较低，分别为13.19、16.05和14.07万KW；2) 模型一各典型年枯水期12~4月平均出力分别为14.18、16.08和14.69万KW，相比于实际值显著增加；3) 模型二各典型年枯水期12~4月平均出力分别为14.75、16.12和16.10万KW，均大于模型一的出力值。可见，模型二考虑生态目标后，增大了枯水期的出库流量和出力。

图4给出了各单目标模型出库流量的典型年变化过程。可以看出：1) 实际运行中丰平枯典型年的生态保证月数均为12，都满足了生态保证要求；2) 模型一未考虑生态约束，各典型年的生态保证月数分别为12、11、11个月，平、枯水年未能满足生态保证要求，平水年1月、枯水年3月生态流量破坏；3) 模型二考虑生态目标，各典型年、特别是枯水年均能满足生态保证率。

将各典型年各单目标的发电效益和生态缺水量统计整理，如表4。分析不同典型年模型一与模型二发电效益下降和生态保证增加的变化关系。

由表4可以看出：考虑生态的模型二相比于模型一，丰水年发电效益下降了0.4%，生态缺水量保持不变；平水年发电效益下降了0.6%，生态缺水量减少了11.54%；枯水年发电效益下降了2%，生态缺水量减少了40.90%，体现出发电与生态目标之间呈显著矛盾关系。

4.2. 多目标结果

本文选取枯水年求解发电、生态的多目标优化调度模型，求解结果以Pareto前端非劣解集呈现。将单目标模型一的发电量最大值、模型二的生态缺水量最小值点绘在Pareto前端最优解曲线，如图5。由图5可知：

1) Pareto曲线前半段呈现为直线，说明发电量的微小调整即可满足生态的需求，竞争关系不明显；Pareto曲线后半段呈现为曲线，说明两个目标之间存在较强的竞争关系，符合多目标解集分布规律；

2) 将单目标结果绘制图上，依据两目标之间此消彼长的关系，将Pareto曲线外延，发电量最大和缺水量

Table 4. Profits and losses of ecology and power generation for different typical years

表4. 不同典型年生态和发电的损益情况

典型年	发电效益(亿 kW·h)		发电效益下降比例 %	生态缺水量(亿 m ³)		生态保证增加比例 %
	模型一	模型二		模型一	模型二	
丰水年	29.14	29.03	0.40	0.00	0.00	0.00
平水年	24.30	24.01	1.19	0.26	0.23	11.54
枯水年	20.07	19.67	2.00	0.66	0.39	40.90

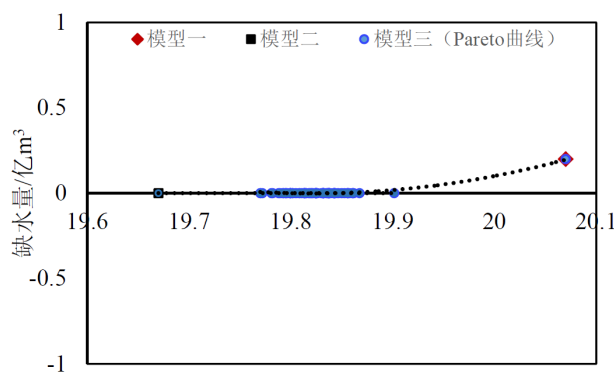


Figure 5. Distribution of single and multi-objective solutions
图5. 单 - 多目标解空间分布图

最小的单目标极值点恰好落在 Pareto 曲线的外延线上，且为曲线的两个端点，论证了单、多目标结果的准确性和可靠性。

3) 单 - 多目标的 Pareto 曲线可将解集分为两段：前段以单目标发电量最大值为起点、Pareto 曲线中直线段的右端点为终点，后段以 Pareto 曲线中直线段的右端点为起点、单目标缺水最小的极值点为终点。

4) 前段 Pareto 曲线的生态水量都保持为 0，在追求发电量最大时，多目标 Pareto 曲线中直线段的右端点为临界值点，其发电量为 19.9 亿 kW·h，生态缺水为 0。此时，可在满足生态的基础上达到发电量的最大值，推荐为最佳均衡解。超过该临界点，Pareto 呈现出曲线特征，即发电和生态呈现处对立矛盾的关系，可为决策者提供多种均衡方案，见图 6。

4.3. 不同生态过程的多目标结果

目前，长江水利委员会(下文简称：长委会)对汉江等长江支流要求的河道生态控制流量偏小。对于安康水电站而言，现有的运行方式下兼顾相对偏小的基本生态目标，基本可以满足生态需水量和保证率的要求，且对发电的影响微乎其微。在未来变化环境下，随着河道生态健康认识和标准的提高，安康水库下游的生态流量呈现出需求增大的趋势。因此，探讨变化环境下加大生态控制流量的多目标调度，量化生态与发电的损益规律，具有重要的意义。本文在现状基本生态过程的基础上分别增加 100%、200%、300%、400%、500%，生成不同生态径流过程，探究不同程度下恢复和维护河流生态健康对发电、运行水位的影响程度。

4.3.1. 不同生态目标对发电效益的影响

采用去量纲法分析不同生态过程和基本生态过程的模型求解结果，由于发电量与生态补给量不是单一的直线关系，因此，去除量纲后分别得到变量为 p 和 q 系列，采用 p 和 q 的比值表示生态发电损益比 k 。 k 值越大，单位生态补水所造成的发电效益损失越小。

$$p_i = (E - E_i) / E \tag{10}$$

$$q_i = (R - R_i) / R \tag{11}$$

$$k = p_i / q_i = (E - E_i) / (R - R_i) \tag{12}$$

式中： E 为基本生态过程下的发电量， E_i 为增加 $i\%$ 比例的生态过程下的发电量， R 为基本生态过程下的生态补给量， R_i 为增加 $i\%$ 比例的生态过程下的生态补给量。

根据长系列优化计算结果，发电量、生态补给量及生态发电损益比等调度指标的变化如表 5 所示。可以看出：随着生态需水量的增大，发电量出现不同程度的减少。

将 p 、 q 的比值点绘在图 7 中，各线段的斜率即为生态发电损益比 k 值。 k 值最大，意味着单位生态需水量

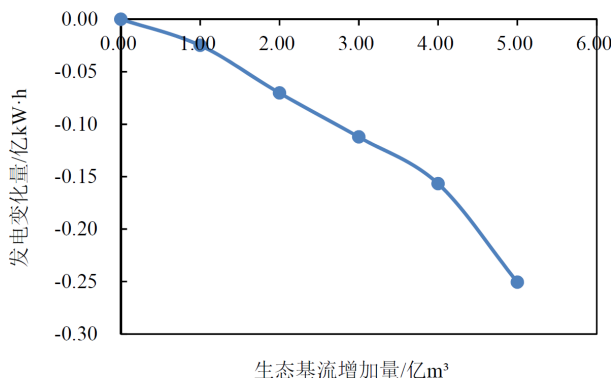


Figure 6. Profit and loss relationship between eco-power generation
图 6. 生态与发电的损益关系

的增加引起的发电损失量最小。图7中,当生态需水量增加100%时, p 、 q 斜率,即 k 值取最大值-0.026,即此时是水库在生态发电目标达到最佳协调状态,因此,在未来变化环境下推荐在基本生态径流过程增加100%的生态径流过程作为生态目标,即200%生态径流过程。

4.3.2. 不同生态目标下的最低控制水位

为了满足不同生态控制流量的目标,采用最低水位作为控制过程,为调度决策者提供简易可操作的调度方式。本文以各月95%的来水序列作为极端枯水系列,并以基本生态、长委会要求的规划生态和增加100%的生态过程为不同生态目标,如图7。图8为模型求解得到不同生态需水过程下的最低控制水位过程。

Table 5. Calculated results of long series data under different growth rates of ecological basis flow

表5. 不同生态基流涨幅下的长系列计算结果

调度指标	+100%生态	+200%生态	+300%生态	+400%生态	+500%生态
生态需水量/亿 m^3	54.40	81.60	108.80	136.00	163.20
发电量/亿 kW·h	23.65	22.66	21.35	20.28	18.52
p	-0.026	-0.062	-0.111	-0.148	-0.215
q	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
k	-0.026	-0.031	-0.037	-0.037	-0.043

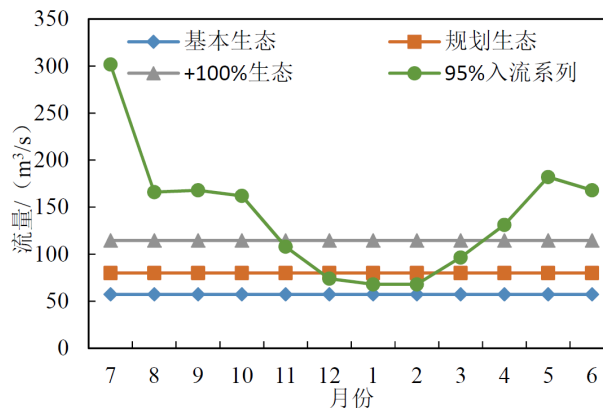


Figure 7. Process of inflow and different ecological flow

图7. 来水过程与不同生态控制流量过程

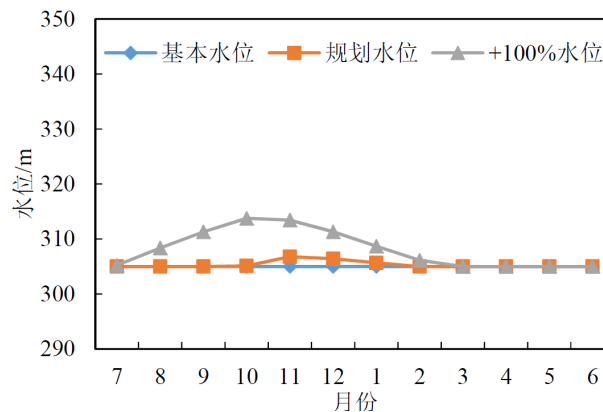


Figure 8. Process of minimum water level in different eco-water demand

图8. 不同生态需水过程的最低水位

由图 8 可知:

- 1) 水位在死水位 305 m 即可满足基本生态过程;
- 2) 规划生态流量要求水库 11~来年 1 月的水位分别在 307 m、306 m、306 m 以上运行;
- 3) 生态需水量增加一倍, 即当生态发电损益比最大时, 水库自 8 月~来年 2 月必须在死水位以上运行, 最低水位分别是 308 m、311 m、314 m、313 m、311 m、309 m、306 m, 方可满足不同生态流量要求。

以上最低控制水位可满足不同生态情景下的生态流量需求, 可作为水库运行过程中的生态控制水位, 大大增强了安康水库生态调度的可操作性。

5. 结论与建议

1) 单 - 多目标解集在 Pareto 曲线上空间分布的分段性特征表明: 现状情景下以基本生态过程的生态目标对安康水电站的发电目标影响不大, 即生态与发电矛盾不突出, 可通过水库的调度解决生态问题。

2) 定义了生态发电损益比 k , 给出了不同生态过程下的发电量与生态需水量变化过程, 揭示了发电与生态目标之间的转换规律, 推荐了环境变化下发电与生态最大损益比的生态径流过程。

3) 设置 95% 来水频率的极端枯水系列, 得到了不同生态过程下的生态控制水位, 为直观、有效地指导安康水库生态调度提供了技术支撑。

4) 本文以安康单一水库调度作为恢复汉江河道生态健康的调节手段, 具有一定的局限性, 下一步将考虑安康上游石泉、喜河和下游旬阳、蜀河等水库群的补偿作用和反调节能力, 探讨汉江干流梯级水库群联合调度下的河道生态健康问题。

基金项目

国家自然科学基金(51409210, 51190093, 91325201); 水利部公益性行业科研专项(201501058); 陕西省水利科技计划项目(2016slkj-8)。

参考文献 (References)

- [1] 毛战坡, 王雨春, 彭文启, 等. 筑坝对河流生态系统影响研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 135-140.
MAO Zhanpo, WANG Yuchun, PENG Wernqi, et al. Advances in effects of dams on river ecosystem. *Advances in Water Science*, 2005, 16(1): 135-140. (in Chinese)
- [2] 刘波. 汉江流域安康段水污染现状及防治对策[J]. 现代物业, 2010, 9(3): 115-117.
LIU Bo. The present environmental condition and countermeasures of Hanjiang River in Ankang period. *Modern Property Management*, 2010, 9(3): 115-117. (in Chinese)
- [3] 郭文献, 付意成, 闫丽娟, 等. 治理修复型水生态补偿问题分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(9): 1538-1546.
GUO Wenxian, FU Yicheng, YAN Lijuan, et al. Analysis of watershed treatment & restoration water eco-compensation. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(9): 1538-1546. (in Chinese)
- [4] 马聪, 鲁春霞, 李亦秋, 等. 安康水库下游径流演变及水库运行对径流影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(11): 1433-1440.
MA Cong, LU Chunxia, LI Yibo, et al. Runoff change in the lower reaches of Ankang reservoir and the influence of Ankang reservoir on its downstream. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(11): 1433-1440. (in Chinese)
- [5] 毛淘金, 曹学章, 陈斌. 安康水库对下游生态水文情势的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(7): 92-96.
MAO Taojin, CAO Xuezhang and CHEN Bin. The influence of operation of Ankang reservoir on eco-hydrological characteristics in low reaches of Hanjiang river. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(7): 92-96. (in Chinese)
- [6] 孙义, 邵东国, 顾文权. 基于关键物种繁殖的汉江中游生态需水量计算方法[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(3): 97-99.
SUN Yi, SHAO Dongguo and GU Wenquan. Calculation approach of ecological water demand based on breeding of critical species in the middle reaches of Hanjiang River. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2008, 6(3): 97-99. (in Chinese)
- [7] 樊皓, 刘金珍, 王中敏. 汉江中下游湿地面积减小后的生态系统服务价值损失[J]. 湿地科学, 2016, 14(4): 576-579.
FAN Hao, LIU Jinzhen and WANG Zhongmin. The loss of ecological service value after wetland area decreasing in middle

- and lower reaches of Hanjiang River. *Wetland Science*, 2016, 14(4): 576-579. (in Chinese)
- [8] 于松延, 徐宗学, 武玮. 基于多种水文学方法估算渭河关中段生态基流[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(2/3): 175-179.
YU Songyan, XU Zongxue and WU Wei. Ecological baseflow in the Guanzhong reach of the Wei river estimated by using different hydrological methods. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2013, 49(2/3): 175-179. (in Chinese)
- [9] 杨芳丽, 张小峰, 谈广鸣. 考虑生态调度的水库多目标调度模型初步研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(4): 433-437.
YANG Fangli, ZHANG Xiaofeng and TAN Guangming. Elementary study of multi-objective operation model considering ecological operation. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2010, 43(4): 433-437. (in Chinese)
- [10] 祝杰, 陈森林, 万飏, 等. 漳河水库多目标中长期优化调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(9): 60-62.
ZHU Jie, CHEN Senlin, WAN Biao, et al. The application of NSGA-II for medium or long-term multi-objective optimal scheduling in Zhanghe reservoir. *China Rural Water and Hydropower*, 2013(9): 60-62. (in Chinese)
- [11] 张洪波, 王义民, 蒋晓辉, 等. 基于生态流量恢复的黄河干流水库生态调度研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 15-21.
ZHANG Hongbo, WANG Yimin, JIANG Xiaohui, et al. Ecological regulation of reservoirs on the Yellow River mainstream oriented to ecological flow restoration. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(3): 15-21. (in Chinese)
- [12] 顾巍巍, 杨怡青, 钟平安, 等. 基于解空间差分进化算法的水电站生态调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(11): 163-167.
GU Weiwei, WANG Yiqing, ZHONG Pingan, et al. Ecological operation of the hydropower station based on feasible solution space-modified differential evolution algorithm. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(11): 163-167. (in Chinese)
- [13] 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. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(3): 186-190. (in Chinese)
- [14] 冯耀龙, 田伊池, 韩金强, 等. 水库生态-发电优化调度及应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(2): 137-141.
FENG Yaolong, TIAN Yichi, HAN Jinqiang, et al. Reservoir ecological power optimal operation and its applied research. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(2): 137-141. (in Chinese)
- [15] 陆延华, 张建平. 棋盘山水库多目标生态调度研究[J]. 吉林水利, 2014(2): 19-23.
LU Yanhua, ZHANG Jianping. The research of multi-objective ecology dispatch in Qipanshan reservoir. *Jilin Water Resources*, 2014(2): 19-23. (in Chinese)
- [16] 李文生, 许士国. 太子河河道生态环境需水量研究[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(1): 116-120.
LI Wensheng, XU Shiguo. Study of water required for ecological environment in Taizi river. *Journal of Dalian University of Technology*, 2006, 46(1): 116-120. (in Chinese)
- [17] 崔树彬. 关于生态环境需水量若干问题的探讨[J]. 中国水利, 2001(8): 71-74.
CUI Shubin. Discussion on some problems of eco-environmental water requirement. *China Water Resources*, 2001(8): 71-74. (in Chinese)
- [18] 门宝辉, 林春坤, 李智飞, 等. 永定河官厅山峡河道内最小生态需水量的历时曲线法[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 52-56.
MEN Baohui, LIN Chunkun, LI Zhifei, et al. Application of flow duration curve method in calculating instream minimum ecological water demand in Guanting gorge of Yongding river. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2012, 10(2): 52-56. (in Chinese)
- [19] 朱才荣, 张翔, 穆宏强. 汉江中下游河道基本生态需水与生径比分析[J]. 人民长江, 2014, 45(12): 11-15.
ZHU Cairong, ZHANG Xiang and MU Hongqiang. Analysis on basic eco-water demands and REF in mid-lower reaches of Hanjiang river. *Yangtze River*, 2014, 45(12): 11-15. (in Chinese)
- [20] STANLNAKER, C. B. *The Instream Flow Incremental Methodology: A Primer for IFIM*. National Ecology Research Center. International Publication, Fort Collins, Colorado, USA, 1994.
- [21] KING, J. M., LOUW, D. *Instream Flow Assessments for Regulated Rivers in South Africa Using the Building Block Methodology*. Aquatic Ecosystem Health Restoration, 1998, 1(2): 109-124.
- [22] 慕琳. 四川天全白沙河小流域生态需水及用水分配研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2008.
MU Lin. Study on ecological water demand and water allocation in the small basin of Baisha River in Tianquan county of Sichuan. Nanjing, Hohai University, 2008. (in Chinese)
- [23] 刘苏峡, 莫兴国, 夏军, 等. 用斜率和曲率湿周法推求河道最小生态需水量的比较[J]. 地理学报, 2006, 61(3): 273-281.
LIU Suxia, MO Xingguo, XIA Jun, et al. Uncertainty analysis in estimating the minimum ecological instream flow requirements via wetted perimeter method: Curvature technique or slope technique. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(3): 273-281. (in Chinese)
- [24] 吉利娜, 刘苏峡, 王新春. 湿周法估算河道内最小生态需水量——以滦河水系为例[J]. 地理科学进展, 2010, 29(3): 287-

291.

JI Lina, LIU Suxia and WANG Xinchun. Wetted perimeter approach to estimate instream flow requirements: A case study in Luanhe Water System. *Progress in Geography*, 2010, 29(3): 287-291. (in Chinese)

- [25] 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 Heping, LIU Dengfeng, TIAN Fuqiang, et al. A method of ecological reservoir reoperation based-on ecological flow regime. *Advances in Water Science*, 2008, 19(3): 325-332. (in Chinese)
- [26] 施展武, 罗云霞, 邱家驹. 基于 Matlab 遗传算法工具箱的梯级水电站优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2005, 25(11): 30-33.
SHI Zhanwu, LUO Yunxia and QIU Jiaju. Optimal dispatch of cascaded hydropower stations using Matlab genetic algorithm toolbox. *Electric Power Automation Equipment*, 2005, 25(11): 30-33. (in Chinese)
- [27] 王东泉, 李承军, 张铭. 基于遗传算法的水库中长期调度函数研究[J]. *水力发电*, 2006, 32(10): 92-94.
WANG Dongquan, LI Chengjun and ZHANG Ming. Research on the function of reservoir long-term operation based on genetic algorithms. *Hydroelectric Power*, 2006, 32(10): 92-94. (in Chinese)
- [28] 贡汝安, 董增川, 王好芳. 基于 NSGA-II 目标优化调度[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2010, 40(6): 124-128.
YUN Ruan, DONG Zengchuan and WANG Haofang. Multi-objective optimization of a reservoir based on NSGA-II. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2010, 40(6): 124-128. (in Chinese)