

# Research on Ecological Operation of Xiaolangdi-Xixiyuan Cascade Reservoirs

Xuejiao Meng, Jianxia Chang, Xuebin Wang, Tian Tian

State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an  
Email: [mengxuejiao@163.com](mailto:mengxuejiao@163.com)

Received: Oct. 1<sup>st</sup>, 2014; revised: Oct. 8<sup>th</sup>, 2014; accepted: Oct. 15<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 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

---

## Abstract

The cascade reservoir operation just considering power generation of the Lower Yellow River has caused serious environmental problems, because it ignored the ecological water requirement. Therefore, an ecological operation model of Xiaolangdi-Xixiyuan cascade reservoirs was developed to explore trade-offs between hydropower generation and ecological water requirement. The results show that the new ecological operation can greatly improve the ecological environment in the case of reducing the power generation, which has vital significance on the ecological environment management and restoration.

## Keywords

Lower Yellow River, Reservoir Operation, Ecological Water Demand, Power Generation

---

# 小浪底 - 西霞院梯级水库生态调度研究

孟雪姣, 畅建霞, 王学斌, 田甜

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, 西安  
Email: [mengxuejiao@163.com](mailto:mengxuejiao@163.com)

收稿日期: 2014年10月1日; 修回日期: 2014年10月8日; 录用日期: 2014年10月15日

作者简介: 孟雪姣(1988-), 女, 硕士研究生, 主要从事水库调度研究。

## 摘要

黄河下游水库群调度主要以发电为目标, 忽视了生态用水的要求, 造成了严重的生态环境问题。针对这些问题, 建立水库生态调度模型, 并对小浪底西霞院梯级水库进行研究, 结果发现, 满足生态调度的水库调度, 在减少少量发电的情况下, 能很大程度的改善生态功能, 对于生态环境的治理和恢复具有重要的意义。

## 关键词

黄河下游, 水库调度, 生态需水, 发电量

## 1. 引言

大量的水利工程改变了河流的天然水文情势, 工程上下游的物理性质和生态环境特征也发生了剧烈变化, 这些变化大部分对于河流健康和生态环境是不利的[1]。其负面影响体现在: 河流水资源量减少, 水生生物多样性受到严重威胁; 下游河道萎缩, 河流过流能力下降; 天然湿地面积萎缩, 生物多样性衰减等。针对这些问题, 人们提出生态调度的概念, 即运用考虑生态的水库调度等技术手段, 使得水资源开发利用既要为经济社会发展提供服务, 又要减轻对河流健康和生态环境的不利影响, 保护和改善河流系统和生态环境[2]-[4]; 文献[5]-[8]指出水库生态调度是水库运行管理过程中兼顾生态因素的调度方式, 在河流生态需水规律研究的基础上, 通过调整水库调度运行方式, 尽量满足河流生态系统的需水要求; 文献[9]探讨了水库生态调度的概念和任务, 建立了水库生态调度多目标模型, 并利用可行搜索离散微分动态规划算法对模型求解。文献[10] [11]通过考虑生态流量目标需求, 建立了水库群生态用水调度模型, 并根据长系列优化运行的结果, 对考虑生态的水库群调度规则和生态流量满足程度进行分析。黄河流域针对出现的生态问题做出了大量尝试, 文献[12]提出了黄河干流水库生态调度总体框架和实施步骤。当前黄河流域生态调度的研究主要集中于黄河上游, 针对黄河下游水库群的生态调度的研究较少, 本文以黄河下游小浪底 - 西霞院梯级水库为例, 构建水库生态调度模型, 用变动微分动态规划方法求解, 研究满足生态需水的发电量最大模型, 定量评估考虑生态因素对发电量造成的损失, 并提出了调度折中方案选择的基本原则。

## 2. 模型建立

生态调度的问题是一个具有高度非线性、多约束条件的复杂动态控制问题[13]。水库生态调度实质就是将生态因素纳入到现有的水库调度中去, 制定相应的生态调度方案。其核心内容是满足流域水资源优化调度和河流生态健康为目标, 建立调度函数。

### 2.1. 目标函数

本次调度在满足生态需水量的基础上, 以发电量最大为目标进行优化调度, 并对下游生态用水影响进行评估比较。

$$E_d = \max \sum_{i=1}^n A Q_i H_i T_i \quad (1)$$

式中,  $E_d$  为调度期总的发电量;  $A$  为机组综合出力系数;  $Q_i$  为发电流量;  $H_i$  为净水头;  $T_i$  为计算时段。

## 2.2. 约束条件

本次调度的约束条件包括生态需水约束，水量平衡约束，泄流量约束，电站出力约束，水位约束，具体约束条件如下：

### 1) 生态需水约束

$$E_w = \min \sum_{a=1}^m \sum_{i=1}^n (Q_{an} - Q_{as}) T_i \quad (2)$$

式中， $E_w$  为总水量偏差； $a$  为生态、供水、灌溉等  $m$  项用水量中的某一项； $Q_{an}$  为需水流量； $Q_{as}$  为供水流量； $T_i$  为计算时段；

### 2) 水量平衡约束

$$V_{t+1} = V_t + (I_t - q_t) \Delta t \quad (3)$$

式中， $V_{t+1}$ ， $V_t$  分别为  $t+1$  时段和  $t$  时段的库容， $I_t$  为  $\Delta t$  时段水库平均入库流量， $q_t$  为出库流量。

### 3) 下泄流量约束

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

式中， $Q_t$  表示水库时段的下泄流量； $Q_{\min r}$  和  $Q_{\max r}$  分别为水库时段的最小下泄流量和最大下泄流量。本次调度对下泄流量最小值进行严格限制，即下泄流量最小值为当月最小生态径流和综合用水量之和。

### 4) 出力约束

$$N_b \leq N_t \leq N_c \quad (5)$$

式中， $N_t$  表示电站时段的发电出力； $N_b$  和  $N_c$  分别为电站时段的保证出力和装机容量。

### 5) 水位约束

$$Z_{\min r} \leq Z_t \leq Z_{\max r} \quad (6)$$

式中， $Z_t$  表示水库时段的水位； $Z_{\min r}$  和  $Z_{\max r}$  为水库时段允许最低水位和最高水位。

## 2.3. 模型求解

本文应用离散微分动态规划算法对生态调度模型求解。动态规划算法是一种成熟、稳定的计算方法，为了避免维数灾带来的不利结果，并力求计算精确，用变动微分动态规划进行计算，求出最优解。

## 3. 实例计算

黄河下游主要有小浪底、西霞院两座水库。两水库主要特征参数见表 1。

小浪底水电站是一座大型常规水电站，6 条发电引水洞进口高程 195 m，单洞引水流量约 300 m<sup>3</sup>/s。每一时段的发电量受来水来沙、下游减淤、下游用水和调节库容等制约。西霞院水库是小浪底水库的反调节水库，水库的任务以反调节为主，结合发电，兼顾灌溉、供水等综合利用。最小下泄流量是 200 m<sup>3</sup>/s，最大下泄流量是 800 m<sup>3</sup>/s。

本文的研究对象为黄河下游小浪底至河口段面，根据各河段的河道形态、河道特性不同，由小浪底、花园口、高村、艾山、利津将该河段划分为五个河段，本文中黄河下游生态需水计算原则为获取逐断面生态流量，扣除重复计算量，由下游反推至花园口的控制流量，获取黄河下游生态径流过程。

### 3.1. 逐断面生态需水

对于各断面生态需水量，本文主要考虑河流水污染防治需水量，维持河道内基本生态环境需水量，河流输沙需水量和河口区生态需水量。

### 1) 黄河下游水污染防治需水

黄河下游水污染防治需水量直接采取 10 年最枯月平均流量法计算河流最小污染防治需水量, 对各控制断面从 1950~2000 进行计算, 获得每 10 年最枯月平均流量, 见表 2。

由于黄河下游 60 年代三门峡水库建成造成的影响, 本文采用 50~60 年代的最枯月平均流量作为黄河下游水污染防治需水量。

### 2) 河道内基本生态环境需水

河道内基本生态环境需水是指为维系和保护河流的最基本生态功能不受破坏, 所必须在河道内保留的最小水量, 具有优先满足性, 本文中采用多年平均流量的 1/10 作为河道内基本生态环境需水量, 计算得出不同河段生态基流见表 3。

### 3) 河流输沙需水

黄河下游泥沙问题严重, 水库运行时必须考虑河流的输沙需水, 根据黄河下游不同断面的平均含沙量和输沙水量, 计算出黄河下游不同时期的输沙需水量。考虑到黄河下游 90 年代以来河道断流和水库运行初期造成的来沙量变化引起的不一致性, 本文拟采用 80 年代各河段平均输沙量计算, 上游来沙量为

**Table 1. Characteristic parameters of Xiaolangdi and Xixiyuan reservoir**  
**表 1. 小浪底、西霞院主要特征参数**

梯级名称	小浪底	西霞院
设计洪水位(m)	274	132.56
正常蓄水位(m)	275	134
汛限水位(m)	248	131
死水位(m)	230	131
总库容( $10^8 \text{ m}^3$ )	126.5	1.62
调节库容( $10^8 \text{ m}^3$ )	51	0.45
水库调节性能	不完全年	日
装机容量(MW)	1800	140
单机装机容量(MW)	300	35
出力系数	8.3	8.3
保证出力(MW)	354	45.6
最大过机流量 $\text{m}^3/\text{s}$	1776	1380
最大水头(m)	128.92	13.82
设计水头(m)	112	11.5

**Table 2. Average of the driest monthly flow**  
**表 2. 10 年最枯月平均流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )**

	花园口	高村	艾山	利津
1950~1960	343.1	265.1	240	196
1960~1970	66.6	5.6	4.9	0
1970~1980	231.5	234.3	146	18.1
1980~1990	202	102	70.6	16.2
1990~2000	131.1	12.7	0	0

8.6 亿吨。而由于黄河下游各断面形态不同，各断面的输沙需水量各异，据黄河下游高效输沙洪水研究和黄委会调水调沙实践，在汛初加大调水调沙流量，冲刷河床，枯水期减少输沙用水，全年输沙需水可以减少大约 100 亿  $m^3$ 。黄河输沙流量见表 4。

4) 河口区生态需水

河口区生态需水量主要考虑维持河流三角洲形态需水量和维持河口生态系统需水量，其中维持河流三角洲形态主要考虑输沙和防治海岸侵蚀，河口生态系统包括陆域生态系统和海域生态系统，基于此，河口生态需水主要为河流输沙需水，河口区湿地需水，河口区陆域海域水生生物需水。河口生态需水过程见图 1。

3.2. 小浪底控制断面生态流量

由各河段生态需水量，扣除重复计算量，从下游河段耦合至小浪底控制断面，得黄河下游生态径流见图 2。

Table 3. Instream flow of the Lower Yellow River  
表 3. 黄河下游各河段生态基流

	花 - 高	高 - 艾	艾 - 利	利 - 河
生态基流( $m^3/s$ )	131	123	122	111

Table 4. Sediment flow of the Lower Yellow River  
表 4. 黄河下游各河段输沙流量

河段	汛初输沙需水( $m^3/s$ )	汛期输沙需水( $m^3/s$ )
小浪底 - 花园口	1972	835
花园口 - 高村	2322	832
高村 - 艾山	2191	756
艾山 - 利津	2140	667

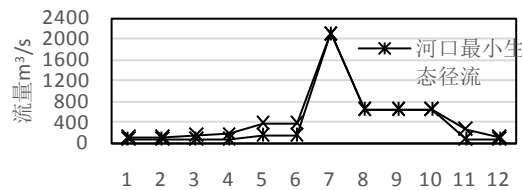


Figure 1. Ecological water demand of estuary  
图 1. 河口生态需水

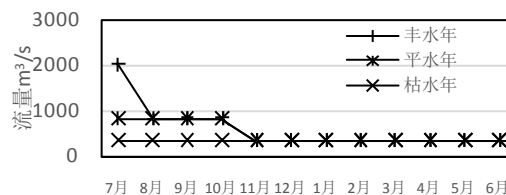


Figure 2. Different ecological runoff processes of the Lower Yellow River  
图 2. 黄河下游不同来水年份适宜生态径流

### 3.3. 实例计算

以黄河 44 年长系列来水资料，以 2020 年工业、农业、生活用水资料，和黄河不同年份适宜生态流量计算，得黄河下游生态调度结果。

## 4. 结果分析

选取 1983 年、1972 年和 1965 年为丰水年、平水年、枯水年，如图 3。

### 4.1. 多年平均发电量

由于生态需水过程和最大发电流量过程不一致，因此考虑生态的水库调度发电量有所下降，满足生态的水库调度和不考虑生态的水库调度相比，结果如表 6。

由表 5 可见，小浪底水库满足生态需水的水库调度比不考虑河流生态需水的水库调度发电量减少 1.32%，梯级水库减少 1.02%，发电量有小幅减少。

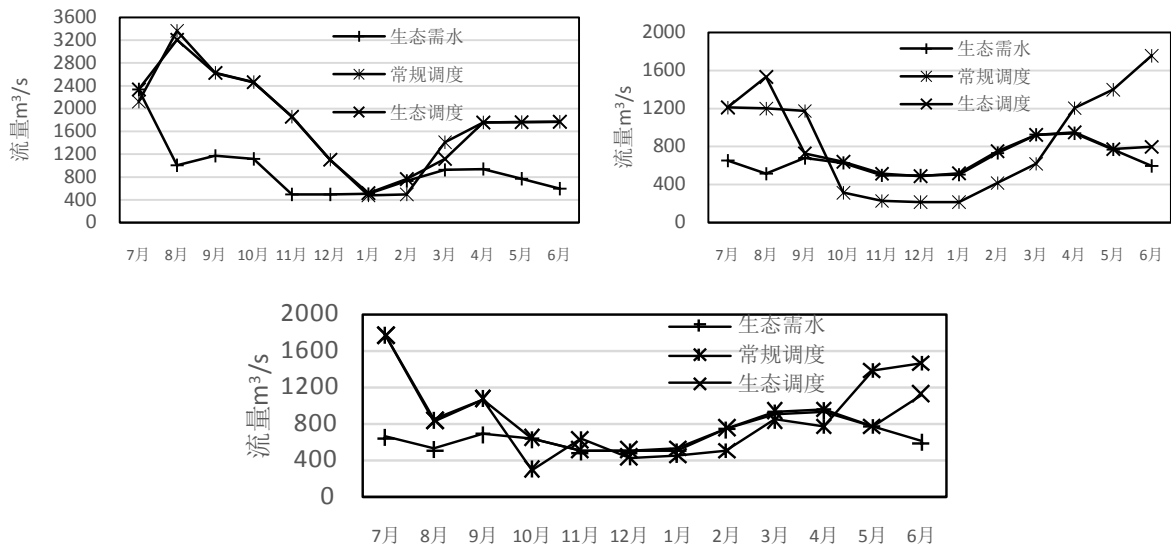


Figure 3. The outflow of Xiaolangdi reservoir in wet, average and dry year  
图 3. 丰、平、枯水年小浪底出库流量过程

Table 5. The average annual generated energy  
表 5. 多年平均发电量变化

	小浪底水库(亿 kW·h)	梯级水库(亿 kW·h)
常规调度	60.6	68.6
生态调度	59.8	67.9

Table 6. Guarantee rate of ecology and water supply  
表 6. 生态和供水保证率

保证率	生态	工业生活	农业
生态调度	88.9%	84.4%	75.6%
常规调度	6.67%	97.8%	91.1%

## 4.2. 生态保证率和供水保证率

以生态用水和 2020 年工业、生活、农业用水为约束, 保证率见表 6, 相比不考虑生态的水库调度, 生态调度的生态用水保证率大大提高。本文中生态调度时供水优先次序为生态优先, 其次是工业和生活需水, 最后保证农业需水。

## 5. 结论

文章在研究黄河下游各断面生态需水量的基础上, 计算了满足生态需水的小浪底控制断面下泄流量过程, 建立水库生态调度模型, 用动态规划求解。与不考虑生态的水库调度想比较, 考虑河流生态需求的黄河下游梯级水库, 在满足河流自净需水, 冲沙需水, 生态基流和河口湿地生态需水的前提下, 梯级发电量减少 1.02%, 但是使河流自净、河道生态和河流泥沙输运等功能大大改善, 对水库的生态调度具有一定的指导意义。

## 基金项目

国家自然科学基金(编号: 51179149)。

## 参考文献 (References)

- [1] 汪恕诚. 论大坝建设与生态环保的关系[J]. 中国三峡建设, 2004, 11(6): 4-5.  
WANG Shucheng. On dam construction and ecological protection. China Three Gorges Construction, 2004, 11(6): 4-5. (in Chinese)
- [2] 董哲仁. 筑坝河流的生态补偿[J]. 中国工程科学, 2006, 8(1): 5-9.  
DONG Zheren. Ecological compensations for Damed Rivers. Engineering Science, 2006, 8(1): 5-9. (in Chinese)
- [3] 麻泽龙, 程根伟. 河流梯级开发对生态环境影响的研究进展[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 20-22.  
MA Zelong, CHENG Genwei. Progress in research on impacts of river hydropower engineering on eco-environment. Advances in water science, 2006, 17(5): 20-22. (in Chinese)
- [4] SYMPHORIAN, G.R., MADAMOMBE, E. and VAN DER ZAAG, P. Dam operation for environmental water releases: The case of Osborne Dam, Save Catchment, Zimbabwe. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28(20-27): 985-993.
- [5] 汪恕诚. 汪恕诚纵论生态调度[N]. 中国水利报, 2006-11-14(001).  
WANG Shucheng. On ecological regulation. China Three Gorges Construction, 2006-11-14(001). (in Chinese)
- [6] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇. 水库多目标生态调度[J]. 水利水电技术, 2007, 38(1): 28-32.  
DONG Zheren, SUN Dongya and ZHAO Jinyong. Multi-objective ecological operation of reservoirs. Water Resource and Hydropower Engineering, 2007, 38(1): 28-32. (in Chinese)
- [7] 张洪波. 黄河干流生态水文效应与水库生态调度研究[D]. 西安理工大学, 2009.  
ZHANG Hongbo. Study on eco-hydrological effect and reservoir ecological regulation on the main yellow river. Xi'an University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [8] 胡和平, 刘登峰, 田富强, 倪广恒. 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 and NI Guangheng. A method of ecological reservoir reoperation based on ecological flow regime. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 325-332. (in Chinese)
- [9] 艾学山, 范文涛. 水库生态调度模型及算法研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(3): 451-455.  
AI Xueshan, FAN Wentao. On reservoir ecological operation model. Research and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(3): 451-455. (in Chinese)
- [10] 朱金峰, 王忠静. 考虑生态用水的水库群优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 71-76.  
ZHU Jinfeng, WANG Zhongjing. Study on optimal scheduling multi-reservoirs considering ecological water demand. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 71-76. (in Chinese)
- [11] 张洪波, 钱会, 辛琛. 基于结构目标的水库生态调度模型与求解[J]. 中国农村水利水电, 2011, 10: 55-58.  
ZHONG Hongbo, QIAN Hui and XIN Chen. A day-scale reservoir multi-objective scheduling model-oriented nature flow regime. China Rural Water and Hydropower, 2011, 10: 55-58. (in Chinese)

- [12] 蒋晓辉. 黄河干流水库生态调度总体框架研究[J]. 环境保护科学, 2009, 35(6): 34-36.  
JIANG Xiaohui. Study on ecological operations of reservoirs in the Yellow River. Environmental Protection Science, 2009, 35(6): 34-36. (in Chinese)
- [13] 董哲仁. 生态水工学的工程理念[J]. 中国水利, 2003, 1: 1-6.  
DONG Zeren. Engineering concept of ecological hydraulic Engineering. China Water Resources, 2003, 1: 1-6. (in Chinese)