

水库生态调度研究的若干思考

金鑫^{1,2}, 王凌河^{1,2}, 赵志轩^{2,3}, 严登华², 王浩^{1,2}

(1. 大连理工大学 建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024;
2. 中国水利水电科学研究院 水资源所, 北京 100038; 3. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 传统的水库调度方式在保障防洪安全的基础上力求最大限度发挥河流水资源的经济效益, 对库区及下游的生态环境考虑较少, 在防洪兴利的同时危及了河流健康。改变传统的水库调度方式, 将生态目标纳入到水库调度中来, 开展以维护或改善河流健康为重要目标的水库生态调度是十分必要和迫切的。从水库修建运用的生态效应出发, 在国内外相关研究的基础上系统分析了水库生态调度的概念、内涵及研究热点, 并重点讨论基于生态水文模拟的水库生态调度方式及其研究中的一些关键技术问题, 以期能够对水库生态调度研究提供参考。

关键词: 水库生态调度; 河流健康; 生态水文模拟

中图分类号: X321; TV 697 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2011)02-0022-05

Reflections on the Research of Ecological Operation of Reservoirs

JIN Xin^{1,2}, WANG Linghe^{1,2}, ZHAO Zhixuan^{2,3}, YAN Denghua², WANG Hao^{1,2}

(1. School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Civil Engineering College, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The traditional reservoir operation mode always considers the economic benefit as the first aim besides ensuring the flood control safety. However, it pays little attention to the eco-environment conditions in the downstream regions and reservoir areas, which might threaten the health of river. The ecological operation of reservoirs takes the ecological aim into consideration, and it changes the traditional way. Aiming to protect and improve the health of river, the ecological reservoir operation becomes necessary and exigent. Based on the researches abroad and home, this paper analyzes the conception, connotation and research hotspots from the point of view of ecological effects with reservoir operation. Particularly, it focuses on the ecological reservoir operation modes based on eco-hydrological modeling as well as the key research technological issues in the research area. This paper aims to provide some suggestions for the ecological reservoir operation research in the future.

Key words: ecological operation of reservoirs; river health; eco-hydrological modeling

长期以来, 修建水库、蓄水兴利一直是人类开发河流水资源的主要手段。截止至 2006 年底, 我国已建成各类水库 85 874 座, 总库容 5 974 亿 m³[1]。水库的修建运用虽然在很大程度上实现了防洪兴利的目的, 但同时也改变库区及下游河道的水文情势, 造成局地生态环境恶化, 危及河流健康。我国现行的水库调度方式普遍是依据水库承担的防洪及兴利任务来制定调度规则, 对生态要求考虑较少, 给库区及下游生态系统造成诸多不利影响[2-3]。改变传统的水库调度方式, 将生态目标纳入水库调度中来, 开展以保护或改善库区及下游河道生态环境、实现河流健康为目标的水库生态调度是十分必要和迫切的。

1 水库修建运用对生态环境的影响

水库的修建运用对生态环境造成的影响主要表现在三

个尺度: ①下游减水河段河流廊道的一维“线”尺度; ②水库淹没区及消落带的二维“面”尺度; ③水库气候影响区的三维“空间”尺度。就影响程度而言, 前两种是主要的。

1.1 水库修建运用对库区及消落带生态环境的影响

水库建成蓄水后, 库区水力性质、水文情势、水温、营养物质分布等较建库前发生根本变化, 局域生境条件明显改变, 主要表现在以下几个方面。

① 库区生境变迁。水库蓄水运行后, 坝前水位抬升, 库区淹没, 生境条件发生根本性变化[4]。陆生物种的生境消失, 水生物种的生境条件(水位、流速等)亦发生重大改变。

② 库区水体温度分层。由于水体自身的理化性质, 水库蓄水运行后, 库区水体温度将发生垂向分层, 对库区水质及水生生物造成诸多不利影响[4-5]。

收稿日期: 2010-11-12 修回日期: 2011-01-29

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体基金项目“流域循环模拟与调控”(51027066)

作者简介: 金鑫(1984), 男, 辽宁抚顺人, 博士研究生, 主要从事流域生态水文模拟及水库生态调度研究。Email: hayate0604@126.com

③ 库区泥沙淤积。水库蓄水运行后,受库区水流流速变缓及库尾回水的影响,河流挟沙将在库区沉降淤积,其中库尾及坝前泥沙淤积尤为严重。库区淤积不仅影响库区生境,若不及时清淤还将缩短水库寿命^[5]。

④ 水库消落带污染。水库消落带是指水库水位季节性涨落而使周边淹没土地周期性出露于水面的一段特殊区域,是水生生态系统及陆生生态系统交替控制的过渡地带,由于水、陆两方面的共同影响,水库消落带极易发生污染,进而造成诸多生态环境问题^[5-6]。

⑤ 库区水体富营养化。水库蓄水运行后,库区水文情势发生变化,营养物质富集,极易导致水体富营养化,进而对库区生态造成显著影响^[2,7]。

除上述问题外,修建水库、蓄水兴利还将造成库区周边地下水水位抬高,土壤盐渍化等环境问题。

1.2 水库调度对下游生态系统的影响

水库的修建及运用将阻断河道并改变下游河流的天然径流规律,从而对下游区域部分生态系统造成胁迫。

① 对河流联通性的影响。河流具有物质运输、生物栖息及迁徙通道的生态功能^[8],建库将阻断河流的联通性,致使鱼类及其他生物的迁徙及繁衍受阻^[4,9]。

② 对下游近坝河段生态系统的影响。下游近坝河段是受水库下泄影响最为严重的区域,水库建成运行后,由于其泄水方式及泄水过程有别于天然径流,坝下地区将出现水体温度过低、水流大量掺气、水体紊动严重、水气雾化等问题^[5],对坝下生态造成严重影响,甚至直接引起物种死亡。

③ 对下游减水河段河流廊道生态环境的影响。水库调度将改变下游河流天然径流过程,从而对下游减水河段河流廊道的生态过程造成胁迫^[9-10],主要表现为: a. 以发电为主要功能的水电站水库通常致力于追求发电效益,从而导致部分时段下游河流流量过低,生态需水要求不能得到满足^[2]; b. 水库调洪导致下游河流汛期洪峰流量大幅削减,河岸带长期得不到淹没,生态退化; c. 水库调度造成年内河流径流规律发生变化,下游河流生态驱动力改变。河流物种在漫长的演化过程中,已经适应了所处河流的天然径流规律。水库调度将改变下游河道年内径流规律,使库区下游河道径流过程均一化,从而对河流生态系统造成胁迫。如长江“四大家鱼”每年5月-6月为产卵高峰期,三峡水库运行后,受其调度影响水库下游河流5月-6月份缺乏明显的涨水峰值,给“四大家鱼”的繁殖造成显著不利影响^[11]。

④ 对河口地区生态环境的影响。河口是河流与海洋的过渡地带,同时受到河流水文情势及海洋动力条件的双重影响,水力过程极为复杂,生态系统十分脆弱。河流建库后,受水库调度的影响,河流入海流量将会发生变化,这将打破河口地区多年来形成的水文平衡,进而造成污染物浓度提高、咸潮入侵等生态环境问题^[12,12]。

1.3 水库调度生态效应的累计性

水库调度生态效应的累计性表现在时间及空间两个尺度。

① 在时间尺度上,水库调度将改变下游河流天然径流

规律,从而改变河流原有物种对生境条件的适应性。其长期效应可能导致外来物种入侵,原有物种消失;此外,水库调度将大幅削减下游河流汛期洪峰流量,从而导致河岸带数年或更长时间得不到淹没,致使河岸带生态退化。

② 在空间尺度上,由于区间汇水的影响,水库对下游河流径流过程的影响随距离的增加而递减,水库调度下游影响区为有限的区域。当水库发展为水库群时,各水库影响区互相重叠,水库调度对水文情势的影响相互累加,从而造成范围及程度上更为严重的生态胁迫^[13]。

2 水库生态调度内涵识别

水库的修建运用将对库区及下游部分生态系统造成明显影响,其中有些方面无法避免(如库区淹没等),但也有许多方面可以通过改善水库调度方式予以补偿、缓解。截至目前,许多学者从不同角度提出并论述了水库生态调度的思想,但到目前为止水库生态调度的概念尚不统一。Symphorian 等认为生态调度是既满足人类社会对水资源的需求,又要尽量满足生态系统需水要求的水库调度方式^[14]。李景波等认为,水库生态调度是利用水库适时适量地调节流量,应对天然径流在时间上分布的不均匀性,满足流域生物种群生存发展动态平衡的要求,最大限度地降低或消除水库对流域生态的负面影响^[15]。董哲仁认为水库生态调度是指:指在实现防洪、发电、供水、灌溉、航运等社会经济多种目标的前提下,兼顾河流生态系统需求的水库调度方式^[2]。艾学山认为水库生态调度是指在水库控制运用过程中,综合考虑防洪、兴利、生态等目标,在满足下游河流生态需水及库区水环境保护要求的基础上,充分发挥水库的防洪、发电、灌溉、供水、航运、旅游等综合效益的水库调度方式^[16]。

与传统的水库调度方式相比,水库生态调度将生态目标纳入水库调度中来,结合水库(或水库群)调度影响区的生态需水规律,统筹协调防洪、兴利、生态等各项要求,在兴利除害的同时维持或修复河流生态健康,从而实现河流水资源的可持续利用(表1)。

表1 水库调度方式对比

Table 1 Comparison between different reservoir operation models

项目	传统水库调度方式	水库生态调度方式
考虑因素	防洪(坝体及下游保护目标汛期防洪安全)兴利(发电、供水、灌溉、航运、渔业等)	防洪(坝体及下游保护目标汛期防洪安全)兴利(发电、供水、灌溉、航运、渔业等)生态(库区及水库下游影响区内的生态环境)
最终目的	在保障防洪安全的基础上提高河流水资源的利用效率及经济效益	在保障防洪安全的基础上,协调兴利目标与生态目标的关系,维护河流健康,实现使河流水资源的可持续利用
效益分析	保障防洪效益的基础上,最大限度的发挥河流水资源的经济效益	保障防洪效益,削减部分经济效益用以进行生态补偿,实现水库调度的生态效益、环境效益。

防洪、兴利、生态作为水库生态调度的三个重要方面,既相互联系又相互制约。在不同区域、不同时期,水库调度的

侧重方向有所不同。如汛期应当优先考虑防洪要求,兴利与生态应服从防洪要求;非汛期则应结合区域特点及水库来水、蓄水条件,合理的协调兴利与生态目标之间的关系,以寻求各部门都能接受的水库调度方案。

3 国内外研究进展及相关研究热点

3.1 国内外相关研究概述

国外对水库生态效应的研究起于20世纪70年代,1984年Petts系统分析了水坝对河流生态的影响^[17],1998年Hughes等提出了一个基于河流生态流量的水库调度模型^[18],2006年Suen等以台湾Shihmen水库为例构建了水库多目标优化模型^[19]。在水库生态调度实践方面,欧洲、美国、澳大利亚等国家起步相对较早。其中较具有代表性的是美国田纳西流域管理局(TVA)1991年-1996年对流域内20个水库的调度方式进行了优化调整^[20-21]。整体而言,国外水库生态调度的研究可概括为两个方面:一是对调度方式优化以及配套技术设施的研究;二是评估实施这些技术方法对生态与环境的影响^[21]。

我国生态调度的研究起步相对较晚,但近年来也有较大发展。艾学山等从水库调度的经济效益、社会效益、生态环境效益出发,构建了水库生态调度模型^[6];胡和平等提出了生态流量过程线的概念,并建立了基于生态流量过程线的水库生态调度方法^[22];郭文献等在河流健康的基础上,构建了梯级水库多目标优化调度模型,并以三峡梯级水库为例进行了研究分析^[10];康玲、黄云燕等以发电量最大为目标,以生态需水为约束,建立了丹江口水库生态调度模型^[23]。

3.2 相关研究热点

水库生态调度的实质是在保障水库防洪、兴利要求的基础上,采用合理的方式下泄适宜的水量以维持库区及下游地区生态健康。综合国内外研究成果,水库生态调度主要包括以下几个方面^[3,24]:①水量调度(包括生态基流调度及生态洪水调度);②水质调度;③水温调度;④泥沙调度;⑤综合调度。现阶段,水库生态调度的研究热点如下。

3.2.1 河流生态需水过程研究

在当前水库生态调度的相关研究中,下游河流生态需水过程是制定水库生态泄水方案的重要依据。河流生态需水研究包括生态基流及生态洪水两方面内容,且已形成诸如水文学法、水力学法、水文-生物分析法、生境模拟法、综合法等诸多计算方法^[25]。其中生境模拟法由于能够从物种生境需求(通常是鱼类生境需求)出发推求生态需水过程,符合水库生态调度的研究目标及需求,近年来在水库生态调度的相关研究中得到了越来越广泛的应用^[10]。

3.2.2 水库生态调度技术措施研究

水库修建运用造成的负面生态效应可通过工程及非工程措施予以缓解,相应的技术措施是水库生态调度研究的热点之一。如可通过修建鱼道等工程措施来缓解筑坝对河流的阻隔作用^[26]。可使用分层取水的方式来降低水库下泄水体与下游河流水体之间的温差,进而缓解低温水体下泄对下游河流鱼类产卵、繁殖造成的不利影响^[2]。针对库区富营养

化的问题,可通过改善水库运行方式,在特定时段降低坝前水位,从而改变库区水动力特性,破坏富营养化形成条件^[27];还可利用营养物质垂向分层的特点,泄水时采用营养物质较集中的深层泄水孔泄水,从而降低库区营养物质富集浓度^[27]。对于库区泥沙淤积这一问题,可适当调节汛限水位及汛后蓄水时间,“蓄清排浊”缓解库区淤积情况^[28]。此外,针对水库调度运行后下游河段水文情势变化,从而危及河道、河岸带的生态健康这一问题,可适当调整水库泄水过程,在防洪、兴利的同时,保证下游河流生态需水要求能够得到满足。特别地,在鱼类产卵繁殖期可根据具体鱼种的生境要求加大水库泄水过程,为下游鱼类提供适宜的生境条件。

3.2.3 水库生态调度泄水方案优选、评价研究

泄水方案的优选、评价技术是水库生态调度的重点研究方向之一。结合国内外相关研究成果,现阶段制定水库生态调度方案主要有两类方法,分别称为优化法与模拟法^[29]。前者是在下游生态需水过程的基础上通过优化技术得到最优的水库下泄方案;后者是预设有限数目的水库调度方案,并通过水动力模型、水生态模型等工具模拟分析不同调度方案下的生态效应,并进行综合分析评价,最终比选出最适宜的水库调度方案。其中优化法虽然使用了多目标优化技术,但目前仍存在诸如模型求解困难等问题,且在时空尺度上有所欠缺;而模拟法虽能够在小时间尺度上分析各方案的生态效应,但是在预设调度方案时,由于没有采用优化技术,故只能保证方案非劣,而不能保证最优。

3.2.4 水库生态调度保障体系及生态补偿机制研究

近年来,水库生态调度保障体系及生态补偿机制的相关研究逐渐增多。水库生态调度存在防洪、兴利及生态三个方面之间矛盾,通常放弃了部分水库经济效益,用于维持或改善进行库区及下游河道的生态健康。为保障水库生态调度顺利实施,需从体制、法律法规及政策等多方面出发,构建生态调度的保障体系。此外,还应在实践中不断完善水库生态补偿机制。在水库调度社会经济效益及生态效应的基础上,明确补偿主体及补偿客体,以“谁受益、谁补偿,谁污染、谁付费”为原则,开展水库调度生态补偿中补偿方式及补偿标准的相关研究^[2,30]。

4 基于生态水文模拟的水库生态调度方式及其关键技术

4.1 基于流域生态水文模拟的水库生态调度方式

目前,我国水库生态调度的研究主要面临两个技术问题:①在空间尺度上,需要从水库(或库群)调度影响区整体出发分析生态需水要求,并结合水库承担的防洪、兴利任务构建调度方案的优化、评价模型;②在制定调度方案时,需在影响区生态水文过程及区域社会经济特征的基础上,分时期有层次的协调水库的各项调度目标(详见图1)。鉴于此,将生态水文模拟引入到水库生态调度中来,在模拟分析影响区生态水文过程的基础上推求适宜的水库生态泄水过程线、分析不同调度方案下的生态效应,是有一定积极意义的。

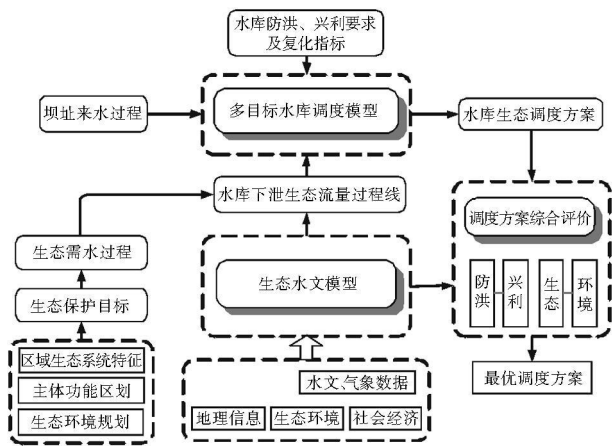


图1 基于生态水文模拟的水库生态调度方式

Fig. 1 Ecological reservoir operation model based on ecohydrological modeling

4.2 关键支撑技术研究现状及思考

4.2.1 下游复合生态系统需水要求及水库生态泄水过程线推求

水库下游影响区生态系统通常是由不同类型、不同规模的生态子系统所共同组成的复合生态系统。下游影响区复合生态系统需水要求是制定水库生态泄水方案的重要依据。在现阶段的研究中,多以下游近坝河段河流生态需水过程为依据确定水库生态泄水过程,对距坝址较远的河道及受水库调度影响的部分河道外生态系统的需水要求考虑较少,给这些生态系统的健康造成隐患。鉴于此,从下游影响区复合生态系统整体出发,开展水库生态泄水过程线的研究是十分有意义的。

下游影响区不同子系统的生态需水过程在组成、时空特征上具有明显差异,难以用统一方法计算,且各项生态需水之间通常有重复部分,这一特征给推求水库生态泄水过程线带来困难。在明晰水库调度下游影响区各生态系统的需水规律的基础上,以水库调度影响区及其汇水区域的生态水文模型为计算平台,构建面向水库调度的区域生态需水整合模型,从而推求可以满足水库下游影响区各生态系统需水要求的生态泄水过程线,对水库生态调度研究具有积极的意义。

4.2.2 水库多目标优化模型研究

现阶段,水库生态调度多目标优化模型的构建策略主要有以下几种:①在分析计算下游生态需水的基础上,将需求的生态流量作为约束条件^[21];②将水库调度后生态效益作为一个目标,与其他调度目标联合求解^[31];③依据天然径流过程是维持河道生态健康的必要条件这一原理,将水库调度后河道径流过程相对天然径流改变最小作为目标之一^[32],但是在这种建模策略下水库经济效益较差,故实践中采用的不多。值得一提的是,利用多目标优化技术制定水库生态调度泄水方案尚存在模型求解困难的问题,且随着考虑因素的增多极易发生“维数灾难”。

在我国当前的研究中,水库生态调度多目标优化模型多以南方水量较丰富的地区为例进行分析,针对北方河流径流量较少且年内分配不均的特点进行水库生态调度多目标优化的研究相对较少。与南方河流相比较,北方地区生态用水往往与工业、农业乃至生活供水相冲突,优化模型更为复杂。

以影响区生态水文过程及供水区各项用水要求为基础,确定不同时期的供水优先级顺序,开展北方缺水地区的多目标生态调度的研究是十分必要的。

4.2.3 水库调度方案评价优选技术

调度方案的综合评价是比选水库生态调度方案的关键技术。评价调度方案的优劣要综合考虑防洪、兴利、生态等多种指标,并构建适宜的评价指标体系及评价模型。其难点是部分指标(如生态效益、社会效益等)难于量化及不同量纲指标之间难于比较。目前国内外与之相关的研究较多,但仍不完善。单就水库调度生态影响评价而言,现阶段的研究主要集中于河流生态系统上,且已形成 IHA 等多种评价指标体系与评价方法^[10],但对沿河及通河湿地、湖泊等其他受水库调度影响的生态系统考虑较少或做了较大简化。因此,将生态水文模型引入到水库调度方案生态影响评价中,构建调度方案的全尺度生态影响评价模型是十分必要的。

5 结语

水库生态调度已成为当今备受关注的研究方向,其核心是水库调度经济效益与生态效益、环境效益之间的统筹协调。本文从水库修建运用对库区及下游地区的不利影响出发,在国内外相关研究的基础上,系统分析了水库生态调度的概念、内涵及研究热点。针对我国研究现状,重点讨论了基于生态水文模拟的水库生态调度方式,并介绍分析了水库生态泄水过程线推求、水库生态调度多目标优化模型及水库调度方案评价优选三项关键技术,以期能够为我国水库生态调度研究提供参考。

参考文献:

- [1] 郝志斌,蒋晓辉,商崇刚,等.水利工程生态调度研究[J].人民黄河,2008,30(12):11-13. (HAO Zhibin, JIANG Xiaohui, SHANG Chonggu, et al. Study on the Ecological Operation of Water Conservancy Projects[J]. Yellow River, 2008, 30(12): 11-13. (in Chinese))
- [2] 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, ZHAO Jinyong. Multiobjective Ecological Operation of Reservoirs [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(1): 28-32. (in Chinese))
- [3] 王远坤,夏自强,王桂华.水库调度的新阶段——生态调度[J].水文,2008,28(1):7-9. (WANG Yuankun, XIA Ziqiang, WANG Guihua. A New Phase of Reservoir Regulation: Ecological Operation [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(1): 7-9. (in Chinese))
- [4] 陈庆伟,刘兰芬,刘昌明.筑坝对河流生态系统的影响及水库生态调度研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2007,43(5):578-582. (CHEN Qingwei, LIU Lanfen, LIU Changming. Impacts of Dam Construction on Ecosystem and Dispatches of Ecological Water [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2007, 43(5): 578-582. (in Chinese))
- [5] 黄铃钰,王从峰,刘德福.水库建设及生态系统和谐[J].节水灌溉,2007,8:63-66. (HUANG YU-ling, WANG Congfeng, LIU Defu. Congruence of Reservoir Construction and Ecology Sys-

- tem[J]. Water Saving Irrigation, 2007, 8: 63-66. (in Chinese)
- [6] 苏维词. 三峡库区消落带的生态环境问题及其调控[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(2): 32-34. (SU Wei ci. Main Ecological and Environmental Problems of Water Level Fluctuation Zone in Three Gorges Reservoir and Their Controlling Measures[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004, 21(2): 32-34. (in Chinese))
- [7] 张晟, 李崇明, 魏世强, 等. 三峡库区富营养化评价方法探讨[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2004, 26(3): 340-343. (ZHANG Sheng, LI Chong ming, WEI Shi qiang, et. al. On the Evaluation Methods for Eutrophication in the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science), 2004, 26(3): 340-343. (in Chinese))
- [8] 杨志峰, 刘静玲, 孙涛, 等. 流域生态需水规律[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (YANG Zhi feng, LIU Jing ling, SUN Tao, et al. Environmental Flows in Basin [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [9] 许可, 周建中, 顾然, 等. 基于流域生物资源保护的水库生态调度[J]. 水生态学杂志, 2009, 2(2): 134-138. (XU Ke, ZHOU Jian zhong, GU Ran, et. al. The effect of different reservoir operating on biological resource in the basin[J]. Journal of Hydroecology, 2009, 2(2): 134-138. (in Chinese))
- [10] 郭文献. 基于河流健康的水库生态调度模式研究[D]. 南京: 河海大学水文水资源学院, 2008. (GUO Wen xian. Research on Reservoir Ecological Operation Model for River Health [D]. Nanjing: College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [11] 郭文献, 夏自强, 王远坤, 等. 三峡水库生态调度目标研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 554-559. (GUO Wen xian, XIA Zi qiang, WANG Yuan kun, et. al. Ecological Operation goals for Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 554-559. (in Chinese))
- [12] 孙涛, 徐静, 刘方方, 等. 河口生态需水研究进展[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 282-288. (SUN Tao, XU Jing, LIU Fang fang, et al. Advances in the Assessment of Ecological Water Requirements in Estuaries [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 282-288. (in Chinese))
- [13] 陈庆伟, 陈凯麒, 梁鹏. 流域开发对环境累积影响的初步研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(4): 300-305. (CHEN Qing wei, CHEN Kai qi, LIANG Peng. Preliminary Study on Cumulative Impact of Basin Development on Water Environment[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003, 1(4): 300-305. (in Chinese))
- [14] Symphorian G R, Madamombe E, Zaag P. Dam operation for environmental water releases; the case of Osborne dam, Save catchment, Zimbabwe [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28: 985-993.
- [15] 李景波, 董增川, 王海潮, 等. 水库健康调度与河流健康生命探讨[J]. 水利水电技术, 2007, 38(9): 12-15. (LI Jing bo, DONG Zeng chuan, WANG Hai chao, et. al. Discussion on Healthy Operation of Reservoir and Health of River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(9): 12-15. (in Chinese))
- [16] 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 Xue shan, FAN Wen tao. On Reservoir Ecological Operation Model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(3): 451-455. (in Chinese))
- [17] Petts G E. Impounded rivers: perspective for ecological management [M]. Chichester (UK): John Wiley & Sons, 1984.
- [18] Hughes D A, Ziervogel G. The inclusion of operating rules in a daily reservoir simulation model to determine ecological reserve releases for river maintenance[J]. Water SA, 1998, 24(4): 293-302.
- [19] 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 Researches, 2006, 42: 1-9.
- [20] Higgins J M, Brock W G. Overview of reservoir release improvements at 20 TVA dams[J]. Journal of Energy Engineering, 1999, 125(1): 1-17.
- [21] 禹雪中, 杨志峰, 廖文根. 水利工程生态与环境调度初步研究[J]. 水利水电技术, 2005, 36(11): 20-22. (YU Xue zhong, YANG Zhi feng, LIAO Wen gen. A Preliminary Study of the Ecological Environment Operation of Water Projects [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(11): 20-22. (in Chinese))
- [22] 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 Flow Regime [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 325-332. (in Chinese))
- [23] 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 Yun yan, YANG Zheng xiang, et al. Reservoir Ecological Operation Model and Its Application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2): 134-141. (in Chinese))
- [24] 徐杨, 常福宣, 陈进, 等. 水库生态调度研究综述[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(6): 33-37. (XU Yang, CHANG Fu xuan, CHEN Jin, et al. Review of Research on Ecological Operation of Reservoir [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(6): 33-37. (in Chinese))
- [25] 杨志峰, 张远. 河道生态环境需水研究方法比较[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(3): 294-301. (YANG Zhi feng, ZHANG Yuan. Comparison of Methods for Ecological and Environmental Flow in River Channels [J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(3): 294-301. (in Chinese))
- [26] 王兴勇, 郭军. 国内外鱼道研究与建设[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(3): 222-228. (WANG Xing yong, GUO Jun. Brief Review on Research and Construction of Fishways at Home and Abroad [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005, 3(3): 222-228. (in Chinese))
- [27] 刘春广, 乔光建, 朱庄. 水库水体富营养化机理分析及治理对策[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(5): 44-48. (LIU Chun guang, QIAO Guang jian. Nutritior rich Mechanism and Its Control at Zhuzhuang Reservoir [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2003, 1(5): 44-48. (in Chinese))
- [28] 童思陈, 周建军. “蓄清排浑”水库运用方式与淤积过程关系探讨[J]. 水力发电学报, 2006, 25(2): 27-30. (TONG Si chen, ZHOU Jian jun. Relationship between Operation and Sedimentation Processes for the “Storing Clear and Releasing Muddy” Reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(2): 27-30. (in Chinese))

(下转第32页)

- 论文集—水与社会经济发展的相互影响及作用[C]. 2005, 613-618. (in Chinese)
- [25] 吴开亚, 金菊良, 周玉良, 等. 流域水资源安全评价的集对分析-可变模糊集耦合模型[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(3): 5-9. (WU Kai-ya, JIN Ju-liang, ZHOU Yu-liang, et al. Set Pair Analysis Based Variable Fuzzy Set Assessment Model for Watershed Water Resources Security [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(3): 5-9. (in Chinese))
- [26] 卢敏, 张展羽, 石月珍. 集对分析法在水安全评价中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(5): 505-508. (LU Min, ZHANG Zhan-yu, SHI Yue-zhe. Application of Set Pair Analysis to Evaluation of Water Safety [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(5): 505-508. (in Chinese))
- [27] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 401-409. (JIN Ju-liang, WU Kai-ya, WEI Yi-ming. Connection Number based Assessment Model for Watershed Water Security. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 401-409. (in Chinese))
- [28] 许美玲. 集对分析在云南强降水预报集成方法中的应用[J]. 气象, 2004, 30(6): 39-42. (XU Mei-lin. Application of Set Pair Analysis to Yunnan Heavy Precipitation Processes Forecast Ensemble [J]. Meteorology, 2004, 30(6): 39-42. (in Chinese))
- [29] 冯利华, 张行才, 龚建林. 关于集对分析的水文水资源变化趋势的统计预测[J]. 水文, 2004, 24(2): 11-14. (Statistical Forecast of Change Tendency of Water Resources Based on the Set Pair Analysis [J]. Journal of China Hydrology, 2004, 24(2): 11-14. (in Chinese))
- [30] 万星, 王文圣, 丁晶. 集对分析在水文水资源中的应用研究[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(4): 9-11. (WAN Xing, WANG Wen-sheng, DING Jing. Set Pair Analysis and Its Application to Hydrology and Water Resources [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(4): 9-11. (in Chinese))
- [31] 王红芳, 黄伟军, 王文圣, 等. 集对分析法在长江寸滩站年径流预测中的应用[J]. 黑龙江水专学报, 2006, 33(4): 3-5. (WANG Hong-fang, HUANG Wei-jun, WANG Wen-sheng et al. Application of Set Pair Analysis Method to the Forecast of Annual Runoff [J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2006, 33(4): 3-5. (in Chinese))
- [32] JIN Ju-liang, WANG Wen-sheng, WU Cheng-guo, et al. A Hybrid Model Based on Set Pair Analysis and NNB for Annual Runoff Prediction [A]. International Symposium of IAHS-PUB and the 2nd International Symposium of China PUB [C]. IAHS Publ. 2008.
- [33] 金菊良, 魏一鸣, 王文圣. 基于集对分析的水资源变化趋势的相似预测模型[J]. 水力发电学报, 2009, 28(1): 72-77. (JIN Ju-liang, WEI Yi-ming, WANG Wen-sheng. Set Pair Analysis Based on Similarity Forecast Model of Water Resources [J]. J. of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(1): 72-77. (in Chinese))
- [34] 吴开亚, 金菊良, 王玲杰, 等. 集对分析聚类预测方法在区域生态足迹趋势预测中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(9): 973-977. (WU Kai-ya, JIN Ju-liang, WANG Ling-jie, et al. Application of Set Pair Analysis Classified Prediction Method to Predicting Dynamic Change of Regional Ecological Footprint [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(9): 973-977. (in Chinese))
- (上接第26页)
- [29] 杨娜, 梅亚东, 李娜. 生态友好型水库调度及其研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(5): 91-94. (YANG Na, MEI Ya-dong, LI Na. Operation of Eco-friendly Reservoirs and Its Research Progress [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(5): 91-94. (in Chinese))
- [30] 王凌河, 张诚, 金鑫, 等. 南水北调西线一期工程的生态补偿问题[J]. 水利水电技术, 2010, 41(2): 6-10. (WANG Ling-he, ZHANG Cheng, JIN Xin, et al. On eco compensation for West route of South to North Water Transfer Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(2): 6-10. (in Chinese))
- [31] 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))
- [32] 滕燕, 高仕春, 梅亚东. 面向生态环境的水库调度方式研究[J]. 水力发电, 2008, 34(6): 24-27. (TENG Yan, GAO Shi-chun, MEI Ya-dong. Research on Reservoir Regulation Considering Eco-environment Effect [J]. Water Power, 2008, 34(6): 24-27. (in Chinese))