

生态友好型水库调度及其研究进展

杨 娜,梅亚东,李 娜

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要 讨论水库调度对河流生态系统的影响机制;总结水库调度生态目标的 4 种设定和量化方法,即流量控制法、水力因子(水质)控制法、生物指标法和综合指标法;对生态友好型水库调度的模拟法和优化方法进行了较全面的评述;讨论了生态友好型水库调度需要进一步研究的问题。

关键词 水库调度 生态目标 模拟方法 优化方法

中图分类号 TV697 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2008)05-0091-04

Operation of eco-friendly reservoirs and its research progress//YANG Na, MEI Ya-dong, LI Na (Key State Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract :The effects of reservoir operation on a river 's ecological system are discussed. Four approaches (flow flux control, hydraulic factors control, biologic indicators and composite indicators control) to set and quantify ecological objectives of reservoir operation are summarized. Two kinds of systemic analysis methods for the operation of eco-friendly reservoirs are briefly introduced. Finally, key issues that require further study are put forward.

Key words :reservoir operation ; ecological objective ; simulation technique ; optimization technique

水库大坝通过对天然径流的时空调控,可以不断满足经济社会发展对防洪、灌溉、发电、工业和城镇供水等方面的要求。另一方面,水库调度改变了河流天然径流的时空分配,可能对河流及相关区域的生态环境造成严重影响,进而危害到人类自身的利益。因此,客观地认识修建大坝带来的生态环境问题,并采取有效的工程措施、生物措施和管理措施,避免或减轻大坝对于生态系统的胁迫,已成为当前我国水电事业发展面临的一个重大挑战^[1-2]。其中,适应生态要求的水库调度(或称生态友好型水库调度)就是一项积极有效的措施。

生态友好型水库调度以实现人和自然和谐为宗旨,既要考虑水(电)资源合理利用、满足经济社会要求,又要维护生态环境健康的要求,通过优化水库运行方式,实现双赢^[3]。既不同于传统的以综合利用效益最佳为目标的水库调度,也与专注改善生态环境的水库生态调度涵义有所差别,生态友好型水库调度将传统的以综合利用效益最佳为目的的水库调度与以改善生态环境为目的的水库调度结合起来,使水库调度理论和实践的发展进入了一个新阶段。

1 水库调度对河流生态系统影响机制

河流生态系统是河流内生物群落和河流环境相互作用的统一体。自然河流生态系统首先是连续的,包括河流在地理空间上的连续、生物过程及非生物环境的连续,其次还是动态的、开放的,与周围环境存在紧密的物质、能量和信息交换。在河流上筑坝建库,一般而言,将产生 4 种效应^[4] ①阻隔效应。由于大坝等挡水建筑物的存在,只能通过水轮机和泄洪设施放水,将阻止无脊椎动物游移和造成鱼类洄游受阻,同时高速水流将导致气体超饱和,最终导致生物多样性降低。②湖泊效应。坝前水流变缓,水面变宽,造成蒸发损失增加、泥沙淤积、化学成分和水温的分层。泥沙淤积使水库透光度提高、下游河流浑浊度降低、河槽冲刷、河势调整;化学成分和水温的分层耽误鱼类洄游,并使浮游生物增加,栖息于温水中的鱼类消失。③河段脱水减水效应。引水式的开发通常会导致下游河段脱水减水,维持河道基本功能的需水得不到满足,河流的纳污能力大幅度下降,河流污染加剧,以及生物群落的消亡。④径流调节效应。包括水库

基金项目 国家自然科学基金(50779049)

作者简介 杨娜(1983—),女,河南正阳人,硕士研究生,从事水资源规划与管理研究。E-mail :yangna-leaf@163.com

下层放水、水流调节和脉动式放水。水库下层放水使河流冬季水温升高、溶解氧含量降低,无脊椎动物丧失热信号。水流调节和脉动式放水对河流水质、泥沙输移,以及河流初级生产、无脊椎动物及鱼类生长均有影响。

尽管水库调度方式并不会对全部效应都产生作用,但在工程建成投入运行后,其的确是改变上述效应(影响河流生态系统)的最主要途径。

从近半个世纪以来国内外对河流生态系统的研究来看,大量的实例研究都表明了径流是河流生态系统中起决定性作用的要素,河流流量模式改变对河流系统生态完整性具有连锁效应^[5]。而水库调度方式不同将导致完全不同的出库径流过程(流量模式)和水库水位变化过程,从而对河流生态系统的完整性产生重要的影响。

2 水库调度的生态目标

生态友好型水库调度的重要内容之一是生态目标的确定,即将其表示和量化成与经济社会目标相权衡的目标函数形式。纵观国内外研究,生态目标的设定和量化途径大致有4种,即流量控制法、水力因子(水质)控制法、生物指标法和综合指标法。

2.1 流量控制法

基于设定的河流流量与河流生物特征的关系,直接对河流流量进行控制,如 Tennant 法、Texas 法等。只要特定时段或每个时段流量大于设定流量,则认为与之相应的河流生态系统健康状况可以保证。20 世纪 70~80 年代,为了确定鱼类所需的河流最小流量,国外学者通过大量的实验研究,相继提出了湿周法、R2 断面法、IFIM,后发展为自然生境模拟法(PHABSIM)^[6-8],PHABSIM 能够对生物物种(通常是鱼类)在不同生长条件下所需要的生境条件进行量化,考察的主要参数包括湿周、水深、流速、水面宽等,据此确定河流流量。

20 世纪 90 年代以来,基于天然流量模式最有利于维持河流生态系统完整性的认识,提出了“天然流量模式”法,即调节后径流越接近天然流量模式,对河流生态系统越有利。并通过流量大小、频率、历时、变化率及发生的时间这 5 类指标(共 32 个水文指标)来表征天然流量模式和调节后流量模式^[5,9]。这种方法关键是如何刻画调节后径流过程与天然径流过程的接近程度。具体地可运用模糊集的隶属度来量化接近程度,如

$$\mu(x) = \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

式中: μ 为生态水文指标的隶属度值; x 为调节后水

文指标值; m, σ^2 分别为建坝前指标的均值和方差。

2.2 水力因子(水质)控制法

河道水流流速、水位、温度、泥沙含量及污染物浓度等与河流生态状况有重要关系。譬如河道水位较天然状态下水位的异常波动对河岸植被及生物的生存会产生较大的影响。在某些情况下,流速与鱼类产卵、繁殖有密切关系。为此,直接以水力因子作为生态目标,而不通过流量间接表达。例如,通过减小径流调节的水位波动,以满足生态系统的要求,其目标函数可表示为^[10]

$$\begin{cases} \min Z = \max \left| \frac{h_{i,j} - h_{i,j+1}}{\Delta t} \right| \\ (1 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq m) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $h_{i,j}$ 为第 i 个断面第 j 个时段的水位; Δt 为时间步长; n 为根据生态需要进行布置的断面数量; m 为模拟时段数。

对水位、流速的控制要用到水动力学方程,一般采用一维非恒定流圣维南方程组。

对于水质问题比较突出的库区或河段,通常以水质目标进行控制。如选择 DO, BOD, TN, TP, 叶绿素 a 作为水质指标^[11]。由于各个单项指标量纲和数值差别大,可采用模糊集理论对各个水质指标进行模糊化处理,然后再进行综合。

2.3 生物指标法

河流生物群落包括藻类、底栖生物、水下和河滨植物、水生无脊椎动物、鱼类、水鸟等,各群落或物种对水体的需求有很大差别。在设定生态目标时,并非要保护所有的生物,而是通过对其关键物种的保护来实现生态系统稳定。鱼类是河流生态系统中的顶级生物,其多样性的变化能反映整个河流系统的生态状况,所以一般优先考虑鱼类作为河流生态保护的關鍵物种。例如,保护莱茵河国际委员会将“鲑鱼重返”作为莱茵河生态改善第一阶段目标^[12];为保护黄河干流水体生物的多样性,同样选择鱼类作为关键物种(尽管各河段的关键鱼种不同)^[13]。在长江流域,为长江中游的四大家鱼(鲢鱼、鳙鱼、草鱼、青鱼)创造适宜生境是对三峡水库生态调度的要求;在多瑙河则把生物多样性和生物种群规模作为河流生态保护的目標^[14]。

对于河流生物状况与栖息地特征、流量变化的关系,目前研究得还不够,可利用的资料不多,采用生物指标法来量化生态目标比较少见。

2.4 综合指标法

河流生态状况可从不同角度、采用多层次指标体系来描述。对于同一河段或者同一河流的不同河段,都是如此。考虑到河流生态指标的多样化和不

可公度性,在确定生态目标时可采用模糊集方法对各个分项生态指标进行处理,分别对每个指标赋予一定的权重,相乘后进行累加合成河流总体生态目标,如式(3)所示。或者根据优势功能原则,确定河流生态目标,如式(4)所示。

$$\max Z = \sum_{i=1}^n w_i \mu_i \quad (3)$$

$$\max Z = \min \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\} \quad (4)$$

式中: w_i 为第*i*个指标占总指标的权重; μ_i 为模糊处理后第*i*个指标的隶属函数; n 为指标数目。

3 生态友好型水库调度研究进展

将生态环境的改善作为水库调度要考虑的主要目标来调整水库的调度运行方式,在国外始于20世纪80年代。到目前为止,发展了2种系统分析方法,一是模拟法,二是优化法。这2种方法分别在时间尺度和优化功能上各有侧重。

3.1 模拟法

模拟法针对有限数目的调度运用方式或水库运行轨迹进行水库调节计算,获得放水流量水位过程,然后结合水动力学模型或水质、水温模型、水生物模型,模拟水库调度的生态环境响应。如美国大古力大坝和哥伦比亚流域其他水利工程的调度从1980年开始,充分考虑了满足维持或增强溯河产卵的鱼类种群的寻址需求。田纳西流域管理局(TVA)自1991年开始对20个水库通过提高水库泄流的水量及水质,以下游河道最小流量和溶解氧为指标,对水库调度运行方式进行了优化调整^[15-16]。最近,中央河谷工程(CVP)甚至将保护和恢复鱼类与野生动物需求放在比发电需求优先的位置考虑。在美国佛罗里达州基西米河,为了恢复河流原有的生态面貌,从1990年开始进行了一系列的生态修复试验,其中包括改变上游水库的运用方式,塑造具有季节性变化的、与天然状态尽量接近的来流条件,以及人为抬高水位以恢复两岸的湿地^[17]。从调控决策的目标看,主要有增加河流最低流量和改善水质、控制河道水位变动及恢复河滨植被、改善栖息地适宜性等^[10,18-19]。由于涉及相关的物理化学及生物过程,主要采用模拟法分析。模拟法的优点是能在比较小的时间尺度上较详细地描述相关过程,不足之处在于不具备优化能力。

3.2 优化法

由于模拟法的局限性,人们尝试以河道生态要求作为目标对水库调度运行方式进行优化。例如,经常将水质作为控制目标^[20]。在更多情况下是将生态目标与经济社会目标结合进行多目标优化求

解,或者将生态目标作为约束条件添加到水库调度模型约束中。例如 Shiao 等^[21-22]在多目标准则下研究了确定河道内流量的问题,采用32个水文参数度量因分水对河流水流情势的改变,利用模糊集方法对多指标进行量化处理,合成一个正态目标,与经济目标一起构成多目标优化模型,采用折衷规划进行求解。Prato^[23]采用防洪、发电、旅游、密苏里河航运、供水、鱼类和野生动植物、排涝、历史文物及密西西比河航运等10个属性指标来描述密苏里河管理方案,采用线性加性效用函数对5个方案打分排序,最终推荐一个方案。Lee 等^[24]针对河流水质、通化能力、污水处理成本等3个目标问题,提出了交互式模糊优化方法。多目标方法在原有调度模型的基础上增加1个目标函数,向量优化较单目标优化困难。如果生态目标作为约束条件,将只是约束条件的增加,优化起来相对而言较为简单,应用比较广泛。

在国内,针对大型水库建设和运行中存在的环境问题,已有的研究主要集中在水库调沙、改善水质方面,且同样以模拟法为主。如为解决水库泥沙淤积,采取‘蓄清排浑’和调整水库水位方式^[25];为研究水库调节下的流场和水质变化规律,对水库有限的几种蓄放水方案进行模拟,得出各方案下流场和几种指定污染物浓度的动态变化规律^[26]。我国目前在大多数情况下水库调度仍以传统的兴利除害为重点,而生态友好型调度才刚刚起步,理论和经验还需要进一步的研究和积累。

4 需要进一步研究的问题

协调水库兴利要求和生态环境要求,实现水库调度经济社会目标和生态目标的均衡优化,下列问题值得进一步研究。

a. 水库调度的生态效益及生态目标。水库调度改变了坝上下游的天然径流过程(流量模式),而河流流量模式又与水质、能量、自然生境、生物相互作用关联,进而影响整个生态系统。如何根据相关领域的研究成果建立水库调度方式与河流流量模式及生态功能目标之间的关系,对水库调度的生态效应进行量化,并在此基础上设定生态管理目标,是重要的基础性工作。

b. 生态目标与经济社会目标的协调。水库大坝蓄水位和放水流量的改变不仅具有生态效应,而且影响到其发电、防洪、灌溉等综合利用效益,影响到水库大坝满足人类社会经济发展的能力。与发电、防洪、灌溉等经济目标可以精确量化相比,生态目标由于数据不完全、水文-生态关系不完整及专家知识经验的模糊性,不精确性是生态目标的重要特

征。另外,由于生态系统的多样性和多功能,对其刻画一般采用多个指标。因此,将多指标的不精确的生态目标与经济社会目标纳于一个宏观决策框架中,值得深入研究。

c. 调度的实施。水库调度不再是从前认为的简单的水库水位的升降和放水流量增减问题,而是关系到全流域,尤其是坝下游区域生态的重大事件。必须从河流系统整体出发,充分考虑到河流健康目标,在建有梯级水库的河流上实行联合调度,共同满足河流系统的生态目标要求。另一方面,为保障生态目标的实现,不仅要研究采取配套的技术措施,如设置分层取水口满足水温要求、设置小机组满足下游基流、水轮机掺气掺氧等,而且要研究保障制度,制定相应的调度规程(规则),用于指导水库蓄水放水。

考虑生态要求的梯级水库群调度在我国才刚刚兴起,尚处于探索阶段。在国外,将生态调度与传统的综合利用调度结合的研究也不多。因此,从我国水库调度面临的生态环境问题出发,系统地研究适应生态要求的梯级水库群调控理论及方法,其理论意义和实际价值不言而喻。

参考文献：

[1] 汪恕诚.论大坝与生态[J].水力发电,2004,30(4):1-4.
[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.
[3] SUEN Jian-ping, EHEART J W. Reservoir management to balance ecosystem and human needs: incorporating the paradigm of the ecological flow regime [J]. Water Resources Research, 2006, 42, W03417.
[4] PETTS G E. Impounded rivers [M]. New York: Wiley, Chichester, 1984.
[5] POFF N L, ALLEN J D, BAIN M B, et al. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration [J]. Bioscience, 1997, 47: 769-784.
[6] 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: A 辑, 2003, 18(3): 294-300.
[7] POSTEL S, RICHTER B. Rivers for life: managing water for people and nature [M]. Washington, D. C.: Island Press, 2003.
[8] 王西琴. 河流生态需水理论、方法与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 31-60.
[9] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, WIGINGTON R, et al. How much water does a river need? [J]. Freshwater Biology, 1997, 37: 231-249.
[10] DESSALEGNE T, NICKLOW J, MINDER E. Evolutionary computation to control unnatural water level fluctuations in multi-reservoir river systems [J]. River Research and Applications, 2004, 20(6): 619-634.
[11] SECHI G M, SULIS A. Multi-reservoir system optimization

using Chlorophyll-a trophic indexes [J]. Water Resour Manage, 2007, 21: 849-860.
[12] 章珂. 鲢鱼—2000 计划 莱茵河流域管理成功案例 [J]. 世界环境, 2006(2): 62-65.
[13] 刘晓燕, 张建中, 张原锋. 黄河健康生命的指标体现 [J]. 地理学报, 2006, 61(5): 451-460.
[14] 李翀, 彭静, 廖文根. 河流管理的生态水文目标及其量化分析——以长江中游为例 [J]. 中国水利, 2006(23): 8-10.
[15] HIGGINS J M, BLOCK W G. Overview of reservoir release improvement at 20 TVA dams [J]. Journal of Energy Engineering, 1999, 125(1): 1-17.
[16] BEDNAREK A T, HART D D. Modifying dam operations to restore rivers: ecological responses to Tennessee river dam mitigation [J]. Ecological Application, 2005, 15(3): 997-1008.
[17] 吴宝生, 陈红刚, 马吉明. 美国基西米河生态修复工程的经验 [J]. 水利学报, 2005, 36(4): 473-477.
[18] MADDOCK I P, BICKERTON M A, SPENCE R, et al. Reallocation of compensation releases to restore river flows and improve instream habitat availability in the Upper Derwent Catchment, Derbyshire, UK [J]. Regulated Rivers Research & Management, 2001, 17(4/5): 417-441.
[19] HUGHES D A, O'KEEFFE J, KING J. Development of a reservoir release operating rule model to simulate time series of reservoir releases for instream flow requirements [J]. Water SA, 1997, 23(1): 21-30.
[20] CHAVES P, TSUKATANI T, KOJIRI T. Operation of storage reservoir for water quality by using optimization and artificial intelligence techniques, mathematics and computers in simulation [J]. Mathematical Modeling of Ecological Systems, 2004, 67: 419-432.
[21] SHIAU J T, WU Fu-chun. Compromise programming methodology for determining instream flow under multiobjective water allocation criteria [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(5): 1179-1191.
[22] SHIAU J T, WU Fu-chun. A dynamic corridor-searching algorithm to seek time-varying instream flow releases for optimal weir operation: comparing three indices of overall hydrologic alteration [J]. River Research and Applications, 2007, 23(1): 35-53.
[23] PRATO T. Multiple-attribute evaluation of ecosystem management for the Missouri River system [J]. Ecological Economics, 2003, 45(2): 297-309.
[24] LEE C S, CHANG Shui-ping. Interactive fuzzy optimization for an economic and environmental balance in a river system [J]. Water Research, 2005, 39(1): 221-231.
[25] 林秉南, 周建军. 三峡工程泥沙调度 [J]. 中国工程科学, 2004, 6(4): 30-33.
[26] 郭磊, 高学平, 张晨, 等. 北大港水库水质模拟及分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 11-16.

(收稿日期 2007-12-06 编辑 高建群)