

水库生态调度研究动向与发展趋势

水资源研究所 游进军、魏传江、季海萍、杜明月

1 水库生态调度

水库的建设使人类能够对水资源进行更为有效的管理和充分利用，但水库为人类带来巨大社会效益的同时，不可避免地对河流生态环境系统造成胁迫。筑坝建闸破坏河流的连续性，水库调蓄将周而复始的洪枯演替均一化，河流形态多样性降低，由此引发了水温、流速、流量、泥沙、营养物质等生态因子的较大改变，在很大程度上破坏了河流自然水文情势，导致了一系列河流生态恶化事件的出现（Whiting P J, 2002）。笼统地反对建设水库不仅带有“因噎废食”的片面性，也不符合中国经济社会发展的实际需要，如何在满足人类发展需求和河流生态环境系统健康两者之间寻找平衡点迫在眉睫。

“生态调度”通过改变水库调度方式弥补或缓解水库对生态环境的影响，已成为现阶段减轻水库对河流健康负面影响的研究热点与重点。国内外学术界尚未对“生态调度”给出明确的定义，国外学者的理解更接近于“生态修复”，国内学者也有各自不同阐述。蔡其华（2006）提出生态调度应在满足坝下游生态、库区水环境保护要求基础上，充分发挥水库社会经济功能，使水库对河流生态环境的负面影响控制在可承受范围内并逐步修复生态环境系统；董哲仁（2007）认为生态调度是在实现防洪、发电、供水、灌溉、航运等社会经济多目标的前提下兼顾河流生态需水的水库调度方法；胡和平（2008）认为水库生态调度就是要在实现基本的生态环境目标的前提下，发挥水库的社会经济效益，但是其大前提是保证人民群众的生命财产安全和正常的生活；梅亚东（2009）给出了生态与环境调度的概念，认为在研究调整水库的调度方式减轻筑坝对生态环境的负面影响的过程中，应该把环境和生态区分开来，环境调度以改善水质为主要目标，生态调度以水库工程建设运行的生态补偿为主要目标，两者相互联系并各有侧重。各方认识虽不一致，但其核心是在水库运行和管理过程中考虑生态因素，通过调整水库现有的调度与运行方式最大程度地满足河流生态环境需水。

2 调研背景概述

20 世纪 70 年代以来，国外学者针对水库引起的生态环境问题就已开展全面系统的研究，生

态调度应运而生，并在部分区域投入实际应用。美国田纳西河流域管理局在 1991–1996 年间对所管辖流域 20 座水库的调度运行方式进行了优化调整以改善下游水域生态环境 (John M. Higgins, 1999), 哥伦比亚河上的大古力水坝自 1983 年始就将对溯河产卵鱼类的影响作为流域管理的主要问题 (吕新华, 2006), 澳大利亚墨累–达令河自 1992 年始经过 10 年准备启动了以“国家为生态系统提供水量”为原则的水库管理机制 (王波等, 2010), 上述实践措施均在尽量减少对防洪、发电、供水等水库原有目标影响的前提下, 通过优化调度方式和配套技术设施等手段降低水库对生态环境影响, 消减对河流健康产生的负面效应, 已成为生态调度研究的成功范例。

河流生态环境问题在我国亦日益受到重视, 但目前尚处在理论探讨与初步尝试阶段。高永胜 (2009) 分析了生态调度的理论基础并给出了生态调度应遵循的基本原则; 王远坤 (2008) 分析了生态调度的内容, 提出了生态调度的六大专项调度; 尹正杰 (2011) 结合长江流域水利工程与生态环境背景, 探讨了水库生态调度实施方法框架。我国水利工作者也做了大量生态调度的有益尝试, 例如黄河调水调沙实验 (李国英, 2002), 太湖流域通过“引江济太”工程以改善水生态和水环境状况 (李大勇, 2007), 长江流域通过三峡工程制造“人造洪峰”满足中下游“四大家鱼”产卵需水要求 (刘世昕, 2011) 等等。

生态调度的主要研究方向是通过构建调度模型将生态因素纳入水库日常调度目标中, 面临的主要问题是河流生态需水的时空要求和保障方式。在参阅大量文献的基础上, 本文对河流生态需水研究和目前主流的生态调度模型进行阐述, 并简要论述研究中的值得关注点, 分析未来研究发展方向, 供讨论参考。

3 学科发展新动向和值得关注点

3.1 河流生态需水研究发展动向

3.1.1 河流生态需水分类

确定合理的河流生态需水是水库生态调度的前提条件。根据河流生态需水在时间分布上的特点, 可将其归为两类: 连续生态需水与非连续生态需水。所谓连续生态需水, 即为了防止河道断流、湖库萎缩, 满足河道内主要生物生存要求的基本水量, 年内过程连续且具有年周期性, 最小生态流量和适宜生态流量均属于连续生态需水; 非连续生态需水则不具有年内连续性, 仅是针对某特定目的的、阶段性的水量需求, 如为鱼类创造产卵繁殖条件的“脉冲洪水”, 防止河道泥沙淤积的冲淤流量和维持河道形态的平滩流量等等, 以上水量过程持续时间少则几日多则数月, 且

周期不定，与连续生态需水有明显差异。

3.1.2 河流生态需水评估方法

河流生态需水的提出始于美国为满足河流航运功能而开展的河道枯水流量研究，至今已有 200 多种生态需水评估方法 (Tharme R E, 2003)，并可大致概括为以下 4 类 (钟华平等, 2006)：水文指标法，水力学法，栖息地法和整体分析法。不同生态需水评价方法各有其适用条件，侧重点不一，在实际应用中需根据河流情况和资料收集情况合理选择，具体可参考有关文献、著作，本文不再详述。

我国学者根据我国河流的实际情况，在借鉴国外研究的基础上对生态需水评估方法做出了诸多改进。李嘉 (2006) 采用水力学法与生物资料结合的方式建立了生态水力学法计算河段最小生态需水；张新华等 (2011) 结合水力学法中湿周法和 R2-Cross 法建立了简单综合法计算河流最小生态流量；张树奎 (2011) 基于熵权理论结合水文指数法确定了长江干流生态适宜流量；刘晓燕等 (2009) 先通过 Tennant 法初步确定黄河下游最小和适宜生态流量，再根据断面流量-水深-流速关系调整，最终确定河流生态需水。不难看出，多种方法耦合是近几年来我国生态需水研究的热点，耦合方法克服了单一方法的缺陷，扬长避短，将是未来研究的重要方向之一。

以上均为针对连续生态需水的研究，对于非连续生态需水，我国研究较多的是河流输沙需水和水质型生态需水。河流输沙需水研究一直在我国黄河、渭河等高含沙河流占重要位置，一般从水力学角度出发，根据河流输沙运动特性计算汛期输沙需水量；以改善河流污染状况为目的的生态需水则多通过水质模型求得。随着生态理论的不断深入，河流生态系统整体性受到重视，河流洪水过程成为非连续生态需水研究的热点。王高旭等 (2009) 将黄河中下游生态需水分为汛前期、汛期和汛后枯水期三个时段，分别对应以适宜生态流量、洪水期生态流量和最小生态流量，通过鱼类生境法计算适宜生态流量，输沙量和流量关系计算洪水期生态流量，流量-河流规模模型计算最小生态流量；赵琴 (2010) 从水力学理论出发，基于 Euler-Lagrange 方法研究汛期使鱼卵漂流的流速从而推算鱼类繁殖期生态需水量；赵越 (2012) 通过生态流组法分析了长江四大家鱼产卵期的生态水文事件组成并构建了满足其产卵要求的生态洪水过程。

上述计算方法主要是从不同角度计算评估河流生态需水量值，受水文随机性以及供用水等因素影响，在有水利工程尤其是水库工程控制条件下，实际的生态需水的保障程度受调度影响很大，需对调度模型进行分析研究。

3.2 水库生态调度模型研究发展动向

我国的水库调度主要围绕防洪、发电、供水、灌溉等社会效益目标进行，防洪调度模型（王栋等，2001）和兴利调度模型（郭生练等，2010）均取得了大量研究成果，在此基础上，增加河流生态需水作为生态效益目标或约束条件，即构成生态调度模型。生态调度模型通常具有如下结构：

$$\text{目标函数: } \text{Max} \{ \text{Social}(X), \text{Economic}(X), \text{Ecological}(X) \} \quad (1)$$

$$\text{约束条件: } a_{\min} \leq \text{Constraint}(X) \leq a_{\max} \quad (2)$$

式中： X 为多维决策变量，一般为水库下泄流量， $\text{Social}(X)$ 、 $\text{Economic}(X)$ 、 $\text{Ecological}(X)$ 分别对应于社会效益、经济效益和生态效益函数， $\text{Constraint}(X)$ 为系统约束条件集， a_{\max} 、 a_{\min} 分别为约束条件的上下限值。社会效益包括防洪、供水、娱乐以及改善区域景观环境等产生的效益，经济效益指发电、工业供水、灌溉、航运等经济活动产生的效益，生态效益指健康的河流生态系统对人类的生产、生活和环境产生的有利影响；约束条件通常包括水库水量平衡约束、水位（库容）约束、发电引用流量约束、电站出力约束、变量非负约束等。根据模型中保障生态需水方式的不同可分为约束型生态调度模型和目标型生态调度模型两类（陈端等，2011）。

3.2.1 约束型生态调度模型

约束型生态调度模型指在约束条件集中加入下泄流量约束作为保证河流生态需水的方式，目标函数通常为水库（群）发电量最大、供水总量最大（用户缺水量最小）等，以发电为主要功能的水库通常将水库（群）发电量最大作为函数目标，以供水为主要功能的水库则以供水总量最大（需水单元缺水量总和最小）为目标，综合型水库一般为多目标函数。函数目标可表示为：

$$\text{Max Electricity}(X) \text{ 或 } \text{Max Supplywater}(X) \quad (3)$$

连续生态需水评估方法成熟，获取相对简单，广泛作为模型的生态约束条件。谢瑞等（2010）以生活、生态、生产供水缺水率最小为目标，并要求水库泄流量不小于最小生态需水流量，建立了石羊河流域水库群生态调度模型。叶季平等（2010）针对大型水库经济、社会和环境效益兼顾的运行方式，建立了以发电、供水和弃水为优化目标的多目标生态调度模型，通过约束法将多目标转化为多个单目标进行求解。张洪波等（2011）基于生态流量恢复法，在防洪、防凌基础上以缺水量最小和发电量最大为调度目标，构建了黄河干流水库生态调度模型。朱金峰等（2012）以供水区生活、工业、农业、生态缺水量最小为优化目标，分别以最小生态流量和适宜生态流量为约束，建立了沙河水系水库群生态调度模型。王霞等（2012）考虑河流生态系统和自然水环境，以总缺水量最小和发电量最大为调度目标构建了黄南水库四种不同下泄流量约束的生态调度模

型。

将非连续生态需水作为约束条件建立生态调度模型在大江大河应用较多,目前的发展趋势是将连续生态需水与非连续生态需水综合考虑。赵越等(2012)针对长江四大家鱼产卵问题,将水库发电量最大作为目标、满足家鱼产卵要求的洪水过程为约束条件,建立了三峡水库生态调度模型,结果表明经模型求解改进的生态流量过程能较好满足四大家鱼繁殖对洪水脉冲的要求。康玲等(2010)针对汉江中下游水体污染和渔业资源退化两大生态问题,建立了以发电量最大为调度目标、生态流量为约束条件的丹江口水库河流生态需水和人造洪水调度模型。邹淑珍等(2011)通过构建赣江中游三座梯级水库的联合调度模型,在以水库群发电量最大作为调度目标,以最小、适宜生态流量和人造洪水为生态约束条件,得出考虑生态需水对水库群总经济效益影响不大的结论。

3.2.2 目标型生态调度模型

目标型生态调度模型是将生态需水作为目标之一,在强调水利工程社会、经济效益的同时,将生态效益提高到应有的位置,目标函数常见形式有两种,一种是生态缺水量最小,另一种是构建评价指标使河流生态流量最优。

以生态缺水量最小为目标函数时,设定的生态需水参照值一般为最小生态流量或天然状态下月平均流量。卢有麟等(2011)以发电量最大和生态缺水量最小为目标建立了三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型,将目标函数进行归一化处理后求解,认为水量不充沛情况下发电效益与生态效益难以同时优化。

所谓河流生态流量最优即经水库调度后下泄流量尽可能地接近自然水文情势(*Nature Flow Regime*)(N. LeRoy Poff 等, 1997), Richter 等于 1997 年提出 RVA 法,通过表征流量大小、发生时间、发生频率、持续时间及变化率等 5 方面的 32 个水文特征值(IHA)来评价河道径流过程的改变程度,并以各指标发生机率 75%和 25%的值作为相应指标的 RVA 目标范围,以水文改变度 D_k 评估(Brian D. Richter 等, 1998)。目前河流生态流量最优的目标函数应用较多的是两种,一为 Shiau 等(2007)提出的整体水文改变度 D_0 最小的目标,另一为 Suen 等(2006)提出的 IHA 加权隶属度 S 最大的目标。

仅以河流生态流量最优为目标在现阶段生态调度模型中并不常见,绝大多数水库优化模型仍是将其作为目标函数之一处理。杨娜等(2012)基于 RVA 法建立了考虑下游河道水流情势天然性要求的调度模型,以隶属函数作为优化目标,并运用到丹江口水库,结果表明考虑河流生态流

量最优时的流量过程能较好地贴近历史平均水平，但发电量仅为以发电效益最大时的一半。张洪波（2011）基于黄河天然水流表征体系研究建立了以 IHA 加权隶属度最大、缺水率最小和发电量最大为目标的刘家峡水库调度模型。杨娜（2013）从河流天然水流情势和水库供水率最大两方面设立了目标函数，构建了兼顾水库兴利要求和生态环境要求的调度模型，并运用于丹江口水库，优化结果表明对水库下泄流量进行仿天然模拟能有效降低水库对河流生态环境系统的负面影响。

3.3 生态调度发展值得关注点

构建水库生态调度模型涉及目标函数的确立、约束条件的选择，国内外学者对此开展了一系列研究工作并取得了很多成果。为进一步完善生态调度模型研究，仍需将以下几个问题作为研究中的主要关注点。

3.3.1 生态需水选取问题

生态调度目的在于通过改善水库下泄水流条件，减轻水库对河流生境的破坏，要实现这一目的，生态需水的选取必须满足维持河流自然生态系统的基本需求。模型中生态流量约束通常为下泄流量不小于最小生态流量（叶季平等，2010；王霞等，2012）。最小生态流量可通过较为简单的水文学法、水力学法求得，且数值固定单一，既保证了坝下河道最基本的生态需水又不会对社会经济效益造成较大影响，应用较广。随着河流生态学的发展，越来越多的学者开始质疑最小生态流量对河流生态环境的保护效果，适宜生态流量研究逐渐受到重视（张洪波等，2011；金峰等，2012）。适宜生态流量是维持水体生物完整性的基本需水，多以目标物种（通常为鱼类）的生存繁殖所需水量为研究内容，通过栖息地模拟法、生物量法计算求得。相较于最小生态流量，适宜生态流量动态响应目标物种不同时期的需水要求，具有较好的保护效果，但计算需大量生物信息、水文数据，且对发电、供水等效益影响较大。国外研究更倾向向下泄流量向自然水文情势逼近，不仅能反映水流宏观上的特征（月均流量），更能刻画极值变化、持续时间、洪水脉冲次数、发生频率等细节（Joseph D. Kiernan 等，2012），这是前两种连续生态需水所不具有的。我国学者在非连续生态需水评估方面也做了大量研究，但多数仍停留在“量”上，且应用到模型中经过了简化处理，忽略了许多重要因素。基于自然水文情势的生态流量约束如何在模型中实现也是一个难题，涉及模型研究尺度、特征值量化等诸多问题。生态需水选择与河流健康状况密切关系，针对地区特点、河流特性，结合生态需水研究进展，选择合适的生态流量约束是生态调度模型需要重点研究的问题。

3.3.2 时间尺度问题

现有模型研究多以月为计算时段，以年为计算周期，以月均流量为生态需水的衡量尺度，这显然是不能完整体现河流生态系统对水需求差异性的。大量研究表明洪水脉冲是河流与洪泛滩区动态联结的纽带，鱼类与其他水生生物的产卵、孵化等生命活动均需依靠洪水脉冲引起的水位涨落信号进行，其对于河流生态系统的保护和修复具有重要意义（董哲仁等，2009）。通过水库调度形成“人造洪水”制造洪水脉冲是目前的普遍做法，但刻画该洪水过程涉及初始水位、初始流量、水位日上涨率、流量日增长率、最大洪峰流量值、洪峰水位上涨持续时间、两峰间隔时间等诸多因子，需在日甚至小时尺度上开展调度。综上，模型时间尺度不能简单以月、日为调度时段，月尺度流量的连续生态需水反映综合水平，日尺度流量如洪水脉冲等非连续生态需水反映特定时期要求，两者嵌套生成不同时间尺度特征水流是生态调度模型需解决的另一问题。

3.3.3 空间尺度问题

关于模型空间尺度，多数模型的调度对象仍为单个水库或存在水力联系的梯级水库，鲜见工程和流域整体生态调度研究。随着水资源供需矛盾加剧，水资源利用程度提高，水库作为水资源配置的主要控制节点呈现流域化的趋势，恢复流域生态环境势必要在全流域实现水库群生态联合调度（赵麦换等，2012）。全流域的水库生态调度较单一水库复杂，干支流、上下游水库下泄流量与区间汇水不再是简单叠加的问题，需考虑上游水库泄流组合以及水库空间位置的不同造成的流量到达时间延滞（张洪波等，2011）。同时，流域层面上不同行政区、不同用水户之间水资源分配矛盾愈加突出，对模型协调多区域、多用水户提出了更高要求。进行全流域水库生态调度是河流生态环境保护的必然方向，未来模型研究中空间尺度的处理将至关重要。

3.3.4 多目标协调关系

水库生态调度势必影响原有防洪、发电、供水、灌溉等功能，目前关于水库多目标间的定性关系描述较多，定量关系却缺少深入研究，这不利于管理部门制定调度策略、形成目标协调机制，加大了生态调度的可操作难度。张洪波等（2011）提出分时段设定优先目标法，春灌、夏灌期灌溉目标优先，汛期防洪目标优先，汛后期发电目标优先，生物重要生命期生态目标优先等，为多目标协调机制提供了参考。笔者认为可从经济角度进行更细化的定量关系分析，将水库目标全部货币化，评价生态水量的生态服务价值、经济水量的经济价值，建立各价值量与水量的响应关系。目前对生态服务经济价值进行确定或定量评估仍是环境经济学、生态经济学研究的前沿和难点，虽然估算方法较多，但不同方法结果差异较大，且与研究区域的国民经济情况关联较大。水库多

目标调度涉及部门广泛，因此除却技术层面的制约，管理层面的协调机制也亟待建立。

4 结论与建议

随着生态问题的日益凸显，生态环境保护迫在眉睫，在传统水库调度基础上考虑河流生态需水问题成为我国水库调度的研究重点。目前生态调度模型主要通过传统调度模型的约束条件中增加生态流量约束或以生态为目标等方式保障水库下游河道生态需水。

针对我国研究现状，未来生态调度模型应在以下几方面开展更深入的研究：（1）关注生态需水研究进展，针对地区特点、河流特性计算获取可行的生态需水量值；（2）模型考虑生态需水过程应兼顾年、月、日时间尺度，同时流域层面的水库群联合生态调度将是研究的重要发展方向；（3）进一步衡量水的生态服务功能，量化生态调度的效益，通过评价河流生态服务价值构建多目标间的定量关系，建立多目标协调机制，更好的为调度管理决策服务。

参考文献

- 1 Brian D. Richter, Jeffrey V. Baumgartner, Robert Wigington. How much water does a river need?[J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37: 231–249.
- 2 Brian D. Richter, Jeffrey V. Baumgartner, David P. Braun, al et. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network[J]. *Regulated River: Research & Management*, 1998, 14: 329–340.
- 3 Jenq-Tzong Shiau, Fu-Chun Wu. Pareto-optimal solutions for environment flow schemes incorporating the intra-annual and interannual variability of the natural regime[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43, W06433, doi: 10.1029/2006WR005523.
- 4 Jian-ping Suen, J Wayland Eheart. Reservoir management to balance ecosystem and human needs: incorporating the paradigm of the ecological flow regime[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42, W03417, doi: 10.1029/2005WR004314.
- 5 John M. Higgins, W. Gary Brock. Overview of reservoir release improvement at 20 TVA dams[J]. *Journal of energy engineering*, 1999, 125 (1): 1–17.
- 6 Joseph D. Kiernan, Peter B. Moyle, Patrick K. Crain. Restoring native fish assemblages to regulated California stream using the natural flow regime concept [J]. *Ecological Applications*, 2012, 22 (5): 1472–1482.

- 7 N. LeRoy Poff, J. David Allan, Mark B. Bain, et al. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration [J]. *Bioscience*, 1997, 47 (11): 769–784.
- 8 Tharme R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers[J]. *River Research and Applications*, 2003, 19 (4): 397–441.
- 9 Whiting P J. Stream flow necessary for environmental maintenance[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2002, 30, 181–206.
- 10 蔡其华. 充分考虑河流生态系统保护因素完善水库调度方式[J]. *中国水利*, 2006, (2): 14–17.
- 11 陈端, 陈求稳, 陈进. 考虑生态流量的水库优化调度模型研究进展[J]. *水力发电学报*, 2011, 30 (5): 248–256.
- 12 董哲仁, 孙东亚. 生态水利工程原理与技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- 13 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.
- 14 董哲仁, 张晶. 洪水脉冲的生态效益[J]. *水利学报*, 2009, 40 (3): 281–288.
- 15 高永胜, 王淑英, 于松林, 等. 对水库生态调度问题的研究[J]. *人民黄河*, 2009, 31 (11), 12–13.
- 16 郭生练, 陈炯宏, 刘攀, 等. 水库群联和优化调度研究进展与展望[J]. *水科学进展*, 2010, 21 (4), 496–503.
- 17 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): 325–328.
- 18 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.
- 19 李国英. 黄河调水调沙[J]. *人民黄河*, 2002, 24 (11): 1–4.
- 20 李嘉, 王玉蓉, 李克峰, 等. 计算河段最小生态需水的生态水力学法[J]. *水利学报*, 2006, 37 (10): 1169–1174.
- 21 李大勇. 区域水量水质联合调度对太湖水生态环境影响效果评估研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- 22 刘世昕. 三峡首次为四大家鱼开闸放水[N]. *中国青年报*, 2011-06-20 (5).
- 23 刘晓燕, 连煜, 可素娟. 黄河河口生态需水分析[J]. *水利学报*, 2009, 40 (8): 956–961.
- 24 卢有麟, 周建中, 王浩, 等. 三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型及其求解方法[J]. *水科学进展*, 2011, 22 (6): 780–788.

- 25 梅亚东, 杨娜, 翟丽妮. 雅砻江下游梯级水库生态友好型优化调度[J]. 水科学进展, 2009, 20 (5): 721-725.
- 26 吕新华. 大型水利工程的生态调度[J]. 科技进步与对策, 2006, 23 (7): 130-132.
- 27 王波, 黄薇. 国内外流域管理体制要点及对长江生态管理启示[J]. 人民长江, 2010, 41 (24): 13-16.
- 28 王栋, 许圣斌. 水库群系统防洪联合调度研究进展[J]. 水科学进展, 2001, 12 (1): 118-124.
- 29 王高旭, 陈敏建, 丰华丽, 等. 黄河中下游河道生态需水研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48 (5): 125-130.
- 30 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.
- 31 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.
- 32 谢瑞, 成自勇, 张芮, 等. 西北内陆河流域水库群生态调度模型[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21 (1): 91-94.
- 33 杨娜, 梅亚东, 许银山, 等. 基于下游河道水流情势天然性要求的水库优化调度[J]. 水力发电学报, 2012, 31 (5): 84-89.
- 34 杨娜, 梅亚东, 于乐江. 考虑天然水流模式的多目标水库优化调度模型及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41 (1): 85-89.
- 35 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.
- 36 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.
- 37 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.
- 38 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.
- 39 张树奎, 鲁子爱. 基于熵权法的生态适宜流量研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29 (6): 27-29.
- 40 张新华, 李红霞, 肖玉成, 等. 河流最小生态基础流量计算方法研究[J]. 中国水利水电科学院学报, 2011, 9 (1): 66-73.
- 41 赵麦换, 徐晨光, 毕黎明. 水库生态调度的原因与对策[J]. 人民黄河, 2010, 32 (8): 55.

- 42 赵琴, 李嘉, 王锐, 等. 基于 Euler-Lagrange 方法的漂流性鱼卵生态需水量数值研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(6): 31-37.
- 43 赵越, 周建中, 许可, 等. 保护四大家鱼产卵的三峡水库生态调度研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(4): 45-50.
- 44 钟华平, 刘恒, 耿雷华, 等. 河道内生态需水估算方法及其评述[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 430-434.
- 45 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.
- 46 邹淑珍, 吴志强, 张铭, 等. 赣江中游水利枢纽群生态优化调度的预测分析[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(6): 61-65.