

再议水库生态环境调度

骆文广^{1,2}, 杨国录^{1,2}, 宋云浩^{1,2}, 陆 晶^{1,2}

(1 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; 2 武汉大学污淤泥研究中心, 湖北 武汉 430072)

摘要: 从生态调度科学内涵、工程实践以及调度体系 3 个方面, 剖析了诸多学者运用水库生态调度概念所取得的丰硕成果, 发现水库生态调度提法得不到共识的原因: 对生态调度中的“生态”自然科学的不同认识; 水库调度对水库“生态”与“环境”作用机制的不同理解; 水库非生物因子与生态系统非生物因子的差异性认识。深入研究和剖析了“水库环境调度”、“水库生态调度”和“水库生态环境调度”的概念及其调度体系内容, 明确了“水库生态环境调度”提法的科学性和可操作性, 澄清认识, 共识提法, 有利于在整体分析水库水资源、水库水环境和水库水生态这个复杂系统的基础上完善水库调度学科体系, 有利于在水库生态环境调度科学实践后增加其科学意义和应用价值, 有利于在构建水库生态环境调度技术体系、调度规程及其应用平台后提高水库调度的综合效益。

关键词: 生态环境; 水库调度; 生态调度; 环境调度; 生态环境调度

中图分类号: TV697.1; X171.1; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2016)02-0317-10

在中国, 现行的水库调度方式以及调度规程考虑生态环境目标要求较少, 给库区生态系统及下游生态环境造成诸多不利影响。为确保水库传统功能兴利目标, 提升水库生态环境标准, 可通过水库“生态调度”来消除或者减少这种负面效应。然而, 对“水库生态调度”的提法也各有不同: 在美国, 多采用“改进大坝运行方式”的表述^[1], 而在国内, 多数采用“水库生态调度”的表述^[2], 也有许多学者^[3-6]虽采用这种表述, 但其定义和内涵存在差别。因此, 这些表述是否科学, “生态调度”是否包含了生态调度和环境调度, 又或者是否真正阐明水库坝前水位调控与水库库区水利环境、库区生态系统、水库上下游资源环境的关系? 这所有的问题都值得商榷。因此, 共识“水库生态调度”及阐明其内涵, 对于实现河流水资源的可持续利用^[7]、改善水库下游河流自然生态环境、恢复大坝修建后河流的生态功能^[8]都非常重要。

近 10 多年来, 学者们对“水库生态调度”的概念性提法保留不少质疑: ① 水库生态调度是一个严格的科学技术定义, 还是困难于囊括水利-资源-生态-环境复杂系统调控而不得不简易地给出一个代表性“命题”? ② “水库生态调度”在内容上仅指以生态目标为宗旨的调度方法, 还是指侧重于生态目标而嵌入环境目标的调度方法, 又或者是指含有环境过程的侧重于生态目标的调度方法? ③ 在“水库生态调度”技术方案的构建上, 是采用“水库非生物因子”, 还是采用“系统非生物因子”?

通过辨析现有的水库生态调度, 选取从基于工程实践、基于生态调度、基于水库非生物因子 3 方面来探讨对水库生态环境调度的认识, 以期达到对水库生态环境调度共识的目的。

1 水库生态调度研究现状

早在 20 世纪 70 年代, 国外学者就已经从两个方面研究水库对生态与环境不利影响^[3]: 一是对调度方式

收稿日期: 2015-11-04; 网络出版时间: 2016-03-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20160314.2210.010.html>

基金项目: 国家科技重大专项课题资助项目(2014ZX07104005)

作者简介: 骆文广(1988—), 男, 湖北鄂州人, 博士研究生, 主要从事水环境治理方面研究。

E-mail: wgluo@whu.edu.cn

通信作者: 杨国录, E-mail: YGL516@sina.com

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，从而在保证改善效果的同时不至于对生态系统产生明显扰动。对此，北美^[10]、欧洲、澳洲、非洲^[11]开展了相关的实践研究，取得了诸多成果，其中最具代表性的是美国田纳西流域管理局(TVA)1991—1996年对流域内20个水库的调度方式在考虑了生态目标后进行了优化调整^[3,10]。国外其他几个典型地区水库，增加生态目标后，其调度的实践研究基本情况如表1所示。

表1 国外水库增加生态目标后调度的典型案例基本情况

Table 1 Basic information about foreign typical cases of adding ecological objective to reservoir operation

地点	改进水库调度生态目标	调度方式	参考文献	地点	改进水库调度生态目标	调度方式	参考文献
美国田纳西河流域	保证流量和下泄水流溶解氧浓度	针对水质因子,调整水库下泄方式进行调节	Higgins和Brockw ^[10]	加拿大西萨蒙水库	恢复自然河流水文情势,保护濒危鱼类	通过改变水库的泄流量、泄流方式和泄流时间来满足下游河道最小生态径流量	哈尔比 ^[14]
南非潘沟拉水	修复水库的生态环境,保证河流鱼类的产卵	制造人工洪峰,模拟有益的生态洪水脉	Hughes和Hannart ^[11]	美国科罗拉多河	营造沙洲和边滩;恢复下泄水温;清除外来鱼类	提高汛期下泄流量,周期性的进行“人造洪水”放水试验,模拟生态洪水脉冲	Lovich和Melis ^[15]
澳大利亚Cooper C-reek	加强水库物质循环,保证水生生物产卵和生长	以尽量维持河流的自然水文特征为目的的水量生态调度	Kingsford等 ^[12]	乌克兰德涅斯特河	改善河流无机氮化合物污染率高的情况	做生态性放水试验,水库加大放水后,能显著改善水质、恢复生态环境	魏什涅夫斯基 ^[16]
美国萨凡纳河流域	修复河道、洪泛区和河口栖息地	以河道最小生态径流量为基础的生态需水量调度	Richter等 ^[13]	美国罗阿诺克河流域	评估建坝前后的生态水文特征变化	采用月流量指标、极限流量指标、时刻指标、高流量和低流量指标、涨水落水指标等来评估生态水文变化过程	Brian等 ^[17]

中国学者对生态与环境的影响这方面的研究起步稍晚，但取得了较大的发展。水库生态调度在中国各大流域中都有工程实践与科学研究，其中卢有麟等^[18]研究了修复改善长江三峡水库上游流域典型生态系统方法；徐天宝等^[19]从生态水文学角度对长江中游的生态水文特征进行了评估；郭文献等^[20]以长江下游河道环境流量与中华鲟和四大家鱼产卵繁殖期为目标来进行调度。何智娟等^[21]对黄河下游流域进行水量统一调度和调水调沙，力图修复河口湿地生态。康玲等^[22]分析了汉江中下游的水体污染和渔业资源衰退两大生态问题。孙克等^[23]研究了水资源供需和水库调度对淮河流域生态产生的消极干扰影响。几个代表性成果列入表2。

表2 中国现有水库生态调度研究情况分析

Table 2 Analysis of domestic existing research on reservoir ecological operation

调度方式的提法	调度目标	研究内容所属范畴	参考文献
基于环境的水库调度	基于环境的干支流水库调度运行方式的统筹考虑,保障生态系统的健康发展	把生态理解成河流的自然规律,属于水环境问题	许新宜等 ^[6]
生态调度	通过“生态调度”补偿对于水库下游及库区的生态系统需求	水利环境问题	王宗志等 ^[7]
完善水库调度方式	通过“生态调度”对水库库区、下游水环境和生态问题做出调整	水利环境问题	蔡其华 ^[5]
水库生态与环境调度	生态调度以水库工程建设运行的生态补偿为主要目标	“生态调度”是一种补偿,属于水利环境问题	梅亚东等 ^[4]
生态调度	利用水库有效调节水量的功能,促进河流复合生态系统朝着有利于生物演替方向的调度	明确把生态需水纳入到目标系统中,属于水环境因子问题	徐扬等 ^[2]
生态调度	在实现基本的生态环境目标前提下,发挥水库的社会经济效益	强调生态流量过程,属于水环境因子问题	胡和平等 ^[24]
生态调度	基于多尺度耦合机制、目标协调机制、特征水流畅生成机制与调度方案滚动修正机制	水利环境问题	张洪波等 ^[25]
水库健康调度	为使水库能改善和维持河流健康生命,达到人水和谐的目的	生态理解成一种“健康”意愿,属于水环境问题	李景波等 ^[9]

通过综合分析国内外对生态调度的研究成果, 可得到如下认识:

(1) 对已建运行水库共识有两点: ① 未能充分认识到由于水库建成运行所引发的生态环境新格局; ② 事先制定的水库调度体系对水库生态环境新情势体现不够, 并由此引发水库上下游生态环境问题。

(2) 国外, 通过嵌入“生态目标”, 采用“改进大坝运行方式”的水库调度方案来解决上述问题。但“生态目标”中没有明确生物指标, 而是企图通过改善水库水利环境来达到生态目标。

(3) 国内, 明确提出“水库生态调度”的解决方案, 力图通过把“生态目标”纳入到水库调度中来改善水库运行对生态环境造成的负面效应。而“生态目标”的考核指标极其个性化, 多数着眼于河道鱼类繁衍对水环境的需求条件。

(4) 在改善水库生态环境负面效应、提高水库生态功能的方案中, 都是通过利用水库来流水文情势、调整水流过程、改变水动力因子和环境因子, 来提高水库水体质量和改善水库下游生态环境。

2 水库生态环境调度

科学地认识水库生态调度和水库生态环境调度内涵, 把握其调度目标、调度过程, 并相应建设好调度规程, 对于指导改善水库上下游生态环境的水库调度至关重要。

2.1 再议水库生态调度

近十多年来, 人们对水库生态调度基本概念的认识、定义、内容等的说法却长期达不成共识, 究其原因, 关键在于对“生态调度”中“生态”的理解和“生态调度”可操作性的认识。总结前人的研究, 对于“生态调度”中“生态”和水库中的“生态”的理解如图 1 所示。由图 1 可知, 水库生态调度概念还没有达成共识。

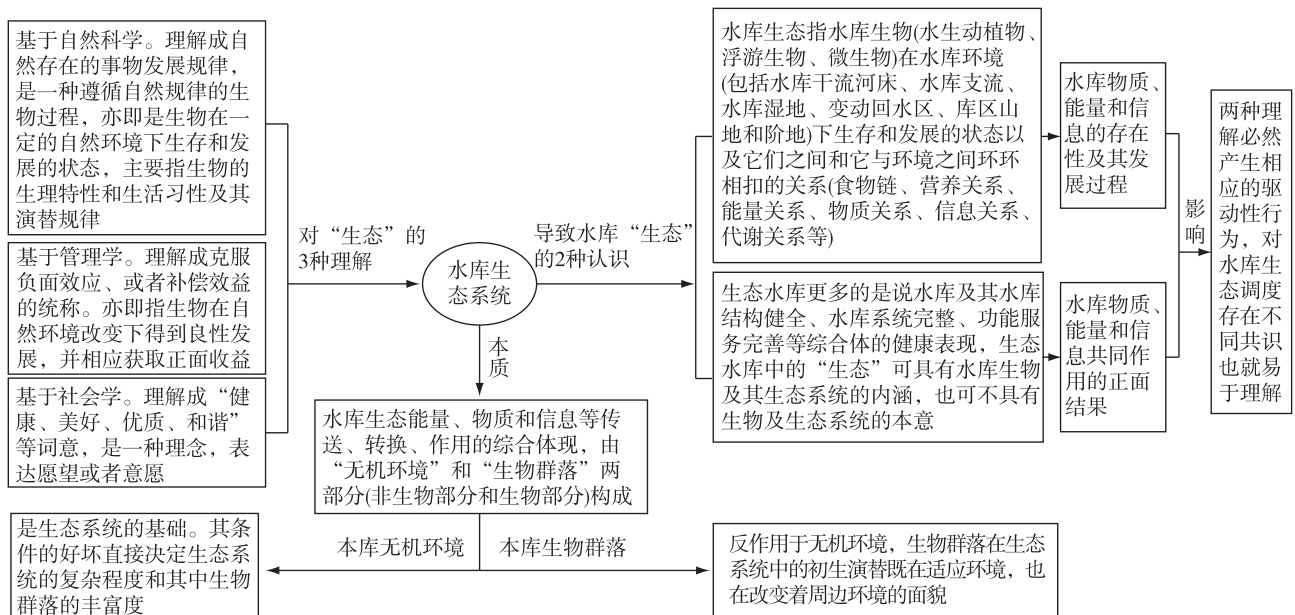


图 1 现有研究对水库“生态”认识过程

Fig. 1 Cognitive process of existing research on reservoir ecology

虽然水库生态调度总体上可以通过水库调度来解决好水库上下游生态问题, 但是水库调度操作的核心是调控坝前水位与出库流量, 依据水库坝前水位流量关系及其相应的操作规程, 基于水库功能效益和水库安全保障所做出的一系列的水位调整过程。所以对水库水利环境、水环境或水生态的直接影响, 成为辨识水库生态调度科学性存在的关键。

2.2 水库生态环境调度

通过使用水库大坝水工建筑物的作用按照时间系列调控坝前水位和出库流量,按照建设水库的目的和要求实现水库蓄水、调蓄和调度,通过多目标调度理论制定的水库调度方案可实现多功能水库的综合兴利效益,其核心在于依据流域水文情势,明确等级功能目标,科学盘算水位-流量-时间过程和制定调度规程。但该过程直接改变的是水库上下游水利环境和水环境,打破生态良性发展的需求环境,最终危及到生态安全。增加生态环境目标的水库生态环境调度,既能保障水库传统效益,又能提升水库的综合效益。所以,水库生态环境调度才是真正降低因筑坝引发的生态环境负面效应、利用水库功能效益空间改善全流域生态环境的环境并服务于生态的有效方法。

2.2.1 基于工程实践认识生态环境调度

中国各流域已建重大水电工程在极力发挥水库社会经济功能、力求经济效益最大化的同时,注重水库运行带来的水库生态问题,并力图通过短期调度或者应急调度来解决和满足生态环境需求,表3列出部分水电工程实施“水库生态调度”的具体内容。

表 3 水利工程“生态调度”实践与认识

Table 3 Practice and recognition of ecological operation of water conservancy project

序号	工程名称	流域	调度内容	解决问题	参考文献
1	观音阁和茆窝水库群联调	太子河流域	保证下游河道内最小生态需水,建立观音阁和茆窝水库联合调度	增加河道枯水期的水量,进而改善河流枯水期的水环境质量	郝利勋 ^[26]
2	三峡-葛洲坝梯级水库调度	长江流域	通过梯级水库调度,改变下游水文情势,以改善生态水文因子及其生态环境	通过联合调度,改善下游河流的水文条件,恢复河流的生态功能	王俊娜等 ^[27]
3	丰满水库全面治理工程	松花江流域	采用叠梁门方案取表层水,对水库水温进行改善	改善河流鱼类的生长繁殖条件	刘昕 ^[28]
4	黄河口湿地生态修复工程	黄河流域	对黄河刘家峡水库至头道拐、三门峡水库至利津干流河段水量统一调度	减缓或遏制了黄河口生态系统的恶化	何智娟等 ^[21]
5	丹江口水库和引江济汉工程	汉江流域	通过增加枯水期下泄流量和加大调水流量联合调度提供生态环境需水量	降低丹江口水库下游淤积与富营养化,减小下游“水华”发生的概率	谢敏 ^[29]
6	沙颍河闸坝群联合调控	淮河流域	开展闸坝联防的闸坝防污调控	减轻闸坝对河流水环境造成的负面影响	李冬锋 ^[30]

从表3可以看出,人们试图通过“水库生态调度”来改善或者修复下游生态功能、提高水体质量、改善河流鱼类繁衍生存环境,实际上是通过水库调控出流(包括出流量、出流过程、出流水质和水温等)来营造鱼类繁衍环境(如人造洪峰)、改善鱼类生存环境(如水深、浅滩、急流)、确保河道生态基流和生态流量以及生态水位,以提高河道下游生态环境正面效应。如此看来,与其说“水库生态调度”,不如说“水库生态环境调度”更为实际。

2.2.2 基于生态调度认识水库生态环境调度

按照生态的自然科学属性,表征“生态”的生态系统中包括“生物因子”和“非生物因子(生态因子)”两大部分,水库水生态系统的兴衰是生物体与其需求环境相互依存、相互作用、相得益彰的集中表现。水库水生态系统中的两大因子来源、属性及其可调控特性见表4。

从表4可以看出,立足于生态目标(生物量、生态系统健康)的水库生态调度,涉及到源于生物生命、流域、大气及其内部组织系统的调控因子“生物因子”和“生态因子”,与水库调度(水位、流量因子)关联性不大,而其涉及到水环境部分与水库调度有关。具体说来,由于水库水生动植物及其生态系统是在水库中起源、生存并发展的,系统中的各生物种群(“生产者、消费者、分解者”)必须而且只有在“水”的环境中生存和发展,其生存和发展中对物质能量的需求分别由流域地表和大气提供,水库调度对其的可控度改变不了其事实存在,而只能改变其环境影响到其存亡。因此,相对而言,水库生态环境调度更具有真实性、可控性和可操作性。

表 4 水库水生态系统中生态因子可调控特性分析

Table 4 Analysis on controllable characteristics of ecological factors in reservoir aquatic ecosystem

因子	表现形式	来源及其特点	问题属性	可控程度
生物因子	生命体 (生产者、消费者) (分解者)	细胞及细胞产物	生物	不可调控
		源于“漂移、寄生、共生、遗传”	生物生命起源	不可调控
	水库生态空间	水环境	可调控	
	生理、生活特性	① 新陈代谢; ② 应激性; ③ 生长、发育、生殖; ④ 遗传和变异; ⑤ 生活营养; ⑥ 呼吸。	生物	不可调控
非生物因子 (生态因子)	阳光、温度、水、空气	(水库体外)源于大气	大气环境	不可调控
		(水库体内)水体猎取吸收	水环境	可调控
	氧、氮、CO ₂	(水库体外)源于空气	大气环境	不可调控
		(水库体内)水体猎取吸收	水环境	可调控
	无机盐、腐殖质	(水库体外)源于流域、城市人类活动	流域环境	不可调控
		(水库体内)水体猎取吸收	水环境	可调控
食物链	水库各种生物获取物质能量方式	组织系统环境	不可调控	

2.2.3 基于水库非生物因子认识水库生态环境调度

在中国近 10 多年来的水库生态调度研究工作中, 极大部分研究成果都采用水库中的阳光、温度、水、空气等非生物因子(水库非生物因子)来建立生态调度体系。这是由于生态系统的“生态”中也包含有“非生物因子”, 且极易将生态系统中的阳光、温度、水、空气等非生态因子(系统非生物因子)混同于水库中非生物因子, 所以导致很多研究中多采用水库非生物因子来建立生态调度体系。而事实上, 因为水库生态是在水库中存在并发展的, 水生动植物及其水生态系统必须而且只有在“水”的环境中生存和发展, 能够满足生物与其生态系统需求的“水”主要由基础物质中的“水”、生物需水量中的“水”和系统运转能耗用“水”共同构成, 它和水库中的其他基础物质组成生态系统非生物因子。虽然水库调度也能通过直接作用于库区水环境而影响到生态系统需水环境, 但是系统平稳用水量不会因水库调度增减库区水量而变化。故此, 水库生态调度应该使用系统非生物因子, 而使用水库非生物因子的应该是水库生态环境调度。

为深入认识水库生态环境调度的实质性内容, 同时有别于水库生态调度, 将水库非生物因子和系统非生物因子列入表 5。

从表 5 可以清楚看到, 尽管两者有同名称谓, 但两者之间存在着重大差别:

(1) “母体”差异 水库的母体是流域, 水库健康发展需从流域中获取物质能量。而水库生物及其生态系统的母体是水库, 水库生态系统良性发展需求直接从水库中猎取营养、物质和能量。“母域”与“子域”关系明确, 存在供需关系。

(2) 源汇差异 水库非生物因子的全体出自于自然, 而系统非生物因子从水库中猎取。大气和流域地表不断地向水库提供物质能量, 其归宿则是储蓄于水库之中, 而水生态系统从水库中猎取到的物质能量, 通过转变成有机物“储蓄”在水生动植物体内。

(3) 属性差异 “水库非生物因子”是水库动态作用“搜集、聚合”的结果, 归属水利环境范畴, 具有收取、储蓄、供给等属性; “系统非生物因子”是生物生长发展过程必需的基本物质, 归属水利资源范畴, 具有猎取、储蓄、消耗属性。

(4) 可控差异 水库非生物因子表征流域内物资、能量和信息的构成与储存, 它不仅随着大气环境和流域环境变化而变化, 而且随着水库坝前水位/流量因子的调控而变化; 系统非生物因子表征着基础物质、能量和信息的构成与转化, 并随着水库生态系统发展需求和衰亡状态而变化, 与水库坝前水位流量调节无直接关系。不管水库调度与否, 只要有生态系统存在就得消耗基础物质和能量。

表 5 水库非生物因子与系统非生物因子对比

Table 5 Comparison between reservoir non-biological factors and system non-biological factors

项目	水库非生物因子	系统非生物因子	特点及关系
内容	① 河道形态因子:宽深比、弯曲率; ② 水水泥沙因子:流量、水位、水深、水量、泥沙; ③ 水动力因子:能坡、阻力、流态、流速; ④ 水环境因子:水量、水质、温度、污染物、pH 值、无机盐和腐殖质; ⑤ 气象因子:水、温度、光照、氧气、氮气、CO ₂	① 无机因子:水、氧、氮、CO ₂ 、无机盐; ② 有机因子:腐殖质; ③ 气象因子:光照、温度、水、空气	① 两者相互依存、相互独立; ② 水库非生物因子包含系统非生物因子内容
共用名	水、光照、空气、氧、氮、CO ₂ 、无机盐、腐殖质	水、光照、空气、氧、氮、CO ₂ 、无机盐、腐殖质	同名不同用途
来源	① 水:降雨、流域地表产流、沿程入汇; ② 光照、温度:太阳能,水库水体吸收; ③ 空气、氧、氮、CO ₂ :大气,水库表面气体循环吸收; ④ 无机盐、腐殖质:流域降雨产流、产污入汇	① 水:取用于水库水量; ② 光照、温度:从水库水体中获取能量、温度; ③ 空气、氧、氮、CO ₂ :取用于水库水体(除浮水植物直接猎取 CO ₂ 之外); ④ 无机盐、腐殖质:取用于水库	前者来源于自然,后者取用于水库水体
来源动力过程	大气循环、降雨产流产沙产泥产污、河道输移	生物质能量输移与转换	前者动力产输过程,后者物质能量消耗过程。
形态	水库非生物因子①—⑤项以原态(形态、固态、液态)形式融合在水库中构成多相体	系统非生物因子①—③被生物猎入到体内转变成有机态和气态	前者原态存于水库,后者异态存于生物体。
容纳空间	流域河道型水库	水库水生动植物	包含关系
供需关系	资源环境供给	资源环境需求	供需关系
学科范畴	水利环境	水利资源	资源与环境关系
驱动作用	水库调度可以调控或者改变非生态因子大小和供给环境,改变不了非生态因子的本质	水库调控改变不了动植物猎食系统非生物因子的固有特性,动植物可改变系统非生态因子的本质	驱动的对象不同

3 水库生态环境调度的实际操作性

基于上述分析,对水库生态调度长期存在的共识问题有了深刻认识,可系统辨识“水库生态调度”、“水库生态环境调度”与“水库环境调度”的科学内涵及其调度体系。

3.1 水库生态调度的操作性

由于“系统生物因子”和“系统非生物因子”不具有调控性,因此,水库生态调度不具有可操作性。只有在广义的“拓展思维”之中,通过调控水库坝前水位/流量改变“水库非生物因子”,并间接地作用到“系统非生态因子”,才得以实现水库生态调度。这就是人们长期对水库生态调度未达成共识的关键,也是人们长期使用水库非生物因子研究水库生态调度的问题所在。

3.2 水库生态环境调度的操作性

水库生物衍生、生存与其生态系统发展与水库水环境是一个不可分割的共存体,水库坝前水位/流量调控直接改变水库水环境,并深刻影响到水库生态,可直接改变水库非生物因子来增减水库物质(水量、营养量等)和能量(光照、温度等),同步改变物质仓库环境(水深、流速、流态和水流结构等)以满足水库生物生理和生活需求,利于生态系统良性发展。水库生态环境调度在保障水库功能综合效益的基础上极力满足水生态系统需求,在兼顾水库资源-环境-生态这一完整资源环境体系中,调控水库的非生物环境因子,来提高水资源利用效率的同时保障生态环境效益,提高水库综合效益。可以说,水库生态环境调度是直接通过改善环境来提高生态系统服务功能的,具有极强的可操作性。

3.3 水库环境调度的操作性

水库环境内容非常宽阔而复杂,涵盖水库入流水文环境、流域变动回水区环境、库区体态环境、水库泄

流环境、干支流库区水环境、物质输移环境、水库生物生存需求环境以及水库抗风险综合能力等,甚至可以说水库防洪、发电、航运、供水状态和程度等等都属于水库环境内容。水库环境调度在保证工程安全的前提下,按照水库主次功能作用,依次保证水库功能效益,提高环境效益。因此,水库环境调度首先要解决好的是水库多功能效益发挥的优化环境问题,在水库防洪、发电、航运、灌溉、供水等功能目标中给出一个最优的效益环境;其次是在库区水利环境(包括水环境)、水利工程安全环境中充分考虑到库区良性环境的必要约束条件。水库环境调度仍然是通过调节坝前水位和调控出流过程改变水库非生物因子来改善水库环境,所以具有较好的操作性。将3种调度方法进行对比总结,其结果如表6所示。

表6 水库各种调度方法之对比

Table 6 Comparison among various kinds of reservoir operation methods

项目	水库生态调度	水库生态环境调度	水库环境调度
概念	<p>狭义 侧重服务于生态,以确保水库生物某一特定种群及其生态系统处于良好发展状态,实现生态目标的一种调度方式</p> <p>广义 以确保水库多样性生物群落及其生态系统处于良好发展状态的一种调度方式</p>	侧重于水库生态环境,运用水库调蓄能力,合理调控水库蓄泄资源,综合改善水库功能调度需求环境和库区水生态环境,力求保障水库功能效益的同时提高生态环境综合效益的一种调度方式	侧重于水库环境,运用水库调蓄能力,合理调控水库蓄泄资源、改善功能调度需求环境、实现水库多功能目标的一种调度方式
面向	水库水生态系统	水库水环境及其水生态系统	水库环境
前提	水库上下游防洪及其大坝建筑物运行安全	和水库生态调度共性相同	和水库生态调度共性相同
传统	防洪、发电、航运、灌溉等	和水库生态调度传统相同	和水库生态调度传统相同
目标	环境 ——	水库水环境符合生态要求	水库综合环境良好
生态	生物量、生态系统健康	生物量、生态系统健康	可有、可无
调度因子	生物因子、系统非生物因子	水库非生物因子(系统非生物因子为约束因子)	水库非生物因子
操作程度	不易操作	易于操作	复杂操作

由表6可知,3种调度方法的差别在于兴利目标主次要求和对生态环境改善程度的要求。例如,水库环境调度重在于改善水库综合环境,使其完全适宜防洪、发电、航运和供水。但是适宜防洪、发电、航运和供水的环境是否能适宜水库生态发展,却不属于水库环境调度范畴;水库生态环境调度则在于改善水库水环境,在确保防洪、发电、航运和供水的前提下做到水库水华得到控制、水质得到提高、水源地安全有保障,使其完全适宜水库生态系统良性发展需求。

4 结论与展望

(1) 流域水资源开发必然伴随着生态环境的改变,水资源有价利用必将伴随着水环境改善与维系,而且,水库建设和运营妥否也会加剧生态环境的变化,引出一些生态与环境的负面效应,构建一个“兼顾”与“和谐”的科学调控方法“水库生态环境调度”成为解决好这些问题的关键。

(2) 水库水资源、水库水环境和水库水生态是一个不可分割而又相互依存的复杂天然系统,它们之间相互作用或者变化必然引发水库环境新情势和改变水库功能兴利效益,水库多功能效益的优化提高和调控运营也必然反作用于水库水利资源和生态环境,三者之间的耦合作用,可以通过建设“水库生态环境调度”得到体现。

(3) 水库资源-环境-生态是共存于一个体系中的独立系统,他们相互依赖、相互影响、相得益彰,但不相互包容,基于提高传统效益和生态环境效益并具有改善环境、服务生态属性的“水库生态环境调度”方

法更加切合实际,较“水库生态调度”提法更加科学,较“水库环境调度”更加具有操作性。“水库生态环境调度”体系的建立能够更好地推动水库调度科学研究和指导工程实践。

(4) 鉴于目前对“生态”一词理解具有多样性,水库生态属性和环境属性又各成体系,水库调度存在对水库非生物因子可控、对系统非生物因子不可控的本质差别,同时兴利目标、生态目标和环境目标各自明确,不能相互涵盖和包容,达成“水库生态环境调度”提法共识,较“水库生态调度”更加具有科学意义和应用价值。

参考文献:

- [1] 王俊娜,董哲仁,廖文根,等. 美国的水库生态调度实践[J]. 水利水电技术, 2011, 42(1): 15-20. (WANG J N, DONG Z R, LIAO W G, et al. Practice on reservoirs operation improvement in the United States [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(1): 15-20. (in Chinese))
- [2] 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 Y, CHANG F X, CHEN J, 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))
- [3] 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 X Z YANG Z F, LIAO W G. A preliminary study of the ecological environment operation of water projects [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(11): 20-22. (in Chinese))
- [4] 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. (MEI Y D, YANG N, ZHAI L N. Optimal ecological sound operation of the cascade reservoirs in the lower Yalongjiang River[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(5): 721-725. (in Chinese))
- [5] 蔡其华. 充分考虑河流生态系统保护因素来完善水库调度方式[J]. 中国水利, 2006(2): 14-17. (CAI Q H. Fully consider the protection of river ecosystem to improve the reservoir operation mode[J]. China Water Resources, 2006(2): 14-17. (in Chinese))
- [6] 许新宜,宾零陵,潘成忠,等. 考虑环境效益的南盘江上游水库调度研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(2/3): 180-186. (XU X Y, BIN L L, PAN C Z, et al. Benefits of reservoir regulation considering environment in upstream of the Nanpan River [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2013, 49(2/3): 180-186. (in Chinese))
- [7] 王宗志,程亮,王银堂,等. 基于库容分区运用的水库群生态调度模型[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 435-443. (WANG Z Z, CHENG L, WANG Y T, et al. A multi-reservoir ecological operation model based on subdivision application of reservoir storage capacities [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 435-443. (in Chinese))
- [8] RICHTER B D, WARNER ANDREW T, MEYER JUDY L, et al. A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations [J]. River Research and Applications, 2006, 22: 297-318.
- [9] 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 J B, DONG Z C, WANG H C, 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))
- [10] HIGGINS J M, BROCKW G. Overview of reservoir release improvement at 20 TVA dams [J]. Journal of Energy Engineering, 1999, 125(1): 1-17.
- [11] HUGHES D A, HANNART P. A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa[J]. Journal of Hydrology, 2003, 27: 167-181.
- [12] KINGSFORD R T, CURTIN A L, PORTER J. Water flows on cooper creek in arid Australia determine ‘boom’ and ‘bust’ periods for waterbirds [J]. Biological Conservation, 1999, 8(8): 231-248.
- [13] RICHTER B D, WAMER A T, MEYER J L, et al. A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations [J]. River Research and Applications, 2006, 22(3): 297-318.
- [14] 哈尔比 A. 水电站调峰对河流生态系统的影响[J]. 李伟民,译. 水利水电快报, 2002, 23(1): 15-18. (HALBY A. Effect of load on river ecological system of hydropower station [J]. LI W M, Translation. Express Water Resources & Hydropower Information, 2002, 23(1): 15-18. (in Chinese))
- [15] LOVICH J, MELIS T S. The state of the Colorado River ecosystem in Grand Canyon: lessons from 10 year of adaptive ecosystem

- management [J]. *International Journal of River Basin Management*, 2007, 5(3): 207-221.
- [16] 魏什涅夫斯基 B U. 关于德涅斯特罗夫水库利用调度进行自然保护的问题[J]. 容致旋,译. 水利水电快报, 1994, 14(1): 7-11. (WEISZ NEVSKI B U. On the problem of natural protection for the use of de Nesterov reservoir [J]. RONG Z X, Translation. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 1994, 14(1): 7-11. (in Chinese))
- [17] BRIAN D, JEFFREY V B, JENNIFER P, et al. A method for assessing hydrologic alteration with in ecosystems [J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [18] 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. (LU Y L, ZHOU J Z, WANG H, et al. Multi-objective optimization model for ecological operation in Three Gorges cascade hydropower stations and its algorithms [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(6): 780-788. (in Chinese))
- [19] 徐天宝, 彭静, 李翀. 葛洲坝水利工程对长江中游生态水文特征的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 72-75. (XU T B, PENG J, LI C. Ecological influences of Gezhouba dam on the eco-hydrological characteristics in the middle reach of the Yangtze river [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(1): 72-75. (in Chinese))
- [20] 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 W X, XIA Z Q, WANG Y K, et al. Ecological operation goals for Three Gorges Reservoir [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(4): 554-559. (in Chinese))
- [21] 何智娟, 黄锦辉, 潘轶敏, 等. 黄河流域生态系统特征及下游生态修复实践[J]. 环境与可持续发展, 2010, 14(10): 9-13. (HE Z J, HUANG J H, PAN Y M, et al. The characteristics of the ecological system in the Yellow River basin and its downstream ecological restoration practice [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2010, 14(10): 9-13. (in Chinese))
- [22] 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 L, HUANG Y Y, YANG Z X, et al. Reservoir ecological operation model and its supplication [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(2): 134-141. (in Chinese))
- [23] 孙克, 胡承超, 颜庆. 淮河流域大型水库群生态调度模型研究[J]. 江苏水利, 2015(6): 35-37. (SUN K, HU C C, YAN Q. Study on the ecological operation model of large reservoir group in Huaihe River basin [J]. *Jiangsu Water Resources*, 2015(6): 35-37. (in Chinese))
- [24] 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 H P, LIU D F, TIAN F Q, 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))
- [25] 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. (ZHANG H B, HUANG Q, QIAN H. Connotation of reservoir ecological operation and its model framework [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2011, 44(4): 427-433. (in Chinese))
- [26] 郝利勋. 基于生态环境改善的太子河水库群联合调度研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. (HAO L X. Joint operation research for Taizihe reservoir group based on eco-environment improvement [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [27] 王俊娜, 李翀, 廖文根. 三峡-葛洲坝梯级水库调度对坝下河流的生态水文影响[J]. 水力发电学报, 2011, 30(2): 84-90. (WANG J N, LI C, LIAO W G. Impacts of the regulation of Three Gorges-Gezhouba cascaded reservoirs on downstream eco-hydrology [J]. *Journal of Hydropower Engineering*, 2011, 30(2): 84-90. (in Chinese))
- [28] 刘昕. 丰满水电站大坝全面治理工程对鱼类资源的影响研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013. (LIU X. Study on fish resources impact of Plump hydropower station dam comprehensive treatment project [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013. (in Chinese))
- [29] 谢敏. 针对河流水华现象的生态调度研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (XIE M. Research on ecological operation of algal bloom in river [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [30] 李冬锋. 闸坝对污染河流水质水量作用分析及调控研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013. (LI D F. Research on effect and regulation of dam on water quality and quantity of polluted rivers [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013. (in Chinese))

Reconsidering ecologically-sound environmental operations at reservoirs *

LUO Wenguang^{1,2}, YANG Guolu^{1,2}, SONG Yunhao^{1,2}, LU Jing^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower Engineering Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China;*

2. *Sewage Sludge & Silt Research Center, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

Abstract: Applying principles of scientific development, this study analyzes long-standing questions related to ecological operations at reservoirs. Three aspects were analyzed based on previous scholarly work: what defines an ecological operation, associated engineering practices, and practices for establishing a system. The research discovered that there are many different interpretations of what it means to be an ecologically-based operation; there are different understandings of the impact that reservoir operations have on the local ecology and environment; and there is wide diversity in how non-biological factors are considered in the ecological operation of reservoirs. Given this diversity, the study examines the concepts of environmental and ecological operations at reservoirs, reservoir ecological operation and reservoir ecological and environmental operation and their operation systems, and explicitly analyzes the scientific nature and feasibility of those ecological and environmental operation approaches. This analysis is designed to inform future operational development, provide scientific guidance related to ecological and environmental operation practices, and improve the overall operations of reservoirs in a comprehensive way.

Key words: eco-environment; reservoir operation; ecological operation; environmental operation; ecological environmental operation

* The study is financially supported by the National Science and Technology Major Project of China(No. 2014ZX07104005).