

【水环境与水生态】

黄河下游生态需水与生态调度研究综述

司 源¹, 王远见², 任智慧²

(1. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084;

2. 黄河水利科学研究院 水利部黄河泥沙重点实验室, 河南 郑州 450003)

摘 要: 系统梳理了 20 世纪中期以来国内外河流生态需水与生态调度的概念、方法、应用效果等, 并针对黄河下游的现状对这些研究的适用性和应用前景做了述评。通过分析指出, 黄河下游的生态需水与生态调度研究已取得了一定进展, 既界定了总体量值范围, 也考虑了不同水平年对应不同保证率下的流量过程。提出黄河下游生态需水与生态调度仍存在水文过程与生态系统作用关系尚未厘清、生态流量与水库调度尺度存在差异、黄河下游水库综合利用任务较难协调、未来水沙变化等因素具有不确定性等问题。

关键词: 生态需水; 生态调度; 流量; 黄河下游

中图分类号: TV213.2; TV882.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1000-1379.2017.03.014

A Review of Ecological Water Requirement and Ecological Reservoir Operation in the Lower Yellow River

SI Yuan¹, WANG Yuanjian², REN Zhihui²

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Yellow River Sediment of the Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: This paper attempted to make a systematic summary as well as commentary towards the previous studies concerning ecological water requirement and ecological reservoir operation, and further provided some insights for future research. Through its analysis, some new progress had been made in the Lower Yellow River (LYR), including total quantitative ranges of ecological water requirement, and flow process in different level years with variable guarantee rates. Nevertheless, there still exist some main problems in applications; the relationship between hydrological process and ecological system is still unclear; the time scale of ecological discharge does not match with that of reservoir operation; the integrated utilization of reservoir operation for the LYR needs more coordination; the uncertainty of variation trend of water and sediment in the LYR.

Key words: ecological water requirement; ecological operation; flow; Lower Yellow River

黄河流域地跨我国北部干旱、半干旱、半湿润气候带, 水资源匮乏且时空分布不均。全河多年平均天然径流量 535 亿 m³, 仅占全国河川径流总量的 2%, 而流域内人口却占全国的 12%, 人均水资源量不足全国水平的四分之一。近年来, 受气候变化影响, 黄河上游来水偏枯, 下游持续干旱, 同时经济社会的快速发展使得沿黄取用水量增加, 黄河水资源供需矛盾日益凸显。1972—1998 年黄河下游重要干支流断流事件频发, 不仅给沿河城镇居民生活及工农业生产带来极大危害, 而且加剧了河道萎缩, 使得周边水环境和生态环境等受到严重威胁。

黄委自 2002 年起开展调水调沙试验, 利用汛期洪水大量输沙, 以保证一定的河道基流, 提高了下游河道的过流能力。水生态文明建设对黄河水量调度提出了更高的要求, 现阶段黄河水量调度要从较低水平不断流转变为实现功能性不断流^[1]。所谓功能性不断流,

是从生态功能和社会服务功能和谐统一的角度出发, 确定使水文断面下泄水量能够满足其下游各项需水总量和过程, 即在确保生活用水的基础上, 满足输沙用水、污染物稀释用水、河道及河口生态系统用水等, 并最大限度地满足工农业用水要求。因此, 深入和系统地研究黄河水量调度中生态需水环节的功能目标及其过程的量化需求, 对于维护黄河河流健康生命具有重大理论意义和应用价值。

收稿日期: 2016-07-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51509102, 51509103); 国家自然科学基金重点基金资助项目(51539004); 水利部公益性行业科研专项(201501033); 水利部“948”计划项目(201505)。

作者简介: 司源(1990—), 女, 山东东营人, 博士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。

通信作者: 王远见(1984—), 男, 河南洛阳人, 高级工程师, 主要从事河流泥沙方面的研究工作。

E-mail: 847231335@qq.com

1 生态环境需水概念与研究方法

国外有关生态环境需水方面的研究始于20世纪中期。针对因水资源开发利用程度不断提高而产生的河流生态系统日益退化问题,美国率先提出了保证重要水生生物栖息地环境所需的河流流量。随后,英国、澳大利亚等国逐步将生态流量纳入其河流综合管理研究体系,并广泛开展实践。事实上,由于各国国情不同,经济发展水平与水资源利用状况存在差异,对于生态环境需水概念的理解和定义不可能完全相同,因此计算方法并没有统一的原则和标准。国内关于这一概念的提出始于20世纪90年代,目前被最广泛接受的生态环境需水概念是钱正英等^[2]于2001年提出的:广义的生态环境需水是指维持全球生物地理生态系统水分平衡所需要的水量,水热平衡、生物平衡、水沙平衡、水盐平衡等所需水都是生态环境用水;狭义的生态环境需水是指维护生态环境不再恶化并逐渐改善所需要消耗的水资源总量。

按照研究对象和所需资料的不同,生态环境需水研究方法可分为水文学方法、水力学方法、生境模拟法、系统学途径和整体法。

(1)水文学方法。根据简单的水文指标对河流所需生态流量进行界定,如Tennant法(也称蒙大拿法)、7Q10法等。其中:Tennant法主要考虑保护鱼类等水生生物以及娱乐、景观等环境资源所需的河道流量^[3];7Q10法则主要考虑水污染防治水量,国内学者也提出了在7Q10法基础上改进的最枯月流量法,更适用于我国河流特性。此类方法仅需通过历史水文资料人为设定流量比例或采用保证率概念确定河流所需生态流量,因此不需现场进行野外观测工作,简单易行,至今仍多用于经验取值,为其他方法提供参考。

(2)水力学方法。根据河道水力参数(如宽度、深度、流速和湿周等)确定河流所需流量,如湿周法、R2CROSS法等。此类方法主要考虑生物栖息地与水力条件关系,只需简单的测量河道断面水力参数(如湿周、流速、水深等),不需要详细的物种-生境数据,但体现不出季节变化因素,可以与其他方法结合使用。

(3)生境模拟法。以生物学为基础,将水文、水化学条件与特定水生生物不同生长阶段生物学信息结合,如物理栖息地模拟法(PHABSIM)以及在此基础上建立的河道内流量增加法(IFIM),通过模拟流速变化与栖息地类型的关系,进行流量变化对栖息地影响的评价进而得出适宜流量。虽然这种方法针对的生态恢复目标更为具体,但所需要的生物信息一般较难获得,应用受到限制。

(4)系统学途径。建立表征生态系统健康状况的指标体系和评估机制,对每一个指标在其领域范围内进行评估,确定其天然变化范围。拟定不同生态流量模式,分别计算指标体系的评估结果,同时参考其他河流功能的满足程度,最终确定河流的生态流量。这种方法基于一个核心思想,即以自然条件下的河流水文条件为生态系统健康参照标准。常用的指标体系是水文改变度指标(IHA),考虑了包含水流量级、频率、持续时间、变化率等流量组分在内的波动过程。

(5)整体法。从河流生态系统整体出发,利用专家经验和不同学科领域关于河流天然水情、地形地貌与水生生物信息等方面的知识研究生态环境需水量,如建立分区法(BBM)、基准法、流量变化下游响应法(DRIFT)等。

综上,生态环境需水研究已从过去采用经验取值的传统思路,发展到注重分析水文-生态响应关系,同时考虑整体生境特点,研究方法愈趋综合全面,然而应用时还应具体问题具体分析。

2 黄河下游生态环境需水研究进展

我国有关生态环境需水的研究起步较晚,但进展较快,初期主要集中于西北等干旱较严重的地区,随着人们对可持续发展理念认识的深化,各流域相继开展了生态环境需水实践研究。21世纪初,在确保黄河功能性不断流的方针指导下,专家学者和流域机构等积极探索黄河流域全河水量统一调度的途径,并将生态环境因子纳入考虑范畴。生态环境需水量既包括维持河道不断流的基本水量,也包括输沙用水、水污染防治用水、沿岸湿地补水、鱼类生存用水等方面。胡鞍钢等^[4]指出,黄河现状生态环境低限需水量(不包括水土保持用水量)为190亿 m^3/a ,其中汛期输沙水量不小于140亿 m^3/a ,非汛期生态基流量不小于50亿 m^3/a 。石伟等^[5]基于平滩流量时输沙用水量最小的设想,估算出黄河下游汛期输运泥沙及污染物的水量为80亿~120亿 m^3/a ,加上非汛期生态基流,得出花园口和利津两个控制性断面的生态需水总量分别为160亿~220亿 m^3/a 和130亿~180亿 m^3/a 。倪晋仁等^[6]将生态需水按水污染防治用水、河流生态需水、河流输沙需水和河口区生态环境需水划分并讨论,汛期以输沙用水为主,非汛期优先考虑维持河流基本的水污染防治和生态保护功能,综合得出进入黄河下游河道的最小生态环境需水量(年径流量)应不低于250亿 m^3 。杨志峰等^[7]主要考虑河道基本生态环境需水量、输沙需水量及入海水量,认为黄河下游河道最小生态环境需水量为189.2亿 m^3/a 。这些研究成果为生态

环境需水的后续研究奠定了基础,综上所述,黄河下游年生态最小需水量约为 200 亿 m^3 。应该看到,这些研究存在几点待进一步解决的问题:多集中于对生态需水“量”的探讨,而未考虑河流生物不同生命周期活动对水流过程的依赖性,不涉及对具体流量过程、历时、频率等的分析;通过计算给出生态环境需水的下限阈值即最小流量,不区分不同水平年情景;多采用经验或半经验公式,没有对研究河段水体功能和生态保护等具体目标进行识别和计算讨论;较少建立水文-生态的联系和响应关系,即河流生态过程与径流要素间的定量关系及作用机理。

后续研究逐渐深入并形成一定体系。在对黄河整体生态环境进行大规模实地调查的基础上,结合专家经验,刘晓燕^[8]深入论证了现阶段黄河河道、水质和水生态健康的评价指标及其适宜标准,提出了维持黄河良好自然功能的用水需求,提出了黄河干流各重要断面的流量/水量控制标准,并以生态低限流量和适宜流量针对不同水平年保证率区分讨论。例如,黄河下游入海口利津断面非汛期适宜流量为 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ 、低限流量为 $80 \text{ m}^3/\text{s}$ 、汛期适宜流量为 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 、低限流量为 $200 \text{ m}^3/\text{s}$,并指出应考虑生物生长需求在 5 月、6 月施以小脉冲洪水过程。最终给出利津断面年水量适宜值为 181 亿 m^3 ,低限值为 145 亿 m^3 ,这一研究成果迄今仍在沿用。在考虑水库调节作用的基础上,蒋晓辉等^[9]对黄河干流水库建造后生态系统的变化进行了调查和定量评估,在此基础上分析水生生物与来水来沙条件的响应关系,建立了环境流量模型,进而用于探讨水库生态调度目标。其中一项重要工作是基于流量恢复法采用栖息地模拟得出符合鱼类生长需求的流量过程。例如,考虑鲟鱼在河口洄游的盐度需求,确定 4—6 月花园口断面适宜脉冲流量为 $1700 \text{ m}^3/\text{s}$,利津断面适宜脉冲流量为 $800 \text{ m}^3/\text{s}$ 。综上,这些研究成果数据来源丰富、考虑问题全面,建立了生态系统对水文情势的响应关系;针对黄河生态环境的具体状况和生态恢复目标研究生态需水量,较之采用经验取值法计算更具实际意义;考虑最小生态流量和适宜生态流量,界定了阈值,用于分析不同水平年来水情况及年内丰枯变化;有意识地考虑了流量的历时、频率、变化率等因素,洪水脉冲流量可为水库短期调度提供参考。

3 水库生态调度研究进展

生态调度是在社会经济发展到一定水平后才提出的,是指在满足人类对河流基本需求的前提下,考虑物种组成、水质目标、湿地保护面积等因素,通过协调生态与其他水库功能目标的关系,最大限度地减小水库

运行对库区和下游生态系统的影响。Hughes 等^[10]最早提出并建立了满足生态需水的水库调度模型;Harman 等^[11]基于不同参数设定的水库泄流准则,研究了包括河道最小生态流量及河流脉冲事件在内的优化调度方案;Suen 等^[12]从近自然的水流情势恢复准则出发,以筛选的台湾生态指标体系(TEIS)为生态目标,在中度干扰假说的指导下建立模糊隶属度函数,对生态目标与经济目标进行多目标优化研究,权衡了生态系统与人类用水间的关系。21 世纪以来,生态调度的理念在国外各大流域中的践行取得了良好成效,典型的成功案例是美国的田纳西流域、科罗拉多河,以及澳大利亚的墨累-达令河。

自傅春等^[13-14]提出人类与自然和谐相处、共同发展的“生态水利”“生态水工学”等理念后,生态调度的概念在国内逐渐兴起,研究也相继开展,主要围绕制度建设和模型建立两方面进行探讨。董哲仁等^[15]在分析了现行水库调度方式缺陷的基础上,认为在满足经济社会发展需求的同时应兼顾河流生态系统需求,提出了包括政策法规和技术手段在内的水库多目标调度原则。艾学山等^[16]建立了水库生态调度多目标数学模型,并用可行搜索离散微分动态规划算法进行求解。胡和平等^[17]考虑具体的生态环境目标,按照一定的规则综合出可以解决或缓解多个生态环境问题的生态流量过程线,并利用水库调度优化模型求解,经过方案比选后发现,在实现生态目标的情况下经济效益并未显著降低。梅亚东等^[18]定义了一种“生态友好型水库调度”,提出了 25 组生态流量控泄方案并建立了以梯级水电站群发电量最大为目标的长期优化调度模型,通过生态需水电能损失指标来评价生态方案对发电的影响。

近 50 a 来,黄河干流上修建的十余座大型水利枢纽工程在很大程度上改变了河道的天然水文情势,对生态系统影响显著,使得将生态调度理念纳入现行水库生态调度体系的重要性日益凸显。考虑黄河复杂的多目标调度问题,应通过耦合各断面的生态需水量,依据包容性(处理不同需水目标关系)和连续性(年内丰枯时段衔接和上下游流量传播关系)原则确定合理阈值,进而制定水库调度时可参考的流量过程线。蒋晓辉^[19]提出并建立了黄河干流水库生态调度的总体框架,主要包括基础研究、调度管理、检测评估反馈三大体系。张洪波^[20]做了比较详尽的资料整理和收集工作,提出一套水文指标体系对黄河上建库及调度所产生的生态影响予以评价,并解决了时间和空间尺度耦合的问题,建立了基于流量的日尺度水库多目标调度模型。郜国明等^[21]全面分析了小浪底水库运行后生

态环境所面临的问题,总结了黄河下游生态调度应采取的措施和发展方向,提出建立水库生态调度决策支持系统。此外,黄委高度重视水库生态调度,并在实践中进行了有益探索。小浪底水库自2002年起实施的调水调沙举措实质上也是大型的生态调水实践,人工塑造异重流排沙出库,主槽冲刷,提高了下游河道的过流能力,同时漫滩洪水也对沿岸湿地和栖息地起到生态补水作用。2008年黄委首次正式实施生态调度,于3—6月即河口地区鱼类洄游及产卵的关键时期塑造适宜的生态流量过程,6月底结合调水调沙有计划地对河口三角洲湿地生态系统进行补水,同时增加对滨海的淡水补充以维持合理盐度,这一举措有效改善了河口地区的生态环境,保护了生物多样性。

4 存在的问题

通过文献调研发现,黄河流域有关生态环境需水方面的研究已取得一定成果,既界定了总体量值范围,也考虑了不同水平年对应不同保证率下的流量过程。然而,将生态环境需水成果应用到生态调度实践的研究相对较少,与实际运用还存在一定差距。目前黄河下游调水调沙仍主要针对黄河下游河道的减淤目标进行,对生态的影响仍缺乏定量评估和主动调节方案。存在的问题主要有以下几点。

(1)水文过程与生态系统作用关系尚未厘清。由于生态环境需水这一概念在国内提出较晚,截至目前动态监测数据资料相对不丰富,水力学等模型模拟精度受限。随着近年来测点增多,监测体系逐步完善,生态需水特性可进一步细致观察和试验研究。

(2)生态流量与水库调度尺度存在差异。生态调度过程不仅需要提供河道最小生态流量,还要考虑水文情势,给出与自然情势相近的水文过程,即满足鱼类产卵、种子发芽等生物习性的人造洪水。这个要求往往较实际调度中“月计划、旬安排”的方式更为精细,不易把控。

(3)黄河下游水库综合利用任务较难协调。黄河下游人口密集,经济发展快,水资源供需矛盾突出,用水利益尚难协调,考虑生态因素更显力不从心。过去大量研究重心在防洪与输沙方面,如今要实现经济、社会、环境“三赢”还需建立多目标模型,寻求合理优化方案。

(4)未来水沙变化等因素具有不确定性。当前,黄河下游来水来沙情势已发生了巨大变化,其未来的水沙变化趋势仍存在争论。如果未来黄河持续当前水沙剧减的情景,则下游河道输沙的负担将大大减轻,而河口抵抗盐水入侵的压力将进一步增大,黄河下游生态需水计算与生态调度方案设计都将发生重大调整。

这些仍有待进一步研究。

5 结语

黄河下游生态需水问题由来已久,现阶段对于该问题的认识已较为清晰,但仍需根据逐步积累的实测资料细化研究,并将计算成果与水库调度有机结合起来,在实践中予以论证。本文通过对国内外有关生态需水及生态调度的相关研究进行总结梳理,结合黄河下游生态调度现状指出有待解决的问题,以期后续研究工作提供参考。

参考文献:

- [1] 李国英.黄河治理的终极目标是“维持黄河健康生命”[J].人民黄河,2004,26(1):1-2.
- [2] 中国工程院“21世纪中国可持续发展水资源战略研究”项目组.中国可持续发展水资源战略研究综合报告[J].中国工程科学,2000,2(8):1-17.
- [3] DONALD Leroy Tennant. Instream Flow Regimes for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resource [J]. Fisheries, 1976(4): 6-10.
- [4] 胡鞍钢,王亚华.如何看待黄河断流与流域水治理:黄河水利委员会调研报告[J].管理世界,2002(6):29-34.
- [5] 石伟,王光谦.黄河下游生态需水量及其估算[J].地理学报,2002,57(5):595-602.
- [6] 倪晋仁,赵业安.黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究[J].水利学报,2002,33(10):1-7.
- [7] 杨志峰,刘静玲,孙涛.流域生态需水规律[M].北京:科学出版社,2006:3-5.
- [8] 刘晓燕.黄河环境流研究[M].郑州:黄河水利出版社,2009:5-8.
- [9] 蒋晓辉,何宏谋,曲少军,等.黄河干流水库对河道生态系统的影响及生态调度[M].郑州:黄河水利出版社,2012:5-10.
- [10] 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 Pretoria, 1998, 24(4): 293-302.
- [11] HARMAN C, STEWARDSON M. Optimizing Dam Release Rules to Meet Environmental Flow Targets [J]. River Research and Applications, 2005, 21(2-3): 113-129.
- [12] 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 Research, 2006, 42(3): 1-9.
- [13] 傅春,冯尚友.水资源持续利用(生态水利)原理的探讨[J].水科学进展,2000,11(4):436-440.
- [14] 董哲仁.生态水工学的理论框架[J].水利学报,2003,34(1):1-6.

- [15] 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.
- [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.
- [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):325-332.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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:西安理工大学,2009:3-5.
- [21] 郜国明,李新杰,马迎平.小浪底水库生态调度的内涵、目标及措施[J].人民黄河,2014,36(9):76-79.

【责任编辑 吕艳梅】