

河流生态流量研究进展

王 珩,肖昌虎,黄站峰,桂 耀

(长江水利委员会长江勘测规划设计研究院,湖北 武汉 430010)

摘 要:水库在发挥巨大社会效益和经济效益的同时,也引发了下游河段生态缺水等生态问题,水生生物尤其是鱼类的生存环境受到了不同程度的影响.鱼类作为水生生态系统中的顶级群落,其种群的动态变化可有效反映水生生物群落与水质状况的整体变化信息.本文从概念辨析、研究方法等方面分析总结了国内外生态流量研究现状,阐明了基于河流天然节律和鱼类习性的生态流量研究进展,探讨了该研究领域存在的问题,并在此基础上提出了基于鱼类生境的生态流量研究方向.

关键词:生态流量;天然节律;鱼类习性;环境水利

中图分类号:TV213

文献标识码:B

文章编号:1004-4701(2018)03-0230-05

0 引 言

随着社会经济的不断进步,人类在不断改造大自然的过程中,对水资源的开发利用强度越来越大,大量的水利工程建设给人类带来巨大社会效益和经济效益的同时,也对生态环境造成了严重的负面影响^[1,2].非洲尼罗河 Aswan 大坝^[3,4]和美国 Glen Canyon 大坝的修建^[5,6],改变了水库下游径流过程,造成下游河道缺水干涸、物种减少、生态环境恶化等问题,是水库引起下游河道生态环境恶化的典型案例.为了保护河流生态健康和鱼类资源,对生态流量的研究十分必要.

1 生态流量的概念

1.1 国外生态流量概念

国外对河道内需水量的研究最早可追溯到19世纪,当时为了满足河流航运排水功能,制定了河道最小需水量.对生态流量的集中研究始于20世纪40年代的美国西部地区,并且在20世纪70年代取得了巨大进展^[7].Powell^[8]认为,生态流量过程模拟应当基于河流历史月径流量与渔获量的关系,包括洪水周期、频率、深度等组合成分,并采用 Texas Estuarine Mathematical Programming (TxEMP) 法优化模型,确定河道环境流量;

Falkenmark 等^[9]提出了“绿水”概念,即同时满足人类生存发展及河流生态过程的水量;Raskin^[10]认为足够的水量是维持河流、湖泊及湿地等生态系统的基本保障;Smakhtin 等^[11]选取河道多年月径流量资料建立河流流量过程,并参照河流生态目标,确定径流基数,就生态流量进行了评价.

国外对闸坝的河道内需水研究主要集中在水生生物与河道流量的关系,关于河道内生态环境流量研究较为成熟.20世纪90年代以后,相关学者对生态环境流量的研究开始扩展到河道外生态需水,如三角洲、河口、湖泊、湿地等^[12,13].目前,国外对于河道外生态系统的生态流量研究还未成熟,且该研究的主要目的是优化水资源配置与合理利用水资源,忽略了河流生态系统的完整性.

1.2 国内生态流量概念

国内于20世纪70年代提出了“生态需水”、“环境流量”和“河流最小流量”等概念,开始了对生态环境流量的初步探讨^[14];20世纪80年代后期,由于水污染问题日益严峻,国务院环境保护委员会提出:水资源规划的同时需要保证改善水质和维持水生态系统所需的环境用水;20世纪90年代起,一些省市提出水利工程的建设运行要保证下泄生态流量.由此,生态环境流量逐渐成为水文生态环境领域的研究热点.

国内生态环境流量主要是从水量平衡和生态系统

收稿日期:2018-01-25

作者简介:王 珩(1989-),男,博士,工程师.

稳定的角度进行研究,并已经取得了一些成果。汤奇成等^[15]在对塔里木盆地的水资源和绿地问题进行分析时第一次提出生态环境用水的概念,使人们对水资源和生态系统之间的关系有了新的认识;崔树彬^[16]认为生态需水量是一个工程学范畴的概念,是“以保护生物群落稳定和维持栖息地生态环境为目的的需水量”,与生态环境需水量是基本一致的,计算方法也相似;王芳和梁瑞驹^[17]探讨了生态需水的概念,提出生态需水量是“用来恢复和维持生态系统结构稳定、保护河流生态环境所消耗的水量”;杨志峰和张远^[18]认为生态环境需水应当从生态和环境两方面考虑,生态方面的目的是“维持生态系统中生物组成水分平衡”,环境方面的目的是“满足人类生存发展和改善水环境”,计算过程中二者都应考虑;宋进喜等^[19]认为“生态需水实质是用以保证和改善河流生态功能健康所必需的水资源数量”。

相关学者通过对不同类型的生态系统进行研究,以生态系统的环境流量需求为前提,对生态用水量的研究转变为生态环境流量研究,研究对象也从河流扩展到其他生态系统,研究领域由水库、河流扩展到流域尺度。

2 生态流量传统计算方法

目前,国内外河流生态需水量的确定方法主要有水文学方法、水力学方法、生物栖息地法以及整体分析法。

2.1 水文学方法

水文学方法又称快速评价法或标准设定法。该法以河流历史水文数据为基础,根据简单的水文指标确定河道生态流量。该方法操作简单,无需现场测定数据,但并未考虑生态栖息地、水质、水温、季节变化、水域景观及河床形状变化等因素;其代表方法有 Tennant 法^[20]、7Q10 法^[21]、Texas 法^[22]、NCPRP 法和最小月径流量^[23]。

2.2 水力学方法

水力学方法将流量变化与河道的水力参数、几何参数联系起来量化河道内需水,最常用的有湿周法及 R2 - cross 法。湿周法最初由 Gippel 和 Stewardson^[24]提出,该方法的主要思路是以湿周与流量关系曲线的转折点所对应流量为维持浅滩的最小生态需水量。R2 - cross 法最早由 Nehring^[25]提出并运用于科罗拉多州(美国)的栖息地,是科罗拉多州水资源保护董事会(CWCB)最为常用的一种生态流量定值方法(表1)。该方法根据河流季节性变化及满足栖息地生态功能的水力学指标,如水深、河宽和流速等计算河流所需水量。

表1 R2 - Cross 法确定生态流量的标准

河流顶宽/m	平均水深/m	湿周率/%	平均流速/(m/s)
0.3 ~ 6.3	0.06	50	0.3
6.3 ~ 12.3	0.06 ~ 0.12	50	0.3
12.3 ~ 18.3	0.12 ~ 0.18	50 ~ 60	0.3
18.3 ~ 30.5	0.18 ~ 0.3	≥70	0.3

近年来随着生态流量研究的发展,相继出现了生态水力半径法^[26]、生态水深 - 流速法^[27]、多目标评价法^[28]等水力学方法的河流生态流量定值新方法。

2.3 生境模拟法

生境模拟法从生物生态环境状况、生物适宜栖息地特征入手,利用数值模拟方法建立生物栖息地面积与流量的响应关系,计算河流生态需水。如美国的 IFIM 法^[29]和 PHABSIM^[30]模型,该法保证的是鱼类或无脊椎动物的环境用水。生物栖息地法结合了水文学、水力学及生物对流量的响应,是生态需水估算较灵活的方法。

2.4 整体分析法

环境流量研究已从考虑单一水文要素的水文学法逐渐转变为考虑多学科交叉的整体分析法,逐步建立起一套完整的方法研究体系,以充分考虑水流、水温、水质等要素对水生生态系统的影响^[31]。该方法强调河流是一个综合的生态系统,着重考虑整个河流系统的维持及保护,从而克服了栖息地方法仅针对特定指示生物的缺点。该方法从生态系统整体出发,并利用专家的经验来弥补生态资料的缺失,调节河流流量能够同时满足栖息地稳定、物种连续、泥沙沉积、水质平衡及水域景观等功能。整体法应用较为广泛的有 BBM 法^[32]和 DRIFT 法^[33];其中 DRIFT 法通过多学科交叉融合,从生物物理、社会、情景开发和经济的角度,全面研究河流生态需水。

以上方法中,水文学方法算法快速、简单,且无需现场测量,只需根据简单的水文指标或固定的比例关系对河道流量进行评估,但该方法并未考虑生态环境因素,其标准仍需验证;传统的水力学方法操作简单,只需简单的现场测量,但不能体现河流的季节性变化,忽略了生态系统中物种各生命阶段的需求;栖息地法及整体分析法能较好地结合河道生态系统及生物种群完整性,生态流量的定值比其他方法更加精确,但需耗费大量人力和物力,操作复杂,耗时长。

3 基于河流天然节律和鱼类习性的生态流量研究

传统生态流量计算方法计算结果过于单一化、静态

化,不能准确反映天然河流流量的动态变化规律,甚至可能导致生态系统进一步退化^[34,35]。近十几年,大量基于恢复河流天然水文节律的生态流量计算方法相继出现。

3.1 基于河流天然节律的生态流量研究方法

Ritcher 等^[36]提出了基于流量百分比的(POF, Percentage of Flow)生态流量可持续边界法(SBA, Sustainability Boundary Approach),该方法设定了适宜生态流量阈值范围,方便了河流生态流量管理;Poff 等^[37]提出了生态流量的水文变化生态限制法(ELOHA, Ecological limits of hydrologic alteration),该方法综合了已有水文、生态技术以及环境流量方法,能适用于各尺度流域流量的综合管理;Zhang 等^[38]利用流量大小、频率、持续时间、发生时间以及变化率等水文节律特征,对淮河流域中上游 45 个水文站进行分类研究,为淮河流域生态流量管理提供了科学依据。

3.2 基于鱼类习性的生态流量研究方法

鱼类作为水生态系统的顶级消费群落,可通过其捕食的下行效应影响整个淡水生态系统^[39]。其群落结构的动态变化是反映水体生物群落与水质状况整体变化信息的重要指标。基于鱼类习性的生态流量研究始于 20 世纪 40 年代,美国开始对鱼类生长繁殖等生命活动与流量之间的关系进行研究,首先提出河流最小环境流量的概念。20 世纪 50 年代,学者提出了基于鲑鱼适宜水深和流速的河道内流量概念(Instream Flow Requirement)^[40]。以上基于鱼类习性生态流量的研究均处于起步阶段,未明确提出生态流量的量化方法。河道内流量增加法(Instream Flow Incremental Methodology)将自然栖息地属性和特定鱼类栖息地偏好结合起来,使得生态流量的分配趋于客观^[41]。Arthington 等^[42]基于生态学家和水文学家的经验,在对鱼类生活习性深入调研的基础上,提出了 DRIFT 法。IFIM 法和 DRIFT 法在国外应用较为广泛,但对水生物资料及水文资料要求较高,不适用于资料较少的河流,且对人力、物力和时间消耗大;陈敏建等^[43]从河流生态系统的特征出发,提出了以鱼类生境法和鱼类生物量计算河流适宜生态流量的途径;Wang^[44]通过建立水文指标与生态指标的量化关系,提出了基于水文-生态响应关系的河流生态需水定值方法;King 等^[45]通过分析澳大利亚 Muray 河环境变量与产卵强度之间的关系,探究了适用于多物种的非生物手段刺激鱼类产卵的生态流量计算方法;Gwinn 等^[46]基于鱼类种群特性,制定了澳大利亚相关河流生态流量计算方法。

4 存在问题与展望

4.1 生态流量法存在的问题

全世界现今已有 200 余种生态流量计算方法,分别涉及六大洲和 44 个国家,但这些方法中大多数都有其使用条件,推广性较差。我国生态需水研究始于 20 世纪 70 年代,迄今为止,该领域的研究大多体现在宏观战略方面,尚未成熟,对生态环境流量如何进行实施和管理仍处于探索阶段,主要存在以下问题。

(1)对生态环境流量的概念和内涵并没有形成统一的定义。目前,众多学者根据自己研究的侧重点及对生态流量的理解给出诸多定义,但尚未形成统一的概念,不利于生态流量研究的进一步深入。

(2)由于缺少生态环境监测系统,无法通过对生态关键因子的长期监测和分析指导管理与确定最优决策,导致我国生态流量研究严重滞后,在计算方法选择与应用时照搬国外研究成果,难免存在不适用性及盲目性。

(3)我国现在主要采用的是水文学方法或传统水力学方法,仅利用简单的统计学方法表征极为复杂的水生生态系统,定量分析过于简单,不能精确反映不同河流生态需求的差异,且对水力学指标的选取存在盲目性。

4.2 生态流量研究展望

针对目前我国生态流量研究存在的不足,未来应主要注重以下研究方向。

(1)加强对生态流量概念的探讨,更高层次地明晰生态流量的概念。

(2)完善生态环境监测体系,加强对河流水生生物及生态关键因子的监测工作,为我国生态流量的进一步研究打下坚实基础。

(3)开展基于鱼类生境的生态流量研究。鱼类作为水生生态系统中顶级群落,其生活习性均为长期自然选择的结果,河流自然属性的改变,使水生生物的生存及繁衍受到侵扰。鱼类通过流速、水深等水力因子感知环境的变化,恢复河流天然水文情势实际上是恢复河流水力因子的天然状态。可通过研究水力学指标与鱼类生态参数的统计学关系,并利用水力学指标控制水文过程中的流量、频率、发生时间、持续时间的变化,模拟河流的自然节律,恢复下游河段鱼类适宜的生态环境。

参考文献:

[1] Afshar A, Massoumi F, Afshar A, et al. State of the Art Review of Ant Col-

- ony Optimization Applications in Water Resource Management[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(11): 3891 ~ 3904.
- [2] Brown C M, Lund J R, Cai X, et al. The future of water resources systems analysis: Toward a scientific framework for sustainable water management [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6110 ~ 6124.
- [3] Mulat A G, Moges S A. Assessment of the Impact of the Grand Ethiopian Renaissance Dam on the Performance of the High Aswan Dam[J]. *Journal of Water Resource & Protection*, 2014, 6(6): 583 ~ 598.
- [4] Myrvald K M, Kennedy B P. Interactions between body mass and water temperature cause energetic bottlenecks in juvenile steelhead[J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2015, 24(3): 373 ~ 383.
- [5] Douglas A J, Harpman D A. Estimating Recreation Employment Effects with IMPLAN for the Glen Canyon Dam Region[J]. *Journal of Environmental Management*, 1995, 44(3): 233 ~ 247.
- [6] Avery L A, Korman J, Persons W R. Effects of Increased Discharge on Spawning and Age - 0 Recruitment of Rainbow Trout in the Colorado River at Lees Ferry, Arizona[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2015, 35(4): 671 ~ 680.
- [7] Jain S K. Assessment of environmental flow requirements[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(22): 3472 ~ 3476.
- [8] Powell G L, Matsumoto J, Brock D A. Methods for determining minimum freshwater inflow needs of Texas bays and estuaries[J]. *Estuaries*, 2002, 25(6): 1262 ~ 1274.
- [9] Falkenmark M. Stockholm Water - Symposium 1994: Integrated Land and Water Management: Challenges and New Opportunities[J]. *Ambio*, 1995, 24(1): 68 ~ 68.
- [10] Raskin P D, Hansen E, Margolis R M. Water and sustainability [C]// *Natural Resources Forum*[J]. Blackwell Publishing Ltd, 1996, 20(1): 1 ~ 15.
- [11] Smakhtin V U. Low flow hydrology: a review[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 240(3): 147 ~ 186.
- [12] 李丽娟, 李海滨, 王娟. 海河流域河道外生态需水研究[J]. *海河水利*, 2002(4): 9 ~ 11.
- [13] 张琳, 刘琼, 白颖, 等. 关于河道外生态需水的讨论[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(5): 543 ~ 546.
- [14] 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 生态及环境需水量研究进展与前瞻[J]. *水科学进展*, 2002, 13(4): 507 ~ 514.
- [15] 汤奇成. 塔里木盆地水资源合理利用及控制措施分析[J]. *干旱区资源与环境*, 1991(3): 26 ~ 33.
- [16] 崔树彬. 需水量若干问题的探讨[J]. *中国水利*, 2001(8): 71 ~ 74.
- [17] 王芳, 梁瑞驹. 生态需水研究(1)——干旱半干旱地区生态需水理论分析[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(1): 1 ~ 8.
- [18] 杨志峰, 张远. 需水研究方法比较[J]. *水动力学研究与进展*, 2003, 18(3): 294 ~ 301.
- [19] 宋进喜, 王伯铎. 水与用水概念辨析[J]. *西北大学学报*, 2006, 36(1): 153 ~ 156.
- [20] Tennant D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources[J]. *Fishers*, 1976, 1(4): 6 ~ 10.
- [21] Ames D P. Estimating 7Q10 confidence limits from data: a bootstrap approach[J]. *Journal of water resources planning and management*, 2006, 132(3): 204 ~ 208.
- [22] Matthews R C, Bao Y. The texas method of preliminary instream flow determination[J]. *Rivers*, 1991, 2(4): 295 ~ 310.
- [23] 张强, 崔瑛, 陈永勤. 基于水文学方法的珠江流域生态流量研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1828 ~ 1837.
- [24] Gippel C J, Stewardson M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows [J]. *Regulated Rivers Research & Management*, 1998, 14(1): 53 ~ 67.
- [25] Nehring R B. Evaluation of instream flow methods and determination of water quantity needs for streams in the state of Colorado[M]. *Colorado Division of Wildlife*, 1979.
- [26] 刘昌明, 门宝辉, 宋进喜. 河道内生态需水量估算的生态水力半径法[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(1): 42 ~ 48.
- [27] 李梅, 黄强, 张洪波, 等. 基于生态水深 - 流速法的河段生态需水量计算方法[J]. *水利学报*, 2007, 38(6): 738 ~ 741.
- [28] Songhao Shang. A multiple criteria decision - making approach to estimate minimum environmental flows based on wetted perimeter[J]. *River Research and Applications*, 2008, 24: 54 ~ 67.
- [29] Reiser D W. Status of Instream Flow Legislation and Practices in North America[J]. *Fisheries*, 1989, 14(2): 22 ~ 29.
- [30] Williams J G. Lost in Space: Minimum Confidence Intervals for Idealized PHABSIM Studies[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1996, 125(3): 458 ~ 465.
- [31] 桑连海, 陈西庆, 黄薇. 河流环境流量法研究进展[J]. *水科学进展*, 2006, 17(5): 754 ~ 760.
- [32] King J, Louw D. Stream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology[J]. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 1998, 1(2): 109 ~ 124.
- [33] King J M, Brown C A, Paxton B R, et al. Development of DRIFT, a scenario - based methodology for environmental flow assessments[R]. *Preto-ria: Water Research Commission*, 2004.
- [34] Bunn S E, Arthington A H. Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity[J]. *Environmental Management*, 2002, 30(4): 492 ~ 507.
- [35] Arthington A H, Bunn S E, Poff L R, et al. The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems[J]. *Ecological Applications A Publication of the Ecological Society of America*, 2006, 16(4): 1311 ~ 8.
- [36] Richter B D, Davis M M, Apse C, Konrad C. A presumptive standard for environmental flow protection [J]. *River Research and Applications*, 2012, 28: 1312 ~ 1321.
- [37] Poff N L R, Zimmerman J K H. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows[J]. *Freshwater Biology*, 2010, 55(1): 194 ~ 205.
- [38] Zhang Y, Arthington A H, Bunn S E, et al. Classification of flow regimes for environmental flow assessment in regulated rivers: the Huai River Basin, China[J]. *River Research and Applications*, 2012, 28(7): 989 ~ 1005.
- [39] Lévêque C. Role and Consequences of Fish Diversity in the Functioning of African Freshwater Ecosystems: A Review[J]. *Aquatic Living Resources*, 1995, 8(1): 59 ~ 78.
- [40] Stromberg J C, Patten D T. Riparian vegetation instream flow require-

- ments; A case study from a diverted stream in the Eastern Sierra Nevada, California, USA [J]. *Environmental Management*, 1990, 14 (2): 185 ~ 194.
- [41] Arunachalam M. Assemblage structure of stream fishes in the Western Ghats (India) [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 430 (1/3): 1 ~ 31.
- [42] Arthington A H, Rall J L, Kennard M J, et al. Environmental flow requirements of fish in Lesotho rivers using the DRIFT methodology [J]. *River Research & Applications*, 2003, 19 (5/6): 641 ~ 666.
- [43] 陈敏建, 丰华丽, 王立群, 等. 适宜生态流量计算方法研究 [J]. *水科学进展*, 2007, 18 (5): 745 ~ 750.
- [44] Wang J N, Dong Z R, Liao W G, et al. An environmental flow assessment method based on the relationships between flow and ecological response: A case study of the Three Gorges Reservoir and its downstream reach [J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56 (6): 1471 ~ 1484.
- [45] King A J, Gwinn D C, Tonkin Z, et al. Using abiotic drivers of fish spawning to inform environmental flow management [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53: 34 ~ 43.
- [46] Gwinn D C, Beesley L S, Close P, et al. Imperfect detection and the determination of environmental flows for fish: challenges, implications and solutions [J]. *Freshwater Biology*, 2016, 61: 172 ~ 180.

编辑: 张绍付

The development of research on ecological flow

WANG Bei, XIAO Changhu, HUANG Zhanfeng, GUI Yao
(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research of Changjiang
Water Resources Commission, Hubei Wuhan 430010, China)

Abstract: Although reservoir demonstrates its huge economic benefits, some ecological environment problems arise like downstream ecological water shortage, making the living environment of aquatic organisms, especially the fish suffered from varying degree of damage. Fish as the climax community in riverine ecosystem, dynamic variations of its population can reflect the whole structural information of aquatic community and water quality. This paper introduces the current researches at home and abroad from the aspects of definition and research method, and focuses on the research on natural rhythm of rivers and fish habitats. In addition, we discuss the problems in this field and present the future research trend of ecological flow.

Key words: Environmental Hydraulic Engineering; Ecological Flow; Natural Rhythm; Fish Habitat

翻译: 王 珮