

文章编号: 1672 3031(2009) 02 0141-06

河流生态水文学研究现状

李 , 廖文根

(中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038)

摘要: 生态水文学是一门新兴的边缘交叉学科, 是生态保护的重要理论基础和技术支撑。河流生态水文学作为一个重要分支, 在河流生态恢复中被寄予厚望, 以协调河流开发与河流生态系统保护之间的矛盾。本文简要回顾了生态水文学研究的发展历程, 并从河流生态学理论、河流水文情势生态效应评价方法、河流生态流量及河流生态修复等方面重点介绍了河流生态水文学领域的研究进展。

关键词: 河流生态水文学; 河流生态修复; 河道生态流量; 河流水文情势; 生态效应

中图分类号: X143

文献标识码: A

1 研究背景

水, 是物质循环和能量转化的载体, 是生命之源、万物之宗。水作为最重要的生境要素之一, 其水文情势、流动形态对生态系统有着极其重要的影响。水也是人类文明发展之源。在人类社会的发展过程中, 水利工程建设一直在防洪、供水、发电、航运等方面发挥着巨大作用, 推动着人类文明的发展。随着科学的进步, 以及水利工程生态环境效应的逐步显现, 人类意识到, 水利工程在造福于人类的同时, 也改变了水文情势、水流形态, 进而改变着人类赖以生存的生态系统。

由于水文循环具有联系地球系统地圈- 生物圈- 大气圈的纽带作用, 水文循环过程变化与其相关的生态环境变化交叉的研究与社会需求, 产生了新的学科生长点, 即生态水文学。1992年在 Dublin 国际水与环境大会上, 生态水文学作为一门独立的学科被提出, 并定义为介于生态学与水文学之间的研究生态格局和生态过程变化的水文学机制的一门边缘学科^[1-2], 其目标是在保持生物多样性、保证水资源的数量和质量的前提下, 提供一个环境健康、经济可行和社会可接受的水资源持续管理范式^[2-3]。

生态水文学的研究进展中, 生态学家和水文学家们针对旱地、湿地、森林、湖泊和河流 5 大生态系统开展了大量的研究。但是, 基于水文循环的生态水文学研究大多以植物作为研究的出发点, 强调植物在水文和生物之间的关键作用, 没有或很少提及动物区系在生态水文学研究中的地位, 但是水文因子对动物区系的分布、组成、种群结构等方面往往具有决定作用。河流作为水文循环的重要一环, 不仅为人类生存提供了有利条件, 也是各种水生生物生存的自然空间, 在为人类提供宝贵水资源的同时, 河流也为环境的调节和改善发挥着重要作用。当今, 由于日益严重的人为干扰, 河流生态系统退化与服务功能下降已被公认为是全球性的生态环境问题, 因此河流生态水文学研究在河流生态恢复中被寄予厚望, 成为生态水文学研究的中心问题。

2 河流生态水文学概念及内涵

河流生态系统是指河流水体的生态系统, 属流水生态系统的一种, 是陆地和海洋联系的纽带, 在生物圈的物质循环中起着主要作用。河流生态系统的结构和功能由水文、生物、地形、水质和连通性 5 个

收稿日期: 2009-04-10

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(200701029、200801023); 国家自然科学基金(40865005)

作者简介: 李 (1971-), 男, 广西桂林人, 博士, 高级工程师, 主要从事河川及流域环境研究。E-mail: Lichong@iwhr.com

相互作用的部分组成,其中水文是主动的、起决定性作用的因素。在河道中流动的水和岩土发生作用,形成了各种各样的河床地貌。水流与河床构成水生生物赖以生存的空间,是生物生存的最基本的条件^[4]。河流生态水文学主要研究河流中生态格局和生态过程变化的水文学机制,它不仅研究各种水生动植物的生态学特征,而且研究河流水文水质变化与水生生物,例如无脊椎动物和鱼类等的关系,其内涵主要是:河流中生态与水文相互作用与影响问题,研究河道内水生生态系统对河流水文过程的作用;以及河流水文过程或水文情势变化对生态系统有何影响的问题^[5]。

河流生态水文学的研究内容主要有3个方面^[6]:

(1)找出并量化影响河流生态系统结构和功能的主要水文特征。河流的水文特征影响了河流生态系统的主要方面:河流的物质循环、能量过程、物理栖息地状况和生物相互作用。不同的水文特征对应不同的生态过程,河流的中高流量过程输移河道的泥沙;大洪水过程通过与河漫滩和高地的连通,大量地输送营养物质并塑造漫滩多样化形态,维系河道并育食河岸生物;小流量过程则影响着河流生物量的补充,以及一些典型物种的生存。水流的时刻、历时和变动率,往往和生物的生命周期相关联,例如在长江,涨水过程(洪水脉冲)是四大家鱼产卵的必要条件,如果在家鱼繁殖期间(每年的5—6月份)没有一定时间的持续涨水过程,性成熟的家鱼就无法完成产卵^[7]。

由于河流生态系统和水文特征的紧密联系,河流生态水文学的研究,首要就是要找出与生态相关的这些水文特征,然后通过各种方法将其量化,从而为下一步分析研究打下坚实的基础。

(2)研究影响河流生态的水文机制。找出并量化影响生态系统结构及功能的主要水文特征后,则需进一步探讨生态系统和水文特征的交互影响机制,即深层次研究水文特征是如何影响生态系统的结构和功能。例如水量交换有助于有机物的分解,增加藻类的歧异度及丰富度;降低流速后又有助于悬浮质沉淀,悬浮质又可吸收污染物如重金属、杀虫剂及酚类等。

(3)发展调控生态水文特性的方法。量化了影响生态系统结构及功能的主要水文特性,并理解了水文特性与生态系统间的交互机制后,通过发展调控生态水文特性的方法和技术,从而实现河流生态系统的保护和恢复。发展调控生态水文特性的方法和技术,涉及到物理、化学、生物等各种因素。在了解水文与生态相互作用机制的基础上,合理设定生态目标,根据河流的具体情况制订科学的河流管理规划,使河流生态系统得以持续地为人类社会做出发展做出贡献。

3 研究方向与进展

河流生态水文学重点研究方向有:河流生态学理论、河流水文情势生态效应评价方法、河流生态流量及河流生态恢复等。

3.1 河流生态学理论 20世纪80、90年代,是生态水文学理论发展的关键期,在河流生态学研究,相继提出了河流连续体概念(River Continuum Concept, RCC)、串连非连续体概念(Serial Discontinuity Concept, SDC)、自然水流范式(Nature Flow Paradigm, NFP)等重要理论,为生态水文学的发展奠定了扎实的基础。

河流连续体概念^[8]是指在天然河流系统中,生物种群形成一个从河源到河口的逐渐变化的时空连续体。RCC描述了从源头到河口水力梯度的连续性;分析了上中下游非生命要素的变化引起的生物生产力的变化;不同颗粒的有机物质输移、遮荫效应影响以及河床基底碎石作用对于食物网的影响等^[9]。

串连非连续体概念是Ward等^[10]为完善RCC提出的理论,意在考虑水坝对河流的生态影响。SDC通过将原来的河流连续体概念的纵向连续扩展到横向和垂直方向的连续,从而实现了理论上的重大突破,在规划新的河流整治项目以及河流整治后其自然属性的恢复工作中有非常重要的作用。

自然水流范式^[11]认为未被干扰状况下的自然水流对于河流生态系统整体性和支持土著物种多样性具有关键意义。自然水流用5种水文因子表示:水量、频率、时机、延续时间和过程变化率,认为这些因子的组合可以描述整个水文过程。在河流生态修复工程中,可以把自然水流作为一种参照系统^[9]。

河流生态系统结构功能整体模型(Holistic Model of River Ecosystem Structure and Function)^[9]是涵盖河

流生态系统主要特征的整体模型,该模型由河流流态-生态结构功能4维连续体模型;水文情势-河流生态过程耦合模型;地貌景观空间异质性-生物群落多样性耦合模型等3种子模型构成。

此外,重要的河流生态学理论还有:洪水脉冲理论(Flood Pulse Concept, FPC)、近岸保持力概念(In-shore Retentivity Concept, IRC)、河流生产力模型(Riverine Productivity Model, RPM)等,为生态水文学的发展提供了可靠的理论基础。

3.2 河流水文情势生态效应评价方法 河流水文情势变化及其生物响应关系,可以认为是河流生态学研究的核心。水流情势决定并影响了河流生态系统的主要方面:河流的物质循环、能量过程、物理栖息地状况和生物相互作用。Poff等^[11]定量了水流情势的指标表征,即水流情势要素(components of flow regime)的5方面为:幅度(magnitude)、频率(frequency)、历时(duration)、时间(timing)和水文条件变化率(rate of change of hydrological condition)。通常认为,河流的中等流量主要影响着河道的泥沙输移,而河道的高流量和低流量对河流是一种生存“瓶颈”,决定了不同物种的胁迫阈值和生存机会。高流量还影响着河流生物的生物量和多样性,因为高流量通过其与漫滩和高地的连通,大量地输送营养物质并塑造漫滩多样化形态,维系河道并育食河岸生物;低流量则影响着河流生物量的补充,以及一些典型物种的生存。水流的时间和持续特征及其变化率,往往和生物的生命周期相关联,生物的产卵、繁殖、育肥、生长,相应于自然水流在时间上的周期性变化,即自然水文周期^[11-12]。

河流水文情势生态效应评价方法的核心是如何量化河流生态水文特征。评价方法的研究从开始的单一指标、综合指标,发展到生态水文指标体系(表1)。Richter等^[12]、Gronics等^[13]相继提出刻画河流生态水文特征的指标及指标集,从整个生态系统的角度出发,通过分析生态相关的流量过程的幅度、频率、历时、时刻和变动率的变化,选用指标表征河流生态水文特征及其变化。Richter等^[12]建立的一套评估生态水文变化过程的IHA(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)方法,指标共有5类,包括:月流量指标、极限流量指标、时刻指标、高流量低流量指标、涨水落水指标。澳大利亚Gronics等^[13]则建立了一套分为7类指标的指标体系,包括:长期指标、高流量指标、低流量指标、极值指标、零流量指标、涨水落水指标和月流量指标。

表1 表征河流生态水文特征各方法特点

研究方向	研究方法	生态相关性	适用条件	优点	局限性
单一指标	7Q10法	以最枯连续7d流量来代表河流生态需水量	任何河流	迅速,数据容易获取	没有考虑高流量;常常低估了河流的生态需水量
	湿周法	认为生物与河道湿周有直接联系,建立湿周和流量的关系	河道地形稳定(宽浅矩形河道,抛物线河道)	数据测量简单,容易操作	没有考虑季节性的变化
	Basque法	生物种群与河流流量有直接关系	目前主要应用于人类影响较小的河流	可直接反映生物种群的变化	需要大量生物数据,不易操作,而且只针对一种物种
	河道流量增量法(IFIM)	生境和生态系统之间有直接联系,建立流量和生境的关系	分析河流中鱼类等脊椎动物	生物依据充分,能反映生物的变化	需要大量的人力物力,不易操作
综合指标	BBM法 澳大利亚的整体研究法	天然流量和生态系统整体性的关系	任何河流	生态系统整体性和流域管理规划相结合	需要大量的人力物力,时间长
生态水文指标体系	IHA方法 澳大利亚Gronics等建立的方法	水文特征和生态系统整体性的关系	任何河流	计算简单,易于操作	主要是定性的认识,目前缺乏定量数据支撑

资料来源:文献[14]

3.3 河流生态流量 河流的生态流量是指实现河流生态目标需求的河流水文过程及其流量^[15]。国外河流生态流量的理论研究始于20世纪40年代,美国渔业和野生动物保护组织为避免河流生态系统退化,规定需保持河流最小生态流量,这也是最早生态环境需水流量的概念,并于20世纪70年代初通过立法列入地方法案。英国、澳大利亚等国自20世纪80年代起接受河流生态流量的概念,并广泛开展研

究,亚洲、南美洲等国家目前逐步接受这一概念^[16]。

Acreman 等^[15]对河流生态流量的评估方法进行了归类,划分为:查表法(look-up tables)、数据分析法(desk top analysis)、功能分析法(functional analysis)和水力栖息模型法(hydraulic habitat modeling)等4类。水文学在河流生态流量确定方法中所占比例最大,约占总数的30%,共有61种计算方法,主要集中在前3类,大多数方法目前仍然在使用^[17]。

特纳塔(Tennant)方法是查表法的代表^[18],该方法基于以下假设:一定比例的平均流量将维持合适水深和流速,维持健康的河流环境所必需的流量。用特纳塔方法估计不同流量下的环境质量是以实际栖息地的质量为基础的。10%的平均流量为最小的推荐流量,维持短期的生存流量;30%为生态基流,维持较好的生存环境和一般的娱乐用水;60%的平均流量提供了绝大多数生物幼儿时期极好的生存环境和大多数的娱乐用水。特纳塔方法是非现场测定类型的标准设定方法,具有宏观的定性指导意义^[15-16]。

数据分析法根据数据的来源可以分为纯水文学数据、水文生态数据融合两种类型。基于IHA的变动范围法(Range of Variability Approach, RVA)^[12]是纯水文学数据类方法的代表。该法采用32个生态水文指标(IHA)来分析河流在人类活动干扰前后与生态相关的水文过程的变化,32个指标划归为流量大小幅度、时间、频率、持续期和变动率等具有生态意义的5大类。该法量化河流生态流量的核心思想是:(1)给出自然(或人工干扰较小)状态下IHA各指标特征值,并以平均值 $\pm\delta$ (标准差)或25%~75%区间范围作为IHA指标的生态目标;(2)计算受人工干扰河流的IHA各指标特征值,判断其是否落在生态目标区间,统计水文状况变化对自然状态的偏离程度;(3)通过各种措施,调节受影响河流水文过程,使其变化尽量落在生态目标区间,以维持河流生物多样性,保护生态系统完整性。这样,每个水文指标在河流作为“自然河流”时期的变动范围就认为是河流生态流量范围。

河流急流无脊椎动物指数(LIFE)^[19-20]是水文生态数据融合类方法,该法需要大型无脊椎动物的监测数据支持。通过建立的LIFE指数与河流流量的关系,监测的大型无脊椎动物数量就可反映河流生态流量的适宜程度。

功能分析法不仅仅是考虑特定物种的生态需求,而且是将河流生态系统的各方面需求与河流的水文分析、水动力信息关联在一起分析^[21-22]。BBM(Building Block Methodology)法是功能分析法的代表性方法^[22]。BBM法根据专家(鱼类专家、无脊椎动物专家、滨岸植物学家和地貌学专家)的相关知识,在理解栖息地需求和河流水力特征的基础上,确定区域内的流量需求。BBM法计算生态流量可分为:正常年份逐月低流量或基本流量、干旱年份逐月低流量或基本流量、正常年份逐月冲洗流量(流量和历时)、干旱年份逐月冲洗流量4种流量。BBM法生态需水量公式可表示为:生态环境需水量=水文动态流量+生态功能流量+流量和栖息地关系流量+噪音流量。噪音流量指还未被认识的方面^[16,23]。另外专家评价法、科学小组方法和历史基准流量法是澳大利亚科学家提出的多种由生物学家与水文学家共同分析设定生态流量的方法。

3.4 河流生态修复 随着人类对河流开发利用程度的不断提高,河流的自然水文情势在人类活动干扰下发生不同程度的改变,对河流生态系统造成胁迫,产生深远影响。过度的河流开发导致生物多样性下降、生态系退化等问题,如何保护和修复河流生态,成为关注的焦点与研究的热点。河流生态修复是一种环境保护行动,其目的是促使河流系统恢复到较为自然的状态,在这种状态下,河流系统具有可持续特征,并可提高生态系统价值和生物多样性^[24]。

水利水电工程在给人类带来福祉的同时,也干扰了河流生态系统。围绕水利水电工程提出的各种河流生态修复方法,是一个重要的研究热点。从本质上说,水利水电工程的生态调度是河流生态修复的一个重要方面,其核心在于恢复或部分恢复河道自然的水文节律,以满足河流生态系统的生态需水过程。由于每条河流所处的地理位置和人文环境不同,在恢复河流生态系统的时候,必须结合河流和工程的特定情况,综合考虑河流的人类利用需要与生态系统的功能需求,寻找人类与环境的水分配平衡点。Richter等^[25]提出了大坝合理运行以恢复河流生态系统的工作框架:(1)评估大坝所致的水文情势变化;(2)分析水文变化的生态和社会后果;(3)设定大坝运行的具体目标;(4)设计达成既定目标的大坝运行模

式; (5) 运行大坝设定模式; (6) 评价大坝运行结果, 再将结果反馈至(3) 进行循环。

生态调度试图寻找人类与环境之间水资源分配的平衡点, 以调节人与自然的需水矛盾, 国外已有多个成功的实例。然而, 生态调度是一个十分复杂的系统问题, 同时受到自然、经济、社会、生态以及技术等方面因素的影响, 在我国目前的情况下, 如何通过对大坝的合理调度运行, 恢复河流生态系统具有重要的意义。

4 结束语

伴随着经济的进一步快速发展, 我国所面临的生态与环境问题将更加突出, 环境保护所面临的挑战也将更加严峻。我国作为一个水利大国, 在经历了深刻反思之后, 治水思路也发生了巨大的转变。促进人与水的和谐, 实现水资源的可持续利用, 成为新时期水利工作的鲜明特征。作为一门新兴的交叉学科, 生态水文学是新时期水利工作的一个重要理论基础, 可为水资源开发利用规划、水利工程生态调度、基于生态需求的河流适应性管理提供不可或缺的科技支撑。尽管如此, 河流生态水文学, 在理论体系和研究方法上还需要不断地对其改进、完善和发展, 尤其在河流生态水文学的理论基础、研究内涵、水文研究尺度与水生态研究尺度匹配与转换、水文情势变化的生态响应量化等方面, 需要深入研究和探讨。在实践应用方面, 大坝的生态调度及其调度示范应该是河流管理的一个重要方面。

参 考 文 献:

- [1] 赵文智, 王根绪. 生态水文学[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [2] 黄奕龙, 傅伯杰, 陈利顶. 生态水文过程研究进展[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 580- 587.
- [3] Zalewski M, Janauer G A, Jolankaj G. Ecohydrology: a new paradigm for the sustainable use of aquatic resources[R]. Paris: UNESCO, 1997: 55- 80.
- [4] 陈敏建, 丰华丽, 王立群, 等. 生态标准河流和调度管理研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 631- 636.
- [5] 王根绪, 刘桂民, 常娟. 流域尺度生态水文研究评述[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 892- 903.
- [6] 廖学诚. 生态与水文结合——生态水文学[J]. 地友, 2002, 55: 2- 6.
- [7] 彭静, 李 , 徐天宝. 论河流保护与修复的生态目标[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 66- 71.
- [8] Vannote R L. The river continuum concept[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1980, 37: 130- 137.
- [9] 董哲仁. 河流生态系统研究的理论框架[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 129- 137.
- [10] Ward J V, Stanford J A. The serial discontinuity concept of lotic ecosystem[C]// Fontaine F D, Bartell S M (Eds.). Dynamics of Lotic Ecosystems. Ann Arbor: Ann Arbor Science, 1983: 29- 42.
- [11] Poff N L, Allan J D, Bain M B, et al. The Natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration [J]. Bioscience, 1997, 47: 769- 784.
- [12] Richter B D, Jeffrey V B, Powell J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem[J]. Conservation Biology, 1996, 10(4): 1163- 1174.
- [13] Grouns J, Marsh N. Characterization of flow in regulated and unregulated streams in Eastern Australia[R]. Canberra: Cooperative Research Centre for Freshwater Ecology Technical Report, 2000: 1- 66.
- [14] 徐天宝. 河流生态水文指标体系及其在长江中上游的应用研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2006.
- [15] Acreman M, Dunbar M J. Defining environmental river flow requirements a review[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2004, 8(5): 861- 876.
- [16] 宋兰兰, 陆桂华. 生态环境需水研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(3): 57- 61.
- [17] 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.
- [18] Tennant DL. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources[C]// Orsbom J F, Allman C H (eds). Proceedings of Symposium and Speciality Conference on Instream Flow Needs II. Maryland: American Fisheries Society, 1976: 359- 373.

- [19] Extence C, Balbi D M, Chadd R P. River flow indexing using British benthic macro invertebrates: a framework for setting hydro ecological objectives[J]. *Regulated Rivers research and management*, 1999, 15: 543– 574.
- [20] Dunbar M J, Acreman M C, Kirk S. Environmental flow setting in England and Wales current practise: future challenges [J]. *Journal of the Institution of Water and Environment Management*, 2004, 18: 5– 10.
- [21] Tharme R E, King J M. Development of the building block methodology for instream flow assessments and supporting research on the effects of different magnitude flows on riverine ecosystems[R]. Cape Town: Report to Water Research Commission, 1998.
- [22] King J M, Tharme R E, Villiers M S. Environmental flow assessments for rivers: manual for the Building Block Methodology[R]. Pretoria: Water Research Commission Report TT 131/00, 2000.
- [23] Huges 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, 270(3– 4): 167– 181.
- [24] 赵进勇,董哲仁,孙东亚. 河流生物栖息地评估研究进展[J]. *科技导报*, 2008, 26(17): 82– 88.
- [25] Richter B D, Thomas G A. Restoring environmental flows by modifying dam operations[J]. *Ecology and Society*, 2007, 12(1): 12.

Research status of riverine eco hydrology

LI Chong, LIAO Wen gen

(*Dept. of Water Environment, IWHR, Beijing 100038, China*)

Abstract: The eco-hydrology is a new discipline that studies the cross-cutting areas between ecology and hydrology, which provides theoretical basis and technical support for restoration and enhancement of the absorbing capacity of ecosystems. The scientific subject of riverine eco hydrology is a branch of eco hydrology and becomes a hot spot of research in water and environment sciences, which could give approaches to harmonize conflicts between utilization and protection of rivers' ecosystem. The paper gives a brief review on the development of the eco hydrology, in the aspects of theory of riverine eco hydrology, assessment methodology of flow regime and its ecological response, river environment flow and river restoration.

Key words: riverine eco hydrology; river restoration; river environment flow; ecology response; flow regime

(责任编辑:韩 昆)