

国外典型河流生态流量管理实践及启示

陈昂¹, 薛耀东², 魏娜², 李慧³

1. 中国水利水电科学研究院水电可持续发展研究中心, 北京 100038
2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048
3. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120

摘要 生态流量是河流开发与生态环境保护协调发展的关键指标和难点问题。目前, 河流生态流量理论方法体系尚不完善, 不足以全面指导生态流量管理实践, 导致部分河流、河段的生态系统服务功能退化。虽然生态流量的理论体系和计算方法已开展了较多研究, 中国学者对国外生态调度也做了回顾和梳理, 但是对生态流量的管理目标仍未形成统一认识。通过梳理国外 7 条典型河流的生态流量管理实践, 从珍稀濒危洄游性鱼类、国际重要湿地、珍稀濒危鸟类等多种生态保护目标, 以及流域综合管理机制、水权交易、国际投资等政策管理的多个方面, 分析了不同河流的生态流量实施过程和效果, 归纳总结了 7 条典型河流生态流量管理实践的成功经验和不足, 进而提出了对政府、管理部门、研究机构、水电企业 and 非政府组织等多个利益相关方在生态流量研究与管理方面的启示。

关键词 生态流量; 环境流量; 适应性管理; 生态调度

河流筑坝、土地利用变化、气候变化以及水资源不合理开发加剧了用水冲突, 导致自然流动的河流越来越少^[1-2]。研究表明, 水资源不合理开发导致全球 1/3 的河流生态系统退化, 水资源短缺影响了全球 1/2 的人口和 3/4 的耕地^[3]。水资源不合理开发导致的水文情势变化, 引起河流生态系统结构与功能的变化, 甚至严重退化。为保护水生态系统, 有必要在水资源开发利用的同时, 确定维持河流生态健康的基本水文条件, 联合国在 2015 年通过的《2030 年可持续发展议程》, 将实施生态流量作为实现可持续发展目标的重要措施之一^[4]。中国自 20 世纪 70 年代开始探索研究生态流量, 已有 40

多年的历史, 最初是对国外理论方法体系的引进与应用, 经过持续的研究与实践, 基本建立了适用于中国河流特征的生态流量研究和管理框架^[5-7]。尽管生态流量研究与实践开展较早, 但由于生态流量涉及目标和内容较多^[8-9], 直到 2007 年在澳大利亚布里斯班召开了“世界环境流量大会”, 才形成环境流量 (environmental flows, e-flows) 的统一认识, 并在《布里斯班宣言》中明确了环境流量的定义和内涵。虽然中国许多管理规定使用“生态流量” (ecological flow), 但其内涵基本与环境流量一致, 制定生态流量标准的目的, 在于协调水资源的社会经济价值与生态价值之间的平衡^[10-12], 自 2006

收稿日期: 2018-01-17; 修回日期: 2018-07-19

基金项目: “政府间国际科技创新合作重点专项 (2016YFE0102400); 中国长江三峡集团公司资助项目 (0799564)

作者简介: 陈昂, 高级工程师, 研究方向为生态水文学、环境影响评价, 电子邮箱: angteenchen@gmail.com

引用格式: 陈昂, 薛耀东, 魏娜, 等. 国外典型河流生态流量管理实践及启示[J]. 科技导报, 2018, 36(21): 116-126; doi: 10.3981/j.issn.1000-

7857.2018.21.015

年《水电水利建设项目河道生态用水、低温水和过鱼设施环境影响评价技术指南(试行)》发布以来,经过10余年的管理实践,在水利水电工程建设项目环境影响评价和规划环境影响评价的管理过程中,不断加强对生态流量的要求,从要求最小生态流量扩展到要求满足以鱼类为主的水生生物完成其生活史的流量过程,并不断强化了工程层面和流域层面的生态流量监管^[13-15]。

在河流生态流量保障方面,无论是发达国家还是发展中国家,都开展了较多的探索,积累了一定的经验。与国外相比,中国河流生态流量管理实践还存在一些不足^[16-17],在流域生态流量监管方面,已有的管理规定尚不能适应河流开发的快速发展格局^[18-19],不同流域、区域的生态流量保障措施存在不均衡现象;在工程下泄生态流量监管方面,生态流量泄放措施、远程测报设施、监督技术手段等还存在一些技术短板^[20-22],未能有效保障生态流量的实施,造成河流断流、水污染、水生态退化等问题。随着“十二五”和“十三五”期间大量水利水电工程建设和运行,众多河流已经形成了梯级水库群的格局,未来生态流量关注的重点将从单一工程坝下减脱水河段的生态流量要求,转向梯级水库群联合调控下的流域干支流生态流量保障。此外,随着“最严格水资源管理制度”“河长制”“湖长制”等政策的实施,未来中国将逐渐形成多部门联合管理生态流

量的新格局,在现有研究基础上,完善生态流量多部门协调管理的机制研究,需要借鉴国外典型河流的成功经验,指导中国的管理实践工作。

因此以下选取了国外7条典型河流,涵盖了世界上主要大洲和生态流量实施效果较好的国家,通过分析典型河流生态流量实施过程、问题和效果,梳理了主要经验与不足,总结了典型河流实施生态流量的共性经验,可为中国的河流生态流量管理实践提供参考。

1 典型河流基本情况

典型河流所在国家包括美国、英国等发达国家和印度、巴基斯坦等发展中国家,7条河流分别为美国的萨瓦纳河、澳大利亚的墨累-达令河、英国的肯尼特河、南非的鳄鱼河、墨西哥的圣佩德罗河、巴基斯坦的蓬奇河和印度的恒河(表1)。这些河流的生态流量实践基本都是不断改善的过程,即最初并未充分考虑生态流量问题,随着社会、经济、生态的用水矛盾不断激化,不断考虑水资源优化配置和生态流量要求,部分国家还通过生态流量的适应性管理措施不断改善生态流量过程,7条典型河流的基本信息如表1所示。

表1 国外典型河流基本信息

Table 1 General information of seven rivers

河流	国家	主要用水目标	主要生态目标
萨瓦纳河 Savannah River	美国	洄游性鱼类、发电、景观	濒危鱼类
墨累-达令河 Murray-Darling Basin	澳大利亚	灌溉用水	维持河流连通性、重要湿地、原生植被、鸟类和鱼类
肯尼特河 River Kennet	英国	地下水抽取	水生动植物
鳄鱼河 Crocodile River	南非	跨界水冲突、克鲁格国家公园生态用水、灌溉用水	克鲁格国家公园
圣佩德罗河 San Pedro River	墨西哥	重要湿地	重要湿地、红树林、鸟类、鱼类
蓬奇河 Poonch River	巴基斯坦	发电	印度鲃国家公园
恒河 Ganga River	印度	大壶节文化活动用水、灌溉用水	140多种鱼类,90种两栖类和5种特有鸟类

2 生态流量实施过程

2.1 萨瓦纳河

1) 背景

萨瓦纳河分布有100多种鱼类,其中有2种国家级

珍稀濒危保护鱼类,分别为短吻鲟(*Acipenser brevirostrum*)和大西洋鲟(*Acipenser oxyrinchus*)。河流筑坝后,水文情势发生变化,出现了河流水质下降、河漫滩湿地消失、洄游性鱼类减少、河口咸水入侵等问题。为减缓筑坝的生态环境影响,大自然保护协会(TNC, The

Nature Conservancy) 和美国陆军工程兵团 (USACE, United States Army Corps of Engineers) 于 2002 年联合开展了可持续河流计划 (SRP, Sustainable River Plan), 以包括萨瓦纳河在内的 8 条河流为试点, 评估水资源管理效果和生态需水满足程度, 2003 年完成了萨瓦纳河的生态流量管理方案并开始实施^[23-24]。

2) 实施

由于缺乏历史监测资料, 2003—2006 年, 萨瓦纳河连续 4 年开展了试验性调度, 通过萨瓦纳河上游的哈特韦尔水库 (Hartwell Dam)、拉塞尔水库 (Russell Dam) 和瑟蒙德水库 (Thurmond Dam) 联合调度, 不断调整下泄生态流量, 并对水质、水生生物等指标开展泄流效果监测。监测结果表明: 试验性调度的效果并不明显, 短吻鲟并没有洄游到上游的栖息地, 但是调度对河口压咸有一定效果。随后, 每年萨瓦纳河都开展生态调度, 进一步研究表明, 水温是短吻鲟产卵洄游的主要驱动因素。

3) 结果

通过萨瓦纳河的生态流量适应性管理, 确定了春季持续的洪水脉冲可改善河流水位、促进鱼类通过闸坝, 同时强调在生态流量实施过程中, 应当注重水质和水量并重。

2.2 墨累-达令河

1) 背景

墨累-达令河流域整体的水资源状况及其开发利用程度与中国十分相似, 都具有水资源短缺、竞争性用水矛盾突出、农业用水比例较大的特点。流域内修建了 90 多座大型水库, 总库容 295 亿 m^3 , 每年灌溉用水量 100 亿 m^3 左右, 占用水总量的 96%。流域内有 3 万多个湿地, 其中 11 个被列入《拉姆萨尔公约》(Convention on Wetlands of Importance Especially as Waterfowl Habitat), 是澳大利亚生物多样性最丰富的区域。由于流域水污染、水生态退化问题比较突出, 造成湿地不同程度的退化, 为遏制流域生态系统的退化趋势, 政府开始研究和实施可持续的水量分配政策。

2) 实施

墨累-达令河流域过去一直由流域所在各州政府管理, 实施高度自治的水管理政策。20 世纪 90 年代, 流域管理委员会开展了实施生态调度的探索性研究, 经过大约 10 年的研究实践, 确定了实施生态调度的可行性方法^[25]。2002 年, 澳大利亚政府和流域 4 个州共同启

动了墨累河生命行动计划, 目的是恢复河流生态系统健康。同时, 政府还要求墨累-达令河流域委员会建立水市场, 逐年实现节水目标从而改善生态环境。

2007 年, 澳大利亚政府颁布了《水法》(Water Act 2007), 成立墨累-达令河流域管理局 (MDBA, Murray - Darling Basin Authority) 取代了流域管理委员会的职责, 专门负责制定和实施“墨累-达令河流域规划”。规划主要有 3 大目标, 一是保护和恢复流域水生态系统, 二是保护和恢复河流生态系统服务功能, 三是提高抗风险能力。规划的核心是在流域和子流域根据不同用水目标设定用水限额, 保障生态环境用水。根据流域综合规划和流域生态环境战略规划, 每年都要制定用水方案, 根据来水条件的不同, 适应性的分配水资源。流域初始设定的生态环境用水量为 2750 GL/年, 后来提高到 3200 GL/年, 主要生态保护目标是保障河流连通性、原生植被、水鸟和鱼类。

3) 结果

《水法》保障了整个流域的生态环境用水管理机制, 允许水权交易提高了水资源配置的灵活性, 也实现了一定的环境效益和经济效益。

2.3 肯尼特河

1) 背景

英国肯尼特河是泰晤士河最大的支流之一, 河流上游生物多样性丰富, 主要优势物种为水田鼠 (*Arvicola amphibius*)、水毛茛 (*Ranunculus aquatilis*)、欧洲七鳃鳗 (*Lampetra fluviatilis*) 和褐鳟 (*Salmo trutta*)。肯尼特河的地下水水源补给方式以降雨补给为主, 地下水开采后的恢复较慢。英国环境署 (EA, Environment Agency) 和泰晤士水务公司 (Thames Water) 研究表明, 丰水期抽取地下水可以满足河流生态流量要求, 枯水期抽取地下水可使肯尼特河地表径流量减少 35%, 难以维持河流生态流量, 影响水毛茛的生长。

2) 实施

1990 年, 为保护肯尼特河的生态系统健康, 当地成立了非政府组织——肯尼特河行动小组 (ARK, Action for the River Kennet), 并于 1996 年促成建立了肯尼特河取水许可制度, 由环境署颁发取水许可证并负责监管。肯尼特河行动小组持续关注地下水抽取对河流生态环境的影响, 促使环境署和泰晤士水务公司开展了肯尼特河生态水文响应关系的深入研究。2000 年, 欧盟“水框架指令” (WFD, Water Framework Directive) 要

求所有成员国的河流都应达到“良好的生态状况”,促进了肯尼特河生态流量的实施。英国环境署作为实施欧盟“水框架指令”的监管机构,负责开展河流生态系统监测,监测项目包括鱼类、无脊椎动物和水环境指标等。

2000—2005年,英国环境署和泰晤士水务公司调查发现,肯尼特河地下水抽取导致夏季河流流量减少了10%到14%,枯水期减少了35%到40%,亟需减少对肯尼特河地下水的进一步抽取。2005—2010年,英国环境署和泰晤士水务公司共同合作寻找肯尼特河地下水抽取的替代方案,经过详细研究后决定,在肯尼特河枯水期,不再抽取肯尼特河地下水,而由临近的法摩尔(Farmoor)水库向斯温登南部供水。

3) 结果

肯尼特河生态流量的实施,保障了枯水期的生态流量,是多个利益相关方共同合作协商的结果,对于协调各利益相关方关系、长效实施生态流量、保障肯尼特河的生态系统健康具有重要作用。

2.4 鳄鱼河

1) 背景

鳄鱼河位于南非克鲁格国家公园(KNP, Kruger National Park)上游,是南非、斯威士兰和莫桑比克跨界河流中开发度最高的河流之一,同时也是该流域缺水最严重的地区。河流上游的奎纳大坝(Kwena Dam)是该河唯一的大坝,对调节生态流量和灌溉用水具有重要作用。流域主要用水目标为农业灌溉和城市生活用水,水资源压力较大,河流管理必须考虑保障流入莫桑比克的流量和对克鲁格国家公园的保护,随着上游用水量的增加,下游包括国家公园在内的大部分地区旱情频发,用水冲突加剧。

2) 实施

由于鳄鱼河生态环境退化,南非水利部早在20世纪80年代就开始研究更好的水资源管理方案,并于1998年出台了“国家水法”,规定必须将一定数量和质量的水用于维持水生生态系统。“国家水法”的实施促成设立新的资源管理部门,负责处理水资源管理的新问题。2006年,通过设立因科马蒂河—阿玛祖鲁流域管理局(IUCMA, Inkomati Usuthu Catchment Management Agency),负责实施根据“国家水法”制定的生态流量。水利部将水资源管理工作下放给流域管理局,同时根据流域管理局的建议制定用水许可。流域管理局

负责监测评价鳄鱼河6个断面的生态流量满足程度,每3年进行一次河流健康监测,监测项目包括鱼类、无脊椎动物和河岸带生态环境^[26]。

鳄鱼河生态流量实施最初是基于BBM法进行评估,后来逐渐发展了DRIFT法和栖息地流量—压力—响应方法^[27]。流域管理局在2009年制定“流域管理战略”时,认为需要在鳄鱼河建立水管理框架,确定了河流的3大目标,包括水资源综合适应性管理、改善水质和水质监测、改善社会用水不平衡问题。同时,由于莫桑比克政府施压,最终达成了一项关于生态流量的协定。

3) 结果

鳄鱼河生态流量的成功实施,缓解了下游多个用水目标的冲突,改善了克鲁格国家公园的生态环境退化,同时南非和莫桑比克的协议,改善了河流的水量分配矛盾。

2.5 圣佩德罗河

1) 背景

圣佩德罗河是世界上少有的未建大坝和其他阻隔的河流,河流下游是墨西哥最大的湿地红树林生物圈保护区(Marismas Nacionales Biosphere Reserve),也是《拉姆萨尔公约》的国际重要湿地。由于计划在河流上修建拉斯克鲁塞斯大坝(Las Cruces Dam)引起各界的广泛关注,不同利益相关方共同评估大坝建设运行可能产生的影响,下游湿地的生态用水需求是关注重点。

2) 实施

2007年,国家水利委员会确定了生态流量实施的技术方法和程序,首先采用自然流态范式和生物梯度的方法确定生态流量,通过颁发用水许可证指导未来水利基础设施建设。2011年,国家水利委员会根据“水法”的规定,确定了189个生物多样性丰富、保护价值较高、可用水资源量丰富和用水竞争较小的流域,作为水资源保护区。2012年,通过美洲开发银行(IDB, Interamerican Development Bank)资助,墨西哥开始编制并实施全国水资源保护计划(NWRP, National Water Reserves Programme),旨在建立国家水资源储备体系、保障流域水循环及其提供的生态系统服务功能、建立一个综合的全国水生态保护体系,通过规定生态流量的阈值和配置方案,在全国范围内实施生态流量。

圣佩德罗河是最初的6个试点之一,通过生态流量的成本效益分析,确定了年径流量的80%用于保障湿

地生态用水。2014年9月15日,墨西哥总统签署了第一个水资源储备法令,涵盖了圣佩德罗河在内的11个流域,明确了各流域的生产、生活和生态用水量。2016年,国家水利委员会在最初189个流域的基础上,又增加了167个保护区,墨西哥的水资源保护区总数达到了356个。

3) 结果

拉斯克鲁塞斯大坝的建设提议引起了多个利益相关方的关注,促成了在环境水资源储备法令中规定各流域的生态用水量。

2.6 蓬奇河

1) 背景

蓬奇河为杰赫勒姆河左岸支流,发源于比尔本贾尔岭西侧丘陵,穿过蓬奇河印度鲃国家公园(Poonch River Mahaseer National Park),最终流入曼格拉水库。蓬奇河径流补给主要为融雪和降雨,径流主要集中在夏季,鱼类多样性丰富,包括2种珍稀濒危保护鱼类。曼格拉大坝上游50 km规划的古尔普尔水电站(Gulpur HPP, Gulpur Hydropower Project)位于国家公园内,由于环境和社会影响评估(ESIA, Environmental and Social Impact Assessment)和项目审批过程缺乏生态流量的评估内容与国际投资机构的参与,因此国际机构要求考虑生态流量并重新评估其环境影响,以减缓对国家公园和印度鲃(*Tor putitora*)和克什米尔鲟鱼(*Glyptothorax kashimirensis*)珍稀濒危保护鱼类及其重要栖息地的影响等。

2) 实施

亚洲开发银行(ADB, Asian Development Bank)和国际金融公司(IFC, International Finance Commission)的环境保护法规非常严格,要求古尔普尔水电站进行生态流量评估。

通过多个利益相关方的参与,项目开发商与咨询公司最终采用DRIFT法评估生态流量,同时优化了项目设计,包括(1)缩短导流距离,从6 km减少为不到1 km,确定了最小下泄生态流量为4 m³/s;(2)将设计水轮机变更为转桨式水轮机,可提高低流量条件下运行的灵活性。此外,还设计了一定的生态补偿措施,制定生物多样性行动计划,为国家公园的生态系统保护提供了资金保障,包括为野生动植物保护服务提供永久性基金,销售该项目产生的电力实施“生物多样性行动计划”,建立鱼类增殖放流站保护下游河段鱼类的物种多

样性。

3) 结果

国际投资机构严格的环境标准,在发展中国家的资源可持续开发方面发挥了关键作用。国际金融公司和亚洲开发银行严格的环境标准是古尔普尔水电站项目重新评估和环境保护措施设计变更的主要因素。评价结果认为,古尔普尔水电站是促进该地区生态可持续发展的项目,为该地区未来水电开发奠定了基础。

2.7 恒河

1) 背景

恒河起源于喜马拉雅山中部的印度北甘戈特里冰川,注入孟加拉湾,河长2500 km,流域面积约100万km²。恒河生态系统健康状况在过去几十年持续退化,亟需恢复河流水生态系统,以维持流域社会、经济和生态的可持续发展。由于恒河流经尼泊尔、印度、中国和孟加拉国,4个国家都受到国际公约对生态流量的约束。恒河流域的农业灌溉用水和文化用水意义重大,印度和孟加拉国的农业灌溉取水导致恒河上游部分地区流量偏低。同时,恒河的圣水沐浴节“大壶节”(Kumbh Mela)是印度教每12年一次的重要活动,也是世界上参加人数最多的节日之一,具有巨大的社会文化意义。为保障该活动顺利进行,印度政府要求严格保障恒河的水位和流量。

2) 实施

印度北方邦灌溉和水资源部门(UPI & WRD, Uttar Pradesh Irrigation and Water Resource Department)具有管理北方邦内的河流、维持灌溉系统、管理社会文化活动用水等任务。2013年,大壶节活动吸引了8000多万人,为保障活动顺利开展,北方邦政府联合流域利益相关方于2012年基于BBM法共同评估了生态流量,评估结果促进了对生态流量多学科交叉研究的思考,评估确定了在大壶节活动期间推荐的生态流量为225 m³/s,相当于安拉阿巴德(Allahabad)1.2 m的岸边水深,在特殊的沐浴日期为310 m³/s,相当于1.5 m的岸边水深。活动期间需通过特赫里水库(Tehri Dam)泄放生态流量,满足活动用水。同时,通过下游灌溉引水渠的改造,避免灌溉用水和活动用水的竞争。

3) 结果

恒河的生态流量强调社会文化功能用水,在实施过程中通过激励利益相关方(政府、用户、发电企业、非政府组织)的共同合作,保障了生态流量的成功实施。

2.8 实施效果

7条河流生态流量实施的背景和过程虽然存在差异,但基本上都是通过流域水工程调控优化生态流量过程,保障河流生态系统健康。总体来看,生态流量的实施效果较好,基本达到甚至超出了计划的目标。在具体实施效果方面(表2),萨瓦纳河和圣佩德罗河通过实施生态流量,推动和促进了国家生态流量相关保护计划的实施,萨瓦纳河的生态流量实施扩大了国家可持续河流计划的规模,将实施生态流量的河流和工程数量提高到14条河流和60多个大坝,圣佩德罗河的生

态流量实施促进全国水资源保护计划目标被纳入了国家发展计划和国家应对气候变化计划中;墨累-达令河、鳄鱼河通过实施生态流量促进了流域整体健康水平的提高,在推动流域生态环境监测方面也有一定效果;肯尼特河和蓬奇河通过实施生态流量促进了流域生态系统恢复,蓬奇河的生态流量实施对工程设计优化和改进具有一定效果;恒河通过实施生态流量保障了大壶节活动期间的用水量和水位,是少有的考虑生态流量社会文化功能的案例,对于重新认识生态流量理论方法具有重要作用。

表2 典型河流生态流量实施内容及效果

Table 2 Ecological flow implementations and results of seven rivers

河流	内容	效果
萨瓦纳河	综合考虑洄游性鱼类、河道、河漫滩和河口生态的需求,针对丰、平、枯3个水平年,分别提出了3种水流组分(低流量、高流量和洪水)的大小、频率、持续时间、出现时间和变化率。	工程层面通过适应性管理不断调整下泄生态流量。管理层面通过推进可持续河流计划,由最初的8条扩展到14条河流和60多个大坝。
墨累-达令河	通过设立墨累-达令河流域管理局,设立生态用水配额和水权交易机制,保障河流连通性、原生植被、水鸟和鱼类的生态用水需求。	促进了流域健康水平的提高,湿地生态、鱼类种群、鸟类繁殖和河口水质有较大改善,流域生态系统健康状况尚需通过生态流量实施效果监测进一步验证。
肯尼特河	环境署负责监测流量变化和生态状况,在河流枯水期减少地下水抽取,通过法摩尔水库在河流枯水期供水,保障肯尼特河生态流量。	河流生态环境有所恢复,生态流量实施正在向既定目标实现。
鳄鱼河	设立因科马蒂河-阿玛祖鲁流域管理局,实施根据“国家水法”制定的生态流量。通过流量监测,基于BBM法、DRIFT法和栖息地流量-压力-响应法评估生态流量。	鳄鱼河生态状况有所改善,尽管水量方面较好,但水质改善情况较差,生物指数没有明显改善;由于农业部门、林业部门等参与,改进了监测和适应性管理。
圣佩德罗河	全国水资源保护计划规定了生态流量的阈值和配置。通过社会、经济和生态的成本效益分析,确定了年径流量的80%用于保障湿地生态用水。	为其他流域的实施奠定了基础,全国水资源保护计划目标被纳入了国家发展计划和国家应对气候变化计划中。
蓬奇河	采用DRIFT法评估生态流量,同时优化了项目设计,缩短了引水导流间距,从6 km减少为不到1 km。	生态流量实施后,环境、社会和经济均有一定改善。鱼类资源有所恢复,通过缩短引水导流间距,减少了移民数量和对生态环境的破坏。
恒河	基于BBM法评估生态流量,确定了在大壶节活动期间推荐的生态流量225 m ³ /s,特殊沐浴期的生态流量310 m ³ /s。	通过调整灌溉系统运行方式,减少灌溉取水量以及干支流水量的共同调节,保障了大壶节活动期间的用水量和水位。

3 生态流量实施经验

3.1 成功经验及问题

7条典型河流的生态流量成功经验可为中国提供一些参考,但是其在研究、管理和实践等方面还存在一些问题和不足,需要进一步完善(表3)。核心的成功经

验包括:萨瓦纳河通过生态流量改善了水资源管理,促进了联邦机构、国际非政府组织的合作,建立了州和地方的利益相关方实施生态流量的适应性管理方式。墨累-达令河采取立法变革把土地和水权分开;提前建立水资源分配上限。肯尼特河通过监管机构与水务公司合作恢复生态流量;利用可靠的数据资料,研究针对性

表 3 典型河流生态流量实施的成功经验和问题

Table 3 Successful implications and problems of ecological flow implementations

河流	成功经验	存在的问题
萨瓦纳河	<ol style="list-style-type: none"> 1. 多方合作开展生态流量实践; 2. 生态流量定量化管理(大小、频率和持续时间等); 3. 生态流量适应性管理与实施效果监测; 4. 加强水库管理人员的参与。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 生态流量初期实施的资金较少; 2. 监测和适应性管理需要较长的周期; 3. 生态流量实施的效果评估缺乏量化方法; 4. 陆军工程兵团通常 2 到 4 年更换领导者,随着人员的变化,需要重新补充生态流量实施人员。
墨累-达令河	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建立水权交易机制,创建自由水市场; 2. 合理设置水权分配总量上限; 3. 制定明确的生态流量保障目标; 4. 研究、管理与实践相结合; 5. 加强社区参与程度; 6. 制定完善的生态流量保障机制与立法。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 最初的水权和土地权是绑定的; 2. 由于水权的固有属性,最初的水权交易机制确定存在难度; 3. 生态流量实施效果评价比较困难; 4. 现有闸坝的运行调度衔接存在一定难度。
肯尼特河	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建立取水、流量变化与生态效应的联系; 2. 建立监管、实施机构等利益相关方在实施生态流量共同参与机制; 3. 完善的长效资助机制和资金支持; 4. 减少主管部门之间的利益冲突和职能交叉。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 确定地下水抽取和河流流量变化及其生态响应之间的关系存在一定难度; 2. 减少泰晤士水务公司的取水限额需要相应补偿资金,建立补偿机制困难。
鳄鱼河	<ol style="list-style-type: none"> 1. 明确界定管理机构的责任; 2. 充分的利益相关方参与,共同确定生态流量目标; 3. 开展生态流量实施的效果监测,评估目标恢复和改善情况; 4. 结合已有监测设施建立统一的信息管理系统,如水文站网、气象站网等; 5. 实施生态流量适应性管理,基于监测结果改进流量泄放过程; 6. 制定可持续管理体系和流量保障措施。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 南非和莫桑比克政府机构水资源部门和流域管理机构之间管理职能不明确; 2. 克鲁格国家公园生态用水与灌溉用水之间存在冲突; 3. 缺乏生态流量实时监测和管理的决策支持系统。
圣佩德罗河	<ol style="list-style-type: none"> 1. 较早确定生态流量,保障生态用水红线和可持续的水资源利用; 2. 以特定流域生态环境状况为参考,确定生态流量实施原则和目的; 3. 基于已有标准制定生态流量评估方法,降低实施难度; 4. 水资源分配机构具有生态流量实施的有利条件; 5. 建立生态流量网络,保证利益相关方了解各自的责任和义务。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 初始水权分配缺乏科学依据; 2. 国家水资源保护计划实施资金匮乏,尤其是生态流量实施效果监测资金。
蓬奇河	<ol style="list-style-type: none"> 1. 综合评估生态流量,开展不同情景(社会、经济和文化等)的影响评估; 2. 国际投资机构采用严格的环境保护标准保障生态流量和项目可持续性; 3. 规划阶段充分考虑最优的规划设计方案; 4. 结合区域生态环境特征合理确定生态流量的实施方案。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 巴基斯坦能源短缺是生态流量实施的主要障碍,电力机构不愿妥协发电效益; 2. 政府、公众或非政府组织普遍缺乏对生态流量的认识; 3. 机构职能交叉是生态流量实施的主要问题,实施过程中明确机构职能后,必须维持机构职能的持续性,以简化未来的决策。
恒河	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可以实施短期的生态流量调控,以满足特殊文化活动的的需求; 2. 开展生态流量实施效果评估,明确对其他用水目标的影响和减缓措施; 3. 提前规划设计生态流量实施方案和监测方案,开展适应性管理; 4. 多方合作共同确定生态流量。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 实施生态流量需要长效的保障机制,缺乏政治意愿是持续实施的关键障碍; 2. 短时间内提高灌溉用水效率存在难度。

的解决方案。鳄鱼河通过各利益相关方合作建立生态流量保护指导方针;共同开发长期战略合作,以确保可持续发展,应对气候变化的影响。圣佩德罗河在生态流量确定和实施的过程中,通过多个利益相关方参与流量评估及改善,由水利部门确定具体流量。蓬奇河利用国际资助机构在发展中国家可持续资源开发中的关键作用,制定严格的环境标准。完善法律框架是维护生态流量的重要保障。基于健全的技术和综合的、全面的生态流量评估方法,评估不同发展模式对环境的影响,同时也允许对社会、文化和经济因素进行评估,在规划阶段综合考虑环境、社会和经济因素,确保在环境保护的基础上,通过开发者、监管者、资助机构等利益相关方之间的协作来实现综合效益最大化。恒河在短期内成功地实施生态流量控制在于合理利用重要社会文化事件激发不同利益相关方的关注,但是从长期来看,生态流量实施必须获得政府支持及利益相关方的认可。

7条典型河流的生态流量实施仍待解决的问题和不足主要分为3种类型,包括生态流量实施的资金、生态流量实施的效果评估以及有效的生态流量管理。生态流量的实施是一个长期的过程,问题的解决也需要开展长期的适应性管理逐步解决。生态流量实施的资金问题一般可通过建立生态补偿措施解决;建立工程下泄生态流量与下游保护目标的生态水文响应关系是评估生态流量实施效果的基础,但这方面目前仍处于研究阶段,无论是措施运行与初始设计目标的相符性,还是下泄生态流量的满足程度,都难以根本解决生态保护目标的用水需求,需要通过开展水库生态调度实践评估生态保护目标对水流变化的响应,适时优化生态流量泄放过程。不同国家的水管理部门及其职责存在较大差异,目前较为统一的认识是建立流域综合管理的方式,例如建立流域综合管理局或建立各利益相关方的协商机制,相关管理机构以流域为对象进行综合管理,建立数据共享的生态环境监测体系,保障生态流量的实施。

3.2 管理实践的启示

河流生态流量涉及研究、管理与实践等多项内容,需要政府部门、管理部门、水电企业、研究机构、非政府组织等多个利益相关方的共同参与。从7条典型河流的生态流量实施经验分析,中国可从以下方面完善生态流量的管理实践。

1) 政府部门

制定明确的法律法规,为规范水资源的使用、分配和许可证等制定执行依据,明确生态流量是保护生态系统服务功能的前提,也是水工程规划设计和管理的核心内容,设定河流水资源利用红线和工程下泄生态流量约束红线,建立全国和流域生态环境保护规划。考虑河流生态流量实施的保障措施和资金支持,进一步完善保障生态流量的生态补偿措施,从类型多样、标准未统一的补偿措施,逐渐探索建立更加高效的补偿措施。

2) 管理部门

根据现有政策,分阶段、分区域、分类型地实施生态流量。尽可能全面考虑生态用水目标,针对不同流域和区域、同一河流不同河段的差异,设计切实可行的生态流量实施方案。对一些建设年代较早、未考虑生态流量的工程,通过以新带老的设备改造增加生态流量泄放设施,充分考虑生态流量设计保证率、生态流量保障的工程措施和非工程措施,结合可持续水电评价、绿色水电评价、环境影响后评价等,通过适应性管理适时优化生态流量泄放过程。

3) 水电企业

加强生态流量适应性管理研究和管理的参与程度,加大生态流量研究的资金投入,适时开展环境影响后评价工作,以工程下游重要生态环境保护目标为对象,开展或委托开展下游水生生态系统监测,建立电站下泄流量过程与下游水生生态系统的响应关系,计算并确定优化下泄生态流量的发电损失及其生态效益,为优化生态补偿措施提供依据。

4) 研究机构

在生态流量的概念内涵中充分考虑多种生态要素与社会经济要素,研究通过实施生态流量实现可持续发展目标的方法,开展基于水文学、地理学、地貌学、生态学、社会学和经济学等多学科交叉的生态流量研究,探索生态流量与生态目标的等效关系,通过定量的水文变化与生态响应关系评估生态流量;开展生态流量监测设施的设计方法和数据收集、存储、管理和分析系统,提高生态流量监测效果。

5) 非政府组织

推动不同国家采取具体措施和行动开展生态流量实践,借鉴生态流量成功实施的先进经验,推动欠发达地区生态流量的实施和资金募集,推动国际专家在生

态流量评估和实施中的参与程度,推动生态流量实施的适应性管理和生态监测网络建设,加强对工程下泄生态流量的监督作用,建立与政府、管理部门和研究机构的长效沟通及合作机制,加强环境保护宣传与教育,推动水电企业对环境保护基金投入和对生态流量的重视程度。

目前,中国生态流量的实施在工程层面已经不断完善,小水电改造的生态电价补偿逐渐提高了生态流量保障情况,但是流域层面的生态流量管理还未形成系统、具体的实施措施。结合中国生态流量的实施情况,研究认为应加强政府部门在生态流量实施过程中的主导作用,建立水利部门主导的,生态环境、农村农业、能源等多个部门共同参与的生态流量管理机制,“最严格的水资源管理制度”已确定了水资源开发利用控制红线,但生态流量约束红线未能随着生态环境保护要求的提高而提升,已不能满足当前管理实践的要求,未来在保障生态流量方面,应重点加强全国流域生态环境保护规划、生态流量的补偿措施等研究内容。

4 结论

梳理了国外7条典型河流的生态流量实施过程和效果,分析了生态流量实施的成功经验和不足,针对中国生态流量的管理实践现状,总结了对政府、管理部门、水电企业、研究机构和非政府组织等多个利益方实施生态流量的启示。

研究认为,生态流量涉及研究、管理与实践等多项内容,需要多个利益相关方的共同参与,充分发挥各方作用,充分考虑可作为生态流量目标和指标的社会、经济和生态环境要素,共同实施生态流量。具体而言,政府部门应加强部门之间的协商机制,在生态流量实施方面,以水利部门为主导,会同生态环境、农村农业、能源等其他相关部门共同制定生态流量管理规定;管理部门应充分考虑不同地区河流、不同建设时间和不同类型工程的差异,探索研究建立适应性管理机制,结合生态流量管理要求,分阶段、分区域、分类型的实施生态流量;水电企业应积极发挥企业社会责任,加强生态流量适应性管理的参与程度,加大生态流量研究的资金投入;研究机构应加强生态流量的基础研究工作,建立明确的生态流量概念和内涵,通过研究建立生态水文响应关系,提出更加科学的生态流量评估方法;非政

府组织尤其是国际非政府组织,应推动生态流量成功经验的应用,推动欠发达地区生态流量的实施和资金募集,提高国际专家在生态流量评估和实施中的参与程度。

对国际典型河流生态流量管理实践经验和启示的梳理,可为完善生态流量理论方法体系和中国生态流量管理实践提供一定参考。生态流量研究还未形成系统的理论方法体系,许多先进经验还未纳入标准方法,管理实践仍有待进一步深化,已有研究成果的应用可检验验证其效果,并反馈于理论不断改善。

参考文献(References)

- [1] Stewart-Koster B, Olden J D, Gido K B. Quantifying flow-ecology relationships with functional linear models[J]. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 2014, 59(3-4): 629-644.
- [2] Harwood A, Johnson S, Richter B, et al. Listen to the river: Lessons from a global review of environmental flow success stories[R]. Brisbane: WWF, 2017.
- [3] Wu M, Chen A. Practice on ecological flow and adaptive management of hydropower engineering projects in China from 2001 to 2015[J]. *Water Policy*, 2018, 20(2): 336-354.
- [4] Bhaduri A, Bogardi J, Siddiqi A, et al. Achieving sustainable development goals from a water perspective[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2016, 4(21): 64.
- [5] 陈昂, 隋欣, 廖文根, 等. 我国河流生态基流理论研究回顾[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2016, 14(6): 401-411.
Chen Ang, Sui Xin, Liao Wengen, et al. Review study on in-stream ecological base flow in China[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2016, 14(6): 401-411.
- [6] 陈昂, 吴淼, 沈忱, 等. 河道生态基流计算方法回顾与评估框架研究[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(2): 97-105.
Chen Ang, Wu Miao, Shen Chen, et al. Review of method for calculation of river ecological base-flow and study on its assessment framework[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(2): 97-105.
- [7] 朱党生, 张建永, 廖文根, 等. 水工程规划设计关键生态指标体系[J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 560-566.
Zhu Dangsheng, Zhang Jianyong, Liao Wengen, et al. A key ecological indicator system for water project planning and design[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 560-566.
- [8] Acreman M C, Overton I C, King J, et al. The changing role of ecohydrological science in guiding environmental flows[J]. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 2014, 59

- (3-4): 433-450.
- [9] Konrad C P, Olden J D, Lytle D A, et al. Large-scale flow experiments for managing river systems[J]. *Bioscience*, 2011, 61(12): 948-959.
- [10] Matthews J H, Forslund A, McClain M E, et al. More than the Fish: Environmental flows for good policy and governance, poverty alleviation and climate adaptation[J]. *Aquatic Procedia*, 2014, 2: 16-23.
- [11] Vorosmarty C J, McIntyre P B, Gessner M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. *Nature*, 2010, 467(7315): 555-561.
- [12] Poff N L, Richter B D, Arthington A H, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards[Z]. 2010: 55, 147-170.
- [13] Chen A, Sui X, Wang D, et al. Landscape and avifauna changes as an indicator of Yellow River Delta Wetland restoration [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 86: 162-173.
- [14] 国家环境保护总局环境影响评价管理司. 水利水电开发项目——生态环境保护研究与实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- State Environmental Protection Administration of China, Department of Environmental Impact Assessment Management. Research and practice of ecological protection for water resource & hydropower development projects[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [15] 陈昂, 温静雅, 王鹏远, 等. 构建河流生态流量监测系统的思考[J]. *中国水利*, 2018, 835(1): 7-10+17.
- Chen Ang, Wen Jingya, Wang Pengyuan, et al. Establishment of river ecological flow monitoring system[J]. *China Water Resources*, 2018, 835(1): 7-10+17.
- [16] Neubauer C P, Hall G B, Lowe E F, et al. Minimum flows and levels method of the St. Johns River Water Management District, Florida, USA[J]. *Environmental Management*, 2008, 42(6):1101-1114.
- [17] Poff N L, 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.
- [18] 陈昂, 王鹏远, 吴森, 等. 国外生态流量政策法规及启示[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(5): 49-53.
- Chen Ang, Wang pengyuan, Wu Miao, et al. Ecological flow policies and regulations review and enlightenment[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2017, 38(5): 49-53.
- [19] 陈昂, 沈忱, 吴森, 等. 中国河道内生态需水管理政策建议[J]. *科技导报*, 2016, 34(22): 11.
- Chen Ang, Shen Chen, Wu Miao, et al. Recommendation on ecological water demand management in china[J]. *Science and Technology Review*, 2016, 34(22), 11.
- [20] Chen A, Wu M, Chen K, et al. Main issues in environmental protection research and practice of water conservancy and hydropower projects in China[J]. *Water Science and Engineering*, 2017, 4(9): 312-323.
- [21] 陈昂, 陈凯麒, 孙志禹, 等. 我国水利水电工程环境影响评价信息化建设回顾与展望[C]//中国环境科学学会2016年学术年会, 海口, 2016.
- Chen Ang, Chen Kaiqi, Sun Zhiyu, et al. Review and prospect of informatization construction of environmental impact assessment for Water conservancy and hydropower projects in China[C]//Chinese Society for Environmental Sciences 2016 Academic Annual Meeting, Haikou, 2016.
- [22] 陈昂, 隋欣, 廖文根, 等. 基于数据云的水利信息化数据共享体系构建模式[J]. *科技导报*, 2014, 32(34): 53-57.
- Chen Ang, Sui Xin, Liao Wengen, et al. Construction of data sharing system of water information based on cloud storage[J]. *Science and Technology Review*, 2014, 32(34): 53-57.
- [23] Warner A T, Bach L B, Hickey J T. Restoring environmental flows through adaptive reservoir management: planning, science, and implementation through the Sustainable Rivers Project[J]. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 2014, 59(3-4): 770-785.
- [24] 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 Junna, Dong Zheren, Liao Wengen, et al. Practice on reservoirs operation improvement in the United States[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011, 42(1): 15-20.
- [25] D. 康奈尔, 鄒全丰, 山松. 墨累-达令流域的水改革和联邦体制[J]. *水利水电快报*, 2012, 33(9): 1-4.
- Daniel Cornell, Wu Quanfeng, Shan Song. The water reform and federal system in the Murray-Darling Basin[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2012, 33(9): 1-4.
- [26] Riddell E, Pollard S, Mallory S, et al. A methodology for historical assessment of compliance with environmental water allocations: lessons from the Crocodile (East) River, South Africa[J]. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 2014, 59(3-4): 831-843.
- [27] King J, Brown C, Sabet H. A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers[J]. *River Research and Applications*, 2003, 19(5-6): 619-639.

Global ecological flow implementations and implications

CHEN Ang¹, XUE Yaodong², WEI Na², LI Hui³

1. Research Center for Sustainable Hydropower Development, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China
2. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China
3. Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, MWR, Beijing 100120, China

Abstract As one of the key indicators in the river protection, the ecological flow is very difficult to manage in the coordinated development of economy, society and environment in a basin. With the fundamental theory and methods of the ecological flow assessment remaining to be established in China, we face with many problems in managing the ecological flow due to the lack of the guidance of an adequate theory, accompanied, therefore, with the degradations of some river ecosystem services. The studies of theory and methods so far have not resulted in an adequate ecological flow assessment. This paper reviews the ecological flow managements of seven rivers in the world as examples. The results of the managements are analyzed from the aspects of rare and endangered migratory fish species, wetlands of international importance (Ramsar wetlands), and rare and endangered avifauna, as well as from the aspects of integrated watershed management, water right transaction and international investment. From the analyses of their problems and successes in the managements, some lessons may be drawn for relevant authorities (i.e. government, management authorities, institutions, enterprises and NGOs).

Keywords ecological flow; environmental flows; adaptive management; ecological regulation ●



(责任编辑 祝叶华)