

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.03.009

重大水利水电工程对重要水生生物的影响与调控

毛劲乔,戴会超

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要: 针对我国多个流域所面临的生物资源更替与衰退问题,阐明重大水利水电工程对河流重要水生生物的影响机理,总结流域水生态调控方法和关键技术,以期为我国流域水生态文明建设和生态保护提供相关技术支撑。主要聚焦长江等我国大型河流,评述了重大水电工程影响下四大家鱼、中华鲟等重要水生生物的生存现状与变化趋势;通过揭示重大水利水电工程建设与运行对重要水生生物生境的多种胁迫效应,分析了重要水生生物自然繁殖的可调控性与实现途径;进而结合重大水利水电工程生态调控实践,系统论述了促进重要水生生物自然繁殖的水利工程优化调控关键技术及其适用性。

关键词: 水利水电工程;水生生物;四大家鱼;中华鲟;生态效应;优化调控

中图分类号:TV697

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2016)03-0240-06

Effects of large water conservancy and hydropower projects on major aquatic species and regulation

MAO Jingqiao, DAI Huichao

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A large number of basins in China are facing problems such as the degradation of ecosystems and decline of biological resources. This paper is devoted to illustrating the influence of large water conservancy and hydropower projects on major aquatic species in rivers, and demonstrating key technologies for control and regulation, which could help to provide technical support for aquatic ecological civilization construction and ecological conservation. With focuses placed on large rivers in China, such as the Yangtze River, this paper provides a review of the current status and trends of four major Chinese carp and the Chinese sturgeon influenced by large water conservancy and hydropower projects. Based on analysis of the stress effects of these projects on the habitats of major aquatic species, the regulation potential for natural reproduction of the aquatic species as well as possible approaches are discussed. Using a large water conservancy and hydropower project as a case study, the key technologies for optimal regulation of the project in order to increase the natural reproduction of major aquatic species and the applicability of these technologies are discussed.

Key words: water conservancy and hydropower projects; aquatic species; four major Chinese carp; Chinese sturgeon; ecological effect; optimal regulation

大型水利水电工程具有能源保障、水资源调配、防洪抗旱等巨大综合效益,是经济社会持续健康发展的基本保障。截至2014年我国水电装机容量已突破3亿kW,形成了初具规模的世界级水电工程群。水利水电工程也会阻隔鱼类洄游通道,改变上下游水文情势,胁迫河流生物栖息地生境,对重要水生生物的生存和繁殖造成直接影响。我国多个流域都出现了重要水生生物资源更替、衰退甚至绝迹的现象,长江四大家鱼和

收稿日期:2015-09-21

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973计划)(2012CB417006);国家自然科学基金(51279047);长江学者和创新团队发展计划(IRT1233)

作者简介:毛劲乔(1978—),男,江苏常州人,教授,博士,主要从事水利水电工程水生态环境安全理论与方法研究。E-mail:jingqm@163.com

通信作者:戴会超,教授。E-mail:dai_huichao@263.net

珍稀物种中华鲟是较有代表性的案例。

长江流域内支流众多,通江湖泊水势相连,为水生生物提供了优越的生长栖息环境,记载有鱼类 378 种,特有鱼类 162 种^[1-2]。长江系产漂流性卵鱼类的主要栖息和繁殖场所,四大家鱼(青、草、鲢、鳙)作为目前主要的淡水养殖和捕捞对象,具有重要的经济价值。长江水系野生四大家鱼的种质性状明显优于其他水系,被认为是宝贵的天然物种种质资源库。但在气候变化、环境污染、过度捕捞、水利建设等多重因素的影响下,四大家鱼产卵规模呈现衰退趋势。监利县是湖北省最大的淡水鱼产地之一,监利的四大家鱼苗径流量已从 1981 年 5—6 月的 67 亿尾,下降到 1997 年同期的 35.87 亿尾,直至 2009 年同期的 0.42 亿尾^[3-4]。又如,国家一级保护动物中华鲟是我国特有的溯河洄游性底栖鱼类,其传统产卵场主要分布在金沙江下游新市至涪陵江段内的 10 多个区域。由于 20 世纪 80 年代葛洲坝工程的修建,阻断了中华鲟洄游线路,使之种群数量锐减,目前仅在葛洲坝下游坝下至古老背长约 30 km 的江段游观测到一处产卵场。三峡工程进一步改变了坝下河段径流量与流场时空分布特征,是否已对中华鲟自然繁殖产生了新的影响,目前还存有争议^[5-6]。

工程界与学术界不断反思重大水电工程给河流水生生物带来的不利影响,提出了生态调度、过鱼设施、生境修复等多种调控措施^[7-10]。但整体而言,相关生态调控技术尚处在探索试验阶段,还需结合工程实践持续深入研究,重点突破复杂条件下生境演变、生物繁殖生态需求、多目标调控等议题。随着生态文明建设理念融入我国经济社会发展的全过程,在保证流域生态安全的基础上实施长江经济带建设等重大战略,已成为普遍共识。如何充分认知重大水利水电工程对河流重要水生生物的影响,继而形成科学可行的生态调控方法和技术,在发挥水电工程效益的同时减轻其生态环境影响,这对当前生态文明和长江经济带建设具有重要意义。

1 水利水电工程对重要水生生物的影响机理

1.1 物理阻隔作用

河流是不同生态系统间的纽带,在营养物质输移、生物多样性、生物迁徙等方面发挥着不可替代的作用。天然河流若受到大坝等水利水电工程物理阻隔,其上下游的物质交换趋于单向性,生境连通性降低,对水生生物栖息产生多方面的不利影响。在长期自然演变过程中,许多鱼类形成了在不同水域空间进行周期性迁徙的习性,按洄游方向可分为溯河洄游、降河洄游、江湖洄游等类型,也可按洄游习性分为索饵洄游、生殖洄游、越冬洄游等。然而,无论是何种类型的洄游活动,一旦洄游路线被人为物理阻隔,洄游鱼类不能有效完成生活史,其种群数量就将面临严重下降乃至灭绝的风险。例如,美国康涅狄格河(Connecticut River)、梅里马克河(Merrimack River)的水电开发被认为是鲑鱼、美洲西鲱灭绝或衰退的主要原因^[7]。对于在局部水域内能完成生活史或半洄游性鱼类,水电工程的物理阻隔则可能影响到不同水域群体之间的遗传交流,导致种群整体遗传多样性丧失,降低种群适应能力,危及物种的长期稳定生存^[4,11]。

我国特有珍稀鱼类中华鲟是筑坝河流引发洄游鱼类生存危机的一个典型案例。中华鲟作为世界现存鱼类中最原始的种类之一,系典型的河海洄游性大型鱼类,性腺成熟后从近海溯游回长江上游产卵。在葛洲坝工程截流当年,即观测到几千尾溯河洄游而来的中华鲟(以及白鲟、部分家鱼种群等)被阻隔在坝下,无法到达上游传统产卵场。根据其后的多年观测,尽管中华鲟已经在葛洲坝下游江段找到新的产卵场,但产卵量已不足过去的 20%;加之航运、捕捞、水污染等因素的复合影响,目前野生中华鲟数量已锐减到百尾左右。中华鲟自然产卵时空特征也在发生变化:一方面,鲟鱼的繁殖时间已逐渐从 10 月推迟到 11 月中下旬至 12 月上旬;另一方面,通过分析对比 2013—2015 年坝下产卵场与长江口幼鱼野外观测表明,中华鲟自然产卵场位置可能再次发生迁移。

1.2 水文水质胁迫作用

河流受到气候变化、地形地貌、水系交互等多重因素的影响,形成了自身的水文规律和水环境特征,对生态系统稳定和生物多样性起着重要作用。与之相对应,水生生物在长期演变过程中适应了栖息环境,其繁殖行为、胚胎孵化对水文、水动力、水质等条件有着自身需求和喜好。水利水电工程的建设与运行改变了河流天然径流过程,使其上下游径流时空分布、局部水动力特征、水沙情势、水温结构等发生显著变化,进而对重要水生生物的自然繁殖、物种组成和丰度产生不利影响。水库建成蓄水使得库区水位升高、水体增加、流速减缓,引起泥沙沉降、透明度增加、水温分层、反季节涨落等现象。尽管水库的缓流特性有利于库区生物多样性和渔业产量增加,但关键生态因子的变化将使得原有重要水生生物面临巨大风险,如原有产漂流性鱼卵可

能将缺乏足够距离进行漂流发育^[11]。由于上游水库水体属性(如水位、分层、水质)发生了变化,大坝调度运行可能会引起下游河道水位涨落异常、水温异常、溶解气体过饱和等问题,不利于下游重要水生生物的生存与繁殖。例如,20 世纪哥伦比亚河(Columbia River)、巴拉那河(Parana River)上大坝泄水引起下游溶解气体过饱和,继而造成大量鱼类患气泡病死亡的事件曾广受关注^[7]。

以我国长江野生四大家鱼为例,葛洲坝工程修建后,家鱼被分隔成上下游两个群体,但长江干流家鱼繁殖所需生态水文条件和鱼苗江讯规律无明显变化^[12]。三峡水库的建成蓄水和调度运行则明显改变了四大家鱼产卵场的水文和水质特性:由于大坝上游水文条件发生变化,自涪陵以下的库区产卵场大部分已消失,家鱼需要上溯至回水区以上河段繁殖;同时,宜昌至城陵矶江段 10 余处家鱼产卵场受到上游水库调节的较大影响,主要体现在产卵时间和产卵规模方面^[12-14]。家鱼繁殖对水温条件较为敏感,三峡蓄水前宜昌站水温通常在 5 月上旬至 6 月下旬达到适宜范围,而蓄水后适宜水温出现时间有所推迟,导致家鱼产卵高峰期也随之延迟。除了适宜水温环境,家鱼繁殖还需要水位上升、流速增大等水流条件的刺激,产出的鱼卵也需要一定流速维系其漂流孵化,直至发育成幼鱼。三峡工程常规运行调度尽管没有显著改变家鱼繁殖期间的涨水频率与强度,但在枯水年份对涨水次数、总涨水时间、平均涨水持续时间等有较大不利影响。此外,由于四大家鱼产卵期与三峡水库泄水期重合,坝下气体过饱和对家鱼卵苗发育的不利影响也不容忽视。

2 重要水生生物自然繁殖的生态水文需求

水利水电工程往往具有调蓄功能,兼具调控改善水生生物自然繁殖的潜力。衡量重要水生生物自然繁殖的工程可调控性,应在明确水生生物栖息繁殖适宜生境因子或洄游习性的基础上,通过对比实际工程的可调度空间或过鱼可行性后综合评估得出。影响水生生物生存繁殖的环境因素众多,主要包括水文情势、水动力特征和水质状况等方面。作为水生态系统中重要的指示物种,鱼类自然繁殖对栖息环境较为敏感,不同种类对水文、水动力和水环境一般有着独特需求和喜好。笔者以长江典型的鱼类四大家鱼与中华鲟为例,简述重要水生生物自然繁殖需求的生态水文学机制。

长江四大家鱼是典型的春季产漂流性卵鱼类,产卵场一般位于狭窄急流弯道,家鱼产卵繁殖主要受产卵场水温和涨水过程影响。水温因素对家鱼繁殖十分关键,适宜水温约在 21~24 ℃ 范围内,水温低于 18 ℃ 时家鱼会停止繁殖活动;家鱼胚胎发育的水温为 18~30 ℃,适宜范围为 22~28 ℃^[14]。当产卵场水温条件适合时,产卵场水位上涨就可能刺激四大家鱼产卵,产卵规模与起涨流量、涨水频率、幅度和持续时间密切相关。对于家鱼繁殖与涨水过程关键指标的定量关系目前尚无确定分析结果,这与各方研究的侧重角度或资料完整程度有关^[15]。近年来实施的调控研究表明,家鱼在水位起涨后大约 0.5~2 d 开始产卵,起涨流量在 10 000~20 000 m³/s 时,通过持续 3~7 d 且日涨幅约为 2 000 m³/s 的涨水,对四大家鱼产卵会产生积极效果。

长期观测研究证实了中华鲟自然繁殖对于地形、底质、流量、流速、水深、水温、含沙量等存在偏好(表 1)^[16]。中华鲟作为产底层黏性卵鱼类,对产卵场河床形态有着特定需求,河床底质主要以卵石与乱石为主,卵砾石堆叠形成缝隙便于受精卵黏附,硬化河床则保证了受精卵的成熟孵化^[17]。河床条件与水文条件相互影响,上游来水来沙条件变化会影响产卵场河床条件,同时河床条件也对近底层产卵微流态环境的形成具有重要作用。鲟鱼自然繁殖与水位涨落变化和局部流场结构密切相关,在适宜的流量和水位变化条件下,产卵场内形成紊乱流场结构有利于促进鲟鱼性腺发育和产卵受精。中华鲟是秋季产卵鱼类,对水温环境也有着较严格的要求,一般认为 18~20 ℃ 较为适宜。

表 1 中华鲟自然繁殖的生境因子需求

Table 1 Requirements for habitat factors of natural reproduction of Chinese sturgeon									
生境因子	水温/ ℃	水位/ m	水深/ m	流速/ (m·s ⁻¹)	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	含沙量/ (kg·m ⁻³)	水流条件	气象条件	河床底质
适宜条件	18~20	42.63~45.35	6~19	1.0~2.0	10 000~17 000	0.20~0.40	河道宽窄相间,潭礁交错,水流状态复杂,流场紊乱	天气剧变或连续晴天能刺激中华鲟自然产卵行为的发生	底质以卵石与乱石为主;产卵前停留在地势较高、流态复杂的位置;产卵时停留在存在负坡的位置,便于受精卵的附着
下限阈值	15	40.00	6	0.7	7 112	0.10			
上限阈值	21	46.00	19	2.6	26 000	1.32			

3 面向重要水生生物栖息繁殖的调控方法及工程实践

3.1 生态调控技术与系统研究

水利水电工程建设和运行致使河流生态系统趋于破碎化,明显改变了上下游水文及水动力条件,破坏了重要水生生物生境连通性和适宜性。从水利水电工程对重要水生生物的影响机理出发,主要形成了以下几种面向水生生物栖息繁殖的调控方法:

a. 过鱼设施。该类技术主要用于解决鱼类洄游路线被物理阻隔的问题,通过在水电工程中增设鱼道、鱼梯、升鱼机、鱼闸等仿自然过鱼设施的方法,辅助溯河洄游或降河洄游的鱼类通过闸坝抵达产卵或培育场所。实践表明,过鱼设施技术对恢复水生生物交流通道能起到积极作用,但其过鱼效果受到工程条件的较多限制,对不同洄游习性、游泳能力的鱼类效果不一。总体而言,目前过鱼设施技术较多适用于中低水头水利枢纽的溯河洄游鱼类过坝。

b. 增殖放流。通过人工繁殖,采用放流、底播、移植等人工方式向天然水域中投放亲体、苗种等活体水生生物,是当前运用较多的一种水生生物物种保护方法。例如,葛洲坝水利枢纽修建后,针对中华鲟的全人工繁殖已经较为成熟,2009年后已经可以人工培养出子二代中华鲟;人工增殖放流已成为鲟鱼生物资源的有力补充,但也面临着贡献率不足、遗传多样性丧失风险等问题。

c. 生境修复。当前普遍存在的水生生物栖息地受损问题,主要是受到高强度人类活动的影响。通过生境修复方法,对生态系统停止或减轻人为干扰,有可能依靠生态系统的自我调节能力进行生境自我恢复。建立自然保护区、限制捕捞、仿自然生境等技术较为常见。

d. 生态调度。水利水电工程既有生态环境效应,也有生态环境调控功能。水电工程生态调度是将生态因素纳入常规水库调度中,通过优化水利水电工程现行调度,最大程度上减轻重大水利工程的影响,满足重要水生生物栖息繁殖的现实需求,我国近年来开始结合三峡等重大工程开展了流域尺度的水生生物资源生态调度试验。

综合比较上述调控方法,过鱼设施和增殖放流手段目前还不能有效解决高坝乃至梯级电站的生物资源保护问题,而生境修复一般也需要较长的实施周期。通过水库优化调度改善水文水动力条件的方式来满足生物栖息繁殖需求,在实施周期与可操作性上有其一定的优势,成为当前关注的热点。但我国水利水电工程建设一般以防洪、发电、供水等功能为主,对水电工程生态环境安全保障的相关研究还处于起步阶段,如何进行有利于河流水生态环境保护、改善重要水生生物栖息繁殖的重大水利水电工程优化调控,是当前水生态安全领域中的难点问题。

面向重要水生生物栖息繁殖的工程优化调控,涉及水文、水动力、水生态、优化控制等诸多方面,是一个跨学科的复杂问题。针对该科学问题具有的复杂性与层次性特点,笔者结合过往机理研究与工程实践,简要介绍所建水利水电工程对重要水生生物的影响与调控系统研究框架(图1),即在充分认知变化环境影响下(包括水电工程)资源与生境演变趋势基础上,有机结合原型观测、理论分析、模型开发、系统集成等手段,厘清重要水生生物栖息繁殖的生态水文学机制,进而综合运用适宜度模型、多目标决策、生境重建等技术,提出既能满足水电工程常规需求,又能营造出有利于重要水生生物繁殖需求的生态水文条件。

3.2 重大水利水电工程生态调控实践

针对大型水利水电工程影响下长江中华鲟及四大家鱼资源衰减的实际问题,国内学者进行了长期研究与实践工作。通过开展水利水电工程对重要水生生物栖息地环境胁迫的机理研究,证实了鱼类自然繁殖对流量、流速、水深、水温、含沙量、溶解气体饱和度等有一定需求和偏好。河流栖息地复杂多变的现场环境,对监测技术的准确性与可靠性有着较高要求,通过与物联网等信息技术的结合,可实现监测信息及鱼类行为信息(如自然繁殖资源量、繁殖群体、产卵场水文及环境要素)的高频采集和信息传输。

四大家鱼作为适应长江中下游江湖复合生态系统的代表性物种,其资源动态是表征水生态系统健康状况的重要指标。家鱼产卵需要产卵场水位上涨的刺激,人工创造适合繁殖所需水文、水力学条件的洪峰过程,将会对四大家鱼保护与资源恢复产生良好的效果。三峡工程运行调度作为长江径流调节的关键工程,直接影响着大坝下游家鱼栖息和繁殖。三峡水库自2003年首次蓄水,坝前水位达到135 m;2006年第二次蓄水,坝前水位达到156 m;2010年9月库区水位成功达到175 m正常蓄水位。按三峡水库的调度运行方式,在

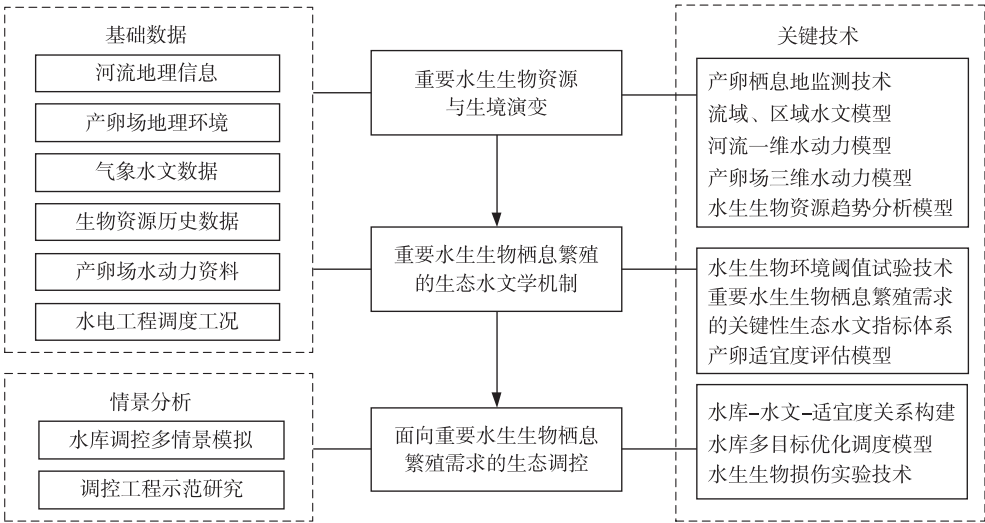


图 1 水利水电工程对重要水生生物的影响与调控系统研究框架

Fig. 1 Framework for studying effects of water conservancy and hydropower projects on major aquatic species and regulation

每年的四大家鱼繁殖产卵期,库区水位基本维持在防洪限制水位 145 m。此期间的水库运行条件具有较佳的调度空间,在保证防洪安全的基础上,根据四大家鱼自然繁殖的生物学特性,可通过优化调度在数天内逐步加大下泄流量,形成“人造洪峰”。

为缓解上游重大水利水电工程对其鱼类生境的不利影响,三峡水库近期连续多年开展了生态调度试验。在 2011 年首次开展了促进四大家鱼自然繁殖的三峡水库生态调度试验,对宜昌至宜都江段家鱼繁殖产生了明显促进作用。此次优化调度试验自 2011 年 6 月 16 日起,下泄流量保持约 2000 m³/s 流量的日增幅,形成持续 4 d 的涨水过程,在“人造洪峰”作用下宜都江段出现了家鱼产卵过程,观测产卵径流量约为 0.25 亿粒。随后连续几年的生态调度试验表明,在水温不低于 18 ℃(适宜范围 21~24 ℃)前提下,合理控制起涨流量(10 000~20 000 m³/s)、涨水持续时间(3 d 及以上)、日涨水幅度(2 000 m³/s 左右)等关键要素,能够在一定程度上促进四大家鱼自然繁殖(表 2)。实施生态调度时应尤其注重水温条件,在 2013 年的生态调度过程中,由于宜都河段的水温偏低,在调度试验期间未观测到明显产卵情况,而其他调度试验期间的水温均达到了适宜温度,调度效果相对明显。

表 2 促进四大家鱼自然繁殖的生态调度试验(2011—2014 年)

Table 2 Ecological regulation tests for natural reproduction of four major Chinese carp (2011–2014)					
调度试验时间 (年-月)	试验期涨水 持续时间/d	日涨水幅度 (宜昌断面)/ (m ³ ·s ⁻¹)	试验期内鱼卵数量/亿粒		
			宜都断面	沙市断面	
2011-06	4	1 307	0.250		
2012-05	4	2 425			
2012-06	4	1 600	0.110	4.060	
2013-05	8	1 170		0.580	
2014-06	3	1 550	0.470	0.538	

4 结 语

在水电开发等高强度人类活动影响下,我国各大流域水生态环境安全存在风险。开展面向重要水生生物栖息繁殖的水利水电工程生态调控是国际水资源与水生态学科的热点问题,也是国家生态文明建设的重大需求。该问题需要开展多学科交叉研究,通过揭示水电工程运行方式、流量、流速、水温、水质等要素对重要水生生物栖息及繁殖的影响机制,建立面向重要水生生物产卵栖息地的生境评价体系、产卵场适合度模型,进而形成满足重要水生生物栖息繁殖需求的水库优化调控方法。近年来成功实施了促进四大家鱼自然繁殖的三峡水库生态调度试验,但我国各大流域水电开发密集,水电工程群对部分珍稀特有鱼类会产生累积影响,实施流域梯级联合生态调度是未来水利水电工程管理的必然需求,也是巨大挑战。

参考文献:

- [1] 刘建康, 曹文宣. 长江流域的鱼类资源及其保护对策[J]. 长江流域资源与环境, 1992, 1(1): 17-23. (LIU Jiankang, CAO Wenxuan. Fish resources of the Yangtze River Basin and the tactics for their conservation[J]. Resources and Environment in the Yangtze Valley, 1992, 1(1): 17-23. (in Chinese))
- [2] TAO J P, GONG Y T, TAN X C, et al. Spatiotemporal patterns of the fish assemblages downstream of the Gezhouba Dam on the Yangtze River [J]. Science China Life Sciences, 2012, 55(7): 626-636.
- [3] 戴会超, 张培培, 董坤, 等. 面向四大家鱼繁殖需求的水库生态调控模拟研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(8): 130-133. (DAI Huichao, ZHANG Peipei, DONG Kun, et al. Study on simulation of reservoir eco-regulation for reproduction demand of four major Chinese carps [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(8): 130-133. (in Chinese))
- [4] 易雨君, 王兆印. 大坝对长江流域洄游鱼类的影响[J]. 水利水电技术, 2009, 40(1): 29-33. (YI Yujun, WANG Zhaoyin. Impact from dam construction on migration fishes in Yangtze River Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(1): 29-33. (in Chinese))
- [5] 毛劲乔, 李智, 戴会超, 等. 水库调度影响下中华鲟产卵场的水动力特征[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(5): 399-403. (MAO Jingqiao, LI Zhi, DAI Huichao, et al. Short-term hydrodynamic features of Chinese sturgeon spawning ground under reservoir regulation conditions [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(5): 399-403. (in Chinese))
- [6] 戴会超, 庞永祥. 三峡工程与长江中下游生态环境[J]. 水力发电学报, 2005, 24(4): 26-30. (DAI Huichao, PANG Yongxiang. Study on relationship between TGP and the eco-environment of the middle & lower Yangtze [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(4): 26-30. (in Chinese))
- [7] 廖文根, 李翀, 冯顺新, 等. 筑坝河流的生态效应与调度补偿[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [8] CLAY C H. Design of fishways and other fish facilities [M]. London: CRC Press, 1995.
- [9] 陈进, 李清清. 三峡水库试验性运行期生态调度效果评价[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(4): 1-6. (CHEN Jin, LI Qingqing. Assessment of eco-operation effect of Three Gorges Reservoir during trial run period [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(4): 1-6. (in Chinese))
- [10] 王煜, 戴会超, 王冰伟, 等. 优化中华鲟产卵生境的水库生态调度研究[J]. 水利学报, 2013, 44(3): 319-326. (WANG Yu, DAI Huichao, WANG Bingwei, et al. Study of the eco-scheduling for optimization Chinese Sturgeon spawning habitats [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(3): 319-326. (in Chinese))
- [11] 常剑波, 曹文宣. 通江湖泊的渔业意义及其资源管理对策[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(2): 153-157. (CHANG Jianbo, CAO Wenxuan. Fishery significance of the river-communicating lakes and strategies for the management of fish resources [J]. Resources and Environment in the Yangtze Valley, 1999, 8(2): 153-157. (in Chinese))
- [12] 段辛斌, 陈大庆, 李志华, 等. 三峡水库蓄水后长江中游产漂流性卵鱼类产卵场现状[J]. 中国水产科学, 2008, 15(4): 523-532. (DUAN Xinbin, CHEN Daqing, LI Zhihua, et al. Current status of spawning grounds of fishes with pelagic eggs in the middle reaches of the Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15(4): 523-532. (in Chinese))
- [13] 柏海霞, 彭期冬, 李翀, 等. 长江四大家鱼产卵场地形及其自然繁殖水动力条件研究综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(3): 249-257. (BAI Haixia, PENG Qidong, LI Chong, et al. A summary of topographical characteristics of the four major Chinese carps' spawning grounds and hydrodynamic conditions for natural propagation in the Yangtze River [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(3): 249-257. (in Chinese))
- [14] 彭期冬, 廖文根, 李翀, 等. 三峡工程蓄水以来对长江中游四大家鱼自然繁殖影响研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(S2): 228-232. (PENG Qidong, LIAO Wengen, LI Chong, et al. Impacts of four major Chinese carps' natural reproduction in the middle reaches of Changjiang River by Three Gorges Project since the impoundment [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(S2): 228-232. (in Chinese))
- [15] 李翀, 彭静, 廖文根. 长江中游四大家鱼发江生态水文因子分析及生态水文目标确定[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(3): 170-176. (LI Chong, PENG Jing, LIAO Wengen. Study on the eco-hydrological factors and flow regime requirement on spawning of four major Chinese carps in the middle reaches of Yangtze River [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006, 4(3): 170-176. (in Chinese))
- [16] 王煜. 中华鲟繁殖需求的生态水力学机制及其生态调度问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2012.
- [17] 杜浩, 危起伟, 张辉, 等. 三峡蓄水以来葛洲坝下中华鲟产卵场河床质特征变化[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 3124-3131. (DU Hao, WEI Qiwei, ZHANG Hui, et al. Changes of bottom substrate characteristics in spawning ground of Chinese sturgeon downstream the Gezhouba Dam from impounding of Three Gorge Reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 3124-3131. (in Chinese))