

梯级水电开发中生态保护分析与生态水头理念及确定原则

王沛芳^{1,2},王超^{1,2},侯俊^{1,2},钱进^{1,2},饶磊³,刘佳佳^{1,2},王洵^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 河海大学环境学院,江苏 南京 210098; 3. 河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098)

摘要:在分析水电开发对生态环境影响及原因的基础上,归纳了近年来水电站建设运行中生态保护措施的研究进展,包括过鱼设施的建设、鱼类增殖放流站的构建、大坝下游河道断面生态流量的确定和梯级水电站水库生态调度,并阐释了这些措施在河流梯级水电开发生态保护中的不足,提出了河流梯级水电开发水头与生态水头协同确定的理念,界定了基于河流自然生境和原生生态及物种保护的生态水头的概念、内涵与确定原则,给出了生态水头规划的综合优化方法。

关键词:梯级水电站;生态环境影响;生态保护措施;生态水头

中图分类号:TV752;X24 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)05-0001-01

Ecological protection analysis of cascade hydropower development and concept and principle for definition of ecological water head//WANG Peifang^{1,2}, WANG Chao^{1,2}, HOU Jun^{1,2}, QIAN Jin^{1,2}, RAO Lei³, LIU Jiajia^{1,2}, WANG Xun^{1,2}(1. *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract:Based on an analysis of impacts of hydropower development on the ecological environment, research progress in ecological protection measures during hydropower station construction and operation is summarized, including construction of fish passage facilities, establishment of fish proliferation and release stations, methods for determination of ecological flow downstream of dams, and ecological operation of cascade reservoirs, and the disadvantages of the ecological protection measures in cascade hydropower development are illustrated. Accordingly, the ideas of cooperative determination of the water head in river cascade hydropower development and the ecological water head are discussed. Furthermore, the concept, implications, and principle for definition of the ecological water head are presented based on natural river habitats, natural ecosystems, and species protection, and a comprehensive optimization method is proposed for ecological water head planning.

Key words: cascade hydropower station; ecological environmental impact; ecological protection measure; ecological water head

水能是清洁的可再生能源,依据清洁能源开发利用优先的原则,我国水电能源在今后的 10~15 年仍然具有较大的开发潜力。然而,水电开发中大坝工程建设在发挥兴利发电、防洪、供水、航运等功能的同时,改变了河流的自然状态,引起生物栖息生境的显著改变,进而导致物种濒危和灭绝^[1],产生严重的生态环境效应,限制了水电能源开发的进程。基于此,本文在分析当前梯级水电开发中大坝建设带来的生态环境影响问题及保护技术的基础上,针

对存在的生物生境保护需求,提出发电水头与生态水头协同确定的理念,阐释生态水头的定义、基本内涵及确定的原则和方法,为可持续开发我国水电能源及降低水电工程建设对生态环境的影响提供理论依据和支撑。

1 问题的提出

近年来关于水电开发中大坝建设对生态环境影响的研究备受关注,其影响特点及产生原因通常归

纳为以下几个方面:①水电开发中大坝建设阻断河道水流,引起水文条件变化,造成下游河流泥沙通量显著改变^[2],导致下游河道冲淤变化、床底形态改变及河道侵蚀^[3-4],并可能进一步导致溃坝或者地震的发生^[5];②大坝阻隔造成水流阻断,影响洄游鱼类产卵繁殖,造成典型鱼类数量减少和物种濒危灭绝,逐渐改变了鱼类区系组成^[6];③大坝建设后下游水文、水动力、河道形态和断面的变化,引起生物生境的不断改变,逐渐引起河流原有底栖生物、水生植物及附着生物物种的选择性变化,导致生物群落种群变化和结构特征改变^[7-9]。可见,大坝通过各种介质和因素直接或者间接地影响河流的环境和生态系统,是水电开发必须重视和面对的问题。

梯级水电站在我国西南地区河流中广泛存在,特别是在金沙江、雅砻江、大渡河等河流上规划建设梯级水电站众多。梯级水电站通过对入库径流的反复调节,连续改变河流天然径流的时空分配过程,使河道的自然洪枯过程减弱,水温过程均化^[10],进而导致生物栖息地减少,影响鱼类产卵、孵化和迁徙,造成鱼类种群减少,生物多样性降低^[11]。调查发现,金沙江下游规划建设的乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝水电站在下游河段形成了人工调控的水位、流量过程,改变了河流自然水文特点,显著威胁着河流水生生态系统的安全。近年来面向生物多样性维持和原生生态保护的梯级水电开发生态保护措施逐渐受到重视并不断得到完善,但对流域梯级水电的满水头开发,这些生态保护措施仍然难以避免对河流水生生态系统产生不利影响,因此需要从水电梯级开发规划这一战略层面开展研究,科学合理地处理好开发和保护的关系。

2 水电开发中的生态保护措施与效果分析

2.1 大坝过鱼设施的建设

鱼道是保持河流纵向连通性的重要工程设施,对缓解大坝阻断影响、帮助恢复鱼类和水生生物物种在河流中洄游具有重要意义。鱼道建筑物运行的成功与否是水利水电工程环境影响评价中生态环境保护的重要评价指标。20 世纪 60 年代初期美国、加拿大以及部分西欧国家开始建设鱼道建筑物,到 20 世纪晚期,鱼道数量在北美有近 400 座,日本有 1 400 余座^[12]。国内在 2000 年重新启动了鱼道等过鱼设施的建设,在水利水电工程环境影响评价时强调必须规划鱼道等过鱼建筑物。陈凯麒等^[13]归纳了当前国内外常用鱼道的类型和特征,认为近自然的鱼道对于鱼类种类数量、鱼类游泳能力及其他水生生物洄游更具有优势;而其他技术型鱼道,包括常

用的竖缝式、池式、Denil 式等鱼道均针对不同类型鱼类特征设计,对微生物和其他水生生物没有上溯洄游效果。此后,许多学者对鱼道设计的参数进行了研究和修正,其中,毛熹等^[14]借助模型试验对鱼道中的技术参数进行了优化,设计的三级跌坎凹槽调整了水流平稳度,增强了过鱼能力;陈静等^[15]采用竖缝式池室结构形式设计了 116 m 坝高的鱼道。这些研究为我国中小河流闸坝阻断条件下鱼类洄游设施建设起到了一定的支撑作用。

鱼道的过鱼效果一直以来是研究的重点,特别是近年来 PIT (passive integrated transponder) 声学标记技术开始应用于过鱼的监测后相关研究更加广泛。研究发现瑞典 Eman 河的 2 条仿自然鱼道对 10 种鱼类的总过鱼效率可达 74%^[16],加拿大 Indian Creek 河流低水头水坝鱼道 3 种鱼类中通过率最高的黑斑风鱼过鱼效率为 38.4%^[17]。国内鱼道工程中较为典型的广西长洲水利枢纽鱼道,最大落差 16.0 m,全长 1443.3 m,鱼道宽 5.0 m,是我国当前最大的鱼道工程。谭细畅等^[18] 2011—2014 年通过堵截法在鱼道内采样 11 个批次,共采集鱼类标本 6 244 尾,体现出一定的鱼道过鱼能力;但该鱼道设计过鱼目标原为中华鲟、鲟、七丝鲚、日本鳗鲡等,鱼道监测发现仅日本鳗鲡为优势种类,花鳗鲡偶见,其他种类尚未出现。总体上,我国鱼道设施应用时间较短,科学实验和实际应用效果观测数据少,工程设计技术还不成熟,运行效果尚不理想。特别是 200 m 以上高坝中建设的鱼道、坝下诱鱼机、坝体升鱼机、空中索道送鱼机等过鱼设施,因为尚不完全明晰鱼类的生活史及生态行为特性,很难达到理想的实施效果。由于河流中鱼类体型差别较大、游泳能力各异且生活习性不同,对鱼道流速要求差别也较大,当需保护的并非单一鱼类时,单一过鱼设施很难满足多种鱼类的洄游要求;特别是梯级水电站联合调度时,各水电站上游急流生境丧失,仅通过鱼道运送能否解决鱼类上溯洄游和种群多样性维持还值得深入探讨;此外,当前鱼类下坝主要是通过溢洪道或者水轮机,对鱼类生命和健康带来很大影响,如何保证鱼类的安全下坝尚未有科学合理的方法。综上可知,现有的过鱼设施在河流闸坝阻断的中低水头落差工程及单级水电开发中会有一定效果,但对多级河流大坝阻断的梯级水电开发,整个河流失去了自然河流的生境条件,原生鱼类完全失去了适宜的繁衍空间和栖息场所,导致逐渐濒危或者灭绝,用于单个坝体的过鱼设施作用并不明显。

2.2 鱼类增殖放流站的构建

鱼类增殖放流站是针对水电工程开发对区域生

态环境造成的影响而采取鱼类资源补偿性措施,主要任务和目的是通过对开发河段野生亲体的捕捞、驯养、人工繁殖、种苗培育及放流,并进行苗种的标记和建立遗传档案,实施增殖放流^[19]。其关键技术包括确定增殖放流规模、进行亲鱼收集捕捞、实施亲鱼驯养繁殖培育、人工孵化、种苗培育放流、放流效果监测及引水和排水水量设计等。

我国最早针对水电工程鱼类资源补偿性的鱼类增殖放流站是葛洲坝工程管理局在 20 世纪 80 年代建设的^[20],用于补偿因葛洲坝建设阻断长江中华鲟洄游通道而导致种群数量减少的中华鲟人工繁殖培育增殖放流。经过调研发现,我国当前运行、建设、设计的鱼类增殖放流站已有数十座,主要分布在长江上游的金沙江、大渡河、雅砻江及澜沧江等河流上。例如,雅砻江锦屏梯级水电站锦屏一级、二级水电站及下游的官地水电站规划设计了 1 座增殖放流站^[21],该放流站 2011 年 11 月 29 日首次放流长丝裂腹鱼、细鳞裂腹鱼、短须裂腹鱼、四川裂腹鱼和长薄鳅等 5 种鱼类共计 10 万尾鱼苗^[22]。然而,当前在鱼类增殖放流站构建的关键技术方面仍存在一些不足,包括:①亲鱼放流量的确定通常以水电工程建设阶段环境影响评价成果为依据,未考虑工程建成后水流条件和水文特征的较大变化,导致适应激流的亲鱼丧失生存环境而无法成活;②使用单一的亲鱼培育池,不适合不同种类亲鱼的驯养,因为原本在山溪性河流中适宜流水生境的鱼类以及珍稀鱼类,需要不同的流水驯养环境或者微水流环境,当前常用的单一培育池有待改进;③放流站及放流地选址要科学,类似锦屏梯级 3 个水电站合并修建 1 座放流站,其放流地点如果不考虑河流上中下游生境差异、鱼类种群区别、同一种类的密度差别等因素,也不利于鱼类资源的保护。

综合分析鱼类增殖放流实践发现,对于单级或保留一定自然河流的水电大坝阻断工程来说,鱼类放流后会按照自身的习性,寻找适宜的生态环境,并逐渐适应新的自然环境,能在一定程度上生存和繁衍。但对于过度密集的梯级水电开发的大坝阻断工程来说,鱼类增殖放流效果并不明显:鱼类放流后,由于坝下和坝上均为水库静水水域,没有适合于激流型鱼类适宜的河流生态环境,这些鱼类长期生存的可能性不大,其产卵繁殖也会因缺乏生境条件而难以实现。因此,这种条件下的鱼类增殖放流对生物多样性维持与物种基因保护没有实质意义。要解决这一核心问题,关键是在河流梯级水电开发时保留一段能为各种鱼类营造适宜生境条件的河段,才能取得鱼类增殖放流的生态效果。

2.3 大坝下游河道断面生态流量的确定

为保留一定的河道流量以维持河流中动植物的正常生存,Tennant^[23]对美国西部地区 11 条河流流量与生物生存、生境维持、河流景观等方面的相关关系进行研究后,依据河流自然年平均流量的百分数确定了 8 个不同生态保护标准,奠定了河流生态流量的研究基础。实际上,河流生态需水量的确定非常复杂,相关因素涉及河流水文学、水力学、生态学、生物学、地理学等诸多学科。因此,基于水力学基础的湿周法、R2-Cross 法、PHABSIM 法,以及基于生物栖息地保护的栖息地法、BBM 法,还有综合分析法、模型模拟法等相继提出^[24]。然而,水文学依据天然流量百分比确定的生态流量不适用于山溪性河流,因为山溪性河流一般流量较小,依据一般用水期时河流流量不低于多年平均流量的 10% 控制的生态流量很难满足生物生存需求;水力学法一般与河道特征紧密相关,其地域性较强,普适性低;栖息地法则需要大量的现场观测,不仅复杂耗时而且河道局限性较强。基于此,关于河流生态流量的研究方法也在不断完善。邵东国等^[25]在罗坝河中应用了水域面积法计算了河道生态流量,获得了水文法与栖息地法相结合的生态流量值。同时,针对具体生物物种及生物栖息地保护的生态流量确定方法也在不断完善^[26-28]。

当前,对于河流大坝阻断工程来说,通常采用向下游排泄水量来确保下游河道断面生态流量,维持河流中动植物的正常生存和繁衍。如我国已建成的糯家渡大坝工程,通过加大电站放水,确保下游控制断面生态流量大于 40 m³/s 以上。然而,对于河流连续梯级水电开发来说,如果上级和下级水库的库头与库尾相接,下级水库的生态水量是可以满足的,但激流、缓流等水动力条件缺失,不能满足动植物及鱼类等物种的多样性要求,对物种多样性保护作用的认识还有待深入。

2.4 梯级水电站水库生态调度

通过优化水库调度可以实现水电站发电出力最佳并同时满足河流生态系统对流量的需求,减少水库调节对生态系统的负面影响,国内外学者在水电开发生态调度方法、模型和决策系统等方面进行了大量的研究。Bednarek 等^[29]研究了田纳西河流中大坝调度运行对生态系统的修复效应及维持下游河段生态流量的要求;梅亚东等^[30-31]探讨了考虑生态流量的水库优化调度模型和水库生态友好型优化调度方法,认为当前水库生态调度的目标和限制因子应包括生态环境保护及河流地形、地貌等因素。在调度方法方面,李捷等^[32]提出了采用逐月频率计算

生态径流的方法;王学敏等^[33]设计了精英选择和混沌迁移机制,对三峡水库优化调度模型进行了研究和求解,得到了多个符合生态效益评价标准的生态调度方案;杨光等^[34]利用改进动态规划法对水库进行柔性决策,生态调度的准确性和对综合目标实现的指导意义不断提高。

水电站水库的生态调度可以解决大坝下游断面的最小生态需水量并人造河流水动力过程,以满足不同鱼类或水生生物的生境需求。在敏感河段,鱼类不仅需要足够的水量,而且需要特定的水动力条件,如急流、缓流、深潭、浅滩等,并且一些鱼类需要在洪水中产卵、繁殖,因此水电站运行调度时,应按照国家保护鱼类生长和繁殖习性,人造洪峰和急流,为其提供适宜的水动力条件。但是,在河流梯级水电站开发中,如果上级和下级水库的库头与库尾相接,坝下失去造就水动力过程的河道空间,其优化调度方案也很难达到预期的生态效果。

3 生态水头的概念、内涵及确定原则

尽管国内外在水电工程生态环境影响方面进行了大量的研究,但梯级水电的满水头开发必将给河流生态环境带来不可避免的影响。为了在未来水电清洁能源开发的同时更为科学合理地保护流域、区域及河流水生态环境,维持保护生物多样性,本文提出河流梯级水电开发水头与生态水头协同确定的理念,以下阐述其基本内涵与确定原则。

3.1 生态水头的概念和基本内涵

水头是表征液体恒定元流的单位位能、单位压能、单位动能总和的物理量^[35]。在自然河流中,各断面总水头沿流动方向逐渐减少,势能水头转化为动能和消耗在河流湿周,水头呈现出一条沿程下降的曲线。水头是河道水面线计算中一个重要的水力学参数,自然河流水面线和水库回水曲线的计算在河流兴建水电工程或进行航道整治规划时非常重要,特别对于当今河流中水电站的梯级开发,水库回水水头直接影响着上游水电站泄水发电出力及下游水电站蓄水发电能力,因此在水电开发中水头规划非常重要。当前的水电工程开发中,水头规划考虑的因素重点集中在梯级水电站水轮机的稳定性和发电出力(以最大为目标)^[36],或者部分考虑区域防洪安全的要求^[37],导致整条河流全部水头均由梯级水电站调节运行转变为电能,出现了水库库头与库尾相接的“水库串”,河流自然形成的流量过程和水头平缓下降的自然河段完全消失,呈现以逐级大坝控制的人工阶梯水面,使得河流中自然生存的各类动植物和微生物丧失了天然生境,物种发生变异或多

样性降低。

为了保护河流的自然生境,维护河流水生生物的多样性,本文提出“生态水头”的概念。在高强度开发特别是梯级水电站建设的河流规划中,建议设立“生态水头”这一水力学指标,即在梯级水电开发中,在上游水电站泄流尾水与下游水电站发电蓄水的水库回水之间,保留一段具有天然水动力过程的河段,形成相应的自然河流调节的水头,实现对该河段自然生境的保护,并为下游水库相关鱼类上溯洄游提供目的地,这段河道的水头是专门为生态保护所预留的,因此称之为“生态水头”。在预留生态水头的河段,其河流生境保持未开发利用的河流天然特征,水流流速、流态、挟沙能力等均保持原有特点,维持了河道急流、缓流、环流等多样性生境条件和河段的冲刷淤积平衡,可为底栖动物栖息繁殖、微生物附着生长和鱼类自由生长繁殖活动等保留自然生存空间,保护河流生态系统的完整性。当然,生态水头的预留会占用梯级水电站开发水头,降低水能资源开发的经济效益,这是由河流梯级开发的“社会、经济、生态”综合效益决定的。

3.2 生态水头的确定原则

生态水头是在充分开发河流水能资源的同时,有效保护河流的自然流态和自然生境而规划设置的。本文基于河流自然生态系统保护原理和生态水文学、生态水利学、环境生态学的理论基础,结合多年来水利工程生态环境影响的研究实践,提出“水能开发有度、生态保护统筹、多目标优化”等生态水头规划原则,具体包括:

a. 河流可利用水头资源量需求的平衡保障原则。我国电能的需求量大,而当前我国水能资源的开发程度仅在 34% 左右,远低于发达国家的开发水平,面对水电能源开发的较大期望值和显著的经济效益,做到有度开发较为困难。但同时也必须防止“绝对生态论”的思想。当前的关键是在河流水能开发规划中要重视可利用水头资源量的综合平衡问题。

b. 自然资源需要的生境空间统筹保护的原则。生态水头规划设置的目的是为了在保障河流水电有效开发的同时,留有一定的河段,保持原有的自然径流特征,保留河道的自然断面、河床湿周形态、深潭浅滩形貌、流量流速流态、生物生长环境、动物栖息空间等,以尽可能地维持河流原生自然生境,保护生物的多样性和敏感物种。

c. 水电站大坝建设技术难度及自然条件综合考虑的原则。一般水电站大坝均建设在峡谷型河流中,特别是我国的西南部地区的河流落差大,两岸峡谷陡峭,适合水电站大坝的建设。但在这样的峡谷

河道中建设大坝,其技术难度和施工难度都很大,加上河床基底条件的复杂性,因此,在这样的河流中建设梯级水电站时,设置生态水头需考虑大坝建设技术难度、施工难度等条件,综合各种因素确定生态水头的设定区段和设定方法。

d. 河流资源储备适度预留的原则。由于能源的紧缺,近年来我国水能资源开发的程度不断提高,部分河流中水电站层叠密布,水电站下游河道自然水头丧失,甚至上游水电站泄水水头受下游水电站蓄水水头阻滞,不仅影响上游水电站发电效率,也使得水流完全受上下游水电站发电蓄水和放水控制,河流自然径流消失,造成河流生态环境突变。河流资源的有效保护,除了通过规划设置生态水头河段外,还需考虑预留一定的储备资源,对水头资源的利用应该有所保留,以备特殊情况下的开发利用。

e. 河流原生生态物种、敏感物种保留的原则。河流中原生生态物种和敏感物种,是每条河流系统中最独特和最基本的生态组成,也是重要的生物资源,在生态水头规划时需要重点考虑河流中原生生态物种和敏感物种的生存河段、生存条件与生境需要,保留好河段的自然空间。

3.3 生态水头的确定方法

生态水头是基于河流水生生物生境保护目的而规划设定的水头,其确定的方法与河流生境特征、水文特征、河流上下游构筑物分布等密切相关。当前,关于河流水电站上下游水头衔接的水力学计算方法已经非常成熟,而在生态流量确定方法方面,也有很多的科研成果。由于生态水头的确定方法不仅涉及自然河流常规水头计算方法,还包括水电开发建设等人类活动干扰下维持河流生态流量的计算方法,以及在流域河流生态系统中综合考虑河道生态流量、原生生境保护、敏感物种保留、水电站发电需求和效益、沿岸居民饮水、农田灌溉等用水需要及航运、防洪等目标的优化方法。因此,生态水头确定的方法,应该是在以上各种方法的基础上,针对河流的具体生境特征和保护生物特点,综合各类保护目标的权重,选择基于生态流量计算、各行业用水需求计算及特种生物物种保护自然水头的确定方法,最终建立综合决策的动态规划方法和调度模型,以科学确定河流的生态水头数值、区段位置和长度等指标。综合国内外研究状况和笔者课题组多年的相关研究和实地调查认为:河流自然总水头中,生态水头的比例应该在 20% ~ 30%,梯级水电开发水头的比例应该在 70% ~ 80%,才能有效保留河流的原生生物生存空间。

4 结 语

梯级水电开发的大坝建成后,河流上下游流量、流速、水位等水力要素和泥沙、营养物、水温等理化指标均受到电站蓄水和放水的人工干扰和控制,导致自然生境多样性丧失,敏感物种和原生生态物种变异、减少或灭绝。尽管国内外学者和工程单位进行了深入研究,提出了系列生态保护、补偿和修复措施,但对于过度密集的梯级水电站大坝及其发电蓄水和放水的人工调控,河流生态环境问题仍然十分突出。“生态水头”理念的提出,为河流梯级开发规划提供了新思路,要保留和保护好河流生态水头,实现梯级开发水头与生态保护水头协同兼顾,取得经济社会与生态环境综合效益,在提高我国水电能源开发率的同时,可持续保护河流生态环境和物种资源。

参考文献:

- [1] CHENG F, LI W, CASTELLO L, et al. Potential effects of dam cascade on fish: lessons from the Yangtze River[J]. Reviews in Fish Biology & Fisheries, 2015, 25(3): 569-585.
- [2] YAN Q, BI Y, DENG Y, et al. Impacts of the Three Gorges Dam on microbial structure and potential function[J]. Scientific Reports, 2015(5): 1-9.
- [3] 汪恕诚. 论大坝与生态[J]. 水力发电, 2004, 30(4): 1-7. (WANG Shucheng. On dams and ecology[J]. Water Power, 2004, 30(4): 1-7. (in Chinese))
- [4] KONDOLF G M. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels[J]. Environmental Management, 1997, 21: 533-551.
- [5] 厉占财. 水利工程对生态环境的影响综述[J]. 黑龙江科技信息, 2008(31): 84. (LI Zhancal. Summary of the influence of water conservancy project on ecological environment[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2008(31): 84. (in Chinese))
- [6] 李蓉, 郑垂勇, 马骏, 等. 水利工程建设对生态环境的影响综述[J]. 水利经济, 2009, 27(2): 12-16. (LI Rong, ZHENG Chuiyong, MA Jun, et al. Summary of influence of hydraulic engineering construction on ecological environment[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2009, 27(2): 12-16. (in Chinese))
- [7] COPEMAN V A. The impact of micro-hydropower on the aquatic environment[J]. Water and Environment Journal, 1997, 11(6): 431-436.
- [8] KUBECKA J, MATENA J, HARTVICH P. Adverse ecological effects of small hydropower stations in the Czech Republic: bypass plants[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1997, 13(2): 101-113.
- [9] OUYANG W, HAO F H, ZHAO C, et al. Vegetatio

- responses to 30 years hydropower cascade exploitation in upper stream of Yellow River [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15 (7):1928-1941.
- [10] 黄薇,陈进,王波. 梯级开发对河流径流过程和水温过程均化作用的研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19 (3): 335-339. (HUANG Wei, CHEN Jin, WANG Bo. Study on average effect of cascade hydropower development on flow and water temperature process [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(3):335-339. (in Chinese))
- [11] 李陈. 长江上游梯级水电开发对鱼类生物多样性影响的初探[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
- [12] 曹庆磊,杨文俊,周良景. 国内外过鱼设施研究综述[J]. *长江科学院院报*, 2010, 27 (5): 39-43. (CAO Qinglei, YANG Wenjun, ZHOU Liangjing. Formation mechanism analysis of collapse occurring in underground powerhouse [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, 27(5): 39-43. (in Chinese))
- [13] 陈凯麒,常仲农,曹晓红,等. 我国鱼道的建设现状与展望[J]. *水利学报*, 2012, 42 (2): 182-189. (CHEN Kailin, CHANG Zhongnong, CAO Xiaohong, et al. Recent progress in studies of overland flow resistance [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 42 (2): 182-189. (in Chinese))
- [14] 毛熹,李嘉,易文敏,等. 鱼道结构优化研究[J]. *四川大学学报 (工程科学版)*, 2011, 43 (增刊 1): 54-59. (MAO Xi, LI Jia, YI Wenmin, et al. Study on optimizing the structure of the fish way [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43 (Sup1): 54-59. (in Chinese))
- [15] 陈静,郎建,何涛,等. 高坝鱼道工程设计案例分析[J]. *水生态学杂志*, 2013, 34 (4): 19-25. (CHEN Jing, LANG Jian, HE Tao, et al. Analysis on engineering design of fishway in high dam [J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, 34(4): 19-25. (in Chinese))
- [16] CALLES E O, GREENBERG L A. The use of two nature-like fishways by some fish species in the Swedish River Eman [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2007, 16 (2): 183-190.
- [17] STEFFENSEN S M, THIEM J D, STAMPLECOSKIE K M. Biological effectiveness of an inexpensive nature-like fishway for passage of warmwater fish in a small Ontario stream [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2013, 22 (3): 374-383.
- [18] 谭细畅,黄鹤,陶江平,等. 长洲水利枢纽鱼道过鱼种群结构[J]. *应用生态学报*, 2015, 26 (5): 1548-1552. (TAN Xichang, HUANG He, TAO Jiangping, et al. Fish population structure in the fishway of Changzhou Hydrojunction [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (5): 1548-1552. (in Chinese))
- [19] 施家月,廖琦琛,梁因铨,等. 功果桥和苗尾水电站鱼类增殖放流站设计中的关键技术研究[J]. *水生态学杂志*, 2009, 2 (6): 51-55. (SHI Jiayue, LIAO Qichen, LIANG Yinquan, et al. Key technique of fish-hatchery designing in the Gongguoqiao and Miaowei Hydropower Station [J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, 2 (6): 51-55. (in Chinese))
- [20] 单婵,薛联芳,周祥林. 水电工程鱼类增殖放流站设计浅析[J]. *水力发电*, 2015, 41 (12): 10-12. (SHAN Jie, XUE Lianfang, ZHOU Xianglin. Analysis on design of fish restocking station of hydropower projects [J]. *Water Power*, 2015, 41 (12): 10-12. (in Chinese))
- [21] 高峰,张湘隆. 雅砻江锦屏梯级水电站鱼类增殖放流站设计[J]. *水利水电技术*, 2011, 42 (2): 21-24. (GAO Feng, ZHANG Xianglong. Design of fish-breeding and releasing station of Jinping Cascade Hydropower Station on Yalong River [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011, 42 (2): 21-24. (in Chinese))
- [22] 陈云华. 雅砻江锦屏大河湾水生生态环境保护研究[J]. *水力发电*, 2012, 38 (10): 5-7. (CHEN Yunhua. Study on aquatic environment protection of Jinping Bend of Yalong River [J]. *Water Power*, 2012, 38 (10): 5-7. (in Chinese))
- [23] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. *Fisheries*, 1976, 4 (4): 6-10.
- [24] 张辉. 河流生态需水理论研究进展[J]. *天津科技*, 2014, 41 (8): 86-88. (ZHANG Hui. Review of theoretical researches on river ecological water demand and relevant progress [J]. *Tianjin Science & Technology*, 2014, 41 (8): 86-88. (in Chinese))
- [25] 邵东国,穆贵玲,易淑珍,等. 基于水域面积法的山区河流水电站下游生态流量定值研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35 (9): 2982-2988. (SHAO Dongguo, MU Guiling, YI Shuzhen, et al. Calculation of ecological flow setting for hydropower station of mountainous river based on water surface area method [J]. *Acta Science Circumstantiae*, 2015, 35 (9): 2982-2988. (in Chinese))
- [26] CLARK J S, RIZZON D M, WATZIN M C, et al. Spatial distribution and geomorphic condition of fish habitat in streams: an analysis using hydraulic modeling and geostatistics [J]. *River Research and Applications*, 2008, 24 (7): 885-899.
- [27] 李永,卢红伟,李克锋,等. 考虑齐口裂腹鱼产卵需求的山区河流生态基流过程确定[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24 (5): 809-815. (LI Yong, LU Hongwei, LI Kefeng, et al. Determination of ecological base flow process of mountainous rivers by taking into account the Prenant's schizothoracin's spawning requirement [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24 (5): 809-815. (in Chinese))

- [28] 杨志峰,于世伟,陈贺,等. 基于栖息地突变分析的春汛期生态需水阈值模型[J]. 水科学进展,2011,21(4): 567-574. (YANG Zhifeng, YU Shiwei, CHEN He, et al. Model for defining environmental flow thresholds of spring flood period using abrupt habitat change analysis[J]. Advances in Water Science, 2011, 21(4): 567-574. (in Chinese))
- [29] BEDNAREK A T, HART D D. Modifying dam operations to restore rivers: ecological responses to Tennessee River dam mitigation[J]. Ecological Application, 2005, 15(3): 997-1008.
- [30] 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. (MEI Yadong, YANG Na, ZHAI Lini. Optimal ecological sound operation of the cascade reservoirs in the Lower Yalong River[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(5):721-725. (in Chinese))
- [31] 陈端,陈求稳,陈进. 考虑生态流量的水库优化调度模型研究进展[J]. 水力发电学报,2011,30(5):248-256. (CHEN Duan, CHEN Qiuwen, CHEN Jin. Review on optimization models of reservoir operation with consideration ecological flow[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(5):248-256. (in Chinese))
- [32] 李捷,夏自强,马广慧,等. 河流生态径流计算的逐月频率计算法[J]. 生态学报,2007,27(7):2916-2921. (LI Jie, XIA Ziqiang, MA Guanghui, et al. A new monthly frequency computation method for instream ecological flow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7):2916-2921. (in Chinese))
- [33] 王学敏,周建中,欧阳硕,等. 三峡梯级生态友好型多目标发电优化调度模型及其求解算法[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 155-163. (WANG Xuemin, ZHOU Jianzhong, OUYANG Shuo. TGC eco-friendly generation multi-objective optimal dispatch model and its solution algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2):155-163. (in Chinese))
- [34] 杨光,郭生练,李立平. 考虑生态流量的梯级水库柔性决策研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(9): 114-116. (YANG Guang, GUO Shenglian, LI Liping. Flexible decision-making for cascade reservoir operation considering ecological flow[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(9): 114-116. (in Chinese))
- [35] 李家星,赵振兴. 水力学:上册[M]. 南京:河海大学出版社,2001.
- [36] 黄奋杰,黄骏. 关于水轮发电机组额定水头选择的探讨[J]. 云南水力发电, 2004, 20(1): 72-75. (HUANG Fenjie, HUANG Jun. Discussion on the selection of rated head of hydroelectric generating set[J]. Yunnan Water Power, 2004, 20(1):72-75. (in Chinese))
- [37] 肖学友. 水库调度在低水头电厂中的经济效益分析[J]. 水电站机电技术, 2013, 36(1): 65-68. (XIAO Xueyou. Economic benefit analysis of reservoir operation in low head power plant[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2013, 36(1): 65-68. (in Chinese))

(收稿日期:2016-02-22 编辑:熊水斌)

《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号:28-244, CN 32-1439/TV, ISSN 1006-7647, 双月刊, A4 开本)

《水利水电科技进展》由河海大学主办,是中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊,全国中文核心期刊,中国科技核心期刊, RCCSE 核心期刊。曾先后被评为中国高校优秀科技期刊,全国水利系统优秀期刊,华东地区优秀期刊,江苏省优秀期刊。主要刊登水科学、水工程、水资源、水环境、水管理方面的科技论文,主要栏目有水问题论坛、研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态等,适合水科学、水工程、水资源、水环境领域的科研、工程、管理人员以及大专院校师生阅读。

《水利水电科技进展》由邮局发行,邮发代号:28-244,2017年每期定价15元,全年6期共计90元。可在全国各地邮局订阅,也可直接向编辑部订阅。

编辑部地址:南京市西康路1号 河海大学《水利水电科技进展》编辑部

邮政编码:210098 电话/传真:025-83786335

网址:www.hehaiqikan.cn E-mail:jz@hhu.edu.cn

微信公众号:水利水电科技进展或 slsdlkjz

