

长江流域上游梯级电站生态调度研究现状

吉小盼,谭平,刘园,傅嘉,王天野

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,四川成都 611130)

摘要:综述了长江流域上游梯级电站生态调度研究现状,认为现有研究在研究广度、生态调度目标确定、生态调度模型研究和生态调度试验研究有效互动、气候变化对生态调度的影响、生态调度管理等方面存在不足,指出今后应在长江流域上游进一步扩大生态调度研究范围,深化水电开发相关生态问题形成机理研究,加强生态调度模型量化、智能化及仿真技术研究,建立生态调度模型研究-生态调度原型试验互馈模式,从相关生态问题形成机理、生态调度模型与工程实际之间的联系以及气候变化对生态调度的影响等方面出发,形成更为具体科学且具有针对性的生态调度方案,更好地推动长江流域上游常规生态调度机制建设及运行。

关键词:长江流域;梯级电站;生态调度;综述

中图分类号:TV737;X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)05-0008-07

Research status of ecological operation of cascade hydropower stations in the upper Yangtze River Basin// JI Xiaopan, TAN Ping, LIU Yuan, FU Jia, WANG Tianye (Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 611130, China)

Abstract: The research status of ecological operation of cascade power stations in the upper reaches of the Yangtze River was reviewed. It is considered that the existing research is insufficient in the aspects of research breadth, determination of ecological operation goals, effective interaction between models and experimental research, the impact of climate change, and ecological operation management. It is necessary to further expand the research scope of ecological operation in the upper reaches of the Yangtze River Basin, deepen the research on the formation mechanism of ecological problems related to hydropower development, strengthen the research on the quantitative, intelligent and simulation technology of ecological operation models, and establish a mutual feedback mode between model test and prototype test. According to the formation mechanism of relevant ecological problems, the relationship between ecological operation model and engineering practice, and the impact of climate change, a more specific, scientific and targeted ecological operation scheme can be formed to better promote the construction and operation of conventional ecological operation mechanisms in the upper Yangtze River Basin.

Key words: Yangtze River Basin; cascade hydropower stations; ecological operation; review

长江是我国第一大河,水能资源丰富,主要分布在上游地区。据不完全统计,长江干流水能理论蕴藏量为2.68亿kW,技术可开发量为1.97亿kW,占全国水能可开发量的53.4%;宜昌以上的上游地区蕴藏量约占流域的80%,可开发的水能资源则占全流域的87%,是“西电东送”的主要产电区。目前,长江上游干流水电梯级开发处于活跃期,陆续建成投产了多个梯级电站,其中不乏调节能力较强的控制性工程,它们主要通过蓄洪补枯的方式调节利用河流水资源,发挥着防洪、发电等社会服务功能。

长江上游梯级水电开发在促进我国社会经济快速发展的同时,也产生了一些生态环境问题,引起社会各界广泛关注,同时也成为学术界的研究焦点。

如何减轻或消除梯级电站对河流生态的负面影响是一个复杂的系统问题,已有研究和实践表明,通过优化电站运行调度方式,将其影响河段的生态需求纳入其中,与电站的防洪、发电等社会服务功能统筹协调,是减轻电站运行对河流生态影响的重要措施之一,这种兼顾河流生态需求的调度方式被称为“生态调度”。

我国从20世纪80年代开始开展生态调度的相关研究,早期的研究主要针对工程下游河段生态需水及水库水温分层对河流生态的负面影响等。进入21世纪,研究主题开始逐渐转向水库生态调度和水体营养物质削减之间的相互影响^[1],针对黄河“中水河槽萎缩、过流量降低”等问题开展的“调水调沙”

生态调度研究^[2],围绕水生生态保护的三峡水库生态调度研究^[3],水库生态调度模型和水库群生态调度模型的构建及多目标优化计算等方面,生态调度相关研究的广度和深度得以不断拓展。与此同时,有关水电建设环境保护的管理要求也不断提高,国家相继出台多项规范性文件强调生态调度,而国家生态环境主管部门在批复水电规划环评或项目环评时也开始明确提出生态调度研究及实施要求。

当前,随着我国生态文明建设持续推进,长江经济带高质量发展要求不断明晰,长江流域经济发展进入新的历史时期。为了加强长江流域生态环境保护和修复,促进资源合理高效利用,保障生态安全,实现人与自然和谐共生、中华民族永续发展,我国首次针对某一流域专门制定了法律——《中华人民共和国长江保护法》。在长江流域水资源保护方面,该法明确提出了“长江干流、重要支流和重要湖泊上游的水利水电、航运枢纽等工程应当将生态用水调度纳入日常运行调度规程,建立常规生态调度机制,保证河湖生态流量”和“对鱼类等水生生物洄游产生阻隔的涉水工程应当结合实际采取建设过鱼设施、河湖连通、生态调度、灌江纳苗、基因保存、增殖放流、人工繁育等多种措施,充分满足水生生物的生态需求”的要求。至此,“生态调度”一词首次在我国以法律的形式登上历史舞台。这一规定意味着今后在长江流域建立和实行生态调度机制有了法律保障,同时也对开展生态调度研究和制定生态调度方案提出了更高要求。

长江上游干流及其重要支流上的水利水电、航运枢纽等工程均具有重要的社会服务功能,但其开发任务当中大多不包括生态保护,因此,兼顾生态需求的工程运行调度方式势必会影响其自身社会服务功能的发挥。生态调度作为保障长江流域生态用水的重要手段,需要在保护长江生态和发挥工程社会服务功能之间寻找最佳契合点,并且,生态调度也具有一定地域性和流域性,需要结合区域或流域实际情况开展研究和组织实施,这其中涉及一系列复杂的科学、技术和管理问题。为切实贯彻《长江保护法》有关要求,积极推进长江流域生态调度机制建设及运行,本文通过分析和总结长江流域上游梯级电站生态调度研究现状,探讨了现有研究存在的不足及今后需要加强的研究重点,以期为后续更好开展长江流域上游生态调度工作提供有益的建议。

1 研究现状

目前,有关长江流域上游的生态调度研究主要集中在干流河段,其中多数是针对三峡工程开展的,

其他少数研究主要针对金沙江下游梯级电站开展,除此之外,长江上游干流的其他梯级电站均尚未开展生态调度研究。长江上游重要支流的生态调度研究较少,比较典型的有雅砻江下游梯级电站联合运行生态调度研究。

1.1 三峡工程生态调度

三峡工程生态调度研究始于 21 世纪初,至今仍是研究者们重点关注的热点问题。近 20 年,相关研究和实践主要着眼于改善坝下江段鱼类产卵条件和防控库区支流水华等方面。

改善三峡工程坝下江段鱼类产卵条件的生态调度研究大致可以分为生态调度模型构建及优化计算、生态调度试验两大类。在生态调度模型构建及优化计算方面,卢有麟等^[4]通过分析发电效益与生态效益之间的制约竞争关系,以发电量最大和生态缺水量最小为目标建立了梯级电站多目标生态优化调度模型,并提出一种改进多目标差分进化算法对模型进行高效求解,又以三峡梯级枢纽(指三峡工程和葛洲坝工程,下同)为例,采用 Tennant 法求得宜昌站生态需水量,进而开展了三峡梯级枢纽多目标生态优化调度的实例应用。王学敏等^[5]将基于逐月频率计算法、长江流域相关生态要素确定的宜昌站适宜生态流量作为生态效益评价标准,构建了三峡梯级枢纽生态友好型多目标发电优化调度模型,提出一种包含外部种群的双种群多目标差分进化算法,并通过“精英选择”和“混沌迁移”机制实现 2 个种群间的信息交换,提高了算法的多目标优化性能,使模型能够在较短计算时间内获得多个符合生态效益评价标准、分布均匀、收敛性较好的非劣调度方案,从而为制定合理的调度方案提供了科学的决策依据。王煜等^[6-7]针对三峡-葛洲坝运行对中华鲟产卵繁殖的影响提出优化中华鲟产卵期(10—11 月)产卵生境的水库调度模型,经优化计算得出的生态调度方案可在葛洲坝水电站仅损失 0.15% 发电量的同时使坝下中华鲟产卵场适合度增加 39%,在此基础上,进一步研究认为梯级水库联合生态调度可在满足三峡水库常规调度目标的基础上同时满足中华鲟产卵所需的生态流量,配合葛洲坝电厂优化调度运行方式,可有效增加坝下中华鲟产卵场水动力环境产卵适合度,补偿梯级水库运行对中华鲟产卵生境造成的不利影响。在生态调度试验方面,纽新强等^[8]最早于 2006 年对三峡工程生态调度若干问题进行了初步探索,在总结三峡工程前期有关研究的基础上,探讨了利用三峡水库汛前腾空调节库容的调度方式改善长江中游四大家鱼产卵条件的可能,首次提出有利于四大家鱼产卵的调度设想。

2008年,水利部中国科学院水工程生态研究所针对四大家鱼自然繁殖需求的三峡工程生态调度方案前期研究的基础上,进一步研究提出促进四大家鱼自然繁殖的三峡工程生态调度方案建议:在5月中旬至6月下旬宜昌水温达到18℃以上时,适时开展生态调度试验,三峡水库通过加大下泄流量,使葛洲坝下游河道产生明显的涨水过程,将宜昌站流量1.1万m³/s作为起始调度流量,在6d内增加8000m³/s,最终达到1.9万m³/s,调度时保持水位持续上涨,水位平均日涨率不低于0.4m。2011年,三峡工程首次启动促进长江中游四大家鱼产卵的生态调度试验;据不完全统计,2011—2018年三峡工程已先后开展生态调度试验12次,2017年5月首次启动溪洛渡、向家坝、三峡梯级水库联合生态调度试验。历次生态调度试验期间,有关单位同步开展了鱼类早期资源监测,并对生态调度试验效果进行评估。相关研究^[9-12]表明,三峡水库在2013—2017年的5—7月的涨水过程能够在一定程度上满足监利江段四大家鱼繁殖所需的水文需求,当监利江段涨水过程持续时间为4d及以上,流量增长率为每天1600~2833m³/s时,家鱼卵苗发生量较大,可占年总规模的45%以上;三峡水库在2011—2018年期间连续实施生态调度对近年来长江中游四大家鱼的种群恢复起到了一定作用。

此外,还有研究^[12]认为,三峡水库在2018—2019年5—7月实施的生态调度对监利江段鳊、银鲴等鱼类的自然繁殖有明显促进作用。徐薇等^[11]采用系统重构的方法分析了四大家鱼自然繁殖的关键生态水文要素,提出了宜昌江段涨水过程的生态调度优化条件,包括初始流量达到1.4万m³/s,持续涨水4d以上,水位日涨幅平均大于0.5m,流量日增幅平均大于2000m³/s,与前一次洪峰的间隔时间在5d以上。

除了针对三峡工程生态调度模型构建及优化计算和生态调度试验研究以外,还有一些学者单纯开展了生态调度目标研究,其主要表现形式为生态水文目标。例如:郭文献等^[13]采用生态水文学法中的逐月频率法量化了三峡水库下泄环境流调度目标,并根据Shelford耐受性定律和IHA-RVA法基本原理量化分析了中华鲟产卵期和四大家鱼产卵期的生态水文目标;李翀等^[14]基于其1900—2004年的日径流资料,采用IHA-RVA法分析每年5—6月涨水过程数、总涨水日数、平均每次涨水过程日数等3项生态水文指标,得出将长江中游每年5—6月的总涨水日维持在(22.1±7.2)d范围内作为生态水文目标的结论,并认为可从生态流量方面补偿三峡工程

对长江中游四大家鱼鱼苗发江量的影响。有学者研究了长江中游中华鲟产卵场的水流条件、水文状况及其与鱼类繁殖活动的关系,为进一步开展针对中华鲟产卵繁殖的生态调度提供了重要参考^[15-17]。

三峡工程生态调度研究涉及的另一个主要方面为防控库区支流水华,刘德富等^[18-19]在深入研究三峡水库干支流水动力特征及其环境效应、支流库湾水华机理的基础上,从水华形成机理出发,结合“临界层理论”和“中度扰动理论”,提出了防控支流水华的三峡水库“潮汐式”生态调度方法,即通过水库短时间的水位抬升和下降实现对生境的适度扰动、增大干支流间的水体交换、破坏库湾水体分层状态、增大支流泥沙含量等机制来抑制藻类水华,包括春季“潮汐式”调度方法、夏季“潮汐式”调度方法和秋季“提前分期蓄水”调度方法。该调度方法提出后,三峡水库自2009年开始每年在预计水华发生期开展试验性调度,以尝试抑制支流水华的发生。根据试验性调度期间的监测结果,水华爆发程度明显低于2007年、2008年等未开展试验性调度年份的同时期水华。刘晋高等^[20]以水位、水位变频、水位变幅为水华预测模型的输入量,水体中的叶绿素浓度为预测输出量,采用BP神经网络构建了水华预测模型;将水华预测模型嵌入到水库调度模型中,以水体中的叶绿素为约束构建了防控支流水华的生态调度模型,并以离散型动态规划法对调度模型进行求解,得出三峡水库开展生态调度在保证整体经济效益不亏损的情况下能有效控制支流极端水华暴发的结果。

1.2 金沙江下游梯级电站生态调度

金沙江下游河段是长江流域水能资源最富集的河段,自上而下依次规划有乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝4座巨型梯级电站。溪洛渡和向家坝水电站是规划开发的第一期工程,装机容量分别为1260万kW和600万kW,已相继于2013年、2012年投产发电。有关金沙江下游梯级电站的生态调度研究最早开始于2012年,由中国水利水电建设工程咨询有限公司联合中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司组织开展。该研究通过大量基础调查和研究,确定了金沙江下游生态保护目标,采用包括生态水力学法、生境分析法、生态水文分析法在内的多种方法研究量化了生态保护目标需求,结合彼时的开发情况及外部环境条件,研究形成金沙江下游一期工程(溪洛渡和向家坝)生态调度与监测方案,并提出了溪洛渡、向家坝水电站联合运行生态调度试验方案。在此基础上,中国长江三峡集团有限公司于2017年5月首次启动溪洛渡、向家坝联合生态调度试验,并同步开展了监测和评估;其中,溪洛渡生态调度方案

主要为通过机组叠梁门进行分层取水,从而调节机组出水口水温,为电站下游河道鱼类产卵创造合适的温度条件,向家坝生态调度方案主要为通过调节向家坝电站出力,人为制造出2次出库流量持续增加的水文过程,提供鱼类产卵所需的流量过程和水温条件。任玉峰等^[21]研究了此次生态调度试验对下游鱼类产卵、梯级电站调峰、水库防洪等的影响,认为向家坝下游河段鱼类产卵受到生态调度刺激作用,在调度期间出现了鱼类产卵高峰(宜宾断面监测鱼卵总量约0.1亿粒,江津断面监测鱼卵总量约1亿粒);生态调度试验对梯级电站运行出力及调峰存在影响,尤其对向家坝调峰影响较大;鉴于生态调度试验期间正值汛前水库水位消落的关键期,调度试验对库区水位消落速度的限制不利于汛期水库防洪调度。

在生态调度模型构建与优化计算方面,龙凡等^[22]利用年内布展法和改进FDC法计算了最小生态流量和适宜生态流量,设置了4种约束方案(工程规划约束,年内布展法计算的最小生态流量约束,改进FDC法计算的最小生态流量约束,改进FDC法计算的适宜生态流量约束),并对建立的溪洛渡-向家坝生态调度模型进行求解,结果表明,当设置最小生态流量约束时,各典型年的发电量基本都能达到最大值,当设置适宜生态流量约束时,各典型年的发电量都有所减少。蔡卓森等^[23]采用RVA法量化下游河道适宜生态流量,建立了以调度期内发电量最大和下游河道适宜生态流量改变度最小为目标的梯级水库群多目标优化调度模型,并以NSGA算法对模型进行求解,以典型丰水年、平水年、枯水年溪洛渡的入库流量进行优化调度计算,得出了适宜生态流量改变度与发电损耗的关系。李力等^[24]基于逐月最小生态径流算法确定河流最小生态流量,以河流生态需水满足度最大和梯级发电量最大为目标建立多目标优化调度模型,并采用改进NSGA-II算法对模型进行求解,研究认为乌东德、白鹤滩投产运行将会导致蓄水期下游河流生态缺水情况更加严峻,通过优化梯级水库运行方式、适当提前蓄水可提高下游河流生态需水满足度,缓解梯级发电效益与生态效益之间的竞争关系。

1.3 雅砻江下游梯级电站生态调度

雅砻江是长江上游重要的一级支流,水能资源丰富,是中国13大水电基地之一。据不完全统计,雅砻江流域干支流水能资源理论蕴藏量3840万kW,技术可开发量3466万kW;其中,干流的水能理论蕴藏量达到2182万kW,占全水系的56.8%,主要处于中下游江段。

有关雅砻江下游的生态调度研究不多,最早开

始于2009年,梅亚东等^[25]针对雅砻江下游梯级电站开展过生态友好型优化调度研究,该研究考虑锦屏二级减水河段和二滩水电站坝下河段生态流量方案,建立了以梯级电站发电量最大为目标的长期优化调度模型,定义并计算了生态需水电能损失指标,比较分析了考虑锦屏二级减水河段和二滩水电站生态流量方案对发电量的影响,认为二滩水电站下泄生态流量方案若维持天然径流模式,将限制水库调节能力和减水梯级电站发电效益。

2012年随着雅砻江干流下游水电开发快速推进,为落实“在做好生态保护的前提下积极发展水电”的科学发展理念,推动雅砻江流域尽快实施梯级电站生态调度,中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司开展了雅砻江流域梯级电站联合运行生态调度研究。该研究通过大量基础调查和研究,重点考虑水生生态及景观的需求,从满足水量、水文过程、水温的角度,确定了相关电站的下泄生态流量方案和叠梁门运行方案;构建了一种研究发电和生态综合目标优化调度的流程方法,并应用该流程方法建立了雅砻江下游包括锦屏一级和二滩水电站两库五级的梯级联合优化调度数学模型,采用逐步优化算法(POA算法)对模型进行求解,对多个考虑生态需水和水温需求的多目标调度方案进行优化计算和综合效益比选分析,最终推荐了雅砻江下游梯级电站联合运行综合效益最大的生态调度方案。

2 现有研究有关问题探讨

长期以来,有关单位及广大研究人员针对长江流域上游梯级电站生态调度开展了大量研究,在通过改善梯级电站运行调度方式减轻或消除水电开发对河流生态环境的影响方面进行了卓有成效的探索,为今后更好开展长江流域生态调度研究积累了大量理论基础和重要技术参考,但从贯彻落实长江保护法有关要求,建立常规生态调度机制的角度来看,现有研究尚显不足,针对长江干流及其重要支流的梯级电站生态调度还有很大的研究空间。

a. 确定生态调度目标是生态调度研究的关键问题之一,这其中包括生态保护目标的选择及对其需求的确定,生态调度目标确定的合理与否,直接关系到生态调度方案的合理性及生态调度作用发挥。结合长江上游生态调度研究现状来看,现有研究在确定生态调度目标方面存在单一化和偏经验化的问题。例如,多数研究仅选择个别的代表鱼类作为生态保护目标,并且在确定其需求时仅考虑了产卵期的需求,这对于长江流域丰富的生物多样性及鱼类资源来说,必然有一定局限性,今后的研究在这点上

有待进一步加强和完善。再如,多数研究在确定鱼类繁殖期所需的水文过程方面采用偏经验类的水文学法,对生态因素的考虑有所欠缺,缺乏对相关生态需求机理的认识,这在某种程度上会影响正确研究结论的得出,从而最终影响生态调度作用的有效发挥,在这点上,有关三峡水库防控支流水华生态调度方法的研究是一个值得借鉴的范例^[18-19]。另一方面,除三峡工程外,现有研究均只重点关注了工程下游河段,而缺少对库区生态环境问题及其调度需求的研究,这也是后续需要重点研究的方面。

b. 生态调度模型研究和生态调度试验研究属于2个可以相得益彰的研究手段,但从目前的研究来看,两者之间缺乏有效的互动,这对最终形成科学合理的多目标协同生态调度方案构成制约。目前的生态调度模型更多侧重于多目标优化计算,而在确定和优化计算边界条件方面与工程实际联系不足,包括对生态调度目标及其他各种约束条件的合理确定,从而影响模型研究成果在工程原型上验证的可能性;而目前的生态调度试验主要采用方案制定—监测实施—效果评价—信息反馈的模式,这种模式在某种特定条件下不失为一种寻求有效生态调度方案的选择,但当生态调度目标与工程的其他调度目标存在明显冲突时却很难被借鉴。因此,建议后续加强行业指导推动各方深入合作,统筹工程运行调度各方面需求,聚焦多目标综合调度存在的矛盾冲突,有针对性的深化生态调度模型研究和生态调度管理制度研究,以促进生态调度模型研究与生态调度试验的有效互动,建立生态调度模型研究—生态调度原型试验互馈模式,形成更加科学合理的多目标协同生态调度方案。此外,生态调度模型研究的终极目标是能构建一套全方位快速支持决策系统,通过与水文预报系统的衔接,可将实时水情条件下若干种生态调度方案运用后的情景准确地展现出来,以便于决策者做出合理决定,为实现这一目标,今后需要在生态调度模型定量化、智能化及仿真技术方面加强研究^[26]。

c. 现有生态调度研究主要集中在三峡工程,对同样位于长江上游干流的乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝等巨型工程及其他工程的研究偏少或者尚无研究;有关重要支流的生态调度研究也偏少,目前仅雅砻江下游开展了梯级电站联合运行生态调度研究,岷江的一级支流大渡河正在开展生态调度研究,岷江干流及其他重要支流(嘉陵江、乌江等)均尚未开展生态调度研究。从长江上游水电格局及开发河段生态环境特点来看,已有研究涉及的水电开发河段范围偏小,关注的梯级电站偏少,未能全部覆盖所

有受工程影响的敏感河段,尚不足以支撑梯级电站生态调度在推动长江大保护方面作出应有贡献。今后需在长江上游干流及其重要支流进一步扩大生态调度研究范围,包括相关控制性工程和外环境敏感的其他梯级,以便为后续实现长江流域上游乃至全流域水库群联合生态调度提供必要支撑。

d. 有关研究显示气候变化对我国淮河及其以南的江河径流影响较大^[27],而江河水情的极端化分布将对梯级电站生态调度带来挑战。陈晓宏等^[28]以澜沧江梯级电站为例研究了气候变化对发电和生态调度的影响,以及发电目标和生态目标间协调关系对气候变化的响应,认为气候变化导致的水文变率增强可加剧发电与生态效益间的冲突,导致保持现有发电效益的同时增大对河道生态的影响。秦鹏程等^[29]预估了气候变化对长江上游径流的影响,结果显示,长江上游径流年内分布的均匀性有所增加,但年际变化明显增大,极端旱涝事件的频率和强度明显增加;金沙江和岷沱江流域年径流量、年际变化和年内分布变化小,对气候变化响应的敏感度较低,而嘉陵江流域、乌江流域和长江上游干流径流增加幅度大,同时极端丰枯出现的频率和程度增加显著,是气候变化响应的敏感区域。对此,为避免基于历史资料的确定性生态调度在指导未来的水库生态调度工作中出现谬误,笔者认为在后续研究中有必要加强气候变化对长江上游梯级电站生态调度的影响研究。

e. 建立常规生态调度机制不可避免会产生利益冲突,尤其对于涉及不同建设单位的梯级电站联合生态调度,其管理问题具有很大的不确定性;目前尚缺少针对生态调度相关管理问题的研究,对科学建立和推动常规生态调度机制不利。对此,笔者认为后续应加强包括生态补偿在内的调度管理制度研究。

3 研究展望

长江流域上游水能资源富集,规划建设梯级电站在促进我国经济社会快速发展的同时,也产生了一些生态环境问题。生态调度作为减轻工程运行对河流生态影响的重要措施之一,受到社会各界高度关注,随着长江保护法的颁布实施,更是将长江流域生态调度提升至新高度。笔者立足长江流域上游河段,通过分析和总结长江流域上游梯级电站生态调度研究现状,探讨了现有研究在研究的广度、水电开发相关生态问题形成机理、生态调度模型与生态调度试验互动、气候变化对梯级电站生态调度的影响等方面存在的不足,从着力推动建立行之有效的长江流域上游常规生态调度机制的角度出发,提出了今后应进一步加强的研究重点,主要包括以下几

个方面:

- a. 在长江上游干流及其重要支流进一步扩大生态调度研究范围,包括相关控制性工程和外环境敏感的其他梯级电站。
- b. 加强水电开发相关生态问题形成机理研究,以确定更加合理的多元化生态调度目标。
- c. 加强生态调度模型量化、智能化及仿真技术方面研究及其与工程实际的联系,建立生态调度模型研究-生态调度原型试验互馈模式,构建生态调度全方位快速支持决策系统。
- d. 开展气候变化对长江流域上游梯级电站生态调度的影响研究。
- e. 从相关生态问题形成机理、生态调度模型与工程实际之间的联系,以及气候变化对于生态调度的影响等方面出发,形成更为具体科学且具有针对性的生态调度方案。
- f. 开展生态调度管理制度研究。

参考文献:

[1] 贾海峰,程声通,丁建华,等. 水库调度和营养物消减关系的探讨[J]. 环境科学,2001,22(4):104-107. (JIA Haifeng, CHENG Shengtong, DING Jianhua, et al. Relationship between eutrophication control and reservoir operation[J]. Environmental Science, 2001, 22(4): 104-107. (in Chinese))

[2] 陈建国,胡春宏,董占地,等. 黄河下游河道平滩流量与造床流量的变化过程研究[J]. 泥沙研究,2006(5):10-16. (CHEN Jianguo, HU Chunhong, DONG Zhandi, et al. Change of bankfull and bed-forming discharges in the Lower Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2006(5): 10-16. (in Chinese))

[3] 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(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(4): 1-6. (in Chinese))

[4] 卢有麟,周建中,王浩,等. 三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型及其求解方法[J]. 水科学进展,2011,22(6):780-788. (LU Youlin, ZHOU Jianzhong, WANG Hao, et al. Multi-objective optimization model for ecological operation in Three Gorges cascade hydropower stations and its algorithms [J]. Advances in Water Science, 2011,22(6):780-788. (in Chinese))

[5] 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(2):154-163. (WANG Xuemin, ZHOU Jianzhong, OUYANG Shuo, et al. TGC eco-friendly generation multi-objective optimal dispatch model and its solution algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013(2):154-

163. (in Chinese))

[6] 王煜,李金峰,翟振男. 优化中华鲟产卵场水动力环境的梯级水库联合调度研究[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):56-63. (WANG Yu, LI Jinfeng, ZHAI Zhennan. Research on joint operation of cascade reservoirs to optimize hydrodynamic environment for Chinese sturgeon spawning ground [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1):56-63. (in Chinese))

[7] 王煜,翟振男,戴凌全. 补偿中华鲟产卵场水动力环境的梯级水库联合生态调度研究[J]. 水利水电技术,2017,48(6):91-97. (WANG Yu, ZHAI Zhennan, DAI Lingquan. Study on joint eco-operation of cascade reservoirs for compensation of hydrodynamic environment of Chinese Sturgeon spawning ground [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(6): 91-97. (in Chinese))

[8] 钮新强,谭培伦. 三峡工程生态调度的若干探讨[J]. 中国水利,2006(14):8-10. (NIU Xinqiang, TAN Peilun. Studies on biological regulation of Three Gorges Project[J]. China Water Resources, 2006(14):8-10. (in Chinese))

[9] 乔晔,廖鸿志,蔡玉鹏,等. 大型水库生态调度实践及展望[J]. 人民长江,2014(15):22-26. (QIAO Ye, LIAO Hongzhi, CAI Yupeng, et al. Practice and prospects of ecological regulation of large reservoirs[J]. Yangtze River, 2014(15):22-26. (in Chinese))

[10] 周雪,王珂,陈大庆,等. 三峡水库生态调度对长江监利江段四大家鱼早期资源的影响[J]. 水产学报,2019,43(8):1781-1789. (ZHOU Xue, WANG Ke, CHEN Daqing, et al. Effects of ecological operation of Three Gorges Reservoir on larval resources of the four major Chinese carps in Jianli section of the Yangtze River [J]. Journal of Fisheries of China, 2019,43(8):1781-1789. (in Chinese))

[11] 徐薇,杨志,陈小娟,等. 三峡水库生态调度试验对四大家鱼产卵的影响分析[J]. 环境科学研究,2020,33(5):1129-1139. (XU Wei, YANG Zhi, CHEN Xiaojuan, et al. Three Gorges Reservoir ecological operation effect on the spawning of the four major Chinese carps[J]. Research of Environmental Sciences, 2020,33(5):1129-1139. (in Chinese))

[12] 孟秋,高雷,汪登强,等. 长江中游监利江段鱼类早期资源及生态调度对鱼类繁殖的影响[J]. 中国水产科学,2020,27(7):824-833. (MENG Qiu, GAO Lei, WANG Dengqiang, et al. The early-stage fish resources and effects of ecological regulation on fish reproduction at the Jianli section of the Yangtze River [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(7): 824-833. (in Chinese))

[13] 郭文献,夏自强,王远坤,等. 三峡水库生态调度目标研究[J]. 水科学进展,2009,20(4):554-559. (GUO Wenxian, XIA Ziqiang, WANG Yuankun, et al. Ecological operation

- goals for Three Gorges Reservoir [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 554-559. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 英晓明, 杨宇, 贾后磊, 等. 中华鲟产卵栖息地与流量关系的数值模拟研究[J]. 人民长江, 2013, 44(13): 84-89. (YING Xiaoming, YANG Yu, JIA Houlei, et al. Numerical simulation research on relation between spawning habitat of Chinese Sturgeon and discharge in Yangtze River[J]. Yangtze River, 2013, 44(13): 84-89. (in Chinese))
- [16] 陶洁, 陈凯麒, 王东胜. 中华鲟产卵场的三维水流特性分析[J]. 水利学报, 2017, 48(10): 1250-1259. (TAO Jie, CHEN Kaiqi, WANG Dongsheng. Analysis of three-dimensional flow characteristics of Chinese Sturgeon spawning ground[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(10): 1250-1259. (in Chinese))
- [17] 杨德国, 危起伟, 陈细华, 等. 葛洲坝下游中华鲟产卵场的水文状况及其与繁殖活动的关系[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 862-869. (YANG Deguo, WEI Qiwei, CHEN Xihua, et al. Hydrology status on the spawning ground of Acipenser sinensis below the Gezhouba Dam and its relation to the spawning run[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(3): 862-869. (in Chinese))
- [18] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 443-454. (LIU Defu, YANG Zhengjian, JI Daobin, et al. A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 443-454. (in Chinese))
- [19] 三峡大学. 一种通过水位调节控制河道型水库支流水华发生的方法: CN201010532571.1[P]. 2011-03-02.
- [20] 刘晋高, 诸葛亦斯, 刘德富, 等. 防控三峡水库支流水华的生态约束型优化调度[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(10): 2379-2386. (LIU Jin'gao, ZHUGE Yisi, LIU Defu, et al. Research on optimal operation at ecological constraint for controlling algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(10): 2379-2386. (in Chinese))
- [21] 任玉峰, 赵良水, 曹辉, 等. 金沙江下游梯级水库生态调度影响研究[J]. 三峡生态环境监测, 2020, 5(1): 8-13. (REN Yufeng, ZHAO Liangshui, CAO Hui, et al. Influence of ecological regulation of cascade reservoirs in the Lower Jinsha River[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2020, 5(1): 8-13. (in Chinese))
- [22] 龙凡, 梅亚东. 金沙江下游溪洛渡-向家坝梯级生态调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(3): 81-84. (LONG Fan, MEI Yadong. A study of ecological operation of Xiluodu-Xiangjiaba Cascade Reservoirs on the Lower Jinsha River[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(3): 81-84. (in Chinese))
- [23] 蔡卓森, 戴凌全, 刘海波, 等. 兼顾下游生态流量的溪洛渡-向家坝梯级水库蓄水期联合优化调度研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(9): 31-38. (CAI Zhuosen, DAI Lingquan, LIU Haibo, et al. Optimizing joint dispatching of Xiluodu-Xiangjiaba Cascade Reservoirs in consideration of appropriate downstream ecological flow in storage period[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(9): 31-38. (in Chinese))
- [24] 李力, 周建中, 戴领, 等. 金沙江下游梯级水库蓄水期多目标生态调度研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(11): 62-66. (LI Li, ZHOU Jianzhong, DAI Ling, et al. Study on multi-objective ecological operation of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinshajiang River during impoundment period[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(11): 62-66. (in Chinese))
- [25] 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 Yalongjiang River[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(5): 721-725. (in Chinese))
- [26] 陈进. 长江流域水资源调控与水库群调度[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 2-8. (CHEN Jin. Regulation of water resources and operation of reservoir group in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 2-8. (in Chinese))
- [27] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 313-323. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, GUAN Xiaoxiang, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 313-323. (in Chinese))
- [28] 陈晓宏, 钟睿达. 气候变化对澜沧江下游梯级电站发电及生态调度的影响[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 754-764. (CHEN Xiaohong, ZHONG Ruida. Hydropower generation and ecological operation under climate change: a case study of the downstream cascade of Lancang River hydropower plants[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 754-764. (in Chinese))
- [29] 秦鹏程, 刘敏, 杜良敏, 等. 气候变化对长江上游径流影响预估[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(4): 405-415. (QIN Pengcheng, LIU Min, DU Liangmin, et al. Climate change impacts on runoff in the upper Yangtze River Basin[J]. Climate Change Research, 2019, 15(4): 405-415. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-07-22 编辑: 刘晓艳)