

三峡工程泥沙问题研究进展与展望*

任实^{1,2**}, 高宇^{1,2}

(1: 中国长江三峡集团有限公司, 武汉 430010)

(2: 高坝大库运行安全湖北省重点实验室, 宜昌 443134)

摘要: 泥沙问题是三峡工程的关键技术问题之一, 关系到三峡工程设计成败和安全高效运行。在三峡工程论证、设计、建设和运行的各个阶段, 针对重大的工程泥沙问题进行了系统和持续的监测与研究, 为三峡工程成功建成与运行提供了重要科技支撑。本文系统阐述了三峡工程泥沙问题的研究历程与解决途径, 对三峡水库蓄水运用以来入库水沙变化、水库淤积、坝下游冲刷、泥沙优化调度等方面取得的研究成果进行了分析总结。研究成果表明三峡工程泥沙问题及其影响基本未超出论证与初步设计的预测, 处于安全可控状态。本文还根据新需求对今后泥沙问题研究提出了建议, 包括梯级水库泥沙联合调度、泥沙变化的生态效益、泥沙监测技术提升等。

关键词: 三峡工程; 泥沙淤积; 优化调度; 坝下游河道冲刷; 江湖关系; 水库长期使用

Research progress and prospects on sediment issues of the Three Gorges Project*

Ren Shi^{1,2**} & Gao Yu^{1,2}

(1: China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, P.R.China)

(2: Hubei Key Laboratory of Operation Safety of High Dam and Large Reservoir, Yichang 443134, P.R.China)

Abstract: Reservoir sedimentation related problem is one of the key technical issues in the Three Gorges Project (TGP). It is related to the success of the TGP design and operation for safety and efficiency. Systematic and continuous monitoring and research have been conducted on major sedimentation related problems during the stages of demonstration, design, construction, and operation, providing significant technological support for successful completion and operation of the TGP. This article systematically elaborated on the research process and solutions to sediment problems in the TGP, and summarized the research achievements in the changes of inflow water and sediment, reservoir sedimentation, downstream scouring, and sediment optimization scheduling. The results showed that reservoir sedimentation and its impact on the TGP have not exceeded the prediction results in stage of demonstration and preliminary design, and reservoir sedimentation related problems were in a safe and controllable state. This article also proposed suggestions for future research on sediment issues based on new demands and requirements, including joint sediment scheduling of cascade reservoirs, ecological benefits of sediment changes, and improvement of sediment monitoring technology.

Keywords: Three Gorges Project; reservoir sedimentation; optimized scheduling; downstream erosion; relationship between rivers and lakes; long term use of reservoir

三峡工程是国之重器, 是治理和开发长江的关键性骨干工程, 具有防洪、发电、航运、水资源利用和生态环境保护等巨大的综合效益。泥沙问题是贯穿三峡工程论证、设计、施工、运行的关键技术问题之一, 直接关系到水库寿命, 影响库区淹没, 库尾段航道、港区的演变, 坝区船闸、电站的正常运用以及枢纽下游的河床演变等。受自然演变、人类活动等影响, 三峡工程泥沙问题具有长期性、系统性、复杂性、偶然性等特点, 需要长期跟踪监测与研究^[1-2]。只有妥善处理好泥沙问题, 才能保证三峡工程长期有效使用, 维持三峡水库功能

* 2024-01-26 收稿; 2024-03-07 收修改稿。

长江水科学研究联合基金项目(U2040218)、中国长江三峡集团员工科研项目(NBYG20220167)和国家重点研发计划项目(2023YFC3209105)联合资助。

** 通信作者; E-mail: ren_sh16i@126.com。

的全面发挥,促进长江流域健康可持续发展。

在三峡工程建设和运行的不同阶段,针对工程水文泥沙的重点问题和区域,进行了广泛、深入、连续的观测与研究,取得了翔实的基础资料和丰富的研究成果,泥沙问题研究资料及成果成为三峡工程勘测、设计、建设和运行管理不可或缺的重要组成部分^[3-5]。三峡工程泥沙问题研究方法包括理论研究、水槽试验、物理模型试验、数值模拟和实测资料分析等^[6]。三峡水库蓄水运用至今已有20年,在“远期和近期相结合、上游和下游兼顾,抓住主要矛盾,突出重点”的原则下,采用原型观测分析、数学模型和物理模型试验相结合,解决了一系列重大而复杂的泥沙问题,系统研究论证了“蓄清排浑”调度方式与长期有效库容保留,推动了水库蓄水进程和调度指标的持续优化^[7-10]。本文系统总结了三峡工程泥沙问题的研究历程与解决途径,重点阐述了三峡水库蓄水运用以来入库水沙变化、水库淤积与有效库容长期保持、坝下游冲淤及影响、泥沙优化调度等方面取得的研究成果以及面临的新情况和新需求,以期对三峡工程安全高效运行提供参考。

1 三峡工程泥沙问题研究历程

在三峡工程论证及设计阶段,泥沙问题直接关系到三峡工程建或不建、建设规模以及水库运用方式,一直受到广泛关注。经过几十年的研究论证,得到“三峡工程可行性研究阶段的泥沙问题,经过研究,已基本清楚,是可以解决的”的结论,确定了正常蓄水位175 m的水库规模,并提出了“蓄清排浑”的运用方式以保证水库的长期使用^[11]。在三峡工程建设阶段,通过对泥沙问题的观测与研究,确定了电站引水口位置和通航建筑物防沙方案、上引航道布置方案,先后实施了三峡水库变动回水区炸礁和葛洲坝下游胭脂坝河段护底加糙等工程^[12-13],有效解决了水库变动回水区和坝下游航道泥沙问题。

三峡工程蓄水运行以来,历经围堰发电期、初期蓄水期、175 m 试验性蓄水期,至2020年11月完成整体竣工验收,转入正常蓄水期运行。由于上游干支流水库群建设运行等人类活动影响与自然气候变化^[14-16],蓄水以来出现了入库水量尤其是蓄水期来水量偏少、入库沙量大幅减少等新情况,与初步设计采用值相比,年来水量偏少10%,来沙量减少70%^[17-18];同时社会各界对三峡工程提出了拓展防洪补偿范围、优化蓄水进程、增加枯水期下游补水量、改善库区淤积分布等新需求。这些都迫切需要突破泥沙问题的制约,提高水库调度灵活性。运行期三峡工程泥沙问题研究重点主要包括:研究变化环境下新入库水沙条件,为研究其他泥沙问题提供边界;研究泥沙淤积与水库长期使用,库区淤积分布对洪水位、航道、港区的影响,坝区泥沙淤积对枢纽建筑物安全运行的影响,实现水库功能的可持续利用;研究枢纽下游河床冲刷对防洪、航运、江湖关系的影响,以及泥沙与生态环境的关系,促进长江流域健康可持续发展;研究优化调度下泥沙冲淤影响,解锁水库优化调度限制条件,提高水库综合效益。

2008年汛后三峡水库进入175 m 蓄水运行,在遵循“保证长江防洪安全,控制水库泥沙淤积、减小生态环境影响”的水库调度运行理念下^[19],围绕入库水沙条件变化^[20-22]、水库淤积与长期有效库容预测^[23-25]、泥沙实时监测与预报技术^[26-29]、泥沙优化调度^[30-32]等方面开展了系列研究工作,推动了汛末提前蓄水、汛期沙峰调度、库尾减淤调度、汛期中小洪水调度等一系列水库优化调度措施的实施^[33-37],为发挥工程综合效益提供了重要技术支撑。

2 三峡水库入库水沙变化

入库水沙条件是研究水库泥沙问题的基础,对科学准确评估水库入库水沙量意义重大。研究重点在于选取合理的入库水沙系列,为数学模型和物理模型模拟预测提供科学合理的边界条件,保证相关研究结论的科学合理性。在三峡工程初步设计阶段,数学模型计算和物理模型试验采用1961—1970系列年的寸滩站和武隆站水沙数据,并考虑特大代表性水沙年资料,年均入库沙量为5.09亿t,年均入库径流量为4202亿m³。

受上游水库蓄水拦沙、水土保持工程实施、河道采砂及气候变化等因素的影响^[38-40],三峡水库蓄水运行以来,入库径流量变化不大,入库沙量明显减少,2003—2012年三峡年均入库泥沙1.91亿t,与初步设计相比,输沙量减少了52%。2012年以来金沙江下游梯级水库陆续蓄水运行后,金沙江来沙减幅超过了99%,2013—2022年三峡年均入库沙量进一步减少至0.79亿t,仅为初步设计的16%(图1)。同时,受暴雨影响,

三峡入库泥沙进一步集中在汛期场次洪水^[41],尤其是寸滩站大于 50000 m³/s 的编号洪水,如 2020 年 8 月三峡水库入库泥沙 1.41 亿 t,占全年来沙的 72%。三峡水库蓄水运用后,入库推移质输沙量也大幅减少^[42-43],2003—2022 年寸滩站实测年平均砾卵石推移质和沙质推移质输沙量分别为 4.03 万 t 和 0.86 万 t,推移质总量较 2002 年前平均值减少了 92%。

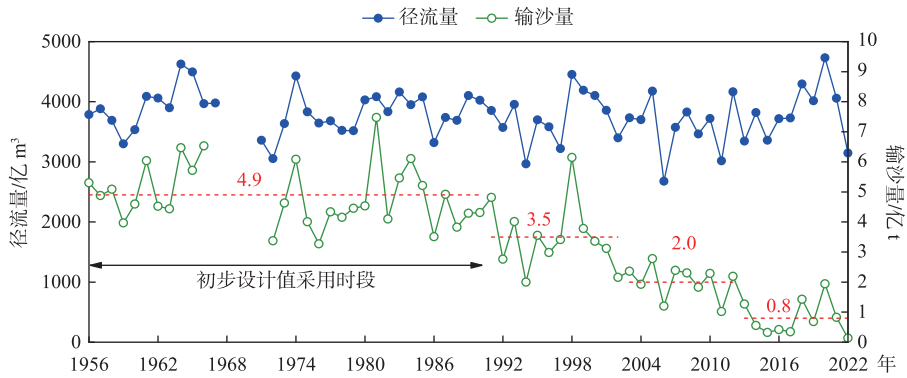


图 1 三峡入库年均径流量与输沙量变化过程

Fig.1 The annual average runoff and sediment load into the Three Gorges Reservoir

随着入库沙量的大幅减少,三峡水库入库泥沙的主要来源组成也发生了较大变化^[44-45],如图 2 所示。2013 年以前,金沙江是三峡水库入库沙量的主要来源区,全年入库泥沙来沙占比在 50.0%~81.1% 之间变化。2013 年以后,在金沙江下游梯级水库的蓄水拦沙作用下,向家坝站输沙量大幅减小,其他支流成为三峡水库入库沙量的主要来源,如 2017 年岷江高场站输沙量占比为 44.1%,2018 年嘉陵江北碛站输沙量占比为 51.9%。三峡水库入库沙量由以前的金沙江来沙为主,转变为以向家坝至朱沱区间的支流和嘉陵江来沙为主。在入库沙量大幅减小及来源组成发生变化的同时,入库泥沙中值粒径变化不大,但粗颗粒泥沙含量有所降低。2003—2022 年寸滩站悬移质泥沙中值粒径为 0.011 mm,与蓄水前的年均值持平,粗颗粒泥沙含量由蓄水前的 10.3% 减少到 5.4%。

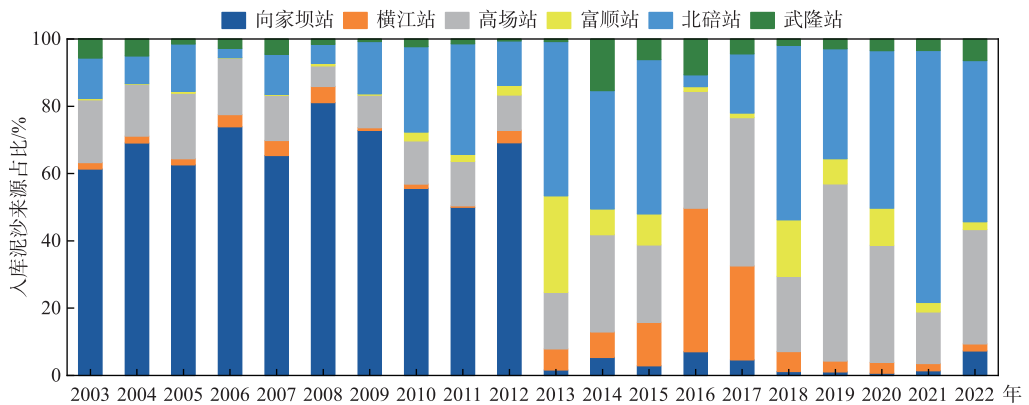


图 2 三峡水库蓄水运行以来入库泥沙来源变化

Fig.2 Changes in source of sediment entering the Three Gorges Reservoir since its operation

今后,随着上游干支流水电站的建设与运用,三峡水库入库沙量将继续维持较低水平^[46]。在三峡水库总体来沙量减少的同时,上游地震、滑坡等地质灾害产沙进入河道的潜在威胁依然存在^[47],一些支流仍有可能出现特大洪水并携带大量泥沙进入水库^[48]。三峡水库未来 30 年年均入库沙量约在 0.5 亿~2.0 亿 t,平均年入库沙量预计约为 1.09 亿 t,未来 30 年水沙系列采用 2013—2022 年实测系列循环^[49],具有较好的代表性。

3 三峡水库泥沙淤积

3.1 泥沙淤积与水库长期使用

三峡水库蓄水运用以来,入库泥沙大幅减少,泥沙淤积较初步设计预计情况显著减轻^[50-51]。输沙量法计算表明,2003—2022年三峡水库入库泥沙26.94亿t,出库泥沙6.35亿t,库区淤积泥沙20.59亿t,近似年均淤积泥沙1.05亿t,仅为论证阶段预测值的32%,水库排沙比为23.6%^[52]。断面法计算表明库区干流段(江津至大坝)累计淤积泥沙17.68亿m³,其中变动回水区(江津至涪陵)河段冲刷0.70亿m³,常年回水区(涪陵至大坝)河段淤积18.38亿m³。库区绝大部分泥沙淤积在水库145m以下的死库容内,淤积在145~175m之间的泥沙为1.5亿m³,占总淤积量的8%,占水库静防洪库容的0.68%,主要集中在丰都至云阳库段。重庆主城区累计冲刷泥沙2067万m³,未出现论证时担忧的库尾河段泥沙累积性淤积的局面,寸滩站汛期水位流量关系没有出现明显变化,水库泥沙淤积未对重庆洪水位产生影响^[53]。

初步设计阶段,年均入库泥沙采用5.09亿t,按照“蓄清排浑”运行方式,三峡水库预计100年左右达到冲淤平衡,平衡时防洪库容保留86%。随着长江上游干支流水库逐步运行,三峡入库水沙发生变化,在考虑上游水库拦沙的基础上,韩其为院士重新评估了三峡水库淤积发展进程,年均入库泥沙采用2.06亿t,按照“蓄清排浑”运行方式,三峡水库预计300年左右达到冲淤平衡,平衡时防洪库容保留率和初步设计相当。年均入库沙量采用金沙江梯级水库运行后的0.8亿t,按照梯级水库联合优化运行调度方式,三峡水库预计380年左右达到冲淤平衡,平衡时防洪库容保留率达到91%。

今后,随着入库沙量继续维持较低水平,水库泥沙淤积预计会进一步减缓,三峡水库采用“蓄清排浑”的运用方式,大部分有效库容可长期保留的目标是可以实现的。同时,根据变化环境下的水库泥沙运动规律^[54-55],研究并实践了三峡水库汛期沙峰过程排沙调度和消落期库尾减淤调度等“蓄清排浑”新模式^[56],进一步提高了水库排沙比,改善了库区淤积分布。

3.2 库区航道泥沙问题

三峡工程运用后,变动回水区航运条件得到明显改善,常年回水区通航条件得到根本改善,航道尺度有较大幅度提升,万吨级船队可到达重庆港,促进了长江航道船舶大型化及标准化,大大提高了长江水路运输效率。库区航道泥沙问题研究主要是根据实测水下地形资料分析重点河段的冲淤现状,制定相应的航道整治措施或管理策略。根据蓄水以来的实测数据,在特定时段,库区局部河段也出现了泥沙淤积碍航的问题^[57],主要表现在:变动回水区上段(江津至重庆河段)存在消落初期枯水河槽卵石集中输移过程对该段航道条件造成不利影响的问题,泥沙沿湿周淤积对影响港口运行^[58];变动回水区中下段(重庆至涪陵河段)尽管淤积发展相对较缓,但主要发生在主航道附近,对航道尺度造成威胁;常年回水区由于水深加大,流速减缓,出现泥沙累积性淤积,部分重点水道在集中消落期内出现主航道出浅碍航现象,航道尺度也受到影响^[52]。针对重庆河段、铜锣峡河段、王家滩河段、青岩子河段等不同滩险段,提出并实施了清障、炸礁、修建航道整治建筑物等具体方案^[59],航道通过能力得到大幅提高。

目前,库区河道泥沙冲淤规律发生了变化,库尾河段走沙时间由汛后转移至次年消落期,局部库段在枯季库水位消落时出现淤积碍航情况,虽然通过管理和疏浚等措施保证了通航条件,未对库区航运造成明显影响,但泥沙淤积发展趋势仍值得关注。

3.3 坝区泥沙淤积问题

三峡水库坝区指庙河至莲沱河段,全长约31km,泥沙问题主要包括坝前河段、永久船闸航道、电站引水区域的泥沙淤积,坝下游近坝河段局部冲刷等。运行期坝区泥沙问题研究主要根据实测数据分析冲淤演变对枢纽运行的影响。2003—2022年,坝前河段累积淤积泥沙1.89万m³,其中110、90m高程以下淤积量分别占该段总淤积量的73.6%、66.5%,坝前河段深泓平均淤厚为38.8m,最大淤厚为67.4m,淤积主要发生在围堰发电期,之后呈逐渐下降趋势。左岸电厂进水口前沿河床平均高程约为80.7m,右岸电厂进水口前沿河床平均高程约为83.9m,低于发电机进水口地板高程(108m);泄洪坝段前河床平均高程约为61.0m,低于泄洪深孔地板高程(108m);地下电站进水口前沿河床平均高程约为104.5m,低于进水口的底板高程(113m);且坝前淤积泥沙颗粒较细,未对发电造成影响^[60](图3)。永久船闸上引航道泥沙淤积较少,下引

航道存在一定的泥沙淤积,经疏浚保持了航道畅通。坝下近坝段河床发生局部冲刷,未危及枢纽建筑物安全。

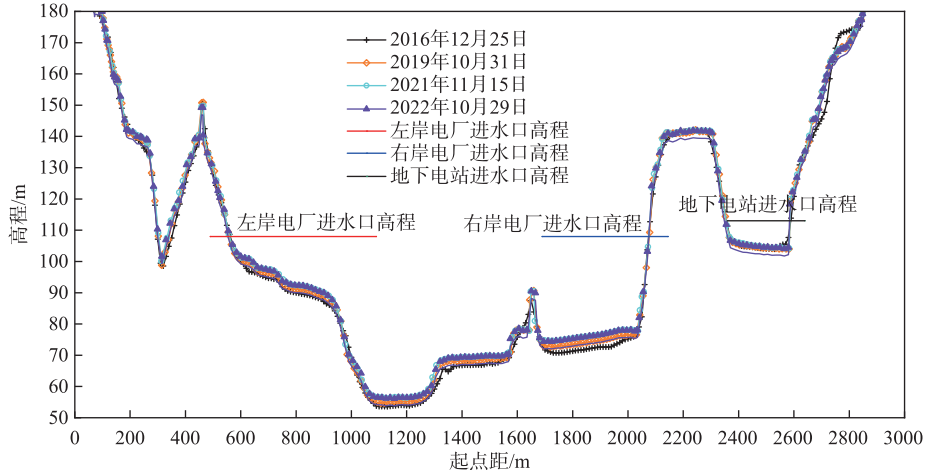


图3 发电机组进水口区域冲淤变化情况

Fig.3 The erosion and sedimentation situation in the inlet area of the generator unit

目前,坝区泥沙淤积、河势情况和引航道的水流条件与论证及初步设计阶段预测结果基本一致。坝前上游船闸和升船机引航道共用一座防淤隔流堤,即“全包”方案的防淤措施是有效的。坝前泥沙淤积未对发电造成影响,地下厂房前泥沙淤积发展较快,今后对其淤积发展趋势应予密切关注。

4 三峡水库坝下游河道冲刷及其影响

4.1 坝下游河道冲淤演变与河势变化

三峡水库蓄水运用以来,长江中下游水沙条件发生了显著变化,下泄泥沙较蓄水前大幅减少。坝下游宜昌站 2003—2022 年平均输沙量仅为 0.321 亿 t,较蓄水前(1950—2002 年)年均值减少了 93%,特别是金沙江下游梯级水库运用后,2013—2022 年宜昌站年均输沙量进一步减少至 0.175 亿 t^[61]。长江中下游干流河势总体稳定,但“清水下泄”导致河道面临长时期、长距离、大幅度冲刷,目前河道冲刷已发展到长江口^[62-64]。2002 年 10 月—2021 年 4 月,宜昌至湖口河段平滩河槽冲刷量为 26.244 亿 m³,年均冲刷量为 1.35 亿 m³,冲刷主要集中在枯水河槽,占平滩河槽冲刷量的 92%。从沿程冲淤分布来看,宜昌至城陵矶段河道冲刷强度最大,占总冲刷量的 55%,城陵矶至汉口、汉口至湖口河段分别占总冲刷量的 19%、26%。近年来城陵矶以下河段河床冲刷强度有所增大,2012 年 10 月—2021 年 4 月城陵矶至汉口河段和汉口至湖口河段的年均冲刷量分别为 4180 万、4560 万 m³,分别远大于 2002—2012 年年均冲刷量(1141 万、2940 万 m³)。

在河床冲淤演变的同时,局部河段河势也发生了一些新的变化,如沙市河段太平口心滩、三八滩和金城洲段等出现短支叉发展,下荆江调关弯道段、熊家洲弯道段主流摆动导致切滩撇弯^[65-66]。随着河势的调整,崩岸塌岸现象时有发生^[67-68],2003—2022 年长江中下游干流河道共发生崩岸 1049 处,累计总崩岸长度约为 758.7 km,近年来随着护岸工程的逐渐实施,崩岸强度、频次逐渐减轻,如图 4 所示。

三峡及长江上中游水库联合调度,对长江中下游枯水期补水作用明显。但受枯水河槽冲刷下切的影响,加之床沙粗化、洲滩植被覆盖、整治工程实施等,坝下游河道阻力有所增加^[69-71]。在枯水流量下,河床阻力增大对于水位抬升效应难以抵消河床下切造成的下降效应,枯水流量下的水位有不同程度的降低^[72],在洪水流量下,河床阻力增大效应与河道主槽冲刷效应接近,使得洪水位并未明显下降^[73]。

4.2 江湖关系

江湖水沙输移规律是江湖水沙交换变化和江湖关系演变的核心。洞庭湖水沙主要来自荆江三口分流和湘江、资水、沅江、澧水湖南四水,经湖区调蓄后由城陵矶注入长江。长江与洞庭湖关系变化直接体现在

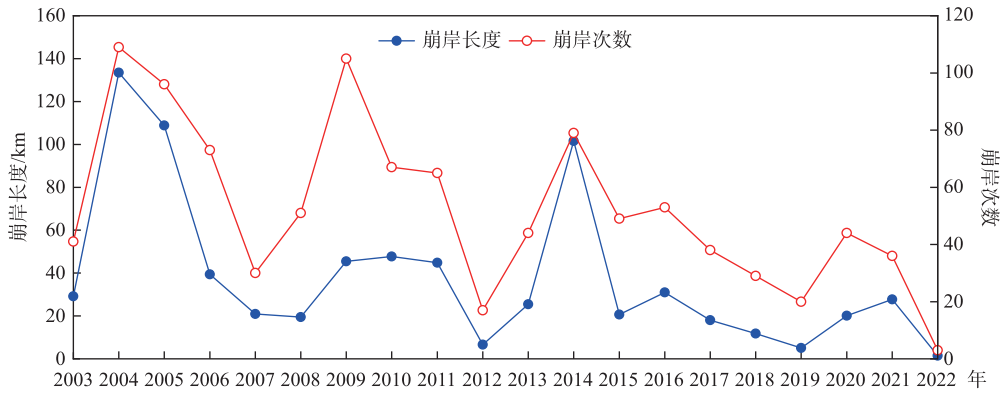


图 4 三峡水库蓄水运用以来长江中下游崩岸长度及次数变化

Fig.4 Changes in length and frequency of bank collapses in the middle and lower reaches of the Yangtze River since the operation of the Three Gorges Reservoir

荆江三口与长江水沙交换量的变化。近五十年来,由于大规模的围湖造田、河道整治以及其他工程措施和自然演变,使得洞庭湖大幅度萎缩、三口洪道大幅淤积,荆江和洞庭湖的关系剧烈调整,水量分配关系发生了重大变化,这是河道自然演变和人类活动影响的结果^[74-76]。

三峡水库蓄水前,受下荆江系统裁弯、葛洲坝水利枢纽兴建以及三口口门段河势调整等因素影响,荆江三口分流分沙量一直处于衰减之中,如图 5 所示。三峡水库蓄水后的 2003—2022 年与 1999—2002 年相比,在枝城站同径流量下,三口分流比无明显变化,出现分流量、分流比明显减小的原因主要是枝城站径流量偏小^[77-78]。随着分流比的减小,三口断流时间也有所增加,如松滋河东支沙道观 1981—2002 年的平均年断流天数为 171 d,蓄水后(2003—2022 年)增加到 175 d,藕池(管)、藕池(康)站 1981—2002 年的平均年断流天数分别为 166、251 d,蓄水后分别增加到 181、273 d。受自然环境变化及人类活动的影响,三峡工程蓄水运行以来,洞庭湖四水入湖水量变化不大,沙量呈明显减小趋势,湖区呈冲刷态势^[79-81]。2003—2022 年洞庭湖四水与荆江三口分流合计年均入湖水、沙量分别为 2174 亿 m³、1600 万 t,较 1981—2002 年均值分别减少 11%、85%;城陵矶年均出湖水、沙量分别为 2482 亿 m³、1720 万 t,分别较 1981—2002 年均值减少了 9%、38%。

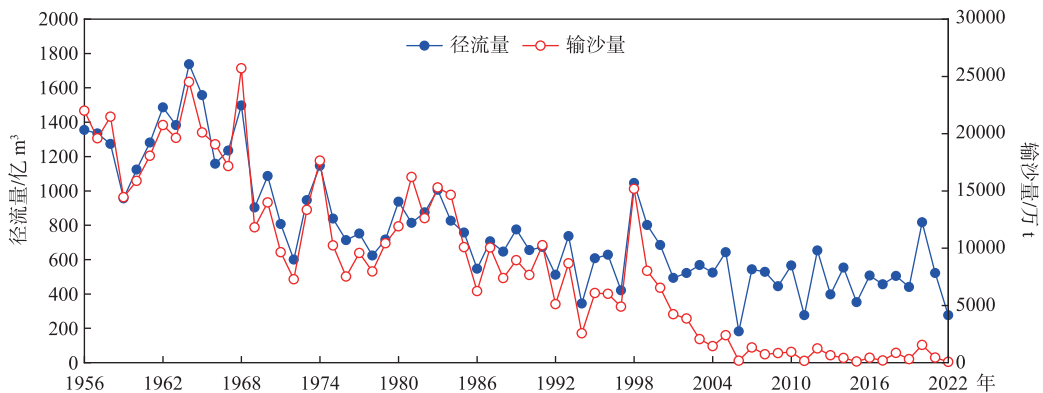


图 5 1956—2022 年荆江三口分流分沙量变化过程

Fig.5 Variation of diversion and sediment distribution ratio and diversion and sediment discharge at the three outlets of the Jingjiang River from 1956 to 2022

鄱阳湖承纳赣江、抚河、信江、饶河、修水江西五河的来水,经调蓄后由湖口注入长江,湖区泥沙绝大部

分来源于赣江。1956—2002年,五河年均入鄱阳湖水、沙量分别为1098亿 m^3 、1420万t,湖口出湖年均水、沙量分别为1476亿 m^3 、938万t。湖区年平均淤积泥沙为482万t,淤积主要集中在五河尾闾和入湖三角洲。三峡工程蓄水运行后,2003—2022年五河年平均入鄱阳湖水、沙量分别为1205亿 m^3 、633万t,较蓄水前分别减少了2%、57%,大规模的水库建设是入湖沙量减少的最主要原因^[82-84];湖口出湖年均水、沙量分别为1498亿 m^3 、984万t,较蓄水前分别增加了1%、5%。

目前,在长江干支流水库群联合调控下,长江中下游径流过程变化较大,主要表现为枯水期流量增加、中水期延长及洪水期洪峰流量减少,同时进入江湖系统的泥沙量不断减小^[85-87]。长江干流水位降低,导致洞庭湖出流加大,湖区出流排沙能力得到增强,洞庭湖容积缩小的速度大为减缓。洞庭湖由大量沉积长江干流泥沙的角色转变为向干流补给泥沙,这种江湖关系的调整对江、湖防洪均是有利的^[88]。三峡工程运用对鄱阳湖的影响与对洞庭湖的影响相似,增加了鄱阳湖的泄流能力,对出湖段主槽冲刷有带动作用,但同时也使鄱阳湖通江水道枯水期落差减小,湖区水位有不同程度的降低,枯水位出现时间有所提前^[89-91]。未来需进一步研究三峡水库汛末提前蓄水时间,减少汛后蓄水对于鄱阳湖枯水位的影响。

4.3 坝下游航道泥沙问题

三峡工程运用后,一方面增加了长江中下游的枯水流量,近些年枯期流量在6000 m^3/s 以上;另一方面大部分河段枯水河槽冲刷以深切为主,出现了低滩冲刷、深槽淤积现象,不利于维持稳定的航槽边界,有可能影响通航条件,总体上极大改善了长江中下游的航道条件^[92]。

葛洲坝水利枢纽位于三峡大坝下游约40 km,其2号船闸下游闸坎坎顶高程为34.0 m,船队过坎和通过引航道需保证庙咀站水位不低于39.0 m。三峡工程蓄水运用以来,葛洲坝下游河道冲刷下切导致宜昌站同流量枯水位下降,2022年宜昌站流量为6000 m^3/s 时水位为39.29 m,较2003年下降了0.81 m。目前,三峡水库通过科学调度,在枯水期通过加大下泄流量(约6000 m^3/s)保证了庙咀站最低水位在39.0 m以上,葛洲坝船闸和下游引航道通航未受影响。长期观测研究表明,坝下游胭脂坝河段、宜都弯道、关洲、芦家河、董市洲以及柳家洲等浅滩、卡口河段在控制宜昌枯水位变化中起到关键作用,其中胭脂坝河段、宜都弯道、芦家河为关键控制节点河段^[93-94]。2004—2011年对胭脂坝河段深槽实施了河床护底工程及胭脂坝坝头防护工程,对河床有一定的保护和加糙作用,有效地减缓了胭脂坝段河床冲刷,对宜昌中、枯水位的下降起到了较好的抑制作用,这也是2006—2008年宜昌枯水位保持基本稳定的重要原因。为抑制宜昌枯水位下降,改善局部通航条件,2014年航道部门实施了宜昌至昌门溪河段一期航道整治工程。2020年起,实施了芦家河段的航道疏浚工程,以确保长江中游航道“645工程”顺利实现。芦家河河段大范围地进行航道整治,可能破坏该河段的节点控制作用,进而影响宜昌枯水位,未来宜昌枯水位变化情势仍需持续关注。

对坝下游沙质河段而言,汛后补枯对航道条件的改善是较为明显的,但清水下泄以及汛末蓄水使得河床演变发生大幅的冲淤调整,演变规律发生了很大变化,弯道段主流向凸岸侧摆动,部分急弯段甚至发生了切滩撇弯,增加了航道变化的不确定性^[95]。航道部门在长江中下游相继实施了南京以下河段12.5 m深水航道整治、荆江航道整治、武汉至安庆段6 m水深航道整治等工程,对于稳定航道的滩槽格局、提升通航能力起到了积极的作用^[96-99]。总体而言,三峡工程运行后对下游航道的的影响基本在预测结果之中。今后需要提高汛期洪水资源化利用水平,进一步研究汛后提前蓄水时间和起蓄水位,减少蓄水期对下游的影响,确保枯水期三峡水库向下游的补水能力,保障航道水深。

5 三峡水库运行方式优化有关的泥沙问题

5.1 三峡水库蓄水进程优化

三峡工程采取的是“一级开发、一次建成、分期蓄水、连续移民”的建设方案。根据初步设计安排,2003年蓄水至135 m,进入围堰发电期;2007年蓄水至156 m,进入初期运行期;蓄水位从156 m升至175 m正常蓄水水位的时间,根据移民安置情况、库尾泥沙淤积原型观测结果以及重庆港泥沙淤积影响处理方面等相机确定,初步定为6年。关于三峡水库何时进入175 m蓄水运行,最重要是泥沙方面的观测与研究结论。通过全方面的泥沙研究认为,只有将蓄水位抬高至172 m以上,才能实际观测到三峡工程蓄水对重庆河段泥沙冲淤的影响,以及验证初步设计对泥沙问题的结论。三峡入库沙量大幅度减少,为水库蓄水位提前抬升提

供了有利条件,2008年汛后进行了175 m 试验性蓄水运行,水库开始提前发挥最终规模的综合效益。

根据实测资料统计,提前5年实施175 m 试验性蓄水运用期间共拦截洪水207亿 m^3 ,增加改善库区航道140 km,约增加发电量800亿度,水库没有出现严重的泥沙淤积情况,淤积程度远远小于初步设计预测值^[100-101]。实践证明,三峡水库提前至2008年汛后实施175 m 试验性蓄水是正确,不仅泥沙淤积量和分布控制在允许范围内,提前发挥了三峡水库综合效益,并在水库调度运行等方面取得了许多宝贵经验^[102]。

5.2 “蓄清排浑”运行方式优化

根据三峡工程论证阶段泥沙问题的研究成果与结论,三峡水库采取“蓄清排浑”运用方式,其中正常蓄水位为175 m,防洪限制水位为145 m,枯水期消落低水位为155 m。水库“蓄清排浑”运行方式是根据入库水沙过程和水库功能发挥来综合确定水库蓄水、泄水时间及运行水位,达到水库有效库容长期保持和兴利的协同目标^[103-104]。具体是指三峡水库在汛期含沙量较大时,水位绝大多数时间维持在防洪限制水位145 m,发挥防洪效益的同时尽量将高含沙水体排出库外,减少水库淤积;汛后在泥沙较少的10月份才开始蓄水到175 m,以发挥航运、补水、生态等其他综合效益。12月一次年4月,水库尽量维持在较高水位,4月末以前水位最低不低于155 m,以保证水电站发电水头和库尾航道必要的航深,5月开始进一步降低库水位至145 m。

2008年三峡水库进行175 m 试验性蓄水运行后,社会各界从保护生态环境、保障中下游供水安全、提高三峡综合利用效益等方面,对三峡水库调度运用提出了更高要求。根据相关研究成果编制形成了《三峡水库优化调度方案》,后续又根据新问题新情况不断地优化调整了三峡水库调度规程。三峡水库蓄水以来开展的优化调度具体包括汛期运行水位浮动、中小洪水调度、城陵矶补偿调度、汛末提前蓄水等^[105]。这些优化调度可能会带来水库排沙比减小、库区泥沙淤积重心上移、有效库容内淤积量增加等泥沙淤积问题。能否解决这些问题,对于实施水库调度优化意义重大。

针对变化环境下的三峡水库泥沙运动规律,研究发现三峡水库出库沙峰普遍滞后洪峰3~7 d^[106-107]、库尾河段主要走沙期由汛后转移至汛前消落期^[108],为三峡水库泥沙调度提供了理论支撑;研发了长江上游梯级水库泥沙实时监测和预报技术,提高了泥沙监测效率和预报可靠性^[109];提出并实践了三峡水库汛期沙峰调度、消落期库尾减淤调度和梯级水库泥沙联合调度等泥沙优化调度技术,减少了水库泥沙淤积,优化了库区淤积形态^[110-111];构建了“实时监测-泥沙预报-动态调度”平台,提出了“调沙提效”的水库泥沙动态调控模式^[112],如图6所示。“调沙提效”动态调控是对“蓄清排浑”运行方式的进一步优化,以提升水库综合效益为核心,通过沙峰调度、库尾减淤调度和梯级水库泥沙联合调度技术,控制水库淤积量及库区淤积形态,进行中小洪水调度、汛期运行水位上浮、汛末提前蓄水等优化调度,达到防洪、发电、航运、生态、补水、减淤协同的最优效益。与三峡水库初步设计阶段“蓄清排浑”运行方式相比,“调沙提效”的泥沙动态调控模式增加了三峡水库调度的灵活性,汛期提升了三峡水库对一般洪水的防洪作用,减轻了中下游防洪压力,10月底蓄满率提高至90%以上,增加了枯水期水库下泄流量和补水时间。

6 展望

在三峡工程论证、设计、建设和运行的各个阶段,对重大工程泥沙问题进行了系统研究,提出了相应的解决方案,为三峡水库成功建成运行和全面发挥综合效益提供了重要科技支撑。面对不断出现的新情况、新变化,在大量研究基础上,三峡水库对初步设计阶段调度方式做出了优化调整。三峡水库蓄水运用以来的实践表明,三峡工程泥沙问题及其影响未超出原先的预测,工程泥沙问题的解决已得到初步检验,局部问题经精心应对,处于可控之中。三峡水库优化后的调度方式更好地发挥了防洪、抗旱、航运、发电、生态等综合效益,是必要的,也是科学合理的。随着长江上游水库群联合调度逐步实践,加之社会经济发展提出的更高需求,三峡水库的运行调度方式还有待进一步优化,原有的泥沙问题必须持续关注,联合调度及新优化调度方式下的泥沙问题也需要深入研究。

6.1 持续研究梯级水库联合调度下的泥沙问题

随着以三峡工程为核心的长江上游水库群的逐步建成,水库群防洪与综合利用、梯级水库间的蓄泄矛盾也逐步显现。为统筹长江上游水库群防洪、抗旱、发电、航运、供水、水生态与水环境保护等方面的需求,

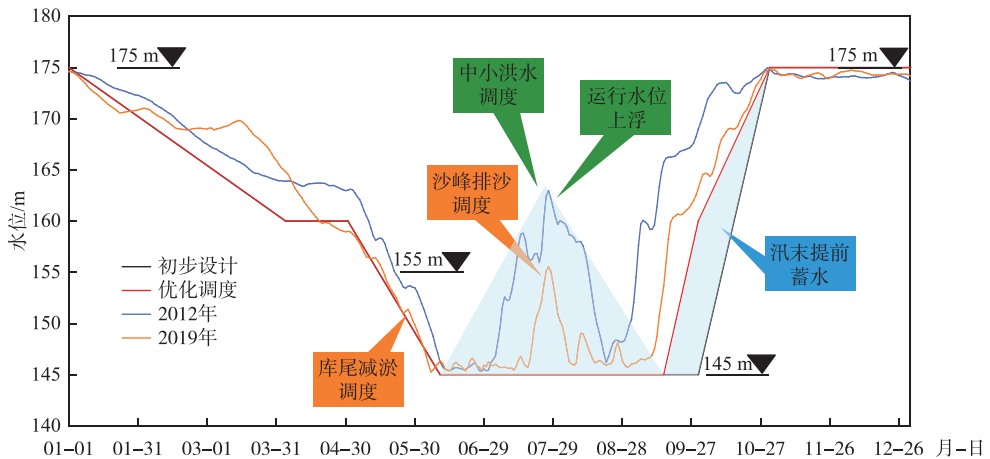


图 6 三峡水库“调沙提效”的泥沙动态调控模式

Fig.6 The dynamic regulation mode of sediment in the Three Gorges Reservoir for “sand regulation and efficiency improvement”

2009 年以来开展了以三峡水库为核心的长江干支流控制性水库群综合调度研究,进行了水库群联合调度实践,不仅为防御长江洪水增添了有效手段,而且在保障流域供水、发电、航运、生态等方面发挥了重要作用。

水库群联合调度改变了河流泥沙的时空分布,一方面梯级水库内泥沙累积性淤积,影响水库功能发挥;另一方面,梯级水库拦沙导致下泄输沙量进一步减少,加剧了长江中下游河床冲刷,可能引起河势变化。今后应当将长江上游、中游、下游和河口作为一个系统来研究水库群的联合调度,深入研究干支流产输沙变化及水库泥沙运动规律,建立健全水沙监测与预报体系,进一步深化梯级水库泥沙联合调度研究,塑造协调的水沙关系,实现水沙合理配置,以期达到既减少水库泥沙淤积,又有利于水库下游河道发育的目标。

6.2 深入探讨长江泥沙变化的生态效应

泥沙是河流发挥生态环境功能的重要载体之一,对河流生境有重要影响。水流强度决定了河道对泥沙的运输能力、河床地形的起伏变化,泥沙颗粒自身物理化学特性又决定了其对营养盐、污染物、细菌等物质的吸附功能,二者结合,对河流生态环境产生重要影响。

三峡水库蓄水运行后,库区悬移质泥沙沉降把吸附的氮、磷带入沉积物,对植物和底栖动物的生长和群落结构有一定影响;坝下游河道沿程持续冲刷,引起床面粗化、床面营养物质减少、微生物多样性降低等。同时,涉河工程及航道整治使得河床边界及河道局部流态进一步复杂化,影响水生生物生境和栖息地适宜度。今后需要深入研究河流输沙变化及河道演变对水生生物生境和岸滩生态的影响。

6.3 提升泥沙测量效率与精度

水文泥沙数据是开展泥沙问题研究的基础,不仅能够掌握入出库水沙条件、库区泥沙淤积特性、坝下游河床冲淤变化、重点河段冲淤演变特点等情况,也能为实施汛期沙峰排沙调度、消落期库尾减淤调度、中小洪水调度等一系列优化调度提供重要数据支撑。因此,泥沙测量的时效性及准确性显得至关重要。同时,随着智慧水利和数字孪生三峡的建设,对于水沙数据获取的及时性和准确性也提出更高要求。

当前泥沙数据的测量仍多以传统泥沙观测方法为主,如悬移质泥沙多采用横式或积时式采样器施测,悬移质颗粒分析多采用横式或积时式采样器施测,这些方法往往需要耗费大量的人力、物力,泥沙样品分析过程存在人为误差,数据精度难以得到保证,并且无法及时获得观测结果,导致泥沙数据存在一定的滞后性,影响后续泥沙问题的研究。为了推动泥沙科学的发展,探寻解决水库泥沙问题的新途径,今后需要不断加强泥沙观测新仪器、新方法的研发与使用,不断提高泥沙观测效率及精度。

7 参考文献

- [1] Hu CH, Fang CM. Research on sediment problem solutions for the Three Gorges Project and its operational effects. *Scientia Sinica: Techno-*

- logica*, 2017, **47**(8): 832-844. DOI: 10.1360/N092017-00098. [胡春宏, 方春明. 三峡工程泥沙问题解决途径与运行效果研究. 中国科学: 技术科学, 2017, **47**(8): 832-844.]
- [2] Hu CH, Fang CM. Sedimentation and regulation technologies in the Three Gorges Reservoir. *River*, 2022, **1**(2): 123-132. DOI: 10.1002/rvr.2.24.
- [3] Pan QS, Hu XY. Progress in sediment research of the Three Gorges Project. *Express Water Resources and Hydropower Information*, 1997, (17): 1-5. [潘庆燊, 胡向阳. 三峡工程泥沙问题研究的进展. 水利水电快报, 1997, (17): 1-5.]
- [4] Han QW. Advances of sediment research during demonstration and feasibility study of Three Gorges Project. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2014, **45**(9): 1-5, 23. [韩其为. 三峡工程论证及可行性研究阶段泥沙研究工作的几点进展. 水利水电技术, 2014, **45**(9): 1-5, 23.]
- [5] Zheng SR. Safe operation and long-term service of Three Gorges Project. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2011, **31**(4): 1-7, 37. [郑守仁. 三峡水利枢纽工程安全及长期使用问题研究. 水利水电科技进展, 2011, **31**(4): 1-7, 37.]
- [6] Xie JH. Methods of sediment research of the Three Gorges Project. *Water Power*, 1989, (12): 40-44. [谢鉴衡. 论三峡工程泥沙问题的研究方法. 水力发电, 1989, (12): 40-44.]
- [7] Hu CH. Development and practice of the operation mode of “Storing Clear Water and Discharging Muddy Flow” in sediment-laden rivers in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(3): 283-291. [胡春宏. 我国多沙河流水库“蓄清排浑”运用方式的发展与实践. 水利学报, 2016, **47**(3): 283-291.]
- [8] Pan QS. Review of sediment research in Three Gorges Project in recent 60 years. *Yangtze River*, 2017, **48**(21): 18-22. [潘庆燊. 三峡工程泥沙问题研究 60 年回顾. 人民长江, 2017, **48**(21): 18-22.]
- [9] Hu CH. Study on sediment simulation and regulation techniques for Three Gorges Reservoir and its downstream reach. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, **49**(1): 1-6. [胡春宏. 三峡水库和下游河道泥沙模拟与调控技术研究. 水利水电技术, 2018, **49**(1): 1-6.]
- [10] Ren S, Zhang BW, Wang WJ *et al.* Sedimentation and its response to management strategies of the Three Gorges Reservoir, Yangtze River, China. *CATENA*, 2021, **199**: 105096. DOI: 10.1016/j.catena.2020.105096.
- [11] Han QW, He MM. Sedimentation control of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 1996, (1): 1-19. [韩其为, 何明民. 论三峡水库泥沙淤积的控制——处理三峡水库泥沙的策略与措施. 泥沙研究, 1996, (1): 1-19.]
- [12] Luo H, Zhu JF. Design of reef-blasting project and analysis of regulation effect for Fuling to Tongluo canyon reach in Three Gorges Reservoir Region. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2006, **28**(5): 47-50. [罗宏, 朱俊凤. 三峡库区涪陵至铜锣峡航道炸礁工程及效果分析. 重庆建筑大学学报, 2006, **28**(5): 47-50.]
- [13] Niu LH, Li YZ, Du LX. Fluvial process and riverbed protection at key points in the downstream river of the Three Gorges Project. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, **31**(6): 123-129. [牛兰花, 李云中, 杜林霞. 三峡工程坝下游河段控制节点演变及护底试验效果分析. 长江科学院院报, 2014, **31**(6): 123-129.]
- [14] Zhao YF, Zou XQ, Gao JH *et al.* Quantifying the anthropogenic and climatic contributions to changes in water discharge and sediment load into the sea: A case study of the Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 2015, **536**: 803-812. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.119.
- [15] Wang KY, Huang L, He GJ *et al.* Spatial-temporal evolution of sediment transport in the Upper Yangtze River Basin considering the cumulative impacts of mega reservoirs. *CATENA*, 2023, **232**: 107370. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107370.
- [16] Dai SB, Lu XX. Sediment load change in the Yangtze River(Changjiang): A review. *Geomorphology*, 2014, **215**: 60-73. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.05.027.
- [17] Wang WP, Zhu YL, Dong SF *et al.* Attribution of decreasing annual and autumn inflows to the Three Gorges Reservoir, Yangtze River: Climate variability, water consumption or upstream reservoir operation? *Journal of Hydrology*, 2019, **579**: 124180. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124180.
- [18] Wei J, He XB, Bao YH. Anthropogenic impacts on suspended sediment load in the Upper Yangtze River. *Regional Environmental Change*, 2011, **11**(4): 857-868. DOI: 10.1007/s10113-011-0222-0.
- [19] Zheng SR. Scientific scheduling optimization operation test in the trial impounding period of the Three Gorges Project to pool level of EL.175-meter. *Technology and Economy of Changjiang*, 2019, **3**(1): 5-10. [郑守仁. 三峡工程 175 米试验性蓄水运行期的科学调度优化运行试验. 长江技术经济, 2019, **3**(1): 5-10.]
- [20] Shan ME, Li ZJ, Zhou YJ *et al.* Variations and driving factors of water flow and sediment transport in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2022, **47**(2): 29-35. [单敏尔, 李志晶, 周银军等. 三峡水库入库水沙变化规律及驱动因素分析. 泥沙研究, 2022, **47**(2): 29-35.]
- [21] Yang CG, Li SW, Dong BJ. Changes of runoff and sediment in the upper reaches of the Yangtze River since the trial impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, **53**(S1): 38-44. [杨成刚, 李圣伟, 董炳江. 三峡水库试验性蓄水以来长江上游来水来沙变化. 水利水电技术, 2022, **53**(S1): 38-44.]

- [22] Gao Y, Ren S, Wang H *et al.* Characteristics of incoming runoff and sediment load in the Three Gorges Reservoir during high flood period after the operation of the cascade reservoirs in the lower Jinsha River. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 662-672. DOI: 10.18307/2023.0222. [高宇, 任实, 王海等. 金沙江下游梯级水库运行后三峡水库高洪水期入库水沙特性. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 662-672.]
- [23] Lu JY, Huang Y. Study on the problems of long-term use of Three Gorges Project. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, **28**(6): 49-54. [卢金友, 黄悦. 三峡水库长期使用问题研究. 水力发电学报, 2009, **28**(6): 49-54.]
- [24] Huang RY, Shu CW, Tan GM. Long-term sedimentation prediction of cascade reservoirs in the upper reaches of the Yangtze River. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, **26**(4): 737-745. [黄仁勇, 舒彩文, 谈广鸣. 长江上游梯级水库泥沙冲淤长期预测初步研究. 应用基础与工程科学学报, 2018, **26**(4): 737-745.]
- [25] Yang CR, Deng JY, Chen L. Sediment deposition trend in the Three Gorges Reservoir under the action of complex boundary conditions. *Advances in Water Science*, 2023, **34**(3): 442-453. [杨春瑞, 邓金运, 陈立. 复杂边界作用下三峡水库泥沙淤积特征与趋势. 水科学进展, 2023, **34**(3): 442-453.]
- [26] Zhou B, Xu QX, Li Y. On new technology of sediment real-time monitoring in Three Gorges Reservoir. *Journal of China Hydrology*, 2016, **36**(4): 53-57. [周波, 许全喜, 李雨. 三峡水库入库泥沙实时监测试验研究. 水文, 2016, **36**(4): 53-57.]
- [27] Wang SP, Wang ML, Xu QX *et al.* Preliminary study and trial forecast of sediment concentration prediction method in Three Gorges storage station. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2015, **36**(5): 11-14. [王世平, 王渺林, 许全喜等. 三峡入库站含沙量预报方法初探与试预报. 水利水电快报, 2015, **36**(5): 11-14.]
- [28] Yang CG, Xu QX, Dong BJ *et al.* Research and application of key technology on real-time sediment forecast of Three Gorges Reservoir: Case of flood season in 2020. *Yangtze River*, 2020, **51**(12): 82-87. [杨成刚, 许全喜, 董炳江等. 三峡水库泥沙实时预报关键技术研究及应用——以2020年汛期为例. 人民长江, 2020, **51**(12): 82-87.]
- [29] Cao H, Chen KB, Dong BJ. Construction and application of sediment forecast model based on Azure AutoML. *Yangtze River*, 2023, **54**(4): 94-100. [曹辉, 陈柯兵, 董炳江. 基于 Azure AutoML 的泥沙预报模型构建与应用. 人民长江, 2023, **54**(4): 94-100.]
- [30] Huang RY, Wang M, Zhang XB *et al.* Preliminary study on dynamic operation mode of “storing clear water and releasing muddy water” in the Three Gorges Reservoir in flood season. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, **35**(7): 9-13. DOI: 10.11988/ckyyb.20170107. [黄仁勇, 王敏, 张细兵等. 三峡水库汛期“蓄清排浑”动态运用方式初探. 长江科学院院报, 2018, **35**(7): 9-13.]
- [31] Ren S, Liu L. Sediment deposition and countermeasures in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2019, **44**(6): 40-45. [任实, 刘亮. 三峡水库泥沙淤积及减淤措施探讨. 泥沙研究, 2019, **44**(6): 40-45.]
- [32] Zhou M, Huang RY, Xu T. Study and practice of the Three Gorges Reservoir regulations for sedimentation reduction in its tail region. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, **34**(4): 98-104. [周曼, 黄仁勇, 徐涛. 三峡水库库尾泥沙减淤调度研究与实践. 水力发电学报, 2015, **34**(4): 98-104.]
- [33] Chu MH, Li RB, Yan YL. Optimal operation practices and reflections on the Three Gorges Reservoir. *China Water Resources*, 2023, (22): 22-26. [褚明华, 李荣波, 闫永奎. 三峡水库优化调度实践与思考. 中国水利, 2023, (22): 22-26.]
- [34] Zhang SG, Zhou M. Operation and regulation of Three Gorges Reservoir. *Strategic Study of CAE*, 2011, **13**(7): 61-65. [张曙光, 周曼. 三峡枢纽水库运行调度. 中国工程科学, 2011, **13**(7): 61-65.]
- [35] Zheng SR. Risk analysis of implementing middle-small flood dispatch by Three Gorges Project and countermeasures. *Yangtze River*, 2015, **46**(5): 7-12. [郑守仁. 三峡水库实施中小洪水调度风险分析及对策探讨. 人民长江, 2015, **46**(5): 7-12.]
- [36] Li YT, Gan FW, Deng JY *et al.* Preliminary study on optimization of the regulation of flood controlled water level of Three Gorges Project. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2008, **27**(4): 1-6. [李义天, 甘富万, 邓金运等. 三峡水库汛限水位优化调度初步研究. 水力发电学报, 2008, **27**(4): 1-6.]
- [37] Hu T, Wang H, Hu XE *et al.* Analysis on regulation mode and operation of Three Gorges Reservoir in past decade. *Yangtze River*, 2014, **45**(9): 24-29. [胡挺, 王海, 胡兴娥等. 三峡水库近十年调度方式控制运用分析. 人民长江, 2014, **45**(9): 24-29.]
- [38] Guo S, Zhou M, Hu T *et al.* An analysis of the variation process and causes of water and sediment to the Three Gorges Reservoir in recent years. *China Rural Water and Hydropower*, 2022, (8): 35-40, 49. [郭率, 周曼, 胡挺等. 近年来三峡水库水沙通量变化过程及原因分析. 中国农村水利水电, 2022, (8): 35-40, 49.]
- [39] Li SX, Yang CG, Dong BJ *et al.* Sediment transport characteristics during high floods in the upper reaches of the Yangtze River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, **38**(12): 6-11. DOI: 10.11988/ckyyb.20200888. [李思璇, 杨成刚, 董炳江等. 长江上游高洪水期泥沙输移特性. 长江科学院院报, 2021, **38**(12): 6-11.]
- [40] Yin SH, Gao GY, Huang AQ *et al.* Streamflow and sediment load changes from China's large rivers: Quantitative contributions of climate and human activity factors. *Science of the Total Environment*, 2023, **876**: 162758. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162758.
- [41] Liu SW, Wang DY, Miao W *et al.* Characteristics of runoff and sediment load during flood events in the Upper Yangtze River, China. *Journal of Hydrology*, 2023, **620**: 129433. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129433.
- [42] Liu SW, Zhang XF, Huang JJ. Analysis on recent variation of transport characteristics of gravel bed-load into Three Gorges Reservoir and its impact. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, **49**(4): 82-89. [刘尚武, 张小峰, 黄俊健. 三峡入库卵石推移质输沙特性

- 近期变化及影响分析. 水利水电技术, 2018, 49(4): 82-89.]
- [43] Xiao Y, Li WJ, Yang SF *et al.* Impact of gravel bed load behavior on channel condition in fluctuating backwater zone of the Three Gorges Reservoir. *Port & Waterway Engineering*, 2019, (7): 122-128. [肖毅, 李文杰, 杨胜发等. 三峡库尾卵石推移质输移对航道的影响. 水运工程, 2019, (7): 122-128.]
- [44] Li SX, Yuan J, Zhu LL *et al.* Study on the flow and sediment sources to the Three Gorges Reservoir during the typical torrential rains. *Journal of Sediment Research*, 2023, 48(6): 38-43. [李思璇, 袁晶, 朱玲玲等. 三峡水库典型暴雨过程径流泥沙来源组成变化分析. 泥沙研究, 2023, 48(6): 38-43.]
- [45] Zhou YJ, Wang J, Jin ZW *et al.* Study on processes of sediment sources to the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2020, 45(4): 21-26. [周银军, 王军, 金中武等. 三峡水库来沙的地区组成变化分析. 泥沙研究, 2020, 45(4): 21-26.]
- [46] Yan HC, Zhang XF, Xu QX. Variation of runoff and sediment inflows to the Three Gorges Reservoir: Impact of upstream cascade reservoirs. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 13.
- [47] Xie J, Wang M, Liu K. Material migration patterns of basin after earthquake under extreme rainfall—A case study on hongxibasin of Sichuan Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 1-7. [谢军, 汪明, 刘凯. 震后极端降雨下流域产沙及物质运移规律模拟——以四川省洪溪河流域为例. 水土保持研究, 2019, 26(1): 1-7.]
- [48] Dong BJ, Zhang OY, Xu QX *et al.* Study on characteristics of sediment yield under heavy rainfall in upstream of Three Gorges Reservoir during flood season in 2018. *Yangtze River*, 2019, 50(12): 21-25. [董炳江, 张欧阳, 许全喜等. 2018年汛期三峡水库上游暴雨产沙特性研究. 人民长江, 2019, 50(12): 21-25.]
- [49] Hu CH, Fang CM, Shi HL. Recent progress in sediment research of the Three Gorges Project. *China Water Resources*, 2023, (19): 10-16. [胡春宏, 方春明, 史红玲. 三峡工程重大泥沙问题研究进展. 中国水利, 2023, (19): 10-16.]
- [50] Yuan J, Xu QX, Tong H. Study of sediment deposition in region of Three Gorges Reservoir after its impoundment. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(2): 139-145, 174. [袁晶, 许全喜, 童辉. 三峡水库蓄水运用以来库区泥沙淤积特性研究. 水力发电学报, 2013, 32(2): 139-145, 174.]
- [51] Li WJ, Yang SF, Fu XH *et al.* Sedimentation characteristics in the Three Gorges Reservoir during the initial operation stage. *Advances in Water Science*, 2015, 26(5): 676-685. [李文杰, 杨胜发, 付旭辉等. 三峡水库运行初期的泥沙淤积特点. 水科学进展, 2015, 26(5): 676-685.]
- [52] Yuan J, Xu QX, Dong BJ *et al.* Sediment deposition of Three Gorges Reservoir and its impact on the reservoir area in recent 20 years. *J Lake Sci*, 2023, 35(2): 632-641. DOI: 10.18307/2023.0219. [袁晶, 许全喜, 董炳江等. 近20年来三峡水库泥沙淤积及其对库区的影响. 湖泊科学, 2023, 35(2): 632-641.]
- [53] Wang YG, Zeng X, Su JL *et al.* Study on scour and deposition characteristics in Chongqing Reach after Three Gorges Reservoir Operation. *Journal of Sediment Research*, 2017, 42(4): 1-8. [王延贵, 曾险, 苏佳林等. 三峡水库蓄水后重庆河段冲淤特性研究. 泥沙研究, 2017, 42(4): 1-8.]
- [54] Zhu LL, Li J, Yuan J. Sediment erosion and deposition in the tail area of Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(5): 142-146, 156. DOI: 10.11988/ckyyb.20170995. [朱玲玲, 李俊, 袁晶. 三峡水库库尾重庆主城区河段冲淤特性. 长江科学院院报, 2018, 35(5): 142-146, 156.]
- [55] Zhang W, Zhu JY, Xue JL *et al.* Asynchrony of flood peaks and sediment peaks in the Three Gorges Reservoir from 1990 to 2021. *Advances in Water Science*, 2023, 34(6): 850-857. [张为, 朱敬一, 薛居理等. 三峡水库1990—2021年洪峰沙峰异步特性分析. 水科学进展, 2023, 34(6): 850-857.]
- [56] Dong BJ, Qiao W, Xu QX. Study on sediment peak regulation of Three Gorges Reservoir in flood season and preliminary practice. *Yangtze River*, 2014, 45(3): 7-11. [董炳江, 乔伟, 许全喜. 三峡水库汛期沙峰排沙调度研究与初步实践. 人民长江, 2014, 45(3): 7-11.]
- [57] Xiao Y, Yang SF, Wang T *et al.* Analysis on navigation condition of the Three Gorges Reservoir at initial stage of water storage. *Port & Waterway Engineering*, 2019, (11): 92-99, 138. [肖毅, 杨胜发, 王涛等. 三峡水库蓄水初期库区航道条件分析. 水运工程, 2019, (11): 92-99, 138.]
- [58] Xu XM, Xi QQ, Zhang XX. Research on the evolution and maintenance strategies of waterways in the Three Gorges Reservoir. *China Water Transportation (Science and Technology for Waterway)*, 2021, (5): 1-6. [徐晓明, 习倩倩, 张星星. 三峡库区航道演变及养护对策研究. 中国水运·航道科技, 2021, (5): 1-6.]
- [59] Yang SF, Li WJ, Hu XQ *et al.* Research of sedimentation model and waterway transit capacity improvement in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2016, 35(S1): 41-48. [杨胜发, 李文杰, 胡小庆等. 三峡水库航道泥沙淤积模式及航道通过能力提升研究. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2016, 35(S1): 41-48.]
- [60] Ren S, Hu XE, Xing L *et al.* Aerodynamic dredging technology for deep water in front of Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2023, 40(1): 24-28. DOI: 10.11988/ckyyb.20210935. [任实, 胡兴娥, 邢龙等. 三峡水库坝前深水清淤疏浚技术研究. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 24-28.]
- [61] Xu QX, Dong BJ, Yuan J *et al.* Scouring effect of the middle and lower reaches of the Yangtze River and its impact after the impoundment

- of the Three Gorges Project. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 650-661. DOI: 10.18307/2023.0221. [许全喜, 董炳江, 袁晶等. 三峡工程运用后长江中下游河道冲刷特征及其影响. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 650-661.]
- [62] Xu QX. Study of sediment deposition and erosion patterns in the middle and downstream Changjiang mainstream after impoundment of TGR. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, **32**(2): 146-154. [许全喜. 三峡工程蓄水运用前后长江中下游干流河道冲淤规律研究. 水力发电学报, 2013, **32**(2): 146-154.]
- [63] Dong BJ, Xu QX, Yuan J *et al.* Mechanism of serious scour along the downstream of Three Gorges Reservoir in recent years. *Journal of Sediment Research*, 2019, **44**(5): 41-46. [董炳江, 许全喜, 袁晶等. 近年来三峡水库坝下游河道强烈冲刷机理分析. 泥沙研究, 2019, **44**(5): 41-46.]
- [64] Lu JY, Huang Y, Wang J. The analysis on reservoir sediment deposition and downstream river channel scouring after impoundment and operation of TGP. *Strategic Study of CAE*, 2011, **13**(7): 129-136. [卢金友, 黄悦, 王军. 三峡工程蓄水运用后水库泥沙淤积及坝下游河道冲刷分析. 中国工程科学, 2011, **13**(7): 129-136.]
- [65] Zhu LL, Xu QX, Chen ZH. Extraordinary scour of Jingjiang reach downstream from Three Gorges Project. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, **26**(1): 85-97. [朱玲玲, 许全喜, 陈子寒. 新水沙条件下荆江河段强冲刷响应研究. 应用基础与工程科学学报, 2018, **26**(1): 85-97.]
- [66] Li M, Hu CH, Zhou CC *et al.* Analysis on the Evolution mechanism of the “steep slope and rapid flow” section of Lujia waterway in the middle reaches of the Yangtze River under new conditions of water and sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(2): 158-168. [李明, 胡春宏, 周成成等. 新水沙条件下长江中游芦家河水道“坡陡流急”段演变机理分析. 水利学报, 2021, **52**(2): 158-168.]
- [67] Zhang XN, Jia DD, Chen CY. The spatial and temporal distribution characteristic of bank collapses in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, **29**(1): 55-63. [张幸农, 假冬冬, 陈长英. 长江中下游崩岸时空分布特征与规律. 应用基础与工程科学学报, 2021, **29**(1): 55-63.]
- [68] Deng Y, Lai XW, Guo L. Monitoring and analysis of bank collapse in middle and lower reaches of Yangtze River. *Yangtze River*, 2018, **49**(15): 13-17. [邓宇, 赖修蔚, 郭亮. 长江中下游崩岸监测及分析研究. 人民长江, 2018, **49**(15): 13-17.]
- [69] Han JQ, Sun ZH, Yang YP. Flood and low stage adjustment in the middle Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR). *J Lake Sci*, 2017, **29**(5): 1217-1226. DOI: 10.18307/2017.0520. [韩剑桥, 孙昭华, 杨云平. 三峡水库运行后长江中游洪、枯水位变化特征. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1217-1226.]
- [70] Yang YP, Zhang MJ, Sun ZH *et al.* The relationship between water level change and river channel geometry adjustment in the downstream of the Three Gorges Dam (TGD). *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(5): 776-789. DOI: 10.11821/dlxb201705002. [杨云平, 张明进, 孙昭华等. 三峡大坝下游水位变化与河道形态调整关系研究. 地理学报, 2017, **72**(5): 776-789.]
- [71] Chai YF, Deng JY, Yang YP *et al.* Evolution characteristics and driving factors of the water level at the same discharge in the Jingjiang reach of Yangtze River. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(1): 101-113. DOI: 10.11821/dlxb202101008. [柴元方, 邓金运, 杨云平等. 长江中游荆江河段同流量-水位演化特征及驱动成因. 地理学报, 2021, **76**(1): 101-113.]
- [72] Yang CG, Li SX, Dong BJ *et al.* Study on the mechanism of lower water level in middle and lower reaches of the Yangtze River after impounding of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2021, **46**(5): 34-40. [杨成刚, 李思璇, 董炳江等. 三峡水库运用后长江中下游枯水位变化成因研究. 泥沙研究, 2021, **46**(5): 34-40.]
- [73] Li YT, Xue JL, Sun ZH *et al.* Channel degradation and river stage variations in reaches downstream of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, **40**(4): 1-13. DOI: 10.11660/slfdbx.20210401. [李义天, 薛居理, 孙昭华等. 三峡水库下游河床冲刷与水位变化. 水力发电学报, 2021, **40**(4): 1-13.]
- [74] Zhou YQ, Li JB, Zhang YL *et al.* Enhanced lakebed sediment erosion in Dongting Lake induced by the operation of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, **25**(8): 917-929. DOI: 10.1007/s11442-015-1210-y.
- [75] Zhang YC, Zhang YG, Song QL *et al.* The history and future of the relationship between the Yangtze River and connected lakes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(10): 1183-1192. [张云昌, 张业刚, 宋秋龄等. 江湖关系的历史和未来. 水利学报, 2021, **52**(10): 1183-1192.]
- [76] Yao SM, Hu CW, Qu G *et al.* Research advances in morphological evolution of lakes connecting the Yangtze River and its influences. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, **39**(9): 15-23. DOI: 10.11988/ckyyb.20220304. [姚仕明, 胡呈维, 渠庚等. 长江通江湖泊演变及其影响效应研究进展. 长江科学院院报, 2022, **39**(9): 15-23.]
- [77] Zhao W, Mao JX, Guan JZ *et al.* Evolution law and driving factors of three outlets along Jingjiang River after operation of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, **54**(8): 1005-1014. [赵伟, 毛继新, 关见朝等. 三峡水库运用后荆南三口分流演变规律及驱动因子. 水利学报, 2023, **54**(8): 1005-1014.]
- [78] Zhu LL, Xu QX, Dai ML. Runoff diverted from the Jingjiang reach to the Dongting Lake and the effect of Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2016, **27**(6): 822-831. [朱玲玲, 许全喜, 戴明龙. 荆江三口分流变化及三峡水库蓄水影响. 水科学进展, 2016, **27**(6): 822-831.]

- [79] Xu Q, Qu YR, Zhu BY *et al.* Evolution of Dongting Lake basin since 1956. *China Rural Water and Hydropower*, 2023, (11): 119-124, 130. DOI: 10.12396/znsd.231646. [徐琪, 瞿毅然, 朱博渊等. 1956年以来洞庭湖盆的演变. 中国农村水利水电, 2023, (11): 119-124, 130.]
- [80] Zhang L, Ma JX, Zhang Q *et al.* Characteristics of runoff-sediment variation of Dongting Lake in recent six decades and its relationship with human activities. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(9): 14-20. DOI: 10.11988/ckyyb.20200708. [张琳, 马敬旭, 张倩等. 近60多年洞庭湖水沙演变特征及其与人类活动的关系. 长江科学院院报, 2021, 38(9): 14-20.]
- [81] Dai W, Lv DQ, Li JB *et al.* Evolution characteristics and driving factors of runoff and sediment changes in Dongting Lake during 1951-2014. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 142-150, 176. [代稳, 吕殿青, 李景保等. 1951—2014年洞庭湖水沙阶段性演变特征及驱动因素分析. 水土保持学报, 2017, 31(2): 142-150, 176.]
- [82] Xie B, Guan XZ, Lu JY *et al.* Analysis on the evolution of water and sediment fluxes into and out of Poyang Lake and the attribution of sediment transport. *Journal of China Hydrology*, 2023, 43(6): 80-85. [谢彪, 关兴中, 卢静媛等. 鄱阳湖入出湖水沙通量演变及输沙量归因分析. 水文, 2023, 43(6): 80-85.]
- [83] Hu JJ, Sun Y, Gu CJ. Analysis on the change of water and sediment fluxes into Poyang Lake of five rivers and its influencing factors in recent 60 years. *Yangtze River*, 2022, 53(S2): 47-51, 58. [胡江军, 孙宇, 顾朝军. 近60年鄱阳湖五河入湖水沙变化及影响因素分析. 人民长江, 2022, 53(S2): 47-51, 58.]
- [84] Zeng Y, Liu JB, Li S *et al.* Effects of climate variation and human activities on runoff and sediment into Poyang Lake. *Yangtze River*, 2020, 51(1): 28-35. [曾瑜, 刘进宝, 厉莎等. 鄱阳湖流域气候变化和人类活动对入湖水沙的影响. 人民长江, 2020, 51(1): 28-35.]
- [85] Zhou JY, Gao F, Yuan Y *et al.* Runoff variation in the middle and lower branches of Yangtze River and the two lakes (Dongting and Poyang Lake) before and after Three Gorges Reservoir's operation. *J Lake Sci*, 2023, 35(2): 696-708. DOI: 10.18307/2023.0226. [周建银, 高菲, 元媛等. 三峡水库运行前后长江中下游干流及两湖的径流过程变化. 湖泊科学, 2023, 35(2): 696-708.]
- [86] Zhou JJ, Zhang M. Effect of dams on the regime of the mid-Lower Yangtze River runoff and countermeasures. *J Lake Sci*, 2018, 30(6): 1471-1488. DOI: 10.18307/2018.0601. [周建军, 张曼. 近年长江中下游径流节律变化、效应与修复对策. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1471-1488.]
- [87] Xu B, Zou L, Yao LQ *et al.* Evolution and attribution analysis of runoff regime in middle and lower reaches of Changjiang River. *Yangtze River*, 2022, 53(4): 91-97. [许斌, 邹磊, 姚立强等. 长江中下游径流情势演变及其归因分析. 人民长江, 2022, 53(4): 91-97.]
- [88] Zhu YH, Guo XH, Chai ZQ. Changes of scouring and silting in the Yangtze River and Dongting Lake and their impacts on flood control and water resources utilization: Analysis and countermeasures. *Technology and Economy of Changjiang*, 2023, (5): 85-93. [朱勇辉, 郭小虎, 柴泽清. 长江与洞庭湖冲淤变化及其对防洪、水资源利用的影响与对策建议. 长江技术经济, 2023, (5): 85-93.]
- [89] Bing JP, Deng PX, Zhang DD *et al.* Influence of Three Gorges Reservoir operation on hydrological regime of Poyang Lake. *Yangtze River*, 2020, 51(3): 87-93. [邴建平, 邓鹏鑫, 张冬冬等. 三峡水库运行对鄱阳湖江湖水文情势的影响. 人民长江, 2020, 51(3): 87-93.]
- [90] Fang CM, Cao WH, Mao JX *et al.* Relationship between Poyang Lake and Yangtze River and influence of Three Georges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(2): 175-181. [方春明, 曹文洪, 毛继新等. 鄱阳湖与长江关系及三峡蓄水的影响. 水利学报, 2012, 43(2): 175-181.]
- [91] Bing JP, Deng PX, Lv SY *et al.* The analysis of water exchange regime research on Poyang Lake and Yangtze River and driving factors. *Scientia Sinica: Technologica*, 2017, 47(8): 856-870. DOI: 10.1360/N092016-00347. [邴建平, 邓鹏鑫, 吕孙云等. 鄱阳湖与长江干流水量交换效应及驱动因素分析. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(8): 856-870.]
- [92] Tang JW, You XY, Li YT *et al.* Impacts of the operation of Three Gorges Reservoir on navigation conditions in middle and Lower Yangtze River. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(1): 102-107. [唐金武, 由星莹, 李义天等. 三峡水库蓄水对长江中下游航道影响分析. 水力发电学报, 2014, 33(1): 102-107.]
- [93] Niu LH, Chen ZH, Shi CL. Influence of shoal and channel evolution in Yichang-Yangjiaobao reach on low water level at Yichang Station. *Yangtze River*, 2018, 49(16): 1-6. [牛兰花, 陈子寒, 史常乐. 宜昌至杨家脑河段滩槽演变对宜昌枯水位的影响. 人民长江, 2018, 49(16): 1-6.]
- [94] Yan JB, Niu LH. Analysis on phase characteristics and influencing mechanism of low-water level corresponding to same flows at Yichang Station on Changjiang River. *Yangtze River*, 2022, 53(12): 75-82. [闫金波, 牛兰花. 长江宜昌站同流量枯水位变化阶段特征及作用机制. 人民长江, 2022, 53(12): 75-82.]
- [95] Yang YP, Zhou LP, Zhang HQ *et al.* Water depth resources and driving mechanism of navigation hindrance of Jingjiang Reach watershed after Three Gorges Project operation. *J Lake Sci*, 2023, 35(2): 684-695. DOI: 10.18307/2023.0224. [杨云平, 周良平, 张华庆等. 三峡工程运行后荆江河段分汇段航道水深资源及碍航驱动机制. 湖泊科学, 2023, 35(2): 684-695.]
- [96] Yang YP, Li M, Liu WL *et al.* Study on the relationship between beach trough evolution and navigation obstruction characteristics in Jingjiang reach of the Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2022, 33(2): 240-252. [杨云平, 李明, 刘万利等. 长江荆江河段滩槽演变与航道水深资源提升关系. 水科学进展, 2022, 33(2): 240-252.]
- [97] Yang YP, Zhang XB, Zheng JH *et al.* Linkage relationship of beach/central bar and waterway shoal obstruction mechanism in Luochengzhou

- reach of the lower reaches of Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2023, **34**(2): 250-264. [杨云平, 张夏博, 郑金海等. 长江下游落成洲河段洲滩联动关系与航道浅滩碍航机制. 水科学进展, 2023, **34**(2): 250-264.]
- [98] Chen YJ, Jiang L. Evaluation of waterway engineering construction and regulation effect in middle and lower reaches of the Yangtze River. *Port & Waterway Engineering*, 2019, (1): 6-11, 34. [陈怡君, 江凌. 长江中下游航道工程建设及整治效果评价. 水运工程, 2019, (1): 6-11, 34.]
- [99] Chen YR. Practice and reflection on green waterway construction on Jingjiang River section in the middle reaches of Yangtze River. *Technology and Economy of Changjiang*, 2021, **5**(2): 51-53. [陈玥如. 长江中游荆江河段绿色航道建设的实践与思考. 长江技术经济, 2021, **5**(2): 51-53.]
- [100] Zheng SR. Some considerations on trial impoundment operation of Three Gorges Project at 175 m water level. *Yangtze River*, 2010, **41**(8): 1-4, 23. [郑守仁. 三峡工程试验性蓄水 175 m 水位运行的相关问题. 人民长江, 2010, **41**(8): 1-4, 23.]
- [101] Hu CH. Analysis on sediment scouring and silting variation of Three Gorges Reservoir since 175 m trial impoundment for past ten years. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, **50**(8): 18-26. [胡春宏. 三峡水库 175m 试验性蓄水十年泥沙冲淤变化分析. 水利水电技术, 2019, **50**(8): 18-26.]
- [102] Zheng SR. Reflections on the Three Gorges Project since its operation. *Engineering*, 2016, **2**(4): 10-27.
- [103] Hu CH. Development and consideration of engineering sediment subject from the Sammenxia Reservoir to the Three Gorges Reservoir in China. *Journal of Sediment Research*, 2019, **44**(2): 1-10. [胡春宏. 从三门峡到三峡我国工程泥沙学科的发展与思考. 泥沙研究, 2019, **44**(2): 1-10.]
- [104] Zhang JL, Hu CH, Liu JX. Operation mode and design technology of “storing clean water and regulating muddy flow” of reservoirs in sediment-laden river. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, **53**(1): 1-10. [张金良, 胡春宏, 刘继祥. 多沙河流水库“蓄清调浑”运用方式及其设计技术. 水利学报, 2022, **53**(1): 1-10.]
- [105] Zhou M, Xu T. Optimal operation for multiple targets and analysis on comprehensive benefits of the Three Gorges Complex. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, **33**(3): 55-60. [周曼, 徐涛. 三峡水利枢纽多目标优化调度及其综合效益分析. 水力发电学报, 2014, **33**(3): 55-60.]
- [106] Wang YX, Jin ZW, Chen P *et al.* Water-sediment asynchrony and transport time of sand peak in flood season of Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, **39**(9): 24-29, 37. DOI: 10.11988/ckyyb.20210510. [王玉璇, 金中武, 陈鹏等. 三峡水库汛期水沙异步特性及沙峰输移时间研究. 长江科学院院报, 2022, **39**(9): 24-29, 37.]
- [107] Ren JQ, Zhao MD, Zhang W *et al.* Impact of the construction of cascade reservoirs on suspended sediment peak transport variation during flood events in the Three Gorges Reservoir. *CATENA*, 2020, **188**: 104409. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104409.
- [108] Zhu LL, Ge H, Dong BJ *et al.* Control index of sediment reduction dispatching in Chongqing reach after the storage level of TGR reaching 175 m. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(1): 114-126. DOI: 10.11821/dlxb202101009. [朱玲玲, 葛华, 董炳江等. 三峡水库 175 m 蓄水后库尾河段减淤调度控制指标研究. 地理学报, 2021, **76**(1): 114-126.]
- [109] Yan JB, Dai SP, Liu TC *et al.* Study on forecast scheme of sediment operation in Three Gorges Reservoir. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2012, **33**(7): 71-74. [闫金波, 代水平, 刘天成等. 三峡水库泥沙作业预报方案研究. 水利水电快报, 2012, **33**(7): 71-74.]
- [110] Hu CH, Fang CM, Xu QX. Application and optimization of “storing clean water and discharging muddy flow” in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, **50**(1): 2-11. [胡春宏, 方春明, 许全喜. 论三峡水库“蓄清排浑”运用方式及其优化. 水利学报, 2019, **50**(1): 2-11.]
- [111] Jin XP, Xu QX. Sediment issues in joint dispatch of reservoir group in Upper Yangtze River. *Yangtze River*, 2018, **49**(3): 1-8, 31. [金兴平, 许全喜. 长江上游水库群联合调度中的泥沙问题. 人民长江, 2018, **49**(3): 1-8, 31.]
- [112] Hu CH, Zhang XM. Study on the change of water and sediment, regulation of water and sediment and utilization of sediment resources in China in recent ten years. *China Water Resources*, 2022, (19): 24-28. [胡春宏, 张晓明. 近十年我国江河水沙变化、水沙调控与泥沙资源化利用研究. 中国水利, 2022, (19): 24-28.]