

三峡工程的供水安全与科技创新保障

夏军^{1,2}, 刘攀¹, 程潜¹

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 430064, 武汉;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 100101, 北京)

摘要: 三峡工程的供水安全是长江流域中下游用水安全的核心支撑。频繁的干旱事件对三峡供水安全构成了严峻挑战。从五个方面探讨了三峡供水安全的核心问题: 有效融合卫星遥感等多源信息能够显著提升来水预报精度; 极端干旱事件日益频繁, 亟须健全长江流域中下游干旱监测、预报与预警机制; 长江上游水库群建成和投产使流域洪水过程发生显著改变, 需要深化水库群优化调度, 推进洪水资源高效利用; 深化水库旱限水位与抗旱调度以及库区生态安全研究。通过综述相关科技创新, 强调了确保三峡供水安全的迫切性, 指出提升三峡供水安全的关键措施, 主要包括: 有效融合多源信息能够显著提升来水预报的精度, 为三峡供水安全提供重要保障; 健全长江流域中下游干旱的监测、预报和预警机制; 开展新形势下长江中上游水库群汛期设计调度一体化研究; 研究三峡水库旱限水位及抗旱调度机制; 统筹水质保护、生态调度、消落带治理等措施, 确保三峡生态安全。

关键词: 三峡工程; 供水安全; 干旱; 来水预报; 抗旱调度; 生态安全

Water supply safety and technological innovation safeguarding for the Three Gorges Project//Xia Jun, Liu Pan, Cheng Qian

Abstract: Water supply safety of the Three Gorges Project shall be the core for water security in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin. Frequent drought events pose a severe challenge to the water supply safety. The core issues of water supply safety faced by the Three Gorges Project are discussed from five aspects of incoming water forecasting based on multi-source information such as satellite remote sensing, drought forecasting and early warning in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin, efficient utilization of flood resources, drought limited water level and drought resistant scheduling and ecological security. By summarizing relevant technological innovations, the urgency of ensuring water supply safety of the Three Gorges Project are emphasized. Key measures to enhance water supply safety are proposed that mainly include integration of multi-source information to improve the accuracy of incoming water forecasting, establishment of a sound monitoring, forecasting, and early warning mechanism for drought in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin, integrated research on flood season design and scheduling of reservoirs in the middle and upper reaches of the Yangtze River under the new situation, study of drought limited water level and drought resistant regulation mechanism of the Three Gorges Reservoir, and measures of integrating water quality protection, ecological regulation and control of water-level fluctuation zone to ensure ecological security.

Keywords: the Three Gorges Project; water supply safety; drought; incoming water forecast; drought resistant scheduling; ecological safety

中图分类号: TV697 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2024)22-0013-04

收稿日期: 2024-10-30

作者简介: 夏军, 中国科学院院士, 主要从事水文水资源方面研究工作。

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目 (U2340213)。

近年长江流域干旱事件频发,给三峡工程的供水安全带来了严峻挑战。因此,需要着力提升水旱灾害防御能力与水资源优化配置能力,确保三峡供水安全,为全面建设社会主义现代化国家提供有力的水安全保障。本文从五个方面探讨三峡供水安全的核心问题:基于卫星遥感等多源信息的来水预报、长江流域中下游干旱预报预警、洪水资源的高效利用、旱限水位与抗旱调度、生态安全,如图1所示。

一、基于卫星遥感等多源信息的来水预报

现代测量技术和计算机技术的进步使信息获取手段更加多样化。来水预报可利用的多源信息主要包括基于3S技术的观测信息、基于工程调查的统计信息以及基于数据智能分析的启发信息。3S技术涵盖遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS、BDS),可获取地形、土壤、水系等空间信息,以及降水、

流量等水文数据和气温、风速、相对湿度、太阳辐射等气象数据。统计信息包括流域内水库的库容和流域面积等工程设计数据。启发信息则通过数据挖掘和分析获得,如插补延长现有观测数据的长度。

有效融合上述多源信息能够显著提升来水预报精度,为三峡供水安全提供重要保障。常用多源信息融合方法包括贝叶斯网络、卡尔曼滤波和机器学习。针对不同水文气象数据和空间信息,需采用相应方法进行信息融合。例如,贝叶斯网络是一种概率图模型,适用于在观测数据充足时建模;卡尔曼滤波是一种递归算法,通过处理噪声干扰测量数据估计动态系统状态,可用于校正水文气象等数据。

二、长江流域中下游干旱预报预警

干旱是一种自然发生的极端气候事件,其核心特征是水分供需失衡,表现为强度大、持续时间长和波及范围广。随着全球气候变化和人类活动的影响,极端干旱事件日益频繁,威胁我国的水资源、生态系统及经济社会发展。如2022年,长江流域遭遇严重“汛期反枯”,农作物受旱面积达到6632万亩(1亩=1/15 hm²),81万人面临饮水困难。相关研究表明拉尼娜现象、大气环流异常、持续高温和用水需求增加等是导致该次极端干旱的关键因素。

为确保三峡供水安全,亟须健全长江流域中下游干旱的监测、预报和预警机制。首先,应建立全面的干旱监测体系,利用遥感技术、气象站和水文观测站等,实时监测降水量、土壤湿度和水位变化等关键指标,并整合不同数据源,形成干旱监测网络,以便及时获取和更新干旱状况,为预报和预警提供可靠数据支持。其次,应采用先进的气象模型和数据

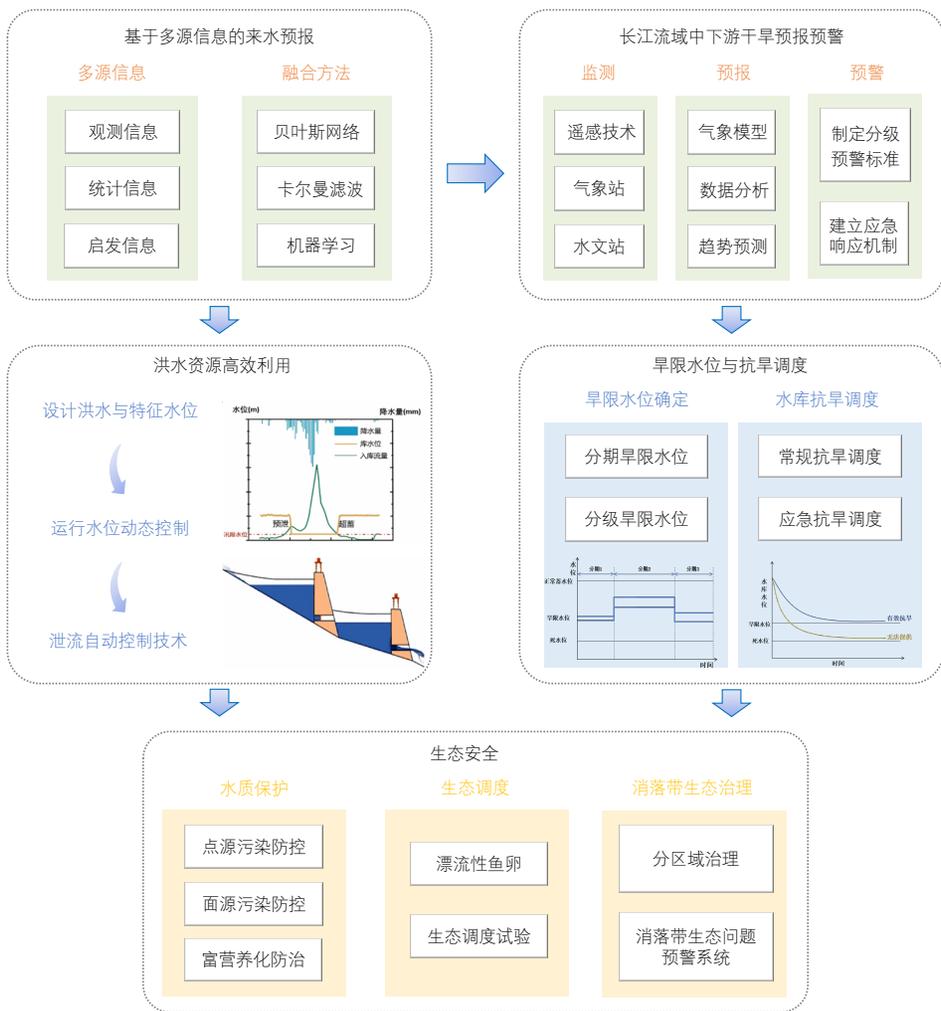


图1 三峡供水安全核心问题

分析技术,结合历史气象数据与实时监测信息,进行干旱趋势预测,分析气候变化对水资源的影响,提前识别干旱风险,并与气象部门合作,确保预报信息的准确性和及时性。最后,应建立预警机制,制定分级预警标准,根据监测和预报结果及时发布干旱预警信息,并建立应急响应机制,以迅速应对干旱事件,保障供水安全。

三、洪水资源高效利用

随着乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝等长江上游水库群的建成和投产,流域洪水过程发生了显著改变,防洪调度方式需要相应作出调整。为进一步促进三峡供水安全,有必要开展新形势下长江中上游水库群汛期设计调度一体化研究。

1. 水库群运行期设计洪水与特征水位理论方法

传统水库规划设计阶段采用的设计洪水典型组合、汛期统计分期和汛限水位静态设计等方法,难以适应运行期动态变化的需求。在气候变化和人类活动影响下,流域洪水过程和空间组成较自然状态发生了显著变化。开展水库群联合调控下的运行期设计洪水研究,对充分发挥水库群的补偿作用具有重要意义。

汛限水位作为关联防洪与兴利、风险与效益的重要参数,设计阶段主要依据洪水统计特性和汛期分期等因素综合确定,但对水库群联合调控影响考虑不足。因此,有必要发展水库群汛限水位联合优化技术,进一步促进洪水资源利用。

2. 水库群汛期运行水位动态控制

水库群之间存在复杂的水力联系,因此防洪库容的最优时空分配问题亟须研究和解决。通过合理分配防洪库容,可以在降低防洪风险的同时提高发电效益。此外,在实际调度过程中,应充分利用多源预报信息,为水库群汛期运行水位的上下阈值界定及区间控制提供风险约束,从而既能满足防洪安全要求,又能充分利用洪水资源。同时,如何根据预先确定的汛期水位进行实时调度,以提高水库的综合利用效益,仍需深入研究。

3. 水库群汛期泄流自动控制技术

传统防洪优化调度主要关注出库流量,未考虑闸门的实际运行约束,导致调度控制脱节和响应速度慢。因此,有必要开展汛期运行水位动态泄流自动控制,以实现汛期运行水位的安全快速响应。机器学习和知识图谱等技术的发展,为大型水库群汛期调控运行方案的快速编制和精准泄流提供了强有力的支持。利用深度学习方法,可以基于水库入库流量、水电站出力 and 水库水位等实时

信息,快速制定闸门调度方案。同时通过各类优化算法能够直接优化闸门组合,实现对泄流的精准控制。

四、旱限水位与抗旱调度

为加强干旱预警和抗旱调度,2011年原国家防汛抗旱总指挥部办公室发布了《旱限水位(流量)确定办法》,首次提出旱限水位(流量)是指江河湖库水位持续偏低,流量持续偏少,影响城乡生活、工农业生产、生态环境等用水安全,应采取抗旱措施的水位(流量)。2022年印发的《水利部水旱灾害防御应急响应工作规程》明确依据江河湖库重要控制站的旱警水位(流量)来决定是否启动响应的规定,突破了在干旱后再启动响应的模式,为水库水资源的综合利用提供了重要指导。旱限水位作为水库在低水位调度运行中的控制性特征水位,其合理设置对区域水资源的高效利用至关重要。

1. 旱限水位确定方法

旱限水位的确定应综合考虑江河湖库的主要用水需求,以最高需求值作为依据,以便及时启动抗旱应急响应。目前水库旱限水位的常见计算方法为:首先计算水库逐月或数月的应供水量,再与水库死库容相加,求出对应水位,最后综合考虑周边供水需求进行分析得出旱限水位。

在实际应用中,若全年采用单一旱限水位,可能导致部分时期标准偏高,影响水库蓄水灵活性,造成枯水期水库在旱限水位以下水量不敢使用,丰水期则出现大量弃水,影响水资源利用和经济效益。此外,水库在同一时期的供水能力因蓄水量不同而异,高蓄水量下供水保障能力强于低蓄水量。因此,计算旱限水位时应分时段和干旱等级进行分期分级确定。

2. 水库抗旱调度

水库抗旱调度主要通过限制水库旱限水位,对水库缺水目标进行优化调控,形成基于旱限水位应对抗旱的一套水库运行机制。调度的最终目标是使缺水量最小化,尽量满足水库下游综合用水需求,减小干旱对水库下游用水产生的破坏。目前,抗旱调度的研究主要分为水库常规抗旱调度和应急抗旱调度。前者将抗旱作为水库调度的常规任务,通过合理设置和科学运用旱限水位,控制水库在低水位下的运行,实现干旱年份的年内补水和年际调蓄。后者则是在干旱发生或预测干旱风险时,通过调整水库闸坝调度规则,提高短期抗旱能力。

现有抗旱调度多停留在理论研究层面,如何在实践中针对不同干旱情况确定旱限水位的运用时机和方式仍是亟待解决的难题。例如,现有水库常规抗旱调度研究集

中于单个水库,缺乏针对水库群的抗旱调度方法。而单一水库应急抗旱调度的实施期限较短,抗旱补水能力有限。

五、生态安全

对于水库来说,生态安全与供水安全息息相关。如何在确保三峡工程供水安全的同时保护三峡库区的生态安全至关重要。为此相关研究进行了多方面探索。

1. 水质保护

自三峡建库以来,尽管对水质保护高度重视,但污染物排放情况依然严峻,点源和面源污染未得到明显改善。农业生产中使用的化肥和农药中的氮、磷等污染物通过降雨径流直接进入库区,同时城镇生活污水和工业废物的排放导致部分河段水质超标,多条支流多次发生水华,并有向干流蔓延的趋势。

为缓解三峡库区水质问题,首先应建立污染源控制机制,控制农药化肥的使用与污水废物的排放,同步减少面源与点源污染。其次,应开展河流富营养化联合防治,建立富营养化预警机制,重点防治发生过水华的区域。

2. 生态调度

对于产漂流性鱼卵的鱼类而言,涨水过程是促进产卵的必要条件,而在鱼卵孵化过程中,特定的流速则是确保其正常孵化的关键。因此,漂流性鱼卵的产卵和孵化流速需求成为生态调度的重要阈值。针对漂流性鱼卵的产卵问题,三峡水库已连续13年开展20次生态调度试验。据监测结果,生态调度显著促进了漂流性鱼卵的产卵效果。调度实施3~4天后,产漂流性鱼卵的鱼类便出现产卵高峰,同时河道内的流速也达到了鱼卵孵化的最低要求,三峡工程对于维护长江生态安全发挥了积极作用。

3. 消落带生态治理

三峡库区消落带面积较大,由于水位频繁波动,每年季节性消涨近30 m,导致其成为一个高度脆弱且治理困难的生态系统。尽管已积极采取措施进行治理,但仍面临自然恢复物种种类少、以草本植物为主、生态调节功能弱等问题。

有效实施消落带的生态治理需要在已有工作基础上建立消落带生态问题预测预警系统,进一步加强消落带生态治理与保护,维护其自然结构与功能。可根据消落带的结构特征分区域采取不同的保护措施。

六、结语

在气候变化与人类活动双重影响下,三峡工程供水安全面临着水量和水质的多重挑战,规划、预报、调度

等关键技术亟须深入研究与实践。未来应融合多源信息提升预报预警精度,提高洪水资源利用效率,健全旱限水位与抗旱调度机制,加强生态安全保障,从而确保三峡供水安全,更好地服务于经济社会高质量发展。

参考文献:

- [1] 夏军,陈进,余敦先.2022年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J].水利学报,2022,53(10):1143-1153.
- [2] 夏军,石卫.变化环境下中国水安全问题研究与展望[J].水利学报,2016,47(3):292-301.
- [3] 初京刚.基于多源信息的分布式水文模拟及优化算法应用研究[D].大连:大连理工大学,2012.
- [4] 杨进怀.基于3S技术的流域农业水资源配置优化研究[D].北京:北京林业大学,2007.
- [5] 许辉熙.空间信息技术在水电开发工程预研中的决策支持[D].成都:成都理工大学,2008.
- [6] 张良培,何江,杨倩倩,等.数据驱动的多源遥感信息融合研究进展[J].测绘学报,2022,51(7):1317-1337.
- [7] 张忠波.三峡入库径流特征及调度问题研究[D].天津:天津大学,2011.
- [8] 周全.洪水预报实时校正方法研究[D].南京:河海大学,2005.
- [9] 王艺婷,黄生志,黄强,等.黄土高原地区干旱可预报性的时空分布与驱动机理[J].自然灾害学报,2024,33(3):137-151.
- [10] 陈仁升,沈永平,毛炜峰,等.西北干旱区融雪洪水灾害预报预警技术:进展与展望[J].地球科学进展,2021,36(3):233-244.
- [11] 张明波,戴明龙,熊丰,等.2022年长江流域极端干旱分析及思考[J].中国防汛抗旱,2023,33(7):9-15.
- [12] 温奇,李苓苓,马玉玲,等.旱灾遥感预警监测评估技术——以2011年长江中下游旱灾为例[J].灾害学,2013,28(2):51-54.
- [13] 庞树森,许继军.分布式水文模型结合气象预报方法初步探讨——以三峡区间实时洪水预报为例[J].人民长江,2012,43(3):55-58+79.
- [14] 张阳博,张帅,朱燕梅,等.汛限水位动态控制对水电-新能源互补能力的提升研究[J].四川电力技术,2023,46(6):15-20.
- [15] 谢雨祚,郭生练,熊立华,等.考虑历史洪水资料的三峡水库运行期非一致性设计洪水估算[J].水利学报,2024,55(6):643-653.
- [16] 徐长江,熊丰,戴明龙,等.梯级水库(下转第104页)

社会主义制度能够集中力量办大事优越性的典范,是中国人民富于智慧和创造性的典范,是中华民族日益走向繁荣强盛的典范。新时代新征程,要守正创新,进一步全面深化改革,不断提升创新发展能力,在中国式现代化建设新征程中体现三峡担当、贡献三峡力量。

参考文献:

[1] 中国长江三峡集团有限公司党组. 奋力谱写中国式现代化三峡新篇章[N]. 人民日报, 2023-11-02(13).
 [2] 阮利民. 聚焦新阶段水利高质量发展 扎实推进做好三峡工程管理工作[J]. 中国水利, 2023(24):31-32.
 [3] 郭树言. 改革开放推动了三峡工程建设[J]. 智慧中国, 2018(6):14-20.
 [4] 吕彩霞. 数字孪生三峡:重点引领 协同高效推进智慧建设[J]. 中国水利, 2022(23):10-13.
 [5] 李洋, 陶景良, 王菡娟. 大国重器 造福人民[N]. 人民政协报, 2022-11-03(6).
 [6] 贾若祥. 适应新质生产力发展的区域政策研究[J]. 新

经济导刊, 2024(5):11-16.

[7] 贾若祥. 以国家江河战略更好推动中国式现代化建设[N]. 经济参考报, 2023-10-17(7).
 [8] 贾若祥. 科学把握推进共同富裕的关键环节[J]. 人民论坛·学术前沿, 2023(7):4-11.
 [9] 贾若祥, 胡蕾, 窦红涛. 生态产品供需的空间关联与匹配路径研究[J]. 生态文明研究, 2024(3):58-70.
 [10] 郭树言. 永载史册的世纪丰碑——三峡工程十年建设的实践与经验[J]. 求是, 2003(15):8-11.
 [11] 陶景良, 刘卡. 简论三峡工程开发性移民的补偿原则[J]. 中国三峡建设, 1999(4):6-7.
 [12] 王喜峰. 水利新质生产力的内涵界定及发展路径研究[J]. 中国水利, 2024(6):26-30.
 [13] 陈飞. 让三峡工程造福人民[J]. 求是, 2012(15):34-35.
 [14] 郭树言. 用改革精神建设三峡[J]. 求是, 1994(21):34-35.

责任编辑 李卢祎

(上接第16页)运行期设计洪水及水位联合优化调控变革与启示[J]. 中国水利, 2024(12):13-17.

[17] 马一鸣, 邱林, 常思源, 等. 潘家口水库群汛限水位动态控制分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(1):46-50.
 [18] 顿晓晗, 周建中, 张勇传, 等. 水库实时防洪风险计算及库群防洪库容分配互用性分析[J]. 水利学报, 2019, 50(2):209-217+224.
 [19] 王宗志, 王银堂, 胡四一, 等. 流域洪水资源利用的理论框架探讨 I:定量解析[J]. 水利学报, 2017, 48(8):883-891.
 [20] 周研来, 郭生练, 王俊, 等. 梯级水库汛期运行水位协同浮动调度模型方法[J]. 水利学报, 2023, 54(5):507-518.
 [21] 黄艳, 王权森, 卢程伟, 等. 水工程联合调度知识图谱构建与应用研究[J]. 人民长江, 2024, 55(9):2-9.
 [22] 徐刚, 舒远丽, 任玉峰, 等. 基于深度学习的三峡水库实时防洪调度模型[J]. 水力发电学报, 2022, 41(3):60-69.
 [23] 王沛霖, 苏承国, 靳世鑫, 等. 考虑泄洪设施闸门控制的水库防洪调度方法[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(8):104-115.
 [24] 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 旱限水位(流量)的确定方法[A]. 2011.

[25] 李博远, 骆进军, 闫永奎. 《水利部水旱灾害防御应急响应工作规程》解读——访水利部水旱灾害防御司司长姚文广[J]. 中国水利, 2022(11):16-19+15.
 [26] 宋树东, 朱文才. 水库旱限水位分期确定的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(3):160-163.
 [27] 罗成鑫, 丁伟, 张弛, 等. 水库分级分期旱限水位设计与控制研究[J]. 水利学报, 2022, 53(3):348-357.
 [28] 李英海, 姜庆琛, 王永强, 等. 三峡水库应急抗旱补水调度及其效益评估研究[J/OL]. 水力发电学报, 2024:1-13[2024-10-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2241.tv.20241016.0957.011.html>.
 [29] 龚文婷, 李帅, 姜伟, 等. 面向鱼类产卵繁殖的人造洪峰生态调度实践——以金沙江下游-三峡梯级水库为例[J]. 中国农村水利水电, 2024(10):65-72.
 [30] 武卫政. 三峡, 期待更严厉的水质保护[N]. 人民日报, 2010-07-02(10).
 [31] 张越, 邓瑞, 刘震, 等. 成渝地区水生态安全保障思路对策[J]. 中国水利, 2023(9):23-26.
 [32] 苏维词. 三峡库区消落带的生态环境问题及其调控[J]. 长江科学院院报, 2004(2):32-34+41.

责任编辑 吕彩霞