

徐晟昊, 李建柱, 姜国瑞, 等. 流域洪水资源利用研究进展与展望[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(8): 175-191. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.013

XU Shenghao, LI Jianzhu, JIANG Guorui, et al. Research progress and prospects of basin floodwater resource utilization[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(8): 175-191. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.013

流域洪水资源利用研究进展与展望

徐晟昊¹, 李建柱¹, 姜国瑞², 张 婷¹, 张立斌¹, 康爱卿³

(1. 天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350; 2. 河北省邢台水文勘测研究中心, 河北 邢台 054000; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘 要: 【目的】受季风气候影响, 我国年内降水时空分布极不均衡, 径流年内分配主要集中在汛期, 常以洪水形式存在。为保障防洪安全, 传统防洪策略中以快速泄洪为主, 但过度依赖单一泄洪模式导致大量雨洪资源未能有效蓄存利用, 加剧了区域非汛期水资源短缺。此外, 洪涝灾害往往与其他区域的干旱事件同时发生, 而洪水资源利用不仅可以起到削峰滞洪的作用, 还可以缓解降水时空分布不均导致的区域水资源短缺问题。【方法】从洪水资源利用的基本概念和研究方法等方面总结了国内外研究进展, 并对跨流域洪水资源利用进行了展望。【结果】具体内容包括: (1) 梳理洪水资源利用潜力概念及其评价方法; (2) 总结水库及蓄滞洪区洪水资源利用的调控策略; (3) 提出区域性和跨流域洪水资源利用途径及研究方向。【结论】通过系统分析洪水资源利用的前沿进展和面临挑战, 可为洪水灾害分析与科学管理提供关键理论与方法支撑, 对缓解跨区域跨流域水资源供需矛盾, 保障区域经济协调发展提供新思路。

关键词: 洪水资源利用潜力; 汛限水位动态控制; 洪水资源调控方式; 多目标协同; 水库群联合调度; 洪水资源利用途径; 跨流域洪水调度; 水网工程

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.013

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)08-0175-17



Research progress and prospects of basin floodwater resource utilization

XU Shenghao¹, LI Jianzhu¹, JIANG Guorui², ZHANG Ting¹, ZHANG Libin¹, KANG Aiqing³

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Xingtai Hydrology Survey and Research Center of Hebei Province, Xingtai 054000, Hebei, China;

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] Influenced by the monsoon climate, the spatiotemporal distribution of precipitation within a year in China is extremely uneven. The annual distribution of runoff is mainly concentrated during the flood season and often exists in the form of floods. To ensure flood control safety, traditional flood control strategies mainly rely on rapid flood discharge. However, excessive reliance on a single flood discharge mode has led to a large amount of rain and floodwater resources failing to be

收稿日期: 2025-08-05; 修回日期: 2025-10-09; 录用日期: 2025-10-20; 网络出版日期: 2025-11-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3006503); 国家自然科学基金(52279022)

作者简介: 徐晟昊(2001—), 男, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: shenghaoxu@tju.edu.cn

通信作者: 李建柱(1981—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: lijianzhu@tju.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

effectively stored and utilized, exacerbating the shortage of water resources in the region during the non-flood season. Moreover, flood disasters often occur simultaneously with drought events in other regions. Floodwater resource utilization can not only aid in peak flow reduction and flood retention, but also alleviate regional water shortages caused by the uneven spatiotemporal distribution of precipitation. [Methods] Domestic and international research progress on the fundamental concepts and methodologies of floodwater resource utilization is reviewed, and prospects for inter-basin floodwater resource utilization are explored. [Results] The specific content includes: (1) outlining the concept of floodwater resource utilization potential and its evaluation method ; (2) summarizing the regulation strategies for the utilization of floodwater resources in reservoirs and flood detention areas; (3) proposing regional and inter-basin floodwater resource utilization pathways and research directions. [Conclusion] Through a systematic analysis of the frontier advancements and challenges in floodwater resource utilization, the analysis can provide critical theoretical and methodological support for flood disaster analysis and scientific management. It offers new perspectives for alleviating the supply-demand contradiction of water resources across regions and basins, thereby supporting coordinated regional economic development.

Keywords: floodwater resource utilization potential; dynamic control of flood-limited water level; floodwater resource regulation strategies; multi-objective coordination; joint scheduling of reservoir groups; floodwater resource utilization pathways; inter-basin floodwater scheduling; water network projects

0 引 言

洪水是最常见、最具破坏性的自然灾害之一，在全球气候变暖的背景下，全球水循环过程不断加剧，导致极端降雨与洪涝事件的发生频率、强度显著增加，对社会经济、生态系统及公共健康等方面产生了深远影响，严重威胁人们的生产、生活及生命财产安全，也给洪水预报和管理带来更大的挑战^[1-4]。中国地域辽阔，地形地貌与水文气象条件复杂多变，不仅是全球洪涝灾害发生最为频繁的国家之一^[5-6]，也是干旱灾害的高发区域^[7]。根据水利部《中国水旱灾害防御公报》，近十年来我国极端天气事件频发，水旱灾害影响范围较大，部分地区暴洪急涝、旱涝急转时有发生。以2024年为例，我国洪水多发频发、局地季节性干旱伴发，水旱灾害防御形势异常严峻复杂。全国主要江河创纪录发生26次编号洪水，为1998年有资料统计以来最多，部分地区反复受灾，洪涝灾害损失重大。同时，西南地区先后发生冬春连旱、伏秋旱，华北西北黄淮等地区夏旱，旱情呈现多季连发态势。在极端气候事件日趋频繁的背景下，充分发挥洪水资源的积极价值，已逐步成为统筹防洪安全与水资源高效利用的关键纽带，是提高水资源利用水平进而解决水资源供需矛盾的重要途径，为高质量发展提供可持续的水安全保障。

受季风气候影响，我国主要江河的天然径流呈现出明显的季节性波动，汛期水量占全年总水量的70%以上，年内水资源分布不均。并且水资源空间分布不均，不同区域间的水量差异显著^[8]，长期以来洪水资源利用在我国的水资源利用中具有十分重要的

地位。为了开展流域洪水资源利用，首先要科学评价流域洪水资源利用现状及其潜力^[9]。近年来，洪水资源利用的研究与实践不断深入^[10-12]，在理论层面，已系统探讨了洪水资源利用的内涵定义、合理性评估标准、风险与效益的量化识别机制，并发展了包括水文气象预报耦合、汛限水位动态控制理论、贝叶斯风险决策模型等在内的相关方法，为实际应用提供了必要的理论支持和技术指导^[13-17]。

洪水资源利用的目标不仅在于减少洪涝灾害带来的损失，还旨在实现供水、发电及生态修复等多重效益^[18]。随着水利信息化技术与统筹调配理念的升级，当前洪水资源利用已从单一工程的局部调控转变为流域尺度的系统化配置^[19]，充分发挥梯级水库群总库容对洪水的调蓄与削峰错峰作用，并通过优化现有蓄滞洪区的功能，使其兼具防洪、地下水回补、农业灌溉及湿地生态修复，是当前洪水资源利用的主要技术途径^[20-26]。然而，随着我国大规模流域水库群和调水工程体系的不断完善，洪水资源利用面临的问题也日益复杂。一方面，多水库、多目标、多约束条件下的联合调度问题显著增加了决策复杂度，如何协调防洪安全、供水保障、发电效益及生态需求之间的关系，实现流域洪水资源整体最优配置，仍然是当前研究的重要难点；另一方面，随着流域内调蓄工程逐渐趋于完善，单一流域内部洪水资源开发利用潜力不断接近上限，仅依靠流域内部调节已难以满足未来水资源安全保障需求。因此，突破传统流域边界限制，探索更大空间尺度上的洪水资源优化配置，成为未来发展的必然趋势。

在单一流域调蓄潜力逐渐接近极限的背景下,充分考虑不同区域和流域水文气象特征和水利工程条件的差异,依托“国家水网”重大工程,构建跨流域洪水资源调配体系,是缓解地区间水资源供需矛盾、保障国家水安全战略的重要途径。基于上述背景,本文旨在对国内外洪水资源利用的发展历程与前沿动态进行全面综述。本文首先介绍洪水资源利用的基本概念和评价方法;其次回顾不同时期流域洪水资源的调控方式,在此基础上,系统梳理流域尺度洪水资源利用的研究脉络和局限性,进而归纳流域洪水资源优化调度的方式;最后提出洪水资源利用未来发展方向和面临的科学技术问题,并强调跨流域跨区域的洪水资源利用是未来研究的重要方向,以期在水旱灾害防御、水资源高效利用和可持续发展提供借鉴。

1 洪水资源及其利用潜力

1.1 洪水资源利用科学内涵

洪水资源的开发利用是由控制洪水向洪水管理转变的过程,通过建设水库和引调水工程,并在实际运行中优化调度策略,可以显著提升水资源的调控能力,从而将汛期的洪水尽可能转化为常规可用的水资源^[27]。“洪水资源利用”的事实一直存在,但这一概念直到21世纪初才被正式提出^[28]。洪水资源和洪水资源化具有不同的含义,洪水资源强调的是洪水的资源特性,包括提供社会生活用水、保持河道行洪能力、补充地下水储量以及维持生态系统的稳定等;洪水资源化是洪水管理的重要内容之一,涵盖了实现资源化的目的与手段。国内许多学者对洪水资源化的定义和概念进行了深入研究,取得了丰富的研究成果^[8,13,17,27-33]。关于“洪水资源化”的学术定义尚未形成统一标准,胡四一等^[28]将其诠释为借助水利工程体系实现洪涝径流的时空调控,在保障防洪安全前提下,通过利用山区保水设施、水库枢纽及人工湖泊等综合系统,实施洪水拦蓄与缓释措施,在维持河道生态基流的同时最大程度补充地下水资源。曹永强^[29]认为洪水资源化应结合区域经济发展水平与水文循环特征,在确保水库和下游河道安全及生态环境可承载的前提下,利用现代化的水文气象预报和科学调度手段调蓄洪水,减少洪水入海量,从而提高洪水资源的利用效率。向立云等^[31]则从多部门多角度考虑,指出洪水资源化概念本质是整合工程与非工程技术手段,在风险可控范围内将传统泄洪模式下流失的过境洪水,通过多目标优化配置实现其资源属性的功能性转化。叶正伟^[10]指出洪水资源化是在充沛降水

和丰富径流的条件下,依托完善的防洪体系,增加水库的调蓄能力并充分发挥湿地的蓄水功能,以最大化利用汛期洪水,并通过跨流域水资源的优化配置实现洪水资源的有效管理与利用。

近年来,随着雨洪资源利用技术的不断发展,胡庆芳等^[34]对洪水资源利用的基本内涵和定义进行了阐述。根据洪水资源利用的核心对象、约束条件、主要途径和目标,认为“洪水资源化(利用)”宜采用“洪水资源利用”代替,并将洪水资源利用定义为:在各类水利工程和洪水管理措施的基础上,确保不超过流域的洪水调控能力,保障河道内必要的生态水需求,将洪水期间的高水位、大流量集中性径流转化为适宜于经济、社会和生态环境使用的水资源。需要说明的是,洪水资源利用并非盲目追求蓄水增容或弃水减量,其核心内涵在于防洪安全风险、社会经济效益与河流生态健康三者之间的深度权衡。有效的利用应是以风险可控为底线,在不损害生态功能的前提下,寻求系统综合效益的最大化。

1.2 洪水资源利用潜力及评价方法

“洪水资源利用潜力”和“洪水资源可利用量”的概念及其评价方法是在洪水资源利用概念的基础上提出的。胡四一等^[28]将洪水资源可利用潜力定义为在满足下游基本用水需求的前提下,依托科学技术发展水平和技术能力,能够调控的洪水资源总量。将洪水资源可利用量定义为在可预见的时期内,在不增加防洪风险并保持河流生态健康的基础上,利用工程与非工程措施,能够开发和调控的尚未被利用的洪水资源量。基于该定义,许继军等^[30]统筹防洪与抗旱两方面因素评价了鄱阳湖流域洪水资源利用潜力,王翠平等^[32]通过适应性改进对长江流域的洪水资源利用潜力进行了评价,赵飞等^[33]从生态修复角度着手,探讨了湿地系统恢复重建与洪水资源利用的耦合机制。毛慧慧等^[16]针对洪水资源的动态性,突破静态评估的局限,提出了洪水资源理论潜力、可实现潜力、实现潜力和待开发潜力的概念,定量揭示了天津北三河水系不同重现期洪水条件下的年内洪水资源潜力分配过程。

胡庆芳等^[8]总结了流域洪水资源利用合理性评价的基本标准和评估方法(见图1),指出洪水资源利用评价方法应涵盖4个主要方面:洪水资源量计算、洪水资源利用水平分析、洪水资源可利用量评价和洪水资源利用潜力评估,并定量评估了海河流域全流域及二级区的洪水资源利用现状和潜力,提出了适用于流域层面的洪水资源利用模式^[35-36]。洪水资源利用

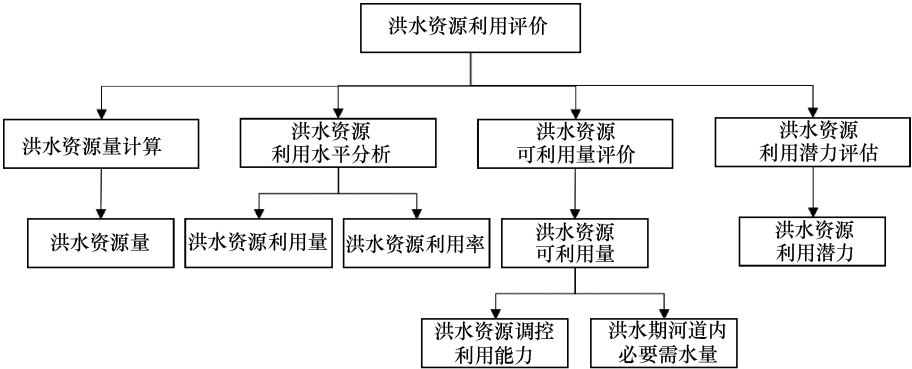


图 1 洪水资源利用评价基本指标^[34]

Fig. 1 Basic indicators for floodwater resource utilization evaluation^[34]

率是表征流域洪水资源开发利用水平高低的常用基本指标，表示洪水期蓄留在出口断面之上的天然径流量占洪水资源量的百分比，近年来随着水利工程和防洪调度的逐渐完善，我国水库(或流域)洪水资源利用率虽然波动较大，但整体趋势在不断提高，海河流域洪水资源利用率多年平均达 76%，淮河流域吴家渡区域最高达 92%^[8,14]。王翠平等^[32]从水资源开发与管理的角度出发，认为洪水资源利用评价应包括利用现状与利用潜力两个方面，利用现状评价方法包括利用方式分析、利用水平评价和利用程度计算等，利用潜力评价方式一般采用单项估算法和综合估算法。王宗志等^[9,17]构建了极限分析理论系统评估模型，确定了流域洪水资源潜力评估的三大核心要素：基于水循环过程的资源总量解析、考虑时空异质性的可利用量评价、融合风险效益分析的利用模式优选。闫成山等^[37]以岸堤水库流域为例，构建该流域多要素耦合的洪水资源利用潜力评估模型，李晓英等^[14]突破传统单维度分析局限，考虑洪水调控能力动态评估与生

态需水量时空匹配，利用二元极限理论建立潜力-需求动态平衡方程，提出了流域洪水资源利用现状和利用潜力的计算方法。

2 洪水资源调控方式研究进展

洪水资源调控方式通常可分为工程措施和非工程措施(见图 2)。工程措施包括大多数水利工程，如水库建设、河道整治、蓄滞洪区建设及考虑雨洪利用的市政工程等，非工程措施包含现有水利工程优化调度与管理、取用水规划等。在考虑经济成本和最大化现有工程效益的基础上，通过工程措施和非工程措施相结合的方式以更加安全地利用洪水资源，成为当前研究的前沿方向。

2.1 水库对洪水资源的调控

水库可以根据汛期不同阶段的洪水规模，实施多阶段防洪-兴利协同调度。通过分期调度可以使原本仅用于防洪的部分库容适当兼顾蓄水兴利的任务^[38]，提高对洪水资源的利用量^[39-41]。因此解决防洪与兴

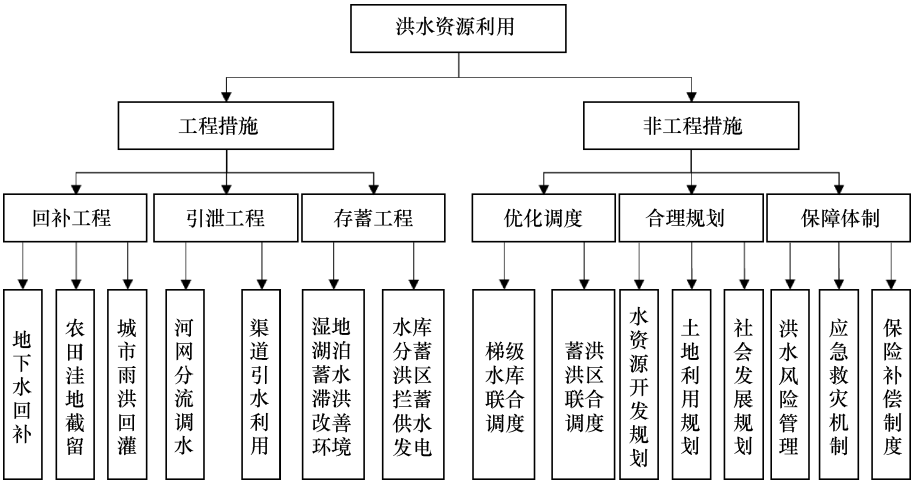


图 2 洪水资源利用主要途径

Fig. 2 Main pathways of floodwater resource utilization

利矛盾的关键任务是合理划分汛期分期并确定分期汛限水位。

2.1.1 汛期分期及其确定方法

汛期分期的方法呈现显著阶段性特征。早期的汛期分期主要依赖水文统计学基础范式,对水文要素进行数理统计来进行分期,优点在于原理简单、计算量小,但忽视了过程模糊性与环境驱动因素。20世纪80年代起,汛期分期理论逐渐发展,逐步形成气象水文学交叉分析框架,基于暴雨气候变化成因的成因分析法开始应用。以气象成因和水文统计相结合的汛期分期方法,突破了传统数理统计法硬性划分的局限,实现了汛期分期从单一的数理统计向定性分析与定量计算相结合的转变^[42]。1988年陈守煜^[43]提出了汛期模糊集合理论,认为汛期属于模糊概念,通过运用汛期分期界限的模糊性,推导出各个时期的汛期隶属度,为汛期分期方法的扩展开辟了新方向。OUARDA等^[44]对三种基于季节划分洪水频率的方法进行了比较,证明了基于超过阈值峰值划分洪水期的方法效果较好。随着模糊集理论在水文学科的应用,可根据不同水文资料和隶属函数确定汛期的隶属度。冯平等^[45]在模糊集合分析理论及汛期划分的基础上,充分考虑到汛期发展的模糊性、随机性和过程性,并结合降雨径流响应特征,通过统计降雨数据构建累计雨量序列,对天津于桥水库进行了汛期分期。莫崇勋等^[46]基于模糊集合理论,利用水库汛期水文信息拟合模糊隶属函数,确定相对隶属度。王宗志等^[47]通过引入时间维聚类算子,改进有效聚类判别函数等,建立了适用于太湖流域的基于模糊时序有效聚类的汛期分期方法。邢旭光等^[48]采用模糊集合分析法对浑河流域的汛期分期进行了研究,并通过实测数据分析验证了该方法的合理性。贾敏等^[49]应用模糊集合分析法对石佛寺水库和清河水库进行了汛期分期,并基于实测旬径流量数据进行了验证。在“从洪水控制到洪水管理”的理念推动下,汛期分期的研究更加深入和广泛。近年来引入概率变点分析和Fisher最优分割,通过无偏的统计检验或最优分割准则确定分期节点,提升了汛期分期方法的客观性^[50]。刘攀等^[51]应用基于超定量取样的概率变点分析方法进行汛期分期,并在三峡水库汛期分期计算中证明了具有较好的无偏性和有效性,能够反映来水的基本规律。刘克琳等^[52]证明了将Fisher最优分割法引入汛期分期可以较好地确定汛期分期的数量,该方法广泛应用于汛期分期领域^[53-55],但Fisher最优分割法中指标权重的选择会影响分期结果^[56]。王宗志等^[57]基于模糊C-

均值聚类和紧密与分离聚类有效函数,对潘家口水库的汛期分期建立了模拟聚类模型。

在实际调度中,统计分析法因其原理简单、计算量小而被广泛应用;而在更深入的计算分析中,通常采用具有一定数学物理背景的聚类分析法,综合考虑水文、气候环境、地质条件等多个因素以及随机性、模糊性等属性,最终确定分期方法。

2.1.2 分期汛限水位及其确定方法

汛限水位是汛期保障水库防洪安全的关键控制参数,是水库在汛期允许兴利蓄水的上限水位^[58-59],界定为汛期防洪库容保障与兴利蓄水约束的刚性平衡点,但固定的汛限水位忽视了汛期洪水的时程分布规律,导致洪水资源在汛末阶段既可能因蓄水滞后产生无效弃水,也可能致使水库难以蓄到正常水位影响枯水期兴利,造成洪水资源的浪费。分期汛限水位是根据地区洪水的季节性规律,按照不同的季节特点进行分期,分别确定每个时期水库的允许兴利蓄水上限水位。武鹏林等^[60]在汾河水库中基于随机函数理论提出了分期汛限水位的新思路。华家鹏等^[61]针对同频率法存在的年际尺度模糊问题,采用组合频率法和库水位法改进了分期汛限水位的确定方法。目前分期汛限水位静态控制的方法比较成熟,主要包括设计洪水过程线法、模糊分析法、多目标设计法等。

设计洪水过程线法是推求分期汛限水位最普遍的方法,在汛期分期确定后通过调洪演算反推汛限水位^[62]。周庆义等^[63]将这一方法应用于音河水库的分期汛限水位研究,有效缓解了防洪与兴利的矛盾。但分期洪水样本容量缩减导致设计值系统性偏低,推算出的分期汛限水位可能增加水库的防洪风险^[64],因此采用全概率公式^[65]和基于Copula函数的联合分布^[66-67]可以更准确地推求分期设计洪水。

模糊分析法是根据时段洪水过程隶属于汛期的程度来给出相应的防洪库容。该方法认为汛期与非汛期之间是一个连续变化的过程,防洪库容也随之变化^[68],通过计算汛期各时间点的隶属度,能够将部分防洪库容转化为兴利库容。陈继东^[69]利用模糊集合理论确定岳城水库汛期不同时刻汛限水位,为水库在汛期及时蓄水提供了理论支持。余玉聪等^[70]基于改进的模糊集分析方法对金沙江下游梯级水库进行汛期分期,并通过隶属度与防洪库容的映射关系确定梯级水库分期汛限水位,得到的分期汛限水位能够在满足防洪安全的前提下提高水库发电等经济效益。此外,李敏等^[71]通过可变模糊集概念,分析了汛期过

渡期对夏秋汛相对隶属度的影响, 并确定了丹江口水库在汛期过渡期需控制的水位。

多目标优化法主要解决水库多功能间的矛盾问题, 采用数学规划方法, 通过汛限水位作为自变量, 建立不同约束条件, 寻找目标函数效益的极大值。吕已奇等^[72]以丰满水库为研究对象, 探讨了水库汛限水位控制的多目标决策问题, 定义了汛限水位控制决策目标与汛限水位之间的协同贡献度函数、系统协调度函数及各目标之间的协同贡献度置换率函数, 构建了汛限水位控制的多目标协同决策模型。李晓英等^[73]采用汛限水位分期控制的效益、风险指标集, 建立了风险效益多目标协同决策模型, 用于确定分期汛限水位。

综上所述, 用于汛期分期与分期汛限水位确定的方法在理论基础与应用侧重点上各有不同。为直观展示各类方法的优劣与适用场景, 从数据需求、计算复杂度以及风险可靠性等维度对上述主要方法进行了系统对比(见表1)。现有的汛期分期及分期汛限水位方法虽已实现水文周期律的基本适配, 但仍存在一定的局限性。例如受限于经验系数传递函数的普适性约束, 跨流域推广应用受到制约。模糊统计法突破了单目标约束边界, 能充分考虑汛期洪水的时间规律, 但其隶属度阈值确定仍受专家主观偏好影响。多目标优化法具有清晰的思路和较强的理论基础, 但这些方法通常只考虑了个别属性, 通过建立简化的模型来求解, 导致结果较为理想化。针对上述瓶颈, 后续研究可基于现有方法, 构建跨流域特征迁移学习模型, 实现经验参数自适应校正, 并结合流域气象水文特征和历史资料等信息, 根据具体情况选择合适的分期汛限水位计算方案。

2.1.3 汛期运行水位动态控制

传统的分期汛限水位控制方法未考虑降雨和洪水预报信息, 导致水库无法充分挖掘其兴利潜力, 从而

造成洪水资源的浪费^[74]。随着现代水文气象预报技术的发展, 特别是中短期降雨预报技术的发展, 基于洪水预报的水库汛期运行水位动态控制研究突破了固定汛限水位的传统调度理念, 进一步提高了水库的兴利潜力^[75-77], 为动态控制汛期运行水位并保障水库在重复库容下的安全运行提供了可靠的信息支持^[78]。目前汛期运行水位动态控制已广泛应用于流域梯级水库联合调度方案的制定^[79], 汛期运行水位动态控制域确定的方法主要有预泄能力约束法^[80-81]和预报调度法^[82]。

在防洪调度策略体系中, 预泄调控技术通过统筹降雨预测时效性、泄洪设施承载阈值及下游防护标准三要素, 采用洪水消退期库容超蓄调控模式, 借助泄流工程使库区水位在后续洪峰到达前回归防洪安全水位阈值。喻杉等^[80]以汛期防洪和洪水资源利用为目标, 对金安桥水电站建立了基于逐步优化算法的水库预报预泄优化模型。任明磊等^[81]提出了一种利用短期降雨预报信息的漳泽水库汛限水位动态调度方法, 确保不降低防洪标准的前提下, 进一步提高洪水资源的利用效率。曹永强^[83]分析了水文气象预报精度对动态水位控制可行域的定量影响, 强调了精确洪水预报及其误差分析对实施动态控制的关键作用。刘招^[84]提出分期分级动态控制理论, 以静态汛限水位为下限, 结合改进的预泄能力约束法确定动态控制域上限, 从而得到了水库汛限水位的动态控制域。预报驱动型调度法通过引入洪水过程概率表征技术, 将设计净雨临界值作为洪水分级决策变量, 构建风险约束下的自适应调度规则体系。周惠成等^[85]提出水库防洪预报调度方法, 通过防洪风险与蓄水效益双维度评估框架实现汛限水位安全抬升。赵强等^[82]通过实时预报调度, 构建了以削峰率最大为目标的水库实时防洪调度模型, 确定了河口村水库动态控制汛期运行水位的上限。

表 1 汛期分期与分期汛限水位确定主要方法对比

Table 1 Comparison of main methods for flood season division and determination of staged flood-limited water levels				
方法类别	代表性方法	数据需求	计算复杂度	风险可靠性
统计分析法	传统数理统计法、设计洪水过程线法	常规单要素历史水文气象极值数据	低	划分边界隔板, 未考虑汛期发展的过程模糊性, 对极端异常洪水的风险可靠性较低
模糊分析法	模糊集合理论、模糊优选法	长序列水文资料以构建隶属度函数	中	隶属度函数的构建及阈值确定受专家主观经验影响较大, 参数跨流域推广时存在潜在防洪风险
聚类分析法	Fisher 最优分割、模糊 C-均值聚类	多维水文气象指标及物理成因数据	较高	结果对指标权重敏感, 受极端异常值影响较大, 对数据质量和样本完整性要求极高
多目标优化法	多目标协同决策模型	水文、防洪、经济、生态等多源数据	高	模型构建与求解复杂, 部分社会/生态指标难以准确定量, 实际应用常面临理想化降维风险

综上所述, 汛期运行水位动态控制方法在洪水演进过程中可以充分考虑实时降雨及洪水预报信息, 对汛限水位进行灵活、及时的调度管理。但该模式的实施效果存在双重限制, 首先, 水库汛期运行水位动态控制方案的构建高度依赖数值天气预报产品的可靠性及洪水过程模拟模型的精度; 其次, 对于流域水文监测网络覆盖度不足或数据同化能力薄弱的水库, 动态水位调控的可行性空间将受制于预报误差的累积放大效应, 其动态汛限水位的运用受到限制^[86]。

2.2 水库群联合优化调度

随着我国各大流域水利枢纽系统化布局的纵深发展, 已构建多层级水库协同运作网络, 传统单体水库调控模式在洪水资源协同管理中的局限性日益凸显。在此背景下, 水文气象预报精度的不断提高、复杂系统优化理论的日益完善以及高性能计算平台与数字孪生技术的快速发展为水库群的联合优化研究创造了有利条件^[20]。水库群联合调度是在流域层面对水库、蓄滞洪区等具有水利联系的相关水利设施进行统一协调调度, 利用流域不同地区间的水文差异性和库群的库容补偿作用实施错峰调度, 获得单库调度难以实现的更大利益^[87-88], 最大程度地发挥工程群对流域洪水资源的时空优化配置能力^[89]。表 2 系统对比了现阶段主要的洪水资源工程调控方式, 不同水利工程施工在洪水资源调控中扮演的角色、发挥的效益及面临的难点各有侧重。

近年来, 针对梯级水库群洪水资源利用的优化调度研究已取得一定的进展。冯平等^[90]通过对岗南水库和黄壁庄水库联合调度的优化, 提高了岗南水库的蓄水效率, 提高了水库洪水资源的利用率。吴泽宁等^[91]对黄河中下游三门峡、小浪底、陆浑和故县水库等梯级水库群及防洪体系运行特性开展研究, 提出了汛期运行水位的动态控制方案, 以满足全流域防洪安全需求。王宗志等^[92]构建了基于库容分区运用的水库群生态调度模型, 制定了多用户分区运用水库群调度模拟规则, 通过库群联合调控作用, 将洪水资源

用于生态补水, 提高了生态供水保证率。周研来等^[93-94]基于“系统聚合思想”, 分别制定了适合清江和乌江流域的梯级水库预泄调度策略, 在保证防洪安全的基础上, 通过协调调度显著提高了洪水资源的利用率, 有效减少了汛期的弃水量。彭少明等^[95]采用多尺度嵌套和多过程耦合方法, 建立了融合供水、输沙、发电、生态等过程的黄河梯级水库群协同调度模型, 通过优化黄河梯级水库群蓄泄秩序和下泄过程, 提高了洪水调度的综合效益。WANG 等^[96]以南四湖流域为研究对象, 将洪水资源利用的空间尺度从单一水库扩展到整个流域内的水库群, 以汛期南四湖入湖水量作为流域的洪水资源利用量, 通过优化水库群汛限水位、调用流域内蓄滞洪区和连通河流间的过水渠道等方法有效地平衡了流域洪水风险和蓄水效益。

水库群系统除具有单一水库的兴利与防洪功能之外, 其内部通过水库间水力耦合形成协同关联与补偿机制, 使得调度管理能够统筹兼顾流域整体的各方面因素, 实现防洪、发电、生态等多目标时空补偿特性, 提高水资源利用率^[92]。与单一水库调度相比, 水库群联合调度的实施条件更加复杂, 需考虑的因素也更多, 如各水库工程参数差异、不同水库的预报精度差异以及各水库防护对象的防洪安全等。目前, 水库群系统调度已经形成了较为完整的分析框架, 在流域预报技术、调度方式研究、优化求解和多目标分析方法方面已经开展了广泛研究。随着多目标调度需求的增加与水库群联合调度的发展, 将更多的潜在洪水资源进行开发利用, 以在电力系统、生态补偿、生产灌溉等方面发挥更大作用, 是未来水库群优化调度不可忽视的研究方向。

2.3 蓄滞洪区对洪水资源的调控

蓄滞洪区是流域防洪体系的重要组成部分, 对不同量级的洪水进行合理调度, 可以在不增加额外洪水风险的前提下, 调整水资源布局, 缓解部分地区缺水状况, 使蓄滞洪区从单纯的防洪功能向集防洪、经济发展、供水和恢复生态环境等综合功能方向转变^[24-25]。

表 2 水库群及蓄滞洪区主要调控方式对比
Table 2 Comparison of main regulation methods for reservoir groups and flood detention areas

调控主体	主要调控方式	核心目标与功能	面临的挑战与难点
单一水库	分期汛限水位、运行水位动态控制	协调单库防洪与兴利矛盾, 挖掘汛期/汛末蓄水潜力	调蓄能力存在物理上限, 高度依赖气象水文预报精度, 抗风险裕度有限
梯级/水库群	库群联合优化调度、库容空间补偿	统筹上下游防洪安全, 实现跨区域多目标时空补偿	多中心利益协调困难, 库间水力耦合机制复杂, 求解“维数灾难”凸显
蓄滞洪区	滞洪动态调度、区内水土资源综合利用	削峰错峰保障干流防洪安全, 兼顾区内地下水回补与湿地生态修复	防洪安全与区内社会经济发展的矛盾突出, 淹没损失补偿机制亟待完善

我国的蓄滞洪区大多兼具防洪和为部分人口提供赖以生存发展的土地资源的特征, 包含人口、资源、环境、社会、经济等多方面的因素。蓄滞洪区内各个功能的实现既有自身的规律又相互关联, 不同功能之间存在矛盾, 如蓄滞洪区防洪运用与其经济社会发展。合理利用蓄滞洪区内的水土资源, 协调各方面的因素, 通过计算各水位下的淹没损失及各项效益, 确定最优蓄水位, 在满足蓄滞洪区防洪功能的前提下提高蓄滞洪区综合利用的整体效益, 是蓄滞洪区洪水资源综合利用的关键。尹雄锐等^[97]通过对胖头泡、月亮泡等蓄滞洪区的分蓄洪能力进行研究, 校核了蓄滞洪区在削峰滞洪方面发挥的重要作用。2023 年海河发生流域性特大洪水期间, 利用蓄滞洪区缓洪、滞洪, 将下泄流量控制在下游河道行洪能力以内, 避免了洪水在下游大面积泛滥, 并且地下水位得到有效回升^[98]。彭静等^[99-100]在对海河流域两个大型蓄滞洪区的研究中发现, 蓄滞洪区的主动利用是推动洪水资源利用的关键路径之一, 同时也是湿地恢复与重建的重要途径。刘兴土^[101]研究了三江平原沼泽湿地的蓄水与调洪功能, 结果表明平原沼泽具备显著的蓄水能力。李娜等^[102]以蓄滞洪区“分得进”“蓄得住”“排得出”“人安全”作为安全运用的判断准则, 构建了蓄滞洪区安全运用分析评价体系。已有的研究成果表明, 以人与自然和谐共生为目标, 主动运用蓄滞洪区来实现洪水资源的有效利用, 成为洪水资源利用的重要措施之一。

3 跨流域洪水资源利用研究进展

3.1 跨流域工程洪水资源利用

跨流域洪水资源利用是在两个或两个以上的流域之间通过调剂水量余缺所进行的水资源合理开发利用^[103], 本质上是对外流域洪水资源采取工程或非工程措施进行合理利用, 与传统洪水资源利用区别在于水资源来自外流域洪水, 并且洪水的利用途径具有明显的区域指向性。目前国内初步建立了流域尺度上的洪水资源利用体系, 形成了流域层面的协同管理框架(见图 3), 是解决区域间水资源分布不均、改善水土资源组合、实现可持续发展的重要战略决策。全球范围已先后

兴建了跨流域调水工程, 国内引滦入津、万家寨引黄工程、引黄济青、南水北调工程等, 以及美国加利福尼亚州水道工程、以色列北水南调工程等跨流域调水工程, 产生了巨大的经济效益、社会效益和生态效益, 为缓解水资源供需矛盾发挥了巨大作用。跨流域的洪水资源利用方式是未来重要发展方向, 对于保障跨流域汛期安全、增加雨洪资源利用、改善水生态环境都有积极影响^[104-105]。

洪水资源利用高度依赖各类水利工程的运用。具有调节功能的控制性和枢纽性工程是实现跨流域洪水资源利用的基础(见图 4)。在统筹维系流域防洪安全与河流生态健康的双重约束下, 跨流域洪水资源利用模式旨在通过疏解本流域的洪水风险, 补充外流域的生产、生活、农业和生态用水。该模式以大型水库为调度中枢, 由控制性枢纽与模块化蓄滞洪区构成动态风险阈值控制系统, 依托河道水网与湖泊湿地系统实现洪水分泄及资源利用。在实际运行中, 需依托数字孪生或物联网技术实时监测受水区的水情、雨情、工情及生态需水缺口, 并将这些动态评估信息作为反馈信号传输至控制性水库群。基于反馈信息, 调度中枢能够修正下一阶段的蓄泄指令与跨流域引调水量, 在保障本流域防洪安全的前提下实现洪水资源的最优动态配置。

汉江流域是南水北调中线工程水源地, 水资源年内分配极不均匀, 以丹江口水库为代表的大中型水利工程及跨流域调水工程众多, 作为跨流域洪水调度源头工程, 霍军军等^[106]为丹江口水库汛末提前蓄水制定方案, 充分挖掘水库的兴利潜力, 提高了枯季向北

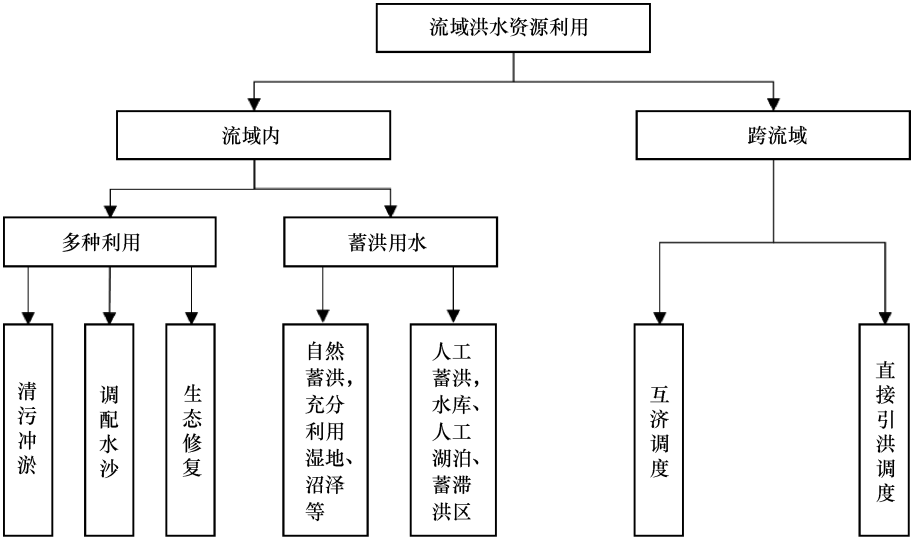


图 3 流域洪水资源利用方式

Fig. 3 Basin floodwater resource utilization methods

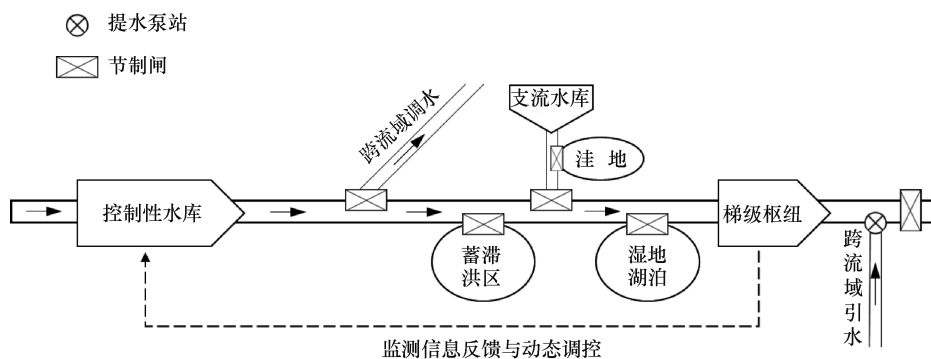


图4 跨流域洪水资源利用一般模式

Fig. 4 General model of inter-basin floodwater resource utilization

方地区的供水量。邹振华等^[107]以持续提高汉江流域洪水资源利用能力为目标,考虑汉江流域雨洪特性,构建了基于预报预泄的水库汛期运行水位多方案动态调控模式,充分利用河道行洪能力,在增加调水工程供水量的同时,将洪水资源转化为可利用的经济、社会和生态用水。

引滦入津工程是跨流域引水工程,该供水系统由潘家口、大黑汀、于桥等三库及配套跨流域输水渠道组成,主要为天津市提供城镇用水、生态用水以及周边灌区的农业用水^[108]。针对供水系统天然入流年内分配极不均匀和年际变化剧烈的问题,相关研究开展了源头水库群防洪优化调度等多项理论和实践研究^[109-110],提出了不同调度方案,充分发挥了各水库调洪滞洪作用,提高了洪水资源的利用率,在南水北调中线通水前保障了天津市供水安全。

近年来国内外跨流域调水工程不断建成,对跨流域调水系统联合优化调度的研究较为广泛^[111-112],但针对跨流域工程对洪水资源利用的研究仍处于初步探索阶段,合理评估跨流域可提供的洪水资源量、对跨流域洪水的可接纳量及河湖水系连通情况等,是未来跨流域洪水资源利用研究的重点方向。

3.2 跨流域洪水资源利用途径

受季风气候影响,我国水资源的空间分布极不均匀,水资源量总体上由东南向西北递减,北方地区水资源匮乏,南方地区水资源相对丰富。水土资源在地区上的组合不相匹配,各地区水资源供需矛盾差异较大,特别是干旱及半干旱地区供需矛盾非常突出,严重制约了当地的经济的发展^[113-114]。将水资源丰富地区的洪水资源通过合理有效的跨流域引调水途径补给北方地区,对社会经济协调发展有着深远影响。

为科学评估跨流域洪水利用潜力,需构建“可供洪水量、可输洪水量、可纳洪水量、可利用洪水

量”四个层面的分析框架。首先识别调水区在保障防洪与生态基流后的可供洪水量,其次,评估跨流域工程过流能力,确定可输洪水量,并核算受水区库容、河湖及地下空间的可纳洪水量,最后确定与需水过程匹配的可利用洪水量。在实际调度中,该分析框架受多重机制约束,一是调度风险约束,需应对气象水文预报误差与丰枯遭遇的不确定性;二是生态约束,需严防污染负荷跨区域转移;三是受水区承载力约束,需兼顾受水区地下水位容纳极限与防洪排涝压力。该框架的核心在于强化风险、效益和生态的综合权衡,避免将洪水资源利用简单理解为提高蓄水量或减少弃水量。

依托国家和区域水网工程,以自然河湖为基础,可调节水库为跨流域洪水调节点,引水、调水、排水工程为通道,智慧调控为手段,实现跨流域洪水资源有效利用。水网工程是基于流域内和跨流域的自然河湖系统加上人工工程(调水工程、水库等)形成的满足经济社会发展和生态环境改善的水循环调控系统,美国加州北水南调工程的修建,使加州初步形成了一个较为完善的水资源调配系统,显著推动了干旱缺水的南加州地区经济的繁荣和社会的发展。以色列通过构建国家智能水网工程,有效地解决了水资源格局与生产力布局不匹配的问题。我国水网工程在调水区和受水区不同流域、不同区域间对水资源重新配置,其主要功能包括供水与灌溉、防洪与排涝、水环境与生态修复等,是应对我国水资源供需失调、结构失衡、提高国家水安全保障的一项重大战略部署^[115-117],如南水北调中、东线一期工程基本功能是供水与灌溉,兼顾生态环境用水,淮河入海水道是以防洪与排涝为主,兼顾灌溉和生态环境用水;京杭大运河全线贯通补水推进了华北地区河湖生态环境复苏和地下水超采治理。

将跨流域洪水用于回灌补给地下水是一种高效的洪水资源利用方式,同时也是解决地下水过量开采问题的有效措施之一,但已有研究主要集中在较小区域尺度。郑德凤等^[22]针对以往按防洪与兴利设计的水库增加补源调节任务后产生的汛期运行风险进行分析,建立了防洪与补源联合优化模型,提高了碧流河水库流域洪水资源利用率。SHETKAR 等^[118]提出建设拦河闸群滞缓洪水并增加地下水入渗补给量,在汛期将洪水尽可能多地转化为地下水,来缓解印度半岛水资源年内分布严重不均导致非汛期水资源短缺的问题。王坤等^[119]在解析典型流域地表-地下水库系统结构基础上,构建多时间尺度的地表-地下水库联合模拟与调控模型,通过调节地下水回补工程水位和地表-地下水库供水规则,提高流域洪水资源利用量,为中小河流洪水资源开发利用提供模型方法。将洪水资源通过跨流域合理调度,储蓄在本流域水库或蓄滞洪区中,并在非汛期对水库下游进行地下水补给,通过蓄滞洪区退水机制将洪水重新纳入河道,服务于更广泛的水资源调配,为缓解流域水资源短缺、保障区域生态协调发展提供新思路。此外,跨流域洪水可为河湖水系连通工程增加供水量,在一定程度上可弥补流域水资源时空分布与用水需求过程不匹配的缺陷,减轻本流域水资源在农业和生态用水方面的负担。

未来跨流域洪水资源是水资源短缺流域供水量的重要组成,在河湖水系连通和跨流域引调水工程日趋完善的背景下,跨流域洪水资源利用将会起到缓解流域防洪压力、改善生态环境、回补地下水、保障供水安全等作用,为保障流域社会经济可持续发展发挥重要作用。

3.3 跨流域洪水调度的复杂性挑战

尽管跨流域洪水资源利用前景广阔,但在实际调度中仍面临自然与社会经济的复杂性挑战,亟须在时空耦合规律识别、不确定性传递控制及利益协同机制等方面深化研究。跨流域洪水资源的科学调度高度依赖于调水区与受水区“丰枯”的时空遭遇匹配。目前识别调水区洪水过程与受水区旱情的时空耦合与补偿规律是跨流域调度的核心难题。现有研究多采用 Copula 函数等统计方法建立多变量联合分布模型,量化跨流域丰枯同步或异步的遭遇概率^[119-121],同时结合标准化降水蒸散发指数和旱涝急转指数等指标,从时间和空间维度揭示旱涝演变及补偿潜力。然而,在多源多受水区复杂工程体系下,极端气候频发导致历史水文序列的非平稳性加剧^[122],如何构建动态环境下的旱涝时空耦合识别模型,精准刻画跨流域水循环

的遥相关机制,是未来的重要研究方向。

在跨流域洪水资源利用全过程中,水文学不确定性的传递效应是不容忽视的技术瓶颈。降雨预报的输入不确定性、水文水动力模型的结构不确定性、参数率定的不确定性等,各类误差会沿着“气象-水文-工程-调度”链条逐级放大。近年来,国内外学者广泛采用多模型集合预报、贝叶斯概率框架及模糊集理论来量化和控制不确定性的传递。但在跨流域长距离调水尺度上,源头洪水的流量与水位预报不确定性如何非线性影响长距离输水效率,进而波及受水区的防洪与供水风险,其级联传递机制尚不清晰^[123]。亟须建立涵盖全过程的概率性水文预测与不确定性动态削减框架,以提升跨流域调度的鲁棒性。

另外,跨流域洪水资源利用不仅是工程技术问题,更涉及跨区域的利益权衡。洪水资源跨流域边界的产权归属界定模糊,易引发输入区防洪压力与输出区用水利益的矛盾。当前,关于跨流域调度的法律法规与利益补偿机制研究正逐步深入。在法律层面,需加快完善跨流域水资源配置条例,明晰特殊时期洪水资源的调度优先权。在利益补偿机制方面,主要集中在构建基于水量、水质及防洪风险分担的横向生态与经济补偿框架,主张通过市场化手段如水权交易与政府宏观调控相结合,实现调水区生态补偿与受水区经济收益的平衡^[124]。未来需进一步探索动态适应旱涝急转情境下的差异化补偿测算模型,为跨区域协同治水提供坚实的制度保障。

4 研究展望

利用水库调整汛限水位来实现洪水资源利用已经形成较为成熟的技术体系,洪水资源协同优化调度也已建立了较为完善的理论方法。然而,在我国“国家水网”战略工程建设的背景下,针对跨流域跨区域洪水资源空间均衡调配的研究仍在初步研究阶段,深入研究跨流域洪水资源利用模式和途径是非常必要的,未来洪水资源利用研究重点应包含以下内容。

(1)多源数据融合与智能预报技术。在基于洪水预报的资源利用中,目前的研究主要集中在已有数据的利用和简单模型的构建上,而数据驱动模型尤其是基于深度学习的方法,已展现出巨大潜力。未来应聚焦多源异构数据(气象卫星、雷达测雨、水文站点监测等)的融合,通过引入更为复杂的深度学习算法和强化学习机制,以有效提高洪水资源利用率。

(2)工程群系统协同调控技术。随着各大流域梯级水库及水库群格局的基本形成,面对梯级水库群-

蓄滞洪区-河道水网组成的复合水利工程系统,传统单库优化的调度策略已无法满足当前洪水资源利用的需求。在流域各类水利工程设施联合防洪调度的基础上,今后应重点关注水库群与蓄滞洪区及河道水网对洪水资源协同化利用措施,尤其是在汛期运行水位动态控制方面,应考虑各水库之间的协同效应及其对下游防洪安全的影响,以实现水资源的最大化利用和洪灾风险的最小化。

(3)跨流域旱涝补偿协同利用技术。跨流域洪水资源利用是未来研究的重要方向,通过流域间的水资源调配和洪水调度,可以实现跨流域水资源的优化配置,缓解跨流域的水资源短缺问题。针对跨流域洪量协同调度机制复杂、资源利用率不高等难题,后续研究可通过大系统分解协调均衡技术和水网工程控制性节点分布,识别跨流域可资源利用的洪水与工程条件,评估洪水资源可调度性,确定跨流域洪量转移阈值,构建洪水资源利用适宜性综合评价指标体系,实现跨流域洪水资源利用效益最大化。

(4)非平稳性洪水特征识别技术。全球气候变暖导致极端暴雨和旱涝急转事件频发,防洪基础理论正面临深刻变革。传统的汛限水位设计与防洪调度高度依赖基于历史观测数据的水文序列平稳性假设,然而,极端气候下径流序列的非平稳演变使得依据历史数据计算的设计洪水可靠性降低,导致现有固定或常规分期汛限水位难以应对突发极端洪灾。未来需突破传统的静态水文频率分析框架,引入时变水文理论与气候-水文动力学耦合模型,构建适应非平稳环境的动态防洪标准及自适应汛限水位调控理论体系。

(5)数字孪生赋能洪水资源实时调度技术。在智慧水利与数字孪生流域建设的驱动下,数字孪生技术为复合工程系统的实时防洪调度提供了全新解法。未来研究应着眼于在孪生平台中嵌入水利知识图谱与智能优化大模型,强化预报、预警、预演、预案“四预”功能的深度集成,实现水库群与蓄滞洪区蓄泄过程的在线推演,在确保防洪绝对安全的前提下,快速锁定复杂工况下洪水资源极限利用的最优决策路径。

(6)水质-水量双约束下的协同利用与风险防控。洪水资源利用的本质不仅是水量的增加,更是水质与水量的有机统一。目前洪水资源利用研究大多侧重于水量的时空调节,而忽视了洪水水质属性对利用路径的约束作用。受地表径流冲刷效应影响,汛初雨水或洪水的污染负荷往往较高,若不加处理直接进入受水区、地下水库或生态系统,可能导致严重的二次污

染。未来研究应重点攻克水质-水量多目标协同调控难题,一方面,需建立覆盖全流域的洪水水质动态监测与风险评估体系,识别不同频率洪水下的污染物运移规律;另一方面,应探索水质、水量、风险三位一体的调度模型,通过利用蓄滞洪区、湿地系统的自然净化功能或采用工程性净化措施对初期劣质洪水进行削减与拦截,实现从单一水量调度向水质-水量协同耦合利用的综合管理范式转变。

参考文献(References):

- [1] 郑彦辰,李建柱,荣佑同,等. 降雨时空分布量化及其在洪水过程分类中的应用[J]. 水利学报, 2022, 53(5): 560-573.
ZHENG Y C, LI J Z, RONG Y T, et al. Quantification of rainfall spatial and temporal distribution characteristics on the flood hydrograph and its application in flood type classification[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(5): 560-573.
- [2] ASIF M, KUGLITSCH M M, PELIVAN I, et al. Review and intercomparison of machine learning applications for short-term flood forecasting[J]. Water Resources Management, 2025, 39(5): 1971-1991.
- [3] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790.
SONG X M, ZHANG J Y, ZHAN C S, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 779-790.
- [4] BERMÚDEZ M, FARFÁN J F, WILLEMS P, et al. Assessing the effects of climate change on compound flooding in coastal river areas[J]. Water Resources Research, 2021, 57(10): e2020WR029321.
- [5] 王小杰,夏军强,李启杰,等. 长江中下游各省市洪涝灾情时空变化及影响因素[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 78-86.
WANG X J, XIA J Q, LI Q J, et al. Spatiotemporal variation of flood distribution and influencing factors in provinces in middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 78-86.
- [6] 赵映慧,郭晶鹏,毛克彪,等. 1949—2015年中国典型自然灾害及粮食灾损特征[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1261-1276.
ZHAO Y H, GUO J P, MAO K B, et al. Spatio-temporal distribution of typical natural disasters and grain disaster losses in China from 1949 to 2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7): 1261-1276.
- [7] 张强,李栋梁,姚玉璧,等. 干旱形成机制与预测理论方法及其灾害风险特征研究进展与展望[J]. 气象学报, 2024, 82(1): 1-21.
ZHANG Q, LI D L, YAO Y B, et al. Progress and prospect of the research on drought formation, prediction, and related risk assessment[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2024, 82(1): 1-21.
- [8] 胡庆芳,王银堂. 海河流域洪水资源利用评价研究[J]. 水文, 2009, 29(5): 6-12.
HU Q F, WANG Y T. Assessment of flood resources utilization in the Haihe River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(5):

- 6-12.
- [9] 王宗志,程亮,刘友春,等. 流域洪水资源利用的现状与潜力评估方法[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 474-481.
WANG Z Z, CHENG L, LIU Y C, et al. Evaluation method for status and potential of flood resource utilization in a basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4): 474-481.
- [10] 叶正伟. 淮河流域洪水资源化的理论与实践探讨[J]. 水文, 2007, 27(4): 15-19.
YE Z W. Discussion on flood resources utilization in Huaihe River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2007, 27(4): 15-19.
- [11] MCCLUSKEY J. Water supply, health and vulnerability in floods [J]. Waterlines, 2001, 19(3): 14-17.
- [12] QUINN J D, REED P M, GIULIANI M, et al. Exploring how changing monsoonal dynamics and human pressures challenge multireservoir management for flood protection, hydropower production, and agricultural water supply [J]. Water Resources Research, 2018, 54(7): 4638-4662.
- [13] 杜慧华. 流域洪水资源利用适度潜力评价研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
DU H H. Evaluation of the Moderate Potential of Flood Water Utilization in a Basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [14] 李晓英,郑浩然,吴淑君,等. 基于二元极限理论的流域洪水资源利用现状与潜力分析[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(2): 70-77.
LI X Y, ZHENG H R, WU S J, et al. Analysis of current and potential flood resources utilization in basin based on bivariate limit theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(2): 70-77.
- [15] 李煜连,钟小敏,帅红,等. 湘江流域洪水资源可利用量与水库调蓄方案研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(1): 78-81.
LI Y L, ZHONG X M, SHUAI H, et al. Available flood resources and reservoir regulation and storage plan in Xiangjiang River Basin [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(1): 78-81.
- [16] 毛慧慧,冯平,王勇. 天津北三河水系雨洪水资源潜力的估算及其应用[J]. 资源科学, 2008, 30(11): 1729-1734.
MAO H H, FENG P, WANG Y. Estimation and utilization of rain and flood water resources in the Tianjin Beisan River system [J]. Resources Science, 2008, 30(11): 1729-1734.
- [17] 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.
WANG Z Z, WANG Y T, HU S Y, et al. Theoretical framework of floodwater resources utilization in a basin I: Quantitative interpretation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(8): 883-891.
- [18] QIU R J, WANG D, SINGH V P, et al. Integration of deep learning and improved multi-objective algorithm to optimize reservoir operation for balancing human and downstream ecological needs [J]. Water Research, 2024, 253: 121314.
- [19] 黄婧,谭超,陈晓宏,等. 基于入库洪水识别模型的洪水资源利用潜力评估[J]. 水利学报, 2024, 55(11): 1286-1297.
HUANG J, TAN C, CHEN X H, et al. Evaluation of flood resource utilization potential based on identification model for inflow flood[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(11): 1286-1297.
- [20] 郭生练,陈炯宏,刘攀,等. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 496-503.
GUO S L, CHEN J H, LIU P, et al. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 496-503.
- [21] 王浩,王旭,雷晓辉,等. 梯级水库群联合调度关键技术发展历程与展望[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 25-37.
WANG H, WANG X, LEI X H, et al. The development and prospect of key techniques in the cascade reservoir operation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 25-37.
- [22] 郑德凤,王本德. 水库防洪与补源优化调度及其风险分析[J]. 水利学报, 2005, 36(7): 772-779.
ZHENG D F, WANG B D. Optimal dispatch of reservoir flood control combining with groundwater recharge and its risk analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(7): 772-779.
- [23] AHMAD A, EL-SHAFIE A, RAZALI S F M, et al. Reservoir optimization in water resources: A review [J]. Water Resources Management, 2014, 28(11): 3391-3405.
- [24] 冯平,毛慧慧,余萍. 蓄滞洪区洪水资源利用的风险效益分析[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 99-103.
FENG P, MAO H H, YU P. Analysis of risk and benefit of flood utilization of detention basin [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(6): 99-103.
- [25] 王艳艳,刘树坤,向立云. 蓄滞洪区综合利用多目标情景分析模型研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2): 209-217.
WANG Y Y, LIU S K, XIANG L Y. Study on the multi-object and scenario analysis model for the integrative utilization of flood detention basin [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(2): 209-217.
- [26] BELLU A, SANCHES FERNANDES L F, CORTES R M V, et al. A framework model for the dimensioning and allocation of a detention basin system: The case of a flood-prone mountainous watershed [J]. Journal of Hydrology, 2016, 533: 567-580.
- [27] 程晓陶. 关于洪水管理基本理念的探讨[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(1): 36-43.
CHENG X T. Discussion on the basic concept of flood management [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004, 2(1): 36-43.
- [28] 胡四一,程晓陶,户作亮,等. 海河流域洪水资源安全利用关键技术研究[J]. 中国水利, 2004(22): 49-51.
HU S Y, CHENG X T, HU Z L, et al. Research on the key technology in safe water utilization in the Hai River Basin [J]. China Water Resources, 2004(22): 49-51.
- [29] 曹永强. 洪水资源利用与管理研究[J]. 资源·产业, 2004, 6(2): 21-23.
CAO Y Q. Study on floodwater utilization and management [J]. Resources & Industries, 2004, 6(2): 21-23.
- [30] 许继军,陈进,黄思平. 鄱阳湖洪水资源潜力与利用途径探讨[J]. 水利学报, 2009, 40(4): 474-480.
XU J J, CHEN J, HUANG S P. Investigation on potentiality and utilization approaches of floodwater resources in Poyang Lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(4): 474-480.
- [31] 向立云,魏智敏. 洪水资源化: 概念、途径与策略[J]. 水利发

- 展研究, 2005, 5(7): 24-29.
- XIANG L Y, WEI Z M. Flood resourcing : Concept, approach and strategy[J]. Water Resources Development Research, 2005, 5(7): 24-29.
- [32] 王翠平, 胡维忠, 宁磊, 等. 长江流域洪水资源利用与策略研究[J]. 人民长江, 2011, 42(18): 85-87.
- WANG C P, HU W Z, NING L, et al. Research on utilization and strategy of flood resources of Yangtze River[J]. Yangtze River, 2011, 42(18): 85-87.
- [33] 赵飞, 王忠静, 刘权. 洪水资源化与湿地恢复研究[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(1): 6-9.
- ZHAO F, WANG Z J, LIU Q. Study on wetland restoration based on utilization of flood resources[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(1): 6-9.
- [34] 胡庆芳, 王银堂, 邓鹏鑫, 等. 对雨洪资源利用的再认识[J]. 水利水运工程学报, 2023(1): 149-160.
- HU Q F, WANG Y T, DENG P X, et al. Reunderstanding on rain and flood resources utilization[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(1): 149-160.
- [35] 王银堂, 胡庆芳, 张书函, 等. 流域雨洪资源利用评价及利用模式研究[J]. 中国水利, 2009(15): 13-16.
- WANG Y T, HU Q F, ZHANG S H, et al. Study on rain & flood resources utilization assessment and utilization model [J]. China Water Resources, 2009(15): 13-16.
- [36] 胡庆芳, 王银堂, 杨大文. 流域洪水资源可利用量和利用潜力的评估方法及实例研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 20-27.
- HU Q F, WANG Y T, YANG D W. Assessment approach for flood resources availability and utilization potentiality and its application [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 20-27.
- [37] 闫成山, 董凤军, 王君诺, 等. 岸堤水库流域洪水资源利用潜力计算方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(4): 13-18.
- YAN C S, DONG F J, WANG J N, et al. Research on the calculation method of flood resources utilization potential of embankment reservoir basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(4): 13-18.
- [38] LIU P, LI L P, GUO S L, et al. Optimal design of seasonal flood limited water levels and its application for the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 1045-1053.
- [39] 邱瑞田, 王本德, 周惠成. 水库汛期限制水位控制理论与观念的更新探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 68-72.
- QIU R T, WANG B D, ZHOU H C. New idea for controlling the limited elevation of reservoirs in the flood season [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 68-72.
- [40] 王蔚, 董增川, 崔璨, 等. 基于洪水资源化的洪泽湖后汛期蓄水策略[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 168-179.
- WANG W, DONG Z C, CUI C, et al. Water storage strategy in post-flood period for Hongze Lake based on flood utilization [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 168-179.
- [41] 欧阳文字, 张弛, 马昊然, 等. 人工智能驱动水文预报与水库调度研究的探索与思考[J]. 水利学报, 2025, 56(9): 1119-1131.
- OUYANG W Y, ZHANG C, MA H R, et al. Exploration and consideration of AI-driven hydrological forecasting and reservoir operation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(9): 1119-1131.
- [42] XU H Q, RAGNO E, JONKMAN S N, et al. Combining statistical and hydrodynamic models to assess compound flood hazards from rainfall and storm surge: A case study of Shanghai [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2024, 28(16): 3919-3930.
- [43] 陈守煜. 从研究汛期描述水文系统模糊集分析的方法论[J]. 水科学进展, 1995, 6(2): 133-138.
- CHEN S Y. Methodology of fuzzy sets analysis to hydrologic system from research on flood period description [J]. Advances in Water Science, 1995, 6(2): 133-138.
- [44] OUARDA T B M J, CUNDERLIK J M, ST-HILAIRE A, et al. Data-based comparison of seasonality-based regional flood frequency methods[J]. Journal of Hydrology, 2006, 330(1/2): 329-339.
- [45] 冯平, 徐向广, 李海. 基于模糊集合分析的汛期分期方法及其应用[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(3): 495-499.
- FENG P, XU X G, LI H. Method to divide flood season based on the fuzzy set analysis and its application [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(3): 495-499.
- [46] 莫崇勋, 刘方贵, 孙桂凯. 水库汛期模糊划分及其分期汛限水位的确定[J]. 水力发电, 2009, 35(8): 13-14.
- MO C X, LIU F G, SUN G K. Fuzzy division of flood season and the determination of its flood control water level of reservoir [J]. Water Power, 2009, 35(8): 13-14.
- [47] 王宗志, 王银堂, 吴浩云, 等. 基于模糊时序有效聚类的太湖流域汛期分期研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 29-34.
- WANG Z Z, WANG Y T, WU H Y, et al. Novel flood season division method based on fuzzy time series-effective cluster and its application to Taihu Lake Basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 29-34.
- [48] 邢旭光, 史文娟, 赵焜. 基于模糊集分析法的浑河流域汛期分期研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(5): 231-234.
- XING X G, SHI W J, ZHAO Z. Study on flood season staging of Hunhe River basin based on the method of fuzzy sets analysis [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2012, 40(5): 231-234.
- [49] 贾敏, 母晓妃. 模糊集分析法在水库汛期分期中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(2): 178-181.
- JIA M, MU X F. Application of fuzzy sets analysis method in staging flood season of reservoir [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(2): 178-181.
- [50] LI J. A flood season division model considering uncertainty and new information priority [J]. Water Resources Management, 2024, 38(10): 3755-3784.
- [51] 刘攀, 郭生练, 王才君, 等. 三峡水库汛期分期的变点分析方法研究[J]. 水文, 2005, 25(1): 18-23.
- LIU P, GUO S L, WANG C J, et al. Flood season staged for Three Gorges Reservoir based on the change-point approach [J]. Hydrology, 2005, 25(1): 18-23.
- [52] 刘克琳, 王银堂, 胡四一, 等. Fisher 最优分割法在汛期分期中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3): 14-16.

- LIU K L, WANG Y T, HU S Y, et al. Application of Fisher optimal dissection method to flood season division[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2007, 27(3): 14-16.
- [53] 王双银, 杨筱筱. 基于相关系数和 Fisher 最优分割法的汛期分期研究[J]. *水文*, 2011, 31(4): 1-5.
- WANG S Y, YANG X X. Flood season division based on correlation coefficient and optimum partition method of fisher[J]. *Hydrology*, 2011, 31(4): 1-5.
- [54] 肖聪, 顾圣平, 崔巍, 等. Fisher 最优分割法在李仙江流域汛期分期中的应用[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(3): 70-74.
- XIAO C, GU S P, CUI W, et al. Application of fisher optimal partition method in division of flood season in Lixianjiang Basin[J]. *Water Resources and Power*, 2014, 32(3): 70-74.
- [55] 龚李莉, 李敏, 蔡梅, 等. 基于 Fisher 最优分割法的太湖调度线时段划分研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(4): 106-110.
- GONG L L, LI M, CAI M, et al. Research on time slot division of Taihu Lake dispatching line based on Fisher Optimal Partition Method[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(4): 106-110.
- [56] 虞慧, 刘星根, 吴晓彬, 等. 指标权重算法对 Fisher 最优分割在水库汛期分期中的影响研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(1): 105-110.
- YU H, LIU X G, WU X B, et al. The influence of the weight of index algorithm on the fisher's optimal segmentation in the reservoir's flood season[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(1): 105-110.
- [57] 王宗志, 王银堂, 胡四一. 水库控制流域汛期分期的有效聚类分析[J]. *水科学进展*, 2007, 18(4): 580-585.
- WANG Z Z, WANG Y T, HU S Y. Effective fuzzy cluster method for dividing reservoir flood season[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(4): 580-585.
- [58] JIANG M, QIAO C Y, LU F, et al. The impact of reservoirs with seasonal flood limit water level on the frequency of downstream floods[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 644: 132009.
- [59] YUN R, SINGH V P. Multiple duration limited water level and dynamic limited water level for flood control, with implications on water supply[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 354(1/2/3/4): 160-170.
- [60] 武鹏林, 晋华. 汛期洪水循时程变化规律研究与应用[J]. *太原理工大学学报*, 1999, 30(1): 106-109.
- WU P L, JIN H. Study and application of the regulation of flood change following time in flood period[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 1999, 30(1): 106-109.
- [61] 华家鹏, 孔令婷. 分期汛限水位和设计洪水位的确定方法[J]. *水电能源科学*, 2002, 20(1): 21-23.
- HUA J P, KONG L T. Calculating methods of staged limit water level in flood season and design flood level[J]. *Water Resources and Power*, 2002, 20(1): 21-23.
- [62] 肖义, 郭生练, 方彬, 等. 设计洪水过程线方法研究进展与评价[J]. *水力发电*, 2006, 32(7): 61-63.
- XIAO Y, GUO S L, FANG B, et al. Advances and assessment on design flood hydrograph methods[J]. *Water Power*, 2006, 32(7): 61-63.
- [63] 周庆义, 皇甫淑贤, 马友春. 音河水库汛期分时段控制运用研究[J]. *黑龙江水利科技*, 1995, 23(3): 69-74.
- ZHOU Q Y, HUANGFU S X, MA Y C. Study on flood season control and application of Yinhe Reservoir[J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 1995, (3): 69-74.
- [64] 李英海, 夏青青, 常文娟, 等. 水库汛限水位确定方法研究综述[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(5): 127-134.
- LI Y H, XIA Q Q, CHANG W J, et al. Review of the methods of reservoir's limiting water level during flood season[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(5): 127-134.
- [65] 王文圣, 姚瑞虎, 覃光华, 等. 以洪水分期为条件的管运洪水直接推求法[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(1): 75-82.
- WANG W S, YAO R H, QIN G H, et al. Direct method of calculating the manage-flood based on division of flood period[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 75-82.
- [66] 肖义, 郭生练, 刘攀, 等. 基于 Copula 函数的设计洪水过程线方法[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2007, 40(4): 13-17.
- XIAO Y, GUO S L, LIU P, et al. Derivation of design flood hydrograph based on Copula function[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2007, 40(4): 13-17.
- [67] 刘菁稳, 玄英姬, 陈星. 汛限水位分期控制方法在石岩水库的应用[J]. *人民黄河*, 2018, 40(4): 32-36.
- LIU J W, XUAN Y J, CHEN X. Application and analysis of stages control method of flood limited water level in Shiyan Reservoir[J]. *Yellow River*, 2018, 40(4): 32-36.
- [68] 马永胜. 基于模糊集理论的石泉水库分期汛限水位确定[J]. *水电能源科学*, 2008, 26(3): 47-49.
- MA Y S. Seasonal flood limited level determination for Shiquan Reservoir based on fuzzy set theory[J]. *Water Resources and Power*, 2008, 26(3): 47-49.
- [69] 陈继东. 利用模糊集理论对岳城水库汛限水位的研究[J]. *海河水利*, 1998(3): 22-23.
- CHEN J D. Study on flood limit water level of yuecheng reservoir by using fuzzy set theory[J]. *Haihe Water Resources*, 1998, (3): 22-23.
- [70] 余玉聪, 李雯晴, 刘招, 等. 金沙江下游梯级水库汛期分期及汛限水位合理性研究[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(9): 39-44.
- YU Y C, LI W Q, LIU Z, et al. Rational flood season staging and limit flood levels of cascade reservoirs in downstream Jinsha River[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(9): 39-44.
- [71] 李敏, 陈守煜, 张艳平. 丹江口水库夏秋汛过渡期汛限水位动态控制[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2010, 29(3): 502-505.
- LI M, CHEN S Y, ZHANG Y P. Dynamic control method of reservoir normal level in transition period between summer and autumn flood seasons at Danjiangkou[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2010, 29(3): 502-505.
- [72] 吕已奇, 王建群, 焦钰, 等. 基于协同的水库汛限水位控制多目标分析[J]. *人民黄河*, 2019, 41(5): 23-27.
- LYU S Q, WANG J Q, JIAO Y, et al. Multi-Objective synergistic analysis of control schemes of the limited water level of reservoir in

- flood season[J]. Yellow River, 2019, 41(5): 23-27.
- [73] 李晓英, 张琰, 童泽淳. 水库汛限水位控制多目标协同决策研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(2): 31-42.
- LI X Y, ZHANG Y, TONG Z C. Study on multi-objective cooperative decision making of flood control water levels of reservoirs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(2): 31-42.
- [74] 田杏丽, 黄强, 王义民, 等. 我国水库洪水资源化研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(5): 24-28.
- TIAN X L, HUANG Q, WANG Y M, et al. Research progress for flood resources utilization of reservoir in China[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(5): 24-28.
- [75] 高波, 吴永祥, 沈福新, 等. 水库汛限水位动态控制的实现途径[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 406-411.
- GAO B, WU Y X, SHEN F X, et al. Available approach to controlling dynamically the limited level of reservoirs during the flood season[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 406-411.
- [76] 刘攀, 郭生练, 王才君, 等. 水库汛限水位实时动态控制模型研究[J]. 水力发电, 2005, 31(1): 8-11.
- LIU P, GUO S L, WANG C J, et al. Real-time dynamic control model for reservoir flood limit water level operation[J]. Water Power, 2005, 31(1): 8-11.
- [77] 黄灵芝. 汛限水位动态控制在石门水库主汛期调度中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 146-150.
- HUANG L Z. Research on limited water level dynamic control of Shimen reservoir dispatch in the main flood season[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(3): 146-150.
- [78] 李玮, 郭生练, 刘攀, 等. 梯级水库汛限水位动态控制模型研究及运用[J]. 水力发电学报, 2008, 27(2): 22-28.
- LI W, GUO S L, LIU P, et al. Dynamic control model for limiting level during flood season of cascade reservoirs operation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(2): 22-28.
- [79] CHEN J H, GUO S L, LI Y, et al. Joint operation and dynamic control of flood limiting water levels for cascade reservoirs[J]. Water Resources Management, 2013, 27(3): 749-763.
- [80] 喻杉, 纪昌明, 杨子俊, 等. 基于逐步优化算法的水库预报预泄规则拟定研究[J]. 水力发电, 2012, 38(2): 57-60.
- YU S, JI C M, YANG Z J, et al. Research on making forecast and pre-discharge rules for hydropower station based on progressive optimality algorithm[J]. Water Power, 2012, 38(2): 57-60.
- [81] 任明磊, 何晓燕, 丁留谦, 等. 基于改进预泄能力约束法的水库汛限水位分期动态控制域确定及应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(1): 16-22.
- REN M L, HE X Y, DING L Q, et al. Research and application of staged dynamic controlling domain of limited reservoir water level in flood season based on the improved pre-discharge capacity constrained method[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(1): 16-22.
- [82] 赵强, 钟平安, 刘冠华, 等. 基于预报调度的河口村水库汛限水位动态控制域研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(10): 56-59.
- ZHAO Q, ZHONG P A, LIU G H, et al. Research on dynamic control domain of flood control level of Hekoucun Reservoir based on forecasting operation[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(10): 56-59.
- [83] 曹永强. 汛限水位动态控制方法研究及其风险分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- CAO Y Q. Study on the Method of Dynamic Control of the Limit Water Level and Its Risk Analysis[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.
- [84] 刘招. 水库的洪水资源化理论和方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- LIU Z. Study on Theory and Method of the Flood Resources Utilization Based on Reservoir[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- [85] 周惠成, 张改红, 王本德, 等. 基于防洪预报调度调整水库汛限水位的研究[J]. 水力发电, 2006, 32(5): 14-17.
- ZHOU H C, ZHANG G H, WANG B D, et al. Study on adjusting the limited level of reservoirs during flood season based on flood control forecast[J]. Water Power, 2006, 32(5): 14-17.
- [86] JAIN S K, SHILPA L S, RANI D, et al. State-of-the-art review: Operation of multi-purpose reservoirs during flood season[J]. Journal of Hydrology, 2023, 618: 129165.
- [87] 钟平安, 孔艳, 王旭丹, 等. 梯级水库汛限水位动态控制域计算方法研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(5): 36-43.
- ZHONG P A, KONG Y, WANG X D, et al. Study on method for estimation of dynamic control bounds of flood limited water level in cascade reservoirs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 36-43.
- [88] 郭旭宁, 秦韬, 雷晓辉, 等. 水库群联合调度规则提取方法研究进展[J]. 水力发电学报, 2016, 35(1): 19-27.
- GUO X N, QIN T, LEI X H, et al. Advances in derivation method for multi-reservoir joint operation policy[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(1): 19-27.
- [89] MORIDI A, YAZDI J. Optimal allocation of flood control capacity for multi-reservoir systems using multi-objective optimization approach[J]. Water Resources Management, 2017, 31(14): 4521-4538.
- [90] 冯平, 陈根福, 卢永兰, 等. 水库联合调度下超汛限蓄水的风险效益分析[J]. 水力发电学报, 1995, 14(2): 8-16.
- FENG P, CHEN G F, LU Y L, et al. Risk benefit analysis on water storage in combined operation of reservoirs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1995, 14(2): 8-16.
- [91] 吴泽宁, 胡彩虹, 王宝玉, 等. 黄河中下游水库汛限水位与防洪体系风险分析[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 641-648.
- WU Z N, HU C H, WANG B Y, et al. Risk analysis on limited water level of reservoirs in flood season and flood control system in midstream and downstream of Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(6): 641-648.
- [92] 王宗志, 程亮, 王银堂, 等. 基于库容分区运用的水库群生态调度模型[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 435-443.
- WANG Z Z, CHENG L, WANG Y T, et al. A multi-reservoir ecological operation model based on subdivision application of reservoir storage capacities[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 435-443.
- [93] 周研来, 郭生练, 段唯鑫, 等. 梯级水库汛限水位动态控制[J]. 水力发电学报, 2015, 34(2): 23-30.

- ZHOU Y L, GUO S L, DUAN W X, et al. Dynamic control of flood limited water level for cascade reservoirs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(2): 23-30.
- [94] 彭涛. 乌江中下游干流梯级水库洪水资源利用方式研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 59-61.
- PENG T. Study on flood resource utilization of cascade reservoirs in the middle and lower reaches of the Wujiang River[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(8): 59-61.
- [95] 彭少明, 王煜, 郑小康, 等. 黄河梯级水库群多过程协同调度模型与方法[J]. 水利学报, 2022, 53(12): 1410-1420.
- PENG S M, WANG Y, ZHENG X K, et al. A multi-process coordinated scheduling model and method for cascade reservoirs in Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(12): 1410-1420.
- [96] WANG Z Z, WANG Y T, LIU K L, et al. Theory and practice of basin-wide floodwater utilization: Typical implementing measures in China[J]. Journal of Hydrology, 2024, 628: 130520.
- [97] 尹雄锐, 方书义, 王晓妮. 松花江流域蓄滞洪区分蓄洪能力研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(12): 129-132.
- YIN X R, FANG S Y, WANG X N. Study on control and application scheme of flood storage and detention areas in Songhua River Basin[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(12): 129-132.
- [98] 杜晓鹤, 何秉顺, 徐卫红, 等. 海河“23·7”流域性特大洪水蓄滞洪区运用复盘及系统治理绿色发展的思考[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(9): 31-38.
- DU X H, HE B S, XU W H, et al. Retrospective operation in the “23·7” extreme flood storage and detention area of the Haihe River Basin and reflection on systematic governance and green development[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(9): 31-38.
- [99] 彭静, 骆辉煌, 马巍, 等. 海河蓄滞洪区洪水资源利用的水污染风险分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(2): 85-89.
- PENG J, LUO H H, MA W, et al. Water pollution risk analysis on flood resource utilization in Haihe River detention areas[J]. Journal of China Institute of Water, 2005, 3(2): 85-89.
- [100] 杨小柳, 周杏雨, 王月玲, 等. 蓄滞洪区洪水资源化的益损定量分析: 以大黄堡洼为例[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 739-744.
- YANG X L, ZHOU X Y, WANG Y L, et al. Quantitative benefit/loss analysis of floodwater utilization in a flood detention area: Case study of Dahuangpu Wa[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 739-744.
- [101] 刘兴土. 三江平原沼泽湿地的蓄水与调洪功能[J]. 湿地科学, 2007, 5(1): 64-68.
- LIU X T. Water storage and flood regulation functions of marsh wetland in the Sanjiang Plain[J]. Wetland Science, 2007, 5(1): 64-68.
- [102] 李娜, 王静, 俞茜, 等. 蓄滞洪区安全运用分析评价体系构建及应用[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(12): 46-54.
- LI N, WANG J, YU Q, et al. Construction and application on safety operation analysis and evaluation system for flood storage and detention areas[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(12): 46-54.
- [103] 冯耀龙, 练继建, 王宏江, 等. 用水资源承载力分析跨流域调水的合理性[J]. 天津大学学报, 2004, 37(7): 595-599.
- FENG Y L, LIAN J J, WANG H J, et al. An analysis of rationality of interbasin water transfer by water resources carrying capability[J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(7): 595-599.
- [104] 田友. 海河流域水生生态恢复与洪水资源化[J]. 中国水利, 2002(7): 29-30.
- TIAN Y. Aquatic environment recovery and utilization of flood resource in the Hai River Basin[J]. China Water Resources, 2002(7): 29-30.
- [105] 李瑛, 金奔, 董磊华, 等. 引汉济渭工程水库生态调度方案研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(7): 80-82.
- LI Y, JIN Y, DONG L H, et al. Study on reservoir ecological operation scheme of Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project[J]. Yellow River, 2020, 42(7): 80-82.
- [106] 霍军军, 许继军, 张莉莉. 丹江口水库汛末提前蓄水策略探讨[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(12): 68-71.
- HUO J J, XU J J, ZHANG L L. Impoundment in advance at the end of flood season for Danjiangkou Reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(12): 68-71.
- [107] 邹振华, 郭含, 尹志. 汉江流域洪水资源利用约束机制及调控模式研究[J]. 人民长江, 2023, 54(7): 8-13.
- ZOU Z H, GUO H, YIN Z. Constraints mechanism of flood resources utilization and control modes in Hanjiang River basin[J]. Yangtze River, 2023, 54(7): 8-13.
- [108] 方淑秀, 黄守信, 王孟华, 等. 跨流域引水工程多水库联合供水优化调度[J]. 水利学报, 1990, 21(12): 1-8.
- FANG S X, HUANG S X, WANG M H, et al. Optimal operation of multireservoir of inter-basin diversion project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 21(12): 1-8.
- [109] 万芳, 周进, 邱林, 等. 跨流域水库群联合供水调度的聚合分解协调模型及应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 54-58.
- WAN F, ZHOU J, QIU L, et al. Aggregation and decomposition-coordinate model of multireservoir optimization water supply dispatching of inter-basin diversion and its application[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(6): 54-58.
- [110] 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.
- MA Y M, QIU L, CHANG S Y, et al. Dynamic control analysis of flood limit water level of Panjiakou Reservoir Group[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(1): 46-50.
- [111] 彭安帮, 彭勇, 周惠成. 跨流域调水条件下水库群联合调度图的多核并行计算研究[J]. 水利学报, 2014, 45(11): 1284-1292.
- PENG A B, PENG Y, ZHOU H C. Multi-core parallel computation for deriving joint operating rule curves in multi-reservoir system under the condition of inter-basin water transfer[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(11): 1284-1292.
- [112] 张弛, 陈晓贤, 李昱, 等. 跨流域引水受水水库最优调度决策的理论分析[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 492-504.
- ZHANG C, CHEN X X, LI Y, et al. Analytical analysis for optimal

- operation of the recipient reservoir in inter-basin water transfer projects[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(4): 492-504.
- [113] 宋先松, 石培基, 金蓉. 中国水资源空间分布不均引发的供需矛盾分析[J]. *干旱区研究*, 2005, 22(2): 162-166.
- SONG X S, SHI P J, JIN R. Analysis on the contradiction between supply and demand of water resources in China owing to uneven regional distribution[J]. *Arid Zone Research*, 2005, 22(2): 162-166.
- [114] 齐泓玮, 尚松浩, 李江. 中国水资源空间不均匀性定量评价[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(6): 28-38.
- QI H W, SHANG S H, LI J. Quantitative evaluation on spatial heterogeneity of water resources in China [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(6): 28-38.
- [115] 夏军, 陈进, 余敦先, 等. 变化环境下中国现代水网建设的机遇与挑战[J]. *地理学报*, 2023, 78(7): 1608-1617.
- XIA J, CHEN J, SHE D X, et al. Opportunities and challenges of national water network construction under changing environment[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(7): 1608-1617.
- [116] 余运磊, 曹一一, 周琪, 等. 国家水网对中国地级市水资源短缺的缓解效果评估[J]. *水利学报*, 2025, 56(4): 531-540.
- SHE Y L, CAO Y Y, ZHOU Q, et al. Assessment the impact of the National Water Network on water shortages in Chinese prefecture-level cities[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2025, 56(4): 531-540.
- [117] 王梦晗, 严登华, 张鑫, 等. 水网工程高质量发展若干关键问题的思考[J]. *水资源保护*, 2025, 41(1): 35-41.
- WANG M H, YAN D H, ZHANG X, et al. Thoughts on key issues for high-quality development of water network projects[J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(1): 35-41.
- [118] SHETKAR R V, MAHESHA A. Tropical, seasonal river basin development through a series of vented dams [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2011, 16(3): 292-302.
- [119] 王坤, 王宗志, 白莹, 等. 沿海中小河流域地表-地下水库联合调控洪水资源利用研究: I. 方法与模型[J]. *水资源保护*, 2024, 40(1): 79-85.
- WANG K, WANG Z Z, BAI Y, et al. Research on joint regulation and utilization of flood resources by surface-underground reservoirs in coastal small and medium-sized river basins: I. methods and models[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1): 79-85.
- [120] HAN Y P, LI J H, ZHAO M D. Spatiotemporal patterns of wet - dry encounters between water source and receiving areas in the South-to-North water transfer project[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 20771.
- [121] 李晓英, 姜紫萍, 樊红霞, 等. 基于非对称乘积 Copula 函数的城市雨洪遭遇风险分析[J]. *水资源保护*, 2024, 40(6): 78-84.
- LI X Y, JIANG Z P, FAN H X, et al. Risk analysis of urban rain-flood encounter based on asymmetric product Copula function[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(6): 78-84.
- [122] SOLTANINIA S, ESKANDARIPOUR M. Trivariate flood frequency analysis using copula functions: Assessing non-stationary hydrological risks under climate change[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2025: jwc2025068.
- [123] WANG J Y, LIU D D, GUO S L, et al. Impacts of inter-basin water diversion projects on the feedback loops of water supply - hydropower generation - environment conservation nexus [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2025, 29(14): 3315-3339.
- [124] XU H, CHEN L X, LI Q F. Research on two-way ecological compensation strategy for transboundary watershed based on differential game[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 371: 123314.

(责任编辑 王海锋)