

流域防洪工程体系的韧性评估与多目标优化策略研究

付芹芹¹ 杨帅^{2*} 袁梅³ 高丽丽⁴ 杨孟钊¹

1. 山东鲁凯水利咨询有限公司, 中国·山东 滨州 256600

2. 博兴县城乡水务发展中心, 中国·山东 滨州 256500

3. 滨州市滨城区水利资源开发建设中心, 中国·山东 滨州 256600

4. 滨州市沾化区城乡水务发展中心, 中国·山东 滨州 256800

摘要: 为了确保流域防洪工程体系的洪灾防御功能正常实施并达到维持区域安全稳定的目的, 就必须进行系统的韧性与优化研究。因此, 论文先从原理层面分析流域防洪工程体系的基本构成, 继而明确该体系在防洪过程中的功能及其特征。随后以不同评价体系(如基于指标体系、模型模拟、设置场景、综合评点法等)系统评价流域防洪工程体系的韧性水平为依据, 以期提出优化措施的指导性意见。最后给出多元优化的策略, 主要侧重于抗洪性能的设计优化措施、环保与工程功效协调均衡措施、对未知风险适应的弹塑性措施以及因地制宜、因势利导的差异化优化措施的提出。

关键词: 流域防洪; 韧性评估; 多目标优化; 结构优化; 风险管理

Research on Resilience Evaluation and Multi-objective Optimization Strategy of Flood Control Engineering System in River Basin

Qinqin Fu¹ Shuai Yang^{2*} Mei Yuan³ Lili Gao⁴ Mengzhao Yang¹

1. Shandong Lukai Water Conservancy Consulting Co., Ltd., Binzhou, Shandong, 256600, China

2. Boxing County Urban and Rural Water Development Center, Binzhou, Shandong, 256500, China

3. Bincheng District Water Resources Development and Construction Center, Binzhou City, Binzhou, Shandong, 256600, China

4. Urban and Rural Water Development Center, Zhanhua District, Binzhou City, Binzhou, Shandong, 256800, China

Abstract: In order to ensure the normal implementation of flood prevention function of river basin flood control engineering system and achieve the purpose of maintaining regional security and stability, it is necessary to study the resilience and optimization of the system. Therefore, this paper first analyzes the basic structure of the river basin flood control engineering system from the principle level, and then defines the function and characteristics of the system in the flood control process. Then, based on different evaluation systems (such as index system, model simulation, setting scenario, comprehensive evaluation method, etc.), the toughness level of flood control engineering system in the basin is evaluated, with a view to providing guiding opinions on optimization measures. Finally, the strategy of multiple optimization is given, which mainly focuses on the design optimization measures of flood resistance performance, the coordination and balance measures of environmental protection and engineering efficiency, the elastic-plastic measures of adaptation to unknown risks, and the differentiated optimization measures according to local conditions and circumstances.

Keywords: watershed flood control; resilience assessment; multi-objective optimization; structure optimization; risk management

0 前言

中国水资源时空分布不均、洪涝灾害频发, 洪涝灾害防治难度极大。目前, 中国主要江河已经基本建立了工程措施与非工程相结合的防洪减灾体系, 成为抵御洪涝灾害的第一道强有力防线。新发展阶段, 国家经济社会发展对防洪安全保障提出了更高的要求, 要求始终把保障人民生命安全放在首位, 着力解决人民群众最关心最直接最现实的洪涝灾害问题, 努力降低人民生命财产损失。随着气候变化和极端天气的增多, 洪涝灾害的频次和强度可能进一步加大, 防洪体

系面临的挑战日益严峻。如何提升防洪体系的韧性, 增强应对复杂洪水情景的能力, 成为当前防洪工作中的重大课题。

1 流域防洪工程体系的理论基础

1.1 流域防洪工程体系的基本构成

流域防洪工程体系由防洪水利工程、河道疏浚设施、蓄洪调节设施和防洪监控系统等部分组成。它们协同配合, 共同起到防洪效益。防洪水利工程包括管理堤坝、水库、溢流口等, 目的是调控洪水流量, 避免向下游地区泛滥。河道疏浚设施是为了清除河道中的淤泥沉积, 提高河流排洪效

率,在暴雨季节快速排出洪流。蓄洪调节设施是为了在洪峰来临时,控制洪流流量速度,减轻洪水对下游地区的影响。防洪监控系统则是对水位、流速数据信息采集作为防洪策略制定的主要参考依据。流域防洪工程体系还包括生态环境保护措施,如湿地保护、植物恢复计划等,以加强大自然的自愈抗洪能力。因此,流域防洪工程体系形成一个多样化及综合性的防洪网架系统。

1.2 工程体系在洪水防御中的作用机制

在防洪的过程中,流域防洪工程体系的核心作用是控制洪水流动的流向,改变洪水流速和提供保障。通过修建堤防、水库等抗洪措施,我们可以在一定程度上控制和引导洪水流动的方向,避免水体肆意横行或淹没周边地区,给周围造成不可估量的损失。水库、水池等蓄水设施可以在一定程度上,在汛期储存汛期流下的水,等到水流缓和、水位下降之后再慢慢放出,以减轻下游地区的洪涝压力。清理河床、整治环境有利于增加水流的速度,避免因为河床淤塞导致河流的水位上升。流域防洪工程体系运用合理布局、科学施工实现合理分配和使用流域内水资源,在洪灾来临时均匀地分散,在很大程度上降低了洪灾的破坏性。除此之外,流域防洪工程体系的另一项任务就是加强信息传递和监控管理工作,使得汛情的报警响应更加高效,增加了汛情警报的时效性、精确性。

1.3 工程体系的运行特性

流域防洪工程体系的运行特性表现为动态调节性、适应性和复杂性。首先,防洪工程体系要在水文气候条件和洪水特性下承担可调适、可适应等功能。由于流域水文特征通常会表现出较为明显的季节特征和随机特征,因此流域防洪设施需要对其水量、水位情况进行灵活响应。例如水库拦蓄流量、泄流量以及水库坝岸加固方案都需要结合即时的水文状态信息来维持工程设施最优性运营。其次,防洪设施具有较强的适应性,能够抵御不同背景下的生态及人为影响。随着流域社会经济的发展、城市化进程推进及气候变化等因素的作用,防洪设施需要不断进行更新改造,以适应新的水文条件和运行模式的需求。最后,防洪设施具有相对的系统性和复杂性特征,包括很多工程设施和有机协同的管理系统。

2 流域防洪工程体系的韧性评估方法

2.1 基于指标体系的评估方法

常用的是建立指标体系的方法来具体量化地测评流域防洪工程的韧性,这种方法主要是在防洪工程的评估中建立一套科学合理的评估指标体系,并借此反映出流域防洪工程所拥有的全部韧性,这一方式通常包括四个方面即,洪水抵御性、防洪工程抵抗性冲击的韧性、应急反应性、生态恢复性。洪水抵御性一般会根据防洪工程设计规范和所要求的防洪效益来评定;防洪工程抵抗性冲击力则主要是借助测试防洪工程结构在超洪水情况下的承载稳固性。应急反应性的评

价主要体现在防洪工程针对突发洪水进行及时紧急响应的速度与效果评分上。生态恢复性主要考量的是防洪工程对自然生态环境的影响。例如,长江流域防洪工程测评就采用多层次指标来给出防洪工程的综合测评,在此基础上,根据堤防承受力、河流通畅性、水库蓄洪效益等多个指标得出防洪工程在面临超洪水时的平均韧度,进而为防洪工程优化完善提供理论依据。

2.2 基于模型模拟的评估方法

模型模拟法是利用计算机模拟、水文模型进行动态评估的方法。该方法可进行不同洪情条件下防洪工程体系的抗洪过程及其复杂环境下的适应力和承受力判断。常用的模拟方法有水流模型、洪水传播模型和风险计算模型等,可以模拟不同的洪雨量、流域水文变化情况和各类防护设施的响应过程。例如,使用“HEC-RAS”水流模拟软件,能够模拟出各种洪水情形下的水位过程曲线,并验证河底清淤、岸坡加固等防洪工程措施的有效性。模型模拟还可以结合多种要素组合,对未来洪水风险水平及其对防洪工程抗洪弹性的反馈进行预估。对于黄河流域而言,使用模型模拟法评估其抗灾性的增强,可以帮助管理人员了解在不同洪涝场景下,如何优化防洪装备部署,为管理人员提供科学的洪水防御方案,从而减少灾害损失。模型模拟法通过多轮模拟和情景分析可以确定防洪体系改进目标和重点。

2.3 基于情景设定的评估方法

情景设定是指通过确定多种可能的场景条件下水文预测值,模拟可能的洪水对防洪体系的影响。该方法不仅考虑了气候变化和江河流域利用模式改变等各方面因素的耦合性影响,也从全方位的角度衡量防洪体系的韧性。实际上,场景设定通常会设定若干典型场景以应对不同洪水压力、重复频率与持续时间,用来评估防洪设施对于不同意外情况的处理能力。例如,一个位于南方的流域内就通过此方法考虑了强降雨的发生、水库容积的变动等因素,计算了不同洪水场景下闸坝结构稳定性、排洪能力和泄洪出口的运行状况。此外,该方法还可添加社会经济发展因素,如居民人口、城镇化水平等,来模拟不同社会发展时期下防洪的需求量,从而准确预测每个未来场景下防洪设施的运行效果,协助政府制定更为敏捷的多元化防洪策略,并及早判断薄弱环节,从而提高防洪工程应对未来洪水的能力。

2.4 基于综合评分的评估方法

基于综合评分的评估方法通过将多个指标的评估结果加权汇总,得出流域防洪工程体系的总体韧性评分。该方法通常将定性和定量的研究方法综合运用,通过给各个评价指标设定一定的分值原则来计算每个评价因子,然后运用加权平均法得出最终的评价总分数。在实践中,可以通过转换各种防汛措施、设备运行效果、应急反应时间、环境影响保护等因素指标为具体数值,按各指标的重要性赋予不同的权重。例如,在对一个城市河道防洪体系进行评价时,可以采

用防洪设计标准、历史防洪状况、设备寿命等指标作为各项防洪措施的评分依据,并按其针对整体防洪效果影响的大小赋予一定的权重,得出一个反映整体韧性的评分。以期得出所有防洪方案的综合效果,以便对政策的变更、资金的投入及科学技术的发展作出明确的数据依据。

3 流域防洪工程体系的多目标优化策略

3.1 提升防洪能力的结构优化策略

想要提高防洪措施的效果和整体抵御灾害的能力,主要需要加强防洪工程措施及建筑物的设计建设,主要通过增大防洪工程措施的规模、加强堤坝结构的建立、对河道进行清淤以及改变水库调度的方式来进行。例如,近期内中国长江流域在对防洪措施中加大了堤坝加固建设和提升建设的力度,既提高了防洪的标准,又进一步提高了防洪工程抵御灾害的能力。针对堤坝的设计,需要考虑水流的方向以及洪灾发生的频率、最高水位等因素,合理设置排水洞以及过水通道,确保水灾时期可以在短时间内排水,避免大坝垮坝。针对水库部分,需要提升水库储存量,改善水流的调配方式,让水库的储存量在暴雨期间可以进一步调控,减少下游的洪灾。同时,针对河域的整理和疏通,可进一步改善水流的分布,提升排水作用。

3.2 兼顾生态与工程效益的协调策略

在进行设计和优化流域防洪工程建设时,兼顾生态效益与工程效益的协调策略尤为重要。通常,传统的防洪举措主要是解决防洪工程建设和发挥其功能,而没有考虑生态环境保护。但实现防洪工程的优化目标需要协调兼顾防洪工程的实施和防护任务开展以及生态恢复和环境保护工作。例如,在防洪工程建设过程中,可以采用建设湿地公园或重塑河道等方法,有助于提升防洪工程防护功效,并通过自然生态系统保护作用的发挥增强其防护水平。例如浙江流域开展了“生态堤坝”,通过实施植被修复或堤岸加固措施,使得防洪工程堤坝更加具有防洪效力,同时也实现了生态环境保护功能,维护水中动物生长生存空间。这可以在提升流域工程防洪功效的同时,维持生物多样性,保证防洪工程的生态环境,避免单一工程建设造成自然生态环境负面影响。

3.3 应对不确定风险的弹性优化策略

应对不确定风险的弹性优化策略旨在提高流域防洪工程在面对不确定因素时的适应性和恢复力。主要是在面对一些风险发生时的不确定性,如气候变暖、极端气候事件、经济社会的突发性变化等。由于洪涝灾害本身具有不可预知性,因此对于现有的水利工程防洪体系造成了一系列的挑战,要求防洪体系的构建遵循一定的要求。由于洪灾的不可预见性,对于洪涝防御系统来说,系统弹性显得尤为重要,即有足够的弹性及反应灵敏度对于不可预见情况发生时作出妥善应对。例如,为了缓解在气候变暖过程下,多雨降雨的频繁现象而造成的影响,华北流域对于工程防洪进行了多样性的方案选择,主要是从散开式出水口、多排槽渠等方面

来解决单一的泄洪通道的问题。

3.4 适配区域特征的差异化优化策略

适配区域特征的差异化优化策略强调根据不同流域的自然环境、社会经济条件和水资源特性,定制化防洪工程的设计和优化方案。“由于不同流域的地形、气候和由此所决定的水文特点不一样,因此必须根据具体地区的特点制定专门的防洪方案。”例如,干旱或者半干旱地区由于降雨稀少,由此制定的储蓄地下水的设备、蓄水池等等就显得特别重要。而如中国西部的地区已经开始采用集多种功能于一身的水库,地下水再导入系统等,既可以发挥防洪作用,又有助于提高水资源的储留与调度系统。对于水资源丰沛的地方如中国长江流域,则更应注重加强疏通、修建河床、疏通泄洪口,以及保留湿地等,可以增强河流洪水控制的能力和保持区域生态环境的稳定。这种适应性的变革也反映了各地不同的管治模式变化,如城市的密集地区要更多考虑如何促进城市排污系统和水体的和谐发展。

4 结语

流域防洪体系的重要功能不言而喻,尤其在气候变化加剧和极端天气事件频发的今天,加强流域的韧性和优化防洪策略显得尤为重要。通过多种手段优化可以综合提高防洪能力,也可以兼顾生态效益、提高工程灵活性,并且在不同的地区提出有针对性的优化策略,包括结构的设计优化、结合生态保护的工程效益协调优化、针对未知风险的弹性优化以及对于不同地区的针对性策略,从而使流域防洪体系具有长期的稳定性效益。未来,不断优化设计、增强系统的整体性、灵活性,将使得流域防洪体系能够更好地抵御各种复杂性的洪涝灾害事件,进而更好地促进区域生态环境和经济社会发展。

参考文献:

- [1] 王兆峰,张先甜.基于PSR模型旅游产业韧性评估及驱动因子非平稳性研究——以黄河流域为例[J].人文地理,2023,38(5):88-97.
- [2] 李国庆,李紫昂,邢开成.适应气候风险的韧性城市治理双体系建设——雄安新区气候风险适应模式[J].中国人口·资源与环境,2023,33(4):1-12.
- [3] 张筱娟,汤琪凤,张镇.黄河流域城市韧性空间分异特征及其影响因素识别[J].地域研究与开发,2022,41(6):48-54.
- [4] 樊凯瑄,周自翔,付媛,等.黄土高原中部泾河流域景观生态韧性动态特征[J].地球科学与环境学报,2023,45(6):1299-1315.
- [5] 曾坚,田健,王倩雯,等.国土空间规划体系中的气候韧性及适灾承洪理论——以闽三角地区为例[J].中国科学:技术科学,2023,53(10):1713-1727.

作者简介: 付芹芹(1984-),女,中国山东德州人,本科,工程师,从事水资源、水土保持研究。

通讯作者: 杨帅(1983-),男,中国山东滨州人,本科,工程师,从事水资源、水土保持研究。