

安全韧性现代水网的科学内涵与实施路径研究

刘洪辰^{1,2}, 李云玲^{1,2*}, 郭旭宁^{1,2}, 刘为锋^{1,2}, 宋秋波^{1,2}, 曹国良³, 杨卫³, 李原园^{1,2}

(1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 2. 水利部水利规划与发展战略研究中心, 北京 100120;
3. 湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司, 武汉 430064)

摘要: 在气候变化背景下, 水网系统运行面临多灾种叠加、跨尺度传递的系统性风险挑战, 传统以工程结构安全为主导的分析范式难以支撑变化环境下复杂巨型系统的安全保障需求。本文从我国水网的建设现状出发, 系统梳理了水网建设取得的成就, 指出了我国建设安全韧性现代水网面临的问题, 在此基础上深入剖析了目前水网韧性基础理论和方法存在的短板。结合水网系统多目标、多层次、多要素耦合特征, 聚焦水网系统防洪、供水与生态三大核心功能, 界定了安全韧性现代水网的科学内涵, 提出了相应的理论框架, 构建了安全韧性现代水网发展战略架构。研究指出, 安全韧性现代水网发展战略架构应以链式风险防控、功能维持、恢复重构与数智迭代为核心战略目标, 采用工程体系、网络结构、调度机制与数智系统结合的实施路径, 构建“感知-分析-决策-执行-反馈-优化”的闭环运行机制; 从宏观规划、中观调度与微观控制3个尺度出发, 给出了建设安全韧性现代水网的多尺度协同推进策略; 从工程基础、调度能力、科学研究、体制机制、产业布局5个层面提出了系统性发展建议。研究成果可为安全韧性现代水网的理论体系构建与工程实践应用提供重要支撑。

关键词: 现代水网; 安全韧性; 多目标协同调度; 闭环运行机制; 系统能力塑造

中图分类号: TV213.4 **文献标识码:** A

Scientific Connotation and Implementation Pathway of a Secure and Resilient Modern Water Network

Liu Hongchen^{1,2}, Li Yunling^{1,2*}, Guo Xuning^{1,2}, Liu Weifeng^{1,2}, Song Qiubo^{1,2},
Cao Guoliang³, Yang Wei³, Li Yuanyuan^{1,2}

(1. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China;
2. Water Resources Planning and Strategic Research Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China;
3. Hubei Institute of Water Resources Survey and Design Co., Ltd., Wuhan 430064, China)

Abstract: Against the backdrop of climate change, water network systems face systemic risks involving multiple overlapping hazards and cross-scale transmission. Traditional analysis paradigms centered on engineering structural safety are insufficient to meet the security requirements of complex mega-systems under changing environmental conditions. Starting from the current status of China's water network development, this study reviews major achievements, identifies key challenges in building a safe and resilient modern water network, and analyzes existing gaps in the basic theories and methods of water network resilience. Considering the multi-objective, multi-level, and multi-element coupling characteristics of water network systems, and focusing on the three core functions of water supply, flood control, and ecological protection, this study defines the scientific connotation of a safe and resilient modern water network and proposes a corresponding theoretical framework. On this basis, a strategic framework for developing a safe and resilient

收稿日期: 2026-05-07; 修回日期: 2026-06-02

通讯作者: *李云玲, 水利部水利水电规划设计总院正高级工程师, 研究方向为水网规划、调度与管理; E-mail: liyunling@giwp.org.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206500)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

modern water network is established. Strategic objectives are proposed around cascading risk prevention and control, functional maintenance, recovery and reconstruction, and digital-intelligent iteration. An implementation pathway is clarified through the coordination of engineering systems, network structures, dispatching mechanisms, and digital-intelligent systems. A closed-loop operation mechanism that integrates perception, analysis, decision-making, execution, feedback, and optimization is also recommended. Furthermore, from the three scales of macro-level planning, meso-level dispatching, and micro-level control, this study proposes a multi-scale collaborative promotion strategy for constructing a safe and resilient modern water network. Systematic development recommendations are also provided from five aspects: engineering foundation, dispatching capacity, scientific research, institutional mechanisms, and industrial layout. The findings can provide important support for building the theoretical system and promoting the engineering application of safe and resilient modern water networks.

Keywords: modern water network; safety and resilience; multi-objective coordinated dispatching; closed-loop operation mechanism; system capacity building

一、前言

国家水网是以自然河湖为基础、引调排水工程为通道、调蓄工程为结点、智慧调控为手段,集水资源优化配置、流域防洪减灾、水生态系统保护等功能于一体的综合体系^[1-2]。中共中央、国务院印发的《国家水网建设规划纲要》将水网建设上升为国家战略,明确提出了构建“系统完备、安全可靠,集约高效、绿色智能,循环通畅、调控有序”的国家水网建设总体目标,统筹解决我国水资源、水生态、水环境、水灾害问题^[3-5]。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》指出,加强国家水网建设,增强洪涝灾害防御、水资源统筹调配、城乡供水保障能力,健全跨流域跨区域水资源调配体系,完善国家水网主骨架和骨干输配水通道。着力建设安全韧性现代水网是提高水网系统抗风险能力的顶层谋划,对保障我国水安全、支撑经济社会发展具有重要意义^[6-9]。

受全球气候变化和人类活动共同影响,极端灾害事件呈现出频次多、强度高、影响大的特点,严重威胁水网系统的安全运行。国际灾害数据库(EM-DAT)统计显示,2000—2024年,全球范围内共发生洪水4124次、风暴2672次、干旱413次、地震664次;从影响程度来看,洪水灾害造成的受影响人口规模最大,达到18.51亿人,经济损失达到10.51万亿美元。我国灾害发生特征与全球趋势基本一致,统计显示,2000—2024年,我国共发生洪水226次、风暴282次、地震120次和干旱27次,其中洪水灾害受影响人口规模达9.43亿人^[10-11]。此外,单一灾害的发生往往会形成多级传递的灾害链,放大灾害影响^[12-16]。在水网系统中,多种灾害往往通过“极端气象—水文响应—程失效—次生灾害”的链式

过程逐级传导,使水网面临多灾种叠加、跨尺度传递的系统性风险,为灾害防御与应对带来极大挑战。

作为由自然水系与工程设施构成的复杂巨系统,水网在不断强化功能的同时,其安全属性也愈发脆弱,任一子系统的功能中断都可能引发整个系统的崩溃。“韧性”作为一种新兴的系统性风险治理理念,已逐渐成为基础设施防灾减灾领域研究与实践的重要范式,是基础设施安全研究中的前沿性和变革性方向^[17-20]。随着水网建设的不断推进,系统安全韧性已成为衡量现代水网运行稳定性与风险应对能力的核心指标。因此,构建兼具抵御、吸收与恢复能力的现代化水网安全韧性管理体系,通过工程与非工程措施的协同,保障水网系统运行安全与效能发挥,成为水利工程领域亟需突破的关键。

本文系统梳理水网建设现状,指出水网实践面临的挑战,深入剖析目前水网韧性基础理论和方法存在的短板,结合我国水网系统运行特征与应用场景,诠释安全韧性现代水网的科学内涵,提出安全韧性现代水网理论框架。在此基础上,围绕战略目标、实施路径、管理闭环、协同推进等方面构建战略架构,最后从工程基础、调度能力、科学研究、体制机制、产业布局5个层面提出发展建议,为我国安全韧性现代水网的建设与管理提供参考。

二、我国水网建设现状及问题探析

(一) 我国水网建设现状

我国已建成世界上规模最大、功能最全、惠及人口最多的水利基础设施体系。全国现有水库大坝约9.5万座,总库容约 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,大坝类型、数量及高坝数量均位居世界首位。“十四五”期间,一批重大水利工程加快推进,国家水网主骨架和大动脉

逐步成型，工程体系规模化和网络化显著增强了水网系统的抗冲击能力，为国家重大战略实施与区域协调发展提供了坚实的水安全保障基础^[21]。

在重大引调水工程建设方面，我国围绕国家水网“纲”的构建，持续推进跨流域、跨区域骨干输配水通道建设。南水北调东、中线工程稳定运行并持续发挥效益，中线引江补汉工程启动实施，标志着南水北调后续工程进入系统化推进阶段；同时，引江济淮等一批工程建成投运，环北部湾、辽东半岛等区域水资源配置工程加快推进，水资源跨区域调配与多水源联合供给能力显著提升，水网“互联互通”格局初步形成^[22-23]。

在工程运行调控方面，面对极端降雨增强、旱涝急转频发等新形势，我国水网调度正由传统单工程、单目标管理向流域统筹、多工程联合、多目标协同调控转变。通过构建以预报、预警、预演、预案为核心的“四预”体系，结合多水库联合调度与跨区域水量调配，水网系统在防洪减灾、水资源优化配置和生态恢复等方面的综合调控能力不断增强^[24]。

在数字孪生体系建设方面，我国已基本形成数字孪生水利总体框架，正由试点探索向体系化应用阶段迈进。数字孪生工程、数字孪生流域及数字孪生水网建设同步推进，相关技术导则与标准体系逐步完善，推动水网运行由经验驱动向数智驱动转变，为复杂条件下的水网工程智能建设与智慧调控提供了重要支撑^[25]。

在此基础上，先进模型及技术在水网建设与运行中的应用不断深化，推动水网系统由工程主导型向系统智能型转变。在模型方法层面，传统水文水动力模型与智能算法深度融合，形成面向多目标调度的模型体系^[26]。与此同时，数据驱动方法快速发展，深度学习模型被广泛应用于径流预测与调度决策支持，显著提高了运算效率^[27]。在关键技术层面，数字孪生、物联网与“天空地水工”一体化监测技术深度融合，形成“物理水网—数字映射—智慧水网”的发展趋势，实现对水网系统运行状态的实时感知和动态模拟。

（二）我国水网建设面临的实践挑战与发展方向

目前，我国水网建设取得较大成就，但安全韧性现代水网不仅要求水网在物理形态上实现互连互通，更要求其在面临灾害冲击时仍能确保关键功能

正常发挥。当前，我国水网建设管理面临的主要矛盾正在由工程建设不足逐步转向系统安全保障能力、协同调控能力和智慧治理能力与复杂风险环境之间的不匹配，安全、韧性与现代要求尚未充分融入水网规划、建设、运行和管理全过程，面临的具体实践挑战如下所述。

1. 变化环境下安全运行压力不断增大

在气候变化和人类活动的共同影响下，极端降雨、持续干旱、旱涝急转和复合型灾害事件呈增多、增强趋势，水网运行面临的不确定性显著上升。当前水网工程体系总体规模较大，但部分地区仍存在防洪排涝能力不足、调蓄空间有限、备用水源不足和应急调水能力不强等问题。面对非常态水文情景，现有工程标准、调度规则和风险预案仍需进一步适应新的变化环境。如何在极端水旱灾害增多背景下确保水网功能正常发挥，是安全韧性现代水网面临的首要实践挑战。

2. 水网物理连通后的功能韧性亟待提升

水网连通并不等同于功能韧性充分形成，部分区域防洪、供水和生态调控仍较依赖单一骨干工程，面临工程故障、来水异常、突发污染等威胁时，替代路径和储备能力不足，缺乏联合调度能力，工程体系的结构优势不能完全转化为系统功能韧性，多水源互补、多工程协同和多路径替代能力仍有提升空间。

3. 多目标协同调控难度增大，统筹运行机制仍需完善

安全韧性现代水网承担防洪减灾、水资源配置、水生态保护等多重任务，不同目标之间存在博弈关系。当前，水网调度正由单工程、单目标向流域统筹、多工程联合、多目标协同转变，但在实际运行中，跨流域、跨区域、跨部门协同仍存在一定困难。不同地区、不同部门和不同工程之间的调度权限、利益协调与应急联动机制还需进一步完善。在非常态情景下，如何确定功能优先序、优化水量分配、协调防洪与供水关系、兼顾经济社会发展和生态保护，仍是安全韧性现代水网面临的难点。

4. 数智技术应用仍需向实战化深入

数字孪生、物联网、大数据和人工智能等技术为现代水网建设提供了重要支撑，但从安全韧性建设要求看，相关技术应用与实际调度运行需求之间仍存在差距，在支撑实现“预报、预警、预演、预

案”功能方面仍有提升空间。部分地区的水网数字化建设仍存在数据标准不统一、监测体系不完善、数据共享不足等问题,影响多源数据融合和实时分析能力。同时,部分智能模型仍存在可解释性不足、泛化能力有限和场景适配性不强等问题,难以完全满足复杂水网调度决策需求,无法深度赋能安全韧性现代水网建设。

三、安全韧性现代水网的理论短板

随着韧性理论及其分析方法的持续发展,相关研究已从单一系统、静态评价逐步向复杂网络、多灾种耦合及数智驱动分析等方向拓展,为认识复杂系统在扰动条件下的功能退化、恢复重构和适应演化提供了重要基础。总体而言,面向安全韧性现代水网的研究仍处于起步阶段,现有理论对水网自然过程、工程调控和多目标协同耦合特征的解释仍不充分,存在水网功能场景适配不足、结构韧性向功能韧性转化不足、全过程韧性调控理论研究不足、数智赋能机制阐释不足等问题,尚未形成成熟的理论体系,在支撑安全韧性现代水网建设方面仍存在一定短板,主要表现在以下几个方面。

1. 韧性概念体系与现代水网功能场景适配不足

韧性概念最早形成于力学与物理学研究中,主要用于刻画物体在外部作用下抵抗失效,并在作用消除后恢复至既定功能状态的能力^[28-29]。目前,韧性研究逐步由单一系统拓展至多系统耦合,认为单一系统的失效可能通过系统间关联引发跨区域、跨部门和跨功能的级联影响^[30],逐渐形成了以稳健性、冗余性、资源调配能力和快速恢复性等为核心的分析维度,为系统规划设计和灾后恢复提供了结构化思路^[31]。与此同时,韧性理论进一步强调系统不仅要在外界扰动下维持基本功能,还应具备根据环境变化调整运行规则、优化组织方式并在必要时实现结构性转型的能力^[32-34]。现代水网作为一种复杂巨系统,其核心功能包括防洪、供水、生态等多重目标,运行过程受自然来水、工程调度、区域需求和管理规则共同影响。若简单沿用工程体系中的韧性定义,容易将水网韧性简化为灾后恢复能力、工程抗灾能力或供水可靠性,难以全面反映其抵御、吸收、恢复、适应与协同调控的全过程属性。当前关于安全韧性现代水网的概念边界、功能指向和核

心内涵尚未形成统一认识,仍需结合水网功能场景进一步深化。

2. 复杂网络韧性理论偏重结构刻画,对水网功能过程解释不足

近年来,随着复杂网络理论与计算方法的发展,韧性研究进一步拓展至复杂基础设施网络层面。在交通、供水等网络系统中,韧性被刻画为系统在扰动情景下的响应行为,相关研究通过复杂网络建模、性能退化分析与压力测试方法,定量评估外界扰动对系统服务能力的影响,探讨韧性提升路径^[35-36]。在供水与管网系统领域,研究者进一步引入图论指标与贝叶斯信念网络等方法,对关键节点或管段在系统整体韧性中的贡献进行识别与排序,为工程规划与运维决策提供支持^[37]。这类研究对识别关键节点、薄弱环节和风险传播路径具有重要价值,但在应用于现代水网时仍存在一定局限。现代水网的网络结构受自然河湖格局、流域地形地貌和既有工程布局影响较大,并非完全可自由设计的人工网络。其韧性水平也不只取决于节点连通性、通道冗余性和网络效率,更取决于不同扰动情景下水量、水质、水位、库容、需水和生态约束之间的动态匹配关系。现有复杂网络韧性研究偏重结构刻画,对水网运行过程、调度规则、多目标协同和核心功能维持能力关注不足,容易造成结构韧性与功能韧性之间的偏差。因此,如何将拓扑结构分析与水文水动力过程和工程调度过程相结合,是安全韧性现代水网理论研究需要突破的重要问题。

3. 动态推演方法较多,但全过程韧性调控理论仍不完善

近年来,基于仿真模拟与情景推演的韧性分析方法得到快速发展^[38-40],该类方法通过设定不同类型的灾害情景、系统运行边界及恢复策略,对系统在扰动冲击下的状态变化进行动态模拟,从而细化系统性能退化与恢复过程,实现对韧性时变特征的刻画^[41]。在基础设施系统研究中,该方法已逐步形成以复杂网络建模、情景推演与恢复优化相结合的分析路径,不仅能够模拟不同强度扰动条件下的功能损失,还可结合优化算法对恢复资源配置与调度策略进行动态调整^[42]。随着数字孪生等技术的发展,相关方法进一步向多源数据融合与在线仿真方向拓展,在城市基础设施韧性分析中得到广泛应用^[43]。然而,现代水网的韧性并非仅表现为扰动后的性能

恢复过程，而是贯穿风险识别、预警预报、工程调度、功能维持、应急处置、灾后恢复和长期适应的全过程。现有情景推演方法虽然能够模拟特定扰动下的系统响应，但对如何形成水网运行全过程韧性调控机制支撑不足。特别是在气候变化背景下，水文条件呈现更强的不确定性，传统基于历史情景或固定设计标准的推演方法难以充分反映未来极端情景。如何揭示扰动过程、系统状态、调度决策和恢复路径之间的动态耦合关系，并将韧性评价结果转化为规划建设和运行调度中的调控规则，仍是当前理论研究的薄弱环节。

4. 数据驱动方法发展迅速，但数智赋能韧性的机制阐释不足

随着大数据、人工智能、数字孪生等数智技术的快速发展，基于数据驱动的韧性分析方法逐渐成为研究前沿。该类方法通过智能算法对系统运行状态、风险演化过程及恢复路径进行动态分析，从而突破传统方法在计算效率方面的局限^[44]。在此基础上，韧性分析逐步由离线评估向实时感知与在线决策演进^[45]。同时，相关研究进一步提出面向复杂系统的智能韧性分析框架，并通过物理系统、信息系统与仿真系统的多域融合，实现对系统韧性状态的持续跟踪与自适应调控^[46]；在宏观层面，则从数据链、技术链与装备链协同发展的角度构建了数智赋能韧性分析的整体框架^[47-49]。总体而言，数据驱动方法能够推动水网韧性分析向实时化与智能化转型，但其在安全韧性现代水网中的理论支撑仍不充分。数字孪生水网不仅是物理水网的数字映射，而应成为支撑风险预演、方案比选、调度优化和反馈修正的智能闭环系统。现有理论对模型不确定性、算法可解释性、工程可操作性等问题研究不足，限制了数智技术赋能安全韧性的转化应用。

四、安全韧性现代水网的科学内涵

（一）水网系统特征刻画

水网系统是以天然河湖水系为基础、输排水工程为通道、结点控制工程为枢纽、智慧化调控为手段，集防洪排涝、水资源配置、水生态保护修复等功能为一体，具有“纲—目—结”网络结构特征的水流网络体系，是天然河湖水系与水利基础设施有机结合形成的一体化综合系统。水网系统呈现出多

目标、多层次、多要素复杂特征：在功能目标方面，水网系统同时承担防洪安全、供水保障、生态维持等多重目标，其中供水保障体现水网对经济社会发展的基础支撑，防洪安全体现水网对灾害风险的底线防控，生态维持体现水网对自然河湖生态安全格局的约束调节，呈现出多目标权衡的博弈特征；在管理层级方面，系统运行涉及国家级、流域管理机构、省级、市级、县级等参与主体，不同层级主体在风险认知、调控权限及服务需求方面存在差异，形成纵向分级与横向协同相结合的多层级治理格局；在形成要素方面，水网系统由天然河湖水系、输排水工程体系、控制性枢纽工程以及智能化信息系统等多类要素构成，各类要素通过水力联系、工程连接及调度规则实现紧密耦合，形成“自然—工程—信息”交错的多要素综合系统。因此，水网系统并非单一工程能力的简单叠加，而是天然河湖水系与工程网络通过水力联系和调度规则耦合形成的整体运行能力。

（二）安全韧性现代水网的概念界定

传统安全理念以风险预防为核心，聚焦于通过技术手段规避系统失效，而韧性理念是对传统安全的延伸与升级，更侧重系统在不可避免遭遇外部冲击后的主动响应能力。二者构成递进互补的关系，安全是韧性的基础，提供物理保障与前置防线；韧性是安全的延伸，突破了“安全—失效”的二元安全状态，聚焦系统在扰动下实现功能维持和在网络协同下实现作用增效。

在中国式现代化理论框架下，现代水网不仅仅是工程规模扩大，更体现在发展理念、运行机制与治理模式的系统性跃升。与传统水网相比，现代水网的特征是能够在更大空间范围、更复杂功能目标和更不确定外部环境下实现系统化组织、协同化运行与动态化调控。其现代化本质在于以高质量发展理念为引导，系统能力塑造为导向，自然水系与工程网络协同组织为基础，供水、防洪、生态等多目标统筹为核心，数智化体系为支撑，系统治理为路径，构建能够适应复杂变化环境的现代化水安全保障体系。

在安全韧性现代水网的概念体系中，安全是底线目标，强调水网系统不发生重大失效并保障基本功能稳定运行；韧性是能力要求，强调水网系统在

外部扰动下具备抵御、吸收、恢复和适应能力；现代是实现条件和支撑体系，强调通过工程体系完善、网络结构优化、调度机制重构、治理方式升级和数智技术赋能，提升水网安全保障能力。三者共同指向水网系统由工程连通型向功能保障型、动态调控型和智慧协同型转变。

基于此，安全韧性现代水网系统可界定为：水网系统在多源外部扰动作用下，依托工程本体、连通网络、调度机制和数智系统，实现防洪、供水、生态三大核心功能，具备“灾前安全防御—灾中冲击抵御—灾后功能恢复—自主迭代升级”的运行效能保障能力。

（三）安全韧性现代水网的内涵剖析

安全韧性现代水网的科学内涵体现为面向防洪、供水、生态三大核心功能，依托工程体系、网络结构、调度机制与数智系统的协同作用，实现系统在复杂扰动情景下的风险防控、冲击响应、恢复重构与持续迭代的综合能力。其内涵可从以下 4 个方面进行诠释。

在风险防控方面，安全韧性现代水网体现为面向多源风险的前置防御能力，依托水网“纲—目—结”网络结构，通过工程布局优化、关键结点加固、安全监测预警等手段，识别系统薄弱环节，构筑关键功能安全底线，通过前置干预抑制风险在网络中的扩散与放大，避免局部失效演化为全局性功能失稳。

在冲击响应方面，外部扰动已经发生且难以完全规避的条件下，安全韧性现代水网依托其网络连通结构与多层级调控体系，通过工程冗余配置、跨区域协同调度与资源动态分配，对冲击进行吸收、分散与缓冲，在此过程中，系统通过功能切换与供需再平衡维持防洪、供水、生态等核心功能。

在恢复重构方面，在扰动减弱或消退后，安全韧性现代水网依托工程体系与调度机制的协同作用，通过工程修复、资源再配置、调度优化，实现系统功能的恢复。

在智能迭代方面，面向变化环境带来的不确定性，安全韧性现代水网体现为基于数智系统支撑的持续学习与迭代升级能力。系统通过监测感知、运行反馈与智能学习，不断优化调度规则，实现从被动应对向主动优化的转变。

（四）安全韧性现代水网的理论框架

基于前述水网系统特征刻画、概念界定及内涵剖析，安全韧性现代水网可界定为由物理基础、功能目标、能力表征、运行机制、数智支撑五大核心维度共同构成的综合理论框架（见图1），其核心目标是在变化环境下实现水网系统整体运行效能最优。物理基础是安全韧性现代水网形成的前提，功能目标明确系统韧性建设的核心指向，能力表征反映系统在不同扰动阶段的安全韧性水平，运行机制解释系统能力形成与释放的实现过程，数智支撑则为系统感知、分析、决策、执行与优化提供技术保障。

在物理基础层面，安全韧性现代水网以天然河湖水系与水利工程体系耦合形成的“纲—目—结”网络结构为物理载体。其中，“纲”体现跨流域、跨区域的骨干输配水通道，“目”对应区域内部水系与配套工程的精细化联通格局，“结”则由控制性水利枢纽工程构成关键调控节点。“纲—目—结”结构通过将工程体系进行水力连通形成复杂网络体系，是安全韧性水网形成的物理前提。

在功能目标层面，安全韧性现代水网以供水、防洪、生态三大核心功能为目标导向，不同功能之间存在相互关联、相互制约的博弈关系。系统通过在不同运行阶段对功能优先级进行动态调整，实现多目标协同优化。

在能力表征层面，安全韧性现代水网可抽象为沿时间维度演化的四类关键能力，即灾前风险预防能力、灾中冲击吸收能力、灾后恢复重构能力以及长期适应迭代能力。四类能力共同决定水网系统在变化环境下的功能维持水平与恢复效率，是评价水网安全韧性的核心表征维度。

在运行机制层面，安全韧性现代水网依托“工程体系—网络结构—调度机制”的协同作用实现能力发挥。其中，水利工程体系提供水资源调蓄与水量调控的物理支撑，网络结构决定水流传播路径、水资源分配效率及系统抗击灾害冲击的潜力，调度机制通过多工程联合调控，实现工程效能和网络优势的充分释放。

在数智支撑层面，安全韧性现代水网以数字孪生技术为核心支撑，构建水网系统全生命周期的数字化映射，实现对系统运行状态的实时感知、过程模拟与未来预测。在此基础上，融合数据驱动模型

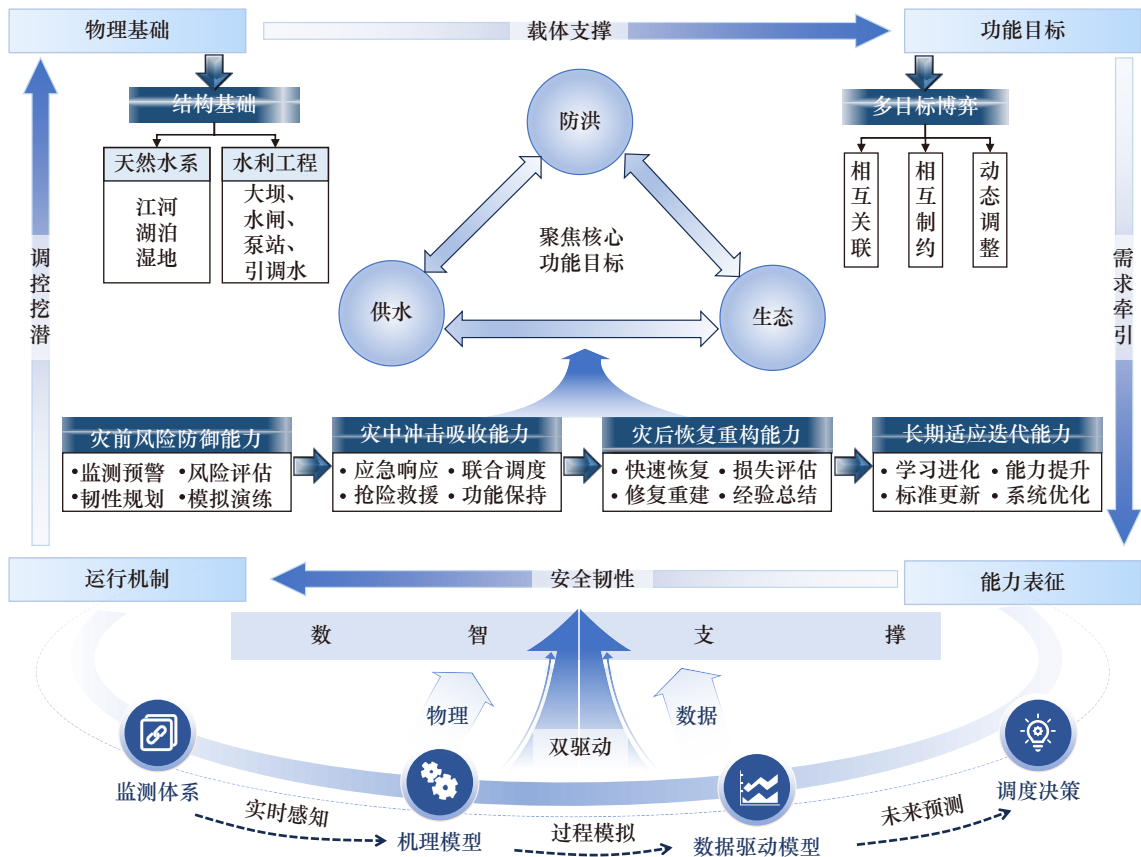


图1 安全韧性现代水网理论框架图

与机理模型，支撑复杂工况下的调度决策，推动水网系统的运行模式由经验驱动向数据与机理双驱动转变。

五、安全韧性现代水网的战略架构

围绕“系统完备、安全可靠，集约高效、绿色智能，循环通畅、调控有序”的总体要求，按照“问题牵引—系统协同—数智赋能—迭代升级”的建设思路，从战略目标、实施路径、闭环管理与协同推进4个维度，系统谋划安全韧性现代水网的总体战略结构（见图2）。

（一）战略目标

面向水网系统多目标、多层级、多要素耦合的复杂特征，以及在复杂扰动条件下面临的安全风险与运行不确定性，安全韧性现代水网建设应坚持“问题牵引—系统协同—数智赋能—迭代升级”的总体建设思路。统筹工程体系、网络结构与调度机制协

同发展，强化国家、省、市、县等不同层级之间的纵向贯通以及区域之间、流域之间的横向联动，推动水网由工程单元分散运行向全局协同优化转变。同时，依托多源感知、数据融合、智能预测和辅助决策等数智技术，构建“感知—分析—决策—执行”一体化运行体系，提升系统对风险扰动的识别、响应和调控能力。通过建立运行反馈与持续优化机制，实现调度规则、管理模式和系统能力的动态调整与持续完善，推动水网系统由被动应对风险向主动适应变化转变，不断提升安全保障能力和韧性水平。

围绕安全韧性现代水网系统的科学内涵，构建以系统能力提升为主线的战略目标体系，重点包括以下4个方面。

1. 构建灾前链式风险防控体系

立足水网系统风险跨要素、跨层级传导特征，构建覆盖风险识别、态势评估与预警响应的链式风险协同防控体系，强化对关键节点、关键通道及薄弱环节的前置防御能力，提升对风险传播路径与级联效应的系统认知与干预能力，实现由单点防控向

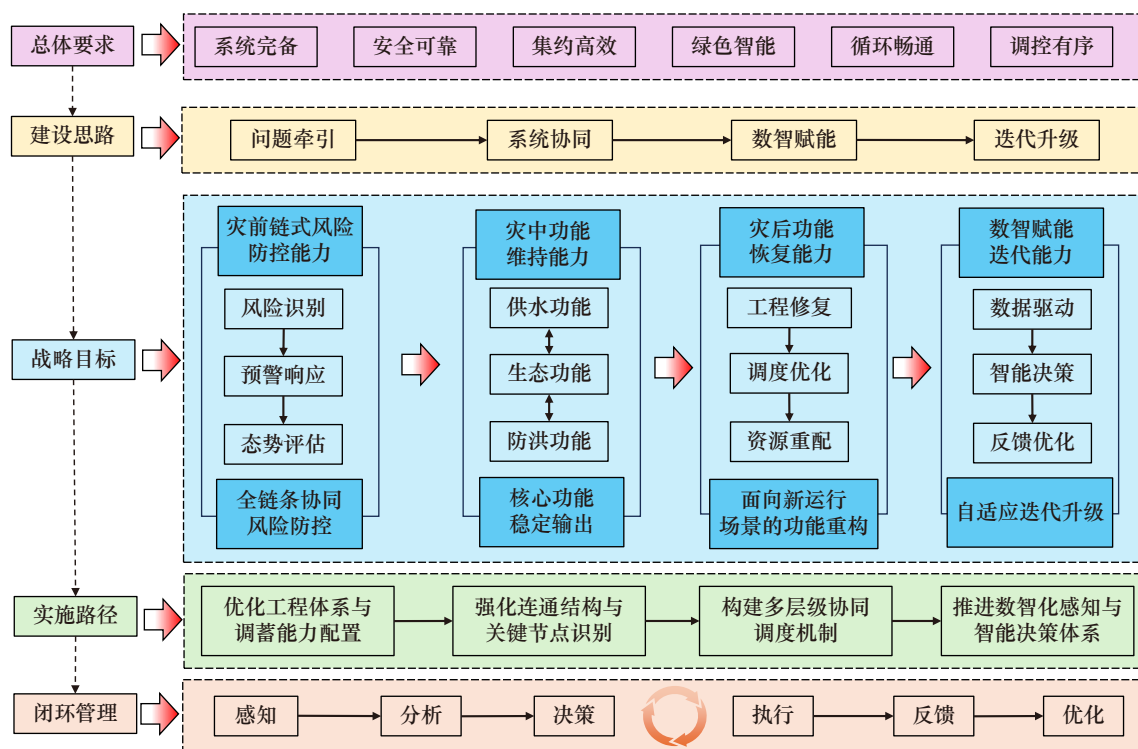


图2 安全韧性现代水网发展战略框架

全链条协同防控的转变。

2. 提升灾中功能维持能力

依托水网连通结构与多层级调度机制，构建跨流域、跨区域、跨层级协同的水资源配置与洪水调蓄能力体系，强化关键节点控制能力、优化多水源联合调度机制、完善洪水调蓄与风险分担机制，提升系统在冲击过程中的功能维持能力，实现供水、防洪与生态功能在灾中阶段的基本稳定输出，抑制局部风险向区域性、系统性风险扩散，增强水网系统在复杂扰动过程中的整体稳定性和运行韧性。

3. 强化灾后功能恢复能力

构建工程修复、资源重配与调度优化相结合的恢复机制，完善关键基础设施快速修复体系、应急水源接续保障体系以及多层级协同恢复机制，加快供水、防洪和生态功能恢复进程，缩短系统恢复时间，降低灾害造成的长期影响，提高系统在扰动后的恢复效率，增强面向新运行场景的功能重构能力。

4. 形成数智驱动持续迭代能力

以数字孪生水网建设为牵引，充分利用物联网、大数据、人工智能和云计算等新一代信息技术，构建覆盖监测感知、分析研判、辅助决策和执行反馈全过程的智慧运行体系，持续跟踪系统运行状态和

调度效果，动态识别新的风险因素和能力短板，不断优化调度规则、运行模式和资源配置策略。推动水网系统从经验驱动管理向数据驱动治理转变，在长期运行中实现自适应迭代升级。

（二）实施路径

1. 优化工程体系与调控能力配置

坚持需求导向与风险导向相结合，统筹考虑流域水资源时空分布格局、经济社会发展需求以及极端气候变化背景下的风险特征，科学布局水库、蓄滞洪区、引调水工程、河湖连通工程等基础设施。强化供水、防洪、生态等多目标统筹协调，提升工程体系对洪水调蓄、水资源储备、应急供水和生态补水等任务的综合支撑能力。针对关键区域和薄弱环节，优化调蓄工程规模与空间布局，提高系统冗余能力，增强工程体系在极端干旱、超标准洪水及早涝急转等条件下的适应能力和安全保障水平。推动工程建设由规模扩张向能力提升转变，形成布局合理、功能完善、运行可靠的现代水网工程体系。

2. 强化水网连通结构与关键节点识别

充分发挥现代网络科学方法在水网规划建设中的支撑作用，建立相应评价体系，识别影响系统稳

定运行的关键节点、关键通道和薄弱链路，完善多水源联合供给和多通道互济互补格局，提高系统整体连通性和资源调配灵活性。通过构建适度冗余的网络结构，增强关键节点失效情况下的替代能力，降低局部故障、工程失效或极端事件引发系统性风险的可能性。同时，加强关键节点运行状态监测与风险预警，提升网络结构的稳定性、可靠性和抗扰动能力，推动水网由工程集群向高效协同网络体系演进。

3. 构建多层次协同调度机制

围绕国家、流域、区域等不同管理层级，建立职责明确、上下贯通、协同联动的水网调度体系，推动形成统一指挥、分级负责、协同高效的运行管理机制。统筹防洪减灾、供水保障、生态保护等多目标需求，完善跨流域、跨区域、跨部门协调机制，建立统一的调度规则、信息共享机制和联合会商机制。强化常态调度与应急调度有机衔接，提升系统在极端事件和突发风险条件下的快速响应能力和协同处置能力，实现水资源配置、防洪调度和生态调控全过程协同，不断提升水网系统整体运行效率和综合效益。

4. 推进数智化感知与智能决策体系建设

以数字孪生水网建设为重要依托，构建覆盖“天空地水工”多源信息的全要素感知体系，全面提升对水资源、水工程、水生态等关键要素的实时监测能力。加强多源异构数据融合与共享，建立统一的数据底板和模型底板，推动监测、预报、预警、预演和预案功能深度融合。依托人工智能、大数据分析、数字孪生和智能优化等先进技术，构建面向常态运行、极端事件和突发风险等多场景的智能决策支持系统，实现风险动态识别、情景模拟推演和调度方案智能生成，持续提升水网系统对复杂扰动条件下的预测预警能力、动态调控能力和自主优化能力，为安全韧性现代水网建设提供强有力的数智支撑。

（三）闭环管理

为保障安全韧性现代水网战略的有效实施，应构建贯穿全过程的闭环管理机制，实现从风险识别到系统优化的持续循环。

1. 感知识别环节

依托多源监测手段，获取水情、雨情、工情等监测信息，实现对水资源、水工程、水生态等关键

要素的全方位、全过程动态感知。加强多源异构数据汇聚与融合分析，提升对降雨洪水、干旱缺水、工程异常运行及生态风险等事件的实时监测能力和早期识别能力。通过构建覆盖流域、区域和工程单元的风险感知网络，实现风险信息的快速获取、精准识别和分级预警，为水网系统运行管理提供及时可靠的数据支撑和决策依据。同时，加强对风险源、风险传播路径和风险影响范围的动态识别，为后续风险评估与调度决策奠定基础。

2. 分析决策环节

充分发挥物理机理模型、数字孪生技术和数据驱动模型协同优势，构建面向多情景和多目标的分析决策体系。结合实时监测信息，对来水过程、工程运行状态、供需变化及风险演化趋势进行动态模拟和预测分析，评估不同风险情景下系统功能受影响程度及潜在损失范围。在此基础上，综合考虑供水保障、防洪安全、生态保护和运行效益等多重目标，开展多方案比选和调度推演，形成科学合理的调度决策方案。通过提高风险预测能力和决策前瞻性，实现由被动响应向主动预防转变，增强系统在复杂扰动条件下的风险应对能力和资源配置效率。

3. 执行反馈环节

依托统一调度平台和多层级协同管理体系，将决策结果转化为具体调度指令和工程控制措施，实现库坝、水闸、泵站、引调水工程等关键设施协同运行。加强调度执行过程中的实时监测和动态跟踪，及时掌握工程运行状态、调度效果及风险变化情况，确保调度方案有效落实。针对执行过程中出现的偏差、异常情况或新的风险因素，及时开展信息反馈和动态调整，增强调度过程的灵活性和适应性。通过建立执行效果评估机制，对供水保障、防洪减灾和生态调控等目标实现情况进行综合评价，不断提高调度执行的精准性和可靠性。

4. 迭代优化环节

建立基于运行反馈和历史数据分析的持续学习与优化机制，对系统运行过程中的监测数据、调度记录、风险事件及处置效果进行系统总结分析，识别现有工程体系、调度规则和管理机制中的不足与短板。结合新技术发展、供需形势变化以及运行需求调整，持续优化工程布局、资源配置方式和调度管理模式，不断完善风险预警模型和决策支持体系。推动经验知识、运行数据和决策规则的积累与沉淀，

形成“感知—分析—决策—执行—反馈—优化”的闭环运行机制，实现系统能力的持续提升。

（四）协同推进

面向复杂变化环境下水网系统能力提升的现实需求，从规划建设、调度组织与控制执行3个层级，论述构建安全韧性现代水网的建设方向（见图3）。安全韧性水网的构建在提升工程规模与网络结构的基础上，更加强调变化条件下的系统整体运行效能保障，通过结构优化、协同调度与精细控制，形成“规划—调度—控制”协同联动的安全韧性现代水网能力体系。在宏观尺度上，重在通过规划建设塑造系统能力基础和空间格局；在中观尺度上，重在通过调度组织将规划形成的工程能力转化为协同运行能力；在微观尺度上，重在通过控制实现保障调度指令向工程执行单元精准传导。

1. 宏观尺度：面向系统能力塑造的规划建设

在宏观尺度上，从流域整体与国家水网格局出发，以系统能力塑造为核心，推进水网规划由工程布局导向向能力构建导向转变。统筹水资源禀赋、江河湖泊演变规律、极端气候变化趋势，构建适应多目标需求的工程体系与网络结构，强化水网在供水、防洪与生态等核心功能上的综合支撑能力。在此基础上，围绕典型业务场景与多工况运行需求，构建“工程体系—网络结构—系统能力”协同匹配的规划体系，使水网在常态、条件态与应急态下均

具备稳定运行和快速响应能力，实现系统能力的整体塑造与空间层面的合理配置。

2. 中观尺度：面向协同运行的调度组织

在中观尺度上，以调度机制为核心，推动水网由工程能力集合向协同运行系统转变。构建跨层级、跨区域的协同调度体系，强化国家、流域、区域之间的调度衔接关系，实现水资源配置、防洪调度与生态调度的统一组织与动态协调。围绕调度全过程，建立贯通“决策—指令—执行—反馈—优化”的运行机制，提升调度运行的可靠性与可控性。面向常态、条件态与应急态等不同运行情景，构建多模式调度策略与动态切换机制，提高系统在复杂扰动条件下的实时响应与协同调控能力。通过调度层面的组织优化与机制重构，使水网运行由分散执行向统一协同转变，由静态调度向动态调控转变。

3. 微观尺度：面向执行落地的控制实现

在微观尺度上，以控制体系为核心，解决调度指令向工程执行单元的传导与落地问题。构建统一的控制对象表达体系，将各类工程设施与水流过程抽象为具有明确功能属性的控制单元，实现不同类型对象在同一控制框架下的统一表达。强化测控一体化能力，构建与控制结构相匹配的感知体系，使系统状态能够被实时识别，为控制决策提供可靠依据。在此基础上，推动控制模式由预设工况控制向全状态控制转变，实现对多变量耦合运行过程的动态调节，通过控制层面的精细化、标准化建设，使

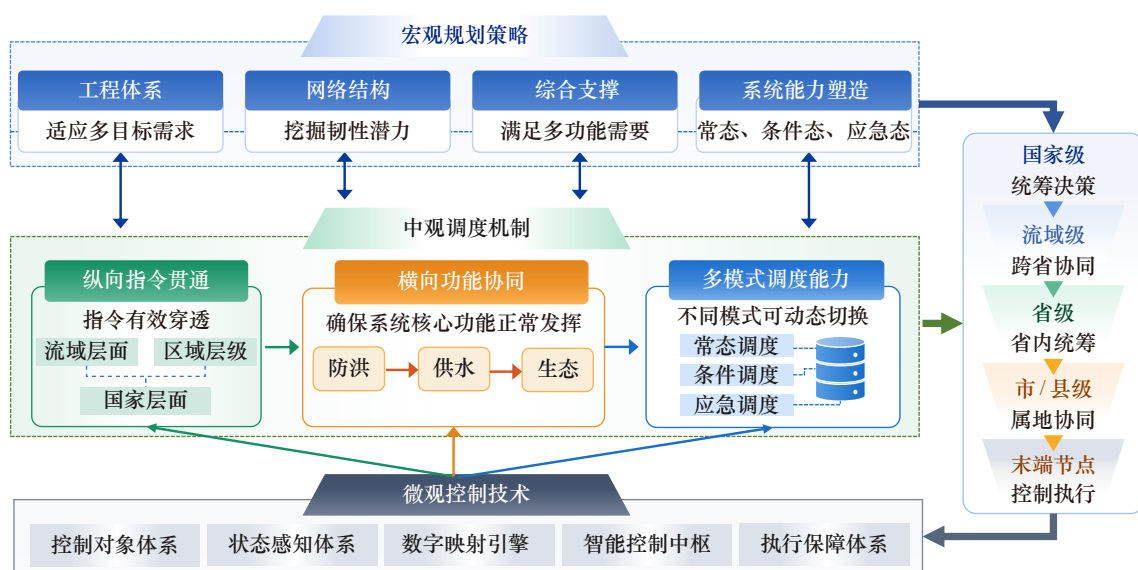


图3 安全韧性现代水网建设方向

调度要求能够准确地转化为可执行、可校核的工程行为。

六、安全韧性现代水网发展建议

（一）工程基础层面

以提升工程体系的韧性承载能力为目标，统筹推进工程设计优化、调蓄体系构建与运行能力升级。通过在规划与建设阶段引入安全韧性理念，强化关键工程在极端情景下的可靠性与冗余设计；通过优化水库、蓄滞洪区、应急水源等设施布局，构建多层级、多类型调蓄体系，对水网系统进行增效，提升系统对极端事件的调节能力；通过强化工程的可测、可控与可协同特性，推动工程体系由物理载体向调控能力载体转变，为水网系统的协同调度与安全韧性运行提供基础支撑。

（二）调度能力层面

围绕水网系统跨层级协同运行与复杂情景动态响应需求，系统提升调度组织能力、运行闭环能力与多情景调控能力。构建国家、流域、区域多层级协同调度体系，明确调度权责边界与协同机制，强化统一调度与分级执行之间的有效衔接，提升复杂情景下跨区域协同处置能力；推动调度运行闭环机制落地，围绕“决策-指令-执行-反馈-优化”全过程，促进运行管理规范；在此基础上，面向常态、条件态与应急态等不同运行情景，构建多模式调度策略与动态切换机制，提高系统在复杂扰动条件下的实时响应与精准调控能力，推动水网调度由分散执行向协同有序、由静态调度向动态调度转变。

（三）科学研究层面

围绕水网系统自然水系与工程网络耦合、多尺度水文水动力过程叠加、多目标功能协调运行等复杂特征，系统推进安全韧性现代水网理论与方法创新。重点突破水网系统在极端洪旱、工程失效、突发污染等复杂扰动下的链式风险演化机理，揭示工程结构、网络连通、调蓄能力与供水、防洪、生态等核心功能维持之间的作用关系，构建融合水文学、水动力学、系统工程与智能计算的综合理论框架和科学评价体系，推动安全韧性由概念描述向可量化模型与科学评价体系转化。在此基础上，突破

传统机理模型与数据驱动方法相互割裂的局限，发展数据驱动与机理约束相融合的多保真模型体系，提升对复杂扰动过程的刻画能力与预测精度，为调度决策提供更加可靠的科学支撑。同时，依托典型流域与重大工程场景，构建面向真实运行环境的验证体系，通过多情景试验与示范应用，系统检验关键技术与方法的适用性和稳定性，推动相关研究成果由理论可行向工程可用转化。

（四）体制机制层面

围绕水网系统跨层级、跨区域协同运行需求，系统推进规则体系、数据治理与运行机制的一体化建设。构建统一的水网运行规则体系，明确对象体系、权限体系与调度规则，推动水网运行由分级管理向统一规则约束下的协同运行转变，实现不同层级与不同区域之间的有序衔接和高效协同；完善数据治理与标准体系，推进数据标准化与共享机制建设，打破“信息孤岛”，构建统一的数据底座；建立以“决策-指令-执行-反馈-优化”为主线的闭环化运行管理机制，实现运行全过程可追溯，推动水网管理由经验驱动向规则驱动、由分散运行向闭环管控转变，全面提升水网系统运行的规范性和可控性。

（五）产业布局层面

围绕安全韧性现代水网系统能力塑造需求，系统构建覆盖全生命周期的产业支撑体系，形成与水网运行逻辑相匹配的能力供给格局。在规划环节，以安全韧性评价体系为基础，围绕水网结构短板识别、风险评估与能力配置优化，提升规划决策的科学性与前瞻性；在建设环节，推动工程建设产业向高质量与韧性导向升级，发展具备高可靠性、适应性的工程建造与装备制造能力，强化工程体系在极端情景下的支撑能力；在调度环节，重点培育以数字孪生水网、智能调度平台与优化算法为核心的数智化产业体系，发展面向多情景推演、实时决策与协同调度的技术产品和服务能力；在控制环节，加快发展面向精准感知与执行调控的装备产业，突破高精度监测设备、边缘计算装置与智能控制终端等关键装备，提升工程单元的可测、可控能力，支撑调度指令的高效传导与精准落地。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: May 7, 2026; **Revised date:** June 2, 2026

Corresponding author: Li Yunling is a professor-level senior engineer from General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources. Her major research fields include water network planning, operation, and management. E-mail: liyunling@giwp.org.cn

Funding project: National Key Research and Development Program of China (2023YFC3206500)

参考文献

- [1] 李国英. 加快建设现代化水网[J]. 中国水利, 2025(22): 1-3.
Li G Y. Accelerating the construction of a modern water network[J]. China Water Resources, 2025(22): 1-3.
- [2] 李国英. 推动水利高质量发展 保障我国水安全 为确保基本实现社会主义现代化取得决定性进展作出水利贡献[J]. 中国水利, 2026(1): 1-9.
Li G Y. Advancing high-quality water conservancy and safeguarding China's water security: Contributing to securing decisive progress in basically achieving socialist modernization[J]. China Water Resources, 2026(1): 1-9.
- [3] 李云玲, 郭旭宁, 刘为锋, 等. 安全韧性现代水网[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2025: 25-35.
Li Y L, Guo X N, Liu W F, et al. Safe and resilient modern water network[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2025: 25-35.
- [4] 李云玲, 宋秋波, 刘为锋, 等. 国家水网调度指挥体系构建思路与路径探讨[J]. 中国水利, 2025(11): 1-7.
Li Y L, Song Q B, Liu W F, et al. Discussion on the construction ideas and pathways of the national water network dispatching and command system[J]. China Water Resources, 2025(11): 1-7.
- [5] 郭旭宁, 刘为锋, 邢西刚, 等. 国家水网的理论内涵与战略策略关系[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1055-1063.
Guo X N, Liu W F, Xing X G, et al. National water network theoretical connotation and its relationship between strategy and tactics[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1055-1063.
- [6] 钮新强, 吴永妍, 王磊, 等. 高质量建设国家水网工程的思考与建议[J]. 中国工程科学, 2024, 26(6): 108-119.
Niu X Q, Wu Y Y, Wang L, et al. Thoughts and suggestions on high-quality construction of national water network project[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(6): 108-119.
- [7] 吴文庆. 加快构建国家水网 推动水利高质量发展[J]. 中国水利, 2024(24): 7-9.
Wu W Q. Accelerating construction of the national water network and promote high-quality development of water resources[J]. China Water Resources, 2024(24): 7-9.
- [8] 郭旭宁, 李云玲, 唱彤, 等. “荆楚安澜”现代水网建设思路与实施路径[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 1-7.
Guo X N, Li Y L, Chang T, et al. Construction thought and implementation pathway of “Jingchu'anlan” modern water network[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 1-7.
- [9] 刘为锋, 郭旭宁, 李云玲, 等. 基于水资源空间均衡评价的“荆楚安澜”现代水网优化布局与组网方案研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 27-32, 104.
Liu W F, Guo X N, Li Y L, et al. Study on optimized layout and networking scheme of “Jingchu Anlan” modern water network based on spatial equilibrium evaluation of water resources[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 27-32, 104.
- [10] Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Université Catholique de Louvain. The international disaster database (EM-DAT)[EB/OL]. (2023-09-26)[2026-04-28]. <https://www.emdat.be/>.
- [11] 付平凡, 孙洪泉, 苏志诚, 等. 基于 EM-DAT 数据的全球干旱灾害链分析研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(3): 287-294, 306.
Fu P F, Sun H Q, Su Z C, et al. Analysis of global drought disaster chains based on EM-DAT data[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(3): 287-294, 306.
- [12] 高长胜, 胡江. 气候变化对我国水利基础设施安全影响及应对建议[J]. 中国水利, 2024(24): 60-67.
Gao C S, Hu J. Impact of climate change on safety of water infrastructures and response measures[J]. China Water Resources, 2024(24): 60-67.
- [13] 靳文波, 刘永强, 房玉东, 等. 链生灾害多源数据分析与灾害趋势研究——以“杜苏芮”台风为例[J]. 水利学报, 2025, 56(8): 1012-1024.
Jin W B, Liu Y Q, Fang Y D, et al. Research on multi-source data analysis and disaster trend of chain-induced disasters: A case study of typhoon “DuSuri”[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(8): 1012-1024.
- [14] 马昱斐, 张建云, 刘翠善, 等. 我国城市极端暴雨洪涝新特征与韧性提升建议[J]. 中国工程科学, 2026, 28(2): 260-274.
Ma Y F, Zhang J Y, Liu C S, et al. New characteristics of extreme rainstorm and flood in Chinese cities and suggestions for enhancing resilience[J]. Strategic Study of CAE, 2026, 28(2): 260-274.
- [15] 苏怀智, 高建新, 傅志敏, 等. 梯级坝群系统服役风险评估与调控研究现状与展望[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(5): 1-12.
Su H Z, Gao J X, Fu Z M, et al. Research status and prospects of service risk assessment and regulation for cascade dam systems[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5): 1-12.
- [16] Gao J X, Mao Y P, Su H Z, et al. Risk assessment method for cascade dam system considering risk transmission effect[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2026, 40(1): 7.
- [17] 程晓陶, 刘昌军, 李昌志, 等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J]. 水利学报, 2022, 53(7): 757-768, 778.
Cheng X T, Liu C J, Li C Z, et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 757-768, 778.
- [18] 杨晶晶, 郑丽娜, 蔡荣宝. 系统治理视角下特大城市防洪除涝韧性提升路径研究——基于济南市 2025 年汛期应对实证分析[J/OL]. 中国防汛抗旱, 2026-02-28. <https://doi.org/10.16867/j.issn.1673-9264.2025686>.
Yang J J, Zheng L N, Cai R B. Pathways for improving flood control and drainage resilience in megacities from the perspective of

- systemic governance: An empirical analysis of Jinan's response during the 2025 flood season[J/OL]. China Flood & Drought Management, 2026-02-28. <https://doi.org/10.16867/j.issn.1673-9264.2025686>.
- [19] 莫永昌, 杨芳, 李行伟. 高密度城市韧性防洪排涝体系构建的香港实践[J]. 中国水利, 2025(23): 28-35.
- Mok W C, Yang F, Lee J H W. Establishment of a resilient flood control and drainage system in high-density cities: Practice from Hong Kong[J]. China Water Resources, 2025(23): 28-35.
- [20] 郑小康, 王煜, 张迪, 等. 黄河流域水资源系统韧性驱动要素与调控策略[J]. 水利学报, 2025, 56(10): 1253-1266.
- Zheng X K, Wang Y, Zhang D, et al. Driving factors and regulation strategies for resilience of water resources system in the Yellow River basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(10): 1253-1266.
- [21] 周创兵, 向衍, 姚池, 等. 安全-生态-智能库坝建设的挑战与展望[J]. 中国水利, 2026(2): 1-10.
- Zhou C B, Xiang Y, Yao C, et al. Challenges and prospects of safe, ecological, and smart reservoir and dam construction[J]. China Water Resources, 2026(2): 1-10.
- [22] 刘为锋, 郭旭宁, 李云玲, 等. 南水北调东线一期工程补偿调度研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(5): 236-248.
- Liu W F, Guo X N, Li Y L, et al. Compensation scheduling of the first phase of the south-to-north water diversion project's eastern route[J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(5): 236-248.
- [23] 何国华, 赵勇, 王浩, 等. 黄河几字弯区水安全保障与一体化水网工程布局研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(4): 129-140.
- He G H, Zhao Y, Wang H, et al. Water security safeguarding and integrated water network layout of the jiziwan region in the Yellow River Basin[J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(4): 129-140.
- [24] 骆进军, 王为. 抗御汉江1961年以来最极端枯水和最密集秋汛的调度实践与思考[J]. 中国水利, 2026(1): 36-44.
- Luo J J, Wang W. Practice and reflections on regulating the most extreme low-flow event since 1961 and the most concentrated autumn flood in the Hanjiang River basin[J]. China Water Resources, 2026(1): 36-44.
- [25] 黄艳, 喻杉, 罗斌, 等. 面向流域水工程防灾联合智能调度的数字孪生长江探索[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 253-269.
- Huang Y, Yu S, Luo B, et al. Development of the digital twin Changjiang River with the pilot system of joint and intelligent regulation of water projects for flood management[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 253-269.
- [26] 卢兴超, 徐宗学, 李永坤, 等. 基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 36-47.
- Lu X C, Xu Z X, Li Y K, et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding and waterlogging disaster based on multi-agent models[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 36-47.
- [27] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [28] Hashimoto T, Stedinger J R, Loucks D P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation[J]. Water Resources Research, 1982, 18(1): 14-20.
- [29] Rinaldi S M, Peerenboom J P, Kelly T K. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(6): 11-25.
- [30] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [31] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems[J]. Ecology and Society, 2004, 9(2): art5.
- [32] Folke C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 253-267.
- [33] Haimes Y Y. On the definition of resilience in systems[J]. Risk Analysis, 2009, 29(4): 498-501.
- [34] Bi W, Schooling J, MacAskill K. Assessing flood resilience of urban rail transit systems: Complex network modelling and stress testing in a case study of London[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 134: 104263.
- [35] Bi W, Hackl J, MacAskill K. Enhancing flood resilience of urban rail transit systems through recovery resource scheduling optimisation: A case study of London[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 128: 106437.
- [36] Pagano A, Giordano R, Portoghese I. A pipe ranking method for water distribution network resilience assessment based on graph-theory metrics aggregated through Bayesian belief networks[J]. Water Resources Management, 2022, 36(13): 5091-5106.
- [37] Diao K G, Sweetapple C, Farmani R, et al. Global resilience analysis of water distribution systems[J]. Water Research, 2016, 106: 383-393.
- [38] Wang J, Zuo W D, Rhode-Barbarigos L, et al. Literature review on modeling and simulation of energy infrastructures from a resilience perspective[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 183: 360-373.
- [39] Dong B X, Shan M, Hwang B G. Simulation of transportation infrastructures resilience: A comprehensive review[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(9): 12965-12983.
- [40] Batouli M, Mostafavi A. Multiagent simulation for complex adaptive modeling of road infrastructure resilience to sea-level rise[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2018, 33(5): 393-410.
- [41] Shadabfar M, Mahsuli M, Zhang Y, et al. Resilience-based design of infrastructure: Review of models, methodologies, and computational tools[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2022, 8: 03121004.
- [42] Ye X Y, Du J X, Han Y, et al. Developing human-centered urban digital twins for community infrastructure resilience: A research agenda[J]. Journal of Planning Literature, 2023, 38(2): 187-199.
- [43] Ajayi O O, Kurien A, Djouani K, et al. Artificial intelligence for infrastructure resilience: Transportation systems as a strategic case for policy and practice[J]. Sustainability, 2025, 17(20): 8992.
- [44] 范志鹏, 李云玲, 马睿, 等. 长江黄河跨流域多线路水网韧性评估[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 27-34, 75.
- Fan Z P, Li Y L, Ma R, et al. Resilience evaluation for the Yangtze River and Yellow River inter-basin multi-route water network[J].

- Water Resources Protection, 2025, 41(1): 27-34, 75.
- [45] 韩凯航, 黎俊轩, 陈湘生, 等. 超大城市地下空间系统智慧韧性发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(4): 95-105.
- Han K H, Li J X, Chen X S, et al. Development strategy for intelligent resilience of underground space system in megacities[J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(4): 95-105.
- [46] 赵钟楠, 刘震, 李光轩, 等. 立体水网构建对西南典型区域水资源系统韧性提升研究[J/OL]. 水资源保护, 2026-05-18. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20260518.1343.016>.
- Zhao Z N, Liu Z, Li G X, et al. Improving water resources system resilience through the construction of a three-dimensional water network in a typical region of Southwest China[J/OL]. Water Resources Protection, 2026-05-18. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20260518.1343.016>.
- [47] 王银堂, 苏鑫, 王磊之, 等. 城市洪涝灾害应对韧性精细化评估[J]. 水科学进展, 2025, 36(6): 933-948.
- Wang Y T, Su X, Wang L Z, et al. A refined assessment of urban flood resilience[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(6): 933-948.
- [48] 王煜, 万芳, 王威浩, 等. 流域水资源系统复杂网络特征及韧性驱动机理[J]. 水科学进展, 2025, 36(2): 190-203.
- Wang Y, Wan F, Wang W H, et al. Complex network characteristics and resilience-driving mechanisms of water resource systems in river basin[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(2): 190-203.
- [49] 张小丽, 姜力荣, 马睿, 等. 基于可变毕达哥拉斯模糊和VIKOR耦合方法的冀中南地区水资源系统韧性评价[J]. 水资源保护, 2026, 42(2): 190-198.
- Zhang X L, Jiang L R, Ma R, et al. Evaluation of water resources system resilience based on variable Pythagorean fuzzy and VIKOR coupling method in central and southern regions of Hebei Province[J]. Water Resources Protection, 2026, 42(2): 190-198.