

基于“自然–工程–管理”三元耦合的智慧水利体系框架

唐洪武^{1,2*}, 刘思源^{2,3,4}, 蒋晟^{5,6}, 卢昌正^{2,3,4}, 蔡阳⁷

(1. 华南理工大学, 广州 510641; 2. 水利部粤港澳大湾区水网全域感知与智能调控技术创新中心, 广州 510641;
3. 华南理工大学工商管理学院, 广州 510641; 4. 广东省智能认知与行为决策工程技术研究中心,
广州 510641; 5. 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098; 6. 河海大学水利水电学院,
南京 210098; 7. 水利部信息中心, 北京 100053)

摘要: 智慧水利是传统水利工程与新兴智能技术交叉融合的产物, 以“天空地水工”感知数据为基础并通过数智技术与机理模型的耦合, 推动国家水治理体系的安全发展和高效运行。本文辨析了我国智慧水利的概念演进与阶段特征, 识别了当前面临的三重结构性约束; 立足“自然–社会”二元水循环的认知框架, 解构了工程设施与管理行为的功能逻辑, 进而构建了基于“自然–工程–管理”三元耦合的智慧水利体系框架。在该框架下, 明确了自然系统随机演化(输入)、工程系统时空调度水动力重构(执行)、管理系统多目标寻优(控制)的互馈机制, 形成了包含“治水(安全)、利水(资源)、活水(生态)、善水(社会)”四维价值的目标函数, 提出了覆盖“要素映射、机理预演、鲁棒优化、闭环智控、价值共生”的五级成熟度演进模型。从理论、方法、路径三个维度出发完善我国智慧水利体系框架, 有助于解决当前智慧水利建设中的多目标动态协同失效、社会博弈量化不足等理论难题, 支撑构建安全、高效、绿色、智能的国家水网体系。

关键词: 智慧水利; 自然水循环; 水动力重构; 管理行为; 闭环智控; 成熟度模型

中图分类号: TV213.4 **文献标识码:** A

Framework of Smart Water Conservancy System Based on Nature–Engineering–Management Ternary Coupling

Tang Hongwu^{1,2*}, Liu Siyuan^{2,3,4}, Jiang Sheng^{5,6}, Lu Changzheng^{2,3,4}, Cai Yang⁷

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Technology Innovation Center for Basin-wide Perception and Intelligent Regulation of Water Networks in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area, Ministry of Water Resources, Guangzhou 510641, China; 3. School of Business Administration, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 4. Guangdong Engineering Research Center for Intelligent Cognition and Behavioral Decision–Making, Guangzhou 510641, China; 5. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210098, China; 6. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 7. Information Center, Ministry of Water Resource, Beijing 100053, China)

Abstract: Smart water conservancy is the product of integrating of traditional hydraulic engineering with emerging intelligent technologies. It leverages sensing data from “space, air, ground, water, and engineering” systems and couples intelligent methods with

收稿日期: 2026-03-09; 修回日期: 2026-04-16

通讯作者: *唐洪武, 华南理工大学教授, 中国工程院院士, 研究方向为水力学及河流动力学、智慧水利; E-mail: hwtang@scut.edu.cn

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(CXTD202403)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

mechanistic models to support the safe development and efficient operation of the national water governance system. This study examines the conceptual evolution and stage-specific characteristics of smart water conservancy in China and identifies three structural constraints to its development. Building on the traditional nature-society dualistic cognitive framework of the water cycle, the study deconstructs the functional logic of engineering facilities and management practices to develop a smart water conservancy system framework based on “nature-engineering-management” ternary coupling. Within this framework, a reciprocal feedback mechanism among the stochastic evolution of natural systems (input), spatiotemporal scheduling and hydrodynamic reconstruction of engineering systems (execution), and multi-objective optimization of management systems (control) is clarified. Furthermore, it proposes a four-dimensional value objective function encompassing water safety, resource utilization, ecological sustainability, and social benefits. On this basis, a five-level maturity evolution model is developed, encompassing element mapping, mechanistic simulation, robust optimization, closed-loop intelligent control, and value symbiosis. It is also proposed to improve the system framework for smart water conservancy in China from three dimensions: theory, methodology, and pathway, which aims to help address key theoretical challenges including deficiencies in the dynamic coordination of multiple objectives and the insufficient quantification of stakeholder game dynamics, thereby supporting the construction of a safe, efficient, green, and intelligent national water network system.

Keywords: smart water conservancy; natural water cycle; hydrodynamic reconstruction; management behavior; closed-loop intelligent control; maturity model

一、前言

水资源是维系地球生态系统健康的核心要素，也是构筑国家安全屏障、支撑经济社会发展的基础性和战略性资源^[1]。当前，全球气候变化面临多重临界点风险^[2]，在“自然-社会”二元水循环耦合系统场景下流域水文要素的非平稳性趋于增强，因而突破资源刚性约束、化解系统性安全风险、制定适宜的管理决策成为事关国家现代化发展的重大科学问题。

长期以来，我国在流域综合治理和大型水网建设中形成了深厚的制度优势、坚实的工程积淀。在制度层面，构建了流域管理与行政区域管理相结合的复合型治理体制，有效统筹了水的自然属性和行政管理需求；实施了“河长制”等管理制度，强化了面对流域治理问题时的执行效能；同步通过垂直化管理改革，提高了环境监管的独立性和权威性。在资源与工程实践层面，建成了世界规模最大的水利基础设施体系、服务人口最多的农村集中供水体系，引领了国际水利工程技术的创新突破^[3]。也要注意，随着水利体系建设从单一的兴利除害转向多维度的系统治理，现有体系框架面临着边际效应递减的发展挑战。一方面，在应对极端天气时面临鲁棒性边界，单纯依赖新增工程建设难以从根本上化解特大城市内涝、流域性洪涝干旱等系统性风险，也受制于生态红线、征地移民的硬约束；另一方面，流域上下游、左右岸的利益博弈更为复杂，单纯依靠行政指令难以解决水资源精细化配置时的多目标动态协同失

效问题。

智慧水利是推进水利治理体系与治理能力现代化的关键路径。我国智慧水利建设的独特性在于特殊的自然水情与国家顶层战略需求：不仅面临超广尺度的跨流域调度^[4]、复杂地形地貌环境适应性等挑战，而且强调政府主导的大规模系统集成、国家水安全战略等刚性需求，更加注重水资源可持续利用与公共服务的普惠性^[5]。近年来，依托“建设数字孪生水利体系”等国家战略部署，在数字孪生流域、数字孪生水网、数字孪生水利工程建设方面取得了阶段性进展^[6]。然而，审视当前发展实践，仍存在技术理性超前、管理逻辑滞后的结构性错位，虽有海量监测数据，但未能有效转化为管理决策所需的知识，出现了物理世界数字化、管理决策经验化并存的情况。

当前正是“十五五”时期谋篇布局的关键节点，应谋划加快实现高水平水利科技自立自强并基本实现水利现代化^[7]。本文在“自然-社会”二元水循环认知框架的基础上，提出基于“自然-工程-管理”（NEM）三元耦合的智慧水利体系框架。该框架突出工程在国家水网建设背景下的本体地位，将之界定为连接自然随机性与管理目的性的物理执行机构；进而厘清工程以时空精准调度的方式对自然流场水动力产生的重构能动作用，强调管理对自然与工程的反馈调节作用。在此基础上，构建包含“治水（安全）、利水（资源）、活水（生态）、善水（社会）”四维价值的目标函数，解构智慧水利从要素映射到价值共生的成熟度演进模型，提出面向未来的实施路径，为构建国家智慧水利体系提

供理论支撑与实践参考。

二、我国智慧水利的概念演进与阶段特征

（一）我国智慧水利的概念演进

在全球视野下，智慧水利的发展体现出同源而异流的显著差异性。智慧水利并非源于单一的理论构建，而是伴随着信息化浪潮与城市管理现代化的需求而生^[8]，主要受到“智慧地球”理念（美国国际商业机器公司2008年提出）的助力。在发达国家，智慧水利本质上是着眼当下存量资产效益最大化的发展建设，随着数字水务行动、国家水务基础设施数智化升级而逐步成熟，可视为技术进步、市场提效需求共同驱动的成果^[9]；侧重城市水务基础设施的资产精细化管理与环境合规性监测，核心诉求是降低运营成本、提升资产回报率，发展路径呈现由单点智能感知向资产全生命周期数字化管理延伸的特征。

单纯复制国际上以水务资产为中心的技术路径，难以解决我国以防洪安全、水资源优化配置为核心的国家水网治理难题（必须遵循底线思维导向）。我国智慧水利建设遵循系统治理逻辑，是应对复杂自然环境、巨系统治理挑战的必然选择，走出了一条由点状感知向系统认知跨越的本土化路径。在发展早期，以智慧流域^[10]、水联网^[11]、智能水网^[12]等概念为牵引，重点利用物联网技术解决信息的数字化映射问题，实现对物理世界的实时监测。然而，随着监测数据的指数级增长，单纯的感知存在着从数据到决策的认知“鸿沟”：海量的物联网数据虽然可以描绘流域的当前状态，但难以基于水文物理规律推演未来的状态变化，更无法量化工程调度对生态与安全的潜在影响。在此背景下，学术界逐步明晰了我国智慧水利的概念边界，将之界定为物联网、大数据、人工智能等信息技术在水利行业的集成应用，旨在通过全要素智慧化提升水资源利用效率、水安全保障能力^[13]；相应内涵也逐步从单一的技术维度扩展至目标、对象、时空、价值、成效等维度^[14]。同时，国家层面进一步确立了以数字孪生流域为核心的智慧水利建设路径，统筹构建具有预报、预警、预演、预案（“四预”）功能的数字孪生体系，以实现物理流域与数字流域的精准映射及虚实交互。

上述概念演进过程超越了单一的技术赋能层次，将智慧水利逐步确立为系统治理范式，即在“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路的指引下，深度耦合实体水利工程与数字智能体系，实现对自然水循环、社会水循环全过程的精准认知与管控。

（二）我国智慧水利的阶段特征

1. 萌芽与信息化起步阶段（20世纪70年代末—20世纪末）

此阶段水利建设的核心任务是支撑国民经济发展，通过工程措施抵御频繁发生的洪涝旱灾^[15]。水利部门主要负责工程建设与维护，开展治理依托单一的行政监管模式。“七五”时期，水利信息化建设起步，以水情自动测报系统的研发与应用为标志。此阶段的技术特征表现为从人工到自动、从引进到自主的双重转型。例如，1981年启动的丹江口系统建设，依托意大利的技术支持完成洪水预报模型开发；大致同期，在世界气象组织志愿合作计划、美国国家海洋大气管理局的支持下，建成了针对长江陆水流域的水文自动测报系统^[16]；1983年，水利部水调中心主导建设了黄龙滩水情测报及防洪调度自动化系统^[17]。然而，主要实践局限于区域性的防汛通信、水情自动测报、水文资料电子化建设等，应用场景单一、刚性强，对生态环境、水资源效率的关注不足。1998年长江流域特大洪水的发生，体现了当时水利体系的能力极限、工程措施的严重短板，由此在国家层面开始了从工程水利向资源水利的转变。

2. 升级与融合阶段（21世纪初—2020年）

21世纪初，随着“金水工程”纳入国家“十二金”重点工程，水利建设明确了以防汛抗旱指挥系统作为业务重心^[18]，规划应用于水利信息的基础采集、业务应用系统、营造保障体系3个部分^[19]。代表性的建设成果有：三峡工程实施视频监控与调度系统联动，提升了大坝运行的安全性和响应速度^[20]；长江、黄河等流域的骨干站点安装了自动监测设备，实现水情信息的网络化传输。2011年，国家提出了“推进水利信息化建设”目标，行业数字化边界迅速扩张^[21]。水利信息化的应用场景从单一的刚性防汛业务，向水资源管理、水土保持、农田灌溉等广义水利业务延伸。江苏、

山东等省份开展了首批“智慧水利”试点^[22-23]，率先探索了物联网技术在农区灌溉与精细化管理中的应用，标志着水利信息化开始介入社会水循环的精细化调控环节。此阶段的技术特征主要体现在两方面：基础设施的层级跃升，从过去的单点测报升级为全流域联网监测，从模拟信号升级为数字化传输，从单一的防汛业务升级为防汛与水资源综合业务；数据资源的标准化融合，针对初期建设产生的“信息孤岛”问题，行业重点转向多源异构数据的标准化治理，推动物联网、地理信息等新兴技术与水利业务场景的初步融合。

3. 智能化深化阶段（2021年起）

面向经济社会高质量发展要求，单纯的信息互联已难以满足复杂环境下的最优决策需求。智慧水利建设的重心开始转向构建物理流域的数字映射体，进入了以数字孪生为核心范式的新阶段。在政策层面上，水利部于2021年将智慧水利建设列为推动水利高质量发展的六条实施路径之一^[24]，在《关于大力推进智慧水利建设的指导意见》（2022年）^[25]中提出了构建以数字孪生流域为关键支撑、具有“四预”功能的智慧水利体系；《数字孪生流域建设技术大纲（试行）》（2022年）进一步细化了“2+N”智能业务场景^[26]。这一系列举措标志着建设重心从业务流程信息化全面转向物理世界孪生化。在技术实践上，当前致力于构建高保真的数字映射体：在感知层形成了“天空地水工”一体化监测网络，实现对水文、气象、工情数据的全域覆盖^[27]；在认知层则依托水文机理模型与数据智能技术，逐步具备了洪水演进全过程仿真预演能力，实现从“记录过去”到“推演未来”的跨越。目前，“数字孪生南水北调”“数字孪生小浪底”等试点项目已取得阶段性成果^[28]，七大江河数字孪生流域建设全面铺开^[29]，相关示范项目在防洪调度与水资源精细化配置方面展现出良好的应用成效，初步实现向智慧治水的范式转变^[30]。整体来看，尽管数字孪生水利建设的“十大样板”已验证当前技术路线的可行性，但智慧水利建设整体处于“由点及面”的探索阶段^[31]，也面临着从技术验证转向规模化应用的挑战。

三、我国智慧水利面临的三重结构性约束

智慧水利面临的现实困境不仅是技术层面的精

度问题，而且是底层逻辑中物理规律、数据算法、管理体制之间的深层不适应。这种不适应具体表现在数据要素、认知模型、管理体制三个维度^[32]。

（一）算据层上全域感知的时空碎片化与资产化壁垒

数据是驱动智慧水利运转的基础性生产要素，当前仍存在数据海量而信息贫乏的现实矛盾。①时空维度上存在映射碎片化问题。我国虽建成世界规模最大的水利监测体系，但感知网络集中分布于大江大河的主流与大型工程节点，而中小流域、山洪沟、地下水系统的监测站点仍呈孤岛状分布^[33]。空间覆盖的不均衡性，叠加遥感数据（广域低频）与地面监测数据（单点高频）在时间尺度上的不同步，导致数字底板难以精准复刻物理流域的实时全貌^[34]。②水利数据权属不清、标准不一，相应的数据治理制度缺失。跨部门（如气象、自然资源、生态环境）数据壁垒依然存在，数据资产化理论与共享交易机制不够完善，使多源异构数据的融合多停留在简单物理拼接层次，难以产生知识增值^[35]。随着数据成为生产要素，水利数据产权、流通机制、安全标准的理论指导和法规支撑亟待完善。③科研地基存在缺陷，制约水文科学的普适性探索研究。国内尚无公开、标准、覆盖全域的大样本水文数据集，研究人员在开展课题时往往需耗费大量精力进行某一特定区域数据的收集、清洗和校核。这就导致很多水文前沿研究无法平衡深度与广度，不利于水文科学研究从经验范式向数据密集型范式的转型。

（二）算法层上机理模型与数据驱动的二元割裂

从数字孪生水利到智慧水利的提升，需要突破数据智能对水利业务逻辑的理解能力。这不仅是自动采集数据并实施静态映射，更是理解数据背后的水文规律并实现自主辅助决策。水文、水动力学模型是数字孪生的核心算子，当前研究发展已较为成熟，具有清晰的物理意义、良好的因果解释力，但在面对全流域精细化模拟时调参困难、计算耗时过长，不适应突发水灾害应急调度的预演需求；深度学习等数据驱动模型计算效率高，但缺乏对物理守恒定律的内嵌约束，经常出现不可解释性预测结果^[36-37]。这导致现有的预报预警模型体系难以适应

气候变化带来的水文非平稳性, 缺乏对复杂时空异质性的自主认知能力; 在不同流域之间迁移泛化能力薄弱, 往往陷入繁琐的参数率定陷阱 (异参同效)^[38]。例如, 季节性周期明显的流域通常表现出负的低流偏置特征, 而季节性周期较小的流域则倾向于正偏置。因此, 建立能够自适应地捕捉不同流域的季节性水文节律与社会水文变量, 突破数据智能对水利业务逻辑的浅层理解, 进而构建具有因果推断能力、可自适应调整结构以消除系统性偏差的“机理+数据”双驱动模型体系, 成为当前突出的技术挑战^[39]。

(三) 业务层上技术理性与管理体制的响应滞后

智慧水利的最终目标是决策优化的闭环, 而当前的数字化能力跃升与传统的科层制管理模式之间存在明显壁垒, 导致管理环节实际上成为水利体系中的短板。① 决策与执行存在功能性解耦。现有的智慧化建设多停留在可视化表征层面, 尽管可以实现物理世界的数字映射, 但未能突破精准调控的预案管理联动^[40]。“四预”功能体系多止步于方案预演, 加之附加责任归属存在模糊性, 导致生成的调度策略难以转化为工程控制指令^[41]。② 社会博弈机制的建模能力缺失。现实维度的水资源配置与防洪调度是涉及上下游补偿、生态红线、经济效益权衡的复杂社会博弈系统^[42]。然而, 现有系统多基于单纯的水力学最优解进行计算, 而将复杂的社会因子简化为静态边界条件, 实际上缺乏对多利益主体博弈行为的动态建模与量化分析能力^[43]。③ 数智敏捷性与组织惯性演化不同步。智慧水利要求具有毫秒级的感知与响应能力, 而基于传统行政区划与科层制的管理响应机制具有天然的滞后性^[44-45], 导致技术系统的最优解往往在层层审批与协调过程中衰减, 难以实现真正的自适应协同治理。

当前智慧水利建设面临的现实困境, 不宜简单归结为感知盲区、算力瓶颈等单一技术维度的缺口, 而更多地折射出既有认知范式在应对复杂巨系统时的适配性缺陷。以小浪底水利枢纽的数字孪生试点建设为例, 通过全要素感知已能精准掌握工程设施的物理状态, 但在计及黄河水沙演变 (具有高度的非平稳性与不确定性) 的自然变量时, 保持与精密的水库群工程调度协同, 实现防洪、减淤、供水等目标动态平衡的管理决策闭环联动, 依然面临

着跨系统语义交互、时空协同等方面的突出挑战。这些现实背后折射出算据层上的多源异构阻滞、算法层上的范式割裂、业务层上的决策响应时滞, 故需要打破物理世界与管理决策的界限, 建立将自然的随机演变、工程的确定性响应、管理的博弈性决策融合为统一体的体系框架。

四、基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架基本构成

面向智慧水利研究与应用“深水区”的复杂挑战, 本研究提出了基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架 (见图1), 以深入解构水利巨系统内部的映射机制, 揭示自然过程、工程调控、管理决策之间的动态协同关系, 进而明确各子系统之间的边界条件、作用路径、反馈机制, 形成从物理现象到管理行为的全链条关联表达, 支撑并优化智慧水利的运行逻辑与价值体系。

(一) 智慧水利体系框架的本体解构

1. 作为随机演化“场”的自然系统

自然系统包括具有高度随机性、非线性、非平稳特征的水文水资源系统 (如降雨、蒸发、产汇流) 以及伴生的泥沙与生态环境。过去受限于计算能力, 自然系统通常简化或降维处理为基于平稳性假设的静态边界条件, 而这种静态描述已难以适应当前自然界的突变特征^[46]。为此, 在基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架中, 自然系统被构建为高维度的时变概率空间, 既是对物理实体的数字化映射, 又是由“数据-知识”双重支撑的动态输入集合。输入变量不再采用固定的概率分布, 而是从属于受气候驱动、随时间变化的分布簇, 再利用多源感知与大模型对这个不确定集合进行动态缩减。自然系统的核心任务是实时捕捉水文序列的异常变化信号, 量化自然演进过程中的不确定性分布, 将不可控的自然随机行为转化为可计算的风险输入场, 提供实时状态感知与趋势推演能力。

2. 作为确定响应“网”的工程系统

工程系统是人类为干预自然水流而构建的物理设施网络 (如水库群、泵站、堤防、闸门) 以及相关的高保真数字孪生体或智能体模型^[47-48]。有别于过去将工程系统隐含于社会系统的水文视角^[49], 基

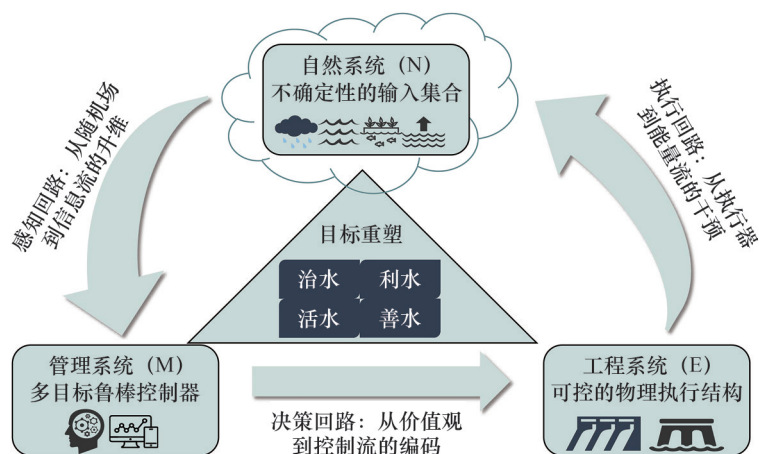


图1 基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架

于NEM三元耦合的智慧水利体系框架赋予工程系统独立的主体地位，将之作为连接自然随机性和管理目的性、具有相对确定性但存在失效风险的执行机构。工程系统的核心特征是可控性，作为可以传递并接收信息、具有明确约束的物理/数字实体，精准地将控制指令转化为物理行为，对自然水流的流向、水位、输移过程进行时空维度上的重构，从而在物理维度上实现水资源的空间均衡配置、降低水旱灾害风险。

3. 作为智慧寻优“脑”的管理系统

管理系统作为智慧水利的“大脑”、跨越虚实维度的多目标鲁棒控制器，核心在于围绕水资源、水利工程、水生态、水灾害、涉水事务构建多层次、多主体、全流程的综合管控体系。在基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架中，管理系统内嵌价值目标函数（如安全、资源、生态、社会）、调度规则、利益博弈机制、风险偏好因子等决策响应偏好，可动态适配丰枯交替、旱涝急转等复杂未知水文情景，实现物理世界运行管理逻辑、数字空间数学计算寻优的深度同构。管理系统在数字空间中是融合物理约束、解析人类意图的算法引擎，在物理世界中则成为流域管理机构、各级水利管理部门落地联合调度方案、落实水利管理制度的操作载体。

（二）智慧水利体系框架的耦合机制

基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架的核心内容是：建立自然环境、工程设施、管理规则之间的闭环响应机制，形成“监测预警-方案优选-工程动作-效果评估”的完整业务流程，贯通信息

上传（从自然到决策）与指令下达（从决策到工程），实时锁定并化解水旱灾害风险，显著增强水利系统应对复杂环境变化的鲁棒性与调控效率。不同于当前滞后响应的开环干预模式，智慧水利应具有自适应的闭环智控能力，强调虚实共生的闭环互馈。当自然系统出现突发异变（如降雨预报与实测产生偏差），管理系统可即时感知残差，动态修正对工程的控制指令。这种“感知-修正-再执行”的迭代机制，赋予水利体系以自适应调节能力，确保系统始终收敛至帕累托最优状态。

1. 感知回路

从随机场到信息流的升维即为基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架的感知回路。利用“天空地水工”一体化的全域感知网，实时捕捉自然系统的物理状态（如洪水演进场、水质浓度场）。应用大模型技术，将散乱的感知数据实时处理为管理系统可理解的结构化风险情报（如旱涝急转的非线性趋势），获得从物理世界到数字决策空间的高保真映射^[50]。

2. 决策回路

从价值观到控制流的编码即为基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架的决策回路。在数字空间中，管理系统基于输入的风险情报并结合预演推演结果，在满足防洪安全、资源利用等非线性约束的前提下，针对国家水网复杂的“纲、目、结”拓扑结构，采用图计算和分布式协同算法，形成跨流域、跨区域的多结点耦合调度方案；将人类社会的治水价值观（如公平性、安全性）转化为数学模型中的目标函数与约束条件，生成针对工程系统的最

优工况指令集（如水库群的联合削峰策略、闸坝的协同调度时序），支撑决策意图的数字化编码^[51]。该决策回路还具备为最优解赋予法律效力合规性的关键智慧，在面临算法难以量化的伦理困境时由人类智慧弥补算法理性的边界局限。

3. 执行回路

从执行器到能量流的干预即为基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架的执行回路。工程系统作为确定性的执行机构，与管理系统共同构建“语义-动作”逻辑关联，依托国家水网的级联调度能力，通过改变闸坝、泵站等节点的运行状态进行各种水动力要素的人工重构。这种重构不再局限于单一断面的流量控制，而是通过自然系统的时空再组织来主动平抑自然系统的随机波动（如削峰滞洪、跨流域补水），将自然系统原本发散的随机演进过程强制约束在人类设定的安全通量内。

（三）智慧水利体系框架的目标构建

在基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架中，管理系统在判定最优解的标准时，不再局限于单一的工程安全或经济效益，而是基于“治水（安全）、利水（资源）、活水（生态）、善水（社会）”四维价值的量化和统筹，构建智慧水利的高阶目标函数。

1. 治水目标

治水是基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架的底线约束。借鉴管理科学中的鲁棒优化理论，纳入自然系统极值分布带来的不确定性风险；不追求特定情境下的确定性最优解，而是通过最小化最坏情境条件风险值（CVaR）实施风险敞口的主动管控^[52]。CVaR是从单纯的工程防洪向全面的洪涝灾害风险管理转变的关键技术指标。基于此，可设定工程系统的失效概率阈值，确保工程系统在面对超标洪涝等肥尾风险时仍具备基本功能维持的韧性^[53]。

2. 利水目标

利水是基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架的效率驱动机制。将水资源利用视为随机动态规划问题，借鉴金融工程中的实物期权思维，构建多目标效用最大化模型。在确保安全的前提下，精准捕捉雨洪资源的时间窗口，动态核算存水、放水的边际效益，追求供水、发电、航运等目标下的综合

经济效用最大化^[54]。

3. 活水目标

活水是基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架的可持续性准则。科学实施生态保护，绝非仅是设定一条红线，而应超越简单的最小生态流量静态阈值，构建基于水生生物节律的水动力-生态响应模型。通过工程手段模拟天然河流的脉冲式水流，维持河流形态的多样性、生物群落的生境适宜度，推动物理工程运行与自然生态演化的良性耦合^[55-56]。

4. 善水目标

善水是基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架伦理维度的体现。引入计算社会科学方法论、合作博弈理论，建模并量化流域上下游、左右岸的利益分配格局，以各参与主体在合作联盟中的边际贡献为基准，建立公平的补偿金额沙普利值分配机制。尤其是在遭遇特大旱涝灾害、需启用蓄滞洪区或限制供水时，系统能自动计算出社会福利损失最小、补偿成本可控的调度方案，在算法治理框架中嵌入程序正义与分配公平的伦理原则^[57-58]。

五、基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架成熟度模型

为了将抽象的理论逻辑转化为具象的能力标杆，按照NEM三元交互的深度（决策范式的跨越）与广度（价值目标的重塑），侧重数据能力、模型能力、系统能力、治理能力4个维度，构建了智慧水利发展演进成熟度模型。

（一）五级成熟度模型

1. 以全域感知为标志的要素映射级（S1级）

此层级代表的能力是智慧水利体系发展的基础。从NEM耦合视角看，系统处于静态语义映射、二元物理隔离的初级状态，数字化建设不再局限于全域要素的表征，而是致力于解决自然系统、工程系统在数字空间中的时空基准同构难题。自然系统依托“天空地水工”一体化感知网，将复杂的自然水文过程从连续的模拟信号转化为计算机可处理的高维时空向量矩阵，重构出具有完整数学属性与时空拓扑关系的动态场。工程系统不仅在几何维度上开展建筑信息模型的标准化建模，而且在属性维度上完成机电参数及运行状态的对象化封装，再在数

字空间中转换为标识唯一、属性可索引的数字化实体，为后续的精细化管控确立基础条件。

在统一的地理空间编码体系下，自然系统、工程系统可以进行基于时空索引的静态关联，但未能完全构建基于水力学的内在互馈机制，即缺乏基于水文规律的动态推演能力（如闸门开度变化对下游流场演进的动力响应）。在此状态下，管理系统并未介入数字化闭环，而重在建立数据治理体系，打破跨层级、跨部门的数据壁垒，将碎片化的感知数据转化为标准的数据资产；确立统一的数据标准与语义规则，确保数字孪生的本体可信度，为下一级的物理仿真提供精确的初始状态与边界条件。

2. 以物理仿真为标志的机理预演级（S2级）

在此层级，系统从静态语义映射向动态机理演化迭代，物理仿真从相对简化的数字信息化表达转向遵循自然规律的原真映射。对应地，NEM耦合状态演进为自然系统与工程系统单向交互、决策辅助的模式。确立水文学理论的认知核心地位，构建“机理+数据”双向赋能范式；将物理过程的水文规律（先验知识）注入深度学习模型，约束模型的行为边界；利用深度学习的强非线性表征能力，从海量数据中提取未知的水文信息，用于修正传统机理模型的简化假设。

在此状态下，数字空间不再只是静止的图景，而是能够重现自然系统对工程系统的物理冲击与交互过程，也可在工程设施的调度状态（如闸门开度曲线）作为强制约束的条件下再现自然水流的演进路径与水力要素变化，由此建立符合质量守恒、动量守恒的“降雨-产流-汇流-调度-演进”因果链条。管理系统从S1级的规则制定者提升为机理过程预演的核心，即基于给定的初始状态、设定的自然边界条件，动态解算流场演进过程，展示淹没范围、资源配置余量等关键指标，将抽象的调度方案转化为清晰的物理过程。然而，管理系统的逆向反演能力明显不足，虽然具有单一水利视角下的局部工况比选能力，但未能建立生态、社会等价值维度统筹的全局反演机制，导致最优解的搜索仍依赖人工设定的经验边界，难以真正实现多目标自主寻优。

3. 以人机协同为标志的鲁棒优化级（S3级）

处于此层级，系统具备正向因果模拟与逆向反演寻优能力，NEM耦合状态演进为不确定性环境

下的人机协同模式。管理系统不再只是规则的执行者，而是通过引入优化算法来深度介入工程系统的工况设定，以应对自然系统的内生随机性。管理系统具备“处方性”分析能力，即面对降雨预报偏差、水文节律非平稳等自然侧的不确定性输入，不再寻求单一条件下的最优解，而是应用基于鲁棒优化算法，在由多维非线性约束（如防洪库容红线、生态流量底线）构成的可行域内，计算出风险可控、效益最大化的控制策略集；反向求解工程调度参数，在海量解空间中收敛出帕累托最优前沿，在数学维度上剔除劣解并量化剩余风险。最后，人类专家可引入社会经验与政策考量，在推荐方案集中进行最终裁决，由此构成算法提供方案、专家提供决策的人机协同模式。

4. 以自主自律为标志的闭环智控级（S4级）

达到此层级，智慧水利体系体现出信息物理系统的实质性融合，NEM耦合状态演进为实时动态闭环模式。工程系统打通“感知-决策-执行”全自动链路，支持在数字空间内对物理实体的直接操控；具备高阶的自适应控制能力，能够实时捕捉自然环境的突发异变（如雨情突变、工情扰动），在毫秒级时间内提供与物理规律自洽的控制策略修正，进而驱动自动化工程设施的精准响应，形成虚实共生、实时纠偏的自律体系。管理系统成为具有独立行为能力的智能体，能力边界出现根本性变化：在极少数涉及重大社会影响或伦理风险的战略性决策需保留人在回路的监督权外，绝大多数常规工况下的水利调度将实现自主闭环，人类专家的职能从具体的调度决策上移至对算法价值观的监督、紧急熔断机制的把控。

5. 以人水和谐为标志的价值共生级（S5级）

人水关系和谐共生是智慧水利发展的终极目标，即在政策、数据资产、智慧技术应用齐备的条件下，开展“治水（安全）、利水（资源）、活水（生态）、善水（社会）”四维价值的联合优化与可审计治理。相应的系统运行逻辑从单一效率的工具理性转变为人水共生下的价值理性^[59]。

从NEM耦合视角看，此阶段变革的核心在于管理系统决策边界的社会化重塑。人类活动不再视为静态且刚性的外部边界条件，而是作为动态内生变量并完整映射到管理系统的算法内核，将“治水（安全）、利水（资源）、活水（生态）、善

水（社会）”价值体系转化为可计算、可优化的多目标泛函。生态系统的长效健康（如生物多样性指数）、社会的代际公平（如水权分配基尼系数）等不再是模糊的定性描述，而是作为硬约束嵌入优化算法。管理系统依然在寻找帕累托最优解，但解空间的维度已从物理工程延伸至社会伦理与生态文明范畴，显现人水关系在数字空间内的价值共生；运行逻辑既由数据驱动，也由以人为本的治水哲学引领。

（二）各级成熟度模型的演进逻辑

1. 能力的增量叠加律

五级成熟度模型的各层级之间存在严格的本体依赖与增量继承关系，而非简单的替代关系。高阶能力的涌现需要以坚实的低阶能力为底座。例如，S3级的鲁棒优化本质上是调用S2级的高保真机理模型作为核心算子，再以S1级的实时感知数据作为边界条件；S5级的价值共生涉及复杂的社会博弈计算，建立在S4级自动化控制系统的强大执行力之上。各层级演进体现了“数据—模型—算法—价值”逐层封装的嵌套结构，呈现内核“由硬变软”、价值由低向高的包含关系。

2. 时空的非均衡协同观

鉴于我国较为复杂的水情条件与发展阶段差异，智慧水利建设不宜采取全域同步的平均策略，而应依据梯次推进、分类施策原则。例如，对于南水北调中线工程、三峡枢纽工程等事关国家安全的高风险、高价值关键节点，应集中资源开展技术攻关，率先突破S4级闭环智控；对于广泛分布的中小河流治理工程，可着力推进S1级感知网、S2级数字底板建设。这种“点”上突破高标准、“面”上筑牢底座的非同步策略，是符合国情的优化演进路径。

3. 需求的逆向牵引机制

五级成熟度模型的演进过程不仅是自下而上的建设，更是自上而下的验证，高阶业务需求可作为低阶基础设施成效发挥的验证项。例如，在探索构建S3级精准调度模型时，算法对边界条件的敏感性通常会迅速暴露现有监测站点的时空分辨率不足，实际上起到驱动感知网优化布局的作用。这种“以用促建、以算促测”的上升机制，是智慧水利体系不断自我完善和成熟的内在动力。

六、基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架战略路径

鉴于我国水利发展的时空异质性、业务复杂性，本研究所提战略路径并非严格时序上的线性推进，而是可以适配不同区域的基础条件、容纳多元业务需求的并行演化与多态共存框架。从系统工程哲学视角来看，智慧水利发展绝非单点技术的线性堆叠，而是时空连续体中的复杂系统进化过程^[60]。五级成熟度模型用于描绘智慧水利体系在空间维度上的拓扑结构（即NEM三元耦合的静态层级），3阶段战略路径用于揭示智慧水利体系在时间维度上的演化动力，两方面共同构成智慧水利发展的体系架构（见图2）。

（一）认知重构阶段的单向链条向系统映射跃迁

作为战略路径的起点，本阶段应优先处理数字底板的本体可信度问题，针对传统“气象—水文—水力”单向耦合模型存在的误差级联效应（前端降雨预报的微小偏差经链条传递后逐级放大为预测谬误），实施从单纯信息工程向深度知识工程的根本性转型。核心任务是构建“数据—知识”驱动的认知基座，将物理守恒定律、经验公式等水利本体知识内嵌至算法模型，引入多模态数据，利用知识约束修正数据噪声，进而解决物理流域的无限复杂、数字孪生有限表达之间的矛盾，推动物理水网与数字水网的融合重构。这一路径通过消除数字空间中自然与工程的异构性，确保数字孪生体在本体论层面与物理实体的同构同演，为后续的高阶智能决策提供高保真、可信赖的状态空间。

（二）决策智能阶段的经验离散向协同调控跃迁

此阶段重在解决传统水利调度决策面临的维数灾难，即面对海量工程节点耦合时，传统的优化算法无法在有限时间内给出满足实时性要求的最优解，因而难以有效应对降雨预报随时间推移的动态偏差。核心任务是聚焦算力与算法的双重突围：一方面，建立“预测—优化—执行—校正”的闭环机制，采用滑动时间窗口，在每一个控制时步内基于最新的状态反馈求解未来有限时域内的最优控制序列（但仅下达当前时刻的首个指令），将长周期预

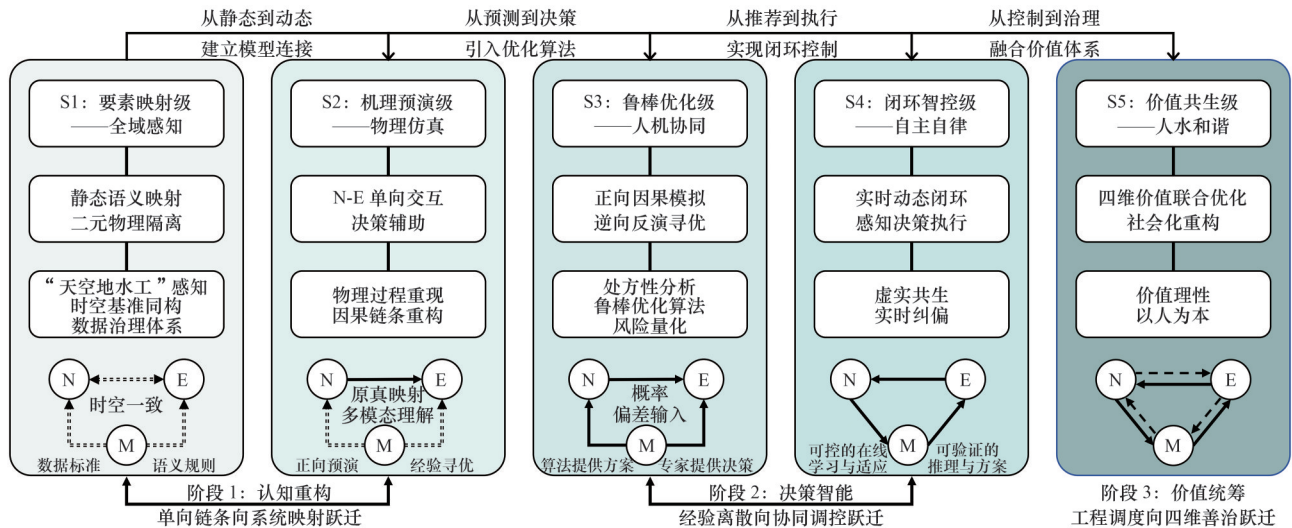


图2 智慧水利的演进标尺与战略路径

报的不确定性通过滚动更新加以量化消减，确保调度指令始终适应更新后的雨水情变化；另一方面，应用神经网络代理模型，在极短时间内开展大量调度情景的快速预演与比选，将依赖专家直觉的定性决策转化为基于边缘计算与运筹优化的定量指令流。

（三）价值统筹阶段的工程调度向四维善治跃迁

作为战略路径的终点，本阶段聚焦在统一的数学框架内，权衡具有明确经济价值的发电供水、仅具模糊社会价值的生态保护、多主体公平性三者之间的内在矛盾。在物理水网硬件格局既定的前提下，应用智能算法挖掘水网体系的水动力重构潜力，重点推进生态价值的算法化与社会博弈的机制化，具体涵盖涝灾期望损失与风险暴露时间的最小化，供水/灌溉保证率与水能综合收益的最大化，生态流量达标率、生境适宜度指数、跨区域公平性指标、博弈补偿成本可控性等多维目标。该阶段需要建立“效益-风险-治理”协同评估体系，以技术迭代与治理升维驱动基于NEM三元耦合的智慧水利体系框架的可持续演化，解决复杂系统在“社会-生态”环境中的适应性进化难题，推动数字技术与生态文明的深度共生。

七、结语

智慧水利既是智能技术在水利行业的叠加应

用，又是国家水治理体系安全发展和高效运行的核心保障。本文面向国家“十五五”规划的水利行业战略部署，从理论、方法、路径三个维度出发，全面完善了我国智慧水利体系框架。①在理论层面，构建了适应当前科技发展态势的NEM三元耦合体系框架。将工程系统确立为独立的确定性智算单元，明确了工程系统在连接自然系统不确定性、管理系统价值博弈方面的物理中枢地位。引入鲁棒优化与随机控制理论，厘清了数字孪生视角下的NEM三元互馈机理，为解决当前算力有余而决策可信度不足的难题提供了理论解。②在方法层面，确立了智慧水利体系框架的价值标尺与成熟度模型。提出了包含“治水（安全）、利水（资源）、活水（生态）、善水（社会）”四维价值的目标函数，将抽象的建设目标量化为从要素映射到价值共生的五级成熟度演进模型，为破解当前建设路径模糊、评价标准缺失的现实困境提供了依据。③在路径层面，揭示了智慧水利建设在时间维度上的演进动力，覆盖从认知重构、决策智能到价值统筹的建设路径，最终实现由单一技术工具向水系统科学跃迁的变革范式。

展望未来，应以学科认知与科技创新的深度融合推动智慧水利的进一步发展，在高标准推进国家水网建设进程中同步实现技术突破与制度创新。一是建立跨流域、跨部门的水利数据资产化机制，明确数据产权界定、流通规则、安全标准，破除数据壁垒；二是明确算法提供方案、专家提供决策的

人机协同职责边界,为向价值统筹阶段的平稳过渡预留制度接口;三是研发鲁棒优化算法,应用智慧化手段挖掘物理工程设施的调控潜力。以此推动水利治理从经验驱动向物理机理与数据耦合的系统科学范式跨越,学科边界从单一的水利科学拓展至控制论、管理科学、社会伦理学的深度交叉与融通。

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: March 9, 2026; **Revised date:** April 16, 2026

Corresponding author: Tang Hongwu is a professor from South China University of Technology, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include hydrodynamics and river dynamics, smart water conservancy. E-mail: hwtang@scut.edu.cn

Funding project: Fundamental Research Funds for the Central Universities (CXTD202403)

参考文献

- [1] 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.
- [2] Möller T, Högner A E, Schleussner C F, et al. Achieving net zero greenhouse gas emissions critical to limit climate tipping risks [J]. Nature Communications, 2024, 15: 6192.
- [3] 刘辉. 国家水网工程智能化建设的思考[J]. 中国水利, 2021(20): 9-10.
Liu H. Thought of intelligentized construction of national water network[J]. China Water Resources, 2021(20): 9-10.
- [4] 王春业,费博.论长江流域治理的协调机制[J].河海大学学报(哲学社会科学版),2023,25(2):84-96.
Wang C Y, Fei B. On the coordination mechanism of the Yangtze River Basin governance [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2023, 25(2): 84-96.
- [5] Xiong W, Li Y, Pfister S, et al. Improving water ecosystem sustainability of urban water system by management strategies optimization[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 254: 109766.
- [6] 李国英.系统谋划推进数字孪生水利体系建设[N].人民日报,2025(10).
Li G Y. Systematically plan and promote the construction of a digital twin water conservancy system [N]. People's Daily, 2025(10).
- [7] 左其亭.未来“水利5.0”构想及研究展望[J].中国水利,2025(19):14-19.
Zuo Q T. Conception and research prospect of future “water conservancy 5.0”[J]. China Water Resources, 2025(19): 14-19.
- [8] Biswas A K, Tortajada C, Rohner P. Assessing global water megatrends[M]. Singapore: Springer, 2018: 87-104.
- [9] Sarni W, White C, Webb R, et al. Digital water: Industry leaders chart the transformation journey[R]. London: The International Water Association, 2019.
- [10] 蒋云钟,冶运涛,王浩.智慧流域及其应用前景[J].系统工程理论与实践,2011,31(6):1174-1181.
Jiang Y Z, Ye Y T, Wang H. Smart basin and its prospects for application [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(6): 1174-1181.
- [11] 王忠静,王光谦,王建华,等.基于水联网及智慧水利提高水资源效能[J].水利水电技术,2013(1):1-6.
Wang Z J, Wang G Q, Wang J H, et al. Developing the Internet of water to prompt water utilization efficiency [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013(1): 1-6.
- [12] 王建华,赵红莉,冶运涛.智能水网工程:驱动中国水治理现代化的引擎[J].水利学报,2018,49(9):1148-1157.
Wang J H, Zhao H L, Ye Y T. Smart water grid project: The engine driving China's water management modernization strategy [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 1148-1157.
- [13] 张建云,刘九夫,金君良.关于智慧水利的认识与思考[J].水利水运工程学报,2019(6):1-7.
Zhang J Y, Liu J F, Jin J L. Understanding and thinking of smart water conservancy [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 1-7.
- [14] 蒋云钟,冶运涛,赵红莉,等.智慧水利解析[J].水利学报,2021,52(11):1355-1368.
Jiang Y Z, Ye Y T, Zhao H L, et al. Analysis of smart water conservancy [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11): 1355-1368.
- [15] 刘树坤.中国水利现代化和新水利理论的形成[J].水资源保护,2003,19(2):1-5.
Liu S K. Modernization of water conservancy in China and formation of new theories of water conservancy [J]. Water Resources Protection, 2003, 19(2): 1-5.
- [16] 黄伟纶.长江陆水流域水文自动测报系统验收完毕[J].水文,1986(4):65.
Huang W L. Acceptance of hydrological automatic measurement and forecasting system in Lushui River Basin of Yangtze River was completed [J]. Journal of China Hydrology, 1986(4): 65.
- [17] 陈如良.黄龙滩水情测报及防洪调度自动化系统通过技术鉴定[J].电力系统自动化,1989(1):32.
Chen R L. Huanglongtan hydrological forecasting and flood control dispatching automation system through technical identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 1989(1): 32.
- [18] 蔡阳.水利信息化、电子政务与金水工程[J].中国水利,2003(7):42-43,54.
Cai Y. Water management information systems, electronic-based administrative management with Jinshui Project [J]. China Water Resources, 2003(7): 42-43, 54.
- [19] 辛立勤,于钊.全国水利信息化规划概述[J].中国水利,2003(22):21-23.
Xin L Q, Yu P. Brief introduction to the water conservancy informatization planning of China [J]. China Water Resources, 2003(22): 21-23.
- [20] 刘俊,王强.三峡与葛洲坝两电站联合运行的发电调度[J].水力发电,2003,29(12):65-67.

- Liu J, Wang Q. Power dispatching for the combined operation of the Three Gorges Hydropower Plant and the Gezhouba Hydropower Plant[J]. Water Power, 2003, 29(12): 65-67.
- [21] 陈雷. 深入贯彻落实中央一号文件精神全面开创中国特色水利现代化新局面[J]. 中国水利, 2011(12): 1-7.
Chen L. Thoroughly implement the spirit of the central document No.1 and create a new situation overall water modernization with Chinese characteristics[J]. China Water Resources, 2011(12): 1-7.
- [22] 黄彬彬, 刘青, 胡振鹏, 等. 基于强化学习的农田水利设施管理进化博弈分析[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(12): 3231-3236.
Huang B B, Liu Q, Hu Z P, et al. Evolutionary game analysis of irrigation infrastructures management based on reinforcement learning-model[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(12): 3231-3236.
- [23] 张智吾, 张瑜洪, 陈锋, 等. 江苏水利现代化建设由制度构建全面转入推动落实——顶层设计引航水利现代化新征程[J]. 中国水利, 2012(14): 4-11.
Zhang Z W, Zhang Y H, Chen F, et al. The modernization of water conservancy in Jiangsu Province has been transferred from system construction to implementation: Top-level design pilots a new journey of water conservancy modernization[J]. China Water Resources, 2012(14): 4-11.
- [24] 蔡阳, 成建国, 曾焱, 等. 加快构建具有“四预”功能的智慧水利体系[J]. 中国水利, 2021(20): 2-5.
Cai Y, Cheng J G, Zeng Y, et al. Accelerate to build smart water system with the function of “four pres” [J]. China Water Resources, 2021(20): 2-5.
- [25] 水利部印发关于推进智慧水利建设的指导意见和实施方案[J]. 水利建设与管理, 2022, 42(1): 5.
Guiding opinions and implementation plans on promoting smart water conservancy construction were printed and distributed by Ministry of Water Resources [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2022, 42(1): 5.
- [26] 水利部对数字孪生流域建设技术大纲等文件进行技术审查[J]. 人民黄河, 2022, 44(3): 2.
The Ministry of Water Resources has conducted a technical review of documents such as the technical outline for the construction of digital twin basins[J]. Yellow River, 2022, 44(3): 2.
- [27] 李激, 邢西刚, 郭旭宁, 等. 面向“四水四定”的“智能监测-风险评估-预警调控”技术构建及应用[J]. 中国工程科学, 2026, 28(3): 314-327.
Li W, Xing X G, Guo X N, et al. Construction and application of “intelligent monitoring – risk assessment – early warning regulation” for “defining city, land, population, and industry based on water”[J]. Strategic Study of CAE, 2026, 28(3): 314-327.
- [28] 耿振云. 数字孪生水利发展历程、关键技术与设计要点[J]. 水利水电工程设计, 2025, 44(3): 1-9.
Geng Z Y. Development history, key technologies, and design principles of digital twin water conservancy[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2025, 44(3): 1-9.
- [29] 李国英. 加快建设数字孪生流域 提升国家水安全保障能力[J]. 中国水利, 2022(20): 1.
Li G Y. Accelerate to build the digital twin river basins and enhance China’s capacity to ensure water security[J]. China Water Resources, 2022(20): 1.
- [30] 甘甜, 王超, 蒋云钟, 等. 基于时空动态知识图谱的明渠实时调度模式智能识别研究[J]. 水利学报, 2025, 56(5): 646-658.
Gan T, Wang C, Jiang Y Z, et al. Intelligent identification of real-time regulation pattern in open channels based on spatiotemporal dynamic knowledge graph[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(5): 646-658.
- [31] 王光谦. 原真黄河: 黄河研究的新范式[J]. 人民黄河, 2026, 48(1): 1-5.
Wang G Q. Authentic Yellow River: A new paradigm for Yellow River research[J]. Yellow River, 2026, 48(1): 1-5.
- [32] 钟平安, 唐洪武. 淮河中下游洪涝综合治理的思考与初探[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 746-753.
Zhong P A, Tang H W. Thinking and preliminary practice of comprehensive treatment of the middle and lower reaches of the Huaihe River basin[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 746-753.
- [33] Wang K W, Liu X M, Cui P, et al. China’s nationwide streamflow decline driven by landscape changes and human interventions[J]. Science Advances, 2025, 11(32): eadu8032.
- [34] 赵菲, 江威, 丁小辉, 等. 卫星通导遥技术在数字孪生流域建设应用潜力与初探[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(S2): 369-377.
Zhao F, Jiang W, Ding X H, et al. Application potential and initial exploration of communication, navigation and remote sensing satellite technology in digital twin watershed construction[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(S2): 369-377.
- [35] Lin J Y, Bryan B A, Zhou X D, et al. Making China’s water data accessible, usable and shareable[J]. Nature Water, 2023, 1(4): 328-335.
- [36] Li Z B, Sahotra H, Ahmad S, et al. A distributed machine learning model for blue and green water resources with transferable applications in similar climatic zones[J]. Water Resources Research, 2025, 61(5): 2024WR039169.
- [37] Fraehr N, Wang Q J, Wu W Y, et al. Supercharging hydrodynamic inundation models for instant flood insight[J]. Nature Water, 2023, 1(10): 835-843.
- [38] Xu Y H, Lin K R, Hu C H, et al. Interpretable machine learning on large samples for supporting runoff estimation in ungauged basins[J]. Journal of Hydrology, 2024, 639: 131598.
- [39] 胡春宏, 郭庆超, 张磊, 等. 数字孪生流域模型研发若干问题思考[J]. 中国水利, 2022(20): 7-10.
Hu C H, Guo Q C, Zhang L, et al. Thinking on some problems in the development of professional models for digital twin basins [J]. China Water Resources, 2022(20): 7-10.
- [40] 黄跃文, 牛广利, 李端有, 等. 大坝安全监测智能感知与智慧管理技术研究及应用[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(10): 180-185, 198.
Huang Y W, Niu G L, Li D Y, et al. Research and application of intelligent perception and intelligent management technology for dam safety monitoring[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(10): 180-185, 198.
- [41] 王浩, 孟现勇, 丁建丽, 等. 数字孪生驱动的水-能-粮-生耦合

- 系统协同治理新范式[J]. 中国水利, 2025(18): 1-11.
- Wang H, Meng X Y, Ding J L, et al. A new paradigm for digital twin-driven water – energy – food – ecosystem (WEFE) nexus collaborative governance[J]. *China Water Resources*, 2025(18): 1-11.
- [42] 胡春宏, 方春明, 关见朝. 三峡水库有效库容监测分析与长期保持对策建议[J]. 中国水利, 2024(22): 17-25.
- Hu C H, Fang C M, Guan J C. Monitoring and evaluation of effective storage capacity of the Three Gorges Reservoir and strategic suggestions for its long-term maintenance[J]. *China Water Resources*, 2024(22): 17-25.
- [43] Chen H, Xu C X, Tong C C. Integrating opinion dynamics and differential game modeling for sustainable groundwater management[J]. *Water Research*, 2025, 287: 124548.
- [44] 张宁, 张澜, 刘聪, 等. 智慧治水、公众参与对水环境治理影响研究——基于浙江“五水共治”的调查[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 2011-2021.
- Zhang N, Zhang L, Liu C, et al. Study on the influence of smart water and public participation on water environment governance: Based on the investigation of “five water joint governance” in Zhejiang Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(9): 2011-2021.
- [45] Li J H, Lei X H, Qiao Y, et al. The water status in China and an adaptive governance frame for water management[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(6): 2085.
- [46] Zhang Z Y, Huang J L, Wagner P D, et al. A method for detecting the non-stationarity during high flows under global change[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158341.
- [47] Chen Z H, Asadi S E, Jiang S, et al. Integration of large vision language models for efficient post-disaster damage assessment and reporting[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 1481.
- [48] Jiang S, Ning Y M, Huang B X, et al. LVLMS as inspectors: An agentic framework for category-level structural defect annotation[J]. *Journal of Building Engineering*, 2026, 120: 115399.
- [49] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然–社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1219-1226.
- Wang H, Jia Y W. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(10): 1219-1226.
- [50] Lei Z Y, Dong Y S, Li W Y, et al. Harnessing large language models for disaster management: A survey[C]//Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2025, 2025: 14528-14551.
- [51] Li X, Zhou X P, Hou J M, et al. A hydrodynamic model and data-driven evolutionary multi-objective optimization algorithm based optimal operation method for multi-barrage flood control[J]. *Water Resources Management*, 2024, 38(11): 4323-4341.
- [52] Huang X, Xu B, Zhong P G, et al. Robust multiobjective reservoir operation and risk decision-making model for real-time flood control coping with forecast uncertainty[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127334.
- [53] Luan F, Zhang W G, Liu Y J. Robust international portfolio optimization with worst-case mean-CVaR[J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 303(2): 877-890.
- [54] Pacheco G C R, Campos M A S. Real options analysis as an economic evaluation method for rainwater harvesting systems[J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(12): 4401-4415.
- [55] Hansen H H, Comoglio C, Elings J, et al. Fish habitat models for a future of novel riverscapes[J]. *BioScience*, 2024, 74(9): 624-639.
- [56] Yarnell S, Murdoch L, Bellido-Leiva F, et al. Flow management through a resilience lens: Allocation of an environmental water budget using the functional flows adaptive implementation model[M]. Amsterdam: Elsevier, 2024: 469-490.
- [57] Mehrabi N, Morstatter F, Saxena N, et al. A survey on bias and fairness in machine learning[J]. *ACM Computing Surveys*, 2022, 54(6): 1-35.
- [58] 王先甲, 刘佳. 基于合作博弈模型的公共河流水资源分配方案研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(1): 1-9.
- Wang X J, Liu J. A cooperative game model for international water sharing problems[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(1): 1-9.
- [59] Wang Y J, Wilchek M, Batarseh F A. From data to policy: A systematic review of AI in water regulations and compliance[J]. *npj Clean Water*, 2026, 9: 33.
- [60] Dunlop T, Khojasteh D, Cohen-Shacham E, et al. The evolution and future of research on nature-based Solutions to address societal challenges[J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 132.