水　利　学　报
2026 年 6 月　　SHUILI　XUEBAO　　第 57 卷　第 6 期

文章编号：0559-9350(2026)06-0932-12　　第二十八届中国科协年会学术论文

数字孪生水圈：理论内涵、基础模型与关键技术

冶运涛[1,2,3]，蒋云钟[1,3]，王　浩[1]，赵　勇[1]，王　英[2]，梁犁丽[4]

（1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环与水安全全国重点实验室，北京　100038；
2. 中建生态环境集团有限公司，北京　100037；3. 水利部数字孪生流域重点实验室，北京　100038；
4. 中国长江三峡集团有限公司 科学技术研究院，北京　101199）

摘要：针对传统水循环模拟与调控难以应对跨气候带、跨圈层、多过程的系统性挑战，且无法支撑大规模国家水网系统指挥调度决策，提出了以水圈模拟器为愿景的数字孪生水圈。本文明确了数字孪生水圈的定义及其与数字孪生流域、数字孪生水网和数字孪生水利工程的关系定位；从本体论、认识论、方法论、价值论四个维度解析了其内涵，归纳出全要素融合与三维共生、全局认知与协同智能、前瞻推演与自适应决策、知识沉淀与持续进化等本质特征；构建了由信息模型与系统模型组成的基础模型，分析了其核心能力、科技难题与关键技术突破方向，并探讨了赋能路径。研究表明，数字孪生水圈可显著提升多尺度“自然-社会”二元水循环的系统认知、情景推演与风险防控能力，可为水系统治理从“经验驱动”向“数据与模型双驱动”的范式转型提供理论依据与技术路径。

关键词：数字孪生水圈；智慧水利；水圈模拟器；国家水网；指挥调度；智能决策；混合建模；协同优化

中图分类号：TV122　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.3724/j.slxb.20260033

1　研究背景

水圈是地球系统中最为活跃、与人类生存发展关系最为密切的圈层之一，涵盖大气水、地表水、土壤水、地下水以及与社会经济密切关联的“社会水”、工程所调控的“工程水”、生态系统所蕴含的“生态水”[1-2]。目前，全球气候变化加剧，极端水文事件频发，人类活动影响的日益深化使水圈演化呈现高度的非线性、强耦合和深度不确定性[1,3-4]。

传统研究多聚焦水系统单一过程或局部区域的研究，难以实现对跨气候带、跨圈层、多尺度相互作用的整体把握[4-7]。以国家水网为例，不同气候带降水、蒸发等的异步性和异质性使水源区、输水线路与受水区的水资源丰枯遭遇复杂多变，长距离输水的自然水循环与大规模人工调控的深度交织导致水流运动、水质演化、生态响应等呈现复杂耦合机制，防洪、供水、发电、生态等多目标冲突以及区域、部门间的利益诉求加剧了调度决策的复杂性等等。其典型场景集中体现水圈研究面临的共性挑战。从水圈视角，将国家水网置于全球变化与区域响应、自然过程与人工干预、水量保障与生态健康协同的宏观框架下研究，能为理解跨区域水资源的复杂联动与长效均衡提供更完备的科学基底[2]。

近年来，数字孪生流域[8-9]、数字孪生水网[10-11]、数字孪生水利工程[12-14]等数字孪生水利建设分别在自然水文单元数字化、工程网络调度智能化、单体设施管理精细化等方面发挥了重要作用。然而，

收稿日期：2026-01-24；网络首发日期：2026-06-11
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.1882.TV.20260610.1515.001
基金项目：国家自然科学基金项目(52279031)；中国建筑生态环境工程研究中心科技创新平台项目(CSCEC-2025-PT-008)；国家重点研发计划项目(2023YFC3209302-03)；宁夏重点研发计划项目(2026BEE02014)
作者简介：冶运涛(1982—)，博士，正高级工程师，主要从事智慧水利、水文水资源研究。E-mail：yeyuntao@iwhr.com.
通信作者：蒋云钟(1969—)，博士，正高级工程师，主要从事智慧水利、水文水资源研究。E-mail：lark@iwhr.com.

以自然分水岭为界的数字孪生流域对跨流域调水等强人类活动干预刻画不足，侧重工程网络连通与调度的数字孪生水网对水网所依托的自然水循环本底及其反馈机制模拟深度有限，聚焦于“点”上精准控制的数字孪生水利工程难以反映其在水系统全局中的连锁效应。上述三者之间存在数据壁垒、模型割裂、标准不一等问题，尚未形成对水圈进行系统、前瞻、协同认知和调控的集成智能载体，亟需构建一个超越传统流域或工程边界、能够全景式刻画水循环全过程及其与人类活动互馈关系的水圈模拟器[7]。因此，以地球水圈的视角，突破现有概念的物理和认知边界，基于水科学与地球系统科学、信息科学、决策科学等学科理论基础，贯通多圈层过程、集成多源数据、融合多类模型，以构建水圈模拟器为愿景，并研究并构建更高维度的数字孪生水圈理论框架和技术体系，为深化水圈科学认知、提升水安全保障能力、强化国家水网智慧调度和韧性管理提供支撑。成为推动新阶段水利高质量发展、保障国家水安全的重大前沿课题[15]。

2　数字孪生水圈概念

2.1　概念定义　数字孪生水圈是以地球水圈系统为物理对象，基于“天-空-地-水-工”一体化监测感知网络获取全要素数据，在数字空间构建的一个全尺度、高保真、能计算、会交互、可进化的水圈模拟器。其能够与物理水圈实时同步、动态交互、闭环优化，可深化对水圈“自然-社会”二元水循环演化规律的科学认知，支撑战略决策、系统性风险管理及国家水网安全运行调度。

该定义将人类活动作为水循环演变的内生驱动力并纳入统一框架，实现对“大气水、地表水、土壤水、地下水、工程水、生态水、社会水”(“七水”体系)的全景刻画与协同调控。空间上覆盖全球、全国、流域、区域等多尺度；要素上统筹七类水体；技术上融合物联网、大数据、人工智能、数字孪生、云计算等技术；功能上具备映射、模拟、推演、决策、控制、进化等智能能；目标上服务于水资源科学认知、空间均衡配置与多维安全保障。

2.2　与相关概念的关系辨析　数字孪生水圈与数字孪生流域、数字孪生水网、数字孪生水利工程共同构成国家数字孪生水利体系的完整谱系，四者间能形成清晰的功能分层与互补关系，如表1所示。

3　数字孪生水圈内涵特征

3.1　内涵解析　数字孪生水圈是在新质生产力理论驱动下[16-17]，强调以数据为基础、以模型为核心、以智能为特征、以协同为关键、以进化为方向，将水资源综合治理范式重塑升维为复杂系统智能体[18-20]。其内涵可从本体论、认知论、方法论与价值论四个相互关联维度阐释。

(1)本体论。数字孪生水圈是统一数字体，主要表现在：① 对象全域性。其映射的物理对象是以国家骨干水网为骨架、覆盖“七水”的复合巨系统。② 表达全息性。静态复现水网物理实体的几何形态与网络拓扑，动态刻画其物理、化学、生物过程的内在机理，并嵌入人类调控规则与社会经济影响。③ 虚实共生性。通过持续的数据流动、指令交互与物理水圈形成共生关系。

(2)认识论。数字孪生水圈是智能认知中枢，主要表现在：① 认知升维。将“七水”纳入统一的数字分析框架以实现对水循环的立体化、一体化认知。② 关系洞察。揭示并量化跨流域、跨区域、跨要素间的复杂关联与涌现规律。③ 前瞻预演。基于耦合模型与人工智能在数字空间中对不同气候情景、发展规划、调度策略进行低成本、高效率、多情景的模拟推演，变“事后应对”为“事前预制”。

(3)方法论。数字孪生水圈是智能治理范式，主要表现在：① 决策模式智能化。从基于历史经验和局部信息的“人工研判”转向基于全局实时数据、机理模型和优化算法的“人机协同智能决策”。② 协同机制程序化。通过标准化的数据接口、模型服务与协同协议为不同管理主体提供“虚拟会商厅”，各方基于共享态势和规则模拟协商形成整体最优指令。③ 系统能力进化性。形成“监测—模拟—决策—执行—评估—学习”的完整闭环，使系统的认知与决策能力不断迭代进化，并具备自适应韧性。

表1　数字孪生水圈与数字孪生流域、数字孪生水网、数字孪生水利工程的对比关系

Table 1　Comparative relationship between Digital Twin Hydrosphere and Digital Twin Basin, Digital Twin Water Network, and Digital Twin Hydraulic Engineering

维度	数字孪生水圈	数字孪生流域	数字孪生水网	数字孪生水利工程
核心对象	地球自然水圈系统(大气水、地表水、土壤水、地下水)及其与社会经济的互馈	以分水岭为边界的自然水文单元(如长江流域)	由自然河湖与人工渠、管、闸、泵等构成的工程连通网络(如国家“纲-目-结”水网)	单一水利枢纽或设施(如三峡大坝、南水北调中线渠首)
空间尺度	全球/国家尺度，跨多个气候带与流域	流域尺度(大至长江，小至一条小河)	跨区域/跨流域尺度，强调“线”与“网”的连通	工程点尺度，聚焦“点”的精细控制
关注重点	多水统筹与圈层耦合：揭示完整水循环过程，服务国家水资源战略配置与长期适应等	自然水循环过程：揭示降水—产流—汇流规律，核心是防洪、水资源自然禀赋评估等	水资源时空调配能力：关注“水流如何被引导和输送”，核心是联合调度、优化配置与供水安全等	工程安全与高效运行：关注结构安全、设备状态、精准执行调度指令等
核心功能	战略模拟器：支撑宏观决策、长期情景推演、多圈层互馈分析、系统性风险识别等	自然预报器：实现流域暴雨洪水预报、水资源情势分析、水生态评估	协同调度器：实现多水源、多工程、多目标的联合优化调度与协同管理等	精准控制器：实现工程状态的实时监控、安全预警、自动化控制与智能运维等
数据特点	多圈层、多源异构数据高度融合，强调大气-陆面-地下及经济社会、工程等数据的耦合等	以流域内自然水文、气象、地形、生态监测数据为主	强调工程运行数据(闸门开度、流量、水位)与网络拓扑数据的整合等	高精度、高频次的工程BIM（Building Information Model）、传感器监测、视频监控数据等
典型应用	评估气候变化对国家水网布局的长远影响；制定云水资源与地表水、地下水联合调度战略等	发布流域洪水预警；制定流域年度水量分配计划等	制定南水北调中线冰期输水方案；协调长江上游水库群与中下游用水矛盾等	大坝变形实时安全监控；泵站机组故障预测与健康管理等
关键挑战	多圈层耦合建模的复杂性；超大规模计算的效率；长期不确定性量化等	水文模型精度提升；下垫面变化的影响；中小河流预报等	大规模网络优化求解；多利益主体协同博弈；水流长距离输送滞后控制等	全生命周期BIM融合；机理与监测数据驱动的安全模型；极端荷载响应等

(4)价值论。数字孪生水圈是战略基础设施，主要表现在：① 赋能全局效能跃升。通过国家骨干水网统筹供水、防洪、生态、能源等多重目标的全局优化调度，使水资源调配效率最大化。② 筑牢国家水安全防线。作为重大水安全风险应对的“预警机”和“参谋部”，能提前识别风险、模拟灾害链、预演应对方案。③ 催生水利新质生产力。以集大成的数智技术驱动水利行业从依赖工程扩张的“硬投入”转向依靠数据与智能的“软驱动”，深刻改变水资源规划、管理、运行和服务模式。

3.2　本质特征　数字孪生水圈具有区别于传统信息化系统和现有数字孪生应用的四大本质特征。(1)全要素融合与三维共生。数字孪生水圈能追踪大气水汽输送、地表产汇流与工程调控，将地下水动态过程作为核心模块，实现对“自然-社会”二元水循环从二维表面到三维立体的刻画，真实模拟气候变化与人类活动耦合驱动下的地表水-地下水互馈机制及其引发的生态效应和地质环境问题，构建与物理水圈高保真同步的虚实共生体。(2)全局认知与协同智能。数字孪生水圈从国家尺度动态认知跨流域、跨区域的水资源供需关系、水力联系和丰枯遭遇规律，洞察地表水调度对地下水的补给或榨取效应，以及地下水变化对地表生态的反馈。在此基础上，构建分布式的协同智能，通过智能体间的协商、博弈与协作生成跨系统的协同调度策略。(3)前瞻推演与自适应决策。数字孪生水圈深度融合气象气候预报和大气-地表-土壤-地下水模型等，支持短期精细模拟和中长期战略推演。通过强化学习、进化算法等AI(Arcifical Intelligence)技术，从历史调度数据和实时反馈中自主学习，动态调整调度规则与决策模型，以“预测—适应”闭环实现从“经验驱动”到“数据与模型混合驱动”的转变。(4)知识沉淀与持续进化。数字孪生水圈的历次调度决策、效果评估和事件应对的过程与结果均被数字化记录、分析并转化为结构化知识形成水圈知识图谱，通过机器学习或深度学习自动发现水体演化规律、识别生态风险模式、优化耦合模型参数，使数字孪生水圈从静态的软件系统转变为持续积累知识、自

主迭代升级的“生命体”。

4　数字孪生水圈基础模型

4.1　信息模型　数字孪生水圈由物理水圈、数字水圈、孪生水圈数据、孪生水圈知识、实时连接交互和数智赋能服务六大核心要素组成[9,18-22]，如图1所示。

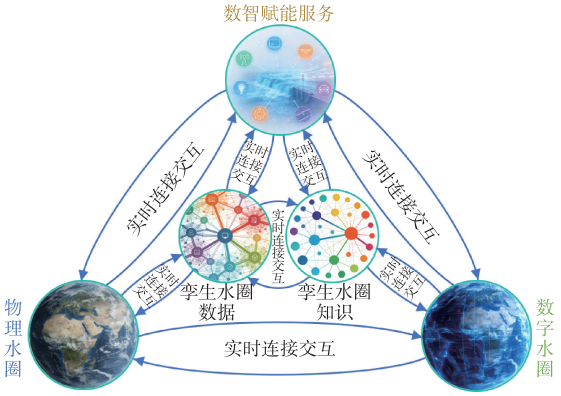


图1　数字孪生水圈信息模型

Fig. 1　Information Model of Digital Twin Hydrosphere

组成要素与形式化表达可以用一个核心集成公式来表征：

$$DTH = \Phi(PH,\ DH,\ D,\ K,\ C,\ S) \tag{1}$$

式中：DTH代表数字孪生水圈；Φ代表系统集成与协同函数；PH为物理水圈；DH为数字水圈；D为孪生水圈数据；K为孪生水圈知识；C为实时连接交互；S为数智赋能服务。

(1)物理水圈。物理水圈是数字孪生水圈所映射的客观实体，其组成可形式化表达为：

$$PH = \{PH_a,\ PH_s,\ PH_{ss},\ PH_g,\ PH_r,\ PH_e,\ PH_h\} \tag{2}$$

式中：PH_a为大气水圈(水汽输送、云物理过程、降水形成等)；PH_s为地表水圈(江河、湖泊、水库、冰川等)；PH_{ss}为土壤水圈(包气带土壤水分，连接大气、地表与地下水)；PH_g为地下水圈(含水层流动系统、战略储备资源等)；PH_r为工程水圈(水库、闸坝、泵站、渠道、管网等水利工程设施)；PH_e为生态水圈(河流生态系统、湿地、河口、植被等)；PH_h为社会水圈(取水、用水、耗水、排水等社会水循环过程)。

(2)数字水圈。孪生数字水圈是物理水圈在数字空间的全息映射与智能增强体，作为数字孪生水圈的核心，其形式化表达为：

$$DH = G \oplus P \oplus B \oplus R \tag{3}$$

式中：$\oplus$表示直和运算，代表各子模型间的组合关系；G为几何模型，包含三维实体模型、建筑信息模型、地理信息模型等；P为物理属性模型，涵盖水文模型、地下水动力学模型、水质模型、生态响应模型、气候模型等；B为行为与规则模型，包含系统动力学模型、控制调度模型、业务规则与政策约束模型等；R为关系与关联模型，以图结构刻画各系统之间及与外部环境的物质、能量、信息关联，是系统复杂性涌现的“关系网络”。

(3)孪生水圈数据。孪生水圈数据是驱动数字水圈运行、连接物理世界的基础要素，其全生命周期流程可形式化表达为：

$$D = \mathrm{Sense}(PH) \rightarrow \mathrm{Transmit}(\cdot) \rightarrow \mathrm{Fuse}(\cdot) \rightarrow \mathrm{Govern}(\cdot) \rightarrow \mathrm{Serve}(DH,\ S) \tag{4}$$

式中：Sense(PH)表示感知数据，通过“天-空-地-水-工”一体化感知网络对物理水圈PH进行多维度测量生成原始数据集；Transmit(·)表示传输数据，通过高速通信网络(5G、光纤、卫星等)将原始数据集低延时、高可靠性地传输至边缘或云端数据中心；Fuse(·)表示融合数据，对多源、异构、多时空尺度的数据进行时空配准、质量控制、插补与深度融合处理，生成高质量、一致性的数据集；Govern(·)表示治理数据，对融合数据集进行标准化、资产化、安全与隐私管理形成标准统一、权属清晰、可信可用的数据资产；Serve(DH，S)表示服务数据，将数据资产通过标准化API接口，按需、实时地提供数字水圈DH进行模型计算或通过数智赋能服务S层提供终端调用。

(4)孪生水圈知识。孪生水圈知识是系统从海量数据与长期实践中提炼出的可复用的规律、规则与深度洞察，是驱动智能决策的支撑，其形式化表达为：

$$K = K_f \cup K_r \cup K_e \cup K_p \tag{5}$$

式中：K_f表示事实知识，描述水系统的基本属性、静态关系、历史状态，以〈实体，关系，实体〉三元组形式存于知识图谱；K_r表示规则知识，描述水循环、工程调度、水资源管理确定性逻辑规则、约束条件与政策条文；K_e表示经验知识，从专家经验、历史成功或失败案例提炼启发性、模糊性知识，通过案例库、经验公式或机器学习模型封装与表达；K_p表示过程知识，描述复杂跨部门业务协同的工作流程、组织职责、应急预案和协同机制。

(5)实时连接交互。实时连接交互是实现物理水圈、数字水圈、孪生水圈数据、孪生水圈知识、数智赋能服务之间实时、稳定、安全交互的纽带与管道，其形式化表达为：

$$C = C_{phy} \oplus C_{vir} \oplus C_{data} \oplus C_{serv} \tag{6}$$

式中：C_{phy}表示物理连接，指连接海量传感器、智能控制器与通信网络的物理链路、工业协议与接口标准；C_{vir}表示虚拟连接，指DH内部各模型组件之间、以及DH与外部专业模型/服务之间的标准化接口、消息中间件和数据交换协议；C_{data}表示数据连接，指数据从感知到服务应用全流程中各环节之间的高速数据管道、数据流处理平台与接口；C_{serv}表示服务连接，指将S层的各项微服务化能力进行统一注册、发现、治理、路由和安全管控的连接机制。

(6)数智赋能服务。数智赋能服务是数字孪生水圈面向规划、调度、管理、应急等不同场景下的用户提供的具体功能与应用，是系统价值的最终体现，其形式化表达为：

$$S = \{S_f,\ S_w,\ S_s,\ S_e,\ S_m\} \tag{7}$$

式中：S_f表示“四预”(预报、预警、预演、预案)服务，为水安全管理和应急决策提供前瞻性决策支持；S_w表示水资源调配服务，包括多层级水资源中长期配置模拟、实时联合调度优化、应急水源调度策略生成等；S_s表示安全监控服务，对重大水利工程进行全生命周期安全监控，对PH整体风险态势感知、评估与预警；S_e表示生态评估服务，定量评估不同水资源调度与开发利用方案对PH_e的影响，模拟生态补水效果，支撑生态流量管理；S_m表示协同管理服务，提供支撑跨部门、跨层级、跨区域的线上协同会商、智能方案推荐、指令一键下达、执行动态跟踪与多维度后评估功能。

4.2 系统模型 数字孪生水圈的系统模型可抽象为包含状态变量、控制变量、输入变量、目标函数和约束条件的数学模型以及求解策略。

4.2.1 *系统组成要素* 包括状态变量、控制变量、输入变量和模型参数，这些要素之间的驱动-响应、耦合-反馈、约束-调控关系共同构成了系统演化的内在机制。

①状态变量。描述系统在任意时刻t的完整状态，构成一个多维向量$\boldsymbol{X}(t)$：

$$\boldsymbol{X}(t) = [X_a(t),\ X_s(t),\ X_{ss}(t),\ X_g(t),\ X_r(t),\ X_e(t),\ X_h(t)]^T \tag{8}$$

式中$X_a(t)$、$X_s(t)$、$X_{ss}(t)$、$X_g(t)$、$X_r(t)$、$X_e(t)$、$X_h(t)$分别表示大气水、地表水、土壤水、地下水、工程水、生态水、社会水的状态变量，涵盖水量、水质、水势、工况、生态及用水行为等。

②控制变量。代表可调控的决策变量$\boldsymbol{U}(t)$，包括：

$$\boldsymbol{U}(t) = [U_r(t),\ U_d(t),\ U_c(t),\ U_w(t),\ U_e(t)]^T \tag{9}$$

式中：$U_r(t)$表示工程调度决策(水库泄流、闸泵操作方案等)；$U_d(t)$表示水源配置决策(跨流域调水量、地下水开采限额方案等)；$U_c(t)$表示天河干预决策(人工增雨作业方案等)；$U_w(t)$表示需水管理决策(用水定额、水价政策方案等)；$U_e(t)$表示生态调控决策(生态补水、生态流量下泄方案等)。

③输入变量。输入变量$\boldsymbol{W}(t)$表示外部不可控因素：

$$\boldsymbol{W}(t) = [P(t),\ E(t),\ D(t),\ W_s(t),\ W_e(t)]^T \tag{10}$$

式中：$P(t)$表示气象气候输入(降水量、气温、辐射等)；$E(t)$表示经济社会输入(用水需求变化、土地利用变化等)；$D(t)$表示突发事件输入(污染事故、工程故障等)；$W_s(t)$表示社会经济情景(产业结构调整、能源转型等)；$W_e(t)$表示生态胁迫输入(外来物种入侵、气候变化对物候的影响等)。

④模型参数。模型参数$\boldsymbol{\theta}$刻画系统物理特性：

$$\boldsymbol{\theta}=[\theta_a,\ \theta_h,\ \theta_{ss},\ \theta_g,\ \theta_c,\ \theta_e,\ \theta_{hh}]^T \tag{11}$$

式中：θ_a表示大气参数；θ_h表示水文参数；θ_{ss}表示土壤水力参数；θ_g表示地质参数；θ_c表示工程参数；θ_e表示生态参数；θ_{hh}表示社会经济参数。

4.2.2 *系统动态模型* 系统演化遵循基于物理机制的动力学方程：

$$\mathrm{d}\boldsymbol{X}(t)/\mathrm{d}t=F(\boldsymbol{X}(t),\ \boldsymbol{U}(t),\ \boldsymbol{W}(t),\ \boldsymbol{\theta})+\varepsilon(t) \tag{12}$$

式中：$F(\cdot)$表示系统动力学函数；$\varepsilon(t)$表示模型误差项。该函数集成了大气过程、地表水过程、土壤水运动、地下水过程、工程过程、生态过程、社会水过程等七大关键子模型。

大气水-地表水耦合通过有效降水过程驱动陆面水文过程；地表水-土壤水-地下水之间通过入渗、渗漏与基流排泄相互转化构成垂向水循环的核心链路；工程水通过取水、调水与供水将自然水体与社会用水需求相连接；生态水的维系依赖于地表水、土壤水与地下水的协同支撑；社会水通过取水、耗水、排水与自然水体交换，其用水行为受控于工程调度、需水管理与政策干预。水量平衡方程确保模型真实反映大气水、地表水、土壤水、地下水、工程水、生态水、社会水的立体转化和系统统筹。

4.2.3 *优化调控模型* 基于上述动态模型，数字孪生水圈的调度决策可表述为一个多目标、多约束的优化控制问题，其核心目标函数J旨在寻求供水安全J_{supply}、防洪减灾J_{flood}、生态健康$J_{ecology}$、经济效益$J_{economy}$、地质安全J_{ground}、土壤健康J_{soil}、社会公平J_{social}等多个目标的协同最优：

$$\min J=\int[\omega_1\cdot J_{supply}+\omega_2\cdot J_{flood}+\omega_3\cdot J_{_ecology}+\omega_4\cdot J_{economy}+\omega_5\cdot J_{ground}+\omega_6\cdot J_{soil}+\omega_7\cdot J_{social}]\mathrm{d}t \tag{13}$$

式中权重系数ω_i反映不同目标的相对重要性，可通过层次分析法或基于历史数据的机器学习动态调整。该优化控制问题受到系统动力学方程、工程能力上下限、生态需水底线、地下水位临界值及水质标准等一系列边界约束。

4.2.4 *参数识别与求解策略* 为确保模型的精准性与可靠性，通过数据同化技术持续优化模型参数$\boldsymbol{\theta}$，其本质是求解一个使模型输出$\boldsymbol{M}(\mathrm{X},\ \boldsymbol{U},\ \boldsymbol{\theta})$与观测数据$\boldsymbol{Y}_{obs}$误差最小的反演问题。

$$\theta^{new}=\arg\underbrace{\min}_{\theta}\left\{\left\|\boldsymbol{Y}_{obs}-\boldsymbol{M}(\boldsymbol{X},\ \boldsymbol{U},\ \boldsymbol{\theta})\right\|_R^2+\left\|\boldsymbol{\theta}-\boldsymbol{\theta}_{prior}\right\|_P^2\right\} \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{Y}_{obs}$为多源观测数据向量；$\boldsymbol{R}$为观测误差协方差矩阵；$\boldsymbol{\theta}_{prior}$为参数先验估计；$\boldsymbol{P}$为参数先验误差协方差矩阵。

上述模型构成高维、非线性、多时空尺度的优化控制问题，需采用分层求解策略：国家战略层基于聚合模型与多目标进化算法，输出年/季尺度的长期水资源配置战略；区域协调层运用分布式优化与博弈论，生成旬/周/日尺度的水量分配与水库联合调度方案；实时控制层则通过模型预测控制MPC（Model Predictive Control）与强化学习，实现小时/分钟级闸泵实时指令与应急调度。各层级通过标准化接口紧密协同，上层提供约束边界与目标指导，下层反馈状态聚合与执行效果，确保宏观战略与微观执行的一致性。

5 数字孪生水圈核心能力

基于上述内涵特征与基本模型，数字孪生水圈具有四项核心能力。

（1）“透视-聚合”的全域立体态势认知。数字孪生水圈集成各流域、水网、工程的监测数据，结合卫星遥感、重力测量、InSAR、地下传感网络等天-空-地表-地下多维信息，能实现对全国范围内地表水与地下水存量、流量、水质、工程状态的透明化立体感知。同时，具备强大的多源信息聚合与深度洞察能力，从海量异构数据中挖掘出跨区域、跨圈层的关联规律，如量化南水北调受水区地表水利用对地下水超采的缓解效应，识别西北内陆河流域地表水开发与下游生态地下水埋深变化的定量关系。

（2）“仿真-寻优”的多情景决策推演。面对国家水网调度中多目标冲突、多约束复杂、多不确定性的挑战，数字孪生水圈能构建强大的 “数字实验室”，在短时间内对数百上千种调度方案并行模拟推演，分析不同方案对区域地下水动态的长期影响，量化评估每种方案的综合效益和潜在风险。基于高性能计算

与智能优化算法，自动寻找在给定约束下的最优或满意解集，为决策者提供清晰的方案比选依据。

（3）“协商-协同”的跨系统智能调度。采用多智能体系统等技术架构，将不同流域管理机构、水网运营公司、地下水管理部门模拟为具有各自目标、规则与信息的“智能体”。当需要进行多水源统筹调度时，这些智能体在数字水圈中基于共享的全局目标和协商机制进行互动，通过博弈、竞价、合作等方式，自发形成整体高效的调度协议，实现分权治理下的高效协同，破解地表水与地下水管理条块分割带来的调度僵局。

（4）“预警-适应”的系统韧性增强。通过实时风险监测与早期预警模型，提前识别出区域性干旱、流域性洪水、地下水污染扩散、地面沉降加速等风险信号。基于推演结果，自适应生成并启动韧性应对策略：旱情萌芽期建议启用地下水应急水源并评估可持续开采量；洪风险情增大时预泄腾库并评估水库蓄水对周边地下水补给的贡献；突发污染时模拟污染物在地表及地下的迁移路径。“监测—预警—推演—预案”的闭环使国家水网从被动抗灾转向主动防灾。

6　数字孪生水圈关键技术

6.1　关键科学问题

6.1.1　*多圈层、多过程、多尺度耦合系统的统一建模与协同仿真*　核心科学问题包括：一是如何构建无缝耦合水圈、岩石圈、生物圈与人类圈的巨型数字模型，突破现有数字孪生（流域、水网、工程）在单一领域或单一过程的局限性，实现涉水地球系统复杂相互作用的全景、动态、高保真数字映射；二是如何将描述不同圈层、不同物理/化学/生物过程的异质模型进行数学形式与时空尺度的统一表达，实现多源异构数据在同一仿真框架下的实时驱动与同化，解决从秒级波浪到百年地质沉降、从米级结构到千公里流域等超大范围时空尺度耦合带来的计算复杂度问题。

6.1.2　*高度不确定性环境下“自然-社会”二元水循环的智能感知与前瞻推演*　核心科学问题包括：一是如何量化从气候模式偏差、水文预报误差到未来人类用水行为全链条不确定性，并使其在模型中可传播、可表达；二是如何将水资源管理政策、水市场交易行为、公众节水响应等社会经济动态过程转化为可计算、可学习的代理模型，并与自然过程模型深度耦合，构建可灵活组合气候路径、发展模式与政策干预的“未来情景工厂”，实现海量情景的高效推演与临界点识别。

6.1.3　*面向巨系统全局最优的“人机混合”平行系统构建与实时交互干预*　核心科学问题包括：一是如何将人类专家的领域知识、价值判断与机器的超强计算、搜索能力深度融合，形成“人类定性指导、机器定量寻优”的混合增强智能决策范式；二是如何建立数字系统与物理系统之间双向、实时的“感知—决策—控制”闭环，在数字空间中预演评估调度指令，再安全、精准地反控物理工程，并在执行中持续学习、双向校准；三是如何研发新型分布式优化与博弈算法，解决涉及成千上万工程节点、多个冲突目标、多重复杂约束的超大规模优化问题，在可接受时间内逼近全局帕累托最优。

6.2　技术体系构建　以上述三个关键科学问题为导向，在需突破的数字孪生水圈关键技术方向构成了一个从数据感知、模型构建、情景推演、决策调控到平台支撑的完整闭环技术体系，如图2所示。

6.2.1　*多圈层数据融合与动态同化技术*

（1）“天-空-地-水-工”一体化感知数据时空对齐与质量增强技术。研发多模态（光学、Synthetic Aperture Radar、高光谱、重力卫星等）遥感数据的物理一致性融合算法，实现降水、土壤湿度、水体面积、地下水储量等关键水文参数的高精度反演；研究基于时空图神经网络的异构监测数据的智能质控与空间插补；研究水圈统一时空网格框架与本体模型，实现多源数据自动配准与语义关联。

（2）水圈全要素集成数据库与知识库构建技术。研究多模态水圈大数据湖仓一体架构及支撑EB级数据毫秒级查询与PB级数据分钟级分析技术；研究基于自然语言处理和事理图谱的“过程-效应-规则”水圈知识图谱自动构建与推理技术；研究水圈数据-模型-知识一体标准化、可互操作封装与统一服务技术。

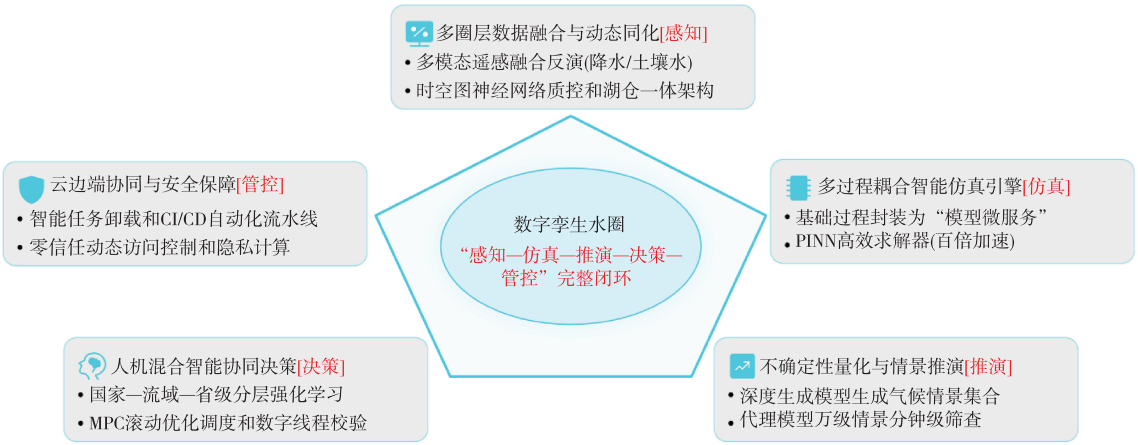


图2　数字孪生水圈关键技术组成

Fig. 2　Composition of key technologies for Digital Twin Hydrosphere

(3)多尺度数据-模型动态同化与状态估计技术。发展高效同化多源、多尺度、异步观测数据的集合-变分混合同化与粒子滤波相结合的方法；研究能够同化工程调度指令、用水统计等社会经济数据的新型同化框架，校准“自然-社会”二元水循环模型状态；建立同化系统性能的实时诊断与不确定性量化方法，确保数字孪生状态估计的可靠性。

6.2.2　多过程耦合的智能仿真引擎技术

(1)水圈多过程组件化模型库与标准化接口技术。研究将“七水”模型封装为标准可替换的“模型微服务”技术；研究异构模型组件互操作与数据交换标准，实现不同尺度、不同编程语言模型组件的“即插即用”；研究面向特定场景的模型链可视化组装平台构建技术，支持用户通过拖拽方式将模型组件与数据源连接，以快速构建复杂模拟工作流。

(2)物理机理与人工智能深度融合的混合建模技术。针对圣维南、Richards等核心控制方程设计专用的物理信息神经网络(Physics Informed Neural Networks，PINN)高效求解器，实现关键过程加速求解；研究基于本征正交分解、深度学习代理模型等复杂机理模型降阶方法，耦合在线学习模块实现动态偏差校正；基于Agent建模技术模拟区域管理者、用水户等主体的决策行为，与自然水循环模型深度耦合，以刻画社会水循环动态。

(3)超大规模耦合模拟的高性能计算与云原生调度技术。研发适用于CPU-GPU异构架构的并行算法，解决多过程、多尺度模型耦合计算负载不均衡与通信瓶颈问题；基于Kubernetes等容器编排技术，实现仿真任务的自动分发、弹性扩缩容和故障迁移；开发基于WebGL的轻量化三维渲染引擎，支持亿级网格数据的实时渲染、动态剖切和仿真可视化交互探索。

6.2.3　不确定性量化与前瞻情景推演技术

(1)“气候-水文-社会”全链条不确定性传递与量化技术。利用深度生成模型(如GAN、VAE等)生成高分辨率、物理机制一致且能覆盖未来气候不确定性的区域气候情景集合；采用贝叶斯模型平均、深度学习等方法区分并量化水文模型结构缺陷与参数不确定性对预报的影响；构建基于共享社会经济路径的用水需求概率预测模型，量化技术发展、政策实施、公众意识等对用水行为的影响范围。

(2)深度不确定性下的决策情景生成与探索技术。采用自适应采样、主动学习等方法，在包含气候、经济、技术、政策等多维度未来情景空间中，高效抽取具有代表性的关键情景组合；发展基于自然语言理解和逻辑推理的方法，将离散的情景假设整合成逻辑自洽、叙事清晰的“未来故事线”；集成非线性时间序列分析、深度学习等方法从模拟数据中自动检测水圈系统发生突变的前兆信号。

(3)海量情景的快速并行推演与智能分析技术。训练海量情景高保真代理模型(如深度神经网络、高斯过程)，实现大规模情景的分钟级初步推演与高风险情景筛选；利用无监督学习对推演结果进行多目标聚类，提取具有不同风险-效益特征的“未来模式”；开发能够动态展示不同情景下国家水网的

演变路径与关键转折点的交互式叙事工具，支持对特定影响(如某城市断水)的多级原因追溯。

6.2.4 人机混合智能协同决策与平行管控技术

(1)多层级、多智能体协同决策与博弈求解技术。设计“国家—流域—省级”分层决策架构，通过通信与信用分配实现协同；在智能体决策模型中引入专家作为特殊智能体，模拟人机之间、不同部门之间的辨论、联盟形成等博弈过程寻求均衡解；研究决策方案的可解释性生成与辩论技术，为AI生成方案自动生成基于数据、模型和知识的解释报告，并构建支持多方观点举证与辩论的模拟环境。

(2)数字–物理平行系统的交互干预与滚动优化技术。建立基于高效混合模型的MPC控制器，将中长期调度方案分解为工程设施的实时控制指令，并根据最新观测滚动优化；研究基于数字孪生的控制指令平行执行和数字线程安全校验技术，支持全链路仿真预演和安全校验，利用“数字线程”确保从决策到执行的可追溯、可审计；研究虚实系统双向校准与在线学习技术，自动诊断偏差来源并触发模型参数或AI代理的在线更新。

(3)沉浸式人机协同决策推演沙盘技术。研究多模态、自然交互与意图理解技术，支持语音、手势、眼动、脑机接口等多模态输入，深度理解决策者的模糊指令(模糊性、概括性的决策目标或约束条件)；构建基于VR的沉浸式指挥舱和基于AR的现场作业辅助系统，让决策者能“进入”水圈场景进行操作和会商；研究多人异地协同决策与共识形成技术，支持异地、多角色、同步/异步参与的协同决策，智能提炼分歧与共识，辅助形成最终决议。

6.2.5 云边端协同的智能平台与安全保障技术

(1)云边端协同的弹性计算与数据分发技术。研究智能任务卸载与边缘计算协同技术，动态决策将任务部署在云端、边缘端或端侧以实现计算资源的最优配置；研究融合5G、卫星互联网、专用物联网的广域异构网络下的高可靠、低时延通信技术，为关键监测数据上行和控制指令下行提供冗余、高可靠的通信保障；研究分布式数据同步与一致性维护技术，确保云端、边缘端数据在弱网络条件下的最终一致性，为分布式决策提供统一的数据视图。

(2)微服务化、容器化与持续集成部署技术。研究基于领域驱动设计的微服务架构。按水圈业务域划分微服务，实现高内聚、低耦合，支持独立开发、部署和伸缩；研究全链路可观测性与智能运维技术，通过AIOps(Artificial Intelligence for IT Operation)实现平台性能的实时监控、异常预警、根因定位和自愈；研究模型与应用的持续集成/持续部署流水线技术，支持从代码提交、模型训练、测试到灰度发布的全流程自动化及平台快速迭代。

(3)全生命周期安全可信与隐私计算技术。研究对所有访问请求持续验证和授权的零信任架构与动态访问控制技术，实施基于身份、设备和环境的精细化动态访问控制策略；研究数据安全与隐私保护计算技术，采用同态加密、安全多方计算、联邦学习等技术在数据加密状态或分散状态下完成联合计算，以保护各方数据主权与隐私；研究模型安全与对抗鲁棒性增强技术，对核心AI模型进行对抗样本检测、防御性训练和鲁棒性认证，防止恶意输入导致模型误判以确保决策安全。

7 数字孪生水圈赋能路径

7.1 破解“三重割裂”，实现全局性统筹 数字孪生水圈将强化水资源管理在空间、过程和要素的系统整合能力，推动形成“全局统筹、多水协同”的治理新格局。通过整合气象、水利、自然资源、生态环境等跨部门、多源异构数据，构建统一连贯的覆盖“七水”的数字映射系统，耦合大气过程、陆面水文、地下水运动、工程调控及生态响应等多尺度模型，实现从降雨到地下水补给、再到生态影响的全链条过程模拟，使管理者能够超越行政区划和单一工程限制，直观评估跨流域调水的立体影响，量化局部决策的连锁效应。数字孪生水圈将作为权威协同平台，为不同区域和部门提供透明的“水账本”与影响评估报告，支撑利益协调与补偿，推动水资源管理从“九龙治水”走向“系统治理”。

7.2 应对“气候不确定性”，增强调度前瞻性 数字孪生水圈构建“气候—水文—调度”无缝衔接的

前瞻性推演环境，系统接入并降尺度处理多源气候模式情景数据，驱动高保真水循环模型对国家水网进行长周期运行下的战略压力测试，评估关键工程在极端水文序列下的适应能力；在短期和中期调度中，融合集合预报与水文模型生成概率化预报产品，自动匹配并预演不同风险等级下的分级响应预案。基于长期积累的海量情景数据与实时反馈，可利用机器学习动态优化调度规则与应急预案库，使核心决策规则具备持续进化能力，推动水网调度从依赖历史经验的被动响应转向基于未来情景仿真的主动适应。

7.3 统筹“多水源配置”，拓展水资源战略空间 数字孪生水圈能实现“七水”的精准刻画与协同模拟，拓展国家水资源配置的战略纵深与灵活性，将空中云水资源纳入可评估、可规划的范畴，耦合大气水汽输送模型精准量化人工增雨潜力，作为“预期开源”变量纳入供需平衡分析；通过精细刻画地下水含水层结构，模拟不同开采回补方案下的水位动态及地质环境效应，为地下水战略储备库的划定、启用与修复提供依据，实现从“掠夺式开采”向“战略储存调用”的转变。在操作层面，作为“数字混配池”对多水源进行跨时空的联合调度模拟，以系统总成本最低、综合效益最大为目标，优化出实时动态配水方案，在实体工程网络之上构建更智能高效的“虚拟配置网络”，最大化水资源承载力。

7.4 识别“链式风险”，提升系统韧性 数字孪生水圈通过真实物理过程模型和网络拓扑关系对突发污染事故、工程故障、极端气候事件等进行全链路动态模拟推演，快速追溯污染扩散路径、评估工程失效连锁影响，实现风险精准定位与防控。通过网络脆弱性分析、系统动力学模拟等方法主动识别国家水网 “单一故障点”与生态系统中敏感的“临界阈值”。作为韧性增强设计平台，在数字空间中预先评估工程冗余、分布式应急水源、柔性调度规则等韧性措施的效能与成本，为物理水网的加固与管理策略优化提供仿真验证的“蓝图”，降低水安全体系的脆弱性，避免因局部失效导致系统性崩溃。

7.5 服务“国家战略决策”，支撑高质量发展 数字孪生水圈将超越传统的水利业务范畴，成为服务国家宏观战略的量化决策模拟器与政策实验室。在能源领域，模拟风光电大规模接入电网后的波动特性，优化水电、抽水蓄能的互补运行策略[23]；在粮食安全领域，模拟不同气候情景与市场导向下的农业需水变化，评估水土资源匹配度[24]；对于京津冀协同发展、长三角一体化等区域重大战略，量化模拟不同人口规模、产业布局和城市发展路径下的水资源需求与压力，为重大引调水工程规模、时序及生态影响提供科学论证。将水与能源、粮食、经济、生态等战略目标关联模拟，为重大涉水决策，并提供前瞻、量化、可视化的科学依据。

8 结语

数字孪生水圈研究是深化水系统科学认知、应对水安全挑战的重大战略需求。以国家水网为代表的重大水利基础设施，作为自然过程与人类活动深度耦合的典型场景，既是数字孪生水圈的重要应用对象，也是验证其科学价值与工程效能的“试验场”。数字孪生水圈通过为国家水网装备能够驾驭跨流域、跨区域、多目标、多圈层复杂性的“数智大脑”，推动水治理从局部优化走向系统统筹、从被动应对走向前瞻适应。作为高于且协同于数字孪生流域、水网、工程的顶层平台，在全球和国家尺度上重新定义了水循环的数智化认知、模拟与调控范式，将大气、地表、土壤、地下、工程、社会、生态等水系统置于统一框架下进行统筹管理。其“透视-聚合”的全域立体态势认知、“仿真-寻优”的多情景决策推演、“协商-协同”的跨系统智能调度、“预警-适应”的系统韧性增强的核心能力，推动水利信息化从工具辅助走向智能主导、从二维管理走向三维协同，从局部数字化与智能化迈向全要素数字化、全系统智能化、全业务协同化的新阶段。

推动数字孪生水圈从理论走向实践，需从四方面发力：一是夯实数据基础，加快构建跨国境、跨流域、跨区域、跨部门协同的数据共享机制与模型互操作标准，形成水圈全要素的数据底座；二是强化技术攻关，破解多圈层耦合建模、超大规模并行计算、深度不确定性量化等科学难题，突破混合建模仿真、人机协同决策等关键技术瓶颈；三是开展示范验证，在国家水网骨干工程、重点流域、重点区域开展示范应用，在实践中迭代算法、沉淀知识、丰富理论、完善技术，再进而优化实践；四是培

育人才生态，推动水文水资源、水力学及河流动力学、大气科学、生态学、信息科学、管理科学等学科深度交叉融合，培养复合型人才队伍。

参 考 文 献：

[1] 王浩，赵勇，等. 国家水网[M]. 北京：科学出版社，2024.

[2] 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.（in Chinese））

[3] IPCC. Climate Change 2021：The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge：Cambridge University Press，2021.

[4] 王建华，刘欢，胡鹏，等. 水网的科学内涵解析与形成演变机制探究[J]. 水利学报，2026，57(1)：128-140.（WANG J H，LIU H，HU P，et al. Analysis of the scientific connotation of water networks and exploration of their formation and evolution mechanisms[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2026，57(1)：128-140.（in Chinese））

[5] 蒋云钟，严子奇，贾绍凤，等. 全球变化背景下特大干旱综合应对研究框架[J]. 水利学报，2023，54(3)：347-357.（JIANG Y Z，YAN Z Q，JIA S F，et al. Initiatives on comprehensive response to serve drought in the context of global changes[J]. Journal of Hydraulic Eingineering，2023，54(3)：347-357.（in Chinese））

[6] TANG Q H，CHEN D L. Global change exacerbates water cycle imbalances and intensifies water resource crises [J]. Science China Earth Sciences，2025，68(9)：1-4.

[7] 陈敏，李铁键，黄跃飞，等. 空中水资源利用：技术、应用及生态经济效益[J]. 中国科学院院刊，2025，40(7)：1317-1328.（CHEN M，LI T J，HUANG Y F，et al. Atmospheric water resources utilization：Technology，applications，and ecological economic benefits[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2025，40(7)：1317-1328.（in Chinese））

[8] 冶运涛，蒋云钟，寇怀忠. 数字孪生水利建设的进展成效、关键问题与对策举措[J]. 中国水利，2026(5)：36-45.（YE Y T，JIANG Y Z，KOU H Z. Progress，key issues and countermeasures for construction of digital twin water conservancy [J]. China Water Resources，2026(5)：36-45.（in Chinese））

[9] 冶运涛，蒋云钟，梁犁丽，等. 数字孪生流域：未来流域治理管理的新基建新范式[J]. 水科学进展，2022，33(5)：683-704.（YE Y T，JIANG Y Z，LIANG L L，et al. Digital twin watershed：New infrastructure and new paradigm of future watershed governance and management[J]. Advances in Water Science，2022，33(5)：683-704.（in Chinese））

[10] 蔡阳. 数字孪生水网建设应着力解决的几个关键问题[J]. 中国水利，2024(17)：36-41.（CAI Y. Key issues should be addressed in digital twin water network construction[J]. China Water Resources，2024(17)：36-41.（in Chinese））

[11] 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.（in Chinese））

[12] 李国英. 推进安全大坝、生态大坝、智能大坝建设[J]. 中国水利，2025(16)：1-3.（LI G Y. Promoting the construction of safe dams，ecological dams and intelligent dams[J]. China Water Resources，2025(16)：1-3.（in Chinese））

[13] 盛金保，陈斯煜，李宏恩，等. 面向数字孪生的智能大坝建设研究进展与展望[J]. 水科学进展，2025，36(6)：1004-1015.（SHENG J B，CHEN S Y，LI H E，et al. Research progress and prospect of intelligent dam construction oriented to digital twin[J]. Advances in Water Science，2025，36(6)：1004-1015.（in Chinese））

[14] 蒋云钟，冶运涛. 数字孪生灌区内涵解析及建设思路与关键技术[J]. 中国水利，2025(13)：24-33.（JIANG Y Z，YE Y T. Connotation analysis，construction approach and key technologies of digital twin irrigation districts [J]. China Water Resources，2025(13)：24-33.（in Chinese））

[15] 李云玲，姜大川，赵钟楠，等. 推进中国式现代化的水安全保障总体态势与战略研究[J]. 中国水利，2025(23)：22-27.（LI Y L，JIANG D C，ZHAO Z N，et al. Overall situation and strategic research on water security for advancing Chinese modernization[J]. China Water Resources，2025(23)：22-27.（in Chinese））

[16] 项晓岚，张圣宇，吴飞. 人工智能赋能新质生产力发展：现状解析与未来展望[J]. 计算机研究与发展，2025，62(1)：281-283.（XIANG X L，ZHANG S Y，WU F. Artificial intelligence empowering the development

of new quality productive forces: current situation analysis and future prospects[J]. Journal of Computer Research and Development, 2025, 62(1): 281-283. (in Chinese))
[17] 钟登华, 张天鸿, 余红玲, 等. 智能时代与大坝工程建设智能化研究进展[J]. 水利学报, 2025, 56(1): 1-19. (ZHONG D H, ZHANG T H, YU H L, et al. Advancements in intelligent dam engineering construction in the intelligent era[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(1): 1-19. (in Chinese))
[18] MICHAEL G, EDWARD Y H. Digital Twins, Simulation, and the Metaverse[M]. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024.
[19] MICHAEL G. Intelligent digital twins and the development and management of complex systems[J]. Digital Twin, 2022, 2(1): 2-8.
[20] MICHAEL G. DIKW as a general and digital twin action framework: data, information, knowledge and wisdom[J]. Knowledge, 2024, 4(2): 120-140.
[21] MICHAEL G. Digital twin phases and futures[J]. Digital Engineering, 2025, 6: 100053.
[22] 陶飞, 张贺, 张辰源, 等. 从数字孪生到数智孪生: 回顾与展望[J]. 计算机集成制造系统, 2026, 32(1): 1-17. (TAO F, ZHANG H, ZHANG C Y, et al. From digital twin to smart digital twin: Review and outlook[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2026, 32(1): 1-17. (in Chinese))
[23] 申建建. 新时代中国水电系统调度发展分析及技术展望[J]. 水利学报, 2026, 57(1): 153-167. (SHEN J J. Development analysis and technological prospect for China's hydropower system dispatching in the new era[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2026, 57(1): 153-167. (in Chinese))
[24] 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. (in Chinese))

Digital twin hydrosphere: theoretical connotations, a foundational model and key technologies

YE Yuntao[1,2,3], JIANG Yunzhong[1,3], WANG Hao[1], ZHAO Yong[1], WANG Ying[2], LIANG Lili[4]

(1. *State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*; 2. *China Construction Eco-environmental Group Co., Ltd., Beijing* 100037, *China*; 3. *Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources, Beijing* 100038, *China*; 4. *Science and Technology Research Institute, China Three Gorges Corporation, Beijing* 101199, *China*)

Abstract: In response to the challenge that conventional water cycle simulation and regulation can hardly address the systemic complexities across climatic zones, spheres, and multi-scale processes—particularly their inadequacy in supporting command, dispatch, and decision-making for large-scale national water networks—this study proposes the Digital Twin Hydrosphere, which is envisioned as a Hydrosphere Simulator. It clarifies the definition of the Digital Twin Hydrosphere and its relationship with the Digital Twin Watershed, the Digital Twin Water Network, and the Digital Twin Water Conservancy Project. The connotations of the Digital Twin Hydrosphere are analyzed from four dimensions: ontology, epistemology, methodology, and axiology. Essential characteristics are identified, including integration of all elements and three-dimensional symbiosis, holistic cognition and collaborative intelligence, forward-looking deduction and adaptive decision-making, and knowledge accumulation and continuous evolution. A foundational model consisting of an information model and a system model was established with analyses of its core capabilities, scientific challenges, and key technological breakthroughs to be made. Enabling pathways were also discussed. The study shows that the Digital Twin Hydrosphere can significantly enhance systematic understanding, scenario simulation, and risk prevention and control capabilities for the multi-scale "natural - social" dual water cycle, providing theoretical foundations and technological pathways for the paradigm shift in water system governance from "experience-driven" to "data- and model-driven".

Keywords: digital twin hydrosphere; smart water conservancy; hydroshpere simulator; national water network; command and dispatch; intelligent decision-making; hybrid modeling; collaborative optimization

(责任编辑: 尹　婧)