

# 数字孪生技术对流域水资源管理的影响探析

张彦杰

内蒙古自治区水利科学研究院

**摘要：**水资源在社会经济进步中扮演着至关重要的角色，然而，我国面临人口众多而水资源匮乏的现状，加上水资源在时间和空间上的不均匀分布，以及严重的水资源短缺、水污染和水生态退化问题，这些都阻碍了社会经济的可持续演进。将水资源管理与先进的信息技术相结合，运用数字孪生技术，可以增强流域水资源的管控能力，提升水资源保护及高效利用的程度，推动水资源管理向数字化、智能化、精细化、规范化和现代化方向发展，有助于提升水利行业的科学治理效能。因此，文章重点分析数字孪生技术对流域水资源管理的影响，仅供参考。

**关键词：**数字孪生技术；流域水资源；管理；影响  
【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.15.091

在当今全力推动生态文明发展的大背景下，流域内的水资源综合管理议题日益凸显其重要性。水资源调配策略对此领域的综合运用将产生重大且持久的效应。其核心在于通过严谨的流域规划、一体化的管理和协作机制，以实现水资源的高效和公正分配。在流域综合管理的视角中，关注点不仅限于水资源的量与质，更包含生态环境的保育和可持续利用。同时，它也要求兼顾各类利益相关者的诉求，确保各方权益的和谐共存。

## 一、加强流域水资源管理的必要性

### （一）是国家实施可持续发展战略的需要

近年来，伴随着社会经济的稳步发展，流域内的水资源开发利用日渐深化，随之而来的是水资源管理与保护的冲突逐渐尖锐。具体体现为：水资源的开发缺乏合理规划，部分地区盲目、过度开发，甚至非法开采，造成了水资源的极度匮乏，阻碍了社会经济的可持续前行；水污染问题严峻，水生生态系统受损，水质普遍下降；农田灌溉中的水资源浪费现象普遍，农村饮用水安全难以得到保障，部分地区的农民和家畜面临饮水难题；过度开发水资源的情况在某些区域尤为明显，引发了河床干涸、湖泊缩减、湿地退化、地下水位下落及海水倒灌等一系列问题；更有甚者，多地河流水质恶化，水生生态系统遭受严重破坏。这些存在的问题对社会的可持续发展构成了重大障碍。

### （二）是落实科学发展观的重要举措

以人的需求为中心是科学发展观的本质。在水资源的管理和开发过程中，首要任务是尊重水资源的承载极限，确保其合理且有效利用，这需要同时实施总量管理和定额管理制度，严格监督所有取水和用水活动。同

时，结合用水效率控制和水权交易机制，以强化水资源的管控。此外，水资源的分配与保护应并行不悖，以全力保护水资源。再者，工程解决方案与非工程策略的融合，对于优化水资源的开发至关重要。当前，流域水资源的过度开发、严重浪费及水质恶化等问题依然存在，对实现流域水资源的可持续使用构成了重大障碍。因此，全面贯彻科学发展观，务必扎实做好流域水资源的管理工作。

### （三）是促进经济社会全面协调可持续发展的必然要求

伴随工业化、城市化进程的加速以及农业现代化的深化，对水资源的需求日益攀升，资源环境承载力已逼近其极限。为了推动全面发展并保持生态平衡，我们必须深入践行科学发展观和公正绩效理念，强化水资源管理与生态保护。在治水策略上，我们主张优先推行节水措施，兼顾区域平衡，实施综合性的管理体系，同时注重开发与保护的动态平衡，以及水资源利用与节约保护的协同效应。我们必须遵循自然法则和经济规律，以水资源的可持续利用为核心，将其视为最严格的限制因素，以此确保经济社会发展的稳定水资源供应。

### （四）是维护生态平衡的迫切需要

水，作为生命的源泉和生态的基础，对人类社会的繁荣与存续具有不可忽视的影响。然而，伴随着社会经济的迅速演进，水资源问题逐渐成为阻碍社会进步的关键因素。我国的水资源分布极不均衡，无论是时间上还是空间上，都存在着显著的短缺，人均占有量仅相当于全球平均水平的四分之一和七分之一，列于世界上最严重的缺水国家之列。此外，我们对水资源的开发和使用时过于原始，浪费现象普遍存在，导致了开发、使用与保护之间的冲突日益尖锐。随着社会进步和民众生活质量的提升，人们对水资源的需求和期待也在不断提升。因此，强化流域水资源的管理，妥善应对当前的紧迫问题，对于维护生态环境的稳定，构建宜居的生活环境显得尤为必要。

## 二、数字孪生技术内涵

数字孪生技术巧妙地融合了物理世界与虚拟环境的互动，旨在实时映射实体对象并在数字领域实现动态模拟。其构建过程分为几个关键环节：首先，核心是数字孪生智能中枢，它整合了多元数据源、算法模型以及业务解决方案，构建了一个高效的平台，承载着数据共享、业务协作和功能输出等重任。其次，信息化基础设施充当了基石，构建起包括信息采集、传输、存储和处

理在内的硬件网络体系，为数据服务提供了强大的后盾。接下来，业务应用模块根据用户和场景需求，设计出精细的监控预警、调度指挥和运行维护功能。网络安全体系则至关重要，确保数据、系统和业务安全无虞，通过严谨的策略和防护措施来维护信息系统的完整性。最后，保障支撑体系提供了全方位的支持，包括人力资源、物资资源和技术援助，以确保项目的顺利进行。以强化工程安全性为目标，强调“预防为主”，在完成基础数据建模、业务数据构建和信息化设施构建后，进一步推进数字孪生平台和定制化业务应用开发，以推动流域水资源管理的智能化升级。

### 三、数字孪生技术对流域水资源管理的影响

数字孪生技术在流域水资源管理中展现出显著的实际价值：其精细的水资源建模体系和全面的资源调控平台显著提升了水资源管理的效能和响应速度，完美契合了新时代对水资源管理与优化的需求，顺应了智慧水利的智能化转型趋势。它代表了一种新型的数字化治理创新实践，强调科技创新的驱动作用，旨在提升水资源的使用效率和经济效益，积极推动智慧水利迈向更高品质的发展阶段。

#### （一）强化分洪调节能力，提高流域防洪水平

借助数字孪生平台，能够对分洪闸的构造安全及流体动力特性进行动态监控和预警，确保能即时识别并解决潜在问题和设备故障，以保证分洪闸在极端条件下的稳定运行，防止灾难性的溃坝事件，提升应对复杂洪水情况的响应能力。通过该平台的仿真模型，建立分洪闸

运行状态与输入输出变量间的非线性关联，可增强预测的精确度和适应性，降低由数据不完整或错误引发的误差。此外，仿真模拟也能估计出分洪闸在极限条件下的峰值水位和最大流速，评估扩建后的分洪闸是否满足防洪标准。依据这些数据，能够制定出科学的防洪策略和调度计划，精确掌握分洪闸的启闭时刻，从而减少人为错误和不必要的干预。

#### （二）保护流域水环境，提升水资源管理综合效益

借助数字孪生平台的数据支持，流域管理能够全面权衡多种因素，包括气候动态、社会经济需求及环境保护等，以评估各种策略的多维度影响。生态效益主要体现在以下三个方面：一是水质管理，通过实时监测水体质量，及时应对工业、农业和生活污染对闸区的影响，灵活调整分洪闸操作，控制污染物排放，确保下游水质符合标准；二是水量保障，监控流域内的用水和排水量，为节水控制措施提供决策依据；三是水生态维护，关注湿地、河岸、鱼类栖息地等生态敏感区域，为科学的生态保护和恢复策略提供帮助，以保护生物多样性。在此基础上，数字孪生平台还能进一步评估分洪闸工程对防洪安全、供水排水、电力生产、航运交通等社会效益，有助于优化流域的产业结构和发展模式。

#### （三）优化流域用水调度，提高水资源利用效率

基于水资源调配模型，开发水资源管理“四预”业务应用，水资源管理与调配系统功能结构（如图1）所示。

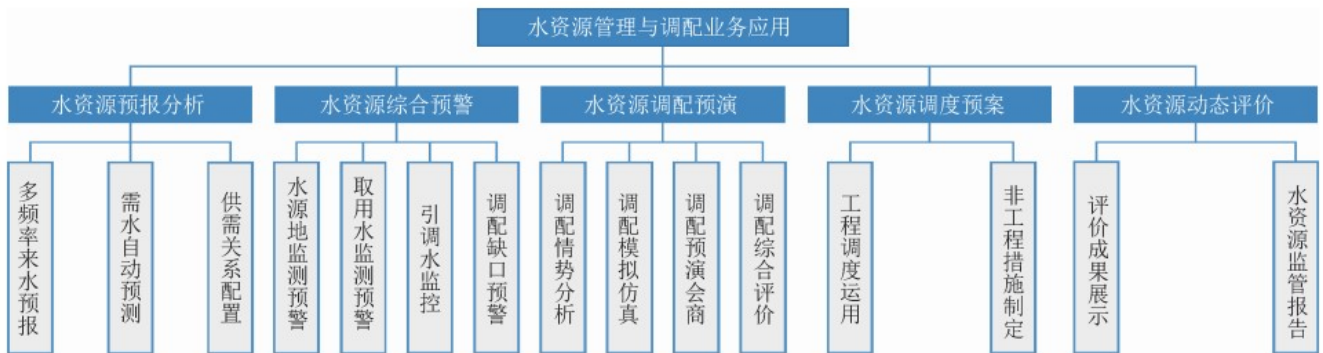


图1 水资源管理与调配系统功能结构图

“四预”业务策略旨在推动精确预报、全面预警、协同预演、详尽预案以及多元评估。具体实施如下：1) 精准即时预报。借助高精度的水资源模型，通过整合多元预报方法，为迅速且科学的调度决策提供了强有力的技术工具。通过集成各部门的跨区域数据，以及融合多源和多级数据，数字孪生技术巧妙地整合并转化这些信息，用于深度分析、决策优化和可视化呈现，确保预报的即时性和准确性。2) 全面预警无遗漏。通过整合流域内的实时降雨、水源地流量、水质、水压和视频监控，系统性地增强对水资源风险的识别和薄弱环节的

识别，从而提升预警的效率和精确度，扩大覆盖范围，实现水资源调度预警的协同联动。3) 同步模拟演练。基于水资源配置的前提条件，通过仿真预演，数字孪生平台在三维环境中生动展现不同情境下的供水效果。针对特定水源地或水厂，可以精细查看其与相关设施的数字拓扑网络，实时进行水资源调配的动态协商，实现全链条的数字孪生管理，提升了从源头到末端的精细度。4) 详尽数字预案设计。侧重于构建水资源管理与调度的数字化预案框架，开发了针对不同水源、调控策略和目标的预演功能，以及自动对比多种预案的能力，从而

实现有策略性的决策，显著提升水资源管理与调度的科学性。5) 多维度动态评估系统。通过可视化流域水循环模型，构建出适应不同时间尺度（年度、月度、日常）的动态评价功能，支持对历史、现状和未来水资源状况的快速分析，有力支撑各类水资源监管报告的高效生成。

### 1. 水资源预报分析

模型平台上的水利专业模拟工具遵循大自然法则，通过对标志性历史事件的深入研究和当前状况的了解，利用现有的智能水利模型资源——如设定频率的径流估算、水资源供需评估模型——以及新开发的径流预测和需水量预测模型的输出，提供无缝的、流程化的水资源预测分析服务。依托流域的数字孪生环境，这些预测和需求预测的结果得以生动呈现，进而能够对流域在特定未来时段的水资源状况进行精确的预测分析。

### 2. 水资源综合预警

在构建的数字孪生流域环境中，我们呈现了全方位的水资源预警情况。这涵盖对水源地水量和水质的监测预警，同时涉及取水和用水活动的监督，以及引水调水控制和供需平衡方面的预警。系统支持即时数据检索和越限预警功能，从而为水资源的“三条红线”管控和调度决策提供坚实的数据支持。

### 3. 水资源调配预演

通过整合和集成各类水资源关键数据，包括基本信息、动态管理和操作策略，实现实时风险评估，构建一个动态的水资源调度预演决策支持系统。这个系统以流域数字双胞胎为基础，全面展示区域的供需网络结构，以及月度和年度的详细调度规划。以下是其核心业务功能的详细阐述：（1）态势评估：基于精确的水资源预测和预警，系统汇总并可视化各区域的预测水源、需求量、供需差距以及预警信息，同时通过地理位置映射，呈现未来水资源调度的全局关联。（2）模拟仿真：利用高级水资源优化调配模型，针对多种可能的调度情景进行模拟，生成各种预演场景下的详细调配方案，涵盖参数配置、年度计划计算和月度方案动态调整。（3）协同决策：在预演过程中，人机协作至关重要。此模块允许用户对预设方案进行深入讨论和分析，通过调整模型参数、边界条件等变量，创建多样化的预演场景，进行多轮审议和优化。（4）综合评估：设计了一套完善的评价体系，涵盖了供水可靠性、缺水程度、水库运行效率、生态流量保护、供水压力和供应平衡等多个维度，对预演方案进行全方位评估。通过对比分析，最终选择最符合水利工程运营目标和优化策略的方案作为推荐。这样的系统旨在提升水资源调度决策的科学性和精准性，为实际操作提供有力的支持。

### 4. 水资源调度预案

根据预演的最优水资源调配策略，构建并实施相应

的工程管理机制和非工程策略。调度指令依据方案生成，由管理机构执行，并持续反馈执行状态以实现指令的实时追踪，从而增强调度预案的合理性与实施性。在数字孪生环境中，以三维可视化方式呈现水资源调度计划和指令。以下是业务应用的概述：1) 工程调度操作：为水资源调度工程措施设计个性化的调度指令模板，清晰定义各类水利设施的调度方法，并提供线上自动生成调度指令的功能。2) 非工程策略制定：用户能够基于实际调度和管理需求，利用调配预演的输出来制定非工程措施的手册，如包含水量调度总结、用水监管报告等，同时支持在线编辑和查询管理这些非工程策略文档。

### 5. 水资源动态评价

通过构建实时的水资源分析评估体系，我们实现了对水循环全过程的全方位洞察，以动态视角监控流域和区域的流量变化，深入剖析区域的水量平衡状况，从而高效满足水资源管理和考核的需求，显著提升水资源评估、统计与核算的精准度与响应速度。以下是其在业务中的具体应用描述：1) 详尽成果呈现：针对水资源管理的不同需求，系统支持多维度、多时段的选择，展示丰富的动态评估结果，如降雨量、河流径流、蒸散量、地下水的补给/排放、水库水位波动（蓄水变量）以及进出境水量等关键指标。2) 智能监管报告：借助实时的水资源动态评估，系统自动生成月度、季度乃至年度的水资源监管报告，用户可以在线个性化定制报告模板，只需一键操作，系统便会智能调取评估数据，快速生成专业且精准的报告，极大地增强了水资源动态监管的智能化水平。

总之，水是支撑生命、推动生产、维护生态的根本，构成了人类生存与进步的基础。保障水资源的安全与健康对于我国社会经济的持久繁荣和全面小康社会的构建至关重要。利用数字孪生技术打造的水利项目，整合了数据获取、模型构建、仿真运行及智能管控等多元功能，旨在构建一个对流域水资源从各个层面、各个阶段直至整个生命周期的全方位数字化再现和智慧化模拟。这种虚拟与现实的同步运行和互动，提升了洪水防控效能，改善了水资源分配，同时也守护了生态环境。数字孪生工程的实施将有力促进大流域水利事业的高质量发展，树立起创新实践的典范。

### 参考文献

- [1] 徐丽娟. 基于智慧水利的数字孪生对流域水资源管理的影响探析[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(02): 124-126.
- [2] 司林波, 萧欣茹. 数字孪生何以破解黄河流域数字化治理的“碎片化”困境——基于整体性治理的运行框架[J]. 学习论坛, 2024, (01): 58-66.
- [3] 张建新. 数字孪生技术在疏勒河流域的应用和探讨[J]. 中国水利, 2023, (23): 58-62.