

4.2 海量异构模型“最终合模”的技术与管理双重困境

项目最终需要将来自不同源、不同格式、不同精度的数百个子模型，整合成一个逻辑一致、几何无缝、信息完整的全线总体模型。这一“合模”过程远非简单拼接，它面临坐标系统一、数据格式转换导致的信息丢失或畸变、超大模型轻量化与可视化性能瓶颈等一系列技术难题。在管理层面，这需要一支具有高技术权威性和协调能力的中央团队，负责制定周密的合模计划、审核各单位提交物的合规性、组织跨专业的碰撞检测协调会，并跟踪数以千计的设计冲突直至闭环整改。其协调工作量之大、过程之复杂，是对项目组织管理能力的极限考验。

4.3 协同责任界面模糊与动态变更管理的失控风险

在三维协同环境下，当合模中发现空间冲突或信息矛盾时，责任界定往往变得复杂。问题可能源于原始设计缺陷、施工深化错误、设备模型不准或安装空间预留不足，多方责任交织，容易导致推诿扯皮。更为棘手的是，工程项目变更是常态，任何一个局部的设计变更都可能引发连锁反应，影响多个关联模型。如何确保变更信息能够及时、准确、完整地传递到所有相关责任方，并督促其同步更新各自负责的模型，是维持整体数字模型“生命力”与“真实性”的关键，但在实践中极易出现信息断点与滞后，导致模型与实际脱节。

5 系统性解决方案的探索与实施

5.1 创新管理机制：以“模型交付工作分解”明晰权责利

项目创新性地将项目管理中的工作分解结构（WBS）思想应用于模型交付管理，创建了“模型交付工作分解”机制。针对每一个可交付的工程单体或系统（如一个泵站、一段隧洞），明文规定其 BIM 模型的“创建方”、“集成方”、“审核方”与“批准方”，并配套相应的交付物清单、时间节点与验收标准。这一机制将抽象的“协同”转化为具体、可考核的合同责任，清晰界定了各参与方在数字资产创造链条中的角色与任务，从根源上减少了责任真空和推诿空间。

5.2 深化技术应用：构建智能协同平台赋能高效合模与变更管理

“轻量化合模”与在线协同审阅：要求各方上传经轻量化处理后的模型，平台后台自动进行整合。授权人员可通过网页浏览器直接访问整合后的全专业模型，进行沉浸式浏览、测量、剖切和在线批注，大幅降低了参与协同的技术门槛和硬件成本，提高了问题发现与沟通的效率。

“版本森林”与智能关联变更推送：平台为每一个模型文件建立完整的版本历史树，清晰记录每一次更改的缘由、内容和责任人。当某个模型发生变更时，平台能基于预定义的关联规则，自动分析并推送预警信息给可能受影响的其他模型的负责人，从而实现变更影响的精准、及时传导，确保了模型集在动态过程中的一致性。

5.3 强化过程管控：建立常态化的培训文化

针对各参与方能力参差不齐的情况，组织多轮次的 BIM 标准宣贯、软件技能和平台操作培训，并通过评选优秀交付案例等方式，积极培育项目的数字化协同文化，提升整体执行力。

6 结论与展望

珠江三角洲水资源配置工程在数字孪生导向下的 BIM 模型交付实践，是一次具有里程碑意义的行业探索。它成功证明了通过统一的顶层设计、精细化的标准体系与“BIM+”技术创新，能够在超大型线性工程中实现设计施工全过程的有效数字化，为构建高保真数字孪生体积累了核心数据资产。

更重要的是，本工程深刻揭示了在迈向数字孪生的道路上，最大的障碍往往不是单项技术的缺乏，而是源于组织、管理和协作模式的滞后。项目所遭遇的模型分散、标准不一、合模困难、变更失控等挑战，本质上是传统工程承包体系与数字化全生命周期管理需求之间的结构性矛盾。对此，项目所采取的以“模型交付工作分解”厘清管理界面、以智能协同平台固化工作流程、以过程管控强化执行力的系统方案，为化解这些矛盾提供了行之有效的思路。

本案例的经验表明，对于大型基础设施项目，数字孪生的实现之路，“三分靠技术，七分靠管理”。未来，随着物联网传感器成本的持续下降、人工智能分析能力的不断增强以及仿真技术的日益逼真，工程数字孪生必将向着更实时、更智能、更自主的方向演进。然而，无论技术如何演进，一个准确、完整、结构化的初始 BIM 模型，依然是所有高级应用的基石。因此，在项目初期高度重视 BIM 模型的交付质量，构建适应数字化时代的协同管理新生态，是行业无法绕行的必修课。珠江三角洲水资源配置工程在这方面的经验与教训，无疑为我国“新基建”浪潮下的重大工程数字化建设，铺下了一块坚实而宝贵的铺路石。

参考文献

- [1] 杜恩燕. 数字孪生技术赋能智慧水库平台建设[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025, (12): 36-38. DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.12.009.
- [2] 刘丰源. 机电安装工程数字化交付标准体系构建与实践[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(12): 35-37. DOI: 10.19449/j.cnki.2095-6282.2025.12.010.
- [3] 孙冠华. 数字化交付数据质量审查技术改进及应用[J]. 河北工业科技, 2025, 42(05): 490-498.
- [4] 李健刚, 杨冰, 颜涯, 等. 京雄大桥 BIM 协同设计与数字化交付[J]. 土木建筑工程信息技术, 2025, 17(03): 117-123. DOI: 10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2025.03.21.
- [5] 曾勃, 马智亮, 黄巍, 等. 数字化集成交付模式研究与应用[C]//中国图学学会土木工程图学分会, 《土木建筑工程信息技术》编辑部. 《第12届 BIM 技术国际交流会——数智建造助力城市高质量发展》论文集. 北京市通州区住房和城乡建设委员会; 清华大学土木水利学院; 北京市建筑设计研究院股份有限公司; 2025: 17-24. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.015682.

Environmental Response Analysis of Water Conservancy Engineering to Surface Runoff Changes

Xiaoxuan Han

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830002, China

Abstract

Xinjiang is located in an arid and semi-arid region, where the spatial and temporal distribution of surface runoff resources is extremely uneven. The role of water conservancy projects in regional water resource allocation is particularly crucial. With the construction and operation of reservoirs, water diversion systems, and canal systems, significant changes occur in surface runoff processes, affecting hydrological rhythms, ecosystem structure, and environmental risk levels. Engineering measures have achieved irrigation guarantee for agriculture and animal husbandry and urban water supply support by regulating natural water systems, but have also caused environmental problems such as wetland shrinkage, river interruption, and groundwater level decline. The changes in surface runoff have become an important driving factor for the evolution of the ecological environment in Xinjiang. It is urgent to systematically evaluate the composite impact of engineering interventions on hydrological processes and ecosystems from a quantitative perspective, clarify the direction of regulation strategies, and provide scientific basis and path support for regional water resource management and ecological security.

Keywords

Xinjiang; water conservancy engineering; surface runoff; hydrological changes; ecological risk

水利工程对地表径流变化的环境响应分析

韩筱璇

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830002

摘要

新疆地区地处干旱半干旱区, 地表径流资源时空分布极不均衡, 水利工程在区域水资源配置中的作用尤为关键。随着水库、引调水系统及渠系工程的建设与运行, 地表径流过程发生显著变化, 影响水文节律、生态系统结构及环境风险水平。工程措施通过对天然水系的调控, 实现了农牧业灌溉保障与城镇供水支持, 但也引发了湿地萎缩、河流断流、地下水位下降等环境问题。地表径流的变化已成为新疆生态环境演变的重要驱动因子, 亟需从定量角度系统评估工程干预对水文过程与生态系统的复合影响, 明确调控策略方向, 为区域水资源管理与生态安全提供科学依据与路径支撑。

关键词

新疆; 水利工程; 地表径流; 水文变化; 生态风险

1 引言

新疆作为我国典型的干旱区流域集中区, 水资源总量有限且时空分布不均, 区域经济社会发展高度依赖水利工程的支撑能力。塔里木河、乌鲁木齐河等主要水系的径流过程受制于季节性降水和高山冰雪融水, 天然径流呈现出强烈的不稳定性与敏感性。水利工程通过蓄水、调水和配水等手段改变了原始水文循环结构, 虽有效缓解了灌溉缺水和洪涝风险问题, 却也对地表径流的连续性、生态系统的稳定性及环境风险水平带来了持续影响。在新疆这一特殊地理与气候背

景下, 研究水利工程对地表径流变化的环境响应, 不仅是生态保护和水资源高效利用的现实需求, 也是推进区域绿色发展的基础工作, 具有重要的理论与实践价值。

2 水利工程建设对地表径流格局的重塑作用

新疆地域广袤, 干旱半干旱气候显著, 地表径流以高山冰雪融水和季节性降水为主, 天然水文节律极不稳定。为满足农业灌溉、城市供水和生态补水需求, 大量拦蓄工程在天山南北分布密集, 形成以水库、渠首、节制闸为核心的调蓄体系。丰水期水库截留洪峰径流, 平抑水位波动, 缓解下游水资源压力, 而枯水期则有计划释放水量以支撑用水需求。这种调控机制有效打破了地表径流的季节分布约束, 但也改变了河流年内流量结构, 导致下游断流频发、水位异常波动、生态过程失衡。以塔里木河流域为例, 干流下段径

【作者简介】韩筱璇(1995-), 女, 中国陕西汉中, 硕士, 工程师, 从事水利水电方向的环境影响评价和环境保护研究。

流断续、湿地缩减、水体盐化等现象普遍存在。在干旱区特殊背景下，水资源统一配置虽提升了调度效能，但也对区域自然水循环构成强干扰，需在设施运行中增强生态敏感性考量，推动工程与环境的协调调节。

3 水利工程运行对水文过程变化的响应特征

3.1 径流时序变化中的突变特征与趋势演化

新疆地区受气候波动和高原地形双重影响，地表径流过程本身存在较大年际差异。在大型水利工程长期运行背景下，这一变异性被进一步放大。高原水库和干渠系统对来水进行集中调控，造成自然流量日变化特征被人工调度节律替代，下游河段表现出流量断层、突升突降、水位非自然涨落等特征。部分水系在大型水库建成投运后，年平均流量出现断点式变化，极值频率上升，尤其在库区下游形成流态跳跃与生态失衡共现的局面。以开都河等为例，其下游多年平均径流呈现阶段性下降趋势，洪峰滞后与枯水提前现象愈加明显。长期趋势演化中，水文节律逐步由自然控制向人控主导转化，对预测模型和风险评价系统带来不确定性挑战，需强化模型适应性与工程动态调度的协调联动。

3.2 降雨—径流响应关系的敏感性改变

新疆降水分布极不均衡，山区汇水能力强，平原区雨量稀少。在水利工程的持续干预下，地表降雨向径流的转化过程发生显著变化。大量蓄水与输水结构对降雨响应具有屏障作用，使得短时暴雨不能及时形成有效径流，径流对雨量的响应出现时间滞后、强度削弱等非线性特征。干渠铺设与硬质护坡广泛应用，降低了雨水入渗与汇流效率，影响洪水过程启动机制。工程运行过程中常出现“雨而不涨水”或“涨水无雨”的错位现象，表明传统线性降雨—径流关系模型在新疆区域水文模拟中的适用性不断减弱。高原河流与干旱气候的耦合背景下，需强化蓄水动态参数、输水路径与入渗条件对响应机制的综合建模，以提高水资源管理的适配能力与风险预判水平。

4 地表径流变化引发的生态系统响应

4.1 湿地水文连通性降低对生物栖息地的影响

新疆湿地分布高度依赖地表径流补给，典型区域如博斯腾湖、艾比湖、塔里木河下游湿地等，其生境稳定性由地表水连通性直接决定。水利工程建成运行后，河流源头至下游的水文连续性被削弱，河道流量断裂、水位不规则变化导致部分湿地水源长期枯竭，生态连通廊道遭受破坏。湿地补水能力下降，湿生植物退化、栖息鸟类迁徙路径中断、土壤盐渍化范围扩大等问题集中暴露，生态系统从完整链条演变为碎片化单元，生态功能与生物多样性双重受损。断流湿地失去生态调蓄与生物屏障能力，进一步加剧了区域生态脆弱性。在干旱区脆弱环境背景下，湿地水文连通性的维持需作为水资源配置中的优先方向，保障生态水量供给成为治理体系中的关键任务。

4.2 河道生态过程的径流扰动效应分析

新疆河流普遍属高原型或山源型，生态过程对径流节律依赖度极高，水利工程对流量节律的干预直接影响河道生物链运行机制。工程调度后，河道断流与低流频繁交替，泥沙输运链条被切断，导致河床结构松散或过度淤积，生境稳定性下降。水流速度减缓，水体滞留时间增加，溶解氧含量波动、水温异常升高，直接影响鱼类产卵周期与幼体存活率。生态流量不足还造成岸带退湿、植物退化、底栖动物栖息地缩小等问题，河道从连续动态系统向间歇性封闭系统演变，生态适应能力下降。在绿洲系统发育依赖水系稳定的区域，这种扰动效应还可扩散至灌区边界与生态过渡带，进一步削弱生态屏障功能。

4.3 地表水变化对植被结构演替的推动作用

在新疆干旱区，地表径流过程是维系地表水分供给的关键变量，其变化将直接推动植被群落结构的演替过程。水利工程建设与运行造成水体萎缩、灌溉水源减少、河道湿润带收缩，绿洲边缘植物群落由水生湿生类型向旱生耐盐物种过渡。浅层土壤含水率下降抑制了水分敏感型植物的生长，造成植被覆盖率降低、物种组成单一、生态系统生产力下降。局部地区表现出明显的“绿洲退化—荒漠侵蚀”链式反应，区域碳汇能力弱化，生态系统稳定性下降。地表径流变化不仅通过直接供水影响植被，还通过改变微气候、水盐分布等路径间接控制群落演替方向，是干旱区生态系统演化的重要驱动机制，需在水资源调配中充分考虑生态植被结构的调适需求。

5 水利工程引起的地表径流变化对环境风险的放大效应

5.1 极端干旱或洪涝事件频率的变化趋势

新疆气候干旱、降水稀少且时空差异显著，极端气象事件对地表径流过程影响显著。为缓解季节性水资源不均问题，区域广泛修建水库、引水渠和蓄水池，形成大范围的人控水系格局。这类工程虽短期提升了水资源保障能力，但长期运行导致径流过程扁平化趋势明显，自然调蓄能力弱化。极端暴雨过程中，部分水库调蓄能力接近极限，易引发突发性洪涝灾害。而在连续干旱年份中，输水路径延长、水源地回补不足，土壤干燥化提前，区域水分循环断裂加剧，旱情出现时间提前、持续期延长。洪旱事件不再仅受自然降水控制，工程调度滞后与运行模式非协同成为影响极端风险频次与强度的重要诱因，表现出高度不确定性与快速演化特征。

5.2 径流断续性增强带来的水质退化风险

新疆河流多为山源型水系，流量依赖高山积雪和冰川融水，在水利工程频繁调度下，河道流量出现周期性中断或断续现象。断流期间，水体交换受阻，蒸发量大于补给量，导致水体浓缩效应增强，盐分、污染物及营养物质累积迅速。断续流态也削弱了水体自净能力，形成富营养化高风险区，