

# 南水北调中线工程运行维护中的风险识别与应急响应能力建设

靳潇凯

中国南水北调集团中线有限公司河南分公司 河南 郑州 450000

**【摘要】**：南水北调中线工程是国家水网主骨架与大动脉，通水十余年来累计调水超 776 亿立方米，受益人口近 1.18 亿人，成为沿线地区生命线工程。但随着运行年限增长和外部环境变化加快，运行维护风险因素日益复杂，应急响应能力短板显现。本文从工程运行维护视角，总结中线工程战略价值与运行管理成效，识别运行维护主要风险类型及成因机制，提出构建“技术赋能与体系优化双轮驱动”应急响应能力建设路径，涵盖风险识别与预警平台化建设、应急管理组织体系制度化完善、技术装备与专业队伍梯队式建设以及多主体协同联动机制构建。研究认为，中线工程应以数字孪生和智能化技术为牵引，推动运维模式从被动处置向主动预防转型，完善以防汛、防冰、水质保障为核心的应急管理体系，为保障工程安全、供水安全、水质安全提供制度与技术双重支撑。

**【关键词】**：南水北调；风险识别；数字孪生；运行维护

DOI:10.12417/2811-0528.26.15.072

南水北调中线一期工程于 2014 年 12 月正式通水，干线全长 1432 公里，多年平均年调水量 95 亿立方米，通水十余年来累计调水超 776 亿立方米，受水区覆盖 27 座大中城市，受益人口近 1.18 亿人，已成为沿线地区不可或缺的生命线工程。随着工程运行年限增长、极端天气事件频发及沿线社会经济活动日益密集，运行维护中的风险因素日趋复杂，应急响应能力的短板也逐渐显现。一旦发生较大突发事件导致供水中断或水质恶化，将在政治、经济、社会等方面造成严重影响。因此，系统识别中线工程运行维护中的主要风险类型及其成因，并在此基础上探讨应急响应能力的建设路径，对于保障工程安全、供水安全和水质安全具有重要的理论和现实意义。

## 1 战略价值与运行复杂性

### 1.1 国家水资源配置的战略支点

南水北调中线工程战略价值体现在三层面。在水资源配置上，实现长江流域与华北平原跨区域调配，与东线、西线构成“四横三纵”水网骨架，改善北方水资源条件与承载能力；在民生保障方面，受益人口近 1.18 亿人，北京等特大城市生活用水依赖南水，如北京城区七成以上供水为南水；在生态修复上，工程生态补水使北方农业用水退还，替代超采地下水，遏制地下水超采。南水北调工程是重大战略性基础设施，其安全运行关系国家水资源安全和群众饮水安全。

### 1.2 运行维护的独特性挑战

中线工程运行维护有三方面独特挑战。一是工程构筑物类型多、分布广，干线长 1432 公里，沿线有各类建筑物数千座、

跨渠桥梁 1238 座，不同建筑物失效模式和风险特征不同，对运行维护专业性和精细度要求高。二是工程运行自然环境复杂，穿越多气候带，面临暴雨洪水和冰期输水挑战，目前已成功应对多轮极端天气，极端天气事件频发，这一现象表明，原有的工程设计标准已难以应对当前及未来的风险。三是工程社会经济敏感性高，深度嵌入沿线城市供水体系，供水中断或水质污染会传导为城市运行和公众健康风险，具有高度放大的社会影响。因此，建立系统化风险识别机制和提升高效应急响应能力是保障工程长期安全运行的必然要求。

## 2 主要风险类型与识别难点

### 2.1 自然灾害风险

中线工程为明渠自流输水系统，其安全运行高度依赖水文气象条件。防汛上，工程沿线河渠交叉和左排建筑物是防洪薄弱环节，暴雨时左排渡槽可能因下游河道行洪能力不足、渡槽淤积及糙率增加，导致泄洪能力减小，引发洪水漫槽入渠。如海河“23·7”特大洪水期间，部分河渠交叉和左排建筑物过流，6 座建筑物超警戒水位，防汛考验严峻。防冰方面，冬季冰期输水是中线工程特有的安全挑战，工程科学布设防冰设施，通过专项隐患排查等手段防范冰凌风险，这些措施的有效运转决定冰期输水安全可靠。

### 2.2 工程结构风险

工程结构风险与工程本身的使用年限和服役状态密切相关。中线工程主体已运行超过十年，各类建筑物和机电设备逐步进入老化期。中线工程沿线安装了 10 万余台安全监测仪器、

1万多部相关监控设备,形成了覆盖全线的安全监测网络。然而,监测能力的提升并不能消解工程结构本身存在的固有风险。对于渡槽、倒虹吸和隧洞等大型跨(穿)河建筑物,需要分别进行失效模式分析,识别风险因子并建立统一的风险评价模型。穿黄工程作为中线总干渠的关键性工程,其双层衬砌结构隧洞在内外多因素耦合作用下的长期服役性态演化机理,仍是当前研究的重点和难点。

### 2.3 事故灾难与水质安全风险

事故灾难风险中,跨渠桥梁交通事故引发的水质污染最为突出。中线工程有跨渠桥梁1238座,交通事故致危化品及其他污染物入渠是中线水质保护最大风险源。此类风险发生频率低,但后果严重,具有突发性、不可预见性且处置窗口期短。水质安全风险是贯穿输水过程的系统性风险。源头层面,丹江口水库水质保护涉及上游多省市污染源管控;输水沿线需防范农业面源污染、工业排放、藻类滋生等威胁。中线工程已构建水质监测体系,持续开展常规、藻类和地下水监测等工作,但仍面临多元生物预警、淡水壳菜在线监测等技术难题。

### 2.4 风险识别的双重难点

从风险识别实践看,当前有两个突出难点。一方面,风险动态演变给识别工作带来困难,沿线经济社会发展使工程运行条件改变,左排渡槽防洪风险因子因下游河道后天因素累积升高。另一方面,多风险因素叠加耦合效应未充分认知,极端天气、工程老化、人为事故等风险相互触发、放大,如暴雨洪水增加跨渠桥梁交通事故概率,事故导致的水质污染又叠加在洪水调度压力上形成复合性突发事件,这种效应超出常规风险识别框架,对风险管理体系的系统性和适应性要求更高。

## 3 技术赋能:智慧监测与预警体系

### 3.1 数字孪生驱动的预警预判

应对多元复杂的运维风险,核心路径之一是从技术层面提升监测感知和预警预判能力。中线工程运维正从“被动监测、事后处置”向“主动预警、智能预防”转型,关键技术载体是数字孪生。数字孪生能在虚拟空间精准映射工程运行状态,让运维人员“看到”当下、“预演”未来。冰期输水时,中线公司依托数字孪生冰期输水平台精准预测水温与冰情,为调度提供支撑;防汛时,依托数字孪生平台模拟洪水演进,预判风险、优化调度,结合视频监控与无人机巡查实现立体化监测。“预演”让风险识别成为科学活动,决策者可在虚拟环境推演找最优方案,避免灾害后仓促应对。

### 3.2 “天空地水工”一体化监测网络

在监测感知层面,中线工程构建了“天空地水工”一体化

监测网络。工程沿线设置全封闭隔离网,综合运用北斗卫星等先进技术,结合人工巡查,实现工程运行状态全天候监控。全线超8万个安全监测点位持续采集数据,研判工程安全态势。

在智能运维试点中,部署无人机巢实现自动巡检,配备智能设备自主巡检与识别,摄像机可实时识别人员行为、防范非法入侵。

中线公司从面向数字孪生的基础平台建设向多源数据融合演进——数字孪生南水北调中线2.0强化多源数据融合能力,打破数据壁垒,实现数据集中管理与共享,推动运维模式从“被动监测”向“主动预警”、从“依赖经验决策”向“数据驱动决策”转变。

在工程安全、供水安全、水质安全(以下简称“三个安全”)方面,水质安全预警尤为突出:中线水源公司依托数字孪生丹江口水质安全数据底板和模型库,实现水质安全“四预”(预报、预警、预演、预案)应用,开创了从“人防”向“技防”转变的水质安全创新管理模式,大幅延长水质污染预警时间窗口,为应急响应争取了宝贵缓冲时间。

### 3.3 从被动监测向主动预警转型

技术赋能的最终目标是推动运维模式转型。中线公司提出,要实现从分块人工巡查到融合智能装置、从人为经验判断到量化智能分析、从分散业务管理到集中监控指挥、从传统事后处置到精准预警预判、从粗放人海战术到科学集约管理的五个转变,勾勒出从传统运维向智慧运维跨越的图景。实现转型的关键是将数字孪生、物联网、人工智能等技术嵌入日常运维流程,让风险识别内嵌于全天候智能感知系统,而非依赖运维人员个体经验和突击检查。实时采集关键断面的水位、流量、水质数据并自动比对预警阈值,可提升风险识别的效率和准确性。

## 4 体系优化:应急响应能力的组织与制度保障

### 4.1 安全生产风险管控的制度框架

技术手段不可或缺,但单靠技术无法支撑完整应急响应能力。先进预警系统若无配套组织架构、制度规范和队伍保障,只能停留在技术展示层面。中线工程已初步建立以安全风险辨识管控、防汛和防冰组织、工程安全监测、安全生产监管、工程维修养护体系为核心的完备工程管理体系。在安全生产领域,全面实施水利安全生产风险管控“六项机制”,围绕风险查找、研判、预警、防范、处置、责任等核心环节,前移安全管理关口。该制度框架核心价值是将风险管理从运动式突击检查转变为常态化制度运行,使风险点管控责任落实到具体岗位和人员。

## 4.2 专业应急队伍与预案体系

应急响应能力的组织基础在于专业应急队伍的建设和预案体系的完善。中线工程已配备16支应急抢险队伍，确保大汛大灾和突发事件能够得到及时有效处置。在应急队伍建设方面，关键岗位应涵盖电工、焊工、水泵及管路工、检修维护工等专业工种，形成专业结构互补、实战能力突出的应急力量。在预案体系建设方面，常态化开展各类应急演练已成为制度安排。从冰期前专项隐患排查实行“销号管理”，到针对深挖方渠段外水入渠的应急调度桌面推演，再到跨部门电源故障应急演练，演练类型不断丰富、场景更加逼真。这些演练不仅验证了应急预案的可行性，也强化了多部门之间的协同配合和快速响应能力。需要强调的是，预案的价值不仅在于其文本本身，更在于通过反复演练使预案中的职责分工和操作流程真正内化为应急队伍的条件反射式反应。

## 4.3 应急物资储备与调配机制

应急响应时效性很大程度上取决于物资储备的充分性与可及性。中线工程遵循“分级储备、动态管理”原则，建立标准化应急物资保障体系。冰期输水保障中，沿线布设拦冰索、融冰设备等，配齐装备，保持良好投运状态，抢险队伍全天候热备。防汛物资按足额储备与动态调配结合原则管理，确保关键时刻可用。物资储备关键是平衡充足性与经济性，可探索区域联合和协议储备机制降低成本。

## 4.4 跨区域跨部门协同联动机制

构建跨区域跨部门协同联动机制在组织体系层面值得关注。中线工程运行维护涉及多主体。海河“23·7”洪水期间，众多建筑物过流，部分超警戒水位，仅靠工程管理部门的力量是不够的。南水北调集团与沿线地方建立防汛指挥和河湖长制协作机制，与应急管理部门建立防汛应急协同机制。突发水污染事件中，南水北调中线工程与地方政府联合应对，形成全流程协同机制。水质安全保障方面，健全上下游协同治理和沿线地方联防联控机制，织密水质保护网络。这些机制核心是打破信息壁垒和权责边界，实现资源共享与行动协同。

# 5 全链条能力的衔接与融合

## 5.1 从风险识别到应急处置的链条贯通

风险识别与应急响应构成“风险识别—监测预警—应急准

备—应急处置—恢复重建”完整链条，任何一环断裂都会使应急响应体系失效。风险识别需从零散经验走向系统化知识工程。针对南水北调中线一期工程，已有研究总结建筑物失事模式，识别分析风险类型，得出工程设计单元工程风险列表。中线工程可依托数字孪生平台，构建动态更新的风险库和场景库，让风险识别与实时监测数据等深度关联。

## 5.2 预警与行动之间的有效衔接

监测预警与应急准备需建立精准高效的衔接机制，若预警信息不能转化为行动指令或应急预案与实际不匹配，预警就只是屏幕上的数字和图形。中线工程通过应急指挥系统等联动，实现数值预警到行动指令的快速转化。在冰期输水保障中，保定运维处开展专题培训，“精准识别—靶向培训—实战检验”的衔接模式打通了预警到行动的“最后一公里”。

## 5.3 闭环管理与持续优化机制

应急处置与恢复重建需建立完整闭环管理。中线工程实践表明，对问题隐患建立台账并“销号管理”是有效方法。每次应急响应结束后应提炼经验、反哺体系。通过案例复盘总结，可优化业务流程、校准升级风险识别模型。风险识别与应急响应形成持续自我进化系统。当前中线工程应急管理能力建设面临监测手段不成熟、信息共享机制未打通、基层运维人员应急技能储备不足等约束，需系统化提升。全链条能力提升需通过制度建设等持续投入，在运行实践中迭代优化，使应急响应能力与风险环境动态变化同步。

# 6 结语

南水北调中线工程安全运行关系近1.18亿人饮水安全和国家战略。随着工程运行年限增加、外部环境变化加快，运行维护风险因素复杂，应急响应能力建设成为保障工程安全紧迫课题。加强风险识别与应急响应能力要坚持技术赋能与体系优化双轮驱动：构建“天空地水工”一体化监测网络，推动运维模式转型；完善安全生产管控体系、应急队伍与跨部门协同机制，确保各环节紧密衔接。未来应深化多风险叠加场景评估模型研究，加快人工智能在运维一线应用，完善跨区域协同机制，守住工程、供水、水质安全底线，打造安全韧性现代水网大动脉。

## 参考文献：

- [1] 周书焕,柴刘锦.南水北调中线工程水源区生态环境保护与治理区域协同路径研究[J].中州大学学报,2026,43(02):20-26.
- [2] 刘嘉琪,刘雪梅,孙维亚,等.南水北调中线工程防汛应急智能体研发及应用[J/OL].华北水利水电大学学报(自然科学版),1-12 [2026-05-18].
- [3] 王凤灵,邹可可.南水北调中线工程河南受水区多水源协同调度优化[J].黑龙江水利科技,2025,53(12):138-141.