

# 长距离输水工程运行安全风险辨识与管控体系研究

刘洋

北京市南水北调环线管理处, 北京 100176

DOI:10.61369/ERA.2026060039

**摘 要 :** 北京市域长距离输水隧洞是城市供水安全的关键生命线, 工程深埋城区地下, 地质复杂、环境敏感, 运行风险隐蔽、突发且易连锁扩散。本文针对北京本地输水隧洞, 从结构、水文地质、运行调度、外部环境及人为管理等方面系统识别风险并剖析成因规律。结合北京城区地下空间开发密集的地域特征, 构建“风险辨识—评估分级—监测预警—分级管控—应急保障”一体化管控体系, 提出适配的技术与管理对策, 为保障隧洞安全运行、夯实城市供水安全基础提供理论与实践支撑。

**关 键 词 :** 输水隧洞; 安全运行; 风险辨识; 管控体系; 北京市域

## Research on the Risk Identification and Control System for the Operation Safety of Long-Distance Water Transmission Projects

Liu Yang

Beijing South-to-North Water Diversion Ring Line Management Office, Beijing 100176

**Abstract :** The long-distance water transmission tunnels in Beijing's urban area are the key lifeline for urban water supply security. The tunnels are buried deep underground in the city, with complex geology and sensitive environment. The operational risks are concealed, sudden, and prone to chain diffusion. This paper systematically identifies risks and analyzes the causes and patterns for the local water transmission tunnels in Beijing from aspects such as structure, hydrogeology, operation scheduling, external environment, and human management. Considering the dense regional feature of underground space development in Beijing, an integrated management system of "risk identification – assessment classification – monitoring and early warning – hierarchical control – emergency guarantee" is constructed. Appropriate technical and management countermeasures are proposed to ensure the safe operation of the tunnels and lay a theoretical and practical foundation for strengthening urban water supply security.

**Keywords :** water transmission tunnel; safe operation; risk identification; management system; Beijing urban area

## 引言

作为首都, 北京供水安全直接关系城市运行与民生保障。市域内东干渠、南干渠、团九二期、西四环暗涵等长距离地下输水隧洞, 构成覆盖中心城区、重点功能区及近郊组团的地下输水网络, 承担水源联调、原水输送、应急供水等重要功能, 是城市连续供水的关键基础设施。

北京输水隧洞多采用浅埋暗挖、盾构法施工, 埋于地下, 穿越软硬不均地层、断裂构造及砂卵石层, 且紧邻地铁、高层建筑、市政管网与交通干道, 运行环境复杂敏感。长期运行中, 在高压、水质腐蚀、结构老化、工况变化、外部施工扰动及季节冻融等多重因素作用下, 易出现衬砌开裂、变形、渗漏及设备故障等隐患。由于地下工程隐蔽性强, 一旦发生涌水、渗漏、结构失稳等突发状况, 不仅会造成区域供水中断, 还可能引发地面沉降、道路塌陷、建构筑物受损等次生灾害, 严重威胁城市公共安全。

目前, 北京输水隧洞运行管理已逐步实现制度化、规范化, 但在风险辨识系统性、评估方法针对性、预警体系智能化及管控措施精细化方面仍有提升空间, 且管控多偏重事后处置, 事前预防与过程管控能力相对不足。因此, 结合北京工程实际开展运行期安全风险识别, 构建全链条、可落地的安全管控体系, 对提升供水工程本质安全水平、保障城市供水持续稳定运行, 具有重要现实意义与工程应用价值。

## 一、北京市输水隧洞运行安全风险辨识

### （一）结构安全风险

结构安全是输水隧洞运行的核心管控重点。北京地区输水隧洞主体多采用钢筋混凝土衬砌，在长期内水压力与外水压力作用下，混凝土易出现碳化、表层脱落、裂缝扩展等劣化，削弱结构稳定性，形成渗漏通道，进而引发围岩掏空、衬砌脱空，严重时可能导致局部鼓胀、错台甚至混凝土脱落，直接威胁结构安全。

部分隧洞穿越地质条件不佳区段，围岩自稳能力弱，地下水位变化易引发应力重分布，导致衬砌受力失衡、产生变形；浅埋段受地面荷载、交通振动影响，加剧结构疲劳，使施工阶段遗留裂缝持续扩展。同时，施工期止水带老化、回填不密实、衬砌厚度不足等隐患，在运行中逐步显现，叠加结构劣化形成恶性循环，进一步推高结构安全风险。

### （二）水文地质风险

北京地质条件复杂，输水隧洞建设、运行期间常穿越粉质黏土、砂卵石、风化岩及断裂带，各层渗透性差异较大。汛期强降雨会导致地下水位骤升，隧洞外水压力增大，细小渗漏点易发展为大规模涌水，直接影响结构安全；砂卵石地层渗透性强，地下水流动易带走土体细颗粒，造成围岩流失，引发地面沉降、隧洞结构变形等问题。

冬季低温环境下，隧洞进出口、闸井、弯道等水流多变部位，易出现水面结冰、侧壁挂冰现象，冰块堆积形成冰塞后，会缩小过水断面、抬高局部水位，加剧水流对衬砌结构的冲刷。同时，反复冻融循环会破坏混凝土内部结构，导致其表面开裂、强度下降，缩短结构使用寿命。部分区段地下水含硫酸盐、氯离子等腐蚀性物质，会腐蚀混凝土与钢筋，进一步降低结构耐久性能。

### （三）运行调度与设备风险

输水隧洞正常运行需稳定管控流量、水位、压力，调度方案不合理、运行工况切换过急，易引发水锤现象，对闸门、阀门、伸缩节及衬砌结构造成瞬时强冲击，导致设备与结构损坏。闸门启闭机、电动阀门等关键设备，长期处于地下潮湿、多粉尘环境，易出现锈蚀、卡滞、运行失灵等问题，若日常检修维护不到位，应急时无法正常启用，会导致风险扩大。

监测监控系统是排查隐患的重要手段，渗压、位移、水位等监测设备易出现传感器偏差、数据传输中断、供电异常等故障，监控平台若卡顿、崩溃，将无法实时掌控隧洞运行状态，难以及时排查隐患。此外，备用电源、应急排水等应急配套设施，若性能不达标、维护不及时，突发停电、渗水积水时，会严重影响应急处置效果，错失风险防控最佳时机。

### （四）周边环境与外部扰动风险

北京城区地下空间开发强度大，输水隧洞沿线常涉及基坑、地铁、市政管线、道路改造等施工。近距离深基坑卸荷、降水及爆破振动会改变周边土体受力，引发地层变形，直接危及隧洞结构安全；地面重车、地铁运行等持续振动，会加速衬砌裂缝扩展与结构松动，降低整体稳定性。

部分隧洞周边老旧污水管破损、雨污混排，污水渗漏易经土层薄弱区进入输水通道，污染原水水质。极端强降雨时，地表垃圾渗滤液、农业面源污染等也会沿地层空隙渗入，给城市供水水质带来安全隐患。

### （五）人为操作与管理风险

人为因素是隧洞运行中常见且可管控的风险。巡检人员专业与安全意识不足，易漏检早期隐患；检修作业不规范、关键环节管控不严，易引发安全事故。部分运维单位重抢修、轻预防，隐患整改不及时、闭环不到位，易造成隐患升级。

管理制度不完善、职责不明、台账不完整会使管控流于形式。应急演练缺乏针对性、部门协同不畅，处置突发情况时易滞后失当，扩大事故影响。

## 二、风险评估与分级

结合北京地区输水隧洞实际现状，本文采用风险矩阵评价法，从隐患发生概率、灾害影响程度两大维度开展量化分析，将隧洞运营安全风险划分为四级，依次为重大风险、较大风险、一般风险与低风险。

### （一）重大风险（Ⅰ级）

判定标准：该等级风险发生概率较高，一旦爆发会造成隧洞主体结构损坏、大范围渗水、区域供水中断，还易引发地面沉降、周边市政配套设施损毁等严重后果，直接威胁工程整体安全。

适用范围：主要针对北京输水隧洞地质条件复杂、结构稳定性薄弱、承担核心输水任务的关键段落及重要枢纽节点。

案例分析：以某处地质复杂隧洞段落为例，该区域土质松散，同时存在断层破碎带，经风险矩阵评估为重大风险等级。该区域曾出现结构失稳渗水问题，若未及时管控，极易引发隧洞局部坍塌、供水管破损，造成停水、路面沉降等问题，严重威胁用水与公共安全，需立刻开展全天候巡查、堵漏加固等应急防护措施。

### （二）较大风险（Ⅱ级）

判定标准：此类风险出现概率适中，隐患发作易造成隧洞局部结构破损、核心设备停运、输水水质不达标，对日常输水调度工作造成明显阻碍。

适用范围：涵盖北京输水隧洞常规地质路段、主要设备集中区域，以及极易受外界施工干扰的薄弱部位。

案例分析：隧洞核心闸阀设备因常年运转，易出现老化，整体出险概率中等。设备故障会造成输水流量下降、水压波动异常，虽不会造成全城停水，但严重影响居民日常用水，必须在规定时间内完成设备检修，同步做好动态监测，防止隐患进一步升级。

### （三）一般风险（Ⅲ级）

判定标准：该类风险危害较轻，不会影响隧洞整体供水运行，仅对局部区域造成轻微影响。

适用范围：涵盖隧洞附属设施、次要非主体结构，以及日常运维中可快速处理的普通轻微隐患区域。

案例分析：隧洞照明线路接触不良为日常常见小隐患，仅影响局部照明使用，不损害工程结构、输水能力与供水水质。该类问题归入日常养护即可，经排查检修、更换配件便可完成整改，无需启动专项应急处置工作。

### （四）低风险（Ⅳ级）

判定标准：此类风险发生概率低、影响范围有限，不会对隧洞结构、输水运行及城市供水造成实质危害。

适用范围：主要涵盖地质条件稳定、无外部施工干扰的常规输水路段，以及各类辅助配套设施区域。

案例分析：花岗岩稳定地层区间排水槽产生轻微水垢堆积，该区域地质稳定、无外界干扰，隐患发生率极低，不会影响输水效率、结构安全与供水水质，仅需日常巡检登记清理，无需专项整改处置。

经综合评估，北京输水隧洞高危隐患主要集中在地质薄弱段结构失稳、周边施工干扰、冬季冰塞水位上涨、核心设备故障等部位，是安全管控核心重点，需长期开展全天候高标准常态化防护管理。

### 三、输水隧洞运行安全管控体系构建

#### （一）全周期隐患排查机制

建立日常巡查、月度排查、季度检测、年度评估的一体化动态隐患排查机制。工作人员日常检查隧洞结构、渗漏、冰冻及设备运行状况，每月全面排查整治隐患，每季度开展结构形变、渗压、设备振动专项检测，每年结合地质、工况及外界环境开展整体安全分析，建立动态闭环隐患台账，做到风险提前排查、及时发现、快速处置。

#### （二）全域智能监测预警体系

搭建一体化智能监测网络，在重点路段、高风险区域布设位移、水压、水位、水质、冰情等各类感知设备，实现监测数据自动采集、实时传输、云端存储汇总。依托智慧水务管理平台，设置蓝、黄、橙、红四级预警机制，数据超标自动推送预警提示，实现风险提前预判、及时告警、快速响应。

#### （三）分级分类精准管控措施

依据风险等级实施分级管控：重大风险区域落实24小时专人值守，加密监测频次，做好结构加固、减震防护，严控周边高危施工；较大风险限期完成整改，做好设备更换、结构修缮与输水调度优化；一般风险纳入日常养护，及时处理微小隐患、定期维护设备；低风险以常规巡查、台账登记管理为主，防范小隐患逐步升级。

#### （四）应急处置多方联动体系

针对隧洞渗漏、冰堵积水、突发涌水、水质异常等隐患问题，制定专项应急预案，明确处置流程、岗位职责与处置要求。配齐专业抢险人员与应急物资并定期维护，完善多部门协同联动模式，定期开展应急演练，提升整体应急处置水平，高效稳妥化解各类突发险情。

#### （五）运维管理长效保障体系

健全输水隧洞安全管理制度，细化管理细则，明确各级人员岗位职责，统一巡检、整改、考核相关标准。逐级压实安全责任，落实全员管控职责。加强运维人员专业培训，定期开展风险排查、设备操作、应急实操学习，全面提升工作人员综合业务能力。

### 四、结论

#### （一）风险整体特征

北京城区长距离输水隧洞运营安全，受地质环境、工程结构、调度方案、外部环境、人为管理等多重因素叠加影响，整体隐患具备隐蔽性强、诱因繁杂、突发概率高、管控难度大、标准要求严的显著特点。

#### （二）整体管控框架

构建风险识别研判、分级评定、监测预警、分级管控、应急兜底全链条一体化管控体系，是防范输水隧洞运营隐患、保障工程长期平稳运行的核心举措。

#### （三）核心管控要点

1. 完善全流程隐患排查机制，全面消除各类安全隐患；
2. 优化智能监测预警设施，强化风险预判预警水平；
3. 推行分级精准管控模式，针对性开展隐患治理；
4. 健全多方应急联动体系，增强突发事件处置效率；
5. 筑牢日常运维管理根基，保障工程长期稳定运行。

#### （四）后期管控重点

结合北京城区建设密集、地质条件复杂的现状，后续重点开展管控工作：严控周边施工带来的外界干扰，减少环境破坏影响；落实冬季防冻防寒措施，保障冬季输水运行安全；整治各类结构病害，根除工程主体安全隐患；推进智慧运维体系建设，全面增强风险防控成效。

#### （五）总体管控目标

推行隐患闭环全流程管控，实行隐患上报、登记、整改、复核、销号全程溯源管理，提升隧洞运维管理规范精细化程度。同时强化人员专业素养与安全意识，落实各项管控措施，保障北京输水隧洞安全平稳长效运转，守住城市供水安全红线，为城市发展和居民用水提供稳定水资源保障。

### 参考文献

- [1] 汝俊起. 团九二期输水隧洞工程运行安全防控实践 [J]. 北京水务, 2022(06): 31-35.
- [2] 陶海军. 北京市东干渠输水隧洞安全监测与风险管控分析 [J]. 水利发展研究, 2021, 21(03): 89-93.
- [3] 北京市水务局. 北京市地下输水设施运行安全管理办法 [Z]. 2020.
- [4] 李萌. 北京城区闭环输水隧洞结构安全隐患排查与治理 [J]. 水利技术监督, 2023(02): 187-190.
- [5] 李保元. 北京市南干渠输水隧洞运行维护关键技术研究 [J]. 北京水务, 2019(04): 45-48.
- [6] 李硕. 城市密集区输水隧洞周边施工扰动风险管控 [J]. 水利建设与管理, 2024, 44(01): 78-82.
- [7] 李雪梅. 北京地区输水隧洞冬季冰期运行风险防控措施 [J]. 水利科技与经济, 2023, 29(08): 102-105.
- [8] 王健. 浅埋式输水隧洞结构劣化机理与修复技术 [J]. 水利水电技术, 2022, 53(S1): 123-128.
- [9] 北京市水务安全生产管理中心. 北京市水务工程运行安全风险辨识导则 [Z]. 2021.
- [10] 李阳. 城市地下输水隧洞智能化监测预警系统构建 [J]. 自动化与仪器仪表, 2023(05): 176-179.