

隧洞涌水危险性分析——以涌水量大小为主

李宗伍

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年9月21日; 录用日期: 2026年10月12日; 发布日期: 2026年10月23日

摘 要

隧洞涌水危险性并不只取决于涌水量绝对值, 还受纵坡、洞径、洞段空间位置、支护与堵排措施、围岩类别、地质构造和施工方法共同控制。富水岩溶、断层破碎带、管道型富水构造和深埋高外水压力洞段中, 即使涌水量相同, 其致灾后果也可能明显不同, 甚至演化为突水突泥。本文根据当前文献并结合深埋长距离输水隧洞的工程特点, 建立“涌水量阈值-隧洞类型-地质条件-处置措施”综合划分思路, 并提出施工期分区预报、TBM超前探测、反坡排水、注浆堵水、监测预警和应急管控建议。综述认为: 单纯以全洞平均涌水量划分风险容易低估掌子面瞬时突涌水、断层导水和反坡排水失效风险; 对于深埋长距离有压输水隧洞, 应同时采用总涌水量 Q 、单位长度涌水量 q 、峰值增长率、外水压力、围岩稳定性和排水冗余度作为动态判据。

关键词

隧洞涌水, 涌水量, 突水突泥, 反坡排水, 岩溶, 断层破碎带, 深埋长距离输水隧洞

Hazard Analysis of Tunnel Water Inrush with Emphasis on Inflow Magnitude

Zongwu Li

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: September 21, 2026; accepted: October 12, 2026; published: October 23, 2026

Abstract

The hazard of tunnel water inrush is not determined solely by the absolute inflow magnitude; it is also jointly governed by the longitudinal gradient, tunnel diameter, spatial position of the tunnel section, support and plugging-drainage measures, surrounding-rock class, geological structure, and construction method. In water-rich karst, fault fracture zones, pipe-type water-rich structures, and deep sections with high external water pressure, even with the same inflow, the disaster consequences

may differ markedly, or even develop into water and mud inrush. The review is based on the available literature and the engineering characteristics of deep, long water-conveyance tunnels. A combined framework of “inflow thresholds, tunnel type, geological condition, and control measures” is proposed. Recommendations are also given for zoned prediction during construction, advance probing ahead of TBM excavation, counter-slope drainage, grouting and water blocking, monitoring and early warning, and emergency control. The analysis indicates that risk may be underestimated when only the average inflow of the whole tunnel is used, because transient water inrush at the face, water-conducting faults, and failures of counter-slope drainage can govern the consequences. For deep, long, pressure water-conveyance tunnels, total inflow Q , unit-length inflow q , peak growth rate, external water pressure, surrounding-rock stability, and drainage redundancy should be used together as dynamic criteria.

Keywords

Tunnel Water Inrush, Inflow Magnitude, Water and Mud Inrush, Counter-Slope Drainage, Karst, Fault Fracture Zone, Deep, Long Water-Conveyance Tunnel

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



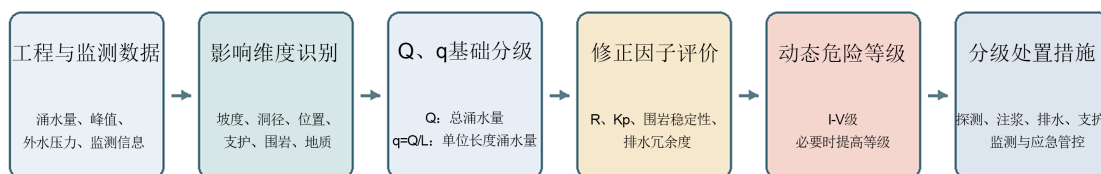
Open Access

1. 引言

隧洞开挖改变地下水径流边界和围岩应力状态,地下水沿节理裂隙、断层破碎带、岩溶管道、层间软弱面或施工扰动区向洞内汇集,形成渗水、滴水、股状涌水、集中突水乃至涌水突泥。文献普遍表明,涌水危险性具有明显的“水量-通道-压力-围岩-施工响应”耦合特征。付登文[1]以岩溶隧道为例指出,不同降水条件下涌水量差异显著,极端气候条件下预测涌水量可由数千立方米每天增至数万立方米每天,最大可达 $58,093 \text{ m}^3/\text{d}$,断层部位涌水量可达 $10,723 \text{ m}^3/\text{d}$ 。李俊[2]基于列白妥隧道研究认为,岩性、构造、地下水赋存状态和工程因素共同决定涌水风险,降雨量与涌水量存在非线性响应,随机森林模型对涌水量预测的拟合效果较好。张付军等[3]针对富水断层隧道提出,A、B级大量涌水宜采用导水洞排水与注浆堵水相结合,C级可采用注浆,D级及以下可采用常规抽排水。

深埋长距离输水隧洞通常穿越复杂地质体,具有埋深大、可溶岩和软质岩分布广、构造背景复杂、岩溶水文地质条件特殊和地应力水平较高等特点[4]。施工过程可能同时面临突涌水突泥、软岩大变形、高外水压力、硬岩岩爆和超硬岩掘进等复合风险。对于采用多工作面或TBM协同施工的长距离隧洞,应将涌水量预测与施工组织、安全监测和应急处置统一考虑,见图1。

以涌水量为主线的隧洞涌水危险性分析框架



核心逻辑: 基础水量等级反映排水负荷, 修正因子反映致灾条件与后果放大效应

Figure 1. Framework for hazard analysis of tunnel water inrush with inflow magnitude as the main line
图 1. 以涌水量为主线的隧洞涌水危险性分析框架

2. 不同条件下隧洞涌水危险性分析

2.1. 不同隧洞角度或坡度条件下的涌水危险性

隧洞坡度首先影响施工排水方式。顺坡施工时,洞内水可依靠重力排至洞外,涌水量增大主要表现为水沟断面、沉淀池和下游排放能力不足;反坡施工时,涌水必须依靠集水坑、移动水箱、泵站和管路逐级抽排,一旦水泵、供电或管路系统失效,水量会在掌子面和低洼段迅速积聚,造成淹井、设备停机、围岩软化和作业面失稳。张铎等[5]关于单线大坡度铁路隧道反坡排水的研究指出,辅助坑道最大坡度可达 10.77%,涌水量差异大,必须按最大排水量配置水泵,并增加约 15%安全系数,水泵应按“工作泵 + 备用泵 + 检修泵”成套配置。卢超[6]、解攀[7]依托太岳山隧道大坡度斜井研究表明,斜井最大坡度为 -14.2%,局部段落达到强富水隧道标准,掌子面积水深度可达 50 cm,导致围岩快速软化、掉块和小型塌方;因此反坡排水系统不仅是排水设施,也是围岩稳定控制措施。刘辉[8]、王杨盛[9]分别对大坡度斜井辅助富水隧道排水和 TBM 施工反坡排水设计进行了研究。

坡度还影响 TBM 掘进时开挖面稳定。杨馨茹等[10]以不同坡度 TBM 隧道为对象,设置 10‰、30‰、40‰、50‰等工况,发现坡度增大后开挖面轴向应力和纵向变形增大,纵向变形较大区域逐渐下移,开挖面稳定性降低;文中建议在坡度地段采取超前支护、跟进支护、注浆加固等措施。该结论虽主要针对开挖面力学稳定,但对涌水危险性同样重要:当坡度增大、掌子面稳定性下降时,富水裂隙或断层被揭露后的冲刷、坍塌和泥化概率上升,涌水容易由“水害”演化为“水-泥-块石”复合灾害。

从危险性角度看,坡度条件下应将同一涌水量分为不同危险等级:顺坡洞段 $Q < 2000 \text{ m}^3/\text{d}$ 时通常可通过常规水沟和泵站控制;反坡洞段即便 Q 为 $500 \sim 2000 \text{ m}^3/\text{d}$,也可能因泵站容量不足、管路堵塞或停电导致中等以上风险;当反坡洞段 $Q > 10,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 或单位长度涌水量 $q > 18 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 时,应视为高危至极高危,必须进行超前探放水、分级泵站、双回路供电、备用管路和应急水仓联合设计。

2.2. 不同隧洞洞径条件下的涌水危险性

洞径改变开挖扰动范围、渗流边界面积、支护闭合时间和洞内排水布置空间。小洞径隧洞断面小,单位断面容水空间有限,管路、水沟、泵站和人员避险空间受限;一旦发生集中涌水,水深上升速度快,施工组织和应急撤离难度较大。孙强等[11]关于小洞径双护盾 TBM 隧洞洞径优化的研究指出,国内直径小于 4m 的深埋长隧洞双护盾 TBM 工程较少,洞径、刀盘直径、管片预留变形量和支护体系相互制约。对涌水危险性而言,小洞径并不意味着总涌水量一定更大,但单位断面水深增长更快,排水与支护可布置空间更紧,危险性具有“低容错”特点。

大洞径和超大直径隧洞则具有另一类危险性。相关超大直径 TBM 工程研究表明,超大直径开挖会增大掌子面暴露面积、围岩卸荷范围和潜在渗流入口。一旦穿越岩溶管道或断层导水带,集中涌水冲刷范围更大,支护体系受到更高水压和更大围岩变形作用。同时,超大直径 TBM 后配套系统长、设备多,涌水会影响皮带出渣、电气系统、管片安装、锚喷支护和连续掘进效率。

因此,洞径条件下的涌水危险性可概括为:小洞径重在控制“快速积水和逃生空间不足”,中等洞径重在常规排水能力与支护闭合,大洞径及超大直径重在“揭露面积大、涌水突变大、支护和设备系统受影响范围大”。在划分危险性时,除 Q 外还应引入 Q/A 或水深上升速率,其中 A 为洞室有效过水断面或可蓄水断面。对 TBM 工程,还应评价排水管路和后配套布置是否具备独立冗余,防止一处涌水造成全系统停机。

2.3. 隧洞不同位置条件下的涌水危险性

隧洞位置可从线路水文地质位置、洞段施工位置和上下游水力边界三个层面理解。在线路水文地质

位置上,补给区、径流区、排泄区、向斜核部、河谷下穿段、可溶岩与非可溶岩接触带、断层交汇部位的危险性差异显著。已有超长输水隧洞线路比选研究[12]指出,强可溶岩区的岩溶水系统通常由补给区经径流区向排泄区运移;线路穿越不同水文地质分区时,遭遇岩溶水系统管道的概率和涌水突泥风险不同。此类研究还将 $q > 18 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 的涌水洞段作为重要地质因素,说明单位长度涌水量对于长隧洞风险识别具有实用意义。

在洞段施工位置上,上游段、下游段、平洞、斜井、竖井、联络通道、施工支洞和主洞交汇处的危险性不同。反坡斜井低点、掌子面附近和泵站之间是积水最易聚集的部位;竖井和深竖井则对水压、水量和提升排水能力更敏感。当长距离隧洞采用深竖井、施工支洞或多台 TBM 协同施工时,上游掌子面突涌水可能经支洞或主洞向低点汇集,并影响其他工作面、竖井施工和穿越建筑物段安全,因此需将局部涌水事件视为施工系统性风险。

从上下游水力边界看,有压输水隧洞在运营期还受外水压力 and 内水压力耦合影响。既有研究[13]表明,深埋隧洞的高外水压力主要分布于深部岩溶地层、导水断裂带、褶皱核部及富水层过沟段,其水压可达 MPa 级。施工期当洞段位于富水含压层下方、邻近河谷或水库、或处于断层导水带时,即使尚未形成超大涌水量,也应提前按高危险性管理,因为水力边界稳定补给可能导致长时间持续涌水。

2.4. 不同支护情况下的涌水危险性

支护措施对涌水危险性的影响体现在两个方面:一是控制围岩变形和坍塌,防止涌水通道扩大;二是通过注浆、衬砌、堵水圈和排水系统调节水压与水量。无支护或支护滞后条件下,富水破碎围岩易在渗流力作用下颗粒流失,发生拱顶掉块、掌子面坍塌、底鼓或突泥。初期支护不足时,裂隙水沿喷层背后和钢拱架接触面集中渗流,可能诱发喷层开裂和围岩软化。二次衬砌、管片或钢管片在高外水压力下若缺乏有效排水或抗水压设计,则可能出现渗漏、衬砌开裂或结构局部失稳。

张付军等[3]比较导水洞排水、注浆堵水和排堵结合措施后提出:富水断层隧道发生 A、B 级大量涌水时,应同时采取导水洞排水和注浆堵水的排堵结合措施;导水洞宜设在近断层处,且与隧道相对距离为 $0.75(D + l)$,注浆圈厚度控制在 7 m 以内,注浆圈相对渗透系数比不超过 10;C 级涌水可采取注浆措施,注浆厚度不低于 3 m;D 级及以下涌水可采取常规抽排水。该研究说明,支护和堵排措施不是简单越强越好,而要兼顾降水、减压、围岩稳定和地下水环境。

在 TBM 施工中,支护形式与机型密切相关。敞开式 TBM 支护灵活,便于遇不良地质时采取超前钻探、锚喷、钢拱架、管棚和注浆,但开挖面与洞壁暴露时间较长;护盾式 TBM 对围岩扰动小、掘进效率高,但在突涌水、软岩大变形和断层破碎带中可能出现卡机、管片上浮、注浆不密实和后配套受淹。相关超大直径 TBM 工程研究[14]建议配置超前地质预报系统、多功能超前钻机、法向预应力锚固钻机、双护盾 TBM 锚网喷支护系统和智能管控平台,以降低超大直径 TBM 在复杂地质中的支护与水害耦合风险。

2.5. 不同围岩情况下的涌水危险性

围岩类别决定裂隙发育、透水性、抗冲刷能力和自稳时间。完整坚硬岩体透水通道少,常规渗漏风险较低,但一旦被高地应力卸荷裂隙、构造裂隙或断层切割,可能形成高压裂隙水集中突涌;软岩、膨胀岩和断层泥则渗透性不一定最高,但遇水后强度迅速降低,易形成变形、挤出、底鼓和支护开裂。王祥[15]关于长大坡度隧道膨胀岩地层分区排水的研究表明,膨胀岩地层中排水分区、围岩软化和支护控制相互关联,不能仅以排水量大小判断风险。

已有研究[16]指出,隧洞穿越软岩洞段或断层软弱带,在地应力条件下可能产生塑性挤压变形,导致

围岩破坏和 TBM 卡机；软岩大变形多位于断裂软弱带和局部超深埋软岩洞段。邹勇等[17]进一步引入软岩大变形分级判别方法，利用地应力实测数据反演隧洞全线地应力特征，并量化地层时代、结构面、岩石强度、岩层厚度和岩体完整性等指标。对涌水危险性而言，软岩大变形会压缩排水沟和管路空间，破坏初支和衬砌防排水体系，使本来可控的渗水变成持续病害。

围岩条件下的危险性判别可采用以下逻辑：Ⅱ、Ⅲ级完整围岩在低水量条件下危险性较低，但在高外水压力、断层影响带或岩爆裂隙发育区应提高等级；Ⅳ、Ⅴ级破碎围岩即使 Q 不大，也因自稳时间短、抗冲刷能力弱，应按中高风险管理；软岩、膨胀岩、断层泥和含泥夹层遇水软化明显，需将“涌水量 + 围岩软化敏感性”作为判据；可溶岩围岩应重点识别溶洞、溶隙、岩溶管道和暗河系统，因其涌水量具有突发性和强非均质性。

2.6. 不同地质条件下的涌水危险性

不同地质条件是涌水危险性的根本控制因素。岩溶地层中，水量受降雨补给、岩溶发育带、地下水动力分带和管道连通性控制，具有强烈时空不均匀性。付登文[1]研究的岩溶隧道在极端干旱、枯水期、丰水期和极端降水条件下，涌水量从 $6578 \text{ m}^3/\text{d}$ 到 $58,093 \text{ m}^3/\text{d}$ 变化，说明岩溶隧道涌水风险必须与降雨和季节性补给联系起来；其研究还将部分洞段划为 A 级高风险段，并建议避开丰水期施工，采用疏、排、导水为主并充分考虑抗水压衬砌。

断层破碎带和裂隙密集带是非可溶岩隧洞突涌水的主要通道[18]。张付军等[3]认为，非可溶岩隧洞突涌水本质上是开挖或爆破扰动触发赋存在破碎带或软弱带中的水和碎屑物，在水压力作用下向洞内释放。富水断层的危险性不仅取决于涌水量，还取决于断层带宽度、充填物颗粒组成、渗透系数、断层与地表水或含水层连通性、围岩完整性以及施工扰动强度。

管道型富水构造的危险性更高。许煜林[19]以管道型富水构造隧道涌水突泥为对象，指出岩溶地区常发育复杂地下水网络，管道型富水构造在隧道施工中极易诱发涌水突泥，且灾害预警难度大，需要建立灾变前兆信息。此类条件下，常规钻孔若未命中管道，可能低估风险；一旦掌子面或洞壁揭露管道，水量和水压可能瞬时释放，形成高流速冲刷和泥砂搬运。

高外水压力深埋洞段则具有“水压高、补给稳定、处置代价大”的特点。相关研究建议高外水压力问题遵循“以堵为主、限量排放”原则，并综合考虑地下水环境影响。对于深埋长距离有压输水隧洞，施工期若过度排水，可能引起地下水环境扰动；若单纯堵水，又可能增大衬砌和支护水压。因此，深埋富水洞段宜采用“超前探测 - 预注浆 - 限量排放 - 抗水压衬砌 - 长期监测”的组合模式。

3. 基于涌水量的危险性划分

3.1. 划分原则

已有文献中对涌水风险分级的指标并不完全一致。付登文[1]采用水文地质、构造、降雨和涌水量综合判定岩溶隧道 A、B 等风险段；张付军等[3]采用 A、B、C、D 级涌水与治理措施对应；已有长距离输水隧洞线路比选研究[12]采用 $q > 18 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 的单位长度涌水指标识别重要涌水问题；李俊[2]采用 AHP-熵值法，将岩性、构造、地下水赋存和工程因素纳入综合评价。综合这些研究，本文建议按以下原则划分：

第一，以施工期最大日涌水量 Q 为基础指标，反映排水系统总负荷。

第二，以单位长度涌水量 $q = Q/L$ 作为长隧洞分段指标，避免全洞平均值掩盖局部高风险。

第三，对反坡、竖井、小洞径、TBM 后配套受限洞段，引入排水冗余度 R ，即设计排水能力与预测最大涌水量之比。 $R < 1.3$ 时即使 Q 不大也应提高风险等级。

第四，对岩溶管道、断层破碎带、高外水压力洞段，引入突变系数 K_p ，即短时峰值流量与正常流量

之比； K_p 高的洞段应按峰值而非平均值管理。

第五，将围岩稳定性作为后果放大系数。IV、V级围岩、软岩大变形、膨胀岩、断层泥和泥质充填岩溶洞段应至少提高一级。

3.2. 以涌水量为基础的危险性等级

Table 1. Classification table of water inflow hazard levels
表 1. 涌水量危险性等级划分表

等级	建议涌水量判据	典型表现	基本危险性	主要处置思路
I 低危险	$Q < 500 \text{ m}^3/\text{d}$, 且 $q < 5 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$	滴水、线状渗水, 局部湿润	对施工扰动小, 常规排水可控	常规水沟、集水坑、巡查监测
II 中等危险	$Q = 500\sim 2000 \text{ m}^3/\text{d}$, 或 $q = 5\sim 18 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$	股状涌水、局部积水, 反坡段需机械排水	可能影响掌子面作业和初支质量	分段集水、移动泵、备用泵、清污分流
III 高危险	$Q = 2000\sim 10,000 \text{ m}^3/\text{d}$, 或 $q > 18 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$	连续涌水, 泵站负荷大, 围岩软化明显	易造成停机、塌方、支护开裂	超前预报、预注浆、分级泵站、双电源
IV 极高危险	$Q = 10,000\sim 30,000 \text{ m}^3/\text{d}$, 或断层/岩溶集中涌水	大量涌水或突涌水, 可能伴泥砂	有淹井、突泥、设备受淹和人员风险	排堵结合、导水洞、抗水压衬砌、应急水仓
V 灾变危险	$Q > 30,000 \text{ m}^3/\text{d}$, 或短时峰值突增、管道型富水构造	高压突水突泥、涌砂、掌子面失稳	可能形成重大施工灾害	停掘处置、长距离超前探放、帷幕注浆、专项应急

上述阈值(见表 1)为文献综合和工程管理建议值, 不宜机械套用。对于岩溶区, 付登文[1]研究中 $6578 \text{ m}^3/\text{d}$ 已属于极端气候下明显风险涌水, 而 $58,093 \text{ m}^3/\text{d}$ 应纳入灾变危险; 对于断层穿越部位, $10,723 \text{ m}^3/\text{d}$ 已需要高等级防控。对于深埋长距离输水隧洞线路比选中使用的 $Q > 18 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 指标, 可作为长距离输水隧洞“高危险起算线”, 尤其适用于分段比较, 见图 2。

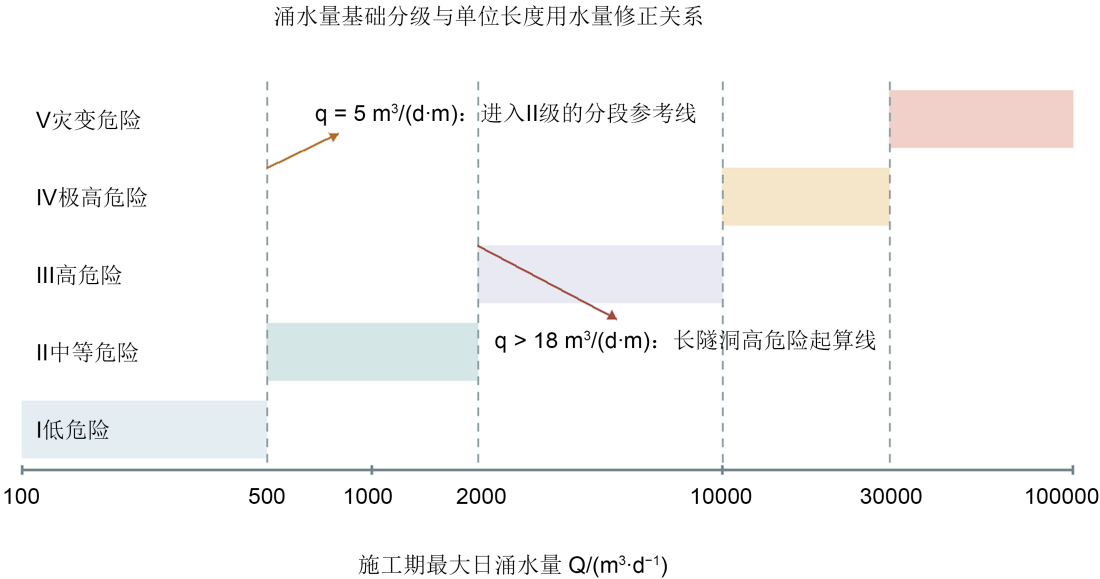


Figure 2. Basic classification of water inflow and its correction by unit-length inflow
图 2. 涌水量基础分级与单位长度涌水量修正关系

3.3. 不同隧洞类型下的危险性修正

Table 2. Hazard level correction table for different tunnel types

表 2. 不同隧洞类型危险性修正表

隧洞类型	同等 Q 下风险修正	原因	管控重点
顺坡钻爆隧洞	可不修正或降低半级	重力排水条件较好	水沟能力、沉淀排放、掌子面局部封堵
反坡斜井或反坡主洞	提高 1 级	依赖泵站、供电和管路，积水后果大	分级泵站、备用泵、备用电源、应急水仓
竖井及深竖井	提高 1~2 级	水头大、提升排水困难、人员撤离路径单一	大扬程排水、井底水仓、提升系统防淹
小洞径 TBM 隧洞	提高 0.5~1 级	作业空间和蓄水空间小，排水布置受限	管路冗余、快速撤离、后配套防水
超大直径 TBM 隧洞	高 Q 时提高 1 级	揭露面积大，设备系统复杂，支护闭合要求高	超前探测、支护快速闭合、设备防水隔离
有压输水隧洞	高外水压力段提高 1 级	外水压力与运营结构安全相关	抗水压衬砌、限量排放、长期渗压监测

该修正(见表 2)体现了“同量不同险”。例如 $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{d}$ 在顺坡完整围岩洞段可为中等危险，但在小洞径反坡 TBM 洞段可能已经构成高危险； $Q = 8000 \text{ m}^3/\text{d}$ 在普通顺坡洞段可按高危险管理，但在岩溶管道、断层破碎带、竖井底部或多种地质风险叠加区，应按极高危险组织施工。

3.4. 不同地质条件下的危险性划分

Table 3. Hazard classification table under different geological conditions

表 3. 不同地质条件下的危险性划分表

地质条件	水害机制	分级建议	典型防控措施
完整硬岩、弱裂隙水	裂隙渗流，水量较小	以 Q 分级为主	常规排水、局部封堵
裂隙密集带	裂隙网络导水，局部集中	Q 达 II 级时按 III 级预控	超前钻探、径向注浆、初支封闭
断层破碎带	断层导水、充填物流失	Q 达 III 级时按 IV 级预控	排堵结合、导水洞、帷幕注浆
可溶岩岩溶区	溶洞、溶隙、暗河突涌	以峰值 Q 和 q 分级，降雨期提高 1 级	多方法预测、避开丰水期、探放水
管道型富水构造	高连通管道瞬时释放	直接按 IV~V 级预控	长短结合超前预报、止浆墙、分段揭露
软岩、膨胀岩、断层泥	水致软化、挤压、底鼓	Q 达 II 级时按 III 级预控	快速支护、让压支护、分区排水
高外水压力深埋段	高水头补给、结构受压	外水压力 $> 1 \text{ MPa}$ 时提高 1 级	以堵为主、限量排放、抗水压衬砌

在前文地质条件分析的基础上，表 3 进一步将各类地质条件对应的水害机制、涌水量分级建议与典型防控措施对应起来：完整硬岩和弱裂隙水洞段以 Q 分级为主；裂隙密集带、断层破碎带宜在 Q 分级基础上按水害机制提高一级预控；可溶岩岩溶区应同时考虑峰值 Q 和 q，并在降雨期提高一级；管道型

富水构造连通性好、瞬时释放风险高，宜直接按 IV~V 级预控；软岩、膨胀岩和断层泥遇水软化明显，需按水致软化机制提高一级；高外水压力深埋段则以水压阈值主导，外水压力大于 1 MPa 时提高一级。工程应用时，应结合超前地质预报和涌水量观测结果对分级进行校核和动态调整，避免机械套用。

3.5. 综合危险性矩阵

综合危险性可用“基础涌水等级 + 修正因子”表达(地质条件划分见表 3)。基础等级由 Q 和 q 确定；修正因子包括：反坡或竖井 + 1；岩溶管道或富水断层 + 1；IV、V 级围岩或软岩大变形 + 1；外水压力大于 1 MPa + 1；排水冗余度 $R < 1.3$ + 1；处于丰水期或暴雨后 + 1。累计修正后最高不超过 V 级。该方法的优点是便于施工现场动态调整。例如：

$Q = 1200 \text{ m}^3/\text{d}$ ，基础为 II 级；若位于反坡斜井、V 级围岩且排水冗余度不足，则修正为 IV 级。

$Q = 8000 \text{ m}^3/\text{d}$ ，基础为 III 级；若位于断层破碎带并伴高外水压力，则修正为 V 级。

$Q = 400 \text{ m}^3/\text{d}$ ，基础为 I 级；若位于软岩大变形洞段且初支开裂渗漏明显，可修正为 II~III 级。

$Q = 20,000 \text{ m}^3/\text{d}$ ，基础为 IV 级；若位于岩溶管道、丰水期且反坡排水，则按 V 级停掘处置。

针对达到 III 级及以上、或因修正因子升级的高风险洞段，建议将预报、控水、排水、支护和监测组织为连续控制链[20]，见图 3。

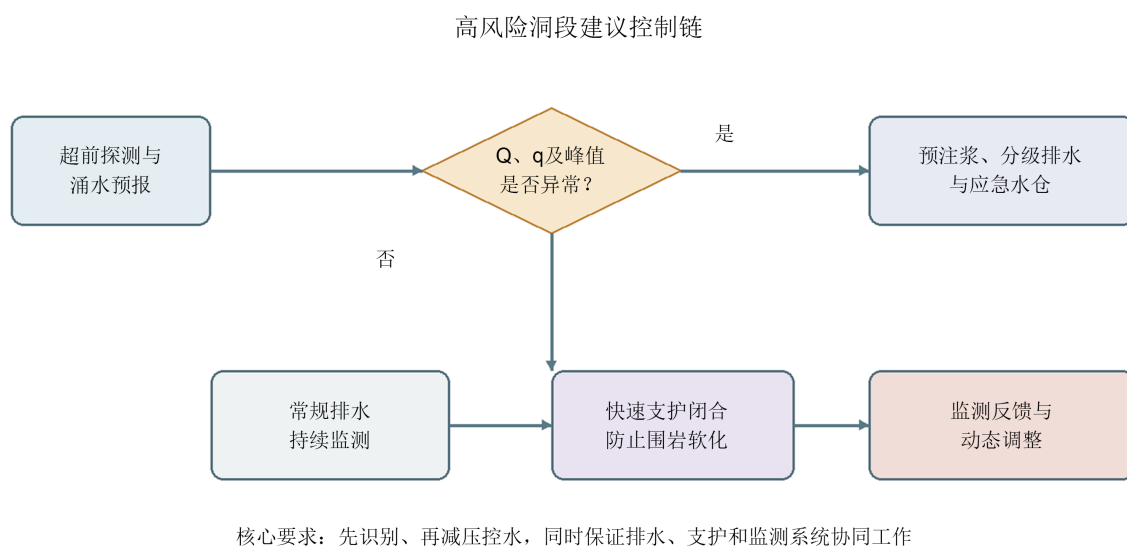


Figure 3. Recommended control chain for high-risk tunnel sections

图 3. 高风险洞段建议控制链

4. 结论与建议

4.1. 主要结论

(1) 隧洞涌水危险性具有明显的多因素耦合特征。涌水量 Q 适合反映排水系统总负荷，单位长度涌水量 q 适合识别长距离隧洞中的局部高风险；二者应作为基础指标，而不宜用全洞平均值替代局部峰值。

(2) 坡度、洞径、洞段位置、支护条件、围岩类别和地质构造会改变同等涌水量下的致灾后果。反坡、竖井、小洞径、岩溶管道、富水断层、软岩大变形和高外水压力洞段，应通过排水冗余度、峰值增长率、外水压力和围岩稳定性等因素进行动态修正。

(3) 基于“基础涌水等级 + 修正因子”的分级方法，能够较直观地把水量指标转化为施工管理等

级。对于深埋长距离有压输水隧洞, 涌水风险应与 TBM 超前探测、注浆堵水、反坡排水、支护闭合、监测预警和应急停掘联动管理。

4.2. 工程建议

施工前应按地质构造、地下水补给条件和施工组织划分风险分区, 形成 Q 、 q 、外水压力和围岩稳定性等基础数据的动态台账。

施工中应把超前探测结果与排水能力、备用电源、备用泵和应急水仓容量联动校核; 当涌水量峰值、单位长度涌水量或排水冗余度达到预警条件时, 及时升级处置等级。

对于岩溶管道、富水断层、高外水压力和软岩大变形叠加洞段, 宜采用“超前探测 - 预注浆 - 限量排放 - 快速支护 - 持续监测”的组合措施, 并预先明确停掘、撤人和恢复施工条件。

4.3. 局限性与未来研究方向

本文所建立的“涌水量阈值 - 隧洞类型 - 地质条件 - 处置措施”综合划分框架以确定性指标和工程经验为主, 对地质与水文条件不确定性的刻画仍有不足: 岩溶管道与断层破碎带的空间展布、含水层渗透系数的非均质性、降雨补给与极端气候的随机性等, 往往难以通过确定性阈值充分反映, 修正因子的取值也多依赖工程类比与经验判断, 可能使风险评估结果偏离实际。未来可将该框架与概率方法和数据驱动模型相结合: 一方面, 引入蒙特卡洛模拟、随机场或贝叶斯方法, 对渗透系数、降雨强度、断层带导水性等关键参数开展不确定性传播分析, 将确定性分级转化为带有概率分布与置信区间的概率性风险评估; 另一方面, 利用随机森林、神经网络等机器学习模型对涌水量峰值和突涌水概率进行数据驱动预测, 并与本文的经验判据相互校验, 从而实现从确定性风险评估向概率性风险评估的跨越, 使评估结果更加全面和科学, 为深埋长距离输水隧洞的精细化风险管理提供更可靠的依据。

参考文献

- [1] 付登文. 不同降水条件下岩溶隧道涌水量预测及风险评价[J]. 地下水, 2024, 46(5): 37-41.
- [2] 李俊. 隧道涌水量预测及涌水风险评估研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2025.
- [3] 张付军, 胡俊, 段宇, 等. 某富水断层隧道涌水治理方案优化分析及工程应用[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 122-131.
- [4] 耿军民, 颜慧明, 贾建红, 等. 引江补汉工程深埋长隧洞主要工程地质问题[J]. 中国水利, 2022(18): 51-53.
- [5] 张铎, 孙慕楠. 单线大坡度铁路隧道反坡排水施工技术[J]. 四川水力发电, 2023, 42(5): 1-3.
- [6] 卢超. 大坡度富水隧道斜井反坡排水技术研究[J]. 山西交通科技, 2024(6): 105-107.
- [7] 解攀. 富水隧道大坡度斜井反坡排水施工技术研究: 以黎霍高速太岳山隧道富水大坡度斜井施工项目为例[J]. 工程技术研究, 2022, 7(18): 65-67.
- [8] 刘辉. 大坡度斜井辅助富水隧道排水施工技术[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(21): 109-111.
- [9] 王杨盛. 引江补汉工程 TBM 施工反坡排水设计[J]. 东北水利水电, 2025, 43(3): 1-4.
- [10] 杨馨茹, 段灿, 薛子斌, 等. 不同坡度 TBM 隧道施工对开挖面稳定性的影响[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2022, 36(1): 33-40.
- [11] 孙强, 闫玉亮, 孙向东. 小洞径双护盾 TBM 隧洞成洞洞径优化研究[J]. 水利建设与管理, 2024, 44(12): 1-6.
- [12] 吴树良, 邓争荣西, 王吉亮, 等. 引江补汉工程超长输水隧洞线路地质比选[J]. 中国水利, 2022(18): 43-47.
- [13] 武松, 韩健, 袁葳, 等. 引江补汉工程超长深埋有压输水隧洞设计[J]. 中国水利, 2022(18): 48-50.
- [14] 宋志忠, 李衡, 邵小康, 等. 引江补汉工程超大直径 TBM 集群设备选型及配置关键技术[J]. 中国水利, 2025(21): 65-72.
- [15] 王祥. 长大坡度隧道膨胀岩地层分区排水技术研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2025.

-
- [16] 李燕波. TBM 法施工深埋输水隧洞变形机理研究[J]. 西北水电, 2023(2): 59-63.
- [17] 邹勇, 项艳, 等. 引江补汉输水沿线补水工程深埋隧洞软岩大变形分级及判别[J]. 水科学与工程, 2025(5): 53-57.
- [18] 吕小强. 富水断层破碎带浅埋隧道涌水及注浆加固机理研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2024.
- [19] 许煜林. 管道型富水构造隧道涌水突泥灾变机理与临灾预警[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [20] 彭春林, 纪杰. 隧洞安全监测技术在引江补汉工程中的应用[J]. 建材世界, 2024, 45(5): 72-76.