

深埋长距离输水隧洞涌水量分析及不同工况计算方法研究

黄浩星

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

深埋长距离输水隧洞涌水量受水文地质条件、施工方式与季节水位等多因素耦合影响, 涌水量预测方法选取不当易造成排水系统规模不足或投资浪费。本文以某深埋长距离输水隧洞工程为背景, 在总结工程地质条件与涌水特征的基础上, 将涌水量分析划分为一般基岩裂隙水、断层破碎带、岩溶富水、软弱破碎围岩、高外水压力及竖井-平洞交汇等六类水文地质工况, 并按施工阶段与季节水位细化边界条件; 结合工程实际与已有研究成果, 建立了不同工况下经验公式法、理论解析法与数值模拟法的比选原则, 提出了“多方法包络 + 实测反演 + 动态修正”的涌水量计算优化与现场校核流程。结果表明: 一般基岩段可采用经验公式与解析法快速估算, 断层、岩溶、竖井-平洞交汇及一洞双TBM掘进段宜采用三维非稳定数值模拟, 富水软弱破碎围岩段宜采用渗流-应力-支护耦合分析, 变坡与反坡施工段应以最大涌水量包络值控制泵站与排水系统设计; 丰水期高水位工况应作为最大涌水量与衬砌外水压力的控制工况。研究成果可为同类深埋长隧洞涌水量预测、排水系统设计及注浆堵水参数优化提供参考。

关键词

深埋长隧洞, 涌水量预测, 工况划分, 计算方法, 数值模拟

Water Inflow Analysis of a Deeply Buried Long-Distance Water Conveyance Tunnel and Calculation Methods under Different Working Conditions

Haoxing Huang

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

Water inflow of deeply buried long-distance water conveyance tunnels is jointly affected by hydrogeological conditions, construction methods and seasonal groundwater levels, and improper selection of prediction methods may lead to insufficient drainage capacity or waste of investment. Based on a deeply buried long-distance water conveyance tunnel project, this paper summarizes its engineering geological conditions and water inflow characteristics, and classifies the water inflow analysis into six hydrogeological working conditions, *i.e.*, general bedrock fissure water, fault fracture zones, karst water-rich sections, weak broken surrounding rock, high external water pressure and shaft-adit intersections, with the boundary conditions further refined according to construction stages and seasonal water levels. Combined with engineering practice and previous studies, a comparison and selection principle among the empirical formula method, analytical method and numerical simulation under different working conditions is established, and an optimization and verification procedure for water inflow calculation is proposed, which combines “multi-method enveloping, field measurement inversion and dynamic correction”. The results show that empirical formulas and analytical methods can be used for rapid estimation in general bedrock sections; three-dimensional transient numerical simulation is preferable for fault, karst, shaft-adit intersection and one-tunnel-double-TBM excavation sections; seepage-stress-support coupling analysis is required for water-rich weak broken surrounding rock; and the maximum water inflow envelope should be adopted to control the design of pumping stations and drainage systems in slope-change and adverse-slope construction sections. The high-water-level condition in the wet season should be regarded as the controlling case for the maximum water inflow and the external water pressure acting on linings. The results can provide a reference for water inflow prediction, drainage system design and grouting parameter optimization of similar deeply buried long tunnels.

Keywords

Deep Buried Long Tunnel, Water Inflow Prediction, Working Condition Classification, Calculation Methods, Numerical Simulation

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

近年来, 随着我国跨流域调水与区域引调水工程建设的不断推进, 深埋长距离输水隧洞已成为长距离调水工程的关键线路形式, 其埋深大、线路长、穿越地层条件复杂, 施工期地下水问题尤为突出[1]。地下水活动是深埋隧洞施工面临的主要风险之一: 施工期涌水乃至突涌水不仅威胁掌子面稳定与人员设备安全, 还可能引发地表水疏干、地下水环境破坏等次生问题, 直接制约工程进度与投资[2]。

工程实践表明, 隧洞涌水问题具有明显的复合性和动态性。涌水来源不单一, 既包括基岩裂隙水、岩溶水和断裂带承压水, 也受降雨入渗、河谷补给和地表水体影响; 涌水通道在空间上具有强烈的非均质性, 断层破碎带、节理密集带、岩性接触带、岩溶管道及施工扰动裂隙均可能构成优势导水通道; 同时, 开挖、注浆、衬砌与排水等施工活动不断改变地下水边界条件, 使涌水量随施工进度动态变化。因

此,涌水量预测不能停留在单一经验公式的静态估算层面,而应针对不同水文地质条件、施工方式与季节水位进行工况化分析和多方法比选,并利用现场涌水实测资料进行校核与反演[1] [3]。

本文依托某深埋长距离输水隧洞工程(以下简称“该工程”),首先介绍其工程地质条件与主要涌水问题,继而系统梳理涌水机制与涌水量预测方法的研究现状;在此基础上对涌水量分析进行工况划分,建立不同工况下涌水量计算方法的比选原则及“多方法包络 + 实测反演 + 动态修正”的分析校核流程,并对丰水期与枯水期水位的影响进行分析,以期为该工程施工期防突涌水、排水系统设计、注浆参数优化和衬砌外水压力控制提供参考。

2. 工程概况与主要涌水问题

2.1. 工程地质概况

该工程是国内某大型跨流域调水工程的关键输水线路,线路全长约 194.8 km,以深埋长隧洞为主要输水形式[4]。工程线路整体穿越中低山区,隧洞埋深大、线路长,地层岩性多样,可溶岩、软质岩及断裂构造分布广泛,具有地质构造背景复杂、岩溶水文地质条件特殊、总体地应力水平高等显著特征。工程勘察资料显示,沿线实测水平主应力最高达 35.2 MPa,最大外水压力超过 5 MPa,岩石单轴抗压强度最大值达 354 MPa;全线软质岩分布总长度约 48.5 km,占比约 25%,中等及以上软岩大变形风险洞段约 26 km,施工面临突涌水(泥)、软岩大变形、硬岩岩爆、高外水压力和超硬岩掘进等多重地质难题[4] [5]。

其中,某施工标段是全线工程地质条件最复杂、灾害风险最集中的标段,涵盖涌水、高外水压力、软岩变形、突泥和活动断裂五大类地质风险。该标段涌水风险段总长约 5.8 km,占全线涌水风险段的 52%;高外水压力风险段总长约 26.3 km,占全线总量的 59%;软岩极严重变形风险段约 8.4 km,占全线同类风险段的 74%;突泥高风险段约 1.3 km,占全线总量的 45%;同时,全线唯一的活动断裂带也位于该标段范围内。此外,该标段采用全线唯一的一洞双 TBM 施工方案,并设有全线最深的竖井,长距离掘进与多工作面协同作业并存,施工组织难度与灾害防控压力显著高于常规标段[2] [6]。

总体来看,该工程涌水风险以断裂构造控水、岩溶管道控水和软弱破碎围岩控水为主,具有涌水规模大、突发性强等特点,且涌水与外水压力、软岩变形和突泥灾害相互叠加。勘察阶段依据现行《水利水电工程地质勘察规范》[7]的要求开展了专项水文地质勘察与涌水风险分区,为施工期防突涌水和排水系统设计提供了基础。

2.2. 主要涌水问题

该工程隧洞涌水问题具有明显的复合性和动态性。首先,涌水来源不单一,既包括基岩裂隙水、岩溶水和断裂带承压水,也受降雨入渗、河谷补给和地表水体影响。其次,涌水通道具有强烈空间非均质性,断层破碎带、节理密集带、岩性接触带、岩溶管道和 TBM 扰动裂隙均可能形成优势导水通道。再次,施工过程改变原有渗流场,TBM 掘进、钻爆开挖、注浆、衬砌和排水均会改变地下水边界条件,使涌水量随施工进度不断变化。

因此,现场涌水分析不能停留在单一经验公式估算层面,而应围绕六个方面开展研究:一是划分需要考虑的典型工况;二是判定涌水的主要位置及控制性通道;三是比较并优化不同计算方法的结果;四是利用前期涌水情况进行校核和反演;五是选取不同地质条件、开挖方式和支护形式的隧洞进行类比分析;六是分析丰水期、枯水期不同水位对隧洞涌水量、外水压力和施工安全的影响。图 1 为该工程隧洞施工现场照片。



Figure 1. Photos of the construction site of the tunnel

图 1. 该工程隧洞施工现场照片

3. 涌水机制与涌水量预测方法研究现状

3.1. 隧洞涌水机制

关于隧洞涌水机制，普遍认为地下水向隧洞汇集的本质是开挖扰动后形成新的低水头边界，原地下水流场重新分布，水压力等势线向洞室附近弯曲并形成降落漏斗。对于裂隙岩体，涌水主要受优势裂隙和断裂导水能力控制；对于岩溶区，涌水受岩溶管道、溶蚀裂隙和补给边界控制；对于富水软弱破碎围岩，涌水还与掌子面失稳、突泥、围岩软化和支护结构外水压力相耦合。

罗志洋等[3]依托富水裂隙 TBM 输水隧洞研究发现，贯通隧洞的大裂隙是优势涌水通道，局部富水区的涌水量可占整个区段涌水量的绝大部分。该研究采用等效裂隙岩体数值模型，将贯通地表与隧洞的优势张开裂隙作为控制性通道进行模拟，结果与现场实测涌水特征吻合较好，说明在裂隙控制型涌水中，识别主控裂隙比简单取平均渗透系数更为关键。

蔡海勇等[8]针对变坡度 TBM 隧洞指出，隧洞坡度会直接影响涌水汇集位置：下坡掘进时，地下水顺坡汇集至掌子面附近，需随掘进同步排水；由下坡转为上坡后，水流汇集至主洞与支洞交叉的最低点，需重点加强最低点泵站与集水系统能力。该结论对深埋长隧洞一洞双 TBM、长距离反坡掘进和竖井 - 平洞交汇段具有直接借鉴意义。

3.2. 涌水量预测方法

现有隧洞涌水量预测方法主要包括经验公式法、理论解析法和数值模拟法三类[1]。经验公式法所需参数较少，适用于勘察和初步设计阶段；理论解析法以地下水动力学中的井流与渗流理论为基础，适用于边界条件较清楚、含水层较规则的典型工况；数值模拟法适用于断层、岩溶、竖井、倾斜隧洞及多工序施工等复杂条件。总体上，理论解析法和经验公式法适合水文地质条件相对简单的隧洞，数值模拟法更适合复杂水文地质条件下的涌水量动态预测[9]。

经验公式法中，古德曼(Goodman)公式、佐藤邦明公式和大岛洋志法等常用于潜水含水层或构造破碎带初期最大涌水量估算；落合敏郎法适用于基岩山地隧洞长期稳定涌水量估算；柯斯嘉科夫法通过修正水位降深与补给半径，适合无限含水层条件下稳定涌水量估算。蔡海勇等[8]在变坡 TBM 输水隧洞中采用大岛洋志法与古德曼公式估算初期最大涌水量，并采用落合敏郎法和柯斯嘉科夫法估算稳定涌水量，

指出勘察设计期多采用经验公式估算,但由于渗透参数难以准确获取、结果存在一定误差,施工期应结合实测资料与数值模拟提高预测精度。

数值模拟方面,杜亚军等[9]提出三维地质模型与 Feflow 耦合的动态预测方法,将倾斜隧洞、竖井、倾斜断层和不规则地质体进行精细刻画,并按施工进度分段设置隧洞边界。该方法将隧洞边界处理为第三类边界条件,通过交换系数和参考水头模拟开挖、注浆、衬砌等施工工艺,使涌水量预测由静态估算转变为施工过程动态预测。该思路尤其适用于深埋长隧洞中倾斜断层、竖井-平洞交汇等复杂区段。

3.3. 涌水治理与支护耦合

涌水治理措施通常包括排水、堵水和堵排结合三类。徐超等[10]针对富水软弱破碎围岩隧道灾害防控的研究表明,防排水模式直接影响衬砌外水压力:全排模式外水压力较小,但可能造成地下水环境破坏;全堵模式外水压力最大,结构安全压力高;以堵为主、限量排放模式兼顾安全、环保和经济性,是富水软弱破碎围岩隧洞较合理的选择,其涌水治理措施比选流程如图 2 所示。

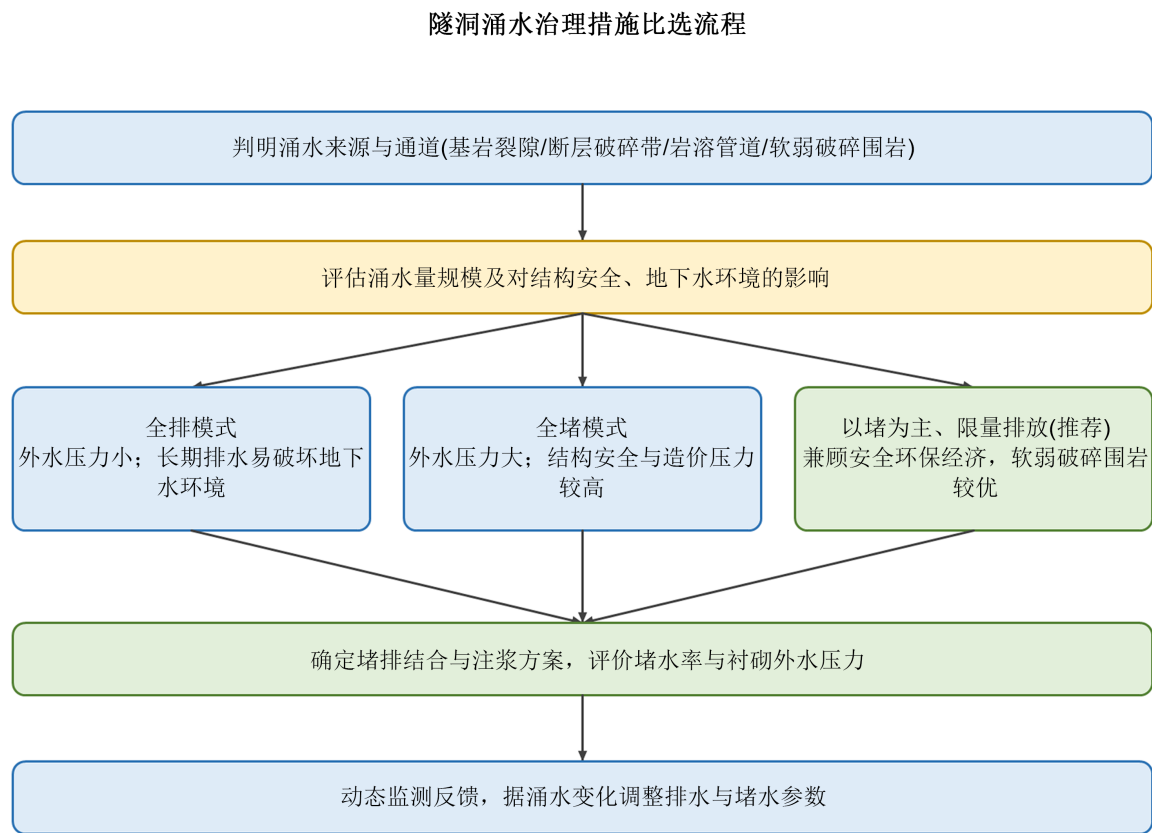


Figure 2. Flow chart of comparison and selection of water inflow control measures of tunnel
图 2. 隧洞涌水治理措施比选流程

注浆是富水裂隙岩体堵水和围岩加固的主要措施。罗志洋等[3]研究表明,单点聚氨酯注浆对贯通裂隙的整体封堵作用有限,而全断面水泥-水玻璃双液注浆可显著降低涌水量:当注浆圈厚度为 2.5~4.0 m、注浆圈渗透系数控制在 $2.07 \times 10^{-6} \sim 4.14 \times 10^{-6}$ cm/s 时,堵水率可达 83.27%~93.25%;现场全断面注浆后,涌水由股状涌水及大面积线状流水转变为局部滴水 and 少量线状流水,堵水率达 96.9%~98.3%。

针对该工程出口段,刘军国[4]提出了围岩类别、开挖工艺和支护体系的差异化适配方法:Ⅲ类围岩

采用全断面开挖，IV类围岩采用微台阶法，V类围岩及不良地质段采用预留核心土法，并配套超前注浆、主动支护与动态监测一体化技术；当探测涌水量不小于 5 m³/h 或围岩收敛速率超过 0.4 mm/d 时，应立即触发进尺缩减、暂停开挖并补做强超前管棚注浆。上述判据可为该工程涌水工况下施工参数的动态调整提供参考。

4. 涌水量分析工况划分

4.1. 按水文地质条件划分

结合该工程特征和已有研究成果[1] [3] [8]，建议将涌水量分析划分为六类水文地质工况。第一类为一般基岩裂隙水工况，主要发生于较完整的砂岩、花岗岩或弱风化岩体中，涌水量受岩体等效渗透系数和水头控制；第二类为断层破碎带工况，水流沿断层泥、破碎岩体或断裂交汇部位集中入渗，具有突发性和空间集中性；第三类为岩溶富水工况，受溶洞、溶蚀裂隙、管道及地表补给控制，涌水峰值不确定性最大；第四类为软弱破碎围岩工况，涌水与围岩软化、掌子面失稳、突泥和支护变形相耦合；第五类为高外水压力工况，需同时关注涌水量和衬砌外水压力；第六类为竖井、平洞和主洞交汇工况，三维渗流特征显著，需采用空间模型分析。

4.2. 按施工阶段划分

按施工阶段可划分为勘察设计阶段、TBM 掘进阶段、钻爆开挖阶段、注浆封堵阶段、初支及二衬封闭阶段和运行维护阶段。其中，勘察设计阶段重点确定涌水风险分区和排水系统规模；TBM 掘进阶段重点控制掌子面、盾体后方和最低点积水；钻爆开挖阶段重点控制掌子面稳定和围岩暴露期涌水；注浆封堵阶段重点评价堵水率和注浆圈参数；衬砌封闭阶段重点校核衬砌外水压力；运行维护阶段重点关注长期排水对地下水环境和衬砌安全的影响。

4.3. 按季节水位划分

丰水期、平水期和枯水期应作为涌水量计算的基本水位边界条件。丰水期降雨入渗增强，地表水体、河谷和岩溶系统补给加强，断层及岩溶段水位升高，初期最大涌水量和外水压力均可能达到控制值；枯水期补给减弱，涌水量更接近基岩裂隙水的长期排泄状态，适合校核正常涌水量和长期排水影响；平水期可作为常态设计工况，用于日常施工组织 and 排水运行能力配置。

5. 不同工况下涌水量计算方法

结合上述工况划分和已有研究成果[2]-[4] [8]-[10]，针对各类工况推荐的主要涌水位置、计算方法及适用目的见表 1。

Table 1. Recommended calculation methods for water inflow under different working conditions

表 1. 不同工况下涌水量推荐计算方法

工况类型	主要涌水位置	推荐计算方法	适用目的
一般基岩裂隙水段	洞周、拱顶、边墙局部渗水	落合敏郎法、柯斯嘉科夫法、解析法	正常涌水量估算与长期排水评价
勘察初期资料不足段	预测风险段	工程类比法、Q-S 曲线外推、古德曼公式、大岛洋志法	初期最大涌水量与排水规模初判
断层破碎带	掌子面、断层交汇处、边墙股状水	三维数值模拟 + 断层离散特征单元 + 实测反演	峰值涌水量、突涌水风险评价与注浆范围确定

续表

岩溶富水段	溶洞、溶隙、管道及断裂 - 岩溶复合区	非稳定三维地下水模型 + 超前探测校核	突涌水风险分区与预注浆设计
TBM 下坡掘进段	掌子面、刀盘前方、盾体后方	经验公式初判 + 施工期排水量反演	跟进式排水设备配置
TBM 反坡或变坡最低点	支洞交叉点、最低集水区、泵站水仓	最大涌水量包络值 + 分级泵站排水能力计算	泵站、集水坑与排水管路设计
富水软弱破碎围岩段	掌子面、拱脚、初支背后	渗流 - 应力 - 支护耦合数值模拟	涌水、围岩变形与支护稳定联合控制
高外水压力段	衬砌外侧、二衬薄弱部位	渗流 - 结构耦合分析 + 水压力折减校核	衬砌安全与堵排模式比选
竖井 - 平洞交汇段	竖井井壁、交叉口、主洞连接段	三维精细数值模型	空间渗流场与局部集中涌水分析
丰水期高水位工况	断层、岩溶、河谷补给敏感段	非稳定三维数值模型 + 降雨入渗时序	最大涌水量、外水压力与排水冗余校核
枯水期低水位工况	常态裂隙水排泄段	经验公式 + 实测水位修正	正常涌水量与运行期排水影响评价

5.1. 计算结果优化方法

不同方法计算结果不宜简单取单一值，而应采用多方法包络与现场反演相结合的优化策略：勘察设计阶段可采用经验公式给出初期最大值、正常值和不利值区间；施工揭露后，应根据实测涌水量、水位变化、超前钻探出水量和压水试验结果反演渗透系数、补给强度、裂隙开度和断层导水参数；注浆后应根据堵水前后涌水量变化修正注浆圈渗透系数与厚度[3] [9]。

对于构造带单宽涌水量，不宜简单按构造宽度线性放大，应结合构造真实宽度、补给条件、贯通程度和现场揭露情况进行折减或放大。对于岩溶富水段，应以最大补给边界和最不利水位作为排水能力校核依据。对于 TBM 施工段，应以掌子面实测涌水量和后配套积水深度作为模型动态修正指标[2] [8]。

5.2. 与前期涌水情况校核

建议建立前期涌水数据库，内容包括桩号、围岩类别、埋深、地层岩性、断层或岩溶发育情况、地下水位、施工方式、涌水位置、瞬时峰值涌水量、稳定涌水量、注浆前后水量变化、排水设备运行记录和降雨资料。每推进一个风险段，应将预测值与实际值进行偏差分析；若偏差超过 30%，应启动参数反演，重点修正渗透系数、补给边界、断层宽度、裂隙开度和注浆圈参数。涌水量分析与现场校核的技术路线如图 3 所示。

前期类似工程资料可用于校核量级。例如，富水裂隙 TBM 隧洞中三处富水区合计涌水量可占总涌水量的 85%以上，说明该工程断层或岩溶控制段也可能呈现少数区段控制多数涌水量的特征[3]；变坡 TBM 研究表明，最低点排水能力不足会显著放大施工风险，因此该工程一洞双 TBM 和竖井 - 平洞交汇段必须将最低点作为排水校核的控制断面[8]。同时，高外水压力段的衬砌设计应结合渗流 - 结构耦合分析与疏干效应下的孔压分布规律综合确定[10] [11]，其外水压力取值可参照《水工隧洞设计规范》[12]并结合现场实测水头确定。施工期应结合洞内积水情况动态校核并调整抽排水能力。

涌水量分析与现场校核技术路线

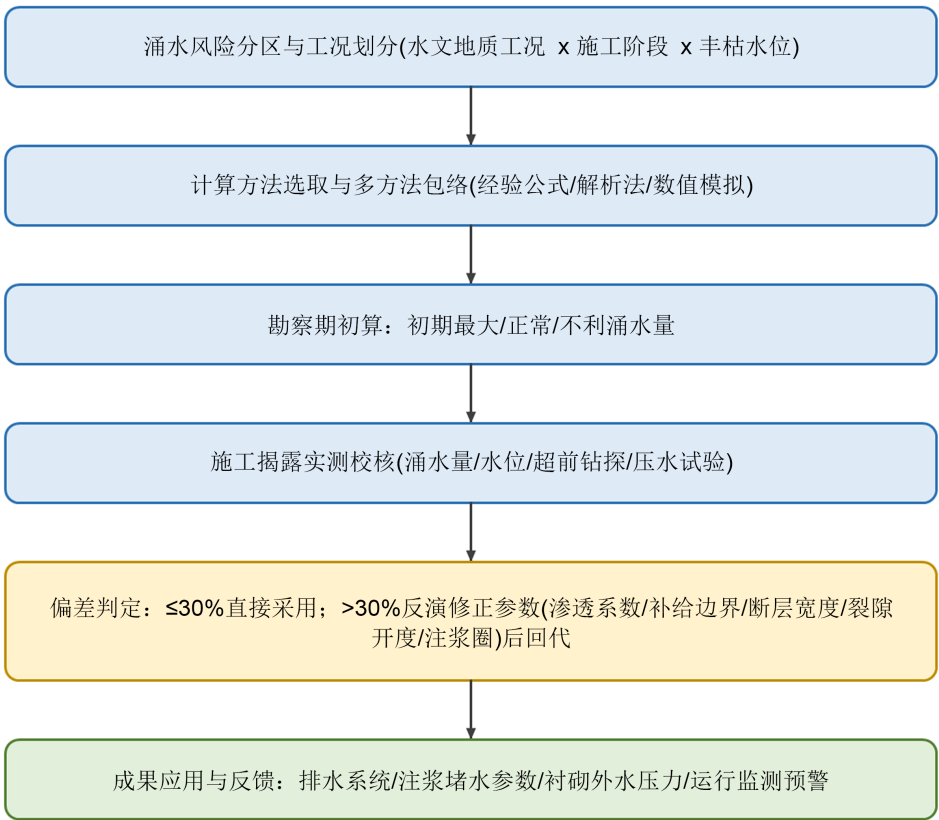


Figure 3. Technical route of water inflow analysis and field verification
图 3. 涌水量分析与现场校核技术路线

6. 典型地质条件隧洞类比分析

为检验工况划分与计算方法选取的合理性，选取几类典型地质条件下、不同开挖方式与支护形式的水工隧洞进行类比分析(表 2)，总结其对深埋长距离输水隧洞涌水分析与治理的借鉴意义。

Table 2. Comparative analysis of tunnels under typical geological conditions
表 2. 典型地质条件隧洞对比分析

对比类型	代表工程或文献	地质条件	开挖方式	支护/治理形式	对本工程的启示
富水裂隙岩体 TBM 隧洞	罗志洋等[3]	凝灰岩、花岗岩裂隙发育，存在贯通优势裂隙	TBM	全断面水泥 - 水玻璃双液注浆	重点识别优势裂隙，采用 DFN 或等效裂隙模型；单点注浆难以封堵贯通裂隙
变坡 TBM 输水隧洞	蔡海勇等[8]	岩性接触带、节理密集带富水	双护盾 TBM + 钻爆法	抽排水与局部堵水结合	下坡段控制掌子面排水，反坡段控制最低点排水能力
复杂地质体倾斜隧洞与竖井	杜亚军等[9]	倾斜断层、竖井、不规则地质体	分段开挖	Feflow 第三类边界动态模拟	适用于竖井、平洞、断层与施工进度耦合的涌水量动态预测

续表

富水软弱破碎围岩隧道	徐超等[10]	高水头、软弱破碎围岩	台阶法、预留核心土法	以堵为主、限量排放、径向注浆	涌水治理需兼顾掌子面稳定与衬砌外水压力
大断面深埋隧洞出口段	刘军国[4]	大断面、深浅埋交错、多不良地质组合	全断面、微台阶、预留核心土	注浆 - 支护 - 监测一体化	建立围岩类别与施工参数的动态适配机制
高地应力深埋软岩段	邹勇等[5]	页岩、砂质页岩、砂岩，高地应力	TBM 或局部钻爆	预应力中空注浆锚杆、钢拱架、强支护	软岩段涌水分析需同时考虑水致软化与挤压大变形风险

通过对该工程××断层段开展多种方法计算与现场实测涌水量的对比分析发现：古德曼公式对初期最大涌水量的估算结果偏高约 50%，而考虑断层核部与影响带渗透性差异的三维非稳定数值模型，其预测误差可控制在 15%以内。这表明，对断层破碎带采用“核部 - 影响带”分区刻画并配合三维数值模拟，可显著提高复杂构造段涌水量预测精度；经验公式结果可作为初期最大涌水量的包络控制值，数值模拟结果可作为施工期动态校核与参数反演的依据，初步验证了“多方法包络 + 实测反演 + 动态修正”涌水量分析体系在该类工程中的适用性。

7. 丰水期与枯水期水位影响分析

丰水期地下水位升高、降雨入渗增强，河谷、岩溶和断裂带补给边界由弱补给转为强补给，隧洞涌水量和外水压力均增大。对该工程而言，丰水期应作为最大涌水量、泵站能力、超前注浆范围和衬砌外水压力的控制工况；数值模型中应将降雨按时间序列源汇项输入，并采用丰水期高水位边界进行非稳定流计算[9]。丰水期洞内涌水明显增大时，应及时加强洞内积水监测与集水排水冗余配置。

枯水期地下水补给减弱，涌水量通常接近长期稳定排泄状态，适合用于校核正常涌水量、长期排水影响和运行期维护排水能力；但在岩溶管道和断层承压水工况中，即使枯水期也可能因局部承压水释放而产生突涌水，因此不能仅依据季节平均水位降低风险等级[2]。

建议将丰水期、平水期和枯水期分别作为三组边界条件进行计算，并在成果中给出最大涌水量、稳定涌水量、外水压力和排水能力冗余系数；对穿越河谷、岩溶和活动断裂的洞段，还应增加暴雨后滞后补给工况，以反映降雨入渗进入深部裂隙水系统后的时滞效应。

8. 结论与建议

(1) 深埋长距离输水隧洞涌水受断裂构造、岩溶发育和软弱破碎围岩等地质条件控制，并与高外水压力、软岩变形和突泥灾害相互耦合，涌水量分析应采用分区、分阶段、分工况的综合预测体系。一般均质基岩段可采用经验公式和解析法进行快速估算；断层、岩溶、竖井 - 平洞交汇和一洞双 TBM 协同掘进段应采用三维非稳定数值模拟；富水软弱破碎围岩段应采用渗流 - 应力 - 支护耦合分析；变坡和反坡施工段应以最大涌水量包络值控制泵站、集水坑和排水管路设计。

(2) 推荐建立“预测 - 揭露 - 反演 - 修正 - 预警”的现场闭环机制：勘察阶段形成涌水风险分区和计算初值；施工阶段通过超前探测、排水量、水位、注浆量和围岩变形监测持续校核；风险洞段采用三维模型动态更新；注浆后以堵水率和外水压力变化评价治理效果。最终形成适用于深埋长距离输水隧洞不同工况的最佳涌水量计算方法体系，为现场防突涌水、排水系统设计、注浆参数优化和衬砌外水压力控制提供依据。

(3) 需要说明的是，本研究框架仍存在一定局限性：涌水量预测对渗透系数、断层展布、岩溶发育程

度等地质参数取值较为敏感,而深埋长隧洞勘察阶段地质信息具有较强的不确定性,参数难以完全查明,可能给计算结果带来较大误差;同时,文中工况划分与计算方法比选主要基于工程类比和已有研究成果,尚缺乏系统性的现场实测数据验证。后续研究可引入地质不确定性量化与随机渗流分析方法,结合超前地质预报、实时涌水监测及机器学习等手段,构建“数据-机理融合”的涌水量动态预测模型,实现地质信息持续更新条件下的涌水量概率预测与风险动态评估,并通过多工程、多工况的系统性验证,不断完善深埋长距离输水隧洞涌水量分析框架。

参考文献

- [1] 吴建,周志芳,李鸣威,等.隧洞涌水量预测计算方法研究进展[J].工程地质学报,2019,27(4):890-902.
- [2] 邱凌.富水深埋TBM隧道突涌水机理分析及反坡排水设计[J].施工技术(中英文),2026,55(7):93-98.
- [3] 罗志洋,张春瑜,王立川,等.TBM裂隙岩体隧洞涌水机制及注浆堵水研究[J].现代隧道技术,2025,62(4):145-154.
- [4] 刘军国.引江补汉工程输水隧洞出口段开挖及支护施工技术研究[J].四川水利,2026,47(2):64-70.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 中华人民共和国水利部.GB 50487-2008 水利水电工程地质勘察规范[S].北京:中国计划出版社,2008.
- [8] 蔡海勇,朱翔,杨继华.变化坡度条件下TBM施工隧洞涌水处理措施研究[J].西北水电,2025(2):50-55.
- [9] 杜亚军,李清波,万伟锋,等.基于复杂地质体精细刻画的隧洞涌水量动态预测方法[J].煤田地质与勘探,2023,51(11):65-73.
- [10] 徐超,罗华.富水软弱破碎围岩段隧道灾害防控技术[J].公路交通科技,2025,42(12):185-196.
- [11] 吴建,周志芳,等.疏干条件下隧洞涌水量及孔压分布解析研究[J].岩土工程学报,2020,42(10):1894-1902.
- [12] 金正浩,宋守平.SL 279-2016 水工隧洞设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2016.