

隧道工程和水文地质勘探物探技术实践

陈亨庄

(福建省地质工程勘察院,福州 350002)

摘要:周家山隧道区域面积广阔,层组复杂,地层岩性单一。本文应用综合物探技术对隧道的工程地质和水文地质勘探进行优化,并实践于该隧道的实测和分析,对隧道的地层围岩进行分类统计并使用地下水动力学法对隧道以及斜井的涌水量进行预测分析。基岩裂隙水为隧道区的主要地下水类型,受大气降水补给,呈潜水-承压水状态。为探明裂隙破碎带分布及构造富水情况,施工采用超前地震回波反射法结合水平孔探测手段,提前制定排水、降水方案并实施,确保施工安全。

关键词:水文地质勘探;综合物探技术;涌水量预测

中图分类号:F205;F301.2

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)07-0073-8

0 引言

隧道建设是交通基础设施中的重要组成部分,水文地质条件的复杂性对施工安全和工程稳定性具有重要影响^[1]。然而,在水文地质条件复杂的区域,隧道施工往往面临严峻的挑战。由于线位限制,部分隧道不可避免地需要穿越地表水体或富水地层,这不仅可能导致隧道涌突水问题,还可能疏干洞顶地表水体^[2-4],进而引发地表塌陷、地下水径流路径改变等次生灾害^[5]。因此,查清隧道开挖与地表水体之间的水力联系,是隧道设计和施工的重点关注所在。然而,水文地质条件的复杂性使得单一勘探方法难以全面揭示地下水的分布和运移规律,必须采用多种勘探手段相结合的综合勘察技术加以优化,以获取准确的水文地质参数^[6]。

隧道涌水量的准确预测是制定隧道施工方案的关键环节,但由于水文地质环境的复杂性和理论公式参数的局限性,精准确定涌水位置和预测涌水量存在较大挑战。因此,在开展水文地质勘察的同时,需要综合运用物探、钻探和水文试验等手段来估算隧道洞身的涌水量。常用的预测方法包括降水入渗系数法、裘布依公式以及古德曼经验公式等^[7-13]。

在隧道工程勘察中,水文地质评价是确保工程安全的重要环节。首先,需充分了解隧道区域地下水的运动规律及其对岩土工程的影响,特别是对建筑物稳定性和岩土性质的影响。其次,根据勘察资料,制定科学合理的评价方案和防治措施,例如发现流砂、钢筋腐蚀等潜在问题,并提出相应的解决方案。此外,还需根据施工工艺要求,随时提供水文地质资料,确保设计与施工的协调性^[14]。对于水文地质条件复杂的区域,如岩溶发育区或断层破碎带,需采用地质雷达、红外探测、瞬变电磁法等先进技术进行综合探测,以提高勘察精度^[15-20]。

1 周家山隧道地质特征

1.1 工程概况

周家山隧道位于泰宁县周家山,设计为分离式隧道,隧道左线和右线长度分别为 7039m 和 7007m。单洞设计净宽 10.25m,左线洞底设计标高 396.273-463.105m,右线洞底设计标高为 396.320-463.316m。

1.2 工程地质

1.2.1 地质构造和地震

SK248 钻探结果表明:研究区隧道最大水平

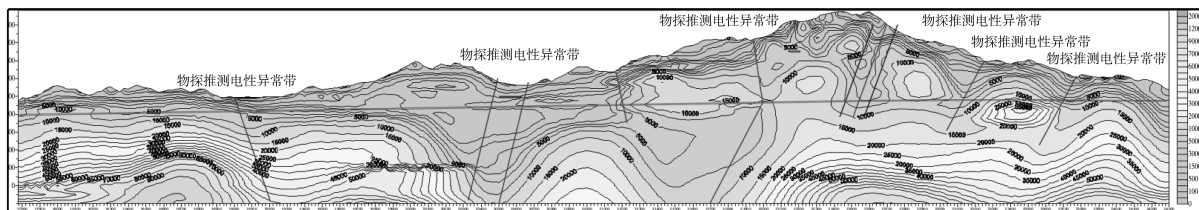


图 1 大地电磁物探结果

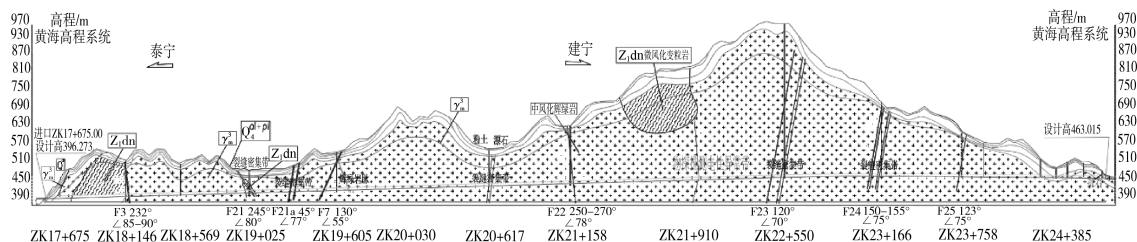


图 2 隧道左线工程地质纵断面

主应力值为 14.06MPa, 最小水平主应力值为 10.59MPa; 自重应力为 12.39MPa, 最大、最小水平主应力随岩层深度均有增大趋势; 最大水平主应力方向为 NE50°左右; 水平地应力以构造应力为主, 地应力场以水平应力为主导; 按岩体分级标准判别法隧道最大埋深区属于一般应力区; 采用 Hoek、Russenes、Turchaninov 标准判别围岩埋深小于 345m 时, 不会有岩爆发生; 当隧道围岩埋深大于 345m 时, 有可能发生轻微岩爆。其余洞身及斜井埋深小于 300m, 且有多条断裂构造及节理密集带与轴线相交通过, 地应力不易集中, 隧道发生岩爆可能性小。

浅层地震物探结果表明: 隧址区属断块差异活动区, 断裂构造较发育, 属于微震频繁发生区, 地震活动主要受新华夏构造体系控制。测区地震为浅震型构造地震, 历史上震源中心均不位于区内, 仅为横波涉及。

大地电磁物探探明了隧道电性异常带的区域位置(图 1)。大地电磁测深中的电性异常带主要由地下介质差异引起, 反映出地下岩性、构造和流体的分布特征。高阻体如花岗岩、石英脉与低阻体如黏土层、硫化物矿体差的异常形成明显对比。断裂带充水或含黏土时呈低阻, 硅质胶结则可能表现为高阻。含水裂隙或高矿化度地下水会显著降低电阻率, 而热液蚀变引入的导电

矿物也会形成低阻异常。硫化物矿床是典型的低阻体, 岩浆房或热液系统则因高温流体呈现深部低阻特征。

上述地表测绘、钻探及浅层地震物探、大地电磁综合物探技术勘探表明: 8 条断裂构造及挤压裂隙密集分布在隧址区(见表 1), 且在不同的地层岩性中, 沿线断裂带呈现出差异化的表面行迹。其中蚀变破碎带、硅化带、挤压性片理带、裂隙密集带及部分构造角砾岩带等构成侵入岩岩体。如图 2 隧道左线工程地质纵断面图所示, 基岩为裂隙较为发育完全的花岗岩(γ_m^3)和震旦系变粒岩(Z_1dn); 隧道洞身围岩为花岗岩(γ_m^3)和零散的震旦系变粒岩(Z_1dn), 斜井洞身围岩为硬质花岗岩(γ_m^3), 能够有效地稳定隧道洞身围岩。

1.2.2 地层岩性和围岩分类

隧址区上覆坡积粘性土或残积粘性土; 下伏加里东期侵入岩(γ_m^3)花岗岩和震旦系变粒岩(Z_1dn)及其风化层。

基于钻孔勘探数据, 分析岩体节理发育特征及岩石硬度属性, 依据岩石在饱和状态下的单轴抗压极限强度(R_c)和岩体完整性系数(K_v), 同时考虑地下水活动、节理裂隙网络及围岩应力分布等因素, 综合评估这些条件对围岩稳定性的影响程度。双线隧道和斜井各桩各级岩石总长如

表 1 断裂构造特征表

编号	位置	产状(°)		长度 (m)	宽度 (m)	性质	特征及对隧道影响	备注
		倾向	倾角					
F3	K18+195	232	85-90	>2km	>1m	压性	断裂带裂隙密集,断层平直延伸长,局部两侧基岩岩性不一致。与轴线大角度斜交,对隧道围岩有影响。	区域构造 钻探
F21	K19+000	245	80	约 600	3-8	压性	大地电法为电阻异常带,岩芯破碎,裂隙发育。与轴线大角度斜交,富水,对隧道围岩有影响。	物探 钻探 资料
F21a	K19+330	45	77	约 500	15-20	压性	物探低速带,破碎、裂隙发育。与轴线大角度斜交,富水,对隧道围岩有影响。	物探 资料
F7	K19+625	130	55	500-800	1-2	压性	断裂带挤压片理、裂隙发育,岩石破碎。与轴线斜交,导水性好,对隧道围岩有影响。	物探 钻探 资料
F22	K21+150	250-270	78	500	2-5	压性	断裂带挤压错动,两侧靡棱岩化强烈,岩石破碎。导水性好,与轴线近直交,对隧道及斜井围岩有影响。	物探 钻探 资料
F23	K22+718	115-125	70	800-1300	5-8	压性	钻探构造挤压带,挤压带裂隙发育,岩石破碎。与轴线斜交,对隧道围岩有影响。	物探 钻探 资料
F24	K23+300	150-155	75	500	15-30	压性	构造挤压破碎带,发育多组节理裂隙。与轴线小角度斜交,对隧道围岩有影响。	物探 钻探 资料
F25	K23+780	123	75	500	2-3	压性	构造挤压破碎,节理裂隙发育。与轴线小角度斜交,对隧道围岩有影响。	物探 钻探 资料

下表 2 所示,总长占比如下图 3 所示。其中隧道围岩 V 级占 3.9%, IV 级占 10.5%, III 级占 51.2%, II 级占 34.1%;斜井围岩 V 级占 12.5%, IV 级占 22.7%, III 级占 64.8%。

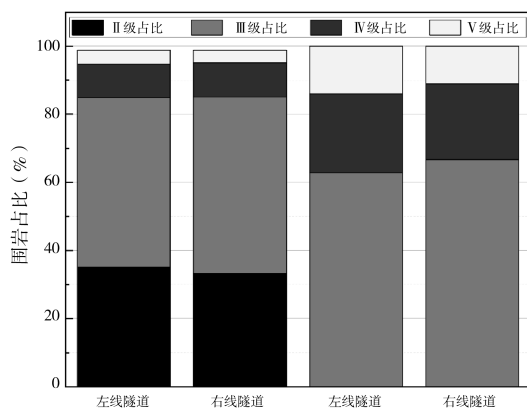


图 3 隧道和斜井各级围岩长度占比

2 隧道水文地质特征

隧道区域的地表水系以山涧溪流为主,其水源主要依赖大气降水,最终汇入沟谷低洼地带,流量呈现显著的季节性波动。风化层网状孔隙裂隙水和基岩裂隙水为隧址区主要的地下水类型,主要来源于大气降水的渗透以及地表溪流的补给。其中,风化层网状孔隙裂隙水主要分布于第四系残坡积层底部及基岩强风化带,而基岩裂隙水则主要存在于构造破碎带和节理裂隙密集带中。隧道地下水系统以大气降水为主要补给来源,通过地表裂隙及残坡积层下渗。山间溪流及际头水库(距隧道最近 185m)可能通过 F3 等断裂带局部补给,但未发现直接导水通道,影响

表 2 隧道和斜井各级围岩总长

	Ⅱ级总长(m)	Ⅲ级总长(m)	Ⅳ级总长(m)	Ⅴ级总长(m)
左线隧道	2472	3506	693	289
右线隧道	2334	3628	706	261
左线斜井		377	139	84
右线斜井		447	149	74

有限。地下水径流主要表现为风化带网状孔隙裂隙水和基岩裂隙水两种类型:前者赋存于第四系残坡积层及强风化带,后者富集于 8 条断裂破碎带及节理密集带,断裂带与隧道轴线多呈斜交或直交,构成主要导水通道。地下水由隧道轴线最高点(高程 885m)向两侧进出口(395-474m)径流,稳定水位普遍高于隧道顶板(478.9-728.59m),最终向沟谷低洼处排泄,动态受季节影响显著。

2.1 抽水试验

选取 YK17+690-YK18+250 近水库路段内洞身 YK18+200 发育 F3 断层处,SK241B 钻孔试验计算渗透系数,得出渗透系数 $K=0.159\text{m/d}$,平均单孔日出水量为 $77\text{m}^3/\text{d}$,水量较小。由工程地质综合物探技术勘探结果可知,这是由于断层两侧岩性为接触较紧密的微风化变粒岩和花岗岩,导水裂隙发育较差,且断层走向为 140° ,与水库岸线近乎平行。因此,水库地表水通过 F3 断层向隧道地下水的补给量有限。在 YK17+690 至 YK17+755 洞口段,岩石风化程度较高,通过钻孔试验测得的渗透系数 K 值为 $0.025-0.673\text{m/d}$,且坡脚处未发现泉眼或其他水库渗漏迹象。而在 YK17+755 至 YK18+205 洞身段,

岩体呈现高电阻率特征,围岩完整性较好,其渗透系数 K 值为 0.211m/d ,说明该段围岩的渗透性较差。进、出洞口稳定水位高于设计路面,地下水分布于强风化层中,水量较小,渗透系数 $K=0.21\text{m/d}$,平均单井日出水量 $32\text{m}^3/\text{d}$ 。洞身构造破碎和节理裂隙密集带中汇集了大部分的地下水,稳定水位高程高于隧道顶板,为 $478.9-728.59\text{m}$ 。构造带岩体较破碎,节理裂隙发育,渗透系数 $K=0.578\text{m/d}$,平均单井日出水量 $351\text{m}^3/\text{d}$ 。通过整合钻探、地表测绘以及大地电磁等物探勘察数据,未发现实际头水库地表水向隧道渗漏的导水通道,故水库蓄水对隧道开挖的影响较小。

2.2 水质检测结果

现场调查周边无污染源,根据取水样本水质检测分析结果,地下水水质为 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ 型水,不会腐蚀施工阶段浇筑的混凝土隧道基体。水质成分分析表如下表 3 所示。

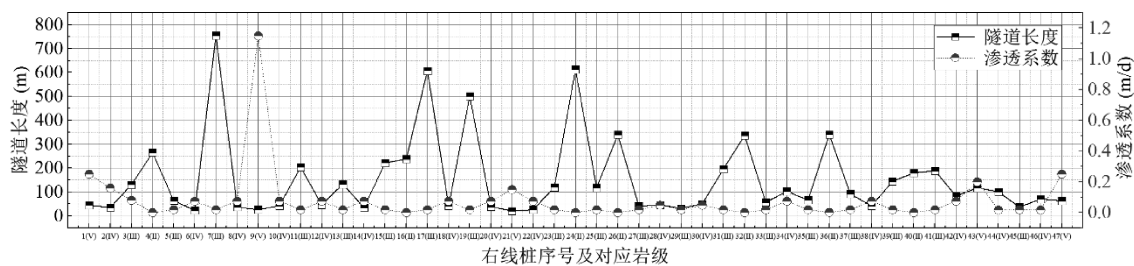
2.3 隧道涌水量预测分析

隧道区地下水主要为风化层网状孔隙裂隙水和基岩裂隙水。本隧道洞身为Ⅱ-Ⅳ级围岩,岩体较破碎~完整,局部构造及节理发育(密集)段涌水量较大,对隧洞开挖和围岩稳定影响较大。

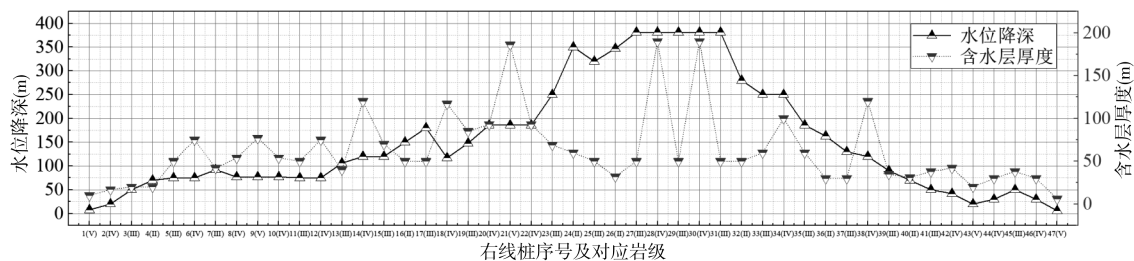
表 3 水质分析表

位置	PH	游离 CO_2	侵蚀性 CO_2	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	含水层及性质
SK243	6.95	12.87	7.90	141.65	2.61	4.78	9.84	40.57	1.76	风化基
SK258	7.48	5.03	4.82	56.13	1.96	3.32	18.51	7.73	0.29	岩弱透
CK082	6.39		11.36	12.81	1.77	1.44	3.38	1.80	0.36	水层

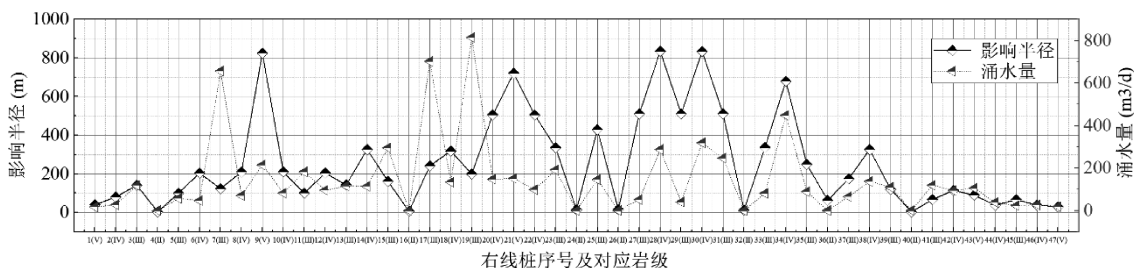
注:除 PH 值外,其他测试指标的单位均为 mg/l 。地层按弱透水层。



(a) 隧道长度和渗透系数计算结果



(b) 水位降深和含水层厚度计算结果



(c) 影响半径和涌水量计算结果

图4 右线隧道地下水动力学法计算结果

根据地下水动力学法估算本隧道的涌水量：隧道区地下水主要为基岩裂隙水，受大气降水补给，呈潜水-承压水状态。采用潜水-承压水型水平巷道公式计算隧道涌水量，公式如下：

$$Q = \frac{BK(2s - M)M}{R}, R = 10s\sqrt{K} \quad (1)$$

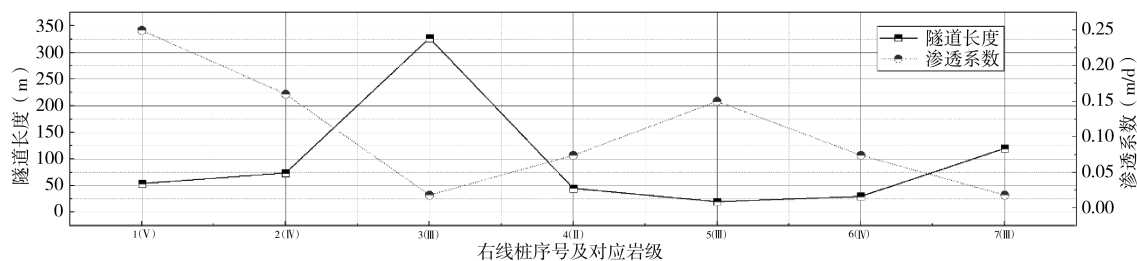
式中： Q 为涌水量 (m^3/d)； B 为巷道长度 (m)； M 为含水层厚度 (m)； s 为静水位与隧道设计路面的高差； R 为影响半径； K 为岩层渗透系数。

右线隧道和斜井涌水量参数计算结果如图4和图5所示，隧道双洞估算涌水量为 $12210m^3/d$ ，双洞同时施工时单洞涌水量 $6105m^3/d$ 。斜井双洞估算涌水量为 $1352m^3/d$ ，双洞同时施工时单洞涌水量 $6763m^3/d$ 。

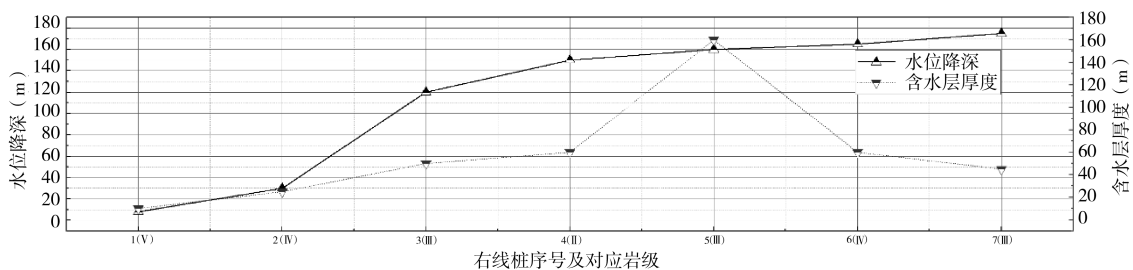
3 结语

相较于单一物探技术，本文采用优化后的集多种探查手段一体的综合物探技术对周家山隧道的工程地质和水文地质特征进行勘探分析，并对隧道和斜井的涌水量进行了计算，得出以下结论。

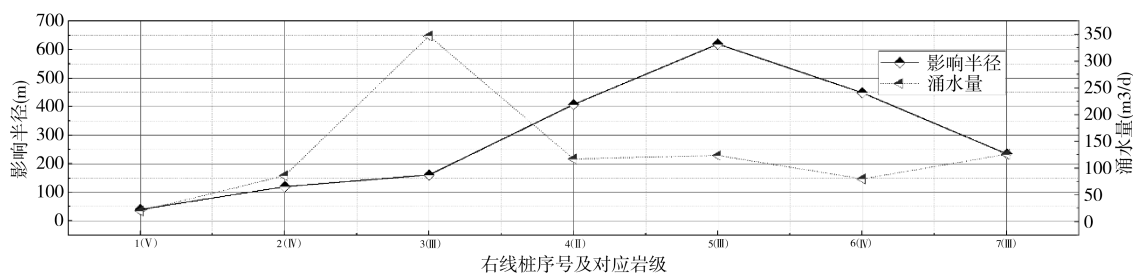
(1)隧道区基岩为加里东期侵入的花岗岩 (γ_m^3)和震旦系变粒岩 (Z_1dn)，受区域性地质构造的影响，节理及裂隙较发育，发育8条断裂构造及挤压裂隙密集带，对隧道围岩级别影响较大。洞身围岩以II-IV级为主，进出口围岩以V级为主。斜井围岩级别：洞身围岩以III-IV级为主，进口围岩以V级为主。局部洞身有压性断裂带及节理



(a) 隧道长度和渗透系数计算结果



(b) 水位降深和含水层厚度计算结果



(c) 影响半径和涌水量计算结果

图 5 右线斜井地下水动力学法计算结果

裂隙密集带断裂构造通过,岩石较为破碎,易在隧道开凿施工时产生掉块或坍塌,且在富水区域伴随局部涌水、突泥、突水情况发生。隧道区域内主要发育了 3 至 4 组裂隙,这些裂隙与隧道轴线呈较大角度相交。然而,由于裂隙之间的相互切割,容易形成楔形岩体。在隧道开挖过程中,可能会引发小规模掉块或坍塌现象。因此,需要加强支护和监测措施,以确保施工安全。

(2) 隧址区地下水主要为基岩裂隙水、构造破碎和影响带裂隙水,水量较丰富,估算隧道双洞涌水量 11995m³/d,斜井双洞涌水量约 1352m³/d,隧道施工宜采用地震回波反射法、地质雷达等综合预报,并结合超前水平钻孔等方法确定破碎带位置、范围和预报岩体及富水情况,提前做好排水、降水和围岩防护措施。斜井为逆

坡施工,应注意采取措施防止山洪从洞口灌入,施工采用超前地震回波反射法结合水平孔确定裂隙破碎带及构造富水情况,提前做好排水、降水,确保施工安全。

(3) 综合物探技术评价应贯穿于工程勘察、设计和施工的全过程,以确保隧道工程的安全性、稳定性和环保性。随着勘察技术的不断进步,隧道建设中的工程和水文地质问题将得到更加有效的解决,为隧道建设提供坚实的技术保障。

参考文献 (References):

[1] 吕敦玉,周建伟,周爱国,等. 青云山隧道水文地质特征及涌水量预测[J]. 安全与环境工程, 2008, 15 (01): 112-116.
 [2] 曾科,许模,张强,等. 傍湖隧道渗漏通道评价及防

- 治措施[J]. 地下水, 2012, 34(02): 169-170.
- [3] 李强. 重庆中梁山地区近邻隧道建设地下水环境效应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [4] 孟庆鑫. 雅康高速飞仙关红层隧道特大涌突水机理分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [5] 吴晓明, 曹嘉一弘, 游涛. 现代市政越岭隧道专项水文勘察技术应用——以拟建的重庆东温泉山隧道为例[J]. 建筑安全, 2022, 37(02): 27-31.
- [6] 杨福荣, 芦军, 杨湘, 等. 多种勘探测试方法在隧道水文地质勘察中的应用研究——以云南省宜良至石林高速公路山冲管隧道为例[C]//中国地质学会. 2018年全国工程地质学术年会论文集. 重庆川东南地质工程勘察设计院, 2018: 423-431.
- [7] 王志杰, 雷飞亚, 高靖遥. 隧道涌水量模糊综合评价法研究[J]. 路基工程, 2019, 36(02): 130-134.
- [8] 郑维, 左昌群, 吴盼盼, 等. 大坪山隧道涌水原因分析及涌水量预测研究[J]. 中外公路, 2014, 38(06): 184-188.
- [9] 崔永兴, 邵长杰, 郑束宁. 复杂水文地质条件下隧道涌水量预测分析[J]. 中外公路, 2020, 40(S2): 195-198.
- [10] 陈亨庄. 海底隧道工程地质综合勘察技术研究[J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(11): 54-60.
- [11] 王健华, 李术才, 李利平, 等. 隧道岩溶管道型突涌水动态演化特征及涌水量综合预测[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1880-1888.
- [12] 程小勇, 黄勤健. 深埋隧道断裂带涌水量预测分析[J]. 人民长江, 2021, 25(08): 133-136.
- [13] 张雷, 赵剑, 张和平. 隧道涌水量预测的计算方法研究[J]. 公路交通技术, 2007, 22(01): 121-123, 129.
- [14] 喻捷. 水文地质在隧道工程勘察中的技术研究[J]. 砖瓦, 2020, 49(04): 72.
- [15] 陈泉霖, 葛晓明, 陈文林, 等. 基于城市工程建设的福建莆田城区地质环境承载力评价[J]. 华东地质, 2020, 41(03): 295-304.
- [16] 邢怀学, 葛伟亚, 华健, 等. 城市地上地下一体化大数据信息平台助力杭州智慧城市建设[J]. 华东地质, 2020, 41(02): 197-197.
- [17] 林丰增. 新时期市级国土空间总体规划编制认识与思考——以福建省宁德市为例[J]. 华东地质, 2021, 42(04): 409-418.
- [18] 韩自强, 陈棚, 曹建. 综合超前地质预报技术在断层发育区隧道下穿水库工程建设中的应用[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(06): 2702-2711.
- [19] 余颂, 李光耀. 采用综合勘测技术研究隧道锚岩体工程地质特征[J]. 土工基础, 2019, 33(01): 91-94, 98.
- [20] 刘猛. 高速铁路隧道勘察钻探与物探综合分析[J]. 铁道勘察, 2021, 47(02): 63-66.

作者简介:

第一作者/通讯作者: 陈亨庄, 1970年生, 男, 福建闽清人, 福建省地质工程勘察院, 高级工程师, 主要研究方向为水文地质工程地质。Email: 3319185388@qq.com

Practices of Geophysical Exploration Technology in Tunnel Engineering and Hydrogeological Survey

CHEN Hengzhuang

(Fujian Provincial Geological Engineering Survey Institute, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The Zhoujiashan Tunnel area is characterized by its vast expanse, complex layer groups, and homogeneous lithology. This paper employs integrated geophysical techniques to optimize the engineering and hydrogeological exploration of the tunnel, and applies these methods to the actual measurement and analysis of the tunnel. It classifies and statistically analyzes the surrounding rock strata of the tunnel and uses groundwater dynamics methods to predict and analyze the water inflow in both the tunnel and the inclined shafts. The primary type of groundwater in the tunnel area is bedrock fissure water, which is recharged by atmospheric precipitation and exists in a phreatic-confined state. During the construction, the advanced seismic echo reflection method, combined with horizontal drilling, is used to identify fissure fracture zones and structural water-rich conditions, facilitating preemptive drainage and dewatering to ensure construction safety.

Key words: hydrogeological exploration; integrated geophysical prospecting technology; water inflow prediction