

文章编号:1673-9469(2023)02-0105-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.02.016

藏东川西交通廊道波密至林芝段重大工程 水文地质条件及问题研究

邵杰¹,滕超^{1*},陈喜庆¹,杨欣杰¹,曹军¹,朱宁¹,肖登¹,吕菲²

(1. 中国地质调查局自然资源实物地质资料中心,河北三河 065201;

2. 国家川藏铁路技术创新中心,四川成都 610200)

摘要: 为研究藏东川西波密至林芝段重大工程的水文地质条件和存在的主要工程水文地质问题,在参考前人研究成果基础上,通过开展关键钻孔岩心地质编录和野外水文地质调查等研究工作,得出了相关研究结果。结果表明:沿线具有高寒、高陡、高地震烈度、高地应力、高地温、高水压等复杂的地质环境特征,主要存在深埋长大隧道高水压涌突水、断裂带基岩裂隙高压突水、高温热水热害、隧道排水对生态环境影响等四类水文地质问题。易贡隧道外水压力预测值在0.80~3.47 MPa之间,易贡隧道和色季拉山隧道预测涌水量最大值接近或超过 $10\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$,拉月隧道附近沿线25个钻孔实测孔底温度在12.5℃~93.5℃。

关键词: 波密至林芝段;水文地质条件;工程水文地质问题;高压涌突水;高温热水热害

中图分类号: P641

文献标识码: A

Research on the Hydrogeological Conditions and Problems of Major Projects in the Bomi to Linzhi Section of the East Tibet and West Sichuan Traffic Corridors

SHAO Jie¹, TENG Chao^{1*}, CHEN Xiqing¹, YANG Xinjie¹, CAO Jun¹, ZHU Ning¹,
XIAO Deng¹, LV Fei²

(1. Cores and Samples Center of Natural Resources (CSCNR), China Geological Survey (CGS), Sanhe, Hebei 065201, China; 2. National Sichuan-Tibet Railway Technology Innovation Center, Chengdu, Sichuan 610200, China)

Abstract: In order to study the hydrogeological conditions and main engineering hydrogeological problems of the major project from western Bomi to Nyingchi section in eastern Tibet, On the basis of the previous research results, the relevant research work of key borehole core geological cataloging and field hydrogeological investigation. The results show that there are four types of hydrogeological problems along the route, such as high cold, high steepness, high seismic intensity, high ground stress, high ground temperature and high water pressure. There are mainly four types of hydrogeological problems, such as high water pressure water inrush in deep-buried long tunnel, high pressure water inrush in fracture zone bedrock, thermal damage caused by high temperature hot water, and the influence of tunnel drainage on ecological environment. The predicted water pressure outside the Yigong tunnel is between 0.80 and 3.47 MPa, the predicted maximum water inflow of the Yigong Tunnel and Seijilashan tunnel is close to or over $100\ 000\text{m}^3/\text{d}$, and the measured bottom temperature of 25 boreholes along the Lanyue tunnel is between 12.5℃ and 93.5℃.

Key words: bomi to Linzhi section; hydrogeological conditions; engineering hydrogeological problems; high pressure water inrush; thermal damage from high temperature hot water

收稿日期:2022-11-10

基金项目:国家重大工程建设实物地质资料综合剖面调查与应用服务(DD20221814)

作者简介:邵杰(1989-),男,安徽亳州人,硕士,工程师,主要从事水工环地质调查与研究工作。

* 通讯作者:滕超(1985-),男,宁夏中宁人,硕士,高级工程师,主要从事地质调查与研究工作。

长期以来,针对青藏高原的关键地质问题国内外学者分别从内、外动力作用效应两方面进行了较为深厚的研究,对重大工程建设沿线滑坡、泥石流等浅表层地质灾害和高地应力、高地温及软岩大变形等地球深部重大灾害开展了大量调查研究工作^[1-4]。现有成果从不同角度对沿线主要工程地质问题进行了阐述,但关于深埋长大隧道高压涌突水、高温热水热害等水文地质问题缺乏系统、全面的认识。

川藏交通廊道沿线地质环境极其恶劣,孕育了高寒、高陡、高地震烈度、高地应力、高地温、高压和大规模突涌水等复杂的地质环境条件,尤其是存在的水文地质问题无疑为川藏交通廊道工程设计、隧道与桥梁建设、后期安全运营带来巨大挑战和科学难题。关于波密—林芝段沿线的水文地质条件研究程度相对较浅,对于含水岩组类型、含水层结构、地下水的补径排特征、地下水循环演化等方面认识相对较薄弱。基于此,本文统筹地下钻孔岩心地质信息和地表地质现象认识,对波密至林芝段的水文地质条件及存在的问题进行深入的分析研究并提出合理的应对建议,以此为波密—林芝段施工及安全运营提供科学依据和技术支撑。

1 区域地质背景

1.1 地形地貌

欧亚大陆板块和印度洋板块的持续碰撞塑造了青藏高原及周缘复杂的地形地貌特征。青藏高原地貌形态的控制因素是高原抬升,断层和褶皱的强烈活动及河流的强烈下切,这些内力和外力地质作用不断地改变着高原的平均海拔和山系的形态。研究区大面积隆起致使河流不断下切,区内地形起伏高差近 3 000 m,形成了具有典型的“V”字型高山深切峡谷地貌、高寒丘陵等不同特点的地貌形态。

塑造山地形态的主要营力来自于区域地表上分布的古冰川、现代冰川和寒冻风化作用。区内主要地貌类型为河谷堆积地貌、冰川地貌和高山峡谷地貌等三类地貌。

1.2 地质构造

研究区在构造演化过程中不仅经历了雅鲁藏布江的生成、俯冲及闭合过程,还经历了印度板块与欧亚板块之间的相互碰撞事件,其中碰撞事件直接导致两块板块碰撞边界发生汇聚。在区域构

造演化过程中,一系列大型区域性活动断裂带在雅鲁藏布江下游地区形成,如雅鲁藏布江断裂带、嘉黎—易贡断裂带等。从波密—林芝段沿线易贡、拉月、鲁朗及色季拉山等隧道编录的钻孔岩心情况来看,研究区的东构造结致使隧道钻孔岩心呈现不同程度的变质和破碎化,嘉黎—易贡活动断裂带致使易贡隧道钻孔岩心极其破碎化。区域内河流如雅鲁藏布江、易贡藏布江、迫龙藏布江等的走向均受到上述断裂的控制^[5-6]。

1.3 地层岩性

研究区出露的地层主要有中新元古界、泥盆系、石炭系、侏罗系、第四系,其中除第四系以外,各时代地层均已发生不同程度的变质。包括前寒武系念青唐古拉岩群 a 组、b 组、c 组、泥盆系的松宗组、石炭系的诺错组、石炭系的来姑组、侏罗系及第四系。从波密—林芝段沿线易贡、拉月、鲁朗及色季拉山等隧道的钻孔岩心编录情况发现,地层岩性均有发现。

2 水文地质及工程地质环境特征

2.1 水文地质分区

波密—林芝段受印度洋暖湿气流影响,沿线气候垂直、水平分带明显。研究区气候具有高寒特点,年平均气温介于 7℃~10℃,最高气温达 30℃,最低气温低至-30℃,温差高达 60℃。复杂的地质、地貌环境决定了气候具有地带性的特点。结合地形地貌条件,波密—林芝段自东向西依次可划分为半湿润气候水文地质区、半干旱气候水文地质区、湿润气候水文地质区以及高寒气候水文地质区。

2.2 含水岩组类型

受青藏高原隆升、板块碰撞和构造作用影响,川藏交通廊道沿线含水岩组类型多样。波密至林芝段主要包括第四系松散堆积层含水岩组、花岗岩和闪长岩等岩浆岩类含水岩组、砂岩和灰岩等沉积岩类含水岩组以及片麻岩和板岩等变质含水岩组。

2.3 地下水类型及赋存特征

按照区内含水介质和孔隙特征,结合地下水的埋藏和分布条件,可将研究区地下水划分为第四系松散岩类孔隙潜水、基岩裂隙水、岩溶水、构造裂隙水。

第四系松散岩类孔隙水主要分布于波密—林芝段沿线松散堆积层中,多以潜水为主,不具承压性,埋藏深度差异较大。其中,冲洪积层、冰水堆积层等主要呈带状分布于区内雅鲁藏布江一级支流或次级支流如帕隆藏布、易贡藏布、迫龙藏布、彼得藏布、亚龙藏布和尼洋河等河流的河道、河漫滩和河流阶地,含水层结构松散,渗透性较好,多见有漂石、卵石、砂类土等。崩积层、残坡积层和滑坡堆积层等多呈不连续状分布,多分布于陡坡和斜坡等地。松散岩类孔隙水主要接受大气降水和冰雪融水的补给,在松散的砂卵砾石层间径流,一般就近汇入区内排泄基准面。

区内基岩裂隙水按照含水介质可划分为碎屑岩裂隙水、岩浆岩基岩裂隙水、变质岩基岩裂隙水。碎屑岩含水岩组分布广泛,主要地层为石炭系来姑组(C_2P_{1l})、石炭系诺错组(C_{1n})及泥盆系的松宗组(D_{2-3s})。变质岩裂隙水涉及的岩性主要为片麻岩夹混合质花岗岩为主,主要赋存于近地表岩体的风化裂隙中,因地形切割导致厚度不大的风化带含水性不均匀,致使其透水性较好、富水性较差。岩浆岩裂隙水主要赋存于区内花岗岩裂隙中。

据野外调查发现,由于区内构造断裂广泛分布,导致基岩的节理裂隙相对发育,透水性较好,基岩裂隙水的赋存条件较差,水量呈现总体贫乏、局部富集的特征。波密—林芝段岩溶水主要分布于波密地区。主要为碳酸盐岩裂隙岩溶水、碳酸盐岩夹碎屑岩裂隙岩溶水。灰岩、大理岩分布区域单一且集中,因岩溶裂隙发育,以中-强富水性为主。

波密—林芝段构造裂隙水主要分布于断裂带和褶皱内,其中背斜两翼、向斜核部因其较为发育的节理裂隙成为了地下水的富集区。沿线大型断裂带性质大多为压扭性,并且是活动断裂带。据沿线隧道钻孔岩心观察,断裂破碎带胶结性较差,岩心碎裂(图1),为地下水储集、运移提供了有利空间,富含地下水,也是构造裂隙水赋存的基本条件。主要接受当地大气降水和冰雪融水的垂向补给,径流强度中等。

综上,波密—林芝段沿线具有丰富的地下水,沿线的基岩在极高的地应力作用下容易产生破裂形变,裂隙高度发育,为地下水赋存和岩溶发育提供了条件。波密地区的碳酸盐岩裂隙中发育大量岩溶水。高度发育的褶皱构造和断裂带内,向斜

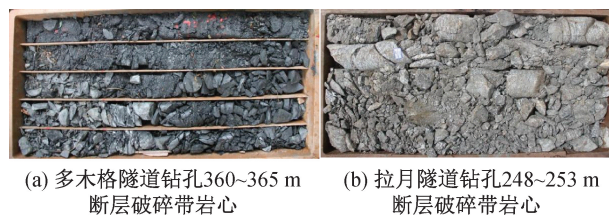


图1 波密—林芝段断层破碎带钻孔岩心

Fig. 1 Borehole core of Bomi to Linzhi fault fracture zone

核部、背斜及两翼节理裂隙密集发育,地下水富集。充沛的大气降水、持续的冰雪融水、大量的河水等下渗,为地下水提供了源源不断的补给。极丰富的地下水资源,极易造成隧道的突涌水事故^[7]。

2.4 地下水补径排特征

所处区域的地层岩性、地质构造塑造了研究区的地下水补给、径流、排泄特征的基本格局,除此之外,还受到区域地形地貌、气象水文等因素的重要影响。研究区地下水主要接受大气降水、冰雪融水及季节性冻结层融化水的“冰-水”双源补给,除此之外,第四系松散堆积层地下水则主要接受地表水体的相互补给。径流特征受含水结构控制,在重力作用下,在松散堆积层孔隙、岩溶溶隙、基岩裂隙中形成径流。其中基岩裂隙水一部分直接补给两侧沟溪内,一部分下渗进入构造裂隙、溶隙中。由于受到局部地带的地形、断裂控制等因素影响,裂隙水在运移过程中受阻以泉的形式排泄至地表。地下水大多就近汇入区内最低侵蚀基准面即排泄基准面。

2.5 主要隧址区地下水化学特征

地下水在松散岩类孔隙、岩溶溶隙、基岩裂隙径流过程中与围岩发生水-岩相互作用,地下水携带的地质信息有助于进一步认识其补给、径流、排泄特征。主要基于前人对波密—林芝段多木格隧址区、易贡隧址区^[8]、拉月隧址区^[9]、色季拉山隧址区^[10]的地下水化学特征研究成果,通过研究波密—林芝段主要隧址区的地下水化学特征,深化对沿线地下水的形成、分布、迁移和富集规律的认识^[11]。

多木格隧址区水化学特征反映出区内地下水和雪融水均处于快速入渗、径流、排泄过程中。结合区内构造复杂,含水介质裂隙相对发育特征,可认为地下水系统与地表水联系紧密,地下水系统对外部补给量变化响应快速,丰枯季融雪补给量变化对研究区地下水系统有着不可忽视的影响。易贡隧址区钻孔水样主要为 SO_4-Ca 型水和 SO_4-Na 型水,

表 1 波密—林芝段主要隧址区地下水化学特征

Tab. 1 Brief table of formation lithology of Bomi to Linzhi section

主要隧址区	pH	TDS($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	主要阴阳离子	水化学类型	备注
多木格隧址区	—	—	SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}	$\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$	主要为隧址区出露的泉水,以雪融水作为补充
易贡隧址区	7.96~8.59	219.6~1314.5	SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Na^+	SO_4-Ca 、 SO_4-Na	推测隧址区地下水可能来自深部循环,径流途径较长
拉月隧址区	6.4~7.74	466.0~938.0	SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Na^+ 、 K^+	$\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3-\text{Na}$ 、 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3-\text{Ca}$ 或 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Na}$	整体偏碱性,主要是拉月温泉群水,温泉水源主要来自周边山区大气降水和冰雪融水,分布于雅鲁藏布江缝合带中
色季拉山隧址区	7.33~11.28	17.2~572.3	SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+	$\text{SO}_4-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 、 HCO_3-Ca	地下水整体呈弱碱性,水体更新速度快,径流途径短

矿化度在 219.6~1314.2 mg/L,其中 ZK01 孔值为 890.2 mg/L、ZK05 孔最高值为 1314.5 mg/L, ZK07 孔值为 1229.3 mg/L,推测地下水可能来自深部循环,且 pH 值均介于 7.96~8.59,表明地下水化学类型总体为 SO_4-Ca 型水,呈弱-中碱性。拉月隧址区温泉水 Na^+ 与 K^+ 相关系数为 0.740,表现为显著正相关关系,反应出两者可能存在共同物质来源。 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 相关系数为 0.834,表现为强相关关系,推断温泉形成运移过程中可能存在石膏等硫酸盐矿物的溶解作用。色季拉山隧址区总体水化学类型以 $\text{SO}_4-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型水为主,部分水样呈现 HCO_3-Ca 型,表明隧址区水化学离子主要来源于硫酸盐岩溶解或大气中 SO_2 溶解于水。

2.6 高地震烈度

波密—林芝段沿线存在两个潜在震源区,分别是波密—通麦潜在地震源和主喜马拉雅潜在地震源。地震活动十分频繁,地震烈度为 9 度。据西藏自治区地震局记载,从 1911—1965 年间,波密县境内发生 4 级以上地震 170 余次,5 级以上地震 130 余次。地震可激发泥石流、冰崩、雪崩、岩崩和滑坡。如古乡沟在 1953 年爆发的泥石流是当时的冷区河地震触发。

2.7 高地应力

波密—林芝段穿行于印度板块与欧亚板块挤压区,水平主应力均大于垂直主应力,属于强烈挤压区。当线路沿线的隧道埋深大于 500 m 时,强度应力比值小于 4,即会产生极高地应力^[12]。由于线路的隧道比超过 80%,隧道埋深大于 500 m 的段落占比高达 90%,使得沿线高地应力突出,将对隧道施工安全产生严重影响。

2.8 高地温

波密—林芝段沿线位于地中海—南亚地热异常带,主要是通麦—拉月地热带。沿线分布有通麦温泉、拉月温泉及长青沸泉等诸多温泉,主要受嘉黎活动断裂和雅鲁藏布江缝合带等控制。高地温将对隧道施工及后期交通廊道安全运行形成威胁。

3 重大工程水文地质问题

波密—林芝段穿越东构造结的西缘,喜马拉雅东构造结位于雅鲁藏布江大拐弯处,是现今地球上构造活动最强烈、地貌演化最快的地区之一。加上混杂的地层岩性,致使沿线水文地质条件复杂^[13]。建设过程中主要存在深埋长大隧道高水压涌突水、断裂带基岩裂隙高压突水、高温热水热害、隧道排水对生态环境影响等重要水文地质问题,这些重大水文地质问题时刻威胁着川藏交通廊道的施工建设和后期安全运营。

3.1 深埋隧道高水压涌突水问题

在隧道深埋条件下,隧道埋深越深,含水层往往越多地被揭露,隧道汇水面积也随之扩大,四周的地下水补给越充足。在隧道上覆岩体自身重力影响下,隧道总涌水量逐渐增大。特殊的储水构造如中-缓倾斜储水构造、向斜储水构造,容易造成严重的隧道高压突水突泥、衬砌渗漏水等事故,进而对隧道施工带来严重安全隐患。例如,位于高海拔地区的新疆精伊铁路北天山隧道,最大涌水量达 $0.46 \text{ m}^3/\text{s}$,水压高达 5 MPa。

据波密—林芝段易贡隧道钻孔资料显示,钻孔地下水具有较强的承压性,深埋长大隧道在穿越储水构造时将会面临较大的涌突水风险,且具

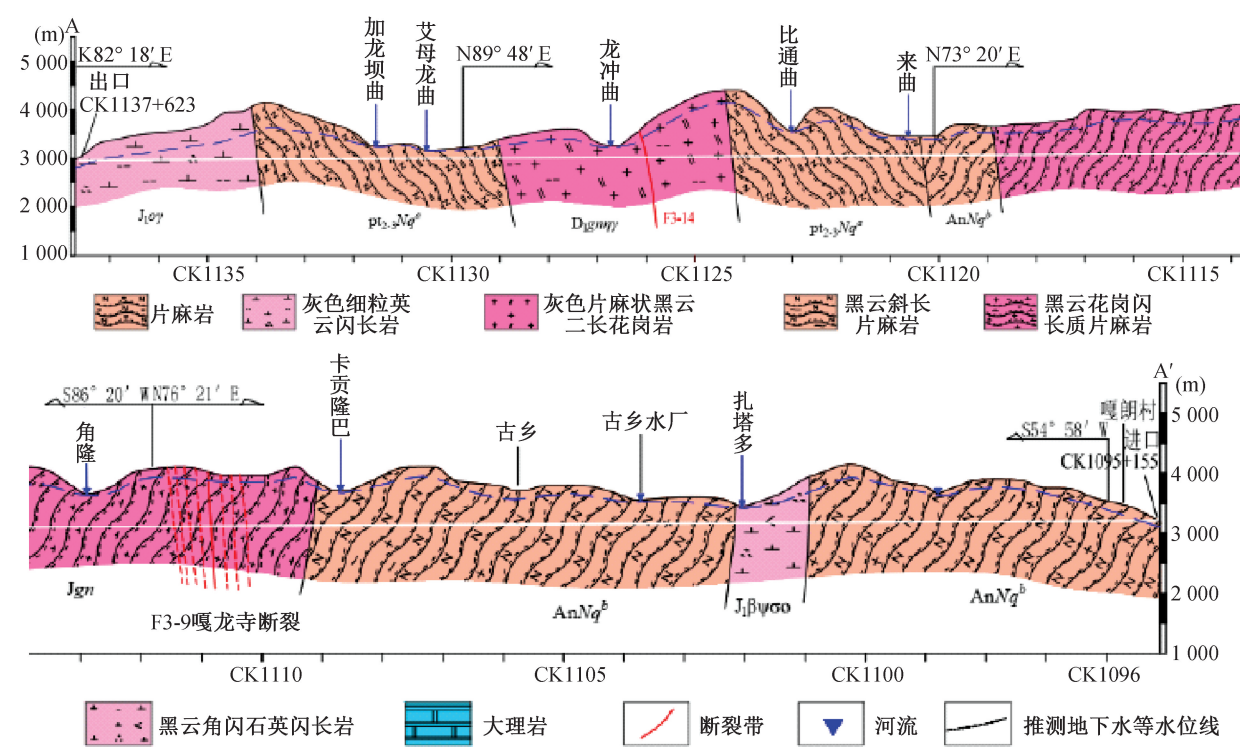


图 2 易贡隧道纵剖面图
Fig. 2 Longitudinal section of Yigong tunnel

表 2 易贡隧道 CK 线外水压力预测结果

Tab.2 Prediction results of external water pressure of Yigong tunnel CK line					
隧道分段桩号	分段长度/ m	岩性特征	地下水位至隧道顶的深度/ m	静水压力/ MPa	外水压力/ MPa
CK1095+155—CK1095+451	296	中硬岩	隧道位于地下水位以上		
CK1095+451—CK1100+936	5 485	中硬岩	375	3. 75	1. 13
CK1099+936—CK1102+162	1 226	硬岩	363	3. 63	1. 45
CK1102+162—CK1109+156	6 994	中硬岩	526	6. 26	1. 58
CK1109+156—CK1110+254	1 098	中硬岩	733	7. 33	2. 20
CK1110+254—CK1111+450	1 198	中硬岩	772	7. 72	3. 47
CK1111+450—CK1118+828	7 378	中硬岩	570	5. 70	1. 71
CK1118+828—CK1120+341	1 513	中硬岩	405	4. 05	1. 22
CK1120+341—CK1124+237	3 894	硬岩软岩互层	795	7. 95	2. 39
CK1124+237—CK1125+971	1 734	中硬岩	760	7. 60	3. 04
CK1125+971—CK1125+31	60	中硬岩	414	4. 14	1. 86
CK1125+31—CK1128+977	2 946	中硬岩	300	3. 00	1. 20
CK1128+977—CK1133+971	4 994	硬岩软岩互层	395	3. 95	1. 19
CK1133+971—CK1138+286	3 315	中硬岩	267	2. 67	0. 80
CK1138+286—CK1137+623	337	中硬岩	隧道位于地下水位以上		

有涌水量大、水头压力高等特点。由此可见,深埋长大隧道的高水压涌突水问题是铁路修建过程应十分关注的重要水文地质问题之一。易贡隧道线路整体上受地下水埋深、地层岩性、断层破碎带影响压力较大,外水压力最大值皆出现在断层发育段,隧道最小埋深约 976 m,图 2 为易贡隧道纵剖面图,其隧道各分段外水压力预测值见表 2。

3.2 断裂带基岩裂隙高压突涌水

波密—林芝段沿线地下水的富集受控于地质构造、地层岩性、地形地貌等因素。断层发育普遍会增多断层周围的构造裂隙,往往断层破碎带岩石较为碎裂,胶结性较差,导水性能较好,利于地下水的赋存,形成带状含水带^[14]。断裂密集带、断层破碎带的可溶岩、碎性岩展布区易形成破碎的

表 3 易贡和色季拉山隧道涌水量预测结果一览表

Tab. 3 List of water inflow prediction results of Yigong and Sejila mountain tunnels

隧道线路	水均衡法		地下水动力学法	
	地下水径流模数法		铁路经验公式	
	正常涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	最大涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	正常涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	最大涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
易贡隧道 CK 线	46 334.33	92 668.67	33 196.49	96 246.95
色季拉山隧道 GK 线	85 089.80	170 179.59	88 011.03	190 198.77

表 4 拉月隧道线路附近主要钻孔测温结果

Tab. 4 Temperature measurement results of main boreholes near the line of layue tunnel

钻孔编号	孔口高程/m	孔深/m	孔底温度/℃	钻孔编号	孔口高程/m	孔深/m	孔底温度/℃
FZ-1	2 550	88.3	35.40	SZ-2	2 775	242.0	56.40
FZ-2	2 507	86.1	24.50	SZ-3	2 910	390.0	66.71
FZ-3	2 472	89.0	17.00	GZ-1	3 588	915.0	58.70
FZ-4	2 650	240.0	29.70	GZ-2	3 330	650.0	24.00
FZ-5	2 739	85.0	18.10	GZ-3	3 550	1 300.0	46.30
FZ-6	2 493	85.0	28.30	GZ-4	3 225	520.0	52.56
FZ-7	2 588	85.0	24.10	GZ-5	3 348	813.0	74.30
FZ-8	2 750	150.3	16.40	YZ-1	2 040	85.0	15.00
FZ-9	2 376	85.0	93.50	YZ-1	2 050	90.0	12.50
FZ-10	2 105	85.0	60.40	YZ-1	2 080	90.0	16.90
FZ-11	2 612	300.0	68.30	YZ-1	2 968	961.0	19.82
FZ-12	3 050	360.0	14.11	YZ-1	2 928	185.0	14.30
SZ-1	2 702	200.0	56.30	—	—	—	—

储水空间及深部的循环通道。当隧道穿越地层的断裂破碎带越发育,地下水进入隧道的概率随之增大,会造成隧道内涌水量增加,进而引发隧道施工安全。据波密—林芝段已完成的 101 个钻孔深孔水位测试成果及预测的隧道涌水量数据表明,钻孔水位与轨面距离大于 500 m 的钻孔 24 个,主要集中在波密—林芝段交通廊道沿线的易贡隧道、通麦隧道、拉月隧道、鲁朗隧道以及色季拉山隧道,其中丰水期估算最大涌水量接近或超过 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的隧道为易贡隧道、拉月隧道、色季拉山隧道,分别采用水均衡法和地下水动力学法对隧道线路涌水量进行预测,具体结果见表 3。

3.3 高温热水热害

伴随着印度板块和欧亚大陆板块的陆陆碰撞,青藏高原地区新生代岩浆活动和水热活动相当活跃,导致了区域性热流异常背景,形成著名的喜马拉雅地热带。该区的平均热流值(约 $90 \text{ mW}/\text{m}^2$)远高于我国大陆地区平均热流值($61.5 \pm 13.9 \text{ mW}/\text{m}^2$),形成著名的喜马拉雅地热带。青藏高原地区中上地壳普遍存在不连续的低速高导层,为深部岩浆向上侵位以及地壳加厚产生热能导致的部分熔融。该部分熔融体为地热流体的主要热源,辅

构造变形产热和花岗岩放射性元素生热,驱动并维系着喜马拉雅地热带强烈的水热活动。

为查明喜马拉雅东构造结的地热分布特征,确定拉月隧道线路方案及热害问题,在交通廊道正线及垂向沟谷完成了 25 个钻孔的勘探及测温,测温结果如表 4 所示。

波密—林芝段穿越藏南雅鲁藏布江大拐弯水热活动区,具体穿越波密—倾多地热异常区和拉月—通麦地热异常区。据实测数据显示,长青沸泉温度高达 $95.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (图 3(a)),涌水量 $5 \sim 6 \text{ L/s}$,天然热流量 $1.884 \times 10^4 \text{ kJ/s}$,硫化氢气味很浓,矿化度和 pH 值较高。拉月温泉、排龙温泉温度(图 3(b))介于 $37.2 \text{ }^\circ\text{C} \sim 78.5 \text{ }^\circ\text{C}$,甲中温泉、拍拍温泉温度介于 $18.5 \text{ }^\circ\text{C} \sim 41.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。深埋长大隧道穿越高地温异常区施工过程中可能遭受高压热水、涌突热水、热水腐蚀、高温岩体等热害问题,进而对川藏交通廊道施工和安全运营带来安全隐患。例如,藏南谷地桑加段桑珠岭隧道,爆破后掌子面岩面温度达到 $69.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.4 隧道排水对生态环境影响

青藏高原地区生态环境具有脆弱性、敏感性的特点,波密—林芝段沿线穿越原始森林、草原、

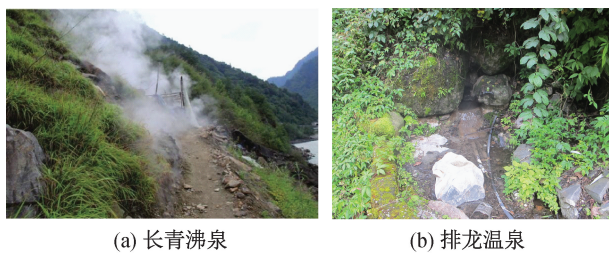


图3 位于喜马拉雅东构造结的长青沸泉和排龙温泉
Fig. 3 Changqing Hot Spring and Pailong Hot Spring
located in the Eastern Himalayas

冻土、湿地等生态系统。隧道的开挖不可避免地改变了地下水含水层结构、地下水流场、水环境平衡以及围岩力学平衡,进而改变地下水的动力学条件,导致形成新的势汇条件。地下水渗流场因隧道施工排水而不断变化,地下水位持续下降,导致降落漏斗范围不断扩大。大量的静储量的地下水不断被排出,最终造成含水层疏干(隧道修建前后地下水位变化情况如图4)。隧道排水导致隧址区周边的泉点、河流、沟溪等地表水体流量不断减少,改变了地表水与地下水的相互转化的自然条件。从而对隧址区周边植被、动物、以及人类饮用水源地等生态环境造成较大影响。

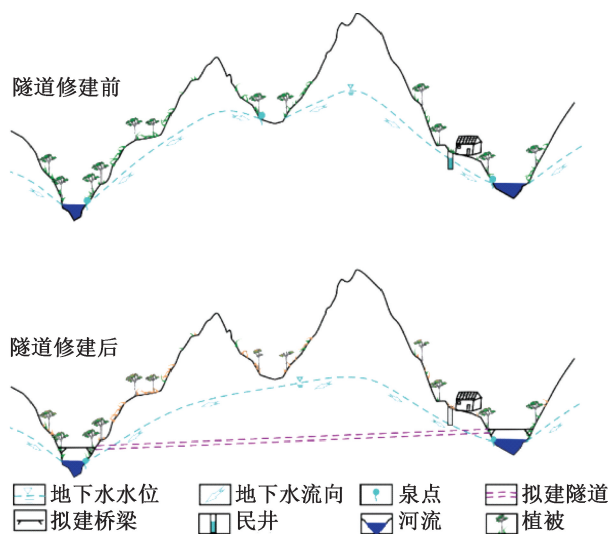


图4 隧道排水对地下水渗流场的影响
Fig. 4 Influence of tunnel drainage on groundwater seepage field

4 对策建议

4.1 深埋隧道高水压涌突水

开展精细的大比例尺的水文地质调查工作,准确认识隧址区的地质结构、地层岩性、地下水含水层结构、地下水动力条件及地下水演化过程等方面。综合运用遥感技术、航空物探、无人机三维

技术、定向钻探等新技术,加强超前地质预报,对可能出现的高压涌突水地段科学制定技术预案。

4.2 断裂带基岩裂隙高压突水

深化区域地质构造和断裂带的认识,尤其是对富水性好、富水量大的深大断裂带的研究要加强。隧道开挖过程中综合运用多种手段,以超前钻探为主,结合物探、地质雷达等先进设备进行超前地质预报,对高压富水段采取超前排水泄压措施,以此消除可能出现的高压涌突水安全隐患。

4.3 隧道高温热水热害

系统研究川藏交通廊道穿越热流异常区高温热水的成因机制,最大限度减少对热流异常区的开挖破坏程度。科学制定隧道排放热水环境影响的应急预案。加强地热水的超前地质预报,选择有利位置安装地热水水温、水量、水质动态监测仪器,实现实时动态监测。隧道施工过程中增设冷却塔或其他降温设施以应对可能出现的高温热水热害问题。

4.4 隧道排水对生态环境影响

在深化对隧址区水文地质条件认识的基础上,探明掌子面及隧洞前方地质条件,坚持“以堵为主、限量排放”的防治水原则。建立长期监测点,安装对地表水和地下水水位、水温、流量、水质等长期观测或测试仪器。发现有异常及时调整施工方案。

5 结论

1) 沿线主要发育第四系松散堆积层含水岩组、花岗岩和闪长岩等岩浆岩类含水岩组、砂岩和灰岩等沉积岩类含水岩组以及片麻岩和板岩等变质含水岩组。隧址区地下水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型等。

2) 主要存在深埋长大隧道高水压涌突水、断裂带基岩裂隙高压突水、高温热水热害、隧道排水对生态环境影响等4类重大工程水文地质问题。

3) 易贡隧道外水压力预测值在 $0.80 \sim 3.47 \text{ MPa}$ 之间,易贡隧道和色季拉山隧道预测涌水量最大值接近或超过 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,拉月隧道附近沿线25个钻孔实测孔底温度在 $12.5 \text{ }^\circ\text{C} \sim 93.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

参考文献:

- [1] 赵留辉. 川藏铁路昌都至林芝段对地下水环境的影响及对策[J]. 铁道建筑, 2020, 60(10): 155-156.
- [2] 许模, 蒋良文, 李潇, 等. 川藏铁路雅安至林芝段重大

- 工程水文地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 14-16.
- [3] 张永双, 郭长宝, 李向全, 等. 川藏铁路廊道关键水工环地质问题: 现状与发展方向[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 2-8.
- [4] 郭长宝, 王保弟, 刘建康, 等. 川藏铁路交通廊道地质调查工程主要进展与成果[J]. 中国地质调查, 2020, 7(6): 2-4.
- [5] 宋健, 唐方头, 邓志辉, 等. 青藏高原嘉黎断裂晚第四纪运动特征[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2013, 49(6): 974-978.
- [6] 郑来林, 金振民, 潘桂棠, 等. 东喜马拉雅南迦巴瓦地区区域地质特征及构造演化[J]. 地质学报, 2004, 78(6): 744-748.
- [7] 王玉海, 李曦滨, 李茸, 等. 曹村煤矿十采区水文地质条件与突水危险性分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2010, 27(3): 66-68.
- [8] 张宇. 川藏铁路贡嘎隧道水文地质条件及线路优选研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [9] 彭琪. 拉月隧道温泉成因机制及地温场数值模拟研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [10] 朱志强. 色季拉山隧道工程岩体渗透特征及涌水预测研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [11] 郭艺, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 基于聚类分析与因子分析的西藏高原南部湖水水化学特征研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2021, 38(3): 81-89.
- [12] 李倩, 王普, 王秀村, 等. 基于改进多属性群决策的高速铁路建设项目质量管理绩效评价[J]. 铁道学报, 2018, 40(5): 156-163.
- [13] 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 446-460.
- [14] 马剑飞, 李向全, 张春潮, 等. 西藏波密冰川覆盖区大型河流与断裂带地下水转化关系[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 24-32.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 90 页)

- [4] 赵迎辉. 高速交会列车的气动性能及车辆动力学特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [5] 田红旗. 风环境下的列车空气阻力特性研究[J]. 中国铁道科学, 2008(5): 108-112.
- [6] 周鹏. 高速列车气动特性及环境影响研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [7] 张小钢, 刘应清, 赵海恒. 高速列车经过路边建筑物时的非定常湍流绕流数值模拟研究[J]. 铁道学报, 1998(2): 88-93.
- [8] 金海, 杨立国, 陈凯. 地铁列车高速过站风环境数值模拟研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2015, 51(4): 606-612.
- [9] 王英学, 高波, 骆建军, 等. 高速列车进入隧道空气动力学模型实验分析[J]. 空气动力学学报, 2004(3): 346-351.
- [10] 王瑞丽. 高速列车驶入隧道气动效应数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [11] 周朝晖, 许建林, 梅元贵. 高速铁路隧道空气动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [12] 黄颖. 城际铁路隧道及地下车站空气动力学效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [13] 徐文协. 高速地铁列车在单洞双线隧道中的空气动力效应研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- [14] 管鸿浩, 龚彦峰, 踪敬良, 等. 高速列车单列通过时双线隧道内列车风分布规律研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(6): 83-89.
- [15] 蒋尧, 李奎, 胡炜, 等. 时速 350 km 高速铁路半地下车站气动效应影响研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(S1): 187-193.
- [16] 邓隆. 高速铁路隧道洞口异型缓冲结构气动参数分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [17] 韩华轩. 高速铁路地下车站隧道气动效应及缓解措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [18] 闫亚光, 杨庆山. 高速列车隧道内会车时气动舒适性研究[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(1): 56-61.
- [19] 李凌宇. 地下高铁站台屏蔽门气动效应研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 104 页)

- [7] 王海军, 陈海滨, 余佩义. 平板闸门小开度时侧收缩引起的水流现象试验研究[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2007(1): 28-30+35.
- [8] 樊晶晶, 王海军, 毛舒娅, 等. 平板闸门小开度闸后水流特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 124-128.
- [9] 郝鑫, 黄海艳, 王海军, 等. 高水头平板闸门小开度的数值模拟与试验对比[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 30-34.
- [10] 苟超, 杨红宣, 沈春颖, 等. 折流角变化下的旋流式竖井溢洪道涡室脉动压强试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 214-220.
- [11] 郭子敬. 基于矢量和法的库水位下降边坡稳定性研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2018, 35(2): 31-34+48.
- [12] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [13] 王蓓, 吕城腾, 纪南. 某水电站倾倒岩体基于 UDEC 变形评价方法研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2017, 34(3): 60-64.
- [14] 苟小武, 刁明军, 王川隘, 等. 消力池尾坎坡度对底板脉动压强特性的影响试验研究[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2022, 48(6): 701-708.

(责任编辑 周雪梅)