新疆某千米埋深隧道断层控制地热成因及热害评价

柴琛[1]，周昌[1*]，夏钊[2]，王修春[2]，梁龙飞[1]，董青红[1*]

1. 中国矿业大学资源与地球科学学院，江苏 徐州 221116；
2. 湖南省水务规划设计院有限公司，长沙 410008

第一作者，E-mail：TS23010102P31@cumt.edu.cn

* 通信作者，E-mail：changzhou@cumt.edu.cn; dongqh@126.com

2024-05-30 收稿；2025-02-08 修回；2025-02-14 接受

基金项目：新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B03017; 2021B03004-3)

中图分类号：TD313　　文章编号：2096-8523(2025)04-0304-12　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240290

摘　要：深部隧道建设受到各种地质活动的影响，其中地热活动严重影响了施工安全和效率，而目前研究缺乏对地热成因的实例研究。以拟建新疆某高速公路隧道(最大埋深 1348 m)为例，通过物探、钻探、水文地球化学、热红外遥感、无人机等方法得到该隧道工程地质、水文地质特征，对隧道附近温泉分布和高温等特征进行了研究。结果表明：温泉仅分布在 F36 与 F37 断裂交汇处 EN 方向的沟谷地区；研究区存在低电阻岩体破碎带，尤其分布在断层和温泉点附近；同时温泉水样矿化度与阿尔先河水相比相差很大，温度也略高于周围地层。研究得出研究区内地热水形成机制：地热水并非由较近的阿尔先河水补给，而是由大气降水和 3000 m 外的冰雪融水补给，地下水汇聚到 F35、F36、F37 断层交汇点附近在地下约 200 m 处遇深部热源加热，高温地下水沿 2 个断层交汇处裂隙向地表流动。同时采用了层次分析法对该隧道拟建线路开展热害评估，将断层、地温、隧道涌水、围岩岩性 4 个因素作为主要影响因子，评估结果表明，B8 线路分值最低，说明其受热害影响程度最小，判断 B8 线为最优线路。本研究揭示了深埋隧道地热活动的形成机制与分布规律，为高寒山区隧道热害防治提供了科学依据。

关键词：深埋隧道；地热成因；断层控制；热害；新疆

在隧道施工过程中，围岩等级、地下水、偏压、开挖方式不合理是引起工程事故的重要因素[1]。而对于大埋深长隧道而言，地温和地下水成为限制施工的最主要原因[2-3]，特别是在我国西部高原地区，在建设大埋深、穿越活跃地质构造区的长隧道过程中面临着围岩温度过高和高温涌水的问题[4-8]。例如，黑白水三级电站引水隧道、玉蒙铁路旧寨隧道内水温达到 45℃ 以上[9]，而我国西部一些大埋深长隧道内岩温甚至达到了 70℃ 以上[10-11]。新疆地区存在天山等多个山脉，地势高低起伏，为构造热演化创造了有利条件，天山地区发现多处温泉出露，水温 20～50℃[12]，新疆布仑口−公格尔水电站引水发电洞施工过程中探测洞内岩石最高温度达到 105℃[13]。受地势影响，新疆道路建设中存在大量隧道施工，因此，研究隧道地热活动规律、评价热害对于当地隧道建设具有重要意义。

地热水通常在水源、流向、排放方式、热源等各方面表现出复杂性和差异性[14]。在地热水受控因素方面，GILLESPIE 等[15] 基于地形地貌学与岩性分析了风化、构造等对地热排放区的影响；TANG 等[16]、ZHANG 等[17] 认为地质构造带对地热水活动具有显著的控制作用；ZHOU 等[18] 通过提出 44 个概念模型，更好地揭示了地质构造条件、地热地质条件和水文地质条件对温泉形成的影响；在地热预测模型方面：庞忠和等[19]、YUAN 等[20] 通过对地表出露温泉统计和对同位素数据分析构建了异常地热温度预测模型；

著录信息：柴琛, 周昌, 夏钊, 等. 新疆某千米埋深隧道断层控制地热成因及热害评价 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(4): 304-315.
CHAI Chen, ZHOU Chang, XIA Zhao, et al. Geothermal genesis and hazard assessment for a fault-controlled kilometer-deep tunnel in Xinjiang[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(4): 304-315.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

陈喆[21]提出了指数覆盖信息量模型、熵权信息量模型和证据权信息量模型，利用这些模型对川藏铁路沿线及邻区的异常地热进行了预测。此外，在探测技术方面，钻探、地球水化学、同位素标记、物探等技术已被广泛应用[22-26]，为地热水运移机制研究奠定了基础。

在隧道中，尤其是在深地环境下，地热水会严重影响工程施工和运行，因此高温被认为是深地工程四大工程地质问题之一。深部岩体温度通常与其深度呈近似线性关系，WANG 等[27]将影响地温的地质因素分为区域大地热流反映的深部地热背景、由地质结构的不均匀性引起的传热条件的空间变化、局部附加热源的存在与否及其规模和强度 3 类，详细描述了地热形成机制并分析了热害存在形式；王争鸣[28]根据热害程度对地热进行了分级，并提出了地热地区选线的基本原则。由此可见，异常地温引起的热害已经成为隧道施工中不可忽视的问题，而当前对地热的研究大多以室内模拟实验为依据展开，而对实际工程勘察资料的分析有所欠缺。

本研究以新疆天山某隧道工程为例，研究区有温泉出露现象，代表存在地下异常热源，围绕深部热源成因及其引发的热害等级展开研究。为避免室内模拟研究的局限性，根据工程勘察结果并结合现场调查经历，采用热红外遥感与现场调查对研究区内出露的温泉分布特征进行研究，结合物探、钻探成果，获得研究区岩层温度随深度变化规律，以揭示该区域地热成因规律。选用层次分析法作为评价手段对拟建隧道的 3 条线路进行热害评级，为隧道的合理设计和施工提供科学依据。

1　研究区概况

1.1　隧道工程

拟建特长隧道位于新疆维尼勒克县喀什河脑子温泉 ES 向约 6 km 处，隧道全长 15.4 km,隧道轴线地面高程 2 760 ~ 3 900 m，相对高差约 1 200 m，最大埋深为 1 348 m。根据地质条件选取了 K、B7、B8 3 条线路作为该隧道的拟建线路(图 1)。

1.2　地质构造

研究区主要地质构造为华里西期构造区，现对拟建线路有影响的构造主要有 F26-1、F28-1、F27、F28、F29 等断层，区域构造见图 1。其中 F26-1、F27 属于平推断层，F28、F29 属于逆断层，F28-1 属于正断层。

研究区域内构造活动强烈，由北向南跨越 3 个新构造区域：天山北缘新构造运动区、天山山体新构造运动区、天山南麓新构造运动区，其中控热构造是那拉提断裂。受天山地震带的影响，该地区地震频繁，据统计 1810—2017 年间，该地区共发生 48 起地震(数据来源为中国地震台网、乌苏地方志、新源地方志、尼勒克地方志等网络数据)。

1.3　地层岩性

研究区地下岩石以花岗岩为主，包括中下志留统结晶灰岩、凝灰岩($S_{1\text{-}2}$)、下石炭统阿吾拉勒组第三亚组安山玢岩、英安斑岩 (C_1a^c)、下石炭统阿吾拉勒组第四亚组凝灰岩 (C_1a^d)、华力西中期黑云母细粒

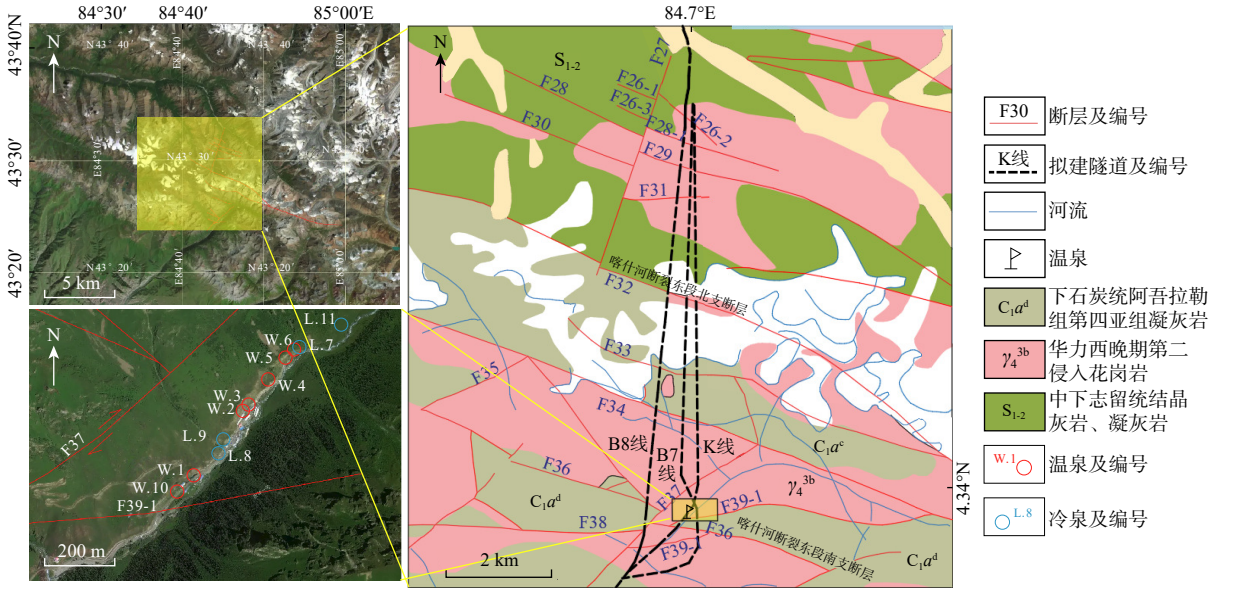


图 1　研究区区域地质构造图

Fig. 1　Regional tectonic map of the study area

花岗岩(γ_4^{2c})、华力西晚期黑云母中粒花岗岩(γ_4^{3b})。

1.4　水文地质条件

研究区内分布 2 条河流、3 处地表冲沟，其中喀什河南侧发育 2 处冲沟；巩乃斯西北南侧发育 1 处冲沟。大气降水和冲沟地表水作为地下水主要补给源。 地下水以基岩裂隙水以及岩溶水为主，基岩裂隙水主要赋存在下石炭统安集海组粉砂岩中；溶岩水含水层岩性主要为中下志留统的硅化灰岩和结晶灰岩。其动态变化主要表现在水量上，受降水量和冰川融水的影响：6−8 月份随着气温升高，降雨增多，高山冰雪大量融化，补给水源在表层第四系碎石、砂砾石层中快速入渗，地下水泉点流量一般在 0.5 ~ 10 L/s 之间，在丰水期最大可达到 20 L/s。

2　研究方法

2.1　钻探方法

钻探采用 DPP-300 型钻机车进行取心钻进，由于拟建区域断层分布较多，依据 3 条拟建隧道线路与断层的空间位置关系，共布设 4 个钻孔(图 2)，B8 线路上布设 ZK15-2、ZK15-3 钻孔；ZK18-4 钻孔布设在 K 线与 B7 线路交点位置附近；ZK15-1 钻孔布设在断层 F35 附近，用以评价断层 F35 与 F37 的影响。钻孔取心以观测地层破碎情况，并对钻孔地下水水温进行观测，用以研究地下水运移过程及热源。

2.2　物探方法

为研究阿尔先温泉附近断层导水能力，本研究勘察采用了天然场音频大地电磁法,通过测量地下电阻率的频率响应来推断地下岩石的导电结构。

分别在温泉群附近布置 4 条物探线，4 条物探线呈矩形将主要研究区包括在内，测点间距 30 m，电偶极距 20 ~ 30 m，平面布置见图 2。将温泉点作为重点研究区域，其所在的沟谷布设 WQ2 线，并在该点以 90°夹角布设 WQ1 线，从 2 个方位上反映温泉区的地层电阻变化情况；同时为研究断层对地热成因的控制意义，布设 WQ3、WQ4 2 条测线切割 F35、F36 和 F37 断层，从而得到其地层完整性情况以便后续分析。

2.3　水文地球化学方法

为研究地下水的迁移情况，分别对阿尔先温泉区 13 处地点进行取样，包括温泉点水样、阿尔先河水水样和钻孔水样，采用多参数水质分析仪对水样 pH 值、总碱度、矿化度等指标进行检测，整体测量精度控制在±5% 以内。通过对水样化学元素分析进一步推测温泉水的补给源头，其原理是：将出露温泉的元素组成分别与地下水、阿尔先河水进行对比，化学元素组成类似的水样推测其存在地下水迁移情况；反之，即使取样点距离相近但化学元素组成存在明显差异，依旧认为两者不存在相互补给关系。

2.4　热红外遥感和无人机热探测

由于温泉点温度明显异于周围环境，因此可以采用热红外遥感技术对该地区进行探测，寻找温泉出露点以及潜在的地温异常点。本研究采用热红外遥感获取研究区地表辐射强度，研究区遥感数据来自于 Landsat-5 TM 遥感影像数据，探测区域选定在隧道入口附近约 4.5 km^2 范围(图 2)，覆盖主要断

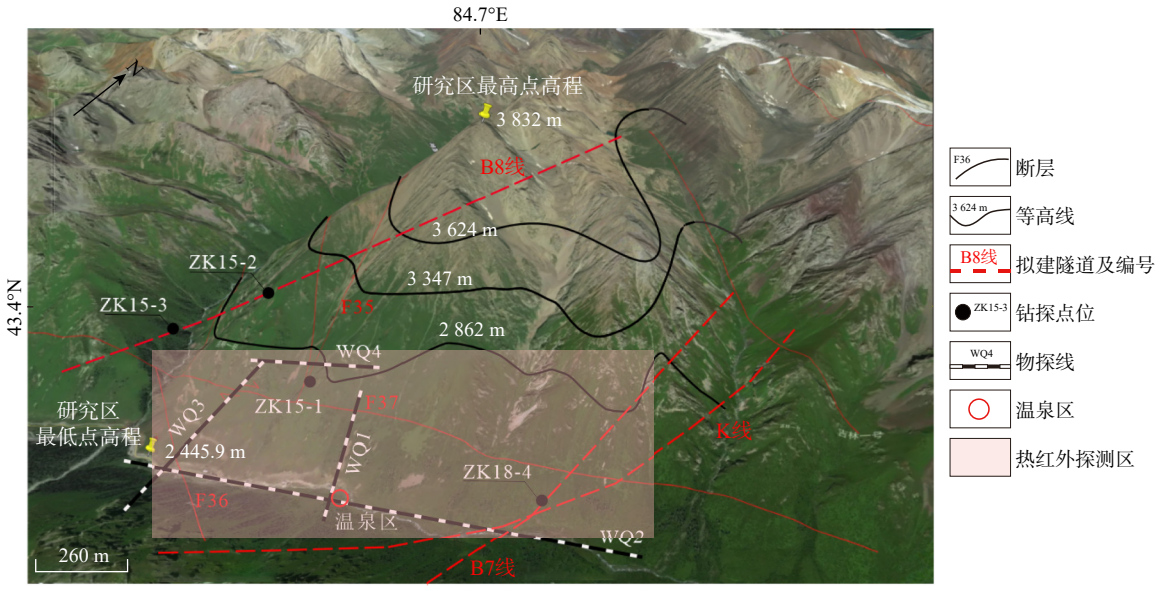


图 2　研究区钻探、物探线布设图

Fig. 2　Distribution of boreholes and geophysical prospecting lines

层和温泉区。在获得大范围数据后，利用 FEIMA D200 无人机搭载 FLIR 热红外相机对温泉点附近做进一步探测以获取更加详细的数据信息，目的是探测区域内未知的断层和泉水出露，同时根据其相对位置关系分析断层对温泉形成的影响。

3 勘察结果

3.1 热红外解译成果

图 3 为研究区地表辐射强度图。高辐射强度主要在断层 F39-1 与 F36 附近，尤其是断层 F39-1 的西北段，辐射强度最高。而在断层 F39-1 与 F36 之间则零散分布有 7 ~ 10 处高辐射集中区，在断层 F36 东南侧则分布有一段较为集中的高辐射区。此外在断层 F37−F35 之间也分布有多处较高辐射区。根据热红外解译结果，对现场进行调查复核，共识别出 13 处地表温泉出露点，其中 11 处为可见出露。这些温泉出露点主要集中在断层 F37 的东侧以及断层 F36 的北侧。在断层 F36 南侧和断层 F37 东侧的周边区域，以及河流左侧，未发现温泉出露。根据现场勘察和调查结果，温泉在地表的出露仅限于断层 F36-2 与 F37 交汇形成的“X”型结构 EN 方向的沟谷地区，该地层因受到剧烈的构造活动影响而呈现出较为破碎的状态，伴随着显著的张性裂隙发育。

3.2 物探结果

图 4 为阿尔先温泉物探结果。其中物探线 WQ1、WQ3 横切断层 F37，且物探线 WQ1 东侧位于温泉群附近。

物探线 WQ1 整体上呈现中低阻特征，但在断层 F37 电阻率梯度呈现横向变化不连续，即断层 F37 将地层电阻云图划分为 2 个部分，西北侧为低电

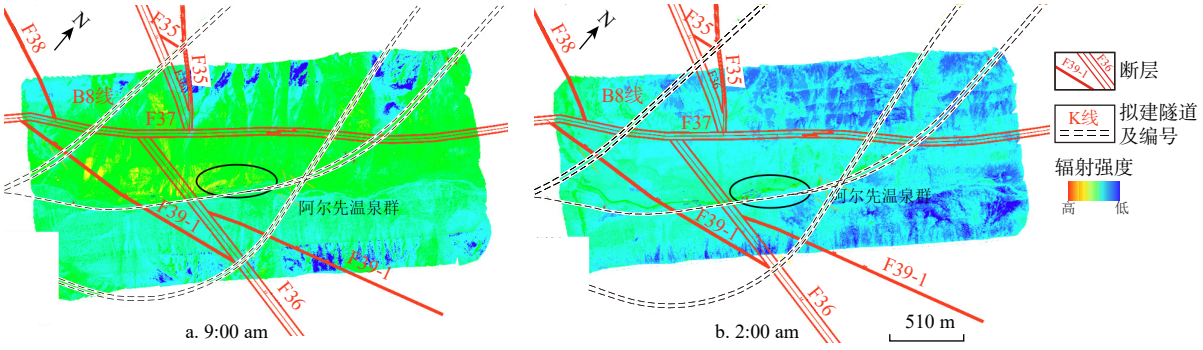


图 3 地表辐射强度图

Fig. 3 Surface radiation intensity maps at 9:00 am (a) and 2:00 am (b)

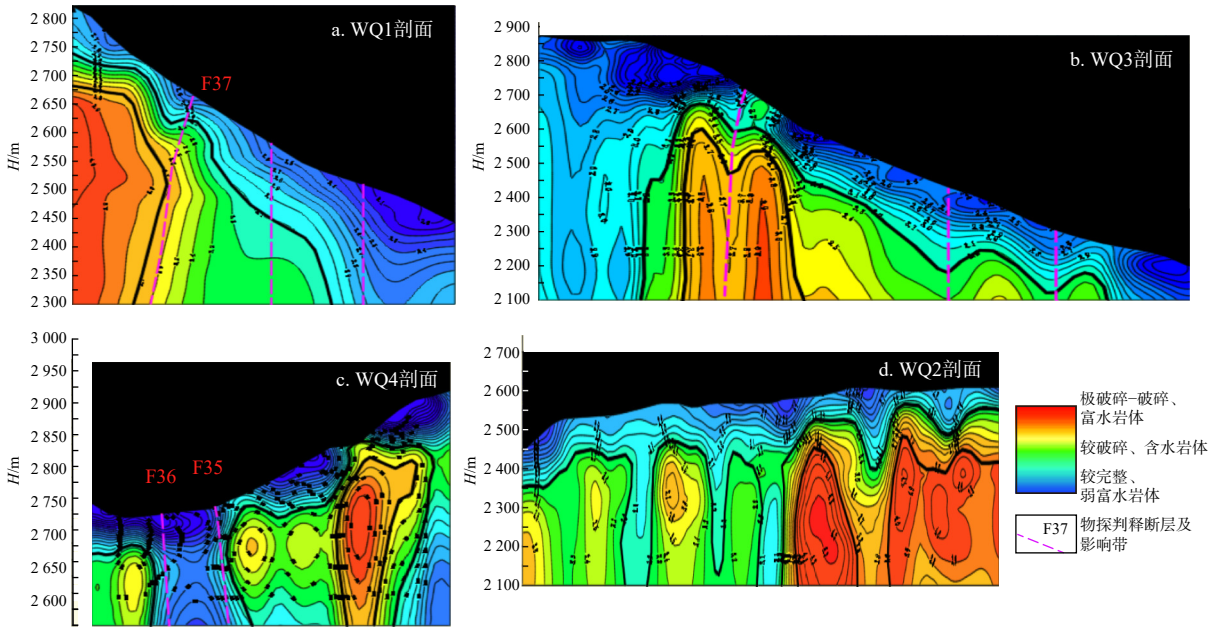


图 4 阿尔先温泉物探结果图（剖面位置见图 2）

Fig. 4 Geophysical survey results for the hot springs in Arxan

阻区，东南部分为高电阻区；而物探线 WQ2 则呈现明显不同的变化趋势，其电阻率值明显小于物探线 WQ1 剖面，且在温泉出露段电阻率整体快速降低（东侧），而西侧电阻率明显偏高；物探线 WQ3 在断层 F37 附近为中电阻区，电阻率较周边段落有所升高；物探线 WQ4 横向上有明显的不连续性，断层 F35、F36 将地层电阻云图分为低、中、高 3 个部分，断层之间地层电阻率值较高，电阻率向两侧呈现逐渐升高趋势。

3.3　钻探结果

现场钻进取样发现岩体破碎呈现明显的空间差异性(图 5)。纵向上，随着深度增加岩石破碎程度也逐渐增加，浅层岩石以块石为主，裂隙发育不完全，岩石完整性较高，地表 50 m 以下岩层较破碎，可以作为地下水迁移场所；横向上，钻孔 ZK15-1、ZK15-3、ZK18-4 处岩石破碎程度较高，3 个钻孔均分布在断层 F37 附近，而距断层较远的钻孔 ZK15-2 所提取的岩心较为完整。

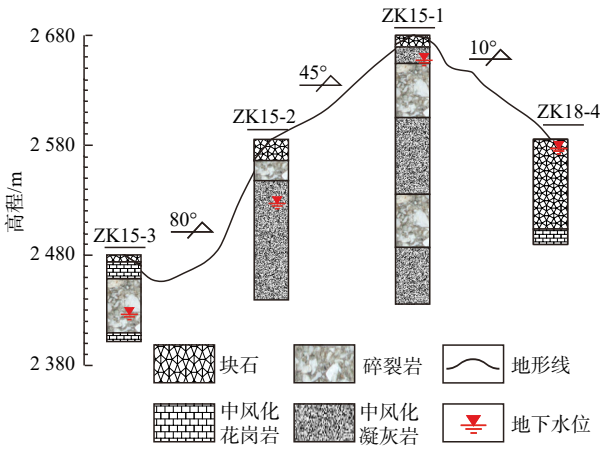


图 5　钻孔柱状图

Fig. 5　Borehole lithological log

通过对钻孔进行注水试验发现，钻孔 ZK15-1 岩体透水率 1.966 ~ 117.95 Lu(1 Lu=1 $L\cdot m^{-1}\cdot h^{-1}$)，透水性极不均一，其中 143 ~ 157 m 井段透水性好，孔底附近透水性中等；钻孔 ZK15-2 属于弱透水层，其渗透系数均小于 0.1 m/d；而与其较近的钻孔 ZK15-3 在 30 m 以下地层透水率超过 50 Lu，最大可达 139.84 Lu，属于强透水层；钻孔 ZK18-4 整体透水性较好，在地下 100 ~ 179 m 段透水率稳定在 80 Lu，地下水在该处有良好的运移环境。

如表 1 所示，钻孔 ZK15-1 最高温度为 23.0℃位于孔口 1 m 处，在井深 100.0 ~ 228.2 m 处温度由 11.3℃ 增加至 13.6℃；钻孔 ZK15-2、ZK15-3 相距较近，相同孔深所对应的温度也较为接近，2 孔地温梯度均在 1.4℃/100 m 左右；钻孔 ZK18-4 孔底最高温度为 24.6℃,在井深 20.0 ~ 323.0 m 处温度由 20.2℃增加至 24.6℃，虽然孔内温度变化范围较大，但地温梯度还是略小于钻孔 ZK15-1。

表 1　钻孔温度表

Table 1　Borehole Temperature measurements

钻孔编号	孔深/m	孔内最高温度/℃	地温梯度/(℃·100^{-1}·m^{-1})
ZK15-1	230	23.0	1.77
ZK15-2	110	21.5	1.39
ZK15-3	72	21.1	1.44
ZK18-4	323	24.6	1.46

3.4　地下水化学特征分析

在 7 处地点进行了野外调查取样，其中阿尔先河水 1、阿尔先河水 4、喀什河水 1、喀什河水 2 属于地表水样；1 号温泉水、5 号温泉水、7 号冷水泉水属于地下水样。

根据水化学监测分析结果，研究区地表水阳离子以 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}为主，含少量 K^+离子；阴离子以 SO_4^{2-} 、HCO^{3-}为主，含少量 Cl^-离子。根据 Piper 三线图(图 6)水化学类型主要为 SO_4^{2-} -Na^+型。地下水 pH 值在 6.69 ~ 8.82 范围内，均值为 7.67，呈中性。矿化度在 142.17 ~ 1 364.97 mg/L 之间，矿化度变化较大，推测来自浅表地下水水体。其中 5 号温泉水化学类型为 SO_4^{2-} -Na^+型，矿化度达到 1 364.97 mg/L，而与其距离较近的阿尔先河水 1 处的矿化度为 477.92 mg/L，反映了研究区 5 号温泉地下水受深部矿化水加热后沿断层上升形成的特征，泉点受溢出带附近浅表层地下水补给稀释作用较小。

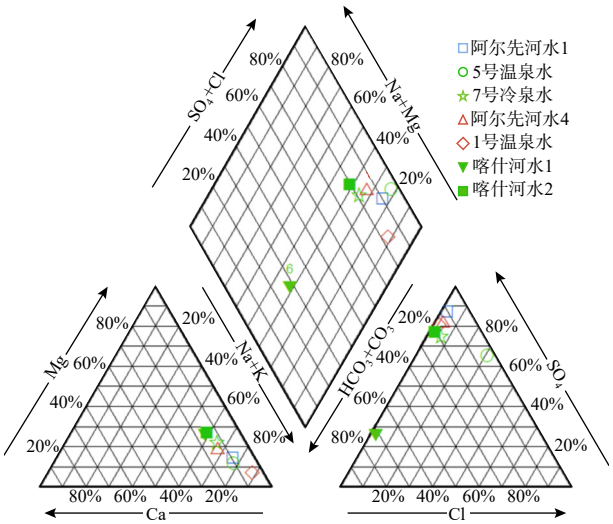


图 6　取样点化学成分 Piper 三线图

Fig. 6　Piper diagram of hydrochemical composition at sampling sites

4 讨 论

4.1 温泉地质成因

4.1.1 补给水源

地下水循环演化机制十分复杂，尤其是温泉热源的确定，其与地层构造、地下水水源、导热通道等相关[29-33]。根据水化学结果，我们发现温泉矿化度在 810.25 ~ 1 364.97 mg/L 范围，而与其相近的阿尔先河水矿化度则为 477.92 mg/L；喀什河水矿化度为 609.59 mg/L，而冷泉水的矿化度为 652.9 mg/L，由此可以发现温泉与地表河流的矿化程度存在着明显的差异，而冷泉水的矿化度与阿尔先河水极为接近，故而可以推测 5 号温泉地下水受深部矿化水加热后沿断层上升形成的特征，而冷泉水则主要受阿尔先河水补给，即温泉与附近浅表层地下水之间的补径排关系微弱，温泉的补给水源来自地下深部。

温泉空间分布主要出露于断层 F35/F36−1/F37 交汇处的断层 F37 东侧，而其他部分出露泉水均为冷泉，ZK15-1 钻孔温度无异常，其孔底已与温泉出露点高程基本一致，说明温泉热水在地表以下 230 m 深度内没有沿断层 F35、F36 发生径流。ZK18-4 钻孔内水位较高，且研究区内沿断层 F37 常有泉水出露，说明该断层富水性、透水性好，故推测其为温泉水补给来源之一；断层 F35、F36-1 破碎带地下水丰富，但地下水温度无异常，推测为温泉中的冷水补给来源之一。

4.1.2 热源分析

断层 F35、F36、F37、F39-1 将研究区分为 A、B、C、D、E 5 个区域(图 7)，结合物探与钻探获取的地层破碎情况，分析各区域的运动方向，以分析研究区热源特征。温泉区位于 B 区域，主要受 F37 和 F39-1 断层控制影响：F39-1 属于正断层，断面倾向 163°，倾角 60° ~ 75°，因此 F39-1 北侧(上盘)下降；F37 为平推断层，SE 盘向 SW 移动，温泉区两侧地层同时有向 SW 侧移动趋势，在构造应力的作用下深部地层挤压变形成为异常热点，可能是温泉热源之一。同时物探结果显示温泉区附近地下岩体极破碎，说明该段内由于断层影响导致地层破碎，形成了沟通表−深层的地下水运移通道，为地下水的赋存和运移提供了空间与通道；断层 F37 整体表现为中低电阻，赋存有地下水，具有导水性，为阿尔先温泉导水导热提供条件。

为深入探究研究区域内的地温分布特征，考虑到钻探结果获取的地热场数据较为局部，因此结合经验公式[34] 对地温进行计算：

$$T = t_0 + 0.01 \times (H - H_s) \times g_r, \quad (1)$$

式中：T 为计算点围岩温度，℃；t_0 为计算段恒温层温度，℃；H 为计算点埋深，m；H_s 为计算段恒温层埋深，m；g_r 为地温梯度，℃/100 m，根据钻孔结果显示，g_r 取 1.46℃/100 m。

地下水的活跃程度也会影响地温梯度，其机理是破碎带处地下水相对较活跃，低温的地下水向深部流动过程中降低了深部的地温，从而出现地温梯度降低的现象。物探线 WQ4 结果显示，山脊处呈中高电阻率特征，推测该处地下岩体较完整，节理裂隙发育

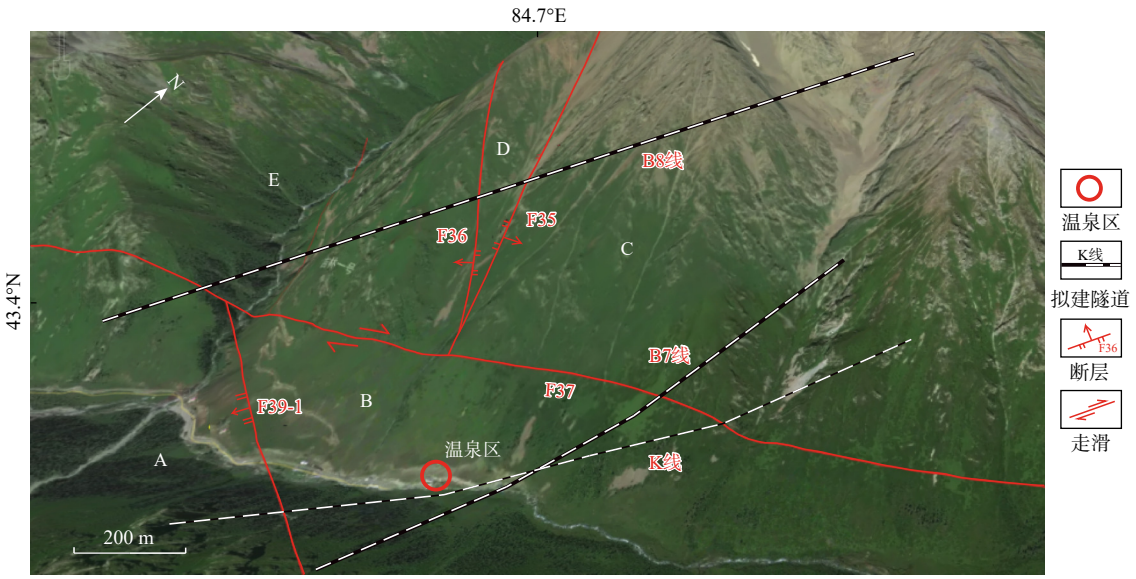


图 7 研究区地层相对位移（A ~ E 为研究区分区编号）

Fig. 7 Stratigraphic relative displacement in the study area

较弱，富水程度一般，在计算地下温度时可排除地下冷水对深部地温的潜在降温效应。结合钻孔 ZK15-1、ZK15-2、ZK15-3、ZK18-4 综合测井结果，按上述公式计算得到各线路最大埋深处的温度值(表 2)。

表 2　最大埋深处温度值

Table 2　Temperature at the maximum buried depth

拟建线路	B8线		B7线		K线	
	左线	右线	左线	右线	左线	右线
最大埋深/m	1 348	1 339	1 363	1 348	1 423	1 442
计算最大埋深处温度/℃	39.98	39.84	40.20	39.98	41.10	41.39

采用线性差值方法绘制了隧道区剖面温度等值线图(图 8)，显示等温线与地形线走势基本重合，在温泉区西北侧雪山沟谷处地表温度较低，因此此处地下温度增高略微滞后于其他位置。由图 8 可知，该地区地下 750 m 处温度已经达到 30℃，温泉区处深部岩石温度略高于附近，证实了该处存在深部热源为温泉水进行加热。

4.1.3　迁移规律

综上所述，地热水循环过程为：研究区后缘雪山被断层切割(例如：断层 F34)，雪山融水通过断层破碎带向深部运移，而在研究区内由于断层 F37、F39 的存在，导致破碎带发育，为地下水向上运移提供了通道，例如钻孔 ZK15-1 处岩层破碎，地下水位较高，而在距断层较远的钻孔 ZK15-2 处，岩层较为完整，故而地下水位比钻孔 ZK15-1 要低 118 m，由此也可推测该区域的地下水主要由深部地下水补给。在沟谷地区，即断层 F35、F36、F37 交汇处，由于温泉区所在区域受断层 F37、F39-1 控制，该区域两侧断层附近的地层同时有向 SW 方向移动的趋势，地层相互挤压形成热源之一。地下水在通过断层破碎带向上运移时，经过深部热源加热，加热后的地下水沿断层 F35、F37 交汇点附近裂隙向上运移，在阿尔先沟温泉附近断层 F37 以上升泉形式出露(地表被第四系覆盖)，同时热水与断层 F35、F36-1、F37 上部及阿先沟沟水渗入坡体覆盖层中的冷水混合后，以 38 ~ 50℃ 温度的泉水出露斜坡坡脚，即目前的阿先沟温泉区(图 9)。

4.2　热害评价

4.2.1　构造判断矩阵

由上述分析可知，地温对地下水的加热作用、断层破碎带的导水导热能力、外部水源与温泉混合后的降温效果等多个因素共同作用才有了温泉出露现象。可以以此为基础选择热害发生的影响因素，将热害等级评估作为目标层，断层、地温、涌水、岩性等直接影响热害评级的因素作为准则层，拟建隧道线路 B8、B7 和 K 线作为方案层(图 10)。根据温泉形成机理确定准则层对目标层的权重，岩石导水性能和导热率分别体现在涌水量和岩性指标上，断层所占权重由断层和隧道之间的距离决定，岩石破碎区域视为导热良好地带，将地温作为热害发生的主要影响因素，赋予最高权重构造判断矩阵 $\boldsymbol{A}$。通过层次分析法综合以上 4 个因素，计算拟建 3 条线路的量化得分，从而根据分值的大小判断相应线路发生热害的难易程度。

4.2.2　计算影响因子权重

分别对准则层、方案层构建判断矩阵，根据所构建的矩阵计算出最大特征根以及其对应的特征向量，

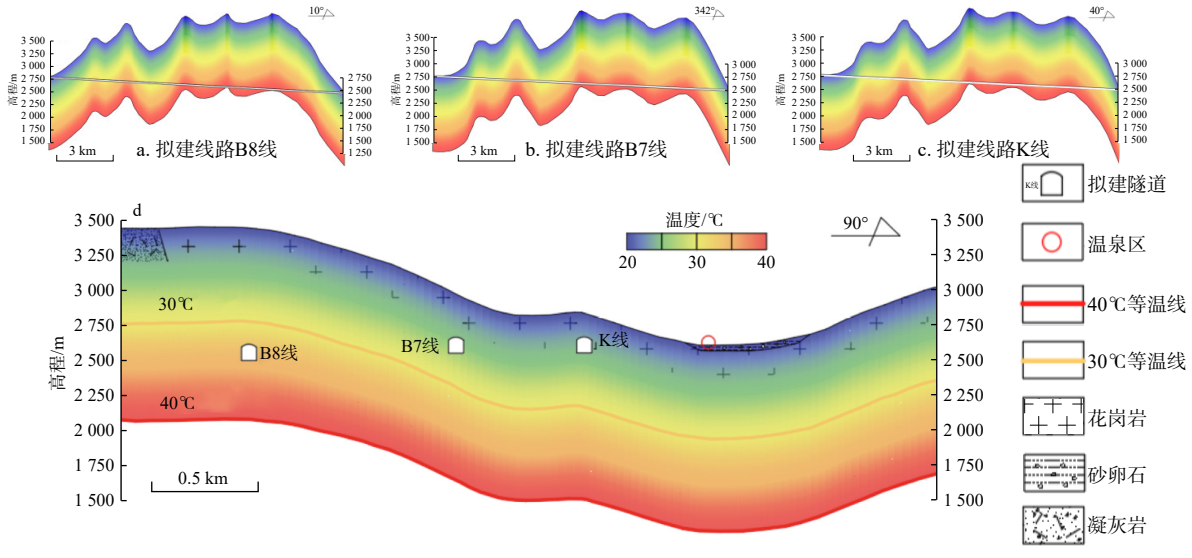


图 8　3 条拟建线路 (a ~ c) 及研究区 (d) 地层温度等值线图

Fig. 8　Isothermal contour maps of strata for the three proposed alignments the study area (d): Route B8 (a), Route B7 (b) and Route K (c)

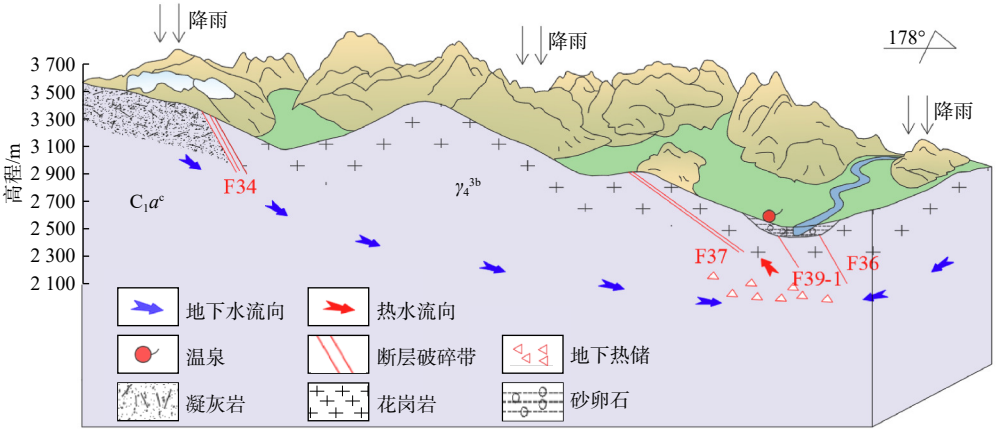


图 9　地热水循环演化图（C_1a^c. 下石炭统阿吾拉勒组第三亚组安山玢岩；γ_4^{3b}. 华力西晚期黑云母中粒花岗岩）

Fig. 9　Conceptual model of geothermal water circulation and evolution

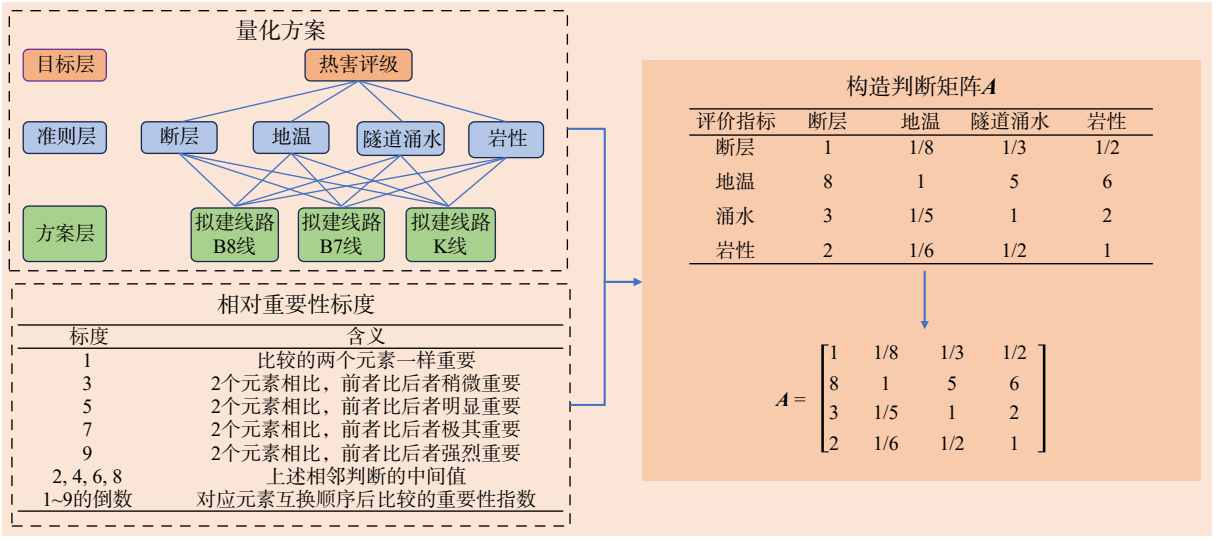


图 10　判断矩阵构造

Fig. 10　Judgement matrix construction

将特征向量作为权重对拟建线路 B8、B7、K 线打分，这里使用方根法进行计算：

（1）计算每行元素的 m 次方（ $\overline{w}_i$ ）：

$$\overline{w}_i = \sqrt[m]{\prod_{i=1}^{m} a_{ij}}, \tag{2}$$

式中：a_{ij} 为所构建判断矩阵中的元素。

（2）对向量 $[\overline{w}_1, \overline{w}_2, \overline{w}_3, ..., \overline{w}_n]^{\mathrm{T}}$ 标准化得到的特征向量即为权重（ w_i ）：

$$w_i = \frac{\overline{w}_i}{\sum_{i=1}^{n} \overline{w}_i}, \tag{3}$$

式中：w_i 为决策层对目标层的权重；n 为矩阵维度。

（3）计算特征向量对应的最大特征值（ $\lambda_{\max}$ ）：

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{(AW)_i}{w_i}, \tag{4}$$

式中：AW 为判断矩阵点乘特征向量后按行累加。

4.2.3　一致性检验

在对各个影响因素进行比较赋值时，为了避免主观逻辑错误影响最后权重结果的合理性，需要对层次单排序进行一致性检验。本研究选用随机一致性指标（$C.R.$）作为评价指标：

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}, \tag{5}$$

式中：$C.I.$，$R.I.$ 均为随机一致性指标；$C.I. = \dfrac{\lambda_{\max} - n}{n-1}$；本次计算为 4 阶矩阵，$R.I.$取 0.9。

4.2.4　热害风险分析

热害成因与多个因素有关，其中各因素所占比重有所不同，需要根据实际工程资料并结合以往工程案例[35-40]对影响因子的比重进行调整。

本工程拟建线路 B8 线穿越可溶岩段长度 3825 m，穿越断层 F26-2、F28-1、F29、F31、F32、

F33、F34、F35、F36、F38。B8 线最大埋深 H 为 1 339 m, 计算最大埋深处的地温约为 39.84℃; 隧道穿越地区主要的地下水以基岩裂隙水和构造裂隙水的形式赋存, 通过对比周边已建隧道的涌水量结果, 结合研究区的实际情况, 采用科斯加可夫公式的预测结果(34 674 ~ 36 489 m^3/d)作为正常涌水量的建议值; 其隧道围岩以较破碎的微风化岩体为主, 约占隧道路段的 64%, 有近 19% 的隧道围岩属于中−微风化花岗岩及断层破碎带及影响带, 高于 B7、K 线 2 条比较线路。

拟建线路 K、B7 线出口段处于 F35/F36/F37 断层交汇点的东北侧上游, 距离阿尔先温泉群出露点水平距离约 100 m, 穿越可溶岩段长度为 3 872 m, 穿越断层 F26-2、F28-1、F29、F31、F32、F33、F34、F37; 根据钻探结果显示: K 线最大埋深处地温可达到 41℃, B7 线最大埋深处地温为 39.98℃; K 线最大涌水量为 611 992 ~ 89 048 m^3/d, 正常涌水量为 4 610 ~ 30 057 m^3/d, 远高于 B7、B8 线; 2 条比较线路的主要隧道围岩与 B8 线基本相似, 但受断层破碎带影响的路段小于 B8 线。

方案层对准则层的权重由 3 条线路的断层、地温、隧道涌水、岩性条件比较分析确定, 进一步通过上述层次分析法进行计算得到结果, 如表 3 所示。

决策层各影响因子对目标层的影响权重和方案层对决策层的权重乘积之和即为 3 条线路在热害评估上的总得分 Q, 结果见表 4。

$$Q=\sum_{i=1}^{n} w_i \times C_i 。 \tag{6}$$

一致性检验指标 *C.R.*经计算为 0.021 0<0.1, 说明构建的判断矩阵没有出现逻辑错误, 该权重确定方法合理, 通过一致性检验。

5　结　论

(1)物探、钻探结果表明, 距离断层 F36、F37、F39 较近的位置处(钻孔 ZK15-1、ZK15-3、ZK18-4)地下岩体明显破碎, 节理发育; 同时该位置地下水位明显高于附近, 说明断层的存在为地下水赋存和运移提供了有利条件。

(2)出露冷泉水和附近的阿尔先河水矿化度相似, 均在 450 ~ 650 mg/L 范围内, 而温泉水的矿化度最高达到 1 364.97 mg/L, 排除地表水对温泉的补给作用。推测冷泉水和阿尔先河水之间存在补给关系, 而温泉水则是由深部地下水向上运移补给。

表 3　影响因子权重表

Table 3　Weighting of influencing factors

热害评估影响因子	决策层对目标层的权重 w_i	拟建线路	方案层对决策层的权重 C_i
断层	0.063 3	B8线	0.142 9
		B7线	0.428 6
		K线	0.428 6
地温	0.655 8	B8线	0.163 4
		B7线	0.297 0
		K线	0.539 6
隧道涌水	0.174 4	B8线	0.400 0
		B7线	0.400 0
		K线	0.200 0
岩性	0.106 5	B8线	0.200 0
		B7线	0.600 0
		K线	0.200 0

表 4　热害评估总得分

Table 4　Total score of thermal hazard assessment

拟建线路	得分
B8线	0.207 3
B7线	0.355 5
K线	0.437 2

(3)根据线性差值方法计算温泉区地下存在异常热源, 分析是由于断层 F37、F39-1 在温泉区 SW 侧相交, 研究区两侧地层有向 SW 侧(断层交汇点)移动的趋势, 深部岩石受构造应力挤压温度升高成为热源之一, 且该区域岩体极破碎, 为阿尔先温泉导水导热提供有利条件。

(4)温泉形成全过程为: 距温泉区 3 km 处的大气降水和雪山融水沿断层破碎带运移, 至断层 F35、F36、F37 交汇点附近在地下遇深部热源加热, 被加热后的地下水沿断层裂隙向地表运移, 在阿尔先沟温泉附近断层 F37 以上升泉形式出露。

(5)拟建线路 B8 线在热害评估中总得分最低, K 线最高。这说明综合断层、地热、隧道涌水和岩性等方面考虑, B8 线路施工过程中发生热害概率最小, 从施工热害角度来看, 拟建线路 B8 线隧道优于 B7 和 K 线。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献:

[1] 张家齐. 山岭铁路隧道施工塌方风险评估 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.

ZHANG J Q. Risk assessment of collapse in mountain railway tun-

nel construction [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2021.（in Chinese with English abstract）

[2] 黄润秋, 王贤能. 深埋隧道工程主要灾害地质问题分析 [J]. 水文地质工程地质, 1998, 25(4): 21-24.
HUANG R Q, WANG X N. The analysis of the main geological hazards in deep lying tunnels[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1998, 25(4): 21-24.（in Chinese with English abstract）

[3] 严金秀. 大埋深特长山岭隧道技术挑战及对策 [J]. 现代隧道技术, 2018, 55(3): 1-5.
YAN J X. Technical challenges of super-long mountainous tunnels at great depth[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(3): 1-5.（in Chinese with English abstract）

[4] 王建平. 高原高地热隧道热害防治安全施工技术 [J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2014(4): 125-126.
WANG J P. Safety construction technology for prevention and control of thermal damage of high geothermal tunnel in plateau[J]. Management & Technology of SME, 2014(4): 125-126.（in Chinese）

[5] 谢君泰, 余云燕. 高海拔隧道工程热害等级划分 [J]. 铁道工程学报, 2013, 30(12): 69-73.
XIE J T, YU Y Y. Grades for heat damage in high altitude tunnel engineering[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(12): 69-73.（in Chinese with English abstract）

[6] 卢达. 拉日铁路雅江峡谷段隧道地热场模拟及地热分级研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
LU D. Geothermal field simulation and geothermal classification of tunnel in Yarlung Zangbo Gorge section of Luda-lari Railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.（in Chinese with English abstract）

[7] 张杰. 拉月隧道地热场分布特征及热害防治措施研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
ZHANG J. Research on the distribution characteristics of geothermal field and the prevention and control measures of heat damage in Layue Tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.（in Chinese with English abstract）

[8] 张宁, 张文哲, 李郎平, 等. 青藏高原地温时空分布及某重大线性工程深部高地温风险分析 [J]. 工程地质学报, 2022, 30(3): 708-719.
ZHANG N, ZHANG W Z, LI L P, et al. Geothermal characteristics of Qinghai-Tibet Plateau and risk analysis of deep underground geothermal hazards for one major linear project[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 708-719.（in Chinese with English abstract）

[9] 袁可. 高温隧道热害现象典型特点及影响因素权重分析 [J]. 铁道建筑技术, 2022(8): 43-47.
YUAN K. Typical characteristics and weight analysis of influencing factors of thermal damage in high temperature tunnels[J]. Railway Construction Technology, 2022(8): 43-47.（in Chinese with English abstract）

[10] LIN M, ZHOU P, JIANG Y F, et al. Numerical investigation on comprehensive control system of cooling and heat insulation for high geothermal tunnel: A case study on the highway tunnel with the highest temperature in China[J/OL]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 173: 107385.

[11] 李准. 玉磨铁路高地温隧道降温技术及其经济研究 [J]. 铁道工程学报, 2022, 39(6): 95-99.
LI Z. Technical and economic research on the efficiency reduction and cooling measures in high geothermal tunnel in Yuxi-Mohan Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(6): 95-99.（in Chinese with English abstract）

[12] 杨志勋, 张兴权, 王进. 新疆地下热水 [J]. 新疆地质, 1990, 8(3): 205-218.
YANG Z X, ZHANG X Q, WANG J. Geothermal water of Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 1990, 8(3): 205-218.（in Chinese with English abstract）

[13] 侯代平, 刘乃飞, 余春海, 等. 新疆布仑口高温引水隧洞几个设计与施工问题探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3396-3403.
HOU D P, LIU N F, YU C H, et al. Discussion on design and construction measures for a rock tunnel in high-temperature conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3396-3403.（in Chinese with English abstract）

[14] 王贵玲, 蔺文静. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式 [J]. 地质学报, 2020, 94(7): 1923-1937.
WANG G L, LIN W J. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1923-1937.（in Chinese with English abstract）

[15] GILLESPIE P A, HOLDSWORTH R E, LONG D, et al. Introduction: Geology of fractured reservoirs[J]. Journal of the Geological Society, 2021, 178(2): 2020-2197.

[16] TANG X C, ZHANG J, PANG Z H, et al. Distribution and genesis of the eastern Tibetan Plateau geothermal belt, western China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 76(1): 31.

[17] ZHANG B J, ZHAO T, LI Y Y, et al. The hydrochemical characteristics and its significance of geothermal water in both sides of large fault: Taking northern section of the Liaokao fault in North China as an example[J]. China Geology, 2019, 2(4): 512-521.

[18] ZHOU X, ZHUO L Y, WU Y Q, et al. Origin of some hot springs as conceptual geothermal models[J]. Journal of Hydrology, 2023, 624: 129927.

[19] 庞忠和, 杨峰田, 袁利娟, 等. 新疆塔县盆地地热显示与热储温度预测 [J]. 地质论评, 2011, 57(1): 86-88.
PANG Z H, YANG F T, YUAN L J, et al. Geothermal display and thermal storage temperature prediction in Taxian Basin, Xinjiang[J]. Geological Review, 2011, 57(1): 86-88.（in Chinese with English abstract）

[20] YUAN D, XIAO K, FENG T, et al. Geothermal characteristics of the Xianshuihe fault zone and their engineering influence on tunnel construction[J]. Thermal Science, 2023, 27(1 Part B): 615-622.

[21] 陈喆. 川藏铁路沿线及邻区地热异常区定量预测评价研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
CHEN Z. Quantitative prediction and evaluation of geothermal anomaly areas along the Sichuan-Tibet Railway and its adjacent areas[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2021.（in Chinese with English abstract）

[22] 杜宇本, 蒋良文, 陈明浩, 等. 中国铁路隧道勘察技术的发展与展

望 [J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1943-1952.
DU Y B, JIANG L W, CHEN M H, et al. Development and prospect of geological surveying technology for railway tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1943-1952. (in Chinese with English abstract)

[23] LUO X, GONG S, HUO Z G, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting method in the exploration of coal mined-out areas[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(1): 2368402.

[24] ZHAO J Y, LI N, LIU F Y. Geological survey and drilling technology of karst land[J]. Desalination and Water Treatment, 2020, 187: 144-153.

[25] YANG P H, DAN L, GROVES C, et al. Geochemistry and genesis of geothermal well water from a carbonate-evaporite aquifer in Chongqing, SW China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(1): 33.

[26] YANG P H, LUO D, HONG A H, et al. Hydrogeochemistry and geothermometry of the carbonate-evaporite aquifers controlled by deep-seated faults using major ions and environmental isotopes[J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124116.

[27] WANG C K, LIU Z Y, ZHANG F K, et al. Heat hazards in high-temperature tunnels: Influencing factors, disaster forms, the geogenetic model and a case study of a tunnel in Southwest China[J]. Sustainability, 2024, 16(3): 1044.

[28] 王争鸣. 拉日铁路地热地区综合选线研究 [J]. 铁道工程学报, 2015, 32(9): 1-5.
WANG Z M. Research on the integrated alignment of geothermal district of Lhasa Rikaze Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(9): 1-5. (in Chinese with English abstract)

[29] 李尚蔚, 刘毅, 李铜邦, 等. 同仁地区地下热水水化学特征及演化过程分析 [J]. 青海大学学报, 2022, 40(5): 75-82.
LI S W, LIU Y, LI T B, et al. Analysis of hydrochemical characteristics and evolution process of thermal groundwater in Tongren[J]. Journal of Qinghai University, 2022, 40(5): 75-82. (in Chinese with English abstract)

[30] 王思琪, 张保建, 李燕燕, 等. 雄安新区高阳地热田东北部深部古潜山聚热机制 [J]. 地质科技通报, 2021, 40(3): 12-21.
WANG S Q, ZHANG B J, LI Y Y, et al. Heat accumulation mechanism of deep ancient buried hill in the northeast of Gaoyang geothermal field, Xiongan New Area[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(3): 12-21. (in Chinese with English abstract)

[31] 邵杰, 李瑛, 侯光才, 等. 新疆伊犁河谷地下水循环演化特征 [J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 20-25.
SHAO J, LI Y, HOU G C, et al. Evolution of groundwater circulation in the Yili River valley in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 20-25. (in Chinese with English abstract)

[32] 王长申, 黄炳香, 赵兴龙, 等. 伊南煤田伊犁一矿侏罗纪煤系地下水化学特征与水循环演化 [J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(1): 160-170.
WANG C S, HUANG B X, ZHAO X L, et al. Chemistry and water cycle of the groundwater in the Jurassic confined fissured aquifers at Ili No. 1 Coal Mine, South Ili Coalfield, China[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(1): 160-170. (in Chinese with English abstract)

[33] 杜先利, 王泓博, 赵容生, 等. 松辽盆地南部大情字井区青山口组地热水化学特征及成因模式 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 22-35.
DU X L, WANG H B, ZHAO R S, et al. Geothermal chemical characteristics and genetic model of the Qingshankou Formation in the Daqingzijing area, southern Songliao Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 22-35. (in Chinese with English abstract)

[34] KUTASOV I M, 李兰忠. 用经验公式估算地温梯度 [J]. 国外油气勘探, 1995, 7(6): 782-783.
KUTASOV I M, LI L Z. Estimation of geothermal gradient by empirical formula[J]. Oil & Gas Prospecting Abroad, 1995, 7(6): 782-783. (in Chinese)

[35] 杨新亮. 拉日铁路吉沃希嘎隧道地热异常特征与防治措施分析 [J]. 铁道标准设计, 2014, 58(7): 107-112.
YANG X L. Research on geothermal anomaly characteristics and control measures for Jiwoxiga tunnel on Lasa-Shigatse Railway[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(7): 107-112. (in Chinese with English abstract)

[36] 张群, 高明中, 王新丰, 等. 潘三煤矿地温分布规律分析 [J]. 煤矿安全, 2014, 45(6): 170-172.
ZHANG Q, GAO M Z, WANG X F, et al. The geotherm regularities analysis in Pansan coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(6): 170-172. (in Chinese with English abstract)

[37] 杨丹. 西卓井田5号煤层热害区分布及成因初步探讨 [C]//佚名. 煤炭绿色开发地质保障技术研究: 陕西省煤炭学会学术年(2019)暨第三届"绿色勘查科技论坛"论文集. 陕西省煤炭学会、重庆市煤炭学会、内蒙古煤炭工业协会、青海省煤炭会, 2019: 266-269.
YANG D. Preliminary discussion on the distribution and causes of heat damage area of No. 5 coal seam in Xizhuo minefield [C]//Anon. Research on geological guarantee technology for green development of coal-Academic Annual Meeting of Shaanxi Coal Society (2019) and the third "Green Exploration Science and Technology Forum" Proceedings. Shaanxi Coal Society, Chongqing Coal Society, Inner Mongolia Coal Industry Association, Qinghai Coal Society, 2019 : 266-269. (in Chinese with English abstract)

[38] 王林涛. 许疃煤矿地温分布特征与控制模式研究 [D]. 安徽 淮南: 安徽理工大学, 2021.
WANG L T. Study on the distribution characteristics and control mode of ground temperature in Xutuan coal mine[D]. Huainan Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)

[39] 刘文连, 利满霖, 许模, 等. 穿越小江断裂的登楼山隧址区水热活动特征分析及隧道热害评估 [J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(9): 1523-1532.
LIU W L, LI M L, XU M, et al. Hydrothermal activity characterization and thermal hazard evaluation in Dengloushan tunnel crossing Xiaojiang fault[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(9): 1523-1532. (in Chinese with English abstract)

[40] 刘星辰, 黄锋, 陈树汪, 等. 水热活动带下的隧道热害特征与成因分析 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(3): 35-44.
LIU X C, HUANG F, CHEN S W, et al. Characteristics and causes of tunnel thermal damage in hydrothermal activity zones[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2024, 43(3): 35-44. (in Chinese with English abstract)

Summary for “新疆某千米埋深隧道断层控制地热成因及热害评价”

Geothermal genesis and hazard assessment for a fault-controlled kilometer-deep tunnel in Xinjiang

CHAI Chen[1], ZHOU Chang[1*], XIA Zhao[2], WANG Xiuchun[2], LIANG Longfei[1], DONG Qinghong[1*]

1. School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China;
2. Hunan Water Planning and Design Institute Co., Ltd., Changsha 410008, China

First author, E-mail: TS23010102P31@cumt.edu.cn

* Corresponding author, E-mail: changzhou@cumt.edu.cn; dongqh@126.com

Abstract: [**Objective**] Deep tunnel construction is impacted by various geological processes, with geothermal activity significantly affecting construction safety and efficiency. However, case studies specifically revealing geothermal genesis remain scarce. [**Methods**] An integrated approach employing geophysical exploration, drilling, hydrogeochemical analysis, thermal infrared remote sensing, and UAV surveys was utilized to characterize the engineering geological and hydrogeological conditions of a planned expressway tunnel in Xinjiang (maximum burial depth: 1 348 m), with specific focus on adjacent hot springs and high-temperature phenomena. [**Results**] Results show that hot springs are exclusively distributed within the valley area northeast of the intersection between the F36 and F37 faults. Low-resistance fractured rock masses are presented within the study area, particularly concentrated near fault zones and hot spring locations. Additionally, hot spring water samples exhibit significantly higher mineralization compared to the Arxian River water, along with slightly elevated temperatures relative to the ambient strata. [**Conclusion**] Based on aforementioned findings, the geothermal water formation mechanism within the study area is proposed. Recharge occurs not from the proximal Arxian River, but from atmospheric precipitation and meltwater sourced from distal glaciers/snowfields approximately 3 km away. These recharged groundwaters converge near the F35-F36-F37 fault intersection, where it is heated at about 200 m depth by a deep-seated heat source before ascending along fractures in the fault zone towards the surface. Furthermore, employing the Analytic Hierarchy Process (AHP) for thermal hazard assessment of present planned tunnel alignments-considering faults, geothermal gradient, water inflow potential, and surrounding rock lithology as key factors-identified alignment B8 as optimal, evidenced by its lowest AHP score indicating minimal thermal hazard impact. This study elucidates the formation mechanisms and distribution patterns of geothermal activity in deep-buried tunnels, providing a scientific basis for thermal hazard mitigation in high-altitude permafrost regions.

Key words: deep-buried tunnel; geothermal genesis; fault control; thermal hazard; Xinjiang

Received: 2024-05-30; Revised: 2025-02-08; Accepted: 2025-02-14

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240290