

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104007

# 川藏铁路康定隧址区地热水成因及其工程影响分析

张云辉<sup>1</sup>, 李 晓<sup>2</sup>, 徐正宣<sup>1,3</sup>, 常兴旺<sup>3</sup>, 黄 珣<sup>2</sup>, 多 吉<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756; 2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘要:** 川藏铁路康定隧址区穿越鲜水河断裂带, 属地热异常区, 对铁路建设造成一定的热害威胁。采用野外调查、水化学分析和氢氧同位素测试等技术方法, 开展了川藏铁路康定隧址区地热水成因研究。结果表明, 康定隧址区地热水水化学类型主要为  $\text{HCO}_3\text{—Cl—Na}$  和  $\text{HCO}_3\text{—Na}$  型, 聚集于折多塘、康定和中谷 3 个热水区。地热水均为未成熟水, 热储温度为  $104\sim 172\text{ }^\circ\text{C}$ , 深部初始地热水温度为  $186\sim 250\text{ }^\circ\text{C}$ , 冷水混合比例为  $0.56\sim 0.81$ 。氢氧同位素显示地热水补给高程为  $3\,768\sim 4\,926\text{ m}$ 。在康定隧址区, 地热水受到高海拔水源补给, 主体断裂构造为导热构造, 次级分支断裂和发育节理、裂隙的断层破碎带为导水构造, 地热水形成后沿浅部断层破碎带出露形成温泉。FEFLOW 数值模拟分析表明研究区  $100\text{ m}$  深度地温场温度为  $35.4\sim 95.1\text{ }^\circ\text{C}$ , 研究区内三个热水区之间存在低温通道。隧道建设时应重点关注康定热水区的高温水热灾害。

**关键词:** 地热水; 水文地球化学; 成因模式; 工程影响; 康定隧址区

中图分类号: P314.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0046-08

## An analysis of the genesis and engineering influence of geothermal water in the Kangding tunnel site of the Sichuan-Tibet Railway

ZHANG Yunhui<sup>1</sup>, LI Xiao<sup>2</sup>, XU Zhengxuan<sup>1,3</sup>, CHANG Xingwang<sup>3</sup>, HUANG Xun<sup>2</sup>, DUO Ji<sup>1</sup>

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China; 2. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Environmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** The Kangding tunnel of the Sichuan-Tibet Railway crosses the Xianshuihe Fault Zone where geothermal abnormality occurs and is harmful for railway construction. This paper analyzes the genetic mechanism of geothermal waters through the integration of field survey, hydrochemical analysis and D-O isotopic experiments. The results show that  $\text{HCO}_3\text{—Cl—Na}$  and  $\text{HCO}_3\text{—Na}$  types are the main hydrochemical types of hot springs in the Kangding tunnel area, which exists in the Zheduotang, Kangding and Zhonggu geothermal areas. Geothermal waters are immature and the reservoir temperature ranges from  $104\text{ }^\circ\text{C}$  to  $172\text{ }^\circ\text{C}$ . Deep initial geothermal waters display the reservoir temperature of  $186\sim 250\text{ }^\circ\text{C}$  and are mixed by  $56\%\sim 81\%$  of cold water. Hydrogen and oxygen isotopes show that the recharge elevation of the geothermal water ranges from  $3\,768\text{ m}$  to  $4\,926\text{ m}$ . In the study area, geothermal waters are recharged by water source at high elevation. The main fault is the structure of thermal conductivity, and secondary faults and fracture zones are the channel of water migration.

收稿日期: 2021-03-31; 修订日期: 2021-06-15

基金项目: 川藏铁路重大工程风险识别与对策研究(2019YFG0460); 国家自然科学基金项目(42072313; 42102334); 中央高校基本科研业务费项目(2682020CX10; 2682021ZTPY063)

第一作者: 张云辉(1990-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事水文地质与工程地质教学科研工作。E-mail: zhangyunhui@swjtu.edu.cn

通讯作者: 李晓(1963-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水文地质与工程地质教学科研工作。E-mail: lixiao@cdut.edu.cn

Geothermal waters arise and expose as hot springs on the land surface. Simulated geothermal field of 100 m has the temperatures of 35.4–95.1 °C. Relatively low-temperature channel may be existed among three geothermal areas. High-temperature geohazard induced by geothermal water should be focused in the Kangding area during tunnel construction.

**Keywords:** geothermal water; hydrogeochemistry; genetic model; engineering effect; Kangding tunnel area

鲜水河断裂是我国川西地区典型的左行走滑活动断裂,新构造运动活跃,大地热流值高,为地热水的形成提供了有利的条件<sup>[1]</sup>。迄今,在地表已发现大量温泉露头,沿着鲜水河断裂呈串珠状分布,自北向南形成了道孚、中谷、康定和磨西等多个热水区,地热资源丰富<sup>[2]</sup>。

近年来,很多学者对鲜水河断裂的地热资源开展了大量的研究,取得了丰硕成果。张健等<sup>[3]</sup>、Zhang 等<sup>[4]</sup>、Tang 等<sup>[5]</sup>综合利用重力、地震、航磁和电法等地球物理方法查明了川西地区深部地热结构。Li 等<sup>[6]</sup>分析对比鲜水河断裂带各个热水区的水文地球化学特征,发现不同热水区的地热水成因存在一定差异。此外,前人针对典型热水点进行了研究,对出露温泉的地质特征、主要阴阳离子和氢氧同位素进行一系列分析,认为地热水的补给来源以高山冰雪融水为主<sup>[7–9]</sup>,热储为二叠系变质岩热储<sup>[10–12]</sup>,热源来自于花岗岩放射性生热、深部熔融体导热和断裂摩擦生热<sup>[13–15]</sup>。

拟建川藏铁路在康定折多山穿越鲜水河断裂带(图1),沿断裂出露众多温泉。为了能顺利穿越折多山,减小地质不利因素和热害的影响,在地质选线过程中,进行过多种方案的比选,不同方案之间的地质不利因素和热害的影响具有一定的差异。鉴于川藏铁路康定段高温热水可能成为隧道工程的制约性影响因素,且地热水研究程度较低,亟需提升隧址区的地热水研究水平,以期降低高温水热活动对铁路隧道建设的不良影响。因此,本文在川藏铁路康定隧址区内地热水的出露特征、水化学和氢氧同位素分析的基础上,探讨地热水的水岩作用过程、热储特征和补给来源,揭示其成因模式,并利用 FEFLOW 数值模拟软件反演研究区地温场特征,以期为康定隧道的安全建设和运营提供科学依据。

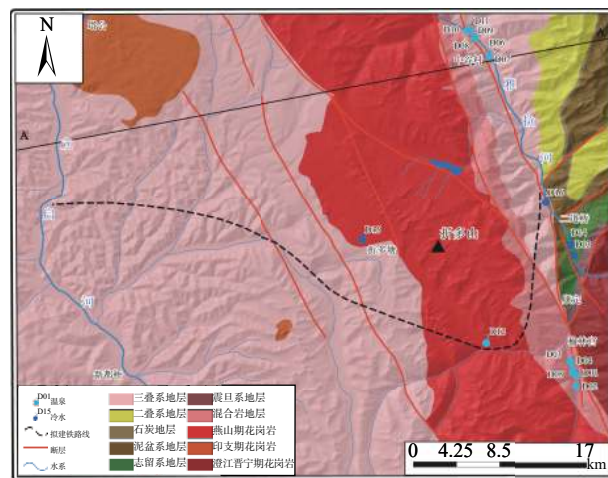


图1 研究区地热地质图(根据文献[16]修改)

Fig. 1 Geological and geothermal map with the sampling locations (modified from Ref. [16])

## 1 研究区概况

研究区处在鲜水河断裂、龙门山断裂和小江断裂的“Y”字型交汇部位,位于鲜水河断裂南段,受左旋走滑作用影响较大。研究区主要出露的地层包括沉积地层和变质地层,上覆第四系沉积物,沉积地层主要由古老的震旦系、志留系和三叠系地层组成;变质地层主要包括泥盆系和二叠系地层(图1)。研究区内岩浆侵入活动强烈,出露有澄江—晋宁期、印支期和燕山期多期的花岗岩。研究区地层和岩体中发育北东-南西向的张性裂隙(图2)。

大气降水是研究区地下水的主要补给来源,局部地区存在河水补给地下水的现象。地下水径流受构造活动影响,在谷坡险峻区具有径流途径短的特点,主要以泉的形式排泄。研究区隶属康定—炉霍地热带南段,区域水文地质资料显示,区内出露温泉或温

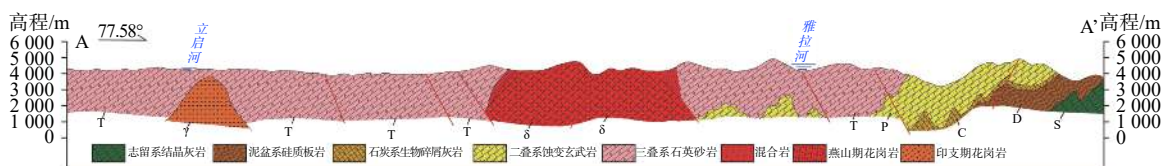


图2 研究区剖面图(根据文献[16]修改)

Fig. 2 A-A' section of study area (modified from Ref. [16])

泉群 50 余处, 沿着鲜水河断裂及其次级断裂出露的温泉或温泉群达到 38 处, 构成南北长约 70 km、东西宽约 7 km 的康定—磨西温泉(或热泉)带, 各泉点的流量差别较大, 为 0.3 ~ 103.0 L/s, 合计流量约 226.0 L/s。川藏铁路康定隧道主要途经中谷、康定和折多塘 3 个热水区, 每个热水区内均出露不同数量的温泉或温泉群, 温泉出露温度为 37 ~ 84 ℃。

## 2 研究方法

2018 年 11 月在甘孜藏族自治州康定市榆林宫、中谷、折多塘等地区进行样品采集, 其中地热水 13 组, 冷泉水 2 组, 地表水 2 组, 进行常规水化学特征分析。在现场使用手持 GPS、便携式水质分析仪(HACH-SL1000)对温泉的出露高程、pH、温度和流量进行测定。 $\text{HCO}_3^-$ 采用格兰氏滴定法现场测量。水样采用容量为 550 mL 的无色聚乙烯瓶保存, 采样前先用待采水样润洗三遍, 在取样过程中尽量保证水样装满取样瓶, 防止瓶中产生气泡, 采样完成后及时蜡封, 并编号标记。为了消除误差设置了对照试验, 每组样品均采集 2 份。样品采集后 48 h 内送至成都理工大学地质灾害防护与地质环境保护国家重点实验室测试。用于测试金属阳离子和微量元素的水样, 取样后需滴加浓盐酸至水样 pH<2。用于测试  $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等阴离子的水样不做酸化处理, 采用离子色谱仪(ICS-1100)测定。 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等主要阳离子采用直读光谱 ICP-OES(ICAP6300)测定。阴阳离子平衡检验在 -4.3% ~ 7.7% 之间, 说明测试结果可靠。氢氧同位素采用平衡法测  $\text{CO}_2$ 、锌法测  $\text{H}_2$ , 质谱计为 MAT251EM 型, 分析精度为  $\pm 0.12\%$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 水化学类型

对水样进行 Piper 三线图分析, 结果表明地表水、冷泉水中主要阳离子为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ , 主要阴离子为  $\text{HCO}_3^-$ ; 地热水的主要阳离子为  $\text{Na}^+$ , 主要阴离子为  $\text{HCO}_3^-$ ; 总体水化学类型可以划分为  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- - \text{Na}$  型、 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}$  型, 康定、中谷和折多塘地区的温泉表现出明显分区差异(图 3)。

#### (1) $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- - \text{Na}$ 型地热水

5 件样品的水化学类型为  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- - \text{Na}$  型, 此类地热水出露地带基本为康定—榆林宫一带。

此类地热水 pH 值为 6.5 ~ 8.7(平均值为 7.6)。溶解性总固体为 1 002.4 ~ 1 949.7 mg/L, (平均值为 1 431.8 mg/L)。

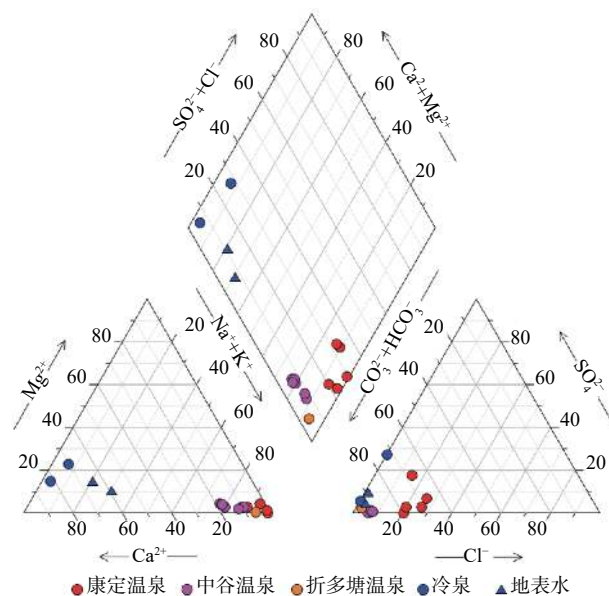


图 3 研究区水样 Piper 三线图

Fig. 3 Piper diagrams for the water samples

地热水中主要阳离子为  $\text{Na}^+$ , 含量为 330.0 ~ 650.0 mg/L (平均值为 454.0 mg/L), 主要阴离子为  $\text{HCO}_3^-$ , 含量为 530.9 ~ 1 304.3 mg/L (平均值为 830.8 mg/L)。

#### (2) $\text{HCO}_3^- - \text{Na}$ 型地热水

8 件样品的水化学为  $\text{HCO}_3^- - \text{Na}$  型, 中谷地区、折多塘地区的地热水水化学类型均为  $\text{HCO}_3^- - \text{Na}$  型。

此类地热水 pH 值为 6.7 ~ 7.8(平均值为 7.0)。溶解性总固体为 388.9 ~ 1 315.8 mg/L, (平均值为 1 040.4 mg/L)。地热水中主要阳离子为  $\text{Na}^+$ , 含量为 140.0 ~ 390.0 mg/L (平均值为 297.1 mg/L); 主要阴离子为  $\text{HCO}_3^-$ , 含量为 372.2 ~ 1 305.8 mg/L(平均值为 951.9 mg/L)。

### 3.2 水岩作用分析

研究区及周边地热水 TDS 含量与  $\text{HCO}_3^-$  相关性较好, 相关系数为 0.788 2, 见图 4。由此表明, 温泉出露的水热活动区地下水径流循环途径畅通。且地表水、冷泉水、地下水的 TDS— $\text{HCO}_3^-$  分区较为明显, 一定程度地反应了三者成因机制、循环方式等方面存在差异。

地热水均具有较高的 Na/Cl 值, 其中尤以折多塘温泉最明显, 高达 15.8, 但水中的  $\text{SiO}_2$  的含量较低(图 4), 表明与其他水热区相比, 折多塘水热区地热水与围岩的水-岩作用程度和机制均存在较大差异。

### 3.3 热储温度估算

在估算热储温度前, 首先利用 Giggenbach Na-K-Mg 三角图解判断地热水的水岩平衡状态图<sup>[17-18]</sup>。研究区内地热水样品均落在未成熟区域, 说明其与矿物并未达到水-岩平衡, 地热水在出露过程中受到了浅部

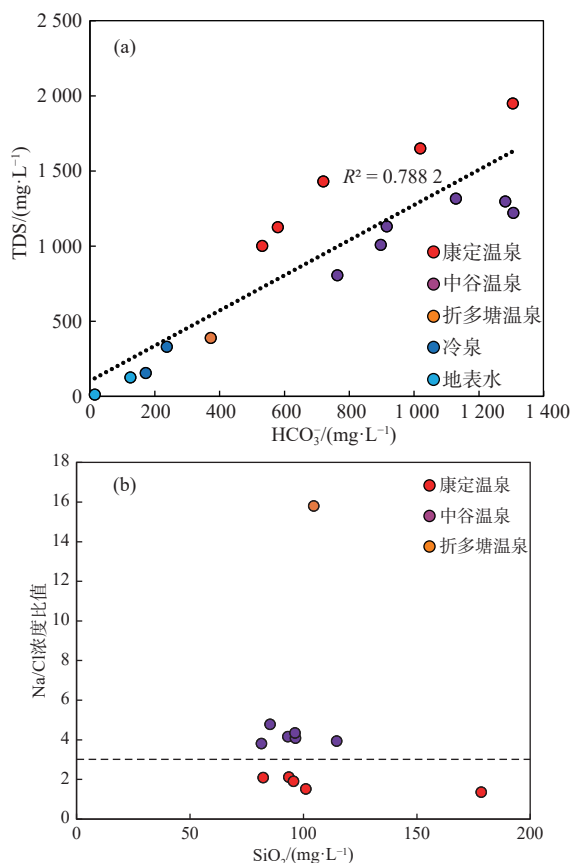


图4 研究区水样 TDS 含量与  $\text{HCO}_3^-$  及  $\text{SiO}_2$  含量与 Na/Cl 浓度比值关系图

Fig. 4 Relationship between TDS and  $\text{HCO}_3^-$  concentrations and  $\text{SiO}_2$  concentration and Na/Cl concentration ratio of the water samples

冷水的混合(图5)。本次在使用阳离子地热温标估算热储温度时结果偏差较大,故而不宜采用。本研究采用  $\text{SiO}_2$  地热温标估算热储温度。在估算热储温度时,需要注意浅部冷水混合作用的影响。

本次研究采用  $\text{SiO}_2$  矿物地热温标估算地热水的热储温度。在估算前先判别不同  $\text{SiO}_2$  矿物在地热水中的平衡状态,采用 Phreeqc 软件模拟得到  $\text{SiO}_2$  矿物石英和玉髓的饱和指数分别为 0.58 ~ 1.12 和 0.15 ~ 0.69,说明石英在地热水中的饱和程度更高,故本次研究采用石英地热温标估算地热水的热储温度,计算结果为 104 ~ 172 °C。选用浅部冷泉的温度 15 °C 和  $\text{SiO}_2$  平均含量 8 mg/L,通过 Fournier 硅-焓方程<sup>[19]</sup>估算深部初始地热水温度为 195 ~ 260 °C,冷水混合比例为 0.56 ~ 0.81 (表1)。

### 3.4 补给来源分析

地下水样品的  $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$  值可以用来查明其补给来源<sup>[20]</sup>。根据测试结果建立研究区地热水  $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$  关系

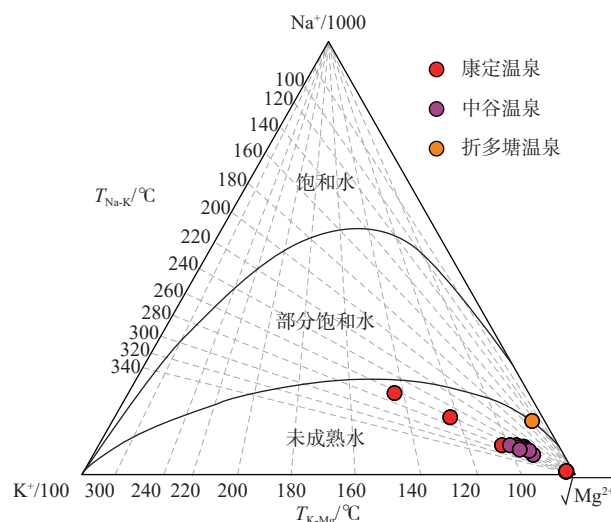


图5 研究区地热水的 Na-K-Mg 三角图<sup>[17]</sup>

Fig. 5 Na-K-Mg triangle diagram for the geothermal waters

直线图(图6),可知大部分地热水样数据点均落在大气降水线右下方,地热水的  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值与地表水相比都更低,说明地热水补给高程较地表水的取样点高程高。中谷温泉及研究区沟水、河水水样数据点均落于大气降水线左上方,说明这些地区相对蒸发强烈,海拔纬度相对较低。

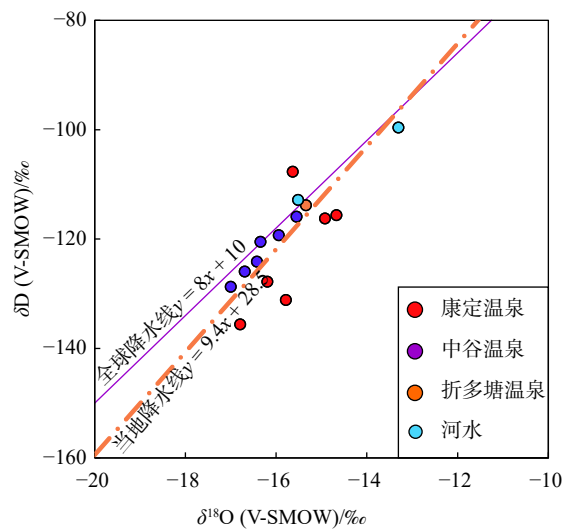


图6 研究区地热水的  $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$  关系

Fig. 6 Plot of oxygen and hydrogen isotopes of the water samples

Craig<sup>[21]</sup>认为在地热系统的高温状态下,深部循环的地热水和围岩之间发生氧同位素交换,表现出“氧同位素漂移”,岩石矿物中的氢元素含量很少,水岩间的氢同位素交换无从进行,因而地热水的  $\delta\text{D}$  与大气降水一致。

根据  $\delta\text{D}$  的高程效应计算补给高程,确定补给区

表 1 研究区水样的水化学和同位素测试分析结果

Table 1 Hydrochemical and isotopic constituents of the water samples in the study area

| 编号                     | 取样类型 | 位置        | 溶解性总固体         |                 |                         |                  |                 |                               |                               |                  |          |      | 离子平衡检验/% |
|------------------------|------|-----------|----------------|-----------------|-------------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|----------|------|----------|
|                        |      |           | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup>        | Mg <sup>2+</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SiO <sub>2</sub> |          |      |          |
| /(mg·L <sup>-1</sup> ) |      |           |                |                 |                         |                  |                 |                               |                               |                  |          |      |          |
| D1                     | 温泉水  | 榆林村白湾     | 1 002.4        | 40.0            | 340.0                   | 4.0              | 0.6             | 223.4                         | 25.1                          | 530.9            | 101.0    | -1.5 |          |
| D2                     |      | 灌顶温泉      | 1 430.8        | 55.0            | 400.0                   | 40.1             | 14.6            | 294.3                         | 75.8                          | 720.0            | 178.3    | 0.6  |          |
| D3                     |      | 龙头沟温泉     | 1 649.6        | 56.0            | 550.0                   | 12.0             | 29.2            | 260.6                         | 0.1                           | 1 019.0          | 93.5     | 7.7  |          |
| D4                     |      | 榆林村温泉     | 1 949.7        | 75.0            | 650.0                   | 7.0              | 7.3             | 340.4                         | 46.4                          | 1 304.3          | 95.5     | -1.8 |          |
| D5                     |      | 金家河坝温泉    | 1 126.5        | 30.0            | 330.0                   | 41.1             | 12.2            | 157.4                         | 182.4                         | 579.7            | 82.2     | -0.2 |          |
| D6                     |      | 二道桥清泉村温泉  | 1 147.1        | 12.0            | 74.0                    | 320.6            | 30.4            | 46.1                          | 11.5                          | 1 281.4          | 93.1     | -2.5 |          |
| D7                     |      | 中谷热水塘1    | 1 009.3        | 30.0            | 270.0                   | 71.1             | 16.4            | 64.9                          | 6.5                           | 897.0            | 96.5     | -0.3 |          |
| D8                     |      | 中谷热水塘2    | 1 315.8        | 32.0            | 340.0                   | 80.2             | 13.4            | 83.3                          | 5.0                           | 1 128.8          | 114.5    | -1.1 |          |
| D9                     |      | 亚拉乡1      | 1 297.5        | 38.0            | 390.0                   | 98.2             | 20.7            | 99.3                          | 10.0                          | 1 281.4          | 96.2     | 0.2  |          |
| D10                    |      | 亚拉乡2      | 1 222.0        | 36.0            | 370.0                   | 90.2             | 21.3            | 85.1                          | 2.9                           | 1 305.8          | 85.2     | -2.0 |          |
| D11                    |      | 中谷大盖1     | 805.4          | 31.0            | 280.0                   | 42.5             | 9.1             | 58.5                          | 8.9                           | 762.7            | 81.5     | 4.2  |          |
| D12                    |      | 中谷大盖2     | 1 132.0        | 34.0            | 290.0                   | 45.1             | 7.9             | 76.2                          | 8.6                           | 915.3            | 104.5    | -4.3 |          |
| D13                    |      | 折多塘       | 388.9          | 2.1             | 140.0                   | 9.0              | 0.6             | 8.9                           | 8.7                           | 372.2            | 52.0     | -1.3 |          |
| D14                    | 冷泉水  | 清泉山庄北60 m | 156.4          | 0.2             | 1.9                     | 106.8            | 8.4             | 0.7                           | 10.4                          | 171.7            | -        | -1.9 |          |
| D15                    |      | 二道桥       | 329.9          | 2.6             | 4.4                     | 73.2             | 23.8            | 0.7                           | 88.7                          | 236.8            | -        | -1.8 |          |
| D16                    | 地表水  | 折多山海子     | 13.0           | 0.1             | 1.4                     | 9.8              | 0.5             | 0.5                           | 0.7                           | 14.2             | -        | -0.2 |          |
| D17                    |      | 雅拉河水      | 127.2          | 1.4             | 8.6                     | 31.2             | 7.2             | 1.8                           | 13.3                          | 124.3            | 10.3     | -1.6 |          |
| 编号                     | 取样类型 | 位置        | 温度/℃           | pH              | 水化学类型                   | 石英温标/℃           | 硅熔方程法           |                               | δ <sup>18</sup> O/‰           | δD/‰             | δD补给高程/m |      |          |
|                        |      |           |                |                 |                         |                  | 初始热水水温/℃        | 冷水混合比                         |                               |                  |          |      |          |
| D1                     | 温泉水  | 榆林村白湾     |                | 6.8             | HCO <sub>3</sub> ·Cl—Na | 138              | 186             | 0.56                          | -16.8                         | -135.6           | 4 926    |      |          |
| D2                     |      | 灌顶温泉      | 84             | 7.6             | HCO <sub>3</sub> ·Cl—Na | 172              | —               | —                             | -14.7                         | -115.6           | 4 097    |      |          |
| D3                     |      | 龙头沟温泉     | 81             | 8.7             | HCO <sub>3</sub> ·Cl—Na | 133              | 198             | 0.63                          | -16.2                         | -127.8           | 4 603    |      |          |
| D4                     |      | 榆林村温泉     | 70             | 8.4             | HCO <sub>3</sub> ·Cl—Na | 135              | 210             | 0.71                          | -15.8                         | -131.1           | 4 740    |      |          |
| D5                     |      | 金家河坝温泉    | 64             | 6.5             | HCO <sub>3</sub> ·Cl—Na | 127              | 228             | 0.80                          | -14.9                         | -116.2           | 4 122    |      |          |
| D6                     |      | 二道桥清泉村温泉  | 48             | 7.4             | HCO <sub>3</sub> —Na    | 133              | —               | —                             | -15.6                         | -107.7           | 3 768    |      |          |
| D7                     |      | 中谷热水塘1    | 40             | 6.9             | HCO <sub>3</sub> —Na    | 135              | 250             | 0.81                          | -15.6                         | -115.9           | 4 109    |      |          |
| D8                     |      | 中谷热水塘2    | 47             | 6.7             | HCO <sub>3</sub> —Na    | 145              | 240             | 0.76                          | -15.9                         | -119.3           | 4 251    |      |          |
| D9                     |      | 亚拉乡1      | 62             | 6.8             | HCO <sub>3</sub> —Na    | 135              | —               | —                             | -16.7                         | -125.9           | 4 524    |      |          |
| D10                    |      | 亚拉乡2      | 45             | 7.1             | HCO <sub>3</sub> —Na    | 128              | 208             | 0.74                          | -17.0                         | -128.7           | 4 641    |      |          |
| D11                    |      | 中谷大盖1     | 50             | 6.9             | HCO <sub>3</sub> —Na    | 126              | —               | —                             | -16.4                         | -124.1           | 4 450    |      |          |
| D12                    |      | 中谷大盖2     | 37             | 7.0             | HCO <sub>3</sub> —Na    | 140              | —               | —                             | -16.3                         | -120.5           | 4 300    |      |          |
| D13                    |      | 折多塘       | 46             | 7.8             | HCO <sub>3</sub> —Na    | 104              | 190             | 0.81                          | -15.3                         | -113.8           | 4 022    |      |          |
| D14                    | 冷泉水  | 清泉山庄北60 m | 38             | 7.8             | HCO <sub>3</sub> —Ca    | —                | —               | —                             | —                             | —                | —        |      |          |
| D15                    |      | 二道桥       | 12             | 7.8             | HCO <sub>3</sub> —Ca    | —                | —               | —                             | —                             | —                | —        |      |          |
| D16                    | 地表水  | 折多山海子     | 12             | 7.3             | HCO <sub>3</sub> —Ca    | —                | —               | —                             | -15.6                         | -112.9           | —        |      |          |
| D17                    |      | 雅拉河水      | —              | 8.1             | HCO <sub>3</sub> —Ca    | —                | —               | —                             | -13.3                         | -99.6            | —        |      |          |

域, 补给高程计算公式为:

$$H = h + (\delta D - \delta D_0) / \text{graD} \quad (1)$$

式中:  $H$ ——地热水的补给高程/m;

$h$ ——地热水高程/m;

$\delta D$ ——地热水的  $\delta D/\text{‰}$ (SMOW);

$\delta D_0$ ——地表河水的  $\delta D/\text{‰}$ (SMOW);

$\text{graD}$ —— $\delta D$  随高程递减梯度。

我国西南地区  $\delta D$  的高程递减梯度为  $-2.6 \text{‰}/100 \text{m}$ <sup>[22]</sup>。基于  $\delta D$  计算补给高程, 结果为  $3\,768 \sim 4\,926 \text{m}$ 。

3.5 成因模式分析

研究区控制地热水发育的断裂主要为雅拉河断裂, 其次为色哈拉断裂和玉龙溪断裂。地热水主要沿雅拉河断裂呈串珠状出露, 在色哈拉断裂和玉龙溪断裂上零星分布。因此, 研究区的水热活动在雅拉河断裂最强, 向西逐步减弱, 向东无温泉出露, 是地热冷区。地质结构、水化学和氢氧同位素分析结果表明, 研究区地热水循环深度大, 补给高程高, 补给区为折多山西南方向的贡嘎山北坡海拔  $4\,000 \text{m}$  以上区域, 补

给来源主要为大气降水、融雪水和浅层地下水。地下水通过北东—南西向的张性裂隙朝北东方向下渗和运移,在雅拉河断裂带 3 000 ~ 4 000 m 深度受热形成高温地热水,地热水形成后沿断裂交汇部位上升,最终在地表出露形成温泉。研究区的地热水成因模式如图 7 所示,属于这一成因模式的温泉水温一般受两组结构面交汇深度控制,深度较大,水温较高、流量较稳定。研究区内出露温度 60 ℃ 以上的温泉,大多属于该成因模式。

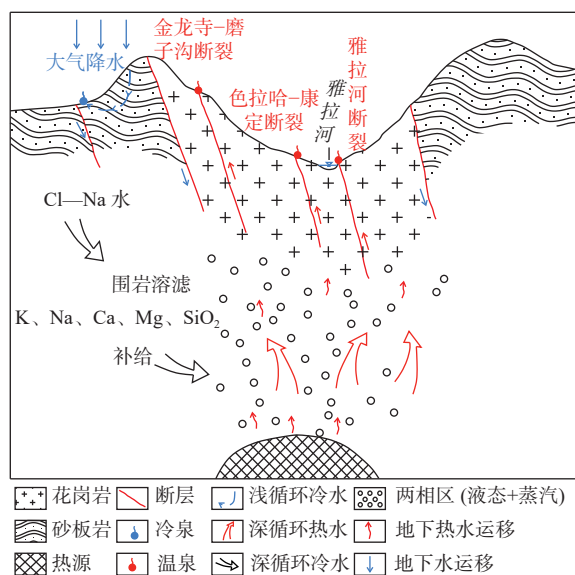


图 7 研究区地热水成因模式图

Fig. 7 Genetic mode of geothermal waters in the tunnel area

### 3.6 地热水对铁路建设的影响分析

高温热害问题会严重干扰隧道施工的进度与隧道结构的稳定性,因此研究地热水对隧道的潜在危害十分必要<sup>[23]</sup>。

本次研究表明,川藏铁路在康定地区主要穿越折多塘、康定和中谷 3 个热水区,其中康定和中谷热水区的温泉露头数量较多,折多塘仅发现一处典型温泉露头。水化学分析结果表明,3 个热水区的水岩反应过程各异,具有不同的地热温标,中谷和康定的热储温度较高,由于中谷热水区距离铁路较远,对隧道修建的影响较小;康定热水区距离铁路隧道较近,在隧道修建时应该做好高温防治工作。

地球内部的热能通过岩层传导和地热流体的对流作用不断向地表散失,热流方向总是垂直于地面,因此大地热流值可以表征热流状况<sup>[24]</sup>。通过搜集研究区大地热流汇编数据以及岩石导热率数据<sup>[25]</sup>,研究区地温场为:

$$T(d) = T_s + q \int_{d_0}^d \frac{dz}{K_r(z)} \quad (2)$$

式中:  $T_s$ ——常温带温度;

$d_0$ ——常温带深度;

$q$ ——大地热流值;

$K_r$ ——岩石导热率;

$z$ ——深度;

$T$ ——温度。

本次采用 FEFLOW 软件对隧道区域地温场进行二维数值模拟计算,此次模拟范围约 2 298.82 km<sup>2</sup>,共剖分 50 000 个网格,运用 Heat 模块,计算研究区 100 m 深度地温场,见图 8。

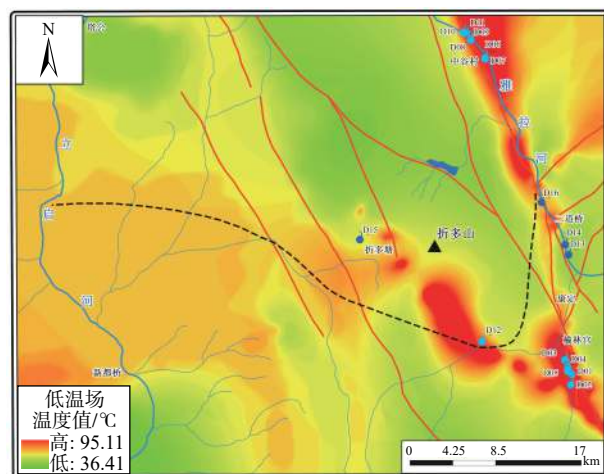


图 8 隧址区 100 m 深度地温场模拟图

Fig. 8 Simulated geothermal field at a depth of 100 m in the tunnel area

由图 8 可知,研究区 100 m 深度地温场温度为 35.4 ~ 95.1 ℃。康定、折多塘、中谷均为温度较高区域,其中康定地区温度最高,为 95.1 ℃,折多塘地区温度为 83.3 ℃,中谷地区温度为 80.0 ℃。地温场模拟图显示,在铁路线路穿越地区有部分相对低温区域,成为有利于隧道修建的相对低温通道。

此外,根据钻探资料分析,鲜水河断裂带折多山地热明显受构造控制,水热活动区展布方向与鲜水河断裂方向基本一致,鲜水河断裂带的主体构造为研究区内的主要导热构造,是深部热源上升对流的主要通道,次级分支断裂与节理密集带是主要的导水通道,分支断裂与主体构造的交汇部位一般岩石破碎、裂隙发育,为地热水的运移、储存提供了有利条件,决定着温泉的出露与分布情况。在宏观上,研究区内各热水区沿鲜水河断裂带呈串珠状分布,每个热水区内,有数个或数十个温泉群组成,每个温泉群内有若干泉

眼,各个地热水集中出露区之间间隔数公里。因此,综合分析认为,在各热水区间,存在有利于隧道修建的相对低温通道。

## 4 结论

本次研究通过现场调查、水文地球化学和数值模拟分析,对川藏铁路康定隧址区开展了地热水成因模式和工程影响分析研究,得出以下结论:

(1)川藏铁路康定隧址区温泉水化学类型主要为  $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3-\text{Na}$  型,  $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Na}$  型温泉主要分布于康定热水区,  $\text{HCO}_3-\text{Na}$  型温泉主要分布于中谷和折多塘热水区。

(2)研究区地热水为未成熟水,热储温度为  $104\sim 172\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,深部初始地热水温度为  $186\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冷水混合比例为  $0.56\sim 0.81$ 。地热水补给高程较高,为  $3\,768\sim 4\,926\text{ m}$ 。

(3)温泉水出露的水热活动区地下水径流循环途径畅通,地热水经过了强烈的水岩作用,受多断裂交汇构造带控制,在地表形成温泉。鲜水河断裂主体构造作为导热构造,是深部热源向上传导热量的通道;次级断裂与断层破碎带作为导水构造,为地热水的循环运移提供了有利空间。

(4)研究区  $100\text{ m}$  深度地温场温度为  $35.4\sim 95.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,地热水集中出露形成 3 个热水区,不同热水区之间存在低温通道。隧道建设时应重点关注康定热水区的高温热害。

## 参考文献 (References):

- [1] 唐哈哈,郭良辉,方圆. 青藏高原东南缘热流估算及与地震活动相关性分析[J]. 地球物理学报, 2020, 63(3): 1056 – 1069. [TANG Hanhan, GUO Lianghui, FANG Yuan. Estimation of heat flow in southeastern margin of Tibetan Plateau and its analysis of the correlation with earthquake activity[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(3): 1056 – 1069. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李晓,王金金,黄珣,等. 鲜水河断裂带康定至道孚段热水化学与同位素特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(6): 733 – 745. [LI Xiao, WANG Jinjin, HUANG Xun, et al. Chemical and isotopic characteristics of hot water in the Kangding-Daofu section of Xianshuihe fault zone, Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2018, 45(6): 733 – 745. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张健,李午阳,唐显春,等. 川西高温水热活动区的地热学分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(8): 899 – 915. [ZHANG Jian, LI Wuyang, TANG Xianchun, et al. Geothermal data analysis at the high-temperature hydrothermal area in Western Sichuan[J]. Science China Earth Sciences, 2017, 47(8): 899 – 915. (in Chinese with English abstract)]
- [4] ZHANG J, LI W Y, TANG X C, et al. Geothermal data analysis at the high-temperature hydrothermal area in Western Sichuan[J]. Science China Earth Sciences, 2017, 60(8): 1507 – 1521.
- [5] TANG X C, ZHANG J, PANG Z H, et al. The eastern Tibetan Plateau geothermal belt, Western China: Geology, geophysics, genesis, and hydrothermal system[J]. Tectonophysics, 2017, 717: 433 – 448.
- [6] LI X, HUANG X, LIAO X, et al. Hydrogeochemical characteristics and conceptual model of the geothermal waters in the Xianshuihe fault zone, southwestern China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(2): 500.
- [7] LI B, SHI Z M, WANG G C, et al. Earthquake-related hydrochemical changes in thermal springs in the Xianshuihe Fault zone, Western China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124175.
- [8] QI J H, XU M, AN C J, et al. Characterizations of geothermal springs along the Moxi deep fault in the western Sichuan plateau, China[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2017, 263: 12 – 22.
- [9] ZHANG Y H, XU M, LI X, et al. Hydrochemical characteristics and multivariate statistical analysis of natural water system: a case study in Kangding County, southwestern China[J]. Water, 2018, 10(1): 80 – 96.
- [10] 卞跃跃,赵丹. 四川康定地热田地下热水成因研究[J]. 地球学报, 2018, 39(4): 491 – 497. [BIAN Yueyue, ZHAO Dan. Genesis of geothermal waters in the Kangding geothermal field, Sichuan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2018, 39(4): 491 – 497. (in Chinese with English abstract)]
- [11] LUO J, PANG Z H, KONG Y K, et al. Geothermal potential evaluation and development prioritization based on geochemistry of geothermal waters from Kangding area, western Sichuan, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(9): 1 – 24.
- [12] GUO Q, PANG Z H, WANG Y C, et al. Fluid geochemistry and geothermometry applications of the Kangding high-temperature geothermal system in eastern Himalayas[J]. Applied Geochemistry, 2017, 81: 63 – 75.

- [13] 张云辉. 鲜水河断裂康定-磨西段地热系统成因及开发利用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018. [ZHANG Yunhui. Research on genesis and development of the geothermal system in the Kangding-moxi segment of the Xianshuihe fault[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [14] LI J X, YANG G, SAGOE G, et al. Major hydrogeochemical processes controlling the composition of geothermal waters in the Kangding geothermal field, western Sichuan Province[J]. *Geothermics*, 2018, 75: 154 – 163.
- [15] LIU Q Q, SHI Y N, WEI D P, et al. Near-surface geothermal gradient observation and geothermal analyses in the Xianshuihe fault zone, eastern Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 2017, 91(2): 414 – 428.
- [16] 梁信之, 谭庆鹄, 师常庆, 等. 1 : 20万康定幅区域报告[R]. 成都: 四川省地质矿产局区域调查队, 1985. [LIANG Xinzhi, TAN Qinghu, SHI Changqing, et al. 1 : 200 000 Kangding regional survey report[R]. Chengdu: Regional Geological Survey Party, Sichuan Bureau of Geological Exploration and Exploration of Mineral Resources, Sichuan, 1985.]
- [17] GIGGENBACH W F. Geothermal solute equilibria Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(12): 2749 – 2765.
- [18] 史杰, 乃尉华, 李明, 等. 新疆曲曼高温地热田水文地球化学特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 165 – 172. [SHI Jie, NAI Weihua, LI Ming, et al. Hydrogeochemical characteristics of high temperature geothermal field of the Quman geothermal field in Xinjiang[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(3): 165 – 172. (in Chinese with English abstract)]
- [19] FOURNIER R O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems[J]. *Geothermics*, 1977, 5: 41 – 50.
- [20] 李明辉, 袁建飞, 黄从俊, 等. 四川广安铜锣山背斜热储性质及地热成因模式[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 36 – 46. [LI Minghui, YUAN Jianfei, HUANG Congjun, et al. A study of the characteristics of geothermal reservoir and genesis of thermal groundwater in the Tongluoshan anticline near Guang'an in east Sichuan[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(6): 36 – 46. (in Chinese with English abstract)]
- [21] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702 – 1703.
- [22] 宋春林, 孙向阳, 王根绪. 贡嘎山亚高山降水稳定同位素特征及水汽来源研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(11): 1860 – 1869. [SONG Chunlin, SUN Xiangyang, WANG Genxu. A study on precipitation stable isotopes characteristics and vapor sources of the subalpine Gongga mountain, China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(11): 1860 – 1869. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 赵志宏, 徐浩然, 刘峰, 等. 川藏铁路折多山段隧道温度场与热害初步预测[J]. 现代地质, 2021, 35(1): 180 – 187. [ZHAO Zhihong, XU Haoran, LIU Feng, et al. Preliminary prediction of temperature field and thermal damage in Zheduoshan region along Sichuan-Tibet Railway[J]. *Geoscience*, 2021, 35(1): 180 – 187. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 何丽娟, 汪集旸. “大地热流”等地热学重要术语的概念与应用[J]. *中国科技术语*, 2021, 23(3): 3 – 9. [HE Lijuan, WANG Jiyang. Concept and application of some important terms in geothermics and geophysics such as terrestrial heat flow[J]. *China Terminology*, 2021, 23(3): 3 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 姜光政, 高珊, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2892 – 2910. [JIANG Guangzheng, GAO Peng, RAO Song, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China(4th edition)[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2892 – 2910. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳