

西藏谢通门县卡嘎地热成因与资源潜力分析

邹俊, 武斌, 马昭雄, 陈宁, 谢伟, 邹华敏, 杨代彬

Geothermal genesis and resource potential of Kaga in Xietongmen County in Tibet

ZOU Jun, WU Bin, MA Zhaoxiong, CHEN Ning, XIE Wei, ZOU Huamin, and YANG Daibin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四川广安铜锣山背斜热储性质及地热成因模式

A study of the characteristics of geothermal reservoir and genesis of thermal groundwater in the Tongluoshan anticline near Guang'an in east Sichuan

李明辉, 袁建飞, 黄从俊, 刘慧中, 郭镜 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 36-46

川藏铁路康定隧址区地热水成因及其工程影响分析

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

张云辉, 李晓, 徐正宣, 常兴旺, 黄, 多吉 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 46-53

基于示踪试验及动态数据的北京小汤山地区地热资源量评价

Tracer test and geothermal resource quantity evaluation based on dynamic data in the Xiaotangshan area of Beijing

杨亚军, 丁桂伶, 徐巍, 李海京, 鲁鹤, 王雨石, 张俊华, 王翊虹 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 196-200

河北平原隆尧地裂缝成因机理与模式研究

A study of the genesis mechanism and model of Longyao ground fissures in Hebei plain

吴玉涛, 杨为民, 周俊杰, 于鸿坤, 李晓乐, 张田田, 万飞鹏 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 169-178

沉积型和火山型地热流体的同位素水文地球化学对比研究

A comparative study of isotopic hydrogeochemistry of geothermal fluids of sedimentary basin type and volcanic type

马致远, 李嘉祺, 翟美静, 吴敏, 许勇 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 9-18

地质灾害隐患和水文地质环境地质调查计划进展

Achievements of the program of geological investigation on geo-hazards and hydrogeology and environmental geology

李文鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 1-1



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208003

邹俊, 武斌, 马昭雄, 等. 西藏谢通门县卡嘎地热成因与资源潜力分析 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 207-216.
ZOU Jun, WU Bin, MA Zhaoxiong, *et al.* Geothermal genesis and resource potential of Kaga in Xietongmen County in Tibet [J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 207-216.

西藏谢通门县卡嘎地热成因与资源潜力分析

邹俊^{1,2}, 武斌^{1,2}, 马昭雄¹, 陈宁^{1,2}, 谢伟¹, 邹华敏³, 杨代彬¹

(1. 四川省地质矿产勘查开发局物探队, 四川 成都 610072; 2. 武斌劳模与工匠人才创新工作室, 四川 成都 610072; 3. 四川省冶金地质勘查院, 四川 成都 610051)

摘要: 西藏谢通门县地处青藏高原高寒山区, 分布有卡嘎温泉, 开发地热解决当地供暖之急, 但地热成因及储量研究尚未开展。通过分析调查区的地质构造、地热活动规律, 并在卡嘎温泉附近开展地质详细调查、音频大地电磁测深及土壤氡气测量等工作, 综合运用地质、物探成果, 对卡嘎温泉的成因及热储特征进行了探讨。研究表明: (1) 音频大地电磁及土壤氡气测量成果清晰地揭示了区内 NE 向、NW 向与 SN 向断层深部的延展情况与叠加关系, 说明区内具备较好的导水通道和热储空间。(2) 研究区热源以中浅部始~渐新世岩浆岩衰变放热及深部存在高温岩浆熔融热源向上传导; 断裂破碎带既是深部热储, 也是深部热水上涌的通道; 第四系上部冲洪积等堆积层为地热水的良好盖层, 而第四系下部松散沉积物及部分基岩风化壳构成区内浅部热储。这些说明本区地热应用潜力较大, 但需要注意的是: 依据音频大地电磁测深成果的三维展示, 发现深部 S1、S2 两个异常区在浅部呈连通状态, 地表温泉点正好位于其连通通道上方, 故在附近钻探取水时需评估对此温泉点水量的影响。最后, 结合本区地热热水的地热特征及电性特征, 构建了调查区“地球物理-地热地质”模型, 可为西藏其他地区地热资源勘探开发提供借鉴和指导作用。

关键词: 地热; 音频大地电磁测深; 氡气测量; 地质调查; 成因模式

中图分类号: P314.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0207-10

Geothermal genesis and resource potential of Kaga in Xietongmen County in Tibet

ZOU Jun^{1,2}, WU Bin^{1,2}, MA Zhaoxiong¹, CHEN Ning^{1,2}, XIE Wei¹, ZOU Huamin³, YANG Daibin¹

(1. *The Geophysical Exploring Team, BGEEMRSP, Chengdu, Sichuan 610072, China*; 2. *Wubin Model Worker and Craftsman Talent Innovation Studio, Chengdu, Sichuan 610072, China*; 3. *Sichuan Metallurgical Geological Exploration Institute, Chengdu, Sichuan 610051, China*)

Abstract: Xietongmen County is located in the alpine mountain area of the Qinghai-Tibet Plateau, where the Kaga hot spring occurs. Geothermal energy is expected to be developed to solve the local heating problem, but research on the genesis and reserves of geothermal energy has not been carried out. By analyzing the geological structure and geothermal activity law of the survey area, and carrying out detailed geological survey, audio frequency magnetotelluric sounding and soil radon measurement near the Kaga hot spring, this paper discusses the genesis and thermal reservoir characteristics of the Kaga hot spring by comprehensively using geological and geophysical

收稿日期: 2022-08-02; 修订日期: 2022-08-22

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 四川省财政厅资助科研项目(51000023Y000008290263)

第一作者: 邹俊(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事应用地球物理勘查工作。E-mail: 164005911@qq.com

通讯作者: 武斌(1972-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事固体地球物理勘查与城市物探。E-mail: 805784975@qq.com

exploration data. The research results show that (1) the audio frequency magnetotelluric and soil radon measurement results clearly reveal the extension and superposition relationship of the deep NE, NW and SN trending faults in the area, indicating that the area has a good permeable channel and thermal storage space. (2) The heat source in the study area is composed of the middle and shallow Eocene Oligocene magmatic rock decay exothermic heat source and the deep high-temperature magmatic melting heat source. The fracture zone is not only a deep thermal reservoir, but also a channel for the upwelling of deep hot water. The alluvial proluvial and other accumulative layers in the upper part of the Quaternary system are good caprocks of geothermal water, while the unconsolidated sediments in the lower part of the Quaternary system and some bedrock weathering crusts constitute shallow geothermal reservoirs in the area. These indicate that the geothermal application potential in this area is large, but it should be noted that, according to the three-dimensional display of audio frequency magnetotelluric sounding results, it is found that the deep S1 and S2 abnormal areas are connected at the shallow part, and the surface hot spring vent is just above its connecting channel, so the impact of the water volume of this hot spring vent needs to be evaluated when drilling water nearby. Finally, combined with the geothermal characteristics and electrical characteristics of geothermal water in this area, the “geophysical geothermal geology” model of the survey area is constructed, providing reference and guidance for the exploration and development of geothermal resources in other regions of Tibet.

Keywords: geothermal resources; audio magnetotelluric sounding; radon measurement; geological survey; genetic mode

西藏地区重点推进高寒高海拔县城供暖工程建设已实施多年,各县城可因地制宜实行高效低碳节能环保措施。而地热资源作为一种清洁可再生资源,具有广阔的应用前景。同时西藏地区地热资源丰富,全区水热爆炸、间歇喷泉、热泉、冒汽地面和泉体等水热活动超过 600 处^[1-5],如羊八井地热田^[6-7]、阿里朗久地热田^[8]、那曲地热田均受青藏高原构造活动影响,具有深部热源垂直传导供热、深大断裂和其发育的次级断裂为有利通道等特性,均已实现装机发电,地热能在藏区应用潜力很大^[9]。

地热勘探方法较多,包括采用地下热水水化学分析开展热储分析^[10-11,14],采用重力^[12-13]、大地电磁法^[15-19]、深地震反射法^[12,19]查明深部构造延展情况及推断热储范围埋深情况,采用放射性测量^[17]辅助确定断层位置,采用遥感热异常测量^[13]评价地表热异常范围等。一般可结合工区特点选择多种方法综合勘探。

谢通门县地处青藏高原高寒山区,位于西藏自治区日喀则市西北部、雅鲁藏布江北岸,平均海拔 4 100 m,地区经济主要以农牧业为主。谢通门县城及附近常住人口近 5 万,取暖问题一直困扰着广大市民群众。卡嘎温泉位于谢通门县城西北 2 km 处,交通便利,现泉区泉水总流量 1 036.8 m³/d,水温 43 ~ 62 °C,地热供暖前景广阔。但以往没有对该区地热资源进行详细勘查和研究,目前地热资源开发程度不足且利用水平

低,仅限于当地村民的洗浴和旅游,远达不到地热供暖的需求。本次结合当地条件采用音频大地电磁测深与土壤氡气测量,结合水文地质、遥感等资料,对调查区断裂构造、热储体的地下分布情况进行研究,以查明区内地热成因机理及地热资源潜力情况,为下一步地热资源开发利用提供科学依据。

1 地质环境背景

1.1 区域地质构造

第四纪是青藏高原地质构造格局的最终形成期。新构造运动以区域性 SN 向正断层和地堑式断陷盆地,NE 向、NW 向等老构造的复活以及地热、地震活动的频繁发生为显著特征^[20-23]。在班公湖—怒江缝合带以南,垂直喜马拉雅造山弧形成 7 条南北走向伸展构造带,其中有 4 条大型构造带:亚东—谷露裂谷、隆格尔裂谷、尼玛—定日裂谷和申扎—定结裂谷,切割了青藏高原的中南部^[24-26]。本文所研究的申扎—谢通门一定结断裂带经研究证明为一条全新世的活动断裂带,在申扎县以南与格仁错断裂带连通,向北切割并可追溯至羌塘高原中部,向南经谢通门,穿过雅鲁藏布江至定结县北部,并延入高喜马拉雅地块^[27-28]。

谢通门一带位于申扎—谢通门一定结断裂带的中段部位,断裂带中次级 SN 向断层发育,在该断裂带中

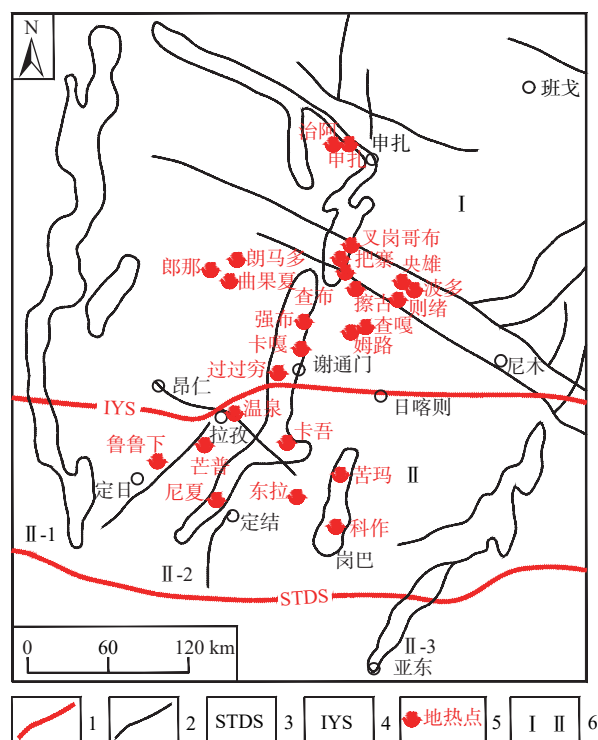


图2 申扎—谢通门—定结构造带温泉位置分布图

Fig. 2 Location of hot springs in the Shenza—Xietongmen—Dingjie structure belt

1—热水活动边界断裂; 2—SN向裂谷与地堑盆地; 3—藏南拆离系; 4—印度—雅鲁藏布江缝合带; 5—温泉点; 6—热水活动分区, II-1为当惹雍错—古堆裂谷带, II-2为申扎—谢通门—定结裂谷带, II-3为亚东—谷露裂谷带

62℃, 累计流量达1 036.8 m³/d, 西侧、南西侧可见大片沼泽湿地, 其中发育有盐华、硫华等现象, 泉区可闻

见硫磺味。地下水可划分为第四系松散岩类孔隙水和岩浆岩类断裂构造裂隙水2种类型。工作区北侧是本区域的地表水和地下水的天然补给区, 大量雨水、冰雪融水及地表水通过岩石裂隙下渗, 在重力作用下形成径流进入地壳深部。工作区中部存在张性正断层F1、F2、F3、F11, 这4条断裂与近SN向当嘎棍巴断裂等贯通, 成为地下水运动的良好通道, 下渗流体也会产生水平方向的移动。地下水沿该通道从北往南径流, 地下水被始~渐新世岩浆岩逐渐加热, 热水在静水压力和热对流的作用下沿断层向上运动。然后再进入卡嘎村南侧第四系砂砾石层形成浅层热储, 地热水便顺着第四系的薄弱部位出露于地表, 形成卡嘎温泉。

2 工作方法

2.1 本次勘查方案

在本区1:1万地质调查11 km²、1:1万水文地质调查11 km²、1:5 000综合剖面测量3 km及遥感地质调查基础上, 主要采用音频大地电磁测深(AMT)及土壤氡气测量推断断裂构造的位置、深度及其在地面以下的延展情况, 以此来圈定地热异常范围和热储体的空间分布, 并预测地下热水的富集部位和推荐井位。由于卡嘎温泉出露点主要在卡嘎村内, 而村内房屋密集, 人文干扰强, 为避开强干扰区, 本次围绕卡嘎村周围布设5条AMT剖面(图3), 其中L10、L20、L60

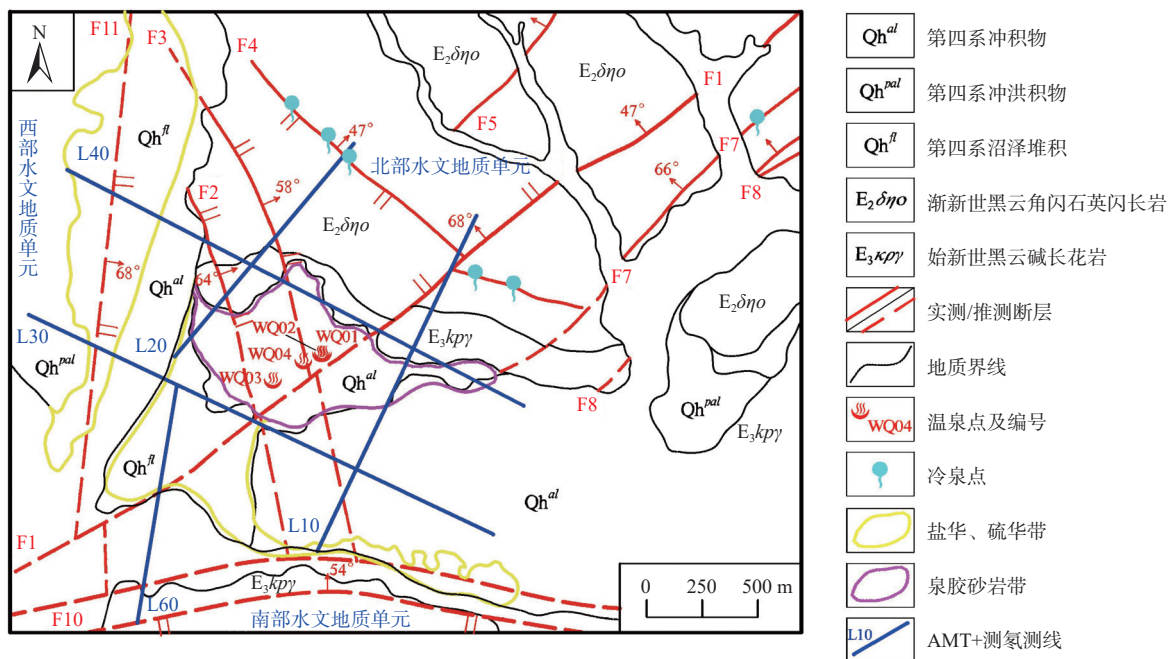


图3 调查区综合地质图及物探测线布置图

Fig. 3 Comprehensive geological map and geophysical survey line layout of the survey area

测线沿 NNE 方向布置, L30、L40 测线 SEE 方向布置。测氦剖面基本与物探测线重合, 部分区域由于沼泽富水测氦无法施测或方向有所偏移。

2.2 工区电性特征

区内第四系覆盖层为碎石土及卵石层等, 底部岩体主要由黑云碱长花岗岩、黑云角闪石英闪长岩组成。通过现场电性测试及剖面电性分析, 第四系浅表

不含水, 表现为中高阻特征, 视电阻率值(ρ_s)在 $60 \sim 200 \Omega \cdot m$ 之间; 第四系浅表潜水面以下表现为低阻特征, ρ_s 在 $10 \sim 60 \Omega \cdot m$ 之间; 底部断裂破碎带附近的黑云碱长花岗岩、黑云角闪石英闪长岩表现为中低阻特征, ρ_s 在 $30 \sim 100 \Omega \cdot m$ 之间; 底部完整的黑云碱长花岗岩、黑云角闪石英闪长岩表现为中高阻特征, ρ_s 在 $100 \sim 1\,000 \Omega \cdot m$ 之间。

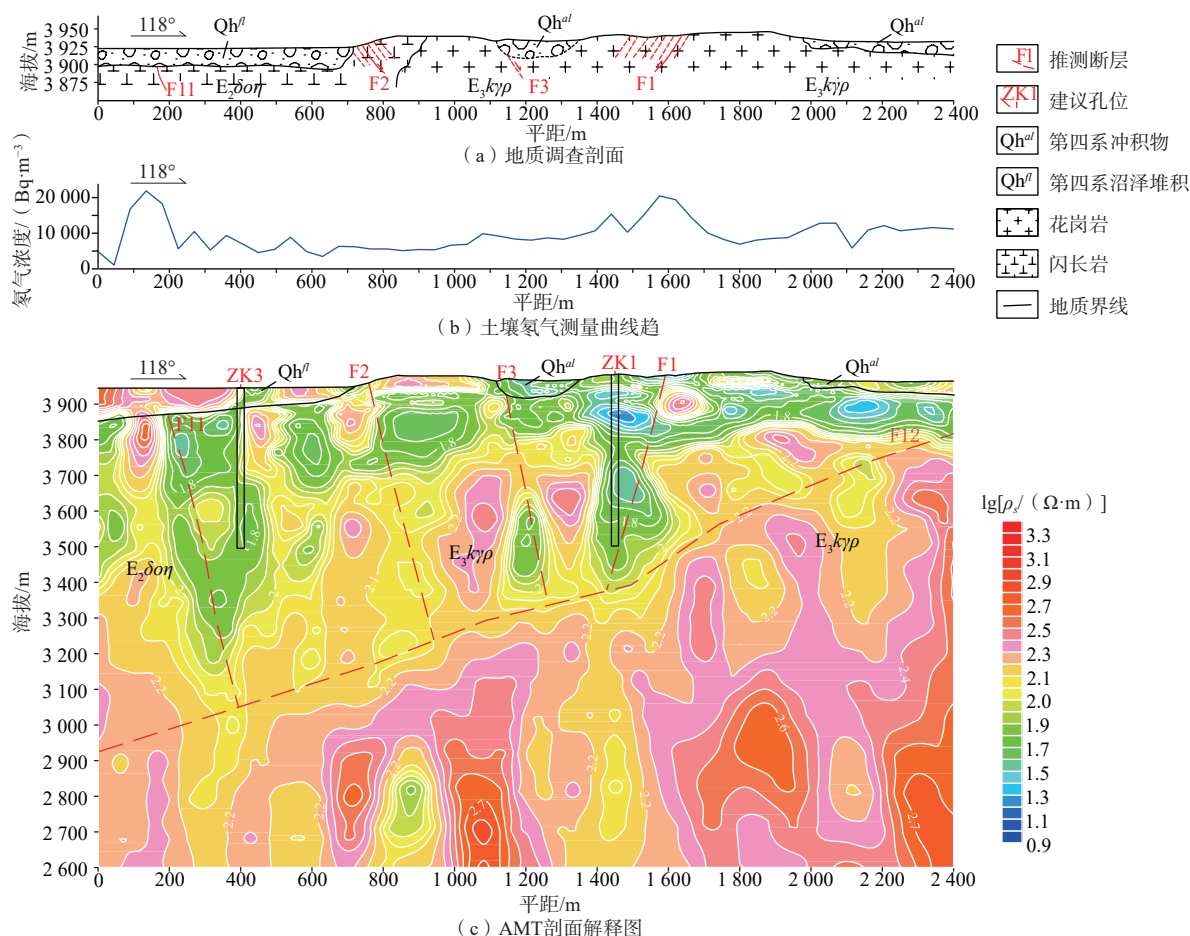


图4 L40线地质-物探成果综合解释图

Fig. 4 Comprehensive interpretation of geological and geophysical exploration results of Line L40

3 综合成果

3.1 典型剖面解释成果

L40 测线位于卡嘎村北侧沿 SEE 向展布(方位角 118°), 从图 4(a)可知, 地表出露主要为第四系冲积物、黑云碱长花岗岩、黑云角闪石英闪长岩, 断层 F1、F2 地表发育。从图 4(b)可知, 氦浓度最小值 $1\,086 \text{ Bq/m}^3$, 最大值 $21\,875 \text{ Bq/m}^3$, 平均值 $10\,095 \text{ Bq/m}^3$ 。其中在平距 $100 \sim 200 \text{ m}$ 、 $1\,580 \sim 1\,700 \text{ m}$ 段出现大于 $15\,142 \text{ Bq/m}^3$ 的异常值(超过平均值 1.5 倍), 推断异常部位分别与

断层 F11、F1 有关。从图 4(c)可知, ρ_s 主要集中在 $10 \sim 1\,000 \Omega \cdot m$ ($\lg \rho_s$ 值为 $1.0 \sim 3.0$) 之间, 变化大。剖面浅表部 $15 \sim 30 \text{ m}$ 之间中低阻区推断为第四系覆盖层或强风化层; 剖面浅部 200 m 深度范围内 ρ_s 较低, 推断为浅部风化岩体破碎、节理发育含水所致; 剖面在平距 200 、 760 、 $1\,140$ 、 $1\,600 \text{ m}$ 下方分别存在 F11、F2、F3、F1 等 4 个断层, 断层附近岩体破碎呈中低阻特征, 其中 F1 断层倾向 NW 方向, 倾角 68° , F11、F2、F3 均倾向 NE 方向, 倾角约 70° ; 剖面底部隐伏断裂 F12, 推断为 SN 走向、倾向 NW 方向, F11、F2、F3、F1 等 4 个断

层底部与 F12 相交;剖面底部高程 3 600 m 以下中阻区推断为完整岩体。在平距 400 m 及 1 450 m 底部低阻异常区域推荐 2 个有利井位。

3.2 土壤氦气测量成果

由于岩石破碎致使断层附近岩石的射气性能增强,断层面附近的放射性元素丰度也往往较大,故断层破碎带附近的氦气测量值出现正异常,这对找寻断

层破碎带具有一定的指导作用^[34]。

本次区内的土壤氦气测量平均值为 $8\,253.5\text{ Bq/m}^3$,从以往经验超过 1.5 倍平均值(即 $12\,380.3\text{ Bq/m}^3$)为异常区来看(图 5),区内断层 F10、F11 线状特征明显,F1、F2、F3 局部有反映,推断为测区中部第四系砂卵石层较厚,普遍富水阻隔了氦气的上移通道,测区四周覆盖层较薄或岩浆岩出露的地方土壤氦气正异常明显。

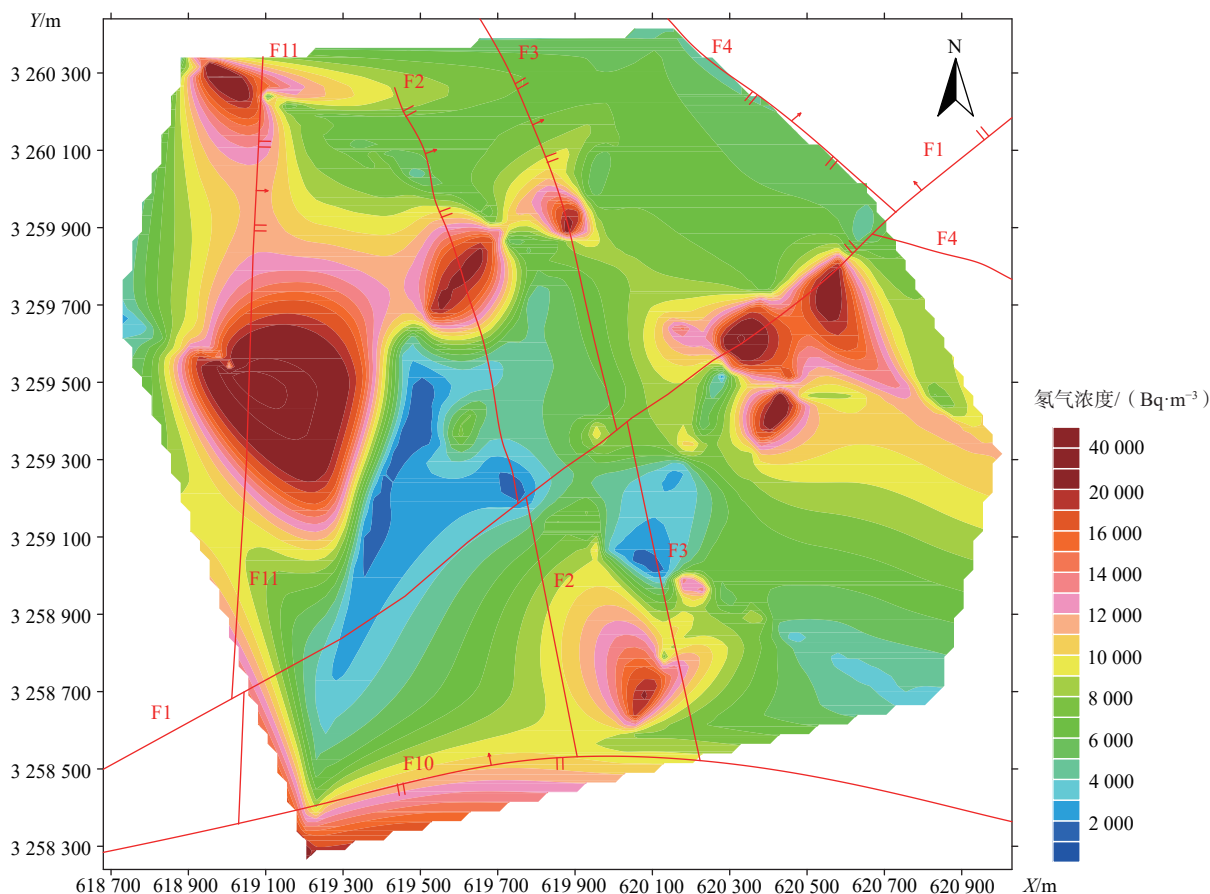


图 5 土壤氦气测量平面等值线图

Fig. 5 Three dimensional map of audio magnetotelluric results in the area

3.3 音频大地电磁测深成果三维立体分析

从音频大地电磁成果三维立体图(图 6、图 7)可以清晰地看出低阻异常的空间位置主要集中在海拔 3 600 m 以浅及 S1、S2 异常区。从图 7 可看出 S1、S2 异常区分布范围较大,深部与断裂 F1、F2、F3 及 F11 连通,其中 S1 异常位于测区中部至北侧,推断为断裂 F2、F3 与断裂 F1 在底部贯通引起,深部延伸至测区北侧边界;S2 异常位于测区西南,推断为断层 F11、F1 控制,深部延伸至断层 F11、F1 交汇处;在浅部高程 200 m 以上,S1 与 S2 异常区在温泉出露点附近呈连通状态,推断两异常区被 F1 断层串通,此处上部第

四系薄弱,地下热水由此涌出形成温泉点;高程 200 m 以下底部异常范围因控制断裂不同逐渐分离形成 S1 与 S2 深部热储;推荐井位 3 处,其中 ZK1 位于 S1 异常区,ZK2、ZK3 位于 S2 异常区;同时调查区的东南部、南部见孤立的封闭的低阻异常区,推断为岩体节理发育破碎区,由于范围有限推断其含水性一般。

4 讨论

4.1 本区与羊八井地热系统对比

羊八井高温地热田位于亚东—谷露裂谷中部,而亚东—谷露裂谷与本区所在的申扎—定结裂谷同属

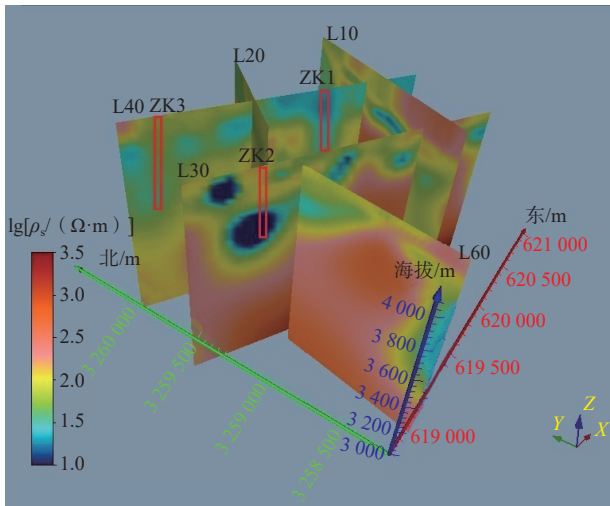


图 6 区内音频大地电磁成果三维立体图

Fig. 6 Three dimensional map of audio magnetotelluric results in the area

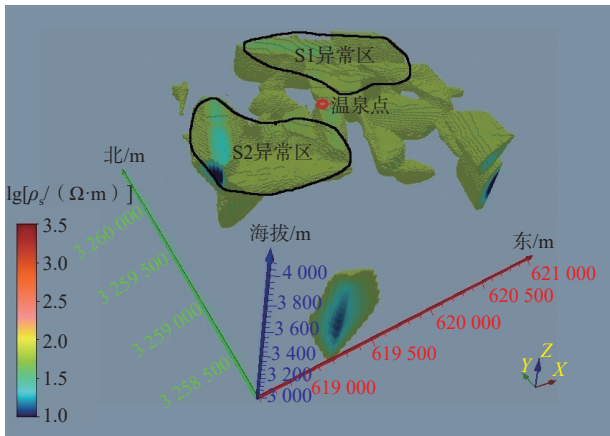


图 7 低阻异常体位置三维立体图

Fig. 7 Three dimensional diagram of low resistance abnormal body position

垂直喜马拉雅造山弧形成大型 SN 走向的伸展构造带。羊八井断陷盆地及盆地内的水热活动是在断陷作用(滑离断层作用)的构造背景下形成,地热田严格受断裂构造的控制^[3,6]。通过对比分析,虽然羊八井地热异常范围较大及地热水温度较高,但本区地热系统与羊八井地热系统具相似性,地热田都受 NE、NW 张性断裂及 SN 向深部大断裂控制。本区与羊八井地热田热储空间均是由浅部与深部热储组成,浅部热储由第四系下部松散沉积物及部分基岩风化壳构成,深部热储属基岩裂隙型脉状或带状热储;盖层为第四系上部的冲积物、洪冲积物及沼泽堆积物;热源为中浅部始~渐新世岩浆岩衰变放热及深部存在的高温岩浆熔融热源向上传导^[35];热流体是以断裂破碎带作为补给、循环上升的通道,在断裂破碎带及裂隙、孔隙

空间储集、运移。

4.2 “地球物理-地热地质”模型构建

通过以上对比分析,本区具备完整的地热水形成条件即盖层、通道、热源、热储等地热特征。研究区广泛出露第四系上部冲积物、洪冲积层及沼泽堆积层,成为地热水的良好盖层。区内地热受断裂构造控制强烈,主要发育两类热储层:第四系下部浅层热储层、断层破碎带热储层。第四系浅层热储层的热水,既有侧向流入,也有从第四系底部断层破碎带直接向上径流补给;区内 SN 向断层与 NE 向、NW 向断层破碎带交错在一起既是地下水深部径流的通道,又是中深层的热储层。区内岩浆岩为始~渐新世,岩浆侵入活动极为频繁,故岩浆岩衰变放热及深部存在高温岩浆熔融热源向上传导的大地热流是本区主要热源。

结合区内电性特征分析,调查区地热资源盖层主要为第四系砂砾石、卵石层,在电性上表现为中低—中高阻特征;热储层及深部地热通道为岩体间破碎带,在电场上表现为低阻—中低阻特征;热源为始~渐新世岩浆岩,在电场上表现为相对中高阻—高阻特征。根据上述电性特征、地热地质要素分析,初步构建了研究区地热水形成机制的“地球物理-地热地质”模型(图 8),对研究申扎一定结构造带及邻区深部地热资源具有实践指导意义。

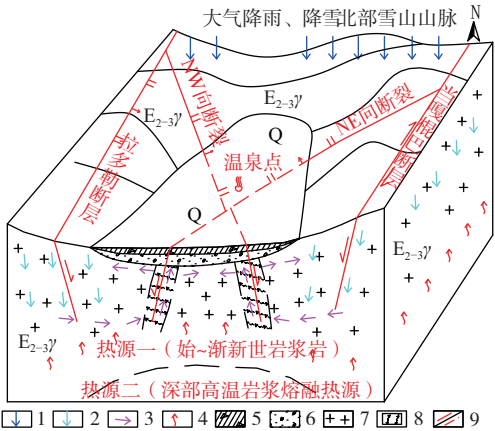


图 8 区内地热成因“地球物理-地热地质”模型图

Fig. 8 “Geophysical-Geothermal geology” model of geothermal genesis in the area

1—大气降雨降雪; 2—冷水流向; 3—热水流向; 4—大地热流; 5—第四系上部含碎石粉质黏土盖层; 6—第四系下部松散沉积物热储; 7—始~渐新世岩浆岩; 8—断裂破碎带(地热上涌通道及热储); 9—实测/推断断裂

5 结论

(1)谢通门县卡嘎温泉具有很好的地热水形成条件,地热供暖潜力较大。SN 向控盆断层与 NE、NW

向正断层叠加,是较好的导水通道和热储空间;浅部第四系为地热水的有利盖层,始~渐新世岩浆岩衰变放热及深部存在高温岩浆熔融热源向上传导的大地热流,为地热水主要热源。

(2)音频大地电磁典型剖面及土壤氦气测量成果清晰地揭示了区内 NE 向、NW 向与 SN 向断层深部的延展情况与叠加关系;音频大地电磁三维立体图更好地展示了区内低阻异常的空间范围,并说明了地表温泉出露的原因,为井位推荐提供依据。

(3)结合地热水的成因及区内电性特征,初步构建了研究区地热水形成机制的“地球物理-地热地质”模型,为申扎一定结构构造带及邻区深部地热资源勘查提供借鉴和指导。

(4)本区异常 S1、S2 范围较大且深部与 SN 向断裂构造呈连通状态,深部水循环更广,具有很好的地热应用前景。但需注意的是,两异常区在浅部呈连通状态,地表温泉点正好位于其连通通道上方,而当地村民经营的许多温泉酒店正是依赖此地热水,故在附近钻探取水时需评估对此出露温泉点水量的影响,避免影响村民温泉酒店的经营。

参考文献 (References):

- [1] 佟伟,童铭陶,章知非,等.西藏地热[M].北京:科学出版社,1981. [TONG Wei, TONG Mingtao, ZHANG Zhifei, et al. Tibet geothermal[M]. Beijing: Science Press, 1981. (in Chinese)]
- [2] 胡先才,索加,多吉.西藏高温地热资源特征及开发远景分析[J].西藏地质,2002(2): 80-85. [HU Xiancai, SUO Gia, DUO Ji. Analysis of characteristics and development prospects of high temperature geothermal resources in Tibet[J]. Geology of Tibet, 2002(2): 80-85. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 蔺文静,刘志明,王婉丽,等.中国地热资源及其潜力评估[J].中国地质,2013,40(1): 312-321. [LIN Wenjing, LIU Zhiming, WANG Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 312-321. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 多吉.典型高温地热系统:羊八井热田基本特征[J].中国工程科学,2003,5(1): 42-47. [DUO Ji. The basic characteristics of the Yangbajing geothermal field: Typical high temperature geothermal system[J]. Engineering Science, 2003, 5(1): 42-47. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 龙登红,周小龙,杨坤光,等.青藏高原东北缘深部地质构造与地热资源分布关系研究[J].中国地质,2021,48(3): 721-731. [LONG Denghong, ZHOU Xiaolong, YANG Kunguang, et al. Research on relationship between the deep structure and geothermal resource distribution in the Northeastern Tibetan Plateau[J]. Geology in China, 2021, 48(3): 721-731. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 吴中海,赵希涛,吴珍汉,等.西藏当雄—羊八井盆地的第四纪地质与断裂活动研究[J].地质力学学报,2006,12(3): 305-316. [WU Zhonghai, ZHAO Xitao, WU Zhenhan, et al. Quaternary geology and faulting in the Damxung—Yangbajain Basin, Southern Tibet[J]. Journal of Geomechanics, 2006, 12(3): 305-316. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 黄力军.可控源音频大地电磁测深在西藏朗久地热田上的应用效果[J].工程地球物理学报,2020,17(4): 457-461. [HUANG Lijun. Application effect of controlled source audio-frequency magnetotelluric sounding in geothermal field of Langjiu in Tibet[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(4): 457-461. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 马冰,贾凌霄,于洋,等.世界地热能开发利用现状与展望[J].中国地质,2021,48(6): 1734-1747. [MA Bing, JIA Lingxiao, YU Yang, et al. The development and utilization of geothermal energy in the world[J]. Geology in China, 2021, 48(6): 1734-1747. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王晓翠,孙海龙,袁星芳.胶东典型花岗岩热储地下水水化学特征及热储研究[J].水文地质工程地质,2022,49(5): 186-194. [WANG Xiaocui, SUN Hailong, YUAN Xingfang. A study of the hydrochemical characteristics and geothermal water of typical granite geothermal reservoir in the Jiaodong area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 186-194. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 安百州,曾昭发,闫照涛,等.鄂尔多斯盆地西缘热储构造模式及地热资源分布特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(4): 1286-1301. [AN Baizhou, ZENG Zhaofa, YAN Zhaotao, et al. Thermal reservoir construction mode and distribution characteristics of geothermal resources in western margin of Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(4): 1286-1301. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 邢一飞,王慧群,李捷,等.雄安新区地热水的化学场

- 特征及影响因素分析[J]. 中国地质, 2022, 49(6): 1711 – 1722. [XING Yifei, WANG Huiqun, LI Jie, et al. Chemical field of geothermal water in Xiongan New Area and analysis of influencing factors[J]. *Geology in China*, 2022, 49(6): 1711 – 1722. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李小林, 吴国禄, 雷玉德, 等. 青海省贵德扎仓寺地热成因机理及开发利用建议[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 220 – 229. [LI Xiaolin, WU Guolu, LEI Yude, et al. Suggestions for geothermal genetic mechanism and exploitation of Zhacang Temple geothermal energy in Guide County, Qinghai Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(1): 220 – 229. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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)]
- [14] 李朝林, 裴忠, 金秀芹, 等. 大地电磁测深应用于地热勘探[J]. *中国煤炭地质*, 2008, 20(9): 68 – 71. [LI Chaolin, PEI Zhong, JIN Xiuqin, et al. Magnetotelluric sounding used in geothermal exploration[J]. *Coal Geology of China*, 2008, 20(9): 68 – 71. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 雷晓东, 杨全合, 李晨, 等. 北京凤河营地热田东北部综合地球物理勘探[J]. 物探与化探, 2017, 41(2): 249 – 255. [LEI Xiaodong, YANG Quanhe, LI Chen, et al. Integrated geophysical exploration in northeast Fengheying geothermal field, Beijing[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(2): 249 – 255. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 孙海川, 刘永亮, 邵程龙. 综合物探在海石湾地区地热勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2019, 43(2): 290 – 297. [SUN Haichuan, LIU Yongliang, SHAO Chenglong. The application of integrated geophysical exploration to geothermal exploration in Haishiwan area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(2): 290 – 297. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 张炯, 黄少鹏, 傅饶, 等. 大地电磁测深在火山区地热研究中的应用[J]. 岩石学报, 2017, 33(1): 279 – 290. [ZHANG Jiong, HUANG Shaopeng, FU Rao, et al. Application of magnetotellurics in geothermal exploration and research in volcano areas[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(1): 279 – 290. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 裴发根, 张小博, 王绪本, 等. 综合地球物理勘探在齐齐哈尔地区低温地热系统调查中的应用: 以HLD1井为例[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(4): 1432 – 1442. [PEI Fagen, ZHANG Xiaobo, WANG Xuben, et al. Application in geothermal survey of low temperature system by integrated geophysical exploration in the Qiqihar area: Take the well HLD1 as an example[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(4): 1432 – 1442. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 国家地震局地质研究所. 西藏中部活动断层[M]. 北京: 地震出版社, 1992. [Institute of Geology, China Earthquake Administration. Active faults in the central Tibet[M]. Beijing: Seismological Press, 1992. (in Chinese)]
- [20] 干成. 中国西藏的活动断层和构造[J]. 地质地球化学, 1980, 8(3): 46 – 52. [GAN Cheng. Active faults and structures in Tibet, China[J]. *Geology-Geochemistry*, 1980, 8(3): 46 – 52. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王鹏, 陈晓宏, 沈立成, 等. 西藏地热异常区热储温度及其地质环境效应[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1429 – 1438. [WANG Peng, CHEN Xiaohong, SHEN Licheng, et al. Reservoir temperature of geothermal anomaly area and its environmental effect in Tibet[J]. *Geology in China*, 2016, 43(4): 1429 – 1438. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 李振清. 青藏高原碰撞造山过程中的现代热水活动[D]. 北京: 中国地质科学院, 2002. [LI Zhenqing. Present hydrothermal activities during collisional orogenics of the Tibetan Plateau[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2002. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 朱菲菲. 雅鲁藏布江中游谢通门南北向活动断裂带特征及工程效应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008. [ZHU Feifei. The research of the north-south active fault belt in Xiatongmoin in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River and effection engineering[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 徐心悦. 藏南申扎—定结断裂系卡达正断裂晚第四纪活动性及其环境效应[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2019. [XU Xinyue. Late quaternary activity and its environmental effects of the N-S trend kharta fault in Xainza—Dinggye rift, Southern Tibet[D]. Beijing:

- Institute of geology, China Seismological Bureau, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 李才, 翟庆国, 徐锋, 等. 西藏查藏错-申扎南北向活动构造带运动学特点[J]. 地质论评, 2005, 51(4): 353 – 359. [LI Cai, ZHAI Qingguo, XU Feng, et al. Kinematics of the active north-south-trending Chazangco—Xainza tectonic belt, Xizang (Tibet)[J]. Geological Review, 2005, 51(4): 353 – 359. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 李应栩, 谢玉玲, 李光明, 等. 西藏申扎一定结南北向构造中段斑岩锆石U-Pb年代学研究[J]. 河北地质大学学报, 2018, 41(6): 25 – 32. [LI Yingxu, XIE Yuling, LI Guangming, et al. U-Pb geochronology study of zircon from porphyry in middle section of Xainza—Dinggye north-south trending structure[J]. Journal of Hebei GEO University, 2018, 41(6): 25 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 张进江, 郭磊, 丁林. 申扎-定结正断层体系中、南段构造特征及其与藏南拆离系的关系[J]. 科学通报, 2002, 47(10): 738 – 743. [ZHANG Jinjiang, GUO Lei, DING Lin. Structural characteristics of the middle and south section of Xainza—Dinggye normal fault system and its relationship with the detachment system in Southern Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(10): 738 – 743. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 杨照应. 西藏谢通门县查布地热田地热流体地球化学特征[D]. 拉萨: 西藏大学, 2022. [YANG Zhaoying. Geochemical characteristics of geothermal fluids in Chabu geothermal field, Xietongmen County, Tibet[D]. Lasa: Tibet University, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 张萌, 蔺文静, 刘昭, 等. 西藏谷露高温地热系统水文地球化学特征及成因模式[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(3): 382 – 392. [ZHANG Meng, LIN Wenjing, LIU Zhao, et al. Hydrogeochemical characteristics and genetic model of Gulu high-temperature geothermal system in Tibet, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(3): 382 – 392. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 刘昭, 蔺文静, 张萌, 等. 西藏尼木—那曲地热流体成因及幔源流体贡献[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 356 – 371. [LIU Zhao, LIN Wenjing, ZHANG Meng, et al. Geothermal fluid genesis and mantle fluids contributions in Nimu—Naqu, Tibet[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(6): 356 – 371. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 章旭, 郝红兵, 刘康林, 等. 西藏沃卡地堑地下热水水文地球化学特征及其形成机制[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1702 – 1714. [ZHANG Xu, HAO Hongbing, LIU Kanglin, et al. Hydrogeochemical characteristics and genetic model of Oiga Graben geothermal waters system in Tibet[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1702 – 1714. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 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 Guiling, LIN Wenjing. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1923 – 1937. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 余传涛, 刘鸿福, 张新军. 测氡法用于隐伏断层探测的实验研究[J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(5): 332 – 335. [YU Chuantao, LIU Hongfu, ZHANG Xinjun. Experimental study of buried fault detection by radon measurements[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2010, 33(5): 332 – 335. (in Chinese with English abstract)]
- [34] SHENG Yue, JIN Sheng, COMEAU M J, et al. Lithospheric structure near the Northern Xainza—Dinggye Rift, Tibetan Plateau—Implications for rheology and tectonic dynamics[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, 126(8): e2020JB0214 42.
- [35] 张云辉, 李晓, 徐正宣, 等. 川藏铁路康定隧址区地热成因及其工程影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 46 – 53. [ZHANG Yunhui, LI Xiao, XU Zhengxuan, et al. An analysis of the genesis and engineering influence of geothermal water in the Kangding tunnel site of the Sichuan—Tibet Railway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 46 – 53. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华
刘真真