

doi: 10.12029/gc20180601

张森琦, 严维德, 黎敦朋, 贾小丰, 张盛生, 李胜涛, 付雷, 吴海东, 曾昭发, 李志伟, 穆建强, 程正璞, 胡丽莎. 2018. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. 中国地质, 45(6): 1087-1102.

Zhang Senqi, Yan Weide, Li Dunpeng, Jia Xiaofeng, Zhang Shengsheng, Li Shengtao, Fu Lei, Wu Haidong, Zeng Zhaofa, Li Zhiwei, Mu Jianqiang, Cheng Zhengpu, Hu Lisha. 2018. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. Geology in China, 45(6): 1087-1102(in Chinese with English abstract).

青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征

张森琦¹ 严维德² 黎敦朋³ 贾小丰¹ 张盛生⁴ 李胜涛¹ 付雷¹ 吴海东¹ 曾昭发⁵
李志伟⁶ 穆建强⁷ 程正璞¹ 胡丽莎¹

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 2. 青海省国土资源厅, 青海 西宁 810001; 3. 福州大学紫金矿业学院, 福建 福州 350116; 4. 青海省水文地质工程地质环境地质调查院, 青海 西宁 810008; 5. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026; 6. 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室, 湖北 武汉 430077; 7. 中国冶金地质总局地球物理勘查院, 河北 保定 071051)

摘要: 基于地热地质、综合地球物理勘查成果等布孔依据, 实施的 GR1 干热岩勘探孔位于共和县恰卜恰干热岩体中南部, 是迄今我国钻遇地层温度最高的干热岩勘探孔, 为我国首个 EGS 示范工程与科研试验平台建设奠定了基础。GR1 孔测温结果表明, 2500 m 深处温度为 150 °C, 进入干热岩段; 终孔深度 3705 m 处的井底温度为 236 °C。2500~3705 m 井段平均地温梯度为 71.4 °C/km, 高于另 3 眼干热岩勘探孔; 2800~3705 m 井段地温梯度大于 80 °C/km, 属中等品质以上干热岩。综合地球物理勘查与 4 眼干热岩勘探孔钻探结果表明, 该干热岩体埋深 2104.31~2500 m, 面积 246.90 km²; 干热岩资源评价结果表明, 3~5 km 深度范围, 100 年内的潜在发电装机容量为 3805.74 MW, 以 2% 的采收率计, 装机容量为 76.11 MW; 3~6 km 潜在装机容量为 7788.26 MW, 以 2% 的采收率计, 装机容量为 155.77 MW; 3~7 km 潜在装机容量为 13639.25 MW, 以 2% 的采收率计, 装机容量为 272.79 MW。

关键词: 共和盆地; 干热岩; 地温梯度; 地热地质

中图分类号: P314.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)06-1087-16

Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province

ZHANG Senqi¹, YAN Weide², LI Dunpeng³, JIA Xiaofeng¹, ZHANG Shengsheng⁴, LI Shengtao¹, FU Lei¹, WU Haidong¹, ZENG Zhaofa⁵, LI Zhiwei⁶, MU Jianqiang⁷, CHENG Zhengpu¹, HU Lisha¹

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei, China; 2. Department of Land and Resources of Qinghai, Xining 810002, Qinghai, China; 3. School of Zijin Mine, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian, China; 4. Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Environmental Geology Survey of Qinghai, Xining 810008, Qinghai, China; 5. School of Resources and Environment, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China; 6. State

收稿日期: 2018-03-28; 改回日期: 2018-06-10

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160192, DD20179033, DD20179621) 资助。

作者简介: 张森琦, 男, 1962 年生, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事地热地质与水文地质调查研究工作; E-mail: senqizhang@126.com。

通讯作者: 付雷, 男, 1986 年生, 硕士, 工程师, 主要从事地热地质与水文地质调查研究工作; E-mail: pengyou0808@163.com。

Key Lab of Geodesy and Geodynamics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 350116, Hubei, China; 7. Geophysical Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract: Based on regional geology, geothermal geology and integrated geophysical exploration results, the GR1 hot dry rock exploration well was completed in the central part of Qiabuqia Town in the Gonghe basin. The GR1 well is the highest temperature hot-dry rock exploration well in China, which has laid an important foundation for China's first EGS demonstration project. The temperature measurement results show that the temperature at the depth of 2500 m is 150°C, entering into the hot dry rock section. The temperature of the bottom hole at the depth of 3705 m is 236°C. The average geothermal gradient of 2500–3705 m is 71.4°C/km, which is higher than that of the other 3 hot dry rock exploration wells. At 2800–3705 m of GR1 well the geothermal gradient is higher than 80°C/km. The exploration results show that the depth of the hot dry rock is 2104.31–2500 m, which is oval-shaped in the east–west direction, with an area of 246.90 km². The evaluation results show that the total theoretical resources of the Qiabuqia hot dry rock is 1638.16EJ in the depth of 3–5 km, equivalent to 55.909 billion tons of standard coal.

Key words: Gonghe Basin; hot dry rock; geothermal gradient; geothermal; geology

About the first author: ZHANG Senqi, male, born in 1962, master, professor, mainly engages in the study of geothermal geology, hydrogeology, and environmental geology survey and research; E-mail: senqizhang@126.com.

About the corresponding author: FU Lei, male, born in 1986, master, engineer, majors in the study of geothermal geology, hydrogeology, and environmental geology survey and research; E-mail: pengyou0808@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. DD20160192, DD20179033, DD20179621).

1 引 言

干热岩(Hot Dry Rock, HDR)是指埋藏于地下3~10 km、温度150~650°C,不含或微含不流动流体的高温岩体(Brown et al., 1995)。据此,本文暂将150°C作为干热岩的温度下限。保守地估计,地壳中3~10 km深处干热岩所蕴含的能量相当于全球所有石油、天然气和煤炭所蕴藏能量的30倍(Brown et al., 1995; 许天福等, 2016)。

在干热岩概念基础上发展而来的增强型地热系统(Enhanced Geothermal Systems, EGS),是指通过水力压裂等工程手段,在地下深部低渗透性干热岩体中形成人工热储,进而长期、经济地采出相当数量热能的人造水热系统(Panel DOE, 2006)。

近年来,随着增强型地热系统工程与技术方法的发展,一方面强调其开发利用工程技术属性;另一方面表现出从局部高温岩体热储圈定,向普遍的干热岩地热资源调查评价与勘探思路转变(蒋林等, 2013)。

尽管理论上干热岩“无处不在,资源量巨大”,但因中国干热岩基础地质研究程度低,适宜板内构造环境的中国干热岩理论、勘查与工程化关键技术研究相对薄弱。特别是受钻探技术和经济成本等

因素制约,目前亟需寻找出埋藏适中、温度高、有潜在经济价值的高温干热岩体,进而推进干热岩地热发电(汪集旻等, 2012)。

干热岩体具有的高温、高硬度、高研磨性、高地应力等特点,导致干热岩钻探成本可能高达EGS工程总投资的50%~60%以上(Polsky et al., 2008; Barbier, 2002)。因此,钻探成果不仅决定着干热岩勘查开发目标靶区的比选(张森琦等, 2017),还影响着后继EGS工程建设,具有重要的地热地质意义。

青海共和盆地GR1干热岩勘探孔(以下简称“GR1孔”)终孔深度3705 m,孔底温度236°C,是中国目前钻获温度最高的干热岩,实现了我国干热岩勘查重大突破。本文重点以GR1孔干热岩勘探孔地质及地热地质资料分析为主线,揭示青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征,以期为我国寻找相似类型的干热岩资源提供参考。

2 区域地质概况

2.1 大地构造位置

在大地构造位置上,GR1孔所在的共和盆地,位于西秦岭造山带西端(图1)。研究区内西秦岭造山带北为青海湖南缘—宝鸡断裂,北侧与祁连造山带相邻;南为玛沁—略阳断裂,南缘以阿尼玛卿

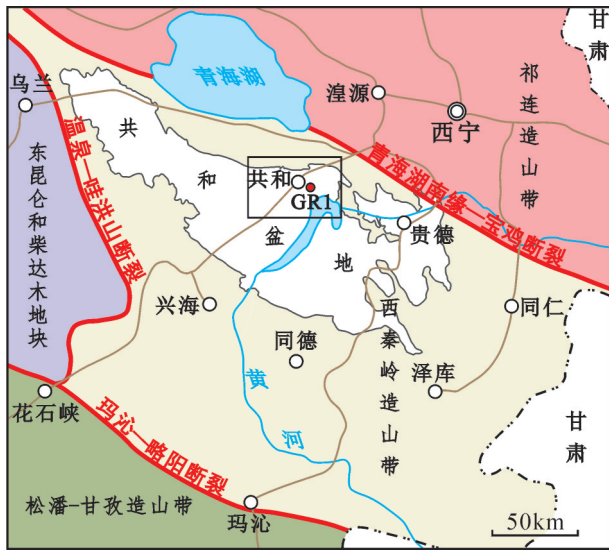


图1 研究区大地构造位置图(张雪亭等,2007)

Fig.1 Geotectonic location map of the study area (after Zhang et al., 2007)

—勉略缝合带为界与松潘—甘孜造山带相接;西为温泉—哇洪山断裂,西缘与东昆仑和柴达木板块毗邻(冯益民等,2003;骆必继,2012)。西秦岭造山带与松潘—甘孜地区一起构成了中国大陆最大的构造结(张国伟等,2004),地质构造十分复杂。其中,阿尼玛卿—勉略缝合带标志着古特提斯洋向北的俯冲作用(李曙光等,1996;Xu et al., 2002; Yang et al., 2009)。区域上,西秦岭造山带无前寒武纪基底地层出露,主要出露奥陶纪—新生代沉积地层,尤以泥盆纪、石炭纪、二叠纪和三叠纪地层为主(冯益民等,2003)。

2.2 共和盆地地质概况

共和盆地西小东大,总面积15184 km²,为青海省第三大盆地,黄河沿其短轴方向横切而过。因其处于多个造山带(西秦岭、东昆仑、祁连)和块体(柴达木和欧龙布鲁克)交接转换的重要结点地区(张国伟等,2004),大地构造位置与构造意义十分重要,是一个值得研究的盆地(王昌桂等,2004)。该盆地成因、深部地质结构、隐伏中酸性侵入体分布规律、中生代地质构造演化与热源机制是干热岩形成与空间分布的关键基础性地质问题。对其成因类型的认识历来也争议颇大,主要观点有:中生代断陷盆地(徐叔鹰等,1984;袁道阳等,2004),新生代拗陷型盆地(王昌桂等,2004;宋博文

等,2014),以及共和后造山磨拉石前陆盆地(张雪亭等,2007)等。

GR1孔位于共和县县府所在地恰卜恰镇南东5 km处的早中更新世湖积台地上,地处共和盆地二级构造单元切吉凹陷的东缘。切吉凹陷北以青海南山南缘断裂、南西以哇玉香卡—拉干隐伏断裂为界,北侧青海南山与南西侧鄂拉山—河卡山走滑逆冲其上,南邻贡玛凸起,东缘新生界不整合于黄河隆起或中晚三叠世党家寺岩体之上。

切吉凹陷基底以三叠纪地层和印支期花岗岩为主。东侧龙羊峡地区早中三叠世地层与中晚三叠世当家寺花岗闪长岩体直接出露于地表;南侧阿乙亥南东油1并于627.29 m钻遇印支期花岗岩;西部最深处的共参1井终孔于5026.6 m尚未凿穿古近—新近系。据此推测GR1孔控制的恰卜恰地区,在三级构造单元上,基底具东浅西深的斜坡带性质。

2.3 地层系统

区域上,共和盆地沉积盖层主要由古近—新近纪西宁组(EN_{1x})、中新世咸水河组(N_{1x})、上新世临夏组(N_{2l})和早中更新世共和组(Q_{1-2g})组成,盆地西南缘造山带局部出露早中侏罗世羊曲组(J_{1-2yq})。共和盆地基底上部主要为早中三叠世隆务河组、中三叠世古浪堤组和中晚三叠世花岗岩(图2a),推测基底中下部为古生界—元古界变质岩系(冯益民等,2003)。

共和盆地地表均被第四系覆盖,上部以中晚更新世河流相砂砾卵石(Q_{2-3^{al}})为主,下部为早中更新世共和组河湖相沉积。共和组下部由黄褐色或蓝灰或绿色亚黏土和砂、砾组成,构成2个旋回,含哺乳类化石等,厚度19 m,与下伏上新世临夏组呈整合接触;中部由黄绿色或灰色砂、砂砾层组成,构成6个旋回,含介形虫等,厚度127 m;上部由黄灰色粉细砂组成,含丰富的介形虫、哺乳类化石,厚度103 m(Stiegeler et al., 2008)。共和盆地内共和组最大厚度可达600 m左右(杨利荣等,2016)。

2.4 侵入岩

共和盆地地处宗务隆—泽库岩浆岩带的青海湖南山—泽库亚带内(张雪亭等,2007)。该岩浆岩带以发育中晚三叠世俯冲—碰撞—造山后中酸性岩浆岩组合为特征,花岗岩多呈带状或断续的长条状、椭圆状分布,侵位时代主要为中晚三叠世,主要

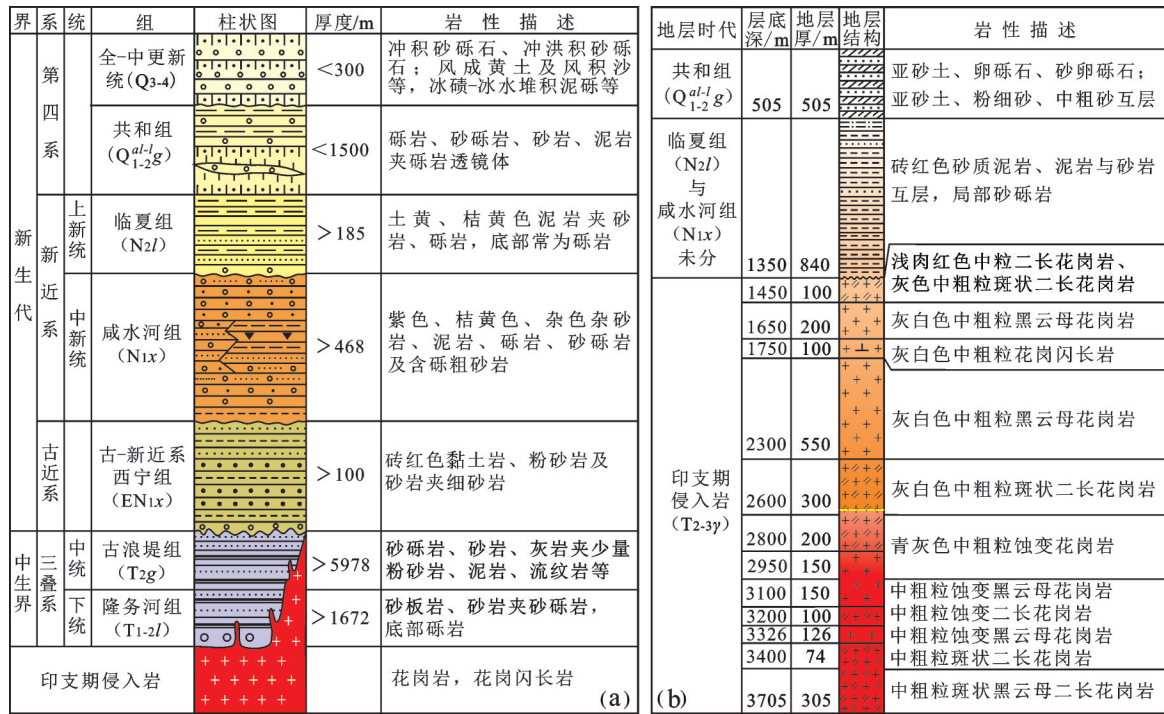


图2 共和地区区域地层 (a) 与GR1孔实钻地层结构图 (b)

Fig.2 (a) Strata in Gonghe area; (b) Strata of GR1

岩性为辉长岩-闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩。GR1孔东部与中晚三叠世当家寺花岗闪长岩、二长花岗岩体毗邻；北部与中晚三叠世江西沟复式花岗岩体、后沟二长花岗岩体相依(表1,图3)。

3 GR1孔布置的地热地质和地球物理依据

实施GR1孔的主要目的是通过钻探,查明4000 m深度范围内干热岩垂向分布、地温梯度与岩性变化,获取干热岩资源评价参数;通过已有钻孔与综合地球物理勘查成果,分析推断干热岩体分布范围,评价干热岩资源。实钻结果表明,GR1孔终孔深度3705 m,井底温度236℃,基本查明了3700 m深度范围内地层结构与干热岩岩性变化、全孔段温

度状况与地温梯度,获得了干热岩资源评价参数。GR1孔不仅是迄今中国钻获温度最高的干热岩勘探孔,而且为中国首个EGS示范工程与科研试验基地建设奠定了重要基础。

3.1 地热地质依据

20世纪60年代发现上塔买村-克才村-东坡村围限的区域发育低温地下热水,热储为早中更新世共和组、上新世临夏组和中中新世咸水河组。而恰卜恰镇南东的上他买-克才一带约25 km²的三角形地带地区,呈北西、北北西向共出露有9处温泉,温度20℃左右,最高32℃(图4)。本区先后施工石油地质、地热地质钻孔9眼(表2),井深628.54~3705 m,总体沿恰卜恰河谷平原区近南北向分布。如何寻找出共和盆地深部温度更高、控制范围更大的干热岩资源,是本次布孔的主要期望。

表1 共和盆地周缘造山带印支期主要岩体统计

Table1 Statistical table of rock masses of orogenic belt surrounding Gonghe Basin in the Indosinian periods

岩体名称	位置	岩浆性质	同位素年龄Ma(文献来源)
中三叠世江西沟花岗岩体	曲什那-江西沟南		240.4~245.4(张永明, 2017)
中三叠世沟后岩浆杂岩体	共和县城北沟后水库一带	中酸性	243~244(张永明, 2017)
中三叠世当家寺花岗岩体	共和盆地北东缘瓦里关山		240~241(张永明, 2017)

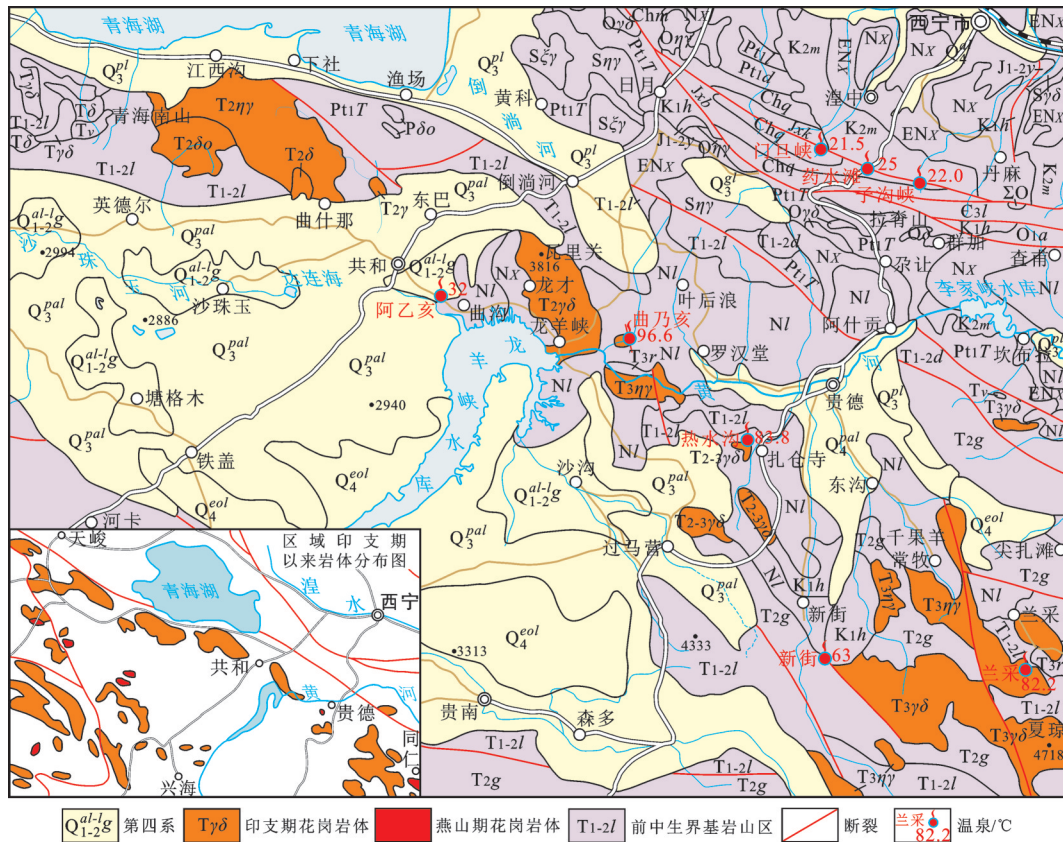


图3 共和盆地周边印支期以来主要花岗岩体分布图
 Fig.3 Distribution of main granite bodies surrounding Gonghe Basin since Indosinian Period

尽管多数孤立的温泉与深部干热岩是否存在联系尚不明晰,但在一个相对较大的范围内出露众多的温泉,形成对流型地下热水时,则一定程度映射出其下部或上游深部可能发育有高温热源,或与深部干热岩构成一定的镜像关系。因此,温泉的群居性与成规模的水热型地热田是寻找干热岩资源的地热地质标志。据此将GR1孔布置于温泉出露区中部上游地区。

3.2 高精度航磁测量提供的依据

依据1:5万高精度航磁测量数据,采用V2D-depth方法(张恒磊等,2012),对隐伏干热岩体进行分析推断。基于二阶导数对磁源边界与顶部埋深进行反演,得出恰卜恰隐伏花岗岩体/干热岩体南部埋深1200~1350 m,相对较浅。据此将GR1孔布置于花岗岩体中部(图5)。

3.3 重磁测量提供的依据

以覆盖共和县恰卜恰—达连海地区800 km²的1:5万重磁测量数据,得出的重磁人机交互反演结

果(图6)表明:重磁计算曲线与实测曲线拟合较好,并反映出三层地质结构,即表层第四纪地层,厚度约600 m;中间古近—新近纪地层,厚度约800 m;下部基底则为花岗岩。因此,重磁测量范围内基底均为隐伏花岗岩体/干热岩体,适宜布置干热岩勘探孔。

3.4 可靠性分析

地震波的P波和S波速度均能够反映地壳内部结构属性的差异。与P波相比,S波对地下岩体的温度、流体等因素更为敏感,能更好地反映地下热结构。流体和部分熔融层/体通常会造S波的低速异常。因此,显著的S波低速异常可能会同时叠加来自温度升高的影响(Mackenzie et al., 2005; Proestley et al., 2006)。如当温度低于固相线时,温度每提高100℃,会造成P波速度降低0.5%~2%,而S波速度则可降低0.7%~4.5%(Goes et al., 2000)。显然,S波速度对较大幅度的温度变化更为敏感。即:在相同岩性条件下,S波速度降幅越大,可能表明所探测的地质体温度越高,更适合岩体温度三维

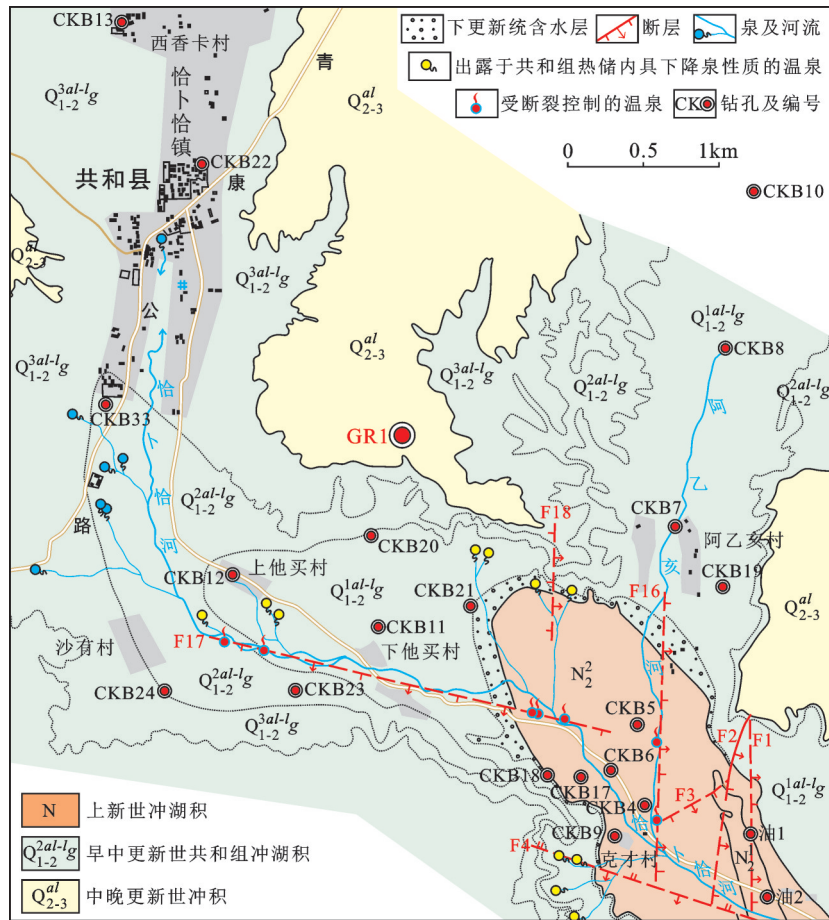


图4 共和县上塔买村—克才村—东坡村温泉分布图

Fig.4 The distribution of hot springs in Shangtamai-Kecai-Dongpo Village of Gonghe

表2 恰卜恰地区地热与干热岩钻孔统计

Table 2 Geothermal and hot dry rock drilling statistics in Qiabuqia area

孔号	位置	经纬度		成井 时间/年	孔深 /m	井口 海拔/m	花岗岩 基底埋深/m	井底温度 /℃
		东经	北纬					
油1井	阿乙亥南东	100°44' 00.00"	36°18' 00.00"	1961	628.54	2690	627.29	
QR1	专科学校西	100°36' 29.06"	36°17' 23.07"	1999	969.00	2786	932.16	70.00
DR1	上塔买北西	100°36' 44.06"	36°14' 31.04"	2011	1453.58	2776	1354.00	87.60
DR2	沙有村北西	100°36' 07.08"	36°14' 08.01"	2012	1852.38	2796	1440.90	98.60
DR3	共和县中医院	100°37' 06.05"	36°15' 47.09"	2014	2927.26	2806	1340.25	181.17
DR4	城北供热中心	100°37' 15.05"	36°18' 01.07"	2015	3102.00	2889	1402.00	182.32
DR5	海南州人民医院	100°36' 34.00"	36°16' 40.05"	2015	1501.60	2860	1490.00	86.70
GR1	上谢尔盖北	100°38' 56.01"	36°15' 08.99"	2017	3705.00	2863.8	1350.00	236.00
GR2	阿乙亥村	100°41' 25.23"	36°14' 03.37"	2017	3003.00	2648.7	940.00	186.00

空间异常特征分析。

基于上述,在共和地区开展了干热岩天然地震背景噪声层析成像勘查。由图7可以看出,恰卜恰干热岩体至10 km深度水平规模最大,之下趋于减少,到21 km深度水平一直处于S波低速区,且圈闭

性良好,说明该干热岩体在垂向上延伸相对稳定,表明上述布孔依据可靠度较高。

在以上GR1孔地热地质和综合地球物理勘查布孔依据的基础上,同时考虑井场周边地形地貌和交通条件等因素,最终将GR1孔布置于共和县府驻

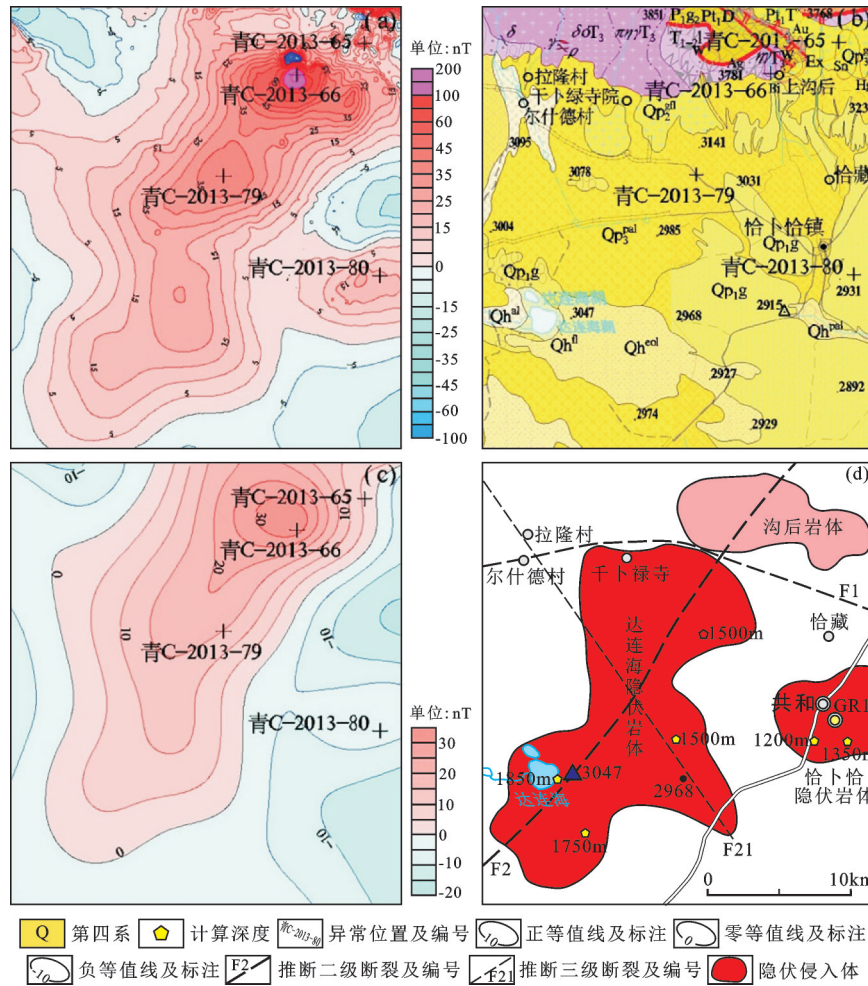


图5 基于高精度航磁数据推断的恰卜恰干热岩体范围图
 a— ΔT 等值线平面图;b—地质矿产图;c—上延1700m等值线平面图;d—岩性、构造推断及顶埋深图
 Fig.5 Inferred range maps of hot dry rock bodies based on high-precision aeromagnetic data in Qiabuqia area
 a— ΔT contour map;b—Geological and mineral resources map;c—Extending upward 1700m contour map;
 d—Lithologic structure inference and top burial depth map

地恰卜恰镇南东5 km处的湖积台地上(图8),钻探目的层为恰卜恰隐伏中晚三叠世高温花岗岩体。

4 GR1孔地热地质特征

4.1 实钻地质结构

GR1孔施工于2015年12月—2017年8月。井口坐标:100°38'55.72"E;36°15'9.02"N;井口海拔2912 m。GR1孔岩心编录表明,0~500 m上部为较薄的中晚更新世河流相砂砾卵石(Q₂₋₃^{al})层,颗粒粗大,向下变细(图2b);中下部主体为早中更新世共和组;500~1350 m为上新世临夏组与中新世咸水河组,岩性为灰黑色、青灰色及青灰色中厚层泥岩夹褐红色薄层泥岩与灰黄色、青灰色及杂色中厚层粉

砂岩。泥岩完整性较好,砂岩颗粒较细。该孔1350 m以浅为新生界沉积盖层,1350~3705 m为中晚三叠世花岗岩,主体岩性为花岗闪长岩、(黑云母)花岗岩、二长花岗岩和斑状(黑云母)二长花岗岩等,组成干热岩型地热资源的热储。

4.2 钻孔测温与地温梯度

GR1孔100 m定深测温采用300°C留点温度计测量。考虑到钻具提升时的振动影响,每次测温放置5~10支温度计,取其均值作为测深处温度(表3)。

在井深-温度曲线图上,2500 m以上呈凸型曲线(图9a)。这种曲线常出现在岩石的导热性随深度增加而增大的陆源区、地下水向上部运移的地区,因岩浆活动、机械变形、变质与放热作用等所引起的放热

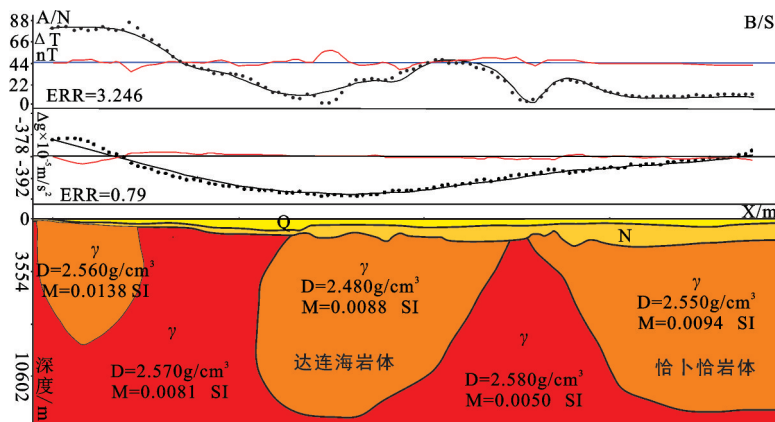


图6 过恰卜恰镇南北向AB剖面重磁人机交互反演结果图

Fig.6 The man – machine interactive inversion results of the north – south AB profile crossing Qiabuqia town

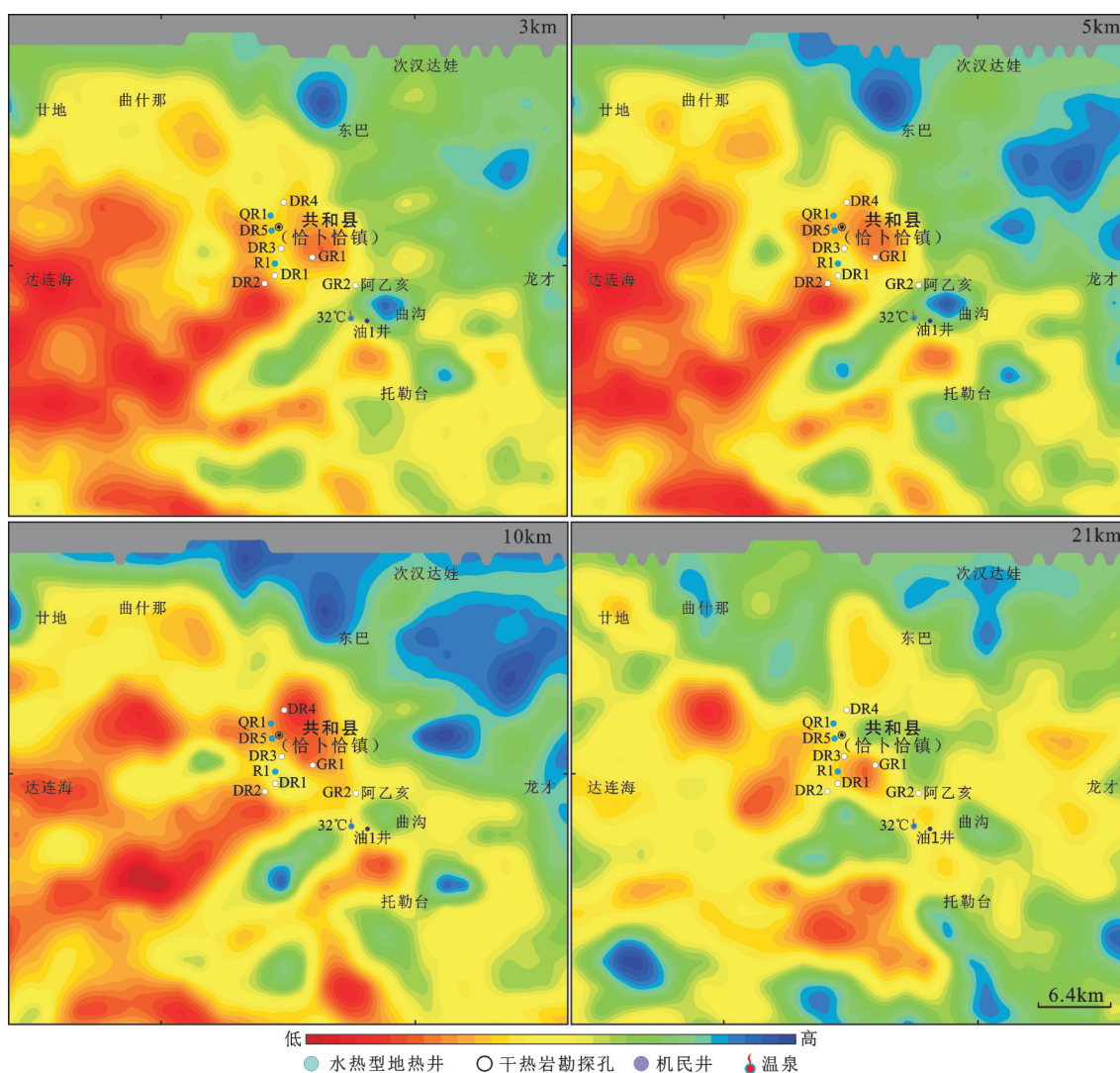


图7 共和地区21 km以上深度水平S波速度结构图

Fig.7 S-wave velocity structures at the depth of 3–21 km in Gonghe

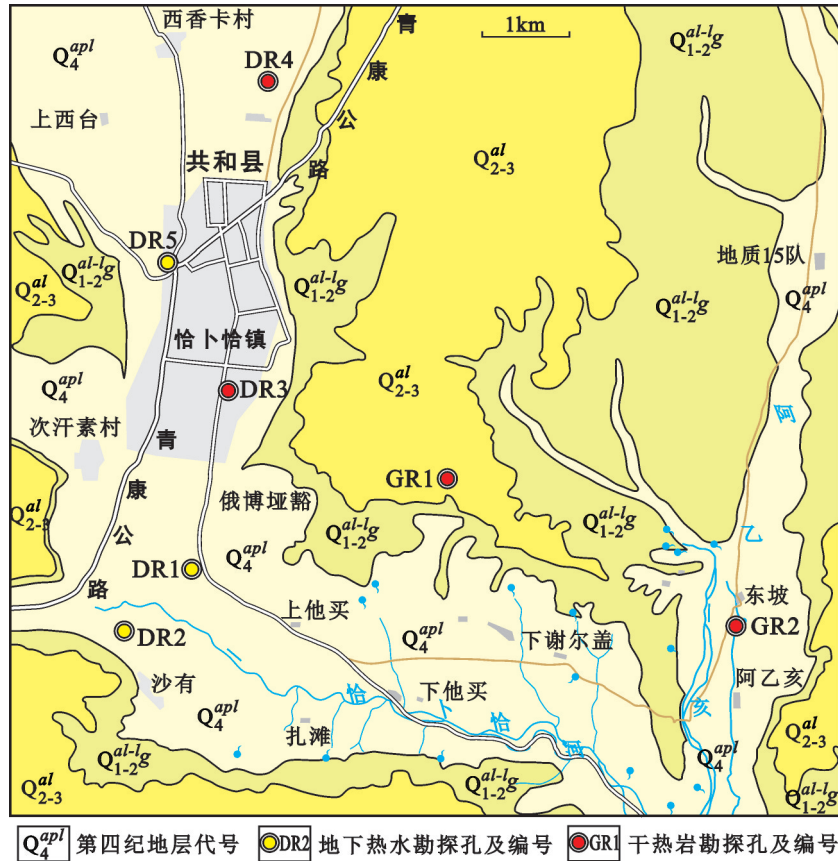


图8 恰卜恰地区干热岩勘探孔分布图
Fig.8 The distribution of hot dry rock wells in Qiabuqia area

表3 GR1孔随钻留点温度计测温结果

Table 3 The temperature measurement results during drilling with thermometer in GR1 well

深度/m	温度/℃	深度/m	温度/℃	深度/m	温度/℃	深度/m	温度/℃
100	28.5	1100	89.0	2100	134.0	3100	174.0
200	31.0	1200	96.0	2200	137.5	3200	179.4
300	38.0	1300	102.5	2300	142.0	3300	183.0
400	45.0	1400	106.5	2400	145.5	3400	192.0
500	52.0	1500	111.0	2500	150.0	3500	198.0
600	59.0	1600	115.0	2600	153.0	3600	203.0
700	65.0	1700	119.0	2700	157.0	3705	236.0
800	72.0	1800	122.0	2800	161.0		
900	78.0	1900	126.0	2900	163.0		
1000	84.0	2000	131.0	3000	169.0		

岩层,以及岩丘和其他构造层以上的地段(切列缅斯基等,1982)。2500 m以下井段井深-温度曲线呈直线型(图9b),表明本井深部无地下水运动(张发旺等,2000),亦无区域性流体扰动,属干热岩无疑。

GR1孔2500~3705 m井段平均地温梯度为71.4 °C/km,高于另3眼干热岩勘探孔;2800~3705 m井段地温梯度大于80 °C/km。依据地温梯度值,即

高级大于80 °C/km,中级40~80 °C/km,低级30~40 °C/km的干热岩资源品级衡量,GR1孔控制的干热岩体属中等品质以上干热岩。

4.3 干热岩体岩石学特征

GR1孔1350 m以下井段全为花岗岩,岩性为花岗闪长岩、(黑云母)花岗岩、二长花岗岩和斑状(黑云母)二长花岗岩(图10),为一复式岩体,并可划

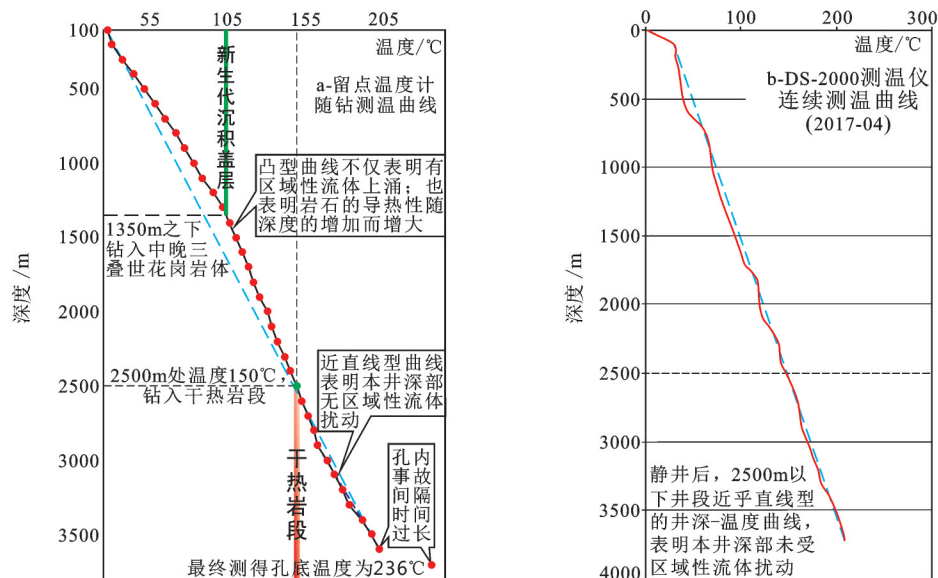


图9 GR1干热岩勘探孔井深-温度曲线图

Fig.9 Well depth-temperature curve of GR1

深度区间/m	岩心实景	岩性描述
2600~2651		灰白色中粗粒黑云母花岗岩, 花岗结构, 块状构造。主要矿物成分斜长石40%~45%, 石英20%~25%, 黑云母10%~15%。可见30 cm宽的细粒二长花岗岩脉
2651~2800		灰白色中粗粒斑状二长花岗岩, 花岗结构, 块状构造。斑晶为钾长石, 含量10%~15%, 粒径12~20 mm。基质主要成分为钾长石25%~35%, 斜长石20%~35%, 石英20%~25%, 黑云母5%~10%
2800~2950		青灰色中粗粒蚀变花岗岩, 中粗粒结构, 块状构造。主要矿物成分斜长石35%~45%, 石英25%~30%, 黑云母10%~15%, 绿帘石10%~15%。中部夹30~40 cm的细粒二长花岗岩脉。沿解理面见3~5 mm宽的沸石粉末
2950~3100		青灰色中粗粒蚀变黑云母花岗岩, 花岗结构, 块状构造。主要矿物成分斜长石35%~40%, 石英25%~30%, 黑云母5%, 绿帘石10%~15%。沿解理面充填3~5 mm宽的钾长石细脉
3100~3200		青灰色中粗粒蚀变二长花岗岩, 中粗粒花岗结构, 块状构造。主要矿物成分斜长石30%~35%, 钾长石25%~30%, 石英20%~25%, 绿帘石10%~15%, 粒径3~8 mm, 偶见钾长石碎块, 沿裂隙面见2~3 mm宽的钙华和沸石薄膜
3200~3300		青灰色中粗粒蚀变黑云母花岗岩, 中粗粒结构, 块状构造。主要矿物成分斜长石30%~40%, 石英25%~30%, 黑云母10%~15%, 钾长石5%~10%。黑云母均已蚀变绿帘石化, 长石蚀变为高岭土。沿节理面充填2~3 mm宽的钙华和沸石细脉
3300~3326		青灰色蚀变花岗岩, 粒状花岗结构, 块状构造。主要成分为斜长石、石英, 偶见少量8~10 mm的钾长石斑晶。可见绿泥石化和绿帘石化蚀变
3226~3380		灰白色中粗粒斑状二长花岗岩, 中粗粒花岗结构, 块状构造, 似斑状结构, 斑晶为钾长石, 含量10%~15%, 粒度8~20 mm, 基质为黑云母5%~8%, 钾长石40%~50%, 斜长石10%~15%, 石英20%~25%, 粒径2~6 mm。沿裂隙可见钾长石粉末
3380~3400		青灰色中粗粒斑状二长花岗岩, 含灰色细粒花岗岩包体, 沿裂隙可见肉红色钾长石化及团块状黑色硬锰矿
3400~3500		浅肉红色中粗粒斑状黑云母二长花岗岩, 含灰色细粒花岗岩包体, 直径5~20 cm, 主要成分黑云母15%, 角闪石5%, 斜长石40%~55%, 钾长石5%, 石英20%~25%, 粒径1~2 mm。发育岩饼状构造, 岩饼厚度1~2 cm。裂隙中充填有高岭石粉末
3500~3600		浅肉红色中粗粒斑状黑云母二长花岗岩, 似斑状构造, 斑晶为钾长石, 肉红色, 含量5%~10%, 粒度6~12 mm。基质以2~6 mm为主, 主要成分黑云母5%~8%, 钾长石30%~45%, 斜长石10%~15%, 石英20%~25%。岩心较破碎, 呈岩饼状, 厚度1~3 cm, 少量5 cm。沿裂隙局部见钾化现象

图10 GR1孔干热岩段岩心柱状图

Fig.10 The core histogram of HDR in GR1

分为2个岩浆序列。第一个岩浆序列分布于孔深1650~1750 m井段,岩性为灰白色中粗粒花岗闪长岩,时代对比为中三叠世;第二个岩浆序列在GR1孔中占绝对优势,由早到晚包括灰白色中粒(黑云母)花岗岩、浅肉红色中粒二长花岗岩、浅肉红色—灰白色中粗粒斑状(黑云母)二长花岗岩,岩浆由早到晚由酸性向碱性演化,时代对比为中晚三叠世。

GR1孔1900~2350 m井段岩心沿节理面充填有肉红色、粉红色浊沸石,局部肉红色钾长石化,推测该井段发育低温蚀变现象。2500~3000 m井段裂隙发育水热蚀变现象,多处见浊沸石细脉及薄膜。3000 m以下井段可见青灰色蚀变花岗岩,蚀变矿物主要为绿泥石化和绿帘石化,黑云母均已绿帘石化,长石具高岭土化。深部可见硅华、钙华、浊沸石等热水沉积矿物。

据钻探编录资料,恰卜恰花岗岩体上部300 m井段岩体较为破碎,呈碎裂状,顶部发育8 m厚的强风化层,300 m以下总体相对完整。受构造变形影响,部分井段岩心裂隙发育,出现完整岩体与裂隙岩体“互层”产出。其中,完整井段岩体厚度44.0~94.8 m,最小厚度17.2 m,岩心呈长柱状,隔水隔汽。裂隙发育井段岩体厚度29.0~94.3 m,最大厚度134.5 m,岩心长度3~13 cm,呈短柱状或块状,线裂隙率0.1%~0.3%。部分井段还有断层发育迹象,如井深2250 m处,岩心呈角砾状,无充填物,厚度34.1 m,推测有一断层穿过。

GR1孔3000 m以下,高地应力井段岩心饼裂现象发育,岩饼一般成组出现,表明饼状岩心发育井段最小主应力方向与岩心轴线方向一致,可能是钻孔取心过程中产生的张应力造成的岩心饼化现象(Haimson et al., 1997; Li et al., 1998; Matsuki et al., 2004; 王成虎, 2014)。

4.4 岩心热物性特征

恰卜恰干热岩体23件岩心热物性样品测试结果表明,该干热岩体比热0.651~1.71 kJ/(kg·K),平均1.08 kJ/(kg·K);热导率0.34~3.16 W/(m·K),平均1.86 W/(m·K);密度1.66~2.71 g/cm³,平均2.64 g/cm³。

4.5 岩心放射性特征

恰卜恰干热岩体6件花岗岩岩心样品的放射性测试结果表明,U含量3.18~12.25 μg/g,平均6.09

μg/g;Th含量17.55~31.60 μg/g,平均24.19 μg/g;K含量3.14%~3.19%,平均3.49%。岩石放射性生热率采用Rybach(1988)提出的计算方法进行计算,得出岩石放射性生热率为2.41~5.73 μW/m³,平均为3.63 μW/m³,高于中国东南地区花岗岩的平均放射性生热率2.1~2.8 μW/m³(赵平等,1995),但低于福建漳州花岗岩放射性生热率平均值的4.22 μW/m³(杨立中等,2016)。

5 恰卜恰干热岩体地热地质特征

5.1 地热地质结构

截至2017年,恰卜恰地区钻遇干热岩体的勘探孔有4眼。其中,共和县中医院DR3孔深2927.2 m,于2104.31 m处钻获干热岩,2927 m处的孔底温度为181.17℃;共和县城北新区供热中心DR4孔深3102 m,于2500 m处钻获干热岩,3080 m处的孔底温度为182.32℃;新近完成的GR1孔深3705 m,于2500 m处钻获干热岩,在干热岩段钻进1105 m,3705 m处的孔底温度为236℃;GR2孔深3003 m,于2300 m处钻获干热岩,3000 m处的孔底温度为186℃(表4)。

共和盆地水热型与干热岩型地热地质钻探揭示出,恰卜恰干热岩体上覆为早中更新世共和组、中新世咸水河组 and 上新世临夏组,厚度932.16~1490.0 m。岩性以泥岩为主夹砂砾岩,呈以段级地层为单位粗细相间的韵律性沉积,构成相应的储盖组合,赋存有水温18~80℃的中低温地下热水。总体而言,恰卜恰干热岩体上部的新生代沉积盖层中,泥岩等细碎岩厚度较大,隔热保温性能良好,为干热岩的二次聚热提供了有利条件。之下为温度低于150℃的隐伏中晚三叠世花岗岩体。2104.31~2500 m温度为150~236℃,进入干热岩段,温度随深度增加而增高。

5.2 空间形态

采用V2D-depth方法,在1:5万高精度航磁测量数据反演计算圈定干热岩体的基础上,依GR2井外推一半的原则,确定出恰卜恰干热岩体分布在共和县恰卜恰镇—上塔迈村一带,平面上呈东西向展布的近椭圆形,东西向长21.2 km,南北向宽14.3 km,面积246.90 km²(图11)。同时得到了恰卜恰—达连海地区1:5万重磁测量成果验证。此外,天然

表4 恰卜恰地区干热岩勘探孔统计

Table 4 The statistical table of HDR exploration wells in Qiabuqia area

孔号	位置	成井时间/年	孔深/m	井口海拔/m	花岗岩基底埋深/m	干热岩温度/℃及埋深/m	井底温度/℃及深度/m	干热岩段平均地温梯度/(℃/km)
DR3	共和县中医院	2014	2927.26	2806	1340.25	150.19/2104.31	181.17/2927	35.1
DR4	城北供热中心	2015	3102.00	2889	1402.00	151.23/2500.00	182.32/3080	53.6
GR1	上谢尔盖北	2017	3705.00	2912	1350.00	150.00/2500.00	236.00/3705	71.4
GR2	阿乙亥村	2017	3003.00	2695	940.00	150.00/2300.00	186.00/3000	51.4

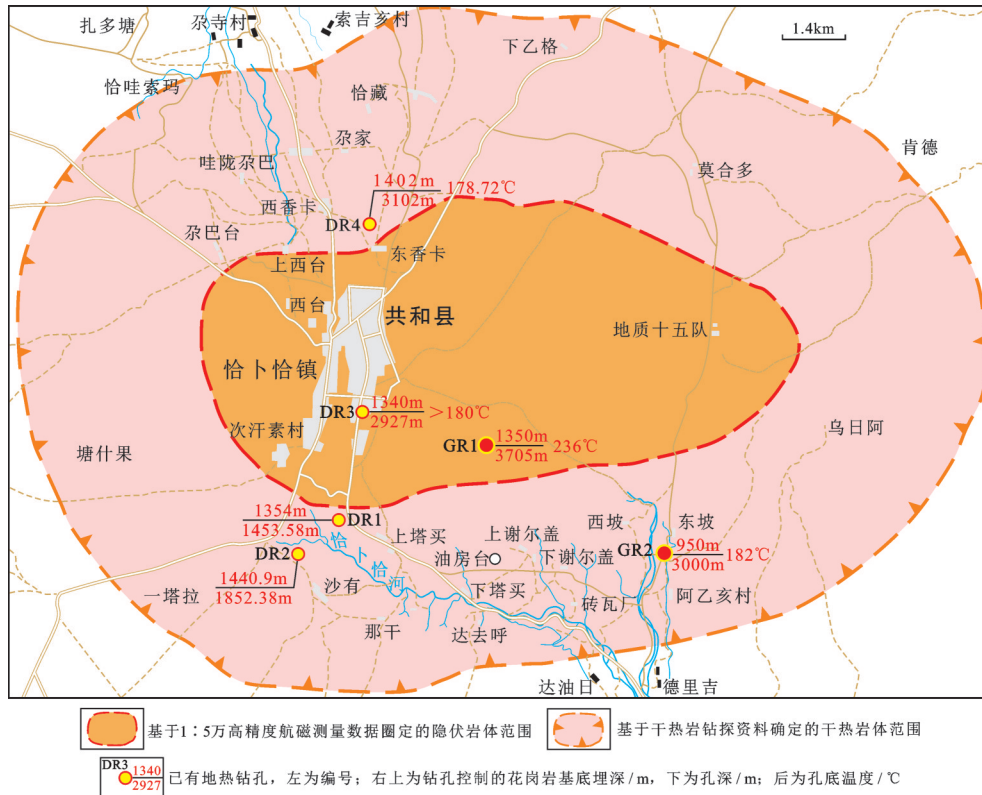


图11 基于钻孔资料推断的恰卜恰干热岩体分布图

Fig.11 The distribution of hot dry rock bodies based on drilling data in Qiabuqia area

地震背景噪声层析成像结果显示,该干热岩体在21 km成像深度范围内发育相对稳定。

5.3 干热岩热能聚集概念模型

热能聚集概念模型重点刻画地热系统的热源、储热岩体、盖层条件及其构造格架等(何治亮等, 2017)。由于共和盆地新生代无岩浆活动,无高温地热显示,仅发育低温温泉和中低温水热型地热田,水热型地热异常区面积约300 km²,可能与青藏高原隆升,地壳压缩增厚,上地壳部分熔融有关(姜鸿才等,1994)。

在前述恰卜恰干热岩体空间分布、盖层条件、地温场特征及其构造位置等的基础上,进一步综合

考虑天然地震背景噪声层析成像和大地电磁测深(MT)勘查结果,本文初步将共和盆地干热岩热能聚集概念模型概括为:埋深于8~32 km、东西向长约50 km的部分熔融层供热(图12),中晚三叠世花岗岩体储热,大厚度新生代泥质岩类沉积盖层二次聚热。目前,这一干热岩热能聚集概念模型的勘探实践与总结上升均十分有限,是否具有“可复制性”,有待未来钻探验证。

5.4 干热岩资源评价

本文基于区域地质、矿产地质、水文地质等地质工作循序渐进的调查勘查理念、地热资源地质勘查规范(GB-T-11615, 2010)等,初步将中国干热

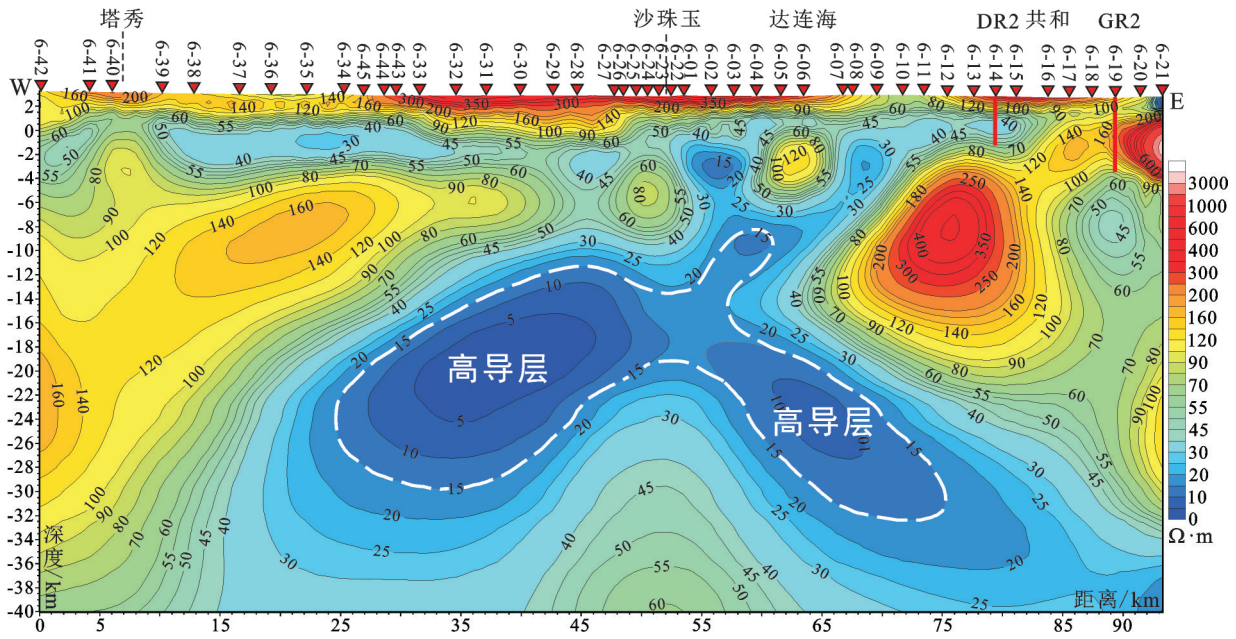


图12 东西向大地电磁测深(MT) 勘查提供的热源信息
Fig.12 The heat source information provided by east-west MT

岩资源调查评价工作阶段划分为全国陆域干热岩资源调查评价、区域级干热岩资源调查评价、地区级干热岩资源调查评价、场地级干热岩资源调查评价和工程级干热岩评价五大阶段。按干热岩资源调查评价精度由低到高,暂称E、D、C、B、A级干热岩资源评价(表5)。

由于恰卜恰干热岩体勘探程度相对较高,本文主要评价控制的干热岩资源(C级)。该级别干热岩资源主要针对上一阶段筛选出的干热岩有利勘查开发区,通过预可行性勘查,依据地热地质调查、综合地球物理、地球化学勘查,并投入一定的控制性钻探工程,基本查明了干热岩热储的岩性结构、空间分布、封闭情况及其温度等地热学参数,进行干热岩资源评价。

同时借鉴(Chanmorro et al.,2014) 评估欧洲EGS技术资源和可持续资源时采用的方法,结合中国控制的干热岩评价目标,提出控制的干热岩资源(C级)计算包括:理论资源、技术资源和可持续资源三个层次。按Rybach et al.(2010) 的定义,“技术资源”是指在能源结构和生态方面的限制条件下,以现有可用技术能够开发的实际可用的能源所占比重;“可持续资源”这一术语的含义更窄,是指按照可持续的生产水平所具有的“技术资源”所占比重。

在上述干热岩资源评价中,将涉及不同深度岩石的温度、密度、比热容、热导率、生热率、地温梯度等参数,而GR1孔相对于其他3眼干热岩勘探孔而言,提供了探深最大的参数系列,为恰卜恰干热岩体干热岩资源评价奠定了基础。

评价控制的干热岩资源(C级)时,采用体积法结合网格插值剖分法计算。面积取干热岩钻探和综合地球物理勘查成果综合确定的246.90 km²,计算深度区间为3~10 km,并分别计算当地多年平均气温(10℃)下的干热岩理论资源总量和发电温度下限(90℃)下的干热岩资源量。

计算结果表明,恰卜恰干热岩体理论资源总量为1638.16 EJ,折合标准煤559.09亿t,节煤量相当于减少燃煤CO₂排放量1323.92亿t,同时减少SO₂排放量9.50亿t,减少NO_x排放量3.35亿t。按国际干热岩标准,以其2%作为可开采资源量计,恰卜恰干热岩体可采资源量为32.76 EJ,折合标准煤11.18亿t。

恰卜恰干热岩体2500 m深度温度在150℃以上,具备发电条件。本次评价以90℃作为发电温度的下限,评价结果表明,3~5 km深度范围,100年内的潜在发电装机容量为3805.74 MW,以2%的采收率计,装机容量为76.11 MW;3~6 km潜在装机容量为7788.26 MW,以2%的采收率计,装机容量为

表5 中国干热岩资源调查评价阶段初步划分方案

Table 5 Preliminary divisions of investigation and evaluation stage for China's dry hot rock resources

工作阶段	评级级别	评价结果	勘探阶段	评价精度	
全国陆域干热岩资源调查评价	预测的	E	远景区	远景评价	1:50万精度地热普查
区域级干热岩资源调查评价	推断的	D	有利勘查区	调查评价	1:25万区域干热岩资源调查
地区级干热岩资源预可行性勘查	控制的	C	目标靶区	预可行性勘查	1:5万干热岩综合地质勘查
场地级干热岩资源可行性勘查	探明的	B	勘查开发场地	可行性勘查	1:1万干热岩地质勘查
工程级干热岩可开采资源评价	工程验证	A	工程场地	工程化运行	量化监测, 动态评价

155.77 MW; 3~7 km 潜在装机容量为 13639.25 MW, 以 2% 的采收率计, 装机容量为 272.79 MW。

5.5 总体评价

目前, 恰卜恰周边地区有在建的 50 万公顷光伏电站, 以龙羊峡为龙头的水能基地和风电基地等。如能在该地区建成中国首个 EGS 示范工程与科研试验平台, 不仅可促进共和盆地新能源集中区建设, 还可丰富清洁能源的家族成员。

依据美国能源部干热岩 FORGE 计划 (FORGE: Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy, 干热岩地热能前沿瞭望台研究计划) (Simmons et al., 2016) 提出的 EGS 工程选址要求: 干热岩储层必须为结晶岩类; 钻探深度 1500~4000 m; 温度 175~225°C 等主要指标衡量, 恰卜恰干热岩体岩性以中晚三叠世花岗闪长岩、二长花岗岩为主, 岩性条件好; 钻探深度为 2927.2~3705 m, 干热岩体埋深 2104.31~2500 m, 钻探深度与干热岩体埋深适中; 孔底最高温度为 236°C, 符合干热岩开发需要, 干热岩总体勘探成果大致与美国能源部 FORGE 计划在研的犹他州盐湖城南约 350 km 处的米尔福德 (Milford) EGS 场地处于“并跑”的水平。

6 结 论

(1) GR1 孔控制的恰卜恰干热岩体上覆新生代沉积地层厚度 932.16~1440.9 m, 泥岩等细碎屑岩盖层厚度较大, 隔热保温性能良好, 为干热岩资源的二次聚热提供了条件。推测共和盆地干热岩热能聚集概念模型可能为: 埋深于 8~32 km、东西向长约 50 km 的部分熔融层供热, 中晚三叠世花岗岩体储热, 大厚度新生代泥质岩类沉积盖层二次聚热。

(2) GR1 孔 2500~3705 m 井段的直线型温度-井深曲线, 表明本井深部无区域性流体扰动, 属干热岩无疑。测温结果表明, 2500 m 深处温度为 150°C, 进入干热岩段。终孔深度 3705 m 处的井底

温度为 236°C。2500~3705 m 的干热岩段平均地温梯度为 71.4°C/km, 高于其他 3 眼干热岩勘探孔。2800~3705 m 井段地温梯度大于 80°C/km, 属中等品质以上干热岩。

(3) GR1 孔在干热岩段钻进 1105 m, 岩性主要为花岗闪长岩、(黑云母) 花岗岩、二长花岗岩和斑状 (黑云母) 二长花岗岩, 侵入时代为中晚三叠世。300 m 以下井段干热岩体相对完整, 部分井段裂隙相对发育, 并有断裂构造发育, 局部井段岩心严重饼化。2500~3000 m 井段, 岩石裂隙和热蚀变作用相对发育, 深部可见硅华、钙华、沸石等地下热水沉积矿物。干热岩体比热平均 1.08 kJ/(kg·K), 热导率平均 1.86 W/(m·K), 密度平均 2.64 g/cm³。

(4) GR1 孔等 4 眼干热岩勘探孔控制的恰卜恰干热岩体, 平面上呈椭圆形, 东西向长 21.2 km, 南北向宽 14.3 km, 面积 246.90 km²。天然地震背景噪声层析成像显示, 在 21 km 的垂深范围内, 该干热岩体发育相对稳定。

(5) 评价结果表明, 恰卜恰干热岩体 3~5 km 深度范围, 100 年内的潜在发电装机容量为 3805.74 MW, 以 2% 的采收率计, 装机容量为 76.11 MW; 3~6 km 潜在装机容量为 7788.26 MW, 以 2% 的采收率计, 装机容量为 155.77 MW; 3~7 km 潜在装机容量为 13639.25 MW, 以 2% 的采收率计, 装机容量为 272.79 MW。

References

- Barbier E. 2002. Geothermal energy technology and current status: an overview[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 6(1): 3-65.
- Brown D. 1995. The US hot dry rock program—20 years of experience in reservoir testing[C]//*Proceedings of World Geothermal Congress*: 2607-2611.
- Chamorro C R, García-cuesta J L, Mondéjar M E, Pérez-Madrado, A. 2014. Enhanced geothermal systems in Europe: An estimation and comparison of the technical and sustainable potentials[J]. *Energy*,

- 65(2): 250–263.
- Chelemanski, Zhang Yi, Chen Ming. 1982. Practical Geothermal Science[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Feng Yimin, Cao Xuanduo, Zhang Erpeng, Hu Yunxu, Pan Xiaoping, Yang Junlu, Jia Qunzi, Li Wenming. 2003. Tectonic evolution framework and nature[J]. Northwest Geology, 36(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- GB-T-11615-2010. 2010. Geothermal Resources Geological Exploration Standard[S].
- Goes S, Govers R, Vacher P. 2000. Shallow mantle temperatures under Europe from P and S wave tomography[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 105(B5): 11153–11169.
- Haimson B C. 1997. Borehole breakouts and core diskings as tools for estimating in situ stress in deep holes[C]// International Symposium on Rock Stress—RS Kumamoto 97: 35–42.
- He Zhiliang, Feng Jianyun, Zhang Ying, Li Pengwei. 2017. A tentative discussion on an evaluation system of geothermal unit ranking and classification in China[J]. Earth Science Frontiers, 24(3): 168–179.
- Jiang Hongcai, Zhou Ruiliang. 1994. Distribution of geothermal water in structure system of Qinghai–Xizang(Tibet) plateau and its prospecting[J]. Bulletin of the 562 Comprehensive Geological Brigade, Chinese Academy of Geological Sciences, (11/12): 243–259 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Lin, Ji Jianqing, Xu Qinqin. 2013. Geologic analysis on the prospects of the enhanced geothermal system (EGS) in the Bohai Bay Basin [J]. Geology and Exploration, 49(1): 167–178 (in Chinese with English abstract).
- Li Shengshuang, Sun Weidong, Zhang Guowei, Chen Jiayi, Yang Yongcheng. 1996. Geochronology and geochemistry of the Heigouxia metamorphic volcanic rock in the Minqing tectonic Belt: Evidence from the Paleozoic ocean basin and its closing era[J]. Science China Earth Sciences, 26(3): 223–230 (in Chinese).
- Luo Bijie, Zhang Hongfei, Xiao Zunqi. 2012. Petrogenesis and tectonic implications of the Early Indosinian Meiwu Pluton in West Qinling, central China[J]. Earth Science Frontiers, 19(3): 199–213 (in Chinese with English abstract).
- Li Y, Schmitt D R. 1998. Drilling-induced core fractures and in situ stress[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 103(B3): 5225–5239.
- Mackenzie G D, Thybo H, Maguire P K H. 2005. Crustal velocity structure across the Main Ethiopian Rift: results from two-dimensional wide-angle seismic modelling[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 162(3): 994.
- Matsuki K, Kaga N, Yokoyama T, Tsuda N. 2004. Determination of three dimensional in situ stress from core discing based on analysis of principal tensile stress[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41(7): 1167–1190.
- Panel DOE. 2006. The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems on the United States in the 21st Century[J]. Geothermics, 17(5): 881.
- Polsky Y, Capuano L J, Finger J, Huh M, Knudsen S, Mansure A J C, Raymond D, Swanson R. 2008. Enhanced Geothermal Systems (EGS) well construction technology evaluation report[J]. Physical Review D, 17(10): 2529–2551.
- Priestley K, Debayle E, McKenzie D, Pilidou S. 2006. Upper mantle structure of eastern Asia from multimode surface waveform tomography[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 111(B10).
- Rybach L. 2010. “The Future of Geothermal Energy” and its challenges[C]//Proceedings of World Geothermal Congress, 2010: 25–29.
- Song Bowen, Xu Yadong, Liang Yiping, Jiang Shangsong, Luo Mansheng, Ji Junliang, Han Fang, Wei Yi, Xu Zenglian, Jiang Gaolei. 2014. Evolution of Cenozoic sedimentary basins in Western China [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 39(8): 1035–1051 (in Chinese with English abstract).
- Stieglar S E. 2008. A Dictionary of Earth Sciences[M]. Rowman & Allanheld.
- Simmons S, Kirby S, Jones C. 2016. The geology, geochemistry and geohydrology of the FORGE Deep Well Site, Milford, Utah[C]//41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 2016: 1–10.
- Wang Chenghu. 2014. Brief review and outlook of main estimate and measurement methods for in-situ stresses in rock mass[J]. Geological Review, 60(5): 971–995 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, He Lijuan, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, Rao Song, Tang Xiaoyin, Kong Yanlong, Luo Lu, Li Weiwei. 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China [J]. Science & Technology Review, 30(32): 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Changgui, Lv Yousheng. 2004. Gonghe Basin: A new and worth-researching basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 25(5): 471–473 (in Chinese with English abstract).
- Xu Tianfu, Yuan Yilong, Jiang Zhenjiao, Hou Zhaoyun, Feng Bo. 2016. Hot dry rock and enhanced geothermal engineering: International experience and China prospect[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 46(4): 1139–1152 (in Chinese with English abstract).
- Xu J F, Castillo P R, Li X H, Yu X Y, Zhang B R, Han Y W. 2002. MORB-type rocks from the Paleo-Tethyan Mian-Lueyang northern ophiolite in the Qinling Mountains, central China: implications for the source of the low $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and high $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ mantle component in the Indian Ocean[J]. Earth & Planetary Science Letters, 198(3): 323–337.
- Xu Shuying, Xu Defu, Shi Shengren. 1984. A discussion on the development of landforms and evolution of environments in the Gonghe Basin[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science), 20(1): 146–157 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Shirendeng, Wucailai, Wang Xibin, Robinson P T. 2009. Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, Northeast Tibetan Plateau: Evidence for Paleo-Tethyan Suture in Northwest China[J]. Journal of Earth Science, 20(2): 303–331.

- Yuan Daoyang, Zhang Peizhen, Liu Xiaolong, Liu Baichi, Zheng Wenjun, He Wengui. 2004. The tectonic activity and deformation features during the Late Quaternary of Elashan Mountain active fault zone in Qinghai Province and its implication for the deformation of the northeastern margins of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 393-402 (in Chinese with English abstract).
- Yang lirong, Yue Leping, Wang Hongliang, Zhang Rui, Guo Huaijun, Zhu Xiaohui, Zhang Yunxiang, Gong Hujun. 2016. Quaternary stratigraphic realm and sedimentary sequence of the Qilian Mountain and adjacent areas[J]. *Geology in China*, 43(3): 1041-1054(in Chinese with English abstract).
- Yang Lizhong, Liu Jinhui, Sun Zhanxue, Wang Andong, Wan Jianjun, Zhou Yi. 2016. Study of the characteristics of radioactive heat production rate and hot dry rock resources potential in Zhangzhou City [J]. *Modern Mining*, 563(3): 123-127, 133 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Henglei, Hu Xiangyun, Liu Tianyou. 2012. Fast inversion of magnetic source boundary and top depth via second order derivative[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(11): 3839-3847 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fawang, Wang Guiling, Hou Xinwei, Li Jianhua, Li Yujing. 2000. An Analysis of the formation of geothermal resources and the effects of groundwater circulation on the wall rock temperature field-taking the Pingdingshan Mining Field as an example[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(2):142-146 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ping, Wang Jiyang, Wang Ji, an, Luo Dingui. 1995. Characteristics of heat production distribution in SE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(3): 292-305(in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, Jia Xiaofeng, Zhang Yang, Li Shengtao, Li Zhiwei, Tian Puyuan, Ming Yuanyuan, Zhang Chao. 2017. Volcanic magma chamber survey and geothermal geological condition analysis for hot dry rock at the Weishan Volcano in Wudalianchi Region, Heilongjiang Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(7): 1506-1521 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Yao Anping. 2004. Western Qinling-Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 23-32(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xueting, Yang Shengde, Yang Zhanjun. 2007. The Plate Tectonics of Qinghai Province - A Guide to the Geotectonic Map of Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 胡云绪, 潘晓萍, 杨军录, 贾群子, 李文明. 2003. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质[J]. *西北地质*, 36(1): 1-10.
- 何治亮, 冯建赞, 张英, 李朋威. 2017. 试论中国地热单元分级分类评价体系[J]. *地学前缘*, 24(3): 168-179.
- GB-T-11615-2010. 2010. 地热资源地质勘查规范[S].
- 姜鸿才, 周瑞良. 1994. 青藏高原构造体系控制下的地热水分布及找热方向[J]. *中国地质科学院 562 综合大队集刊*, (11/12): 243-259.
- 蒋林, 季建清, 徐芹芹. 2013. 渤海湾盆地应用增强型地热系统(EGS)的地质分析[J]. *地质与勘探*, 49(1): 167-178.
- 骆必继, 张宏飞, 肖尊奇. 2012. 西秦岭印支早期美武岩体的岩石成因及其构造意义[J]. *地学前缘*, 19(3): 199-213.
- 李曙光, 孙卫东, 张国伟, 陈家义, 杨永成. 1996. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学-古生代洋盆及其闭合时代的证据[J]. *中国科学(地球科学)*, 26(3): 223-230.
- 切列维斯基, 赵羿, 陈明. 1982. 实用地热学[M]. 北京: 地质出版社.
- 宋博文, 徐亚东, 梁银平, 江尚松, 骆满生, 季军良, 韩芳, 韦一, 徐增连, 姜高磊. 2014. 中国西部新生代沉积盆地演化[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 39(8): 1035-1051.
- 汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 何丽娟, 赵平, 朱传庆, 饶松, 唐晓音, 孔彦龙, 罗璐, 李卫卫. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. *科技导报*, 30(32): 25-31.
- 王昌桂, 吕友生. 2004. 共和盆地——一个值得研究的新盆地[J]. *新疆石油地质*, 25(5): 471-473.
- 王成虎. 2014. 地应力主要测试和估算方法回顾与展望[J]. *地质论评*, 60(5): 971-996.
- 许天福, 袁益龙, 姜振蛟, 侯兆云, 冯波. 2016. 干热岩资源和增强型地热工程: 国际经验和我国展望[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 46(4): 1139-1152.
- 徐叔鹰, 徐德馥, 石生仁. 1984. 共和盆地地貌发育与环境演化探讨[J]. *兰州大学学报(自科版)*, 20(1): 150-161, 188.
- 袁道阳, 张培震, 刘小龙, 刘百麓, 郑文俊, 何文贵. 2004. 青海鄂拉山断裂带晚第四纪构造活动及其所反映的青藏高原东北缘的变形机制[J]. *地学前缘*, 11(4): 393-402.
- 杨利荣, 岳乐平, 王洪亮, 张睿, 郭怀军, 朱小辉, 张云翔, 弓虎军. 2016. 祁连山及邻区第四纪地层区划与沉积序列[J]. *中国地质*, 43(3): 1041-1054.
- 杨立中, 刘金辉, 孙占学, 王安东, 万建军, 周毅. 2016. 漳州岩体放射性生热率特征及干热岩资源潜力[J]. *现代矿业*, 563(3): 123-127.
- 张森琦, 贾小丰, 张杨, 李胜涛, 李志伟, 田蒲源, 明圆圆, 张超. 2017. 黑龙江省五大连池尾山地区火山岩浆囊探测与干热岩地热地质条件分析[J]. *地质学报*, 91(7): 1506-1521.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. *地学前缘*, 11(3): 23-32.
- 张雪亭, 杨生德, 杨站君. 2007. 青海省板块构造研究——1:100万青海省大地构造图说明书[M]. 北京: 地质出版社.
- 张恒磊, 胡祥云, 刘天佑. 2012. 基于二阶导数的磁源边界与顶部深度快速反演[J]. *地球物理学报*, 55(11): 3839-3847.
- 张发旺, 王贵玲, 侯新伟, 李建华, 李玉静. 2000. 地下水循环对围岩温度场的影响及地热资源形成分析——以平顶山矿区为例[J]. *地球学报*, 21(2): 53-142.
- 赵平, 汪集旻, 汪缉安, 罗定贵. 1995. 中国东南地区岩石生热率分布特征[J]. *岩石学报*, 11(3): 292-305.