



引文格式: 刘生荣, 罗新刚, 辜平阳, 等. 共和盆地深部构造格架及其对干热岩热源的影响[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 130-141. DOI: 10.12401/j.nwg.2024068

Citation: LIU Shengrong, LUO Xingang, GU Pingyang, et al. Deep Tectonic Framework of Gonghe Basin and Its Influence on Heat Source of Dry Hot Rock[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 130-141. DOI: 10.12401/j.nwg.2024068

共和盆地深部构造格架及其对干热岩热源的影响

刘生荣^{1,2}, 罗新刚^{1,2,*}, 辜平阳^{1,2}, 唐小平^{1,2}, 杨尚倍^{1,2}, 何雷宇^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119; 2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710119)

摘要: 干热型地热资源作为一种新型的地热资源形式, 是一种发展前景广阔的新型清洁能源。青海省共和盆地位于青藏高原东北缘, 区域地质活动丰富, 为干热岩的形成创造了良好的条件。因此, 研究共和盆地构造格架与干热岩成热模式, 对地热资源勘探具有重要意义。笔者基于重力异常归一化总水平导数垂向导数技术(NVDR-THDR)和重磁异常融合方法划分了共和盆地的断裂构造格架, 共识别深大断裂 20 条, 有 9 条是前人未识别断裂。其中, F1-15 推断断裂作为共和盆地东西分界断裂, 对共和盆地干热岩成因具有重要意义。基于超低频大地电磁测深剖面及重力异常归一化总梯度的反演结果显示, 共和盆地地幔物质向上运移并加热和侵蚀岩石圈底部, 导致岩石圈底部发生熔融减薄。盆地东部和西部均存在自青海南山及贵南南山向盆地的逆冲推覆构造, 但深部地质结构存在明显差异。盆地西部地质体挤压变形程度强于盆地东部, 西部盆地深部地质体密度结构呈“八”字型特征, 表现为压陷盆地的特征, 断裂发育较少; 而东部盆地大量发育深大断裂, 为深部的热源物质和热量提供了传输通道。因此, 认为共和盆地干热岩热源以地幔热流传导供热和壳内部分熔融层供热为主, 放射性元素衰变生热为辅, 盆地东部相较于西部更具备干热岩成藏条件。

关键词: 共和盆地; 干热岩; 断裂构造; 地幔热流传导; 熔融层

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)05-0130-12

Deep Tectonic Framework of Gonghe Basin and Its Influence on Heat Source of Dry Hot Rock

LIU Shengrong^{1,2}, LUO Xingang^{1,2,*}, GU Pingyang^{1,2}, TANG Xiaoping^{1,2}, YANG Shangbei^{1,2}, HE Leiyu^{1,2}

(1. Xi'an Center of China Geological Survey / Geosciences Innovation Center of Northwest China, Xi'an 710119, Shaanxi, China;
2. Centre for Orogenic Belt Geology, China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: As a new type of geothermal resource, dry-hot geothermal resource is a type of clean energy with broad development prospects. The Gonghe basin in Qinghai Province is located in the northeastern margin of the

收稿日期: 2024-05-01; 修回日期: 2024-07-25; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“西北地区区域地球物理调查”(DD20243470), “西北地区大地电磁基础调查”(DD20230239)和“商丹-大柴旦地区区域地质调查”(DD20190069)联合资助。

作者简介: 刘生荣(1987-), 男, 高级工程师, 主要从事西北地区区域地球物理研究工作。E-mail: lsrgcs@163.com。

* 通讯作者: 罗新刚(1991-), 男, 博士, 主要从事重、磁方法理论及应用技术研究。E-mail: lxg_chd@163.com。

Qinghai-Tibet Plateau. The regional geological activities are rich, which creates good conditions for the formation of hot dry rock. Therefore, it is of great significance to study the tectonic framework of the Gonghe Basin and the heat generation model of dry-hot rock for geothermal resource exploration. Based on the normalized vertical derivative of total horizontal derivative of gravity anomaly (NVDR-THDR) and the fusion method of gravity and magnetic anomalies, the fault tectonic framework of Gonghe basin has been divided. A total of 20 deep and large faults are identified, and 9 of them are not identified by predecessors. The inferred F1-15 fault is the east-west boundary fault of Gonghe basin, which is of great significance to the genesis of dry-hot rock in Gonghe basin. The results from the ultra-low frequency magnetotelluric sounding profile and the normalized total gradient inversion of gravity anomalies show that the mantle material of the Gonghe basin migrated upward, heated and eroded the bottom of the lithosphere, resulting in melting and thinning of the bottom of the lithosphere. The basin are subject to the thrust nappe of the Qinghai Nanshan and Guinan Nanshan, but there are obvious differences in the deep geological structure between the eastern part and western part. The degree of extrusion deformation of the geological body in the western part is stronger than that in the eastern part. The density structure of the deep geological body in the western basin is characterized by an 'eight' shape, which is characterized by a depressed basin, but the faults are less developed. A large number of deep faults are developed in the eastern basin, which provides a transmission channel for deep heat source materials and heat. Therefore, it is considered that the heat source of dry-hot rock in Gonghe basin is dominated by mantle heat flow conduction and partial melting layer in the crust, supplemented by heat generation of radioactive element decay, and the eastern part of the basin has more dry-hot rock accumulation conditions than the western part.

Keywords: Gonghe basin; dry-hot rock; fault structure; mantle heat flow conduction; melting layer

干热型地热资源作为一种新型的地热资源形式,其赋存状态表现为不含水或含少量水的高温岩体,是一种稳定的、发展前景广阔的新型清洁能源(郭森等, 2015; 王坤, 2019; 白奋飞等 2023)。中国地热资源蕴藏丰富,其中印度-欧亚板块俯冲碰撞过程造就了青藏高原广阔的构造变形区域,强烈的构造活动使得该地区具有较高的热背景,是重要的高温热异常分布带,孕育了诸如羊八井、羊易等高温地热田(赵振明等, 2005; 严维德等, 2013)。青海省共和盆地位于青藏高原东北缘,区域地质活动丰富,为干热岩的形成创造了良好的条件(薛建球等, 2013; 王贵玲等, 2017; 张森琦等, 2018; 许天福等, 2018; 毛翔等, 2019)。自 2017 年在共和盆地恰卜恰 3 705 m 深处钻获 236 °C 高温干热岩体以来,区域内干热岩资源的调查评价成为了研究热点。因此,研究共和盆地构造格架与干热岩成热模式,对地热资源勘探具有重要意义。

目前,关于干热岩的区域性热源还存在不同的认识。张超等(2018)根据共和-贵德盆地周边出露的花岗岩样品放射性生热率测试结果,认为研究区花岗岩的放射性生热率较低,不是引起局部高热异常的主要原因,而位于上地壳内深部异常热源体(岩浆囊)才是

共和盆地高温热异常的主要原因。唐显春等(2020)认为新生代中-下地壳发育高温低速高导层是主要热源,中晚三叠世花岗岩是良好的导热和储热体,新生代低热导率沉积岩是良好的盖层。侯增谦等(2021)研究认为印度大陆岩石圈地幔俯冲触发了亚洲大陆软流圈涌动,沿后陆区若干地幔通道垂直上涌,热蚀并吞噬地幔岩石圈,直抵地壳底部。这些“地幔通道流”源于 400 km 深处,不仅为维持青藏高原隆升提供了深部热能,而且为高原地壳生长输送了新生幔源物质,同时引发中下地壳塑性流变和侧向流动,并驱动青藏高原向 NE 方向侧向生长。张超等(2018)通过对 DR3、GR2 和 GR1 等 3 口干热岩钻孔进行温度测量,认为钻孔内井液温度与地层温度基本达到热平衡状态,但也有学者认为新生代以来,印度板块与欧亚板块发生持续性的陆-陆碰撞,整个青藏高原整体被不断抬升,地壳受 SN 向挤压而发生水平缩短与垂向增厚,增厚的地壳使得青藏地区岩石圈发生强烈的挠曲变形,打破了岩石圈-软流圈边界的原始热平衡状态,局部软流圈发生对流,热的地幔物质向上运移并加热和侵蚀岩石圈底部,导致岩石圈底部发生熔融减薄,从而使得部分地区地幔热贡献量增加(沈显杰等,

1992)。

前人关于共和盆地干热岩的区域性热源起因主要有4种观点:①花岗岩放射性生热率局部高异常(Chen et al., 2009; 唐显春等, 2020)。②典型的传导型热储, 热源来自深部, 通过断裂传导至浅部(张森琦等, 2018; Gao et al., 2020)。③深部异常热源(岩浆囊)(沈显杰等, 1990; Springer, 1999; 张超等, 2018)。④热的地幔物质向上运移加热和侵蚀岩石圈底部, 导致岩石圈底部发生熔融减薄, 使得部分地区地幔热贡献量增加(沈显杰等, 1992; Feng et al., 2018)。基于区域重力、航磁数据建立盆地的构造格架和断裂系统, 通过兴海-共和-湟源部署的超低频大地电磁测深剖面、区域重力剖面研究共和盆地深部的电性结构和密度结构特征, 综合分析共和盆地干热岩的区域热源成因。

1 区域地质概况

研究区共和盆地位于青藏高原东北缘, 为中生代—新生代发展起来的菱形断陷盆地。盆地北侧以青海

南山断裂与祁连造山带相接, 南侧以阿尼玛卿缝合带与松潘-甘孜块体相邻, 东西两侧分别以多禾茂断裂和瓦洪山断裂与西秦岭和东昆仑造山带相接(孙知新等, 2011; 薛建球等, 2013; 王斌等, 2015)。大地构造位置上, 共和盆地处于中央造山带秦岭-祁连-昆仑褶皱系、中东昆仑与西秦岭造山带的交接转换部位(石宝颐等, 1982; 刘春雷等, 2022)(图1)。盆地边缘西秦岭、南祁连及东昆仑造山带经历了新元古代、古生代、早中生代和晚中生代4期显著的岩浆作用。共和盆地位于宗务隆-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, 主要岩性为辉长岩-闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩(张森琦等, 2018)。印支期岩浆岩广泛发育, 共和县恰卜恰地区10余眼钻遇花岗岩。基底的地热井钻探资料显示, 不同类型源岩的花岗质岩浆在印支期间隔较短地多次集中侵入、反复套叠或叠置, 形成的复式花岗岩岩基

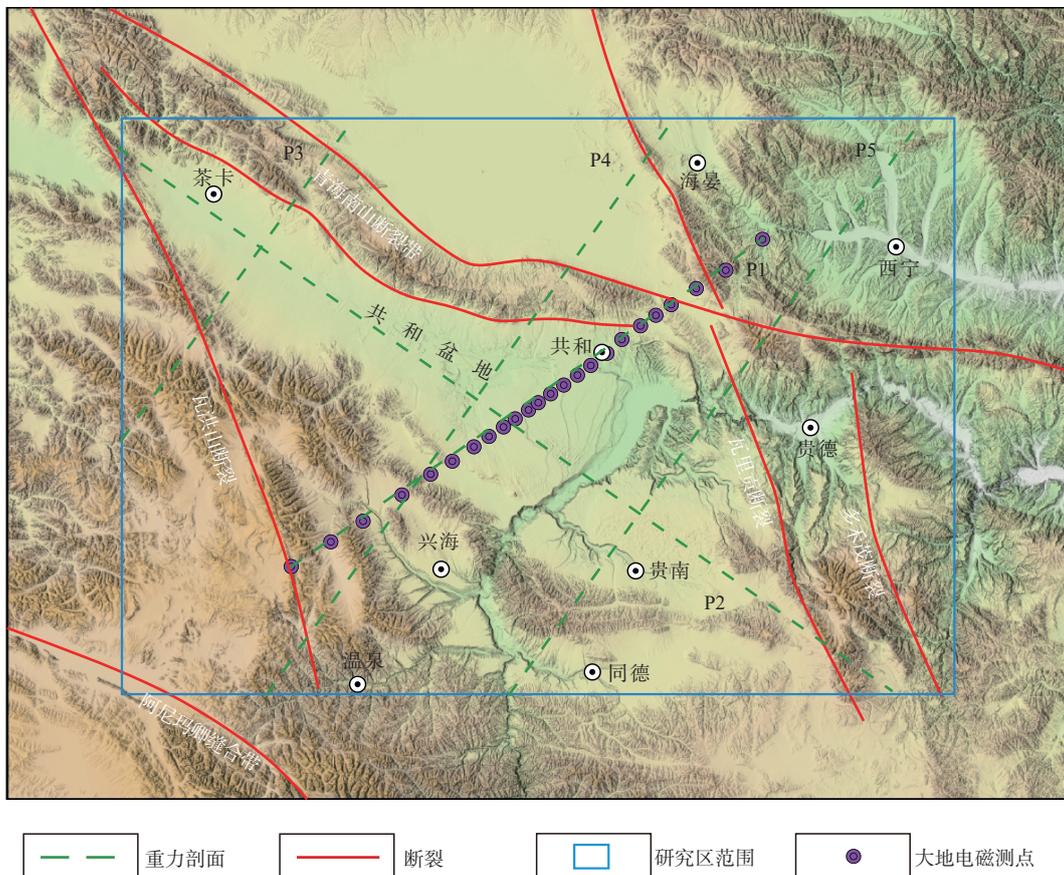


图1 共和盆地大地构造位置(据负晓瑞等, 2020)

Fig. 1 The geotectonic location of Gonghe basin

构成了共和盆地基底的主要组成部分。

2 重力、磁力异常特征及构造格架

2.1 共和盆地及周缘重、磁力异常特征

共和盆地及其周缘布格重力异常(图2)资料的比例尺为1:25万。研究区内布格重力异常值的变化总趋势是由西向东、从南向北,异常值逐渐增大,在不同地区重力场特征有所不同。最高值位于测区内东北部西宁市-海晏县一带,最低值位于西南角一带,重力差达161 mGal。重力场主要分为鄂拉山重力低异常区、茶卡-共和-贵德县重力异常区、青海湖-西宁市高重力异常区。茶卡-共和县-贵德县沿线北侧布格重力场为一巨型梯级带;在茶卡镇西南-温泉乡重力场走向开始发生转变,由NW向转为NNE向,布格重力异常上表现为梯级带与地质上的瓦洪山断裂相吻合。布格重力异常走向主要以NW向为主,该方向反映了工作区受西秦岭造山带构造的影响较大(冯治汉等, 2018; 杜威, 2018; 张森琦等, 2020)。

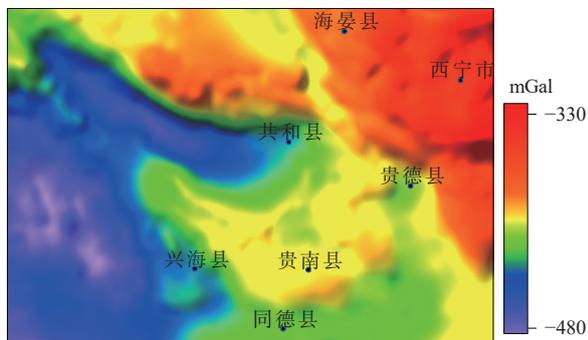


图2 共和盆地布格重力异常

Fig. 2 Bouguer gravity anomaly in Gonghe basin

共和盆地及其周缘航磁化极异常(图3)资料的比例尺为1:10万。研究区内化极磁异常显示共和盆地北部的青海南山-拉脊山呈正、负相伴的宽缓异常或串珠状异常,场值较高;南西部鄂拉山一带正、负异常伴生,强度高;青海南山及其以北地区以团块状、条带状、环状异常为主,异常幅值较高;共和盆地呈大面积宽缓低值的弱磁异常区,场值由西向东缓慢增高,大面积的平缓弱磁异常可能反映了盆地具有弱磁性的下元古界基底且埋藏过深等信息,或者可能与深部热力因素导致磁性矿物的消磁作用有关(冯治汉等, 2018; 杜威, 2018; 张森琦等, 2020),暗示深部发育有高温地质体或存在部分熔融层。

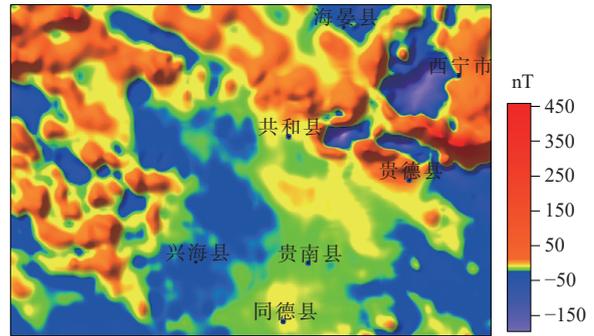


图3 共和盆地化极磁力异常

Fig. 3 Reduction-to-pole magnetic anomaly in Gonghe basin

2.2 共和盆地断裂构造格架

利用重、磁力异常识别断裂的方法技术有多种,笔者采用重力异常归一化总水平导数垂向导数技术(NVDR-THDR)(Wang et al., 2009; 何涛等, 2019; Zhu et al., 2021)、剩余布格重力异常计算技术和重磁异常融合方法(鲁宝亮等, 2020)对共和盆地及其周缘断裂平面位置进行识别。断裂平面位置的主要识别标志为布格重力异常 NVDR-THDR(图4)极大值连线或极大值错断位置,在布格重力异常 NVDR-THDR 的极大值连续性较差的地方,需结合重磁融合异常特征(图5)、剩余布格重力异常和剩余化极磁力异常零直线位置(图6)进行判断。剩余布格重力异常和剩余化极磁力异常是利用最小曲率位场分离方法(纪晓琳等, 2015)对布格重力异常和化极磁力异常进行位场分离计算得到的。断裂的平面位置位于真实断裂的倾向一侧。

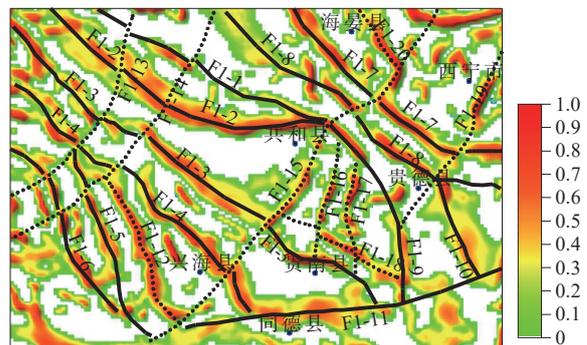


图4 共和盆地布格重力异常 NVDR-THDR

Fig. 4 NVDR-THDR of Bouguer gravity anomaly in Gonghe basin

综合前人断裂研究成果,本次在共和盆地及其周缘识别出了断裂20条(图4),其中有11条断裂为前人已经识别的断裂(F1-1~F1-11),9条断裂为本次识别的隐伏断裂(F1-12~F1-20)。断裂属性统计见表

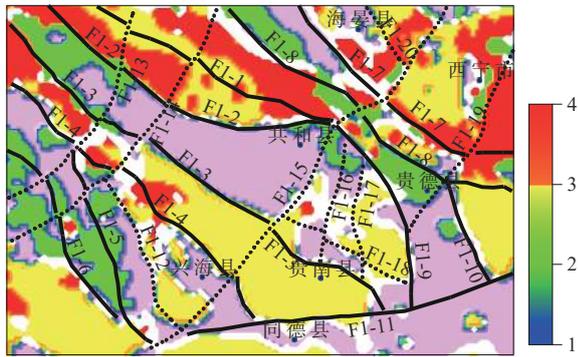


图5 共和盆地重磁融合异常

Fig. 5 Gravity and magnetic fusion anomaly in Gonghe Basin

表1和表2。根据图4和图5可以看出共和盆地及其周缘断裂走向以NW和NWW向为主,其次为NNE、NE向。在识别出的断裂构造中,NWW向断裂(F1-1~F-4)与NNE向断裂(F1-13~F1-15)规模大、延伸较长,控制着盆地的构造和演化,对构造分区、岩浆活动、变质程度等有明显的控制作用,可能对深部岩体的形成和热流上涌有一定的控制作用。

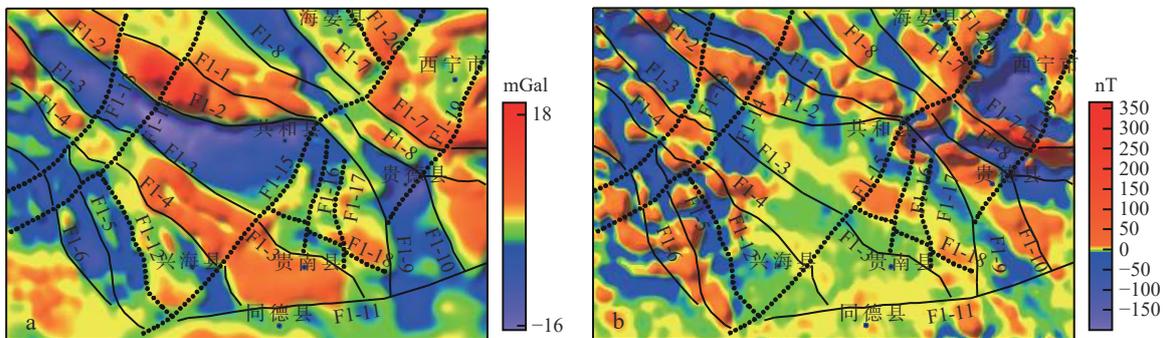
(1)青海南山断裂(F1-1)构成南祁连构造带与青海南山构造带的分界断裂。区域上,西起土尔根大坂,东经宗务隆山、青海湖南缘、武山至宝鸡与华北克拉通西南缘断裂交汇,走向NWW向,为一条自西向东逐渐变深的超岩石圈断裂。在剩余布格重力场中该断裂沿青海湖重力高异常展布,在剩余化极磁力异常上断裂两侧表现出“南高北低”的特征。重磁异常融合结果上则表现为地下异常体不同物性的分界断裂,与青海南山南缘断裂(F1-2)一同控制着共和盆地西北部的构造演化。

(2)青海南山南缘断裂(F1-2)近EW向展布于青海南山南缘的文巴地-卜卜禄寺-恰藏一线,走向

NWW。在航磁 ΔT 化极异常图上,断裂北侧以波动变化磁场背景上叠加团块状、条带状、孤立点状异常为特征;南侧大部分为平缓变化的负磁场。在剩余布格重力异常图上,断裂反映为北高南低的负重力梯度带,表明该断裂两侧基底北高南低,控制两侧地层与岩体分布。重磁异常融合结果上断裂两侧表现出明显的不同物性特征,北侧为高密度、高磁性地层,南侧为低密度、低磁性地层,这说明该断裂是共和盆地北侧的边界断裂。

(3)哇玉香卡-贵南断裂(F1-3)位于共和盆地南西缘山前地带,为一隐伏断裂。断裂西起茶卡南,向南东大致沿丘陵与洪积台地边缘,经哇玉香卡农场北侧、新哲农场南侧展布。该断裂具切割较深、活动历史较长、方式复杂多变、现代活动强烈等特点。断裂总体走向NWW向,性质为一逆冲兼右行走滑断裂。该断裂东南段在剩余化极磁力异常上表现不明显,说明此处深部热活动较弱。在剩余布格重力异常图上,断裂位于不同异常特征的分界处,北侧为共和盆地低重力异常带,南侧为高重力异常带。重磁异常融合结果上断裂北侧为共和盆地低密度、低磁性凹陷地层,南侧为高密度、低磁性隆起地层。该断裂与贵南南山南缘断裂(F1-4)一同控制着共和盆地东南部边界的构造演化。

(4)贵南南山南缘断裂(F1-4)为一条NW向走滑活动断层。重力异常特征表现为北高南低,由于该断裂倾向为NE,因此断裂两侧北高南低的重力异常特征说明断裂上盘向NE方向逆冲,即该断裂不仅是一条走滑活动断层,同时兼具逆冲特性。与贵南隐伏断裂(F1-3)类似,断裂东南段在剩余化极磁力异常上也表现不明显。在重磁异常融合结果上断裂两侧也表



a. 剩余布格重力异常; b. 剩余化极磁力异常

图6 共和盆地剩余布格重力异常和剩余化极磁力异常

Fig. 6 Residual gravity anomaly of Gonghe basin

表1 共和盆地控盆断裂属性统计表

Tab. 1 Statistical table of basin-controlling fault attributes in Gonghe basin

编号	名称	走向	位置	性质	长度 (km)	段数 (个)
F1-1	青海南山断裂	NWW	北部	挤压	152	3
F1-2	青海南山南缘断裂	NWW	中部	挤压	188	3
F1-3	哇玉香卡-贵南断裂	NW	中部	走滑	283	4
F1-4	贵南南山南缘断裂	NW	西南部	走滑	206	4
F1-5	瓦洪山断裂	NW	西南部	挤压	128	2
F1-6	瓦洪山南缘断裂	NW	西南部	挤压	120	3
F1-7	拉脊山东缘断裂	NW	东北部	挤压	158	3
F1-8	拉脊山断裂	NW	东北部	挤压	206	3
F1-9	瓦里贡山断裂	NNW	东北部	挤压	123	1
F1-10	多禾茂断裂	NNW	东南部	挤压	63	1
F1-11	贵南南断裂	EW	东南部	挤压	195	1

注: 王洪等(2021)给出了研究区的应力情况, 笔者依据此应力分布推断了断裂的性质。

表2 共和盆地隐伏断裂属性统计表

Tab. 2 Statistical table of buried fault attributes in Gonghe basin

编号	走向	位置	性质	长度 (km)	段数 (个)
F1-12	NNW	西南部	挤压	101	1
F1-13	NNE	西北部	走滑	138	1
F1-14	NNE	西北部	走滑	187	1
F1-15	NE	中部	走滑	271	1
F1-16	NNE	中部	走滑	71	1
F1-17	NNE	中部	走滑	73	1
F1-18	NWW	东南部	挤压	82	3
F1-19	NNE	东部	走滑	120	1
F1-20	NW	东北部	挤压	41	1

注: 王洪等(2021)给出了研究区的应力情况, 笔者依据此应力分布推断了断裂的性质。

现出不同的物性特征, 北侧为高密度、低磁性隆起地层, 南侧为低密度、低磁性地层。同时该断裂是共和盆地南侧边界断裂, 控制着共和盆地西南部边界的构造演化。

(5) NNE 向隐伏断裂(F1-13~F1-15)的识别依据主要是基于重力异常、磁力异常以及重磁融合异常的错断特征。在布格重力异常上 NVDR-THDR 和剩余布格重力异常上 F1-13~F1-15 对异常的错断尤为明显。实际上共和盆地受 NE 方向的挤压应力作用, 形成一系列的 NW 向断裂, 那必然在 NW 方向上会存在

剪贴应力, 形成一系列具有走滑特征的 NE 向走滑断裂。在重磁异常融合结果上物性向 NE 方向的错断特征也能说明这一点。

3 基于重力和电法剖面的共和盆地干热岩热源分析

干热岩是地热能的载体之一, 一般为温度大于 150 °C、埋深数千米、内部不含流体或仅有少量流体的高温岩体。干热岩地热藏的关键因素主要包括高异常热源、低热导率($<2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)的保热盖层及高导热性的储层。共和盆地处于秦祁昆结合部, 构造十分发育且复杂, 具有局部高大地热流及高地温梯度, 是中国大陆平均值的两倍; 在盆缘边界断裂带有多处温泉出露, 已在恰卜恰及扎仓寺等地多口钻井钻遇盆地基底印支期花岗岩类干热岩。笔者基于超低频大地电磁测深剖面非线性共轭梯度反演方法(NLCG)(张昆等, 2011; 赵维俊等, 2014; 黄磊, 2022)及重力剖面归一化总梯度反演方法(郭灿灿等, 2012; 苏超等, 2014)对共和盆地干热岩热源成因进行了分析。

3.1 共和盆地深部电性结构与干热岩热源关系

沿共和-玉树高速西侧部署 NE-SW 向大地电磁测深剖面, 贯穿共和盆地南北, 北至青海湟源县, 南侧邻温泉镇(图 1)。使用 Ather 大地电磁仪器, 采用长周期观测模式, 盆地中心点距为 5 km, 两端放稀至 10~15 km, 剖面长度为 205 km, 保障有效采集时长为 80 h, 最低频率为 1/10 000 Hz, 重点控制 60 km 以浅的电性结构, 揭示共和盆地深部地质结构壳幔演化状态。

基于共和盆地(兴海-共和-湟源)超低频大地电磁测深剖面数据, 采用非线性共轭梯度法(NLCG)反演获得该区域的深部电性结构(图 7), 共和盆地及其周缘深部电性结构表现为南侧高阻、中间低阻、北侧高阻的“M”型电性结构特征, 低阻异常未封闭, 具有向深部延伸的趋势。共和盆地中心呈上隆的“背斜”状, 北边及南边两侧下凹。20 km 以浅深度存在较厚的高阻层, 两侧连续稳定, 中间位置存在明显错动, 共和盆地位于该高阻层错动位置上方, 整体呈显中阻特征。在盆地深部高阻向下延伸至 40 km。

综上所述, 共和盆地深部呈现低-高-低分布的“M”型电阻率异常结构特征, 推测在盆地深部存在明显的地幔物质上涌或已固化的上涌地幔, 隆升幅度约 30 km, 由此引起了该区域地壳变薄, 深部热量通

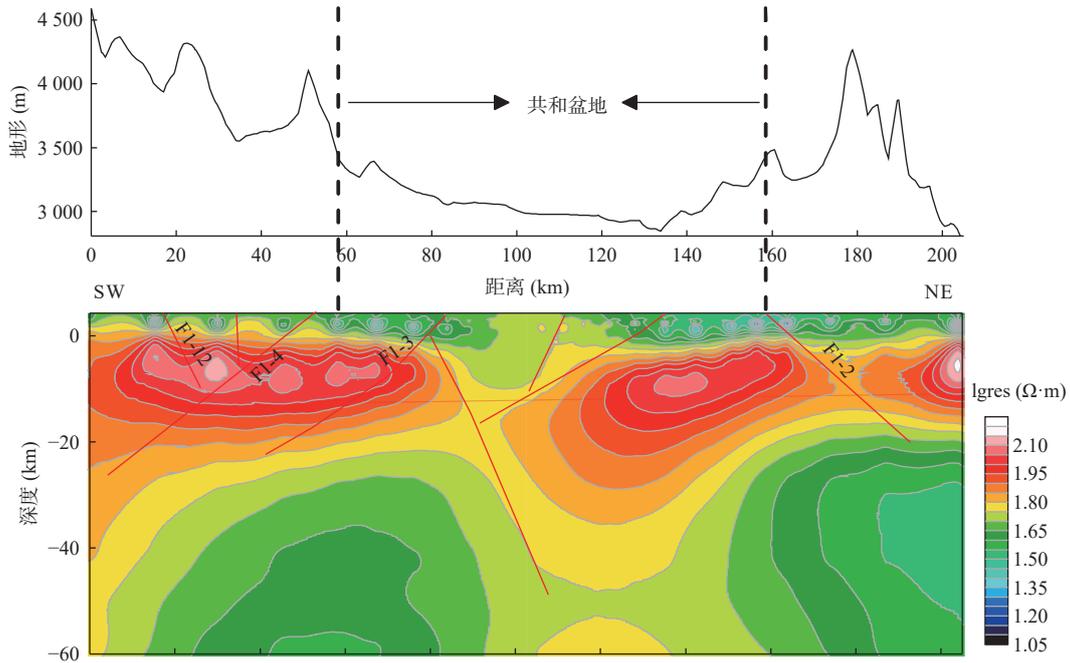


图7 大地电磁测深剖面非线性共轭梯度反演解译结果

Fig. 7 Interpretation results of nonlinear conjugate gradient inversion of magnetotelluric sounding profile

过深大断裂传导到浅部,储存在花岗岩体中。因此,地幔热流传导供热可能是共和盆地干热岩的重要热源之一。

3.2 共和盆地深部密度结构与干热岩热源关系

对研究区的5条重力剖面进行归一化总梯度反演,识别出较为清晰的深部密度结构特征(图8)。

1号剖面位于共和盆地中部地区,与大地电磁剖面重合。归一化总梯度反演结果显示,共和盆地整体

两侧为低密度异常体,中心为略高密度异常体。盆地两侧受挤压应力作用,向中间凹陷。在盆地下方30 km以下存在较为明显的M型密度异常特征,深部界面呈中间上隆的“背斜”状,发育大量相互错段的断裂,表明共和盆地与青海湖盆地及其周缘地区表现为多期挤压变形的结构特征,具有压陷盆地的属性。

2号剖面位于共和盆地中心,NW-SE向贯穿整个共和盆地。重力异常归一化总梯度反演结果显示,共

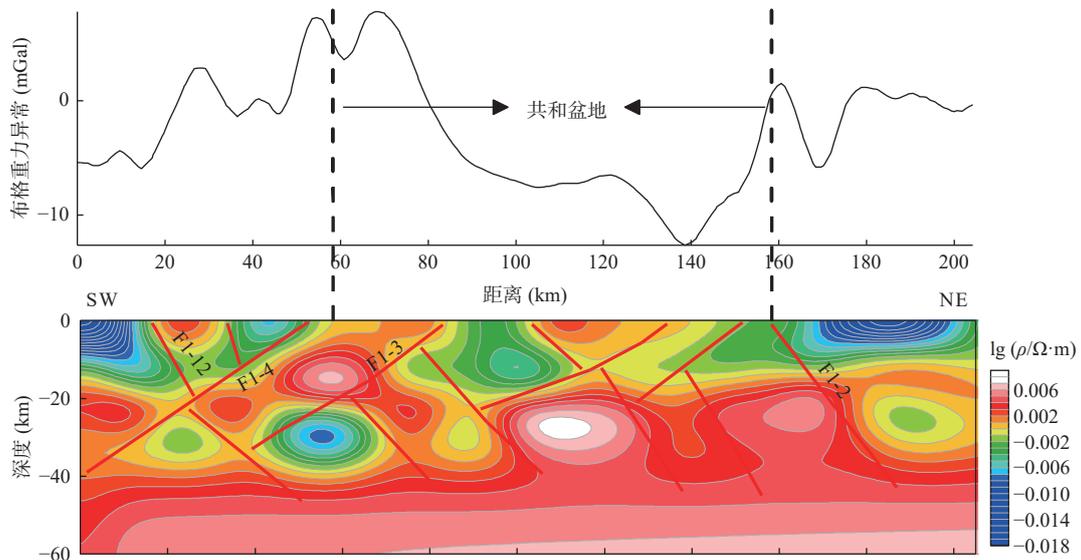


图8 重力异常1号剖面归一化总梯度反演解译结果

Fig. 8 Interpretation results of gravity profile 1 from normalized total gradient inversion

和盆地 NW-SE 向中部地区深部具有明显隆起特征, 呈现“两端深、中间浅”密度特征(图 9), 与 1 号剖面反演结果一致, 共同揭示了在共和盆地中部地区存在较为明显的深部隆起。以断裂 F1-15 为界, 共和盆地西部和东部在密度结构具有较大差异, 西部存在明显的深部界面隆起特征, 但整体结构模糊, 密度较大; 东部则呈现凹型特征, 密度自浅到深逐步增大, 深部结构较为清晰。据此推测共和盆地深部存在明显的地幔物质上涌, 深部热量通过 F1-15 深大断裂传导到浅部, 为共和盆地干热岩提供热源物质和热量通道。

为了进行东西盆地深部组成结构的对比, 在研究区自西向东依次提取 3~5 号剖面。重力异常归一化总梯度反演结果显示, 共和盆地东盆地和西盆地均存在自青海南山及贵南南山向盆地的逆冲推覆构造, 但深部地质结构存在明显差异, 西盆地地质体挤压变形程度强于东盆地(图 10); 东部盆地地质体受构造作用影响表现为更为破碎(图 11、图 12), 呈不同形态的“构造块体”, 断裂构造更为发育, 大量的断裂构造通道将深部的热源物质和热量带到了盆地浅部, 为共和盆地提供干热岩成藏条件。相对于盆地西部, 共和盆地

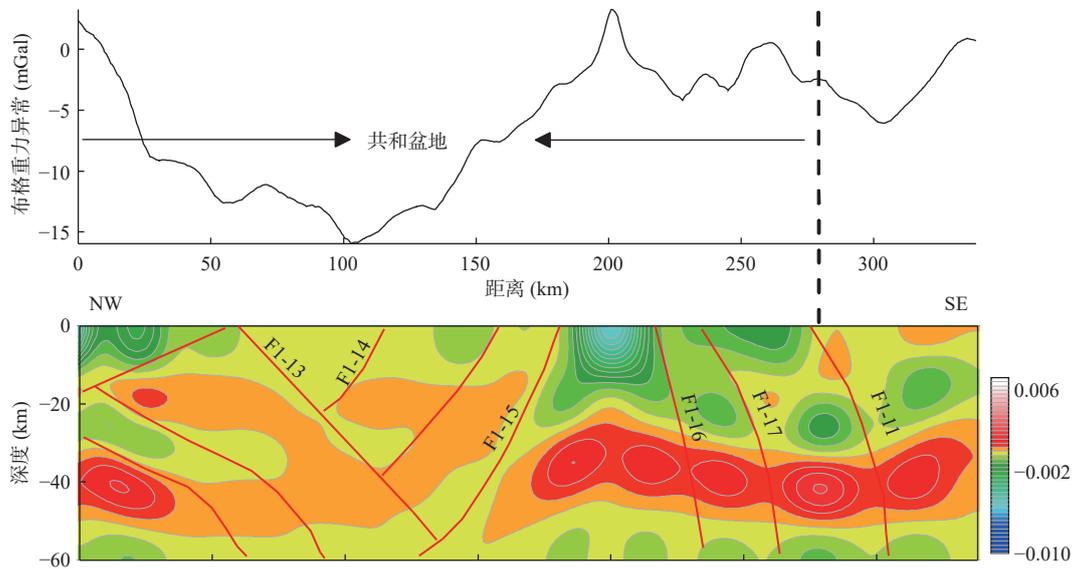


图 9 重力异常 2 号剖面归一化总梯度反演解译结果

Fig. 9 Interpretation results of gravity profile 2 from normalized total gradient inversion

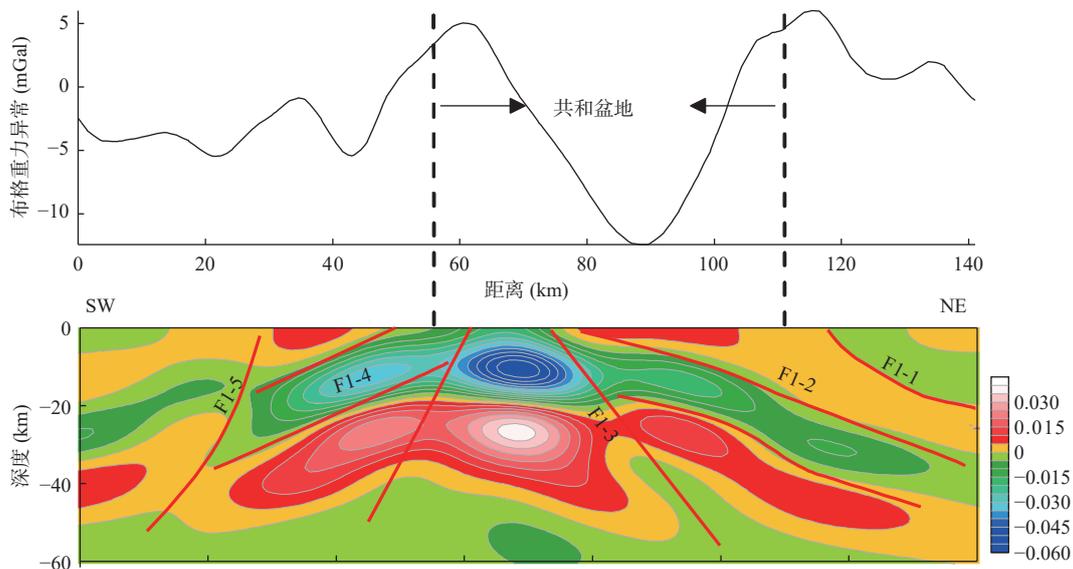


图 10 重力异常 3 号剖面归一化总梯度反演解译结果

Fig. 10 Interpretation results of gravity profile 3 from normalized total gradient inversion

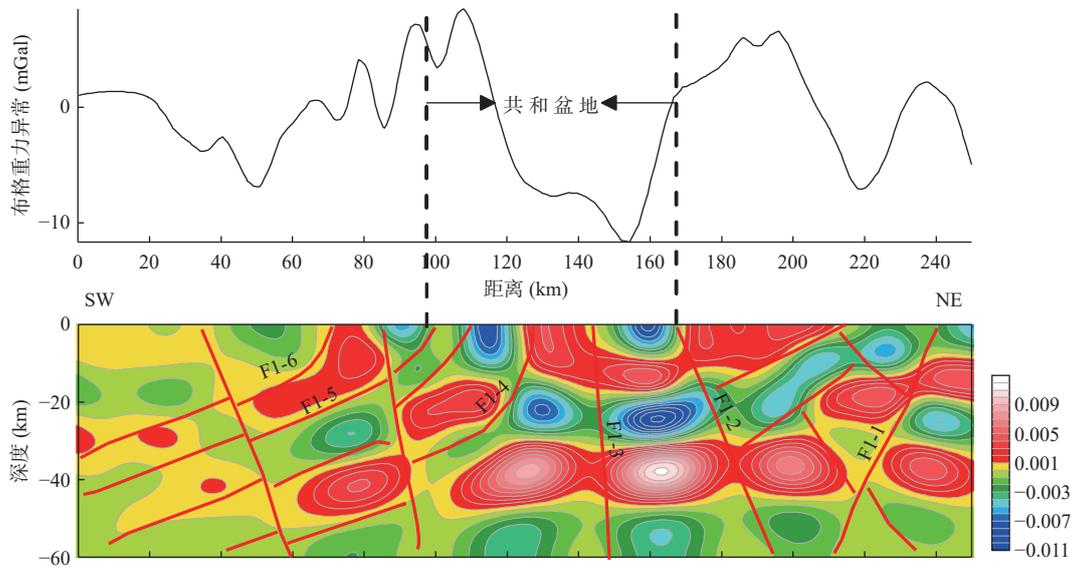


图11 重力异常4号剖面归一化总梯度反演解译结果

Fig. 11 Interpretation results of gravity profile 4 from normalized total gradient inversion

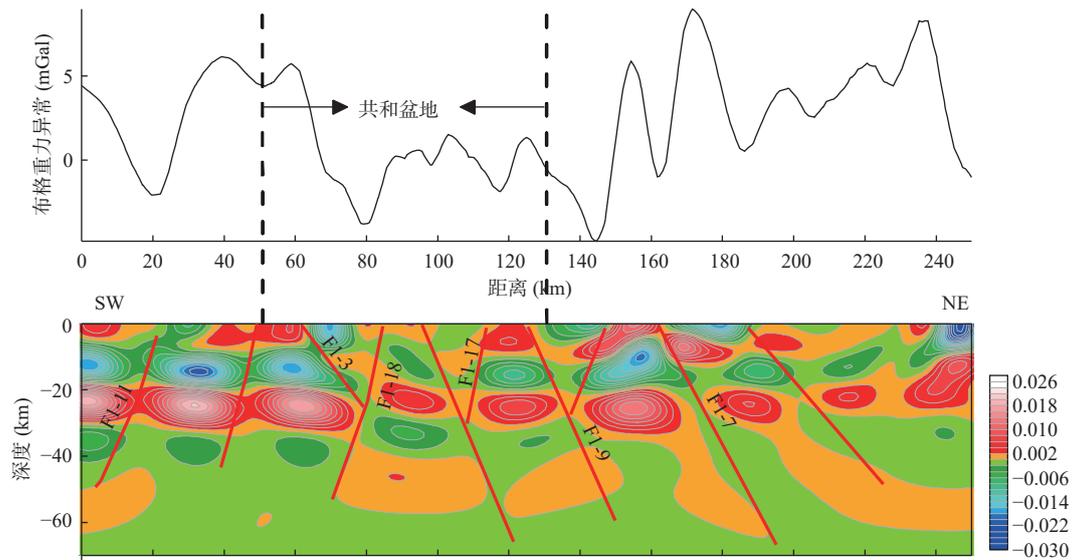


图12 重力异常5号剖面归一化总梯度反演解译结果

Fig. 12 Interpretation results of gravity profile 5 from normalized total gradient inversion

东部更具备干热岩成藏条件。

综上所述,基于超低频大地电磁测深剖面及重力归一化总梯度反演结果表明,盆地深部存在明显的地幔物质上涌现象,隆升幅度约30 km,可能是地幔物质向上运移并加热和侵蚀岩石圈底部,导致岩石圈底部发生熔融减薄,同时共和盆地东部大量发育深大断裂,将深部的热源物质和热量带到了盆地浅部,为共和盆地提供干热岩成藏条件。因此,认为共和盆地干热岩热源以地幔热流传导供热和壳内部分熔融层供热为主,放射性元素衰变生热为辅,并且盆地东部相较于

盆地西部更具备干热岩成藏条件。

4 结论

(1)共和盆地及其周缘识别出了断裂20条,其中有11条断裂为前人已经识别的断裂(F1-1~F1-11),9条断裂为本次识别的隐伏断裂(F1-12~F1-20)。共和盆地及其周缘断裂走向以NW和NWW向为主,其次为NNE、NE向。在识别出的断裂构造中,NWW向断裂(F1-1~F1-4)与NNE向断裂(F1-13~F1-15)规模大、

延伸较长,控制着盆地的构造和演化,对构造分区、岩浆活动、变质程度等有明显的控制作用,可能对深部岩体的形成和热流上涌有一定的控制作用。

(2)共和盆地在0~20 km存在一个水平带状展布的高阻异常体,该异常在共和盆地下方存在明显的错断;深部20~60 km具有明显的隆起特征,密度和电性均呈现“两端低、中间高”的“M”型结构特征,推测盆地深部存在地幔物质上涌或已固化的上涌地幔,隆升幅度约30 km,可能是地幔物质向上运移并加热和侵蚀岩石圈底部,导致岩石圈底部发生熔融减薄。

(3)以F1-15断裂为界,盆地东部和西部均受到青藏高原隆升及向北挤压的影响,存在来自青海南山及贵南南山向盆地的逆冲推覆构造,但深部密度结构特征存在明显差异。西部盆地地质体挤压变形程度明显强于东盆地,西部盆地深部地质体密度结构呈“八”字型特征,表现为压陷盆地的特征;东盆地地质体受构造作用影响表现为更为破碎,呈不同形态的“构造块体”,断裂更为发育。

(4)基于超低频大地电磁测深剖面及重力归一化总梯度反演结果,认为共和盆地地幔物质向上运移并加热和侵蚀岩石圈底部,导致岩石圈底部发生熔融减薄。盆地东部大量发育深大断裂,将深部的热源物质和热量带到了盆地浅部,为共和盆地提供干热岩成藏条件。因此,认为共和盆地干热岩热源以地幔热流传导供热和壳内部分熔融层供热为主,放射性元素衰变生热为辅,盆地东部相较于西部更具备干热岩成藏条件。

参考文献(References):

- 白奋飞,魏登峰,韩伟,等.鄂尔多斯盆地延长油气区地热资源赋存特征及开发利用建议[J].西北地质,2023,56(6): 329-339.
- BAI Fenfei, WEI Dengfeng, HAN Wei, et al. Occurrence Characteristics and Exploitation of Geothermal Resources in Yanchang Oil and Gas Area of Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 329-339.
- 杜威.几种位场数据处理方法的研究及在青海共和地区干热岩勘探中的应用[D].吉林:吉林大学,2018.
- DU Wei. The research of several techniques in the potential-field data processing and application on dry hot rock exploration in Gonghe Qinghai[D]. Jilin: Jilin University, 2018.
- 冯治汉,刘宽厚,郭培虹,等.西北地区重磁场特征及其应用研究[M].武汉:中国地质大学出版社,2018.
- FENG Zhihan, LIU Kuanhou, GUO Peihong, et al. Characteristics of gravity and magnetic field and their application in Northwest China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
- 郭灿灿,张凤旭,王彦国,等.基于泰勒级数迭代的重力归一化总梯度[J].世界地质,2012,31(04): 824-830.
- GUO Cancan, ZHANG Fengxu, WANG Yanguo, et al. Calculating normalized full gradient of gravity anomalies using Taylor series iteration[J]. *Global Geology*, 2012, 31(04): 824-830.
- 黄磊,侯泽明,韩萱,等.基于二维NLGC反演的水文地质结构辨识研究[J].西北地质,2022,55(1): 249-254.
- HUANG Lei, HOU Zeming, HAN Xuan, et al. Study on Aquifer Structure Identification based on 2D Magnetotelluric NLGC Inversion[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(1): 249-254.
- 郭森,马致远,李劲彬,等.我国地热供暖的现状与展望[J].西北地质,2015,48(4): 204-209.
- GUO Sen, MA Zhiyuan, LI Jinbin, et al. Status and Prospects of Geothermal Heating in China[J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48(4): 204-209.
- 何涛,王万银,黄金明,等.正则化方法在比值类位场边缘识别方法中的研究[J].物探与化探,2019,43(2): 308-319.
- HE Tao, WANG Wanyin, HUANG Jinming, et al. The research of the regularization method in the ratio methods of edge recognition by potential field[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(2): 308-319.
- 侯增谦,许博,郑远川,等.地幔通道流:青藏高原大规模生长的深部机制[J].科学通报,2021,66: 2671-2690.
- HOU Zengqian, XU Bo, ZHENG Yuanchuan, et al. Mante low: The deepmechanism of large-scale growth in Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66: 2671-2690.
- 纪晓琳,王万银,邱之云.最小曲率位场分离方法研究[J].地球物理学报,2015,58(03): 1042-1058.
- JI Xiaolin, WANG Wanyin, QIU Zhiyun. The research to the minimum curvature technique for potential field data separation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(03): 1042-1058.
- 鲁宝亮,马涛,熊盛青,等.基于重磁异常相关分析的场源位置及属性识别方法[J].地球物理学报,2020,63(4): 1663-1674.
- LU Baoliang, MA Tao, XIONG Shengqing, et al. A new recognition method for source locations and attributes based on correlation analysis of gravity and magnetic anomalies[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(4): 1663-1674.
- 刘春雷,杨会峰,曹文庚.利用环境同位素识别共和盆地地下水

- 补给特征及其环境指示意义[J]. 西北地质, 2022, 55(2): 227-236.
- LIU Chunlei, YANG Huifeng, CAO Wengeng. Identify Groundwater Recharge Characteristics and Environmental Implications in Gonghe Basin Using Environmental Isotopes in Gonghe Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(2): 227-236.
- 毛翔, 国殿斌, 罗璐, 等. 世界干热岩地热资源开发进展与地质背景分析[J]. 地质论评, 2019, 65(06): 1462-1472.
- MAO Xiang, GUO Dianbin, LUO Lu, et al. The global development process of hot dry rock(enhanced geothermal system) and its geological background[J]. *Geological Review*, 2019, 65(06): 1462-1472.
- 沈显杰, 张文仁, 杨淑贞, 等. 青藏高原南北地壳幔热结构差异的大地热流证据[J]. 中国地质科学院院报, 1990, 21(02): 203-214.
- SHEN Xianjie, ZHANG Wenren, YANG Shuzhen, et al. Heat flow evidence for the differentiated crust-mantle thermal structures of the northern and southern terranes of the Qinghai-Xizang plateau[J]. *Bulletin of The Chinese Academy of Geological Sciences*, 1990, 21(02): 203-214.
- 沈显杰, 朱元清, 石耀霖. 青藏热流与构造热演化模型研究[J]. 中国科学(B辑 化学 生命科学 地学), 1992(03): 311-321.
- SHEN Xianjie, ZHU Yuanqing, SHI Yaolin. Study on the model of heat flow and tectonic thermal evolution in Qinghai-Tibet[J]. *Science in China (Series B Chemical Life Sciences Geoscience)*, 1992(03): 311-321.
- 石宝颐, 张峻太. 论秦—昆构造带的共和“缺口”[J]. 青海地质, 1982, (3): 20-29.
- SHI Baoyi, ZHANG Juntao. On the Republic "Gap" in Qin-Kun Structural Belt[J]. *Geology of Qinghai*, 1982, (3): 20-29.
- 苏超, 杜晓娟, 马国庆, 等. 几何平均重力归一化总梯度在山东招远金矿采空区的应用[J]. 世界地质, 2014, 33(4): 889-894.
- SU Chao, DU Xiaojuan, MA Guoqing, et al. Application of normalized full gradient method with geometric mean in mined-out area of Zhaoyuan gold deposit in Shandong[J]. *Global Geology*, 2014, 33(4): 889-894.
- 孙知新, 李百祥, 王志林. 青海共和盆地存在干热岩可能性探讨[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(02): 119-124+129.
- SUN Zhixin, LI Baixiang, WANG Zhilin. Exploration of the possibility of hot dry rock occurring in the Qinghai Gonghe Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(02): 119-124+129.
- 唐显春, 王贵玲, 马岩, 等. 青海共和盆地地热资源热源机制与聚热模式[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 2052-2065.
- TANG Xianchun, WANG Guiling, MA Yan, et al. Geological model of heat source and accumulation for geothermal anomalies in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7): 2052-2065.
- 王斌, 李百祥, 马新华. 青海共和—贵德干热岩勘查评价中热储温度与深度预测[J]. 地下水, 2015, 37(3): 28-30, 72.
- WANG Bin, LI Baixiang, MA Xinhua. Prediction of heat storage temperature and depth in Gonghe-Guide dry hot rock exploration and evaluation in Qinghai Province[J]. *Ground Water*, 2015, 37(3): 28-30, 72.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 2017, 38(04): 449-450+134+451-459.
- WANG Guiling, ZHANG We, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of Geothermal Resources Potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(04): 449-450+134+451-459.
- 王洪, 王成虎, 高桂云, 等. 青海共和盆地地应力状态与断层稳定性分析[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(1): 123-133.
- WANG Hong, WANG Chenghu, GAO Guiyun. The State of the In-situ Stress and Fault Slide Evaluation of Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2021, 16(1): 123-133.
- 王坤. 干热岩勘查中大地电磁测深正反演及其应用研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2019.
- WANG Kun. Research on Simulation and Inversion of Magnetotelluric for Hot Dry Rock Exploration and Its Application[D]. Jilin: Jilin University, 2019.
- 许天福, 胡子旭, 李胜涛, 等. 增强型地热系统: 国际研究进展与我国研究现状[J]. 地质学报, 2018, 92(09): 1936-1947.
- XU Tianfu, HU Zixu, LI Shengtao, et al. Enhanced Geothermal System: International Progresses and Research Status of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(09): 1936-1947.
- 薛建球, 甘斌, 李百祥, 等. 青海共和—贵德盆地增强型地热系统(干热岩)地质—地球物理特征[J]. 物探与化探, 2013, 37(1): 35-41.
- XUE Jianqiu, GAN Bing, LI Baixiang, et al. Geological-geophysical characteristics of enhanced geothermal systems(hot dry rocks) in Gonghe-Guide basin[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2013, 37(1): 35-41.
- 严维德, 王焰新, 高学忠, 等. 共和盆地地热能分布特征与聚集机制分析[J]. 西北地质, 2013, 46(4): 223-230.
- YAN Weide, GAO Xuezhong, GAO Xuezhong, et al. Distribution and aggregation mechanism of geothermal energy in Gonghe basin[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(4): 223-230.
- 员晓瑞, 陈希节, 蔡志慧, 等. 青海共和盆地东北部干热岩岩浆侵位结晶条件及深部结构初探[J]. 岩石学报, 2020, 36(10): 3171-3191.

- YUN Xiaorun, CHEN Xijie, CAI Zhihui, et al. Preliminary study on magmatic emplacement and crystallization conditions and deep structure of hot dry rock in the northeastern Gonghe basin, Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(10): 3171–3191.
- 张超, 张盛生, 李胜涛, 等. 共和盆地恰卜恰地热区现今地热特征[J]. *地球物理报*, 2018, 61(11): 4545–4557.
- ZHANG Chao, ZHANG Shengsheng, LI Shentao, et al. Geothermal characteristics of the Qiabugia geothermal area in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(11): 4545–4557.
- 张森琦, 付雷, 张杨, 等. 基于高精度航磁数据的共和盆地干热岩勘查目标靶区圈定. *天然气工业*, 2020, 40(9): 156–169.
- ZHANG Senqi, FU Lei, ZHANG Yang, et al. Delineation of hot dry rock exploration target area in the Gonghe Basin based on high-precision aeromagnetic data[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(9): 156–169.
- 张森琦, 严维德, 黎敦朋等. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. *中国地质*, 2018, 45(6): 1087–1102.
- ZHANG Senqi, YAN Weide, LI Dunpeng, et al. Characteristics of geothermal geology of the Qiabugia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 2018, 45(6): 1087–1102.
- 张雪亭, 杨生德, 杨站君. 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, 2007.
- 赵维俊, 颜廷杰, 高智超. 大地电磁非线性共轭梯度反演试验—以内蒙古扎鲁特盆地数据为例[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(05): 2128–2135.
- ZHAO Weijun, YAN Tingjie, GAO Zhichao. Magnetotelluric nonlinear conjugate gradient inversion experiments: an example from data acquired in the Jarud Basin, Inner Mongolia, China[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(05): 2128–2135.
- 张昆, 魏文博, 吕庆田, 等. 井地大地电磁非线性共轭梯度二维反演研究[J]. *地质学报*, 2011, 85(05): 915–924.
- ZHANG Kun, WEI Wenbo, LV Qingtian. The study of 2-D nonlinear conjugate gradients inversion of borehole-to-surface magnetotelluric[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(05): 915–924.
- 赵振明, 刘百箴. 对龙羊峡形成的初步认识[J]. *西北地质*, 2005, 38(2): 24–32.
- ZHAO Zhenming, LIU Baichi. The primary perspective of Longyang Gorge formation[J]. *Northwestern Geology*, 2005, 38(2): 24–32.
- Chen D, Wyborn D. Habanero field tests in the cooper Basin, Australia: A proof of concept for EGS[J]. *Transactions Geothermal Resources Council*, 2009, 33: 140–145.
- Feng Y F, Zhang X X, Zhaang B, et al. The geothermal formation mechanism in the Gonghe basin: Discussion and analysis from the geological background[J]. *China Geology*, 2018, 1: 331–345.
- Gao J, Zhang H J, Zhang H P, et al. Three-dimensional magnetotelluric imaging of the geothermal system beneath the Gonghe basin, Northeast Tibetan Plateau[J]. *Geothermic*, 2020, 76: 15–25.
- Springer M. Interpretation of heatflow density in the Central Andes[J]. *Tectonophysics*, 1999, 306(3-4): 377–395.
- Wang W Y, Pan Y, Qiu Z Y. A new edge recognition technology based on the normalized vertical derivative of the total horizontal derivative for potential field data[J]. *Applied Geophysics*, 2009, 6(3): 226–233.
- Zhu Y J, Wang W Y, Farquharson C G, et al. Normalized vertical derivatives in the edge enhancement of maximum-edge-recognition methods in potential fields[J]. *Geophysics*, 2021, 86(4): G23–G34.