

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.094>



# 共和盆地壳内部分熔融层存在的地球物理证据与干热岩资源区域性热源分析

张森琦<sup>1</sup>, 李旭峰<sup>1</sup>, 宋健<sup>1\*</sup>, 文冬光<sup>1</sup>, 李志伟<sup>2</sup>, 黎敦朋<sup>3</sup>, 程正璞<sup>1</sup>, 付雷<sup>1</sup>,  
张林友<sup>1</sup>, 冯庆达<sup>1</sup>, 杨涛<sup>1</sup>, 牛兆轩<sup>1</sup>

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. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 湖北武汉 430077
3. 福州大学紫金矿业学院, 福建福州 350116

**摘要:** 新生代以来, 共和盆地及其周缘造山带无火山、岩浆活动, 印支期隐伏花岗岩体岩浆余热与放射性元素衰变生热等难以构成共和盆地干热岩资源的主要热源, 而共和盆地又为一高温地热异常盆地。目前已基本探明了共和县恰卜恰与贵德县热水泉干热岩体 2 处, 圈定出干热岩勘查目标靶区 16 处。区域重力和区域航磁调查、区域天然地震成像、盆地尺度天然地震背景噪声层析成像勘查, 以及超高分辨率重力异常、电阻率与 Rayleigh 波群相速度线性反演结果均表明共和盆地地下发育有壳内部分熔融层, 进而构成地壳内环境、高热流区共和盆地干热岩资源的区域性热源。盆地尺度 MT 勘查结果表明, 共和盆地西盆地壳内部分熔融层埋深 15~35 km, 东西向长约 41 km, 南北向宽约 34 km, 厚度 2~12 km。综合分析认为, 该部分熔融层熔融程度最高可达 4%~7%, 15 km 深处温度约为 574 °C, 主体位于贵南南山推覆体系与共和准推覆体系深部主拆离滑脱推覆界面之下, 兴海大型复合推覆体系主拆离滑脱推覆界面之上。晚近地质时期深构造、多层次、近水平展布的韧性拆离滑脱推覆构造界面的连续动态剪切摩擦生热, 可能是部分熔融层形成的主要因素。

**关键词:** 低速高导层; 部分熔融层; 干热岩; 热源; 共和盆地; 构造。

中图分类号: P314; P548

文章编号: 1000-2383(2021)04-1416-21

收稿日期: 2020-03-16

## Analysis on Geophysical Evidence for Existence of Partial Melting Layer in Crust and Regional Heat Source Mechanism for Hot Dry Rock Resources of Gonghe Basin

Zhang Senqi<sup>1</sup>, Li Xufeng<sup>1</sup>, Song Jian<sup>1\*</sup>, Wen Dongguang<sup>1</sup>, Li Zhiwei<sup>2</sup>, Li Dunpeng<sup>3</sup>, Cheng Zhengpu<sup>1</sup>,  
Fu Lei<sup>1</sup>, Zhang Linyou<sup>1</sup>, Feng Qingda<sup>1</sup>, Yang Tao<sup>1</sup>, Niu Zhaoxuan<sup>1</sup>

1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, China
2. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China
3. School of Zijin Mine, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(No.2018YFB1501801); 中国地质调查局地质调查项目(No.DD20190131)。

**作者简介:** 张森琦(1962-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事地热地质调查评价与研究工作。ORCID: 0000-0002-4243-5972。

E-mail: senqizhang@126.com

\* 通讯作者: 宋健, E-mail: songjian5596@126.com

**引用格式:** 张森琦, 李旭峰, 宋健, 等, 2021. 共和盆地壳内部分熔融层存在的地球物理证据与干热岩资源区域性热源分析. 地球科学, 46(4): 1416-1436.

**Abstract:** The volcanic magmatic activity has not been observed in the Gonghe basin and its surrounding orogenic belts since the Cenozoic. Heat generation from the magma of concealed granite body during the Indosinian period and the radioactive elements within the stratum are difficult to form the heat source of hot dry rock resources in the Gonghe basin. However, it has been widely recognized that this basin is a high-temperature geothermal abnormal basin. Nowadays, two hot dry rock masses were verified in the Qiabuqia of the Gonghe County and the Reshuiquan of the Guide County basically. Sixteen target areas of the hot dry rock exploration were also delineated in this region. Evidences from the regional gravity and aeromagnetic survey, regional natural seismic imaging profile, tomographic exploration of natural seismic background noise at basin scale, ultra-high resolution gravity anomalies, as well as linear inversion of resistivity and phase velocity of Rayleigh wave group all show that partial melting layer was developed in the crust of the Gonghe basin. This partial melting layer, located in the inner plate environment and characterized by high heat flow, constitutes the regional heat source of the hot dry rock resources in the Gonghe basin. The MT exploration reflects that the partial melting layer within the crust of the western basin of the Gonghe basin is characterized by a depth of 15–35 km, length of about 41 km and 34 km in east-west and north-south directions respectively, thickness of 2–12 km. Comprehensive analysis shows that this partial melting layer, marked by a melting degree of 4%–7% and temperature of about 574 °C at 15 km depth, is mainly located under the main detachment nappe interface between the nappe systems of the Guinan Nanshan and Gonghe, and above the main detachment nappe interface of Xinghai large composite nappe system. Heat generation from the continuous dynamic shear friction at the deep structural, multi-level, and near horizontal detachment nappe interface during the Neoid period is the main factor for the formation of the partial melting layer.

**Key words:** low velocity-high conductivity layer; partial melting layer; hot dry rock; heat source; Gonghe basin; tectonics.

近年来,采用地质—地热地质调查、综合地球物理勘查和钻探等手段,基本探明了共和县恰卜恰干热岩体和贵德县热水泉干热岩体2处,同时在共和盆地及其外围地区圈定出干热岩勘查目标靶区16处(图1)。随着干热岩勘查开发工作的不断深入,干热岩资源的区域性热源就成为迫切需要解决的关键基础性地质—地热地质问题之一。

一般而言,地热热源是地热资源热能的直接补给源。高温地热田的热源主要为近代至现代火山活动,以及地壳浅部的、时代不早于上新世的岩浆侵入体;中低温地热田的热源一般与火山、岩浆活动无直接关系,其热能多数来源于地壳地温梯度的加热,也可能是高焓地热流体的副产品,或者是高温地热系统的衰老阶段(黄宗理,2005)。

区域地质调查表明,新生代以来共和盆地及其周缘造山带无火山、岩浆活动;实钻结果表明,恰卜恰干热岩体由中晚三叠世花岗岩构成,上覆缺失晚三叠世—古近纪沉积记录,新近纪地层直接侵蚀不整合覆盖其上,意味着该岩体在地质历史时期曾长期暴露于地表遭受剥蚀,岩浆余热或早已散失殆尽;钻孔岩心放射性元素生热率平均为 $4.43 \mu\text{W}/\text{m}^3$ ,略高于福建漳州花岗岩放射性元素生热率平均值的 $4.22 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (杨立中等,2016)和全球中新世代花岗岩放射性元素生热率平均值的 $3.09 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (Artemieva *et al.*, 2017),但远低于澳大利亚库珀盆地干热岩产地所在地区基底花岗岩高达7~

$10 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 的放射性元素生热率(Mclaren *et al.*, 2003; Beardsmore, 2004)。因此,放射性元素衰变生热难以构成恰卜恰干热岩体的主要热源。同时,共和盆地又为一高温地热异常盆地(张超等,2018)。

为破解共和盆地干热岩资源的区域性主要热源,本文基于地质—地热地质与综合地球物理勘查资料,依低速高导层→壳内部分熔融层→深沟相、多层次、近水平韧性拆离滑脱推覆构造界面动态连续剪切摩擦生热诱发壳内部分熔融层形成的研究主线,综合分析共和盆地壳内部分熔融层存在的主要证据及其与干热岩资源区域性热源的关系。

## 1 区域地质背景

### 1.1 地质概况

共和盆地地处青藏高原北东缘,总面积 $1.52 \times 10^4 \text{km}^2$ ,为青海省第三大盆地。通常将龙羊峡水库北西部分称西盆地;南东部分称东盆地。区域上,该盆地位于西秦岭造山带北西端,北东以宗务隆山南缘—青海南山南缘断裂为界,北东为宗务隆—青海南山构造带;南西以东昆南断裂为界,南西为南昆仑结合带;西以赛什塘—兴海蛇绿混杂岩带为界与柴达木东部构造带过渡(蒋荣宝等,2008;潘桂棠等,2009;郭安林等,2009)。

共和盆地周缘造山带出露的地层主要有金水口岩群( $\text{Pt}_1\text{J}$ )、石炭纪—二叠纪甘家组( $\text{CP}_2\text{gj}$ )、早中三叠世隆务河组( $\text{T}_{1-2}\text{l}$ )、中三叠世古浪堤组



( $T_2g$ )和晚三叠世鄂拉山组( $T_3e$ ),印支期花岗岩侵入其中,并构成共和盆地的基底.基底之上发育的沉积盖层主要有早中侏罗世羊曲组( $J_{1-2}yq$ )、古近纪一新近纪西宁组( $EN_{1x}$ )、中新世咸水河组( $N_{1x}$ )、上新世临夏组( $N_2l$ )、早中更新世共和组( $Q_{1-2}^{al-g}$ )和第四纪其他地层(图1).

共和盆地东北部青海南山—瓦里关山发育的中三叠世黑马河花岗岩体、江西沟花岗岩体、沟后岩浆杂岩体和党家寺花岗岩体,兼具岛弧花岗岩和同碰撞花岗岩特征,形成于俯冲阶段的末期(张永明,2017).南部东、西两侧发育的晚三叠世温泉岩体,同仁岩体形成于后碰撞期,显示地壳加厚后岩石圈拆沉作用的地球动力学背景(张宏飞等,2006).早侏罗世花岗岩呈岩株状产出,仅见于共和盆地切吉西和同德盆地南等地,属后碰撞期花岗

岩.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构成了共和盆地基底的主要组成部分.

### 1.2 地壳结构

共和盆地上地壳主要由沉积地层和结晶基底(G)组成,以脆性变形为主,推覆构造占主导.中地壳为花岗质层,下地壳为麻粒岩层,中、下地壳均以韧性和塑性流变构造变形为主,总体具“厚壳薄幔”型壳幔结构(张雪亭等,2007).

据玛多—共和—雅布赖深地震广角反射/折射探测(深地震探测,DSS)结果,上地壳底界面( $C1$ )在共和盆地内缺失,但在盆地北东及南西两侧深度约为15 km.中地壳( $C1$ 与 $C3$ 界面间)底界埋深29~

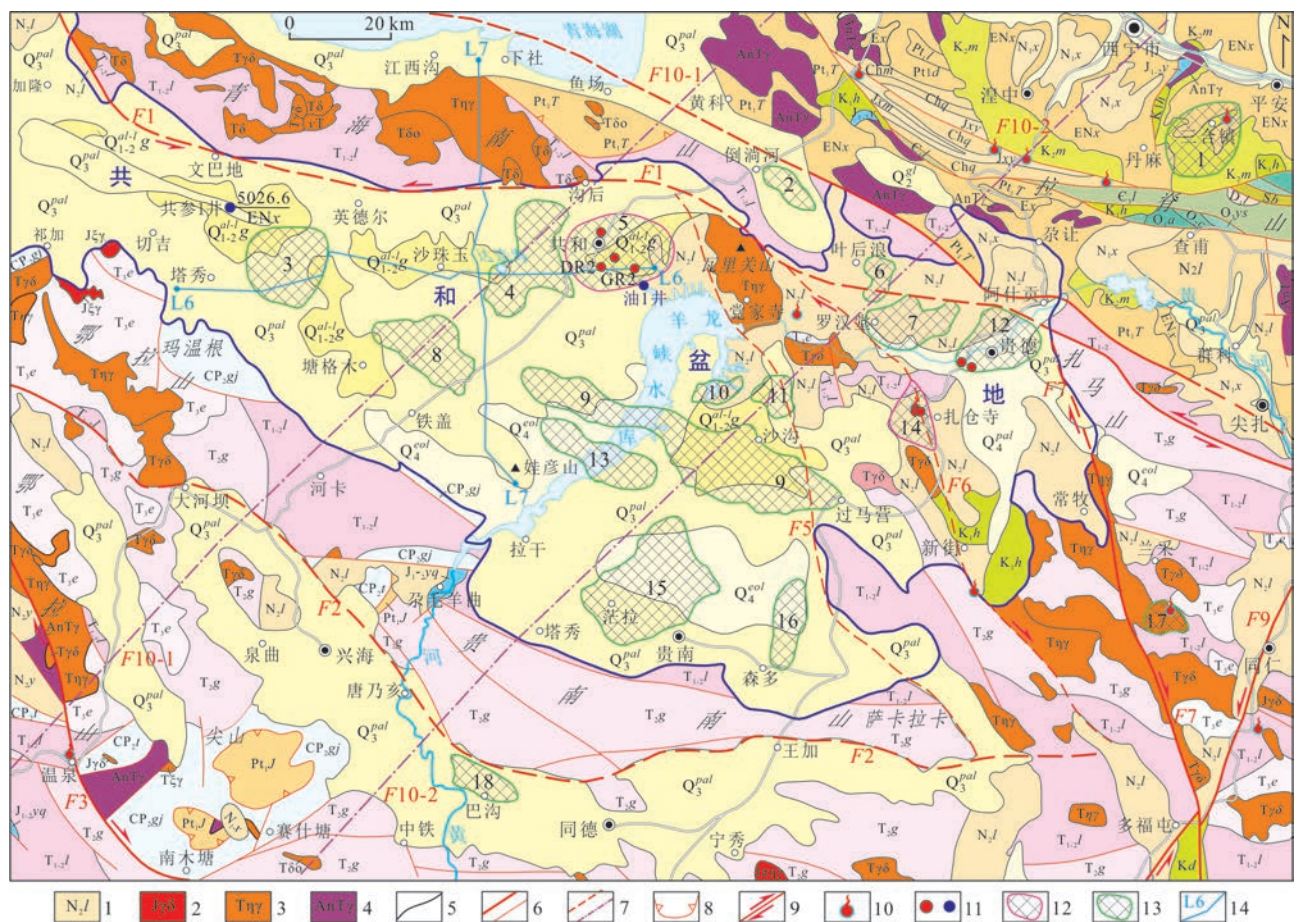


图1 共和盆地及周缘造山带区域地质图与隐伏干热岩勘查开发目标靶区分布

Fig.1 Regional geological map and target areas of concealed hot dry rock exploration and development within the Gonghe basin and its surrounding orogenic belt

1. 地层代号; 2. 燕山期侵入岩; 3. 印支期侵入岩; 4. 前印支期侵入岩; 5. 地质界线; 6. 区域性断裂和一般断裂; 7. 地质(红)与地球物理(紫)推断的隐伏断裂; 8. 推覆构造/飞来峰; 9. 断层位移方向; 10. 温泉; 11. 地热及石油勘探孔; 12. 干热岩开发目标靶区; 13. 干热岩勘查目标靶区; 14. MT 勘查线

31 km,下地壳(C3与Moho之间)底界/Moho埋深48~51 km(图2).共和盆地中心Moho呈上隆的“背斜”状,埋藏相对较浅;北东及南西两侧下凹,埋藏稍深.地壳所有的地震相均具较低的视速度,中下地壳具低速塑性变形特征(Jia *et al.*, 2019).

### 1.3 陆内造山阶段的起始

共和盆地北东侧的宗务隆—青海南山构造带,晚泥盆世—二叠纪中期为裂解和洋壳扩张阶段,晚二叠世—中三叠世为洋壳向南俯冲—碰撞造山阶段,晚三叠世—新生代为造山期后和陆内造山阶段(郭安林等, 2009; 彭渊, 2015);南西侧的阿尼玛卿蛇绿混杂岩带代表的昆南洋扩张时限为早泥盆世—早二叠世,俯冲于早中二叠世,阿尼玛卿山一带碰撞于中晚三叠世,晚三叠世—新生代为造山期和陆内造山阶段(张雪亭等, 2007);西侧的赛什塘—兴海蛇绿混杂岩带,泥盆纪早期—晚古生代中晚期为裂谷—扩张期,晚古生代末—早中三叠世为总体向西的斜向俯冲—碰撞期,晚三叠世—新生代亦为造山期后和陆内造山阶段(孙延贵, 2004).因此,共和盆地前身所在地区陆内造山阶段起始于晚三叠世或侏罗纪(冯益民等, 2002).

区域上,西秦岭造山带晚三叠世—现今的陆内叠覆造山阶段,以区域性壳内拆离、层圈滑脱—韧

性剪切、逆冲逆掩—推覆等大规模地壳缩短为特征.岩石圈深部发生的后造山拆沉(张宏飞等, 2006)与壳内拆离(冯益民等, 2002)等深部地质作用,开始了区域新地热场的重建与新热源的形成过程.

### 1.4 陆内造山阶段基本构造格架

晚三叠世以来的陆内造山期,共和盆地及周围造山带至少可识别出以下3期主要构造变形.

第1期,晚三叠世—上新世早期,柴北缘构造带与南祁连造山带之间出现强烈的挤压短缩,夹持其间的欧龙布鲁克地块与西秦岭构造带向南东侧向挤出,在青海南山南缘断裂(F1)、哇洪山—温泉断裂(F3)与玛沁—文都弧形断裂(F9)限定的区域内,形成北西收敛,向南东撒开、具厚皮构造性质的扇形兴海大型复合推覆体(冯益民等, 2002; 王二七等, 2009).哇洪山—温泉断裂东侧,该推覆体将北部古元古代金水口岩群(Pt<sub>1</sub>J)基底结晶变质杂岩脱离基底,以飞来峰的形式向南推覆于上新世早期及其以前的地层上,而上新世中期地层基本未变形,说明该期逆冲推覆活动的休止时间为上新世早期(陈宣华等, 2010).依主拆离滑脱推覆界面出现在下元古界构造岩片与下伏岩层的接触部位,以及推覆体南端赛什塘地区出露的斜长角闪质糜棱岩、花岗质糜棱岩是中地壳内或中地壳同下地壳之间拆离滑脱的岩石学等证据(冯益民等, 2002)分析,其构造层次为深切中地壳中下部,部分切穿下地壳上部的深构相韧性推覆剪切带(图3).

第2期,中新世至早中更新世(Q<sub>1-2</sub>),限于哇洪山—温泉断裂(F3)与多禾茂断裂(F7)之间的青海南山和贵南南山分别形成由北向南推覆的逆冲推覆体系,前锋带主逆冲推覆断裂分别为青海南山南缘断裂(F1)和贵南南山南缘断裂(F2)(Harkins *et al.*, 2007; Craddock *et al.*, 2010, 2014).山脉尺度的背斜和缩短量意味着主拆离滑脱推覆界面可能为根植于中上地壳相对较深的韧性剪切带.其中,青海南山南缘逆冲推覆断裂向北可能至少延伸到中地壳尺度,滑脱层深度至少约为30 km,浅层次断裂系统向北可能延伸数十千米深;而贵南南山南缘逆冲推覆断裂系统向北延伸到共和盆地下伏相对较浅的滑脱界面(Craddock *et al.*, 2014).

第3期,上新世至全新世(Q<sub>4</sub>),受印度板块持续向北东推挤与阿拉善、鄂尔多斯刚性块体“砥柱”作用的阻挡(图3b),区域上由东向西依次出现六盘

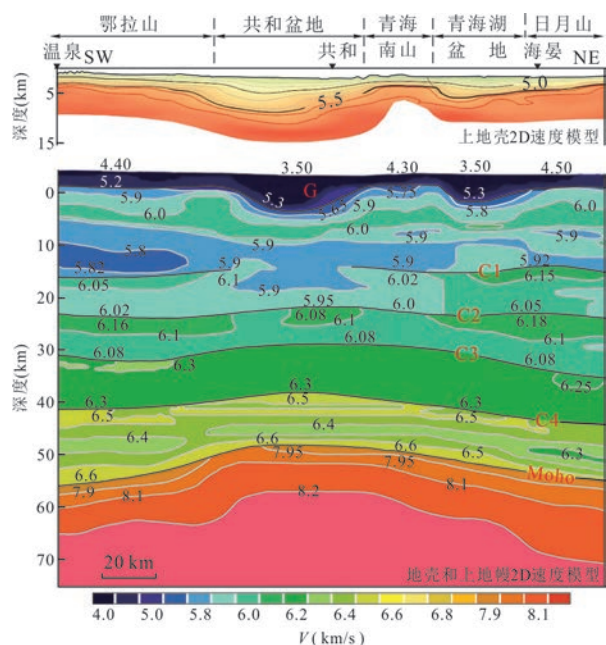


图2 共和盆地DSS剖面速度模型

Fig.2 Velocity model along the DSS profile of Gonghe basin

据 Jia *et al.* (2019) 修改



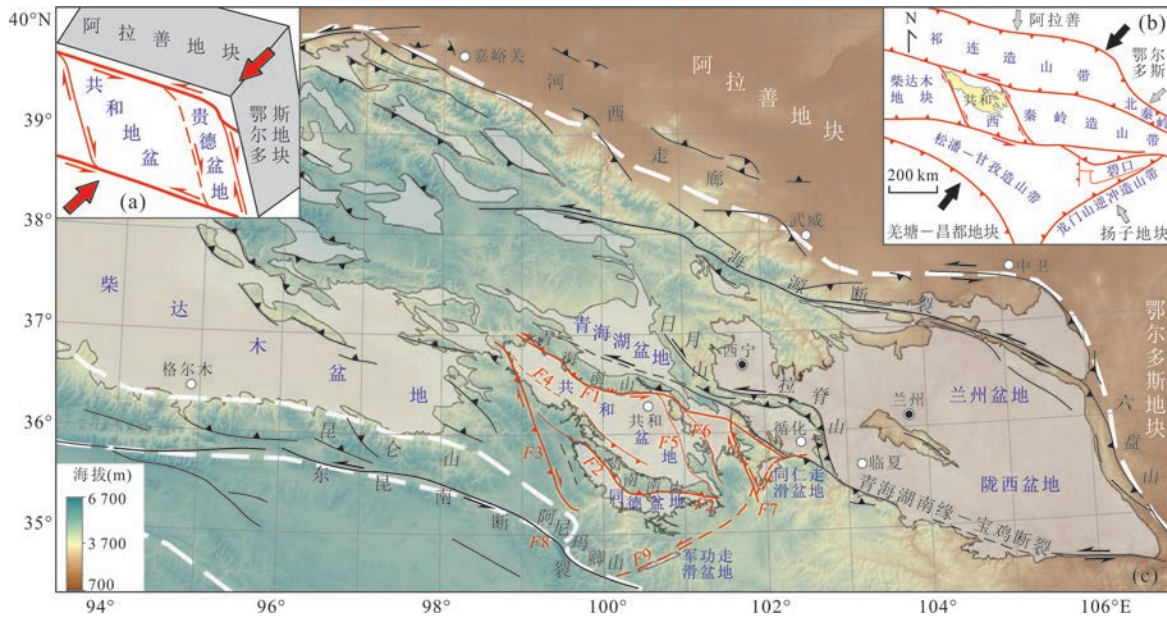


图3 共和盆地及周缘主要第四纪断裂系统

Fig.3 Main Quaternary fault system of the Gonghe basin and its surrounding area

F1. 青海南山南缘断裂; F2. 贵南南山南缘断裂; F3. 哇洪山—温泉断裂; F4. 哇玉香卡—贵南隐伏断裂; F5. 沙沟断裂; F6. 新街断裂; F7. 多禾茂断裂; F8. 东昆南断裂; F9. 马沁—文都弧形断裂. 黑、红色实三角形所在盘为逆断层上盘; 半箭头指示所在盘移移方向. 图 a 据袁道阳等 (2004); 图 b 据张国伟等 (2004); 图 c 据 Craddock *et al.* (2014) 修改

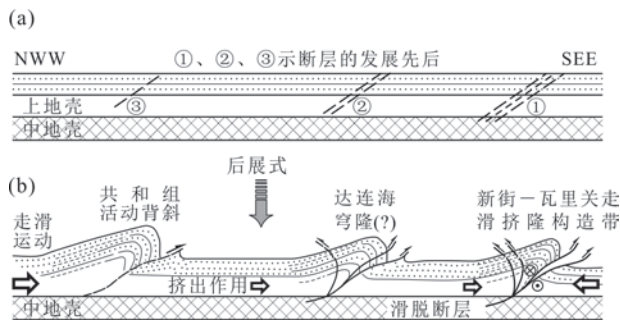


图4 区域NNW向走滑挤隆构造形成机制示意图

Fig.4 Formation mechanism schematic diagram of the regional NNW strike slip extrusion structure  
据侯康明等 (1999) 修改

山、拉脊山、野牛山等由大变小、向东突出的弧形挤出构造. 在 NNW 向主断裂继续左行走滑的限制下, 夹持其间的先存次级 NNW 向断裂带出现右行走滑兼逆冲逆掩活动, 进而呈现出向东滑移、东西向隆拗相间的构造地貌格局 (侯康明等, 1999; 袁道阳等, 2004). 在此动力学与运动学环境下, 形成沙沟断裂 (F5) 与新街断裂 (F6) 限定的 NNW 向新街—瓦里关走滑挤隆构造带、达连海—塘格木—新哲等数条由共和组构成的 NNW 向带状挤隆构造、达连海穹隆与切吉一带的共和组活动背斜等构造组合, 并构成由 SW 向 NE 推覆的共和准推覆体构

造组合 (图 4). 其中, 瓦里关山走滑兼逆冲推覆体构成其前锋带的局部.

## 2 壳内部分熔融层及其与干热岩热源的关系

### 2.1 壳内部分熔融层的基本特征

壳内部分熔融是在地壳一定深度范围内, 地温温度接近或达到岩石固相线时而引起局部熔融作用的产物, 由部分熔融作用所形成的壳内低速层称壳内部分熔融低速层 (杨晓松和金振民, 1998). 壳内低速层的动态成因模型认为, 低速层的存在说明该区域内正在进行着花岗岩化、花岗岩的熔融与区域变质等活动 (Feldman, 1976). 诸多大地构造学家认为壳内低速层是壳内的拆离滑脱面, 而岩石学家则认为它是花岗质岩浆源. 实际上, 两者很可能是兼而有之 (冯益民等, 2002).

实验岩石学、岩石地球物理学、地质学及理论分析表明, 至少在高热流区, 部分熔融作用可能是造成壳内低速高导层的主要原因. 因此, 由部分熔融作用引起的壳内低速高导层称之为壳内部分熔融低速高导层 (顾群等, 1980; 郭新峰等, 1990; Chen *et al.*, 1996; 孔祥儒等, 1996; 滕吉文等, 1997; 杨晓松和金振民, 1998; Wang *et al.*, 2016); 白嘉启等

(2006)称之为部分熔融岩浆囊;杨彧等(2010)称之为酸性熔体囊.基于深熔熔体的地质证据(Grujic *et al.*, 1996; Searle *et al.*, 2006)、数值模型(Beaumont *et al.*, 2001; Jamieson *et al.*, 2011)、大地电磁测深和地震(Nelson *et al.*, 1996; Owens and Zandt, 1997; Unsworth *et al.*, 2005; Le Pape *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012)等方面证据,地壳通道流模型认为,低速—高导电性带(LV-HCZs)就是部分熔融层(Wang *et al.*, 2016).

## 2.2 壳内部分熔融层的判别标志

20世纪80年代以来,中外学者发现青藏高原及周边地区壳内普遍发育有低速高导层.当时的实验表明,当花岗岩类物质未产生物理—化学变化时,其电阻率主要决定于温度和压力;但当岩石开始熔融时,熔融物质在固体颗粒的周围形成连续的导电薄膜,致使岩石的电阻率明显下降(袁学诚等, 1985).顾群等(1980)在圈定华北和西北一些地区的地壳和上地幔内低阻高导层时,将电阻率值确定为 $1\sim 20\ \Omega\cdot\text{m}$ ,具体取值因地而异;袁学诚等(1985)将雅鲁藏布江以北,由花岗岩类物质部分熔融所引起的低阻层电阻率值确定为 $1\sim 7\ \Omega\cdot\text{m}$ ;闫永利等(2012)将低阻高导层的电阻率值确定为小于 $10\ \Omega\cdot\text{m}$ ;Desissa *et al.*(2013)和Didana *et al.*(2014)亦采用小于 $10\ \Omega\cdot\text{m}$ 对低阻高导层进行圈定;He *et al.*(2016)依MT电阻率剖面,圈定西藏玛旁雍地热田壳内部分熔融层时,出于保守,采用的电阻率值为 $1\sim 8\ \Omega\cdot\text{m}$ .据以上研究,本文采用 $1\sim 10\ \Omega\cdot\text{m}$ 作为壳内部分熔融层的圈定依据.

杨晓松和金振民(1998)认为,岩石物理学意义上的低速层是指现今大陆地壳内部呈水平或近水平分布、波速衰减幅度大于3%的地质实体.确定西藏大部分地区低速层时,多将S波速度小于 $3.4\ \text{km/s}$ 作为划分依据(Yang *et al.*, 2012; Hacker *et al.*, 2014; 严江勇等, 2019),且判断低速层时需满足如下3个条件:(1)低速层的S波速度应比其上覆和下伏地层都要低;(2)高速还是低速应有比较标准;(3)低速层应具有一定的规模,其厚度不能太薄(严江勇等, 2019).

理论上,岩石在一定深度范围内发生部分熔融将引起其自身体积的变化,导致密度随之变化,通常表现为重力低(顾群等, 1980).西藏羊八井地热田浅部部分熔融层,表现为重力负异常,对应 $-500\times 10^{-5}\sim -540\times 10^{-5}\ \text{m/s}^2$ 的最大布格负

重力异常(Zhao and Nelson, 1993),同时在航磁和地面磁测图上表现为低的负磁异常(吴钦, 1982).

地质历史时期形成的“S”型花岗岩、混合花岗岩和条带状片麻岩等是壳内岩石部分熔融的结果,是当时壳内存在部分熔融的直接地质证据(杨晓松和金振民, 1998).而新生代以来,源自地壳深部的淡色花岗岩(高利娥等, 2016; 张泽明等, 2017, 2018)、火山岩和中地壳麻粒岩捕虏体则成为判别现今壳内部分熔融层存在的岩石学证据(Wang *et al.*, 2016).因此,壳内低速与低阻高导电性层,以及新生代以来的淡色花岗岩、火山岩与捕虏体是判断现今壳内部分熔融层存在的地质—地球物理组合证据.

## 2.3 壳内部分熔融层的构造成因及其与干热岩的热源关系

随着大陆岩石圈板块研究的深入,愈来愈多的学者认识到大陆岩石圈内部存在多个滑脱面,如沉积盖层与结晶基底间滑脱面、中地壳低速与高导层滑脱面、莫霍面附近的滑脱面等等,它们常常与浅部陡倾断层相连,以逆掩—推覆断层或正断层的形式发生韧性滑动,成为大陆内部地震的震源区与岩浆活动的源区(万天丰, 2018).燕山运动以来,上述一系列滑脱面在滑移过程中,由于界面的不平整与应力的不均匀,局部地段出现减压作用,诱发不同深度的岩石发生部分熔融(万天丰和朱鸿, 2002).

Fleitout and Froidevaux(1980)出于实验岩石学考虑,认为壳内拆离的摩擦热可导致壳内花岗质物质的部分熔融,形成沿拆离滑脱面出现的花岗质岩浆源区.袁学诚等(1985)认为,西藏洛扎—羊八井地区深 $20\sim 30\ \text{km}$ 处发育的壳内低阻层,是由缓倾断层摩擦面附近的花岗岩类物质部分熔融与饱含热水的岩层所引起.由于岩石的导热率低,摩擦面附近的温度可以显著高于其下伏岩层的温度,故在地壳上部仍有岩浆活动.朱元清和石耀霖(1990)认为,青藏高原壳内部分熔融层的主要热能来源于剪切带内的摩擦生热.许志琴等(1997)运用“热—机械”模式解释了中国大陆造山带中诸多与韧性剪切带相关的花岗质岩浆岩带的成因,以及一些与壳内拆离滑脱叠置推覆相关的花岗质构造岩浆活动.杨彧等(2010)认为,由于部分熔融层具有力学性质上的软弱性,易于发展成构造拆离带,从而具有协调地壳浅部刚性层与下部地壳或岩石圈地幔的差异运动,使得大陆岩石圈内部发生解耦成为可能.戚



学祥等(2003)总结出,在连续动态韧性剪切作用过程中,且在一定的时间和剪切位移速率内,剪切作用产生的剪切热足以使局部地热异常达到地壳岩石部分熔融所需的温度.

李振清等(2005)从热水地球化学特征、硅华与自然硫同位素组成,温泉气体 He 同位素特征、高温温泉流体活动,以及热储温度计算与温度场模拟等方面,均证明了部分熔融发生的可能性,并推断出藏南上地壳中的低速高导层是以岩浆熔体为主的部分熔融层,而非以水为主的超临界流体.吴珍汉等(2005)认为,藏中南冈底斯—拉萨地块上地壳部分熔融、花岗岩侵位,伸展型韧性剪切变形、高角度正断层与念青唐古拉山脉隆升、当雄—羊八井盆地裂隙、高温温泉和强烈的地震活动,在空间上紧密伴生、时间上存在一定序次关系,形成了一个完整的地壳熔融、深部变形、构造运动、地震活动与水热活动系列的地质动力学过程.

Wang *et al.*(2016)则首次将西藏中北部羌塘、松潘—甘孜、昆仑中部等地上新世—第四纪(4.7~0.3 Ma)的长英质火山岩和部分麻粒岩捕虏体作为部分熔融层/低速—高导电性带在地表的岩石学证据,进而揭示出青藏高原中北部部分熔融发生的深度为 15~50 km,温度为 700~1 050 °C,压力为 0.5~1.5 GPa,熔融程度 8%~22%.

因少量的熔体可以在地壳深部长时间(1 Ma)的存在(杨晓松和金振民,1998),而部分熔融层也是高温层.故而壳内部分熔融层可构成板内环境、高热流区干热岩资源的区域性热源,且深构相、多层次、近水平展布的韧性拆离滑脱剪切作用摩擦生热可能是部分熔融层形成的主要因素.

地球物理勘查结果表明,美国犹他州米尔福德干热岩体下伏发育面积超过 100 km<sup>2</sup>、“非常反常的低速、高衰减地质体”,向上延伸至地表以下约 5 km,被解释为部分熔融层(Robinson and Iyer, 1981),临近的罗斯福地热田地热流体中的异常 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值与相关证据也支持了这一解释(Kennedy and van Soest, 2007).因此,米尔福德干热岩体的热源应为部分熔融层(张森琦等,2019).

### 3 壳内部分熔融层存在的地球物理证据

迄今,不同比例尺的区域地质调查结果表明,

在新生界覆盖的共和盆地尚未发现新生代以来与部分熔融层有关的火山—岩浆活动记录.唯见蔡鹏捷等(2014)有贵德盆地南缘常牧镇五龙村附近局部“临夏组底部与二长花岗岩角度不整合面之上首次发现新近系火山活动”的报道,但经野外复查,并采集了 2 件锆石 U-Pb 测年样,获得年龄分别为 235.7±3.6 Ma 和 235.7±4.9 Ma 的结果,表明所报道的火山岩形成于中三叠世.基于此,本文重点利用综合地球物理勘查资料,对共和盆地壳内部分熔融层的存在证据进行综合分析.

#### 3.1 区域重力和区域航磁异常

**3.1.1 区域重力异常** 将 Moho 起伏引起的区域重力异常从布格重力异常中除去,可得到反映地壳密度的剩余重力异常.因此,剩余重力异常主要反映该地区的地壳密度结构(姜永涛等,2015).由图 5 可以看出,共和盆地主要发育茶卡—共和剩余重力低异常(G21)和贵德剩余重力低异常(G23).北部青海南山—拉脊山、南西部哇玉香卡—贵南盆缘带及山区主要发育剩余重力高异常(G13、G15、G19、G20)与局部剩余重力低异常(G28)(青海省自然资源厅,1992,青海东部 1:100 万区域重力调查报告).

根据剩余重力异常等值线圈闭情况,将茶卡—共和剩余重力低(G21)异常划分为茶卡剩余重力低(G21-1)和共和剩余重力低(G21-2)两个异常.茶卡剩余重力低异常(G21-1)主体位于茶卡盐湖北东,呈 NWW 向展布,异常长约 60 km,宽约 30 km,走向 310°,幅值  $-20 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,梯度较大,达  $20 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$ ;共和剩余重力低异常(G21-2)主体位于共和及其以西的沙珠玉河南北两侧,走向 285°,长约 150 km,东宽西窄,范围较广,异常值最大为  $-30 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,异常梯度北大南小,说明共和盆地北缘陡,而南缘相对平缓.G21-2 异常形态呈不规则状,发育若干小圈闭,反映出盆地基底的次一级起伏变化,也不排除新生代沉积盖层局部密度不均匀等因素.

贵德剩余重力低(G23)异常由北部贵德剩余重力低(G23-1)和南部新街南剩余重力低(G23-2)两个异常组成.贵德剩余重力低异常(G23-1)占据整个贵德盆地,走向 330°,异常值最大为  $-24 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ .新街南剩余重力低(G23-2)异常走向 NE 向,范围较小,幅值  $-18 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ .

不排除其他地质因素的影响,将剩余重力低异

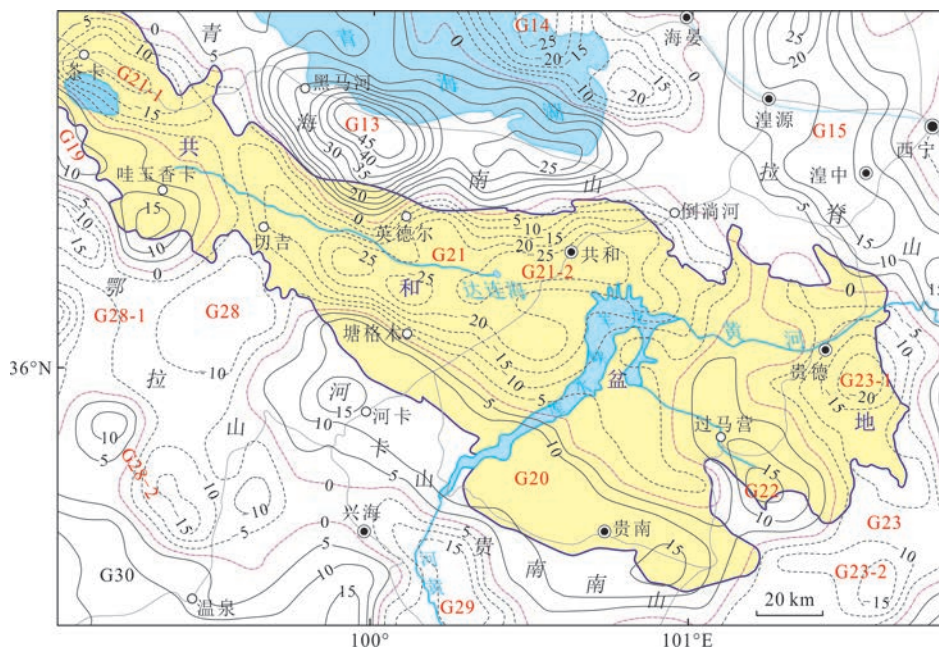


图 5 1:100 万区域剩余重力异常平面图

Fig.5 The 1:1 000 000 regional residual gravity anomaly

黑实线为剩余异常正值线,紫色点划线为剩余异常零等值线,黑断线为剩余异常负等值线;数字注记单位为  $10^{-5} \text{ m/s}^2$ . G21 等代号为剩余重力异常编号. 图据青海省自然资源厅(1992, 青海东部 1:100 万区域重力调查报告)

常归因于深部热力因素的体积效应导致低密度物质形成,上述区域剩余重力异常特征则一定程度反映出,共和盆地地下伏有一定面积的低密度或高温地质体存在.

**3.1.2 区域航磁  $\Delta T$  异常** 在区域航磁  $\Delta T$  异常图上(图 6),共和盆地表现为负或大片平静低磁场区,其中发育有若干小圈闭,场值由西向东缓慢增高. 北部的青海南山—拉脊山呈正、负相伴的宽缓异常

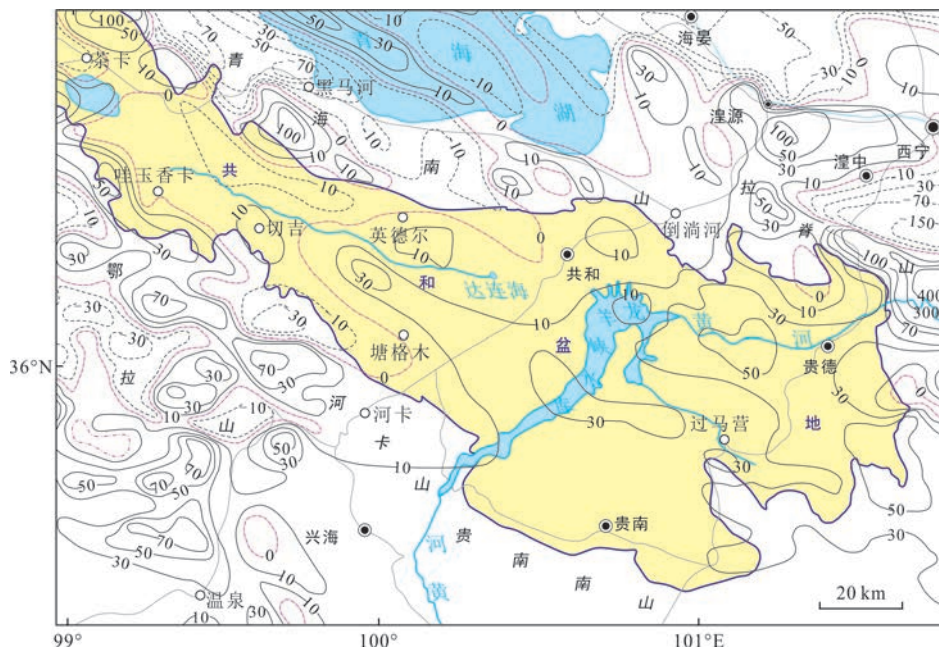


图 6 1:100 万区域航磁  $\Delta T$  异常平面图

Fig.6 Map of the 1:1 000 000 regional aeromagnetic  $\Delta T$  anomaly

实线  $\Delta T$  正值线,紫点划线为  $\Delta T$  零等值线,虚线为  $\Delta T$  负等值线;数字注记单位为  $nT$ . 据青海省自然资源厅(1992, 青海东部 1:100 万区域重力调查报告)



或串珠状异常,场值较高;南西部鄂拉山一带正、负异常伴生,大小不等,走向各异,形态复杂,强度高(青海省自然资源厅,1992,青海东部1:100万区域重力调查报告)。

1:5万高精度航磁测量结果表明,青海南山及其以北地区以团块状、条带状、环状异常为主,局部异常较多,异常值较高;共和盆地则以大面积宽缓低值异常为主,航磁 $\Delta T$ 整体处于负或弱磁背景场中;贵南南山南部有局部零星异常分布,多以孤立点状或团块状异常为主(黄金辉等,2016,青海省青海南山—共和地区1:5万航磁测量报告)。因此,共和盆地表现出的大片负或低磁场可能反映了具有弱磁性的下元古界基底埋藏过深等信息(青海省自然资源厅,1992,青海东部1:100万区域重力调查报告)。此外,温度的变化主要表现为对磁性矿物的去磁作用,而出现负或弱磁异常。尤其是在岩体温度升高到居里温度时,岩石磁性将会消失(曾昭发等,2012)。基于此,本文初步认为共和盆地负或大片平静低磁场区可能与深部热力因素导致磁性矿物的消磁作用有关。

综合分析认为,共和盆地表现出大范围负重力异常与航磁 $\Delta T$ 负或弱磁异常,不排除其他地质因素,一定程度反映出盆地地下伏有低密度、弱磁性地质体存在,或许暗示出其深部发育有高温地质体或部分熔融层存在。

### 3.2 天然地震成像勘查

**3.2.1 区域尺度天然地震成像剖面勘查** 控制共和盆地西盆地的青海共和—玉树公路沿线天然地震观测剖面(图7)反映出,玉树以北沿线的特征是高速体与低速体在垂向上相间叠置。近地表到约5 km深度范围内的低速体为第四纪松散或弱成岩地层,在约15~40 km的中、下地壳以低波速/低密度地质体为主(钱辉等,2001)。

以前述的S波速度小于3.4 km/s为边界,进一步对共和盆地西盆地低速体进行圈定(图8)。可以看出,该低速体埋深23~42 km,NE向长约37 km。且被解释为壳内熔融体,并构成干热岩的热源(杨冶等,2019)。

由于在数据处理与正演计算时,使用的高斯参数仅保留了0.5 Hz以下的低频部分,反演的纵向分辨率为3~4 km,横向分辨率受台站分布的影响,大致在50 km左右。因此,上述低速体的规模可能较实际偏小、偏深。

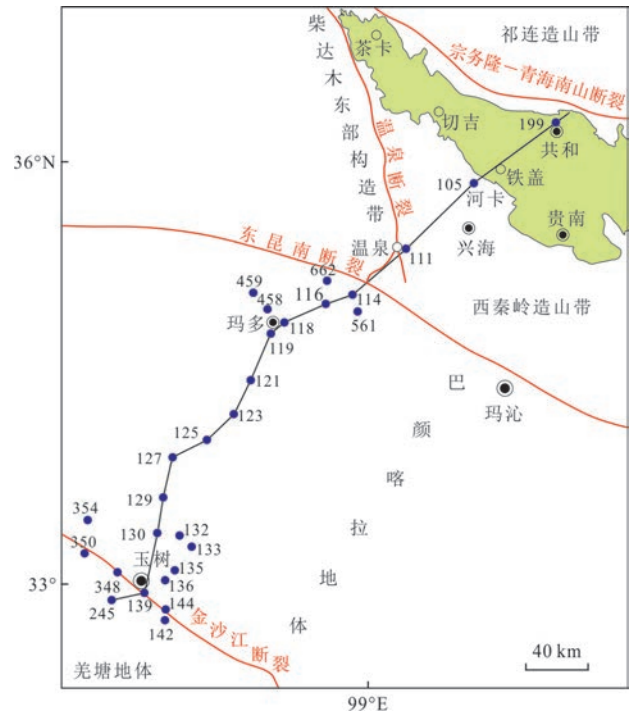


图7 共和—玉树三分量地震台站分布

Fig.7 Distribution of three component seismic stations across Gonghe-Yushu

图内数字注记为测点号;据钱辉等(2001)修改

### 3.2.2 盆地尺度天然地震背景噪声层析成像勘查

部分熔融和流体通常会造S波显著低速异常,而S波低速异常也可能同时叠加来自温度升高和部分熔融的影响(McKenzie *et al.*, 2005; Priestley and Kenzie, 2006)。如当温度低于固相线时,温度每提高100 °C,会造成P波速度降低0.5%~2.0%,使S波速度降低0.7%~4.5%(Goes *et al.*, 2000)。故与P波速度相比,S波速度对较大幅度温度的变化更为敏感,更适合分析地壳内部岩体温度三维空间异常特征。

对于壳内部分熔融层而言,每当S波速度降低0.023~0.026 km/s,对应于1%体积比例的熔融成分(Flinders *et al.*, 2018)。4眼钻遇恰卜恰干热岩体的钻孔测温资料表明,150 °C等温面埋深为2 104.31~2 500.00 m,平均埋深2 301.08 m。新近完成的GH1孔4 000 m的井底温度为209 °C,表明共和盆地4 km深度水平温度已经较高。

为刻画共和盆地西盆地三维波速结构的细节,选用周期为5 s的三分量地震仪133台,平均台间距为3~5 km,控制面积约7 500 km<sup>2</sup>,组成观测台阵进行观测。利用地震背景噪声,基于台站间波形互相关方法,提取出一至十几秒周期Rayleigh面波的台站间面波经验格林函数,进而提取出频散曲线并反

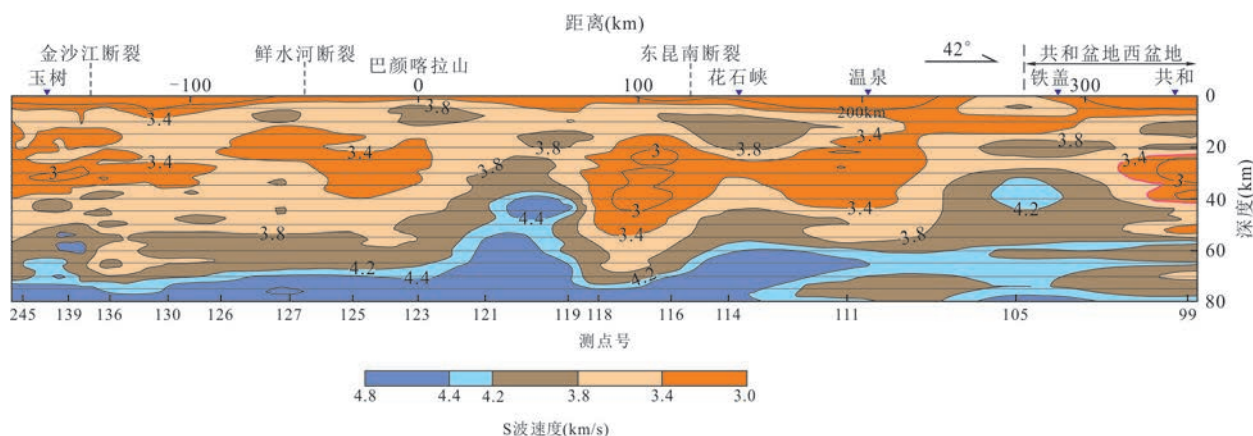


图8 共和—玉树接收函数反演的S波波速剖面

Fig.8 Profile of the S-wave velocity inverted by receiver function across Gonghe-Yushu

据钱辉等(2001)修改

演获得台阵下方 24 km 以浅的三维 S 波速度结构(图 9).

从 S 波速度结构看,共和盆地西盆地 2~22 km 深度水平,以 S 波低速异常为主,且随深度增加,异常幅度有所趋弱;而 22~24 km 深度水平,S 波低速异常逐渐趋于平静.

北东部周缘地区的青海南山—瓦里关山、南西隅河卡山,以及沙珠玉以西的茶卡次级盆地等地,尽管处于成像区域的边部,分辨率低,但由 24 km 深度水平向上,一直处于次低→次高→高速异常区,且随深度变浅,高速异常区的分布面积和异常幅度均不断增加.沙珠玉西开口向西的喇叭状 S 波高速异常区,自 2 km 深度水平起,愈向深部,面积愈大,异常幅度愈高,并向达连海南东发展.

共和—曲什那—达连海围限的区域,2~10 km 深度水平,S 波低速异常区的面积和幅度,处于不断增大的状态;10~24 km 深度水平,S 波低速异常区的面积和幅度则有所衰减.结合干热岩勘探孔测温数据分析,该 S 波次低速异常区,在目前可钻及的深度内温度均有可能达到 150 °C 以上.

整体来看,在 16~22 km 深度,恰卜恰及其西部达连海地区的 S 波速度较周边区域明显偏低约 0.1~0.2 km/s,暗示着部分熔融层主要集中在这—深度范围.按 S 波速度衰减幅度(Flinders *et al.*, 2018),推算熔融程度最大可达 4%~7%. 24 km 深度以下,恰卜恰与达连海地区仍然存在较为明显的低速异常,尽管幅度有所减弱,但该深度温度依然很高.因现有地震背景噪声成像对于 24 km 以下,及更大深度的分辨能力有限,尚不能提供更大深度

的速度结构异常特征.

综上所述,从 S 波速度异常的幅度和深度分布分析,共和盆地西盆地在 16~22 km 的中地壳,存在较为明显的部分熔融,且具有较高的温度.

### 3.3 MT 勘查

**3.3.1 区域尺度 MT 长剖面勘查** 地壳深部岩石电导率的主要影响因素为温度和压力,但温度的影响远比压力要大(柳江琳等,2001),且电导率随温度的增加而呈指数规律增大(魏文博等,1997). 高温高压实验发现,岩石达到近熔融温度时,电导率将比常温时高几个数量级(马晓冰等,2005),进而导致地壳和上地幔中的干燥岩石变得更具导电性.因此,壳幔电性结构特征主要取决于地下的热状态(魏文博等,2003).

岩石圈内存在电解导电、电子导电、半导体导电与熔融体导电 4 种导电机制(Nover,2005). 其中,电解导电和电子导电主要与流体、石墨或金属矿物相关,温度对导电性的影响作用相对较小.因此,电解导电和电子导电机制引起的低阻体,相对于干热岩 MT 勘查而言,是需要剔除的多解性问题.中下地壳及上地幔的导电机制是与温度关系密切的半导体导电机制(张乐天等,2011). 而部分熔融岩石的导电机制须重点关注熔融体导电机制.

青海贵德—大通 MT 勘查电阻率剖面(图 10),揭示出岩石圈的电性分布特征.根据定性与定量解释结果,黑峡口和贵德测点在 94 km 与 102 km 深处发现上地幔高导层,电阻率为 6  $\Omega \cdot m$  和 1.7  $\Omega \cdot m$ ,反映出软流层上隆较邻近测点(128 km)抬升约 30 km.



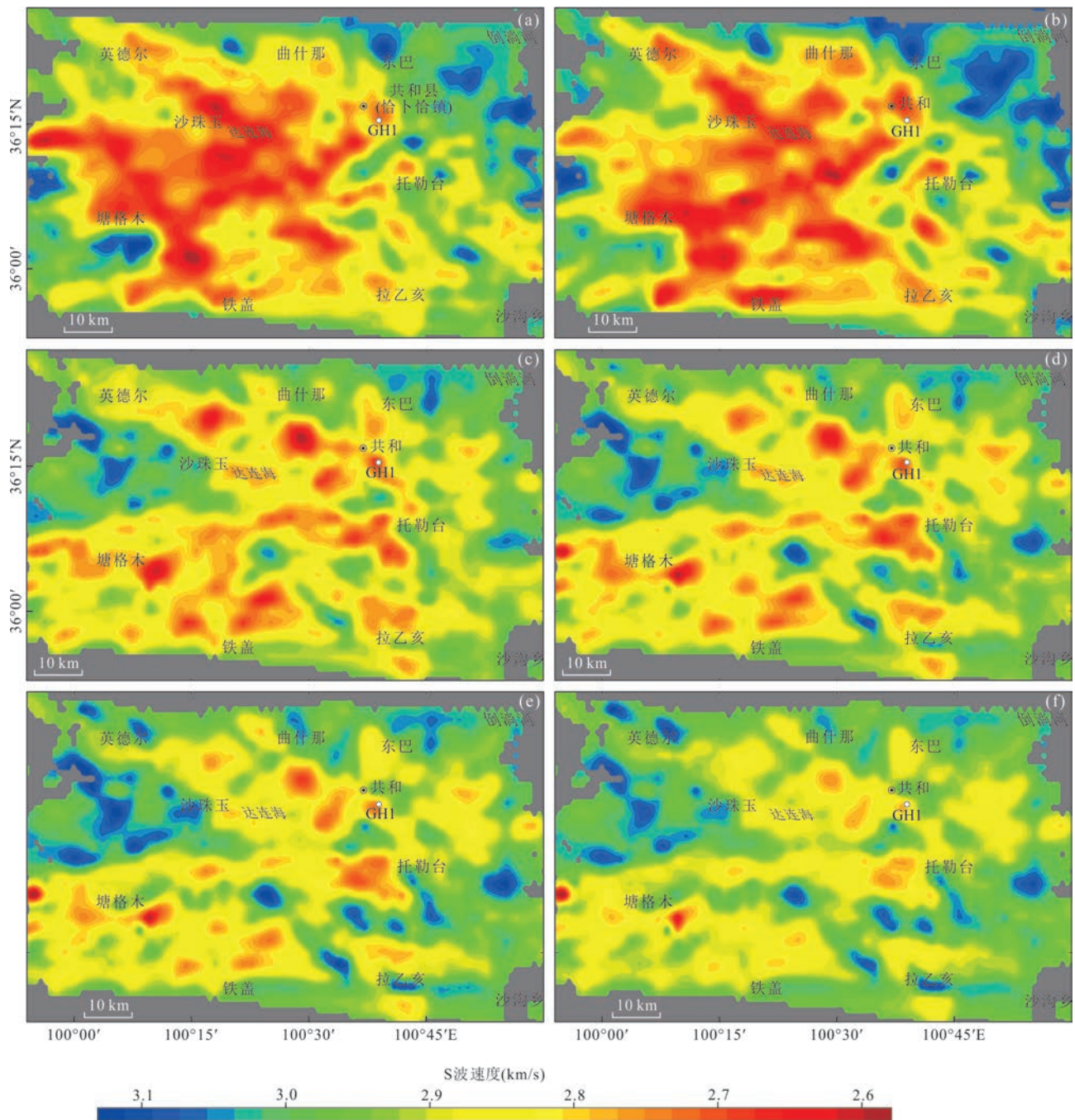


图9 共和盆地西盆地不同深度天然地震背景噪声层析成像

Fig.9 Tomographic map of the natural seismic background noise at different depths within the western basin of the Gonghe basin  
a. 深度为 4 km; b. 深度为 8 km; c. 深度为 16 km; d. 深度为 20 km; e. 深度为 22 km; f. 深度为 24 km

贵德地区深部 5~18 km 间,存在中上地壳高导层,电阻率 4.4~7.8  $\Omega \cdot m$ ,厚度 5.0~13.5 km,被解释为壳内部分熔融层,表明共和盆地壳内有低阻高导电性层存在.

**3.3.2 盆地尺度 MT 勘查** 选择 MT 勘查控制程度较高的共和盆地西盆地东西向 L6 线和南北向 L7 线进行分析(图 1). 勘探时采用 Phoenix 公司的 V8 多

功能电法仪,采用旁侧矢量采集模式工作,点距 1~4 km,采集时间 20 h 左右,采集频率 0.001~320.000 Hz,测深大于 10 km.

大地电磁法数据处理流程包括采用 TBL-EDITOR 软件对原始数据 TBL 格式转换;采用 SYNCTSV 软件及 SSMT2000 软件开展时序文件查看、筛选,采集参数修正、原始数据滤波、傅里叶

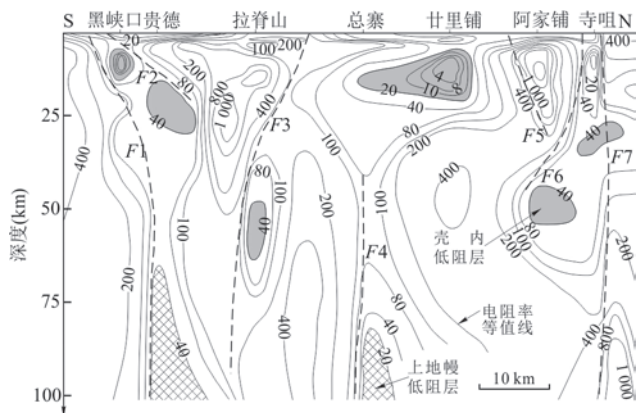


图 10 贵德—大通大地电磁测深(MT)剖面

Fig.10 Magnetotelluric sounding profile of the Guide-Datong area

图中数据为电阻率等值线(单位:Ω·m). 据地质矿产部第一物探综合大队(1993,青海省贵德—西宁—甘肃省民乐大地电磁测深成果报告)修改

变换等过程;利用MT-EDITOR软件开展突跳点剔除、圆滑处理生成标准的EDI格式数据;再利用Winglink软件开展静态校正、带地形的二维非线性共轭梯度反演与数据输出等工作.

(1)东西向剖面揭示的壳内部分熔融层与主拆离滑脱构造界面:由近东西向L6线二维反演剖面

(图 11)和近剖面地热井实钻资料(表 1)可以看出,在地层结构上,海拔-12 km 上下,上部电阻率呈高一低一高的交替变化.浅部的第四系(Q)以中高阻为主,中部新生界(E+N)以次低阻为主,且由东向西不断增厚;下部印支期花岗岩基底(T<sub>γ</sub>)电阻率变化较大.

海拔-12 km 上下,上部与下部表现出两大电性层.上部总体以高阻体夹低阻异常体为主,下部则以低阻异常体为主,推测二者间沿电阻率变化最大方向发育共和准推覆体主拆离滑脱推覆界面(N3).剖面控制范围内N3界面埋深13~23 km,呈近水平舒缓波状起伏展布,总体位于中上地壳.该界面之上各电性层电阻率等值线在剖面的东部连续性变差,高阻异常体被一系列自下而上发育的局部似呈蘑菇状低阻异常带分隔,说明剖面上有断裂构造存在.其中,Fa与Fb应为共和准推覆体由NW向SEE推覆过程中,遇新街—瓦里关走滑挤隆构造带受阻而出现的东倾反冲断层,抑或是具正花状构造结构的新街—瓦里关走滑挤隆构造带的南西界断裂;逆冲推覆构造分支断层Fc及其反冲断层Fd则共同导致了达连海穹隆的穹起.分支断层Fc与Fd之间为NE向日喀则—狼山断裂带(袁学诚,1995)或其北东段共和—狼山断裂带(李百祥,

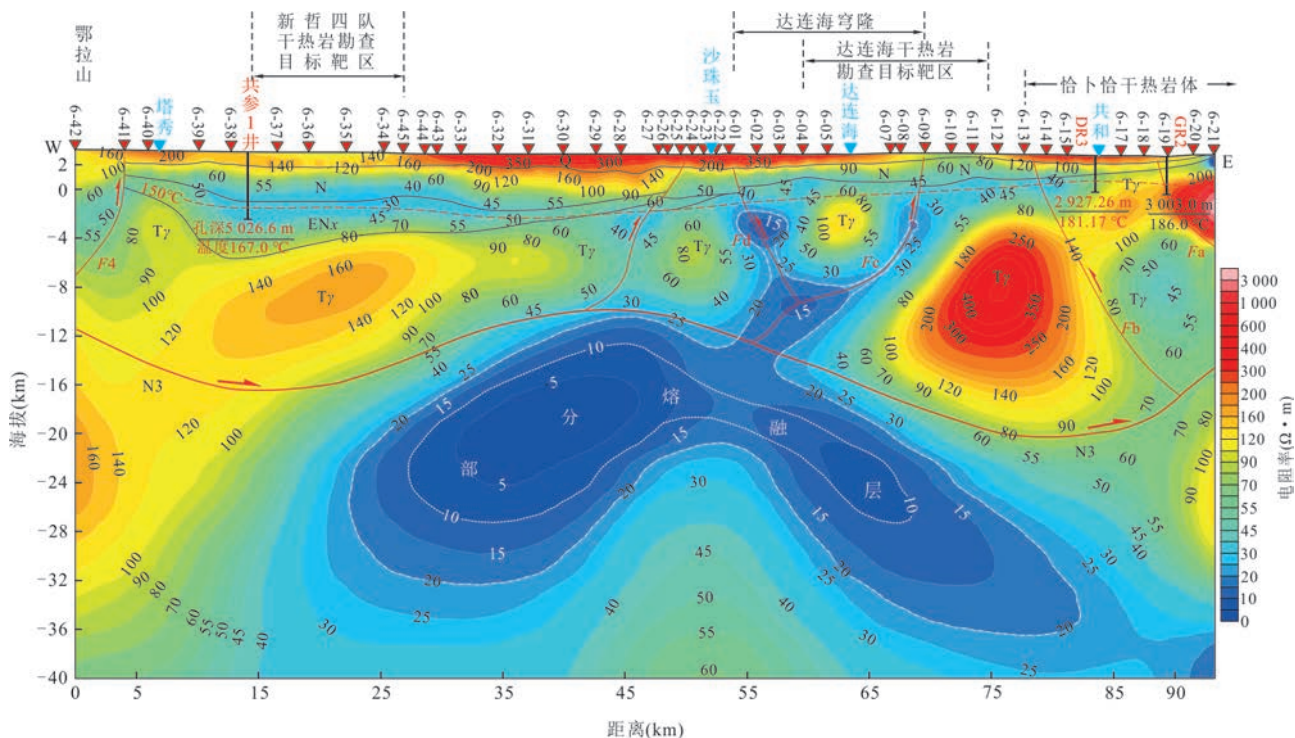


图 11 共和—塔秀MT 勘查L6线二维反演结果

Fig.11 2D inversion result of the MT exploration line L6 of the Gonghe-Taxiu



表 1 L6测线附近主要钻孔地质—地热地质数据统计

Table1 Statistics of the geological and geothermal geological data of the main boreholes near the survey line L6

钻孔编号	孔深(m)	第四系底界埋深(m)	新近系底界埋深(m)	古近—新近系底界埋深(m)	隐伏花岗岩顶界埋深(m)	近干热岩体顶界温度(°C)/孔深(m)	近孔底温度(°C)/深度(m)
共参1井	5 026.60	1 076.00	4 005.00	>5 026.6	>5 026.6	—	167.00/ 5 026.60
DR3	2 927.26	607.50	1 340.25	—	1 340.25	150.19/ 2 104.31	180.27/ 2 880.29
DR2	1 852.38	610.00	1 440.90	—	1 440.90	145.00/ 3 000.00	98.60/ 1 840.00

2002)北枝(F10-1)断裂通过之处,而其南枝(F10-2)则位于共和盆地东盆地内.区域上,共和—狼山断裂带沿线温泉、地热异常成群成带分布,为中国西部一条NE向导热、控震断裂构造(李百祥,2002).此外,该隐伏断裂对深部热源有向上传递的作用(王坤,2019),为一区域性导热构造.剖面西端的F4为哇玉香卡—贵南隐伏断裂,之西为赛什塘—兴海蛇绿混杂岩带.

N3界面之下,剖面中部大部分区域表现为低阻高导体,上部由东向西依次发育恰卜恰干热岩体、达连海和新哲四队干热岩勘查目标靶区.据DR2、DR3和共参1井钻孔测温结果推断的150°C等温线,东浅西深,由东向西埋深依次为2 104.31 m、3 000.00 m和4 588.00 m.依据剖面东段基本探明的恰卜恰干热岩体5眼地热勘探孔深度—温度曲线(图12),将剖面上150°C等温线之下划归干热岩,推断其深部埋深于15.5~30.5 km的低阻体为中地壳部分熔融层,并构成干热岩的热源体.部分熔融层上覆沿断层上升的蘑菇状次低阻体为深部热流上涌的主通道,而新生代沉积盖层则构成干热岩体的隔热保温盖层(张森琦等,2018).

以1~10 Ω·m作为壳内部分熔融层的圈定依据.可以看出,东西向壳内部分熔融层埋深15.5~30.5 km,东西向长约41 km,厚度2~12 km,西厚东薄,两端下翘中部弧形上凸,埋深最浅处位于沙珠玉西,其东由西向东倾没,顶界面位于共和准推覆体主拆离滑脱推覆界面(N3)之下.

以电阻率值10~20 Ω·m等值线圈定部分熔融层潜在的区域与热流上涌主通道.可以看出,达连海东、西两侧的F<sub>c</sub>与F<sub>d</sub>断层或日喀则—狼山断裂带北枝断裂(F10-1)构成了深部热流上涌的主通道,沿F<sub>c</sub>和F<sub>d</sub>断层呈蘑菇状上涌的热流羽最浅处贴近150°C等温线.

(2)南北向剖面揭示的壳内部分熔融层与主拆离滑脱构造界面:由近南北向L7线MT勘查二维反

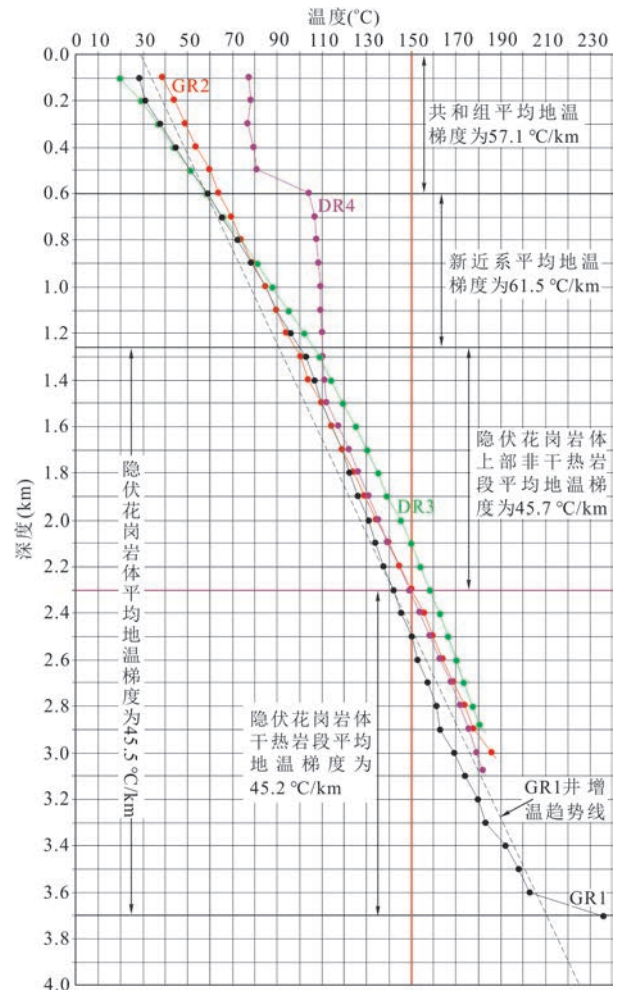


图 12 恰卜恰地区干热岩勘探孔深度—温度曲线

Fig.12 Depth-temperature curves of the hot dry rock exploration holes within the Qiabuqia area

演剖面(图13),结合地质调查资料可以看出,在地层结构上,北部青海南山主要由中三叠世江西沟花岗岩体(T<sub>2γ</sub>)组成,近F1断裂北侧有少量隆务河组地层出露;其南的共和盆地海拔—1.1 km之上为新近系—第四系,其下为印支期隐伏花岗岩体(T<sub>γ</sub>),二者间的界线埋深北深南浅,北部近青海南山山前呈凹陷状,南段为贡玛凸起.位于7-11~7-19测点东面的DR9地热勘探孔在临夏组与共和组中已揭

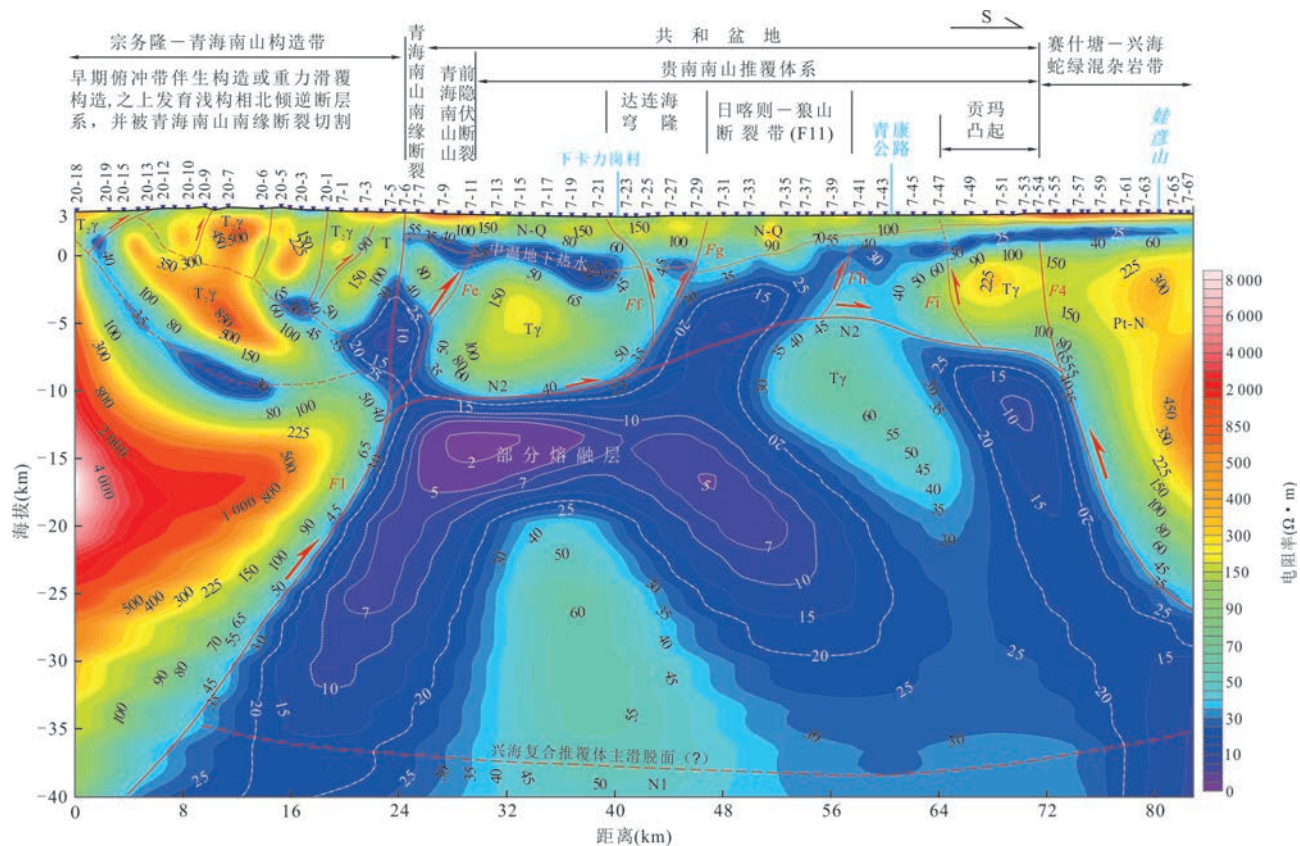


图13 青海湖南岸下社西一娃彦山南MT勘查L7线二维反演结果

Fig.13 2D inversion result of the MT exploration line L7 across the west of Xiashe to the south of Wayan Mountain in the south bank of the Qinghai Lake

露出井口温度为101.3℃的中温地下热水。

以7-6测点为界,以北的青海南山主体表现为高阻,南侧的共和盆地总体表现为次高阻—低阻,二者的分界线即北倾的青海南山南缘断裂(F1),其南侧在海拔-10 km之上发育有青海南山南缘山前隐伏断裂(Fe)。推测青海南山山体内海拔-10 km以上南倾弧形低阻带为早期俯冲带伴生构造或重力滑覆构造,之上发育浅构相北倾逆断层系,并被青海南山南缘断裂切割。

7-54测点之南控制的娃彦山—河卡山山前地带为赛什塘—兴海蛇绿混杂岩带,主体表现为高阻—次高阻,以北的共和盆地仍表现为次高阻—低阻,二者间的电阻率突变带即为南西倾的哇玉香卡—贵南隐伏断裂(F4),地表对应7-54测点。现今相背而倾的青海南山南缘断裂(F1)与哇玉香卡—贵南隐伏断裂(F4)下盘均出现相对较宽的低阻异常带。

共和盆地内海拔-10.5 km以上,总体以次高阻体夹低阻异常体为主,下部则以低阻异常体为主,推测二者间沿电阻率变化最大方向处发育贵南

南山推覆体主拆离滑脱推覆界面(N2)。剖面控制范围内,N2界面埋深8~15 km,总体位于上地壳,剖面上呈近水平舒缓波状展布,中部凸起,南北两端下翘,并被第四纪仍在活动的哇玉香卡—贵南隐伏断裂(F4)和青海南山南缘断裂(F1)切割。该界面之上各电性层电阻率等值线连续性差,次高阻体被一系列自下而上发育的局部似呈蘑菇状或带状低阻异常带分隔,表明有断裂构造发育。其中,次级逆冲推覆断层Fg与其同期配套产生的反冲断层Ff共同限制了达连海穹隆。同时受东西向Fc和Fd断层切割,在平面上呈穹隆状;推测在Fg与Fh两断层之间出现的低阻异常带,相当于日喀则—狼山断裂的北东段。

进一步推断出,发育于共和盆地深部的兴海大型复合推覆体主拆离滑脱推覆界面(N1),在剖面控制范围内埋深37~42 km,总体位于下地壳中上部。N1界面之上为连续上凸规模较大的低阻异常体/部分熔融层,接近N1界面附近趋于消失。

同样,依剖面上1~10 Ω·m电阻率等值线作为壳内部分熔融层的圈定依据,可以看出共和盆地西



盆地南北向壳内部分熔融层顶界面位于贵南推覆体系主拆离滑脱推覆界面(N2)之下,底界面位于兴海大型复合推覆体系主拆离滑脱推覆界面(N1)之上,埋深 15~35 km,厚度 4~7 km,北厚南薄,与东西向剖面控制者大致处于相同的埋深范围内;南北向宽约 34 km,较东西向剖面控制者稍短,南北两端下翘并尖灭,中部呈上凸的弓形,且连续性好。

以电阻率值 10~20 Ω·m 等值线圈定部分熔融层潜在的区域与热流上涌主通道,可以看出,北枝热流上涌主通道沿青海南山南缘断裂(F1)与青海南山南缘山前隐伏断裂由部分熔融层向上,热流羽呈蘑菇状向上扩展;南枝沿 Ff 和 Fh 断层之间的日喀则—狼山断裂带热流羽由北向南扩展并尖灭,上覆新近系—第四系层状热储中发育有中温水热系统。因此,在中温水热系统下与部分熔融层上应为干热岩地热系统。

在温度场数值模拟的基础上,依共和县恰卜恰地区 150 °C 等温面平均埋深为 2 301.08 m,干热岩段分段平均地热增温率为 45.2 °C/km 推算,共和盆地 15 km 深处,温度约为 574 °C,较 Wang *et al.* (2016) 报道的西藏中北部壳内部分熔融层温度 (700~1 050 °C) 低。

### 3.4 大范围超高分辨率重力、电阻率异常与 Rayleigh 波群相速度综合分析

基于 Hirt *et al.* (2013) 超高分辨率重力数据库提取的区域重力异常分布特征 (图 14a)、电阻率异常与 Rayleigh 波群相速度图线性反演得到穿越共和盆地东西向和南北向剖面 (图 14b~14c),可以看出共和盆地表现出明显的低密度、低重力异常、低速和低电阻率特征,表明其下伏有高导的低密度物质存在 (Gao *et al.*, 2018)。

目前,对低速高导体、岩石的地震波低速度、低重力异常与高热流值相匹配的地质体较为合理的解释,就是现今共和盆地下伏发育有壳内部分熔融层。

### 3.5 区域干热岩资源热源和热源构造分析

综合以上所述,具高温层性质的壳内部分熔融层可能构成了地处于板内环境、高热流区共和盆地干热岩资源的区域性热源或热源体。

盆地尺度 MT 勘查结果表明,共和盆地西盆地壳内部分熔融层埋深 15~35 km,东西向长约 41 km,南北向宽约 34 km,厚度 2~12 km。依盆地尺度天然地震背景噪声层析成像勘查 S 波速度衰减幅

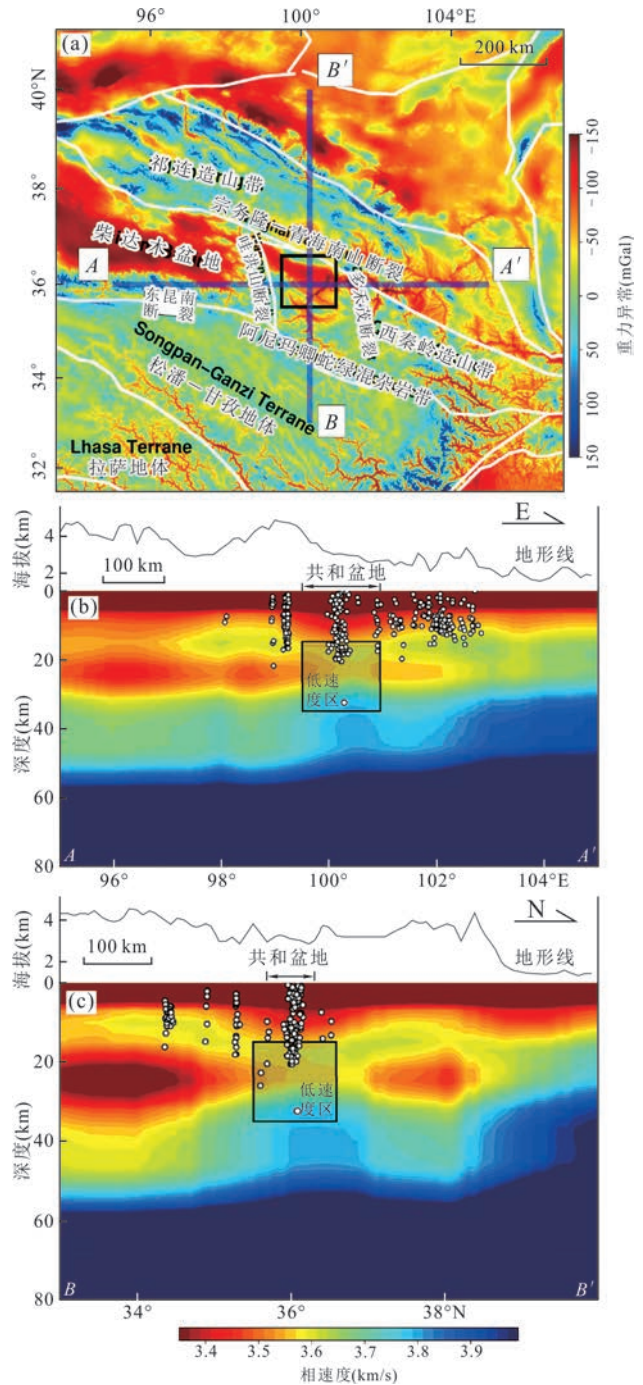


图 14 区域重力异常与深部层析成像剖面  
Fig.14 Profiles of the regional gravity anomaly and the Vs model from ambient noise tomography

a. 基于超高分辨率重力数据库的区域重力异常特征; b. 电阻率与 Rayleigh 波群相速度线性反演 A-A' 剖面; c. 电阻率与 Rayleigh 波群相速度线性反演 B-B' 剖面。据 Gao *et al.* (2018) 修改

度推测,该部分熔融层熔融程度最大可达 4%~7%。温度场数值模拟和干热岩段分段平均地热增温率推算结果表明,共和盆地西盆地 15 km 深处温度约为 574 °C,主体位于贵南南山推覆体系与共和准推

覆体系主拆离滑脱推覆界面之下,兴海大型复合推覆体系主拆离滑脱推覆界面之上. 挽近地质时期深构造相、多层次、近水平展布的韧性拆离滑脱推覆构造主界面的连续动态剪切摩擦生热,可能是部分熔融层形成的主要因素和主控热源构造.

## 4 认识与结论

区域重力与区域航磁调查、天然地震成像与MT长剖面勘查,超高分辨率重力异常、电阻率与Rayleigh波群相速度线性反演结果,以及盆地尺度综合地球物理勘查均表明,共和盆地地下发育有壳内部分熔融层.

共和盆地西盆地壳内部分熔融层埋深15~35 km,东西向长约41 km,南北向宽约34 km,厚度2~12 km,熔融程度最大可达4%~7%,15 km深处温度约为574 °C,主体位于贵南南山推覆体系与共和准推覆体系主拆离滑脱推覆界面之下,兴海大型复合推覆体系主拆离滑脱推覆界面之上.

具高温层性质的壳内部分熔融层可能构成了共和盆地干热岩资源的区域性热源或热源体,而深构造相、多层次、近水平展布的韧性拆离滑脱推覆剪切带是主控热源构造.

致谢:衷心感谢李百祥先生、两位匿名审稿人和本刊编辑对本文提出的宝贵意见与有益建议.

## References

- Artemieva, I. M., Thybo, H., Jakobsen, K., et al., 2017. Heat Production in Granitic Rocks: Global Analysis Based on a New Data Compilation GRANITE2017. *Earth-Science Reviews*, 172: 1–26.
- Bai, J. Q., Mei, L., Yang, M. L., 2006. Geothermal Resources and Crustal Thermal Structure of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geomechanics*, 12(3): 354–362 (in Chinese with English abstract).
- Beardsmore, G., 2004. The Influence of Basement on Surface Heat Flow in the Cooper Basin. *Exploration Geophysics*, 35(4): 223–235. <https://doi.org/10.1071/eg04223>
- Beaumont, C., Jamieson, R. A., Nguyen, M. H., et al., 2001. Himalayan Tectonics Explained by Extrusion of a Low-Viscosity Crustal Channel Coupled to Focused Surface Denudation. *Nature*, 414(6865): 738–742. <https://doi.org/10.1038/414738a>
- Cai, P. J., Xu, R. K., Liu, J., et al., 2014. The First Discovery of the Neogene Volcanic Activity in the Guide Basin, Qinghai Province. *Resources Survey & Environment*, 35(2): 129–129, 156 (in Chinese).
- Chen, L. S., Booker, J. R., Jones, A. G., et al., 1996. Electrically Conductive Crust in Southern Tibet from INDEPTH Magnetotelluric Surveying. *Science*, 274(5293): 1694–1696. <https://doi.org/10.1126/science.274.5293.1694>
- Chen, X. H., Dang, Y. Q., Yin, A., et al., 2010. Basin-Mountain Coupling and Tectonic Evolution of the Qaidam Basin and Its Surrounding Mountain System. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Craddock, W. H., Kirby, E., Harkins, N., et al., 2010. Rapid Fluvial Incision along the Yellow River during Headward Basin Integration. *Nature Geoscience*, 3(3): 209–213.
- Craddock, W. H., Kirby, E., Zhang, H. P., et al., 2014. Rates and Style of Cenozoic Deformation around the Gonghe Basin, Northeastern Tibetan Plateau. *Geosphere*, 10(6): 1255–1282. <https://doi.org/10.1130/geS01024.1>
- Desissa, M., Johnson, N. E., Whaler, K. A., et al., 2013. A Mantle Magma Reservoir beneath an Incipient Mid-Ocean Ridge in Afar, Ethiopia. *Nature Geoscience*, 6(10): 861–865.
- Didana, L. Y., Thiel, S., Heinson, G., 2014. Magnetotelluric Imaging of Upper Crustal Partial Melt at Tendaho Graben in Afar, Ethiopia. *Geophysical Research Letters*, 41(9): 3089–3095. <https://doi.org/10.1002/2014gl060000>
- Feldman, I. S., 1976. On the Nature of Conductive Layers in the Earth's Crust and Upper Mantle. *Geoelectric and Geothermal Studies*, 1(1): 721–730.
- Feng, Y. M., Cao, X. D., Zhang, E. P., et al., 2002. Fragment, Process and Mechanism of the Western Qinling Orogenic Belt. Xi'an Cartographic Press, Xi'an (in Chinese).
- Fleitout, L., Froidevaux, C., 1980. Thermal and Mechanical Evolution of Shear Zones. *Journal of Structural Geology*, 2(1/2): 159–164.
- Flinders, A. F., Shelly, D. R., Dawson, P. B., et al., 2018. Seismic Evidence for Significant Melt beneath the Long Valley Caldera, California, USA. *Geology*, 46: 799–802. <https://doi.org/10.1130/g45094.1>
- Gao, J., Zhang, H. J., Zhang, S. Q., et al., 2018. Three-Dimensional Magnetotelluric Imaging of the Geothermal System beneath the Gonghe Basin, Northeast Tibetan Plateau. *Geothermics*, 76: 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.06.009>



- Gao, L. E., Zeng, L. S., Wang, L., et al., 2016. Timing of Different Crustal Partial Melting in the Himalayan Orogenic Belt and Its Tectonic Implications. *Acta Geologica Sinica*, 90(11): 3039–3059(in Chinese with English abstract).
- Goes, S., Govers, R., Vacher, P., 2000. Shallow Mantle Temperatures under Europe from P and S Wave Tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B5): 11153–11169. <https://doi.org/10.1029/1999jb900300>
- Grujic, D., Casey, M., Davidson, C., et al., 1996. Ductile Extrusion of the Higher Himalayan Crystalline in Bhutan: Evidence from Quartz Microfabrics. *Tectonophysics*, 260: 21–43. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(96\)00074-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(96)00074-1)
- Gu, Q., Sun, J., Shi, S. L., et al., 1980. The Features of Highly Electrical Conductivity Layer in North China and Northwest China Regions. *Seismology and Geology*, 2(2): 21–29 (in Chinese with English abstract).
- Guo, A. L., Zhang, G. W., Qiang, J., et al., 2009. Indosinian Zongwulong Orogenic Belt on the Northeastern Margin of the Qinghai–Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X. F., Zhang, Y. C., Cheng, Q. Y., et al., 1990. Magnetotelluric Studies along Yadong–Golmud Geosciences Transect in Qinghai–Xizang Plateau. *Acta Geoscientica Sinica*, 11(2): 191–202(in Chinese with English abstract).
- Hacker, B. R., Ritzwoller, M. H., Xie, J., 2014. Central Tibet has a Partially Melted, Mica–Bearing Crust. *Tectonics*, 33: 1408–1424. <https://doi.org/10.1002/2014tc003545>
- Harkins, N., Kirby, E., Heimsath, A., et al., 2007. Transient Fluvial Incision in the Head–Waters of the Yellow River, Northeastern Tibet, China. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112:F03S04. <https://doi.org/10.1029/2006JF000570>
- He, L. F., Chen, L., Dor, J., et al., 2016. Mapping the Geothermal System Using AMT and MT in the Mapamyum (QP) Field, Lake Manasarovar, Southwestern Tibet. *Energies*, 9(10): 855. <https://doi.org/10.3390/en9100855>
- Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., et al., 2013. New Ultrahigh–Resolution Picture of Earth’s Gravity Field. *Geophysical Research Letters*, 40(1–5): 4279–4283. <https://doi.org/10.1002/grl.50838>
- Hou, K. M., Shi, Y. M., Zhang, X., 1999. Activity Ways and Formation Age of the New Tectonics in the Northern Tibet Plateau. *Seismology and Geology*, 21(2): 127–136(in Chinese with English abstract).
- Huang, J. H., Wang, M., Liu, H., 2016. Qinghai South Mountain–Gonghe Area 1: 50 000 Aeromagnetic Survey Report. Data Center of Natural Resources Department, Qinghai Province, Xining (in Chinese).
- Huang, Z. L., 2005. A Dictionary of Earth Sciences • Applied Science Volume. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Jamieson, R. A., Unsworth, M. J., Harris, N. B. W., et al., 2011. Crustal Melting and the Flow of Mountains. *Elements*, 7(4): 253–260.
- Jia S. X., Guo W. B., Mooney, W. D., et al., 2019. Crustal Structure of the Middle Segment of the Qilian Fold Belt and the Coupling Mechanism of Its Associated Basin and Range System. *Tectonophysics*, 770: 128154. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.06.024>
- Jiang, R. B., Chen, X. H., Dang, Y. Q., et al., 2008. Apatite Fission Track Evidence for Two Phases Mesozoic–Cenozoic Thrust Faulting in Eastern Qaidam Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(1): 116–124(in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y. T., Zhang, Y. Z., Wang, L. M., et al., 2015. The Characteristics of Gravity Fields in Sichuan–Yunnan Region and Its Relationship with Regional Earthquakes. *Progress in Geophysics*, 30(5): 1990–1994(in Chinese with English abstract).
- Kennedy, B. M., van Soest, M. C., 2007. Flow of Mantle Fluids through the Ductile Lower Crust: Helium Isotope Trends. *Science*, 318(5855): 1433–1436. <https://doi.org/10.1126/science.1147537>
- Kong, X. R., Wang, Q. S., Xiong, S. B., 1996. Study on the Comprehensive Geophysics and Lithospheric Structure in the Western Tibet Plateau. *Science in China (Series D)*, 26(4): 308–315(in Chinese).
- Le Pape, F., Jones, A. G., Vozar, J., et al., 2012. Penetration of Crustal Melt beyond the Kunlun Fault into Northern Tibet. *Nature Geoscience*, 5(5): 330–335. <https://doi.org/10.1038/ngeo1449>
- Li, B. X., 2002. Langshan–Wuwei–Gonghe Faulted Zone and Geothermal Distribution. *Acta Geologica Gansu*, 11(1): 83–88 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Q., Hou, Z. Q., Nie, F. J., et al., 2005. Characteristic and Distribution of the Partial Melting Layers in the Upper Crust: Evidence from Active Hydrothermal Fluid in the South Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 68–77 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. L., Bai, W. M., Kong, X. R., et al., 2001. Electrical

- Conductivity of Granite, Basalt and Pyroxene Peridotite under High Temperature-High Pressure Conditions. *Chinese Journal of Geophysics*, 44(4): 528-533 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X.B., Kong, X.R., Liu, H.B., et al., 2005. The Electrical Structure of Northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 48(3): 689-697(in Chinese with English abstract).
- McKenzie, D., Jackson, J., Priestley, K., 2005. Thermal Structure of Oceanic and Continental Lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(3/4): 337-349. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.005>
- Mclaren, S., Sandiford, M., Hand, M., et al., 2003. The Hot Southern Continent: Heat Flow and Heat Production in Australian Proterozoic Terranes. *Geological Society of Australia Special Publication*, 22: 151-161. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.005>
- Nelson, K. D., Zhao, W. J., Brown, L. D., et al., 1996. Partially Molten Middle Crust beneath Southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH Results. *Science*, 274(5293): 1684-1688. <https://doi.org/10.1126/science.274.5293.1684>
- Nover, G., 2005. Electrical Properties of Crustal and Mantle Rocks: A Review of Laboratory Measurements and Their Explanation. *Surveys in Geophysics*, 26(5): 593-651. <https://doi.org/10.1007/s10712-005-1759-6>
- Owens, T.J., Zandt, G., 1997. Implications of Crustal Property Variations for Models of Tibetan Plateau Evolution. *Nature*, 387: 37-43. <https://doi.org/10.1038/387037a0>
- Pan, G.T., Xiao, Q. H., Lu, S. N., et al., 2009. Subdivision of Tectonic Units in China. *Geology in China*, 36(1): 1-27 (in Chinese with English abstract).
- Peng, Y., 2015. The Late Hercynian - Indosinian Structural Characteristics of the Zongwulong Tectonic Belt in North Qaidam Basin (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Priestley, K., Kenzie, D. M., 2006. The Thermal Structure of the Lithosphere from Shear Wave Velocities. *Earth and Planetary Science Letters*, 244(1/2): 285-301. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.01.008>
- Qi, X.X., Li, H.B., Zhang, J.X., et al., 2003. Relationship between Deformation-Metamorphism and Syntectonic Melting in a Ductile Shear Zone: A Case Study of the Baokuhe Ductile Shear Zone in the Central Qilian Mountains. *Geological Review*, 49(4): 413-421, T003(in Chinese with English abstract).
- Qian, H., Jiang, M., Xue, G.Q., et al., 2001. Crustal Structure of Northeastern Tibet Inferred from Receiver Function Analysis. *Acta Seismologica Sinica*, 23(1): 103-108(in Chinese with English abstract).
- Robinson, R., Iyer, H. M., 1981. Delineation of a Low-Velocity Body under the Roosevelt Hot Springs Geothermal Area, Utah, Using Teleseismic P-Wave Data. *Geophysics*, 46(10): 1456-1466. <https://doi.org/10.1190/1.1441152>
- Searle, M. P., Law, R. D., Jessup, M. J., 2006. In Channel Flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones. *Geological Society, London, Special Publications*, 268: 355-378.
- Sun, Y. G., 2004. Gonghe Aulacogen and Conjugate and Transfer between the West Qinling and East Kunlun Orogens(Dissertation). Northwest University, Xi'an(in Chinese with English abstract).
- Teng, J.W., Xiong, S.B., Zhang, Z.J., 1997. Review and Prospects for Geophysical Study of the Deep Lithosphere Structure and Tectonics in Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 40(S1): 121-139(in Chinese with English abstract).
- Unsworth, M. J., Jones, A. G., Wei, W., et al., 2005. Crustal Rheology of the Himalaya and Southern Tibet Inferred from Magnetotelluric Data. *Nature*, 438(7064): 78-81. <https://doi.org/10.1038/nature04154>
- Wan, T.F., 2018. On the Dynamic Mechanics of Global Lithosphere Plate Tectonics. *Earth Science Frontiers*, 25(2): 320-335(in Chinese with English abstract).
- Wan, T. F., Zhu, H., 2002. Tectonics and Environment Change of Meso-Cenozoic in China Continent and Its Adjacent Area. *Geoscience*, 16(2): 107-1120 (in Chinese with English abstract).
- Wang, E. Q., Su, Z., Xu, G., 2009. A Case Study on Lateral Extrusion Occurred along Some Orogenic Belts in China. *Chinese Journal of Geology*, 44(4): 1266-1288 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K., 2019. Research on Simulation and Inversion of Magnetotelluric for Hot Dry Rock Exploration and Its Application(Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Hawkesworth, C. J., Wyman, D., et al., 2016. Pliocene-Quaternary Crustal Melting in Central and Northern Tibet and Insights into Crustal Flow. *Nature Communications*, 7:11888.
- Wei, W.B., Chen, L.S., Tan, H.D., et al., 1997. Application of Advanced Mt Processing and Inversion Methods in Project Indepth Mt. *Geoscience*, 11(3): 387-392(in Chinese with English abstract).



- nese with English abstract).
- Wei, W. B., Jin, S., Ye, G. F., et al., 2003. Methods to Study Electrical Conductivity of Continental Lithosphere. *Earth Science Frontiers*, 10(1): 15–23(in Chinese with English abstract).
- Wu, Q., 1982. Application of Gravity–Magnetic Method in Geothermal Field. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 6(2): 121–124 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. H., Hu, D. G., Wu, Z. H., et al., 2005. Geological Characteristics and Formation Age of Yangbajing–Dangxiong–Gulu Graben in Tibet. In: *Geochanics Professional Committee and Quaternary Geology Professional Committee, ed., Geological Processes and Environmental Disaster Effects in Tibetan Plateau*. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Xu, Z. Q., Zhang, J. X., Xu, H. F., et al., 1997. Ductile Shear Zones in the Main Continental Mountain Chains of China and Their Dynamics. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yan, J. Y., Zheng, H. W., He, R. Z., et al., 2019. Low Velocity Layer Investigation in Central Qiangtang in North Tibet and Its Dynamic Implications. *Earth Science*, 44(6): 1784–1796(in Chinese with English abstract).
- Yan, Y. L., Ma, X. B., Chen, Y., et al., 2012. The Study of Magnetotelluric Sounding on Coqên–Xainza Profile in Tibet. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(8): 2636–2642 (in Chinese with English abstract).
- Yang, L. Z., Liu, J. H., Sun, Z. X., et al., 2016. Study of the Characteristics of Radioactive Heat Production Rate and Hot Dry Rock Resources Potential in Zhangzhou City. *Modern Mining*, 32(3): 123–127, 133(in Chinese with English abstract).
- Yang, X. S., Jin, Z. M., 1998. The Low Velocity Zone Resulted from Crustal Partial Melting and Its Significance. *Progress in Geophysics*, 13(3): 38–45(in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. J., Ritzwoller, M. H., Zheng, Y., et al., 2012. A Synoptic View of the Distribution and Connectivity of the Midcrustal Low Velocity Zone beneath Tibet. *Journal of Geophysical Research*, 117: B04303. <https://doi.org/10.1029/2011jb008810>
- Yang, Y., Chen, J. Y., Yang, X. S., et al., 2010. Does Alignment of Melt Enhance Seismic Anisotropy beneath Tibet? *Seismology and Geology*, 32(1): 59–69(in Chinese with English abstract).
- Yang, Y., Jiang, Z. H., Yue, J. H., et al., 2019. Discussion on Application of Geophysical Methods in Hot Dry Rock (HDR) Exploration. *Progress in Geophysics*. 34(4): 1556–1567 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, D. Y., Zhang, P. Z., Liu, X. L., et al., 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. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 393–402(in Chinese with English abstract).
- Yuan, X. C., 1995. On Continental Basal Structure in China. *Chinese Journal of Geophysics*, 38(4): 448–459(in Chinese with English abstract).
- Yuan, X. C., Li, L., Jin, G. Y., et al., 1985. Deep Magnetotelluric Sounding in the Luozha–Yangbajing Area, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, (1): 26–32 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z. F., Chen, X., Li, J., et al., 2012. Advancement of Geothermal Geophysics Exploration. *Progress in Geophysics*, 27(1): 168–178 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Zhang, S. S., Li, S. T., et al., 2018. Geothermal Characteristics of the Qiabuqia Geothermal Area in the Gonghe Basin, Northeastern Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(11): 4545–4557 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Guo, A. L., Yao, A. P., 2004. Western Qinling–Songpan Continental Tectonic Node in China’s Continental Tectonics. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 23–32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Chen, Y. L., Xu, W. C., et al., 2006. Granitoids around Gonghe Basin in Qinghai Province: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2910–2922(in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. T., Wei, W. B., Jin, S., et al., 2011. Studies on the Temperature Dependence of Electrical Conductivity of Upper Mantle Rocks. *Progress in Geophysics*, 26(2): 505–510(in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. Q., Wen, D. G., Xu, T. F., et al., 2019. The U. S. Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy Project and Comparison of Typical EGS Site Exploration Status in China and U. S.. *Earth Science Frontiers*, 26(2): 321–334 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. Q., Yan, W. D., Li, D. P., et al., 2018. Characteristics of Geothermal Geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province. *Geology in China*, 45(6): 1087–1102(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. T., Yang, S. D., Yang, Z. J., 2007. The Plate

- Tectonics of Qinghai Province—A Guide to the 1:1 Million Geotectonic Map of Qinghai Province. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Zhang, Y. M., 2017. Indosinian Tectonic - Magmatism and Regional Tectonic Evolution in the Qinghainanshan Tectonic Belt (Dissertation). Chang'an University, Xi'an(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Dong, X., Ding, H. X., et al., 2017. Metamorphism and Partial Melting of the Himalayan Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 33(8): 2313—2341(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Kang, D. Y., Ding, H. X., et al., 2018. Partial Melting of Himalayan Orogen and Formation Mechanism of Leucogranites. *Earth Science*, 43(1): 82—98(in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. J., Nelson, K. D., 1993. Project INDEPTH Team Deep Seismic Reflection Evidence for Continental under Thrusting beneath Southern Tibet. *Nature*, 366: 557—559.
- Zhu, Y. Q., Shi, Y. L., 1990. Shear Heating and Partial Melting of Granite-Thermal Structure at Overthrustured Terrains in the Greater Himalaya. *Acta Geophysica Sinica*, 33(4): 408—416 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 白嘉启, 梅琳, 杨美伶, 2006. 青藏高原地热资源与地壳热结构. *地质力学学报*, 12(3): 354—362.
- 蔡鹏捷, 许荣科, 刘嘉, 等, 2014. 青海省贵德盆地内首次发现新近系火山活动. *资源调查与环境*, 35(2): 129—129, 156.
- 陈宣华, 党玉琪, 尹安, 等, 2010. 柴达木盆地及其周缘山系盆山耦合与构造演化. 北京: 地质出版社.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 等, 2002. 西秦岭造山带结构造山过程及动力学. 西安: 西安地图出版社.
- 高利娥, 曾令森, 王莉, 等, 2016. 喜马拉雅碰撞造山带不同类型部分熔融作用的时限及其构造动力学意义. *地质学报*, 90(11): 3039—3059.
- 顾群, 孙洁, 史书林, 等, 1980. 华北、西北一些地区地壳和上地幔内高导层. *地震地质*, 2(2): 21—29.
- 郭安林, 张国伟, 强娟, 等, 2009. 青藏高原东北缘印支期宗务隆造山带. *岩石学报*, 25(1): 1—12.
- 郭新峰, 张元丑, 程庆云, 等, 1990. 青藏高原亚东—格尔木地学断面岩石圈电性研究. *地球学报*, 11(2): 191—202.
- 侯康明, 石亚缪, 张忻, 1999. 青藏高原北部NNW向构造活动方式及形成年代. *地震地质*, 21(2): 127—136.
- 黄金辉, 王牧, 刘浩, 2016. 青海省青海南山—共和地区1:5万航磁测量报告. 西宁: 青海省国土资源厅资料馆.
- 黄宗理, 2005. 地球科学大辞典·应用学科卷. 北京: 地质出版社.
- 蒋荣宝, 陈宣华, 党玉琪, 等, 2008. 柴达木盆地东部中生代两期逆冲断层作用的FT定年. *地球物理学报*, 51(1): 116—124.
- 姜永涛, 张永志, 王丽美, 等, 2015. 川滇地区重力场特征及其与区域强震的关系. *地球物理学进展*, 30(5): 1990—1994.
- 孔祥儒, 王谦身, 熊绍柏, 1996. 西藏高原西部综合地球物理与岩石圈结构研究. *中国科学(D辑)*, 26(4): 308—315.
- 李百祥, 2002. 狼山—武威—共和断裂带和地热分布. *甘肃地质学报*, 11(1): 83—88.
- 李振清, 侯增谦, 聂凤军, 等, 2005. 藏南上地壳低速高导层的性质与分布: 来自热水流体活动的证据. *地质学报*, 79(1): 68—77.
- 柳江琳, 白武明, 孔祥儒, 等, 2001. 高温高压下花岗岩、玄武岩和辉橄岩电导率的变化特征. *地球物理学报*, 44(4): 528—533.
- 马晓冰, 孔祥儒, 刘宏兵, 等, 2005. 青藏高原东北部地区地壳电性结构特征. *地球物理学报*, 48(3): 689—697.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等, 2009. 中国大地构造单元划分. *中国地质*, 36(1): 1—27.
- 彭渊, 2015. 柴北缘宗务隆构造带海西晚期—印支期构造特征研究(博士学位论文). 北京: 中国地质科学院.
- 戚学祥, 李海兵, 张建新, 等, 2003. 韧性剪切带的变形变质与同构造熔融作用: 以中祁连地块宝库河韧性走滑剪切带为例. *地质论评*, 49(4): 413—421, T003.
- 钱辉, 姜枚, 薛光琦, 等, 2001. 天然地震接收函数揭示的青藏高原东部地壳结构. *地震学报*, 23(1): 103—108.
- 孙延贵, 2004. 西秦岭—东昆仑造山带的衔接转换与共和坳拉谷(博士学位论文). 西安: 西北大学.
- 滕吉文, 熊绍柏, 张中杰, 1997. 青藏高原深部结构与构造地球物理研究的回顾和展望. *地球物理学报*, 40(S1): 121—139.
- 万天丰, 2018. 论全球岩石圈板块构造的动力学机制. *地学前缘*, 25(2): 320—335.
- 万天丰, 朱鸿, 2002. 中国大陆及邻区中生代—新生代大地构造与环境变迁. *现代地质*, 16(2): 107—1120.
- 王二七, 苏哲, 许光, 2009. 我国的一些造山带的侧向挤出构造. *地质科学*, 44(4): 1266—1288.
- 王坤, 2019. 干热岩勘查中大地电磁测深正反演及其应用研究(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 魏文博, 陈乐寿, 谭捍东, 等, 1997. 西藏中—南部壳内高导体与热结构特点: INDEPTH-MT提供的证据. *现代地质*, 11(3): 387—392.
- 魏文博, 金胜, 叶高峰, 等, 2003. 大陆岩石圈导电性的研究方法. *地学前缘*, 10(1): 15—23.
- 吴钦, 1982. 地热田上重磁方法的应用. *物探与化探*, 6(2):



- 121—124.
- 吴珍汉, 胡道功, 吴中海, 等, 2005. 西藏羊八井—当雄—谷露地堑的地质特征与形成时代. 见: 地质力学专业委员会与第四纪地质专业委员会, 编, 青藏高原地质过程与环境灾害效应文集. 北京: 地震出版社.
- 许志琴, 张建新, 徐惠芬, 等, 1997. 中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学. 北京: 地质出版社.
- 严江勇, 郑洪伟, 贺日政, 等, 2019. 藏北羌塘盆地中部地壳低速层分布与动力学意义. 地球科学, 44(6): 1784—1796.
- 闫永利, 马晓冰, 陈赞, 等, 2012. 西藏错勤—申扎剖面大地电磁测深研究. 地球物理学报, 55(8): 2636—2642.
- 杨立中, 刘金辉, 孙占学, 等, 2016. 漳州岩体放射性生热率特征及干热岩资源潜力. 现代矿业, 32(3): 123—127, 133.
- 杨晓松, 金振民, 1998. 壳内部分熔融低速层及其研究意义. 地球物理学进展, 13(3): 38—45.
- 杨彧, 陈建业, 杨晓松, 等, 2010. 部分熔融强化了青藏高原地壳的各向异性? 地震地质, 32(1): 59—69.
- 杨冶, 姜志海, 岳建华, 等, 2019. 干热岩勘探过程中地球物理方法技术应用探讨. 地球物理学进展, 34(4): 1556—1567.
- 袁道阳, 张培震, 刘小龙, 等, 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. 地学前缘, 11(4): 393—402.
- 袁学诚, 1995. 论中国大陆基底构造. 地球物理学报, 38(4): 448—459.
- 袁学诚, 李立, 金国元, 等, 1985. 西藏洛扎—羊八井地区的磁大地电流地壳测深. 地质学报, (1): 26—32.
- 曾昭发, 陈雄, 李静, 等, 2012. 地热地球物理勘探新进展. 地热能, 27(1): 168—178.
- 张超, 张盛生, 李胜涛, 等, 2018. 共和盆地恰卜恰地热区现今地热特征. 地球物理学报, 61(11): 4545—4557.
- 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. 地学前缘, 11(3): 23—32.
- 张宏飞, 陈岳龙, 徐旺春, 等, 2006. 青海共和盆地周缘印支期花岗岩类的成因及其构造意义. 岩石学报, 22(12): 2910—2922.
- 张乐天, 魏文博, 金胜, 等, 2011. 上地幔岩石的电性—温度依赖关系研究. 地球物理学进展, 26(2): 505—510.
- 张森琦, 文冬光, 许天福, 等, 2019. 美国干热岩“地热能前沿瞭望台研究计划”与中美典型EGS场地勘查现状对比. 地学前缘, 26(2): 321—334.
- 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 等, 2018. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征. 中国地质, 45(6): 1087—1102.
- 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. 北京: 地质出版社.
- 张永明, 2017. 青海南山构造带印支期构造岩浆作用与区域构造演化(博士学位论文). 西安: 长安大学.
- 张泽明, 董昕, 丁慧霞, 等, 2017. 喜马拉雅造山带的变质作用与部分熔融. 岩石学报, 33(8): 2313—2341.
- 张泽明, 康东艳, 丁慧霞, 等, 2018. 喜马拉雅造山带的部分熔融与淡色花岗岩成因机制. 地球科学, 43(1): 82—98.
- 朱元清, 石耀霖, 1990. 剪切热及花岗岩部分熔融——关于喜马拉雅地区逆冲断层与地壳热结构分析. 地球物理学报, 33(4): 408—416.