

doi: 10.12029/gc20210304

龙登红,周小龙,杨坤光,辜平阳,高银虎,王树明,陈桂凡. 2021. 青藏高原东北缘深部地质构造与地热资源分布关系研究[J]. 中国地质, 48(3): 721-731.

Long Denghong, Zhou Xiaolong, Yang Kunguang, Gu Pingyang, Gao Yinghu, Wang Shuming, Chen Guifan. 2021. Research on relationship between the deep structure and geothermal resource distribution in the Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Geology in China*, 48(3):721-731(in Chinese with English abstract).

青藏高原东北缘深部地质构造 与地热资源分布关系研究

龙登红^{1,2},周小龙¹,杨坤光²,辜平阳³,高银虎¹,王树明¹,陈桂凡²

(1. 甘肃省地质矿产勘查开发局第一地质矿产勘查院,甘肃天水 741020;2. 中国地质大学(武汉),湖北武汉 430074;3. 中国地质调查局西安地质调查中心,陕西西安 710054)

摘要:青藏高原内部及边缘分布大量地热田,主要有青海共和—贵德地热田、甘肃张掖盆地地热田、甘肃天水地热田、云南腾冲地热田等,所有地热田系统整体围绕青藏高原边缘呈带状展布,主要受控于青藏高原构造活动。对该区域多个地热田进行分析,均具有深部热源垂直传导供热、深大断裂和其发育的次级断裂为有利通道等特性。青藏高原深部分布多个通道流,在地震层析成像观测结果、远震P波走时层析成像等地球物理资料上均有显著反映,青藏高原中北部地壳低速—高导层是部分熔融层的岩石学证据亦被证实。主要地热田均分布在通道流沿线,根据地热田的研究成果,认为下地壳的通道流不仅为地热田提供热源,形成明显的大地热流异常区带,通道流区域的地壳厚度减薄、构造活动增强,热流易于向上传导运移。文章综合分析后初步建立了地热分布与通道流关系模型、与通道流相关的地热田地热模型,认为青藏高原东北缘地区分布的多个地热田均受控于其深部的通道流;通过对该区域地热资源前景进行分析,认为甘肃天水地区位于通道流的交汇部位,地热资源前景巨大。

关键词:地热资源;青藏高原;通道流;天水地热;地质调查工程

中图分类号:P54,P314.1

文献标志码:A

文章编号:1000-3657(2021)03-0721-11

Research on relationship between the deep structure and geothermal resource distribution in the Northeastern Tibetan Plateau

LONG Denghong^{1,2}, ZHOU Xiaolong¹, YANG Kunguang², GU Pingyang³,
GAO Yinghu¹, WANG Shuming¹, CHEN Guifan²

(1. The First Institute of Geology and Mineral Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration, Tianshui 741020, Gansu, China; 2. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Large number of geothermal fields are distributed on the margin and inside of the Tibetan Plateau, such as Gonghe—Guide

收稿日期:2019-09-08;改回日期:2019-12-26

基金项目:甘肃省基础地质调查项目“甘肃省定西市华家岭—黄家窑地区四幅1:5万矿产远景调查(2017-105-1)”、“甘肃省天水市甘谷县地热资源调查评价(2019-27-2)”资助。

作者简介:龙登红,1987年生,男,工程师,地质学专业,主要从事区域基础地质调查研究工作;E-mail:625571323@qq.com。

geothermal field, Zhangye geothermal field, Tianshui geothermal field and Tengchong geothermal field. All these geothermal fields are basically characterized by zonal distribution along the Tibetan Plateau and systematically controlled by its tectonic activities. The analysis on multiple geothermal fields shows that they all have a deep heat source with vertical upward heating conduction through favorable channels from deep faults to their secondary faults. It is revealed that several channel flows exist under the deep Tibetan Plateau and are remarkably shown in geophysical data like the seismic tomographic imaging and teleseismic P-wave travel time tomography. It has also been verified by petrologic evidence that the low-velocity and high conductive layer beneath the crust of the Mid-Northern Tibetan Plateau is a partial melting layer. In view of geothermal fields distributed along the channel flow and combined with other research results, it is believed that the channel flows not only act as heating resources, but also form significant abnormal zones of terrestrial heat flow. In the area of channel flows, crust is thinned, structural activities are intensified, which enables heat to be easily transferred upward. According to comprehensive analysis, the relationship model of geothermal distribution and channel flow, and the geothermal field model related to channel flow are preliminarily established. It is believed that geothermal fields distributed in the northeast margin of the Tibetan Plateau are controlled by the channel flow in the deep crust. Through the analysis of the prospect of geothermal resources in this area, it is suggested that the Tianshui area in Gansu Province is located at the intersection of channel flows, and has great potential for prospecting of geothermal resources.

Key words: geothermal resource; Tibetan Plateau; channel flow; geotherm of Tianshui; geological survey engineering

About the first author: LONG Denghong, male, born in 1987, engineer, engaged in geological investigation and study of mineral resources; E-mail: 625571323@qq.com.

Fund support: Funded by the Geological Survey Program Foundation of Gansu Province (No.2017-105-1, No.2019-27-2).

1 引 言

地热系统形成的基础是热源,大规模的热源是形成大型地热系统的必要条件,是造山带型地热系统和盆地型地热系统的相同先决条件(张英等,2017)。已有研究表明,位于地壳浅部5 km以内的岩浆岩会在5~20 Ma期间冷却至围岩温度,只有新近纪以来浅层次侵入的规模较大的岩浆岩体能对地热热源具有显著贡献(张朝锋等,2018)。对于非岩浆型地热系统,主要以地球深部传热和放射性物质生热作为热源,较高的热背景值对于地热系统的形成非常关键(张英等,2017)。地球深部热能以对流和传导的方式传输到地球浅部,在地表能量释放方式主要为洋陆作用、盆山作用、岩浆活动等,构成释热构造系统(图1)(李德威等,2017)。

青藏高原内部及边缘,分布有大量地热田,主要受控于青藏高原构造事件。青藏高原腹地分布有羊八井地热田、羊易地热田和古堆地热田等;沿着青藏高原边缘分布有青海共和—贵德地热田、甘肃张掖盆地地热田、甘肃天水地热田、陕西关中盆地地热田、云南腾冲地热田等,所有地热田系统整体围绕青藏高原边缘呈带状展布。目前对各个地热田的热源研究争议较大,有岩浆型和深部地幔热流等不同观点(方斌等,2009;孙红丽等,2015;许鹏

等,2018;张朝锋等,2018)。本文以青藏高原东北缘为研究对象,对其地热的热源从深部构造背景场进行研究,对其地热资源前景进行预测分析。

2 青藏高原东北缘深部地质构造特征

青藏高原地壳电性结构存在显著的不均一性,处于不同构造演化阶段和具有不同构造性质的大地构造单元(李德威等,2001)。大量的地球物理资料表明,青藏高原下地壳具有高导层、低速层、热流密度值异常等特征,显示青藏高原不存在刚性的岩石圈,可解体出分层流变的弱下地壳(赵继龙等,2007)。青藏高原与周边沉积盆地的地壳结构差异性特征,可能由于下地壳可能发生流动(李德威等,2000),其下地壳高导层、低速层等的形成,与青藏高原活动过程中的中下地壳岩石的热软化和韧性流动有关。2004年由伦敦地质学会主办召开的“大陆碰撞带中—下地壳的通道流、挤出和折返”大会上,给出了通道流(Channel Flow)的模型,主要对青藏高原地壳中岩层的通道流或韧性剪切挤出方面进行探讨(滕吉文等,2012)。通道流模型认为以青藏高原为例的一些造山带区域,相对于较为刚性的上地壳和岩石圈上地幔,处于中间层的中、下地壳作为强度较低的塑性流变层,具有更强的流动性,因而在高原厚地壳的重力差异驱动或是上地幔的

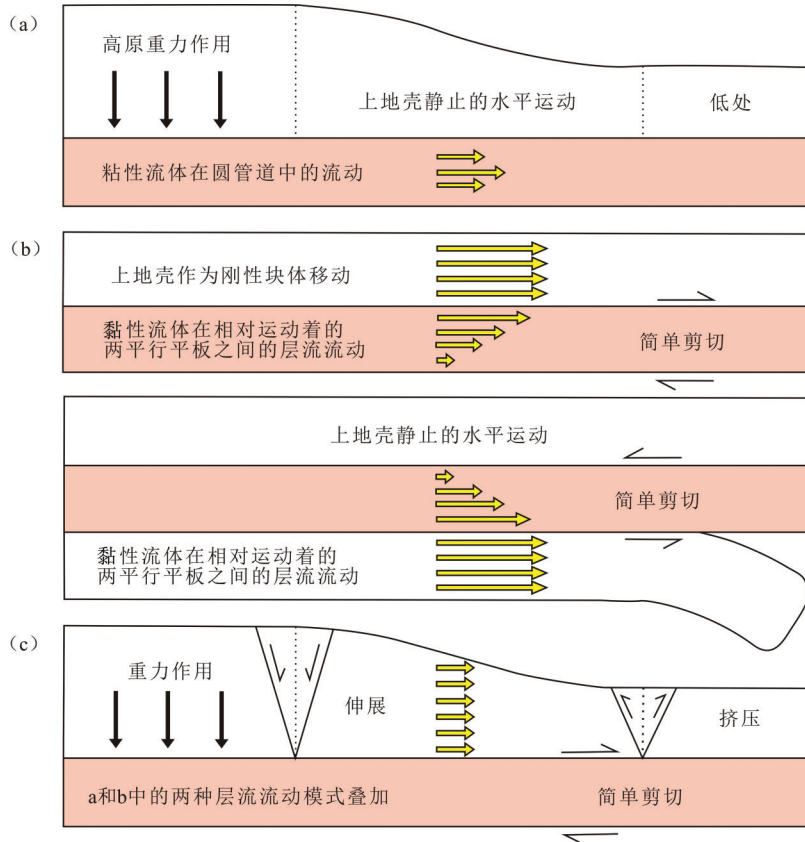


图1 通道流动模式图(据 Klemperer, 2006)

a—压力驱动的泊肃叶流;b—上地壳挤压(上)或岩石圈俯冲作用(下)驱动的库爱特流;c—叠加泊肃叶流和库爱特流

Fig.1 Mode of channel flow(after Klemperer, 2006)

a—Poiseuille flow driven by pressure gradient; b—Couette flow driven by upper-crustal extrusion(above) or lithospheric subduction (below); c—Combined Poiseuille flow and Couette flow

拖曳作用下易发生流动而形成通道流(Klemperer et al., 2006)(图1)。青藏高原周边盆地的地幔物质上涌后莫霍面凸起,在重力势能及热驱动下下地壳黏性物质流入青藏高原慢坳区,造成青藏高原下地壳物质加厚、构造隆升伴生地壳深部热流物质上升和侧向扩展,从而在北部、东部和南部均形成具有通道流结构(赵继龙等,2007)。

地震层析成像观测(Bao et al., 2015)显示,在青藏高原存在大面积的地幔低速带,位于上地幔顶部深度,从中北部连续延伸到东部地区(图2),可能指示了下方的软流圈地幔流在印度—欧亚大陆的板块汇聚挤压下向东的逃逸挤出。通过开展SKS波各向异性观测,显示在中北部和东部地区的特征,符合地幔软流圈挤出的动力学特征(王琼等,2013)。青藏高原新生代钾质火山活动时空迁移,具有从高原腹地向周缘迁移的趋势特征(莫宣学

等,2007),在东北部的秦岭构造带内的礼县—宕昌地区分布有含有地幔包体的钾质基性火山岩,可能指示了青藏高原下方存在流向秦岭的地幔流通道(图2)。据西秦岭地区地震物探成果显示,青藏高原东北部天水地区存在一个巨型地幔热隆,在地幔热隆的上部存在一个埋深约40 km、厚度约20 km的壳内韧性流变层。认为其为青藏高原向东流动的软流圈地幔流与周缘刚性块体发生碰撞,致使地幔流发生局部扰动,从而触发和加速了秦岭边界带下方的岩石圈地幔拆沉和热侵蚀过程,地震剖面亦证实青藏高原东北缘地壳经历了高原隆升后强烈的减薄作用(王海燕等,2014;叶卓等,2018)。

通过高分辨率的QLg波数据(Zhao et al., 2013),获得青藏高原及其邻区层析成像图(图3),显示了青藏高原强烈衰减区域普遍存在部分熔融,显示在青藏高原东北缘深部物质流动通道有3条:

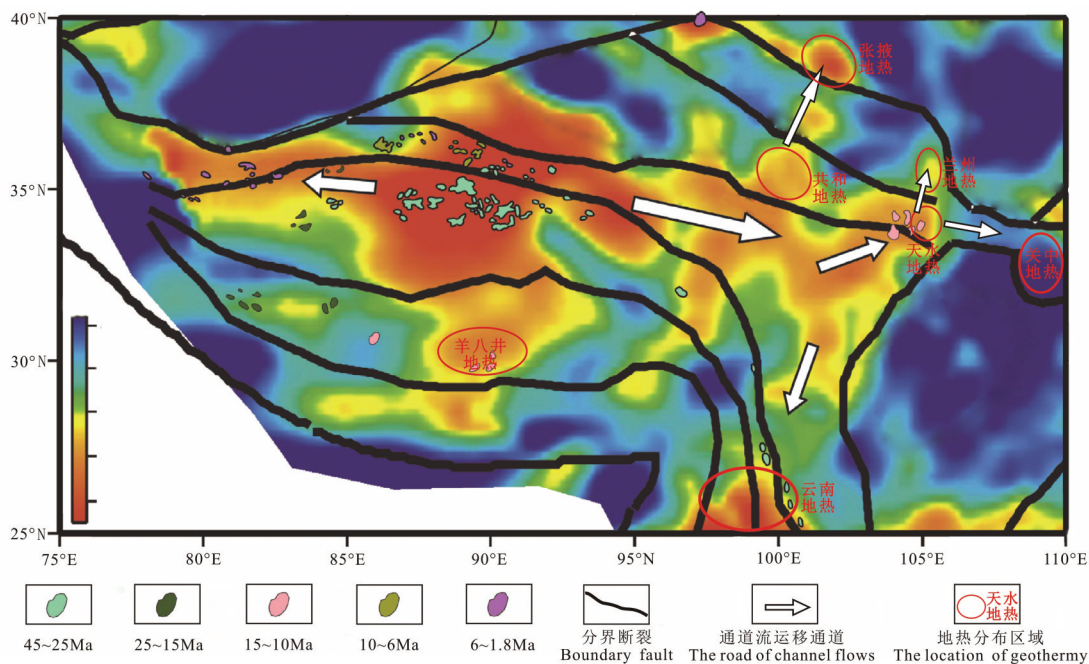


图2 青藏高原及邻区新生代火山岩的时空分布叠合于95 km深度剪切波速度分布图(据叶卓,2018)

Fig.2 Shear-wave velocity at depth of 95 km in the Tibetan Plateau and its adjacent area, overlain by spatial and temporal distribution of the Cenozoic volcanisms (modified from Ye Zhuo,2018)

分别为共和—民乐一线、贵德—天水—西安一线、天水—宕昌—成都一线。根据远震P波走时层析成像研究,认为青藏高原东北缘中下地壳存在明显方位各向异性的低速层,显示在秦祁地块下面有深达

70 km的高速异常(图4),阻断了青藏高原块体下地壳低速层向东北方向的延伸,与下地壳通道流模式相吻合(董兴朋等,2018)。

通过对青藏高原中北部宕昌地区的新生代火

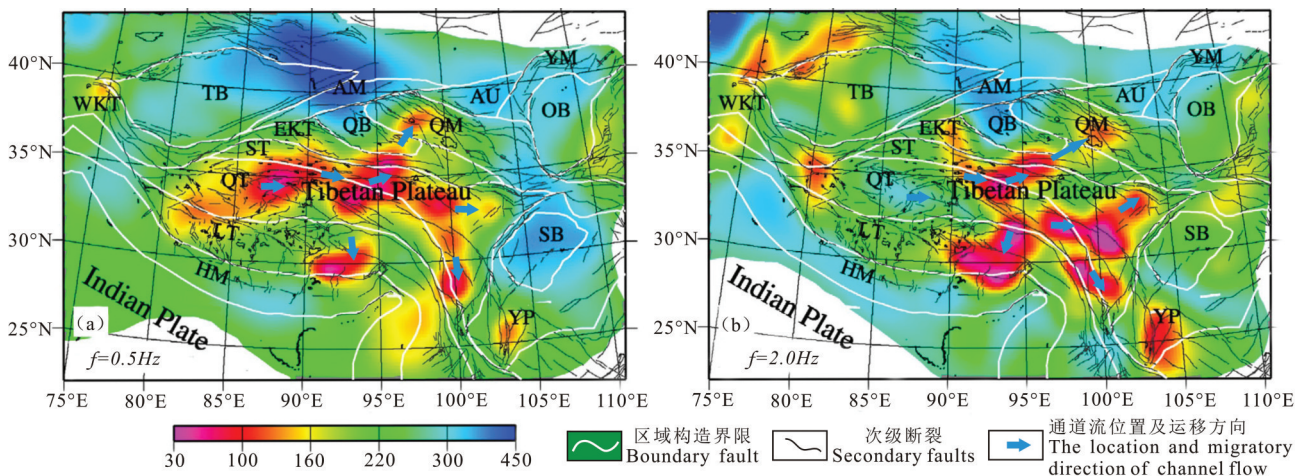


图3 青藏高原及其邻区层析成像图(a-0.5 Hz频率;b-2.0 Hz频率;据 Zhao et al.,2013)

WKT—西昆仑地块;HM—喜马拉雅地块;LT—拉萨地块;QT—羌塘地块;ST—松潘地块;TB—塔里木盆地;OB—鄂尔多斯盆地;SB—四川盆地;YP—云贵高原;QM—秦祁昆造山带;EKT—东昆仑地块;AM—阿尔金造山带;QB—柴达木盆地;AU—阿拉善地块

Fig.3 Tomographic images of the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas (a-QLg maps at 0.5 Hz; b-QLg maps at 2.0Hz, after Zhao et al.,2013)

WKT—Western Kunlunshan terrane;HM—Himalaya;LT—Lhasa Terrane;QT—Qiangtang;ST—Songpan-Ganzi-Hoh xil;TB—Tarim basin;OB—Ordos basin;SB—Sichuan basins;YP—Yungui plateau;QM— Qilianshan mountains;EKT— Eastern Kunlunshan terrane;AM—Alty n Tagh mountains;QB— Qaidam basin;AU— Alashan uplift

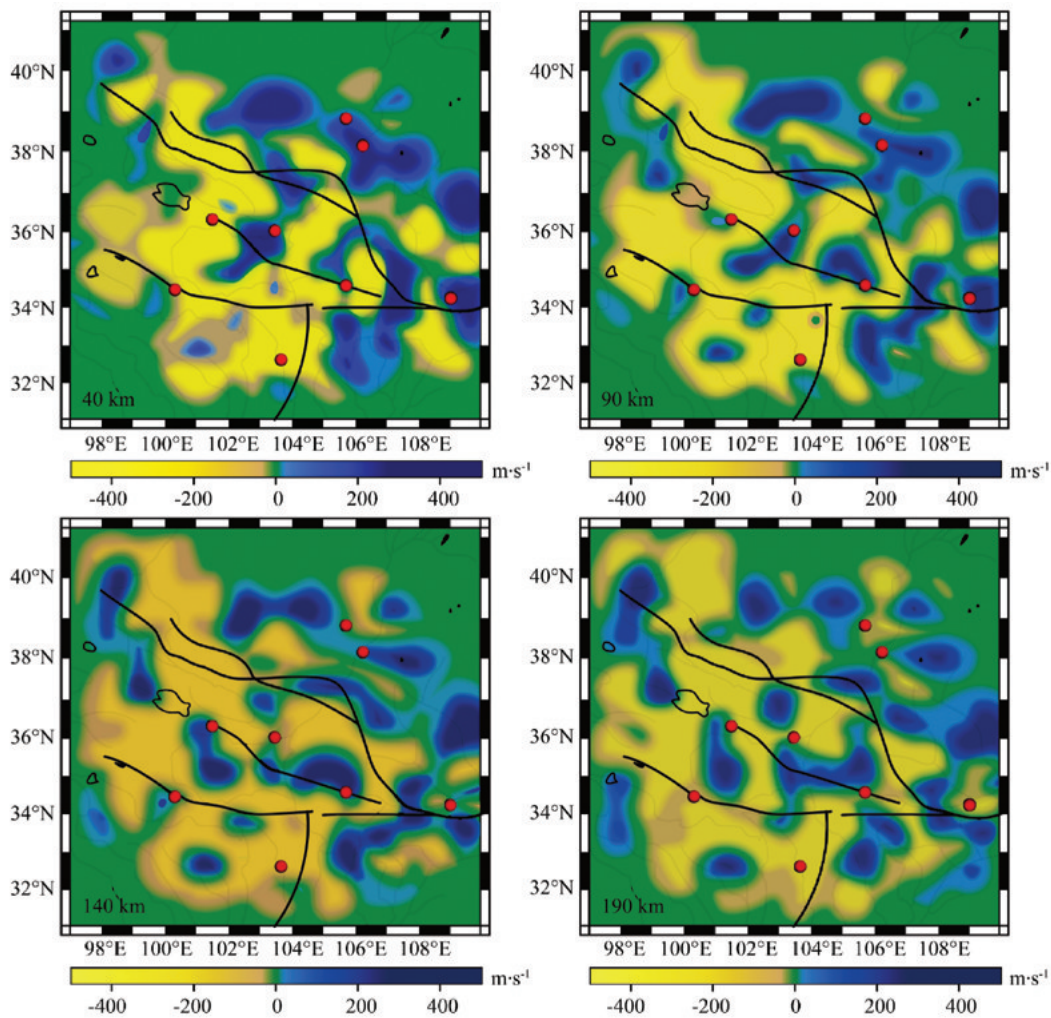


图4 不同切片的P波速度扰动(每层深度标于图的左下角)(董兴鹏,2018)

Fig.4 The P wave velocity perturbation images in different slices (The depths of every slice are marked at bottom left of maps) (Dong Xingpeng, 2018)

山岩和包体的研究,认为长英质岩浆由地壳岩石在700~1050℃的温度和0.5~1.5 GPa的压力条件下熔融形成,与地球物理、地壳包体和地球物理与岩石学模拟得出的结论相一致(袁超等,2016;王强等,2016)。研究显示,中下地壳中存在8%~20%的熔体,显著改变了地壳强度,有利于熔体弱化的中下地壳向北和向东流动。在高温、部分熔融的中下地壳中,地壳熔体强化的塑性流动使得青藏高原保持较为一致的整体抬升,并使得青藏高原东北部边缘发生扩展活动。

3 地热资源特征

印度—欧亚碰撞形成的巨大构造动力,导致青藏高原大面积发生区域性地壳缩短和增厚,大规模

岩浆活动、高原快速隆升,伴随着频繁的大地震和强烈的地表水热活动,同步形成了蕴藏丰富的地热资源(白嘉启等,2006),形成了中国温泉数量最多、延伸最长、规模最宏伟的地热带。在青藏高原东北缘地区,形成一系列地热田,其成因具有相似的特征,本文选择甘肃张掖地热、青海共和地热、甘肃天水地热、陕西关中地热(图2),对其地热特征进行简要分析。

3.1 张掖地热

张掖地热为位于青藏高原北部地区,形成于张掖盆地内,属盆地传导型中低温地热田,水源主要靠南部祁连山区大气降水和冰雪融水下渗侧向补给和盆地自身越流补给。地热主要靠大地热流正常增温,其温度随热储层埋藏深度增加而升高,热

源可能来自上地幔。地下水深循环主要依靠祁连山北缘断裂和盆地内NNW向断裂内形成的导水构造和通道,在地下深循环过程中加热,热储层主要为孔隙发育、渗透性较好的古近系白杨河组(魏红军等,2007;张振杰等,2018;俞兆虎等,2018)。

3.2 贵德地热

贵德盆地为一新生代断陷盆地,基底由印支期花岗岩组成,其上沉积着新生代古近纪和新近纪中新世、上新世地层,为典型的传导型中低温地热资源。热能的来源主要来自于地球内部地幔热能及地壳岩石放射性元素衰变产生的热能;新生界沉积物为研究区内地下热水的形成和赋存提供了良好的储盖条件和地热水库容。地下热水中的化学成分显示,除了从深部带来的成分外,主要是靠径流运移过程中与围岩的溶滤作用及水岩作用而成(李乐乐等,2016;郎旭娟等,2017)。

贵德盆地莫霍面埋深浅,岩石圈厚度较薄,盆地内断裂发育。贵盆地内三河平原地热区地温呈现出由边缘向中心增高的趋势,地温梯度值介于 $5.29\sim 9.70^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,远高于正常地温梯度值 $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。大地热流值的分布大体上呈现出从南往北逐渐增大的趋势,这与莫霍面的埋深规律正好相反,说明莫霍面埋深越浅,温度越高,越有利于地下热水的形成,说明热源主要来源深部传导热(郎旭娟,2016)。

3.3 天水地热

天水地区地温场高、温泉多,与深部存在SN向构造与地表近EW向构造形成立交桥式构造有关。据地震测深、大地电磁测深推断天水—西吉一线莫霍面、地幔高导层上隆,地壳厚度仅为45 km,岩石圈厚度为90 km,远小于邻区(110~160 km)。在天水—西吉地区的中地壳存在15~20 km的低速、高导层,可能是部分熔融物质热状态的间接反映。

温泉多沿基底隆起、区域性断裂以及重力梯级带反映的隐伏断裂带分布,并且多出现在活动断裂的交汇部位。如沿西秦岭北缘和渭河断裂带分布的天水街子、中滩、武山温泉,沿通渭—清水断裂分布的通渭、秦安、清水温泉,沿中祁连构造带北缘会宁—张家川隐伏断裂分布的西巩驿、义岗温泉,都与近南北向断裂交汇有关,形成东西成行、南北成列的网状格局(梁炳仁等,2016)。天水地热田的热

源争议较大,笔者认为三叠纪岩体形成时间较早,个别以往认为是新近纪岩体,已被最新测年数据确定为三叠纪(丁守卓等,2015),岩体整体放射性元素含量不高,故岩体无法提供足够热源。认为该区域主要热源为深循环地热能,天水地区的大地热流值高达 $86\text{ mW}/\text{m}^2$ (姜光政等,2016),地下水沿某些活动断裂深入地下,被深部地球热能加热,又沿深大断裂向上运移。

3.4 陕西关中地热

关中盆地是位于鄂尔多斯台地和秦岭造山带之间的特殊构造体,盆地内新构造运动强烈,莫霍面隆起,活动断裂切错交织,凸凹断块相间(赵慧等,2009)。关中盆地莫霍面埋深约浅6~16 km,岩石圈厚度较薄,莫霍面温度较高,盆地内大地热流值平均值为 $69.62\text{ mW}/\text{m}^2$,属大地热流异常区。横向和纵向的测温曲线表明,热储温度随热储埋深的增加而增大,热的深部来源特征显著(孙红丽等,2015;饶松等,2016)。独特的地质地热背景造成了盆地内地热资源以地壳热传导通过岩石加热基底为主,盆地边缘或浅层含水层以局部热对流为辅的热循环系统,垂向热传导是区内热主要来源,而对流型传递是区内地热资源维持温度稳定的重要作用。

对以上地热田进行分析,认为地热田具有相似的热源,均主要为深部热源垂直传导供热,地下水主要来源于大气降水,少量深部水,深大断裂和其发育的次级断裂为水运移的有利通道,但对于深部热源的来源,在以往工作中未进行分析研究,本次进行重点探讨。

4 深部构造特征和地热资源分布关系的讨论

根据地质特征和地球物理特征综合分析,认为在青藏高原下地壳—上地幔之间,存在塑性高温物质运移的通道。在青藏高原东北部地区,主要分布有3条通道流,其通道流分布与该地区地热资源的分布具有高度的一致性,分别为共和—民乐通道流(分布有共和地热、张掖地热)、贵德—天水—西安通道流(分布有天水地热、关中地热)、天水—成都—云南通道流(分布有天水地热、四川地热、云南地热)(图2)。同时在水天地区向北有一条小规模次级通道流,其主要受到鄂尔多斯地块的阻挡后,

通道物质流沿着地块西侧边缘带北上,形成了兰州地热。从图上可以明显看出,高原东北缘地区的所有地热田均位于通道流上,并且通道流的主通道上的地热资源前景均较好,而在次级小通道上的地热田温度相对偏低。

对高原东北缘的地热的热源研究中,早期认识主要以岩浆热源的观点,目前通过多个地热田的勘查,未发现深部的供热岩浆岩,目前主流观点均认为以上地幔热流传导为主,垂向热传导是区内热主要来源。从中国大地热流分布图可以看出(图5),青藏高原腹地的大地热流值最高,向北和东部方向递减,与通道流和地热田分布特征一致,显示总体为热传导型地热田的特征。

结合以上特征,笔者认为青藏高原东北缘地区分布的多个地热田,均受控于青藏高原深部的通道流控制。青藏高原下地壳通道流内物质运移,不仅为地热田提供热源,形成明显的大地热流异常区,并且通道流带上的地壳厚度减薄,使得热流物质易于向上运移和上升。

通过以上分析,初步建立出青藏高原东北缘地区地热分布与通道流模型(图6),主要地热田分布于通道流沿线。在青藏高原地区的地热主要以高温地热田为主,该区域新生代岩浆岩发育,主要为岩浆型地热,地热主要分布于地热通道与北东向两组构造的交汇位置,以羊八井地热等为代表;在青藏高原前缘分布的盆地型地热田,在通道流上方的盆地型地热田资源丰富,以中低温地热为主,少量高温地热,例如共和—贵德地热田;在造山带内发育的地热田,主要受控于通道流上方的构造发育程度,在多组构造交汇地区分布,主要以中低温地热田为主,例如武山温泉、街子温泉等。

据此初步建立与通道流相关的地热田地热模型(图7)。在通道流经过地段,地壳厚度减薄、莫霍面上移,构造断裂相对发育程度加强。通道流热量源源不断向上运移(亦有少量上地幔的热量),同时少量幔源和通道流内的热流体向上运移;沿着盆地断裂带向下运移的地表水在循环过程中持续加热后,沿着断裂带运移进入热储层,由于上部的盖层

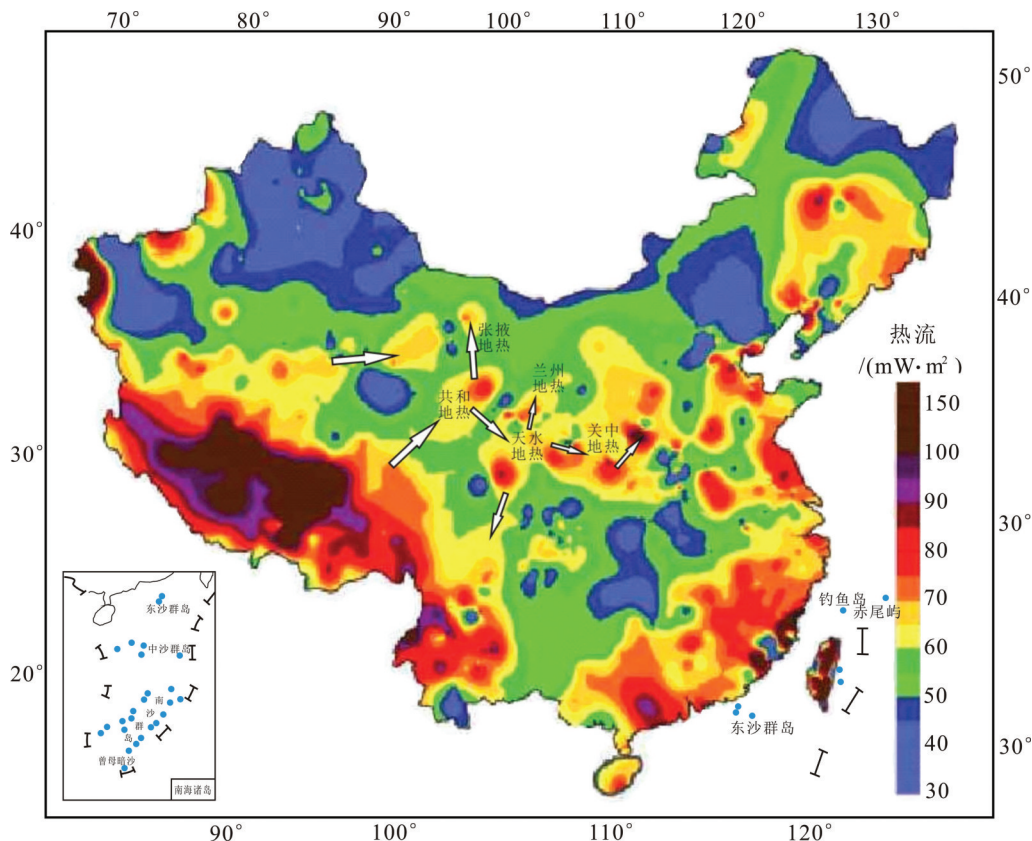


图5 中国大陆地区热流图(据汪集吻,2012)

Fig.5 Updated map of heat flow in the continental area of China (modified from Wang Jiyang, 2012)

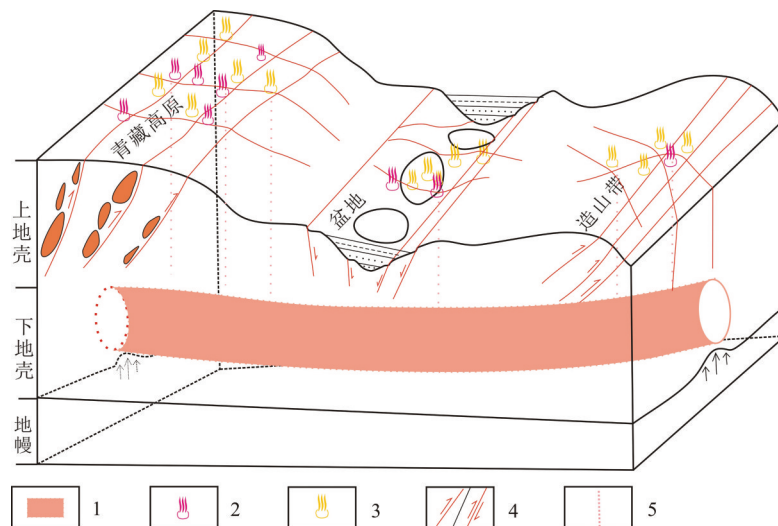


图6 通道流与地热田在区域三维空间关系示意图

1—通道流;2—高温地热田;3—中低温地热田;4—断层;5—地热田与通道流关系连接线

Fig.6 3D Map of relation between channel flow and geothermal field

1—Channel flow; 2—High temperature geothermal field; 3—Medium and low temperature geothermal field; 4—Fault; 5—Connection line between geothermal field and channel flow

封闭作用使得热流体保存在热储层中,在局部联通地表分布的断裂带处热泉出露。水热型地热主要以开发利用热储层地热为主,干热岩型地热主要以开发通道流上方的高温岩石,热源主要以通道流的热量传导供应。

根据该认识,对地热资源潜力进行初步预测分析。在通道流沿线分布的共和地热、贵德地热、天

水地热、关中地热等,理论上认为其地热资源前景巨大,目前已经在共和地热、关中地热资源等均取得的巨大成果,而天水地区地热资源勘查工作尚未取得重要进展。甘肃天水地区位于东西向通道流和南北向通道流交汇部位,理论上具有巨大的地热资源前景,需要在下一步加强地热勘查工作,力争实现该区域地热资源勘查取得重大突破。

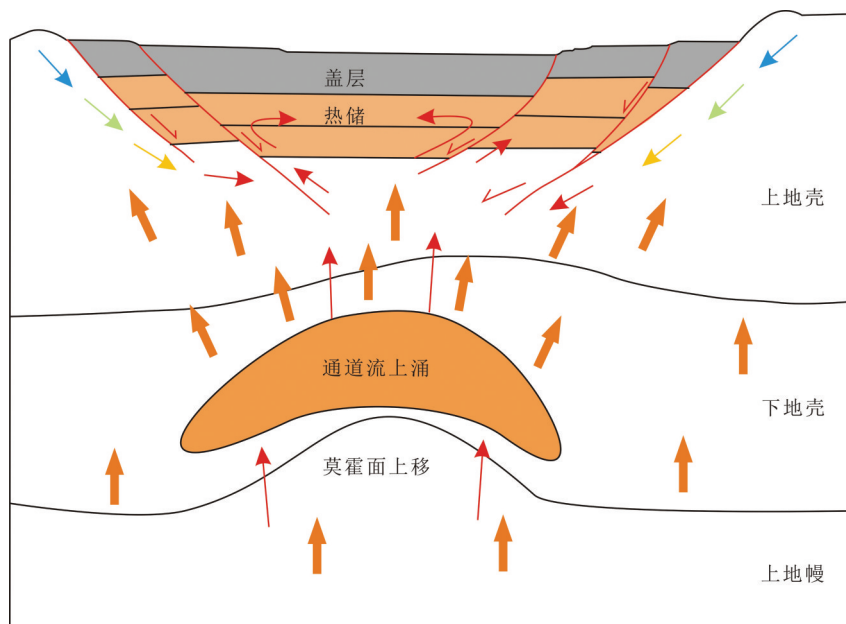


图7 地热田成矿模型图(通道流切面)

Fig.7 Metallogenic model of geothermal field (channel flow section)

5 结 论

(1)对青藏高原腹地及东北缘分布的多个地热田进行分析,认为该区域地热田具有相同的成矿概念模型。各地热田均具有热源垂直传导供热热源。

(2)根据地质和地球物理特征分析,认为青藏高原的深部分布多个通道流。在 seismic 层析成像观测结果、远震P波走时层析成像等地球物理资料上均有显著反映,同时青藏高原中北部地壳低速—高导层是部分熔融层的岩石学证据被证实。

(3)青藏高原东北缘地区分布的多个地热田均受控于青藏高原深部的通道流控制。青藏高原下地壳通道流内物质运移,不仅为地热田提供热源,形成明显的大地热流异常区,并且通道流带上的地壳厚度减薄,使得热流物质易于向上运移和上升。

(4)对区域地热资源分析,认为甘肃天水地区处于通道流的交汇位置,地热资源前景巨大。

致谢:笔者在研究及成文过程中得益于与孟继红、陶天才、张勇三位高级工程师等的讨论,审稿专家对文章提出诸多宝贵的修改意见和建议,在此表示由衷的感谢。

References

- Bai Jiaqi, Mei Lin, Yang Meiling. 2006. Geothermal resources and crustal thermal structure of the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 12(3): 354-362(in Chinese with English abstract).
- Bao X, Song X, Li J. 2015. High-resolution lithospheric structure beneath Mainland China from ambient noise and earthquake surface-wave tomography[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 417:132-141.
- Ding Shouzhao, Luo Jinhai, Cheng Jiachao, Han Kui, Wang Shidi, You Jia. 2015. Geochemistry and chronology of quartz orthopyroxene in Boyang of the Western Qinling Orogenic Belt, and their geological significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(4):247-254(in Chinese with English abstract).
- Dong Xingpeng, Teng Jiwen. 2018. Travel time tomography using teleseismic P wave in the northeastern Tibetan plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(5): 420-428(in Chinese with English abstract).
- Fang Bing, Yang Yunjun, Wang Genghou, Zhou Xun, Chen Shengnan. 2009. Characteristics and resource evaluation of the Jiwa geothermal field in central Qiangtang, northern Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1335-1341(in Chinese with English).
- Jiang Guozheng, Gao Peng, Rao Song, Zhang Songyou, Tang Xiaoyin, Huang Fang, Zhao Ping, Pang Zhonghe, He Lijuan, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2019. Compilation of heat flow data in the continental area of China(4th edition) [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(8): 2892-2910.
- Hong Zenglin, Zhang Yinlong, Zhou Yang. 2019. Research on the modes of occurrence and application of geothermal resources in the middle and deep layers of the piedmont area in southern Guanzhong Basin[J]. *Geology in China*, 46(5): 1224-1235(in Chinese with English abstract).
- Klemperer S L. 2006. Crustal Flow in Tibet: Geophysical Evidence for the Physical State of Tibetan Lithosphere, and in Ferred Patterns of Active Flow[M] // Law R D, Searle M P, Godin L. *Geological Society of London, Special Publications*.
- Lang Xujuan. 2016. The Thermal Structure and Geothermal Genesis Mechanism in Guide Basin[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Science(in Chinese with English abstract).
- Lang Xujuan, Zhang Fawang, Wang Guiling. 2017. The thermal structure and geothermal genesis mechanism in Guide Basin[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(B11): 43-46(in Chinese with English abstract).
- Long Denghong. 2021. Geochemistry, Zircon U-Pb dating and tectonic significance of basite in the middle section of Bogda Orogenic Belt, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 54(1):15-29 (in Chinese with English abstract).
- Long Denghong, Wang Sicheng, Hao Hechao, Mu Xufeng, Wang Liangliang, Liang Minghong, Gao Xiaofeng. 2020. Geochemical features and tectonic significance of volcanic rock in Qijiaojing Group of Middle Section of Bogda, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 53(1):13-23(in Chinese with English abstract).
- Li Dewei, Wang Jiaying. 2001. Geophysical anomaly of continental lower crust and its tectonic significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 20(3): 11-16(in Chinese with English abstract).
- Li Dewei. 2017. Relevance of seismicity and geothermics: A new thought to alleviate disasters from earthquake prediction to taking energy[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 39(4): 563-574(in Chinese with English abstract).
- Li Lele. 2016. Research on the Preservative Law and Genetic Model of Geothermal Resources in Guide Basin, Qinghai Province[D]. Nanchang: East China Institute of Technology.
- Li Dewei, Ji Yunlong. 2000. Laminar flow in the lower continental crust and its significance for continental dynamics[J]. *Seismology and Geology*, 22(1): 89-96(in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, Yu Xuehui, Luo Zhaohua, Dong Fuchen. 2007. Migration of the Tibetan Cenozoic potassic volcanism and its transition to eastern basaltic province: Implications for crustal and mantle flow[J]. *Geoscience*, 21(2):255-264.
- Rao Song, Jiang Guangzheng, Gao Yajie, Hu Shengbiao, Wang Jiyang.

2016. The thermal structure of the lithosphere and heat source mechanism of geothermal field in Weihe Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(6): 2176–2190(in Chinese with English abstract).
- Sun Hongli, Lin Wenjing, Liu Zhao, Wang Guiling, Nan Dawa. 2015. Geochemical characteristics and geothermometer application in high temperature geothermal field in Tibet[J]. Geological Science and Technology Information, 34(3): 176–182(in Chinese with English abstract).
- Sun Hongli. 2015. The Bearing Features and Genetic Model for Geothermal Resources in Guanzhong Basin[J]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Teng Jiwen, Yuan Xiaoming, Zhang Yongqian, Hu Guoze, Yan Yafen. 2012. The stratificational velocity structure of crust and covering strata of upper mantle and the orbit of deep interaquifer substance locus of movement for Tibetan Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(12):4077–4100.
- Wang Haiyan, Gao Rui, Li Qiusheng, Li Wenhui, Hou Hesheng. 2014. Deep seismic reflection profiling in the Songpan–west Qinling–Linxia basin of the Qinghai–Tibet plateau: Data acquisition, data processing and preliminary interpretations[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(5):1451–1461.
- 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, 30(32): 25–31(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiong, Gao Yuan, Shi Yutao, Wu Jing. 2013. Seismic anisotropy in the uppermost mantle beneath the northeastern margin of Qinghai–Tibet plateau: Evidence from shear wave splitting of SKS, PKS and SKKS[J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(3): 892–905(in Chinese with English abstract).
- Wei Hongjun, Li Baixiang. 2007. Characteristics of geological structures in Zhangye–Minle basin and feasibility study of geothermal resources in Zhangye city[J]. Gansu Geology, 16(4): 73–76(in Chinese with English abstract).
- Xiong Xiaosong. 2010. Moho Depth and Variation of the Continent in China and Its Geodynamic Implications[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- Xie Na, Yu Shengbo, Ding Hongwei, Zhang Mingquan. 2020. Occurrence features of geothermal resources and geothermal potential assessment in Gansu Province[J]. Geology in China, 47(6): 1804–1812(in Chinese with English abstract).
- Xu Peng, Tan Hongbing, Zhang Yanfei, Zhang Wenjie. 2018. Geochemical characteristics and source mechanism of geothermal water in Tethys Himalaya belt[J]. Geology in China, 45(6): 1142–1154(in Chinese with English abstract).
- Ye Zhuo, Gao Rui, Li Qiushui, Xu Xiao, Huang Xingfu, Xiong Xiaosong, Li Wenhui. 2018. Eastward extrusion and northward expansion of the Tibetan Plateau—Discussions for the deep processes of the plateau uplift[J]. Chinese Science Bulletin, 63(31): 3217–3222(in Chinese).
- Yu Zhaohu, Teng Hanreng, Li Baixiang. 2018. On geothermal resource potential and optimization prospecting methods in terms of geology geophysical information in Zhangye–Minle basin[J]. Gansu Geology, (27): 79–84(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chaofeng, Shi Qianglin, Zhang Lingjuan. 2018. Discussion on the relationship between Cenozoic magmatic activity and geotherm in Tibetan Plateau[J]. Geological Survey of China, 5(2): 18–24(in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, YanWeide, 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).
- Zhang Ying, Feng Jianyun, He Zhiliang, Li Pengwei. 2017. Classification of geothermal systems and their formation key factors[J]. Earth Science Frontiers, 24(3): 190–198(in Chinese with English abstract).
- Zhao Hui. 2009. Study on Hydrogeochemistry and Environmental Impacts from Exploitation and Utilization of Geothermal Water in Guanzhong Basin[D]. Xi'an: Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- Zhao Jilong, Yuan Yanming, Li Dewei, Hao Shuang. 2007. Geophysical anomaly of Lower Crust of Qinhai–Tibet Plateau and its adjacent regions[J]. Geological Science and Technology Information, 26(2): 13–18(in Chinese with English abstract).
- Zhao L F, Xie X B, He J K, Tian X, Yao Z X. 2013. Crustal flow pattern beneath the Tibetan Plateau constrained by regional Lg–wave Q tomography[J]. Earth and Planetary Science Letters, 383: 113–122.

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[J]. 地质力学学报, 12(3):354–362.
- 丁守卓, 罗金海, 程佳孝, 韩奎, 王师迪, 尤佳. 2015. 西秦岭伯阳石英正长斑岩的地球化学、年代学及其地质意义[J]. 地学前缘, 22(4): 247–254.
- 董兴朋, 滕吉文. 2018. 青藏高原东北缘远震P波走时层析成像研究[J]. 地球物理学报, 61(5):420–428.
- 方斌, 杨运军, 王根厚, 周训, 陈胜男. 2009. 藏北羌塘中部吉瓦地热田的特征及其资源评价[J]. 地质通报, 28(9):1335–1341.
- 姜光政, 高翔, 饶松, 张林友, 唐晓音, 黄方, 赵平, 庞忠和, 何丽娟, 胡圣标, 汪集咏. 2019. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. 地球物理学报, 59(8): 2892–2910.
- 洪增林, 张银龙, 周阳. 2019. 关中盆地南部山前中深层地热资源赋存特征及应用[J]. 中国地质, 46(5): 1224–1235.
- 郎旭娟, 张发旺, 王贵玲. 2017. 贵德盆地热结构及地热成因机制[J].

- 地球学报, 38(B11): 43-46.
- 龙登红, 王思成, 郝贺超, 慕旭峰, 王亮亮, 梁明宏, 高晓峰. 2020. 新疆博格达中段木垒地区七角井组火山岩岩石地球化学特征及构造意义[J]. 西北地质, 53(1): 13-23.
- 龙登红. 新疆博格达中段木垒地区基性侵入岩岩石地球化学、锆石U-Pb年代学及其构造意义[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 15-29.
- 李德威, 纪云龙. 2000. 大陆下地壳层流作用及其大陆动力学意义[J]. 地震地质, 22(1): 89-96.
- 李德威, 王家映. 2001. 大陆下地壳地球物理异常及其构造意义[J]. 地质科技情报, 20(3): 11-16.
- 李德威. 2017. 地震与地热的关联性:从预测减灾到取能减灾[J]. 地球科学与环境学报, 39(4): 563-574.
- 李乐乐. 2016. 青海贵德盆地地热资源赋存规律及成因模式研究[D]. 南昌: 东华理工大学.
- 莫宜学, 赵志丹, 邓晋福, 喻学惠, 罗照华, 董国臣. 2007. 青藏新生代钾质火山活动的时空迁移及向东部玄武岩省的过渡:壳幔深部物质流的暗示[J]. 现代地质, 21(2): 255-264.
- 饶松, 姜光政, 高雅洁, 胡圣标, 汪集旻. 2016. 渭河盆地岩石圈热结构与地热田热源机理[J]. 地球物理学报, 59(6): 2176-2190.
- 孙红丽, 马峰, 蔺文静, 刘昭, 王贵玲, 男达瓦. 2015. 西藏高温地热田地球化学特征及地热温标应用[J]. 地质科技情报, 34(03): 176-182.
- 孙红丽. 2015. 关中盆地地热资源赋存特征及成因模式研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 滕吉文, 阮小敏, 张永谦, 胡国泽, 闫亚芬. 青藏高原地壳与上地幔成层速度结构与深部层间物质的运移轨迹[J]. 岩石学报, 2012, 28(12): 4077-4100.
- 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.
- 郎旭娟. 2016. 贵德盆地地热结构及地热成因机制[D]. 中国地质科学院.
- 王海燕, 高锐, 李秋生, 李文辉, 侯贺晟. 2014. 青藏高原松潘-西秦岭-临夏盆地深地震反射剖面-采集、处理与初步解释[J]. 地球物理学报, 57(5): 1451-1461.
- 王琼, 高原, 石玉涛, 吴晶. 2013. 青藏高原东北缘上地幔地震各向异性:来自SKS、PKS和SKKS震相分裂的证据[J]. 地球物理学报, 56(3): 892-905.
- 魏红军, 李百祥. 2007. 张掖-民乐盆地地质构造特征与张掖市地热资源开发可行性分析[J]. 甘肃地质, 16(4): 73-76.
- 熊小松. 2010. 中国大陆莫霍面深度与变化特征及其地动力学意义[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 谢娜, 喻生波, 丁宏伟, 张明泉. 2020. 甘肃省地热资源赋存特征及潜力评价[J]. 中国地质, 47(6): 1804-1812.
- 许鹏, 谭红兵, 张燕飞, 张文杰. 2018. 特提斯喜马拉雅带地热水化学特征与物源机制[J]. 中国地质, 45(6): 1142-1154.
- 叶卓, 高锐, 李秋生, 徐啸, 黄兴富, 熊小松, 李文辉. 2018. 青藏高原向东挤出与向北扩展——高原隆升深部过程之探讨[J]. 科学通报, 63(31): 65-76.
- 俞兆虎, 滕汉仁, 李百祥. 2018. 张掖-民乐盆地地质-地球物理信息揭示的地热资源前景与勘查方法优化组合[J]. 甘肃地质, (27): 79-84.
- 袁超. 2016. 青藏高原中北部地壳低速-高导层是部分熔融层的岩石学证据被证实[J]. 矿物岩石地球化学通报, (4): 755-755.
- 张朝锋, 史强林, 张玲娟. 2018. 青藏高原新生代岩浆活动与地热关系探讨[J]. 中国地质调查, 5(2): 18-24.
- 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.
- 张英, 冯建赞, 何治亮, 李朋威. 2017. 地热系统类型划分与主控因素分析[J]. 地学前缘, 24(3): 190-198.
- 张振杰, 李兴海, 胡潇. 2018. 综合物探方法在张掖城区及外围深部地热资源勘查中的应用研究[J]. 地下水, 193(4): 58-60.
- 赵慧. 2009. 关中盆地地下水地球化学及其开发利用的环境效应研究[D]. 西安: 长安大学.
- 赵继龙, 袁晏明, 李德威, 郝爽. 2007. 青藏高原及周边地区下地壳地球物理异常及成因[J]. 地质科技情报, 126(2): 13-18.