

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.058>



干热岩控热构造系统厘定与类型划分

刘德民¹, 韦梅华², 孙明行³, 张昌生², 关俊朋⁴, 康志强⁵, 祁焱雅¹, 张小波¹, 周天禹¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074
2. 山西省第一水文地质工程地质队, 山西太原 030024
3. 广西壮族自治区地质调查院, 广西南宁 530023
4. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018
5. 广西壮族自治区地质矿产勘查开发局, 广西南宁 530023

摘要: 为了研究干热岩成因机理, 综合分析了干热岩形成背景、控热构造系统及尺度。地球中的干热岩具有特殊的形成构造背景, 控热构造对干热岩热能的传输与聚敛具有很重要的作用, 导致岩石圈不同热结构和热异常。控热构造可划分为生热、导热、储热和释热构造。生热构造包括地幔软流圈底辟, 具有大量高放射性元素的岩浆房, 活动性的深大断裂等; 中、下地壳脆韧性转换带, 活动的韧性剪切带是导热构造; 中、下地壳的低阻高导体, 韧性剪切流变层既是导热层, 也是储热构造; 火山、地震、浅表层次的活动断裂等为释热构造; 控热构造的类型受到构造尺度和构造背景的限定。由于地壳中控热构造分布状态及发育特征差异较大, 从而导致干热岩等地热能资源在地壳中的埋深、规模、热量以及分布状态等也有较大差异。

关键词: 干热岩; 控热构造; 韧性剪切流变层; 热聚敛与传输; 地球物理。

中图分类号: P314

文章编号: 1000-2383(2022)10-3723-13

收稿日期: 2021-11-11

Classification and Determination of Thermal Control Structural System of Hot Dry Rock

Liu Demin¹, Wei Meihua², Sun Minghang³, Zhang Changsheng², Guan Junpeng⁴, Kang Zhiqiang⁵, Qi Yanya¹, Zhang Xiaobo¹, Zhou Tianyu¹

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. The First Hydrogeology Engineering Geology Team of Shanxi Province, Taiyuan 030024, China
3. Guangxi Institute of Geological Survey, Nanning 530023, China
4. Geological Survey Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China
5. Guangxi Bureau of Geology and Mineral Prospecting and Exploration, Nanning 530023, China

Abstract: In order to study the genetic mechanism of hot dry rock (HDR), the formation background, thermal control structure system and scale of HDR are comprehensively analyzed in this paper. The distribution of HDR in the earth is not ubiquitous, but

基金项目: 中国地质大学(武汉)研究生联合培养实践基地建设项目(No. YJC2021506); 大同盆地重点地区深部高温地热资源详查项目(No. 2021-0009-G009-C05); 广西干热岩选区预测与分级评价项目(No. 2019016207); 苏北盆地干热岩控热构造背景研究项目(No. 2018016417); 中国地质大学(武汉)第二批本科教学工程项目(No. ZL201925)。

作者简介: 刘德民(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事构造地质学与地热地质学方面的教学和研究。ORCID: 0000-0002-5038-4802。E-mail: 5guc@163.com

引用格式: 刘德民, 韦梅华, 孙明行, 张昌生, 关俊朋, 康志强, 祁焱雅, 张小波, 周天禹, 2022. 干热岩控热构造系统厘定与类型划分. 地球科学, 47(10): 3723-3735.

Citation: Liu Demin, Wei Meihua, Sun Minghang, Zhang Changsheng, Guan Junpeng, Kang Zhiqiang, Qi Yanya, Zhang Xiaobo, Zhou Tianyu, 2022. Classification and Determination of Thermal Control Structural System of Hot Dry Rock. *Earth Science*, 47(10): 3723-3735.

has its special tectonic background. The thermal controlling structure system plays a very important role in the transmission and accumulation of heat energy of HDR and causes different anomalies in the lithosphere. The thermal controlling structures can be further divided into four basic types: heat generating structure, heat conducting structure, heat storage structure and heat releasing structure. Heat generating structures include mantle asthenosphere diapir, magma chamber with large amount of high radioactive elements, active deep faults and so on. The brittle-ductile transitional zone in the middle and lower crust and the active ductile shear zone are thermal conductive structures. The ductile shear rheological layer is the heat conduction layer and the heat storage structure. Volcanoes, earthquakes, shallow active faults are heat releasing structures. The types of thermal control structure are limited by structural scale and tectonic setting. Due to the great differences in the distribution and development characteristics of heat controlling structures in the crust, the buried depth, scale, capacity and distribution state of geothermal energy such as hot dry rocks in the crust are also quite different.

Key words: hot dry rock; thermal control structure; ductile-shear rheological layer; thermal convergence and transmission; geophysics.

干热岩地热资源是地球内部的本土资源,对其进行勘探开发不仅能起到减灾减排的作用,还有助于碳达峰和碳中和目标的实现.目前,地球正处于壮年期,地热能资源量巨大,而其中的干热岩是当前公认的利用率高(远高于风能、太阳能)、无污染(不会影响生态、环境变化)、储量巨大、分布广、持续稳定(不受天气、季节变化而影响)、最优质的新型清洁能源(汪集暘等,2012;王贵玲等,2017).我国能源局2019年3月将干热岩(hot dry rock)定义为:不含或仅含少量流体,温度高于180℃,其热能在当前技术经济条件下可以利用的岩体(国家能源局,2019).考虑到干热岩的自然属性、社会属性和经济属性,可分为广义干热岩和狭义干热岩.广义干热岩主要考虑其自然特征,不必强调开发的经济成本和可行性,可定义为:流体含量很少、温度为180~650℃的储热岩石;狭义干热岩是指作为自然资源开发对象的干热岩,还必须强调经济效益和可行性,可定义为:流体含量少,埋深为3~5 km,温度为150~350℃,赋含的热能在目前的经济技术条件下可以开发利用的固态岩石.目前,干热岩被认为是可以梯级综合利用的,可以用于发电、供暖、辅助采油、干燥、降温、医疗、洗浴、养殖种植等(李德威和王焰新,2015).

地球自形成以来经历了多期次、多阶段地质构造演化及复杂的热演化.地球演化之初聚集的热能以及演化过程中(尤其是地球板块构造形成以后)新产生的热能受到不同构造(构造运动)的控制,不均匀地逐步释放.这些释放的热能大部分成为干热岩的热源,因而详细划分控热构造系统对干热岩的赋存、勘探及评价具有重要意义.

干热岩埋藏深,成因机理不明,控热构造系统错综复杂.目前,国内外还没有实现干热岩地热能

大规模梯级发电.干热岩的成因、分布、选区、勘探、评价、开发、综合利用等方面的研究极为薄弱,很多领域仍是空白,特别是在干热岩地热能的孕育环境、控热构造系统、分布规律、形成机理、勘查思路、能量评估、大规模开采及开发技术等方面.本文在前人研究工作基础上系统划分了控热构造类型,以此引起广大专家学者对干热岩研究与开发的热情,促进我国干热岩事业稳步快速发展,有利于绿色宜居地球建设,碳达峰碳中和目标实现.

1 干热岩控热构造背景

据全球已勘探到干热岩的特征来看,狭义的干热岩并不是无处不在,只有在年轻活动(构造活动强烈)的陆内和陆缘盆山系统中分布,在活动性非均的匀固态一半固态流变有关的强烈韧性变形—热隆伸展构造区带才发育干热岩,与中、下地壳不均匀流动的活动韧性剪切带及中、下地壳震源分布区密切相关(李德威和王焰新,2015;张森琦等,2021).

开放地球系统中地热能的分布规律主要取决于多尺度控热构造系统,不同时空尺度的控热构造系统孕育于不同的大地构造环境.地球大部分地区都经历了多期次地质构造演化及其热演化,在地球演化过程中,地球内核不断将极高温铁泵向外核,外核液态的铁携带高热能逐渐向地幔运移.地幔深部的热流体以地幔柱(或地幔树、地幔枝、地幔墙)向上运移,有一部分热流体会在不同的物理边界(核幔边界,上、下地幔边界以及壳幔边界)发生侧向扩展,即垂平转换,从而引起热能驱动或热能转换成热动力及其相关作用力形成的全球板块构造和相关建造.地球内部不同深度存在高温的、熔融或半熔融状态的似层状、透镜状的低速体(层)

(Naif *et al.*, 2013)就是在这种深部热运移作用下形成的,同时,这些又构成了赋存在不同深度干热岩的热源或导热体(图 1).大陆下地壳韧性流动是造山成盆的统一机理,也是成矿成藏生气、热灾害链的主因.而且,开放的地球系统是生命的有机体,整体关联,动态平衡,地球深部热流驱动地球板块的形成及运动,并控制浅部构造(李德威和王焰新, 2015),浅部构造的活动又反作用于地球深部,引起其不断降温.

据现代地热地质理论研究发现,陆内地热主要产于活动的(以新生代为主)、高地温梯度的大陆盆地体系.以动态的莫霍面、康拉德面和不同物质界面划分出具有非均匀分层流变结构的上、中、下地壳;温度变化与岩石能干性耦合分解出熔融、部分熔融、固态流变(韧性变形)、韧—脆性转换、脆—韧性转换和脆性变形系列.这些热构造岩石组合制约不同类型的热储,形成浆热型、干热型、气热型、水热型和混合型地热能,从而构成热源、结构和机理密切相关的地热构造系统(李德威和王焰新, 2015).大陆地壳热结构和地质结构极不均匀,在热构造异常活动区带,地壳深部局部存在浆热型地热能、干热型地热能,以及热储埋深较浅、活性极高的气热型地热能.受热气化形成的幔源、壳源 CO_2 、 H_2 、 CH_4 、 CO 、 H_2S 、 HCl 和浅层次水汽均可作为输热介质,与其他类型的地热能一起构成多种形式的混合型地热能.因此,气热型地热能不同于单纯由水蒸汽构成的蒸汽型地热能,而且与无机油气、二氧化

碳气田、金属矿床、热灾害链、温室效应、气候变化之间存在关联机理.

2 干热岩控热构造系统

干热岩控热构造系统的详细划分,对于深层热储的圈定与地热能勘探开发具有重要的意义.总体而言,干热岩控热构造系统可划分为生热构造、导热构造、储热构造和释热构造 4 种基本类型.生热、导热、储热和释热符合深部构造控制浅部构造、热量自发地从较热的物体传递到较冷的物体等基本规律.由于干热岩成因机理复杂,4 种基本控热构造类型之间没有严格的界线,即某些生热构造也具有导热特征,某些导热构造也具有储热特征.不同的控热构造对干热岩的形成、赋存起着不同的决定性作用,从而导致了发育不同构造的岩石圈具有不同的热结构(汪洋等, 2001; Jiang *et al.*, 2016).

2.1 干热岩生热构造

生热构造就是指形成干热岩热源的结构.当然,热可以催动构造形成,如热聚集可以引起地震,热运输可以催动板块;反之,板块的运动(如俯冲、碰撞)可以产生热(Hasterok and Chapman, 2011).所以,热与构造是互生互存的.而干热岩的热源目前有 4 种主流观点,即高放射性花岗岩产热、岩浆活动生热、强烈构造活动成熟以及地幔传导运热(甘浩男等, 2015; 蔺文静等, 2021).不同的干热岩其主要热源不同,且受到不同的生热构造控制.构造活动、岩浆活动、花岗岩放射元素衰变、地球形成初始积聚的热都是地热能的热源,但各个热源对地热能的贡献是多少?它们分别在哪个层次对哪种类型地热能起主导作用?只有解决了地热能的热源问题,才能科学地开展地热能勘查、评价、开发等各项后续工作.

高放射性花岗岩产热形成的干热岩热源主要为地壳热源,生热方式为放射性元素衰变生热(汪洋等, 2001).地球中可产生衰变的放射性元素较多,但能够为干热岩提供热能的元素必须具备 3 种条件,即有足够的丰度、放射性生热效率较高和适宜半衰期;据目前所知,具备这些条件的元素只有 U、Th、K 这 3 种;由于这 3 种元素在地壳岩石中平均含量和生热差异悬殊,经计算分析发现在花岗岩中含量大且生热率高;因而,在花岗岩大量发育的地方有可能赋存有干热岩,即高放射性产热型干热岩(汪洋等, 2001; Zhang *et al.*, 2020).

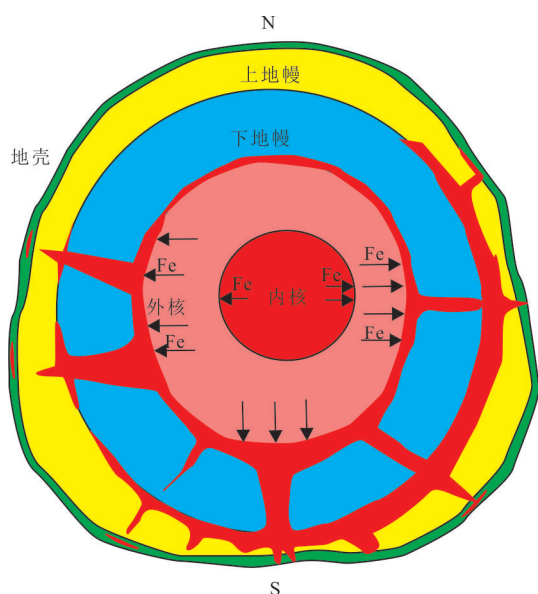


图 1 全球级控热构造系统

Fig. 1 Global thermal-controlling structure system

高放射性花岗岩只是干热岩热源的一种,并且是占比较少的一种附加热源.花岗岩只是赋存在上地壳,上地壳通常称为花岗质地壳或硅铝质地壳,所以,花岗岩热源可称为地壳热源.而下地壳、地幔甚至地核都不是由花岗岩组成;所以,富含高放射性元素的花岗岩不可能为地球深部的物质以及深部物质运移提供全部的热量,而只能为浅部岩石地层地温场提供热量(Artemievai *et al.*, 2017),如共和盆地干热岩仅壳内热源来自花岗岩的放射性生热,主体热源还有附加热(张超等, 2020).形成时代较老的花岗岩,如中生代以前的岩浆侵入活动和喷发作用所伴生的地热已经消逝或其温度降至与围岩相同,不能成为干热岩动态热源;但新构造运动时期的岩浆侵位(发育在地表及浅部)或喷发(浆热型热源)对干热岩或温泉的形成和地热能的储存具有重要意义.所以,规模较大(达到岩株、岩基规模)、放射性元素含量高的中、新生代花岗岩对干热岩的形成更有意义,既是其静态热源,又是其动态热源.如果幔源传导型热量也较高时,在覆盖层理想的地方,可以获得具有开发潜力的干热岩资源.如:东南沿海断陷盆地中,发育大量中、新生代酸性花岗岩体的区域可能具有优质干热岩.

岩浆活动生热型干热岩往往赋存在晚近时期火山发育处,生热方式为高温熔浆沿断裂系统向浅部运移生热.国际上很多知名的干热岩资源区(如冰岛、日本干热岩区)均属于这种类型(Tanaka *et al.*, 2004).受底部未冷却岩浆的作用,地表具有明显的水热活动现象.新生代火山活动其实并不生热,火山活动是热的表现、热的释放、热的耗散.火山活动只能说明深部存在巨大高温热能,地球深部汇聚的巨量的热(热物质),打破了深部物质稳定状态就会以火山形式释放,即火山通道下或周边则可形成近代火山型干热岩.火山喷发具有周期性,因而有死火山、休眠火山和活火山之说;死火山就是指火山喷发作用导致火山区域早期汇聚的高温热物质(岩浆)释放完;休眠火山存在热物质的再汇聚或早期汇聚的热物质经过周期性的释放还没有彻底释放完;而活火山就显示火山区域依然存在大量未喷发完的高温热物质流(Witter *et al.*, 2019).所以,我国台湾的基隆火山和大屯火山、海南和广东的雷琼火山群、内蒙古的阿尔山火山、山西大同盆地火山、黑龙江五大连池和镜泊湖、吉林长白山天池以及云南腾冲火山群,这些区域均存在活火山或

休眠火山,说明深部可能还存在高温岩浆活动.深部的岩浆沿断裂运移并把大量的热向上传导,不断加热浅部物质,通常在较浅的地方就可以获得较高的温度(Wang *et al.*, 2016).所以,这些区域目前还存在较多的高温温泉.总之,新生代火山活动较发育往往显示深部存在高温岩浆活动,深部这种高温热源极易在较浅部形成优质干热岩;但火山活动不是干热岩的热源,只是深部高温汇聚的表现,是一种将深部热能释放出来的构造现象.

强烈构造活动生热型干热岩的热源为地壳运动,生热方式为强烈的构造运动减压熔融生热,也是壳内透镜状、似层状部分熔融体形成的主导因素.断层活动往往会在断层面上形成铁质磨擦镜面、方解石或石英薄膜层,这些都是断层活动产生瞬时高温导致物质熔融后新生成的矿物集合体;地震活动往往会导致道路、桥梁等不仅发生脆性破裂,还会发生塑性的扭曲变形以及物质熔融后快速冷凝固晶而形成的假玄武玻璃等玻化物质,这些指示了地震活动也能产生瞬时高温.但断层活动、地震活动产生的高温热耗散快,瞬时释放,很难有效积聚,不利于开发利用(Tanaka *et al.*, 2007);同时,断层活动、地震活动具有热成因特征,即具有导热和释热表现,也是热在某个区域聚集超过临界状态导致地壳块体(岩石体)活动而形成.所以,新构造运动、活动构造、地震等构造强烈区不仅是构造运动产生新的热能,而且是深部热能高度聚集的表现.我国新构造运动最为剧烈的地区如青藏高原南部,东部沿海(包括台湾)以及滇西是沸泉、高温温泉的分布区.受太平洋板块向欧亚板块俯冲、印度板块和欧亚板块的碰撞这两种最为强烈的新构造运动的影响,在我国的喜马拉雅构造域和环太平洋构造域部分区域发育有侵入体和熔融体等高温岩浆热源,壳内低速层以及强烈韧性变形—热隆伸展构造,这些是干热岩等高温地热资源赋存的有利条件,因此这些区域具有高热流、高地温梯度、高温温泉和沸泉以及水热爆炸等热异常.

沉积盆地型干热岩的热源主要为地幔热流,生热方式为地幔传导生热,也就是由于地幔活动将深部(地球核部)的热向上、向外传导而引起浅部的物质被加热而形成岩浆或干热岩.沉积盆地型干热岩资源具有基岩覆盖层较厚、表层地温梯度较大、增温稳定的特征.由于地幔热物质向上运移,软流圈底辟上涌导致岩石圈减薄、莫霍面和居里面局部抬

升,中下地壳汇聚了大量的热能,低阻高导体及韧性剪切流变带快速将热能向上传导;深部热源向上传导到达覆盖层时,由于沉积覆盖层热导率小的特点,阻止了热量的散失,从而在地壳浅部聚敛超常热能而形成干热岩高温热储;沉积盆地型干热岩资源虽然有时地表热流值并不太高,但由于热量在深部的聚集,其盆地基底温度较高。

低阻高导体快速传热以及韧性剪切流变带的剧烈活动往往会在造山带间导致大型断陷盆地、裂谷盆地形成(图2),如东非裂谷、莱茵地堑(Frey-mark *et al.*, 2017)以及我国的松辽断陷盆地、汾渭裂谷盆地、苏北断陷盆地、雷琼裂谷盆地、羊八井—当雄地堑盆地、那曲—古堆—错那地堑盆地等中生代断陷盆地。这些断陷盆地中干热岩的热源相对较复杂:有些是地幔源,有些是活动构造热源,有些是兼而有之,但总体均表现出沉积覆盖层具有较高的地温梯度,与水热型地热系统共生。

青藏高原晚近时期具有强烈的地壳运动,形成热壳冷幔特征,因而高原内部南北向的羊八井—当雄地堑盆地、那曲—古堆—错那地堑盆地等均为新生代地壳强烈增厚伸展拉张而形成的断陷盆地,其

干热岩生热构造为强烈的地壳构造运动。受太平洋板块向欧亚板块深俯冲作用诱发的大陆地壳强烈伸展拉张减薄,地幔软流圈热物质底辟上升,形成了我国华北、苏北及东南沿海等东部热构造区(袁玉松等,2006;Zuo *et al.*, 2013;徐立等,2014;Xiao *et al.*, 2020)。所以,松辽盆地、渤海湾盆地、苏北盆地等区域具有较高的热流异常,干热岩生热构造以地幔底辟隆升为主兼具强烈地壳构造运动。

我国大陆地壳构造活动性强,地热资源丰富,地热能类型齐全,常见多种地热能共生。例如,羊八井地热田发育水热型、干热型和气热型地热能,很可能存在浆热型地热能;腾冲地热田发育浆热型、气热型、水热型地热能,很可能存在干热型地热能;琼北地热田发育浆热型、水热型地热能,很可能存在干热型地热能;福建漳州地热田发育水热型地热能,很可能存在干热型地热能;汾渭裂谷型高温地热田地壳厚度小、构造强烈活动,中、高温水热型地热能极为发育,其深部也有可能是优质干热型地热能赋存之地。

埋藏在地壳中的干热岩,其形成的主导热源可能都是来源于地幔热流体热(Sclater *et al.*, 1980;

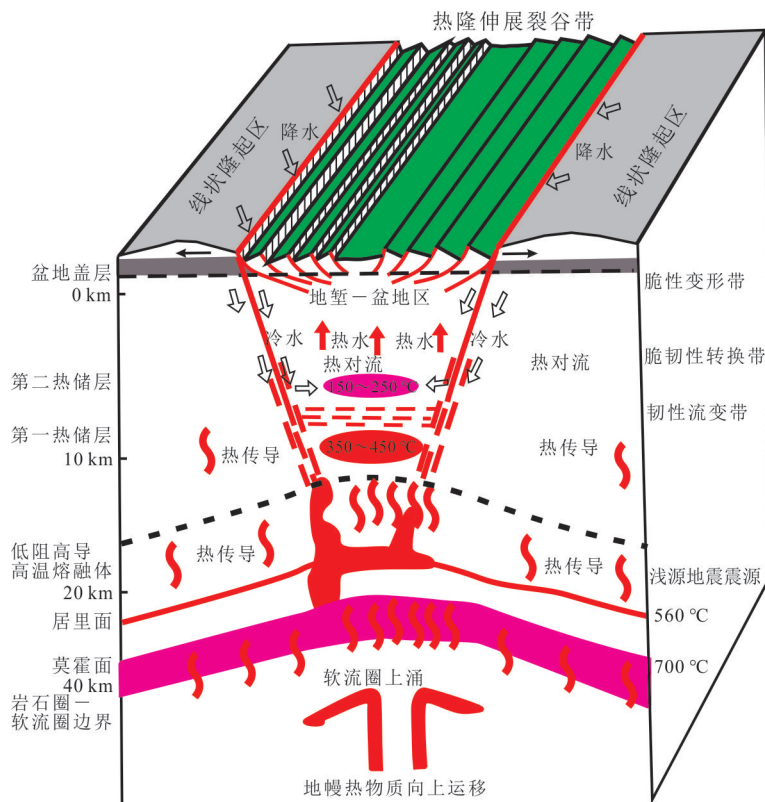


图2 热隆伸展区干热岩成因概念模型

Fig. 2 Conceptual model of genesis of hot dry rocks in thermal uplift extension area

据刘德民等(2020)修改

Weinstein, 1993). 软流圈地幔底辟上涌、岩石圈拉张减薄、莫霍面、居里面上隆、中下地壳韧性剪切流变(熊盛青等, 2016; 刘德民等, 2020), 有利于来自核、幔的热迅速、高效向上传导, 从而形成有动态热源的优质干热岩. 地幔软流圈底辟导致地壳发生不同程度的热隆伸展, 形成了裂谷、断陷盆地、坳陷构造等伸展拉张型负地形, 并在一定程度上制约了成矿、生烃、聚油气以及伴生的自然灾害.

2.2 干热岩导热构造

干热岩导热构造就是具有将热能传递给干热岩热储层的构造, 这些构造能够将热储层周边或地球更深层的热以传导形式源源不断地向热储层输送热能. 真正对干热岩资源有导热作用的导热构造有 3 种, 一是地幔热物质上隆时具有快速、高效传热的具有活动性的深大断裂, 尤其是具有正断式或走滑剪切的断裂是良好的导热构造; 二是便于地球物理技术进行探测的埋藏深度较浅、低密度、高温的准固态流动层—低速高导体(Naif *et al.*, 2013); 三是接触到深部热源的岩脉、盐底辟构造等.

不同块体之间的分界断裂、板内区域性断裂、盆山边界的控盆断裂以及盆内不同隆、凹之间的边界伸展或走滑断裂均具有规模大、延伸远、切割深、性质复杂、活动性强等特征, 均是热物质传导和载热流体的良好通道. 尤其是切割深度达壳幔边界甚至更深, 往往具有铲式和韧性变形特征, 更是地幔热物质和深部岩浆上涌的最佳通道(Qi and Yang, 2010; 李小林等, 2016). 深大断裂是深部幔源热物

质和高温岩浆上涌的主要通道; 同时, 这些高温的热物质上涌也可以促使深大断裂的活化或催生新的断裂系统. 西宁盆地地下热水的热源来自下部地壳和上地幔, 深大断裂为导热通道, 构造控水控热—热流沿断裂上升、扩散(图 3a), 到近地表扩散的方式为传导和对流(张森琦等, 2013). 在传导方式下, 低热导率的岩层是聚积热流; 在对流方式下, 断裂构造的发育程度和地下水的贫富、流动性是关键因素. 较厚的保温隔热盖层, 造成盆地中次级凸起成为局部构造热储. 关中盆地热源为隆起地幔的深部热能, 并通过伸展断裂的导通和岩层的热传导(图 3b), 在可利用的深度内形成地热资源, 岩层内的热传导以垂向扩散热能为主, 而在具有与深部高温部位导通作用的深断裂是导热构造(穆根胥等, 2015), 导热构造附近可形成沿水平方向的热对流进行热扩散, 水平热对流作用主要是由于流体的参与. 切穿至岩石圈的深大走滑断裂带对河北马头营干热岩的形成具有良好的导热作用(Wang *et al.*, 2013; 张保健等, 2020).

地壳内低速低阻高导体不仅具有较高的温度, 也具有好的导热功能, 其能将地幔软流圈底辟传导的热能储集汇聚在一起. 由于低速低阻高导体相对于围岩来说能干性较弱, 其内部压力相对较小, 周边围岩产生水平方向的附加拉张应力, 引起深部韧性断裂活动, 从而加速携带高热量的热液沿断裂系统向上进一步传输, 因而壳内低速低阻高导体不仅是干热岩的热源, 也是干热岩的导热构造.

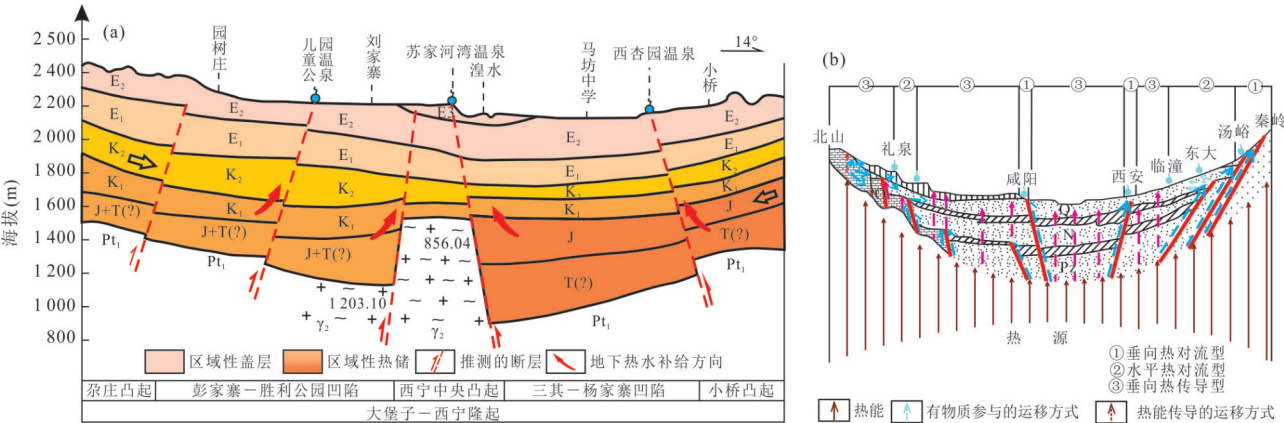


图 3 西宁地热田热储构造概念模型示意图(a)和关中盆地地热形成模式(b)

Fig. 3 Schematic diagram of conceptual model of heat reservoir structure in Xining geothermal field (a) and geothermal formation model of Guanzhong basin (b)

图 a 据张森琦等(2013)修改;图 b 据穆根胥等(2015)修改

青藏高原中下地壳普遍存在大规模的低速低阻高导层(Nelson *et al.*, 1996; 王椿镛等, 2016). 由于高导层温度较高, 导致高原岩石圈熔断拆沉作用十分发育, 不仅引起了青藏高原造山后的水平伸展和垂向快速生长, 以及壳—幔物质和能量的再循环, 还造成了深部的热能快速向上传导. 青藏高原中下地壳的低速高导层不仅是引起青藏高原快速整体隆升的“渠流”、“层流”等物质流, 也是导致青藏高原热地壳形成的直接因素(刘德民等, 2020).

华南沿海至南海具有流变分层特征, 普遍存在壳内低速层, 从上地壳至下地壳再到上地幔和热岩石圈底部出现脆性—韧性—脆性—韧性的组合结构(施小斌等, 2000; 滕吉文等, 2019); 下地壳 15~25 km 低速层最发育, 从南海中央向华南陆内缓倾, 低速层从海陆过渡区到内陆地壳脆韧性转换界面从 16 km 加深至 20 km(张中杰等, 2010; 王敏玲等, 2015), 显示热的岩石圈上部具有多层低速流变特征(图 4a). 下地壳和上地幔低速层在海陆过渡带相连, 低速层的导电性较好显示低阻特征, 可能是地幔软流圈粘性流动制约下地壳韧性变形带. 活动的韧性剪切带不仅是岩石圈深层韧性域高温的表现, 也是具有将深部的热向地壳脆性域传输的特征, 是优良的导热构造, 建起了生热构造与释热构造之间的桥梁, 并进一步制约中地壳震源层和上地壳热隆伸展正断层系统.

大量地震探测表明苏北及邻区的地壳中普遍存在壳内低速层, 下地壳 15~25 km 低速层—韧性流变层最发育(图 4b), 壳内低速高导层范围内地壳

温度约 300~400 °C 左右, 达到岩石的韧性变形温度; 因此, 壳内低速高导层不仅是浅层干热岩的热源, 同时也具有将深部地幔热能向上传导的作用, 具有很强的导热性能(陈沪生, 1988; 袁玉松等, 2006; 滕吉文等, 2019; 张森琦等, 2021). 天然地震 P 波信息显示苏北盆地高邮—泰州—东台一带 5~10 km 以及 10~15 km 范围均整体呈北东东或近东西向低速异常, 不同方向断裂交汇部位往往形成低速异常中心(黄耘等, 2006). 低速体分布不仅受到深大断裂构造的控制, 同时, 这些深大断裂可能是地壳内部流体和热能的运移通道; 如汉留—吴堡断裂, 铜城断裂, 切割深, 活动性强, 并对区内侵入岩的分布控制作用强.

地球深部低速低阻高导体不仅能接收深部传导来的热, 形成深部热储; 而且还具有很强的导热功能. 规模较大的岩石圈断裂、超壳断裂, 如果接触到低速低阻高导体, 将会成为很重要的导热构造(滕吉文等, 2019). 深大断裂一般起到导热或储热作用, 而次级断裂或与之相切的断裂起到导热导水作用.

2.3 干热岩储热构造

由以上分析可知, 狭义的干热岩地热能并非无处不在, 只有在年轻活动的陆内和陆缘盆山系统中与活动性非均匀固态—半固态流变有关的强烈韧性变形—热隆伸展构造区带才发育狭义干热岩, 与下地壳不均匀流动的活动韧性剪切带(“热河”)及其中地壳震源密切相关. 考虑地热能形成的大地构造背景(活动盆山三维热结构及圈层耦合)、控热构

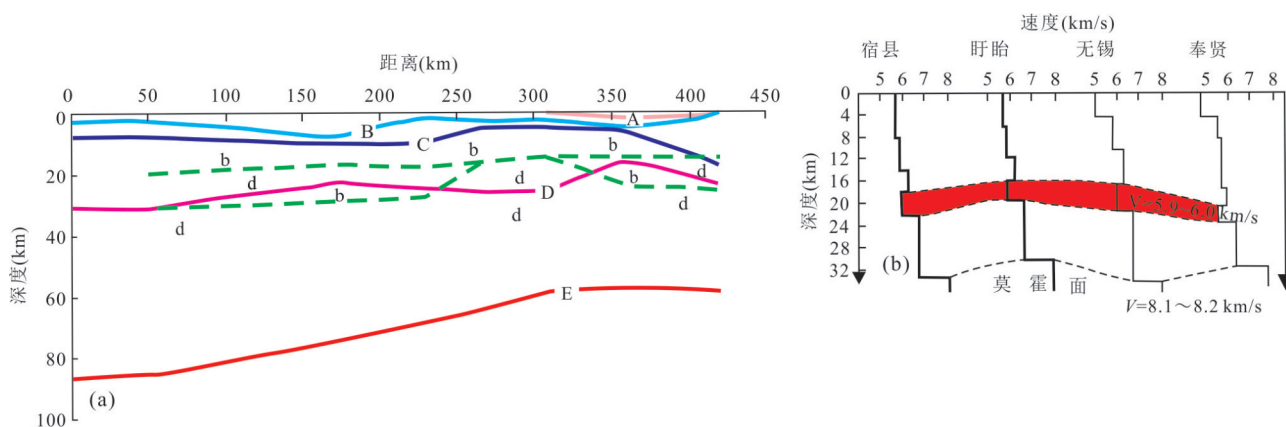


图 4 南海—内陆岩石圈流变分层结构图(a)和地震地壳测深 HQ-13 线横向速度结构(b)

Fig. 4 Rheological stratification structure of South China Sea inland lithosphere (a) and lateral velocity structure of seismic crustal sounding HQ-13 line(b)

图 a 据施小斌等(2000)修改; 图 b 据陈沪生(1988)修改. 实线为岩石圈结构分层界线, 虚线为流变层分界线; b. 脆性层; d. 韧性层; A. 海底; B. 新生界基底; C. 上地壳底界; D. 莫霍面; E. 热岩圈底界

造(从岩石熔融到脆性断裂)、温度(或深度)变化和热储性质(固态、液态、气态),活动的、有生命力的地球是通过四维非均匀的热结构和热演化保持其动态平衡的.活动的洋陆体系及其关联的盆山体系具有分层、分块和分时的差异流变特征,在现今热活动强烈的构造区带存在正在进行的半固态和固态流变及其韧性变形,这种流体少、活性强、能量大、以水平剪切运动为特征的活动热构造应当作为干热岩地热能开发的热构造背景,其上持续吸热的韧—脆性和脆—韧性构造及其间的各种岩石组合可能是干热岩热储(汪集暘等,2012;李德威和王焰新,2015;刘德民等,2021).

糜棱岩是发育在韧性剪切带中的一种动力变质岩,其中至少有一种造岩矿物发生了塑性变形,这种塑性变形必须发生在较大的温压条件下.因此,韧性剪切带不仅能够导热,同时还能储集热而成为储热构造.总体而言,干热岩储热构造可以包括强烈热隆伸展活动区内脆性变形构造带、脆韧性变形带,活动造山带内韧脆性变形带、韧性剪切带等.褶皱有时也可成为储水储热构造,褶皱作用在转折端形成的虚脱空间是良好的储水构造;而褶皱本身就是一种良好的储热体,其形成的不同深度温度场在平面上具有规律性分布.干热岩储热构造基本都呈隐伏状态,因而必须借助物探手段、钻探方法才能探测到.

我国干热岩地热能研究与开发具有地域优势,青藏高原及邻区、渤海和华北(含汾渭地堑)、东南沿海及其海域(大亚湾、北部湾)以及台湾是地热异常区,也是自然灾害多发、连发和群发区,这些不同类型(分别为热活动复合造山带、热活动盆地、热活动海盆及陆缘、热活动岛弧)热构造单元中的储热构造非常发育,存在不可估量的可再生干热岩地热能(李德威和王焰新,2015).

2.4 干热岩释热构造

释热构造是指把地球内部的热能向浅表层次释放的构造,包括把地球深部的热向浅部运移的导热构造,也包括把干热岩热储层的热向地球表壳运移的释热构造(狭义),释热构造具有层次特征.干热岩的释热构造也属于地球的释热构造,同时,更多地成为了更浅层地热以及水热型地热的导热构造.地球系统中具有释热功能的除了大地热流(Pollack *et al.*, 1993),地壳活动、断裂、地震、火山、温泉、成油、排气、成矿等均需要获得一部分热能进

行,所以,部分断裂、火山、地震往往是干热岩的释热构造.从成矿理论方面来讲,这些释热构造其实就是一种破矿构造,也就是将干热岩的热能输送到浅部或围岩,同时也成了浅部地热资源的导热构造.大规模控热断裂的浅部往往发育次级高角度的伸展脆性断裂,这些伸展脆性断裂及其组合构造具有很好的释热功能.火山、地震、温泉是直接把地热释放出来最好的表现,只是热释放的介质不同,分别为熔浆、构造运动和水.

苏北盆地存在多种释热构造.苏北盆地内NE走向张性断裂在燕山晚期—喜马拉雅早期形成,沿断裂带热液石英脉、热液蚀变、热水等热液活动较强,显示断裂强烈的释热作用.因而NE向断裂不仅控制了盆地内的隆凹格局的形成,还对地热有强烈的控制作用.而盆地内叠加在早期构造之上的NW走向正断层以及盆地内坳陷和隆起的边界—铲式张性断裂是喜马拉雅期释热构造.晚期NW向断裂和早期NE向断裂叠加处构造破碎带未完全固结,有利于热水向上运移,地壳浅表层次脆性断层向下发生脆韧性转换,产状变缓,热活动性加强,是地热能主要的释热构造,因而在交切区域地热异常明显.苏北盆地内有多个隆起和凹陷边界均由张性断裂控制,构成堑—垒构造,释热表现明显.如涟水一带NE-SW向地堑活动性很强,盐城一带NE向地堑温泉最发育,高邮北柳堡一带堑—垒边界地震发育,这些堑—垒构造都具有形成干热型和水热型地热田的潜力.苏北盆地新生代火山活动强烈,古近纪火山活动集中出现在涟水以南,整体呈NE向展布,新近纪至第四纪火山活动整体呈EW向展布(吴向阳等,1999),它们是浆热型地热能的控热构造系统,具有将深部热能快速向上传导并释放的作用(刘德民等,2020).苏北盆地大地震没有,小地震频发,这些地震的震源深度均在10~15 km范围内,是中、下地壳热量汇聚的地方.苏北盆地地震分布以滨海断裂为界向西强度变小、密度变小,在盐城凹陷、临泽凹陷以及小海凸起一带密度大、强度大,主要沿NE向断裂带发育.地震的发生不仅释放了前期聚集的应力,也在一定程度上释放震源区汇聚的大量地热能(汪集暘,2015),所以,地震也是一种特殊的释热构造.苏北盆地频发的小地震、不同方向的脆性断裂构造,联合线状热隆伸展构造系统组成了苏北盆地“馒头开花”式释热构造(刘德民等,2020).这些释热构造将深部干热岩的热能逐渐传输

到浅层,所以,这些释热构造对浅层水热型地热能资源而言是导热构造,而对于深部的干热岩地热能资源而言是释热构造。

温泉是地下热水流出地表的自然露头。大气降水、地表水和地下水沿断裂或构造裂隙渗入地壳深部,与围岩发生水—热(岩)活动反应而成为热载体,即形成热水带,并储存于地壳内。新构造时期的应力作用,尤其在现代构造应力作用下,地下热水通过尚未胶结的正在活动着的断裂溢出地表,形成温泉或沸泉。在正常的地温梯度下,大气降水的深循环可以形成温泉或浅层地热水,但这些水温不会太高;高温温泉的形成可能取决于埋藏相对较深的干热岩热储,所以温泉和热水带的规律性分布在一定程度上是新构造运动的活动类型(表现)之一,同时高温温泉也是干热岩释热构造的一种表现形式。

3 控热构造系统划分尺度

不同尺度的地热构造单元具有不同的控制构造。控热构造的尺度有多种,可以分为板块尺度(全球尺度)、区域尺度、地热田尺度、热储(热藏)尺度等级别。不同的尺度下,控热构造的控热作用类型不同。如盆山边界活动的断裂在地热田尺度(中等尺度)下为导热构造,在区域尺度(大尺度)上为生热构造,而在热储尺度(小尺度)上还具有释热功能。所以,控热构造类型的划分是具有很强的尺度限定的,在日常生产实践中,在大、中尺度背景下,必须加强中、小尺度控热构造的分析研究。

从全球尺度来讲,地核(内核)是一级生热构造,内幔(外核)是储热构造,地幔墙(柱)是导热构造,上下地壳边界、软流圈和地幔柱可能是储热构造(Lay *et al.*, 2008),而洋中脊(裂谷)、火山、地震等是释热构造。地球不同圈层中所赋存的热基本都来源于地核,所以地球内核为动态生热构造系统;极高温导致地球深部岩石熔融或部分熔融,热流物质在外核及下地幔富集,构成全球级储热构造系统;外核及下地幔因物性和温度的非均匀性而发生分异,高密度物质在重力作用下沉入地核,固态流变物质顺层流动,低密度高温流体在浮力作用下向上非均匀流动,形成地幔树(包括地幔墙、地幔柱或地幔枝);垂向的地幔柱、地幔枝以及地幔树等岩浆热物质具有将地核热向浅表层次传导的作用;地幔岩浆热物质往往在地球内部不同界面上进行侧向扩展,形成地球深处大小不一的似层状、透镜状

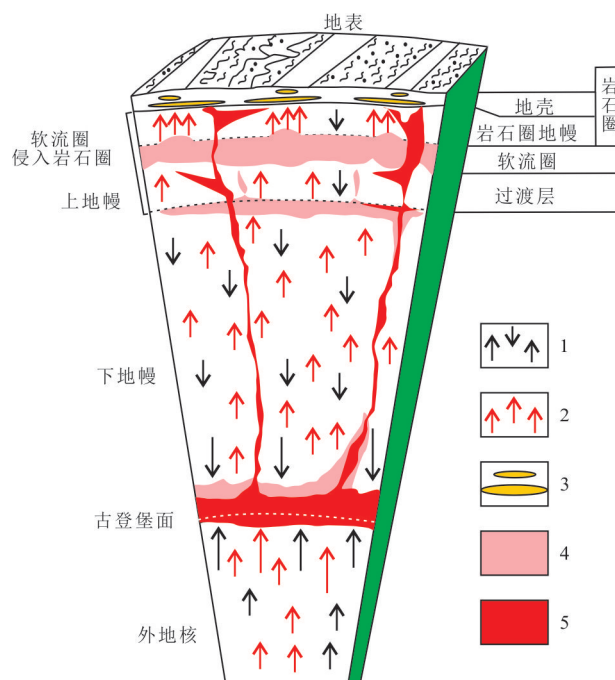


图5 地球内部热物质运移示意图

Fig. 5 Schematic diagram of thermal material migration in the earth's interior

据杨巍然等(2016)修改。1. 重力运动潜势方向;2. 热能潜势方向;3. 地壳热流熔体(低速高导层);4. 地幔熔融热流体;5. 核幔边界形成的熔融热流体

的低速高导体热物质体;离开不同的界面时,地幔岩浆热物质则以次级地幔柱、地幔枝、地幔羽的形式将热物质在不同圈层间进行热能传导,构成全球级导热构造系统(图5)。在目前的经济技术条件下,地核热对于干热岩的勘探与开发没有意义,只有经过地幔柱、地幔枝或地幔树向上传导的热能(热根),再经过多次热扩展(垂平转换)后才能成为干热岩的热源。

深部地幔上升的异常热物质体,在后期演化过程中可能有多种表现形式。如果在小区域内形成,并散布在海底,则成为“热点”构造;如果从海洋中喷发出来,就成为海底壮观的火山、岛屿,如大洋中脊的火山、冰岛、亚速尔群岛等;如果在中、下地壳汇聚,则成为浅源地震震源能量;如果以热传导的形式向上运移,在中、下地壳形成韧性的低速高导体,则成为干热岩的主要热源(Ma *et al.*, 2017)。深部的热物质和能量可以直接导致金属矿产的形成富集、烃源岩成熟生烃、地震浅源频发、火山活化近喷及油气成藏汇聚等,因而干热岩的勘探寻找时也需要评价油气田的分布、新生代火山岩的分布及地震活动特征等(刘德民等, 2021)。所以,地球深部热

能以对流和传导的方式传输到地球浅部,由洋陆作用、盆山作用、岩浆活动、变质作用、构造作用,以及成矿作用、成藏作用、成灾(地震、火山)作用、气田聚敛作用和热泉喷涌等方式释放能量,构成不同级别、不同层次的释热构造系统。

从次一级尺度来讲,生热构造即包括地幔软流圈底辟,具有大量高放射性元素的岩浆房(囊),也包括软流圈地幔上隆时具有活动性的深大断裂等;下地壳层状流体,中、下地壳脆韧性转换带,软流圈地幔上隆时具有活动性的深大断裂是导热层(导热构造);而中、下地壳的低阻高导体既是导热层,也是第一热储层;地壳浅部(3~6 km)热导率高、裂隙少、含水少、固态的岩石(包括沉积岩、变质岩、岩浆岩)为第二热储层,也是当前经济技术条件下的干热岩勘探的目标层;而具有释热功能的释热构造不仅能指示地球深部存在热能,同时将传输到浅部的热能进行释放,如火山、地震、成矿、浅表层次的活动断裂、堑—垒构造、温泉以及油气田等。

对于青藏高原地热省,生热构造可能是中新世以来恒河盆地之下的地幔软流圈底辟构造,为下地壳韧性流动提供热能;导热构造可能是恒河盆地向北非均匀流动的下地壳韧性剪切带,释热构造包括青藏高原隆升构造及脆性断层。对于羊八井地热田,亚东—谷露下地壳韧性剪切带是生热构造,中地壳脆韧性剪切带是导热构造,地壳强烈加厚区转折端可能是储热构造,亚东—谷露地堑中脆性断层系可能是释热构造,大量的强震也释放了部分能量。大陆下地壳韧性流动是不均匀的,根据构造地貌(地堑)、温泉、矿床、地震、磁异常及低速—低阻层分布,青藏高原可能存在多条活动的下地壳韧性剪切带(Nelson *et al.*, 1996),表壳显示为热隆伸展构造带和地震—地热异常带,它们可能是干热岩的主要控热构造。

对于华北地热省,生热构造可能是渤海盆地之下的地幔软流圈底辟构造,导热构造可能是渤海盆地非均匀放射状流动的下地壳韧性剪切带,其沟通了深部热源,将地幔热源带到浅部源源不断供给干热岩热储层,从而引起干热岩的温度上升或恒定;释热构造主要是脆性活动断层和发震构造,这些将干热岩的热能不断地向外传输,从而引起干热岩的温度下降。对于汾渭裂谷带高温地热田,地幔底辟上涌、岩石圈减薄拉张导致地幔热是干热岩的主导热源,下地壳韧性剪切带是生热和储热构造,中地

壳脆韧性剪切带是导热构造,裂谷带内高角度脆性断裂、火山机构和发震构造是释热构造。

对于东南沿海地热省,生热构造可能是南海盆地之下周期性活动的地幔软流圈底辟构造(丁航航等, 2021),导热构造可能是一系列向 NW、NWW、SWW 方向的非均匀流动的下地壳韧性剪切带,释热构造主要是同方向的地堑、发震构造和火山机构。

因此,系统深入研究不同构造单元控热构造的分布形式、组合规律、形成时代、活动强度、物质运动、能量传输和成灾、成矿、成藏,是认识地热能热源、搞清岩石热相变规律、确定地热能勘查方案、制定靶区优选准则的基础。

4 结论

干热岩控热构造系统错综复杂,控热构造的分布、尺度、层次、类型直接控制了地壳中干热岩的热源、热运、热聚、热储。

(1)作为地球内部本土的干热岩受构造严格控制,不同尺度的构造对干热岩的控制有不同的表现;干热岩热能的传输、聚敛与控热构造有密切的联系,控热构造是形成岩石圈不同热结构和热异常的直接因素。

(2)干热岩控热构造系统可划分为生热构造、导热构造、储热构造和释热构造 4 种基本类型,4 种控热构造之间互有穿插,控热作用互补。

(3)中下地壳低速低阻高导体和韧性剪切流层不仅是热储层,也是优良的导热层;高角度伸展脆性断裂及其构造组合、温泉、火山、地震分别与地壳浅部热对流、深部热传导以及中、深部热汇聚有关,都具有放热特征,都可作为释热构造的一种表现。

(4)控热构造系统类型的划分具有尺度的概念,不同尺度下的控热构造可能具有不同的控热作用。在详细的类型划分时,要强调构造尺度和研究背景。

致谢:非常感谢 3 位匿名审稿人对本文投入的大量细致入微的审稿工作和建设性意见。感谢编辑部主审及各位编辑全面耐心地指导。

References

- Artemievai, M., Thybo, H., Jakobsen, K., et al., 2017. Heat Production in Granitic Rocks: Global Analysis Based on a New Data Compilation Granite. *Earth-Science Re-*

- views, 172(2): 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2017.07.003>.
- Chen, H. S., 1988. Comprehensive Geophysical Survey of HQ-13 Line in the Lower Yangzi Reaches and Its Geological Significance. *Oil & Gas Geology*, 9(3): 211–222, 327(in Chinese with English abstract).
- Ding, H.H., Ding, W.W., Zhang, F., et al., 2021. Asymmetric Deep Structure of the South China Sea Basin and Its Controlling Factors. *Earth Science*, 46(3): 929–941(in Chinese with English abstract).
- Freyermark, J., Sippel, J., Scheck-Wenderoth, M., et al., 2017. The Deep Thermal Field of the Upper Rhine Graben. *Tectonophysics*, 694: 114–129. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.013>
- Gan, H.N., Wang, G.L., Lin, W.J., et al., 2015. Research on the Occurrence Types and Genetic Models of Hot Dry Rock Resources in China. *Science & Technology Review*, 33(19): 22–27(in Chinese with English abstract).
- Hasterok, D., Chapman, D. S., 2011. Heat Production and Geotherms for the Continental Lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(1/2): 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.04.034>
- Huang, Y., Li, Q.H., Sun, Y.J., et al., 2006. Review of Study on the Crust and Upper Mantle Structure in Jiangsu Province and Its Adjacent Areas. *Northwestern Seismological Journal*, 28(4): 369–376(in Chinese with English abstract).
- Jiang, G. Z., Li, W. W., Rao, S., et al., 2016. Heat Flow, Depth-Temperature, and Assessment of the Enhanced Geothermal System (EGS) Resource Base of Continental China. *Environmental Earth Sciences*, 75(22): 1432. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6238-5>
- Lay, T., Hernlund, J., Buffett, B. A., 2008. Core-Mantle Boundary Heat Flow. *Nature Geoscience*, 1(1): 25–32. <https://doi.org/10.1038/ngeo.2007.44>
- Li, D. W., Wang, Y. X., 2015. Major Issues of Research and Development of Hot Dry Rock Geothermal Energy. *Earth Science*, 40(11): 1858–1869(in Chinese with English abstract).
- Li, X.L., Wu, G.L., Lei, Y.D., et al., 2016. Suggestions for Geothermal Genetic Mechanism and Exploitation of Zhangcang Temple Geothermal Energy in Guide County, Qinghai Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(1): 220–229 (in Chinese with English abstract).
- Lin, W.J., Wang, G.L., Shao, J.L., et al., 2021. Distribution and Exploration of Hot Dry Rock Resources in China: Progress and Inspiration. *Acta Geologica Sinica*, 95(5): 1366–1381(in Chinese with English abstract).
- Liu, D. M., Zhang, C. S., Sun, M. H., et al., 2021. Evaluation Indexes and Formation Conditions of Hot Dry Rock Exploration. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(3): 1–11(in Chinese with English abstract).
- Liu, D.M., Zhang, G.Y., Guan, J.P., et al., 2020. Analysis of Geothermal Resources Potential for Hot Dry Rock in the Subei Basin. *Earth Science Frontiers*, 27(1): 48–54(in Chinese with English abstract).
- Ma, Z.Y., Li, X.C., Zheng, H.J., et al., 2017. Origin and Classification of Geothermal Water from Guanzhong Basin, NW China: Geochemical and Isotopic Approach. *Journal of Earth Science*, 28(4): 719–728. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0637-0>
- Mu, G.X., Li, F., Yan, W.Z., et al., 2015. Occurrence Law of Geothermal Resources and Key Technologies for Development and Utilization in Guanzhong Basin. Geology Press, Beijing(in Chinese).
- Naif, S., Key, K., Constable, S., et al., 2013. Melt-Rich Channel Observed at the Lithosphere—Asthenosphere Boundary. *Nature*, 495(7441): 356–359. <https://doi.org/10.1038/nature11939>
- National Energy Administration, 2019. The Energy Industry Standard of the People's Republic of China—Terminology of Geothermal Energy(NB-T 10097–2018). Sinopec Press, Beijing (in Chinese).
- 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>
- Pollack, H. N., Hurter, S. J., Johnson, J. R., 1993. Heat Flow from the Earth's Interior: Analysis of the Global Data Set. *Reviews of Geophysics*, 31(3): 267–280. <https://doi.org/10.1029/93rg01249>
- Qi, J. F., Yang, Q., 2010. Cenozoic Structural Deformation and Dynamic Processes of the Bohai Bay Basin Province, China. *Marine and Petroleum Geology*, 27(4): 757–771. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.08.012>
- Slater, J. G., Jaupart, C., Galson, D., 1980. The Heat Flow through Oceanic and Continental Crust and the Heat Loss of the Earth. *Reviews of Geophysics*, 18(1): 269–311. <https://doi.org/10.1029/rg018i001p00269>
- Shi, X.B., Zhou, D., Zhang, Y.X., 2000. Thermal Rheological Structure of Continental Margin Lithosphere in the Northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 45(15): 1660–1665 (in Chinese with English abstract).

- Tanaka, A., Yamano, M., Yano, Y., et al., 2004. Geothermal Gradient and Heat Flow Data in and around Japan (I): Appraisal of Heat Flow from Geothermal Gradient Data. *Earth, Planets and Space*, 56(12): 1191–1194. <https://doi.org/10.1186/bf03353339>
- Tanaka, H., Chen, W.M., Kawabata, K., et al., 2007. Thermal Properties across the Chelungpu Fault Zone and Evaluations of Positive Thermal Anomaly on the Slip Zones: Are these Residuals of Heat from Faulting? *Geophysical Research Letters*, 34: L01309. <https://doi.org/10.1029/2006gl028153>
- Teng, J.W., Si, X., Zhuang, Q.X., et al., 2019. Fine Structures of Crust and Mantle and Potential Hot Dry Rock beneath the Zhangzhou Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(5): 1613–1632(in Chinese with English abstract).
- Wang, C.Y., Li, Y.H., Lou, H., 2016. Issues on Crustal and Upper-Mantle Structures Associated with Geodynamics in the Northeastern Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 61(20): 2239–2263(in Chinese with English abstract).
- Wang, G.L., Lin, W.J., Zhang, W., et al., 2016. Research on Formation Mechanisms of Hot Dry Rock Resources in China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 90(4): 1418–1433. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12776>
- Wang, G.L., Zhang, W., Liang, J.Y., et al., 2017. Evaluation of Geothermal Resources Potential in China. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(4): 448–459(in Chinese with English abstract).
- Wang, J.Y., 2015. Geothermics and Its Applications. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, J.Y., Hu, S.B., Pang, Z.H., et al., 2012. Estimate of Geothermal Resources Potential for Hot Dry Rock in the Continental Area of China. *Science & Technology Review*, 30(32): 25–31(in Chinese with English abstract).
- Wang, M.L., Chen, B.Y., Liang, X.F., et al., 2015. Surface Wave Tomography for South China and the Northern South China Sea Area. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(6): 1963–1975(in Chinese with English abstract).
- Wang, S.F., Pang, Z.H., Liu, J.R., et al., 2013. Origin and Evolution Characteristics of Geothermal Water in the Niutuozen Geothermal Field, North China Plain. *Journal of Earth Science*, 24(6): 891–902. <https://doi.org/10.1007/s12583-013-0390-6>
- Wang, Y., Wang, J., Xiong, L.P., et al., 2001. Lithospheric Geothermics of Major Geotectonic Units in China Mainland. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(1): 17–22(in Chinese with English abstract).
- Weinstein, S.A., 1993. Catastrophic Overturn of the Earth's Mantle Driven by Multiple Phase Changes and Internal Heat Generation. *Geophysical Research Letters*, 20(2): 101–104. <https://doi.org/10.1029/93gl00044>
- Witter, J.B., Trainor-Guitton, W.J., Siler, D.L., 2019. Uncertainty and Risk Evaluation during the Exploration Stage of Geothermal Development: A Review. *Geothermics*, 78(1): 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.12.011>
- Wu, X.Y., Mou, R., Shi, S.Q., et al., 1999. Relationship between Volcanic Rocks and Structural Evolution in Subei Basin. *Petroleum Explorationist*, 4(1): 44–47, 7(in Chinese with English abstract).
- Xiao, Z.C., Wang, S., Qi, S.H., et al., 2020. Petrogenesis, Tectonic Evolution and Geothermal Implications of Mesozoic Granites in the Huangshadong Geothermal Field, South China. *Journal of Earth Science*, 31(1): 141–158. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1242-9>
- Xiong, S.Q., Yang, H., Ding, Y.Y., et al., 2016. Characteristics of Chinese Continent Curie Point Isotherm. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(10): 3604–3617(in Chinese with English abstract).
- Xu, L., Wang, L.S., Yang, Q., 2014. An Estimation of Hot-Dry-Rock(HDR) Resources in Jiangsu Province. *Geological Journal of China Universities*, 20(3): 464–469(in Chinese with English abstract).
- Yang, W.R., Jiang, C.F., Zhang, K., et al., 2016. Opening-Closing Tectonics: Exploration of a New Idea on Global Tectonics. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 42–60(in Chinese with English abstract).
- Yuan, Y.S., Ma, Y.S., Hu, S.B., et al., 2006. Present-Day Geothermal Characteristics in South China. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(4): 1118–1126(in Chinese with English abstract).
- Zhang, B.J., Li, Y.Y., Gao, J., et al., 2020. Genesis and Indicative Significance of Hot Dry Rock in Matouying, Hebei Province. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 2036–2051(in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Hu, S.B., Song, R.C., et al., 2020. Genesis of the Hot Dry Rock Geothermal Resources in the Gonghe Basin: Constraints from the Radiogenic Heat Production Rate of Rocks. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(7): 2697–2709(in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Hu, S.B., Zhang, S.S., et al., 2020. Radiogenic Heat Production Variations in the Gonghe Basin, Northeastern Tibetan Plateau: Implications for the Origin of High-Temperature Geothermal Resources. *Renewable Energy*, 148: 284–297. <https://doi.org/10.1016/j.renewenergy.2020.03.033>

nene.2019.11.156

- Zhang, S.Q., Li, X.F., Song, J., et al., 2021. 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. *Earth Science*, 46(4): 1416—1436(in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.Q., Xu, W.L., Yan, W.D., et al., 2013. Geothermal Geology of Xining Basin. Geology Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, Z.J., Liu, Y.F., Zhang, S.F., et al., 2010. The Depth-Dependence of Crustal Extension beneath Qiongdongnan Basin Area and Its Tectonic Implications. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(1): 57—66(in Chinese with English abstract).
- Zuo, Y.H., Qiu, N.S., Pang, X.Q., et al., 2013. Geothermal Evidence of the Mesozoic and Cenozoic Lithospheric Thinning in the Liaohe Depression. *Journal of Earth Science*, 24(4): 529—540. <https://doi.org/10.1007/s12583-013-0347-9>

附中文参考文献

- 陈沪生, 1988. 下扬子地区 HQ-13 线的综合地球物理调查及其地质意义. 石油与天然气地质, 9(3): 211—222, 327.
- 丁航航, 丁巍伟, 张帆, 等, 2021. 南海海盆区深部结构的不对称性及控制因素. 地球科学, 46(3): 929—941.
- 甘浩男, 王贵玲, 蒯文静, 等, 2015. 中国干热岩资源主要赋存类型与成因模式. 科技导报, 33(19): 22—27.
- 黄耘, 李清河, 孙业君, 等, 2006. 江苏及邻区地壳上地幔结构研究. 西北地震学报, 28(4): 369—376.
- 李德威, 王焰新, 2015. 干热岩地热能研究与开发的若干重大问题. 地球科学, 40(11): 1858—1869.
- 李小林, 吴国禄, 雷玉德, 等, 2016. 青海省贵德扎仓寺地热能成因机理及开发利用建议. 吉林大学学报(地球科学版), 46(1): 220—229.
- 蒯文静, 王贵玲, 邵景力, 等, 2021. 我国干热岩资源分布及勘探: 进展与启示. 地质学报, 95(5): 1366—1381.
- 刘德民, 张昌生, 孙明行, 等, 2021. 干热岩勘查评价指标与形成条件. 地质科技通报, 40(3): 1—11.
- 刘德民, 张根袁, 关俊朋, 等, 2020. 苏北盆地干热岩地热资源前景分析. 地学前缘, 27(1): 48—54.
- 穆根胥, 李锋, 闫文中, 等, 2015. 关中盆地地热资源赋存规律

及开发利用关键技术. 北京: 地质出版社.

- 国家能源局, 2019. 中华人民共和国能源行业标准地热能术语(NB-T 10097-2018). 北京: 中国石化出版社.
- 施小斌, 周蒂, 张毅祥, 2000. 南海北部陆缘岩石圈热一流变结构. 科学通报, 45(15): 1660—1665.
- 滕吉文, 司芾, 庄庆祥, 等, 2019. 漳州盆地精细壳、幔异常结构与潜在干热岩探讨. 地球物理学报, 62(5): 1613—1632.
- 王椿镛, 李永华, 楼海, 2016. 与青藏高原东北部地球动力学相关的深部构造问题. 科学通报, 61(20): 2239—2263.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等, 2017. 中国地热资源潜力评价. 地球学报, 38(4): 448—459.
- 汪集暘, 2015. 地热学及其应用. 北京: 科学出版社.
- 汪集暘, 胡圣标, 庞忠和, 等, 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估. 科技导报, 30(32): 25—31.
- 王敏玲, 陈赞, 梁晓峰, 等, 2015. 华南及南海北部地区瑞利面波层析成像. 地球物理学报, 58(6): 1963—1975.
- 汪洋, 汪集暘, 熊亮萍, 等, 2001. 中国大陆主要地质构造单元岩石圈地热特征. 地球学报, 22(1): 17—22.
- 吴向阳, 牟荣, 石胜群, 等, 1999. 苏北盆地火成岩发育与构造演化的关系. 勘探家, 4(1): 44—47, 7.
- 熊盛青, 杨海, 丁燕云, 等, 2016. 中国陆域居里等温面深度特征. 地球物理学报, 59(10): 3604—3617.
- 徐立, 王良书, 杨谦, 2014. 江苏干热岩地热资源潜力估算. 高校地质学报, 20(3): 464—469.
- 杨巍然, 姜春发, 张抗, 等, 2016. 开合构造: 新全球构造观探索. 地学前缘, 23(6): 42—60.
- 袁玉松, 马永生, 胡圣标, 等, 2006. 中国南方现今地热特征. 地球物理学报, 49(4): 1118—1126.
- 张保建, 李燕燕, 高俊, 等, 2020. 河北省马头营干热岩的成因机制及其示范意义. 地质学报, 94(7): 2036—2051.
- 张超, 胡圣标, 宋荣彩, 等, 2020. 共和盆地干热岩地热资源的成因机制: 来自岩石放射性生热率的约束. 地球物理学报, 63(7): 2697—2709.
- 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.
- 张森琦, 许伟林, 严维德, 等, 2013. 西宁盆地地热地质. 北京: 地质出版社.
- 张中杰, 刘一峰, 张素芳, 等, 2010. 琼东南盆地地壳伸展深度依赖性及其动力学意义. 地球物理学报, 53(1): 57—66.