



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, doi: 10. 6038/pg2019CC0276.

YANG Ye, JIANG Zhi-hai, YUE Jian-hua, et al. 2019. Discussion on application of geophysical methods in Hot Dry Rock (HDR) exploration. Progress in Geophysics (in Chinese), 34(4): 1556-1567, doi: 10. 6038/pg2019CC0276.

# 干热岩勘探过程中地球物理方法技术应用探讨

## Discussion on application of geophysical methods in Hot Dry Rock (HDR) exploration

杨冶,姜志海\*,岳建华,刘树才

YANG Ye, JIANG Zhi-hai\*, YUE Jian-hua, LIU Shu-cai

中国矿业大学资源与地球科学学院,江苏徐州 221116

School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221116, China

**摘要** 干热岩(Hot Dry Rock, HDR)地热资源又称作增强型地热资源(Enhanced Geothermal Resources, EGS),是地热资源的重要组成部分.目前国际上非常重视干热岩地热的勘探开发,干热岩地热资源在今后清洁能源开发中潜力巨大,研究干热岩对于环境保护、能源利用、国家发展都具有重大的意义.本文回顾了国内外干热岩勘探开发现状;简要分析干热岩体地球物理特征;结合我国干热岩勘探实例总结了常用的干热岩勘探方法及存在的问题.在干热岩勘探开发过程中,经济有效地选择合适的干热岩靶区是关键.通过对我国干热岩靶区勘探方向及方法选择的探讨,概括了我国目前圈定干热岩靶区的探测方法,说明了地球物理勘探方法在干热岩开发环节中的重要性.希望通过本文的概述,读者能够对地球物理方法勘探干热岩有初步的认识,以期本文对干热岩地热资源开发勘探有一定指导作用.

**关键词** 干热岩;增强型地热能源;地球物理勘探;探讨

中图分类号 P314, P631

文献标识码 A

doi: 10. 6038/pg2019CC0276

**Abstract** Hot Dry Rock (HDR) geothermal resource, also known as Enhanced Geothermal Resources (EGS), is an important part of geothermal resources. At present, the international community pay great attention to the exploration and development of HDR geothermal resource, and which is a potential clean energy in future energy development. Exploring and researching HDR is of great significance for environmental protection energy utilization and national development. In this paper, we review the present situation of HDR exploration and development in domestic and abroad and analysis the geophysical characteristics of HDR. Combining with some exploration examples of HDR in China, we summarize the common exploration methods and existed problems. The cost-effectively selection of suitable target areas is crucial to the successful exploration and development of HDR. By discussing with the exploration direction and method selection of target area of HDR in China, we expound the steps of the detection method for HDR and which reflects the importance of geophysical exploration methods in the development of HDR. Base on above analysis, we hope readers can have a preliminary understanding of the development of HDR exploration and development and expect that it will be a guiding role in the development and exploration of HDR geothermal resources.

**Keywords** Hot Dry Rock (HDR); Enhanced geothermal energy; Geophysical exploration; Discussion

## 0 引言

开发利用清洁能源是解决替代传统化石能源消耗、减轻环境污染压力等问题的重大决策.早在1970年地质部长李四光先生就高瞻远瞩地提出“地下是一个大热库,是人类开辟自然能源的一个新来源,就像人类发现煤炭、石油可以燃烧一样”.2016年12月21日,习近平总书记在中央财经领导

小组第十四次会议上强调,要尽快推进北方地区冬季清洁取暖的进程,尽可能利用清洁能源,加快提高清洁供暖比重任务的进展.由于浅部地热资源的温度和分布量有限,深部干热岩地热资源的开发利用逐渐进入人们的视野.干热岩地热资源作为“未来的清洁能源”,有着清洁性、可再生、广泛分布性及巨大的高温发电潜力等优势.其在涉及热能供应的相关行业有着十分广阔的应用前景,干热岩地热资源开发将迎

收稿日期 2018-10-16; 修回日期 2019-05-26. 投稿网址 http://www.progeophysics.cn

基金项目 国家自然科学基金青年基金项目(41304113)资助.

第一作者简介 杨冶,男,1993年生,江西抚州人,在读硕士,主要从事电磁方法技术方面应用及研究.(E-mail: 1761539218@qq.com)

\* 通讯作者 姜志海,男,1978年生,山东德州人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事应用地球物理方面的教学和科研工作,主要研究方向为矿井水文物探技术、电磁法数值模拟和资料解释.(E-mail: jzh3885434@126.com)

来革命性机遇发展(殷秀兰,2008)。

随着浅部地热资源的日益减少,地热资源的开发正朝着深部方向转变,利用与开发干热岩地热资源正受到世界范围内的广泛关注。与发达国家相比,我国干热岩资源勘查开发及其技术发展仍处于初级阶段,并未形成系统的勘探开发方法。从我国干热岩勘查开发现状来看,如何经济有效地选取干热岩靶区及确定工程场地是干热岩开发成败的关键一步,在这个过程中,地球物理方法起到了重要作用,本文主要从地球物理方法探测的角度进行论述,期望在干热岩的勘探环节起到一定的积极作用。

## 1 干热岩的基本特征及主要用途

根据地热能赋存状态和温度,可以将地热能分为:浅层地热资源、水热型地热资源及增强型地热资源(EGS),干热岩地热资源即为增强型地热资源。按照国际上流行的定义:干热岩是指埋深较浅、温度较高、有较高经济开发价值的热岩体,埋藏于距地表3~10 km深处,岩体温度范围在150~650℃,主要是各种变质岩或结晶类岩体,较常见的岩石有黑云母片麻岩、花岗岩、花岗岩闪长岩等(赵阳升等,2002)。干热岩资源储量极为丰富,比浅层地热资源要大得多,比天然气、石油、煤炭转化的热能总和还要大。在相对较浅的干热岩资源中,蕴藏的热能等同于100亿库德(即quad,1 quad相当于2400万公吨,也就是 $2.4 \times 10^{10}$  kg石油的热量)。这些能量比所有的浅层地热资源评估能量的800倍还多,是我国石油、天然气和煤炭总资源量的30多倍。近年来,中国科学院对我国大陆3~10 km深处的干热岩资源进行了评价,估计资源总量约为 $2.09 \times 10^{25}$  J的热量,相当于715万亿t(1 t=1000 kg)标准煤。根据国际标准开采2%和2010年全国能源消耗标准,这些能源可供中国使用4400年(许天福等,2016)。干热岩地热资源几乎是不竭的,相比于传统化石能源而言,石油、煤炭等资源形成的周期极长,是不可再生能源。干热岩地热储层中热量被部分利用后,地壳深部热源又源源不断地向干热岩补充热量,因此干热岩地热资源的利用不需要担心来源供应不足的问题。

目前,干热岩资源最主要的用途是发电,如图1所示,整个发电过程是通过钻孔以加压的方式注水到埋深3000~5000 m的高温岩体(大多数是花岗岩)中,这些水被地下储热层加热变为高温高压水或水汽混合物,然后通过裂隙从其他的钻孔中喷出地表,这些喷出的热汽水通过热交换(比如让沸点更低的液体沸腾)及地面循环装置,用于推动蒸汽涡轮机,从而达到发电的目的,由于发电冷却后的水是以循环的方式通过钻孔回流至干热岩储热层并继续利用(冉恒谦和冯起赠,2011),所以干热岩地热资源也是清洁能源。

## 2 国内外干热岩勘探开发现状

### 2.1 国外干热岩开发进展

早在1970年,美国的两位研究员莫顿和史密斯就提出利用干热岩储存热量发电的设想,1972年,美国学者在新墨西哥州北部芬顿山(Fenton Hill)开始干热岩开发试验,该地区地表出现热泉、喷气孔和蚀变岩石以及规模大、持续时间长的年青火山活动现象,经过前期勘探工作,最终建成两口

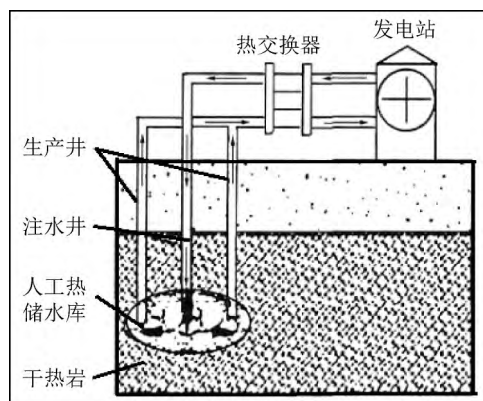


图1 干热岩地热发电系统示意图

(冉恒谦和冯起赠,2011)

Fig. 1 Schematic diagram of HDR geothermal power generation system(Ran H Q and Feng Q Z 2011)

深约4000 m的钻井,探明干热岩储层为花岗岩,温度高达317℃,通过注水井成功在另外一口钻井中取出相当于功率为2300 kW的热蒸汽,这次试验的成功预示着干热岩开发由设想进入试验阶段,1973年正式进行干热岩发电实验,1986年建立了较为完整的干热岩发电系统,最终该项目在2000年结束现场试验。2001年美国能源部开始实施“增强地热系统”(EGS)计划,2002年启动EGS计划的Desert Peaked项目,探明储热层为变质岩,地下深2457 m,温度高达204℃,经过不断的发展,在2013年成功并网发电。2009年分别启动Geysers和Newberry项目,其中Geysers项目热储岩性为热变质黑云母角砾岩,钻井最高温达347℃,并成功发电,Newberry项目热储岩性为火成岩,井底最高温达315℃。英国在1973年开始Rosemanowes项目,工程位于罗斯曼奴斯火山地区露天矿的Carmenellis花岗岩体内,地温梯度(30~40)℃/km,热流密度120 mW/m<sup>2</sup>,且岩体具有高放射性,通过探查确定热储岩性为花岗岩,并在开发试验过程中首次使用支撑剂,该项目在1992年结束。在日本,1980年新能源和工业技术发展组织开展Hijiori项目,选区依据是该地区位于山形县Hijiori火山口的南缘,该火山在最近1万年前还曾活动过,地表高温异常明显,通过前期工作共确定了四个钻孔位置,钻井发现在1800 m和2200 m深度处天然裂隙非常发育,探明热储层为花岗岩,最高温270℃,该项目于2002年结束,并进行了发电实验。德国的干热岩研究始于1977年,1987年联合法国等国家在阿尔萨斯地区开始进行深入研究,建成两口分别深3500 m和5000 m的钻井,并证实是非火山地区也可进行干热岩开发,经过多年发展于2003年开始实施Landau项目,探明热储层为水热型碳酸盐岩,最高温达300℃,在斯图加特地区附近建立了稍具规模的地下热交换系统。1987年,英、法、德三国集中于法国上莱茵的Soultz-sous-Forêts地区实施Soultz项目,该地区是著名的Pechelbronn-Merkwiller油田,建成两口深3590 m和3876 m钻井,探明热储层为花岗岩,井底温度达300℃,并进行开发潜力评估,在2011年开始发电。澳大利亚于2009年实施Habanoero项目,热储层为花岗岩,钻井深度达4911 m,井底温

度高达 270 °C,并于 2013 年成功发电,其他国家如瑞典、瑞士等国家也相继开始干热岩开发试验项目,均取得一定成效。从国外干热岩开发勘探选区经验来看,大多选择那些地表高温异常明显(地温梯度高、热流密度大)、地表暴露温泉数量较多的地区,或者选在年青火山活动的区域附近以及前期进行过石油、浅层地热开发,具有丰富物探资料且能初步判断可能存在干热岩的地区,亦或选择那些地温梯度并不高但岩体放射性高的地区作为干热岩开发试验场地(杨吉龙和胡可,2001;徐巍,2007;苏正等,2014;陆川和王贵玲,2015;张杨,2016)。

## 2.2 国外地球物理方法探测干热岩概况

国际上在研究开发干热岩地热资源的过程中取得了许多成果,积累了大量经验。Stix(1982)利用合成孔径雷达(SAR)卫星图像技术间接地评估了内布拉斯加州西部地区的地热潜力,并预测出两个具有干热岩石地热潜力的区域。Souidi(2009)采用各个时期的遥感数据,计算大地热流值并总结规律,为后续探测提供依据。Hinze等(1986)在美国中部大陆利用重力和磁异常圈定干热岩有利区。Rimi等(2005)等利用摩洛哥地热田的重磁异常数据计算出居里面的深度为 10~40 km,为后续评估提供依据。Gutmann等(1980)在美国亚利桑那州尤马县的干热岩勘探区根据重力负异常推测火山口的存在,并结合大地电磁来确定地壳和上地幔深度。Arney和Goff(1982)利用重力与地震资料对爱达荷州 Mountain Home 地区进行了干热岩潜力评估。Meixner等(2014)在 Hatchobaru 地区利用 59 个观测站进行微重力监测,通过微小的重力值变化得出了干热岩区域开发时的储层物质流失情况。Michael(1986)在洛斯阿拉莫斯的芬顿山干热岩试验区进行井间地震勘探,根据测得的 P 波、S 波的波形特征、振幅、频率成分对井间断裂进行反演,用三种方法得到的断裂位置吻合,为建立地下热流循环系统提供有利依据。Soma等(1997)利用人工源(声波)地震反射法对法国 Soultz HDR 试验区深部岩性储层、构造等进行探测。Vécsey等(1998)在 Fjallbacka HDR 试验区进行了各向异性地震层析成像探测干热岩石热储层效果研究。Michelet和Toksöz(2003)对法国 Soultz-sous-Forêts 干热岩试验基地用震源联合定位法结合微地震观测资料进行处理,提高了对地下热流流动路径的探测精度。Baria(2004)使用微震观测方法对干热岩储层进行监测。Karastathis(2011)应用三维地震成像技术和居里面深度分析地热田深部构造。Ander等在 1980 年在调查新墨西哥州干热岩地热时进行过大面积 MT 和 CSAMT 探测,对该地区深部岩石电性结构有了初步了解。Thiel等(2011)对干热岩进行三维大地电磁正演模拟,并在澳大利亚南部 Paralana 验证,结果能够很好的反映盖层、热储层的电性信息。Suzuki等(1998)利用地震反射波法和 CSAMT 法联合反演对日本 Ogachi 干热岩实验区进行探测,很好地反映地下储层信息。海江田秀志和铃木浩一(2014)利用澳大利亚南部库珀盆地 HDR 地热能开发项目的探测数据,结合 CSAMT 和 TEM 联合反演,得到测区地下准确的电性结构,对于判断干热岩赋存状态具有重要意义。

国外圈定干热岩靶区所利用的地球物理方法是多样化的,不局限于某种方法,而是结合各方法技术特点,在各个

勘探阶段结合具体地质情况,选择适当的方法完成勘探任务。

## 2.3 国内干热岩开发现状

我国从 1993 年开始关注并研究干热岩,各相关科研单位及高校相继开展了关于中国干热岩的资源分布和潜力评估的工作,但是目前还未建成我国第一个 EGS 示范研究场地。2007 年,中国能源研究会与澳大利亚 Petrathern 公司进行合作,现场采集部分干热岩试验样品,并对其进行了分析测试、模型研究等工作。2010 年,福建某公司开展晋江地域 EGS 工程及地震检测试验项目。2012 年国家高技术研究发展计划(“863”计划)启动了“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”项目,吉林大学牵头并承担课题“干热岩靶区工程测试及人工压裂工艺技术研究”主要研究干热岩开发过程中的关键技术问题。2013 年,中国地质调查局出台了第一个关于中国干热岩勘查与开发工作实施规范和指导方案《全国干热岩勘查与开发示范实施方案(2013—2030)》。2014 年国土资源系统在我国青海、西藏、四川、福建、广东、湖南、松辽盆地、海南等高热流区域进行了干热岩资源勘查。2015 年 5 月 21 日,由中国地质调查局承担的中国第一个干热岩科学钻探项目在福建漳州开钻,至此中国干热岩综合性开发与研究工作正式开始(曾义金,2015;张所邦等,2017)。2017 年 9 月,勘查研究人员在青海共和盆地 3705 m 深处钻获 236 °C 的高温岩体,是国内目前为止钻获温度最高的干热岩体,这是我国首次钻获埋藏最浅、温度最高的干热岩体,实现了我国干热岩勘查的重大突破(王丽华和康维海,2017)。2018 年 3 月 23 日我国东部地区第一口干热岩参数井在海南省琼北地区成功完钻,该钻井在深度 4387 m 处钻获超过 185 °C 干热岩体,是我国第一口进入开发阶段的干热岩钻井成功案例(邵长春,2018)。

## 2.4 国内地球物理方法探测干热岩概况

我国学者在勘探干热岩方面做了许多工作,借鉴了浅层地热勘探、石油勘探及国外干热岩勘探经验,多年来在干热岩勘探过程中也获得了许多宝贵经验,勘探方法多样化,在不同程度上取得了一定成效。孙知新等(2011)通过地质研究发现青海共和盆地为新生代断陷盆地,这类盆地是干热岩有利赋存区,通过地震反射波勘探和可控源大地电磁测深(CSAMT)推断出基底界面,并推测盆地斜坡界面对应重力低异常可能是由花岗岩引起,初步推断为干热岩热源赋存区。薛建球(2013)通过浅层测温、深井测温、航磁资料、重力资料以及 CSAMT 测深对青海贵德—共和盆地的干热岩开发进行评价。2013 年 6 月开始对青海共和盆地进行深部钻探,并于次年 4 月在地下深 2230 m 处钻获温度约为 153 °C 的热岩体并判断为干热岩岩体。梁学堂等(2015)通过对航空磁异常数据的分析,采用空间域连续模型居里面反演方法,揭露了湖北省居里面构造特征,结合当地水文、地质情况,推断出湖北境内两处“干热岩”潜在赋存靶区,为今后勘探、开发干热岩资源提供了参考依据。万建军(2015)等利用佛冈岩体放射性特征,对广东省进行细致的干热岩评价工作,圈定了干热岩示范靶区。张前等(2015)通过重力探测和大地电磁测深(MT)两种物探方法,对海南陵水地区进行干热岩勘查,并结合水文、地质等资料初步推测了热源侵入通道和勘

探区断裂构造特征。赵雪宇等(2015)利用松辽盆地重力磁法勘探数据,进行莫霍面、居里面深度反演,计算出各深度的地热热流值,分析了松辽盆地干热岩形成的机理,圈定了干热岩潜在靶区。陈雄(2016)在其博士论文中对地球物理方法在干热岩勘查应用进行探讨研究。庄庆祥(2017)建议利用综合物探方法(重、磁、电、震)进行高精度探测,高分辨数据收集,获取精细的密度、磁性、电性、波场速度结构,从而缩小钻探范围,在测区打少数的浅孔,通过分析比较浅孔地质资料,综合推测深部热源交换机制,最终确定了福建省漳州市干热岩深部钻探位置。赵贵福等(2016)结合重力、磁法、MT、CSAMT等多种地热探测成果资料证实青海共和—贵德盆干热岩的存在。闫琳琳等(2016)利用大地电磁测深法,并结合具体地质资料和已有的重磁、自然电位资料,进行重磁电模型数值模拟及数据处理分析,获取了广东阳江地区地热结构特征。张大明(2017)利用大地电磁测深(MT)获得较好的地下电性结构资料,结合地质、水文资料,对测区内断裂特征及展布情况进行研究,通过对测深资料进行解译获取了地下深部典型结构及初步分层信息,并据此推测燕山期侵入岩(热源)的赋存状态,通过电阻率的对比分析解释了地质体厚度及埋深,为后续干热岩资源勘探、开发及评估提供了依据。

### 3 我国干热岩勘探区域选择分析及物探方法探讨

#### 3.1 从我国大地热流分布与区域地质构造来看

干热岩靶区选择最重要的指标是岩体温度,大地热流异常可以较为直观地反应出地下深部岩体温度,这也是干热岩远景区圈定最重要的依据之一。根据我国大陆地区大地热流测点地理分布图(图2所示)明显看出高温异常区域主要分布在板块构造带或构造活动带,大致规律是东高、中低;西北低、西南高。滇藏造山带的甘孜、云南地区,南海地台中的琼北地区,华南造山带中的广东和福建、江西地区,台湾造山带中台湾地区,华北克拉通的南部(河南)及东北部(山东、河北),天山—兴蒙造山带中松辽盆地、长白山、五大连池地区,秦祁昆造山带中青海贵德、共和盆地,塔里木陆块中塔里木盆地等地区都是干热岩潜在靶区,目前我国主要在青海、西藏、四川、福建、广东、湖南、松辽盆地、海南等高温地区进行干热岩资源勘探,并在福建漳州、青海共和、海南琼北地区成功钻获高温干热岩岩体。

#### 3.2 从莫霍面的埋深来看

岩石学家把莫霍面看成是地壳和地幔在岩性上的过渡带,莫霍面以上的地壳岩石,主要由辉长岩、麻粒岩等构成,而莫霍面之下的地幔岩则主要由橄榄岩组成,同时莫霍面是弹性分界面,在莫霍面之上的地壳P波波速小于7 km/s,之下地震波波速为8 km/s左右,莫霍面也是地壳物质与地幔岩浆物质交换的界面(马昌前,1998)。所以,莫霍面是一个地球物理场分界面,研究莫霍面可以指导干热岩成因机制分析。由于地面高程与莫霍面埋深呈镜像关系,地势高的地方莫霍面向下凹,地势低的地方莫霍面向上凸(舒良树,2010),而干热岩主要热源来自地幔的岩浆活动,因此,对于地势较低的区域来说,莫霍面埋深较浅,热源更加接近地表,从钻井深度的角度上来看可减轻对钻井技术的要求,为干热岩的开

发提供良好条件。我国地壳厚度由东向西逐渐递增,即霍面埋深变化亦是如此,因此我国东部地区(盆地优选)及沿海地带是干热岩潜在靶区。图3为南海地区莫霍面深度分布图,在整个南海地区,莫霍面埋深较浅,有利于干热岩勘探开发,其中我国第一口进入开发阶段的干热岩钻井正是位于我国东部海南省琼北地区。

#### 3.3 从年轻的构造活动及火山活动来看

我国学者对干热岩岩体进行了初步定义,干热岩储层岩体可以是中生代变质岩、中生代的中酸性侵入岩(以花岗岩为主),甚至是巨厚的块状沉积岩(杨吉龙和胡可,2001),这个定义对岩体形成的时期进行了限制,所以干热岩形成的时间不能太早(热量散失多),以中生代为佳,而且地热形成常与构造活动联系在一起,在构造活动较为年轻的地区可能是干热岩潜在靶区。在中、新生代,地处欧亚板块东部的中国活动大陆边缘是从三叠纪(250 Ma)开始的,青藏高原素称“世界屋脊”,高原的强烈隆起是新生代以来地球上发生的重大地质事件,而且火山活动与高原岩石圈的构造演化和隆升过程有良好的耦合关系(胡受奚等,1994;邓万明和孙宏娟,1999),一般认为,全新世以来的岩浆活动对温度场有很大的影响,而更新世以前发生的岩浆活动由于经过长时间的冷却,对地温场影响较小。根据理论计算小的岩浆体(小于0.5 km)在全新世早期活动的余热全部散失,只有较大的晚更新世以来活动的岩浆体,现仍有可能提供一部分余热(张杨,2016),因此我国东部沿海地区以及青藏高原等中生代构造活动且在更新世以后仍然有火山活动的地域是干热岩赋存的有利地区。

#### 3.4 物探方法技术探讨

##### 3.4.1 干热岩物性特征

利用地球物理探测方法圈定干热岩靶区的重要依据是干热岩岩体与围岩有明显的物性差异,一方面,干热岩岩体可以是变质岩、侵入岩、沉积岩,这些岩体受高温高压特定环境的影响,物理性质会发生改变而与围岩物理性质出现差异,另一方面,干热岩地热区的“源”、“储”、“盖”各个不同部位有明显的物性差异。通过分析干热岩岩体性质有助于开展探测工作。

(1) 温度及压力对岩石电阻率的影响:电阻率随着温度的增加而减小,最初减小的速率较快,当温度变得较高时电阻率减小得较慢,而且电阻率随温度变化是非线性的,电阻率随着压力变化与控制压力不变温度对电阻率影响的规律是一致的(赵发展和王晕,1997),虽然温度压力对岩体的电阻率有影响,但是干热岩多为基性或中酸性岩体,与周围沉积岩相比通常表现为高阻异常。

(2) 温度对岩石磁性的影响:温度的变化影响磁化率的变化,这种变化主要体现在对磁性矿物的去磁作用,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)。对于热源是岩浆侵入岩的地热来说,由于岩浆岩的磁性较高,因而呈现高磁性,热储层附近岩石中的铁磁性物质(磁化率远大于其他磁性物质,量级高达 $10^5$ )随着温度从低温增高达到居里温度时而具有最大磁性,之后随着温度增高而失去磁性,因而显示出低磁性质,对于顺磁性矿物而言,其磁化率量级为 $10^{-5}$ ,与温度变化成反比(武斌,2013;

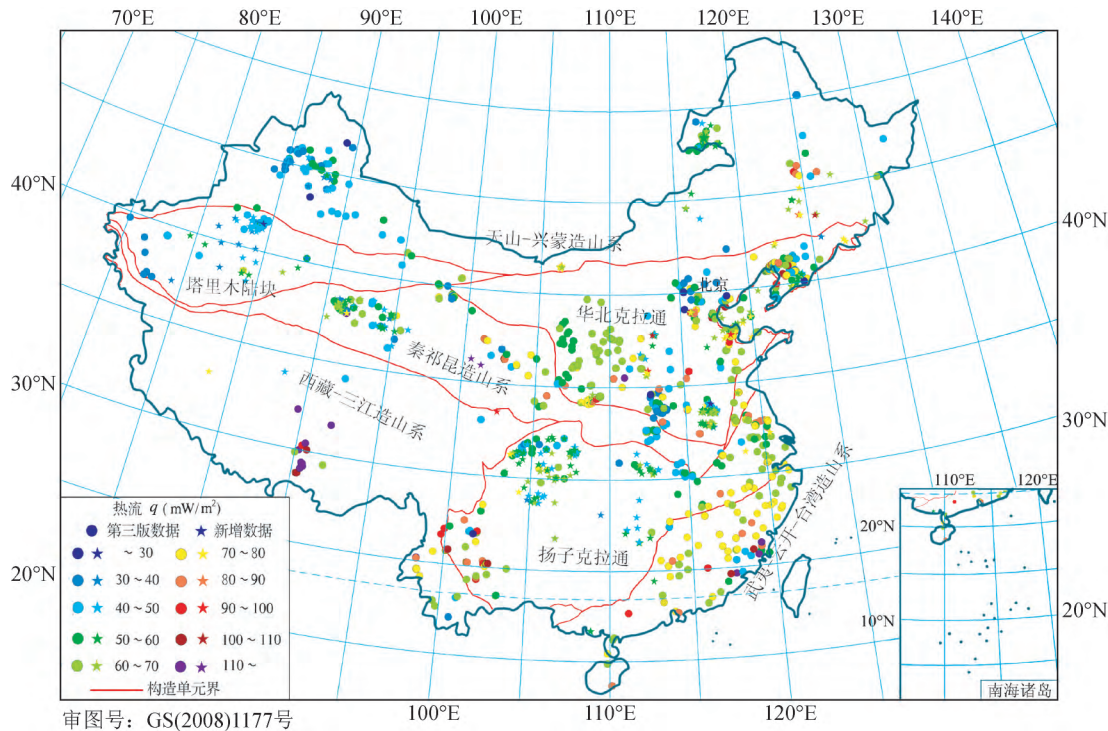


图2 中国大陆地区大地热流测点地理分布图(第四版)(姜光政等 2016)

Fig. 2 Geographic distribution of heat flow sites in the continental area of China ( the 4 diction) ( Jiang G Z *et al.* , 2016)

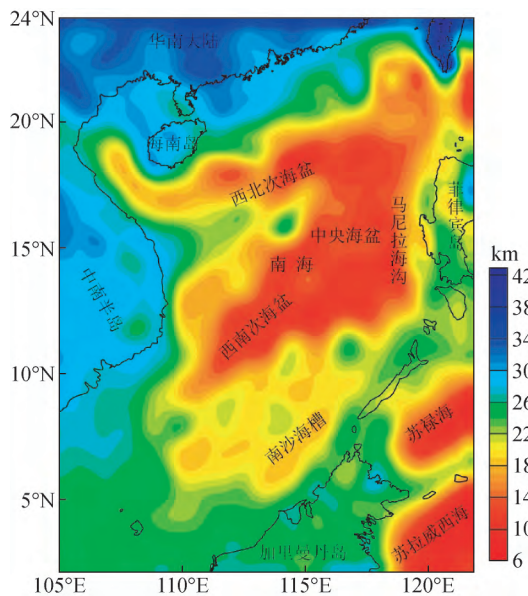


图3 南海地区莫霍面深度图(鲁宝亮等 2018)

Fig. 3 Moho depth of the SCS( Lu B L *et al.* , 2018)

焦新华和吴彦冈 2009) ,因此干热岩岩体在一般情况下呈低磁性.

(3) 温度、压力对岩石波速、密度的影响: 一般来说 ,压力增大 ,孔隙度减小 ,岩石更为致密;导致弹性波速度会有一

定的提升 ,而温度升高 ,弹性波速降低 ,岩石波速与温度呈线性关系 ,而密度随温度增高呈非线性降低( Jaya *et al.* , 2010) ,因此干热岩的地震波波速与围岩相比应该是降低的 ,密度也是明显降低的.

### 3.4.2 探测干热岩的地球物理方法

干热岩形成条件与石油孕育条件有相似之处 ,干热岩的勘探可借鉴石油开发技术理论 ,可以从干热岩的“源”、“储”、“盖”三方面入手进行开发评价 ,山东省干热岩靶区指标评价标准中热储岩性、覆盖层厚、局里面埋深等指标所占权重比较大 ,分别为 0.6、0.7、0.8 ( 张玲等 2018) ,这些指标均可以通过物探方法技术探测出来 ,而干热岩开发在于对干热岩靶区的圈定以及盖层、热储层、基底等结构信息的精确获取.

目前常用的干热岩物探方法技术主要包括: 电磁法勘探、重力磁法勘探、地震勘探、遥感技术、测井技术等 ,这些方法在干热岩勘探开发过程中起着不可忽视的作用 ,地球物理探测的目的是揭示干热岩勘探区浅部地壳结构和寻找壳内异常热源( 体) ,查明地下深大断裂( 导热通道或作为深部热源运移有利通道) ,热储层、覆盖层的赋存状态( 位置、埋深、规模等) ,判断热储层形成机制.

#### (1) 地震勘探技术

地震勘探技术有着探测深度大、探测精度和分辨率高等优点 ,能够较好地对比岩性分界面进行精确刻画 ,不存在电阻率法“高阻屏蔽”等现象而影响深部结构的精细探查 ,为测区重、磁、电等数据的反演解释提供必要的约束条件 .在地热

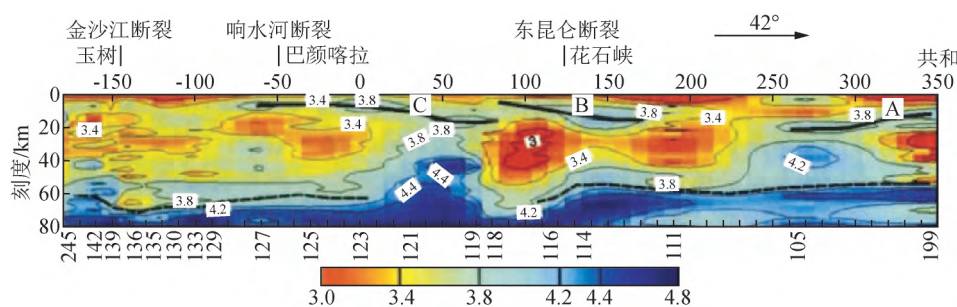


图4 玉树—共和地壳浅部速度剖面图(姜枚等,2009)

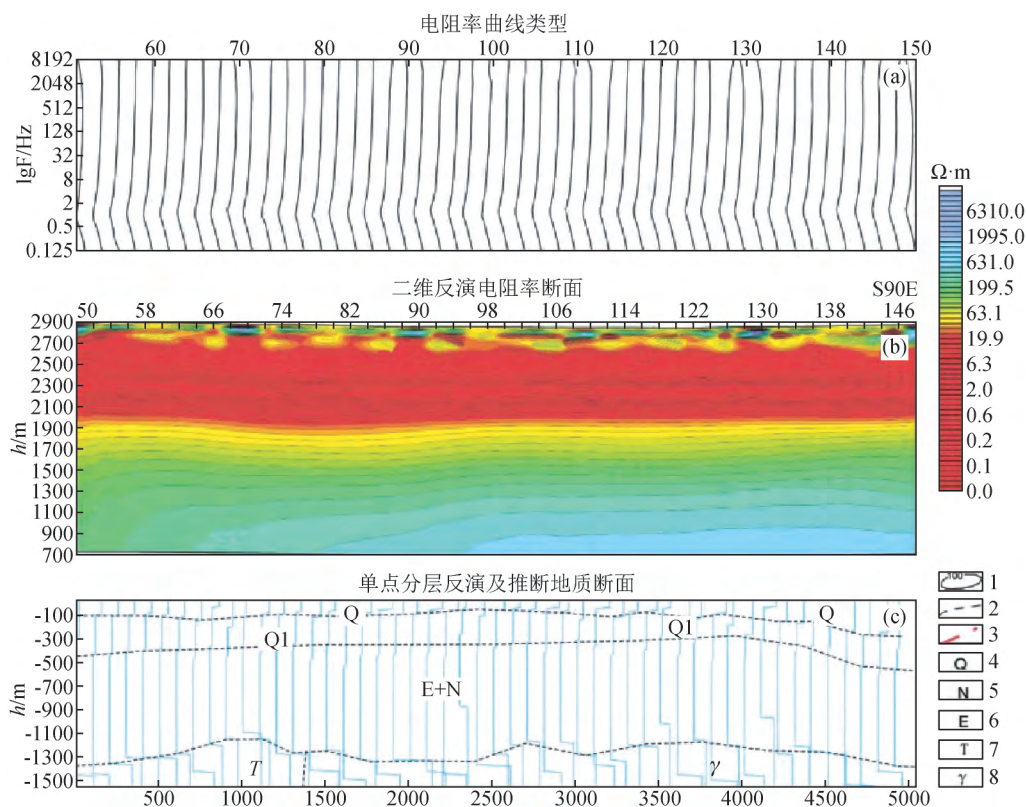
Fig.4 Velocity section in shallow crust of Yushu-Gonghe (Jiang M *et al.*, 2009)

图5 共和盆地地热详查 CSAMT 电阻率及地质解释综合断面图(赵贵福等 2016)

Fig.5 Comprehensive profile and geological interpretation (Zhao G F *et al.*, 2016)

作用下,岩石弹性波速度会明显降低,这一特性在干热岩热储层圈定过程中起着巨大的作用。同时,该方法能够精确推断断层性质、地层埋深等,在了解干热岩地热储层的成因机制方面有着极其重要的作用(曾昭发和刘四新,2010)。探测干热岩过程中,由于干热岩埋藏较深,采用“大深井、大药量、多次覆盖”野外采集技术,利用地面地震层析成像技术和高分辨率地震反射剖面结合、反射与宽角反射探测技术联合,可以获取地下深部高分辨结构图像和物质组成信息。地震勘探方法技术中有一种名为天然地震流动台阵观测研究技术(portable seismic array)常俗称为宽频带地震方法(broadband seismic method)通过采集天然地震数据来研究阵列下方地壳和上地幔的结构,对深部构造有良好的反映,可用干热岩

勘探中来(袁桂琴等,2011)。近年来微震方法得到较好发展,对干热岩系统开发过程产生的裂隙拓展过程反映敏感,能够定位出微小震源,起到较好的监测作用。然而地震勘探技术的野外施工对地形要求较高,在我国部分地形较为复杂地区受局限。图4为玉树—共和地壳浅部速度剖面,可以看到共和盆地南部温泉一带地下15~40 km处有一低速体,其与盆地南缘地下10 km内的低速体相连,并延伸到盆地中心地下,判断为壳内熔融体(干热岩热源成因)。

## (2) 电磁法探测技术

电磁法的优势是相对成本较低,野外施工相对简单、效率较高而且勘探范围大,由于高温岩体与围岩的电性差异较为明显,为电法和电磁法的应用提供了物性基础(陆川和王

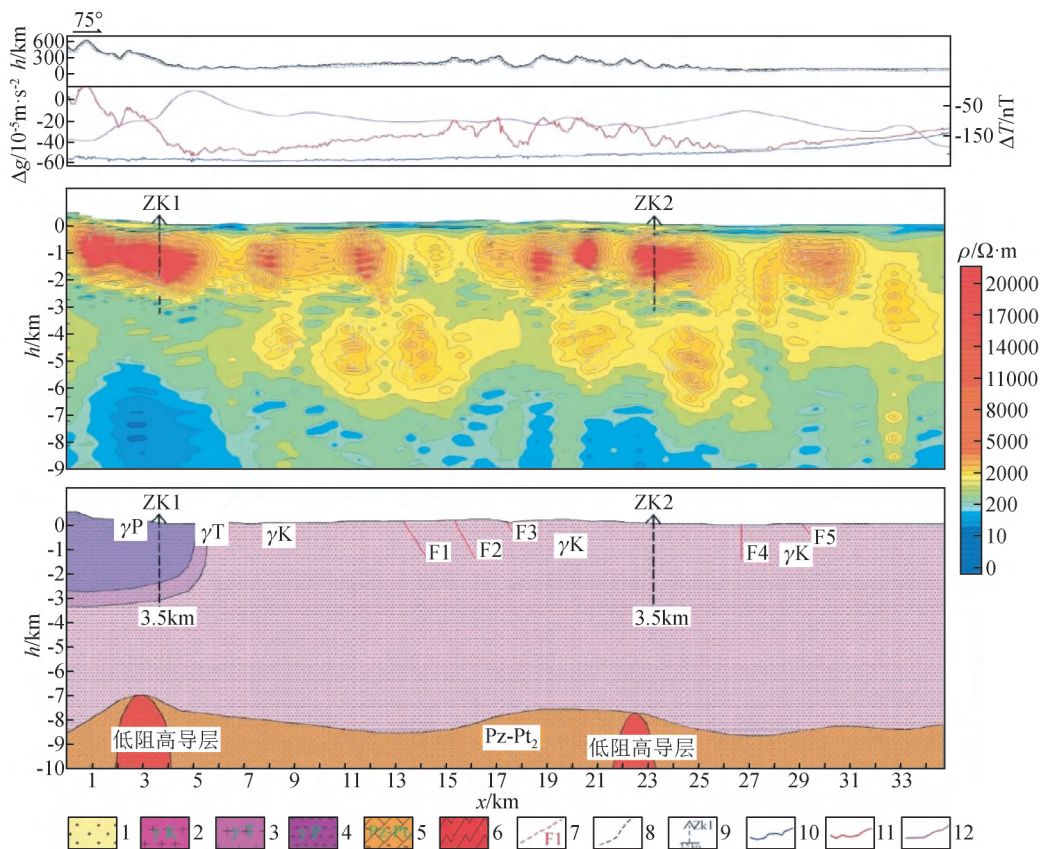


图6 测区剖面 I-I' 地质-物探综合剖面(张前等, 2015)

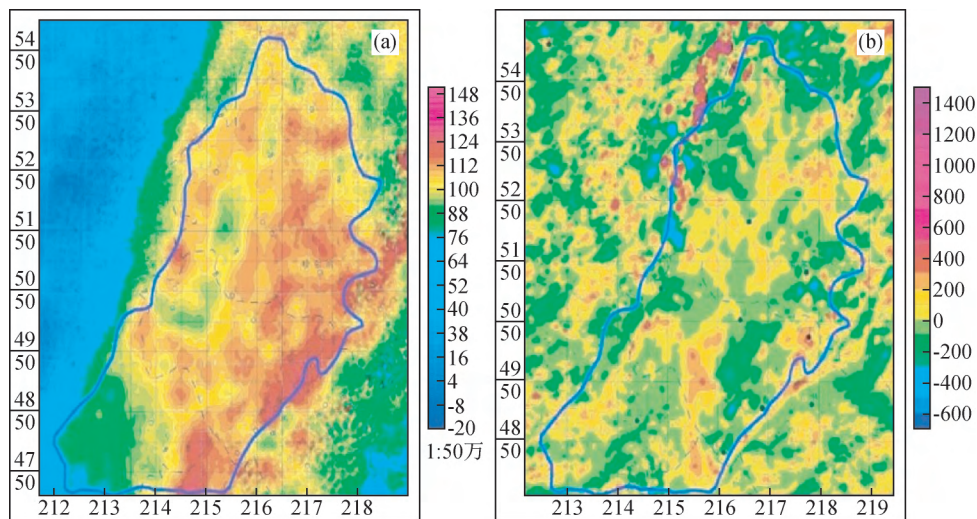
Fig. 6 Geological and geophysical comprehensive profile of section I-I' (Zhang Q *et al.*, 2017)

图7 研究区布格重力与航磁异常图(赵雪宇等, 2015)

Fig. 7 Bouguer gravity and Aeromagnetic abnormal map( Zhao X Y *et al.*, 2015)

贵玲, 2015). MT 利用天然电磁场的宽频带 ( $10^{-4} \sim 10^4$  Hz) 能量, 可以穿透巨厚的岩石圈, 可以提供地下几十到几千米深的地壳及地幔电性信息. 由于岩石电阻率与温度间的密切关系, MT 对干热岩盖层的厚度、形态、范围等信息有较好的反映. CSAMT 采用人工源进行频率测深, 其观测音频 ( $n \times$

$10^{-1} \sim n \times 10^3$  Hz) 在 MT 的稍高部分, 可较好地探测埋藏较为浅的地质体. CSAMT 可以确定导热断层的产状, 在探测岩体赋存深度方面有更好的垂向分辨率, 不受高阻屏蔽影响. 一般而论, MT 与 CSAMT 比较, 具有经济、便捷和大深度探测的优势. 在强干扰区, MT 与 CSAMT 均难以获取可靠的信息,

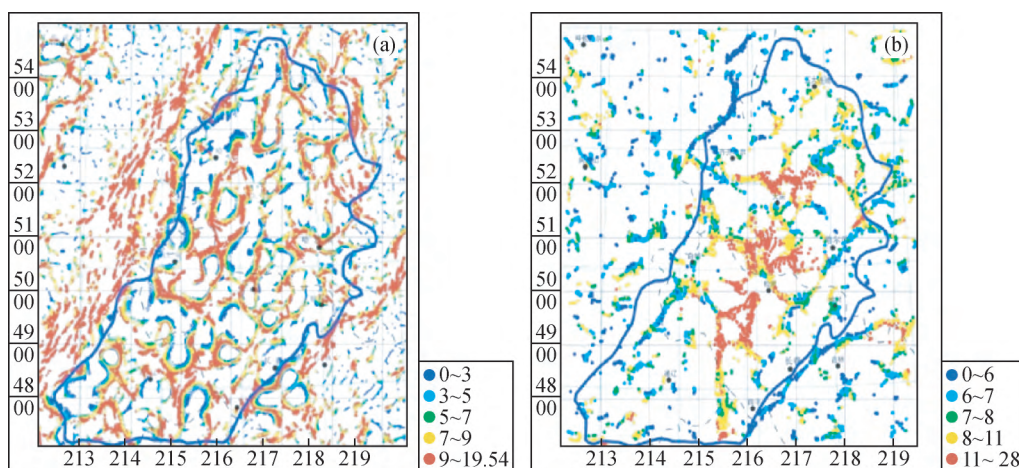
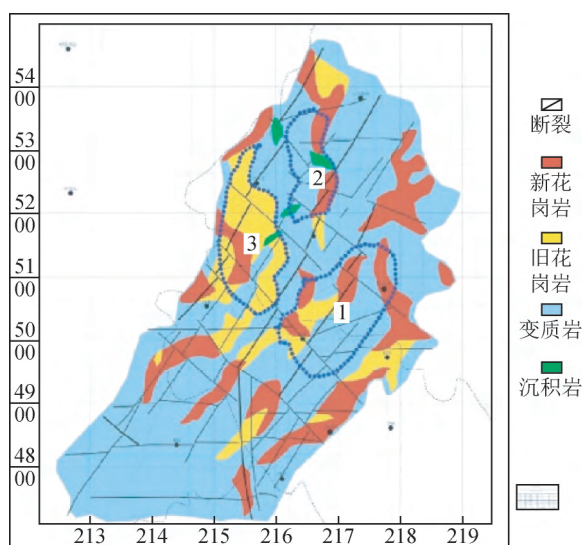


图8 重力与磁测数据欧拉反褶积计算结果图(赵雪宇等,2015)

Fig. 8 Gravity and Magnetic Euler deconvolution map( Zhao X Y *et al.* ,2015)图9 松辽盆地基底岩性分布及靶区位置示意图  
(赵雪宇等,2015)Fig. 9 Basement lithology distribution and the geothermal gradient map in Songliao Basin( Zhao X Y *et al.* ,2015)

CSAMT在接地条件不好或植被发育、地形复杂的地区难以展开工作。

如图4所示,共和盆地所在县城附近西深东浅的斜坡地带进行CSAMT探测的其中一条剖面,整个剖面电性结构明显地分为四层,第四层判断岩性为印支—燕山期中酸性基底,为潜在干热岩储热层(赵贵福等,2016)。图5是利用MT及磁测资料结合重力资料对海南陵水地区的保城岩体进行综合物探中间的为MT反演剖面图,结果显示的电性结构整体上划分为三层,第一层是对应于第四系的沉积或表面的岩石风化层;第二层为高阻层(张前等,2015),这两个实例分别利用了CSAMT与MT法对深部地层进行探测,可以较好地解译出电性结构,对基底、盖层、热储层、断层等有良好的反映,证明这两种方法应用于干热岩勘探是可行的。

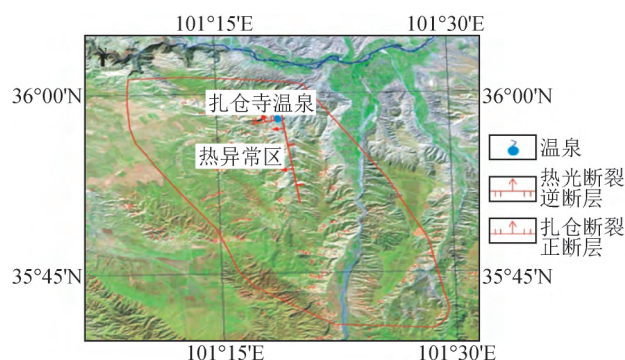


图10 区域热异常遥感图像(李小林等,2016)

Fig. 10 Remote sensing of regional thermal anomaly( Li L L *et al.* ,2016)

### (3) 重力、磁法勘探

该方法是利用地层的密度和磁性差异来探测干热岩并圈定靶区。国外学者在研究安纳托利亚东部区域构造时发现,自由空气重力异常与航空磁测异常呈明显负相关,这一规律特性成为圈定地热资源有利区的重要依据(Pamukcu, 2007)。重力、磁法勘探成本较低,通过航空探测可以大幅度缩短施工时间而且覆盖范围也较大。但是,使用重力、磁法勘探不能直接反映地热赋存状态。重力异常可用于揭示岩浆岩侵入体空间分布、寻找深大构造断裂、基岩拗陷中的凸起构造,该方法在研究地热的成因特征等方面作用巨大;磁法在地热勘查中可以用于追索断裂断裂带、褶皱构造等,从地热构造环境上进行勘查(刘义波,2014)。利用铁磁性物质与居里温度的关系,通过磁测数据的反演可获取居里面埋深情况,对于探查热储层有一定指导作用。如图7所示,为松辽盆地重力与磁测异常图,利用重力数据,反演莫霍面深度,圈定莫霍面深度较浅的区域,对磁异常数据进行处理,反演出居里面深度,圈画出莫霍面及居里面深度较浅的区域,结合近地地表地温梯度数据,寻找出地温高温场所在的区域,缩小干热岩靶区区域,图8是通过重力与磁测数据进行欧拉反褶积等相

关处理,初步划明断裂构造,图9是利用重磁分析对应结合图8圈定的有利于地热汇集的褶皱、断裂区域,得到的研究区基底分布图,进一步缩小靶区范围,并圈定了三处干热岩靶区(赵雪宇等,2015)。

#### (4) 测井技术

测井是将地球物理仪器放入钻井孔内,通过测量井壁周围岩石的地球物理响应,得到井壁围岩与深度相关的不同物理场记录曲线,通过对测井曲线的分析,推断钻孔周围介质的性质,主要利用该技术进行井间测温和电阻率探测等,为判断热储层位置以及热储质量评价提供重要依据。

#### (5) 遥感技术

遥感方法的数据采集装置与探测目标有一定的距离,在数据采集阶段,使用不同的采集探头获取不同波段的电磁波信息,然后对这些不同波段信息进行处理,从而得到有用的地质信息。在地热区,地表温度比背景值高,因此遥感红外摄影图像资料能够直接反映出地热赋存区域,从而圈定高温异常区,为探测圈定地热靶区提供依据(刘瑞德,2008)。如图10所示,是利用贵德盆地的遥感资料解译出的区域遥感热异常图像,红色点密集区域代表温度异常区,该异常区作为干热岩的远景靶区。

#### 3.4.3 物探方法适用性探讨

在干热岩勘探选区过程中,需要借助各类地球物理方法进行间接探测从而确认钻井位置。一方面:在不同探测阶物探方法的选择是不同的,不同的地形地貌条件对仪器及方法技术的选择的影响也需要考虑。在干热岩远景圈定阶段,我们需要利用到遥感技术来圈定高温异常区,之后选择重力、磁法勘探对区域构造进行研究从而圈定干热岩有利区,最后开展深部电磁勘探或三维地震勘探对干热岩赋存状态进行精细刻画。另一方面:在同一探测阶段也需要多种方法相互结合来弥补自身的缺点,比如CSAMT方法可以探测深部电性信息,但存在浅部盲区,此时结合MT方法可以对浅部电性信息进行解译。

野外施工阶段,地貌对物探施工影响很大,我国地貌地势较为复杂,地势西高东低,共分三个阶梯逐级下降,较高一级阶梯为青藏高原,海拔在4000 m以上,雄踞我国西南,第二阶梯以青藏高原东北,大兴安岭,太行山,雪峰山以西为界,海拔1000~2000 m,包括内蒙古高原黄土高原,云贵高原,塔里木以及四川等大型盆地。第三阶梯则包括松辽、华北等东部平原,及平原东侧的胶辽山地,东南沿海及东海浅水大陆架等(蒋复初和吴锡浩,1993)。地球物理方法在较为复杂的地形地区应用的效果受限,要针对不同交通情况、不同地形来选择适当的技术方法,遥感、航空重力及磁法勘探技术可以突破地形地貌限制对山区、无人区及沿海大陆架进行探测,地貌对物探方法的影响主要体现在地面详查精细探测阶段,其中电磁法勘探及地震勘探对地形地貌条件要求较高。

### 4 干热岩开发技术及经济效益评价

由于干热岩深埋地下处于高温高压的环境下,物探技术只是间接的探测手段,要想获取深部干热岩具体信息参数,钻井技术的应用必不可少。在整个勘探开发过程中,如何经济有效的完成干热岩探测任务也是很重要的一步。

#### 4.1 深部钻井技术要求

干热岩深埋地下3~10 km,就算开发埋藏较浅部分的干热岩也要求钻井深度达到3 km以上。我国目前油田钻井最大深度将近8 km,从理论上来说我国钻井技术是能够满足干热岩开发深度要求的。然而,石油深部赋存状态与干热岩的状态不同,石油开采只要求钻机钻透上部韧性岩层(泥岩、砂岩等),而干热岩则要求钻头深入岩体内部(多为硬度较大的花岗岩),岩体硬度大;干热岩赋存上部地质条件较为复杂,深井、超深井钻探易出现井眼失稳、井斜、掉钻和卡钻等问题,因此需要提高固井和钻进导向技术水平。目前,干热岩资源多用于发电,需要将深部热量通过水蒸气或热水等形态传回地面,在这个过程中如何有效减少热量耗散也有了更高的要求。因此,研究隔热材料并应用于钻井中也是很重要的。

#### 4.2 经济效益评价

干热岩资源是一种极具经济效益的绿色可再生能源,要使我国的干热岩开发在国际上有竞争力,就要考虑经济效益的问题。在整个干热岩开发勘探的过程中,我们可以从以下几个方面来考虑:

(1) 勘探成本问题:在干热岩靶区圈定的过程中,选择交通方便,地形条件较为简单的干热岩潜在区可以在很大程度上减少勘探成本。

(2) 钻探技术的提高:应用高技术、高效率的钻井技术来进行干热岩钻探,可以减少大量人力、财力及时间成本的消耗。

(3) 发电站选址问题:我们应该选择人口较为密集、水源较近的区域建立发电站(减少材料及电力消耗、便于注水),同时干热岩资源也可用于城市供暖,所以选择接近生活区建立发电站,可以大大减少不必要的人力物力的浪费。

(4) 人工储层的建立问题:在利用干热岩资源发电过程中,需要建立地下人工热交换系统,建立有一定使用寿命,可以充分利用各级温度梯度的热量的人工储层,热储层应选择中酸性花岗岩为佳(李胜涛等,2018)。

(5) 科学对待开发干热岩资源问题:理论上,干热岩分布遍及全球,我们可以在任何一个赋存干热岩地区开发干热岩资源,这只是一个假设,对待任何事我们要本着科学态度,要依据我国实际科技水平,要优中选优,综合考虑各方面因素,这样才能以最少成本获取最大利益,使得我国干热岩开发技术具有竞争力。

### 5 结 论

干热岩资源是一种绿色清洁的地热能源,应用前景非常好。研究成熟的勘探开发干热岩技术成为重中之重,如何经济有效地圈定干热岩靶区,选定适当的地球物理方法是关键。通过整个文章的论述可以得到以下结论:

(1) 干热岩岩体物性特征主要表现为:由于地热作用,岩石的弹性波速度会明显的降低;温度较高岩体与围岩具有较明显的电性差异,通常表现为高阻异常;自由空气重力异常与航空磁异常在地热区一般呈明显负相关;地热区的地表温度比背景值高,因此遥感红外摄影图像资料能够直接反映出地热赋存区。

(2) 干热岩勘探大致可以分为四个阶段: ①结合勘探区水文、地热、地质资料, 利用遥感成像资料, 寻找高温异常区, 圈定干热岩勘探远景区; ②通过重力勘探获得资料进行欧拉反褶积处理, 分析断裂的倾向以及展布深度, 结合重力磁法资料反演出居里面及莫霍面埋深, 结合前期遥感资料, 选取具有较浅的莫霍面或居里面的区域作为有利干热岩靶区; ③利用深部三维地震勘探、大地电磁测深、可控源音频电磁测深等方法进行精细构造勘探(密度结构、磁性结构、电性结构及波场速度结构), 获取干热岩地热资源的热储层赋存状态, 盖层厚度、热源分布等, 综合分析获取钻孔位置, 圈定干热岩靶区; ④利用钻井测温结合物探资料、地质资料进行对比获取热储层、盖层岩性、热储层岩体温度分布、热流值、热导率等信息, 为干热岩工程选区提供依据。

(3) 在利用地球物理方法探测干热岩的过程中会许多问题, 一方面, 技术方法自身的局限性、物探方法的多解性问题等, 通过多种物探资料综合解译以规避方法技术的局限性、外界干扰带来的误差等, 从而达到提高探测精度的目的, 另一方面, 要充分考虑测区的地理、人文条件, 有选择性的调整勘探方案。

(4) 以科学的态度来勘探开发干热岩资源, 选择合适的物探方法进行探测, 合理调配资源, 提高自身科技实力, 在开展钻井工作中借鉴石油钻井技术, 同时要改进相关技术来合理地进行钻探, 干热岩资源储量惊人, 如果能够成功有效地开发利用, 必将利国利民。

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

## References

- Arney B H, Goff F. 1982. Evaluation of the hot-dry-rock geothermal potential of an area near Mountain Home, Idaho [J]. doi: 10. 2172/5350339.
- Baria R, Michelet S, Baumgaertner J, et al. 2004. Microseismic monitoring of the world's largest potential HDR reservoir [C]. 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, California, USA: Stanford University.
- Chen Xiong. 2016. Research on the application of geophysical methods in hot dry rock prospecting [Ph. D. thesis]. Changchun: Jilin University.
- Deng W M, Sun H J. 1999. Relationship between Cenozoic volcanic activity and plateau uplift in the Tibetan Plateau [J]. Geological Review (in Chinese), 45 (7): 952-958, doi: 10. 16509/j. georeview. 1999. s1. 008.
- Gutmann J T, Aiken C L V, Ander M E, et al. 1980. Preliminary geological and geophysical evaluation of the Castle Dome HDR geothermal prospect, Southwestern Arizona [C]// Geothermal Resource Council Meeting, Salt Lake City, Ut, Usa, 9 Sep 1980.
- 海江田秀志, 鈴木浩一. 2014. Geophysical exploration for Hot Dry Rock geothermal energy development at Cooper Basin, Australia [J]. 物理探查 = Geophysical exploration, 67(4): 277-285, doi: 10. 3124/segj. 67. 277.
- Hinze W J, Braile L W, Frese R R B V, et al. 1986. Exploration for Hot Dry Rock geothermal resources in the Midcontinent USA. Volume 1. Introduction, geologic overview, and data acquisition and evaluation. United States. doi: 10. 2172/6053708.
- Hu S X, Zhao Y Y, Hu Z H, et al. 1994. Evolution and development of the continental marginal tectonic-magmatic action in the Cenozoic movements of the East China Cenozoic in eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 10(04): 370-381.
- Jaya M S, Shapiro S A, Kristinsdóttir L H, et al. 2010. Temperature dependence of seismic properties in geothermal rocks at reservoir conditions [J]. Geothermics, 39(1): 115-123.
- Jiang F C, Wu X H. 1993. The basic characteristics of the stepped landforms in China [J]. Marine Geology and Quaternary Geology (in Chinese), (03): 15-24, doi: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 1993. 03. 002.
- Jiang G Z, Gao P, Rao S, et al. 2016. Compilation of geothermal data in the Chinese mainland (4th Edition) [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 59(08): 2892-2910, doi: 10. 6038/cjg20160815.
- Jiang M, Wang Y X, Qian H. 2009. Broad-spectrum seismic exploration of the plateau-the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas and the crustal upper mantle structure [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Jiao X H, Wu Y G. 2009. Gravity and magnetic exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Karastathis VK, Papoulias J, et al. 2011. Deep structure investigations of the geothermal field of the North Euboean Gulf, Greece, using 3-D local earthquake tomography and Curie Point Depth analysis [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 206(3-4): 106-120. doi: 10. 1016/j. jvolgeores. 2011. 06. 008.
- Liang X T, Liu L, Li Y, et al. 2015. Residential characteristics and prediction of hot and dry rock distribution in Hubei Province [J]. Resources Environment & Engineering (in Chinese), 29(06): 999-1005, doi: 10. 16536/j. cnki. issn. 1671-4211. 201506050.
- Li S T, Zhang S Q, Jia X F, et al. 2018. Research on site selection evaluation index system of hot dry rock exploration and development engineering site [J]. China Geological Survey (in Chinese), 5(2): 64-72, doi: 10. 19388/j. zgddc. 2018. 02. 10.
- Li X L, Wu G L, Lei Y D, et al. 2016. Suggestions for Geothermal Genetic Mechanism and Exploration of Zhacang Temple Geothermal Energy in Guide County, Qinghai Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science in Edition) (in Chinese), 46(1): 220-229, doi: 10. 13278/j. cnki. jjuess. 201601206.
- Liu R D. 2008. Research on electromagnetic prospecting and application technology in geothermal field [Ph. D. thesis]. Beijing: China University of Geosciences.
- Liu Y B. 2014. Geothermal Geophysical Prospecting and Research in Jingyue District, Changchun City [Master's. thesis]. Jilin University.
- LU BaoLiang, WANG WanYin, ZHAO ZhiGang, et al. 2018. Characteristics of deep structure in the South China Sea and geological implications: Insights from gravity and magnetic inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 61(10): 4231-4241, doi: 10. 6038/cjg2018L0564.
- Lu C, Wang G L. 2015. Research status and prospects of hot dry rock [J]. Science & Technology Review (in Chinese), 33(19): 13-21. doi: 10. 3981/j. issn. 1000-7857. 2015. 19. 001.
- Ma C Q. 1998. Moho, lower crust and magmatic action [J]. Earth Science Frontier (in Chinese), (04): 20-27.
- Meixner AJ, Kirkby AL, Horspool N. 2014. Using constrained gravity inversions to identify high-heat-producing granites beneath thick sedimentary cover in the Cooper Basin region of central Australia [J]. Geothermics, 51: 483-495.
- Michael Fehler, Chris Peason, Ge Y Y. 1986. Study on Underground Fracture System in Hot-hot Rock Geothermal Area by Interwell Seismic Detection Method [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), (1): 30-41.
- Michelet S, Toksöz M N. 2007. Fracture mapping in the Soultz-sous-Forêts geothermal field using microearthquake locations [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 112(B7).
- Pamukcu O A, Akçığ Z, Demirbaş Ş, et al. 2007. Investigation of crustal thickness in Eastern Anatolia using gravity, magnetic and topographic data [J]. Pure Appl. Geophys., 164(11): 2345-2358.
- Ran H Q, Feng Q Z. 2011. Some technical issues about hot dry rock exploration of China [J]. Exploration Engineering (ROCK & SOIL DRILLING AND TUNNELING) (in Chinese), 37(10): 17-21.

- Rimi A, Fernandez M, Manar A, *et al.* 2005. Geothermal anomalies and analysis of gravity fracturing and magnetic features in Morocco [J]. International Journal of Medical Robotics + Computer Assisted Surgery Mrcas, 10(4): 432-438.
- Shao C C. 2018. The first hot dry rock well in eastern China was successfully drilled in Qiongbai [N]. Hainan Daily, (A04).
- Shu L S. 2010. General Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Soma N, Niitsuma H, Baria R. 1997. Estimation of Deeper Structure at the Soultz Hot Dry Rock Field by Means of Reflection Method Using 3C AE as Wave Source [J]. Pure & Applied Geophysics, 150(3-4): 661-676.
- Souidi Zahira, Hamimed Abderrahmane, Khalladi Mederbal, *et al.* 2009. Mapping latent heat flux in the western forest covered regions of algeria using remote sensing data and a spatialized model [J]. Remote Sens., 1(4): 795-817.
- Stix J. 1982. Seasat-Satellite Investigation of the Structure of Western Nebraska and Its Application to the Evaluation of Geothermal Resources [J]. Laboratory Investigation, 29(6): 587-94.
- Su Z, Wang X X, Hu J, *et al.* 2014. The site selection for enhanced geothermal system in China [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 29(01): 386-391, doi: 10.6038/pg20140155.
- Sun Z X, Li B X, Wang Z L. 2011. The possibility of dry hot rock in Gonghe Basin, Qinghai Province [J]. Hydrogeology and Engineering Geology (in Chinese), 38(2): 119-124, 129, doi: 10.3969/j.issn.1000-3665.2011.02.021.
- Suzuki K, Kaieda H, Ohta Y, *et al.* 1998. Seismic reflection method and CSAMT method at Ogachi Hot Dry Rock site [C]. 275-279.
- Thiel S, Peacock J, Heinson G S, *et al.* 2011. Electromagnetic monitoring of stimulated hot dry rock systems-modelling and examples from South Australia [C]. AGU Fall Meeting, AGU Fall Meeting Abstracts, S39-44.
- Vécsey G, Holliger K, Pratt R G, *et al.* 1998. Anisotropic seismic tomography of a potential hot dry rock reservoir before and during induced pressurization [J]. Geophysical Research Letters, 25(11): 1991-1994.
- Wan J J, Sun Z X, Hu B Q, *et al.* 2015. Study on the Geochemical Characteristics of the Fogang Rock Mass and the Potential of the Hot-hot Rock Resource in Guangdong Province [J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science) (in Chinese), 38(04): 398-406, doi: 10.3969/j.issn.1674-3504.2015.04.010.
- Wang L H, Kang W H. 2017. The first time drilled a high-temperature, high-quality hot dry rock mass in the Gonghe Basin of Qinghai Province in China and realized a major breakthrough in the exploration of hot dry rock in China [J]. QINGHAI GUOTU JINGLUE (in Chinese), (04): 55.
- Wu B. 2013. Geophysical exploration of geothermal resources in the Songpan-Ganzi Area [Ph.D. thesis]. Chengdu: Chengdu University of Technology.
- Xu T F, Yuan Y L, Jiang Z Y, *et al.* 2016. Hot dry rock resources and enhanced geothermal engineering: international experience and prospects in China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese), 46(04): 1139-1152, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201604201.
- Xu W. 2007. Development Status and Trends of Dry Hot Rocks in the World [C]. Proceedings of the National Symposium on Geothermal Resources Development and Utilization and Conservation: Beijing.
- Xue J Q, Gan B, Li B X, *et al.* 2013. Geological-geophysical characteristics of enhanced geothermal systems (HDR) in Gonghe-guide basin [J]. Geophysical & Geochemical Exploration (in Chinese), 37(1): 35-41.
- Yan L L. 2016. Research on dry hot rock exploration based on geophysical model—A case study of Yangjiang area in Guangdong Province [C]. China Geophysical Society, China Seismological Society, National Petrology and Geodynamics Symposium Organizing Committee, China Geological Society Structural Geology and Geodynamics Committee, China Geological Society Regional Geology and Mineralization Professional Committee.
- Yang J L, Hu K. 2001. Summary of research and development technology of dry hot rock (HDR) resources [J]. WORLD GEOLOGY (in Chinese), 20(01): 43-51.
- Yin X L. 2008. Unlimited prospects for utilization of hot dry rock geothermal resources [N]. China Mining News, (B04).
- Yuan G Q, XIONG Shengqing, MENG Qingmin, *et al.* 2011. Geophysical exploration technology and application research [J]. Acta Geologica Sinica (in Chinese), 85(11): 1744-1805, doi: 10.11951/P.20111025.0834.008.
- Zeng Y J. 2015. Technical Progress and Thinking for Development of Hot Dry Rock (HDR) Geothermal Resources [J]. Petroleum Drilling Techniques (in Chinese), (2): 1-7, doi: 10.11911/syztjs.201502001.
- Zeng Y L, Liu J J. 2005. Current status and development trend of deep well ultra-deep well drilling technology [J]. Petroleum Drilling Techniques (in Chinese), (05): 4-8.
- Zeng Z F, Chen X, Li J, *et al.* 2012. Advancement of geothermal Geophysics exploration [J]. Progress in Geophysics. (in Chinese), 27(1): 168-178, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.019.
- Zeng Z F, Liu S X. 2010. Engineering and Environmental Geophysics [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Zhang D M. 2017. The application of magneto telluric exploration in the research and potential assessment of dry hot rock resources [J]. World Nonferrous Metals (in Chinese), (06): 225, 227.
- Zhang L, Xu C J, Liu Y, *et al.* 2018. Constituency research and occurrence conditions of dry hot rock geothermal resources in Shandong Province [J]. Science & Technology Economics Journal (in Chinese), 26(3): 77-78.
- Zhang Q, Wu X J, Xie S S, *et al.* 2015. Application of integrated geophysical methods in the exploration of hot dry rock resources in Lingshui area, Hainan Province [J]. Journal of Engineering Geophysics (in Chinese), 12(04): 477-483, doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2015.04.011.
- Zhang S B, Song H, Chen B, *et al.* 2017. Key Technologies for hot dry rock Development and Drilling in China [J]. Journal of Resources Environment and Engineering (in Chinese), 31(02): 202-207, doi: 10.16536/j.cnki.issn.1671-2111.2017.02.017.
- Zhang Y. 2016. The formation mechanism and development potential of Hot Dry Rock: A Case Study of Songliao Basin [Master's thesis]. Xi'an: Chang'an University.
- Zhao F Z, Wang Y, *et al.* 1997. Experimental study on resistivity of igneous rock formations under high temperature and high pressure [C]. of the 13th Annual Conference of Chinese Geophysical Society, 52.
- Zhao G F, Wei L, Li B X. 2016. Discussing geophysical exploration methods on dry-hot-rock according to geothermal exploration results in Gonghe-Guide basin of Qinghai Province [J]. Gansu Geology (in Chinese), 25(02): 62-67.
- Zhao X Y, Zeng Z F, Wu Z Y, *et al.* 2015. Determining the target area of dry hot rock in Songliao Basin by geophysical method [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 30(06): 2863-2869, doi: 10.6038/pg20150654.
- Zhao Y S, Wan Z J, Kang J R. 2004. Introduction of geothermal development in high temperature rock masses [M]. Beijing: Science Press: 4-5, 15, 107.
- Zhuang Q X. 2017. Discussion on Deep-hole Drilling and Comprehensive Geothermal Geological Exploration Work Plan for hot dry Rock in Zhangzhou City [J]. Energy and Environment (in Chinese), (02): 6.

## 附中文参考文献

- 陈雄. 2016. 地球物理方法在干热岩勘查中的应用研究 [博士论文]. 长春: 吉林大学.
- 邓万明, 孙宏娟. 1999. 青藏高原新生代火山活动与高原隆升关系 [J]. 地质论评 45(7): 952-958, doi: 10.16509/j.georeview.1999.s1.008.
- 胡受奚, 赵乙英, 胡志宏, 等. 1994. 中国东部中-新生代活动大陆

- 边缘构造-岩浆作用演化和发展[J]. 岩石学报, 10(04): 370-381.
- 蒋复初, 吴锡浩. 1993. 中国大陆阶梯地貌的基本特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, (03): 15-24, doi: 10.16562/j.cnki.0256-1492.1993.03.002.
- 姜光政, 高棚, 饶松, 等. 2016. 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(08): 2892-2910, doi: 10.6038/cjg20160815.
- 姜枚, 王有学, 钱辉. 2009. 造山的高原-青藏高原及其邻区的宽频地震探测与地壳上地幔结构[M]. 北京: 地质出版社.
- 焦新华, 吴彦冈. 2009. 重力与磁法勘探[M]. 北京: 地质出版社.
- 李胜涛, 张森琦, 贾小丰, 等. 2018. 干热岩勘查开发工程场地选址评价指标体系研究[J]. 中国地质调查, 5(2): 64-72, doi: 10.19388/j.zgdzdc.2018.02.10.
- 李小林, 吴国禄, 雷玉德, 等. 2016. 青海省贵德扎仓寺地热成因机理及开发利用建议[J]. 吉林大学学报(地球科学版) 46(01): 220-229, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201601206.
- 梁学堂, 刘磊, 李义, 等. 2015. 湖北省居里面特征与干热岩分布预测[J]. 资源环境与工程, 29(06): 999-1005, doi: 10.16536/j.cnki.issn.1671-4211.201506050.
- 刘瑞德. 2008. 地热田电磁法勘查与应用技术研究[博士论文]. 北京: 中国地质大学.
- 刘义波. 2014. 长春市净月区地热地球物理勘查与研究[硕士论文]. 长春: 吉林大学.
- 鲁宝亮, 王万银, 赵志刚, 等. 2018. 南海深部构造特征及其地质意义: 来自重磁位场反演的认识[J]. 地球物理学报, 61(10): 4231-4241, doi: 10.6038/cjg201810564.
- 陆川, 王贵玲. 2015. 干热岩研究现状与展望[J]. 科技导报, 33(19): 13-21, doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.19.001.
- 马昌前. 1998. 莫霍面、下地壳与岩浆作用[J]. 地学前缘, (04): 20-27.
- Michael Fehler, Chris Pearson, 葛叶阳. 1986. 用井间地震探测法研究干热岩地热区的地下断裂系统[J]. 地球物理学进展, (01): 30-41.
- 冉恒谦, 冯起赠. 2011. 我国干热岩勘查的有关技术问题[J]. 探矿工程岩土钻掘工程, 37(10): 17-21.
- 邵长春. 2018. 我国东部第一口干热岩井在琼北成功完钻[N]. 海南日报, (A04).
- 舒良树. 2010. 普通地质学[M]. 北京: 地质出版社.
- 苏正, 王晓星, 胡剑, 等. 2014. 我国增强型地热系统选址问题探讨[J]. 地球物理学进展 29(01): 386-391, doi: 10.6038/pg20140155.
- 孙知新, 李百祥, 王志林. 2011. 青海共和盆地存在干热岩可能性探讨[J]. 水文地质工程地质, 38(2): 119-124, 129, doi: 10.3969/j.issn.1000-3665.2011.02.021.
- 万建军, 孙占学, 胡宝群, 等. 2015. 广东佛冈岩体放射性地球化学特征及其干热岩资源潜力研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 38(04): 398-406, doi: 10.3969/j.issn.1674-3504.2015.04.010.
- 王丽华, 康维海. 2017. 我国首次在青海共和盆地钻获高温优质干热岩体实现了我国干热岩勘查重大突破[J]. 青海国土经略, (04): 55.
- 武斌. 2013. 松潘甘孜地区地热资源的地球物理勘探研究[博士论文]. 成都: 成都理工大学.
- 薛建球, 甘斌, 李百祥, 等. 2013. 青海共和—贵德盆地增强型地热系统(干热岩)地质—地球物理特征[J]. 物探与化探, 37(01): 35-41.
- 许天福, 袁益龙, 姜振蛟, 等. 2016. 干热岩资源和增强型地热工程: 国际经验和我国展望[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 46(04): 1139-1152, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201604201.
- 徐巍. 2007. 世界干热岩发展现状及趋势[C]. 2007年全国地热资源开发利用与保护考察研讨会论文集, 北京.
- 闫琳琳, 胡祥云, 张恒磊. 2016. 基于地球物理模型的干热岩勘探研究——以广东省阳江地区为例[C]. 2016中国地球科学联合学术年会.
- 杨吉龙, 胡克. 2001. 干热岩(HDR)资源研究与开发技术综述[J]. 世界地质, 20(01): 43-51.
- 殷秀兰. 2008. 干热岩地热资源利用前景无限[N]. 中国矿业报, (B04).
- 袁桂琴, 熊盛青, 孟庆敏, 等. 2011. 地球物理勘查技术与应用研究[J]. 地质学报, 85(11): 1744-1805, doi: 11-4951/P.20111025.0834.008.
- 曾义金. 2015. 干热岩热能开发技术进展与思考[J]. 石油钻探技术, 43(02): 1-7, doi: 10.11911/syztjs.201502001.
- 曾昭发, 陈雄, 李静, 等. 2012. 地热地球物理勘探新进展[J]. 地球物理学进展, 27(1): 0168-0178, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.019.
- 曾昭发, 刘四新. 2010. 工程与环境地球物理[M]. 北京: 地质出版社.
- 张大明. 2017. 大地电磁勘查在干热岩资源研究与潜力评估中的应用[J]. 世界有色金属, (06): 225, 227.
- 张玲, 许传杰, 刘岩, 等. 2018. 山东省干热岩地热资源赋存条件及选区研究[J]. 科技经济导刊, 26(3): 77-78.
- 张前, 吴小洁, 谢顺胜, 等. 2015. 综合物探方法在海南陵水地区干热岩资源勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 12(04): 477-483, doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2015.04.011.
- 张所邦, 宋鸿, 陈兵, 等. 2017. 中国干热岩开发与钻井关键技术[J]. 资源环境与工程, 31(02): 202-207, doi: 10.16536/j.cnki.issn.1671-4211.2017.02.017.
- 张杨. 2016. 干热岩形成机理及开发潜力研究[硕士论文]. 西安: 长安大学.
- 赵发展, 王晕. 1997. 高温高压下火成岩地层的电阻率实验研究[C]. 1997年中国地球物理学会第十三届学术年会论文集. 52.
- 赵贵福, 尉亮, 李百祥, 等. 2016. 从青海共和—贵德盆地地热勘查成果探讨干热岩综合地球物理勘查技术[J]. 甘肃地质, 25(02): 62-67.
- 赵雪宇, 曾昭发, 吴真玮, 等. 2015. 利用地球物理方法圈定松辽盆地干热岩靶区[J]. 地球物理学进展, 30(06): 2863-2869, doi: 10.6038/pg20150654.
- 赵阳升, 万志军, 康建荣. 2004. [M]. 北京: 科学出版社: 4-5, 15, 107.
- 庄庆祥. 2017. 浅谈漳州市干热岩地热深孔钻探和综合地热地质勘查工作方案[J]. 能源与环境, (02): 6.