我国干热岩资源分布及勘探:进展与启示

蔺文静[1,2,3],王贵玲[2,3],邵景力[1],甘浩男[2,3],谭现锋[4]

1) 中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京,100083;

2) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所,河北石家庄,050061;

3) 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心,河北石家庄,050061;

4) 山东省鲁南地质工程勘察院(山东省地勘局第二地质大队),山东济宁,272100

内容提要:干热岩是地热资源的重要赋存形式之一,是未来地热开发的主攻方向。我国干热岩勘查工作近年来进展迅速,先后在不同地区发现了优质的干热岩资源,取得了我国干热岩资源勘查突破,但同时也存在不少勘查失败的案例。本文在分析高放射性产热型、沉积盆地型、近代火山型和强烈构造活动带型等四种类型干热岩成因模式的基础上,结合我国的地质构造背景、地热地质条件,对未来我国干热岩资源重点勘查方向及靶区进行了论述,并重点针对目前不同类型区干热岩资源勘探工程进行了梳理,简要分析了不同勘探区的选址依据、勘探过程、地温场分布及特征、前景预测等,并初步进行了经验总结,希望对我国未来干热岩资源勘查及开发工作起到借鉴作用。

关键词:干热岩;成因类型;勘查方向;勘查进展

干热岩(Hot Dry Rock-HDR)指地层深处(一般指地下3~10 km)存在的没有水或蒸汽的致密的热岩体,是地热资源的重要赋存形式之一。干热岩分布广泛,是未来地热开发的主要方向。由于技术和手段等限制,能被人类所揭露及开发利用的干热岩资源主要是埋深较浅、温度较高、有开发经济价值的地下高温岩体。考虑地热能发电的经济性和可行性,我国将干热岩的温度下限定义为180℃(国家能源局,2018),未来随着干热岩开发技术的不断成熟及深部地热开采成本的下降,干热岩的应用领域的不断扩大,将会进一步拓宽其温度利用下限(Engine Coordination Action,2008)。目前世界上进行干热型地热资源开发的相关案例大多与火山活动、岩浆余热等附加热源有关(Xu Tianfu et al.,2018)。我国地处环太平洋板块地热带的西太平洋岛弧型板缘地热带以及地中海-喜马拉雅陆陆碰撞型板缘地热带的交汇部位,受构造活动控制,在西南藏滇地区以及台湾地区孕育有大量的高温水热活动,在这些特定高温水热系统的翼部可能形成不透水的高温岩层或含少量蒸汽的高温岩层,从而具有干热岩的开发前景。另外,我国陆区分布有大面积的中、新生代沉积盆地,尤其东部地区的华北盆地、松辽盆地、江汉盆地、苏北盆地等裂谷型盆地,其巨厚的沉积盖层也为热量的保存提供了必要的条件。这些条件都预示着我国地下的干热岩资源前景是相当可观的。

我国干热岩开发研究虽然起步稍晚,但近年来也取得了丰硕的成果。Lin Wenjing et al.(2012)开展了我国陆区10 km以浅的干热岩资源潜力估算,显示我国干热岩资源潜力巨大,未来有极大的开发潜力。Gan Haonan et al.(2015)、Wang Guiling et al.(2016)以及Lu et al.(2017)通过对国内外已发现干热岩资源进行综合分析,结合中国地质构造背景,将中国干热岩资源分为高放射性产热型、沉积盆地型、近代火山型和强烈构造活动带型等四种成因类型,并提出了不同类型干热岩资源的成因机制。Li Dewei et al.(2015)认为干热岩热源不一定是流行的高放射性花岗岩,也与非活动性火山无关,而与构造地震有关,并建议未来重点在华北、青藏高原及

注:本文为中国地质调查项目(编号12120115045901、DD20190555)和国家自然科学基金项目(编号41741018)联合资助的成果。
收稿日期:2021-02-08;改回日期:2021-03-17;网络发表日期:2021-04-02;责任编委:张永双;责任编辑:李曼。
作者简介:蔺文静,男,1978年生。博士,正高级工程师,从事水文地质、地热地质相关研究。E-mail:lwenjing@msn.com。通讯作者:王贵玲,男,1964年生。研究员,博士生导师,主要从事水文地质、地热地质及环境地质相关研究。E-mail:guilingw@163.com。

引用本文:蔺文静,王贵玲,邵景力,甘浩男,谭现锋. 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, doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021213.
Lin Wenjing, Wang Guiling, Shao Jingli, Gan Haonan, Tan Xianfeng. 2021. Distribution and exploration of hot dry rock resources in China: progress and inspiration. Acta Geologica Sinica, 95(5):1366~1381.

邻区、东部沿海以及台湾等地区开展勘查工作。Xu Tianfu et al.(2018)通过分析美国干热岩开发过程中具有重大意义和成果的几个经典工程实例，结合我国干热岩资源的赋存条件、开发利用背景以及当前的技术装备条件，指出了未来研究的重点领域，并给出了重要意见。各地的干热岩资源勘查工作也先后开展，Tan Xianfeng et al.(2016，2020)在济阳坳陷陈庄潜凸起区开展了干热岩资源勘查工作，并对2003～2500 m 深处揭露的花岗岩、二长花岗岩等不透水岩层进行了水力压裂试验，提出应选取天然裂隙发育段作为压裂试验的目的层。Li Wenbin et al.(2016)开展了沧县台拱带干热岩资源勘查工作，成功实施了深部碳酸盐岩热储的水力压裂，并开展了中低温地热发电与综合梯级利用(Qin Xiangxi et al.，2019)。Lin Wenjing et al.(2016，2020)在综合国内外相关干热岩开发项目的基础上，系统总结了干热岩选址的地热地质学指标，并对我国东南沿海地区的干热岩赋存背景进行论述，选取了广东阳江新州、雷琼断陷盆地、海南陵水以及广东惠州黄沙洞等几个地区作为我国东南沿海干热岩开发的重点潜力靶区，进行了干热岩资源靶区选址对比研究。Zhang Senqi et al.(2017)针对五大连池火山群开展了火山岩浆囊探测与干热岩形成条件分析，认为尾山地区 6.5 km 深处存在火山岩浆囊，具较好的干热岩地热地质条件。Jiang Haiyang et al.(2019)开展了中国山东半岛干热岩资源勘查工作，获得了文登花岗岩体规模、裂隙储层空间分布、深部地温及地温梯度、花岗岩热物性参数和岩石力学参数等，认为其发电潜力高于法国 Soultz。Qi Xiaofei et al.(2020)开展了冀东马头营凸起区干热岩资源勘查工作，取得了我国沉积盆地古潜山区高温岩体勘查突破。截止到目前，我国已在青海共和盆地发现了品质较高(4000 m 深度内揭露温度大于 200℃的花岗岩体，且裂隙发育)的干热岩体，取得了我国干热岩资源的勘查突破(Yan Weide，2015；Zhang Shengsheng et al.，2019)。

本文针对高放射性产热型、沉积盆地型、近代火山型以及强烈构造活动带型等四种成因类型干热岩资源，在分析不同成因类型干热岩地质构造背景的基础上，对未来我国干热岩资源重点勘查方向及靶区进行了论述，并重点针对目前不同类型区干热岩资源勘查工作及进展进行了梳理，初步进行了经验总结，希望对我国未来干热岩资源勘查及开发工作提供有益的借鉴，为促进我国能源结构调整、生态环境优化以及产业转型升级服务。

1　高放射性产热型干热岩资源

尽管理论上处在一定地壳深度的变质岩(如片麻岩等)和岩浆岩(如花岗岩、闪长岩等)都可视作干热岩体，但是目前开发的干热岩体大部分为温度较高的花岗岩体。花岗岩是大陆地壳的主要组成部分，花岗岩中富含 U、Th、K 等放射性元素，其放射性元素的衰变热是地壳重要的热源，常用单位体积生热率这一量化指标来评价岩体的生热能力。目前单位体积岩石生热率的临界值或最佳值为多少尚无定论，Rybach et al.(1978)对瑞士阿尔卑斯山附近不同类型的岩石，包括花岗岩、片麻岩、片岩、石英岩、角闪岩和超基性岩的单位体积生热率进行了计算，发现四个花岗岩体的单位体积生热率均大于 10 HGU(Heat Generation Unit，生热单位，1 HGU＝0.4184 $\mu W/m^3$)，而其他岩石类型的单位体积生热率均小于 10 HGU，仅片麻岩为 5.8 HGU，余下岩石均小于 4 HGU。这可能是目前绝大部分干热岩体均为花岗岩的重要原因之一。

1.1　主要分布区及勘查方向

我国花岗岩体分布广泛，面积约 90.9 万 km^2，约占国土面积的 10%，主要出露在东部地区，特别集中在粤、闽、桂、赣、湘等省，其中粤、闽两省的花岗岩面积占全国的 30%～40%，是我国最主要的花岗岩分布区。Zhao Ping et al.(1995)对我国东南地区的岩石生热率进行了系统的研究，揭示出华南沉积区地层在新元古代—寒武纪和侏罗纪出现两次生热率高峰，花岗岩具有异常高的生热率背景，岩石生热率以粤中-赣南为核心向外扩展呈下降趋势，部分地区高达 5.7 $\mu W/m^3$，远远超过国外学者的统计值(Rybach，1988)。另外，华南地区在晚中生代时期发育有众多类型多样的沉积盆地(总面积约为 14 万 km^2)，不同时期形成的不同类型的花岗岩，以及大量沉积盆地的存在，为干热岩热量的生成及保存创造了良好的地质条件，成为我国高放射性产热型干热岩资源的重点勘查靶区。

1.2　勘查工作进展

2013 年起始，中国地质调查局启动了干热岩资源潜力评价与示范靶区研究项目，重点开展了东南沿海地区干热岩勘查靶区选址与科学钻探等工作，针对福建漳州、湖南汝城、广东阳江新州、雷琼断陷盆地、海南陵水以及广东惠州黄沙洞等重点靶区开展了系统的地热地质调查、地球物理勘查

等工作(Lin Wenjing et al.,2016),最终选择福建漳州(Lin Wenjing et al.,2015,2020)、广东惠州黄沙洞(Li Tingxin et al.,2020)等地区开展了地热科学钻探工作,并在广东惠州钻获了 127.7℃的自喷水热资源,进一步完善了高放射性产热型干热岩资源的成因模式,取得了东南沿海地区干热岩资源赋存条件的科学认识,对区内未来干热岩资源勘查指明了方向。

1.2.1 广东惠州黄沙洞

黄沙洞热田位于粤东区惠州市东北方向,地理坐标范围:北纬 23°08′15″~23°20′45″、东经 114°32′30″~114°46′50″,面积约 260 km²。区内构造褶皱及次生断裂发育,以北东向、北西向断裂最为发育,黄沙洞地热田处在北东向河源深断裂带和莲花山深断裂带所夹持的 NE-SW 向梅县-惠阳拗陷沉积区之内。2017 年在该地热田实施了惠热 1 井钻探工作,钻进深度达 3009.17 m,钻遇地层从浅至深依次为第四系(0~20 m)、寒武系(21~466 m)、震旦系(467~1565 m)和侏罗系岩体(1566~3009.17 m)。钻孔于 1565 m 深处成功揭穿沉积盖层,进入下部隐伏花岗岩体,钻遇地层岩性从浅至深依次是砂岩、千枚状页岩、碳质/粉砂质板岩、构造角砾岩、硅化石英砂岩、绢英岩化花岗岩以及二长花岗岩。成孔后利用水泵短时间抽水后即发生持续自喷,2900 m 测得热水温度为 127.7℃,井口最高稳定温度 118℃,最大流量 137 m³/h。

惠热 1 井分两个阶段施工,第一阶段从 2017 年 11 月 29 日到 2018 年 4 月 3 日,施工进尺 2000 m,在停钻后 36 h、60 h 和 84 h 进行了三次地温测井(图 1),从图 1 可明显看出钻探所产生的热效应逐渐消失及井温的恢复过程:上段瞬时井温比原始地温高,下段比原始地温低,在上下两段之间有一过渡带,此处井液温度和围岩地温相平衡,称为中性点或中性段(1000~1100 m 处),代表真实的地层温度。中性点之下,静井时间越长,井温越高,越接近地层温度。平衡点之上则相反。根据第三次测温数据获取的地温梯度,0~500 m、500~1000 m、1000~1500 m 和 1500~2000 m 平均地温梯度分别约为 3.78℃/100 m、4.32℃/100 m、5.02℃/100 m、3.78℃/100 m,地温梯度最高区段为 1000~1500 m,1565 m 处揭穿沉积盖层进入下部隐伏花岗岩体后地温梯度显著降低。第二阶段从 2018 年 4 月 8 日到 2018 年 9 月 27 日,终孔深度 3009 m,在停钻后分别于 9 月 29 日~10 月 1 日进行了两次测温,最终测得孔底温度为 127.7℃,在 2400~2500 m 及 2700~2800 m 井段,曲线温度均有迅速升高(图 2),反映其为主要的热水出水井段,地温梯度显示 0~1500 m 平均地温梯度约为 4.52℃/100 m,1565 m 深处揭穿沉积盖层进入下部隐伏花岗岩体后地温梯度逐渐降低,其中 1500~2500 m 段平均地温梯度仅为 2.03℃/100 m。

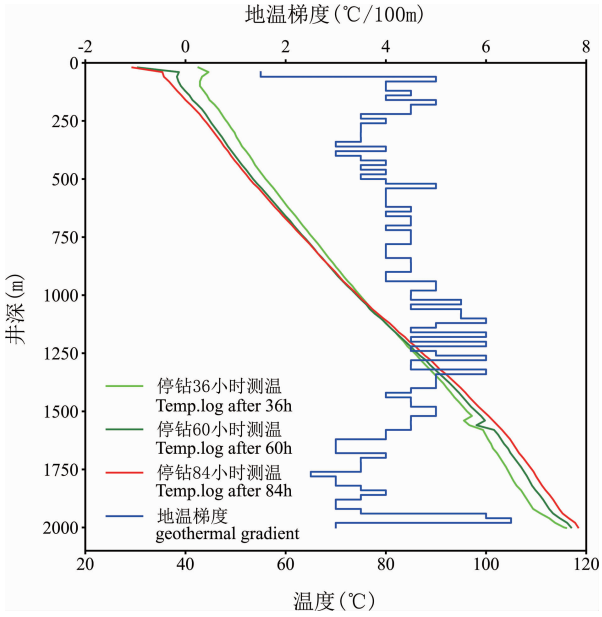

图 1 广东黄沙洞惠热 1 井第一阶段(0~2000 m)测温曲线

Fig. 1 The first stage temperature log (0~2000 m) of Huire-1 well located in Huangshadong, Guangdong

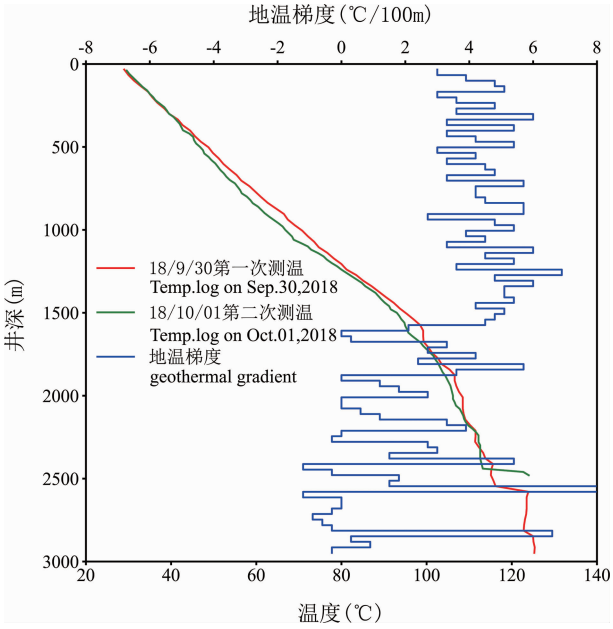

图 2 广东黄沙洞惠热 1 井第二阶段(0~3000 m)测温曲线

Fig. 2 The second stage temperature log (0~3000 m) of Huire-1 well located in Huangshadong, Guangdong

1.2.2　福建东南沿海

福建东南沿海是典型地热异常区，区内出露温泉众多，水温大多为 40～80℃，其中漳州地区高于 60℃的温泉就有 13 处。区内普遍缺失侏罗纪以后至第四纪以前的地层，下部为燕山期花岗岩体侵入，地表为第四纪更新世冲洪积层覆盖，厚度大于 20 m。在区域地热地质调查、地球物理勘查的基础上，2014～2017 年分别在龙海清泉林场与厦门集美等地开展了干热岩科学钻探工作。其中，龙海清泉林场 HDR-1 井钻探深度为 4000 m，于 2015 年 5 月 21 日开钻，穿过 36 m 厚的表层第四系黏土层后进入花岗岩体，岩性以花岗岩、花岗闪长岩、二长花岗岩等为主；2015 年 12 月 15 日进尺至 3121 m 处发生卡钻，经爆破松扣及落鱼打捞，井内剩余落鱼钻具 119.43 m 无法取出，后采取了绕障侧钻设计方案于 2016 年 5 月 28 日恢复钻探施工，侧钻点井深为 2860 m。2016 年 6 月 18 日，工程钻至 3005.0 m 后直至终孔钻井出现持续泥浆严重漏失现象，井内泥浆不上返，采取堵漏剂、CMC、锯末调制泥浆等常规堵漏措施进行堵漏，其中 3260.36 m 处采取常规堵漏措施无果后进行了注水泥，对漏失井段进行了封堵。

完钻后进行了三回次井温测井工作，2017 年 1 月 1 日 8 时（停钻 4 d 后）进行了第一次井温测井；2017 年 1 月 2 日 8 时进行了第二次井温测井；2017 年 1 月 3 日 8 时进行了第三次井温测井，于 3997 m 处最终测得井温 109.58℃（图 3）。从图 3 可以看出，第一次测井温度比另外两次温度均低约 3℃，第二次和第三次测井温度曲线重合度较高，这表明第一次测井温度尚未达到平衡状态，测试结果偏差较大，第二次和第三次温度基本接近，说明测井井温已经基本达到平衡，测井温度可视为实际地层温度。根据第三次测温结果获取的地温梯度，全孔平均地温梯度仅为 2.20℃/100 m，其中，500～1000 m、1000～1500 m、1500～2000 m、2000～2500 m、2500～3000 m、3000～3500 m 以及 3500～4000 m 等每隔 500 m 的平均地温梯度分别为 1.71℃/100 m、1.80℃/100 m、2.05℃/100 m、2.15℃/100 m、2.37℃/100 m、2.45℃/100 m、2.78℃/100 m，地温梯度随深度增加而呈缓慢上升趋势。

2017 年在厦门集美杏林湾地区开展了 JM-1 井干热岩勘探孔施工，2017 年 3 月 21 日开钻，2017 年 6 月 25 日完钻，完钻井深 2014.81 m，钻遇地层从上至下分别为第四系残积层、侏罗纪二长花岗岩以及

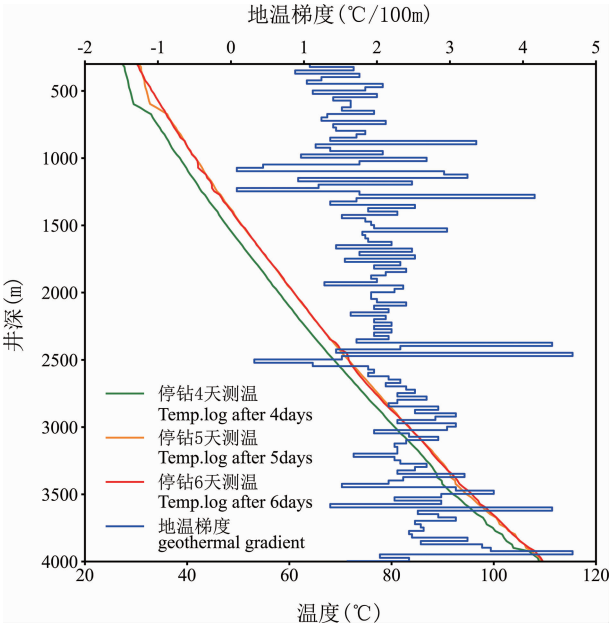

图 3　福建龙海清泉林场 HDR-1 井测温曲线

Fig. 3　Temperature log of HDR-1 well located in Longhai, Fujian

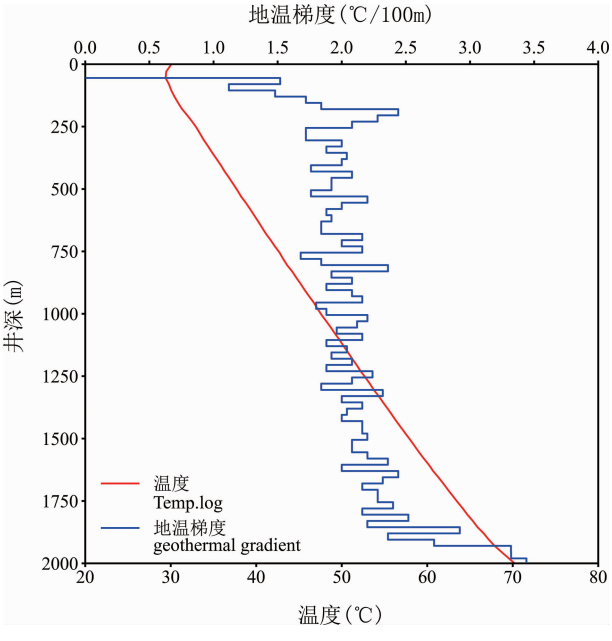

图 4　福建厦门集美 JM-1 井测温曲线

Fig. 4　Temperature log of JM-1 well located in Jimei, Xiamen

风化黑云二长花岗岩、微风化黑云斜长花岗岩。根据测井曲线响应的变化程度，结合钻探实际情况，本测量井段岩性完整致密，渗透率低，裂隙发育一般，富水性一般。为了有效测得井内真实地层的温度数据，完钻后进行了 3 次井温测井（图 4）。2017 年 7 月 3 日（停钻 72 h）第一次井温测井，于 2006.00 m 处最终测得井温 69.73℃；2017 年 7 月 4 日（停钻

96 h)第二次井温测井于 2002 m 处最终测得井温 70.15℃;2017 年 7 月 5 日(停钻 120 h)第三次井温测井于 2005 m 处最终测得井温 70.4℃。本次井温测井曲线质量良好,基本反映了本井段的地温趋势以及井内温度随着时间和井深度的变化规律。根据第三次测温结果获取的地温梯度,全孔平均地温梯度仅为 2.02℃/100 m,其中,0～500 m、500～1000 m、1000～1500 m、1500～2000 m 平均地温梯度分别为 1.56℃/100 m、1.97℃/100 m、2.07℃/100 m、2.48℃/100 m,与 HDR-1 所获结果基本一致,地温梯度也随深度增加而呈缓慢上升趋势。

1.3 经验小结

高放射性产热型干热岩勘查开发靶区选址应充分考虑深部热源条件、地表盖层厚度以及深大断裂的影响。

(1)热源条件:尚无证据显示东南沿海深部存在正熔融的岩浆囊作为附加热源,为"热幔冷壳"热结构,区内幔源热贡献率大约 60%,而放射性元素衰变生热贡献率大约 40%(Pang Zhonghe, 1987; Yang Lizhong et al.,2016; Lin Lefu et al.,2017)。各类岩石中,燕山期尤其是燕山晚期花岗岩具有最高的平均单位体积生热率(Zhao Ping et al.,1995; Yang Lizhong et al.,2017; Lin Wenjing et al.,2020),显著高于晋宁期、加里东期和印支期花岗岩的平均单位体积生热率,是未来东南沿海地区干热岩勘查开发优先考虑的对象。

(2)盖层条件:为了保存好基底热量,防止大气降水渗入冷却岩体,需要在基底之上覆盖有低导热率的盖层,这种盖层通常主要是沉积岩(沉积物)或火山岩,也可以是合适厚度的风化壳层。东南沿海第四纪沉积岩主要为砂岩、粉砂岩、黏土岩以及一些风化物,普遍较薄,难以形成有效的保温盖层。值得一提的是,漳州地区发育有大量中生代火山岩,其 85%以上为凝灰岩或熔结凝灰岩,凝灰岩盖层与火山岩之间具有"同源异相"的关系,具有相对高的放射性生热率,因此,凝灰岩的分布及其导热性能直接关系到基底花岗岩热量的保存,可作为未来干热岩靶区选址的重要因素之一(Lin Wenjing et al.,2020)。

(3)构造条件:深大断裂是控制区域水热系统的重要通道(Wang Guiling et al.,2020)。这些深大断裂的存在对于沟通深部热源、在地壳浅部局部地区形成高温岩体具有一定意义,但对于干热岩开发来说,则应尽量避免直接揭露该类断裂,以免在钻探过程中形成掉钻、堵塞等工程事故。

2 沉积盆地型干热岩资源

活动构造控制的新生代沉积盆地是孕育现代水热系统的天然温床。沉积盆地基岩面的起伏形成基底隆起和凹陷格局,对区域地温场和地表热流的分布起着控制作用(Chen Moxiang, 1988)。沉积盆地深部一般无异常热源(如岩浆囊),其内部坳中凸的结构造成了水平方向上热传导能力的差异,从而引来温度场发生变化。当其巨厚的沉积盖层下存在热导率相对较高的基岩时,源于正常的基底热流.会向热导率大的基岩凸起部位集中,使得基底隆起区的大地热流值大于凹陷区的大地热流值(Xiong Liangping et al.,1988;Chen Moxiang et al.,1990;Wang Guiling et al.,2017),即地热田之下存在的高热传导层可以将基底热量快速地传递到浅层而形成异常高温(Mao Xiaoping et al.,2018; Mao Xiaoping,2018),因此,具有良好隔热保温作用的覆盖层的沉积盆地潜凸区是寻找干热岩的良好靶区。

2.1 重点勘查区及勘查方向

我国沉积盆地主要包括松辽盆地、下辽河盆地、华北平原、河淮盆地、苏北盆地、江汉平原、汾渭盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、西宁盆地、柴达木盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地等。不同盆地沉积环境及热结构的差异造成了其地热资源的多样性(Qiu Nansheng,1998),东部地区的华北、松辽、苏北等盆地,软流圈上拱地壳变薄,沉积巨厚,发育多层叠置的热储系统,主要热储层是中生界砂岩孔隙型热储和古生界与中新元古界碳酸盐岩岩溶裂隙型热储,盆地热流值较高,为 60～83 mW/m^2。中部四川、江汉与鄂尔多斯等盆地,地壳总体较厚,大地热流值较低,40～60 mW/m^2,主要热储层是中生界砂岩孔隙型热储和古生界碳酸盐岩岩溶裂隙型热储,一般为低温热水,深凹陷地带赋存中温热卤水。西部包括塔里木、柴达木、准噶尔等盆地,地壳厚,盆地热流值低(34～51 mW/m^2),主要热储层是第三系砂砾孔隙型热储和古生界碳酸盐岩岩溶裂隙型热储,一般矿化度较高,常为卤水。北部主要为松辽、海拉尔与二连等盆地,地壳较厚,盆地热流值(44～90 mW/m^2)与国内平均水平相当。综合考虑各盆地的地热地质背景及区域社会经济发展水平,华北平原地区具有良好干热岩资源赋存背景,可作为开展沉积盆地型

干热岩资源勘查开发的优先区域。

2.2　勘查工作进展

2.2.1　山东利津陈庄凸起

陈庄凸起位于山东利津中部的盐窝、陈家庄、傅家庄等地。凸起北、西为沾化凹陷，南、东为东营凹陷，呈近 EW 向长方形分布，北部边界参差不齐。凸起东西长 23 km，南北宽 5 km，面积约 70 km^2。新近系及第四系覆盖厚度 950～1200 m，凸起由元古宙变质变形二长花岗岩及古生代地层组成（Wang Lidong et al.，2016）。2013 年，东营市利津县国土资源局与山东省鲁北地质工程勘察院合作在利津县开展了区内首个干热岩勘探孔（SDGRY1，原编号 GRY1）施工，2013 年 6 月开钻施工，2014 年 2 月完钻，勘探孔采用三开井身结构，下部裸眼完井，终孔孔深 2500.58 m。SDGRY1 孔于 1243.00 m 处揭露新太古代泰山岩群，上段岩性为玄武岩及少量侵入花岗岩岩体，下段岩性为辉长岩及侵入花岗岩等变质岩系。钻探过程中先后进行了 3 次测井，分别在二开下管之前、三开及终孔之前进行。通过测温资料分析（图 5），井深 2492 m 处测温 104.2℃，平均地温梯度为 3.71℃/100 m；整个测温曲线可分为两段，上段为盖层段（0～1200 m）平均地温梯度为 4.77℃/100 m；下段为基岩段，地温梯度迅速降低，平均地温梯度仅为 2.90℃/100 m（Tan Xianfeng et al.，2015），据此推测该地区于 5120 m 深度以下才具备现有技术条件下干热岩经济发电的条件（>180℃）。上下两段温-深曲线均呈线性，表现为典型传导型地温的特点。2014 年对该孔实施 2 组水力压裂试验（Tan Xianfeng et al.，2016），主要压裂段为天然裂隙较发育的 2180～2263 m、2313～2411 m 区段，岩性为花岗岩、二长花岗岩，第一次压裂后降压 2 h，因未使用颗粒支撑，压力下降后压裂裂隙又重新闭合，但第二次压裂时，在压裂压力前（26.5 MPa），相同的注水量下压力下降了约 15%，在压裂压力后（26.5 MPa），相同的注水量下压力上升了约 15%，该试验为同类地区干热岩资源的开发提供了借鉴。

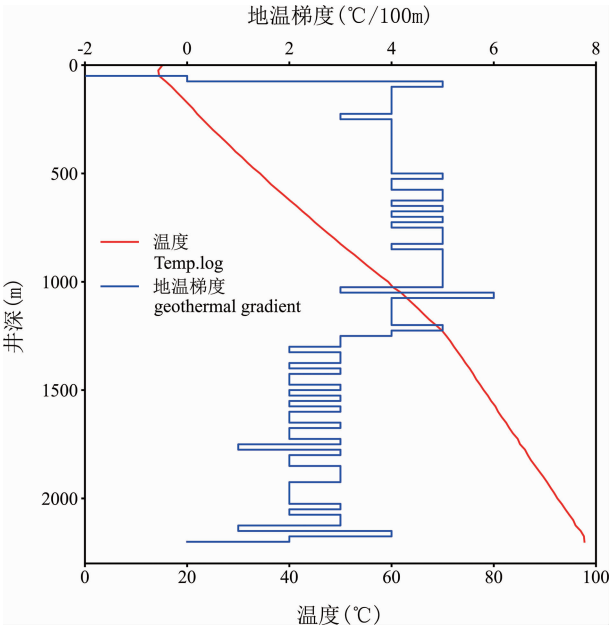

图 5　山东利津 SDGRY1 孔测温曲线（据 Tan Xianfeng et al.，2015）

Fig. 5　Temperature log of SDGRY1 well located in Lijin, Shandong (after Tan Xianfeng et al.，2015)

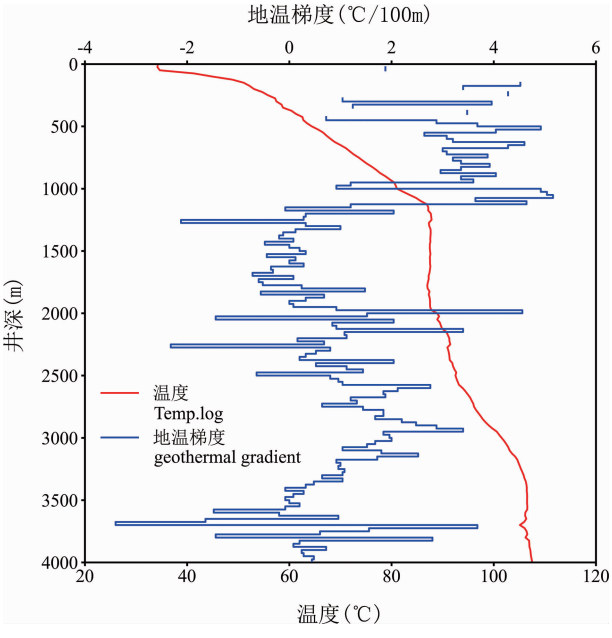

图 6　河北献县 HBGRY1 孔测温曲线

Fig. 6　Temperature log of HBGRY1 well located in Xianxian, Hebei

2.2.2　河北沧县凸起

河北省沧县台拱带位于河北省平原区中东部，沧州市西部。在地质构造上属于沧县隆起，区域上形成了一种凸凹相间配置的构造格局，并且工作区内有一定的新生界覆盖，在高凸深凹相间的地质构造格局下，在基岩隆起区的浅部易形成高温和高地温梯度（Li Wenbin，2016；Wang Junke et al.，2020）。2016 年河北省煤田地质局在献县梅庄洼农场组织实施了 HBGRY1（原编号 GYR1）干热岩勘探孔施工，钻探工作于 2016 年 11 月 7 日开钻，2017 年 5 月 20 日竣工，孔深 4025.82 m。揭露地层由老到新依次为：长城系高于庄组（Chg），本次未揭穿，

揭露厚度为 258.36 m;蓟县系杨庄组(Jxy)地层底界深度 3767.46 m,厚度为 744.39 m;蓟县系雾迷山组(Jxw)地层底界深度 3023.07 m,厚度为 1696.47 m;新近系(N)地层底界深度 1326.60 m,厚度 822.64 m;第四系(Q)地层底界深度 503.96 m,厚度 503.96 m。该井在进入高于庄组地层后裸眼成井,井径为 152 mm,井底温度为 107.5℃,井口出水温度为 103℃。

成井后开展了三次测温工作,不同层段地温梯度变化较大,其中,1326.60 m 以上新生界盖层段温-深曲线呈线性(图 6),表现为传导型地温的特点,地温梯度也最大,平均地温梯度约为 3.5℃/100 m,进入基岩段后,为碳酸盐岩热储层,热对流是储层内的主要热传递方式,由于储层内灰岩、白云岩的热导率明显高于新生代的砂泥质沉积岩(1 倍以上),其地温梯度显著降低,平均地温梯度不到 1℃/100 m。另外,由于静井时间较短,下部岩溶储层的热水受到前期钻探扰动作用仍然存在,使得温度较为均一。

2017 年,针对 HBGRY1 孔 3700~4000 m 的裸眼段实施了水力压裂试验,试验自 2017 年 6 月 26 日开始,7 月 16 日结束,历时 21 d。压裂后进行了抽水试验,与压裂前抽水试验数据相比,压裂前后降深由 43.74 m 降至 25.33 m,变化幅度为 18.41 m;单位涌水量由 0.8359 L/s·m 增至 1.7108 L/s·m,变化幅度为 0.8749 L/s·m,增速 2 倍,压裂效果较明显。目前,已在该地建立了京津冀地热资源梯级综合开发利用(献县)科研基地,开展中低温地热发电与综合梯级利用研究(Qin Xiangxi et al.,2019)。

2.2.3 冀东平原马头营凸起

马头营位于冀东沿海一带,所处大地构造位置为冀东南沉降区黄骅坳陷北端,其西为沧县隆起、南为埕宁隆起、北与燕山褶皱带相连接。构造总体格局以北东向展布为主,黄骅坳陷内次级凹陷与凸起相间分布。区内断裂构造以北东向为主,隐伏的固安-昌黎大断裂从马头营凸起北部通过,是Ⅲ级构造单元分界线。由于断裂和升降运动,造就了马头营凸起及南堡、乐亭凹陷区。2017 年起,河北省煤田地质局在马头营凸起区组织施工干热岩科探井(M-1 井),井深 4000 m,M-1 井于 1376 m 深处揭露太古宙变质岩系,岩性主要由一套灰白、浅肉红色二云变粒岩、黑云母变粒岩、黑云母二长变粒岩夹少量浅粒岩及黑云母二长变粒岩组成,混合岩化强烈,地层区域厚度>4000 m。测温资料显示(图 7),孔底温度达 151.25℃,其中,新生界地温梯度为 5~7℃/100 m;2500 m 以浅至新生界底界,太古宙地层地温梯度为 1.2℃/100 m,2500~3500 m 深度太古宙地层地温梯度为 1.7℃/100 m,3500 m 太古宙地层地温梯度为 2.7℃/100m,基岩层段(太古宙)地温梯度总体变化趋势是由浅至深逐渐增大。按已揭露的地温梯度预测,该地区于 5074 m 深度以下具备现有技术条件下干热岩经济发电的条件(>180℃)。

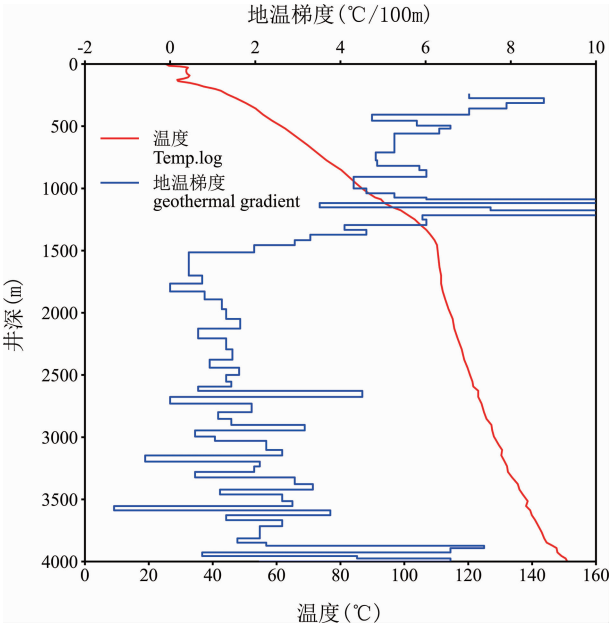

图 7 河北马头营凸起 M-1 孔测温曲线

Fig. 7 Temperature log of M-1 well located in Matouying, Hebei

2019 年中科院广州能源所在 M-1 孔中开展了超长重力热管取热与温差发电试验,在地下取热段岩石平均温度为 119℃的条件下,地面获得了温度最高达 90℃的饱和水蒸气,持续采热功率接近 200 kW(尚未发表)。

2.3 经验小结

(1)我国东部的大型沉积盆地多为“热幔冷壳”型岩石圈热结构,决定了来自地幔的热源是区内热储的主要热源。华北地区自中生代以来遭受了强烈的改造,软流圈上隆及岩石圈的减薄,为华北盆地深部热能进入地层浅部提供了良好的条件(Wang Guiling et al.,2017),决定了该盆地具有较高的热背景,在 4500~5500 m 的范围内有望发现可供开发的干热岩资源。

(2)沉积盆地内凹凸相间的构造格局有利于热流的分配与再分配。基岩与松散沉积物的热导率差异导致的“热折射”效应,有利于热流自凹陷区向凸

起区聚集（Zhang Baojian et al.，2020）。凸起区上部的温度高于拗陷区的温度，产生由凸起区流向拗陷区的水平热流；凸起区下部的温度均低于拗陷区的温度，产生由拗陷区流向凸起区的水平热流，在此之间存在一热流平衡线，其深度与上覆盖层厚度、基岩隆起高度以及盖层与基岩热导率的比值等有关（Xiong Liangping et al.，1982；Mao Xiaoping et al.，2018），沉积盆地型干热岩资源的勘查选址应充分考虑这些因素对区域地温场的影响以及热流平衡线的位置。

3　近代火山型干热岩资源

地下岩浆沿断裂带喷发出地表而形成火山，由于基性岩浆以喷发为主，因此喷出地表的岩浆很快冷却而散失热量；而未喷发部分残存于深部以局部岩浆囊的形式存在，在其周围则易形成干热岩资源。受残存未喷发岩浆深度的影响，其热源深浅不一，通常在较浅的地方就可以获得较高的温度，成为干热岩资源赋存的良好靶区（Gan Hannan et al.，2015；Wang Guiling et al.，2016）。

3.1　重点勘查区及勘查方向

我国近代火山主要分布在腾冲、雷琼、长白山、五大连池等地区，一般属于冷壳热幔型热结构，其热源特征与底部岩浆活动历史和岩浆活动特征密切相关。其中，腾冲火山区是我国最年轻的火山区之一，火山多、面积广、喷发类型齐全，上新世晚期至全新世，火山活动频繁，MT 观测揭示该区域 7 km 以下存在着高导层，可能是一个正在冷却的岩浆囊（Liao Zhijie et al.，1997）。琼北地区则是我国四大最著名休眠火山群之一（Fan Qicheng et al.，2004），据区内 MT 测线数据解译结果，在琼北海口地区地下深部存在两个低阻体，推测其下伏有退化的岩浆通道并沟通了上地幔的深部低阻体，即岩浆囊（Hu Jiuchang et al.，2007）。长白山天池是环太平洋火山带上的一座活动火山，物探结果揭示长白山火山与太平洋板块的俯冲及在地幔转换带中的滞留有关，深部 15 km 以下呈低阻特征（Lei Jianshe et al.，2018）。大同火山群发育于大同盆地中，位于我国东部突出的构造地貌格局——NNE 向雁行式剪切拉张断陷盆地带，即山西地堑系中最北的一个盆地，而该地堑系又处于华北克拉通地壳减薄上地幔隆起带（Li Shude，1988），区域成像结果及远震波形资料显示，大同火山至渤海下方存在一“Y”字形低波速异常，这个低波速异常往深部一直延伸至下地幔，可能暗示大同火山的形成与太平洋板块俯冲密切相关（Lei，2012）。这些地区均是我国近代火山型干热岩资源勘查的重点靶区。

3.2　勘查工作进展

3.2.1　黑龙江五大连池火山群

五大连池火山群位于黑龙江省中北部，地处松嫩平原北东缘，由 14 座新老火山组成。其中，五大连池老黑山和火烧山喷发于 1719～1721 年，距今不到 300 a，一直处于休眠状态，可能保存有岩浆余热。2014 年起，中国地质调查局组织在五大连池尾山地区开展了系统的地面调查及地球物理勘查等工作，认为区内放射状断裂和环形构造发育，外环影响直径 12～13 km，是地壳浅部火山穹窿构造的反映；深部存在正在冷却中的岩浆囊，岩浆囊顶界埋深 6.5 km，平面上呈北西—南东向展布西大东小的“蝌蚪状”，是尾山地区干热岩资源的潜在热源；区内晚白垩世嫩江组（K_{2n}）和新元古代—早寒武世北宽河组（Pt_3- $\in_1 b$）变泥质岩类构成了干热岩资源良好的隔热保温盖层；印支期小洪山单元（T_3xh）二长花岗岩是可作为区内干热岩资源勘查开发的主要目的层（Zhang Senqi et al.，2017）。

3.2.2　琼北火山群

琼北地区位于欧亚板块的东南缘，受到菲律宾板块、印度板块运动和南海海盆扩张的联合作用与影响，构造运动、火山活动和地震活动强烈。根据地表第四纪火山的活动时间，其最近一期的喷发时间为距今 10000 a 左右的第四纪全新世，且喷发最为强烈（Fan Qicheng et al.，2004）。地震动力学特征研究表明，第四纪频繁而强烈的火山活动可能造成该区深部地壳内存在岩浆囊，是形成该区异常地温的主因（Liu Hui et al.，2008；Chen Kaiqi et al.，2020）。同时，本区有分布在前古近系基底上发育起来的新生代断陷裂谷盆地——北部湾盆地（Zhang Zhiqiang et al.，2013），盆地的巨厚沉积层为深部热能提供了保暖盖层，为干热岩资源的赋存提供了必要的条件。

雷琼盆地为北部湾盆地的陆上部分，包括雷州半岛以及隔琼州海峡相望的海南岛定安大断裂以北的琼北地区，统称为雷琼盆地。近些年来，在雷琼盆地开展的石油勘查多次揭露深部高温地层，其中位于雷州半岛湛江市徐闻县的徐 4 孔，深度 3203.18 m，成井后进行了全孔测温，测温最大深度 3150 m 处测到井温 146.4℃（图 8），全井段平均地温梯度达到 3.44℃/100 m，其中 0～1500 m 段平均地温梯度

为 2.88℃/100 m，1500～3200 m 段平均地温梯度高达 3.96℃/100 m，且越往深部地温梯度越大，按此地温梯度推算，该井于 4050 m 深度即可揭露具备干热岩开发的温度条件（>180℃）。另外，位于琼北海口市以西的澄迈福山凹陷也布设有深部石油钻孔，根据钻井测温数据，福山凹陷不同地区各井的地温梯度均出现分层现象，即上层地温梯度低，为 2.4～3.1℃/100 m，而下层地温梯度较高，为 4.0～5.6℃/100 m，不同地区地温分层界线的深度不同，约为 2300～3000 m（Zhao Yingdong et al.，2016）。图 9 为 L15X 孔的测温曲线。2017 年 12 月 28 日，由渤海钻探第一钻井公司 50669 钻井队施工的干热岩参数井——琼北花东 1R 井正式开钻，经过 66 d 的钻探施工，在深度 4387 m 处钻获超过 185 ℃的高温岩体（非稳态测温，尚未正式发表），对海南地区干热岩的勘查开发具有里程碑式的意义。

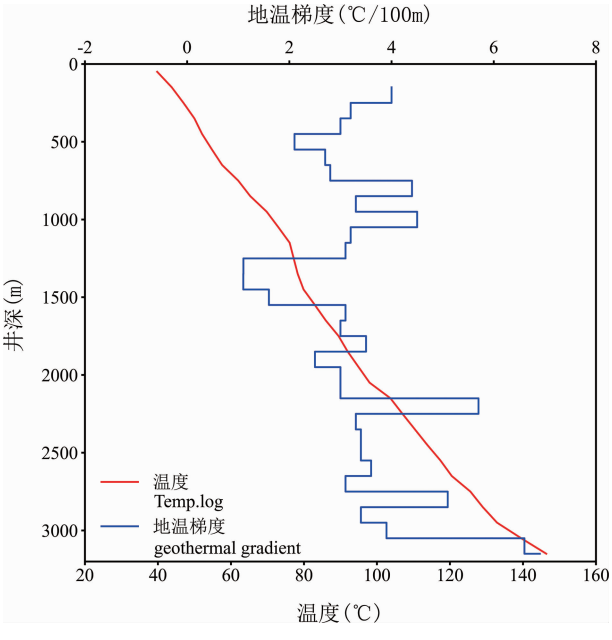

图 8 广东徐闻徐 4 井测温曲线

Fig. 8 Temperature log of Xu-4 well located in Xuwen, Guangdong

3.3 经验小结

地下一定深度范围内是否存在尚未冷却固结的岩浆囊是探测近代火山型干热岩资源的关键。一般来说，尚未冷却固结的岩浆囊大都具有高热流、低波速、低电阻率等特征，可以通过深部地球物理探测作出判断（Xu Yi et al.，2015）。而较大范围的热流活动和偏低的波速只能说明地壳内部可能具备岩浆活动的深层条件，并不是绝对条件。壳内低速区的产生有 3 种可能：一是破碎带，由于岩石的裂隙增多，

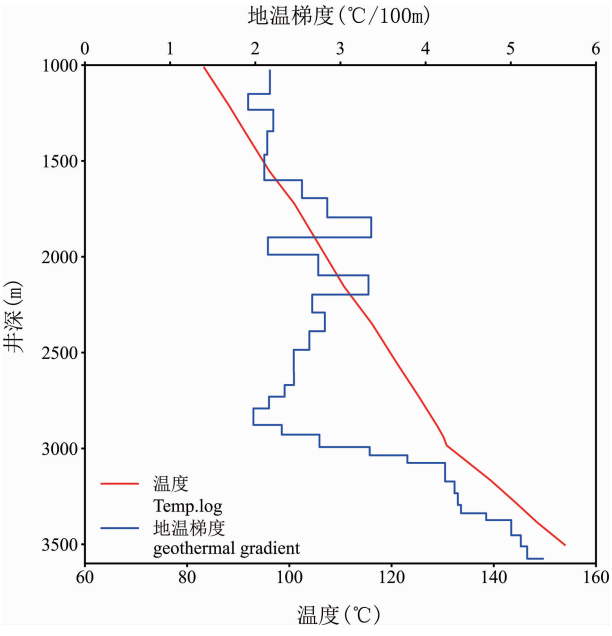

图 9 海南福山凹陷 L15X 井测温曲线（据 Zhao Yingdong et al.，2016）

Fig. 9 Temperature log of L15X well located in Fushan sag, Hainan (after Zhao Yingdong et al.，2016)

孔隙度加大，可使 P 波速度减小；二是岩石的孔隙压力、温度和含水性质发生变化，特别是有水蒸气存在时，会使 P 波速度降低；三是地壳中存在部分熔融的高温物质，使岩石体积膨胀、密度变小（Xiong Shaobai et al.，1991）。苏联和德国进行的深钻均在深部探测到了富含流体的断裂破碎带，证实了壳内低速区的多种可能性。因此，应结合区域地质构造背景、热异常区分布及特征、深部地球物理探测等多种手段判断地壳浅部低速区的性质，从而为干热岩资源的探测提供依据。

4 强烈构造活动带型干热岩资源

作为活动构造中最活跃的因素，活动断裂对于酸性侵入岩隆起具有重要的指示作用。一方面活动断裂往往切割地壳较深而且形成了软弱的结构面，使深部酸性岩浆易于侵入，其年龄与断裂活动年龄紧密相关，因此往往较年轻；二是岩浆岩的侵入在局部打破了断裂原有的空间几何结构和变形特征，这种调整作用在侵入岩体上加剧了其隆起。我国大陆的活动隆起大都起源于新近纪并持续活动至今，其中的酸性侵入体保持着较高辐射热，利于干热岩的形成，而且这一时期的侵入岩体出露地表或被浅层覆盖，也易于被钻掘，这为干热岩资源的赋存及开发利用提供了可能。以羊八井地热田为例，羊八井地

热田处在念青唐古拉山前全新世活动断裂拉张的亚东-谷露断陷断裂带内，边缘出露酸性侵入岩隆起，地热田的浅层热储主要由中更新统冰碛砾石、卵石构成，基底为新近纪花岗岩，与侵入岩隆起属于一个时相的岩体。羊八井地热田施工的 ZK4002 孔，孔深 2006 m，在 1850 m 处测得温度为 329.8℃，孔中揭露少量蒸汽（Zhao Ping et al.，1998），为典型的高温水热系统翼部所伴生的干热型地热系统。

4.1　重点勘查区及勘查方向

我国位于欧亚板块的东南隅，处于印度板块、太平洋板块和菲律宾海板块的夹持之中，是一个晚第四纪和现代构造活动强烈的地区。板块之间的晚第四纪和现代活动边界通过喜马拉雅和台湾地区，其他地区为板块内部地区。板块边界构造带是最重要的活动构造带，因而形成现代活动造山带及强烈活动的地震带和火山带，也是天然温泉的主要分布区；板内块体存在相对运动，且其活动程度有所区别，形成活动程度不同的活动块体和活动构造带。根据晚第四纪构造活动特征的差异，我国除喜马拉雅和台湾两条现代板块活动边界构造带外，大陆板块内部可以分为青藏、西域、东北亚、华北、华南、南海以及滇缅等 7 个 Ⅰ 级活动断块区和 22 个 Ⅱ 级活动地块（Zhang Peizhen et al.，2003）。通常把新构造时期有成因联系的各种活动断裂、各种地质作用、各种地质现象组合而成的总体，统称为活动断裂构造带。图 10 给出的这些活动地块边界带实际上就是我国大陆内部的重要活动构造带，这一系列深达上地幔的大断裂致使大量的上地幔物质上涌，造成地壳浅层处于高温状态，具备干热岩存在的热源基础。以纵贯我国整个东部地区作北北东向延伸的郯庐大断裂为例，高温的壳下物质会源源不断地沿该深达上地幔的深大断裂带上涌，从而将深部热量直接带至地壳浅部或携出地表，形成了围绕郯庐大断裂的带状高地温异常的深部地质背景（Tao Shizhen et al.，2000）

4.2　勘查工作进展

4.2.1　青海共和盆地

青海共和盆地处于秦昆结合部，是一总体呈北西西向展布的菱形新生代断陷盆地，总面积约 1.7 $\times 10^4$ km^2，其北缘由宗务隆-青海南山断裂控制，该断裂是祁连地块与昆仑地块的分界断裂，走向北西，

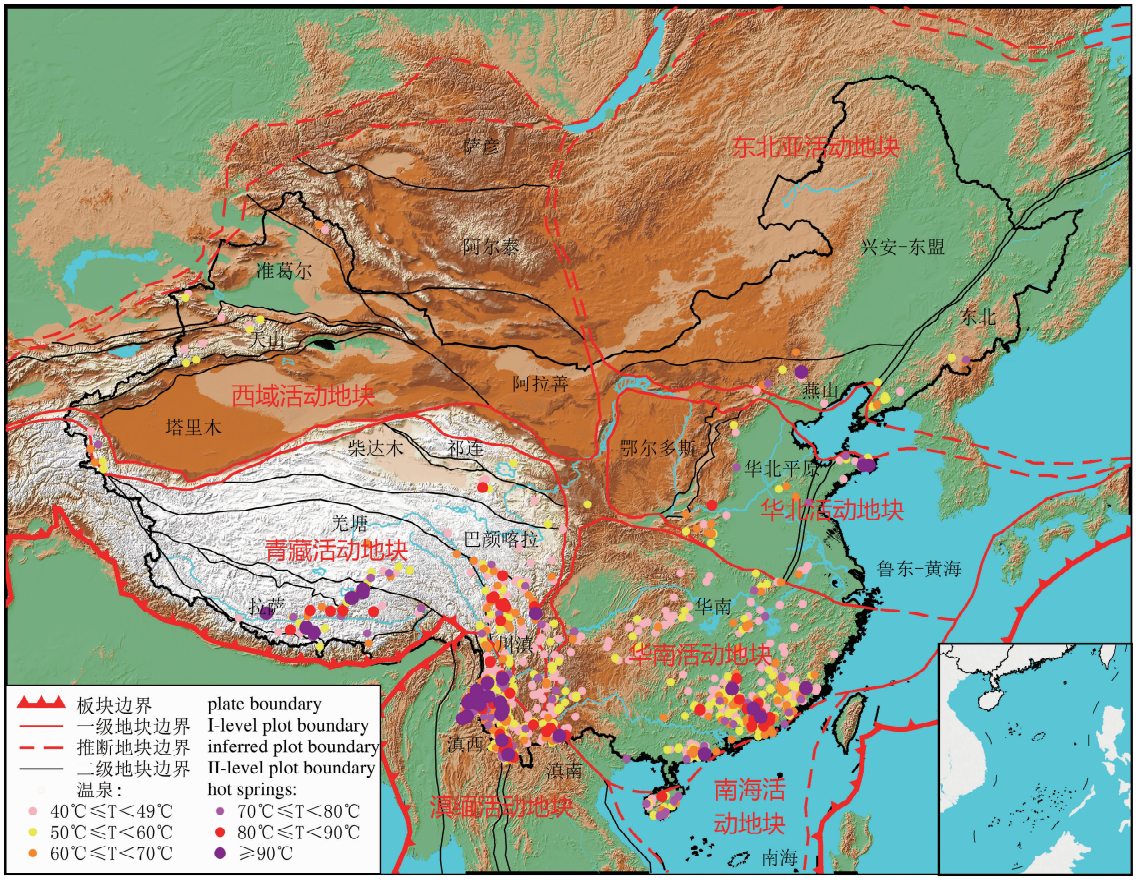

图 10　中国主要活动块体及温泉分布示意图（据 Zhang Peizhen et al.，2003 修改）

Fig. 10　Sketch map of main active blocks and hot springs distribution in China (modified after Zhang Peizhen et al.，2003)

长度大于 650 km，是一条断面近直立微向南倾的超岩石圈活动断裂；南界为鲸鱼湖-阿尼玛卿晚古生代—早中生代缝合带主边断裂，西延伸到新疆，东延与甘肃勉略断裂相接，是一条总体向北陡倾的岩石圈或超岩石圈断裂。新生代以来受喜马拉雅造山运动的影响，共和盆地新构造运动活动强烈，表现在盆地周边及盆地内老断裂的复活，深部的水热活动进一步加强，造就了共和盆地具备地热资源形成的区域地质构造背景。加之盆地内沉积着 600～2400 m 厚的第四系冲湖相（Q_1^{al-l}）细颗粒地层及新近系上新统（N_2）的泥岩地层，起着隔热保温作用，造成共和盆地现今仍保留着较高的地热背景，特别是远离山前冷水带盖层条件较好的盆地中部地区（如恰卜恰地区）的热流值较高（3.68 HFU）（Heat Flow Unit，热流单位，1 HFU＝1 μcal/(cm^2·s)）（Lei Yude et al.，2017；Zhang Shengsheng et al.，2019）。近些年来相继在共和盆地中部的恰卜恰地区和东缘的扎仓沟相继发现了优质的干热岩资源，取得了我国干热岩勘查突破（Yan Weide，2015；Li Linguo et al.，2017；Zhang Senqi et al.，2020）。

（1）共和盆地恰卜恰地区：位于共和凹陷中，北侧受青海南山南侧深大断裂控制，西南方向以达连海隆起为界，东边受瓦里关山火成岩隆起制约，形成了共和盆地东北部边角一个小型凹陷。在凹陷中心基底埋深大于 3000 m，东侧由于瓦里关山火成岩侵入而隆起，与共和凹陷之间形成了斜坡地带。由于挽近期新构造运动的强烈活动的结果，使新生界的新近纪地层产生褶皱和断裂，基底呈现出凸起和凹陷，支离破碎，这些凸起岩层上拱，裂隙发育，断裂断至热源体基性火成岩中，成为热能上升的通道，所以在阿乙亥和恰卜恰深切河谷中有很多地热异常泉点出露，在 300 m 以浅井（孔）中，揭露到水温 30～42.5℃的浅层低温热水。2011 年以来，为解决城市供暖，青海省在恰卜恰地区相继开展了“青海省共和县恰卜恰镇地下热水资源勘查”、“青海省共和县恰卜恰镇中深层地热能勘查”项目，布置了多眼 2000 m 以上深钻孔，探明盆地基底由印支期花岗岩组成，上部堆积有第四纪（Q）和新近纪（N）地层，厚度达 1300～1500 m，下部花岗岩岩体总体相对完整，其中盆地北部 2200 m 左右岩体温度达到 150℃，3000 m 左右温度达 180℃以上。其中，DR3、DR4 两孔南北相距 4 km，钻孔见花岗岩深度分别为 1360 m、1400 m，DR3 钻孔井底深度 2927.26 m，孔底温度为 181.17℃，DR4 孔井底深度 3102.00 m，孔底温度 175℃。测温曲线显示（图 11），温度与深度为线性关系，具有典型的传导型特征，全孔平均地温梯度为 5.99℃/100 m，其中 1360 m 以上沉积盖层的平均地温梯度高达 7.73℃/100 m，进入花岗岩体后平均地温梯度下降为 4.37℃/100 m，且有逐步减少的趋势。2017 年以来，青海省相关单位组织开展了恰卜恰地区干热岩勘查，在区域地球物理勘探、地面调查等工作的基础上，先后实施了 GR1、GR2 干热岩勘探井。其中，GR1 孔终孔深度 3705 m，1350 m 以浅为新生界沉积盖层，1350～3705 m 为中晚三叠世花岗岩，主体岩性为花岗闪长岩、（黑云母）花岗岩、二长花岗岩和斑状（黑云母）二长花岗岩等；测温结果显示，2500～3705 m 井段平均地温梯度为 7.14℃/100 m；2800～3705 m 井段地温梯度大于 8℃/100 m，井底温度 236℃，是迄今中国钻获温度最高的干热岩勘探孔，而且为中国首个 EGS 示范工程与科研试验基地建设奠定了重要基础（Zhang Senqi et al.，2018）。

（2）共和盆地扎仓沟地区：2013～2018 年，在青海省国土资源厅及中国地质调查局的大力支持下，青海省环境地质勘查局先后在贵德县热水泉地区热光断裂东西两侧的上下盘先后实施了 ZR1 和 ZR2 号干热岩勘探孔。ZR1 孔深 3050.68 m，实测孔底温度为 151.34℃；ZR2 孔深 4703.00 m，实测 4600 m 处温度为 205℃，为典型的高温水热系统翼部所伴生的干热型地热系统。ZR1 孔 50～600 m、1200～1700 m 和 2200～2800 m 发育三层相对稳定的地下热水含水层，热储岩石较破碎；相对完整或隔水的井段为 600～1200 m 和 1700～2200 m（Zhang Senqi et al.，2020）。以此相对应，测温数据 1200 m 以上温压变化小，增温趋势相对稳定，温度维持在 120 ℃左右，反映出地热流体在裂隙系统内循环对流条件良好；1200～1500 m 段温度明显增加，与钻探过程钻遇相对完整的岩芯且水量贫乏相对应；1500 以下地温梯度相对稳定，温度缓慢增加。

4.2.2 胶东地区

胶东地区位于欧亚板块与菲律宾板块俯冲带的北西侧，濒临西太平洋弧后盆地区，中生代印支期由于地壳发生强烈的脆性引张变形作用，形成了一系列近南北向张性断裂以及北东向、北西向和近东西向扭性断裂，并导致下部地壳部分岩石熔融，从而产生大规模的花岗质岩浆沿断裂入侵形成花岗岩体，有的沿北东向断裂入侵形成一些浅成脉岩，由于上述地质演变，区域上具有良好的地热形成条件

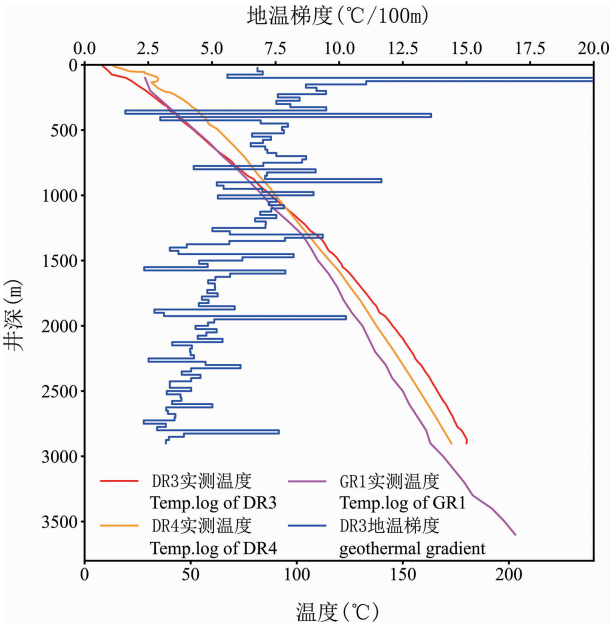

图 11　青海共和 DR3、DR4 及 GR1 孔测温曲线(GR1 孔测温曲线引自 Zhang Senqi et al.，2018)

Fig. 11　Temperature log of DR3, DR4, GR1 wells located in Gonghe, Qinghai (after Zhang Senqi et al.，2018)

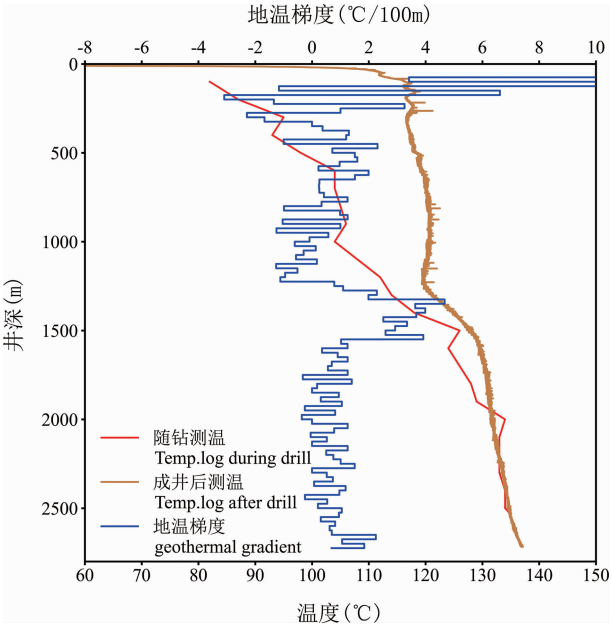

图 12　青海贵德 ZR1 孔测温曲线

Fig. 12　Temperature log of ZR1 wells located in Guide, Qinghai

(Jiang Haiyang et al.，2019)。

文登地区位于苏鲁高压—超高压变质岩带上，广泛发育元古宙花岗岩、花岗片麻岩、花岗闪长岩和片麻岩，区内地热资源丰富，具有干热岩资源赋存的背景条件(Tian Liqiang et al.，2016)。2016 年山东省第一地质矿产勘查院在文登成功施工 ZKCW01 测温孔，2016 年 1 月 5 日正式开钻，9 月 11 日钻至 2000.76 m 深度处终孔，钻遇岩石主要为文登序列冶口单元二长花岗岩。钻遇的主要破碎带有四处，一是 330～380 m 段；二是 975～1010 m 段；三是 1160～1242 m 段；四是 1800.44～1923.44 m 段。通过对 ZKCW01 测温孔进行准稳态井温测量(井温稳定时间 80 h)，实测孔底温度为 114.12℃，全孔自上而下地温梯度变化较大，具有明显的对流型特征(图 13)。按 1575～1990 m 段平均地温梯度 1.85℃/100m 推算，预测 5000 m 处揭露温度为 170℃，未达到现有技术条件下干热岩经济发电的温度条件(>180℃)。

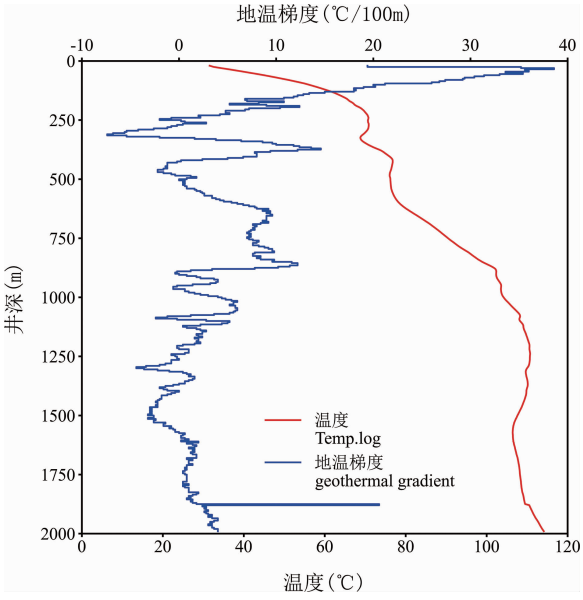

图 13　山东文登 ZKCW01 孔测温曲线(据 Jiang Haiyang et al.，2019)

Fig. 13　Temperature log of ZKCW01 wells located in Wendeng, Shandong (after Jiang Haiyang et al.，2019)

4.3　经验小结

我国除台湾、腾冲等部分地区存在有明确证据的火山活动或岩浆余热控制的高温地热系统外，已揭露的干热型地热系统多为特定水热系统翼部的不透水高温岩层或含少量蒸汽的高温岩层，干热型地热系统与水热型地热系统同源共生的特征十分明显(Wang Guiling et al.，2020)。尽管多数孤立的温泉与深部干热岩是否存在联系尚不明晰，但在一个相对较大的范围内出露众多的温泉，形成对流型地下热水时，则一定程度映射出其下部或上游深部可能发育有高温热源，或与深部干热岩构成一定的镜像关系。因此，温泉的群居性与成规模的水热型地

热田是寻找干热岩资源的地热地质标志(Zhang Senqi et al.,2018)。

5 结论

在分析我国不同类型干热岩资源成因模式及重点勘查靶区的基础上,重点针对已开展的干热岩资源勘探工程进行了梳理,总结归纳了不同类型区勘查重点。获得如下主要认识:

(1)高放射性产热型干热岩资源主要分布于华南地区,其放射性元素衰变生热贡献率占到40%以上,区内干热岩资源的勘查应重点考虑燕山晚期花岗岩储层、一定厚度的保温盖层以及深大断裂导热作用,干热岩的钻探应尽量避免直接揭露该类断裂,以免在钻探过程中形成掉钻、堵塞等工程事故。

(2)沉积盆地型干热岩资源主要分布于东部的华北、松辽等盆地,盆地内凹凸相间的构造格局有利于热流自坳陷区向凸起区聚集,成为盆地内干热岩资源选址的重点靶区,盆地区干热岩资源的勘查应重点考虑上覆盖层厚度、基岩隆起高度及其对区域地温场的影响。

(3)近代火山型干热岩资源主要分布于腾冲、雷琼、长白山以及大同等近代火山群分布区,利用深部地球物理探测地下是否存在尚未冷却固结的岩浆囊是探测近代火山型干热岩资源的关键,应结合区域地质构造背景、热异常区分布特征、深部地球物理探测等多种手段判断地壳浅部低速区的性质,从而为干热岩资源的探测提供依据。

(4)强烈构造活动带型干热岩资源与保持着较高辐射热的活动断裂内酸性侵入体有关,干热型地热资源多赋存于特定水热系统翼部的不透水高温岩层或含少量蒸汽的高温岩层,与水热型地热系统同源共生的特征十分明显,温泉的群居性与成规模的水热型地热田是寻找该类型干热岩资源的重要标志。

致谢:本文在绘图过程中应用了GMT中文社区提供的免费开源代码及相关人员的热心帮助,审稿专家对本文提出了宝贵的修改建议,在此一并表示诚挚的谢意。

References

Chen Kaiqi, Li Zhiwei, Lin Jianmin, Bao Feng, Xia Xin, Xia Shaohong, Lin Wenjing, Gan Haonan, Wang Liaoliang, Tu Guanghong, Wang He. 2020. Crustal magma chamber beneath the Qiongbei volcano field in Hainan Island unveiled by seismic ambient noise tomography. Progress in Geophysics, http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20200319.1032.004.html.

Chen Moxiang. 1988. Geothermics of North China. Beijing: Science Press, 3～15(in Chinese).

Chen Moxiang, Wang Jiyang, Wang Jian, Deng Xiao, Yang Shuzhen, Xiong Liangping, Zhang Juming. 1990. The characteristics of the geothermal field and its formation mechanism in the North China down-fault basin. Acta Geologica Sinica, (1): 79～91(in Chinese with English abstract).

Engine Coordination Action. 2008. Best Practice Handbook for the development of Unconventional Geothermal Resources with a focus on Enhanced Geothermal System. Orleans, BRGM Editions: 1～97.

Fan Qicheng, Sun Qian, Li Ni, Sui Jianli. 2004. Periods of volcanic activity and magma evolution of Holocene in North Hainan island, Acta Petrologica Sinaca, 20(3): 533～544(in Chinese with English abstract).

Gan Haonan, Wang Guiling, Lin Wenjing. 2015. Research on the occurrence types and genetic models of hot dry rockresources in China. Science & Technology Review, 33(19): 22～27(in Chinese with English abstract).

Hu Jiuchang, Bai Denghai, Wang Weihua, Wang Lifeng, He Zhaohai, Han Jimin. 2007. Magnetotelluric surveying and electrical structure of the deep underground part in Leiqiong volcanic area. South China Journal of Seismology, 27(1):1～7 (in Chinese with English abstract).

Jiang Haiyang, Wang Shuxing, Kang Fengxin, Shi Meng, Fan Zhenhua, Zhang Ling. 2019. Geological characteristics and resource potential of dry- hot pore ZKCW01 in Wendeng, Shandong Province. Acta Geologica Sinica, 93(s1):217～225 (in Chinese with English abstract).

Lei Jianshe, Zhao Dapeng, Xu Yigang, Fan Qicheng, Mi Qi, Du Mofei, Lu Mingwen. 2018. Is there a gap in the stagnant Pacific slab in the mantle transition zone under the Changbaishan volcano? Acta Petrologica Sinica, 34(1): 13～22 (in Chinese with English abstract).

Lei Yude, Tong Yu, Yang Zhanmei, Yang Shaokang, Liu Yi, Li Xiaolin. 2017. Resources types and typical geothermal models of hot dry rocks in Qinghai. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 15(4): 117～122.

Lei J. 2012. Upper-mantle tomography and dynamics beneath the North China Craton. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. doi: 10.1029/2012jb009212

Li Dewei, Wang Yanxin. 2015. Majorissues of research and development of hot dry rock geothermal energy. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 40(11): 1858～1869(in Chinese with English abstract).

Li Linguo, Li Baixiang. 2017. A discussion on the heat source mechanism and geothermal system of Gonghe-Guide basin and mountain geothermal field in Qinghai Province. Geophysical and Geochemical Exploration, 41(1): 29～34(in Chinese with English abstract).

Li Shude. 1988. Morphotectonic setting of the development of Datong volcano groups in the eastern part of China. ACTA Geographica Sinica, 43(3): 233～240(in Chinese with English abstract).

Li Tingxin, Lin Wenjing, Gan Haonan, Yue Gaofan, Zhang Delong, Wang Guiling. 2020. Occurrence geological characteristitics and development potential of hot dry rocks inQinghai Gonghe basin. Journal of Geomechanics, 26(2): 187～200 (in Chinese with English abstract).

Li Wenbin. 2016. Hot dry rock resource potential assessment in Cangxian anticlise zone, Hebei Province. Coal Geology of China, 28(11): 43～48(in Chinese with English abstract).

Liao Zhijie, Yin Zhengwu, Jia Xiyi, Lü Weixin. 1997. Conceptual model of the Rehai(Hot Sea) geothermal field in Tengchong, Yuannan Province, China. Geological Journal of China Universities, 3(2): 212～221(in Chinese with English abstract).

Lin Lefu, Sun Zhanxue, Wang Andong, Liu Jinhui, Wan Jianjun, Li Xiaocong, Luo Xianwen. 2017. Radioactive geochemical characteristics of Mesozoic granites from Nanling region and

southeast coastal region and their constraints on lithospheric thermal structure. Acta Petrologica et Mineralogica, 36(4): 488～500(in Chinese with English abstract).

Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma Feng, Wang Guiling. 2012. Potential Estimation of HDR Resources of Mainland China. Acta Geoscientica Sinica, 33(5): 807～811(in Chinese with English abstract).

Lin Wenjing, Wang Fengyuan, Gan Haonan, et al. 2015. Site Selection of HDR Exploration Project of Zhangzhou, Fujian and the Analysis of the Prospect. Science & Technology Review, 33(19): 28～34(in Chinese with English abstract).

Lin Wenjing, Gan Haonan, Wang Guiling, Ma Feng. 2016. Occurrence prospect of HDR and target site selection study in Southeastern of China, ACTA Geologica Sinica, 90(8): 2043～2057 (in Chinese with English abstract).

Lin Wenjing, Chen Xiangyang, Gan Haonan, Yue Gaofan. 2020. Geothermal geological characteristics and exploration direction of hot dry rocks in the Xiamen bay-Zhangzhou basin, southeastern China. Acta Geologica Sinica, 94(7):2066～2077 (in Chinese with English abstract).

Liu Hui, Hong Hanjing, Ran Hongliu. Shen Fanluan, Zhao Bo, Chen Huixian. 2008. Dynamic mechanism of volcanic belt and new understanding from earthquake evidence in Northern Hainan Island, China. Chinese Journal of Geophysics, 51(6): 1804～1809(in Chinese with English abstract).

Lu C, Lin W, Gan H, Liu F, Wang G. 2017. Occurrence types and genesis models of hot dry rock resources in China. Environmental Earth Sciences, 76(19): 646.

Mao Xiaoping. 2018. Genetic Mechanism and Distribution Characteristics of High Temperature Anomaly in Geothermal Field. Acta Geoscientica Sinica, 39(2): 216～224(in Chinese with English abstract).

Mao Xiaoping, Wang Xinwei, Li Kewen, Guo Shaobin. 2018. Sources of heat and control factors in geothermal field. Earth Science, 43(11): 4256～4266(in Chinese with English abstract).

National Energy Administration. 2018. Terminology of geothermal energy: NB/T10097-2018. Beijing: China Petrochemical Press, 1～24(in Chinese).

Pang Zhonghe. 1987. Zhangzhou basin geothermal system-Genesis model, energy potential and the occurrence of thermal water. Ph. D thesis of the Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences(Beijing), 1～270(in Chinese with English abstract).

Qi Xiaofei, Shangguan Shuangtong, Zhang Guobin, Pan Miaomiao, Su Ye, Tian Lanlan, Li Xiang, Qiao Yongchao, Zhang Jianyong. 2020. Earth Science Frontiers, 27(1): 95～102 (in Chinese with English abstract).

Qin Xiangxi, Zhang Men, Ye Jia, Liu Hongmei, Wang Guiling, Shi Jiansheng. 2019. ORC Power Generation and Integrated Cascade Utilization of Medium-low Temperature Geothermal Resources in Cangxian Bulge Region, Hebei Province. Acta Geoscientica Sinica, 40(2): 307～313(in Chinese with English abstract).

Qiu Nansheng. 1998. Thermal status profile in the terrestrial sedimentary basin in China. Advances in Earth Science, 13(5): 447～451 (in Chinese with English abstract).

Rybach L, Bodmer P, Pavoni N, Mueller S. 1978. Siting criteria for heat extraction from hot dry rock: Application to Switzerland. Pure and Applied Geophysics Pageoph, 116(6): 1211～1224.

Rybach L. 1988. Determination of heat production rate. In: Handbook of Terrestrial Heat Flow Density Determination (Haenel R, Rybach L, Stegena L, Eds), Kluwer, Dordrecht, 125～142.

Tan Xianfeng, Wang Hao. 2015. Geothermal field characteristics and heat generation rate of radioactive elements in Taishan rock group at Chenzhuang uplift, Shandong Province. Science & Technology Review, 33(19): 58～61(in Chinese with English abstract).

Tan Xianfeng, Wang Hao, Kang Fengxin. 2016. Experimental study on fracturing of GRY1 Hot Dry Rock hole in Chenzhuang town, Lijin County. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling, 43(10): 230～233(in Chinese with English abstract).

Tan Xianfeng, Liu Xiao, Wang Guiling, Wang Hao. 2020. Research on the key technology for the investigation and evaluation of the hot dry rock geothermal resources in Lijin. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2166～2176(in Chinese with English abstract).

Tao Shizhen, Liu Deliang. 2000. Geothermal field characteristics of Tanlu fault zone and its neighbouring regions, thermal spring genesis and its composition. Natural Gas Industry, 206: 42～47 (in Chinese with English abstract).

Tian Liqiang, Fan Shiyan. 2016. Analysis on occurrence conditions of geothermal resources in shallow hot dry rock in Wendeng area. Shandong Land and Resources, 32(8): 27～30(in Chinese with English abstract).

Wang Guiling, Lin Wenjing, Zhang Wei, Lu Chuan, Ma Feng, Gan Haonan. 2016. Research on formation mechanisms of hot dry rock resources in China. Acta Geologica Sinica (English Edition), 90(4):1418～1433.

Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li Jun. 2017. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing-Tianjin-Hebei region. Geology in China, 44(6):1074～1085 (in Chinese with English abstract).

Wang Guiling, Lin Wenjing. 2020. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China. Acta Geologica Sinica, 94(7):1923～1937 (in Chinese with English abstract).

Wang Junke, Zhu Xi, Liu Yanguang, Zhang Qinglian, Niu Fei, Ma Feng. 2020. Study on earth temperature field characteristics and heat controlling factors in geothermal field of Xianxian County. China Energy and Environmental Protection, 42(1): 113～120(in Chinese with English abstract).

Wang Lidong, Wang Hao, Zhang Mingde, Yu Xi. 2016. Possibility Analysis on the Occurrence of Geothermal resources in Hot Dry Rock in Chenzhuang Area of Lijin County. Shandong Land and Resources, 32(1): 33～36(in Chinese with English abstract).

Xiong Liangping, Gao Weian. 1982. Characteristics of geothermal in up lift and depression. Chinese Journal of Geophysics, 25(5): 60～68(in Chinese with English abstract).

Xiong Liangping, Zhang Juming. 1988. Relationship between geothermal gradient and the relief of basement rock in North China Plain. Journal of Geophysics, 32(2): 146～155(in Chinese with English abstract).

Xiong Shaobai, Jin Dongmin, Sun Kezhong, Zou Yisheng, Fan Xubang, Du Xiaogang. 1991. Some characteristics of deep structure of the Zhangzhou geothermal field and it's neighbourhood in the Fujian province. Acta Geophysica Sinica, 34(1): 55～63(in Chinese with English abstract).

Xu Tianfu, Hu Zixu, Li Shengtao, Jiang Zhenjiao, Hou Zhaoyun, Li Fengyu, Liang Xu, Feng Bo. 2018. Enhanced Geothermal System: International Progresses and Research Status of China. Acta Geologica Sinica, 92(9): 1936～1947 (in Chinese with English abstract).

Xu Yi, Wang Sheng, Zhang Lili, Yang Xiaotao. 2015. Crust and upper mantle structure and its relations with magma activity of the Tengchong volcanic area. Progress in Geophysics, 30(3): 1034～1038(in Chinese with English abstract).

Yan Weide. 2015. Characteristics of Gonghe basin hot dry rock and its utilization prospects. Science & Technology Review, 33(19): 54～57(in Chinese with English abstract).

Yang Lizhong, Liu Jinhui, Sun Zhanxue, Wang Andong, Wan Jianjun. 2016. Study of the characteristics of radioactive heat production rate andHot dry rock resources potential in Zhangzhou City. Mordern Mining, (3) 123～127＋133(in Chinese with English abstract).

Zhang Baojian, Li Yanyan, Gao Jun, Wang Guiling, Li Jun, Xing

Yifei, Zhao Tian. 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 Peizhen, Deng Qidong, Zhang Guomin, Ma Jin, Gan Weijun, Min Wei, Mao Fengying, Wang Qi. 2003. Strong earthquakes and active plots in mainland China. Science in China(Series D), 33(z1): 12～20(in Chinese).

Zhang Senqi, Jia Xiaofeng, Zhang Yang, Li Shengtao, Li Zhiwei, Tian Puyuan, Ming Yuanyuan, Zhang Chao. 2017. Volcanic magma chamber survey and geothermal geological condition analysis for hot dry rock in the Weishan Volcano in Wudalianchi region, Heilongjiang Province. Acta Geologic Sinica, 91(7): 1506～1521(in Chinese with English abstract).

Zhang Senqi, Yan Weide, 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. Geology in China, 45(6): 1087～1102(in Chinese with English abstract).

Zhang Senqi, Wu Haidong, Zhang Yang, Ssong Jian, Zhang Linyou, Xu Weilin, Li Dunpeng, Li Shengtao, Jia Xiaofeng, Fu Lei, Li Xufeng, Feng Qingda. 2020. Characteristics of regional and geothermal geology of the Reshuiquan HDR in Guide County, Qinghai Province. Acta Geologica Sinica, 94(5):1591～1605(in Chinese with English abstract).

Zhang Shengsheng, Zhang Lei, Tian Chengcheng, Cai Jingshou, Tang Baochun. 2019. Occurrence Geological Characteristics and Development Potential of hot dry rocks in Qinghai Gonghe basin. Journal of Geomechanics, 25(4): 501～508(in Chinese with English abstract).

Zhang Zhiqiang, Zhan Wenhuan, Tang Minqiang, Zhou Puzhi, Wang Weiping. 2013. Subsidence of Beibuwan basin since late miocene. Marine Geology and Quaternary Geology, 33(3): 9～13(in Chinese with English abstract).

Zhao Ping. 1995. The distribution features of Heat generation rate of southeastern China. Acta Petrologica Sinica, 11(3): 292～305(in Chinese with English abstract).

Zhao Ping, Jin Jian, Zhang Haizheng, Duo Ji, Liang Tingli. 1998. Chemical composition of thermal water in he Yangbajing geothermal field, Tibet. Scientia Geologica Sinica, 33(1): 61～72(in Chinese with English abstract).

Zhao Yingdong, Gan Huajun, Shi Yang, Chen Shanbin, Wang Guanhong. 2016. Characteristics of geothermal anomaly and its effect on oil andgas reservoir in Fushan sag of Beibuwan basin. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 23(3): 40～46(in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

陈凯琪，李志伟，林建民，包丰，夏鑫，夏少红，蔺文静，甘浩男，王嘹亮，涂广红，王鹤. 2020. 海南琼北火山区上地壳岩浆囊的地震背景噪声成像研究. 地球物理学进展(网络首发)http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20200319.1032.004.html.

陈墨香. 1988. 华北地热. 北京：科学出版社，3～15.

陈墨香，汪集旸，汪缉安，邓孝，杨淑贞，熊亮萍，张菊明. 1990. 华北断陷盆地热场特征及其形成机制. 地质学报，(1)：79～91.

樊棋诚，孙谦，李霓，隋建立. 2004. 琼北火山活动分期与全新世岩浆演化. 岩石学报，20(3)：533～544.

甘浩男，王贵玲，蔺文静. 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.

国家能源局. 2018. 地热能术语：NB/T10097—2018. 北京：中国石化出版社，1～24.

胡久常，白登海，王薇华，王立风，何兆海，韩吉民. 2007. 雷琼火山区地下深部大地电磁探测与电性结构分析. 华南地震，27(1):1～7.

江海洋，王树星，康凤新，史猛，范振华，张玲. 2019. 山东文登ZKCW01干热岩钻孔地质特征及资源潜力. 地质学报，93(s1): 217～225.

雷建设，赵大鹏，徐义刚，樊祺诚，米琦，杜沐霏，鲁明文. 2018. 长白山火山下方地幔转换带中滞留的俯冲太平洋板块存在空缺吗？岩石学报，34(1)：13～22.

雷玉德，童珏，杨占梅，杨绍康，刘毅，李小林. 2017. 青海省干热岩资源类型及典型地热模式. 南水北调与水利科技，15(4)：117～122.

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——中国地质大学学报，40(11)：1858～1869.

李林果，李百祥. 2017. 从青海共和—贵德盆地与山地地温场特征探讨热源机制和地热系统. 物探与化探，41(1) ：29～34.

李树德. 1988. 中国东部大同火山群发育的构造地貌背景. 地理学报，43(3)：233～240.

李亭昕，蔺文静，甘浩男，岳高凡，张德龙，王贵玲，2020. 东南沿海干热岩资源成因模式探讨及勘查进展. 地质力学学报，26(2) ：187～200.

李文彬. 2016. 河北省沧县台拱带干热岩资源潜力评估. 中国煤炭地质，28(11)：43～48.

廖志杰，尹正武，贾希义，吕维新. 1997. 腾冲热海地热田的概念模型. 高校地质学报，3(2)：212～221.

林乐夫，孙占学，王安东，刘金辉，万建军，李小聪，罗贤文. 2017. 南岭地区与东南沿海地区中生代花岗岩放射性地球化学特征及岩石圈热结构对比研究. 岩石矿物学杂志，36(4)：488～500.

蔺文静，陈向阳，甘浩男，岳高凡. 2020. 东南沿海厦门湾-漳州盆地地热地质特征及干热岩勘查方向. 地质学报，94(7)：2066～2077.

蔺文静，甘浩男，王贵玲，马峰. 2016. 我国东南沿海干热岩赋存前景及与靶区选址研究. 地质学报，90(8)：2043～2057.

蔺文静，刘志明，马峰，王贵玲. 2012. 我国陆区干热岩资源潜力估算. 地球学报，33(5)：807～811.

蔺文静，王凤元，甘浩男，等. 2015. 福建漳州干热岩资源选址与开发前景分析. 科技导报，33(19)：28～34.

刘辉，洪汉净，冉洪流，沈繁銮，赵波，陈会仙. 2008. 琼北火山群形成的动力学机制及地震现象的新认识. 地球物理学报，51(6)：1804～1809.

毛小平，汪新伟，李克文，郭少斌. 2018b. 地热田热量来源及形成主控因素. 地球科学，43(11)：4256～4266.

毛小平. 2018a. 地热田高地温异常成因机理及温度分布特征. 地球学报，39(2)：216～224.

庞忠和. 1987. 漳州盆地地热系统-成因模式、热能潜力与热水分布规律的研究. 中国科学院地质与地球物理研究所，博士学位论文.

齐晓飞，上官拴通，张国斌，潘苗苗，苏野，田兰兰，李翔，乔永超，张建永. 2020. 河北省乐亭县马头营区干热岩资源孔位选址及开发前景分析. 地学前缘，27(1)：94～102.

秦祥熙，张萌，叶佳，刘红梅，王贵玲，石建省. 2019. 河北沧县台拱带中、低温地热资源 ORC 发电与综合梯级利用. 地球学报，40(2)：307～313.

邱楠生. 1998. 中国大陆沉积盆地地热状况剖面. 地球科学进展，13(5):447～451.

谭现锋，刘肖，王贵玲，王浩. 2020. 利津干热岩型地热资源调查评价关键技术研究. 地质学报，94(7)：2166～2176.

谭现锋，王浩，康凤新. 2016. 利津陈庄干热岩 GRY1 孔压裂试验研究. 探矿工程(岩土钻掘工程)，43(10)：230～233.

谭现锋，王浩. 2015. 山东省陈庄潜凸起地区地温场特征与泰山岩群放射性元素. 科技导报，33(19)：58～61.

陶士振，刘德良. 2000. 郯庐断裂带及邻区地热场特征、温泉形成因素及气体组成. 天然气工业，20(6):42～47.

田立强，范士彦. 2016. 文登地区浅部干热岩地热资源的赋存条件分析. 山东国土资源，32(8)：27～30.

王贵玲，蔺文静. 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式. 地质学报，94(7)：1923～1937.

王贵玲，张薇，蔺文静，刘峰，朱喜，刘彦广，李郡. 2017. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究. 中国地质，44(6)：1074

～1085.
王君珂，朱喜，刘彦广，张庆莲，牛飞，马峰. 2020. 献县地热田地温场特征及控热因素研究. 能源与环保，42(1)：113～120.
王立东，王浩，张明德，于溪. 2016. 利津县陈庄地区干热岩地热资源存在可能性分析. 山东国土资源，32(1)：33～36.
熊亮萍，高维安. 1982. 隆起与拗陷地区地温场的特点. 地球物理学报，25(5)：60～68.
熊亮萍，张菊明. 1988. 华北平原区地温梯度与基底构造形态的关系. 地球物理学报，32(2)：146～155.
熊绍柏，金东敏，孙克忠，邹以生，樊叙邦，杜小刚. 1991. 福建漳州地热田及其邻近地区的地壳深部构造特征. 地球物理学报，34(1)：55～63.
胥颐，汪晟，张丽莉，杨晓涛. 2015. 腾冲火山区深部构造研究及其与岩浆活动的关系. 地球物理学进展，30(3)：1034～1038.
许天福，胡子旭，李胜涛，姜振蛟，侯兆云，李凤昱，梁旭，冯波. 2018. 增强型地热系统：国际研究进展与我国研究现状. 地质学报，92(9)：1936～1947.
严维德. 2015. 共和盆地干热岩特征及利用前景. 科技导报，33(19)：54～57.
杨立中，刘金辉，孙占学，王安东，万建军，周毅. 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，(3)：123～127＋133.
张保建，李燕燕，高俊，王贵玲，李郡，邢一飞，赵甜. 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.
张培震，邓起东，张国民，马瑾，甘卫军，闵伟，毛凤英，王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学(D辑)，33(z1)：12～20.
张森琦，贾小丰，张杨，李胜涛，李志伟，田蒲源，明圆圆，张超. 2017. 黑龙江省五大连池尾山地区火山岩浆囊探测与干热岩地热地质条件分析. 地质学报，91(7)：1506～1521.
张森琦，吴海东，张杨，宋健，张林友，许伟林，黎敦朋，李胜涛，贾小丰，付雷，李旭峰，冯庆达. 2020. 青海省贵德县热水泉干热岩体地质-地热地质特征. 地质学报，94(5)：1591～1605.
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. 中国地质，45(6)：1087～1102.
张盛生，张磊，田成成，蔡敬寿，唐保春. 2019. 青海共和盆地干热岩赋存地质特征及开发潜力. 地质力学学报，25(4)：501～508.
张志强，詹文欢，汤民强，周普志，王伟平. 2013. 北部湾盆地晚中新世以来沉降过程. 海洋地质与第四纪地质，33(3)：9～13.
赵平，金建，张海政，多吉，梁廷立. 1998. 西藏羊八井地热田热水的化学组成. 地质科学，33(1)：61～72.
赵平. 1995. 中国东南地区岩石生热率分布特征. 岩石学报，11(3)：292～305.
赵迎冬，甘华军，时阳，陈善斌，王观宏. 2016. 北部湾盆地福山凹陷异常地温特征及其对油气藏的影响. 油气地质采收率，23(3)：40～46.

Distribution and exploration of hot dry rock resources in China: progress and inspiration

LIN Wenjing[1,2,3)], WANG Guiling[*2,3)], SHAO Jingli[1)], GAN Haonan[2,3)], TAN Xianfeng[4)]

1) *School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*;
2) *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei* 050061, *China*;
3) *Technology Inovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploitation and Development, MNR, Shijiazhuang, Hebei* 050061, *China*; 4) *Shandong Provincical Lunan Geo-engineering Exploration institutes (The Second Geological Brigade of Shandong Geological Exploration Bureau), Jining, Shandong* 272100, *China*

* *Corresponding author: guilingw@163.com*

Abstract

Hot dry rock is one of the important forms of geothermal resources, and it is also the main direction of future geothermal development. In recent years, the exploration of hot dry rock resources in China has made rapid progress. High-quality hot dry rock resources have been discovered in different regions and breakthroughs have been made in the exploration of hot dry rock resources. However, there have also been some cases of failure in exploration. This article briefly discusses the four types of hot dry rock genetic models, including high-radioactive heat-producing type, sedimentary basin type, modern volcanic type, and intense tectonic activity belt type, and combined with China's geological tectonic background, geothermal geological conditions and other factors, the key prospecting directions and target areas of hot dry rock resources in China in the future are analyzed. In addition, hot dry rock resource exploration projects in different types of areas have been sorted out, and the site selection basis, exploration process, deep temperature distribution characteristics, and prospect predictions of different exploration projects have been briefly analyzed. Finally, a preliminary experience summary is made, hope which to serve as a reference and warning to the future exploration and development of hot dry rock resources in China.

Key words: Hot dry rock; genetic models; exploration directions and target areas; current exploration work and progress