https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.351



中国陆区干热岩勘探靶区优选: 来自国内外干热岩系统成因机制的启示

饶 松^{1,2},黄顺德^{1,2},胡圣标^{3*},高 腾^{1,2}

1. 长江大学地球科学学院,湖北武汉 430100

2. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室,湖北武汉 430100

3. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室,北京 100029

摘 要: 干热岩是指地下高温但由于低孔隙度和渗透率而缺少流体的岩石(体),储存于干热岩中的热量需要通过人工压裂 形成增强地热系统(EGS)才能得以开采,赋存于干热岩中在当前技术经济条件下可以开采的地热能被称为干热岩型地热 资源,它是人类未来的重要替代新能源之一.干热岩的研究始于20世纪70年代,经过近50年的不断发展,干热岩在理论和 实践两方面都有了长足发展,美国、日本、法国、德国、澳大利亚等发达国家相继投入巨资进行干热岩勘查、评价和开发实 验,并且初步形成了商业开发的成功范例.实践表明,干热岩地热资源是深层地热能的一部分,往往与高温水热系统共热源 且存在共生关系,但其地质条件复杂,开采难度较大,应倡导"深层地热能"和"广义EGS"概念,即按照EGS技术着眼深层 水热型和干热岩型地热能整体开发.为了克服诱发地震等环境安全问题,干热岩压裂造储技术研发方向正在从"刚性造储" 向"柔性造储"发展.近几年来,我国分别在青海、西藏、四川、福建、广东、湖南、黑龙江、海南等高热流区域进行了干热岩地 质勘查,并在青海共和、山东利津、广东惠州、四川康定、冀东马头营和琼北等地相继开展了干热岩初步钻探,但仅在青海共 和的干热岩勘探与开发实验中取得突破.综合考虑全球高温地热带分布和中国陆区板块构造背景、现今大地热流分布格 局、岩石圈热结构、Moho面深度及壳内热源、新生代火山活动、温泉分布、深大断裂分布与活动性,以及现有干热岩勘查结 果,认为当前中国陆区最具前景的干热岩勘探靶区为东北新生代火山活动区、海南岛及雷州半岛和滇藏川地区——青藏高 原东构造结.此外,高热背景条件下的中厚层碳酸盐岩应作为深层地热能开采的重点目标储层.

关键词:干热岩;增强地热系统;成因机制;地热能;中国陆区.

中图分类号: P314 **文章编号:** 1000-2383(2023)03-857-21 **收稿日期:** 2022-04-24

Exploration Target Selection of Hot Dry Rock in Chinese Continent: Enlightenment from Genesis Mechanism of Global Hot Dry Rock System

Rao Song^{1,2}, Huang Shunde^{1,2}, Hu Shengbiao^{3*}, Gao Teng^{1,2}

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China

作者简介:饶松(1985—),男,教授,博士,主要从事地热地质学与油气地质学的教学和科研工作.ORCID:0000-0001-5991-9730.E-mail: raosong08@163.com

* 通讯作者:胡圣标, E-mail: sbhu@mails. iggcas. ac. cn

Citation: Rao Song, Huang Shunde, Hu Shengbiao, Gao Teng, 2023. Exploration Target Selection of Hot Dry Rock in Chinese Continent: Enlightenment from Genesis Mechanism of Global Hot Dry Rock System. *Earth Science*, 48(3):857-877.

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.41877210,42074096);油气资源与勘探技术教育部重点实验室青年创新团队项目(No.PI2018-04);中国 石化深部地质与资源重点实验室开放基金课题.

引用格式: 饶松,黄顺德,胡圣标,高腾,2023.中国陆区干热岩勘探靶区优选:来自国内外干热岩系统成因机制的启示.地球科学,48(3):857-877.

3. State Kay Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: Hot dry rock (HDR) is defined by the rock underground with high temperature but lack of fluid due to low porosity and permeability. The heat stored in HDR needs to be artificially fractured to form an enhanced geothermal system (EGS) to be exploited. The geothermal energy that can be exploited in HDR under the current technical and economic conditions is called HDR geothermal resources, which is regarded as one of the important alternative new energy sources for human beings in the future. The research on HDR began in the 1970s. After nearly 50 years of continuous development, great progress in both theory and practice has been made. Developed countries such as the United States, Japan, France, Germany, and Australia have successively invested heavily in HDR exploration, evaluation and development experiments. Moreover, some successful commercial development examples of HDR have been set up. The practices show that HDR geothermal resources are a part of deep geothermal energy, which means they often co-heat and are symbiotic with high temperature hydrothermal system. However, it is more difficult to exploit HDR than the hydrothermal system due to more complex geological conditions. Therefore, "deep geothermal energy" and "generalized EGS" concept should be advocated. According to EGS technology, we should focus on the overall development of deep hydrothermal and HDR geothermal energy. Moreover, it is developing from "rigid reservoir stimulation" to "soft reservoir stimulation" in order to overcome the environmental safety problems such as induced earthquakes. In recent years, China has carried out geological exploration on HDR in Qinghai, Tibet, Sichuan, Fujian, Guangdong, Hunan, Heilongjiang, Hainan and other areas with high heat flow. And then, preliminary drillings of HDR in Gonghe, Lijin, Huizhou, Kangding, Matouyin and northern Hainan have been implemented. Unfortunately, the breakthrough has only been made in the exploration and development experiments of HDR in Gonghe basin. Considering the distribution of global high-temperature geothermal zones, plate tectonic setting in Chinese continent, the current distribution pattern of terrestrial heat flow, lithospheric thermal structure, Moho depth and heat source in crust, Cenozoic volcanic activity, the distribution of hot springs, the distribution and active faults, and the existing HDR exploration results, the most promising HDR exploration target areas in Chinese continent are delineated, which include the Cenozoic volcanic activity area in Northeast China, Hainan Island-Leizhou Peninsula and the Yunnan-Tibet-Sichuan area (eastern Tibetan Plateau tectonic junction). In addition, medium and thick carbonate rocks with high thermal background should be the key target for deep geothermal energy exploitation.

Key words: hot dry rock; enhanced geothermal system; genesis mechanism; geothermal energy; Chinese continent.

地热资源是一种极具竞争力的清洁、可再生 能源,具有资源量大、能源利用效率高、成本低、节 能减排效果好等诸多优点.在当前形势下,大规模 开发利用地热能是贯彻落实习近平总书记国家能 源安全战略,应对全球气候变化和节能减排,助力 实现"2030碳达峰,2060碳中和"目标的具体举措 (汪集旸,2016).近年来,在政府一系列政策的推 动鼓励下,我国正迎来地热能开发利用的新热潮 (庞忠和等,2017;郑克棪和陈梓慧,2017).

按照分布位置和赋存状态,地热资源可以分为 4大类:浅层地热资源、水热型地热资源、干热岩型 地热资源和岩浆型地热资源.其中,干热岩(hot dry rock,简称 HDR)是指地下高温但由于低孔隙度和 渗透率而缺少流体的岩石(体),储存于干热岩中的 热量需要通过人工压裂形成增强地热系统(enhanced geothermal system,简称 EGS)才能得以开 采,赋存于干热岩中可以开采的地热能被称之为干 热岩型地热资源.基于商业开发目的,各国对干热 岩的定义并不完全相同:美国科学家根据 Fenton Hill干热岩研究工作认为干热岩是埋藏于距地面 2~3 km 以下、无裂隙、无流体、自然温度达到 200 ℃ 的岩体;日本科学家根据Hijiori干热岩研究工作认 为只要岩体的温度达到200℃,埋藏深度合理,内含 流体不是太多(或者没有),能用干热岩技术来提取 岩体中的热量,就把这种岩体称为干热岩;欧洲一 些科学家根据法国 Soultz 干热岩研究认为,埋藏于 地面1km以下,温度大于150℃的岩体都可称为干 热岩,条件无需过于严格;我国国家能源局于2018 年发布了干热岩概念,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 下可以被利用的岩体(国家能源局, 2018). 据初 步测算,干热岩的蕴藏量十分丰富,仅地球内部 3~10 km 深处蕴藏的干热岩的热量,相当于全部 煤炭、石油、天然气蕴藏能量的30倍(陆川和王贵

玲,2015).中国陆区 3~10 km 深度内干热岩所蕴藏 的地热能总量的 2%,即可采资源量高达 4.2×10⁵ EJ,折合标准煤 1.43×10¹³ t,相当于 2010 年我国 能源消耗总量的 4 400 倍(汪集旸等,2012).

干热岩地热资源因储量巨大,而被视为人类 未来的重要替代新能源之一,受到了世界各国的 高度重视.干热岩的研究始于20世纪70年代,经 讨近50年的不断发展,干热岩在理论和实践两方 面都有了长足发展.2006年,美国麻省理工学院联 合美国国家实验室18位专家,历时两年,完成了 科技发展战略报告——"地热能的未来:增强地热 系统对21世纪美国的影响",该报告首次对美国 本土干热岩地热资源量和干热岩开采技术做出了 系统评价.近年来,美国、英国、日本、瑞典、澳大 利亚等发达国家相继投入巨资开展地质调查、钻 探实验以及规模较大的干热岩生产实验研究,并 且初步形成了商业开发的成功范例,为干热岩地 热利用技术的发展提供了非常珍贵的经验资 料.2015年,美国启动了地热能前沿观测研究计 划 (Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy,简称FORGE),旨在建设大规模、经 济可持续和商业化的EGS技术,形成可降低工业 开发风险和促进EGS商业化的严谨、可复制的 方法,计划由3个阶段构成,经费不设上限,号称 干热岩的"阿波罗"计划(Moore et al., 2019).

我国干热岩的勘查和研究起步相对较晚.2014 年以来,我国国土资源系统分别在青海、西藏、四 川、福建、广东、湖南、黑龙江、海南等高热流区域进 行了干热岩资源地质勘查,并在青海共和-贵德、山 东利津、广东惠州、四川康定、冀东马头营、琼北等 地相继开展了干热岩初步钻探,但仅在青海共和-贵德的干热岩勘探与开发实验中取得重要突破.在 干热岩形成机理方面,李德威和王焰新(2015)等提 出将地球系统动力学的思想贯穿到干热岩及其关 联的资源、灾害、环境、工程地质的调查研究与应用 的各个环节之中,并建议在华北、青藏高原及其邻 区、东南沿海、台湾地区这4种不同类型的热构造 活动区进行联合勘查、综合评价与系统开发.甘浩 男等(2015)将中国干热岩资源的赋存类型分为高 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,提出了包括东南沿海、渭河盆地、长白 山、五大连池和青藏高原在内的干热岩资源赋存有 利前景区.许天福等(2018)通过对2013-2016年来 国外典型EGS场地研究动态的信息收集和整理,阐 述了国际上开发活动较活跃的EGS 场地所取得的 经验和教训,并分析了国内几个干热岩资源开发的 远景地区,如青海贵德-共和盆地、福建漳州断陷盆 地、松辽盆地、川西和山东利津县等.毛翔等(2019) 总结了国际干热岩开发项目的板块构造位置,其主 要分布在欧亚板块板内地热域、印澳板块板内地热 域、东太平洋离散-汇聚板缘型地热域、西太平洋汇 聚板缘型地热域和加勒比海火山活动岛弧区.庞忠 和等(2020)倡导"柔性造储"和"广义EGS"理念, 强调储层属性和地球物理场的整合,并利用专家 建议,发挥模糊数学综合评估作用,评估了中国陆 区9个区域深层地热能开发的难易程度. 蔺文静 等(2021)梳理了我国已开展的干热岩资源勘探工 程,总结归纳了不同类型区勘查重点.刘德民等 (2022)总结了干热岩勘查评价指标,包括岩石圈 厚度和莫霍面埋深、居里等温面、地温梯度、大 地热流、新构造运动以及高温温泉与气田等.

本文系统梳理了国内外代表性的干热岩项 目,总结了干热岩成因模式.综合考虑全球高温地 热带分布和中国陆区板块构造背景、现今大地热 流分布格局、岩石圈热结构、Moho面深度及壳内 热源、新生代火山活动、温泉分布、深大断裂分布 与活动性,以及现有干热岩钻探结果,圈定了当前 中国陆区最具潜力的干热岩勘探靶区.

1 全球大地热流及干热岩试验场 地分布

大地热流是地温场的综合性热参数,能够准确地反映区域内的地温场特征,因此是干热岩勘查的最重要指标之一.大地热流值较大(\geq 75 mW/m²)就指示地球深部有存在高温岩石(体)的可能,如美国Fenton Hill 干热岩试验场大地热流超过 200 mW/m²;美国 Geysers 干热岩试验场大地热流为 168 mW/m²;美国 Soultz 干热岩试验场大地热流为 80±10 mW/m²;美国犹他州 Milford 干热岩试验场大地热流为 120±20 mW/m².

截至 2021 年,国际热流委员会 (International Commission of Heat Flow,简称 IHFC)发布最新汇 编的大地热流测量数据,全球共有 74 458 项数据 点,其中陆地数据点为 40 870 项、海洋数据点为 33 678 项.统计结果表明大陆和海洋地区的平均热 流分别为 67 mW/m²、92 mW/m² (Lucazeau, 2019).



图1所示为全球热流分布图,从图中可以清晰识别 出全球4大地热异常带,即环太平洋地热异常带、地 中海-喜马拉雅地热异常带、大西洋中脊地热异常 带和红海-亚丁湾-东非裂谷地热异常带,这与全球 活动板块边界位置吻合.在这些地热异常带内,大 地热流值普遍大于100 mW/m²,以火山、熔融体为 主要热源,高温地热资源丰富,地表水热活动强烈, 温泉温度普遍高于当地水的沸点,成为"沸泉".

截至目前,全球已经进行了约42项干热岩试验 项目,其中24个属于传统意义的干热岩开发项目, 18个属于EGS开发项目.图2为全球地热异常区及 国际干热岩试验场地分布.从地域上看,国际干热 岩开发项目绝大多数分布于欧洲,共计23个,主要 分布在阿尔卑斯褶皱带的上莱茵地堑、磨拉石盆地 等;其次为北美及加勒比地区,共计12个,主要分布





在科迪勒拉造山带.从全球地热域上看,这些实验场地主要分布在欧亚板块板内地热域(如法国 Soultz项目)、印澳板块板内地热域(如澳大利亚 Habanero项目)、东太平洋离散-汇聚板缘型 地热域(如美国 Fenton Hill项目)、西太平洋汇聚 板缘型地热域(如日本 Hijiori项目)和加勒比海 火山活动岛弧区(如法国 Bouillante项目).此外, 干热岩开发项目所处的大地构造环境包括了克 拉通盆地、前陆盆地、裂谷盆地、弧前盆地、弧后 盆地、近现代火山(火山带)和褶皱带地区.有意 思的是,除了北美、欧洲中北部、加勒比海、日本 地区处于传统认为地热资源丰富的环太平洋火 山地震带之外,欧洲南部近阿尔卑斯山区域、 亚洲和澳大利亚的干热岩开发项目均不处于传 统认为的地热资源丰富区(毛翔等,2019).

表1统计了国内外代表性干热岩项目地质特征.全球干热岩项目探井井深500~5000m, 热储岩性主要为火成岩和沉积岩,火成岩以花 岗岩为主;压裂方法以水力压裂为主,化学压 裂为辅,爆破压裂正悄然行进.为了克服诱发 地震等环境安全问题,国际干热岩技术研发方 向正在从"刚性造储"向"柔性造储"发展,即采 用灵活的压裂和化学等造储技术和工艺,避免 纯粹靠提高压力来造储(庞忠和等,2020).

表1	国内外代表性干热岩项目地质特征

		Table 1 (Geologi	cal character	stics of represe	ntative HDR project	ts at home and	l abroad	
国家	序号	项目名	类型	压裂方式	开发年代	所处构造带	储层岩性	钻井深度(m)	热储 温度 (℃)
奥地利	1	Altheim	EGS	水力、 化学压裂	1989至今	阿尔卑斯褶皱带	碳酸盐岩	2 165~2 306	105
	2	Paralana	干热 岩	水力压裂	2005-2014	南澳克拉通内的元 古宙盆地	花岗岩	1 807~4 003	170
澳大利亚	3	Hunter valley	干热 岩		1999-2015	悉尼盆地	花岗岩	1 946	275
	4	Habanero	干热 岩	水力压裂	2003-2013	库柏盆地	花岗岩	3 700~4 459	242~ 278
	5	Bruchsal	EGS		1983至今	上莱茵地堑	砂岩	1 930~2 540	120~ 130
	6	Neustadt- Glewe	EGS		1984至今	德国盆地	砂岩	2 320	99
	7	Groβ-Schne- beck	干热 岩	水力压裂	2000至今	德国盆地	砂岩、 安山岩	4 309~4 400	145
	8	Unterhaching	EGS	化学压裂	2004至今	磨拉石盆地	碳酸盐岩	3 350~3 380	123
德国	9	Insheim	EGS		2007至今	上莱茵地堑	砂岩、 花岗岩	3 600~3 800	165
	10	Genesys Han- nover	干热 岩	水力压裂	2009年至今	德国盆地	砂岩	3 900	150~ 160
	11	Mauerstetten	干热 岩	水力、 化学压裂	2011-2012, 2015重启	磨拉石盆地	碳酸盐岩、 花岗岩	4 055	130
	12	Landau	EGS		2003-2013	上莱茵地堑	砂岩、 花岗岩	3 170~3 300	159
	13	Falkenberg	干热 岩	水力压裂	1977-1986	磨拉石盆地	花岗岩	500	-

续表1									
国家	序号	项目名	类型	压裂方式	开发年代	所处构造带	储层岩性	钻井深度(m)	热储 温度 (℃)
	14	Bad Urach	干热 岩		1977-2008	华力西褶皱带	变质岩	4 300~4 445	170
法德合作	15	GEOSTRAS	干热 岩		2012至今 (计划)	上莱茵地堑	花岗岩	-	> 150
	16	Soultz-sous- Forêts	干热 岩	水力、化学压 裂	1984至今	上莱茵地堑	花岗岩	3 600~5 000	165
法国	17	Rittershoffen	EGS		2011年至今	上莱茵地堑	花岗岩	~2 500	163
	18	Le Mayet	干热 岩		1978-1986	华力西褶皱带	花岗岩	200~800	-
法国西印度 群岛	19	Bouillante	EGS	爆破压裂	1996至今	Lesser Antilles 火 山岛弧带	火山岩	1 000~1 500	250~ 260
韩国	20	Pohang	干热 岩	水力压裂	2010-2017	Pohang 盆地	花岗岩	~4 340	约 180
	21	Raft river	EGS		2009至今	内华达盆地	变质岩	$1\ 500{\sim}2\ 000$	150
	22	Northwest Geysers	EGS	爆破压裂	2009至今	萨克拉门托盆地	变质岩	3 058~3 396	~400
	23	Newberry Volcano	干热 岩	水力压裂	2010至今	内华达盆地	火山岩	3 066	315
	24	Milford	EGS		2015至今	内华达盆地	花岗岩	2 133.6~3 854.0	175~ 230
美国	25	Fenton Hill	干热 岩	水力压裂	1974-1992	圣胡安盆地	结晶岩	2 932~4 390	$200 \sim$ 327
	26	Coso	干热 岩	水力、化学、爆 破压裂	2002-2012	内华达盆地	花岗岩	2 430~1 956	300
	27	Bradys	EGS		2008-2015	内华达盆地	火山岩	1 320	200
	28	Desert Peak	EGS		2012-2013	内华达盆地	流纹岩	1 000	210
	29	Southeast Geysers	EGS		2008-2009	萨克拉门托盆地	杂砂岩	3 660	-
墨西哥-欧 洲合作	30	GEMex(Ac- oculco)	EGS		2016至今 (计划)	跨墨西哥火山带	花岗岩	2 000	> 300
	31	Hijiori	干热 岩	水力压裂	1985-2002	环太平洋火山带	花岗岩	1 788~2 300	270
日平	32	Ogachi	干热 岩	水力压裂	1989-2002	环太平洋火山带	花岗岩	400~1 100	60~ 228
瑞典	33	Fj¨allbacka	干热 岩	水力、化学压 裂	1984-1995	加里东褶皱带	花岗岩	70~500	_
	34	Basel	干热 岩		2005-2009	上莱茵地堑	花岗岩	2 700~5 003	预计 200
墒士	35	St.Gallen	EGS	水力、化学压 裂	2009-2014	磨拉石盆地	沉积岩	4 450	130~ 150
萨尔瓦多	36	Berlín	EGS	水力、化学压 裂	2001至今	太平洋海岸平原盆 地	火山岩	2 000~2 380	183
匈牙利	37	Szeged	干热 岩		2016至今 (计划)	潘诺盆地	花岗岩	3 000~3 500	175
意大利	38	Lardarello	EGS	水力、热压裂	20世纪70年 代至今	北亚平宁盆地	变质岩	2 500~4 000	$300\sim$ 350

续表1									
									热储
国家	序号	项目名	类型	压裂方式	开发年代	所处构造带	储层岩性	钻井深度(m)	温度
									(°C)
	30	Redruth	干热		2000 五人	华力西褶皱带	花岗岩	2 500~5 275	100
—————————————————————————————————————	55		岩		2009主7				150
	40	P.I.	干热		2010至今	华力西褶皱带	花岗岩	4 000	$180\sim$
	40	Eden	岩		(计划)				190
	41	Rosemanowes	干热	北土口刻	1004 1009	华力西褶皱带	花岗岩	2 600	$79\sim$
	41		岩	小刀压袋	1984-1992				100
中国	4.9	-++T.rt	干热		9011 云 人	十和分山	花岗岩	2 927.2~3 705.0	$150\sim$
	42	共相	岩		2011 主今	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			236

注:参考 Breede et al. (2013)、Olasolo et al. (2016)、Lu (2018)、张森琦等(2019)、Parisio and Yoshioka (2020)、Park et al. (2020)、Gan et al. (2021).

2 国际代表性干热岩项目实例

2.1 美国 Fenton Hill 干热岩项目

美国 Fenton Hill 项目是国际上实施的第 一个干热岩实验项目,于1970年提出实施方 案,1973年开展 EGS 实验,2000年被迫中止, 对该区干热岩的地质特征、储层激发、发电 实验等方面均开展了系统研究.

Fenton Hill项目位于新墨西哥州北部 Valles Caldera火山西侧,处于北美板块中元古代北美增生 型造山带内,如图 3 所示.由于拆离伸展作用,造山 带内高原塌陷形成一系列伸展裂谷盆地,与南北向 山系组成盆岭省.距今约 16~17 Ma,黄石地幔柱开 始活动,盆岭省发生显著的伸展作用,地壳强烈沉 降,岩浆活动强烈,Fenton Hill最近一次火山喷发距 今仅 1.25 Ma(Spell and Kyle, 1989).地球物理探 测结果表明,Fenton Hill火山深部 5~15 km存在一 个长约 10~14 km的低速带,呈近椭圆状展布,推 测深部存在岩浆囊(Steck *et al.*, 1998).Fenton Hill 试验区出露大量的喷气孔及温泉,与贯穿火山口的 断裂展布相一致,证实了该地区浅部高温水热型地 热系统与深部干热岩地热系统存在共生关系.

Fenton Hill试验场地具有异常高的地温梯度和 大地热流,地温梯度达65 ℃/km,热流值大于 200 mW/m²(Sass and Morgan, 1988).Fenton Hill 项目先后开发了两套热储,第一套储层深度为 2800~2950 m,储层温度在180~200 ℃之间,岩 性为花岗闪长岩;第二套储层深度约为3500 m, 温度为240 ℃,岩性为片岩及花岗闪长岩.

Fenton Hill项目共分两个阶段进行.第一阶段: 1974年第一井钻至2042m,水力压裂后又加深至

2 932 m,获得 180 ℃井底温度;第二井在 3 064 m获 200 ℃井底温度;1977 年从第一井的开斜井与第二 井做连通试验,两井相距 100 m,试验了 417 d,获得 35 MWt 热能,进行了 60 kWe 双工质发电试验.第 二阶段:1978 年后又钻了两井,进行了压裂试验并 钻开斜井,4 390 m井底温度 327 ℃,1986 年循环试 验 30 d,注水总量 3.7×10⁴ m³,注水流量 10.6~ 18.5 kg/s,压力 26.9~30.3 MPa,产出温度 192 ℃, 回收 66%.Fenton Hill项目试验持续至 2000 年,因 塌孔、开斜钻井和设备损坏等被迫停止.Fenton Hill项目的最大成果在于它验证了在渗透率很低 的干热岩中通过人工压裂的方法可以实现储层改 造,使用循环流体提取地热能的概念是可行的,为 地热能的开采开创了新方向(Brown *et al.*, 2012).

Fenton Hill项目是近代火山型干热岩地热系统的典型代表.5~10 km 深度部分熔融的岩浆房是该地热系统的壳内异常热源(Steck *et al.*, 1998; Aprea *et al.*, 2002).热储层以花岗闪长岩为主,热导率高、放射性生热率大,一方面将下伏岩浆房热量快速向浅部传导,另一方面高的放射性生热起到了附加热源的作用.盖层以凝灰岩或火山碎屑岩沉积为主,热导率低,覆盖于花岗岩体之上,起到了很好的保温隔热作用(Sass and Morgan, 1988).

2.2 美国 Geysers 干热岩项目

Geysers 干热岩试验场地位于美国旧金山北部, 从 1960年开发以来,该项目装机容量从 12 MW发 展到 2 043 MW,是目前世界上仍在运行的较大的 地热发电站(Garcia *et al.*, 2016).该地区东北及西 南方向为两条互相平行的走滑断层,即 Collayomi 断裂和 Mercuryville 断裂,加州地区最年轻的火山, 即 Clear Lake火山,分布在该区东北部,如图 4 所示.



图 3 Fenton Hill 干热岩试验场地质背景(a)、测温曲线(b) Fig.3 Geological background of Fenton Hill HDR test site (a), temperature measurement curve (b) 据 Kelkar *et al.* (2016)

由于 Clear Lake 火山多期次的喷发及侵入活动, 火山岩在该地区广泛分布.Geysers 项目地处环 太平洋地热异常带,其大地热流值可达 168 mW/m²(Walters and Combs, 1989).重力及 大地电磁探测资料表明,Geysers 干热岩实验场 地深部存在局部熔融体(Peacock *et al.*, 2020).

Geysers 地热田具备地温梯度大、热储温度高 且埋深浅的特点.该项目揭示了两套地热储层,即 浅层常温热储(~230℃)和深层高温热储(230~ 400℃)(Rutqvist *et al.*, 2015).其中浅层常温热储 位于2.5 km以浅的深度区域,主要由杂岩组成,受 两条平行断裂带的影响,热储裂隙和断裂发育,水 热活动强烈,形成了浅层的高温水热型地热系统. 深层高温储层位于2.5 km以深的区域,岩性为变 质杂砂岩和夹层泥质岩,渗透率低,温度高,当深 部为3 km时,温度可达400℃,是典型的干热岩型 地热系统(Garcia *et al.*, 2016),如图4所示.

Geysers 干热岩项目最典型的特征是深部干 热岩型地热系统与浅部水热型地热系统同源共 生,证实了在现有水热系统深部或者外围进行干 热岩地热开发的可行性.新生代侵入的局部熔融 体是浅部水热地热系统和深部干热岩地热系统的 共同主要热源(Oppenheimer and Herkenhoff, 1981; Kennedy and Truesdell, 1996; Peacock *et al.*, 2020).Geysers地区两侧相互平行的走滑断裂 对该地区的地下水具有严格的控制作用,断裂带 之间,垂直裂隙发育,浅层常温热储中流体对流活 跃,形成了以断裂或裂隙为运输通道的水热型地 热系统.而深部常温热储,岩性为变质杂砂岩,渗 透率极低,形成了干热岩型地热系统.两套地热 系统的上部被页岩、硅质岩、绿片岩及蛇纹岩等 低渗透性岩石覆盖,起到了保温隔热作用.

2.3 法国 Soultz 干热岩项目

法国 Soultz 干热岩试验区处于欧洲上莱茵河地堑(The Upper Rhine Graben,简称 URG),该地区曾经是油田,并且在早期的石油勘探中证实了该地区存在地热异常.

URG是欧洲大陆典型的新生代裂谷盆地.受 区域断裂活动控制,上莱茵河地区在花岗岩基岩 之上,沉积了巨厚的沉积盖层,其中 Soultz 地区 沉积盖层厚约1400m,如图5所示.在拉张作用 下,地壳和岩石圈伸展、减薄,深部地幔热量传导 加热地壳,该地区平均基底热流密度高达80± 10mW/m²,地下水循环进一步促进了浅部热量 的再分配,使局部地区大地热流值较基底热流值 提高50%以上,如Soultz地区现今平均大地热流 值高达127mW/m²(Harlé *et al.*, 2019).地球物理 探测结果表明,URG地区的地壳较邻区剧烈减 薄,地壳厚度约24~27km,减薄幅度达10~15km (Buchmann and Connolly, 2007),如图5所示.

Soultz项目始于1987年的欧盟科研开发项目,通 过一步一步地扎实推进和发展,在2013年实现了利用 干热岩技术路线稳定发电.现有地热井4口,井深分别 为3590m、4950m、5903m和5105m,最高井底温





度约 200 ℃,其中 GPK-2钻井测温曲线如图 5 所示. Soultz 项目实施大致可以分为两个阶段.1987-2007 年为研究阶段,进行了钻井、压裂激发和循环 试验,在 20~25 kg/s 注入条件下产出流体温度 140 ℃,回收率接近 100%,地热产能接近 10 MWt. 2007 年以来为建厂和试验监测阶段,2009 年两灌两采,产出流体 35 L/s(3 024 m³/d),产出温 度 164 ℃.为减少诱发地震,2011 年改为两灌一采, 生产条件下产出流体 24 L/s(2 074 m³/d),产出温 度 159 ℃.安装的 1.5 MWe 的双工质有机朗肯循环 (organic rankine cycle,简称ORC)发电机组,2011年 实现了发电,项目最终完成后ORC装机容量将达到 6 MWe. Soultz项目是法国第一个EGS的ORC发 电示范项目,也是世界上第一个EGS兆瓦级发 电项目.Soultz项目证明了EGS发电的可行性, 大大增强了欧洲开发深部干热岩资源的信心.

Soultz项目是沉积盆地型(板内裂谷盆地)EGS 的典型实例.在区域拉张作用下,地壳和岩石圈伸 展、减薄,深部地幔热量传导加热地壳.区域深大断 裂是良好的构造-热通道,深部热流体沿断裂上涌,



图 5 Soultz 地区地质剖面(a), URG 地区莫霍面深度(b), GPK-2测温曲线(c)

Fig.5 Geological section of Soultz area (a), depth contour map of Moho surface in URG (b), GPK-2 temperature measurement curve (c)

据 Buchmann and Connolly (2007)、Genter et al. (2010)、Vidal et al. (2018)

进一步促进了深部热量向浅部的传递,其结果 呈现了异常高背景的热流值.沉积盆地内断裂 为地热水运移提供通道,地热水由地堑肩部向 中部流动,在裂谷中心汇合,促进了浅部热量的 再分配.Soultz地区表现为典型的"热幔冷壳"型 热结构,地幔热源是该类地热系统的主要热源. 上覆厚度适当的沉积层,岩性以砂泥岩为主,具 有较好的隔热保温作用.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,阻止 了热量的散失(Aichholzer *et al.*, 2016).

2.4 澳大利亚 Habanero 干热岩项目

Habanero EGS 试验项目位于澳大利亚中东 部的 Cooper 盆地.Cooper 盆地是一个典型的板内 克拉通盆地,为北东走向,横跨南澳大利亚州的 东北部与昆士兰州西南部,面积约1.3×10⁵ km², 是澳大利亚天然气主要生产地,如图6所示.

与Fenton Hill、Geysers和Soultz等EGS项目场 地具有丰富的地表热显示不同,Habanero项目场地 无明显地热显示,其地热异常是经由先期的石油钻 探发现的.地球物理探测显示该区域存在较大范围 的低重力异常区,推测该地区存在大面积花岗岩



图 6 澳大利亚大地热流(a), 5 km 深度温度分布(b)及 H-01 井测温曲线(c)

Fig.6 Terrestrial heat flow in Australia (a), temperature distribution map at 5 km depth (b); temperature measurement curve of H-01 (c)

据 Llanos et al. (2015)、Pollett et al. (2019)

体,同时放射性元素测试结果表明,Cooper盆地 花岗岩体的放射性生热率介于7.2~10.1 µW/m³, 是世界上花岗岩体平均放射性生热率的2~3倍, 属于异常高放射性产热花岗岩(Meixner *et al.*, 2014).图6展示了澳大利亚现今大地热流分布, 可见Cooper盆地表现为明显的区域地热异常,其 大地热流值在90~110 mW/m²之间,平均值大 于100 mW/m²(Beardsmore, 2004).澳大利亚大 陆地区温度分布显示Cooper盆地5 km 深度温 度普遍大于200 ℃,明显高于盆地周缘地区.

Habanero项目第一口地热井完工于 2003年,测 温资料表明,深度4 220 m处,温度高达 244 C,位于 上部沉积层盖层的地温梯度接近 60 C/km,下部花 岗岩层地温梯度约为 32 C/km (Llanos *et al.*, 2015; Ayling *et al.*, 2016).经两次水力压裂,在 4 136 m深度形成呈水平方向的主裂隙,覆盖面 积约 4 km².采用对井开采实验,注水流量达到 25 kg/s,生产井口温度 210 C,建成了 1 MWe 地 热电站.Habanero项目显示巨大连续整合的放射 性花岗岩体是非常有价值的干热岩开发靶区.

Habanero项目属于高放射性产热型地热系统.Cooper盆地是典型的板内克拉通盆地,构造活动不活跃,地表无明显地热显示,其热异常的主要来源是高放射性花岗岩的放射性生热,巨大的花岗岩体产生了大量热量,岩石圈热结构属于典型的"热壳冷幔"型(Beardsmore, 2004; Meixner *et al.*, 2014).高放射性花岗岩体之上覆盖了厚度约为3 500 m的热导率较低沉积层作为 Habanero 地热系统的盖层,能够提供优质的隔热以及保温作用(Ayling *et al.*, 2016).

3 中国代表性干热岩项目进展

2014年以来,国土资源系统分别在青海、西藏、 四川、福建、广东、湖南、黑龙江、海南等高热流区域 进行了干热岩资源地质勘查,并在青海共和-贵德、 山东利津、广东惠州、四川康定、琼北等地相继 开展了干热岩初步钻探,但仅在青海共和-贵 德干热岩勘探与开发实验中取得重要进展.

共和盆地位于青藏高原东北缘,是一个北西 西向展布、呈菱形的中-新生代断陷盆地,总面积 约2.12×10⁴ km². 在构造上,共和盆地属于西秦岭 造山带与东昆仑构造带的结合部,其北缘是北西 走向的宗务隆-青海南山断裂,为一条断面近直立 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,是一 条总体向北陡倾的岩石圈或超岩石圈断裂.盆地 内新生代沉积总体呈现"西厚东薄"的特征,西侧 厚度可达6000m,中东部恰卜恰地区厚度一般为 1500 m 左右, 东侧贵德地区一般为500~1500 m, 为第四系冲湖相和新近系上新统细粒沉积盖层, 具有很好的隔热保温作用,其下部为印支期壳熔 花岗岩(唐显春等, 2020).受新生代以来喜马拉 雅造山运动的影响,共和盆地新构造运动强烈, 地表热显示丰富,温泉温度最高可达96.6℃, 且多沿着深大断裂分布(Tang et al., 2022).

钻探结果证实,共和盆地恰卜恰地区2200m 深度岩体温度可达150℃,3000m深度岩体温度 达 180 ℃.DR3 和 DR4 钻孔完钻井深分别为 2 927.26 m 和 3 102.00 m, 对应的井底温度为 181.2 ℃、175.0 ℃. 2017年,在恰卜恰地区又相继实 施了GR1、GR2干热岩勘探井,其中GR1井终孔深 度 3 705 m, 井底温度 236 ℃. 恰卜恰地区钻孔测温 曲线表现为典型的分段线性特征,其中沉积盖层平 均地温梯度高达77.3℃/km,基底花岗岩层地温梯 度为 39.0~45.2 ℃/km,平均值为 41.3 ℃/km,大地 热流值在 93.3~111.0 mW/m²之间,平均值为 102.2 mW/m²(张超等, 2018),远高于中国陆区热 流平均值60.4 mW/m².此外,在共和盆地扎仓沟地 区,实施了ZR1和ZR2两口干热岩勘探孔,在 3 050.68 m 和 4 703.00 m 的孔底深度,分别获得了 151.34 ℃和 205 ℃的岩体温度,证实了典型的高温 水热系统翼部所伴生的干热岩型地热系统.共 和盆地GR1井是迄今中国钻获温度最高的干热 岩勘探孔,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(张森琦等, 2018).

测试结果表明,共和盆地以花岗岩和花岗闪长 岩等为主的基底岩石的放射性生热率在1.17~ 5.81 μW/m³之间,平均值为3.20±1.07 μW/m³,属 于中等放射性产热花岗岩(张超等,2020;Weinert et al., 2021),表明共和盆地花岗岩并未表现 出强烈的热异常(唐显春等,2020).大地电磁探 测和宽频地震反射结果表明,共和盆地在15~ 35 km深度存在两个显著电阻率较低的区域,且 壳内存在地震波低速带,可能为熔融物质或是与 侵入活动相关(Gao et al., 2018),如图7所示.

共和盆地干热岩地热系统热源机理目前仍存 在争论.综合地质、地球物理和地球化学资料,Tang et al. (2022)将该地区热源归因于地壳增厚的放射 成因热贡献和局部热异常体(可能是岩浆囊或深度 ~15~35 km处的部分熔融)的附加热贡献的综合作 用.区内北东向的隐伏深大断裂,一方面构成了深 部热流体向地壳浅部运动的通道,造成高温异常, 另一方面断裂带的导水作用和低压环境有助于深 部岩石发生局部熔融(张盛生等,2019).新生界 低热导率沉积盖层上覆于印支期壳熔花岗岩之 上,形成了较好的储盖组合.共和盆地地热资源 不仅丰富,而且品位很高.初步计算结果表明, 恰卜恰地区干热岩体理论资源总量为1 638.16 EJ,折合标准煤 559.09亿吨(张森琦等,2018).

除了青海共和-贵德盆地勘查取得突破之外, 近年来,我国在福建漳州、广东惠州、福建厦门、山 东利津、河北沧县、琼北等重点靶区也开展了地热 科学钻孔工作,但钻探结果总体不尽人意.如在福 建龙海清泉林场实施的HDR-1井,于3997m深度 仅获得109.58℃地层温度(蔺文静等, 2021);位于 广东惠州黄沙洞地区的惠热1井,终孔深度 3 009.17 m,井底温度 127.7 ℃(旷健等, 2020);厦门 集美杏林湾地区实施的JM-1井,于2005m深度最 终测得井温仅70.4℃;在山东利津陈庄凸起实施的 SDGRY1井,终孔深度2500.58m,井深2492m深 度测得104.2℃(王立东等,2016);在河北沧县台拱 带实施的HBGRY1井,孔深4025.82m,井底温度 为107.5℃(段和肖等, 2022);在琼北地区实施的徐 4井,深度3203.18m,于3150m深度测得地层温度 146.4 ℃, 推测该钻孔 4 050 m 深度可达到我国现行 干热岩温度条件(>180℃),另外琼北花东1R井, 在深度4387m深度钻获超过185℃(非稳态测温) 的干热岩体,对雷琼火山区干热岩的勘查开发具有 里程碑式的意义(蔺文静等, 2021).尽管这些钻探 工作大多并未揭露温度大于180℃的干热岩体(琼 北花东1R孔除外),但很大程度上深化了我国干热



据 Gao et al. (2018)

岩资源赋存条件的科学认识,为我国未来干 热岩勘探选址、钻探过程和储层改造提供了 有益的经验和借鉴.

4 中国干热岩发展前景区

中国的板块构造位置比较特殊,西南部受印度板块挤压,东南部受菲律宾板块挤压,东南部受菲律宾板块挤压,东部受太平洋板块的俯冲和挤压作用,地壳应力场极其复杂,构造极为活跃,地震和岩浆活动强烈.此外,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-热活动控制,大地热流呈现"东高、中低、西南高、西北低"的分布格局(Jiang et al., 2019),如图8所示.

干热岩地热资源评价的直接参数是深部温度. 在理想化的各向同性均匀介质稳态传导模型中,可 以基于现今大地热流、地表温度和分层地壳模型预 测深部地层(岩体)温度.图9展现了中国陆区基于 现有地热测量数据计算出的不同深度上的温度分 布格局.在2.5 km 深度,除藏南部分地区温度达到 100~150 ℃外,其他大部分地区温度均低于100 ℃; 至4.5 km 深度,藏南部分地区温度超过200 ℃,云贵 及东部大部分地区温度超过100 ℃;在6.5 km 深度, 藏南大部分地区温度已达250~300 ℃,其他热异常 区,包括云贵、东南沿海、渤海湾盆地、汾渭地堑、东 北等地温度达到150~200 ℃;至8.5 km 深度,藏南 大部分地区温度超过200 ℃,高温中心温度达到 400 ℃,其他热异常区温度超过200 ℃.总体上看,中 国陆区以藏南地区地壳温度最高,云南西部和整个 东部(华南、华北、东北)地区温度相对较高.

除了大地构造背景、大地热流分布和深部地层 温度,结合新生代火山分布、地表热显示(温泉分 布)、深部地球物理资料揭示的岩浆囊埋深、Moho 面深度等数据资料综合分析,中国陆区有利的干热 岩开发初选靶区为:藏南地区、滇西地区、东南沿 海、华北(渤海湾盆地、汾渭地堑)、东北(松辽盆地、 长白山、龙岗、镜泊湖、五大连池等火山活动区)等 地区.依据前期中国深层地热能开采的地质条件评 价结果(庞忠和等, 2020),可进一步缩小干热岩勘



图 8 中国陆区现今热流与大地构造背景关系(a)以及中国西南部、中北部、东部(b~d)的岩石圈热结构及其构造背景 Fig.8 Relationship between present-day heat flow and geotectonic background in Chinese continent (a), and represent the lithospheric thermal structure and its tectonic background in southwestern, north-central, and eastern China (b-d) 箭头的颜色、长度表示相对热流贡献,据 Jiang *et al.* (2019)

探重点区域,当前应该将研究重点放在以下3个区域:与南海扩张及地幔柱密切相关的海南岛及雷州 半岛;与新生代火山相关的东北新生代火山活动 区;与新生代板块碰撞及下地壳物质流相关的雅江 缝合带,尤其是应力场转折的喜马拉雅东构造结.

4.1 东北新生代火山活动区

我国东部地区高热流背景的形成与晚中生代 以来库拉板块和西太平洋/菲律宾海板块向西低角 度俯冲、弧后扩张及板内岩石圈减薄等过程有关 (朱日祥等,2012).而与板块俯冲相关联的新生代 火山活动(存在深部岩浆囊)是形成板内高温地热 系统的重要条件.东北地区处于郯庐断裂带东北 段,是我国东部新生代火山活动最强烈的地区,壳 内存在大面积低速层甚至岩浆系统,如镜泊湖、五 大连池、长白山天池等.地球物理探测表明,长白山 天池下方有壳内岩浆囊存在的迹象,具备高温地热 系统形成的有利地热地质条件(陈棋福等,2019).

郑庐断裂带东北段集壳内低速层-深大断裂-盆山构造-地表火山于一体,是我国东部地区最有可能形成高温地热系统的地区.松辽盆地和 辽河断陷深井测温数据显示,松辽盆地松基6井4300m深度的温度为155℃,辽河盆地锦117井3500m的温度为150℃,预示着该区域高温地热资源前景可期.此外,我国东北地区松辽盆地、辽



河断陷等孕育了大庆油田、吉林油田、辽河油田 等,区内钻井数量众多,地质基础资料扎实,为开 展系统的地热学研究和干热岩勘查提供了不可 或缺的工作条件.该地区人口密度大、年平均气 温低,能源消费量大,地热能需求市场旺盛.

4.2 海南岛及雷州半岛

海南岛地处华南地块和印支地块之间.早燕山 期,由于岩石圈裂解拉张,地幔上涌,在琼中微地块 的东缘,沿陵水-龙滚深大断裂形成了一系列与陆 内拉张有关的侵入岩.晚燕山期,南部的三亚地体 与琼中块体沿九所-陵水韧性剪切带发生对接,最 终形成了由多个微陆块组成的海南岛陆块.在太平 洋板块作用下,岛内处于拉张构造体制,形成北 北东向白沙断陷盆地,并促使东西向九所-陵水 深大断裂带复活,控制了一些小型陆相火山沉 积盆地的发育.南海扩张期后的岩浆活动广泛 分布于中央海盆、西南次海盆、海南岛、雷州半 岛等地,研究表明火山岩可能是"海南地幔柱" 活动的产物(Yan et al., 2018).地球物理探测揭 示海南岛附近下方地幔存在低速结构,从浅部 向下穿越 660 km 的不连续面处并一直延伸到 1 900 km,其影响范围达4×10⁶ km²以上.海南岛 及雷州半岛经历了明显的地壳减薄,莫霍面深 度仅30km(黄海波等,2012,高维等,2020).

海南岛整体热背景值很高,温泉发育,是滇-藏地热带的延伸.海南岛地热流体的温度在34~ 84℃之间,属于中低温地热资源.但该区域地幔 隆起、新生代火山活动频繁是形成干热岩地热资 源的有利条件,其中雷州半岛500 m 深的钻孔地 温梯度最高达60℃/km.琼北花东1R井,在深度 4 387 m 深度钻获超过185℃(非稳态测温)的干热 岩体,对雷琼火山区干热岩的勘查开发具有里程 碑式的意义.此外,该地区能源需求旺盛,开采成 本也会远远低于西藏.因此该区域是目前我国进 行干热岩地热资源勘探开采的极有利区域.

4.3 滇藏川地区——青藏高原东构造结

青藏高原是欧亚-印度板块陆陆碰撞后经多 期隆升的产物,地质构造的基本特征可以概括为: 地壳加积模、壳幔滑脱、高原南部的大陆岩石圈俯 冲、高原北缘和东缘的大规模侧向平移.在大陆岩 石圈碰撞之后,岩石圈的俯冲并未随之停止,而是 分裂为一系列近似水平的薄片,互相运动和冲掩 堆叠起来,形成厚约70 km的地壳.这除了新生代 印度大陆北缘的地壳加积模之外,中生代末广泛的岩浆活动及适度地壳缩短的安第斯型岛弧增厚作用、新生代晚期向南倾斜的陆内俯冲带并伴以新一轮地壳加积模,也都起到了重要的作用(莫宣学,2011,许志琴等,2011,侯增谦等,2020).

滇藏川地热带是全球地热异常带的重要组成 部分,是我国地热活动最强烈的地带,出露的温泉 总数超过全国的一半,汇集着中国陆区所有的沸 泉、沸喷泉、喷汽孔、冒汽地面、水热爆炸区和间歇 喷泉等高温地热显示和地热田,如羊八井地热田、 恰卜恰地热区、康定温泉和茶洛温泉等.这些地热 显示在喜马拉雅山北麓沿雅鲁藏布江呈带状密集 分布,向东扩展至川西高原,沿横断山脉向南延伸 到云南西部.滇藏川地热带是我国热流背景值最 高的区域,局部的热流值高达300 mW/m².高温水 热活动区与干热岩往往具有同源共生的关系,以 川西地区为例,该地区具有地表水热活动剧烈,热 储温度高,断裂发育,中-新生代花岗岩广泛分布 的特点(Tang et al., 2017;张健等, 2017; Tian et al., 2021), 而这恰恰与美国 Geysers 项目极 为相似,因此,在强烈的构造活动带,高温水热 活动可以作为识别存在干热岩的一个现象.

大地电磁观测结果表明,在青藏高原存在两 条巨大的中下地壳低阻异常带,推测为两条中下 地壳的弱物质流:一条从拉萨地块沿雅鲁藏布缝 合带向东延伸,环绕东喜马拉雅构造结向南转折, 最后通过腾冲火山;另一条从羌塘地体沿金沙江 断裂带、鲜水河断裂带向东延伸,在四川盆地西缘 转向南,最后通过小江断裂和红河断裂之间的川 滇菱形块体(Bai et al., 2010). 西藏及川西地区 平均地温梯度大于 50 ℃/km, 地球化学研究表明 众多地区热储温度大于180℃,符合干热岩勘探 评价标准,是干热岩勘探的极有利区域,地热发 电,特别是万千瓦级地热电站基地的选址,非此 带不可.然而,滇藏川地区丰富的水热型地热资 源以及经济的欠发达,致使干热岩地热资源的 竞争优势并不明显,而且恶劣的自然条件会加 大勘探和开发成本,川藏铁路的建设有望加快 该区域地热资源勘查开发.川藏铁路沿线的地 热分布属喜马拉雅陆-陆碰撞型地热域,可以怒 江断裂带、龙门山断裂带为界划分为板缘碰撞 造山型、板内逆冲推覆型、盆内稳定坳陷型3个 地热带,分别发育高温岩浆岩型、中-低温断裂

深循环型、低温坳陷盆地型3类地热田.根据 其资源禀赋的差异主要开发方式可分为林芝-拉萨段的高温发电、供暖与制冷;雅安-林芝段 的中低温发电、供暖与制冷;以及成都-雅安段 的低温供暖、温泉洗浴等(汪新伟等,2022).

5 结论与展望

本文系统梳理了国内外代表性的干热岩项目, 总结了干热岩成因模式.综合考虑中国陆区板块 构造背景和全球高温地热带分布、现今大地热流 分布格局、岩石圈热结构、Moho面深度及壳内热 源、新生代火山活动、温泉分布、深大断裂分布与 活动性,以及现有干热岩勘查结果,圈定了中国 陆区最具潜力的干热岩勘探靶区.

(1)热源是干热岩型地热系统形成的首要因素,干热岩型地热系统的热源类型大致可以分为 新生代裂谷区高地幔热流型;花岗岩大面积分布 区高放射性产热型;近代火山型和强烈构造活动 带复杂热源型,其代表性中国陆区分别为:东部 大型中新生代裂谷盆地(松辽盆地、渤海湾盆 地)、汾渭地堑,东南沿海岩浆岩分布区,滇西、东 北、雷琼新生代火山区,青藏高原东构造结-滇藏 川地区、西藏南北地堑带、青海共和盆地等.

(2) 壳内异常热源供热是干热岩产出基础;低热导率(<2 W/m/K)、且厚度1 km 左右盖层保热增温是干热岩产出的必要条件;基底(岩)层地温梯度≥35℃/km,盖层地温梯度≥45℃/km,平均大地热流≥75 mW/m²,可作为干热岩勘探靶区优选的重要指标.

(3) 干热岩勘探手段应遵循地质、地球物 理和地球化学三位一体模式.构造位置、地表 热显示等是干热岩靶区初选的重要指标,钻 井地热测量是最直接的干热岩勘探手段;地 球物理探测的目的是揭示浅部地壳结构和寻 找壳内异常热源(熔融体);地球化学特征可 以指示流体的成因——岩浆或深循环.

(4)人工造储的EGS技术是干热岩地热资源开 发的关键,为了克服诱发地震等环境安全问题,干 热岩压裂造储技术研发方向正在从"刚性造储"向 "柔性造储"发展,即采用灵活的压裂和化学等造储 技术和工艺,避免纯粹靠提高致裂压力造储.

(5)干热岩与高温水热系统共热源且存在共生 关系,干热岩地热资源是深层地热能的一部分,但 其地质条件复杂,开采难度较大,应倡导"深层 地热资源"和"广义EGS"概念,即按照EGS技术 着眼深层水热型和干热岩型地热能整体开发.

(6)当前,中国陆区最具前景的干热岩勘 探靶区为东北新生代火山活动区、海南岛及 雷州半岛和滇藏川地区-青藏高原东构造 结.此外,高热背景条件下的中厚层碳酸盐 岩应作为深层地热能开采的重点目标储层.

References

- Aichholzer, C., Duringer, P., Orciani, S., et al., 2016. New Stratigraphic Interpretation of the Soultz - Sous -Forêts 30-Year-Old Geothermal Wells Calibrated on the Recent one from Rittershoffen (Upper Rhine Graben, France). *Geothermal Energy*, 4(1): 1-26. https://doi. org/10.1186/s40517-016-0055-7
- Aprea, C. M., Hildebrand, S., Fehler, M., et al., 2002. Three-Dimensional Kirchhoff Migration: Imaging of the Jemez Volcanic Field Using Teleseismic Data. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 107(B10): 2247-2258. https://doi.org/10.1029/2000jb000097
- Ayling, B. F., Hogarth, R. A., Rose, P. E., 2016. Tracer Testing at the Habanero EGS Site, Central Australia. *Geothermics*, 63: 15-26. https://doi.org/10.1016/j. geothermics.2015.03.008
- Beardsmore, G., 2004. The influence of basement on surface heat flow in the Cooper Basin. *Exploration Geophysics*, 35(4):223-235. https://doi.org/10.1071/EG04223
- Breede, K., Dzebisashvili, K., Liu, X. L., et al., 2013. A Systematic Review of Enhanced (or Engineered) Geothermal Systems: Past, Present and Future. *Geothermal Ener*gy, 1(1): 1-27. https://doi.org/10.1186/2195-9706-1-4
- Brown, D. W., Duchane, D. V., Heiken, G., et al., 2012. The Future of Hot Dry Rock Geothermal Energy. Mining the Earth's Heat: Hot Dry Rock Geothermal Energy. Springer, Berlin Heidelberg, 561-569. https://doi. org/10.1007/978-3-540-68910-2_10
- Buchmann, T. J., Connolly, P. T., 2007. Contemporary Kinematics of the Upper Rhine Graben: A 3D Finite Element Approach. *Global and Planetary Change*, 58(1-4): 287– 309. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.02.012
- Bai, D., Unsworth, M. J., Meju, M. A., et al., 2010. Crustal Deformation of the Eastern Tibetan Plateau Revealed by Magnetotelluric Imaging. *Nature Geoscience*, 3(5): 358-362. https://doi.org/10.1038/ngeo830
- Chen, Q. F., Ai, Y., Chen, Y.S., 2019. Overview of Deep Structures under the Changbaishan Volcanic Area in

Northeast China. *Science in China* (*Series D*), 49(5): 778-795 (in Chinese with English abstract).

- Duan, H. X., Liu, Y. G., Wang, G. L., et al., 2023. Characteristics of the Terrestrial Heat Flow and Lithospheric Thermal Structure in Central Cangxian Uplift: A Case Study of Xianxian Geothermal Field. *Earth Science*, 48 (3): 988-1001 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Gan, Q., Feng, Z., Zhou, L., et al., 2021. Down-Dip Circulation at the United Downs Deep Geothermal Power Project Maximizes Heat Recovery and Minimizes Seismicity. *Geothermics*, 96: 102204. https://doi. org/ 10.1016/j.geothermics.2021.102204
- Gao, J., Zhang, H. J., Zhang, S. Q., et al., 2018. Three-Dimensional Magnetotelluric Imaging of the Geothermal System beneath the Gonghe Basin, Northeast Tibetan Plateau. *Geothermics*, 76: 15-25. https://doi.org/ 10.1016/j.geothermics.2018.06.009
- Gao, W., Guo, Z. H., Zhou, J. X., et al., 2020. High Precision Aeromagnetic Characteristics and Curie Depth Analysis of the Hainan Island. Acta Geologica Sinica, 94 (11): 3249-3262 (in Chinese with English abstract).
- Garcia, J., Hartline, C., Walters, M., et al., 2016. The Northwest Geysers EGS Demonstration Project, California. *Geothermics*, 63: 97-119. https://doi.org/ 10.1016/j.geothermics.2015.08.003
- Genter, A., Evans, K., Cuenot, N., et al., 2010. Contribution of the Exploration of Deep Crystalline Fractured Reservoir of Soultz to the Knowledge of Enhanced Geothermal Systems (EGS). *Comptes Rendus Geoscience*, 342(7–8): 502–516. https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.01.006
- Harlé, P., Kushnir, A. R. L., Aichholzer, C., et al., 2019. Heat Flow Density Estimates in the Upper Rhine Graben Using Laboratory Measurements of Thermal Conductivity on Sedimentary Rocks. *Geothermal Energy*, 7 (1): 1-36. https://doi.org/10.1186/s40517-019-0154-3
- He, Z. L., Feng, J. Y., Zhang, Y., et al., 2017. A Tentative Discussion on an Evaluation System of Geothermal Unit Ranking and Classification in China. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 168-179 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Zheng, Y. C., Lu, Z. W., et al., 2020. Growth, Thickening and Evolution of the Thickened Crust of the Tibet Plateau. Acta Geologica Sinica, 94

(10): 2797-2815 (in Chinese with English abstract).

- Huang, H. B., Qiu, X. L., Xia, S. H., 2012. Crustal Structure and Poisson's Ratio Beneath Hainan Island. *Journal of Tropical Oceanography*, 31(3): 65-70 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, G., Hu, S., Shi, Y., et al., 2019. Terrestrial Heat Flow of Continental China: Updated Dataset and Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 753: 36-48. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.01.006
- Kelkar, S., WoldeGabriel, G., Rehfeldt, K., 2016. Lessons Learned from the Pioneering Hot Dry Rock Project at Fenton Hill, USA. *Geothermics*, 63: 5-14. https://doi. org/10.1016/j.geothermics.2015.08.008
- Kennedy, B. M., Truesdell, A. H., 1996. The Northwest Geysers High-Temperature Reservoir: Evidence for Active Magmatic Degassing and Implications for the Origin of the Geysers Geothermal Field. *Geothermics*, 25(3): 365-387. https://doi.org/10.1016/0375-6505(96)00005-3
- Kuang, J., Qi, S. H., Wang, S., et al., 2020. Granite Intrusion in Huizhou, Guangdong Province and Its Geothermal Implications. *Earth Science*, 45(4): 1466-1480 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- 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., Wei, M. H., Sun, M. H., et al., 2022. Classification and Determination of Thermal Control Structural System of Hot Dry Rock. *Earth Science*, 47(10): 3723-3735 (in Chinese with English abstract).
- Llanos, E. M., Zarrouk, S. J., Hogarth, R. A., 2015. Numerical Model of the Habanero Geothermal Reservoir, Australia. *Geothermics*, 53: 308-319. https://doi.org/ 10.1016/j.geothermics.2014.07.008
- Lu, C., Wang, G. L., 2015. Current Status and Prospect of Hot Dry Rock Research. *Science & Technology Review*, 33(19): 13-21 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. M., 2018. A Global Review of Enhanced Geothermal System (EGS). *Renewable and Sustainable Energy Re*views, 81: 2902-2921. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.097
- Lucazeau, F., 2019. Analysis and Mapping of an Updated Terrestrial Heat Flow Data Set. *Geochemistry*, *Geo*-

physics, *Geosystems*, 20(8): 4001-4024. https://doi. org/10.1029/2019gc008389

- Mao, X., Guo, D. B., Luo, L., et al., 2019. The Global Development Process of Hot Dry Rock (Enhanced Geothermal System) and Its Geological Background. *Geological Re*view, 65(6): 1462-1472 (in Chinese with English abstract).
- Meixner, A. J., Kirkby, A. L., 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. *Geothermics*, 51: 483-495. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.10.010
- Mo, X. X., 2011. Magmatism and Evolution of the Tibetan Plateau. *Geological Journal of China Universities*, 17 (3): 351-367 (in Chinese with English abstract).
- Moore, J., McLennan, J., Allis, R., et al., 2019. The Utah Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy (Forge): An International Laboratory for Enhanced Geothermal System Technology Development. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering 2019, Stanford.
- National Energy Administration, 2018. Terminology for Geothermal Energy. China Petrochemical Press, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Olasolo, P., Juárez, M. C., Morales, M. P., et al., 2016. Enhanced Geothermal Systems (EGS): A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56: 133-144. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.031
- Oppenheimer, D. H., Herkenhoff, K. E., 1981. Velocity -Density Properties of the Lithosphere from Three - Dimensional Modeling at the Geysers-Clear Lake Region, California. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 86(B7): 6057-6065. https://doi.org/10.1029/ jb086ib07p06057
- Pang, Z. H., Kong, Y. L., Pang, J. M., et al., 2017. Geothermal Resources and Development in Xiongan New Area. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 32(11): 1224-1230 (in Chinese with English abstract).
- Pang, Z. H., Luo, J., Cheng, Y. Z., et al., 2020. Evaluation of Geological Conditions for the Development of Deep Geothermal Energy in China. *Earth Science Frontiers*, 27(1): 134-151 (in Chinese with English abstract).
- Parisio, F., Yoshioka, K., 2020. Modeling Fluid Reinjection into an Enhanced Geothermal System. *Geophysical Re*search Letters, 47(19): e2020GL089886. https://doi. org/10.1029/2020gl089886
- Park, S., Kim, K. I., Xie, L., et al., 2020. Observations and Analyses of the First Two Hydraulic Stimulations in

the Pohang Geothermal Development Site, South Korea. *Geothermics*, 88: 101905. https://doi.org/10.1016/ j.geothermics.2020.101905

- Peacock, J. R., Earney, T. E., Mangan, M. T., et al., 2020. Geophysical Characterization of the Northwest Geysers Geothermal Field, California. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 399: 106882. https:// doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106882
- Pollett, A., Hasterok, D., Raimondo, T., et al., 2019. Heat Flow in Southern Australia and Connections with East Antarctica. *Geochemistry*, *Geophysics*, *Geosystems*, 20(11): 5352-5370. https://doi. org/10.1029/ 2019gc008418
- Rutqvist, J., Dobson, P. F., Garcia, J., et al., 2015. The Northwest Geysers EGS Demonstration Project, California: Pre-Stimulation Modeling and Interpretation of the Stimulation. *Mathematical Geosciences*, 47(1): 3– 29. https://doi.org/10.1007/s11004-013-9493-y
- Sass, J. H., Morgan, P., 1988. Conductive Heat Flux in VC-1 and the Thermal Regime of Valles Caldera, Jemez Mountains, New Mexico. Journal of Geophysical Research, 93(B6): 6027. https://doi. org/10.1029/ jb093ib06p06027
- Spell, T. L., Kyle, P. R., 1989. Petrogenesis of Valle Grande Member Rhyolites, Valles Caldera, New Mexico: Implications for Evolution of the Jemez Mountains Mgmatic System. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B8): 10379-10396. https://doi.org/ 10.1029/jb094ib08p10379
- Steck, L. K., Thurber, C. H., Fehler, M. C., et al., 1998. Crust and Upper Mantle P Wave Velocity Structure Beneath Valles Caldera, New Mexico: Results from the Jemez Teleseismic Tomography Experiment. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 103(B10): 24301– 24320. https://doi.org/10.1029/98jb00750
- Tang, X. C., Liu, S. S., Zhang, D. L., et al., 2022. Geothermal Accumulation Constrained by the Tectonic Transformation in the Gonghe Basin, Northeastern Tibetan Plateau. *Lithosphere*, 2021(Special 5): 3936881. https://doi.org/10.2113/2022/3936881
- Tang, X. C., Wang, G. L., Ma, Y., et al., 2020. Geological Model of Heat Source and Accumulation for Geothermal Anomalies in the Gonghe Basin, Northeastern Tibetan Plateau. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2052– 2065 (in Chinese with English abstract).
- Tang, X. C., Zhang, J., Pang Z. H., et al., 2017. The Eastern Tibetan Plateau Geothermal Belt, Western China: Geology, Geophysics, Genesis, and Hydrothermal Sys-

tem. *Tectonophysics*, 717: 433-448. https://doi.org/ 10.1016/j.tecto.2017.08.035

- Tian, J., Pang, Z., Liao, D., et al., 2021. Fluid Geochemistry and Its Implications on the Role of Deep Faults in the Genesis of High Temperature Systems in the Eastern Edge of the Qinghai Tibet Plateau. *Applied Geochemistry*, 131: 105036. https://doi. org/10.1016/j. apgeochem.2021.105036
- Vidal, J., Patrier, P., Genter, A., et al., 2018. Clay Minerals Related to the Circulation of Geothermal Fluids in Boreholes at Rittershoffen (Alsace, France). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 349: 192– 204. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.10.019
- Walters, M. A., Combs, J., 1989. Heat-Flow Regime in the Geysers-Clear Lake Area of Northern California, USA. 1989 Annual Meeting of the Geothermal Resources Council, Santa Rosa.
- Wang, J. Y., 2016. The Belt and Road Initiative, Geothermal First. Science & Technology Review, 34(21): 1 (in Chinese with English abstract).
- 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, L. D., Wang, H., Zhang, M. D., et al., 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).
- Wang, X. W., Wang, T. H., Gao, N. A., et al., 2022. Formation Mechanism and Development Potential of Geothermal Resources along the Sichuan - Tibet Railway. *Earth Science*, 47(3): 995-1011 (in Chinese with English abstract).
- Weinert, S., Bär, K., Scheuvens, D., et al., 2021. Radiogenic Heat Production of Crystalline Rocks in the Gonghe Basin Complex (Northeastern Qinghai-Tibet Plateau, China). *Environmental Earth Sciences*, 80(7): 270. https://doi.org/10.1007/s12665-021-09558-x
- Xu, T. F., Hu, Z. X., Li, S. T., et al., 2018. Enhanced Geothermal System: International Progresses and Research Status of China. *Acta Geologica Sinica*, 92(9): 1936-1947 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Li, H. B., et al., 2011. On the Tectonics of the India-Asia Collision. Acta Geologica Sinica, 85(1): 1-33 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Q., Shi, X., Metcalfe, I., et al., 2018. Hainan Mantle

Plume Produced Late Cenozoic Basaltic Rocks in Thailand, Southeast Asia. *Scientific Reports*, 8(1): 2640-2454. https://doi.org/10.1038/s41598-018-20712-7

- 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., Zhang, S. S., Li, S. T., et al., 2018. Geothermal Characteristics of the Qiabuqia Geothermal Area in the Gonghe Basin, Northeastern Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(11): 4545-4557 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Li, W. Y., Tang, X. C., et al., 2017. Geothermal Data Analysis at the High-Temperature Hydrothermal Area in Western Sichuan. *Science in China (Series* D), 47(8): 899-915 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. Q., Wen, D. G., Xu, T. F., et al., 2019. The U. S. Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy Project and Comparison of Typical EGS Site Exploration Status in China and U.S. *Earth Science Frontiers*, 26(2): 321-334 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. Q., Yan, W. D., Li, D. P., et al., 2018. Characteristics of Geothermal Geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province. *Geology in China*, 45 (6): 1087-1102 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. S., Zhang, L., Tian, C. C., et al., 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).
- Zheng, K. Y., Chen, Z. H., 2017. Hot Dry Rock Development in China: A Long Way to Go. Sino-Global Energy, 22(2): 21-25 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Xu, Y. G., Zhu, G., et al., 2012. Destruction of the North China Craton. *Science in China (Series D)*, 42(8): 1135–1159 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈棋福,艾印双,陈赟,2019.长白山火山区深部结构探测的研究进展与展望.中国科学(D辑),49(5):778-795.
- 段和肖,刘彦广,王贵玲,等,2023. 沧县隆起中部大地热流 及岩石圈热结构特征——以献县地热田为例. 地球科 学,48(3):988-1001.
- 甘浩男,王贵玲, 蔺文静, 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.
- 高维, 郭志宏, 周坚鑫, 等, 2020. 海南岛高精度航磁特征与 居里等温面深度分析. 地质学报, 94(11): 3249-3262.

- 何治亮, 冯建赟, 张英, 等, 2017. 试论中国地热单元分级分 类评价体系. 地学前缘, 24(3): 168-179.
- 侯增谦,郑远川,卢占武,等,2020.青藏高原巨厚地壳:生 长、加厚与演化.地质学报,94(10):2797-2815.
- 黄海波, 丘学林, 夏少红, 2012. 海南岛地壳厚度与泊松比结构. 热带海洋学报, 31(3): 65-70.
- 旷健, 祁士华, 王帅, 等, 2020. 广东惠州花岗岩体及其地热 意义. 地球科学, 45(4):1466-1480.
- 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.
- 蔺文静,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, 韦梅华, 孙明行, 等, 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.
- 陆川,王贵玲,2015.干热岩研究现状与展望.科技导报,33 (19):13-21.
- 毛翔,国殿斌,罗璐,等,2019.世界干热岩地热资源开发进 展与地质背景分析.地质论评,65(6):1462-1472.
- 莫宣学,2011. 岩浆作用与青藏高原演化. 高校地质学报, 17(3): 351-367.
- 国家能源局, 2018. 地热能术语. 北京: 中国石化出版社.
- 庞忠和,孔彦龙,庞菊梅,等,2017.雄安新区地热资源与开 发利用研究.中国科学院院刊,32(11):1224-1230.
- 庞忠和, 罗霁, 程远志, 等, 2020. 中国深层地热能开采的地 质条件评价. 地学前缘, 27(1): 134-151.
- 唐显春,王贵玲,马岩,等,2020.青海共和盆地地热资源热 源机制与聚热模式.地质学报,94(7):2052-2065.

汪集旸, 2016. 一带一路, 地热先行. 科技导报, 34(21): 1.

汪集旸, 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.

- 王立东,王浩,张明德,等,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.
- 汪新伟,王婷灏,高楠安,等,2022.川藏铁路沿线地热资源 形成机理与开发潜力.地球科学,47(3):995-1011.
- 许天福, 胡子旭, 李胜涛, 等, 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.
- 许志琴,杨经绥,李海兵,等,2011.印度-亚洲碰撞大地构 造.地质学报,85(1):1-33.
- 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.
- 张超,张盛生,李胜涛,等,2018.共和盆地恰卜恰地热区现 今地热特征.地球物理学报,61(11):4545-4557.
- 张健,李午阳,唐显春,等,2017.川西高温水热活动区的地 热学分析.中国科学(D辑),47(8):899-915.
- 张森琦,文冬光,许天福,等,2019.美国干热岩"地热能前 沿瞭望台研究计划"与中美典型 EGS 场地勘查现状对 比.地学前缘,26(2):321-334.
- 张森琦,严维德,黎敦朋,等,2018.青海省共和县恰卜恰干 热岩体地热地质特征.中国地质,45(6):1087-1102.
- 张盛生,张磊,田成成,等,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.
- 郑克棪, 陈梓慧, 2017. 中国干热岩开发: 任重而道远. 中外 能源, 22(2): 21-25.
- 朱日祥,徐义刚,朱光,等,2012.华北克拉通破坏.中国科 学(D辑),42(8):1135-1159.