

世界干热岩地热资源开发进展与地质背景分析

毛翔^{1, 2)}, 国殿斌^{1, 2)}, 罗璐^{1, 2)}, 王婷灏^{1, 2)}

1) 中国石化集团新星石油有限责任公司新能源研究院, 北京, 100083;

2) 中国石化地热资源开发利用重点实验室, 北京, 100083

内容提要:干热岩资源指内部不存在或仅存在少量流体, 温度高于 180 °C 的异常高温岩体, 是一种极具潜力的地热资源类型。自 20 世纪 70 年代美国 Fenton Hill 项目实施以来, 已在全球 14 个国家实施了 41 个干热岩开发项目, 以干热岩储层建造和连通的目标地层周围或上部是否存在水热型储层为标准, 25 个属于传统意义的干热岩开发项目, 16 个属于增强型地热系统(Enhanced Geothermal System 或 Engineered Geothermal System, 缩写为 EGS)。从板块构造角度分析, 这些干热岩开发项目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。按照盆地类型划分, 全球干热岩开发项目所处的大地构造背景包括克拉通盆地、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, 其中以欧洲阿尔卑斯褶皱带磨拉石盆地为代表的前陆盆地, 和以欧洲阿尔卑斯褶皱带上莱茵地堑、北美新生代科迪勒拉造山带内华达盆地为代表的裂谷盆地是全球干热岩开发项目最为集中的两种盆地类型。考虑我国干热岩资源分布情况, 上莱茵地堑、内华达盆地的干热岩开发历程对我国干热岩资源的勘探和开发具有一定的借鉴作用。

关键词:干热岩; 增强型地热系统; 开发历程; 项目分布; 构造背景; 储层特征

地热能储量丰富、分布广泛, 具有不受季节、气候、昼夜变化影响的特点(荆铁亚等, 2018), 近年来逐渐在我国北方地区治理雾霾过程中发挥越来越重要的作用。干热岩(Hot dry rock)型地热资源与浅层地热能、水热型地热能并列为地热能的三种基本类型, 其资源勘查开发处于起步阶段, 但将是未来地热能发展的重要领域(Tester et al., 2006)。

对于干热岩的定义, 不同的学者给出过不同的标准。早期的干热岩定义多数基于某个干热岩开发项目的研究与试验给出不同的埋深、温度与裂隙发育情况定义, 如 Brown (1995) 根据全球第一个干热岩开发项目——美国 Fenton Hill 项目提出, 干热岩需满足埋深范围为 2000~3000 m, 温度大于 200 °C, 且无天然裂隙; Hashizume (1995) 和 Hori (1995) 根据日本 Hijiori 项目提出干热岩仅需满足岩体温度大于 200 °C, 埋深合理、地层内流体含量较少或无流体。随着越来越多干热岩开发项目的实施, 对其温度的要求有所降低, 许天福等(2016)提出, 干热岩

是一种没有水(或含有少量水而不能流动)的高温岩体, 很少存在孔隙或裂隙渗透性能极差, 其温度范围介于 150~650 °C。2018 年, 中国国家能源局组织地热行业专家编制了国家能源行业标准《地热能术语(NB-T 10097-2018)》, 规定干热岩指内部不存在或仅存在少量流体, 温度高于 180 °C 的异常高温岩体。

在干热岩资源研究与现场试验的早期, 相关工作主要集中在具有高温的花岗岩体, 储层改造难度大、资金需求量大, 项目的经济性相对较差; 此后, 干热岩的研究与现场试验多转向增强型地热系统, 即通过扩展水热储层的边缘或深部以增加已有水热型地热田发电能力, 如美国 Desert Peak、Geysers 和 Raft River 等(许天福等, 2016)。

1 全球干热岩开发项目开展概况

据统计, 全球目前先后实施了 38~41 个干热岩开发项目(美国 Northwest Geysers、Southeast

注: 本文为中国石化科技项目“中国典型地热田地热水水化学特征对比研究”(编号: JKL18033)、“干热岩勘探开发关键工程技术研究”(编号: JP17013)的研究成果。

收稿日期: 2019-04-21; 改回日期: 2019-10-08; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.06.013

作者简介: 毛翔, 男, 1986 年生, 2014 年于北京大学取得构造地质学博士学位, 现为高级工程师, 主要从事地热资源勘探开发、构造地质学研究; Email: maoxiang.xxxy@sinopec.com。

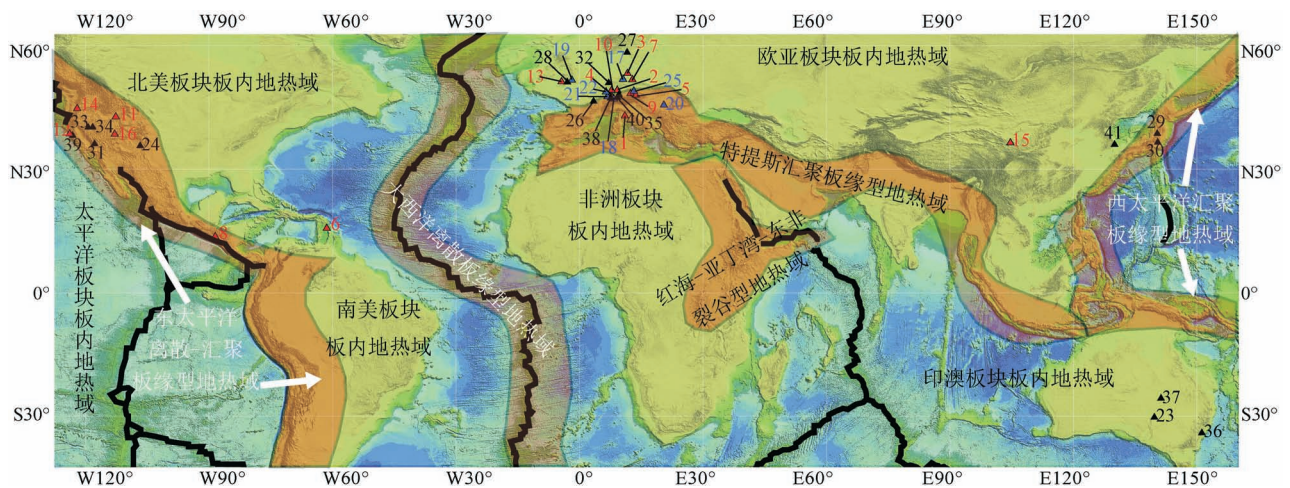


图 1 全球 41 个干热岩开发项目分布图(编号对应项目名称见表 2;地热单元划分据何治亮等,2017;
全球地貌底图据李江海等,2014)

Fig. 1 Distribution map of 41 hot dry rock (EGS) projects in the world (project number see table 2;
division of tectonic units from He Zhiliang et al., 2017& landscape map from LI Jianghai et al., 2014#)

Geysers,德国 GeneSys Hannover、GeneSys Horstberg, 法国 Soultz-sous—Forêts 与法德联合实施的 GEOSTRAS 被不同的研究者归入同一项或两项独立的项目)(Breede et al., 2013; Sigfússon and Uihlein, 2015; 张森琦等, 2019),本文按照 41 个项目进行分析。这些项目主要分布在欧洲、北美洲、澳洲、亚洲、中美洲的 14 个国家,除中国、萨尔瓦多为发展中国家外均位于发达国家,其中德国、美国为实施干热岩开发项目最多的国家,各国实施项目数见表 1。

41 个项目中实施最早的为美国 Fenton Hill 项目,于 1970 年提出实施方案,1973 年开展了增强型地 热 系 统 (Enhanced Geothermal System 或 Engineered Geothermal System, 缩写为 EGS) 试验。20 世纪 70 年代,共有 5 项干热岩开发项目开展了研究与试验工作,其中 4 项位于欧洲,1 项位于美国;80 年代进入干热岩开发项目开展的第一个高潮期,共计启动了 8 项干热岩开发项目,6 项位于欧洲,2 项位于美国,其中法国 Soultz-sous—Forêts 项目是目前为止全球最为成功并稳定商业发电的干热岩开发项目(郑人瑞等, 2017;周舟等,2018);90 年代仅法属西印度群岛、澳大利亚各启动了 1 个项目;进入 21 世纪头 10 年,干热岩勘探开发迎来了第二个高潮期,欧洲、中北美洲合计启动了 17 个干热岩开发项目;2010 年以来,全球启动了 10 个

干热岩开发项目,其中美国 Milford 和中国青海共和项目为近年来关注度最高的两个。41 个项目中,25 个属于传统意义的干热岩开发项目,16 个属于增强型地热系统(EGS)。

对这些项目的现状进行分类统计,14 个项目处于运行状态、2 个项目处于钻探状态(尚未进行储层改造、连通)、2 个项目因遇到技术或经济问目前停止试验施工仅开展相关研究工作、3 个项目处于计划筹备阶段、2 个项目处于暂停状态、11 个项目完成研究目标后由于出现相关技术问题或经费问题结束、7 个项目因出现可能相关的地震、施工事故或财务危机而终止(表 2)。

图 1 显示了 41 个干热岩开发项目在全球的分布,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、加勒比海火山活动岛弧区。其中,仅北美、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,欧

表 1 全球 41 个干热岩开发项目按国家分布统计表
Table 1 Table of 41 Hot dry rock (EGS) projects in the world according to the national distribution

国家	德国	美国	法国	英国	澳大利亚	日本	瑞士	法德合作
数量	11	9	3	3	3	2	2	1
国家	奥地利	瑞典	意大利	匈牙利	萨尔瓦多	韩国	中国	
数量	1	1	1	1	1	1	1	

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识的地热资源丰富区。

2 欧洲地区干热岩开发项目分布特点

根据构造单元划分,欧洲地区的 23 个干热岩开发项目主要分布在阿尔卑斯褶皱带的上莱茵地堑、磨拉石盆地、潘诺盆地、北亚平宁盆地,华力西褶皱带,西欧地台英荷盆地、西北德国盆地、东北德国盆地和芬兰—斯堪的纳维亚地盾。阿尔卑斯褶皱带上

莱茵地堑、磨拉石盆地是欧洲干热岩开发项目最为集中地两个盆地(图 2)。

2.1 上莱茵地堑

上莱茵地堑位于法德边界并延伸到瑞士境内,整体呈北—北东走向。地堑南部边界为侏罗山(Jura)褶皱带,西部边界为孚日山脉和哈德特山脉(Vosges and Haardt mountains),东部为黑森林地块(Black Forest Massif),北部为亨斯拉克地块和陶努斯地块(Hunsrück and Taunus massifs)。

表 2 全球 41 个干热岩开发项目统计表(按项目现状及启动时间排序)

Table 2 Table of 41 dry hot rock (EGS) projects in the world according to current status and start time

国家	No.	项目	类型	现状	启动年份	发电能力 (MW)	资料来源
意大利	1	Lardarello	EGS	运行	70 年代至今	700(含水热发电)	Breede et al., 2013
德国	2	Bruchsal	EGS	运行	1983 至今	0.55	Sigfússon and Uihlein, 2015
德国	3	Neustadt—Glewe	EGS	运行	1984 至今	0.21	Breede et al., 2013
法国	4	Soultz-sous—Forêts	干热岩	运行	1984 至今	1.5	Sigfússon and Uihlein, 2015
奥地利	5	Altheim	EGS	运行	1989 至今	1	Sigfússon and Uihlein, 2015
法国西印度群岛	6	Bouillante	EGS	运行	1996 至今	15(含水热发电)	Mas et al., 2006; Lachassagne et al., 2009; Breede et al., 2013
德国	7	Groß—Schnebeck	干热岩	运行	2000 至今	1	Lu Shyi-Min, 2018
萨尔瓦多	8	Berlín	EGS	运行	2001 至今	最大增产 6	Barrios et al., 2002
德国	9	Unterhaching	EGS	运行	2004 至今	计划 3.4	Sigfússon and Uihlein, 2015
德国	10	Insheim	EGS	运行	2007 至今	计划 4.8	
美国	11	Rafriver	EGS	运行	2009 至今	计划 5	
美国	12	NorthwestGeysers	EGS	运行	2009 至今	增产 3.5	
英国	13	Redruth	干热岩	运行	2009 至今	计划 10	
美国	14	NewberryVolcano	干热岩	运行	2010 至今	计划 35	
中国	15	共和	干热岩	试验(已钻探)	2011 至今		张森琦等,2019
美国	16	Milford	EGS	试验(尚未钻探)	2015 至今		张森琦等,2019
德国	17	GeneSys Hannover	干热岩	仅研究(结垢严重)	2003~2007, 2015 重启		Sigfússon and Uihlein, 2015
德国	18	Mauerstetten	干热岩	仅研究(造储效果不佳,经费问题)	2011~2012, 2015 重启		
英国	19	Eden	干热岩	计划	2010 至今	计划 4	
匈牙利	20	Szeged	干热岩	计划	2016 至今	计划 8.9	
法德合作	21	GEOSTRAS	干热岩	计划	2012 至今	计划 6.7	
德国	22	Landau	EGS	暂停(2013 年工区发生地震)	2003~2013	2.9~3	Sigfússon and Uihlein, 2015; Lu Shyi-Min, 2018
澳大利亚	23	Paralana	干热岩	暂停(经费问题)	2005~2014		Sigfússon and Uihlein, 2015
美国	24	Fenton Hill	干热岩	结束	1974~1992	0.06	Sigfússon and Uihlein, 2015; Lu Shyi-Min, 2018
德国	25	Falkenberg	干热岩	结束(技术不足、温度流量低)	1977~1986		Sigfússon and Uihlein, 2015
法国	26	Le Mayet	干热岩	结束(技术不足、温度流量低)	1978~1986		
瑞典	27	Fjällbacka	干热岩	结束(技术不足、温度流量低)	1984~1995		
英国	28	Rosemanowes	干热岩	结束(技术不足、温度流量低)	1984~1992		

国家	No.	项目	类型	现状	启动年份	发电能力 (MW)	资料来源
日本	29	Hijiori	干热岩	结束(漏失、结垢)	1985~2002	0.13	Sigfússon and Uihlein, 2015; Lu Shyi-Min, 2018
日本	30	Ogachi	干热岩	结束(资金问题)	1989~2002		Sigfússon and Uihlein, 2015
美国	31	Coso	干热岩	结束(钻井、压裂事故)	2002~2012		
德国	32	GeneSys Horstberg	干热岩	结束	2003		
美国	33	Bradys	EGS	结束	2008~2015		
	34	Desert Peak	EGS	结束	2012~2013	1.7	
德国	35	Bad Urach	干热岩	终止(技术不足、财务困难)	1977~2008		
澳大利亚	36	Hunter valley	干热岩	终止(缺少政策及资金支持)	1999~2015		
澳大利亚	37	Cooper Basin Habanero	干热岩	终止(资金问题)	2003~2013	1	
瑞士	38	Basel	干热岩	终止(伴生地震)	2005~2009		
美国	39	Southeast Geysers	EGS	终止(井筒垮塌)	2008~2009		
瑞士	40	St. Gallen	EGS	终止(伴生地震)	2009~2014		
韩国	41	Pohang	干热岩	终止(工区地震)	2010~2017		Song et al., 2015; KGS & CCPE, 2019

上莱茵河堑属于比利牛斯造山运动后形成的从地中海延伸至北海的横贯欧洲裂谷系统的一部分,为裂谷盆地地壳减薄区,地堑演化过程中形成的很薄的沉积物呈现出异常高的地温梯度(105℃/km)。中始新世至早中新世,莱茵地堑区域沿先存的海西期剪切带发生伸展作用,产生正断层并下沉;上新世中期后就转为左旋运动,使挤压轴与裂谷斜交形成了逆断层(滕吉文等,1997)。上莱茵地堑内干热岩开发项目主要针对目的层由上至下依次为中生代地层和石炭纪花岗岩侵入体,后者又可进一步划分为上部受水热蚀变的花岗岩和深部的二云母花岗岩(Vidal et al., 2018)。大部分干热岩开发项目以开发地堑斜坡位置的花岗岩储层为主,仅德国 Insheim 项目位于地堑中部,沉积岩底板埋深可达近 3500 m。

中生界沉积地层中的干热岩目的层主要包括三叠系和二叠系沉积岩。德国 Landau 项目的二叠系沉积岩储层以粗碎屑岩(陆相砾岩)、河流和风成砂岩、页岩和蒸发岩为主,其上发育三叠系砂岩。德国 Insheim 项目二叠系和三叠系砂岩储合计约 500 m 厚,并发育连通天然裂隙(Baumgärtner et al., 2013);德国 Bruchsal 项目以二叠系和三叠系砂岩为目的储层,含水破碎带控制了砂岩热储的渗透性(Meixner et al., 2016)。此套热储层温度相对较低,约 120~130℃。

为保证持续发电能力,法国 Soultz-sous—Forêts 未对浅部的沉积岩和受水热蚀变花岗岩进行储层改

造,仅针对 4500~5230 m 的未蚀变花岗岩开展工作。该花岗岩层为灰色细粒二云母花岗岩,年龄约 327 ± 7 Ma (Cocherie et al., 2004),孔隙度约为 0.5% (Géraud et al., 2010),发育 N—S 走向破碎带。瑞士 Basel 项目钻遇了受水热蚀变的角闪石—黑云母二长花岗岩和其下部未蚀变的二云母花岗岩,均发育 NW—SE 至 NNW—SSE 走向破碎带;德国 Landau(2400 m 深度)和 Insheim 项目(3500 m 深度)钻遇受水热蚀变的斑状花岗岩,其内部的含水破碎带在一定程度上控制了热储层内的流体流动(Vidal and Genter, 2018)。花岗岩热储层整体温度 150~165℃。

整体而言,上莱茵地堑内的干热岩开发项目深部均发育有花岗岩,并可划分为上部受水热系统蚀变的斑状花岗岩和下部未蚀变的二云母花岗岩,但部分项目钻井未钻至花岗岩层而以上部的沉积岩地层为储层(德国 Bruchsal 和 Landau),部分钻至斑状花样岩层(德国 Insheim),仅法国 Soultz-sous—Forêts 和瑞士 Basel 项目钻遇了未蚀变二云母花岗岩层。

2.2 磨拉石盆地

磨拉石盆地属于阿尔卑斯褶皱带前渊,位于阿尔卑斯山北侧,西起法国东至奥地利(盆地主体主要分布于瑞士和德国南部)东西长 900 km,南北宽 120 km。磨拉石盆地是前陆盆地开发地热资源的典型案例,盆地具有快速变化的地热背景值,以慕尼黑巴伐利亚为例,3500 m 深度最高和最低的地层温度差可以达到 40℃(Agemar et al. 2012)。

磨拉石盆地经过了四个主要发育阶段:石炭系—二叠系受控于华力西右旋扭动产生断陷,先后发育河流相沉积和冲积扇和干盐湖沉积;中生代发育为被动大陆边缘,发育的上侏罗统玛姆统(Malm)碳酸盐岩为盆地的主要热储层,主要由白色灰岩和细晶至粗晶白云岩组成(Wolfgramm et al., 2007);晚白垩世,古近纪非洲大陆与欧洲大陆碰撞产生前渊盆地复理石沉积;始新世至早中新世,随着奥地利—阿尔卑斯和彭尼内推覆体仰冲于北欧克拉通的边缘之上,阿尔卑斯前渊的磨拉石盆地中心向北欧克拉通方向不断迁移;新近纪前渊盆地北移,发育磨拉石沉积(朱伟林等,2011)。

磨拉石盆地内的干热岩开发项目有德国的 Unterhaching、Mauerstetten、Falkenberg, 奥地利

Altheim 和瑞士 St. Gallen,主要针对中生界碳酸盐岩储层,除 Falkenberg 项目外钻井深度介于 2000 ~ 4000 m,井底温度约 105 ~ 150 ℃ (Sigfússon and Uihlein, 2015)。受地热背景、储层物性与岩相变化影响,磨拉石盆地内的地热项目大多数没有达到预期的温度或压力,针对这一现象,Moeck 等(2013)提出,前陆盆地型的地热勘探需针对不同部位采用构造地质学、生物地层学和地质力学等不同方法开展综合研究。

3 北美及加勒比地区干热岩开发项目分布特点

北美及加勒比地区的 11 个干热岩开发项目中, 9 个位于北美板块中、新生代科迪勒拉造山带,

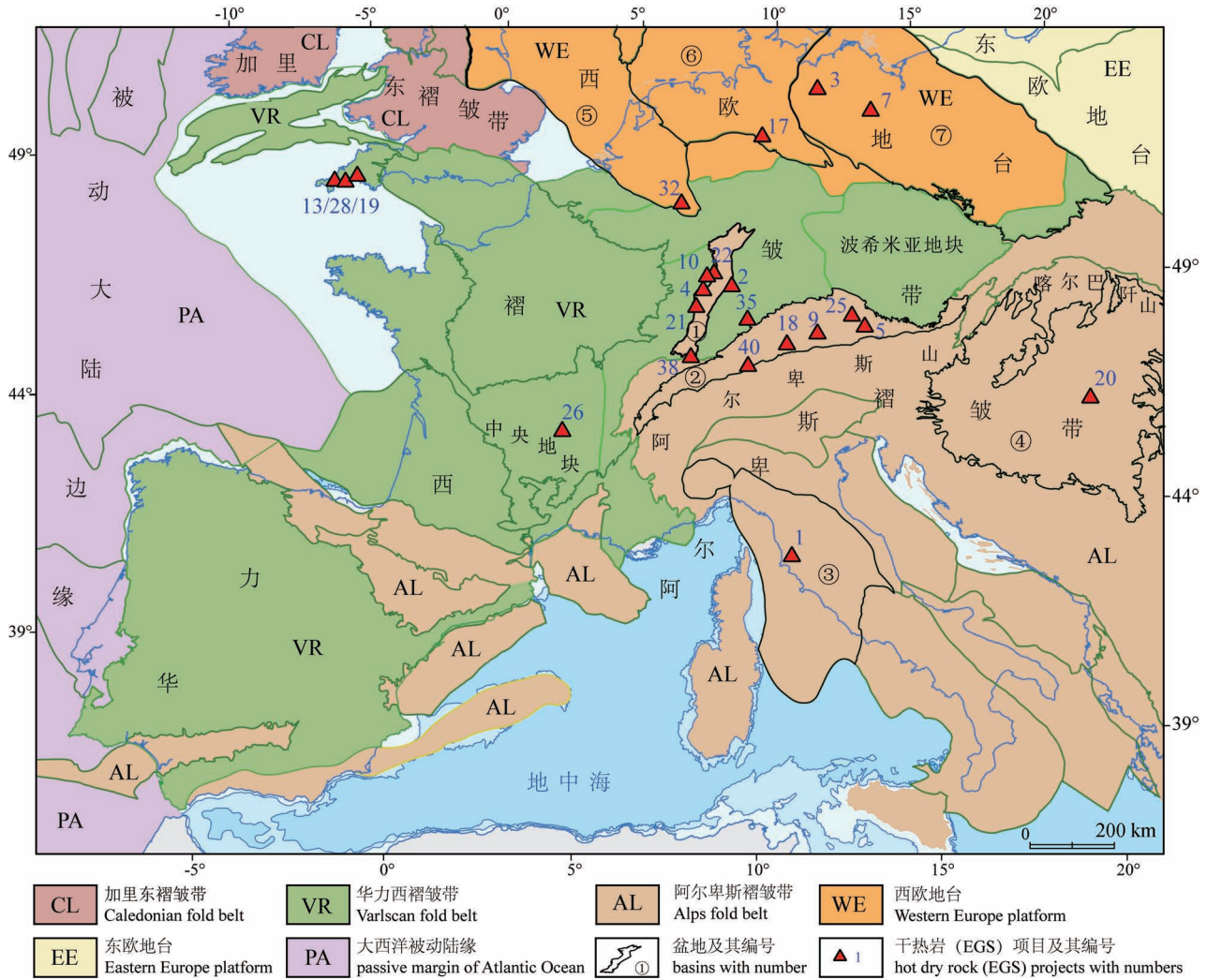


图 2 欧洲地区干热岩开发项目大地构造单元分布(构造区划据朱伟林等,2011)

Fig. 2 Tectonic map of hot dry rock (EGS) projects in Europe (tectonic units according to Zhu Weilin et al., 2011#)

盆地: ①上莱因地堑; ②磨拉石盆地; ③北亚平宁盆地; ④潘诺盆地; ⑤英荷盆地; ⑥西北德国盆地; ⑦东北德国盆地

Basins: ①Upper Rhine Graben; ②Molasse Basin; ③Northern Apennines Basin; ④Pannonian Basin;

⑤Anglo—Dutch Basin; ⑥Northwest German Basin; ⑦Northeast German Basin

Fenton Hill 项目位于北美板块中元古代北美增生型造山带,Bouillante 项目位于加勒比板块(图 3)。

北美板块中、新生代科迪勒拉造山带内是北美干热岩开发项目最为集中的构造单元,科迪勒拉造山带由多个增生地体、变质岩和花岗岩组成,并在新生代进一步发育了火山岛弧,并一直延伸到拉丁美洲,构成了北美地区干热岩开发项目的热储改造地层基础,科迪勒拉造山带内的 9 个干热岩开发项目中,4 个以火山岩为储层改造目的层、2 个以变质岩为储层改造目的层、2 个以花岗岩为储层改造目的层,仅 Southeast Geysers 项目以浅部沉积岩为储层改造目的层。

在科迪勒拉造山带内,干热岩开发项目主要分

布在内华达盆地及其邻近地区,属于造山带中的高原塌陷伸展裂谷盆地,由于拆离伸展作用,盆地变成一个个小的盆地和南北向的山系组成的盆岭省(朱伟林等,2016),火山活动剧烈。距今 16~17Ma,黄石地幔柱开始活动并逐渐增大,坐落在黄石地幔柱上方的盆岭省发生显著的伸展作用致巨量碱性玄武岩浆上升喷发;距今 5 Ma 左右法拉隆板块俯冲作用停止,黄石地幔柱影响成为盆岭地区主控构造背景,盆岭地区进一步伸展变形、地壳强烈沉降,岩浆活动持续,且除玄武岩外,还有流纹质火山岩喷发(舒良树等,2006),Desert Peak 项目的目的储层即与此相关。

干热岩资源的热源均与年轻的伸展构造、第四

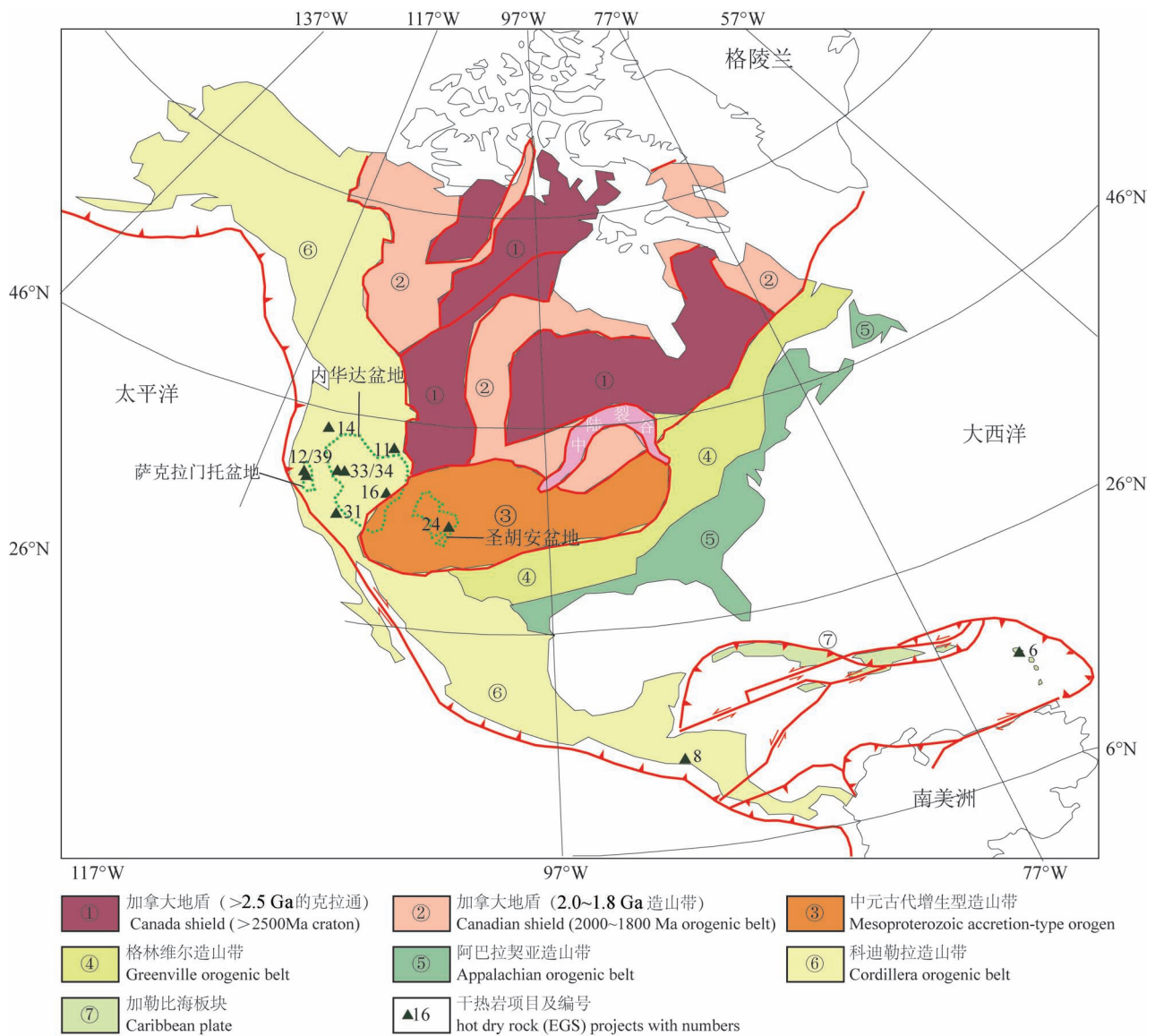


图 3 北美地区干热岩开发项目大地构造单元分布(构造区划据朱伟林等,2016)

Fig. 3 Tectonic map of hot dry rock (EGS) projects in North America (tectonic units according to Zhu Weilin et al., 2016#)

纪岩浆活动有关,部分干热岩开发项目目的层之上的沉积盖层也与火山事件相关,如米尔福德 EGS 场地盖层为新生代火山—沉积,岩性以凝灰岩和凝灰质沉积岩为主;基底由新生代花岗岩和前寒武纪片麻岩组成,片麻岩的变质年龄为 1720 Ma,侵入事件发生于 18 Ma 和 11~8 Ma,其后又发生了第四纪火山(0.8~0.5 Ma)喷发(张森琦等,2019),该项目即以新生界火山地层为热储改造目的层。

4 澳大利亚及东亚干热岩开发项目分布特点

澳大利亚的 3 个干热岩开发项目分别位于其东南部的南澳克拉通内元古宙盆地(Paralana)和塔斯曼褶皱带内的库珀盆地(Habanero)、悉尼盆地(Hunter valley)(图 4),均以花岗岩作为干热岩储层改造的目的层(Sigfússon and Uihlein, 2015),钻井深度介于 1807~4459m,储层温度最高可到 278℃。Paralana 项目位于南澳克拉通内的元古宙盆地,基底由元古宙花岗岩和片麻岩组成,具有高放射性组分并导致了该区域出现明显的高地表热流值(126 mW/m²),其上覆盖着古近系—新近系至新元古界沉积岩;埋深 2815 至 3360 m 的一套厚层均质石英岩层被作为储层改造的目的层(Albaric et al., 2014)。Hunter valley 项目所在的塔斯曼褶皱带悉尼盆地属于前陆盆地,从晚石炭世末到中三叠世经历了弧后扩张到前陆盆地的转化,盆地基底为拉克兰(Lachlan)褶皱带和晚石炭系火山岩沉积物;Hunter valley 是澳大利亚第一个干热岩开发项目,基于该地区具有高地温梯度和低重力异常而被发现(Wyborn et al., 1995)。Habanero 项目所在的塔斯曼褶皱带库珀盆地是东澳大利亚主要克拉通盆地之一,主要为石炭纪—三叠纪盆地,其上被面积更大的侏罗纪—白垩纪发育的埃罗

曼加盆地所覆盖(朱伟林等,2013);项目的目的层为库珀盆地基底的 300~320 Ma 的中粒—粗粒花岗岩层,经历了冰川和热液侵蚀从而发育天然裂隙(Llanos et al., 2015)。

东亚地区的干热岩开发项目包括包括日本的 Hijiori、Ogachi,韩国的 Pohang 和中国青海共和。

日本 Hijiori 和 Ogachi 项目以探索近现代火山型干热岩资源为目标(陆川,王贵玲,2015;杨冶等,2019),前者位于日本东北岛弧的 Hijiori 活火山的南部边缘(大约在 12 ka 前首次喷发,目前地表火山机构属于破火山口,直径约 2 km, Miyagi et al., 2017),1500 m 深度温度可达 225℃(许天福等,2016);后者位于 Yamabushi 火山,目标储层岩性为花岗闪长岩,1000 m 深度温度达 230℃(许天福等,2016)。

韩国 Pohang 项目位于早中新世东海张开过程的弧后伸展阶段作用形成的 Pohang 盆地内,自上而下发育地层依次为薄层第四系冲积层、200~400 m 厚新近系中新统泥岩、约 1000 m 厚白垩系砂泥岩及

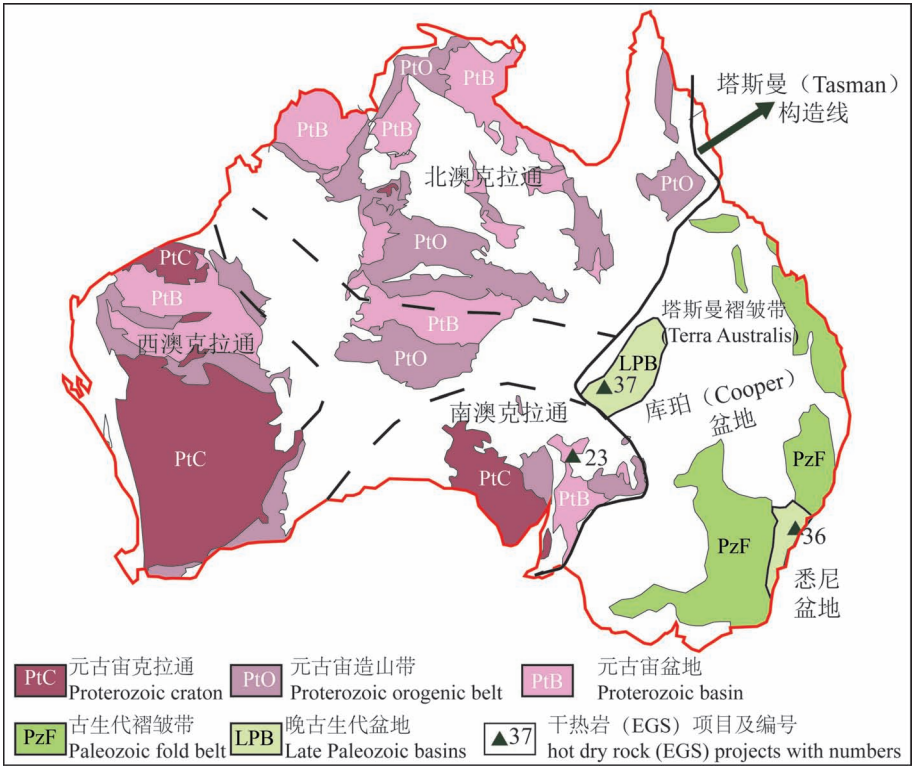


图 4 澳大利亚主要克拉通地质及干热岩开发项目分布图(构造单元据 Cawood and Korsch, 2008; 朱伟林等, 2013)

Fig. 4 Distribution map of the main craton shields and hot dry rock (EGS) projects in Australia (tectonic map from Cawood and Korsch, 2008; Zhu Weilin et al., 2013#)

始新世火山侵入岩、约 900 m 厚白垩系安山岩和火山凝灰岩,约 2350 m 进入花岗闪长岩基底(KGS & CCPE, 2019),干热岩热储改造即针对花岗岩基底。Pohang 地区平均地温梯度高于韩国其它地区,地下 4~4.5 km 温度可达 180 ℃(Song et al., 2015)。

中国青海共和干热岩开发项目在大地构造上位于西秦岭、南祁连、东昆仑三大造山带的接合部的共和盆地,属于比较典型的中—新生代断陷盆地(裂谷盆地)(王吉玉等,1979;许天福等,2018),地热异常可能与青藏高原隆升,地壳压缩增厚,上地壳部分熔融有关,目标干热岩体以中—晚三叠世花岗闪长岩、二长花岗岩为主,3705 m 处的孔底温度达 236

℃(张森琦等,2019)。

5 全球主要干热岩开发项目构造背景研究

排除未钻至目的层、储层温度较低或尚未实施钻探的干热岩开发项目,对全球 33 个干热岩开发项目进行分析,其所处的大地构造背景主要有 7 类,分别为克拉通盆地、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。克拉通盆地型的主要发育在印澳板块澳大利亚西南部,以开发深部结晶基底花岗岩为主,其上及周边没有水热型储层,钻井深度介于 1800~4500 m,储层温度

表 3 全球 33 个干热岩开发项目构造背景及储层特征表(资料来源见表 2)

Table 3 Table of tectonic setting and reservoir characteristics of 33 hot dry rock (EGS) projects in the world (Source of data see table 2)					
构造背景类型	所处盆地	项目名	储层类型	钻井深度(m)	热储温度(℃)
克拉通盆地	Cooper 盆地	Habanero	花岗岩(干热岩)	3700~4459	242~278
	南澳克拉通内的元古宙盆地	Paralana	花岗岩(干热岩)	1807~4003	170
前陆盆地	悉尼盆地	Hunter valley	花岗岩(干热岩)	1946	275
	阿尔卑斯褶皱带	Altheim	中生界碳酸盐岩(EGS)	2165~2306	105
	磨拉石盆地	Unterhaching	中生界碳酸盐岩(EGS)	3350 ~3380	123
		Mauerstetten	中生界碳酸盐岩、花岗岩(干热岩)	4080(失败)	130
		St. Gallen	中生界沉积岩(EGS)	4450	130~150
	阿尔卑斯褶皱带北亚平宁盆地	Lardarello	变质岩(EGS)	2500~4000	
	西欧地台北德国盆地	Neustadt—Glewe	砂岩(EGS)	2320	99
		Groß—Schnebeck	砂岩、安山岩(干热岩)	4309~4400	145
	西欧地台西北德国盆地	GeneSys Hannover	三叠系砂岩(干热岩)	2900~3800	150~160
裂谷盆地	阿尔卑斯褶皱带上莱茵地堑	Bruchsal	三叠系砂岩(EGS)	1930~2540	120~130
		Soultz-sous—Forêts	石炭纪花岗岩(干热岩)	3600~5000	165
		Insheim	二叠系砂岩、石炭纪花岗岩(EGS)	3600~3800	165
		Landau	二叠系砂岩、石炭纪花岗岩(EGS)	3170~3300	159
		Basel	石炭纪花岗岩(干热岩)	2700~5003	预计 200
	北美科迪勒拉造山带内华达盆地	Raft river	变质岩(EGS)		150
		Newberry Volcano	火山岩(干热岩)	3066	315
		Milford	新生代花岗岩(EGS)	2133.6~3854	175~230
		Coso	花岗岩(干热岩)	2430~1956	300
		Bradys	火山岩(EGS)	1320	200
		Desert Peak	流纹岩(EGS)	1000	210
	秦岭造山带西端共和盆地	共和	三叠纪花岗岩(干热岩)	2927.2~3705	150~236
弧前盆地	北美科迪勒拉造山带萨克拉门托盆地	Northwest Geysers	变质沉积岩(EGS)	3058~3396	~400
弧后盆地	科迪勒拉造山带太平洋海岸平原盆地	Berlin	火山岩(EGS)	2000~2380	179~196
近现代火山	东海 Pohang 盆地	Pohang	花岗岩(干热岩)	4348~4361.88	约 180
	环太平洋火山带	Hijiori	花岗岩(干热岩)	1788~2300	270
	环太平洋火山带	Ogachi	花岗岩(干热岩)	400~1100	60~228
	中元古代增生型造山带圣胡安盆地	Fenton Hill	前寒武纪结晶岩(干热岩)	2932~4390	200~327
	Lesser Antilles 火山岛弧带	Bouillante	火山岩(EGS)	1000~1500	250~260
褶皱带内隆起区	华力西褶皱带	Eden	花岗岩(干热岩)	4000	估计 180~190
		Rosemanowes	花岗岩(干热岩)	2600	79~100
		Bad Urach	变质岩(干热岩)	4300~4445	170

在 170~180 ℃。前陆盆地型干热岩开发项目主要集中在欧亚板块欧洲部分的阿尔卑斯褶皱带、西欧地台,前者以开发中生界碳酸盐岩储层内的干热资源为主,后者则针对三叠系砂岩,此外,澳大利亚悉尼盆地内也有针对花岗岩基底的干热岩开发项目。裂谷盆地型干热岩开发项目主要分布在欧亚板块阿尔卑斯褶皱带内的上莱茵地堑、北美板块科迪勒拉造山带内的内华达盆地,分别以石炭纪火山岩及其上覆的上古生界碎屑岩和新生界火成岩为目的层,前者储层温度相对较低,介于 120~170 ℃ 为主,后者介于 150~315 ℃,为各类干热岩开发项目中储层温度最高的地区,我国青海共和干热岩开发项目从地质背景角度与北美内华达盆地内的干热岩开发项目具有一定的相似性。弧前、弧后盆地及火山带内的干热岩开发项目均集中在环太平洋地区。此外,华力西褶皱带隆起区也有部分干热岩开发项目分布。

6 结 论

截至 2019 年初,全球目前先后实施了 41 个干热岩开发项目,主要分布在欧洲、北美洲、澳洲、亚洲、中美洲的 14 个国家,其中德国、美国为实施干热岩开发项目最多的国家。41 个项目中,25 个属于传统意义的干热岩开发项目,16 个属于增强型地热系统(EGS)。

全球干热岩开发项目所处的大地构造背景包括克拉通盆地、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。克拉通盆地型的主要发育在印澳板块澳大利亚西南部;前陆盆地型干热岩开发项目主要集中在欧亚板块欧洲部分的阿尔卑斯褶皱带、西欧地台;裂谷盆地型干热岩开发项目主要分布在欧亚板块阿尔卑斯褶皱带内、北美板块科迪勒拉造山带内;弧前、弧后盆地及火山带内的干热岩开发项目均集中在环太平洋地区。

欧洲阿尔卑斯褶皱带上莱茵地堑、北美新生代科迪勒拉造山带内华达盆地是干热岩开发项目分布最为集中的区域,均属于裂谷盆地,与我国干热岩资源分布区的地质构造背景具有一定的相似性,其近 40 年的干热岩勘探、开发与利用历程和经验对我国青海共和干热岩开发项目具有重要的指导作用,且对我国东部人口稠密、经济发达的渤海湾裂谷盆地勘探、开发沉积盆地型干热岩资源提供一定的借鉴作用。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

国家能源局. 2009. NB-T 10097-2018 地热能术语. 北京: 中国石化出版社.

何治亮, 冯建赟, 张英, 李鹏伟. 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.

荆铁亚, 赵文韬, 邵时旺, 王金意, 张健. 2018. 干热岩地热开发实践及技术可行性研究. 中外能源, 23(11): 17~22.

李江海, 韩喜球, 毛翔. 2014. 全球构造图集. 北京: 地质出版社.

陆川, 王贵玲. 2015. 干热岩研究现状与展望. 科技导报, 33(19): 13~21.

舒良树, 王德滋. 2006. 北美西部与中国东南部盆岭构造对比研究. 高校地质学报, 12(1): 1~13.

王吉玉, 张兴鲁. 1979. 青海省共和盆地的第四纪地层. 地质论评, 25(2): 15~20.

滕吉文, 张中杰. 1997. 东亚大陆伸展和裂谷作用与动力学. 地球物理学进展, 12(2): 1~29.

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.

许天福, 袁益龙, 姜振蛟, 侯兆云, 冯波. 2016. 干热岩资源和增强型地热工程: 国际经验和我国展望. 吉林大学学报(地球科学版), 46(4): 1139~1152.

杨冶, 姜志海, 岳建华, 刘树才. 2018. 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, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20181023.0923.010.html>

张森琦, 文冬光, 许天福, 付雷, 贾小丰, 孙晟, 翁炜, 张杨, 杨涛, Joseph Moore, 蒋恕, Rick Allis, John McLennan. 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, <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2019.2.9>

郑人瑞, 周平, 唐金荣. 2017. 欧洲地热资源开发利用现状及启示. 中国矿业, 26(5): 13~17.

周舟, 金衍, 卢运虎, 周博成. 2018. 干热岩地热储层钻井和水力压裂工程技术难题和攻关建议. 中国科学(D), <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5848.N.20181107.0913.004.html>.

朱伟林, 侯贵廷, 房殿勇, 等. 2016. 北美洲含油气盆地. 北京: 科学出版社.

朱伟林, 胡平, 季洪泉. 2013. 澳大利亚含油气盆地. 北京: 科学出版社.

朱伟林, 杨甲明, 杜栩. 2011. 欧洲含油气盆地. 北京: 科学出版社.

Agemar T, Schellschmidt R, Schulz R. 2012. Subsurface temperature distribution in Germany. Geothermics, 44: 65~77.

Albaric J, Oye V, Langet N, Hasting M, Lecomte I, Iranpour K. 2014. Monitoring of induced seismicity during the first geothermal reservoir stimulation at paralana, Australia. Geothermics, 52: 120~131.

Barrios L A, Quijano J E, Romero R E, Mayorga H, Castro M, Caldera J. 2002. Enhanced permeability by chemical stimulation at the Berlin geothermal field, El Salvador. Transactions — Geothermal Resources Council 26: 73~78.

Baumgärtner J, Teza D, Wahl G. 2013. Gewinnung geothermischer Energie durch Entwicklung und Zirkulation eines Störungssystems im Kristallin und deren mikroseismische Überwachung am Beispiel des Geothermieprojektes Insheim (Internal Report No. 0325158). (Bestec GmbH, Landau, Germany).

- Breede K, Dzebisashvili K, Liu Xiaolei, Falcone G. 2013. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future. *Geothermal Energy*, 1(1): 4.
- Brown D. 1995. The US hot dry rock program—20 years of experience in reservoir testing. *Proceedings of World Geothermal Congress, Italy*: 2607~2611.
- Cawood P A, Korsch R J. 2008. Assembling Australia: Proterozoic building of a continent. *Precambrian Research*, 166(1): 1~35.
- Cocherie A, Guerrot C, Fanning M C, Genter A. 2004. Datation U-Pb des deux faciès du granite de Soultz (Fossé Rhénan, France). *Comptes Rendus Geosciences (C.R. Geosci.)*, 336: 775~787.
- Géraud Y, Rosener M, Surma F, Place J, Le Garzic É, Diraison M. 2010. Physical properties of fault zones within a granite body: example of the Soultz-sous-Forêts geothermal site. *Comptes Rendus Geosciences (C.R. Geosci.)*, 342: 566~574.
- Hashizume Ryokichi. 1995. Study of hot dry rock geothermal power plant in the kansai area. *Proceedings of World Geothermal Congress, Italy*: 2685~2690.
- He Zhiliang, Feng Jiangyun, Zhang Ying, Li Pengwei. 2017&. A tentative discussion on an evaluation system of geothermal unit ranking and classification in China. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 168~179.
- Hori Yoshinao. 1995. Project with multi-layer fracturing method for HDR geothermal power (outline and future plan). *Proceedings of World Geothermal Congress, Italy*: 2691~2693.
- Jing Tieya, Zhao Wentao, Gao Shiwang, Wang Jinyi, Zhang Jian. 2018&. Practice and technical feasibility study of hot dry rock geothermal development. *Sino—Global Energy*, 23(11): 17~22.
- Lachassagne P, Maréchal J C, Sanjuan B. 2009. Hydrogeological model of a high energy geothermal field (Bouillante area, Guadeloupe, French West Indies). *Hydrogeology Journal*, 17(7): 1589~1606.
- Li Jianghai, Han Xiqiu, Mao Xiang. 2014#. *Global Tectonic Atlas*. Beijing: Geological Press.
- Llanos E M, Zarrouk S J, Hogarth R A. 2015. Numerical model of the Habanero geothermal reservoir, Australia. *Geothermics*, 53: 308~319.
- Lu Chuan, Wang Guiling. 2015&. Current status and prospect of hot dry rock research. *Science & Technology Review*, 33(19): 13~21.
- Lu Shyi-Min. 2018. A global review of enhanced geothermal system (EGS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81: 2902~2921.
- Mas A, Guisneau D, Mas P P, Beaufort D, Genter A, Sanjuan B, Girard J P. 2006. Clay minerals related to the hydrothermal activity of the Bouillante geothermal field (Guadeloupe). *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 158(3): 380~400.
- Meixner J, Schill E, Grimmer J C, Gaucher E, Kohl T, Klingler P. 2016. Structural control of geothermal reservoirs in extensional tectonic settings: an example from the Upper Rhine Graben. *J. Struct. Geol.*, 82: 1~15.
- Miyagi Isoji, Kita Noriko, Morishita Yuichi. 2017. The geochemical and petrological characteristics of prenatal caldera volcano: A case of the newly formed small dacitic caldera, Hijiori, northeast Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172(9): 79.
- Moock I, Jensch A, Steiger T, Stiller M, Tondera D, Guido Blöcher. 2013. Geothermal field development in foreland basins: Case study Mauerstetten, Bavarian Molasse Basin (Germany). *Egu General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts*. National Energy Administration. 2009#. NB-T 10097-2018 Terminology of Geothermal Energy. Beijing: Sinopec Press.
- Park S, Xie L, Kim K I, Kwon S, Mina K B, Choi J, Yoon W S, Song Y. 2017. First hydraulic stimulation in fractured geothermal reservoir in Pohang PX-2 well. *Procedia Engineering*, 191: 829~837.
- Shu Liangshu, Wang Dezi. 2006&. A comparison study of basin and range tectonics in the western north America and southeastern China. *Geological Journal of China Universities*, 12(1): 1~13.
- Sigfússon B, Uihlein A. 2015. Technology, market and economic aspects of geothermal energy in Europe. 2015 European Commission — Joint Research Centre (JRC) Geothermal Energy Status Report.
- Song Y, Lee T J, Jeon J, Yoon W S. 2015. Background and progress of the Korean EGS Pilot Project. In: *Proceedings of World Geothermal Congress 2015*. Melbourne: International Geothermal Association, 2015.
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie. 1997&. Continental extension, rift action and dynamics in eastern Asia. *Progress in Geophysics*, 12(2): 1~29.
- Tester J W, Anderson B J, Batchelor A S, Blackwell D D, DiPippo R, Drake E M, Garnish J, Livesay B, Moore M C, Nichols K, Petty S. 2006. The future of geothermal energy. Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 372.
- The Geological Society of Korea (KGS), Korean Government Commission on the Cause of the Pohang Earthquake (CCPE). 2019. Summary report of the Korean Government Commission on relations between the 2017 Pohang earthquake and EGS Project.
- Vidal J, Genter A. 2018. Overview of naturally permeable fractured reservoirs in the central and southern Upper Rhine Graben: Insights from geothermal wells. *Geothermics*, 74: 57~73.
- Wang Yuji, Zhang Xinglu. 1979#. Quaternary strata of Gonghe basin, Qinghai Province. *Geological Review*, 25(2): 15~20.
- Wolfgramm M, Bartels J, Hoffmann F, Kittl G, Lenz G, Seibt P, Schulz R, Thomas R, Unger H J. 2007. Unterhaching geothermal well doublet: structural and hydrodynamic reservoir characteristics; Bavaria (Germany), in: *Proceedings European Geothermal Congress 2007*, German Geothermal Association, Berlin.
- Wyborn D, Somerville M, Bocking M, Murray A. 1995. Australian hot dry rock geothermal energy potential and a possible test site in the Hunter Valley. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*(8), 375A.
- Xu Tianfu, Hu Zixu, Li Shengtao, Jiang Zhenjiao, Hou Zhaoyun, Li Fengyu, Liang Xu, Fengbo. 2018&. Enhanced geothermal system: international progress and research status of China. *Acta Geologica Sinica*, 92(9): 1936~1947.
- Xu Tianfu, Yuan Yilong, Jiang Zhenjiao, Hou Zhaoyun, Feng Bo. 2016&. Hot dry rock and enhanced geothermal engineering: international experience and China prospect. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(4): 1139~1152.
- Yang Ye, Jiang Zhihai, Yue Jianhua, Liu Shucai. 2018&. Discussion on application of geophysical methods in hot dry rock exploration. *Progress in Geophysics*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20181023.0923.010.html>.
- Zhang Senqi, Wen Dongguang, Xu Tianfu, Fu Lei, Jia Xiaofeng, Sun Sheng, Weng Wei, Zhang Yang, Yang Tao, Joseph Moore, Jiang Shu, Rick Allis, John McLennan. 2019&. Frontier observatory for research in geothermal energy project and comparison of typical EGS site exploration status in China and U.S. *Earth Science Frontiers*,

<https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2019.2.9>.

Zheng Renrui, Zhou Ping, Tang Jinrong. 2017. Current status and enlightenments of geothermal development in Europe. *China Mining Magazine*, 26(5): 13~17.

Zhou Zhou, Jin Yan, Lu Yunhu, Zhou Bocheng. 2018. Present challenge and prospects of drilling and hydraulic fracturing technology for hot dry rock geothermal reservoir. *Scientia Sinica*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5848.N.20181107.0913.004>.

html.

Zhu Weilin, Hou Guiting, Fang Dianying, et al. 2016. North American Petroliferous Basins. Beijing: Science Press.

Zhu Weilin, Hu Ping, Ji Hongquan. 2013. Australia Petroliferous Basins. Beijing: Science Press.

Zhu Weilin, Yang Jiaming, Du Xu. 2011. Europe Petroliferous Basins. Beijing: Science Press.

The global development process of hot dry rock (enhanced geothermal system) and its geological background

MAO Xiang^{1, 2)}, GUO Dianbin^{1, 2)}, LUO Lu^{1, 2)}, WANG Tinghao^{1, 2)}

1) *New Energy Research Institute, SINOPEC Star Petroleum Co., Ltd., Beijing, 100083;*

2) *Key Laboratory of Geothermal Exploitation and Utilization, SINOPEC, Beijing, 100083*

Abstract: Hot dry rock is one kind of geothermal energy with great development potential. It refers to the rocks with a temperature higher than 180 °C and does not exist or only exists a small amount of fluid inside. Since the built of Fenton Hill project in the United States in 1970s, 41 hot dry rock (EGS) projects were constructed in 14 countries around the world. Based on the existence of hydrothermal reservoirs around or above the hot dry rock, the 41 projects can be divided into two types, 25 belong to traditional hot dry rock systems and 16 belong to enhanced geothermal systems (EGS). From the point of plate tectonic, these hot dry rock (EGS) projects are mainly distributed in the thermal realm of the Eurasian plate interior, the India—Australian plate interior, the divergence and convergent plate margin of the eastern Pacific Ocean, the convergent plate margin of the western Pacific Ocean, and the volcanic island arc area of the Caribbean Sea. From the point of the basin type, craton basins, foreland basins, rift basins, fore-arc/back-arc basins, fold belts and modern volcanic belts are the main structural settings of hot dry rock (EGS) projects. Among them, the foreland basin which represented by Molasse basin in the European Alps fold belt, and the rift basin which represented by Upper Rhine Graben in the European Alps fold belt and Nevada basin in the north American Cordillera orogenic belt are the two main basin types with a large number of hot dry rock (EGS) projects. Considering the distribution of China's hot dry rock, the development experiences of the Upper Rhine Graben and the Nevada basin will be valuable for exploring and developing hot dry rock (EGS) in China.

Keywords: hot dry rock; enhanced geothermal system (EGS); development process; projects distribution; tectonic setting; reservoir characteristics

Acknowledgements: This study was financially co-sponsored by Sinopec scientific research projects “Comparative study on hydrochemical characteristics of typical geothermal field in China” (No. JKL18033) and “Research on Key Engineering Techniques for Exploration and Development of Hot Dry Rocks (EGS)” (No. JP17013)

First author: MAO Xiang, male, born in 1986, Senior Engineer, is mainly engaged in the research of tectonic and geothermal resources. Email: maoxiang.xxsy@sinopec.com; maoxiang.pku@163.com

Manuscript received on: 2019-04-21; Accepted on: 2019-10-08; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.06.013