

我国增强型地热系统选址问题探讨

苏正, 王晓星, 胡剑, 吴能友

(中国科学院广州能源研究所, 可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广州: 510640)

摘要: 增强型地热系统(简称EGS)是目前地热领域的重要发展方向, EGS研究受到了发达国家的普遍重视。本文考察了EGS的勘查选址原则和国际典型案例, 并结合我国地热资源分布特征, 评估各地热资源分布区的开发潜力, 探讨不同地热带EGS选址的可能性。最终将我国进行EGS项目的选址地区分为三类: 优先开发利用区、勘探开发区、综合调查区。为我国EGS开发可行性评价等基础研究及项目实施提供参考。

关键词: EGS; 选址; 开发潜力

0 引言

增强型地热系统(EGS-Enhanced/Engineered Geothermal Systems)是指在地下3~10 km低渗透性的高温岩体中, 经济地开采相当数量的热能, 并用于发电的人工热能系统。1970年, 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory)最早提出了这种高温岩体地热资源开发的概念与思路; 1974年, 世界上第一个EGS试验在美国的芬登山(Fenton Hill)正式开始; 随后, 日本、英国、法国等经济发达的能源消耗大国也投入巨资进行基础科学试验研究, 甚至将其纳入国家开发计划。尽管受资金、技术等条件限制, 目前EGS还没有形成工业规模, 但少数国家已经进行了工业试验, 如美国的沙漠峰(Desert Peak)、英国的罗斯曼奴斯(Rosemanowes)、法国的苏尔士(Soultz)、澳大利亚的库伯盆地(Cooper Basin)、日本的肘折(Hijiori)和雄胜(Ogachi)等。经过近40年的探索和发展, EGS开发过程中涉及的各项技术正日趋成熟(杨伍林, 2007)。然而, 我国EGS研究仍处于起步阶段(徐世光等, 2009; 尹立河, 2010; 陈墨香等, 1994)。

地热田的形成是一个地区地质结构和地质演化的产物, 因此, 地热资源开发, 首先是一个地质学问题(郭进京等, 2008; 郭进京等, 2010; 赵阳升等, 2004)。根据对深层地热产出条件的分析, 认为在地壳深部总会存在高温岩体, 只是

赋存深度或深或浅。但在EGS经济性开发中, 总是希望在较浅地层中获取温度较高的地热田, 并期许获得的热能资源能被高效利用(杨伍林, 2007)。因此, EGS选址问题尤为关键。本文将通过对比EGS和常规水热型地热资源, 并参考国外已有EGS试验案例, 分析影响EGS选址的因素, 进一步结合我国高温岩体地热资源及地热电站分布, 探讨不同地热带中EGS选址的可能性, 旨在为我国EGS开发可行性评价等基础研究及项目实施提供参考。

1 EGS 勘查选址原则

目前, 地热开发的主要对象是天然的水热型地热资源, 即通过直接获取地下水提取地下热能, 其资源形成除热源外, 热储层内必须含有流体, 具有高渗透性, 下伏于不透水或弱透水的盖层, 同时有足够的流体补给以维持地热田的长期运行(徐世光等, 2009)。而EGS开发目标定位于地壳深部, 理论上高温岩体普遍存在, 利用水力压裂等井下作业措施在高温岩体中造成具有高渗透性的裂隙体系, 利用热交换介质(水或CO₂)在注入井、“人造热储”、生产井组成的“闭合回路”之间循环来实现热能提取, 其开发过程涉及的各项技术实现难度极大, 相比之下, 对资源地质状况要求并不十分苛刻。但高温岩体的埋深、结构、地应力状态以及所处地表的自然环境

等特点仍然会对项目的经济性产生显著影响（杨伍林，2007）。目前宏观上对地热资源的勘探与开发，方法技术还主要引进石油、天然气和金属矿产的勘探方法技术，譬如重磁法、电磁法等，还配合 3S 及计算机技术进行勘探（周厚芳等，2003；曾昭发等，2012）；而微观上的勘查选址则需要考虑更多因素。

具体而言，EGS 勘查选址应主要考察如下方面：

1.1 地温

高温和高热流值是地热异常区存在的最直接标志。由于 EGS 用于发电，建造人工储层的高温岩体应在 200℃ 以上才能保证较高的热电转换效率（杨伍林，2007；Baria et al., 1999）。此外，对任何地热开发项目，钻井成本都是最重要的经济效益影响因素之一，较高的地温梯度可以保障在较浅的深度钻遇目标温度，降低钻井费用（杨伍林，2007）。在现有的钻井技术条件下，地温梯度需在 60℃/km 以上，EGS 的开发成本才能与化石能源相竞争。由于地热田上方湿度升高，使得岩石去磁和密度降低，且电阻率与温度有很好的相关性，所以地热地球物理学中常用重磁法及电磁法来探测高温区域（曾昭发等，2012）。

1.2 热源

地热资源的分布主要受地质构造控制。高温地热资源集中分布在相对较狭窄的地壳活动带，即公认的全球板块的边界。研究表明，强震和活动地块边缘密切相关，在这些区带的地壳浅部，存在着强大的火山或岩浆侵入，但在板块内部存在的热点或热柱，也可能分布有高温地热资源。板内层发生过的多期岩浆活动对地热区的影响主要取决于岩体侵入的地质时代。中新世（新第三纪早期）至第四纪以来的岩浆侵入和喷发对地热田形成有意义，之前的岩浆活动由于长时间的冷却，余热基本消失殆尽（杨伍林，2007；田廷山等，2006；张国民等，2005）。

1.3 岩体

从岩石本身的物理性质考虑，应选择那些密度大、热传导率高的岩石，花岗岩和花岗闪长岩较其它类岩石（如辉长岩、玄武岩类）要好得

多。而且花岗岩本身含有高浓度的放射性元素，能够增加岩体中热能的供应，但岩石生成的时间越长，散失的热量越多，应尽量选择生成时间较晚的花岗岩。同时，大体积、质地相对均匀岩体为首选（杨伍林，2007；田廷山等，2006；蔡义汉，2004；李虞庚等，2007；杨吉龙等，2001）。

1.4 裂隙

不单纯强调岩石本身的性质，更注重通过增强天然裂隙或人造裂隙网络的方法来提高岩石渗透率进而提高热能的采收率，最终达到商业化目的。如果高温岩体中具有原生水储藏，显示出渗透性地点，具有一定优势（杨伍林，2007）。

1.5 地应力

地应力主要决定人造储层中裂隙形态、方位、高度等压裂效果以及钻井策略，但目前还没有足够的信息确定 EGS 开发的最佳应力状态如何，在开发计划中，更重要的是掌握整个地区应力方向和大小的信息（杨伍林，2007）。

1.6 沉积盖层

基岩上厚度大，但没有超压的沉积性盖层，可使结晶质岩层绝缘，导致较高的平均温度梯度，由此降低钻井费用。

1.7 接近负荷中心

相对接近现有基础设施（道路、输电线路、供水等）的负荷中心为合理地点。

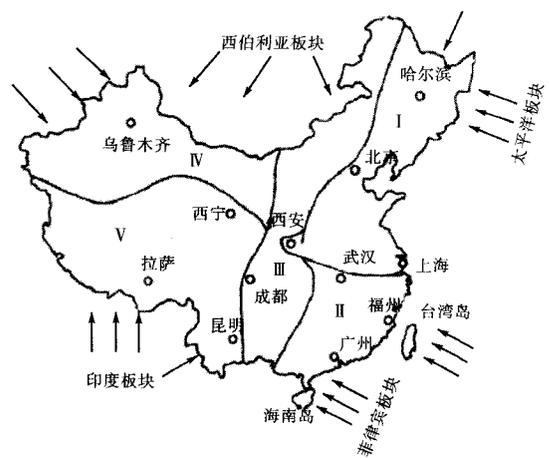


图 1 中国大陆板块边界受外力挤压示意图及地热流统计构造分区图

表1 世界范围内典型 EGS 选址

场地名称	热源	钻井温度
芬登山	布拉沃河 (Rio Grande) 断裂带北端乌尔斯火山口 (Valles Caldera) 边缘, 720m 以上的沉积岩地温梯度 100℃/km, 以下的花岗岩为 50~70℃/km, 对应的热流密度 160mW/m ²	GT-2 井 2932m 处温度 180℃ EE-2 井 4390m 处温度 327℃
罗斯曼奴斯	罗斯曼奴斯火山地区露天矿的 Cammenellis 花岗岩地层, 地温梯度 30~40℃/km, 热流密度 120mW/m ² , 岩体具有高放射性	RH12 井 2156m 处温度 79℃, RH15 井 2600m 处温度 100℃
苏尔士	前身是法国著名 Péc helbronn-Merkwiller 油田 (1888~1970), 对地区地层学和构造情况了解, 近 500 口油井中进行温度测量的结果显示, 沉积盖层 (~1km) 的地温梯度达到 110℃/km, 且热流值大于 140mW/m ²	GPK1 井 2002m 处温度 140℃, 3590m 处 168℃; GPK2 井 3876m 处 168℃, 5000m 处 202℃
库伯盆地	油气钻井显示在 4km 深度温度接近 250℃, 石油勘探钻遇包含高浓度放射性元素的花岗岩基岩层	Habanero-1 井 4421m 处温度 250℃
肘折	大型更新世迦山 (Gassan) 火山旁边的小火山口	SKG2 井 1800m 处温度 254℃, HDR1, HDR2, HDR3 井 2200m 处温度 270℃
雄胜	秋之宫地热区边缘, 利用 Yamabushi 山的火山作为热源	OGC-1 井 1000m 处温度 230℃, OGC-2 井 1100m 处 240℃

2 我国地热资源分布及开发潜力

我国大陆大地热流值可分为 5 个构造区 (陈墨香等, 1994): 按照从高到低排列依次为: 西南 (70~85 mW/m²) > 华南 (66~70 mW/m²) > 华北-东北 (59~63 mW/m²) > 中部 (40~60 mW/m²) > 西北 (43~47mW/m²) (赵阳升等, 2004)。基本表现我国西南和华南地区地热资源开发具有较大的优势, 而中西部相对匮乏。

我国地热发电从 20 世纪 70 年代开始, 据 WGC2010 统计, 全世界已有 27 个国家利用地热发电, 中国地热发电量仅居第 18 位 (尹立河, 2010; 郑克棧等, 2009)。目前全国已建成或筹备的地热电站, 实际上是已知地热资源分布的一个缩影。

2.1 高温地热带

我国的高温地热资源主要集中分布在西藏南部, 四川西部、云南西部和台湾。这些地区构造上处于印度板块、太平洋板块和菲律宾板块 (次级板块) 的夹持地带, 区域内地震火山活动频繁强烈, 属全球构造活动最强烈的地区之一, 沿板块边界展布出藏滇地热带和台湾地热带 (徐世光等, 2009; 赵阳升等, 2004; 张国民等, 2005; 李虞庚等, 2007; wan et al., 2005; 汪洋等, 2001)。

藏滇地热带位于印度、亚欧两大板块的边界, 为全球性的地中海-喜马拉雅地热带东支, 其区域背景热流值在 80~100 mW/m², 最高可达

364 mW/m², 是我国大陆地热活动最为强烈的一个带 (李虞庚等, 2007)。据推测, 从白垩纪开始至始新世, 印度板块北移和亚洲板块的地壳开始接触并全面碰撞, 引起上部地壳大规模断裂和岩浆作用, 形成地壳重融区。岩石圈的现代断裂和褶皱作用及其伴随的岩浆活动和地壳重融, 为藏滇地热带提供了良好的通道和强大的热源。在高温背景的存在下, 水热活动十分强烈, 且类型俱全, 见有大量的热泉、沸泉、冒汽地面、水热爆炸等, 水热蚀变及泉华沉积发育 (徐世光等, 2009; 赵阳升等, 2004; 李虞庚等, 2007)。

2.2 藏南地热带

西藏自治区位于中国西南边陲, 热能资源居全国首位, 是我国地热资源宝藏中最丰富的地区之一, 但大多开发程度较低。在近 600 处之多的地热显示区 (点) 中有不同程度利用的不足 50 处, 且绝大多数仅限于利用其天然流量, 只有藏南的羊八井、宁中, 藏中的那曲、藏西的朗久存在人为开采 (谢鄂军, 2002; 徐纪人等, 2005)。

羊八井地热田是我国唯一进入实质性开发的高温水热系统, 该区存在着温度高达 93℃, 热流值高达 364mW/m²。自 1977 年 10 月 1 号发电试验机组试运行以来, 浅层热储生产井的井口参数显示其能量和质量都表现出明显下降, 热田从南区向北区急剧萎缩, 已趋枯竭, 浅层资源已不能满足 25.18MW 装机容量发电机组正常运行。

1994 和 1996 年施工完成的 ZK4001、ZK4002 两口深井已揭示北区深部热储的开发前景, 较浅部资源具有温度高、压力大、不结垢、流量稳定的优点。综合研究认为北区深部存在两个热储层, 以北区深部高温资源分布面积 3.765 km^2 计算, 预测仅开发深部第一高温热储层, 其发电潜力可达 31.18 MW (谢鄂军, 2002; 徐纪人等, 2005; 多吉, 2003; 周大吉, 2003; 王绍亭等, 1999)。

表 2 西藏地热资源分区表

资源分区	水热显示 (处)	水热平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)	热储平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)	热储面积 (km^2)	可采资源量 ($\times 10^4 \text{ kW}$)
藏南	234	58.19	142.76	255.5	8096.29
藏西	49	51.4	134.02	47.49	1763.97
藏中	151	46.42	120.19	130.11	11564.30
藏东	190	39.73	105.63	82.0	7666.97
藏北	40	9.6	76.58	5.0	791.51

那曲地热田因结垢问题未得到根本解决, 自 1994 年建厂发电至 2002 年, 共发电仅 $100 \text{ 万 kW} \cdot \text{h}$, 未发挥其地热资源作用。按《那曲地热田地质详查报告》提供的数据, 那曲地热田采用双工质机组, 发电潜力为 5780 kW , 实际装机容量只有 1000 kW , 与热田可提供的资源量相差甚远 (谢鄂军, 2002; 徐纪人等, 2005; 多吉, 2003; 周大吉, 2003; 王绍亭等, 1999)。

朗久地热田由于其盲目性, 缺乏详细的基础地质工作, 在建厂安装、井孔布置等方面都存在问题, 只能断续发电 (谢鄂军, 2002; 徐纪人等, 2005; 多吉, 2003; 周大吉, 2003; 王绍亭等, 1999)。

与羊八井位于同一断陷盆地的羊易地热田早已提交勘探报告, 但由于羊湖抽水蓄能电站的建成, 延缓了羊易地热电厂的投资建设。对热田资源进行评价显示, 圈定热田面积 10.79 km^2 , 测得热储最高温度 207.16°C , 有可供生产发电的勘探井 5 口, 一旦开发利用, 即可安装 3 万 kW 的机组运行发电, 与拉萨电站并网 (谢鄂军, 2002; 徐纪人等, 2005; 多吉, 2003; 周大吉, 2003; 王绍亭等, 1999)。另外, 有新近研究对青藏高原东北部的贵德盆地深部地热资源远景进行了评价, 划分了经济地热田和亚经济地热田范围, 为

今后该区的地热资源开发提供了借鉴 (龙作元等, 2009)。

除藏北多为无人区, 交通、经济条件极差以外, 其他区域均具有地热资源条件好、地表热显示强烈、有一定自然地理条件和社会经济基础的电力开发预选地, 如阿里地区的门士热显示区, 山南地区的古堆热显示区, 日喀则地区的可措热显示区等 (谢鄂军, 2002; 徐纪人等, 2005; 多吉, 2003; 周大吉, 2003; 王绍亭等, 1999)。

表 3 西藏部分热显示区地热参数

热显示区	水热最高温度 ($^{\circ}\text{C}$)	热储平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)	热储面积 (km^2)	可采资源量 ($\times 10^4 \text{ kW}$)
门士	69	172.60	1.0	630.0
可措	86	188.17	15.44	156.13
古堆	82	193.43	6	315.0
日多	85	220.75	1.0	-

2.2.2 滇西地热带

云南省共有温泉 815 个, 是我国温泉数量最多的省份。根据云南大地构造特点和地热资源分布规律, 以红河-洱海大断裂为界, 划分为滇东和滇西两大区域。滇东为中低温水热区, 滇西为高温水热区。由大盈江、龙川江和龙陵-瑞丽三个热水带组成的腾冲地区即位于滇西, 这一区域是我国西部高热流集中的唯一地区, 其热流值甚至大于 90 mW/m^2 , 地温梯度甚至超过 100°C/km 。其热源与西藏陆-陆碰撞带板缘高温热储相似, 只是区域内发育大面积的第四纪火山岩 (赵阳升等, 2004; 刘志江等, 1994; 袁玉松等, 2006)。尽管腾冲地区高温地热资源丰富, 但区域内并无地热电站。其中热海地热田进行发电酝酿已久, 曾拟在热水塘一带建立一座 10 MW 级的地热试验电站。1998 年钻地热勘探井, 深 1640 m 的最高温度 143.5°C , 最终因井孔内岩石渗透性较差, 深部裂隙不够发育, 没有能够获取大流量高温的地热流体, 整个计划宣告失败。2004 年《腾冲县地热电站项目建议书》通过有关部门专家组的论证。以色列 Ormat 公司与云南省地热开发公司合作, 拟投资 9900 万美元开发腾冲热海热田, 计划建设一座 48.8 MW 的地热电站, 截止 2007 年项目没有得到国家发改委批准 (刘志江等,

1994)。根据地面调查(1994),腾冲地区有多处地热田具有开发价值。

表4 腾冲地区主要高温热田地热参数

资源潜力	区域名称				
	热海热田	朗蒲热水塘	攀枝花硝塘	瑞滇热田	瑞丽热田
装机容量(MW)	233.5	95.8	49.4	47.2	20.0
运行年限(Y)	30	30	30	30	100

2.2.3 台湾地热带

台湾地热带位于欧亚板块与菲律宾板块接触的活动带上,为全球性环太平洋地热带的一部分。岛内地壳活动活跃,第四纪火山活动及水热活动强烈,地震频繁,地热温泉主要分布在大屯火山群以及中央山脉地区(徐世光等,2009;赵阳升等,2004;李虞庚等,2007;龚士良,2003)。台湾岛北部北投附近的大屯火山群,共有13个地热区,有大量热泉、沸泉和喷气孔,测得喷气孔最高温度为120℃。北投火山温泉区一眼地热钻孔,1005m深已获得294℃的高温蒸汽,但由于该区地热流体以酸性硫酸盐氯化物为主,对金属腐蚀严重,且位于某公园内,限制了地热的大规模开发利用。转而以中央山脉的清水、土扬为重点开发基地,1982年建立清水地热发电厂,装机容量为3MW,初期发电量曾达2MW以上,后来产量逐渐减少。一方面是由于深部热水中溶有大量CO₂,产生的碳酸盐沉淀堵塞井筒;另一方面是储层渗透率偏低,难以生产大量热水,1993年电厂终告关闭。1986年2月在土扬建造的300kW小型地热电厂,至今运转正常(徐世光等,2009;赵阳升等,2004;李虞庚等,2007;龚士良,2003)。

除藏滇地热带、台湾地热带外,作为高温岩体,已发表文献中讨论过地区还有海南琼北、吉林长白山天池以及黑龙江五大连池。三者与腾冲同属第四纪火山,地球物理勘探显示,地下深部均可能存在熔融或正在冷却的高温岩浆体(赵阳升等,2004;万志军等,2005;佟伟等,1990;杨森林等,2004)。

2.3 中低温地热资源

我国中低温地热资源广泛分布于板块内部大陆隆起区和地壳沉降区(李虞庚等,2007)。20

世纪70年代初,随着第一次石油危机的到来,中国掀起了地热能开发的热潮,在全国建成了7个中低温地热发电厂:广东丰顺县邓屋(92℃,300kW);湖南宁乡县灰汤(98℃,300kW);河北怀来县后郝窑(87℃,200kW);山东招远县汤东泉(98℃,300kW);辽宁盖县熊岳(90℃,200kW);广西象州市热水村(79℃,200kW);江西宜春县温汤(67℃,100kW),并先后都试验发电成功。70年代后期,由于经济效益不佳或机组老化等原因,现除广东丰顺县邓屋和湖南宁乡县灰汤外,其余5处均陆续停产(徐世光等,2009;郑克棧等,2009)。

东南沿海和胶辽半岛地热带是我国板内地壳隆起的中低温地热带。其中,包括江西东部、湖南南部、福建、广东及海南等地的东南沿海温泉密集。有不少国内外地热界人士认为,该地区有可能出现温度大于150℃的高温水热系统,甚至有干热岩体存在。李福等根据海南岛地热构造及地质条件,分析了陵水地区可进行干热岩地热发电项目的优势,包括具有侵入岩体时间晚,靠近冷却用水,交通便利等优势。但也有学者认为该区并不存在出现高温水热系统或干热岩体的地质构造条件及高热背景区。从区域内已经进行过不同程度勘探工作的几个地热系统来看,热储温度均不超过140℃,地下热水循环深度在3.5~4.0km左右,属典型的中低温对流型地热系统(徐世光等,2009;李虞庚等,2007;熊亮萍等,1993;李福,2010)。

此外对塔里木盆地现今地热特征的研究表明,该盆地隆起区地温梯度和热流相对较高,或许也具备一定的中低温地热资源开发潜力(冯昌格等,2009)。

板内地壳沉降区的中低温地热资源,通常富集油气资源,如华北、江汉、四川等盆地,相继获得热水及热卤水,尤以华北中生代沉积盆地资源潜力最大,其大地热流值初步测定大约为62.8mW/m²。尽管各油田多为中低温地热资源,但几十年的勘探开发积累了大量的地质资料及丰富的钻井、压裂等技术经验。深部地层勘探和钻井投资成本高,因此,首先依托油气田开展高温岩体地热能的调查,并且在闲置井或报废井中进

行水力压裂等技术试验不失为一种现实的做法(徐世光等, 2009; 李虞庚等, 2007; 袁玉松等, 2006; 徐明等, 2011; 马德辉等, 2000)。

3 结论

任何 EGS 项目的开发首先要解决科学选址的问题, 选址的关键考察点是地质条件、岩体特征、经济效益及工程技术能力。根据我国地热资源分布特点、形成条件和勘探开发现状及经济社会需求, 可将我国进行 EGS 项目的选址地区分为三类:

(1) 优先开发利用区

藏南和滇西是我国大陆高温地热资源最为丰富的地区, 从地热资源潜力来看, 足以建立高温地热电站, 其中羊八井和腾冲热海尤为突出。相比之下, 羊八井地区高温岩体结构较为单一、均匀的酸性花岗岩, 易于钻井和人工储层的建造, 已有多年浅层热储开发经验, 且西藏电力紧缺, 该地区地热发电的成本明显低于水电、风力、太阳能、煤、核等其它能源, 无疑为我国 EGS 开发选址最佳区域(郭进京等, 2010)。腾冲热海高温岩体具有明显的多层结构, 开发条件稍显复杂, 且小水电久负盛名, 对地热发电需求不十分强烈, 但枯水期缺电状况长期无法改变, 仍迫切需要解决地热发电与其互补, 建议在羊八井项目技术成熟后, 在该区进行高温地热资源开发。

(2) 勘探开发区

海南、福建等为代表的东南沿海及已获得热水/热卤水的各沉积盆地, 尽管多为中低温地热资源, 对是否存在高温地热资源目前还有争议, 但上述地区多为已建立过中低温地热电站或经过几十年的勘探开发, 至少可在已有大量钻孔基础上进行与 EGS 相关的地热资源调查和工程技术现场试验。

(3) 综合调查区

根据大地电磁测深等资料推测, 长白山天池和黑龙江五大连池可能存在岩浆热源, 具有 EGS 开发潜力。但目前均缺乏钻孔资料, 对地热资源量不能进行估计, 开发条件不成熟, 应继续进行综合调查研究。

参考文献

- [1] 陈墨香, 王集昉. 1994. 中国地热研究的回顾和展望[J]. 地球物理学报, 37(S1): 320-339.
- [2] 陈墨香, 汪集昉, 邓孝. 1994. 中国地热资源—形成特点和潜力评估[M]. 北京: 科学出版社.
- [3] 蔡义汉. 2004. 地热直接利用[M]. 天津: 天津大学出版社.
- [4] 多吉. 2003. 典型高温地热系统—羊八井热田基本特征[J]. 中国工程科学, 5(1): 42-47.
- [5] 冯昌格, 刘绍文, 王良玉, 等. 2009. 塔里木盆地现今地热特征[J]. 地球物理学报, 52(11): 2752-2762.
- [6] 龚士良. 2003. 台湾地热温泉水资源的开发与利用[J]. 水资源研究, 24(4): 15-16.
- [7] 郭进京, 周安朝. 2008. 高温岩体圈定的思路与方法探讨[J]. 能源工程, (6): 1-4.
- [8] 郭进京, 周安朝. 2010. 羊八井和腾冲高温岩体地质特征比较与优先选址[J]. 可再生能源, 28(3): 149-152.
- [9] 郭进京, 周安朝, 赵阳升. 2010. 高温岩体地热资源特征与开发问题探讨[J]. 天津城市建设学院学报, 16(2): 77-84.
- [10] 李福. 2010. 海南陵水地区深层干热岩地热发电项目的勘查选址[J]. 地热能, (3): 21-27.
- [11] 李虞庚, 蒋其坤, 杨伍林. 2007. 关于高温岩体地热能及其开发利用问题[J]. 石油科技论坛, (1): 28-40.
- [12] 刘志江, 韩升良. 1994. 云南腾冲地热发电预可行性研究[J]. 热力发电, (2): 19-23.
- [13] 龙作元, 薛国强, 周楠楠, 等. 2009. 贵德盆地深部地热资源地球物理评价[J]. 地球物理学进展, 24(6): 2261-2266.
- [14] 马德辉, 闫鸿林, 王德良, 等. 2000. 地热资源的开发与利用[J]. 国外油田工程, (6): 47-52.
- [15] 田廷山, 李明朗, 白冶. 2006. 中国地热资源及开发利用[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- [16] 佟伟, 穆治国, 刘时彬. 1990. 中国晚新生代火山和现代高温水热系统[J]. 地球物理学报, 33(3): 329-335.
- [17] 万志军, 赵阳升, 康建荣. 2005. 高温岩体地热资源模拟与预测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 24(6): 945-949.
- [18] 王绍亭, 陈新民. 1999. 西藏地热资源及地热发电的现状与发展[J]. 中国电力, 32(10): 79-81.
- [19] 汪洋, 邓晋福, 汪集昉, 等. 2001. 中国大陆热流分布特征及热构造分区[J]. 中国科学院研究生院学报, 18(1): 51-58.
- [20] 谢鄂军. 2002. 西藏地热资源开发利用方案探讨[J]. 西藏科技, (3): 16-27.

- [21] 熊亮萍, 胡圣标, 汪集旻. 1993. 中国东南地区实测热流值[J]. 地球物理学报, 36(6): 784-790.
- [22] 徐纪人, 赵志新, 石川有三. 2005. 青藏高原中南部岩石圈扩张应力场与羊八井地热异常形成机制[J]. 地球物理学报, 48(4): 861-869.
- [23] 徐世光, 郭远生. 2009. 地热学基础[M]. 北京: 科学出版社.
- [24] 徐明, 朱传庆, 田云涛, 等. 2011. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征[J]. 地球物理学报, 54(4): 1052-1060.
- [25] 杨吉龙, 胡克. 2001. 干热岩(HDR)资源研究与开发技术综述[J]. 世界地质, 20(1): 43-51.
- [26] 杨森林, 潘震宇, 潘玉林. 2004. 五大连池火山区地热显示及开发前景探讨[J]. 东北地震研究, 20(2): 1-7.
- [27] 尹立河. 2010. 地热利用迎来又一个高峰-2010年世界地热大会见闻[J]. 国土资源, (6): 33.
- [28] 袁玉松, 马永生, 胡圣标, 等. 2006. 中国南方现今地热特征[J]. 地球物理学报, 49(4): 1118-1126.
- [29] 曾昭发, 陈雄, 李静, 等. 2012. 地热地球物理勘探新进展[J]. 地球物理学进展, 27(1): 168-178.
- [30] 张国民, 马宏生, 王辉, 等. 2005. 中国大陆活动地块边界带与强震活动[J]. 地球物理学报, 48(3): 602-610.
- [31] 赵阳升, 万志军, 康建荣. 2004. 高温岩体地热开发导论[M]. 北京: 科学出版社.
- [32] 周厚芳, 刘闯, 石昆法. 2003. 地热资源探测方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 18(4): 656-661.
- [33] 周大吉. 2003. 西藏羊八井地热发电站的运行、问题及对策[J]. 电力建设, 24(10): 1-9.
- [34] 郑克桢, 潘小平. 2009. 中国地热发电开发现状与前景[J]. 中外能源, 14(2): 45-48.
- 转自 2014, 29(1)《地球物理学进展》

中意地热能技术交流会在京举行

为促进中国和意大利在地热科学技术领域的合作和相互了解, 搭建友好交流平台, 意大利国家研究委员会(CNR)的地球科学与资源研究所(IGG)与帕多瓦大学(University of Padua)联合中国能源研究会地热专业委员会于2014年9月17-18日在北京举行了中意地热能技术交流会。与会的8位意方专家来自蒸汽公司(Steam)、海瑞弗空调公司(HiRef S.p.A.)和效能公司(Exergy), 8位专家分别介绍全球和意大利地热能领域的优秀成果和创新研究; 中方组织了来自研究所、大学、事业和企业单位的10余位专家在会上介绍中国高温地热、低温地热、地源热泵和干热岩等相关课题勘查与开发利用的最新进展。交流会按高温地热和低温地热内容安排两天的交流、讨论和答疑议程, 双方进一步探讨了今后可能合作的领域和交流方式。

意大利地球科学与资源研究所(IGG)的Eloisa Di Sipio介绍IGG是国家研究委员会(CNR)的下属单位, 前称意大利国际地热能学院, 有近百位专业人员从事地热研究、教学和培训, 其最近进行的南方4省浅层地热能评价已编绘出热导率、地下热交换潜力和浅层热流分布

图, 并专门为地源热泵设计开发了应用的EED(地能设计师)软件。虽然意大利是世界地热发电的鼻祖, 但他们仍在深入研究如何更高效率的发电技术, STEAM Group公司的Renato Papale介绍了绿色开发的新战略: 首先提出高焓有机朗肯循环优于传统的闪蒸发电技术, 但比单级闪蒸简单, 没有腐蚀和结垢问题, 有5~10MW模块化机组, 建设周期短, 成本可竞争, 通过空气冷却后可全部回灌, 该系统能力强、易操作、维护少; 其二, 提出地热井口电站技术, 该模式在钻井完成后立即在井口安装发电系统。历史悠久(建于1222年)的帕多瓦大学的Giuseppe Emmi介绍了地源热泵的系统研究, 利用地下热能作为热源比空气源好, 但有低温利用的技术限制, 注重用CaRM(容量抵抗模型)等拟合研究和预测。帕多瓦大学的另两位专家Viviana Gialain和Elena Quagliato介绍了欧盟设立的2020地平线(Horizon 2020)研究创新框架项目(2014~2020), 该项目获得7700万欧元基金, 用于研究科学、产业技术和社会挑战; 其中给欧洲研究委员会(ERC)17%份额, 支持自下而上的竞争, 设立前沿技术研究, 大学的国际研究室以