

# 中国 EGS 示范工程靶区选址与指标矩阵评价

马峰, 孙红丽, 蔺文静, 甘浩男, 王贵玲

中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061

**摘要** 选择理想靶区建立中国第一个 EGS 示范工程, 在中国节能减排及应对全球气候变化过程中具有重大的战略意义。根据全国大地热流图、居里面深度图、新构造运动图、酸性岩体分布图, 通过剖面分析, 将中国 EGS 靶区分为板块构造活动、近代火山、沉积盆地和酸性岩体分布 4 种类型, 分析了各类型干热岩靶区的产热特征。遴选了 10 个靶区通过建立指标体系进行 EGS 示范工程选址指标分析, 指标包括大地热流、热储岩性、覆盖层厚度、居里面深度、地应力(构造历史)、放射性生热率、地温梯度、区域经济 8 个指标, 在对指标分析打分的基础上最终确定羊八井、阳江、漳州、福州等为中国 EGS 潜在靶区。通过典型地区的热结构剖面分析说明了评价结果的合理性。

**关键词** 增强型地热系统; 示范工程; 靶区选址; 指标矩阵

**中图分类号** P314, TK521

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.08.006

## Target site selection and index matrix evaluation of EGS trial project in China

MA Feng, SUN Hongli, LIN Wenjing, GAN Haonan, WANG Guiling

Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China

**Abstract** Selection of ideal target site to establish the enhanced geothermal system (EGS) trial project in China has strategic significance to China in the process of energy conservation and coping with global climate change. Four types of target sites, namely plate tectonic activity, recent volcano, sedimentary basins and acidic rock areas are defined by their differential heat generation characteristics based on profile analysis using the national terrestrial heat flow map, Curie depth map, neotectonic map and acid rock distribution map. Eight indexes including heat flow, reservoir lithology, caprock thickness, Curie depth, tectonic stress, radioactive heat generation rate, temperature gradient and regional economics are used for establishing the target site evaluation system. Ten potential sites are evaluated comprehensively based on the index matrix system. The results show that Yangbajing, Yangjiang, Zhangzhou, Fuzhou could be the optimum target sites. Heat structure section analysis of two potential target sites was carried out to demonstrate the rationality of the matrix evaluation.

**Keywords** enhanced geothermal system; trial project; target site selection; index matrix

随着全社会对新能源及环境保护的深入关注, 作为可再生能源的干热岩已经被国际上公认为可以改变未来的清洁能源。继美国地调局<sup>[1]</sup>完成了美国本土干热岩资源评价之后, 中国地质调查局以同样的方法评价了中国陆区干热岩资

源潜力<sup>[2]</sup>, 中国大陆 3.0~10.0 km 深处干热岩资源总量为  $2.52 \times 10^{25}$  J, 相当于 860 万亿 t 标准煤, 按 2% 的可开采资源量计算, 相当于中国 2010 年能源消耗总量的 5300 倍。汪集旻等<sup>[3]</sup>也对中国大陆干热岩资源量进行了评价, 评价结果为相当于中

收稿日期: 2014-06-03; 修回日期: 2014-12-16

基金项目: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所基金项目(SK201212); 中国地质调查局地质调查项目(12120113077900)

作者简介: 马峰, 助理研究员, 研究方向为裂隙水流和深部地热, 电子信箱: mf-1203@163.com; 王贵玲(通信作者), 研究员, 研究方向为地热资源评价、深部地热开发等, 电子信箱: Guilingw@163.com。

引用格式: 马峰, 孙红丽, 蔺文静, 等. 中国 EGS 示范工程靶区选址与指标矩阵评价[J]. 科技导报, 2015, 33(8): 41-47.

国2010年能源消耗总量的4400倍。可见,中国干热岩资源潜力巨大,对其进行合理有效开发符合国家清洁能源发展战略与可持续发展的要求。

与此同时,地热能开发利用也逐步受到中国各级部门的重视。2013年1月10日国家能源局、财政部、国土资源部和住房城乡建设部印发《关于促进地热能开发利用的指导意见》<sup>[4]</sup>,提出了积极开展深层地热发电试验示范的任务。2013年11月中国地质调查局组织编写了全国干热岩资源勘查与开发实施方案,将利用8年时间,建立中国第一个增强型地热系统(EGS)场地。

## 1 干热岩靶区选址分析

### 1.1 国外EGS选址

第一个干热岩工程于20世纪70年代在美国的芬顿山开始,主要目标是在无水的高温岩体中,通过激发裂隙制造人工热储,利用施工注入井和开采井实现热能发电<sup>[5]</sup>。随后,20世纪80年代,日本也开展了2个干热岩工程,选址地点同样位于近代的火山地区,希望在较浅的地区获得较高的温度。但是,在日本的干热岩工程中,人们已经发现天然的裂隙系

统仍然主导着整个热储的开发,因此,他们将工程定义为“湿热岩”以考虑天然的水热系统。

随后的位于法国著名的Soulitz干热岩工程则建立在上莱茵地堑<sup>[6]</sup>,相对先前的EGS工程,地温梯度相对偏低,然而区域的断裂构造和裂隙特征已被深入研究和认识,这为储层激发和循环提供了便利条件,也使该工程成为目前为止全球最成功的EGS工程。

同样在非火山活动地带,位于澳大利亚的Cooper盆地<sup>[7]</sup>则将EGS场地选在构造相对稳定的大型岩石圈,同样可以获取较高的温度和流量。因此,增强型地热系统在考虑温度的同时,同样关注储层是否具备理想的天然裂隙系统,可以为后期的储层扩建提供条件<sup>[8,9]</sup>。

表1为目前世界上主要的EGS工程,其中美国Fenton Hill和日本的Hijiori项目都位于火山口边缘。尽管通过非常高的地温梯度可以在较浅的深度获得温度可观的大型热储层,但是在这样的区域,地质、地应力条件和岩石裂隙历史非常复杂,给项目的设计、建设和管理带来很大的挑战,也给后期的储层建造带来了很大的不确定性,大大增加了热储构建的费用,这也是两个EGS项目暂停的原因之一<sup>[10,11]</sup>。

表1 目前世界上几个主要干热岩工程选址条件

Table 1 Conditions of main EGS prototype (research) systems in the world

EGS工程	温度/°C	构造成因	岩性	其他
美国新墨西哥州 Fenton Hill(1972—1996) Phase I 3.0 km Phase II 3.5 km	180 275	火山喷发形成于100万年前,最近一次喷发在5万年前	上部覆盖凝灰岩,中部为片麻岩,下部热储为前寒武纪结晶岩	
日本,Hijiori,(1985—2002) Phase I 1.8 km Phase II 2.2 km	250 约280	更新世大型迦山火山侧面一个小火山口,最近喷发约为1万年前		
日本秋天县Ogachi (1982—2000) 1.0 km	超过 230	Yamabushi火山	上部200 m为第三系凝灰岩,下部为花岗岩、花岗闪长岩	水量很少
英国康瓦尔州 Rosemanowes(1978—1991) 2.6 km	100	底部9 km可能有岩浆入侵	早二叠世连续花岗岩基	裸露花岗岩
法国莱茵地堑, Soulitz(1987—) 2.9~3.5 km	约168	上莱茵地堑	上部第三纪沉积砂岩,下部古生代花岗岩	
澳大利亚cooper 盆地(2002—) 4.42 km	250	大陆型岩石圈	上覆地层达到3668 m,为中元古代变质沉积岩层,下部年代较新的花岗岩	花岗岩时代小于5千年

### 1.2 中国EGS选址

对中国干热岩靶区选址而言,寻找火山活动区作为EGS靶区这种传统的方式并不一定适用,主要原因如下。

1) 从火山活动历史而言,中国的大部分的火山活动均为基性岩浆活动,而且很多均在新生代以前已停止剧烈的岩浆

活动,由于基性岩冷却很快,因此无法在相对较浅的深度提供建立EGS工程所需的温度。

2) 板块构造运动的影响,中国的大部分火山均经受了多期次的构造运动,地应力条件复杂,深部岩体支离破碎,这给热储建造也带来了很大的挑战。

由于中国以中低温地热田为主,因此,作为示范工程的选址,首先应该考虑的是温度因素,选择在较浅的地区获得相对较高的温度。汪集咏等<sup>[9]</sup>在评价了中国干热岩资源潜力的基础上,提出了部分潜在的靶区。从干热岩地热资源可开采储量和温度状态看,中国大陆地区有利的干热岩开发区在藏南地区、云南西部(腾冲)、东南沿海(浙闽粤)、华北(渤海湾盆地)、鄂尔多斯盆地东南缘的汾渭地堑、东北(松辽盆地)等地区。这些地区均是传统的地热显示区,地热的成因与深部热源及浅部构造活动有着密切关系<sup>[12]</sup>。

对于干热岩,更为关注的是深部热源和深部的热结构。目前,中国很多地热显示较好的地区均缺少3 km以上的深井,通过地温梯度计算的深部温度,常会造成很大偏差;地球化学手段相对较好,但在很多地区受取样、测试条件的限制所得出的结论也缺乏合理性,同时也存在数据点集中覆盖面积小的缺陷<sup>[13]</sup>。因此,本研究以全国基础性地热图件为基础,从深部热结构剖面出发,通过建立指标评价矩阵,综合研究中国干热岩最佳选址区。

### 1.3 热结构剖面

针对目前中国干热岩靶区选址,从区域构造、大地热流、居里面深度及酸性岩体分布4个方面进行了选址分析。大地热流是地下热能在地壳表层综合反映,包括了壳源和幔源产热。本研究通过最新收集测试的大地热流数据,并根据以往热流数据<sup>[14-16]</sup>重新编制了中国大地热流分布图(图1),可以看出,中国高热流分布区主要集中在藏南和东南沿海地区。

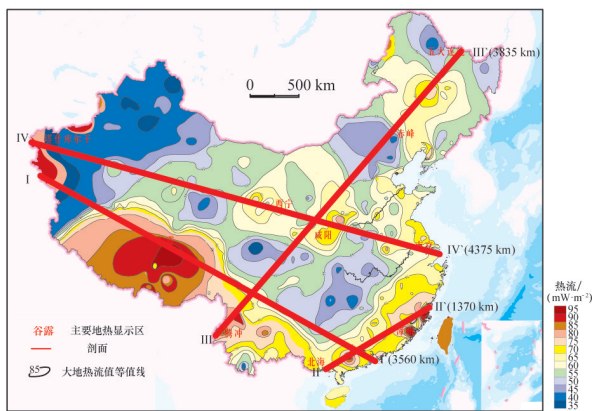


图1 中国大热流分布

Fig. 1 Heat flow distribution in China

居里面是物体温度达到一定高度而失去磁性的界面,它不仅能表征地下温度场的分布特征,也可提供地壳深部热应力场和其他地球物理资料,对于研究地壳热结构而言,居里面变浅则代表可能地幔上隆,是幔源产热的一个重要标志。区域新构造主要反映了各靶区构造活动历史,是应力分析的基础。

图2各剖面图中反映了大地热流、居里面深度和新构造特征。

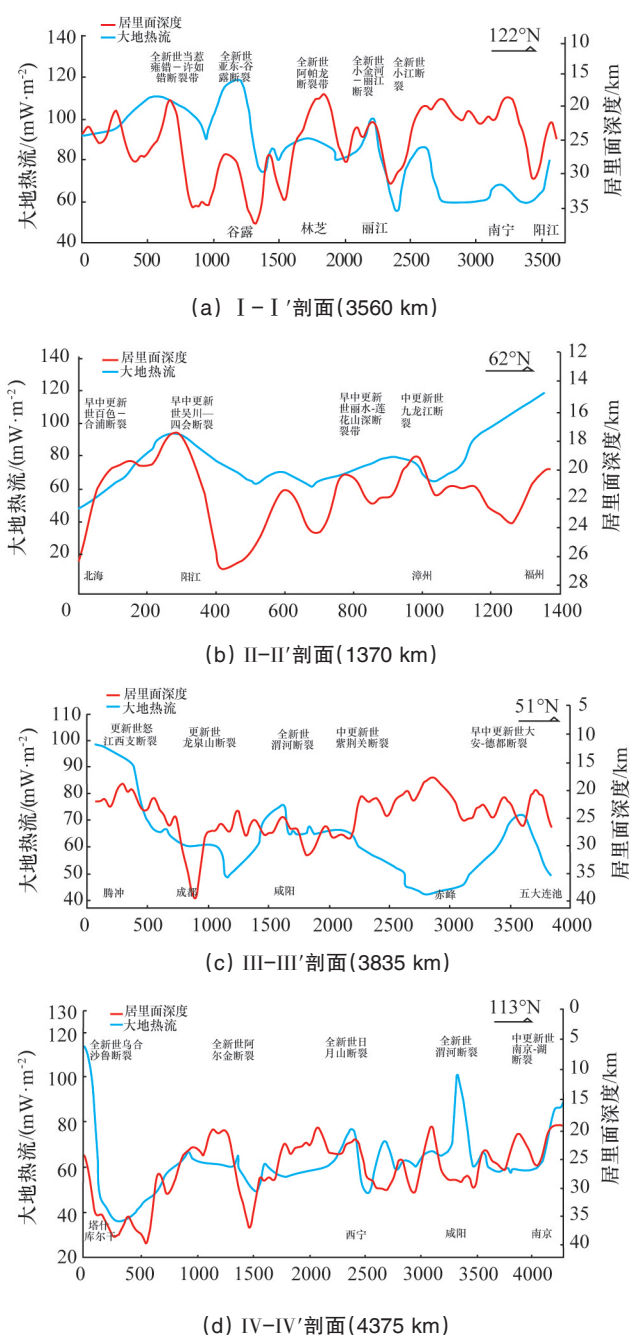


图2 热结构剖面分析

Fig. 2 Sectional analysis of thermal structures

在大地热流图的基础上,绘制了4条典型剖面,从剖面中可以看出谷露、阳江、漳州、福州、腾冲、惠州一带均位于大地热流值高且居里面浅的地方,同时这些点附近都伴随着新生代以来的新活动断裂,是典型的地热显示区,为干热岩开发的重点研究靶区;而咸阳、南京属于大地热流值高而居里面深的地方,这些地方一般都具有基岩覆盖层较大、地温梯度较小的特点,深部热源向上传导,覆盖层中因热导率变小而使热流聚集形成高热流特征;赤峰、五大连池属于大地热流值偏小而居里面较浅的部位,这些类似地方热流特别容易受构造运动和幔源热流的影响,虽然热流在地表显示较小但受

火山运动和构造控制深部可能具有较大的地温梯度,也可能成为干热岩潜在的开发靶区。

## 2 干热岩靶区选址指标分析评价

### 2.1 指标矩阵及评价

结合地热深部综合剖面图,选择10个干热岩潜在靶区运用指标标准法进行等级评价。参考Newberry火山EGS示范工程选址因素,一共选取了8项指标,将各指标分为4个等级,等级范围的确定结合中国地热基础条件和专家打分确定。各指标权重的确定采用投影寻踪法。

各指标分别赋予不同权重,其中和热量相关的大地热

流、放射性生热率及地温梯度指标权重为1,居里面深度指标权重为0.8,覆盖层厚度和区域经济条件权重为0.7,热储岩性和地应力及活动构造指标权重为0.6。在确定指标权重时,既考虑了各指标在EGS靶区选址中的关键性,也结合收集资料的详细程度进行综合评估。各指标根据内部比较分为4个等级,分别为A、B、C、D。A为4分,B为3分,C为2分,D为1分,将无法找到充分数据的部分地方定为C或者D级。干热岩靶区指标评价标准见表2,评价结果见表3,指标数据统计见表4。结果显示羊八井得分最高,为中国干热岩最有利靶区,其次为位于东南沿海的阳江、漳州、惠州等地区,而松辽盆地和川西地区则综合评价价值小于18,评定为不适宜地区。

表2 干热岩靶区指标评价标准

Table 2 Index evaluation criteria for hot dry rock (HDR) target sites

指标取值	评价指标标准							
	大地热流/ ( $\text{mw}\cdot\text{m}^{-2}$ )	热储岩性	覆盖层厚/km	居里面埋深/km	地应力及活动构造	放射性生热率/ ( $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ )	地温梯度/ ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ )	区域经济
A	>100	花岗岩花岗闪长岩	<0.3	<20	张性	>4	>40	用电需求大
B	90~100	片麻状花岗岩	0.3~1.0	20~23	张扭性	3~4	35~40	供电充足或旅游地区
C	70~90	凝灰岩	1.0~2.0	23~26	压性	2~3	30~35	适宜清洁能源发电
D	<70	其他	>2.0	>26	—	<2	<30	电力充足
权重	1	0.6	0.7	0.8	0.6	1	1	0.7

注:指标评价部分标准值参考美国Newberry干热岩示范场地指标评价矩阵进行选取。

表3 干热岩靶区评价结果

Table 3 Evaluation results of HDR sites

靶区	评价指标等级								
	大地热流	热储岩性	覆盖层厚	居里面埋深	地应力及活动构造	放射性生热率	地温梯度	区域经济	总得分
羊八井	A	A	A	A	B	A	A	A	25.0
腾冲	A	B	B	A	A	D	A	B	20.4
漳州	A	A	A	A	A	A	B	B	23.9
福州	A	A	B	A	A	B	B	A	23.6
阳江	A	A	A	A	A	A	B	A	24.6
雷州半岛	C	A	B	A	A	A	B	B	21.2
陵水	C	A	A	B	B	A	C	B	20.5
松辽盆地	C	B	C	C	A	C	B	B	16.3
川西地区	D	A	C	A	B	C	C	B	15.9
西宁盆地	C	A	A	C	B	B	A	B	19.7

表4 干热岩靶区指标数据统计  
Table 4 Index statistics of different HDR sites

靶区	评价指标								
	大地热流/ ( $\text{mw}\cdot\text{m}^{-2}$ )	热储岩性	覆盖层 厚/m	居里面 埋深/km	地应力	活动 构造	放射性生热率/ ( $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ )	地温梯度/ ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ )	区域经济
羊八井	108 (ZK308)	火山角砾碎屑凝灰岩、碎裂花岗岩	240 (ZK4001)	16~18	最大水平主应力方向以NW-NNW为主,最大水平主应力值3.3~10.4 MPa	NE及NW向,至今活动强烈	4.5 (0~12 km)	约44	年发电量在拉萨电网中占45%,经济总量较低
腾冲	极大值 120.5	第三纪花岗岩	>4000	16.7	最大水平主应力方向以NE38.9°~48.6°为主,最大水平主应力值8.02~23.53 MPa	NE及NS向,NE向断裂张扭性新构造活动明显	10 km以内 1.67~1.12	40~140 (岩浆囊干扰)	地热资源丰富,但无地热发电站
漳州	90.8~ 115.1	燕山晚期花岗闪长岩	20~30	17~18	NNE压性及NWW张性	主要受断裂控制	4.4	局部为40	用电需求年增长较大
福州	90~220, 平均108.7	燕山晚期花岗岩类岩石	30~65	14	最大水平主应力方向为北西向	主要受NNW向张性断层组控制	3.94	40~100	用电需求大
阳江	100.6	中粗粒斑状黑云母二长花岗岩,中粒黑云母花岗岩	20~100	18	—	北东向压扭性断裂及近东西向张扭性断裂	4.1	40	周边为旅游区,用电量需求大
雷州半岛	平均75, 正异常 80~100	古生界碳酸盐岩和变质岩或燕山期花岗岩	400~5000	15~16	—	拉张型断陷盆地,NE及NW向断裂发育	0.56 (玄武岩) 5.02 (花岗岩) 0.49 (碳酸盐岩)	平均地温 梯度35.8	用电需求较大
陵水	70~85	花岗岩类	20~3300	20~23	—	EW向和NW向断裂构造	按花岗岩 平均值4	约31	农牧为主,温泉众多
松辽盆地	83	玄武岩花岗岩	>1650	>24	NEE-SWW, 40°~100°或220°~ 280°	EW及SN向, SN为张扭性	2.6	36	气候较冷,用电需求较大
川西地区	50~70	花岗岩	—	>18	川西坳陷沙NW向, 306°±12.4°	受深大断裂和地层控制	1.07~3.31	20~45	用电需求大,自然灾害频发
西宁盆地	95.68	元古代蓟县系花石群及片麻状花岗岩	800	23~26	—	近NS向张扭性	—	平均值 为44.3	以水电为主,电力较充沛

2.2 靶区热结构分析

结合以往的历史调查及研究资料,对指标评价显示最好的两个地区羊八井和漳州进行了热结构剖面分析来验证评价的合理性。

图3为羊八井深部热结构,反映了18 km以浅的岩性结

构,放射性产热特征、温度以及热流变化特征。可见,羊八井地热田地温梯度在2300 m以上逐渐增大,超过2300 m后地温梯度逐渐减小;放射性集中层厚度为6 km,从大地热流看幔源热流所占比例为53.7%。4 km处温度能达到360°C,从温度条件讲,完全符合干热岩选址的要求。

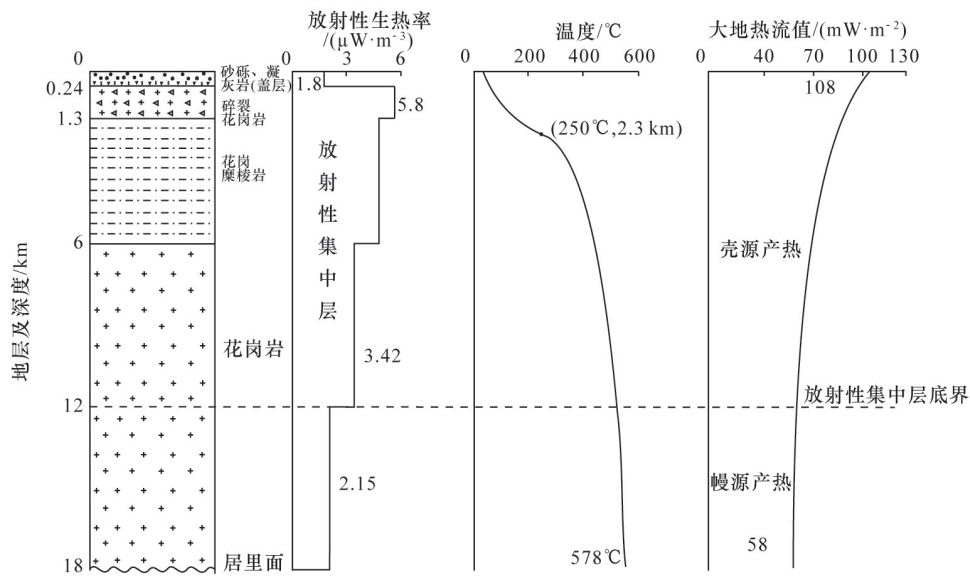


图3 羊八井深部热结构

Fig. 3 Geothermal structure analysis in Yangbajing

图4显示漳州地热田地温梯度相对稳定,放射性集中层厚度为10 km;从热流值来看幔源热流所占比例为39.6%<sup>[17,18]</sup>。4 km处漳州地区温度将达到165°C,与文献[17]中提到的5

km处温度为195°C的结论相近,从干热岩选址温度指标而言基本达到了干热岩选址的要求。从以上2个干热岩潜在靶区分析可看出指标评价矩阵及评价结果合理。

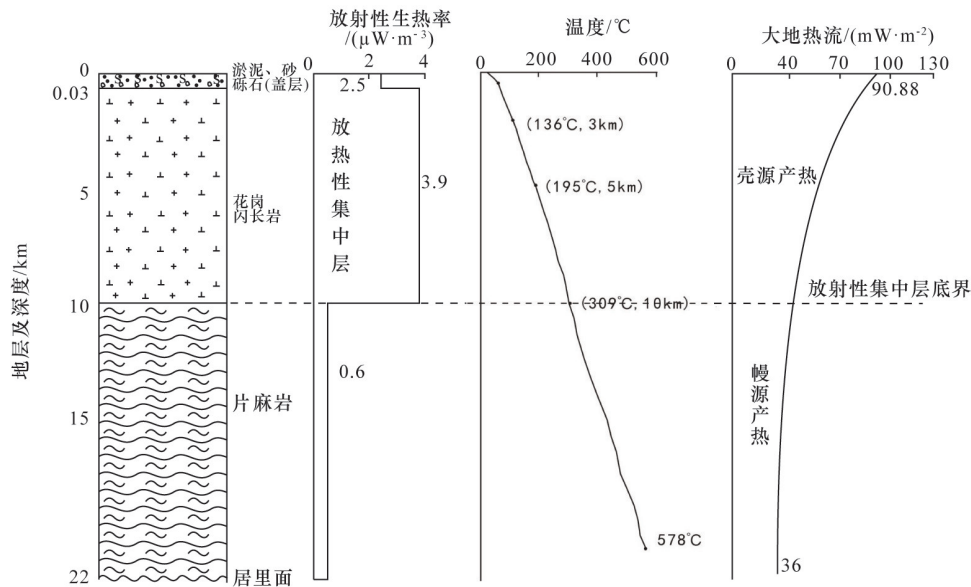


图4 漳州深部热结构

Fig. 4 Geothermal structure analysis in Zhangzhou

### 3 结论与建议

干热岩资源潜力巨大,是未来可能改变世界能源结构的可再生资源。目前,国际上很多国家已经开展了干热岩示范工程建设并取得了丰硕的成果,其中著名的法国 Soultz 已经

成功发电。中国 EGS 相关研究起步较晚,目前正处于选址阶段。

结合中国地热地质条件,从深部热结构研究角度出发,通过大地热流、居里面深度、酸性岩体分布、区域构造运动的

综合剖面分析,遴选出了若干的EGS有利示范靶区,这些地区大致可分为4种类型。

1) 板块构造活动带靶区,如羊八井、谷露。属于全球地中海-喜马拉雅地热带,具有很强的深部热异常,单从资源属性而言,为目前中国最佳的干热岩靶区。

2) 大面积酸性岩体分布区,如漳州、阳江、福州等地,这些地区壳源热流占有较大的比重,但普遍存在覆盖层厚度小或基岩裸露地表的情况,不利于热能蓄积,寻找较厚覆盖层下的大型高放射性酸性岩体是在该类型选址关键。

3) 沉积盆地型靶区,以关中盆地,松辽盆地为代表,具有大的覆盖层,具有大地热流相对较大,居里面深的特点,作为干热岩靶区需要进行较深的钻探施工。

4) 近代火山型靶区,如腾冲、雷州半岛等,居里面普遍较浅,但大地热流值则介于60~100 mW/m<sup>2</sup>,作为干热岩靶区存在较大的不确定性。

在热结构剖面分析的基础上,建立了EGS靶区选址评价矩阵,选取了8个指标对中国潜在的10个干热岩靶区进行了评价,得出羊八井、阳江、惠州等地可能成为目前EGS潜在的靶区。参考了美国Newberry评价体系并对评价结果进行了对比,评价体系及评价结果具有合理性。在初步选定EGS靶区的基础上,建议对各个靶区进行更准确的模拟研究,通过对深部地温场的模拟,评价深部热结构,为中国EGS靶区圈定提供更为准确的依据。

#### 参考文献(References)

- [1] Tester J W, Anderson B J, Batchelor A S, et al. The future of geothermal energy—Impact of enhanced geothermal system (EGS) on the united states in the 21 century[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [2] 蔺文静, 刘志明, 马峰, 等. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. 地球学报, 2012, 33(5): 807-811.  
Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma Feng, et al. An estimation of HDR resources in China's mainland[J]. Journal of Geological, 2012, 33(5): 807-819.
- [3] 汪集咏, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25-31.  
Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 25-31.
- [4] 国家能源局, 财政部, 国土资源部, 住房城乡建设部. 关于促进地热能开发利用的指导意见[J]. 太阳能, 2013(4): 15-18.  
National Energy Administration, The Ministry of Finance, Ministry of Land and Resources, Ministry of Housing Urban and Rural Development. Guidance on the promotion of geothermal energy development and utilization[J]. Solar Energy, 2013(4): 15-18.
- [5] Brown D W, Duchane D V, Heiken G, et al. Mining the earth's heat: Hot dry rock geothermal energy[R]. Idaho Falls: Los Alamos National Laboratory, 2012.
- [6] Sanyal S K, Butler S J. An analysis of power generation prospects from enhanced geothermal systems[C]. Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, April 25-29, 2010.
- [7] Genter A, Hill A J, Budd A R, et al. Current status of the EGS soultz geothermal project[C]. Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, April 25-29, 2010.
- [8] Goldstein B A, Hill A J, Budd A R, et al. Hot rocks in Australia—national outlook[C]. Stanford University, Stanford, California, January 28-30, 2008.
- [9] Genter A, Traineau H, Dezayes C, et al. Fracture analysis and reservoir characterization of the granitic basement in the HDR Soultz Project (France)[J]. Geothermal Science & Technology, 1995, 4(3): 189-214.
- [10] Genter A, Traineau H, Bourguin B, et al. Over 10 years of geological investigations within the European Soultz HDR project[C]. Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000.
- [11] 曾玉超, 苏正, 吴能友. 增强型地热系统储层试验与性能特征研究进展[J]. 矿业研究与开发, 2012, 32(3): 22-27.  
Zeng Yuchao, Su Zheng, Wu Nengyou. Advances in reservoir test and performance characteristics of enhanced geothermal system[J]. Mining Research and Development, 2012, 32(3): 22-27.
- [12] 汪洋. 利用地下流体氦同位素比值估算大陆壳幔热流比例[J]. 地球物理学报, 2000, 43(6): 762-769.  
Wang Yang. Estimations of the ratio of crust/mantle heat flow using helium isotope ratio of underground fluid[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(6): 762-769.
- [13] 孙知新, 李百祥, 王志林. 青海共和盆地存在干热岩可能性探讨[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(2): 119-124.  
Sun Zhixin, Li Baixiang, Wang Zhilin. Exploration of the possibility of hot dry rock occurring in the Qinghai Gonghe Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(2): 119-124.
- [14] 汪集咏, 黄少鹏. 中国大陆地区热流数据汇编[J]. 地质科学, 1988(2): 196-204.  
Wang Jiyang, Huang Shaopeng. Compilation of heat flow data in the China continental area[J]. Scientia Geologica Sinica, 1988(2): 196-204.
- [15] 汪集咏, 黄少鹏. 中国大陆地区热流数据汇编(2版)[J]. 地震地质, 1990, 12(4): 351-366.  
Wang Jiyang, Huang Shaopeng. Compilation of heat flow data in the China continental area (2nd ed)[J]. Seismology and Geology, 1990, 12(4): 351-366.
- [16] 胡圣标, 何丽娟, 汪集咏. 中国大地热流数据汇编(3版)[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 612-624.  
Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. Compilation of heat flow data in the china continental area (3rd ed)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(5): 612-624.
- [17] 万天丰, 褚明记, 陈明佑. 福建省岩石圈的热状态与地热资源的远景评价[J]. 地质学报, 1988, 62(2): 178-188.  
Wan Tianfeng, Chu Mingji, Chen Mingyou. Thermal regimes of the lithosphere and geothermal resources potential in Fujian province[J]. Journal of Geological, 1988, 62(2): 178-188.
- [18] 廖志杰. 福建无岩浆热源的深循环水热系统[J]. 现代地质, 2012, 26(1): 85-98.  
Liao Zhijie. Deep-circulation hydrothermal systems without magmatic heat source in Fujian Province[J]. Geoscience, 2012, 26(1): 85-98.

(责任编辑 赵业玲)