

浅层地热能与干热岩资源潜力及其开发前景对比分析

马峰¹,王潇媛¹,王贵玲¹,蔺文静¹,李洪磊²

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所,石家庄 050061

2. 中国电建吉林省电力勘测设计院,长春 130022

摘要 浅层地热能与干热岩是地热能中最具潜力的部分,前者通过给建筑供暖(制冷)减少国家能源需求,后者则通过高温发电增加国家可再生能源供给,两者都具有资源潜力大、清洁环保的优势,其开发技术地源热泵与增强型地热系统也具有原理上的相似性。本文对比分析了浅层地温能与干热岩的基本概念、资源潜力、节能效果、经济效益、环境影响等,讨论了两者的优缺点及开发前景,针对中国地热资源赋存特征及国家能源发展规划,提出了未来地热向深部发展的建议。

关键词 浅层地热能;干热岩;地源热泵;增强型地热系统

中图分类号 TE28

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.19.007

Analysis of the potential and development prospects of shallow geothermal energy and hot dry rock resources

MA Feng¹, WANG Xiaoyuan¹, WANG Guiling¹, LIN Wenjing¹, LI Honglei²

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

2. Jilin Electric Power Survey and Design Institute, Power China, Changchun 130022, China

Abstract Shallow geothermal energy and hot dry rock have the most utilization potential among geothermal energy. The former is used to offer indoor heating or cooling to reduce the country's energy demands, and the latter is used to generate electricity to increase the national renewable energy supply. Both of them have tremendous potentials and are environmentally friendly, and the development technology named ground source heat pump and enhanced geothermal systems share some similarities. This paper compares the basic concept, resource potential, energy-saving effects, economic benefit and environmental impacts between shallow geothermal energy and hot dry rock, discussing their advantages and disadvantages and development prospects. Based on the characteristics of geothermal resources in China and the national planning on energy development, geothermal development is suggested to go deeper in the future.

Keywords shallow geothermal energy; hot dry rock; ground source heat pump; enhanced geothermal system

中国是世界上利用地热资源较早的国家之一,至今已有2000多年的历史。历史上对地热资源的开发利用大多限于对温泉的直接利用,且主要用于医疗和洗浴方面^[1]。国内利用地热供暖的历史可追溯到明朝。

可以说早期对地热能的利用主要集中在水热型地热资

源,其开发利用特点是采水取热,通过将地下热水开发到地表上来进行换热,但受地层回灌的影响,这种地热能的利用方式通常会对地下环境产生较大的影响,导致地热能不可持续的开发利用。

随着相关技术的进步及人们对地热能的关注,浅层地温

收稿日期:2015-06-03;修回日期:2015-07-31

基金项目:中国地质科学院水文地质环境地质研究所科研基金项目(SK201212,SK201408);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,研究方向为地热地质和水文地质学,电子信箱:guilingw@163.com

引用格式:马峰,王潇媛,王贵玲,等.浅层地热能与干热岩资源潜力与开发前景分析[J].科技导报,2015,33(19):49-53.

能作为清洁能源开始被人们认识,1948年第一台地下水源热泵系统在美国俄勒冈州波特兰市联邦大厦运行^[3],该系统从设计开始就得到了广泛关注^[3]。随后发展的埋管地源热泵系统具有更加环境友好的特点。通过在地下埋设水平或垂直的聚乙烯和聚丙烯塑料管而与岩土体进行换热,其寿命可达50年。比普通空调高35年的使用寿命。同时运行费用低,比普通空调可节约30%~40%的运行费用。其次,还具有建站灵活,占地面积小,适用于各种建筑工程应用的特点^[4]。

近年来,随着国家对可再生能源的需求,地热能最具潜力的部分——干热岩被越来越多地提起。干热岩通常是指埋藏于地表下数公里、温度高于150℃、没有水或蒸汽的热岩体。干热岩作为清洁的可再生能源与传统可再生能源相比具有“资源量巨大、地理分布广、零污染排放、安全性好、热能连续性好、利用效率高”等优势,随着全球经济的迅速发展,能源需求和环境保护与日俱增,干热岩资源开发技术受到世界各国的广泛关注。

浅层地温能与干热岩资源的开发均是通过形成换热工质循环回路而达到持续热提取的目的(图1)。浅层地温能采用地源热泵技术,通过将低品级的地下热置换为高品级的热,从而达到给建筑供暖或制冷的目的,目前,地热热泵技术已经成熟应用于中国多数城市建筑中的空调系统;干热岩

能量的提取采用增强型地热系统,通过储层激发后,将换热流体从注入井进入裂隙储层换热后,从生产井提取高温流体进行发电。表1将两者基本概念进行了对比分析。

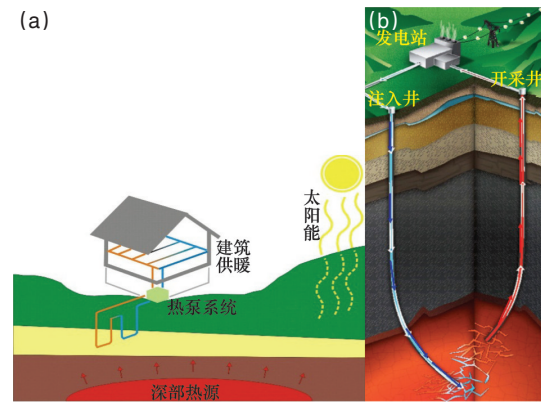


图1 浅层地温能(a)与干热岩(b)开发示意

Fig. 1 Schematic diagram for development of shallow geothermal energy (a) and hot dry rock (b)

本综述从浅层地温能与干热岩基本概念、资源潜力、节能效果、经济效益、环境影响多方面进行对比分析,讨论各自潜力及优缺点。

表1 浅层地温能与干热岩基本概念对比

Table 1 Comparison of basic concepts between shallow geothermal energy and hot dry rock

地热类型	埋藏深度/m	温度/℃	分布范围	换热介质	开发技术	用途	可能引起的环境问题
浅层地热	0~200	无要求	第四系覆盖层理想	地下水、埋管	地源热泵	建筑供暖制冷	水位下降、热冷堆积
干热岩	≥3000	≥150	酸性岩体分布区	地下水(地表水)、CO ₂	增强型地热系统	发电	微地震

1 资源潜力

浅层地温能是指在地球表层一定深度内参与热量循环,在一定技术经济条件下可以被利用的热能资源^[5]。2011—2012年,中国地质调查局完成了中国省会城市的浅层地温能调查评价工作,结果显示:中国所有省会级以上城市每年地源热泵系统夏季(按5个月计算)换热量约为3万亿kW·h,折合标准煤约3.83亿t,可制冷面积为101亿m²;每年地源热泵系统冬季(按4个月计算)换热量为1.5万亿kW·h,折合标准煤约1.83亿t,可供暖面积为119亿m²。每年可节能2.3万亿kW·h,折合标准煤2.83亿t,可减少二氧化碳排放9.78亿t。

美国最先开始干热岩资源的评价和开发,经初步估算,美国大概90%的地热资源储存在EGS系统中。2011年,美国地热技术协会、美国能源部在旧金山会议指出了未来5~20年EGS技术的发展机遇,通过发展EGS开发技术优化热储层性能,在2050年EGS储层发电达到100GW的目标。图2为美国干热岩资源潜力评估结果。

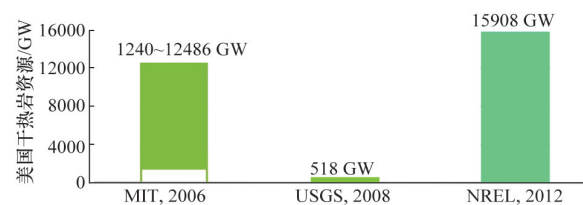


图2 MIT,USGS,NREL干热岩开发工程资源潜力估算

Fig. 2 Hot dry rock resources evaluation from MIT,USGS and NREL

据美国估算,20年之后,50GW的煤炭发电和40GW的核电将需要用其他能源来取代。干热岩是唯一可再生并且有潜力接替的新能源。2006,MIT报告显示,现有美国EGS储层的激发可以增加500GW的发电潜力,并且在今后50年内,可以提供10万MW发电量^[6]。

中国干热岩资源潜力巨大,初步估算,在埋深3~10km范围内的干热岩资源量达到860万亿t标准煤,按照2%的可利用量计算,相当于国内2014年能源消耗总量的4480倍^[7]。

2 节能效果

浅层地温能开发利用的主要技术是地源热泵,这是一种绿色、环保成熟的节能技术。利用地源热泵开发利用浅层地温能,来为城市建筑供热、制冷,节能效果非常显著。它比传统空调节能40%,比电采暖节能70%,比燃气炉效率提高45%以上,运行费用是传统中央空调的50%~60%。尤其在中国华北地区,冬天供暖期长、夏季制冷期长,开发地源热泵具有广阔的市场空间和得天独厚的资源条件,是增加能源供给、改善能源结构、提高环境质量、建设生态文明的重要路径^[8]。

对于干热岩开发,目前尚没有一个运行周期足够长的干热岩开发工程,因此对其节能效果评价目前还不成熟,随着钻井及开发技术的发展,干热岩发电将显现出巨大的节能潜力。

3 经济效益分析对比

目前,地源热泵已经体现出其巨大的经济效益。下面以石家庄某地源水复合热泵冬季供暖监测数据为依据讨论其经济性,地下水源热泵系统试验运行期间为2015年3月11—27日,具体运行情况如表2所示。

表2 办公楼供暖过程中地源热泵系统运行能耗
Table 2 Energy consumption of the ground source heat pump system for office building heating

运行期间	供暖方案	运行时间/h	场地潜			每天耗电量/(kW·h)
			机组耗电/(kW·h)	水泵耗电/(kW·h)	总耗电/(kW·h)	
3月11—16日	办公楼供暖	127	7036	2794	9830	1858
3月21—27日	办公楼供暖	152	8520	3344	11864	1873

热泵机组在对家属楼供暖期间,一个供暖季家属楼用电为42.24万kW·h,按照居民用电价格0.52元/(kW·h)计算,总用电费用为24.04万元。家属楼供暖建筑面积为15550 m²,则供暖季办公楼供暖费用为15.46元/m²。相对于石家庄目前供暖期收费标准22元/m²,节省6.54元/m²。

热泵系统的初投资相对整个热泵运行过程收益而言,仅占很小部分。根据实际工程测算,如采用地下水的地源热泵系统,系统初期投资约为250~420元/m²,其中冷源部分的投资大概在150~220元/m²。如采用土壤源地源热泵系统,初投资平均在300~480元/m²,其中冷源部分投资约为200~270元/m²^[4]。

因此,在地质条件适宜、系统配置合理的情况下,地源热泵与传统中央空调系统相比,冬季采暖运行成本可以节约30%以上,夏季可以节约10%以上。

目前,干热岩发电还没有达到理想的经济性,但是通过已有示范工程的研究以及其所表现出的巨大发电潜力来看,干热岩发电成本要远远低于太阳能光电池等其他发电成

本。德国学者在综合考虑斯图加特附近Bad Urach干热岩实验基地的各种软、硬环境后认为,在当前向第二代技术过渡的时期,该地电厂的运行成本是8~10美分/(kW·h)。这个价格要比当前北京居民用电0.47元/(kW·h)的价格要高一些。但可以肯定的是,随着干热岩发电技术的成熟和大规模开发,干热岩发电的电价必定会与国内火电、水电的电价持平。

同样,美国地热发电评价报告指出在2009年瑞士信贷投资银行引用传统地热发电为3.6美分/(kW·h),低于5.5美分/(kW·h)的煤炭发电,然而EGS发电成本很高。2007年的咨询报告显示未来EGS发电成本最有可能达到5.4美分/(kW·h),相对成熟的低成本技术将会在2030年实现。在美国能源部的EGS降低成本战略中,资源表征及井场施工占2030年成本降低目标的50%(表3)。

表3 EGS电站各项费用估算
Table 3 Cost estimation for EGS power plants

电站寿命	30年
地热田容积系数	0.95
每个场地需要钻孔(最少)	2
每个场地提供发电潜力	7 MW
激发体积	0.2 km ³
年运行及管理费用	3.5美分/(kW·h)(最大)
钻探费用(生产井和注入井)	5.5百万美元
单井激发费用	0.75百万美元
电站及其他地表设备费用	2000美元/(kW·h)
年利润	9%
年通胀率	4%

图3假设条件为使用20 MW双工质EGS电站,热储深度3 km,温度为175℃。总发电成本将从2011年的24美分/(kW·h),降低到2030年的6美分/(kW·h)。

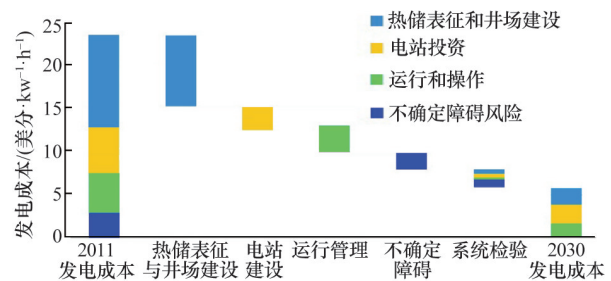


图3 干热岩发电成本降低趋势

Fig. 3 Cost reduction trend for Hot Dry Rock power plant

从国内干热岩发电潜力看来,在技术条件较为成熟的条件下,干热岩发电的前景十分广阔。在目前国内外干热岩实例发电情况看来,如何有效降低干热岩发电成本将是影响干热岩发电前景的重要因素。如果干热岩的商业开发可以得到国家政策的扶持,将其上网电价调整到太阳能光伏发电的1元/千瓦时,则干热岩发电厂可较火力、水力电厂更快地收回成本,从而加速中国干热岩发电厂的建设步伐。

综上所述,利用干热岩建立 EGS 示范工程发电前期投入较大,主要集中在勘察及钻探上。但是,随着钻探水平的提高,这部分费用在未来的几十年内将会发生重大改变,大大减少前期投资费用及投资风险。根据 EGS 建设时期,一般将整个工程分为:勘查选址阶段、储层建造阶段及电站建设阶段,相应地,EGS 发电投入包括 3 个基本组成部分:钻探费用、储层建造费用及电站建设费用。

4 环境影响分析对比

尽管浅层地温能和干热岩都属于清洁能源,但在可采资源量评价不合理、开发技术不当的情况下,仍会造成一定的环境影响。其中地源热泵工程产生的主要环境影响为地下水水位下降及随之而来的热堆积和冷堆积,而 EGS 产生的主要环境问题是微震对周围居民的影响。以下同样以石家庄某地源热泵工程为例评价浅层地温能开发的环境响应。

系统设计了 4 个水井,井深均为 80 m,区域稳定地下水水位为 46 m。系统在家属楼供暖期间采用一抽两灌模式、1 号井抽水,2、3 号井作为回灌井。抽水过程中 1 号抽水井水位下降 4.8 m,2 号注入井水位上升 2.6 m,3 号井水位上升 4.3 m。在抽水结束后 3 个井的水位很快恢复到稳定水位值 46 m。从图 4 可以看出,采用一抽两灌的模式,灌采比可以达到 100%。可见在华北平原山前地区,区域地层具有良好的渗透性和水力传导性。因此,在一抽两灌的条件下,地下水能够保证完全回灌。同时,处于山前的区域地下水水流场对热堆积和冷堆积现象也起到了抑制作用。

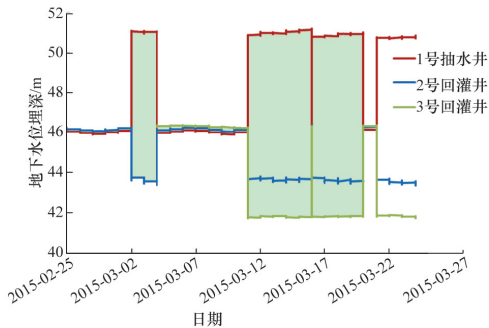


图 4 石家庄某热泵工程供暖过程中一抽两灌条件下地源井水位变化

Fig. 4 Water level fluctuation for building heating during one well pumping with two wells injection in Institute of Hydrogeology and Environmental Geology

表 4 世界部分 EGS 工程诱发地震等级及激发参数

Table 4 EGS stimulation parameters and induced seismicity in the world

名称	诱发最大微震等级	最大井口压力/MPa	深度/km	最大流量/(L·s ⁻¹)	总注入量/m ³	应力状态
Cooper Basin	3.7	68.0	4.25	24.0	20000	逆冲
Basel	3.4	30.0	4.60	62.0	11570	走滑
Soultz(GPK3)	2.9	16.0	4.75	50.0	39800	正断层/走滑
Rosmanowes	2.0	16.0	2.00	100.0	100000	走滑
Paralana	2.5	62.0	4.00	19.8	1800	逆冲
Soultz(GPK1)	1.9	11.4	3.00	36.0	25300	正断层/走滑
Soultz(GPK2)	2.6	15.0	4.70	51.0	23400	正断层/走滑
Soultz(GPK4)	2.7	18.0	4.75	45.0	12300	正断层/走滑

图 5 为回灌过程中回灌井中的水温变化情况,从图 5 中可以看出,回灌井温度具有较大的波动性。从稳定阶段的 14.7℃,经过 3 月 2 日回灌后,水温下降到 13.8℃,且保持稳定;随后 3 月 12 日继续回灌,井中水温又出现下降趋势,下降至 12℃附近,3 月 20 日停止注入后,地下水温度上升并稳定至前期的 13.8℃。总体而言,回灌井中温度的变化与注水过程具有一致性,但因地下水温度监测探头投放在水面以下 10 m 左右,受扰动条件下地下水对流换热的影响,水温变化具有极大的跳跃性。

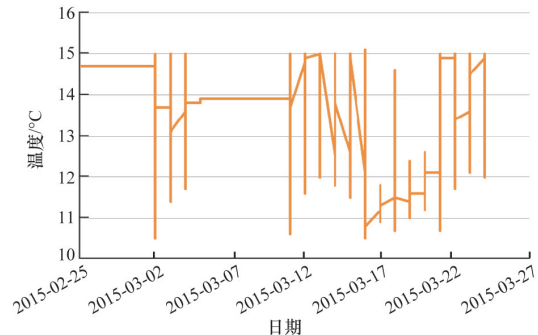


图 5 家属楼供暖条件下回灌井水温变化

Fig. 5 Temperature fluctuation of reinjection well during residential building heating

在干热岩水力压裂过程中,随着裂隙的生长热储层逐渐扩大,同时伴随微震的发生。可以通过在地表和地下埋设微震检波器来预测震源及震级。目前为止,瑞士的 Basel 干热岩开发工程是唯一受微震事件影响而中止的项目,工程由于施工在城市中心,微震对附近居民带来了一定的恐慌。表 4 为世界各 EGS 工程储层激发与微震数据^[9-12]。

从表 4 可以看出,EGS 所诱发的微震等级均小于 4,其中最大的为澳大利亚 Cooper 盆地 EGS 工程所激发的 3.7 级。所有诱发的最大微震等级与井口压力成正相关关系,注入过程中井口压力越大,所产生的微震等级越大,最大微震事件多数发生在关井以后。

图 6 为位于美国 Newberry 火山的 EGS 工程激发过程中产生了 114 个微震事件,可以看出,震级介于 0.5~2.0 之间微震事件对数值与震级负相关,并且大多数的微震均介于此范围内,最大震级为 2.39^[13]。而 3 级是人们可以感知的地震等级,所以处于 3 km 以下储层激发所产生的微地震通常不会影响人们日常生活^[14,15]。

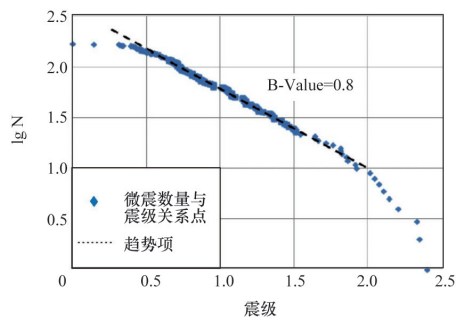


图6 Newberry火山EGS工程微震数量与震级关系

Fig. 6 Relationship between the number of seismicity and magnitude of EGS demonstration projects in Newberry

微震除了可能对场地附近居民生活造成一定的干扰外,对EGS工程建设而言,诱发的微震可以用于判断热储层生长方向、评价激发效果、优化开采井布设等,因此,应该合理评价干热岩开发过程中所产生的微震,一方面应将其控制在最小的范围内,避免对环境产生影响,另一方面,应详细研究微震发生机理、产生区域等,为干热岩开发工程建设提供支撑。

5 结论与建议

浅层地温能和干热岩均是地热能未来发展的方向,将在未来清洁能源中占有一席之地。浅层地温能技术目前已成熟,其开发应用正逐步地推广,发展浅层地温能应该结合区域地质条件及供暖制冷需求,合理开发。

干热岩在中国刚刚起步,由于其潜力巨大,目前应开展以下相关工作。

1) 加强针对干热岩开发条件的勘察和评价。目前为止,国内尚未开展系统的干热岩资源勘察开发及其技术研究,特别是干热岩资源勘查、评价、靶区选择、关键技术研究 and 示范工程建设等,通过建立干热岩资源勘查开发技术体系,缩小与发达国家间的差距,紧跟国际步伐。

2) 推进干热岩关键技术的发展。干热岩资源开发是一个系统的工程,从勘察到开发、运行、监测等各个工程阶段需要综合考虑,由于涉及到多学科的相关理论和技术,因此融合关键技术,统一最终目标是工程成败的关键。通过EGS技术开采深部干热岩体中的热量,最终利用高温地热发电的概念是最近几年来逐渐发展并成熟的理念,相对比较新颖,但是,EGS的各项技术则均是从石油、钻探等相关领域通过技术转化而应用到干热岩开发工程。因此,如何形成已有技术的转化机制是制约中国EGS发展的关键,我们应该充分利用已有的技术方法,促使其在EGS上更新并发展,最终可以形成中国自有的EGS相关关键技术。

3) 建立EGS国际长期交流合作机制。欧美国家在干热岩的开发上已经积累了40余年的经验和教训,这些成功和失败的工程都可以为中国干热岩勘察与开发提供借鉴。随着国内干热岩示范工程的建立以及干热岩相关研究的深入,需

要在很多方面与国际干热岩开发较好的国家进行学习和交流。主要体现在干热岩储层增产技术、高温钻探技术及设备、热储管理方面。

参考文献(References)

- [1] 蔺文静, 吴庆华, 王贵玲. 我国浅层地温能潜力评价及其环境效应分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 57-61.
Lin Wenjing, Wu Qinghua, Wang Guiling. Shallow geothermal energy resource potential evaluation and environmental effect in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(3): 57-61.
- [2] Hatten M J. Groundwater heat pumping: Lessons learned in 43 years at one building[J]. ASHRAE Transactions, 1992, 98(1): 1031-1037.
- [3] Kroecker J D, Chewing R C. Costs of operating the heat pump in the equitable building[J]. ASHRAE Transactions, 1954, 60: 157-176.
- [4] 王贵玲, 刘志明, 蔺文静, 等. 中国地热资源潜力评估[C]//地热能开发利用与低碳经济研讨会——第十三届中国科协年会第十四分会论文集摘要集. 2011: 14-25.
Wang Guiling, Liu Zhiming, Lin Wenjing, et al. The assessment for geothermal resources potential of China[C]//Seminar on Geothermal Potential Assessment & Low Carbon Economy. 2011: 14-25.
- [5] 刘瀚, 陈安国, 周吉光, 等. 浅层地温能开发利用的环境效应[J]. 中国国土资源经济, 2013, 26(8): 6-38.
Liu Han, Chen Anguo, Zhou Jiguang, et al. Environmental effect of exploitation and utilization of shallow geothermal resource[J]. Natural Resource Economics of China, 2013, 26(8): 36-38.
- [6] 卫万顺, 李宁波, 冉伟彦, 等. 浅层地温能开发利用中的关键问题研究[J]. 理论探讨, 2009, 3(4): 2-8.
Wei Wanshun, Li Ningbo, Ran Weiyang, et al. Study on the key problems of development and utilization of shallow geothermal energy[J]. Theoretical Discussion, 2009, 3(4): 2-8.
- [7] Asanuma H, Nozaki H, Niitsuma H, et al. Interpretation of microseismic events with larger magnitude collected at Cooper Basin, Australia[J]. Geothermal Resources Council Transactions, 2005, 29: 87-91.
- [8] Hazzard J F, Young R P. Dynamic modelling of induced seismicity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1365-1376.
- [9] Albaric J, Oye V, Langet N, et al. Monitoring of induced seismicity during the first geothermal reservoir stimulation at Paralana, Australia[J]. Geothermics, 2014, 52: 120-131.
- [10] Zang A, Oye V, Jousset P, et al. Analysis of induced seismicity in geothermal reservoirs—An overview[J]. Geothermics, 2014, 52: 6-21.
- [11] 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.
- [12] Tester J W, Anderson B, Batchelor A, et al. The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century[J]. Massachusetts Institute of Technology, 2006, 209.
- [13] Cladouhos T T, Clyne M, Nichols M, et al. Newberry volcano EGS demonstration stimulation modeling[J]. GRC Transactions, 2011, 35: 317-322.
- [14] Shapiro S A, Dinske C. Fluid-induced seismicity: Pressure diffusion and hydraulic fracturing[J]. Geophysical Prospecting, 2009, 57(2): 301-310.
- [15] Xu T, Pruess K. Modeling multiphase non-isothermal fluid flow and reactive geochemical transport in variably saturated fractured rocks: 1. Methodology[J]. American Journal of Science, 2001, 301(1): 16-33.

(责任编辑 刘志远)