

中国干热岩资源主要赋存类型与成因模式

甘浩男, 王贵玲, 蔺文静, 王潇, 马峰, 朱喜

中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061

摘要 干热岩资源作为地热资源重要的组成部分, 以其清洁、稳定、可再生的资源优势及巨大的高温发电潜力, 越来越受到关注。中国自20世纪90年代开始对干热岩资源进行调查研究, 并在不同地质背景条件预测或勘查到干热岩资源, 然而至今仍未对干热岩资源的赋存形式进行分类及开展干热岩资源成因机制研究, 阻碍了中国干热岩资源的调查与精细潜力评价。在阐述干热岩资源赋存的指标参数的基础上, 通过对国内外已发现干热岩资源的成因模式分析, 结合中国地壳结构背景, 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。并在此基础上研究了不同类型干热岩资源的成因机制, 比较不同类型干热岩资源成因机制之间的差别, 提出干热岩资源赋存的有利前景区。

关键词 干热岩资源; 指标参数; 热源; 放射性生热; 成因机制

中图分类号 TK529

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.19.002

Research on the occurrence types and genetic models of hot dry rock resources in China

GAN Haonan, WANG Guiling, LIN Wenjing, WANG Xiao, MA Feng, ZHU Xi

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

Abstract As a significant part of geothermal resources, hot dry rock (HDR) resources have attracted increasing attention due to their clean, stable, reproducible characteristics and huge potential of high temperature geothermal power generation. China started research on HDR resources since the 1990s, and has successfully explored and predicted quite a few HDR resources deposits. However, until now, we have not classified HDR resources and studied the genetic mechanisms of their occurrence, which hinders the exploration and precise potential estimation of HDR resources in China. Based on the geological indicators of the occurrence of HDR resources and genetic analysis of them in the world and the crustal structure in China, this paper divides the HDR resources into four types, i.e. the high radioactive heat production type, the sedimentary basin type, the modern volcano type and the intraplate active tectonic zone type. The genetic mechanisms of different types of HDR resources are analyzed and compared, and the prospect regions of HDR resources are proposed, which may provide references for precise potential estimation of the HDR resources in China.

Keywords HDR resources; geological indicator; heat source; radioactive heat generation; genetic mechanism

随着全球经济的快速发展与常规能源的不断消耗, 人们面临着越来越严峻的能源紧缺问题和环境问题。地热资源

属于清洁的可再生能源, 与其他能源相比有零排放、持续性好等显著优势^[1], 积极推广地热资源的开发利用, 对中国实现

收稿日期: 2015-06-30; 修回日期: 2015-07-31

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (12120113077900); 中国地质科学院水文地质环境地质研究所科研基金项目 (SK201408)

作者简介: 甘浩男, 硕士研究生, 研究方向为地热地质学, 电子信箱: ganhaohao@foxmail.com; 王贵玲 (通信作者), 研究员, 研究方向为地热地质与水文地质学, 电子信箱: guilingw@163.com

引用格式: 甘浩男, 王贵玲, 蔺文静, 等. 中国干热岩资源主要赋存类型与成因模式[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 22-27.

节能减排目标与能源结构调整战略有重要意义。

地热资源按其成因和产出条件分为水热型地热资源和干热岩型地热资源,世界上目前开采和利用的地热资源主要是水热型地热资源,占已探明地热资源的10%左右^[2,3]。狭义的干热岩概念是指埋深数千米,温度普遍大于200℃,内部不存在流体或仅有少量地下流体的高温岩体^[4]。随着干热岩开发利用技术的进步,尤其是压裂技术的发展和成本的下降,干热岩资源温度的限制在逐渐模糊^[1]。干热岩资源是地热资源的最重要组成部分,也是未来中高温地热资源开发利用的发展方向^[5]。

温度是判别是否存在干热岩资源的最重要标准。由于地温随着深度不断升高,因此根据定义,干热岩的分布十分普遍,只要到达一定深度即可满足干热岩条件。然而受限于人类技术的发展,人们优先勘探和开发埋深较浅且温度较高的干热岩资源。因此,此处讨论的干热岩资源是指方便人类开发利用的经济型干热岩资源。

干热岩资源的勘查开发研究已有30多年的历史,但以往

只局限在美国、英国、法国、德国、瑞士、日本、澳大利亚等国家^[6]。从目前世界上已开展研究的干热岩资源来看,干热岩资源的主要赋存地质条件包括近代火山周边^[7-9]、高热流花岗岩地区^[10-12]和构造活动区^[13,14]。

1 干热岩资源赋存指标参数

由于干热岩资源埋藏于地表以下,除钻探工作外不能直接勘查与评价,仅能通过一些指标参数来间接反映地下的热异常。这些指标包括:大地热流值、居里面埋深、酸性岩体分布和控热构造分布。

1.1 大地热流值

大地热流值简称热流,地球内部热能传输至地表的一种现象,是地热场最重要的表征^[11,15]。中国大陆热流空间展布格局大致以105°E经线为界,西半部热流等值线为近东西或南东东—北西西走向,而东半部则变化为北北东到北东走向。大地热流的整体空间展布趋势可以归结为:西部“南高北低”,东部“东高西低”,中部“北高南低”(图1^[1])。

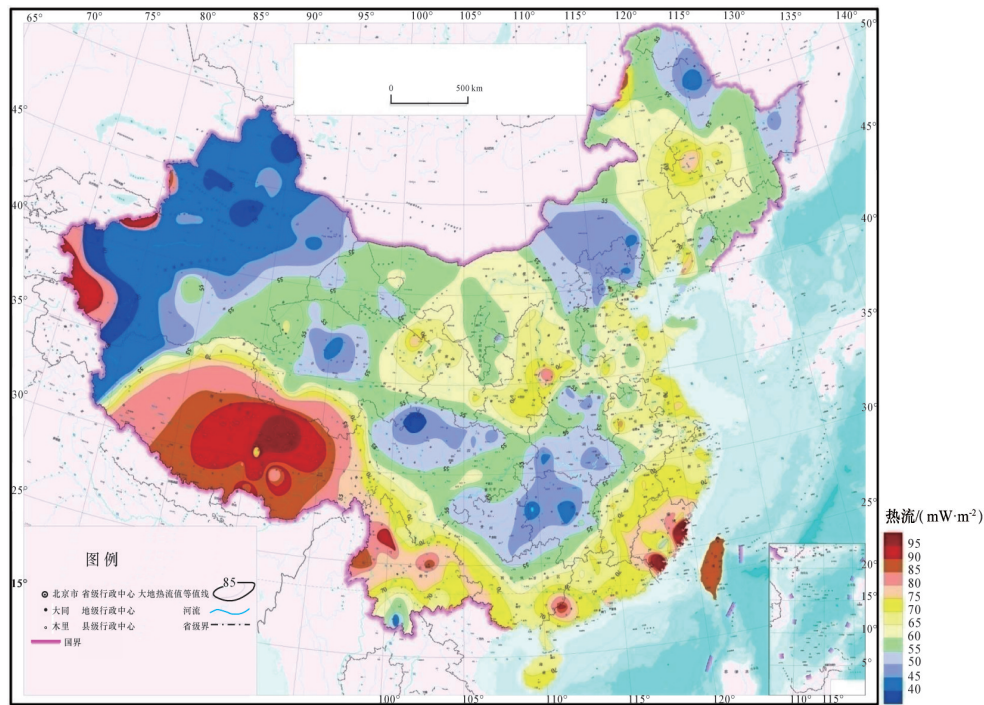


图1 中国大陆地区热流分布

Fig. 1 Heat flow distribution map of mainland China

1.2 居里面埋深

在地壳中,当铁磁体温度上升达到某值时,铁磁体磁化率会急剧下降,从铁磁相转换成顺磁相,这种临界温度即为居里点,居里点埋深面则为居里面,又称居里等温面。利用航磁资料可以计算达到居里点的地温深度,深度相对较浅,则表示深部热流向地表传递散发距离较短,有利于干热岩等高温地热资源的勘探研究及开发利用。

1.3 酸性岩体分布

地表所观测到的热流由两部分构成,来自地核和地幔向上输入地壳的对流和传导热量,简称地幔热流;地壳中放射性元素,尤其是U、Th和K的同位素衰变产生的热,即地壳热流。较高的地壳热流对地壳浅部温度分布具有重要影响^[6],有利于干热岩资源的赋存。酸性岩体由于相对富含放射性生热元素U、Th和K,因此作为干热岩资源赋存的重要指标条

件。例如,中国东南沿海地区酸性岩体广泛分布,是干热岩资源赋存的前景场所(图2)。

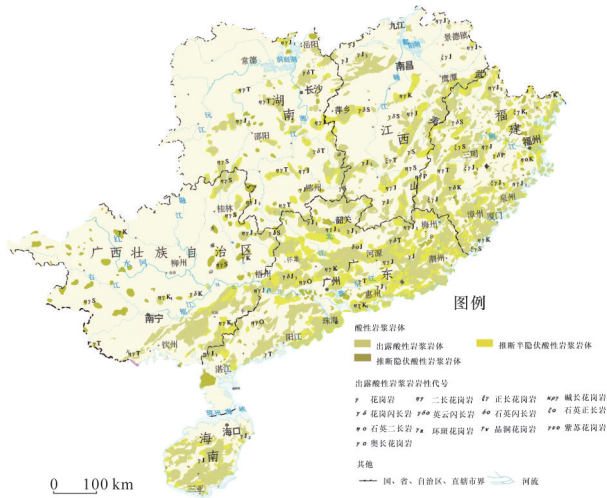


图2 中国大陆东南沿海地区酸性岩体分布
Fig. 2 Granitoids distribution map of southeast coast of China mainland

1.4 控热构造特征

新构造运动塑造了现今的地热资源背景,而活动构造对这些资源的分布具有重要的指示意义。按照热流-构造分区,通常地热活动强度随远离板块边界而减弱。中国西部的滇西地区及东部台湾中央山脉两侧,分别处于印度板块与欧亚板块、欧亚板块与菲律宾板块的边界及其相邻地区,均是当今世界上构造活动最强烈的地区之一,具有产生强烈水热活动和孕育高温水热系统必要的构造条件和热背景。

2 干热岩资源分类与成因机制研究

根据地壳结构和成因机制,中国干热岩资源主要可分为:高放射性产热型、近代火山型、沉积盆地型及强烈构造活动带型。

2.1 高放射性产热型干热岩资源

类似于法国Saultz地区及澳大利亚Cooper盆地等高放射性花岗岩地区,中国东南沿海地区,地表及地壳浅部发育许多大型的中生代酸性花岗岩类岩体,该类岩体具有较高的放射性产热特征(表1^[6]),在壳源产热和幔源产热均理想的情况下大地热流值可超过 $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$ 。在覆盖层理想的地方,可以获取理想的干热岩资源。其热成因模式如图3所示。

高放射性产热干热岩资源主要集中在中国东南沿海(图4),如广东、福建、江西、海南以及广西部分地区,以燕山期大范围形成的酸性岩体为赋存体形成干热岩资源区。

2.2 沉积盆地型干热岩资源

沉积盆地型干热岩资源具有基岩覆盖层较大、表层地温梯度较大、增温稳定的特点。深部热源向上传导到达覆盖层

表1 中国东南沿海岩石生热率统计

Table 1 Statistics of radioactive heat generation of rock in southeast coast of China

岩性	样品数	放射性生热率/ $(\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3})$	
		变化范围	平均值
花岗岩	450	0.9~9.3	4.2
花岗闪长岩	119	0.9~8.1	3.5
正长岩	11	1.5~7.8	4.0
凝灰岩	153	0.6~5.5	2.7
变质砂岩	33	0.6~3.6	2.1
泥质岩	83	1.0~3.8	2.0
沉积碎屑岩	431	0.3~4.3	1.8

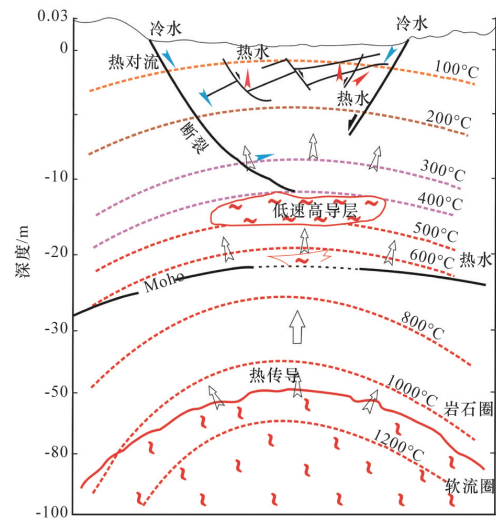


图3 高放射性产热干热岩资源区成因模式
Fig. 3 Genetic model of the HDR resource area with high radioactive heat generation

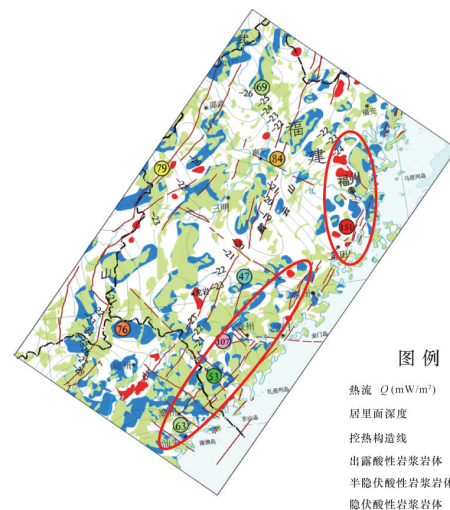


图4 东南沿海放射性产热干热岩资源区
Fig. 4 HDR Resource Area of radioactive heat generation in southeast coast of China

时,由于沉积覆盖层热导率小的特点,阻止了热量的散失。本类干热岩资源虽然地表热流值并不太高,但由于热量在浅部的聚集,其底部基岩岩体温度可以达到150℃以上。其热成因模式如图5所示。

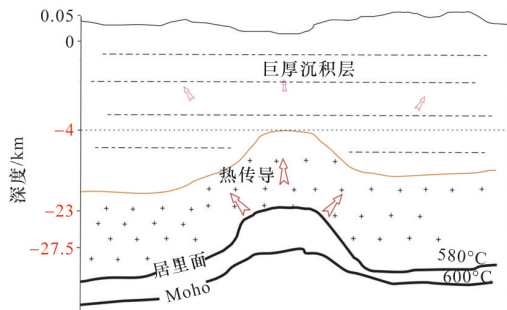


图5 沉积盆地型干热岩资源成因模式

Fig. 5 Genetic model of the sedimentary basin type of HDR resources

沉积盆地型干热岩资源主要分布在关中(图6)、咸阳、贵德、共和、东北等白垩系形成盆地的下部,由于沉积覆盖层具有较高的地温梯度,通常与水热型地热田共生。

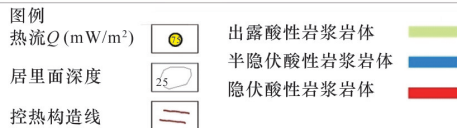
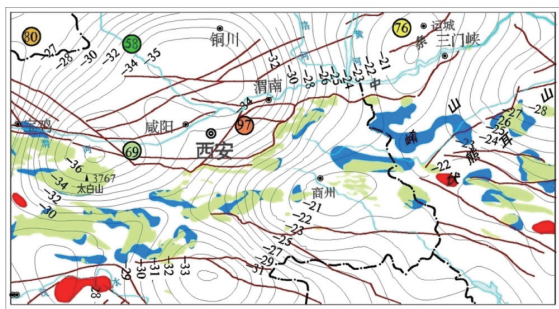


图6 关中盆地干热岩资源区

Fig. 6 HDR resource area in Guanzhong basin

2.3 近代火山型干热岩资源

近代火山型干热岩资源和火山活动密切相关。国际上很多知名的干热岩资源区均属于这种类型^[7,9]。受底部未冷却岩浆的作用,地表具有明显的水热活动现象。通常在较浅的地方就可以获得较高的温度,其成因模式如图7所示。

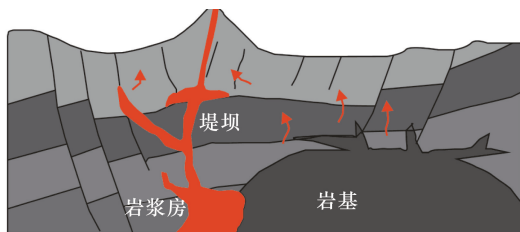
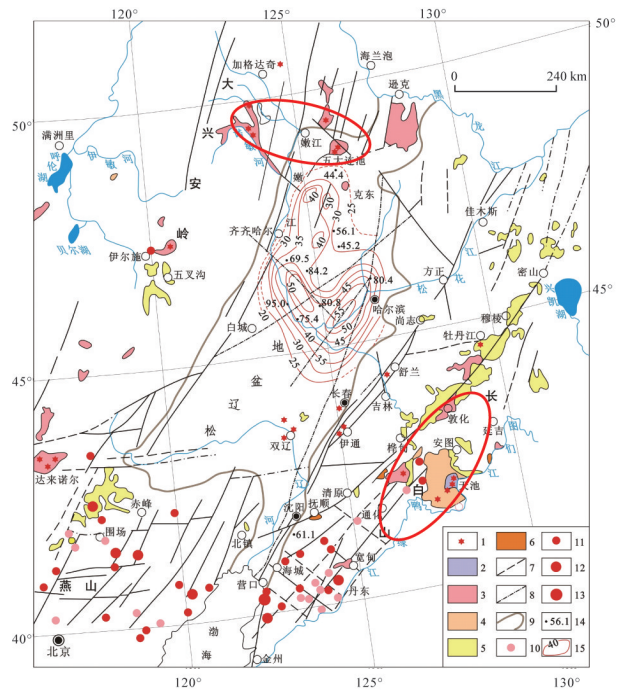


图7 近代火山型干热岩资源成因模式

Fig. 7 Genetic model of the intraplate active tectonic zone type of HDR resources

近代火山型干热岩资源分布在中国腾冲、长白山、五大连池(图8^[7])等地区。其热源特征与底部岩浆活动历史和岩浆活动特征密切相关。



1—火山口;2—中更新世—全新世粗面岩、碱流岩、浮岩;3—更新世玄武岩;4—上新世玄武岩;5—中新世玄武岩;6—老第三纪玄武岩;7—活动断裂;8—隐伏活动断裂;9—松辽盆地边界;10—25~40℃温泉;11—40~60℃温泉;12—60~80℃温泉;13—80~100℃温泉;14—大地热流值(mW/m²);15—地温梯度(℃/km)

图8 中国东北综合地热异常图

Fig. 8 Comprehensive geothermal anomaly of northeast China

2.4 强烈构造活动带型干热岩资源

强烈构造活动带型干热岩资源分布在青藏高原。受亚欧板块和印度洋板块的挤压,新生代以来青藏高原逐渐隆升,局部有岩浆底侵的存在,在这些区域可能形成理想的干热岩资源,其热成因模式如图9^[18]所示。

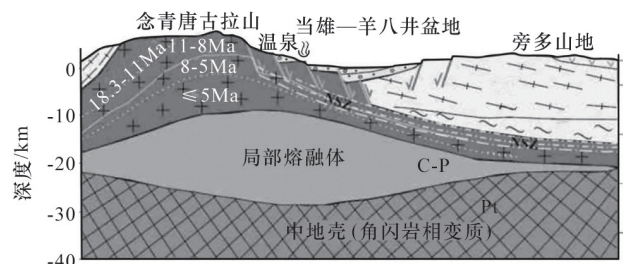
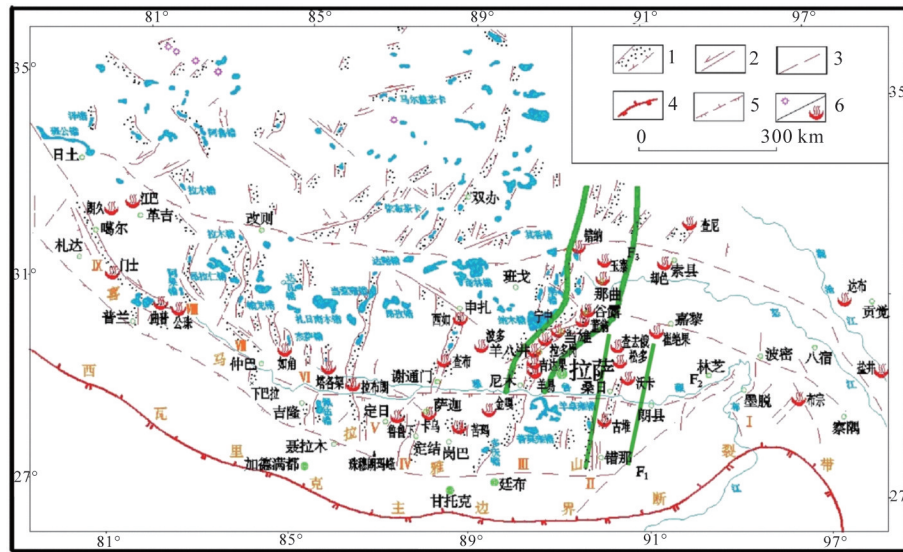


图9 强烈构造活动带干热岩资源成因模式

Fig. 9 Genetic model of HDR Resource of intraplate active tectonic zone

受构造活动的影响,自第四纪以来,青藏高原受到南北向强烈挤压,随着地质应力的变化,早期以东西向展布为主的构造格局逐渐遭受破坏,产生了一系列的北西向走滑断裂及近南北向的张性和张扭性的活动构造带。在这些近南北向断裂带内现代地热活动强烈,又以那曲—羊八井—多庆错

活动构造带和查去俄—古堆—错那构造带最为显著(图10)。查去俄—古堆—错那构造带内由南往北有错那、古堆、日多、沃卡、松多、查去俄等中—高温地热显示区。这些地区可作为强烈构造活动带型干热岩资源的理想前景区。



1—正断层性质为主的边界断裂及断陷带;2—走滑性质为主的边界断裂;3—推测活动断裂;4—西瓦里克主边界断裂带;
5—早期压性深断裂;6—第四纪(?)火山口/地热高温显示区(点);F1为高喜马拉雅深断裂;F2为雅鲁藏布江深断裂;
F3为班公错—怒江深断裂;I、II、III为活动构造带编号

图10 西藏地热活动与构造分布

Fig. 10 Geothermal activity and structure distribution map of Tibet

3 讨论

从以上4种干热岩资源赋存类型的成因模式可以看出,近代火山型和强烈构造活动带型干热岩资源的热源具有相似之处,两者均在地壳中深层次存在高温熔融体作为热源,引起了浅部的热异常^[9]。因此从成因机制上来讲,这两类干热岩资源的形成都源于地壳中深层次的高温热源。而二者区别在于,近代火山型干热岩资源的热源是由于深部热扰动(岩浆活动)引起的热源沿岩石裂隙向浅部运移,以致喷发出地表;而强烈构造活动带型干热岩资源的热源则是由于板块间构造运动导致的减压熔融而形成。二者主要热源的驱动力本源存在区别,以致二者资源赋存的展布形式存在不同。

高放射性产热型干热岩资源的热源与其余类型有本质区别,其更强调壳源热源对于干热岩资源形成的贡献^[20]。即在高热流花岗岩地区,放射性生热形成的地壳热流所占大地热流的比例高于其他地区地壳热流所占大地热流的比例。因此,寻找此类干热岩资源的前景区在于获取大面积、高放射性生热率的花岗岩类作为赋存体,为干热岩资源提供较高的地壳热流。

相比于其他类型干热岩资源热源上的差别,沉积盆地型

干热岩资源的形成与赋存所不同之处在于其储热方式。即沉积盆地型干热岩资源的热源并未比一般地区明显加强,而是通过有效的防止热量散失来集聚热能,形成浅部地壳的高地温梯度和热异常。因此,厚层、热导率低的沉积盖层,是赋存此类干热岩资源的沉积盆地所需的必要条件。

4 结论

在明确干热岩资源赋存的地热地质学指标的基础上,从地壳结构与成因模式角度,研究了中国主要干热岩资源的赋存类型与成因机制。主要得到以下结论。

1) 影响干热岩资源赋存的直接指标是温度,间接指标包括大地热流、居里面埋深、酸性岩体分布和控热构造特征,不同指标对应了不同的干热岩资源类型成因模式。

2) 干热岩资源的赋存类型主要可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。

3) 4种干热岩资源的成因机制各不相同,其中高放射性产热型、近代火山型和强烈构造活动带型干热岩资源是通过加强热源形成的,沉积盆地型干热岩资源则是通过减少热散失,集聚热量而赋存。

参考文献 (References)

- [1] 汪集昉, 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.
- [2] 康玲, 王时龙, 李川. 增强地热系统EGS的人工热储技术[J]. 机械设计与制造, 2008, 9: 141-143.
Kang Ling, Wang Shilong, Li Chuan. Reservoir technology in enhanced geothermal systems[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008, 9: 141-143.
- [3] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312-321.
Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 312-321.
- [4] Grant M, Bixley P. Geothermal reservoir engineering[M]. New York: Academic Press Inc, 2011.
- [5] 杨方, 李静, 任雪姣. 中国干热岩勘查开发现状[J]. 资源环境与工程, 2012, 26(4): 339-341.
Yang Fang, Li Jing, Ren Xuejiao. Prospecting and exploitative present situation of hot dry rock in China[J]. Resources Environment & Engineering, 2012, 26(4): 339-341.
- [6] 许天福, 张延军, 曾昭发, 等. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 42-45.
Xu Tianfu, Zhang Yanjun, Zeng Zhaofa, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock) [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 25-31.
- [7] Manuel N. The dependence of permeability on effective stress from flow tests at hot dry rock reservoirs at Rosemanowes (Cornwall) and Fenton Hill (New Mexico)[J]. Geothermics, 1999, 28(3): 315-340.
- [8] Hori Y, Kitano K, Kaieda H, et al. Present status of the Ogachi HDR project, Japan, and future plans[J]. Geothermics, 1999, 28(4/5): 637-645.
- [9] Norio Y, Isao M, Hajime S, et al. Temperature-dependent scale precipitation in the Hijiori Hot Dry Rock system, Japan[J]. Geothermics, 2008, 37(1): 1-18.
- [10] Genter A, Traineau H, Dezayes C, et al. Fracture analysis and reservoir characterization of the granitic basement in the HDR Soultz project (France)[J]. Geotherm. Science and Technology, 1995, 4(3): 189-214.
- [11] Roger P. The Rosemanowes HDR project 1983-1991[J]. Geothermics, 1999, 28(4/5): 603-615.
- [12] Gallagher, K. Thermal conductivity of sedimentary and basement rocks from the Eromanga and Cooper Basins, South Australia[J]. Exploration Geophysics, 1987, 18: 381-92.
- [13] Stober I, Bucher K. Enhanced-geothermal-systems (EGS), hot-dry-rock systems (HDR), deep-heat-mining (DHM)[J]. Springer Geology, 2012: 163-176.
- [14] Yusuke M, Hiroshi A, Hiroaki N, et al. Characteristics of large-magnitude microseismic events recorded during and after stimulation of a geothermal reservoir at Basel, Switzerland[J]. Geothermics, 2013, 45(45):1-17.
- [15] 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场论文摘要集. 2011: 14-25.
Wang Guiling, Liu Zhiming, Lin Wenjing, et al., The assessment of geothermal resources potential of China[C]//Seminar on geothermal potential assessment & low carbon Economy. 2011: 14-25.
- [16] 赵平, 汪集昉, 汪缉安, 等. 中国东南地区岩石生热率分布特征[J]. 岩石学报, 1995, 11(3): 292-305.
Zhao Ping, Wang Jiyang, Wang Ji'an, et al. Characteristics of heat production distribution in SE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11(3): 292-305.
- [17] 王锡魁, 裘善文, 宋长春, 等. 中国东北新生代火山活动与地热资源[J]. 地质论评, 1999, 45: 190-195.
Wang Xikui, Qiu Shanwen, Song Changchun, et al. Cenozoic volcanism and geothermal resources in northeast China[J]. Geological Review, 1999, 45: 190-195.
- [18] 白嘉启, 梅琳, 杨美伶. 青藏高原地热资源与地壳热结构[J]. 地质力学学报, 2006, (12): 354-362.
Bai Jiaqi, Mei Lin, Yang Meiling. Geothermal resources and crustal thermal structure of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 2006, (12): 354-362.
- [19] 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(5): 807-811.
Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma Feng, et al. An estimation of HDR resources in China's mainland[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012(5): 807-811.
- [20] Massachusetts Institute of Technology. The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century[M]. London: Cambridge Press, 2006.

(责任编辑 刘志远)

 科技导报
SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。