

# 中国大陆干热岩地热资源潜力评估

汪集旻<sup>1</sup>, 胡圣标<sup>1</sup>, 庞忠和<sup>1</sup>, 何丽娟<sup>1</sup>, 赵平<sup>1</sup>, 朱传庆<sup>1</sup>, 饶松<sup>1,2</sup>, 唐晓音<sup>1,2</sup>, 孔彦龙<sup>1,2</sup>, 罗璐<sup>1,2</sup>, 李卫卫<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 地热资源是一种极具竞争力的清洁可再生能源,按其成因和产出条件可分为水热型和干热岩型,其中,干热岩型地热资源以其分布的普遍性和高热储温度而更具开发潜力与前景。干热岩地热资源潜力评估是干热岩开发的基础工作。本文基于大量热流数据,编制了新版中国大陆地区热流图。进而依据岩石热物性数据库,计算评价了中国大陆地区干热岩地热资源。评价方法主要采用体积法,文中详细介绍了评价方法中各参数选取的原则与数据来源。计算结果表明,中国大陆(3—10km深度)干热岩地热资源总量为 $20.9 \times 10^6 \text{ EJ}$ ,合 $714.9 \times 10^{12} \text{ t}$ 标准煤。若按2%的可开采资源量计算,是传统水热型地热资源量的168倍,相当于中国2010年能源消耗总量的4400倍。但是,囿于干热岩开发的经济性和现有技术条件,近期应着眼于4—7km深度段干热岩地热资源的开发,热储目标温度是150—250℃,干热岩开发的有利靶区包括藏南地区、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。最后,指出了现阶段干热岩研究的主要任务。

**关键词** 干热岩;地热资源潜力评价

**中图分类号** P314

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.32.003

## Estimate of Geothermal Resources Potential for Hot Dry Rock in the Continental Area of China

WANG Jiyang<sup>1</sup>, HU Shengbiao<sup>1</sup>, PANG Zhonghe<sup>1</sup>, HE Lijuan<sup>1</sup>, ZHAO Ping<sup>1</sup>, ZHU Chuanqing<sup>1</sup>, RAO Song<sup>1,2</sup>, TANG Xiaoyin<sup>1,2</sup>, KONG Yanlong<sup>1,2</sup>, LUO Lu<sup>1,2</sup>, LI Weiwei<sup>1,2</sup>

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** As one of the clean renewable energy, geothermal energy is very competitive. According to its genesis and exploration conditions, geothermal resources could be divided into two kinds, that is, one is hydrothermal resources and the other one is Hot Dry Rock (HDR) geothermal resources. Because of its universality and high temperature, HDR geothermal resources have great potential for projecting future development. The assessment of HDR geothermal resources potential is the base of HDR resources exploration. Here the heat flow map in the continental area of China is updated on the basis of more new heat flow data. Then the HDR geothermal resources are estimated using volume methods with a thermal physical access in the continental area of China (3 km—10 km). Results show that the total HDR geothermal energy is  $20.9 \times 10^6 \text{ EJ}$ , which is equivalent to standard coal of  $714.9 \times 10^{12} \text{ t}$ . If the recoverable energy is 2% by computing, then it is 168 times of conventional hydrothermal energy, and it is equivalent to 4,400 times of total annual energy consumption during the year of 2010 in China. Nevertheless, due to the limitation of economics and technology, the HDR geothermal resources exploration within the depth of 4—7 km accompanied with an expected temperature of 150—250 °C should be conducted in the near future. Several target regions for HDR geothermal resources exploration are proposed, including South Tibet, West Yunnan (Tengchong), the southeast coast of China (Zhejiang, Fujian and Guangdong), North China (BBB basin), the southeast regions of Ordos Basin (Fenwei Graben), and Northeast China (Songliao Basin). Finally, the future tasks involving geothermal resources research are listed.

**Keywords** hot dry rock; assessment of geothermal resources potential

收稿日期: 2012-09-11; 修回日期: 2012-09-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA052801)

作者简介: 汪集旻, 中国科学院院士, 研究方向为地热学, 电子信箱: jywlp@mail.iggcas.ac.cn

## 0 引言

地球是个巨大的热库,其内核(地核)的温度高达约6000℃。地核与地表巨大的温差使得地球不断地向外(大气层)散发着热量,同时地壳内部放射性衰变热、势能转换热、摩擦热等也在不断生成与供给<sup>[1]</sup>。而位于地壳上部,人类可以经济采出的那部分地热能被称之为地热资源。地热资源作为一种极具竞争力的清洁和可再生能源,与其他能源相比优势显著,大规模开发利用是应对全球气候变化和节能减排的需要,且其巨大的资源储量决定了地热能必然成为人类未来的重要替代新能源之一。

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。其中水热型(Hydrothermal)地热资源赋存于高渗透型的孔隙或裂隙介质中,与年轻火山活动或高热流背景相伴生形成高温水热系统,而处于正常或偏低热流背景下的地下水循环通常形成的是中-低温水热系统<sup>[2]</sup>,通过对水热系统中流体的开采即可获取其地热能;而干热岩(Hot Dry Rock, HDR)则是指地下高温但由于低孔隙度和渗透性而缺少流体的岩石(体),储存于干热岩中的热量需要通过人工压裂形成增强型地热系统(Enhanced Geothermal System)才能得以开采,赋存于干热岩中可以开采的地热能称之为干热岩型地热资源。出于经济效益考量,早期狭义的干热岩地热资源通常是指赋存于高温(>200℃)干热岩中的可采地热能,但随着干热岩开发技术,尤其是压裂技术的进步和成本的下降,今后必然会过渡到广义的干热岩地热资源,即不再有温度的限制,且干热岩系统会类似于水热系统地演进为高温、中-低温系统。在中国大陆地区,高温水热系统主要分布在欧亚板块与印度板块于新生代碰撞形成的喜马拉雅造山带<sup>[3]</sup>,其他地区以中-低温水热系统为主,干热岩型地热资源以其分布的普遍性和可以获得更高热储温度而更具开发潜力和前景。

地热资源的利用分为两端:高端地热发电和低端直接利用(如供暖、洗浴、温室、烘干等)。中国地热利用历史悠久,目前中国地热资源的直接利用规模达12.6GWh/a,处于世界第一<sup>[4]</sup>,但地热发电多年徘徊不前。中国是地热资源大国,但高温水热型地热资源主要分布于经济欠发达且人口稀少地区。地热能要想在未来国家能源格局中占居一席之地,服务于国家节能减排战略,就必须在目前直接利用的同时,着力推进地热发电,而国内地热资源的类型与状态及其区域分布决定了大规模地热发电必须依靠干热岩地热资源的开发。

干热岩发电概念是20世纪70年代由美国加州大学实验室研究人员提出,其基本思想是在高温但无水或无渗透率的热岩体中,通过水力压裂等方法制造出一个人工热储,将地面冷水注入地下深处获取热能,然后将热导出地面进行发电。30多年来,发达国家如美国(1973年)、日本(1980年)、法国(1997年)、德国(1987年)和澳大利亚(2003年)等先后投入巨资进行干热岩发电试验研究,结果表明,干热岩开发在技术上可行。2006年,美麻省理工学院联合美国国家实验室18位专家,历时两年,完成了科技发展战略报告:“地热能的

未来——增强地热系统对21世纪美国的影响”,该报告首次对美国本土干热岩地热资源量和干热岩开采技术做出了系统评价。

2011年,中国地质调查局发布了中国干热岩地热资源潜力的初步评估,该项评估基于2000年版中国大陆地区热流图<sup>[5]</sup>。10年来,地热测量数据已得到了进一步扩展,本文讨论了基于新版热流图和更为全面的岩石热物性数据库完成的中国大陆地区干热岩地热资源再评价结果。

## 1 干热岩地热资源评价方法与参数

### 1.1 干热岩地热资源评价方法

干热岩所蕴含的地热资源量取决于干热岩的温度及干热岩岩石的热物性。干热岩地热资源总量或称资源基数 $Q$ 就是低孔渗(忽略岩石中流体的储热量)岩石介质中所赋存的热量

$$Q = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot (T - T_c)$$

其中, $\rho$ 为岩石密度; $C_p$ 为岩石比热; $V$ 为岩石体体积; $T$ 为特定深度上的岩石温度; $T_c$ 为地表平均温度或特定参考温度。

鉴于现阶段钻探技术水平和地热资源的经济开采深度,目前干热岩的评价深度限于地壳浅部10km以内<sup>[6]</sup>。通常在一个独立的水文地质单元内,地形起伏的相对高差在3km左右,于是天然水热型地热系统中地下水的循环深度在3km左右,亦即地壳浅部水热型地热资源主要存在于3km以浅,此外,在以热传导为主的非火山活动区,3km以浅的地壳表层不可能具有较高温的干热岩,因此,通常将干热岩评价的深度范围限定在3—10km。

目前世界上最深的钻井为苏联的科拉半岛超深井,深度为12.261km,中国最深钻井位于塔里木盆地,深度为9.1km。不同勘探目的,钻井深度不一,其中石油勘探孔数量最多,深度一般介于1—6km。无论从钻井的深度,还是钻井的密度而言,深部温度不能完全直接进行测量,而只能依据钻井温度测量和岩石热物性测试结果,基于稳态热传导理论进行深部温度的计算,从而获得深部温度及干热岩热储量。

进行干热岩地热资源量评价的直接参数是深部温度,而决定不同深度 $z$ 温度分布的参数包括:地表温度 $T_0$ ,地表热流 $q_0$ ,岩石生热率 $K$ ,岩石生热率 $A$ 。其中,地表温度可以由地表多年平均气温得到;地表热流则来自钻井温度和岩石热导率测量;岩石热导率和生热率来自中国科学院地质与地球物理研究所地热实验室自20世纪70年代以来长期积累的不同岩石类型测试数据。在一维稳态热传导条件下,对于均匀层状的沉积岩分布区,其单层内热导率和生热率可以近似为常数,依不同岩性取其实测平均值即可,相应的深部温度可由下式进行计算:

$$T(z) = T_0 + q_0 z / K - A z^2 / 2K$$

而对于深变质岩和火成岩分布区,热导率依然可以视岩性分别取值,但生热率则不然,由于高温条件下较强的地球化学分异,放射性生热元素(U、Th、K)会向浅部富集,从而随深度

呈指数衰减<sup>[7]</sup>

$$A(z) = A_0 \exp(-z/D)$$

其中,  $D$  为放射性生热元素富集层的厚度;  $A_0$  为地表生热率。对应的深部温度为

$$T(z) = T_0 + [(q - AD)z] / [K + AD^2[1 - \exp(-zD)] / K]$$

## 1.2 参数选取

深部温度计算时需要依据实测数据, 分区域和岩石类型对前述参数进行合理取值才能获得能与实测温度数据一致的计算结果。中国大陆地区现有测温深度超过 3km 的钻井 60 多口, 这些深井测温数据和相应的岩石热物性数据是检验和标定深部温度计算模型与参数选取的重要基础。

### 1.2.1 大地热流值

大地热流值简称热流, 是表征地壳浅部热状态的一个综合参数, 也是深部温度计算的最重要参数。中国大地热流测量始于 20 世纪 70 年代初。1979 年, 中国科学院地质研究所地热组公布了中国华北第一批大地热流数据 25 个, 填补了国内地球物理场“重、磁、电、震、热”中热场研究的空白。此后, 青藏地区、华北盆地、辽河盆地、攀西古裂谷、东南沿海、塔里木盆地、四川盆地等地的热流测量工作相继展开<sup>[8-9]</sup>。截止 1999 年, 中国大陆地区共有热流数据 862 个<sup>[10]</sup>。此后, 相继在四川<sup>[11]</sup>、江汉<sup>[12]</sup>、塔里木<sup>[13-14]</sup>和渤海湾盆地<sup>[15-16]</sup>获得了一批新的热流数据, 如今热流数据总数已达 921 个, 作为干热岩地热资源量评价的一项基础工作, 更新了热流数据库, 并编制了中国大陆地区新版热流图(图 1)。

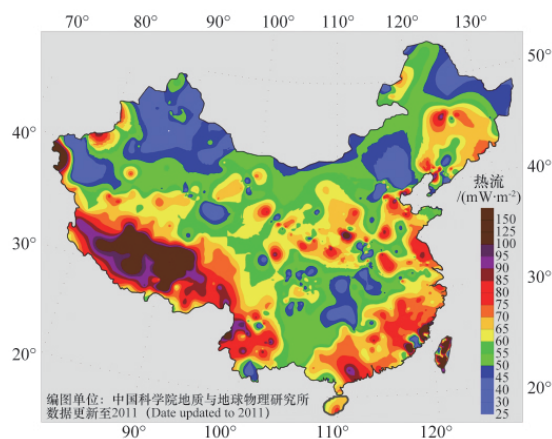


图 1 中国大陆地区新版热流图

Fig. 1 Updated map of heat flow in the continental area of China

鉴于现有热流测点的密度状态, 深部温度计算时, 采用  $1^\circ \times 1^\circ$  网格进行计算, 网格节点上的热流值从新版热流等值线图获取。考虑到热流测量钻井的深度多数在地下水循环深度内, 不可避免受到地下水补给和排泄的热效应的影响, 因而有必要进行去峰化, 即当热流值  $> 140 \text{ mW/m}^2$ , 取  $140 \text{ mW/m}^2$ ; 当热流值  $< 40 \text{ mW/m}^2$ , 取  $40 \text{ mW/m}^2$ , 其作用是排除非传导热传递所产生的浅部热异常, 以获得深部传导温度分布。

### 1.2.2 岩石热导率

岩石热导率表示地壳岩石的导热能力性能, 岩石热导率的高低取决于岩石的化学成分、结构、含水状况、温度和压力等。在沉积盆地内, 钻井和地震剖面资料比较丰富, 不同层位的热导率可以直接根据相应盆地和层位及特定岩性的实测数据进行赋值。整体而言, 表层未固结松散-弱固结沉积物的热导率值为  $1.0\text{--}2.4 \text{ W/mK}$ ; 中生代沉积地层的热导率值为  $2.4\text{--}2.8 \text{ W/mK}$ ; 古生代及更老沉积层通常以海相碳酸盐岩为主, 热导率较高 ( $2.8\text{--}3.4 \text{ W/mK}$ ), 局部的薄层泥岩热导率值略低 ( $2.1\text{--}2.6 \text{ W/mK}$ ); 在塔里木、四川盆地古生代地层中含有厚层膏盐层, 其热导率值显著偏高 ( $3.8\text{--}6.5 \text{ W/mK}$ ), 对深部温度分布具有重要影响, 不容忽视。在盆地下伏基底岩石和周边造山带地区, 主要是前寒武纪变质岩和不同时期的侵入岩, 其热导率值普遍较高 ( $2.6\text{--}3.5 \text{ W/mK}$ ), 与盆地内碳酸盐岩比较接近。不同地区的造山带或盆地基底变质岩和火成岩的研究程度和实测数据差异较大, 本项研究中热导率的取值原则考虑了热导率与深度的关联,  $4\text{--}6 \text{ km}$ :  $2.6\text{--}2.8 \text{ W/mK}$ ;  $6\text{--}8 \text{ km}$ :  $3.0 \text{ W/mK}$ ;  $8\text{--}10 \text{ km}$ :  $3.2 \text{ W/mK}$ 。

### 1.2.3 岩石生热率及放射性元素富集层厚度

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)与地壳中放射性元素, 尤其是铀、钍和钾的同位素衰变产生的热, 即地壳热流。岩石生热率是单位体积的岩石在单位时间内由其所含的放射性元素衰变而产生的热量。地壳内放射性元素属于亲石元素, 主要富集于上地壳。地壳热流通常占地表所观测到的热流量的  $30\text{--}50\%$ , 因此岩石生热率的垂向分布对地壳浅部温度分布具有重要影响。不同岩类的生热率差异较大, 火成岩中, 酸性岩(花岗岩等)生热率值较高(可达  $7.0 \text{ W/mK}$ ), 基性超基性岩生热率极低 ( $0\text{--}0.2 \text{ W/mK}$ ); 沉积岩中, 黏土含量较高的泥岩、页岩生热率高 ( $1.5\text{--}2.4 \text{ W/mK}$ ), 碳酸盐岩生热率值较低。变质岩生热率变化范围较大, 为  $0.6\text{--}3.0 \text{ W/mK}$ <sup>[17-22]</sup>。

对于层状沉积岩分布区, 可以充分利用盆地内不同岩性大量实测生热率数据分层赋值。而在主要有变质岩、火成岩分布区, 则采用生热率随深度的指数分布模型<sup>[7]</sup>。在指数分布模型中, 除了地表生热率  $A_0$  外, 还需确定放射性富集层的厚度  $D$ 。正常稳定克拉通背景下  $D$  值通常在  $10 \text{ km}$  左右, 但中国大陆受中生代—新生代构造作用的强烈改造, 东部晚中生代的伸展作用使得地壳拉张减薄; 西部的新生代印藏碰撞使得岩石圈显著增厚与青藏高原隆升。这些构造作用必然改变了在长期地壳演化过程中业已成型的放射性元素富集层厚度。本项研究中, 中部稳定区(四川—鄂尔多斯盆地等)的  $D$  值取为  $10 \text{ km}$ ; 东部减薄区  $D$  值取  $8 \text{ km}$ ; 而青藏高原地区  $D$  值设定为  $15\text{--}20 \text{ km}$ 。为了验证该赋值的合理性和调整参数的赋值, 在东部地区利用江苏东海大陆科学深钻井的实测温度和热物性数据<sup>[23]</sup>进行了验证; 在四川、塔里木和渤海湾等钻井众多的含油气盆地<sup>[11,15]</sup>, 将计算结果与深井实测温度数据进行了

对比;在青藏高原采用地热方法计算的“热”岩石圈与地球物理方法得到的岩石圈厚度进行了比较研究<sup>[24]</sup>。这一比对验证的过程实质上是标定相关参数的取值是否合理。总体上,深部温度计算结果与实测数据的差别在可接受范围( $<20^{\circ}\text{C}$ )内,表明计算参数的取值是合理的。

#### 1.2.4 地表温度与参考温度

地表温度是深部温度计算的必要参数,可以计算年平均气温近似代替地表温度。此外,在前述干热岩资源量计算时,需要有个参考温度( $T_0$ ),该参考温度的物理意义是某个温度以上划作可利用的地热资源,通常是取地表温度( $T_0$ ),但也不尽合理,例如在青藏高原海拔 8km 的位置,地表温度为  $-24^{\circ}\text{C}$ ,但这一温度的地热能已不是可以利用的资源,势必导致部分资源量无效且总量偏大,因此,本项研究中统一将资源量计算时的参考温度取为  $18^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 深部温度分布格局

图 2 展示了中国大陆地区基于现有地热测量数据计算出的不同深度上的温度分布的格局。在 2.5km 深度上,除藏南

部分地区温度达到  $100\text{--}150^{\circ}\text{C}$  外,其他地区温度均低于  $100^{\circ}\text{C}$ 。至 4.5km 深度上,藏南部分地区温度超过  $200^{\circ}\text{C}$ ,云贵及东部大部分地区温度超过  $100^{\circ}\text{C}$ 。在 6.5km 深度上,藏南大部分地区温度已达  $250\text{--}300^{\circ}\text{C}$ ,其他热异常区,包括云贵、东南沿海、华北(渤海湾盆地)、鄂尔多斯盆地东南部(汾渭地堑)、东北(松辽盆地)等地温度达到  $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$ 。在 8.5km 深度上,藏南大部分地区温度超过  $200^{\circ}\text{C}$ ,高温中心温度达到  $400^{\circ}\text{C}$ ,其他热异常区温度超过  $200^{\circ}\text{C}$ 。总体上看,中国大陆地区以藏南地区地壳温度最高,云南西部和整个东部(华南、华北、东北)地区温度相对较高,准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地及内蒙阴山一带的温度相对较低。

需要指出的是,图 2 中展示的温度分布是深部向地表的热传递,是一维垂向、稳态热传导的前提下获得的,代表的是稳态传导温度场。区域性地下水活动<sup>[19,25]</sup>、地表快速隆升与剥蚀<sup>[17]</sup>等地质作用可能使得温度场偏离稳态传导型地温场,而深部温度的一维计算未能反映不同热导率岩石接触带(隆起与凹陷接触带)上的侧向热传递<sup>[26]</sup>。这些热扰动对浅部温度场具有较大影响,但随深度增加会显著降低。

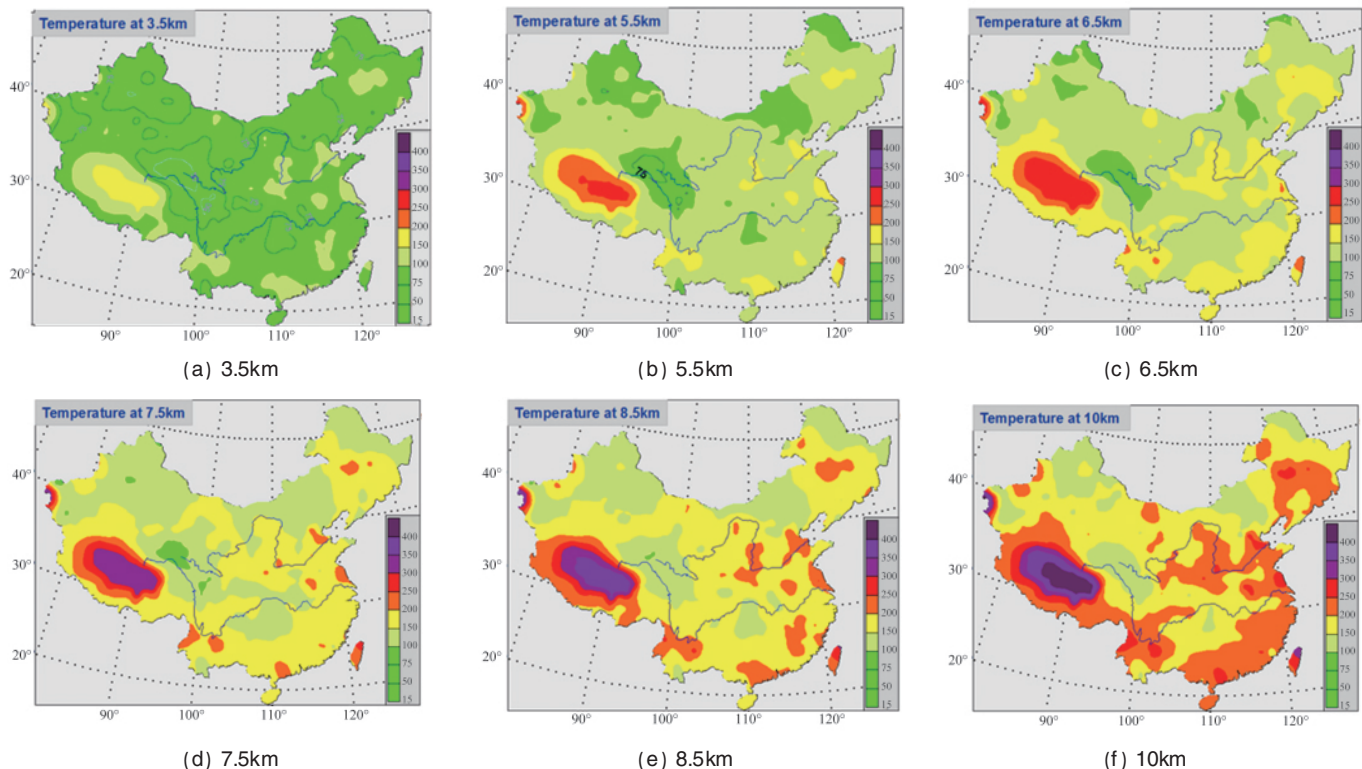


图 2 中国大陆地区不同深度温度分布格局(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 2 Deep temperature patterns in the continental area of China (unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

## 3 干热岩资源量及其分布

根据所获得的深部温度结果,采取体积法计算了中国大陆地区(未含台湾)干热岩地热资源量。计算时,垂向上以 1km 厚度的板片为单位,分别计算 3—10km 深度段的干热岩地热资源量(表 1,图 3)。

中国大陆 3—10km 深处干热岩资源总计为  $20.9 \times 10^6 \text{EJ}$ ,合  $714.9 \times 10^{11} \text{t}$  标准煤,高于美国本土(不包括黄石公园)干热岩地热资源量( $14 \times 10^6 \text{EJ}$ )。若按 2% 的可开采资源量计算,相当于中国大陆 2010 年能源消耗总量的 4400 倍(2010 年中国能源消费总量 32.5 亿 t 标准煤)。

表 1 中国大陆干热岩地热资源量

Table 1 Estimative recoverable fraction of energy and resource base from HDR in the continental area of China

资源类型	资源基数总量(100%)		可采资源量上限(40%)		可采资源量中值(20%)		可采资源量下限(2%)	
	热能/10 <sup>6</sup> EJ	折合标煤/10 <sup>12</sup> t	热能/10 <sup>6</sup> EJ	折合标煤/10 <sup>12</sup> t	热能/10 <sup>6</sup> EJ	折合标煤/10 <sup>12</sup> t	热能/10 <sup>6</sup> EJ	折合标煤/10 <sup>12</sup> t
干热岩型	21.0	714.9	8.4	286.0	4.2	143.0	0.42	14.3
水热型							0.025	0.852

注: 1EJ=10<sup>18</sup>J=2.930760×10<sup>16</sup>t 标准煤。

Note: 1EJ=10<sup>18</sup>J=2.930760×10<sup>16</sup>t standard coal.

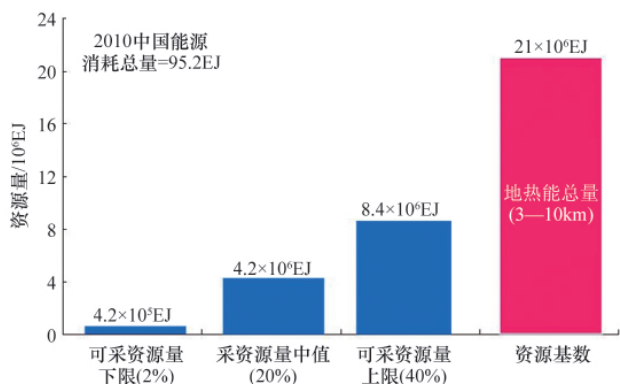


图 3 中国大陆地区干热岩地热资源基数与可开采量  
Fig. 3 Estimated total geothermal resource base and recoverable resource of China

这一资源量的计算是基于现有热流数据和相关的热物性参数得到的,其中参数的给定在研究程度较低的地区具有不确定性。作为一种检验,亦可以直接利用地温梯度值计算深部温度从而得到更粗略的干热岩地热资源量,其计算过程与热物性参数无关。由于放射性生热的影响,地壳浅部不同深度底部输入的热流是递减的,同时沉积岩岩石热导率因为随深度增加压实程度增高而增加,地温梯度随深度总体趋于降低。中国大陆地区现有地表实测地温梯度(18—45℃/km)的面积加权平均值为 26.5℃/km,可以作为中国大陆地区地温梯度的上限,取地表地温梯度的最低值(15℃/km)作为中国大陆地区地温梯度的下限,分别计算了不同深度的温度后得到的

干热岩地热资源量的上、下限为(16.6—29.4)×10<sup>6</sup>EJ,中值为 22.9×10<sup>6</sup>EJ。

Sanyal 与 Butler<sup>[27]</sup>模拟了裂缝型储层的流体流动与热交换状况,分析了可采热储量对岩体温度、裂缝体积、裂缝间隔、流体循环量、地热井构造和激发压裂后孔隙率和渗透性的关系。在一种裂缝介质和经济性生产条件下,从压裂体积最小的 0.1km<sup>3</sup> 的岩体中,可采热能的百分数几乎接近一常数(40±7%),而且这个可采系数不受地热井布置、裂缝间隔和渗透性的影响,只需要使激发体积超过 10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。这种预测已经在几个干热岩开发试验项目中得到证实。40%可采储量因此可以作为干热岩地热资源开采率的上限。保守些的估计可以将开采率的上、下限降低到 20%和 2%。

从干热岩地热资源的温度上看,3—10km 深度内,<75℃ 的干热岩资源总量为 0.4×10<sup>6</sup>EJ, 占总资源量 2%;75—150℃ 资源总量为 8.9×10<sup>6</sup>EJ, 占 43%;>150℃ 资源总量为 11.7×10<sup>6</sup>EJ, 占 55%。由于深部温度随深度增加而增高,资源量也与深度呈正比。在中国大陆地区的热状态和干热岩开发的经济性以及以发电为目的的考量下,现阶段的开采深度在 4—7km 比较适宜,这一深度段可开采(2%)资源量为 7.9×10<sup>6</sup>EJ,热储温度目标是 150—250℃。

从干热岩地热资源区域分布上看,青藏高原南部占中国大陆地区干热岩总资源量的 20.5%(表 2),温度亦最高;其次是华北(含鄂尔多斯盆地东南缘的汾渭地堑)和东南沿海中生代岩浆活动区(浙江—福建—广东),分别占总资源量的 8.6%和 8.2%;东北(松辽盆地)占 5.2%;云南西部干热岩温度较高,但面积有限,占总资源量的 3.8%。

表 2 中国大陆主要干热岩分布区干热岩资源量

Table 2 Estimated total geothermal resource base and recoverable resource in the major geothermal areas of China

地区	资源基数总量(100%)		可采资源量上限(40%)		可采资源量中值(20%)		可采资源量下限(2%)		占资源总量百分比/%
	热能/10 <sup>6</sup> EJ	折合标准煤/10 <sup>12</sup> t	热能/10 <sup>6</sup> EJ	折合标准煤/10 <sup>12</sup> t	热能/10 <sup>6</sup> EJ	折合标准煤/10 <sup>12</sup> t	热能/10 <sup>6</sup> EJ	折合标准煤/10 <sup>12</sup> t	
青藏	4.30	146.8	1.72	58.7	0.86	29.4	0.09	2.94	20.5
华北	1.81	61.7	0.72	24.7	0.36	12.3	0.04	1.23	8.6
东南	1.73	58.9	0.69	23.6	0.35	11.8	0.03	1.18	8.2
东北	1.08	37.0	0.43	14.8	0.22	7.4	0.02	0.74	5.2
云南	0.82	28.1	0.33	11.2	0.16	5.6	0.02	0.56	3.9

#### 4 结论与建议

基于现有地热测量数据,中国大陆地区3—10km深度段干热岩地热资源总量(基数)为 $2.09 \times 10^7 \text{EJ}$ ,低于中国地质调查局报道的资源基数( $2.52 \times 10^7 \text{EJ}$ ),相当于 $71.5 \times 10^5$ 亿t标准煤;即便按2%的可开采资源量计算,亦达 $4.2 \times 10^5 \text{EJ}$ ,相当于 $14.3 \times 10^3$ 亿t标准煤,是中国大陆2010年能源消耗总量的4400倍。随着传统化石能源的日益减少,地热能具备在中国能源中占有重要位置的资源基础。

中国地热资源构成中,干热岩地热资源占主导地位,其可采资源量(2%)是传统水热型地热资源量<sup>[28]</sup>的168倍。因此,加强干热岩地热资源的勘探与开发是推动中国地热资源规模化利用,尤其是地热发电快速发展与突破的关键和希望所在。

从干热岩地热资源可开采储量和温度状态来看,中国大陆地区有利的干热岩开发区是藏南地区、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。囿于干热岩开发的经济性和现有技术条件,近期应着眼于4—7km深度段干热岩地热资源的开发,热储目标温度是150—250℃。

现阶段干热岩研究的主要任务包括:(1)展开全国性深井地热测量,尤其是地热测量空白区和重点远景区,进一步明确干热岩资源分布与赋存条件,圈定更经济的优先开发区;(2)着手干热岩科学钻探、人工压裂试验、回灌试验、热储模拟技术开发以及干热岩地热发电等干热岩开发利用关键技术研究;(3)建立以地热发电为主兼顾综合利用的中国干热岩开发利用示范平台,加快中国干热岩开发利用步伐,为节能减排服务;(4)整合国土资源部、中国科学院、高等院校和大型国企(中石油、中石化等)的力量,在国家能源局的领导下,建立干热岩开发利用国家研发中心。

2012年,科技部国家高技术研究发展计划(863计划)已经启动了“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”项目,此外,国家目前正大力勘探开发页岩气,而页岩气与干热岩二者在开发技术上存在异曲同工之处,页岩气开发的关键技术,包括水平井技术、压裂技术等可直接转移至干热岩地热资源的开发,因此,页岩气的大发展也为今后干热岩大发展提供了机遇和技术积累。值得注意的是,干热岩地热能开发成本的50%—60%来自钻井和成井成本,而中国油田企业拥有大量深井,部分位于热异常区的非生产深井可以直接用于地热开发,在各油田区地热产业未来或许会成为油田企业的接替产业。可以预期,今后若干年中国地热资源开发利用,尤其是干热岩地热发电将会取得长足进步和跨越式发展。

**致谢:**本项研究过程中,得到中国地质大学李克文教授、王成善教授的大力支持,特致谢意!

#### 参考文献 (References)

[1] Clauser C. Geothermal energy [M]/Heinloth K. Landolt-Bornstein-Nu-

merical data and functional relationship, new series, Vol VIII: Energy Technologies, Subvolume: 3 Renewable Energies. Heidelberg-Berlin: Springer Verlag, 2005.

- [2] 汪集旻. 中低温对流型地热系统[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1-240.  
Wang Jiyang. Low-medium temperature geothermal system of convective type[M]. Beijing: Science Press, 1993: 1-240.
- [3] 佟伟, 张知非, 章铭陶, 等. 喜马拉雅地热带[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1978(1): 81-93, 162.  
Tong Wei, Zhang Zhifei, Zhang Mingtao, et al. *Journal of Peking University: Natural Science Edition*, 1978(1): 81-93, 162.
- [4] 汪集旻. 从世界地热看我国地热能开发利用问题[C]//郑克桢, 韩振华. 科学开发中国地热资源——科学开发中国地热资源高层研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2009: 3-6.  
Wang Jiyang. From the world's geothermal energy's perspective to realize the development and utilization of geothermal energy in China[C]// Zheng Keyan, Han Zhenhua. Scientific development of geothermal resources: Scientific development of geothermal resources senior symposium. Beijing: Geology Press, 2009: 3-6.
- [5] Hu S B, He L J, Wang J Y. Heat flow in the continental area of China: A new data set[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179(2): 407-419.
- [6] 杨峰田. 深层地热资源成因与潜力评价: 以苏北盆地为例[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2011.  
Yang Fengtian. Evaluation to the causes and potential of deep geothermal resources: A case study of SuBei basin[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [7] Birch F, Roy R F, Decker E R. Heat flow and thermal history in New York and New England[M]//Zen E, White W S, Hadley J B, et al. Studies of appalachian geology, Northern and Maritime. New York: Interscience Publishers, 1968.
- [8] 汪集旻, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编[J]. 地质科学, 1988, 23(2): 196-204.  
Wang Jiyang, Huang Shaopeng. *Chinese Journal of Geology*, 1988, 23(2): 196-204.
- [9] 汪集旻, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版)[J]. 地震地质, 1990(4): 351-366.  
Wang Jiyang, Huang Shaopeng. *Seismology and Geology*, 1990(4): 351-366.
- [10] 胡圣标, 何丽娟, 汪集旻. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 611-626.  
Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(5): 611-626.
- [11] 徐明, 朱传庆, 田云涛, 等. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征[J]. 地球物理学报, 2011, 54(4): 1052-1060.  
Xu Ming, Zhu Chuanqing, Tian Yuntao, et al. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(4): 1052-1060.
- [12] 徐明, 赵平, 朱传庆, 等. 江汉盆地钻井地温测量和大地热流分布[J]. 地质科学, 2010, 45(1): 317-323.  
Xu Ming, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, et al. *Chinese Journal of Geology*, 2010, 45(1): 317-323.
- [13] 王良书, 李成, 刘绍文, 等. 库车前陆盆地大地热流分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 79-83.  
Wang Liangshu, Li Cheng, Liu Shaowen, et al. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(4): 79-83.
- [14] 冯昌格, 刘绍文, 王良书, 等. 塔里木盆地现今地热特征[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2752-2762.

- Feng Changge, Liu Shaowen, Wang Liangshu, *et al.* *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(11): 2752-2762.
- [15] 王良书, 刘绍文, 肖卫勇, 等. 渤海盆地大地热流分布特征[J]. 科学通报, 2002, 47(2): 151-155.  
Wang Liangshu, Liu Shaowen, Xiao Weiyong, *et al.* *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(2): 151-155.
- [16] 龚育龄, 王良书, 刘绍文, 等. 济阳拗陷大地热流分布特征[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(4): 384-391.  
Gong Yuling, Wang Liangshu, Liu Shaowen, *et al.* *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 2003, 33(4): 384-391.
- [17] 沈显杰, 杨淑贞, 沈继英, 等. 西藏岩浆岩放射性生热率的实验研究[J]. 岩石学报, 1989(4): 83-92.  
Shen Xianjie, Yang Shuzhen, Shen Jiyong, *et al.* *Acta Petrologica Sinica*, 1989(4): 83-92.
- [18] 赵平. 中国东南地区岩石生热率研究[D]. 北京: 中国科学院地质研究所, 1993.  
Zhao Ping. Investigation of heat production in southeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 1993.
- [19] 胡圣标, 熊亮萍. 热流测量中的地下水运动干扰的校正方法[J]. 地质科学, 1994, 29(1): 85-92.  
Hu Shengbiao, Xiong Liangping. *Chinese Journal of Geology*, 1994, 29(1): 85-92.
- [20] 汪洋, 汪集旸, 熊亮萍, 等. 中国大陆主要地质构造单元岩石圈地热特征[J]. 地球学报, 2001, 22(1): 17-22.  
Wang Yang, Wang Jiyang, Xiong Liangping, *et al.* *Acta Geoscientica Sinica*, 2001, 22(1): 17-22.
- [21] 邱楠生. 中国西北部盆地岩石热导率和生热率特征 [J]. 地质科学, 2002, 37(2): 196-206.  
Qiu Nansheng. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(2): 196-206.
- [22] He L J, Hu S B, Yang W C, *et al.* Radiogenic heat production in the lithosphere of Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 227(3-4): 525-538.
- [23] He L J, Hu S B, Huang S P, *et al.* Heat flow study at the Chinese continental scientific drilling site: Bore hole temperature, thermal conductivity, and radiogenic heat production [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113: B02404. doi: 10.1029/2007JB004958.
- [24] 吴功建, 高锐, 余钦范, 等. 青藏高原“亚东-格尔木地学断面”综合地球物理调查与研究[J]. 地球物理学报, 1991(5): 552-562.  
Wu Gongjian, Gao Rui, Yu Qinfan, *et al.* *Chinese Journal of Geophysics*, 1991(5): 552-562.
- [25] 汪集旸, 熊亮萍. 一种利用地热资料判别地下水活动的新方法[J]. 科学通报, 1991, 36(4): 295-297.  
Wang Jiyang, Xiong Liangping. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36(4): 295-297.
- [26] 熊亮萍, 高维安. 隆起与拗陷地区地温场的特点 [J]. 地球物理学报, 1982(5): 142-152.  
Xiong Liangping, Gao Wei'an. *Chinese Journal of Geophysics*, 1982(5): 142-152.
- [27] Sanyal S K, Butler S J. An analysis of power generation prospects from enhanced geothermal systems [C]. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, April 24-29, 2005.
- [28] 陈墨香, 汪集旸, 邓孝. 中国地热资源: 形成特点和潜力评估 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.  
Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao. Geothermal energy in China: Formation characteristics and potential assessment [M]. Beijing: Science Press, 1994.

(责任编辑 刘志远)

· 学术动态 ·



## “第一届全国软土工程学术会议”征文

“第一届全国软土工程学术会议”将于2013年11月15—17日在上海市召开。此次大会是由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会与软土工程专业委员会共同主办。

征稿范围: 软土强度与变形特性; 软土特性测试技术; 软土基础工程理论设计与施工; 软土地下工程理论设计与施工; 软土地区重大工程实践; 软土工程的其他问题

全文截稿日期: 2012年4月30日。

通信地址: 上海市四平路1239号同济大学地下建筑与工程系。

电子信箱: softsoilcom@163.com。

大会网站: <http://geonjut.42137.east-icp.cn/show.asp?id=706>。