

# 我国陆区干热岩资源潜力估算

蔺文静, 刘志明, 马峰, 刘春雷, 王贵玲\*

中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061

**摘要:** 干热岩是一种清洁的可再生地热资源, 在过去 40 年里, 干热岩的利用技术日趋成熟, 显现出了巨大的利用价值。我国陆区面积广阔且地处三大板块交界处, 具有良好的干热岩赋存背景。本文在对我国陆区大地热流、不同深度岩石热导率、岩石生热率以及放射性元素集中层的厚度分析的基础上, 利用根据浅部测温资料向地壳深部外推的方法, 对我国陆区不同深度温度进行了估算, 在此基础上利用体积法对我国陆区 3.0~10.0 km 深处的干热岩资源量进行了估算, 结果显示, 我国大陆 3.0~10.0 km 深处干热岩资源总计为  $2.5 \times 10^{25}$  J, 相当于 860 万亿吨标准煤, 按 2% 的可开采资源量计算, 相当于我国目前能源消耗总量的 5200 倍, 其中, 位于深度 3.5~7.5 km 之间, 温度介于 150°C 到 250°C 的干热岩储量巨大, 约为  $6.3 \times 10^6$  EJ, 按 2% 的可开采储量计算, 也将获得 126000 EJ 的热能, 相当于 2010 年我国能源消费总量的 1320 倍, 开发利用前景巨大。

**关键词:** 干热岩; 大地热流; 潜力评估

中图分类号: P31.1; TK529; P624.6 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.05.12

## An Estimation of HDR Resources in China's Mainland

LIN Wen-jing, LIU Zhi-ming, MA Feng, LIU Chun-lei, WANG Gui-ling

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

**Abstract:** As a clean renewable geothermal resource, the hot dry rock has been more and more maturely utilized with obviously increasing values. Located at the junction of three tectonic plates with vast territory, China possesses abundant hot dry rock storage. Based on an analysis of terrestrial heat flow, rock thermal conductivity at different depths, radioactive heat generation and radioactive depth variable constant, the authors estimated the terrestrial temperature at different depths by calculating the measured temperatures from shallow strata to the depth of the crust. Then the hot dry rock resource amount at the depth of 3000–10000 m was estimated by virtue of the volume method. The results show that the resource amount at the depth of 3000–10000 m could reach  $2.5 \times 10^{25}$  J, which is equivalent to the heat of 860 trillion tons of standard coal. This resource is estimated to be 5,200 times that of the current total energy consumption on the basis of 2% of the exploitable resources amount. The hot dry rock amount at the depth of 3500–7500 m and between the temperature of 150–250°C is estimated to reach  $6.3 \times 10^6$  EJ, which could yield 126000 EJ on the basis of 2% of exploitable resources amount, around 1320 times that of the total energy consumption in 2010, thus demonstrating a promising utilization potential.

**Key words:** hot dry rock; heat flow; resources potential estimation

本文由 863 计划项目“干热岩地热地质资源评价与开发技术研究”(编号: 2012AA052802)和地质调查项目“全国地热资源调查评价专题和综合研究”(编号: 1212011120064)联合资助。

收稿日期: 2012-05-07; 改回日期: 2012-05-28。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 蔺文静, 男, 1978 年生。博士, 副研究员。主要从事地热地质及水文地质学科相关研究。通讯地址: 050061, 河北石家庄中华北大街 268 号。电话: 0311-67598539。E-mail: lwenjing@msn.com。

\*通讯作者: 王贵玲, 男, 1964 年生。博士生导师, 研究员。主要从事地热地质及区域水文地质相关研究。E-mail: guilingw@163.com。

干热岩是埋藏于地面 1 km 以下、温度一般大于 200°C, 埋深数千米, 内部不存在流体或仅有少量地下流体的高温岩体(Grant et al., 2011)。干热岩的开发要通过深井将高压水注入深部岩层, 使其渗透进入岩层的缝隙并吸收地热能量; 再通过另外一个专用深井将岩石裂隙中的高温水、汽提取到地面, 通过热交换及地面循环装置用于发电及综合利用; 冷却后的水再次通过高压泵注入地下热交换系统循环使用。整个过程都是在一个封闭的系统内进行(Armstead et al., 1987)。1970 年, 美国在新墨西哥州北部的 Fenton 山地区打了两口约 4000 m 的深斜井开展干热岩开采实验, 功率达 2300 kW, 标志着干热岩的开发利用研究从概念模式转入到实验阶段。此后, 这种发电技术引起了世界各国的关注, 一些经济发达、能源消耗量大的国家竞相开展干热岩发电技术的研发工作, 甚至纳入到国家开发研究计划。通过国际合作和各国不断努力, 美国、日本、英国、法国、德国等国家在过去 20 年相继进行了有关方面的实验, 基本掌握了干热岩发电各个环节的技术(Massachusetts Institute of Technology, 2006)。随着技术的熟练, 试验电厂的发电量也逐渐由 3 MW 增大到 11 MW, 更加接近商业开发的规模(王贵玲等, 2000)。

干热岩的分布几乎遍及全球, 它是无处不在的资源。我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, 都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温水热系统必要的地质构造条件和热背景。我国西南部的地热活动呈南强北弱、西强东弱; 东部区的地热活动呈东强西弱之势, 明显地反映了这一特点(陈墨香等, 1994)。根据我国区域地质背景, 高热流区均处于板块构造带或构造活动带, 在藏南、滇西、琼北、长白山等地区分布有范围较大的火山岩体, 说明我国具备干热岩地热资源形成的区域构造条件(赵阳升等, 2004)。

## 1 评价方法

采取体积法估算我国陆地地区干热岩资源储量估算, 体积法公式如下:

$$Q = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot (T - T_0)$$

式中:  $Q$ -干热岩资源储量;  $\rho$ -岩石密度;  $C_p$ -岩石比热容;  $V$ -岩体体积;  $T$ -所计算深度的岩石温度;  $T_0$ -地表温度。

目前的钻孔深度一般小于 5000 m, 对于深部的温度状况不能直接进行测量时, 超过钻孔深度范围的地方就只能用间接的方法推算出来。在稳态热流状态下的深部温度可用下式推算(邱南生等, 2004):

$$T(z) = T_0 + q_0 \sum (Z_i / K_i) - \left[ A_0 Z - (A_0 - A') Z^2 / (2Z') \right] \times 1/2 \sum (Z_i / K_i)$$

式中:  $T_0$ 为地表温度,  $q_0$ 为地表热流值,  $A_0$ 为地表生热率,  $Z_i$ 和  $K_i$ 分别为各层段的厚度和热导率,  $A'$ 和  $Z'$ 分别为底部生热率和计算点地层的总厚度。

一般情况下, 为了简单计算, 常用下式进行计算:

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

式中:  $K$ -热导率;  $z$ -深度。

## 2 数据获取及参数选取

根据前人所作的相关研究, 开展干热岩资源的估算至少需要以下数据资料: 大地热流值, 岩石热导率, 岩石生热率, 放射性元素集中层的厚度。根据我国目前已有的相关工作及资料积累程度, 本次研究用的数据及来源分述如下。

### 2.1 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。在一维稳态条件下, 热流量( $q$ )是岩石热导率( $k$ )和垂直地温梯度( $dT/dZ$ )的乘积, 即  $q = k(dT/dZ)$ 。在大陆地区, 地表附近的垂直地温梯度, 由测量深钻孔的温度随深度增加的变化率来确定; 岩石热导率, 通常是选取测段内有代表性的岩心标本在实验室用热导仪测定。中国热流测量工作开展较晚, 但发展迅速, 先后在华北、东北、攀西、三江、青藏、东南沿海地区取得了一大批热流数据, 并编制了中国大地热流图(图 1)(汪集旸等, 1988, 1990; 胡圣标等, 2001; 金旭

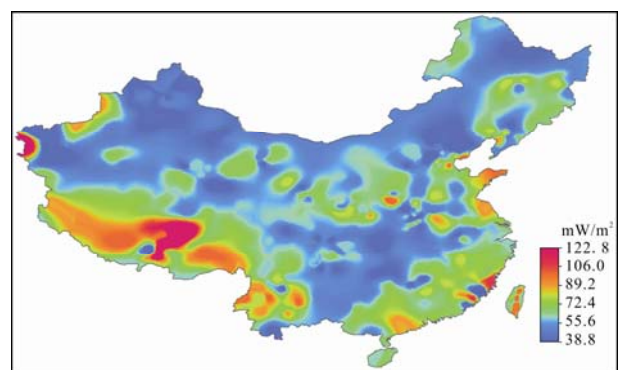


图 1 中国大陆地区大地热流值栅格图(5'×5')  
Fig. 1 Heat flow map of China's mainland (5'×5')

表 1 我国主要沉积盆地地壳平均生热率( $\mu\text{W}/\text{m}^3$ )  
Table 1 Average radioactive heat generation in main basins of China's mainland

地区	地壳平均生热率	地区	地壳平均生热率	地区	地壳平均生热率
松辽盆地	1.0	苏北盆地	0.84	鄂尔多斯	0.84
辽河盆地	0.90	三水盆地	0.82	四川盆地	0.86
黄骅凹陷	0.77	河淮盆地	0.82	柴达木盆地	0.67
济阳凹陷	0.76	南阳盆地	1.12	准葛尔盆地	0.65
冀中凹陷	0.88	江汉盆地	1.05	塔里木盆地	0.65

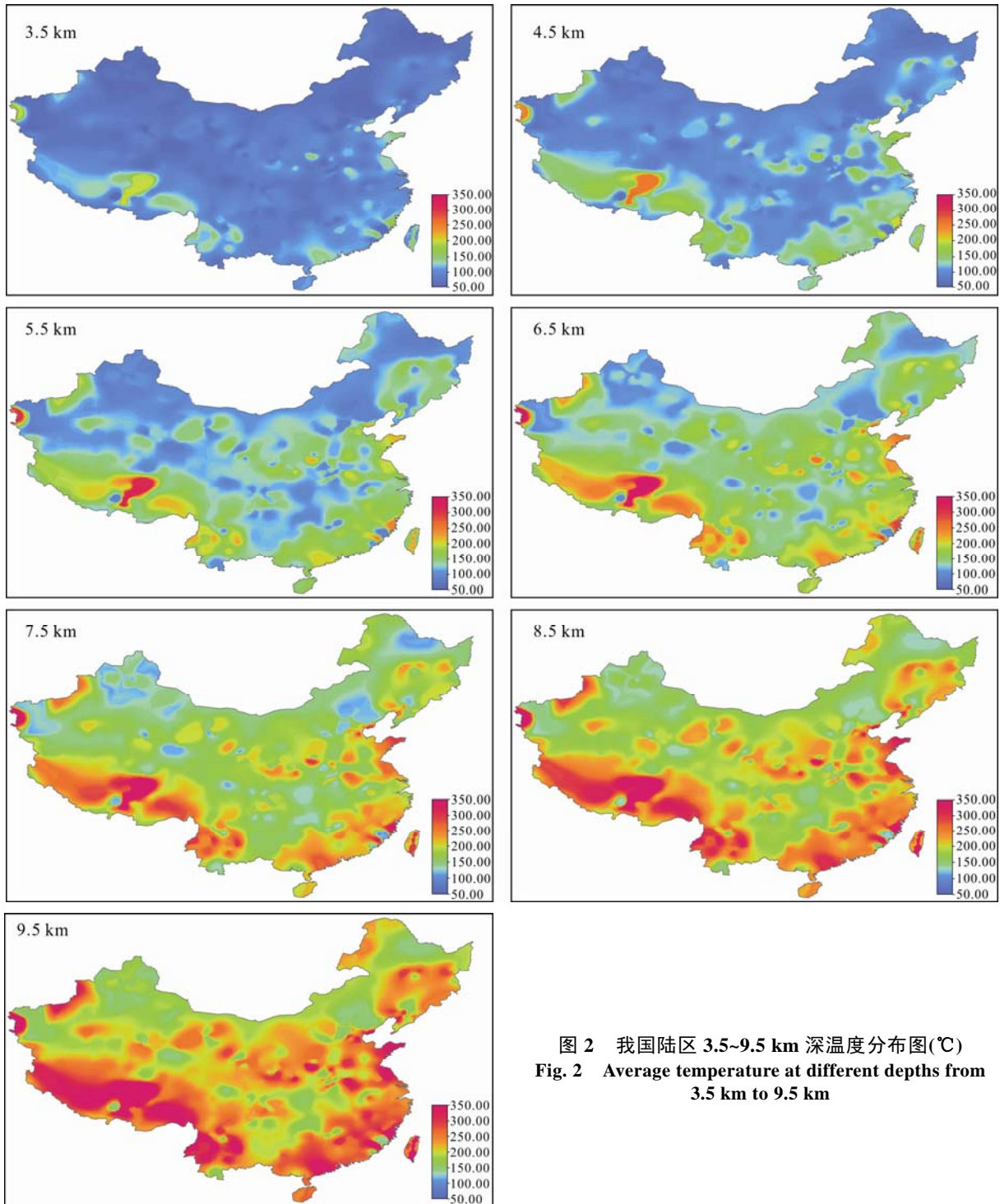


图 2 我国陆区 3.5~9.5 km 深温度分布图( $^{\circ}\text{C}$ )  
Fig. 2 Average temperature at different depths from 3.5 km to 9.5 km

等, 2001)。本次工作以该图数据为基础进行干热岩背景资源估算。

## 2.2 岩石热导率

表示岩石导热能力的大小, 即沿热流传递的方向单位长度上温度降低一度时单位时间内通过单位面积的热量。岩石的热导率取决于岩石的成分、结构、形成条件、含水状况、温度和压力等。一般情况下, 岩石的热导率随压力、密度和湿度的加大而增高, 随温度的增高而减小。地壳上部的温度和压力对岩石热导率的影响极小。不同地区 4 km 以浅的岩石热导率可根据钻井测温等数据获取, 4 km 深度下的岩石热导率根据相关研究取定值为 2.6 w/mK(Massachusetts Institute of Technology, 2006)。

## 2.3 岩石生热率

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即为岩石放射性生热率, 简称岩石生热率。放射性元素的衰变生热是地球内部驱动众多深部构造热过程的重要动力来源, 也是岩石圈内热场(温度场)分布的主要控制因素。我国主要沉积盆地地壳平均生热率如表 1 所示(胡圣标等, 1994; 邱楠生, 2002; 汪洋等, 2001), 为方便计算, 本次统一取为 1.0。

## 2.4 放射性元素集中层的厚度

除个别地区之外, 放射性元素集中层的厚度值变化不大, 一般在 10 km 左右, 研究中统一取为 10 km。

## 2.5 地表温度

以各地年平均气温近似代替地表温度。

## 3 结果分析

我国大陆地区 3~10 km 不同深度温度分布图见图 2。

根据所计算的我国陆区 3.5~9.5 km 深温度结果, 采取体积法在相关 GIS 软件中估算我国陆地地区干热岩资源储量。各类数据首先进行矢量化, 然后以经纬度 5'(0.08333°, 约为 8 km)为间隔进行栅格化, 即每个方格约为 64 km<sup>2</sup>。深度上, 以 1 km 为单位, 分别计算 3~10 km 深处各段的干热岩资源潜力。结果见表 2。

我国大陆 3.0~10.0 km 深处干热岩资源总计为 2.52×10<sup>25</sup> J(美国干热岩资源的估算结果为 1.67×10<sup>25</sup> J, 不包括黄石公园地区), 合 85.6×10<sup>5</sup> 亿吨标准煤, 按 2%的可开采资源量计算, 相当于我国目前能源消耗总量的 5200 倍(2010 年我国能源消费

表 2 我国陆区 3.0~10.0 km 深处干热岩资源估算结果  
Table 2 HDR resources at different depths in China's mainland

序号	计算层位深度 (km)	热能 (×10 <sup>25</sup> J)	换算成标准煤(×10 <sup>5</sup> 亿吨)
1	3.0-4.0	0.19	6.5
2	4.0-5.0	0.25	8.4
3	5.0-6.0	0.30	10.3
4	6.0-7.0	0.36	12.2
5	7.0-8.0	0.42	14.1
6	8.0-9.0	0.47	16.1
7	9.0-10.0	0.53	18.0
合计		2.52	85.6

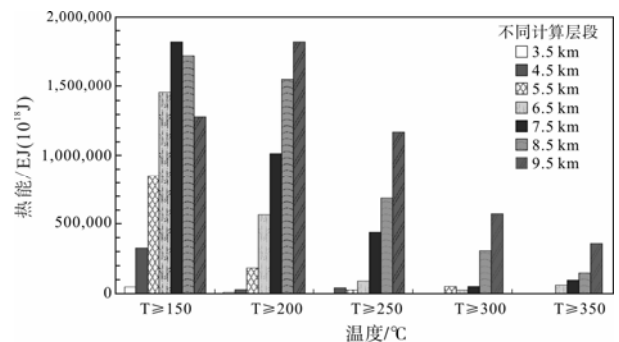


图 3 不同深度给定温度范围干热岩热能资源储量  
Fig. 3 Histogram of heat content in EJ, as a function of depth for 1 km slices

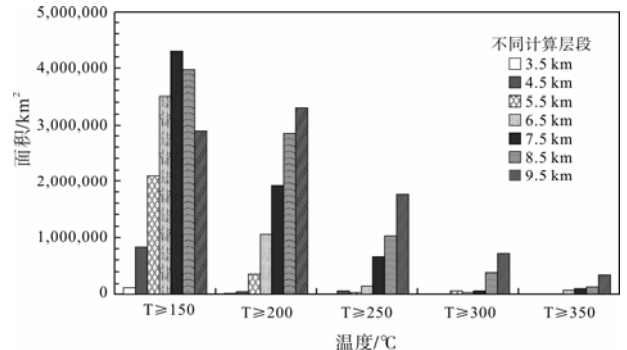


图 4 不同深度给定温度下限区域的面积  
Fig. 4 Histograms of China's mainland at a given temperature, as a function of depth for 1 km slices

总量 32.5 亿吨标准煤)。

图 3 和图 4 分别为我国陆区不同深度给定温度范围的干热岩储量及其分布面积, 从图中可以看出在位于深度 3.5~7.5 km 之间, 温度介于 150°C 到 250°C 的干热岩储量巨大, 约为 6.3×10<sup>6</sup> EJ, 即使仅仅其 2%的储量得到开发, 也将获得 126000 EJ 的热能, 相当于 2010 年我国能源消费总量的 1320 倍。

## 4 结论

我国大陆 3.0 km 至 10.0 km 深处干热岩资源总

计为  $2.52 \times 10^{25}$  J, 略高于美国干热岩资源的估算结果(不包括黄石公园地区, 美国干热岩资源量为  $1.67 \times 10^{25}$  J), 相当于 860 万亿吨标准煤, 按 2% 的可开采资源量计算, 相当于我国目前能源消耗总量的 5200 倍; 其中, 位于深度 3500 ~ 7500 m 之间, 温度介于 150℃ 到 250℃ 的干热岩储量巨大, 约为  $6.3 \times 10^6$  EJ, 按 2% 的可开采储量计算, 也将获得 126000 EJ 的热能, 相当于 2010 年我国能源消费总量的 1320 倍。

## 参考文献:

- 陈墨香, 汪集昉, 邓孝. 1994. 中国地热资源[M]. 北京: 科学出版社.
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集昉. 2001. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J]. 地球物理学报, 44(5): 611-626.
- 胡圣标, 汪集昉. 1994. 中国东南地区地壳生热率与地幔热流[J]. 中国科学(B 辑), 24(2): 185-193.
- 金旭, 韩湘君. 2001. 大地热流测量数据子库[J]. 地球学报, 22(6): 521-526.
- 邱南生, 胡圣标, 何丽娟. 2004. 沉积盆地热体制研究的理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 邱楠生. 2002. 中国西北部盆地岩石热导率和生热率特征[J]. 地质科学, 37(2): 196-206.
- 汪集昉, 黄少鹏. 1988. 中国大陆地区大地热流数据汇编[J]. 地质科学, 23(2): 196-204.
- 汪集昉, 黄少鹏. 1990. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版)[J]. 地震地质, (4): 351-366.
- 汪洋, 汪集昉, 熊亮萍, 邓晋福. 2001. 中国大陆主要地质构造单元岩石圈地热特征[J]. 地球学报, 22(1): 17-22.
- 王贵玲, 张发旺, 刘志明. 2000. 国内外热能开发利用现状及前景分析[J]. 地球学报, 21(2): 134-139.
- 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.

## References:

- ARMSTEAD C H, TESTER J W. 1987. Heat Mining: a New Source of Energy[M]. New York: E. & F.N. Spon.
- CHEN Mo-xiang, WANG Ji-yang, DENG Xiao. 1994. Geothermal resources in China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- GRANT M A, BIXLEY P F. 2011. Geothermal Reservoir Engineering[M]. New York: Academic Press Inc.

- HU Shen-biao, HE Li-juan, WANG Ji-yang. 2001. Compilation of heat flow data in the China continental area (3<sup>rd</sup> edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 44(5): 611-626(in Chinese with English abstract).
- HU Sheng-biao, WANG Ji-yang. 1994. Crustal heat production and mantle heat flow in Southeast China[J]. Science in China (Series B), 24(2): 185-193(in Chinese).
- JIN Xu, HAN Xiang-jun. 2001. Terrestrial Heat Flow Database Management System[J]. Acta Geoscientica Sinica, 22(6): 521-526(in Chinese with English abstract).
- Massachusetts Institute of Technology. 2006. The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21<sup>st</sup> Century[M]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.
- QIU Nan-sheng, HU Sheng-biao, HE Li-juan. 2004. The theory and application in sedimentary basin thermal mechanism research[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- QIU Nan-sheng. 2002. Characters of thermal conductivity and radiogenic heat production rate in basins of northwest China[J]. Chinese Journal of Geology, 37(2): 196-206(in Chinese with English abstract).
- WANG Gui-ling, ZHANG Fang-wang, LIU Zhi-ming. 2000. An analysis of present situation and prospects of geothermal energy development and utilization in the world[J]. Acta Geoscientica Sinica, 21(2): 134-139(in Chinese with English abstract).
- WANG Ji-yang, HUANG Shao-peng. 1988. Compilation of heat flow data for continental area of China[J]. Chinese Journal of Geology, 23(2): 196-204(in Chinese with English abstract).
- WANG Ji-yang, HUANG Shao-peng. 1990. Compilation of heat flow data in the China continental area (2<sup>nd</sup> edition)[J]. Seismology and Geology, 12(4): 351-366(in Chinese).
- WANG Yang, WANG Ji-yang, XIONG Liang-ping, DENG Jin-fu. 2001. Lithospheric geothermics of major geotectonic units in China mainland[J]. Acta Geoscientica Sinica, 22(1): 17-22(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yang-sheng, WAN Zhi-jun, KANG Jian-rong. 2004. An introduction to hot dry rock (HDR) geothermal exploitation[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).