

中国地热资源潜力评价

王贵玲, 张 薇, 梁继运, 蔺文静, 刘志明, 王婉丽

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: 中国地热资源分布广泛, 资源种类繁多, 分布具有明显的规律性和地带性。针对中国不同类型的地热资源, 采用不同的评价方法分别对浅层地热能、水热型地热资源和干热岩资源进行了潜力评估, 并对地热资源的开发利用现状及地热资源开发利用的经济环境效益进行了分析。我国地热资源量相对较为丰富, 出露温泉 2 334 处, 地热开采井 5 818 眼。水热型地热资源量折合标准煤 12 500 亿吨, 每年可开采量折合标准煤 18.65 亿吨; 336 个地级以上城市浅层地热能资源每年可开采量折合标准煤 7 亿吨; 干热岩远景资源量折合标准煤 856 万亿吨。目前我国地热资源每年利用量折合标准煤 0.21 亿吨, 其中水热型地热资源开采率仅为 0.2%, 浅层地热能开采率仅为 2.3%, 地热资源开发利用潜力巨大。在现有技术条件下科学开发利用地热资源, 每年可节煤 10 亿吨, 其中 336 个地级以上城市浅层地热能资源高效利用每年可节煤 2.5 亿吨; 地下水热资源高效利用每年可节煤 7.5 亿吨, 地热资源节能减排效果显著, 能有效缓解雾霾。

关键词: 浅层地热能; 水热型地热资源; 干热岩; 地热资源评价

中图分类号: P314; P964 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2017.04.02

Evaluation of Geothermal Resources Potential in China

WANG Gui-ling, ZHANG Wei, LIANG Ji-yun, LIN Wen-jing, LIU Zhi-ming, WANG Wan-li

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

Abstract: China's geothermal resources are widely distributed and characterized by multiple types. They are distributed with obvious patterns and along certain geographies. Based on China's geothermal resources of different types, this paper assesses the potential of shallow geothermal resources, geothermal resources of hydrothermal type and geothermal resource of hot dry rocks type and analyzes their exploitation and utilization status as well as the economic and environmental benefit of geothermal resources. China's geothermal resources are relatively abundant with 2 334 hot springs and 5 818 geothermal exploitation wells. Geothermal resources of hydrothermal type are equivalent to 1.25 trillion tons standard coal. Annual exploitable amount is equivalent to 1.865 billion tons standard coal. The annual exploitable shallow geothermal resources of 336 cities above prefecture-levels are equivalent to 700 million tons of standard coal. The amount of hot dry rocks of prospective areas is equivalent to 856 trillion tons of standard coal. Currently, China's annual utilization of geothermal resources is equivalent to 21 million tons, of which only 0.2% geothermal resources of hydrothermal type and only 2.3% of shallow geothermal resources have been exploited. Therefore, geothermal resources have a tremendous exploitation and utilization potential. Thanks to the existing technology, scientific exploitation and utilization of geothermal resources can save 1 billion tons of coal annually. The efficient utilization of shallow geothermal resources in 336 cities above prefecture-levels can save 250 million tons of coal annually. The efficient utilization of underground geothermal resources can save 750 million tons of coal annually. Geothermal resources can efficiently cut emissions and save energy. They can also effectively reduce dust haze.

Key words: shallow geothermal resources; geothermal resources of hydrothermal type; hot dry rocks; geothermal resources evaluation

本文由国家自然科学基金青年基金项目(编号: 41302189)和中国地质调查局国土资源大调查项目(编号: 12120113078100; 1212011120064)联合资助。

收稿日期: 2016-08-23; 改回日期: 2016-12-21。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 王贵玲, 男, 1964 年生。研究员, 博士生导师。主要从事水文地质、地热地质及环境地质相关研究。E-mail: guilingw@163.com。

随着经济社会的发展,以气候变化为核心的全球环境变化,正在广泛而深刻地影响着人类社会的方方面面。气候变化所导致的气温增高、海平面上升、极端天气与气候频发等,对自然生态系统和人类生存环境产生了严重影响。石油、煤炭和天然气等化石燃料燃烧是温室气体产生的主要来源。扩大能源来源、改善目前我国严重依赖煤炭和石油的能源结构,是减少温室气体排放量、解决全球气候变化问题的根本途径。而作为新型能源之一的地热资源的开发利用,越来越受到人们关注。它以低成本、可持续利用和环保而具有其他能源不可比拟的独特优点。大力推进地热资源开发利用,改善能源结构,对于解决日趋严重的全球环境问题具有重要的意义。“十二五”期间,国土资源部中国地质调查局组织全国 60 多家单位 3 000 多名技术人员,投入中央财政资金 4.16 亿元,完成了 336 个地级以上城市浅层地温能调查,31 个省(区、市)地下热水资源调查,启动了干热岩资源调查,基本查明了我国地热资源赋存条件、分布特征与开发利用现状,评价了全国地热资源量,本文为“十二五”期间地热资源调查评价工作成果的总结,为地热资源的可持续科学开发利用提供了技术支撑。

1 地热资源分布规律及特征

地热资源是指能够经济地被人类所利用的地球内部的地热能、地热流体及其有用组分,目前可利用的地热资源主要包括:天然出露的温泉、通过热泵技术开采利用的浅层地热能、通过人工钻井直接开采利用的地热流体以及干热岩体中的地热资源。

我国地热资源种类繁多,考虑地质构造特征、热流体传输方式、温度范围以及开发利用方式等因素,我国地热资源可分为浅层地热能资源、水热型地热资源和干热岩资源三种类型。

1.1 中国地热资源分布

我国水热型地热能资源分布具有明显的规律性和地带性,但受构造、岩浆活动、地层岩性、水文地质条件等因素的控制总体分布不均匀(图 1)。我国有高温地热资源,但以中低温地热资源为主。其中,高温地热资源主要分布在藏南、滇西、川西和台湾地区,已发现高温地热系统 200 多处(廖志杰和赵平, 1999);中低温地热资源主要分布于大型沉积盆地和山地的断裂带上。分布在山地的断裂带上的地热一般规模较小,分布在盆地特别是大型沉积盆地的地热资源储集条件好、储层多、厚度大、分布广,热储温度随深度增加,地热资源储量大,是地

热资源开发潜力最大的地区。其中,沉积盆地型地热资源主要分布于我国的东部地区、琼雷盆地、松辽盆地和环鄂尔多斯断陷盆地等地区,均为中低温地热资源。隆起山地型地热资源主要分布于我国的东南沿海、台湾、藏南、川西、滇西和胶辽半岛等地区(陈墨香等, 1994; 陈墨香和汪集昉, 1994)。

浅层地热能资源的分布遍及全球,世界大陆的浅部地下都分布着浅层地热能资源。虽然,基岩(除灰岩外)的导热系数要比第四系松散岩层的高,其比热容要比第四系松散岩层的低,但由于其难以钻进,回灌也相对困难,其浅层地热能资源较第四系松散岩层的要难以开发利用。第四系松散岩层是开发浅层地热能资源的理想场所。第四系松散岩层的地层松软,易于钻进,有利于竖直埋管热泵的应用,又因第四系松散岩层的富水性一般较基岩(除灰岩外)强,也有利于地下水源热泵的应用。基岩中的灰岩,由于其岩溶裂隙发育,富含岩溶水,水量大,虽然钻进困难,但由于地下水源热泵所需的井孔数量较少,易于回灌,因此也可作为地下水源热泵的应用场所。

干热岩的分布几乎遍及全球,世界各大陆地下都有干热岩资源。不过,干热岩开发利用潜力最大的地方,还是那些新的火山活动区,或地壳较薄的地区,这些地区主要位于全球板块或构造地体的边缘。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。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。

1.2 中国地热资源特征

1.2.1 水热型地热资源特征

大地热流与地温梯度和地表温度可以推算出地下一定深度范围的热储层温度条件,一般来说,构造活动越强烈或构造-热事件年龄越小的地区,大地热流值越高;构造稳定的古老块体大地热流值较低。根据收集及补充测量的全国大地热流值(973 个),中国大地热值分布很不均匀,总体上藏南地区、滇西、东部沿海最高,平均值为 90~150 mW/m²,个别地区高达 304 mW/m²;其次为藏北地区、台湾地区,平均值为 80~90 mW/m²;中部鄂尔多斯盆

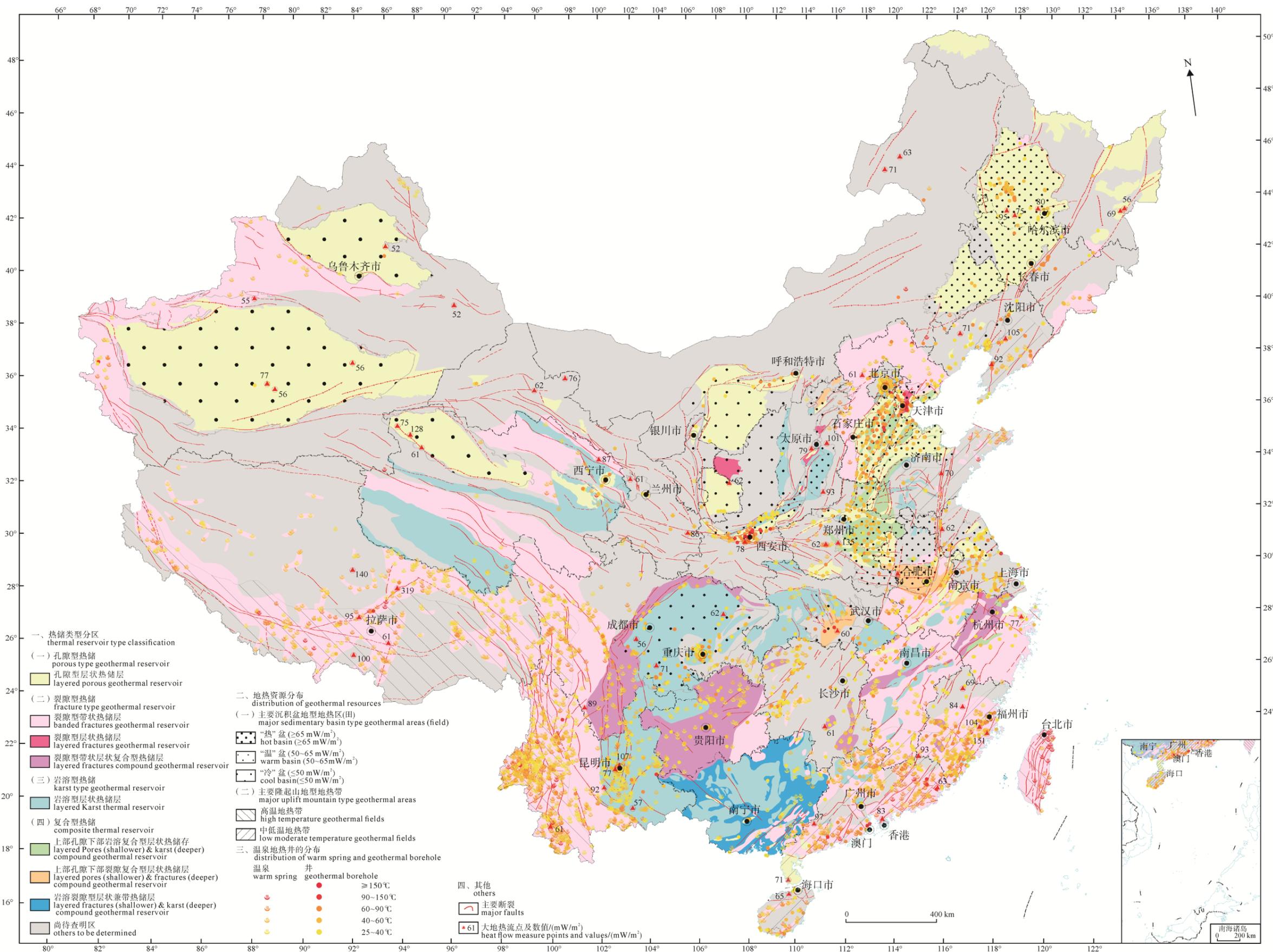


图1 中国地热资源分布图
Fig. 1 Distribution of geothermal resources in China

地、四川盆地, 南方沿海盆地, 东部的华北南部、松辽盆地北部、苏北、渤海湾盆地以及北部的海河流域, 平均值在 55~80 mW/m²; 新疆的塔里木盆地、准噶尔盆地、四川盆地北部以及松辽盆地北部与三江盆地等, 其平均值为 30~50 mW/m², 为冷盆(廖志杰, 1985; 胡圣标等, 2001; 多吉, 2003; 龚育龄等, 2003; 王良书等, 2005)。

中国沉积盆地平均地温梯度在 1.5~4.0°C/m, 平均值约为 3.2°C/m。地温梯度由地核热变和地层介质热导率控制。地温梯度与大地热流相比, 其受该地区的大地构造影响, 同时也与地层岩性及其结构密切相关, 导致地温梯度与大地热流呈现不同规律。沉积盆地地温梯度最高值主要分布在云南腾冲、北部湾盆地、厦门与汕头、华北平原(南部)大部分地区、渤海最南端与天津地区、海拉尔盆地、柴达木盆地西边与松辽盆地, 其值为 3.0~4.0°C/m, 大概占全国沉积盆地面积的 1/10。大部分沉积盆地梯度分布在 2.0~3.0°C/m, 其余低于 2.0°C/m, 其主要分布在塔里木盆地、准噶尔盆地部分地区与四川盆地西北地区。

1.2.2 浅层地温场特征

浅层地温场是指浅部地层内温度在地层中的分布和变化情况, 地层的温度与开发利用的方式有直接关系。通过横竖四条剖面可反映我国的浅层地温场分布特征(图 2)。

我国由北向南(I-I'剖面)从中温带、暖温带、亚

热带到热带, 从平原区到丘陵山地, 平均气温和恒温带温度逐渐升高, 恒温带顶板埋深与温度变化趋势相反。

由北向南(II-II'剖面)从中温带、暖温带到亚热带, 从高原地区到西南岩溶丘陵地区。总体上从北向南平均气温和恒温带温度逐渐升高, 恒温带顶板埋深基本一致, 稳定在 20 m 左右。

由西向东(III-III'剖面)从青藏高寒区、中温带到暖温带, 从西北盆地区到黄土高原, 大部分位于华北平原地区。气温多为 14°C 左右, 恒温带埋深基本位于 15~20 m 之间。

由西向东(IV-IV'剖面)从青藏高寒区到亚热带, 从高原盆地区到长江三角洲地区, 大部分位于丘陵山地区, 恒温带埋深 15 m 左右(图 3)。

我国恒温带温度与近五年平均气温两者温度变化趋势十分相近(图 4), 总体都表现出随纬度的升高而降低, 同一纬度西部大于东部的特点。说明在我国陆区范围内, 恒温带温度受太阳辐射影响最大。气候条件控制了恒温带温度在全国范围内的整体变化趋势。我国陆区恒温带温度平均比当地年平均气温高 1.85°C, 二者呈线性正相关关系。在小范围区域内, 恒温层温度也受各种因素的影响而表现出不同的区域性特征。断裂的存在一般会使局部地温增大, 地下水的影响则较复杂, 会使地温向水温方向变化。在一定程度上, 基岩浅埋区的地温略大于深埋区。

从总体上来说, 中温带(高寒区)气温低、恒温带

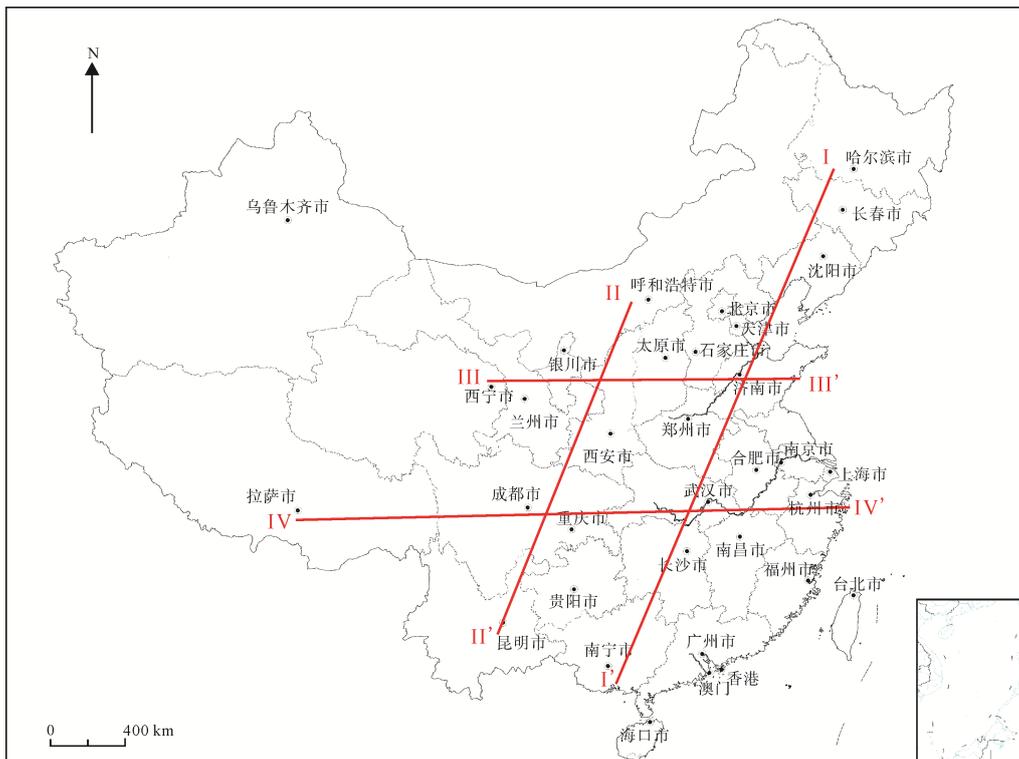


图 2 浅层地温场剖面位置图
Fig. 2 Section position of shallow geothermal fields

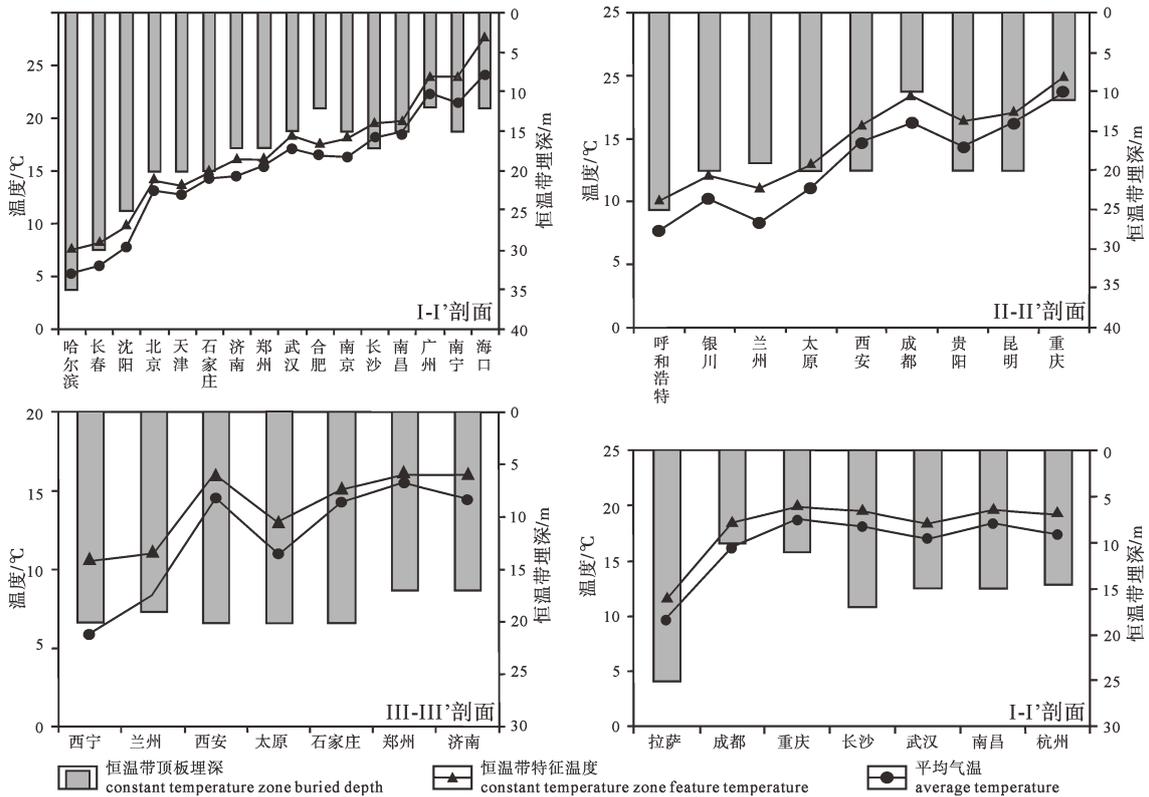


图3 恒温带特征典型剖面
Fig. 3 Typical section of characteristics of constant temperature zones

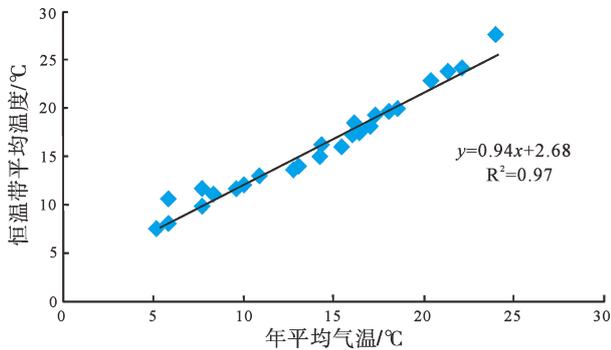


图4 我国陆区恒温带温度-年平均气温相关曲线图

Fig. 4 Correlogram between temperature of constant temperature zone and annual average temperature of China's mainland

顶板埋深大、深部温度高，供暖周期长，可视地质条件用深孔；南方地区气温高，地层上部温度低，以夏季排热利用为主，可施浅孔。

2 中国地热资源潜力

2.1 地热资源潜力评价方法

水热型地热资源量采用热储法。沉积盆地型地热资源，热储面积由 4 000 m 以浅热储层温度大于 25℃、单井出水量大于 20 m³/h 且盖层平均地温梯度大于 2.5℃/100 m 圈闭的范围，将各地热田及地热异常区分界线、热储温度等值线和热储厚度等值线计算机数字化，计算各分区的面积，热储厚度根

据砂厚比计算。隆起山地型地热资源，山西、内蒙古、山东、江苏、浙江、重庆及贵州勘察程度较高地区均分热储层计算，其他省份按每个温泉、地热井单点评价地热资源量。热储体积如可由控热断裂构造圈闭，则由地质构造来圈定，如热储范围界线模糊，则考虑地热异常点 1 km³ 范围作为储量计算范围(Muffler and Cataldi, 1978)。水热型地热资源可开采量采用回灌条件下地热流体可开采热量(蔺文静等, 2012, 2013)。中低温地热资源中，沉积盆地型地热资源按回灌条件下开采 100 a，消耗 15% 的地热储量，根据热量平衡计算，隆起山地型地热资源按泉(井)流量法计算地热流体可开采热量的 2 倍进行计算。高温地热资源也是按已探明地热流体可开采热量的 2 倍进行计算。

浅层地热能资源在适宜性分区的基础上分别进行浅层地热能容量和浅层地热能换热功率计算。地源热泵系统总换热功率的计算是在浅层地热资源开发利用适宜性区划的基础上，综合地理管地源热泵换热功率计算和地下水地源热泵换热功率计算的成果得出的。其中，对于地理管地源热泵系统适宜或较适宜而地下水地源热泵不适宜的区域，按地理管地源热泵换热功率计算总换热功率；对于地理管地源热泵系统不适宜而地下水地源热泵系统适宜或较适宜的区域，按照地下水地源热泵换热功率计算总换热功率；而对于地理管地源热泵系统和地下水

地源热泵系统均适宜或较适宜的区域,则按照地理管地源热泵换热功率的 2/3 和地下水地源热泵换热功率的 1/3 进行折算。根据计算的浅层地热能换热功率,结合当地的土地利用规划以及供暖、制冷削峰负荷,计算当地的可供暖和制冷面积,进行浅层地热资源潜力评价。

干热岩资源储量采取体积法进行估算,根据干热岩开发利用的温度要求及目前的钻探技术,估算范围定为地下 3—10 km 范围内。开展干热岩资源量估算的参数包括: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,地表温度,深部地温等,若分别计算深部温度形成的沉积贡献及基底贡献,还需要大陆壳幔热流比例等数据(蔺文静等, 2012, 2013)。

2.2 中国地热资源潜力

中国地热资源丰富,其中水热型地热资源每年可开采量折合标准煤 18.65 亿吨,相当于我国 2015 年煤炭消耗的 50%; 336 个地级以上城市浅层地热能资源每年可开采量折合标准煤 7 亿吨,相当于我国 2015 年煤炭消耗的 19%; 干热岩远景资源量折合标准煤 856 万吨,潜力巨大,属国家战略能源。

2.2.1 水热型地热资源

我国水热型地热资源非常丰富,出露温泉 2 334 处,地热开采井 5 818 眼。水热型地热资源量折合标准煤 12 500 亿吨,每年地热资源可开采量折合标准煤 18.65 亿吨,有高温地热资源($\geq 150^{\circ}\text{C}$),但以中温地热资源($90\sim 150^{\circ}\text{C}$)和低温地热资源($< 90^{\circ}\text{C}$)为主。其中,水热型中低温地热资源量折合标准煤 12 300 亿吨,每年地热资源可开采量折合标准煤 18.5 亿吨,发电潜力 150 万千瓦;水热型高温地热资源量折合标准煤 141 亿吨,每年地热资源可开采量折合标准煤 0.18 亿吨,发电潜力为 846 万千瓦。

水热型中低温地热资源主要分布于华北平原、河淮平原、苏北平原、松辽盆地、下辽河平原、汾渭盆地等 15 个大中型沉积盆地和山地的断裂带上,分布在山地的断裂带上的地热一般规模较小,分布在盆地特别是大型沉积盆地的地热资源储集条件好、储层多、厚度大、分布广,热储温度随深度增加,地热资源储量大,是地热资源开发潜力最大的地区。15 个大中型沉积盆地地热资源量折合标准煤 10 600 亿吨,每年可开采量折合标准煤 17.0 亿吨。其中地热资源可开采量最多的为四川盆地,折合标准煤 5.44 亿吨(表 1)。其次为华北平原,折合标准煤 4.22 亿吨,与山东省、河北省中低温沉积盆地型地热资源量丰富相一致(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 2015a, b)。

高温地热资源(表 2)主要分布在藏南—川西—

滇西水热活动密集带,其高温地热资源发电潜力为 712 万千瓦,占全国的 84.1%,热储温度高于 150°C 的共 139 处,其中藏南 34 处、川西 56 处、滇西 49 处;东南沿海地区高温地热资源发电潜力为 70 万千瓦,占全国的 8.27%,热储温度高于 150°C 的共 14 处。关中盆地、新疆塔什库尔干地区及吉林长白山地区也有高温地热系统分布。充分开发利用高温地热资源,积极推进西南地区高温地热发电,因地制宜建立多能互补的发电格局,符合我国当前能源革命需求,也是可再生能源重要组成部分。

2.2.2 浅层地热能

全国 336 个地级以上城市浅层地热能资源每年可开采量折合标准煤 7 亿吨,可替代标准煤 11.7 亿吨/年,节煤量 4.1 亿吨/年。从浅层地热能开发利用方式来看,地理管热泵系统适宜区占总评价面积的 29%;较适宜区占 53%;地下水源热泵系统适宜区占总评价面积的 11%,较适宜区占 27%。比较适合应用地下水地源热泵系统的地区主要分布在我国的东部平原盆地及富水性较好的地区。不适宜建立地下水地源热泵系统的地区主要位于我国西部的缺水区域以及部分炎热、寒冷的区域。地理管地源热泵系统在具有较好的适宜性,不适宜区主要是从地理管的施工难度和建设成本上考虑。综合考虑,浅层地热能开发利用的影响因素,我国适宜开发浅层地热能地区主要分布在中东部省份,包括北京、天津、河北、山东、河南、辽宁、上海、湖北、湖南、江苏、浙江、江西、安徽等 13 个省市。

浅层地热能换热功率为在浅层岩土体、地下水中单位时间内的热交换量。我国 336 个地级以上城市地下水地源热泵系统夏季换热功率为 7.49×10^8 kW,冬季换热功率为 3.68×10^8 kW;地理管地源热泵系统夏季换热功率为 2.69×10^9 kW,冬季换热功率为 1.91×10^9 kW。地源热泵系统总的换热功率夏季为 3.14×10^9 kW,冬季为 2.10×10^9 kW。336 个地级以上城市浅层地热能资源热容量为 1.11×10^{17} kJ/ $^{\circ}\text{C}$,每年可开采量折合标准煤 7 亿吨(表 3)。

目前,浅层地热能资源主要用于建筑物供暖和制冷,采用单位面积可利用量的供暖和制冷面积表示浅层地热能资源潜力。336 个地级以上城市 80% 的土地面积适宜利用浅层地热能,可实现建筑物夏季制冷面积 3.26×10^{10} m^2 ,冬季供暖面积 3.23×10^{10} m^2 。其中,地下水地源热泵系统夏季可制冷面积为 5.59×10^9 m^2 ,冬季可供暖面积为 3.61×10^9 m^2 ;地理管地源热泵系统夏季可制冷面积为 3.56×10^{10} m^2 ,冬季可供暖面积为 3.75×10^{10} m^2 (表 4)。

表 1 主要沉积盆地中低温地热资源评价表
Table 1 Evaluation table of moderate- and low-temperature geothermal resources of main sedimentary basins

盆地名称	地热资源量		地热资源可采量		地热流体 储量/m ³	地热流体可 开采量 (m ³ /a)	地热流体可开采热量		考虑回灌条 件下地热流 体可开采量 (m ³ /a)	考虑回灌条件下地热流体 可开采热量	
	地热资源量 /kJ	折合标准煤/ 亿吨	地热资源可 采量/kJ	折合标准煤/ 亿吨			地热流体可开 采热量/(kJ/a)	折合标准煤 /(万吨/年)		可开采热量 /(kJ/a)	折合标准煤 /(亿吨/年)
华北平原	7.23×10 ¹⁸	2 470.0	1.46×10 ¹⁸	498.00	1.34×10 ¹³	3.99×10 ⁹	5.96×10 ¹⁴	2 030.00	6.84×10 ¹⁰	1.24×10 ¹⁶	4.22
河淮平原	5.33×10 ¹⁸	1 820.0	9.20×10 ¹⁷	314.00	5.13×10 ¹²	7.74×10 ⁸	1.52×10 ¹⁴	520.00	4.05×10 ¹⁰	9.02×10 ¹⁵	3.08
苏北平原	6.75×10 ¹⁷	230.0	1.52×10 ¹⁷	51.90	1.88×10 ¹²	1.98×10 ⁹	1.82×10 ¹⁴	620.00	7.15×10 ⁹	9.20×10 ¹⁴	0.31
松辽盆地	1.24×10 ¹⁸	422.0	1.24×10 ¹⁷	42.20	1.92×10 ¹²	2.17×10 ⁸	4.86×10 ¹³	166.00	8.45×10 ⁹	2.01×10 ¹⁵	0.69
下辽河平原	3.95×10 ¹⁶	13.5	3.95×10 ¹⁵	1.35	5.68×10 ¹⁰	2.84×10 ⁷	2.31×10 ¹²	7.88	9.35×10 ⁸	7.52×10 ¹³	0.03
汾渭盆地	2.20×10 ¹⁸	749.0	4.38×10 ¹⁷	149.00	3.87×10 ¹²	1.75×10 ⁹	3.44×10 ¹⁴	1 170.00	1.95×10 ¹⁰	3.86×10 ¹⁵	1.32
鄂尔多斯盆地	1.48×10 ¹⁸	503.0	2.11×10 ¹⁷	72.00	1.84×10 ¹²	5.66×10 ⁸	9.03×10 ¹³	308.00	1.73×10 ¹⁰	2.68×10 ¹⁵	0.92
四川盆地	9.62×10 ¹⁸	3 280.0	1.44×10 ¹⁸	493.00	6.68×10 ¹²	3.43×10 ⁹	6.93×10 ¹⁴	2 370.00	8.39×10 ¹⁰	1.59×10 ¹⁶	5.44
江汉盆地	2.49×10 ¹⁷	85.1	4.99×10 ¹⁶	17.00	6.76×10 ¹¹	2.03×10 ⁸	3.73×10 ¹³	127.00	1.94×10 ⁹	3.64×10 ¹⁴	0.12
河套盆地	6.61×10 ¹⁷	225.0	1.65×10 ¹⁷	56.40	1.26×10 ¹¹	6.29×10 ⁸	1.54×10 ¹⁴	527.00	5.28×10 ⁹	9.59×10 ¹⁴	0.33
银川平原	9.37×10 ¹⁷	320.0	2.32×10 ¹⁷	79.10	1.51×10 ¹²	7.45×10 ⁸	2.10×10 ¹⁴	717.00	5.36×10 ⁹	1.43×10 ¹⁵	0.49
西宁盆地	1.34×10 ¹⁷	45.7	1.34×10 ¹⁶	4.57	1.17×10 ¹¹	1.76×10 ⁷	5.43×10 ¹²	18.50	7.14×10 ⁸	2.09×10 ¹⁴	0.07
准噶尔盆地	4.78×10 ¹⁷	163.0	2.39×10 ¹⁶	8.16	1.78×10 ¹¹	1.78×10 ⁷	6.84×10 ¹²	23.30	—	—	—
塔里木盆地	4.83×10 ¹⁷	165.0	2.42×10 ¹⁶	8.26	3031×10 ¹⁰	3.31×10 ⁶	1.60×10 ¹²	5.46	—	—	—
柴达木盆地	3.04×10 ¹⁷	104.0	3.04×10 ¹⁶	10.40	1.74×10 ⁹	8.80×10 ⁶	1.28×10 ¹⁴	437	—	—	—
总计	3.11×10 ¹⁹	106.0	5.29×10 ¹⁸	1 800.00	3.87×10 ¹³	1.44×10 ¹⁰	2.65×10 ¹⁵	9 050.00	2.59×10 ¹¹	4.98×10 ¹⁶	17.00

注：“—”表示数据资料太少，未评价。

表 2 隆起山地型主要水热活动密集带地热资源评价表
Table 2 Evaluation of geothermal resources in the main hydrothermal activity zones of uplifted mountains

主要水热活动密集带	中低温地热资源					高温地热资源	
	地热资源量		地热流体可开采量 (m ³ /a)	地热流体可开采热量		热储热能 (kJ)	30 年发电 潜力 (万千瓦)
	地热资源量 (kJ)	折合标准煤 (亿吨)		地热流体可 开采热量 (kJ/a)	折合标准煤 (亿吨/年)		
藏南—川西—滇西	3.16×10 ¹⁷	108.000 0	2.26×10 ⁸	3.61×10 ¹³	0.012 300	3.37×10 ¹⁷	712
东南沿海地区	1.17×10 ¹⁷	58.500 0	2.04×10 ⁸	3.22×10 ¹³	0.011 000	3.56×10 ¹⁶	70
胶辽半岛	2.69×10 ¹⁴	0.091 8	5.37×10 ⁶	1.27×10 ¹²	0.000 434		
台湾			3.78×10 ⁶	9.40×10 ¹²	0.003 210		
合计	4.88×10 ¹⁷	167.000 0	4.73×10 ⁸	7.90×10 ¹³	0.027 000	3.72×10 ¹⁷	782

表 3 浅层地热能热容量、换热功率计算汇总表(考虑土地利用系数)
Table 3 Summary of the calculation of heat capacity and heat transfer rate of shallow geothermal resources (land-use coefficient)

城市	评价面积 (km ²)	200 m 以浅热 容量/(kJ/°C)	地下水源热泵系统换热功率 (kW)		地理管热泵系统总换热功率 (kW)		地源热泵系统换热功率/kW	
			夏季制冷	冬季供暖	夏季制冷	冬季供暖	夏季制冷	冬季供暖
			青海	624	3.97×10 ¹³	2.68×10 ⁶	7.23×10 ⁵	7.65×10 ⁵
西藏	514	1.85×10 ¹⁴	0	1.05×10 ⁶	0	2.70×10 ⁵	0	1.19×10 ⁶
黑龙江	2 203	9.27×10 ¹⁴	6.56×10 ⁶	2.07×10 ⁶	1.51×10 ⁷	5.86×10 ⁶	1.54×10 ⁷	5.66×10 ⁶
内蒙古	2 601	1.07×10 ¹⁵	8.99×10 ⁶	4.49×10 ⁶	2.04×10 ⁸	8.39×10 ⁷	1.39×10 ⁸	5.76×10 ⁷
新疆	2 201	4.13×10 ¹⁶	2.54×10 ⁷	1.44×10 ⁷	2.53×10 ⁷	1.45×10 ⁷	3.55×10 ⁷	2.03×10 ⁷
吉林	2 985	1.37×10 ¹⁵	1.23×10 ⁶	5.31×10 ⁵	6.31×10 ⁷	2.35×10 ⁷	5.94×10 ⁷	2.24×10 ⁷
辽宁	9 377	4.76×10 ¹⁵	5.48×10 ⁷	3.32×10 ⁷	8.78×10 ⁷	5.00×10 ⁷	1.34×10 ⁸	7.90×10 ⁷
宁夏	1 587	6.96×10 ¹⁴	3.73×10 ⁶	1.87×10 ⁶	2.50×10 ⁷	5.81×10 ⁶	2.15×10 ⁷	6.91×10 ⁶
甘肃	2 130	3.41×10 ¹⁴	2.86×10 ⁷	1.43×10 ⁷	4.87×10 ⁷	1.90×10 ⁷	4.44×10 ⁷	1.73×10 ⁷
北京	6 130	1.94×10 ¹⁵	1.47×10 ⁷	7.35×10 ⁶	7.17×10 ⁷	3.59×10 ⁷	8.64×10 ⁷	4.33×10 ⁷
天津	11 250	5.59×10 ¹⁵	8.03×10 ⁵	4.02×10 ⁵	1.01×10 ⁸	6.70×10 ⁷	1.01×10 ⁸	6.70×10 ⁷
山西	5 817	1.93×10 ¹⁵	1.44×10 ⁶	9.15×10 ⁵	7.00×10 ⁷	3.34×10 ⁷	5.10×10 ⁸	3.24×10 ⁷
陕西	2 615	1.15×10 ¹⁵	2.51×10 ⁷	1.26×10 ⁷	6.00×10 ⁷	3.96×10 ⁷	5.49×10 ⁷	3.21×10 ⁷
河南	7 785	3.95×10 ¹⁵	4.21×10 ⁸	2.13×10 ⁸	8.37×10 ⁷	7.01×10 ⁷	8.21×10 ⁷	6.80×10 ⁷
山东	7 936	2.50×10 ¹⁵	6.86×10 ⁷	3.43×10 ⁷	1.17×10 ⁸	9.35×10 ⁷	1.17×10 ⁸	8.63×10 ⁷
河北	2 460	8.78×10 ¹⁴	3.02×10 ⁶	1.58×10 ⁶	6.99×10 ⁷	4.35×10 ⁷	5.46×10 ⁷	3.43×10 ⁷
云南	1 083	4.90×10 ¹⁴	6.91×10 ⁵	3.45×10 ⁵	1.18×10 ⁷	1.18×10 ⁷	1.04×10 ⁷	1.02×10 ⁷
贵州	1 414	6.79×10 ¹⁴	2.23×10 ⁶	1.11×10 ⁶	5.20×10 ⁷	3.42×10 ⁷	4.47×10 ⁷	2.93×10 ⁷
江苏	26 610	1.10×10 ¹⁶	1.22×10 ⁷	6.44×10 ⁶	2.72×10 ⁸	2.15×10 ⁸	2.21×10 ⁸	1.66×10 ⁸
四川	3 960	1.80×10 ¹⁵	7.33×10 ⁶	3.68×10 ⁶	4.20×10 ⁷	3.85×10 ⁷	4.17×10 ⁷	3.70×10 ⁷
浙江	12 914	6.88×10 ¹⁵	5.00×10 ⁶	2.50×10 ⁶	9.11×10 ⁷	6.32×10 ⁷	8.36×10 ⁷	5.80×10 ⁷
湖南	17 012	7.27×10 ¹⁵	2.17×10 ⁶	1.08×10 ⁶	1.72×10 ⁸	1.16×10 ⁸	1.55×10 ⁸	1.12×10 ⁸
湖北	5 606	3.04×10 ¹⁵	4.65×10 ⁶	2.33×10 ⁶	8.43×10 ⁷	7.02×10 ⁷	8.27×10 ⁷	6.76×10 ⁷
安徽	11 488	4.15×10 ¹⁵	6.15×10 ⁶	3.08×10 ⁶	2.74×10 ⁸	1.49×10 ⁸	2.69×10 ⁸	1.46×10 ⁸
江西	2 584	9.93×10 ¹⁴	5.41×10 ⁶	2.70×10 ⁶	2.20×10 ⁸	2.38×10 ⁸	1.43×10 ⁸	1.15×10 ⁸
上海	1 980	9.94×10 ¹⁴	0	0	6.89×10 ⁷	6.99×10 ⁷	6.89×10 ⁷	6.99×10 ⁷
重庆	2 432	3.81×10 ¹⁴	0	0	2.15×10 ⁸	2.33×10 ⁸	2.15×10 ⁸	2.33×10 ⁸
福建	3 411	5.38×10 ¹⁴	5.96×10 ⁵	1.12×10 ⁶	1.18×10 ⁷	1.21×10 ⁷	1.03×10 ⁷	1.06×10 ⁷
广西	2 942	1.49×10 ¹⁵	3.59×10 ⁷	0	9.68×10 ⁷	0	7.60×10 ⁷	0
广东	6 735	2.56×10 ¹⁵	4.07×10 ⁵	9.65×10 ⁵	3.56×10 ⁷	6.89×10 ⁷	2.57×10 ⁸	4.73×10 ⁸
海南	499	2.82×10 ¹⁴	2.58×10 ⁴	0	2.52×10 ⁶	0	2.47×10 ⁶	0
合计	168885	1.11×10 ¹⁷	7.49×10 ⁸	3.68×10 ⁸	2.69×10 ⁹	1.91×10 ⁹	3.14×10 ⁹	2.10×10 ⁹

2.2.3 干热岩资源

我国干热岩资源潜力巨大, 开发前景广阔, 高于美国干热岩资源的估算结果(570 万亿吨标准煤)。经初步测算, 地下 3—10 km 范围内干热岩资源折合标准煤 860 万亿吨(表 5), 利用其中 2%, 即相当

于全国能源总消耗量的 4 040 倍。尤其是位于 3.5—7.5 km 深度的干热岩资源温度介于 150~250°C 之间, 资源量巨大, 折合标准煤 215 万亿吨。干热岩资源是最具有潜力的战略接替能源, 但是开发难度较大。

表 4 浅层地热能潜力评价结果计算汇总表
Table 4 Summary of the calculation of potentials evaluation results of shallow geothermal resources

城市	地下水源热泵供暖和制冷面积/m ²		地埋管热泵供暖和制冷面积/m ²		地源热泵供暖和制冷面积/m ²	
	夏季制冷	冬季供暖	夏季制冷	冬季供暖	夏季制冷	冬季供暖
青海	4.58×10 ⁷	9.20×10 ⁶	1.65×10 ⁷	9.64×10 ⁶	6.23×10 ⁷	1.88×10 ⁷
西藏		1.76×10 ⁷		4.50×10 ⁶		2.00×10 ⁷
黑龙江	1.15×10 ⁸	2.59×10 ⁷	2.52×10 ⁸	7.32×10 ⁷	2.56×10 ⁸	9.01×10 ⁷
内蒙古	1.38×10 ⁸	9.99×10 ⁷	3.13×10 ⁹	1.87×10 ⁹	2.15×10 ⁹	1.28×10 ⁹
新疆	4.18×10 ⁸	2.34×10 ⁸	3.89×10 ⁸	2.23×10 ⁸	5.75×10 ⁸	3.30×10 ⁸
吉林	1.54×10 ⁷	8.84×10 ⁶	7.89×10 ⁸	3.17×10 ⁸	7.43×10 ⁸	2.85×10 ⁸
辽宁	6.36×10 ⁸	5.23×10 ⁸	1.02×10 ⁹	7.88×10 ⁸	1.55×10 ⁹	1.25×10 ⁹
宁夏	5.40×10 ⁷	3.63×10 ⁷	4.08×10 ⁸	1.89×10 ⁸	3.12×10 ⁸	1.47×10 ⁸
甘肃	8.89×10 ⁸	3.94×10 ⁸	7.84×10 ⁸	2.76×10 ⁸	7.13×10 ⁸	2.48×10 ⁸
北京	2.72×10 ⁸	1.63×10 ⁸	1.33×10 ⁹	7.96×10 ⁸	1.60×10 ⁹	9.59×10 ⁸
天津	1.01×10 ⁷	8.04×10 ⁶	1.26×10 ⁹	1.34×10 ⁹	1.26×10 ⁹	1.34×10 ⁹
山西	3.16×10 ⁷	1.76×10 ⁷	1.20×10 ⁹	6.50×10 ⁸	1.13×10 ⁹	5.28×10 ⁸
陕西	2.69×10 ⁸	1.87×10 ⁸	6.80×10 ⁸	6.11×10 ⁸	6.65×10 ⁸	5.41×10 ⁸
河南	1.12×10 ⁹	8.46×10 ⁸	2.88×10 ⁹	3.51×10 ⁹	1.12×10 ⁹	1.30×10 ⁹
山东	9.79×10 ⁸	6.23×10 ⁸	1.67×10 ⁹	1.70×10 ⁹	2.58×10 ⁹	2.29×10 ⁹
河北	3.47×10 ⁷	2.60×10 ⁷	8.11×10 ⁸	7.58×10 ⁸	6.35×10 ⁸	5.99×10 ⁸
云南	1.30×10 ⁷	7.70×10 ⁶	2.26×10 ⁸	2.35×10 ⁸	1.53×10 ⁸	1.80×10 ⁸
贵州	3.17×10 ⁷	2.22×10 ⁷	7.43×10 ⁸	6.84×10 ⁸	6.39×10 ⁸	5.86×10 ⁸
江苏	9.29×10 ⁷	6.64×10 ⁷	2.85×10 ⁹	2.97×10 ⁹	2.31×10 ⁹	2.59×10 ⁹
四川	9.16×10 ⁷	5.53×10 ⁷	5.22×10 ⁸	6.42×10 ⁸	5.17×10 ⁸	6.16×10 ⁸
浙江	5.00×10 ⁷	3.57×10 ⁷	9.11×10 ⁸	1.03×10 ⁹	8.36×10 ⁸	8.29×10 ⁸
湖南	3.17×10 ⁷	3.12×10 ⁷	2.51×10 ⁹	3.34×10 ⁹	2.28×10 ⁹	3.27×10 ⁹
湖北	5.83×10 ⁷	3.99×10 ⁷	1.05×10 ⁹	1.20×10 ⁹	1.03×10 ⁹	1.16×10 ⁹
安徽	8.77×10 ⁷	6.14×10 ⁷	3.79×10 ⁹	3.02×10 ⁹	3.72×10 ⁹	2.97×10 ⁹
江西	3.15×10 ⁷	2.10×10 ⁷	2.75×10 ⁹	3.97×10 ⁹	2.44×10 ⁹	2.56×10 ⁹
上海	0	0	4.64×10 ⁸	1.45×10 ⁹	4.64×10 ⁸	1.45×10 ⁹
重庆	0	0	2.15×10 ⁹	3.89×10 ⁹	2.15×10 ⁹	3.89×10 ⁹
福建	7.45×10 ⁶	2.24×10 ⁷	1.47×10 ⁸	2.43×10 ⁸	1.28×10 ⁸	2.11×10 ⁸
广西	5.74×10 ⁷	0	2.83×10 ⁸	0	3.35×10 ⁸	0
广东	5.81×10 ⁶	2.41×10 ⁷	5.08×10 ⁸	1.72×10 ⁹	1.98×10 ⁸	7.36×10 ⁸
海南	2.86×10 ⁵	0	2.82×10 ⁷	0	2.75×10 ⁷	0
合计	5.59×10 ⁹	3.61×10 ⁹	3.56×10 ¹⁰	3.75×10 ¹⁰	3.26×10 ¹⁰	3.23×10 ¹⁰

表 5 我国陆区 3—10 km 深处干热岩资源
Table 5 Dry hot rock resources at the depth of 3—10 km in China's mainland

序号	计算层位深度/km	干热岩资源量		干热岩可开采量(按 2%可提取)	
		资源量/J	折合标准煤/万吨	资源量/J	折合标准煤/万吨
1	3.0—4.0	1.9×10 ²⁴	64.8	3.8×10 ²²	1.30
2	4.0—5.0	2.5×10 ²⁴	85.3	5×10 ²²	1.71
3	5.0—6.0	3×10 ²⁴	102.0	6×10 ²²	2.05
4	6.0—7.0	3.6×10 ²⁴	123.0	7.2×10 ²²	2.46
5	7.0—8.0	4.2×10 ²⁴	143.0	8.4×10 ²²	2.87
6	8.0—9.0	4.7×10 ²⁴	160.0	9.4×10 ²²	3.21
7	9.0—10.0	5.3×10 ²⁴	181.0	1.06×10 ²³	3.62
8	3.0—10.0	2.52×10 ²⁵	860.0	5.04×10 ²³	17.20

3 中国地热资源开发利用

据史料记载,我国开发利用地热与温泉已有 5 000 多年的悠久历史,是世界上利用地热资源较早的国家之一。解放后,国家重视人民的医疗保健

事业,从 20 世纪 50 年代起,先后建立温泉疗养院 160 多家,20 世纪 70 年代后,地热资源的开发利用进入快速发展阶段,尤其是 20 世纪 90 年代以来,在市场经济需求的推动下,地热资源的开发利用得到更加蓬勃的发展。

地热资源主要用途包括发电和直接利用。其中 150℃以上的高温地热主要用于发电,发电后排出的热水可进行梯级利用(Duchane, 1996; Lund and Boyd, 2016)。90~150℃的中温和 25~90℃的低温地热以直接利用为主,多用于工业、种植、养殖、供暖制冷、旅游疗养等方面。25℃以下的浅层地温,可利用地源和水源热泵供暖、制冷。目前全国地热资源开发利用的基本格局是:西南、华南发电;华北、东北供暖与养殖,华东、华中、西北地区洗浴与疗养(王贵玲等,2000)。

目前我国地热资源每年利用量折合标准煤 0.21 亿吨,其中水热型地热资源利用量折合标准煤 415 万吨,开采率为 0.2%,浅层地热能利用量折合标准煤 1 600 万吨,开采率为 2.3%,地热资源开发利用潜力巨大。水热型地热资源利用方式中,地热发电占 0.5%,供热采暖占 32.70%,医疗洗浴与娱乐健身占 32.32%,养殖占 2.55%,种植占 17.93%,工业利用占 0.44%,其他占 13.56%(图 5)。浅层地热能资源开发利用方式主要为供暖制冷。

3.1 地热发电

我国适于发电的地热资源主要分布在西南和东南沿海地区,总发电潜力 996 万千瓦。高温地热资源发电潜力为 846 万千瓦,中低温地热资源发电潜力为 150 万千瓦。目前,每年发电量可达 800 亿度,相当于我国 2015 年电力消耗的 1.5%。20 世纪 70 年代以来,我国先后在西藏羊八井、朗久、那曲建设商业性地热发电站,总装机容量 28.18 MW。其中羊八井地热热电站装机容量 25.18 MW,利用每年 $1.095 \times 10^7 \text{ m}^3$ 流量、温度 130~170℃的水汽,其 2005 年、2006 年、2007 年和 2008 年的发电量分别为 1.154、1.261、1.158 和 1.436 亿 kWh,屡创历史最高记录,羊八井电厂到 2014 年累计发电量 31.1 亿 kWh,并为拉萨市提供大量电力资源,曾占拉萨电网全年供电量的 40%,冬季超过 60%。

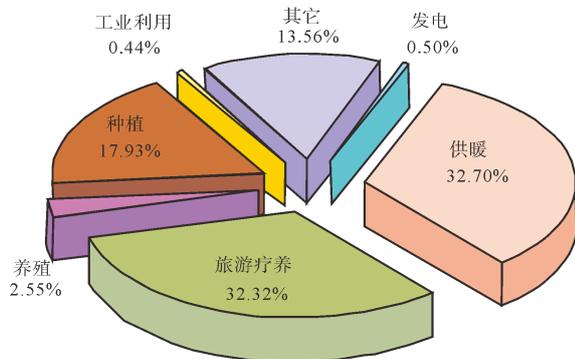


图 5 水热型地热开发利用方式
Fig. 5 Exploitation and utilization methods of geothermal resources of hydrothermal type

1970 年广东丰顺建成第一座地热试验电站,机组功率 0.01 万 kW,随后在河北后郝窑、广东邓屋、湖南灰汤、江西遂川、广西象州、山东招远等地建立了地热试验电站,单机容量 50~300 kW,总装机容量 1.55 MW。而 70 年代后期,我国的中低温地热发电厂中有 5 个陆续关停,虽然技术上并未出现较大障碍,但经济效益不佳是导致关停的主要原因;邓屋电厂和灰汤电厂直到 2008 年,才因机组老化而停止运行。现仅剩广东丰顺 300 kW 的一个地热试验电站仍在运行。

3.2 地热直接利用

我国是一个以中低温地热资源为主的国家,近 10 年来地热直接利用均以每年 10%速率增长,目前以直接利用设备装机容量的产量居世界之首,多用于供暖制冷、工业、种植养殖、旅游疗养等方面。

建筑物供暖是地热资源利用的主要方式。目前,利用水热型地热资源供暖面积 8 875 万 m^2 ,利用浅层地热能供暖面积 4.3 亿 m^2 。浅层地热能资源主要用于供暖制冷。我国浅层地热能资源开发利用起步较晚,热泵技术的研究始于 20 世纪 80 年代。90 年代中期在北京、宁波等地实施了第一批地源热泵工程应用项目。进入 21 世纪后,地源热泵技术形成了产、学、研结合利用浅层地温的研究方法。2000 年,我国地源热泵的工程应用面积达 10 万 m^2 ,2004 年应用面积达 767 万 m^2 ,至 2009 年沈阳市供暖面积达 5 462 万 m^2 ,北京 2 100 万 m^2 ,全国总利用面积 1.007 亿 m^2 ,相当于热功率 5 210 MWt,中国在世界 43 个应用国家中跃居第二。2015 年底,全国地源热泵总利用面积达 4.3 亿 m^2 ,其利用浅层地热能的装机容量已超过 12.85 GWt,2010 年以来的平均年累进增长率约 28%,远高于世界增长速度。我国地源热泵所利用的浅层地热资源量已超过常规地热,成为地热直接利用的最大部分(58%),在我国“十二五”和四部委《指导意见》所指定的 5 亿 m^2 地热供暖面积中,地源热泵的贡献将超过 80%。

利用地热进行旅游疗养几乎遍及全国各省(区、市)。在已经开发利用的地热田中,全部或部分用于洗浴的估计占热田总数的 60%以上。全国现有公共温泉浴池和温泉游泳池 1 600 处。利用地热进行水产养殖,北京、天津、福建、广东等地起步较早,现已遍及 20 多个省(区、市)的 47 个地热田,建有养殖场约 300 处,鱼池面积 550 万 m^2 。将地热能用于水产养殖的方式在西北地区最多,占 33%,华南占 26%,华东占 19%,华中占 17%,西南占 3%,华北占 2%。

4 地热资源开发利用的经济环境效益分析

地热资源是清洁稳定安全高效的能源,节能效果明显。在现有技术条件下,每年可节煤 10 亿吨,其中 336 个地级以上城市浅层地热能资源高效利用每年可节煤 2.5 亿吨;地下热水资源高效利用每年可节煤 7.5 亿吨。地热资源减排效果显著,可在减少温室气体排放中发挥重要作用。每年可减少 CO₂ 排放 24 亿吨,其中浅层地热能利用每年可减少 CO₂ 排放 6 亿吨,地下热水资源利用每年可减少 CO₂ 排放 18 亿吨,约占 2014 年我国 CO₂ 排放总量的 30%。目前,我国每年已开发地热资源量折合标准煤 0.21 亿吨,每年减少二氧化碳排放 0.5 亿吨。如河北雄县利用地热供暖满足了县城 90% 以上的供热需求,年替代标准煤 9 万吨,减排 CO₂ 22.5 万吨,创建了地热利用的“雄县模式”。

5 结论

(1)我国地热资源分布广泛,资源种类繁多,分布具有明显的规律性和地带性,但受构造、岩浆活动、地层岩性、水文地质条件等因素的控制总体分布不均匀。我国有高温地热资源($\geq 150^{\circ}\text{C}$),但以中温地热资源($90\sim 150^{\circ}\text{C}$)和低温地热资源($< 90^{\circ}\text{C}$)为主。其中,高温地热资源主要分布在藏南、滇西、川西和台湾地区;中低温地热资源主要分布于大型沉积盆地和山地的断裂带上,分布在山地的断裂带上的地热一般规模较小,分布在盆地特别是大型沉积盆地的地热资源储集条件好、储层多、厚度大、分布广,热储温度随深度增加,地热资源储量,是地热资源开发潜力最大的地区。

(2)我国地热资源量相对较为丰富,出露温泉 2 334 处,地热开采井 5 818 眼。水热型地热资源量折合标准煤 12 500 亿吨,每年可开采量折合标准煤 18.65 亿吨,相当于我国 2015 年煤炭消耗的 50%,西南地区高温地热资源发电潜力为 712 万千瓦,占全国高温地热资源发电潜力的 84.1%,充分利用高温地热资源优势,推进西南地区高温地热发电;336 个地级以上城市浅层地热能资源每年可开采量折合标准煤 7 亿吨,相当于我国 2015 年煤炭消耗的 19%;干热岩远景资源量折合标准煤 856 万亿吨,潜力巨大,开发前景广阔。

(3)我国开发利用地热与温泉已有 5 000 多年的悠久历史,是世界上利用地热资源较早的国家之一。目前我国地热资源每年利用量折合标准煤 0.21 亿吨,其中水热型地热资源利用量折合标准煤 415 万吨,开采率仅为 0.2%,浅层地热能利用量折合标准煤 1 600 万吨,开采率仅为 2.3%,地热资源

开发利用潜力巨大。

(4)地热资源是清洁稳定安全高效的能源,节能效果明显。在现有技术条件下,每年可节煤 10 亿吨,其中 336 个地级以上城市浅层地热能资源高效利用每年可节煤 2.5 亿吨;地下热水资源高效利用每年可节煤 7.5 亿吨。地热资源减排效果显著,可在减少温室气体排放中发挥重要作用。

致谢:感谢全国地热资源调查评价计划项目各省相关地勘单位及科研院所数据资料方面提供的帮助,并感谢中国地质科学院水文地质环境地质研究所陆川研究员、王婉丽助理研究员、朱喜助理研究员及其他同事在文章润色及图件方面的帮助。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41302189), and China Geological Survey (Nos. 12120113078100 and 1212011120064).

参考文献:

- 陈墨香,汪集旸,邓孝. 1994. 中国地热资源——形成特点和潜力评估[M]. 北京: 科学出版社.
- 陈墨香,汪集旸. 1994. 中国地热研究的回顾和展望[J]. 地球物理学报, 37(S1): 320-338.
- 多吉. 2003. 典型高温地热系统——羊八井热田基本特征[J]. 中国工程科学, 5(1): 42-47.
- 龚育龄,王良书,刘绍文,李成,韩用兵,李华,刘波,蔡进功. 2003. 济阳拗陷大地热流分布特征[J]. 中国科学(D 辑), 33(4): 384-391.
- 胡圣标,何丽娟,汪集旸. 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.
- 廖志杰,赵平. 1999. 滇藏地热带—地热资源和典型地热系统[M]. 北京: 科学出版社.
- 廖志杰. 1985. 台湾省地热开发简史[J]. 地质论评, 31(3): 285-288.
- 蔺文静,刘志明,马峰,刘春雷,王贵玲. 2012. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. 地球学报, 33(5): 807-811.
- 蔺文静,刘志明,王婉丽,王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 40(1): 312-321.
- 王贵玲,张发旺,刘志明. 2000. 国内外地热资源开发利用现状及前景分析[J]. 地球科学, (02): 134-139.
- 王良书,李成,刘绍文,李华,徐鸣洁,于大勇. 2005. 库车前陆盆地大地热流分布特征[J]. 石油勘探与开发, 32(4): 79-83.
- 中国地质科学院水文地质环境地质研究所. 2015a. 全国地热资源调查评价专题和综合研究成果报告[R]. 河北正定: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所.
- 中国地质科学院水文地质环境地质研究所. 2015b. 全国地热资源现状调查评价与区划成果报告[R]. 河北正定: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所.

References:

- CHEN Mo-xiang, WANG Ji-yang, DENG Xiao. 1994. China's Geothermal Resources, the Characteristics and Potential Evaluation[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- CHEN Mo-xiang, WANG Ji-yang. 1994. Review and prospect on geothermal studies in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 37(S1): 320-338(in Chinese and with English abstract).
- DUCHANE D V. 1996. Geothermal Energy from hot dry rock: A Renewable Energy Technology Moving Towards Practical Implementation[J]. Renewable Energy, 9(1-4): 1246-1249.
- DUO Ji. 2003. Typical High Temperature Geothermal Systems, Yangbajing Thermal Field Basic Characteristics[J]. China Engineering Science, (01): 42-47(in Chinese and with English abstract).
- GONG Yu-ling, WANG Liang-shu, LIU Shao-wen, LI Cheng, HAN Yong-bing, LI Hua, LIU Bo, CAI Jin-gong. 2003. Terrestrial heat flow distribution in Jiyang Depression[J]. Science in China, (Series D: Earth Sciences), 33(4): 384-391(in Chinese).
- HU Sheng-biao, HE Li-juan, WANG Ji-yang. 2001. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 44(5): 611-626(in Chinese with English abstract).
- Institute of Hydrogeology and Environmental Geology Chinese Academy of Geological Sciences. 2015b. National Geothermal Resources Investigation and Assessment and Regional Outcome Report[R]. Zhengding, Hebei: Institute of Hydrogeology and Environmental Geology Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- Institute of Hydrogeology and Environmental Geology Chinese Academy of Geological Sciences. 2015a. National Geothermal Resources Investigation and Assessment Program and Research Outcome Report[R]. Zhengding, Hebei: Institute of Hydrogeology and Environmental Geology Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- LIAO Zhi-jie, ZHAO Ping. 1999. The Sichuan-Tibet tropical Belt, Geothermal Resources and Typical Geothermal System[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- LIAO Zhi-jie. 1985. Taiwan province geothermal development history[J]. Geological Review, 31(3): 285-288(in Chinese).
- LIN Wen-jing, LIU Zhi-ming, MA Feng, LIU Chun-lei, WANG Gui-ling. 2012. Estimates of China's Land Area Hot Dry Rock Resource Potential[J]. Journal of Earth, 33(5): 807-811(in Chinese with English abstract).
- LIN Wen-jing, LIU Zhi-ming, WANG Wan-li, WANG Gui-ling. 2013. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 40(1): 312-321(in Chinese with English abstract).
- LUND J W, BOYD T L. 2016. Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review[J]. Geothermics, 60: 66-93.
- MUFFLER P, CATALDI R. 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources[J]. Geothermics, 7(2-4): 53-89.
- WANG Gui-ling, ZHANG Fa-wang, LIU Zhi-ming. 2000. Development and Utilization of Geothermal Resources at Home and Abroad Present Situation and Prospect Analysis[J]. Earth Science, (2): 134-139(in Chinese with English abstract).
- WANG Liang-shu, LI Cheng, LIU Shao-wen, LI Hua, XUE Min-jie, YU Da-yong, JIA Cheng-zao, WEI Guo-qi. 2005. Terrestrial heat flow distribution in Kuqa foreland basin, Tarim, NW China[J]. Petroleum exploration and development, 32(4): 79-83(in Chinese with English abstract).