

中国地热资源及其潜力评估

蔺文静 刘志明 王婉丽 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:笔者在阐述中国地热资源特征的基础上,针对中国不同类型的地热资源,采用不同的计算方法对浅层地热能、水热型地热资源和干热岩地热资源进行了潜力评估。结果表明,中国 287 个地级以上重点城市浅层地热能 2.78×10²⁰ J, 每年浅层地热能可利用资源量为 2.89×10¹² kWh; 中国主要平原(盆地)沉积盆地地热资源储量为 2.5×10²² J, 可开采资源量为 7.5×10²¹ J; 中国温泉区放热量共计 1.32×10¹⁷ J, 可采资源为 6.6×10¹⁷ J/年; 中国大陆 3.0~5.0 km 深处干热岩资源总计为 2.5×10²⁵ J, 是中国目前年度能源消耗总量的 2.6×10⁵ 倍。

关键词:浅层地热能; 沉积盆地型地热资源; 隆起山地型地热资源; 干热岩

中图分类号: P314.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)01-0312-10

地热属于清洁的可再生能源, 中国是世界上地热资源储量较大的国家之一, 尤其是中低温地热资源, 开发利用潜力巨大。建国以来, 中国有重点地开展了多次地热资源勘探开发工作, 先后在 20 多个省区开展了地热资源普查和考察^[1], 并对滇藏高温地热带^[2-4]、东南沿海地热带^[5]、华北盆地^[6] 等中低温地热资源重点进行了分析研究, 先后完成了全国温泉资源分布图^[7]、大地热流图、地温梯度图等全国性的一系列地热资源基础性图件, 建立了中国第一个示范性的地热数据库^[8]。地热资源的开发利用也蓬勃兴起, 尤其是 20 世纪 90 年代以来, 在市场需求推动下, 中国地热资源开发利用得到了进一步蓬勃发展, 地热资源被广泛利用于发电、温室种植、水产养殖、疗养-洗浴和取暖等各个方面, 地热井数量急增, 勘探深度越来越大。同时, 矿山地热^[9]、石油地热^[10]、海洋地热等领域的研究也相继开展, 并取得丰硕的成果。据不完全统计, 中国目前有温泉 2 300 多处, 施工地热钻孔近 4 000 眼。作为清洁能源的地热资源开发, 为缓解中国能源紧张的局面、保护环境起到了应有的作用。但是, 由于国家对地热资源勘探等研究

经费减少, 区域性地热资源相关调查研究等几乎处于停滞状态, 地热资源家底不清, 严重影响地热资源勘查开发规划的制定和地热产业发展。本文在系统分析中国地热资源分布及特征的基础上, 依据不同的开发利用方向, 分别对中国浅层地热能资源、水热型热资源以及干热岩资源进行了潜力估算, 从而为制定中国地热资源勘查开发规划、推进地热资源科学开发利用提供科学依据。

1 地热资源特征

1.1 地热资源分类

地热资源一般按热储介质、构造成因、水热传输方式可划分成不同的类型。按热储介质, 可分为孔隙型地热资源、裂隙型地热资源和岩溶裂隙型地热资源; 按构造成因, 可分为沉积盆地型地热资源和隆起山地型地热资源; 按热传输方式, 可分为传导型地热资源和对流型地热资源。地热资源按温度分级, 可分为高温地热资源(温度 ≥ 150℃)、中温地热资源(温度 < 150℃ 且 ≥ 90℃) 和低温地热资源(温度 < 90℃) 三级。按构造成因, 可将中国的地热资源分为沉积盆

收稿日期: 2012-10-09; 改回日期: 2012-11-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划“863”项目(2012AA052802)和中国地质调查局地质调查项目(1212011120064)共同资助。

作者简介: 蔺文静, 男, 1978 年生, 博士, 副研究员, 主要从事地下水及地热资源调查评价相关研究; E-mail: lwenjing@msn.com。

通讯作者: 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。

地形地热资源和隆起山地型地热资源两大类型。另外,按热源和构造等综合条件,又可将隆起山地型地热资源细划为火山型、非火山型和深循型3类;按盆地的构造性质,又可将盆地型地热资源细分为断陷盆地型和坳陷盆地型两大类^[1]。

笔者在综合分析已有地热资源分类的基础上,主要考虑热储赋存特征、热流体传输方式、温度范围以及开发利用方式等因素,将中国地热资源分为浅层地热能、水热型地热资源和干热岩三大类型,其中,水热型地热资源又分成沉积盆地地热资源与隆起山地地热资源两种类型。

1.2 中国地热特征

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。根据收集的全国大地热流值(921个),中国大地热流分布很不均匀,总体上藏南地区、台西盆地以及厦门地区永泰与南靖盆地最高,平均值为100~150 mW/m²,个别地区高达304 mW/m²;其次为藏北羊湖盆地、羌湖盆地,中部鄂尔多斯盆地、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尔盆地,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。

中国沉积盆地平均地温梯度在1.5~4.0℃/m,平均值约为3.2℃/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,其值在3.0~4.0℃/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℃/m,其余低于2.0℃/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。

1.3 地热资源分布

中国地热资源分布具有明显的规律性和地带性。水热型地热资源主要分布于中国的东部地区、东南沿海、台湾、环鄂尔多斯断陷盆地、藏南、川西和滇

西等地区。其中,沉积盆地传导型地热资源主要分布于中国的东部地区华北盆地、河淮盆地、松辽平原、苏北盆地、江汉平原以及西部环鄂尔多斯断陷盆地、西宁盆地等地区,均为中低温地热资源;隆起山地地热资源主要分布于中国的东南沿海、台湾、藏南、川西、滇西和胶辽半岛等地区,其中,高温地热资源主要分布于藏南、滇西、川西和台湾等地区,其余地区为中低温地热资源。

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。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,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水热系统必要的地质构造条件和热背景,是中国未来干热岩开发的主要靶区^[19]。

浅层地热能指地球浅表层数百米内的土壤砂石和地下水中所蕴藏的低温热能,其能量来源于太阳辐射和地球梯度增温,主要采用热泵系统进行开发利用,是一种可再生能源,与水热型地热资源相比,浅层地热能分布广泛,在目前经济技术条件下,广大寒冷地区、夏热冬冷、夏热冬暖地区均可开发利用。

2 地热资源评价方法

2.1 浅层地热资源评价方法

采用《浅层地热能勘查评价规范》(DZ/T 0225-2009)所采用体积法计算热容量,再根据计算区可利用温度差评价该地区的浅层地温潜力资源,分饱水带和包气带计算。

1) 热容计算

(1) 包气带中,浅层地热容量计算公式:

$$Q_R = Q_S + Q_W + Q_A$$

$$Q_S = \rho_s C_s (1 - \Phi) M d_1$$

$$Q_W = \rho_w C_w \omega M d_1$$

$$Q_A = \rho_A C_A (\Phi - \omega) M d_1$$

其中: Q_R —浅层地热容量, kJ/℃; Q_S —岩土体的热容量, kJ/℃; Q_W —岩土体中所含水的热容量, kJ/℃; Q_A —岩土体中空气的热容量, kJ/℃; ρ_s —岩土体密度, kg/m³; C_s —岩土骨架比热容, kJ/(kg·℃); Φ —岩土体孔隙率; M —计算面积, m²; d_1 —包气带

厚度, m; ρ_w —水密度, kg/m^3 ; C_w —水比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; ω —岩土体的含水量; ρ_A —空气密度, kg/m^3 ; C_A —空气比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

(2) 饱水带中, 浅层地热容量计算:

$$Q_R = Q_S + Q_W$$

$$Q_W = \rho_w C_w \omega M d_2$$

$$Q_S = \rho_s C_s (1 - \Phi) M d_2$$

其中: d_2 为潜水面至计算下限深度。

2) 资源量计算

浅层地热资源量为热储层热容与评估区可利用温度之积, 可利用资源应考虑城市建筑面积系数、浅层地热能可采系数与可利用系数。计算公式如下:

$$Q = Q_R \times \Delta T \times \alpha \times \beta \times \gamma$$

其中: Q 为浅层地温可利用资源总量, kWh/a ; Q_R 浅层地热容量, $\text{kJ}/^\circ\text{C}$; ΔT 为可利用温度差, $^\circ\text{C}$; α 为城市面积系数; β 为浅层地热能可采系数; γ 为浅层地热能开发利用系数。

2.2 水热型地热资源评价方法

(1) 对流型地热资源

采用《地热资源评价方法》(DZ 40~85) 所采取的放热量法计算对流型地热资源量, 主要计算全国温泉的放热量。

$$Q = \alpha \times q_v \times c \times \rho \times (t_1 - t_0)$$

又 $c \times \rho \approx 1$, 则

$$Q = \alpha \times q_v \times (t_1 - t_0)$$

式中: Q —温泉放热量资源潜力, kcal/s ; α —为温泉利用效率; q_v —温泉的流量, L/s ; c —温泉水的比热, $\text{kcal}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$; ρ —温泉水的密度, kg/L ; t_1 —温泉水的温度, $^\circ\text{C}$; t_0 —非热异常区恒温层温度, $^\circ\text{C}$ 。

(2) 传导型地热资源

传导型地热资源主要采取体积法估算, 具体有两种估算方法。

第一种估算方法计算公式为:

$$Q = A \cdot D (T - T_{ref}) (\rho \cdot C)$$

式中, Q —地热资源; A —计算面积; D —计算热储层平均厚度; T —计算热储层平均温度; T_{ref} —参考温度; $(\rho \cdot C)$ —(岩石+水)的体积比热容。

第二种估算方法计算公式为:

$$Q = V (T - T_{ref}) (\rho \cdot C)$$

式中, Q —地热资源; V —潜山体积, 为潜山区面

积与平均厚度之积。

华北平原的古潜山碳酸岩地热资源计算采用的就是这种方法。

2.4 干热岩资源评价方法

采取体积法估算中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; ρ —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。

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, 在 3 km 范围内, 岩层温度一般不超过 150°C , 也是目前水热型地热系统开发利用的主要深度, 故纳入水热型地热资源计算范围。

目前的钻孔深度一般小于 5000 m, 对于所计算深度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^[20]:

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

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。参数数据来源及获取方法如下:

(1) 大地热流值

根据目前公开出版的中国大陆地区 921 个热流数据, 编制了中国大地热流图, 以该图数据为基础进行干热岩背景资源估算。

(2) 岩石热导率

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, 本研究主要开展 3 000 m 以下的干热岩资源估算, 根据相关研究其岩石热导率取定值为 $2.6 \text{ w}/\text{Mk}$ ^[21]。

(3) 岩石生热率

中国主要沉积盆地地壳平均生热率介于 0.6~1.2, 为方便计算, 本次统一取为 1.0。

(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。

(5)地表温度

以各地年平均气温近似代替地表温度。

一般情况下,为了简单计算,常用下式进行计算^[9]:

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

中国大陆地区 3~10 km 不同深度温度计算结

果见图 1。

3 地热资源估算结果

3.1 重点城市浅层地热资源估算

3.1.1 参数选取

(1)评价深度

根据《浅层地热能勘查评价规范》(DZ/T 0225-

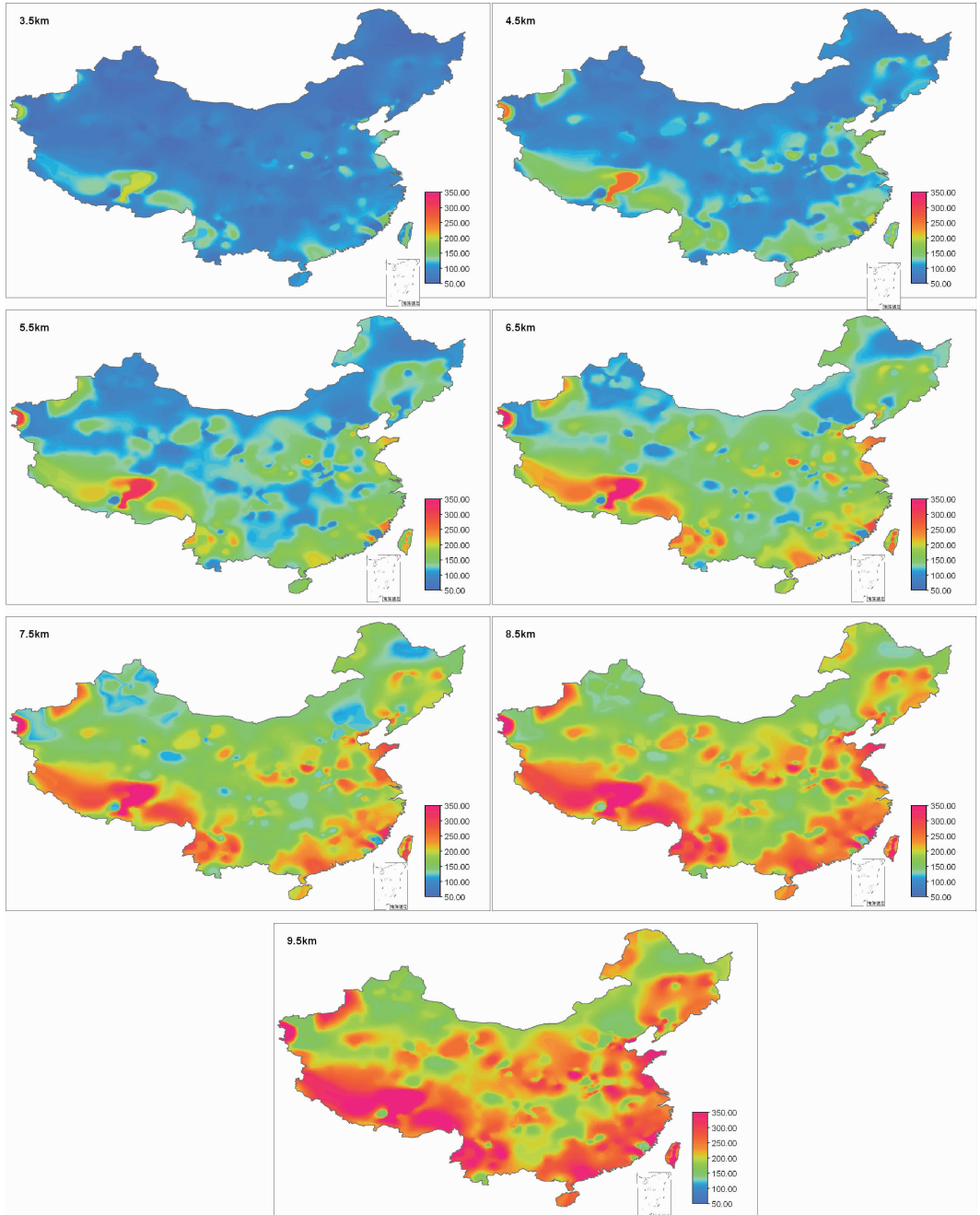


图 1 中国陆区 3.5~9.5 km 深温度分布图(°C)

Fig.1 Average temperatures at different depths from 3.5km to 9.5km

2009)对浅层地热能定义,确定评价深度范围为 200 m,涉及到包气带、饱水带以及基岩等介质。在对中国每个地级市城市进行评价时,这 3 种介质所占的比率均不相同,根据各地级市 200 m 地质基础数据确定其比率。

(2)热储介质

通过对中国全部地级市 200 m 以浅地层岩性资料概化分析,将包气带松散层岩性概化为砂性土和砂砾石,基岩岩性概化为砂岩、泥岩、花岗岩以及石灰岩。在包气带中需要考虑土壤水、空气热储能力,在基岩中则考虑孔隙、裂隙水热储能量。

(3)计算面积

评价面积为中国各地级市 2012 年中心城市规划面积,总面积为 58 950.5 km²。

(4)参数选取

评价中涉及到的物理参数(表 1)主要有水、砂性土、砂砾石、砂岩、泥岩、花岗岩以及石灰岩的密度与比热,包气带中砂性土与砂砾石土壤体含水量、孔隙率,饱水带中介质的孔隙率或裂隙率,评价区可利用温度差,潜水位埋深等。根据评价区所出的气候条件分为华北、东北、华东、华南、西南、华中与西北地区,其可利用温差见表 2。

可利用的浅层地热能计算需要考虑到城市建筑面积系数,浅层地热能可采系数,利用效率。城市建筑面积系数为城市建成区面积与城市规划面积之比;浅层地热能可采系数为单位面积浅层地热能可利用量与地层储存地温能之比;利用效率为浅层地源热泵系统从地下提取的有效能量与总能之比,与

热量传输系统能量损耗以及机组运行过程中地热能损失有关,根据实际调研与专家意见分别采取 25%,30%,50%。

3.1.2 评价结果

评估结果显示,中国 287 个地级以上城市 200 m 以浅总浅层地热能资源量为 7.71×10^{13} kWh/a,相当于 94.86 亿 t 标准煤完全燃烧所释放的能量,可利用资源总量为 2.89×10^{12} kWh(3.56 亿 t 标准煤)。31 个省(市、区)浅层地热资源量估算见表 3。

3.2 水热型地热资源估算

(1)沉积盆地地热资源

采用前面所述的沉积盆地地热资源估算方法,对中国 12 个主要平原盆地内沉积盆地型地热资源进行了估算,结果显示,全国主要平原(盆地)地热资源量为 24964.4×10^{18} J,折合标准煤 $8 531.9 \times 10^8$ t(表 4)。

从表 4 可以看出,四川盆地地热资源量所占总地热能资源量的比例最高,为 31.2%;其次是华北平原,所占比例为 21.7%;再次是渭河—运城盆地,所占比例为 14.6%;鄂尔多斯盆地所占比例为 10.2%;河淮盆地所占比例为 8.0%。其余的平原盆地所占比例均小于 5%。所占比例最小的是下辽河盆地,仅为 0.1%。

(2)对流型地热资源

采用前面所述的对流型地热资源估算方法,对全国目前所掌握的所有温泉放热量进行了统计及计算,结果显示,中国温泉放热量共计 1.32×10^{17} J,相当于燃烧 451.83 万 t 标准煤产生的热量。取可采系数 5.0,则中国对流型地热资源的可采资源量为 6.6×10^{17} J/年,折合标准煤 2 259.1 万 t。其中各个省

表 1 浅层地热能评价物理参数一览

Table 1 Geo-physical parameters for different lithologies

项目	水	空气	砂性土	砂砾石	砂岩	泥岩	花岗岩	石灰岩
比热 kcal / kg · °C	1.0	0.24	0.33	0.19	0.21	0.35	0.19	0.22
密度 kg/m ³	1000	1.29	1780	1650	2600	2500	2700	2700
孔隙率			0.42	0.33	0.12	0.012	0.014	0.115

表 2 中国不同地区浅层地热能可利用温差一览表

Table 2 Utilizable temperature differences of shallow geothermal energy in different regions

地区	华北	东北	华东	华南	西南	华中	西北
可利用温差/°C	8	6	9	11	9	10	7

表 3 中国浅层地热资源量估算及效益分析一览表
Table 3 Benefit analysis and assessment of shallow geothermal resources of China

编号	省(市、区)	中心城区规划 面积/km ²	总资源量		可利用资源量与效益		
			10 ¹² kWh	标准煤 亿吨	10 ¹⁰ kWh	标准煤 亿 t	减排 二氧化碳量/亿 t
1	北京	2580	3.01	3.70	11.3	0.14	0.36
2	天津	1450	1.75	2.15	6.56	0.08	0.21
3	上海	1700	2.30	2.83	8.64	0.11	0.28
4	重庆	1000	1.54	1.89	5.79	0.07	0.19
5	河北	1820.00	2.32	2.85	8.70	0.11	0.28
6	山西	1208.31	1.67	2.05	6.27	0.08	0.20
7	内蒙	1586.26	1.80	2.21	6.77	0.08	0.22
8	辽宁	3566.83	3.30	4.06	12.4	0.15	0.40
9	吉林	2070.00	1.84	2.26	6.91	0.09	0.22
10	黑龙江	3318.00	3.31	4.07	12.4	0.15	0.40
11	江苏	4080.00	7.13	8.77	26.8	0.33	0.86
12	浙江	2739.00	4.57	5.62	17.1	0.21	0.55
13	安徽	2560.06	3.83	4.71	14.4	0.18	0.46
14	福建	2450.00	3.49	4.29	13.1	0.16	0.42
15	新疆	450.00	0.486	0.60	1.82	0.02	0.06
16	西藏	295	0.330	0.41	1.24	0.02	0.04
17	青海	128.4	0.160	0.20	0.600	0.01	0.02
18	宁夏	810.00	0.974	1.20	3.65	0.04	0.12
19	甘肃	1266.21	1.21	1.49	4.55	0.06	0.15
20	陕西	2087.00	2.24	2.76	8.42	0.10	0.27
21	云南	730.00	0.972	1.20	3.65	0.04	0.12
22	贵州	482.00	0.687	0.85	2.58	0.03	0.08
23	四川	2080.00	3.10	3.81	11.6	0.14	0.37
24	海南	800.00	0.978	1.20	3.67	0.05	0.12
25	广西	1220.00	1.58	1.94	5.91	0.07	0.19
26	广东	5230.00	8.11	9.98	30.4	0.37	0.98
27	湖南	1710.00	2.21	2.72	8.29	0.10	0.27
28	湖北	2685.00	3.92	4.82	14.7	0.18	0.47
29	河南	2668.00	3.45	4.24	12.9	0.16	0.42
30	山东	2964.93	3.47	4.27	13.0	0.16	0.42
31	江西	1215.50	1.36	1.67	5.09	0.06	0.16
	总计	58950.50	77.1	94.86	289	3.56	9.32

表 4 中国主要平原(盆地)地热资源量估算

Table 4 Geothermal resources assessment of main planes (basins) of China

平原(盆地)	面积/km ²	计算热储岩性	热能/10 ¹⁸ J	折合标准煤/10 ⁸ t
华北平原	90000	明化镇组、馆陶组、 古潜山碳酸岩	5420.5	1852.5
河淮盆地	68050	新近系	1984.7	678.3
苏北盆地	31750	新近系	495.0	169.2
下辽河盆地	3385	新近系	31.9	10.9
渭河—运城盆地	24625	新近系、第四系	3652.1	1248.2
松辽盆地	144400	白垩系中、上统	992.4	339.2
鄂尔多斯盆地	159600	下白垩系、侏罗系、 三叠系、二叠系	2548.1	870.8
四川盆地	200000	侏罗系、三叠系、二叠系	7783.8	2660.2
银川平原	2515	古近—新近系、奥陶系	409.8	140.0
西宁盆地	834	古近—新近系	238.7	81.6
江汉盆地	28000	新近系	241.5	82.5
河套平原	28000	新近系	1165.9	398.5
合计	781159		24964.4	8531.9

表 5 中国温泉放热量计算结果

Table 5 Geothermal resources of hot springs of China

省名	放热量(亿千卡/年)	折合标准煤(万吨/年)	温泉数量(个)
北京	153.30	0.22	3
河北	1338.77	1.91	25
山西	12293.68	17.56	7
内蒙古	1022.07	1.46	4
辽宁	2427.19	3.47	36
吉林	1681.91	2.40	5
山东	1125.25	1.61	17
江苏	2003.72	2.86	5
安徽	1488.77	2.13	17
浙江	36.22	0.05	4
江西	3522.50	5.03	80
福建	6988.25	9.98	171
台湾	10395.42	14.85	28
河南	2531.88	3.62	23
湖北	4633.06	6.62	49
湖南	5584.37	7.98	108
广东	12314.19	17.59	302
海南	1488.19	2.13	33
广西	1406.47	2.01	49
陕西	5600.27	8.00	14
宁夏	133.69	0.19	2
甘肃	366.28	0.52	8
青海	5511.37	7.87	43
新疆	2415.83	3.45	54
四川	22840.42	32.63	241
重庆	3322.70	4.75	43
贵州	3554.44	5.08	63
云南	88356.30	126.22	820
西藏	111741.94	159.63	308
合计	316278.48	451.83	2562

(市)的温泉放热量计算详见表 5。

3.3 干热岩资源储量估算结果

根据前面所述的干热岩资源估算方法及相关参数取值,中国大陆 3.0~10.0 km 深处干热岩资源总计为 2.52×10^{25} J (美国的估算结果为 1.67×10^{25} J,不

表 6 中国陆区 3.0~5.0km 深处干热岩资源估算结果

Table 6 The assessment of the hot dry rock resources in the depth of 3.0~5.0km in China's mainland

序号	计算层位深度/km	热能/10 ²⁵ J	换算成标准煤/10 ⁵ 亿 t
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
	3.0~10.0 km	2.52	85.6

包括黄石公园地区^[16],合 85.6×10^5 亿 t 标准煤,是中国目前年度能源消耗总量的 2.6×10^5 倍 (2010 年中国能源消费总量 32.5 亿 t 标准煤)(表 6)。

图 2 和图 3 分别为中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,从中可以看出在位于深度 3.5~7.5 km,温度介于 150℃到 250℃的干热岩储量巨大,约为 6.3×10^6 EJ,即使仅仅其 2%的储量得到开发,也将获得 126 000 EJ 的热能,相当于 2010 年中国能源消费总量的 1 320 倍。

4 结 论

(1)中国重点城市浅层地热能资源量为 $2.78 \times$

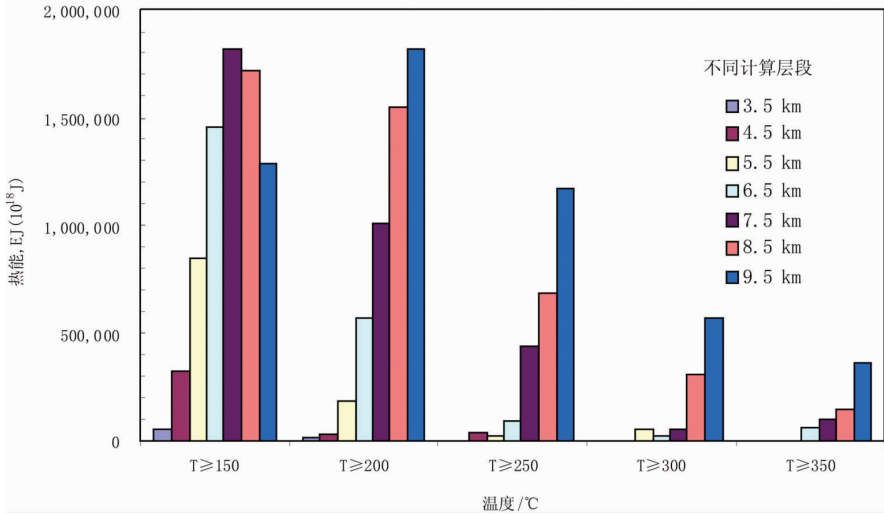


图 2 不同深度给定温度范围干热岩热能资源储量

Fig.3 Hot dry rock resources in the specified temperature range in different depths

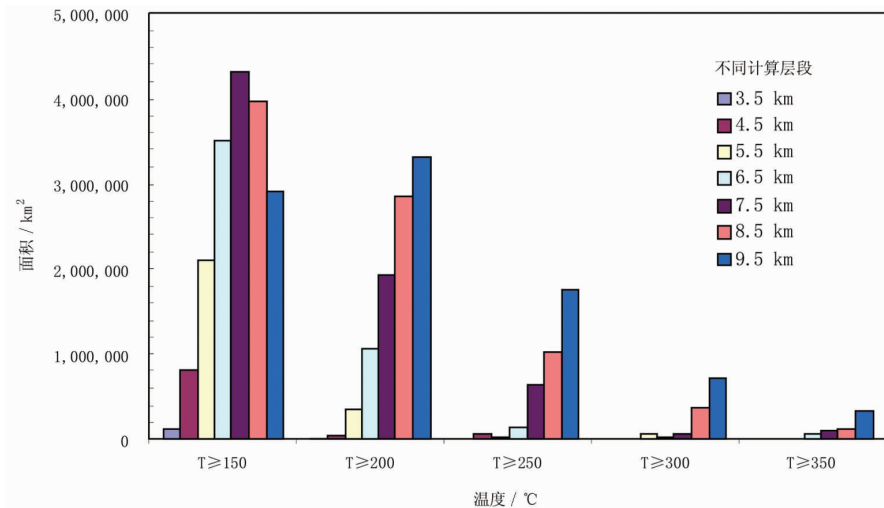


图 3 不同深度给定温度下限区域的面积

Fig.3 Area of the region of the specified temperature lower limit in different depths

10^{20} J, 折合标准煤 94.86 亿 t, 如果城市建筑面积系数取 0.25, 浅层地热能可采系数取 0.3 以及利用效率取 0.5, 则每年浅层地热能可利用资源量为 2.89×10^{12} kWh (3.56 亿吨标准煤), 按浅层地热能开发利用能耗比 30% 计算, 则每年可节能 2.02×10^{12} kWh/a, 折算标准煤 2.48 亿 t, 减少二氧化碳排放 6.52 亿 t。

(2) 中国主要平原 (盆地) 沉积盆地地热资源储量为 2.5×10^{22} J, 折合标准煤 8531.9 亿 t; 以回采系数 0.3 计算, 可开采资源量为 7.5×10^{21} J, 折合标准煤 2559.6 亿 t; 每年可开采的资源量为 1.8×10^{19} J, 相当于 6.2 亿 t 标准煤, 每年可减少 CO₂ 排放 14.0 亿 t。

(3) 中国温泉区放热量共计 1.32×10^{17} J, 折合标

准煤 452 万 t。取可采系数 5.0, 则温泉区隆起山地地热能可采资源为 6.6×10^{17} J/年, 折合标准煤 2260 万 t, 每年减少 CO₂ 排放 5930 万 t。

(4) 中国大陆 3.0~5.0 km 深处干热岩资源总计为 2.5×10^{25} J, 折合标准煤 8.6×10^6 亿 t, 是中国目前年度能源消耗总量的 2.6×10^5 倍。

参考文献 (References):

[1] 陈墨香, 汪集旻. 中国地热研究的回顾和展望 [J]. 地球物理学报, 1994, 37(增刊 1): 320-338.
Chen Moxiang, Wang Jiyang. Review and prospect on geothermal studies in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(Supp.

- l):320-338(in Chinese with English abstract).
- [2] 佟伟, 章铭陶, 张知非, 等. 西藏地热 [M]. 北京: 科学出版社, 1981:1-118.
Tong Wei, Zhang Mingtao, Zhang Zhifei, et al. Geothermal Resources in Tibet [M]. Beijing: Science Press, 1981:1-118(in Chinese).
- [3] 佟伟, 章铭陶. 腾冲地热[M]. 北京: 科学出版社, 1989:1-247.
Tong Wei, Zhang Mingtao. Geothermal Resources in Tengchong [M]. Beijing: Science Press, 1989:1-247 (in Chinese with English abstract).
- [4] 廖志杰, 赵平. 滇藏地热带——地热资源和典型地热系统[M]. 北京: 科学出版社, 1999:1-146.
Liao Zhijie, Zhao Ping. Geothermal Belt of Yunnan and Tibet: Geothermal Resources and Typical Geothermal Systems [M]. Beijing: Science Press, 1999:1-146(in Chinese with English abstract).
- [5] 汪集旻, 熊亮萍, 庞忠和. 中地温对流型地热系统[M]. 北京: 科学出版社, 1993:1-233.
Wang Jiyang, Xiong Liangping, Pang Zhonghe. Low-medium temperature geothermal system of convective type [M]. Beijing: Science Press, 1993:1-233(in Chinese with English abstract).
- [6] 陈墨香. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社, 1988:1-214.
Chen Moxiang. Geothermal resources in North China [M]. Beijing: Science Press, 1988:1-214(in Chinese).
- [7] 黄尚瑶. 中国温泉资源——1:600 万中国温泉分布图说明书[M]. 北京: 中国地图出版社, 1993:2-12.
Huang Shangyao. Hot Spring Resources in China: Explanation of the Distribution Map of Hot Springs in China (1:6000000) [M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1993:2-12 (in Chinese with English abstract).
- [8] 熊亮萍, 林锦璇. 地热资源数据库系统 [M]. 北京: 地震出版社, 1993:1-165.
Xiong Liangping, Lin Jinxuan. Geothermal Resources Database of China [M]. Beijing: Seismological Press, 1993:1-165(in Chinese).
- [9] 余恒昌, 邓孝, 陈碧琬. 矿山地热与热害治理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991:1-403.
Yu Hengchang, Deng Xiao, Chen Biwan. Mine Geothermal and Disasters Control [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1991:1-403(in Chinese).
- [10] 汪集安, 熊亮萍, 杨淑贞. 地热与石油 [M]. 北京: 科学出版社, 1985:1-78.
Wang Jian, Xiong Liangping, Yang Shuzhen. Geothermal and Petroleum [M]. Beijing: Science Press, 1985:1-78(in Chinese).
- [11] 陈墨香, 汪集旻. 中国地热资源——形成特点和潜力评估[M]. 北京: 科学出版社, 1994:1-39.
Chen Moxiang, Wang Jiyang. Geothermal Resources in China: Formation Characteristics and Potential Assessment [M]. Beijing: Sciences Press, 1994:1-39(in Chinese with English abstract).
- [12] 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. Compilation of heat flow data in the China continental area (2rd edit ion) [J]. Chinese Journal of Geophysics. 2001, 44 (5):611-626 (in Chinese with English abstract).
- [13] 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 Chuangqing, Tian Yuntao, et al. Borehole temperature logging and characteristics of subsurface temperature in the Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(4):1052-1060(in Chinese with English abstract).
- [14] 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. Borehole temperature logging and terrestrial heat flow distribution in Jianghan Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(1):317-323(in Chinese with English abstract).
- [15] 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. Terrestrial heat flow distribution in Kuqa foreland basin, Tarim, NW China [J]. Petroleum exploration and Development, 2005, 32 (4):79-83 (in Chinese with English abstract).
- [16] 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. Present-day geothermal regime in Tarim basin, northwest China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52 (11):2752-2762 (in Chinese with English abstract).
- [17] 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. Terrestrial heat flow distribution in Bohai basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(2):151-155(in Chinese with English abstract).
- [18] 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), 2003, 33(4):384-391.
Gong Yuling, Wang Liangshu, Liu Shaowen, et al. Terrestrial heat flow distribution in Jiyang Depression [J]. Science in China, (Series D: Earth Sciences), 2003, 33(4):384-391(in Chinese with English abstract).
- [19] 赵阳升, 万志军, 康建荣. 高温岩体地热开发导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2004:191-198.
Zhao Yangsheng, Wan Zhijun, Kang Jianrong. Introduction of Hot Dry Rock Geothermal Extraction [M]. Beijing: Science Press, 2004:191-198(in Chinese).
- [20] 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 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, 2004:26-29.
Qiu Nansheng, Hu Shengbiao, He Lijuan. Theory and Application of study on geothermal Regime of Sedimentary Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004:26-29.
- [21] Massachusetts Institute of Technology. The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century [R], 2006. 2-3-2-48.

The assessment of geothermal resources potential of China

LIN Wen-jing, LIU Zhi-ming, WANG Wan-li, WANG Gui-ling

(*Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, Hebei, China*)

Abstract: Based on expounding the characteristics of geothermal resources in China and taking into account the existence of different types of geothermal resources in China, the authors adopted different calculation methods to conduct the potential assessment of shallow geothermal resources, conductive geothermal resources, convective geothermal resources and hot dry rock resources. The results show that the shallow geothermal resources of key cities are 2.78×10^{20} J with the annual approved yield being 2.89×10^{12} kWh, the conductive geothermal resources of main planes (basins) reach 2.5×10^{22} J with the approved yield being 7.5×10^{21} J, the discharge energy of hot springs is 1.32×10^{17} J in total with the annual approved yield being 6.6×10^{17} J, and the hot dry rock resources of China in the depth 3.0–5.0 km come to 2.5×10^{25} J in total, and this amount is 2.6×10^5 times that the annual total consumption of energy resources at present.

Key words: shallow geothermal resources; conductive geothermal resources; convective geothermal resources; hot dry rock geothermal resources

About the first author: LIN Wen-jing, male, born in 1978, doctor, associate researcher, engages in groundwater and geothermal resources survey and evaluation. E-mail: lwenjing@msn.com.

About the corresponding author: WANG Gui-ling, born in 1964, senior researcher, supervisor of doctor candidates, engages in the study of hydrogeology, geothermal and environmental geology; E-mail: guilingw@163.com.