

• 特约稿 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201900026

粤港澳大湾区地热资源潜力评估

谢和平^{1,2,3}, 杨仲康², 邓建辉²

(1. 深圳大学 深地科学与绿色能源研究院, 广东 深圳 518060; 2. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 水利水电学院, 四川 成都 610065; 3. 深圳市清洁能源研究院, 广东 深圳 518060)

摘要:粤港澳大湾区是中国参与全球竞争的重要空间载体, 为平衡其区域经济发展对能源的需求与生态环境保护问题, 大力开发地热资源是一种重要的途径。作者从大地构造、地层岩性和地温场特征分析入手, 论证了大湾区赋存地热资源的可能性, 综合考虑深部地温、岩石热物理性质和大地热流值等要素, 通过建立网格单元对水热型和干热岩型地热资源量进行定量评价, 并识别圈定地热资源高值区。初步研究结果表明: 1) 大湾区深、大断裂交汇发育, 花岗岩广布, 形成了有利于地热赋存和输送的地质环境, 大地热流值也印证了该区域存在地热异常和良好热源。2) 通过地温估算发现, 当地层深度在 1.3 km 以下时, 地温能达到 70 °C 以上; 当地层深度在 5 km 时, 地温在 168.81~233.61 °C, 干热岩具有较高的开采价值。3) 大湾区 5 km 深度范围内, 地热资源总量为 5.83×10^{17} kJ, 采收率取 30%, 预计可获取的地热能折合标准煤 5.94×10^9 t, 同时减少排放 4.04×10^9 t 的 CO₂。4) 地热资源赋存相对高值区主要沿东北向深大断裂带分布, 集中在佛山、中山、江门、深圳和香港局部地区, 单位面积上的资源赋存量为 5.19×10^5 t/km² 标准煤, 建议为地热勘察与开采的重点区域。

关键词: 粤港澳大湾区; 地热资源; 地质环境; 潜力评估; 栅格单元

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2019)01-0001-08

Assessment of Geothermal Resource Potential in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area

XIE Heping^{1,2,3}, YANG Zhongkang², DENG Jianhui²

(1. College of Deep Underground Science and Green Energy, Shenzhen Univ., Shenzhen 518060, China; 2. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 3. Shenzhen Clean Energy Research Inst., Shenzhen 518060, China)

Abstract: As an important space carrier to participate in global competition, the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay area is facing the pressure from the energy demand and environment protection. Developing geothermal resources is an effective way to solve the problem. In this paper, the possibility of geothermal development in Greater Bay area was reasoned, based on the analysis of regional geotectonic, stratigraphic lithology and geothermal field. Considering deep ground temperature, rock thermal physical parameters and terrestrial heat flow, geothermal water resource and hot dry rock resource were quantitatively assessed through raster units. Further, high potential geothermal zones were distinguished. Results show that: 1) the intersected fault structures and widely distributed granite in the Greater Bay area provide a favorable geological environment for the storage and formation of geothermal resource, which is verified by the measured terrestrial heat flow; 2) the computing results indicates that temperature would be over 70 °C at depth of over 1.3 km and 168.81~233.61 °C at depth of 5 km, showing a high potential of geothermal resource; 3) The estimate geothermal resources in the Greater Bay area amount to 5.83×10^{17} kJ within the depth of 5 km. It is equivalent to the thermal value of standard coal of 5.94×10^9 t and can reduce the emission of CO₂ by 4.04×10^9 t, when recovery rate is set at 30%. 4) The area of high potential geothermal resources is mainly distributed along the northeast deep fault, i.e. in Foshan, Zhongshan, Jiangmen, Shenzhen and Hong Kong, where the unit geothermal resource potential is equivalent to standard coal of 5.19×10^5 t per square kilometer, and should be taken as key area for geothermal prospecting and exploitation.

Key words: Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay area; geothermal resources; geological environment; potential assessment; raster unit

收稿日期: 2019-01-09

基金项目: 深圳市清洁能源研究院专项资金资助(深科技创新[2018]374号)

作者简介: 谢和平(1956—), 男, 中国工程院院士。研究方向: 岩石力学与工程。E-mail: xiehp@scu.edu.cn

网络出版时间: 2019-01-22 14:18:44 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20190122.1141.001.html>

地热是蕴藏于地球内部的自然能源,以蒸汽、热水、干热岩和岩浆等形式赋存在地壳浅部,在温度差的驱动下通过岩层传导或断层等介质向地表流动。依据温度高低,可通过采暖、加热等方式,直接应用于工农业生产和生活休闲,也可以利用地热蒸汽动力和热能进行发电。地热是一种优质、清洁的绿色能源,开发地热资源有利于缓解能源紧缺,促进区域协调发展,同时也可减缓全球变暖趋势做出贡献。

中国的地热资源分布广泛,类型多样,初步形成滇藏、华北和东南沿海3大地热带^[1],以中低温地热资源为主,仅在藏南、滇西地区存在高温地热资源,如西藏羊八井热田、云南腾冲热海,应用历史悠久^[2]。以蒸汽和液态水为主的水热型地热资源是中国开发利用热能的基本方式。干热岩型地热资源的利用也逐渐兴起,中国干热岩地热能的利用尚处在初级阶段,干热岩是深埋2 km以下,几乎无流体的高温岩体^[3],已有研究认为中国可采的干热岩资源量是传统的水热型资源量的168倍^[4];中国地质调查局在2016年组织实施了干热岩调查,在全国初步圈定了16处干热岩靶区,并在局部地区,如青海贵德县、福建漳州市和山东利津县进行了干热岩开采试验^[5]。然而,与中国丰富的地热资源储量相比,经国家正规勘察评价的地热区只是其中很小一部分,勘察利用率不到1%,地热能在中国能源结构中的比例也不足0.5%^[6],区域性地热资源调查研究薄弱,地热资源储量不明,是制约中国地热能源利用的关键瓶颈之一^[7]。目前,常用的地热资源评价方法有地表热流量法、热储体积法、蒙特卡罗法和数值法,其中,热储体积法被证实是一种可靠且准确的方法,在世界各地的地热评价中被广泛应用^[8];而数值法评价精度最高,但需要更加详细的热储资料^[9]。现有的各种评价方法各有优缺点,更多是针对单点尺度的局部热田地热资源估算,对于区域尺度尤其是在热储参数较少时的热储量估算适用性十分有限。

作者以粤港澳大湾区为研究对象,在热储体积法的基础上,尝试应用空间分析技术,通过划分栅格评价单元,建立区域尺度地热资源估算方法,对大湾区地热储量进行定量估算,并圈定识别地热高值区,为大湾区地热资源勘察规划和能源结构优化提供科学依据。

1 粤港澳大湾区概况

“粤港澳大湾区”概念于2015年在《推进共建海上丝绸之路经济带》文件中首次提出,在2017年3月5日国家政府工作报告中正式确立,粤港澳大湾区是指由广州、佛山、肇庆、深圳、东莞、惠州、珠海、中

山、江门九市和香港、澳门两个特别行政区形成的城市群,覆盖面积5.6万km²,人口6 670万,是继美国纽约湾区、旧金山湾区、日本东京湾区之后,世界第四大湾区,是国家建设世界级城市群和参与全球竞争的重要空间载体。粤港澳大湾区是占全国国土面积不足1%的区域,却创造了全国国内生产总值的12.6%,是全国经济举足轻重的重要增长极^[10]。但是,在未来经济持续高速发展过程中,大湾区资源、环境势必面临更大的挑战。

2 地质地热条件

大湾区位于中国东南丘陵南缘,地势北高南低,以中低山丘陵为主,平原沿珠江沿岸和海岸线分布。研究区为亚热带季风气候,年平均气温为22℃,年平均降雨量为2 300 mm,降雨主要集中在4—9月。虽然广东省地热勘探起步早,但已有的地热研究主要集中在梅州丰顺、阳江新洲和信宜等大湾区范围外的区域^[11],大湾区地热资源潜力如何,首先需要从地热赋存条件进行分析。

2.1 地质构造

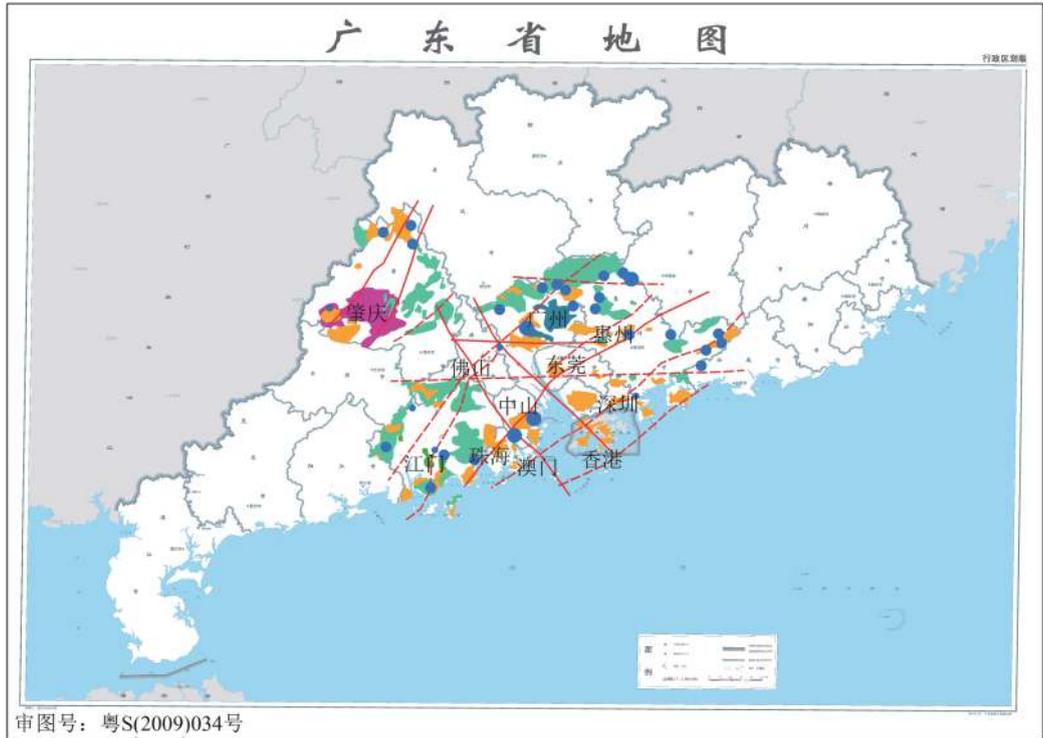
大湾区地处欧亚板块、太平洋板块和菲律宾板块的交汇部位,在板块运动过程中,长期受到大洋板块的俯冲作用,导致冷的大洋岩石圈板块下沉反而热的地幔物质上升,从而使东南沿海地区上地幔具有类似于大洋岩石圈地幔的高热状态,形成华南“热—构造区”^[12],为东南沿海地热带形成提供了稳定的热源。已有布格重力场资料表明,大湾区附近基底抬升过程十分显著,沉积盖层由北向南逐渐变薄。

中新代以来以隆起为主的构造活动频繁,形成了一系列规模宏大的深、大断裂,有3组主要构造线,以东北走向的断裂带最为发育(图1),恩平—新丰断裂带深切地壳20 km,3组构造线在大湾区中部切割交汇,为地表水的深循环和深部热地幔物质上涌提供了优势通道,为地热异常区的形成创造了条件。

2.2 地层岩性

研究区内地层发育,类型繁杂,广泛出露有中—晚元古代、震旦纪、白垩纪和第四纪地层。最为显著的特征是花岗岩广布,燕山期岩浆侵入活动尤其剧烈,如图1所示,与太平洋板块同期俯冲相耦合,花岗岩由老到新呈东北方向向沿海迁移。花岗岩分布面积为9 092 km²,约占大湾区面积1/3。如表1所示,广州、深圳和江门这些城市花岗岩出露面积占城市面积40%以上,是重要的地层类型。

花岗岩来源于大陆地壳,更加容易富集放射性元素(U、Th、⁴⁰K),这些元素具有一定丰度,其半衰期长且产热量高。岩石的放射性生热也是大地热流



注:底图为《广东省地图》,审图号为粤S(2009)034号,来源于广东省自然资源厅广东省标准地图服务栏,图上地质标注内容为作者标绘。

图1 大湾区地质地热条件

Fig. 1 Geology and geothermal conditions in Greater Bay area

表1 大湾区各城市花岗岩分布情况

Tab. 1 Distribution of granite in different cities of Greater Bay area

城市	花岗岩占总花岗岩面积比重/%	花岗岩占该城市面积比重/%
广州	17.20	48.40
东莞	1.18	9.78
深圳	4.10	41.93
珠海、澳门	2.32	28.64
香港	2.14	39.56
中山	1.81	20.61
肇庆	29.55	38.27
江门	31.75	68.27
惠州	9.95	2.46

的重要来源,在各期次岩体生热率中,燕山期生热率最高,峰值区为 $3.65\sim 4.53\ \mu\text{W}/\text{m}^3$,为高产热花岗岩^[13],具有显著干热岩意义。同时,花岗岩作为一种脆性物质,在新构造运动中容易发育裂隙破碎带,成为地表热泉的出露通道,大湾区共出露30处热泉,其中26处出露在花岗岩地层上。

3 地热分布特征

地热现象源于深部,见于地表,地热水通过有利的构造部位上涌地表。如图1所示,大湾区出露热泉30处,出露密集,反映了该区域活跃的地下热水活动,且以中低温热泉为主,仅在大湾区南部中山、珠海境内出露2处高温热泉。热泉温度能够在一定程度上与深部地热分布形成镜像关系,地温和大地热流值是量化描述地热异常最直接的标志,也是在地热普查阶段首要获取的指标^[14]。

3.1 大地热流值特征

大地热流值表征热流状况,定义为单位时间内通过地球表面单位面积的热流值。作者通过搜集整理文献资料,获取大湾区附近15组地热参数测井数据(表2)^[15-16],利用软件ArcGis10.2中Kriging插值方法生成大湾区大地热流分布图(图2),由图2可知大地热流值高低悬殊,介于 $63.5\sim 83.04\ \text{MW}/\text{m}^2$ 间,平均值 $73.89\ \text{MW}/\text{m}^2$,高于中国南方大地热流平均值 $64.2\ \text{MW}/\text{m}^2$,表明大湾区为明显的地热异常区域。在大湾区内部,以东西向深、大断裂为界,北缘(肇庆、广州北部)为

低热流区,热流值仅在 $63.5\sim 70.0\text{ MW/m}^2$ 间;南部区域存在一个以深圳、香港、珠海、澳门为中心的高热流区,热流值在 80 MW/m^2 以上,为潜在高热能地带。

表 2 研究区地热测井数据

Tab. 2 Geothermal logging data in research area

编号	位置	地温梯度/ $(\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1})$	大地热流/ $(\text{MW}\cdot\text{m}^{-2})$
1	广东曲江	3.11	76.4
2	广东翁源	2.79	61.6
3	广东陆丰	2.87	67.6
4	广东普宁	2.91	72.0
5	广东深圳	2.82	73.7
6	广东深圳	3.27	83.9
7	广东深圳	2.94	81.6
8	广东花县	2.77	63.5
9	广东广州	2.75	72.2
10	广东阳江	2.83	81.5
11	广东阳江	3.65	75.19
12	广东阳江	2.71	66.01
13	广东恩平	2.00	70.09
14	广东台山	2.73	74.56
15	广东茂名	2.75	82.52

该区域更加接近大洋边缘,基底抬升作用明显,沉积盖层薄,距上地幔热源更近,也为高产热的燕山晚期花岗岩集中分布区,热源更加丰富。

3.2 地温梯度特征

地温梯度,又称地热增温率,表示每 100 m 垂直深度上增加的温度。通过和第3.1节中相同空间插值方法获取大湾区地温梯度分布图(图2),可知受大地热流背景控制,由北向南地温梯度逐渐升高,介于 $2.68\sim 3.17\text{ C}/100\text{ m}$ 间,平均值为 $2.84\text{ C}/100\text{ m}$,而中国南方的地温梯度平均值为 $2.41\text{ C}/100\text{ m}$,总体而言大湾区为地层增温较快的区域。尤其是在江门地区,存在一个地温快速增高区,地温梯度在 $2.9\text{ C}/100\text{ m}$ 以上。这与地下热水的强烈活动有关,仅江门地区出露热泉7处,说明裂隙高度发育,垂直渗透性好,地下热水上涌快而热量消耗小,对经过岩层增温作用显著。

综上所述,大湾区为大地热流高值区,具有明显的地热异常现象,大湾区内部以东西向深切断裂为界,南部地区地热价值比北部高,且在燕山晚期花岗岩集中分布区形成高值中心。



注: 底图为《广东省地图》, 审图号为粤S(2009)034号, 来源于广东省自然资源厅广东省标准地图服务栏, 图上地热标注内容为作者标绘。

图 2 大湾区地热特征

Fig. 2 Geothermal characteristics of Greater Bay area

4 地热资源评估

通过第2、3节分析论证了大湾区具有形成、赋存地热资源的有利地质条件,由测井数据得到的大地

热流背景值也印证大湾区的地热异常现象,粤港澳大湾区赋存有丰富地热资源的可能性很高。相比于定性描述与推断,地热资源储量的定量估算具有更加显著的实际价值,这是制定区域能源发展规划和

确定能源政策的依据。地热资源按照热储介质、构造成因、水热传输方式被划分为多种类型,不同地热类型对应不同的评估方法,作者主要对水热型和干热岩型两种主要地热资源进行估算。

4.1 地热资源评估方法

1) 地温估算方法

深部地层温度是进行地热资源评价首先需要获取的参数,目前所搜集到地温资料绝大部分都在2 km深度以内,为获取更深部的地温数据,建立地温场热传导空间模型是十分有效、可行的方法^[17],模型如下:

$$T(z) = T_0 + \frac{qz}{k} - \frac{Az^2}{2k} \quad (1)$$

式中: $T(z)$ 为深度 z 处的温度,℃; T_0 为地表温度; q 为热流值, MW/m^2 ; A 为岩石生热率(无量纲); k 为岩石导热率(无量纲)。

2) 水热型地热资源评价方法

大湾区地热资源尚处于初步勘察阶段,缺乏相应的监测资料。现阶段也只是对大湾区地热储量做一个初步的估算,基于这些因素选取热储体积法对水热型地热资源评价。该方法所需要的岩石、水热物理参数可以由实验室准确获取,具体计算方法参照《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)^[18],计算公式如下:

$$Q = [\varphi C_w \rho_w + (1 - \varphi) C_r \rho_r] (T - T_0) V \quad (2)$$

式中: Q 为地热资源量, J ; φ 为热储裂隙率, %; C_w 、 C_r 分别为热水和岩石的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ_w 、 ρ_r 分别为热水和岩石的密度, kg/m^3 ; T 、 T_0 分别为热储温度和基准温度,℃; V 为热储体积, m^3 。

3) 干热岩型地热资源评价方法

采取资源量体积法估算干热岩地热资源,体积法公式如下^[18]:

$$Q = \rho \times C_p \times V \times (T - T_0) \quad (3)$$

式中: Q 为干热岩地热资源量, J ; ρ 为岩石密度; C_p 为岩石比热; V 为干热岩地层热储体积, m^3 。

地表基准温度通过Terra卫星MOD11A2陆地温度数据反演获取,取2018年3月的月平均地温作为基准温度;由《广东省、香港、澳门特别行政区地质图》获取大湾区地质图,可将大湾区地层岩性分为花岗岩、石灰岩、安山岩、玄武岩、页岩、砂岩和砂质黏土7种类型,各类岩石热物理参数参照《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)^[18]提供的经验值,具体如表3所示,同时考虑到大湾区断层构造密集广布的特征,以岩石孔隙率代替热储裂隙率不符合实际情况,统一取值为3%^[19]。

表3 岩石热物理参数

Tab. 3 Rock thermal physical parameters

岩石类型	比热/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热导率/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	生热率/ ($\text{MW} \cdot \text{m}^{-3}$)
花岗岩	794	2 700	2.72	2.45
石灰岩	920	2 700	2.01	0.62
安山岩	787	2 600	1.42	1.08
玄武岩	886	2 840	1.61	0.31
页岩	774	2 650	1.40	1.80
砂岩	878	2 600	2.60	0.33
砂质黏土	1 379	1 780	0.92	0.98

基于区域尺度的大湾区地热资源评价方法的基本思想:首先,将评价对象划分为大小相等的网格单元,这些网格单元之间可以存在显著的差异,而网格内部具有同质性。然后,利用已有地热资源评价方法,对每一个被赋予不同热物理参数、温度和大地热流值的网格单元进行计算,得到每一个网格单元上的地热储量;最后,进行汇总就可以获取大湾区地热资源总储量。该方法的显著优点是能够在实际勘探资料缺乏的前提下,最大程度地考虑大地热流、温度和岩性热物理的差异,进行非均质地热资源估算,提高计算精度。

上述地热参数数据由不同方式获取,储存形式也各有差异,网格单元在GIS环境中对应栅格数据结构,采用矩阵形式进行数据的组织,运算速度高效,故利用GIS模块中的转换工具,将各种地热参数统一转换为栅格数据。为确保具有不同属性的栅格单元在计算时能够一一对应,将计算所需的基准温度、大地热流值、地层温度、岩石生热率、比热、密度、热导率数据划分为分辨率 $500 \times 500 \text{ m}$ 的栅格单元,并投影转换为统一的坐标系统,具体设置为:投影坐标为GCS_WGS_1984_Transverse_Mercator,地理坐标系为GCS_WGS_1984,中央经线105.00,起始纬度0.00,栅格列数为807,栅格行数为567。

4.2 地热资源估算结果

1) 深部地温

通过影像数据反演得到大湾区地表温度,介于 $21.12 \sim 22.47 \text{ }^\circ\text{C}$ 间,各区域温差较小。通过计算得到1~5 km深部地层温度:1 km深度处,地温在 $53.24 \sim 65.16 \text{ }^\circ\text{C}$ 间,自北向南逐渐增温,为低温热能,利用价值有限;2 km时,深部地温在 $80 \sim 105 \text{ }^\circ\text{C}$,区域温差越来越显著;随着深度增加,地温继续增高,5 km深部温度在 $168.81 \sim 233.61 \text{ }^\circ\text{C}$ 间,从温度角度考虑,该深度干热岩具有较大的经济开发价值。

2) 地热资源储量

还需要确定关键参数即热储层体积才能进行地

热资源储量的估算。通过划分网格单元,计算每个单元上的热储量,热储层面积可以由网格分辨率获取,即底面积已知,确定热储深度即可。理论上,水热型地热资源循环深度可为3~4 km,但同时参考东南沿海地区钻孔记录的地热水最高值,广东省阳江新洲97 °C、福建漳州105 °C^[19],设置热储层底板温度为105 °C,顶部温度为70 °C,得到水热型地热能热储层范围为1.3~2 km;根据干热岩开发利用的温度要求和目前的钻探深度,取2~5 km深度为干热岩型地热储量的估算范围^[20]。

如表4所示:水热型地热资源总量为 1.83×10^{17} kJ,折合标准煤 6.24×10^9 t;2~5 km深度内干热岩地热资源总量为 4.0×10^{17} kJ,折合标准煤 1.356×10^9 t,干热岩型地热资源潜力十分广阔;5 km深度内,地热资源总量共计 5.83×10^{17} kJ,折合标准煤 19.8×10^9 t。采收利用率取30%^[21],最终能够为经济发展提供的能源总量折合标准煤为 5.94×10^9 t,在大湾区未来经济发展中,清洁能源使用比例可以大幅度提高,能源利用结构进一步优化。假设这些清洁绿色能源全部被利用,可以减排 4.04×10^9 t的CO₂,生态效益显著。

表 4 大湾区5 km深度内地热资源量估算

Tab. 4 Assessment of the geothermal resources of 5 km depth in Greater Bay area

层位深度/ km	热储层温度/ °C	地热 类型	热能/ (10 ¹⁷ kJ)	换成标准煤/ (10 ⁹ t)
1.3~2.0	70~105	水热型	1.83	6.24
2.0~3.0	84~150	干热岩型	1.07	3.43
3.0~4.0	114~191	干热岩型	1.32	4.53
4.0~5.0	141~234	干热岩型	1.61	5.60
汇总			5.83	19.80

为了进一步探明大湾区内部地热能的分布差异,精确圈定地热资源高值区,对每个栅格单元上的地热资源量按照自然断点法进行相对分级,按照资源潜力高低分为高、较高、中等和较低4类。如图3所示,红色标志区具有更高的地热资源开采潜力,沿东北向深、大断裂带分布,主要集中在佛山、中山和江门接壤部位、深圳东北部和香港东部,大湾区单位面积上地热资源为 3.54×10^5 t/km²标准煤,而这些地热高值区能够达到 5.19×10^5 t/km²标准煤,建议为地热勘察与开采的重点区域。

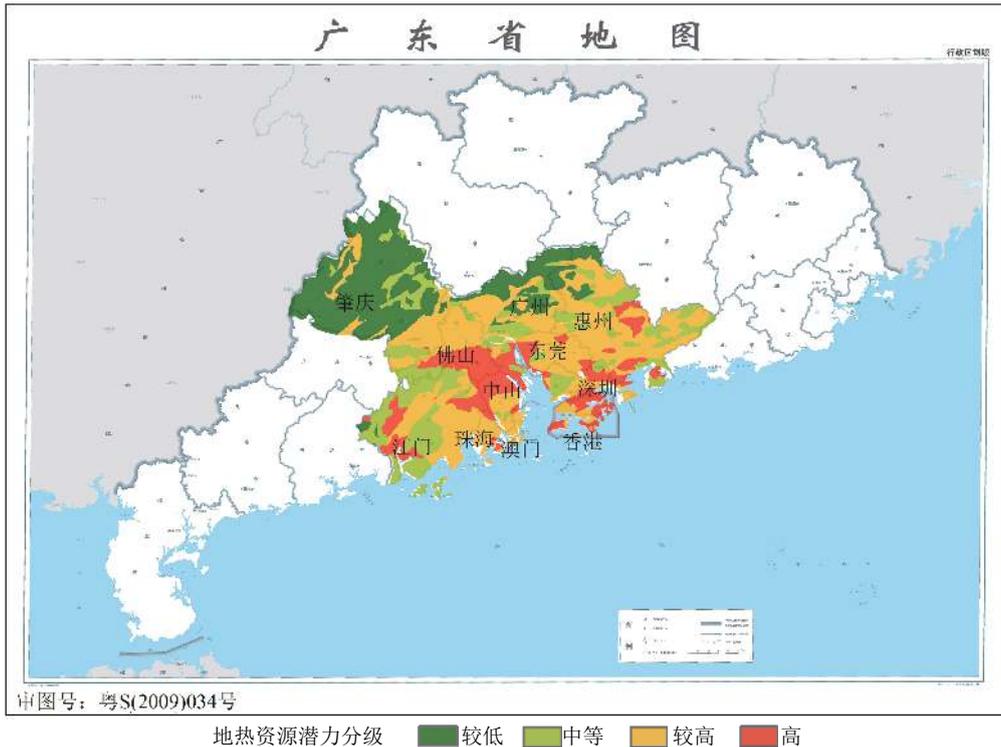


图 3 大湾区地热赋存潜力分级

Fig. 3 Classification of potential geothermal resources in Greater Bay area

5 结 论

通过搜集整理已有地质地热资料,对大湾区地

热潜力进行了推断性的评估,随着地热勘察推进和实测资料的补充,地热潜力评价结果将更加具有控制性和精确性,现阶段取得的结论主要有:

1) 粤港澳大湾区地处亚欧大陆东南部,独特的区域格局使断裂构造和岩浆活动频繁,形成了有利于地热赋存和输送的地质环境,大地热流值也印证了该区域存在地热异常和良好热源。

2) 通过建立栅格评价单元,实现了区域尺度的地温计算和地热资源评价。地温计算结果表明:热储层深度在1.3 km以下时,地温能达到70 °C以上;当地层深度达到5 km时,地温在168.81~233.61 °C间,干热岩具有较高的经济开采价值。

3) 大湾区5 km深度内地热资源总量为 5.83×10^{17} kJ,采收率取30%,预计可获取的能量折合标准煤 5.94×10^9 t,同时减排 4.04×10^9 t的CO₂。地热资源高值区主要沿东北向深大断裂带分布,建议佛山、中山、江门、深圳和香港局部地区为地热勘察与开采的重点区域。

参考文献:

- [1] Chen Moxiang, Wang Jiyang. Review and prospect on geothermal studies in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(Supp 1): 320–338. [陈墨香, 汪集旸. 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.]
- [2] Wang Shaoting, Chen Xinming. Present status and development of geothermal power generation and geothermal resources in Xizang[J]. Electric Power, 1999, 32(10): 79–81. [王绍亭, 陈新民. 西藏地热资源及地热发电的现状与发展[J]. 中国电力, 1999, 32(10): 79–81.]
- [3] Breede K, Dzebisashvili K, Liu X, et al. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: Past, present and future[J]. Geothermal Energy, 2013, 1(1): 4–13.
- [4] Gan Haonan, Wang Guiling, Lin Wenjing, et al. Research on the occurrence types and genetic models of hot dry rock resources in China[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19): 22–27. [甘浩男, 王贵玲, 蔺文静. 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.]
- [5] Zheng Keyan, Chen Zihui. Hot dry rock development in China: A long way to go[J]. Sino Global Energy, 2017, 22(2): 21–25. [郑克桢, 陈梓慧. 中国干热岩开发: 任重而道远[J]. 中外能源, 2017, 22(2): 21–25.]
- [6] 徐世光, 郭远生. 地热学基础[M]. 北京, 科学出版社, 2009: 3–5.
- [7] Chen Zihui, Zheng Keyan, Jiang Jianjun. Discussion on the development strategy of hot dry rock in China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015(3): 161–166. [陈梓慧, 郑克桢, 姜建军. 试论我国干热岩地热资源开发战略[J]. 水文地质工程地质, 2015(3): 161–166.]
- [8] Burns E R, Ingebritsen S E, Manga M, et al. Evaluating geothermal and hydrogeologic controls on regional groundwater temperature distribution[J]. Water Resources Research, 2016, 52(2): 1328–1344.
- [9] Zhang Baiming. Study of geothermal reservoir engineering in low middle temperature-example of geothermal fields of Tianjin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2006: 15–17. [张百鸣. 中低温地热热储工程研究——以天津地热田为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006: 15–17.]
- [10] Ma Xiangming, Chen Yang. The Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay area: A new era and a big challenge[J]. Tropical Geography, 2017, 37(6): 762–774. [马向明, 陈洋. 粤港澳大湾区: 新阶段与新挑战[J]. 热带地理, 2017, 37(6): 762–774.]
- [11] Wang Xiao. Formation conditions and hydrogeochemical characteristics of the geothermal water in typical coastal geothermal field with deep faults, Guangdong province[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018: 72–74. [汪啸. 广东沿海典型深大断裂带地热水系统形成条件及水文地球化学特征[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018: 72–74.]
- [12] Zhao hailing, Yu Junji, Deng Jinfu, et al. Characteristics and genesis of paleogene lithospheric mantle in southeast coastal area[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3): 77–85. [赵海玲, 于俊吉, 邓晋福, 等. 东南沿海地区古近纪大陆岩石圈地幔特征及成因[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 77–85.]
- [13] Lin Wenjing, Wang Fengyuan, Gan Haonan. Site selection and development prospect of a hot dry rock resource project in Zhangzhou geothermal field, Fujian Province[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19): 28–34. [蔺文静, 王凤元, 甘浩男, 等. 福建漳州干热岩资源选址与开发前景分析[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 28–34.]
- [14] Yuan Yusong, Ma Yongsheng, Hu Shengbiao. Present-day geothermal characteristics in South China[J]. Chinese J. Geophys, 2006, 49(4): 1118–1126. [袁玉松, 马永生, 胡圣标. 中国南方现今地热特征[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1118–1126.]
- [15] Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition)[J]. Geophys, 2001, 44(5): 611–626. [胡圣标, 何丽娟, 汪集旸. 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.]

- [16] Jiang Guangzheng, Gao Peng, Rao Sun. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition)[J]. *Geophys*, 2016, 59(8): 2892–2910. [姜光政, 高棚, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2892–2910.]
- [17] Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 312–321. [蔺文静, 刘志明, 王婉丽. 中国地热资源及其潜力评估[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 312–321.]
- [18] 全国国土资源标准化技术委员会. 地热资源地质勘查规范: GB/T 11615—2010[S]. 2010.
- [19] 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.
- [20] Yang Lizhong, Sun Zhanxue, Liu Jinhui, et al. On deployment of high-temperature deep geothermal wells in typical areas with hot dry rock potential in China[J]. *Geology and Exploration*, 2017, 53(2): 151–156. [杨立中, 孙占学, 刘金辉, 等. 中国典型干热岩潜力区的地热深井部署[J]. *地质与勘探*, 2017, 53(2): 151–156.]
- [21] Li Tongbiao. A review of geothermal resource evaluation methods[J]. *Energy and Environment*, 2015(5): 91–92. [李同彪. 地热资源评估方法综述[J]. *能源与环境*, 2015(5): 91–92.]



谢和平, 湖南双峰人, 能源与力学专家, 1982年毕业于中国矿业大学数学与力学系, 2001年当选为中国工程院院士。深圳大学特聘教授, 深圳大学深地科学与绿色能源研究院院长, 四川大学原校长, 教授, 博士生导师。国务院学位委员会委员、中国科学技术协会常委。国家重点研发计划“深部岩体力学与开采理论”项目负责人。长期致力于采矿工程、矿山工程力学、绿色能源开发利用及深地科学领域的基础研究与工程实践, 特别是破断煤岩体力学研究方面具有突出成果。在中国最早建立了矿山裂隙岩体宏观损伤力学模型, 开拓了矿山裂隙岩体损伤力学研究新领域。1982年起, 创造性引入分形方法对裂隙岩体进行非连续变形、强度和断裂破坏研究, 并与损伤力学结合在国际上开创了岩石力学分形研究新领域。近年来, 在深地科学探索领域, 包括深地固体资源流态化开采、地热能开发与中低温地热发电、地下空间开发利用、海水能源化及深地医学等领域提出了创新性理念与构想, 并在绿色能源、低碳技术与CO₂矿化及综合利用技术领域进行了深入探索, 取得了重要进展。谢和平院士为国家“973”项目首席科学家(2次)、国家自然科学基金委创新研究群体首席科学家。首届“中国青年科学家奖(技术科学)”、何梁何利科技进步奖(技术科学奖)、国家自然科学基金二、三等奖、国家科技进步二、三等奖, 均为第一获奖人。被英国Nottingham大学、德国Clausthal工业大学、香港理工大学授予“荣誉博士”学位, 获牛津大学授予“牛津大学圣艾德蒙Fellow”学术称号。

(编辑 张琼)

引用格式: Xie Heping, Yang Zhongkang, Deng Jianhui. Assessment of geothermal resource potential in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 1–8. [谢和平, 杨仲康, 邓建辉. 粤港澳大湾区地热资源潜力评估[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(1): 1–8.]