

doi:10.3969/j.issn.1674-1803.2018.02.10
文章编号:1674-1803(2018)02-0050-08

湖南花岗岩体干热岩资源赋存条件分析

何大芳¹, 曾琳¹, 杨汉元¹, 叶见玲¹, 曹晖¹, 张大礼²

(1. 湖南省煤田地质局油气资源勘探队, 长沙 410014; 2. 湖南省煤田地质局, 长沙 410014)

摘要: 利用已有的岩体地质、地球化学、华南地区地热异常数据及区域地震特征, 初步获得了湖南省主要花岗岩体的放射性生热、盖层导热率、地温梯度、大地热流、居里面深度以及地体稳定性6项干热岩指标。结合国内外有关干热岩判别指标及权重, 对湖南地区具有高放射性生成热的岩体干热岩地质赋存条件进行了评价, 认为湘东南的诸广山岩体、九疑山岩体、香花岭岩体、骑田岭岩体是重点干热岩勘探区, 其次为大义山岩体、越城岭岩体、关帝庙以及沩山岩体。基于放射性异常及深部隐伏岩体分布特征, 建议在诸广山岩体热水地区、香花岭-骑田岭NEE向带、九疑山岩体北西部、关帝庙岩体中部、沩山岩体中部红盆覆盖区开展干热岩勘查工作。

关键词: 干热岩; 指标参数; 赋存条件; 花岗岩; 湖南
中图分类号: P511.4 **文献标识码:** A

Granite Mass Hot Dry Rock Resources Hosting Condition in Hunan

He Dafang¹, Zeng Lin¹, Yang Hanyuan¹, Ye Jianling¹, Cao Hui¹ and Zhang Dali²

(1. Oil and Gas Resources Exploration Team, Hunan Bureau of Coal Geological Exploration, Changsha, Hunan 410014;
2. Hunan Bureau of Coal Geological Exploration, Changsha, Hunan 410014)

Abstract: Based on available data of rock mass geology, geochemistry, geothermal anomalous data and regional seismic features, preliminarily obtained 6 hot dry rock indices including radioactive heat generation, overburden heat conductivity, geothermal gradient, telluric heat flow, Curie point isotherm depth and terrain stability in main Hunan granite masses. Combined with related hot dry rock discrimination indices and weights both home and abroad, carried out assessment for geologic hosting conditions of hot dry rock mass with high radiogenic heat. The assessment has considered that the Zhuguangshan, Jiuyishan, Xianghualing and Qitianling granite masses are the key hot dry rock exploration areas; while the Dayishan, Yuechengling, Guandimiao and Weishan granite masses the next. Based on radioactivity anomaly and deep part buried granite mass features, it is proposed that to carry out hot dry rock prospecting in the Reshui area in Zhuguangshan, NEE belt in Xianghualing-Qitianling, northwest part of Jiuyishan, middle part of Guandimiao, middle part red basin covered area in Weishan granite masses.

Keywords: hot dry rock; indicative parameter; hosting condition; granite; Hunan

0 引言

干热岩是埋藏于地面1 km以下、温度一般大于200℃, 内部不存在流体或仅有少量地下流体的高温岩体^[1], 其蕴藏着巨大的热能, 是世界发达国家积极开发的重要资源之一^[2-3], 对其的勘探开发日益受到高度重视。目前, 国土资源部、吉林大学、清华大学、中国地质大学、中国科学院广州能源研究所、中国地质科学院水文地质环境地质研究所等单位近年来都开展了初期的干热岩勘探与资源评价工作, 在干热岩的赋存条件及评价方

法等方面进行了大量的研究, 并取得了较多成果^[3-4]。同时, 通过借鉴国外干热岩各种地质理论及勘探开发实例基础上, 国内已针对我国东南沿海地区、海南陵水地区、苏北盆地、青海共和盆地、漳州岩体等重点干热岩地区进行了勘探评价^[3, 5-6], 提供了大量可借鉴资料。但我国干热岩分布区地质背景十分复杂, 区域差异性极大, 相关研究尚处于起步阶段, 因此, 有关干热岩资源赋存条件分析可为今后的区域干热岩资源开发及利用研究提供基础参考。

湖南是我国重要的富含U、Th、K放射性元素花岗岩分布区, 具有形成干热岩的有利条件, 但研究程度极低, 相关地质参数指标不明确, 缺乏系统的针对花岗岩体干热岩的评价, 已制约了湖南地区干热岩勘探开发。已有研究表明, 湖南省东南

第一作者简介: 何大芳(1984—) 硕士研究生, 研究方向: 目前主要从事非常规能源资源调查研究。

收稿日期: 2017-07-14

责任编辑: 宋博羣

部局部存在形成干热岩的有利条件^[6-8],且近年来针对湖南省主要花岗岩体的区域调查工作取得了一定进展,开展了大量的分析测试^[9-16],为干热岩赋存条件分析提供了可借鉴基础数据。2016年以来,湖南省国土资源厅开展了针对湖南地区干热岩的专项调查工作,笔者有幸参与了该项目工作,并获得了部分数据资料。在国内外干热岩研究基础上,参考前人有关干热岩赋存的地热地质条件^[5-6,11],充分利用湖南地区已有花岗岩研究的基础地质、物探等资料,对区内主要花岗岩体的干热岩赋存条件进行了分析,获得了相应的指标参数。在综合分析各岩体深部地热地质条件基础上,评价了湖南花岗岩体干热岩潜力,圈定了勘查靶区,为湖南省干热岩资源的科学勘探提供依据。

1 区域花岗岩基本特征

湖南省地处扬子准地台和华南加里东褶皱带两个构造单元之内,以雪峰弧为界湘中、湘东南属华南褶皱带,雪峰弧以西及以北属扬子准地台,岩浆活动显示出明显的区域性差异^[18]。

湖南岩浆岩发育中等,总出露面积约 $1.7 \times 104 \text{ km}^2$, 占全省总面积的 8.3%, 其中,酸性侵入岩最为发育,约占全省岩浆岩总出露面积的 99%。其中加里东期第二阶段、印支期第二阶段和燕山早期是本区花岗岩浆侵入活动的三个主峰期^[18]。加里东期花岗岩出露面积较大,主要岩性为黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩及正长花岗岩。湖南印支期中酸性侵入岩分布众多出露面积超过 5600 km^2 , 包括沧水铺、沅山、大神山、白马山、紫云山、歇马、关帝庙、瓦屋塘、塔山、阳明山、大义山、鸡笼街、将军庙、五峰仙等岩体,上述岩体多呈岩基产出主要侵位于板溪群—泥盆系中。岩性包括中细粒斑状黑云母花岗岩、二云母花岗岩、中细粒黑云母花岗岩,个别岩体发育中细粒斑状黑云母花岗闪长岩,以中细粒—中粒似斑状结构和中细粒花岗结构为主^[19-20]。燕山早期花岗岩是本省中酸性岩浆活动高峰的产物,形成由湘东南至湘东北巨大的北东向花岗岩带。本期岩体产状及岩性变化均较大,浅成相小侵入体广泛发育。以含角闪石斑状花岗岩类、二长花岗岩及花岗岩闪长斑岩为主。燕山晚期花岗岩浆岩出露面积和范围均很小。

隐伏岩体方面,据南岭地区重力场特征研究^[12,16],湖南隐伏岩体集中在湘中地区,呈散点状分布,可能与湘中地区居里面深度较小有关(见下文相关讨论),其次为湘南地区(图1),越城岭岩

体北东部、塔山—大义山岩体周边以及香花岭—骑田岭一线、衡阳盆地东部集中了较大规模的隐伏岩体。

2 干热岩资源赋存条件研究

2.1 干热岩体

放射性生热作为地壳生热最主要的热来源,对干热岩资源的赋存有重要意义。干热岩体应具有相对高的放射性生热元素,包括 Th、U 和 K 含量的高低直接决定了干热岩体的温度^[6],同时地壳岩石放射性热流是影响地表热流大小的因素之一,尤其是花岗岩体大面积分布的地区,地表热流中的放射性热流占相当大的比例。由于壳源成因的花岗岩在熔融形成过程中具有富集不相容元素的能力,因而壳源成因的花岗岩体是形成干热岩体的有利部位。

通过对前人资料的整理分析,本文计算了湖南地区花岗岩放射性生热率(表1),采用的花岗岩密度为平均值 2.677 g/cm^3 ^[17],本次计算获得的热水岩体放射性生热率为 $7.53 \mu\text{W/m}^3$,与赵平等^[25]研究结果值 $7.6 \mu\text{W/m}^3$ 基本一致。结果表明,相对于东南沿海地区而言,湖南花岗岩体普遍具有较高的放射性生热元素(表1),其中放射性生热率大于 $5 \mu\text{W/m}^3$ 以上的占到了统计花岗岩数的 33.3% 以上, $4 \mu\text{W/m}^3$ 以上的花岗岩体可达 57.1%。放射性生热率分布在 $2.70 \sim 7.53 \mu\text{W/m}^3$ 之间,平均值为 $4.61 \mu\text{W/m}^3$,其中最高为诸广山岩体,为 $7.53 \mu\text{W/m}^3$,其次为骑田岭—香花岭岩体、九嶷山、塔山—大义山、幕阜山、沅山等。同时,根据中南地区 1:150 万区域地球化学资料,对湖南省岩体中 U、Th、K 含量值分布特征进行了分析(图2),本次采用的岩体放射性判别指标中 U 质量分数大于 5.5×10^{-6} , Th 质量分数大于 20.5×10^{-6} , K_2O 质量分数大于 3.2%。分析表明,岩体中具有明显 U、Th、 K_2O 叠合异常岩体集中在诸广山岩体、骑田岭岩体、越城岭岩体和幕阜山岩体,其次为九嶷山、沅山、五峰仙、关帝庙和塔山岩体,这一特征与放射性生热率分布特征基本一致。

在岩石放射性生热率计算过程中,同等含量条件先又以铀钍所占比重最大,因此本文中采用铀钍异常圈定范围作为岩体中有利干热岩分布范围。其中放射性生热率在 $4 \mu\text{W/m}^3$ 以上的岩体中,除阳明山岩体以外,其他均在 100 km^2 以上(表1),考虑到深部可能存在隐伏岩体,岩体规模可能远大于上述统计值。

因此,从花岗岩岩体的放射性生热率及岩体规模来说,湖南部分岩体具备形成干热岩体的条件。

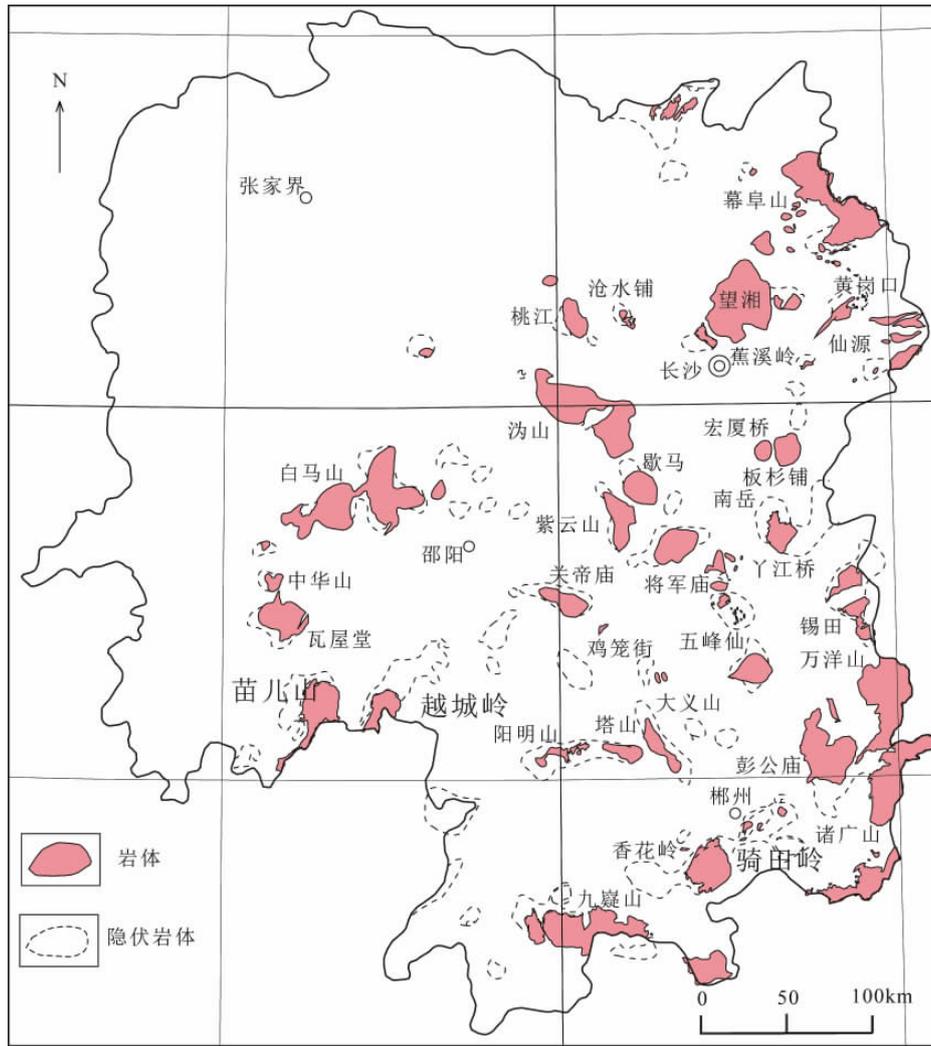


图1 湖南省花岗岩及推断半隐伏岩体分布简图

Figure 1 A sketch of granite and inferred semi-buried granite masses distribution in Hunan Province

表1 湖南省花岗岩体主要干热岩指标参数

Table 1 Main hot dry rock indicative parameters of granite masses in Hunan Province

序号	岩体	C_U / 10^{-6}	C_{Th} / 10^{-6}	C_K /%	放射性 生热率 / $\mu W \cdot m^{-3}$	岩体中放射性 原始偏高规模 / km^2	地温 梯度 / $^{\circ}C \cdot km^{-1}$	盖层类型	热流值 / $mW \cdot m^{-2}$	构造 稳定性	居里面 埋深 /km	基底 4km 温度/ $^{\circ}C$
1	诸广山	17.76	37.17	4.94	7.53	144	24	古生代	75	4级及以下	25	117
2	万洋山	5.16	19.20	3.91	3.00		22.5	古生代	67.5	4级及以下	27	111
3	骑田岭	13.29	52.13	5.01	7.43	696.6	20	古生代	66	4级及以下	31	101
4	越城岭	8.74	27.97	5.02	4.61	251	20	古生代	52.5	发生过5级	19	101
5	幕阜山	13.95	24.00	4.68	5.64	468.5	21	元古代及以前	52.5	发生过5级	30	105
6	浏山	9.86	30.99	4.43	5.05	244	15	白垩系	44	发生过5级	21.5	81
7	五峰仙	4.33	26.87	4.61	3.38	202	20	古生代	56	4级及以下	22	101
8	关帝庙	7.56	31.30	4.64	4.50	300	20	古生代	51	4级及以下	22	101
9	塔山	7.04	15.63	4.39	3.27	200	17.5	古生代	57.5	4级及以下	30	91
10	南岳	3.90	25.20	4.60	3.15		20	古生代	55	4级及以下	21	101
11	香花岭	17.64	26.55	4.57	6.74	>100	21	古生代	65	4级及以下	29	105
12	九疑山	13.79	33.01	4.85	6.23	100	22	古生代	61	4级及以下	24	109

续表

序号	岩体	C_U / 10^{-6}	C_{Th} / 10^{-6}	C_K /%	放射性 生热率 / $\mu W \cdot m^{-3}$	岩体中放射性 原始偏高规模 / km^2	地温 梯度 / $^{\circ}C \cdot km^{-1}$	盖层类型	热流值 / $mW \cdot m^{-2}$	构造 稳定性	居里面 埋深 /km	基底 4km 温度/ $^{\circ}C$
13	大义山	10.35	54.48	5.19	6.85		17.5	古生代	57.5	4级及以下	27	91
14	阳明山	11.01	24.40	4.83	4.93	43	20	古生代	56	4级及以下	31	101
15	彭公庙	4.15	18.09	4.34	2.70		17.5	古生代	66	4级及以下	26	91
16	丫江桥	8.70	18.30	4.76	3.91		16	元古代、白垩系	53	4级及以下	22	85
17	紫云山	5.69	34.38	4.69	4.24	100	15	元古代及以前	48	4级及以下	21	81
18	瓦屋塘	8.95	22.20	4.83	4.25	107	10	古生代	51	4级及以下	21	61
19	白马山	4.56	22.25	4.11	3.07		13	元古代及以前	47	发生过5级	22	73
20	宏厦桥	4.15	25.57	2.90	3.08		13	元古代及以前	54	发生过5级	21.5	73

* 据文献 [3-5, 7, 9, 14-15, 17, 24]

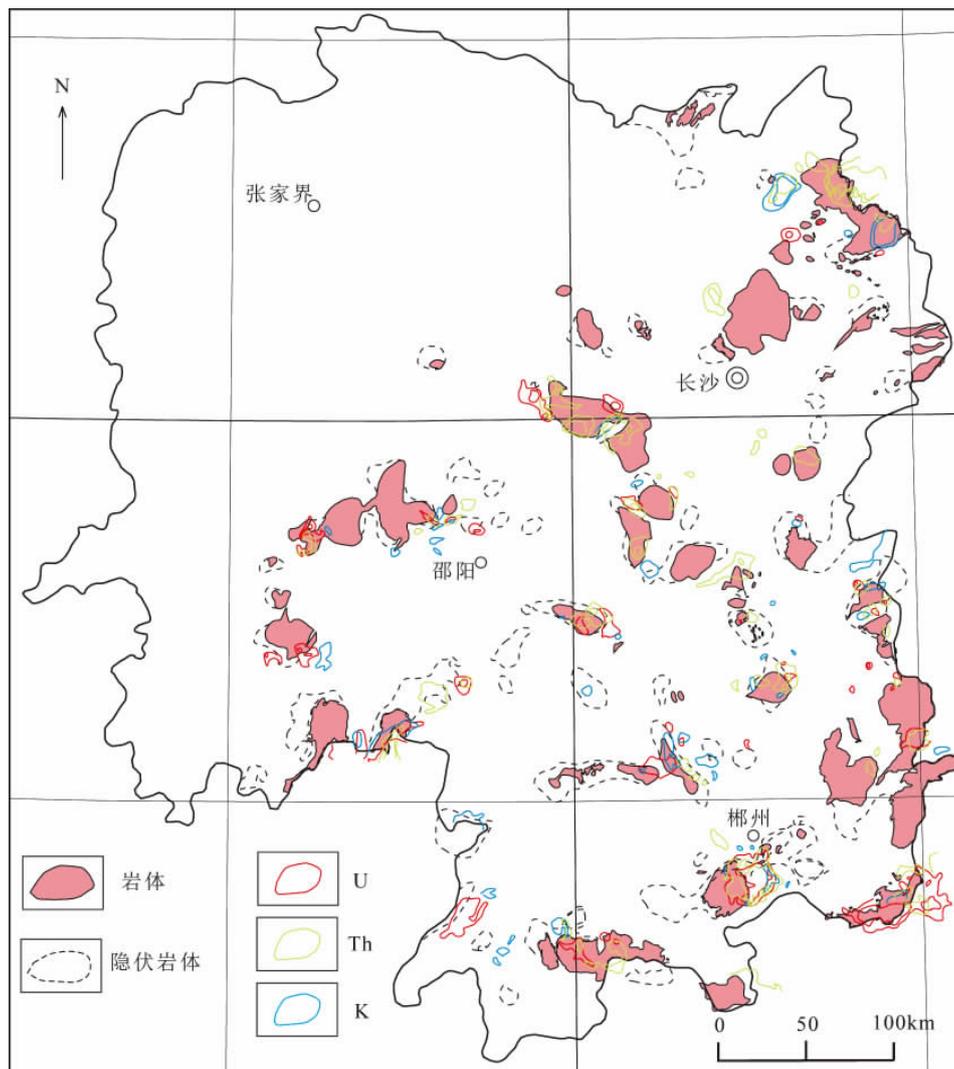


图2 湖南花岗岩体及其周边放射性元素分布特征

Figure 2 Radioactive elements distribution features in granite masses and periphery in Hunan Province

2.2 盖层导热率

为了保存好基底的能量,地堑(断陷)盆地是最

适合干热岩能量开发^[5]。前人研究表明^[22],中生代沉积盆地地区地温梯度代表沉积盖层的地温梯度,

岩层热导率小,地温梯度高,基岩隆起区、造山带、古老地层出露区,岩石热导率高,地温梯度小。如下扬子地区, K_2P-Es 地层热导率为 $1.5 \sim 2.2 W(m \cdot K)$,而 $O-T_2$ 地层热导率为 $2.6 \sim 3.7 W(m \cdot K)$ 。湖南白垩系红盆较为发育,其中以衡阳盆地为代表,具有较高的地温梯度^[22],地温梯度局部可达 30° 以上。沅山、关帝庙、丫江桥等岩体周边发育规模不一的白垩系红盆,但大多的岩体(及隐伏岩体)受古生代断陷盆地中沉积盖层覆盖。

2.3 地热异常

2.3.1 地温梯度

研究区主要位于华南加里东褶皱带两个构造单元之内,地质构造复杂。有关资料表明^[22],湖南省除衡阳盆地中东部以外(局部可达 30° 以上),总体地温梯度在 $25^\circ C/km$ 以下,相对东南沿海地区具有较低的地温梯度值,同时东部及南部地温梯度相对偏高,均在 $20^\circ C$ 以上,其中诸广山岩体及湘北局部

接近 $25^\circ C$ 。因此,从岩体与地温梯度分布关系来看,诸广山岩体具有相对较高的地温梯度值,可达 $24^\circ C$,其中地温梯度在 $20^\circ C$ 以上的包括了万洋山、幕阜山、九嶷山、骑田岭-香花岭、越城岭、五峰仙、关帝庙、五峰仙、南岳以及阳明山等。与放射性生热率相对较高的岩体大致吻合。

2.3.2 大地热流特征

通常认为,热流量显著高于 $63 \sim 105 mW/m^2$ 的区域才有干热岩开发价值。湖南省大地热流分布特征呈现出东南高、北西低的特征(图4)。从岩体角度来看,诸广山岩体地表热流值最高,可达 $75 mW/m^2$,九嶷山、骑田岭-香花岭岩体地表热流值可达 $60 mW/m^2$ 以上。其他岩体的热流值则主要分布 $50 \sim 60 mW/m^2$ 。中国南方不同地区软流圈顶界埋深差别很大,湘中-桂中为 $199 km$,华南造山带为 $83 km$ 。对应地大地热流值为湘中-桂中为 $30 \sim 40 mW/m^2$,华南造山带为 $72 mW/m^2$,规律性非

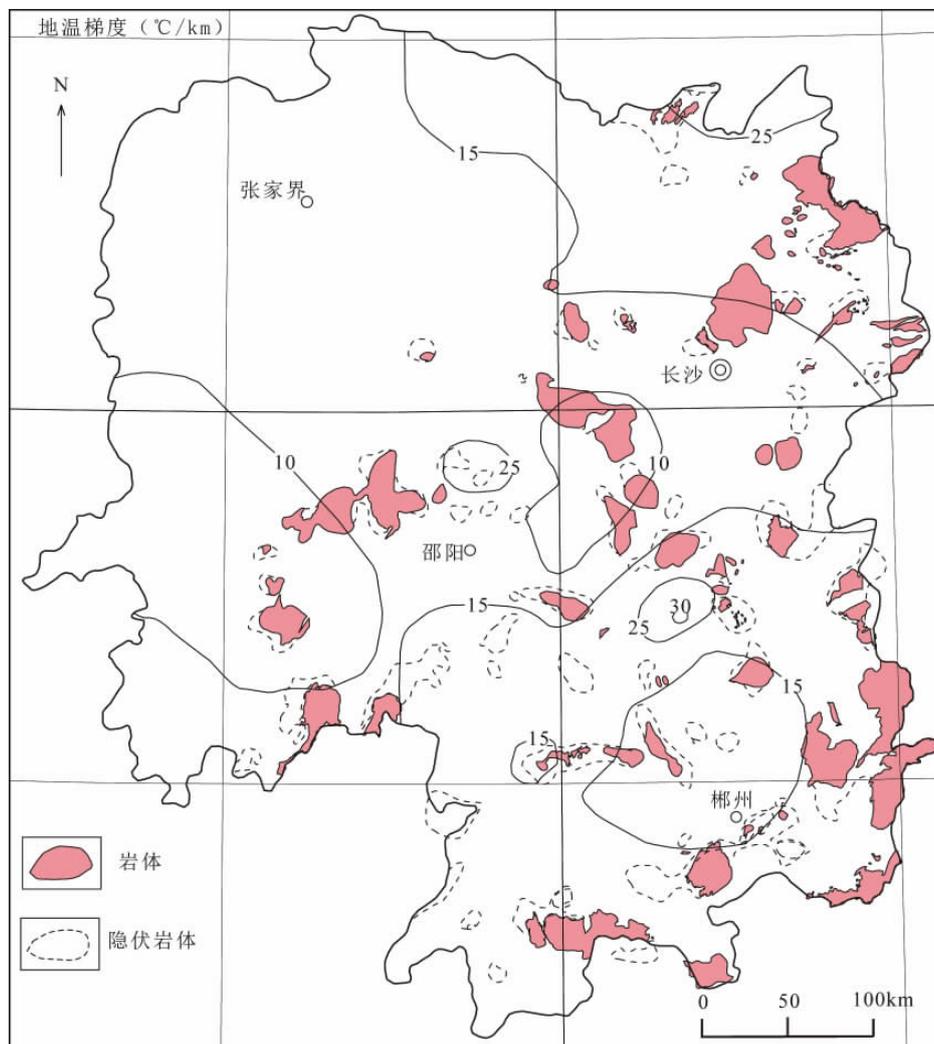


图3 湖南省地温梯度等值线分布图

Figure 3 Isogram of geothermal gradient in Hunan Province

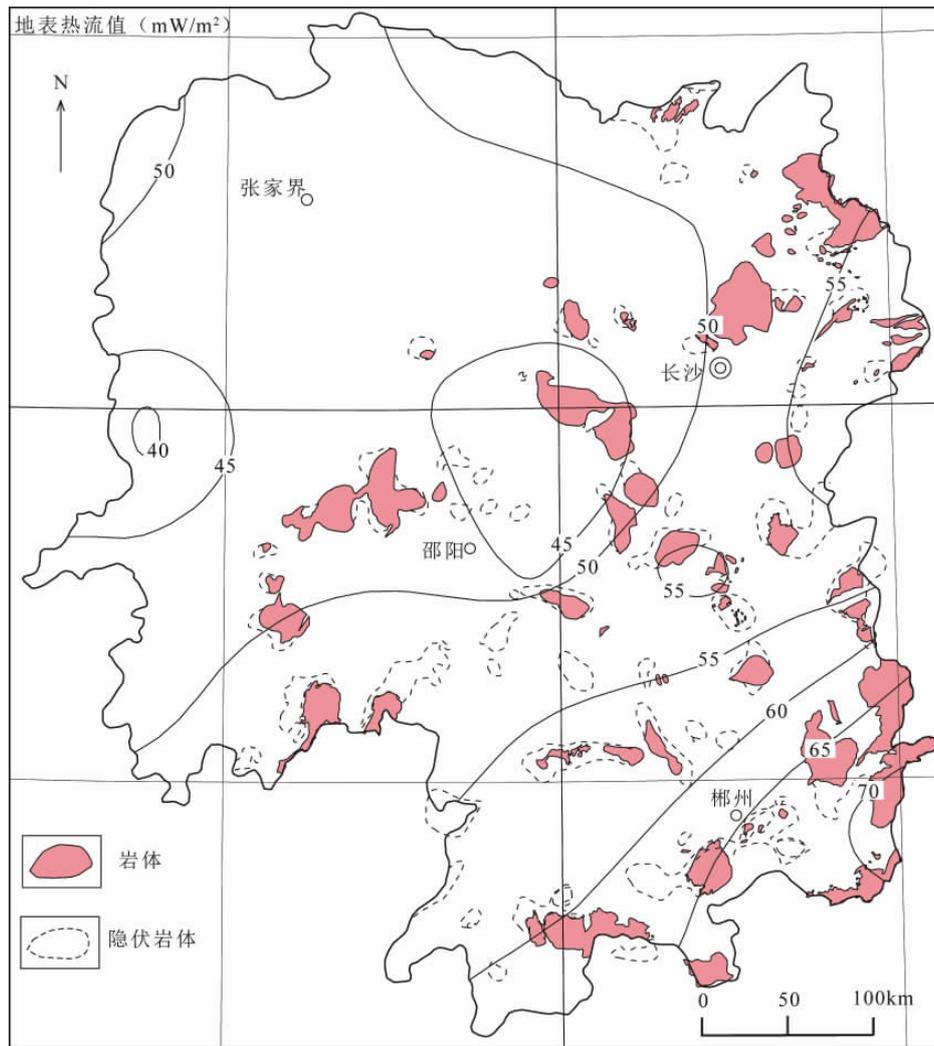


图4 湖南省地温大地热流等值线分布图

Figure 4 Isograms of ground temperature and telluric heat flow in Hunan Province

常明显^[22],因此湖南省东南部具有相对有利的形成干热岩的条件。

2.3.3 居里面分布特征

从湖南省居里面等深图上可以看出(图5)^[20],居里面深度在17~34km,表现出NEE向的相间条带状构造。其中湘西南—湘中地区最浅,深度在23km以浅,表现出隆起和凹陷相间的团块状构造,在湘西南的越城岭地区埋深最浅,约17km。湘东南和湘西北地区最深,最深处位于塔山—大义山岩体、骑田岭岩体附近,可达34km。研究表明,居里面的结构特征可以间接反映出岩石圈的热活动状态,居里面隆起位置有利于干热岩的形成,但湖南省居里面深度特征与地表面热流值、地温梯度的分布特征存在差异,可能与岩体生热率有关。

2.4 应力条件

中国大陆域及各活动地块、南北地震带现今地

壳浅部原地应力场分布特征表明^[25],中国大陆域地表实测地应力均为压性,随埋深均呈线性增大。地块地壳浅部应力场特征分析表明,由于受到菲律宾海板块以及青藏地块的作用,在华南地块内部,最大主应力方向主要为SE方向,长江中下游平原区表现出较大的压应力水平。已有研究表明,挤压构造背景下的应力场格局有利于沉积物盖层和花岗岩基底保持高的构造应力存在,进而保证他们具有低的流体渗透率、低的热流传导^[5],因此湖南省主要主要SE向的压应力作用范围内,有利于花岗岩岩体具有低的流体渗透率、低的热流传导。

2.5 地体稳定区域

湖南地震资料分析表明^[17],湖南历史上发生4(3/4)级以上的中强震22次,其中 $M_s \leq 5.0$ 级地震10次,5.0 $\leq M_s \leq 5.9$ 级地震11次,6.0级以上地震1次,总体表现较为稳定的特征。有仪器记录以

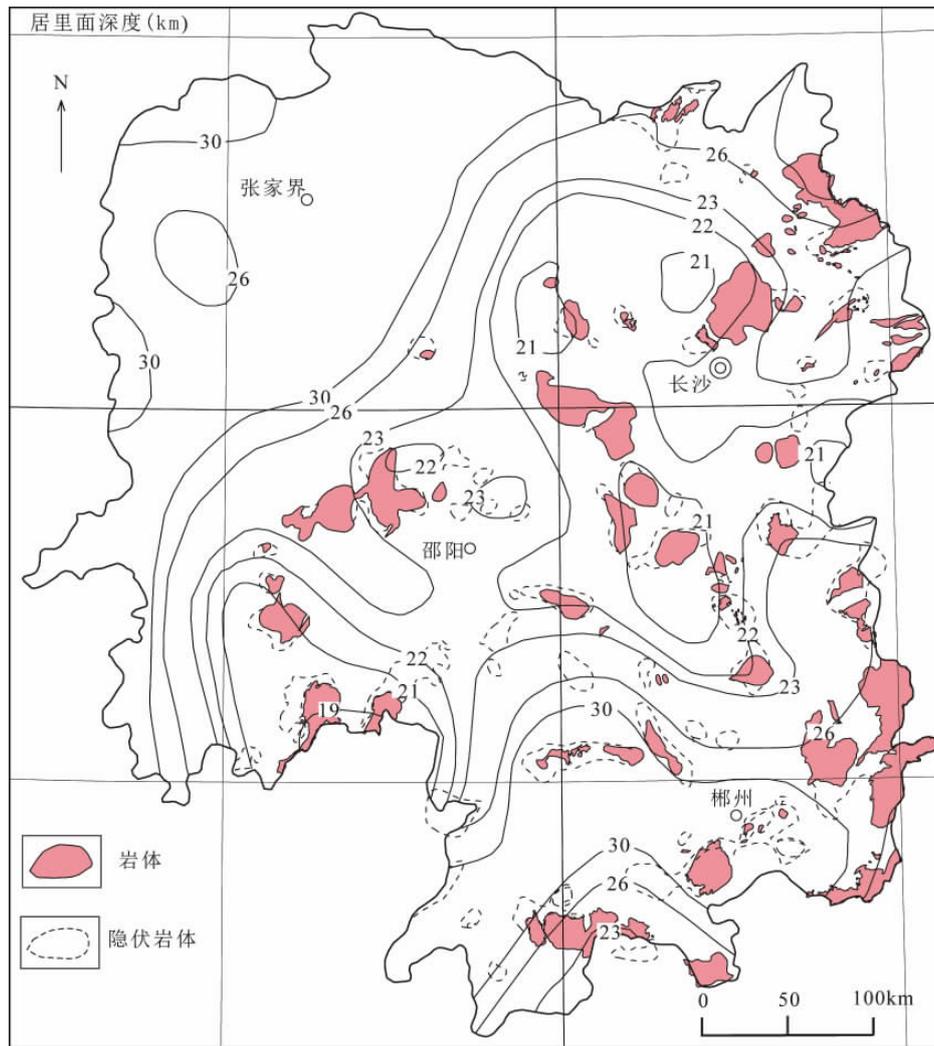


图5 湖南省居里面等深图

Figure 5 Isogram of Curie point isotherm depth in Hunan Province

来的近代地震湖南共发生 ML3.0 级以上地震 40 次,集中分布在近东西的断裂带上,即湘北西带、东中带和湘东南带,与重磁异常区、莫霍面陡坡和缓坡区、温度异常区有相同的展布。其中洞庭拗陷盆地东西两侧晚期北北东向断裂继续活动,形成省内两条重要的地震活动带。如公田—新宁高级断裂带,据地震资料说明,断裂带附近曾发生 24 次 3~5 级地震。而湘东南如桂东—汝城断裂、瑶岗仙断裂、郴县—临武等地区,地震强度一般小于 4 级,是的干热岩开发的有利地区。

3 靶区优选

3.1 评价指标综合体系

根据上述分析结果,结合国内外有关干热岩判别指标,择优选取 6 项评价指标对湖南省花岗岩体干热岩赋存条件进行评价,并对每个指标进行细分(表 2、表 3),依据其重要性赋予权重,进而优选有利区。

3.2 靶区优选

依据上述评价指标及权重,本次重点对具有高放射性生成热大于 $4 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 的岩体进行了判别,各岩体评价指标见表 3 所示。根据权重算获得的地质评价系数 60 分以上的按大小排序依次为:诸广山岩体(81)、九疑山岩体(77)、香花岭岩体(74)、骑田岭岩体(71)、大义山岩体(包括塔山部分)和越城岭岩体(66)、关帝庙和沅山岩体(65)、万洋山岩体(62)、五峰仙岩体和幕阜山岩体(61)。依据这一结果可以优选有利区,认为湘东南的诸广山岩体、九疑山岩体、香花岭岩体、骑田岭岩体重点干热岩勘探区,其次为大义山岩体、越城岭岩体、关帝庙以及沅山岩体。同时,根据隐伏岩体及放射性元素分布特征,可以考虑对诸广山岩体热水地区、香花岭—骑田岭 NEE 向带、九疑山岩体北西部、关帝庙岩体中部、沅山岩体中部红盆覆盖区开展干热岩勘查工作。

表 2 湖南省花岗岩体干热岩评价标准

Table 2 Assessment criterion for granite mass hot dry rocks in Hunan Province

评价指标	权重系数	级别			
		一级(100)	二级(80)	三级(60)	四级(40)
放射性生热率($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	0.2	>6	5~6	4~5	4 以下
盖层	0.15	白垩系断陷红盆	侏罗系-三叠系	古生代	元古代及以前
地温梯度(基底 4km 温度 地表取 21℃)	0.2	≥ 150	150~120	120~100	100 以下
大地热流特征(mW/m^2)	0.2	>70	70~60	60~50	50 以下
居里面深度(km)	0.15	<20	20~25	25~30	30 以上
地体稳定性(岩体周边)	0.1	无地震活动	发生过 4 级及以下地震	发生过 5 级地震	发生过 6 级及以上地震

表 3 湖南省主要花岗岩体干热岩指标分值及评价结果

Table 3 Main granite mass hot dry rock indicative scores and assessed results in Hunan Province

岩体	放射性生热率	盖层	基底 4km 温度	大地热流特征	居里面深度	地体稳定性	评价系数
诸广山岩体	100	60	60	100	80	80	81
万洋山	40	60	60	80	60	80	62
骑田岭岩体	100	60	60	80	40	80	71
越城岭	60	60	60	60	100	60	66
幕阜山	80	40	60	60	60	60	61
沩山	80	100	40	40	80	60	65
五峰仙	40	60	60	60	80	80	61
关帝庙	60	60	60	60	80	80	65
塔山	40	60	40	60	60	80	54
香花岭	100	60	60	80	60	80	74
九疑山	100	60	60	80	80	80	77
大义山	100	60	40	60	60	80	66
阳明山	60	60	60	60	40	80	59
紫云山	60	40	40	40	80	80	54
瓦屋塘	60	60	40	60	80	60	59

4 结论

(1) 在综合分析前人已有资料基础上,综合湖南花岗岩岩体分布、岩石放射性生热率、大地热流分布、深度温度场特征,初步获得了湖南省主要花岗岩体干热岩指标。

(2) 依据干热岩体地质评价指标研究分析表明,湘东南的诸广山岩体、九疑山岩体、香花岭岩体、骑田岭岩体重点干热岩勘探区,其次为大义山岩体、越城岭岩体、关帝庙以及沩山岩体。

(3) 湖南省干热岩研究尚处起步阶段,建议在诸广山岩体热水地区、香花岭—骑田岭 NEE 向带、九疑山岩体北西部、关帝庙岩体中部、沩山岩体中部的红盆覆盖区开展干热岩勘查工作。

参考文献:

[1] Brown D W, Duchane D B, Heiken G. Mining the earth's heat: Hot dry rock geothermal energy. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg GmbH&Co. KG, Berlin. 2012.

[2] Olasoloa P, Juárez M C, Morales M P, Sebastiano D A, Liarte I A. Enhanced geothermal systems(EGS): A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016(56): 133-144.

[3] 柏道远, 陈建超, 马铁球, 等. 湘东南骑田岭岩体 A 型花岗岩的地球化学特征及其构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(4):

255-272.

[4] 柏道远, 钟响, 贾朋远, 等. 湘中印支期关帝庙岩体地球化学特征及成因[J]. 沉积与特提斯地质, 2014, 34(4): 92-104.

[5] 柏道远, 钟响, 贾朋远, 等. 南岭西段加里东期越城岭岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地质地球化学特征及其形成构造背景[J]. 地球化学, 2015, 44(1): 27-42.

[6] 曹晖, 姜文, 叶见玲, 等. 湖南五峰仙花岗岩体干热岩热源与热通浅析[J]. 能源与环境, 2016(5): 41-42.

[7] 陈卫锋, 陈培荣, 黄宏业, 丁兴, 孙涛. 湖南白马山岩体花岗岩及其包体的年代学和地球化学研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(7): 873-893.

[8] 郭春丽, 郝佳浩, 楼法生, 等. 华南印支期花岗岩类的岩石特征、成因类型及其构造动力学背景探讨[J]. 2012, 36(3): 457-472.

[9] 兰鸿锋. 诸广山南体“三九”地区花岗岩的成因研究和铀成矿潜力探讨[D]. 南京: 南京大学, 2015: 1-88.

[10] 李德威, 王焰新. 干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2015, 40(11): 1858-1869.

[11] 李恒新. 湖南省花岗岩成因类型及其与金矿的关系[J]. 贵金属地质, 1995, 4(4): 283-293.

[12] 简文静, 甘浩男, 王贵玲, 等. 我国东南沿海干热岩赋存前景及与靶区选址研究[J]. 地质学报, 2016, 90(8): 2043-2058.

[13] 陆川, 王贵玲. 干热岩研究现状与展望[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 13-21.

[14] 马丽艳, 刘树生, 付建明, 等. 湖南塔山、阳明山花岗岩的岩石成因: 来自锆石 U-Pb 年龄、地球化学及 Sr-Nd 同位素证据[J]. 地质学报, 2016, 90(2): 284-303.

(下转第 67 页)

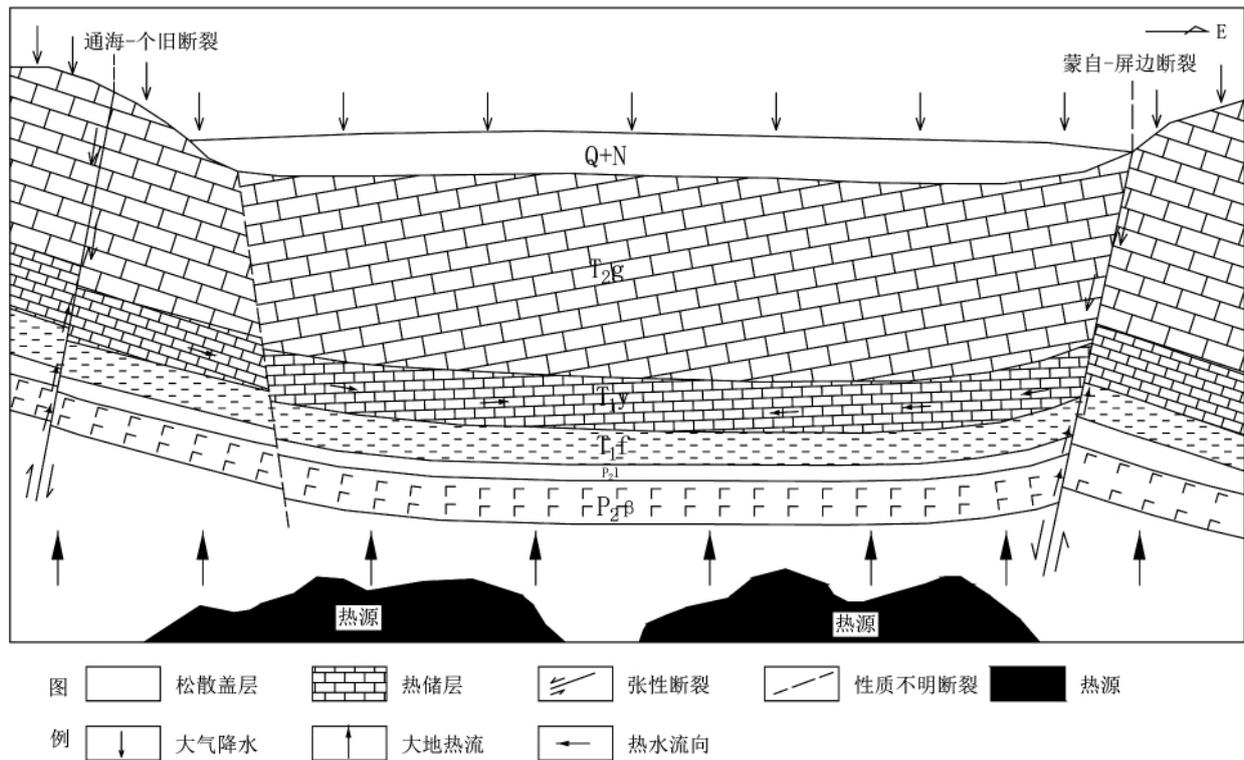


图 2 蒙自坝区地热成因模式

Figure 2 Mengzi basin area geothermal genetic model

产生巨大经济效益及社会效益,地热资源虽属可再生资源,在开发利用过程中也应有科学规划,合理适度开采。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 11615 - 2010 地热资源地质勘查规范:GB/T 11615 - 2010 [S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
- [2] 付在林. 嵩山地区地热地质特征及成因分析[J]. 能源技术与管理, 2010, (2): 107 - 109.
- [3] 程先峰, 徐世光, 张世涛, 等. 云南省安宁温泉地热地质特征及成因模式[M]. 水文地质工程地质, 2008, (5): 128.
- [4] 汪集暘, 熊亮萍, 庞忠和, 等. 中低温对流型地热系统[M]. 北京:科学出版社, 1993: 1 - 10.
- [5] 刘红战, 张小凌, 姚明波, 等. 云南石林盆地地热地质特征及成因分析[J]. 东华理工大学学报, 2014, (37): 69 - 74.
- [6] 姚六三, 李庆仁, 马文华, 等. 云南地热地质特征[J]. 云南地质, 1983, (2): 47 - 56.
- [7] 汪缙安, 徐青, 张文仁, 等. 云南大地热流及地热地质问题[J]. 地震地质, 1990, (12): 367 - 377.
- [8] 陈默香, 汪集暘, 汪缙安, 等. 华北断陷盆地地热场特征及其形成机制[J]. 地质学报, 1990, (1): 80 - 91.
- [9] 刘时彬. 地热资源及其开发利用保护[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- [10] 杨艳华, 和怀忠, 任世川, 等. 昆明盆地地热资源及开发[J]. 云南地质, 2004, 23(1): 30 - 36.
- [11] 朱培玲, 姜常刚, 等. 云南地热资源开发与利用[M]. 北京:地震出版社, 2001.
- [12] 熊盛青, 杨海, 丁燕云, 等. 中国陆域居里等温面深度特征[J]. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3604 - 3617.
- [13] 杨立中, 刘金辉, 孙占学, 等. 漳州岩体放射性生热率特征及干热岩资源潜力[J]. 现代矿业, 2016, (563): 123 - 127, 133.
- [14] 杨树新. 中国陆域地壳应力场分布特征研究[D]. 北京:北京交通大学, 2013: 1 - 115.
- [15] 马铁球, 李彬, 陈焰明, 周柯军, 查建章. 湖南南岳岩体 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄及其地球化学特征[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1712 - 1724.
- [16] 孙劲松. 南岭成矿带重磁场特征研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2013, 1 - 117.
- [17] 童迎世, 童琼. 湖南深部地球物理场特征与地震的关系[J]. 高原地震, 2012, 24(1): 1 - 10.
- [18] 汪集暘, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估. 科技导报, 2012, 30(32): 25 - 31.
- [19] 王岳军, 范蔚茗, 梁新权, 等. 湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U - Pb 年龄及其成因启示[J]. 科学通报, 2005, 50(12): 1259 - 1266.
- [20] 熊盛青, 杨海, 丁燕云, 等. 中国陆域居里等温面深度特征[J]. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3604 - 3617.
- [21] 杨立中, 刘金辉, 孙占学, 等. 漳州岩体放射性生热率特征及干热岩资源潜力[J]. 现代矿业, 2016, (563): 123 - 127, 133.
- [22] 杨树新. 中国陆域地壳应力场分布特征研究[D]. 北京:北京交通大学, 2013: 1 - 115.
- [23] 袁玉松, 马永生, 胡圣标, 等. 中国南方现今地热特征[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1118 - 1126.
- [24] 张术根, 袁莹, 姚翠霞. 南岭中段诸广山复式花岗岩岩石学及其控矿作用[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(6): 1585 - 1598.
- [25] 赵平, 汪集暘, 汪缙安, 等. 中国东南地区岩石生热率分布特征[J]. 岩石学报, 1995, 11(3): 292 - 305.

(上接第 57 页)