

南岭地区与东南沿海地区中生代花岗岩放射性 地球化学特征及岩石圈热结构对比研究

林乐夫^{1,2}, 孙占学^{1,3}, 王安东^{1,2}, 刘金辉^{1,3}, 万建军^{1,2}, 李小聪^{1,2}, 罗贤文^{1,2}

(1. 东华理工大学 核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学
地球科学学院, 江西 南昌 330013; 3. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 华南地区广泛发育中生代花岗岩, 主要出露于南岭地区和东南沿海地区。受大地构造作用影响, 自西向东, 莫霍面深度逐渐变薄, 深部温度逐渐升高, 软流圈顶部上升, 花岗岩形成时代也随之逐渐年轻化。南岭和东南沿海地区的地表和钻孔花岗岩放射性生热元素含量测试结果表明, 南岭地区放射性生热率平均值为 $5.18 \mu\text{W}/\text{m}^3$, 东南沿海地区为 $3.01 \mu\text{W}/\text{m}^3$, 最高生热率为南岭佛冈岩体 $7.56 \mu\text{W}/\text{m}^3$; 热贡献率主要来自 Th 和 U 的放射性衰变热, K 的热贡献率一般不超过 10%。通过本文研究结果, 结合前人地质学、地球物理学和地热学研究成果, 发现南岭地区和东南沿海地区地壳热流对地表热流值的贡献率分别为 60%~65% 和 40%~45%, 指示两者分别为“热壳冷幔”和“冷壳热幔”型岩石圈热结构。

关键词: 南岭地区; 东南沿海地区; 深部温度; 放射性生热率; 岩石圈热结构

中图分类号: P588.12⁺1; P598

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)04-0488-13

Radioactive geochemical characteristics of Mesozoic granites from Nanling region and southeast coastal region and their constraints on lithospheric thermal structure

LIN Le-fu^{1,2}, SUN Zhan-xue^{1,3}, WANG An-dong^{1,2}, LIU Jin-hui^{1,3}, WAN Jian-jun^{1,2}, LI Xiao-cong^{1,2} and
LUO Xian-wen^{1,2}

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 2. College of Earth Sciences, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 3. School of Water Resources Environmental Engineering, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Mesozoic granite is widely distributed in southeast China, which can be divided into Nanling and southeast coastal granitic belts. Due to the effect of tectonism, the depth of Moho and the thickness of lithosphere together with the emplacement age of granite bodies decrease eastward, but the temperature at the depth increases eastward. Radioactive heat-producing element content determinations of granites from surface and drill holes within Nanling region and Southeast coastal region show that the average radioactive heat generation ratios are 5.18 and $3.01 \mu\text{W}/\text{m}^3$, respectively, and that the Fogang granitic body exhibits the highest value of 7.56

收稿日期: 2017-03-13; 接受日期: 2017-06-19

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120113077900); 江西省教育厅科研项目(GJJ14476); 核资源与环境省部共建国家重点实验室自主基金(Z1606, Z1608, RGET1606); 江西省研究生创新基金(YC2016-S279)

作者简介: 林乐夫(1991-), 男, 硕士研究生, 地质学专业, E-mail: LinLoverFu@163.com; 通讯作者: 孙占学(1962-), 男, 博士, 教授, 水文地质专业, 长期从事水文地球化学和地热开发研究, E-mail: zhxsun@ecit.cn; 王安东(1985-), 男, 博士, 讲师, 地球化学专业, 长期从事同位素地球化学及地热学研究, E-mail: adw008@mail.ustc.edu.cn。

$\mu\text{W}/\text{m}^3$. In addition, the thermal contribution rate mainly comes from the radioactive decay heat of Th and U with ^{40}K thermal contribution being less than 10%. The new data obtained by the authors, in combination with previous geological, geophysical and geothermal data, indicate that the contribution rate from the crust to the surface heat flow in Nanling region and Southeast coastal region is about 60% ~ 65% and 40% ~ 45%, respectively. The result suggests that Nanling region is of “hot crust-cold mantle” type and the Southeast coastal region is of “cold crust- hot mantle” type lithospheric thermal structure.

Key words: Nanling region; southeast coastal region; deep temperature; radioactive heat generation; lithospheric thermal structure

Fund support: Project of China Geological Survey(12120113077900); Project of Jiangxi Provincial Education Department(GJJ14476); Independent Foundation of Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment (Z1606, Z1608 and RGET 1606); Science and Technology Innovation Fund of Postgraduate in Jiangxi Province (YC2016-S279)

中国东南部属华南板块,其区域内广泛发育中生代花岗岩(王德滋等, 2002; Zhou and Li, 2000; Zhou *et al.*, 2006; 李献华等, 2007)。按其空间分布特征,可分为南岭内陆和东南沿海两个岩浆岩带,岩体大面积出露,并伴生有同时代的火山-沉积盆地发育,形成独具特色的盆岭构造(Zhou and Li, 2000; Zhou *et al.*, 2006; 周新民, 2007)。同时,华南地区也是我国重要的 W、Sn、U 和 REE 等稀有金属矿床基地(华仁民等, 2005; 舒良树等, 2006; 李献华等, 2007; Yang *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2015)。区域内温泉密集,分布有大量的水热型地热资源,大地热流背景值相对较高(Hu *et al.*, 2000; 姚金等, 2011; Wang *et al.*, 2016)。重力、电磁、地震及放射性等地球物理特征资料综合研究结果表明,南岭地区与东南沿海地区在深部结构上存在明显差别,自内陆到沿海岩石圈厚度逐渐变薄,莫霍面温度逐渐升高,软流圈顶部逐渐变浅(庞忠和, 1987; 熊绍柏等, 1991; 王培宗等, 1993; 袁学诚, 1996; 吴健生等, 2014; 马峰等, 2015),深入研究并对比两者地质学、地球物理学及地球化学等特征,对解释地温场分布、查明放射性衰变热对地表热流值的贡献率以及探讨岩石圈热结构都具有十分重要的意义(赵平, 1995; Cermak and Rybach, 1987; Wang *et al.*, 2016)。

本文在已有的南岭赣南-粤北地区和东南沿海漳州地区花岗岩放射性生热元素含量和热导率数据的基础上,补充测试了漳州地区东泗乡花岗岩的放射性生热元素含量和生热率数据,结合已有的大地构造、地球物理学、地球化学和地热学等资料,探究两者的放射性地球化学及岩石圈热结构特征。

1 区域地质概况

1.1 南岭地区

南岭位于华南地区中南部,分布范围跨湘、桂、粤、赣、闽等省,大体呈 E-W 向分布于 $\text{N}23^{\circ}20' \sim 26^{\circ}40'$ 、 $\text{E}111^{\circ} \sim 117^{\circ}$ 范围内。大地构造上,其东部属滨西太平洋构造域,西部则进入滨特提斯-喜马拉雅构造域。岩体和盆地展布以 EW 向为主,受控于萍乡-桂林断裂带、龙岩-大埔-海丰断裂带、赣江断裂带和四会-吴川断裂带、茶陵-广昌隐伏断裂、梧州-四会隐伏断裂等 5 条断裂带。区内花岗岩带主要以 EW 向平行展布,自北向南依次由骑田岭-九峰山花岗岩带(北带)、大东山-贵东花岗岩带(中带)、佛冈-新丰江花岗岩带(南带)共同组成(舒良树等, 2006; 周新民, 2007)。自印支期北侧和南西侧诸陆块拼合以来,又经历了多期构造-岩浆-沉积作用,发育华南地区最大规模的早中生代花岗岩和裂谷盆地(包志伟等, 2003; 刘昌实等, 2003; 舒良树等, 2006; 周新民, 2007)。该区出露的岩浆岩以大型花岗岩岩基为主,如大东山-贵东复式岩体、佛冈复式岩体以及九峰-诸广山复式岩体,时代上主要从加里东期至燕山晚期,其中燕山早期花岗岩分布范围最广(沈渭州等, 1999; 孙涛, 2006; 周新民, 2007; Sun *et al.*, 2015)。值得注意的是,燕山晚期花岗岩类在南岭地区分布不多(Zhou and Li, 2000; Li *et al.*, 2014),东南沿海地区则主要为燕山晚期花岗岩(图 1)。区内存在类前陆盆地、裂谷盆地和断陷盆地 3 种盆地类型,其中断陷盆地面积最广,主要分布于赣江断裂

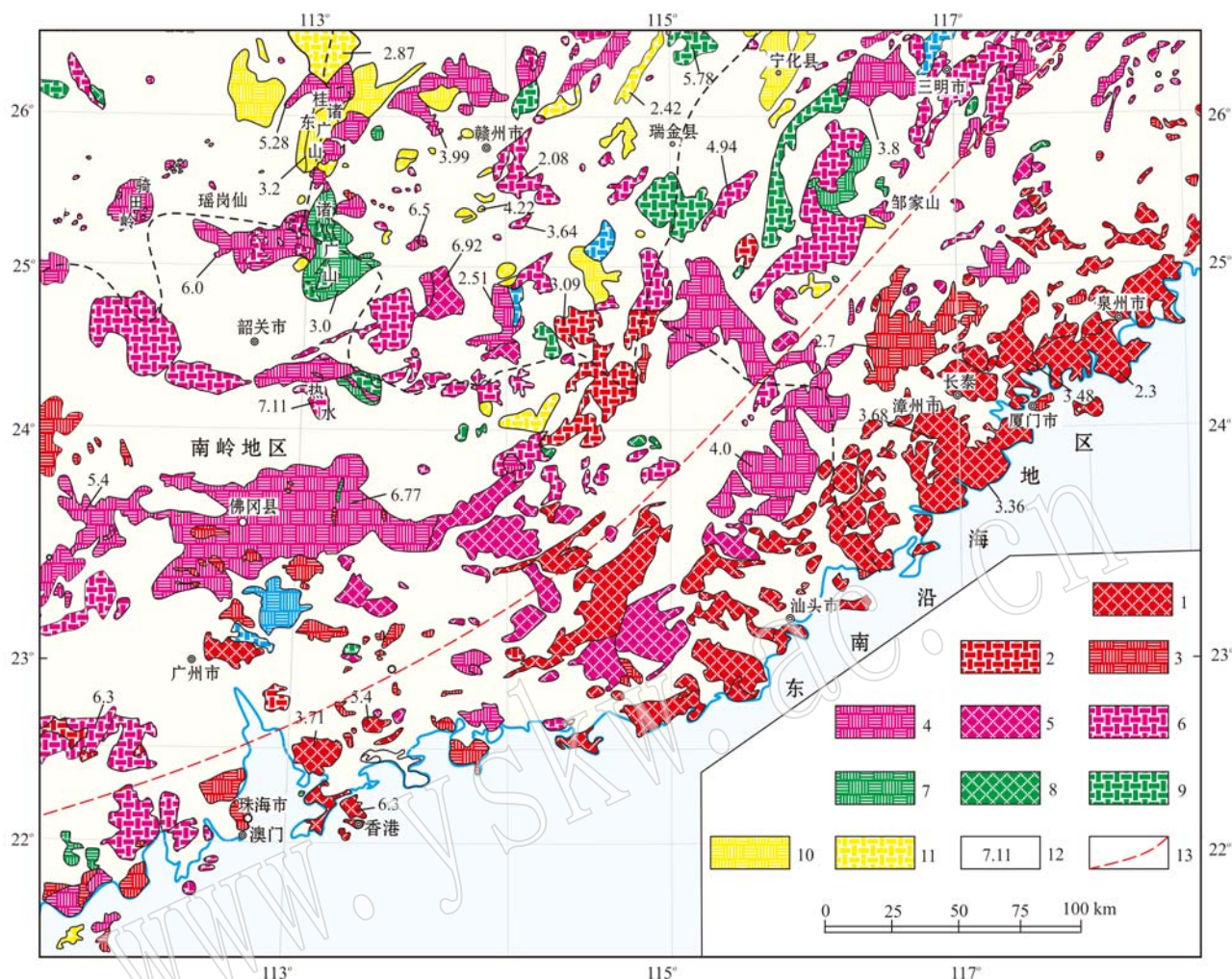


图 1 南岭及东南沿海地区花岗岩分布图[据孙涛(2006)修改]

Fig. 1 Distribution of granites in Nanling area and southeast coast area (after Sun Tao, 2006)

- 1—燕山晚期准铝花岗岩; 2—燕山晚期强过铝花岗岩; 3—燕山晚期弱过铝花岗岩; 4—燕山早期弱过铝花岗岩; 5—燕山早期准铝花岗岩; 6—燕山早期强过铝花岗岩; 7—印支期弱过铝花岗岩; 8—印支期准铝花岗岩; 9—印支期强过铝花岗岩; 10—加里东期弱过铝花岗岩; 11—加里东期强过铝花岗岩; 12—生热率值; 13—区域分界线

1—late Yanshanian quasi-aluminous granite; 2—late Yanshanian strongly peraluminous granite; 3—late Yanshanian weakly peraluminous granite; 4—early Yanshanian weakly peraluminous granite; 5—early Yanshanian quasi-aluminous granite; 6—early Yanshanian strongly peraluminous granite; 7—Indo-Chinese epoch weakly peraluminous granite; 8—Indo-Chinese epoch quasi-aluminous granite; 9—Indo-Chinese epoch strongly peraluminous granite; 10—Caledonian weakly peraluminous granite; 11—Caledonian strongly peraluminous granite; 12—heat generation; 13—regional boundary

带及四会-吴川断裂带东部(舒良树等, 2004; 周新民, 2007)。受岩体和断裂作用影响, 南岭地区有大量温泉出露, 其中粤北共发现 36 处温泉(有 32 处分布在花岗岩岩体内)(姚金等, 2011), 表明区域内有丰富的地下热水资源, 且其分布与花岗岩关系密切。

1.2 东南沿海地区

东南沿海地区隶属于中国东南部, 全区分布大量晚中生代火山-侵入杂岩, 是环太平洋地区岩浆岩

带的重要组成部分(王德滋等, 1999; Zhou and Li, 2000)(图 1)。在大地构造上, 属欧亚板块与太平洋板块相互作用地带(王培宗等, 1993), 晚侏罗世以来, 除华南局部地段表现为 EW 向构造, 大部分为 NE 和 NNE 向, 表明构造格局发生重大变化与古太平洋板块向大陆强烈俯冲及随后的伸展-减薄作用有关(王德滋等, 2002; 舒良树等, 2002)。东南沿海地区岩体和盆地展布同样以 NE 和 NNE 向为主。

本文研究重点为福建漳州地区,地处 $E117^{\circ}\sim 118^{\circ}$ 、 $N23.8^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 之间,陆域南北长 187 km,东西宽 127 km,面积约 1.3 万 km^2 。漳州岩体为研究主体,出露面积约为 900 km^2 ,挟持于长乐-南澳断裂带与政和-大埔断裂带之间(Li *et al.*, 2014; 王安东等, 2015),出露岩石以燕山晚期花岗岩为主。区域内盆地发育明显,盆周高度主要受酸性-中酸性火山岩和超浅成酸性岩体控制(马杏垣等, 1983; 李国华等, 2008)。漳州位于板块运动活跃区,地壳厚度相对较薄,其所属的东南沿海地热带是中国四大地热带之一,内有丰富的地热资源,水热活动强烈,是中国中低温温泉分布最为密集的地带(庞忠和, 1987; 汪集旸, 1996; 王贵玲等, 2000)。

2 岩石学特征

南岭地区广泛出露花岗岩,其类型主要为 S 型花岗岩,与稀有金属矿产关系密切,是中国花岗岩与成矿作用研究的摇篮(Zhou and Li, 2000; Zhou *et al.*, 2006; 李献华等, 2007; Huang *et al.*, 2015)。

该区以多期复式岩体为主,如诸广岩体、贵东岩体、佛冈岩体、下庄岩体、骑田岭岩体等。据陈培荣等(2002)、李献华等(2007)研究统计表明,大部分为燕山早期花岗岩(165~160 Ma),出露面积不等,如佛冈岩体,出露面积 $>6\,000\ km^2$,为南岭最大和最有代表性的花岗岩体。南岭地区燕山早期花岗岩以灰白色黑云母二长花岗岩、肉红色黑云母钾长花岗岩为主,兼有部分花岗闪长岩等(图 2a、2b),全晶质中粗粒-不等粒、似斑状结构和块状构造。主要组成矿物有石英、斜长石、正长石等,次要矿物为黑云母、白云母、绿泥石等,偶见角闪石,副矿物主要为绿帘石和磁铁矿。

东南沿海地区花岗岩类型主要为 I-A 型,燕山晚期花岗岩大面积出露(王德滋等, 2002; Li *et al.*, 2014),进一步说明东南沿海地区与南岭地区岩体形成于不同的构造环境中。以漳州岩体为代表的东南沿海地区花岗岩岩石类型复杂多样,主要有花岗闪长岩、中粒花岗岩、似斑状花岗岩和黑云母花岗岩(图 2c、2d),似斑状结构和块状构造,主要矿物有石英、角闪石,长石多为钾长石。东南沿海地区花岗岩

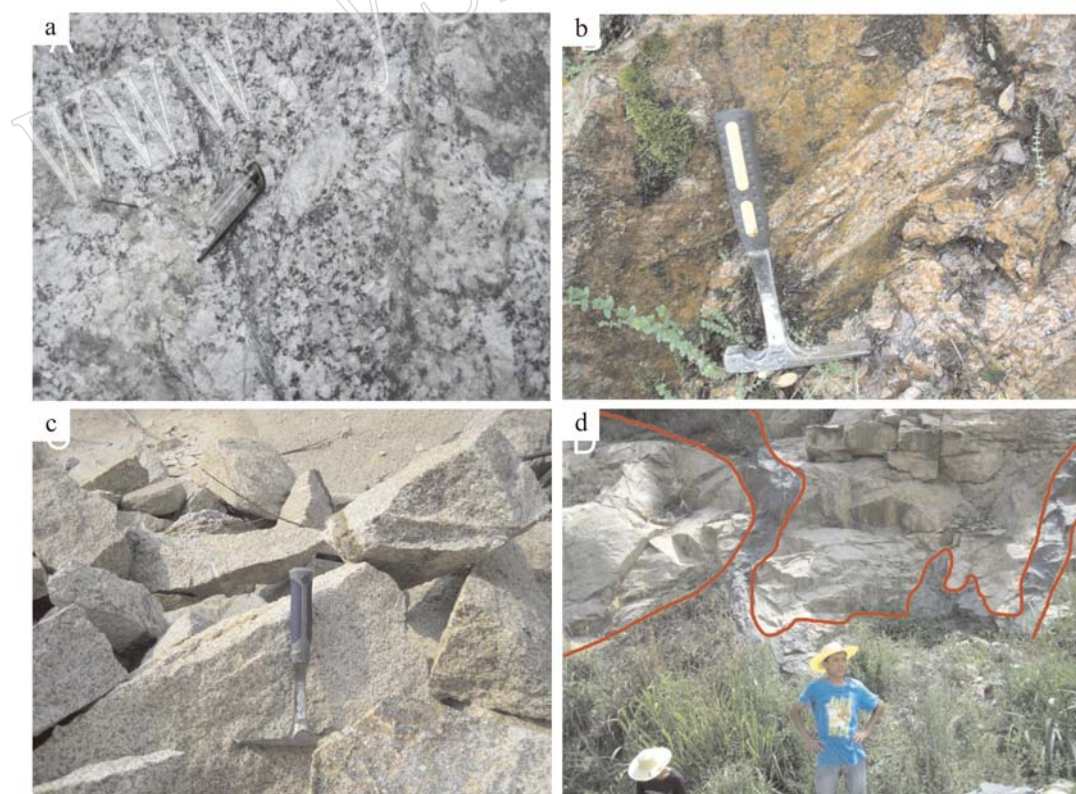


图 2 南岭地区岩体野外照片(a、b)及东南沿海地区岩体野外照片(c、d)

Fig. 2 Field photographs showing plutons from Nanling area (a, b) and southeast coastal region area (c, d)

体中含有大量的显微暗色包体(MME),并见有镁铁质岩脉侵入(图2d),这是该地区最为显著的野外特征,与南岭地区具有明显的差别,指示该区存在强烈的壳、幔混合作用,幔源热在地表热流中有重要贡献(王德滋等,2002; Wang *et al.*, 2016)。

3 地球物理特征

南岭地区和东南沿海地区在重力、电磁、地震乃至放射性等地球物理特征上存在明显差别。根据以往重力资料显示(王德滋等,2002),东南沿海地区布格重力异常值明显高于南岭武夷山地区,受大地构造影响,南岭至东南沿海地区,以EW向走势逐渐转变为NNE向,重力变化趋势与区域内断裂走向和岩体展布方向变化相似。东南沿海地区以正异常为主,南岭地区以负异常为主,变化范围为 $20 \times 10^{-5} \sim -65 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,夹于长乐-南澳断裂带与政和-大埔断裂带之间的漳州地区重力值约为 $-10 \times 10^{-5} \sim -20 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,南岭地区约为 $-20 \times 10^{-5} \sim -40 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (图3)。区域磁场特征与火山-侵入岩带在空间分布上联系密切,东南沿海地区磁异常变化强烈,正负异常均出现较高异常值;南岭地区磁异常变化平缓,以正异常变化为主。两者磁异常变化

较强烈地段均位于构造断裂带周边,其分界线与岩石构造界线有较好的吻合性。

地壳厚度与地温场的分布有密切关系,地壳薄则地温高,地壳厚则地温低(王贵玲等,2004)。东南沿海莫霍面普遍较浅,在NE向重力梯度带处的浙闽沿海,莫霍面深度仅29~30 km,愈近海区,地壳厚度愈薄。向东到南岭地区,厚度可达33~34 km;越过赣江断裂,地壳厚度达35 km,已接近正常地壳厚度值(37~40 km),地壳厚度从海区到陆内不断增大(Rudnick *et al.*, 1995; 王德滋等, 2002)(图3)。庞忠和(1987)综合早期大量地质学和地球物理学资料,认为漳州地区的地壳厚度为27~30 km,与实际地震测深结果近似一致。三维速度地震层析成像结果及110 km深度处的速度图像表明,东南沿海地区和南岭地区的下地壳和上地幔内存在显著的横向不均匀性,南岭地区多为高速带,东南沿海区多为低速带或高热流带。据此,东南沿海在110 km深度处已成为软流圈,而南岭地区软流圈的顶部埋深要比110 km深度大,表明上地幔岩石圈的顶部埋深东浅西深(王德滋等,2002)。东南沿海地区热岩石圈厚度小于100 km,而南岭地区厚度为100~110 km(袁学诚,1996),两者居里面深度分别为19~24 km和21~26 km(马峰等,2015),指示东南沿海地区相对南岭

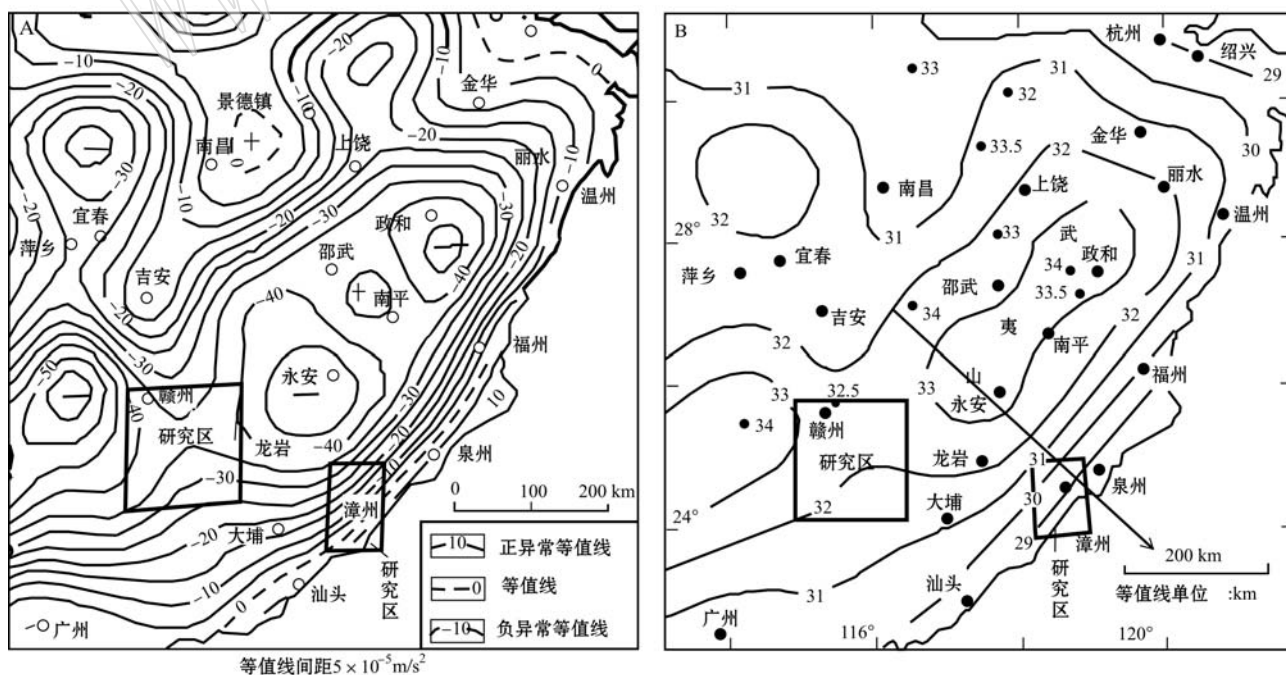


图3 中国东南部布格重力异常图(a)及莫霍面图(b)[据王德滋等(2002)修改]

Fig. 3 Bouguer gravity map (a) and Moho depth map (b) of southeast China(after Wang Dezi *et al.*, 2002)

地区,地幔热贡献更加突出,总体上显示从内陆到沿海地区,莫霍面深度越来越小,软流圈顶部埋深越来越浅,热岩石圈厚度越来越薄。

4 地热学特征

南岭地区和东南沿海地区在深部温度、大地热流值、温泉温度等方面也存在明显差别。据汪集旸等(2012)、蔺文静等(2012)研究统计,在深度为 3.5 km 时,南岭地区温度约 50~75℃,东南沿海地区温度为 75~100℃;深度为 6.5 km 处,南岭地区温度为 100~150℃,东南沿海地区为 150~190℃;在深度为 10 km 时,前者温度约 150~200℃,后者温度 200~240℃,表明总体温度随深度增加而升高;同等深度下,东南沿海地区温度要高于南岭地区;从内陆至沿海地区,温度呈阶梯式上升。早期研究显示,南岭地区大地热流值介于 65~75 mW/m² 之间,东南沿海地区大地热流值介于 75~85 mW/m² 之间,最高可达 120 mW/m²。两者皆具有较高的大地热流值,后者高于前者(汪集旸等,1990,2012;胡圣标等,2001;蔺文静等,2012)。区域内温泉密布,热水资源丰富,南岭粤北地区共发现 36 处温泉(姚金等,2011),水温最高为 73~81℃(万建军等,2015)。东南沿海漳州地区温泉密布,为我国中低温温泉温度有记录的最高保持者,钻孔测量记录为井口温度 114℃,深度至 90 m 时水温最高为 120℃(Pang, 2005),东南沿海地区温泉温度高于南岭地区。南岭地区莫霍面温度 500~550℃,粤北局部地区可达 600℃,东南沿海地区莫霍面温度 575~625℃,高温地段主要集中在大埔-政和断裂带周边,温度为 650℃(袁学诚,1996)。温度变化受构造断裂影响,温度越高,越接近构造活跃地带。胡圣标等(1994)指出,稳定大陆地区的地表热流主要由幔源热流和地壳内放射性生热元素所产生的壳源热流构成。为了进一步查明南岭地区和东南沿海地区热源组成的差别,下文重点探讨两者的花岗岩放射性地球化学及岩石圈热结构特征。

5 岩石放射性地球化学特征

5.1 分析测试原理与方法

自然界的岩石里存在着放射性元素,放射性衰变热是岩石圈内热的主要来源之一。放射性元素种

类很多,只有具有一定丰度、生热量高和半衰期长的元素,才具有地热研究意义,U、Th 和 ⁴⁰K 具备了这些条件(Rybach *et al.*, 1978; 赵平, 1995; 王安东等, 2015)。本次针对所采集的福建漳州地区 31 个地表及 20 个钻孔花岗岩,分别进行了岩石热导率和放射性生热元素含量测定工作。新鲜岩石样品经过室内处理后,U、Th、K 含量由广州澳实分析检测中心完成测试。U 和 Th 含量测定采用 ICP-MS 溶液法,数据精度在 ±10% 范围内,K₂O 含量测定采用 X 射线荧光光谱法(XRF),分析精度在 ±2% 范围内。岩石热导率表示岩石导热能力的大小,直接影响地球内部各个圈层岩石中热的传递、储存,是地表热流、地球内部温度分布和热传递研究中的重要参数(胡圣标等,2015)。样品热导率测试所用仪器为加拿大 C-Thermal 公司生产的 TCi 导热系数分析仪,测试工作在东华理工大学核资源与环境重点实验室完成,标样监测和 6 次重复测试结果显示分析精度在 ±10% 误差范围内。

5.2 分析结果

5.2.1 岩石放射性生热元素含量

野外伽马值是放射性强度的重要指标,间接反映了被测区域内放射性生热元素含量的高低。野外研究发现东南沿海漳州岩体的野外伽马值比较低,一般在 20~50 γ 之间,而华南陆内粤北-赣南地区花岗岩体的伽马值普遍较高,范围较大,在 40~180 γ 之间,主要落在 60~110 γ 之间(图 4)。虽然野外伽马值只是定性半定量分析结果,但是这一结果与野外地质学特征具有很好的一致性。南岭粤北-赣南地区花岗岩以 S 型为主,富含放射性生热元素 U、Th 和 K,不少花岗岩体为含铀矿型花岗岩;而漳州地区花岗岩以 I-A 复合型花岗岩为主,幔源物质贡献相对较大,不相容的放射性生热元素 U、Th 和 K 相对含量较低,因此野外伽马值强度自然低。

本文新测定的部分东南沿海地区花岗岩放射性元素含量数据见表 1。综合 Sun 等(2015)、王安东等(2015)和杨立中(2016)实验结果,发现南岭地区与东南沿海地区花岗岩 Th 含量分别介于 40×10^{-6} ~ 51×10^{-6} 和 14.58×10^{-6} ~ 35.2×10^{-6} 之间,平均值分别为 41.8×10^{-6} 和 23.67×10^{-6} ; U 含量分别为 9×10^{-6} ~ 18×10^{-6} 和 4.05×10^{-6} ~ 9.1×10^{-6} ,平均值分别为 12.6×10^{-6} 和 6.25×10^{-6} ; K 含量分别为 4.02%~5.43% 和 1.70%~5.25%,平均值分别为 4.97% 和 4.24%。由此可见,南岭地区 Th、U

含量明显高于东南沿海地区,其中,佛冈岩体 Th 含量与下庄岩体 U 含量分别为区域内最高值 51×10^{-6} 、 18×10^{-6} ,除立人学校岩心之外,两者 K 元素含量近乎一致。

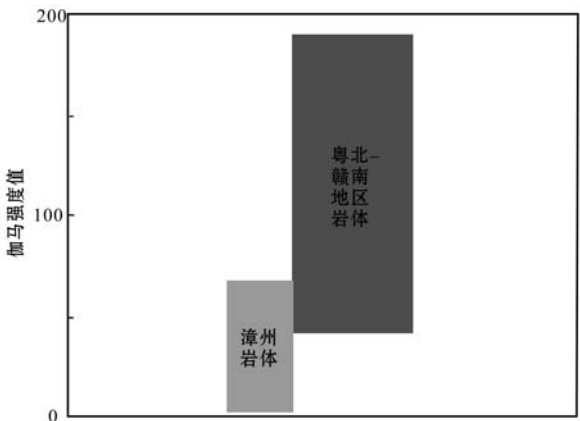


图 4 南岭粤北-赣南岩体与东南沿海漳州岩体野外伽马值对比图
Fig. 4 The difference of γ values between Nanling area and southeast coastal region

表 1 南岭地区及东南沿海地区花岗岩放射性地球化学特征
Table 1 Granite radioactive geochemical characteristics of Nanling area and southeast coastal region

采样位置(样品数)	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	参考文献
南岭地区				
诸广岩体(128)	40	11	5.43	Sun 等 (2015)
贵东岩体(4)	41	9	4.02	
下庄岩体(26)	31	18	5.34	
热水岩体(12)	46	14	4.95	
佛冈岩体(37)	51	11	5.12	
东南沿海地区				
地表花岗岩(219)	25.3	6.45	4.62	王安东等 (2015)
立人学校岩心(11)	24.7	9.1	1.70	
芝山公园岩心(27)	35.2	6.8	5.25	
隆教乡岩心(58)	14.58	4.84	4.44	杨立中(2016)
东泗乡岩心(20)	18.58	4.05	5.22	本文实测

5.2.2 岩石放射性生热率特征

通过采用 Rybach 推荐的计算方法,发现两者均具有相对较高的平均单位体积生热率(表 2)。南岭地区放射性生热率变化范围为 $2.08 \sim 7.56 \mu\text{W}/\text{m}^3$;东南沿海地区放射性生热率变化范围为 $1.40 \sim 4.39 \mu\text{W}/\text{m}^3$,两者生热率平均值分别为 $5.18 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 和 $3.01 \mu\text{W}/\text{m}^3$,整体均大于世界范围花岗岩平均生热率 $2.5 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (McLaren *et al.*, 2003),南岭地区岩体生热率整体显著高于东南沿海地区岩体,其中佛

表 2 南岭地区及东南沿海地区部分花岗岩生热率
Table 2 Granite radioactive heat generation of Nanling area and southeast coastal region

采样位置	主要岩性特征	生热率/ $\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$	数据参考文献
南岭地区			
诸广岩体	黑云母中粒花岗岩	5.51	Sun <i>et al.</i> (2015)
诸广岩体	中细粒花岗岩	6.89	
诸广岩体	中粗粒花岗岩	6.34	
诸广岩体	花岗岩	5.78	
贵东岩体	中粗粒花岗岩	7.44	
贵东岩体	中粗粒花岗岩	6.98	
下庄岩体	中细粒花岗岩	7.03	
热水岩体	中细粒花岗岩	7.11	
佛冈岩体	中粗粒花岗岩	7.56	
佛冈岩体	中细粒花岗岩	6.34	
东南沿海地区			
铅山武夷山	花岗岩	3.98	赵平(1995)
甘霖岩体	花岗闪长岩	2.08	
上犹营前	花岗闪长岩	4.27	
龙舌岩体	花岗岩	3.99	
深圳南头	花岗岩	3.71	
贵溪冷水	花岗斑岩	3.11	
赣南河岭	花岗岩	3.09	
瑞金谢坊	花岗岩	4.94	
大富足岩体	花岗岩	2.51	
青峰山岩体	花岗岩	6.50	
足洞岩体	花岗岩	3.64	
东南沿海地区			
漳州地表	花岗岩	3.68	王安东等(2015)
立人学校岩心	中粗粒花岗岩	4.05	
芝山公园岩心	中粗粒花岗岩	4.39	
隆教乡岩心	细粒花岗岩	2.52	杨立中(2016)
东泗乡岩心	粗粒钾长花岗岩	2.97	本文实测
福建集美	花岗岩	3.48	赵平(1995)
福建胡坊	花岗岩	3.8	
福建埔前	花岗岩	3.4	
福建埔前	花岗闪长岩	1.8	
福建宏屿	花岗岩	2.7	
福建莆田	二长花岗岩	2.3	
福建鼓山	花岗岩	2.1	
福建丹阳	花岗岩	1.4	
福建漳浦	花岗岩	3.36	
浙江庆元	花岗岩	3.9	
浙江龙泉	花岗岩	2.45	
浙江大香	钾长花岗岩	1.5	
浙江遂昌	花岗闪长岩	4.3	

冈岩体放射性生热率最高为 $7.56 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 。两者岩石中的生热元素丰度差异明显,这也与南岭地区野外伽马值高于东南沿海地区这一野外测试结果相对应。野外伽马值和放射性元素衰变生热结果显示,东南沿海漳州地区的放射性元素含量及生热率均低于南岭赣南-粤北地区,暗示东南沿海地区地表热流

中地壳热贡献率低于南岭地区,而地幔热贡献扮演了更重要的角色。

结合前人研究资料(表2),华南地区花岗岩生热率变化程度较大,产热岩体分布不均(详细见图1),表明生热元素在大陆地壳中分布具不均一性。受侵入期次和程度的影响,花岗闪长岩生热率均值要低于花岗岩。区域内花岗岩形成时代不同,生热元素含量和生热率也有所差异(柏道远等,2007;徐岩等,2013;王丽丽,2015)。通过相应计算,发现受不同时期岩浆活动影响,加里东期的岩石生热率最低,燕山期的生热率较高(图5)。南岭地区与东南沿海地区的主要岩石分别形成于燕山早期和燕山晚期,且前者生热率高于后者,导致这种现象的原因可能有两个方面:一方面重熔型花岗岩具有较高的生热率,同熔型次之,幔源型最低(赵平,1995;王德滋等,2002;李献华等,2007)。燕山早期为南岭花岗岩主要形成阶段,主要以大规模多期次形成的重熔型复式岩体出现,多个阶段的岩浆活动促使生热元素向地壳浅层迁移,而东南沿海地区的花岗岩主要以幔源型、同熔型为主。另一方面,晚中生代时期的碰撞事件与碰撞后地壳伸展作用,在华南地区形成了大规模的断陷盆地和断裂构造,为南岭与东南沿海地区提供有利的热源运移条件,这一阶段也是南岭地区大规模铀成矿与东南沿海地区成岩的重要阶段(李献华等,1997;王德滋等,2002;邓平等,2003)。因此,南岭地区较东南沿海地区,放射性生热元素有着更好的富集条件,考虑到南岭地区具有相对较高的放射性生热率值,可称之为高产热花岗岩(HH-PG)(Chopra and Wyborn, 2003)。

放射性生热率的另一个重要特征是每个放射性生热元素的热贡献率。数据结果显示,岩石放射性生热率主要来自于U和Th的放射性衰变热,K的

贡献率相对较小,一般在10%左右(Wang *et al.*, 2016),由于不同生热元素的半衰期不同,它们之间热贡献的相对比例也会随时间发生变化,半衰期较长的生热元素如 ^{232}Th ,其热贡献的相对比例在逐渐增大,而半衰期较短的生热元素如 ^{235}U 和 ^{40}K 反之(赵平等,2015)。为进一步表征U和Th的相对贡献率,对研究区不同类型的样品分别作U相对K的贡献率与Th相对K贡献率的关系图(图5),结果显示,南岭地区佛冈岩体Th贡献率高,而下庄岩体U贡献率高;漳州岩体除芝山公园花岗岩岩心样品的Th热贡献率大于U外,其它大部分样品U热贡献率大于Th,这一特征类似于南岭地区花岗岩。

6 岩石圈热结构特征

岩石圈热结构是一个地区各种地热参数的综合体现,对了解该地区的岩石圈演化、地表热流组成和地热开发具有重要的意义。通过对研究区花岗岩放射性地球化学特征研究,结合前人地质学、地球物理学和地热学研究成果,可以进一步窥见上述两地区岩石圈热结构的差别(王安东等,2015)。

地球物理和钻探资料显示,南岭地区地壳厚度在34 km左右,根据华南地区主要铀矿床放射性成矿深度、岩石圈有效弹性厚度、均衡重力、地震测深等,推测南岭地区放射性集中层厚度为7~9 km,居里面埋深约21~23 km(章邦桐等,1990,2005;袁炳强等,2005;马峰等,2015);东南沿海地区地壳厚度在29 km左右,居里面埋深在17~18 km,放射性集中层厚度在10~12 km(庞忠和,1987;马峰等,2015;王安东等,2015)。地表热流主要来源于地壳热流(Q_c)与地幔热流(Q_m)(Morgan *et al.*, 1984; Nyblade and Pollack, 1993),其中 Q_c 主要与地壳中U、Th、K元素丰度有关;而 Q_m 来源于幔源岩浆底侵作用,是地壳厚度和莫霍面深度的函数(He, 2015)。由于放射性集中层主要位于中上地壳,因此地壳热流可近似认为由岩体放射性衰变热提供。采用本文测定的平均放射性生热率数据:南岭地区 $5.18 \mu\text{W}/\text{m}^3$,东南沿海地区 $3.01 \mu\text{W}/\text{m}^3$,可推测两者地壳热流值分别为 $35 \sim 45 \text{ mW}/\text{m}^2$ 和 $30 \sim 35 \text{ mW}/\text{m}^2$,南岭和东南沿海地区地温梯度分别为 $23 \sim 33 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ 和 $30 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ (汪集旻等,1990,2012; Hu *et al.*, 2000; 胡圣标等,2001)。结合前人和本文测定的热导率数据(汪集旻等,1990;胡圣标等,

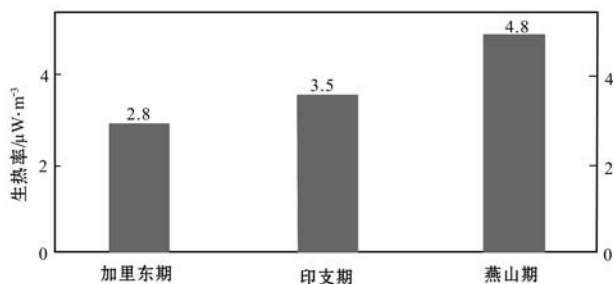


图5 华南地区部分花岗岩生热率与时代关系图

Fig. 5 The relationship between radioactive heat generation and age of southeast China

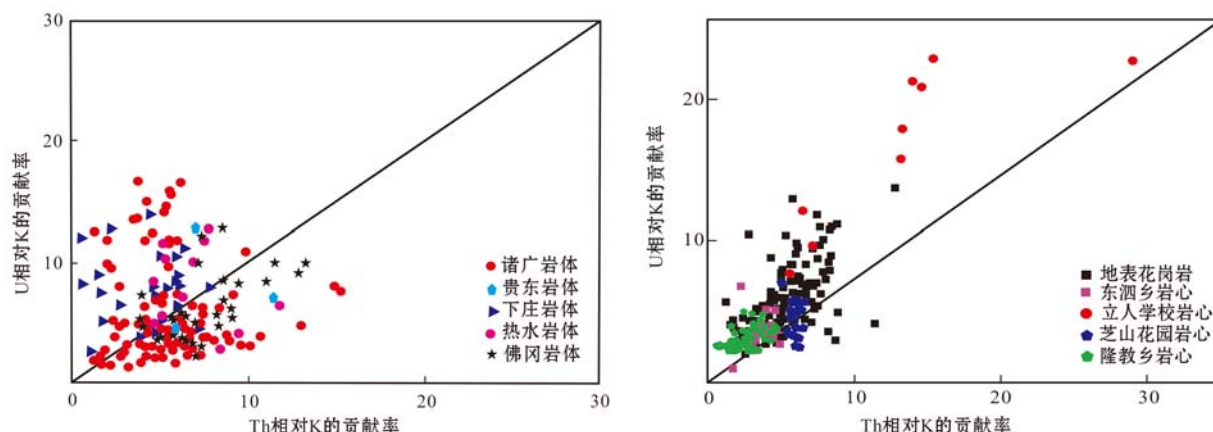


图6 赣南-粤北地区(a)及漳州地区(b)岩石放射性生热率对比[据 Sun 等(2015)、王安东等(2015)和杨立中(2016)修改]

Fig. 6 Thermal contribution of rocks from Nanling area (a) and Zhangzhou area (b)(after Sun *et al.*, 2015; Wang Andong *et al.*, 2015; Yang Lizhong, 2016)

2001; 王安东等, 2015), 南岭地区岩石热导率平均值为 2.61 W/mK , 东南沿海地区热导率平均值为 2.83 W/mK , 计算大地热流值分别为 $60 \sim 85 \text{ mW/m}^2$ 和 $85 \sim 110 \text{ mW/m}^2$, 平均值分别为 75 mW/m^2 和 90 mW/m^2 , 略高于两者大地热流背景值 70 mW/m^2 和 80 mW/m^2 (汪集旻等, 1990, 2012; 胡圣标等, 2001; 蔺文静等, 2012)。根据上述计算结果可知南岭地区和东南沿海地区地幔热流值分别为 $25 \sim 40 \text{ mW/m}^2$ 和 $55 \sim 75 \text{ mW/m}^2$, 南岭地区 Q_c 明显大于 Q_m , 即 $Q_c/Q_m > 1$, 地壳热流对地表热流值的贡献率为 $60\% \sim 65\%$; 东南沿海地区 $Q_c/Q_m < 1$, 地壳热流对地表热流的贡献率为 $40\% \sim 45\%$ 。研究分析表明, 自南岭内陆到东南沿海地区, 地温梯度、岩体冷却速度和抬升速率都在加快 (Shen *et al.*, 2000), 两者均有较好的地热资源, 但是地区的岩石圈结构不同, 南岭地区为“热壳冷幔”, 其地热能主要来源于地壳中花岗岩放射性元素衰变, 漳州地区属于“冷壳热幔”, 地幔热是地表热流的最主要贡献者。

本文研究讨论的是当前的岩石圈热结构特征, 在此之前, 尤其是中生代拉伸作用启动时, 南岭和东南沿海地区的地温梯度和地表热流值应该更高 (王安东等, 2015)。地震层析成像研究结果也显示自南岭内陆到东南沿海, 岩石圈厚度越来越薄。造成这种现象可能有两种原因: 一是由于中生代古太平洋板块的俯冲大洋板片带入了大量的流体成分, 软化了岩石圈; 还有一种可能是在深部存在未完全固化的岩浆。因此, 在传统地热和干热岩开发过程中, 必须注意综合华南内陆地区和沿海地区两者地壳厚

度、深部温度、大地构造、岩石放射性元素含量等方面的系统差别。

7 结论

通过对南岭地区与东南沿海地区地质学、地球物理学、放射性地球化学、地热学等方面综合对比, 得到以下结论:

(1) 通过对大量的地表和岩芯样品的放射性地球化学研究, 获得南岭地区花岗岩放射性生热率为 $5.18 \mu\text{W/m}^3$, 为高产热花岗岩 (HHPG); 东南沿海地区花岗岩平均生热率为 $3.01 \mu\text{W/m}^3$, 两者皆高于世界花岗岩的平均值 $2.50 \mu\text{W/m}^3$ 。

(2) 南岭地区和东南沿海地区在深部温度、温泉温度、地表热流值等方面也存在差别。在同等深度下, 深部温度和温泉水温均为后者高于前者; 前者地表热流背景值为 75 mW/m^2 , 后者为 90 mW/m^2 。

(3) 南岭地区的地壳热贡献率高于地幔热贡献率, 属于“热壳冷幔”型岩石圈热结构; 东南沿海地区地幔热贡献率高于地壳热贡献率, 为典型的“冷壳热幔”型岩石圈热结构。

References

- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Ma Tieqiu, *et al.* 2007. Relationship of petro-geochemical characteristics to metallogenic capacity differences between Indosinian and Early Yanshanian granites in southeastern Hunan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(5): 387~398(in

- Chinese with English abstract).
- Bao Zhiwei and Zhao Zhenhua. 2003. Geochemistry and tectonic setting of the Fogang aluminous A-type granite, Guangdong province, China—A preliminary study[J]. *Geology-Geochemistry*, 31(1): 52~61(in Chinese with English abstract).
- Cermak V and Rybach L. 1987. International conference report: Terrestrial heat flow and the lithosphere structure[J]. *Geothermics*, 16(5): 583~585.
- Chen Peirong, Hua Renmin, Zhang Bangtong, *et al.* 2002. Post-orogenic of the early Yanshanian(Jurassic)granitoids: Petrological constraints and dynamic background of the earth[J]. *Science in China (Series D)*, 32(4): 279~289(in Chinese).
- Chopra P and Wyborn D. 2003. Australia's first hot dry rock geothermal energy extraction project is up and running in granite beneath the cooper basin, NE South Australia[A]. *The Ishihara Symposium: Granite and Associated Metallogenesis*[C].
- Deng Ping, Shu Liangshu and Tan Zhengzhong. 2003. The geological setting for the formation of rich uranium ores in Zhuguang-Guidong large-scale uranium metallogenetic area[J]. *Geological Review*, 49(5): 486~494(in Chinese with English abstract).
- Geology Department of Nanjing University. 1981. *Granitoids of Different Ages in Southern China and Their Relationship with Mineralization*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Hao Yi. 2010. *Caledonian Structural Characteristics and Dynamics in South China*(Doctoral dissertation) [D]. Ocean University of China (in Chinese with English abstract).
- He L J. 2015. Thermal regime of the North China Craton: Implications for carbon destruction[J]. *Earth-Science Reviews*, 140: 14~26.
- Hu S, He L and Wang J. 2000. Heat flow in the continental area of China: A new data set[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 179(2): 407~419.
- Hu Shengbiao, He Lijuan and Wang Jiyang. 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).
- Hu Shengbiao and Wang Jiyang. 1994. Heat production rate of the crust with mantle heat flow in the southeast China[J]. *Science in China (Series B)*, 2: 185~196(in Chinese).
- Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, *et al.* 2005. Metallogenesis and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in the Nanling range[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 601~601(in Chinese with English abstract).
- Huang H Q, Li X H, Li Z X, *et al.* 2015. Formation of the Jurassic South China large granitic orovince: Insights from the genesis of the Jiufeng pluton[J]. *Chemical Geology*, 401: 43~58.
- Li Guohua. 2008. Discussion on genesis of the Zhangzhou Basin—A differentially eroded basin rather than a fault-depressed basin[J]. *Geological Review*, 54(2): 199~206(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Hu Ruizhong and Lin Jinrong. 1997. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from Northern Guangdong, SE China[J]. *Geochimica*, 26(2): 14~31(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Li Wuxian and Li Zhengxiang. 2007. Genetic types and tectonic significance of early Yanshan Nanling granite[J]. *Chinese science Bulletin*, 52(9): 981~991(in Chinese with English abstract).
- Li Z, Qiu J S and Yang X. 2014. A review of the geochronology and geochemistry of Late Yanshanian (Cretaceous) plutons along the Fujian coastal area of southeastern China: Implications for magma evolution related to slab break-off and rollback in the Cretaceous[J]. *Earth-Science Reviews*, 128(1): 232~248.
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma Feng, *et al.* 2012. An estimation of HDR resources in China's mainland[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 5(5): 807~811(in Chinese with English abstract).
- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Wang Rucheng, *et al.* 2003. Origin of Nankunshan aluminous A-type granite, Longkou County, Guangdong Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 1~10(in Chinese with English abstract).
- Ma Feng, Sun Hongli, Lin Wenjing, *et al.* 2015. Target site selection and index matrix evaluation of EGS trial project in China[J]. *Science and Technology Review*, 8(8): 41~47(in Chinese with English abstract).
- Ma Xingyuan, Liu Hefu, Wang Weixiang, *et al.* 1983. Meso-Cenozoic taphrogeny and extensional tectonics in eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1(1): 24~34(in Chinese with English abstract).
- McLaren S, Sandiford M, Hand M, *et al.* 2003. The hot southern continent: Heat flow and heat production in Australian Proterozoic terranes[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 372(22): 151~161.
- Morgan P. 1984. The thermal structure and thermal evolution of the continental lithosphere[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 15: 107~193.
- Nyblade A A and Pollack H N. 1993. A global analysis of heat flow from

- Precambrian terrains: implications for the thermal structure of Archean and Proterozoic lithosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978~2012), 98(B7): 12 207~12 218.
- Pang Z H. 2005. Origin of sulphur compounds and application of isotope geothermometry in selected geothermal systems of China [A]. IAEA. Use of Isotopes to Trace the Origin of Acidic Fluid in Geothermal Systems[C].
- Pang Zhonghe. 1987. Zhangzhou Basin Geothermal System-Genesis Model, Energy Potential and the Occurrence of Thermal Water (Doctoral dissertation)[D]. Beijing: Institute of Geology (in Chinese with English abstract).
- Rudnick R L and Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. *Rev. Geophys.*, 33: 267~309.
- Rybach L. 1988. Determination of heat production rate[A]. Hänel R, Rybach L and Stegena L. *Handbook of Terrestrial Heat Flow Density Determination*[C]. Kluwer, Dordrecht, 125~142.
- Rybach L, Bodmer P, Pavoni N, *et al.* 1978. Siting Criteria for heat extraction from hot dry rock: Application to Switzerland[J]. *Pageoph.*, 116(6): 1 211~1 224.
- Shen W, Ling H, Li H, *et al.* 2000. The thermal history of the miarolitic granite at Xincun, Fujian Province, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(21): 1 991~1 995.
- Shen Weizhou, Ling Hongfei, Li Wuxian, *et al.* 1999. Study on the Nd-Sr isotopic compositions of granitoids in SE China[J]. *Geological Journal of China Universities*, (1): 22~32 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu and Zhou Xinmin. 2002. Late Mesozoic tectonism of southeast China[J]. *Geological Review*, 48(3): 249~260 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, *et al.* 2004. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic basins in southeastern China[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 876~884 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, *et al.* 2006. Principal geological features of Nanling tectonic belt South China[J]. *Geological Review*, 52(2): 251~265 (in Chinese with English abstract).
- Sun Tao. 2006. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 332~335 (in Chinese without English abstract).
- Sun Z, Wang A, Liu J, *et al.* 2015. Radiogenic heat production of granites and potential for hot dry rock geothermal resource in Guangdong Province, Southern China[A]. *Proceedings World Geothermal Congress*[C].
- Wan Jianjun, Sun Zhanxue, Hu Baoqun, *et al.* 2015. Radiogenic geochemistry investigation on granitic rocks from Fogang complex, Northern Guangdong Province and its Implications for Hot Dry rock resource[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 38(4): 398~406 (in Chinese with English abstract).
- Wang A, Sun Z and Liu J. 2016. Thermal conductivity and radioactive heat-producing element content determinations for rocks from Zhangzhou region, SE China, and their constraints on lithospheric thermal regime[J]. *Environmental Earth Sciences*, 75(17): 1 213.
- Wang Andong, Sun Zhanxue, Liu Jinhui, *et al.* 2015. Radiogenic heat production of rocks from Zhangzhou, Southeast China and its implications for thermal regime of lithosphere[J]. *Science and Technology Review*, 33(24): 41~45 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi and Zhou Jincheng. 1999. Look back and look forward to granite research[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 161~169 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi and Zhou Xinmin. 2002. Petrogenesis and Crustal Evolution of Late Mesozoic Granitic Volcanic Intrusive Complexes in Southeastern China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese without English abstract).
- Wang Guiling, Liu Zhiming and Lin Wenjing. 2001. Tectonic control of geothermal resources in the peripheral of Ordos basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 44~51 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Fawang and Liu Zhiming. 2000. An analysis of present situation and prospects of geothermal energy development and utilization in the world[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(2): 134~139 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang. 1996. Low-Medium temperature geothermal system of convective type[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, (3): 96~100 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang and Huang Shaopeng. 1988. Compilation of heat flow data in the China Continental Area (2nd edition)[J]. *Seismology and Geology*, 44(4): 351~366 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, *et al.* 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. *Science and Technology Review*, 30(32): 3~10 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lili. 2015. Geochemistry and Petrogenesis of Early Paleozoic-Mesozoic Granites in Ganzhou, Jiangxi Province, South China Block

- (Doctoral dissertation)[D]. China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- Wang Peizong, Chen Yaoan, Cao Baoting, *et al.* 1993. Crust-upper-mantle structure and deep structural setting of Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, (2): 79~158(in Chinese with English abstract).
- Wu Jiansheng, Wang Jialin, Chen Bin, *et al.* 2014. Integrated regional geophysical study on lithospheric structure in eastern China seas and adjacent regions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(12): 3 884~3 895(in Chinese with English abstract).
- Xiong Shaobai and Jin Dongming. 1991. Some characteristics of deep structure of the Zhangzhou geothermal field and it's neighbourhood in the Fujian Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(1): 55~63 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yan, Hu Yanhua, Gu Mingguang, *et al.* 2013. The tectonic extensional event during the Late Indosinian Period in the southeastern Zhejiang Province: Evidence from the Dashuang pluton in Zhuji County[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3 131~3 141(in Chinese with English abstract).
- Yang Lizhong. 2016. The Radioactive Heat-producing Characteristics and the Hot Dry Rock Resources Potential of Prototypes Granite Rocks in Zhangzhou Region(Doctoral dissertation)[D]. East China Institute of Technology(in Chinese with English abstract).
- Yang S Y, Jiang S Y, Jiang Y H, *et al.* 2011. Geochemical, zircon U-Pb dating and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the age and petrogenesis of an Early Cretaceous volcanic-intrusive complex at Xiangshan, Southeast China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 101(1): 21~48.
- Yao Jin, Li Jingrong and Ling Zao. 2011. Using remote sensing technique to investigate geothermal water in north of Guangdong province, China[J]. *Journal of Geoinformation Science*, 13(1): 144~150(in Chinese with English abstract).
- Yuan Bingqiang and Zhang Guowei. 2005. The correlation between the effective elastic thickness of the continental lithosphere and some related geophysical parameters: A case study of the Quanzhou-Heishui geoscience transect[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(3): 203~208 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong, Ling Hongfei and Chen Peirong. 2005. On the relationship between basalt underplating and felsic igneous rock-formation: A case study of the volcano-intrusive complex in East China[J]. *Geological Review*, 51(4): 393~400(in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong, Xie Bingrong and Dai Yongshan. 1990. The analysis and calculation of metallogenic heat source for granite-type uranium deposits in South China[J]. *Mineral Deposits*, (3): 270~278(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shugen, Yuan Ying and Yao Cuixia. 2014. Petrology and ore-control of Zhuguangshan composite granitic pluton in middle section of Nanling region[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, (6): 1 585~1 598(in Chinese with English abstract).
- Zhao Ping. 1995. Research of Heat Production in SE China(Doctoral dissertation)[D]. Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences(in Chinese).
- Zhao Ping, He Lijuan, Liu Shaowen, *et al.* 2015. Terrestrial heat flow of China[A]. Wang Jiyang. *Geothermics and Its Applications*[C](in Chinese).
- Zhou Xinmin. 2007. Late Mesozoic Granite Genesis and Evolution of Lithospheric Dynamics in Nanling Region[M]. Science Press(in Chinese).
- Zhou X M and Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 326(3~4): 269~287.
- Zhou X, Shen W, Shu L, *et al.* 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 29(1): 26~33.

附中文参考文献

- 柏道远, 贾宝华, 马铁球, 等. 2007. 湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力差异与岩石地球化学特征关系探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 26(5): 387~398.
- 包志伟, 赵振华. 2003. 佛冈铝质 A 型花岗岩的地球化学及其形成环境初探[J]. *地球与环境*, 31(1): 52~61.
- 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 等. 2002. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景[J]. *中国科学: 地球科学*, 32(4): 279~289.
- 邓平, 舒良树, 谭正中. 2003. 诸广-贵东大型铀矿聚集区富铀矿成矿地质条件[J]. *地质论评*, 49(5): 486~494.
- 郝义. 2010. 华南加里东期构造变形特征和动力学机制(博士论文)[D]. 中国海洋大学.
- 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.
- 胡圣标, 黄少鹏. 2015. 中国陆地大地热流[A]. 汪集旸, 等. *地热学及其应用*[C]. 北京: 科学出版社, 64~122.
- 胡圣标, 汪集旸. 1994. 中国东南地区地壳生热率与地幔热流[J].

- 中国科学, 化学(2): 185~196.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 2005. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. 高校地质学报, 11(3): 601~601.
- 李国华. 2008. 论漳州盆地的成因——是差异侵蚀盆地而非断陷盆地[J]. 地质论评, 54(2): 199~206.
- 李献华, 胡瑞忠. 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. 地球化学, 26(2): 14~31.
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. 科学通报, 52(9): 981~991.
- 蔺文静, 刘志明, 马 峰, 等. 2012. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. 地球学报, (5): 807~811.
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 2003. 广东龙口南昆山铝质 A 型花岗岩的成因[J]. 岩石矿物学杂志, 22(1): 1~10.
- 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 等. 1983. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造[J]. 地质学报, (1): 24~34.
- 马 峰, 孙红丽, 蔺文静, 等. 2015. 中国 EGS 示范工程靶区选址与指标矩阵评价[J]. 科技导报, (8): 41~47.
- 南京大学地质系. 1981. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系[M]. 北京: 科学出版社.
- 庞忠和. 1987. 漳州盆地地热系统——成因模式、热能潜力与热水分布规律的研究(博士学位论文)[D]. 中国科学院地质研究所.
- 沈渭洲, 凌洪飞, 李武显, 等. 1999. 中国东南部花岗岩类 Nd-Sr 同位素研究[J]. 高校地质学报, (1): 22~32.
- 舒良树, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代构造作用[J]. 地质论评, 48(3): 249~260.
- 舒良树, 周新民, 邓 平, 等. 2004. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化[J]. 地质通报, 23(9): 876~884.
- 舒良树, 周新民, 邓 平, 等. 2006. 南岭构造带的基本地质特征[J]. 地质论评, 52(2): 251~265.
- 孙 涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 25(3): 332~335.
- 万建军, 孙占学, 胡宝群, 等. 2015. 广东佛冈岩体放射性地球化学特征及其干热岩资源潜力研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 38(4): 398~406.
- 汪集旸. 1996. 中低温对流型地热系统[J]. 地学前缘, (3): 96~100.
- 汪集旸, 胡圣标, 庞忠和, 等. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 30(32): 3~10.
- 汪集旸, 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, 44(4): 351~366.
- 王丽丽. 2015. 华南赣州地区早古生代晚期-中生代花岗岩类地球化学与岩石成因(博士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京).
- 王安东, 孙占学, 刘金辉, 等. 2015. 漳州地区岩石放射性地球化学特征及岩石圈热结构[J]. 科技导报, 33(24): 41~45.
- 王德滋, 周金城. 1999. 我国花岗岩研究的回顾与展望[J]. 岩石学报, 15(2): 161~169.
- 王德滋, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化[M]. 北京: 科学出版社.
- 王贵玲, 刘志明, 蔺文静. 2004. 鄂尔多斯周缘地质构造对地热资源形成的控制作用[J]. 地质学报, 78(1): 44~51.
- 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.
- 王培宗, 陈耀安, 曹宝庭, 等. 1993. 福建省地壳-上地幔结构及深部构造背景的研究[J]. 福建地质, (2): 79~158.
- 吴健生, 王家林, 陈 冰, 等. 2014. 中国东部海区岩石层结构的区域综合地球物理研究[J]. 地球物理学报, 57(12): 3884~3895.
- 熊绍柏, 金东敏. 1991. 福建漳州地热田及其邻近地区的地壳深部构造特征[J]. 地球物理学报, 34(1): 55~63.
- 徐 岩, 胡艳华, 顾明光, 等. 2013. 浙江东南印支晚期的构造伸展事件: 来自诸暨大爽岩体的证据[J]. 岩石学报, 29(9): 175~185.
- 杨立中. 2016. 漳州地区典型花岗岩体放射性生热特征及干热岩资源潜力研究(博士学位论文)[D]. 东华理工大学.
- 姚 金, 李静荣, 凌 造. 2011. 粤北地热资源遥感调查探测模式与应用[J]. 地球信息科学学报, 13(1): 144~150.
- 袁炳强, 张国伟. 2005. 大陆岩石圈有效弹性厚度与有关地球物理参数的关系——以泉州黑水地学断面为例[J]. 地球学报, 26(3): 203~208.
- 袁学诚. 1996. 中国地球物理图集[M]. 地质出版社.
- 章邦桐, 凌洪飞, 陈培荣. 2005. 论玄武岩底侵作用与长英质火成岩形成的关系——以华东南花岗质火山-侵入杂岩为例[J]. 地质论评, 51(4): 393~400.
- 章邦桐, 谢炳荣, 戴永善. 1990. 华南花岗岩型铀矿床成矿热源的分析 and 计算[J]. 矿床地质, (3): 270~278.
- 张术根, 袁 莹, 姚翠霞. 2014. 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, (6): 1585~1598.
- 赵 平. 1995. 中国东南地区岩石生热率研究(博士学位论文)[D]. 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 赵 平, 何丽娟, 刘绍文, 等. 2015. 中国陆地大地热流[A]. 汪集旸. 地热学及其应用[C]. 北京: 科学出版社, 186~253.
- 周新民. 2007. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M]. 北京: 科学出版社.