

漳州地区岩石放射性地球化学特征及岩石圈热结构

王安东^{1,2}, 孙占学^{1,3}, 刘金辉^{1,3}, 胡宝群^{1,2}, 万建军², 杨立中³

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, 南昌 330013
2. 东华理工大学地球科学学院, 南昌 330013
3. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 南昌 330013

摘要 对漳州地区的地表和钻孔岩石进行了岩石密度、放射性生热元素含量和岩石导热率测试。结果显示, 岩石密度的平均值在 2.60 g/cm³ 左右, 与世界范围内花岗岩的密度平均值一致; 花岗岩放射性生热率的平均值为 3.7 μW/m³, 高于中酸性火山岩和基性岩脉等其他类型岩石的放射性生热率值, 热贡献率主要来自 Th 和 U 的放射性衰变热。研究区岩石导热率的平均值为 2.83 W/mK, 接近世界范围内上地壳岩石的平均值。结合前人地质学、地球物理学和地热学研究成果, 认为地幔对地表热流贡献率要高于地壳, 漳州地区为典型的“冷壳热幔”型岩石圈热结构。

关键词 漳州地区; 放射性生热率; 导热率; 冷壳热幔

中图分类号 P62

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.24.007

Radiogenic heat production of rocks from Zhangzhou, Southeast China and its implications for thermal regime of lithosphere

WANG Andong^{1,2}, SUN Zhanxue^{1,3}, LIU Jinhui^{1,3}, HU Baoqun^{1,2}, WAN Jianjun², YANG Lizhong³

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

Abstract Rock density, radioelement content and rock thermal conductivity of rock from the ground surface and drilling holes within Zhangzhou region, southeast China were measured. The results show that the weighted mean value of rock density was 2.60 g/cm³, in good agreement with the average density of granite worldwide. The average radiogenic heat production of the investigated granite was 3.7 μW/m³, which is apparently higher than that of volcanic rock, mafic dykes and sedimentary rock from the same region. What is more, the main heat production was sourced from the decay of U and Th. The average rock thermal conductivity was 2.83 W/mK, approaching that of the middle-upper crustal rock. Our new data, together with previous geological, geophysical and geothermal data, indicate that the mantle contributes more heat flow than the crust to the surface heat flow, i.e., $Q_m/Q_c > 1$, thus Zhangzhou region is a typical region with cold crust and hot mantle type lithospheric thermal regime.

Keywords Zhangzhou region; radiogenic heat production; thermal conductivity; cold crust and hot mantle

自然产出的具有一定丰度的长半衰期放射性元素 U、Th 和 ⁴⁰K 在衰变过程中所释放的衰变热是岩石圈内热的主要来源之一, 也是板块构造运动与岩石圈演化的重要驱动力之一^[1,2]。由于 U、Th 和 K 具有相对强的活动性和不相容性, 因此

收稿日期: 2015-08-31; 修回日期: 2015-09-30

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(Z201403)

作者简介: 王安东, 讲师, 研究方向为元素和同位素地球化学, 电子信箱: adw008@mail.ustc.edu.cn; 孙占学(通信作者), 教授, 研究方向为地热资源评价和深部地热开发等, 电子信箱: zhxsun@ecit.cn

引用格式: 王安东, 孙占学, 刘金辉, 等. 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, 2015, 33(24): 41-45.

它们在自然界中的分布极不均匀,在不同类型、不同时代、不同地区甚至在同类型岩石的不同矿物中的含量变化也比较大。深入研究岩石放射性生热元素的分布规律,对解释地温场分布、理解放射性衰变热对地表热流值的贡献率及探讨岩石圈热结构都具有十分重要的意义^[3]。

本文选择中国东南沿海漳州地区的地表和钻孔样品,进行岩石密度、放射性生热元素含量和岩石导热率测试,探究其放射性地球化学特征。

1 研究区概况与样品特征

漳州地区隶属于中国东南部,位于亚洲大陆东部边缘南段,全区分布有大量的晚中生代火山-侵入杂岩,是濒太平洋

地区一个宏伟的构造-岩浆带的重要组成部分^[4]。作为研究区主体的漳州岩体是一个大型复式岩体,出露面积约为900 km²,挟持于长乐—南澳断裂带与政和—大埔断裂带之间,是福建燕山期岩浆岩带的重要组成部分^[5](图1,据文献[5]修改)。除漳州岩体外,在岩体的边部还出露有早侏罗世梨山组沉积岩、晚侏罗世南园组火山岩、新近纪佛昙组火山-碎屑沉积岩及第四系沉积物。早期大量研究成果显示,漳州乃至整个东南沿海地区晚中生代侵入岩与火山岩在时、空、源上具有一致性,王德滋等^[4]将其称为“同源异相”,即它们物质源区相同而产出状态不同。东南沿海燕山期大型岩浆岩带的形成一般被认为与中生代太平洋板块俯冲所导致的弧后拉伸作用有关^[6,7]

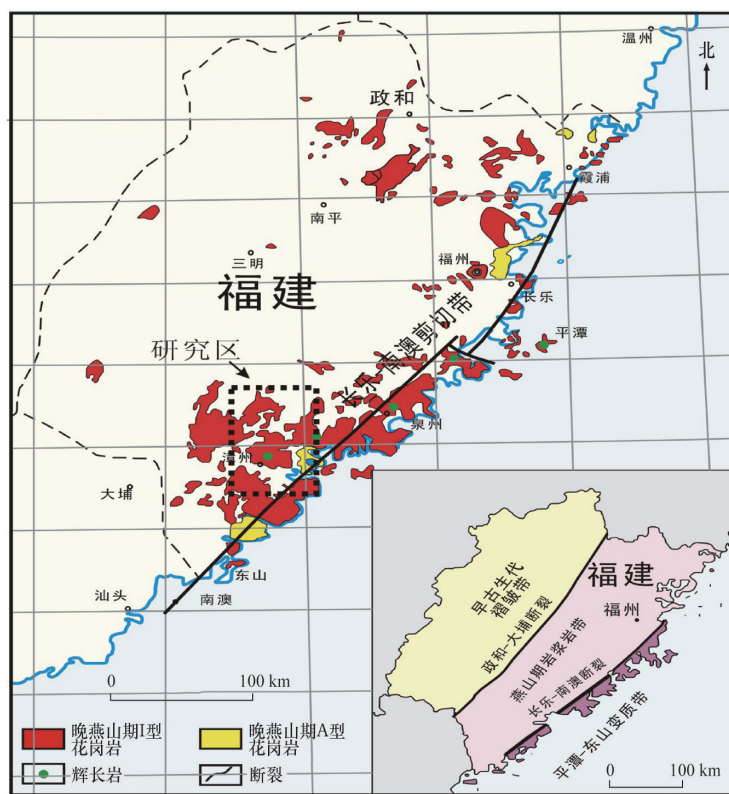


图1 福建沿海地区晚中生代岩体分布地质简图

Fig. 1 Simplified geological map showing late Mesozoic rock distribution in the coastal region of Fujian

漳州地区地热资源丰富,全市范围内有大量的温泉分布,其所属的东南沿海地热带是中国四大地热带之一,也是中国中低温温泉分布最为密集的地带。漳州地区是目前中国有报道的中低温温泉中水温最高者,最高温度超过120℃^[8]。庞忠和^[9]根据地球化学温标计算后认为漳州地热田的热储温度可能不超过150℃,地下热水循环深度为4 km。

漳州岩体花岗岩岩石类型多样,有细粒花岗岩、中-粗粒花岗岩、球状风化花岗岩、碱长花岗岩、花岗斑岩、二长花岗岩、黑云母花岗岩和花岗闪长岩等,在野外可见不同类型花

岗岩之间的直接接触关系(图2(a))。此外,在野外花岗岩中可见有显微暗色包体(图2(b)),以及花岗岩被后期基性脉体所侵入(图2(c))。在岩体的边部亦可见有花岗岩体与火山岩之间的接触关系(图2(d))。本次研究共采集了188个地表出露的新鲜花岗岩样品,99个地表非花岗岩样品(包括凝灰岩、熔结凝灰岩、泥岩、泥质砾岩、玄武岩、火山熔岩和基性岩脉等,主要为凝灰岩和熔结凝灰岩),在立人学校和芝山公园钻孔中分别采集11个和27个花岗岩样品(两钻孔的采样深度分别为10~120 m和30~120 m)。



图2 漳州地区野外考察照片

Fig. 2 Field photographs showing the features of Zhangzhou pluton

2 分析测试方法

新鲜岩石样品经室内处理后,首先用密度仪测定其密度,密度测试工作在东华理工大学核资源与环境重点实验室完成,同一样品的多次测试结果显示其分析精度在±5%误差范围内。样品放射性生热元素含量测定工作在广州澳实分析检测公司完成,标样监测结果显示元素U和Th的分析精度在±10%误差范围内(ICP-MS法测定),而K₂O的分析精度在±5%误差范围内(XRF法测定)。为进一步表征研究区的岩石圈热结构特征,本次研究还从所采集的样品中选择130个代表性样品进行导热率测试,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5次重复测试结果显示分析精度在±10%误差范围内。

3 分析结果与讨论

3.1 岩石放射性生热率特征

所有样品的放射性生热率值计算均采用Rybach^[9]推荐的方法,由于数据量较大,表1仅列出了测试结果的主要特征,图3对比了不同类型岩石的放射性生热率特征。

表1 漳州地区岩石放射性地球化学特征

Table 1 Radiogenic geochemical features of the rock from Zhangzhou

岩石类型 (样品数)	密度(平均值)/(g·cm ⁻³)	Th含量(平均值)/ (10 ⁻⁶ g·g ⁻¹)	U含量(平均值)/ (10 ⁻⁶ g·g ⁻¹)	K ₂ O质量分数 (平均值)/%	生热率(平均值)/ (μW·m ⁻³)
地表花岗岩(188)	2.22~2.84(2.60)	4~59(23.6)	4~17(6.6)	0.27~6.64(4.28)	1.25~8.18(3.52)
立人学校岩心(11)	2.52~2.77(2.62)	13~38(24.7)	5~13(9.1)	0.48~3.10(1.70)	2.10~5.23(4.05)
芝山公园岩心(27)	2.18~2.79(2.58)	29~38(35.2)	4~11(6.8)	5.09~5.52(5.25)	3.49~5.39(4.39)
中酸性火山岩(51)	2.29~2.77(2.57)	4~41(21.9)	4~11(5.6)	1.34~6.73(4.26)	1.31~4.90(2.82)
其他非花岗岩/48	2.24~2.81(2.56)	4~36(8.7)	4~7(4.3)	0.17~5.60(1.74)	1.08~4.40(1.62)

注:其他非花岗岩指基性火山岩、基性岩脉、砂岩和粉砂岩等。

表1显示出漳州地区地表及岩心样品的密度值范围基本一致,平均值均在2.60 g/cm³左右,与世界范围内花岗岩的密度值也近似一致;总体上地表和岩心花岗岩样品的放射性生热元素含量要显著高于中酸性火山岩,而中酸性火山岩又高于基性火山岩、基性岩脉、砂岩和粉砂岩等(图3),这与Rybach等^[9]的观测结果一致;地表花岗岩样品、立人学校和芝山公园钻孔花岗岩样品放射性生热率的平均值分别为3.52, 4.05和4.39 μW/m³,显著高于世界花岗岩放射性生热率的平均值2.5 μW/m³^[10],但又显著低于南岭花岗岩放射性生热率^[11,12];钻孔花岗岩样品的放射性生热率略高于地表露头样品,造成这一差异的原因可能是采样的两个钻孔为温泉钻孔,局部的热流活动造成放射性生热元素的部分富集,另一个可能的因素是该地区的花岗岩放射性生热率存在不均一性^[8],所有花岗岩样品生热率的加权平均值为3.7 μW/m³,这

一结果应可代表该地区花岗岩的放射性生热率值。

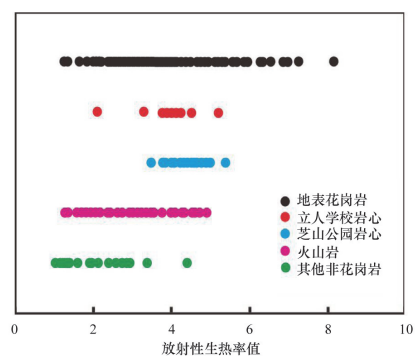


图3 漳州地区不同类型岩石的放射性生热率对比

Fig. 3 Radiogenic heat production of various types of rocks from Zhangzhou

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,⁴⁰K的热贡献率相对较低,大部分样品不超过10%,这与Joshua^[13]对尼日利亚东南地区地壳岩石的研究结果一致。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(即以K的放射性生热率为参照,分别做两者的比值)(图4),结果显示除芝山公园花岗岩岩心样品的Th热贡献率大于U外,其他大部分样品U热贡献率大于Th,这一特征类似于南岭地区花岗岩,但是后者的放射性生热率要显著高于前者,这也与南岭地区广泛出现铀矿化点和铀矿化这一地质事实相一致。

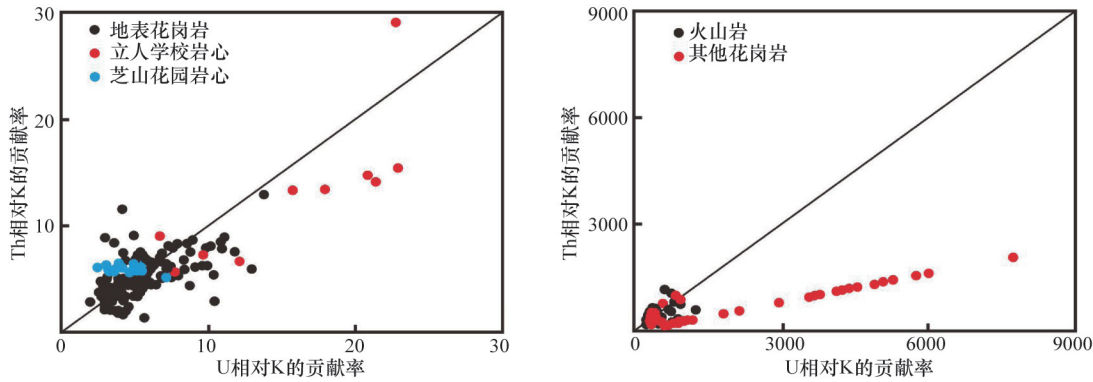


图4 漳州地区不同类型岩石的放射性生热率对比

Fig. 4 Thermal contribution between U and Th for rock from Zhangzhou

3.2 岩石导热率特征

选择130个岩石样品进行导热率测试,其中59个花岗岩样品的导热率平均值为3.19 W/mK,71个非花岗岩(主要为中酸性火山岩和基性火山岩)样品的导热率平均值为2.52 W/mK,所有130个岩石样品的平均导热率为2.83 W/mK,略高于文献[8]报道的该地区岩石导热率的平均值(56个样品,平均值为2.47 W/mK),接近Smithson等^[14]所推荐的中上地壳导热率平均值2.7 W/mK。数据结果进一步证实火山岩盖层的导热率要低于基底花岗岩导热率,盖层较低的导热率是干热岩热量保存的重要条件之一^[9]。

3.3 漳州地区岩石圈热结构特征

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^[15]。通过对研究区放射性地球化学特征和热导率的研究,结合前人地质学、地球物理和地热学研究成果,可以进一步窥见漳州地区岩石圈热结构特征。

早期的地球物理和钻探资料显示,研究区地壳厚度在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^[8,16],采用本文测定的平均放射性生热率3.7 μ W/m³,可求得放射性元素衰变热对地表热流的贡献值为37~45 mW/m²,落在McLennan等^[17]所推荐的由放射性衰变而导致的热流值范围内。由于放射性生热集中层主要位于中上地壳,因此37~45 mW/m²可代表漳州地区的地壳热流值(Q_c)。漳州地区的地温梯度在30~40°C/km,采用本文测定的平均导热率为2.83 W/mK,可求得地表热流值在85~113 mW/m²,与前人实测结果90~115 mW/m²近乎一致^[18-21]。地表大地热流值主要由地幔热流值(Q_m)和地壳热流值(Q_c)两部分组成^[1],根据上述的地表大地热流值和 Q_c 值,可知漳州地区的 Q_m 值在

40~75 mW/m²,明显高于 Q_c 值37~45 mW/m², $Q_m/Q_c > 1$, Q_m 对地表热流值的贡献率为55%~65%。周珣若等^[22]通过同位素模拟结果发现幔源物质在漳州地区花岗岩中的贡献率>60%,虽然物质与能量的贡献并不是完全的线性关系,但是大量地幔物质的上涌必然带来大量的地幔热量。因此漳州地区的岩石圈热结构不同于青藏地区的“热壳冷幔”型^[23],而是典型的“冷壳热幔”型,地幔热源是地表大地热流的最主要贡献者。

Morgan^[11]和Nyblade等^[24]均认为地表热流值主要由 Q_c 和 Q_m 两部分组成, Q_c 主要来自地壳岩石放射性生热元素的衰变,而 Q_m 与岩石圈厚度密切相关^[25]。因此,地表热流值是岩石圈厚度与地壳放射性生热元素含量的函数。放射性元素含量越高,则 Q_c 对地表热流值贡献度越高;岩石圈厚度越薄,则 Q_m 对地表热流值贡献度越高。大陆地区的平均陆壳厚度在35 km左右,而研究区地壳厚度在29 km左右,以及研究区较浅的居里面埋深都证实漳州地区地壳厚度较薄,幔源上涌热显著,这不仅与在野外观察到大量的显微暗色包体及基性脉体这一基本现象相符(图2),而且也与该地区中生代以来受太平洋板块俯冲而导致的弧后拉伸作用这一地质构造解释相一致。值得一提的是,随着拉伸作用的终止,漳州地区的地温梯度、岩体冷却速率和抬升速率都在加快^[26],当然本文研究的是当前的岩石圈热结构特征,在这之前,尤其是中生代拉伸作用启动时,漳州地区的地温梯度和地表热流值应该更高。

与华东南内陆地区南岭花岗岩相比,漳州地区的花岗岩放射性生热率相对较低,而两者地表热流值近乎相当^[11,12],这暗示南岭地区 Q_c 的贡献率和地壳厚度要大于漳州地区,地震层析成像研究结果也显示自东南沿海到华南内陆,岩石圈厚度越来越大。因此,在传统地热和干热岩开发过程中,必须

考虑华东南内陆地区和沿海地区两者不同的岩石圈热结构特征,虽然它们均具有相对较高的地表热流值。

4 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,获得漳州地区花岗岩的平均放射性生热率为 $3.7 \mu\text{W}/\text{m}^3$,高于世界花岗岩的平均生热率。

2) 漳州地区花岗岩的平均导热率要高于非花岗岩,所有测试样品的导热率平均值 $2.83 \text{ W}/\text{mK}$ 可代表该地区地壳岩石的导热率值,接近世界范围内中上地壳导热率值。

3) 漳州地区的地幔热贡献率要高于地壳热贡献率,为典型的“冷壳热幔”型岩石圈热结构。

致谢:在漳州野外工作期间,得到福建闽南地质大队和中国地质科学院水文地质环境地质研究所专家的大力支持!

参考文献(References)

- [1] Morgan P. The thermal structure and thermal evolution of the continental lithosphere[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1984, 15: 107-193.
- [2] Rybach L. Determination of heat production rate[M]//Hänel R, Rybach L, Stegena L. *Handbook of Terrestrial Heat Flow Density Determination*. Kluwer, Dordrecht, 1988: 125-142.
- [3] 赵平, 汪集旸, 汪缉安, 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.
Zhao Ping, Wang Jiyang, Wang Ji'an, et al. Characteristics of heat production distribution in SE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(3): 292-305.
- [4] 王德滋, 周新民. 中国东南部晚中生代花岗岩质火山-侵入杂岩成因与地壳演化[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Wang Dezi, Zhou Xinmin. The genesis of Late Mesozoic granitic volcanic-intrusive complex from SE China and its crustal evolution[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [5] Li Z, Qiu J S, Yang X. 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*, 2014, 128: 232-248.
- [6] Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 2000, 326(3): 269-287.
- [7] Li Z X, Li X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 2007, 35(2): 179-182.
- [8] 庞忠和. 漳州盆地地热系统[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1987.
Pang Zhonghe. Zhangzhou basin geothermal system[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, CAS, 1987.
- [9] Rybach L, Bodmer P, Pavoni N, et al. Siting Criteria for heat extraction from hot dry rock: Application to Switzerland[J]. *Pageoph*, 1978, 116(6): 1211-1224.
- [10] McLaren S, Sandiford M, Hand M, et al. The hot southern continent: heat flow and heat production in Australian Proterozoic terranes[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 2003, 372(22): 151-161.
- [11] Wang A D, Sun Z X, Hu B Q, et al. Guangdong, a potential province for developing Hot Dry Rock geothermal resource[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 492: 583-585.
- [12] Sun Z, Wang A, Liu J, et al. Radiogenic heat production of granites and potential for hot dry rock geothermal resource in Guangdong Province, Southern China[C]. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, April 19-25, 2015.
- [13] Joshua E O, Ehinola O A, Akpanowo M A, et al. Radiogenic heat production in crustal rock samples of Southeastern Nigeria[J]. *European Journal of Scientific Research*, 2008, 23(2): 305-316.
- [14] Smithson S B, Decker E R. A continental crustal model and its geothermal implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1974, 22(3): 215-225.
- [15] Pollack H N, Chapman D S. On the regional variation of heat flow, geotherms, and lithospheric thickness[J]. *Tectonophysics*, 1977, 38(3): 279-296.
- [16] 马峰, 孙红丽, 蔺文静, 等. 中国EGS示范工程靶区选址与指标矩阵评价[J]. *科技导报*, 2015, 33(19): 49-53.
Ma Feng, Sun Hongli, Lin Wenjing, et al. Target site selection and indexes matrix evaluation of EGS demonstration in China[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(19): 49-53.
- [17] McLennan S M, Taylor S R. Heat flow and the chemical composition of continental crust[J]. *The Journal of Geology*, 1996, 104(4): 369-377.
- [18] 汪集旸, 黄少鹏. 中国大陆地区热流数据汇编[J]. *地质科学*, 1988(2): 196-204.
Wang Jiyang, Huang Shaopeng. Compilation of heat flow data in the China continental area[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1988(2): 196-204.
- [19] 汪集旸, 黄少鹏. 中国大陆地区热流数据汇编(第二版)[J]. *地震地质*, 1990, 12(4): 351-366.
Wang Jiyang, Huang Shaopeng. Compilation of heat flow data in the China continental area (2nd edition)[J]. *Seismology and Geology*, 1990, 12(4): 351-366.
- [20] 胡圣标, 何丽娟, 汪集旸. 中国大地热流数据汇编(第三版)[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(5): 612-624.
Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition)[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(5): 612-624.
- [21] Hu S, He L, Wang J. Heat flow in the continental area of China: A new data set[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179(2): 407-419.
- [22] 周珣若, 陈安国, 宋新华, 等. 福建漳州花岗岩侵入体的Rb-Sr同位素年龄及其成因的初步探讨[J]. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 1988, 9(2): 55-67.
Zhou Xunruo, Chen Anguo, Song Xinhua, et al. Rb-Sr isotope ages and preliminary studies of genesis on Zhangzhou granitoid intrusive body, Fujian Province[J]. *Bulletin of Nanjing Institute of Geological Mineral and Resources*, 1988, 9(2): 55-67.
- [23] 石耀霖, 朱元清, 沈显杰. 青藏高原构造热演化的主要控制因素[J]. *地球物理学报*, 1992, 35(6): 710-720.
Shi Yaolin, Zhu Yuanqing, Shen Xianjie. Tectonic processes and thermal evolution of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1992, 35(6): 710-720.
- [24] Nyblade A A, Pollack H N. A global analysis of heat flow from Precambrian terranes: implications for the thermal structure of Archean and Proterozoic lithosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 1993, 98(B7): 12207-12218.
- [25] He L J. Thermal regime of the North China Craton: Implications for craton destruction[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 140: 14-26.
- [26] Shen W, Ling H, Li H, et al. The thermal history of the miarolitic granite at Xincun, Fujian Province, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(21): 1991-1995.

(责任编辑 刘志远)