

华夏地块花岗岩生热率特征及其对地温场的影响

李科甫^{1,2}, 朱传庆^{1,2*}

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

* 通信作者, zhucq@cup.edu.cn

收稿日期: 2023-03-20

国家重点研发计划课题 (2021YFA0716003) 资助

摘要 中国华南地区的华夏地块位于欧亚大陆东南缘, 是我国重要的矿产、地热资源区。经历了多期次的构造事件, 使得区内广泛分布着不同构造期花岗岩。花岗岩类在地球及其热状态的动力学和演化中发挥着特殊的作用, 其放射性衰变产生的热量是地球上的主要热源之一。我国高放射性产热型干热岩资源主要分布于华南地区, 以放射性元素的衰变热为主要热源, 岩性主要为花岗岩。本文通过对华南地区花岗岩数据统计, 分析了华南不同地区、不同花岗岩类型的生热率情况, 总结了研究区花岗岩放射性生热特征及其与大地热流之间的关系, 对认识研究区地温场主控因素及地热资源分布的宏观背景具有参考价值。本文基于华南地区 1933 个花岗岩样品的地球化学分析得到如下认识: (1) 花岗岩生热率范围 $0.40\sim 17.45\ \mu\text{W}/\text{m}^3$, 平均生热率为 $4.46\pm 2.66\ \mu\text{W}/\text{m}^3$, 同时根据大地热流与生热率分布情况, 两者有着较好的对应关系; (2) 放射性生热元素 U、Th、K 的生热贡献率分别为 49.45%、40.16% 和 10.39%, 同时, U、Th 浓度和 Th/U 比值变化较大, 与年龄无明显相关性; (3) 三种类型花岗岩生热率存在差异, I 型花岗岩平均生热率明显低于 A 型和 S 型花岗岩平均生热率, 值为 $3.86\pm 2.43\ \mu\text{W}/\text{m}^3$, A 型和 S 型花岗岩平均生热率分别为 $5.55\pm 2.91\ \mu\text{W}/\text{m}^3$ 和 $5.00\pm 2.58\ \mu\text{W}/\text{m}^3$; (4) 利用蒙特卡罗方法计算得到华南燕山期花岗岩平均产热量为 $99.01\times 10^5\ \text{GJ}/\text{a}$, 折合成标准煤为 $3.38\times 10^5\ \text{t}/\text{a}$, 印支期花岗岩平均产热量为 $63.13\times 10^5\ \text{GJ}/\text{a}$, 折合成标准煤为 $2.15\times 10^5\ \text{t}/\text{a}$; (5) 两种地壳模型的计算表明, 花岗岩在华南大地热流贡献中有着重要作用, 沉积地层覆盖区域, 地壳放射性生热对地表热流贡献为 $29.13\ \text{mW}/\text{m}^2$, 占总热流值的 41.61%; 侵入岩出露区域, 地壳放射性生热对地表热流贡献为 $43.85\ \text{mW}/\text{m}^2$, 占总热流值的 51.76%。

关键词 花岗岩; 生热率; 放射性生热元素; 产热量; 大地热流

Heat generation rate of granite in the Cathaysia block and its influence on geothermal fields, Southeast China

LI Kefu^{1,2}, ZHU Chuanqing^{1,2}

1 College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract The South China Cathaysia block is located in the southeast margin of the Eurasian plate, and is an important mineral and geothermal resource area in China. After several tectonic events, granites of different tectonic stages are widely distributed in

引用格式: 李科甫, 朱传庆. 华夏地块花岗岩生热率特征及其对地温场的影响. 石油科学通报, 2023, 03: 259–289

LI Kefu, ZHU Chuanqing. Heat generation rate of granite in the Cathaysia block and its influence on geothermal fields, Southeast China. Petroleum Science Bulletin, 2023, 03: 259–289. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.03.020

the area. Granitoids play a special role in the dynamics and evolution of the Earth and its thermal state, and the heat generated by their radioactive decay is one of the main heat sources on Earth. The high radioactive heat-producing hot dry rock resources are mainly distributed in South China, and the decay heat of radioactive elements is the main heat source, and the lithology is mainly granite. Based on the statistics of granite data in South China, this paper analyzes the heat generation rate of different granite types in different areas of South China, and summarizes the radioactive heat generation characteristics of granite in the study area and the relationship between them and terrestrial heat flow, which has reference value for understanding the main controlling factors of the geothermal field and the macro background of geothermal resource distribution in the study area. Based on the geochemical analysis of 1933 granite samples in South China, the following results are obtained: 1) The heat generation rate of granite ranges from 0.40 to 17.45 $\mu\text{W}/\text{m}^3$, with an average heat generation rate of $4.56 \pm 2.66 \mu\text{W}/\text{m}^3$, and there is a good correspondence between them according to the distribution of ground heat flow and heat generation rate; 2) The contribution rates of radiothermic elements U, Th and K were 49.45%, 40.16% and 10.39%, respectively. At the same time, the concentrations of U, Th and Th/U varied greatly, and there was no obvious correlation with age; 3) There are differences in the heat generation rate of the three types of granite (Type I, A and S). The average heat generation rate of type I granite ($3.86 \pm 2.43 \mu\text{W}/\text{m}^3$) is significantly lower than the average heat generation rate of type A and type S granite, which are $5.55 \pm 2.91 \mu\text{W}/\text{m}^3$ and $5.0 \pm 2.58 \mu\text{W}/\text{m}^3$, respectively; 4) A Monte Carlo method is used to calculate that the average heat yield of the Yanshanian granite in South China is $99.01 \times 10^5 \text{ GJ}/\text{a}$ ($1 \text{ GJ}/\text{a} = 10^9 \text{ J}/\text{a}$), which is converted into standard coal $3.38 \times 10^5 \text{ t}/\text{a}$, and that of Indosinian granite is $63.13 \times 10^5 \text{ GJ}/\text{a}$, which is converted into standard coal $2.15 \times 10^5 \text{ t}/\text{a}$; 5) The calculation of two crustal models shows that granite plays an important role in the contribution of earth heat flow in South China. In the area covered by sedimentary strata, the contribution of Earth's radioactive heat generation to surface heat flow is $29.13 \text{ mW}/\text{m}^2$, accounting for 41.61% of the total heat flow value. In the area of intrusive rock exposure, the contribution of crustal radioactive heat generation to surface heat flow is $43.85 \text{ mW}/\text{m}^2$, accounting for 51.76% of the total heat flow value.

Keywords granite; heat generation rate; radioactive heat-generating elements; heat production; heat flow

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.03.020

0 引言

地壳岩石中所含的放射性元素在衰变过程中不断地释放能量,产生热量,是地壳热量的主要来源之一^[1-2]。在地球物理研究背景下,岩石中放射性衰变产生的热量在了解地球热历史和解释大陆热流数据方面起着重要作用^[3-4]。

放射性元素 U、Th、K 含量在地壳各类岩石中并不均匀^[5-10],酸性岩中 U、Th 含量一般最为富集,基性岩 U、Th 含量最少。花岗岩作为常见的酸性岩,一般具有高浓度放射性元素,并且在上地壳岩石组成中占据主导地位,厚度通常为 10–20 km^[11-13],因此,其放射性元素生热对地表热流的贡献非常巨大。根据岩浆源区性质一般将花岗岩分为四类,A 型、S 型、I 型和较为少见的 M 型^[14-20]。目前,对于四类花岗岩生热研究较少,本文基于前人所报道的花岗岩地化数据,对四类花岗岩生热差异进行分析。

主体属于华夏地块的我国东南沿海地区具有高热流值特点,平均热流值在 $70 \text{ mW}/\text{m}^2$ 左右,高于全国大陆平均热流值 $61.5 \text{ mW}/\text{m}^2$ ^[21-23],经过多期构造事件,区内分布着大量不同期次花岗岩^[24-27]。华南沿海地区大部分温泉的地下水活动受控于花岗岩体,其热源主要是来源于晚中生代花岗岩的放射性生热^[22]。因

此,研究华夏地块花岗岩放射性生热情况对了解华南地区现今地温场、大地热流情况以及地热资源量等有着重要作用。前人已指出,我国高放射性产热型干热岩资源主要分布于华南地区,以放射性元素的衰变热为主要热源,岩性主要为花岗岩^[28]。本文通过对华南地区花岗岩数据统计,分析了华南不同地区、不同花岗岩类型的生热率情况,总结了研究区花岗岩放射性生热特征及其与大地热流之间的关系,对认识研究区地温场主控因素及地热资源分布的宏观背景具有参考价值。

1 地质背景

中国华南地区位于欧亚大陆东南缘,是我国重要的矿产、地热资源区。华南由扬子和华夏两大块体组成,地质构造活动频繁,经历了至少 4 期区域规模的地球动力学事件,分别为新元古代早—中期的板块俯冲—聚合与裂解事件、早古生代晚期的陆内造山与花岗岩浆事件、早中生代的陆内再造事件与晚中生代构造体制转换和太平洋俯冲背景下的构造伸展—巨量岩浆活动事件^[29]。在太平洋板块西向俯冲以及俯冲相伴的地幔对流活动中,华南地区出现了多期岩浆—热事件,使得在整个华南区域,特别是华夏地块广泛分

布着加里东期、海西期、印支期以及燕山期花岗岩，其中燕山期花岗岩分布最多^[30-31]，花岗岩分布情况如图1所示。

2 样品收集与生热率计算

本次研究范围主要包括华南地区的七个省份，分别为广东、广西、福建、海南、浙江、湖南、江西，

主题以华夏地块为主，包括了扬子地块东缘的华南复合陆内造山区。本文收集并整理了共1933个花岗岩类数据(附录1)^[32-200]，广东148个^[32-48]、广西407个^[49-77]、福建251个^[78-104]、海南184个^[105-118, 200]、浙江277个^[119-144]、湖南401个^[145-175]、江西265个^[176-198]，在确保都具有Th、U和K₂O含量的情况下，尽量包括花岗岩类型、侵位年龄等信息。

不同学者对于岩体放射性生热率计算提出了不同

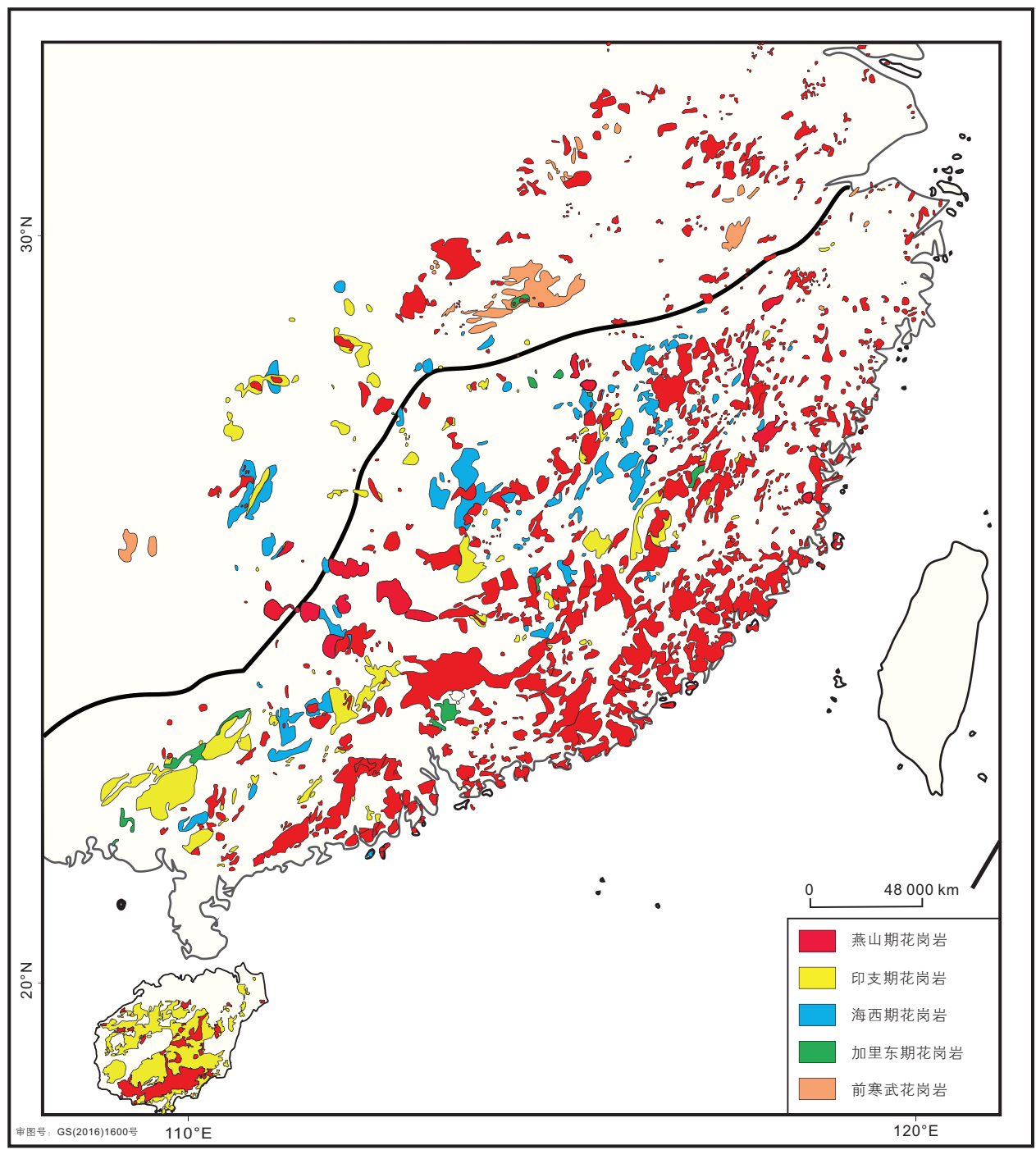


图1 华南地区花岗岩分布图(根据孙涛^[199];周云等^[200]修改,黑色线条为扬子地块和华夏地块的分界)

Fig. 1 Distribution map of granite in South China (modified according to Sun Tao^[199]; Zhou Yun et al^[200])

的计算公式^[4,201]。本文采取 Rybach^[4]提出的岩石放射性生热率计算经验公式，公式如下：

$$A=10^{-5}\rho(9.52C_U+2.56C_{Th}+3.48C_K) \quad (1)$$

其中， A 为岩石放射性生热率，单位为 $\mu W/m^3$ ； ρ 为岩石密度，单位为 kg/m^3 ； C_u 、 C_{Th} 分别为岩石放射性元素U、Th的含量，单位为ppm； C_k 为岩石中K的质量分数，单位为%。

本次研究采用的岩石密度选用华南地区不同岩性岩石平均密度或选取近似岩类的平均密度值进行计算^[5]，普通花岗岩、石英二长岩和石英正长岩选用 2.677 g/cm^3 ，花岗闪长岩和石英闪长岩选用 2.689 g/cm^3 。

表 1 华南各省花岗岩类样品个数
Table 1 Number of Granite Samples in South China

省份	样品个数	K ₂ O 含量/%	U 含量/ppm	Th 含量/ppm
海南	184	0.25~8.41	0.66~20.42	1.63~85.00
福建	251	1.33~7.04	0.56~38.18	1.15~92.10
广东	148	1.52~6.20	0.91~56.90	1.29~112.00
广西	407	0.49~9.02	1.00~45.20	1.39~71.41
浙江	277	0.33~7.97	0.55~47.90	0.33~87.30
湖南	401	1.64~13.30	0.75~50.86	2.00~170.94
江西	265	1.14~6.01	1.18~38.78	2.09~73.20
华南	1933	0.25~13.30	0.55~56.90	0.33~170.94

3 结果与讨论

3.1 华南地区花岗岩生热率

华南花岗岩生热率值较广，从 $0.40\text{ }\mu W/m^3$ ~ $17.45\text{ }\mu W/m^3$ ，其中有 1220 块样品数据位于 $2\sim6\text{ }\mu W/m^3$ ，占样品总数的 63.11%(图 2)。根据计算结果，华南地区花岗岩平均生热率为 $4.46\pm2.66\text{ }\mu W/m^3$ ，这与赵平等^[5]计算得到的华南地区花岗岩生热率 $4.20\text{ }\mu W/m^3$ 相近，高于 Hasterok and Webb^[202]所计算的花岗岩平均生热率 $3.54\text{ }\mu W/m^3$ 。各地区花岗岩生热率详见附录 1。

根据图 3 显示，华南地区花岗岩生热率从前寒武至白垩纪整体上呈现出增加的趋势，这主要与放射性元素衰变有关，岩石中放射性元素经过长期衰变，浓度不断降低，导致生热率随之降低。华南不同时代花岗岩生热率最低值出现在前寒武，平均生热率为 $2.25\pm1.10\text{ }\mu W/m^3$ ，略低于 Liao et al^[203]计算得到的晚元古代花岗岩生热率 $2.41\text{ }\mu W/m^3$ 。本文根据华南不同地区的花岗岩生热率绘制了华南地区花岗岩生热率与大地热流简图(图 4)，花岗岩生热率与地表热流有着较好的对应关系，低生热率区域相对于邻近区域热流值降低。由于数据信息限制，本图存在误差，仅供参考。

志留纪花岗岩生热率表现出明显的突增性，对志留纪花岗岩样品信息进行分析之后，我们发现其成因

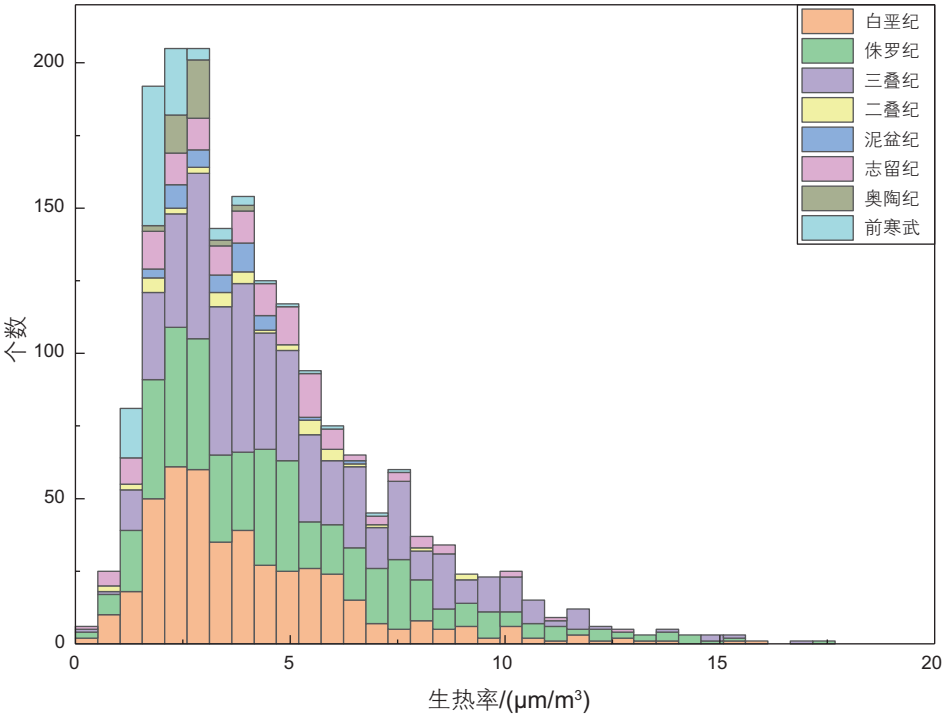


图 2 华南花岗岩生热率柱状图
Fig. 2 Histogram of heat generation rate in South China

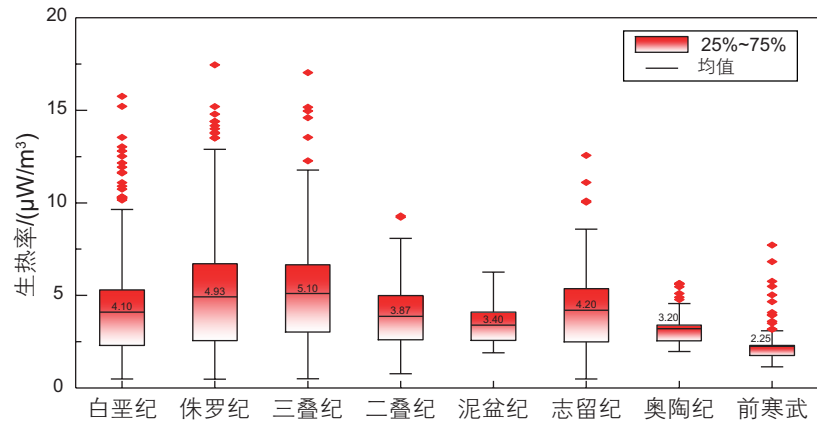


图 3 各时代平均生热率箱线图
Fig. 3 Box diagram of average heat generation rate in different times

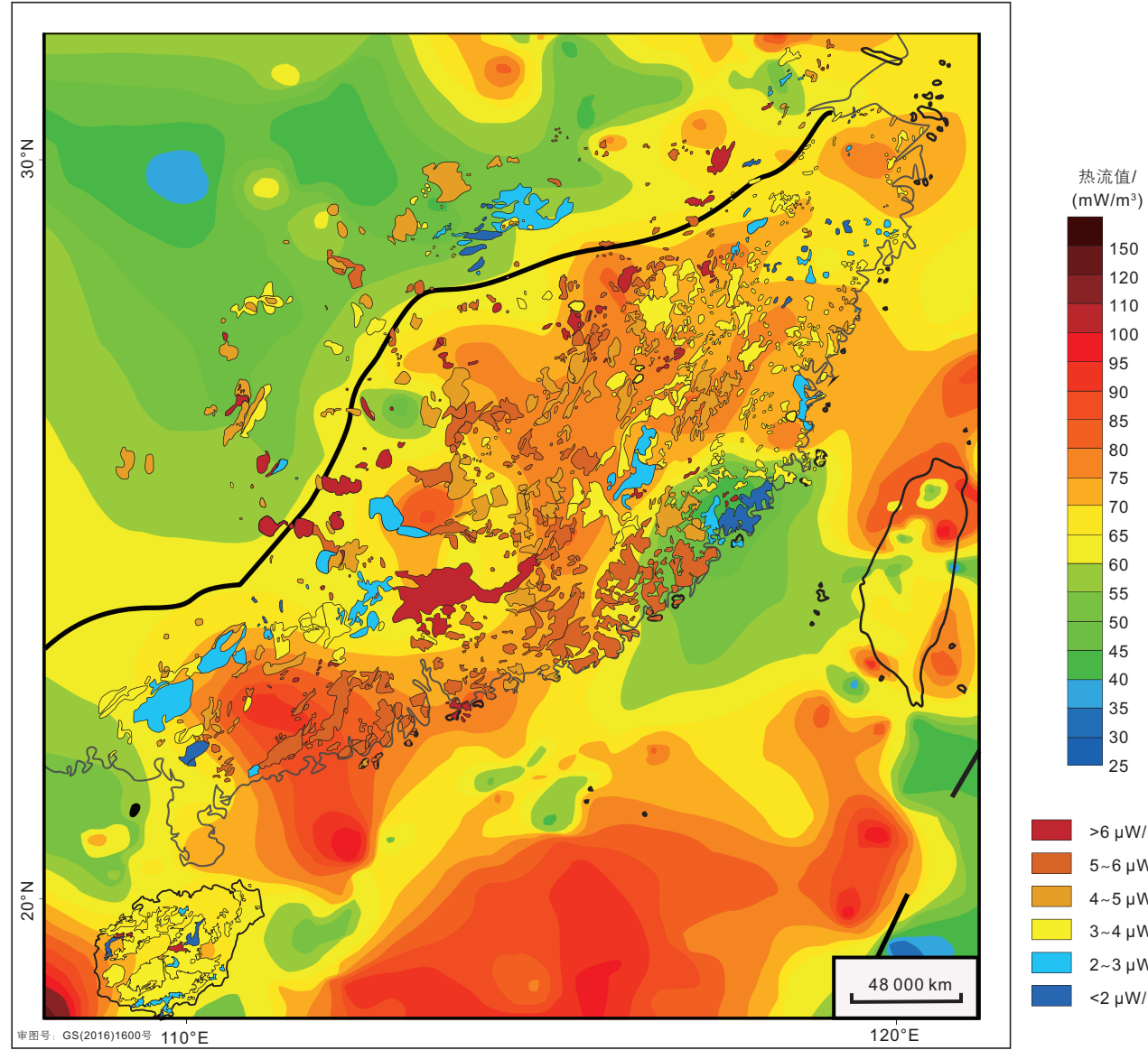


图 4 华南地区花岗岩生热率与大地热流分布简图((大地热流等值线根据姜光政等^[23])
Fig. 4 Schematic diagram of granite heat generation rate and terrestrial heat flow distribution in South China (according to Jiang (according to Jiang Guangzheng et al^[23])

类型大部分为S型,共94块,I型花岗岩有23块,无A型和M型花岗岩,根据本文对华南地区不同成因类型花岗岩生热率研究,华南地区S型花岗岩普遍具有高产热性(见4.4),同时周新民^[204]认为华南加里东期花岗岩成因方式可能相当独特和多样,此外,U、Th和K元素对较高Si₂O含量岩石具有亲和力,较高Si₂O含量的花岗岩通常具有较高生热率^[205],而华南地区加里东期花岗岩Si₂O和Na₂O+K₂O含量从早期到晚期逐渐升高,富集Sr、Hf、U、Th等元素^[206],因此这些可能是使得华南地区志留纪花岗岩具有高生热率特征的原因。华南地区花岗岩生热率变化情况说明了在不同岩浆事件下形成的花岗岩的来源和构造环境的不同对花岗岩生热率有着十分重要的影响。

放射性生热元素的热贡献率对于研究岩石放射性生热率特征是一个重要参数^[3,207]。放射性元素U、Th、K随着地球演化而不断衰变,三种元素的不同半衰期使得三者之间的热贡献率存在差异^[208]。研究分析本次华南地区所有样品生热元素贡献率(图5),结果显示,U的生热贡献分布范围较广,从93.13%到5.50%,平均生热贡献率为49.45%,Th的生热贡献率为40.16%,K的生热贡献最低,为10.39%,这一结果与全球放射性元素生热贡献情况一致。

U和Th浓度以及Th/U比值是研究花岗岩特征的重要参数。U和Th都是不相容元素,在部分熔融过程中,两者的比值不会发生显著变化,因此Th/U通常被用来反映物源变化^[209]。Taylor and McLennan^[210]通过地球化学模型预测了全球大陆地壳的平均Th/U比值,范

围为3.7~4.0,该范围一直以来也被广泛使用。

华南Th/U平均比值为 3.88 ± 3.24 (表2),处于全球Th/U比值范围内。如果Th/U比值遵循Artemieva et al.^[211]所认为的正态分布,则当排除正态分布中超过 σ 的尾部时,再次计算华南Th/U比值,计算结果如表2中Th/U*所示,华南Th/U比值降低为 3.51 ± 3.22 。华南各时代花岗岩U、Th浓度和Th/U比值变化较大,与年龄无明显相关性(图6),这与Artemieva et al.^[211]所报道的结果并不一致,我们认为这可能与华南地区复杂的构造活动有关,构造活动影响了花岗岩放射性元素的富集情况,导致不同时代花岗岩U、Th浓度变化较大。

从各时代Th和U浓度分布图显示(图7),并不是所有数据点都遵循Th/U比值规律,存在部分数据点远离比值曲线,我们选取个别较为集中的数据点(图中阴影部分数据点),对这些数据进行追踪分析,发现这些样品数据中大部分花岗岩成因类型为S型。进一步对整个华南地区花岗岩数据进行处理,筛选了Th/U<1和U>20 ppm的样品数据,结果显示,在筛选出的113个样品中,S型花岗岩有94个,A型花岗岩13个,I型花岗岩为6个,出现这种情况的原因可能是部分S型花岗岩在成岩时,富集了大量富铀矿物,导致异常高的铀含量。含有富铀矿物的岩体一般具有较强的铀成矿潜力,因此,探究华南地区S型花岗岩的分布可能有利于寻找区内含铀矿床。

3.2 不同类型花岗岩生热率

花岗岩是由不同源岩熔融形成的产物,每一种花

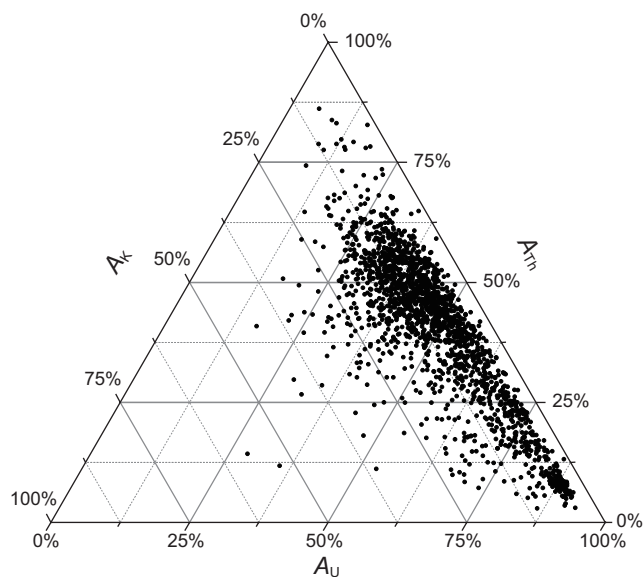


图5 U、Th和K生热贡献三元图

Fig. 5 Ternary diagram of U, Th and K heat generation contribution

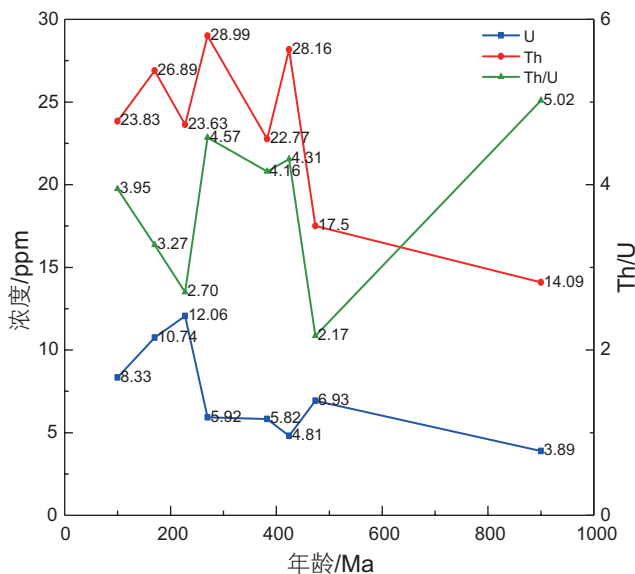


图6 U、Th和Th/U年龄变化图

Fig. 6 U, Th and Th/U age change diagram

表 2 各地区花岗岩平均 Th/U 比值

Table 2 Average Th/U ratio of granite in different regions

时代	U		Th		Th/U		Th/U*
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	
白垩纪	0.55~41.45	8.33 ± 7.49	1.15~112.00	23.83 ± 15.10	0.14~58.18	4.13 ± 3.35	3.95 ± 2.13
侏罗纪	0.80~56.90	10.74 ± 8.68	1.39~116.30	26.89 ± 18.00	0.13~23.69	3.34 ± 2.25	3.27 ± 1.15
三叠纪	0.67~50.86	12.06 ± 9.87	2.40~170.94	23.63 ± 15.49	0.12~35.34	3.46 ± 3.44	2.70 ± 1.83
二叠纪	0.66~18.40	5.92 ± 3.89	1.63~82.43	28.99 ± 17.85	1.45~31.03	6.69 ± 5.81	4.57 ± 3.43
泥盆纪	1.97~15.42	5.82 ± 2.85	6.80~39.50	22.77 ± 7.37	1.33~11.42	4.85 ± 2.83	4.16 ± 2.83
志留纪	0.60~30.60	4.81 ± 3.64	1.29~69.30	28.16 ± 17.22	0.36~31.00	4.81 ± 3.64	4.31 ± 1.82
奥陶纪	3.40~15.28	6.93 ± 2.58	8.40~40.50	17.50 ± 7.59	1.14~6.59	2.64 ± 1.28	2.17 ± 1.28
前寒武	1.00~24.30	3.89 ± 3.53	2.74~42.70	14.09 ± 5.90	0.26~14.00	4.94 ± 2.41	5.02 ± 2.41
总	0.55~56.90	9.52 ± 8.31	1.15~170.94	24.21 ± 15.80	0.12~58.18	3.88 ± 3.24	3.51 ± 3.22

Th/U* 为排除正态分布中超过 σ 的尾部时, 所计算的比值

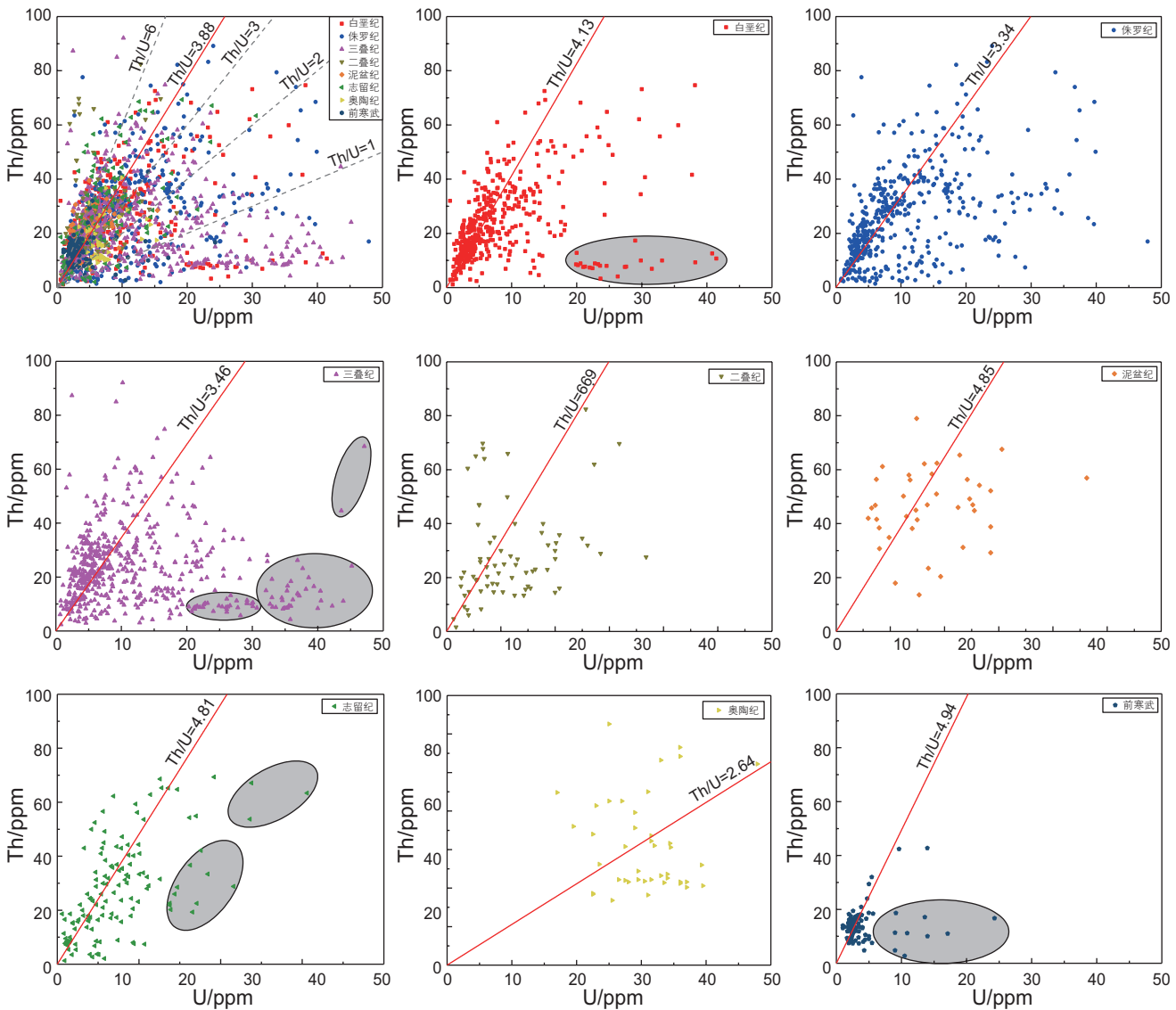


图 7 华南不同时代 Th 与 U 浓度散点图

Fig. 7 Scatter plot of Th and U concentrations in different times in South China

花岗岩的形成都与特定的构造相关,因此判别花岗岩的成因类型能够帮助确定构造环境^[212-213]。前人将花岗岩成因类型分为四类,I、S、A和M型,I型花岗岩主要来自于火成岩或深部下地壳的部分熔融^[14-15];S型花岗岩一般源自上地壳的变沉积岩^[14-15,214];A型花岗岩根据来源分为2类,A1型花岗岩源岩来自于地幔物质,并受到地壳物质不同程度的混染作用,A2型花岗岩主要来自于地壳基性火成岩的部分熔融^[17-18,215];M型花岗岩源自俯冲型大洋地壳的部分熔融或地幔直接熔融^[19]。

本文收集的 1933 个花岗岩数据中拥有成因类型信息的数据一共有 1536 个,I型花岗岩有 492 个,S型花岗岩有 675 个,A型花岗岩有 369 个,未收集到M型花岗岩数据,因此本文仅对I、S和A型花岗岩

岩在华南地区的产热情况进行研究。图 8 显示了三种花岗岩生热率平均生热率情况,I型花岗岩平均生热率明显低于A型和S型花岗岩平均生热率,值为 $3.86 \pm 2.43 \mu\text{W}/\text{m}^3$,A型和S型花岗岩平均生热率分别为 $5.55 \pm 2.91 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 和 $5.00 \pm 2.58 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 。

Artemieva et al.^[211]认为花岗岩年龄比花岗岩类型更加能够影响生热率变化,而我们对华南地区花岗岩年龄和类型的研究中并未发现此特点(图 9),猜测可能与研究的时间跨度有关,Artemieva et al.^[211]研究该问题使用宙为时间跨度单位,而本文则使用的纪为跨度单位,在小尺度的时间范围内,该特点可能并不能体现出来。在对三种类型花岗岩不同时代生热率分析中发现,除A型花岗岩缺少二叠纪之前的数据,导致无法对其进行有效分析外,S型和I型花岗岩的生热率

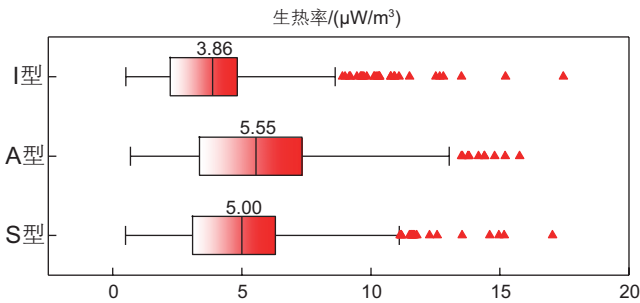


图 8 不同类型花岗岩平均生热率
Fig. 8 Average heat generation rate of different types of granite

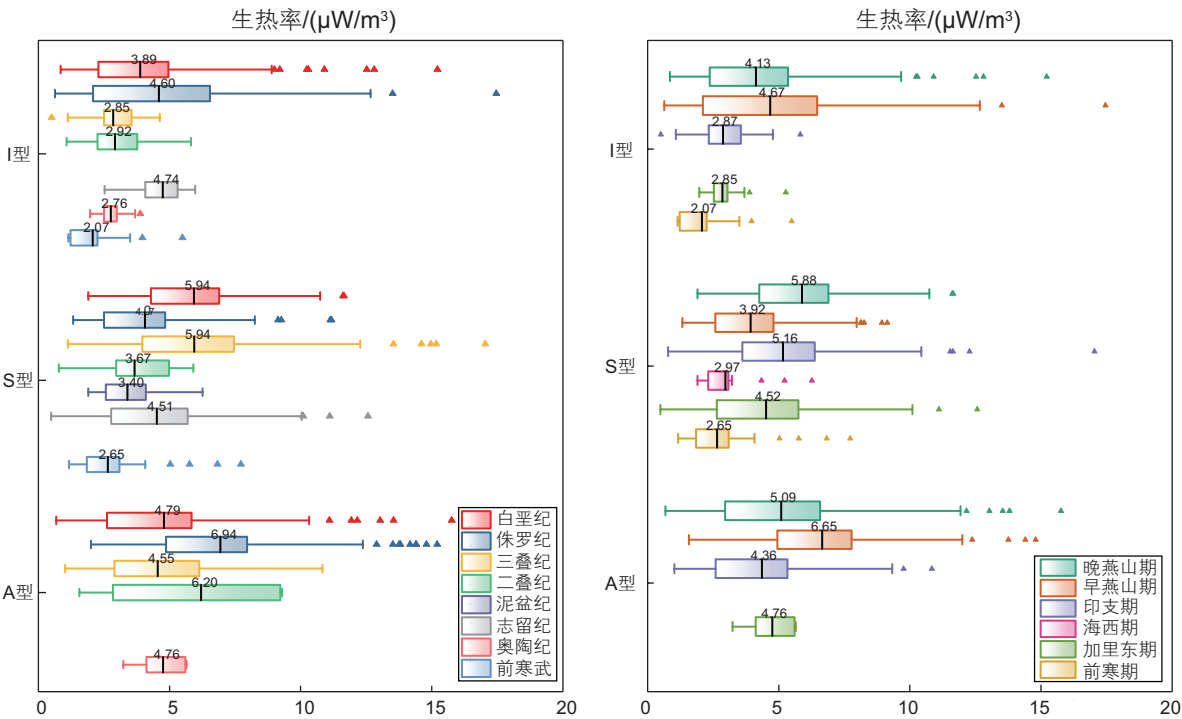


图 9 不同类型花岗岩各时代(左)和各构造期生热率(右)
Fig. 9 Heat generation rates of different types of granites in different ages (left) and tectonic periods (right)

从前寒武到白垩纪尽管出现了不同程度的变化起伏,但其整体上都具有增加的趋势,这表明了即使具有复杂的构造活动,放射性元素衰变对生热率的影响在不同类型花岗岩中依然能够体现出来。另外,从现有的数据来看,A型花岗岩一直处于一个较高的生热率值,均超过 $4.50 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 。

Artemieva et al.^[211]认为花岗岩年龄比花岗岩类型更加能够影响生热率变化,而我们对华南地区花岗岩年龄和类型的研究中并未发现此特点(图 9),猜测可能与研究的时间跨度有关,Artemieva et al.^[211]研究该问题使用宙为时间跨度单位,而本文则使用的纪为跨度单位,在小尺度的时间范围内,该特点可能并不能体现出来。在对三种类型花岗岩不同时代生热率分析中发现,除A型花岗岩缺少二叠纪之前的数据,导致无法对其进行有效分析外,S型和I型花岗岩的生热率从前寒武到白垩纪尽管出现了不同程度的变化起伏,但其整体上都具有增加的趋势,这表明了即使具有复杂的构造活动,放射性元素衰变对生热率的影响在不

同类型花岗岩中依然能够体现出来。另外,从现有的数据来看,A型花岗岩一直处于一个较高的生热率值,均超过 $4.50 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 。

三种类型花岗岩同一时代生热率有着明显差异,特别是三叠纪,三者差异最为显著,S型生热率达到了 $5.94 \mu\text{W}/\text{m}^3$,而I型花岗岩却仅有 $2.58 \mu\text{W}/\text{m}^3$,并且值得注意的是,从三叠纪到侏罗纪,三种类型花岗岩生热率均出现了突增或突减的变化,而此时间跨度也是华南地区由印支构造期进入燕山构造期,由此可以推测不同的构造活动对花岗岩生热率有着显著的影响。

不同构造期下花岗岩生热率没有统一变化规律(图 9 右),不同类型不同构造期花岗岩生热率差异较大,无法简单的说明花岗岩在某一构造期生热率出现了增加或减少的变化,即使在同一构造活动下,不同成因的花岗岩对生热元素的富集程度也并不相同,这可能与源岩来源和形成过程中矿物分异机制的差异有关。

在图 10 中,可以清晰的看到不同类型花岗岩中 Th、U 和 K 的浓度与生热率 A 的变化情况,结果显

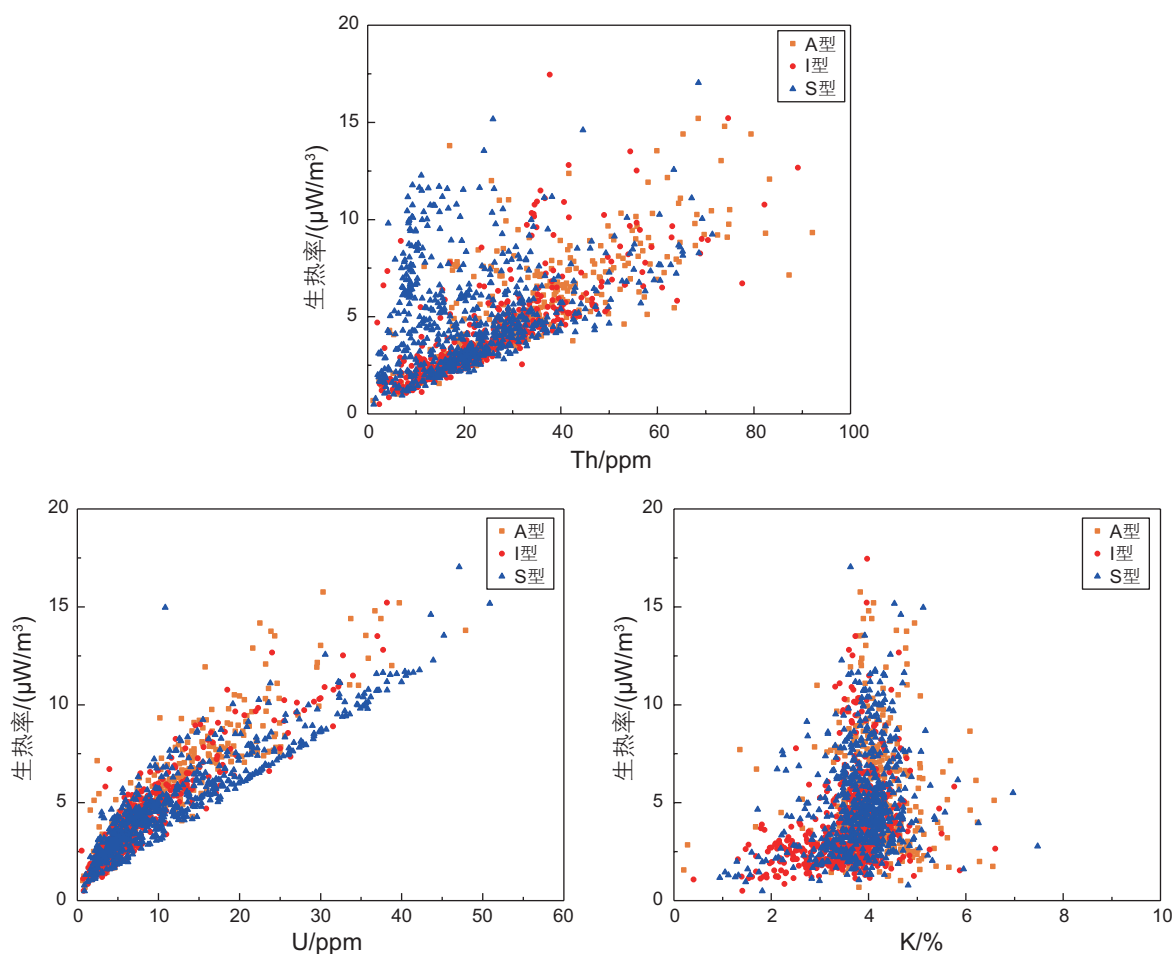


图 10 不同类型花岗岩 Th、U、K 浓度与生热率 A 关系图

Fig. 10 Relationship between Th, U, K concentration and heat generation rate A of different types of granite

示,没有表现出太大的差异,这与Pleitavion et al^[205]和Artemieva et al^[211]之前报道的生热率与放射性元素浓度之间表现出的结果一致。生热率 A 与Th、U浓度具有明显的正相关关系,其中S型花岗岩Th浓度虽然分散度较高,但其整体上也呈现此特点。而生热率 A 与K浓度没有太大相关关系。

为探究不同类型花岗岩Th与U浓度关系,对Th与U浓度关系进行线性拟合,限定拟合截距为0,从拟合结果来看(图11),S型花岗岩表现的相对离散化。另外,S型花岗岩有着更低的Th/U比值,低比值表明当Th含量一定时,S型花岗岩有着更高的U含量,三者的平均U含量证明了这一特点,S型花岗岩U平均含量为12.15 ppm,略高于A型花岗岩的11.13 ppm,明显高于I型花岗岩的7.62 ppm。但我们发现,这与所计算出来的生热率情况并不相符,S型花岗岩有着更高U含量,其生热率却低于A型花岗岩。三种类型花岗岩Th平均含量的计算结果表明A型花岗

岩Th平均含量为34.37 ppm,显著高于S型花岗岩的22.50 ppm和I型的23.70 ppm,从结果来看,华南地区I型花岗岩表现出了相对富Th的特征。

对不同构造期下三种类型花岗岩浓度分布进行分析,结果(图11b、11c)显示,相同构造期下,三种类型花岗岩之间依然有着相同的差异,因此浓度差异与构造活动可能没有太大关系。总之,华南地区S型花岗岩相对富U,A型花岗岩相对富Th,而S型花岗岩浓度分布表现出的离散化,我们猜测可能与成因环境有关,其成因环境相对于A型和I型更为复杂和多样,并且更多的处在具有富铀矿物环境中。

3.3 花岗岩对华南地区地热资源的贡献

3.3.1 产热量

东南沿海中-低温地热资源丰富,有大量温泉出露,温泉的形成和分布与花岗岩侵入体的大小和放射性热的产生密切相关,其地下水热活动受控于花岗岩

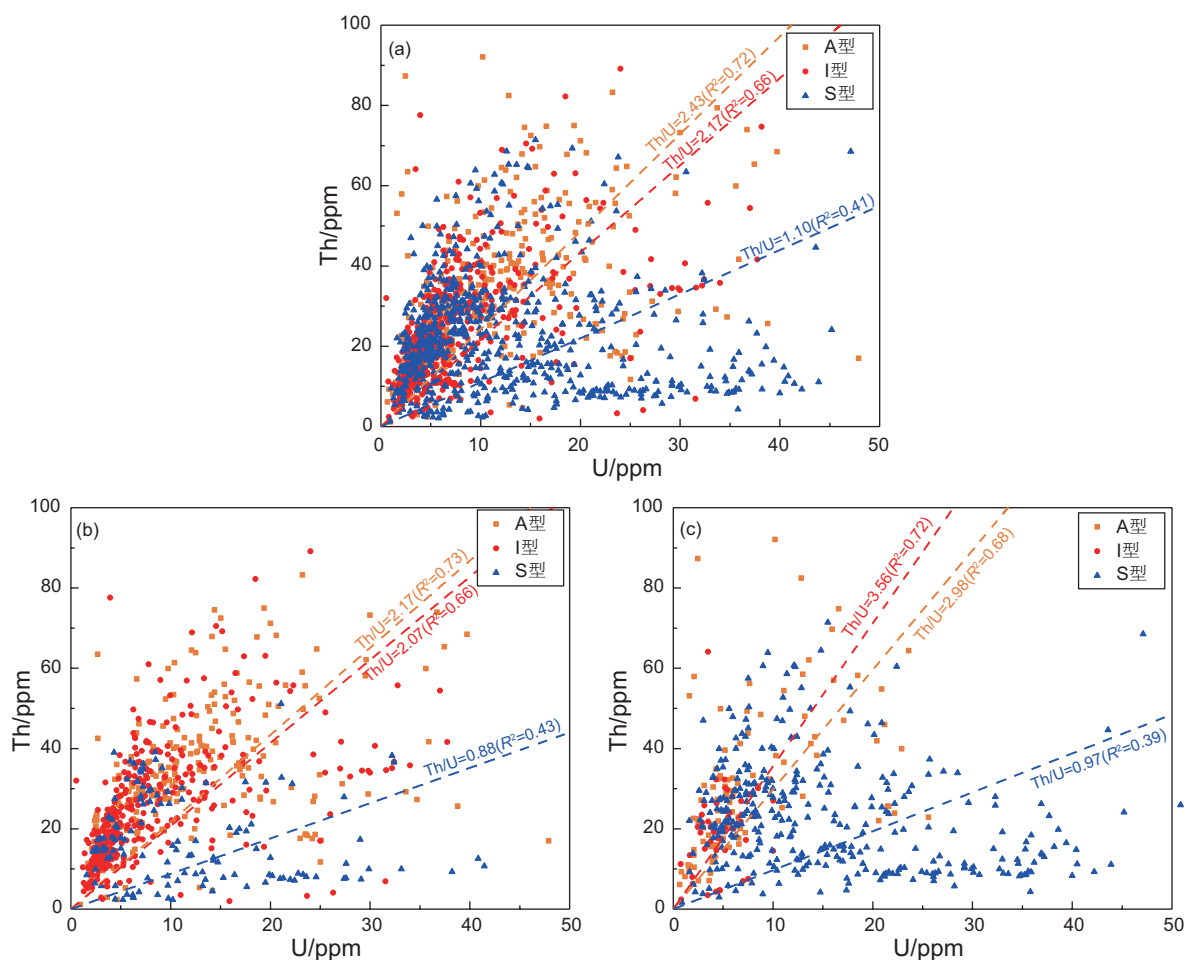


图11 不同类型花岗岩全部构造期(a)、燕山期(b)、印支期(c)的Th与U浓度关系图

Fig. 11 Th and U concentration relationship diagrams of different types of granite during all tectonic periods (a), Yanshanian period (b), and Indosinian period (c)

体,并且热源主要是叠加在地幔热源之上的晚中生代花岗岩中的放射性生热元素^[22,216]。因此,为了研究华南地区花岗岩对地热资源的热量贡献,本文通过所计算得到的花岗岩生热率并利用产热计算公式对华南地区花岗岩产热量进行估算。

由于资料的限制,本文为了计算花岗岩每年的放射性生热量,将华南地区花岗岩假设为一个圆柱体,其体积通过出露面积乘以厚度来计算^[204,216],产热计算公式如下:

$$Q = A \times S \times H \times \rho \times 10^{15} \times 10^{-6} \tag{2}$$

其中, A 为花岗岩岩石生热率, $\mu\text{J/g}\cdot\text{a}$; S 为岩体出露面积, km^2 ; H 为岩体厚度, km ; ρ 为花岗岩密度, g/cm^3 。

Zhou et al^[217]对华南地区燕山期和印支期花岗岩出露面积进行了估算,同时根据 $A/\text{CNK}(\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}))$ 比值进行了进一步划分,如表 3 所示。根据前人大量实验数据结果表明, S 型花岗岩 A/CNK 比值往往较高,通常大于 1.05,而 I 型和 A 型花岗岩常表现为准铝质/弱过铝质 ($A/\text{CNK} < 1.1$) 和过碱性, I 型 A/CNK 通常小于 1.1^[26,212-213,218]。因此本文根据前人研究情况,将表 3 中 $A/\text{CNK} > 1.1$ 花岗岩生热率值取所本文计算得到的 S 型生热率, $A/\text{CNK} < 1.0$ 生热率取 I 型生

热率,将 I、A 和 S 型平均生热作为 1.0~1.1 的生热率。

由于花岗岩体厚度很难被准确定量,本文采用蒙特卡罗法对花岗岩厚度进行统计模拟。选取正态分布为本次计算的数学模型,为了得到更为精准的结果,正态分布的期望与标准差的计算将采用三点估算获得。三点估算计算方法如下:

$$\mu = a + 4b + c / 6 \tag{3}$$

$$\sigma = (c - a) / 6 \tag{4}$$

其中 μ 为期望; σ 为标准差; a 为最小值; b 为最可能值; c 为最大值。

根据王懋基等^[219]对华南地区重力场的研究,华南地区花岗岩厚度范围大致为 5~15 km。因此,在三点估算中, a 取 5 km, b 取 15 km, c 取 10 km,最终计算得到的 μ 为 10, σ 为 1.67。对厚度进行 10 000 次模拟,模拟结果如图。考虑到误差问题,我们选取置信区间为 95% 的厚度范围作为本次计算的花岗岩厚度范围,当置信区间为 95% 时,厚度范围为 6.64~13.32 km,平均值为 9.97 km。

计算产热资源量,结果如表 4,华南燕山期花岗岩产热量范围为 $65.89 \times 10^5 \sim 132.25 \times 10^5 \text{ GJ/a}$,平均产热量为 $99.01 \times 10^5 \text{ GJ/a}$,折合成标准煤为 $3.38 \times 10^5 \text{ t/a}$,

表 3 华南花岗岩出露面积 (据 Zhou et al^[218])

Table 3 Exposed area of granite in South China (according to Zhou et al^[218])

时期	花岗岩出露面积/ m^2			
	总面积	A/CNK		
		<1.0	1.0 ~1.1	>1.1
晚燕山期	14 300	1300(9.1%)	4400(30.8%)	8600(60.1%)
早燕山期	62 700	12 500(20.0%)	29 300(46.7%)	20 900(33.3%)
印支期	50 300	19 300(38.4%)	21 600(42.9%)	9400(18.7%)

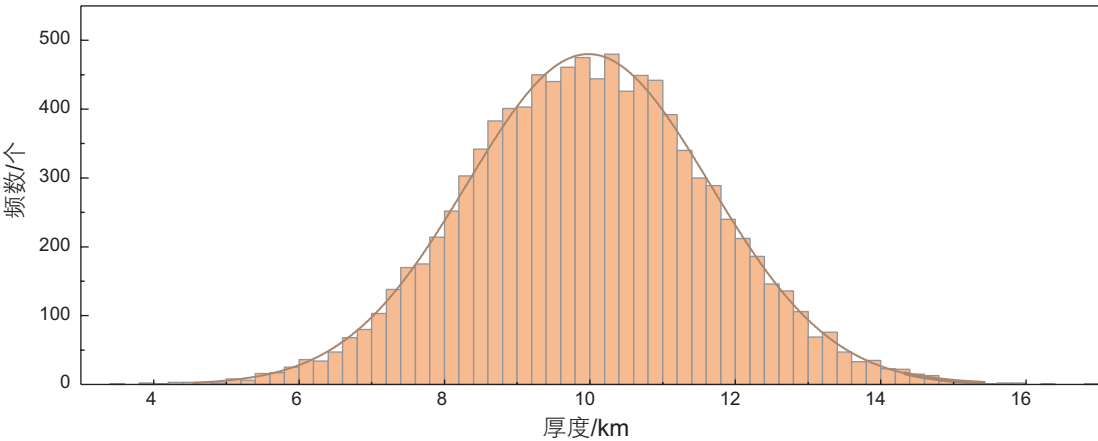


图 12 花岗岩厚度正态分布模拟结果

Fig. 12 Simulation results of normal distribution of granite thickness

表 4 华南地区花岗岩产热量
Table 4 Heat production of granite in South China

时期	产热量(10 ⁵ GJ/a)									总量		
	A/CNK											
	<1.0			1.0~1.1			>1.1					
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
晚燕山期	0.95	1.91	1.73	3.32	6.67	4.99	8.99	18.03	13.50	13.26	26.62	19.93
早燕山期	10.37	20.82	15.59	27.70	55.59	41.62	14.56	29.22	21.88	52.63	105.63	79.08
印支期	11.08	26.10	18.59	18.80	37.75	28.26	97.06	22.86	16.28	39.60	86.71	63.13

印支期花岗岩产热量范围为 $39.60 \times 10^5 \sim 86.71 \times 10^5$ GJ/a, 平均产热量为 63.13×10^5 GJ/a, 折合成标准煤为 2.15×10^5 t/a。通过所计算的结果表明, 花岗岩每年能够产生的可观的资源量, 证明了花岗岩对华南地区地热资源形成有着良好的热贡献。

3.3.2 热流贡献

华南地区平均热流值在 70 mW/m^2 左右, 高于全国大陆平均热流值 61.5 mW/m^2 ^[21-23], 并且根据姜光政等^[23]所绘制的中国大陆热流等值线图, 结合本文所计算并绘制的生热率分布情况来看(图 4), 华南地区热流值与花岗岩生热率有着良好的对应关系, 高生热率地区热流值普遍较高, 低生热率地区热流值相对较低, 这说明花岗岩对华南大地热流有着重要贡献。

大地流值是地热资源重要的信号之一, 高温地热资源赋存区一般具有高热流值。地表热流由两个部分组成, 即地壳层的辐射热产生(Q_c)和地幔的热损失(Q_m)。因此, 建立地壳热流分布模型并评估地壳热流成分是确定热成分从而了解地热系统热源的基础。

根据马锐等^[220]利用地震波速建立的华南地区地壳模型, 华南地区地壳分为: 沉积层(4.8 km)、上地

壳(9.5 km), 中地壳(10.6 km), 下地壳(14.3 km)。为了更好的研究华南地区花岗岩对大地热流的贡献情况, 本文采取两种地壳模型进行计算, 第一种模型用于计算沉积层覆盖区域, 第二种则用于计算侵入岩区域。

对于第一种, 采取四层模型, 其中沉积层生热率使用 $1.50 \text{ } \mu\text{W/m}^3$ ^[3,221]; 上地壳生热率采用 $1.26 \text{ } \mu\text{W/m}^3$ ^[222]; 中地壳和下地壳生热率根据 Hasterok and Chapman^[223]提出的全球模型取值。

对于第二种, 采取三层模型, 其中上地壳厚度取 14.3 km, 生热率值采取指数模型进行计算, 公式如下:

$$A = A_0 \exp(-z / D) \tag{5}$$

其中, A_0 为表层生热率, $\mu\text{W/m}^3$, 取华南花岗岩平均生热率 $4.46 \text{ } \mu\text{W/m}^3$; D 为放射性元素富集层厚度(生热率衰减指数), 本文选取花岗岩平均厚度作为 D 值。

各层热贡献由层内生热率和地层厚度决定:

$$Q_i = A_i \times Z_i \tag{6}$$

其中 A_i 为各层生热率, $\mu\text{W/m}^3$; Z_i 为各层厚度, km。

模型与计算结果如图 13, 中、下地壳热流贡献均为 4.24 mW/m^2 和 5.72 mW/m^2 , 沉积地层覆盖区域中,

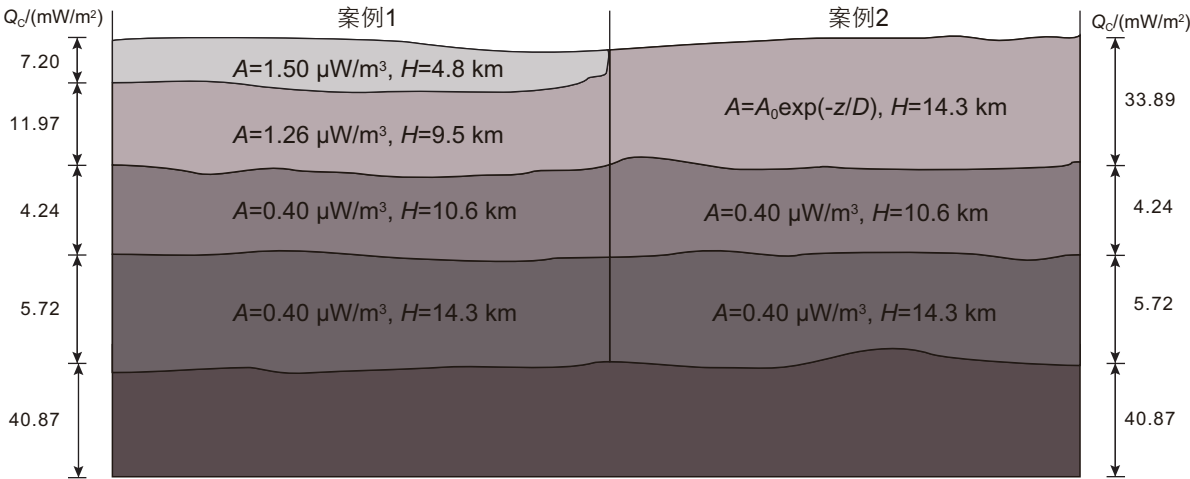


图 13 华南地区热流分配模型
Fig. 13 Heat flow distribution model in South China

沉积层和上地壳放射性生热对热流贡献分为 7.20 mW/m^2 和 11.97 mW/m^2 , 地壳总热流贡献(Q_c)为 29.13 mW/m^2 , Q_c/Q_0 为 41.61%, 地幔热流(Q_m)为 40.87 mW/m^2 ; 侵入岩区域, 上地壳热流贡献为 33.89 mW/m^2 , 地壳总热流贡献为 43.85 mW/m^2 , 假设侵入岩区域地幔热流与沉积层覆盖区一致, 则 Q_c/Q_0 为 51.76%。这一结果反映了当地层存在巨厚花岗岩体时, 其对大地热流有着重要贡献。前人在进行干热岩选区时已认识到高岩石放射性生热, 能够造成沉积盆地地表热流的升高^[224], 与地热储盖组合之间的热导率差异造成的“热折射”^[225]一起, 是形成地热资源富集的有利因素, 在华南地区高放射性花岗岩干热岩资源^[28]选取中应考虑放射性生热、沉积盖层等因素对地温场的影响。

4 结论

本文通过对华南地区花岗岩放射性生热元素富集情况的分析, 对不同类型花岗岩生热率差异进行了统计, 讨论了花岗岩对华南地区地热资源和热流值贡献的作用, 获得如下认识:

(1) 华南地区花岗岩生热范围从 $0.40 \mu\text{W/m}^3$ 到 $17.45 \mu\text{W/m}^3$, 平均生热率为 $4.46 \pm 2.66 \mu\text{W/m}^3$, 生热率与花岗岩体发育年代具有一定关系。从前寒武花岗岩至侏罗纪花岗岩整体上呈现出生热率升高的趋势。前寒武纪花岗岩生热率最低, 为 $2.25 \pm 1.10 \mu\text{W/m}^3$ 。

不同岩浆事件下形成的花岗岩的来源和构造环境对花岗岩生热率有着十分重要的影响。

(2) 放射性生热元素 U、Th、K 的生热贡献率分别为 49.45%, 40.16% 和 10.39%。花岗岩 Th/U 平均比值为 3.51 ± 3.214 。华南各时代花岗岩 U、Th 浓度和 Th/U 比值变化较大, 与年龄无明显相关性。

(3) 三种类型花岗岩生热率存在差异, I 型花岗岩平均生热率明显低于 A 型和 S 型花岗岩平均生热率, 值为 $3.86 \pm 2.43 \mu\text{W/m}^3$, A 型和 S 型花岗岩平均生热率分别为 $5.55 \pm 2.91 \mu\text{W/m}^3$ 和 $5.00 \pm 2.58 \mu\text{W/m}^3$ 。华南地区 S 型花岗岩相对富 U, A 型花岗岩相对富 Th, 而 S 型花岗岩浓度分布表现出的离散化, 其成因环境相对于 A 型和 I 型更为复杂, 并且更多的处在具有富铀矿物环境中。

(4) 基于蒙特卡罗模拟方法, 计算得到华南燕山期花岗岩产热量范围为 $65.89 \times 10^5 \sim 132.25 \times 10^5 \text{ GJ/a}$, 平均产热量为 $99.01 \times 10^5 \text{ GJ/a}$, 折合成标准煤为 $3.38 \times 10^5 \text{ t/a}$, 印支期花岗岩产热量范围为 $39.60 \times 10^5 \sim 86.71 \times 10^5 \text{ GJ/a}$, 平均产热量为 $63.13 \times 10^5 \text{ GJ/a}$, 折合成标准煤为 $2.15 \times 10^5 \text{ t/a}$ 。

(5) 花岗岩在华南大地热流贡献中有着重要作用, 沉积地层覆盖区域, 地壳放射性生热对地表热流贡献为 29.13 mW/m^2 , 占总热流值的 41.61%; 侵入岩出露区域, 地壳放射性生热对地表热流贡献为 43.85 mW/m^2 , 占总热流值的 51.76%。

参考文献

- [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] 汪集旸. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [WANG J Y. Geothermy and its application[M]. Beijing: Science Press, 2015.]
- [3] HURLEY P M, FAIRBAIRN H W. Radiation damage in zircons: A possible age method[J]. In the central Alps, Switzerland. *Tectono-physics*, 1953, 41(3): 113–126.
- [4] RYBACH L. Radioactive heat production in rocks and its relation to other petrophysical parameters[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1976, 114(2): 309–318.
- [5] 赵平, 汪集, 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, (03): 292–305. [ZHAO P, WANG J, WANG J A, et al. Distribution characteristics of rock heat generation rate in southeast China[J]. *ACTA PETROLOGICA SINICA*, 1995, (03): 292–305.]
- [6] ROBINSON E S, POTTER R M, MCINTERR B B, et al. A preliminary study of the nuclear subterranean[M]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 1971.
- [7] 章邦桐, 谢炳荣, 戴永善. 华南花岗岩型铀矿床成矿热源的分析和计算[J]. *矿床地质*, 1990, (03): 270–278. [ZHANG B T, XIE B G, DAI Y S. Analysis and calculation of heat source for mineralization of granite-type uranium deposit in south China[J]. *Mineral Deposits Geology*, 1990, (03): 270–278.]
- [8] PORTIER S, VUATAZ F D, NAMI P, et al. Chemical stimulation techniques for geothermal wells: Experiments on the three-well EGS system at Soultz-sous-For ́ ts, France[J]. *Geothermics*, 2009, 38(4): 349–359.

- [9] 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.
- [10] 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. [WANG A D, SUN Z X, LIU J H, et al. Radio-geochemical characteristics and lithospheric thermal structure of rocks in Zhangzhou area[J]. *Science and Technology Review*, 2015, 33(24): 41–45.]
- [11] CHRISTENSEN N I, MOONEY W D. Seismic velocity structure and composition of the continental-crust a global view[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 9761–9788.
- [12] ARTEMIEVA I M, THYBO H. Euneiseis: A seismic model for moho and crustal structure in Europe, Greenland, and the north Atlantic region[J]. *Tectonophysics*, 2013, 609: 97–153.
- [13] CHEREPANOVA Y, ARTEMIEVA I M, THYBO H, et al. Crustal structure of the Siberian craton and the west Siberian basin: An appraisal of existing seismic data[J]. *Tectonophysics*, 2013, 609: 154–183.
- [14] CHAPPELL B W, WHITE A J R. Two contrasting granite types[J]. *Russian Journal of Pacific Geology*, 1974, 8: 173–174
- [15] CHAPPELL B W, WHITE A J R. Two contrasting granite types—25 years later[J]. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 2001, 48: 489–499.
- [16] LOISELLE M C, WONES D R. Characteristics and origin of an orogenic granites[J]. *Geological Society of America, Abstracts With Programs*, 1979, 11: 468.
- [17] EBY N G. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 1992, 20: 641–644.
- [18] EBY G N. A-type granites: Magma sources and their contribution to the growth of the continental crust[J]. In: *Seventh Hutton Symposium on Granites and Related Rocks*, 2011, 50–51.
- [19] WHITE A J R. Sources of granite magmas[J]. *Geological Society of America, Abstracts With Programs*, 1979, 11(7): 539.
- [20] FROST B R, BARNES C, COLLINS W J, et al. A geo-chemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(11): 2033–2044.
- [21] 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, (04): 1118–1126. [YUAN Y S, MA Y S, HU S B, et al. Present geothermal characteristics in southern China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, (04): 1118–1126.]
- [22] 张健, 王蓓羽, 唐显春, 等. 华南陆缘高热流区的壳幔温度结构与动力学背景[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(10): 3917–3932. [ZHANG J, WANG B Y, TANG X C, et al. Crust and mantle temperature structure and dynamic setting in high heat flow area of south China continental margin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(10): 3917–3932.]
- [23] 姜光政, 高珊, 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(08): 2892–2910. [JIANG G Z, GAO T, RAO S, et al. *Compilation of terrestrial heat flow data in mainland China (Fourth edition)*[J]. *Journal of Geophysics*, 2016, 59(08): 2892–2910.]
- [24] 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(3–4): 269–287.
- [25] 王德滋, 周新民. 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, 2002. [WANG D Z, ZHOU X M. *Genesis and crustal evolution of late Mesozoic granitic volcanic-intrusive complex in Southeast China*[M]. Beijing: Science Press, 2002.]
- [26] 李献华, 李武显, 李正祥. 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*, 2007, (09): 98–991. [LI X H, LI W X, LI Z X. Genetic types and tectonic significance of early Yanshanian granites in Nanling[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, (09): 98–991.]
- [27] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007(06): 1217–1238. [WU F Y, LI X H, YANG J H, et al. Some problems in the study of granite genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007(06): 1217–1238.]
- [28] 李根生, 武晓光, 宋先知, 等. 干热岩地热资源开采技术现状与挑战[J]. *石油科学通报*, 2022, 03: 343–364. [LI G S, WU X G, SONG X Z, et al. Status and challenges of hot dry rock geothermal resource exploitation[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2022, 03: 343–364.]
- [29] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(07): 1035–1053. [SHU L S. Basic characteristics of tectonic evolution in south China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(07): 1035–1053.]
- [30] 张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. *地球学报*, 2012, 33(03): 257–279. [ZHANG Y Q, DONG S W, LI J H, et al. New progress in Mesozoic tectonics in south China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 33(03): 257–279.]
- [31] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1553–1582. [ZHANG G W, GUO A L, WANG Y J, et al. Tectonics and problems of south China continent[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 43(10): 1553–1582.]
- [32] 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 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*, 2003(01): 1–10. [LIU C S, CHEN X M, WANG R C, et al. Genesis of aluminous A-type granites in Kunshan, south Longkou, Guangdong[J]. *Journal of Petromineralogy*, 2003(01): 1–10.]
- [33] 凌洪飞, 沈渭洲, 孙涛, 等. 广东省 22 个燕山期花岗岩的源区特征及成因: 元素及 Nd-Sr 同位素研究[J]. *岩石学报*, 2006(11):

- 2687–2703. [LING H F, SHEN W Z, SUN T, et al. Provenance characteristics and genesis of 22 Yanshanian granites in Guangdong province: Elements and Nd-Sr isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006(11): 2687–2703.]
- [34] 姚正红, 肖惠良, 范飞鹏, 等. 广东南山花岗岩形成时代、地球化学特征与成因[J]. *资源调查与环境*, 2011, 32(01): 66–78. [YAO Z H, XIAO H L, FAN F P, et al. Formation age, geochemical characteristics and genesis of Nanshan granite in Guangdong province[J]. *Resources Survey and Environment*, 2011, 32(01): 66–78.]
- [35] 余长发, 赵海杰, 陈懋弘, 等. 粤西大金山花岗岩体地球化学特征及岩石成因探讨[J]. *中国地质*, 2012, 39(06): 1670–1689. [YU C F, ZHAO H J, CHEN M H, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of Dajinshan granite in western Guangdong[J]. *Geology in China*, 2012, 39(06): 1670–1689.]
- [36] 赵海杰, 余长发, 关炳庭, 等. 粤西高枧铅锌银矿区黑云母花岗岩的年代学及岩石成因[J]. *岩石学报*, 2012, 28(12): 3951–3966. [ZHAO H J, YU C F, GUAN B T, et al. Geochronology and petrogenesis of biotite granite in Gaocheng Pb-Zn-Ag deposit, western Guangdong[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(12): 3951–3966.]
- [37] 程亮开. 粤北大东山岩体加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *华南地质与矿产*, 2018, 34(01): 31–40. [CHENG L K. Zircon U-Pb age and geological significance of Caledonian granites in Dadongshan pluton, northern Guangdong[J]. *South China Geology and Mineral Resources*, 2018, 34(01): 31–40.]
- [38] 苏扣林. 广东良口黄田埔高分异 I 型花岗岩地球化学特征及大地构造意义[J]. *地质学刊*, 2018, 42(02): 197–205. [SU K L. Geochemical characteristics and tectonic significance of Huangtianpu type I granite in Liangkou, Guangdong province[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2018, 42(02): 197–205.]
- [39] 孟德磊, 贾小辉, 谢国刚, 等. 粤南长蛇山分异 I 型花岗岩的年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(04): 193–204. [MENG D L, JIA X H, XIE G G, et al. The geochronology, geochemistry and tectonic significance of Changshishan type I granite in southern Guangdong province[J]. *Geological information science and technology*, 2019, 38 (4): 193–204.]
- [40] 谢昊, 梁新权, 王策, 等. 广东白石嶂钨矿区花岗岩 U-Pb 年代学及其地球化学特征[J]. *地球化学*, 2020, 49(05): 479–493. [XIE H, LIANG X Q, WANG C, et al. U-Pb chronology and geochemical characteristics of granites in Baishizhang molybdenum deposit, Guangdong province[J]. *Geochimica*, 2020, 49(05): 479–493.]
- [41] 旷健, 祁士华, 王帅, 等. 广东惠州花岗岩体及其地热意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(04): 1466–1480. [KUANG J, QI S H, WANG S, et al. The granite mass in Huizhou, Guangdong and its geothermal significance[J]. *Earth Science*, 2020, 45(04): 1466–1480.]
- [42] 田峰, 祁士华, 王帅, 等. 广东惠州石坝-黄沙洞地区岩石放射性生热率特征研究[J]. *地质科学*, 2020, 55(04): 1277–1289. [TIAN F, QI S H, WANG S, et al. Characteristics of radioactive heat generation rate of rocks in Shiba-Huangshadong area, Huizhou, Guangdong[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2020, 55(04): 1277–1289.]
- [43] 陈昌盛, 谢财富, 费光春. 广东三岗山二长花岗岩体形成时代、地球化学特征及地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2021, 40(04): 925–937. [CHEN C S, XIE F F, FEI G C. Formation age, geochemical characteristics and geological significance of the Sangangshan monzonite granite in Guangdong province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrogeochemistry*, 2021, 40(04): 925–937.]
- [44] 叶升明, 李宏卫, 何翔, 等. 粤中从化地区佛冈岩基白垩纪花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征[J]. *华南地质*, 2021, 37(03): 265–279. [YE S M, LI H W, HE X, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and geochemical characteristics of the Fogangite base Cretaceous granites in Conghua area, central Guangdong province[J]. *South China Geology*, 2021, 37(03): 265–279.]
- [45] 张小葛. 广东冷水地区花岗岩体成因: 矿物学、年代学、地球化学及 Nd-Hf 同位素制约[D]. 东华理工大学, 2021. [ZHANG X G. Genesis of granitoids in Qiaishui area, Guangdong province: Mineralogy, chronology, geochemistry and Nd-Hf isotope restriction[D]. East China University of Technology, 2021.]
- [46] 罗财宝, 徐畅, 余小清, 等. 粤西福湖岭早新元古代片麻状花岗岩的岩石成因及构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2022, 46(05): 1008–1027. [LUO B B, XU C, YU X Q, et al. Petrogenesis and tectonic significance of early Neoproterozoic gneissic granites in Fuhuling, western Guangdong province[J]. *Geotectonics and Metallogeny*, 2022, 46(05): 1008–1027.]
- [47] 杨航, 辛宇佳, 李建华, 等. 广东莲花山花岗岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. *地球学报*, 2022, 43(02): 211–223. [YANG H, XIN Y J, LI J H, et al. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics and geological significance of the Lianhuashan granitic pluton, Guangdong province[J]. *Journal of Earth Sciences*, 2022, 43(02): 211–223.]
- [48] 张宏辉, 谢财富, 陈凯, 等. 粤西北大桂山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年、岩石成因及构造环境分析[J]. *现代地质*, 2022, 36(03): 862–875. [ZHANG H H, XIE F F, CHEN K, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, petrogenesis and tectonic environment analysis of the Guishan pluton in northern Guangdong[J]. *Geoscience*, 2022, 36(03): 862–875.]
- [49] 邱检生, 周金城, 张光辉, 等. 桂北前寒武纪花岗岩类岩石的地球化学与成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 2002, (03): 197–208. [QIU Z S, ZHOU J C, ZHANG G H, et al. Geochemistry and genesis of Precambrian granitoids in northern Guangxi[J]. *Journal of Petromineralogy*, 2002, (03): 197–208.]
- [50] 李文杰, 梁金城, 冯佐海, 等. 桂东北地区几个加里东期花岗岩体的地球化学特征及其构造环境判别[J]. *矿产与地质*, 2006, (Z1): 353–360. [LI W J, LIANG J C, FENG Z H, et al. Geochemical characteristics and tectonic environment discrimination of several Caledonian granites in northeast Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2006, (Z1): 353–360.]

- [51] 程顺波, 付建明, 徐德明, 等. 桂东北大宁岩体锆石 SHRIMP 年代学和地球化学研究[J]. 中国地质, 2009, 36(06): 1278–1288. [CHENG S B, FU J M, XU D M, et al. SHRIMP chronology and geochemistry of zircon from Daning pluton, northeast Guangxi[J]. *Geology in China*, 2009, 36(06): 1278–1288.]
- [52] 程顺波, 付建明, 马丽艳, 等. 桂东北越城岭岩体加里东期成岩作用: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(04): 853–872. [CHENG S B, FU J M, MA L Y, et al. Caledonian diagenesis of the Yuechengling pluton, northeast Guangxi: Zircon U-Pb chronology, geochemistry and Nd-Hf isotope constraints[J]. *Geotectonics and Metallogeny*, 2016, 40(04): 853–872.]
- [53] 谭俊, 魏俊浩, 李水如, 等. 广西昆仑关 A 型花岗岩地球化学特征及构造意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2008(06): 743–754. [TAN J, WEI J H, LI S R, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of the A-type granites in Kunlun pass, Guangxi[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2008, (06): 743–754.]
- [54] 谢晓华, 陈卫锋, 赵葵东, 等. 桂东北豆仵山花岗岩年代学与地球化学特征[J]. 岩石学报, 2008, 24(06): 1302–1312. [XIE X H, CHEN W F, ZHAO K D, et al. Geochronology and geochemical characteristics of Douchashan granite in northeast Guangxi[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(06): 1302–1312.]
- [55] 来志庆. 桂西北地区摩天岭和元宝山花岗岩岩石地球化学及其成因研究[D]. 中国海洋大学, 2009. [LAI Z Q. Petrogeochemistry and genesis of Motianling and Yuanbaoshan granites in northwest Guangxi[D]. Ocean University of China, 2009.]
- [56] 张雪峰, 刘晓东, 刘剑钊. 广西花山花岗岩体地球化学特征及产铀潜力分析[J]. 地质与勘探, 2011, 47(06): 1051–1058. [ZHANG X F, LIU X D, LIU J Z. Geochemical characteristics and uranium production potential of the Huashan granitic pluton in Guangxi[J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(06): 1051–1058.]
- [57] 韩宗珠, 衣伟虹, 李三忠, 等. 桂北摩天岭和元宝山花岗岩类岩石地球化学及成因研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(04): 59–65. [HAN Z Z, YI W H, LI S Z, et al. Geochemistry and genesis of granitoids in Motianling and Yuanbaoshan, northern Guangxi[J]. *Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition)*, 2012, 42(04): 59–65.]
- [58] 贾小辉, 王晓地, 杨文强, 等. 桂北圆石山早侏罗世 A 型花岗岩的岩石成因及意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, 39(01): 21–36. [JIA X H, WANG X D, YANG W Q, et al. Petrogenesis and significance of early Jurassic A-type granites in Yuanshis-han, northern Guangxi[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2014, 39(01): 21–36.]
- [59] 张怀峰, 陆建军, 王汝成, 等. 广西栗木大岐岭隐伏花岗岩的成因及其构造意义: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(05): 901–918. [ZHANG H F, LU J J, WANG R C, et al. Genesis and tectonic significance of the Daqiling concealed granites in Lili, Guangxi: Petrogeochemistry, zircon U-Pb chronology and Nd-Hf isotope constraints[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 44(05): 901–918.]
- [60] 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(01): 27–42. [BAI D Y, ZHONG X, JIA P Y, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Age, Geological and geochemical characteristics and tectonic setting of the Caledonian Yuechengling Pluton, west Nanling[J]. *Geochimica*, 2015, 44(01): 27–42.]
- [61] 卢玫瑰. 广西浦北花岗岩岩石学及地球化学研究[D]. 成都理工大学, 2016. [LOU M G. Petrology and geochemistry of the Pubei granite in Guangxi[D]. Chengdu University of Technology, 2016.]
- [62] 张世涛, 马东升, 陆建军, 等. 桂北平英花岗岩锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素、地球化学特征及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2016, 22(01): 92–104. [ZHANG S T, MA D S, LU J J, et al. Zircon U-Pb chronology, Hf isotopes, geochemical characteristics and their geological significance of the Peiping quartz granite, Guangxi province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2016, 22(01): 92–104.]
- [63] 黄诚, 沈睿文, 南争路, 等. 广西六万山印支早期花岗岩地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 2017, 36(Z1): 209–223. [HUANG C, SHEN R W, NAN Z L, et al. Geochemical characteristics and zircon U-Pb age of early Indochinese granites in Liuwan-shan, Guangxi[J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(Z1): 209–223.]
- [64] 杨启军, 孙明行, 秦亚, 等. 广西大瑶山大黎花岗岩体年代学研究及地质意义[J]. 矿产与地质, 2017, 31(05): 843–853. [YANG Q J, SUN M X, QIN Y, et al. Geochronology and geological significance of the Dali granites in Dayaoshan, Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2017, 31(05): 843–853.]
- [65] 秦亚, 张青伟, 杨启军, 等. 广西大瑶山隆起罗平花岗岩的地质地球化学特征及其意义[J]. 矿产与地质, 2018, 32(02): 283–297. [QIN Y, ZHANG Q W, YANG Q J, et al. Geological and geochemical characteristics and significance of Luoping granites in Dayaoshan uplift, Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2018, 32(02): 283–297.]
- [66] 刘飞, 李堃, 黄圭成, 等. 桂中昆仑关 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年代学与地球化学特征[J]. 地球科学, 2018, 43(07): 2313–2329. [LIU F, LI K, HUANG G G, et al. Zircon U-Pb chronology and geochemical characteristics of Kunlun A-type granites in central Guangxi[J]. *Earth Science*, 2018, 43(07): 2313–2329.]
- [67] 王廷祯. 广西大厂—昆仑关成矿带晚白垩世花岗岩成因及其成矿意义[D]. 中国地质大学(北京), 2018. [WANG T Y. Genesis and metallogenic significance of late Cretaceous granites in Dachang-Kunlun metallogenic belt, Guangxi[D]. China University of Geosciences (Beijing), 2018.]

- [68] 王正庆, 范洪海, 陈东欢, 等. 桂东北苗儿山张家花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. 地质通报, 2018, 37(05): 895–907. [WANG Z Q, FAN H H, CHEN D H, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of Zhangjia granite in Miaoshe, northeast Guangxi[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(05): 895–907.]
- [69] 卢昆昆, 黄长帅, 李学彪, 等. 广西大容山东北部花岗岩地球化学特征及地质意义[J]. 矿产与地质, 2019, 33(06): 1026–1033. [LU J K, HUANG C S, LI X B, et al. Geochemical characteristics and geological significance of granites in northeastern Darong Mountains, Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2019, 33(06): 1026–1033.]
- [70] 马万伟. 广西栗木含锡花岗岩岩浆–热液演化特征及成矿机制[D]. 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2019. [MA W W. Magmatic-hydrothermal evolution and metallogenic mechanism of Limu tin-bearing granite in Guangxi[D]. University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), 2019.]
- [71] 詹华思, 丁伟品, 何波, 等. 桂东南博白地区片麻状花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造环境研究[J]. 矿产与地质, 2020, 34(04): 724–733. [ZHAN H S, DING W P, HE B, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age, geochemical characteristics and tectonic environment of gneissic granites in Bobai area, southeast Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2020, 34(04): 724–733.]
- [72] 刘风雷. 广西姑婆山花岗岩暗色包体年代学和地球化学特征及其地质意义[D]. 桂林理工大学, 2021. [LIU F L. The chronology and geochemical characteristics of the dark inclusions of the Niaposhan granite in Guangxi province and their geological significance[D]. Guilin University of Technology, 2021.]
- [73] 文成, 谭双. 桂北香草坪岩体放射性地球化学及岩石圈热结构特征[J]. 能源研究与管理, 2021, No.48(03): 95–99. [WEN C, TAN S. Radio-geochemistry and lithospheric thermal structure of Xiangcaofao pluton in northern Guangxi[J]. Energy Research and Management, 2021, No.48(03): 95–99.]
- [74] 吴昆明, 陈琪, 王珂, 等. 广西苗儿山中段天门地区花岗岩体年代学及地球化学特征[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2021, 44(06): 501–518. [WU K M, CHEN Q, WANG K, et al. Geochronology and geochemistry of granites in Tianmen area, midsection of Miaoshe mountain, Guangxi[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 44(06): 501–518.]
- [75] 许华, 韩淑朋, 钟锋运, 等. 广西大瑶山东南缘侏罗纪埃达克质花岗岩的特征、成因及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(06): 1074–1092. [XU H, HAN S P, ZHONG F Y, et al. Characteristics, genesis and tectonic significance of Jurassic Adakitic granites in the southeast margin of Dayaoshan, Guangxi[J]. Journal of Petrology and Mineralogy, 2021, 40(06): 1074–1092.]
- [76] 高爱洋, 时毓, 刘希军, 等. 桂东北均洞花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 高校地质学报, 2022, 28(02): 225–239. [GAO A Y, SHI Y, LIU X J, et al. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics and tectonic implications of Jundong granitic pluton, northeast Guangxi[J]. Geological Journal of China Universities, 2022, 28(02): 225–239. (in Chinese)]
- [77] 吴疆. 南岭湘桂交界地区印支期花岗岩成因及其地质意义[D]. 桂林理工大学, 2022. [WU J. Genesis and geological significance of Indosinian granites in the border area of Hunan and Guangxi, Nanling[D]. Guilin University of Technology, 2022.]
- [78] 邱检生, 王德滋, 蟹泽聪史, 等. 福建沿海铝质 A 型花岗岩的地球化学及岩石成因[J]. 地球化学, 2000, (04): 313–321. [QIU J S, WANG D Z, XIE Z C S, et al. Geochemistry and petrogenesis of aluminous A-type granites in coastal Fujian province[J]. Geochimica, 2000, (04): 313–321.]
- [79] 邱检生, 肖娥, 胡建, 等. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2468–2484. [QIU J S, XIAO E, HU J, et al. Origin of highly differentiated type-I granites in the northeast coast of Fujian province: Zircon U-Pb chronology, geochemistry and Nd-Hf isotope constraints[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(11): 2468–2484.]
- [80] 邱检生, 李真, 刘亮, 等. 福建漳浦复式花岗岩体的成因: 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学及 Nd-Hf 同位素制约[J]. 地质学报, 2012, 86(04): 561–576. [QIU J S, LI Z, LIU L, et al. Genesis of the Zhangpu complex granitic pluton: Zircon U-Pb chronology, elemental geochemistry and Nd-Hf isotope constraints[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(04): 561–576.]
- [81] 李良林, 周汉文, 陈植华, 等. 福建太姥山地区花岗岩岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(04): 593–609. [LI L L, ZHOU H W, CHEN Z H, et al. Geochemical characteristics and geological significance of granites in Taimu mountain area, Fujian province[J]. Journal of Petrology and Mineralogy, 2011, 30(04): 593–609.]
- [82] 李良林, 周汉文, 陈植华, 等. 福建太姥山地区和鼓山地区 A 型花岗岩对比及其地球动力学意义[J]. 现代地质, 2013, 27(03): 509–524. [LI L L, ZHOU H W, CHEN Z H, et al. The correlation of A-type granites in Taimu mountain area and Gushan area, Fujian province and its geodynamic significance[J]. Geoscience, 2013, 27(03): 509–524.]
- [83] 向庭富. 闽西北某些中生代花岗岩的年代学、地球化学和岩石成因研究及其铀成矿潜力评价[D]. 南京大学, 2012. [XIANG T F. Study on the chronology, geochemistry and petrogenesis of some Mesozoic granites in northwest Fujian province and its evaluation on uranium metallogenic potential[D]. Nanjing University, 2012.]
- [84] 赵姣龙, 邱检生, 李真, 等. 福建太武山花岗岩体成因: 锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 2012, 28(12): 3938–3950. [ZHAO J L, QIU J S, LI Z, et al. Zircon U-Pb chronology and Hf isotope analysis of the Taiwushan granitic pluton, Fujian province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(12): 3938–3950.]
- [85] 张承帅, 苏慧敏, 于森, 等. 福建龙岩大洋–莒舟花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2012,

- 28(01): 225–242. [ZHANG C S, SU H M, YU M, et al. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of the Longyan-Da-huang-Juzhou granite in Fujian province and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(01): 225–242.]
- [86] 沈莽庭, 周延, 张晓东, 等. 闽西南虎岗地区晚中生代花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. *地质论评*, 2013, 59(02): 369–381. [SHEN M T, ZHOU Y, ZHANG X D, et al. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb age, geochemical characteristics and geological significance of late Mesozoic granites in Hugang area, southwest Fujian province[J]. *Geological Review*, 2013, 59(02): 369–381.]
- [87] 周红芳. 福建龙岩—泉州地区晚中生代花岗岩类的年代学、地球化学及地质意义[D]. 中国地质大学(北京), 2013. [ZHOU H F. The chronology, geochemistry and geological significance of late Mesozoic granites in Longyan-Quanzhou area, Fujian province[D]. China University of Geosciences (Beijing), 2013.]
- [88] 单强, 曾乔松, 李建康, 等. 福建魁岐晶洞花岗岩锆石 U-Pb 年代学及其地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2014, 30(04): 1155–1167. [SHAN Q, ZENG Q S, LI J K, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Kuiqi geode granites, Fujian province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(04): 1155–1167.]
- [89] 来守华, 陈仁义, 张达, 等. 福建潘田铁矿床花岗岩岩石地球化学特征、锆石 U-Pb 年代学及其与成矿的关系[J]. *岩石学报*, 2014, 30(06): 1780–1792. [LAI S H, CHEN R Y, ZHANG D, et al. Geochemical characteristics, zircon U-Pb chronology and their relationship with mineralization in pantian iron peposit, Fujian province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(06): 1780–1792.]
- [90] 丁聪, 赵志丹, 杨金豹, 等. 福建石狮白垩纪花岗岩与中基性脉岩的年代学与地球化学[J]. *岩石学报*, 2015, 31(05): 1433–1447. [DING C, ZHAO Z D, YANG J B, et al. Chronology and geochemistry of Cretaceous granites and mesobasic dikes in Shishi, Fujian province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(05): 1433–1447.]
- [91] 王森, 张达, Absai Vatuva, 等. 福建龙岩大洋—莒舟花岗岩地球化学、年代学、铪同位素特征及其地质意义[J]. *地球化学*, 2015, 44(05): 450–468. [WANG S, ZHANG D, ABSAI V, et al. Geochemistry, chronology and Hafnium isotope characteristics of the Longyan-Juzhou granite in Fujian province and their geological significance[J]. *Geochimica*, 2015, 44(05): 450–468.]
- [92] 王森, 张达, 赵红松, 等. 福建平和矾山地区花岗岩地球化学、年代学、Hf 同位素特征及地质意义[J]. *地球科学*, 2016, 41(01): 67–83. [WANG S, ZHANG D, ZHAO H S, et al. Geochemistry, chronology, Hf isotope characteristics and geological significance of granites in PingpingFan Shan area, Fujian province[J]. *Earth Science*, 2016, 41(01): 67–83.]
- [93] 陈进全. 闽西南华安正长花岗岩同位素测年及地球化学特征[J]. *福建地质*, 2016, 35(04): 247–258. [CHEN J Q. Isotopic dating and geochemical characteristics of the Hua ‘an Syenite granite in southwest Fujian[J]. *Fujian Geology*, 2016, 35(04): 247–258.]
- [94] 周伟强. 福建莆田地区晚中生代花岗岩年代学、地球化学及岩石成因[D]. 中国地质大学(北京), 2016. [ZHOU W Q. The chronology, geochemistry and petrogenesis of late Mesozoic granites in Putian area, Fujian province[D]. China University of Geosciences (Beijing), 2016.]
- [95] 康丛轩, 周延, 宗雯, 等. 闽西南龙岩地区印支期天宫山花岗岩体成因[J]. *地球科学*, 2018, 43(12): 4621–4637. [KANG C X, ZHOU Y, ZONG W, et al. Genesis of the indosinian Tiangongshan granitic pluton in Longyan area, southwest Fujian[J]. *Earth Science*, 2018, 43(12): 4621–4637.]
- [96] 李学燮. 福建将乐新路口花岗岩体地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及成矿意义[J]. *华东地质*, 2019, 40(03): 179–187. [LI X X. Geochemical characteristics, zircon U-Pb age and metallogenic significance of the Xinkou granitoids in Jiangle county, Fujian province[J]. *Geology of East China*, 2019, 40(03): 179–187.]
- [97] 邵雯. 福建建瓯筹岭早白垩世花岗岩同位素测年及地球化学特征[J]. *福建地质*, 2019, 38(01): 13–23. [SHAO W. Isotopic dating and geochemical characteristics of early Cretaceous granites in Chouling, Jianou, Fujian[J]. *Fujian Geology*, 2019, 38(01): 13–23.]
- [98] 王峰. 闽北浮盖山晶洞花岗岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及地质意义[J]. *福建地质*, 2019, 38(02): 98–110. [WANG F. Zircon U-Pb Age, Geochemical characteristics and geological significance of the Fugaishan geode granites in northern Fujian province[J]. *Fujian Geology*, 2019, 38(02): 98–110.]
- [99] 王峰. 闽西南宣和加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及对华南造山的启示[J]. *中国地质*, 2021, 48(01): 207–228. [WANG F. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of the Xuanhe Caledonian granites in southwest Fujian province and implications for orogeny in south China[J]. *Geology in China*, 2021, 48(01): 207–228.]
- [100] 李国文. 福建顺昌吴地中三叠世正长花岗岩地球化学特征及地质意义[J]. *福建地质*, 2020, 39(03): 163–173. [LI G W. Geochemical characteristics and geological significance of middle Triassic syenite granite in Wudian, Shunchang, Fujian province[J]. *Fujian Geology*, 2020, 39(03): 163–173.]
- [101] 肖晓牛, 肖娥, 陈振宁, 等. 闽中梅仙铅锌多金属矿区花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2020, 27(04): 158–171. [XIAO X N, XIAO E, CHEN Z N, et al. Zircon U-Pb chronology and geochemical characteristics of granites in Meixian Pb-Zn polymetallic deposit, Minzhong and its geological significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(04): 158–171.]
- [102] 钟锦辉. 福建长泰天柱山晶洞花岗岩锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征[J]. *福建地质*, 2020, 39(02): 96–107. [ZHONG J H. Zircon U-Pb age and petrogeochemical characteristics of the Tianzhu mountain geode granites in Changtai, Fujian province[J]. *Fujian Geology*, 2020, 39(02): 96–107.]

- [103] 赖斯颖. 福建连城李屋二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及地质意义[J]. 福建地质, 2021, 40(03): 197–208. [LAI S Y. Zircon U-Pb age, petrogeochemical characteristics and geological significance of Liwu Monzogranite in Licheng, Fujian province[J]. Fujian Geology, 2021, 40(03): 197–208.]
- [104] 黄文昌. 福建延平安丰桥二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征[J]. 福建地质, 2022, 41(03): 200–209. [HUANG W C. Zircon U-Pb age and petrogeochemical characteristics of Anfengqiao monzogranite in Yanping, Fujian province[J]. Fujian Geology, 2022, 41(03): 200–209.]
- [105] 云平, 雷裕红, 吕端艳. 海南岛中北部三叠纪花岗岩源区的锶、钕同位素制约及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 2005(02): 234–241. [YUN P, LEI Y H, LU C Y. Isotopic restriction of strontium and neodymium in Triassic granite source area of central northern Hainan island and its significance[J]. Geotectonics and Metallogeny, 2005(02): 234–241.]
- [106] 贾小辉, 王强, 唐功建, 等. 海南屯昌早白垩世晚期埃达克质侵入岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学与岩石成因[J]. 地球化学, 2010, 39(06): 497–519. [JIA X H, WANG Q, TANG G J, et al. Zircon U-Pb chronology, geochemistry and petrogenesis of late early Cretaceous Adakitic intrusive rocks in Tunchang, Hainan province[J]. Geochimica, 2010, 39(06): 497–519.]
- [107] 唐立梅. 海南岛中生代两期构造伸展作用的岩浆记录及其大陆动力学意义[D]. 浙江大学, 2010. [TANG L M. The magmatic record of tectonic extension in two Mesozoic periods in Hainan island and its implications for continental dynamics[D]. Zhejiang University, 2010.]
- [108] 周佐民, 谢才富, 徐倩, 等. 海南岛中三叠世正长岩—花岗岩套的地质地球化学特征与构造意义[J]. 地质论评, 2011, 57(04): 515–531. [ZHOU Z M, XIE C F, XU Q, et al. Geological and geochemical characteristics of the middle Triassic Syenite-granite suite in Hainan island and its tectonic significance[J]. Geological Review, 2011, 57(04): 515–531.]
- [109] 束云生. 海南岛南部崖城—三亚一带中生代岩浆作用及其构造意义[D]. 中国地质大学(北京), 2013. [SHU Y S. Mesozoic magmatism and its tectonic significance in Yacheng-Sanya area, southern Hainan island[D]. China University of Geosciences (Beijing), 2013.]
- [110] 董海龙. 琼南越南白垩纪花岗岩岩石地球化学特征与古南海构造演化[D]. 中国地质大学(北京), 2014. [DONG H L. Petro-geochemical characteristics of Cretaceous granites in south vietnam and tectonic evolution of the ancient south China Sea[D]. China University of Geosciences (Beijing), 2014.]
- [111] 张卓. 海南五指山地区早二叠世(强)过铝花岗岩成因及构造意义[D]. 东华理工大学, 2014. [ZHANG Z. Genesis and tectonic significance of early Permian (strong) peral granites in Wuzhishan area, Hainan province[D]. East China University of Technology, 2014.]
- [112] 张志刚. 海南中新世代火山岩岩石学特征及形成构造背景[D]. 中国地质大学(北京), 2015. [ZHANG Z G. Petrological characteristics and tectonic setting of Meso-Cenozoic volcanic rocks in Hainan[D]. China University of Geosciences (Beijing), 2015.]
- [113] 李翔, 魏俊浩, 李艳军, 等. 海南岛早白垩世初期 A 型花岗岩成因: U-Pb 年代学、地球化学及 Nd-Hf 同位素制约[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(03): 587–602. [LI X, WEI J H, LI Y J, et al. Origin of early Cretaceous A-type granites in Hainan island: U-Pb chronology, geochemistry and Nd-Hf isotope constraints[J]. Geotectonics and Metallogeny, 2016, 40(03): 587–602.]
- [114] 赵国锋, 刘汇川, 钱鑫, 等. 琼东南晚二叠世 I 型花岗岩成因及其构造指示[J]. 地球科学, 2018, 43(04): 1321–1332. [ZHAO G F, LIU H C, QIAN X, et al. Genesis and tectonic indication of the late Permian type I granites in Qiongsoutheast China[J]. Earth Science, 2018, 43(04): 1321–1332.]
- [115] 苟琪钰, 钱鑫, 何慧莹, 等. 海南荔枝沟中三叠世酸性火山岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 地球科学, 2019, 44(04): 1357–1370. [GOU Q Y, QIAN X, HE H Y, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of middle Triassic acid volcanic rocks in Lichigou, Hainan province[J]. Earth Science, 2019, 44(04): 1357–1370.]
- [116] 吕昭英, 陈沐龙, 傅杨荣, 等. 海南岛儋州地区两期 A 型花岗岩的岩石成因与地质意义[J]. 矿产与地质, 2019, 33(04): 660–669. [LU Z Y, CHEN M L, FU Y G, et al. Petrogenesis and geological significance of A-type granites of two stages in Danzhou area, Hainan island[J]. Mineral Resources and Geology, 2019, 33(04): 660–669.]
- [117] 王超, 魏昌欣, 云平, 等. 海南岛五指山地区顺作花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 2019, 38(08): 1352–1361. [WANG C, WEI C X, YUN P, et al. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics and geological significance of the Synzuo granites in Wuzhishan area, Hainan island[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(08): 1352–1361.]
- [118] 陈婕. 海南保亭地区二叠纪花岗岩岩石学特征及其成因研究[D]. 成都理工大学, 2020. [CHEN J. Petrology and genesis of Permian granites in Baoting area, Hainan province[D]. Chengdu University of Technology, 2020.]
- [119] 卢成忠, 汪庆华, 董传万, 等. 浙江洪公铝质 A 型花岗岩类的岩石地球化学及其构造环境[J]. 高校地质学报, 2006(04): 500–506. [LU C Z, WANG Q H, DONG C W, et al. Petrogeochemistry and tectonic environment of aluminous A-type granites in Honggong, Zhejiang province[J]. Geological Journal of China Universities, 2006(04): 500–506.]
- [120] 肖娥, 邱检生, 徐夕生, 等. 浙江瑶坑碱性花岗岩体的年代学、地球化学及其成因与构造指示意义[J]. 岩石学报, 2007(06): 1431–1440. [XIAO E, QIU Z S, XU X S, et al. The chronology, geochemistry, genesis and tectonic implication of the Yaokeng Alkaline granitic pluton, Zhejiang province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007(06): 1431–1440.]

- [121] 李艳军, 魏俊浩, 姚春亮, 等. 浙东南石平川花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及构造意义[J]. 地质论评, 2009, 55(05): 673–684. [LI Y J, WEI J H, YAO C L, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and tectonic significance of Shipingchuan granitic pluton, southeast Zhejiang province[J]. Geological Review, 2009, 55(05): 673–684.]
- [122] 李万友, 马昌前, 刘园园, 等. 浙江印支期铝质 A 型花岗岩的发现及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(02): 164–177. [LI W Y, MA C Q, LIU Y Y, et al. Discovery and geological significance of Indosinian aluminium-A-type granite in Zhejiang province[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 42(02): 164–177.]
- [123] 贾德龙, 严光生, 叶天竺, 等. 浙江绍兴地区广山花岗岩杂岩体的锆石 U-Pb 年代学、锆石 Hf 同位素、岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(12): 4087–4103. [JIA D L, YAN G S, YE T Z, et al. Zircon U-Pb chronology, zircon Hf isotopes, petrogeochemical characteristics and their geological significance of the Guangshan granitic complex in Shaoxing, Zhejiang province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(12): 4087–4103.]
- [124] 厉子龙, 周静, 毛建仁, 等. 浙西北木瓜燕山期花岗斑岩的定年、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(10): 3607–3622. [LI Z L, ZHOU J, MAO J R, et al. The dating, geochemical characteristics and geological significance of Papaya Yanshanian granite-porphyry in northwest Zhejiang province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(10): 3607–3622.]
- [125] 贾少华, 赵元艺, 王宗起, 等. 浙江建德岭后铜矿花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其意义[J]. 地质学报, 2014, 88(11): 2071–2085. [JIA S H, ZHAO Y Y, WANG Z Q, et al. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of granodiorite porphyry in Jiandelinghoucopper deposit, Zhejiang province and its significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(11): 2071–2085.]
- [126] 王对兴, 李春麟, 高万里, 等. 浙北绍兴地区新元古代早期铝质花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年、岩石地球化学及其成因讨论[J]. 矿物岩石, 2014, 34(03): 70–80. [WANG D X, LI C L, GAO W L, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating, petrogeochemistry and genesis of early Neoproterozoic aluminaceous granites in Shaoxing area, northern Zhejiang province[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2014, 34(03): 70–80.]
- [127] 王对兴, 高万里, 李春麟, 等. 浙中地区晚侏罗世花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(06): 1684–1699. [WANG D X, GAO W L, LI C L, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of late Jurassic granite-porphyry in central Zhejiang province and its geological significance[J]. Geology of China, 2015, 42(06): 1684–1699.]
- [128] 王对兴, 管琪, 高万里, 等. 浙东天台地区早白垩世花岗岩及暗色包体锆石 U-Pb 年龄、地球化学及其成因[J]. 中国地质, 2019, 46(06): 1512–1529. [WANG D X, GUAN Q, GAO W L, et al. Zircon U-Pb age, geochemistry and genesis of early Cretaceous granites and dark inclusions in Tiantai area, eastern Zhejiang[J]. Geology of China, 2019, 46(06): 1512–1529.]
- [129] 金庆花, 李春麟, 王宗秀. 浙江景宁岩体岩石地球化学特征与 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 2015, 34(Z1): 456–465. [JIN Q H, LI C L, WANG Z X. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of Jingning pluton, Zhejiang province[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(Z1): 456–465.]
- [130] 张建芳, 汪隆武, 陈津华, 等. 锆石 U-Pb 年代学和地球化学对浙皖马鞍山高分异岩体成因的约束[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(01): 98–114. [ZHANG J F, WANG L W, CHEN J H, et al. Zircon U-Pb chronology and geochemistry constraints on genesis of highly differentiated pluton in Maanshan, Zhejiang province[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2015, 40(01): 98–114.]
- [131] 张建芳, 龚瑞君, 汪隆武, 等. 浙皖晚中生代仙霞岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成岩地质意义[J]. 地质学报, 2017, 91(01): 198–212. [ZHANG J F, GONG R J, WANG L W, et al. Zircon U-Pb chronology, geochemistry and diagenetic geological significance of the late Mesozoic Xianxia pluton in Zhejiang and Anhui[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(01): 198–212.]
- [132] 廖圣兵, 陈荣, 褚平利, 等. 浙江长乐绿溪花岗岩体 U-Pb 年代学及地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(01): 87–98. [LIAO S B, CHEN R, CHU P L, et al. U-Pb chronology and geochemistry of the Luxi granites in Changle, Zhejiang province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(01): 87–98.]
- [133] 廖圣兵, 陈荣, 褚平利, 等. 浙东地区东园花岗岩体年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(05): 974–988. [LIAO S B, CHEN R, CHU P L, et al. Geological characteristics and geochemical characteristics of the Dongyuan granitic pluton, east Zhejiang province[J]. Geotectonics and Metallogeny, 2017, 41(05): 974–988.]
- [134] 段政, 邢光福, 余明刚, 等. 浙江外北山铝质 A1 型花岗岩成因: 矿物学、年代学、地球化学及 Hf 同位素制约[J]. 地质学报, 2017, 91(01): 180–197. [DUAN Z, XING G F, YU M G, et al. Origin of A1-type aluminous granite in Waibeishan, Zhejiang province: Mineralogy, chronology, geochemistry and Hf isotope constraints[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(01): 180–197.]
- [135] 胡庆海. 扬子板块东缘(浙江北部)晚中生代花岗岩的地球化学特征及其地球动力学意义[D]. 中国地质大学, 2017. [HU Q H. Geochemical characteristics of the late mesozoic granites in the eastern margin of the Yangtze Plate (northern Zhejiang province) and their geodynamic implications[D]. China University of Geosciences, 2017.]
- [136] 韩效忠, 吴兆剑, 刘蓉蓉, 等. 浙江新路盆地九华山火山-侵入杂岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地球科学, 2018, 43(S1): 192–208. [HAN Z L, WU Z J, LIU R R, et al. The geochronology and geochemical characteristics of the Jiuhuashan volcanic-intrusive complex in Xinlu basin, Zhejiang province and its geological significance[J]. Earth Science, 2018, 43(S1): 192–208.]

- [137] 唐增才, 孟祥随, 董学发, 等. 浙北地区晚中生代侵入岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素地球化学: 成因演化过程及其构造环境示踪[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(02): 403–419. [TANG Z C, MENG X S, DONG X F, et al. Zircon U-Pb chronology and Hf isotope geochemistry of late Mesozoic intrusive rocks in northern Zhejiang: Genetic evolution process and tectonic environment trace[J]. Geotectonics and Metallogeny, 2018, 42(02): 403–419.]
- [138] 包浪. 浙江舟山衢山岛燕山晚期花岗岩岩石学特征及其构造意义[D]. 成都理工大学, 2019. [BAO L. Petrological characteristics and tectonic significance of late Yanshanian granites in Zhoushan, Qushandao, Zhejiang[D]. Chengdu University of Technology, 2019.]
- [139] 徐汇, 宋华颖, 肖本盛, 等. 浙北花岗岩体放射性地球化学特征与地热关系[C]//浙江省地质学会. 资源利用与生态环境—第十六届华东六省一市地学科技论坛论文集. 浙江国土资源杂志社, 2020: 11. [XU H, SONG H Y, XIAO B S, et al. Radio-geochemical characteristics of granites in northern Zhejiang and their relationship with geothermal energy[C]// Zhejiang Geological Society. Resource Utilization and Ecological Environment: Proceedings of the 16th East China Forum on geoscience and technology in six provinces and one city. Zhejiang Land and Resources Magazine, 2020: 11.]
- [140] 陈焕元, 贾飞. 浙江统里地区早白垩世花岗岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学及其成因[J]. 地质学报, 2021, 95(11): 3352–3365. [CHEN H Y, JIA F. Zircon U-Pb age, geochemistry and genesis of early Cretaceous granitoids in Tongli area, Zhejiang province[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(11): 3352–3365.]
- [141] 骆雅琴. 浙江温州北部中酸性岩浆岩的岩石地球化学特征及其成因探讨[D]. 浙江大学, 2021. [LUO Y Q. Petrogeochemical characteristics and genesis of Medium acid magmatic rocks in northern Wenzhou, Zhejiang province[D]. Zhejiang University, 2021.]
- [142] 薛怀民. 江南造山带东段皖浙交界附近晚中生代花岗岩类的年代学、地球化学与层圈相互作用讨论[J]. 岩石学报, 2021, 37(02): 433–461. [XUE H M. Discussion on the geochronology, geochemistry and stratospheric interaction of late Mesozoic granites in the eastern Jiangnan orogenic belt, Anhui province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(02): 433–461.]
- [143] 杜秀玲, 汪方跃, 闫海洋, 等. 浙江中部芙蓉山花岗岩斑岩及包体岩石地球化学研究[J]. 地质论评, 2022, 68(01): 18–46. [DU X L, WANG F Y, YAN H Y, et al. Geochemistry of granite porphyry and inclusion rocks in Furongshan, central Zhejiang[J]. Geological Review, 2022, 68(01): 18–46.]
- [144] 刘远栋, 苏小浪, 程海艳, 等. 浙南加里东期龙泉岩体年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质力学学报, 2022, 28(02): 237–256. [LIU Y D, SU X L, CHENG H Y, et al. The chronology and geochemical characteristics of Caledonian Longquan pluton in southern Zhejiang province and its geological significance[J]. Chinese Journal of Geomechanics, 2022, 28(02): 237–256.]
- [145] 郑佳浩, 郭春丽. 湘南王仙岭花岗岩体的锆石 U-Pb 年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(01): 75–90. [ZHENG J H, GUO C L. Zircon U-Pb chronology, geochemistry, zircon Hf isotope characteristics and its geological significance of Wangxianling granitic pluton, Southern Hunan province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(01): 75–90.]
- [146] 王显彬, 蔡明海, 彭振安, 等. 湘南荷花坪地区王仙岭岩体地球化学特征及成矿作用[J]. 华南地质与矿产, 2012, 28(02): 115–123. [WANG X B, CAI M H, PENG Z N, et al. Geochemical characteristics and metallogenic evolution of Wangxianling pluton in Hehuaping area, southern Hunan province[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2012, 28(02): 115–123.]
- [147] 张龙升, 彭建堂, 张东亮, 等. 湘西大神山印支期花岗岩的岩石学和地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(01): 137–148. [ZHANG L S, PENG J T, ZHANG D L, et al. Petrological and geochemical characteristics of the Dashenshan Indosinian granite in western Hunan[J]. Journal of geotectonics and metallogeny, 2012, 36(01): 137–148.]
- [148] 蔡杨, 陆建军, 马东升, 等. 湖南邓阜仙印支晚期二云母花岗岩年代学、地球化学特征及其意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(12): 4215–4231. [CAI Y, LU J J, MA D S, et al. The geochronology and geochemical characteristics of late Indochinese two-mica granite in Dengfuxian, Hunan province and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(12): 4215–4231.]
- [149] 黄卉, 马东升, 陆建军, 等. 湘东邓阜仙二云母花岗岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究[J]. 矿物学报, 2013, 33(02): 245–255. [HUANG H, MA D S, LU J J, et al. Zircon U-Pb chronology and geochemistry of Dengfuxian two-mica granite in eastern Hunan province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2013, 33(02): 245–255.]
- [150] 马铁球, 李彬, 陈焰明, 等. 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(06): 1712–1724. [MA T Q, LI B, CHEN Y M, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of Nanyue pluton, Hunan province[J]. Geology of China, 2013, 40(06): 1712–1724.]
- [151] 柏道远, 陈必河, 钟响, 等. 湘西南印支期五团岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及形成背景[J]. 中国地质, 2014, 41(06): 2002–2018. [BAI D Y, CHEN B H, ZHONG X, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age, geochemical characteristics and formation background of the Indosinian Wutuan pluton in southern Hunan [J]. Geology in China, 2014, 41(06): 2002–2018.]
- [152] 柏道远, 吴能杰, 钟响, 等. 湘西南印支期瓦屋塘岩体年代学、成因与构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(05): 1075–1091. [BAI D Y, WU N J, ZHONG X, et al. Chronology, genesis and tectonic environment of the Indosinian Wawutang pluton in southern Hunan[J]. Geotectonics and Metallogeny, 2016, 40(05): 1075–1091.]
- [153] 陈希清, 付建明, 程顺波, 等. 湖南宝峰仙花岗岩地球化学特征与锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 矿床地质, 2015, 34(03): 602–616. [CHEN X Q, FU J M, CHENG S B, et al. Geochemical characteristics and zircon SHRIMP U-Pb dating of Baofeng granite in Hunan province[J]. Deposit Geology, 2015, 34(03): 602–616.]

- [154] 黄金川, 彭建堂, 阳杰华, 等. 湖南水口山花岗闪长岩的地球化学特征及成因[J]. 地球化学, 2015, 44(02): 131–144. [HUANG J C, PENG J T, YANG J H, et al. Geochemical characteristics and genesis of Shuikoushan granodiorite in Hunan[J]. *Geochemistry*, 2015, 44(02): 131–144.]
- [155] 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(02): 284–303. [MA L Y, LIU S S, FU J M, et al. Petrogenesis of the Tashan and Yangmingshan granites in Hunan province: Evidence from zircon U-Pb ages, geochemistry and Sr-Nd isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(02): 284–303.]
- [156] 陈迪, 刘珏懿, 王先辉, 等. 湖南五峰仙岩体岩石地球化学、SHRIMP U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征[J]. 地质科技情报, 2017, 36(06): 1–12. [CHEN D, LIU J Y, WANG X H, et al. Geochemistry, SHRIMP U-Pb age and Hf isotope characteristics of Wufengxian pluton, Hunan province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36(06): 1–12.]
- [157] 陈迪, 刘珏懿, 付胜云, 等. 湖南邓阜仙岩体地质地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质通报, 2017, 36(09): 1601–1615. [CHEN D, LIU J Y, FU S Y, et al. Geochemical characteristics, zircon U-Pb age and its significance in the Dengfuxian pluton, Hunan province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(09): 1601–1615.]
- [158] 杜云, 罗小亚, 黄革非, 等. 湘西南苗儿山岩体北段印支期花岗岩成因: 来自地球化学、U-Pb 年代学证据[J]. 华南地质与矿产, 2017, 33(03): 229–242. [DU Y, LUO X Y, HUANG G F, et al. Genesis of Indosinian granites in the northern section of Miaoshan pluton, southern Hunan: Evidence from geochemistry and U-Pb chronology[J]. *South China Geology and Mineral Resources*, 2017, 33(03): 229–242.]
- [159] 杜云, 罗小亚, 黄革非, 等. 湖南塔山岩体岩石学、地球化学、U-Pb 年代学特征及其形成构造背景[J]. 地质科技情报, 2017, 36(06): 50–61. [DU Y, LUO X Y, HUANG G F, et al. Petrology, geochemistry, U-Pb chronology and tectonic setting of Tashan pluton in Hunan province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36(06): 50–61.]
- [160] 杜云, 郭爱民, 卢友月, 等. 湘西南苗儿山岩体北段加里东期花岗岩成因: 来自岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 中国地质, 2021, 48(05): 1540–1561. [DU Y, GUO A M, LU Y Y, et al. Genesis of caledonian granites in the northern section of Miaoshan pluton, southern Hunan: Evidence from petrology, geochemistry and zircon U-Pb chronology[J]. *Geology in China*, 2021, 48(05): 1540–1561.]
- [161] 鲁玉龙, 彭建堂, 阳杰华, 等. 湘中紫云山岩体的成因: 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学及 Hf-O 同位素制约[J]. 岩石学报, 2017, 33(06): 1705–1728. [LU Y L, PENG J T, YANG J H, et al. Zircon U-Pb chronology, elemental geochemistry and Hf-O isotope analysis of the Ziyunshan pluton in central Hunan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(06): 1705–1728.]
- [162] 许德如, 邓腾, 董国军, 等. 湘东北连云山二云母二长花岗岩的年代学和地球化学特征: 对岩浆成因和成矿地球动力学背景的启示[J]. 地学前缘, 2017, 24(02): 104–122. [XU D R, DENG T, DONG G J, et al. The geochronology and geochemistry of the two-mica monzogranite in Lianyungshan, northeast Hunan province: Implications for magmatic genesis and geodynamic setting of mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(02): 104–122.]
- [163] 程顺波, 付建明, 崔森, 等. 湘桂边界越城岭岩基北部印支期花岗岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征[J]. 地球科学, 2018, 43(07): 2330–2349. [CHENG S B, FU J M, CUI S, et al. Zircon U-Pb chronology and geochemical characteristics of the Indosinian granites in the northern Yuechengling lithography, Hunan-Guangxi boundary[J]. *Earth Science*, 2018, 43(07): 2330–2349.]
- [164] 何苗, 刘庆, 孙金凤, 等. 湘东地区锡田印支期花岗岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 2018, 34(07): 2065–2086. [HE M, LIU Q, SUN J F, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of Xitian Indosinian granites in eastern Hunan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(07): 2065–2086.]
- [165] 何苗, 刘庆, 侯泉林, 等. 湘东邓阜仙花岗岩成因及对成矿的制约: 锆石/锡石 U-Pb 年代学、锆石 Hf-O 同位素及全岩地球化学特征[J]. 岩石学报, 2018, 34(03): 637–655. [HE M, LIU Q, HOU Q L, et al. Genesis and constraints on mineralization of Dengfuxian granite in eastern Hunan province: Zircon/kassite U-Pb chronology, zircon Hf-O isotope and whole rock geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(03): 637–655.]
- [166] 李超. 湖南骑田岭花岗岩体岩石学、岩石地球化学及其大地构造意义[D]. 成都理工大学, 2019. [LI C. Petrology, petrogeochemistry and tectonic implications of Qitianling granitic pluton, Hunan province[D]. *Chengdu University of Technology*, 2019.]
- [167] 于玉帅, 戴平云, 张旺驰, 等. 湘东丫江桥岩体时代与成因: 来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Lu-Hf 同位素制约[J]. 地质学报, 2019, 93(02): 394–413. [YU Y S, DAI P Y, ZHANG W C, et al. The age and genesis of the Yajiangqiao pluton in eastern Hunan: LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology, geochemistry and Lu-Hf isotope constraints[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(02): 394–413.]
- [168] 李湘玉, 易立文, 陈迪, 等. 湖南将军庙花岗岩的成因: 岩石化学、锆石 U-Pb 年代学与 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(04): 726–740. [LI X Y, YI L W, CHEN D, et al. Genesis of Jiangjunmiao granites in Hunan province: Petrochemistry, zircon U-Pb chronology and Sr-Nd-Hf isotope constraints[J]. *Bulletin of Mineral and Rock Geochemistry*, 2020, 39(04): 726–740.]
- [169] 宋泽友, 冯雨周, 邵拥军, 等. 湖南当家冲铜矿床白石峰岩体地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(08): 1942–1956. [SONG Z Y, FENG Y Z, SHAO Y J, et al. Geochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf isotopes of Baishifeng pluton in Zhuochong copper deposit, Hunan province[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(08): 1942–1956.]

- [170] 罗鹏, 陈迪, 杨俊, 等. 湖南川口印支期花岗岩成因及与钨成矿关系[J]. 华南地质, 2021, 37(03): 247–264. [LUO P, CHEN D, YANG J, et al. Genesis and its relationship with tungsten mineralization in Chuankou Indosinian granite, Hunan province[J]. South China Geology, 2021, 37(03): 247–264.]
- [171] 孙海瑞, 吕志成, 韩志锐, 等. 湖南大义山晚侏罗世富硼型成锡矿 A 型花岗岩成因及地质意义[J]. 岩石学报, 2021, 37(06): 1749–1764. [SUN H R, LU Z C, HAN Z R, et al. Genesis and geological significance of late Jurassic Boron-rich Tin-forming A-type granite in Dayishan, Hunan province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(06): 1749–1764.]
- [172] 覃莉茜, 饶灿, 林晓青, 等. 湖南香花岭地区花岗岩中锂对成岩成矿的制约[J]. 高校地质学报, 2021, 27(02): 149–162. [QIN L Q, RAO C, LIN X Q, et al. Constraints of lithium on diagenesis and mineralization in granites in Xianghualing area, Hunan province[J]. Geological Journal of China Universities, 2021, 27(02): 149–162.]
- [173] 陈迪, 罗鹏, 曾志方, 等. 湘南都庞岭复式花岗岩成因及地质意义: 矿物化学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学与 Nd-Hf 同位素制约[J]. 地质力学学报, 2022, 28(04): 617–641. [CHEN D, LUO P, ZENG Z F, et al. Genesis and geological significance of the Pangling complex granite in southern Hunan province: Mineral chemistry, zircon U-Pb chronology, geochemistry and Nd-Hf isotope constraints[J]. Chinese Journal of Geomechanics, 2022, 28(04): 617–641.]
- [174] 刘飏, 吴玺虹, 孔华, 等. 湖南锡田矿田花岗岩时空分布与钨锡成矿关系: 来自锆石 U-Pb 年代学与岩石地球化学的约束[J]. 地球科学, 2022, 47(01): 240–258. [LIU B, WU Q H, KONG H, et al. The relationship between the temporal and spatial distribution of granites in Xitian orefield, Hunan province and the formation of tungsten-Tin mineralization: Constraints from zircon U-Pb chronology and petrogeochemistry[J]. Earth Science, 2022, 47(01): 240–258.]
- [175] 袁玲玲, 王祎帆, 刘建平, 等. 湖南香花岭晚侏罗世高分异花岗岩的岩石地球化学特征: 岩石成因与稀有金属成矿效应[J]. 岩石学报, 2022, 38(07): 2113–2138. [YUAN L L, WANG Y F, LIU J P, et al. Geochemical characteristics of late Jurassic High differentiation granites in Xianghueling, Hunan province: Petrogenesis and metallogenic effect of rare metals[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(07): 2113–2138.]
- [176] 张招崇, 简平, 魏罕蓉. 江西三清山国家地质公园花岗岩 SHRIMP 年龄、地质-地球化学特征和岩石成因类型[J]. 地质论评, 2007(S1): 28–40. [ZHANG Z Z, JIAN P, WEI H R. SHRIMP age, geogeochemical characteristics and petrogenetic types of granites in Sanqingshan national geopark, Jiangxi province[J]. Geological Review, 2007(S1): 28–40.]
- [177] 张苑, 舒良树, 陈祥云. 华南早古生代花岗岩的地球化学、年代学及其成因研究—以赣中南为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(08): 1061–1079. [ZHANG Y, SHU L S, CHEN X Y. Geochemistry, chronology and genesis of early Paleozoic granites in south China: A case study of central southern Jiangxi[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 41(08): 1061–1079.]
- [178] 郭博然, 刘树文, 杨朋涛, 等. 江西卧龙岗花岗岩和铜厂花岗闪长斑岩的地球化学特征及成因—对赣东北地区铜矿成矿地质背景的制约[J]. 地质通报, 2013, 32(07): 1035–1046. [GUO B R, LIU S W, YANG P T, et al. Geochemical characteristics and genesis of Wolonggu granite and Tongchang granodiorite porphyry in Jiangxi province[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(07): 1035–1046.]
- [179] 任海涛, 吴俊奇, 叶锡芳, 等. 江西富城岩体西部过铝质细粒花岗岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. 高校地质学报, 2013, 19(02): 327–345. [REN H T, WU J Q, YE X F, et al. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of peraluminous fine-grained granites in western Fucheng pluton, Jiangxi province[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(02): 327–345.]
- [180] 杨泽黎, 邱检生, 邢光福, 等. 江西宜春雅山花岗岩体的成因与演化及其对成矿的制约[J]. 地质学报, 2014, 88(05): 850–868. [YANG Z L, QIU Z S, XING G F, et al. Genesis and evolution of Yichun Yashan granitoids in Jiangxi province and its constraints on mineralization[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(05): 850–868.]
- [181] 罗刚. 赣西北花山洞钨矿隐伏花岗岩地球化学特征及锆石 U-Pb 定年分析[D]. 中国地质大学(北京), 2015. [LUO G. Geochemical characteristics and zircon U-Pb dating of concealed granite in Huashan tungsten deposit, northwest Jiangxi province[D]. China University of Geosciences (Beijing), 2015.]
- [182] 石连成. 江西南村地区燕山期花岗岩体地质地球化学特征及其地质意义[D]. 东华理工大学, 2015. [SHI L C. Geological and geochemical characteristics of Yanshanian granitoids in Jiangxincun area and its geological significance[D]. East China University of Technology, 2015.]
- [183] 王先广, 刘战庆, 刘善宝, 等. 江西朱溪铜钨矿细粒花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和岩石地球化学研究[J]. 岩矿测试, 2015, 34(05): 592–599. [WANG X G, LIU Z Q, LIU S B, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and petrogeochemistry of fine-grained granites in Zhuxi copper-tungsten deposit, Jiangxi province[J]. Rock and Mineral Testing, 2015, 34(05): 592–599.]
- [184] 周佐民, 谢财富, 孙文良, 等. 江西乐安县咸口花岗岩体的锆石 LA-ICP-MS 定年及构造意义[J]. 地质学报, 2015, 89(01): 83–98. [ZHOU Z M, XIE F F, SUN W L, et al. Zircon LA-ICP-MS dating of the Xiankou granitic pluton in Le'an county, Jiangxi province and its tectonic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(01): 83–98.]
- [185] 周万蓬, 谢财富, 郭福生, 等. 赣中乐安加里东期花岗岩体岩石学及主、微量元素特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(02): 259–269. [ZHOU W P, XIE F F, GUO F S, et al. Petrology and main and trace elements of the Leian Caledonian granites in central Jiangxi province[J]. Bulletin of Mineral and Rock Geochemistry, 2017, 36(02): 259–269.]

- [186] 李永明, 李吉明. 赣北东坪钨矿区二云母花岗岩地球化学特征及其构造动力学意义[J]. 中国钨业, 2018, 33(02): 1-9. [LI Y M, LI J M. Geochemical characteristics and tectonic dynamic significance of two-mica granite in Dongping tungsten ore area, northern Jiangxi province[J]. China Tungsten Industry, 2018, 33(02): 1-9.]
- [187] 张建岭, 许德如, 于得水, 等. 赣中山庄二长花岗岩的成因与构造背景: 岩石学、地球化学及锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 岩石学报, 2018, 34(06): 1641-1656. [ZHANG J L, XU D R, YU D S, et al. Genesis and tectonic setting of the monzogranite in Shanshan mountain: Petrological, geochemical and zircon U-Pb chronology evidence[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(06): 1641-1656.]
- [188] 吴显愿. 江西大湖塘超大型钨矿多期似斑状花岗岩岩浆作用与成因[D]. 中国地质大学(北京), 2019. [WU X X. Magmatism and genesis of multi-stage porphyritic granites in Dahutang super-large tungsten deposit, Jiangxi province[D]. China University of Geosciences (Beijing), 2019.]
- [189] 褚平利, 段政, 廖圣兵, 等. 江西大湖塘中生代花岗岩的成因与构造指示意义: 年代学、矿物化学、地球化学与 Lu-Hf 同位素制约[J]. 地质学报, 2019, 93(07): 1687-1707. [ZHU P L, DUAN Z, LIAO S B, et al. Genesis and tectonic implications of Mesozoic granites in Dahutang, Jiangxi province: Chronology, mineral chemistry, geochemistry and Lu-Hf isotope constraints[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(07): 1687-1707.]
- [190] 冯尚杰, 陈卫锋, 王洪作, 等. 赣中地区晚中生代高分异 A 型花岗岩的厘定及其成因研究[J]. 地质学报, 2020, 94(04): 1227-1247. [FENG S J, CHEN W F, WANG H Z, et al. Determination and genesis of high differentiation A-type granites of late Mesozoic in central Jiangxi[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(04): 1227-1247.]
- [191] 刘萌. 江西万载县新元古代花岗岩类地球化学特征及其意义[D]. 成都理工大学, 2020. [LIU M. Geochemical characteristics and significance of Neoproterozoic granitoids in Wankai County, Jiangxi province[D]. Chengdu University of Technology, 2020.]
- [192] 王艳, 马昌前, 王连训, 等. 赣西北小九宫-沙店白垩纪花岗岩的岩石成因及构造意义[J]. 地球科学, 2020, 45(04): 1115-1135. [WANG Y, MA C Q, WANG L X, et al. Petrogenesis and tectonic significance of the Xiaojiugong-Shadian Cretaceous granites in northwestern Jiangxi province[J]. Earth Science, 2020, 45(04): 1115-1135.]
- [193] 黄昌旗, 张开毕, 曹明志, 等. 闽赣交界桃溪穹隆与外围印支期花岗岩岩石地球化学特征对比及地质意义[J]. 福建地质, 2022, 41(01): 12-25. [HUANG C Q, GAO K B, CAO M Z, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Taoxi dome and its outflanked Indosinian granites in the Fujian-Jiangxi border area[J]. Fujian Geology, 2022, 41(01): 12-25.]
- [194] 黄迪, 黄旭栋, 章荣清, 等. 赣西北花山洞与九岭花岗岩对比及其成矿指示意义[J]. 地质学刊, 2022, 46(01): 22-33. [HUANG D, HUANG X D, ZHANG R Q, et al. Correlation between Huashan cave and Jiuling granites in northwest Jiangxi province and their metallogenic significance[J]. Chinese Journal of Geology, 2022, 46(01): 22-33.]
- [195] 徐文坦, 张雪辉, 张斌斌, 等. 赣东北地区福泉山岩体高分异 S 型花岗岩成因: 来自锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及地球化学的证据[J]. 地质通报, 2022, 41(04): 577-589. [XU W T, ZHANG X H, ZHANG B B, et al. Origin of highly differentiated S-type granites in Fuquanshan pluton, northeast Jiangxi: Evidence from zircon U-Pb ages, Hf isotopes and geochemistry[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(04): 577-589.]
- [196] 张福神, 徐进, 张娟, 等. 江西九岭地区新元古代花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(01): 12-20. [ZHANG F S, XU J, ZHANG J, et al. Geochemical characteristics, zircon U-P age and geological significance of Neoproterozoic granites in Jiuling area, Jiangxi province[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 43(01): 12-20.]
- [197] 张垚垚, 刘凯, 何庆成, 等. 江西武功山中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 地质论评, 2022, 68(04): 1301-1319. [ZHANG Y Y, LIU K, HE Q C, et al. Zircon U-Pb age and Hf isotope characteristics of Mesozoic granites in Wugongshan, Jiangxi province and their geological significance[J]. Geological Review, 2022, 68(04): 1301-1319.]
- [198] 赵文, 张怀瑾. 江西香炉山钨矿床矽卡岩矿物和成矿花岗岩地球化学特征及其指示意义[J]. 岩石学报, 2022, 38(02): 483-494. [ZHAO W, ZHANG H J. Geochemical characteristics of skarn minerals and ore-forming granites in Xianglushan tungsten deposit, Jiangxi province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(02): 483-494.]
- [199] 孙涛. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 2006(03): 332-335+426-427. [SUN T. New distribution map of granite in south China and its description[J]. Geological Bulletin, 2006(03): 332-335+426-427.]
- [200] 周云, 梁新权, 梁细荣, 等. 海南白垩纪六罗村组火山岩的年代学、地球化学特征及其大地构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(05): 903-918. [ZHOU Y, LIANG X Q, LIANG X R, et al. Geochronology and geochemistry of Cretaceous Liuluocun formation volcanic rocks in Hainan province and their tectonic implications[J]. Geotectonics and Metallogeny, 2015, 39(05): 903-918.]
- [201] WOLLENBERG H A, SMITH A R. Radiogenic heat production of crustal rocks an assessment based on geochemical data[J]. Geophysical Research Letters, 1987, 14(3): 295-298.
- [202] HASTEROK D, GARD M, WEBB J. On the radiogenic heat production of metamorphic, igneous, and sedimentary rocks[J]. Geoscience Front, 2018, 9: 1777-1794
- [203] LIAO D W, FENG D J, LUO J, et al. Relationship between radiogenic heat production in granitic rocks and emplacement age[J]. Energy Geoscience, 2023, 100157.

- [204] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 2003(04): 556–565. [ZHOU X M. Some thoughts on the study of granite in south China. *Geological Journal of Universities*, 2003(04): 556–565]
- [205] PLEITAVION M, CARRO P M E, GARCIA A E, et al. Radiogenic heat production in granitoids from the sierras de Córdoba, argentina. *Geothermal Energy*, 2021, 9(16).
- [206] 张芳荣. 华南武夷山中段加里东期花岗岩类成因初探[C]. 2006 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要集, 2006. [ZHANG F R. A preliminary study on the genesis of Caledonian granites in the middle part of Wuyi mountain, south China[C]. 2006 National Symposium on Petrology and Geodynamics, 2006.]
- [207] 赵平, 何丽娟, 刘绍文, 等. 中国陆地大地热流[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [ZHAO P, HE L J, LIU S W, et al. *Terrestrial heat flow in China*[M]. Beijing: Science Press, 2015.]
- [208] 汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25–31. [WANG J Y, HU S B, PANG Z H, et al. Evaluation on geothermal resource potential of dry hot rock in mainland China[J]. *Science and Technology Review*, 2012, 30(32): 25–31.]
- [209] SCHARFENBERG L, REGELOUS A, WALL H D. Radiogenic heat production of Variscan granites from the western Bohemian Massif, Germany. *Journal of Geosciences*, 2019, 64: 251–269.
- [210] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33: 241–265.
- [211] ARTEMIEVA I M, THYBO H, JAKOBSEN K, et al. Heat production in granitic rocks: global analysis based on a new data compilation GRANITE2017. *Earth-Science Reviews*, 2017, 172: 1–26.
- [212] 马鸿文. 花岗岩成因类型的判别分析[J]. 岩石学报, 1992(04): 341–350. [MA H W. Discriminant analysis of genetic types of granite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1992(04): 341–350.]
- [213] PITCHER W S. Granite type and tectonic environment. *Mountain building processes*, 1983, 19: 40.
- [214] CLEMENS J D, WALL V J. Origin and crystallization of some peraluminous (S-type) granitic magmas. *Can. Mineral*, 1981, 19: 111–131.
- [215] LOISELLE M C, WONES D R. Characteristics and origin of anorogenic granites. In: *Geological Society America, Abstracts With Programs* 11, 1979, 7: 468.
- [216] ZHOU Z M, MA C Q, QI S H, et al. Late Mesozoic high-heat-producing (HHP) and high-temperature geothermal reservoir granitoids: The most significant geothermal mechanism in south China[J]. *Lithos*, 2020, 366–367: 105568.
- [217] ZHOU X M, SUN T, SHEN W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in south China: A response to tectonic evolution. *Episodes*. 2006, 29(1).
- [218] 贾小辉, 王强, 唐功建. A型花岗岩的研究进展及意义[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(03): 465–480. [JIA X H, WANG Q, TANG G J. Research progress and significance of A-type granites[J]. *Geotectonics and metallogeny*, 2009, 33(03): 465–480.]
- [219] 王懋基. 根据重力场研究华南地壳结构[J]. 物探与化探, 1985(03): 161–169. [WANG M J. Research on crustal structure of south China based on gravity field[J]. *Geophysical and geochemical exploration*, 1985(03): 161–169]
- [220] 冯锐, 朱介寿, 丁韞玉, 等. 利用地震面波研究中国地壳结构[J]. 地震学报, 1981(04): 335–350. [FENG R, ZHU J S, DING Y Y, et al. Crustal structure of China using seismic surface waves[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1981(04): 335–350.]
- [221] 杨鹏, 刘绍文. 中国东南地区岩石圈热结构特征及其构造意义[J]. 高校地质学报, 2022, 28(05): 698–708. [YANG P, LIU S W. Thermal structure of lithosphere in southeast China and its tectonic significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2022, 28(05): 698–708.]
- [222] 陈超强, 何丽娟, 焉力文, 等. 中国陆地热岩石圈厚度及其地球动力学意义[J]. 地球物理学报, 2022, 65(08): 3054–3063. [CHEN C Q, HE L J, YAN L W, et al. Thickness of terrestrial hot lithosphere in China and its geodynamic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(08): 3054–3063.]
- [223] HASTEROK D, CHAPMAM D S. Heat production and geotherms for the continental lithosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 307(1–2): 59–70.
- [224] 许天福, 张炜. 增强型地热工程国际发展和我国前景展望. 石油科学通报, 2016, 01: 38–44. [XU T F, ZHANG W. Enhanced geothermal systems: International developments and China's prospects. *Petroleum Science Bulletin*, 2016, 01: 38–44.]
- [225] 朱传庆, 陈驰, 杨亚波, 等. 岩石热导率影响因素实验研究及其对地热资源评估的启示. 石油科学通报, 2022, 03: 321–333. [ZHU C Q, CHEN C, YANG Y B, et al. Experimental study into the factors influencing rock thermal conductivity and their significance to geothermal resource assessment. *Petroleum Science Bulletin*, 2022, 03: 321–333.]

附录 1 各地区生热率表

省份	地区	样品 个数	测量方式		K ₂ O/%		U/ppm		Th/ppm		生热率/ $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$		
			主量元素	微量元素	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	平均值
福建	天宫山	4	XRF	ICP-MS	2.05	6.09	7.66	16.60	42.90	92.10	6.72	9.76	8.02
	大洋	17	XRF	ICP-MS	4.23	5.30	4.96	38.18	16.90	74.67	2.85	15.22	7.71
	潘田矿区	3	XRF	ICP-MS	4.58	4.96	23.67	31.55	3.26	6.90	6.61	8.90	7.62
	营舟	6	XRF	ICP-MS	4.81	5.29	4.90	18.20	38.31	69.20	4.28	8.99	7.23
	将乐新路口	3	XRF	ICP-MS	4.97	7.04	7.82	19.55	29.46	31.54	4.40	7.54	6.03
	程溪	2	XRF	ICP-MS	4.45	4.68	11.86	13.78	29.07	38.24	5.36	6.50	5.93
	梅仙矿区	9	XRF	ICP-MS	4.84	5.77	6.06	24.02	21.50	89.13	3.32	7.28	5.75
	新村	3	湿法化学分析法	INAA	4.34	4.59	9.80	12.80	35.30	36.40	5.25	6.11	5.61
	金刚山	4	湿法化学分析法	INAA	4.22	4.28	9.05	10.60	35.20	36.90	5.07	5.54	5.38
	长桥	2	XRF	ICP-MS	4.80	4.88	8.68	18.22	21.96	23.19	4.09	6.60	5.35
	古罗	8	XRF	ICP-MS	5.19	5.70	5.35	9.70	32.80	46.50	4.14	5.93	5.01
	华安	13		ICP-MS	4.39	5.69	3.81	21.12	22.85	36.16	2.98	7.97	4.65
	天柱山	4			4.46	4.67	2.88	11.33	19.40	29.95	2.42	5.28	4.32
	宣和	16	XRF	ICP-MS	4.29	6.14	3.88	18.44	16.79	36.36	7.38	2.56	4.30
	太姥山	4	XRF	ICP-MS	4.07	4.42	5.81	8.25	21.10	40.50	2.86	5.21	4.19
	顺昌吴地	3	XRF	ICP-MS	5.66	6.48	5.03	7.32	27.75	29.13	3.62	4.30	4.02
	建瓯筹岭	3			4.29	4.99	4.13	5.95	22.32	39.02	2.96	4.38	3.83
	金山	13	ICP-AES	ICP-MS	3.89	6.23	4.15	12.00	16.70	31.20	2.68	5.57	3.79
	周宅	4	XRF	ICP-MS	4.29	5.01	4.57	5.58	19.10	32.50	2.82	4.04	3.71
	连城李屋	4			3.89	4.91	3.78	7.01	23.00	31.78	2.84	4.19	3.62
	延平安丰桥	3	XRF	ICP-MS	4.29	4.98	2.93	11.15	17.60	30.19	2.35	5.30	3.62
	南镇	2	XRF	ICP-MS	4.57	5.48	4.49	6.70	24.43	27.36	3.17	4.01	3.59
	霞洋	6	XRF	ICP-MS	3.35	4.68	3.17	9.62	17.20	46.50	2.29	5.92	3.59
	乌山	2	湿法化学分析法	INAA	3.39	3.88	6.00	6.00	25.00	26.00	3.54	3.57	3.56
	鼓山	3		ICP-MS	3.83	4.54	4.22	9.37	19.50	25.80	2.92	4.06	3.43
	长坑	7	ICP-AES	ICP-MS	3.69	5.67	3.17	8.04	16.90	34.30	2.27	4.90	3.38
	平海	6	XRF	ICP-MS	4.12	5.44	2.56	7.02	13.30	27.20	1.94	3.95	3.02
	魁岐	15			2.03	4.59	0.96	7.00	2.37	64.50	0.68	7.82	3.00
	浮盖山	4	XRF	ICP-MS	4.54	4.90	4.40	5.63	19.30	20.60	2.80	3.16	2.97
	矾山	15	XRF	ICP-MS	2.84	5.20	3.47	7.39	13.64	25.30	2.09	3.93	2.87
	湖西	2	XRF	ICP-MS	3.14	4.18	2.65	9.78	8.37	16.53	1.58	3.89	2.73
	大京	2	XRF	ICP-MS	4.47	4.62	3.39	4.12	14.87	24.84	2.23	3.11	2.67
	大京	2	XRF	ICP-MS	4.47	4.62	3.39	4.12	14.87	24.84	2.23	3.11	2.67
	捕虎尖	7	XRF	ICP-MS	3.30	4.68	2.80	5.09	17.30	22.80	2.21	3.04	2.64
	赤石	8	XRF	ICP-MS	3.59	4.70	1.80	6.59	10.60	30.70	1.86	3.74	2.57
	永定虎岗	8	XRF	ICP-MS	4.59	6.29	4.44	10.20	2.30	5.88	1.68	3.30	2.55
	其他	3	XRF/ICP-AES	ICP-MS	4.43	4.56	3.00	3.60	16.10	20.30	2.23	2.61	2.41
	太武山	6	XRF	ICP-MS	4.02	5.05	2.13	7.11	9.74	20.44	1.63	3.55	2.34
	泉州	7	ICP-AES	ICP-MS	3.34	4.52	2.79	6.23	9.47	18.10	1.62	2.75	2.25
	三沙	2	XRF	ICP-MS	4.56	4.79	3.01	3.37	10.34	12.24	1.92	1.98	1.95

(续表)

省份	地区	样品 个数	测量方式		K ₂ O/%		U/ppm		Th/ppm		生热率/ $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$		
			主量元素	微量元素	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	平均值
福建	青芝	3			4.31	4.41	2.05	2.76	11.47	14.50	1.65	2.03	1.86
	东埔	3	ICP-AES	ICP-MS	2.10	4.53	0.70	7.51	2.80	15.60	0.54	3.33	1.51
	石狮	4	ICP-AES	ICP-MS	1.33	1.85	0.56	6.10	2.90	15.50	0.48	2.76	1.11
	总	251			1.85	7.04	0.96	38.18	1.15	92.10	0.68	15.22	4.04
广东	南昆山	6		ICP-MS	4.25	4.87	9.51	30.31	29.90	112.00	5.24	15.76	9.78
	良口黄田埔	9	XRF	ICP-MS	4.06	5.62	10.50	56.90	29.50	82.20	6.21	17.45	9.39
	鸡笼岭	2	XRF	ICP-MS	5.35	5.55	14.60	16.60	50.60	50.90	7.62	8.13	7.87
	连阳	14	XRF	ICP-MS	4.08	5.89	4.01	32.70	20.10	73.00	2.77	13.15	6.89
	大金山	10	XRF	ICP-MS	4.08	5.89	4.01	32.70	20.10	73.00	2.77	13.15	6.89
	南山	5	湿化学方法	ICP-AES	4.81	6.10	10.60	13.60	39.00	48.20	5.87	6.99	6.46
	佛冈	11	XRF	ICP-MS	4.42	5.86	7.57	17.36	27.01	70.48	4.81	9.08	6.43
	其他	18	XRF	ICP-MS	3.47	5.49	3.41	39.66	10.99	60.09	2.06	14.00	5.80
	禾洞	9	XRF	ICP-MS	4.32	5.36	3.06	22.00	11.00	54.30	1.92	9.66	5.18
	大桂山	11	XRF	ICP-MS	4.32	5.30	6.88	15.28	13.00	40.50	3.24	5.64	4.76
	白石嶂铅矿区	9	XRF	ICP-MS	4.49	6.08	3.73	17.21	8.97	38.13	2.03	7.89	4.58
	莲花山	6	XRF	ICP-MS	3.94	4.84	2.52	32.20	13.90	35.10	1.93	10.92	4.35
	将军头	2	XRF	ICP-MS	4.25	4.27	4.08	4.09	21.80	22.10	2.86	2.89	2.87
	大东山	3	XRF	ICP-MS	4.27	4.81	2.21	4.29	18.90	29.60	2.19	3.49	2.77
	福湖岭	8	XRF	ICP-MS	1.93	3.95	3.05	5.01	14.70	29.40	1.99	3.92	2.69
	广宁	2	XRF	ICP-MS	4.22	4.74	4.60	6.18	14.10	14.16	2.47	2.91	2.69
	三岗山	10	XRF	ICP-MS	4.08	4.86	2.34	5.54	12.13	22.10	1.75	2.89	2.51
	长蛇山	4	AAS	ICP-MS	4.00	5.07	4.66	8.00	6.54	13.50	2.06	2.90	2.48
	高枧铅锌银矿区	9	XRF	ICP-MS	1.52	5.22	0.91	5.21	1.29	9.51	0.49	2.22	1.41
	总	148			1.52	6.20	0.91	56.90	1.29	112.00	0.49	17.45	5.37
广西	大厂	5	XRF	ICP-MS	4.21	4.76	29.87	41.45	9.29	12.59	8.66	11.65	10.42
	香草坪	36	XRF	ICP-MS	3.76	5.44	6.35	45.20	5.70	32.80	3.37	13.54	9.98
	张家	8	XRF	ICP-MS	4.22	5.73	12.20	38.60	13.10	46.40	5.40	11.64	8.45
	花山	7	XRF	ICP-MS	4.04	6.11	12.90	23.30	28.10	71.20	7.39	10.45	8.22
	里松	3	XRF	ICP-MS	4.67	4.79	11.30	20.80	40.10	54.00	5.99	9.13	7.62
	都庞岭	10	XRF	ICP-MS	4.73	6.36	7.59	19.50	30.90	71.41	4.97	9.23	7.17
	新宁	6	XRF	ICP-MS	4.54	5.69	5.00	25.60	19.20	46.86	2.97	9.18	6.61
	圆石山	11	AAS	ICP-MS	3.18	6.67	6.43	18.30	14.90	40.50	2.93	7.79	5.81
	大岐岭	6	XRF	ICP-MS	4.23	5.14	12.40	18.00	12.20	4.90	4.40	6.47	5.34
	豆乍山	17	XRF/ICP-AES	ICP-MS	4.25	5.45	2.89	23.15	3.77	35.35	1.40	8.59	5.32
	昆仑关	24	XRF	ICP-MS	4.00	5.34	4.60	24.30	19.90	38.46	3.35	8.38	5.26
	大宁	18	AAS	ICP-MS	3.11	5.34	5.36	10.10	24.33	47.20	4.01	5.72	4.93
	石村	5	XRF	ICP-MS	4.94	6.72	3.00	13.00	28.00	47.00	3.81	5.91	4.92
	猫儿山	15	XRF	ICP-MS	4.32	5.32	6.24	21.36	6.29	37.05	2.50	7.46	4.88
	栗木	20	XRF	ICP-MS	2.65	5.14	2.21	20.80	4.22	15.90	1.12	6.63	4.85
	老虎头	4	XRF	ICP-MS	0.49	4.52	12.40	15.50	8.11	10.30	3.98	5.00	4.43
	摩天岭和元宝山	9	全岩分析法/XRF	AAS/ICP-MS	3.40	5.53	2.34	17.11	8.73	18.04	1.78	5.49	4.38
	平英	7	XRF/湿法化学法	ICP-MS/XRF	4.94	5.51	2.86	24.30	9.00	18.40	2.30	7.72	4.37
	五团	16	XRF	ICP-MS	4.21	5.55	3.30	16.20	19.80	42.60	3.20	6.11	4.36

(续表)

省份	地区	样品 个数	测量方式		K ₂ O/%		U/ppm		Th/ppm		生热率/μW·m ⁻³		
			主量元素	微量元素	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	平均值
广西	古民	3	湿化学法	ICP-MS	4.26	5.27	6.63	11.44	23.03	28.58	3.93	4.90	4.34
	越城岭	26	XRF	ICP-MS	2.08	9.02	1.80	16.57	3.50	56.59	1.05	7.10	4.34
	苗儿山	4			3.81	5.07	4.80	11.00	21.00	43.00	3.03	5.11	4.03
	大湾	7	XRF	ICP-MS	3.47	4.89	7.50	10.20	19.40	33.80	2.60	5.24	4.02
	均洞	4	XRF	ICP-MS	2.51	6.83	2.51	6.88	12.96	65.28	1.93	6.45	4.00
	大黎花	4	XRF	ICP-MS	3.51	3.92	6.69	9.68	20.00	23.90	3.45	4.16	3.78
	那蓬	8	XRF	ICP-MS	2.73	5.15	3.00	6.30	25.00	47.00	2.96	4.62	3.59
	上小地	4	XRF	ICP-MS	5.01	5.67	4.98	7.80	15.60	31.20	3.11	4.16	3.54
	鸭子头	3	XRF	ICP-MS	4.75	5.26	5.10	9.50	6.80	14.60	2.17	4.54	3.51
	大容山	10	AAS	ICP-MS	3.41	5.42	2.51	14.58	10.79	20.13	2.17	5.22	2.90
	浦北	14			3.11	5.31	2.97	6.06	15.35	21.80	2.49	3.33	2.87
	博白	3	XRF	ICP-MS	3.95	5.93	3.84	5.54	16.00	18.10	2.49	3.11	2.78
	罗平	39	XRF	ICP-MS	1.78	3.86	3.40	7.90	8.40	31.30	1.97	3.88	2.76
	海洋山	5			3.88	4.48	2.80	3.80	10.00	24.00	2.35	3.06	2.60
	六万山	16	XRF	ICP-MS	2.78	6.95	2.82	8.07	8.26	21.46	1.82	3.70	2.57
	大榜	4	XRF	ICP-MS	2.51	3.30	2.90	4.23	13.20	25.13	1.90	3.12	2.50
	水溪庙	4	XRF	ICP-MS	1.11	3.00	3.99	12.20	1.39	5.06	1.47	3.46	2.20
	圆珠顶	8	A	ICP-MS	2.38	5.02	2.52	4.58	11.60	17.50	1.90	2.73	2.16
	上洞	2	XRF	ICP-MS	2.95	2.96	3.05	3.35	14.29	17.54	2.07	2.21	2.14
	其他	9	XRF/湿法化学法	ICP-MS/XRF	2.24	5.26	1.00	14.00	2.30	14.00	0.63	2.22	1.88
浙江	大佛顶	3	XRF	ICP-MS	2.09	2.66	1.89	3.66	3.12	3.66	0.88	1.54	1.32
	总	407			0.49	6.95	1.00	45.20	1.39	71.41	0.63	13.54	4.83
	沈家塍	3	AAS	ICP-MS	4.50	4.88	12.00	20.60	50.60	58.80	6.90	9.46	8.32
	泗岭	3	AAS	ICP-MS	4.66	4.93	8.98	19.50	39.20	63.10	6.51	9.65	7.58
	木瓜	3	XRF	ICP-MS	5.59	6.17	11.93	14.02	34.21	37.18	5.83	6.57	6.21
	鸠莆山	2	XRF	ICP-MS	4.85	4.91	6.45	13.90	43.00	49.30	4.97	7.30	6.13
	沈中坞	4	XRF	ICP-MS	4.34	5.38	8.13	17.90	28.20	56.50	4.42	8.77	6.07
	凤凰山	3	AAS	ICP-MS	4.55	4.67	7.71	15.50	26.50	40.30	4.14	7.06	6.01
	伏岭	4	XRF	ICP-MS	4.67	5.20	5.98	11.40	36.10	52.30	4.37	6.21	5.71
	妙西	8	XRF	ICP-MS	3.82	4.66	7.10	14.30	31.10	46.60	4.70	6.14	5.56
	埭溪	6	XRF	ICP-MS	4.40	5.28	6.62	17.20	18.90	38.80	3.39	7.49	5.53
	靖居	4	XRF	ICP-MS	6.86	7.94	1.61	4.75	49.90	87.30	4.62	7.14	5.51
	广山	9	XRF	ICP-MS	4.23	5.18	6.56	21.80	21.40	65.70	3.62	10.44	5.00
	顺溪	5	XRF	ICP-MS	2.84	5.05	7.20	19.36	15.50	33.60	3.24	6.39	4.91
	瑶坑	6	湿法化学法	ICP-MS	4.06	4.58	4.43	12.42	19.99	46.16	3.70	6.21	4.85
	九华山	7	XRF	ICP-MS	4.71	5.92	2.13	9.88	15.00	29.60	2.01	13.80	4.72
	麻车埠	7	XRF	ICP-MS	3.19	5.26	4.10	14.40	23.90	51.00	3.09	7.52	4.64
	莫干山	2	XRF	ICP-MS	4.29	4.53	5.52	10.40	29.70	35.10	3.79	5.39	4.59
	黄坟坞	2	XRF	ICP-MS	2.04	3.91	3.95	15.77	9.30	40.80	1.95	6.97	4.46
	绍兴	5	XRF	ICP-MS	3.22	6.00	3.44	13.99	15.80	42.70	2.31	6.82	4.27
	康山	5	AAS	ICP-MS	4.57	5.40	6.88	14.20	5.40	38.30	4.07	5.86	4.05
	小圩坞	7	ICP-AES	ICP-MS	3.72	5.72	4.03	11.50	17.10	39.60	2.60	5.62	3.75
	刘村	14	XRF	ICP-MS	4.09	5.74	4.00	15.62	6.90	29.30	2.23	5.95	3.49

(续表)

省份	地区	样品 个数	测量方式		K ₂ O/%		U/ppm		Th/ppm		生热率/ $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$		
			主量元素	微量元素	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	平均值
浙江	白菊花尖	5	XRF	ICP-MS	0.33	5.19	1.38	19.31	0.33	17.30	0.40	6.25	3.15
	后山店	4	XRF	ICP-MS	4.27	4.99	4.41	7.04	17.24	21.45	2.65	3.60	3.04
	东山	2	XRF	ICP-MS	5.10	5.78	4.20	3.60	21.90	23.20	2.95	2.97	2.96
	仙霞	11	XRF	ICP-MS	2.77	5.84	2.64	9.50	7.34	32.96	1.39	5.06	2.93
	马鞍山	7	XRF	ICP-MS	4.57	5.22	3.00	10.12	11.93	22.13	2.03	4.46	2.92
	景宁	7	XRF	ICP-MS	4.10	5.02	2.17	6.41	16.50	33.10	2.17	2.18	2.85
	道场	7	XRF	ICP-MS	2.74	5.45	1.31	10.50	4.40	30.30	0.85	5.50	2.71
	鹤盛	4	XRF	ICP-MS	4.40	5.01	2.30	6.10	15.10	31.50	2.01	4.05	2.64
	石平川	5	湿化学方法	ICP-MS	4.43	7.79	2.38	4.96	16.60	20.60	2.30	2.90	2.62
	衢山岛	17	XRF	ICP-MS	2.80	4.93	0.55	6.90	12.8	32.50	1.78	4.34	2.58
	洪公	10	湿法化学法	ICP-MS	5.06	6.14	2.40	2.80	13.70	23.20	2.13	2.70	2.50
	其他	6	XRF	ICP-MS	2.55	5.46	2.06	6.79	7.95	30.10	1.27	4.21	2.50
	亭子山	8	XRF	ICP-MS	4.39	5.70	1.80	13.21	8.10	23.10	1.51	4.49	2.48
	白鹤	2	XRF	ICP-MS	4.30	4.80	2.98	3.24	16.30	20.20	2.21	2.58	2.39
	外北山	6	XRF	ICP-MS	4.25	4.84	1.73	6.22	9.59	14.50	1.83	2.92	2.15
	芙蓉山	12	XRF	ICP-MS	3.93	5.17	2.09	4.39	10.50	22.20	1.63	2.75	2.06
	何村	2	AAS	ICP-MS	3.56	3.67	3.38	3.90	10.00	10.80	1.82	2.02	1.92
	东园	6	XRF	ICP-MS	4.54	5.63	0.67	2.32	6.09	22.60	1.02	2.50	1.73
	中泰	3	XRF	ICP-MS	0.98	3.06	2.29	6.97	6.00	10.60	1.39	2.26	1.73
	竹尖山	4	XRF	ICP-MS	3.41	3.84	2.60	5.33	3.53	12.50	1.17	2.48	1.69
	大雁山	2	XRF	ICP-MS	2.28	2.68	0.69	4.97	3.50	14.40	0.60	2.46	1.53
	龙泉	15	XRF	ICP-MS	1.37	6.51	0.93	2.65	5.38	18.60	0.88	2.18	1.48
	马家地	3			4.48	4.75	1.21	1.87	10.20	10.70	1.37	1.56	1.48
	绿溪	3	XRF	ICP-MS	4.75	4.86	1.38	1.96	5.78	8.65	1.16	1.67	1.43
	岭后	7	ICP-MS	ICP-MS	1.59	5.95	1.70	5.85	5.20	7.00	1.13	2.10	1.39
	赤石	6	XRF	ICP-MS	0.89	4.04	0.80	6.19	2.70	12.20	0.47	2.72	1.27
	栅溪	2			1.48	1.59	1.93	2.58	7.06	9.27	1.10	1.41	1.26
	山川乡	2	XRF	ICP-MS	3.73	3.95	0.84	0.87	2.70	3.20	0.69	0.74	0.72
	总	277			0.33	7.97	0.55	47.90	0.33	87.30	0.40	13.80	3.37
湖南	千里山	3			4.43	5.56	19.38	37.45	15.00	65.35	8.50	14.40	11.14
	骑田岭	20			4.10	5.97	6.59	39.72	27.40	105.38	4.61	14.80	10.08
	其他	3	ICP-AES	ICP-MS	3.46	5.63	13.00	43.60	9.86	44.60	4.26	14.60	9.43
	宝峰仙	7			4.18	5.78	6.60	33.60	29.20	58.10	6.11	11.92	8.32
	都庞岭	10	XRF	ICP-MS	1.64	5.19	7.50	23.60	39.90	64.40	5.33	10.83	8.08
	锡田	23	XRF	ICP-MS	3.55	13.30	5.86	47.10	7.43	68.50	3.25	17.04	7.73
	香花岭	21	XRF	ICP-MS	3.03	7.09	3.20	37.00	2.00	77.60	1.53	13.51	7.70
	大义山	6	XRF	ICP-MS	3.49	4.24	23.00	25.10	17.10	18.70	7.62	7.84	7.65
	王仙岭	34	XRF	ICP-MS	2.56	5.56	1.98	43.90	6.39	38.30	1.88	12.27	7.29
	越城岭	4	AAS	ICP-MS	4.34	4.90	5.00	25.60	19.50	33.50	2.97	9.18	6.31
	癞子岭	5	XRF	ICP-MS	3.35	4.56	3.00	28.00	11.00	36.00	3.49	9.66	5.81
	川口	15	XRF/ICP-AES	ICP-MS	2.67	4.97	3.66	30.70	6.32	21.17	2.95	8.73	5.71
	苗儿山	21	XRF	ICP-MS	3.43	5.56	4.03	22.20	6.79	54.90	1.97	7.78	5.39
	邓阜仙	31	XRF/ICP-AES	ICP-MS	4.25	6.24	4.23	27.59	3.71	64.42	2.28	10.25	5.20

(续表)

省份	地区	样品 个数	测量方式		K ₂ O/%		U/ppm		Th/ppm		生热率/μW·m ⁻³		
			主量元素	微量元素	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	平均值
湖南	白石峰	5	XRF	ICP-MS	5.17	5.71	6.26	6.78	42.60	49.70	4.97	5.38	5.15
	将军庙	10	XRF	ICP-MS	4.18	5.34	5.50	34.90	4.55	32.80	2.15	9.81	5.04
	唐市	2			3.25	4.72	9.72	10.00	28.50	27.80	4.68	4.82	4.75
	瓦屋塘	17	XRF/ICP-AES	ICP-MS	3.91	5.97	4.94	23.17	10.31	34.67	2.98	6.96	4.71
	丫江桥	7	XRF	ICP-MS	3.85	5.01	4.27	11.80	22.20	37.90	3.16	5.90	4.51
	关帝庙	2	ICP-AES	ICP-MS	4.03	4.04	4.71	5.96	27.50	47.90	3.40	5.11	4.25
	塔山	19	XRF	ICP-MS	3.38	5.84	3.60	22.10	2.97	35.50	1.61	8.33	4.10
	阳明山	6	XRF/ICP-AES	ICP-MS	3.48	4.46	6.04	18.89	3.06	27.00	2.20	5.52	4.03
	五团	17	XRF	ICP-MS	4.43	6.46	2.70	16.20	9.60	31.40	2.68	6.11	4.01
	五峰山	9	XRF	ICP-MS	3.90	5.63	3.02	9.67	15.60	32.60	2.49	5.12	3.45
	南岳	15	XRF	ICP-MS	3.23	5.99	2.61	6.26	7.51	34.80	1.88	5.24	3.24
	紫云山	27	XRF	ICP-MS	1.70	6.64	0.80	8.49	2.40	32.30	0.50	4.63	3.09
	白马山	12	XRF	ICP-MS	3.74	4.87	1.82	6.57	17.21	31.06	2.27	3.87	3.07
	铜山岭	4	XRF	ICP-MS	3.28	4.24	4.22	7.19	12.30	19.40	2.41	3.36	2.78
	连云山	20	XRF/压熔法	ICP-MS	1.94	4.79	1.37	5.01	4.64	37.62	0.91	3.57	2.39
	水口山	19			3.10	5.60	2.43	4.04	8.50	17.60	1.40	2.55	1.98
	大神山	7	XRF	ICP-MS	3.29	3.67	3.47	6.99	3.47	7.52	1.38	2.71	1.94
	总	401			1.64	13.30	0.75	47.10	2.00	116.30	0.50	17.04	5.33
江西	三清山国家地质公园	9			4.29	5.19	10.30	35.60	48.30	73.20	6.69	13.54	10.57
	武夷山	13	XRF	ICP-MS	4.65	5.83	9.60	30.60	53.70	69.30	6.76	12.56	8.73
	炉同	18	XRF	ICP-MS	4.61	5.75	7.52	38.78	18.41	50.42	4.82	12.00	7.49
	山心	4	XRF	ICP-MS	4.43	5.16	8.46	17.36	18.40	43.17	3.81	7.48	6.30
	东坪坞矿区	5	XRF	ICP-MS	4.14	4.65	14.28	29.00	7.13	12.80	4.82	8.93	6.29
	武功山	6	XRF	ICP-MS	2.80	3.34	6.32	21.09	27.29	51.11	4.31	9.13	5.76
	富城	13	XRF	ICP-MS	4.58	5.95	4.60	29.60	18.40	47.20	3.21	9.77	5.54
	红山	5			4.25	4.87	6.60	17.40	20.40	43.00	4.83	6.57	5.42
	其他	6			4.57	5.32	3.40	14.40	16.00	52.70	2.36	6.46	4.97
	小九宫	6	XRF	ICP-MS	3.92	5.23	3.63	15.57	23.50	50.50	2.82	7.83	4.74
	大乌山	12	XRF	ICP-MS	4.45	5.85	4.33	25.02	11.72	41.38	2.93	7.58	4.63
	大湖塘	31	XRF	ICP-MS	3.75	5.09	1.60	27.60	3.60	21.10	1.32	7.91	4.62
	香炉山	6	XRF	ICP-MS	5.36	5.69	7.24	9.87	24.50	30.50	4.29	4.91	4.56
	沙店	7	XRF	ICP-MS	4.45	4.79	4.31	11.12	23.70	34.90	3.09	5.36	4.25
	汤屋	3			4.52	5.31	8.40	26.70	13.20	14.80	3.57	8.06	4.20
	朱溪	5	XRF	ICP-MS	4.72	4.84	9.68	16.40	7.01	8.89	3.38	5.13	4.15
	雅山	7	XRF	ICP-MS	2.19	4.45	6.27	14.29	2.97	13.23	1.81	4.87	3.47
	乐安	18	XRF 和化学分析法 CA	ICP-MS	2.52	5.89	1.97	9.50	19.10	39.50	2.15	4.54	3.27
	卧龙谷	10	XRF	ICP-MS	2.64	5.48	1.18	20.60	8.89	20.10	1.66	6.25	3.11
	蛟洋	2			5.13	5.19	2.60	4.00	17.70	29.50	2.86	3.09	2.86
	九岭花	4	XRF	ICP-MS	1.83	3.93	1.79	4.73	12.00	24.00	1.45	3.17	2.24
	九岭	11	XRF	ICP-MS	3.44	4.12	2.07	10.50	2.74	17.70	1.68	3.18	2.06
	福泉山	5	XRF	ICP-MS	3.82	4.77	2.20	3.66	12.60	14.70	1.90	2.16	2.00
	万载	38	XRF	ICP-MS	2.50	6.01	1.25	9.01	4.73	19.40	1.51	3.07	1.95
	山庄	5	XRF	ICP-MS	4.40	4.99	4.01	5.78	2.09	3.73	1.61	2.00	1.80

(续表)

省份	地区	样品 个数	测量方式		K ₂ O/%		U/ppm		Th/ppm		生热率/ $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$		
			主量元素	微量元素	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	平均值
江西	花山洞	16	XRF	ICP-MS	1.14	3.28	1.64	4.14	7.34	10.40	1.14	1.85	1.38
	总	265			1.14	6.01	1.18	38.78	2.09	73.20	1.14	13.54	4.33
海南	红岭	3			4.70	5.04	12.84	15.92	62.04	82.43	8.08	9.29	8.87
	石碌	3	XRF	ICP-MS	4.96	5.23	14.15	17.80	42.70	72.50	7.85	9.20	8.57
	便文村	14	XRF	ICP-MS	3.07	6.90	1.47	18.40	8.30	69.80	1.62	7.11	4.94
	崖城-三亚	14	XRF	ICP-MS	4.42	7.49	3.55	20.42	15.91	48.46	2.60	8.64	4.03
	大王岭	7	XRF	ICP-MS	4.90	5.63	4.41	13.00	24.60	29.50	3.41	5.62	3.99
	黄山水库	2			4.79	5.04	3.12	10.02	25.82	26.99	3.97	4.18	4.07
	其他	31			0.49	6.41	1.10	16.40	8.01	47.20	1.07	8.57	3.83
	保城	4	XRF	ICP-MS	3.74	4.27	3.90	7.80	12.70	61.00	2.54	6.50	3.80
	兴隆	3	XRF	ICP-MS	5.99	6.09	6.17	6.72	20.10	29.37	3.55	4.06	3.77
	金寮	3	湿化学法	ICP-MS	5.46	5.54	5.20	5.90	24.20	30.60	3.58	3.85	3.70
	红峰队	6			4.52	5.43	4.24	9.29	17.80	26.80	2.71	4.33	3.65
	新风岭	8	XRF	ICP-MS	4.11	7.32	4.80	10.40	13.40	30.00	3.21	4.20	3.57
	番阳峒	13	湿化学法	ICP-MS	5.14	6.50	1.60	8.00	9.60	49.30	1.46	5.73	3.51
	儋县	3	ICP-AES	ICP-MS	3.59	4.48	3.60	9.70	11.20	31.70	1.97	4.56	3.37
	中林岭	4			4.48	6.95	1.67	3.79	13.41	64.10	1.75	5.82	3.09
	琼中	10	ICP-AES	ICP-MS	2.56	5.53	2.10	12.30	7.30	59.50	1.59	7.57	2.88
	高峰	4	XRF	ICP-MS	4.08	4.83	2.30	5.70	14.00	25.40	1.91	3.54	2.87
	顺作	10	湿化学法/XRF	ICP-MS	3.58	8.41	0.66	9.36	1.63	60.50	0.76	5.50	2.68
	响南	3			3.74	3.94	4.34	5.20	14.66	17.61	2.42	2.70	2.58
	麻山田	7	湿化学法	ICP-MS	5.80	7.91	1.50	4.60	7.00	34.90	1.59	3.99	2.49
	发美村	2			0.25	0.34	2.08	4.46	14.79	24.52	1.56	2.84	2.20
	屯昌	4	XRF	ICP-MS	3.30	3.58	1.71	4.05	9.43	13.70	1.33	2.13	1.81
	荔枝沟	8	XRF	ICP-MS	2.79	4.76	1.81	3.12	7.86	12.10	1.22	1.98	1.51
	高通岭	3	XRF	ICP-MS	4.55	4.74	2.09	3.65	5.35	6.91	1.76	1.30	1.46
	牛鼻岭	3	XRF	ICP-MS	3.43	4.11	1.08	2.29	7.70	10.60	1.11	1.63	1.33
	叉河	3	XRF	ICP-MS	2.13	2.38	1.29	1.92	5.45	7.14	0.89	1.14	1.05
	三亚	6	XRF	ICP-MS	1.95	3.15	1.00	2.10	5.70	10.60	0.74	1.47	0.98
	总	184			0.25	8.41	0.66	20.42	1.63	85.00	0.74	9.29	3.44