

桂北豆乍山岩体放射性地球化学特征及其干热岩资源潜力研究

谭双¹, 陈琪¹, 王安东², 万建军², 黄剑¹, 高翔¹

(1. 核工业二三〇研究所, 湖南长沙 410007; 2. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西南昌 330013)

摘要: 对桂北豆乍山岩体钻孔样品进行了放射性生热元素含量、岩石密度和岩石热导率测试。结果显示该岩体花岗岩U平均含量为 17.49×10^{-6} , Th平均含量为 27.54×10^{-6} , K_2O 平均含量为4.64%, 放射性生热率平均值 $6.46 \mu W/m^3$, 高于地壳平均值及大部分华南其他岩体的放射性生热率值; 岩石密度平均在 $2.57 g/cm^3$ 左右, 与世界范围内花岗岩密度的平均值大致相同; 岩石热贡献率主要来自Th和U的放射性衰变热, 而U的贡献率相对更高。研究区岩石热导率平均为 $3.389 W/mK$, 与目前已知的花岗岩热导率平均值相近。通过本文及周边其他岩体的研究结果, 结合前人资料, 推断豆乍山岩体所在的苗儿山地区, 乃至桂北地区的地幔热流值低于地壳热流值贡献, 属于“热壳冷幔”型岩石圈热结构。根据豆乍山岩体放射性生热元素和生热率的优势, 认为其干热岩开发潜力较大, 可对其进行进一步干热岩评价工作。

关键词: 豆乍山岩体; 放射性生热率; 热导率; 热壳冷幔; 干热岩

中图分类号: P598

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)03-0501-12

Radioactive geochemical characteristics of rocks from Douzhashan pluton in northern Guangxi and its implications for hot dry rock resources

TAN Shuang¹, CHEN Qi¹, WANG An-dong², WAN Jian-jun², HUANG Jian¹ and GAO Xiang¹

(1. Changsha Uranium Geology Research Institute, CNC, Changsha 410007, China; 2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Radioelement content, rock density and rock thermal conductivity of drill hole samples within Douzhashan pluton of northern Guangxi were analyzed. The results suggest that the average U, Th and K_2O values of the investigated granites are 17.49×10^{-6} , 27.54×10^{-6} and 4.64%, respectively. The average value of rock density is $2.57 g/cm^3$, which is in good agreement with the average density of granites in the world. The average radiogenic heat production of the investigated granites is $6.46 \mu W/m^3$, which is obviously higher than that of crustal rock and most plutons in South China. The main heat production contribution is sourced from the decay of U and Th, and the U plays the most important role. The average rock thermal conductivity is $3.389 W/mK$, close to that of the middle-upper crustal rocks. Combined with the previous data around the study area from previous researchers, this paper indicates that the crust contributes more heat flow to the surface than the mantle, thus the area of Miao'ershan and northern Guangxi is a typical region with cold crust and hot mantle type lithospheric thermal regime.

收稿日期: 2020-06-15; 接受日期: 2021-03-23; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 中国核工业地质局地勘费项目(201917, 202035-6); 国家重点研发计划项目(2018YFA0404104); 核资源与环境国家重点实验室自主基金(Z1912)

作者简介: 谭双(1993-), 男, 硕士, 工程师, 地质学专业, 主要从事铀矿地质勘查和研究工作, E-mail: 835257339@qq.com。

Based on the advantages of radioelement content and radiogenic heat production, the authors hold that the Douzhashan pluton has a great exploration potential as hot dry rock resource, and hence more further work is needed in the future.

Key words: Douzhashan pluton; radiogenic heat production; thermal conductivity; hot crust and cold mantle; hot dry rock

Fund support: China Nuclear Geology Project (201917, 202035-6); National Key R&D Project (2018YFA0404104); Independent Fund of State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment(Z1912)

岩石圈内热很大一部分是由一定丰度的长半衰期放射性元素 U、Th 和 ^{40}K 在衰变过程中所释放的放射性衰变热产生,这种衰变热同时也是板块构造运动与岩石圈演化的重要驱动力 (Robinson *et al.*, 1971; Blair *et al.*, 1976; Morgan, 1984; Rybach, 1988; Kim, 2001; 汪集旻等, 2012)。U、Th 和 K 元素具有较强的活动性和不相容性,导致它们在地球上分布极不均匀,在不同类型、不同时代、不同地区岩石中的含量变化比较大 (Robinson *et al.*, 1971; 赵平等, 1995; 章邦桐等, 1990; Portier *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2014; 王安东等, 2015)。开展岩石放射性生热元素分布规律研究,对查清放射性衰变热对地表热流值的贡献率以及厘清岩石圈热结构都具有十分重要的意义 (赵平, 1995; 万建军等, 2015; 王安东等, 2015; 杨立中, 2016)。此外,岩石放射性生热率参数是判断干热岩生热能力的重要参数,是探讨干热岩潜力的一个重要指标。

广西苗儿山矿田是我国铀矿产的重要聚集地,自上世纪 60 年代以来陆续发现了一批铀矿床/矿点 (柏道远等, 2007; 石少华等, 2011a; 吴昆明等, 2016)。研究显示,该地区花岗岩体与区域深大断裂关系密切,苗儿山地区复杂的构造格架,对豆乍山、香草坪、张家等岩体中铀矿化的形成与演化极为有利,为铀活化转移与富集成矿提供了得天独厚的便利条件 (黄宏业等, 2008; 郝义, 2010; 李妩巍等, 2010b, 2011; 陈琪等, 2013)。根据中国东部至华南地区的花岗岩数据整体分析,上述花岗岩体中常富含 U、Th、K 元素,从而具有较强的放射性生热能力。本文选择桂北苗儿山中段豆乍山岩体未经风化的钻孔岩石样品进行放射性生热元素含量和岩石密度测试,计算其放射性生热率,探究放射性地球化学特征,并通过岩石热导率数据,结合研究区地质学、地球物理及地热学研究成果,剖析该地区岩石圈热结构,为华南乃至全国的地热和干热岩型地热资源的研究提供理论和数据基础。

1 区域地质概况

苗儿山复式岩体规模较大,整个苗儿山岩体出露面积约为 $1\,633\text{ km}^2$,跨越广西资源县和湖南新宁县,为一个多期多阶段花岗岩体构成的复式岩基,主要岩性为黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩 (石少华等, 2010; 胡欢等, 2013)。其大地构造位置处于华南扬子板块江南被动陆缘隆起带的南缘,苗儿山-越城岭花岗岩穹窿构造西翼,南东侧为华夏岛弧系 (石少华等, 2011b; 欧阳平宁等, 2012)。本文所研究豆乍山花岗岩体位于苗儿山复式岩体中部,出露面积约 31.7 km^2 ,岩性主要为中细粒二云母花岗岩,锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究显示其年龄为 $228\pm 11\text{ Ma}$,属印支期晚三叠世岩浆作用的产物 (谢晓华等, 2008; 李妩巍等, 2010a; 柏道远等, 2014)。区内断裂构造发育,主体为 NNE 向,同时发育多条次级断裂,直接控制了铀矿化的分布 (图 1)。在豆乍山岩体内以及豆乍山与香草坪岩体接触界线附近发现了一批铀矿床,这些铀矿床的分布亦指示了区内干热岩地热资源的开发潜力。

2 样品采集与分析方法

选取不同位置钻孔,对不同深度揭露岩心进行系统采样,并选择具有代表性的 110 个样品进行分析测试,样品新鲜未见明显蚀变 (图 2)。新鲜岩石样品经室内处理后,首先用密度仪测定其密度,密度测试工作在核工业二三〇研究所分析测试中心完成,同一样品进行多次测试,其结果显示分析精度在 $\pm 5\%$ 误差范围内。样品主量元素测试工作在核工业二三〇研究所分析测试中心内完成,仪器采用 Rigaku ZSX100e 型 X 射线荧光光谱仪。测试所需玻璃片制作步骤包括: ① 称取 $0.51\sim 0.58\text{ g}$ 的样品,并加入样品质量 8 倍的 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 熔剂,摇匀; ② 在铂

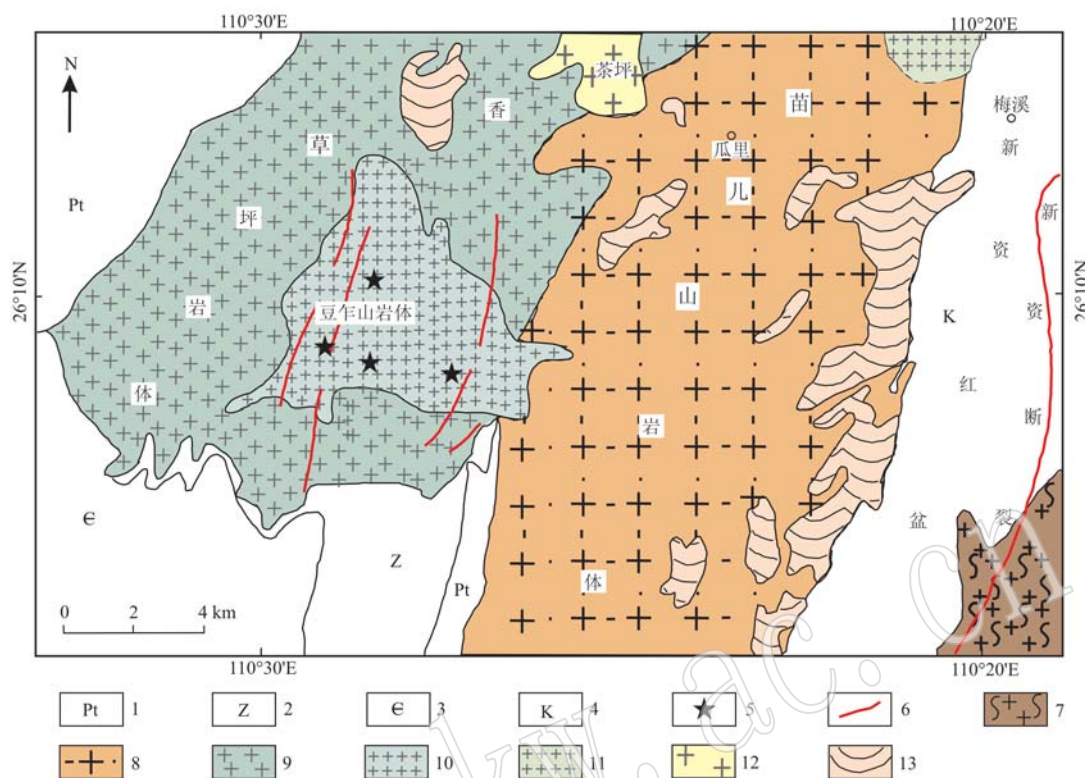


图1 苗儿山复式花岗岩体中段地质简图(据胡欢等, 2013)

Fig. 1 Simplified geological map of the middle part of the Miaoershan complex (after Hu Huan *et al.*, 2013)

1—板溪群; 2—震旦系; 3—寒武系; 4—白垩系崑山组; 5—取样位置; 6—断裂; 7—越城岭片麻状混合花岗岩; 8—苗儿山中粗粒斑状黑云母二长花岗岩; 9—香草坪中粗粒斑状黑云母花岗岩; 10—豆乍山中细粒二云母花岗岩; 11—张家中细粒二云母花岗岩; 12—茶坪中粗粒二云母花岗岩; 13—小木楠细粒二云母花岗岩

1—Banxi Group; 2—Sinian; 3—Cambrian; 4—Cretaceous Liangshan Formation; 5—sampling location; 6—fault; 7—Yuechengling gneissoid granite; 8—Miaoershan medium-coarse grained porphyritic biotite granite; 9—Xiangcaoping medium-coarse grained porphyritic biotite granite; 10—Douzhashan medium-fine grained two mica granite; 11—Zhangjia medium-fine grained two mica granite; 12—Chaping medium-coarse grained two mica granite; 13—Xiaomunan fine grained two mica granite

金坩埚中加入1滴2% LiBr和1% NH_4I 混合助熔剂,倒入摇匀的混合样品;③将上述坩埚置于1150℃的加热装置下熔融后冷却,使粉末样品最终形成浅褐色、透明、完整的圆形玻璃片。若该过程未形成完整的玻璃片,则应重复上述②、③步骤。放射性生热元素含量测定工作在核工业二三〇研究所分析测试中心完成,标样监测结果显示元素U和Th的分析精度在±5%误差范围内(ICP-MS法测定), K_2O 的分析精度在±5%误差范围内(XRF法测定)。为进一步表征研究区的岩石圈热结构特征,本次研究还从所采集的样品中选择15个代表性样品进行导热率测试,测试所用仪器为加拿大C-Thermal公司生产的TCi导热系数分析仪,测试工作在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成,标样监测和5次重复测试结果显示分析精度在±5%误差范围内。

3 岩石学及地球化学特征

豆乍山岩体主体岩性为中细粒二云母花岗岩,岩石样品颜色呈灰白色-青灰色,造岩矿物为钾长石(20%~25%)、斜长石(25%~30%)、石英(25%~30%)、黑云母(5%~8%)、白云母(5%~8%),副矿物有锆石、黑钨矿、黄铁矿、锡石、白钨矿、电气石、辉钼矿、毒砂等(2%)。11个典型豆乍山花岗岩样品主量元素分析见表1,其 SiO_2 含量变化范围为72.23%~75.33%,平均73.89%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为1.20~1.74,平均1.54,全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)含量为6.75%~8.26%,平均7.81%,铝饱和指数为1.09~1.27,平均1.14。总体上,该岩体花岗岩呈现出为富硅、偏碱性(且 $\text{K}>\text{Na}$)、贫钙、铝过饱和及暗色组分



图 2 豆乍山岩体野外露头(a,b)、岩心手标本(c)及正交偏光显微镜下照片(d)

Fig. 2 Field outcrops (a, b), core specimens (c) and cross nicols photos (d) of Douzhashan pluton

Q—石英; Bt—黑云母; Ms—白云母; Mc—微斜长石; Pl—斜长石

Q—quartz; Bt—biotite; Ms—muscovite; Mc—microcline; Pl—plagioclase

表 1 豆乍山岩体样品主量元素数据表

$w_B/\%$

Table 1 Data of major elements of Douzhashan pluton

样号	DZS01	DZS06	DZS18	DZS20	DZS24	DZS35	DZS36	DZS42	DZS51	DZS66	DZS70	平均
SiO ₂	72.23	72.79	73.29	74.24	75.01	73.21	74.21	74.53	74.05	73.94	75.33	73.89
TiO ₂	0.29	0.28	0.27	0.14	0.13	0.14	0.13	0.14	0.27	0.14	0.14	0.19
Al ₂ O ₃	14.05	13.72	13.83	13.94	13.41	13.96	13.42	13.71	13.71	13.56	13.64	13.72
Fe ₂ O ₃	0.30	0.20	0.28	0.35	0.27	0.23	0.29	0.31	0.16	0.24	0.27	0.26
FeO	2.11	2.04	1.91	1.18	1.32	1.29	1.35	1.29	1.95	1.27	1.25	1.54
MnO	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05
MgO	0.67	0.64	0.66	0.30	0.30	0.28	0.32	0.28	0.61	0.27	0.31	0.42
CaO	1.26	1.21	1.26	0.92	0.91	0.94	0.82	1.02	1.26	0.95	0.95	1.05
Na ₂ O	2.81	2.81	2.95	3.24	3.24	3.24	3.24	3.24	2.81	3.24	3.07	3.08
K ₂ O	4.88	4.70	4.90	4.96	4.90	5.02	4.55	4.78	4.78	4.9	3.68	4.73
P ₂ O ₅	0.16	0.14	0.09	0.10	0.10	0.10	0.13	0.10	0.13	0.07	0.09	0.11
LOI	1.14	0.83	0.75	0.71	0.62	0.63	1.02	0.96	0.58	0.65	0.71	0.78
总量	99.94	99.27	100.25	100.14	100.27	99.09	99.54	100.42	100.36	99.29	99.51	99.82
σ	2.02	1.89	2.03	2.15	2.07	2.26	1.94	2.04	1.86	2.14	1.41	1.98
ALK	7.69	7.51	7.85	8.20	8.14	8.26	7.79	8.02	7.59	8.14	6.75	7.81
A. R.	2.16	2.21	2.28	2.55	2.65	2.54	2.67	2.57	2.20	2.61	2.45	2.45
A/NK	1.42	1.41	1.36	1.30	1.26	1.30	1.31	1.30	1.40	1.27	1.51	1.35
A/CNK	1.15	1.15	1.11	1.13	1.09	1.12	1.14	1.11	1.13	1.10	1.27	1.14

含量少等特点,在地球化学分类图解中,样品集中落于酸性岩区域,属于过铝质高钾钙碱性系列,并归为

镁质花岗岩大类(图3)。

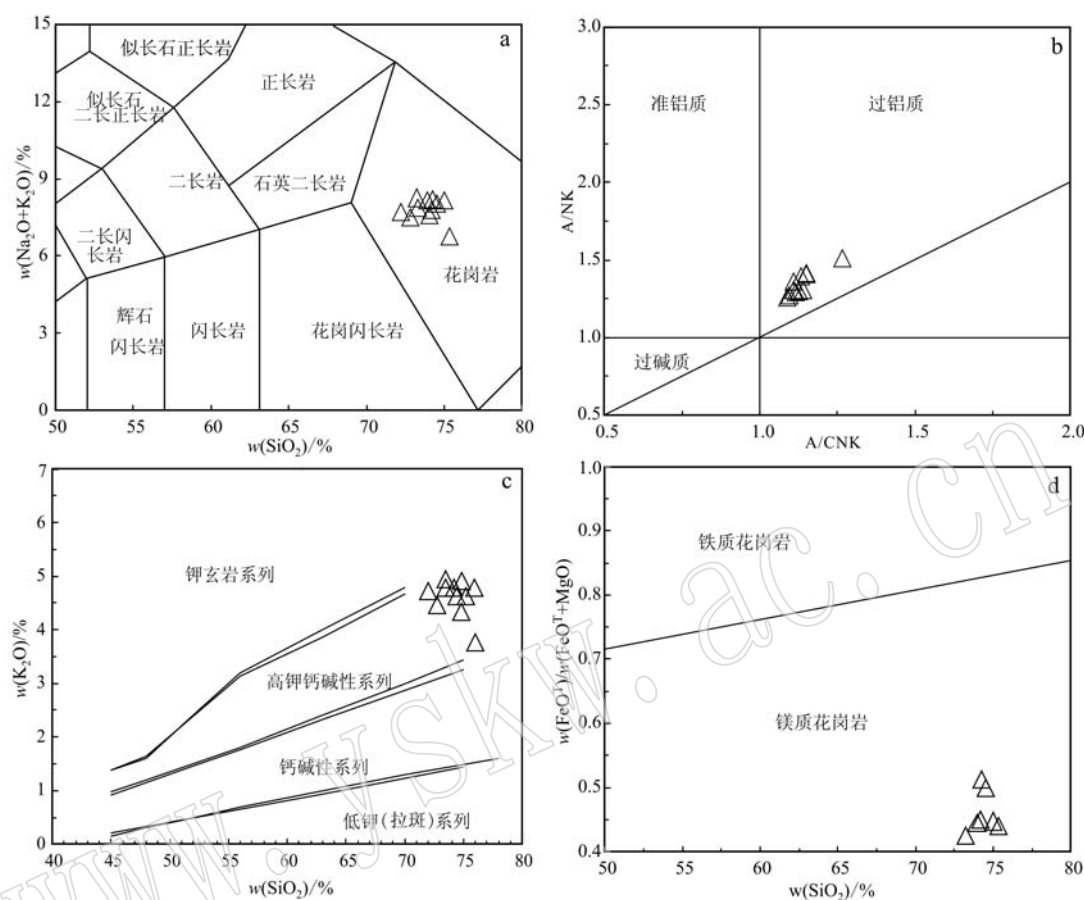


图3 豆乍山花岗岩地球化学分类图解(a 据 Middlemost, 1994; b, c, d 据 Frost *et al.*, 2001)

Fig. 3 Diagrams of geochemical classification of granitoids in Douzhashan pluton (a after Middlemost, 1994; b, c, d after Frost *et al.*, 2001)

4 岩石放射性地球化学特征

4.1 U、Th、K 放射性地球化学特征

前人研究结果普遍认为,地球岩石圈内热主要是由放射性元素在衰变过程中产生的热量所提供的(Blair *et al.*, 1976; Morgan, 1984; Rybach, 1988; 汪集旻, 1996; 王贵玲等, 2000; 汪集旻等, 2012)。岩石中各种矿物内部天然放射性元素种类众多,而其中具有丰度高、半衰期长、生热量高等条件的元素对岩石放射性生热贡献尤为突出(Robinson *et al.*, 1971; Rybach, 1988; 胡圣标等, 1994; 邓平等, 2003)。放射性元素 U、Th、K 相对于其他元素对放射性贡献相对较大,可认为是地壳岩石中放射性衰变热的主要来源之一。因此,U、Th、K 的含量特征是

考量岩体放射性地球化学特征、评估干热岩开发潜力的一个重要指标(赵平等, 1995, 2015)。

花岗岩样品的 U、Th、K 含量分析测试结果见表2。花岗岩样品中 U 含量变化范围为 4.90×10^{-6} ~ 54.80×10^{-6} , 平均 17.49×10^{-6} , Th 含量变化范围为 2.96×10^{-6} ~ 45.80×10^{-6} , 平均 27.54×10^{-6} , K_2O 含量变化范围为 0.98% ~ 7.32%, 平均 4.64%, Th/U 值相对较为稳定, 平均 2.20。前人(沈渭洲等, 1999; 舒良树等, 2002; 万建军等, 2015; 杨立中, 2016; 林尔夫等, 2017)在华南地区的佛冈、诸广、贵东、下庄以及热水等岩体都开展了放射性地球化学方面的研究工作, 研究显示 U 含量的平均值变化范围为 9×10^{-6} ~ 18×10^{-6} , Th 含量的平均值变化范围为 31×10^{-6} ~ 51×10^{-6} , K_2O 含量的平均值变化范围为 4.02% ~ 5.43%。与华南等周边其他地区岩体相比

表 2 豆乍山岩体 U、Th、K 含量、密度(ρ)及生热率(Q_A)数据
Table 2 The data of U, Th, K, density and heat production in Douzhashan pluton

样品号	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	$w(\text{Th})/w(\text{U})$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$Q_A/(\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$
DZS01	24.10	34.90	5.29	1.45	2.60	8.59
DZS02	29.10	34.10	5.04	1.17	2.58	9.74
DZS03	29.60	38.70	4.87	1.31	2.57	10.15
DZS04	26.80	34.10	4.88	1.27	2.60	9.16
DZS05	14.90	4.98	5.05	0.33	2.62	4.35
DZS06	26.30	19.60	4.71	0.75	2.56	8.07
DZS07	21.90	13.10	4.46	0.60	2.54	6.55
DZS08	28.40	25.30	5.17	0.89	2.56	9.00
DZS09	13.00	2.96	3.49	0.23	2.57	3.63
DZS10	19.30	10.10	3.52	0.52	2.53	5.65
DZS11	23.80	3.39	4.02	0.14	2.58	6.34
DZS12	12.30	10.30	4.41	0.84	2.52	4.01
DZS13	27.10	4.21	3.54	0.16	2.49	7.17
DZS14	54.70	3.74	3.28	0.07	2.60	13.87
DZS15	53.10	18.20	4.58	0.34	2.58	14.53
DZS16	29.30	8.79	4.02	0.30	2.58	8.05
DZS17	28.70	11.70	4.35	0.41	2.58	8.11
DZS18	16.20	34.10	5.05	2.10	2.58	6.58
DZS19	21.60	4.97	3.77	0.23	2.59	5.89
DZS20	13.70	4.03	3.89	0.29	2.62	3.91
DZS21	10.80	4.07	3.71	0.38	2.61	3.19
DZS22	9.44	10.20	4.16	1.08	2.55	3.29
DZS23	38.90	18.50	4.53	0.48	2.56	11.07
DZS24	28.70	12.00	4.73	0.42	2.57	8.16
DZS25	12.30	35.70	7.15	2.90	2.58	5.89
DZS26	15.90	45.40	5.86	2.86	2.58	7.31
DZS27	30.40	9.10	3.55	0.30	2.57	8.30
DZS28	10.50	32.40	5.01	3.09	2.57	5.07
DZS29	54.80	5.51	3.96	0.10	2.57	14.06
DZS30	14.30	7.97	4.11	0.56	2.58	4.33
DZS31	19.00	3.34	3.71	0.18	2.60	5.14
DZS32	31.00	4.27	3.61	0.14	2.62	8.13
DZS33	18.60	3.05	4.02	0.16	2.63	5.05
DZS34	20.50	3.02	3.51	0.15	2.66	5.47
DZS35	26.80	32.20	4.92	1.20	2.58	9.04
DZS36	11.20	35.80	4.95	3.20	2.51	5.46
DZS37	11.00	32.50	5.01	2.95	2.53	5.20
DZS38	20.50	8.52	0.98	0.42	2.56	5.65
DZS39	12.10	42.50	4.44	3.51	2.59	6.09
DZS40	13.10	37.00	4.56	2.82	2.60	5.98
DZS41	11.90	40.30	4.70	3.39	2.61	5.91
DZS42	13.10	40.80	4.84	3.11	2.56	6.25
DZS43	12.30	39.10	4.92	3.18	2.57	5.95
DZS44	10.60	36.50	4.87	3.44	2.57	5.36
DZS45	12.80	35.10	4.90	2.74	2.60	5.80
DZS46	7.54	33.20	4.99	4.40	2.60	4.40
DZS47	17.20	39.50	4.61	2.30	2.60	7.15
DZS48	10.10	30.20	5.21	2.99	2.57	4.84
DZS49	9.97	33.90	4.92	3.40	2.58	5.03
DZS50	12.00	37.70	4.84	3.14	2.58	5.78
DZS51	12.60	39.10	4.85	3.10	2.59	6.02
DZS52	7.50	39.80	4.90	5.31	2.59	4.82
DZS53	10.90	30.60	4.76	2.81	2.58	5.03
DZS54	13.80	29.00	4.75	2.10	2.57	5.64
DZS55	15.10	33.70	4.70	2.23	2.56	6.26
DZS56	9.91	30.30	4.84	3.06	2.57	4.78
DZS57	42.30	26.20	4.19	0.62	2.59	12.38
DZS58	11.50	33.70	4.73	2.93	2.52	5.38
DZS59	11.20	32.40	5.04	2.89	2.57	5.25

续表 2
Continued Table 2

样品号	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	$w(\text{Th})/w(\text{U})$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$Q_A/(\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$	
DZS60	19.20	34.20	4.53	1.78	2.60	7.28	
DZS61	13.20	33.20	4.81	2.52	2.57	5.77	
DZS62	25.80	29.00	4.62	1.12	2.57	8.56	
DZS63	11.80	32.00	4.93	2.71	2.58	5.36	
DZS64	9.23	34.70	5.04	3.76	2.59	4.92	
DZS65	9.42	33.70	5.07	3.58	2.59	4.90	
DZS66	13.30	33.70	5.03	2.53	2.57	5.84	
DZS67	12.70	35.50	4.85	2.80	2.62	5.80	
DZS68	12.20	36.30	5.22	2.98	2.60	5.76	
DZS69	17.10	34.90	5.06	2.04	2.60	6.86	
DZS70	14.60	36.90	5.40	2.53	2.54	6.40	
DZS71	6.64	34.80	5.28	5.24	2.55	4.31	
DZS72	21.10	19.90	3.23	0.94	2.55	6.71	
DZS73	11.80	24.60	3.98	2.08	2.56	4.80	
DZS74	11.60	23.50	3.61	2.03	2.60	4.65	
DZS75	14.50	37.00	4.92	2.55	2.57	6.35	
DZS76	11.20	25.50	3.51	2.28	2.61	4.68	
DZS77	12.90	36.00	4.96	2.79	2.60	5.89	
DZS78	9.31	45.80	4.77	4.92	2.60	5.65	
DZS79	14.80	44.30	4.29	2.99	2.63	6.85	
DZS80	6.27	19.70	7.32	3.14	2.62	3.37	
DZS81	14.60	41.20	4.86	2.82	2.65	6.64	
DZS82	8.36	33.30	4.74	3.98	2.65	4.59	
DZS83	8.81	33.10	4.72	3.76	2.57	4.68	
DZS84	15.40	43.20	4.07	2.81	2.57	6.91	
DZS85	7.89	35.80	4.94	4.54	2.57	4.65	
DZS86	11.90	38.80	4.96	3.26	2.58	5.83	
DZS87	7.88	34.70	5.17	4.40	2.58	4.59	
DZS88	12.90	36.80	4.34	2.85	2.56	5.90	
DZS89	7.54	36.10	4.73	4.79	2.56	4.57	
DZS90	9.24	45.60	4.57	4.94	2.58	5.60	
DZS91	14.50	29.60	4.30	2.04	2.58	5.81	
DZS92	4.90	40.10	5.20	8.18	2.59	4.22	
DZS93	5.97	37.20	4.62	6.23	2.57	4.25	
DZS94	10.40	36.40	4.69	3.50	2.54	5.29	
DZS95	19.60	29.30	5.49	1.49	2.56	7.13	
DZS96	18.90	29.90	5.49	1.58	2.54	7.00	
DZS97	11.50	27.70	5.41	2.41	2.57	5.04	
DZS98	21.00	28.60	5.58	1.36	2.57	7.43	
DZS99	22.00	38.00	5.32	1.73	2.58	8.28	
DZS100	23.00	23.30	3.89	1.01	2.56	7.45	
DZS101	7.80	31.90	4.41	4.11	2.59	4.32	
DZS102	24.30	19.20	4.63	0.79	2.57	7.55	
DZS103	11.20	36.60	4.90	3.27	2.53	5.51	
DZS104	22.60	31.20	4.96	1.38	2.56	7.95	
DZS105	22.80	34.40	4.90	1.51	2.57	8.21	
DZS106	21.90	34.50	5.02	1.58	2.57	8.00	
DZS107	21.70	29.10	4.55	1.34	2.54	7.56	
DZS108	25.40	32.00	4.78	1.26	2.52	8.67	
DZS109	31.50	35.00	4.90	1.11	2.57	10.37	
DZS110	24.10	34.10	3.68	1.41	2.58	8.41	
桂北地区	豆乍山岩体	17.49	27.54	4.64	2.20	2.57	6.46
	香草坪岩体	13.94	33.98	4.81	2.98	2.57	6.00
	张家岩体	18	25	4.60	1.39	2.56	6.37
	小木楠岩体	14	23	4.65	1.63	2.56	5.27
粤北诸广下庄地区	佛冈岩体	11	51	5.12	4.96	2.56	6.77
	诸广岩体	11	40	5.43	4.83	2.60	5.75
	贵东岩体	9	41	4.02	4.08	2.61	5.28
	下庄岩体	18	31	5.34	2.14	2.60	6.45
	热水岩体	14	46	4.95	4.01	2.59	7.11
	粤北地区	12	41	4.45	5.31	2.59	6.09
地壳平均		1	4	1.10	3.85	2.70	0.78

较,豆乍山岩体的 U 含量明显高于华南地区均值(9.7×10^{-6} , 张祖还等, 1991)。

4.2 放射性生热率研究

岩石放射性生热率是判定花岗岩体放射性生热能力的重要参数,岩石生热率(Q_A)是指一定体积的岩石在单位时间内由所含放射性元素通过放射性衰变所产生的能量,单位为 $\mu\text{W}/\text{m}^3$,可由实测岩石中 U、Th、 ^{40}K 这 3 种放射性元素含量及岩石密度根据公式计算获得 (Rybach, 1988)。本文采用 Rybach 等 (1988) 提出且据天然放射性核参数修正过的元素生热系数进行计算: $Q_A=\rho(9.52 C_U+2.56 C_{Th}+3.48 C_K)/100$; 其中 Q_A 为岩石生热率($\mu\text{W}/\text{m}^3$), C_U 、 C_{Th} 分别为岩石中 U、Th 含量(10^{-6}), C_K 为 K 含量(%), ρ 为岩石密度(g/cm^3)。岩石放射性生热率的计算结果见表 2。

从表 2 可以看出,豆乍山岩体密度值在一定范围内波动较小,变化范围为 $2.47\sim 2.66\text{ g}/\text{cm}^3$,平均 $2.57\text{ g}/\text{cm}^3$,与世界范围内花岗岩密度的平均数值大致相同,Th/U 值相对稳定,平均 2.20。数学统计处理剔除异常值后,显示豆乍山岩体具有相对较高的平均单位体积生热率,变化范围为 $3.18\sim 14.53\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$,平均 $6.46\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$,大大高于世界范围花岗岩放射性生热率($2.5\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$)的平均值,这也与前人(赵平等, 1995; 万建军等, 2015; 王安东等, 2015; Sun *et al.*, 2015; 杨立中, 2016; 林乐夫等, 2017)在华南其他花岗岩体研究结果(主要集中在 $5\sim 8\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$ 的范围内)较为一致。

放射性生热元素的热贡献率对于放射性生热率是一个重要参数,可进一步精细判别不同元素对于放射性生热的效率。按照上述公式计算的生热率比重,岩石放射性生热率主要是来自于 U 和 Th 的放射性衰变热,而 K 的贡献率基本在 10%左右,相对较小,该结果与大部分地区一致(万建军等, 2015; 杨立中, 2016; Wang *et al.*, 2016; 林乐夫等, 2017)。不同生热元素之间的热贡献比例因其半衰期的差异也会有有一定的变化, ^{232}Th 相对于 ^{234}U 和 ^{40}K 的半衰期较长,因此 ^{232}Th 的热贡献的相对比例逐渐增大(赵平等, 2015)。从本次样品 U 相对 K 的贡献率与 Th 相对 K 的贡献率的关系图解上可直观对比 U 和 Th 的相对贡献率(图 4),由图 4 可以看出,豆乍山岩体数据点大多数都位于等分线的上半部分,即偏向于 U 相对于 K 的贡献率一侧,因此豆乍山岩体 U 的贡献率相对较高,这与华南地区前人研究过的其他大

部分岩体具有相似的特征(万建军等, 2015; 林乐夫等, 2017)。

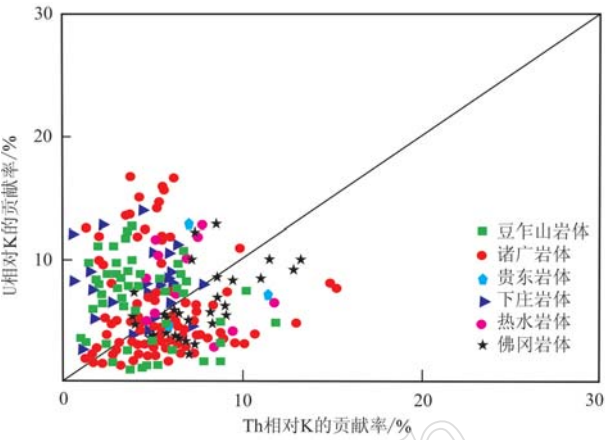


图 4 豆乍山岩体与华南其他几种岩体放射性生热率对比(据林乐夫等, 2017 修改)
Fig. 4 Thermal contribution between U and Th for rocks from Douzhashan pluton and several other plutons in South China (modified after Lin *et al.*, 2017)

4.3 热导率特征

热导率值的大小是影响干热岩热量保存的重要因素之一,盖层较低的热导率将更有利于热量保存 (Rybach *et al.*, 1978; Nyblade and Pollack, 1993; 王安东等, 2015)。实验结果见表 3。通过对豆乍山岩体花岗岩的岩石热导率研究,获得本区岩石平均热导率平均为 $3.388\text{ W}/\text{mK}$,符合花岗岩热导率数据

表 3 豆乍山岩体花岗岩样品热导率 W/mK
Table 3 Data of thermal conductivity in Douzhashan pluton

样号	1	2	3	4	5	平均	相对误差
DZS01	3.160	3.190	3.214	3.199	3.198	3.192	0.6
DZS06	3.364	3.357	3.367	3.361	3.341	3.358	0.3
DZS18	2.808	2.773	2.784	2.773	2.774	2.783	0.5
DZS20	3.298	3.288	3.295	3.314	3.316	3.302	0.4
DZS24	3.049	3.053	3.061	3.052	3.053	3.054	0.2
DZS35	3.265	3.254	3.259	3.265	3.227	3.254	0.5
DZS36	3.513	3.558	3.549	3.574	3.575	3.554	0.7
DZS42	3.319	3.274	3.280	3.262	3.290	3.285	0.7
DZS51	3.686	3.682	3.683	3.661	3.699	3.682	0.4
DZS66	3.672	3.674	3.715	3.676	3.671	3.681	0.5
DZS70	3.634	3.657	3.678	3.667	3.685	3.664	0.6
DZS72	3.284	3.244	3.262	3.240	3.249	3.256	0.6
DZS80	3.848	3.854	3.901	3.893	3.858	3.871	0.6
DZS81	3.493	3.507	3.497	3.523	3.526	3.509	0.4
DZS85	3.368	3.364	3.371	3.372	3.391	3.373	0.3

3.14~3.60 W/mK, 并且处于范围的较低水平, 显示出本区地表盖层岩石热导率相对较低, 具有能够更好的保证地下热能储存的能力。

5 干热岩潜力分析

由前文分析可知, 豆乍山岩体花岗岩样品 U、Th、K₂O 含量的平均值分别为 17.49×10^{-6} 、 27.54×10^{-6} 、4.64%, Th/U 值为 2.20, 岩石密度为 2.57 g/cm^3 , 单位体积生热率平均值为 $6.46 \mu\text{W/m}^3$, 以上各项数据都指示本区花岗岩属于高产热花岗岩(马峰等, 2015; 黄昌旗等, 2018)。

根据研究区所处的大地构造位置以及前人地球物理和钻探资料显示, 豆乍山岩体所处的桂北地区地壳厚度均值为 30 km 左右(郝义, 2010; 杨海, 2015)。另外, 参照华南地区主要铀矿床成矿深度、岩石圈有效弹性厚度、均衡重力、地震测深等数据, 可进一步推测苗儿山地区放射性元素集中层厚度平均值为 8 km(章邦桐等, 1990; 马峰等, 2015; 万建军等, 2015; 林乐夫等, 2017)。大地热流值主要由地壳热流值(Q_c)和地幔热流值(Q_m)两部分组成(Morgan, 1984), 大地热流值= Q_c+Q_m , 其中 Q_c 主要与地壳中 U、Th、K 元素丰度有关, 而 Q_m 来源于幔源岩浆底侵作用。由于放射性集中层主要位于中上地壳, 因此地壳热流可近似认为由岩体放射性衰变热提供。前文放射性元素特征分析数据可知豆乍山岩体放射性生热率为 $6.46 \mu\text{W/m}^3$, 香草坪岩体放射性生热率为 $6.00 \mu\text{W/m}^3$, 可推算豆乍山岩体的地壳热流值贡献为 51.68 mW/m^2 左右, 香草坪岩体地壳热流值贡献为 48.00 mW/m^2 , 故可认为苗儿山地区地壳热流值在 $48.00 \sim 51.68 \text{ mW/m}^2$ 左右。根据周边华南及南岭地区前人研究结果, 苗儿山地区地温梯度取其平均值 28°C/km , 采用上地壳平均热导率值 2.57 W/mK , 对大地热流值进行初步估算为 71.96 mW/m^2 (胡圣标等, 2001; 蔺文静等, 2012; 马峰等, 2015)。因此, 地幔热流值(Q_m)为 $20.28 \sim 23.96 \text{ mW/m}^2$ (Morgan, 1984; 林乐夫等, 2017), 明显低于地壳热流值(Q_c), $Q_c/Q_m > 1$, Q_m 对地表热流值的贡献率为 30%左右。苗儿山地区为“热壳冷幔”型岩石圈热结构, 其地热能主要贡献来源于地壳中花岗岩放射性元素衰变, 地幔热流贡献稍小, 但也占一定比例(Nyblade and Pollack, 1993; Wang *et al.*, 2016)。

苗儿山地区构造活动明显, 区内发育大量 NNE

向断裂, 这些断裂严格控制了花岗质岩体的分布以及成矿热液流体活动, 有利于放射性生热元素的活化及深部热流的运移。此外, 还广泛出露以凝灰岩、砾岩和夹沉积碎屑岩层为主要岩性的晚中生代-新生代陆相断陷盆地, 这对于生热岩体热量的保存有着得天独厚的优势, 可形成一个完整的增强型地热系统(Portier *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2014)。

6 结论

(1) 获得豆乍山岩体放射性生热率为 $6.46 \mu\text{W/m}^3$, 为高产热花岗岩(HHPG), 远高于世界范围内花岗岩放射性生热率的平均值 $2.5 \mu\text{W/m}^3$ 。

(2) 豆乍山岩体热导率平均为 3.388 W/mK , 可代表本区地壳岩石的热导率值, 在 $3.14 \sim 3.60 \text{ W/mK}$ 的花岗岩热导率范围内。

(3) 苗儿山地区地壳对地表的热贡献率为 70%左右, 地壳热贡献率高于地幔热贡献率, 属于“热壳冷幔”型岩石圈热结构。

(4) 苗儿山地区放射性生热率等参数优势显著, 控热构造明显, 可对其进行进一步的干热岩评价工作, 为完善广西地区乃至全国的基础数据补充和干热岩开发奠定基础。

References

- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Ma Tieqiu, *et al.* 2007. Relationship of petro-geochemical characteristics to metallogenic capacity differences between Indosinian and Early Yanshanian granites in southeastern Hunan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(5): 387~398 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Zhong Xiang, Jia Pengyuan, *et al.* 2014. SHRIMP U-Pb age, geochemical characteristics and tectonic significance of zircons in the Miaoe Mountain, Gary East, Nanling[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(3): 407~423 (in Chinese with English abstract).
- Blair A G, Tester J W and Mortensen J J. 1976. LASL Hot Dry Rock Geothermal Project Progress Report[M]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory.
- Chen Qi, Xiao Jianjun, Fan Liting, *et al.* 2013. Geochemical characteristics of trace and rare earth elements in Xiangyangping uranium deposit of Guangxi[J]. *Uranium Geology*, 29(3): 153~161 (in Chinese with English abstract).

- Deng Ping, Shu Liangshu and Tan Zhengzhong. 2003. The geological setting for the formation of rich uranium ores in Zhuguang-Guidong large-scale uranium metallogenetic Area [J]. *Geological Review*, 49(5): 486~494 (in Chinese with English abstract).
- Frost B R, Barnes C G and Collins W J. 2001. A geochemical classification for granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2 033 ~ 2 048.
- Hao Yi. 2010. Caledonian Structural Characteristics and Dynamics in South China [D]. Qingdao: Ocean University of China (in Chinese with English abstract).
- Hu Shengbiao, He Lijuan and Wang Jiyang. 2001. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition) [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 44(5): 611 ~ 626 (in Chinese with English abstract).
- Hu Shengbiao and Wang Jiyang. 1994. Heat production rate of the crust with mantle heat flow in the southeast China [J]. *Science in China (Series B)*, Chemistry, 24(2): 185~196 (in Chinese).
- Huang Changqi, Lin Fengjie and Ye Bingfei. 2018. The characteristics of radioactive heat production rate and assessment to hot dry rock in high-value areas of Heat Flow, Fujian Province [J]. *Geology of Fujian*, 37(3): 227~237 (in Chinese with English abstract).
- Huang Hongye, Xiao Jianjun, Ouyang Pingning, *et al.* 2008. Geochemical characteristics statistical analysis-an example from the altered tectonic type uranium deposit in Xiangyangping, Guangxi Province [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 24(3): 211~216 (in Chinese with English abstract).
- Kim E E K. 2001. The Economic Value of Sustainable Development as Applied to Enhanced Geothermal Power Generation [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- Li Wuwei, Wang Gan, Chen Weifeng, *et al.* 2010. Geochemical and chronological characteristics of Xiangcaoping granite pluton in Miaoershan area [J]. *Uranium Geology*, 26(4): 215~227 (in Chinese with English abstract).
- Li Wuwei, Wang Gan, Xu Laisheng, *et al.* 2010. Analysis on uranium metallogenetic condition of Dapingli-Xiangyangping area [J]. *World Nuclear Geoscience*, 27(2): 72 ~ 77 (in Chinese with English abstract).
- Li Wuwei, Wang Gan, Xu Laisheng, *et al.* 2011. Ore-controlling pattern and mechanism of strike-slip fault in Shazijiang uranium deposit [J]. *Uranium Geology*, 27(3): 146 ~ 151 (in Chinese with English abstract).
- Lin Lefu, Sun Zhanxue, Wang Andong, *et al.* 2017. Radioactive geochemical characteristics of Mesozoic granites from Nanling region and Southeast coastal region and their constraints on lithospheric thermal structure [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(4): 488~500 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma Feng, *et al.* 2012. An estimation of HDR resources in China's mainland [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(5): 807~811 (in Chinese with English abstract).
- Ma Feng, Sun Hongli, Lin Wenjing, *et al.* 2015. Target site selection and index matrix evaluation of EGS trial project in China [J]. *Science and Technology Review*, 33(8): 41 ~ 47 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth Sci. Rev.*, 37: 215~224.
- Morgan P. 1984. The thermal structure and thermal evolution of the continental lithosphere [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 15: 107~193.
- Nyblade A A and Pollack H N. 1993. A global analysis of heat flow from Precambrian terrains: Implications for the thermal structure of Archean and Proterozoic lithosphere [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978~2012), 98(B7): 12 207~12 218.
- Ouyang Pingning, Huang Manxiang, Liu Xinyang, *et al.* 2012. Characteristics of primary halo in fault structure of Xiangyangping uranium deposit and its prospecting significance [J]. *Uranium Geology*, 28(2): 78~83 (in Chinese with English abstract).
- Portier S, Vuataz F D, Nami P, *et al.* 2009. Chemical stimulation techniques for geothermal wells: Experiments on the three-well EGS system at Soultz-sous-Forêts, France [J]. *Geothermics*, 38(4): 349~359.
- Robinson E S, Potter R M, McInerney B B, *et al.* 1971. A Preliminary Study of the Nuclear Subterranean [M]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory.
- Rybach L. 1988. Determination of heat production rate [A]. Hänel R, Rybach L and Stegena L. *Handbook of Terrestrial Heat Flow Density Determination* [M]. Dordrecht: Kluwer, 125~142.
- Rybach L, Bodmer P, Pavoni N, *et al.* 1978. Siting Criteria for heat extraction from hot dry rock: Application to Switzerland [J]. *Pageoph*, 11(6): 1 211~1 224.
- Shen Weizhou, Ling Hongfei, Li Xianwu, *et al.* 1999. Study on the Nd-Sr isotopic compositions of granitoids in SE China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 5(1): 22~32 (in Chinese with English abstract).
- Shi Shaohua, Hu Ruizhong, Wen Hanjie, *et al.* 2010. Geochronology of the Shazijiang uranium ore deposit, northern Guangxi, China: U-Pb ages of pitchblende and their geological significance [J]. *Acta Geol-*

- ica Sinica, 84(8): 1 175~1 182(in Chinese with English abstract).
- Shi Shaohua, Hu Ruizhong, Wen Hanjie, *et al.* 2011a. A tentative discussion on fluid inclusions in quartz veins of Shazijiang uranium ore deposit, northern Guangxi[J]. Mineral Deposits, 30(1): 33~44(in Chinese with English abstract).
- Shi Shaohua, Hu Ruizhong, Wen Hanjie, *et al.* 2011b. Isotope compositions of carbon, oxygen and sulfur in the Shazijiang granite-hosted uranium ore deposit, Northern Guangxi, China and their genetic significance[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 31(1): 36~42(in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu and Zhou Xinmin. 2002. Late Mesozoic tectonism of south-east China[J]. Geological Review, 48(3): 249~260(in Chinese with English abstract).
- Sun Zhanxue, Wang Andong, Liu Jinhui, *et al.* 2015. Radiogenic heat production of granites and potential for hot dry rock geothermal resource in Guangdong Province, Southern China[A]. Proceedings World Geothermal Congress, Australia[C]. Melbourne, 1~5.
- Wan Jianjun, Sun Zhanxue, Hu Baoqun, *et al.* 2015. Radiogenic geochemistry investigation on granitic rocks from Fogang complex, Northern Guangdong Province and its implications for hot dry rock resource[J]. Journal of East China Institute of Technology, 38(4): 398~406(in Chinese with English abstract).
- Wang A D, Sun Z X, Hu B Q, *et al.* 2014. Guangdong, a potential province for developing hot dry rock geothermal resource[J]. Applied Mechanics and Materials, 492: 583~585.
- Wang Andong, Sun Zhanxue, Liu Jinhui, *et al.* 2015. Radiogenic heat production of rocks from Zhangzhou, Southeast China and its implications for thermal regime of lithosphere[J]. Science and Technology Review, 33(24): 41~45(in Chinese with English abstract).
- Wang Andong, Sun Zhanxue, Liu Jinhui, *et al.* 2016. Thermal conductivity and radioactive heat-producing element content determinations for rocks from Zhangzhou region, SE China, and their constraints on lithospheric thermal regime[J]. Environmental Earth Sciences, 75(17): 1 213~1 218.
- Wang Guiling, Zhang Fawang and Liu Zhiming. 2000. An analysis of present situation and prospects of geothermal energy development and utilization in the world[J]. Acta Geoscientia Sinica, 21(2): 134~139(in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang. 1996. Low-Medium temperature geothermal system of convective type[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 3(3): 96~100(in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, *et al.* 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. Science and Technology Review, 30(32): 3~10(in Chinese with English abstract).
- Wu Kunming, Li Dayan, Chen Qi, *et al.* 2016. Geological features of Xiangyangping uranium deposit in Guangxi[J]. Uranium Geology, 32(4): 224~229(in Chinese with English abstract).
- Xie Xiaohua, Chen Weifeng, Zhao Kuidong, *et al.* 2008. Geochronology and geochemistry of dzouzhashan granite in northeast Guangxi[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1 302~1 312(in Chinese with English abstract).
- Yang Hai. 2015. Characteristics of Chinese Continental Curie Point Isotherm[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Yang Lizhong. 2016. The Radioactive Heat-Producing Characteristics and the Hot Dry Rock Resources Potential of Prototypes Granite Rocks in Zhangzhou Region[D]. Nanchang: East China University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong, Xie Bingrong and Dai Yongshan. 1990. The analysis and calculation of metallogenic heat source for granite-type uranium deposits in South China[J]. Mineral Deposits, 9(3): 270~278(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zuhuan and Zhang Bangtong. 1991. Study on Uranium Granites and Uranium Deposits in South China[M]. Beijing: Atomic Energy Press(in Chinese).
- Zhao Ping. 1995. Research of Heat Production in SE China[D]. Beijing: Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences(in Chinese).
- Zhao Ping, He Lijuan, Liu Shaowen, *et al.* 2015. Terrestrial Heat Flow of China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Zhao Ping, Wang Jiyang and Wang Jian. 1995. Characteristics of heat production distribution in SE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 11(3): 292~305(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柏道远, 贾宝华, 马铁球, 等. 2007. 湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力差异与岩石地球化学特征关系探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 26(5): 387~398.
- 柏道远, 钟 响, 贾朋远, 等. 2014. 南岭西段加里东期苗儿山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(3): 407~423.
- 陈 琪, 肖建军, 范立亭, 等. 2013. 广西向阳坪铀矿床微量元素和稀土元素地球化学特征[J]. 铀矿地质, 29(3): 153~161.

- 邓平, 舒良树, 谭正中. 2003. 诸广-贵东大型铀矿聚区富铀矿成矿地质条件[J]. 地质论评, 49(5): 486~494.
- 郝义. 2010. 华南加里东期构造变形特征和动力学机制[D]. 青岛: 中国海洋大学.
- 胡欢, 王汝城, 陈卫峰, 等. 2013. 桂东北豆乍山产铀花岗岩热液活动时限的确定与铀成矿意义[J]. 科学通报, 58(36): 3 849~3 858.
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集旸. 2001. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J]. 地球物理学报, 44(5): 611~626.
- 胡圣标, 汪集旸. 1994. 中国东南地区地壳生热率与地幔热流[J]. 中国科学 B 辑(化学), 24(2): 185~196.
- 黄昌旗, 林锋杰, 叶冰斐. 2018. 福建大地热流高值区岩体岩石放射性生热率特征及与干热岩有关的指标评价[J]. 福建地质, 37(3): 227~237.
- 黄宏业, 肖建军, 欧阳平宁, 等. 2008. 基于多元统计分析的微量元素地球化学特征分析——以广西资源县向阳坪地区构造蚀变岩型铀矿为例[J]. 地质找矿论丛, 24(3): 211~216.
- 李妩巍, 王敢, 陈卫峰, 等. 2010a. 香草坪花岗岩体年代学和地球化学特征[J]. 铀矿地质, 26(4): 215~227.
- 李妩巍, 王敢, 许来生, 等. 2010b. 大坪里-向阳坪地区铀成矿条件分析[J]. 世界核地质科学, 27(2): 72~77.
- 李妩巍, 王敢, 许来生, 等. 2011. 沙子江铀矿床走滑构造控矿规律及控矿机制[J]. 铀矿地质, 27(3): 146~151.
- 林乐夫, 孙占学, 王安东, 等. 2017. 南岭地区与东南沿海地区中生代花岗岩放射性地区化学特征及岩石圈热结构对比研究[J]. 岩石矿物学杂志, 36(4): 488~500.
- 蒯文静, 刘志明, 马峰, 等. 2012. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. 地球学报, 33(5): 807~811.
- 马峰, 孙红丽, 蒯文静, 等. 2015. 中国 EGS 示范工程靶区选址与指标矩阵评价[J]. 科技导报, 33(8): 41~47.
- 欧阳平宁, 黄满湘, 刘鑫扬, 等. 2012. 向阳坪铀矿床断裂构造原生晕特征及找矿意义[J]. 铀矿地质, 28(2): 78~83.
- 沈渭洲, 凌洪飞, 李显武, 等. 1999. 中国东南部花岗岩类 Nd-Sr 同位素研究[J]. 高校地质学报, 5(1): 22~32.
- 石少华, 胡瑞忠, 温汉捷, 等. 2010. 桂北沙子江铀矿床成矿年代学研究: 沥青铀矿 U-Pb 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 84(8): 1 175~1 182.
- 石少华, 胡瑞忠, 温汉捷, 等. 2011a. 桂北沙子江铀矿床流体包裹体初步研究[J]. 矿床地质, 30(1): 33~44.
- 石少华, 胡瑞忠, 温汉捷, 等. 2011b. 桂北沙子江铀矿床稀土元素地球化学特征[J]. 矿物岩石, 31(1): 36~42.
- 舒良树, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代构造作用[J]. 地质论评, 48(3): 249~260.
- 万建军, 孙占学, 胡宝群, 等. 2015. 广东佛冈岩体放射性地球化学特征及其干热岩资源潜力研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 38(4): 398~406.
- 王安东, 孙占学, 刘金辉, 等. 2015. 漳州地区岩石放射性地球化学特征及岩石圈热结构[J]. 科技导报, 33(24): 41~45.
- 王贵玲, 张发旺, 刘志明. 2000. 国内外热能开发利用现状及前景分析[J]. 地球学报, 21(2): 134~139.
- 汪集旸. 1996. 中低温对流型地热系统[J]. 地学前缘, 3(3): 96~100.
- 汪集旸, 胡圣标, 庞忠和, 等. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 30(32): 3~10.
- 吴昆明, 李大雁, 陈琪, 等. 2016. 广西向阳坪铀矿床成矿地质特征[J]. 铀矿地质, 32(4): 224~229.
- 谢晓华, 陈卫峰, 赵葵东, 等. 2008. 桂东北豆乍山花岗岩年代学与地球化学特征[J]. 岩石学报, 24(6): 1 302~1 312.
- 杨海. 2015. 中国陆域居里面特征研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 杨立中. 2016. 漳州地区典型花岗岩体放射性生热特征及干热岩资源潜力研究[D]. 南昌: 东华理工大学.
- 章邦桐, 谢炳荣, 戴永善. 1990. 华南花岗岩型铀矿床成矿热源的分析 and 计算[J]. 矿床地质, 9(3): 270~278.
- 张祖还, 章邦桐. 1991. 华南产铀花岗岩及有关铀矿床研究[M]. 北京: 原子能出版社.
- 赵平. 1995. 中国东南地区岩石生热率研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 赵平, 何丽娟, 刘绍文, 等. 2015. 中国陆地大地热流[M]. 北京: 科学出版社.
- 赵平, 汪集旸, 汪缉安, 等. 1995. 中国东南地区岩石生热率分布特征[J]. 岩石学报, 11(3): 292~305.