

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2019.01.003

引用格式:刘道荣,林荣吉. 浙江燕山期花岗岩类放射性生热率特征研究[J]. 华东地质, 2019, 40(1):19-26.

浙江燕山期花岗岩类放射性生热率特征研究

刘道荣¹, 林荣吉²

(1.中化地质矿山总局浙江地质勘查院, 杭州 310002; 2.浙江省地质勘查局, 杭州 310007)

摘要:浙江省位于中国东部沿海高热流地热异常区,燕山期岩浆侵入活动强烈,高放射性产热型干热岩资源潜力巨大。燕山期花岗岩类生热元素分布规律研究表明:石英正长岩类、二长花岗岩、正长花岗岩和花岗岩的 K_2O 含量相近,花岗岩的U、Th含量最高。岩体放射性生热率计算结果表明:不同花岗岩类放射性生热率相差较大。石英正长岩类生热率相对最低,变化范围相对较窄,平均值为 $2.14 \mu W/m^3$;正长花岗岩生热率变化范围相对较宽,平均值为 $3.31 \mu W/m^3$;花岗岩生热率相对最高,平均值为 $5.41 \mu W/m^3$ 。参照高放射性产热型干热岩开发的地热地质学标准,初步判定浙西北泗岭、九华山、河桥、儒洪和学川(顺溪)及浙东南小将等岩体,具有较好的干热岩资源勘查前景。

关键词:生热率;干热岩;花岗岩类;燕山期;浙江

中图分类号:P314.3

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2019)01-019-08

稳定大陆地区的地表热流由上地幔的地幔热流和地壳内放射性生热产生的地壳热流构成^[1]。较高的地壳热流对地壳浅部温度分布具有重要影响,有利于干热岩资源的赋存^[2]。地壳内放射性元素众多,只有具有一定丰度、半衰期长和产热量高的元素才具有地质研究意义^[3]。U、Th和⁴⁰K具备上述条件,是地球内部主要的生热元素^[4],对地温场具有重要作用^[5-6]。研究表明^[4,7],酸性岩类特别是壳源花岗岩类富集U和Th,具有较高的放射性生热率。

浙江省位于环太平洋岩浆活动带西侧,大地热流值 $62.8\sim 79.9 \text{ mW/m}^2$,平均值 70.59 mW/m^2 ,高于全国大地热流平均值^[8],属中国东部沿海高热流地热异常区,具有良好的干热岩资源赋存条件。热流值较高的地区为宁波盆地、金衢盆地以及泰顺、庆元等地区,大地热流值大约为 $72.6\sim 78.2 \text{ mW/m}^2$ 。省内燕山期岩浆侵入活动强烈,形成数量众多的中-酸性侵入岩,高放射性产热型干热岩资源潜力巨大^[9-10],但岩体放射性生热率研究程度较低,仅浙东南地区少量岩体有相关报道^[4]。

本文通过系统梳理浙江省内燕山期主要岩体U、Th和⁴⁰K等生热元素含量,研究花岗岩类(石英

含量 $>5\%$ 的中酸性岩类)生热元素的分布规律,计算岩体放射性生热率,参照适合高放射性产热型干热岩开发的地热地质学标准^[7],圈定可供勘查的靶区,为浙江省干热岩的后续勘查及研究提供依据。

1 燕山期花岗岩类分布特征

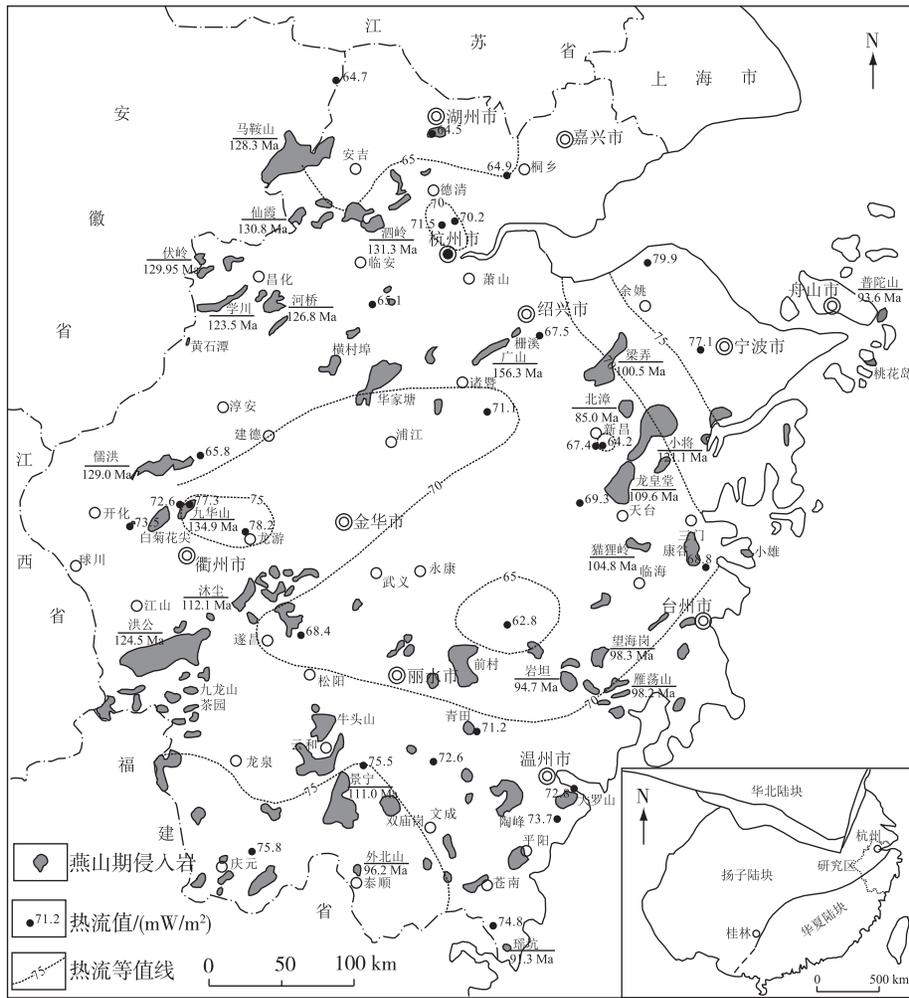
燕山期,浙江地处活动大陆边缘,广泛发育中酸性侵入岩(图1)。岩体数量众多、岩性复杂,但大部分岩体出露规模较小($<100 \text{ km}^2$)。前人对浙江燕山期花岗岩类同位素年代学、地球化学特征开展大量研究工作,总体而言,岩体形成年龄自浙西北向浙东南逐渐变新,分为燕山早期(172~145 Ma)和燕山晚期(145~65 Ma)2个阶段。

燕山早期(中晚侏罗世,172~145 Ma),岩浆侵入活动相对较弱,主要集中在浙西北地区,形成桐村、里陈家、岭后、郭坞、千家村、闲林、栅溪、广山和何村等岩体,规模较小,多呈岩瘤和岩株产出。岩性主要有花岗岩、花岗闪长岩和石英闪长岩等,是挤压环境下岩浆局部熔融的产物,物质来源以壳幔混合源为主。

燕山晚期(白垩纪,145~65 Ma),火山-侵入活动

* 收稿日期:2018-03-07 修订日期:2018-04-13 责任编辑:谭桂丽

第一作者简介:刘道荣,1982年生,男,高级工程师,主要从事矿产地质勘查及研究工作。

图1 浙江燕山期侵入岩与热流值分布图^[11]Fig. 1 Map showing the distribution of Yanshanian intrusive rocks and heat flow values in Zhejiang Province^[11]

相对较强烈。浙西北地区侵入岩主要分布在古生代地层中,有马鞍山(刘村)、儒洪、伏岭、仙霞、河桥、学川(顺溪)和泗岭等岩体,其中马鞍山、儒洪和伏岭岩体规模较大($>100 \text{ km}^2$),其余岩体多呈岩株和岩枝产出,岩性主要为正长花岗岩、花岗岩和二长花岗岩等。儒洪、泗岭、伏岭和岩前等岩体为 A 型花岗岩,物质来源以壳源为主,混有地幔物质,显示拉张构造背景。浙东南地区侵入岩主要分布在中生代火山岩、火山-沉积岩中,有洪公、前村、景宁、小将、梁弄、龙皇堂、猫狸岭、沐尘、雁荡山和望海岗等岩体,其中洪公、前村、景宁和小将等岩体呈岩基产出,其余岩体呈岩株、岩瘤状产出,岩性以正长花岗岩为主,次为二长花岗岩、石英正长岩、石英二长岩、花岗闪长岩等。浙东南沿海靠近温州—镇海断裂带发育 A 型花岗岩带,出现桃花岛、瑶坑和青田 A 型花岗岩,岩性以晶洞正

长花岗岩为主,次为碱性花岗岩^[12]。

2 放射性生热率

不同学者对岩体放射性生热率提出了不同的计算公式^[13-14]。本文采用 Rybáč L^[15] 提出的生热率计算经验公式 $A = 0.01\rho(9.52C_U + 2.56C_{Th} + 3.48C_K)$ 进行计算。 A 为岩石生热率, $\mu\text{W}/\text{m}^3$, ρ 为岩石密度, g/cm^3 , C_U 为放射性元素铀 U 含量, 10^{-6} ; C_{Th} 为放射性元素钍 Th 含量, 10^{-6} ; C_K 为钾含量, %。显然,生热率与岩石密度及岩体放射性元素含量有关。

2.1 岩石密度

根据浙江省地球物理地球化学勘查院测定结果^[16],全省侵入岩(样品数为1 021件)平均密度值为 $2.63 \text{ g}/\text{cm}^3$, 低于变质岩和沉积岩密度平均值,高于火

山岩密度平均值。中酸性-酸性岩石密度一般约为 2.56~2.62 g/cm³,属中低密度岩石(表 1)。岩体生热率计算采用各岩类的密度平均值,复式岩体仅考虑其主要岩性,岩性略有差异时,采用相似岩类的密度值。

表 1 浙江中酸性-酸性岩石密度值

Table 1 Densities of intermediate-felsic and felsic rocks in Zhejiang Province

岩性	样品数/件	密度/ (g·cm ⁻³)	平均密度/ (g·cm ⁻³)
石英正长(斑)岩	108	2.47~2.60	2.56
二长花岗岩	96	2.56~2.64	2.61
正长花岗岩	428	2.54~2.63	2.58
花岗岩	84	2.58~2.66	2.62

注:数据引自文献[16]。

2.2 岩体放射性元素含量

浙江燕山期花岗岩类 K₂O 含量相近,U、Th 含量差异大(表 2、图 2)。K₂O 含量为 3.26%~5.62%,二长花岗岩 K₂O 含量平均值为 4.45%,其他花岗岩类 K₂O 含量为 4.73%~4.82%。石英正长岩类及正长花岗岩 U 含量分别为 2.77×10⁻⁶和 5.43×10⁻⁶;花岗岩和二长花岗岩 U 含量分别为 11.10×10⁻⁶和 9.45×10⁻⁶。石英正长岩类 Th 含量为 17.03×10⁻⁶,正长花岗岩和二长花岗岩 Th 含量为 24×10⁻⁶,花岗岩 Th 含量为 33.94×10⁻⁶。九华山花岗岩体 U 含量最高,为 14.88×10⁻⁶;河桥正长花岗岩体 Th 含量最高,为 47.12×10⁻⁶。

表 2 浙江燕山期花岗岩类放射性生热率统计

Table 2 Statistics of radioactive heat generation of the Yanshanian granitoids in Zhejiang Province

岩体名称	位置	岩性	出露面积/ km ²	年龄/ Ma	样品数/ 件	元素含量平均值			生热率/ (μW·m ⁻³)	平均生热率/ (μW·m ⁻³)
						U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	K ₂ O/%		
洪公	江山	石英正长岩	470.1	124.5	10	2.58	20.41	5.62	2.38	
望海岗	黄岩	石英正长岩	62	98.3	8	2.39	15.40	4.92	1.95	
猫狸岭	临海	石英二长闪长岩、 石英二长岩	60	104.8	4	4.66	19.97	3.26	2.68	2.14
沐尘	龙游	石英二长岩	58	112.1	6	2.47	17.90	4.99	2.14	
雁荡山	乐清	石英正长斑岩	55	98.2	3	1.76	11.46	5.30	1.57	
景宁	景宁	正长花岗岩	230	111.0	7	3.66	22.66	4.72	2.75	
小将	新昌	正长花岗岩	150	121.1	3	7.77	37.49	4.80	4.74	
儒洪	淳安	正长花岗岩	147	129	5	10.68	44.62	4.87	5.93	
伏岭	绩溪—临安	正长花岗岩	145	129.95	6	5.40	23.10	4.89	3.22	
龙皇堂	新昌	正长花岗岩	75	109.6	3	2.65	10.62	4.81	1.71	
河桥	临安	正长花岗岩	59.1	126.8	5	12.15	47.12	5.12	6.48	
岩坦	永嘉	正长花岗岩	56	94.7	1	2.41	15.00	5.01	1.96	3.31
普陀山	舟山	晶洞正长花岗岩	26	93.6	2	2.26	18.37	4.61	2.11	
外北山	泰顺	碱长花岗岩	20	96.2	6	3.89	11.77	4.62	2.08	
广山	绍兴	正长花岗岩	18	156.3	7	8.60	33.70	4.67	4.69	
桃花岛	舟山	正长花岗岩	17			3.15	15.5	4.37	2.12	
瑶坑	苍南	正长花岗岩	12	91.3	6	8.09	35.71	4.39	4.67	
绿溪	嵊县	正长花岗岩	4.5	127.6	3	1.62	9.44	4.78	1.38	
石平川	青田	正长花岗岩	1.5	102.5	6	3.75	19.18	4.54	2.52	
九华山	衢江区	花岗岩	37.37	134.9	8	14.88	38.75	4.89	6.68	5.41
双溪口	淳安	花岗岩	-	130.4	6	7.32	29.13	4.81	4.14	
马鞍山(刘村)	宁国—安吉	二长花岗岩	300	128.3	6	5.49	16.84	4.90	2.86	
梁弄	余姚	二长花岗岩	92	100.5	6	6.52	21.04	3.84	3.31	
仙霞	宁国—临安	二长花岗岩、 正长花岗岩	84.18	130.8	9	5.51	18.06	4.67	2.93	4.30
学川(顺溪)	临安	二长花岗岩	53.82	123.5	5	14.00	31.06	4.57	5.90	
泗岭	余杭	二长花岗岩	53.8	131.3	9	13.91	42.59	5.09	6.69	
北漳	嵊州	二长花岗岩	42	85	5	11.25	15.56	3.65	4.11	

注:洪公据文献[17],望海岗据文献[18],猫狸岭据文献[19],沐尘据文献[20],雁荡山据文献[21],景宁据文献[22],小将据文献[23],儒洪据文献[24],伏岭据文献[25],龙皇堂据文献[26],河桥据文献[27],岩坦据文献[28],普陀山据文献[29],外北山据文献[30],广山据文献[31],桃花岛据文献[32],瑶坑据文献[12],绿溪据文献[33],石平川据文献[34],九华山据文献[35],双溪口据文献[36],马鞍山(刘村)据文献[37-38],梁弄据文献[39],仙霞据文献[40],学川(顺溪)据文献[27],泗岭据文献[41],北漳据文献[39]。

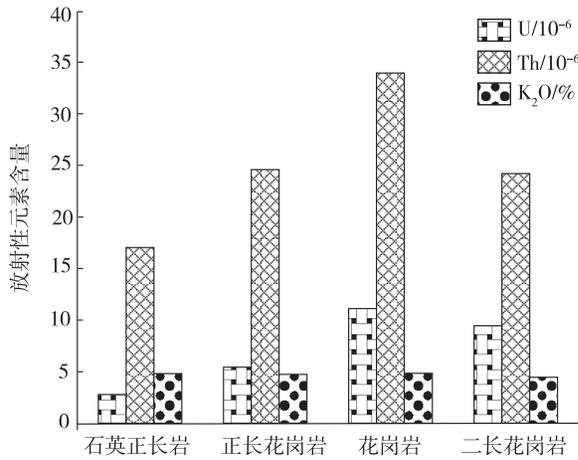


图2 浙江燕山期花岗岩类放射性元素含量对比

Fig. 2 Comparison of radioactive element contents of the Yanshanian granitoids in Zhejiang Province

2.3 花岗岩类生热率特征

不同花岗岩类放射性生热率相差较大(图3)。石英正长岩类 U、Th 含量较低,差异较小,生热率

变化范围较窄,为 $1.57 \sim 2.68 \mu\text{W}/\text{m}^3$,生热率平均值为 $2.14 \mu\text{W}/\text{m}^3$;正长花岗岩 U、Th 含量变化较大,生热率变化范围较宽,为 $1.38 \sim 6.48 \mu\text{W}/\text{m}^3$,生热率平均值为 $3.31 \mu\text{W}/\text{m}^3$;花岗岩及二长花岗岩具有较高的 U、Th 含量,生热率较高,变化范围分别为 $4.14 \sim 6.68 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 和 $2.86 \sim 6.69 \mu\text{W}/\text{m}^3$,二者的生热率平均值分别约为 $5.41 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 和 $4.30 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 。

不同地区岩体的生热率差异明显,浙西北岩体生热率高于浙东南岩体生热率(图4)。常山—淳安一带岩体生热率相对较高,一般 $>5 \mu\text{W}/\text{m}^3$;绍兴—新昌地区岩体生热率为 $3 \sim 5 \mu\text{W}/\text{m}^3$;遂昌—龙游、景宁—泰顺、雁荡山地区岩体生热率较低,一般 $<3 \mu\text{W}/\text{m}^3$,生热率具有“浙西北南东段高、浙东南北侧中等、浙东南南部低”的特征。其中,浙西北泗岭二长花岗岩体、九华山花岗岩体、河桥正长花岗岩体、儒洪正长花岗岩体和学川(顺溪)二长花岗岩体的生热率 $>5 \mu\text{W}/\text{m}^3$,为高产热花岗岩^[7]。

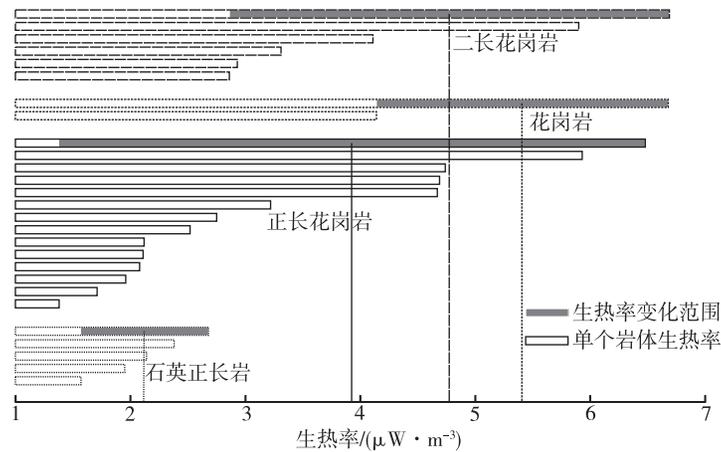


图3 浙江燕山期花岗岩类放射性生热率分布图

Fig. 3 Distribution of radioactive heat generation of the Yanshanian granitoids in Zhejiang Province

2.4 花岗岩类热贡献率特征

随着地球的演化,放射性元素²³²Th、²³⁸U、²³⁵U和⁴⁰K不断衰变,丰度值逐步降低,放射性生热量不断减少(图5)。²³²Th、²³⁸U等半衰期越长的放射性元素,其含量减少的越慢。与²³⁵U和⁴⁰K相比,²³²Th半衰期较长,热贡献率随时间变化逐渐增大^[42]。现今岩石的放射性生热量主要来源于Th和U的衰变,K的热贡献率一般约占10%^[43]。

U、Th相对K的热贡献率关系图可进一步表明U、Th的相对热贡献率,进而判断岩体放射性生热率的主导因素^[43]。由浙江燕山期花岗岩类U、Th相对K的热贡献率关系图(图6)可知,除学川(顺溪)和泗岭岩体Th的热贡献率显著高于U外,其余二长花岗岩类Th的热贡献率均略高于U;而石英正长岩类和正长花岗岩类U热贡献率略高于Th。这一特征与南岭地区相对富U的花岗岩^[43]差异较明显。

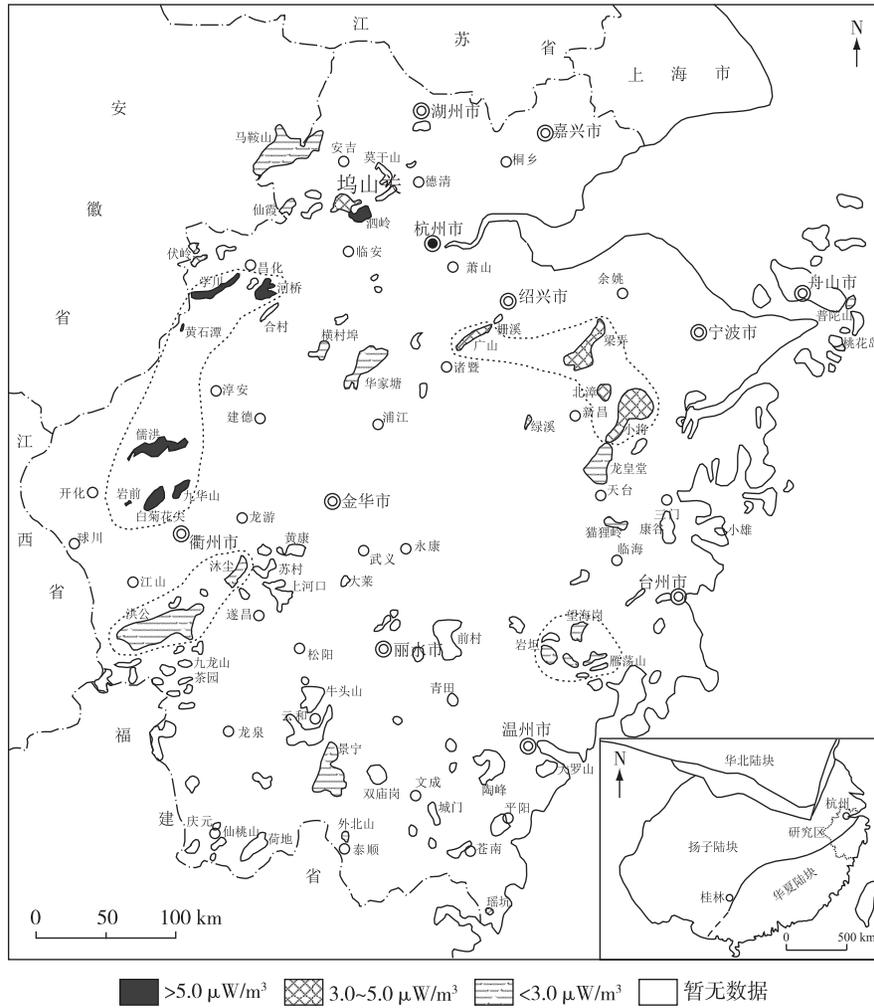


图 4 浙江燕山期花岗岩类生热率分布图

Fig. 4 Distribution of heat generation of the Yanshanian granitoids in Zhejiang Province

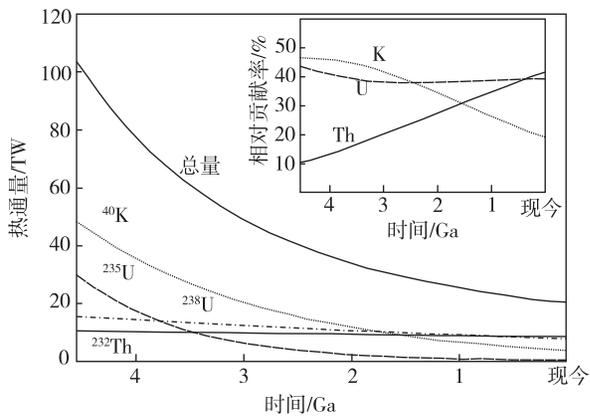


图 5 生热元素的热通量及相对贡献率随时间变化图^[40]
Fig. 5 Variation of heat flux of heat generating elements and its relative contribution ratio through time^[40]

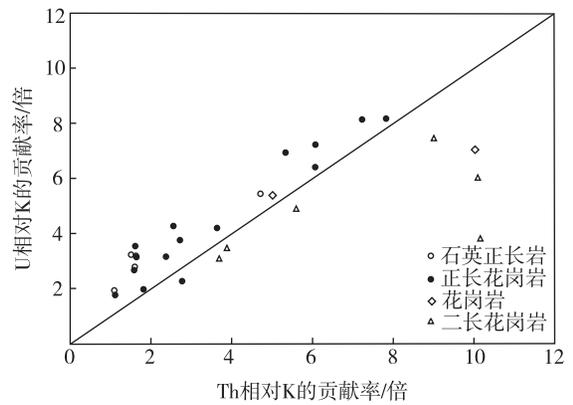


图 6 浙江燕山期花岗岩类 U、Th 相对 K 的热贡献率关系图
Fig. 6 Heat contribution ratios of U and Th to K in the Yanshanian granitoids in Zhejiang Province

3 适合开展高放射性产热型干热岩勘查的岩体

蔺文静等^[7]在综合国内外干热岩开发项目的基础上,系统总结了干热岩选址的地热地质学指标(表3),并对东南沿海地区几个干热岩靶区进行对比,提出优先勘查靶区。

表3 适合干热岩开发的地热地质学标准

地热地质学指标	适宜标准
基底岩石类型	以壳源型高产热花岗岩为主
单位体积生热率	$\geq 5.0 \mu\text{W}/\text{m}^3$
岩体规模	$\geq 100 \text{ km}^2$
岩体构造应力状态	高构造应力
岩体形成时代	以显生宙为主
干热岩体地温梯度	一般 $> 30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$
盖层地温梯度	越高越好,局部(火山口)达 $100 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$
盖层盆地类型	断陷盆地最佳
地表热流值	显著 $> 70 \text{ mW}/\text{m}^2$
构造区域	地震不活跃的高热流地区

浙江属于地震不活跃的高热流地区(图1),地温梯度达 $16.44 \sim 33.52 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ ^[44]。浙西北地区泗岭、九华山、河桥、儒洪、学川(顺溪)岩体放射性生热率 $> 5.0 \mu\text{W}/\text{m}^3$,已有重、磁资料^[27]显示,除泗岭岩体外,九华山、河桥、儒洪和学川(顺溪)4个岩体的面积达 $167 \sim 309 \text{ km}^2$,皆 $> 100 \text{ km}^2$ 。泗岭、河桥、儒洪和学川岩体外围大部分被古生代或新元古代沉积岩覆盖,岩性主要为泥质岩、泥质灰岩、硅质岩和白云岩等,少部分被白垩纪火山碎屑岩类(凝灰岩)覆盖。这些沉积盖层具有较低的热导率,厚度从岩体中部向外可增大到 $600 \sim 800 \text{ m}$ ^[27]。浙东南地区小将岩体呈岩基产出,岩体顶部还留有火山岩盖层,未完全出露,剥蚀程度浅,放射性生热率达 $4.74 \mu\text{W}/\text{m}^3$,围岩主要为早白垩世高坞组熔结凝灰岩夹沉凝灰岩,最大厚度 $> 800 \text{ m}$ 。参照相关选址指标^[7],上述6个岩体满足大部分选址指标要求,具有良好的干热岩勘查前景。

由于浙江干热岩研究基础资料相对贫乏,如大地热流、盖层及岩体地温梯度、隐伏岩体的分布等研究程度较低,上述分析需要下一步工作验证,除小将岩体外,浙东南地区是否还有可供勘查的靶区,还需进一步研究。

4 结论

(1)浙江燕山期花岗岩类的 K_2O 含量相近,U、Th含量差异较大。石英正长岩类及正长花岗岩U含量较低,花岗岩和二长花岗岩U含量较高;石英正长岩类Th含量最低,花岗岩Th含量最高。

(2)不同花岗岩类放射性生热率相差较大。石英正长岩类生热率变化范围较窄,生热率相对最小;正长花岗岩生热率变化范围较宽,生热率平均值为 $3.31 \mu\text{W}/\text{m}^3$;花岗岩生热率最高,生热率平均值为 $5.41 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 。

(3)除学川(顺溪)、泗岭岩体Th的热贡献率显著高于U外,其余二长花岗岩Th的热贡献率略高于U;石英正长岩类和正长花岗岩类U的热贡献率略高于Th。

(4)浙西北泗岭、九华山、河桥、儒洪、学川(顺溪)及浙东南小将等岩体规模较大,生热率较高,适合进一步开展高放射性产热型干热岩勘查。

参考文献

- [1] 胡圣标,汪集旻.中国东南地区地壳生热率与地幔热流[J].中国科学(B辑),1994,24(2):185-193.
- [2] 甘浩男,王贵玲,蔺文静,等.中国干热岩资源主要赋存类型与成因模式[J].科技导报,2015,33(19):22-27.
- [3] 吴耀,金振民,欧新功,等.中国大陆科学钻探(CCSZ)主孔地区岩石圈热结构[J].岩石学报,2005,21(2):439-450.
- [4] 赵平,汪集旻,汪集安,等.中国东南地区岩石生热率分布特征[J].岩石学报,1995,11(3):292-305.
- [5] 迟清华,嫣明才.华北地台岩石放射性元素与现代大陆岩石圈热结构和温度分布[J].地球物理学报,1998,41(1):38-48.
- [6] 谭现锋,王浩,张震宇.山东省陈庄潜凸起区地温场特征与泰山岩群放射性元素生热率[J].科技导报,2015,33(19):58-61.
- [7] 蔺文静,甘浩男,王贵玲,等.我国东南沿海干热岩赋存前景及与靶区选址研究[J].地质学报,2016,90(8):2043-2058.
- [8] 胡圣标,何丽娟,汪集旻.中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J].地球物理学报,2001,44(5):611-626.
- [9] 刘道荣.浙江陆域干热岩地热资源地质分区初步研究[J].浙江国土资源,2017(Z):194-200.
- [10] 李海亭.浙江大陆地区干热岩资源评估[J].浙江国土资源

- 源, 2015(Z):71-78.
- [11] 浙江省水文地质工程地质大队. 1:50万浙江省地热资源调查与区划[R]. 2012.
- [12] 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, 23(6):1431-1440.
- [13] 汪屹华, 汪集扬. 利用地震波速资料计算地壳深部岩石的生热率——以石城—惠安剖面为例[J]. 科学通报, 1992, 37(7):633-636.
- [14] RYBACH L, BUNTEBARTH G. The variation of heat generation, density and seismic velocity with rock type in the continental lithosphere [J]. *Tectonophysics*, 1984, 103(1/4):335-344.
- [15] RYBACH L. Determination of heat production rate. In: Haenel R, Rybach L, Stegena L, eds. *Hand Book of terrestrial heat-flow density determination* [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988:125-142.
- [16] 浙江省地球物理地球化学勘查院. 浙江省区域地层岩石地球物理地球化学参数研究报告[R]. 1991.
- [17] 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, 12(4):500-506.
- [18] 邱检生, 刘亮, 李真. 浙江黄岩望海岗石英正长岩的锆石 U-Pb 年代学与 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学及其对岩石成因的制约[J]. 岩石学报, 2011, 27(6):1557-1572.
- [19] 刘亮, 邱检生, 杨泽黎. 浙江临海猫狸岭岩体的成因: 年代学、地球化学与 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 2013, 29(12):4069-4086.
- [20] 卢成忠. 浙江沐尘石英二长岩体的岩石地球化学特征及构造意义[J]. 地球化学, 2007, 36(5):457-466.
- [21] HE Z Y, XU X S, YU Y, et al. Origin of the Late Cretaceous syenite from Yandangshan, SE China, constrained by zircon U-Pb and Hf isotopes and geochemical data[J]. *International Geology Review*, 2009, 51(6):556-582.
- [22] 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(2/3):456-465.
- [23] 王对兴, 李春麟, 高万里, 等. 浙东早白垩世岩浆混合作用: 新昌小将岩体 U-Pb 年代学及地球化学证据[J]. 岩石学报, 2013, 29(11):3993-4003.
- [24] LI Z L, ZHOU J, MAO J R, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of two episodes of granitoids from the northwestern Zhejiang Province, SE China: Implication for magmatic evolution and tectonic transition[J]. *Lithos*, 2013, 179:334-352.
- [25] 张虹, 戴圣潜, 管运财, 等. 皖南绩溪伏岭岩体岩石地球化学特征[J]. 中国地质, 2005, 32(3):411-416.
- [26] 闫强. 浙江新昌晚中生代火成杂岩研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006:1-61.
- [27] 浙江省地质调查院. 浙西地区中生代岩浆侵入活动及其成矿作用研究报告[R]. 2016.
- [28] 高万里, 王宗秀, 王对兴, 等. 浙东南晚中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(3):861-875.
- [29] 邱检生, 王德滋, McInnes B I A. 浙闽沿海地区 I 型-A 型复合花岗岩体的地球化学及成因[J]. 岩石学报, 1999, 15(2):237-246.
- [30] 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(1):180-197.
- [31] 贾德龙, 严光生, 叶天竺, 等. 浙江绍兴地区广山花岗杂岩体的锆石 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.
- [32] 邱检生, 王德滋, 彭亚鸣, 等. 浙江舟山桃花岛碱性花岗岩的岩石学和地球化学特征及成因探讨[J]. 南京大学学报, 1996, 32(1):80-89.
- [33] 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(1):87-98.
- [34] 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(5):673-684.
- [35] YANG S Y, JIANG S Y, ZHAO K D, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of two Early Cretaceous A-type granites in the Gan-Hang Belt, Southeast China[J]. *Lithos*, 2012, 150:155-170.
- [36] 唐增才, 汪发祥, 董学发, 等. 浙西双溪口花岗岩锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素组成和地球化学特征: 对 Sn 成矿作用的制约[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(5):879-891.
- [37] 陈芳, 王登红, 杜建国, 等. 安徽宁国刘村二长花岗岩地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2014, 88(5):869-882.
- [38] 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(1):98-114.
- [39] 陈荣, 邢光福, 杨祝良, 等. 浙东白垩纪北漳和梁弄花岗岩体及其暗色岩石包体研究[J]. 高校地质学报, 2005, 11(2):264-275.
- [40] 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(1):198-212.
- [41] 卢成忠, 顾明光, 罗以达, 等. 杭州泗岭铝质 A 型花岗岩的发现及其构造意义[J]. 中国地质, 2008, 35(3): 392-398.
- [42] AREVALO J R, MCDONOUGH W F, LUONG M. The K/U ratio of the silicate Earth: Insights into mantle composition, structure and thermal evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 278(3/4): 361-369.
- [43] 林乐夫, 孙占学, 王安东, 等. 南岭地区与东南沿海地区中生代花岗岩放射性地球化学特征及岩石圈热结构对比研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2017, 36(4): 488-500.
- [44] 徐克定. 浙江省岩石圈构造与地温场[J]. 浙江国土资源, 2012(Z): 162-171.

Characteristic study of radioactive heat generation of the Yanshanian granitoids in Zhejiang

LIU Dao-rong¹, LIN Rong-ji²

(1. *Zhejiang Institute of Geological Exploration, General Bureau of Geology and Mine, Hangzhou 310002, China*;
2. *Geological exploration bureau of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China*)

Abstract: Zhejiang is located in the high heat flow geothermal anomaly area along the eastern coast of China. The Yanshanian magmatic activities were intensive, thus forming high resource potential of hot dry rock(HDR) with high radioactive heat generation. The study of the distribution law of heat generating elements in the main Yanshanian granitoids shows that quartz syenite, monzonitic granite, syenogranite, granite contain similar K_2O contents, and granite contains highest U and Th concentration. The calculation results for radioactive heat generation of rocks indicate that the radioactive heat generation rate varies greatly with types of granitoids. Quartz syenite has relatively low heat generation with a narrow change range and an average of $2.14 \mu W/m^3$; syenite has a wide range of heat generation with an average of $3.31 \mu W/m^3$; and granite has the highest heat generation with an average of $5.41 \mu W/m^3$. According to the geothermal standard of high radioactive heat production HDR, it can be determined preliminarily that Siling, Jiuhuashan, Heqiao, Ruhong and Xuechuan (Shunxi) in northwestern Zhejiang and Xiaojiang in southeastern Zhejiang are of good prospecting outlook for hot dry rocks exploration.

Key words: heat generation; hot dry rocks; granitoid; Yanshanian; Zhejiang