

湘东北三墩铜铅锌矿区花岗岩的岩石成因 ——锆石U-Pb测年、岩石地球化学和Hf同位素约束

张 鲲, 徐德明, 胡俊良, 卢友月, 黄 皓

ZHANG Kun, XU Deming, HU Junliang, LU Youyue, HUANG Hao

武汉地质矿产研究所, 湖北 武汉 430205

Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, Wuhan 430205, Hubei, China

摘要:对湘东北三墩铜铅锌矿区花岗岩进行了系统的锆石U-Pb年代学、岩石地球化学和Hf同位素分析。LA-ICP-MS锆石U-Pb定年表明,三墩铜铅锌矿区花岗岩成岩年龄为 131.9 ± 1.1 Ma。三墩铜铅锌矿区花岗岩为一套强过铝质钙碱性系列花岗岩,富集U、Ta、Pb,亏损Ba、Nb、Sr、Zr、Ti等元素,稀土元素配分模式为右倾配分模式,具有弱负Eu异常。Hf同位素分析表明,三墩铜铅锌矿区花岗岩燕山晚期锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-5.9 \sim -2.4$, Hf同位素二阶段模式年龄为1558~1338 Ma,表明其物质来源于中元古代古老地壳岩石部分熔融。749.5 Ma继承锆石核的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为+4.8, Hf同位素二阶段模式年龄为1355 Ma,暗示其物质来源有幔源物质加入。三墩铜铅锌矿区花岗岩可能是由于中下地壳的熔融岩浆形成后,混入少量幔源物质上侵形成的。

关键词:钦杭成矿带;幕阜山岩体;锆石U-Pb定年;Hf同位素

中图分类号: P618.4; P588.12⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2017)09-1591-10

Zhang K, Xu D M, Hu J L, Lu Y Y, Huang H. Petrogenesis of the granites in Sandun area—Constraints from petrochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf Isotope. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(9):1591-1600

Abstract: In this paper, the authors studied the petrogenesis and tectonic-significance of the granite from the Sandun Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in northeastern Hu'nan Province by means of zircon U-Pb isotope chronology, whole rock geochemistry and Hf isotope. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yielded crystallization age of 131.9 ± 1.1 Ma for the Sandun granite. The Sandun granite is a peraluminous high-Al calc-alkaline intrusive granite. The rocks are characterized by high U, Ta, Pb and low Ba, Nb, Sr, Zr, Ti values. The REE distribution patterns are strongly LREE enriched and HREE depleted, with weakly negative Eu anomalies. The Hf isotope analyses show that the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the late Yanshanian granite zircons are between -5.9 and -2.4 , and the two stage Hf model ages ranging from 1558 Ma to 1338 Ma, which indicates that its parental magma was derived from partial melting of rocks of Middle Proterozoic paleo-crust. Inherited zircon with an age of 749.5 Ma has the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ of +4.8 and two stage Hf model age of 1355 Ma, respectively, which indicates that its parental magma was mainly derived from the mantle. The Sandun granite probably resulted from the formation of the molten magma in the middle and lower crust and the formation of a small amount of mantle derived material.

Key words: Qinzhong-Hangzhou metallogenic belt; Mufushan granite; zircon U-Pb dating; Hf isotope

钦杭结合带是扬子和华夏2个古陆块于新元古代碰撞拼接所形成的板块结合带^[1-2],其南西起自广西钦州湾,经湘、赣往北东延伸至浙江杭州湾,总体

呈北东向反“S”状弧形展布。钦杭成矿带是沿钦杭结合带两侧扩展而新圈定的一个重要成矿带,成矿地质条件优越。开展地质调查工作以来,相继在该

收稿日期:2016-10-14;修订日期:2017-06-28

资助项目:中国地质调查局项目《钦杭成矿带(西段)重要金属矿床成矿规律及找矿方向研究》(编号:1212011085405)、《钦杭成矿带西段资源远景调查评价》(编号:12120113067200)和《湘南柿竹园-香花岭有色稀有金属矿产集中开采区地质环境调查》(编号:DD20160334)

作者简介:张鲲(1982-),男,硕士,工程师,从事地质与矿产调查研究。E-mail:zhangkun019@163.com

成矿带发现了一批大中型矿床,如锡田锡矿、思委银矿、园珠顶铜钼矿等,找矿突破成果显著^[3]。对钦杭成矿带内一些典型矿床进行系统的研究,对了解区域成矿地质条件、矿床成因、矿床分布规律等具有重要意义。

幕阜山地区位于钦杭成矿带中部,是钦杭成矿带西段部署的重点找矿地区之一,已发现的主要矿种有钨、金、铀、铍、铌、钽、铜、铅、锌等,湖南三墩铜铅锌矿位于幕阜山岩体南部^{[2-3]①}。幕阜山岩体呈岩基状产出,出露面积达 2530 km²,主体部分位于湖南省境内。幕阜山岩体为多期次侵入的复式岩体^{②③},区域地质调查对其进行了划分,其中燕山早期岩浆活动持续时期较长(189~145 Ma),在长达 44 Ma 的地质时期内,除了侵入以粗中粒斑状二长花岗岩为主的岩体外,在岩浆后阶段还有大量花岗伟晶岩脉生成,燕山晚期岩浆活动基本上紧接着燕山早期岩浆活动发生,其活动时期在 136~115 Ma 之间,持续时间 21 Ma,燕山晚期岩体划分出第一、第二、第三次侵入体,还伴有部分花岗伟晶岩脉的生成。虽然前人对幕阜山岩体进行了成岩期次划分和同位素年龄分析,但受当时测试条件和方法本身的制约,同位素年龄存在精度不高的问题,且缺乏系统的岩石成因研究。为了获得高精度的成岩年龄数据,本文采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,并结合 Hf 同位素和岩石地球化学分析,深入探讨岩石成因,为研究成岩与成矿的关系提供重要的科学依据。

1 地质背景

三墩铜铅锌矿区位于下扬子陆块江南古岛弧的北缘,幕阜山岩体南部与冷家溪群侵入接触部位、北东向天府山-幕阜山断裂与枫林-浆市断裂复合处北西侧^{②④}。矿区出露地层较简单(图 1),主要为冷家溪群变质岩,位于矿区南部,岩性以黑云母片岩、二云母片岩、石英片岩为主,其中有大量伟晶岩岩脉及石英脉穿插。区内断裂构造发育,尤其以北北西向和近南北向断裂最发育,延伸稳定、规模较大,断裂带内构造透镜体、石英脉、角砾岩等发育。区内岩浆岩十分发育,主要出露幕阜山岩体燕山晚期第一次侵入体,在矿区东北角还出露燕山早期侵入体和燕山晚期第三次侵入体,燕山早期侵入体($M\gamma_5^{2Pb}$)岩性为片麻状粗中粒斑状黑云母二长花

岗岩,燕山晚期第一次侵入体(γ_5^{3-1})岩性为中细粒二云母二长花岗岩,燕山晚期第三次侵入体(γ_5^{3-3})岩性为细粒花岗闪长岩。

矿区内热液活动强烈,硅化显著,尤其在断裂带内硅化现象最明显,往往被石英脉充填,石英脉除少数呈透镜状产出外,大部分呈整脉状充填在断裂带内。区内已探明 19 条含矿石英脉,其中具有工业矿体的有 5 条,皆呈脉状、透镜状产出,其走向为北北西向,倾向为北东东向。围岩蚀变除硅化外,还有绢云母化、绿泥石化、萤石化,偶见碳酸盐化、重晶石化等,萤石化与矿化关系密切。一般在断层构造带的中部、断裂构造转折处、两组断裂相交处,硅化、绿泥石化强烈发育处和北北西向断裂(节理)带中,形成较富的矿体^{②③}。

2 岩石学特征

三墩铜铅锌矿区花岗岩岩石地球化学和测年样品(东经 113°45.626'、北纬 28°52.622')均采于幕阜山岩体燕山晚期第一次侵入体的地表露头。通过观察手标本和显微镜下特征(图 2),鉴定三墩铜铅锌矿区花岗岩岩性为二云母二长花岗岩,灰白色,中细粒花岗结构,块状构造,矿物成分为石英(25%~30%)、钾长石(30%~35%)、斜长石(25%~30%)、黑云母(5%~7%)、白云母(5%~8%)。

3 分析测试方法

主量、微量元素测试在中国地质调查局武汉地质调查中心中南矿产资源监督检查中心进行(前者用 X-射线荧光光谱法 XRF,后者用 ICP-MS 法)。地球化学参数计算与图解生成使用 GeoKit 软件^[4]。

花岗岩样品破碎和锆石挑选由廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。锆石阴极发光(CL)图像在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室拍摄,并结合透射光和反射光图像观察锆石内部结构。

锆石 U-Pb 定年分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR) LA-ICP-MS 仪器上完成,ICP-MS 型号为 Agilent 7500a。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005,所用斑束直径为 32 μm 。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件

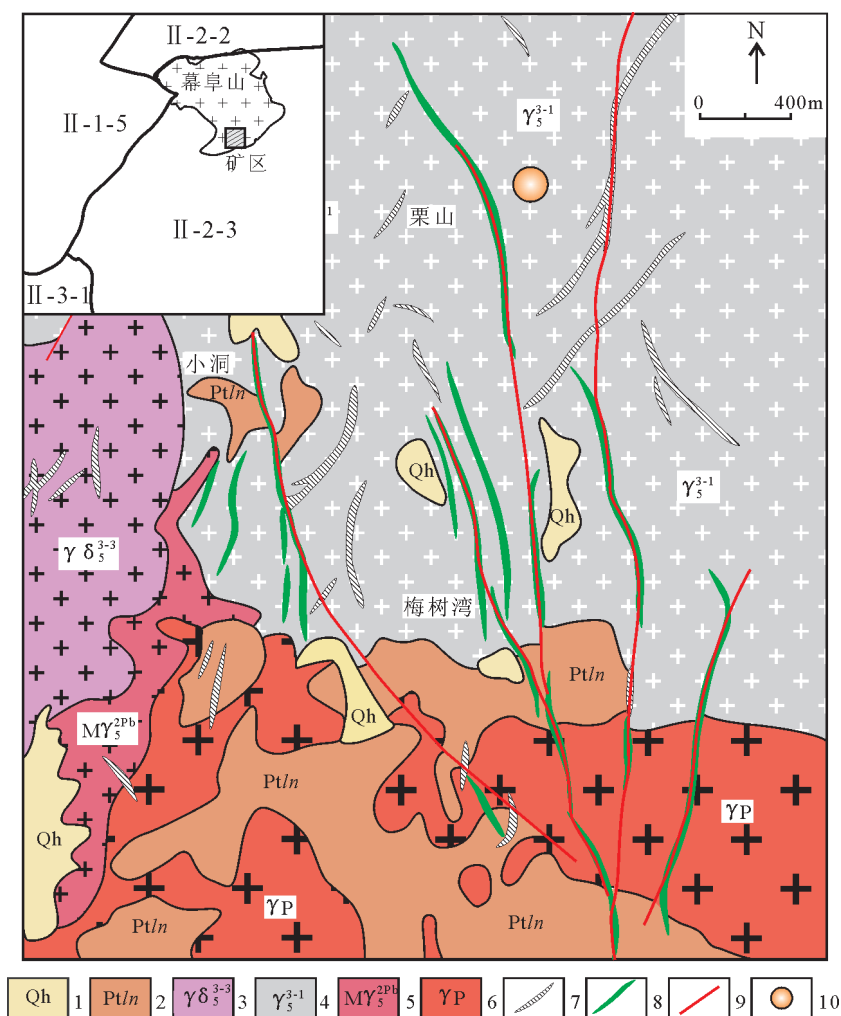


图1 三墩铜铅锌矿区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Sandun

1—第四系全新统;2—冷家溪群;3—燕山晚期第三次侵入体;4—燕山晚期第一次侵入体;5—燕山早期侵入体;6—花岗伟晶岩;7—石英脉;8—含矿石英脉;9—断裂;
10—采样位置(锆石U-Pb);II-1-5—江汉-洞庭断陷盆地;II-2-2—下扬子被动陆缘;II-2-3—江南古岛弧;II-3-1—湘中-桂中裂谷盆地

ICPMSDataCal^[5-6]完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同Liu等^[5-6]。锆石样品的U-Pb年龄谐和图绘制和年龄加权平均值计算均采用Isoplot 3.0完成^[7]。

锆石Hf同位素原位测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室的多接受电感耦合等离子质谱仪MC-ICP-MS(Nu Plasma)上完成。分析时采用氦作为剥蚀物质载气,激光束斑直径为42 μm,分析步骤和流程参见徐平等^[8]和Yuan等^[9]。采用标准锆石91500、MON-1和GJ-1作为外部标样,分析精度和误差用标样来校准,误差为2σ,本次实验测试中

91500的分析结果 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282307\pm0.000016$,与参考值一致。

4 分析结果

4.1 锆石U-Pb分析结果

本次研究采集的测年样品编号为SD2-2。样品CL图像显示(图3),锆石形态大部分呈短柱状,晶形比较完整,裂纹不发育,振荡环带发育。从制备好的测年样品中选取锆石进行测试,每颗锆石一个测点,多数测点位于锆石柱体两端,少数测点在柱体中部。锆石Th含量为 $192\times10^{-6}\sim963\times10^{-6}$,U含

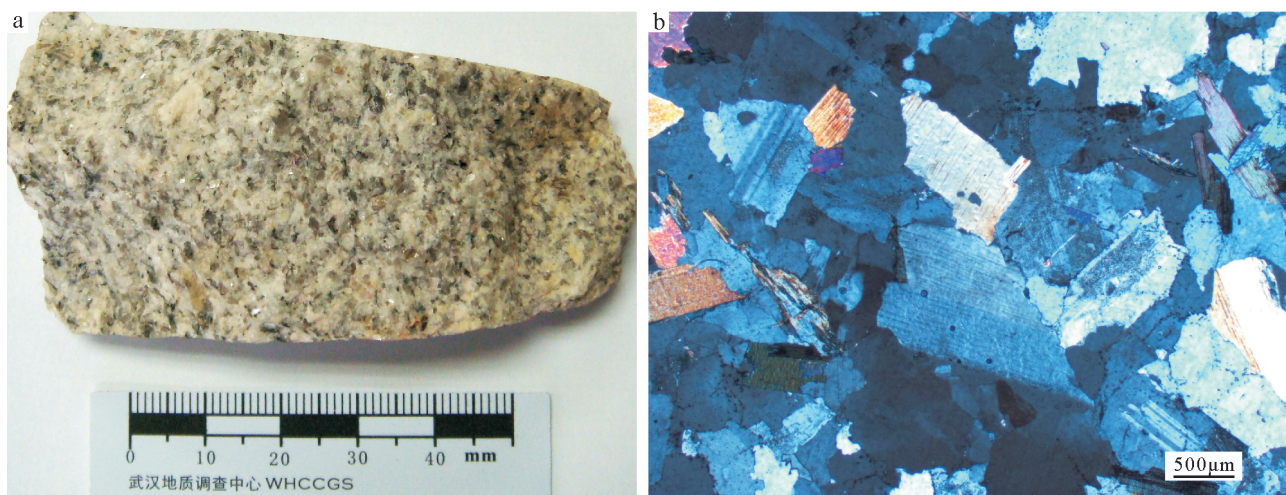


图2 花岗岩手标本(a)和正交偏光照片(b)

Fig. 2 Hand specimen (a) and crossed nicols photograph (b) of granite

量为 $1581 \times 10^{-6} \sim 10530 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.034~0.39, 虽然锆石的 Th/U 值较低,但其具有较高的 Th、U 含量和存在振荡环带等特征,表明其为岩浆锆石^[10]。

测年样品的同位素分析结果见表1。共测试20

个测点,除3号点数据有明显错误删除外,有效测点为19个,其中15号点年龄明显较老,14号点年龄明显较小,其余17个测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值集中于 129.0~134.9Ma 之间,投影点均落在谐和线

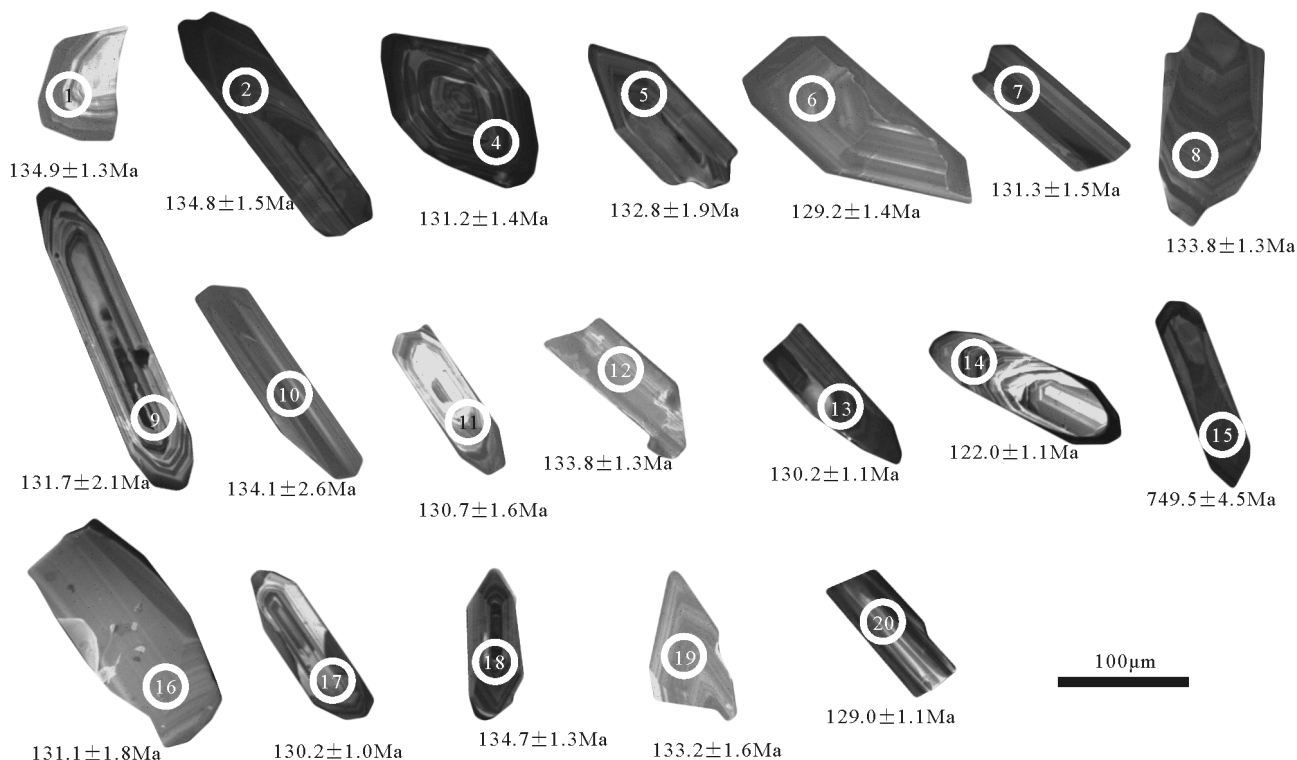


图3 样品中代表性锆石阴极发光(CL)图像及其U-Pb年龄

Fig. 3 Representative CL images for zircons with U-Pb ages

表 1 花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素测试结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotopic compositions of zircons for the granite

分析点	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
1	231	323	9563	0.034	0.04826	0.00120	0.14259	0.00348	0.02115	0.00021	122.3	57.4	135.3	3.1	134.9	1.3
2	155	377	6425	0.059	0.04627	0.00127	0.13697	0.00381	0.02114	0.00023	13.1	63.0	130.3	3.4	134.8	1.5
3	103	243	4266	0.057	0.04430	0.00125	0.13036	0.00375	0.02102	0.00024	error	error	124.4	3.4	134.1	1.5
4	174	358	7255	0.049	0.04723	0.00137	0.13570	0.00381	0.02056	0.00022	61.2	66.7	129.2	3.4	131.2	1.4
5	101	240	4245	0.057	0.04742	0.00182	0.13820	0.00545	0.02082	0.00030	77.9	88.9	131.4	4.9	132.8	1.9
6	109	279	4578	0.061	0.05025	0.00160	0.14233	0.00446	0.02024	0.00022	205.6	74.1	135.1	4.0	129.2	1.4
7	84	224	3476	0.064	0.04772	0.00160	0.13724	0.00451	0.02058	0.00023	87.1	-117.6	130.6	4.0	131.3	1.5
8	110	259	4530	0.057	0.04652	0.00146	0.13614	0.00420	0.02097	0.00021	33.4	64.8	129.6	3.8	133.8	1.3
9	81	211	3513	0.060	0.04946	0.00318	0.14136	0.00903	0.02063	0.00034	168.6	154.6	134.3	8.0	131.7	2.1
10	233	376	10530	0.036	0.04686	0.00134	0.13658	0.00453	0.02102	0.00042	42.7	66.7	130.0	4.0	134.1	2.6
11	120	375	5185	0.072	0.04865	0.00152	0.13863	0.00437	0.02049	0.00026	131.6	78.7	131.8	3.9	130.7	1.6
12	79	192	3258	0.059	0.04918	0.00166	0.14283	0.00465	0.02097	0.00021	166.8	79.6	135.6	4.1	133.8	1.3
13	148	399	6305	0.063	0.04854	0.00110	0.13748	0.00307	0.02040	0.00017	124.2	55.6	130.8	2.7	130.2	1.1
14	210	561	9618	0.058	0.04795	0.00103	0.12706	0.00283	0.01910	0.00017	98.2	45.4	121.5	2.5	122.0	1.1
15	392	963	2472	0.390	0.06553	0.00086	1.11877	0.01526	0.12330	0.00078	790.7	27.8	762.4	7.3	749.5	4.5
16	38	286	1581	0.181	0.04736	0.00244	0.13302	0.00626	0.02055	0.00029	77.9	109.3	126.8	5.6	131.1	1.8
17	141	371	6038	0.061	0.04796	0.00111	0.13634	0.00319	0.02040	0.00016	98.2	53.7	129.8	2.9	130.2	1.0
18	138	326	5740	0.057	0.04908	0.00174	0.14255	0.00407	0.02112	0.00021	150.1	83.3	135.3	3.6	134.7	1.3
19	145	358	6175	0.058	0.04931	0.00142	0.14325	0.00423	0.02089	0.00025	161.2	66.7	135.9	3.8	133.2	1.6
20	154	398	6752	0.059	0.04837	0.00138	0.13621	0.00389	0.02022	0.00017	116.8	63.9	129.7	3.5	129.0	1.1

上(图 4), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $131.9 \pm 1.1\text{Ma}$ (95%置信度, $\text{MSWD}=2.3$), 可代表三墩铜铅锌矿区花岗岩的成岩年龄。结合阴极发光图像分析, 15 号测点应为继承锆石核, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 749.5Ma 。

4.2 地球化学分析结果

岩石地球化学分析结果见表 2。花岗岩 SiO_2 含量为 $72.56\% \sim 74.27\%$ ($>70\%$), Al_2O_3 含量为 $14.05\% \sim 14.46\%$, 铝饱和指数 (A/CNK) 值为 $1.13 \sim 1.28$, 属强

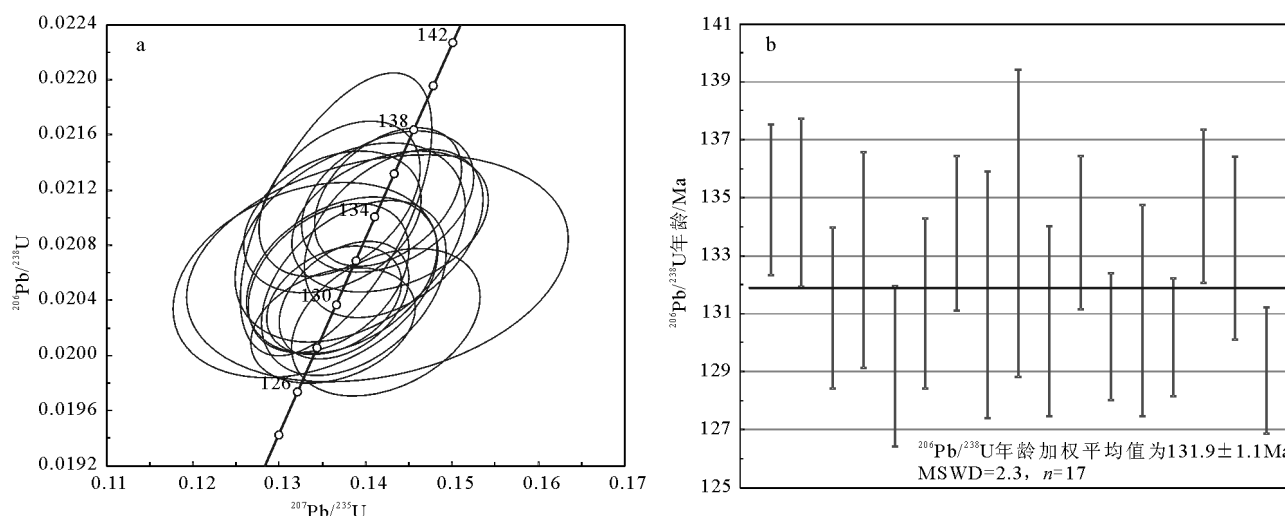


图 4 花岗岩锆石 U-Pb 谐和图(a)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图谱(b)

Fig. 4 U-Pb concordia diagram (a) and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age spectrum (b) of zircons from the granites

表2 花岗岩主量、微量和稀土元素含量
Table 2 Major, trace and rare earth element
values of the granite

样号	SD1-4	SD1-5	SD2-2	SD3-1	SD4-1	样号	SD1-4	SD1-5	SD2-2	SD3-1	SD4-1
岩性	二云母 花岗岩	二云母 花岗岩	二云母 花岗岩	二云母 花岗岩	二云母 花岗岩	岩性	二云母 花岗岩	二云母 花岗岩	二云母 花岗岩	二云母 花岗岩	二云母 花岗岩
SiO ₂	72.70	72.56	74.27	73.49	73.49	Ta			2.86	2.57	4.89
Al ₂ O ₃	14.45	14.46	14.18	14.35	14.05	Zr			48.0	59.9	51.2
Fe ₂ O ₃	0.501	0.383	0.250	0.228	0.237	Hf			2.26	2.52	1.97
FeO	1.88	2.04	1.73	1.77	2.34	U			17.2	8.02	8.00
CaO	0.553	1.02	0.475	0.732	0.739	Th			6.55	9.92	10.7
MgO	0.325	0.346	0.184	0.231	0.320	La	22.8	15.7	12.7	17.4	20.7
K ₂ O	5.61	4.50	4.77	5.00	4.22	Ce	36.1	27.2	26.6	35.8	40
Na ₂ O	3.20	3.66	3.08	3.12	3.49	Pr	5.5	4.02	3.16	4.37	4.73
TiO ₂	0.125	0.107	0.106	0.127	0.165	Nd	18.9	14	10.9	15.1	16.2
P ₂ O ₅	0.201	0.181	0.267	0.215	0.111	Sm	4.49	3.39	2.67	3.81	3.78
MnO	0.034	0.035	0.050	0.039	0.064	Eu	0.47	0.4	0.25	0.46	0.54
灼失量	0.399	0.277	0.419	0.459	0.460	Gd	3.83	2.93	2.26	3.32	3.39
Cu	13.5	15.0	19.6	17.8	12.7	Tb	0.58	0.46	0.45	0.56	0.57
Pb	65.0	90.3	28.2	43.2	43.5	Dy	2.56	2.05	2.5	2.54	2.64
Zn	108	59.4	47.0	57.9	146	Ho	0.36	0.29	0.44	0.35	0.42
Cr	14.5	3.86	17.9	7.27	9.28	Er	0.87	0.73	1.24	0.81	1.09
Ni	2.25	2.29	2.65	19.4	5.07	Tm	0.12	0.093	0.24	0.11	0.2
Co	1.70	1.54	1.20	1.42	2.12	Yb	0.74	0.58	1.51	0.74	1.39
W	2.19	2.14	3.12	3.27	2.29	Lu	0.094	0.071	0.19	0.091	0.19
Mo			0.85	0.55	0.89	Y	9.27	7.49	12.7	9.43	11.8
Bi	1.04	1.25	1.45	4.82	0.22	A/CNK	1.17	1.13	1.28	1.21	1.21
Sr	42.4	63.3	18.1	33.3	38.8	ΣREE	106.68	79.40	77.81	94.89	107.64
Ba	251	199	78.9	163	226	δEu	0.35	0.39	0.31	0.40	0.46
Nb			17.3	14.8	18.6	δCe	0.79	0.84	1.03	1.01	0.99

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量为10⁻⁶

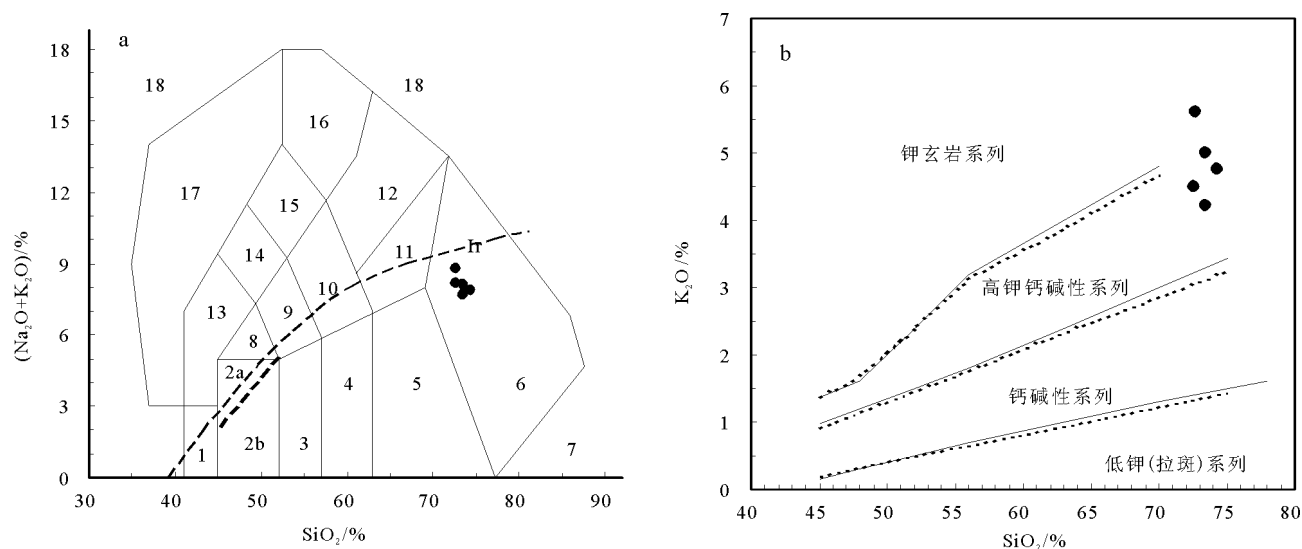
过铝质(>1.1)。碱含量(Na₂O+K₂O)变化范围为7.71%~8.81%,其中K₂O含量为4.22%~5.61%,在TAS岩石分类图解(图5-a)上^[11-12],样品点落在亚碱性花岗岩系列。在岩石系列SiO₂-K₂O图解(图5-b)上^[13],样品点落在高钾钙碱性系列。

花岗岩稀土元素总量(ΣREE)为77.81×10⁻⁶~107.64×10⁻⁶,平均为80.56×10⁻⁶,δEu=0.31~0.46,δCe=0.79~1.03。在微量元素蛛网图(图6-a)上,富集U、Ta、Pb等元素,亏损Ba、Nb、Sr、Zr、Ti等元素。Nb/Ta值为3.80~6.05,平均为5.20,低于地壳Nb/Ta值,指示源区具有地壳性质。Sr亏损指示斜长石的分离结晶;Ti亏损指示钛铁矿的分离结晶,

暗示岩浆物质来源于地壳^[14-16]。在稀土元素球粒陨石标准化配分图(图6-b)上,稀土元素为右倾配分模式,轻、重稀土元素分异强烈,富集轻稀土元素,重稀土元素平坦分布,具有弱负Eu异常特征。

4.3 Hf同位素分析结果

对测年样品锆石19个有效测点中的17个测点(包含15号继承锆石核,除去5号和14号测点)进行了原位Hf同位素分析,除继承锆石用测点的年龄计算外,其余锆石Hf同位素计算所用的年龄为该样品的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值,分析结果见表3。测年样品的16个燕山晚期花岗岩锆石的微区原位Hf同位素组成相对均匀,初始¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值

图5 花岗岩TAS岩石分类图解(a)和 SiO_2 - K_2O 关系图(b)Fig. 5 TAS (a) and SiO_2 - K_2O (b) diagram of the granite

- 1—橄榄辉长岩; 2a—碱性辉长岩; 2b—亚碱性辉长岩; 3—辉长闪长岩; 4—闪长岩;
5—花岗闪长(斑)岩; 6—二长花岗(斑)岩; 7—石英岩; 8—二长辉长岩; 9—二长
闪长岩; 10—二长岩; 11—石英二长岩; 12—正长岩; 13—副长石辉长岩;
14—副长石二长闪长岩; 15—副长石二长正长岩; 16—副长石正长岩;
17—副长深成岩; 18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

较一致,分布在0.282526~0.282624之间,平均值为0.282589, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中分布在-5.9~-2.4之间,平均值为-3.7,二阶段模式年龄($T_{2\text{DM}}$)在1558~1338Ma之间,平均值为1417Ma。15号继承锆石核初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.282453, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为4.8,一阶段模式年龄($T_{1\text{DM}}$)为1130Ma,二阶段模式年龄($T_{2\text{DM}}$)为1355Ma。

5 讨论

5.1 成岩年龄

幕阜山复式岩体最早的同位素年龄测定是在20世纪80年代区域地质调查时完成的,其中报道有南江桥附近的铷锶(全岩)同位素年龄样品等时线年龄为 $189 \pm 29.7\text{Ma}$,黄龙山岩体的白云母K-Ar年

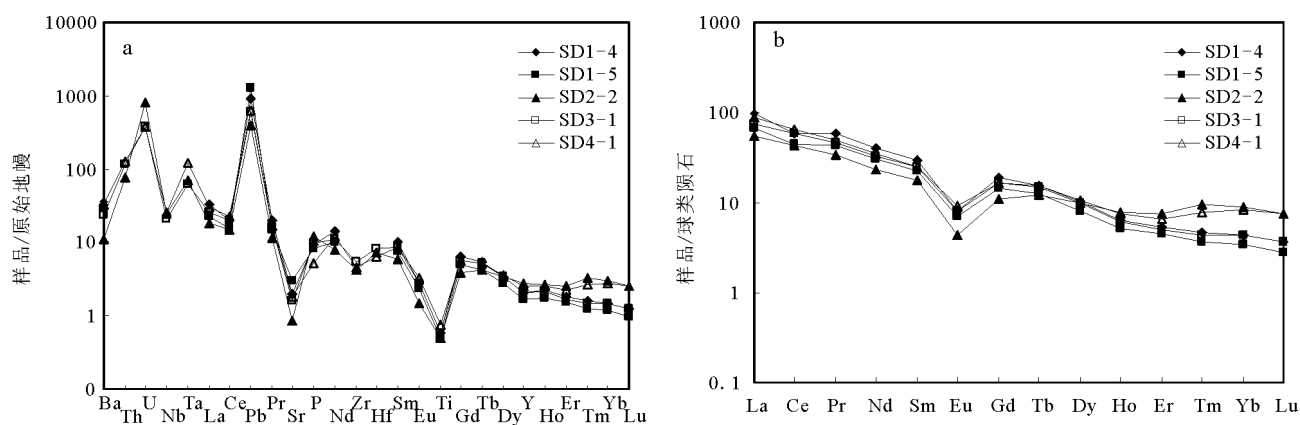


图6 花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化模式图(b)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) of the granite

表3 锆石 Lu-Hf 同位素分析结果
Table 3 Lu-Hf isotope data of zircons

分析点	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值	2σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值	2σ	t/Ma	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM}/Ma	$T_{2\text{DM}}/\text{Ma}$	f_{LuHf}
1	0.282554	0.000018	0.000975	0.000003	0.026140	0.000080	131.9	-4.9	988	1496	-0.97
2	0.282570	0.000017	0.000971	0.000008	0.025686	0.000242	131.9	-4.4	966	1460	-0.97
4	0.282526	0.000021	0.000974	0.000004	0.025628	0.000105	131.9	-5.9	1028	1558	-0.97
6	0.282584	0.000016	0.000732	0.000009	0.019666	0.000251	131.9	-3.8	939	1426	-0.98
7	0.282605	0.000019	0.000830	0.000020	0.021906	0.000564	131.9	-3.1	912	1380	-0.98
8	0.282600	0.000014	0.001043	0.000011	0.027627	0.000318	131.9	-3.3	925	1392	-0.97
9	0.282597	0.000019	0.000897	0.000002	0.024262	0.000049	131.9	-3.4	926	1399	-0.97
10	0.282624	0.000016	0.001042	0.000014	0.027703	0.000383	131.9	-2.4	890	1338	-0.97
11	0.282614	0.000028	0.001068	0.000004	0.029513	0.000140	131.9	-2.8	906	1361	-0.97
12	0.282588	0.000017	0.000782	0.000004	0.020700	0.000127	131.9	-3.7	935	1418	-0.98
13	0.282616	0.000016	0.001003	0.000014	0.026896	0.000377	131.9	-2.7	901	1355	-0.97
15	0.282453	0.000018	0.000985	0.000004	0.023484	0.000117	749.5	4.8	1130	1355	-0.97
16	0.282575	0.000015	0.000511	0.000002	0.013413	0.000053	131.9	-4.1	946	1445	-0.98
17	0.282595	0.000019	0.001079	0.000005	0.028965	0.000139	131.9	-3.4	932	1403	-0.97
18	0.282541	0.000021	0.000971	0.000006	0.025835	0.000161	131.9	-5.4	1006	1524	-0.97
19	0.282619	0.000021	0.000940	0.000002	0.024897	0.000063	131.9	-2.6	896	1349	-0.97
20	0.282613	0.000016	0.001165	0.000002	0.031296	0.000053	131.9	-2.8	910	1364	-0.96

龄为 139Ma^{②③}, 由于当时条件制约, 存在同位素年龄精度不高的问题。锆石中 Pb 的扩散封闭温度高达 900℃^[17], 是目前测定岩浆结晶年龄最理想的矿物之一, 锆石结晶年龄代表了岩石成岩年龄^[10]。本次选取与成矿关系密切的燕山晚期第一次侵入体开展锆石 LA-ICP-MS 定年工作, 获得了燕山晚期第一次侵入体花岗岩的年龄为 131.9±1.1Ma, 为准确限定幕阜山岩体燕山晚期第一次侵入体的年龄提供了重要的年代学依据。

本次工作发现了新元古代继承锆石核的存在, 其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 749.5Ma, 与前人研究一致, 表明湖南地区的中酸性岩体中存在新元古代一新太古代继承锆石核^[18-20]。

5.2 物质来源

近年来的研究发现, 锆石原位 Hf 同位素分析是揭示地壳演化和示踪岩浆源区的重要手段^[21]。三墩铜铅锌矿区花岗岩燕山晚期锆石的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282526~0.282624, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -5.9~-2.4 (图 7-a), Hf 同位素二阶段模式年龄在 1558~1338Ma 之间。在 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图 (图 7-b) 上, 花岗岩样品燕山晚期锆石测点均落在球粒陨石和下地壳演化线之间, 表明其物

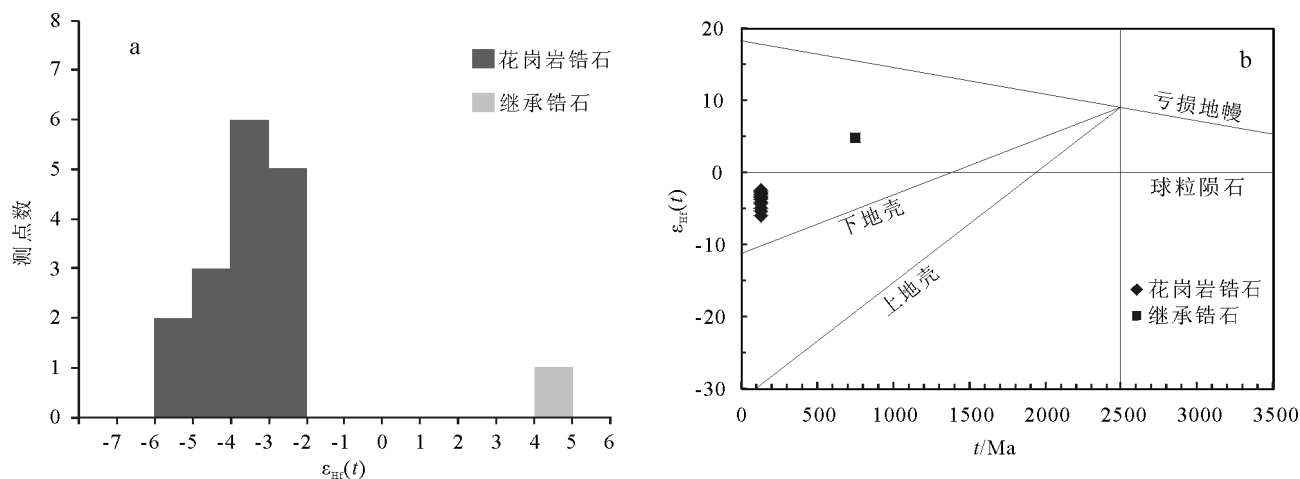
质来源为中元古代古老地壳岩石部分熔融。

继承锆石核的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282453, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 4.8, 二阶段模式年龄 ($T_{2\text{DM}}$) 为 1355Ma, 投影点落在亏损地幔和球粒陨石之间, 表明其岩浆源区为直接源于亏损地幔分异的新生地壳的迅速重熔, 新生地壳年龄为中元古代。

综合证据表明, 花岗岩主要物质来源为中元古代地壳岩石的部分熔融, 岩浆源区或上升通道可能有新元古代幔源物质加入。燕山晚期锆石和继承锆石的二阶段模式年龄都为中元古代, 指示中元古代是该区重要的地壳生长阶段。

5.3 构造背景

钦杭成矿带是一条巨型的构造岩浆活动带, 学者们普遍认为其在新元古代完成了拼接, 但在中侏罗世又复活^[22-23]。中侏罗世是一个重要的构造转折期, 华南乃至中国东部发生了特提斯体制向太平洋体制的转变, 随着太平洋板块持续俯冲, 华南板块受到强烈挤压, 地壳缩短加厚, 产生一系列北东向断裂, 原先不活动的断裂又重新活动; 大约在早白垩世太平洋板块运动方向由原来的斜俯冲转向几乎平行大陆边缘运动, 中国大陆乃至东亚大陆边

图7 花岗岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 直方图(a)和Hf同位素演化图解(b)Fig. 7 Histograms of $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (a) and Hf isotopic diagram (b) of zircons from the granite

缘转换为伸展阶段,区域上对应出现了基性岩浆活动,代表性的有蕉溪岭煌斑岩,其成岩年龄在136Ma左右^[24]。沿钦杭结合带,是构造相对薄弱的古板块拼接带,由于强烈挤压活化,壳幔相互作用更加活跃,致使钦杭成矿带成为华南中生代大规模岩浆活动和成矿作用最集中的地区^[2,22]。

前人研究表明,岩石圈减薄和软流圈上涌是华南中生代岩浆作用形成的主要机制^[25-28],笔者认为,太平洋板块的运动方式制约了华南中生代大规模的岩浆活动和成矿作用,其中中晚侏罗世受太平洋板块挤压加厚的中下地壳发生部分熔融,局部出现岩石圈垮塌,形成大量火山岩浆活动;早白垩世太平洋板块运动方向发生转向,发生了强烈挤压向伸展的构造转换,出现大规模的岩石圈减薄和软流圈上涌事件,加速了中下地壳的熔融,爆发了大规模岩浆活动和成矿作用,幕阜山岩体燕山晚期第一次侵入体就是其成岩事件爆发的响应。三墩铜铅锌矿区花岗岩岩石地球化学特征具有壳源特征,Hf同位素特征表明,其主要物质来源为中元古代地壳岩石的部分熔融,在岩浆熔融的过程中有少量幔源物质的加入。三墩铜铅锌矿区花岗岩可能是由于中下地壳的部分熔融岩浆形成后,混入少量幔源物质上侵形成的。

6 结 论

(1)通过对LA-ICP-MS锆石U-Pb定年,获得了三墩铜铅锌矿区幕阜山岩体燕山晚期第一次侵

入体的年龄加权平均值为 $131.9 \pm 1.1\text{Ma}$,成岩年龄为燕山晚期,继承锆石核的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为749.5Ma,暗示区内可能存在新元古代岩浆活动。

(2)通过岩石地球化学研究,确定三墩铜铅锌矿区花岗岩为一套强过铝质高钾钙碱性系列花岗岩,富U、Ta、Pb等元素,贫Ba、Nb、Sr、Zr、Ti。具有向右倾斜的稀土元素配分模式,富集轻稀土元素,重稀土元素分布平坦,具弱负Eu异常。

(3)结合Hf同位素分析,确定三墩铜铅锌矿区花岗岩物质来源主要为中元古代地壳物质重熔,并混入少量的幔源物质。其成岩可能是在大范围的岩石圈伸展背景下,发生了岩石圈拆离、软流圈上涌,中下地壳加热,部分熔融形成花岗岩浆上侵。

致谢:武汉地质调查中心付建明研究员和王磊副研究员在论文撰写过程中给予了帮助,西北大学戴梦玲博士对Hf同位素实验给予了支持,审稿专家对论文提出了宝贵意见,一并致谢。

参考文献

- [1]杨明桂,梅勇文.钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. 华南地质与矿产, 1997, (3): 52-59.
- [2]徐德明,蒯志永,龙文国,等.钦杭成矿带的研究历史和现状[J]. 华南地质与矿产, 2012, 28(4): 277-289.
- [3]张鲲,徐德明,胡俊良.湖南桃林铅锌矿区花岗岩地球化学特征及其与成矿的关系[J]. 华南地质与矿产, 2012, 28(4): 307-314.
- [4]路远发. Geokit: 一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.

- [5] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [6] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1&2): 537-571.
- [7] Ludwig K R. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 2003, 39.
- [8] 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素[J]. *科学通报*, 2004, 49: 1403-1410.
- [9] Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS[J]. *Chem. Geol.*, 2008, 247: 100-118.
- [10] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [11] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to chemical classification classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8:532-548.
- [12] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Sci. Rev.*, 1994, 37:15-224.
- [13] Peceerillo R, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1976, 58:63-81.
- [14] Green T H, Pearson N J. An experimental study of Nb and Ta partitioning between Ti-rich minerals and silicate liquids at high pressure and temperature[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1987, 51:55-62.
- [15] Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical process in the crust-mantle system[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120:347-359.
- [16] Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. *Chemical Geology*, 2000, 165:195-213.
- [17] Cherniak D J, Watson E B. Pb diffusion in zircon[J]. *Chemical Geology*, 2000, 172: 5-24.
- [18] 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 湖南骑田岭岩体东缘菜岭岩体的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. *中国地质*, 2004, 33(1): 96-100.
- [19] 马铁球, 柏道远, 邝军, 等. 湘东南茶陵地区锡田岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. *地质通报*, 2005, 24(5):415-419.
- [20] 朱金初, 张佩华, 谢才富, 等. 桂东北里松花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因[J]. *地球化学*, 2006, 35(5):506-51.
- [21] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185-220.
- [22] 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. *地质学报*, 2011, 85(5):636-658.
- [23] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 2008, 23(10): 2329-2338.
- [24] 贾大成, 胡瑞忠, 卢焱, 等. 湘东北蕉溪岭富钠煌斑岩地球化学特征[J]. *岩石学报*, 2002, 18(4):459-467.
- [25] 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. *地球化学*, 1997, 26(2): 14-31.
- [26] 郭峰, 范蔚茗, 林舸, 等. 湖南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨[J]. *科学通报*, 1997, 42(15): 1661-1664.
- [27] 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 湖南九嶷山复试花岗岩体 SHRIMP 锆石定年及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(4): 370-378.
- [28] 魏道芳, 鲍征宇, 付建明. 湖南铜山岭花岗岩体的地球化学特征及锆石 SHRIMP 定年[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(4): 482-489.
- ①徐德明, 张鲲, 蒯志永, 等. 钦杭成矿带(西段)重要金属矿床成矿规律及找矿方向研究. 2015.
- ②湖南省地质局 402 地质队. 1:20 万平江幅区域地质调查. 1977.
- ③湖南省地质局 402 地质队. 1:5 万虹桥幅区域地质调查. 1988.
- ④赵小明, 张开明, 毛新武, 等. 中南地区矿产资源潜力评价成矿地质背景研究报告, 2013.