

江西彭山锡多金属矿集区隐伏花岗岩体的岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成*

罗兰¹ 蒋少涌^{1**} 杨水源¹ 赵葵东¹ 汪石林² 高文亮²

LUO Lan¹, JIANG ShaoYong^{1**}, YANG ShuiYuan¹, ZHAO KuiDong¹, WANG ShiLing² and GAO WenLiang²

1. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093

2. 江西地质矿产勘查开发局 916 地质勘查大队, 九江 332000

1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2. No. 916 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangxi Province, Jiujiang 332100, China

2010-07-10 收稿, 2010-08-21 改回.

Luo L, Jiang SY, Yang SY, Zhao KD, Wang SL and Gao WL, 2010. Petrochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotopic composition of the granitic pluton in the Pengshan Sn-polymetallic orefield, Jiangxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2818–2834

Abstract In this study, we carried out a comprehensive research including zircon U-Pb dating and Hf isotopic composition analysis, and petrochemistry on the granite related to the Huangjinwa tin deposit in Pengshan Sn-polymetallic orefield, Jiangxi Province, China. SHRIMP and LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology indicated that the Pengshan granitic pluton emplaced at 128 ~ 129Ma. Chemical analyses show the Pengshan granite has high SiO₂ (SiO₂ = 75.42% ~ 76.46%), high alkaline (Na₂O + K₂O = 7.93% ~ 8.35%, K₂O/Na₂O = 1.32 ~ 1.61) contents, low Mg and Ca (MgO = 0 ~ 0.07%, CaO = 0.37% ~ 0.69%), weakly peraluminous (A/CNK = 1.04 ~ 1.11), enriched in LILEs such as Rb, Th, U, and HFSEs such as Hf and Nb, and depleted in Sr, Ba, Eu, P, and Ti. The rocks also display low total REE contents ($\sum \text{REE} = 41.18 \times 10^{-6} \sim 85.06 \times 10^{-6}$) with strong negative Eu anomalies (Eu/Eu* = 0.05 ~ 0.11). The 10⁴ × Ga/Al ratios vary from 2.75 to 4.04, averaging 3.19. These characteristics indicate that the Pengshan granite is different from typical S-type or A-type granites. Overall, our integrated petrological and geochemical data suggest that the rocks are highly fractionated I-type granite. Zircon Hf isotope analyses show relatively homogeneous Hf isotopic compositions, with $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values from -0.6 to -4.5, which are higher than many of the granites in South China, and may indicate a significant involvement of mantle component in petrogenesis. The granite was likely generated via crust-mantle interaction during Late Yanshanian lithosphere extension events in South China.

Key words Pengshan granites; zircon U-Pb dating; Hf isotopic compositions; Petrogeochemistry; Highly fractionated I-type granite; Crust-mantle interaction

摘要 本文对江西彭山锡多金属矿集区隐伏花岗岩体进行了详细的锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成和岩石地球化学研究。SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年表明, 该岩体年龄为 128 ~ 129Ma, 属燕山晚期岩浆活动的产物。详细的地球化学分析显示, 彭山隐伏花岗岩体具有高硅(SiO₂ = 75.42% ~ 76.46%)、富碱(Na₂O + K₂O = 7.93% ~ 8.35%, K₂O/Na₂O = 1.32 ~ 1.61)的特征, 极度贫 Mg(普遍 MgO = 0 ~ 0.07%), 贫 Ca(CaO = 0.37% ~ 0.69%), 弱过铝质(A/CNK = 1.04 ~ 1.11), 富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素及 Hf、Nb 等高场强元素, 强烈亏损 Sr、Ba、Eu、P、Ti。稀土总量偏低($\sum \text{REE} = 41.18 \times 10^{-6} \sim 85.06 \times 10^{-6}$), 强烈的 Eu 负异常(Eu/Eu* = 0.05 ~ 0.11)。10⁴ × Ga/Al 比值变化于 2.75 ~ 4.04, 平均值为 3.19。这些特征均不同于典型的 A 型和 S 型花岗岩。岩石学和地球化学特征指示该岩体可能是一个高分异的 I 型花岗岩。该花岗岩中锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值偏高, 主要集中在 -0.6 ~ -4.5, 显示在成岩过程中有地幔组分的参与, 属壳幔混源花岗岩, 推测该岩体的形成可能与燕山

* 本文受国家自然科学基金项目(41072055)和江苏省科学基金重点项目(BK2008026)联合资助。

第一作者简介: 罗兰, 女, 1985 年生, 硕士研究生, 矿床学专业

** 通讯作者: 蒋少涌, 男, 1964 年生, 教授, 矿床学和地球化学专业, E-mail: Shyjiang@nju.edu.cn

晚期华南岩石圈伸展拉张环境有关。

关键词 彭山隐伏花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素组成; 岩石地球化学; 高分异 I 型花岗岩; 壳幔相互作用

中图分类号 P588.121

1 引言

长江中下游地区是我国东部最重要的铁、铜、金多金属成矿带,由西向东分为鄂东南、九瑞(九江-瑞昌)、安庆-贵池、庐枞(庐江-枞阳)、铜陵、宁芜、宁镇等七个大型矿集区,区内斑岩、矽卡岩型矿床主要是与燕山期中酸性侵入岩有关(常印佛等,1991;翟裕生等,1992;唐永成等,1998;周涛发等,2008,2010)。

彭山锡多金属矿集区位于长江中下游成矿带的九瑞铜多金属矿集区的南部,区内以锡铅锌矿的成矿为特色,是一个近年来才取得重大找矿突破的新的矿集区,初步预测全区锡金属资源总量可达 30×10^4 t,铅锌金属资源远景在 150×10^4 t 以上(卢树东等,2004a),可望成为我国又一处超大型锡、铅锌多金属资源基地。由于区内燕山期花岗岩底劈穹窿构造,形成了以彭山隐伏岩体为主,各种矿产如黄金洼锡矿、张十八铅锌矿、葛洪山铅锌矿、坡西层状氧化锡矿等围绕其分布的一种格局(卢树东等,2004b)。前人对该岩体进行过初步研究,获得全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 128 ± 4 Ma(马长信,1989),并根据地球化学特征认为其属于典型的 S 型花岗岩(马长信,1989;刘南庆,1995;卢树东等,2004c)。本文着重以黄金洼锡矿区内隐伏花岗岩为研究对象,运用高精度的离子探针质谱(SHRIMP)和激光等离子质谱(LA-ICP-MS)等方法对该花岗岩进行了锆石 U-Pb 定年,锆石 Hf 同位素组成以及岩石地球化学的研究,以深入探讨其成因类型及物质来源。

2 地质背景

彭山锡多金属矿集区在江西省德安县境内,大地构造位于扬子板块与华夏板块交接地带——钦杭结合带北部边缘,偏扬子板块一侧(图1)。彭山作为九瑞地区的一个重要组成部分,在近年开展的国土资源大调查项目中取得一系列成果,相继发现了黄金洼锡矿、张十八铅锌矿、尖峰坡锡矿等一批大中型矿床。

彭山地区构造分为深部的基底构造与浅部的盖层构造:基底构造主要呈 NE 与 NW 向分布(李启全和罗健雄,1997);而盖层则以穹窿构造为主,由彭山穹窿褶皱、环弧状层间重力滑动断裂、放射状断裂组成(卢树东等,2004a)(图1)。燕山晚期大规模岩浆上侵的通道以基底断裂与盖层断裂交汇处为主。区内岩浆岩种类众多,主体隐伏花岗岩体位于彭山穹窿构造北部近轴部的转折位置,平面 NE 向延伸,区内数十处锡、铅、锌等多金属矿床均产于隐伏花岗岩体的内

外接带,形成了一种“晕圈式”的格局。在江西省北部德安彭山、永修云山、修水香炉山、上高蒙山、景德镇高台山等地,分布着一系列大小不等的花岗岩底劈穹窿构造,并与锡、钨、锌、铋等矿床关系密切(马长信,1989)。

本研究以彭山矿集区中黄金洼锡矿为主要对象,该研究区位于彭山穹窿构造的北西转折端,地层发育较为齐全,如图1所示由南东向北西,由老至新地层依次出露:寒武系下统观音堂组(ϵ_{1g})为一套碎屑岩建造组成,砂岩和泥质岩石组成互层;中统杨柳岗组(ϵ_{2y})、上统华严寺组西阳山组(ϵ_{3h} , ϵ_{3x})、奥陶系下统仑山组(O_{11})下段在区内广泛分布,为碳酸盐地层(卢树东等,2006);第四系主要分布于黄金洼低地低洼处。由于该区隐伏花岗岩体在地表并未出露,经大量钻探及坑探才得以揭露,分别在钻孔 1002 与钻孔 801 下 350.6m 与 406.77m 采集到花岗岩样品。

3 样品与分析方法

8 件花岗岩样品均取自黄金洼锡矿区钻孔中。手标本呈灰色,电子显微镜背散射及显微镜下观察表明样品具有花岗结构(图2a-d),局部见有石英与钾长石构成文象结构。主要矿物有黑云母(5%~10%)、斜长石(20%~30%)、钾长石(30%~40%)、石英(30%~35%),副矿物有锆石、磁铁矿、榍石等。其中钾长石有不同程度泥化,见有微斜长石发育的格子双晶,偶尔见文象结构。黑云母遭受不同程度的绿泥石化或绢云母化,斜长石有小部分发生绢云母化及泥化现象,岩体中有时还出现少量白云母,白云母形态多为半自形-他形,主要呈细小鳞片状分布与黑云母呈反应关系等,应该属于次生白云母。

本文选取了钻孔 ZK801 和 ZK1002 花岗岩样品各四个进行了岩石地球化学的分析,并选取 ZK801-12 和 ZK1002-12 两个样品进行锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素组成分析。

用于锆石年代学测试的花岗岩样品,全岩逐级分选破碎,小于 100 目的粉尘经水淘洗、电磁分选,最后在双目镜下挑选晶形完好、透明度和光泽度好的锆石颗粒,用环氧树脂固定于样品靶上,经研磨抛光,具体制靶方法参考北京离子探针中心实验室提供的方法(宋彪等,2002a),ZK801-12 样品锆石在北京离子探针中心拍摄反射光、透射光、阴极发光(CL)图像,锆石 U-Pb 年龄测试在该中心的 SHRIMP II 上完成,用澳大利亚地调局标准锆石 TEM(417Ma)进行元素间的分馏校正。详细分析流程和原理参考 Compston *et al.* (1984)、宋彪等(2002b)。

ZK1002-12 样品锆石,在西北大学大陆动力学国家重点实验室拍摄反射光、透射光、阴极发光(CL)图像后,在南京

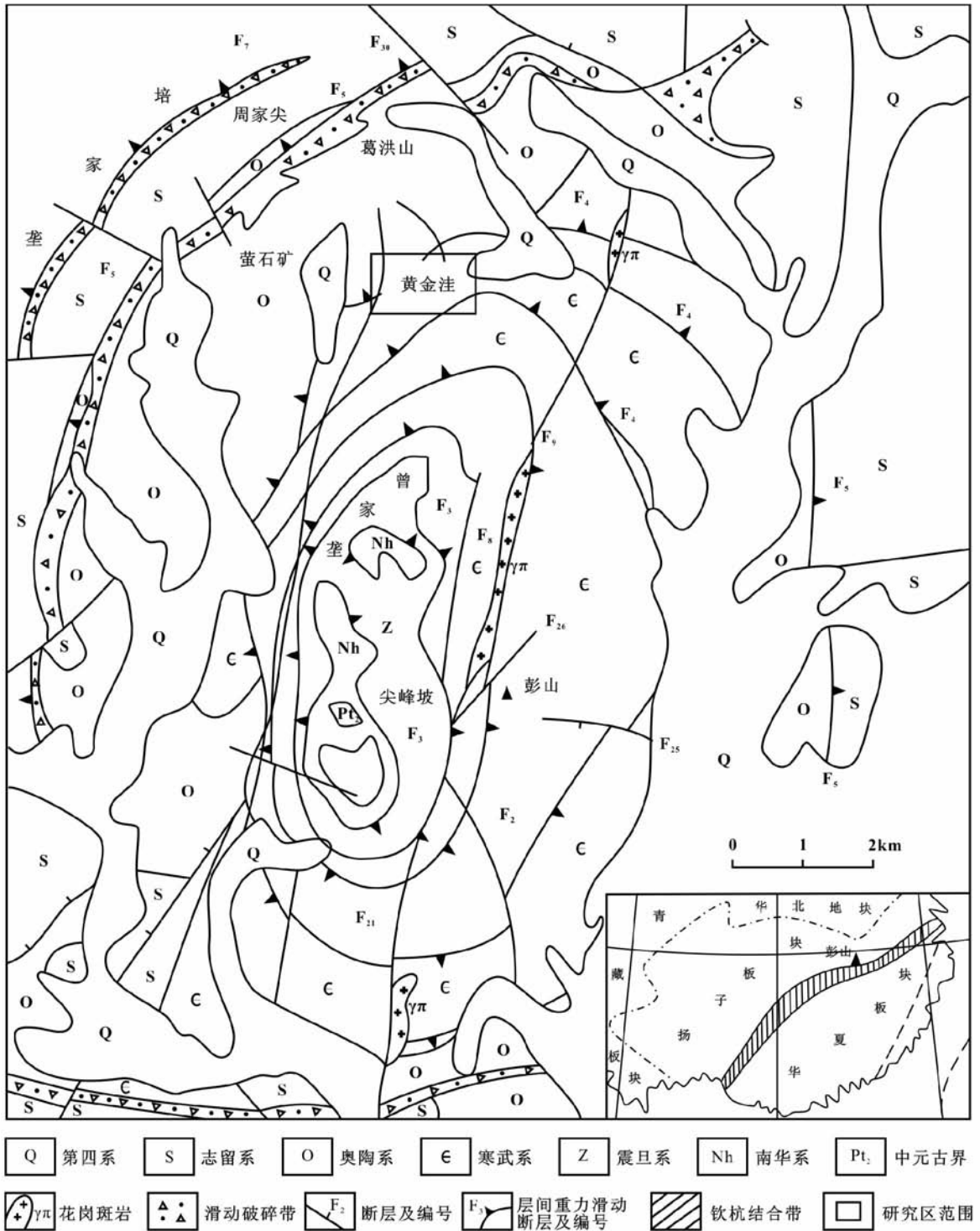


图 1 彭山地质构造及矿产分布略图(据卢树东等, 2006)

Fig. 1 Map of geological structure and distribution of mineral deposits in Pengshan area (after Lu *et al.*, 2006)

大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室用 LA-ICP-MS 进行测试。激光剥蚀系统为 New Wave 公司生产的 UP213 固体激光剥蚀系统, ICP-MS 型号为 Agilent 7500a 型, 采用 He 气作为剥蚀物质的载气, 通过直径 3mm 的 PVC 管将剥蚀物质传送到 ICP-MS, 并在进入 ICP-MS 之前与 Ar 气混

合, 形成混合气。质量分馏校正采用标样 GEMOC/GJ-1 (608Ma), 每组样品包括一个已知年龄锆石 Mud Tank (735Ma)。数据处理采用 Ludwig SQUID1.0 (Ludwig, 2001) 及 ISOPLOT 程序(Ludwig, 2003)。

对做过 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的两个样

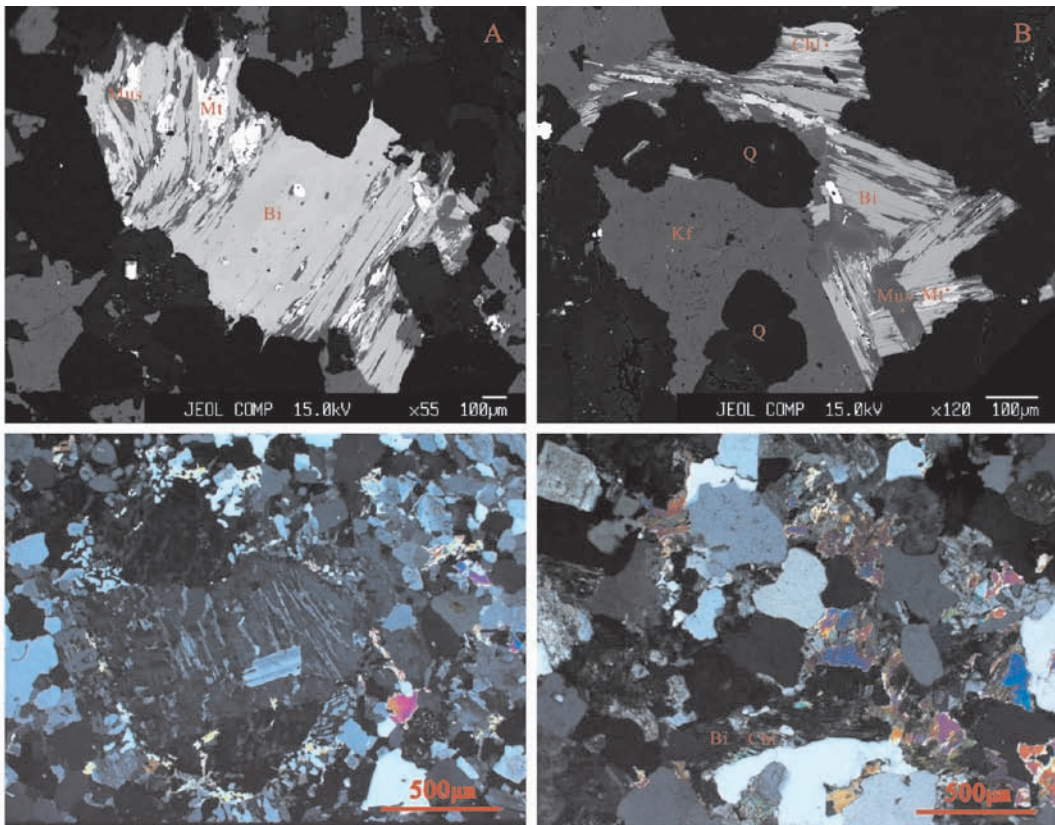


图2 彭山岩体代表性显微照片

(a)-ZK801-12 号样品,黑云母绢云母化作用;(b)-ZK801-12 号样品,黑云母发生绿泥石化和绢云母化作用;(c)-ZK801-16 号样品,见石英与钾长石构成文象结构;(d)-ZK1002-12 号样品,花岗结构,绿泥石化黑云母

Fig.2 Photomicrographs showing typical mineral association and texture of the Pengshan granites

(a)-Biotite with slight alteration of sericite in sample ZK801-12; (b)-Biotite with slight alteration of chlorite and sericite in sample ZK801-12; (c)-quartz and K-feldspar intergrowth in sample ZK1002-12; (d)-granitic texture, chloritization in sample ZK1002-12

品,在中国地质科学院矿产资源所实验室用 LA-MC-ICP-MS 进行了原位的 Hf 同位素组成分析,激光剥蚀器型号为 New Wave 公司生产的 UP213 固体激光剥蚀系统,MC-ICP-MS 型号为 Finnigan Neptune,相关仪器的测试条件及详细分析流程可见参考文献(侯可军等,2007)。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,将剥蚀物质从激光探针传送到 MC-ICP-MS 之前与 Ar 混合,形成混合气。根据锆石大小,剥蚀直径采用 40 μm 或 55 μm 。在本次测试中,使用锆石国际标样 GJ-1 作为参考物质,其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 0.282015 ± 0.000025 (2SD, $n = 10$),在误差范围内与文献报道一致: 0.282015 ± 0.000019 ; 0.282008 ± 0.000025 (Elhlou *et al.*, 2006; 侯可军等,2007)。

全岩主量元素分析在南京大学现代分析中心采用 XRF (X 射线荧光光谱仪,仪器型号为 ARI-9800) 完成,分析误差优于 0.5%。微量元素在南京大学内生金属矿床成矿机制研究重点实验室完成,分析采用 HR-ICP-MS (型号为 Finnigan Element II),相对标准偏差优于 10% (高剑峰等,2003)。

4 分析结果

4.1 花岗岩形成时代

彭山隐伏花岗岩体样品 ZK801-12 和 ZK1002-12 锆石 U-Pb 定年结果列于表 1 和表 2,图 3(a, b) 分别显示了锆石的阴极发光 (CL) 照片及 U-Pb 定年的分析点和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值。样品 ZK801-12 和 ZK1002-12 锆石结晶较好,透明度较高,长柱状,一般长 100 ~ 300 μm ,宽 50 ~ 100 μm ,长/宽比约 2 : 1 ~ 4 : 1,图 3 的阴极发光照片显示其具有很好的振荡环带,为典型的岩浆结晶锆石。样品 ZK801-12 锆石 Th/U 比值变化在 0.05 ~ 1.00,大部分都大于 0.1,ZK1002-12 锆石 Th/U 比值为 0.12 ~ 0.49,均属于岩浆锆石范围 (Belousova *et al.*, 2002)。

样品 ZK801-12 锆石共分析了 22 个点(表 1),除两个点打在残留锆石上给出较老的年龄 (1603Ma 和 2137Ma) 外,其余 20 个点的年龄比较一致, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化在 122 ~ 132Ma 之间,也全落在 U-Pb 年龄谐和图上(图 4a),给出加权

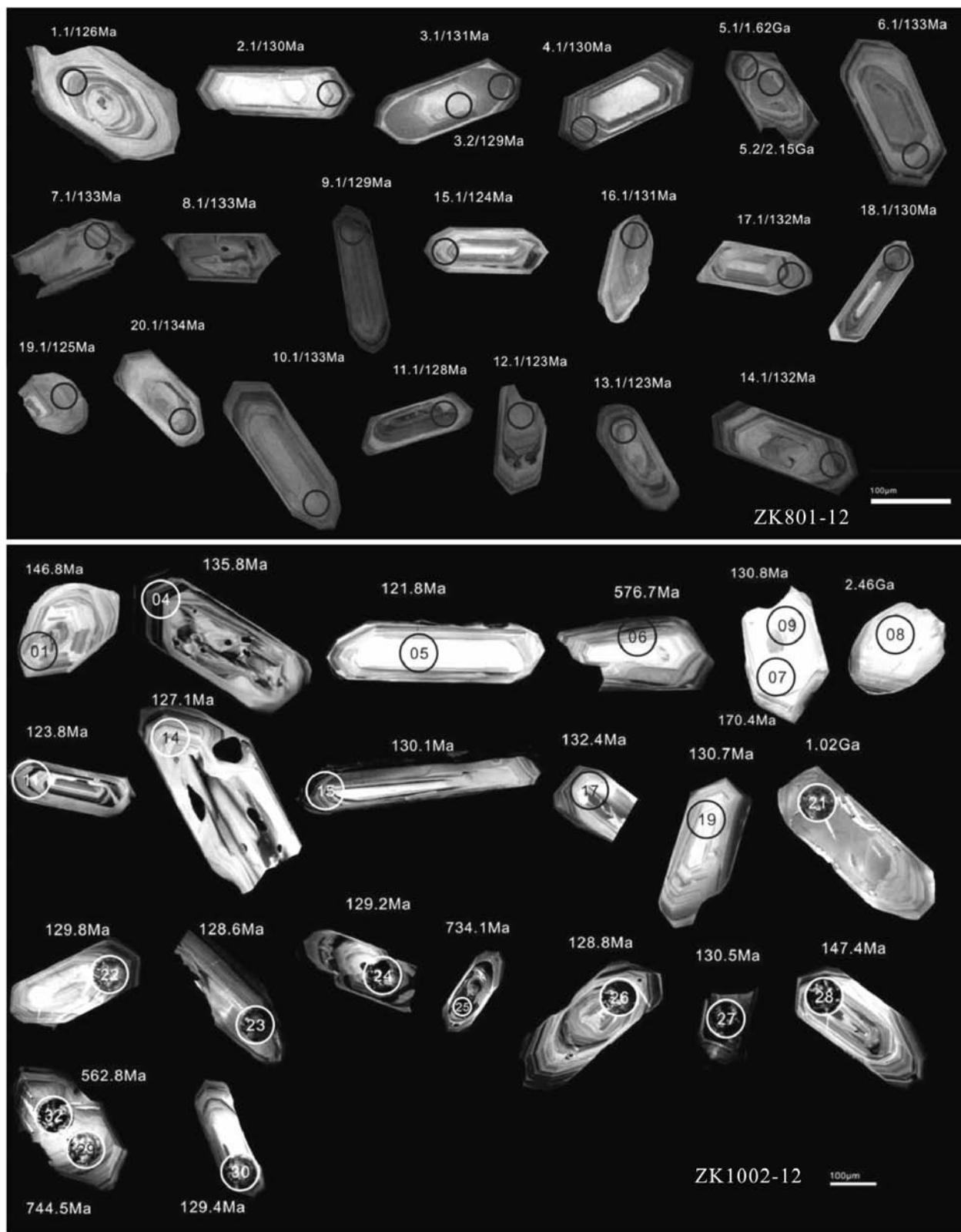


图3 彭山花岗岩锆石阴极发光(CL)照片

图中标出了 U-Pb 定年测试的点位及相应结果

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of selected zircon grains from the Pengshan granites

表 1 ZK801-12 样品锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果

Table 1 SHRIMP U-Pb dating results of zircons for the Pengshan granite sample ZK801-12

测点号	²³² Th (×10 ⁻⁶)	²³⁸ U (×10 ⁻⁶)	Th/U	年龄 (Ma)					
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ
ZK801-12-1.1	55	204	0.28	192	77	125.1	2.3	134.7	5.2
ZK801-12-2.1	98	262	0.39	51	73	129	2.4	129.3	6.1
ZK801-12-3.1	67	769	0.09	43	42	131.2	2.3	124.3	5.2
ZK801-12-3.2	38	273	0.14	123	100	124.7	2.4	104	11
ZK801-12-4.1	113	856	0.14	135	39	130.8	2.3	119.8	4
ZK801-12-5.1	139	417	0.34	2,365.6	6.3	1,603	25	1,534	29
ZK801-12-6.1	67	383	0.18	24	65	129.4	2.3	121.5	5.3
ZK801-12-7.1	112	381	0.30	14	66	129.9	2.4	126.0	4.1
ZK801-12-8.1	106	918	0.12	50	46	128.0	2.2	117.6	5.8
ZK801-12-9.1	120	401	0.31	242	76	126.0	2.3	136.5	4.2
ZK801-12-10.1	91	127	0.74	186	93	131.7	2.6	132.2	4.4
ZK801-12-11.1	70	968	0.07	70	38	126.3	2.2	132.4	5
ZK801-12-12.1	49	182	0.28	215	78	122.1	2.3	123.8	9.1
ZK801-12-13.1	136	140	1.00	193	95	127.1	2.5	133.7	4.5
ZK801-12-14.1	130	855	0.16	175	39	130.8	2.3	134.3	3.9
ZK801-12-15.1	146	253	0.60	197	68	124.0	2.3	127.4	3.6
ZK801-12-16.1	73	379	0.20	144	60	131.9	2.4	137.4	4.9
ZK801-12-17.1	103	547	0.19	156	46	129.9	2.3	129.2	3.9
ZK801-12-18.1	67	1281	0.05	169	29	127.4	2.2	138.0	4.9
ZK801-12-5.2	139	317	0.45	2,502.3	7.4	2,137	34	2,103	40
ZK801-12-19.1	78	199	0.41	54	98	124.8	2.3	121.2	5
ZK801-12-20.1	82	395	0.21	226	57	130.6	2.3	131.3	4.9

表 2 ZK1002-12 样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb dating results of zircons for the Pengshan granite sample ZK1002-12

测点号	²³² Th (×10 ⁻⁶)	²³⁸ U (×10 ⁻⁶)	Th/U	年龄 (Ma)							
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ
ZK1002-01	114	144	0.80	490	71	169	7	147	3	129	10
ZK1002-04	447	435	1.03	102	40	134	4	136	2	91	5
ZK1002-05	52	186	0.28	279	55	130	4	122	2	121	9
ZK1002-06	232	338	0.69	807	17	626	8	577	7	582	31
ZK1002-07	178	77	2.31	2661	150	465	31	148	4	129	3
ZK1002-08	90	122	0.74	2458	14	2460	16	2461	29	1836	110
ZK1002-09	162	66	2.45	588	113	158	11	131	3	109	11
ZK1002-11	274	481	0.57	177	37	127	3	124	2	118	10
ZK1002-14	307	225	1.36	248	59	133	5	127	2	111	8
ZK1002-15	141	344	0.41	59	51	126	4	130	2	118	10
ZK1002-17	378	471	0.80	233	27	138	3	132	2	109	5
ZK1002-19	129	212	0.61	107	72	130	6	131	2	95	7
ZK1002-21	218	245	0.89	1811	13	1302	12	1016	12	412	14
ZK1002-22	220	482	0.46	30	26	125	2	130	2	66	2
ZK1002-23	253	655	0.39	181	39	131	4	129	2	66	4
ZK1002-24	385	215	1.79	217	43	134	4	129	2	82	3
ZK1002-25	141	118	1.20	828	45	758	19	734	12	621	79
ZK1002-26	82	251	0.33	176	41	131	4	129	2	104	7
ZK1002-27	126	451	0.28	133	36	131	3	130	2	58	3
ZK1002-28	81	249	0.32	201	42	151	4	147	2	218	16
ZK1002-29	74	81	0.91	1485	95	941	29	725	10	696	9
ZK1002-30	278	487	0.57	159	36	131	3	129	2	67	4
ZK1002-32	64	87	0.73	1349	102	733	26	548	8	525	8

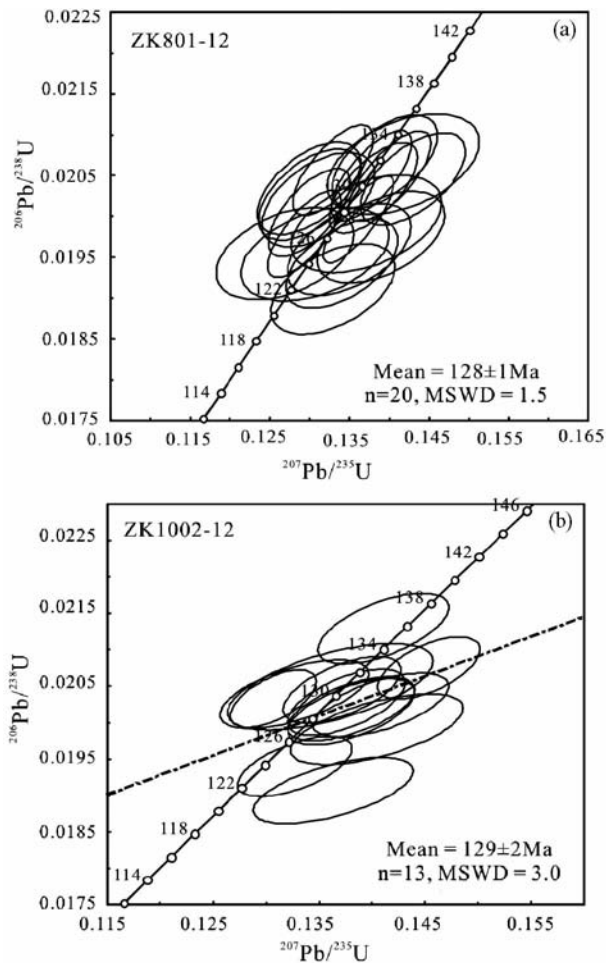


图4 彭山花岗岩锆石 U-Pb 谐和图
Fig. 4 U-Pb concordia plots of zircons from the Pengshan granites

平均年龄为 128 ± 1 Ma ($n = 20$, $MSWD = 1.5$)。

样品 ZK1002-12 锆石共分析了 23 个点(表 2), 样品中存在一些残留老锆石, 最老的一颗具有谐和的年龄, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2461Ma。年轻锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化在 122 ~ 132Ma 间, 加权平均值为 129 ± 2 Ma ($n = 13$, $MSWD = 3.0$) (图 4b)。

两个样品年龄一致, 代表了彭山隐伏花岗岩体的结晶年龄。

4.2 主量元素

表 3 列出彭山隐伏岩体代表性样品的主量元素含量, 以及由主量元素含量计算出的 CIPW 标准矿物及相关参数。该岩体具有以下特征: (1) 富 Si ($\text{SiO}_2 = 75.42\% \sim 76.46\%$), 极度贫 Mg (普遍 $\text{MgO} = 0 \sim 0.07\%$, 只有 ZK1002-13 样品为 0.21%), 贫 Ca ($\text{CaO} = 0.37\% \sim 0.69\%$), 在 TAS 图解(图 5a)中, 彭山隐伏岩体均落入花岗岩区域中, 分异指数高 ($DI = 93.31 \sim 94.95$), 反映岩体具有高分异演化的特

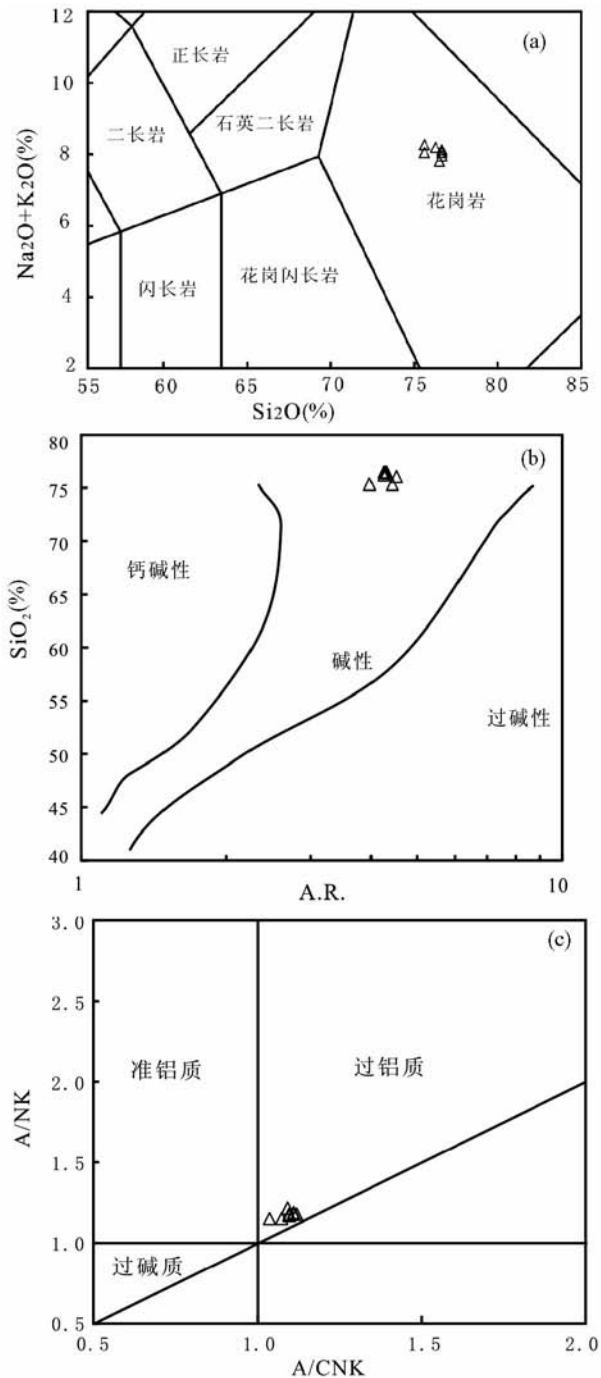


图5 岩石类型判别图解

(a)-侵入岩岩石类型 TAS 判别图解(据 Middlemost, 1994); (b)- SiO_2 vs. Alkalinity Ratio (AR) 图解(据 Wright, 1969); (c)-A/NK vs. A/CNK 图解

Fig. 5 Plot for rocks

(a)-TAS plot for plutonic rocks (after Middlemost, 1994); (b)- SiO_2 vs. Alkalinity Ratio (AR) plot (after Wright, 1969); (c)-A/NK vs. A/CNK plot

表 3 彭山花岗岩主量元素含量 (wt%)、CIPW 标准矿物及相关参数

Table 3 Major oxide compositions (wt%) with calculated CIPW-normative minerals and parameters for the Pengshan granites

样品号	ZK801-12	ZK801-13	ZK801-15	ZK801-16	ZK1002-12	ZK1002-13	ZK1002-16	ZK1002-20
SiO ₂	76.40	76.42	76.09	76.46	75.43	75.46	76.27	76.42
TiO ₂	0.10	0.10	0.12	0.10	0.13	0.14	0.13	0.13
Al ₂ O ₃	12.66	12.86	12.51	12.66	12.55	12.88	12.33	12.40
Fe ₂ O ₃	0.25	0.23	0.11	0.31	0.36	0.47	0.19	0.13
FeO	0.89	1.08	1.25	0.89	0.97	0.74	1.24	1.26
MnO	0.05	0.08	0.08	0.06	0.06	0.04	0.07	0.07
MgO	0.03	0.00	0.01	0.01	0.07	0.21	0.05	0.05
CaO	0.39	0.37	0.45	0.43	0.66	0.69	0.44	0.47
Na ₂ O	3.38	3.54	3.37	3.49	3.25	3.12	3.17	3.21
K ₂ O	4.77	4.66	4.90	4.66	5.10	5.03	4.76	4.82
P ₂ O ₅	0.08	0.08	0.06	0.07	0.07	0.08	0.06	0.06
LOI	0.70	0.59	0.72	0.60	0.92	0.98	0.89	0.94
Total	99.71	100.00	99.68	99.73	99.56	99.85	99.61	99.96
Q	37.59	36.83	36.32	37.30	35.54	36.54	38.33	37.79
Or	28.47	27.70	29.26	27.78	30.55	30.07	28.50	28.77
Ab	28.89	30.13	28.82	29.79	27.88	26.70	27.17	27.43
An	1.43	1.32	1.86	1.69	2.86	2.93	1.81	1.96
C	1.43	1.52	1.00	1.27	0.66	1.25	1.32	1.20
A. R.	4.33	4.26	4.53	4.30	4.44	4.01	4.28	4.32
K/N	1.41	1.32	1.45	1.34	1.57	1.61	1.50	1.50
AKI	0.85	0.85	0.87	0.85	0.87	0.82	0.84	0.85
A/CNK	1.11	1.11	1.07	1.09	1.04	1.09	1.10	1.09
DI	94.95	94.66	94.40	94.87	93.97	93.31	94.00	93.99

A. R. - 莱特碱度率; K/N = K₂O/Na₂O; AKI = (Na₂O + K₂O)/Al₂O₃ (分子比); A/CNK = Al₂O₃/(Na₂O + K₂O + Al₂O₃) (分子比); DI- 分异指数

征。(2) 碱含量较高, (Na₂O + K₂O) = 7.93% ~ 8.35%, 且相对富钾, K₂O/Na₂O 比值为 1.32 ~ 1.61。岩石的铝碱指数 (AKI 值) 为 0.82 ~ 0.87, 岩石的碱度率指数 (A. R.) 为 4.01 ~ 4.53, 在碱度率图解 (图 5b) 上, 样品均位于碱性区域内。按洪大卫等 (1987) 建议的碱性、偏碱性和钙碱性花岗岩 AKI 值分界线 (> 1.0, 0.9 ~ 1.0 和 < 0.9), 这些岩体可归属于偏碱性花岗岩。(3) 弱过铝质, 花岗岩 A/CNK 值变化范围为 1.04 ~ 1.11 (图 5c)。(4) 低 TiO₂ (0.10% ~ 0.14%) 和 P₂O₅ (0.06% ~ 0.08%), 表明岩浆经历了显著的钛铁矿、磷灰石等矿物的分离结晶作用。标准矿物计算结果表明, 该岩体岩石主要组成矿物为石英、钾长石与斜长石, 大多属于弱过铝质花岗岩。

4.3 稀土及微量元素

彭山隐伏花岗岩稀土元素及其他微量元素分析结果见表 4。由表 4 可以看出, 彭山花岗岩体稀土元素组成特征总体表现为稀土总量偏低, Σ REE = 41.18 × 10⁻⁶ ~ 85.06 × 10⁻⁶; 轻微富集轻稀土, LREE/HREE = 2.37 ~ 3.27, (La/Yb)_N = 1.24 ~ 2.24, 在球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线

(图 6a) 中, 总体呈现略微右倾的海鸥型特征, 所有样品均具有强烈的 Eu 负异常 (Eu/Eu* = 0.05 ~ 0.11)。微量元素蛛网图 (图 6b) 显示该岩体富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素及 Hf、Nb 等高场强元素, 而明显亏损 Ba、Sr、Ti 等元素。其中 Rb/Sr、Rb/Ba 比值分别为 8.46 ~ 49.79 和 7.00 ~ 42.28 (表 4), 指示岩体分异演化程度高。Eu、Ti 的亏损可能同斜长石和钛铁矿的分离结晶有关。上述微量和稀土元素相似于我国东北地区的高分异 I 型花岗岩 (Wu *et al.*, 2003)。

4.4 锆石 Hf 同位素

对 ZK801-12 和 ZK1002-12 样品中进行 U-Pb 定年的锆石相应地进行了 Hf 同位素的测定, 结果如表 5 和图 7。进行数据处理时, ¹⁷⁶Lu 的衰变常数采用 1.867 × 10⁻¹¹ a⁻¹ (Söderlund *et al.*, 2004), ε_{Hf}(t) 值的计算利用 (Bouvier *et al.*, 2008) 推荐的球粒陨石 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值 (0.282772) 及 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值 (0.0332), Hf 模式年龄计算时采用当前亏损地幔的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值 (0.28325) 和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值 (0.0384) (Griffin *et al.*, 2000), 采用的地壳参数 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值 (0.015) 及 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值 (0.015) (Amelin *et al.*, 1999)。

表4 彭山花岗岩微量元素和稀土元素含量 ($\times 10^{-6}$)Table 4 Results of trace and rare earth elements compositions for the Pengshan granites ($\times 10^{-6}$)

样品号	ZK801-12	ZK801-13	ZK801-15	ZK801-16	ZK1002-12	ZK1002-13	ZK1002-16	ZK1002-20
Ti	521	372	531	385	560	682	601	616
Zn	14.50	7.90	7.06	8.97	8.20	8.02	7.53	8.66
Ga	23.76	22.26	21.34	27.11	18.32	19.62	18.67	19.27
Rb	631	602	535	706	426	405	413	434
Sr	18	12	14	18	33	48	17	14
Y	15.1	15.9	19.8	19.2	24.9	25.2	24.8	24.2
Zr	74.9	65.8	71.9	70.6	82.4	77.4	96.4	101.7
Nb	27.0	22.3	23.3	29.8	23.0	20.2	21.4	21.8
Cs	26.75	25.82	20.47	25.51	12.81	13.68	15.71	17.35
Ba	33	14	34	23	38	58	32	32
La	6.26	5.07	9.09	6.60	9.22	9.69	12.74	12.43
Ce	16.56	13.76	23.20	17.32	23.09	23.59	30.25	28.77
Pr	2.03	1.74	2.77	2.08	2.79	2.78	3.65	3.51
Nd	7.29	6.31	10.39	7.89	10.51	10.53	13.97	13.29
Sm	2.27	2.07	2.98	2.55	3.06	2.99	3.81	3.61
Eu	0.06	0.03	0.07	0.05	0.10	0.13	0.08	0.10
Gd	2.21	2.07	2.94	2.57	3.29	3.20	3.89	3.62
Tb	0.51	0.51	0.68	0.62	0.72	0.74	0.85	0.78
Dy	3.21	3.35	4.32	4.14	4.96	4.96	5.63	5.17
Ho	0.60	0.64	0.85	0.83	1.03	1.02	1.17	1.06
Er	1.99	2.09	2.80	2.63	3.28	3.30	3.65	3.35
Tm	0.34	0.37	0.47	0.47	0.56	0.56	0.62	0.54
Yb	2.47	2.75	3.30	3.39	3.82	3.81	4.11	3.74
Lu	0.37	0.42	0.50	0.53	0.59	0.59	0.64	0.59
Hf	3.54	3.65	3.47	4.50	3.73	3.94	4.37	4.65
Ta	6.39	4.44	3.64	4.76	3.12	3.19	3.18	3.20
Pb	15.19	14.44	14.09	18.20	15.64	16.45	15.39	18.74
Th	14.93	14.26	14.48	15.47	14.03	14.81	16.36	16.34
U	15.59	21.96	12.33	24.49	14.45	14.06	13.40	14.90
Σ REE	46.15	41.18	64.37	51.66	67.03	67.90	85.06	80.57
LREE	34.47	28.97	48.49	36.48	48.78	49.71	64.50	61.71
HREE	11.68	12.21	15.88	15.18	18.25	18.19	20.56	18.85
LREE/HREE	2.95	2.37	3.05	2.40	2.67	2.73	3.14	3.27
Rb/Ba	19.18	42.28	15.53	30.57	11.19	7.00	12.79	13.65
Rb/Sr	34.72	49.79	37.69	40.16	12.78	8.46	23.94	31.69
(La/Yb) _N	1.71	1.24	1.86	1.31	1.63	1.71	2.09	2.24
Eu/Eu*	0.07	0.04	0.06	0.05	0.09	0.11	0.06	0.08
Ce/Ce*	1.12	1.12	1.11	1.13	1.10	1.09	1.07	1.05
T(°C) zircon	734	724	728	728	735	734	754	758

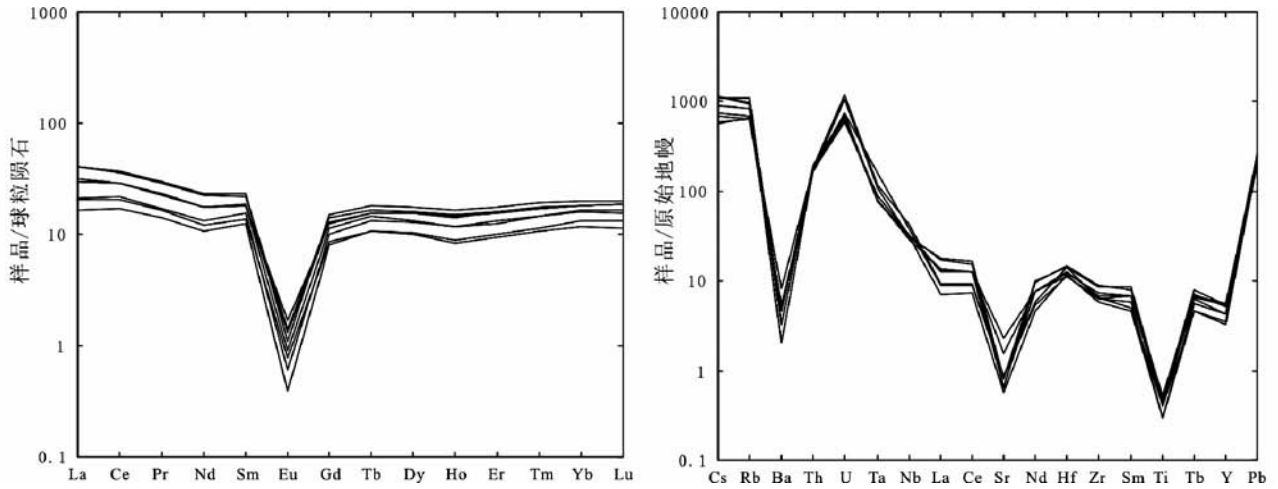


图 6 球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a,球粒陨石数据据 Boynton, 1984)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b,原始地幔数据据 McDonough *et al.*, 1992)

Fig. 6 Chondrite-normalized rare earth element patterns of the Pengshan granites (a, after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element patterns of the Pengshan granites (b, after McDonough *et al.*, 1992)

表 5 锆石 Hf 同位素组成

Table 5 Hf isotope composition of zircons for the Pengshan granites

测点号	Age (Ma)	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
ZK801-12-1. 1	126	0.001151	0.282700	0.000024	0.1	0.8	785.0	1171.3	-1.0
ZK801-12-2. 1	130	0.001557	0.282616	0.000020	-2.8	0.7	913.5	1358.4	-1.0
ZK801-12-3. 1	131	0.002439	0.282703	0.000018	0.2	0.7	808.0	1167.8	-0.9
ZK801-12-3. 2	129	0.000579	0.282629	0.000017	-2.3	0.6	871.8	1324.5	-1.0
ZK801-12-4. 1	130	0.002670	0.282670	0.000021	-1.0	0.8	862.9	1245.1	-0.9
ZK801-12-5. 1	1615	0.001735	0.281687	0.000021	-4.3	0.8	2235.3	2583.7	-0.9
ZK801-12-6. 1	133	0.001182	0.282666	0.000021	-0.9	0.7	833.3	1242.5	-1.0
ZK801-12-7. 1	133	0.001676	0.282585	0.000022	-3.9	0.8	961.6	1427.7	-0.9
ZK801-12-8. 1	133	0.005942	0.282687	0.000027	-0.6	1.0	921.5	1223.7	-0.8
ZK801-12-9. 1	129	0.003338	0.282591	0.000023	-3.9	0.8	997.8	1425.5	-0.9
ZK801-12-10. 1	133	0.001366	0.282598	0.000023	-3.3	0.8	934.4	1395.8	-1.0
ZK801-12-11. 1	128	0.005005	0.282688	0.000028	-0.6	1.0	893.3	1216.9	-0.8
ZK801-12-12. 1	123	0.001099	0.282599	0.000023	-3.5	0.8	926.4	1398.0	-1.0
ZK801-12-13. 1	123	0.002259	0.282670	0.000027	-1.1	0.9	852.9	1246.1	-0.9
ZK801-12-14. 1	132	0.001320	0.282641	0.000023	-1.9	0.8	873.1	1301.6	-1.0
ZK801-12-15. 1	124	0.002371	0.282572	0.000025	-4.5	0.9	998.6	1464.7	-0.9
ZK801-12-16. 1	131	0.000510	0.282609	0.000021	-2.9	0.8	898.5	1368.3	-1.0
ZK801-12-17. 1	132	0.002018	0.282605	0.000024	-3.2	0.8	941.9	1386.0	-0.9
ZK801-12-18. 1	130	0.003494	0.282627	0.000028	-2.6	1.0	946.9	1344.0	-0.9
ZK801-12-19. 1	125	0.004218	0.282581	0.000034	-4.4	1.2	1038.3	1453.9	-0.9
ZK801-12-20. 1	134	0.002277	0.282596	0.000022	-3.5	0.8	961.6	1406.2	-0.9
ZK1002-12-1	146.8	0.002326	0.282588	0.000029	-3.5	1.0	974.4	1417.3	-0.9
ZK1002-12-4	135.8	0.002363	0.282587	0.000029	-3.8	1.0	976.7	1425.5	-0.9
ZK1002-12-5	121.8	0.001120	0.282620	0.000021	-2.8	0.7	897.6	1352.5	-1.0
ZK1002-12-7	170.04	0.002125	0.282602	0.000033	-2.5	1.2	947.8	1371.0	-0.9
ZK1002-12-8	2460	0.001283	0.281433	0.000038	5.7	1.4	2559.7	2618.1	-1.0
ZK1002-12-9	129	0.003338	0.282591	0.000023	-3.9	0.8	997.8	1425.5	-0.9
ZK1002-12-11	123.8	0.003487	0.282623	0.000025	-2.8	0.9	953.6	1357.2	-0.9
ZK1002-12-14	127.1	0.001245	0.282602	0.000029	-3.3	1.0	925.9	1390.0	-1.0
ZK1002-12-15	130.1	0.002432	0.282682	0.000029	-0.6	1.0	839.9	1217.3	-0.9
ZK1002-12-19	130.7	0.001425	0.282628	0.000023	-2.3	0.8	893.0	1330.3	-1.0
ZK1002-12-21	1020	0.002087	0.282287	0.000027	4.0	1.0	1402.1	1611.7	-0.9
ZK1002-12-22	129.8	0.002462	0.282712	0.000021	0.5	0.7	795.9	1149.4	-0.9
ZK1002-12-23	128.6	0.005364	0.282650	0.000037	-2.0	1.3	964.5	1304.9	-0.8
ZK1002-12-24	129.2	0.003864	0.282701	0.000025	0.0	0.9	844.0	1180.9	-0.9
ZK1002-12-25	734.1	0.002925	0.282575	0.000029	7.8	1.0	1008.8	1150.1	-0.9
ZK1002-12-26	128.8	0.000968	0.282632	0.000025	-2.2	0.9	876.6	1320.1	-1.0
ZK1002-12-28	147.4	0.001723	0.282658	0.000029	-0.9	1.0	857.0	1255.5	-0.9

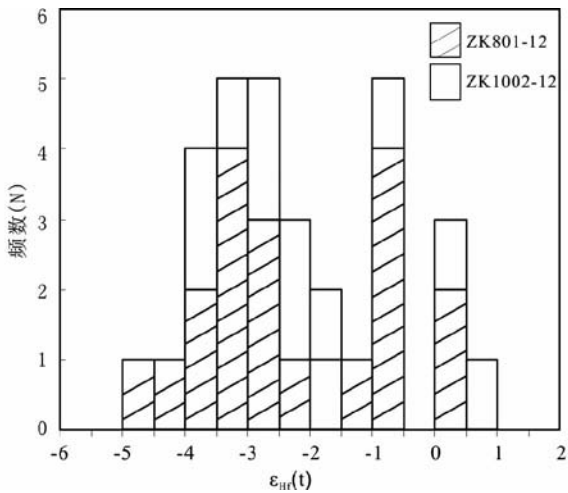


图7 彭山花岗岩中锆石 Hf 同位素 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值统计直方图

Fig. 7 Histogram of zircon Hf isotope $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ of the Pengshan granites

样品 ZK801-12 锆石大部分都具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,主要集中在 $-0.6 \sim -4.5$, 仅有两个点具有正的 Hf 同位素组成,分别为点 1.1 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 0.1$) 和 3.1 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 2.1$), 单阶段 Hf 模式年龄介于 785 ~ 1038Ma, 二阶段 Hf 模式年龄介于 1168 ~ 1465Ma。样品 ZK1002-12 锆石 Hf 同位素组成, 主要分为两组, 一组是老锆石, 它们都具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 变化范围是 3.0 ~ 8.1; 另一组是具有岩浆结晶年龄的锆石, 它们大部分具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 变化范围是 $-3.5 \sim 0.5$ 。单阶段 Hf 模式年龄变化范围是 785 ~ 998Ma, 二阶段 Hf 模式年龄介于 1024 ~ 1612Ma。

5 讨论

5.1 成岩年龄及意义

较早时期曾有研究者对彭山隐伏花岗岩体开展过同位素年代学工作, 利用全岩 Rb-Sr 等时线法测定年龄为 $127 \pm 4\text{Ma}$ (马长信, 1989)。但由于锆石 U-Pb 计时体系的封闭温度 ($700 \pm 50^\circ\text{C}$, Dodson and McClelland-Brown, 1985) 与花岗岩质的结晶温度相近, 被认为是花岗岩质岩石定年最为可靠的方法。因此在本研究中, 采用 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 方法分别对该地区两件花岗岩样品 (ZK801-12 和 ZK1002-12) 进行锆石 U-Pb 定年, 获得的年龄分别为 $128 \pm 1\text{Ma}$ 和 $129 \pm 2\text{Ma}$, 锆石内部结构特征 (图 3) 表明它们代表的是岩浆结晶锆石, 两组年龄一致, 代表了该岩体的侵位年龄。

长江中下游地区是我国重要的铜、铁多金属成矿带, 区内斑岩、矽卡岩型矿床主要是与燕山期中酸性侵入岩有关 (常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992)。前人对长江中下游地区中酸性侵入岩进行了锆石 U-Pb 定年的工作, 其中包括鄂

东南铜山口花岗闪长斑岩 ($140.6 \pm 2.4\text{Ma}$, Li *et al.*, 2008), 九瑞邓家山花岗闪长斑岩 ($138.2 \pm 1.8\text{Ma}$, 李亮和蒋少涌, 2009)、武山花岗闪长斑岩 ($144.6 \pm 3.9\text{Ma}$, Ding *et al.*, 2006), 安庆月山闪长岩 ($138.7 \pm 0.5\text{Ma}$, 张乐骏等, 2008), 铜陵大团山石英二长闪长岩 ($139.7 \pm 2.4\text{Ma}$, 吴才来等, 2008) 等等, 锆石 U-Pb 年龄集中分布在 135 ~ 145Ma, 与本文研究的彭山隐伏花岗岩体 ($129 \pm 2\text{Ma}$, $128 \pm 1\text{Ma}$) 年龄相差比较大; 而长江中下游宁芜地区娘娘山组火山岩样品 (全岩-钾长石-斜长石-黑云母) Rb-Sr 等时线年龄为 $133.1 \pm 3.2\text{Ma}$ (闫峻等, 2009), 龙王山组和大王山组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 $127 \pm 3\text{Ma}$ 和 $131 \pm 4\text{Ma}$ (张旗等, 2003), 年龄集中在 130Ma 左右, 与本区年龄相近, 说明是同时期的岩浆活动, 但由于宁芜地区发育的是火山岩, 相关的矿床主要为矽岩铁矿, 而与本研究区的花岗岩及锡多金属矿床的成矿系统截然不同。在长江中下游的庐-枞地区产有许多 A 型花岗岩体, 范裕等 (2008) 的锆石 LA-ICP-MS 定年结果表明其形成年龄在 126 ~ 124Ma, 与本文研究的彭山花岗岩体年龄相差不大。范裕等 (2008) 认为, 该时期是长江中下游地区岩石圈伸展最强烈的阶段。

在总结大量前人资料的基础上, 华仁民等 (2005) 提出在华南地区燕山期发生过三次大规模成矿作用。第一期在燕山早期 (180 ~ 170Ma), 以赣东北和湘东南的 Cu、Pb-Zn、(Au) 矿化为主; 第二期在燕山中期 (约 150 ~ 139Ma), 主要是南岭及相邻地区, 以 W、Sn、Nb-Ta 等有色-稀有金属矿化为主; 第三期在燕山晚期 (125 ~ 98Ma), 以南岭地区的 Sn、U 矿化和东南沿海地区的 Au、Cu、Pb-Zn、Ag 矿化为主。根据研究区花岗岩体年龄 ($129 \pm 2\text{Ma}$, $128 \pm 1\text{Ma}$), 本区应属于第三期即燕山晚期的成矿作用。这一期华南地区主要发育一些侵位较浅的或“次火山岩相”的花岗岩类, 有的甚至与火山岩共生, 很多与钨锡矿有关的岩体, 如江西岩背斑岩锡矿, 相关花岗斑岩全岩 Rb-Sr 等时线测定年龄为 136 ~ 104Ma (王德滋等, 1994; 熊小林等, 1994; 梅玉萍等, 2007), 香炉山钨矿区内的黑云母花岗岩岩体全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $126 \pm 2.6\text{Ma}$ (张家菁等, 2008); 此外还有广东的塌山锡矿 (刘师先, 1992), 浙江的洋滨锡矿 (沈渭洲等, 1994), 以及著名的广西大厂箱盖花岗岩及相关锡矿 (蔡明海等, 2006; Zhao and Jiang, 2007) 等。华南地区的三期大规模成矿作用, 是该地区岩石圈发展演化的产物。第一、二次大规模成矿作用分别对应于印支造山运动后的局部拉张-裂解和大规模伸展-减薄; 而第三次成矿作用背景复杂, 既有拉张又有挤压, 显示该时期的壳幔相互作用达到了前所未有的高峰 (毛景文等, 1999; 华仁民等, 2005)。

本研究中, 样品 ZK801-12 两个残留锆石给出较老的年龄 (1603Ma 和 2137Ma)。样品 ZK1002-12 一颗残留锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2461Ma, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 5.7, $t_{\text{DM2}} = 2618\text{Ma}$ 。宁芜盆地火山-次火山岩的锆石 U-Pb 定年研究中出现了年龄为 1733Ma, 1818Ma 和 1953Ma 的残留锆石 (侯可军和袁顺

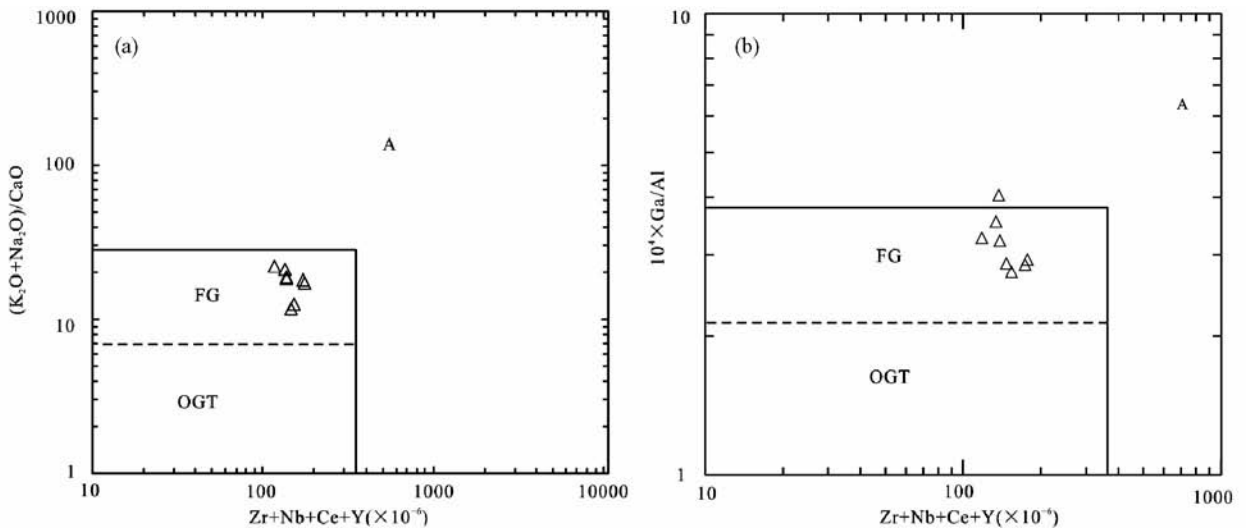


图8 彭山岩体 $(Zr + Nb + Ce + Y) - (K_2O + Na_2O)/CaO$ 关系图(a, 据 Whalen *et al.*, 1987) 和 $(Zr + Nb + Ce + Y) - 10^4 \times Ga/Al$ 关系图(b, 据 Eby, 1990)

其中,OGT 区代表 I、S 和 M 型花岗岩区;FG 区代表分异的 I 型花岗岩区;A 区代表 A 型花岗岩区

Fig. 8 $(Zr + Nb + Ce + Y)$ vs. $(K_2O + Na_2O)/CaO$ diagram (a, after Whalen *et al.*, 1987) and $(Zr + Nb + Ce + Y)$ vs. $10^4 \times Ga/Al$ diagram (b, after Eby, 1990) of the Pengshan granites

达, 2010), 但还没有发现象本研究中这样更古老的 ($>2.0Ga$) 残留锆石。而位于华夏地块东南缘的湘南地区, 与本研究区同属于扬子板块与华南板块之间的过渡带, 骑田岭岩体锆石 U-Pb 测年研究中获得了年龄为 2445Ma 和 1708Ma 的残留锆石 (赵葵东等, 2006), 这与近年来报道的一系列湘赣粤过渡带残留锆石的年龄比较吻合 (洪大卫等, 2002)。这些残留锆石的存在为古元古代华夏古陆块的存在提供了新的证据, 也说明该地区中生代岩浆作用过程中有古老下地壳物质的参与。这一发现同时从一个侧面说明了彭山花岗岩的源区应该比较深。

5.2 岩石成因类型

Chappell and White (1974) 提出 I 型、S 型花岗岩分类之后, 1979 年有学者又进一步提出 M 型和 A 型花岗岩分类, 分别用于指示花岗岩源岩和构造环境 (Bonin, 2007)。对于 I 型、S 型和 A 型花岗岩的判定已有大量文献论述, 其中角闪石、堇青石和碱性铁镁矿物的出现被认为是最有效的判别标志 (吴福元等, 2007)。然而, 当岩石经历高度分异结晶作用之后, 其矿物化学成分都趋近于低共结的花岗岩, 从而使岩石类型鉴别困难 (Li *et al.*, 2007)。特别是由于 I、S 型经过高度分异演化的长英质花岗岩 ($SiO_2 > 74\%$) 的某些地球化学特征与 A 型花岗岩颇为相似, 因此, 利用地球化学方法如何区分它们令人关注。Whalen *et al.* (1987) 和 Eby (1990) 先后提出了一些以 $(Zr + Nb + Ce + Y)$ 与 $10^4 \times Ga/Al$ 为基础的判别图解。

彭山岩体具有明显不同于 A 型花岗岩的一系列地球化

学特征, 主要表现在: (1) 稀土元素含量偏低 ($\sum REE = 41.18 \times 10^{-6} \sim 85.06 \times 10^{-6}$), 虽然 Ga 含量相对较高, $10^4 \times Ga/Al$ 比值变化于 $2.75 \sim 4.04$, 平均值为 3.19, 但低于 Whalen *et al.* (1987) 建议的 A 型花岗岩平均值 (3.75); (2) 高场强元素 Zr、Nb、Ce、Y 等含量均不高, 其中 Zr 为 $65.8 \times 10^{-6} \sim 101.7 \times 10^{-6}$, Y 为 $15.1 \times 10^{-6} \sim 25.2 \times 10^{-6}$; $Zr + Nb + Ce + Y$ 为 $117.8 \times 10^{-6} \sim 176.5 \times 10^{-6}$, 低于 A 型花岗岩的下限值 (350×10^{-6})。在 $(Zr + Nb + Ce + Y)$ 与 $10^4 \times Ga/Al$ 比值为基础的判别图解 (图 8) 中, 它们投影在非 A 型花岗岩区域和高分异的 I 型花岗岩区内, 而其 Nb/Ta 比值 (4.23 ~ 7.35) 与分异花岗岩的相应值 (2.3 ~ 9.9, Dostal and Chatterjee, 2000) 接近, 这一特征也说明彭山岩体应属于分异的 I 型花岗岩; (3) 彭山岩体的锆石饱和温度 (Watson and Harrison, 1983) 介于 $724 \sim 757^\circ C$, 平均 $737^\circ C$ 。明显低于典型的 A 型花岗岩的锆石饱和温度。

根据彭山岩体富硅、富碱、贫钙、低镁铁、高挥发份、铝过饱和及轻稀土相对富集, Eu 具有强烈亏损的地球化学特征, 前人认为该岩体应属于陆壳重熔型 (S 型) 花岗岩 (马长信, 1989; 刘南庆, 1995; 卢树东等, 2004c)。前述元素地球化学特征显示, 本次研究的岩体具有弱过铝的性质, A/CNK 值主要变化于 $1.0 \sim 1.1$, 与典型的强过铝 S 型花岗岩 ($A/CNK > 1.1$, Chappell and White, 2001) 有一定的差别。岩体的 P_2O_5 含量均很低 ($< 0.10\%$), 这点也明显不同于典型的 S 型花岗岩, 后者常具有较高的 P_2O_5 , 并且随着分异作用的进行 P_2O_5 有递增的演化趋势 (Chappell, 1999)。在 ACF 三角图解 (图 9) 中, 样品点大部分投影在 I 型花岗岩区, 部分落在

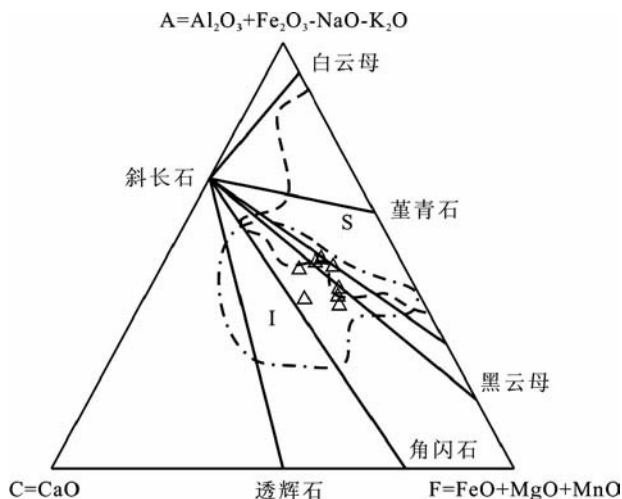


图9 彭山岩体 ACF 图(底图据徐克勤等, 1984)

Fig. 9 ACF diagram of the Pengshan granites (after Xu *et al.*, 1984)

I型与S型花岗岩交界区。结合岩石分异演化程度高的特点,彭山隐伏花岗岩体应属于分异的I型花岗岩。

传统观点认为,与锡矿成因有关的花岗岩主要为S型花岗岩(Lehmann, 1990; Heinrich, 1990),不仅为锡的成矿作用提供物质母源,也是其成矿的重要场所。近年来也报道了很多锡矿床成因与A型花岗岩有关(Liverton and Alderton, 1994; 赵振华等, 2000; 邱检生等, 2005; Haapala and Lukkari, 2005; 蒋少涌等, 2008; 朱金初等, 2008)。关于华南燕山晚期大规模成矿,相关的岩石成因类型,大部分学者认为它们属于陆壳重熔型花岗岩类或陆壳重熔型火山-侵入杂岩,但也有一些研究者认为应属于“同熔型”,岩浆来源于“上地幔至下地壳”(刘师先, 1992)。从本文获得的彭山岩体数据,印证了“同熔型”观点,表明在华南燕山晚期的成矿成矿作用类型是丰富多样的。

5.3 物质来源

一般认为,与锡矿成因有关的花岗岩主要起源于具Sn初始富集的地壳物质的部分熔融,经历了高分异演化的作用(Lehmann, 1990)。从Sn本身的地球化学特征来看,除了具有很强的亲石性,总体趋于在地壳中富集,但Sn也具有一定的亲Fe性,这一特征决定Sn首先应该富集在地幔中(陈骏等, 2000)。Sillitoe (1974)提出尼日利亚Jos高原的含锡花岗岩属于地幔热点活动产物,Sn来源于地幔,突破了Sn仅来源于地壳的传统认识。随着研究的深入,越来越多的资料显示深部物质的参与和壳幔作用对这类矿床的形成具有重要的贡献。Sun and Higgins (1996)对Blue Tier花岗质岩基研究认为,幔源岩浆有利于维持花岗质岩浆的分异并最终导致Sn矿的形成。Lenharo *et al.* (2003)在巴西Pitinga锡矿有关花岗岩的研究中指出岩体在形成过程中有不同比例的幔源

物质的加入。Sun and Higgins (1996)、赵振华等(2000)对湖南柿竹园超大型钨锡多金属矿床的研究指出,在成矿过程中伴有较强烈的深源岩浆活动。江西密坑山岩体,与周围的一系列大中型锡多金属矿床有关,邱检生等(2005)指出成岩过程中有部分幔源组分的参与,并且地幔组分对成矿具有重要贡献。

锆石化学性质稳定,抗风化能力强, Lu/Hf 比值低,不受部分熔融作用的影响,这使得锆石 Hf 同位素组成可以记录岩浆源区不同性质的原岩特征,成为讨论岩浆甚至是探讨地壳演化以及壳幔相互作用过程的重要工具。彭山花岗岩体普遍具有偏高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,样品 ZK801-12 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要集中在 $-0.6 \sim -4.5$, 平均值为 -2.4 , 二阶段 Hf 模式年龄介于 $1168 \sim 1465\text{Ma}$; 样品 ZK1002-12 锆石 Hf 同位素组成,具有和谐年龄 ($129 \pm 2\text{Ma}$) 的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围是 $-3.5 \sim 0.5$, 平均值为 -2.2 , 二阶段 Hf 模式年龄介于 $1024 \sim 1612\text{Ma}$ 。于津海等(2005)对武平花岗杂岩体进行了 Lu-Hf 同位素分析,其中武平黑云母花岗岩大多数具有高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-3.6 \sim -6.7$), 少数颗粒 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值很低, 它们的 Hf 模式年龄也不同,前者变化于 $1.43 \sim 1.63\text{Ga}$, 后者变化于 $1.84 \sim 1.89\text{Ga}$ 。彭山岩体整体比武平花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值偏高,并且更为集中,说明地幔组分贡献更大。

在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相关图解(图 10)中投影,可以明显看出,彭山岩体 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值比较高,集中位于球粒陨石值以下而高于上地壳比值,并且相对均一。通常,高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值是较多幔源组分参与成岩的标志。已有的研究(刘南庆, 1995)显示,该区进入燕山期,东西向构造及伴生的横

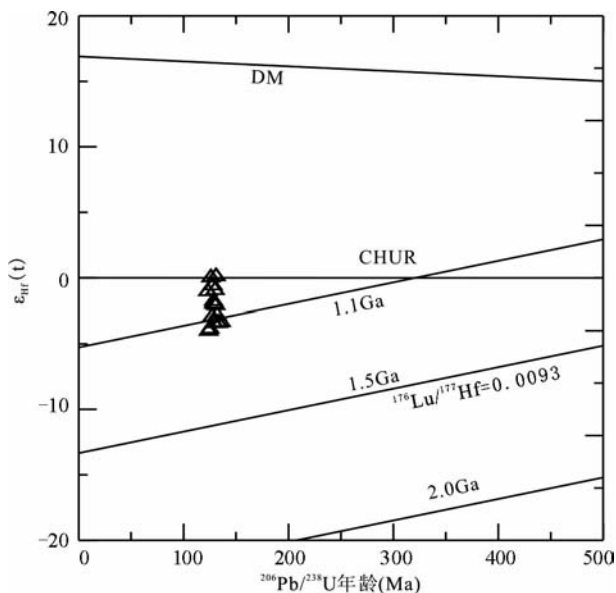


图10 彭山岩体锆石 Hf 同位素组成与 U-Pb 年龄相关图解

Fig. 10 Hf isotopic compositions vs. U-Pb ages of zircons from the Pengshan granites

向剪切断裂重新活化、加剧,它们对花岗质岩浆的侵入产生了重要的影响。于津海等(2005)认为,南岭地区燕山期花岗岩在同位素上的巨大差异主要是不同地区不同时间成岩过程中幔源岩浆贡献形式和混合的程度不同引起的,如武平杂岩体(于津海等,2005),千里山岩体(毛景文等,1995),广西花山复式岩体(朱金初等,1989)等。其中,幔源组分贡献大的花岗岩表现出 I 型花岗岩的特征,而贡献小的具有典型的 S 型花岗岩的特征。彭山岩体具有较高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,并且具有典型的 I 型花岗岩特征,均表明了它们受到了强烈的壳幔作用,并且锆石的 U-Pb 同位素定年数据显示花岗岩的原岩组分中包含有早元古代的组分,也支持壳幔混合模式。

6 结论

(1) 彭山锡多金属矿集区隐伏花岗岩体成岩年龄为 128 ~ 129Ma。地球化学上具有高硅、富碱、贫钙、贫镁,强烈亏损 Sr、Ba、Eu、P、Ti,低稀土元素含量等特点。岩体应属于高分异的 I 型花岗岩。

(2) 彭山隐伏花岗岩体 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 偏高(-4.5 ~ 0.5),二阶段 Hf 模式年龄变化为 1024 ~ 2618Ma,花岗岩形成时有地幔物质参与了成岩过程,应属于壳幔混合型。

(3) 由于黄金锡钨矿与该隐伏花岗岩紧密相关,很可能指示地幔对 Sn 成矿作用也有贡献,这一认识对于进一步研究江西西北部大小穹窿岩体、长江中下游地区成矿机理,具有重要的意义。

致谢 本文在进行锆石阴极发光分析得到了弓虎军老师的帮助和指导,锆石 U-Pb 同位素定年时得到刘敦一教授、以及宋彪和武兵老师的帮助和指导,电子探针分析工作得到张文兰高工的帮助和指导,锆石 Hf 同位素组成分析得到侯可军老师的帮助和指导,在此表示衷心的感谢。

References

Amelin Y, Lee DC, Halliday AN and Pidgeon RT. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 399(6733): 252 - 255

Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly SY and Fisher NI. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602 - 622

Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, 97(1-2): 1 - 29

Bouvier A, Vervoort JD and Patchett PJ. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1-2): 48 - 57

Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63 - 114

Cai MH, He LQ, Liu GQ, Wu DC and Huang HM. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating of the intrusive rocks in the Dachang tin

polymetallic ore field, Guangxi and their geological significance. *Geological Review*, 52(3): 409 - 414 (in Chinese with English abstract)

Chang YF, Liu XP and Wu YC. 1991. The Copper-Iron Belt of the Middle Lower Reaches of the Yangtze River. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 379 (in Chinese)

Chappell BW and White A. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8(2): 173 - 174

Chappell BW. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535 - 551

Chappell BW and White A. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489 - 499

Chen J, Ji JF, Wang RC and Zhou JP. 2000. *Geochemistry of Tin*. Nanjing: Nanjing University Press, 1 - 320 (in Chinese)

Compston W, Williams IS and Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from lunar Breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe. *Journal of Geophysical Research*, 89 (Suppl.): 525 - 534

Ding X, Jiang SY, Zhao KD, Nakamura E, Kobayashi K, Ni P, Gu LX and Jiang YH. 2006. In-situ U-Pb SIMS dating and trace element (EMPA) composition of zircon from a granodiorite porphyry in the Wushan copper deposit, China. *Mineralogy and Petrology*, 86(1): 29 - 44

Dodson MH and McClelland-Brown E. 1985. Isotopic and palaeomagnetic evidence for rates of cooling, uplift and erosion. *Geological Society of London*, 10(1): 315 - 325

Dostal J and Chatterjee AK. 2000. Contrasting behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton (Nova Scotia, Canada). *Chemical Geology*, 163(1-4): 207 - 218

Eby GN. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26(1-2): 115 - 134

Elhoul S, Belousova E, Griffin WL, Pearson NJ and Reilly SYO. 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158

Fan Y, Zhou TF, Yuan F, Qian CC, Lu SM and David RC. 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the A-type granites in the Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) area and their geological significances. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1715 - 1724 (in Chinese with English abstract)

Gao JF, Lu JJ, Lai MY, Lin YP and Pu W. 2003. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICPMS. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 39(6): 844 - 850 (in Chinese with English abstract)

Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Acherbergh E, Reilly SYO and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133 - 147

Haapala I and Lukkari S. 2005. Petrological and geochemical evolution of the Kymi stock, a topaz granite cupola within the Wiborg rapakivi batholith, Finland. *Lithos*, 80(1-4): 347 - 362

Heinrich CA. 1990. The chemistry of hydrothermal tin (-tungsten) ore deposition. *Economic Geology*, 85(3): 457 - 481

Hong DW, Guo WQ, Li GJ, Kang W and Xu HM. 1987. Petrology of the Miarolitic Granite Belt in the Southeast Coast of Fujian Province and Their Petrogenesis. Beijing: Science and Technology Press of Beijing (in Chinese)

Hong DW, Xie XL and Zhang JS. 2002. Geological significance of the Hangzhou-Zhuguangshan-Huashan high- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ granite belt. *Regional Geology of China*, 21(6): 348 - 354 (in Chinese with English abstract)

Hou KJ, Li YH and Zou TR. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595 - 2604 (in Chinese with English abstract)

Hou KJ and Yuan SD. 2010. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the volcanic and sub-volcanic rocks in the Ningwu

- basin and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (3): 888–902 (in Chinese with English abstract)
- Hua RM, Chen PR, Zhang WL and Lu JJ. 2005. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China. *Mineral Deposits*, 24(2): 99–109 (in Chinese with English abstract)
- Jiang SY, Zhao KD, Jiang YH and Dai BZ. 2008. Characteristics and genesis of Mesozoic A-type granites and associated mineral deposits in the southern Hunan and northern Guangxi provinces along the Shi-Hang belt, South China. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 496–509 (in Chinese with English abstract)
- Lehmann B. 1990. *Metallogeny of Tin*. Berlin: Springer, 1–211
- Lenharo S, Pollard PJ and Born H. 2003. Petrology and textural evolution of granites associated with tin and rare-metals mineralization at the Pitinga mine, Amazonas, Brazil. *Lithos*, 66(1–2): 37–61
- Li JW, Zhao XF, Zhou MF, Vasconcelos P, Ma CQ, Deng XD, de Souza ZS, Zhao YX and Wu G. 2008. Origin of the Tongshankou porphyry-skarn Cu-Mo deposit, eastern Yangtze craton, eastern China: Geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic constraints. *Mineralium Deposita*, 43(3): 315–336
- Li L and Jiang SY. 2009. Petrogenesis and geochemistry of the Dengjashan porphyritic granodiorite, Jiujiang-Ruichang metallogenic district of the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2877–2888 (in Chinese with English abstract)
- Li QQ and Luo JX. 1997. A Review of Tectonic features on Jiujiang-Ruichang metallogenic district. *Jiangxi Geology*, 11(3): 67–73 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li ZX, Li WX, Liu Y, Yuan C, Wei G and Qi C. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96(1–2): 186–204
- Liu NQ. 1995. Development history of its structure from the view of magmatic evolution of Pengshan area. *Geology of Jiangxi*, 9(3): 205–217 (in Chinese with English abstract)
- Liu SX. 1992. Geological characteristics and metallogenic mechanism of Tashan porphyry tin deposit. *Geochimica*, 1(2): 149–157 (in Chinese with English abstract)
- Liverton T and Alderton DHM. 1994. Plutonic rocks of the Thirtymile Range, Dorsey Terrane: Ultrafractionated tin granites in the Yukon. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 31(10): 1557–1568
- Lu SD, Wang SL, Gao WL, Xiao E and Xu CW. 2004a. Study on metallogenic characteristics and genesis of Sn, Pb and Sn polymetallic deposits in Pengshan region, Jiangxi Province. *Journal of East China Institute of Technology*, 27(3): 202–207 (in Chinese with English abstract)
- Lu SD, Du YS, Xiao E and Xu CW. 2004b. Study on tectonic features and metallogenic mechanism of the Pengshan Sn-Pb-Zn polymetallic orefield, Jiangxi Province. *Geotectonica Et Metallogenia*, 28(3): 297–305 (in Chinese with English abstract)
- Lu SD, Du YS, Xiao E and Zhu YS. 2004c. Geochemical characteristics and related mineralization of Pengshan granitic body in Jiangxi Province. *Geology and Mineral Resources*, (2): 46–51 (in Chinese with English abstract)
- Lu SD, Wang SL, Gao WL, Xiao E and Xu JH. 2006. Geological features and ore-control factors of Huangjinwa Sn deposit, De'an County in Jiangxi Province. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 28(1): 17–23 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2001. *Squid 1.02: A user manual*. Berkeley: Geochronological Center Special Publication, 1–219
- Ludwig KR. 2003. *ISOPLOT 3.00: A geochronology toolkit for microsoft excel*. Berkeley: Geochronological Center Special Publication, 1–70
- Ma CX. 1989. A high-volatile diapiropic granite dome in the Pengshan area and its ore-controlling role. *Geological Review*, 35(2): 127–135 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Li HY and Pei RF. 1995. Nd-Sr isotopic and petrogenetic studies of the Qianlihan granite stock, Hunan Province. *Mineral Deposits*, 14(3): 235–242 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Hua RM and Li XB. 1999. A preliminary study of large-scale metallogenesis and large clusters of mineral deposits. *Mineral Deposits*, 18(4): 291–299 (in Chinese with English abstract)
- McDonough WF, Sun SS, Ringwood AE, Jagoutz E and Hofmann AW. 1992. Potassium, rubidium, and cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 56(3): 1001–1012
- Mei YP, Li HQ, Wang DH, Lu YF, Yang HM, Xu JX and Zhang JJ. 2007. Rock-forming and ore-forming ages of the Yanbei porphyry tin deposit in Jiangxi Province and their geological significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 28(5): 456–461 (in Chinese with English abstract)
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4): 215–224
- Qiu JS, McInnes BIA, Jiang SY and Hu J. 2005. Geochemistry of the Mikengshan pluton in Huichang County, Jiangxi Province and new recognition about its genetic type. *Geochimica*, 34(1): 20–32 (in Chinese with English abstract)
- Shen WZ, Liu CS, Min MZ, Wang XF and Wang DZ. 1994. Isotope geologic study of the Yangbin porphyry tin deposit, Zhejiang. *Mineral Deposits*, 13(2): 186–192 (in Chinese with English abstract)
- Sillitoe RH. 1974. Tin mineralization above mantle hot spots. *Nature*, 248: 497–499
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3–4): 311–324
- Song B, Zhang YH, Wan YS and Jian P. 2002a. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26–30 (in Chinese with English abstract)
- Song B, Zhang YH and Liu DY. 2002b. Introduction to the naissance of SHRIMP and its contribution to isotope geology. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 23(1): 58–62 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and Higgins NC. 1996. Neodymium and strontium isotope study of the Blue Tier Batholith, NE Tasmania, and its bearing on the origin of tin-bearing alkali feldspar granites. *Ore Geology Reviews*, 10(3–6): 339–365
- Tang YC, Wu FC, Chu GZ, Xing FM, Wang YM, Cao FY and Chang YF. 1998. *Geology of Copper-Gold Polymetallic Deposits along the Changjiang Area of Anhui Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1–351 (in Chinese)
- Wang DZ, Shen WZ, Liu CS and Xiong XL. 1994. Geochemical features and origin of volcanic-intrusive complex in Yanbei, Jiangxi. *Science in China (Series B)*, 24(5): 531–538 (in Chinese)
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295–304
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407–419
- Wright JB. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis. *Geological Magazine*, 106(4): 370–384
- Wu CL, Dong SW, Guo HP, Guo XY, Gao QM, Liu LG, Chen QL, Lei M, Wooden JL and Mazadab FK. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating of intermediate-acid intrusive rocks from Shizishan, Tongling and the deep processes of magmatism. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1801–1812 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Jahn B, Wilde SA, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge W and Sun D. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66(3–4): 241–273
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238 (in Chinese with English abstract)
- Xiong XL, Zhu JC, Liu CS and Shen WZ. 1994. Alteration zoning of the

- Yanbei porphyry tin deposit in Jiangxi and geochemical characteristics of its main altered rocks. *Mineral Deposits*, 13(1): 1-10 (in Chinese with English abstract)
- Xu KQ, Sun N, Wang DZ and Tu GC. 1984. Petrogenesis of the Granitoid and Their Metallogenic Relations in South China. Nanjing: Jiangsu Sciences Technology Press, 1-20 (in Chinese)
- Yan J, Yu YF and Chen JF. 2009. Rb-Sr isotopic dating of volcanic rocks from the Niangniangshan Formation in the Nanjing-Wuhu area and its geological implications. *Geological Review*, 55(1): 121-125 (in Chinese with English abstract)
- Yu JH, Zhou XM, Zhao L, Jiang SY, Wang LJ and Ling HF. 2005. Mantle-crust interaction generating the Wuping granites: Evidence from Sr-Nd-Hf-U-Pb isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 51-64 (in Chinese with English abstract)
- Zhai YS, Yao SZ, Lin XD, Zhou XR, Wan TF, Jin FQ and Zhou ZG. 1992. Metallogenic Regularity of the Copper-Gold Deposits in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River. Beijing: Geological Publishing House, 1-235 (in Chinese)
- Zhang JJ, Mei YP, Wang DH and Li HQ. 2008. Isotope chronology study on the Xianglushan scheelite deposit in north Jiangxi Province and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 927-931 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LJ, Zhou TF, Fan Y and Yuan F. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of Yueshan intrusion in the Yueshan ore field, Anhui Province, and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1725-1732 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Jian P, Liu DY, Wang YL, Qian Q, Wang Y and Xue HM. 2003. Zircon U-Pb age of the volcanic rocks in the Ningwu basin and their geological implications. *Science in China (Series D)*, 33(4): 309-314 (in Chinese)
- Zhao KD, Jiang SY, Jiang YH and Liu DY. 2006. SHRIMP U-Pb dating of the Furong unit of Qitangling granite from Southeast Hunan Province and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2611-2616 (in Chinese with English abstract)
- Zhao KD and Jiang SY. 2007. Rare earth element and yttrium analyses of sulfides from the Dachang Sn-polymetallic ore field, Guangxi Province, China: Implication for ore genesis. *Geochemical Journal*, 41(2): 121-134
- Zhao ZH, Bao ZW, Zhang BY and Lin XX. 2000. Crust-mantle interaction of W-polymetallic ore deposit in Shizhuyuan. *Science in China (Series D)*, 30(S1): 161-168 (in Chinese)
- Zhou TF, Fan Y and Yuan F. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1665-1678 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Song CZ, Zhang LJ, Qian B, Ma L, Qian CC, Lu SM and David RC. 2010. Temporal-spatial framework of magmatic intrusions in Luzong volcanic basin in East China and their constrain to mineralizations. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2694-2714 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Li XD, Shen WZ, Wang YX and Yang JD. 1989. Sr, Nd and O isotope studies on the genesis of the Huashan granite complex. *Acta Geologica Sinica*, 63(3): 225-235 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Chen J, Wang RC, Lu JJ and Xie L. 2008. Early Yanshanian NE trending Sn/W-bearing A-type granites in the western-middle part of the Nanling Mts. region. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 474-484 (in Chinese with English abstract)
- 大学出版社, 1-320
- 范裕,周涛发,袁峰,钱存超,陆三明,David RC. 2008. 安徽庐江-枞阳地区 A 型花岗岩的定年及其地质意义. *岩石学报*, 24(8): 1715-1724
- 高剑峰,陆建军,赖鸣远,林雨萍,濮巍. 2003. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析. *南京大学学报(自然科学版)*, 39(6): 844-850
- 洪大卫,郭文歧,李戈晶,康炜,徐海明. 1987. 福建沿海晶洞花岗岩带的岩石学和成因演化. 北京:北京科学技术出版社
- 洪大卫,谢锡林,张季生. 2002. 试析杭州-诸广山-花山高 e_{Nd} 值花岗岩带的地质意义. *地质通报*, 21(6): 348-354
- 侯可军,李延河,邹天人,曲晓明,石玉若. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. *岩石学报*, 23(10): 2595-2604
- 侯可军,袁顺达. 2010. 宁芜盆地火山-次火山岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义. *岩石学报*, 26(3): 888-902
- 华仁民,陈培荣,张文兰,陆建军. 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用. *矿床地质*, 24(2): 99-109
- 蒋少涌,赵葵东,姜耀辉,戴宝章. 2008. 十杭带湘南-桂北段中生代 A 型花岗岩带成矿特征及成因讨论. *高校地质学报*, 14(4): 496-509
- 李亮,蒋少涌. 2009. 长江中下游地区九瑞矿集区邓家山花岗闪长斑岩的地球化学与成因研究. *岩石学报*, 25(11): 2877-2888
- 李启全,罗健雄. 1997. 九瑞地区区域地质构造环境新述. *江西地质*, 11(3): 67-73
- 刘南庆. 1995. 从彭山地区的岩浆演化看其构造的发展史. *江西地质*, 9(3): 205-217
- 刘师先. 1992. 塌山斑岩锡矿床地质特征及成矿机理. *地球化学*, 1(2): 149-157
- 卢树东,汪石林,高文亮,肖锆,徐春伟. 2004a. 江西彭山锡铅锌多金属矿床成矿特征与成因浅析. *东华理工学院学报*, 27(3): 202-207
- 卢树东,杜杨松,肖锆,徐春伟. 2004b. 江西彭山锡(铅锌)多金属矿田构造地质特征及成矿机理探讨. *大地构造与成矿学*, 28(3): 297-305
- 卢树东,杜杨松,肖锆,朱元松. 2004c. 江西彭山岩体的地球化学特征及成矿关系探讨. *华南地质与矿产*, (2): 46-51
- 卢树东,汪石林,高文亮,肖锆,许建华. 2006. 江西德安黄金洼锡矿地质特征及控矿因素. *地球科学与环境学报*, 28(1): 17-23
- 马长信. 1989. 关于彭山高挥发份花岗岩底辟穹窿构造及其控矿作用. *地质论评*, 35(2): 127-135
- 毛景文,李红艳,裴荣富. 1995. 湖南千里山花岗岩体的 Nd-Sr 同位素及岩石成因研究. *矿床地质*, 14(3): 235-242
- 毛景文,华仁民,李晓波. 1999. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区. *矿床地质*, 18(4): 291-299
- 梅玉萍,李华芹,王登红,路远发,杨红梅,许建祥,张家菁. 2007. 江西岩背斑岩锡矿的成矿时代及其地质意义. *地球学报*, 28(5): 456-461
- 邱检生,McInnes BIA,蒋少涌,胡建. 2005. 江西会昌密坑山岩体的地球化学及其成因类型的新认识. *地球化学*, 34(1): 20-32
- 沈渭洲,刘昌实,闵茂中,王学锋,王德滋. 1994. 浙江洋滨斑岩锡

附中文参考文献

- 蔡明海,何龙清,刘国庆. 2006. 广西大厂锡矿田侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其意义. *地质论评*, 52(3): 409-414
- 常印佛,刘湘培,吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京:地质出版社, 1-379
- 陈骏,季峻峰,王汝成,周建平. 2000. 锡的地球化学. 南京:南京

- 矿的同位素地质研究. 矿床地质, 13(2): 186-192
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002a. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增刊): 26-30
- 宋彪, 张玉海, 刘敦一. 2002b. 微量原位分析仪器 SHRIMP 的产生与锆石同位素地质年代学. 质谱学报, 23(1): 58-62
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1-351
- 王德滋, 沈渭洲, 刘昌实, 熊小林. 1994. 江西岩背火山侵入杂岩的地球化学特征和成因. 中国科学(B辑), 24(5): 531-538
- 吴才来, 董树文, 国和平, 郭祥炎, 高前明, 刘良根, 陈其龙, 雷敏, Wooden JL, Mazadab FK. 2008. 铜陵狮子山地区中酸性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及岩浆作用的深部过程. 岩石学报, 24(8): 1801-1812
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217-1238
- 熊小林, 朱金初, 刘昌实, 沈渭洲. 1994. 江西岩背斑岩锡矿蚀变带及其主要蚀变岩的地球化学特征. 矿床地质, 13(1): 1-10
- 徐克勤, 孙鼐, 王德滋, 涂光炽. 1984. 华南花岗岩成因与成矿. 南京: 江苏科学技术出版社, 1-20
- 闫峻, 俞永飞, 陈江峰. 2009. 宁芜地区娘娘山组火山岩 Rb-Sr 同位素定年及其意义. 地质论评, 55(1): 121-125
- 于津海, 周新民, 赵蕾, 蒋少涌, 王丽娟, 凌洪飞. 2005. 壳幔作用导致武平花岗岩形成——Sr-Nd-Hf-U-Pb 同位素证据. 岩石学报, 21(3): 51-64
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若, 万天丰, 金福全, 周宗桂. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京: 北京出版社, 1-235
- 张家菁, 梅玉萍, 王登红, 李华芹. 2008. 赣北香炉山白钨矿床的同位素年代学研究及其地质意义. 地质学报, 82(7): 927-931
- 张乐骏, 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 安徽月山岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义. 岩石学报, 24(8): 1725-1732
- 张旗, 简平, 刘敦一, 王元龙, 钱青, 王焰, 薛怀民. 2003. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义. 中国科学(D辑), 33(4): 309-314
- 赵葵东, 蒋少涌, 姜耀辉, 刘敦一. 2006. 湘南骑田岭岩体芙蓉超单元的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 22(10): 2611-2616
- 赵振华, 包志伟, 张伯友, 熊小林. 2000. 柿竹园超大型钨多金属矿床形成的壳幔相互作用背景. 中国科学(D辑), 30(S1): 161-168
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报, 24(8): 1665-1678
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 宋传中, 张乐骏, 钱兵, 马良, 钱存超, 陆三明, David RC. 2010. 庐枞盆地侵入岩的时空格架及其对成矿的制约. 岩石学报, 26(9): 2694-2714
- 朱金初, 李向东, 沈渭洲, 王银喜, 杨杰东. 1989. 广西花山复式花岗岩体成因的锶, 钕和氧同位素研究. 地质学报, 63(3): 225-235
- 朱金初, 陈骏, 王汝成, 陆建军, 谢磊. 2008. 南岭中西段燕山早期北东向含锡钨 A 型花岗岩带. 高校地质学报, 14(4): 474-484