

福建紫金山地区中生代岩浆岩成因 ——锆石 Hf 同位素证据

梁清玲¹, 江思宏¹, 王少怀², 刘翼飞¹, 白大明¹, 陈春良¹

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 福州大学 紫金矿业学院, 福建 福州 350108)

摘要:对福建紫金山地区中生代岩浆岩进行了锆石 Hf 同位素分析, 结果表明中-晚侏罗世与早白垩世岩浆岩具有不同的 Hf 同位素组成。中-晚侏罗世花岗岩体具有低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-13.5 \sim -2.9$), Hf 同位素的二阶段模式年龄 (t_{DM}^{C}) 峰值介于 $1.7 \sim 2.0$ Ga, 表明其主要来源于古元古代基底。早白垩世侵入-次火山岩分为四方花岗闪长岩体和紫金山次火山岩、悦洋次火山岩以及温屋次火山岩。四方岩体 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-2.3 \sim 0.4$, t_{DM}^{C} 峰值介于 $1.3 \sim 1.4$ Ga, 紫金山次火山岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围大 ($-8.9 \sim 5.6$), t_{DM}^{C} 峰值介于 $1.1 \sim 1.5$ Ga, 表明两者均形成于中元古代基底和地幔物质混合作用的环境。悦洋和温屋次火山岩具有相对较低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-2.7 \sim -9.6$) 和较高的 t_{DM}^{C} (峰值为 $1.4 \sim 1.7$ Ga), 表明二者来源于中-古元古代基底和少量幔源物质的混合物。早白垩世岩浆岩 Hf 同位素特征显示, 紫金山地区的侵入-次火山岩体形成于同一岩浆源区, 但岩浆源区随着时间的演化各组分及组分含量在不断变化, 显示了该时期复杂的壳幔作用过程。紫金山地区中生代岩浆岩中锆石 Hf 同位素特征表明, 中-晚侏罗世岩体与早白垩世侵入-火山岩来源于不同源区, 为古太平洋板块俯冲作用不同阶段的产物。

关键词: 锆石 Hf 同位素, 中生代, 岩浆源区, 华夏板块, 紫金山

中图分类号: P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)03-0318-11

Petrogenesis of the Mesozoic magmatic rocks in Zijinshan area: constraints from zircon Hf isotope evidence

LIANG Qing-ling¹, JIANG Si-hong¹, WANG Shao-huai², LIU Yi-fei¹, BAI Da-ming¹ and
CHEN Chun-liang¹

(1. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2. Zijin College of Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Zircon in-situ Lu-Hf isotopic analysis of the Mesozoic magmatic rocks in Zijinshan area was carried out by using the laser ablation multicollector inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-MC-ICP-MS) to reveal their protolith origin. The results show that Middle-Late Jurassic and Early Cretaceous magmatic rocks have different Hf isotopic compositions, suggesting that they originated from different sources. The Middle-Late Jurassic granites exhibit obviously negative $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values from -13.5 to -2.9 , with the peak values of two-stage model ages (t_{DM}^{C}) ranging from 1.7 to 2.0 Ga, indicating that the magma was mainly sourced from the partial melting of Paleoproterozoic basement. The Early Cretaceous intrusive-volcanic rocks include Sifang granodiorite, Zijinshan, Yueyang and Wenwu volcanic rocks. The Sifang granodiorite and Zijinshan volcanic rocks have similar zircon Hf isotopic compositions, with a wide range of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ($-2.3 \sim 0.4$ and $-8.9 \sim 5.6$)

收稿日期: 2012-12-04; 修订日期: 2013-03-18

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(200911007-1-17)

作者简介: 梁清玲(1986-), 女, 汉, 硕士研究生, 矿床学专业, E-mail: liangqinglingcdut@126.com; 通讯作者: 江思宏(1968-), 男, 汉, 博士, 研究员, 主要从事金属矿床成矿规律研究, E-mail: jiangsihong1@163.com

and two-stage model ages (1.3~1.4 Ga and 1.1~1.5 Ga), suggesting that they originated from the same source, with the mixing of partial melting of the Mesoproterozoic basement and mantle-derived melts. The negative $\epsilon\text{Hf}(t)$ values from -2.7 to -9.6 and two-stage model ages ranging from 1.4 to 1.7 Ga of Yueyang and Wenwu volcanic rocks indicate that they were derived from partial melting of the Meso-Paleoproterozoic basement with minor mantle components. It is held that the Early Cretaceous intrusive-volcanic rocks of Zijinshan area were derived from the same magma source, and the evolution of magma source with continuous variation of components and compositional content reveals a complex crust-mantle interaction. Therefore, the difference of Hf isotopic compositions between the Middle-Late Jurassic and Early Cretaceous magmatic rocks could be attributed to different magma sources, and these rocks were produced at different stages of the paleo-Pacific Plate subduction beneath the Eurasian continent.

Key words: zircon Hf isotopes; Mesozoic; magma source; Cathaysia block; Zijinshan

华夏板块位于扬子克拉通东南侧,华南东南部,呈北东向展布。中生代时期板内岩浆活动强烈,根据构造环境的差异性,分为东西向的南岭带和北东向的沿海带。中生代时期,华夏板块经历了构造体制的转换,即由古特提斯构造体系向古太平洋构造体系的转换,但不同学者对体系转换的时间界定不一(徐夕生等,1999,2005;Zhou and Li,2000;Zhou *et al.*,2006;舒良树,2012;张岳桥等,2012),而北东向的中生代火山岩形成与古太平洋板块的俯冲有着密切关系。福建紫金山地区中生代岩浆岩属于华夏板块北东向的沿海带,著名的紫金山超大型 Cu-Au 矿床发现于此。研究表明,紫金山多期次岩浆活动使得该地区能形成以紫金山高硫型浅成低温热液 Cu-Au 矿床为中心的斑岩-浅成低温热液成矿系统(So *et al.*,1998,毛建仁等,2002,2004;张德全等,2003,2005;Jiang *et al.*,2013),因此,探讨该地区中生代岩浆源区及演化对识别该地区构造域的属性和多金属矿床的形成也就有着重要意义。

前人利用 Nd 同位素对福建乃至华夏地区显生宙火成岩源区问题开展了大量研究(黄萱等,1986;沈渭洲等,1993,2000;Gilder *et al.*,1996;Chen and Jahn,1998;邢光福等,1998;凌洪飞等,1999;邱检生等,2008)。近年来,也有学者结合锆石 U-Pb 年龄通过 Hf 同位素来探讨华夏板块的演化(Xu *et al.*,2007;Yu *et al.*,2009;Sun *et al.*,2011)。除了广泛应用于研究壳-幔演化(Patchett and Tatsumoto,1981a,1981b;Patchett *et al.*,1981,2004;Audrey *et al.*,2008;Catherine *et al.*,2008),Lu-Hf 同位素在研究岩体的演化和源区问题上比 Nd 同位素更具有优越性(吴福元等,2007)。

Jiang 等(2013)在利用元素地球化学和 Nd-Sr-Pb 同位素对紫金山地区中生代岩浆岩岩浆源区进行探讨时,发现岩石 CIA 指数非常高(54.8~98.4,而花岗岩类新鲜样品为 54~55),且有一个样品 ϵNd 值出现异常。因而,本文利用 LA-MC-ICP-MS 测定分析锆石 Hf 同位素组成,进一步明确福建紫金山地区中生代岩浆岩岩浆源区及演化过程。

1 区域地质背景

华夏板块北东向沿海火山岩带以政和-大浦断裂带为界(Chen and Jahn,1998)分为东西两个带(图 1a),以燕山早期为主的花岗质岩浆活动分布在西部广大区域,包括浙江和福建西部以及近东西向的南岭花岗岩带,东部的闽浙沿海地区为以燕山晚期为主的火山岩带(朱春林等,1997)。福建紫金山中生代岩浆岩出露在北东向政和-大浦断裂与北西向上杭-云霄深断裂的交汇处,北西向上杭白垩纪火山-沉积盆地的东北缘。区域出露的地层主要有早震旦世楼子坝群、晚泥盆世天瓦素组和桃子坑组、早石炭世林地组、早白垩世石帽山群以及第四系。

紫金山中生代岩浆岩体总体上呈北东向展布(图 1b),包括中-晚侏罗世的花岗质岩体和早白垩世的火山-侵入杂岩(张德全等,2001a,2001b)。中-晚侏罗世的紫金山岩体沿 NE 向宣和复背斜轴部侵入,先后形成迳美中粗粒花岗岩(165.4 Ma, LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 法, Jiang *et al.*, 2013)、五龙寺中细粒黑云母花岗岩(164.3 Ma, LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 法, Jiang *et al.*, 2013)和金龙桥细粒白云母花岗岩(156.8 Ma, LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 法, Jiang *et al.*, 2013)。中-晚侏罗世的才溪岩

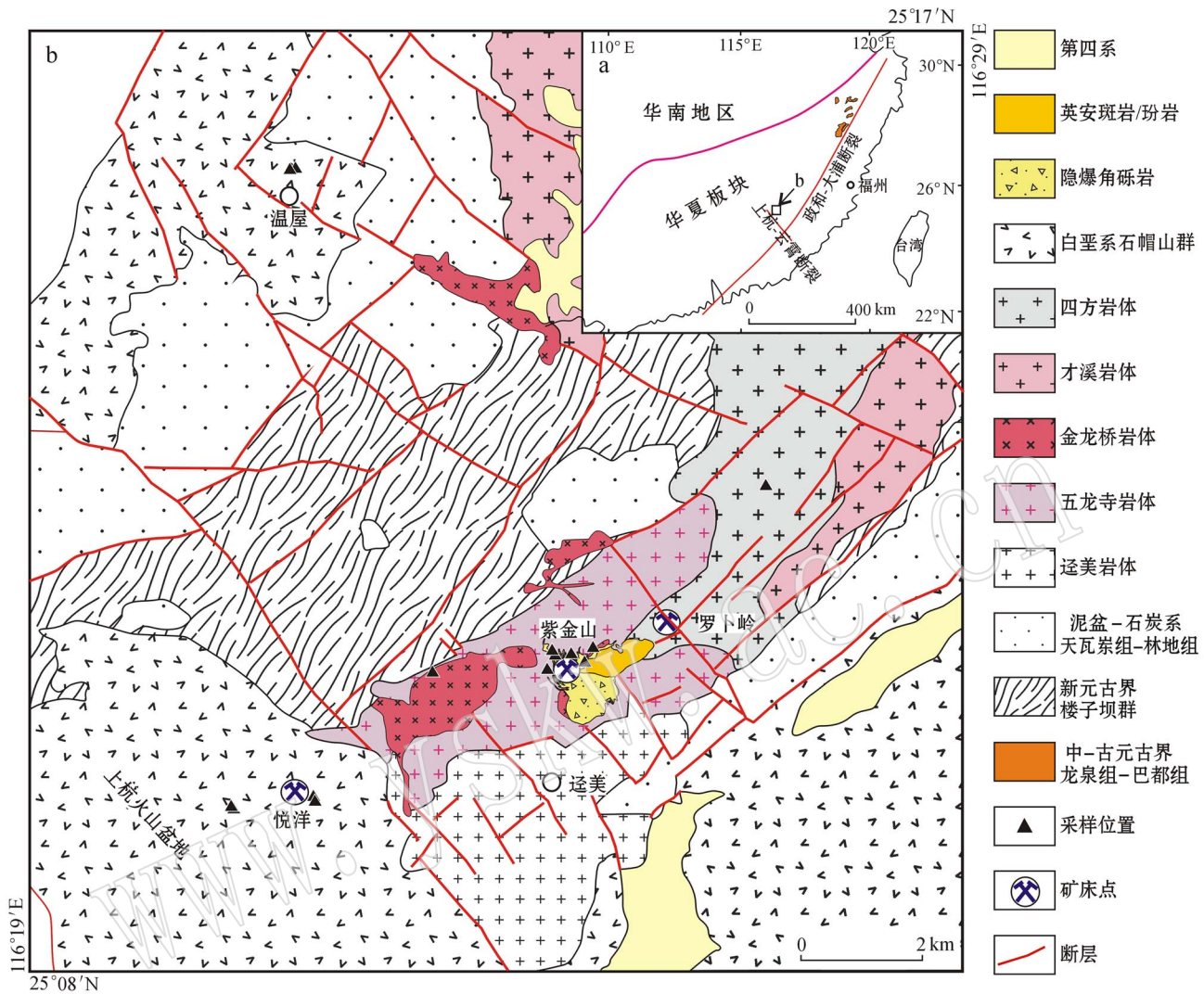


图 1 紫金山地区地质简图(据 Yu *et al.*, 2009; Jiang *et al.*, 2013)

Fig. 1 Sketch geological map of Zijinshan area (modified after Yu *et al.*, 2009; Jiang *et al.*, 2013)

体(150 Ma; SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, 赵希林等, 2007)位于紫金山矿田北部, 为二长花岗岩。四方和罗卜岭岩体分布于紫金山的北东部, 四方岩体(111.5 Ma, LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 法, Jiang *et al.*, 2013)侵入于才溪岩体, 主要为花岗闪长岩; 罗卜岭花岗闪长斑岩(104~98 Ma, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法, 黄文婷等, 2013)侵入于紫金山岩体, 出露面积较小。火山-次火山岩(110.7±0.6~101.8±0.2 Ma, LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 法, Jiang *et al.*, 2013)包括英安玢岩、英安岩、流纹岩、火山角砾岩、石帽山群火山岩等, 主要分布在紫金山岩体中和上杭火山盆地。著名的紫金山斑岩-浅成低温热液 Cu-Au-Ag-Mo 多金属矿田与早白垩世的火山-侵入活动

在时空上紧密相连(张德全等, 2001a, 2001b; 毛景文等, 2004)。

2 采样及 Hf 同位素分析

本次 Hf 同位素分析样品来自 Jiang 等(2013)在紫金山地区开展的 LA-MC-ICP-MS 锆石测年样品, 采样位置详见图 1。

本文锆石原位 Hf 同位素分析测试是在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室的 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上完成的。实验过程中使用锆石国际标样 GJ1 为参考, Hf 同位素分析点在 U-Pb 分析点上进行, 采用 He 作为

剥蚀物质载气,剥蚀直径采用 $55 \mu\text{m}$,剥蚀时间为 27 s。分析流程及 Yb、Lu 的校正方法详见侯可军等(2007)。测试锆石标准 GJ1 的 29 个点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282\,006 \pm 2(2\sigma)$,与文献报道值(Elhlou *et al.*, 2006; 侯可军等, 2007)在误差范围内完全一致。

3 分析结果

此次对 14 件样品共分析了 209 颗岩浆锆石,结果见表 1 和图 2。结果表明,中-晚侏罗世的花岗质侵入岩和早白垩世的侵入-次火山岩具有不同的 Hf 同位素组成。

3.1 中-晚侏罗世侵入岩

迳美岩体共测试了 29 个岩浆锆石点。锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.282\,292 \sim 0.282\,500$,对应的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 均为负值,介于 $-13.5 \sim -6.1$ 。Hf 同位素单阶段模式年龄 t_{DM} 介于 $1\,071 \sim 1\,354 \text{ Ma}$;二阶段模式年龄 t_{DM}^{C} 介于 $1\,693 \sim 2\,157 \text{ Ma}$ 。五龙寺岩体共分析了 13 颗锆石。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.282\,360 \sim 0.282\,593$,对应的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值变化范围较大,为 $-11.1 \sim -2.9$, t_{DM} 为 $943 \sim 1\,162 \text{ Ma}$, t_{DM}^{C} 为 $1\,484 \sim 2\,005 \text{ Ma}$ 。金龙桥岩体所测的 15 颗锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.282\,354 \sim 0.282\,492$, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值 $-11.6 \sim -6.7$, t_{DM} 介于 $1\,105 \sim 1\,303 \text{ Ma}$, t_{DM}^{C} 为 $1\,711 \sim 2\,018 \text{ Ma}$ 。从分析结果来看,迳美岩体、五龙

寺岩体、金龙桥岩体三期岩浆活动具有相似的锆石 Hf 同位素特征。

3.2 早白垩世岩浆岩

3.2.1 早白垩世侵入岩

四方花岗闪长岩体共测得 15 组数据。锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.282\,664 \sim 0.282\,718$,对应的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值 $-2.3 \sim 0.4$ 。 t_{DM} 和 t_{DM}^{C} 分别介于 $791 \sim 884 \text{ Ma}$ 和 $1\,203 \sim 1\,374 \text{ Ma}$ 。早白垩世侵入岩体与中-晚侏罗世侵入岩体 Hf 同位素特征明显不同,表明两者源区存在明显差异。

3.2.2 早白垩世次火山岩

紫金山次火山岩 5 件样品共测得 75 组数据,锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 $0.282\,453 \sim 0.282\,874$,对应的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值变化范围大,介于 $-8.9 \sim 5.6$ 之间。 t_{DM} 和 t_{DM}^{C} 分别为 $587 \sim 1\,116 \text{ Ma}$ 和 $851 \sim 1\,796 \text{ Ma}$ 。

悦洋次火山岩共测得 32 组数据。锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 $0.282\,438 \sim 0.282\,628$,对应的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-9.6 \sim -2.7$, t_{DM} 为 $876 \sim 1\,151 \text{ Ma}$, t_{DM}^{C} 为 $1\,395 \sim 1\,831 \text{ Ma}$,与紫金山次火山岩 Hf 同位素存在一定差异。

温屋次火山岩共测得 30 组数据。锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 $0.282\,492 \sim 0.282\,598$,对应的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-7.7 \sim -3.9$, t_{DM} 介于 $915 \sim 1\,069 \text{ Ma}$, t_{DM}^{C} 介于 $1\,474 \sim 1\,710 \text{ Ma}$ 。温屋与悦洋次火山岩 Hf 同位素特征相似,与紫金山早白垩世次火山岩存在差异,表明岩浆源区组分发生了变化。

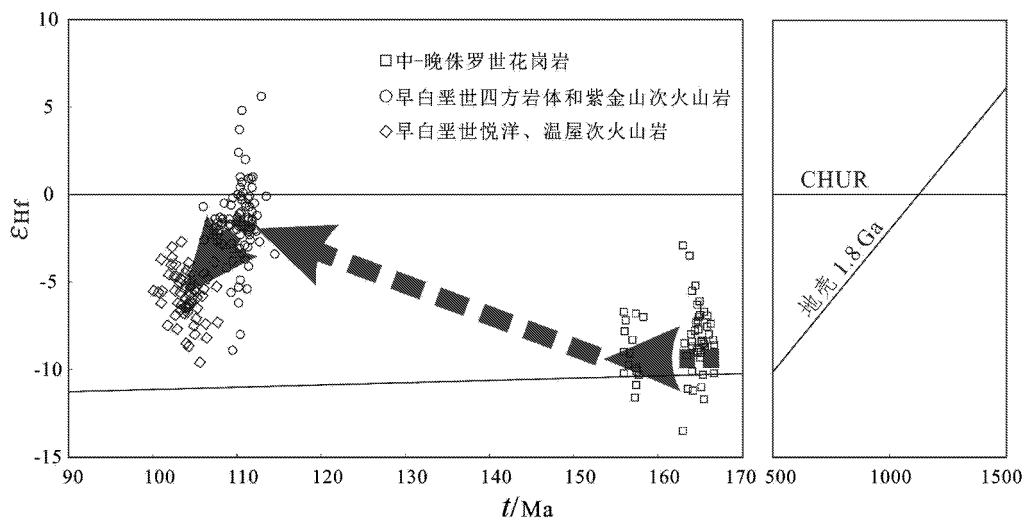


图 2 紫金山地区中生代岩浆岩锆石 Hf 同位素组成

Fig. 2 Zircon Hf isotopic compositions of Mesozoic magmatic rocks in Zijinshan area

表 1 紫金山地区中生代岩浆岩锆石原位 Hf 同位素分析结果
Table 1 In situ Hf isotopic analyses of zircons from Mesozoic magmatic rock in Zijinshan area

时代	样品编号	个数	t/Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$\epsilon_{HF}(0)$	$\epsilon_{HF}(t)$	t_{DM}/Ma	t_{DM}^*/Ma	$f_{Lu/Hf}$		
中生代	逢美岩体													
		ZJ10-13	16	165.4	0.043 967~0.102 287	0.000 900~0.001 935	0.282 292~0.282 500	0.000 017~0.000 027	-17.0~-9.7	-13.5~-6.1	1 071~1 354	1 693~2 157	-0.98~-0.94	
		ZJ10-14	13	164.8	0.030 767~0.093 302	0.000 583~0.001 256	0.282 356~0.282 484	0.000 016~0.000 024	-14.7~-10.2	-11.2~-6.7	1 089~1 252	1 728~2 041	-0.98~-0.95	
		五龙寺岩体												
		ZJ10-2	13	164.3	0.032 453~0.122 215	0.000 595~0.002 277	0.282 360~0.282 593	0.000 013~0.000 023	-14.6~-6.3	-11.1~-2.9	943~1 162	1 484~2 005	-0.98~-0.93	
		金龙桥岩体												
		ZJ10-25	15	156.8	0.028 058~0.155 842	0.000 520~0.002 906	0.282 354~0.282 492	0.000 015~0.000 027	-14.8~-9.9	-11.6~-6.7	1 105~1 303	1 711~2 018	-0.97~-0.91	
	早白垩世	四方岩体												
			ZJ10-34	15	111.5	0.044 885~0.115 277	0.001 130~0.002 652	0.282 664~0.282 718	0.000 015~0.000 019	-4.6~-1.9	-2.3~-0.4	791~884	1 203~1 374	-0.97~-0.92
			紫金山火山-次火山岩											
			ZJ10-5	19	110.7	0.046 642~0.073 026	0.000 945~0.001 557	0.282 667~0.282 810	0.000 017~0.000 020	-3.7~-1.3	-1.3~-3.7	630~832	998~1317	-0.97~-0.96
			ZJ10-29	13	110.3	0.054 107~0.074 314	0.001 154~0.002 418	0.282 532~0.282 657	0.000 015~0.000 018	-8.5~-4.1	-6.2~-1.8	860~1 024	1 340~1 620	-0.97~-0.93
			ZJ10-12	17	109.6	0.064 670~0.332 610	0.001 400~0.002 711	0.282 589~0.282 874	0.000 016~0.000 026	-6.5~-3.6	-4.2~-5.6	587~969	851~1 492	-0.97~-0.96
			ZJ10-7	7	109.8	0.068 960~0.013 505	0.000 299~0.001 337	0.282 453~0.282 670	0.000 013~0.000 016	-11.3~-3.6	-8.9~-1.2	815~1 116	1 312~1 796	-0.99~-0.96
			ZJ10-23	19	107.5	0.044 558~0.066 487	0.000 996~0.001 517	0.282 626~0.282 694	0.000 015~0.000 019	-5.2~-2.8	-2.9~-0.5	794~898	1 259~1 410	-0.97~-0.95
		悦洋火山-次火山岩												
		ZJ10-16	17	105.2	0.040 156~0.091 973	0.000 777~0.001 956	0.282 438~0.282 596	0.000 015~0.000 019	-11.8~-4.9	-9.6~-2.7	876~1 151	1 395~1 831	-0.98~-0.94	
		ZJ10-22	15	101.8	0.050 916~0.122 825	0.000 890~0.002 309	0.282 498~0.282 628	0.000 015~0.000 020	-9.7~-5.1	-7.5~-3.0	912~1 062	1 406~1 696	-0.98~-0.95	
		温屋火山-次火山岩												
		ZJ10-31	15	103.9	0.030 816~0.055 098	0.000 757~0.001 106	0.282 492~0.282 581	0.000 017~0.000 028	-9.9~-6.7	-7.7~-4.5	944~1 069	1 510~1 710	-0.98~-0.97	
		ZJ10-32	15	104.1	0.061 758~0.022 354	0.000 550~0.001 031	0.282 506~0.282 598	0.000 017~0.000 022	-9.4~-6.2	-7.1~-3.9	915~1 050	1 474~1 678	-0.98~-0.96	

注: $\epsilon_{HF}(t) = 10 000 \times [((^{176}Hf/^{177}Hf)_S - (^{176}Lu/^{177}Hf)_S \times (e^{\lambda t} - 1)) / ((^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR,0} - (^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR} \times (e^{\lambda t} - 1))] - 1$;

$t_{DM} = 1/\lambda \times \ln [1 + [((^{176}Hf/^{177}Hf)_S - (^{176}Lu/^{177}Hf)_S \times (e^{\lambda t} - 1)) / ((^{176}Lu/^{177}Hf)_S - (^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM}]]$;

$t_{DM}^* = t_{DM} - (t_{DM} - t) \times [(f_{CC} - f_S) / (f_{CC} - f_{DM})]$; $f_{Lu/Hf} = (^{176}Lu/^{177}Hf)_S / ((^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR} - 1$;

其中: $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}/a$ (Schoelkopf *et al.*, 2004); t 为锆石结晶年龄;

$(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR,0} = 0.032 2$; $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR,0} = 0.282 772$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997);

$(^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM} = 0.038 4$; $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM} = 0.283 25$; $f_{DM} = 0.16$ (Griffin *et al.*, 2000); $f_{CC} = -0.337 5$ (Amelin *et al.*, 1999)。

4 讨论

4.1 岩浆源区

从 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图 [$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为平均值, 图 3] 可以看出, 中-晚侏罗世花岗岩落在下地壳单元内, 早白垩世侵入-次火山岩则落在了下地壳-洋岛玄武岩单元, 表明两期岩浆来源于不同的源区。前人获得的元素地球化学特征数据, 也认为两期岩体来源于不同的源区, 但对具体物源是什么以及所占的比例是多少仍然存在异议(张德全等, 2001b; 毛建仁等, 2004; Jiang *et al.*, 2013), 而锆石 Hf 同位素分析则能在同一个岩石样品中获得不同成因锆石的 Hf 同位素组成, 这对示踪岩浆源区和识别一个岩体是否有多组组分参与成岩过程将十分有效。

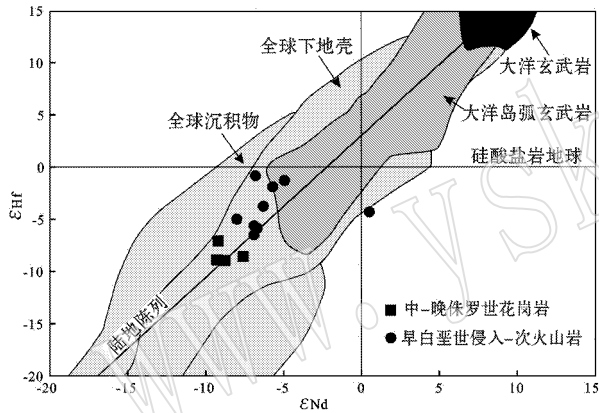


图 3 紫金山地区中生代岩浆岩 $\epsilon_{\text{Hf}} - \epsilon_{\text{Nd}}$ 关系图

(据 Dobosi *et al.*, 2003; ϵ_{Nd} 值据 Jiang *et al.*, 2013)

Fig. 3 Plot of ϵ_{Hf} versus ϵ_{Nd} for Mesozoic magmatic rock in Zijinshan area (modified after Dobosi *et al.*, 2003; ϵ_{Nd} values after Jiang *et al.*, 2013)

4.1.1 中-晚侏罗世岩体

中-晚侏罗世紫金山岩体 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $-13.5 \sim -2.9$ 之间, t_{DM}^{C} 峰值在 $1700 \sim 2000$ Ma (图 4), 对于该岩体的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和模式年龄一个直接的解释是来源于古元古代地壳熔融。目前, Nd-Hf 同位素研究表明华夏地区显生宙火成岩源区主要为元古代基地 (Gilder *et al.*, 1996; Chen and Jahn, 1998; Xu *et al.*, 2007; Shu *et al.*, 2011)。于津海等 (2006b) 认为华夏地块前寒武纪岩石主要是在新元古代形成, 但大量的资料也显示华夏地块存在一个主要由古元古代和中元古代地壳组成的变质基底(沈渭洲等, 1993, 2003; 于津海等, 2006a, 2007; Zheng *et al.*,

2006)。武夷山地区 $1855 \sim 1888$ Ma 花岗岩及变质岩的发现证明了政和-大浦断裂以西的西华夏地块存在古元古基底 (Yu *et al.*, 2009) (图 1a), 且 Xu 等 (2007) 认为加里东期 (450 Ma)、印支期 (240 Ma) 和早燕山期 (160 Ma) 为西华夏地块发生折返的主要时期。紫金山中-晚侏罗世花岗岩年龄为 $157 \sim 164$ Ma, 形成于西华夏地块的主要折返期, 因此, 尽管在紫金山地区并未发现古元古代地层, 但仍可推断其深部有可能存在古元古代基底。

4.1.2 早白垩世侵入-次火山岩

早白垩世紫金山侵入-次火山岩包括了四方花岗闪长岩和紫金山次火山岩, 四方岩体位于次火山岩的北东侧, 次火山岩与紫金山铜金矿化成因上密切联系。四方岩体 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-2.3 \sim 0.4$, 紫金山次火山岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-8.9 \sim 5.6$ 之间, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化幅度较大, 且散布于正值与负值之间 (图 4) 的特征亦指示它们经历了比较显著的壳幔岩浆混合过程 (Griffin *et al.*, 2002; Belousova *et al.*, 2006), 元素地球化学特征也显示具壳幔混合岩浆的特征 (张德全等, 2001b; Jiang *et al.*, 2013)。四方岩体 t_{DM}^{C} 峰值变化在 $1300 \sim 1400$ Ma (图 4), 紫金山次火山岩 t_{DM}^{C} 峰值在 $1100 \sim 1500$ Ma 之间, 表明均来源于中元古代地壳。Xu 等 (2007) 在研究华夏地区演化史时认为西华夏地块也有少量中元古代基底, 因此, 四方花岗闪长岩和紫金山次火山岩很可能都是由深部中元古代基底和上涌的地幔物质混合产生。同时, 两者都具火山弧花岗岩或者活动大陆边缘花岗岩的特征 (Jiang *et al.*, 2013), 故四方花岗闪长岩和紫金山次火山岩很可能是同一物源区先后就位形成的。

悦洋和温屋次火山岩具有相似的 Hf 同位素特征, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-9.6 \sim -2.7$, t_{DM}^{C} 峰值介于 $1400 \sim 1700$ Ma, 说明两者都主要来源于中元古代-古元古代基底和少量地幔物质的混合物。Hf 同位素特征以及悦洋和温屋相距仅约 8 km, 说明两者很可能为同一源区。从元素地球化学特征 (Jiang *et al.*, 2013) 和 Hf 同位素特征来看, 紫金山侵入-次火山岩和悦洋、温屋次火山岩都来自同一岩浆房, 悦洋和温屋较低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值显示是岩浆演化后期的产物, 即幔源物质的减少以及古元古代基底物质的加入。

4.2 岩浆源区演化

紫金山地区因是我国著名的矿集区, 且成矿作用与中生代岩浆活动密切相关, 因此, 前人对该区岩

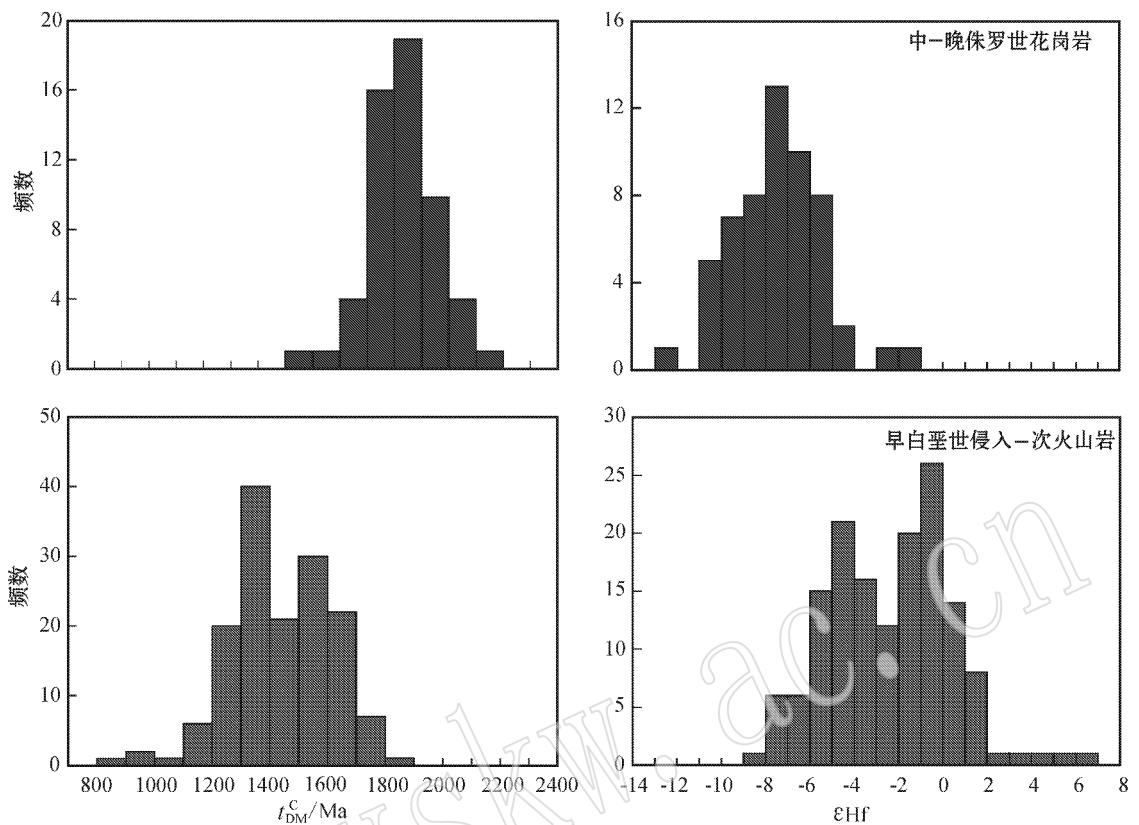


图 4 紫金山地区中生代岩浆岩体锆石 ϵHf 值与二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM}^{C}) 频数分布直方图

Fig. 4 Histograms of zircon ϵHf values and two-stage Hf model ages of Mesozoic magmatic rock in Zijinshan area

浆活动与成矿作用的关系取得了一定认识。研究(张德全等, 2003; Jiang *et al.*, 2013)表明, 紫金山形成以斑岩矿为中心的整个斑岩-浅成低温热液型成矿系统与早白垩世的侵入-次火山岩活动密切相关。已有的元素地球化学结果显示, 紫金山中-晚侏罗世花岗岩和早白垩世花岗闪长岩都具火山弧花岗岩或者活动大陆边缘花岗岩的特征, 但 Sr-Nd-Pb 同位素表明中-晚侏罗世花岗岩可能主要是早元古代基底部分熔融形成的, 而早白垩世花岗闪长岩和火山岩则是壳幔熔体混合产物(Jiang *et al.*, 2013)。从本文锆石 Hf 同位素特征来看, 尽管单阶段模式年龄显示为早元古代-中元古代, 但对于花岗质岩体来说 t_{DM}^{C} 能更真实的反映壳幔分异的时代(吴福元等, 2007), 因此, 本文认为紫金山地区中生代岩浆岩源区主要与中-古元古代基底物质相关, 同时亦反映了 Hf 同位素对源区示踪的优越性。

尽管学者对华夏板块处于古太平洋板块俯冲作用环境的时间界定不一, 但普遍认为从中-晚侏罗世开始已经处于古太平洋板块向欧亚板块俯冲的环境

(Zhou and Li, 2000; 谢昕等, 2005; Zhou *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2007; Jiang *et al.*, 2013)。因此, 紫金山地区从中-晚侏罗世时期开始, 由于古洋壳的俯冲导致古元古代基底地壳物质部分熔融形成紫金山花岗岩体; 早白垩世时期, 古洋壳继续俯冲, 导致地幔物质上涌和古洋壳物质的加入, 与中元古代基底形成混合岩浆区。早白垩世时期侵入-次火山岩的 Hf 同位素特征显示了复杂的壳幔作用过程: 从四方岩体(112 Ma)的侵入到紫金山次火山岩(108 Ma)的形成, Hf 同位素特征显示为 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值介于正负之间(-8.9~5.6), t_{DM}^{C} 峰值在 1100~1500 Ma 之间, 反映上涌的地幔物质混合有中元古代基底物质, 随着源区岩浆演化, 从悦洋次火山岩(105 Ma)开始, 一直到温屋次火山岩(102 Ma)的形成, 岩浆组分发生了明显变化, 岩浆锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值变小, 介于 -9.6~-2.7 之间, t_{DM}^{C} 峰值介于 1400~1700 Ma, 说明幔源物质的减少以及少量古元古代基底的加入。源区的变化说明紫金山地区在早白垩世时期古洋壳俯冲作用发生了改变, 有可能是俯冲作用的减弱引

起的,亦是俯冲方向、角度或速率的改变(Engelbretson *et al.*, 1985; Northrup *et al.*, 1995; Ren *et al.*, 2002)。

Hf 同位素特征显示早白垩世与中-晚侏罗世岩浆岩两者源区明显不同,尽管两者都具火山弧花岗岩或者活动大陆边缘花岗岩的特征,但该区大规模的成矿事件却只发生在白垩纪时期,因而成矿作用可能是与上涌的地幔物质有关。毛建仁等(2004)在分析该区成岩成矿作用时认为紫金山地区的成矿物质铜及其他金属来源于地幔,早白垩世时期花岗岩体为该区的主要含矿母岩。同时研究表明,东南沿海地区在燕山晚期受古太平洋板块向欧亚板块俯冲作用的影响,导致弧后拉张、岩石圈减薄、地幔物质上涌(徐夕生等, 1999; 华仁民等, 2003; 毛景文等, 2004),引起大量的岩浆活动以及 Au、Cu、Pb-Zn、Ag 等矿化(Pirajno and Bagas, 2002)。因此,本文认为紫金山地区早白垩世时期的成矿作用与幔源岩浆的参与有关,大量的铜、金等金属成矿物质可能来源于地幔,而幔源物质的上涌正是由古太平洋板块的俯冲作用所引起的。

5 结论

(1)福建紫金山地区中生代岩浆岩锆石 Hf 同位素分析结果表明,中-晚侏罗世与早白垩世岩浆岩具有不同的岩浆源区:①中-晚侏罗世花岗岩体岩浆源区主要来源于古元古代基底;②早白垩世侵入-次火山岩分为四方花岗闪长岩体和紫金山次火山岩、悦洋次火山岩以及温屋次火山岩,但岩体来源于同一岩浆源区,只是随着时间的演化(112~102 Ma)岩浆源区成分逐渐发生变化,早期为地幔与中元古代基底的混合,晚期幔源物质减少以及有少量古元古代基底加入。

(2)紫金山地区中-晚侏罗世和早白垩世岩浆岩均为古太平洋板块俯冲作用的产物,而紫金山地区大规模的成矿事件只发生在白垩纪时期,因而成矿作用可能是与上涌的地幔物质有关。

References

Ameline Y, Lee D C, Halliday A N, *et al.* 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. *Nature*, 399: 252~255.

- Audrey B, Vervoort J D and Patchett P J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 273: 48~57.
- Belousova E A, Griffin W L and O'Reilly S Y. 2006. Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modelling: Examples from eastern Australian granitoid[J]. *Journal of Petrology*, 47(2): 329~353.
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243~258.
- Catherine C, Eric L, Marion C, *et al.* 2008. Role of recycled oceanic basalt and sediment in generating the Hf-Nd mantle array[J]. *Nature*, 1: 64~67.
- Chen J F and Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Tectonophysics*, 284: 101~133.
- Dobosi G, Kempton P D, Downes H, *et al.* 2003. Lower crustal granulite xenoliths from the Pannonian Basin, Hungary, Part 2: Sr Nd Pb Hf and O isotope evidence for formation of continental lower crust by tectonic emplacement of oceanic crust[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144: 671~683.
- Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, *et al.* 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158.
- Engelbretson D, Cox A and Gordon R G. 1985. Relative plate motions between ocean and continental plates in the Pacific basin[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 206: 1~59.
- Gilder S A, Gill J, Coe R S, *et al.* 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 101(B7): 16 137~16 154.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SC China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61: 237~269.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological application[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595~2 604 (in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, *et al.* 2003. Metallogenic systems related to Mesozoic and Cenozoic granitoids in South China[J]. *Science in China (Series D)*, 46(8): 816~829.
- Huang Wenting, Li Jing, Liang Huaying, *et al.* 2013. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and highly oxidized features of magma associated with Luoboling porphyry Cu-Mo deposit in Zijinshan ore field, Fu-

- jian Provincel [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 29(1): 283 ~ 293 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xuan , Sun Shihua , Depaolo D J , *et al.* 1986. Nd-Sr isotope study of cretaceous magmatic from Fujian province [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 2(2): 50 ~ 63 (in Chinese with English abstract).
- Jiang S H , Liang Q L , Bagas L , *et al.* 2013. Geodynamic setting of the Zijinshan porphyry-epithermal Cu-Au-Mo-Ag ore system , SW Fujian Province , China : constrains from the geochronology and geochemistry of the igneous rocks [J]. *Ore Geology Reviews* , 53 : 287 ~ 305.
- Li X H , Li Zh X , Li W X , *et al.* 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 ? [J]. *Lithos* , 96 : 186 ~ 204.
- Ling Hongfei , Shen Weizhou and Huang Xiaolong. 1999. Nd and Sr isotopic compositions of granitoids of Fujian and their significancel [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 15(2): 255 ~ 262 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jianren , Tao Kuiyuan , Li Jiyu , *et al.* 2002. Geochronology and geochemical characteristics in Late Mesozoic Sifang pluton , southwestern Fujian , and their significancel [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 18(4): 449 ~ 458 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jianren , Xu Naizheng , Hu Qing , *et al.* 2004. The Mesozoic rock-forming and ore-forming processes and tectonic environment evolution in Shanghang-Datian region , Fujian [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 20(2): 285 ~ 296 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen , Xie Guiqing , Li Xiaofeng , *et al.* 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China [J]. *Earth Science Frontiers* , 11(1): 45 ~ 55 (in Chinese with English abstract).
- Northrup C J , Royden L H and Burchfiel B C. 1995. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia [J]. *Geology* , 23(8): 719 ~ 722.
- Patchett P J , Kuovo O , Hedge C E , *et al.* 1981. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity : evidence from Hf isotopes [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 78(3): 279 ~ 297.
- Patchett P J and Tatsumoto M. 1981a. The hafnium isotopic evolution of lunar basalts [J]. *Lunar and Planetary Science* , 12 : 819 ~ 821.
- Patchett P J and Tatsumoto M. 1981b. Lu/Hf in chondrites and definition of a chondritic hafnium growth curve [J]. *Lunar and Planetary Science* , 12 : 822 ~ 824.
- Patchett P J , Vervoort J D , Söerlund U , *et al.* 2004. Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systematics in chondrites and their constraints on the Lu-Hf properties of the Earth [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 222 : 29 ~ 41.
- Pirajno F and Bagas L. 2002. Gold and silver metallogeny of the South China Fold Belt : a consequence of multiple mineralizing events ? [J]. *Ore Geology Reviews* , 20 : 109 ~ 126.
- Qiu Jiansheng , Xiao E , Hu Jian , *et al.* 2008. Petrogenesis of highly fractionated I -type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province : Constraints from zircon U-Pb geochronology , geochemistry and Nd-Hf isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 24(11): 2468 ~ 2484 (in Chinese with English abstract).
- Ren J , Tamaki K , Li S , *et al.* 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas [J]. *Tectonophysics* , 344 : 175 ~ 205.
- Shen Weizhou , Ling Hongfei , Li Wuxian , *et al.* 2000. Crust evolution in southeast China : evidence from Nd model ages of granitoids [J]. *Science in China Series D : Earth Sciences* , 43(1): 36 ~ 49.
- Shen Weizhou , Yu Jinghai , Zhao Lei , *et al.* 2003. Nd isotopic characteristics of post-Archean sediments from the Eastern Nanling Range : Evidence for crustal evolution [J]. *Chinese Science Bulletin* , 48(16): 1679 ~ 1685.
- Shen Weizhou , Zhu Jinchu , Liu Changshi , *et al.* 1993. Sm-Nd isotopic study of basement metamorphic rocks in South China and its constraint on material sources of granitoids [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 9(2): 115 ~ 124 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. *Geological Bulletin of China* , 31(7): 1035 ~ 1053 (in Chinese with English abstract).
- Shu L S , Faure M , Yu J H , *et al.* 2011. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China) : New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia [J]. *Precambrian Research* , 187 : 263 ~ 276.
- So C S , Zhang D Q , Yun S T , *et al.* 1998. Alteration-mineralization zoning and fluid inclusions of the high sulfidation epithermal Cu-Au mineralization at Zijinshan , Fujian Province , China [J]. *Economic Geology* , 93 : 961 ~ 980.
- Soderlund U , Patchett P J , Vervoort J D , *et al.* 2004. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 219 : 311 ~ 324.
- Sun Y , Ma C Q , Liu Y Y , *et al.* 2011. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of late Triassic aluminous A-type granites in southeast China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* , 42 : 1117 ~ 1131.
- Wu Fuyuan , Li Xianhua , Zheng Yongfei , *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 23(2): 185 ~ 220 (in Chinese with English abstract).
- Xie Xin , Xu Xisheng , Zou Haibo , *et al.* 2006. Early J₂ basalts in SE China : Incipience of large-scale late Mesozoic magmatism [J]. *Science in China Series D : Earth Sciences* , 49(8): 796 ~ 815.

- Xing Guangfu and Tao Kuiyuan. 1998. The impact of Sr content on Sr isotope of magmatic rocks during crust-mantle interaction-an application to petrogenesis of Cretaceous bimodal rocks in the coastal region of Southeastern China[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 19(1):24~33 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng and Xie Xin. 2005. Late Mesozoic-Cenozoic basaltic rocks and crust-mantle interaction, SE China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3):318~334 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng, Zhou Xinming and Wang Dezi. 1999. Crust-mantle interaction and the genesis of granite: A case study of coastal area of Southeastern China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 5(3):241~250 (in Chinese with English abstract).
- Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. 2007. The crust of Cathaysia: Age, assembly and reworking of two terranes[J]. *Precambrian Research*, 158:51~78.
- Yu Jinhai, O'Reilly Y S, Wang Lijuan, et al. 2007. Finding of ancient materials in Cathaysia and implication for the formation of Precambrian crust[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(1):13~22.
- Yu J H, Wang L J, O'Reilly S Y, et al. 2009. A Paleoproterozoic orogeny recorded in a long-lived cratonic remnant (Wuyishan terrane), eastern Cathaysia Block, China[J]. *Precambrian Research*, 174:347~363.
- Yu Jinhai, Wang Lijuan, Zhou Xinming, et al. 2006a. Compositions and formation history of the basement metamorphic rocks in north-eastern Guangdong Province[J]. *Earth Science*, 31(1):38~48 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jinhai, Wei Zhenyang, Wang Lijuan et al. 2006b. Cathaysia Block: a young continent composed of ancient materials[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(4):440~447 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dequan, She Hongquan, Li Daxing, et al. 2001a. The temporal and special framework of the Mesozoic magmatic system in the Zijinshan region and its geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(5):403~408 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dequan, She Hongquan, Yan Shenghao, et al. 2001b. Geochemistry of Mesozoic magmatites in the Zijinshan region and implication on regional tectonic inversion[J]. *Geological Review*, 47(6):608~616 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dequan, She Hongquan, Li Daxing, et al. 2003. The porphyry-epithermal metallogenic system in the Zijinshan region, Fujian province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(2):253~261 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dequan, She Hongquan, Li Daxing, et al. 2005. The evolution of ore-forming fluids in the porphyry-epithermal metallogenic system of Zijinshan area[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(2):127~136 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, et al. 2012. The new progress in the study of Mesozoic tectonic of South China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(3):257~279 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xilin, Mao Jianren, Chen Rong, et al. 2007. Zircon SHRIMP age and geochemical characteristics of the Caixi pluton in southwestern Fujian Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogia*, 26(3):223~231 (in Chinese with English abstract).
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. 2006. Widespread Archean basement beneath the Yangtze craton[J]. *Geology*, 34(6):417~420.
- Zhou X M and Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magma[J]. *Tectonophysics*, 326:269~287.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 29(1):26~33.
- Zhu Chunlin and Long Bin. 1997. Evolution of granitoids in Southern China[J]. *Geotectonic and Metallogenia*, 21(2):181~188 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 侯可军,李延河,邹天人,等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. *岩石学报*, 23(10):2595~2604.
- 华仁民,陈培荣,张文兰,等. 2003. 华南中、新生代与花岗岩有关的成矿系统[J]. *中国科学(D辑)*, 33(4):335~343.
- 黄文婷,李晶,梁华英,等. 2013. 福建紫金山矿田罗卜岭铜钼矿化斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及成矿岩浆特征研究[J]. *岩石学报*, 29(1):283~293.
- 黄莹,孙世华,Depaolo D J,等. 1986. 福建省白垩纪岩浆岩 Nd、Sr 同位素研究[J]. *岩石学报*, 2(2):50~63.
- 凌洪飞,沈渭洲,黄小龙. 1999. 福建省花岗岩类 Nd-Sr 同位素特征及其意义[J]. *岩石学报*, 15(2):255~262.
- 毛建仁,陶奎元,李寄岬,等. 2002. 闽西南晚中生代四方岩体同位素年代学、地球化学及其构造意义[J]. *岩石学报*, 18(4):449~458.
- 毛建仁,徐乃政,胡青,等. 2004. 福建省上杭-大田区中生代成岩成矿作用与构造环境演化[J]. *岩石学报*, 20(2):285~296.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,等. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. *地学前缘*, 11(1):45~55.
- 邱检生,肖娥,胡建,等. 2008. 福建东北沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. *岩石学报*, 24(11):2468~2484.
- 沈渭洲,凌洪飞,李武显,等. 2000. 中国东南部花岗岩类的 Nd 模

- 式年龄与地壳演化[J]. 中国科学(D辑), 30(5): 471~478.
- 沈渭洲, 朱金初, 刘昌实, 等. 1993. 华南基底变质岩的 Sm-Nd 同位素及其对花岗岩类物质来源的制约[J]. 岩石学报, 9(2): 115~124.
- 沈渭洲, 于津海, 赵 蕾, 等. 2003. 南岭东段后太古宙地层的 Sm-Nd 同位素特征与地壳演化[J]. 科学通报, 48(16): 1740~1745.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1035~1053.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 谢 昕, 徐夕生, 邹海波, 等. 2005. 中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕: J₂ 早期玄武岩[J]. 中国科学(D辑), 33(7): 587~605.
- 邢光福, 陶奎元. 1998. 在壳幔作用过程中 Sr 含量对岩浆岩 Sr 同位素组成的影响——兼论东南沿海白垩纪双峰式火山岩成因[J]. 火山地质与矿产, 19(1): 24~33.
- 徐夕生, 周新明, 王德滋. 1999. 壳幔作用与花岗岩成因——以中国东南沿海为例[J]. 高校地质学报, 3(3): 241~250.
- 徐夕生, 谢 昕. 2005. 中国东南部晚中生代-新生代玄武岩与壳幔作用[J]. 高校地质学报, 11(3): 318~334.
- 于津海, 王丽娟, 周新民, 等. 2006a. 粤东北基底变质岩的组成和形成时代[J]. 地球科学, 31(1): 38~48.
- 于津海, 魏震洋, 王丽娟, 等. 2006b. 华夏地块: 一个由古老物质组成的年轻陆块[J]. 高校地质学报, 12(4): 440~447.
- 于津海, O'Reilly Y S, 王丽娟, 等. 2007. 华夏地块古老物质的发现和前寒武纪地壳的形成[J]. 科学通报, 52(1): 11~18.
- 张德全, 余宏全, 李大兴, 等. 2001a. 紫金山地区中生代岩浆系统的时空结构及其地质意义[J]. 地球学报, 22(5): 403~408.
- 张德全, 余宏全, 阎升好, 等. 2001b. 福建紫金山地区中生代构造环境转换的岩浆岩地球化学证据[J]. 地质评论, 47(6): 608~616.
- 张德全, 余宏全, 李大兴, 等. 2003. 紫金山地区的斑岩-浅成热液成矿系统[J]. 地质学报, 77(2): 253~261.
- 张德全, 丰成友, 李大兴, 等. 2005. 紫金山地区斑岩-浅成热液成矿系统的成矿流体演化[J]. 地球学报, 26(2): 127~136.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. 地球学报, 33(3): 257~279.
- 赵希林, 毛建仁, 陈 荣, 等. 2007. 闽西南地区才溪岩体锆石 SHRIMP 定年及其地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 26(3): 223~231.
- 朱春林, 龙 斌. 1997. 华南花岗岩类的演化特征[J]. 大地构造与成矿学, 21(2): 181~188.