

福建龙岩大洋-莒舟花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义^{*}

张承帅¹ 苏慧敏¹ 于淼¹ 胡兆国²

ZHANG ChengShuai¹, SU HuiMin¹, YU Miao¹ and HU ZhaoGuo²

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国冶金地质总局山东正元地质勘察院, 济南 250101

1. Faculty of Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Shandong Zhengyuan Institute of Geological Exploration, China Central Bureau of Metallurgy and Geology, Jinan 264002, China

2011-09-20 收稿, 2011-11-09 改回.

Zhang CS, Su HM, Yu M and Hu ZG. 2012. Zircon U-Pb age and Nd-Sr-Pb isotopic characteristics of Dayang-Juzhou granite in Longyan, Fujian Province and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 225–242

Abstract Makeng Fe deposit is a large strata-bound skarn-type magnetite deposit. Juzhou-Dayang granite exposed on either side of Makeng deposit, and had genetic relationship to ore bodies. The SHRIMP zircon U-Pb age of Dayang granite is 132.6 ± 1.3 Ma, MSWD = 1.3; The LA-ICP-MS zircon U-Pb age of Juzhou granite is 129.6 ± 0.8 Ma, MSWD = 2.3, indicating that they formed in Early Cretaceous, which identified with the time when Makeng deposit (130 ~ 133 Ma, Re-Os age) were formed. Juzhou-Dayang granite is regarded as the weakly peraluminous-metaluminous granite, which is characterized by high silicon, enrichment of alkali, low calcium and magnesium, and high differentiation index. The rocks have high and remarkably varying REE, and their distribution patterns show LREE enrichment with gentle right oblique deviation, and a “V” model characterized by significant negative Eu anomaly; The trace elements compositions are strongly enriched in Rb, U, Th and La and considerably depleted in Ba, Sr, P and Ti; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70878 \sim 0.71349$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.2 \sim -8.6$, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = -0.27 \sim 0.16$, $t_{2\text{DM}} = 1511 \sim 1637$ Ma, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 18.588 \sim 18.955$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.660 \sim 15.682$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 38.935 \sim 39.168$, $\mu = 9.54 \sim 9.59$, $\omega = 36.77 \sim 38.13$. The petrogeochemistry and isotopic characteristics of Dayang-Juzhou granite show that it is regarded as the crust-derived type granite, and experiences high differentiated evolution. The lithospheric thinning in relation to paleo-Pacific plate is a likely responsible mechanism for their formation. The magma sources of the Dayang-Juzhou granite mainly derived from Proterozoic crustal materials, but also involved some portions of EMII component, which reduced crustal residence age of the granite.

Key words Dayang-Juzhou granite; Zircon U-Pb age; Nd-Sr-Pb isotopic characteristics; Fujian

摘 要 马坑铁矿是一个大型层控矽卡岩型矿床, 大洋、莒舟花岗岩分布于铁矿东西两侧, 与铁矿关系密切。本文利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年法测得莒舟花岗岩年龄为 129.6 ± 0.8 Ma, MSWD = 2.3, 利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年法测得大洋花岗岩年龄为 132.6 ± 1.3 Ma, MSWD = 1.3, 它们都形成于早白垩世, 与马坑铁矿辉钼矿 Re-Os 年龄 (130 ~ 133 Ma) 一致。大洋-莒舟花岗岩具高硅、富碱、贫钙镁和高分异指数等特点, 属弱过铝或准铝质花岗岩; 岩石稀土元素含量较高, 配分模式呈轻稀土富集并缓向右倾斜, 呈明显负铕异常的“V”型展布; 微量元素具有 Rb、U、Th、La 等元素强烈富集而 Ba、Sr、P、Ti 等元素相对亏损的特点; 大洋岩体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值变化于 0.70878 ~ 0.71349 之间; $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化于 -7.2 ~ -8.6 之间, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = -0.27 \sim 0.16$, $t_{2\text{DM}} = 1511 \sim 1637$ Ma, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 18.588 \sim 18.955$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.660 \sim 15.682$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 38.935 \sim 39.168$, μ 值介于 9.54 ~ 9.59, ω 值介于 36.77 ~ 38.13。岩石地球化学和同位素组成特征表明大洋-莒舟花岗岩属于高分异壳源型花岗岩, 形成于岩石圈减薄的背景下。花岗岩主要来源于元古代地壳物质, 有 EM II 型富集地幔组分的参与, 使花岗岩的

^{*} 本文受国家重点基金项目 (40930419)、中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2011PY0158) 和国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室开放研究项目联合资助。

第一作者简介: 张承帅, 男, 1985 年生, 博士生, 矿床学专业, E-mail: zhangchengshuai@gmail.com

地壳留存年龄的降低(1.51~1.63Ga)。

关键词 大洋-莒舟花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; Nd-Sr-Pb 同位素特征; 福建
中图法分类号 P588.121; P597.3

华南地区是东亚大陆边缘的重要组成部分,中生代发生了大规模多期次的岩浆活动,是我国东部中生代大规模成矿或大爆发成矿最具代表性的区带之一(毛景文等,1999,2005;华仁民等,2005;陶奎元等,1999;Xie *et al.*, 2007)。近年来,研究的焦点逐渐集中到岩浆活动的动力学机制及相关的成矿作用(毛景文等,2004,2007,2008b,2011;蒋少涌等,2008)。闽西南地区位于南岭成矿带东段与东南沿海岩浆岩带的衔接处,是中生代太平洋板块与欧亚板块相互作用的重要地区(赵希林等,2007,2008,2009)。区内中生代岩浆活动强烈,成矿地质条件优越,蕴藏着众多金属矿床(点)(吴淦国等,2000;毛建仁等,2001,2002,2006)。马坑铁矿是区内最大的一个铁矿床,位于福建省龙岩市东南12km处,已探明铁矿石量约4.3亿吨,钼矿石量约8万吨(张承帅,2010),矿化发育于莒舟-大洋花岗岩外接触带内黄龙组(C_2h)灰岩和林地组(C_1l)碎屑岩层间构造破碎带中,其辉钼矿 Re-Os 年龄为 133.0 ± 0.8 Ma(张承帅等,2012),是研究闽西南花岗岩成岩、成矿作用的理想场所。前人已对大洋和莒舟岩体的年代学进行了一些研究,如地质三所测得大洋花岗岩黑云母 K-Ar 法年龄为 124 ± 4 Ma, 莒舟岩体钾长石 Rb-Sr 法年龄为 95.5 Ma(洪大卫等,1980);成都地院和桂林地质所分别测得莒舟岩体黑云母 K-Ar 年龄为 112Ma 和 164Ma;地矿所测得大洋花岗岩钾长石 Rb-Sr 法年龄为 156Ma(赵一鸣等,1983);毛建仁等(2006)测得莒舟花岗岩体单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 136Ma 和 133.9Ma。

马坑铁(钼)矿成岩成矿年龄虽然大体一致,但是前人报道的大洋、莒舟岩体成岩年龄所跨时间范围相对较大,因此还需要进行精确的年代学限定;大洋、莒舟花岗岩体出露于马坑铁矿东西两侧,与成矿关系密切,已有的岩石地球化学数据尚无法满足这种需要,尤其是同位素数据的缺乏严重影响了对岩浆源区等问题的讨论;对闽西南“马坑式”铁矿的深入研究有赖于对含矿岩体与不含矿岩体及不同时代不同成因岩体的成岩过程、构造环境及地球动力学的对比研究,这一方面的工作目前仍比较薄弱。本文针对以上几个方面问题,对大洋、莒舟花岗岩进行了岩石地球化学、锆石 U-Pb 定年和 Sr-Nd-Pb 同位素的研究,旨在进一步确定岩体的形成时代,探讨岩浆源区、成岩过程及与马坑铁矿的关系。

1 地质概况和岩石学特征

大洋、莒舟花岗岩体位于永梅上古生代拗陷带中部的龙章复向斜内(地矿所第三铁矿队,1978^①)。其中,大洋岩体位于龙岩市东南16km处,呈南北向展布,长26km,最宽处3km,面积约28km²;莒舟岩体位于龙岩市东南18km处,呈北

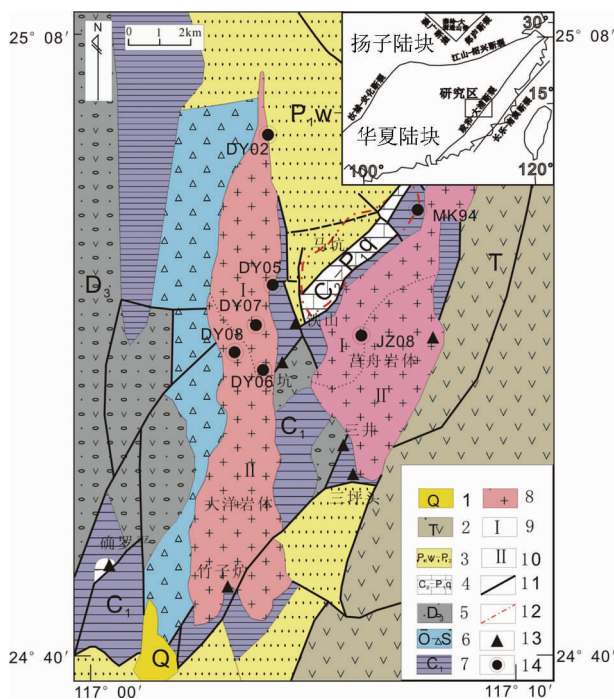


图1 大洋和莒舟岩体地质简图(据赵一鸣等,1983修改)

1-第四系地层;2-三叠系砂岩;3-二叠系文笔山-翠屏山组砂岩;4-石炭系黄龙组-二叠系栖霞组灰岩;5-上泥盆统粉砂岩;6-奥陶-志留系变质砂岩;7-下石炭统林地组粉砂岩;8-花岗岩;9-中细粒斜长花岗岩相;10-中粗粒黑云花岗岩相;11-断层;12-马坑隐伏矿体投影;13-铁矿点;14-样品位置

Fig.1 Simplified geologic map of the Dayang and Juzhou plutons(after Zhao *et al.*, 1983)

1-Quaternary strata; 2-Triassic sandstone; 3-Wenbisha-Chuipingshan Formation sandstone of Permian; 4-limestone of Huanglong Formation of Carboniferous and Xixia Formation of Permian; 5-siltstone of Upper Devonian; 6-Ordovician-Silurian metamorphic sandstone and siltstone; 7-Lindi Formation quartz sandstone of Lower Carboniferous; 8-granites; 9-medium-fine grained plagioclase granite; 10-medium coarse grained biotite granite; 11-fault; 12-location of ore bodies at the surface; 13-mineral occurrence; 14-sampling position

东向葫芦状,长约12km,南部最宽3.5km,面积21.5km²,大洋岩体与莒舟岩体在地表出露的最近距离仅1km,马坑矿区位于其中(图1)。大洋和莒舟岩体分异明显,相带发育,均为北部出露黑云母正长花岗岩岩相(中粗粒花岗结构)(图2a),南部出露微斜长石花岗岩岩相(中细粒花岗结构)(图

① 地矿所第三铁矿队. 1978. 闽西南某些燕山期花岗岩的岩石特征及其与铁矿成矿关系的探讨(内部报告). 1-127

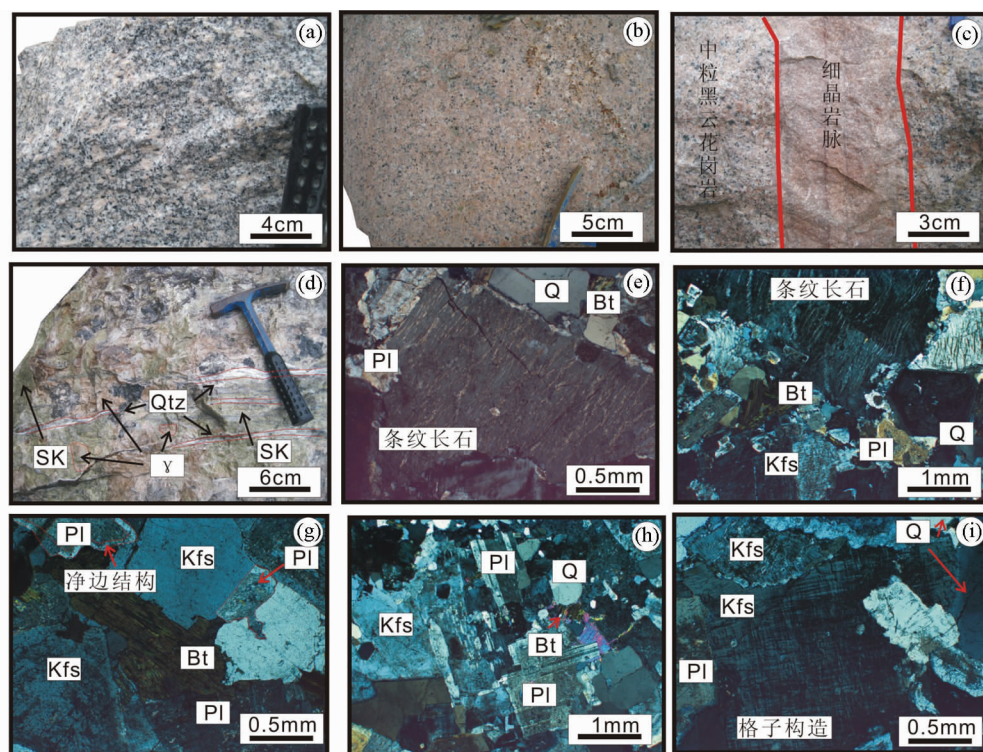


图2 大洋-莒舟花岗岩岩石标本和显微照片

(a)-灰白色中粗粒黑云花岗岩, DY08, 大洋岩体; (b)-中细粒黑云母花岗岩, DY07, 大洋岩体; (c)-大洋花岗岩内细晶岩脉; (d)-砂卡岩化花岗岩, 莒舟岩体; (e)-条纹长石显微照片, DY08, 正交偏光; (f, g)-中粗粒黑云母花岗岩显微照片, 样品 DY08, 正交偏光; (h, i)-中细粒黑云花岗岩显微照片, DY07, 正交偏光。Kfs-钾长石; Bt-黑云母; Q-石英; Qtz-石英脉; Pl-斜长石; SK-砂卡岩; γ-花岗岩

Fig. 2 Sample photos and microphotographs of Dayang-Juzhou granite

(a)-grey white medium coarse grained biotite granite, DY08, Dayang granite; (b)-pale red medium tiny grained biotite granite, DY07, Dayang granite; (c)-aplite in Dayang granite; (d)-skarnization granite, Juzhou granite; (e)-photomicrograph of perthite, by polarizing microscope with perpendicular polarized light, DY08; (f, g)-photomicrograph of medium grain biotite granite, by polarizing microscope with perpendicular polarized light, DY08; (h, i)-photomicrograph of medium tiny grained biotite granite, by polarizing microscope with perpendicular polarized light, DY07. Kfs-potassium feldspar; Bt-biotite; Q-quartz; Qtz-quartz vein; Pl-plagioclase; SK-skarn; γ-granite

2b)。岩体与围岩呈明显的侵入接触关系, 石炭系下统至泥盆系上统石英砂岩(C_1-D_3)接触变质成石英角岩, 石炭系中统至二叠系下统灰岩(C_2-P_1)变质成砂卡岩(图2d、图3)。花岗岩成分比较均匀, 主要由钾长石、斜长石、石英和黑云母组成。岩体内部发育浅成相的脉岩, 如细晶岩、花岗斑岩和石英斑岩(图2c)。

结合 IUGS 的矿物 QAP 定量分类方案(1989), 在前人(赵一鸣等, 1983; 地矿所第三铁矿队, 1978)研究的基础上, 经过较为详细的手标本和显微镜观察, 大洋和莒舟花岗岩的岩相学特征如下:

(1)微斜长石花岗岩相(I), 由中细粒花岗岩、似斑状花岗岩及花岗斑岩组成。岩石为肉红色-灰白色, 具有中细粒花岗结构, 局部具斑状及文象结构, 主要由钾长石(45%~50%)、斜长石(15%~20%)、石英(25%~30%)、黑云母(1%~5%)及副矿物磷灰石、榍石组成。钾长石格子双晶清楚, 条纹长石不发育, 斜长石聚片双晶发育, 也出现泥化。石

英多呈他型粒状和不规则集合体, 有时也呈乳滴状。黑云母含量稍少, 绿泥石化较显著(图2h, i)。这一岩相主要集中在大洋和莒舟岩体北部(图1)。(2)黑云母正长石花岗岩相(II), 由中粗粒黑云母花岗岩和似斑状黑云母花岗岩组成, 呈浅肉红色-肉红色, 具中粗粒花岗结构和似斑状结构, 块状构造, 主要由钾长石(45%~50%)、斜长石(15%~25%)、石英(25%~30%)、黑云母(1%~5%)及副矿物磁铁矿、磷灰石、榍石组成。长石为条纹长石, 斜长石一般泥化较强, 表面浑浊, 绢云母化发育, 并具有明显的净边构造(图2e)。石英形态较规则, 有时沿裂隙被钾长石或斜长石填充、交代, 黑云母自形程度差, 不规则鳞片状, 多色性显著(图2f, g)。这一岩相主要发育岩体南部(图1)。另外大洋和莒舟花岗岩的另一显著特点是应变显现普遍而强烈, 石英破碎且出现不同程度的波状消光、黑云母解理纹扭曲等现象十分常见, 表明岩体受到后期作用的影响。

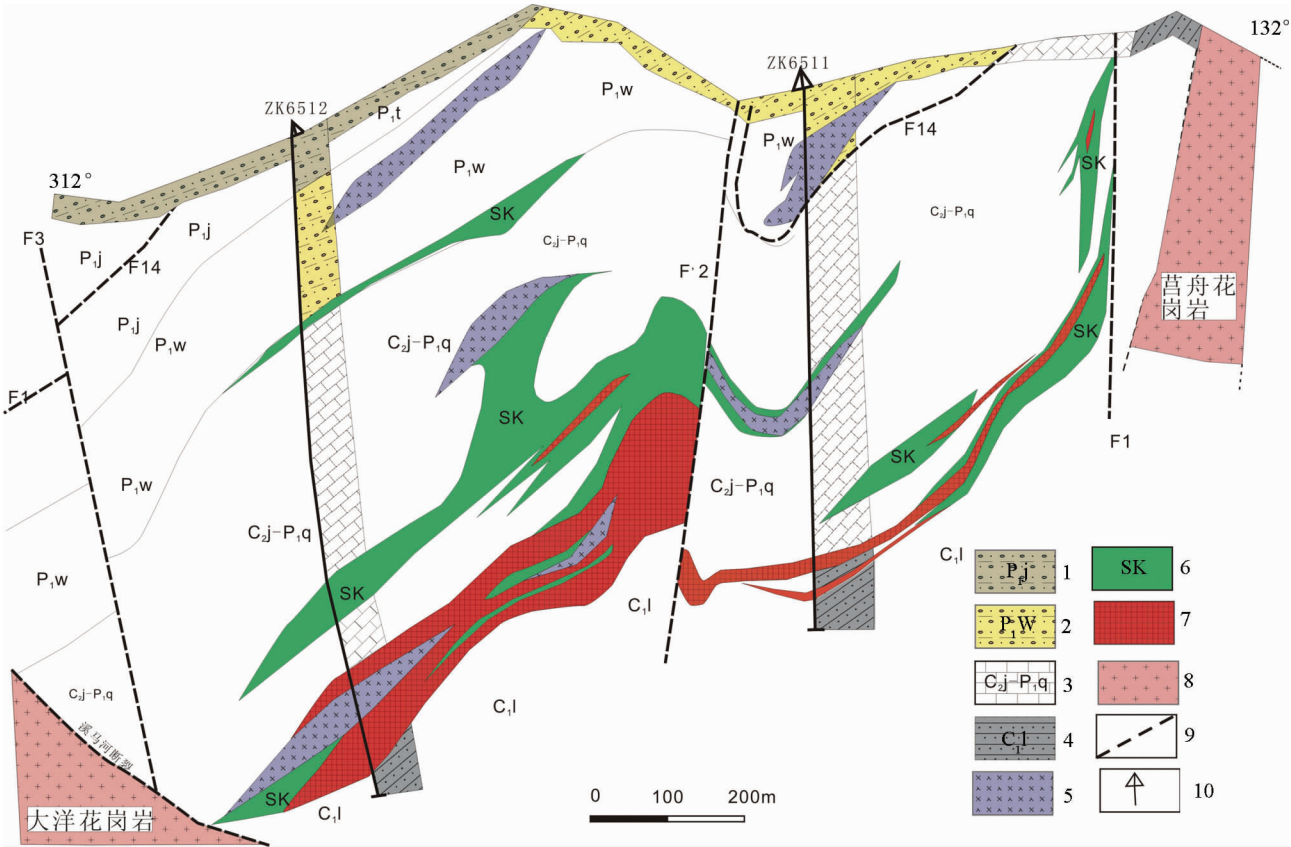


图3 马坑铁(钼)矿床 61 线剖面图(据赵一鸣等,1990 修改)
1-下二叠统加福组砂质页岩;2-下二叠统文笔山组页岩;3-石炭系黄龙组-二叠系栖霞组灰岩;4-下石炭统林地组石英砂岩;5-辉长-辉绿岩;
6-砂卡岩;7-矿体;8-细粒微斜长石花岗岩(I);9-断层;10-钻孔

Fig. 3 Geological section along exploration line 61 of the Makeng Fe-Mo Deposit (after Zhao *et al.* , 1990)
1-Jiafu Formation sandy shale of Lower Permian;2-Wenbishan Formation shale of Lower Permian;3-limestone of Huanglong Formation of Carboniferous and Xiaixia Formation of Permian; 4-Lindi Formation quartz sandstone of Lower Carboniferous; 5-gabbro-diabase; 6-skarn; 7-ore body;8- fine grained microcline granite(I); 9-fault; 10-drilling

2 岩体地质年代学

2.1 测试方法

本文样品 DY06 采自三坑采石场,距马坑铁矿约 1.5km,采自大洋花岗岩,样品 JZ08 采自莒舟村西南 100m 的公路旁,采自莒舟花岗岩,岩性都为中细粒黑云母花岗岩,具体采样位置见图 1。用常规方法将岩石样品破碎,经磁法和密度分选后,经过淘洗,最后在双目镜下挑纯。将待测样品锆石颗粒与标样 M257 和 TEM 置于环氧树脂制靶,然后研磨抛光直至有足够的新鲜锆石截面,使锆石内部结构暴露,对靶上锆石进行显微镜下透射光、反射光观察、照相,然后进行阴极发光成像,镀金以备分析测试。阴极发光(CL)成像在中国地质科学院地质所实验室完成(苏慧敏等,2010;周振华等,2010)。DY06 的锆石 U-Pb 测年分析在中国地质科学院北京离子探针中心 SHRIMP 上进行,JZ08 的锆石 U-Pb 同位素分

析在中国地质科学院矿床资源研究所锆石激光剥蚀等离子质谱(LA-ICP-MS)仪上完成,详细分析流程和数据处理过程见文献(宋彪等,2002;张东阳,2011)。为了保证测试结果的可靠性,每分析 2~3 个测点,测一次标样以监测仪器的稳定性和离子计数统计的精确性。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.* , 2010),普通铅校正采用 Andersen(2002)的方法,年龄计算使用 Isoplot(ver 3.00)完成(Ludwig, 2003)。

2.2 锆石特征及分析结果

对大洋和莒舟花岗岩分别挑选了 DY06、JZ08 两个样品中的锆石进行分析。锆石为半自形到他形,有较清晰的生长环带,DY06 粒径 70~150 μm ,JZ08 粒径 100~200 μm (图 4),表现出典型的岩浆锆石特征。本文利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年法对 DY06 共测定了 20 个数据点,主要测试数据和计算结果列于表 1。其中 18 个粒锆石的 18 个点在 128~136Ma 之间,变化范围小,在谐和图上组成密集的一簇,说明锆石保

表 1 大洋花岗岩体样品 DY06 中锆石 SHRIMP 的 U-Pb 同位素定年结果

Table 1 SHRIMP U-Pb isotopic dating results of zircons of sample DY06 from Dayang granite

测点号	²⁰⁶ Pb _c (%)	Th (×10 ⁻⁶)	U (×10 ⁻⁶)	Th/U	²⁰⁶ Pb*	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	1σ	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb Age (Ma)	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U Age (Ma)	1σ
DY06-1.1	1.20	352	413	0.85	6.4	.0586	2.5	0.14	8.6	.0208	2.2	138	195	132.8	2.9
DY06-2.1	1.00	459	505	0.91	8.6	.0557	2.2	0.14	6.3	.0216	2.1	74	140	137.8	2.9
DY06-3.1	0.62	253	287	0.88	4.5	.0522	3.0	0.13	6.0	.0206	2.3	54	134	131.6	2.9
DY06-4.1	0.27	798	554	1.44	14.5	.0502	2.8	0.14	3.9	.0211	1.9	101	81	134.5	2.5
DY06-5.1	0.66	430	430	1.00	7.9	.0536	2.3	0.14	6.3	.0213	1.9	109	142	136.2	2.6
DY06-6.1	0.36	576	930	0.62	10.4	.0510	2.3	0.14	4.0	.0208	1.9	103	83	133.0	2.5
DY06-7.1	0.20	369	434	0.85	6.7	.0500	3.2	0.14	4.7	.0210	1.9	114	102	133.9	2.6
DY06-8.1	0.54	286	433	0.66	5.2	.0540	3.5	0.14	6.3	.0210	3.1	177	129	133.8	4.1
DY06-9.1	0.69	642	1004	0.64	11.5	.0519	2.6	0.13	4.6	.0207	2.4	8	96	131.9	3.2
DY06-10.1	0.55	208	252	0.83	3.8	.0576	4.1	0.16	6.3	.0214	2.0	334	136	136.3	2.7
DY06-11.1	2.99	333	492	0.68	5.3	.0671	2.5	0.11	13.8	.0181	2.3	-194	342	115.6	2.6
DY06-12.1	0.86	482	557	0.87	8.1	.0561	2.5	0.13	4.9	.0194	1.9	155	106	123.7	2.3
DY06-13.1	1.16	447	479	0.93	7.8	.0556	2.1	0.13	6.2	.0200	1.9	-1	143	127.9	2.4
DY06-14.1	0.41	763	803	0.95	13.3	.0513	1.8	0.13	3.7	.0202	1.9	98	75	129.0	2.4
DY06-15.1	0.64	1036	1280	0.81	18.9	.0533	2.3	0.14	4.2	.0211	1.9	101	89	134.4	2.6
DY06-16.1	0.79	315	265	1.19	5.4	.0568	2.6	0.14	5.8	.0200	2.0	210	126	127.5	2.5
DY06-17.1	0.56	344	384	0.90	6.4	.0524	3.1	0.14	5.8	.0213	2.0	90	130	136.2	2.7
DY06-18.1	0.68	283	288	0.98	4.9	.0539	2.8	0.13	4.3	.0202	2.0	115	91	129.1	2.5
DY06-19.1	0.63	320	305	1.05	5.7	.0536	5.5	0.14	8.0	.0206	2.8	124	177	131.4	3.7
DY06-20.1	0.80	143	264	0.54	2.6	.0590	3.9	0.15	5.6	.0207	2.3	308	115	132.4	3.0

注: Pb_c 和 Pb* 分别代表普通铅和放射成因铅;假设 ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁸Pb/²³²Th 年龄谐和校正普通铅

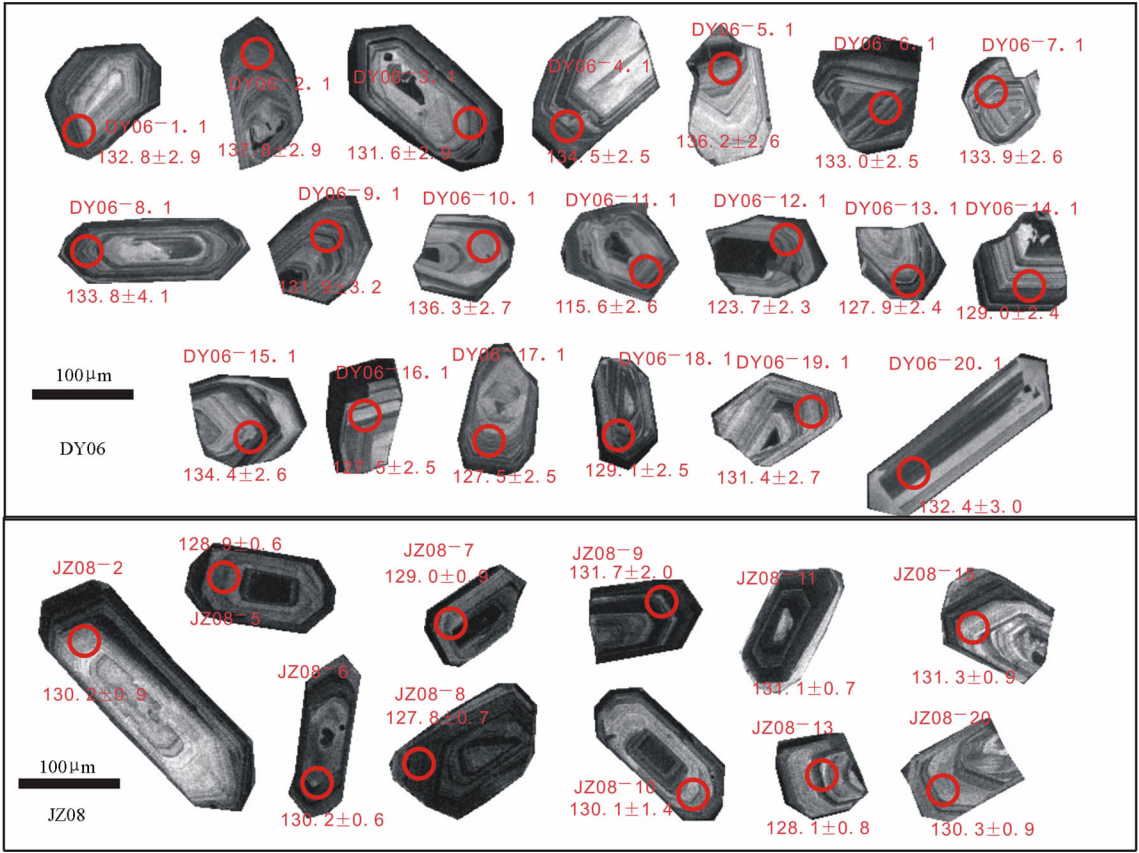


图 4 大洋和莒舟花岗岩部分锆石样品阴极发光(CL)图像及测试位置

Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircon and sites of analyzed point from Dayang and Juzhou granites

表2 营舟花岗岩体样品 JZ08 中锆石 LA-ICP-MS 的 U-Pb 同位素定年结果
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating results of zircons of sample JZ08 from Juzhou granite

测点号	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	Age (Ma)	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	Age (Ma)	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	Age (Ma)	1 σ	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	Age (Ma)	1 σ
* JZ08-1	83	89	0.93	0.0591	0.0002	0.1625	0.0038	0.0200	0.0002	0.0030	0.0005	569	49	153	3	128	1	61	10				
JZ08-2	201	257	0.78	0.0500	0.0007	0.1405	0.0018	0.0204	0.0001	0.0016	0.0002	198	32	133	2	130	1	32	5				
* JZ08-3	42	45	0.93	0.0501	0.0010	0.1348	0.0038	0.0196	0.0002	0.0050	0.0008	211	32	128	3	125	1	101	16				
* JZ08-4	72	60	1.20	0.1524	0.0007	0.4860	0.0088	0.0232	0.0002	0.0038	0.0006	2373	33	402	6	148	1	76	12				
JZ08-5	237	206	1.15	0.0501	0.0013	0.1396	0.0017	0.0202	0.0001	0.0014	0.0002	211	26	133	2	129	1	29	3				
JZ08-6	429	253	1.70	0.0497	0.0007	0.1397	0.0015	0.0204	0.0001	0.0008	0.0001	189	22	133	1	130	1	16	2				
JZ08-7	143	121	1.18	0.0490	0.0002	0.1362	0.0023	0.0202	0.0001	0.0021	0.0002	150	39	130	2	129	1	43	5				
JZ08-8	259	269	0.96	0.0497	0.0005	0.1369	0.0018	0.0200	0.0001	0.0011	0.0001	189	30	130	2	128	1	22	3				
JZ08-9	171	295	0.58	0.0533	0.0004	0.1515	0.0046	0.0206	0.0003	0.0017	0.0003	343	65	143	4	132	2	35	6				
JZ08-10	103	58	1.77	0.0502	0.0007	0.1410	0.0058	0.0204	0.0002	0.0020	0.0003	206	86	134	5	130	1	40	6				
JZ08-11	497	878	0.57	0.0532	0.0006	0.1507	0.0012	0.0205	0.0001	0.0009	0.0001	339	15	142	1	131	1	18	2				
* JZ08-12	126	72	1.75	0.0504	0.0005	0.1345	0.0033	0.0194	0.0001	0.0018	0.0002	213	49	128	3	124	1	36	4				
JZ08-13	163	187	0.87	0.0504	0.0003	0.1394	0.0032	0.0201	0.0001	0.0019	0.0003	213	52	132	3	128	1	38	5				
* JZ08-14	86	51	1.68	0.0530	0.0003	0.1411	0.0070	0.0193	0.0002	0.0028	0.0004	328	106	134	6	123	1	57	7				
JZ08-15	180	149	1.21	0.0534	0.0008	0.1515	0.0031	0.0206	0.0001	0.0015	0.0002	346	44	143	3	131	1	31	4				
* JZ08-16	270	350	0.77	0.0559	0.0005	0.1571	0.0025	0.0204	0.0001	0.0011	0.0001	456	33	148	2	130	1	21	3				
* JZ08-17	132	101	1.31	0.3138	0.0007	1.4922	0.0370	0.0338	0.0004	0.0036	0.0003	3540	22	927	15	214	3	73	7				
* JZ08-18	637	188	3.39	0.2742	0.0004	1.1812	0.0095	0.0313	0.0002	0.0012	0.0001	3331	11	792	4	198	1	24	2				
* JZ08-19	84	70	1.19	0.0495	0.0006	0.1349	0.0044	0.0198	0.0001	0.0027	0.0004	169	71	128	4	126	1	54	8				
JZ08-20	159	164	0.97	0.0492	0.0008	0.1383	0.0027	0.0204	0.0001	0.0014	0.0002	167	38	132	2	130	1	27	4				

注: * 表示未计算

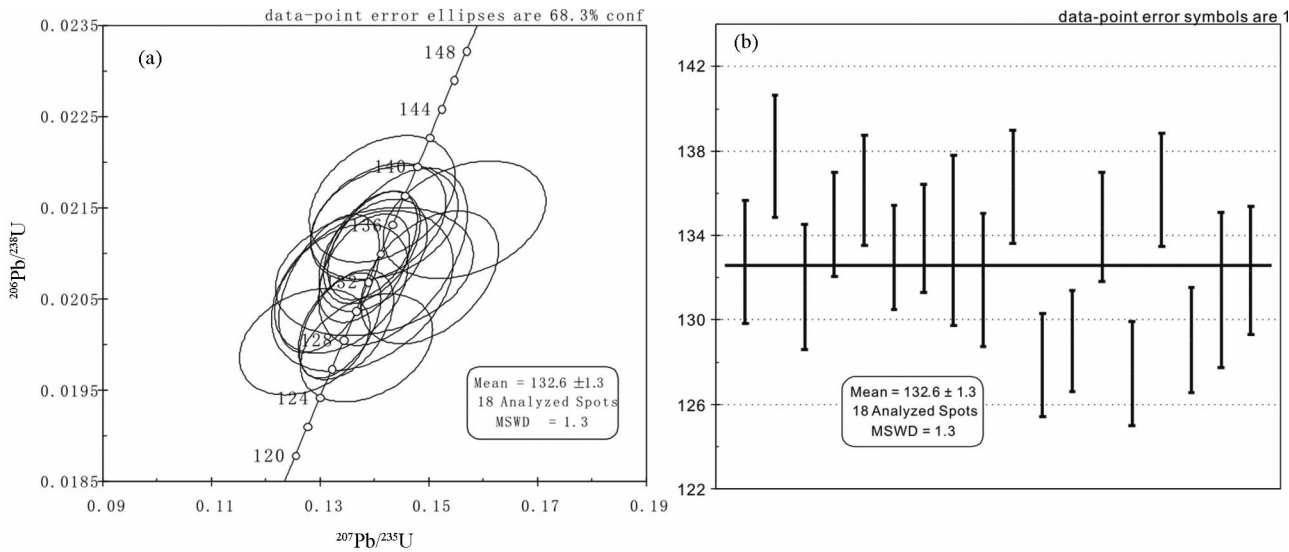


图5 大洋花岗岩 DY06 样品的锆石 U-Pb 年龄及谐和图
Fig.5 Zircon U-Pb age and its concordia diagram of DY06 sample from Dayang granite

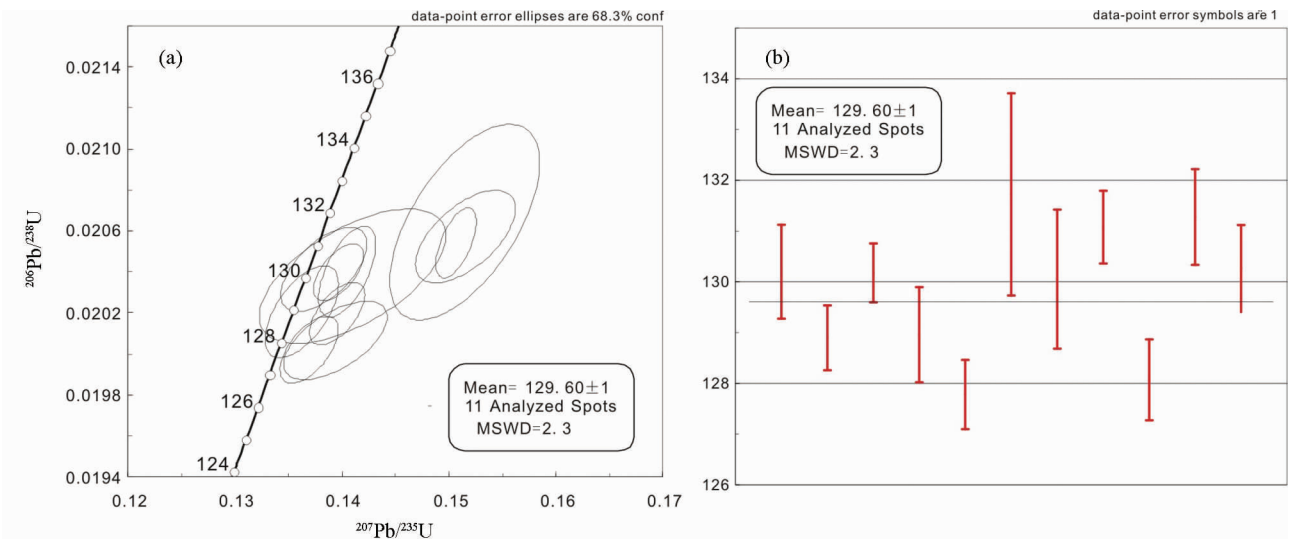


图6 莒舟花岗岩 JZ08 样品的锆石 U-Pb 年龄及谐和图
Fig.6 Zircon U-Pb age and its concordia diagram of JZ08 sample from Juzhou granite

持了良好的 U-Pb 封闭体系,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 $132.6 \pm 1.3\text{Ma}$, MSWD = 1.3, 其中 DY06-11.1 和 DY06-12.1 结果偏年轻,出现轻微偏离谐和线,可能是由于发生 Pb 丢失所致,因此舍弃这两个点的结果(图5)。样品中锆石的 U、Th 含量较低, Th/U 比值集中, $U = 252 \times 10^{-6} \sim 1280 \times 10^{-6}$, $Th = 208 \times 10^{-6} \sim 1036 \times 10^{-6}$, $Th/U = 0.54 \sim 1.44$, 应属岩浆成因锆石(吴元保和郑永飞, 2004)。利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年法对 JZ08 样品测定了 20 个数据点,主要测试数据和计算结果列于表 2。其中 11 个粒锆石的 11 个点在 128 ~ 131Ma 之间,变化范围小,在谐和图上组成密集的一簇,说明锆石保持了良好的 U-Pb 封闭体系,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均

年龄为 $129.6 \pm 0.8\text{Ma}$, MSWD = 2.3, 其中 1、12、14、19 号点的结果偏年轻,出现轻微偏离谐和线,可能是由于发生 Pb 丢失所致;4 号点(148Ma), 17 号点(214Ma), 18 号点(198Ma)的结果较大,可能为捕获锆石,故将以上 9 个点剔除(图6)。样品中锆石的 U、Th 含量较高, $U = 58 \times 10^{-6} \sim 878 \times 10^{-6}$, $Th = 103 \times 10^{-6} \sim 429 \times 10^{-6}$, Th/U 值范围与 DY06 类似, $Th/U = 0.57 \sim 1.70$, 也表明为岩浆成因锆石(吴元保和郑永飞, 2004)。由上文可知,虽然采用不同测试方法,但 DY06 测试结果为 $132.6 \pm 1.3\text{Ma}$, JZ08 测试结果为 $129.6 \pm 0.8\text{Ma}$, 两者几乎一致,表明大洋岩体与莒舟岩体的成岩时代一致。

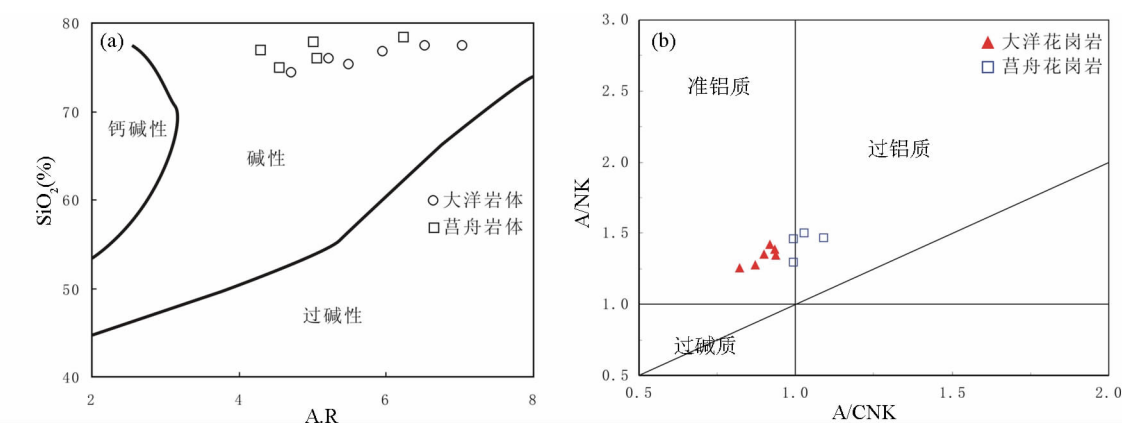


图7 莒舟-大洋岩体的SiO₂-AR关系图(a)(底图据Wright, 1969)和A/CNK-A/NK图(b)

Fig. 7 Diagrams of SiO₂-AR(a, after Wright, 1969) and A/CNK-A/NK (b) from Dayang-Juzhou pluton

表3 大洋和莒舟岩体主量元素组成(wt%)

Table 3 Major elements compositions of Dayang and Juzhou plutons (wt%)

样品号	DY02	DY05	DY06	DY07	DY07-3	DY08	MK-94	JZ1	JZ2	JZ3	JZ4
岩性	大洋花岗岩(I)				大洋花岗 细晶岩	大洋花岗岩 (II)	近矿莒舟花 岗岩小岩枝	莒舟花岗岩			
SiO ₂	77.42	75.98	76.88	75.39	77.52	74.4	78.44	74.94	76.06	76.91	77.83
TiO ₂	0.04	0.09	0.08	0.09	0.02	0.16	0.038	0.11	0.18	0.10	0.19
Al ₂ O ₃	10.71	11.53	11.88	11.91	11.45	12.31	10.6	12.9	12.44	12.06	11.08
Fe ₂ O ₃	0.32	0.64	0.39	0.58	0.37	0.65	0.13	0.32	0.49	0.48	0.72
FeO	0.25	0.65	0.25	0.7	0.2	1.15	0.2	0.95	1.04	0.58	1.09
FeO ^T	0.54	1.22	0.60	1.22	0.53	1.74	0.31	1.24	1.48	1.01	1.74
Fe ₂ O ₃ ^T	0.6	1.36	0.67	1.36	0.59	1.93	0.35	1.38	1.65	1.12	1.93
MnO	0.03	0.07	0.04	0.07	0.02	0.07	0.02	0.04	0.03	0.04	0.07
MgO	0.05	0.25	0.09	0.12	0.04	0.21	0.18	0.17	0.40	0.13	0.17
CaO	0.94	0.75	0.51	0.86	0.48	1.04	0.69	0.84	0.26	0.87	0.47
Na ₂ O	3.7	3.47	3.93	3.76	4.57	3.79	1.79	3.5	3.09	3.29	2.85
K ₂ O	4.85	4.86	4.89	5.07	4.39	4.88	6.38	5.28	5.42	4.75	4.85
P ₂ O ₅	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.04	0.01	0.05	0.02	0.03	0.07
烧失量	1.58	1.47	0.97	1.25	0.84	1.1	1.45	0.64	0	0.46	0
Total	98.32	98.32	98.96	98.58	99.07	98.70	98.47	99.10	99.43	99.23	99.39
(DI)	95.94	95.07	97.63	95.68	96.76	93.3	96.39	93.52	94.39	93.99	94.42
A/NK	1.25	1.38	1.35	1.35	1.28	1.42	1.30	1.47	1.46	1.50	1.44
A/CNK	0.82	0.94	0.94	0.9	0.87	0.92	0.96	0.99	1.09	0.99	1.03
K/N	1.31	1.40	1.24	1.35	0.96	1.29	3.56	1.51	1.75	1.44	1.70
AKI	1.06	0.95	0.99	0.98	1.07	0.94	0.93	0.89	0.88	0.88	0.90
ALK	8.55	8.33	8.82	8.83	8.96	8.67	8.17	8.78	8.51	8.04	7.7
SI	0.55	2.53	0.94	1.17	0.42	1.97	2.07	1.66	3.83	1.41	1.76
AR	6.52	5.22	5.94	5.48	7.03	4.71	6.24	4.54	5.06	4.29	5
来源					本文			毛建仁等,2006			

注: I、II 对应前文岩相. A/CNK = Al₂O₃/(K₂O + Na₂O + CaO) (摩尔比); A/NK = Al₂O₃/(K₂O + Na₂O) (摩尔比); ALK = K₂O + Na₂O; AKI = (K₂O + Na₂O)/Al₂O₃ (摩尔比); AR, 碱度率; K/N = K₂O + Na₂O

3 岩体地球化学

样品在清洗后,磨碎至200目。主量、微量元素和Sr、

Nd、Pb同位素的分析测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行。除FeO和烧失量(LOI)采用标准湿化学分析外,其它主量元素分析采用XRF方法(X荧光光谱仪3080E),分析精度为5%,分析结果见表3。稀土和微量元素

表 4 莒舟-大洋花岗岩稀土和微量元素含量表($\times 10^{-6}$)
Table 4 Rare earth and trace elements compositions ($\times 10^{-6}$) of Juzhou-Dayang pluton

样品号	DY02	DY05	DY06	DY07	DY07-3	DY08	MK94	JZ1	JZ2	JZ3	JZ4
岩性	大洋花岗岩(I)				大洋花岗 细晶岩	大洋花岗岩 (II)	近矿莒舟花 岗岩小岩枝	莒舟花岗岩			
La	13. 60	27. 10	23. 20	23. 40	5. 30	42. 20	12. 90	42. 60	32. 40	26. 00	51. 16
Ce	25. 60	58. 10	40. 50	48. 30	11. 70	79. 00	24. 90	91. 60	50. 47	49. 60	86. 29
Pr	3. 90	7. 55	4. 34	6. 18	1. 64	9. 54	2. 44	11. 00	7. 17	6. 74	2. 03
Nd	16. 60	28. 60	14. 70	23. 20	7. 63	35. 10	7. 69	39. 20	29. 49	23. 20	51. 44
Sm	6. 59	8. 74	3. 51	6. 95	4. 00	7. 49	2. 73	9. 02	4. 66	5. 50	8. 62
Eu	0. 33	0. 41	0. 25	0. 42	0. 11	0. 68	0. 18	0. 48	0. 71	0. 42	0. 55
Gd	7. 93	8. 64	3. 60	7. 35	5. 45	7. 40	3. 21	8. 04	3. 64	6. 32	5. 03
Tb	1. 97	2. 14	0. 79	1. 75	1. 70	1. 41	1. 03	1. 58	1. 02	1. 27	1. 22
Dy	13. 30	13. 60	5. 20	11. 00	12. 20	8. 68	7. 93	11. 40	4. 18	7. 58	4. 17
Ho	2. 67	2. 80	1. 09	2. 34	2. 80	1. 70	1. 99	2. 56	1. 15	1. 79	1. 05
Er	8. 03	9. 22	3. 83	7. 30	9. 28	5. 31	7. 58	7. 56	2. 76	5. 72	3. 36
Tm	1. 24	1. 68	0. 75	1. 34	1. 75	0. 91	1. 78	1. 28	0. 63	1. 05	0. 53
Yb	7. 62	11. 00	5. 39	8. 67	12. 00	5. 92	13. 90	10. 60	3. 23	7. 58	2. 97
Lu	1. 11	1. 82	0. 97	1. 39	1. 97	0. 93	2. 45	1. 37	0. 76	1. 28	0. 70
Y	69. 80	86. 70	38. 00	68. 80	90. 60	53. 60	52. 10				
ΣREE	110. 5	181. 4	108. 1	149. 6	77. 53	206. 3	90. 71	238. 3	142. 3	144. 1	219. 1
LREE	66. 62	130. 5	86. 50	108. 5	30. 38	174. 0	50. 84	193. 9	124. 9	111. 5	200. 1
HREE	43. 87	50. 90	21. 62	41. 14	47. 15	32. 26	39. 87	44. 39	17. 37	32. 59	19. 03
LREE/HREE	1. 52	2. 56	4. 00	2. 64	0. 64	5. 39	1. 28	4. 37	7. 19	3. 42	10. 51
(La/Yb) _N	1. 28	1. 77	3. 09	1. 94	0. 32	5. 11	0. 67	2. 88	7. 20	2. 46	12. 36
(La/Sm) _N	1. 33	2. 00	4. 27	2. 17	0. 86	3. 64	1. 33	3. 05	3. 05	4. 49	3. 05
(Gd/Yb) _N	0. 86	0. 65	0. 55	0. 70	0. 38	1. 03	1. 07	0. 19	0. 63	0. 93	0. 69
δEu	0. 14	0. 14	0. 21	0. 18	0. 07	0. 28	0. 18	0. 17	0. 53	0. 22	0. 26
δCe	0. 86	1. 00	0. 99	0. 98	0. 97	0. 97	1. 09	1. 04	0. 81	0. 92	2. 08
Rb	267	371	326	371	309	270	322	403		314	
Ba	278	145	56	251	47	351	191	146		77	
Th	16. 90	35. 40	31. 90	28. 70	25. 90	25. 90	32. 40	27. 10		21. 40	
U	5. 16	14. 40	7. 27	8. 71	13. 40	6. 74	23. 10				
K	40245	40328	40577	42070	36428	40494	52940	43813	44974	39415	40245
Ta	2. 57	7. 73	3. 24	5. 34	9. 05	3. 00	23. 40	3. 85		5. 04	
Nb	39. 10	41. 50	44. 00	38. 90	49. 60	30. 50	50. 20	21. 10		48. 30	
Ce	25. 60	58. 10	40. 50	48. 30	11. 70	79. 00	24. 90	91. 60	50. 47	49. 60	86. 29
Ce	25. 60	58. 10	40. 50	48. 30	11. 70	79. 00	24. 90				
Pb	21. 40	45. 90	26. 40	40. 80	46. 40	33. 80	38. 70				
Pr	3. 90	7. 55	4. 34	6. 18	1. 64	9. 54	2. 44				
Sr	54. 90	50. 90	32. 60	56. 50	20. 20	89. 20	51. 40				
P	52. 39	104. 8	61. 13	109. 2	52. 39	152. 8	39. 30	226. 7	91. 60	122. 1	305. 2
Nd	16. 60	28. 60	14. 70	23. 20	7. 63	35. 10	7. 69	39. 20	29. 49	5. 50	51. 44
Zr	44. 9	88. 2	85. 7	82. 9	101	134	174	132		97. 0	
Hf	1. 99	4. 63	4. 35	4. 37	6. 91	5. 22	14. 30	6. 61		4. 73	
Sm	6. 59	8. 74	3. 51	6. 95	4. 00	7. 49	2. 73	9. 02	4. 66	5. 50	8. 62
Eu	0. 33	0. 41	0. 25	0. 42	0. 11	0. 68	0. 18				
Ti	216	540	474	558	126	960	228	659	1079	599	1139
Dy	13. 30	13. 60	5. 20	11. 00	12. 20	8. 68	7. 93				
Y	69. 80	86. 70	38. 00	68. 80	90. 60	53. 60	52. 10	74. 30	29. 29	52. 50	25. 20
Ho	2. 67	2. 80	1. 09	2. 34	2. 80	1. 70	1. 99				
Yb	7. 62	11. 00	5. 39	8. 67	12. 00	5. 92	13. 90	10. 60	3. 23	7. 58	2. 97
Lu	1. 11	1. 82	0. 97	1. 39	1. 97	0. 93	2. 45				
Ga	16	20. 4	19. 4	18. 2	18. 4	18. 1	12. 4				
资料来源					本文				毛建仁等,2006		

注:空格表示未测出; I 、II 对应前文岩相

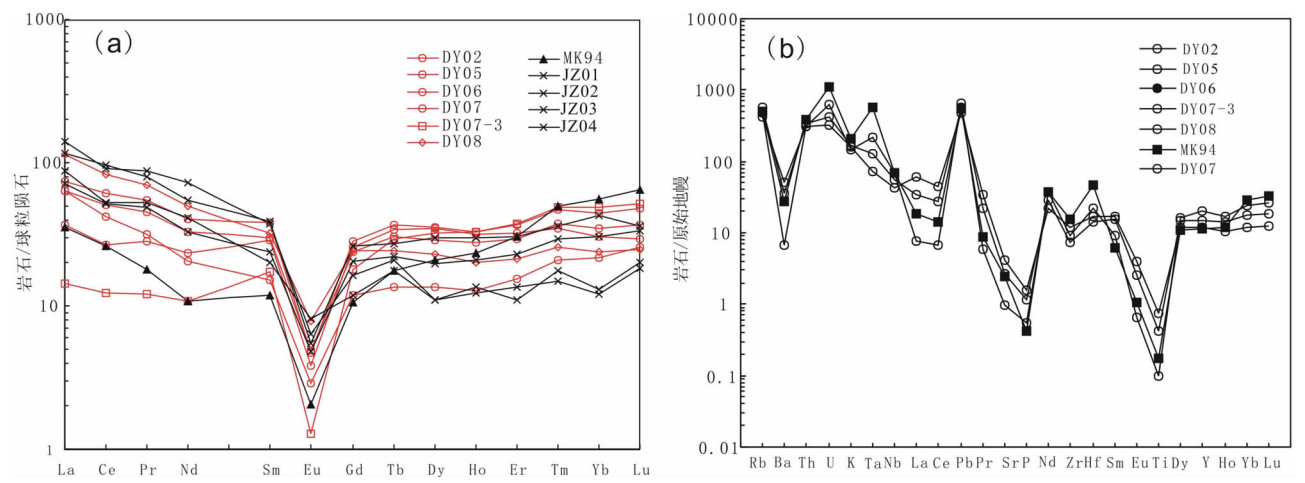


图8 大洋和莒舟花岗岩稀土元素分布模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化值据 McDonough and Sun, 1995)

Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) of representative samples of Dayang and Juzhou granites (normalization values after McDonough and Sun, 1995)

表5 大洋花岗岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 5 Sr-Nd isotopic compositions of Dayang granite

样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Error (2s)	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	Error(2s)
DY02	221	44.7	14.3267	0.740568	0.000011	5.5	14.6	0.2274	0.512263	0.000008
DY05	367	43.6	24.3344	0.755542	0.00001	7.83	27	0.1754	0.512225	0.000006
DY06	298	28.1	30.6594	0.766743	0.000015	2.89	12.2	0.1429	0.512223	0.000008
DY07	398	57.3	20.1232	0.75001	0.000011	7.63	26.6	0.1732	0.512224	0.000005
DY08	275	89.8	8.8723	0.729052	0.000009	8.66	41.4	0.1266	0.51213	0.000009
97lb4-2	301.9	45.17	19.41	0.743459		5.545	22.71	0.1477	0.512225	
$t(\text{Ma})$	$\varepsilon_{\text{Sr}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$	$f_{\text{Rb/Sr}}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$f_{\text{Sm/Nd}}$	$t_{2\text{DM}}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	来源
133	512.0	129.8	172.24	0.71349	-7.3	-7.8	0.16	1565	0.512065	
133	724.5	73.8	293.25	0.70954	-8.1	-7.7	-0.11	1553	0.512072	
133	883.5	63.1	369.73	0.70878	-8.1	-7.2	-0.27	1511	0.512099	本文
133	646.0	108.3	242.33	0.71197	-8.1	-7.7	-0.12	1552	0.512073	
144	348.5	93.1	106.28	0.71089	-9.9	-8.6	-0.36	1637	0.512011	
136	553.0	22.7	233.70	0.70594	-8.1	-7.2	-0.25	1516	0.512094	毛建仁等, 2006

注: ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) $^0_{\text{CHUR}}$ = 0.7045, ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$) $^0_{\text{CHUR}}$ = 0.0827, ($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$) $^0_{\text{CHUR}}$ = 0.1967, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) $^0_{\text{CHUR}}$ = 0.512638; λ_{Rb} = $1.42 \times 10^{-11}/\text{a}$, λ_{Sm} = $6.5 \times 10^{-12}/\text{a}$. 97lb4-2 样品及年龄引自毛建仁等(2006), DY08 年龄来自笔者自测. 为减少 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 变化对 Nd 模式年龄计算产生的影响,表中所列 $t_{2\text{DM}}$ 年龄统一采用二阶段模式计算. 空格表示无

采用 ICP-MS 方法分析,使用等离子质谱仪(ICP-MS-Excell),分析结果见表4.全岩 Sr、Nd、Pb 同位素测试分析在热电离质谱仪上完成,仪器型号为 ISOPROBE-T,分析方法详见赵海杰等(2010),分析结果见表5和表6. Sr 同位素比值测定的内校正因子采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$ = 0.1194,标准测量结果:NBS987 为 0.710250 ± 7 . Nd 同位素比值采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ = 0.7219 校正标准测量结果:SHINESTU 为 0.512118 ± 3 (标准值为 0.512110) (赵海杰等,2010).

3.1 主量元素

从表3中可看出,莒舟、大洋花岗岩在主量元素组成上具以下特征:(1)富 Si,大洋岩体6个样品的 SiO₂ = 74.4% ~ 77.52%,莒舟岩体5个样品的 SiO₂ = 74.94% ~ 78.44%,分异指数高,大洋岩体的 DI = 93.3% ~ 97.63%,莒舟岩体的 DI = 93.52% ~ 96.39%,反映了岩体经过了高程度的分异演化作用.(2)碱含量较高, K₂O + Na₂O = 7.7% ~ 8.96%,且相

表6 大洋花岗岩的铅同位素组成
Table 6 Pb isotopic compositions of of Dayang granite

样品号	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Pb ($\times 10^{-6}$)	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2σ	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2σ	$t(\text{Ma})$	$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	μ	ω
Dy02	16.9	5.16	21.4	18.995	0.001	15.673	0.001	39.184	0.002	133	15.663	18.796	38.939	9.55	37.04
DY05	35.4	14.4	45.9	19.028	0.002	15.673	0.002	39.158	0.005	133	15.663	18.829	38.915	9.55	36.77
DY06	31.9	7.27	26.4	19.154	0.001	15.671	0.001	39.413	0.003	133	15.661	18.955	39.168	9.54	37.07
DY07	28.7	8.71	40.8	19.018	0.003	15.692	0.002	39.202	0.0005	133	15.682	18.818	38.957	9.59	37.17
DY08	25.9	6.74	33.8	18.787	0.001	15.67	0.001	39.187	0.003	144	15.660	18.588	38.935	9.56	38.13

注: $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{实测}} - \mu(e^{\lambda t} - 1)$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{实测}} - \mu/137.88(e^{\lambda t} - 1)$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = (^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{实测}} - \omega(e^{\lambda t} - 1)$, 式中 t 为侵位年龄 133Ma, $\lambda^{238}\text{U} = 1.55125 \times 10^{-10}/\text{a}$, $\lambda^{235}\text{U} = 9.8485 \times 10^{-10}/\text{a}$, $\lambda^{232}\text{Th} = 4.9475 \times 10^{-11}/\text{a}$. DY08 年龄为 144Ma, 为笔者自测, 未发表

对富钾, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.96 \sim 3.56$ 。岩石的碱度率指数 (AR 值) 变化于 4.29 ~ 7.03, 碱铝指数 (AKI 值) 介于 0.88 ~ 1.07, 反映碱含量较高, 在 SiO_2 -A. R 关系图上, 样品点投影在碱性区 (图 7a)。(3) 莒舟岩体样品的 A/CNK 为 0.96 ~ 1.09, 大洋岩体样品的 A/CNK 为 0.82 ~ 0.94, 表明岩体属于弱过铝质-准铝质花岗岩类 (图 7b)。(4) 铁、镁、钙、钛、磷的含量很低, 这一成分特点同样指示了岩石经历了高分异演化作用。

3.2 稀土元素和微量元素

大洋-莒舟花岗岩的稀土元素和微量元素及主要的参数见表 4。它们的稀土元素组成特征总体表现为稀土总量较低, $\Sigma\text{REE} = 110.5 \times 10^{-6} \sim 238.3 \times 10^{-6}$; 富集轻稀土, $\text{LREE}/\text{HREE} = 1.52 \sim 5.39$, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值低 (1.28 ~ 5.11), 变化范围也不大, 暗示各样品都是岩浆演化到同一阶段的产物, 属于轻稀土富集型, 且轻稀土的分馏比重稀土明显, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 和 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 比值分别为 2.97 ~ 4.38 和 0.61 ~ 1.37; 强 Eu 负异常, Eu 值为 0.14 ~ 0.28, 反映稀土分馏程度的稀土元素配分模式呈缓向右倾斜、明显铕负异常的“V”型展布 (图 8a)。

大洋-莒舟花岗岩的微量元素分布较为一致, 都表现出富集 K、Rb、Th、Yb、Y, 贫 Sr、Ba、Ti、P, 在微量元素蛛网图中, Sr、Ba、Ti、P 呈明显的“V”形谷 (图 8b), 具典型的低 Ba-Sr 高 Y 花岗岩的特征。U、Th 含量也显著偏高, V、Cr、Co 和 Ni 基性场元素强烈亏损, 上述特征表明岩体的成岩过程经历了高度的分异演化作用。

3.3 Sr-Nd-Pb 同位素组成

本次研究对 5 件大洋花岗岩的样品进行了 Sr-Nd 同位素分析 (表 5)。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值变化于 0.70878 ~ 0.71349 之间, 比莒舟花岗岩的相应值 (0.70594, 毛建仁等, 2006) 稍大; $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化于 -7.2 ~ -8.6 之间, 根据 Nd 同位素组成计算的相关参数 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = -0.27 \sim 0.16$, $t_{2\text{DM}} = 1511 \sim 1637\text{Ma}$ 。较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值和稍低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值表明大洋、莒舟花岗岩的源岩可能以地壳物质为主 (董方浏等, 2007)。

5 件大洋花岗岩的样品 Pb 同位素组成见表 6, 根据样品的 Th、U 和 Pb 含量, 进行 Pb 同位素比值的时间校正计算 ($t = 133\text{Ma}$), 校正后的数据与实测值几乎一致, 分别是 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 18.588 \sim 18.955$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.660 \sim 15.682$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 38.935 \sim 39.168$, μ 值介于 9.54 ~ 9.59, ω 值介于 36.77 ~ 38.13。

4 讨论

4.1 岩石成因类型

莒舟花岗岩和大洋花岗岩的岩石学组成和地球化学特

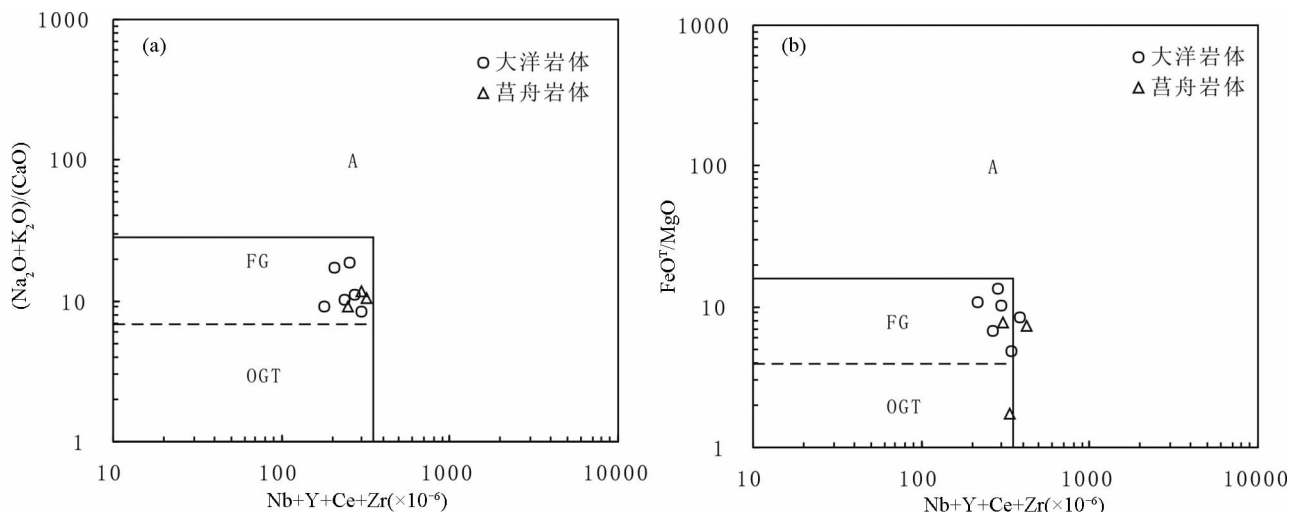


图9 大洋岩体 $Zr + Nb + Ce + Y$ 和 $(Na_2O + K_2O)/CaO$ 、 FeO^T/MgO 图解 (底图据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 9 Diagrams of $Zr + Nb + Ce + Y$ and $(Na_2O + K_2O)/CaO$, FeO^T/MgO for the Dayang pluton (after Whalen *et al.*, 1987)

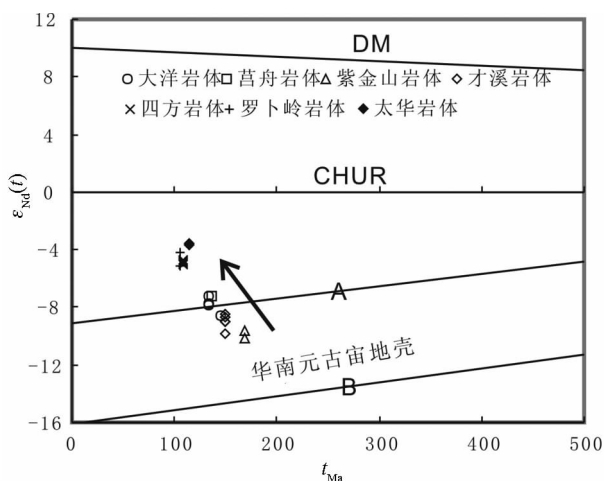


图10 闽西南地区晚中生代花岗岩质岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ - t 图解

(a)-华南成熟度较低的古宙地壳;(b)-华南成熟度较高的元古宙地壳;DM-亏损地幔;CHUR-球粒陨石均一储库;苕舟、太华岩体数据来自毛建仁等(2006),才溪、紫金山、四方岩体数据来自赵希林(2007),底图据沈渭洲等(1993)

Fig. 10 $\epsilon_{Nd}(t)$ - t diagram of Late Mesozoic granitic rocks from southwestern Fujian

(a)-immature Proterozoic crust in South China; (b)-mature Proterozoic crust in South China; DM-depleted mantle; CHUR-chondritic uniform reservoir; data of Juzhou and Taihua are after Mao *et al.* (2006), Caixi, Zijinshan, Sifang are after Zhao (2007). The base map is after Shen *et al.* (1993)

质的碱性花岗岩,CIPW 表中标准矿物中没有或极少刚玉分子,P 含量均很低。样品的主量元素以高硅、富碱、低铝为特征;微量元素以富集 Rb、K、U、Th 等大离子亲石元素及 Zr、Hf、Nb、Ta 等高场强元素,而明显亏损 Sr、Ba 和 P 等元素,总体呈轻-重稀土分异的右倾型,所有样品均具有强烈的 Eu 的负异常,与典型强烈富铝的华南壳源型花岗岩的地球化学特征略有不同(Chappell and White, 1974; Blyman, 2001; Hong *et al.*, 1998; 蒋少涌等,2008)。大洋-苕舟岩体的 $Zr + Nb + Ce + Y$ 和 $(Na_2O + K_2O)/CaO$ 、 FeO^T/MgO 图解(图9)中样品都落入高分异的花岗岩区域。虽然在 Whalen *et al.* (1987) 的地球化学判别图解上,该岩体大多数样品都投影在 A 型花岗岩区,但是都位于界线附近,可能是极高的分异作用使岩石中 Ga 含量增高而使苕舟-大洋岩体具有某些 A 型花岗岩的地球化学特征。因此,笔者认为大洋-苕舟花岗岩属于具准铝质-弱过铝质特征的高分异壳源型花岗岩。

4.2 花岗岩源区讨论

由 Sr、Nd、Pb 同位素组成可知,大洋花岗岩具有较高的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值(0.729052~0.71585)和负的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-7.2~-8.6),说明其源区以壳源为主,区内同时代的花岗岩也具有类似的 Nd 同位素组成,例如苕舟花岗岩($t = 130$ Ma, 133Ma, 136Ma) $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -7.2 (毛建仁等,2006),太华岩体($t = 115$ Ma)为 -3.68、-3.6,紫金山花岗岩($t = 168$ Ma)为 -9.88,才溪二长花岗岩($t = 150$ Ma)为 -8.99,四方花岗岩闪长岩($t = 108$ Ma)值为 -4.88,罗卜岭花岗岩闪长岩($t = 105$ Ma)值为 -4.64 (赵希林,2007;赵希林等,2007,2008,2009),表明区内岩体的物质来源具有单一性。大洋-苕舟花岗岩二阶段 Nd 模式年龄(t_{2DM})为 1.51~1.64Ga,推测源区可能是古元古代麻源群变质岩(毛建仁等,2001,2002,2003,2004,

征几乎一致,年代学结果也很相近,矿区深部也打到花岗岩,因此笔者认为苕舟和大洋花岗岩为同一岩体(洪大卫等,1980,1995)。总的来说,大洋-苕舟岩体属于弱过铝质-准铝

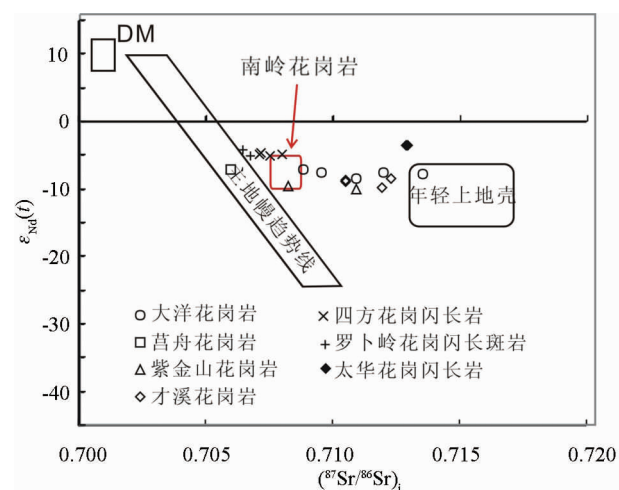


图 11 闽西南地区晚中生代花岗岩质岩体的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解

DM-亏损地幔; 莒舟、太华岩体数据来自毛建仁等(2006), 才溪、紫金山、四方岩体数据来自赵希林(2007), 南岭花岗岩数据来自 Hong *et al.* (1998), 底图据 Jahn *et al.* (1999)

Fig. 11 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram of Late Mesozoic granitic rocks from southwestern Fujian

DM-depleted mantle; data of Juzhou and Taihua are after Mao *et al.* (2006), Caixi, Zijinshan and Sifang are after Zhao (2007). Data of granite in Nanling Range are after Hong *et al.* (1998). The base map is after Jahn *et al.* (1999)

2006; 赵希林, 2007)。大洋-莒舟岩体在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t 关系图上投点位于元古宙地壳上方, 且区内岩体随时间推移, 地幔组分在岩体形成过程中贡献逐渐增大 (图 10), $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解也显现同样规律 (图 11) (赵希林, 2007)。上述特征说明这些花岗岩岩浆应起源于古老基底地壳物质的熔融, 但有不同程度的地幔物质加入。另外, 目前多数学者认为华南地壳识别出的多条具有低 Nd 模式年龄的花岗岩是地幔物质参与成岩过程的重要表现 (Zhou *et al.*, 2006), 大洋-莒舟花岗岩的二阶段 Nd 模式年龄 ($t_{2\text{DM}}$) 变化于 1.51 ~ 1.64 Ga, 较之华夏地块基底变质岩的 Nd 模式年龄 (主要为 1.8 ~ 2.2 Ga, 陈江峰等, 1999) 偏低, 区内的太华、四方、罗卜岭等岩体也表现出偏低的 Nd 模式年龄 (赵希林, 2007), 无疑也说明这些岩体成岩过程中有幔源组分加入, 使花岗岩的地壳留存年龄的降低 (1.51 ~ 1.63 Ga)。

在 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ - $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 和 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ - $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 相关图上, 大洋岩体 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化不大, 都位于在中国大陆地幔演化及延长线附近, 且位 EMII 演化线下部 (图 12), 可见大洋岩体的 Pb 同位素来源受到 EMII 型富集地幔端元的影响, 说明存在有幔源岩浆与地壳物质之间的相互作用。考虑到地幔岩浆分异一般不可能直接形成长英质花岗岩, 因此临近 EMII 型富集地幔端元并不意味着岩体起源于以地幔物质为主的壳幔混源岩浆的结晶分异, 而更可能是少量 EMII 型富集地幔组分参与大洋-莒舟岩体花岗岩的形成 (徐夕生和谢昕, 2005; 邱检生等, 2008)。

显然, 这种以古老地壳物质的熔融为主, 同时有地幔物质加入的成因模式能更全面地解释大洋-莒舟高分异壳源型花岗岩的岩石成因。软流圈地幔物质上涌和新生幔源岩浆的底侵作用为花岗岩源区提供了一定的物质来源和大量源区熔融所需要的热量 (毛景文等, 2004; 周新民, 2003; 高庚等, 2006; 李良林等, 2011), 而导致这一深部地质过程的动力学机制与该地区晚中生代特殊的大地构造活动密切相关。同样的, 大洋-莒舟岩体成岩过程中幔源组分的加入和充分

2006; 赵希林, 2007)。大洋-莒舟岩体在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t 关系图上投点位于元古宙地壳上方, 且区内岩体随时间推移, 地幔组分在岩体形成过程中贡献逐渐增大 (图 10), $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解也显现同样规律 (图 11) (赵希林, 2007)。上述特征说明这些花岗岩岩浆应起源于古老基底地壳物质的熔融, 但有不同程度的地幔物质加入。另外, 目前多数学者认为华南地壳识别出的多条具有低 Nd 模式年龄的花岗岩是地幔物质参与成岩过程的重要表现 (Zhou *et al.*, 2006), 大洋-莒舟花岗岩的二阶段 Nd 模式年龄 ($t_{2\text{DM}}$) 变化于 1.51 ~ 1.64 Ga, 较之华夏地块基底变质岩的 Nd 模式年龄 (主要为 1.8 ~ 2.2 Ga, 陈江峰等, 1999) 偏低, 区内的太华、四方、罗卜岭等岩体也表现出偏低的 Nd 模式年龄 (赵希林, 2007), 无疑也说明这些岩体成岩过程中有幔源组分加入, 使花岗岩的地壳留存年龄的降低 (1.51 ~ 1.63 Ga)。

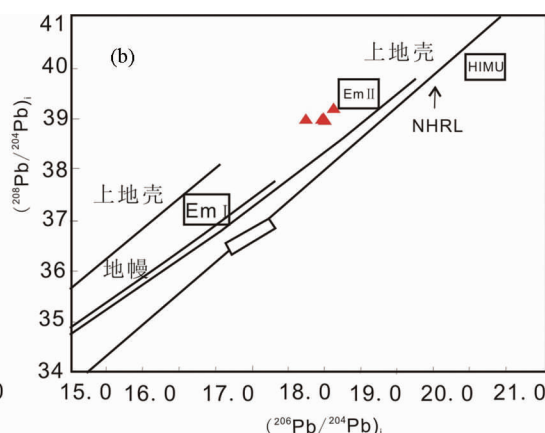
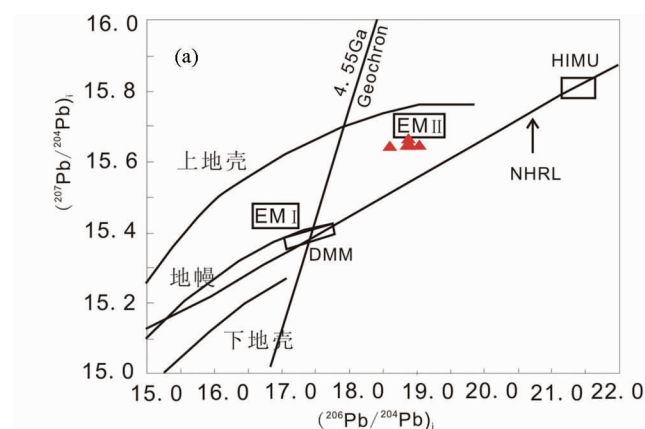


图 12 大洋花岗岩的的 Pb 同位素组成图解

DMM-亏损地幔端元, EM(I, II)-富集地幔端元 (Zindler and Hart, 1986); Geochron-零等时线; NHRL-北半球参考线 (Hart, 1984); 中国大陆地幔、下地壳和上地壳 (李龙等, 2001; 闫峻等, 2003)

Fig. 12 Pb isotopic diagrams of Dayang granite

DMM-The depleted mantle member, EM(I, II)-The enriched mantle (Zindler and Hart, 1986); Geochron-Zero isochron; NHRL-The northern hemisphere reference line (Hart, 1984); The mantle, the upper crust and the lower crust of continent in China (Li *et al.*, 2001; Yan *et al.*, 2003)

的分异演化对马坑铁矿的形成也有重要作用。

4.3 构造背景演化

毛景文等(2007)根据华南金属矿产形成最早时间及其动力学特点,推测自 175Ma 左右,中国东部大陆边缘由于受伊泽奈奇板块向北西俯冲逐渐成为活动大陆边缘(毛景文等,1999,2004,2005,2007,2008b,2011;舒良树等,2006;王彬等,2006;董树文等,2007;苏慧敏等,2010)。随着大洋板块持续低角度俯冲,大陆地壳不断加厚,在弧后地区出现一系列 NE 向岩石圈伸展带和深大断裂。大田县境内的汤泉花岗岩闪长岩(年龄为 183 ~ 158Ma)和上杭县的紫金山花岗岩(168Ma)存在是闽西南地区开始岩石圈伸展的岩石学记录(毛建仁等,2002,2003;赵希林等,2007),毛建仁等(2004)研究认为地幔的底侵作用为它们的形成提供热量,促进了加厚地壳的物质的部分熔融,但地幔物质未参与成岩。在 160 ~ 150Ma 期间俯冲板片于南岭及邻区开天窗或撕裂,导致发生大规模的岩浆活动(毛景文等,2008b),在钦杭带形成了千里山、锡田、骑田岭、贵东、佛冈、姑婆山-花山和九嶷山等壳幔混源的 A 型花岗岩(蒋少涌等,2008;毛景文等,2011)。而赵希林(2007)通过对闽西南同时代的才溪花岗岩(150Ma,上杭县)研究认为,它的形成过程中也有少量幔源组分的加入,说明该区的岩石圈出现了进一步伸展。毛景文通过对武夷山北侧的冷水坑、治头岭金矿等矿床(时代为 151 ~ 135Ma)的研究推测该区在晚侏罗世-早白垩世曾发生过一次伸展过程,成岩成矿可能与岩石圈局部底侵、地壳物质重熔有关(毛景文等,2011)。135Ma 之后,中国大陆,乃至东亚大陆边缘处于持续伸展阶段,Goldfarb *et al.* (2007)、毛景文等(2007,2008b,2009a,b,2011)、Mao *et al.* (2006,2008a)认为应归处于太平洋板块运动方向发生转向,由原来的斜俯冲转向几乎平行大陆边缘运动,在华南地区,造成大陆岩石圈大面积伸展而形成了大量白垩纪断陷盆地和变质核杂岩。由于闽西南地区政和-大浦断裂 NNE 走向与古太平洋板块的俯冲缝合线走向一致,因此我们推测 135Ma 古太平洋板块的转向造成了本区政和-大浦断裂重新活化拉张。而大洋-莒岩体侵位于早白垩世,其显然形成于古太平洋板块由斜俯冲转向几乎平行大陆边缘运动而造成大陆岩石圈进一步伸展的背景下,但是此时古太平洋板块转向刚刚开始,软流圈未开始大规模上涌,所以本区未形成同时代的玄武岩,但是底侵已经相当强烈,在“成分”和“热”两方面为莒岩-大洋花岗岩的形成提供条件(毛建仁等,2006)。

结合矿区和区域地质背景,笔者认为大洋-莒岩花岗岩的成因与岩石圈减薄的背景下,幔源岩浆的底侵促使上覆的先存地壳发生部分熔融有关。

4.4 岩体的形成时代及与成矿的关系

虽然许多学者对马坑铁矿进行过详细的研究,但是其成因尚存在争议:一是接触交代后生成因(赵一鸣等,1983,

1990;张承帅,2010);二是海相火山沉积变质成因(韩发和葛朝华,1983)。显然成岩成矿年龄的精确限定是确定矿床成因的一个关键依据。张承帅(2010)和王登红等(2010)测得马坑铁矿辉钼矿年龄分别为 133Ma 和 130Ma,而毛建仁等(2006)测得莒岩花岗岩体单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 136Ma 和 133.9Ma,黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄为 132.3Ma,石英斑岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 117.4Ma,张承帅(未发表)曾测得利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年法测得大洋花岗岩的年龄 127.5 ± 0.4Ma 和 144.8 ± 0.9Ma,两者存在近 18Ma 的时差。本文利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 方法测得大洋岩体年龄为 132.6 ± 1.3Ma,利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年法测得莒岩花岗岩年龄为 129.6 ± 0.8Ma,与两个辉钼矿年龄一致。综上所述可知,大洋和莒岩体的成岩年龄相同,且两个岩体岩性、矿物组成、主微量和 Sr-Nd-Pb 同位素非常类似,因此笔者认为它们是同一岩体,而且岩体与马坑铁矿磁铁矿共生的辉钼矿 Re-Os 定年结果一致,进一步证实了成岩成矿过程的同时性。

闽西南地区构成永安-梅县-会昌多金属成矿带的主体,是中国东南部重要成矿集中区(毛建仁等,2001;许乃政等,2008),花岗岩和火山岩中产出有众多铁、铜、铅、锌、金、锡多金属矿床。因此,研究该区花岗岩与矿化之间的关系以及在该区寻找新的铁矿床是地质学家在该区研究的重点问题。传统上,世界上大多数的矽卡岩型铁矿床发育在中酸性岩体与碳酸盐接触带上,通过矽卡岩矿床和岩浆岩成矿专属性研究认为,铁矿多与闪长岩之类中性岩有关(涂光炽,1997)。而常印佛等(1991)为解释铜陵地区一些主矿体呈似层状产出的矿床(例如狮子山、冬瓜山等)提出了层控矽卡岩概念。马坑铁矿具明显层控特点,矿体赋存于黄龙组灰岩和林地组碎屑岩层间构造破碎带中,成矿时代和控矿层位与长江中下游的层控矽卡岩矿床相似,矽卡岩与铁矿密切共生,分带现象普遍,矿物学特征表明它们形成于相对较氧化的条件下,与典型矽卡岩矿床特征一致(毛景文等,2009b;张承帅等,2010)。马坑铁矿发育多期辉绿岩,但是其规模较小,并且由于莒岩-大洋花岗岩锅底状包围使早期的辉绿岩被热液强烈蚀变交代,我们已经无法考证辉绿岩的侵入是否形成矽卡岩和铁矿,即使曾经存在也由于热液强烈蚀变交代而不复存在。因此,马坑铁矿与莒岩-大洋花岗岩存在密切联系确是毋庸置疑的事实,这与矽卡岩矿床与岩浆岩成矿专属性不同,但是铁矿石中 Fe 的品位和 Sn 的含量呈密切正相关关系,二者的相关系数为 0.89(赵一鸣等,1983),而 Sn、Mo 是华南燕山期花岗岩成矿的最主要元素,它们与铁矿共生在一起,表明了铁矿与花岗岩在地球化学上联系密切。另外,国内一些矽卡岩铁矿床,例如黄冈、程潮,它们的侵入岩也为酸性花岗岩,说明花岗岩也能形成大型铁矿床。本区的碎屑岩地层中含铁质(多为赤铁矿)较高,部分地区 Fe^T 含量可达 5% ~ 7%,辉绿岩本身的铁镁质含量也较高,通过花岗岩的接触交代作用能使它们活化运移形成磁铁矿,这一认识可从野外观察和模拟实验得到证实(梁祥济和曲国林,1982;梁祥

济和王福生,2002)。马坑铁矿的成矿模式在闽西南地区并不是孤立存在,区内其他铁矿,例如阳山、洛阳、潘田等在空间上均位于晚中生代花岗岩接触带部位,岩体的产状、形态、规模及其围岩间的接触构造形式各有特色,形成矿体的规模也大小不一,而莒舟-大洋花岗岩呈锅底形包围有利围岩(图3),挥发分相对集中,特别有利于矿质的搬运和富集,张承帅(另文发表)通过流体包裹体群组分析发现马坑铁矿的包裹体内富含 F^- 和 Cl^- 等离子,也证明了这一点,所以马坑铁矿的规模最大。

由上可知,花岗岩与区内铁矿在时间和空间上存在密切联系,花岗岩的侵入是铁矿形成的控制要素之一。

5 结论

(1) 本文利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年法测得莒舟花岗岩年龄为 129.6 ± 0.8 Ma, 利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年法测得大洋花岗岩年龄为 132.6 ± 1.3 Ma, 它们都形成于早白垩世, 与马坑铁辉钼矿 Re-Os 年龄 (130 ~ 133 Ma) 一致, 成岩成矿的一致性有力的支持了马坑铁矿属于矽卡岩型矿床的认识。

(2) 岩石地球化学和同位素组成特征表明大洋-莒舟岩体为弱过铝质-准铝质花岗岩, 花岗岩主要来源于元古代地壳物质, 有 EM II 型富集地幔组分的参与成岩, 使花岗岩的地壳留存年龄的降低 ($1.51 \sim 1.63$ Ga)。

(3) 大洋-莒舟花岗岩具有高分异壳源型花岗岩地球化学特征, 其成因与岩石圈减薄的背景下, 幔源岩浆的底侵促使上覆的先存地壳发生部分熔融有关。

致谢 论文撰写过程中得到了中国地质科学院矿产资源研究所毛景文、谢桂青研究员、张长青、袁顺达副研究员的悉心指导; 中国地质大学(北京)张招崇教授和南京地质研究所毛建仁研究员对本文撰写提出建设性建议; 特此表示感谢!

References

Andersen T. 2002. Correlation of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192: 59–79

Blyuman BA. 2001. Isotope characteristics of crustal and mantle heterogeneities with application to their timing and depth of formation. *Geochemistry International*, 39(5): 505–510

Chang YF, Liu XP and Wu CY. 1991. The Copper-iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House, 1–379 (in Chinese with English abstract)

Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173–174

Chen JF, Guo XS, Tang JF and Zhou TX. 1999. Nd isotopic model ages: Implications of the growth of the continental crust of southeastern China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, (6): 7–16 (in Chinese with English abstract)

Dong FL, Mo XX, Yu XH, Hou ZQ and Wang Y. 2007. Trace elements geochemical and Nd-Sr-Pb isotopes characteristics of the Zhuopan alkaline complex in Yongping, Yunnan Province and its geological

significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 986–994 (in Chinese with English abstract)

Dong SW, Zhang YQ, Long CX, Yang ZY, Ji Q, Hu JM and Chen XH. 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1449–1461 (in Chinese with English abstract)

Gao G, Xu Z, Wen YX, Nan W, Yun J, Zhang J, Jiang SY and Ling HF. 2006. Petrogenesis of the Baimangshan pyroxene diorite Intrusion in Tongling area, Anhui Province: Constraints from Sr-Nd-Pb-O isotopes. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 42(3): 269–279 (in Chinese with English abstract)

Goldfarb R J, Hart C, Davis G and Geoves D. 2007. East Asian gold: Deciphering the anomaly of Phanerozoic gold in Precambrian cratons. *Economic Geology*, 102(3): 341–345

Han F and Ge CH. 1983. Geological and geochemical features of submarine volcanic hydrothermal-sedimentary mineralization of making iron deposit, Fujian Province. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences*, (2): 1–118 (in Chinese with English abstract)

Hart SR. 1984. A large scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, 309: 753–757

Hong DW, Chen XZ, Li CJ and Yu SM. 1980. Typomorphic characteristics of the rock-forming minerals of the Juzhou-Dayang granite and the conditions of their formation. *Acta Geologica Sinica*, 54(1): 52–69 (in Chinese with English abstract)

Hong DW, Wang SG, Han BF and Jin MY. 1995. Alkaline granite tectonic environment classification and identifies markers. *Science in China (Series B)*, 25(4): 418–428 (in Chinese)

Hong DW, Xie X and Zhang JS. 1998. Isotope geochemistry of granitoids in South China and their metallogeny. *Resource Geology*, 48(4): 251–263

Hua RM, Chen PR, Zhang WL, Yao JM, Lin JF, Zhang ZS and Gu SY. 2005. Metallogenesis and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in the Nanling range. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 291–304 (in Chinese with English abstract)

Jahn BM, Wu FY, Capdevila R, Wang YX and Zhao ZH. 1999. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an (Khingan) Mountain in NE China. In: Bardach G and Jahn BM (eds.). *Abstract of IGCP420 and Workshop in Ulaanbaator. Géosciences Rennes, Hors Série*, 2: 43–46

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)

Li L, Zheng YF and Zhou JB. 2001. Dynamic model for Pb isotope evolution in the continental crust of China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 61–68 (in Chinese with English abstract)

Li LL, Zhou HW, Chen ZH, Wang JR and Xiao Y. 2011. Geochemical characteristics of granites in Taimushan area, Fujian Province, and their geological significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 593–609 (in Chinese with English abstract)

Liang XJ and Qu GL. 1982. A preliminary experiment on the formation temperature and pressure of the iron deposit in Makeng, Fujian. *Bulletin of Chinese Academy of Geological Sciences*, (4): 83–94 (in Chinese with English abstract)

Liang XJ and Wang FS. 2000. Experimental study on the formation mechanism of the skarn gold deposits of stratabound metasomatic type. *Gold Geology*, (4): 1–13 (in Chinese with English abstract)

Liu YS, Gao S, Hu Z, Gao C, Zong K and Wang D. 2010. 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. *Journal of Petrology*, 51: 537–571

Ludwig KR. 2003. User's Manual for Isoplot/Ex. Version 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication: 1–70

- Mao JR, Tao KY, Xie FG, Xu NZ and Chen SY. 2001. Rock-forming and ore-forming processes and tectonic environments in Southwest Fujian. *Acta Petrologica et Mineralogica*, (3): 329 – 336 (in Chinese with English abstract)
- Mao JR, Tao KY, Li JY, Xie FG and Xu NZ. 2002. Geochronology and geochemical characteristics in Late Mesozoic Sifang pluton, southwestern Fujian, and their significance. *Acta Petrologica Sinica*, (4): 449 – 458 (in Chinese with English abstract)
- Mao JR, Hu Q, Xu NZ, Xie FG and Tao KY. 2003. Geochronology and geochemical characteristics in late Mesozoic Tangquan pluton, southwestern Fujian, and their significance. *Acta Geologica Sinica*, (3): 386 (in Chinese with English abstract)
- Mao JR, Xu NZ, Hu Q, Xing GF and Tao KY. 2004. The Mesozoic rock-forming and ore-forming processes and tectonic environment evolution in Shanghang-Datian region, Fujian. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 285 – 296 (in Chinese with English abstract)
- Mao JR, Chen R, Li JY, Ye HM and Zhao XL. 2006. Geochronology and geochemical characteristics of Late Mesozoic granitic rocks from southwestern Fujian and their tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1723 – 1734 (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)
- Mao JW, Xie GQ, Li XF, Zhang CQ and Mei YX. 2004. Mesozoic Large scale Mineralization and Multiple lithospheric extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45 – 55 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Zhang ZH, Li XF, Wang YT, Zhang CQ and Li YF. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169 – 188 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Wang YT, Lehmann B, Yu JJ, Du AD, Mei YX, Li YF, Zang WS, Stein HJ and Zhou TF. 2006. Molybdenite Re-Os and albite ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River Valley and metallogenic implications. *Ore Geology Reviews*, 29: 307 – 324
- Mao JW, Xie GQ, Guo CL and Chen YC. 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China; Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329 – 2338 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Bierlein F, Ye HS, Qu WJ, Du AD, Pirajno F, Li HM, Guo BJ, Li YF and Yang ZQ. 2008a. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 4607 – 4626
- Mao JW, Xie GQ, Guo CL, Yuan SD, Chen YB and Chen YC. 2008b. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings. *Geological Journal of China Universities*, 14: 510 – 526 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Chen YB and Chen YC. 2009a. Mineral deposit models of Mesozoic ore deposits in South China. *Geological Review*, 55(3): 347 – 354 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Shao YJ, Xie GQ, Zhang JD and Cheng YC. 2009b. Mineral deposit model for porphyry-skarn polymetallic copper deposits in Tongling ore dense district of Middle-Lower Yangtze Valley metallogenic belt. *Mineral Deposits*, 28(2): 109 – 119 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Chen MH, Yuan SD and Guo CL. 2011. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits. *Acta Geologica Sinica*, (5): 636 – 658 (in Chinese with English abstract)
- McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223 – 253
- Qiu JS, Xiao E, Hu J, Xu XS, Jiang SY and Li Z. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468 – 2484 (in Chinese with English abstract)
- Shen WZ, Zhu JC, Liu CS, Xu JS and Ling HF. 1993. Sm-Nd isotopic study of basement metamorphic rocks in South China and its constraint on material sources of granitoids. *Acta Petrologica Sinica*, (2): 115 – 124 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS, Zhou XM, Den P and Yu XQ. 2006. Principal geological features of Nanling tectonic belt, South China. *Geological Review*, 52(2): 251 – 265 (in Chinese with English abstract)
- Song B, Zhang YH, Wan YS and Jian P. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26 – 30 (in Chinese with English abstract)
- Su HM, Xie GQ, Sun J, Zeng ZL, Zhang CS and Cheng YB. 2010. Zircon U-Pb dating for the granite porphyries in Hongshan porphyry copper deposit and Tongkenzhang porphyry molybdenum deposits in East Jiangxi Province and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 819 – 829 (in Chinese with English abstract)
- Tao KY, Mao JZ, Xing GF, Yang ZL and Zhao Y. 1999. Strong Yanshanian volcanic-magmatic explosion in East China. *Mineral Deposits*, 18(4): 316 – 322 (in Chinese with English abstract)
- Tu GC. 1997. *Geochemistry of Mineral Deposits*. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 122 (in Chinese with English abstract)
- Wang B, Shu LS and Yang ZY. 2006. Study of the Early-Middle Jurassic tectono-stratigraphy in the Jiangxi-Fujian-Guangdong region, SE China. *Journal of Stratigraphy*, 30(1): 42 – 49 (in Chinese with English abstract)
- Wang DH, Chen ZH, Chen YC, Tang JX, Li JK, Ying LJ, Wang CH, Liu SB, Li LX, Qin Y, Li HQ, Qu WJ, Wang YB, Chen W and Zhang Y. 2010. New data of the rock-forming and ore-forming chronology for China's important mineral resources areas. *Acta Geologica Sinica*, 84(7): 1 – 11 (in Chinese with English abstract)
- Wright JB. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis. *Geological Magazine*, 106: 307 – 384
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407 – 419
- Wu GG, Zhang D, Chen BL and Wu JS. 2000. Transformation of mesozoic tectonic domain and its relation to mineralization in southeastern China: An evidence of southwestern Fujian Province. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 25(4): 390 – 396 (in Chinese with English abstract)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Zircon genesis mineralogy and its restriction for U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589 – 1604 (in Chinese)
- Xie GQ, Mao JW, Li RL, Qu WJ, Pirajno F and Du AD. 2007. Re-Os molybdenite and Ar-Ar phlogopite dating of Cu-Fe-Au-Mo (W) deposits in southeastern Hubei, China. *Mineralogy and Petrology*, 90: 249 – 270
- Xu NZ, Mao JZ, Ye HM, Shen MT, Liu YP and Chen LZ. 2008. Geological characteristics and new ore-finding progress in the Dapai lead and zinc deposit of Yongding County, Fujian Province. *Geology and Prospecting*, 44(4): 20 – 23 (in Chinese with English abstract)
- Xu XS and Xie X. 2005. Late Mesozoic-Cenozoic basaltic rocks and crust-mantle interaction, SE China. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 318 – 334 (in Chinese with English abstract)
- Yan J, Chen JF, Yu G, Qian H and Zhou TX. 2003. Pb isotopic characteristics of Late Mesozoic mafic rocks from the Lower Yangtze region: Evidence for enrich mantle. *Geological Journal of China Universities*, 9(2): 195 – 206 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CS. 2010. Geological characteristics of Makeng skarn Fe-Mo deposit in Fujian Province. *Mineral Deposits*, 29(Suppl.): 123 – 124 (in Chinese)
- Zhang CS, Mao JW, Xie GQ, Yu M, Wang JX and Liu WG. 2012. Molybdenite Re-Os ages of Makeng skarn Fe-Mo deposit and their geological significance in Fujian Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, in press (in Chinese with English abstract)
- Zhang DY. 2011. Petrogenesis of Late Phanerozoic ore-forming porphyries

- in the western Tianshan, Xinjiang, NW China: Implications for metallogenetic geology background. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences, 1 – 144 (in Chinese with English summary)
- Zhao HJ, Mao JW, Xiang JF, Zhou ZH, Wei KT and Ke YF. 2010. Mineralogy and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of quartz diorite in Tonglushan deposit, Hubei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (3): 768 – 784 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XL. 2007. The geochronology, petrography and geochemical characteristics of Mesozoic granitoids from Shanghang area in SW Fujian and their implications. Master Degree Thesis. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1 – 56 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XL, Mao JR, Chen R Xu NZ, Zeng QT and Ye HM. 2007. Zircon SHRIMP age and geochemical characteristics of the Caixi pluton in southwestern Fujian Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26 (3): 223 – 231 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XL, Mao JR, Chen R and Xu NZ. 2008. SHRIMP zircon dating of the Zijinshan pluton in southwestern Fujian and its implications. *Geology in China*, 35 (4): 590 – 597 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XL, Mao JZ, Ye HM, Xu NZ and Hu Q. 2009. The geochemical characteristics of biotite and its petrogenesis implication in the Caixi pluton and Sifang pluton from Shanghang area of Fujian Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28 (2): 162 – 168 (in Chinese with English abstract)
- Zhao YM, Tan HJ, Xu ZN, Yuan RG, Bi CE, Zhen RL, Li DX and Sun JH. 1983. The calcic-skarn iron ore deposit of making type in southwestern Fujian. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences*, (1): 1 – 141 (in Chinese with English abstract)
- Zhao YM, Lin WW and Bi CS. 1990. Skarn Deposit of China. Beijing: Geological Publishing House, 164 – 171 (in Chinese)
- Zhou XM. 2003. My thinking about granite geneses of South China. *Geological Journal of China Universities*, 9 (4): 556 – 565 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM, Sun T, Shen WZ, Shu LS and Niu YL. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29: 26 – 33
- Zhou ZH, Lü LS, Yang YJ and Li T. 2010. Petrogenesis of the Early Cretaceous A-type granite in the Huanggang Sn-Fe deposit, Inner Mongolia: Constraints from zircon U-Pb dating and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (12): 3521 – 3537 (in Chinese with English abstract)
- Zindler A and Hart SR. 1986. Chemical geodynamics. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493 – 571
- 地球化学特征. 中国地质科学院矿床地质研究所刊, (2): 1 – 118
- 洪大卫, 陈学正, 李纯杰, 余时美. 1980. 福建龙岩苔舟-大洋花岗岩体造岩矿物的标型特征和形成条件. *地质学报*, 54 (1): 52 – 69
- 洪大卫, 王式洸, 韩宝福, 靳满元. 1995. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志. *中国科学(B辑)*, 25 (4): 418 – 428
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 姚军明, 林锦富, 张展适, 顾晨彦. 2005. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景. *高校地质学报*, 11 (3): 291 – 304
- 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 型花岗岩带成岩成矿特征及成因讨论. *高校地质学报*, 14 (4): 496 – 509
- 李良林, 周汉文, 陈植华, 王锦荣, 肖依. 2011. 福建太姥山地区花岗岩岩石地球化学特征及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 30 (4): 593 – 609
- 李龙, 郑永飞, 周建波. 2001. 中国大陆地壳铅同位素演化的动力学模型. *岩石学报*, 17 (1): 61 – 68
- 梁祥济, 曲国林. 1982. 福建马坑铁矿床形成温度和压力实验的初步研究. *中国地质科学院院报*, (4): 83 – 94
- 梁祥济, 王福生. 2000. 层控交代型夕卡岩金矿床形成机理的实验研究. *黄金地质*, (4): 1 – 13
- 毛建仁, 陶奎元, 谢芳贵, 许乃政, 陈三元. 2001. 闽西南地区成岩成矿作用与构造环境. *岩石矿物学杂志*, (3): 329 – 336
- 毛建仁, 陶奎元, 李寄隅, 谢方贵, 许乃政. 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. *岩石学报*, 18 (4): 449 – 458
- 毛建仁, 胡青, 许乃政, 谢方贵, 陶奎元. 2003. 闽西南地区早中生代汤泉岩体同位素年代学、地球化学特征及其构造意义. *地质学报*, (3): 386
- 毛建仁, 许乃政, 胡青, 谢方贵, 陶奎元. 2004. 福建省上杭-大田地区中生代成岩成矿作用与构造环境演化. *岩石学报*, 20 (2): 285 – 296
- 毛建仁, 陈荣, 李寄隅, 叶海敏, 赵希林. 2006. 闽西南地区晚中生代花岗质岩石的同位素年代学、地球化学及其构造演化. *岩石学报*, 22 (6): 1723 – 1734
- 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
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. *地学前缘*, 11 (1): 45 – 55
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. *岩石学报*, 21 (1): 169 – 188
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 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. *岩石学报*, 23 (10): 2329 – 2338
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 2008b. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. *高校地质学报*, 14: 510 – 526
- 毛景文, 谢桂青, 程彦博. 2009a. 华南地区中生代主要金属矿床模

附中文参考文献

- 常印佛, 刘湘培, 吴昌言. 1991. 长江中下游地区铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1 – 379
- 陈江峰, 郭新生, 汤加富, 周泰禧. 1999. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄. *南京大学学报(自然科学版)*, (6): 7 – 16
- 董方浏, 莫宣学, 喻学惠, 侯增谦, 王勇. 2007. 云南永平卓潘新生代碱性杂岩体的元素地球化学和 Nd-Sr-Pb 同位素特征及地质意义. *岩石学报*, 23 (5): 986 – 994
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 胡建民, 陈宣化. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. *地质学报*, 81 (11): 1449 – 1461
- 高庚, 徐兆文, 杨小男, 王云健, 张军, 蒋少涌, 凌洪飞. 2006. 安徽铜陵白芒山辉石闪长岩体的成因: Sr-Nd-Pb-O 同位素制约. *南京大学学报(自然科学版)*, 42 (3): 269 – 279
- 韩发, 葛朝华. 1983. 福建马坑铁矿床海相火山热液-沉积成因-地质

- 型. 地质论评, 55(3): 346–354
- 毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 张建东, 陈毓川. 2009b. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型. 矿床地质, 28(2): 109–119
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律. 地质学报, (5): 636–658
- 邱俭生, 肖娥, 胡建, 徐夕生, 蒋少涌, 李真. 2008. 福建北东沿海高分异 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. 岩石学报, 24(11): 2468–2484
- 沈渭洲, 朱金初, 刘昌实, 徐士进, 凌洪飞. 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. 岩石学报, (2): 115–124
- 宋彪, 张云海, 万渝生, 简平. 2002. 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
- 苏慧敏, 谢桂青, 孙嘉, 曾载淋, 张承帅, 程彦博. 2010. 江西铜坑嶂钼矿和红山铜矿含矿斑岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 26(3): 819–829
- 舒良树, 周新民, 邓平, 余心起. 2006. 南岭构造带的基本地质特征. 地质论评, 52(2): 251–265
- 陶奎元, 毛建仁, 邢光福, 杨祝良, 赵宇. 1999. 中国东部燕山期火山-岩浆大爆发. 矿床地质, 18(4): 316–322
- 涂光炽. 1997. 矿床地球化学. 北京: 地质出版社, 1–112
- 王彬, 舒良树, 杨振宇. 2006. 赣闽粤地区早、中侏罗世构造地层研究. 地层学杂志, 30(1): 42–49
- 王登红, 陈郑辉, 陈毓川, 唐菊兴, 李建康, 应立娟, 王成辉, 刘善宝, 李立兴, 秦燕, 李华芹, 屈文俊, 王彦斌, 陈文, 张彦. 2010. 我国重要矿产成岩成矿年代学研究新数据. 地质学报, 84(7): 1–11
- 吴淦国, 张达, 陈柏林, 吴建设. 2000. 中国东南大陆中生代构造域的转换及其与成矿的关系——以闽西南地区为例. 地球科学—中国地质大学学报, 25(4): 390–396
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589–1604
- 许乃政, 毛建仁, 叶海敏, 沈莽庭, 刘仰炮, 陈乐柱. 2008. 福建省永定县大排铅锌矿床成矿地质特征及找矿新进展. 地质与勘探, 44(4): 20–23
- 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. 高校地质学报, 11(3): 318–334
- 闫峻, 陈江峰, 喻钢, 钱卉, 周泰禧. 2003. 长江中下游晚中生代中基性岩的铅同位素特征: 富集地幔的证据. 高校地质学报, 9(2): 195–206
- 张承帅. 2010. 福建马坑铁钼多金属矿床地质特征研究. 矿床地质, 29(增刊): 123–124
- 张承帅, 毛景文, 谢桂青, 于森, 王金祥, 刘武刚. 2012. 福建马坑矽卡岩型铁(钼)矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄. 吉林大学学报(自然科学版), 待刊
- 张东阳. 2011. 西天山晚古生代成矿斑岩的岩石成因和成矿地质背景研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1–144
- 赵海杰, 毛景文, 向君峰, 周振华, 魏克涛, 柯于富. 2010. 湖北铜绿山矿床石英闪长岩的矿物学及 Sr-Nd-Pb 同位素特征. 岩石学报, 26(3): 768–784
- 赵希林. 2007. 福建省上杭地区中生代花岗岩体的年代学、岩石学、地球化学特征及其地质意义. 硕士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 1–56
- 赵希林, 毛建仁, 陈荣, 许乃政, 曾庆涛, 叶海敏. 2007. 闽西南地区才溪岩体锆石 SHRIMP 定年及其地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 26(3): 223–231
- 赵希林, 毛建仁, 陈荣, 许乃政. 2008. 闽西南地区紫金山岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 中国地质, 35(4): 590–597
- 赵希林, 毛建仁, 叶海敏, 许乃政, 胡青. 2009. 福建省上杭地区晚中生代花岗质岩体黑云母的地球化学特征及成因意义. 矿物岩石地球化学通报, 28(2): 162–168
- 赵一鸣, 谭惠静, 许振南, 许振南, 袁润广, 毕承恩, 郑人来, 李大新, 孙静华. 1983. 闽西南地区马坑式钙矽卡岩型铁矿床. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, (1): 1–141
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承恩. 1990. 中国矽卡岩矿床. 北京: 地质出版社, 164–171
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. 高校地质学报, 9(4): 556–565
- 周振华, 吕林素, 杨永军, 李涛. 2010. 内蒙古黄岗锡铁矿区早白垩世 A 型花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学制约. 岩石学报, 26(12): 3521–3537