

粤中早白垩世亚髻山正长质杂岩体的成分分异及岩石成因*

苏扣林¹ 丁兴^{2,3**} 黄永贵¹ 郑小战¹ 吴凯^{4,5} 胡永斌^{4,5}

SU KouLin¹, DING Xing^{2,3**}, HUANG YongGui¹, ZHENG XiaoZhan¹, WU Kai^{4,5} and HU YongBin^{4,5}

1. 广州市地质调查院, 广州 510440

2. 中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101

4. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

5. 中国科学院大学, 北京 100049

1. Geological Survey Institute of Guangzhou, Guangzhou 510640, China

2. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China

4. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2014-09-01 收稿, 2014-12-28 改回.

SU KL, Ding X, Huang YG, Zheng XZ, Wu K and Hu YB. 2015. Compositional differentiation of Early Cretaceous Yajishan syenitic complex and its petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 31(3):829–845

Abstract Alkaline magmas usually intrude into the early-formed granites as small stocks in South China, suggesting a dominant lithospheric extensional regime. This paper studied that the Yajishan syenitic complex in Central Guangdong of South China, a representative alkaline intrusion, and divided the samples into three groups because of obvious lithological and geochemical differentiations, which is attributed to magmatic process and post-magmatic fluid metasomatism. Compositional variations among the three groups show that: 1) Group 1 has the lowest values for SiO_2 (59.37% ~ 64.10%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (0.70 ~ 1.11), I_{Sr} (0.70741 ~ 0.71003), $t_{2\text{DM}}$ model ages (1.0 ~ 1.1 Ga), but the highest one for Al_2O_3 (17.30% ~ 19.18%), $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (11.13% ~ 13.76%), $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-1.6 ~ -0.9) and Nb/Ta (19.6 in average), Zr/Hf (47.1 in average), with alkaline-peralkaline, metaluminous characteristics in major components and LREE enrichment and Ba, Ti, Sr, P depletions in the primitive mantle-normalized trace element spidergrams. 2) Group 2 has the highest values for TiO_2 (0.47% ~ 0.49%), MgO (0.98% ~ 1.07%), P_2O_5 (0.15% ~ 0.16%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (2.57 ~ 6.69) and moderately lower values for I_{Sr} (0.70845), $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-7.9 ~ -7.8), and Nb/Ta and Zr/Hf (11.6 and 36.3 in average, respectively), showing alkaline-calc alkaline, strongly peraluminous, and depleted Nb-Ta, LREE, P and Ti. 3) Group 3 has the highest values for SiO_2 (77.50% ~ 76.54%), I_{Sr} (0.72563), $t_{2\text{DM}}$ model age (1.6 Ga) and the lowest values for mafic components, Al_2O_3 (13.00% ~ 13.16%), $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-8.3), as well as Nb/Ta and Zr/Hf (3.0 and 18.5 in average, respectively), displaying alkaline and strongly peraluminous in major components, with flat patterns and Eu negative anomalies in the chondrite-normalized REE distribution patterns and Ba, Nb, LREE, Sr, P, Ti negative anomalies and Rb, Th-U, Ta, Pb positive anomalies in the primitive mantle-normalized trace element spidergrams. LA-ICP-MS U-Pb dating for zircon from the Group 3 yielded two mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of 140.9 ± 1.4 Ma (MSWD = 2.0) and 141.4 ± 0.9 Ma (MSWD = 1.6). These ages are consistent with previous ages obtained from the Group 1, suggesting the Yajishan syenitic complex as the product of single an Early

* 本文受广州城市地质调查项目(1212010511106)、科技部973项目(2012CB416703)和国家自然科学基金项目(41090373、41421062)联合资助。

第一作者简介: 苏扣林,男,1964年生,高级工程师,从事区域地质、地质矿产及环境地质工作,E-mail: sukoulin@163.com

** 通讯作者: 丁兴,男,1978年生,副研究员,元素地球化学研究方向,E-mail: xding@gig.ac.cn

Cretaceous magmatism. Compositional differentiations among the three groups also show on the genetic classification that the Group 1 belongs to typical A₁ subgroup in A-type igneous suites whereas the Group 2 displays a trend from A-type to normal I-type, and the Group 3 wavers between highly-evolved granite and A-type granite. The results indicate that the Group 1 was derived mainly from silicon-unsaturated alkaline magma differentiated from an enriched source in the upper mantle with minor crustal assimilation. The Group 2 was the product of strong assimilation of silicon-unsaturated alkaline magma by host Fogang granites, whereas the Group 3 was formed by feldspar, ilmenite and apatite fractionation from the Group 2 magma and subsequent strong metasomatism by fluorine-rich fluids. Therefore, the compositional differentiation of the Yajishan syenitic complex is an integrated result from strong assimilation between silicon-unsaturated alkaline magma and wall rocks and subsequent post-magmatic fluid metasomatism. This further suggests that the influence of magmatic and subsequent fluid processes on the original composition of magma cannot be ignored, especially for those granites with specious genetic classifications. Most likely these processes resulting in formation of compositional zonation in a small magmatic stock are critical to rare metal mineralization of some alkaline or intermediate-acidic igneous rocks.

Key words Nepheline syenite; A-type suites; Composition differentiation; Yajishan; South China

摘要 华南的碱性岩浆往往以小岩株形式侵入于早期花岗岩中,指示了伸展拉张的大地构造背景。本文通过对华南代表性的碱性岩体——粤中亚髻山正长质杂岩体不同相带岩石的研究,发现它们可按照岩性和成分的差异划分三组,其成因与岩浆过程和岩浆期后流体作用密切相关。化学成分上,三组的差异体现在:1) Group 1 显示最低的 SiO₂ (59.37% ~ 64.10%)、K₂O/Na₂O (0.70 ~ 1.11)、I_{Sr} 值 (0.70741 ~ 0.710032)、t_{2DM} 模式年龄 (1.0 ~ 1.1 Ga), 最高的 Al₂O₃ (17.30% ~ 19.18%)、全碱 (K₂O + Na₂O: 11.13% ~ 13.76%)、ε_{Nd}(t) 值 (-1.6 ~ -0.9) 和碱性-过碱性、准铝质特征; 稀土配分曲线呈明显右倾, 在原始地幔标准化蛛网图上, 表现出 Ba、Ti、Sr 和 P 负异常; 具有球粒陨石质 Nb/Ta 比值 (平均为 19.6) 和超球粒陨石值 Zr/Hf 比值 (平均为 47.1); 2) Group 2 显示最高的 TiO₂ (0.47% ~ 0.49%)、MgO (0.98% ~ 1.07%)、P₂O₅ (0.15% ~ 0.16%)、K₂O/Na₂O (2.57 ~ 6.69) 和中等低的 I_{Sr} (0.70845)、ε_{Nd}(t) 值 (-7.9 ~ -7.8), 具有强过铝质且碱性-钙碱性过渡的特征; 稀土配分曲线呈明显右倾, 在原始地幔标准化蛛网图上, 表现出 Nb-Ta、LREE、P 和 Ti 负异常; 其 Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值均近似于平均陆壳 (平均值分别为 11.6 和 36.3); 3) Group 3 具有最低的镁铁质含量、Al₂O₃ (13.00% ~ 13.16%)、ε_{Nd}(t) 值 (-8.3) 和最高的 SiO₂ (77.50% ~ 76.54%)、I_{Sr} (0.72563) 以及与过渡带相似的 t_{2DM} 模式年龄 (1.6 Ga), 总体显示碱性、强过铝质的特征; 稀土配分曲线近似于“海鸥形”, Eu 异常明显, 在原始地幔标准化蛛网图上, 显示 Ba、Nb、LREE、Sr、P、Ti 负异常和 Rb、Th、U、Ta、Pb 正异常。其 Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值均远低于平均陆壳 (平均值分别为 3.0 和 18.5)。Group 3 中锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年获得了 2 个加权平均年龄, 即 140.9 ± 1.4 Ma (MSWD = 2.0) 和 141.4 ± 0.9 Ma (MSWD = 1.6), 与之前报道的 Group 1 的形成时代一致, 表明它们都是早白垩世同一次岩浆作用的产物。这些成分的差异也体现在岩石成因类型判别上, 结果显示 Group 1 属于 A 型岩套中典型的 A₁ 型亚类, 而 Group 2 和 Group 3 显示似是而非的类型, 比如, Group 2 具有 A 型向 I 型过渡的特征, Group 3 则既具有高演化花岗岩的特征, 又类似于铝质 A 型花岗岩。基于 Sr-Nd 同位素和主、微量元素成分特征, 我们认为亚髻山正长质杂岩体中的 Group 1 形成自富集的上地幔分异的硅不饱和碱性岩浆, 较少陆壳物质混染; Group 2 岩石则是硅不饱和碱性岩浆在侵位过程中大比例同化混染了外圈的佛冈花岗岩而成; 而 Group 3 岩石则是 Group 2 岩浆发生长石、钛铁矿、磷灰石等矿物分离结晶后再与富氟流体发生显著的相互作用而形成。因此, 杂岩体各组岩石成分的明显差异, 是碱性岩浆与围岩同化混染及后期流体改造、分异的结果。这进一步暗示诸多似是而非岩石类型的花岗岩, 其岩浆过程及其后的流体交代对于其源区岩浆的地球化学特征的影响不容忽视; 而这些过程很可能对于一些碱性火成岩及中酸性岩岩体的成分环带的形成及成矿作用具有至关重要的意义。

关键词 霞石正长岩; A 型岩套; 成分分异; 亚髻山; 华南

中图法分类号 P588.122; P597.3

中生代是中国东部构造-岩浆活动的活跃期, 华南陆块大面积出露各种类型的中生代岩浆岩, 长期以来受到了国内外研究者的高度关注 (Zhou and Li, 2000; Zhou *et al.*, 2006; Li and Li, 2007; Ling *et al.*, 2009; Jiang *et al.*, 2009)。已有研究显示华南陆块晚中生代岩浆岩以钙碱性岩石为主, 同时存在少数面积小但成因特殊的碱性花岗岩类。这些晚中生代碱性岩体通常形成于拉张伸展的环境中, 对于华南陆块乃至整个中国东部晚中生代地球动力学过程和大地构造环境有着重要意义 (肖振宇等, 1998; 王强等, 2005; Wang *et al.*, 2005; 刘昌实等, 2002, 2003a; 包志伟等, 2000; Chen *et al.*, 2002, 2005; Li *et al.*, 2003, 2007, 2012; 柏道远等, 2005;

He *et al.*, 2009)。

粤中良口亚髻山正长质杂岩体是华南陆块腹地早白垩世重要的代表性碱性岩体, 位于广东省从化市良口镇石岭村, 侵入于佛冈复式花岗岩基中, 出露面积约 10.4 km²。该岩体最初于 20 世纪 60 年代区测工作中被发现 (潘维祖, 1966), 后来被诸多学者以“从化石岭碱性杂岩” (肖振宇等, 1998)、“从化石岭方钠石正长岩” (刘昌实等, 2002, 2003a; Xu *et al.*, 2007)、“恶鸡脑碱性正长岩” (包志伟等, 2000)、“恶鸡脑方钠石正长岩” (Xu *et al.*, 2012) 等名字予以研究。2010 年, 广东省正式以“亚髻山霞石正长岩”之名将之列广东省典型岩石遗迹。该杂岩体的形成时代运用角闪石 Ar-

Ar 法获得的坪年龄为 127.5Ma(周玲棣等, 1996), 全岩 K-Ar 法获得的年龄为 140Ma(肖振宇等, 1998)、矿物-全岩 Rb-Sr 等时线法年龄为 145Ma(刘昌实等, 2003a); 锆石 U-Pb 年龄为 137 ± 2 Ma(王强等, 2005) 和 ~ 145 Ma(Xu *et al.*, 2012), 最近的锆石 SIMS U-Pb 定年结果是 141 ~ 143Ma(杨进辉未发表数据, 私人通讯)。因此, 普遍认为该岩体侵位时间比佛冈花岗岩(159 ~ 165Ma)(Li *et al.*, 2007)晚 20Ma 左右。

到目前为止, 有关亚髻山正长质杂岩体的岩石成因和岩浆来源仍存在较大分歧。例如, 肖振宇等(1998)认为该碱性杂岩体产于板内引张的构造环境, 是佛冈 A 型花岗岩浆分异结晶的产物; 包志伟等(2000)认为该碱性杂岩体是中国东南部由挤压造山向拉张伸展转变的产物, 其物质主要来源于富集的上地幔, 是上地幔硅不饱和的正长岩岩浆与佛冈花岗岩源区物质或类似佛冈花岗岩源区的地壳物质发生同熔作用的产物; 刘昌实等(2002, 2003a)也认为该碱性杂岩体中的方钠石正长岩形成于大规模拉张背景, 其源区为岩石圈地幔, 极少陆壳物质的混染; 而王强等(2005)认为该碱性岩的形成可能与古太平洋板块快速斜向俯冲所导致的弧后伸展或岩石圈减薄有关。值得注意的是, 前人的研究多立足于亚髻山正长岩杂岩体中间部位的霞石角闪正长岩, 而对杂岩体其他部分的角闪正长岩、黑云母正长岩、石英正长岩等几乎未予以关注。

本文利用最新区域地质调查的结果, 并结合室内岩相学观察, 对杂岩体岩石的地球化学特征、岩石成因和源区性质进行了较为细致的分析研究。研究显示, 杂岩体岩石成分存在明显的分异, 是来源于富集的上地幔的硅不饱和碱性岩浆与佛冈花岗岩同化混染及后期流体改造的结果; 研究的样品可分为三组, Group 1 霞石角闪正长岩类具有 A 型岩套中 A₁ 亚型的地球化学特征, 较少陆壳物质混染, 而其他组如方沸石正长岩类、碱性花岗岩类等则显示似是而非的岩石类型, 表明岩浆过程及岩浆期后流体作用使得它们的岩石成因类型难以厘定。

1 区域地质概况和样品简况

粤中良口亚髻山正长质杂岩体位于 NE 向广州-从化断裂带和 EW 向隐伏佛冈-丰良深大断裂带交汇部位, 岩体总体走向近东西向, 南部受近东西向 F1 断层控制, 边界较平直; 西端受近南北向 F2 断层影响, 岩体向北突出呈蝌蚪状; 岩体最宽达 2.2km, 呈岩株状, 北东面为隐伏的石磴子组(C_{1sh})灰岩, 其余外围为燕山期汤塘序列高桥单元中粒斑状黑云母二长花岗岩(J_{3G}), 即佛冈花岗岩。岩株与外围岩体呈侵入接触, 产状向外倾, 倾角在 65° ~ 75°。F1 断层近东西走向, 倾角 50° ~ 60°, 长 8000m, 宽 1.8 ~ 8m, 以构造碎裂岩为主, 属正断层, 该断层为碱性岩浆上侵的通道(图 1)。

亚髻山正长质杂岩体最初发现时被报道存在内部相角闪霞石正长岩和外部相黑云母角闪正长岩(潘维祖, 1966)。

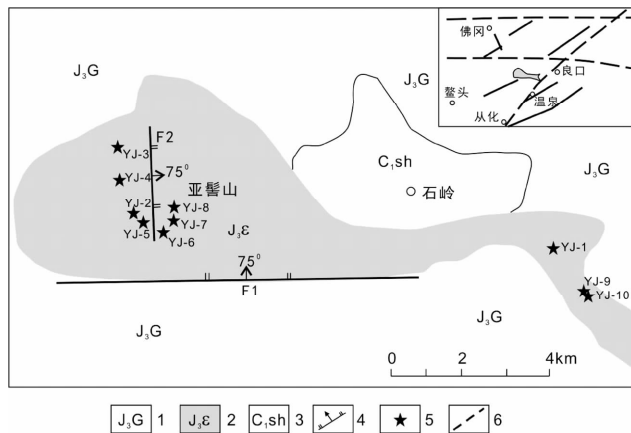


图 1 广东从化良口亚髻山正长质杂岩体区域地质简图(据广东省地质科学研究所, 1989^①, 略有修改)

1-佛冈花岗岩; 2-亚髻山正长质杂岩体; 3-石炭纪石磴子组灰岩; 4-断裂及编号; 5-采样位置; 6-深大断裂带

Fig. 1 Regional geological sketch map for the Yajishan syenitic complex, Liangkou

1-Fogang granite; 2-Yajishan syenitic complexes; 3-concealed Carboniferous limestone of Shidengzi Formation; 4-faults; 5-sampling location; 6-fault zone

其后 1 : 1 万地质调查和填图发现该杂岩体由霞石角闪石正长岩、黑云母正长岩和(石英)角闪石正长岩组成(肖振宇等, 1998)。本文在新的 1 : 1 万地质调查基础上, 根据野外观察以及镜下主要造岩矿物组合、结构构造的差异, 将本次研究的样品分为三组。

(1) Group 1——黑云角闪霞石正长岩类: 岩石较为新鲜, 出露在亚髻山山顶附近。岩石为浅灰色, 风化后为灰白色, 自形-半自形粗粒结构, 似粗面结构, 块状构造, 粒度 5 ~ 8mm。矿物特征为(图 2a, b): 钾长石为微纹长石, 具有条纹连晶构造, 呈板柱状自形-半自形晶体, 晶体具有定向或半定向排列, 含量 80% ~ 85%, 边部可见钠化, 偶见高岭石化、绢云母化; 角闪石呈自形-半自形柱状, 具有菱形和六边形切面, 为富铁、钠角闪石, 含量 7% ~ 8%; 黑云母呈厚板状自形-半自形, 含量 2% ~ 3%; 浅红色霞石呈细小六方柱状产于长石间隙, 含量 3% ~ 8%; 蚀变方钠石为均质体, 无色透明, 含量 3% ~ 5%。另外含有极少量磷灰石、榍石、磁铁矿、锆石、方解石、绿泥石、绿帘石等副矿物。该岩类历来为多次研究的主要研究对象, 典型特征为含有霞石且暗色矿物可见定向排列。

(2) Group 2——方沸石斑状正长岩类: 岩石为浅灰色, 多见于岩体中部和边部。部分风化较为强烈, 风化后为灰白色, 自形-半自形中粒结构, 似斑状结构, 块状构造, 粒度 3 ~ 6mm, 斑晶成分为钾长石, 斑晶大小在 5 ~ 10mm。镜下矿物

① 广东省地质科学研究所. 1989. 1 : 1 万广东从化良口亚髻山正长岩地质图

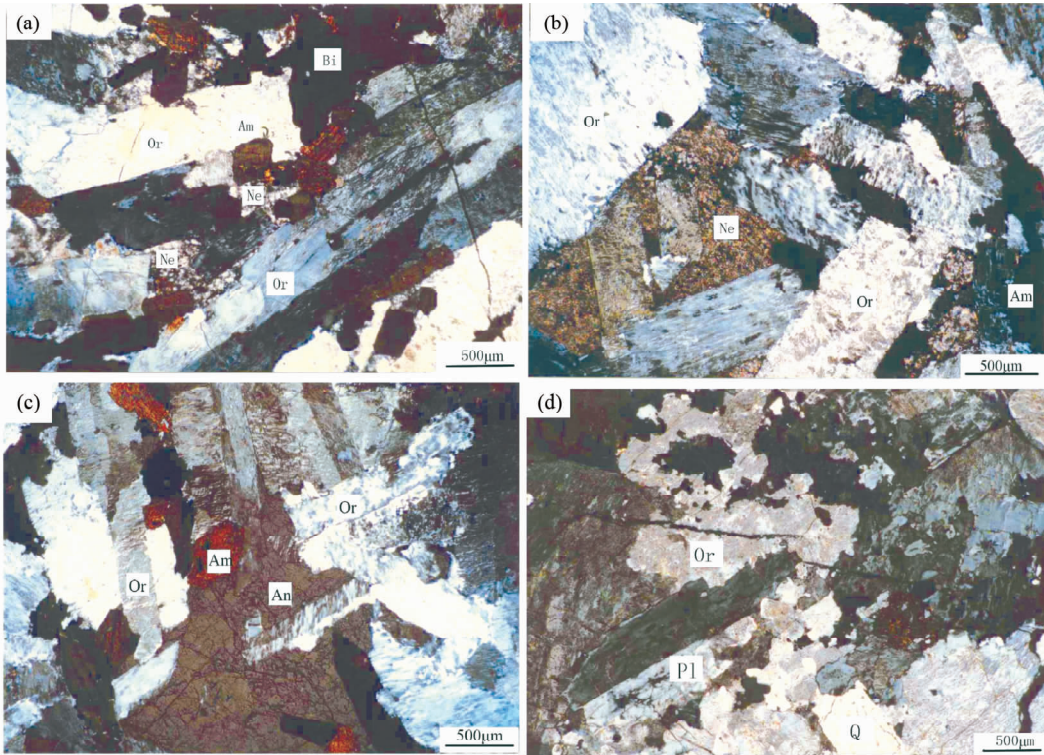


图2 亚髻山正长质杂岩体各岩石的显微照片

(a,b)黑云角闪霞石正长岩类;(c)方沸石斑状正长岩类;(d)碱性花岗岩类. Am-角闪石;An-方沸石;Bi-黑云母;Ne-霞石;Or-钾长石;Pl-斜长石;Q-石英

Fig.2 Photomicrographs of the Yajishan syenitic complex

(a, b) biotite-amphibole-bearing nepheline syenitic rocks; (c) analcime syenitic rocks; (d) quartz syenitic rocks. Am-amphibole; An-analcime; Bi-biotite; Ne-nepheline; Or-K-feldspar; Pl-plagioclase; Q-quartz

特征为(图2c):钾长石为微纹长石,具有条纹连晶构造,呈宽板状、板条状自形-半自形晶体,晶体具有半定向排列,含量50%~80%,表面常发生高岭石化、绢云母化;方沸石呈它形粒状,含量5%~15%;角闪石呈半自形-他形柱状,为富铁、钠角闪石,含量7%~8%,部分发生绿泥石化;黑云母呈厚板状自形-半自形晶体,含量2%~3%;蚀变方钠石为均质体,含量4%~6%;浅红色霞石呈细小六方柱状产于长石中,含量1%~2%,另含少量磷灰石、磁铁矿、钛铁矿等矿物。该岩类的主要识别特征在于方沸石的出现、较低的霞石含量以及暗色矿物无明显定向排列。

(3) Group 3——含石英正长岩类和碱性花岗岩类:该岩类主要见于岩体东部,包括两种主要岩石,一种呈灰色或灰绿色伟晶化的石英正长岩类,中细粒似斑状结构,可见大的碱性长石、石英斑晶(最大可达6cm),还可见暗色矿物包体和捕虏体以及伟晶岩脉穿插;另一种呈灰绿色细粒碱性花岗岩,抗风化能力强,致密坚硬,粒度1~2mm,为岩体最边部的冷凝边。矿物特征为(图2d):钾长石为微纹长石,具有条纹连晶构造,呈宽板状、自形板条状自形-半自形晶体,含量55%~65%;斜长石为钠长石,自形-半自形板条状,含量5%~10%;石英呈他形粒状,波状消光,充填于长石裂隙,部分与长石构成似文象结构,含量8%~20%;角闪石呈半自形-

他形柱状,为富铁、钠角闪石,含量3%~10%,多发生绿泥石化或云母化;黑云母呈自形-半自形片状,含量2%~6%;另外含少量的磷灰石、榍石、锆石、帘石和白云母等矿物。该组岩石的矿物组成以含石英为特征。

2 分析方法

锆石定年、主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素的测试均在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。

锆石样品选自亚髻山正长质杂岩体 Group 3 中碱性花岗岩类(YJ-9和YJ-10),在河北省区域地质调查所用常规方法分选后,首先在双目镜下挑选出晶形完整、无包裹体和裂隙的锆石和标样 TEMORA 粘于双面胶上,然后用环氧树脂固化制靶,最后将锆石靶进行打磨、抛光至将近一半进行锆石阴极发光(CL)显微照相。锆石 U-Pb 定年仪器采用购自美国 Resonetics 公司的 RESolution M-5 激光剥蚀系统和 Agilent 7500a 型的 ICP-MS 联机组成。仪器工作参数:激光剥蚀斑束为 33 μ m,频率为 8Hz,剥蚀时间为 40s,背景积分时间 25s(涂湘林等,2011;Li et al., 2012)。采用国际标准锆石 TEMORA

表1 亚髻山正长质杂岩体代表性岩石的主量元素 (wt%) 及微量元素 ($\times 10^{-6}$) 组成Table 1 Major elements (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of the Yajishan syenitic complex

样品号	YJ-2	YJ-5	YJ-6	YJ-7	YJ-8	YJ-3	YJ-4	YJ-1	YJ-9
	Group 1					Group 2		Group 3	
SiO ₂	61.32	60.31	59.37	61.16	64.10	66.67	67.23	77.50	76.54
TiO ₂	0.25	0.14	0.23	0.26	0.34	0.49	0.47	0.09	0.11
Al ₂ O ₃	17.99	18.47	19.18	18.63	17.30	15.19	15.46	13.00	13.16
Fe ₂ O ₃ ^T	6.28	5.83	5.18	4.86	4.58	4.82	4.46	0.81	1.12
MnO	0.21	0.17	0.19	0.13	0.13	0.07	0.07	0.05	0.06
MgO	0.24	0.16	0.29	0.41	0.24	1.07	0.98	0.07	0.06
CaO	1.31	1.63	1.27	1.57	1.39	0.96	1.97	0.19	0.21
Na ₂ O	5.87	7.22	8.07	6.00	5.37	0.92	1.77	3.09	3.28
K ₂ O	5.26	5.54	5.69	6.12	5.98	6.18	4.55	4.25	4.24
P ₂ O ₅	0.05	0.04	0.06	0.08	0.05	0.15	0.16	0.01	0.01
LOI	1.62	1.01	0.98	1.19	0.91	3.49	2.95	0.93	0.98
Total	100.40	100.52	100.51	100.41	100.39	100.01	100.07	99.98	99.77
ALK	11.13	12.77	13.76	12.13	11.36	7.11	6.32	7.34	7.52
A. R	3.72	4.48	5.11	3.93	3.70	2.57	2.14	2.76	2.93
ACNK	1.01	0.89	0.88	0.96	0.97	1.53	1.35	1.30	1.27
NK/A	0.85	0.97	1.01	0.88	0.88	0.54	0.51	0.75	0.76
K ₂ O/Na ₂ O	0.9	0.77	0.7	1.02	1.11	6.69	2.57	1.38	1.29
FeO ^T /MgO	24	33	16	11	17	4	4	10	17
Cs	3.30	4.97	4.35	5.32	4.56	5.39	6.86	9.63	9.87
Rb	311	240	339	227	199	224	170	621	626
Ba	298	41	135	391	512	1585	1016	83	121
Th	144	19.1	17.9	13.9	18.9	19.5	26.3	33.5	35.2
U	30.3	4.12	4.47	2.65	4.83	4.27	4.83	7.50	7.82
Nb	196	67.3	76.1	53.2	67.1	13.4	16.4	22.7	24.0
Ta	12.9	3.04	4.34	2.35	3.19	1.21	1.35	8.23	7.49
K	43666	45990	47236	50805	49643	51303	37772	35281	35198
La	314	74.2	79.1	67.6	99.4	45.9	52.2	18.6	20.7
Ce	495	136	136	116	187	80.9	99.6	44.9	46.3
Pb	110	24.9	20.7	30.5	22.6	22.2	23.3	29.8	31.1
Pr	48.4	14.5	13.8	12.9	20.9	9.09	12.2	6.03	6.42
Sr	112	24.1	64.2	208	151	442	460	29.1	40.2
P	218	175	262	349	218	655	698	43.6	43.6
Nd	136	45.1	41.7	42.1	72.1	32.1	45.7	23.2	22.8
Sm	19.1	6.23	5.82	5.99	10.41	5.40	8.34	7.44	7.29
Zr	2211	389	560	274	487	161	201	78.1	95.5
Hf	43.6	8.52	11.98	6.18	10.15	4.47	5.49	4.00	5.45
Eu	1.40	0.465	0.599	0.969	1.34	1.33	2.05	0.306	0.387
Ti	1495	811	1280	1571	1881	2679	2707	521	687
Gd	18.0	5.37	5.10	4.88	8.87	4.46	7.29	7.07	7.68
Tb	2.83	0.747	0.795	0.695	1.20	0.575	1.02	1.43	1.53
Dy	17.2	4.11	4.86	3.83	6.20	2.97	5.50	8.98	9.46
Y	116	26.5	36.2	24.6	37.4	14.3	30.5	50.6	57.4
Ho	3.91	0.860	1.12	0.813	1.28	0.545	1.06	1.75	1.84
Er	12.6	2.59	3.73	2.38	3.67	1.48	3.04	5.13	5.97
Tm	2.14	0.420	0.641	0.366	0.558	0.230	0.470	0.853	0.902
Yb	14.7	3.00	4.77	2.59	3.80	1.63	3.21	6.18	6.08
Lu	2.25	0.506	0.759	0.418	0.606	0.253	0.496	0.938	0.972
Sc	2.77	0.102	0.325	0.685	2.66	7.32	6.08	2.03	3.51
V	9.09	10.5	8.52	12.1	7.98	67.2	65.4	6.93	26.0
Cr	114	128	74	109	118	181	164	108	83
Mn	1734	1474	1612	1229	1195	652	628	430	550

续表 1

Continued Table 1

样品号	YJ-2	YJ-5	YJ-6	YJ-7	YJ-8	YJ-3	YJ-4	YJ-1	YJ-9
	Group 1				Group 2		Group 3		
Co	1.79	2.94	3.25	3.94	2.11	6.50	6.13	0.849	0.953
Ni	7.31	7.49	6.38	6.57	21.5	11.2	8.53	6.29	6.87
Cu	42.5	46.3	51.2	32.6	31.7	21.0	21.8	42.9	51.5
Zn	212	87.3	109	83.4	70.7	58.3	54.3	21.7	37.3
Ga	34.1	23.0	25.1	20.0	21.3	18.0	19.5	18.6	20.4
∑REE	1204	320	335	286	455	201	273	183	196
(La/Yb) _N	12.7	14.7	9.9	15.6	15.6	16.7	9.7	1.8	2.2
(La/Sm) _N	10.3	7.4	8.5	7.0	6.0	5.3	3.9	1.6	1.8
(Gd/Yb) _N	0.99	1.45	0.86	1.53	1.89	2.21	1.84	0.93	1.02
δEu	0.23	0.25	0.34	0.55	0.43	0.83	0.81	0.13	0.16
TE _{1,3}	0.98	0.98	0.98	0.96	0.96	0.95	0.97	1.12	1.11
Rb/Sr	2.8	10.0	5.3	1.1	1.3	0.5	0.4	21.4	15.6
Rb/Ba	1.05	5.8	2.51	0.58	0.39	0.14	0.17	7.44	5.17
Nb/Ta	15.1	22.1	17.5	22.6	21.0	11.1	12.1	2.8	3.2
Zr/Hf	50.7	45.6	46.7	44.3	48.0	36.0	36.6	19.5	17.5
Yb/Ta	1.1	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	2.4	0.8	0.8
Y/Nb	0.6	0.4	0.5	0.5	0.6	1.1	1.9	2.2	2.4
10000Ga/Al	3.58	2.35	2.47	2.02	2.32	2.24	2.39	2.71	2.93

注: K 和 P 根据主量元素含量换算而来; $ALK = K_2O + Na_2O$, $ACNK = Al_2O_3 / (K_2O + Na_2O + CaO)$, $NK/A = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$, 分子比

作为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标,²⁹Si 作为内标元素进行校正;同时采用清湖锆石作为监测标样。样品的同位素比值和元素含量数据处理采用软件 ICPMSDataCal8.3 (Liu *et al.*, 2008), 锆石 U-Pb 谐和图及平均加权年龄计算采用软件 Isoplot 4.15 (Ludwig, 2003)。

主量元素采用 Rigaku RIX 200 型荧光光谱仪 (XRF) 分析,分析精度优于 2%。微量元素使用 Perkin-Elmer Scie ELAN 6000 型电感耦合等离子体-质谱仪 (ICP-MS) 分析,分析流程和相关参数见刘颖等 (1996),分析精度优于 5%。Sr-Nd 同位素测试在 Micromass Isoprobe 型多接受器电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 上进行。化学分离采用常规的阳离子树脂 (REE 和其他元素分离) 和 HDEHP (Sm、Nd 分离) 方法, Sr-Nd 同位素分析的全流程本底 < 100pg, 详细的分析流程见梁细荣等 (2003)。

3 岩石地球化学特征和年代学

3.1 主量元素

粤中良口亚髻山正长质杂岩体的代表性成分见表 1。从表 1 可以看出,亚髻山正长质杂岩体具有明显差异性的主量元素成分特征: Group 1 具有最低的 SiO₂ 和最高的 Al₂O₃、Fe₂O₃、MnO、Na₂O、K₂O; Group 2 具有最高的 TiO₂、MgO、P₂O₅ 和最低的 Na₂O; Group 3 拥有最高的 SiO₂ 和最低的 TiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MnO、MgO、CaO、K₂O、P₂O₅。其中 Group 1 岩石全碱 (ALK) 变化于 11.13% ~ 13.76%, Group 2 变化于

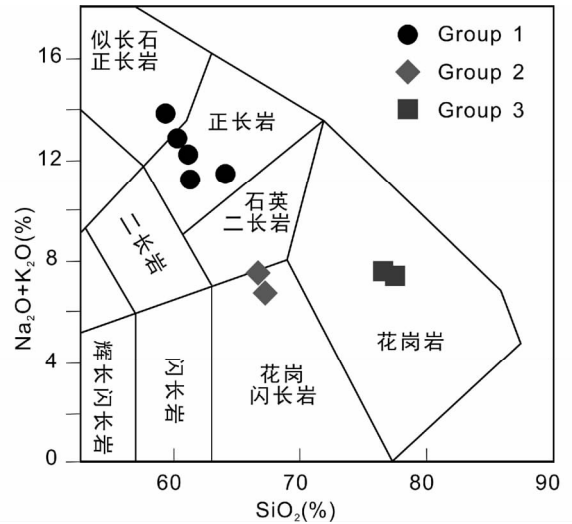


图 3 亚髻山正长质杂岩体岩石 TAS 图解 (据 Middlemost, 1994, 略修改)

图 4、图 8、图 9 的图例同此图

Fig. 3 TAS diagrams for the Yajishan syenitic complex (modified after Middlemost, 1994)

Symbols in Fig. 4, Fig. 8 and Fig. 9 are same as in this figure

6.32% ~ 7.11%, 而 Group 3 则变化于 7.34% ~ 7.52%。因此在 SiO₂-ALK 岩石分类图上 (图 3), Group 1 样品主要落入正长岩区域, 个别落入似长石正长岩区域; 而 Group 2 样品落入石英二长岩和花岗闪长岩的界线区域, Group 3 样品则落入花岗岩区域。而在 SiO₂-A. R 图解上 (图 4a), Group 1 样品

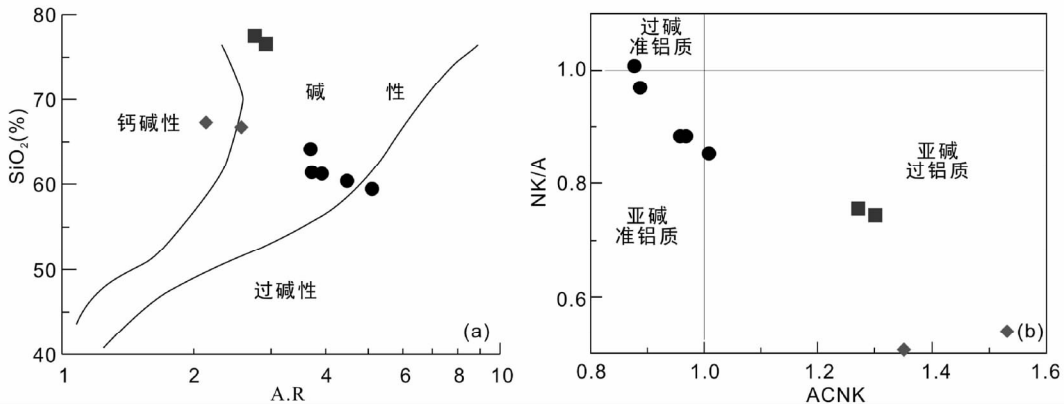


图4 亚髻山正长质杂岩体岩石的 SiO₂-A. R(a)和 NK/A-ACNK 图解(b)

Fig.4 Plots of A. R-SiO₂ (a) and ACNK vs. NK/A (b) for the Yajishan syenitic complex

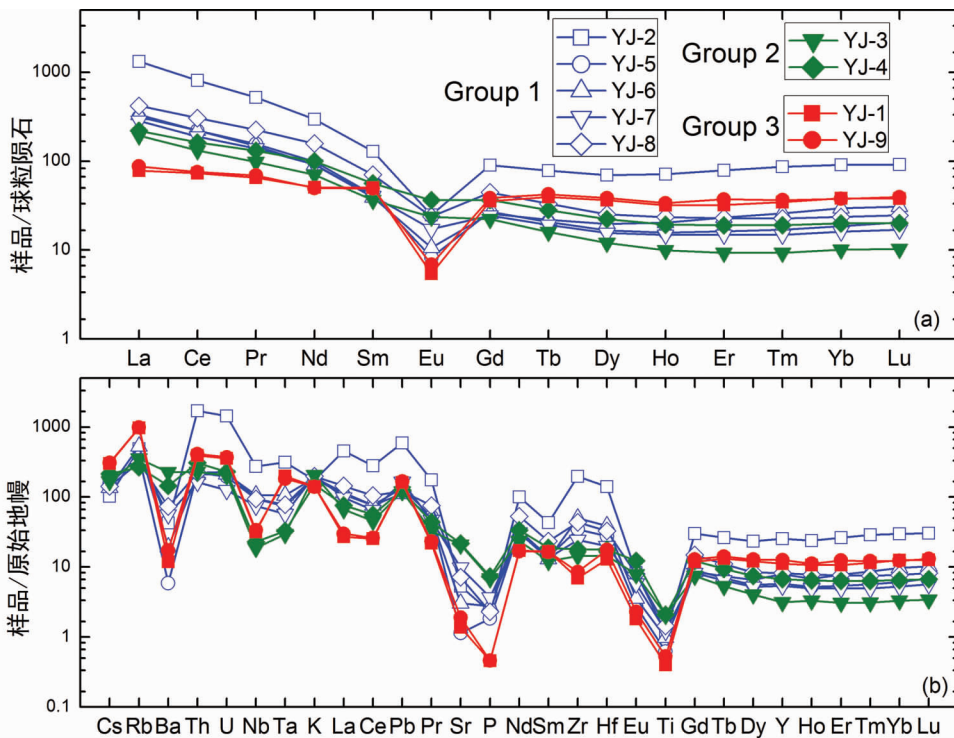


图5 亚髻山正长质杂岩体球粒陨石标准化稀土元素配分图(a,标准化值据 McDonough and Sun, 1995)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b,标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.5 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a, normalization values after McDonough and Sun, 1995) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989) for the Yajishan syenitic complex

落在过碱性到碱性的区域, Group 2 岩石样品落在碱性到钙碱性区域, Group 3 样品则落在碱性区域; 与此对应的是 Group 1 样品具有最低的 K₂O/Na₂O 比值(0.70 ~ 1.11), 而 Group 2 则具有最高的 K₂O/Na₂O 比值(2.57 ~ 6.69)。对于 ACNK 值, Group 1 岩石样品 ACNK 值在 0.88 ~ 1.01, 平均值 0.94, 为准铝质特征; Group 2 岩石样品因具有最高的 Al₂O₃ 含量, 因此 ACNK 值也最高, 变化于 1.35 ~ 1.53, 平均值

1.44; Group 3 样品 ACNK 值在 1.27 ~ 1.30, 平均值 1.29, 与 Group 2 样品一样, 显示强过铝质的特征(图 4b)。

3.2 稀土元素特征

粤中良口亚髻山正长质杂岩体各组岩石的稀土元素特征存在较明显差别(表 1、图 5a)。Group 1 的 ΣREE 变化于 286 × 10⁻⁶ ~ 1204 × 10⁻⁶, 具有最高的稀土总量; (La/Yb)_N

表2 亚髻山正长质杂岩体 Sr-Nd 同位素组成

Table 2 Sr-Nd isotopic compositions of the Yajishan syenitic complex

样品号	YJ-2	YJ-5	YJ-6	YJ-7	YJ-8	YJ-3	YJ-4	YJ-1	
	Group 1				Group 2		Group 3		
Rb($\times 10^{-6}$)	311.4	239.9	338.5	226.6	198.9	224.4	169.6	620.9	
Sr($\times 10^{-6}$)	112.1	24.08	64.21	208.2	150.5	441.6	460.4	29.07	
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	8.051	28.990	15.299	3.151	3.827	1.471	1.066	62.642	
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	0.72522 \pm 12	0.76648 \pm 14	0.73863 \pm 16	0.71355 \pm 13	0.71539 \pm 14	0.71183 \pm 14	0.71104 \pm 13	0.84761 \pm 17	
I_{Sr}	0.70908	0.70838	0.70797	0.70723	0.70772	0.70889	0.70890	0.72207	
Sm($\times 10^{-6}$)	19.1	6.23	5.82	5.99	10.41	5.4	8.34	7.44	
Nd($\times 10^{-6}$)	136	45.1	41.7	42.1	72.1	32.1	45.7	23.2	
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.085	0.083	0.084	0.086	0.087	0.101	0.110	0.193	
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	0.51248 \pm 9	0.51245 \pm 18	0.51248 \pm 8	0.51247 \pm 7	0.51249 \pm 7	0.51215 \pm 8	0.51216 \pm 8	0.51221 \pm 10	
ϵ_{Nd}	-1.0	-1.6	-1.1	-1.3	-0.9	-7.9	-7.8	-8.3	
$t_{2\text{DM}}$ (Ga)	1019	1063	1020	1038	1006	1573	1562	1607	

注:岩体侵位时间取 141 Ma

变化于 9.9 ~ 15.6, 显示明显的右倾; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 变化于 6.0 ~ 10.3, 具有最富集的轻稀土含量; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 变化于 0.86 ~ 1.89, 显示重稀土较为富集。Group 2 的 ΣREE 变化于 $201 \times 10^{-6} \sim 273 \times 10^{-6}$, 具有中等高的稀土总量; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 变化于 9.7 ~ 16.7, 显示明显的右倾; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 变化于 3.9 ~ 5.3, 具有中等富集的轻稀土含量; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 变化于 1.84 ~ 2.21, 在亚髻山正长质杂岩体中属于重稀土最亏损的一组。Group 3 的 ΣREE 变化于 $183 \times 10^{-6} \sim 196 \times 10^{-6}$, 稀土总量在三个相带中最低; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 变化于 1.8 ~ 2.2, 显示较为平坦的稀土配分模式; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 变化于 1.6 ~ 1.8, 具有相对亏损的轻稀土含量; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 变化于 0.93 ~ 1.02, 显示总体较为富集的重稀土。亚髻山正长岩杂岩体三组岩石的 δEu 也有所差别, 其中 Group 2 的 δEu 介于 0.81 ~ 0.83, Eu 负异常不明显, 而 Group 1 的 δEu 介于 0.23 ~ 0.55, Group 3 的 δEu 介于 0.13 ~ 0.16, 均显示明显的 Eu 负异常, Group 3 相对更甚。值得注意的是, Group 1 和 Group 2 样品的 $\text{TE}_{1,3}$ 均小于 1, 而 Group 3 样品 $\text{TE}_{1,3}$ 介于 1.11 ~ 1.12, 表明 Group 3 样品存在一定的稀土元素四分组效应。

3.3 微量元素特征

亚髻山正长质杂岩体的微量成分见表 1。从表中可知, 从 Group 1 到 Group 2 到 Group 3, LREE、Zr、Mn、Zn 含量趋于降低, 其中 Zr 含量降低最为明显; 而 Cs 含量逐渐增高。在三组岩石中, Group 2 具有相对最高的 Ba、Sr、P、Eu、Ti、Sc、V、Cr、Co、Ni 含量。Group 1 样品 YJ-2 相对于其他样品而言, 显示大部分元素的富集, 如 Th、U、Nb、Ta、Zr、Hf、Ti、REE、Pb、Sr、Sc 等元素的含量比其他样品往往几倍到一个数量级的高。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 5b), Group 1 岩石样品具有明显的 Ba、Ti、Sr、P 负异常; Group 2 样品显示明显的 Nb-Ta、La-Ce、P 和 Ti 负异常; Group 3 样品则具有明显的 Ba、Nb、La-Ce、Sr-P、Ti 负异常和 Rb、Th-U、Ta、Pb 正

异常。

在一些具有重要意义的元素对比值方面, 亚髻山正长质杂岩体各组之间也显示较为明显的分异。比如, Group 3 的 Rb/Sr、Rb/Ba 比值分别介于 15.6 ~ 21.4 和 5.17 ~ 7.44, 高于 Group 1 (1.1 ~ 10.0, 0.39 ~ 5.8) 和 Group 2 (0.4 ~ 0.5, 0.14 ~ 0.17), 远高于原始地幔值 (0.03, 0.96) (Sun and McDonough, 1989), 反映了 Group 3 岩石经历了较高度度的演化。Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值方面, Group 1 的 Nb/Ta 介于 15.1 ~ 22.6, 平均值为 19.7, 近似于原始地幔和球粒陨石的比值 (17.5 ± 2.0) (McDonough and Sun, 1995; Sun and McDonough, 1989; Münker *et al.*, 2003); Group 2 的 Nb/Ta 变化于 11.1 ~ 12.1, 平均值为 11.6, 接近平均陆壳的组成 (11 ~ 13) (Rudnick and Gao, 2003); 而 Group 3 有最低的 Nb/Ta 比值, 变化于 2.8 ~ 3.2, 平均为 3.0, 具有明显“亚陆壳质”的 Nb/Ta 特征 (Ding *et al.*, 2013), 类似于一些成矿的高演化岩石 (Dostal and Chatterjee, 2000)。然而, Group 1 的 Zr/Hf 变化于 44.3 ~ 50.7, 平均为 47.1, 高于原始地幔和球粒陨石的值 (34 ~ 36) (McDonough and Sun, 1995; Sun and McDonough, 1989; Münker *et al.*, 2003), 具有超球粒陨石的特征; Group 2 的 Zr/Hf 变化于 36.0 ~ 36.6, 平均为 36.3, 类似于原始地幔和球粒陨石的值, 也接近于平均陆壳值 (35.7) (Rudnick *et al.*, 2003); 而 Group 3 的 Zr/Hf 变化于 17.5 ~ 19.5, 平均为 18.5, 类似于亏损地幔值 (Münker *et al.*, 2003)。

3.4 Sr-Nd 同位素特征

亚髻山正长质杂岩体不同岩石的 Sr-Nd 同位素测试结果见表 2。Group 1 的 I_{Sr} 值介于 0.70723 ~ 0.70908, 平均值为 0.70808; Group 2 和 Group 3 的 I_{Sr} 平均值分别为 0.70889 与 0.72207。Group 1 和 Group 2 的 I_{Sr} 值基本相当, 变化于 0.707 ~ 0.709 之间, 说明来自上地幔的岩浆受少量壳源物质的混

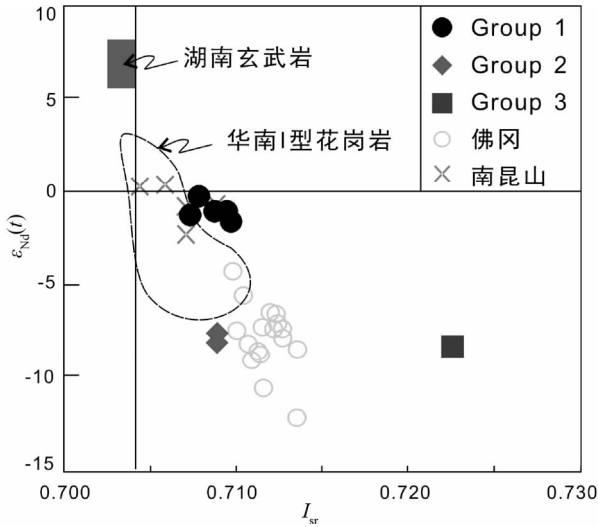


图6 亚髻山正长质杂岩体的 $\epsilon_{Nd}-I_{Sr}$ 图解 (据 Ding *et al.*, 2014a 修改)

图中佛冈和南昆山数据引自 Li *et al.* (2007)

Fig. 6 ϵ_{Nd} vs. I_{Sr} diagram for the Yajishan syenitic complex (modified after Ding *et al.*, 2014a)

Data for the Fogang and Nankunshan plutons are from Li *et al.* (2007)

染以及后期方沸石、方钠石形成等影响 Sr 同位素交换。Group 3 的 I_{Sr} 值大于 0.722, Rb 含量高达 621×10^{-6} , Rb/Sr 比值较高 (21.4), 远高于其他样品, 暗示其 Sr 同位素体系可能受到一定扰动。Group 1 的 ϵ_{Nd} 值介于 $-1.6 \sim -0.9$, 平均值为 -1.2 ; Group 2 和 Group 3 的 ϵ_{Nd} 值分别为 $-7.9 \sim -7.7$ 和 -8.3 , 显示两者混入了更多壳源物质。在二阶段模式年龄上, Group 1 介于 1.0 ~ 1.1 Ga, 而另外两组均在 1.6 Ga 左右, 也进一步暗示后两者具有相似的成分端元组成, 且可能

混入更多古老地壳物质。在 $\epsilon_{Nd}-I_{Sr}$ 图解上 (图 6), Group 1 岩石的 Sr-Nd 同位素特征类似于佛冈岩基中的南昆山 A 型花岗岩, 而 Group 2 岩石则与佛冈花岗岩类似 (Li *et al.*, 2007; 刘昌实等, 2003b)。

3.5 锆石 U-Pb 年龄

亚髻山正长质杂岩体 Group 3 中 2 件样品的锆石 U-Pb 定年结果见表 3, 年龄谐和图及部分代表性锆石的 CL 图像见图 7。从 CL 图像可以看出, 其锆石部分显示暗黑色, 发生部分或全部蜕晶化; 少数锆石显示灰白色, 可见岩浆振荡环带。这些锆石的 CL 图像与亚髻山 Group 1 霞石正长岩中的锆石非常相似, 均显示蜕晶化、高 U 的特点 (Xu *et al.*, 2012)。YJ-9 锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄介于 126.5 ~ 182.5 Ma, 其中老的年龄明显偏离谐和线 (图 7a), 暗示存在放射成因 Pb 的丢失, 将谐和度优于 90% 的分析点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄进行加权平均, 获得加权平均年龄为 140.9 ± 1.4 Ma (MSWD = 2.0); YJ-10 锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄介于 135.3 ~ 144.8 Ma, 同样将谐和度优于 90% 的分析点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄进行加权平均, 获得加权平均年龄为 141.4 ± 0.9 Ma (MSWD = 1.6)。这表明亚髻山 Group 3 形成于早白垩世, 与 Group 1 黑云角闪霞石正长岩的形成时代基本一致, 都属于同一次岩浆活动的产物。

4 讨论

4.1 岩石类型

非造山 A 型花岗岩通常会与一些碱性岩、镁铁质和中性岩石密切相关, 从而构成具有指示意义的 A 型岩套 (Eby, 1992; 刘昌实等, 2003c; Bonin, 2007), 包括霞石正长岩-碱

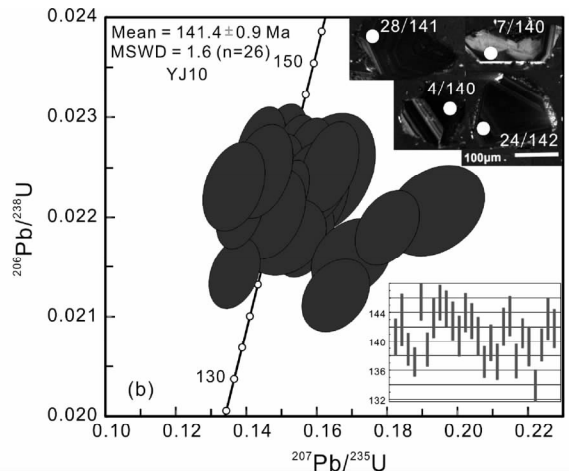
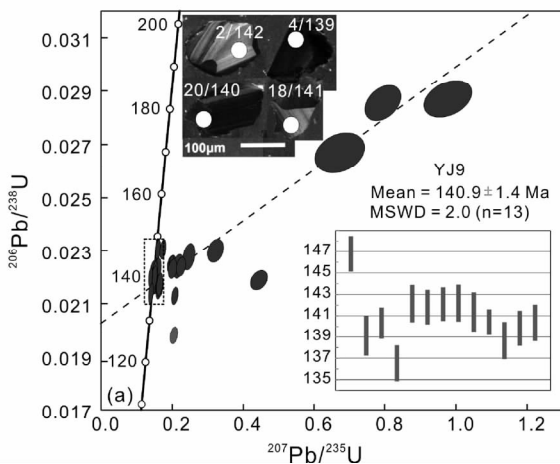


图7 亚髻山正长质杂岩体外带岩石的锆石 U-Pb 定年

CL 图像中红色圆圈代表 $33\mu m$ 激光束斑, 数字代表表 3 中的数据号和对应的年龄

Fig. 7 U-Pb dating of zircons for quartz syenite from the Yajishan syenitic complex

Red circle represents ablation position for $33\mu m$ diameter laser and number is the Serial No. and corresponding $^{206}Pb/^{238}U$ age in the Table3

表 3 亚髻山正长质岩体碱性花岗岩锆石 U-Pb 定年

Table 3 Zircon U-Pb dating for alkali granites from the Yajishan syenitic complex

测点号	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ (Ma)		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ (Ma)		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ (Ma)		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ (Ma)		谐和度
	Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Age	1 σ	Age	1 σ	Age	1 σ	Age	1 σ	
YJ9-01	0.049536	0.001524	0.15889	0.00487	0.023035	0.000267	0.006845	0.000195	172.3	72.2	149.7	4.3	146.8	1.7	137.9	3.9	98%
YJ9-02	0.063144	0.002328	0.199841	0.008285	0.022314	0.00024	0.009264	0.000411	722.2	79.6	185	7	142.3	1.5	186.4	8.2	73%
YJ9-03	0.097783	0.00415	0.320885	0.015354	0.023007	0.000297	0.011498	0.000519	1583.3	79.6	282.6	11.8	146.6	1.9	231.1	10.4	36%
YJ9-04	0.050484	0.002347	0.152292	0.007079	0.021818	0.000295	0.008541	0.000577	216.7	107.4	143.9	6.2	139.1	1.9	171.9	11.6	96%
YJ9-05	0.073704	0.002666	0.203447	0.007331	0.019809	0.000217	0.006342	0.000184	1035.2	73.6	188	6.2	126.5	1.4	127.8	3.7	60%
YJ9-06	0.054004	0.001899	0.172965	0.005852	0.02306	0.000255	0.009747	0.000349	372.3	75	162	5.1	147	1.6	196.1	7	90%
YJ9-07	0.053486	0.001814	0.160804	0.005464	0.0215	0.000213	0.007325	0.000227	350.1	50	151.4	4.8	137.1	1.3	147.5	4.6	90%
YJ9-08	0.044995	0.001346	0.137841	0.003997	0.022007	0.000234	0.006366	0.000178	-	-	131.1	3.6	140.3	1.5	128.3	3.6	93%
YJ9-09	0.046509	0.001567	0.138751	0.004709	0.021411	0.000268	0.006522	0.000195	33.4	68.5	131.9	4.2	136.6	1.7	131.4	3.9	96%
YJ9-10	0.048609	0.001847	0.150927	0.00575	0.022298	0.000278	0.006453	0.000171	127.9	90.7	142.7	5.1	142.2	1.8	130	3.4	99%
YJ9-11	0.167378	0.009321	0.670593	0.046286	0.026697	0.000497	0.024322	0.001624	2531.8	93.5	521.1	28.1	169.8	3.1	485.7	32	-2%
YJ9-12	0.239764	0.010329	0.975218	0.044802	0.028711	0.000458	0.019493	0.000779	3118.2	69.6	691.1	23	182.5	2.9	390.2	15.5	-17%
YJ9-13	0.07638	0.003489	0.245545	0.01165	0.02278	0.000338	0.009326	0.000347	1105.6	91.8	223	9.5	145.2	2.1	187.6	6.9	57%
YJ9-14	0.047264	0.001984	0.145753	0.005938	0.022245	0.000256	0.008628	0.000377	61.2	105.5	138.2	5.3	141.8	1.6	173.7	7.6	97%
YJ9-15	0.048953	0.001431	0.152101	0.004662	0.022291	0.000251	0.007021	0.000185	146.4	68.5	143.8	4.1	142.1	1.6	141.4	3.7	98%
YJ9-16	0.050817	0.001795	0.158573	0.006377	0.022305	0.000275	0.006794	0.000166	231.6	86.1	149.5	5.6	142.2	1.7	136.8	3.3	95%
YJ9-17	0.070671	0.00238	0.206388	0.006423	0.021303	0.000222	0.007319	0.000173	947.8	69.6	190.5	5.4	135.9	1.4	147.4	3.5	66%
YJ9-18	0.048856	0.001555	0.150137	0.005181	0.022174	0.000291	0.006838	0.000171	142.7	74.1	142	4.6	141.4	1.8	137.7	3.4	99%
YJ9-19	0.06312	0.00153	0.19687	0.005205	0.022467	0.000225	0.006603	0.000175	722.2	50.8	182.5	4.4	143.2	1.4	133	3.5	75%
YJ9-20	0.048848	0.001261	0.149725	0.00404	0.022022	0.000191	0.006937	0.000163	139	59.3	141.7	3.6	140.4	1.2	139.7	3.3	99%
YJ9-21	0.055192	0.002019	0.165093	0.005734	0.021631	0.000251	0.007226	0.000187	420.4	76.8	155.2	5	138	1.6	145.5	3.8	88%
YJ9-22	0.071707	0.002868	0.223543	0.008692	0.022395	0.000238	0.009079	0.000279	977.5	81.5	204.9	7.2	142.8	1.5	182.7	5.6	64%
YJ9-23	0.068041	0.003026	0.215873	0.009899	0.022419	0.000304	0.00759	0.000239	870.1	92.6	198.5	8.3	142.9	1.9	152.8	4.8	67%
YJ9-24	0.047749	0.001795	0.146265	0.005343	0.021748	0.000277	0.007323	0.00022	87.1	85.2	138.6	4.7	138.7	1.7	147.5	4.4	99%
YJ9-25	0.053268	0.001996	0.163648	0.005947	0.021742	0.000281	0.007195	0.000219	338.9	89.8	153.9	5.2	138.7	1.8	144.9	4.4	89%
YJ9-26	0.048607	0.0018	0.15009	0.005298	0.02193	0.000262	0.007069	0.000209	127.9	87	142	4.7	139.8	1.7	142.4	4.2	98%
YJ9-27	0.142726	0.005219	0.443059	0.016176	0.021893	0.000246	0.007004	0.000226	2260.8	64	372.4	11.4	139.6	1.6	141.1	4.5	9%
YJ9-28	0.063009	0.003019	0.198077	0.009	0.022472	0.000238	0.009223	0.000338	709.3	98	183.5	7.6	143.3	1.5	185.6	6.8	75%
YJ9-29	0.048225	0.001799	0.149158	0.005427	0.022011	0.000271	0.006936	0.000204	109.4	87	141.2	4.8	140.4	1.7	139.7	4.1	99%
YJ9-30	0.194016	0.007566	0.791953	0.033764	0.028555	0.000441	0.018737	0.0007	2776.2	64.2	592.3	19.1	181.5	2.8	375.2	13.9	-7%

续表 3

Continued Table 3

测点号	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ (Ma)		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ (Ma)		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ (Ma)		$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$ (Ma)		谐和度	
	Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Age	1 σ	Age	1 σ	Age	1 σ	Age	1 σ		
YJ10-01	0.051246	0.002453	0.15692	0.007403	0.022183	0.00028	0.007807	253.8	83.3	0.00648	0.000648	141.4	1.8	157.2	13	95%
YJ10-02	0.053444	0.003074	0.162955	0.009064	0.022441	0.000397	0.008887	346.4	129.6	0.00491	0.000491	143.1	2.5	178.8	9.8	93%
YJ10-03	0.064237	0.003221	0.193606	0.009319	0.022071	0.000302	0.006252	750	107.4	0.00206	0.000206	140.7	1.9	126	4.1	75%
YJ10-04	0.049366	0.001783	0.150555	0.005525	0.021995	0.000248	0.007079	164.9	88	0.00207	0.000207	140.3	1.6	142.6	4.2	98%
YJ10-05	0.048793	0.001714	0.147253	0.005002	0.021796	0.000216	0.006933	200.1	81.5	0.00212	0.000212	139	1.4	139.7	4.2	99%
YJ10-06	0.04753	0.001554	0.150029	0.004944	0.022719	0.000276	0.007174	76	74.1	0.00227	0.000227	144.8	1.7	144.5	4.5	97%
YJ10-07	0.049079	0.002071	0.150294	0.006327	0.021993	0.000258	0.007073	150.1	100	0.00248	0.000248	140.2	1.6	142.5	5	98%
YJ10-08	0.04816	0.001563	0.150468	0.004879	0.022474	0.000295	0.007376	105.6	80.5	0.00241	0.000241	143.3	1.9	148.5	4.8	99%
YJ10-09	0.045582	0.0015	0.144062	0.004696	0.022709	0.000264	0.007348	-	-	0.00219	0.000219	144.8	1.7	148	4.4	94%
YJ10-10	0.048666	0.001484	0.153399	0.004586	0.022618	0.000269	0.007205	131.6	76.8	0.00208	0.000208	144.2	1.7	145.1	4.2	99%
YJ10-11	0.056377	0.002536	0.16986	0.007574	0.021595	0.000263	0.008078	477.8	100	0.00341	0.000341	137.7	1.7	162.6	6.8	85%
YJ10-12	0.050941	0.001916	0.159461	0.005797	0.022431	0.000292	0.006841	239	87	0.00205	0.000205	143	1.8	137.8	4.1	95%
YJ10-13	0.051691	0.0021	0.159713	0.006264	0.022196	0.00031	0.008193	272.3	92.6	0.00555	0.000555	141.5	2	164.9	11.1	93%
YJ10-14	0.049716	0.001576	0.157037	0.004876	0.022559	0.000289	0.0081	189	74.1	0.0003	0.0003	143.8	1.8	163.1	6	97%
YJ10-15	0.047359	0.00153	0.148936	0.00475	0.022432	0.000266	0.008132	77.9	64.8	0.00216	0.000216	143	1.7	163.7	4.3	98%
YJ10-16	0.048119	0.001734	0.149679	0.005442	0.022196	0.000291	0.008026	105.6	85.2	0.00223	0.000223	141.5	1.8	161.6	4.5	99%
YJ10-17	0.047395	0.001898	0.144909	0.005696	0.021799	0.000235	0.010694	77.9	83.3	0.00057	0.00057	139	1.5	215	11.4	98%
YJ10-18	0.049085	0.001899	0.151942	0.005796	0.022094	0.000276	0.008282	150.1	90.7	0.00236	0.000236	140.9	1.7	166.7	4.7	98%
YJ10-19	0.051401	0.001918	0.156393	0.005625	0.021801	0.000268	0.008225	257.5	85.2	0.00236	0.000236	139	1.7	165.6	4.7	94%
YJ10-20	0.055589	0.00211	0.16538	0.0064	0.021215	0.000242	0.014679	435.2	83.3	0.000786	0.000786	135.3	1.5	294.5	15.7	86%
YJ10-21	0.051423	0.002174	0.159092	0.006683	0.022341	0.000288	0.007894	261.2	93.5	0.00205	0.000205	142.4	1.8	158.9	4.1	94%
YJ10-22	0.052089	0.001624	0.163557	0.005573	0.022504	0.0003	0.007873	300.1	75	0.00204	0.000204	143.5	1.9	158.5	4.1	93%
YJ10-23	0.05011	0.002596	0.150446	0.007782	0.021811	0.000258	0.007495	211.2	120.4	0.00235	0.000235	139.1	1.6	150.9	4.7	97%
YJ10-24	0.049513	0.001148	0.152319	0.003657	0.022238	0.000225	0.007391	172.3	58.3	0.000171	0.000171	141.8	1.4	148.8	3.4	98%
YJ10-25	0.048598	0.002115	0.147132	0.006378	0.02204	0.000302	0.007318	127.9	97.2	0.00025	0.00025	140.5	1.9	147.4	5	99%
YJ10-26	0.059377	0.002001	0.180064	0.006046	0.021895	0.000249	0.007067	588.9	74.1	0.00159	0.000159	139.6	1.6	142.3	3.2	81%
YJ10-27	0.046026	0.0017	0.136569	0.004844	0.02144	0.000237	0.006773	-	-	0.00018	0.00018	136.7	1.5	136.4	3.6	94%
YJ10-28	0.044842	0.00147	0.138163	0.004522	0.022061	0.000248	0.006847	-	-	0.000167	0.000167	140.7	1.6	137.9	3.4	93%
YJ10-29	0.045969	0.001875	0.144273	0.005906	0.022461	0.00031	0.007037	-	-	0.000184	0.000184	143.2	2	141.7	3.7	95%
YJ10-30	0.04391	0.001988	0.136394	0.005869	0.022311	0.000296	0.008597	-	-	0.000502	0.000502	142.2	1.9	173	10.1	90%

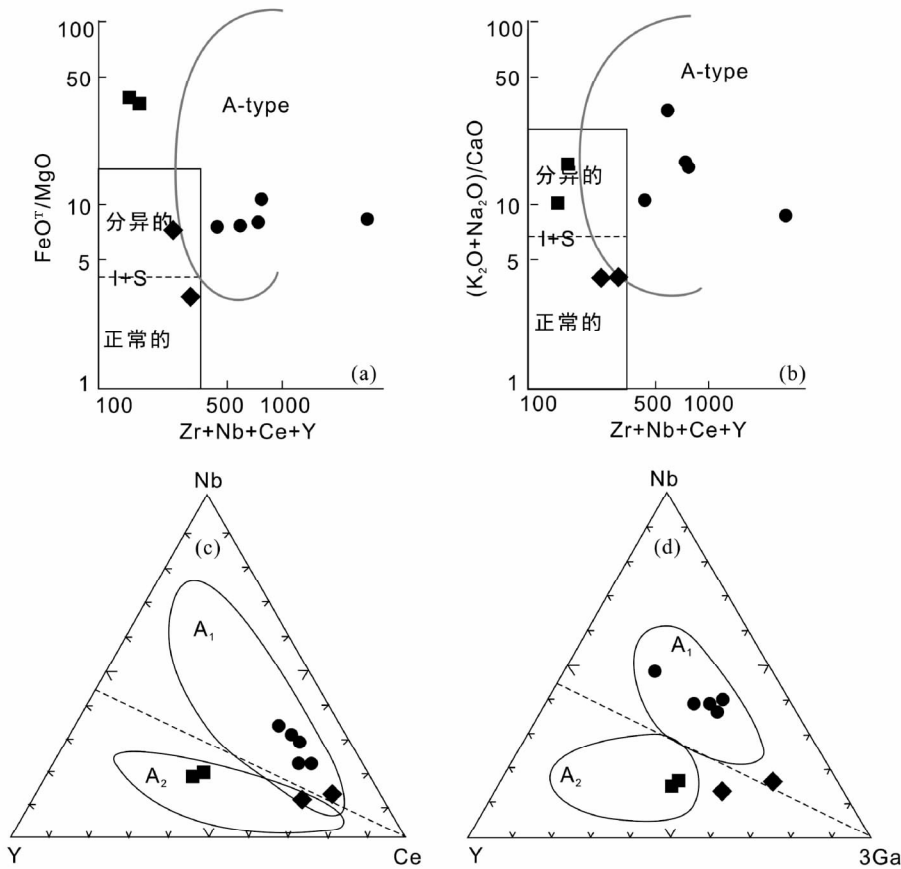


图8 亚髻山正长质杂岩体岩石类型判别图解(据 Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1992)

Fig. 8 Discrimination diagram for the Yajishan syenitic complex (after Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1992)

性正长岩-正长岩和相关喷出岩、镁铁质碱性岩、碳酸岩以及碱性花岗岩类等(Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1992; Bonin and Giret, 1985; Bonin, 2007)。为了更好地探讨亚髻山正长质杂岩体各组岩石的成因差异以及与佛冈花岗岩及附近的南昆山A型花岗岩的联系,这里将尝试运用常规的岩石成因类型判别图来区分它们。

作为同一次岩浆活动的产物,亚髻山正长质杂岩体各组岩石却显示不一致的岩石成因类型。在A型岩石判别图上(图8a, b), Group 1岩石投点均落在A型岩石区域,在 $10000\text{Ga}/\text{Al}-(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 图解上,则大部分落在硅不饱和的正长岩范围(图9); Group 2岩石的投点落在A型和非A型岩石界线上或附近,其中一个样品落在界线上,而另一个样品偏向于正常的I型或S型花岗岩(图8、图9); Group 3岩石的投点则显示不一致,在 $\text{FeO}^T/\text{MgO}-(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 图解上,投点偏离正常区域,既不属于A型岩石,也不属于高分异或正常的花岗岩(图8a);在 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 图解上,投点落在分异花岗岩区域(图8b);而在 $10000\text{Ga}/\text{Al}-(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 图解上, Group 3样品投点却落在铝质A型花岗岩或碱性A型花岗岩区域(图9)。在A型岩套亚类判别图解上, Group 1岩石投点基本都落入A₁

型亚类区域(图8、图9); Group 2岩石投点落在A₁和A₂亚类分界线上(图8),不同于典型的A₁和A₂亚类(Eby, 1992); Group 3岩石投点则落入A₂亚类区域(图8、图9)。

Group 1——黑云角闪石正长岩类在矿物组成上以霞石、方钠石、微纹长石、富铁钠角闪石为特征矿物,在成分上低 SiO_2 ,高 Fe_2O_3 和ALK,具有碱性、准铝质的特征(图4),富含大离子亲石元素Rb、轻稀土元素和高场强元素Nb、Ta、Zr和放射性生热元素Th、U等。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上显示Ba、Sr、P、Ti强烈亏损,而Rb、Th、U、Zr、Hf强烈富集的特征(图5)。这些特征与A型岩套中典型的硅不饱和的岩石较为一致(刘昌实等, 2003c; Eby, 1992; Bonin, 2007)。又因为富集Ce等轻稀土元素和Nb等高场强元素,因而在Nb-Y-Ce和Nb-Y-3Ga图解中也均落入A₁亚型区域(图8a, b)。这与之前的研究结论保持一致(刘昌实等, 2002, 2003a)。

Group 2——黑云角闪方沸石正长岩在矿物组成上以方沸石、方钠石、霞石、微纹长石和富铁钠角闪石为特征。在成分上显示高的 TiO_2 、 MgO 、 P_2O_5 、LOI,低的 Na_2O ,具碱性向钙碱性过渡、强过铝的特征(图4)。同时亏损重稀土、Nb、Ta、Ti等元素(图5)。这些特征与亚髻山正长质杂岩体侵入的主体佛冈花岗岩较为类似(Li *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2007;

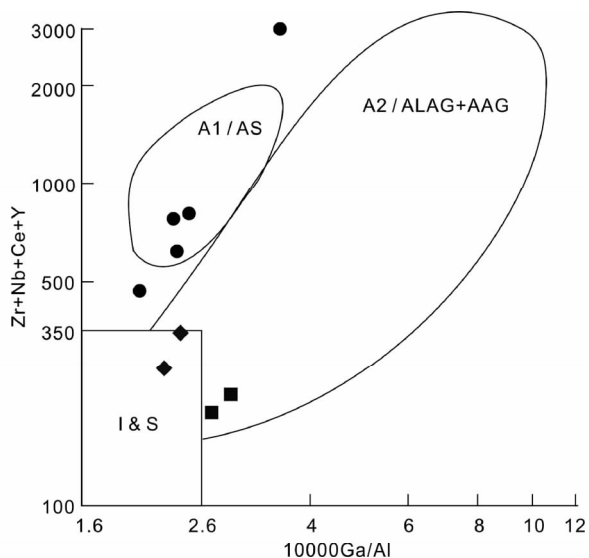


图9 亚髻山正长质杂岩体岩石的 $10000Ga/Al$ -($Zr + Nb + Ce + Y$)图解(据刘昌实等, 2003c)

图中 A_1 和 A_2 代表 A 型岩套亚类, AS 代表硅不饱和的似长石正长岩和碱性正长岩, ALAG 代表铝质 A 型花岗岩, AAG 代表碱性 A 型花岗岩

Fig.9 $10000Ga/Al$ vs. ($Zr + Nb + Ce + Y$) diagram for the Yajishan syenitic complex (after Liu *et al.*, 2003c)

A_1 , A_2 -subtype of A-type suites; AS-feldspathide syenite and alkali syenite; ALAG-aluminous A-type granite; AAG-alkaline A-type granite

陈小明等, 2002)。值得注意的是, Group 2 岩石与佛冈花岗岩的 Sr-Nd 同位素也相似, 暗示了一定的壳幔混合 (Li *et al.*, 2007)。正如佛冈花岗岩一直陷入 A 型、高演化 I 型或高演化 S 型之争 (Li *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2007; 陈小明等, 2002; 包志伟和赵振华, 2003; 庄文明等, 2000), Group 2 也显示似是而非的岩石成因类型。它们总体上也具有中等偏低的 ($Zr + Nb + Ce + Y$) 含量, FeO^T/MgO 和 $(K_2O + Na_2O)/CaO$ 比值也不高, 因此在 A 型岩套判别图上落在 A 型和非 A 型界线上或附近 (图 8、图 9), 在 A 型岩套亚类判别图上既不属于典型的 A_1 型, 也不属于典型的 A_2 型 (图 8c, d)。从特征矿物上来讲, Group 2 岩石具有碱性花岗岩特征, 而从地球化学特征上来看, 则显示从 A 型到普通 I 型花岗岩过渡的特征。

Group 3——本次研究的碱性花岗岩类在矿物组成上以微纹长石、富铁钠角闪石和石英为特征。在成分上显示高的 SiO_2 和非常低的镁铁质成分, 具碱性和强过铝的特征 (图 4)。同时亏损 Ba、Nb、LREE、P、Ti 等元素 (图 5)。其稀土配分模式和微量元素特征类似于华南的高演化 I 型花岗岩 (Li *et al.*, 2007; Ding *et al.*, 2014a; Dolejš and Štemprok, 2001), ($Zr + Nb + Ce + Y$) 总量较低, 因此在 A 型岩套判别图上, 它们显示高分异花岗岩的趋势 (图 8b); 然而, 它们具有极高的 FeO^T/MgO 值, 又不同于常规的高演化花岗岩 (图

9a), 而偏高的 $10000Ga/Al$ 值又使得它们类似于铝质 A 型花岗岩 (图 9)。地球化学特征上同样显示似是而非的岩石成因类型。

毫无疑问, 亚髻山正长质杂岩体是同一次岩浆侵位而形成, 其岩石成因类型应该都类似于 A 型岩套。对于 Group 1 而言, 它们显示更少的演化、分异和较少的陆壳物质混染 (图 7), 因而能够更为有效的指示岩石的成因类型 (吴福元等, 2007)。而 Group 2 和 Group 3 的岩石成因类型从地球化学特征上显示差异, 很可能是由于岩浆后期过程造成 (具体过程见下一节)。

4.2 岩石成因

Sr-Nd 同位素揭示亚髻山正长质杂岩体 Group 1 与南昆山碱性花岗岩一样, 主要来源于上地幔, 混入少量壳源物质。由于 Group 1 岩石比佛冈花岗岩具有更低的 I_{Sr} 和更高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (图 6), 显然不大可能由佛冈花岗岩浆通过分离结晶作用而形成, 因此并不支持肖振宇等 (1998) 的观点。值得注意的是, Group 1 岩石 Nb/Ta 平均为 19.7, 近似于原始地幔和球粒陨石的比值 (17.5 ± 2.0), 远高于亏损地幔值 (McDonough and Sun, 1995; Sun and McDonough, 1989; Münker *et al.*, 2003); 而 Zr/Hf 比值平均为 47.1, 高于原始地幔和球粒陨石值 ($34 \sim 36$), 同样远高于亏损地幔值 (McDonough and Sun, 1995; Sun and McDonough, 1989; Münker *et al.*, 2003), 因此, Group 1 的起源不可能是亏损上地幔。从成分特征上来看, 其总体呈硅不饱和, 且富集 REE、Nb、Ta、Zr、Hf 等不相容元素 (图 5), 并显示类似 OIB 的元素特征 (图 5、图 10), 因此, 其主要形成于富集上地幔分异的硅不饱和碱性岩浆。该富集端元是来自于亏损地幔熔融后的残留、还是再循环的壳源物质抑或被交代的上地幔, 则有待于进一步研究。

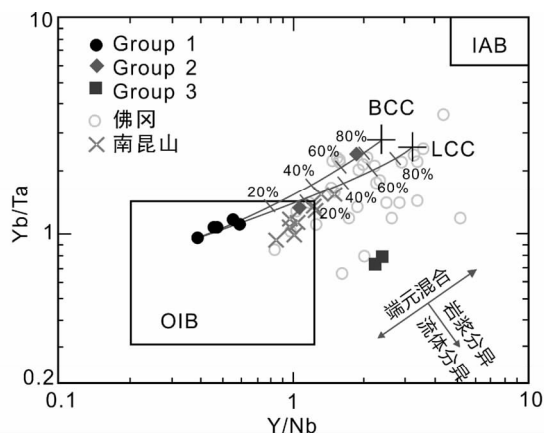


图 10 亚髻山正长质杂岩体 Y/Nb-Yb/Ta 图解(据 Eby, 1990 修改)

Fig.10 Y/Nb vs. Yb/Ta diagram for the Yajishan syenitic complex (modified after Eby, 1990)

至于 Group 2,它们具有与佛冈花岗岩非常相似的主、微量及 Sr-Nd 同位素特征,暗示它们的成因与佛冈花岗岩息息相关。Sr-Nd 同位素显示它们岩石成分中壳源物质的组分要比 Group 1 多得多(图 6);而在 Y/Nb-Yb/Ta 图解上,如果 Group 2 岩石是碱性岩浆跟陆壳物质二元混合而成的话,那么则需要高达 80% 平均陆壳物质或高达 60% 下地壳物质。显而易见,这些壳源物质的混入不可能在源区完成,否则内带样品不会显示那么少量的陆壳端元组分。因此,我们认为 Group 2 岩石中壳源物质的混入发生在碱性岩浆侵位过程中。考虑到亚髻山正长质杂岩体侵入在佛冈花岗岩大岩基内部(图 1),且 Group 2 岩石与佛冈花岗岩密切相关,这些壳源物质组分很可能是来自于佛冈花岗岩。因为佛冈花岗岩的样品都落入下地壳混合线附近(图 10),且它们的 t_{2DM} 模式年龄介于 1.3 ~ 2.3Ga (Li *et al.*, 2007),它们的混染更容易使得 Group 2 岩石的成分趋同。

Group 3 与 Group 2 具有相似的 Nd 同位素特征和 t_{2DM} 模式年龄(表 2),暗示它们具有相似的端元组成。然而,Group 3 的主、微量成分又显示明显的分异,这又表明它们的成因过程更为复杂。首先,Group 3 显示高分异的特征,在整个碱性岩体中,它具有最高的 SiO_2 和最低的 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 MgO 、 CaO 、 K_2O 、 P_2O_5 和 LREE、Zr 等微量元素含量,且显示明显的 Ba、Nb、Sr、P 和 Ti 的亏损(图 5);而相反的是,Group 2 则具有与之互补的成分特征,比如 Group 2 具有最高的 TiO_2 、 MgO 、 P_2O_5 含量,且相对 Group 1 成分而言,具有 Ba、Sr、P、Eu、Ti 等元素的相对富集。我们认为 Group 3 岩浆是过渡带岩浆经过长石、钛铁矿和磷灰石等矿物的分离结晶分异演化而成。因此,Group 3 的岩石样品并不落在碱性岩浆和陆壳混合演化线上,而与佛冈花岗岩中分异程度最高的样品类似(图 10)。其次,从亚髻山正长质杂岩体 Group 1 到 Group 2 再到 Group 3, Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值呈现明显的递减,比如 Nb/Ta 平均值由 19.7 变化至 11.6 再至 3.0,而 Zr/Hf 平均值由 47.1 变化至 36.3 再至 18.5。Nb/Ta 分异的趋势与成矿的高演化花岗岩极为相似(Dostal and Chatterjee, 2000)。长石、钛铁矿和磷灰石等矿物的分离结晶无法造成如此明显的高场强元素分异(Ding *et al.*, 2013; Green, 1995; Münker *et al.*, 2004)。值得注意的是,相对于 Group 1 的成分而言,其它两组岩石样品的 LREE、Nb、Zr 和 Hf 等元素明显亏损(图 5),这导致它们的 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 明显偏小,继而使得它们在 A 型岩套判别图上偏离 A 型岩石区域(图 8、图 9)。而亚髻山正长质杂岩体从 Group 1 到 Group 3 中 Nb 和 Zr 的逐步亏损,正是造成 Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值递减的关键。我们认为,富氟流体的分异在其中扮演了关键的角色,正如所有成矿的高演化花岗岩、碱性岩和 A 型花岗岩一样(Bonin, 2007; Collins *et al.*, 1982; Dostal and Chatterjee, 2000; Salvi *et al.*, 2000; Whalen *et al.*, 1987)。亚髻山正长质杂岩体 Group 1 的霞石正长岩含氟量介于 $2400 \times 10^{-6} \sim 3500 \times 10^{-6}$ (刘昌实等, 2003a),说明其碱性岩浆拥有较高

含量的氟。在 Group 2 岩浆分异出外带岩浆的同时,可能形成了富氟的流体(Manning, 1981; Carroll and Webster, 1994; Dolejš and Baker, 2007)。富氟流体提取了 Group 2 和 Group 3 的 REE 和高场强元素等,形成了稳定的络合物(Richardson and Holland, 1979; Collins *et al.*, 1982; Wang *et al.*, 1993; 王玉荣等, 1995),并与 Group 3 岩浆长时间相互作用,从而造成 Group 3 岩石具有一定的稀土元素四分组效应。另外,由于 Nb 和 Ta 的含氟络合物在富水流体或熔体中具有不一致的水解规律,表现为 Nb 比 Ta 更稳定,更易于迁移(Collins *et al.*, 1982; 王玉荣等, 1995; Ding *et al.*, 2014b),因此 Ta 更多原位或半原位富集在岩体边部,而 Nb 随流体迁移进入围岩,或者进入附近断裂带。虽然没有直接的实验数据支持,但 Zr 和 Hf 的情况估计也类似。富氟流体分异的结果是造成岩体具有 Nb/Ta 和 Zr/Hf 的成分环带;同时,大量的 LREE、Nb 和 Zr 等元素随流体迁移出岩体。从这点上来看,亚髻山正长质杂岩体外带和佛冈花岗岩接触带或者附近的断裂带可能具有一定的稀有金属找矿前景。

4.3 成岩意义

判断岩石的成因类型,对于确定其物质来源及形成的动力学背景具有重要的意义(Gong *et al.*, 2014; Tang *et al.*, 2013; Zhou *et al.*, 2006; 吴福元等, 2007; 王德滋, 2004)。然而,一些花岗岩往往会显示与典型的 I 型、S 型、A 型稍微不同或逐渐过渡的特征,从而导致在岩石成因类型分类中出现一些争议,比如前面提及的佛冈花岗岩(Li *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2007; 陈小明等, 2002; 包志伟和赵振华, 2003; 庄文明等, 2000)。造成这些争议的根本原因在于忽视了岩浆演化过程以及岩浆演化晚期的岩浆-流体相互作用对岩浆地球化学特征的影响。之前的研究已经发现,由于氟对 Ga 的络合能力高于对 Al 的络合能力,形成的八面体络合离子团 $[\text{GaF}_6]^{3-}$ 在熔体中更为稳定,因此随着岩浆的演化分异, $10000\text{Ga}/\text{Al}$ 比值会增高(Manning *et al.*, 1980),导致一些高演化花岗岩会落入 A 型花岗岩区域,从而造成误判。我们的研究也发现,流体分异可能会使得 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 显著变小,继而可能会造成 A 型花岗岩被误判成高分异花岗岩或普通花岗岩。而且,无论是哪一个组,岩石的全碱成分都被“低估”,导致在 TAS 图解上,三个组岩石的归类明显与矿物组成的定名出现偏差(图 3),也暗示了后期过程对于岩体化学成分的改造。Group 3 的碱性花岗岩中的锆石明显的蜕晶化和高 U 特点,也已被解释为流体作用的影响(Xu *et al.*, 2012)。此外,亚髻山正长质杂岩体 Group 2 与佛冈花岗岩具有非常相似的地球化学特征,这表明高度的混染会改变岩浆的本质地球化学特征,也易于产生误判。因此,岩浆过程及后期的流体分异对于其源区岩浆的地球化学特征的影响不容忽视。对于小岩株而言,一方面这些过程能够更为显著且有效地对岩浆或岩体造成影响,从而形成明显的成分环带,另一方面,这些过程造成的成分分异的机制很可能同样适用于成矿的

高演化花岗岩、A 型花岗岩或碱性火成岩。

5 结论

(1) 本次研究的亚髻山正长质杂岩体岩石可划分三组, 它们存在明显的岩相学和地球化学成分差异。主要表现在 Group 1 为霞石正长岩类, 具有典型的 A₁ 型岩套的地球化学特征, Group 2 为方沸石正长岩类, 显示 A 型向 I 型过渡的成分特征, 而 Group 3 为碱性花岗岩类, 则既具有高演化花岗岩的特征, 又类似于铝质 A 型花岗岩的特征。

(2) 基于 Sr-Nd 同位素和主、微量元素成分特征, 我们认为亚髻山正长质杂岩体中 Group 1 形成自富集的上地幔分异的硅不饱和和碱性岩浆, 较少陆壳物质混染; Group 2 则是硅不饱和和碱性岩浆在侵位过程中大比例同化混染了外围的佛冈花岗岩而成; 而 Group 3 则是 Group 2 岩浆发生长石、钛铁矿、磷灰石等矿物分离结晶后再与富氟流体发生显著的相互作用而形成。

(3) 亚髻山正长质杂岩体各组岩石成分的明显差异, 是碱性岩浆与围岩同化混染及后期流体改造、分异的结果。它们显示的似是而非的岩石类型, 则是由于岩浆过程及岩浆期后流体作用使得它们的岩石成因类型很难厘定。这进一步暗示诸多似是而非岩石类型的花岗岩, 其岩浆过程及后期的流体交代对于其源区岩浆的地球化学特征的影响不容忽视; 而这些过程很可能对于一些高演化花岗岩、A 型花岗岩或碱性火成岩岩体的成分环带形成以及成矿作用具有重要意义。

致谢 在本文写作过程中得到广东省地质勘查局原副总工程师杨超群研究员和武汉地质矿产研究所同位素地球化学研究室邱啸飞博士的大力帮助; 同时蒋少涌教授、徐夕生教授及两位匿名审稿人对本文提出了宝贵的意见; 在此一并表示衷心感谢!

References

Bai DY, Chen JC, Ma TQ and Wang XH. 2005. Geochemical characteristics and tectonic setting of Qitianling A-type granitic pluton in Southeast Hunan. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24 (4): 255–272 (in Chinese with English abstract)

Bao ZW, Zhao ZH and Xiong XL. 2000. Geochemistry of Ejinao alkali syenite and its geodynamic significance. *Geochimica*, 29 (5): 462–468 (in Chinese with English abstract)

Bao ZW and Zhao ZH. 2003. Geochemistry and tectonic setting of the Fugang aluminous A-type granite, Guangdong Province, China: A preliminary study. *Geology-Geochemistry*, 31 (1): 52–61 (in Chinese with English abstract)

Bonin B and Giret A. 1985. Contrasting roles of rock-forming minerals in alkaline ring-complexes. *Journal of African Earth Sciences*, 3 (1–2): 41–49

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

Carroll MR and Webster JD. 1994. Solubilities of sulfur, noble gases, nitrogen, chlorine, and fluorine in magmas. *Reviews in Mineralogy*

and *Geochemistry*, 30 (1): 231–279

Chen PR, Hua RM, Zhang BT, Liu JJ and Fan CF. 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region: Petrological constraints and geodynamic settings. *Science in China (Series D)*, 45 (8): 755–768

Chen PR, Zhou XM, Zhang WL, Li HM, Fan CF, Sun T, Chen WF and Zhang M. 2005. Petrogenesis and significance of Early Yanshanian syenite-granite complex in eastern Nanling Range. *Science in China (Series D)*, 48 (7): 912–924

Chen XM, Wang RC, Liu CS, Hu H, Zhang WL and Gao JF. 2002. Isotopic dating and genesis for Fogang biotite granites of Conghua area, Guangdong Province. *Geological Journal of China Universities*, 8 (3): 293–307 (in Chinese with English abstract)

Collins WJ, Beams SD, White AJR and Chappell BW. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80 (2): 189–200

Ding X, Hu YH, Zhang H, Li CY, Ling MX and Sun WD. 2013. Major Nb/Ta fractionation recorded in garnet amphibolite facies metagabbro. *Journal of Geology*, 121 (3): 255–274

Ding X, Sun WD, Chen WF, Chen PR, Sun T, Sun SJ, Lun CT and Chen FK. 2014a. Multiple Mesozoic magma processes formed the 240–185 Ma composite Weishan pluton, South China: Evidence from geochronology, geochemistry, and Sr-Nd isotopes. *International Geology Review*, doi: 10.1080/00206814.2014.905997

Ding X, Wang YR and Sun WD. 2014b. Hydrolysis of niobium and tantalum fluoride complexes: Implication on Nb/Ta fractionation. *Goldschmidt 2014 Abstract*, 560

Dolejš D and Stempok M. 2001. Magmatic and hydrothermal evolution of Li-F granites: Cínovec and Krásno intrusive, Krušné hory batholith, Czech Republic. *Bulletin of the Czech Geological Survey*, 76 (2): 77–99

Dolejš D and Baker DR. 2007. Liquidus equilibria in the system K₂O-Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-F₂O-1-H₂O to 100 MPa; II. Differentiation paths of fluorosilicic magmas in hydrous systems. *Journal of Petrology*, 48 (4): 807–828

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: 115–134

Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20 (7): 641–644

Gong SL, Chen NS, Geng HY, Sun M, Zhang L and Wang QY. 2014. Zircon Hf isotopes and geochemistry of the Early Paleoproterozoic high-Sr low-Y quartz-diorite in the Quanji Massif, NW China: Crustal growth and tectonic implications. *Journal of Earth Science*, 25 (1): 74–86

Green TH. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chemical Geology*, 120 (3–4): 347–359

He ZY, Xu XS and Zou HB. 2009. Origin of the Late Cretaceous syenite from Yandangshan, SE China, constrained by zircon U-Pb and Hf isotopes and geochemical data. *International Geology review*, 51 (6): 556–582

Jiang YH, Jiang SY, Dai BZ, Liao SY, Zhao KD and Ling HF. 2009. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, Southeast China: Implications for a continental arc to rifting. *Lithos*, 107 (3–4): 185–204

Li H, Ling MX, Li CY, Zhang H, Ding X, Yang XY, Fan WM, Li YL and Sun WD. 2012. A-type granite belts of two chemical subgroups in central eastern China: Indication of ridge subduction. *Lithos*, 150: 26–36

Li XH, Chen ZG, Liu DY and Li WX. 2003. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi Province, SE China: Age, origin, and tectonic significance. *International Geology Review*, 45 (10): 898–921

- Li XH, Li ZX, Li WX, Liu Y, Yuan C, Wei GJ and Qi CS. 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
- Li ZX and Li XH. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179–182
- Liang XR, Wei GJ, Li XH and Liu Y. 2003. Precise measurement of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd ratios using multiple-collectors inductively coupled plasma-mass spectrometer (MC-ICPMS). *Geochimica*, 32(1): 91–96 (in Chinese with English abstract)
- Ling MX, Wang FY, Ding X, Hu YH, Zhou JB, Zartman RE, Yang XY and Sun WD. 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River belt, eastern China. *Economic Geology*, 104(2): 303–321
- Liu CS, Chen XM, Wang RC, Hu H, Zhang WL and Lai MY. 2002. Mineralogic characteristics and genesis for Shiling sodalite syenite, Nanling area, South China. *Acta Mineralogica Sinica*, 22(3): 261–269 (in Chinese with English abstract)
- Liu CS, Chen XM, Wang RC, Hu H and Wang DZ. 2003a. Characteristic and origin of the Shiling sodalite syenite, Conghua City, Guangdong Province. *Geological Review*, 49(1): 28–39 (in Chinese with English abstract)
- Liu CS, Chen XM, Wang RC and Hu H. 2003b. Origin of Nankunshan aluminous A-type granite, Longkou County, Guangdong Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 1–10 (in Chinese with English abstract)
- Liu CS, Chen XM, Chen PR, Wang RC and Hu H. 2003c. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A-type rock suites. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 573–591 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rocks samples using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552–558 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43
- Ludwig KR. 2003. User's Manual for ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center; Special Publication, 4: 1–70
- Manning DAC, Hamilton DL, Henderson CMB and Denpsey MJ. 1980. The probable occurrence of interstitial Al in hydrous, F-bearing and F-free aluminosilicate melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 75(3): 257–262
- Manning DAC. 1981. The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess water at 1 kb. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 76(2): 206–215
- McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4): 223–253
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Science Review*, 37(3–4): 215–224
- Münker C, Pländer JA, Weyer S, Büchl A, Kleine T and Mezger K. 2003. Evolution of planetary cores and the earth-moon system from Nb/Ta systematics. *Science*, 301(5629): 84–87
- Münker C, Wörner G, Yagodzinski G and Churikova T. 2004. Behaviour of high field strength elements in subduction zones: Constraints from Kamchatka-Aleutian arc lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 224(3–4): 275–293
- Pan WZ. 1966. Amphibole nepheline syenite body observed in Guangdong. *Geological Review*, 24(1): 71 (in Chinese)
- Richardson CK and Holland HD. 1979. The solubility of fluorite in hydrothermal solutions, an experimental study. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43(8): 1313–1325
- Rudnick RL and Gao S. 2003. Composition of the Continental Crust. In: Holland HD and Turekian KK (eds.). *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Pergamon, 1–64
- Salvi S, Fontan F, Monchoux P, Williams-Jones AE and Moine B. 2000. Hydrothermal mobilization of high field strength elements in alkaline igneous systems: Evidence from the Tamazeght complex (Morocco). *Economic Geology*, 95(3): 559–576
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Tang LM, Chen HL, Dong CW and Chu FY. 2013. Geochronology, geochemistry and its tectonic significance of Chahe granites in Hainan Island. *Journal of Earth Science*, 24(4): 619–625
- Tu XL, Zhang H, Deng WF, Ling MX, Liang HY, Liu Y and Sun WD. 2011. Application of RESOLUTION in-situ laser ablation ICP-MS in trace element analyses. *Geochimica*, 40(1): 83–98 (in Chinese with English abstract)
- Wang DZ. 2004. The study of granitic rocks in South China: Looking back and forward. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 305–314 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Li JW, Jian P, Zhao ZH, Xiong XL, Bao ZW, Xu JF, Li CF and Ma JL. 2005. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): Link to Permian-Triassic transtension. *Earth and Planetary Science Letters*, 230(3–4): 339–354
- Wang Q, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Bao ZW, Dai TM, Xu JF and Ma JL. 2005. Geochronology of Cretaceous A-type granitoids or alkaline intrusive rocks in the hinterland, South China: Constraints for Late-Mesozoic tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 795–808 (in Chinese with English abstract)
- Wang YR, Gu F and Yuan ZQ. 1993. Partitioning and hydrolysis of Nb and Ta and their implications with regard to mineralization. *Chinese Journal of Geochemistry*, 12(1): 84–91
- Wang YR, Chen WH and Zhang HX. 1995. Experimental study of irreversible hydrolysis reactions of Sn-, Nb- and Ta-fluorine complex at high temperature and high pressure. *Geochimica*, 24(Suppl.): 183–190 (in Chinese with English abstract)
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419
- 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)
- Xiao ZY, Wang LM, Yang XM and Yang XY. 1998. Petrological characteristics of Shiling alkaline complex, Conghua, Guangdong Province, and its geological implications. *Geological Journal of China Universities*, 4(2): 133–138 (in Chinese with English abstract)
- Xu XS, Lu WM and He ZY. 2007. Age and generation of Fogang granite batholith and Wushi diorite-hornblende gabbro body. *Science in China (Series D)*, 50(2): 209–220
- Xu XS, Zhang M, Zhu KY, Chen XM and He ZY. 2012. Reverse age zonation of zircon formed by metamictisation and hydrothermal fluid leaching. *Lithos*, 150: 256–267
- Zhou LD, Zhao ZH and Zhou GF. 1996. Isotopic chronology of some alkaline rock bodies in China. *Geochimica*, 25(2): 162–171 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM and Li WX. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326(3–4): 269–287
- 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(1): 26–33
- Zhuang WM, Chen SQ and Huang YY. 2000. Geological and geochemical characteristics of Fogang composite pluton and its source rock. *Guangdong Geology*, 15(3): 1–12 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 柏道远, 陈建超, 马铁球, 王先辉. 2005. 湘东南骑田岭岩体 A 型花岗岩的地球化学特征及其构造环境. 岩石矿物学杂志, 24(4): 255 - 272
- 包志伟, 赵振华, 熊小林. 2000. 广东恶鸡脑碱性正长岩的地球化学及其地球动力学意义. 地球化学, 29(5): 462 - 468
- 包志伟, 赵振华. 2003. 佛冈铝质 A 型花岗岩的地球化学及其形成环境初探. 地质地球化学, 31(1): 52 - 61
- 陈小明, 王汝成, 刘昌实, 胡欢, 张文兰, 高剑锋. 2002. 广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因. 高校地质学报, 8(3): 293 - 307
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 刘颖. 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值. 地球化学, 32(1): 91 - 96
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 胡欢, 张文兰, 赖鸣远. 2002. 广东从化石岭方钠石正长岩矿物学特征及成因. 矿物学报, 22(3): 261 - 269
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 胡欢, 王德滋. 2003a. 广东从化石岭方钠石正长岩特征及其起源. 地质论评, 49(1): 28 - 39
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 胡欢. 2003b. 广东龙口南昆山铝质 A 型花岗岩的成因. 岩石矿物学杂志, 22(1): 1 - 10
- 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 王汝成, 胡欢. 2003c. A 型岩套的分类、判别标志和成因. 高校地质学报, 9(4): 573 - 591
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 25(6): 552 - 558
- 潘维祖. 1966. 广东发现角闪霞石正长岩体. 地质论评, 24(1): 71
- 涂湘林, 张红, 邓文峰, 凌明星, 梁华英, 刘颖, 孙卫东. 2011. RESOLUTION 激光剥蚀系统在微量元素原位微区分析中的应用. 地球化学, 40(1): 83 - 98
- 王德滋. 2004. 华南花岗岩研究的回顾与展望. 高校地质学报, 10(3): 305 - 314
- 王强, 赵振华, 简平, 熊小林, 包志伟, 戴樟漠, 许继峰, 马金龙. 2005. 华南腹地白垩纪 A 型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约. 岩石学报, 21(3): 795 - 808
- 王玉荣, 陈文华, 张海祥. 1995. Sn、Nb、Ta 氟配合物高温水解不可逆反应实验研究. 地球化学, 24(增刊): 183 - 190
- 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
- 肖振宇, 汪礼明, 杨学明, 杨晓勇. 1998. 广东从化石岭碱性杂岩的岩石学特征及其地质意义. 高校地质学报, 4(2): 133 - 138
- 周玲棣, 赵振华, 周国富. 1996. 我国一些碱性岩的同位素年代学研究. 地球化学, 25(2): 164 - 171
- 庄文明, 陈绍前, 黄友义. 2000. 佛冈复式岩体地质地球化学特征及其成岩源岩. 广东地质, 15(3): 1 - 12