

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.181>



江西相山铀矿田中西部鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩特征对比及其成因探讨

田明明, 李子颖, 聂江涛, 刘军港, 王健, 曹建辉

核工业北京地质研究院, 北京 100029

摘要: 以在相山中西部钻孔中揭露到的鹅湖岭组和打鼓顶组碎斑流纹岩为研究对象, 从岩石矿物学、岩石地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素等方面对比研究了这两套碎斑流纹岩。结果显示其矿物学组成较为接近, 且具有相似的岩石地球化学特点, 岩石富硅、高 K₂O 低 Na₂O、低 MgO; 稀土元素配分曲线形态总体一致, 均为富集轻稀土的右倾式, 鹅湖岭组碎斑流纹岩 Eu 负异常更为明显, 指示其可能经历了更高程度的斜长石结晶分离作用, 或源区残留有更多的斜长石; 打鼓顶组碎斑流纹岩轻重稀土分馏更为明显, 可能与源区岩浆中的榍石、褐帘石和独居石含量有关; 蛛网图上显示 K、Ba、Sr 等大离子亲石元素和 Nb、Ti、P 等高场强元素亏损, 而 Rb、Th、Nd 等富集的特点。这些相似的岩石地球化学特征暗示两套碎斑流纹岩之间具有一定的同源性。锆石 U-Pb 测年结果显示鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩年龄分别为 132.4±0.7 Ma 和 131.9±0.8 Ma; 通过计算测得鹅湖岭组碎斑流纹岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -9.5~−4.5, 两阶段模式年龄 t_{DMC} 为 1 470~1 787 Ma, 打鼓顶组碎斑流纹岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -14.2~−8.1, 两阶段模式年龄 t_{DMC} 为 1 704~2 087 Ma。以上岩石矿物学特征、岩石地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征表明鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩具有一定的相似性, 但同时又有差别, 结合前人研究资料, 认为鹅湖岭组和打鼓顶组碎斑流纹岩的形成可能具有同源性, 二者均是在早白垩世弧后拉伸环境背景下, 主要由古元古代—中元古带基底变质岩部分熔融而形成, 可能伴随有不同程度的地幔物质的加入。

关键词: 碎斑流纹岩; 岩石地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; 锆石 Hf 同位素; 相山铀矿田。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2021)12-4546-16

收稿日期: 2020-02-22

A Comparative Study and Its Genesis of Porphyroclastic Rhyolite from Ehuling and Daguding Formations in Midwestern of Xiangshan Uranium Orefield, Jiangxi Province

Tian Mingming, Li Ziying, Nie Jiangtao, Liu Jungang, Wang Jian, Cao Jianhui

Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

Abstract: Porphyroclastic rhyolites of Ehuling and Daguding formations were taken as the research objects in this paper, which was sampled from the boreholes in the midwestern parts of Xiangshan uranium orefield. A comparative study of porphyroclastic rhyolite from these two formations were carried out by means of petromineralogy, lithogeochemistry, U-Pb geochronology and Hf isotopes. The results illustrate that the mineralogical composition and lithogeochemical characteristics of porphyroclastic rhyolite from Ehuling and Daguding formations are relatively semblable, the rock enriching Si and K₂O, low Na₂O and MgO. Chondrite normalized REE curves are generally consistent, showing right-inclined type with enriched LREE. The samples from the Ehuling

基金项目: 相山大型铀矿田科学钻探Ⅱ期铀多金属深部探测研究 (No. 地 HXS1403)。

作者简介: 田明明(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事铀矿地质工作。ORCID: 0000-0002-3693-3756. E-mail: tian_ming_ming@126.com

引用格式: 田明明, 李子颖, 聂江涛, 等, 2021. 江西相山铀矿田中西部鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩特征对比及其成因探讨. 地球科学, 46

(12):4546—4561.

Formation demonstrate more intensive Eu negative anomaly, indicating that a high degree of crystallization fractionation of plagioclase was occurred, or more plagioclase resided in source area. While the high fractional degree of LREE and HREE of Daguding porphyroclastic rhyolite is likely related to the high contents of secondary minerals, such as titanite, epidote and monazite. Primitive mantle-normalized spider diagram shows depletion of lithophile elements (K, Ba, Sr) and high field strength elements (Nb, Ti, P), and enrichment of Rb, Th, Nd. These similar petrogeochemical characteristics suggest a certain homology between Ehuling and Daguding porphyroclastic rhyolite. Zircon U-Pb dating results indicate that the age of porphyroclastic rhyolite from Ehuling Formation and Daguding Formation are 132.4 ± 0.7 Ma and 131.9 ± 0.8 Ma respectively. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ of porphyroclastic rhyolite of Ehuling Formation is $(-9.5) - (-4.5)$, and the two-stage Hf model age is 1 470–1 787 Ma; while the $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ of porphyroclastic rhyolite of Daguding Formation is $(-14.2) - (-8.1)$, and the two-stage Hf model age is 1 704–2 087 Ma. The above petromineralogy, lithogeochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotope characteristics show that the porphyroclastic rhyolite of Ehuling Formation and the Daguding Formation have certain similarities, but at the same time, some differences exist. Combined with previous research data, a conclusion can be drawn, the formation of two sets of porphyroclastic rhyolite maybe homologous, both of them are derived from the partial melting of Paleoproterozoic-Mesoproterozoic metamorphic rock basement under the background of Early Cretaceous regional extensional environment, and may be accompanied by the merging of mantle material in a certain degree.

Key words: porphyroclastic rhyolite; lithogeochemistry; zircon U-Pb age; zircon Hf isotope; Xiangshan uranium orefield.

0 引言

江西相山铀矿田是我国最大的火山岩型铀矿田,至今已有70多年的开采历史,其赋矿围岩主要为一套火山侵入杂岩。随着高精度同位素年代学测试的发展以及岩石地球化学测试手段的逐渐丰富,近年来较多的学者通过岩石矿物学、岩石地球化学和同位素年代学等对这套火山侵入杂岩做了较为系统的研究并取得了一系列成果(方锡珩等,1982;刘昌实等,1990;范洪海等,2005;张万良和李子颖,2007;张万良,2016;王勇剑等,2019),多数学者认为这套侵入杂岩主要来源于硅铝质地壳的部分熔融(范洪海等,2001a; Jiang *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2011; 郭福生等,2016; Yu *et al.*, 2019)。但是对于各类岩石是否具有同源性、是否有地幔物质加入等问题还尚存一些争论。较多的学者认为相山各类火山岩、次火山岩为相同或者相似岩浆源区部分熔融形成的产物(方锡珩等,1982; 范洪海等,2001a; Jiang *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2011),但也有部分学者认为这套侵入杂岩具有不同的源区性质,且越来越多的证据表明其在形成过程中有地幔物质的参与(范洪海等,2001b; Jiang *et al.*, 2005; 郭福生等,2016)。近年来随着相山地区钻探工程、探矿工程和三维地质建模的发展,对于相山地区深部地层结构的认识愈来愈清楚,其基底主要为中元古界变质岩和部分下石炭统、上三叠统地层,而盖层主要由两部分组成,上部为下白垩统鹅湖岭组(K_1e)的碎斑流纹岩,下部主要为下白垩统打鼓顶组(K_1d)流纹英安岩。

笔者近年来在相山铀矿田工作时,通过钻孔编录发现在相山中西部打鼓顶组中也发育有少量的碎斑流纹岩,该碎斑流纹岩与上部鹅湖岭组碎斑流纹岩是否具有同期同源性?本文将从岩石矿物学、岩石地球化学、Hf同位素地球化学和同位素年代学等方面对这两套碎斑流纹岩进行研究,在此基础上探讨其形成机制。

1 地质概况

相山铀矿田位于NE向赣杭火山岩铀成矿带的南西段,古生代处在扬子板块与华南褶皱系的过渡部位,位于中新生代形成的总体呈NE向赣杭火山岩成矿带与NNE向展布的大王山—于山花岗岩成矿带的交汇部,具体而言盆地产于NE向抚州—永丰深断裂与NNE向宜黄—安远深断裂及NW向断裂带交汇部。地理位置上处于江西省乐安县和崇仁县交界部位(图1)。相山火山盆地经历了早白垩世压扭—晚白垩世伸展减薄—古近纪以来的挤压“开一合”交替演化的构造演化历史,且在早白垩世经历了大规模的中—酸性岩浆喷发、喷溢和浅层侵入活动,形成了一个大型的火山塌陷盆地,其结构上总体分为三层。其中基底主要为中元古界变质岩和少量下石炭统、上三叠统地层,而盖层为一套下白垩统火山侵入杂岩,上部为鹅湖岭组(K_1e)碎斑流纹岩,下部为打鼓顶组(K_1d)流纹英安岩,其间夹杂有部分火山碎屑岩、陆相碎屑沉积岩。鹅湖岭组碎斑流纹岩为相山盆地主体岩性。对于相山铀矿田主

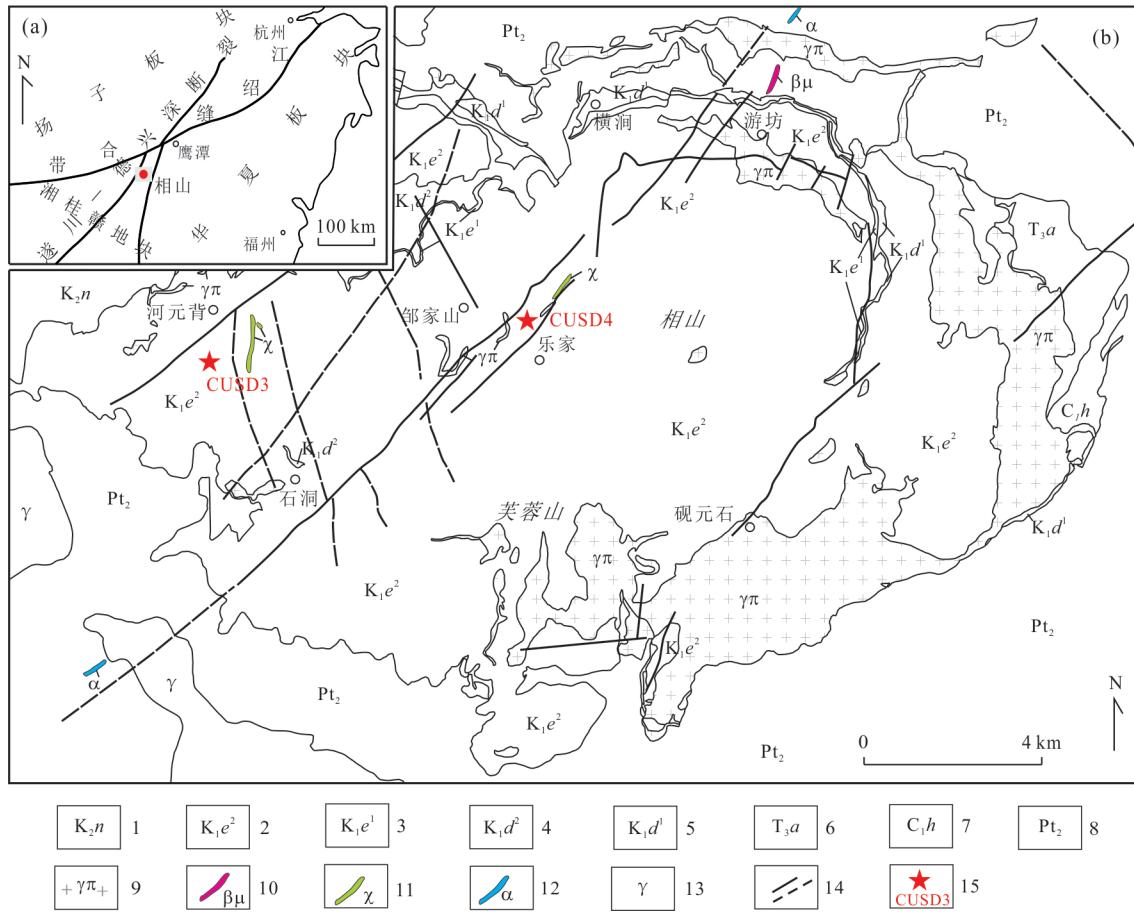


图1 相山铀矿田大地构造位置(a)及地质简图(b)

Fig.1 Geotectonic location (a) and geological sketch map (b) of Xiangshan uranium orefield

1.上白垩统砂砾岩;2.碎斑流纹岩;3.凝灰岩、粉砂岩;4.流纹英安岩;5.凝灰质粉砂岩、凝灰岩、熔结凝灰岩;6.上三叠统石英砂岩、页岩;7.下石炭统浅变质石英砂岩;8.中元古界片岩、千枚岩;9.花岗斑岩;10.石英二长斑岩;11.煌斑岩;12.辉绿岩;13.加里东期花岗岩;14.断裂;15.钻孔位置;据王勇剑等(2019)修改

体岩性的命名长期看法不一,早期部分学者将其定名为“碎斑熔岩”,20世纪50年代至20世纪60年代初期将相山“碎斑熔岩”定名为黑云母花岗斑岩,并同中深成花岗岩联系起来;1966年华东608大队12队在《相山地区1:5万地质测量报告》中提出了完全对立的意见,认为这种岩石不是侵入岩,而是火山碎屑岩,属火山喷发成因(华东608大队,1966)。1977年江西省地质局区域地质调查大队1:20万新干幅地质图及说明书将“碎斑熔岩”定名为碎斑次花岗斑岩(即碎斑潜花岗斑岩)(江西省地质局区域地质调查大队,1977)。王传文和候文尧(1980)对相山、玉华山、礼陂、潭港、谙源、高家、林家等地产出的这种“碎斑熔岩”进行了一次较系统的研究,结合核工业261地质大队广大地质人员发现的用喷发机制难以解释的一些地质现象,提出了另一种火山成因观点,即火山溢流成因,将岩石命

名为碎斑流纹岩。笔者及项目组成员在相山参加工作过程中,通过对岩石的产状、规模的分析以及前人资料的总结,发现采用“碎斑流纹岩”更为合理。

2 岩石矿物学特征

用于本次研究的岩石样品采自相山河元背CUSD3钻孔和乐家CUSD4钻孔(图1)。样品均比较新鲜;其中,打鼓顶组(K₁d)碎斑流纹岩产出于泥质粉砂岩之中(图2),这一地质现象与正常的相山火山侵入杂岩地层序略有差异,很难用正常的层序解释。所以推测认为相山矿田内应存在一期浅层或超浅层流纹斑岩侵入活动,时间上应该和上部碎斑流纹岩近乎一致。鹅湖岭组(K₁e)碎斑流纹岩呈灰色、青灰色,局部由于蚀变而呈浅肉红色,具斑状结构,块状构造(图3a);下部打鼓顶组碎斑流纹岩呈青灰色—浅红色,具有斑状结构,块状构造(图3b)。

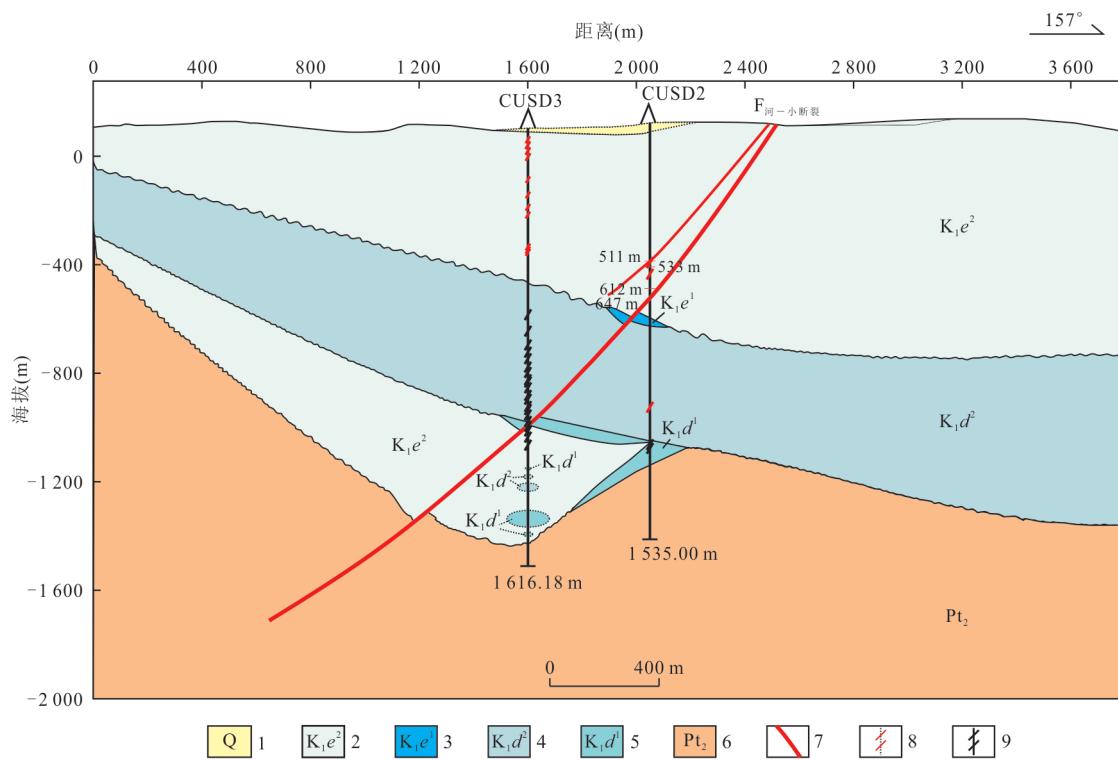


图2 相山河元背地区 CUSD2-CUSD3 钻孔剖面

Fig.2 Cross section of CUSD2-CUSD3 boreholes of Heyuanbei area in Xiangshan

1.第四系;2.下白垩统鹅湖岭组上段;3.下白垩统鹅湖岭组下段;4.下白垩统打鼓顶组上段;5.下白垩统打鼓顶组下段;6.中元古界变质岩;7.断裂;8.铀矿化;9.多金属矿化

镜下鉴定表明,鹅湖岭组碎斑流纹岩由斑晶和基质两部分组成,斑晶占30%~35%,主要包括斜长石,石英,碱性长石和少量黑云母。其中石英粒度为2~4 mm,含量约15%,自形程度较低,以他形粒状为主,部分颗粒上可见港湾状熔蚀;钾长石粒度为2~4 mm,半自形—他形,含量约11%,局部颗粒可见钠长石化、绿泥石化;斜长石自形程度较高,以半自形—自形板状为主,2~4 mm,含量约12%;黑云母呈部分由于假象绿泥石化而成墨绿色,1.5~2.5 mm,含量约2%。基质约占65%,由微晶的碱性长石、石英、斜长石和黑云母组成,大体与斑晶组成近似(图3c、3d)。打鼓顶组碎斑流纹岩镜下特征与鹅湖岭组碎斑流纹岩较为相似,也由斑晶和基质两部分构成,斑晶以斜长石,石英和少量黑云母为主,基质由长英质矿物组成(图3e)。仅斑晶的含量及粒度稍大,含量约为40%,粒径在3~4 mm,且其造岩矿物的自形程度稍好于鹅湖岭组碎斑流纹岩,岩石中可见后期碳酸盐细脉充填(图3f)。

3 分析测试方法

3.1 主微量元素分析测试

本次所采集的样品均属于新鲜无蚀变的岩石标本,主量元素、微量及稀土元素数据在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。在进行分析测试前,首先将样品磨至200目。主量元素测试采用XRF方法,X射线荧光光谱仪型号为PW2404,将粉末样品制成扁平玻璃片后用XRF荧光光谱仪进行分析,分析精度优于5%。稀土和微量元素采用等离子质谱仪(ICP-MS)分析,样品处理方法如下:(1)称取200 mg粉末样品,将其与900 mg LiBO₂熔剂混合均匀,在1 000 °C的熔炉中熔化;(2)待熔液冷却后,用100 mL 4%的硝酸溶解稀释,然后用ICP-MS分析,分析精度为5%~10%。

3.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

本次用于锆石测年的样品在核工业北京地质研究院分析测试中心通过电磁分离和重液浮悬的方法将锆石挑选出来,再在双目镜下挑选晶型完好,具有代表性的锆石颗粒。锆石的制靶、透射光、反射光以及阴极发光图像的采集工作在北京锆年

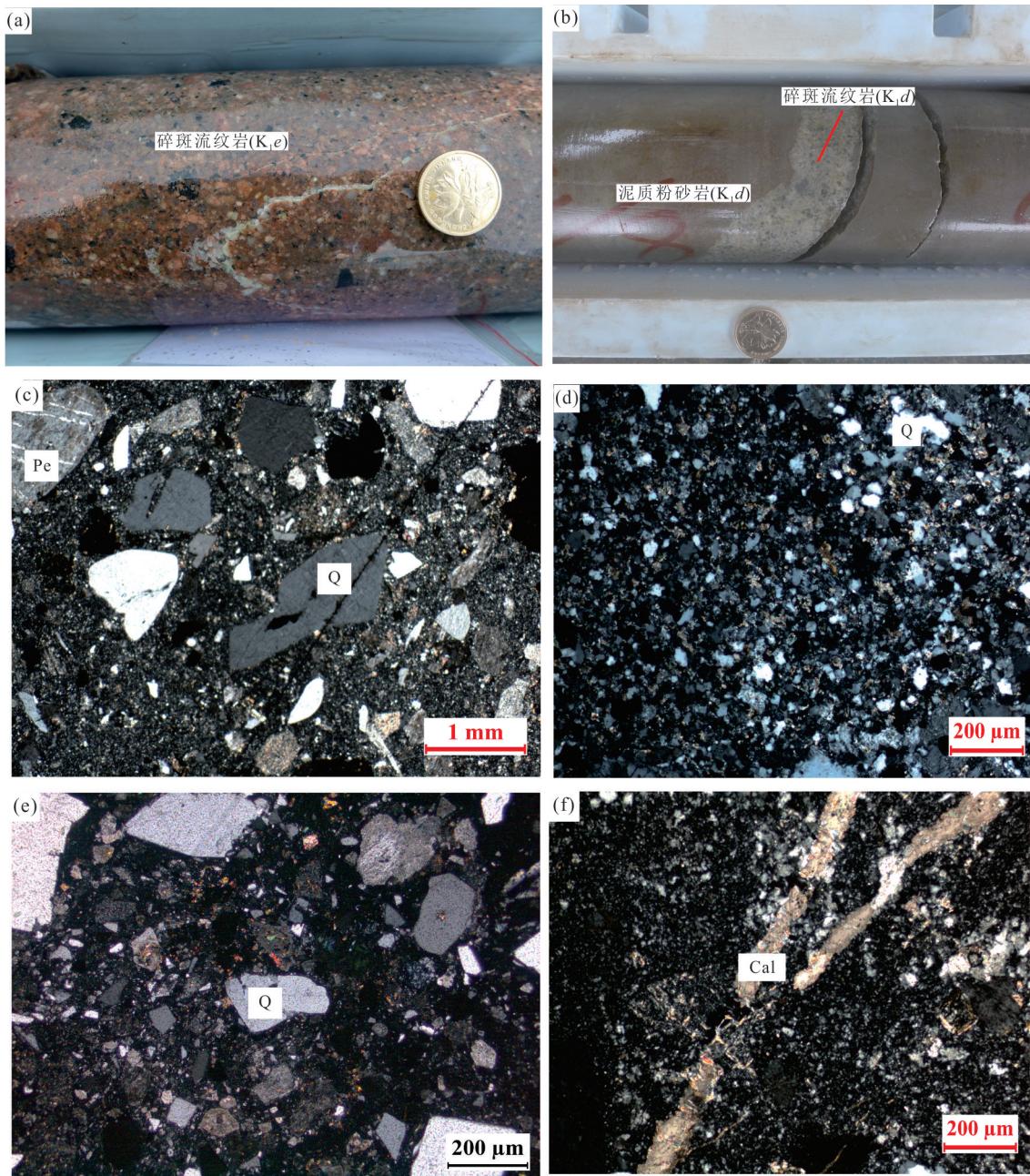


图3 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩野外照片及镜下照片

Fig.3 Field photos and micrographs of porphyroclastic rhyolites of Ehuling Formation and Daguding Formation

a. 鹅湖岭组碎斑流纹岩野外照片;b. 打鼓顶组碎斑流纹岩野外照片;c. 鹅湖岭组碎斑流纹岩的斑状结构(正交偏光);d. 鹅湖岭组碎斑流纹基质显微照片(正交偏光);e. 打鼓顶组碎斑流纹岩显微照片(正交偏光);f. 碎斑流纹岩中的后期碳酸盐脉(正交偏光);Cal. 碳酸盐脉;Pe. 条纹长石;Q. 石英

领航科技有限公司完成。通过上述过程,系统的研究样品锆石图像,识别锆石结构构造、微裂隙及包体等,优选出晶型完好、晶棱晶面清晰、透明的岩浆结晶锆石待测。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,激光剥蚀系统是德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M,激光剥蚀以 He 作为剥蚀物质载气,剥蚀直径为 30 μm ,

频率为 10 Hz,激光能量为 90 mJ,每个分析点的气体采集背景时间为 30 s,信号采集时间为 40 s。进行锆石 U-Pb 测定的 ICP-MS 为 Agilient 公司生产带有 Shield Torch 的 Agilient7500a。本次实验普通铅校正采用 Andersen (2002) 的方法,详细实验测试过程可参见袁洪林等 (2003)。样品同位素比值通过 GLITTER 程序计算得出,年龄计算采用国际标准程序

Isoplot ver3.0(Ludwing, 2003)完成.

3.3 锆石 Hf 同位素分析

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,在靠近 U-Pb 定年测点位或与定年点位相似的位置,采用 Nu Plasma HR 多接受电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)完成. Lu-Hf 同位素测定用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.026\ 69$ 、 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.588\ 6$ 进行同量异位干扰校正计算测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 、 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值. 在锆石样品测定期间, 对锆石标样 91500 和 GJ1 也进行相关测试分析, 用于仪器质量监控和样品校正分析. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算采用 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}$ (Scherer *et al.*, 2001), 现今 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}=0.282\ 772$ 、 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}=0.033\ 2$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997). 锆石 Hf 亏损地幔模式年龄计算采用现今 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.028\ 325$ 和 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.038\ 4$.

4 分析测试结果

4.1 主量元素特征

鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩主量元素特征见表 1. 从表 1 中可以看出, 鹅湖岭组碎斑流纹岩 SiO_2 含量为 $73.30\% \sim 77.01\%$, Al_2O_3 含量为 $11.95\% \sim 12.85\%$, MgO 含量为 $0.17\% \sim 0.56\%$, 岩

石全碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量为 $6.56\% \sim 8.09\%$, 平均值为 7.81% , $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 $0.47 \sim 0.98$; 打鼓顶组碎斑流纹岩 SiO_2 含量为 $76.59\% \sim 77.72\%$, Al_2O_3 含量为 $11.15\% \sim 11.52\%$, MgO 含量为 $0.25\% \sim 0.26\%$, 岩石全碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量为 $6.63\% \sim 7.15\%$, 平均值为 6.89% , $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 $0.83 \sim 0.98$. 总体而言, 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩主量元素组成接近, 均表现出富 Si、高 K_2O 、低 Na_2O 、低 MgO 的特点, 区别在于鹅湖岭组碎斑流纹岩较打鼓顶组碎斑流纹岩而言, Na_2O 含量明显偏低. 在图 4 中, 两种碎斑流纹岩大多落在高钾钙碱性系列附近.

4.2 微量元素特征

鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩微量元素分析结果见表 2. 从表 2 中可以看出, 两套碎斑流纹岩微量元素含量接近, 在原始地幔标准化蛛网图上(图 5), 鹅湖岭组、打鼓顶组碎斑流纹岩与 Jiang *et al.* (2005) 在该区获得的碎斑流纹岩曲线形态总体一致, 均表现为 K^+ 、 Ba^+ 、 Sr^+ 等大离子亲石元素和 Nb^+ 、 Ti^+ 、 P^+ 等高场强元素亏损, 而 Rb^+ 、 Th^+ 、 Nd^+ 等富集的特点. 其中 Sr^+ 、 Ba^+ 的亏损表明两套碎斑流纹岩均经历了斜长石强烈结晶分离作用, 而 P^+ 、 Ti^+ 的亏损可能与磷灰石、金红石等结晶分离有密切关系.

4.3 稀土元素特征

鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩稀土元素分析结果见表 3. 从表 3 中可以看出, 两套碎斑流纹岩

表 1 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩主量元素含量(%)及相关参数

Table 1 Major element compositions (%) and related parameters of porphyroclastic rhyolite from Ehuling Formation and Daguding Formation

样品号	岩性	层位	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	烧失量*	$\frac{\text{K}_2\text{O}}{\text{Na}_2\text{O}} + \frac{\text{Na}_2\text{O}}{\text{K}_2\text{O}}$	
SD4-1			73.30	0.26	12.85	0.39	1.58	0.03	0.41	1.49	2.43	5.18	0.06	1.80	7.61	0.47
SD4-9			76.29	0.11	12.43	0.23	1.07	0.04	0.18	0.59	2.83	5.26	0.03	0.74	8.09	0.54
SD4-10			76.32	0.11	12.33	0.05	1.23	0.04	0.17	0.79	2.90	5.19	0.03	0.65	8.09	0.56
SD4-12			76.30	0.12	12.36	0.33	1.06	0.04	0.20	0.78	2.69	5.38	0.03	0.57	8.07	0.50
SD4-14	鹅湖岭组 碎斑流纹岩		75.90	0.11	11.95	0.42	0.8	0.04	0.17	1.13	2.73	5.15	0.03	1.44	7.88	0.53
SD4-16		K_{1e}	76.08	0.09	12.05	0.40	0.84	0.04	0.19	0.81	2.80	5.19	0.02	1.34	7.99	0.54
SD4-18		K_{1e}	76.89	0.09	11.96	0.11	0.99	0.04	0.18	0.77	2.72	5.25	0.02	0.81	7.97	0.52
SD4-43			77.01	0.12	12.14	0.04	1.36	0.04	0.26	0.58	2.93	4.82	0.03	0.46	7.75	0.61
SD4-54			76.82	0.08	12.1	0.18	1.01	0.05	0.20	0.79	3.01	4.79	0.02	0.80	7.80	0.63
SD4-55			76.42	0.01	12.14	0.34	0.92	0.05	0.22	0.75	3.07	4.97	0.02	0.86	8.04	0.62
SD4-57			76.69	0.08	11.99	0.22	0.94	0.06	0.20	0.87	3.10	4.77	0.02	0.89	7.87	0.65
SD4-63			74.71	0.19	12.56	0.70	1.41	0.16	0.56	0.93	2.31	4.25	0.05	1.99	6.56	0.54
SD4-97	打鼓顶组	K_{1d}	76.59	0.08	11.15	0.68	0.63	0.07	0.26	1.42	3.54	3.61	0.03	1.83	7.15	0.98
SD4-102	碎斑流纹岩	K_{1d}	77.72	0.08	11.52	0.44	0.61	0.07	0.25	0.95	3.01	3.62	0.03	1.58	6.63	0.83

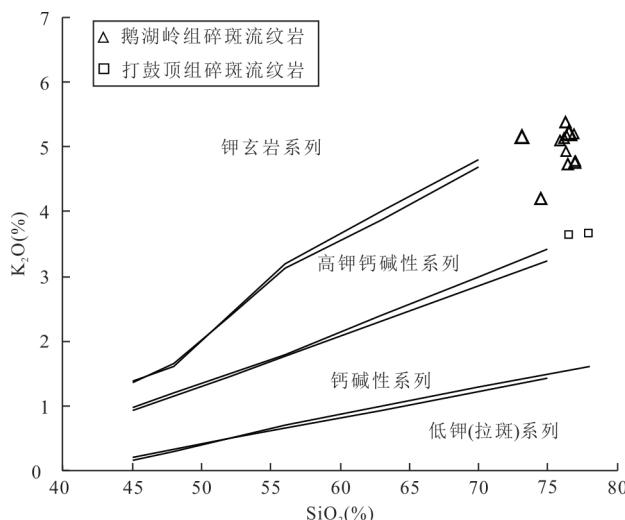


图 4 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解
Fig.4 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ diagram of porphyroclastic rhyolite from Ehuling Formation and Daguding Formation

稀土元素成分差异甚小,鹅湖岭组碎斑流纹岩稀土总量 ΣREE 为 $(121.39 \sim 253.67) \times 10^{-6}$, 轻重稀土比值 LREE/HREE 为 $3.78 \sim 12.13$, 表明岩石富集轻稀土, δEu 为 $0.15 \sim 0.40$, 表明碎斑流纹岩 Eu 负异常明显; 打鼓顶组碎斑流纹岩稀土总量 ΣREE 为 $(123.78 \sim 163.47) \times 10^{-6}$, 轻重稀土比值 LREE/HREE 为 $9.45 \sim 10.88$, 岩石富集轻稀土, δEu 为 $0.71 \sim 0.81$, 表明打鼓顶组碎斑流纹岩 Eu 负异常较为明显。在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线上(图 6),两套碎斑流纹岩与 Jiang *et al.* (2005) 在该区

获得的碎斑流纹曲线形态总体趋势较为相似,均表现出富集轻稀土的右倾式曲线形态,但鹅湖岭组碎斑流纹岩 Eu 负异常更为明显,表明鹅湖岭组碎斑流纹岩与打鼓顶组碎斑流纹岩相比,经历了更高程度的斜长石结晶分离作用,或者源区在部分熔融过程中,残留有更多的斜长石;打鼓顶组碎斑流纹岩轻重稀土元素分馏更为明显,表明源区岩浆中榍石、褐帘石和独居石等副矿物的含量较多。

4.4 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

本文所用的两个锆石 U-Pb 测年样品 SD3-62 和 SD3-211,采自 CUSD3 钻孔鹅湖岭组碎斑流纹岩和打鼓顶组碎斑流纹岩,采样深度为 430 m 和 1 495 m。锆石样品阴极发光图像见图 7,所测锆石外形特征主要为长柱状和针状,部分锆石颗粒呈粒状;锆石颜色以无色透明、淡黄色—黄色为主;锆石晶形较好,成分单一,阴极发光图像显示具有典型的岩浆振荡环带结构,为典型的岩浆型锆石。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测定结果见表 4 和图 8。

(1) 鹅湖岭组碎斑流纹岩(样品号 SD3-62)。本次实验对鹅湖岭组碎斑流纹岩 1 个样品的 25 颗锆石进行了 25 个点的测定。从表 4 可以看出,测定锆石的 U 含量为 $69.94 \times 10^{-6} \sim 694.59 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $33.92 \times 10^{-6} \sim 195.06 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.22 \sim 0.77$, 平均值为 0.49(大于 0.1), 为典型的岩浆成因锆石(宋彪等, 2002; Bowring and Schmitz, 2003; Corfu *et al.*, 2003), 获得的年龄可代表鹅湖岭组碎斑流纹岩的形成年龄。在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}-^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谱和

表 2 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩微量元素含量(10^{-6})

Table 2 Trace element compositions (10^{-6}) of porphyroclastic rhyolites from Ehuling Formation and Daguding Formation

样品号	岩性	层位	Cu	Zn	Rb	Sr	Mo	Cd	Sb	Cs	Ba	W	Tl	Pb	Bi	Th	U	Nb	Ta	Zr	Hf
SD4-1			4.39	45.6	226	126	0.85	0.01	0.21	20.8	316	0.77	1.24	31.5	0.32	22.3	4.88	16.1	1.45	59.1	2.47
SD4-9			2.83	35.3	307	84.6	1.71	<0.002	0.08	15.6	106	1.35	1.47	36.3	0.60	26.4	7.4	20	2.28	65.7	2.99
SD4-10			4.01	29.3	272	71.2	1.54	<0.002	0.08	12.7	90.5	1.32	1.36	33.1	1.23	26.4	7.91	18.6	2.2	62.3	2.9
SD4-12			2.53	33.7	306	81.2	1.81	0.03	0.09	15	105	1.48	1.46	35.9	0.59	24.8	7.31	18.8	2.21	55.9	2.74
SD4-14	鹅湖岭组 碎斑流纹岩	K _{1e}	3.08	30.4	338	76.3	1.81	0.02	0.08	13.9	85.7	0.95	1.54	36.1	0.56	25.9	7.48	17.8	2.22	62.3	3.07
SD4-16		K _{1e}	8.21	34.1	357	64.9	2.98	0.01	0.12	17.7	79.7	1.99	1.74	37.3	1.17	27.8	9.46	19	2.51	73.2	3.63
SD4-18		K _{1e}	5.66	31	352	56	1.67	0.04	0.13	16.7	71.1	1.92	1.64	37.2	0.96	26.6	8.64	17.7	2.48	63.1	3.19
SD4-43			52.4	107	268	64.1	2.36	0.02	0.16	8.48	92	1.87	1.38	48.3	1.13	28.7	9.84	19.5	2.64	76.6	3.77
SD4-54			4.87	37.4	319	69.7	2.26	0.05	0.16	13.4	69.1	2.49	1.58	45.8	1.17	28	10.3	20.7	2.92	71.8	3.73
SD4-55			4.83	40.5	335	62.7	2.13	0.03	0.12	13.7	90.8	1.85	1.67	42.7	0.77	27.5	9.83	19.5	2.77	69.6	3.57
SD4-57			30.1	37	352	45.9	2.16	0.02	0.14	17	61.6	4.61	1.73	39.9	3.05	29.4	11.4	19.9	3.07	74.4	4.08
SD4-63			43.2	154	338	52.1	2.94	0.55	0.41	21.8	143	2.97	2.03	48.2	1.18	25.6	8.57	16.9	2.23	72.8	3.35
SD4-97	打鼓顶组	K _{1d}	2.89	51.1	169	61	0.215	0.15	0.22	8.85	96.1	0.99	0.93	29.6	0.09	26.4	4.43	23.4	1.51	101	4.71
SD4-102	打鼓顶组 碎斑流纹岩	K _{1d}	1.94	41	169	50.4	0.213	0.05	0.20	9.95	69.5	0.85	1.08	35.6	0.05	25	4.36	22.9	1.48	93.9	4.38

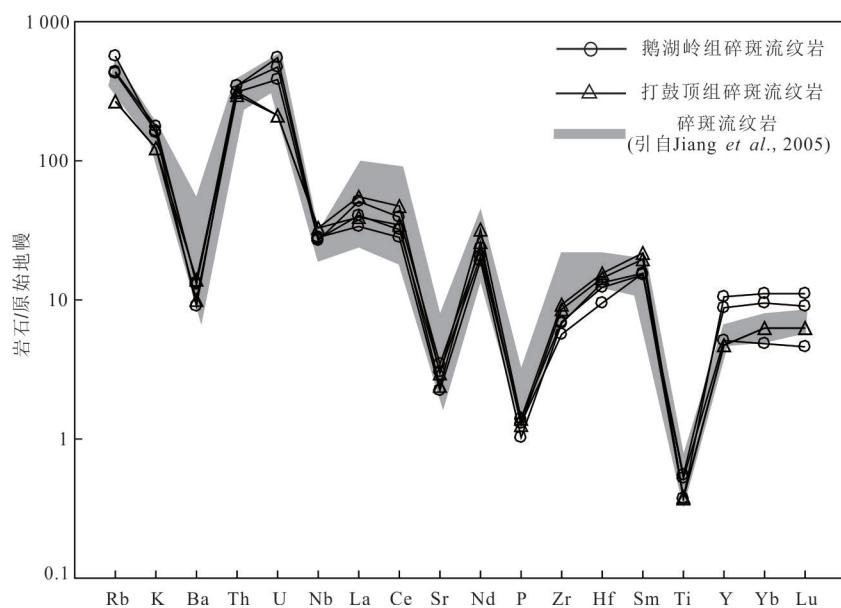


图5 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(标准化值引自Sun and McDonough, 1989)

Fig.5 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram of porphyroclastic rhyolite from Ehuling Formation and Da-guding Formation (standardized data quoted from Sun and McDonough, 1989)

表3 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩稀土元素含量(10^{-6})及相关参数

Table 3 REE element compositions (10^{-6}) and related parameters of porphyroclastic rhyolites from Ehuling Formation and Da-guding Formation

样品号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE	LREE	HREE	LREE/HREE	δ Eu
SD4-1		58.5	109.0	12.50	45.3	8.10	0.94	6.47	1.02	5.08	0.92	2.51	0.40	2.56	0.37	24.9	253.67	234.34	19.33	12.13	0.40
SD4-9		40.7	79.9	9.77	35.7	7.48	0.56	5.79	1.02	4.95	0.88	2.37	0.38	2.44	0.36	24.1	192.29	174.11	18.19	9.57	0.26
SD4-10		34.8	69.3	8.47	31.5	6.79	0.48	5.52	0.96	4.79	0.86	2.28	0.37	2.38	0.34	23.1	168.83	151.34	17.49	8.65	0.24
SD4-12		34.5	69.0	8.38	31.7	6.80	0.51	5.39	0.93	4.47	0.79	2.19	0.35	2.29	0.32	21.9	167.61	150.89	16.73	9.02	0.26
SD4-18		25.1	52.7	6.60	25.5	6.03	0.38	4.70	0.82	4.27	0.79	2.11	0.36	2.34	0.34	20.9	132.05	116.31	15.74	7.39	0.22
SD4-21	鹅湖岭组 碎斑流纹岩	24.4	50.7	6.52	25.6	6.13	0.35	5.05	0.95	4.92	0.93	2.63	0.45	2.99	0.45	26.6	132.06	113.70	18.36	6.19	0.19
SD4-26		20.9	43.9	5.77	22.9	6.26	0.32	5.25	1.04	5.80	1.13	3.21	0.58	3.77	0.56	30.3	121.39	100.05	21.34	4.69	0.17
SD4-43		27.2	56.3	7.03	27.8	6.68	0.42	6.16	1.28	6.95	1.44	4.01	0.73	4.60	0.65	39.1	151.25	125.43	25.83	4.86	0.20
SD4-48		27.6	58.0	7.42	29.3	7.61	0.36	7.02	1.44	8.44	1.73	4.79	0.88	5.56	0.82	46.6	160.96	130.29	30.67	4.25	0.15
SD4-54		25.0	53.0	6.61	26.3	6.59	0.37	5.84	1.18	6.80	1.32	3.87	0.71	4.46	0.64	38.2	142.69	117.87	24.82	4.75	0.18
SD4-55		25.6	53.7	6.72	26.9	6.62	0.38	5.84	1.21	6.86	1.36	3.89	0.71	4.46	0.63	38.0	144.88	119.92	24.96	4.80	0.18
SD4-57		23.0	49.3	6.30	25.7	6.85	0.32	6.39	1.39	8.18	1.65	4.79	0.88	5.42	0.80	47.3	140.97	111.47	29.50	3.78	0.15
SD4-63		23.8	47.2	5.83	22.9	5.36	0.44	4.96	0.99	5.68	1.12	3.24	0.59	3.84	0.56	31.8	126.52	105.53	20.99	5.03	0.26
SD4-97	打鼓顶组 碎斑流纹岩	34.9	67.3	8.16	32.0	6.10	1.25	4.82	0.75	3.37	0.61	1.68	0.29	1.95	0.30	21.2	163.47	149.71	13.76	10.88	0.71
SD4-102		26.0	50.1	6.06	23.7	4.51	1.11	3.89	0.6	3.06	0.52	1.54	0.28	1.67	0.24	21.4	123.28	111.48	11.80	9.45	0.81

图上,25个测点年龄均落在谐和线上及其附近.其加权平均年龄值为 132.4 ± 0.7 Ma, MSWD=0.31(图8).

(2)打鼓顶组碎斑流纹岩(样品号SD3-211).对打鼓顶组碎斑流纹岩1个样品的25颗锆石进行了25个点的测定,其结果见表4.从表4中可以看出,测定锆石的U含量为 $136.16 \times 10^{-6} \sim 143.63 \times 10^{-6}$, Th

含量为 $63.05 \times 10^{-6} \sim 655.08 \times 10^{-6}$, Th/U比值为0.26~1.02,平均值为0.44(大于0.1),为典型的岩浆成因锆石(宋彪等,2002;Bowring and Schmitz, 2003;Corfu et al., 2003),获得的年龄可代表打鼓顶组碎斑流纹岩的形成年龄.在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}-^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和线上,25个测点年龄均落在谐和线上及其附近.其加权平均年龄值为 131.9 ± 0.8 Ma, MSWD=0.31(图8).

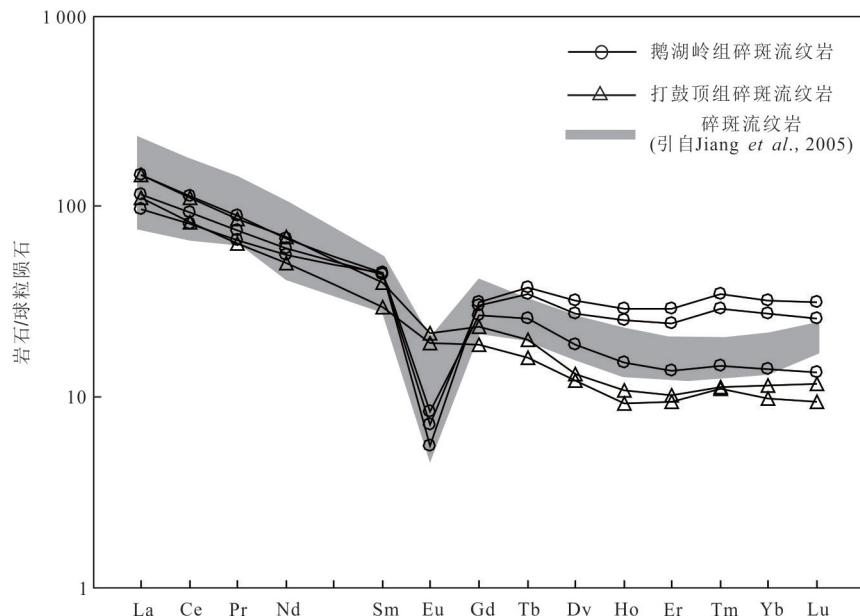


图 6 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(标准化值引自 Sun and McDonough, 1989)
 Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of porphyroclastic rhyolite from Ehuling Formation and Daguding Formation(stan-dardized data quoted from Sun and McDonough, 1989)

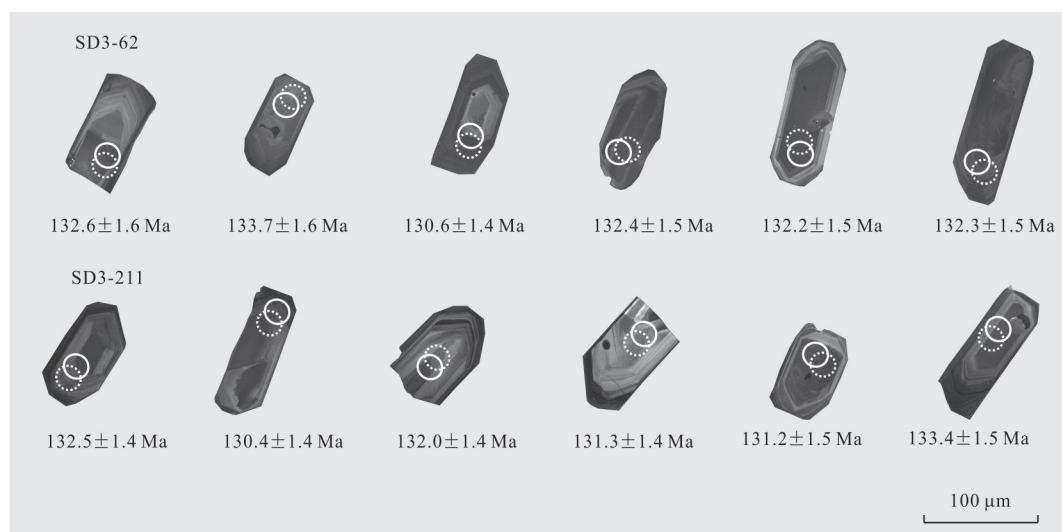


图 7 碎斑流纹岩锆石阴极发光图像
 Fig.7 Zircon CL images of porphyroclastic rhyolites
 图中实心圈与虚线圈分别代表锆石 U-Pb 测年测点位置和 Lu-Hf 同位素测点位置

从锆石 U-Pb 测年结果看, 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩形成年龄在误差范围内较为一致, 故推测两种碎斑流纹岩可能为同一期岩浆活动形成。

4.5 Lu-Hf 同位素特征

在锆石 U-Pb 测年基础上, 对已完成测年的锆石样品进行了原位 Lu-Hf 同位素分析, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值的计算采用相对应的锆石 U-Pb 测年值, 其计算结果见表 5。一般而言, 若所测锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比

值小于 0.002, 表明这些锆石在形成后具有极低的放射性成因 Hf 积累, 所测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值基本可以代表锆石结晶时体系的 Hf 同位素组成(侯可军等, 2007; 吴福元等, 2007)。从表 5 中可以看出, 除去 SD3-211-3 点所测 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.002 818, 其余测点 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002, 通过计算测得鹅湖岭组碎斑流纹岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -9.5~ -4.5, 两阶段模式年龄 t_{DMC} 为 1 470~1 787 Ma; 而打鼓顶组碎斑流纹

表4 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析结果

Table 4 LA-ICP-MS zircons U-Pb data of porphyroclastic rhyolites from Ehuling Formation and Daguding Formation

样品号及 点号	元素含量(10^{-6})			同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$									
鹅湖岭组碎斑流纹岩(样品号SD3-62)															
SD3-62-1	69.21	110.22	0.63	0.05165	0.00175	0.14800	0.00425	0.02078	0.00025	270.0	75.9	140.1	3.8	132.6	1.6
SD3-62-2	117.76	221.58	0.53	0.05130	0.00131	0.14599	0.00271	0.02064	0.00023	254.2	57.7	138.4	2.4	131.7	1.5
SD3-62-3	71.35	133.1	0.54	0.04933	0.00161	0.14259	0.00388	0.02096	0.00025	163.5	74.5	135.3	3.5	133.7	1.6
SD3-62-4	195.06	670.31	0.29	0.04890	0.00110	0.13828	0.00198	0.02051	0.00023	142.9	52.1	131.5	1.8	130.9	1.4
SD3-62-5	133.00	315.54	0.42	0.05181	0.00136	0.14826	0.00288	0.02075	0.00024	277.1	59.0	140.4	2.6	132.4	1.5
SD3-62-6	142.98	563.75	0.25	0.04981	0.00113	0.14057	0.00203	0.02047	0.00023	186.0	51.8	133.6	1.8	130.6	1.4
SD3-62-7	73.88	157.82	0.47	0.04746	0.00141	0.13684	0.00327	0.02091	0.00024	71.6	69.9	130.2	2.9	133.4	1.5
SD3-62-8	100.22	226.02	0.44	0.15668	0.00359	0.52677	0.00769	0.02438	0.00028	2420.2	38.3	429.7	5.1	155.3	1.8
SD3-62-9	94.95	186.49	0.51	0.04740	0.00125	0.13628	0.00269	0.02085	0.00024	68.7	62.3	129.7	2.4	133.0	1.5
SD3-62-10	127.08	194.99	0.65	0.04943	0.00141	0.14160	0.00318	0.02077	0.00024	168.2	65.5	134.5	2.8	132.5	1.5
SD3-62-11	86.05	226.95	0.38	0.05084	0.00140	0.14631	0.00309	0.02087	0.00024	233.7	62.3	138.6	2.7	133.1	1.5
SD3-62-12	82.52	292.47	0.28	0.05026	0.00123	0.14424	0.00246	0.02081	0.00023	207.2	55.7	136.8	2.2	132.8	1.5
SD3-62-13	159.21	206.62	0.77	0.04905	0.00134	0.14033	0.00292	0.02075	0.00024	150.1	62.6	133.3	2.6	132.4	1.5
SD3-62-14	173.97	226.97	0.77	0.04939	0.00127	0.14109	0.00264	0.02071	0.00023	166.3	58.8	134.0	2.3	132.2	1.5
SD3-62-15	55.65	110.21	0.50	0.08834	0.00265	0.26976	0.00642	0.02214	0.00028	1389.8	56.3	242.5	5.1	141.2	1.7
SD3-62-16	124.74	276.92	0.45	0.04986	0.00127	0.14256	0.00262	0.02073	0.00023	188.5	58.1	135.3	2.3	132.3	1.5
SD3-62-17	153.03	694.59	0.22	0.05239	0.00120	0.14841	0.00221	0.02054	0.00023	302.7	51.3	140.5	1.9	131.1	1.4
SD3-62-18	102.15	232.28	0.44	0.05024	0.00141	0.14436	0.00313	0.02084	0.00024	206.0	63.7	136.9	2.9	132.9	1.5
SD3-62-19	88.04	193.50	0.45	0.05152	0.00149	0.14841	0.00340	0.02089	0.00024	263.9	65.1	140.5	3.0	133.3	1.5
SD3-62-20	110.91	218.13	0.51	0.05106	0.00138	0.14642	0.00301	0.02080	0.00024	243.3	61.2	138.7	2.7	132.7	1.5
SD3-62-21	83.12	215.90	0.38	0.05056	0.00140	0.14514	0.00309	0.02082	0.00024	220.8	62.7	137.6	2.7	132.8	1.5
SD3-62-22	100.78	219.85	0.46	0.04578	0.00160	0.13135	0.00392	0.02081	0.00025	0.1	67.4	125.3	3.5	132.7	1.6
SD3-62-23	134.42	205.38	0.65	0.05135	0.00129	0.14735	0.00266	0.02081	0.00023	256.4	56.8	139.6	2.4	132.8	1.5
SD3-62-24	108.39	153.64	0.71	0.05283	0.00149	0.15285	0.00334	0.02098	0.00024	321.4	62.6	144.4	2.9	133.8	1.5
SD3-62-25	33.92	69.94	0.48	0.04546	0.00209	0.13280	0.00561	0.02118	0.00027	0.1	76.2	126.6	5.0	135.1	1.7
打鼓顶组碎斑流纹岩(样品号:SD3-211)															
SD3-211-1	191.6	356.57	0.54	0.05091	0.00119	0.15348	0.00238	0.02186	0.00024	236.9	53.1	145.0	2.1	139.4	1.5
SD3-211-2	157.62	420.57	0.37	0.04873	0.00120	0.13728	0.00237	0.02043	0.00023	134.9	56.8	130.6	2.1	130.4	1.4
SD3-211-3	655.08	643.40	1.02	0.04952	0.00119	0.14078	0.00233	0.02061	0.00023	172.4	55.3	133.7	2.1	131.5	1.4
SD3-211-4	174.43	662.16	0.26	0.04852	0.00109	0.13841	0.00195	0.02068	0.00022	124.9	51.9	131.6	1.7	132.0	1.4
SD3-211-5	102.57	237.11	0.43	0.05256	0.00137	0.15360	0.00295	0.02119	0.00024	309.7	58.1	145.1	2.6	135.2	1.5
SD3-211-6	170.69	336.24	0.51	0.04837	0.00118	0.13751	0.00235	0.02061	0.00023	117.6	56.6	130.8	2.1	131.5	1.4
SD3-211-7	127.00	306.03	0.41	0.05101	0.00124	0.14524	0.00245	0.02065	0.00023	241.2	55.0	137.7	2.2	131.7	1.4
SD3-211-8	436.89	1143.63	0.38	0.06906	0.00149	0.19733	0.00256	0.02072	0.00023	900.5	44.0	182.9	2.2	132.2	1.4
SD3-211-9	148.85	407.71	0.37	0.04995	0.00116	0.14172	0.00221	0.02057	0.00023	192.8	53.3	134.6	2.0	131.3	1.4
SD3-211-10	85.47	160.61	0.53	0.04399	0.00145	0.12614	0.00349	0.02079	0.00025	0.1	0.00	120.6	3.1	132.7	1.6
SD3-211-11	130.72	509.02	0.26	0.05062	0.00115	0.14461	0.00211	0.02071	0.00023	223.7	51.5	137.1	1.9	132.2	1.4
SD3-211-12	94.05	288.59	0.33	0.06686	0.00150	0.21197	0.00302	0.02299	0.00025	833.5	46.0	195.2	2.5	146.5	1.6
SD3-211-13	105.68	249.55	0.42	0.04665	0.00124	0.13397	0.00270	0.02082	0.00024	31.5	61.7	127.7	2.4	132.8	1.5
SD3-211-14	151.35	336.84	0.45	0.05032	0.00124	0.14265	0.00250	0.02056	0.00023	209.8	56.1	135.4	2.2	131.2	1.5
SD3-211-15	79.16	175.71	0.45	0.04669	0.00131	0.13464	0.00298	0.02091	0.00024	33.3	65.1	128.3	2.7	133.4	1.5
SD3-211-16	190.95	598.10	0.32	0.04821	0.00108	0.13750	0.00199	0.02068	0.00023	109.5	52.1	130.8	1.8	132.0	1.4
SD3-211-17	88.66	150.74	0.59	0.04869	0.00142	0.14816	0.00345	0.02207	0.00026	132.8	67.0	140.3	3.1	140.7	1.6
SD3-211-18	63.05	136.16	0.46	0.05156	0.00139	0.15848	0.00328	0.02229	0.00026	266.0	60.8	149.4	2.9	142.1	1.6

续表4

样品号及 点号	元素含量(10^{-6})			同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$									
SD3-211-19	132.38	433.81	0.31	0.049 07	0.001 12	0.138 98	0.002 10	0.020 54	0.000 23	151.3	52.6	132.1	1.9	131.0	1.4
SD3-211-20	109.83	270.89	0.41	0.051 61	0.001 26	0.149 13	0.002 60	0.020 95	0.000 24	268.4	55.1	141.1	2.3	133.7	1.5
SD3-211-21	81.09	165.03	0.49	0.053 20	0.001 44	0.150 02	0.003 13	0.020 45	0.000 24	337.5	60.3	141.9	2.8	130.5	1.5
SD3-211-22	115.00	245.05	0.47	0.046 59	0.001 25	0.133 55	0.002 76	0.020 79	0.000 24	28.1	62.4	127.3	2.5	132.6	1.5
SD3-211-23	152.48	307.34	0.50	0.051 67	0.001 17	0.152 76	0.002 28	0.021 44	0.000 24	270.9	51.1	144.3	2.0	136.7	1.5
SD3-211-24	130.57	380.93	0.34	0.054 02	0.001 39	0.151 87	0.002 89	0.020 39	0.000 23	371.7	56.6	143.6	2.6	130.1	1.5
SD3-211-25	81.56	170.08	0.48	0.050 21	0.001 37	0.144 11	0.003 03	0.020 81	0.000 24	204.8	61.9	136.7	2.7	132.8	1.5

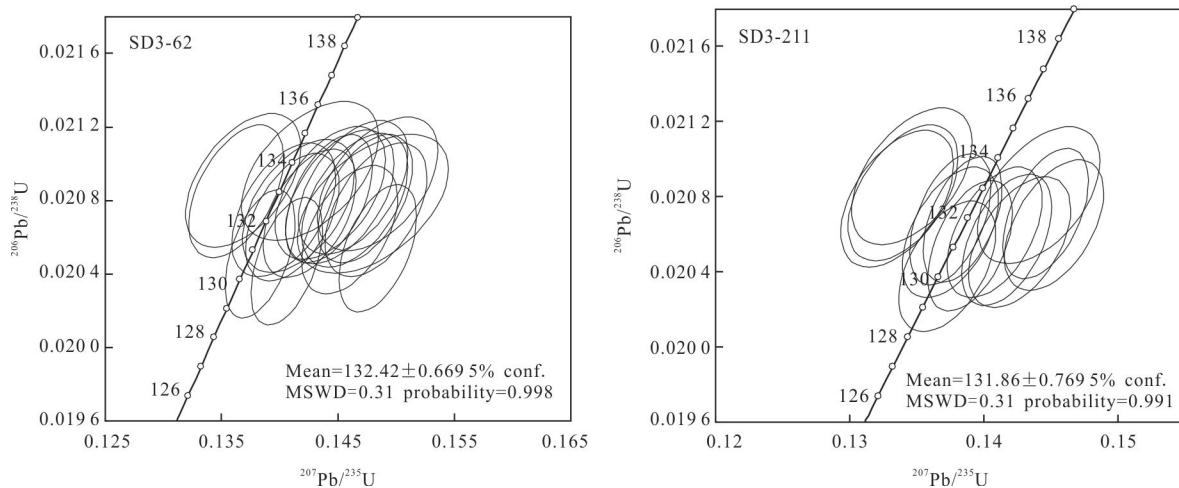


图 8 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图及加权平均年龄

Fig.8 LA-ICP-MS zircon U-Pb age concordia diagram and average-weighted age of porphyroclastic rhyolites from Ehuling Formation and Daguding Formation

岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-14.2 \sim -8.1$, 两阶段模式年龄 t_{DMC} 为 $1704 \sim 2087$ Ma.

5 讨论

近年来随着高精度同位素测年技术手段的发展, 较多的学者通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和 SHRIMP 测年方法等对相山铀矿田这套火山侵入杂岩(碎斑流纹岩、流纹英安岩、花岗斑岩等)进行了时代确定(杨水源等, 2010; Yang *et al.*, 2011; 陈正乐等, 2013; 杨水源, 2013; 司志发等, 2018), 认为这套中酸性侵入杂岩主要形成于 $130 \sim 135$ Ma, 是早白垩世一次岩浆侵入活动的产物。本文对相山铀矿田中西部鹅湖岭组和打鼓顶组碎斑流纹岩做了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 其结果显示鹅湖岭组碎斑流纹岩为 132.4 ± 0.7 Ma, 打鼓顶组碎斑流纹岩为 131.9 ± 0.8 Ma, 与前人所测结果较为吻合, 且二

者年龄误差小于 5 Ma, 表明鹅湖岭组碎斑流纹岩与打鼓顶组碎斑流纹岩很有可能是早白垩世同一次岩浆活动的产物。华南地区在晚侏罗世—早白垩世已经完成了由挤压构造转折向拉伸环境的过渡(Li, 2000; 陈卫峰等, 2005; Zhou *et al.*, 2006; 贺振宇等, 2007), 尽管目前对这种构造转换的具体时限还存在不确定性, 但中国东南部晚侏罗世—早白垩世总体上应为挤压—拉张的转换环境。大致 $140 \sim 135$ Ma 发生了区域性的构造应力体制转变(邢光福等, 2008; 张岳桥等, 2009; 周涛发等, 2010)。从 135 Ma 左右开始, 由于古太平洋板块俯冲角度的逐渐增大而导致的弧后伸展拉张作用或岩石圈减薄(李三忠等, 2017), 致使一系列早白垩世断陷盆地的形成, 同时伴随有强烈的中酸性岩浆侵入作用和火山作用, 而相山铀矿田这套火山杂岩就是形成于这种弧后拉伸环境机制之下。

鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩具有相似的

表5 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩 Lu-Hf 同位素分析结果
Table 5 Lu-Hf isotopic data of porphyroclastic rhyolite from Ehuling Formation and Daguding Formation

样品测点号	<i>t</i> (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM} (Ma)	t_{DMC} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
鹅湖岭组碎斑流纹岩(样品号 SD3-62)											
SD3-62-1	132.6	0.029 988	0.001 170	0.000 008	0.282 433	0.000 023	-11.98	-9.18	1 161	1 769	-0.96
SD3-62-2	131.7	0.021 733	0.000 834	0.000 006	0.282 536	0.000 016	-8.35	-5.52	1 008	1 539	-0.97
SD3-62-3	133.7	0.017 610	0.000 705	0.000 003	0.282 467	0.000 015	-10.78	-7.92	1 100	1 690	-0.98
SD3-62-4	130.9	0.013 598	0.000 540	0.000 006	0.282 500	0.000 012	-9.61	-6.78	1 049	1 616	-0.98
SD3-62-5	132.4	0.024 355	0.000 982	0.000 002	0.282 467	0.000 015	-10.80	-7.99	1 108	1 692	-0.97
SD3-62-6	130.6	0.019 147	0.000 758	0.000 006	0.282 468	0.000 013	-10.76	-7.95	1 100	1 690	-0.98
SD3-62-7	133.4	0.021 721	0.000 879	0.000 005	0.282 499	0.000 016	-9.66	-6.80	1 060	1 619	-0.97
SD3-62-8	133.0	0.030 149	0.001 152	0.000 003	0.282 509	0.000 015	-9.30	-6.49	1 054	1 599	-0.97
SD3-62-9	132.5	0.026 411	0.001 019	0.000 007	0.282 538	0.000 015	-8.26	-5.44	1 009	1 533	-0.97
SD3-62-10	133.1	0.016 663	0.000 652	0.000 001	0.282 451	0.000 011	-11.35	-8.50	1 121	1 727	-0.98
SD3-62-11	132.8	0.012 534	0.000 498	0.000 003	0.282 424	0.000 016	-12.32	-9.46	1 154	1 787	-0.99
SD3-62-12	132.4	0.029 903	0.001 119	0.000 010	0.282 566	0.000 019	-7.27	-4.45	972	1 470	-0.97
SD3-62-13	132.2	0.026 309	0.001 030	0.000 013	0.282 486	0.000 016	-10.13	-7.32	1 083	1 651	-0.97
SD3-62-14	132.3	0.021 373	0.000 844	0.000 003	0.282 496	0.000 015	-9.76	-6.93	1 064	1 628	-0.97
打鼓顶组碎斑流纹岩(样品号 SD3-211)											
SD3-211-1	132.5	0.023 517	0.000 911	0.000 003	0.282 399	0.000 018	-13.18	-10.35	1 200	1 843	-0.97
SD3-211-2	130.4	0.015 427	0.000 610	0.000 002	0.282 402	0.000 016	-13.08	-10.26	1 187	1 837	-0.98
SD3-211-3	131.5	0.077 555	0.002 818	0.000 029	0.282 320	0.000 023	-15.98	-13.35	1 380	2 030	-0.92
SD3-211-4	132.0	0.015 915	0.000 631	0.000 005	0.282 429	0.000 013	-12.15	-9.30	1 151	1 777	-0.98
SD3-211-5	135.2	0.013 182	0.000 519	0.000 004	0.282 460	0.000 016	-11.02	-8.10	1 104	1 704	-0.98
SD3-211-6	131.5	0.033 978	0.001 296	0.000 015	0.282 404	0.000 017	-13.00	-10.23	1 206	1 835	-0.96
SD3-211-7	131.7	0.020 091	0.000 791	0.000 001	0.282 438	0.000 013	-11.81	-8.99	1 143	1 757	-0.98
SD3-211-8	132.2	0.049 472	0.001 857	0.000 024	0.282 293	0.000 151	-16.95	-14.22	1 384	2 087	-0.94
SD3-211-9	131.3	0.018 276	0.000 718	0.000 007	0.282 447	0.000 012	-11.50	-8.68	1 128	1 736	-0.98
SD3-211-10	132.7	0.020 658	0.000 811	0.000 002	0.282 424	0.000 015	-12.30	-9.46	1 163	1 788	-0.98
SD3-211-11	132.2	0.017 028	0.000 670	0.000 002	0.282 395	0.000 011	-13.33	-10.47	1 199	1 852	-0.98
SD3-211-12	132.8	0.032 942	0.001 272	0.000 009	0.282 445	0.000 015	-11.58	-8.79	1 148	1 744	-0.96
SD3-211-13	131.2	0.016 687	0.000 653	0.000 009	0.282 388	0.000 013	-13.59	-10.77	1 209	1 870	-0.98
SD3-211-14	133.4	0.027 795	0.001 066	0.000 006	0.282 424	0.000 018	-12.31	-9.48	1 171	1 789	-0.97

岩石地球化学特征,两者的稀土元素配分曲线均为富集轻稀土的右倾式(图6),鹅湖岭组碎斑流纹岩与打鼓顶组碎斑流纹岩相比,具有较为明显的Eu负异常,表明其经历了更高程度的斜长石结晶分离作用,或者源区在部分熔融过程中,残留有更多的斜长石;但打鼓顶组碎斑流纹岩轻重稀土分馏更为明显,表明打鼓顶组碎斑流纹岩原岩可能含有较多的榍石、褐帘石和独居石等副矿物.La-La_N/Yb_N图解(图9)表明,鹅湖岭组和打鼓顶组碎斑流纹岩稀土元素含量变化受控于褐帘石和独居石的分离结晶作用.在原始地幔标准化蛛网图上(图5),两者均表现为K、Ba、Sr等大离子亲石元素和Nb、Ti、P等高场强元素亏损,而Rb、Th、Nd等富集的特点,这些

地球化学特征均指示相山铀矿田碎斑流纹岩的成岩物质主要来自硅铝地壳的部分熔融.

锆石Hf同位素具有很高的体系封闭温度,这使得锆石可以记录岩浆源区不同性质的源岩特征,并且可以成为探讨岩浆起源甚至探讨地壳演化及壳幔相互作用的重要工具(Griffin *et al.*, 2000, 2002; Söderlund *et al.*, 2004; 杨水源等, 2010).鹅湖岭组碎斑流纹岩两阶段Hf模式年龄平均值为1 644 Ma;打鼓顶组碎斑流纹岩两阶段Hf模式年龄平均值为1 832 Ma,表明碎斑流纹岩可能是古元古代—中元古代变质岩的部分熔融而形成.鹅湖岭组碎斑流纹岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-9.5~-4.5,打鼓顶组碎斑流纹岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-14.2~-8.1,在²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄与 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 关系图

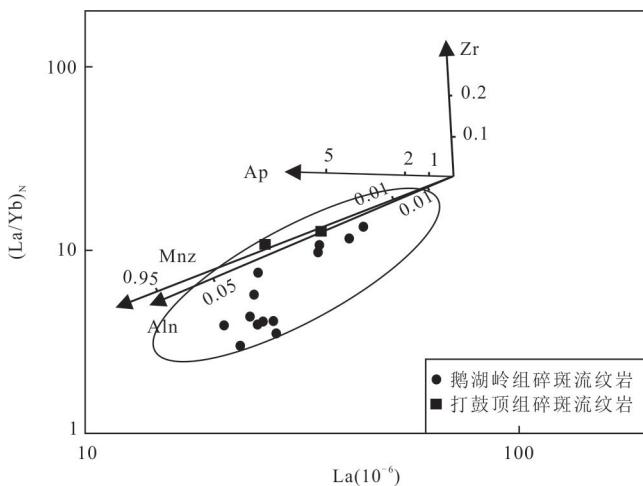


图 9 碎斑流纹岩结晶分异图解

Fig.9 Diagram of fractional crystallization of porphyroclastic rhyolite

Ap.磷灰石;Aln.褐帘石;Mnz.独居石;Zr.锆石;底图据郭福生等(2016)

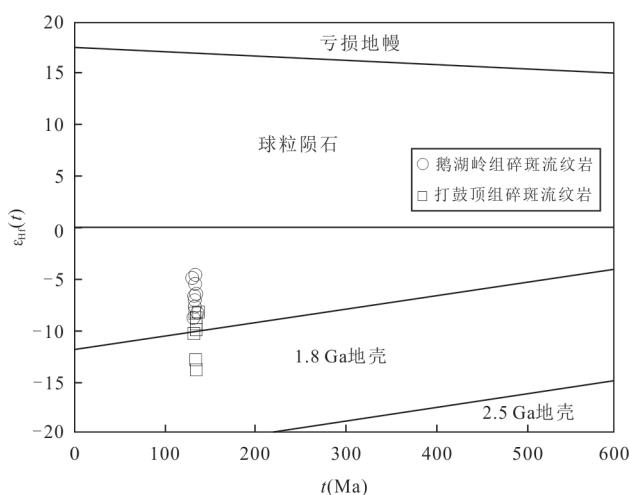


图 10 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄与 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 关系

Fig.10 Zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram of porphyroclastic rhyolites from Ehuling Formation and Da-guding Formation

上(图 10),样品测点均落在球粒陨石演化线以下,且样品测点在垂向上却比较分散,然而这些样品测点却有着近乎一致的锆石 U-Pb 年龄。一般而言,单一的岩浆演化不会造成同位素的分馏,因此 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的差异性表明在成岩过程中不止有地壳物质的部分熔融,可能还存在少量地幔物质的加入。郭福生等(2016)通过岩石地球化学、同位素地球化学对相山铀矿田侵入杂岩做了较为系统的研究,发现碎斑流纹岩,流纹英安岩和花岗斑岩等主体岩性具有较为

相似的岩石地球化学和同位素地球化学特点,同时在花岗斑岩中发现有镁铁质微粒包体,且含镁铁质包体的花岗斑岩与流纹英安岩、碎斑流纹岩之间具有相同的 Nd-Hf 同位素组成,表明基性与酸性岩浆发生了相对均匀的混合作用,但由于两种岩浆温差较大,故这种混合作用仅发生在浅部,进而表明幔源物质参与较少。且这种基性岩浆与酸性岩浆的混合作用在相山地区已经得到了充分的证明,例如在相山地区发育有较多的基性煌斑岩脉与同期形成的英安斑岩脉等(范洪海等,2005; Jiang et al., 2005)。

综上所述,笔者认为相山铀矿田中西部鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩均形成于早白垩世弧后伸展环境机制之下,起源于古元古代—中元古代基底变质岩的部分熔融,可能伴随有不同程度的地幔物质的加入。

6 结论

(1) 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩锆石 U-Pb 年龄结果非常接近,分别为 132.4 ± 0.7 Ma 和 131.9 ± 0.8 Ma, 可能为同一期岩浆形成。

(2) 鹅湖岭组与打鼓顶组碎斑流纹岩具有相似的岩石矿物学、岩石地球化学、锆石 Hf 同位素组成,二者均是在早白垩世弧后拉伸环境背景之下,主要由古元古代—中元古带基底变质岩部分熔融而形成,可能伴随有不同程度的地幔物质的加入。

致谢:感谢两位审稿专家对本文的修改提出了宝贵的建议;张云龙博士后对本文的英文摘要提出了建设性意见,在此表示衷心的感谢!

References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1–2): 59–79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)
- Blichert-Toft, J., Albarède, F., 1997. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1–2): 243–258. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(97\)00040-x](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(97)00040-x)
- Bowring, S. A., Schmitz, M. D., 2003. High-Precision U-Pb Zircon Geochronology and the Stratigraphic Record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 305–326. <https://doi.org/10.2113/0530305>

- Chen, W.F., Chen, P.R., Xu, X.S., et al., 2005. Geochemical Characteristics of Cretaceous Basaltic Rocks in South China and Constraints on Pacific Plate Subduction. *Science in China:Earth Sciences*, 35(11):1007—1018(in Chinese).
- Chen, Z.L., Wang, Y., Zhou, Y.G., et al., 2013. SHRIMP U-Pb Dating of Zircons from Volcanic-Intrusive Complexes in the Xiangshan Uranium Orefield, Jiangxi Province, and Its Geological Implications. *Geology in China*, 40(1): 217—228(in Chinese with English abstract).
- Corfu, F., Hanchar, J. M., Hoskin, P. W.O., et al., 2003. Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1):469—500.
- Fan, H.H., Ling, H.F., Shen, W.Z., et al., 2001a. Nd-Sr-Pb Isotope Geochemistry of the Volcanic - Intrusive Complex at Xiangshan, Jiangxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3):395—402(in Chinese with English abstract).
- Fan, H.H., Wang, D.Z., Liu, C.S., et al., 2001b. Discovery of Quenched Enclaves in Subvolcanic Rocks in Xiangshan, Jiangxi Province and Its Genetic Mechanism. *Acta Geologica Sinica*, 75(1):64—69, 146(in Chinese with English abstract).
- Fan, H.H., Wang, D.Z., Shen, W.Z., et al., 2005. Formation Age of the Intermediate-Basic Dikes and Volcanic-Intrusive Complex in Xiangshan, Jiangxi Province. *Geological Review*, 51(1):86—91(in Chinese with English abstract).
- Fang, X.H., Hou, W.Y., Wan, G.L., 1982. Petrographic Studies of the Volcanic Complex in the Xiangshan Caldera. *Rock and Mineral Analysis*, 1(1):1—10(in Chinese with English abstract).
- Griffin, W.L., Pearson, N.J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle:LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133—147. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00343-9)
- Griffin, W.L., Wang, X., Jackson, S.E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China:In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3—4): 237—269. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(02)00082-8)
- Guo, F.S., Yang, Q.K., Meng, X.J., et al., 2016. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of the Acidic Volcano-Intrusive Complexes, Xiangshan, Jiangxi. *Acta Geologica Sinica*, 90(4): 769—784(in Chinese with English abstract).
- He, Z.Y., Xu, X.S., Chen, R., et al., 2007. Genesis of Middle Jurassic Syenite - Gabbro in Southern Jiangxi Province and Their Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6):1457—1469 (in Chinese with English abstract).
- Hou, K.J., Li, Y.H., Zou, T.R., et al., 2007. Laser Ablation-MC-ICP-MS Technique for Hf Isotope Microanalysis of Zircon and Its Geological Applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10):2595—2604 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y.H., Ling, H.F., Jiang, S.Y., et al., 2005. Petrogenesis of a Late Jurassic Peraluminous Volcanic Complex and Its High-Mg, Potassic, Quenched Enclaves at Xiangshan, Southeast China. *Journal of Petrology*, 46(6): 1121—1154. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi012>
- Li, X.H., 2000. Cretaceous Magmatism and Lithospheric Extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 293—305. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(99\)00060-7](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(99)00060-7)
- Li, S.Z., Zang, Y.B., Wang, P.C., et al., 2017. Mesozoic Tectonic Transition in South China and Initiation of Palaeo-Pacific Subduction. *Earth Science Frontiers*, 24(4):213—225(in Chinese with English abstract).
- Liu, C.S., Zhu, J.C., Shen, W.Z., et al., 1990. Classification and Source Materials of Continental Crust Transformation Series Granoids in South China. *Acta Geologica Sinica*, 64(1):43—52(in Chinese with English abstract).
- Ludwing, K. R., 2003. ISOPLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Geochronology Center. Special Publication , Berkeley.
- Regional Geological Survey Brigade of Jiangxi Geological Bureau, 1977. 1: 20 000 Regional Geology and Mineral Resources Survey Report in Xing'an. Geological Survey of Jiangxi Province, Nanchang(in Chinese).
- Scherer, E.E., Münker, C., Mezger, K., 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium Clock. *Science*, 293 (5536): 638—687.
- Si, Z.F., Li, Z.Y., Nie, J.T., et al., 2018. Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Hf-Sr-Nd Isotopic Characteristics of the Rhyolite Porphyry at Heyuanbei in Xiangshan Uranium Ore-Field, Jiangxi Province. *Geoscience*, 32(1): 45—55(in Chinese with English abstract)
- Söderlund, U., Patchett, P.J., Vervoort, J.D., et al., 2004. The ¹⁷⁶Lu Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3—4): 311—324. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(04\)00012-3](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(04)00012-3)
- Song, B., Zhang, Y.H., Liu, D.Y., 2002. Introduction to the Naissance of SHRIMP and Its Contribution to Isotope Geology. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 23(1):58—62(in Chinese with English abstract)
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic

- Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Wang, Y.J., Lin, J.R., Hu, Z.H., et al., 2019. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopic Compositions of Dacitic Porphyry in Zoujiashan Deposit of Xiangshan Uranium Orefield and Its Geological Implication. *Earth Science*, 46(1):31–42(in Chinese with English abstract).
- Wang, C. W., Hou, W. Y., 1980. Characteristics and Genetic Mechanism of Porphyroclastic Rhyolite in Xiangshan – Genetic and Geological Significance of Crystal Pyroclast-Rich Porphyroclastic Rhyolitic Volcanic Rocks. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing (in Chinese).
- Wu, F.Y., Li, X.H., Zheng, Y.F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):185–220(in Chinese with English abstract).
- Xing, G.F., Lu, Q.D., Chen, R., et al., 2008. Study on the Ending Time of Late Mesozoic Tectonic Regime Transition in South China:Comparing to the Yanshan Area in North China. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 451–463 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., 2013. Petrogenesis and Geodynamic Setting of Magmatic Rocks from Uranium-Bearing Volcanic Basins, Gan-Hang Belt, Southeast China (Dissertation). Nanjing University, Nanjing(in Chinese with English abstract).
- Yang, S.Y., Jiang, S.Y., Jiang, Y.H., et al., 2010. Zircon U-Pb Geochronology, Hf Isotopic Composition and Geological Implications of the Rhyodacite and Rhyodacitic Porphyry in the Xiangshan Uranium Ore Field, Jiangxi Province, China. *Science China: Earth Sciences*, 40(8): 953–969(in Chinese).
- Yang, S. Y., Jiang, S. Y., Jiang, Y. H., et al., 2011. Geochemical, Zircon U-Pb Dating and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on the Age and Petrogenesis of an Early Cretaceous Volcanic-Intrusive Complex at Xiangshan, Southeast China. *Mineralogy and Petrology*, 101(1): 21–48. <https://doi.org/10.1007/s00710-010-0136-4>
- Yu, Z. Q., Chen, W. F., Chen, P. R., et al., 2019. Chemical Composition and Sr Isotopes of Apatite in the Xiangshan A-Type Volcanic-Intrusive Complex, Southeast China: New Insight into Petrogenesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 172: 66–82. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2018.08.019>
- Yuan, H. Y., Wu, F. Y., Gao, S., et al., 2003. Zircon Laser Probe U-Pb Dating and REE Composition Analysis of Cenozoic Intrusions in Northeast China. *Chinese Science Bulletin*, 48(14):1511–1520(in Chinese).
- Zhang, W. L., 2016. New Understanding of the Genesis of Cryptoexplosive Intrusive Rock, Xiangshan. *Jiangxi Geology*, 17(3):184–189(in Chinese).
- Zhang, W.L., Li, Z.Y., 2007. Single Zircon U-Pb Age of Rhyodacite from Xiangshan Area and Its Geological Implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1):21–26(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.Q., Xu, X.B., Jia, D., et al., 2009. Deformation Record of the Change from Indosinian Collision-Related Tectonic System to Yanshanian Subduction-Related Tectonic System in South China during the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234–247 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X.M., Sun, T., Shen, W.Z., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, 29(1):26–33. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2006/v29i1/004>
- Zhou, T.F., Fan, Y., Yuan, F., et al., 2010. Temporal-Spatial Framework of Magmatic Intrusions in Luzong Volcanic Basin in East China and Their Constraint to Mineralizations. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9):2694–2714 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈卫锋,陈培荣,徐夕生,等,2005.华南白垩纪玄武质岩石的地球化学特征及其对太平洋板块俯冲作用的制约.中国科学:地球科学,35(11):1007–1018.
- 陈正乐,王永,周永贵,等,2013.江西相山火山—侵入杂岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义.中国地质,40(1): 217–228.
- 范洪海,凌洪飞,沈渭洲,等,2001a.相山火山—侵入杂岩 Nd-Sr-Pb 同位素地球化学特征.岩石学报,17(3):395–402.
- 范洪海,王德滋,刘昌实,等,2001b.江西相山潜火山岩中淬冷包体的发现及其成因机制探讨.地质学报,75(1): 64–69, 146.
- 范洪海,王德滋,沈渭洲,等,2005.江西相山火山—侵入杂岩及中基性脉岩形成时代研究.地质论评,51(1):86–91.
- 方锡珩,侯文尧,万国良,1982.相山破火山口火山杂岩体的岩石学研究.岩石学报,1(1):1–10.
- 郭福生,杨庆坤,孟祥金,等,2016.江西相山酸性火山—侵入杂岩体地球化学特征与岩石成因.地质学报,90(4): 769–784.
- 贺振宇,徐夕生,陈荣,等,2007.赣南中侏罗世正长岩—辉长岩的起源及其地质意义.岩石学报,23(6):1457–1469.
- 侯可军,李延河,邹天人,等,2007.LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf

- 同位素的分析方法及地质应用.岩石学报,23(10):2595—2604.
- 华东608大队,1966.江西省乐安—崇仁县相山地区1:5万地质测量总结报告.南昌:核工业270研究所.
- 江西省地质局区域地质调查大队,1977.新干幅1:20万区域地质矿产调查报告.南昌:江西省地质调查院.
- 李三忠,臧艺博,王鹏程,等,2017.华南中生代构造转换和古太平洋俯冲启动.地学前缘,24(4):213—225.
- 刘昌实,朱金初,沈渭洲,等,1990.华南陆壳改造系列花岗岩类型划分和成岩物质来源.地质学报,64(1):43—52.
- 司志发,李子颖,聂江涛,等,2018.江西相山铀矿田河元背地区流纹斑岩地球化学、锆石U-Pb年龄及Hf-Sr-Nd同位素特征.现代地质,32(1):45—55.
- 宋彪,张玉海,刘敦一,2002.微量原位分析仪器SHRIMP的产生与锆石同位素地质年代学.质谱学报,23(1):58—62.
- 王传文,候文尧,1980.相山碎斑流纹岩特征及其成因机制—兼论浙赣富晶屑碎斑流纹质火山岩成因和地质意义.北京:核工业北京地质研究院.
- 王勇剑,林锦荣,胡志华,等,2019.相山铀矿田邹家山矿床英安斑岩脉锆石U-Pb年代学、地球化学、Hf同位素组成及其地质意义.地球科学,46(1):31—42.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等,2007.Lu-Hf同位素体系及其岩石学应用.岩石学报,23(2):185—220.
- 邢光福,卢清地,陈荣,等,2008.华南晚中生代构造体制转折结束时限研究:兼与华北燕山地区对比.地质学报,82(4):451—463.
- 杨水源,蒋少涌,姜耀辉,等,2010.江西相山流纹英安岩和流纹英安斑岩锆石U-Pb年代学和Hf同位素组成及其地质意义.中国科学:地球科学,40(8):953—969.
- 杨水源,2013.华南赣杭构造带含铀火山盆地岩浆岩的成因机制及动力学背景(博士学位论文).南京:南京大学.
- 袁洪林,吴福元,高山,等,2003.东北地区新生代侵入体的锆石激光探针U-Pb年龄测定与稀土元素成分分析.科学通报,48(14):1511—1520.
- 张万良,李子颖,2007.相山“流纹英安岩”单颗粒锆石U-Pb年龄及地质意义.岩石矿物学杂志,26(1):21—26.
- 张万良,2016.隐爆侵入岩—相山碎斑熔岩成因新认识.江西地质,17(3):184—189.
- 张岳桥,徐先兵,贾东,等,2009.华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录.地学前缘,16(1):234—247.
- 周涛发,范裕,袁峰,等,2010.庐枞盆地侵入岩的时空格架及其对成矿的制约.岩石学报,26(9):2694—2714.