

南极半岛屈韦维尔岛白垩纪中期火山岩浆作用及其构造指示:锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素制约^{*}

郑光高^{1,2} 刘晓春¹ 赵越¹ 王伟^{1,2} 陈龙耀^{1,2}

ZHENG GuangGao^{1,2}, LIU XiaoChun¹, ZHAO Yue¹, WANG Wei^{1,2} and CHEN LongYao^{1,2}

1. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081

2. 北京大学地球与空间科学学院,北京 100871

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2016-03-23 收稿, 2016-10-20 改回.

Zheng GG, Liu XC, Zhao Y, Wang W and Chen LY. 2017. Mid-Cretaceous volcano-magmatism in the Curverville Island of the Antarctic Peninsula and its tectonic significance: Constraints from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3):978–992

Abstract The Antarctic Peninsula, located in the western margin of Gondwana for a long time, was the final place of the Gondwana dispersion. Voluminous Mesozoic-Cenozoic igneous rocks occur in the Antarctic Peninsula, and the magmatic process, source characteristics and geodynamic setting of these rocks remain controversial. This has led to the argument for the tectonic evolution of the Antarctic Peninsula. This paper reports zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotopes of the andesitic volcanic rock, diorite porphyrite vein and diorite xenolith from the Curverville Island in the central domain of the Antarctic Peninsula. The results show that the zircon U-Pb ages are 103.3 ± 1.7 Ma for andesitic breccia lava, 101.9 ± 1.8 Ma for andesitic breccia, 92.0 ± 1.2 Ma for medium-grained diorite xenolith, and 85.7 ± 0.7 Ma for diorite porphyrite vein. This suggests that there existed three episodes of volcanism in the Mid-Cretaceous, with the first episode of intensive volcanic eruption at ca. 102 Ma, the second episode of diorite intrusion at ca. 92 Ma, and the third episode of diorite porphyrite intrusion at ca. 86 Ma. The in-situ zircon Hf isotopic analysis indicates that most $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values are $+2.5 \sim +7.9$, with an average value of $+4.4$. Their Hf model ages ranging from 505 Ma to 678 Ma, suggesting that the Mid-Cretaceous igneous rocks may have been derived from the partial melting of depleted mantle materials of the Neoproterozoic-Cambrian age. Coupled with the available published data, we propose that the igneous rocks from the Curverville Island formed in an island arc setting, which accompanies with the process of the Gondwana breakup. Therefore, the igneous rocks from the Curverville Island are one of the main lithology that makes up the central magmatic domain of the Antarctic Peninsula.

Key words Zircon U-Pb dating; Zircon Hf isotope; Antarctic Peninsula; Mid-Cretaceous; Island arc setting

摘 要 南极半岛长期以来位于冈瓦纳古陆的西缘,是冈瓦纳古陆最后裂解的发生地。南极半岛内出露有大量的中生代火成岩,关于其成岩期次、源区性质以及产出的动力学背景等尚存争议,从而影响到对南极半岛构造演化的认识。本文报道了南极半岛中部构造域屈韦维尔岛地区出露的安山质火山岩、闪长玢岩脉及其中闪长岩捕虏体的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素分析数据。其中含角砾安山质熔岩、安山质火山角砾岩、中粒闪长岩捕虏体和闪长玢岩脉 4 件样品的锆石 U-Pb 测年结果分别为 103.3 ± 1.7 Ma、 101.9 ± 1.8 Ma、 92.0 ± 1.2 Ma 和 85.7 ± 0.7 Ma,表明该岛在白垩纪中期存在三幕火山岩浆作用事件:第一幕约为 102 Ma 发生的强烈火山喷发;第二幕约为 92 Ma 的闪长岩侵入作用;第三幕约为 86 Ma 的闪长玢岩体侵入作用。锆石的 Hf 同位素原位分析结果表明,主要测点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $+2.5 \sim +7.9$ 之间,平均值为 $+4.4$,其一阶段 Hf 模式年龄为 505 ~ 678 Ma,表明白垩纪中期出露的火成岩可能由新元古代-寒武纪的亏损地幔物质部分熔融所形成。结合前人研究成果,得出本岛出露的火成岩形成于冈瓦纳古陆裂解过程所伴生的俯冲岛弧环境中,是构成南极半岛中部岩浆弧构造

^{*} 本文受国家自然科学基金项目(41372082)、国家极地专项(CHINARE2016-02-05)和国土资源大调查项目联合资助。

第一作者简介:郑光高,男,1987年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: tiangang755@163.com

域的主体岩性之一。

关键词 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 南极半岛; 白垩纪中期; 岛弧环境

中图法分类号 P588.122; P597.3

1 引言

南极半岛为一条窄长的弧形大陆地壳,其西濒临南太平洋,东临威德尔海,北接斯科舍海(Barker, 1982)。从地理位置关系上,南极半岛可以分成南部的帕默地(Palmer Land)和北部的格雷厄姆地(Graham Land);从大地构造格局上,其亦可区分成东部冈瓦纳构造域、中部岩浆弧构造域和西部增生杂岩构造域(Vaughan and Storey, 2000; 郑光高等, 2015; 图 1a)。中生代以来,受南太平洋构造域构造活动的影响,南极半岛地质构造演化复杂,特别是中生代白垩纪构造变形-岩浆作用响应在全球中生代构造中独具特色(范蔚茗等, 2003)。主要表现为原太平洋板块向南极半岛之下俯冲增生,同时诱发了大规模的火山-岩浆侵入活动,所形成的火山岩曾被统称为南极半岛火山群(Antarctic Peninsula Volcanic Group)(Thomson and Pankhurst, 1983),时代从侏罗纪一直延续到新生代(Storey and Garrett, 1985),伴生的中酸性侵入体(闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩)具有相似的年龄和类似的成因机制(Leat *et al.*, 1995)。

20 世纪 80 年代以来,国外学者对南极半岛白垩纪火山-岩浆侵入作用等方面做了若干研究,并取得一些重要的成果和认识。例如,在格雷厄姆地西部阿德莱德岛(Adelaide Island)的迈尔斯通陡崖(Milestone Bluff)流纹质熔结凝灰岩中获得 $113.9 \pm 1.2\text{Ma}$ 的锆石 U-Pb 年龄(Riley *et al.*,

2012),在帕默地北部弗莱明冰川(Fleming Glacier)的硅质熔岩中获得 $107 \pm 1.7\text{Ma}$ 的锆石 U-Pb 年龄(Leat *et al.*, 2009),从而证明了白垩纪火山作用的存在。另一方面,在格雷厄姆地西岸线的一套钙碱性花岗质岩石中获得 $117.0 \pm 0.8\text{Ma} \sim 73.6 \pm 0.4\text{Ma}$ 之间的锆石 U-Pb 年龄(Tangeman and Mukasa, 1996),在帕默地南部比恩群峰(Been Peaks)同构造花岗岩席中获得 $106.9 \pm 1.1\text{Ma}$ 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(Vaughan *et al.*, 2002),在帕默地南部英吉利海岸(English Coast)的哈里山(Mount Harry)石英二长岩中获得 $105.2 \pm 1.1\text{Ma}$ 的锆石 U-Pb 年龄(Flowerdew *et al.*, 2005),这些年龄同样确定了白垩纪岩浆作用在南极半岛中部岩浆弧构造域广泛的发生。Smellie *et al.* (1996)对利文斯顿岛史莱夫角(Cape Shirreff)橄榄岩玄武岩进行 K-Ar 定年,获得 90Ma 火山作用年龄;郑祥身等(1996)结合该年龄,并对本样品进行 Sr-Nd 同位素研究,指出该火山岩由上地幔部分熔融生成。然而,由于南极半岛地理位置的特殊性,露头出露有限,前人对半岛内白垩纪的火山-岩浆侵入活动的研究或局限于某一区域,或样品测试方法有限,或未能有效结合同位素地球化学等方面的研究,使得对半岛上的火山-岩浆侵入活动的精细时序研究工作比较薄弱,无法对半岛地区的火山岩浆作用期次划分提供直接的年代学证据和其源区特征提供有利的同位素证据,从而影响了半岛出露的火山-岩浆岩的成岩期次、成岩源区特征以及动力学背景等认识。

屈韦维尔岛(Curvature Island)地处南极半岛格雷厄姆

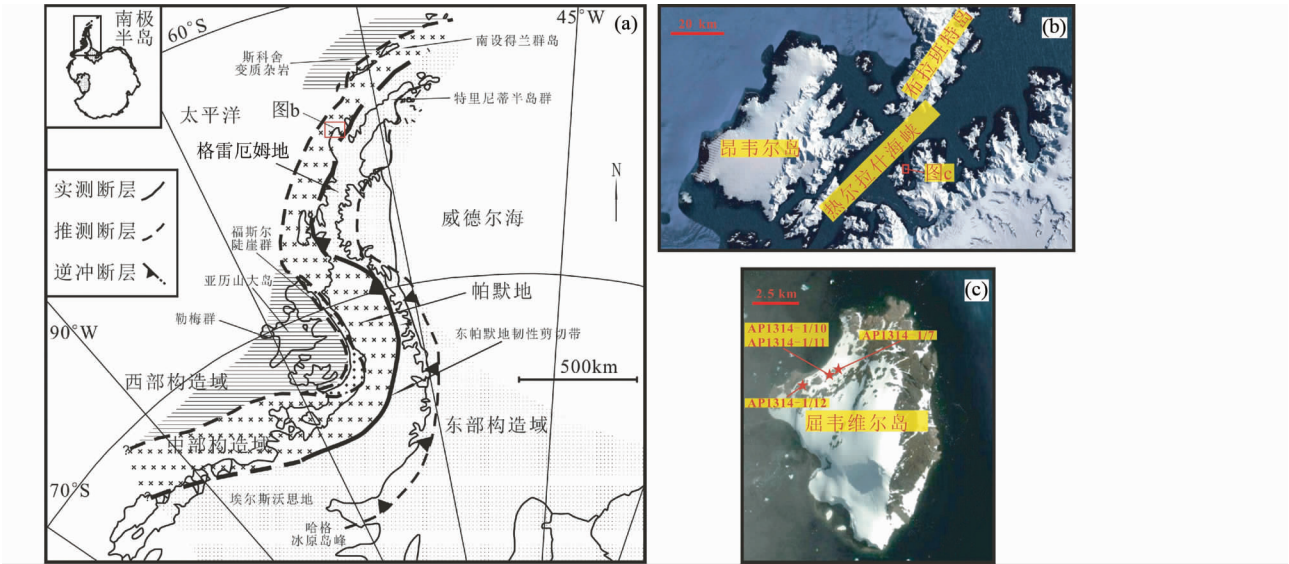


图 1 南极半岛大地构造分区简图及采样位置(a,据 Vaughan and Storey, 2000 修改; b、c,据 Google 地图, 2013 修改)

Fig.1 Schematic tectonic division map of the Antarctic Peninsula and sampling locations (a, modified after Vaughan and Storey, 2000; b, c, modified after Google Earth, 2013)

地西缘,是研究南极半岛中生代以来俯冲增生作用的重要区域之一,国内外学者对该岛的岩石学特征、形成年代及源区特征均暂无报道。中国第29次南极科学考察对该岛进行了系统调查和取样。笔者选取典型的熔岩、脉岩及脉岩中的捕虏体作为研究对象,开展了精细的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学研究,厘定了其喷发-侵入次序,并结合锆石原位 Hf 同位素分析,探讨了成岩的源区性质及其成因的深部动力学背景,从而为重建南极半岛白垩纪大地构造演化提供重要依据。

2 区域地质背景

以东帕默地韧性剪切带(Eastern Palmer Land Shear Zone)为分界线,可将南极半岛地区划分为三个构造域,即东部构造域、中部构造域和西部构造域(Vaughan and Storey, 2000; 图1a)。

东部冈瓦纳构造域位于南极半岛东侧,从帕默地向北连续延伸至格雷厄姆地,地理位置上邻近冈瓦纳古陆的核心,具有准原地的性质(Kellogg and Rowley, 1989)。该构造域以出露有类似于增生楔的晚石炭世-晚三叠世特里尼蒂半岛群(Trinity Peninsula Group)的浊积岩地层(Smellie and Millar, 1995)为特征,并经历了晚三叠世-早侏罗世变形作用的改造(Storey and Garrett, 1985)。上覆岩系包括早侏罗世博特尼

湾群(Botany Bay Group)陆源泥岩/砂岩序列(Farquharson, 1982, 1984)以及侏罗纪南极半岛火山群(Antarctic Peninsula Volcanic Group)(Thomson and Pankhurst, 1983; Riley and Leat, 1999)。中晚侏罗世的花岗质深成岩体切穿了南极半岛火山群的火山岩系和博特尼湾群的沉积岩系(Pankhurst *et al.*, 2000)。

中部岩浆弧构造域以东帕默地韧性剪切带为界与东部构造域相区分,其主体由中生代以及一些可能更老的火山岩和侵入岩构成。该构造域出露的最古老变质沉积岩为角闪岩相云英片岩和石榴黑云斜长片麻岩(Wendt *et al.*, 2008),它们是早侏罗世或更老俯冲杂岩的一部分(Meneilly, 1988)。最老的岩浆岩是晚三叠世含钾长石巨晶的花岗岩类和层状花岗质片麻岩,中侏罗世辉长岩-花岗岩套侵入于片麻岩中(Wever *et al.*, 1994; Scarrow *et al.*, 1996; Vaughan and Storey, 2000)。火山岩主要包括晚侏罗世前变形的安山质凝灰岩、熔岩以及未变质的侏罗纪和更年轻的南极半岛火山岩群钙碱性凝灰岩和熔岩(Thomson and Pankhurst, 1983; Davies, 1984)。在帕默地东部,晚侏罗世-早白垩世埃达克质岩石侵入到三叠纪和侏罗纪的片麻岩和岩浆岩中(Vaughan *et al.*, 1997, 1998; Wareham *et al.*, 1997)。

西部增生杂岩构造域主要包括南极半岛南部的亚历山大岛(Alexander Island)和北部的南设得兰群岛(South Shetland Islands),它们分别以新生代裂谷带乔治六世海峡

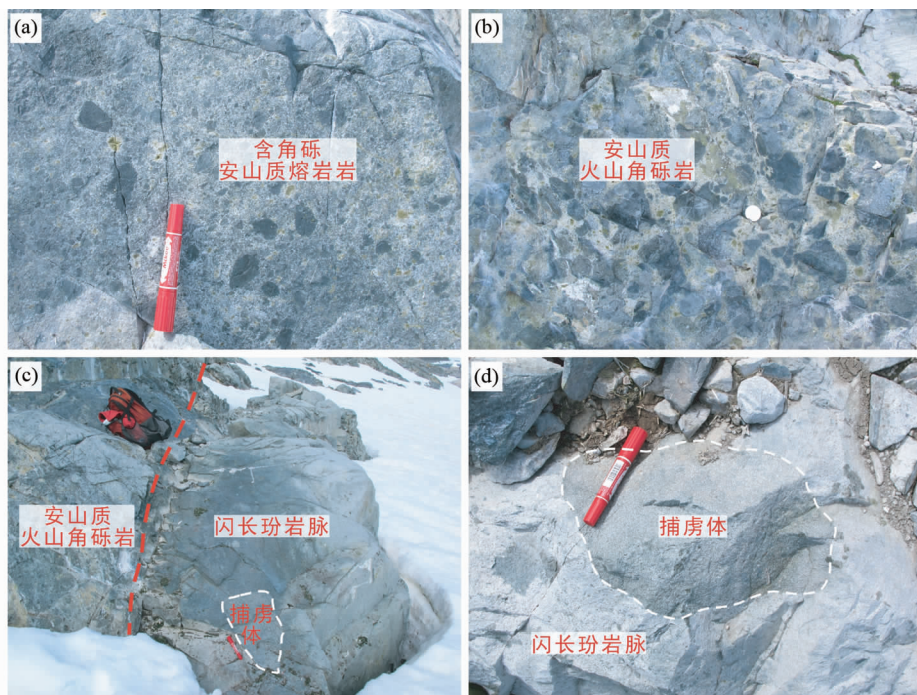


图2 屈韦维尔岛火山岩、岩脉及捕虏体的野外产状

(a) 安山质火山角砾岩; (b) 含角砾安山质熔岩; (c) 闪长玢岩脉及其内的闪长岩捕虏体; (d) 闪长玢岩脉中的闪长岩捕虏体

Fig. 2 Field photographs of volcanic rocks, veins and xenoliths of Curverville Island

(a) andesitic volcanic breccias; (b) andesitic lava with breccias; (c) diorite porphyrite vein and diorite xenoliths within it; (d) diorite xenoliths within diorite porphyrite vein

(George VI Sound) (Bell and King, 1998) 和布兰斯菲尔德海峡 (Bransfield Strait) (Solari *et al.*, 2008; 郑光高等, 2015) 与中部构造域分隔, 其中亚历山大岛中生代地壳主要由弧前的勒梅群 (LeMay Group)、福斯尔陡崖群 (Fossil Bluff Group)、晚白垩世-古近纪火山岩、花岗岩类及形成于俯冲作用停止之后少量新近纪 ($\leq 7\text{Ma}$) 碱性火山岩组成 (McCarron and Millar, 1997)。南设得兰群岛的斯科舍变质杂岩 (Scotia Metamorphic Complex) 为一套变质程度达蓝片岩-角闪岩相的深位俯冲-增生杂岩 (Trouw *et al.*, 1998)。

屈韦维尔岛是南极半岛格雷厄姆地西部的小岛屿, 大地构造位置处于南极半岛的中部岩浆弧构造域, 其西以热尔拉什海峡 (Gerlache Strati) 与布拉班特岛 (Brabant Island) 和昂韦尔岛 (Anvers Island) 相隔 (图 1b)。该岛出露的地层统称为中侏罗世至白垩纪的南极半岛火山群, 主要岩性为含角砾安山质熔岩和安山质火山角砾岩, 火山岩体被后期的中酸性的闪长玢岩和花岗斑岩脉体所穿插。安山质熔岩和角砾岩呈灰绿色, 风化后呈灰白色, 角砾为灰色细粒隐晶质, 角砾大小一般小于 $1 \sim 8\text{cm}$, 基质为凝灰质和熔岩, 含有大量斜长石斑晶, 部分角砾因蚀变呈橄榄绿色 (图 2a, b)。闪长玢岩脉切割火山岩 (图 2c), 主要有两组, 一组走向 $N60^\circ\text{E}$, 另一组走向约 $N30^\circ\text{E}$, 脉宽 $0.5 \sim 1.8\text{m}$ 不等。岩脉内含有较多的 $10 \sim 40\text{cm}$ 大小不等的中粒闪长岩捕虏体 (图 2c, d)。

3 样品与分析方法

3.1 样品

含角砾安山质熔岩 (AP1314-1/12, GPS: $64^\circ 41' 04.1''\text{S}$, $62^\circ 37' 45.5''\text{W}$), 灰绿色, 角砾结构, 块状构造。主要成分为安山质角砾 ($10\% \sim 20\%$)、斜长石 ($40\% \sim 50\%$)、绿帘石 ($5\% \sim 10\%$)、绿泥石 ($5\% \sim 10\%$)、石英 (5%)、不透明矿物 (不足 5%)。安山质角砾呈次棱角状, 粒径 $1 \sim 4.5\text{mm}$, 被大小不等的岩屑、晶屑所胶结, 安山岩角砾中的斜长石长条状微晶呈弱定向排列, 其内可见明显的绿泥石化现象。石英斑晶溶蚀呈港湾状。副矿物有锆石和磷灰石等 (图 3a)。

安山质火山角砾岩 (AP1314-1/7, GPS: $64^\circ 41' 02.0''\text{S}$, $62^\circ 37' 31.0''\text{W}$), 灰绿色, 火山角砾结构, 块状构造。主要成分为安山质角砾 ($20\% \sim 40\%$)、斜长石 ($30\% \sim 40\%$)、石英 ($5\% \sim 10\%$)、绿帘石 ($5\% \sim 10\%$)、绿泥石 (5%)、不透明矿物 (不足 5%)。安山岩角砾呈次棱角状, 粒径 $1 \sim 4\text{mm}$, 同样被大小不等的磨圆化的岩屑和次棱角状的晶屑所胶结, 角砾内部的斜长石长条状微晶呈弱定向排列, 并可见少量绿泥石化现象, 基质呈隐晶质。副矿物有锆石和磷灰石等 (图 3b)。

中粒闪长岩捕虏体 (AP1314-1/11, GPS: $64^\circ 41' 02.4''\text{S}$, $62^\circ 37' 33.8''\text{W}$), 灰白色, 半自形中粒结构、块状构造。主要矿物成分为斜长石 ($50\% \sim 60\%$)、角闪石 ($20\% \sim 30\%$)、辉石 ($10\% \sim 15\%$)、少量石英 (不足 5%)、不透明矿物 (不足 5%)。斜长石发育聚片双晶, 辉石多具绿泥石化和绿帘石

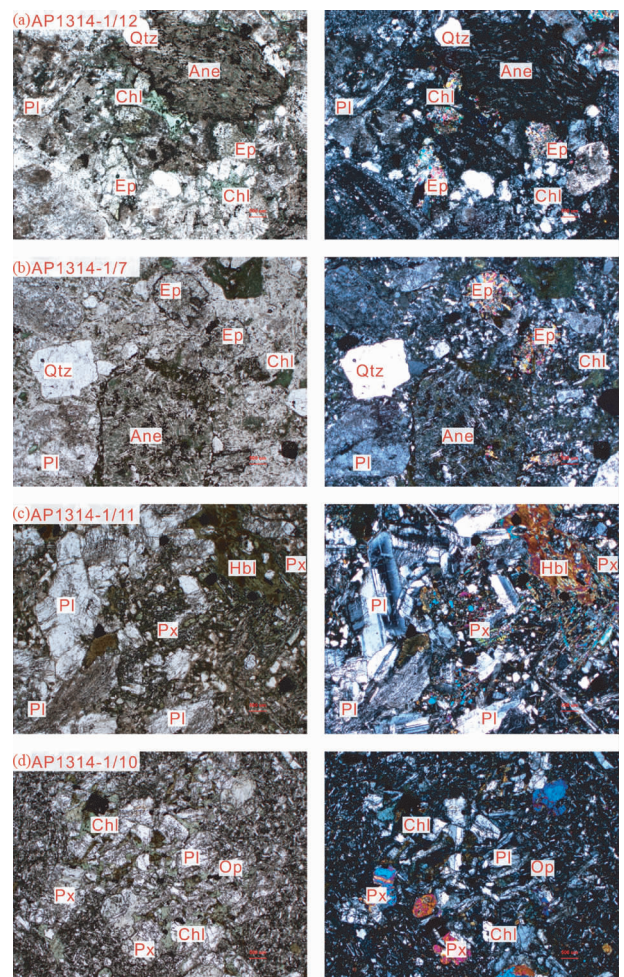


图 3 屈韦维尔岛火山岩、岩脉及捕虏体的显微结构照片 (单偏光和正交偏光)

(a) AP1314-1/12: 含角砾安山质熔岩 (安山质角砾 + 斜长石 + 绿帘石 + 绿泥石 + 石英 + 不透明矿物); (b) AP1314-1/7: 安山质火山角砾岩 (安山质角砾 + 斜长石 + 石英 + 绿帘石 + 绿泥石 + 不透明矿物); (c) AP1314-1/11: 中粒闪长岩捕虏体 (斜长石 + 角闪石 + 辉石 + 石英 + 不透明矿物); (d) AP1314-1/10: 闪长玢岩脉 (斜长石 + 辉石 + 绿帘石 + 石英 + 不透明矿物)。Ane-安山质角砾; Chl-绿泥石; Ep-绿帘石; Hbl-角闪石; Op-不透明矿物; Pl-斜长石; Px-辉石; Qtz-石英

Fig. 3 Microphotographs of volcanic rocks, veins and xenoliths of Curverville Island (plane and perpendicular polarizers)

(a) AP1314-1/12: Andesitic lava with breccias (Ane + Pl + Ep + Chl + Qtz + Op); (b) AP1314-1/7: Andesitic volcanic breccias (Ane + Pl + Qtz + Chl + Ep + Op); (c) AP1314-1/11: Medium grain diorite xenoliths (Pl + Hbl + Px + Qtz + Op); (d) AP1314-1/10: Diorite porphyrite veins (Pl + Px + Chl + Qtz + Op). Ane-andesitic breccia; Chl-chlorite; Ep-epidote; Hbl-hornblende; Op-opaque mineral; Pl-plagioclase; Px-pyroxene; Qtz-quartz

化, 角闪石被绿帘石化等交代呈假象产出。副矿物有锆石和磷灰石等 (图 3c)。

闪长玢岩脉 (AP1314-1/10, GPS: 64°41'02.4"S, 62°37'33.8"W), 深灰-灰白色, 似斑状结构, 块状构造。主要矿物成分为斜长石 (60% ~ 70%)、辉石 (20% ~ 30%)、绿泥石 (5% ~ 10%)、少量石英 (不足 5%)、不透明矿物 (不足 5%)。自形-半自形斜长石斑晶可见聚斑结构, 其边部因粘土化呈土灰色, 褐色角闪石部分绿泥石化; 基质为半自形粒状结构, 粒径 0.05 ~ 0.20mm, 含量约 65% ~ 70%, 主要由斜长石、辉石及少量石英组成。副矿物有锆石和磷灰石等 (图 3d)。

3.2 分析方法

用于测年研究的上述 4 件样品中的锆石采用电磁与重液选法分选, 然后在双目镜下挑选出晶型较好、透明度高的锆石颗粒, 最后将挑好的锆石置于环氧树脂内固定、抛光, 将制好的靶样进行透、反射光照相, 并采集阴极发光 (CL) 图像。根据锆石 CL 图像判别锆石成因, 结合透、反射照片, 选择无包体、无裂隙的锆石微区, 圈定激光剥蚀区域。

API314-1/12、API314-1/7 和 API314-1/11 这 3 件样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成, API314-1/10 样品的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析在中国地质调查局天津地质调查中心同位素实验室完成。前者的锆石测试仪器为 Bruker M90 型 ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统, 激光剥蚀所用的束斑直径为

40 μm , 频率为 10Hz, 能量密度约为 2.5J/cm², 以 He 作为剥蚀物质的载气, 详细实验条件与测试分析过程见侯可军等 (2009)。后者的测试仪器为 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 193nm 激光取样系统, 激光束斑孔径为 35 μm , 频率为 8 ~ 10Hz, 能量密度 13 ~ 14J/cm⁻³, 以 He 作为剥蚀物质的载气, 详细实验条件与测试分析过程见李怀坤等 (2009)。对实验数据的处理采用软件 ICPMSDataCal 9.0 完成, 详细的实验过程与数据处理方法参照 Liu *et al.* (2008, 2010a, b)。锆石谐和年龄的绘制利用软件 Isoplot 3.0 完成 (Ludwig, 2003)。

锆石 Lu-Hf 同位素分析在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室的 Neptune Plus (Thermo Fisher Scientific, 德国) 多接收等离子质谱和 GeoLae 2005 (Lambda Physik, 德国) 激光剥蚀系统 (LA-MC-ICP-MS) 上完成, 激光剥蚀束斑直径为 44 μm , 仪器详细参数见 Hu *et al.* (2012)。样品测试过程中以 91500 作为标样, 其 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282308 ± 12 (2 σ), 对数据的处理利用软件 ICPMSDataCal 9.0 完成。实验过程及数据处理方法见 Liu *et al.* (2010a)。为使 Hf 同位素分析与锆石 U-Pb 测年分析相对应, 此次在锆石 U-Pb 年龄谐和度较好的基础上, 选择同一颗锆石晶体内部与年龄点环带趋势一致的微区圈定 Hf 同位素的分析点位。

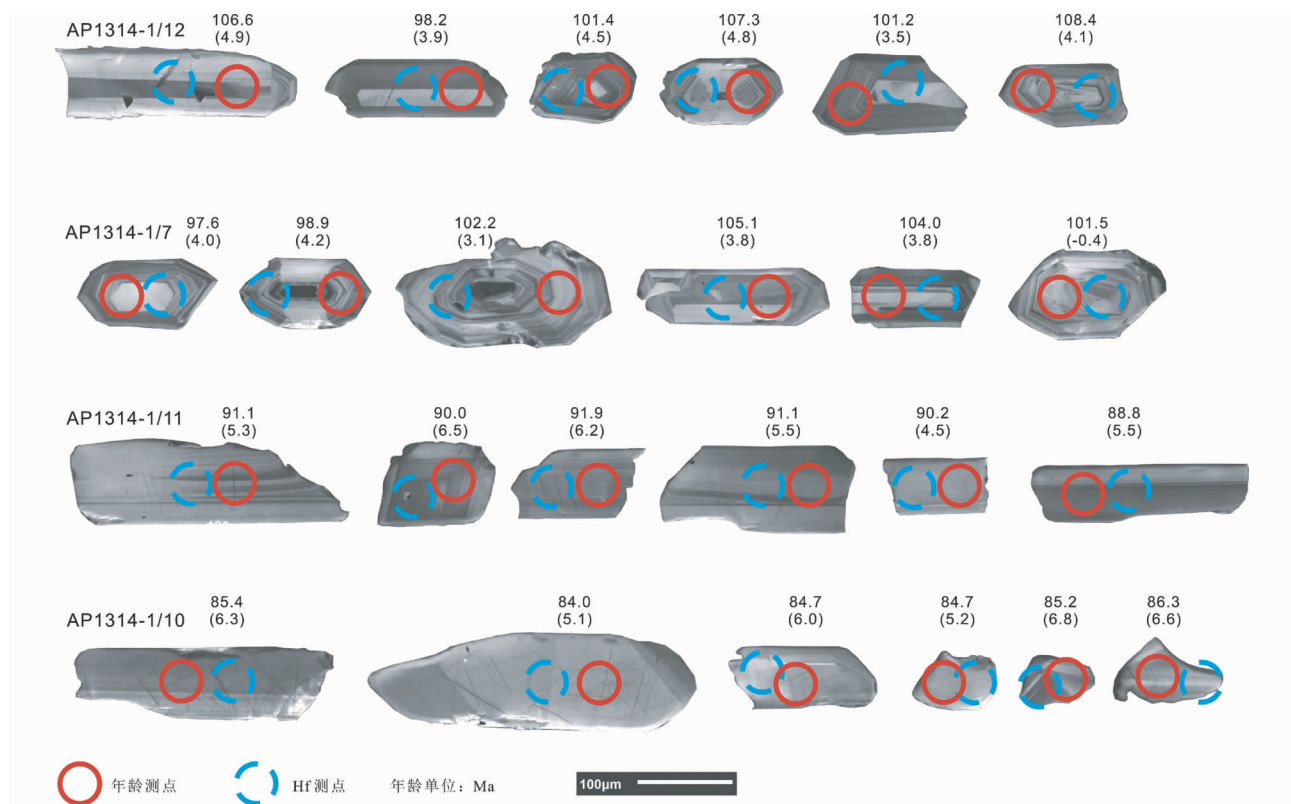


图 4 屈韦维尔岛火山岩、岩脉及捕掳体中典型锆石的阴极发光图像

Fig. 4 Cathodoluminescence images of representative zircons from volcanic rocks, veins and xenoliths of Curverville Island

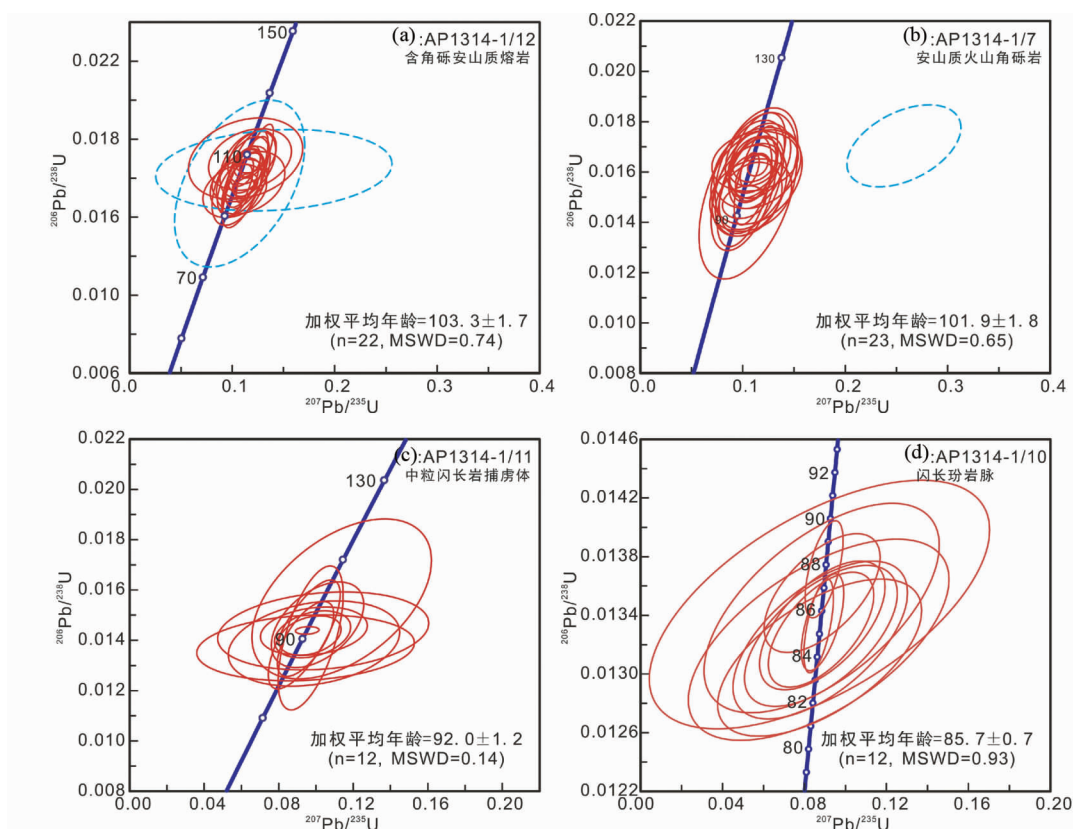


图5 屈韦维尔岛火山岩、岩脉及捕虏体中锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 U-Pb concordia diagram of zircons from volcanic rocks, veins and xenoliths of Curverville Island

4 分析结果

本文对上述4件样品进行了锆石 U-Pb 同位素测年和原位 Hf 同位素分析, 数据分析参数及结果列于表1、表2。

4.1 锆石 U-Pb 年代学

样品 AP1314-1/12 挑选出的锆石颗粒为 150 粒, 24 粒用于 U-Pb 测年。CL 图像显示锆石呈长柱状或短柱状(图4), 锆石颗粒长轴长 130 ~ 270 μm , 长宽比为 1 : 3.3 ~ 1 : 1.1。锆石无色, 透明至半透明, 大多数锆石可见明显的振荡环带。根据测试结果, 24 个分析点中有 1 个年龄谐和度低于 90% 舍弃(图5a 中的虚线圈, 表1), 1 个点误差过大而同样舍弃(图5a 中的虚线圈, 表1), 剩余 22 个分析点均落在一致曲线上或其附近, 显示出很好的和谐性。锆石的 Th、U 含量分别为 $56 \times 10^{-6} \sim 385 \times 10^{-6}$ 和 $109 \times 10^{-6} \sim 405 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.47 ~ 1.09, 表明它们均属于典型的岩浆锆石(Hoskin and Black, 2000; Wu and Zheng, 2004)。所测定的 22 个锆石数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 98.2 ~ 109.1 Ma 之间, 计算的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $103.3 \pm 1.7 \text{ Ma}$ ($n = 22$, MSWD = 0.74)(图5a), 该年龄可以代表屈韦维尔岛的火山作用年龄。

样品 AP1314-1/7 挑选出的锆石颗粒为 150 粒, 24 粒用于 U-Pb 测年。CL 图像显示锆石呈长柱状或菱形(图4), 锆石颗粒长轴长 120 ~ 220 μm , 长宽比为 1 : 3.5 ~ 1 : 1.2。锆石无色, 透明至半透明, 大多数锆石可见明显的振荡环带, 部分锆石可见暗色继承核。根据测试结果, 24 个分析点中有 1 个年龄谐和度低于 90% 舍弃(图5b 中的虚线圈, 表1), 剩余 23 个分析点均落在一致曲线上或其附近, 显示出很好的和谐性。锆石的 Th、U 含量分别为 $65 \times 10^{-6} \sim 337 \times 10^{-6}$ 和 $106 \times 10^{-6} \sim 330 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.48 ~ 1.02, 具有典型岩浆锆石的高 Th/U 比值特征。所测定的 23 个锆石数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 94.7 ~ 106.2 Ma 之间, 计算的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $101.9 \pm 1.8 \text{ Ma}$ ($n = 23$, MSWD = 0.65)(图5b), 这个年龄同样可以代表屈韦维尔岛的火山作用年龄。

样品 AP1314-1/11 挑选出的锆石颗粒为 150 粒, 12 粒用于 U-Pb 测年。CL 图像显示锆石呈长柱状或菱形(图4), 锆石颗粒长轴长 100 ~ 240 μm , 长宽比为 1 : 3.3 ~ 1 : 1。锆石无色, 透明至半透明, 部分锆石振荡环带清晰。根据测试结果, 12 个分析点均落在一致曲线上或其附近, 和谐性很好。锆石的 Th、U 含量分别为 $49 \times 10^{-6} \sim 342 \times 10^{-6}$ 和 $75 \times 10^{-6} \sim 296 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.65 ~ 1.29, 具有典型岩浆锆石的高 Th/U 比值特征。所测定的 12 个锆石数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$

表1 屈韦维尔岛火山-侵入杂岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic compositions from volcanic rocks, veins and xenoliths of Curruvill Island

测点号	Pb	²³² Th	²³⁸ U	Th/U	同位素比值				年龄(Ma)				谐和度				
					²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U			²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U			
					1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ		1σ	1σ		
API314-1/7-1	3.67	136	218	0.63	0.0483	0.0075	0.1075	0.0201	0.0155	0.0013	116.8	338.8	103.7	18.4	98.9	8.0	95%
API314-1/7-2	2.11	74	133	0.56	0.0496	0.0087	0.1010	0.0211	0.0153	0.0016	189.0	353.7	97.7	19.5	97.6	10.0	99%
API314-1/7-3	2.92	93	158	0.59	0.0544	0.0066	0.1127	0.0140	0.0159	0.0013	387.1	269.4	108.5	12.7	101.5	8.2	93%
API314-1/7-4	6.42	337	330	1.02	0.0492	0.0028	0.1067	0.0061	0.0161	0.0004	166.8	141.6	103.0	5.6	102.9	2.8	99%
API314-1/7-5	2.70	85	147	0.58	0.0514	0.0121	0.1142	0.0281	0.0162	0.0011	257.5	466.6	109.8	25.6	103.3	6.7	93%
API314-1/7-6	3.17	107	165	0.65	0.0573	0.0101	0.1131	0.0176	0.0160	0.0010	501.9	394.4	108.8	16.1	102.2	6.0	93%
API314-1/7-7	3.44	96	192	0.50	0.0562	0.0149	0.1134	0.0266	0.0161	0.0016	461.2	500.0	109.0	24.3	103.1	10.1	94%
API314-1/7-8	2.65	86	150	0.57	0.0454	0.0067	0.1017	0.0176	0.0152	0.0014	error		98.3	16.2	97.4	9.2	99%
API314-1/7-9	3.95	122	214	0.57	0.0509	0.0067	0.1122	0.0147	0.0165	0.0006	235.3	287.0	108.0	13.4	105.6	3.8	97%
API314-1/7-10	2.83	89	151	0.59	0.0524	0.0110	0.1119	0.0191	0.0166	0.0010	301.9	422.2	107.7	17.4	106.2	6.1	98%
API314-1/7-11	2.56	68	142	0.48	0.0486	0.0108	0.1121	0.0278	0.0164	0.0008	127.9	461.1	107.9	25.4	105.0	5.0	97%
API314-1/7-12	3.27	113	169	0.67	0.0556	0.0193	0.1134	0.0294	0.0158	0.0012	435.2	631.1	109.1	26.8	101.0	7.9	92%
API314-1/7-13	4.72	176	250	0.70	0.0511	0.0029	0.1147	0.0065	0.0163	0.0003	255.6	129.6	110.2	5.9	104.0	1.8	94%
API314-1/7-14	2.72	95	149	0.64	0.0522	0.0053	0.1103	0.0115	0.0158	0.0006	300.1	226.8	106.2	10.5	101.0	4.0	94%
API314-1/7-15	3.32	121	193	0.63	0.0502	0.0071	0.1012	0.0139	0.0148	0.0004	211.2	290.7	97.9	12.8	94.7	2.7	96%
API314-1/7-16	3.37	110	191	0.58	0.0549	0.0167	0.1078	0.0264	0.0151	0.0010	405.6	567.5	103.9	24.2	96.5	6.0	92%
API314-1/7-17	1.85	65	106	0.61	0.0463	0.0129	0.1058	0.0215	0.0149	0.0010	13.1	562.9	102.1	19.8	95.5	6.2	93%
API314-1/7-18	1.69	71	107	0.67	0.0562	0.0116	0.1052	0.0316	0.0151	0.0022	457.5	403.7	101.6	29.1	96.3	13.9	94%
API314-1/7-19	2.10	73	114	0.64	0.0554	0.0140	0.1065	0.0241	0.0153	0.0012	427.8	481.4	102.8	22.1	97.8	7.7	95%
API314-1/7-20	4.63	106	202	0.53	0.1079	0.0111	0.2572	0.0367	0.0170	0.0011	1764.5	188.9	232.4	29.7	108.9	6.8	27%
API314-1/7-21	2.35	75	134	0.56	0.0510	0.0065	0.1075	0.0138	0.0158	0.0006	239.0	270.3	103.6	12.6	101.3	3.6	97%
API314-1/7-22	3.11	94	171	0.55	0.0534	0.0102	0.1145	0.0180	0.0166	0.0012	346.4	381.4	110.0	16.4	106.0	7.5	96%
API314-1/7-23	3.07	125	165	0.76	0.0527	0.0103	0.1166	0.0200	0.0164	0.0010	316.7	390.4	112.0	18.1	105.1	6.2	93%
API314-1/7-24	3.59	153	189	0.81	0.0502	0.0073	0.1100	0.0158	0.0163	0.0005	211.2	298.1	106.0	14.4	104.0	3.4	98%
API314-1/12-1	2.71	83	158	0.53	0.0519	0.0050	0.1056	0.0100	0.0155	0.0010	283.4	215.7	102.0	9.2	99.4	6.4	97%
API314-1/12-2	2.13	60	126	0.48	0.0543	0.0101	0.1150	0.0241	0.0158	0.0011	383.4	371.9	110.5	21.9	100.9	6.7	90%
API314-1/12-3	1.95	56	109	0.51	0.0512	0.0076	0.1081	0.0156	0.0159	0.0010	250.1	311.1	104.3	14.3	101.8	6.5	97%
API314-1/12-4	4.95	208	256	0.81	0.0541	0.0062	0.1143	0.0137	0.0165	0.0013	376.0	261.1	109.8	12.5	105.5	8.3	95%
API314-1/12-5	1.66	47	108	0.44	0.0505	0.0139	0.1073	0.0419	0.0157	0.0028	216.7	549.9	103.5	38.4	100.6	17.9	97%
API314-1/12-6	3.51	114	210	0.54	0.0488	0.0065	0.1087	0.0187	0.0159	0.0015	200.1	233.3	104.7	17.1	101.4	9.5	96%
API314-1/12-7	2.29	72	126	0.57	0.0554	0.0060	0.1220	0.0119	0.0168	0.0013	427.8	242.6	116.9	10.8	107.1	8.4	91%
API314-1/12-8	2.40	90	139	0.65	0.0475	0.0077	0.1025	0.0205	0.0153	0.0009	72.3	344.4	99.1	18.9	98.2	5.7	99%
API314-1/12-9	8.23	385	405	0.95	0.0491	0.0031	0.1089	0.0070	0.0162	0.0004	153.8	144.4	105.0	6.4	103.3	2.4	98%
API314-1/12-10	4.09	134	210	0.64	0.0505	0.0036	0.1147	0.0086	0.0168	0.0005	220.4	160.2	110.3	7.8	107.3	3.1	97%
API314-1/12-11	4.07	126	202	0.62	0.0528	0.0094	0.1152	0.0180	0.0167	0.0011	320.4	359.2	110.7	16.4	106.9	7.1	96%
API314-1/12-12	6.37	321	295	1.09	0.0513	0.0030	0.1184	0.0074	0.0167	0.0004	257.5	133.3	113.6	6.7	106.6	2.6	93%

续表 1
Continued Table 1

测点号	Pb	²³² Th	²³⁸ U	Th/U	同位素比值				年龄(Ma)				1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	谐和度		
					1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U					
API314-1/12-13	2.90	93	142	0.66	0.0510	0.0073	0.1194	0.0156	0.0171	0.0009	239.0	300.0	114.5	14.1	109.1	5.7	95%
API314-1/12-14	4.13	163	219	0.74	0.0529	0.0036	0.1126	0.0081	0.0157	0.0004	327.8	153.7	108.3	7.4	100.1	2.5	92%
API314-1/12-15	2.28	67	119	0.57	0.0662	0.0321	0.1407	0.0761	0.0164	0.0014	813.0	779.3	133.6	67.9	104.9	8.7	75%
API314-1/12-16	3.59	113	195	0.58	0.0524	0.0056	0.1132	0.0114	0.0163	0.0007	301.9	244.4	108.9	10.4	104.1	4.3	95%
API314-1/12-17	3.76	126	189	0.67	0.0516	0.0084	0.1072	0.0177	0.0159	0.0007	333.4	272.2	103.4	16.2	101.6	4.5	98%
API314-1/12-18	3.26	103	164	0.63	0.0490	0.0099	0.1173	0.0267	0.0170	0.0010	146.4	418.5	112.7	24.3	108.4	6.6	96%
API314-1/12-19	4.18	144	228	0.63	0.0529	0.0031	0.1113	0.0065	0.0155	0.0003	324.1	135.2	107.2	6.0	99.3	2.1	92%
API314-1/12-20	3.65	110	189	0.58	0.0500	0.0039	0.1187	0.0101	0.0170	0.0005	194.5	-17.6	113.9	9.1	108.4	2.9	95%
API314-1/12-21	4.38	159	245	0.65	0.0523	0.0064	0.1085	0.0124	0.0158	0.0012	298.2	268.5	104.6	11.4	101.2	7.7	96%
API314-1/12-22	3.42	105	189	0.56	0.0516	0.0068	0.1072	0.0143	0.0155	0.0010	333.4	212.9	103.4	13.1	99.4	6.2	96%
API314-1/12-23	3.26	87	186	0.47	0.0582	0.0097	0.1132	0.0150	0.0158	0.0015	538.9	376.8	108.9	13.7	101.0	9.8	92%
API314-1/12-24	3.26	101	167	0.60	0.0465	0.0122	0.1131	0.0368	0.0170	0.0014	33.4	533.3	108.8	33.5	108.7	8.7	99%
API314-1/11-1	1.83	97	112	0.87	0.0510	0.0068	0.0944	0.0100	0.0141	0.0010	239.0	281.5	91.6	9.3	90.0	6.2	98%
API314-1/11-2	2.70	168	159	1.06	0.0527	0.0107	0.0989	0.0189	0.0144	0.0006	322.3	398.1	95.7	17.5	91.9	4.0	95%
API314-1/11-3	1.25	49	75	0.65	0.0569	0.0259	0.1039	0.0374	0.0144	0.0010	500.0	764.8	100.4	34.4	92.0	6.5	91%
API314-1/11-4	2.92	157	167	0.94	0.0490	0.0060	0.0982	0.0135	0.0142	0.0006	146.4	262.9	95.1	12.5	91.1	3.9	95%
API314-1/11-5	1.98	107	111	0.96	0.0434	0.0033	0.0937	0.0127	0.0142	0.0014	error	error	91.0	11.8	91.1	9.1	99%
API314-1/11-6	2.85	166	169	0.98	0.0454	0.0154	0.0944	0.0386	0.0137	0.0009	error	error	91.6	35.8	87.7	5.5	95%
API314-1/11-7	5.31	342	296	1.15	0.0482	0.0047	0.0968	0.0110	0.0142	0.0005	109.4	214.8	93.8	10.2	90.8	3.3	96%
API314-1/11-8	1.94	93	114	0.81	0.0479	0.0023	0.0953	0.0042	0.0144	0.0001	94.5	111.1	92.4	3.9	92.1	0.6	99%
API314-1/11-9	2.37	122	150	0.82	0.0422	0.0110	0.0971	0.0115	0.0141	0.0019	error	error	94.1	10.7	90.2	12.0	95%
API314-1/11-10	2.63	143	145	0.98	0.0550	0.0135	0.1008	0.0164	0.0146	0.0011	413.0	470.3	97.5	15.1	93.5	7.1	95%
API314-1/11-11	2.02	91	109	0.83	0.0649	0.0191	0.1138	0.0318	0.0156	0.0021	772.2	522.2	109.4	29.0	100.1	13.3	91%
API314-1/11-12	4.09	284	221	1.29	0.0518	0.0170	0.0989	0.0304	0.0139	0.0011	276.0	624.0	95.8	28.1	88.8	7.1	92%
API314-1/10-1	8.80	839	459	1.83	0.0473	0.0016	0.0869	0.0029	0.0133	0.0001	63.7	79.1	84.6	2.9	85.4	0.8	100.9%
API314-1/10-2	2.22	157	128	1.23	0.0474	0.0063	0.0886	0.0116	0.0136	0.0002	69.7	316.5	86.2	11.3	86.8	1.1	100.7%
API314-1/10-3	1.08	71	69	1.03	0.0476	0.0165	0.0869	0.0260	0.0132	0.0003	81.0	820.9	84.6	25.3	84.7	1.8	100.2%
API314-1/10-4	0.98	60	57	1.05	0.0470	0.0245	0.0873	0.0339	0.0135	0.0003	48.5	1243.2	85.0	33.0	86.3	2.2	101.5%
API314-1/10-5	5.02	371	301	1.23	0.0482	0.0023	0.0888	0.0042	0.0134	0.0001	110.6	110.7	86.4	4.1	85.5	0.9	99%
API314-1/10-6	2.19	164	133	1.23	0.0482	0.0073	0.0887	0.0125	0.0133	0.0002	111.5	355.8	86.3	12.2	85.4	1.1	99%
API314-1/10-7	9.76	1154	457	2.53	0.0474	0.0020	0.0895	0.0038	0.0137	0.0001	67.0	100.2	87.1	3.7	87.8	0.9	100.8%
API314-1/10-8	1.04	58	62	0.94	0.0476	0.0133	0.0884	0.0235	0.0134	0.0003	81.7	663.4	86.0	22.8	86.1	1.9	100.1%
API314-1/10-9	1.42	107	88	1.22	0.0483	0.0123	0.0874	0.0203	0.0131	0.0002	115.6	599.5	85.1	19.8	84.0	1.4	98.7%
API314-1/10-10	3.70	314	218	1.44	0.0480	0.0057	0.0881	0.0105	0.0133	0.0002	99.9	282.6	85.7	10.2	85.2	1.0	99.4%
API314-1/10-11	0.96	59	69	0.85	0.0481	0.0109	0.0877	0.0174	0.0132	0.0002	102.2	535.4	85.3	16.9	84.7	1.4	99.3%
API314-1/10-12	1.29	87	83	1.05	0.0481	0.0095	0.0880	0.0152	0.0133	0.0002	105.5	468.8	85.6	14.8	84.9	1.3	99.2%

表 2 屈韦维尔岛火山-侵入杂岩锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic compositions from volcanic rocks, veins and xenoliths of Curverville Island

测点号	年龄 (Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	t _{DM1} (Ma)	t _{DM2} (Ma)	f _{Lu/Hf}
API314-1/7-1	98.9	0.037999	0.001729	0.282834	0.000021	2.2	4.2	605	791	-0.95
API314-1/7-2	97.6	0.032298	0.001520	0.282827	0.000022	2.0	4.0	610	803	-0.95
API314-1/7-3	101.5	0.020700	0.000962	0.282698	0.000042	-2.6	-0.4	783	1054	-0.97
API314-1/7-4	102.9	0.023862	0.001141	0.282798	0.000016	0.9	3.1	646	857	-0.97
API314-1/7-5	103.3	0.033794	0.001570	0.282828	0.000022	2.0	4.1	611	800	-0.95
API314-1/7-6	102.2	0.028301	0.001349	0.282798	0.000019	0.9	3.1	650	859	-0.96
API314-1/7-7	103.1	0.034406	0.001586	0.282804	0.000021	1.1	3.3	645	848	-0.95
API314-1/7-8	97.4	0.049566	0.002234	0.282803	0.000026	1.1	3.1	657	853	-0.93
API314-1/7-9	105.6	0.043147	0.001920	0.282829	0.000020	2.0	4.2	615	799	-0.94
API314-1/7-10	106.2	0.028985	0.001387	0.282812	0.000018	1.4	3.6	631	830	-0.96
API314-1/7-11	105.0	0.028634	0.001357	0.282827	0.000020	1.9	4.2	608	800	-0.96
API314-1/7-12	101.0	0.025956	0.001215	0.282815	0.000021	1.5	3.7	623	825	-0.96
API314-1/7-13	104.0	0.038685	0.001739	0.282818	0.000018	1.6	3.8	628	821	-0.95
API314-1/7-14	101.0	0.030268	0.001414	0.282794	0.000020	0.8	2.9	656	866	-0.96
API314-1/7-15	94.7	0.033600	0.001542	0.282805	0.000017	1.2	3.2	643	848	-0.95
API314-1/7-16	96.5	0.042107	0.001912	0.282786	0.000020	0.5	2.5	677	886	-0.94
API314-1/7-17	95.5	0.028933	0.001354	0.282817	0.000023	1.6	3.6	623	824	-0.96
API314-1/7-18	96.3	0.026080	0.001228	0.282795	0.000021	0.8	2.9	652	866	-0.96
API314-1/7-19	97.8	0.026445	0.001242	0.282798	0.000022	0.9	3.0	647	859	-0.96
API314-1/7-20	108.9	0.041053	0.001874	0.282808	0.000021	1.3	3.5	644	838	-0.94
API314-1/7-21	101.3	0.035928	0.001649	0.282794	0.000020	0.8	2.9	661	868	-0.95
API314-1/7-22	106.0	0.038921	0.001797	0.282784	0.000020	0.4	2.6	678	887	-0.95
API314-1/7-23	105.1	0.023525	0.001095	0.282815	0.000024	1.5	3.8	621	822	-0.97
API314-1/7-24	104.0	0.026141	0.001241	0.282821	0.000020	1.7	3.9	615	812	-0.96
API314-1/12-1	99.4	0.032723	0.001473	0.282842	0.000021	2.5	4.5	589	774	-0.96
API314-1/12-2	100.9	0.043627	0.002038	0.282833	0.000022	2.1	4.2	611	793	-0.94
API314-1/12-3	101.8	0.034378	0.001567	0.282791	0.000021	0.7	2.8	664	874	-0.95
API314-1/12-4	105.5	0.039076	0.001789	0.282820	0.000016	1.7	3.9	626	816	-0.95
API314-1/12-5	100.6	0.075817	0.003303	0.282812	0.000021	1.4	3.4	664	839	-0.90
API314-1/12-6	101.4	0.034635	0.001603	0.282838	0.000025	2.3	4.5	596	780	-0.95
API314-1/12-7	107.1	0.023544	0.001108	0.282800	0.000025	1.0	3.2	643	853	-0.97
API314-1/12-8	98.2	0.030881	0.001395	0.282825	0.000021	1.9	3.9	612	807	-0.96
API314-1/12-9	103.3	0.036417	0.001649	0.282824	0.000023	1.8	4.0	617	807	-0.95
API314-1/12-10	107.3	0.038437	0.001785	0.282845	0.000021	2.6	4.8	590	766	-0.95
API314-1/12-11	106.9	0.027228	0.001286	0.282822	0.000024	1.8	4.0	614	809	-0.96
API314-1/12-12	106.6	0.026814	0.001245	0.282848	0.000020	2.7	4.9	577	759	-0.96
API314-1/12-13	109.1	0.027786	0.001295	0.282834	0.000020	2.2	4.5	597	784	-0.96
API314-1/12-14	100.1	0.044763	0.002041	0.282840	0.000022	2.4	4.5	601	779	-0.94
API314-1/12-15	104.9	0.017315	0.000875	0.282817	0.000019	1.6	3.8	615	819	-0.97
API314-1/12-16	104.1	0.033724	0.001584	0.282831	0.000025	2.1	4.3	606	793	-0.95
API314-1/12-17	101.6	0.022046	0.001026	0.282827	0.000020	2.0	4.1	603	800	-0.97
API314-1/12-18	108.4	0.043606	0.001949	0.282832	0.000022	2.1	4.4	611	791	-0.94
API314-1/12-19	99.3	0.028480	0.001358	0.282839	0.000023	2.4	4.4	592	779	-0.96
API314-1/12-20	108.4	0.030787	0.001422	0.282825	0.000022	1.9	4.1	613	804	-0.96
API314-1/12-21	101.2	0.028612	0.001326	0.282810	0.000022	1.3	3.5	632	835	-0.96

续表 2

Continued Table 2

测点号	年龄 (Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM1} (Ma)	<i>t</i> _{DM2} (Ma)	<i>f</i> _{Lu/Hf}
AP1314-1/12-22	99.4	0.027780	0.001319	0.282832	0.000018	2.1	4.2	601	793	-0.96
AP1314-1/12-23	101.0	0.034954	0.001689	0.282814	0.000019	1.5	3.6	633	829	-0.95
AP1314-1/12-24	108.7	0.037256	0.001691	0.282810	0.000031	1.3	3.6	638	834	-0.95
AP1314-1/11-1	90.0	0.107616	0.004265	0.282908	0.000028	4.8	6.5	534	655	-0.87
AP1314-1/11-2	91.9	0.080044	0.003235	0.282895	0.000024	4.4	6.2	537	676	-0.90
AP1314-1/11-3	92.0	0.045014	0.001857	0.282890	0.000023	4.2	6.1	525	682	-0.94
AP1314-1/11-4	91.1	0.074797	0.003047	0.282870	0.000022	3.5	5.3	572	726	-0.91
AP1314-1/11-5	91.1	0.056899	0.002320	0.282875	0.000023	3.6	5.5	554	714	-0.93
AP1314-1/11-6	87.7	0.078142	0.003178	0.282858	0.000025	3.0	4.8	593	752	-0.90
AP1314-1/11-7	90.8	0.130924	0.005226	0.282891	0.000037	4.2	5.9	577	693	-0.84
AP1314-1/11-8	92.1	0.047232	0.001959	0.282868	0.000026	3.4	5.3	558	726	-0.94
AP1314-1/11-9	90.2	0.066560	0.002733	0.282848	0.000027	2.7	4.5	600	769	-0.92
AP1314-1/11-10	93.5	0.067412	0.002741	0.282852	0.000023	2.8	4.7	594	760	-0.92
AP1314-1/11-11	100.1	0.063357	0.002609	0.282887	0.000021	4.1	6.1	541	689	-0.92
AP1314-1/11-12	88.8	0.149285	0.005827	0.282883	0.000028	3.9	5.5	600	710	-0.82
AP1314-1/10-01	85.4	0.288094	0.010925	0.282960	0.000031	6.6	7.9	563	575	-0.67
AP1314-1/10-03	84.7	0.048711	0.001982	0.282892	0.000024	4.3	6.0	524	681	-0.94
AP1314-1/10-04	86.3	0.068261	0.002937	0.282911	0.000020	4.9	6.6	510	647	-0.91
AP1314-1/10-6	85.4	0.067139	0.002679	0.282901	0.000022	4.6	6.3	521	665	-0.92
AP1314-1/10-7	87.8	0.202617	0.007878	0.282902	0.000031	4.6	6.1	607	679	-0.76
AP1314-1/10-8	86.1	0.078128	0.003129	0.282879	0.000022	3.8	5.5	560	709	-0.91
AP1314-1/10-9	84.0	0.095390	0.003932	0.282869	0.000028	3.4	5.1	589	733	-0.88
AP1314-1/10-10	85.2	0.081591	0.003348	0.282918	0.000030	5.2	6.8	505	635	-0.90
AP1314-1/10-11	84.7	0.040254	0.001673	0.282870	0.000026	3.5	5.2	552	725	-0.95
AP1314-1/10-12	84.9	0.061684	0.002492	0.282862	0.000032	3.2	4.9	575	741	-0.92

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(0) = [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} - 1] \times 10^4$; $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (\text{e}^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (\text{e}^{\lambda t} - 1)] - 1 \} \times 10^4$; $t_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \}$; $t_{\text{DM2}} = t_{\text{DM1}} - (t_{\text{DM1}} - t) \times [(f_{\text{cc}} f_{\text{S}}) / (f_{\text{cc}} f_{\text{DM}})]$; $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$; 其中: $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 为样品测量值, t 为锆石结晶年龄, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} = 0.282772$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$ (Blichert-Toft and Albarède, 1997; Griffin *et al.*, 2000), $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Söderlund *et al.*, 2004), $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{C}} = 0.015$, $f_{\text{cc}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{C}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$, $f_{\text{S}} = f_{\text{Lu/Hf}}$, $f_{\text{DM}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$

²³⁸U 年龄变化于 87.7 ~ 100.1Ma 之间,计算的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 92.0 ± 1.2Ma (n = 12, MSWD = 0.14) (图 5c),这个年龄可以代表屈韦维尔岛深成侵入体的结晶年龄。

样品 AP1314-1/10 挑选出的所有锆石颗粒共 55 粒,12 粒用于 U-Pb 测年。CL 图像显示,锆石颗粒大小不一,部分呈长柱状,部分熔蚀严重呈港湾状(图 4),锆石颗粒长轴长 80 ~ 350μm,长宽比为 1 : 3.6 ~ 1 : 1.2。锆石无色,透明至半透明,振荡环带不明显。根据测试结果,12 个分析点锆石的 Th、U 含量分别为 57.9 × 10⁻⁶ ~ 1154.4 × 10⁻⁶ 和 56.5 × 10⁻⁶ ~ 458.8 × 10⁻⁶,Th/U 比值为 0.85 ~ 2.53,具有典型岩浆锆石的高 Th/U 比值特征。所测定的 12 个锆石数据点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化于 84.0 ~ 87.8Ma 之间,计算的

²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 85.7 ± 0.7Ma (n = 12, MSWD = 0.93) (图 5d),代表屈韦维尔岛闪长玢岩脉的侵位时间。

4.2 锆石 Hf 同位素

样品 AP1314-1/12 对已进行 U-Pb 测年的 22 颗锆石再进行原位 Hf 同位素测试分析,可得¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 值为 0.022046 ~ 0.044763,¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值为 0.001026 ~ 0.002041,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282791 ~ 0.282848,其 ε_{Hf}(*t*) 值为 2.8 ~ 4.9,*f*_{Lu/Hf} 值为 -0.97 ~ -0.94,一阶段 Hf 模式年龄 (*t*_{DM1}) 为 577 ~ 664Ma,两阶段 Hf 模式年龄 (*t*_{DM2}) 为 759 ~ 874Ma (图 6)。

样品 AP1314-1/7 对已进行 U-Pb 测年的 23 颗锆石再进

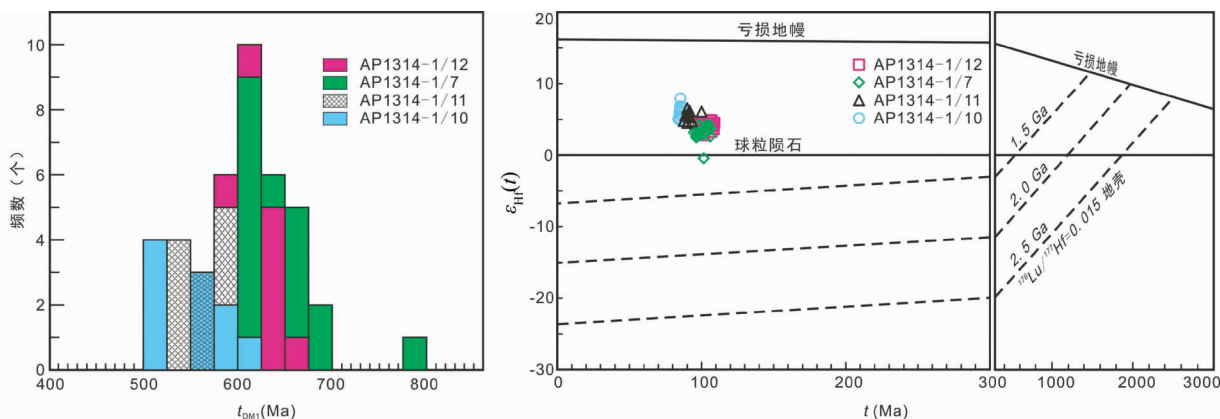


图6 屈韦维尔岛火山岩、岩脉及捕虏体的锆石 t_{DM1} 直方图和 $\varepsilon_{Hf}(t)$ - t 值

Fig. 6 Zircon t_{DM1} histogram and $\varepsilon_{Hf}(t)$ values vs. t (Ma) diagram from volcanic rocks, veins and xenoliths of Curverville Island

行原位 Hf 同位素测试分析, 可得除 1 个测点 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 -0.4 (一阶段 Hf 模式年龄为 783Ma , 二阶段 Hf 模式年龄为 1054Ma) (图 6), 误差较大可以忽略外, 其余 22 个测点的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.023525 \sim 0.049566$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.001095 \sim 0.002234$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282784 \sim 0.282834$, 其 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 $2.5 \sim 4.2$, $f_{Lu/Hf}$ 值为 $-0.97 \sim -0.93$, 一阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM1}) 为 $605 \sim 678\text{Ma}$, 两阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 为 $791 \sim 887\text{Ma}$ 。

样品 AP1314-1/11 对已进行 U-Pb 测年的 12 颗锆石再进行原位 Hf 同位素测试分析, 可得 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.045014 \sim 0.149285$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.001857 \sim 0.005827$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282848 \sim 0.282908$, 其 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 $4.5 \sim 6.5$, $f_{Lu/Hf}$ 值为 $-0.94 \sim -0.82$, 一阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM1}) 为 $525 \sim 600\text{Ma}$, 两阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 为 $655 \sim 769\text{Ma}$ 。

样品 AP1314-1/10 对已进行 U-Pb 测年的 12 颗锆石中选取 10 颗锆石再进行原位 Hf 同位素测试分析, 可得 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.040254 \sim 0.288094$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.001673 \sim 0.010925$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282862 \sim 0.282960$, 其 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 $4.9 \sim 7.9$, $f_{Lu/Hf}$ 值为 $-0.95 \sim -0.67$, 一阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM1}) 为 $505 \sim 607\text{Ma}$, 两阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 为 $575 \sim 741\text{Ma}$ 。

综上所述, 4 件样品共 66 个原位 Hf 同位素测点中, 有 11 个测点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值大于 0.003000 , 最大的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.010925 , 其余所有锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.003000 , 其平均值为 0.002225 , 表明锆石在形成后具有少量放射成因的 Hf 积累, 因此所测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值能代表锆石形成时期的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值 (吴福元等, 2007a)。

5 讨论

5.1 侵入序列

西南极白垩纪火山岩作用主要集中在南极半岛的帕

默地南部、格雷厄姆地西部及其北侧的南设得兰群岛。在南设得兰群岛地区, 白垩纪火山作用主要发生在西南部的利文斯顿岛、格林尼治岛 (Greenwich Island)、罗伯特岛 (Robert Island) 和纳尔逊岛 (Nelson Island) (Leat *et al.*, 1995; 胡世玲等, 1995; 郑祥身等, 1998; Zheng *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2009; Kraus *et al.*, 2010), 形成了如利文斯顿岛东部的鲍勒斯山组 (Mount Bowles Formation) 的火山岩系, 该岩系以玄武安山质熔岩和火山碎屑岩为主, 并包含与其共生的超浅成侵入岩套 (郑祥身等, 1997)。在格雷厄姆地西部, 流纹质熔结凝灰岩及钙碱性花岗质岩石零星出露, 其锆石 U-Pb 年龄介于 $117 \sim 74\text{Ma}$ 之间。在帕默地南部, 超过 $100 \times 800\text{km}^2$ 面积范围内广泛分布有白垩纪中期 (岩浆作用峰期年龄为 110Ma 和 100Ma) 岩浆作用形成的拉西特海岸侵入岩套 (Lassiter Coaster Intrusive Suite) (Vennum and Rowley, 1986; Vaughan *et al.*, 2012a) 等, 该岩套的岩性从辉长岩变化到花岗岩, 并以花岗闪长岩为主, 变质程度可达角闪岩相 (Vaughan *et al.*, 2012b)。

屈韦维尔岛位于格雷厄姆地西部, 火山岩和侵入岩脉分布广泛。本次研究获得含角砾安山质熔岩、安山质火山角砾岩、中粒闪长岩捕虏体和闪长玢岩脉的形成年龄分别为 $103.3 \pm 1.7\text{Ma}$, $101.9 \pm 1.8\text{Ma}$, $92.0 \pm 1.2\text{Ma}$ 和 $85.7 \pm 0.65\text{Ma}$ 。结合野外接触关系可以推断, 在 102Ma 左右, 屈韦维尔岛经历过一次强烈的火山作用。随后, 火山岩被多条闪长玢岩脉所切割, 其侵位年龄为 86Ma 左右。岩脉捕获较大小不等的中细粒闪长岩捕虏体, 锆石年龄为 92Ma 。所以, 屈韦维尔岛存在明显的三幕火山岩浆作用事件: 首先火山活动发生在早白垩世晚期 (102Ma), 且喷发时间较短, 随后在晚白垩世早期 (92Ma , 86Ma) 发生两幕中性岩浆侵入事件, 代表了南极半岛中部岩浆弧构造域中-新生代火山岩浆作用的典型时期。本岛南西 45° 方位约 85km 处的玛利亚山 (Mount De Emaria) 出露的花岗闪长岩和蒂克森角 (Cape Tuxen) 出露的石英闪长岩均获得约 85Ma 的锆石 U-Pb 年龄 (Tangeman and Mukasa, 1996), 证实第三幕侵入作用在南极半岛广泛

存在。

5.2 岩浆源区示踪

由于锆石 Lu-Hf 同位素体系具有较高的封闭温度, 不同物源的锆石其 Hf 同位素组成可能有所差异, 且相对于 U-Pb 同位素体系其更不易被后期流体、热事件改造 (Harrison *et al.*, 2005), 因此锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 能反映出岩浆的源区特征。通常情况下, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 正值代表源区为亏损地幔或从亏损地幔中新增生的年轻地壳 (第五春荣等, 2012), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 负值代表源区为古老地壳 (吴福元等, 2007a, b), 正负变化较大的宽泛 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值域很可能指示了壳幔混染或其它物源混染的特征 (Hawkesworth and Kemp, 2006; 禹丽等, 2014)。所以, 锆石原位 Hf 同位素在记录地质演化历史和岩浆源区信息方面具有很好的优越性 (Griffin *et al.*, 2000; 吴福元等, 2007a, b)。

我们对屈韦维尔岛 4 件火成岩样品锆石 Hf 同位素组成进行分析, 发现各样品的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值集中分布在 0.2828 附近, 一阶段 Hf 模式年龄位于 505 ~ 678Ma 之间 (图 6), 与利文斯顿岛玄武岩的 Nd 模式年龄相近 (郑祥身等, 1996)。其中, API314-1/12 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 平均值为 4.1, 一阶段 Hf 模式年龄平均值为 612Ma; API314-1/7 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的平均值为 3.4, 一阶段 Hf 模式年龄平均值为 636Ma; API314-1/11 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 平均值为 5.5, 一阶段 Hf 模式年龄平均值为 566Ma; API314-1/10 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 平均值为 6.0, 一阶段 Hf 模式年龄平均值为 550Ma。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解上 (图 6), 66 个测点均落在球粒陨石 Hf 同位素演化线和亏损地幔演化线之间, 且后期侵入的岩脉及其捕获的捕虏体 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值比早期喷发的火山岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值较大。结合利文斯顿岛史莱夫角白垩纪中期 (90.2 ± 5.6Ma) 橄榄玄武岩的 ε_{Nd} 值为 +4.177 (郑祥身等, 1996; Smellie *et al.*, 1996), 揭示出南极半岛中部构造域白垩纪中期火山岩浆作用形成的火成岩由新元古代-寒武纪亏损地幔物质部分熔融生成。这部分地幔物质可能来源于大洋板块在俯冲过程中导致上覆的增生楔受热发生部分熔融所形成的熔体, 并具有后期岩浆侵入的熔体幔源比早期火山喷发的熔体幔源亏损程度更高的特征。

5.3 构造背景探讨

南极半岛长期以来位于冈瓦纳古陆-太平洋边缘, 在西冈瓦纳裂解初期由弧后扩张而与东南极分离 (刘小汉等, 1991), 亦是西冈瓦纳古陆最后裂解的发生地 (沈炎彬, 1998)。晚白垩世冈瓦纳彻底裂解之前, 冈瓦纳西缘由南美经南极半岛延伸至玛丽伯德地和新西兰 (McCarron and Larter, 1998), 此刻原太平洋已向南极半岛北端的冈瓦纳古陆之下俯冲增生, 在南极半岛表现为石炭纪-三叠纪的特里尼蒂半岛群和迈尔斯陡崖组 (Miers Bluff Formation) 的褶皱及亚历山大岛西部的侏罗纪-早白垩世勒梅群增生杂岩。半岛主体岩浆弧的形成与冈瓦纳古陆裂解相伴生的原太平洋

洋底板块向南极半岛西缘展布的海沟之下的俯冲有关 (Suárez, 1976), 且俯冲作用持续了整个中生代和大部分的新生代阶段, 并在侏罗纪和白垩纪早期最为强烈, 相应的岩浆和活动作用达到高峰, 此时太平洋板块、法拉隆板块和菲尼克斯板块很可能形成了简单的三联点板块体系 (Larson and Chase, 1972)。

由于新元古代晚期罗迪尼亚 (Rodinia) 超大陆的开始裂解分离, 构成了新元古代裂解体系。此时随着大洋的闭合, 两个或更多的陆块拼合成西冈瓦纳大陆, 最终在寒武纪末期 (大约 500Ma) 聚合形成冈瓦纳古陆 (Dalziel, 1992; Boger, 2011; Harley *et al.*, 2013)。在俯冲增生过程中, 古太平洋板块向南极板块之下俯冲, 蚀变的大洋板块及其上部的含水沉积物随俯冲温度和压力的升高, 形成了脱水流体, 这些流体进入到上覆的地幔楔, 降低了地幔楔橄榄岩的固相线, 发生交代作用, 并诱发地幔物质发生部分熔融, 形成了初融岩浆。在约 102Ma 时期, 初融岩浆沿火山通道经地壳直接喷出地表, 形成了现有的正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的岛弧火山岩; 在大约 92Ma 和 86Ma 期间, 新生的初融岩浆沿构造薄弱带穿过地壳上升至地表, 未受到壳源物质的明显混染, 形成了均为正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的、具有典型亏损幔源物质特征的岛弧岩浆岩, 这些岛弧火山-岩浆岩是组成南极半岛中部岛弧岩浆构造域的主体岩性之一。

6 结论

(1) 屈韦维尔岛四件火成岩样品的锆石 U-Pb 年龄分别为 101.9 ± 1.8Ma、103.3 ± 1.7Ma、92.0 ± 1.2Ma 和 85.7 ± 0.7Ma, 说明该岛发生明显的三幕火山岩浆作用事件, 反映出白垩纪中期火山岩浆作用在南极半岛中部构造域普遍存在。

(2) 屈韦维尔岛四件样品锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值 (+2.5 ~ +7.9), 一阶段 Hf 模式年龄 t_{DM2} 为 505 ~ 678Ma; 在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解中, 测点均落在球粒陨石和亏损地幔之间, 指示出该地火成岩岩浆熔体主要来源于新元古代-寒武纪亏损地幔物质的部分熔融。

(3) 屈韦维尔岛出露的火山-侵入杂岩形成于冈瓦纳古陆裂解过程所伴生的俯冲带之上的岛弧环境中, 是构成南极半岛中部岩浆弧构造域的主体岩性之一。

致谢 野外考察工作得到中国第 29 次南极考察队的支持以及美国德州大学奥斯汀分校 Ian Dalziel 教授和巴西圣保罗大学 Rudolph Trouw 教授的帮助; 论文撰写过程中得益于与中国科学院地质力学研究所张拴宏研究员、崔建军博士和西北大学第五春荣教授的讨论; 中国地质科学院矿产资源研究所王倩实验员在样品测试和分析过程中提供了帮助; 审稿人提出了宝贵的修改意见; 在此一并致谢。

References

- Barker PF. 1982. The Cenozoic subduction history of the Pacific margin of the Antarctic Peninsula; Ridge crest-trench interactions. *Journal of the Geological Society*, 139(6): 787–801
- Bell AC and King EC. 1998. New seismic data support Cenozoic rifting in George VI Sound, Antarctic Peninsula. *Geophysical Journal International*, 134(3): 889–902
- Blichert-Toft J and 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
- Boger SD. 2011. Antarctica-before and after Gondwana. *Gondwana Research*, 19(2): 335–371
- Dalziel IWD. 1992. Antarctica; A tale of two supercontinents. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 20(1): 501–526
- Davies TG. 1984. The geology of part of Northern Palmer Land. Scientific Report of the British Antarctic Survey. Cambridge: British Antarctic Survey, 103
- Diwu CR, Sun Y and Wang Q. 2012. The crustal growth and evolution of North China Craton; Revealed by Hf isotopes in detrital zircons from modern rivers. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3520–3530 (in Chinese with English abstract)
- Fan WM, Wang YJ, Guo F and Peng TP. 2003. Mesozoic mafic magmatism in Hunan-Jiangxi provinces and the lithospheric extension. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 159–169 (in Chinese with English abstract)
- Farquharson GW. 1982. Late Mesozoic sedimentation in the northern Antarctic Peninsula and its relationship to the southern Andes. *Journal of the Geological Society*, 139(6): 721–727
- Farquharson GW. 1984. Late Mesozoic, non-marine conglomeratic sequences of northern Antarctic Peninsula (The Botany Bay Group). *British Antarctic Survey Bulletin*, 65: 1–32
- Flowerdew MJ, Millar IL, Vaughan APM and Pankhurst RJ. 2005. Age and tectonic significance of the Lassiter Coast Intrusive Suite, Eastern Ellsworth Land, Antarctic Peninsula. *Antarctic Science*, 17(3): 443–452
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Achterbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle; LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147
- Harley SL, Fitzsimons ICW and Zhao Y. 2013. Antarctica and supercontinent evolution: Historical perspectives, recent advances and unresolved issues. In: Harley SL, Fitzsimons ICW and Zhao Y (eds.). *Antarctica and Supercontinent Evolution*. Geological Society, London, Special Publications, 383(1): 1–34
- Harrison TM, Blichert-Toft J, Müller W, Albarède F, Holden P and Mojzsis SJ. 2005. Heterogeneous Hadean hafnium; Evidence of continental crust at 4.4 to 4.5 Ga. *Science*, 310(5756): 1947–1950
- Hawkesworth CJ and Kemp AIS. 2006. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution. *Chemical Geology*, 226(3–4): 144–162
- Hoskin PWO and Black LP. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423–439
- Hou KJ, Li YH and Tian YR. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481–492 (in Chinese with English abstract)
- Hu SL, Zheng XS, E ML and Birkenmajer K. 1995. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar dating of the volcanic rocks from the northern coast of King George Island, West Antarctica. *Antarctic Research*, 7(4): 26–37 (in Chinese with English abstract)
- Hu ZC, Liu YS, Gao S, Liu WG, Zhang W, Tong XR, Lin L, Zong KQ, Li M, Chen HH, Zhou L and Yang L. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X-skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391–1399
- Kellogg KS and Rowley PD. 1989. Structural geology and tectonics of the Orville Coast region, southern Antarctic Peninsula, Antarctica. United States: U.S. Geological Survey Professional Paper
- Kraus S, Poblete F and Arriagada C. 2010. Dike systems and their volcanic host rocks on King George Island, Antarctica: Implications on the geodynamic history based on a multidisciplinary approach. *Tectonophysics*, 495(3–4): 269–297
- Larson RL and Chase CG. 1972. Late Mesozoic evolution of the western Pacific Ocean. *Geological Society of America Bulletin*, 83(12): 3627–3644
- Leat PT, Scarrow JH and Millar IL. 1995. On the Antarctic Peninsula batholith. *Geological Magazine*, 132(4): 399–412
- Leat PT, Flowerdew MJ, Riley TR, Whitehouse MJ, Scarrow JH and Millar IL. 2009. Zircon U-Pb dating of Mesozoic volcanic and tectonic events in north-west Palmer Land and south-west Graham Land, Antarctica. *Antarctic Science*, 21(6): 633–641
- Li HK, Geng JZ, Hao S, Zhang YQ and Li HM. 2009. Study on zircon U-Pb geochronology using laser ablation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-MC-ICPMS). *Acta Mineralogica Sinica*, 29(Suppl.): 600–601 (in Chinese)
- Liu XH, Zheng XS and E ML. 1991. Review on the geotectonic division and Gondwana Movement, Antarctica. *Antarctic Research*, 3(2): 1–9 (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
- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen; U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, Gao CG, Gao S, Xu J and Chen HH. 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546
- Ludwig KR. 2003. *ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center
- McCarron JJ and Millar IL. 1997. The age and stratigraphy of fore-arc magmatism on Alexander Island, Antarctica. *Geological Magazine*, 134(4): 507–522
- McCarron JJ and Larter RD. 1998. Late Cretaceous to Early Tertiary subduction history of the Antarctic Peninsula. *Journal of the Geological Society*, 155(2): 255–268
- Meneilly AW. 1988. Reverse fault step at Engel Peaks, Antarctic Peninsula. *Journal of Structural Geology*, 10(4): 393–403
- Pankhurst RJ, Riley TR, Fanning CM and Kelley SP. 2000. Episodic silicic volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of magmatism associated with the break-up of Gondwana. *Journal of Petrology*, 41(5): 605–625
- Riley TR and Leat PT. 1999. Large volume silicic volcanism along the proto-Pacific margin of Gondwana; Lithological and stratigraphical investigations from the Antarctic Peninsula. *Geological Magazine*, 136(1): 1–16
- Riley TR, Flowerdew MJ and Whitehouse MJ. 2012. Chrono- and lithostratigraphy of a Mesozoic-Tertiary fore- to intra-arc basin; Adelaide Island, Antarctic Peninsula. *Geological Magazine*, 149(5): 768–782
- Scarrow JH, Pankhurst RJ, Leat PT and Vaughan APM. 1996. Genesis and evolution of Antarctic Peninsula granitoids: A case study from Mount Charity, NE Palmer Land. *Antarctic Science*, 8: 193–206
- Shen YB. 1998. A paleoisthmus linking southern South America with the Antarctic Peninsula during Late Cretaceous and Early Tertiary. *Science in China (Series D)*, 41(3): 225–229
- Smellie JL and Millar IL. 1995. New K-Ar isotopic ages of schists from

- Nordenskjöld Coast, Antarctic Peninsula: Oldest part of the Trinity Peninsula Group? *Antarctic Science*, 7(2): 191–196
- Smellie JL, Pallàs R, Sùbat F and Zheng XS. 1996. Age and correlation of volcanism in central Livingston Island, South Shetland Islands: K-Ar and geochemical constraints. *Journal of South American Earth Sciences*, 9(3–4): 265–272
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoot JD and Isachsen CE. 2004. The ^{176}Lu 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
- Solari MA, Hervé F, Martinod J, Le Roux JP, Ramírez LE and Palacios C. 2008. Geotectonic evolution of the Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: Insights from analogue models. *Antarctic Science*, 20(2): 185–196
- Storey BC and Garrett SW. 1985. Crustal growth of the Antarctic Peninsula by accretion, magmatism and extension. *Geological Magazine*, 122(1): 5–14
- Suárez M. 1976. Plate-tectonic model for southern Antarctic Peninsula and its relation to southern Andes. *Geology*, 4(4): 211–214
- Tangeman JA and Mukasa SB. 1996. Zircon U-Pb geochronology of plutonic rocks from the Antarctic Peninsula: Confirmation of the presence of unexposed Paleozoic crust. *Tectonics*, 15(6): 1309–1324
- Thomson MRA and Pankhurst RJ. 1983. Age of post-Gondwanian calc-alkaline volcanism in the Antarctic Peninsula region. In: Oliver RL, James PR and Jago JB (eds.). *Antarctic Earth Science*. Cambridge: Cambridge University Press, 289–294
- Trouw RAJ, Simões LSA and Valladres CS. 1998. Metamorphic evolution of a subduction complex, South Shetland Islands, Antarctica. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(4): 475–490
- Vaughan APM, Wareham CD and Millar IL. 1997. Granitoid pluton formation by spreading of continental crust: The Wiley Glacier complex, Northwest Palmer Land, Antarctica. *Tectonophysics*, 283(1–4): 35–60
- Vaughan APM, Wareham CD, Johnson AC and Kelley SP. 1998. A Lower Cretaceous, syn-extensional magmatic source for a linear belt of positive magnetic anomalies: The Pacific Margin Anomaly (PMA), western Palmer Land, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 158(3–4): 143–155
- Vaughan APM and Storey BC. 2000. The eastern Palmer Land shear zone: A new terrane accretion model for the Mesozoic development of the Antarctic Peninsula. *Journal of the Geological Society*, 157(6): 1243–1256
- Vaughan APM, Pankhurst RJ and Fanning CM. 2002. A Mid-Cretaceous age for the Palmer Land event, Antarctic Peninsula: Implications for terrane accretion timing and Gondwana palaeolatitudes. *Journal of the Geological Society*, 159(2): 113–116
- Vaughan APM, Eagles G and Flowerdew MJ. 2012a. Evidence for a two-phase Palmer Land event from crosscutting structural relationships and emplacement timing of the Lassiter Coast Intrusive Suite, Antarctic Peninsula: Implications for mid-Cretaceous Southern Ocean plate configuration. *Tectonics*, 31(1), doi: 10.1029/2011TC003006
- Vaughan APM, Leat PT, Dean AA and Millar IL. 2012b. Crustal thickening along the West Antarctic Gondwana margin during Mid-Cretaceous deformation of the Triassic intra-oceanic Dyer Arc. *Lithos*, 142–143: 130–147
- Vennum WR and Rowley PD. 1986. Reconnaissance geochemistry of the Lassiter Coast intrusive suite, southern Antarctic Peninsula. *Geological Society of America Bulletin*, 97(12): 1521–1533
- Wang F, Zheng XS, Lee JIK, Choe WH, Evans N and Zhu RX. 2009. An $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology on a Mid-Eocene igneous event on the Barton and Weaver peninsulas: Implications for the dynamic setting of the Antarctic Peninsula. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(12), doi: 10.1029/2009GC002874
- Wareham CD, Millar IL and Vaughan APM. 1997. The generation of sodic granite magmas, western Palmer Land, Antarctic Peninsula. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128(1): 81–96
- Wendt AS, Vaughan APM and Tate A. 2008. Metamorphic rocks in the Antarctic Peninsula region. *Geological Magazine*, 145(5): 655–676
- Wever HE, Millar IL and Pankhurst RJ. 1994. Geochronology and radiogenic isotope geology of Mesozoic rocks from eastern Palmer Land, Antarctic Peninsula: Crustal anatexis in arc-related granulitoid genesis. *Journal of South American Earth Sciences*, 7(1): 69–83
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007a. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007b. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238 (in Chinese with English abstract)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569
- Yu L, Li GJ, Wang QF and Liu XF. 2014. Petrogenesis and tectonic significance of the Late Cretaceous magmatism in the northern part of the Baoshan block: Constraints from bulk geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2709–2724 (in Chinese with English abstract)
- Zheng GG, Liu XC and Zhao Y. 2015. Mesozoic-Cenozoic tectonomagmatic evolution of the Antarctic Peninsula and its correlation with patagonia of southernmost South America. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(6): 1090–1102 (in Chinese with English abstract)
- Zheng X, Kamenov B, Sang H and Monchev P. 2003. New radiometric dating of the dykes from the Hurd Peninsula, Livingston Island, South Shetland Islands. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(8): 925–934
- Zheng XS, Sùbat F and Smellie JL. 1996. Multiple magma generation processes of the volcanic rocks from Livingston Island, West Antarctica: Geochemical evidences. *Antarctic Research*, 8(3): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Zheng XS, Liu JQ, Hu SL and Sùbat F. 1997. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and their geological significance of the volcanic rocks of Mount Bowles Formation in Livingston Island, South Shetland Islands. *Chinese Journal of Polar Research*, 9(1): 30–36 (in Chinese with English abstract)
- Zheng XS, Sang HQ, Qiu J, Liu JQ, Li ZY and Huang Z. 1998. Isotopic age of the volcanic rock in Byers Peninsula, Livingston Island, West Antarctica. *Chinese Journal of Polar Research*, 10(1): 1–10 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 第五春荣, 孙勇, 王倩. 2012. 华北克拉通地壳生长和演化: 来自现代河流碎屑锆石 Hf 同位素组成的启示. *岩石学报*, 28(11): 3520–3530
- 范蔚茗, 王岳军, 郭锋, 彭头平. 2003. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展. *地学前缘*, 10(3): 159–169
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. *矿床地质*, 28(4): 481–492
- 胡世玲, 郑祥身, 鄂莫岚, Birkenmajer K. 1995. 西南极乔治王岛北海岸火山岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和 K-Ar 年龄测定. *南极研究*, 7(4): 26–37
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪 (LA-MC-ICPMS) 测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究. *矿物学报*, 29(增刊): 600–601
- 刘小汉, 郑祥身, 鄂莫岚. 1991. 南极洲大地构造区划和冈瓦纳运动. *南极研究*, 3(2): 1–9
- 沈炎彬. 1998. 晚白垩世-早第三纪连接南美南部与南极半岛的一条

古地峡. 中国科学(D辑), 28(2): 166 – 169

吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007a. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185 – 220

吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007b. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217 – 1238

禹丽, 李龚健, 王庆飞, 刘学飞. 2014. 保山地块北部晚白垩世岩浆岩成因及其构造指示: 全岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素制约. 岩石学报, 30(9): 2709 – 2724

郑光高, 刘晓春, 赵越. 2015. 南极半岛中新世代构造岩浆演化及与南美巴塔哥尼亚对比. 矿物岩石地球化学通报, 34(6): 1090

– 1102

郑祥身, Sàbat F, Smellie JL. 1996. 西南极利文斯顿岛火山岩多种成因过程的地球化学证据. 南极研究, 8(3): 1 – 12

郑祥身, 刘嘉麒, 胡世玲, Sàbat F. 1997. 南设得兰群岛利文斯顿岛鲍斯山组火山岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及地质意义. 极地研究, 9(1): 30 – 36

郑祥身, 桑海清, 裘冀, 刘嘉麒, 李鍾益, 黄政. 1998. 西南极利文斯顿岛百耳斯半岛火山岩的同位素年龄. 极地研究, 10(1): 1 – 10