

# 东南极普里兹湾地区花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义\*

李淼 刘晓春 赵越

LI Miao, LIU XiaoChun and ZHAO Yue

中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

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

2007-01-19 收稿, 2007-04-20 改回.

Li M, Liu XC and Zhao Y. 2007. Zircon U-Pb ages and geochemistry of granitoids from Prydz Bay, East Antarctica, and their tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5):1055–1066

**Abstract** Voluminous granitic plutons from the Prydz Bay of East Antarctica were emplaced during the Pan-African period. Using LA-ICP-MS U-Pb zircon technique, the Dalkoy, Munro Kerr and Amanda granites were dated at  $519 \pm 2\text{Ma}$ ,  $497 \pm 2\text{Ma}$  and  $498 \pm 7\text{Ma}$ , respectively. All granitoids are geochemically characterized by having high total alkali contents, low Mg, Ca, Cr, Ni contents and high  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO})$  and  $10^4\text{Ga}/\text{Al}$  ratios, in accord with A-type granites. These rocks also show LILE- and HREE-enriched patterns with variable trough at Sr, Nb-Ta, Ti and P, and have very low initial  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values and high initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios. This suggests that magmatism in Prydz Bay is probably related to the post-collisional orogeny, including lithospheric thinning, magmatic underplating and crustal extension. The occurrence of post-collisional A-type granitoids from Prydz Bay supports the suggestion that the Prydz Belt may represent a collisional orogen.

**Key words** East Antarctica, Prydz Bay, granitoids, post-collision

**摘要** 东南极普里兹湾地区出露大量泛非期花岗岩类, 利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位定年方法测得达尔克花岗岩、蒙罗克尔花岗岩和阿曼达花岗岩的年龄分别为  $519 \pm 2\text{Ma}$ ,  $497 \pm 2\text{Ma}$  和  $498 \pm 7\text{Ma}$ 。所有普里兹湾地区花岗岩类均具有较高的全碱含量以及  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO})$  和  $10^4\text{Ga}/\text{Al}$  比值, 较低的 Mg、Ca、Cr 和 Ni 丰度, 表现出 A 型花岗岩的特点, 同时还富集大离子亲石元素和稀土元素, 不同程度亏损 Sr、Nb、Ta、P 和 Ti, 并具有高  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值和低  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值的同位素特征。研究结果表明, 普里兹湾地区的岩浆活动可能与后碰撞的造山作用有关, 包括岩石圈减薄、岩浆底侵和地壳伸展作用等。普里兹湾 A 型后碰撞花岗岩的确定支持普里兹带为碰撞造山带的构造属性。

**关键词** 东南极; 普里兹湾; 花岗岩类; 后碰撞

**中图法分类号** P588.121; P597.3

## 1 引言

东南极泛非普里兹带是冈瓦纳超大陆上继莫桑比克缝合带之后的又一条重要构造带, 由于其成因涉及到冈瓦纳超大陆在寒武纪的形成与演化问题, 因此一直是国际地学界关注的焦点。普里兹带主要出露于普里兹湾 (Prydz Bay) 沿岸、埃默里冰架东缘 (eastern Amery Ice Shelf) 以及南极内陆格罗

夫山 (Grove Mountains), 普里兹湾地区花岗岩类作为普里兹带的重要组成部分对普里兹造山带的构造演化起重要的示踪作用, 为进一步探讨普里兹带的构造属性提供了可能。

普里兹湾地区花岗岩的有限年代学研究基本上确定其为泛非期岩浆活动的产物 (Tingey *et al.*, 1981; Kinny *et al.*, 1993; Zhao *et al.*, 1992; Carson *et al.*, 1996; Zhao *et al.*, 2003), 并确认泛非事件是继格林维尔事件之后的又一次重要的构造热事件, 对普里兹湾地区的构造演化有重大意义。

\* 国家自然科学基金 (40372046) 和国土资源大调查项目 (1212010511505) 资助。

第一作者简介: 李淼, 女, 1973 年生, 博士, 岩石学专业, E-mail: limiao331@sohu.com

根据岩石学和地球化学研究, Sheraton and Black (1988) 认为兰丁花岗岩表现出 A 型花岗岩的特征, 可能是由贫水条件下麻粒岩相正片麻岩部分熔融形成的。Stüwe *et al.* (1989) 认为出露于拉斯曼丘陵 (Larsmann Hills) 的进步花岗岩属于同构造 S 型花岗岩, 而达尔克花岗岩与兰丁花岗岩相似, 属于 A 型花岗岩。在阿曼达湾 (Amanda Bay) 出露的花岗岩也被认为是同构造-后构造花岗岩 (Fitzsimons and Harley, 1991)。

现有为数不多的年代学研究虽已确定普里兹湾地区花岗岩类为泛非期岩浆活动的产物, 但整体上还缺乏系统的岩石学、年代学和地球化学方面的工作, 也就不能对其源区、形成演化过程及形成的构造背景等做更深层次的讨论。本文将通过对普里兹湾地区花岗岩类年代学和地球化学研究, 确定岩石成因及其形成的构造环境, 并进一步探讨东南极地盾普里兹带的构造属性及其在冈瓦纳古陆形成和演化中所起的作用。

## 2 地质概况

东南极普里兹湾沿岸发育着具有不同前格林维尔期和前泛非期地质演化历史的几个地质单元, 由东北向西南依次为西福尔丘陵太古宙地块、赖于尔群岛太古宙-元古宙拼合杂岩、普里兹湾-埃默里冰架东缘的中元古代-古生代变质杂岩。西福尔丘陵是普里兹湾地区出露最大的连续地块, 该区在太古宙末 (2500Ma) 经历了麻粒岩相高级变质作用并快速形成稳定块体 (Black *et al.*, 1991), 其后在古一中元古代

经历了挤压与拉张交替进行的地质演化历史, 形成大量脆性韧性剪切变形, 并伴随有多期基性岩墙群的侵入 (Lanyon *et al.*, 1993; Seitz, 1994; Dirks *et al.*, 1994)。赖于尔群岛东南部主要出露太古宙复合正片麻岩, 西部为中元古代花岗岩质正片麻岩和新元古代变沉积岩及正片麻岩 (Kinny *et al.*, 1993; Harley *et al.*, 1998)。普里兹湾-埃默里冰架东缘地区主要由中-新元古代片麻岩组成。正片麻岩作为基底受到中元古代晚期的岩浆侵入及可能的格林维尔期变质作用的影响。基底之上为副片麻岩盖层系列, 由基底岩石的剥蚀沉积形成。除西福尔丘陵外, 普里兹湾沿岸大部分地区都不同程度地受到泛非期构造作用的影响。

普里兹湾沿岸地区发育有大量的花岗岩类, 主要分布在兰丁陡崖、蒙罗克尔山、拉斯曼丘陵、达尔克岛、斯泰因半岛和阿曼达湾 (图 1)。这些花岗岩侵位于不同的高级变质岩中, 有些岩体发育后期面状的伟晶岩脉, 局部地区发育晚期花岗岩岩墙。在兰丁陡崖已获得花岗岩  $493 \pm 17\text{Ma}$  的 Rb-Sr 全岩年龄和  $500 \pm 4\text{Ma}$  的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 (Tingey, 1981; Tingey, 1991)。拉斯曼丘陵的进步花岗岩中锆石  $^{207}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}$  蒸发年龄为  $547 \pm 9\text{Ma}$  (Zhao *et al.*, 1992), 而利用 SHRIMP 获得的锆石 U-Pb 年龄为  $516 \pm 7\text{Ma}$  和  $514 \pm 7\text{Ma}$  (Carson *et al.*, 1996)。有关达尔克花岗岩的同位素年龄尚存争议, Zhao *et al.* (2003) 获得锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $543 \pm 6\text{Ma}$ , 而 Wang *et al.* (2003) 测得 SHRIMP 锆石的 U-Pb 年龄为  $501 \pm 11\text{Ma}$ , 本文利用 LA-ICP-MS 定年方法对达尔克花岗岩进行了重新厘定。

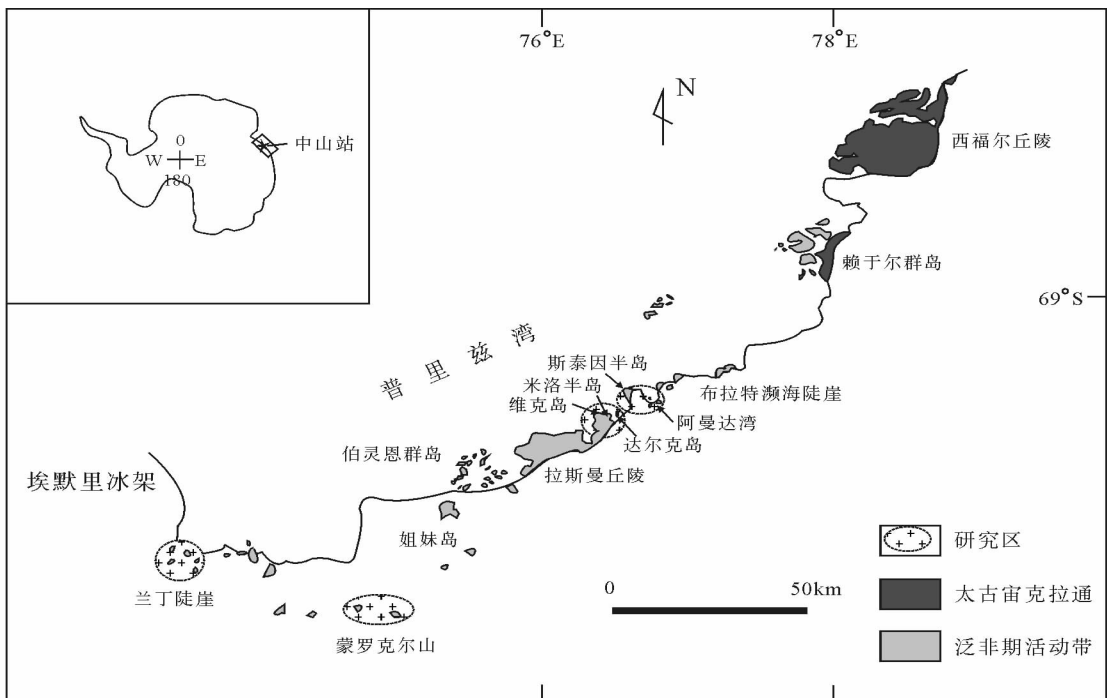


图 1 东南极普里兹湾地区花岗岩分布略图

Fig. 1 sketch Map showing distribution of granitoids from Prydz Bay, East Antarctica

### 3 岩相学特征

普里兹湾地区花岗岩按照岩石特征及产地可分为兰丁花岗岩、蒙罗克尔花岗岩、达尔克花岗岩、进步花岗岩和阿曼达花岗岩。它们具体的岩相学特征如下：

兰丁花岗岩出露在兰丁陡崖整个岛屿，主要为灰白色似斑状钾长花岗岩，局部可见宽约 0.5m 的中粒花岗岩脉侵入。似斑状钾长花岗岩主要由钾长石(35%)、黑云母(25%)、斜长石(20%，An = 30 ~ 50)和石英(25%)组成，未见角闪石。钾长石斑晶大小 1 ~ 10cm 不等，呈自形晶，作为基质的黑云母、斜长石和石英的粒度较粗，可达 0.5 ~ 0.8cm。镜下可见有的钾长石蚀变为高岭土，石英多为不规则粒状。副矿物有褐帘石、榍石、磷灰石、萤石、磁铁矿，另外含少量白云母。

蒙罗克尔花岗岩主要出露在 Meknattane 岛峰(图 2)的东部、西北部以及 Vestknatten 岛峰。Meknattane 岛峰的花岗岩与条带状正片麻岩呈明显的侵入关系，界限呈港湾状，花岗岩中含有片麻岩捕虏体，并可见麻粒岩的残留。蒙罗克尔花岗岩也呈似斑状构造，主要由钾长石斑晶(约占 45%)和包括斜长石(10%)、角闪石(10%)、黑云母(10%)以及石英(20%)的基质组成。斜长石多为中长石，有的角闪石发生蚀变为黑云母。副矿物有榍石、尖晶石和磁铁矿。Vestknatten 岛峰也出露暗肉红色粗粒黑云母钾长花岗岩，岩石结构与 Meknattane 岛峰花岗岩类似，但粒度稍细，钾长石斑晶约 3cm，黑云母较多，风化后呈黑色。

达尔克花岗岩呈块状构造，局部被后期不规则伟晶岩脉穿切，花岗岩与变质泥质岩呈侵入接触关系，但后期变形改造明显。变质泥质岩的主体岩性为含石榴石片麻岩，呈条带状且褶皱发育，主体产状 230°/25°。片麻岩靠近边界线的部分黑云母含量较高，片麻理发育且含少量石榴石，远离边界线的部分颜色变浅，主要为石榴堇青片麻岩，内含少量石榴夕线片麻岩。达尔克花岗岩主要矿物有钾长石(50%)、斜长石(10%，An = 30 ~ 50)、黑云母(15%)、石英(15%)，副矿物有榍石、磷灰石、磁铁矿等，未见角闪石。有的斜长石蚀变为绢云母和粘土矿物，黑云母部分蚀变为绿泥石。

进步花岗岩主要出露在拉斯曼丘陵的米洛半岛、维克岛和斯泰因半岛，岩石为肉红色中粒黑云母钾长花岗岩。岩性均一，略具片麻理，且花岗岩的片麻理与围岩的片麻理协调一致。米洛半岛进步花岗岩的围岩为堇青石-夕线石片麻岩组合，主要包括石榴黑云斜长片麻岩、堇青石片麻岩和夹磁铁矿结核的石榴夕线黑云斜长片麻岩。该片麻岩组合西侧为浅肉红色条带状含石榴石的片麻岩，其内可见较大的蠕虫状石榴石和石英，东侧为条带状含石榴石的淡色片麻岩(图 3)。另外，有一宽约 10m 的暗红色花岗岩脉切穿进步花岗岩，该花岗岩脉普遍含有约 1cm 长的钾长石斑晶，并略具定向。进步花岗岩矿物成分主要有钾长石(40%)、斜长石(20%，An = 30 ~ 45)、黑云母(15%)、石英(25%)，副矿物有石榴石、红柱石、磁铁矿、钛铁矿、尖晶石、磷灰石和锆石。

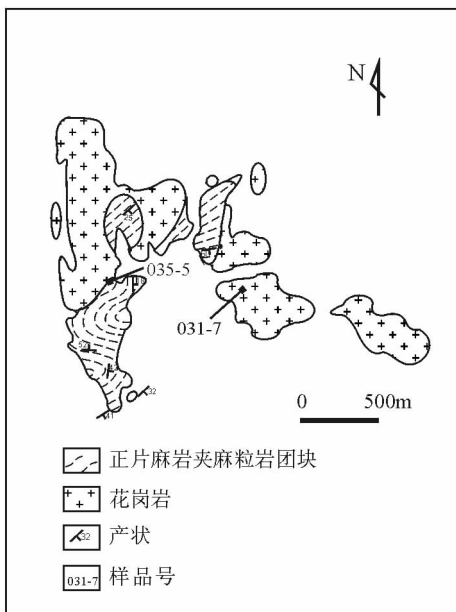


图 2 蒙罗克尔山 Meknattane 岛峰地质简图  
Fig. 2 Sketch map of the Meknattane Nunatak, Munro Kerr Mountains

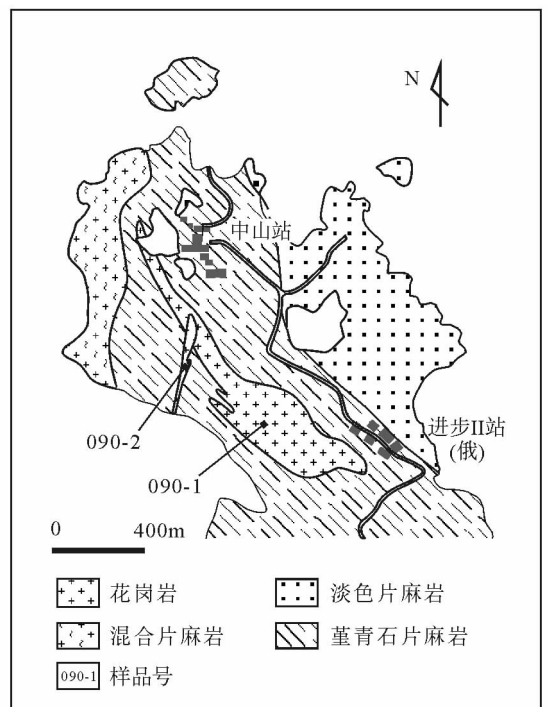


图 3 米洛半岛地质简图  
Fig. 3 Sketch map of the Mirror Peninsula, Larsemann Hills

阿曼达花岗岩为粗粒黑云母钾长花岗岩,钾长石定向明显,斑晶一般在  $1 \times (2 \sim 3)$  cm 大小,基质中普遍含有石榴石。阿曼达花岗岩与进步花岗岩不同的是粒度粗大且不具有片麻理。岩石主要矿物成分有钾长石(45%)、斜长石(25%,  $An = 30 \sim 45$ )、石英(15%)、黑云母(5%)和石榴石(5%)。在与钾长石接触的斜长石的边缘可见蠕虫状石英颗粒,可能为高温钾长石因温度降低析离形成的。副矿物有尖晶石、褐帘石、磷灰石和锆石。

## 4 测试方法

普里兹湾地区花岗岩的锆石 U-Pb 分析在西北大学大陆动力学实验室利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪测定。激光剥蚀系统为 Deolas 200M, 激光器为 ComPex 102Arf 准分子激光器(波长为 193nm), ICP-MS 为 Elan6100DRC 型。实验采用 He 作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究员研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化,采用哈佛大学国际标准锆石 91500 作外部校正,用 NIST610 计算锆石的 U、Th 和 Pb 含量。同位素比值计算采用 Glitter 4.0 软件,年龄计算采用标准程序 ISOPLOT,用 Anderson(2002)程序校正普通铅。实验条件和详细的分析方法见袁洪林等(2003)。

样品的主化学组分元素使用 3080E 型 X 荧光光谱仪分析,在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成,其中氧化物的执行标准按 GB/T 14506.28 - 1993 标准;  $H_2O^+$  按 GB/T 14506.2 - 1993 标准;  $CO_2$  按 GB 9835 - 1988 标准; LOI 按 LY/T 1253 - 1999 标准。微量元素分析在西北大学大陆动力学实验室完成。样品的分解采用  $HNO_3 + HF$  密闭容器分解,以保证样品完全溶解。利用美国 ELAN6100DRC 型电感耦合等离子质谱仪测试。样品测试经国际标样 BHVO-2、BCR-2 和空白样进行质量监控。分析精度优于 5%,极少数低浓度元素在 5% ~ 10% 之间。详细的分析和测试方法见 Gao *et al.* (1999)。

同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所同位素超净实验室完成。样品用  $HF + HClO_4$  在 Teflon 容器中低温溶解,采用 AG50W  $\times 8(H^+)$  阳离子交换柱分离出纯净的 Rb 和 Sr; 采用 AG50W  $\times 8(H^+)$  阳离子交换柱和 P507 萃淋树脂分离出纯净的 Sm 和 Nd。实验流程见已有文献叙述(Qiao, 1998)。同位素测量在 VG354 固体同位素质谱计上进行,其中 Sr、Nd 同位素采用多接收器跳扫方法测定, Rb、Sm 采用 Daly 倍增器跳峰方法测定。Sr 同位素分馏用  $^{86}Sr/^{88}Sr = 0.1194$  校正。国际标样 NBS987 的测定结果为  $0.710254 \pm 16 (n=8, 2\sigma)$ , NBS607 的测定结果为  $1.20032 \pm 30 (n=2)$ , Rb-Sr 全流程空白本底约为  $1 \times 10^{-10} \sim 2 \times 10^{-10}$  g。Nd 同位素分馏用  $^{146}Nd/^{144}Nd = 0.7219$  校正。国际标样 La Jolla 的测定结果为  $0.511862 \pm 7 (n=6, 2\sigma)$ , BCR-1 的测定结果为  $0.512626 \pm 9 (n=2)$ , Sm-Nd 全流程空白本底约为

$5 \times 10^{-11}$  g。年龄计算均采用 ISOPLOT 程序。本文采用两阶段亏损地幔线性演化的模式计算模式年龄,其中:

$$\varepsilon_{Nd} = ((^{143}Nd/^{144}Nd)_s / (^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR} - 1) \times 10000;$$

$$f_{Sm/Nd} = (^{147}Sm/^{144}Nd)_s / (^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR} - 1;$$

$$(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR} = 0.512638;$$

$$(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR} = 0.1967; s \text{ 代表样品};$$

$$t_{DM}^1 = 1/\lambda \ln \left[ 1 + \frac{(^{143}Nd/^{144}Nd)_s - 0.51315}{(^{147}Sm/^{144}Nd)_s - 0.2137} \right];$$

$$\lambda = 6.54 \times 10^{-6} \text{ Ma}^{-1};$$

$$t_{DM}^2 = t_{DM}^1 - (t_{DM}^1 - t)(f_{cc} - f_s) / (f_{cc} - f_{DM});$$

其中  $f_{cc}$ ,  $f_s$  和  $f_{DM}$  分别为地壳、样品和亏损地幔的  $f_{Sm/Nd}$  平均值;  $f_{cc} = -0.4$ ,  $f_{DM} = 0.08592$ ,  $t$  为岩体的侵位年龄。

## 5 测试结果

### 5.1 锆石 U-Pb 定年

对普里兹湾达尔克花岗岩、蒙罗克尔山花岗岩和阿曼达湾花岗岩锆石颗粒的 LA-ICP-MS 分析结果见表 1。

达尔克花岗岩锆石 Th/U 比值除样品数据点 001-1-01 外都大于 0.3, 表现出岩浆锆石的成分特征。其 23 个数据点基本位于谐和线上及附近,  $^{206}Pb/^{238}U$  的加权平均年龄为  $519 \pm 2$  Ma ( $2\sigma$ , MSWD = 0.48), 应代表岩浆结晶的年龄(图 4A)。蒙罗克尔山花岗岩样品 031-7 的 15 个锆石颗粒的 Th/U 比值为 0.73 ~ 2.18, 也属于岩浆锆石, 所有点均落在谐和线上或附近, 它们的  $^{206}Pb/^{238}U$  的加权平均年龄为  $497 \pm 2$  Ma ( $2\sigma$ , MSWD = 1.1), 应代表岩浆结晶的年龄(图 4B)。阿曼达花岗岩中锆石颗粒的 Th/U 比值总体偏低, 在 0.05 ~ 0.48 之间, 其数据点可明显分为两组, 其中一组数据的非一致线与谐和线的下交点年龄为  $534 \pm 6$  Ma ( $2\sigma$ , MSWD = 5.6), 与该区区域变质时代一致(Zhang *et al.*, 1996; Fitzsimons *et al.*, 1997), 可能代表了继承变质锆石的年龄; 另一组数据的加权平均年龄为  $498 \pm 7$  Ma, 代表岩浆侵位的年龄(图 4C)。处于两组数据之间的三个数据点 100-1-05、100-1-07 和 100-1-13(图 4C 中用虚线表示)可能为锆石的混合年龄, 没有实际意义。总体上看大多数数据点分布在谐和线以下, 说明所测大部分样品有明显的放射的铅丢失。铅丢失主要有两方面原因: 一是锆石粒度普遍较小, 表面积与体积之比大, 铅丢失量相对多, 二是锆石 U 含量高, 晶体受放射性损伤严重, 铅丢失也越多。

### 5.2 主化学成分及微量元素地球化学

样品的主量和微量元素测试结果见表 2。

普里兹湾地区花岗岩类包括碱长花岗岩和正长花岗岩,  $SiO_2$  为 59.83% ~ 76.92%,  $Al_2O_3$  为 11.45% ~ 15.85%, CaO 为 0.66% ~ 4.01%,  $K_2O$  为 4.79% ~ 7.06%,  $Na_2O$  为 1.72% ~ 2.55%, 全碱含量高( $K_2O + Na_2O = 6.97\% \sim 9.61\%$ ), 富

表 1 普里兹湾花岗岩锆石 U-Pb 同位素 LA-ICP-MS 定年分析结果

Table 1 Zircon isotopic LA-ICP-MS analyses for granitoids from the Prydz Bay

点号	含量( $\times 10^{-6}$ )			Th/U	同位素比值 $\pm 1\sigma$			年龄(Ma) $\pm 1\sigma$		
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
达尔克花岗岩(样品 001-1)										
001-1-01	21	7	225	0.03	0.0599 $\pm$ 0.0014	0.6932 $\pm$ 0.0146	0.0839 $\pm$ 0.0006	601 $\pm$ 33	535 $\pm$ 9	519 $\pm$ 4
001-1-02	23	428	164	2.61	0.0616 $\pm$ 0.0042	0.7237 $\pm$ 0.0486	0.0852 $\pm$ 0.0009	662 $\pm$ 150	553 $\pm$ 29	527 $\pm$ 6
001-1-03	22	357	113	3.16	0.0587 $\pm$ 0.0014	0.6830 $\pm$ 0.0144	0.0844 $\pm$ 0.0006	557 $\pm$ 33	529 $\pm$ 9	522 $\pm$ 4
001-1-04	26	492	184	2.67	0.0595 $\pm$ 0.0014	0.6843 $\pm$ 0.0145	0.0835 $\pm$ 0.0006	584 $\pm$ 34	529 $\pm$ 9	517 $\pm$ 4
001-1-05	17	372	119	3.11	0.0584 $\pm$ 0.0017	0.6672 $\pm$ 0.0178	0.0829 $\pm$ 0.0007	544 $\pm$ 44	519 $\pm$ 11	513 $\pm$ 4
001-1-06	20	23	66	0.34	0.0579 $\pm$ 0.0016	0.6639 $\pm$ 0.0168	0.0832 $\pm$ 0.0007	525 $\pm$ 41	517 $\pm$ 10	515 $\pm$ 4
001-1-07	13	334	131	2.55	0.0603 $\pm$ 0.0029	0.6979 $\pm$ 0.0319	0.0839 $\pm$ 0.0011	615 $\pm$ 77	538 $\pm$ 19	520 $\pm$ 6
001-1-08	24	332	118	2.82	0.0616 $\pm$ 0.0016	0.7049 $\pm$ 0.0174	0.0830 $\pm$ 0.0007	660 $\pm$ 39	542 $\pm$ 10	514 $\pm$ 4
001-1-09	23	159	84	1.88	0.0624 $\pm$ 0.0019	0.7243 $\pm$ 0.0210	0.0841 $\pm$ 0.0008	689 $\pm$ 46	553 $\pm$ 12	521 $\pm$ 5
001-1-10	7	737	153	4.80	0.0567 $\pm$ 0.0027	0.6532 $\pm$ 0.0305	0.0836 $\pm$ 0.0010	478 $\pm$ 83	510 $\pm$ 19	518 $\pm$ 6
001-1-11	13	258	154	1.68	0.0661 $\pm$ 0.0040	0.7651 $\pm$ 0.0452	0.0839 $\pm$ 0.0015	810 $\pm$ 95	577 $\pm$ 26	520 $\pm$ 9
001-1-12	7	424	131	3.24	0.0637 $\pm$ 0.0035	0.7355 $\pm$ 0.0395	0.0840 $\pm$ 0.0013	730 $\pm$ 88	560 $\pm$ 23	519 $\pm$ 8
001-1-13	5	391	120	3.27	0.0667 $\pm$ 0.0034	0.7769 $\pm$ 0.0384	0.0845 $\pm$ 0.0011	827 $\pm$ 82	584 $\pm$ 22	523 $\pm$ 6
001-1-14	13	8	24	0.35	0.0568 $\pm$ 0.0018	0.6545 $\pm$ 0.0195	0.0835 $\pm$ 0.0008	485 $\pm$ 50	511 $\pm$ 12	517 $\pm$ 5
001-1-15	5	126	41	3.06	0.0668 $\pm$ 0.0038	0.7827 $\pm$ 0.0432	0.0849 $\pm$ 0.0013	832 $\pm$ 89	587 $\pm$ 25	525 $\pm$ 8
001-1-16	8	84	53	1.57	0.0626 $\pm$ 0.0028	0.7228 $\pm$ 0.0308	0.0838 $\pm$ 0.0010	694 $\pm$ 70	552 $\pm$ 18	519 $\pm$ 6
001-1-17	9	108	31	3.53	0.0620 $\pm$ 0.0032	0.7177 $\pm$ 0.0358	0.0840 $\pm$ 0.0012	672 $\pm$ 82	549 $\pm$ 21	520 $\pm$ 7
001-1-18	8	42	123	0.34	0.0654 $\pm$ 0.0031	0.7619 $\pm$ 0.0348	0.0845 $\pm$ 0.0011	788 $\pm$ 74	575 $\pm$ 20	523 $\pm$ 6
001-1-19	8	149	51	2.93	0.0619 $\pm$ 0.0030	0.7121 $\pm$ 0.0338	0.0835 $\pm$ 0.0011	669 $\pm$ 79	546 $\pm$ 20	517 $\pm$ 7
001-1-20	7	111	51	2.16	0.0629 $\pm$ 0.0036	0.7400 $\pm$ 0.0414	0.0853 $\pm$ 0.0013	706 $\pm$ 93	562 $\pm$ 24	528 $\pm$ 8
001-1-21	10	8	22	0.35	0.0599 $\pm$ 0.0026	0.6896 $\pm$ 0.0286	0.0835 $\pm$ 0.0009	600 $\pm$ 71	533 $\pm$ 17	517 $\pm$ 6
001-1-22	8	115	45	2.59	0.0597 $\pm$ 0.0024	0.6878 $\pm$ 0.0268	0.0836 $\pm$ 0.0009	591 $\pm$ 65	531 $\pm$ 16	518 $\pm$ 6
001-1-23	9	127	58	2.21	0.0568 $\pm$ 0.0020	0.6546 $\pm$ 0.0220	0.0836 $\pm$ 0.0008	483 $\pm$ 57	511 $\pm$ 14	518 $\pm$ 5
蒙罗克尔花岗岩(样品 031-7)										
031-7-01	30	185	253	0.73	0.0623 $\pm$ 0.0018	0.6842 $\pm$ 0.0195	0.0796 $\pm$ 0.0006	685 $\pm$ 64	529 $\pm$ 12	494 $\pm$ 3
031-7-02	20	220	122	1.79	0.0572 $\pm$ 0.0034	0.6117 $\pm$ 0.0358	0.0775 $\pm$ 0.0007	500 $\pm$ 134	485 $\pm$ 23	481 $\pm$ 4
031-7-03	18	211	143	1.48	0.0601 $\pm$ 0.0010	0.6617 $\pm$ 0.0097	0.0799 $\pm$ 0.0005	607 $\pm$ 21	516 $\pm$ 6	495 $\pm$ 3
031-7-04	7	91	54	1.66	0.0661 $\pm$ 0.0015	0.7278 $\pm$ 0.0154	0.0798 $\pm$ 0.0006	810 $\pm$ 32	555 $\pm$ 9	495 $\pm$ 3
031-7-05	9	119	66	1.82	0.0670 $\pm$ 0.0015	0.7486 $\pm$ 0.0149	0.0811 $\pm$ 0.0006	837 $\pm$ 30	567 $\pm$ 9	503 $\pm$ 3
031-7-06	7	99	47	2.09	0.0632 $\pm$ 0.0039	0.6966 $\pm$ 0.0426	0.0799 $\pm$ 0.0009	715 $\pm$ 136	537 $\pm$ 26	496 $\pm$ 5
031-7-07	18	218	131	1.66	0.0581 $\pm$ 0.0010	0.6436 $\pm$ 0.0100	0.0804 $\pm$ 0.0005	533 $\pm$ 23	505 $\pm$ 6	498 $\pm$ 3
031-7-08	12	142	86	1.66	0.0609 $\pm$ 0.0024	0.6702 $\pm$ 0.0262	0.0790 $\pm$ 0.0006	636 $\pm$ 88	521 $\pm$ 16	495 $\pm$ 4
031-7-09	22	305	143	2.14	0.0581 $\pm$ 0.0022	0.6491 $\pm$ 0.0244	0.0810 $\pm$ 0.0006	535 $\pm$ 86	508 $\pm$ 15	502 $\pm$ 3
031-7-10	9	108	70	1.54	0.0574 $\pm$ 0.0019	0.6407 $\pm$ 0.0204	0.0810 $\pm$ 0.0007	505 $\pm$ 54	503 $\pm$ 13	502 $\pm$ 4
031-7-11	12	162	85	1.92	0.0643 $\pm$ 0.0030	0.7100 $\pm$ 0.0322	0.0801 $\pm$ 0.0007	751 $\pm$ 100	545 $\pm$ 19	497 $\pm$ 4
031-7-12	9	131	63	2.07	0.0619 $\pm$ 0.0017	0.6845 $\pm$ 0.0173	0.0802 $\pm$ 0.0006	671 $\pm$ 40	529 $\pm$ 10	497 $\pm$ 4
031-7-13	13	158	100	1.58	0.0614 $\pm$ 0.0013	0.6754 $\pm$ 0.0128	0.0799 $\pm$ 0.0005	652 $\pm$ 29	524 $\pm$ 8	495 $\pm$ 3
031-7-14	12	133	88	1.52	0.0608 $\pm$ 0.0024	0.6658 $\pm$ 0.0255	0.0794 $\pm$ 0.0006	632 $\pm$ 86	518 $\pm$ 16	493 $\pm$ 4
031-7-15	5	75	34	2.18	0.0627 $\pm$ 0.0023	0.6839 $\pm$ 0.0240	0.0791 $\pm$ 0.0007	699 $\pm$ 59	529 $\pm$ 14	491 $\pm$ 4
阿曼达花岗岩(样品 100-1)										
100-1-01	65	29	649	0.05	0.0595 $\pm$ 0.0007	0.6712 $\pm$ 0.0076	0.0818 $\pm$ 0.0004	587 $\pm$ 28	521 $\pm$ 5	507 $\pm$ 3
100-1-02	126	74	1162	0.06	0.0615 $\pm$ 0.0006	0.7499 $\pm$ 0.0066	0.0884 $\pm$ 0.0004	658 $\pm$ 22	568 $\pm$ 4	546 $\pm$ 3
100-1-03	60	77	575	0.13	0.0579 $\pm$ 0.0015	0.6433 $\pm$ 0.0158	0.0806 $\pm$ 0.0006	527 $\pm$ 57	504 $\pm$ 10	499 $\pm$ 3
100-1-04	66	50	605	0.08	0.0592 $\pm$ 0.0012	0.7040 $\pm$ 0.0138	0.0862 $\pm$ 0.0006	575 $\pm$ 46	541 $\pm$ 8	533 $\pm$ 3
100-1-05	54	46	492	0.09	0.0617 $\pm$ 0.0010	0.7073 $\pm$ 0.0107	0.0831 $\pm$ 0.0004	665 $\pm$ 35	543 $\pm$ 6	515 $\pm$ 3
100-1-06	137	421	963	0.44	0.0656 $\pm$ 0.0018	0.8238 $\pm$ 0.0221	0.0911 $\pm$ 0.0006	794 $\pm$ 59	610 $\pm$ 12	562 $\pm$ 3
100-1-07	67	37	621	0.06	0.0612 $\pm$ 0.0013	0.7167 $\pm$ 0.0141	0.0850 $\pm$ 0.0005	645 $\pm$ 46	549 $\pm$ 8	526 $\pm$ 3
100-1-08	169	94	1282	0.07	0.0623 $\pm$ 0.0026	0.6786 $\pm$ 0.0278	0.0790 $\pm$ 0.0005	684 $\pm$ 91	526 $\pm$ 17	490 $\pm$ 3
100-1-09	118	241	1019	0.24	0.0665 $\pm$ 0.0008	0.8334 $\pm$ 0.0086	0.0909 $\pm$ 0.0005	822 $\pm$ 25	616 $\pm$ 5	561 $\pm$ 3
100-1-10	50	124	504	0.25	0.0599 $\pm$ 0.0011	0.6516 $\pm$ 0.0108	0.0789 $\pm$ 0.0005	600 $\pm$ 39	509 $\pm$ 7	490 $\pm$ 3
100-1-11	63	415	470	0.88	0.0650 $\pm$ 0.0013	0.8061 $\pm$ 0.0136	0.0899 $\pm$ 0.0006	774 $\pm$ 24	600 $\pm$ 8	555 $\pm$ 3
100-1-12	299	335	2477	0.14	0.0657 $\pm$ 0.0010	0.8054 $\pm$ 0.0116	0.0889 $\pm$ 0.0005	798 $\pm$ 33	600 $\pm$ 7	549 $\pm$ 3
100-1-13	83	56	787	0.07	0.0595 $\pm$ 0.0008	0.7185 $\pm$ 0.0092	0.0876 $\pm$ 0.0005	584 $\pm$ 31	550 $\pm$ 5	542 $\pm$ 3
100-1-14	59	44	614	0.07	0.0570 $\pm$ 0.0009	0.6265 $\pm$ 0.0090	0.0798 $\pm$ 0.0005	489 $\pm$ 35	494 $\pm$ 6	495 $\pm$ 3
100-1-15	59	512	347	1.48	0.0644 $\pm$ 0.0026	0.7271 $\pm$ 0.0294	0.0819 $\pm$ 0.0006	756 $\pm$ 89	555 $\pm$ 17	507 $\pm$ 3
100-1-16	56	28	590	0.05	0.0569 $\pm$ 0.0008	0.6299 $\pm$ 0.0086	0.0802 $\pm$ 0.0005	489 $\pm$ 33	496 $\pm$ 5	498 $\pm$ 3

表2 普里兹湾地区花岗岩类主化学成分(wt%)、微量元素成分( $\times 10^{-6}$ )分析结果Table 2 Major(wt%) and trace element( $\times 10^{-6}$ ) compositions of granitoids from Prydz Bay

岩体名称	达尔克花岗岩		蒙罗克尔花岗岩		兰丁花岗岩		进步花岗岩			阿曼达花岗岩	
样号	001-1	031-7	035-5	036-1	083-1	084-1	090-1	090-2	005-3	102-1	100-1
SiO <sub>2</sub>	59.83	71.66	76.92	69.57	69.32	69.05	69.97	68.25	70.84	67.13	71.69
TiO <sub>2</sub>	1.97	0.64	0.26	0.49	0.66	0.73	0.49	0.88	0.36	0.95	0.56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.85	12.65	11.45	14.29	13.69	13.09	14.77	15.07	15.24	15.08	13.89
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.23	1.71	1.42	1.84	1.23	1.42	1.26	1.21	1.11	1.57	0.44
FeO	4.04	2.71	0.92	2.14	2.59	3.43	1.71	2.23	0.86	2.50	2.07
MnO	0.06	0.06	0.02	0.04	0.04	0.06	0.01	0.01	<0.01	0.03	0.02
MgO	1.91	0.39	0.08	0.24	0.54	0.45	0.40	0.80	0.35	0.94	0.59
CaO	4.01	2.21	0.66	1.89	2.03	2.16	1.33	1.7	1.29	1.85	1.38
Na <sub>2</sub> O	2.54	1.84	1.72	1.77	1.95	2.22	2.37	2.34	2.55	2.54	2.47
K <sub>2</sub> O	4.79	5.13	6.00	6.51	6.37	5.44	6.49	6.27	7.06	6.20	5.47
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.70	0.16	0.04	0.19	0.15	0.23	0.16	0.28	0.14	0.32	0.14
H <sub>2</sub> O +	1.42	0.66	0.52	0.56	0.82	0.84	0.48	0.64	0.36	0.60	0.58
CO <sub>2</sub>	0.39	0.22	0.30	0.55	0.22	0.30	0.13	0.39	0.30	0.13	0.39
烧失量	1.18	0.45	0.58	0.50	1.02	0.67	0.43	0.60	0.59	0.78	0.46
总量	99.11	99.61	100.07	99.47	99.59	98.95	99.39	99.64	100.39	99.89	99.18
A/CNK	0.95	1.00	1.09	1.07	0.99	0.97	1.11	1.10	1.07	1.06	1.11
A/NK	1.69	1.47	1.23	1.44	1.36	1.37	1.35	1.42	1.29	1.38	1.39
Fe <sup>#</sup>	0.76	0.92	0.96	0.94	0.87	0.91	0.88	0.81	0.84	0.81	0.81
Sc	7.81	8.30	2.69	5.93	9.6	10.3	5.22	4.02	2.70	5.00	3.53
V	120.3	22.3	4.66	10.10	24.1	20.6	25.9	40.5	18.9	52.5	32.1
Cr	18	2.4	4.9	2.7	6	2.6	3.1	6	4.7	9.99	10.59
Co	13.8	5.87	1.73	3.86	4.90	5.44	3.94	6.86	2.80	6.69	4.29
Ni	8.1	1.8	3.3	2.1	2.8	1.6	2.3	3.7	3.0	3.04	3.01
Cu	29	12.5	7.8	12.8	11.9	11.4	4.4	5.3	4.5	17.5	6.43
Zn	197	69.4	44.2	97.0	83.2	101.6	97.8	244	41.4	133	48.6
Ga	39.3	21.8	23.1	31.3	30.7	30.3	40.4	37.7	31.1	32.4	23.9
Rb	277.4	151.3	247.7	258.0	337.4	289.4	436	423	349.1	351	337
Sr	455	199	58.4	212	136	157	240	121	300	282	168
Ba	2545	1838	408.0	1690	799	1284	1075	899	1331	1372	753
Pb	74.0	35.63	47.9	76.5	81.3	72.6	148.5	112.7	98.7	121.2	88.5
Th	68.0	7.89	75.7	77.5	213.4	109.6	209.1	365.1	163.5	250	131
U	1.54	0.72	1.83	1.54	3.92	2.66	8.12	5.22	6.32	3.11	3.74
Nb	34.0	32.1	18.5	28.7	22.5	34.7	14.6	17.1	8.3	18.8	13.5
Ta	1.36	2.06	0.76	1.78	1.27	2.10	0.23	0.52	0.42	0.55	0.41
Zr	1058	640	331	448	460	707	417	733	327	719	389
Hf	24.0	14.8	10.13	11.4	12.4	18.6	11.3	19.4	9.16	17.6	9.55
Rb/Sr	0.61	0.76	4.24	1.22	2.48	1.85	1.82	3.49	1.16	1.24	2.01
Th/U	44.09	10.99	41.33	50.49	54.41	41.26	25.74	69.95	25.87	80.35	35.19
Ga/Al ( $\times 10^4$ )	4.69	3.26	3.81	4.14	4.23	4.37	5.17	4.73	3.86	4.05	3.25
La	330	49.8	96.9	184	326	247	439	384	328	401	196
Ce	723	106.8	256	362	655	524	796	863	573	849	412
Pr	83.1	14.0	26.2	40.2	68.3	60.1	75.4	98.3	55.6	90.8	45.3
Nd	285	55.5	88.2	134	219	205	222	313	162	291	144
Sm	34.1	11.3	16.5	20.7	33.1	33.6	26.8	40.8	18.6	35.2	19.8
Eu	4.43	2.63	0.97	3.16	1.94	2.28	2.68	1.96	2.76	2.56	1.70
Gd	23.9	9.39	13.1	16.5	26.3	26.4	20.5	25.6	14.0	25.8	15.5
Tb	1.87	1.39	1.65	1.70	2.89	3.07	1.45	1.84	0.98	1.71	1.31
Dy	7.17	7.93	8.36	7.41	13.5	15.0	4.91	6.13	3.64	5.72	5.10
Ho	0.76	1.50	1.39	1.07	2.11	2.38	0.42	0.51	0.36	0.46	0.65
Er	1.74	4.04	3.37	2.62	5.34	5.90	0.84	1.07	0.71	1.65	1.64
Tm	0.18	0.59	0.40	0.28	0.61	0.68	0.064	0.095	0.055	0.080	0.14
Yb	1.09	3.90	2.38	1.75	3.63	4.15	0.40	0.62	0.30	0.56	0.90
Lu	0.136	0.54	0.31	0.24	0.48	0.55	0.050	0.081	0.036	0.074	0.13
Y	19.8	40.5	30.8	26.7	52.1	58.5	10.58	12.78	9.25	10.7	17.1
ΣREE	1517.0	309.7	546.4	803.1	1411.0	1187.7	1601.3	1750.3	1168.6	1716.2	861.6
(La/Yb) <sub>N</sub>	216.8	9.2	29.2	75.5	64.5	42.7	780.4	443.2	792.1	513.0	155.8
Eu/Eu*	0.47	0.77	0.20	0.52	0.20	0.23	0.34	0.18	0.51	0.26	0.29

注: Fe<sup>#</sup> = FeO<sup>T</sup>/(FeO<sup>T</sup> + MgO); Eu/Eu\* = Eu<sub>N</sub>/(Sm<sub>N</sub>\*Gd<sub>N</sub>)1/2

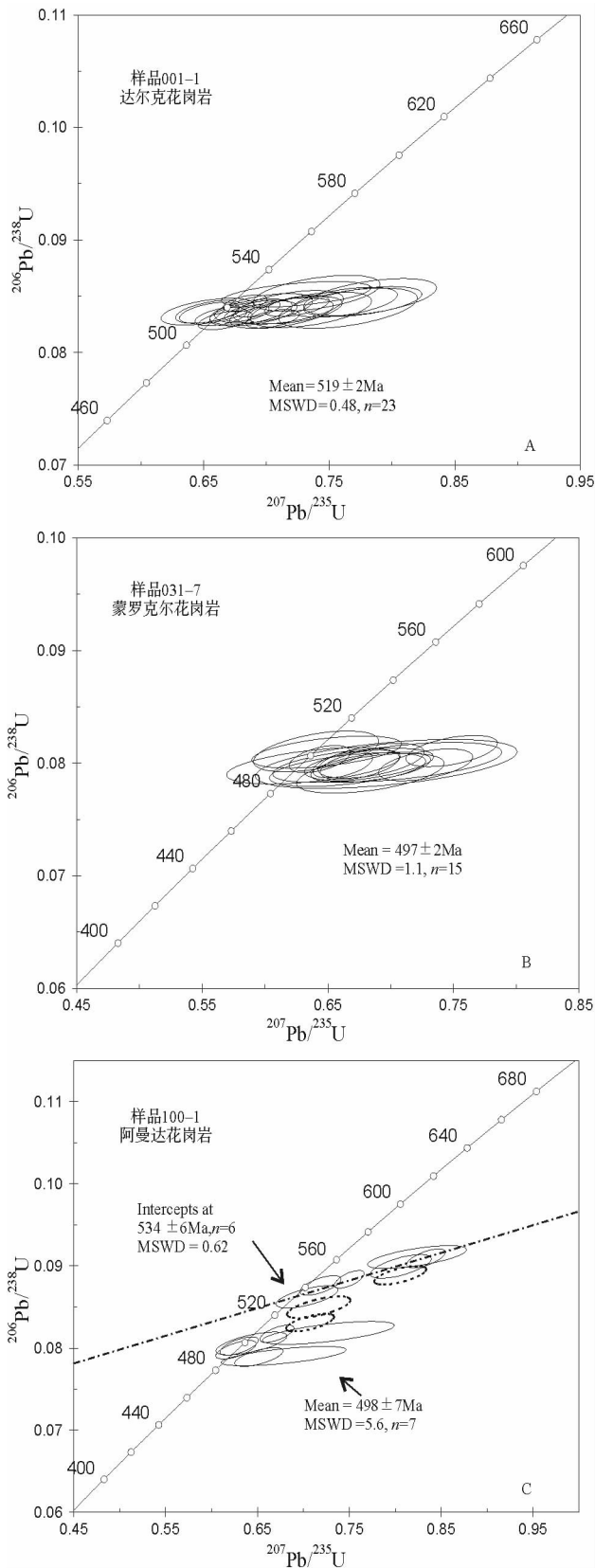


图4 普里兹湾花岗岩类锆石 U-Pb 同位素一致图解  
Fig. 4 U-Pb concordia diagrams for zircons from granitoid samples of Prydz Bay

钾 ( $K_2O/Na_2O$  为 1.89 ~ 3.68),  $FeO$  为 0.86% ~ 4.04%,  $Fe_2O_3$  为 0.44% ~ 2.23%,  $MgO$  为 0.08% ~ 1.91%,  $Fe^{\#} [Fe^{\#} = FeO^T / (FeO^T + MgO)]$  值高 (0.76 ~ 0.96),  $TiO_2$  为 0.26% ~ 1.97%,  $P_2O_5$  为 0.04% ~ 0.70%。样品在花岗质岩石的 TAS 分类图解中,除达尔克花岗岩(样品 001-1)落在二长岩区域外,大部分样品落入石英二长岩和花岗岩的范围中,并且所有样品都分布在碱性系列与亚碱性系列分界线以下(图 5A)。铝饱和指数  $A/CNK$  为 0.95 ~ 1.11,具有准铝质-过铝质的特点(图 5B)。

普里兹湾花岗岩类的稀土元素含量高,变化范围大,  $\Sigma REE$  为  $(309.7 \sim 1750.3) \times 10^4$ ,总体表现为轻稀土相对于重稀土富集的右倾分布模式(图 6),具有中等-强的铕负异常 ( $\delta Eu$  为 0.19 ~ 0.78)。按照稀土分馏程度可分为两类:一类花岗岩包括兰丁和蒙罗克花岗岩,它们的  $\Sigma LREE / \Sigma HREE$  相对较低 (6.5 ~ 23.8),轻重稀土分异明显 ( $(La/Yb)_N = 6.7 \sim 75.5$ );另一类花岗岩包括达尔克、阿曼达和进步花岗岩,它们的  $\Sigma LREE / \Sigma HREE$  相对较高 (32.2 ~ 56.6),轻重稀土分异十分明显 ( $(La/Yb)_N = 155.8 \sim 792.1$ )。达尔克、阿曼达与进步花岗岩的稀土分布模式极其相似,表明他们可能是同源岩浆演化的产物或是有相同的源区。普里兹湾地区花岗岩的铕负异常并不随  $SiO_2$  含量而变化,说明铕负异常主要不是由岩浆中斜长石的分离结晶引起的,更可能是由源区部分熔融过程斜长石保存在残余物中而产生的。低 HREE 含量可能反映源区有石榴石的残余。

普里兹湾地区所有花岗岩类均富集 Rb、Ba、Th 和 K 等大离子亲石元素,在微量元素标准化蛛网图中呈现 Ba、Ta、Hf、Sr、P 和 Ti 的负异常(图 7)。此外,花岗岩具有高的 Th/U 比值 (10.99 ~ 80.35),远高于地壳平均值 ( $\approx 3.8$ ; Taylor and McLennan, 1985)。Rb/Sr 比值 (0.61 ~ 4.24) 远高于地幔平均值 (约 0.025),表明岩浆经历了强烈的分异演化。普里兹湾花岗岩类还具有低 Ni、Cr、Co 和 Sc 等相容元素含量的特征。

### 5.3 同位素组成

普里兹湾地区花岗岩类同位素分析结果见表 3。

岩浆的同位素比值在其分异过程中基本保持恒定,因此岩浆岩的同位素比值代表了源区的特征。从  $I_{Sr-\epsilon Nd}(t)$  图解(图 8)中可以看出,普里兹湾花岗岩类岩样品的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值变化范围较大,在 0.7080 ~ 0.7261 之间。普里兹湾花岗岩类  $^{143}Nd/^{144}Nd$  的比值集中,在 0.511558 ~ 0.511914 之间,  $\epsilon Nd(t)$  值低,变化范围在 -12.93 ~ -9.46 之间;利用两阶段模式计算出普里兹带 Nd 同位素模式年龄在 2.0 ~ 2.3Ga (代表了平均地壳的残留年龄),可能与古元古代古老地壳物质的再循环有关。

普里兹湾地区花岗岩类的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值变化范围较大,反映了源岩的 Sr 同位素组成的不均一,也可能受到成岩后地质作用的影响。阿曼达花岗岩高  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值也有

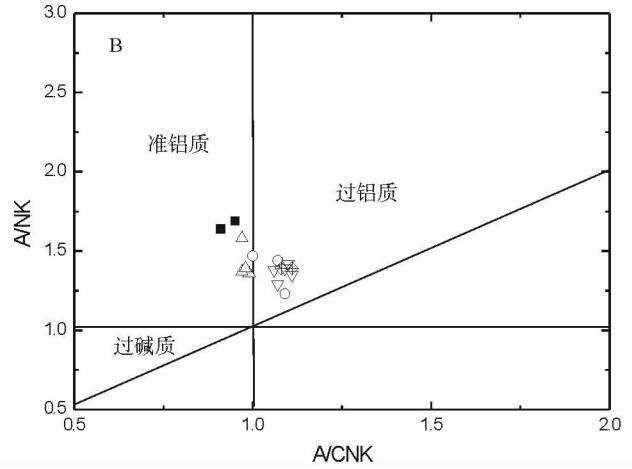
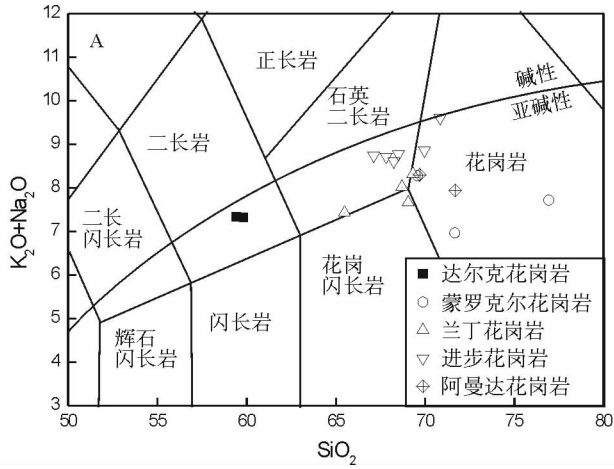


图5 普里兹湾地区花岗质岩石的分类图解(A据 Middlemost, 1994; B据 Maniar and Piccoli, 1989)

数据来源: Stüwe *et al.*, 1989; Sheraton *et al.*, 1984; 本文

Fig.5 Classification of granitoids from Prydz Bay(A from Middlemost, B from Maniar and Piccoli, 1989)

表3 普里兹湾花岗岩类 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic composition of the granitoids from Prydz Bay

样号	<i>t</i> (Ma)	Rb ( $\times 10^{-6}$ )	Sr ( $\times 10^{-6}$ )	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	<i>I</i> <sub>Sr</sub>	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	<i>f</i> <sub>Sm/Nd</sub>	<i>t</i> <sub>DM</sub> (Ga)	<i>t</i> <sub>DM</sub> <sup>2</sup> (Ga)
001-1	519	277.4	454.7	1.761	0.731067 ± 13	0.7180	34.15	285.19	0.0724	0.511587 ± 13	-20.50	-12.28	-0.63	1.68	2.24
005-3	516	349.1	299.7	3.361	0.741258 ± 10	0.7165	18.56	161.75	0.0694	0.511603 ± 13	-20.19	-11.81	-0.65	1.63	2.20
031-7	497	151.3	199.3	2.191	0.729667 ± 13	0.7141	11.29	55.47	0.1232	0.511914 ± 12	-14.12	-9.46	-0.37	2.07	1.99
035-5	497	247.7	58.4	12.241	0.794689 ± 13	0.7080	16.55	88.19	0.1135	0.511865 ± 12	-15.08	-9.81	-0.42	1.95	2.02
036-1	497	258.0	212.2	3.509	0.739620 ± 13	0.7148	20.70	134.35	0.0932	0.511777 ± 13	-16.80	-10.24	-0.53	1.73	2.05
083-1	500	337.4	136.3	7.144	0.764334 ± 10	0.7134	33.08	219.07	0.0914	0.511723 ± 13	-17.85	-11.13	-0.54	1.77	2.13
084-1	500	289.4	156.7	5.332	0.750440 ± 11	0.7125	33.65	204.53	0.0995	0.511761 ± 13	-17.11	-10.91	-0.49	1.85	2.11
090-1	516	436.1	239.9	5.247	0.754187 ± 11	0.7156	26.82	222.14	0.0731	0.511637 ± 7	-19.53	-11.39	-0.63	1.64	2.16
090-2	516	423.1	121.3	10.065	0.794713 ± 14	0.7207	40.79	313.06	0.0788	0.511623 ± 10	-19.80	-12.04	-0.60	1.72	2.22
100-1	498	337.1	167.5	5.807	0.767267 ± 13	0.7261	19.83	144.36	0.0831	0.511620 ± 10	-19.86	-12.64	-0.58	1.78	2.25
102-1	516	350.9	281.9	3.593	0.744884 ± 11	0.7185	35.15	291.34	0.0730	0.511558 ± 13	-21.07	-12.93	-0.63	1.72	2.29

注: 样品 083-1、084-1 的侵位年龄按 500Ma(Tingey, 1991) 计算, 样品 005-3、090-1、090-2 和 102-1 的侵位年龄按 516Ma(Carson *et al.*, 1996) 计算

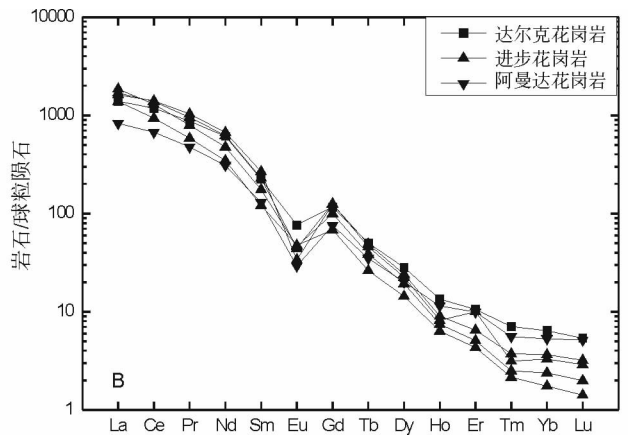
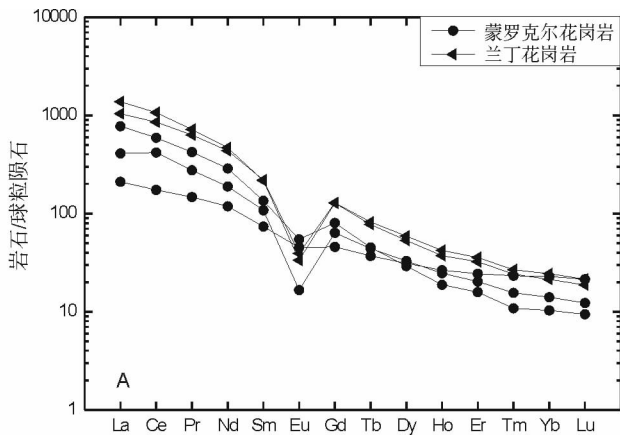


图6 普里兹湾花岗岩稀土元素球粒陨石标准化(Sun and Mcdonough, 1989)分布模式

A-蒙罗克尔花岗岩和兰丁花岗岩; B-达尔克花岗岩、进步花岗岩和阿曼达花岗岩

Fig.6 Chondrite-normalized (Sun and Mcdonough, 1989) REE distribution patterns for Munro Kerr and Landing granites (A), and Dalkoy, Progress and Amanda granites (B) of Prydz Bay



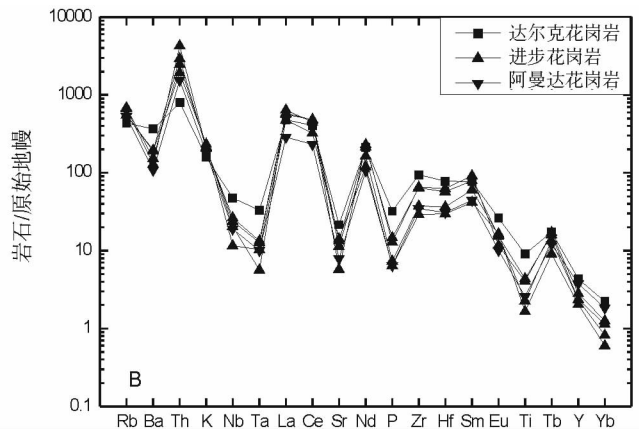
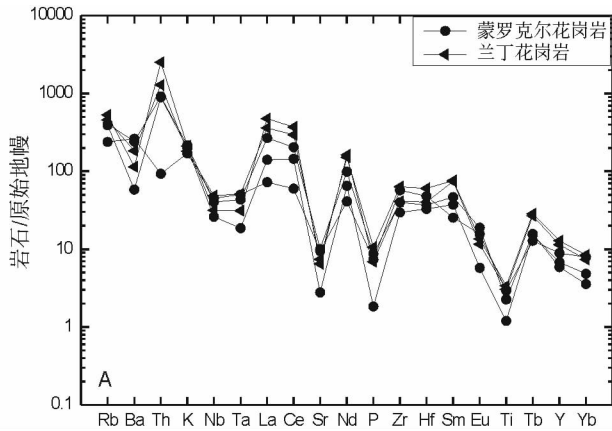


图7 普里兹湾花岗岩微量元素原始地幔标准化(Sun and Mcdonough, 1989)蛛网图

A-蒙罗克尔花岗岩和兰丁花岗岩; B-达尔克花岗岩、进步花岗岩和阿曼达花岗岩

Fig.7 Primitive mantle normalized (Sun and Mcdonough, 1989) spidergram for Munro Kerr and Landing granites (A), and Dalkoy, Progress and Amanda granites (B) of Prydz Bay

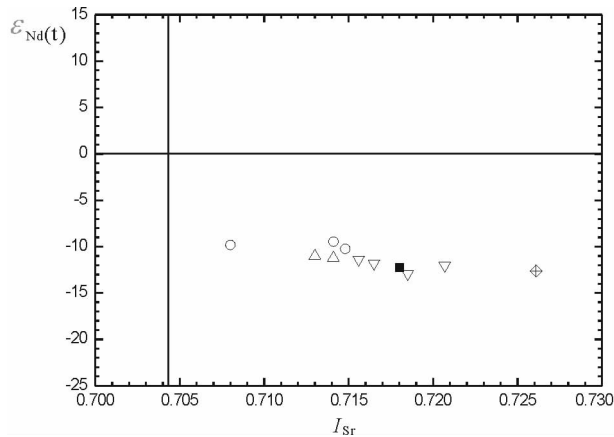


图8 普里兹湾花岗岩类  $I_{Sr}-\epsilon_{Nd}(t)$  图解(符号同图5)

Fig.8  $I_{Sr}-\epsilon_{Nd}(t)$  diagram for granitoids from Prydz Bay

可能是岩浆经长期分异演化的结果,因为岩浆的长期分离结晶可导致晚期结晶相 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值偏高(刘昌实和杨心宜, 1991)。值得一提的是,拉斯曼丘陵地区花岗岩的Nd同位素模式年龄与该区片麻岩的1.7~2.1Ga的Nd同位素模式年龄趋于一致(Sheraton *et al.*, 1984; Zhao *et al.*, 1995),从而花岗岩在成因上可能与该区片麻岩相联系。

## 6 讨论与结论

### 6.1 成因类型与构造环境

与世界平均S型花岗岩(Whalen *et al.*, 1987)相比,普里兹湾地区的花岗岩类具有较高的 $Fe^{\#}$ ( $Fe^{\#} = FeO^T / (FeO^T + MgO)$ )值、 $10^4 Ga/Al$ 值、全碱含量( $K_2O + Na_2O$ )和 $K_2O/Na_2O$ 比值,较低的铝饱和指数(A/CNK)以及Mg、Cr和Ni丰度,具有A型花岗岩的特征。在Zr- $10^4 Ga/Al$ 图解中,所有花

岗岩都落在A型花岗岩的区域(图9a);在Rb-(Y+Nb)构造图解(Pearce, 1996)中,所有花岗岩落入同碰撞花岗岩和板内花岗岩的区域,特别是有些样品分布在二者的界限边缘,表现出典型的后碰撞A型花岗岩的特征(图9b)。

前人仅仅根据产状和富含富铝矿物的特征认为拉斯曼丘陵的进步花岗岩属于同构造S型花岗岩(Stüwe *et al.*, 1989),经过地球化学分析后本文认为它只是一种特殊的铝质A型花岗岩,主要原因有以下两个方面:第一,从地球化学特征上看,进步花岗岩具有以上A型花岗岩的基本特征;第二,虽然进步花岗岩比一般的A型花岗岩富铝,但其铝饱和指数A/CNK不超过1.11,并不属于典型的强过铝质花岗岩。进步花岗岩的富铝特征很可能是在岩浆经历了强烈的分异演化,发生角闪石分离作用、挥发反应或与泥质岩石同化作用之后,俘获了过铝质成分并形成富铝矿物而产生的。

King *et al.* (1997)认为铝质A型花岗岩起源于长英质下地壳的部分熔融,其源区应是经过地幔流体交代作用后的富集碱质和高场强元素的“饱满型”源区。Jiang *et al.* (2002)也认为受幔源流体富集作用影响的地壳重融形成的花岗岩富集大离子亲石元素和稀土元素和放射性生热元素如Th、U等。从地球化学特征上看,普里兹湾地区的花岗岩类高 $(La/Yb)_N$ 和LREE/HREE比值暗示了岩浆源区不可能来自亏损的软流圈地幔,同时相对S型花岗岩更加富集Rb、Ba、Th和K等大离子亲石元素和稀土元素、富放射性生热元素Th和Zr、Nb、P等高场强元素以及高 $I_{Sr}$ 、低 $\epsilon_{Nd}$ 的同位素特征,反映出岩浆的源区可能是受幔源流体交代作用影响的“饱满型”下地壳岩石部分熔融形成。

以往的研究表明,A型花岗岩均无例外地产于拉张的构造背景下(王德滋,1999),其中一类花岗岩形成于裂谷和地幔柱环境,另一类形成于碰撞后的构造环境(Eby, 1992)。与产于大陆裂谷或洋岛环境下的碱性花岗岩(钠质具有正或

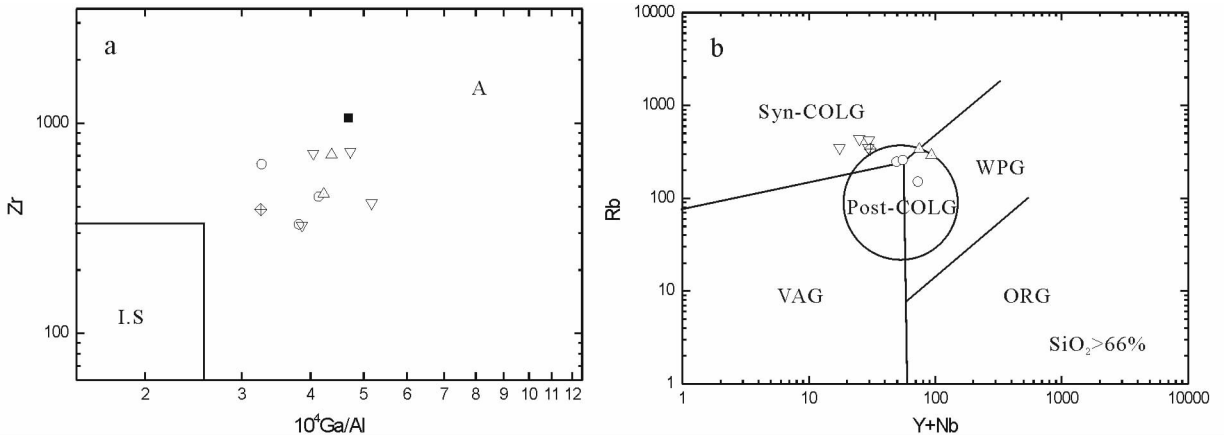


图9 Zr- $10^4\text{Ga}/\text{Al}$  (a)与Rb-(Y+Nb) (b)图解(据 Whalen *et al.*, 1987; Pearce, 1996; 符号同图5)

图中WPG-板内花岗岩; ORG-洋中脊花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; Syn-COLG-同碰撞花岗岩; Post-COLG-后碰撞花岗岩

Fig. 9 Plot of Zr- $10^4\text{Ga}/\text{Al}$  and Rb-(Y+Nb) of granitoids from Prydz Bay

无Nb异常)不同,普里兹湾地区花岗岩类具有高 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值、Nb负异常的特点。达尔克花岗岩与进步花岗岩具有极其相似的地球化学特征,其 $519 \pm 2\text{Ma}$ 的侵位年龄也与进步花岗岩(Carson *et al.*, 1996)相近,表明二者是同源岩浆同期演化的产物。从地质年代上看,普里兹湾地区花岗岩类的侵位年龄在 $520 \sim 490\text{Ma}$ 之间,其中达尔克花岗岩与进步花岗岩早于阿曼达、兰丁和蒙罗克尔花岗岩约20Ma。普里兹湾拉斯曼丘陵的变质峰期年龄为 $541 \pm 1\text{Ma}$ 和 $528 \pm 1\text{Ma}$ (Zhang *et al.*, 1996),布拉特滨海陡崖的变质峰期年龄为 $535\text{Ma}$ (Fitzsimons *et al.*, 1997)。显然,区域总体上的岩浆活动晚于变质峰期约 $20 \sim 40\text{Ma}$ 。在空间产状上,花岗岩体与区域变质岩呈侵入接触,进步花岗岩中还发育与区域片麻岩片理一致的弱变形条带。另外,普里兹湾地区变质岩总体上具有早期中下地壳挤压变形结构( $D_{1,2}$ )和随后的中上地壳拉伸变形结构( $D_{3,6}$ ),区域麻粒岩均表现为近等温减压的顺时针 $P-T$ 演化轨迹,反映出先是在总的东西向挤压构造体制下发生地壳增厚,随后南北向地壳伸展垮塌的剥蚀模式(Carson *et al.*, 1995; Dirks and Wilson, 1995; Fitzsimons, 1996)。综合以上分析,普里兹湾地区的花岗岩类应该形成于后碰撞的构造环境。普里兹湾地区泛非期的岩浆活动可能与后碰撞的造山作用有关,包括岩石圈减薄、岩浆底侵和地壳伸展作用等。

## 6.2 构造意义

过去十几年来南极地质研究取得了重大突破,主要表现为:在东南极地盾内部包括普里兹湾(Prydz Bay)、吕措-霍尔姆湾(Lützow-Holm Bay)、登曼冰川(Denman Glacier)和毛德皇后地(Dronning Maud Land)等地区都广泛发育泛非期高级变质作用和构造事件(Zhao *et al.*, 1992; Shiraishi *et al.*, 1992; Black *et al.*, 1992; Jacobs *et al.*, 1995),并对传统上东南极克拉通与东冈瓦纳其他块体于格林维尔期拼合的认

识提出质疑(Hensen and Zhou, 1995; Carson *et al.*, 1996; Fitzsimons, 2000)。

研究表明,普里兹带两侧为前泛非期不同性质的岩石圈单元,整个区域经历了早期中-下地壳挤压逆冲( $D_{1,2}$ )和晚期中-上地壳伸展垮塌( $D_{3,6}$ )的构造演化历史(Carson *et al.*, 1995),区域麻粒岩相变质作用表现为近等温减压的顺时针 $P-T$ 轨迹(Dirks and Wilson, 1995),结合冈瓦纳各个块体在 $500\text{Ma}$ 前的古地磁极移曲线并不一致的证据(Powell and Pisarevsky, 2001; Torsvik *et al.*, 2001),似乎表现出碰撞造山带的特点,但目前尚未发现蛇绿岩套、岛弧增生杂岩或高压变质岩等与碰撞造山紧密联系的直接指相标志。

普里兹带中普里兹湾地区的花岗岩类与格罗夫山泛非期花岗岩(Liu *et al.*, 2006)相似,都属于同碰撞-后碰撞A型花岗岩,这些花岗岩的演化具有多阶段性和穿时性。按照岩体侵位的时间先后顺序可将普里兹带花岗岩类分为早、中、晚三个阶段:格罗夫山紫苏花岗岩的侵位最早( $547\text{Ma}$ ; Liu *et al.*, 2006),其次是拉斯曼丘陵的进步花岗岩( $516\text{Ma}$ ; Carson *et al.*, 1996)和达尔克花岗岩( $519\text{Ma}$ ; 本文),最后是格罗夫山花岗岩( $503\text{Ma}$ ; Liu *et al.*, 2006)、阿曼达花岗岩( $498\text{Ma}$ ; 本文)、蒙罗克尔花岗岩( $497\text{Ma}$ ; 本文)和兰丁花岗岩( $500\text{Ma}$ ; Tingey, 1991)。普里兹带花岗岩类的形成时间近于或略晚于整体区域上的变质峰期(约 $550 \sim 535\text{Ma}$ ; Liu *et al.*, 2007)的年龄。在冈瓦纳古陆形成过程中,印度-南极和澳大利亚-南极微板块在泛非期发生沿北西-南东向碰撞造山引起普里兹湾沿岸和格罗夫山发生区域变质变形和广泛的岩浆作用,以及大量面状伟晶岩及同碰撞-后碰撞A型花岗岩的侵入。普里兹湾后碰撞花岗岩的确定支持普里兹带为泛非期碰撞造山带的认识。

致谢 野外工作得到任留东研究员、徐刚研究员的指导和大力协助,并提出重要的修改意见,在此深表感谢!

## References

- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192: 59–79
- Black LP, Kinny PD, Sheraton JW and Delor CP. 1991. Rapid production and evolution of late Archaean felsic crust in the Vestfold Block of East Antarctica. *Precambrian Research*, 50: 283–310
- Black LP, Sheraton JW, Tingey RJ, McCulloch MT. 1992. New U-Pb zircon ages from the Denman Glacier area, East Antarctica, and their significance for Gondwana reconstruction. *Antarctic Science*, 4: 447–460
- Carson CJ, Dirks PHGM, Hand M, Sims JP and Wilson CJL. 1995. Compressional and extensional tectonics in low-medium pressure granulites from the Larsemann Hills, East Antarctica. *Geological Magazine*, 132: 151–170
- Carson CJ, Fanning CM and Wilson CJL. 1996. Timing of the Progress Granite, Larsemann Hills: Additional evidence for Early Palaeozoic within east Antarctic Shield and implications for Gondwana assembly. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43: 539–553
- Dirks PHGM, Hoek JD, Wilson CJL and Sims JR. 1994. The Proterozoic deformation of the Vestfold Hills basement complex, East Antarctica: Implications for the tectonic evolution of adjacent granulite belts. *Precambrian Research*, 65: 277–295
- Dirks PHGM and Wilson CGL. 1995. Crustal evolution of the East Antarctica mobile belt in Prydz Bay: continental collision of 500Ma? *Precambrian Research*, 75: 189–207
- Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20: 641–644
- Fitzsimons ICW and Harley SL. 1991. Geological relationships in high-grade gneisses of the Brattstrand Bluffs coastline, Prydz Bay, East Antarctica. *Australian Journal of Earth Sciences*, 38: 497–519
- Fitzsimons ICW. 1996. Metapelitic migmatites from Brattstrand Bluffs, East Antarctica – metamorphism, melting and exhumation of the mid crust. *Journal of Petrology*, 37: 395–441
- Fitzsimons ICW, Kinny PD and Harley SL. 1997. Two stages of zircon and monazite growth in anatectic leucogneiss: SHRIMP constraints on the duration and intensity of Pan-African metamorphism in Prydz Bay, East Antarctica. *Terra Nova*, 9: 47–51
- Fitzsimons ICW. 2000. Grenville-age basement provinces in East Antarctica: Evidence for three separate collisional orogens. *Geology*, 28: 879–882
- Gao S, Ling W, Qiu Y, Lian Z, Hartmann G and Simon K. 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 2071–2088
- Harley SL, Snape I and Black LP. 1998. The evolution of a layered metaigneous complex in the Rauer Group, East Antarctica: Evidence for a distinct Archaean terrane. *Precambrian Research*, 89: 175–205
- Harley BJ and Zhou B. 1995. A Pan-African granulite facies metamorphic episode in Prydz Bay, Antarctica: Evidence from Sm-Nd garnet dating. *Australian Journal of Earth Sciences*, 42: 249–258
- Jacobs J, Kreutzer H and Weber K. 1995. K-Ar,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and apatite fission track evidence for Neoproterozoic and Mesozoic basement rejuvenation events in the Heimfrontfjella and Mannfallknausane (East Antarctica). *Precambrian Research*, 75: 251–262
- Jiang YH, Ling HF, Jing SY, Zhou XR, Rui XJ and Yang WZ. 2002. Enrichment of Mantle-derived fluids in the formation process of granitoids: Evidence from the Himalayan granitoids around Kunjirap in the western Qinghai-Tibet plateau. *Acta Geologica Sinica*, 76 (3): 343–350
- King PL, White AJR, Chappell BW and Allen CM. 1997. Characterization and origin of Aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38: 371–391
- Kinny PD, Black LP and Sheraton JW. 1993. Zircon ages and the distribution of Archaean and Proterozoic rocks in the Rauer Islands. *Antarctic Science*, 5: 193–206
- Lanyon R, Black LP and Seitz HM. 1993. U-Pb zircon dating of mafic dykes and its application to the Proterozoic geological history of the Vestfold Hills. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115: 184–203
- Liu CS and Yang XY. 1991. The effect of protracted fractionation of magma on change in initial Sr ratio in granitic batholith. *Geotectonica et Metallogenia*, 15: 152–159 (in Chinese with English abstract)
- Liu XC, Jahn BM, Zhao Y, Li M, Li HM and Liu XH. 2006. Late Pan-African granitoids from the Grove Mountains, East Antarctica: Age, origin and tectonic implications. *Precambrian Research*, 145: 131–154
- Liu XC, Zhao Y, Zhao GC, Jian P and Xu G. 2007. Petrology and geochronology of granulites from the McKaskle Hills, Eastern Amery Ice Shelf, Antarctica, and implications for the evolution of the Prydz Bay. *Journal of Petrology* (in press)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of the America Bulletin*, 101: 635–643
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Science Research*, 37: 215–224
- Pearce JA. 1996. sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19: 120–125
- Powell CM and Pisarevsky SA. 2001. Late Neoproterozoic assembly of East Gondwana. *Geology*, 30: 3–6
- Qiao GS. 1998. Normalization of isotopic dilution analyses: A new program for isotope mass spectrometric analysis. *Scientia Sinica (Series A)*, 31: 1263–1268
- Seitz HM. 1994. Estimation of emplacement pressure for 2350Ma high-Mg tholeiite dykes, Vestfold Hills, Antarctica. *European Journal of Mineralogy*, 6: 195–208
- Sheraton JW, Black LP and McCulloch MT. 1984. Regional geochemical and isotopic characteristics of high-grade metamorphics of the Prydz Bay area: the extent of Proterozoic reworking of Archaean continental crust in East Antarctica. *Precambrian Research*, 26: 169–198
- Sheraton JW and Black LP. 1988. Chemical evolution of granitic rocks in the East Antarctic Shield, with particular reference to post-orogenic granites. *Lithos*, 21: 37–52
- Shiraishi K, Hiroi Y, Ellis DJ, Fanning CM, Motoyoshi Y and Nakai Y. 1992. The first report of a Cambrian orogenic belt in East Antarctica-an ion microprobe study of the L tzoow-Holm Complex. In: Yoshida Y, Kamiuma K., Shiraishi K. (eds) *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 29–35
- Stüwe K, Braun HM and Peer H. 1989. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica. *Australian Journal Earth Sciences*, 36: 219–241
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Sanuder AD and Norry MJ (eds), *Magmatism in the Ocean Basins*, Geological Society Special Publication, 42: 313–345
- Taylor SR and McLennant SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, 312
- Tingey RG. 1981. Geological investigations in Antarctica 1968~1969: The Prydz Bay Amery Ice Shelf-Prince Charles Mountains area. Bureau Mineral Resources, Australia, Record, 1981(34)
- Tingey RG. 1991. The regional geology of Archaean and Proterozoic rocks in Antarctica. In: Tingey RJ (ed) *The geology of Antarctica*. Oxford: Oxford University Press, 1–73
- Torsvik TH, Carter LM, Ashwal LD, Bhushan SK, Pandit MK and Jamtveit B. 2001. Rodinia refined or obscured: Palaeomagnetism of the Malani igneous suite (NW India). *Precambrian Research*, 108: 319–333
- Wang DZ and Zhou JC. 1999. Lack back and look forward to granite research. *Acta Petrologica Sinica*, 15: 161–169 (in Chinese with

English abstract)

- Wang Y, Liu D, Ren L and Tang S. 2003. Advances in SHRIMP geochronology and their constrains on understanding the tectonic evolution of Larsemann Hills, East Antarctica. Programme & Abstract of the 9th International Symposium on Antarctic Earth Science, Potsdam, Germany, 334 – 335
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95: 407 – 419
- Yuan HL, Wu FY, Gao S, Liu XM, Xu P and Sun DY. 2003. Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS. Chinese Science bulletin, 48: 1511 – 1520 (in Chinese)
- Zhang L, Tong L, Liu XH and Scharer U. 1996. Conventional U-Pb age of the high-grade metamorphic rocks in the Larsemann Hills, East Antarctica. In: Pang Z, Zhang J and Sun J (eds). Advances in Solid Earth Sciences. Beijing: Science Press, 27 – 35
- Zhao Y, Song B and Wang Y. 1992. Geochronology of the metamorphic evolution of the larsemann Hills, East Antarctica. In: Yoshida Y *et al.* (eds). Recent Progress in Antarctic Earth Science. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 155 – 161
- Zhao Y, Liu XC, Song B, Zhang Z, Li J, Yao Y and Wang Y. 1995.

Constraints on the stratigraphic age of metasedimentary rocks of the Larsemann Hills, East Antarctica; Possible implication for Neoproterozoic tectonics. Precambrian Research, 75: 175 – 188

- Zhao Y, Liu XH, Liu XC and Song B. 2003. Pan-African events in Prydz Bay, East Antarctica, and their implications for East Gondwana tectonics. In: Yoshida M, Windley BF and Dasgupta S. (eds). Proterozoic East Gondwana: Supercontinent Assembly and Breakup. Geological Society, London, Special Publications, 206: . 231 – 245

#### 附中文参考文献

- 刘昌实, 杨心宜. 1991. 岩浆的长期分离结晶对岩石锆同位素初始比值的影响. 大地构造与成矿学, 15(2): 152 – 159
- 王德滋, 周金城. 1999. 我国花岗岩研究的回顾与展望. 岩石学报, 15(2): 161 – 169
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 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: 1511 – 1520