

# 南极横贯南极山脉休斯陡崖花岗质岩体的成因

崔迎春<sup>1,2,3</sup>, 马立杰<sup>4,5</sup>, 刘晨光<sup>1,2,3</sup>, 王庆超<sup>1</sup>, Andreas LÄUFER<sup>6</sup>

CUI Yingchun<sup>1,2,3</sup>, MA Lijie<sup>4,5</sup>, LIU Chenguang<sup>1,2,3</sup>, WANG Qingchao<sup>1</sup>, Andreas LÄUFER<sup>6</sup>

1. 自然资源部第一海洋研究所, 海洋地质与地球物理实验室, 山东 青岛 266061;

2. 自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东 青岛 266061;

3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237;

4. 中科院青岛海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071;

5. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266237;

6. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hannover 30655, Germany

1. *Lab of Marine Geology and Geophysics, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, Shandong, China;*

2. *Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, Shandong, China;*

3. *Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, Shandong, China;*

4. *Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, Shandong, China;*

5. *Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, Shandong, China;*

6. *Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hannover 30655, Germany*

**CUI Y C, MA L J, LIU C G, et al., 2021. Petrogenesis of the Hughes Bluff granitic pluton in the Transantarctic Mountains, Antarctica [J]. Journal of Geomechanics, 27 (5): 783 – 795. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.064**

**Abstract:** In order to elucidate the petrogenesis of the Hughes Bluff granitic pluton, the petrological and geochemical studies were conducted, and the results show that the Hughes Bluff granitic pluton is composed of monzogranite, intruded by fine-grained monzogranite dikes in the later period. They both are characterized by high abundance of silicon, alkali and potassium, enriched in Rb, Th, U and K and depleted in Nb, Ta, Nd and Ti relative to those of the primitive mantle, with the Rittmann Indexes less than 3 and the A/CNK values less than 1. They both also have a low total amount of rare earth elements and an abundance of light rare earth, showing weakly negative Eu anomaly and slightly positive Eu anomaly in the chondrite-normalized REE pattern for the monzogranite and granitic monzogranite dike respectively. All the data show that the rocks from the Hughes Bluff granitic pluton belong to the I-type granites, and the source region is probably the lower continental crust, but the contribution of mantle material cannot be ruled out. The magma in the source region underwent varying degrees of fractional crystallization of plagioclase, ilmenite, rutile and apatite, and was derived from a volcanic island arc environment related to subduction.

**基金项目:** 国家自然科学基金 (91958216, 41876227); 极地考察业务化与科研 (JD0620010, JD0620020)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91958216, 41876227), and the projects of Polar Operation and Scientific Research (Grant No. JD0620010, JD0620020).

**第一作者简介:** 崔迎春 (1976—), 男, 博士, 高级工程师, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: cuiyingchun@fio.org.cn

**收稿日期:** 2021-05-30; **修回日期:** 2021-08-30; **责任编辑:** 范二平

**引用格式:** 崔迎春, 马立杰, 刘晨光, 等. 2021. 南极横贯南极山脉休斯陡崖花岗质岩体的成因 [J]. 地质力学学报, 27 (5): 783–795. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.064

**Key words:** the Transantarctic Mountains; Petrogenesis; Pluton; I-type granite

**摘要:** 为了探讨横贯南极山脉休斯陡崖花岗质岩体的岩石成因, 对其开展了岩相学和岩石化学分析。结果表明, 休斯陡崖岩体主体岩石为二长花岗岩, 后期被细粒二长花岗岩岩脉侵入。二者都具有高硅、富碱和高钾特征, 里特曼指数小于 3, 岩石铝饱和指数 (A/CNK) 值小于 1; 微量元素原始地幔标准化分布型式具有 Rb、Th、U 和 K 元素富集, Nb、Ta、Nd 和 Ti 等元素亏损特征; 稀土元素总量偏低, 轻稀土富集。主期二长花岗岩的稀土元素球粒陨石标准化分布型式具有轻微的负 Eu 异常, 而岩脉具有正的 Eu 异常。休斯陡崖岩体的岩石类型为钙碱性准铝质 I 型花岗岩, 源区为下陆壳, 并伴有幔源物质的混入。在源区, 岩浆发生了不同程度的斜长石、钛铁矿、金红石和磷灰石的分离结晶作用, 其形成的构造环境为与俯冲作用有关的火山岛弧环境。

**关键词:** 横贯南极山脉; 地球化学; 花岗质岩石; I 型花岗岩

**中图分类号:** P581 **文献标识码:** A

## 0 引言

横贯南极山脉 (Transantarctic Mountains) 是世界上最宏伟的山系之一, 从南极洲太平洋奥茨海岸 (Oats Coast) 延伸到威德尔海龙尼冰架 (Ronne Ice Shelf), 长达 3000 多千米, 其前泥盆纪基底记录了晚新元古代—早古生代期间区域地质构造环境由被动陆缘向活动陆缘转变的过程 (Stump, 1995; Faure and Mensing, 2011; Goodge, 2020), 受此影响, 基底岩石普遍发生变质、变形、抬升与剥蚀并伴随岩浆的侵入。这期地质作用被称为罗斯造山运动 (Ross Orogeny; Stump, 1995), 它是晚新元古代—早古生代期间古太平洋板块与东南极板块间汇聚的结果。

横贯南极山脉造山带与罗斯造山运动相关的岩浆作用非常发育, 侵入岩产状主要呈岩株状, 还发育少量喷出岩 (Encarnación et al., 1999; Wareham et al., 2001)。侵入就位的岩体被统称为格拉尼特港侵入体 (Granite Harbor Intrusives; Gunn and Warren, 1962), 主要由长英质岩石和少量超镁铁质—镁铁质岩石组成, 以钙碱性系列岩石为主, 还有少量的碱性系列岩石。规模上, 它由罗斯海 (Ross Sea) 至彭萨科拉山脉 (Pensacola Mountains) 逐渐减少 (Stump, 1995)。

Borg et al. (1987) 和 Vetter and Tessensohn (1987) 对位于北维多利亚地威尔逊地体 (Wilson Terrane) 的格拉尼特港侵入体研究后发现, 威尔逊地体内侧即靠近极地高原 (Polar Plateau) 一侧主要由过铝二云母花岗岩组成, 具有 S 型花岗岩特征; 而远离的一侧即外侧则以花岗闪长岩至石英

闪长岩为主, 具有 I 型花岗岩特征; 其构造环境为活动陆缘环境。同时主微量元素由内侧至外侧的变化表明地壳组分越来越多的参与。格拉尼特港侵入体氧同位素结果也显示了类似的结果 (Dallai et al., 2002, 2003)。Read et al. (2002) 和 Cottle and Cooper (2006) 还发现了与区域拉张环境相关的 A 型花岗岩类熔体。另外, Goodge et al. (2012) 对位于中横贯南极山脉的格拉尼特港侵入体研究后发现, 该地区岩浆活动时限长达 100 Ma, 岩浆中心有海向迁移的特征, 这可能反映了造山收缩过程中俯冲板块的折返和弧前增厚。

至今, Stump (1995)、Goodge (2020) 和 Faure and Mensing (2011) 系统梳理了格拉尼特港侵入体相关研究动态。资料显示, 格拉尼特港侵入体可分为前构造期、同构造期和构造期后岩浆作用 (Allibone et al., 1993; Goodge et al., 1993; Encarnación and Grunow, 1996; Goodge et al., 2012), 但由于造山带剥蚀严重, 且上覆巨厚的冈瓦纳序列和年轻的冰川沉积以及横贯南极山脉内侧被现代冰帽覆盖, 造成对罗斯造山带岩浆作用认知仍很局限, 尤其是由于可靠的 U-Pb 结晶年龄的缺乏, 很难确定事关罗斯岩浆作用的开始时间及其地球化学随时间的演化。

休斯陡崖花岗质岩体位于戴维冰川 (David Glacier) 的南侧, 属于格拉尼特港侵入体的一部分, 目前对此岩体的研究属于空白。文中对休斯陡崖花岗质岩体开展了岩石成因研究, 岩相学和地球化学研究结果显示该岩体属于 I 型花岗岩, 源区可能为下地壳, 但有幔源物质的混入, 岩浆演化过程中经历了不同程度的斜长石、钛铁矿、金红石和磷灰石的分离结晶作用。综合岩石地球化

学和区域地质特征, 认为休斯陡崖岩体形成于与俯冲作用有关的火山岛弧环境。

## 1 地质背景

相关学者曾对横贯南极山脉的地质特征进行过系统总结 (Stump, 1995; Faure and Mensing, 2011; Goodge, 2020), 它的抬升主要发生在晚中生代和早新生代 (Goodge, 2020)。目前该山脉出露的最古老岩石为位于中部米勒岭-地质学家岭 (Miller Range-Geologist Range) 的中太古代尼姆洛德杂岩 (Nimrod Complex; Goodge and Fanning, 2016), 它不但记录了古元古代尼姆洛德造山作用 (Nimrod Orogeny), 也记录了早古生代罗斯造山作用 (Ross Orogeny)。

早古生代罗斯造山带的形成是古太平洋板块西向俯冲于东南极古陆之下所致 (Estrada et al., 2016)。位于太平洋奥茨海岸和罗斯海 (Ross Sea) 之间的北维多利亚地 (Northern Victoria Land) 是罗斯造山带出露最好的区域, 研究程度较高。北维多利亚地地质构造复杂, 由陆向海方向依次为威尔逊地体 (Wilson Terrane)、鲍威尔地体 (Bowers Terrane) 和罗伯逊湾地体 (Robertson Bay Terrane; Weaver et al., 1984; 图 1a)。威尔逊地体主要由遭受多期变形的低-高级变沉积岩、混合岩组成, 该套岩石记录了被动边缘和活动边缘沉积环境, 两种陆缘环境的转换时间即俯冲开始时间约在 550 Ma (Estrada et al., 2016)。罗斯造山运动造成了威尔逊地体岩石局部发生榴辉岩相超高压变质作用 (1.6 ~ 3.3 Gpa,  $T \approx 750 \sim 850 \text{ }^\circ\text{C}$ ; Di Vincenzo et al., 1997), 同时威尔逊地体普遍遭受与罗斯造山作用不同演化阶段有关的岩浆侵入 (Armienti et al., 1990), 这些岩浆的源区主要为深部壳源熔体或者地幔, 岩浆成分变化较大, 而且镁铁质和长英质岩浆并非来自同一岩浆源区 (Cooper et al., 2007), 最晚阶段镁铁质和长英质岩浆活动与板片折返有关 (Rocchi et al., 2009)。

鲍威尔地体主要由中寒武世-早奥陶世极低级变火山-沉积岩组成 (Weaver et al., 1984), 火山岩具有大洋岛弧特征 (Rocchi et al., 2011)。罗伯逊湾地体主要由晚寒武世-早奥陶世深水浊积岩组成 (Goodge, 2007), 属于俯冲增生楔环境 (Estrada et al., 2016)。鲍威尔地体与威尔逊地体

和罗伯逊湾地体之间均以断层接触, 前者为兰特曼断层 (Lantermann Fault), 后者为闰年断层 (Leap Year Fault; Capponi et al., 1999)。三个地体拼贴在一起后受到泥盆纪-早石炭世阿德默勒尔蒂侵入岩 (Admiralty Intrusives) 的侵入并伴随着加利波利火山岩 (Gallipoli Volcanics) 的喷发 (Federico et al., 2010)。

罗斯造山运动造成区域抬升和剥蚀, 这种过程持续到了晚志留世或早泥盆世, 形成了区域性剥蚀面——库克里剥蚀面 (Kukri Erosion Surface; Isbell, 1999)。在该剥蚀面之上沉积了志留纪-三叠纪陆源沉积序列——贝肯超群 (Beacon Supergroup; Barrett, 1981)。它与结晶基底一起被侏罗纪柯克帕特里克玄武岩 (Kirkpatrick Basalts) 和弗拉尔粒玄武岩 (Ferrar Dolerites) 侵入 (Antonini et al., 1999)。此后为晚新生代的麦克默多火山岩组 (McMurdo Volcanic Group) 和冰川沉积。

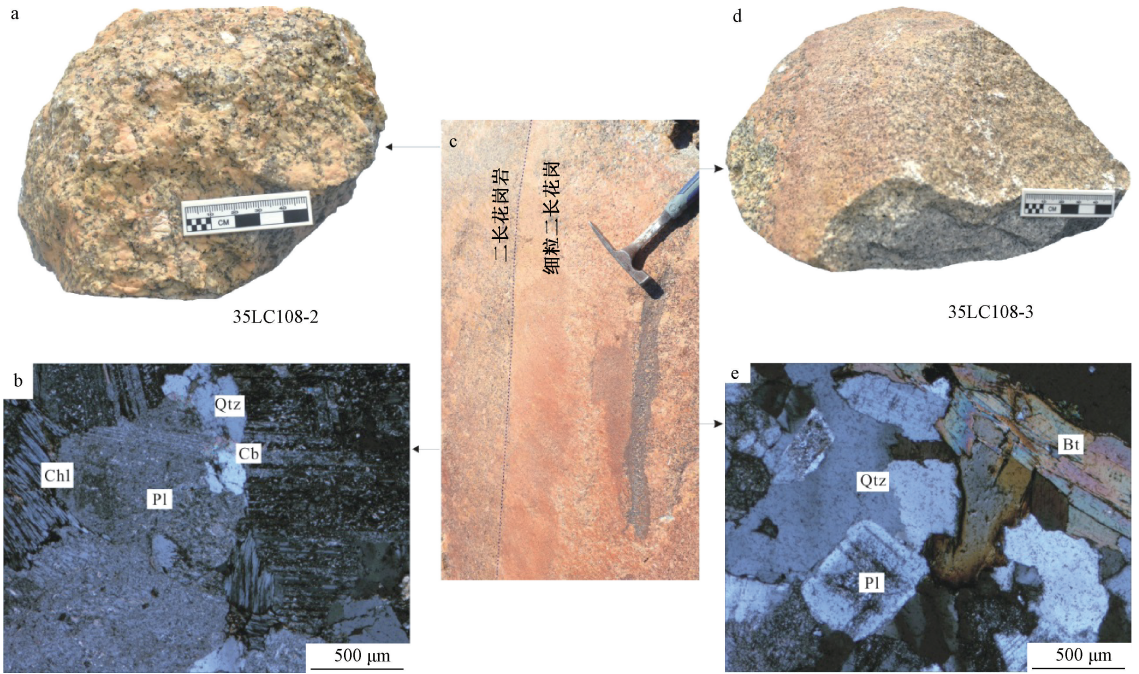
断裂构造是北维多利亚地主要特征构造类型之一。最为典型的断裂构造是西北-东南方向的右旋走滑断层, 如鲍威尔地体与威尔逊地体之间的兰特曼断层以及威尔逊地体和罗伯逊湾地体之间的闰年断层 (Capponi et al., 1999), 这些断层为早古生代断层 (Ferraccioli et al., 2009), 此后还发生了不同程度的活化 (Rossetti et al., 2000; Di Vincenzo et al., 2004)。除此之外, 区域上还发育受右旋拉张动力背景影响的东北-西南方向断层 (Salvini et al., 1997)。

休斯陡崖位于戴维冰川南侧, 为一冰原岛峰。大地构造位置上属于威尔逊地体, 周边出露的露头多为与罗斯造山作用相关的岩浆岩体。北侧紧邻戴维磁条带 (David magnetic lineation), 西南侧为 B1 磁条带 (B1 magnetic lineation), Ferraccioli and Bozzo (2003) 认为这些磁条带可能是新生代正断层 (图 1)。

## 2 岩体地质特征

休斯陡崖岩体面积约 1.7 km<sup>2</sup>, 鉴于安全因素和时间, 并未在该岩体出露点开展全面考察, 仅在直升机着陆处附近开展了地质考察并进行了取样 (图 1b)。总体上看, 该岩体经受了较强的冰川作用影响, 发育有羊背石、冰川擦痕和磨光面等冰川构造 (图 1c), 这表明戴维冰川的进退对此岩





Qtz—石英; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Chl—绿泥石; Cb—碳酸盐矿物

a—35LC108-2 样品宏观照片; b—二长花岗岩 (35LC108-2) 显微照片 (正交偏光); c—二长花岗岩与细粒二长花岗岩脉野外照; d—35LC108-3 样品宏观照片; e—细粒二长花岗岩 (35LC108-3) 显微照片 (正交偏光)

图 2 休斯陡崖岩体二长花岗岩及二长花岗岩脉野外露头接触关系及显微照片

Fig. 2 Outcrop and photomicrographs of the Hughes Bluff pluton

(a) Photograph of the sample 35LC108-2; (b) Photomicrograph of the monzogranite sample 35LC108-2 (crossed-polarized light); (c) Photograph of the outcrop of monzogranite and dyke; (d) Photograph of the sample 35LC108-3; (e) Photomicrograph of the fine-grained monzogranite sample 35LC108-3 (crossed-polarized light)

Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Bt—biotite; Chl—chlorite; Cb—carbonate

后采用日本理学 ZSX Primus II 型 X 射线荧光光谱仪进行测试, 测试项目包括 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub>、MnO 等元素。实验选用岩石标准物质 AGV-2、GSR-4、GSD-2、GSR-3 作为标准物质进行质量监控, 所有数据基本都在标准值及不确定度范围内, 所测试数据精度偏差小于 2%。在实验过程中, 每 5 个样品, 制备平行样一次, 控制实验流程稳定性。

微量元素测试在自然资源部第一海洋研究所测定, 具体流程为准确称取 50.00 mg 样品粉末于特氟龙溶样内胆中, 加几滴高纯水润湿后, 加入 1.50 ml 高纯 HNO<sub>3</sub>、1.50 ml 高纯 HF 后摇匀, 加盖并使用钢套密闭, 放入 190 °C 烘箱中分解 48 h 以上。冷却后取出溶样内胆, 置于电热板上蒸干后, 加入 1 ml HNO<sub>3</sub> 蒸至湿盐状, 加入 3 ml 体积分数为 50% 的 HNO<sub>3</sub> 和 0.5 ml Rh (1.0×10<sup>-6</sup>) 内标溶液后, 加盖并使用钢套密闭, 放入 150 °C 烘箱中分解 8 h 以上, 以保证对样品的完全提取。冷却

后用去离子水定容至 50.00 g。从待测溶液中取出 10.00 g, 用去离子水稀释至 20.00 g, 使用 Thermal X series 2 ICP-MS 分析系统, 测定 Li、Be、Co、Cr、Ni、Cu、Ga、Ge、Rb、Nb、Mo、Cd、In、Cs、Hf、Ta、W、Tl、Pb、Bi、Th、U、Sc、Y、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 等元素。

## 4 分析结果

### 4.1 岩相学特征

#### 4.1.1 样品 35LC108-2

岩性为二长花岗岩, 呈红褐色, 具有中粗粒花岗结构, 块状构造 (图 2a)。矿物主要为斜长石、钾长石、石英和黑云母 (图 2b)。斜长石 (38%~40%) 呈半自形柱状, 粒径多数为 2~4 mm, 部分粒径为 0.5~2.0 mm, 表面发生较强烈土化和绢云母化, 表面较浑浊; 钾长石 (23%~

45%) 呈他形粒状, 粒径多数为 2~5 mm, 个别粒径为 1~2 mm, 表面发生轻微土化, 多见钾长石内部包含或边缘镶嵌斜长石和黑云母构成包含嵌晶结构; 石英 (20%~23%) 呈他形粒状, 粒径多数为 2~4 mm, 表面干净无色; 黑云母 (5%~8%) 呈半自形片状, 片径 0.10~1.75 mm, 多数发生强烈绿泥石化, 沿解理缝析出黑色不透明矿物。副矿物主要有锆石和褐帘石。次生矿物主要有高岭土、碳酸盐矿物和绢云母。

#### 4.1.2 样品 35LC108-3

岩性为二长花岗岩, 呈灰褐色, 细粒花岗结构, 块状构造 (图 2d)。岩石中的矿物主要为斜长石、钾长石、石英和黑云母 (图 2e)。斜长石 (48%~50%) 呈半自形板柱状, 粒径多数为 0.2~2.0 mm, 少数粒径为 2.0~4.5 mm, 多数斜长石表面发生绢云母化和土化, 少数发育环带结构, 个别环带结构发育的斜长石中心蚀变较强, 边缘较干净, 形成净边结构; 钾长石 (18%~20%) 呈他形粒状, 粒径多数为 0.2~2.0 mm, 少数粒径为 2~4 mm, 钾长石表面发生轻微土化; 石英 (23%~25%) 呈他形粒状, 粒径多数为 0.2~2.0 mm, 少数粒径为 2.0~4.5 mm, 石英表面干净无色; 黑云母 (5%~8%) 呈半自形片状, 片径 0.2~1.5 mm, 个别黑云母发生轻微绿泥石化。副矿物主要有楣石。

#### 4.1.3 样品 35LC108-4

岩性为二长花岗岩, 呈肉红色, 具有似斑状结构, 块状构造。岩石主要由斑晶和基质组成, 斑晶主要为微斜长石 (13%~15%), 呈半自形板柱状, 粒径 10~20 mm 不等, 钾长石表面多发生土化。基质主要为斜长石、钾长石、石英和黑云母。斜长石 (28%~30%) 呈半自形柱状, 粒径多数为 2~4 mm, 部分粒径为 0.5~2.0 mm, 斜长石表面发生较强烈土化和绢云母化, 个别斜长石边缘与石英交生构成显微蠕虫结构; 钾长石 (23%~25%) 呈他形粒状, 粒径 1~5 mm 不等, 钾长石表面发生土化和轻微碳酸盐化, 多见钾长石边缘镶嵌斜长石和黑云母构成嵌晶结构; 石英 (20%~23%) 呈他形粒状, 粒径多数为 1.0~4.5 mm, 石英表面干净无色; 黑云母 (3%~5%) 呈半自形片状, 片径 0.10~1.25 mm, 部分黑云母发生绿泥石化, 沿解理缝析出黑色不透明矿物。副矿物主要由楣石、磷灰石、绿帘石和褐帘石等组成。

## 4.2 岩石地球化学特征

### 4.2.1 主量元素特征

休斯陡崖岩体的全岩主量元素分析结果见表 1。从表 1 中可以看出, 主期二长花岗岩 (35LC108-2 和 35LC108-4) 的主量元素中  $\text{SiO}_2$  含量介于 70.50%~71.20% 之间, 平均值为 70.85%;  $\text{Na}_2\text{O}$  含量介于 3.86%~4.07% 之间, 平均值为 3.97%;  $\text{K}_2\text{O}$  含量介于 4.17%~4.44% 之间, 平均值为 4.43%; 全碱含量 ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) 为 8.37%~8.65%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  为 1.09~1.15, 相对富钾;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为平均值为 14.00%,  $\text{CaO}$  含量的平均值为 1.75%, 样品的铝饱和指数 ( $A/\text{CNK}=\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO})$ ; 分子比) 介于 0.95~0.98,  $A/\text{NK}(\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ ; 分子比) 为 1.22~1.26, 属于准铝质岩石。岩石里特曼指数  $\sigma=2.15\sim 2.55$ ,  $\text{Mg}^\#$  值介于 38.92~41.55。CIPW 标准矿物中出现刚玉分子, 含量为 0.36%~0.64%, 无透辉石。该岩石属准铝质钙碱性花岗岩类。

细粒二长花岗岩脉 (35LC108-3) 的主量元素分析结果见表 1。其  $\text{SiO}_2$  含量为 74.47%,  $\text{CaO}$  含量为 1.63%,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 4.06%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 4.17%, 全碱含量 ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) 为 8.25%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  为 1.03, 样品相对富钾。样品的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 13.36%, 铝饱和指数 ( $A/\text{CNK}$ ) 为 0.94,  $A/\text{NK}$  为 1.19, 属于准铝质岩石。岩石里特曼指数  $\sigma=2.15$ ,  $\text{Mg}^\#$  值为 22.28。CIPW 标准矿物中出现透辉石, 含量为 0.61%, 无刚玉分子。该岩石属于准铝质钙碱性岩类。

### 4.2.2 微量元素特征

休斯陡崖岩体的微量元素分析见表 2。二长花岗岩 (35LC108-2 和 35LC108-4) 明显相对富集 Ba、Sr、Zr 和 Rb, 其含量分别介于  $1124.32\times 10^{-6}\sim 123.89\times 10^{-6}$ 、 $369.72\times 10^{-6}\sim 625.32\times 10^{-6}$ 、 $112.33\times 10^{-6}\sim 179.32\times 10^{-6}$  和  $133.03\times 10^{-6}\sim 149.48\times 10^{-6}$  之间。 $\text{Nb}/\text{Ta}$  值介于 8.69~12.57, 总体低于幔源岩浆的  $\text{Nb}/\text{Ta}=17$  (Hofmann, 1988; Green, 1995)。在原始地幔标准化微量元素蜘蛛网图中 (图 3a), 二长花岗岩具有明显的 K、La、Pb、P 和 Zr 异常峰和 U、Ta、Nb、Ce、Sm 和 Ti 异常谷, 具有右倾型式。

细粒二长花岗岩脉 (35LC108-3) 也具有较高的 Ba、Sr、Zr 和 Rb 含量, 分别为  $1124.32\times 10^{-6}$ 、 $369.72\times 10^{-6}$ 、 $112.33\times 10^{-6}$  和  $138.87\times 10^{-6}$ 。在原

表1 休斯陡崖岩体主量元素分析结果

Table 1 Major element results of the Hughes Bluff pluton

主量元素含量/%	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	总和	Mg <sup>#</sup>	石英	斜长石	正长石	刚玉	透辉石	紫苏辉石	钛铁矿	磁铁矿	磷灰石
35LC108-2	70.5	0.35	14.00	2.43	0.04	0.87	2.01	3.86	4.42	0.48	0.84	99.8	41.55	25.55	40.22	26.71	0.64	0.00	3.95	0.53	0.29	0.83
35LC108-3	74.47	0.12	13.36	1.53	0.02	0.22	1.63	4.06	4.17	0.11	0.64	100.33	22.28	30.92	40.45	24.76	0.00	1.28	1.88	0.23	0.22	0.25
35LC108-4	71.20	0.28	14.00	1.94	0.04	0.62	1.49	4.07	4.44	0.35	0.61	99.04	38.92	25.87	40.00	26.48	0.36	0.00	5.14	0.66	0.36	1.14

注: 矿物含量来自于GIPW标准矿物的计算结果; Mg<sup>#</sup> = 100 × Mg<sup>2+</sup> / (Mg<sup>2+</sup> + Fe<sup>2+</sup>)

表2 休斯陡崖岩体微量元素分析结果

Table 2 Trace element results of the Hughes Bluff pluton

微量元素含量/×10 <sup>-6</sup>	Ba	Sr	Zn	Zr	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Ga	Ge	Rb	Y	Nb	Mo	Cd	Cs	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U
35LC108-2	1231.89	625.32	48.06	179.72	36.12	2.91	2.48	9.45	1.06	2.54	0.8	4.19	19.17	0.84	133.03	10.14	11.64	0.78	—	2.07	4.76	1.24	0.27	0.84	23.67	0.03	14.55	2.14
35LC108-3	1124.32	369.72	28.62	112.33	26.15	2.15	1.21	2.17	0.44	0.96	0.27	0.65	13.29	0.92	138.87	8.42	6.19	4.60	0.02	1.85	3.16	0.71	0.33	0.71	37.77	0.03	10.32	2.00
35LC108-4	1172.63	521.56	52.35	178.86	27.12	2.52	1.59	8.29	1.36	2.37	0.55	0.41	17.16	0.99	149.48	8.98	9.99	0.11	0.02	4.20	4.90	0.79	0.28	0.69	30.40	0.03	17.46	2.61

注: — 低于检测限

表3 休斯陡崖岩体稀土元素分析结果

Table 3 Rare earth element results of the Hughes Bluff pluton

稀土元素含量/×10 <sup>-6</sup>	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	Eu <sub>N</sub>
35LC108-2	32.89	58.20	6.27	20.49	3.24	0.79	2.39	0.30	1.51	0.32	0.90	0.16	1.15	0.17	128.76	19.36	0.83
35LC108-3	25.04	41.73	4.47	14.76	2.27	0.75	1.80	0.25	1.41	0.30	0.89	0.15	1.08	0.17	95.05	15.71	1.10
35LC108-4	29.47	54.01	5.81	19.97	3.30	0.70	2.50	0.33	1.68	0.32	0.88	0.13	0.84	0.13	120.06	23.70	0.72

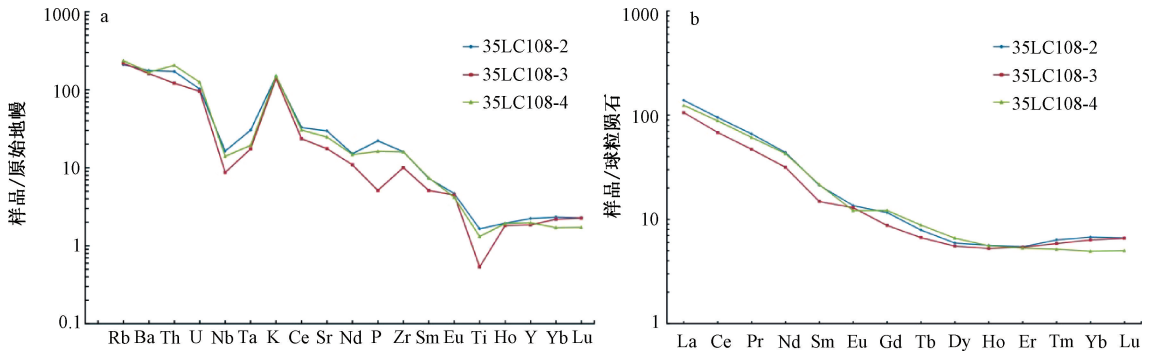
始地幔标准化微量元素蜘蛛网图中 (图 3a), 细粒二长花岗岩脉具有明显的 K、La、Pb 和 Zr 异常峰和 U、Ta、Nb、P、Sm 和 Ti 异常谷, 也具有右倾型式。

#### 4.2.3 稀土元素特征

二长花岗岩 (35LC108-2 和 35LC108-4) 的稀土元素总量 ( $\Sigma\text{REE}$ ) 偏低 (表 3), 介于  $120.06 \times 10^{-6} \sim 128.76 \times 10^{-6}$  之间。轻稀土元素 (LREE) 相对富集, 重稀土元素 (HREE) 相对亏损 ( $\text{LREE}/\text{HREE} = 16.66 \sim 17.69$ )。球粒陨石标准化稀土配分

曲线显示右倾型分布模式, 轻重稀土元素分馏明显 ( $(\text{La}/\text{Yb})_N = 15.71 \sim 23.70$ ), 且具有轻微的负 Eu 异常 ( $\delta\text{Eu} = 0.72 \sim 0.83$ ; 图 3b)。

细粒二长花岗岩脉 (35LC108-3) 的稀土元素总量偏低, 为  $95.05 \times 10^{-6}$ 。轻稀土元素 (LREE) 相对富集, 重稀土元素 (HREE) 相对亏损 ( $\text{LREE}/\text{HREE} = 14.75$ )。球粒陨石标准化稀土配分曲线显示右倾型分布模式, 轻重稀土元素分馏明显 ( $(\text{La}/\text{Yb})_N = 23.70$ ), 具有轻微的正 Eu 异常 ( $\delta\text{Eu} = 1.10$ ; 图 3b)。



a—微量元素原始地幔标准化蛛网图; b—稀土元素球粒陨石标准化配分模式图

图 3 休斯陡崖岩体稀土元素球粒陨石标准化配分模式图与微量元素原始地幔标准化蛛网图 (球粒陨石和原始地幔数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Primitive mantle (PM) normalized spider diagram (a) and chondrite-normalized REE pattern (b) for the Hughes Bluff pluton (Chondrite and PM values used for normalization are from Sun and McDonough, 1989)

## 5 讨论

### 5.1 岩石成因类型

花岗岩是地球分布较为广泛的一类岩石, 是大陆地壳重要的组成部分。尽管花岗岩的矿物组成在所有岩石类型中并非复杂, 但类型多样 (吴福元等, 2007)。目前最被广泛接受的花岗岩成因分类方案是 MISA 型分类, 其中 M 型十分少见。但这种方案对于经历高度分异结晶作用, 矿物组成和化学成分都趋于低共结的花岗岩而言并非有效 (吴福元等, 2007)。因此, 在花岗岩成因探讨及其分类研究时, 有必要先分析其是否经历了高度分异结晶作用。

高分异花岗岩具有较为特殊的地质、岩石、矿物和地球化学组成, 吴福元等 (2017) 曾对此进行了系统性总结。休斯陡崖岩体在矿物组成上并未出现高分异花岗岩的标志性矿物锂电气石、锂云母或含锂白云母, 元素组成不具有铝过饱和特征, 以及不具有稀土元素四组分效应特征 (吴

福元等, 2017)。此外, 在二元图  $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / \text{CaO} - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$  (图 4a) 中, 研究样品均落入了未分异的花岗岩域内, 这表明休斯陡崖岩体不属于高分异花岗岩。

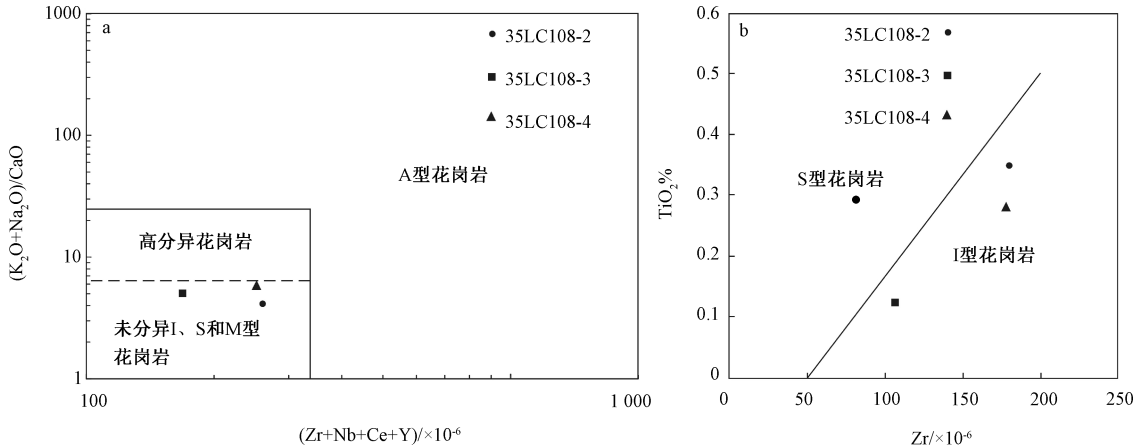
休斯陡崖岩体无论是二长花岗岩还是细粒二长花岗岩脉岩均未发现角闪石、堇青石和碱性矿物等指示 I、S 和 A 型花岗岩的典型矿物 (吴福元等, 2007), 因此从矿物学角度判定其成因类型比较困难。在花岗岩类型判别指标中,  $10000 \times (\text{Ga}/\text{Al}) > 2.6$ 、 $\text{Zr} > 250 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y} > 350 \times 10^{-6}$  常作为 A 型花岗岩的有效识别标准 (吴福元等, 2007)。而休斯陡崖岩体的  $10000 \times (\text{Ga}/\text{Al}) < 2.6$ 、 $\text{Zr} < 250 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y} < 350 \times 10^{-6}$ , 并不符合典型的 A 型花岗岩地球化学特征。此外, 休斯陡崖岩体稀土元素配分模式图并未出现 A 型花岗岩的“海鸥型”稀土配分模式 (王金芳等, 2018)。因此, 休斯陡崖岩体不属于 A 型花岗岩。

从岩石 CIPW 标准矿物角度看, 休斯陡崖岩体二长花岗岩的 CIPW 标准矿物中出现刚玉分子, 没有出现透辉石分子, 而且含量小于 1%; 细粒二长花



花岗岩脉的 CIPW 标准矿物中出现透辉石分子, 没有出现刚玉分子, 但其含量仍小于 1%。而且二长花岗岩和细粒二长花岗岩脉的铝饱和指数均低于 1, 属于准铝质系列。相比于典型的 I 型和 S 型花岗岩的

基本特征 (Chappell and White, 2001), 研究样品更倾向于 I 型花岗岩。另外, 在 I 型与 S 型判别图解 ( $\text{TiO}_2\text{-Zr}$ ; 图 4b) 中, 研究样品均落在 I 型花岗岩域内, 综合以上数据表明该岩体为 I 型花岗岩。



a—休斯陡崖花岗质样品的  $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$  图解 (底图据 Whalen et al., 1987); b—休斯陡崖花岗质样品的  $\text{TiO}_2\text{-Zr}$  图解 (底图据刘洪等, 2016)

图 4 休斯陡崖花岗岩成因类型判别图解

Fig. 4 Petrogenesis discrimination diagrams for the Hughes Bluff granitic pluton

(a)  $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$  diagram (modified after Whalen et al., 1987); (b)  $\text{TiO}_2\text{-Zr}$  diagram (modified after Liu et al., 2016)

### 5.2 岩浆源区及演化过程

岩浆一般是指在由上地幔或地壳部分熔融形成的, 常含有固体的混合物和富含挥发分的高温粘稠的硅酸盐熔融体。休斯陡崖岩体  $\text{SiO}_2$  含量为 70.50%~74.47%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量高于 13%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量高于 4%,  $\text{Na}_2\text{O}$  的含量高于 3%, 但低于相应  $\text{K}_2\text{O}$  的含量。一般而言,  $\text{SiO}_2$  含量大于 71% 的岩石中,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量不高于 12% (李锦轶等, 2007), 这表明岩体主要是由壳源物质熔融侵位形成的。Nb 和 Ta 的亏损也说明与陆壳有密切关系, 因为在原始地幔形成陆壳的第一阶段过程中 Nb 和 Ta 会优先残留于地幔 (Green, 1995)。休斯陡崖岩体 Nb/Ta 比值为 8.69~12.97, 低于幔源岩石的平均值 ( $17.5 \pm 2.0$ ; Hofmann, 1988; Green, 1995), 而接近于陆壳岩石的平均值 (11; Taylor and McLennan, 1985; Green, 1995)。同时该岩体的稀土元素配分曲线具有右倾特征, 也表明源区环境为地壳环境。此外, Rb/Sr 比值也常常用来判断花岗质岩石的源区性质, 休斯陡崖岩体 Rb/Sr 比值介于 0.21~0.38, 远大于上地幔 Rb/Sr 比值 (0.034; 国显正等, 2019), 综合证据表明其源区为地壳。

休斯陡崖岩体具有相对较低的 Sr、Yb 和 Y 含量, 暗示了其源区为中高压环境 (0.8~1.5 GPa; 孟元库等, 2018)。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  比值是指示岩浆形成温度的重要指标, 若其值大于 100, 则源区温度环境低于 875 °C, 反之, 则高于 875 °C (何鹏等, 2020)。休斯陡崖岩体  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  比值均小于 100, 因此其源区温度环境高于 875 °C, 这相当于区域罗斯造山运动的构造热环境 (Di Vincenzo et al., 1997)。 $\text{Mg}^\# (<40)$  也较低, 显示岩浆是玄武质下地壳发生部分熔融所成 (Rapp and Watson, 1995)。同时该岩体的 Zr/Hf 比值为 35.58~37.73, 高于壳源岩石的值 (33; Taylor and McLennan, 1985; Green, 1995), 而接近于幔源岩石的值 ( $36 \pm 2.0$ ; Taylor and McLennan, 1985; Green, 1995), 这表明可能发生了幔源物质的混入。

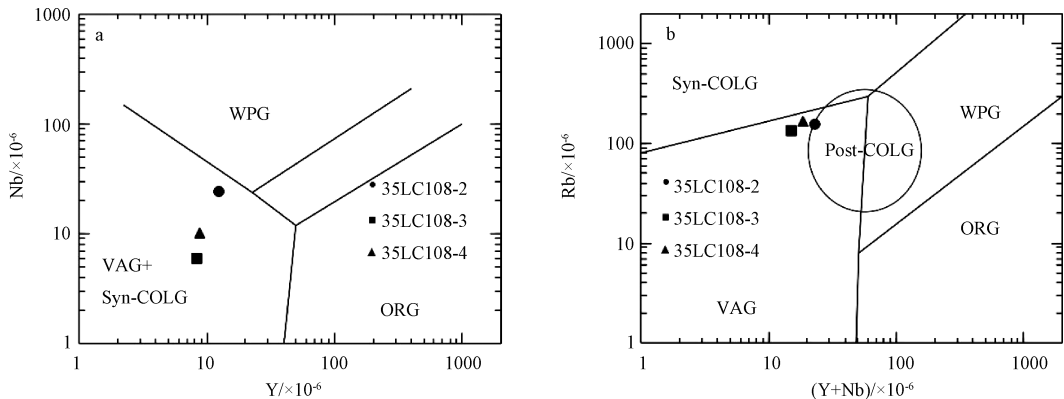
在源区岩浆常发生复杂的演化过程。二长花岗岩和细粒二长花岗岩脉都具有明显的 Ti 元素亏损, 表明在源区发生了钛铁矿、金红石等富 Ti 矿物的分离结晶。P 元素在二长花岗岩中富集, 但在细粒二长花岗岩脉中亏损, 这表明休斯陡崖岩体主期岩浆没有像晚期岩浆那样发生磷灰石的分离结晶。主体二长花岗岩具有弱的 Eu 负异常, 可能

暗示岩浆由低程度的熔融产生,而且经历了一定程度的斜长石分离结晶作用;而细粒二长花岗岩脉具有弱的 Eu 正异常,表明岩浆分异作用不明显,可能与原岩特征、结晶温压有关。

### 5.3 构造环境

花岗质岩石形成的构造环境是花岗岩研究中的一项重要内容,但由于源区继承性和熔融分异都会影响最终形成的花岗质岩石的物质成分,给判断其形成构造环境带来不便,因此需要综合运用多种方法(吴福元等,2007)。休斯陡崖岩体主体二长花岗岩具有 Rb 和 K 元素富集以及弱的负 Eu 异常,花岗岩的这种特征往往被认为是反映了母岩浆的特点(Ma et al., 1998),因此,休斯陡崖岩体地球化学特征可以用来释读其形成时的地质环境。休斯陡崖二长花岗岩和细粒二长花岗岩

脉都具有明显的 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素亏损,这种特征被认为是与俯冲作用有关的岛弧岩浆岩特征(张亚峰等,2015)。同时在 Y-Nb 和 (Y+Nb)-Rb 构造环境判别图解中(图 5),二长花岗岩和细粒二长花岗岩脉落在火山岛弧环境中。此外,休斯陡崖岩体中存在钾长石线理,这种构造现象区域上比较常见,通常被认为是与罗斯造山作用有关的俯冲作用引起的(Capponi et al., 2020)。另外,与休斯陡崖临近的伊里萨尔角(Irizar Cape)的花岗质岩体的锆石 U-Pb 年龄为  $489.9 \pm 4.4$  Ma (Rocchi et al., 2009),它与休斯陡崖主体岩石具有相似的元素化学组成,被认为是形成于罗斯造山带的最晚阶段的拉张环境中。综合以上资料推测,产生休斯陡崖岩体的构造环境为活动陆源的岩浆弧环境。



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

a—Y-Nb 构造环境判别图(底图据 Pearce et al., 1984); b—(Y+Nb)-Rb 构造环境判别图(底图据 Pearce, 1996)

图 5 休斯陡崖岩体微量元素构造环境判别图

Fig. 5 Diagrams showing the tectonic setting of Y-Nb (a) and (Y+Nb)-Rb (b) for the Hughes bluff pluton (a after Pearce et al., 1984; b after Pearce, 1996)

ORG—oceanic ridge granites; WPG—within-plate granites; VAG—volcanic arc granites; Syn-CLOG—syncollisional granites; Post-CLOG—postcollisional granites

## 6 结论

(1) 休斯陡崖岩体主体岩石类型为二长花岗岩,后期被细粒二长花岗岩岩脉侵入。无论是二长花岗岩还是细粒二长花岗岩脉,都具有高硅、高钾、富碱特征,属于准铝质钙碱性花岗质岩石。岩石普遍富集 Rb、Th、K 和 U 等大离子亲石元素,明显亏损 Nb 和 Ti 等元素,显示岛弧花岗岩地球化学特征,成因类型为 I 型花岗岩。

(2) 休斯陡崖岩体源区可能为下地壳,但有

幔源物质的混入。在源区,岩浆发生了不同程度的斜长石、钛铁矿、金红石和磷灰石的分离结晶作用。休斯陡崖岩体形成于与俯冲作用有关的火山岛弧环境,进一步的年代学资料将有助于制约其形成环境。

**致谢:** 在此感谢德国联邦地球科学与自然资源研究所邀请参加德国第十三次北维多利亚地地质考察(GANOVEX XIII)以及提供后勤支撑,同时也感谢考察队队友在取样方面给予的帮助和相关问题的建设性研讨。

## References

- ALLIBONE A H, COX S C, GRAHAM I J, et al., 1993. Granitoids of the Dry Valleys area, southern Victoria Land, Antarctica; plutons, field relationships, and isotopic dating [J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 36 (3): 281-297.
- ANTONINI P, PICCIRILLO E M, PETRINI R, et al., 1999. Enriched mantle-dupal signature in the genesis of the Jurassic Ferrar tholeiites from Prince Albert Mountains (Victoria Land, Antarctica) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 136 (1-2): 1-19.
- ARMIENTI P, GHEZZO C, INNOCENTI F, et al., 1990. Isotope geochemistry and petrology of granitoid suites from Granite Harbour Intrusives of the Wilson Terrane, North Victoria Land, Antarctica [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2 (1): 103-124.
- BARRETT P J, 1981. History of the Ross Sea region during the deposition of the Beacon Supergroup 400~180 million years ago [J]. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 11 (4): 447-458.
- BORG S G, STUMP E, CHAPPELL B W, et al., 1987. Granitoids of northern Victoria Land, Antarctica; Implications of chemical and isotopic variations to regional crustal structure and tectonics [J]. *American Journal of Science*, 287 (2): 127-169.
- CAPPONI G, CRISPINI L, MECCHERI M, 1999. Structural history and tectonic evolution of the boundary between the Wilson and Bowers terranes, Lanterman Range, northern Victoria Land, Antarctica [J]. *Tectonophysics*, 312 (2-4): 249-266.
- CAPPONI G, MONTOMOLI C, CASALE S, et al., 2020. Geology of the northern Convoy Range, Victoria Land, Antarctica [J]. *Journal of Maps*, 16 (2): 702-709.
- CHAPPELL B W, WHITE A J R, 2001. Two contrasting granite types: 25 years later [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48 (4): 489-499.
- COOPER A K, RAYMOND C, DIGGLES M, et al., 2007. Guidelines for extended abstracts in the 10th ISAES X online proceedings [C] //COOPER A K, RAYMOND C R. Antarctica: a keystone in a changing world-online proceedings of the 10th ISAES X. USGS Open-File Report 2007-1047.
- COTTLE J M, COOPER A F, 2006. Geology, geochemistry, and geochronology of an A-type granite in the Mulock Glacier area, southern Victoria Land, Antarctica [J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 49 (2): 191-202.
- DALLAI L, GHEZZO C, TURI B, et al., 2002. Oxygen isotope geochemistry of the Granite Harbour Intrusives, Wilson Terrane, Northern Victoria Land, Antarctica [J]. *Mineralogy and Petrology*, 75 (3-4): 223-241.
- DALLAI L, GHEZZO C, SHARP Z D, 2003. Oxygen isotope evidence for crustal assimilation and magma mixing in the Granite Harbour Intrusives, Northern Victoria Land, Antarctica [J]. *Lithos*, 67 (1-2): 135-151.
- DI VINCENZO G, PALMERI R, TALARICO F, et al., 1997. Petrology and geochronology of eclogites from the Lanterman Range, Antarctica [J]. *Journal of Petrology*, 38 (10): 1391-1417.
- DI VINCENZO G, ROCCHI S, ROSSETTI F, et al., 2004.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating of pseudotachylytes: the effect of elast-hosted extraneous argon in Cenozoic fault-generated friction melts from the West Antarctic Rift system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 223 (3-4): 349-364.
- ENCARNACIÓN J, GRUNOW A, 1996. Changing magmatic and tectonic styles along the paleo-Pacific margin of Gondwana and the onset of early Paleozoic magmatism in Antarctica [J]. *Tectonics*, 15 (6): 1325-1341.
- ENCARNACIÓN J, ROWELL A J, GRUNOW A M, 1999. A U-Pb age for the Cambrian Taylor Formation, Antarctica; Implications for the Cambrian time scale [J]. *The Journal of Geology* 107 (4): 497-504.
- ESTRADA S, LÄUFER A, ECKELMANN K, et al., 2016. Continuous Neoproterozoic to Ordovician sedimentation at the East Gondwana margin-implications from detrital zircons of the Ross Orogen in northern Victoria Land, Antarctica [J]. *Gondwana Research*, 37: 426-448.
- FAURE G, MENSING T M, 2011. The transantarctic mountains: rocks, ice, meteorites and water [M]. Dordrecht; Springer: 1-804.
- FEDERICO L, CRISPINI L, CAPPONI G, 2010. Fault-slip analysis and transpressional tectonics: a study of Paleozoic structures in northern Victoria Land, Antarctica [J]. *Journal of Structural Geology*, 32 (5): 667-684.
- FERRACCIOLI F, BOZZO E, 1999. Inherited crustal features and tectonic blocks of the Transantarctic Mountains: an aeromagnetic perspective (Victoria Land, Antarctica) [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104 (B11): 25297-25319.
- FERRACCIOLI F, BOZZO E, 2003. Cenozoic strike-slip faulting from the eastern margin of the Wilkes Subglacial Basin to the western margin of the Ross Sea Rift: an aeromagnetic connection [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 210 (1): 109-133.
- FERRACCIOLI F, ARMADILLO E, ZUNINO A, et al., 2009. Magmatic and tectonic patterns over the Northern Victoria Land sector of the Transantarctic Mountains from new aeromagnetic imaging [J]. *Tectonophysics*, 478 (1-2): 43-61.
- GOODGE J W, WALKER N W, HANSEN V L, 1993. Neoproterozoic-Cambrian basement-involved orogenesis within the Antarctic margin of Gondwana [J]. *Geology*, 21 (1): 37-40.
- GOODGE J W, 2007. Metamorphism in the Ross Orogen and its bearing on Gondwana margin tectonics [M] //CLOOS M, CARLSON W D, GILBERT M C, et al. Convergent Margin Terranes and Associated Regions: A Tribute to W. G. Ernst. Boulder, CO, USA; Geological Society of America: 185-203.
- GOODGE J W, FANNING C M, NORMAN M D, et al., 2012. Temporal, Isotopic and Spatial Relations of Early Paleozoic Gondwana-Margin Arc Magmatism, Central Transantarctic Mountains, Antarctica [J]. *Journal of Petrology*, 53 (10): 2027-2065.
- GOODGE J W, FANNING C M, 2016. Mesoarchean and Paleoproterozoic history of the nimrod complex, central Transantarctic mountains, Antarctica; Stratigraphic revisions and relation to the

- Mawson Continent in East Gondwana [J]. *Precambrian Research*, 285: 242-271.
- GOODGE J W, 2020. Geological and tectonic evolution of the Transantarctic Mountains, from ancient craton to recent enigma [J]. *Gondwana Research*, 80: 50-122.
- GREEN T H, 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. *Chemical Geology*, 120 (3-4): 347-359.
- GUNN B M, WARREN G, 1962. Geology of Victoria Land between Mawson and Mullock Glaciers, Antarctica [J]. *New Zealand Geological Survey Bulletin*, 71: 1-157.
- GUO X Z, JIA Q Z, LI J C, et al., 2019. The forming age and geochemistry characteristics of the granodiorites in Harizha, East Kunlun and its tectonic significance [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (2): 286-300. (in Chinese with English abstract)
- HE P, LU X Z, YANG R N, et al., 2020. Petrogeochemistry, zircon U-Pb chronology of I type granite from Yaolesayi estuary, Northern Altun [J]. *Mineral Exploration*, 11 (9): 1822-1830. (in Chinese with English abstract)
- HOFMANN A W, 1988. Chemical differentiation of the earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 90 (3): 297-314.
- ISELL J L, 1999. The Kukri Erosion Surface; a reassessment of its relationship to rocks of the Beacon Supergroup in the central Transantarctic Mountains, Antarctica [J]. *Antarctic Science*, 11 (2): 228-238.
- LÄUFER A L, KLEINSCHMIDT G, HENJES-KUNST F, et al., 2005. Geological map of the cape Adare Quadrangle Victoria Land, Antarctica, 1: 250000 [R]. PERTUSATI P C, ROLAND N W. German-Italian Geological Antarctic Map Programme (GIGAMAP), Hannover; BGR.
- LI J Y, Gao L M, SUN G H, et al., 2007. Shuangjingzi midge Triassic syn-collisional crust derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (3): 565-582. (in Chinese with English abstract)
- LIU H, ZHANG H, LI G M, et al., 2016. Petrogenesis of the Early Cretaceous Qingcaoshan strongly peraluminous S-type granitic pluton, Southern Qiangtang, Northern Tibet: Constraints from whole-rock geochemistry and zircon U-Pb geochronology [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 52 (5): 848-860. (in Chinese with English abstract)
- MA C Q, LI Z C, EHLERS C, et al., 1998. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China [J]. *Lithos*, 45 (1-4): 431-456.
- MENG Y K, XU Z Q, GAO C S, et al., 2018. The identification of the Eocene magmatism and tectonic significance in the middle Gangdese magmatic belt, southern Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34 (3): 513-546. (in Chinese with English abstract)
- PEARCE J, 1996. Sources and settings of granitic rocks [J]. *Episodes*, 19 (4): 120-125.
- PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G, 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25 (4): 956-983.
- RAPP R P, WATSON E B, 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8 ~ 32 kbar; implications for continental growth and crust-mantle recycling [J]. *Journal of Petrology*, 36 (4): 891-931.
- READ S E, COOPER A F, WALKER N W, 2002. Geochemistry and U-Pb geochronology of the Neoproterozoic-Cambrian Koettlitz Glacier Alkaline province, Royal Society range, Transantarctic mountains, Antarctica [J]. *Royal Society of New Zealand Bulletin*, 35: 143-151.
- ROCCHI S, DI VINCENZO G, GHEZZO C, et al., 2009. Granite-lamprophyre connection in the latest stages of the Early Paleozoic Ross Orogeny (Victoria Land, Antarctica) [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 121 (5-6): 801-819.
- ROCCHI S, BRACCIALI L, DI VINCENZO G, et al., 2011. Arc accretion to the early Paleozoic Antarctic margin of Gondwana in Victoria Land [J]. *Gondwana Research*, 19 (3): 594-607.
- ROSSETTI F, STORTI F, SALVINI F, 2000. Cenozoic noncoaxial transtension along the western shoulder of the Ross Sea, Antarctica, and the emplacement of McMurdo dyke arrays [J]. *Terra Nova*, 12 (2): 60-66.
- SALVINI F, BRANCOLINI G, BUSETTI M, et al., 1997. Cenozoic geodynamics of the Ross Sea region, Antarctica: crustal extension, intraplate strike-slip faulting, and tectonic inheritance [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102 (B11): 24669-24696.
- STUMP E, 1995. The Ross orogen of the Transantarctic Mountains [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press: 1-284.
- SUN S S, MCDONOUGH W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [M] // SAUNDERS A D, NORRY M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42 (1): 313-345.
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M, 1985. *The continental crust: its composition and evolution* [M]. Palo Alto, California: Blackwell Scientific: 1-312.
- VETTER U, TESSENHORN F, 1987. S- and I-type granitoids of North Victoria Land, Antarctica, and their inferred geotectonic setting [J]. *Geologische Rundschau*, 76 (1): 233-243.
- WANG J F, LI Y J, LI H Y, et al., 2018. Zircon U-Pb dating of the Shijiangshan Late Jurassic-early Cretaceous A-type granite in Xi Ujimqin Banner of Inner Mongolia and its tectonic setting [J]. *Geological Bulletin of China*, 37 (2-3): 382-396. (in Chinese with English abstract)
- WAREHAM C D, STUMP E, STOREY B C, et al., 2001. Petrogenesis of the Cambrian Liv Group, a bimodal volcanic rock suite from the Ross orogen, Transantarctic Mountains [J]. *GSA Bulletin*, 113 (3): 360-372.
- WEAVER S D, BRADSHAW J D, LAIRD M G, 1984. Geochemistry of Cambrian volcanics of the Bowers Supergroup and implications for the early Palaeozoic tectonic evolution of northern Victoria Land, Antarctica [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 68 (1): 128-

140.

WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. 1987. A-Type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95 (4): 407-419.

WU F Y, LI X H, YANG J H, et al. , 2007. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (6): 1217-1238. (in Chinese with English abstract)

WU F Y, LIU X C, JI W Q, et al. , 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research [J]. *Science China Earth Sciences*, 60 (7): 1201-1219.

ZHANG Y F, LIN X W, GUO Q M, et al. , 2015. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Geochemistry of Aral Granitic Plutons in Koktokay Area in the Southern Altay Margin and Their Source Significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89 (2): 339-354. (in Chinese with English abstract)

### 附中文参考文献

国显正, 贾群子, 李金超, 等, 2019. 东昆仑哈日扎花岗岩闪长岩形成时代、地球化学特征及其构造意义 [J]. *地质力学学报*, 25 (2): 286-300.

何鹏, 芦西战, 杨睿娜, 等, 2020. 阿尔金北缘尧勒萨依河口 I 型花岗岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学研究 [J]. *矿产勘查*, 11

(9): 1822-1830.

李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等, 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束 [J]. *岩石学报*, 23 (3): 565-582.

刘洪, 张晖, 李光明, 等, 2016. 藏北羌塘南缘早白垩世青草山强过铝质 S 型花岗岩的成因: 来自地球化学和锆石 U-Pb 年代学的约束 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 52 (5): 848-860.

孟元库, 许志琴, 高存山, 等, 2018. 藏南冈底斯带中段始新世岩浆作用的厘定及其大地构造意义 [J]. *岩石学报*. 34 (3): 513-546.

王金芳, 李英杰, 李红阳, 等, 2018. 内蒙古西乌旗石匠山晚侏罗世—早白垩世 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄及构造环境 [J]. *地质通报*, 37 (2-3): 382-396.

吴福元, 李献华, 杨进辉, 等, 2007. 花岗岩成因研究的若干问题 [J]. *岩石学报*, 23 (6): 1217-1238.

吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等, 2017. 高分异花岗岩的识别与研究 [J]. *中国科学: 地球科学*, 47 (7): 745-765.

张亚峰, 蔺新望, 郭岐明, 等, 2015. 阿尔泰南缘可可托海地区阿拉尔花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其源区意义 [J]. *地质学报*, 89 (2): 339-354.

### 开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 可以听到作者的语音

介绍及更多文章相关资讯

