

东南极格罗夫山变质基性岩地球化学特征^{*}

俞良军¹ 刘小汉¹ 刘晓春² 赵越² 方爱民¹ 琚宜太¹

YU LiangJun¹, LIU XiaoHan¹, LIU XiaoChun², ZHAO Yue², FANG AiMin¹ and JU YiTai¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化实验室, 北京 100029

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

1. LTE Lab. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

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

2001-08-07 收稿, 2001-10-13 改回.

Yu LJ, Liu XH, Liu XC, Zhao Y, Fang AM and Ju YT. 2002. Geochemical characteristics of the metabasic volcanic rocks in the Grove Mountains, East Antarctica. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1):91-99

Abstract Based on geochemical signatures of metabasic volcanic rocks, two types of basalt in the Grove Mountains are recognized, namely, oceanic island basalt (OIB) and Mid-oceanic ridge basalt (MORB). Type 1 rocks have similar geochemical characteristics, with high Ti ($\text{TiO}_2=2.68\%$), REE ($=202\mu\text{g/g}$), LREE [$(\text{La}/\text{Yb})_N=4.8$], Ti/Y ($=343$) and Zr/Ti ($=3.1$), which are similar to those of OIB, and are considered to be products of magma from enriched mantle sources (EM). Type 2 rocks are characterized by low Ti ($\text{TiO}_2=1.1\%\sim 1.31\%$), REE ($47\sim 93\mu\text{g/g}$), LREE/HREE ($2.27\sim 2.54$), $(\text{La}/\text{Yb})_N (=1.30\sim 1.62)$ and lower P ($\text{P}_2\text{O}_5=0.1\%\sim 0.2\%$) than those of OIB, which are similar to those of MORB. The presence of such rock assemblages suggests the existence of an ocean basin in this region during Pan-African ages.

Key words OIB, MORB, Grove Mountains, East Antarctica

摘要 东南极格罗夫山变质基性岩的地球化学研究表明, 该区存在两类玄武岩, 即洋岛型玄武岩(OIB)和洋中脊型玄武岩(MORB)。OIB型具有大体类似的地球化学性质, 它们均富集 Ti($\text{TiO}_2=2.68\%$)、REE($=202\mu\text{g/g}$)、LREE [$(\text{La}/\text{Yb})_N=4.8$]、Ti/Y($=343$)、Zr/Y($=3.1$), 具洋岛玄武岩的特征, 推测岩浆来源于富集地幔源区(EM)。而MORB型以低 Ti($\text{TiO}_2=1.1\%\sim 1.31\%$), 明显低于OIB的P的含量($\text{P}_2\text{O}_5=0.1\%\sim 0.2\%$), 低REE($47\sim 93\mu\text{g/g}$)、LREE/HREE($2.27\sim 2.54$)、 $(\text{La}/\text{Yb})_N (=1.30\sim 1.62)$ 为特征, 具洋中脊玄武岩的特征。MORB和OIB组合的出现说明在泛非期该区可能存在过洋盆。

关键词 洋岛型玄武岩; 洋中脊型玄武岩; 格罗夫山; 东南极

中图法分类号 P588.124; P595

格罗夫山(Grove Mountains)属于南极冰盖内陆的冰原岛峰(nunatak)群, 位于中山站南450公里($72^\circ 20' - 73^\circ 10' \text{S}$, $73^\circ 50' - 75^\circ 40' \text{E}$), 是目前东南极极少数尚未有任何国家开展正规科学考察的地区之一(图1)。中国第15次、16次南极考察队(1998年12月-2000年1月)对该区进行了野外考察。

10年来, 中国地质学家对位于东南极伊利莎白公主地(Princess Elizabeth Land)普里兹湾(Prydz Bay)海岸带中部的拉斯曼丘陵(Larsemann Hills)进行的地质研究, 证实了它属于泛非期(Pan-African)的构造活动带(Zhao *et al.*, 1992, 1993, 1995; Dirks and Wilson 1995; Hensen and Zhou,

* 本工作为中国科学院创新(KZCX2-303)和国家攻关(98-927-01-06)资助项目

第一作者简介: 俞良军, 男, 1972年生, 助研, 岩石学专业. E-mail: yulj21@sohu.com

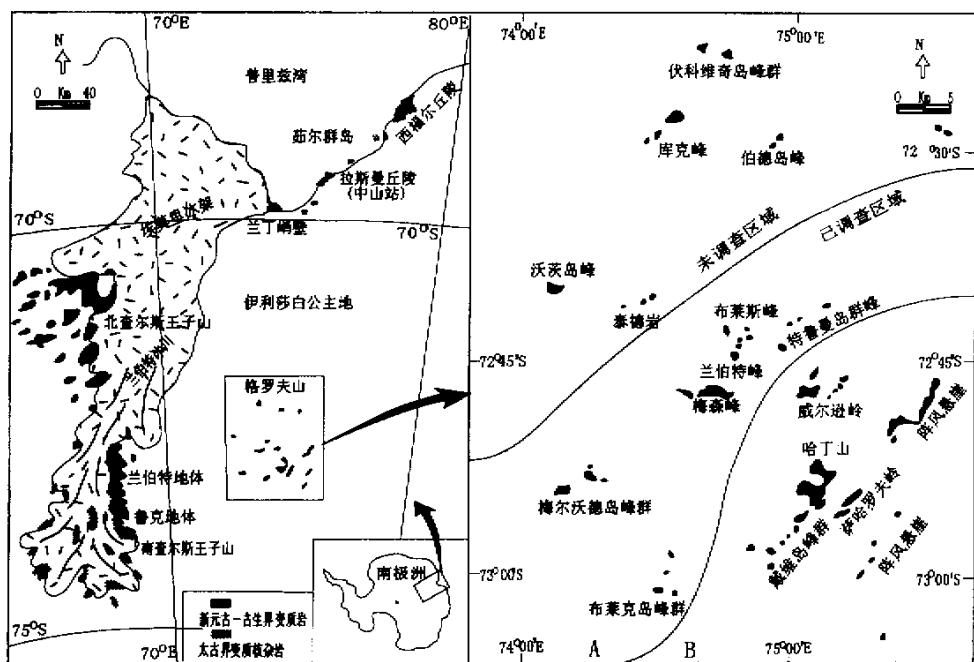


图1 格罗夫山地理位置图

Fig. 1 Geographical map of the Grove Mountains

1995),而不是前人(Tingey, 1982, 1991; Sheraton *et al.*, 1984; Grew and Manton, 1986; Black *et al.*, 1987; Stüwe *et al.*, 1989; Stüwe and Powell, 1989; Katz, 1989; Fitzsimons and Harley, 1991; Moores, 1991)所指的格林威尔(Grenville)构造带。而澳大利亚和俄罗斯地质学家则查明南面的查尔斯王子山(Prince Charles Mountains)产出28亿年的太古代变质核杂岩及中元古代晚期深变质杂岩,可以与西福尔丘陵(Vestfold Hills)、茹尔群岛(Rauer Islands)对比(Tingey, 1982, 1991; Sheraton *et al.*, 1996; Black *et al.*, 1991, 1992; Kinny *et al.*, 1993, 1997; Harley *et al.*, 1998; Dirks *et al.*, 1994)。但是对拉斯曼丘陵和南、北查尔斯王子山之间的格罗夫山的地质特征和大地构造属性,如泛非造山带在内陆的延伸情况以及该区的主要的岩石类型及特征尚一无所知,因此这个地区倍受关注。本文对格罗夫山经历了麻粒岩相变质作用的基性火山岩的研究成果的报道,将为研究伊丽莎白公主地乃至整个东南极的岩石圈结构和构造演化提供重要的证据。

1 地质特征

根据野外地质特征及镜下观察,格罗夫山出露的岩石类型主要可分为变质表壳岩、变质深成岩及岩浆岩(Yu *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2001)。变质表壳岩包括镁铁质麻粒岩、斜长

角闪岩、(泥质)片麻岩、长英质麻粒岩和含磁铁矿石英岩,以及(石榴石)斜长单斜辉石岩。它们以透镜状或似层状包体产出在大面积分布的变质深成岩-花岗岩片麻岩和花岗岩中,在A、B二区都有出露,层厚一般为数厘米,最厚达20米。所有的变质表壳岩都经历了麻粒岩相变质作用。镁铁质表壳岩和磁铁矿石英岩一同产出,有时与石榴黑云斜长片麻岩互层,这种组合具明显的火山-沉积特征,同时也成为野外明确鉴别镁铁质岩是表壳岩还是深成岩的最可靠标志。

2 岩石学与地球化学

2.1 岩相学

灰黑色镁铁质麻粒岩以斜长角闪麻粒岩为主,少量角闪二辉麻粒岩和黑云角闪二辉麻粒岩,主要矿物为紫苏辉石(15%~40%)、角闪石(15%~65%)、斜长石(20%)、单斜辉石、黑云母及石英等,少量样品中含有石榴石,副矿物主要有磁铁矿、磷灰石和锆石。细-中细粒粒状柱状变晶结构,块状构造或弱片麻状构造,有时矿物分布不均匀而呈条带状构造。岩石中矿物之间主要是呈120°交角的平衡共生结构,保留峰期变质作用矿物组合。也可见紫苏辉石有角闪石的反应边。变质反应结构显示多为单一的区域性麻粒岩相变质作用。含石榴石片麻岩中的石榴石-斜方辉石温度计显示变质

表 1 格罗夫山变质基性火山岩化学分析

Table 1 Major elements (%) and trace elements ($\mu\text{g/g}$) contents of metabasic volcanic rocks from Grove Mountains

| 岩石类型 原岩类型 样品号 | 斜长角闪岩 | | | | | | 镁铁质麻粒岩 | | | | | |
|--------------------------------|-------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------------------|-------|--------|--------|--------|
| | OIB 型 变 基 性 火 山 岩 | | | | | | 平均 | MORB 型 变 基 性 火 山 岩 | | | | |
| | s9101 | s1462 | s7607 | Z004 | s9102 | s9108 | s9306 | s8203 | | s7107 | s9801 | s10804 |
| SiO ₂ | 48.7 | 46.85 | 48.5 | 46.37 | 49.81 | 47.08 | 47.6 | 46.78 | 47.71 | 48.92 | 47.23 | 49.9 |
| TiO ₂ | 2.57 | 3.42 | 2.23 | 2.06 | 1.89 | 2.48 | 2.29 | 4.5 | 2.68 | 2.36 | 1.1 | 1.31 |
| Al ₂ O ₃ | 14.59 | 13.19 | 14.56 | 16.25 | 13.26 | 16.56 | 14.21 | 13.12 | 14.47 | 12.72 | 16.15 | 15.55 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.62 | 2.6 | 3.06 | 2.17 | 3.37 | 2.66 | 2.77 | 2.94 | 2.77 | 2.32 | 3.36 | 3.31 |
| FeO | 10.38 | 12.61 | 9.67 | 9.24 | 9.93 | 10.55 | 10.43 | 12.97 | 10.72 | 13.66 | 7.2 | 9.77 |
| MnO | 0.14 | 0.16 | 0.13 | 0.12 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.14 | 0.15 | 0.13 | 0.13 |
| CaO | 8.47 | 7.62 | 9.20 | 8.73 | 9.63 | 10.06 | 8.13 | 7.83 | 8.71 | 11 | 11.52 | 6.62 |
| MgO | 5.51 | 5.03 | 6.33 | 7.15 | 5.52 | 6.15 | 7.18 | 4.12 | 5.87 | 5.36 | 9.19 | 6.41 |
| K ₂ O | 1.56 | 2.35 | 1.36 | 2.65 | 1.22 | 0.72 | 2.05 | 1.95 | 1.73 | 0.16 | 0.68 | 2.06 |
| Na ₂ O | 3.25 | 2.92 | 2.74 | 2.82 | 3.02 | 2 | 2.95 | 2.65 | 2.79 | 1.64 | 2.14 | 3.08 |
| P ₂ O ₅ | 0.24 | 1.09 | 0.21 | 0.63 | 0.3 | 0.25 | 0.22 | 1.13 | 0.51 | 0.21 | 0.1 | 0.21 |
| Los. | 1.47 | 1.58 | 1.58 | 1.57 | 1.73 | 1.17 | 1.49 | 1.44 | 1.50 | 1.52 | 1.28 | 1.27 |
| Tot. | 99.50 | 99.42 | 99.57 | 99.76 | 99.93 | 99.83 | 99.47 | 99.58 | 99.63 | 100.02 | 100.08 | 99.62 |
| Mg [#] | 46 | 39 | 51 | 56 | 46 | 48 | 52 | 34 | 47 | 39 | 65 | 50 |
| La | 27.06 | 45.46 | 47.45 | 33.37 | 27.20 | 25.52 | 19.11 | 33.73 | 32.36 | 11.44 | 4.50 | 9.71 |
| Ce | 59.68 | 100.55 | 101.16 | 87.60 | 62.12 | 59.10 | 45.66 | 81.83 | 74.71 | 24.97 | 11.78 | 25.73 |
| Pr | 7.40 | 12.56 | 10.76 | 11.04 | 7.41 | 7.59 | 5.96 | 10.66 | 9.17 | 3.62 | 1.92 | 3.66 |
| Nd | 34.79 | 58.54 | 44.14 | 52.01 | 32.96 | 36.21 | 28.17 | 52.17 | 42.37 | 18.47 | 10.23 | 19.21 |
| Sm | 7.53 | 12.68 | 7.99 | 11.79 | 7.12 | 7.92 | 6.56 | 10.90 | 9.06 | 4.98 | 3.15 | 5.30 |
| Eu | 2.53 | 3.48 | 2.42 | 2.13 | 2.18 | 2.35 | 2.18 | 3.25 | 2.56 | 1.59 | 1.17 | 1.56 |
| Gd | 7.44 | 12.72 | 7.30 | 11.62 | 6.96 | 7.67 | 6.66 | 11.33 | 8.96 | 5.86 | 3.56 | 5.59 |
| Tb | 1.26 | 2.23 | 1.28 | 2.03 | 1.25 | 1.23 | 1.16 | 1.85 | 1.54 | 1.23 | 0.66 | 1.11 |
| Dy | 7.34 | 13.35 | 6.93 | 11.77 | 7.40 | 7.41 | 6.45 | 10.36 | 8.88 | 8.16 | 4.15 | 7.00 |
| Ho | 1.32 | 2.48 | 1.29 | 2.19 | 1.35 | 1.37 | 1.21 | 1.85 | 1.63 | 1.54 | 0.77 | 1.40 |
| Er | 3.82 | 7.77 | 3.78 | 6.26 | 4.17 | 3.85 | 3.65 | 5.40 | 4.84 | 4.75 | 2.23 | 4.22 |
| Tm | 0.57 | 1.20 | 0.57 | 0.92 | 0.64 | 0.57 | 0.54 | 0.81 | 0.73 | 0.70 | 0.36 | 0.71 |
| Yb | 3.40 | 8.65 | 3.87 | 6.31 | 4.32 | 3.75 | 3.79 | 5.44 | 4.94 | 4.77 | 2.34 | 5.01 |
| Lu | 0.45 | 1.13 | 0.48 | 0.80 | 0.55 | 0.44 | 0.47 | 0.66 | 0.62 | 0.65 | 0.33 | 0.64 |
| REE | 165 | 283 | 239 | 240 | 166 | 165 | 132 | 230 | 202 | 93 | 47 | 91 |
| L/H | 5.43 | 4.71 | 8.39 | 4.72 | 5.22 | 5.28 | 4.50 | 5.11 | 5.42 | 2.35 | 2.27 | 2.54 |
| (La/Yb) _N | 5.51 | 3.64 | 8.49 | 3.66 | 4.36 | 4.71 | 3.49 | 4.30 | 4.77 | 1.66 | 1.33 | 1.34 |
| (La/Sm) _N | 2.25 | 2.25 | 3.72 | 1.77 | 2.40 | 2.02 | 1.83 | 1.94 | 2.27 | 1.44 | 0.90 | 1.15 |
| δEu | 1.0 | 0.8 | 0.9 | 0.5 | 0.9 | 0.9 | 1.0 | 0.9 | 0.88 | 0.9 | 1.1 | 0.9 |
| Co | 39 | 44 | 49 | 48 | 46 | 37 | 53 | 48 | 45 | 49 | 57 | 43 |
| Ni | 29 | 29 | 58 | 88 | 33 | 50 | 136 | 24 | 56 | 47 | 110 | 10 |
| Rb | 96.4 | 287.2 | 24.7 | 236.7 | 30.0 | 38.3 | 224.6 | 72.8 | 126.3 | 5.0 | 10.7 | 178.2 |
| Sr | 264 | 157 | 326 | 153 | 237 | 312 | 184 | 252 | 236 | 52 | 316 | 168 |
| Y | 41 | 80 | 37 | 64 | 40 | 39 | 35 | 54 | 49 | 45 | 22 | 39 |
| Zr | 161 | 276 | 141 | 131 | 144 | 154 | 112 | 38 | 145 | 52 | 57 | 44 |
| Nb | 18 | 23 | 16 | 22 | 17 | 14 | 18 | 27 | 20 | 12 | 2 | 7 |
| Cs | 7.1 | 7.5 | 0.2 | 6.4 | 0.2 | 2.8 | 47.3 | 0.5 | 9.0 | 0.3 | 0.2 | 9.6 |
| Ba | 398 | 441 | 211 | 212 | 128 | 181 | 281 | 595 | 306 | 20 | 69 | 341 |
| Hf | 4.54 | 6.63 | 4.59 | 3.62 | 4.32 | 4.59 | 3.81 | 2.02 | 4.26 | 2.10 | 2.05 | 1.87 |
| Ta | 1.33 | 1.62 | 1.31 | 1.11 | 1.51 | 1.14 | 1.39 | 1.74 | 1.39 | 0.97 | 0.21 | 0.71 |
| Pb | 13.3 | 15.4 | 23.1 | 15.2 | 14.0 | 12.6 | 12.2 | 11.1 | 14.6 | 2.3 | 5.1 | 8.7 |
| Th | 3.89 | 6.14 | 6.45 | 3.76 | 5.20 | 3.88 | 3.27 | 0.28 | 4.11 | 1.30 | 0.16 | 0.14 |
| U | 0.91 | 3.63 | 2.54 | 1.20 | 1.61 | 1.49 | 0.74 | 0.24 | 1.55 | 1.06 | 0.08 | 0.25 |
| Ti/Y | 379 | 256 | 360 | 194 | 285 | 384 | 390 | 501 | 343 | | | |
| Zr/Y | 4.0 | 3.4 | 3.8 | 2.1 | 3.6 | 4.0 | 3.2 | 0.7 | 3.1 | | | |
| Ba/Ce | 6.7 | 4.4 | 2.1 | 2.4 | 2.1 | 3.1 | 6.2 | 7.3 | 4.3 | | | |

注:所有表和图中的球粒陨石的 REE 含量引自 Anders and Grevesse (1989); MORB 的微量元素含量引自 Sun and McDonough (1989).

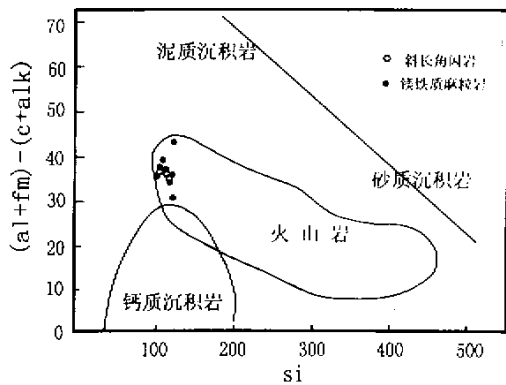


图2 (al+fm)-(c+alk) vs. Si 图解

(据 Simon A 1953, 转引自王仁民等, 1987)

Fig. 2 (al+fm)-(c+alk) vs. Si diagram (after Simon A, 1953)

峰期温度为 $780\text{C} \pm 50\text{C}$, 压力为 $0.55 \sim 0.68\text{GPa}$ (Liu XC *et al.*, 2001)。含石榴石的镁铁质麻粒岩的详细工作则显示了近等温降压 (ITD) 的顺时针 PT 演化轨迹, 包括三个阶段。M1: 以石榴石变斑晶以及其中包体单斜辉石+斜长石+石英组合为代表, 变质作用温压条件为 800C , 0.93GPa ; M2: 表现为围绕在石榴石周围的成冠状体的斜长石及斜方辉石+单斜辉石+角闪石 (棕色)+钛铁矿组合, $797\text{C} \sim 811\text{C}$, 0.64GPa ; M3: 以围绕辉石的角闪石 (绿色) 为代表, 形成的温度更低, 仅 650C 。其中包在石榴石变斑晶里的单斜辉石还出溶了细粒状石榴石和条纹状紫苏辉石, 可能代表了更早期的等压降温 (IBC) 变质作用 (Yu L. J. *et al.*, 2001)。

斜长角闪岩以角闪石和斜长石为主, 粒状柱状变晶结构, 块状构造。

2.2 原岩类型

主量元素在中国科学院地质与地球物理研究所的 X 荧光光谱 (XRF) 实验室分析, 微量元素在中国科学院地质与地球物理研究所的电感耦合等离子体-质谱 (ICP-MS) 实验室分析。4 个斜长角闪岩和 7 个镁铁质麻粒岩样品的主量和微量元素分析结果列于表 1。

所有的斜长角闪岩和镁铁质麻粒岩的主量元素组成和玄武岩一致, SiO_2 : $46.37\% \sim 49.9\%$ 。由于这些样品经历了麻粒岩相变质, 其 K、Na 和低场强元素 (LFSE) Cs、Rb、Ba、Sr 在变质作用过程中为易迁移元素, 因此用它们来判断变质基性火山岩的原岩类型、成因及形成环境时往往得出不确定的、模糊的、甚至是完全错误的结论。本文则运用在风化、热水蚀变和麻粒岩相变质作用过程中都不易迁移的高场强元素 (HFSE) Ti、Zr、Nb、Ta、Hf 和 Th、稀土元素 (REE) 和过渡金属元素 (Sc、V、Cr、Ni) 来进行岩石分类、判别岩石成因。

在 (al+fm)-(c+alk) vs. Si (Simon A, 1953, 转引自王

仁民等, 1987) 图中所有样品皆落入火山岩区 (图 2), 表明它们的原岩为火山岩。在 Zr/TiO₂ vs. SiO₂ 分类图和 Nb/Y vs. Zr/TiO₂ 分类图 (Winchester and Floyd, 1977) 中 (图 3) 皆落入拉斑玄武岩范围。在 AFM 图 (Irvine and Baragar, 1971) 中 (图 3), 样品多落在拉斑玄武岩区, 少量样品落在接近拉斑玄武岩的钙碱性玄武岩区。所以这套样品基本属于拉斑玄武岩系列的演化趋势。

根据主量元素、稀土和微量元素特征, 研究区的变基性火山岩属于二种类型, 即洋岛玄武岩型 (OIB) 和洋中脊玄武岩型 (MORB)。

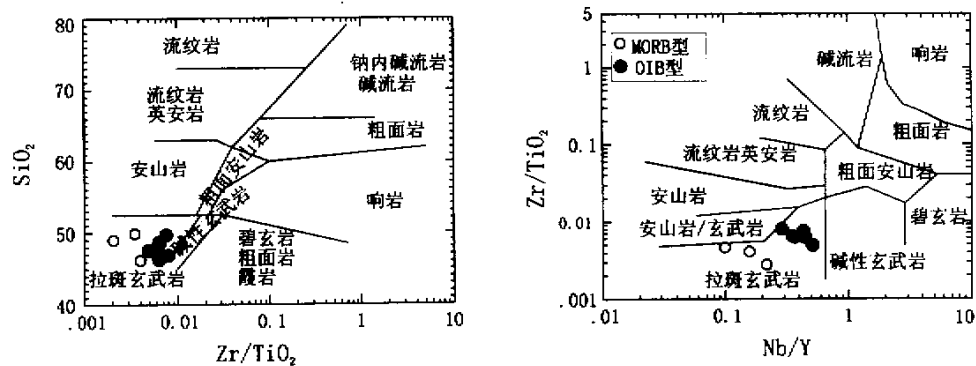
2.3 主量元素

洋岛型变基性火山岩的 MgO 含量较低且变化较大 ($\text{MgO} = 4.12\% \sim 7.15\%$, 平均为 5.87% , 相应的 $\text{Mg}^\# = 47$, $\text{Mg}^\# = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$, Mg、Fe 为原子数), $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 多 < 0.7 , 表明这些样品均经历过较低程度的部分熔融。相比之下, 洋中脊型变基性火山岩的 MgO 含量较高 ($\text{MgO} = 7\%$, 相应的 $\text{Mg}^\# = 52$), $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.67$, 部分熔融的程度要比洋岛型火山岩要高。TiO₂ 含量较高 ($1.89\% \sim 3.42\%$, 其中 S8203 达 4.5%), P₂O₅ 含量 (平均 0.51%) 和 K₂O 含量 (平均 1.73%) 都较高, Al₂O₃ 含量平均为 14.47% 的变质基性火山岩为洋岛型。而洋中脊型变基性火山岩低 Ti ($\text{TiO}_2 = 1.1\% \sim 1.31\%$, 除 S7107), 明显低于 OIB 的 P 的含量 ($\text{P}_2\text{O}_5 = 0.1\% \sim 0.2\%$)。

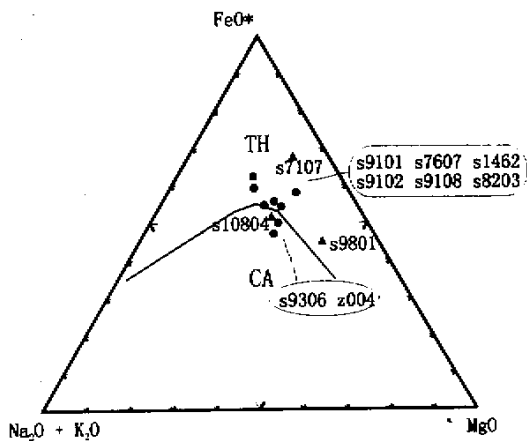
2.4 微量元素

从所有样品的稀土元素配分模式图 (图 4) 上也可以看出二类明显不同的变质基性火山岩。一类为明显的右倾型的配分模式, 与 Condie (1981) 的划分的太古宙 TH2 型拉斑玄武岩相似 (即 EAT 型, 类似于现代岛弧钙碱性拉斑玄武岩或洋岛拉斑玄武岩); 稀土总量较高 ($131 \sim 240\mu\text{g/g}$, 平均为 $202\mu\text{g/g}$), 轻稀土富集 ($\text{LREE}/\text{HREE} = 4.5 \sim 8.4$), 球粒陨石标准化的 $(\text{La})_N = 81 \sim 202$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.4 \sim 8.5$, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 平均为 2.27 。样品没有明显的 Eu 负异常 ($0.8 \sim 1.0$) (除 Z004 为 0.55)。而另一类为“平坦型”的稀土元素配分模式, 类似于 TH1 型 (即 DAT, 类似于现代洋中脊或不成熟岛弧拉斑玄武岩); 低 REE ($47 \sim 93\mu\text{g/g}$), $\text{LREE}/\text{HREE} (2.27 \sim 2.54)$, $(\text{La}/\text{Yb})_N (1.30 \sim 1.62)$, 基本与 N-MORB 相似), 无明显的 Eu 异常 ($0.9 \sim 1.1$)。两类样品的稀土元素配分图其中的共同点是 HREE 分异都不明显, 呈平坦分布; 但是两者的 HREE 含量有明显区别。

图 5 为样品的洋中脊玄武岩 (MORB) 归一化微量元素分布图 (Pearce, 1982)。可以看出, 所有 OIB 型变基性火山岩的元素相对于 MORB 均有不同程度的富集, 显示出相似的“隆起”分布型式, 没有明显的 Nb-Ta 亏损 (而相对 Ce 有负异常, 可能与经历了麻粒岩相变质作用导致 Ce 的迁移富集有关), 表明它们形成于板内环境, 类似于洋岛和大陆裂谷的



From Winchester and Floyd, 1977



From Irvine & Baraga, 1971

图 3 Zr/TiO_2 vs. SiO_2 、 Zr/TiO_2 vs. Nb/Y (据 Winchester and Floyd, 1977)和 AFM(据 Irvine and Bragar, 1971) 岩石分类图解

Fig. 3 Zr/TiO_2 vs. SiO_2 、 Zr/TiO_2 vs. Nb/Y (after Winchester and Floyd, 1977) and AFM (after Irvine and Baragar, 1971) classification diagrams for metabasic volcanic rocks

板内碱性玄武岩。Nb-Ta 值为 MORB 标准的 10~20 倍,这是 OIB 最典型的地球化学特征(Weaver, 1991a)。洋中脊玄武岩中的 Ba/Ce 比值为 1.1~0.6,洋岛玄武岩的该比值为 4.5~1.3(Halliday, 1995),格罗夫山变质基性岩平均 Ba/Ce 比值为 4.3(表 1),暗示出该类变质火山岩具有洋岛玄武岩的特点。明显的高的 Ti/Y(平均为 343)、Zr/Y(平均为 3.1)比值(表 1),也显示了洋岛玄武岩的特征。在样品的原始地幔归一化微量元素分布图上(图 5),所有元素相对原始地幔也有不同程度的富集。

MORB 型变质基性火山岩的 LIL(Sr 至 Ba)相对于 MORB 明显富集,由于 LIL 元素(除 Th)在蚀变和变质过程中是活动元素,故它们对变质火山岩往往没有明确的构造背景意

义。不活泼元素(Th、HFS 和 REE)基本上与标准的 MORB 较类似的分布型式,表明它们很可能来源于 MORB 或类似于 MORB 的幔源,没有受到地壳物质的混染;HFS 和 REE 含量稍高于标准的 MORB,可能是由于较低程度的部分熔融有关。Nb-Ta 值低于 OIB 型。

3 讨论与结论

通过以上主量元素和微量元素组成所给出的信息,格罗夫山地区变质基性火山岩应该属于洋岛玄武岩(OIB)和洋中脊玄武岩(MORB)组合。

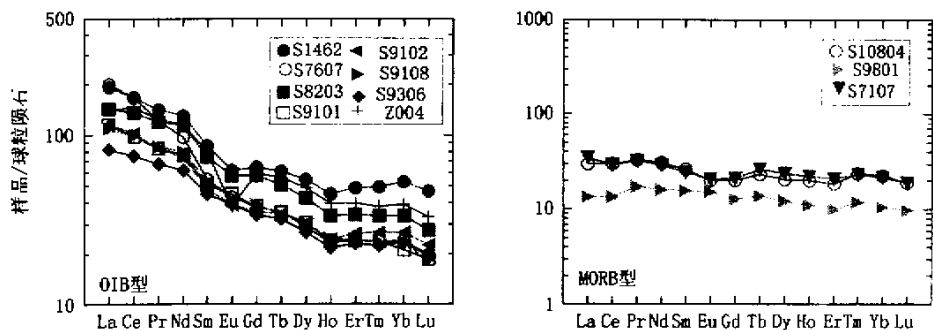


图 4 REE 分布型式图

Fig. 4 Chondrite-normalized REE diagrams

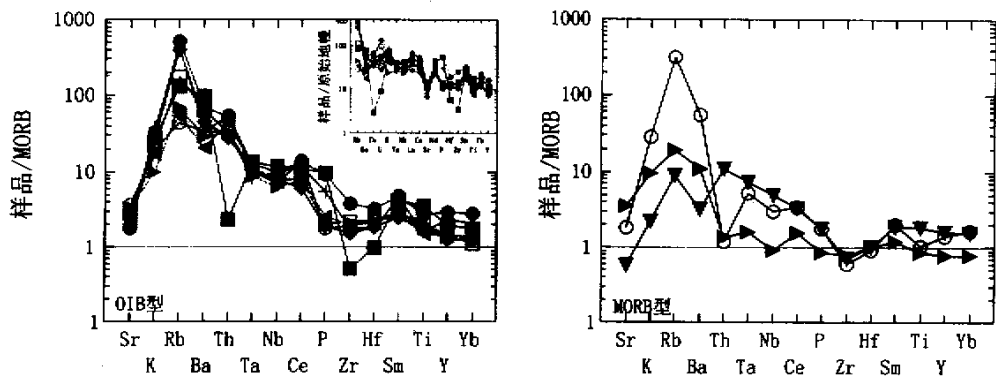
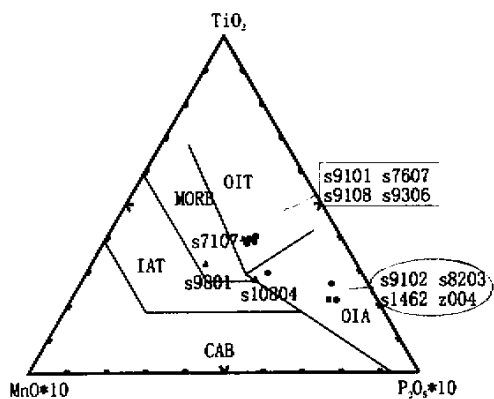
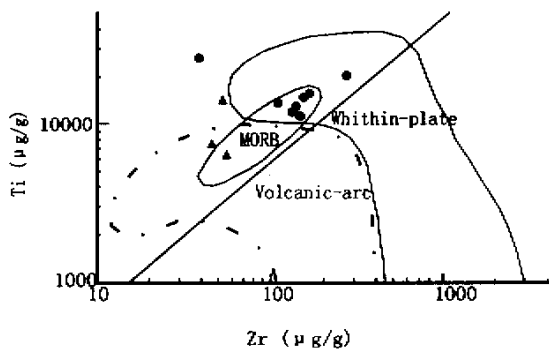


图 5 微量元素分布图(图列同图 4)

Fig. 5 MORB-normalized incompatible element spidergrams



From Mullen, 1983 (SiO₂ 45-54%)



From Pearce, 1982

图 6 微量元素构造判别图

Fig. 6 Tectonic discriminant diagrams for metabasic volcanic rocks

由于玄武岩中微量元素含量与其所形成的构造环境密切相关,因此可以根据玄武岩中各种微量元素的含量特征来判断玄武岩的形成环境,这也是目前在判断岩石成因及形成环境时最常用和最有效的方法。在利用微量元素进行板块构造环境判别的同时,我们也强调使用主量元素进行环境判别。

在构造环境判别图(图6)的 $TiO_2 - MnO - P_2O_5$ (Mullen, 1983)图解中,两类样品基本上分别落入 OIB 和 MORB 范围内。Zr 和 Y 是蚀变和变质作用过程中十分稳定的不活动微量元素,而火山岩中 Ti 丰度与火山岩源区物质组成及火山岩的形成环境有十分密切的关系(Pearce, 1983)。因此,根据 Ti/Zr、Ti/Y、Zr/Y 比值特征及 Ti-Zr 图解(Pearce, 1982),也可以判别本区变质基性火山岩的来源,洋岛型变质基性火山岩落入 MORB 和板内叠加区, MORB 型变质基性火山岩基本落入 MORB 区。

尽管在 OIB 岩浆中微量元素的丰度和比值存在相当的

变化,但是与喷发于会聚和离散板块边缘的玄武岩而言,它们仍然是有特征的(而且经常是强烈的)富集不相容微量元素。OIB 岩浆的微量元素特征表明它们来源于富集地幔源区,明显不同于来源于亏损地幔源区的 MORB (Vote *et al.*, 1988; Weaver, 1991a, b)。强不相容元素比值能有效的判别玄武岩的源区特征(OIB 端元组分)(Palacz and Saunders, 1986; Weaver *et al.*, 1986, 1987; Loubet *et al.*, 1988; Woodhead and McCulloch, 1989)。表2列出了本区 OIB 型变质基性火山岩的不相容元素比值的平均值,并与地幔端元比值(Weaver, 1991a)进行了比较,大多数比值与富集地幔源区(EM)较一致。沉积物的俯冲对一些 EM 型 OIB 的地球化学留下了重要的印记(如:Walvis Ridge, Gough, Society Island, Samoan Islands),高的 Ba/Nb、La/Nb 等比值就是沉积物俯冲的结果(Weaver *et al.*, 1986; Sun and McDonough, 1989)。本区 OIB 型变质基性火山岩的不是典型的富集 Nb 和 Ta,可能与俯冲-重循环的地壳的混染有关。

表2 格罗夫山 OIB 型变质基性火山岩微量元素与地幔端元组分的差异

Table 2 The difference between mantle end-member compositions and trace elements of OIB-type metabasic volcanic rocks from Grove Mountains

| | 本区 | 原始地幔 | N-MORB | 陆壳 | HIMU | EMI | EMII |
|-------|------|-------|--------|-------|-------|-------|------|
| Zr/Nb | 7.8 | 14.8 | 30 | 16.2 | 4.1 | 7.05 | 6.1 |
| Ba/Nb | 15 | 9 | 4.3 | 54 | 5.6 | 14.73 | 9.73 |
| Th/La | 0.13 | 0.125 | 0.067 | 0.204 | 0.121 | 0.12 | 0.14 |
| Ba/La | 9.92 | 9.6 | 4 | 25 | 7.82 | 15.03 | 10 |

注:各参数值引自 Weaver (1991a)

锆石 U-Pb 的离子探针分析显示格罗夫山麻粒岩相峰期变质年龄集中于 $529 \pm 14 Ma$, 花岗岩侵位年龄 $534 \pm 5 Ma$, 细晶岩脉年龄 $501 \pm 7 Ma$, 属于“泛非”构造热事件(Zhao *et al.*, 2000)。格罗夫山连通了普里兹湾、拉斯曼丘陵和南查尔斯王子山“泛非”构造,构成超过一千公里长的冈瓦纳古陆聚合构造带,很可能是东、西冈瓦纳最终拼合的缝合带。

东南极内陆-格罗夫山洋岛型和洋中脊型变质基性火山岩组合的存在,说明该区在泛非期可能存在过洋盆;在本区还发育了一套长英质火山岩的成熟岛弧环境的产物(另文发表),因此格罗夫山火山岩可能发育在一个有大陆边缘裂谷充分扩张而发展成的洋盆或弧后盆地。同时该区变质基性火山岩及与其共生的超镁铁质岩(石榴辉石岩, MgO 15.2%~21.3%)也可能共同组成与泛非期碰撞造山作用有关的混杂带,作为东、西冈瓦纳泛非拼合的缝合带。

致谢 感谢国家海洋局极地办公室对本工作的支持。向李继亮研究员、张旗研究员、王凯怡研究员及杨进辉博士深表谢意。

References

- Black L P, Harley S L, Sun S S and McCulloch M T. 1987. The Rayner complex of East Antarctica: complex isotopic systematics within a Proterozoic mobile belt. *J. Metamorphic Geol.*, 5: 1-26
- Black L P, Kinny P D, Sheraton J W, Delor C P. 1991. Rapid production and evolution of late Archaean felsic crust in the Vestfold Block of East Antarctica. *Precambrian Res.*, 50: 283-310
- Black L P, Sheraton J W, Kinny P D. 1992. Archaean Events in Antarctica. *Recent Progress in Antarctic Earth Sciences*, Tokyo, 1-6
- Condie K C. 1981. *Archaean Greenstone Belts*. Elsevier, Amsterdam
- Dicks P H G M and Wilson C J L. 1995. Crustal evolution of the East Antarctica mobile belt in Prydz Bay: continental collision at 500Ma. *Precambrian Res.*, 75: 187-205
- Dirks P H G M, Hoek J D, Wilson C J L, Sims J R. 1994. The Proterozoic deformation of the Vestfold Hills basement complex,

- East Antarctica; implications for the tectonic evolution of adjacent granulite belts. *Precambrian Res.*, 65: 277—295
- Fitzsimons I C W and Harley S L. 1991. Geological relationships in high-grade gneiss of the Brattstrand Bluffs coastline, Prydz Bay, east Antarctica. *Austral. J. Earth Sci.*, 38: 497—519
- Grew E S E and Manton W I. 1986. A new correlation of sapphirine granulites in the Indo-Antarctic metamorphic terrain, late Proterozoic dates from the Eastern Ghats Province of India. *Precambrian Research*, 33: 123—137
- Haliday A N, Lee Der-Chuen, Tommasini S, Davies G R, Paslick C R, Fitton J G and James D E. 1995. Incompatible trace elements in OIB and MORB and source enrichment in the sub-oceanic mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 133: 379—395
- Harley S L, Snape I, Black L P. 1998. The evolution of a layered metaigneous complex in the Rauer Group, East Antarctica; evidence for a distinct Archaean terrane. *Precambrian Res.*, 89(3—4): 175—205
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8: 523—548
- Katz M B. 1989. Sri Lanka-Indian eastern Ghats-East Antarctica and the Australian Albany Fraser mobile belt, Gross geometry, age relationships, and tectonics in Precambrian Gondwanaland. *J. Geology*, 97: 646—648
- Kinny P D, Black L P and Sheraton J W. 1993. Zircon ages and the distribution of Archaean and Proterozoic rocks in the Rauer Islands. *Antarctic Sci.*, 5: 193—206
- Kinny P D, Black L P, Sheraton J W. 1997. Zircon U-Pb ages and geochemistry of igneous and metamorphic rocks in the northern Prince Charles Mountains, Antarctica. *J. Australian Geology and Geophysics*, 16(5): 637—654
- Liu X C, Zhao Y, Liu X H. 2001. The Pan-African granulite facies metamorphism and syn-tectonic magmatism in the Grove Mountains, East Antarctica. *Abstract Vol. of EUG XI, LS08*, 379
- Loubet M, Sassi R and Donato G D. 1988. Mantle heterogeneities: A combined isotope and trace element approach and evidence for recycled continental materials in some OIB sources. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 89: 299—315
- Moores E M. 1991. Southwest U. S. — East Antarctica (SWEAT) connection; a hypothesis. *Geology*, 19: 425—428
- Mullen E D. 1983. MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 62: 53—62
- Palacz Z and Saunders A D. 1986. Coupled trace element and isotopic enrichment in the Cook-Austral-Samoa islands, southwest Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 79: 270—280
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe R S (ed.). *Andesites*. New York; Wiley, 528—548
- Pearce J A. 1983. The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. In: Hawkesworth *et al.* (eds.). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Nantwich Shiva, 230—249
- Sheraton J W, Black L P and McCulloch M T. 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 Res.*, 26: 169—198
- Sheraton J W, Tindle A G and Tingey R J. 1996. Geochemistry, origin, and tectonic setting of granitic rocks of the Prince Charles Mountains, Antarctica, AGSO. *Journal of Australian Geology and Geophysics*, 16: 345—370
- Stüwe K and Braun H M. 1989. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica. *Austral. J. Earth Sci.*, 36: 219—241
- Stüwe K and Powell R. 1989. Low pressure granulite facies metamorphism in the Larsemann Hills, East Antarctica: petrology and tectonic implications for the evolution of the Prydz Bay area. *J. Metamorphic Geol.*, 7: 465—483
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts; implications for mantle composition and process. In: Saunders A D and Norry M J (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 42: 313—345
- Tingey R J. 1982. The geologic evolution of the Prince Charles Mountains—an Antarctic Archaean cratonic block, In: Craddock C. (ed.), *Antarctic Geoscience*, University of Wisconsin Press, Madison, WI, 455—464
- Tingey R J. 1991. The regional geology of Archaean and Proterozoic rocks in Antarctica. In: Tingey R J (ed.). *The geology of Antarctica*. Clarendon Press, Oxford, 1—78
- Vote S W, Macll J B and Hawkins J W. 1988. Lau Basin Basalts (LBB): Trace element and Sr-Nd isotopic evidence for heterogeneity in back arc basin mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 190: 174—187
- Wang Renmin, He Gaoping, Chen Zhenzhen, Zheng Songyan, Gen Yuanshen. 1987. *The discriminant diagrams of protolith from metamorphic rocks*. Beijing: Geological Publishing House, (in Chinese)
- Weaver B L, Wood D A, Tarney J and Joron J-L. 1986. Role of subducted sediment in the gneiss of ocean land basalts; Geochemical evidence from South Atlantic Ocean Islands. *Geology*, 14: 275—278
- Weaver B L, Wood D A, Tarney J and Joron J-L. 1987. Geochemistry of ocean island basalts from the South Atlantic; Ascension, Bouvet, St. Helena, Gough and Tristan da Cunha. In: Fitton J G and Upton B G J (eds.). *Alkaline igneous rocks*; Geological Society of London Special Publication 30, 253—267
- Weaver B L. 1991a. Trace element evidence for the origin of ocean-island basalts. *Geology*, 19: 123—126
- Weaver B L. 1991b. The origin of ocean island basalts end-member compositions; trace element and isotopic constraints. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104: 381—397

- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chem. Geol.*, 20: 325—343
- Woodhead J D and McCulloch M T. 1989. Ancient seafloor signals in Pitcairn Island lavas and evidence for large amplitude, small length-scale mantle heterogeneities. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 94: 257—273
- Yu L J, Liu X H, Zhao Y, Liu X C. 2001. Preliminary report on metamorphic and geochemical study of rock from the Grove Mountains, East Antarctica. Abstract Vol. of EUGXI, LS08, 377—378
- Zhao Y, Liu X C, Fanning C M, Liu X H. 2000. The Grove Mountains, a segment of a Pan-African orogenic belt in East Antarctica. Abstract Vol. Of 31th IGC, 9—7 section. in: Abstract Volume of 31th I. G. C., Rio de Janeiro, Brazil, in press
- Zhao Y, Liu X, Song B, Zhang Z, Li J, Yao Y and Wang Y. 1995. Constraints on the stratigraphic age of metasedimentary rocks from the Larsemann Hills, East Antarctica: possible implications for Neoproterozoic tectonics. *Precambrian Res.*, 75: 175—188
- Zhao Y, Song B, Wang Y, Ren L, Li J and Chen T. 1992. Geochronology of the late granite in the Larsemann Hills, East Antarctica. In: Yoshida Y *et al.* (eds.). *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Tokyo: TERRAPUB, 155—161
- Zhao Y, Song B, Zhang Z, Fu Y, Chen T, Wang Y, Ren L, Yao Y, Li J and Liu X. 1993. Early Paleozoic (Pan-African) thermal event of the Larsemann Hills and its neighbours, Prydz Bay, East Antarctica. *Science in China (series B)*, 23: 1001—1008 (in Chinese)

附中文参考文献

- 王仁民, 贺高平, 陈珍珍, 郑松彦, 耿元生. 1987. 变质岩原岩图解判别法. 北京: 地质出版社, 6
- 赵越, 宋彪, 张宗清, 富云莲, 陈廷愚, 王彦斌, 任留东, 姚玉鹏, 李继亮, 刘小汉. 1993. 东南极拉斯曼丘陵及其邻区的泛非热事件. *中国科学(B)*, 23(9): 1001—1008