

# 东南极格罗夫山地质特征——冈瓦纳 最终缝合带的新证据\*

刘小汉<sup>①</sup> 赵越<sup>②</sup> 刘晓春<sup>②</sup> 俞良军<sup>①</sup>

①中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化开放研究实验室, 北京 100029;

②国土资源部中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要** 格罗夫山主要出露高角闪-麻粒岩相深变质岩, 包括长英质麻粒岩和花岗质片麻岩、镁铁质麻粒岩透镜体、紫苏花岗岩、后造山期的片麻状花岗岩、及造山期后细晶岩脉. 岩石化学特征显示紫苏花岗岩、花岗质片麻岩和花岗岩属铝质 A 型深成岩系列, 而长英质和镁铁质麻粒岩则来自岛弧、洋岛和洋中脊环境的表壳岩系列. 测区以低角度面理构造为主, 局部出现强剪切变形带. 韧性变形可分为 3 个阶段:  $D_1$  与泛非期的构造事件有关,  $D_2$  相应于区域性麻粒岩相变质作用,  $D_3$  则可能反映泛非期造山作用后期的伸展作用. 变质反应结构多显示为简单的区域性麻粒岩相变质作用, 但镁铁质麻粒岩可鉴别出 3 个阶段:  $M_1$  的温压条件为  $800^\circ\text{C}$ ,  $9.3 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;  $M_2$  为  $800\text{--}810^\circ\text{C}$ ,  $6.4 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;  $M_3$  仅  $650^\circ\text{C}$ . 代表性花岗质片麻岩的锆石 U-Pb 的离子探针分析显示峰期变质年龄集中于  $(529 \pm 14) \text{ Ma}$ , 花岗岩侵位年龄  $(534 \pm 5) \text{ Ma}$ , 细晶岩脉年龄  $(501 \pm 7) \text{ Ma}$ , 属于“泛非”期构造热事件. 这些地质新证据显示在东南极内陆存在着一条从普里兹湾、格罗夫山到南查尔斯王子山的巨大“泛非”期造山带, 应当是冈瓦纳最后拼合的缝合带.

**关键词** 东南极地盾 格罗夫山 泛非构造事件 冈瓦纳古陆 最终拼合

1992 年以前, 科学界一致认为作为东冈瓦纳核心陆块的东南极地盾是由太古宙陆核于新元古代格林维尔期(Grenville aged Orogeny)时聚合焊接而形成, 而早古生代的泛非运动(Pan-African Orogeny)仅表现为局部岩浆活动及浅变质作用<sup>[1-9]</sup>. 1992 年中国科学家在拉斯曼丘陵(Larsemann Hills)发现早古生代构造热事件记录<sup>[10-13]</sup>, 并首次提出泛非事件应当是冈瓦纳最终拼合的构造运动<sup>[13, 14]</sup>. 之后, 各国科学家在普里兹湾地区(Prydz Bay)、吕措霍母湾区(Lützow-Holm Bay)、毛德皇后地(Dronning Maud Land)、南查尔斯王子山(Southern Prince Charles Mts.)等地陆续发现了泛非事件记录<sup>[15-17]</sup>. 结合横贯南极山脉(Trans-Antarctic Mountains)的罗斯造山带(Ross Orogenic Belt)及印度、斯里兰卡、马达加斯加泛非期构造带的发现与研究<sup>[2, 4, 7, 9, 18-22]</sup>, 科学界充分认识到泛非运动对冈瓦纳古陆形成的关键作用, 同时逐渐清理出早于冈瓦纳的另一个超大陆——罗迪尼亚古陆的轮廓. 而对于东南极地盾本身来说, 有人又提出当罗迪尼亚超大陆裂解后, 它作为陆块整体继承至泛非期, 重新组成东冈瓦纳的核心<sup>[18-22]</sup>. 这一假说的主要依据是环东南极分布的格林维尔构造带(图 1(a)), 而东、西冈瓦纳陆

2001-12-03 收稿, 2002-03-08 收修改稿

\* 中国科学院知识创新项目(编号: KZCX2-303)和科学技术部攻关项目(编号: 98-927-01-06)

块拼合的边界则是莫桑比克缝合带<sup>[21]</sup>. 该带从东非与大印度之间向南延伸至东南极, 经吕措霍母湾区与毛德皇后地相连(图 1(b)). 按照这个观点, 东南极地盾内部显然不应当出现任何晚于格林维尔期的构造带. 而普里兹湾-拉斯曼丘陵泛非构造带的发现, 又使人提出莫桑比克带在吕措霍母湾区分出一个分支构造带的新方案, 即沿海岸带向东经普里兹湾-拉斯曼丘陵直至西澳大利亚的勒文杂岩(Leewin Complex)<sup>[15~17]</sup> (图 1(c)).

最近, 科学界向莫桑比克缝合带的含义提出新的挑战, 如 Fitzsimon<sup>[23]</sup>提出东南极地盾并不是稳定陆块, 而是由 3 个年龄不同的格林维尔期陆块在泛非期时才拼合而成. 而赵越和刘小汉等<sup>1), 2), 3)</sup>基于 1998~1999 年首次格罗夫山考察的初步结果, 提出格罗夫山的泛非年代学证据显示普里兹湾-拉斯曼丘陵泛非构造带应当向南深入东南极内陆连接格罗夫山, 而不大可能向西跨越北查尔斯王子山与吕措霍母湾连接. 东南极地盾应当是罗迪尼亚古陆彻底裂解之后, 在泛非期由完全不同的碎块重新组合拼接而成. 赵越等于 2000 年 8 月在第 31 届国际地质大会上报告了格罗夫山离子探针锆石 U-Pb 泛非期年代学数据之后, Boger 等<sup>[24]</sup>又宣布在南查尔斯王子山发现了泛非期构造带, 提出普里兹湾-拉斯曼丘陵泛非期造山带的确向南深入东南极内陆, 将格林维尔期以来始终完整的东南极地盾至少一分为二(图 1(d)). 显然, 查清东南极泛

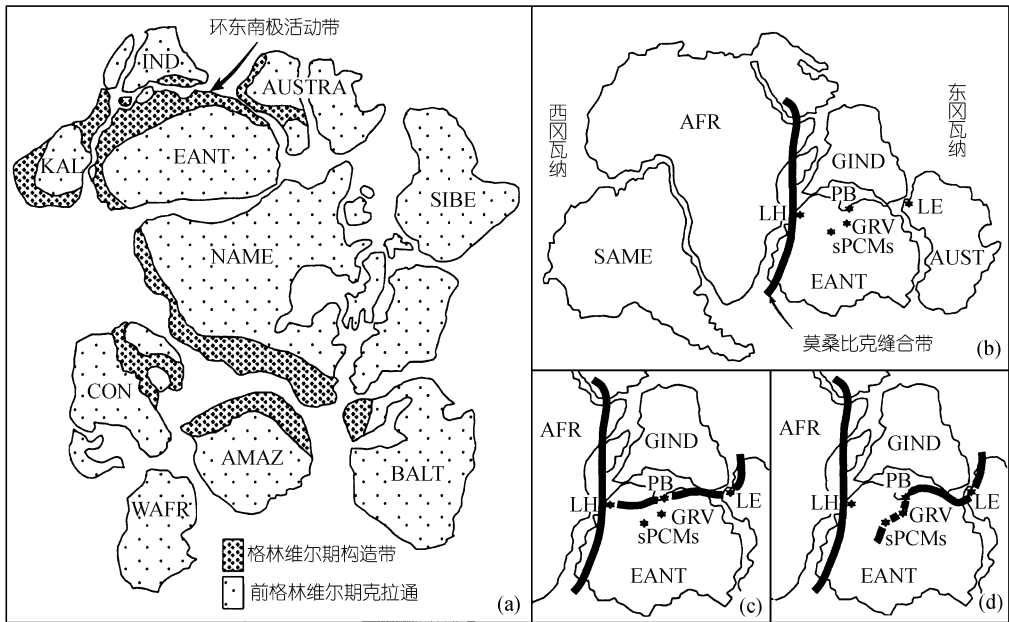


图 1

(a) 罗迪尼亚古陆复原示意图<sup>[18]</sup>. AMAZ 示亚马逊地盾; AUSTR 示澳大利亚; BALT 示波罗地地盾; CON 示刚果地盾; EANT 示东南极地盾; IND 示印度; KAL 示卡拉哈里(卡普瓦尔-津巴布维)克拉通; NAME 示北美地盾; SIBE 示西伯利亚克拉通; WAFR 示西非地盾. (b~d) 莫桑比克缝合带位置示意图<sup>[24]</sup>. AFR 示非洲; AUST 示澳大利亚; EANT 示东南极地盾; GIND 示大印度; GRV 示格罗夫山; LE 示勒文杂岩; LH 示吕措霍母湾; PB 示普里兹湾; SAME 示南美洲; sPCMs 示南查尔斯王子山

1) Zhao Y, Liu X C, Fanning C M, et al. The Grove Mountains, a segment of a Pan-African orogenic belt in East Antarctica, in: Abstract Volume of 31<sup>th</sup> I.G.C., 9-7 session, Rio de Janeiro, Brazil, 2000 (CD)  
 2) Xiaohan Liu, Yue Zhao, Xiaochun Liu, et al. Grove Mountains: a segment in the collage during East Antarctic Shield forming? Journal of Conference Abstracts. Strasbourg, France, E U G. XI, 2001. 374  
 3) Xiaochun Liu, Yue Zhao, Xiaohan Liu. The Pan-African granulite facies metamorphism and syn-tectonic magmatism in the Grove Mountains, East Antarctica, Journal of Conference Abstracts, Strasbourg, France, E U G. XI, 2001. 379

非构造带的展布形式及其与格林维尔带的承接关系, 是解决这一全球尺度构造格局的关键。

格罗夫山(Grove Mountains)位于东南极兰伯特裂谷(Lambert Rift)右岸, 介于南纬 72°20' ~ 73°10', 东经 73°50' ~75°40' 之间, 北距中山站 450 km, 属于东南极冰盖内陆的冰原岛峰群。近 20 年来, 中、澳、俄、英等国科学家已经在该地区查明: 在西福尔丘陵(Vestfold Hills)<sup>[2]</sup>、茹尔群岛(Rauer Is.)<sup>[26]</sup>和南查尔斯王子山<sup>[1, 2, 24]</sup>产出太古界麻粒岩建造; 在北查尔斯王子山(northern Prince Charles Mts.)<sup>[1, 25]</sup>、茹尔群岛<sup>[3, 27]</sup>和拉斯曼丘陵<sup>[6]</sup>产出中-新元古界变质杂岩; 在普里兹湾海岸带、拉斯曼丘陵<sup>[10-14]</sup>和南查尔斯王子山发现早古生代泛非期构造带<sup>[24]</sup>。但是, 对位于查尔斯王子山和拉斯曼丘陵之间的格罗夫山的地质属性则一无所知。因此, 格罗夫山成为各国地学家当前关注的热点。1998~2000 年, 中国南极考察队在格罗夫山首次对 64 座岛峰中的 53 座进行了地质调查。本文将介绍格罗夫山考察研究的成果(图 2)。

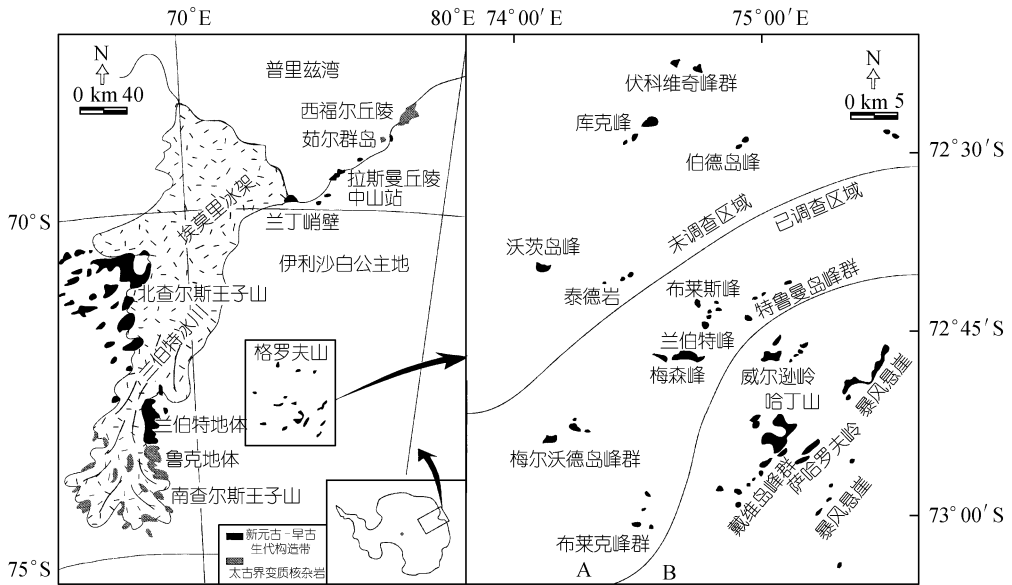


图 2 东南极格罗夫山位置图

A 区: 花岗质片麻岩、二长花岗岩、镁铁质麻粒岩出露区; B 区: 浅色麻粒岩、紫苏花岗岩、二长花岗岩、镁铁质麻粒岩出露区

### 1 区域地质概况

在格罗夫山 3200 km<sup>2</sup> 范围的蓝冰面上共出露 64 座独立的冰原岛峰, 大体分 5 组沿北北东-南南西方向成岛链状分布, 宏观呈现山脊纵谷地貌。岛峰与蓝冰表面的相对高度介于 100~800 m 不等, 由于冰盖自南东向北西运动的攀升刮削作用, 岛峰南东侧一般雪冰线相对较高, 而北西侧则往往是近直立的断裂垮塌陡壁。

格罗夫山出露麻粒岩至高角闪岩相的深变质杂岩, 同造山或造山晚期花岗岩, 以及构造后期花岗质、花岗闪长质细晶岩脉和长英质伟晶岩。深变质杂岩包括: 浅色长英质麻粒岩、暗色镁铁质麻粒岩、紫苏花岗岩和花岗质片麻岩。整个测区可按北北东-南南西方向分为东西两个岩区, 东侧以长英质麻粒岩和紫苏花岗岩为主, 西侧则以花岗质片麻岩为主(表 1, 图 2)。

表 1 格罗夫山岩性一览表

原岩	岩石种类	产状特征
变质表壳岩	浅色长英质麻粒岩	厚层至块状, 区域性低角度片麻理
	镁铁质麻粒岩(斜长角闪麻粒岩、角闪二辉麻粒岩、黑云角闪二辉麻粒岩) 超镁铁质岩(角闪辉石岩、斜长辉石岩、石榴辉石岩) 斜长角闪片麻岩 (泥质)片麻岩(石榴黑云堇青斜长片麻岩、矽线石榴黑云斜长片麻岩、含尖晶石黑云斜长片麻岩), 含磁铁矿(及含矽线石或紫苏辉石)石英岩	透镜状或似层状包体产出在大面积分布的变质深成岩-花岗质片麻岩和花岗岩中 镁铁质表壳岩和含磁铁矿石岩一同产出, 有时与石榴黑云斜长片麻岩互层, 具火山-沉积建造特征
变质深成岩	紫苏花岗岩 花岗质片麻岩(灰白-浅红条纹条带状花岗片麻岩、暗灰条纹条带状花岗闪长片麻岩)	厚层至块状, 区域性低角度片麻理
岩浆岩	浅黄-褐红色钾长花岗岩 二长花岗岩	侵入于麻粒岩和片麻岩中, 一般平行于围岩的片麻理, 局部低角度截切, 多夹早期麻粒岩和片麻岩捕虏体
	花岗闪长岩、伟晶岩、花岗细晶岩	小岩体、岩脉, 多呈高角度切截围岩的面状构造

出露于测区东部大部分岛峰的浅色麻粒岩和紫苏花岗岩占露岩总量的 55%, 如哈丁山(Mount Harding), 萨哈罗夫岭(Zakharoff Ridge)、戴维岛峰群(Davey Nunataks), 威尔逊岭(Wilson Ridge)和暴风悬崖(Gale Escarpment)一带. 麻粒岩中普遍夹有暗灰色条纹条带状斜长角闪质和花岗质片麻岩层, 片麻岩约占露岩总量的 15%. 测区西侧各岛峰以浅色中至粗晶花岗质片麻岩为主, 约占露岩总量的 60%, 如梅尔沃德岛峰群(Melvold Nunataks)、梅森峰(Mason Peaks)、特鲁曼岛峰群(Truman Nunataks)和布莱克峰群(Black Nunataks). 但在布莱克峰群局部露头见到片麻岩中夹有少量浅色麻粒岩夹层. 东、西两区的浅色麻粒岩和花岗质片麻岩中普遍含有暗色镁铁质麻粒岩和超镁铁质岩薄层或透镜体, 层厚一般为 0.1~0.3 m, 最厚达 20 m.

浅黄至浅褐红色粗晶钾长花岗岩在全区广泛分布, 约占露岩总量的 20%. 花岗岩多呈小岩体、岩株和网脉状侵入于麻粒岩和片麻岩中. 较大的花岗岩体出露于暴风悬崖中段和戴维岛峰群. 岩体本身已经微片麻理化, 且一般平行于围岩的片麻理, 局部低角度截切, 显示同-后造山构造关系. 花岗岩体中多见早期浅色、暗色麻粒岩和片麻岩捕虏体.

在威尔逊岭北部和布莱斯峰(Bryse Peaks)产出含斜方辉石的石榴黑云堇青斜长片麻岩、含尖晶石石榴黑云斜长片麻岩薄层, 属于格罗夫山地区仅见的变沉积岩类. 该区还产出典型的条带状或透镜状变超镁铁质岩, 如角闪辉石岩、斜长辉石岩、石榴辉石岩捕虏体. 花岗闪长质、花岗质细晶岩脉和长英质伟晶岩在全区均可见到, 厚度 0.5~20 m 不等, 侵入上述各岩性组中, 多以高角度切截围岩的面状构造.

## 2 岩相学特征

浅褐灰色厚层长英质麻粒岩, 主要矿物为紫苏辉石(15%)、角闪石(10%)、黑云母(5%~10%)、斜长石(30%)、条纹长石(20%)和石英(20%), 副矿物为锆石、磷灰石和磁铁矿等. 鳞片粒状变晶结构, 片麻状或弱片麻状构造.

浅褐红色-灰色厚层至块状紫苏花岗岩: 主要矿物为暗色斜长石(30%~50%)、钾长石(5%~30%)、暗色石英(15%~30%)、紫苏辉石(<5%)和黑云母(1%), 含有少量的单斜辉石和角闪石, 副矿物为磁铁矿、磷灰石和锆石. 中粒粒状变晶结构, 多呈均一块状构造. 钾长石多为条

纹长石, 其中斜长石呈白色乳滴状定向分布, 似有出溶形成. 有的斜长石晶体中有蠕虫状石英颗粒, 构成蠕英结构. 紫苏辉石多为不规则粒状, 有时在晶体边部出现细粒的磁铁矿和褐色黑云母以及角闪石的反应边, 属退化变质的产物. 薄片甚至可见由黑云母、碳酸钙加不透明氧化物构成的辉石假象. 斜长石、紫苏辉石和透辉石之间常呈  $120^\circ$  交角的三连点结构, 表明它们是平衡共生的. 沿片麻理常可见同-后构造深熔条带. 紫苏花岗岩粒度较粗, 岩性均一, 一般不具有明显的片麻状构造, 显示岩浆侵入特征, 形成时间比长英质麻粒岩稍晚.

浅黄灰色厚层至块状花岗质片麻岩属二长石或钾长石片麻岩, 主要矿物为钾长石, 局部见微斜长石、斜长石和石英, 少量黑云母或角闪石和不透明氧化物, 石榴石罕见. 具中-粗粒变晶结构, 块状-弱片麻状构造.

黑灰色镁铁质麻粒岩以斜长角闪麻粒岩为主, 亦见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, 副矿物主要有磁铁矿、磷灰石和锆石. 细-中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  $120^\circ$  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. 少量样品中含有石榴石, 显示出至少三期变质作用矿物组合. 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. 威尔逊岭北部的石榴石单斜辉石岩呈 1~2 m 厚的薄层产于花岗质片麻岩中, 主要矿物有石榴石、单斜辉石、方柱石(钙柱石), 部分薄片可见细粒斜长石, 极少量硅灰石和萤石, 以及方柱石转变为黝帘石+方解石的局部退变反映现象.

泥质片麻岩以石榴黑云斜长片麻岩为主, 包括紫苏-堇青-石榴石-黑云母片麻岩, 黑灰色, 层状构造. 斑状变晶结构, 变斑晶为石榴石和堇青石. 基质为柱状粒状鳞片变晶结构, 包含堇青石、黑云母、钾长石、斜长石、石英、紫苏辉石和尖晶石, 以及副矿物锆石和磷灰石等. 石榴石(15%)多被拉长, 大者达(3.5~4) mm × 1.7 mm, 一般为 1.5 mm, 内含石英和黑云母包体; 堇青石(15%)为柱状和粒状, 分两个粒度级别, 大者为 1.5 mm, 与石榴石共同组成变斑晶, 内有黑云母包体; 小者 0.75 mm, 局部富集成条带. 堇青石的锆石包体周围具有特征柠檬黄多色晕. 黑云母(20%)呈片状定向排列, 构成片麻理. 基质中的板片状的黑云母明显不同于石榴石斑晶内的小圆片状的黑云母, 而基质黑云母内还有石英包体. 紫苏辉石(2%)为细粒不规则粒状, 由于退变常被黑云母包围. 铁镁尖晶石(1%)呈细粒不规则蠕虫状残留在堇青石内, 尖晶石中又有黑云母包体, 且表面有磁铁矿条带.

浅黄色-肉红色块状中-粗晶二长花岗岩的主要矿物包括钾长石(正长石、微斜长石或条纹长石)、斜长石、石英、黑云母, 角闪石也普遍可见. 而细粒花岗闪长质或花岗质岩脉主要矿物有黑云母、角闪石、斜长石、条纹长石和石英, 局部可见热接触镶边. 长英质伟晶岩则由钾长石、石英及少量斜长石、黑云母等矿物组成. 根据野外构造关系, 可看出上述各岩性的生成顺序为: 镁铁质麻粒岩、长英质麻粒岩、紫苏花岗岩和花岗质片麻岩, 同构造-后构造二长花岗岩, 以及后期的花岗闪长质细晶岩和伟晶岩.

### 3 构造特征与变形分析

已调查露头均显示较平缓的区域性片麻理, 仅局部地段见有强烈韧性变形带. 片麻理由麻粒岩和片麻岩中的造岩矿物定向排列形成, 普遍清晰稳定. 除普遍强烈的压扁变形外, 其中

基性麻粒岩条带和透镜的褶皱说明其经历过不同程度的“顺层”剪切作用. 同-后构造花岗岩体中的片麻理则相对比较微弱(图 3).

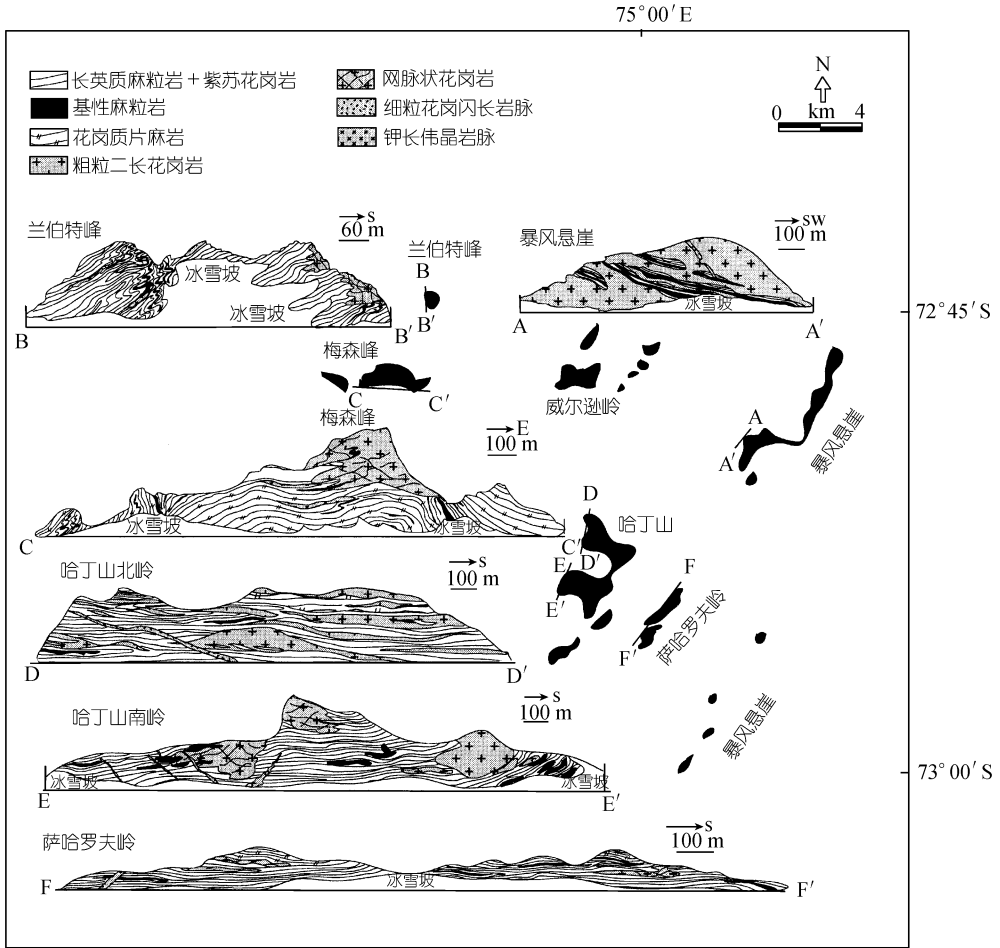


图 3 格罗夫山主要露头信手剖面图

格罗夫山地区的韧性变形过程可初步分解为 3 期. 早期变形(D<sub>1</sub>)形迹表现为基性麻粒岩透镜或黑云母片麻岩内部残留的矿物组构. 由黑云母、细粒斜长石等矿物定向排列构成残留面理(S<sub>1</sub>)和线理构造(L<sub>1</sub>). 有时在石英大颗粒中可见到这类残留的早期矿物组合, 由于后期变形的改造而使其组构方向不具备区域稳定性. 这期变形可能属于区域性峰期变质作用以前更早期的构造事件记录.

第 2 期变形作用(D<sub>2</sub>)表现为区域性低角度平缓面理构造(S<sub>2</sub>), 是测区最显著的变形事件. 在测区西南梅尔沃德岛峰近水平的花岗质片麻岩中见到多组垂直延伸的变基性岩脉, 脉宽 10~50 cm 不等, 长度 20~100 m. 由于同变质的变形作用, 岩脉已形成紧闭的蛇曲状褶皱. 褶皱轴面与片麻岩面理平行, 翼部减薄, 转折端加厚, 显示强烈的共轴压编作用. 褶皱显然与围岩面理同期形成, 可能是早期纵弯褶皱在峰期变质作用时强烈改造所致. 这期变形普遍未见到

明显的线理(L<sub>2</sub>), 其变形期次可能与板底垫托(underplating)导致的地壳垂向增生有关。

第 3 期变形(D<sub>3</sub>)表现为在全区稳定的低角度面状构造背景中, 在局部地段出现叠加的强烈韧性剪切变形带。这些变形带出露于萨哈罗夫岭北端, 梅森峰西侧, 兰伯特峰北部, 暴风悬崖南端等地。变形带厚度一般几十米至百米规模, 与围岩呈渐变过渡关系。剪切作用改造了围岩的区域性面理, 使得原近水平片麻理形成紧闭同斜褶皱或平卧褶皱, 局部可见被置换了的早期褶皱构造。紧闭同斜褶皱的基性麻粒岩条带及围岩显示高角度面理(S<sub>3</sub>)和线理(L<sub>3</sub>), 亦可见 S-C 构造, 不对称微褶皱等现象。剪切带普遍显示混合岩化现象, 粗-伟晶岩脉多顺褶皱层理侵入, 局部斜切或者网状脉, 显示同构造期高温及流体参与的重融作用。强变形带的紧闭同斜褶皱显示非共轴简单剪切机制。在同一强变形带中, S<sub>3</sub> 和 L<sub>3</sub> 运动学方向相对稳定, 但在全区尺度, 由于各孤立岛峰相距较远, 构造形迹难以对比连接, 无法准确恢复区域性构造极向。由于强变形带边界与区域围岩呈渐变过渡状态, 变质矿物组合也大体一致, 说明 D<sub>2</sub> 与 D<sub>3</sub> 变形作用的温压条件相似, 时间上也先后间隔不大, 可能在 D<sub>2</sub> 之后由于区域应力场和边界条件的变化, 变形机制在局部地段由纯剪切转变为简单剪切。由于多数强剪切带的运动学指向显示张性正断性质, 故本期变形应当属于造山后期伸展阶段的产物。

脆性变形作用主要表现为在大部分岛峰的北西西侧发育与山脊宏观走向平行的断裂构造, 断面近直立或高角度倾向北西西, 断面上可见擦痕阶步, 显示上盘(北西盘)下滑的正断层特征。多数断层走向平直, 暴风悬崖一带呈雁行排列。尽管各岛峰互不相连, 但结合冰面地形起伏, 可看出它们是一组北北东走向的阶梯状或箕状正断-掀斜组合, 形成区域性盆岭构造地貌。这组晚期区域性脆性正断裂构造似乎与中、新生代夭亡的兰伯特裂谷活动有关。

## 4 变质作用

格罗夫山深变质杂岩代表性矿物组合(表 2), 以及基性麻粒岩和变泥质片麻岩中的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峰期温度为(780 ± 50) °C, 压力为(5.5~6.8) × 10<sup>5</sup> Pa<sup>1)</sup>。镁铁质麻粒岩的详细工作则显示了近等温降压(ITD)的 P-T-t 演化轨迹, 包括 3 个阶段。M<sub>1</sub>: 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 800 °C, 9.3 × 10<sup>5</sup> Pa; M<sub>2</sub>: 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, (800~810) °C, 6.4 × 10<sup>5</sup> Pa; M<sub>3</sub>: 以围绕辉石的角闪石(绿色)为代表, 形成的温度更低, 仅 650 °C。包在石榴石变斑晶里的单斜辉石还出溶了细粒石榴石和条纹状紫苏辉石, 可能代表更早期的等压降温变质作用<sup>[29]</sup>。

表 2 格罗夫山地区不同变质岩类的典型矿物组合

岩石类型	矿物组合
长英质麻粒岩	紫苏辉石 + 角闪石 + 黑云母 + 斜长石 + 石英 ± 钾长石
紫苏花岗岩	紫苏辉石 + 黑云母 + 钾长石 + (暗色)斜长石 + 角闪石 + (暗色)石英
花岗质片麻岩	黑云母 + 钾长石 + 斜长石 + 石英 ± 角闪石 ± 石榴石
镁铁质麻粒岩	紫苏辉石 + 单斜辉石 + 角闪石 + 黑云母 + 斜长石 ± 石榴石 ± 石英
变超镁铁质麻粒岩	单斜辉石 + 角闪石 + 斜长石 + 方柱石 ± 石榴石 ± 硅灰石 ± 萤石
变泥质岩	石榴石 + 堇青石 + 黑云母 + 尖晶石 + 斜长石 + 石英 ± 紫苏辉石 ± 矽线石

1) Xiaochun Liu, Yue Zhao, Xiaohan Liu. The Pan-African granulite facies metamorphism and syn-tectonic magmatism in the Grove Mountains, East Antarctica, Journal of Conference Abstracts, Strasbourg, France, E U G. XI, 2001. 379

## 5 变质年代分析

我们选择格罗夫山代表性的花岗质片麻岩、二长花岗岩和花岗闪长细晶岩进行了锆石 U-Pb 同位素测年. 锆石样品在澳大利亚国立大学(堪培拉)地球科学院进行离子探针(SHRIMP II)U-Pb

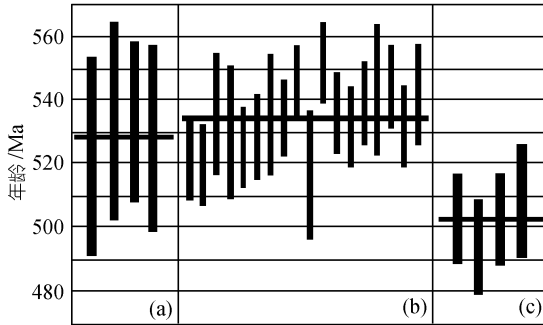


图 4 格罗夫山代表性花岗质片麻岩(a)、同构造二长花岗岩(b)和花岗闪长细晶岩(c)的锆石 U-Pb 同位素年龄数据直方图

(a)  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄统计权重平均值( $529 \pm 14$ ) Ma, 95%置信度, MSWD = 0.12(2 $\sigma$ ); (b)  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄统计权重平均值( $534 \pm 5$ ) Ma, 95%置信度, MSWD = 2.0(2 $\sigma$ ); (c)  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄统计权重平均值( $501 \pm 7$ ) Ma, 95%置信度, MSWD = 0.71(2 $\sigma$ )

显示了格罗夫山区麻粒岩相变质峰期的年龄属于泛非构造热事件, 说明格罗夫山应当是东南极泛非活动带的一个组成部分<sup>1)</sup>。

格罗夫山区的变质峰期年龄与拉斯曼丘陵的峰期年龄不谋而合, 而且近年在北查尔斯王子山东部也发现了泛非期的记录. 尽管在该区麻粒岩相深变质杂岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄大部分集中于 10 亿年, 但其东侧也陆续获得一些 500~550 Ma 的花岗岩、伟晶岩锆石和独居石 U-Pb 年龄<sup>[25]</sup>. 虽然锆石 U-Pb 法的 530 Ma 的年龄可能解释为由于部分 Pb 丢失所致, 但毕竟揭示了该区可能存在着泛非构造热事件记录. 此外, 不少岩类的石榴石/全岩和石榴石/基质的 Sm/Nd 年龄显示 800 Ma 和 630~550 Ma 两组, 后者更集中于比弗湖(Beaver Lake)东部的杰蒂半岛(Jetty Pen.)一带<sup>[28]</sup>. 最近, Boger 等在南查尔斯王子山的南莫森悬崖(Southern Mawson Escarpment)(73° 30' S, 68° 30' E)又发现了明确的泛非期构造热事件的年代记录. 在该区兰伯特地体(Lambert Terrane)的含石榴石黑云母长英质片麻岩中的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄集中于 (550~490) Ma<sup>[24]</sup>. 这一发现显示普里兹湾-拉斯曼丘陵的泛非构造带经过格罗夫山后继续向南西穿越南查尔斯王子山.

## 6 岩石地球化学特征与原岩分析

长英质麻粒岩、镁铁质麻粒岩、变斜长角闪岩、泥质片麻岩、含磁铁矿(及含或矽线石或紫苏辉石)石英岩、(石榴石)斜长单斜辉石岩等岩性的岩石地球化学特征显示它们均属于变质表壳岩类, 原岩分别为岛弧花岗-闪长岩系列, 洋岛玄武岩和洋中脊玄武岩类等. 紫苏花岗岩、

年龄分析. 所测梅尔沃德峰花岗质片麻岩的锆石普遍具有核-幔结构. 多数锆石的核部年龄比较分散, 介于 870~953 Ma 之间, 应当代表不同继承锆石的结晶年龄. 而各锆石生长环的年龄则一致集中于( $529 \pm 14$ ) Ma, 无疑代表麻粒岩相变质作用的峰期年龄(图 4(a)). 大量同-后构造二长花岗岩的锆石 SHRIMP 年龄集中于( $534 \pm 5$ ) Ma(图 4(b)), 显示伴随峰期变质事件的侵入时代. 而细粒花岗闪长质岩脉的锆石 SHRIMP 年龄为  $501 \pm 7$  Ma (图 4(c)). 此外, 花岗闪长岩黑云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄则为 498.2 Ma, 反映了短期内快速冷却的历史. 这些年代学数据清楚地

1) Zhao Y, Liu X C, Fanning C M, et al. The Grove Mountains, a segment of a Pan-African orogenic belt in East Antarctica, in: Abstract Volume of 31<sup>th</sup> I.G.C., 9-7 session, Rio de Janeiro, Brazil, 2000 (CD)



花岗质片麻岩和二长花岗岩属于铝质的 A 型花岗岩。而后期的花岗闪长岩脉、伟晶岩、细晶岩脉等则属于重熔作用成因。

所有的变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,  $\text{SiO}_2$ : 46.37%~49.9%。根据主量元素、稀土和微量元素特征, 明显的可以分为二类玄武岩。第 1 类富集 Ti ( $\text{TiO}_2=2.68\%$ ),  $\text{LREE}[(\text{La}/\text{Yb})_N=4.77]$ ,  $\text{Ti}/\text{Y}(=343)$ ,  $\text{Zr}/\text{Y}(=3.1)$  的变基性火山岩, 具洋岛玄武岩的特征, 岩浆应当来源于富集地幔源区(EMI), 推测可能与地幔柱活动有关。而第 2 类则显示低 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 ( $47 \sim 93$ ) $\times 10^{-6}$ 、 $\text{LREE}/\text{HREE}$  (2.27~2.54)、 $\text{La}_N/\text{Yb}_N$  (1.30~1.62), 具有洋中脊玄武岩的特征。这套洋岛型和洋中脊型变质基性火山岩组合说明该地区在泛非期前应当存在过洋盆。格罗夫山还发育一套长英质成熟岛弧环境的火山岩(另文发表), 因此该区变火山岩可能发育在大陆边缘的弧后盆地-大洋盆地环境<sup>[29]</sup>。

## 7 结论及讨论

格罗夫山由高角闪-麻粒岩相深变质岩组成, 其中紫苏花岗岩、花岗质片麻岩和花岗岩属铝质 A 型深成岩系列, 而长英质麻粒岩、镁铁质麻粒岩等属于岛弧、洋岛和洋中脊环境的表壳岩系列。测区以低角度面理构造为主, 局部显示强剪切变形带, 韧性变形可分为 3 个阶段。片麻岩的变质反应结构多显示为单一的区域性麻粒岩相变质作用, 而镁铁质麻粒岩中保留有 3 个阶段变质作用, 其近等温降压(ITD)的  $P$ - $T$  轨迹与碰撞导致的地壳构造增厚以及随后的抬升剥蚀和构造减薄相一致。代表性花岗质片麻岩的锆石 U/Pb 的离子探针分析显示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。

格罗夫山的地质特征和构造热事件年代学数据说明该区域经历了早古生代强烈的构造-变质作用。这样, 格罗夫山就在空间上连通了普里兹湾、拉斯曼丘陵和南查尔斯王子山泛非期造山带。具有如此规模的普里兹-格罗夫-南查尔斯王子山活动带不可能突然终止, 显然应当继续向内陆延伸。在活动带南部的查尔斯王子山兰伯特地体的泛非期活动带构造走向近东-西, 似乎应当与毛德皇后地的泛非期构造带<sup>[24]</sup>相接。而在中部格罗夫山和北部拉斯曼丘陵的构造走向则以北东为主, 显示活动带向北东应当与东侧的丹曼冰川(Denman Glacier)-奥布鲁切夫丘陵地区和西澳大利亚的勒文杂岩相接。但在北查尔斯王子山和印度东高止(Eastern Ghats)地块, 却无论从变质年代学、侵入事件或者同位素配分特征等都缺乏泛非期热事件的证据<sup>[4]</sup>, 因此这一活动带很可能经北查尔斯王子山东侧和印度东高止地块的东北部进入当时的和扬子陆块西侧和青藏东北部, 构成现今羌塘和滇东的冈瓦纳期变质基底。

尽管东南极地盾的泛非期活动带也可能属于陆内造山带, 但现有证据表明这一活动带已将东南极地盾的太古宙陆核和新元古构造带分割开来。如在普里兹湾地区, 活动带将东侧的西福尔丘陵太古宙地体( $2480 \text{ Ma}$ )<sup>[30]</sup>和茹尔群岛太古宙地体( $2800 \sim 2550 \text{ Ma}$ )<sup>[31]</sup>与西侧的北查尔斯王子山新元古构造带和吕措霍母湾太古宙地体分开; 在南查尔斯王子山将北侧的北查尔斯王子山新元古构造带与南侧的太古宙地体( $3160 \sim 2650 \text{ Ma}$ )<sup>[24]</sup>分开。不仅如此, 与这一泛非活动带有关的北查尔斯王子山、吕措霍母湾和印度东高止地块的格林维尔期构造带的年龄和同位素特征也与毛德皇后地的相应同期构造带有很大差别<sup>[32]</sup>, 它们应当分别属于前泛非期不同的岩石圈单元。此外, 南查尔斯王子山泛非期活动带两侧的锆石残留年龄完全不同, 其北侧兰

伯特地体并没有接受来自南侧鲁克地体的沉积物,也没有接受茹尔群岛和西福尔丘陵等东南极地盾太古宙陆核的沉积物,而是与格罗夫山一样,在很大程度上由泛非期“新生”地壳物质(juvenile)组成.因此,普里兹-格罗夫-南查尔斯王子山活动带不应当属于陆内造山带,而应当代表冈瓦纳最后拼合的缝合带(图 5).如果这一假说成立,则普里兹-格罗夫-南查尔斯王子山泛非构造带以西的东南极地盾部分和大印度就不再属于东冈瓦纳.目前有限的可靠古地磁资料并不排除这种可能性<sup>[33-35]</sup>.它们沿莫桑比克带与非洲等部分拼合的时间(570~520 Ma)比普里兹-格罗夫-南查尔斯王子山活动带(550~490 Ma)更早一些.而且,这一趋势也与西冈瓦纳构造域内部泛非期活动带由西向东变年轻的趋势相一致<sup>[36]</sup>.

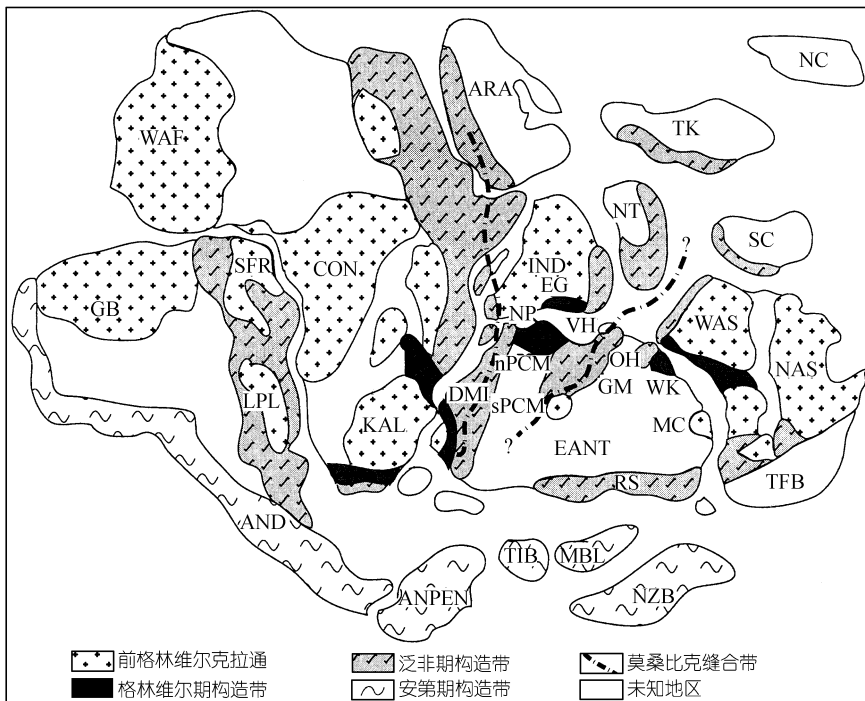


图 5 泛非构造带及冈瓦纳古陆拼接图(据赵越等, 2000, 修改)

AND 示安第斯造山带; ANPEN 示南极半岛; ARA 示阿拉伯半岛; CON 示刚果地盾; DML 示毛德皇后地; EANT 示东南极地盾; EG 示印度东高止地块; GB 示圭亚那地盾; GM 示格罗夫山; IND 示印度克拉通; KAL 示卡拉哈里(卡普瓦尔-津巴布维)克拉通; LPL 示拉普拉塔地盾; MBL 示马里伯德地; MC 示莫森克拉通; NAS 示北澳大利亚陆块; NC 示华北克拉通; nPCM 示北查尔斯王子山; NP 示纳皮尔杂岩; NT 示羌塘高原; NZB 示新西兰陆块; OH 示奥布鲁切夫丘陵; RS 示罗斯造山带; SC 示扬子板块; SFR 示圣弗郎西斯科地盾; sPCM 示南查尔斯王子山; TFB 示塔斯曼构造带; TIB 示索斯顿岛; TK 示塔里木-卡拉库姆板块; WAF 示西非地盾; WAS 示西澳大利亚地盾; WK 示威尔克斯地; VH 示西福尔丘陵

由于南极内陆岩石露头很少,因此普里兹湾-格罗夫山-南查尔斯王子山活动带的详细结构仍然很不清楚,例如活动带的区域构造极性,可能的俯冲方向等等.据目前所知,各露头区的共同特征是高温变质作用和重融作用,后造山花岗岩侵入和快速的冷却抬升.与拉斯曼丘陵相比,格罗夫山变质作用的压力更高,岩性也以长英质为主,与拉斯曼丘陵西部相似.格罗夫山仅见到少量副变质岩,而在拉斯曼丘陵的米洛半岛则产出大量副变质岩,并显示岛弧-复理石加积楔构造混杂带特征.格罗夫山北西部主要产出岛弧性质的片麻岩,南东侧则以深成岩为主;而拉斯曼丘陵米洛半岛西部也主要产出岛弧性质的片麻岩,南东侧以变沉积岩为主.

在格罗夫山东部见到许多由于冰川剪切流动而带出的蛇绿混杂带成分的转石, 如堆晶辉长岩、纯橄岩、硅质岩等, 暗示格罗夫山东侧附近冰盖之下可能存在蛇绿混杂带。格罗夫山大量出露紫苏花岗岩, 与毛德皇后地、印度和斯里兰卡呼应, 而拉斯曼丘陵则未见到。南查尔斯王子山兰伯特地体具有晚太古和中元古年龄的残留锆石, 说明古老陆块在泛非期时再次经历了改造, 应当处于碰撞造山带的边缘部位。而格罗夫山并未见到古老的残留年龄, 应当属于泛非期的新生地壳物质。普里兹湾-格罗夫山-南查尔斯王子山活动带显然是一个结构复杂的造山带。这一活动带向南究竟与横贯南极山脉的罗斯造山带相接, 还是与毛德皇后地会合, 向北是否与印度东高止、羌塘东北部和西扬子相接, 都有待于深入研究。这一构造带的发现不仅勾画出东南极地盾内部泛非期缝合带的轮廓, 也暗示了另一条规模与莫桑比克带相当的, 连接南极与扬子陆块、羌塘陆块和塔里木-卡拉库母陆块的又一条冈瓦纳主要缝合带。

**致谢** 本项工作获得国家海洋局极地考察办公室 1998, 1999 年度专项野外考察经费资助, 在此深表感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Tingey R J. The geologic evolution of the Prince Charles Mountains-an Antarctic Archaean cratonic block. In: Craddock C, ed. Antarctic Geoscience. Madison WI: University of Wisconsin Press, 1982. 455~464
- 2 Tingey R J. The regional geology of Archaean and Proterozoic rocks in Antarctica. In: Tingey R J, ed. The geology of Antarctica. Oxford: Clarendon Press, 1991. 1~78
- 3 Sheraton J W, Black L P, McCulloch M T. 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*, 1984, 26: 169~198
- 4 Grew E S, Manton W I. A new correlation of sapphirine granulites in the Indo-Antarctic metamorphic terrain, late Proterozoic dates from the Eastern Ghats Province of India. *Precambrian Res*, 1986, 33: 123~137
- 5 Black L P, Harley S L, Sun S S, et al. The Rayner complex of East Antarctica: complex isotopic systematics within a Proterozoic mobile belt. *J Metamorphic Geol*, 1987, 5: 1~26
- 6 Stüwe K, Powell R. 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*, 1989, 7: 465~483
- 7 Katz M B. 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*, 1989, 97: 646~648
- 8 Fitzsimons I C W, Harley S L. Geological relationships in high-grade gneiss of the Brattstrand Bluffs coastline, Prydz Bay, east Antarctica. *Austral. J Earth Sci*, 1991, 38: 497~519
- 9 Moores E M. Southwest U. S.-East Antarctica (SWEAT) connection: a hypothesis. *Geology*, 1991, 19: 425~428
- 10 Ren L, Zhao Y, Liu S, et al. Re-examination of the metamorphic evolution of the Larsemann Hills, East Antarctica, In: Yoshida, Y, et al. ed. *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Tokyo: Terra Sci Pub Com, 1992. 145~153
- 11 Zhao Y, Song B, Wang Y, et al. Geochronology of the late granite in the Larsemann Hills, East Antarctica, In: Yoshida, Y, et al. ed. *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Tokyo: Terra Sci Pub Com, 1992. 155~161
- 12 任留东, 刘小汉. 东南极普里兹湾姐妹群岛石榴辉石麻粒岩变质事件年龄及其与邻区关系. *南极研究*, 1995, 7(3): 13~17
- 13 赵 越, 宋 彪, 张宗清, 等. 东南极拉斯曼丘陵及其邻区的泛非热事件. *中国科学, B 辑*, 1993, 23(9): 1001~1008
- 14 刘小汉, 全来喜, 李继亮, 等. 东南极地盾中元古-早古生代构造演化. 海峡两岸地球科学研讨会论文集(详细摘要)(2). 台北: 中国地质协会出版社, 1995. 165~169
- 15 Carson C J, Fanning C M, Wilson C J L. Timing of the progress granite, Larsemann Hills, evidence for Early Palaeozoic

- orogenesis within the east Antarctic Shield and implications for Gondwana assembly. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1996, 43: 539~553
- 16 Hensen B J, Zhou B. East Gondwana amalgamation by Pan-African collision? Evidence from Prydz Bay, Eastern Antarctica, in: Ricci C A, ed. *The Antarctic region, geological evolution and processes*. Siena, Italy: Terra Antartica Pub, 1997. 115~119
- 17 Fitzsimons I C W. The Brattstrand paragneiss and the Sostrene orthogneiss: A review of Pan-African metamorphism and Grenville relics in southern Prydz Bay. in: Ricci C A, ed. *The Antarctic region. Siena, Italy: geological evolution and processes*, Terra Antartica Pub, 1997. 121~130
- 18 Hoffman P F. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside out? *Science*, 1991, 252: 1409~1412
- 19 Clarke G L, Sun S S, White R W. Grenville-age belts and associated older terrains in Australia and Antarctica. *AGSO J Aust Geol Geophys*, 1995, 16: 25~39
- 20 Yoshida M. Assembly of East Gondwanaland during the Mesoproterozoic and its rejuvenation during the Pan-African period. In: Yoshida M, Santosh M, eds. *India and Antarctica during the Precambrian*. Geological Society of India Memoir, 1995, 34: 22~45
- 21 Shackleton R M. The final collision zone between East and West Gondwana: Where is it? *Journal of African Earth Sciences*, 1996, 23: 271~287
- 22 Kriegsman L M. The Pan-African event in East Antarctica: A view from Sri Lanka and the Mozambique belt. *Precambrian Research*, 1995, 75: 263~277
- 23 Fitzsimons I C W. Grenville-age basement provinces in East Antarctica: Evidence for three separate collisional orogens. *Geology*, 2000, 28(10): 879~882
- 24 Boger S D, Wilson C J L, Fanning C M. Early Paleozoic tectonism within the East Antarctic craton: The final suture between east and west Gondwana? *Geology*, 2001, 29(5): 463~466
- 25 Boger S D, Carson C J, Wilson C J L, et al. Neoproterozoic deformation in the Radok Lake region of the northern Prince Charles Mountains, east Antarctica; evidence for a single protracted orogenic event. *Precambrian Res*, 2000, 104: 1~24
- 26 Kinny P D, Black L P, Sheraton J W. Zircon ages and the distribution of Archean and Proterozoic rocks in the Rauer Islands. *Antarctic Sci*, 1993, 5: 193~206
- 27 Harley S L. Proterozoic granulites from the Rauer Group, East Antarctica. I. Decompressional pressure-temperature Paths deduced from mafic and felsic gneisses. *J Petrol*, 1988, 29: 1059~1095
- 28 Manton W I, Grew E S, Hoffman J, et al. Granitic rocks of the Jetty Peninsula, Amery Ice Shelf area, East Antarctica, in: Yoshida Y, et al. ed. *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Tokyo: Terra Sci Pub Com, 1992. 179~189
- 29 俞良军, 刘小汉, 刘晓春, 等. 东南极格罗夫山变质基性岩地球化学特征. *岩石学报*, 2002, 18(1): 91~99
- 30 Snape I, Black L P, Harley S L. Refinement of the timing of magmatism, high temperature metamorphism and deformation in the Vestfold Hills, East Antarctica, from new U-Pb zircon geochronology, in: Ricci C A, ed. *The Antarctic region, Geological evolution and processes*. Siena, Italy: Terra Antartica Pub, 1997. 139~148
- 31 Harley S L, Snape I, Black L P. The evolution of a layered metaigneous complex in the Rauer Group, east Antarctica; evidence for a distinct Archean terrane. *Precambrian Res*, 1998, 89: 175~205
- 32 Jacobs J, Fanning C M, Henjes-Kunst F, et al. Continuation of the Mozambique belt Into East Antarctica: Grenville-age metamorphism and polyphase Pan-African high-grade events in central Dronning Maud Land. *Journal of Geology*. 1998, 106: 385~406
- 33 Powell C M, Li Z X, McElhinny M, et al. Paleomagnetic constraints on the timing of the Neoproterozoic break-up of Rodinia and the Cambrian formation of Gondwana. *Geology*, 1993, 21: 889~892
- 34 Gose W A, Helper M A, Connelly I N, et al. Paleomagnetic data and U-Pb isotopic age determinations from Coats Land, Antarctica: Implication for late Proterozoic plate reconstructions. *Journal of Geophysical Res*, 1997, 102: 7887~7902
- 35 张世红, 李正祥, 吴怀春, 等. 华北地台新元古代古地磁研究新成果及其古地理意义. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(增刊): 138~147
- 36 Grunow A, Hansen R, Wilson T. Were aspects of Pan-African deformation linked to Lapeyus opening? *Geology*, 1996, 24: 1063~1066