中 国 科 学 (B 辑)
第23卷 第9期 SCIENCE IN CHINA (Series B) 1993年 9月

# 东南极拉斯曼丘陵及其邻区的泛非热事件 *

赵 越 宋 彪 张宗清 富云莲 陈廷愚
王彦斌 任留东 姚玉鹏
(中国地质科学院地质研究所,北京 100037)
李继亮 刘小汉
(中国科学院地质研究所,北京 100029)

## 摘 要

本文以Sm-Nd内部等时年龄,单颗粒锆石$^{207}Pb$-$^{206}Pb$逐层蒸发年龄和黑云母$^{40}Ar/^{39}Ar$坪年龄为根据,论述了东南极拉斯曼丘陵泛非热事件. 野外地质和同位素年代学的证据表明,该热事件不仅有区域强烈的部分熔融,而且还有低压麻粒岩相变质. 它的产生可能与冈瓦纳古陆的最终形成有关.

**关键词** 泛非热事件、早古生代、同位素年代学、麻粒岩相变质、东南极

与东南极克拉通的许多地区一样,拉斯曼丘陵和其所在的Prydz Bay地区(图1)经历了麻粒岩相变质作用[1—3]. 目前国际上普遍认为这一高级变质事件发生在1100—1000Ma[1, 2, 4—6]. 其主要依据是Sheraton等的工作[4]. 实际上,文献[4]中年代学的主要贡献是Prydz Bay地区高级变质岩石的Sm-Nd模式年龄. 同时发表的Rb-Sr年龄数据被忽视了(见后). 仔细地核查文献[4],我们发现其确定区域麻粒岩相变质时代的年龄数据,不是来自文献[4]研究本身,而是Arriens的工作(文献[4]第172页). 这一数据最早见于Tingey的报道[7, 8],后被广泛引用. 该数据是一Rb-Sr全岩等时年龄(1050±109Ma, $I_{Sr}$=0.7086±0.0013). 样品取自Rauer群岛的Filla岛,为长英质正片麻岩. 在后面的讨论中,我们将阐明:该年龄是正

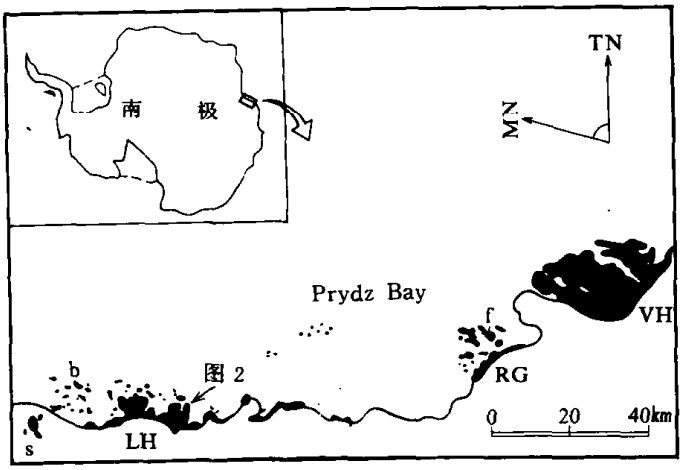



图1 东南极拉斯曼丘陵位置图
LH: 拉斯曼丘陵, RG:Rauer群岛, VH: 西福尔丘陵, f为Filla岛, b为Bolingen岛, s为Sostrene岛

1992-12-30收稿,1993-05-10收修改稿.
* 国家自然科学基金、地质行业科技发展基金和南极考察委员会资助项目.

片麻岩的侵入年龄，而不是区域麻粒岩的变质年龄.

在东南极克拉通，500Ma 前后的热事件被称为“泛非热事件”. 东南极大规模地质考察早期积累的 K-Ar 及 Rb-Sr 同位素年龄数据，多数集中在 500Ma 前后[9]. 这一热事件的地质含意一直没有被揭示，现在它已成为国际东南极地学研究的一个重点[10]. 在 Prydz Bay 地区，500Ma 前后的泛非热事件对应于构造晚期的花岗岩侵入[1, 4, 11]及绿片岩相变质[2, 5, 6].

在对拉斯曼丘陵东部进行了野外地质调查和对属于构造晚期的正长花岗岩做了初步研究[12]后，我们发现本区主期麻粒岩相变质事件很可能发生在泛非期. 为了获得直接、可靠的证据证实这一判断，我们选择 Sm-Nd 内等时线法，对主期麻粒岩相变质组合的矿物和岩石进行年龄测定. 同时补之单颗粒锆石 Pb-Pb 蒸发法和 Ar-Ar 法，以期对本区泛非热事件有一个初步的、全面的研究.

## 1 地 质 概 况

拉斯曼丘陵出露的岩石经历了低压麻粒岩相变质和部分熔融. 构造晚期的正长花岗岩岩枝虽然在 Sigdoy 岛、Broknes 半岛和 Mirror 半岛的一些地点切割了麻粒岩相变质的岩石，但在 Mirror 半岛北部，它与麻粒岩相变质岩石逐渐过渡(图 2). 正长花岗岩本身具弱片麻理是它形成于构造晚期的标志. 岩体的矿物组成和化学成分[1]1) 与周围的混合片麻岩相同或相近，说明它来自围岩的部分熔融. 岩体的两组锆石样品分别给出了 547±9Ma 和 556±7Ma 的结晶年龄[12]. 后者(样品：ZG20405, 图 2)取自 Stüwe 等划分的正长花岗岩岩体之外(文献[1]图 3)，被他们视为麻粒岩相变质岩石.

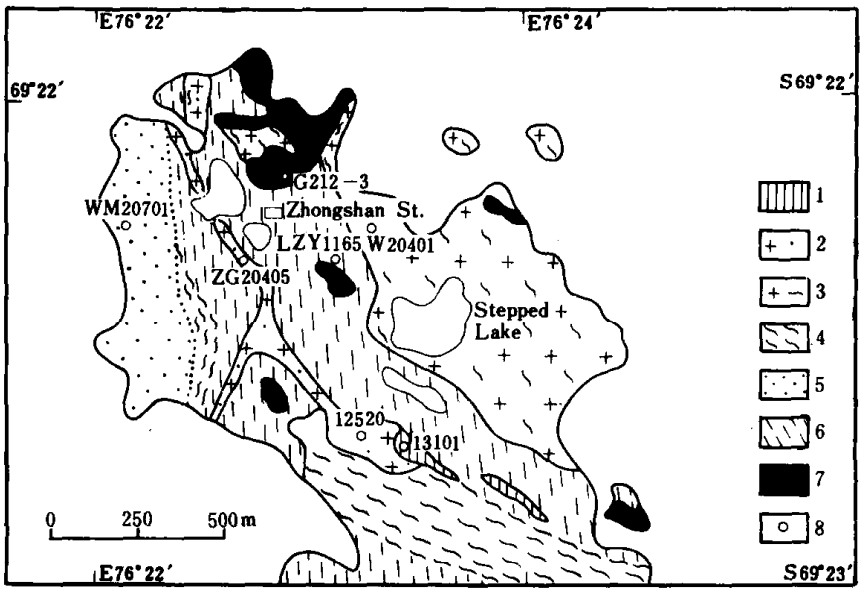



图 2 拉斯曼丘陵 Mirror 半岛北部地质图(附采样位置)

1—— 花岗伟晶岩，2—— 黑云正长花岗岩，3—— 片麻状浅色花岗岩，4—— 富含堇青石、矽线石和磁铁矿的片麻岩，5—— 混合片麻岩，6—— 条带状混合片麻岩，7—— 暗色麻粒岩，8—— 采样位置

在岩体南侧，分布着本区麻粒岩相变质的重要岩石—— 富含堇青石、矽线石、尖晶石和钛

1) 赵越等待刊资料.

铁矿的片麻岩（‘蓝色片麻岩’[1]）. 最近，又在其中发现罕见的硼硅酸盐矿物 1). 在‘蓝色片麻岩’中，可见与正长花岗岩成分相同的不规则钾长质脉体沿片麻理方向分布. 堇青石、矽线石、钛铁矿和磁铁矿等变质矿物晶体粗大. 有的几乎构成单矿物岩石，并出现粗大的呈放射状的矽线石，说明它们同样形成在构造晚期. 形成时的压力不高，并伴有部分熔融.

根据对本区麻粒岩相变质的进一步研究[3]，区内镁铁质和超镁铁质麻粒岩，富 Al, Fe 和 Mg 的片麻岩（‘蓝色片麻岩’）及南极首次发现的罕见的硼硅酸盐矿物组合（硅硼镁铝矿 - 柱晶石 - 电气石），一致显示麻粒岩相变质峰期的低压环境（750℃, 0.45GPa）. 在主期麻粒岩相变质期间，部分熔融广泛发育[1].

## 2　样品和实验方法

### 2.1　样品

暗色麻粒岩（G212-3）　样品取自中山站附近的观景山（图 2）. 由紫苏辉石、角闪石、斜长石、单斜辉石、黑云母、钛铁矿、磁铁矿及少量石英组成. 中粒，麻粒变晶结构. 紫苏辉石 - 角闪石 - 斜长石为主期麻粒岩相变质事件的矿物组合[1－3]. 从 G212-3 中缩分出全岩样品，同时选取紫苏辉石、角闪石、斜长石单矿物样品，纯度达到 98%.

片麻状浅色花岗岩（W20401）　样品取自中山站附近的卧龙滩（图 2）. 由钾长石 67%、石英 26% 和石榴石 6% 组成. 副矿物主要为锆石，并有少量不透明矿物. 片麻状构造. 主要组成矿物属主期麻粒岩相变质事件的矿物组合[1]. 一些地点，钾长石、石榴石形成的变质分异体及少量黑云母定向排列构成了岩石的片麻理. 从 W20401 中缩分出全岩样品，选出的钾长石、石榴石单矿物样品纯度达 99%,

条带状石榴黑云片麻岩（LZY1165）　样品取自中山站附近的友谊山旁. 为 Stüwe 等[1]划分的‘蓝色片麻岩’之部分. 长英质组分和石榴石、黑云母的变质分异体构成岩石的条带. 主要组成矿物为石英、斜长石、黑云母和石榴石，副矿物为锆石、磷灰石、磁铁矿和黄铁矿等. 用常规方法从样品中分离出锆石. 在双目显微镜下观察挑选、分类，再将待测锆石颗粒拍摄扫描电子显微镜照片，详细研究锆石的形态和表面特征. 结合矽薄片的观察，确定锆石晶体内部的组成，区分变质生成的锆石和具有继承锆石的样品特点.

混合片麻岩（WM20701）　样品取自中山站附近的西岭. 为 Stüwe 等划分的‘黄色片麻岩’[1]. 由钾长石、斜长石、石英、石榴石、黑云母及锆石、磷灰石和不透明矿物组成. 片麻状构造. 在采样点附近可见囊状的矽线石团块. 从样品中选取的黑云母纯度达 99%. 所有的样品新鲜、没有蚀变.

### 2.2　实验方法

本文的同位素年代学测试分析在中国地质科学院地质研究所同位素年代学实验室完成.

Sm, Nd 含量和 Nd 同位素比值的测定实验方法详见文献[13, 14]. Sm, Nd 流程空白本底为 $5\times10^{-11}$g. 样品经清洗和碾磨后用 $HF+HNO_3$ 混合酸溶解. AG50w×8($H^+$) 阳离子交换柱和 HDEHP 离子交换柱分离. MAT261 热 离子质谱计测定. 双带、$M^+$ 离子型式、可调法拉弟筒多接收器接收. 质量分馏校正相对于 $^{146}Nd/^{144}Nd=0.72190$. 标准样 BCR-1[1] $^{143}Nd/^{144}Nd=0.512643\pm12(2\sigma)$. 年龄计算用 York 方法[15]. 衰变常数 $\lambda_{Sm}=6.54\times10^{-12}a^{-1}$. 年龄值

1) 任留东、王彦斌，1992— 1993 年南极夏季中山站野外考察资料.

及 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 值误差均以 $2\sigma$ 给出.

用 NBS982 标定仪器,在 MAT261 质谱计上用 SEM 测定单颗粒锆石逐层蒸发年龄,这项技术是由 Kober 建立[16]. 刘敦一等[17]引入中国地质科学院地质研究所同位素年代学实验室. 本文采用的这种方法与他们介绍的相同. 为了提高数据的可靠性和解释的合理性,我们对锆石样品又进行了晶体内部铀含量分布的分析 (图 3). 分析在中国科学院高能物理研究所核技术应用部完成. 方法和原理见文献[18]. 根据已有的研究[17],凡是锆石晶体铀含量 >450 ppm 的,一般都有放射性成因的 Pb 丢失,常规 U-Pb 分析数据远离一致线上交点;<400 ppm 的,一般少有或没有放射性 Pb 的丢失,常规 U-Pb 分析数据落在一致线上交点上或附近. 从图 3 可以看出,虽然本文锆石样品的群组中有的已出现严重的 Pb 丢失,但其中仍有变质生成的锆石和继承锆石保持 U-Pb 封闭体系. 因此,只要选择适当的样品,用单颗粒锆石逐层蒸发法应当给出它们的结晶年龄. 基于这项技术的优点和多数锆石晶体外壳层放射性成因 Pb 丢失的实际性情况,在数据处理上,我们选择稳定阶段或最后阶段的放射性成因 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 值计算该锆石的结晶年龄. 年龄误差按 $2\sigma$ 给出.

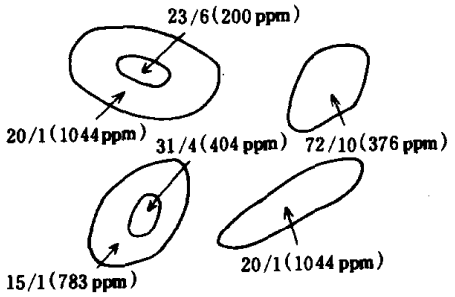



图 3 LZY1165 锆石样品铀含量分布图
分子为诱发裂变径迹数目,分母为面积(格),1 格 = $1\times10^{-6}cm^2$. 括号内为分布区平均铀含量. 锆石粒径大小 100—200 μm

$^{40}Ar/^{39}Ar$ 实验方法富云莲已有报道[19]. 本文的黑云母样品在中国原子能科学研究院 49-2 堆 $H_4$ 孔边的中部照射. 标样黑云母 ZBH-25 作为中子通量的监测样品,年龄为 133.5Ma. 氩的析出、纯化及测量均在 MM-1200 质谱计系统进行,采用电子轰击炉熔样,自动控制阶段升温. 析氩系统真空度约 $10^{-7}$Pa,空白热本底 $^{40}Ar \sim 10^{-13}$ mol, $^{36}Ar \sim 10^{-15}$ mol. 数据的分析、测定和计算,年龄谱和等时线结果皆由计算机处理完成[20]. 采用的衰变常数 $\lambda_{40K}=5.543\times10^{-10}a^{-1}$. 年龄误差按 $1\sigma$ 给出.

## 3 结果及地质解释

样品 G212-3 和 W20401 及其矿物的 Sm, Nd 含量及 $^{147}Sm/^{144}Nd$, $^{143}Nd/^{144}Nd$ 的测定值列于表 1. 暗色麻粒岩 (G212-3) 的内部等时线示于图 4. 尽管存在一定误差,由紫苏辉石、角闪石、斜长石和全岩所确定的等时线给出了一个明确的早古生代的变质年龄. $t=540\pm75$ $(2\sigma)$ Ma,初始 Nd 同位素比值 $I_{Nd}=0.51182\pm7$ $(2\sigma)$, $\varepsilon_{Nd}$ $(t)=-2.3\pm0.6$. 这说明本区主期麻粒岩相变质属于泛非热事件.

片麻状浅色花岗岩 (W20401) 的内部等时线示于图 5. 由石榴石、钾长石和全岩确定的等时线给出了一个精确的内部等时年龄. $t=497\pm7$ $(2\sigma)$ Ma,初始 Nd 同位素比值 $I_{Nb}=0.51165\pm4$ $(2\sigma)$, $\varepsilon_{Nd}$ $(t)=-6.9\pm0.6$. 这一数据进一步证实本区主期低压麻粒岩相变质作用发生在早古生代. 由于全岩基本由钾长石和石英组成,而石英 Sm 和 Nd 含量又极低,因此钾长石和全岩的 Sm-Nd 同位素分析结果必然比较接近. 当本样品的石榴石 Sm/Nd 比值很高时,在图 5 中,钾长石与全岩的点就显得十分接近.

条带状石榴黑云片麻岩 (LZY1165) 的单颗粒锆石逐层蒸发测年结果列于表 2. 相对年轻

表 1　拉斯曼丘陵暗色麻粒岩、片麻状浅色花岗岩岩石单矿物 Sm, Nd 含量及 Sm-Nd 同位素分析结果

| 岩石名称 | 样品号 | Sm(ppm) | Nd (ppm) | $^{147}Sm/^{144}Nd$ | $^{143}Nd/^{144}Nd$ | 2σ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 暗色麻粒岩 | G212-3 | 8.066 | 32.733 | 0.1491 | 0.512357 | 12 |
| | G212-3 hbl | 24.246 | 91.432 | 0.1604 | 0.512382 | 9 |
| | G212-3 opx | 1.263 | 5.532 | 0.1381 | 0.512322 | 7 |
| | G212-3 plag | 0.278 | 2.716 | 0.0619 | 0.512034 | 17 |
| 片麻状浅色花岗岩 | W20401 | 3.536 | 14.824 | 0.1443 | 0.512158 | 14 |
| | W20401 Gat | 10.944 | 2.752 | 2.4060 | 0.519477 | 14 |
| | W20401 Kf | 1.255 | 6.698 | 0.1133 | 0.512010 | 6 |

的年龄结果落入早古生代(元古宙末)的 Sm-Nd 等时年龄范围,并且接近部分熔融产生的黑云正长花岗岩的单锆石结晶年龄. 这些锆石浅黄色,透明,少或无放射性损伤,表明它们应属晚构造期热事件结晶的锆石. 分散的较老年龄数据与混合片麻岩 (WM20701) 中已经获得的单锆石 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 蒸发年龄相似[21]. 这些年龄数据可以认为代表了样品中部分碎屑锆石的结晶年龄. 两个岩石的矿物组成和化学成分[1],分散的锆石年龄数据,负的 $\varepsilon_{Nd}$ 值和相似岩石高的 Sr 初始值[4] 均支持其原岩为砂泥质岩石.

混合片麻岩 (WM20701) 的黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 阶段升温数据和年龄谱见表 3 和图 6(a). 与已经报道的黑云母正长花岗岩和花岗伟晶岩的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄谱相同[12]. 混合片麻岩的黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄谱是未受扰动的年龄谱线. 坪年龄为 488±2Ma, 等时年龄为 486±7 Ma, MSWD=0.6(图 6(b)). 等时年龄与坪年龄一致. 且初始比 ($^{40}Ar/^{39}Ar$) $_i$=290±38, 与 Nier 值在误差范围内相同. 因而排除了有过剩氩析明,这一 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 坪年龄并不代表通常所指的独立的热事件,但对认识早期 K-Ar 数据的地质含意却是有帮助的.

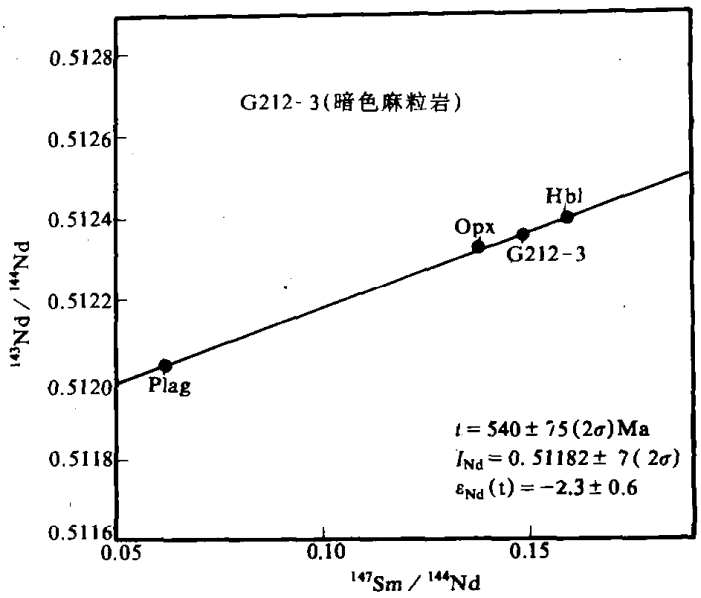



图 4　暗色麻粒岩的 Sm-Nd 内部等时线

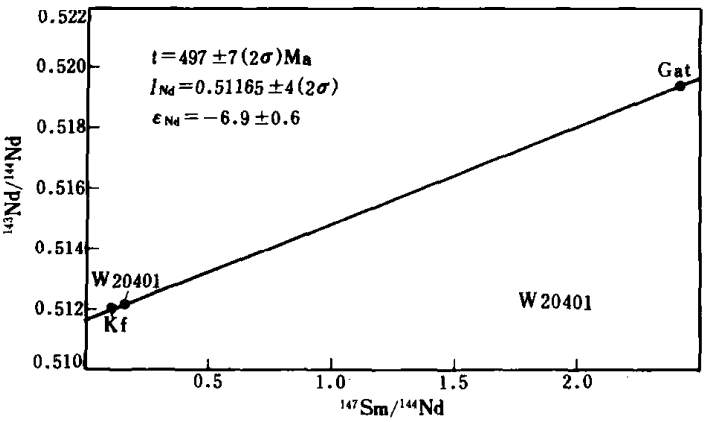



图 5　片麻状浅色花岗岩的 Sm-Nd 内部等时线

表2 拉斯曼丘陵条带状石榴黑云片麻岩单颗粒锆石蒸发法 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 数据

| 样品号 | 锆石颗粒号 | 蒸发次序 | 测量组数 | $^{207}Pb/^{206}Pb$ (测量) | 误差 ($2\sigma$) | $^{204}Pb/^{206}Pb$ (测量) | 误差 ($2\sigma$) | $^{207}Pb/^{206}Pb$ (放射成因) | 误差 ($2\sigma$) | $^{207}Pb/^{206}Pb$ (Ma) | 误差 ($2\sigma$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LZY | 91852 | 2 | 6 | 0.06571 | 31 | 0.000038 | 12 | 0.06517 | 26 | | |
| 1165 | | 3 | 7 | 0.06717 | 43 | 0.000049 | 12 | 0.06646 | 23 | 821 | 7 |
| | 91874 | 2 | 2 | 0.06320 | 44 | ~ | | 0.06320 | 44 | 716 | 15 |
| | 91862 | 1 | 5 | 0.07949 | 53 | 0.00134 | 7 | 0.0600 | 10 | | |
| | | 2 | 5 | 0.06481 | 13 | 0.000301 | 16 | 0.06002 | 34 | 604 | 12 |
| | 91870 | 1 | 5 | 0.0642 | 9 | 0.00030 | 15 | 0.0599 | 9 | 601 | 33 |
| | 91875 | 1 | 3 | 0.0576 | 15 | ~ | | 0.0576 | 15 | | |
| | | 2 | 5 | 0.05816 | 22 | ~ | | 0.05816 | 22 | 536 | 8 |

表3 拉斯曼丘陵混合片麻岩黑云母阶段升温数据[a)]

(重量 =60 mg, $J$=0.01301)

| 温度 (℃) | $(^{40}Ar/^{39}Ar)_m$ | $(^{36}Ar/^{39}Ar)_m$ | $(^{37}Ar/^{39}Ar)_m$ | $^{40}Ar^*/^{39}Ar$ | $^{39}Ar$ (mol) $\times10^{-14}$ | 表面年龄 (Ma) | 累计百分数 (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 570 | 72.6187 | 0.1977 | 1.3134 | 14.3050 | 43.60 | 308±62 | 0.81 |
| 700 | 26.0000 | 0.0153 | 0.6431 | 21.5262 | 77.60 | 445±5 | 2.26 |
| 830 | 26.4122 | 0.0089 | 0.0500 | 23.7700 | 995.62 | 486±7 | 20.79 |
| 910 | 26.2284 | 0.0088 | 0.0386 | 23.6244 | 1362.42 | 483±4 | 46.16 |
| 1000 | 24.9570 | 0.0034 | 0.0512 | 23.9478 | 866.84 | 489±4 | 62.30 |
| 1075 | 26.0229 | 0.0073 | 0.0876 | 23.8634 | 329.29 | 488±5 | 68.43 |
| 1140 | 26.4056 | 0.0081 | 0.1526 | 24.0211 | 314.83 | 491±5 | 74.29 |
| 1400 | 25.0900 | 0.0023 | 0.0260 | 24.4240 | 1381.03 | 498±5 | 100.00 |
| 830— 1140 | | | | | | 488±2 | |
| 570— 1400 | | | | | | 487 | |

a)$^{40}Ar^*$: 放射性成因的 $^{40}Ar$; 实验误差以 $1\sigma$ 给出.

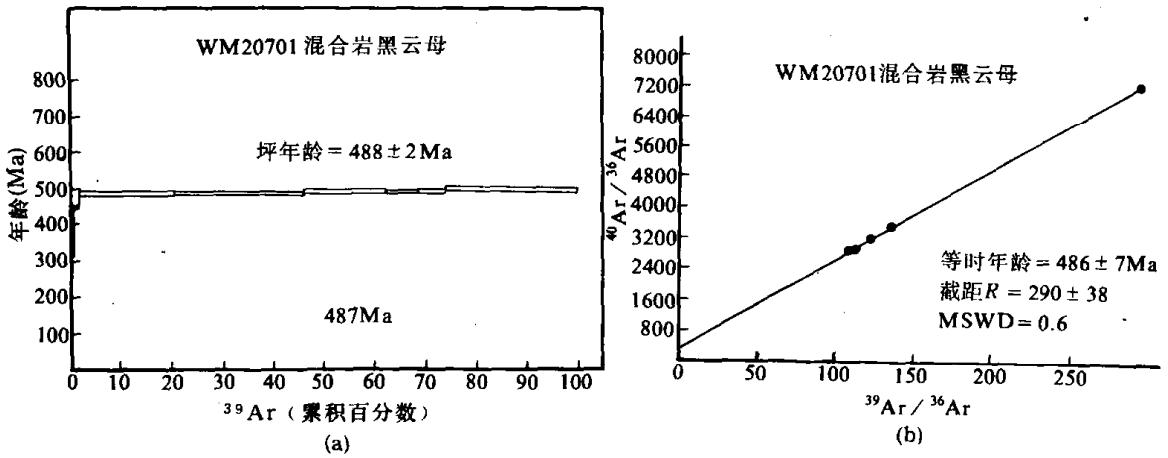



图6 混合片麻岩黑云母年龄谱(a)和等时线(b)

## 4 讨 论

野外地质、变质演化和同位素年代学的研究证实: 东南极拉斯曼丘陵主期低压麻粒岩相变质发生在早古生代(泛非热事件), 与作者已经报道的部分熔融事件关系非常密切. 它不可能

是次要的热事件．整个拉斯曼丘陵现今的构造面貌和变质记录主要是这次热事件形成的．

500Ma 前后的泛非热事件不仅在拉斯曼丘陵十分重要，在 Prydz Bay 地区也同样重要．我们初步认为它的分布范围从拉斯曼丘陵的西侧东至 Rauer 群岛(图 1)．拉斯曼丘陵以西的 Sostrene 岛经历了高压的麻粒岩相变质[22]，变质历史明显不同于以东地区．Rauer 岛以东的西福尔丘陵是太古宙的陆核[11]，仅西南边缘遭受了后期变质作用．

Rauer 群岛地区经历了麻粒岩相变质作用．最近 Kinny 等[23]用离子探针质谱计测定了来自该区不同岩石单元的锆石 U-Pb年龄，Filla 岛的长英质正片麻岩的锆石结晶年龄为 1030Ma 和 1000Ma，是其侵位年龄．因此，原来它的 Rb-Sr 全岩等时年龄(1050±109Ma，重新计算[11]为 1106±114Ma，Sr 初始值 0.7086±0.0013)并不是该岩石的变质年龄，而是形成年龄．所有 Rauer 群岛的锆石样品，不论是太古宙的还是元古宙的，离子探针质谱的分析结果都出现了 500 Ma 左右的下交点年龄，反映了泛非热事件在 Rauer 群岛影响的普遍和深刻．

拉斯曼丘陵片麻状浅色花岗岩与 Filla 岛的长英质片麻岩岩性相似．片麻状浅色花岗岩(W20401)的单锆石 Pb-Pb 蒸发年龄为 940±6Ma[1)]，与 Filla 岛的长英质正片麻岩形成年龄相近．而本区片麻状浅色花岗岩的麻粒岩相变质事件恰恰发生在500Ma!

野外的地质调查发现，片麻状浅色花岗岩有可能是一个异地的岩片．中山站区以北和以南一线，李继亮发现了冲断岩席和构造混杂带[2)]．在 500Ma 的泛非热事件中，这一重要构造界线被强烈变形变质了．

本区缺乏区域上 1250Ma 或更老的基性岩墙群[11]，1000— 1100Ma 麻粒岩相变质事件的否定，占多数的晚元古代的碎屑锆石年龄，说明本区遭受麻粒岩相变质的砂泥质岩石并非沉积在 1250— 1100Ma 期间，而是元古宙的晚期，晚元古代的地质演化在本区举足轻重．对它的研究将揭示东南极广泛分布的晚元古代活动带的构造含意．

当我们重新考虑 Sheraton 等人曾经报道的那条 Rb-Sr 全岩等时年龄[4](560± 7.0Ma，$I_{Sr}$=0.750±0.01)时，新的解释是它代表了 Prydz Bay 地区广泛的麻粒岩相变质和混合岩化的时代．理由是那条等时线上的样品，原岩基本上都是砂泥质岩石，Sr 的初始比较高，也较分散．由于样品分布范围广，高级变质和混合岩化不可能使它们的 Rb-Sr 体系彻底均一化，年龄误差自然较大．因此，它是区域强烈的泛非热事件的记录．等时线上样品的区域分布为我们了解 Prydz Bay 地区泛非热事件的范围和影响程度提供了线索．

东南极拉斯曼丘陵泛非热事件的构造含意是什么？目前国际上对东南极范围内的泛非热事件的构造意义仍缺乏明确认识．它发生在高级变质地区，研究起来自然要困难得多．不过有一些重要事实和它们之间的联系值得我们考虑：(1)晚元古代活动带在东南极的存在；(2)包括东南极在内的冈瓦纳古陆在晚古生代的鼎盛；(3)拉斯曼丘陵 Mirror 半岛东部构造混杂带的发现；(4)本区变质砂泥质岩石(弧前增生楔的浊积岩?)的碎屑锆石的年龄限制．这些使我们有理由推测这一热事件与冈瓦纳古陆的最终形成有关，至少是冈瓦纳古陆克拉通化的热事件．

本区混合片麻岩，黑云正长花岗岩和花岗伟晶岩的黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 坪年龄的意义在于证实早期 K-Ar 数据记录的热事件的存在．但是我们的研究揭示，它不是一个独立的热事件，而

1) 赵越等，4 个单锆石数据的加权结果，待发表．

2) 李继亮，待刊资料．

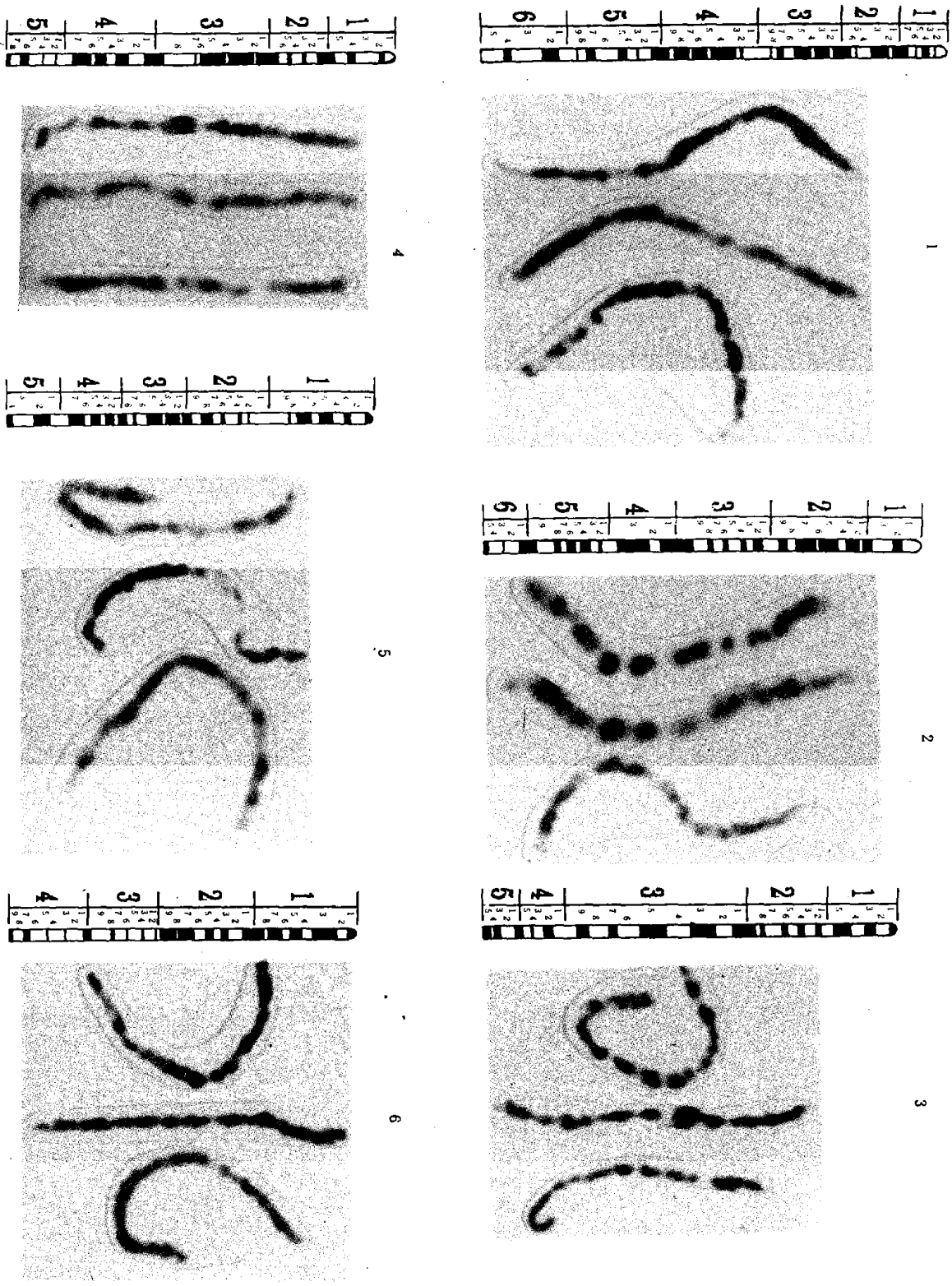
是矿物和岩石 K-Ar 时钟所能记录的泛非热事件的晚期阶段. 同一样品不同计时器记录的年代差异正是由于它们封闭温度的差异引起的[12]. 因此,本区的黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 坪年龄不一定对应一次绿片岩相的变质事件,而是与区域泛非事件经历的热历史有关. 这也正是早期 K-Ar 年龄数据的含意所在.

本文 Sm-Nd 矿物等时年龄的误差可能是由于不同矿物的封闭温度的差异引起的. 目前矿物 Sm-Nd 时钟的封闭温度的研究刚刚开始[24]. 另一可能是与主期低压麻粒岩相变质作用的亚阶段演化有关. 600Ma 左右的锆石数据可能对应于更早的中压麻粒岩相变质事件. 它的残余体最早被 Ren 等识别出[3],在 1992—1993 年南极夏季的野外考察中被中外地质学家确证(王彦斌、任留东面告). 这些问题将在今后的工作中进一步研究.

**致谢** 作者对康铁笙和王世成研究员帮助分析了锆石样品的铀含量分布表示感谢.

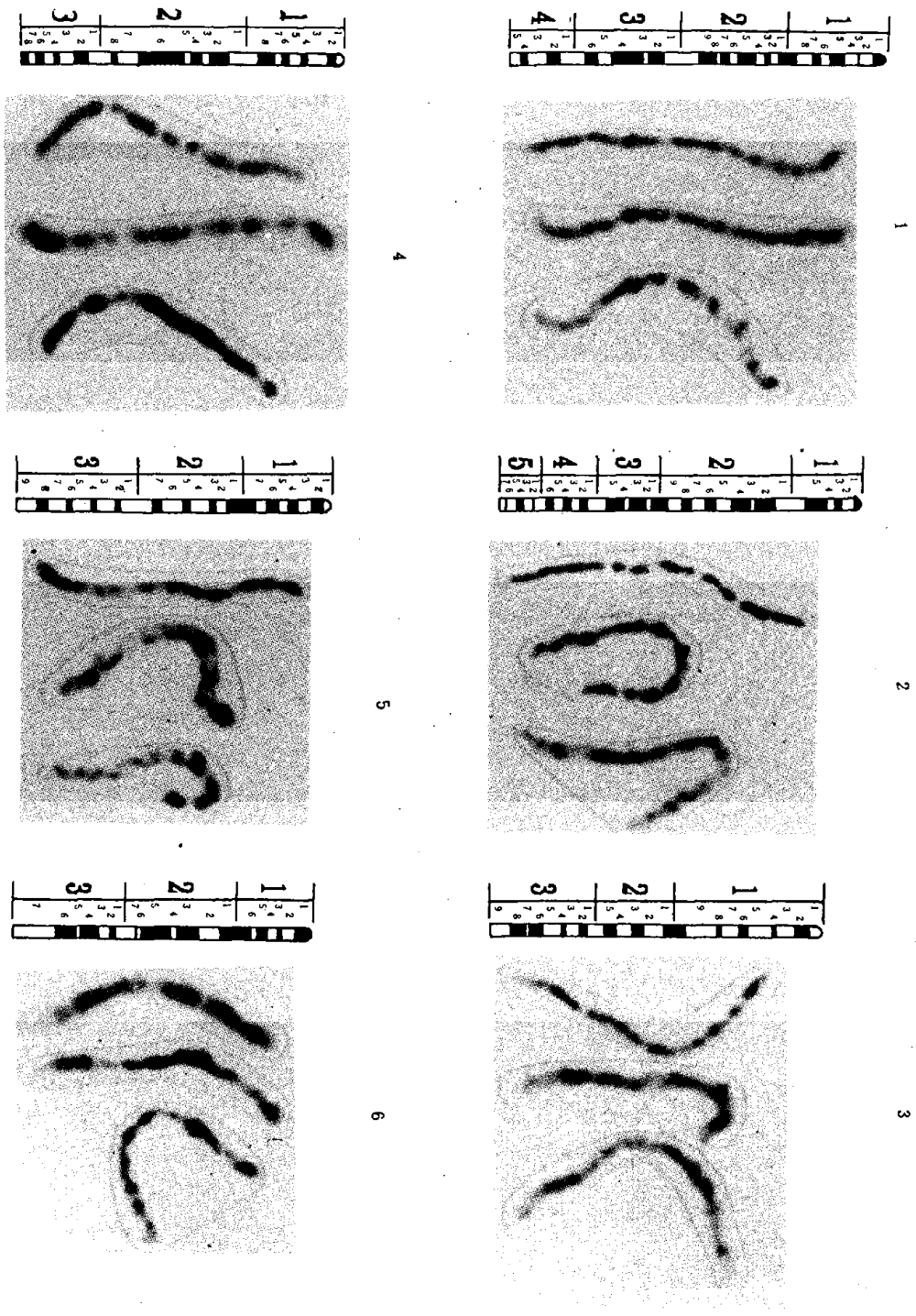
## 参 考 文 献

[1] Stüwe, K., Braun, H. M., Peer, H., *Aust. J. Earth Sci.*, 1989, **36**: 219—241.
[2] Stüwe, K., Powell, R., *J. Metamorphic Geol.*, 1989, **7**: 465—483.
[3] Ren, L., Zhao, Y., Liu, X. *et al.*, in : *Recent Progress in Antarctic Earth Science* (eds. Yoshida, Y., Kaminuma, K., Shiraishi, K.), TERRAPUB, Tokyo, 1992, 145—153.
[4] Sheraton, J. W., Black, L. P., McCulloch, M. T., *Precam.* Res., 1984, **26**: 169—198.
[5] Harley, S. L., *J. Petrol.*, 1988, **29**: 1059—1095.
[6] Fitzsimons, I. C. W., Harley, S. L., *Aust. J. Earth Sci.*, 1991, **38**: 497—519.
[7] Tingey, R. J., *Bur. Miner. Resour. Aust. Record*, 1981, **34**: 1—72.
[8] Tingey, R. J., *Antartic Geosci.* (ed. Craddock, C.), Univ. Wisconsin Press, Madison, 1982, 455—464.
[9] Craddock, C. (ed.), *Geologic Map of Antarctica* (1: 5000000), American Geographical Society, New York, 1972.
[10] University of Adelaide, *ANARE News*, 1991, **65**: 9.
[11] Tingey, R. J. (ed.), *The Geology of Antarctica*, Clarendon Press, Oxford, 1991.
[12] Zhao, Y., Song, B., Wang, Y. *et al.*, in: *Recent Progress in Antarctic Earth Science* (eds. Yoshida, Y., Kaminuma, K., Shiraishi, K.), TERRAPUB, Tokyo, 1992, 155—161.
[13] 张宗清、叶笑江,中国地质科学院地质研究所所刊,地质出版社,北京, 1987, **17**: 108—128.
[14] 叶笑江、张宗清,分析测试通报,1990, **9**: 6—10.
[15] York, D., *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1969, **5**: 320—324.
[16] Kober, B., *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1987, **96**: 63—71.
[17] 刘敦一、赵敦敏,地质论评,1988, **34**: 496—505.
[18] 康铁笙、王世成,地质热历史研究的裂变径迹法,科学出版社,北京,1991, 112.
[19] 富云莲、罗修泉、张思红等,中国地质科学院地质研究所所刊,地质出版社,北京,1987, **17**: 85—107.
[20] 富云莲,质谱学报,1987, **8**: 57—67.
[21] Zhao, Y. *et al.*, *Abs. the 6th ISAES*, Tokyo, 1991, 662—663.
[22] Hensen, B. J., Thost, D., Motoyoshi, Y., *Abs. the 6th ISAES*, Tokyo, 1991, 222.
[23] Kinny, P. D., Black, L. P., *Abs. Geol. Soc. Aust.*, 1990, **25**: 251—252.
[24] Mezger, K., Essene, E. J., Halliday, A. H., *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1992, **113**: 383—396.



黄鳝中粗线期二价染色体高分辨G带的带型模式图

图中所显示的二价体选自20个黄鳝中粗线期分裂相




黄鳝中粗线期二价染色体高分辨G带的带型模式图

图中所显示的二价体选自20个黄鳝中粗线期分裂相