

# 东南极拉斯曼丘陵麻粒岩相岩石中早期残留 矿物组合的特征及其变质作用条件<sup>\*</sup>

## Characteristics of the Early Remnant Mineral Associations in Granulite-facies Rocks from the Larsemann Hills, East Antarctica and Their Metamorphic Conditions

全来喜<sup>1</sup> 刘小汉<sup>1</sup> 张连生<sup>1</sup> 陈海泓<sup>1</sup> 任留东<sup>2</sup>  
王彦斌<sup>2</sup> 赵越<sup>2</sup>

Tong Laixi<sup>1</sup>, Liu Xiaohan<sup>1</sup>, Zhang Liansheng<sup>1</sup>,  
Chen Haihong<sup>1</sup>, Ren Liudong<sup>2</sup>, Wang Yanbin<sup>2</sup> and Zhao Yue<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地质研究所 北京 100029; 2. 中国地质科学院地质研究所 北京 100037)

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029;*

2. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037)*

**摘要** 东南极拉斯曼丘陵出露的麻粒岩相泥质片麻岩和镁铁质麻粒岩经历了复杂的变形变质历史。代表前进的增厚事件的早期残留变质构造 D<sub>1</sub> 形成于 1000Ma (Grenvillian) 期间。对应于 D<sub>1</sub> 的变质峰期 M<sub>1</sub> 的变质组合以泥质片麻岩的石榴石和尖晶石变斑晶中的堇青石和夕线石包裹体以及镁铁质麻粒岩的石榴石变斑晶中的斜方辉石和斜长石包裹体为特征。在该区斯托尼斯半岛的紫苏黑云石英岩的粗粒紫苏辉石中发现了包裹的假蓝宝石+磁铁矿和假蓝宝石+尖晶石+夕线石+磁铁矿+石英组合, 这种假蓝宝石又包裹更细粒的尖晶石包裹体。石榴石-斜方辉石温度计及石榴石-斜方辉石-斜长石-石英压力计的计算表明 M<sub>1</sub> 变质作用最大的 P-T 条件为 0.95GPa 和 870°C。这些早期残留的矿物组合指示了其变质作用具有逆时针近等压冷却 (IBC) 的 P-T 演化特征, 反映了它们的形成是一个埋深期间前进加热的进变质作用过程。本文得出该区 M<sub>1</sub> (1000Ma) 变质作用的逆时针 (IBC) P-T 轨迹可能与已存在的大陆壳下面的岩浆底侵作用及地壳内大量岩浆物质的侵入和结晶作用有关。此类型逆时针 P-T 轨迹不同于该区在晚期 500Ma (Pan-African) 期间顺时针演化的 P-T 轨迹。

\* 1996-04-12 收稿, 1997-01-05 改回。

本文为国家自然科学基金资助项目成果之一。

第一作者简介: 全来喜 男 1967 年出生 硕士 岩石学专业

**Abstract** Granulite facies pelitic gneiss and mafic granulite outcropping in the Larsemann Hills, East Antarctica, underwent a complicated deformational-metamorphic history. Early remnant  $D_1$  structures represent a prograde thickening event which probably formed at 1000Ma (Grenvillian). In response to  $D_1$ ,  $M_1$  peak metamorphic assemblages were characterized by inclusions of cordierite and sillimanite within coarse-grained garnets or spinels in pelitic gneisses and inclusions of orthopyroxene and plagioclase within coarse-grained garnet in mafic granulites. Sapphirine-magnetite and sapphirine-spinel-sillimanite-magnetite-quartz assemblages included in coarse-grained orthopyroxene in orthopyroxene-biotite-bearing quartzite from Stornes Peninsula have been found, whilst fine-grained spinel occurs as inclusions within this sapphirine.  $P-T$  calculations suggest maximum  $M_1$  metamorphic conditions of  $\sim 870^\circ\text{C}$  and  $\sim 0.95\text{GPa}$  according to garnet-orthopyroxene thermometer and garnet-orthopyroxene-plagioclase-quartz barometer. These remnant mineral associations indicate that their metamorphism takes on characteristics of anticlockwise near-isobaric cooling (IBC)  $P-T$  evolution, also reflect a prograde metamorphic formation process of prograde heating during burial. The  $M_1$ (1000Ma) anticlockwise (IBC)  $P-T$  path derived here for this area may be related to magmatic underplating beneath existing continental crust and intrusion and crystallization of substantial volumes of igneous material within crust. This type of anticlockwise  $P-T$  path is distinct from the late clockwise  $P-T$  path evolved during the 500Ma (Pan-African).

**关键词** 东南极 拉斯曼丘陵 麻粒岩相岩石 残留矿物组合 变质作用  $P-T$  条件  
**Key words:** East Antarctica; Larsemann Hills; Granulite-facies rocks; Remnant mineral assemblages; Metamorphic  $P-T$  conditions

**分类号:** P588.34

**Classific. code:** P588.34

## 1 前言

处于东南极普里滋湾 (Prydz Bay) 中部的拉斯曼丘陵 (Larsemann Hills) 主要由米洛 (Mirror)、布洛克尼斯 (Broknes) 和斯托尼斯 (Stornes) 三大半岛及众多岛礁组成 (图 1), 面积约  $60\text{km}^2$ 。一般认为, 拉斯曼丘陵出露的岩石在 1000Ma 左右经历低压麻粒岩相变质作用 (Stüwe and Powell, 1989)。近几年来, 进一步的构造、年代学及变质作用研究表明该区的构造主要有早期残留的  $D_1$  麻粒岩相变质构造 (1000Ma) 和一系列  $D_2 \sim D_5$  角闪岩相至麻粒岩相变质构造 (500Ma), 而后者对应的变质作用以低中压为特征并具有顺时针的  $P-T$  演化轨迹 (Ren et al., 1992; Dirks et al., 1993; Carson et al., 1995a)。

本文研究了对应于  $D_1$  变形的  $M_1$  峰期变质作用的残留矿物组合, 并用矿物温压计估算了  $M_1$  峰期  $P-T$  条件为  $870^\circ\text{C}$  和  $0.95\text{GPa}$ 。结果表明, 这些残留矿物组合指示了在早期 1000Ma 变质事件期间  $M_1$  变质作用沿着逆时针近等压冷却 (IBC) 的  $P-T$  轨迹演化。此  $M_1$  变质事件对应于该区前进的  $D_1$  构造增厚事件。

## 2 地质背景

中山站所处的拉斯曼丘陵位于东南极普里滋湾中部 (图 1)。该区是东南极晚元古代高级

变质地体的一部分, 主要由副片麻岩、正片麻岩、混合岩化副片麻岩、石英岩及镁铁质麻粒岩组成, 其中被过铝质的花岗岩及伟晶岩体广泛侵入 (Stüwe and Powell, 1989; Dirks et al., 1993), 经历了晚元古 (约 1000Ma) 低压麻粒岩相变质作用并在 500Ma (Pan-African) 期间叠加了一次绿片岩相变质作用 (Sheraton et al., 1984; Black et al., 1987; Stüwe and Powell, 1989). Stüwe and Powell (1989) 认为低压麻粒岩相变质作用的峰期变质条件为约 0.45GPa 和 750°C, 之后经历了等温减压 (0.05~0.1GPa) 变化。Ren et al. (1992) 和 Carson et al. (1995a) 分别提出了变质峰期更高的  $P-T$  条件为 0.9GPa 和 850°C 与 0.7GPa 和 780°C。

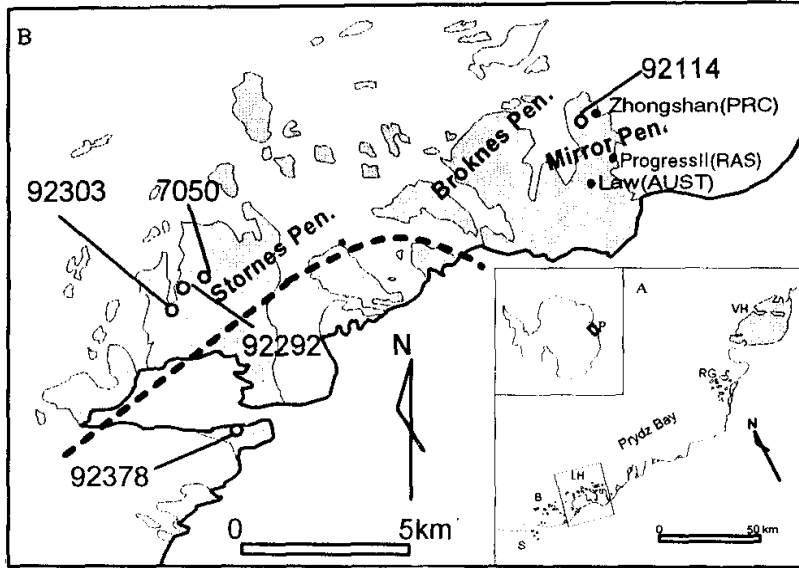


图1 研究区的位置(A)和采样点分布(B)图

VH 为西福尔丘陵; RG 为茹尔群岛; LH 为拉斯曼丘陵; B 为 Bolingen 岛; S 为 Søstrene 岛; Stornes Pen. 为斯托尼斯半岛; Broknes Pen. 为布洛克尼斯半岛; Mirror Pen. 为米洛半岛; 灰色表示岩石露头

Fig 1 The location of the studied area and the distribution of the sampled points

最近, 对拉斯曼丘陵的变形构造、年代学及变质作用研究认为 500Ma (Pan-African) 事件是比 1000Ma (Grenvillian) 更重要的构造热事件 (Zhao et al., 1992)。但对两次事件的重要性有不同的认识, 一种认为该区麻粒岩相变质峰期发生在 500Ma (Pan-African) 期间而不是在 1000Ma (Grenvillian) 期间 (Ren et al., 1992; 赵越等, 1993; Zhao et al., 1995; Hensen and Zhou, 1995), 另一种认为两次同样重要的麻粒岩相变质事件独立存在, 两者形成于相似的温度条件下而后者具有略低的压力条件 (Dirks et al., 1993; Carson et al., 1995a)。

拉斯曼丘陵经历了复杂的构造变质历史, 至目前确定了至少四期变形 ( $D_1 \sim D_4$  或  $\sim D_5$ ) (Dirks et al., 1993; Carson et al., 1995a, b)。麻粒岩中残留的  $D_1$  构造可能形成于 1000Ma, 代表早期前进增厚事件的残迹。 $D_2$  及其后变形表现为一系列紧闭褶皱和剪切构造, 同时造成

了岩石中的减压结构 (Dirks et al., 1993; Carson et al., 1995a)。然而, D<sub>1</sub> 组合及其历史则是不清楚的 (Carson et al., 1995b)。

### 3 岩相学与矿物化学特征

代表性矿物探针分析结果见表1。本文描述的样品在1991~1993年的南极度夏和越冬考察期间采于东南极拉斯曼丘陵, 紫苏辉石石英岩样品(92303)和泥质片麻岩样品(92292)采

表1 拉斯曼丘陵代表性变质矿物的电子探针分析结果

Table 1 The representative mineral compositions analyzed from microprobe for the Larsemann Hills

矿物	92303					92114				92378				92292		
	Spr	Spl	Opx	Sil	Bi	Grt	Opx	Bi (in)	Bi (out)	Grt	Opx	Bi (in)	Bi (out)	Grt	Crd (in)	Crd (out)
SiO <sub>2</sub>	11.56	0.08	49.43	36.43	38.22	36.89	47.90	38.01	36.29	38.40	47.40	37.81	37.26	37.05	48.58	48.82
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.01	0.08	0.04	4.12	0.04	0.18	2.89	5.79	0.03	0.10	2.67	3.69	0.09	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	61.31	62.45	7.07	61.58	14.20	21.14	4.83	13.86	13.73	21.67	6.61	14.38	14.61	21.09	31.98	32.46
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.21	0.08	0.03	0.04	0.03	0.03	0.06	0.05	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	2.12	1.72	0.00	0.00	0.34	2.60	0.00	0.00	0.58	3.48	0.00	0.00	0.47	0.00	0.00
MgO	14.83	13.01	22.90	0.22	18.10	6.60	17.02	18.40	12.87	9.46	18.59	16.11	13.72	5.41	9.13	8.64
CaO	0.01	0.00	0.04	0.00	0.03	1.73	0.13	0.00	0.00	0.82	0.05	0.00	0.00	1.07	0.02	0.03
MnO	0.04	0.23	0.09	0.01	0.00	1.84	0.46	0.08	0.01	0.32	0.10	0.05	0.00	1.91	0.11	0.20
FeO	10.46	20.92	18.20	1.64	10.33	30.48	26.40	11.69	16.52	29.20	23.47	14.80	17.01	33.40	7.61	8.51
NiO	0.00	0.19	0.20	0.00	0.09	0.01	0.03	0.09	0.04	0.00	0.00	0.06	0.11	0.02	0.00	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.03	0.00	0.00	0.64	0.00	0.01	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.06
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	9.11	0.01	0.00	9.63	9.53	0.00	0.00	9.68	9.68	0.00	0.02	0.01
Total	98.29	99.24	99.62	99.94	94.88	99.11	99.58	94.73	94.89	100.51	99.84	95.55	96.21	100.50	97.48	98.28
O	10	32	6	20	12	12	6	12	12	12	6	12	12	12	18	18
Si	0.713	0.017	1.820	3.970	2.804	2.944	1.847	2.817	2.757	2.963	1.799	2.814	2.788	2.948	5.030	5.024
Ti	0.001	0.002	0.002	0.003	0.227	0.003	0.005	0.161	0.331	0.002	0.003	0.150	0.208	0.005	0.000	0.000
Al	4.447	15.606	0.307	7.908	1.223	1.988	0.220	1.210	1.230	1.971	0.296	1.262	1.289	1.977	3.903	3.937
Cr	0.002	0.035	0.002	0.003	0.002	0.002	0.001	0.003	0.003	0.002	0.001	0.000	0.008	0.000	0.000	0.001
Fe <sup>3+</sup>	0.000	0.339	0.048	0.000	0.000	0.020	0.076	0.000	0.000	0.034	0.100	0.000	0.000	0.028	0.000	0.000
Mg	1.360	4.113	1.257	0.036	1.979	0.785	0.977	2.032	1.456	1.088	1.051	1.787	1.531	0.641	1.408	1.325
Ca	0.001	0.000	0.002	0.000	0.003	0.148	0.005	0.000	0.000	0.067	0.002	0.000	0.000	0.091	0.002	0.004
Mn	0.002	0.041	0.003	0.001	0.000	0.124	0.015	0.005	0.001	0.021	0.003	0.003	0.000	0.129	0.010	0.017
Fe <sup>2+</sup>	0.539	3.710	0.560	0.149	0.634	2.034	0.852	0.725	1.050	1.885	0.745	0.921	1.065	2.223	0.659	0.693
Ni	0.000	0.032	0.001	0.000	0.005	0.000	0.001	0.005	0.002	0.000	0.000	0.004	0.007	0.001	0.000	0.001
Na	0.003	0.011	0.000	0.002	0.090	0.000	0.001	0.005	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.011
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.853	0.001	0.000	0.910	0.923	0.000	0.000	0.919	0.924	0.000	0.002	0.001
Total	7.064	23.904	4.058	12.072	7.825	8.049	4.000	7.873	7.762	8.032	4.000	7.725	7.820	8.004	11.024	11.013
X <sub>Mg</sub>	0.716	0.526	0.692		0.757	0.278	0.535	0.737	0.419	0.366	0.585	0.660	0.590	0.288	0.681	0.657
X <sub>Grt</sub>						0.036				0.004				0.013		
X <sub>Spr</sub>						0.040				0.007				0.042		
X <sub>Al</sub>		0.154				0.110				0.148						

Spr 为假蓝宝石; Spl 为尖晶石; Opx 为斜方辉石; Bi 为黑云母; Grt 为石榴石; Crd 为蓝青石; (in) 为被包裹在矿物中; (out) 为不被包裹的。

于斯托尼斯半岛北部,石榴石斜方辉石镁铁质麻粒岩(92114)和(92378)分别采于米洛半岛北部和斯托尼斯半岛西南部(图 1)。下面描述样品的岩相学和矿物组合的化学成分特征。

### 3.1 紫苏石英岩

石英岩一般以 4~5m 厚的连续或不连续的层状普遍产于泥质片麻岩中。它们主要是粗粒蓝色至暗色的磁铁尖晶夕线石英岩和黑云石榴紫苏石英岩,尤其在斯托尼斯半岛。其矿物组合主要为石英+黑云母+石榴石+紫苏辉石+磁铁矿+尖晶石+夕线石。锆石、独居石、磷灰石及磷钇矿为其中普遍的副矿物。

样品 92303 紫苏石英岩采于斯托尼斯半岛北部,以厚度约 20cm 左右薄的夹层产于柱晶紫苏堇青麻粒岩中。手标本上可见较大的紫苏辉石变斑晶(直径达 2~3cm)及黑云母片。其主要组成矿物为紫苏辉石(30%)、黑云母(20%±)和石英(45%±),少量的磁铁矿、尖晶石、假蓝宝石和夕线石等作为紫苏辉石变晶中早期残留的包裹体存在(全来喜等,1996)。紫苏辉石变晶中的板条状假蓝宝石包裹体本身又包含了更小的尖晶石包裹体(图 2a)。此外,紫苏辉石还包含有一些近圆形的黑云母和石英的包裹体。

该假蓝宝石为正中心突起,具明显多色性, $N_g$ =淡蓝, $N_p$ =无色,一级灰干涉色,斜消光, $N_g \wedge c = 57^\circ$ 。其成分经常有  $Fe^{2+}$  代替 Mg、 $Fe^{3+}$  替代 Al 及 Al 替换 Si,显示轻微不均匀,其  $X_{Mg}$  ( $=Mg/(Mg+Fe)^{2+}$ ) 值在 0.705 和 0.724 之间变化。尖晶石则比该区已报道的尖晶石( $Al_2O_3$  为 53.41%,MgO 为 2.89%,Ren et al.,1992)含有更高的  $Al_2O_3$ (62.45%)和 MgO(13.01%), $X_{Mg}=0.526$ 。紫苏辉石含有高  $Al_2O_3$  含量,可达 7.07%,它的  $X_{Mg}=0.692$ , $X_{Al}$  ( $=Al/2$ ) 为 0.154。夕线石含有 1.64%的 FeO。黑云母在成分上属于金云母,其  $X_{Mg}$  值为 0.762。这些矿物的  $X_{Mg}$  值以金云母(0.76)、假蓝宝石(0.72)、紫苏辉石(0.69)、尖晶石(0.53)的顺序降低(全来喜等,1996)。

### 3.2 镁铁质麻粒岩

在拉斯曼丘陵,中粒石榴紫苏麻粒岩也普遍分布。它们由  $D_1$  之前侵入的镁铁质岩墙变质而来,以等斜褶皱的薄层或透镜体产于混合岩化的副片麻岩中(Dirks et al.,1993),主要由石榴石+紫苏辉石+斜长石+黑云母+石英+钾长石组合组成。其副矿物有磁铁矿、尖晶石、锆石和磷灰石。

样品 92114 石榴紫苏麻粒岩采自米洛半岛北部等斜褶皱的条带状副片麻岩中的透镜体,厚度 0.5m。这种片麻岩相当于 Stüwe and Powell (1989) 的组分层状片麻岩。样品主要由石榴石、紫苏辉石、斜长石、黑云母和石英组成,并有少量的尖晶石和磁铁矿。细小不规则粒状的紫苏辉石被斜长石+石英组合所包裹,它们又一同被更大的石榴石变斑晶包裹。基质中斜长石和黑云母的排列方向普遍指示了一个发育很好的  $S_2$  叶理(Carson et al.,1995a)。石榴石变晶中斜长石和黑云母包体与外面的斜长石和黑云母排列方向斜交可以看作是早期残留的  $S_1$  叶理(图 2b)。

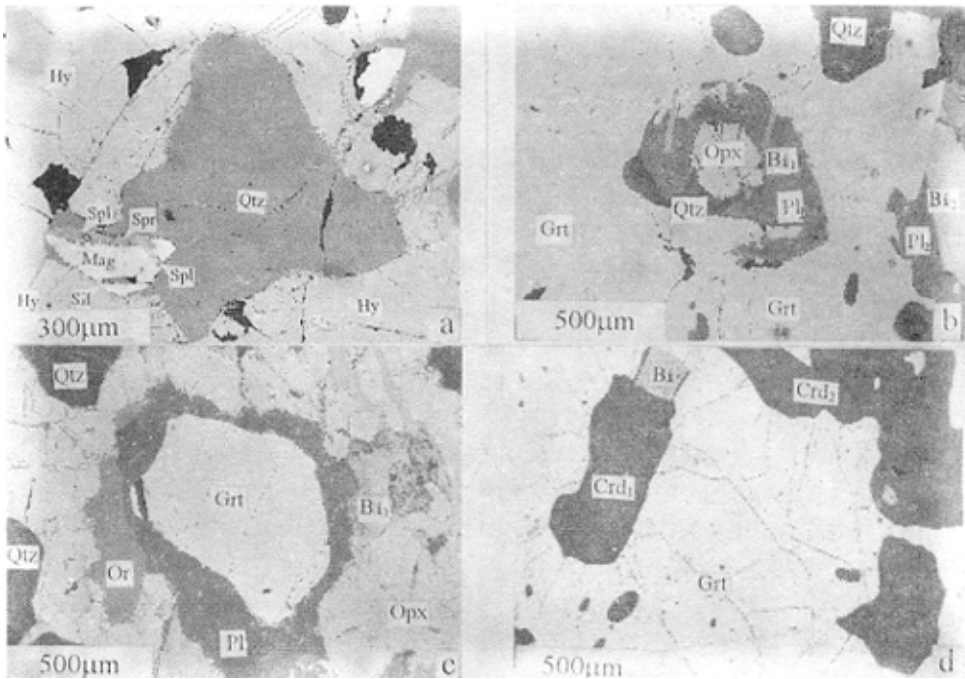


图2 拉斯曼丘陵样品的背散射电子图象

a. 石英岩(92303)中包裹在紫苏辉石变晶里的尖晶石(Spl)-假蓝宝石(Spr)-磁铁矿(Mag)-石英(Qtz)-夕线石(Sil)组合及假蓝宝石里的细粒尖晶石包裹体; b. 镁铁质麻粒岩(92114)中石榴石变晶里的斜方辉石(Opx)-斜长石(Pl)-黑云母(Bi)-石英(Qtz)包裹体; c. 镁铁质麻粒岩(92378)中富  $\text{Al}_2\text{O}_3$  斜方辉石变晶里的石榴石(Grt)-斜长石(Pl)-黑云母(Bi)包裹体; d. 泥质片麻岩(92292)中石榴石变晶里的堇青石(Crd)包裹体, 石榴石发育放射状裂理结构。

Fig. 2 Backscattered Electron Images of samples from the Larsemann Hills, showing: (a) spinel-sapphirine-magnetite-quartz-sillimanite assemblages included in hyperthene porphyroblast and fine-grained spinel inclusion in sapphirine from quartzite (92303); (b), orthopyroxene-plagioclase-biotite-quartz inclusions within garnet metacryst from mafic granulite (92114); (c), garnet-plagioclase-biotite inclusions within  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -rich orthopyroxene metacryst from mafic granulite (92378); (d), cordierite inclusions in garnet porphyroblast from pelitic gneiss (92292), garnet shows radial crack textures.

石榴石变晶中的紫苏辉石的  $X_{\text{Mg}}$  值为 0.535,  $X_{\text{Al}}$  则为 0.110。石榴石属镁铝榴石-铁铝榴石系列, 它的  $X_{\text{Mg}}$  为 0.278, Alm 组分为 0.658, Pyp 组分为 0.254, Grs 组分为 0.036, Sps 组分为 0.040。变晶包裹的黑云母在成分上和外面的黑云母有明显的差异, 前者的  $\text{TiO}_2$  (2.89%) 和 FeO (11.69%) 含量低于后者 ( $\text{TiO}_2$  5.79% 和 FeO 16.52%), 而 MgO 含量 (18.40%) 则明显比后者高 (12.87%), 相应的  $X_{\text{Mg}}$  值分别为 0.737 和 0.419。石榴石变晶中包裹的斜长石的 An 组分 (0.46~0.48) 低于外面斜长石的 An 组分 (0.53), 表现为更富 Ab 组分。

样品 92378 采于斯托尼斯半岛西南部条带状副片麻岩中的镁铁质麻粒岩薄层, 主要由石榴石、紫苏辉石、黑云母、斜长石、石英及钾长石组成, 副矿物有锆石等。其中细粒石榴石矿物被斜长石、钾长石和黑云母所包绕, 它们又一同被紫苏辉石变斑晶(直径可达 1.5~2.0cm)所围绕(图 2c)。

紫苏辉石变斑晶中的石榴石为富镁铝榴石的铁铝榴石, 其  $X_{Mg}$  值=0.366, Alm 组分为 0.616, Pyp 组分为 0.355, Grs 组分为 0.004, Sps 组分为 0.007。紫苏辉石变斑晶的  $Al_2O_3$  含量在该区的镁铁质麻粒岩的紫苏辉石中是最高的, 达 6.61%, 远高于 Ren et al. (1992) 报道的 2.49%。它的  $X_{Al}$ =0.148,  $X_{Mg}$ =0.585。紫苏辉石中的黑云母和样品 92114 石榴石变晶中的黑云母具有相似的成分, 只是前者的  $X_{Mg}$  值(0.660)低于后者(0.737)。紫苏辉石中的斜长石的 An 组分和钾长石的 Or 组分分别为 0.268 和 0.779。

### 3.3 泥质片麻岩

泥质片麻岩露头大约占拉斯曼丘陵岩石出露面积的 10%, 以厚度变化(10~400m)的连续延伸的层出现 (Carson et al., 1995a)。这种岩石在矿物组合和结构上是不均一的, 以含有丰富的夕线石、尖晶石、堇青石、石榴石、磁铁矿、黑云母、斜长石、钾长石和石英为特征。这种片麻岩相当于 Stüwe and Powell (1989) 划分的蓝色片麻岩, 或 Ren et al. (1992) 划分的钛铁矿-尖晶石-夕线石-堇青石片麻岩, 或 Dirks et al. (1993) 所划分的尖晶石-堇青石片麻岩, 以及 Carson et al. (1995a) 划分的变泥质单元 1。泥质片麻岩还可作为大的岩片或不连续的岩层分布于经历过部分熔融的石榴石-堇青石长英质麻粒岩中 (Dirks et al., 1993), 有时由于强烈的混合岩化作用而过渡为混合岩化的副片麻岩。

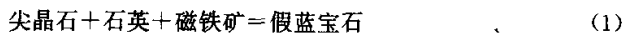
样品 92292 采于斯托尼斯半岛北部 2~3m 厚的连续层中, 可见粗粒的石榴石、尖晶石及稀少的磁铁矿变斑晶(直径达 0.5~1.0cm), 基质矿物组合为尖晶石+磁铁矿+黑云母+堇青石+夕线石+斜长石+钾长石+石英。石榴石变晶中有堇青石、夕线石、黑云母及石英的包裹体并发育放射状裂理结构(图 2d)。基质中夕线石的“S”型排列方向相当于  $S_2$  叶理 (Carson et al., 1995a), 因此, 石榴石变晶中垂直  $S_2$  叶理的夕线石排列方向可能代表更早期残留的  $S_1$  叶理。

样品 92292 中石榴石变斑晶的成分均一, 其  $X_{Mg}$  为 0.288, Alm 组分为 0.721, Pyp 组分为 0.208, Grs 组分为 0.013, Grs 组分为 0.042。而包裹于石榴石变晶中的堇青石的  $X_{Mg}$  值为 0.681, 高于基质中堇青石的  $X_{Mg}$  值(0.657)。基质中斜长石的 An 组分为 0.41。

## 4 P-T 条件估算

### 4.1 紫苏石英岩

样品 92303 的富  $Al_2O_3$  的紫苏辉石变晶中, 含尖晶石包裹体的假蓝宝石与磁铁矿和石英直接接触(图 2a), 表明如下的可能反应:



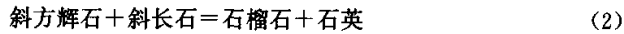
假蓝宝石可能由峰期初始或峰期稍后变质条件期间的出溶反应所形成 (Hensen, 1995; Harley, 1995, 个人通讯)。假蓝宝石里含有细小尖晶石包裹体的这一反应结构则普遍指示了

一个逆时针演化的  $P$ - $T$  轨迹 (Motoyoshi and Hensen, 1989; Harley and Hensen, 1990)。

假蓝宝石-尖晶石的 Mg-Fe 交换温度计 (Owen and Greenough, 1991) 可用来估算假蓝宝石形成的温度。估算结果为  $714 \pm 75^\circ\text{C}$  (表 2)。然而, Harley (1993) 认为这一温度计的精度是很差的。因此, 笔者使用闫月华等 (1991) 的堇青石温压计与从 92303 互层的紫苏辉石-柱晶石-堇青石片麻岩中富铝紫苏辉石变晶里的镁堇青石包裹体获得了  $847^\circ\text{C}$  和  $0.75\text{GPa}$  的参考结果, 从而进一步证实了 Harley (1993) 的研究结果。由于缺乏假蓝宝石压力计, 其形成压力不能直接测定。但是, 在假蓝宝石组合中缺乏镁堇青石矿物, 意味着它形成的  $P$ - $T$  条件至少不能低于  $847^\circ\text{C}$  和  $0.75\text{GPa}$  (图 3)。

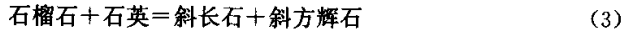
#### 4.2 镁铁质麻粒岩

在样品 92114 镁铁质麻粒岩的石榴石变斑晶中包裹的斜方辉石+斜长石的结构显示了如下的变质反应 (图 2b):



这一反应从左至右反映了压力的升高, 轻微的斜长石环带 ( $\text{An}_{46-48}$ ) 意味着此反应可能发生于温度变化的条件下。

92378 中的反应结构与 92114 的反应结构相反 (图 2c), 表明了如下变质反应:



反应 (3) 从左至右普遍被认为代表减压过程 (Harley, 1988)。

以上两个反应可利用 Harley (1984) 和 Sen and Bhattacharya (1984) 的石榴石-斜方辉石温度计对温度进行估算。用 Harley (1984) 的方法估算的温度低于用 Sen 和 Bhattacharya (1984) 的方法估算的温度值, 这可能是由冷却期间石榴石和斜方辉石之间 Fe-Mg 交换反应的封闭所致, 在误差范围允许在内 (Fitzsimons and Harley, 1994) (表 2)。Bohlen et al. (1983) 的石榴石-斜方辉石-斜长石-石英压力计被用来估算压力并给出了较为合理的压力值。

表 2 拉斯曼丘陵麻粒岩  $M_1$  峰期变质矿物的代表性  $P$ - $T$  值  
Table 2 The representative  $P$ - $T$  values for  $M_1$  metamorphic minerals  
in granulitic rocks of the Larsemann Hills

样品号	矿物对	$T_{\text{OG}}$	$T_{\text{H}}$	$T_{\text{SB}}$	$T_{\text{Y}}$	$P_{\text{ref}}$	$P_{\text{B}}$	$P_{\text{Y}}$	$T_{\text{ref}}$
92303	Spr+Spl( $M_1$ )	$714^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-
92114	Grt+Opx( $M_1$ )	-	$690^\circ\text{C}$	$754^\circ\text{C}$	-	$0.7\text{GPa}$	$0.8\text{GPa}$	-	$700^\circ\text{C}$
92378	Grt+Opx( $M_1$ )	-	$770^\circ\text{C}$	$870^\circ\text{C}$	-	$0.7\text{GPa}$	$0.95\text{GPa}$	$800^\circ\text{C}$	-
92292	Crd( $M_1$ )	-	-	-	$670^\circ\text{C}$	-	-	$0.62\text{GPa}$	-
7050	Crd( $M_1$ )	-	-	-	$847^\circ\text{C}$	-	-	$0.75\text{GPa}$	-

注: 1. Spl-Spr 矿物对的温度计  $T_{\text{OG}}$  据 Owen and Greenough (1991); 2. Grt-Opx 矿物对温度计  $T_{\text{H}}$  和  $T_{\text{SB}}$  分别据 Harley (1984) 及 Sen and Bhattacharya (1984); 3. Grt-Opx 矿物对的压力计  $P_{\text{B}}$  据 Bohlen et al. (1983); 4. Crd 的温压计  $T_{\text{Y}}$  和  $P_{\text{Y}}$  据闫月华等 (1991)。  $P_{\text{ref}}$  和  $T_{\text{ref}}$  分别为参考压力和参考温度。矿物缩写: Spr 为假蓝宝石, Spl 为尖晶石, Grt 为石榴石, Opx 为紫苏辉石, Crd 为堇青石。

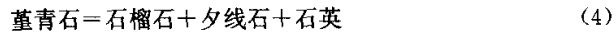
从表 2 可以看出, 样品 92378 记录了  $M_1$  的  $P$ - $T$  条件上限 ( $870 \pm 60^\circ\text{C}$  和  $0.95 \pm 0.02 \sim 0.1\text{GPa}$ )。由样品 92114 获得的  $M_1$  期间  $P$ - $T$  条件为  $754 \pm 60^\circ\text{C}$  和  $0.8 \pm 0.02 \sim 0.1\text{GPa}$ , 这可能



意味着早期  $D_1$  增厚事件期间拉斯曼丘陵西南部变质作用的  $P$ - $T$  条件高于东部。另外, 该区西南部  $P$ - $T$  条件值更接近于邻近 Bolingen 群岛和 Sørstrene 岛早期热事件(1000Ma)的  $P$ - $T$  条件值(1.0GPa 和 900°C)(Thost et al., 1991)。

#### 4.3 泥质片麻岩

斯托尼斯半岛北部泥质片麻岩中石榴石变晶中的堇青石包裹体为前进  $P$ - $T$  轨迹进一步提供了矿物学及结构上的证据(图 2d)。夕线石包裹体则暗示了初始的条件处于夕线石稳定域。结构关系表明了如下的进变质反应:



上述堇青石的分解反应具有相对扁平的  $dP/dT$  环, 堇青石处于低压一侧(Newton, 1972; Hensen and Green 1973)。石榴石变晶具有堇青石包裹体及放射状裂理, 与最近报道的东南极北查尔斯王子山(Northern Prince Charles Mountains)晚元古代泥质片麻岩中的石榴石变晶具有完全一致的特征, 被认为代表了逆时针前进的  $P$ - $T$  轨迹(Thost and Hensen, 1992)。由于该区强烈的混合岩化作用, 含有堇青石包裹体的石榴石尽管可能通过部分熔融形成(Harley, 1996, 个人通讯), 然而, 该区混合岩化副片麻岩中由部分熔融形成的石榴石在成分上则是明显不均一的, 它含有钾长石的包裹体, 并发育该区典型的堇青石反应边结构(作者待发表资料), 此处泥质片麻岩中含堇青石包裹体的石榴石则具有均一的成分(见前面所述), 二者显示完全不同的特征。因此, 这意味着该区泥质片麻岩中含堇青石包裹体的石榴石变晶并非由部分熔融形成。

根据阎月华等(1991)的堇青石温度压力计, 估算泥质片麻岩中堇青石包裹体形成的  $P$ - $T$  条件, 为 0.62GPa 和 670°C。

## 5 讨论与结论

拉斯曼丘陵地区在 1000Ma (Grenvillian) 事件期间经历了峰期低压麻粒岩相变质作用, 变质的  $P$ - $T$  条件为 0.45GPa 和 750°C (Stüwe and Powell, 1989)。近年来, Ren et al. (1992)、王彦斌等(1994)及 Carson et al. (1995a) 识别出早期中压麻粒岩相变质事件及其矿物组合, 分别给出了峰期变质的不同条件如 0.9GPa 和 850°C、0.63GPa 和 750°C、0.7GPa 和 780°C。这一新识别出的中压麻粒岩相变质事件被归因于 600Ma (赵越等, 1993; Zhao et al., 1995; 任留东和刘小汉, 1995), 而最近从该区中压镁铁质麻粒岩中锆石新获得的 U-Pb 年龄数据似乎支持了中压麻粒岩相变质事件很可能发生于 770Ma 左右(全来喜等, 1995)。另一方面, 最近, 通过传统 U-Pb 方法从斯托尼斯半岛的石榴黑云石英岩中的独居石和环带状锆石获得了同时具有上交点 1000~1100Ma 和下交点 500~550Ma 的同位素年龄结果(刘小汉等, 1995; Zhang et al., 1996)。这一结果既指示了 500~550Ma (Pan-African) 在拉斯曼丘陵地区是一个重要的变质事件, 也证实了更早期的 1000Ma (Grenvillian) 变质事件在该区的存在(刘小汉等, 1995; Tong et al., 1995; Zhang et al., 1996)。拉斯曼丘陵早期中压及晚期低压麻粒岩相变质作用已被确定为沿着顺时针的  $P$ - $T$  轨迹演化(Stüwe and Powell, 1989; Ren et al., 1992; Carson et al., 1995a), 但是更早期残留的  $D_1$  矿物组合及  $P$ - $T$  演化则是不

清楚的 (Carson et al., 1995b)。

基于最近详细的岩相学观察,笔者识别出保留在石英岩 92303、泥质片麻岩 92292 及镁铁质麻粒岩 92114 和 92378 中的  $D_1$  矿物组合的结构及矿物学证据。研究表明,变质反应(1)的形成条件应不低于 847°C 和 0.75GPa,反应(2)形成的  $P-T$  条件为 754°C 和 0.8GPa。反应(4)的  $P-T$  条件较低,为 670°C 和 0.62GPa。但是,反应(3)记录了最大的峰期变质的  $P-T$  条件,为 870°C 和 0.95GPa。反应(1)和反应(4)都指示了逆时针近等压冷却(IBC)的  $P-T$  轨迹。这种类型的  $P-T$  轨迹业已从许多其它麻粒岩地体获得,例如,Bohlen (1987)所总结的 Adirondacks 和 Nilgiri 丘陵,以及东南极莫森海岸带(Mawson Coastline)(Clarke et al., 1989)、恩德比陆地的纳皮尔杂岩(Enderby Land, Napier Complex)(Motoyoshi and Hensen, 1989)与北查尔斯王子山(Thost and Hensen, 1992; Fitzsimons and Harley, 1992)。

本文得出的逆时针近等压冷却(IBC)的  $P-T$  轨迹对应于该区最早期残留的前进的  $D_1$  (1000Ma)增厚事件。这一  $P-T$  轨迹与从普里滋湾其它露头得出的  $P-T$  轨迹是矛盾的,那里的泥质片麻岩和镁铁质麻粒岩的结构证据指示,减压主要是退变质特征(Harley, 1988; Thost et al., 1991)。但是,北查尔斯王子山的泥质片麻岩和镁铁质片麻岩保留了与这里得出的  $P-T$  轨迹一致的矿物组合,并具有逆时针近等压冷却的过程(Thost and Hensen, 1992)。已有的研究表明,这种近等压冷却的  $P-T$  轨迹与从普里滋湾其它露头得出的等温减压继之以等压冷却的历史没有必要完全一致(Clarke et al., 1989; Thost and Hensen, 1992)。然而,石英岩中假蓝宝石中残留的细粒尖晶石包裹体与泥质片麻岩的石榴石变晶中的堇青石包裹体位于低压一侧都指示了  $P-T$  轨迹的方向是逆时针的(如前所述),这与等压冷却之前的高压事件是不一致的。一些研究者对这种不一致已经用东南极晚元古活动带的不同部位具有不同的  $P-T$  演化历史进行了合理的解释(Clarke et al., 1989; Thost and Hensen, 1992)。在拉斯曼丘陵,其两侧已被认为分属于不同的构造域(Ren et al., 1992),因此,这意味着拉斯曼丘陵的两侧在 1000Ma (Grenvillian) 事件期间具有不同的  $P-T$  历史。

逆时针近等压冷却的  $P-T$  轨迹可能与已存在的大陆壳下面的岩浆底侵作用及地壳里面大量岩浆物质的侵入和结晶作用有关(Bohlen, 1987)。它可能发生于具有初始裂谷或伸展伴随后挤压的地区如大陆裂谷环境或热点(Sandiford and Powell, 1986; Bohlen, 1991)。赵越等(1993)报道的该区米洛半岛北部浅色花岗质片麻岩具有 960Ma 的最小侵入年龄,以及 Ren et al. (1992) 和 Tong and Liu (1996) 报道的该区别斯托尼斯半岛北部具有 Ol-Opx-Cpx-Hbl-Spl 和 Spl-Ol-Opx-Cpx-Prg-Phl-Cal 组合的深源的透镜状超镁铁质残留体都支持了这一结论。此外,这一结论也得到了最近通过传统 U-Pb 方法从石榴黑云石英岩中独居石和环带状锆石获得的定义很好的 1000~1100Ma 年龄的进一步支持(刘小汉等, 1995; Zhang et al., 1996)。

**致谢** 感谢国家海洋局南极办公室在 1991~1993 南极考察期间提供的后勤支持。矿物探针分析是在徐平和韩秀伶工程师帮助下完成的。B. J. Hensen, S. L. Harley, Y. Motoyoshi 与作者进行了有意义的讨论。I. C. W. Fitzsimons, S. L. Harley and C. J. Carson 还曾提出过不少建设性修改意见。郭敬辉、翟明国和阎月华副研究员对本文进行了审阅。在此一并致以谢意。

## 参 考 文 献

- 阎月华, 翟明国, 郭敬辉. 1991. 华北地台太古代麻粒岩相带的堇青石-夕线石组合: 低压麻粒岩相的标志. 岩石学报, (4): 46~56
- 赵越, 宋彪, 张宗清, 傅云莲, 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辑), (23): 1001~1008
- 王彦斌, 赵越, 任留东, 陈廷恩, 刘小汉, 全来喜. 1994. 东南极拉斯曼强丘陵镁铁质麻粒岩的地球化学特征及其在中压变质作用. 南极研究 (中文版), 6 (3): 1~11
- 刘小汉, 全来喜, 李继亮, 赵越, 任留东, 王彦斌. 1995. 东南极地盾中元古-早古生代构造演化, 海峡两岸地质学研讨会论文集 (II), 165~169
- 任留东, 刘小汉. 1995. 东南极普里滋湾 Søstrene 岛麻粒岩变质年代及其与邻区的关系. 南极研究 (中文版), 7 (3): 13~17
- 全来喜, 刘小汉, 陈福坤, 王彦斌, 任留东. 1995. 东南极拉斯曼丘陵暗色麻粒岩锆石的 U-Pb 年龄及其地质意义. 南极研究 (中文版), 7 (4): 65~70
- 全来喜, 刘小汉, 徐平, 韩秀伶, 赵越, 任留东, 王彦斌. 1996. 东南极拉斯曼丘陵含假蓝宝石紫苏石英岩的发现及其地质意义. 科学通报 (中文版), 41 (13): 1205~1208
- 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
- Bohlen S R. 1987. Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites. *J. Geol.*, 95: 617~632
- Bohlen S R. 1991. On the formation of granulites. *J. Metamorphic Geol.*, 9: 223~229
- Bohlen S R, Wall V J and Boettcher A L. 1983. Experimental investigation and application of garnet granulite equilibria. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 83: 52~61
- Carson C J, Dirks P H G M, Hand M, Sims J P and Wilson C J L. 1995a. Compressional and extensional tectonics in low-medium pressure granulites from the Larsemann Hills, East Antarctica. *Geol. Mag.*, 132: 151~170
- Carson C J, Fanning C M, Wilson C J L and Powell R. 1995b. Early Palaeozoic Evolution of Southeast Prydz Bay, East Antarctica. VII ISAES (abstracts), Siena, Italy, 78
- Clarke G L, Powell R and Guiraud M. 1989. Low-pressure granulite facies metapelitic assemblages and corona textures from MacRobertson Land, east Antarctica; the importance of  $Fe_2O_3$  and  $TiO_2$  in accounting for spinel-bearing assemblages. *J. Metamorphic Geol.*, 7: 323~335
- Dirks P H G M, Carson C J and Wilson C J L. 1993. The deformational history of the Larsemann Hills, Prydz Bay; the importance of the Pan-African (500Ma) in East Antarctica. *Antarctic Sci.*, 5: 179~192
- Fitzsimons I C W and Harley S L. 1992. Mineral reaction textures in high-grade gneisses; evidence for contrasting temperature-pressure paths in the Proterozoic complex of East Antarctica. In: Yoshida, Y. et al. eds., *Recent Progress in Antarctic Earth Science*, Tokyo: TERRAPUB, 103~111
- Fitzsimons I C W and Harley S L. 1994. The influence of retrograde cation exchange on granulite *P-T* estimates and a convergence technique for the recovery of peak metamorphic conditions. *J. Petrol.*, 35: 543~576
- Grew E S. 1980. Sapphirine-quartz association from Archaean rocks in Enderby Land, Antarctica. *Ame. Mineral.*, 65: 821~836
- Harley S L. 1984. An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 86: 359~373
- Harley S L. 1988. Proterozoic granulites from the Rauer Group, East Antarctica. I. Decompressional pressure-temperature Paths deduced from mafic and felsic gneisses. *J. Petrol.*, 29: 1059~95
- Harley S L. 1993. Sapphirine granulites from the Vestfold Hills, East Antarctica; geochemical and metamorphic evolution. *Antarctic Sci.*, 5: 389~402
- Harley S L and Hensen B J. 1990. Archaean and Proterozoic high-grade terranes of East Antarctica (40~80°E); a case

- study of diversity in granulite facies metamorphism. In high-temperature Metamorphism and Crustal Anatexis, ed. J. R. Ashworth and M. Brown, London, Unwin Hyman, 320~370
- Hensen B J and Green D H. 1973. Experimental study of the stability of cordierite and garnet in pelitic compositions at high pressures and temperatures. III. Synthesis of experimental data and geological applications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 38: 151~166
- Hensen B J and Zhou B. 1995. Retention of isotopic memory in garnets partially broken down during an overprinting granulite-facies metamorphism; Implications for the Sm-Nd closure temperature. *Geology*, 23: 225~228
- Holdaway M J. 1971. Stability of andalusite and the aluminium silicate phase diagram. *Ame. J. Sci.*, 271: 97~131
- Holdaway M J and Lee S M. 1977. Fe-Mg cordierite stability in high-grade pelitic rocks based on experimental, theoretical, and natural observations. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 63: 175~198
- Motoyoshi Y and Hensen B J. 1989. Sapphirine-quartz-orthopyroxene symplectites after cordierite in the Archaean Napier Complex, Antarctica; evidence for a counterclockwise *P-T* path. *European J. Mineral.*, 1: 467~471
- Newton R C. 1972. An experimental determination of the high pressure stability limits of magnesian cordierite under wet and dry conditions. *J. Geol.*, 80: 398~420
- Owen J V and Greenough J D. 1991. An empirical sapphirine-spinel Mg-Fe exchange thermometer and its application to high grade xenoliths in the Popes Harbour dyke, Nova Scotia, Canada. *Lithos*, 26: 317~332
- Ren L, Zhao Y, Liu X and Chen T. 1992. Re-examination of the metamorphic evolution of the Larsemann Hills, East Antarctica. In: Yoshida, Y. et al. eds., *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Tokyo: TERRAPUB, 145~153
- Sandiford M A and Powell R. 1986. Deep crustal metamorphism during continental extension; ancient and modern examples. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 79: 151~158
- Sen S K and Bhattacharya A. 1984. An orthopyroxene-garnet thermometer and its application to the Madras charnockites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 88: 64~71
- 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
- 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
- Thost D E, Hensen B J and Motoyoshi Y. 1991. Two-stage decompression in garnet-bearing mafic granulites from Sjøstrene Island, Prydz Bay, East Antarctica. *J. Metamorphic Geol.*, 9: 245~256
- Thost D E and Hensen B J. 1992. Gneisses of the Porthos and Athos Ranges, Northern Prince Charles Mountains, East Antarctica; constraints on the prograde and retrograde *P-T* path. In: Yoshida, Y. et al. eds., *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Tokyo: TERRAPUB, 93~102
- Tong L, Liu X, Zhang L and Chen F. 1995. The U-Pb Zircon Chronology of Mafic Granulite from the Larsemann Hills, East Antarctica and Its Possible Geological Implications. *TERRA ANTARTICA*, 2 (2): 123~126
- Tong L and Liu X. 1996. Ultramafic xenoliths of the Larsemann Hills, East Antarctica; petrological and geochemical characteristics and tectonic implications. In: abstracts, 30th International Geological Congress, Beijing, China. Vol. 1: 238
- Zhang L, Tong L, Liu X and Scharer U. 1996. Conventional U-Pb ages of the high-grade metamorphic rocks in the Larsemann Hills, East Antarctica. *Advances in Solid Earth Sciences*, edited by Pang Z. H. et al., Science Press, 27~35
- 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, 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