

东南极格罗夫山镁铁质麻粒岩的变质作用*

俞良军¹ 刘小汉¹ 赵越² 琚宜太¹ 刘晓春²

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

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈开放实验室, 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

2002-08-15 收稿, 2002-09-16 改回.

Yu LJ, Liu XH, Zhao Y, Ju YT and Liu XC. 2002. Metamorphism of mafic granulites in the Grove Mountains, East Antarctica. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4):501–516

Abstract Mafic granulites and amphibolites crop out in the Grove Mountains (GMs), 450km south of Zhongshan Station on the coast of Prydz Bay, East Antarctica. Most metamorphic reaction textures suggest that the high-grade metamorphic rocks were formed by a single-granulite facies event. But, the garnet-bearing mafic granulites exhibit corona of Opx + Pl + minor Hbl on garnet, formed after peak metamorphic conditions (M_1). The corona was originated during a second metamorphic event (M_2) via the reaction $Grt + Cpx + SiO_2 = Opx + Pl$. The mafic granulite shows a near-isothermal decompression (ITD) P - T history from 0.93GPa and >800 C (M_1) based on the assemblage of garnet core with Cpx-Pl-Qtz occurred as inclusion within the garnet to 0.65GPa and 733~850 C (M_2), followed by 0.46~0.61GPa (M_3). Conventionally, this clockwise P - T path can be explained in a model involving extensional collapse and exhumation of thickened crust, which can be compared with that of Larsemann Hills, East Antarctica. Based on metamorphic temperatures and pressures estimated by geothermometer - geobarometer, we proposed that the mafic granulite from Grove Mountains, East Antarctica, might be the high-pressure granulite.

Key words Mafic granulite, ITD, High-pressure granulite, Grove Mountains, East Antarctica

摘要 东南极内陆-格罗夫山存在一套经历了麻粒岩相变质作用的镁铁质麻粒岩和斜长角闪岩。变质反应结构显示该区多为单一的区域性麻粒岩相变质作用。但是,对含石榴石的镁铁质麻粒岩的详细工作则显示了包括3个阶段的近等温降压(ITD)的顺时针 PT 演化轨迹, M_1 : 0.93GPa, >800 C; M_2 : 0.65GPa, 733~850 C; M_3 : 0.46~0.61GPa,并有着与拉斯曼丘陵相似的演化历史。根据矿物组合和成分、变质反应结构及温压计算结果,格罗夫山镁铁质麻粒岩可能为高压麻粒岩。

关键词 镁铁质麻粒岩; ITD; 高压麻粒岩; 格罗夫山; 东南极

中图法分类号 P588.346

1992年中国地质学家根据对位于东南极伊丽莎白公主地(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,首次提出了普里兹湾东南是属于泛非期(Pan-African)的构造活动带(Zhao *et al.*, 1992),而不是前人所认为的格林威尔(Grenvillian)构造带(Tingey, 1982, 1991; Sheraton *et al.*,

1984; Grew and Manton, 1986; Black *et al.*, 1987; Stüwe and Powell, 1989; Moores, 1991),并且得到了其它研究者的认可(赵越,1993; Zhao *et al.*, 1995; Dirks and Wilson, 1995; Hensen and Zhou, 1995)。而澳大利亚和俄罗斯地质学家则查明了南部的查尔斯王子山(Prince Charles Mountains)28亿年的太古代变质核杂岩及中元古代晚期的深变质

* 中国科学院知识创新项目(KZCX2-303)和科技部公益项目(2001DIA0040-9)资助。

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

杂岩,并将它们与西福尔丘陵(Vestfold Hills)、茹尔群岛(Rauer Islands)的变质杂岩进行对比(Black *et al.*, 1991, 1992; Kinny *et al.*, 1993, 1997; Dirks *et al.*, 1994; Sheraton *et al.*, 1996; Harley *et al.*, 1998)。但是,对拉斯曼丘陵和南、北查尔斯王子山之间的格罗夫山(Grove Mountains),除了仅根据极其有限的推测为是一个格林威尔地体,显示了与北查尔斯王子山有一定的地质联系(Tingey, 1991)之外,对于其地质特征和大地构造属性皆一无所知,因此倍受地质工作者关注。

格罗夫山位于中山站南 450km(72°20′-73°10′S, 73°50′-75°40′E),属于南极冰盖内陆的冰原岛峰(nunatak)群,在 3200km² 的区域内出露了 64 座相互独立的冰原岛峰(图 1),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。中国南极考察队在第 15 次(1998 年 12 月-1999 年 1 月)和 16 次(1999 年 12 月-2000 年 1 月)考察期间对其

中的 53 座冰原岛峰进行了野外地质考察,确认格罗夫山属于泛非造山带的一部分(Zhao *et al.*, 2000; 刘小汉等, 2002)。拉斯曼丘陵的镁铁质-超镁铁质麻粒岩根据其矿物组合的不同可分为三种类型,即:角闪石辉石麻粒岩、二辉石麻粒岩和橄榄方辉麻粒岩(王彦斌等,1994),并指出拉斯曼丘陵区深变质杂岩的变质作用可分出 3 期:占主导地位的低压麻粒岩相变质作用(M₂)的峰期不早于 550Ma,并发现了早期较高温压的麻粒岩相变质的残余(M₁)和晚期绿片岩相退变质作用(M₃)(Zhao *et al.*, 1992; Ren *et al.*, 1992)。那么格罗夫山是否出露镁铁质-超镁铁质麻粒岩呢?它们的变质作用演化又如何呢?本文即是对格罗夫山镁铁质麻粒岩从变质作用演化的角度进行了较深入的研究,填补了该区的研究空白,并与拉斯曼丘陵区的变质作用进行对比,为继续深入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证据。

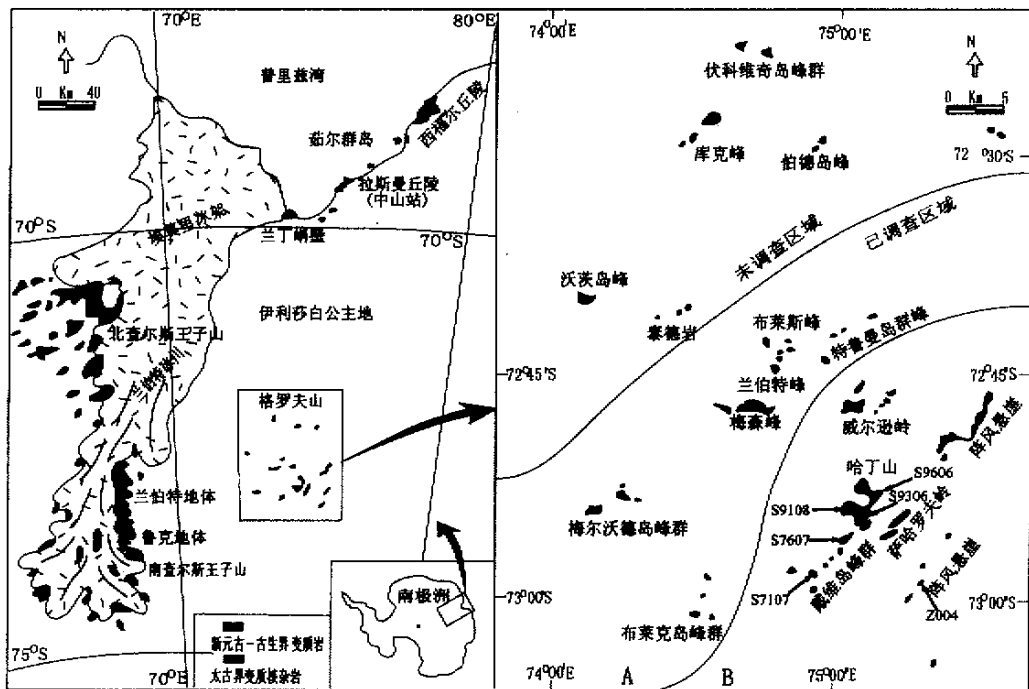


图 1 东南极格罗夫山地理位置图

Fig. 1 Geographical map of the Grove Mountains, East Antarctica

1 地质背景

格罗夫山出露的岩石包括深变质杂岩和岩浆岩。变质杂岩主要有长英质麻粒岩、镁铁质麻粒岩、斜长角闪岩、泥质片麻岩、含磁铁矿石英岩、含砂线石石英岩、(石榴石)斜长单斜

辉石岩、花岗质片麻岩及紫苏花岗岩; 岩浆岩有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(Yu *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2001; 刘小汉等, 2002)。整个测区以北北东-南南西方向分为东西两个岩区,东区(B区)以长英质麻粒岩和紫苏花岗岩为主,西区(A区)则以花岗质片麻岩为主(图 1)。整个测区内的长英质麻粒岩和花岗质片麻岩中都普遍含有镁铁质麻粒岩和超镁铁质

麻粒岩的薄层或透镜体,层厚一般为数厘米到2米,在梅森峰(Mason Peaks)甚至可达30米。斜长角闪岩作为长英质麻粒岩中的夹层,主要出露在东区。

在研究区内,露头上均显示较平缓的区域性片麻理,片麻理主要由麻粒岩和片麻岩中的造岩矿物定向排列而成。局部地段可见有强烈韧性变形带。除普遍强烈的压扁变形外,镁铁质麻粒岩薄层和透镜体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2)。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(D₁)形迹表现为镁铁质麻粒岩薄层和透镜体或泥质片麻岩内部残留的矿物结构,由于后期变形的改造而使其结构方向不具备区域稳定性;第2期变形作用(D₂)表现为区域性低角度平缓面理构造,是研究区最显著的变形事件;第3期变形(D₃)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。脆性变形作用主要表现为在大部分岛峰的北西西侧发育的与山脊宏观走向平行的断裂构造(刘小汉等,2002)。

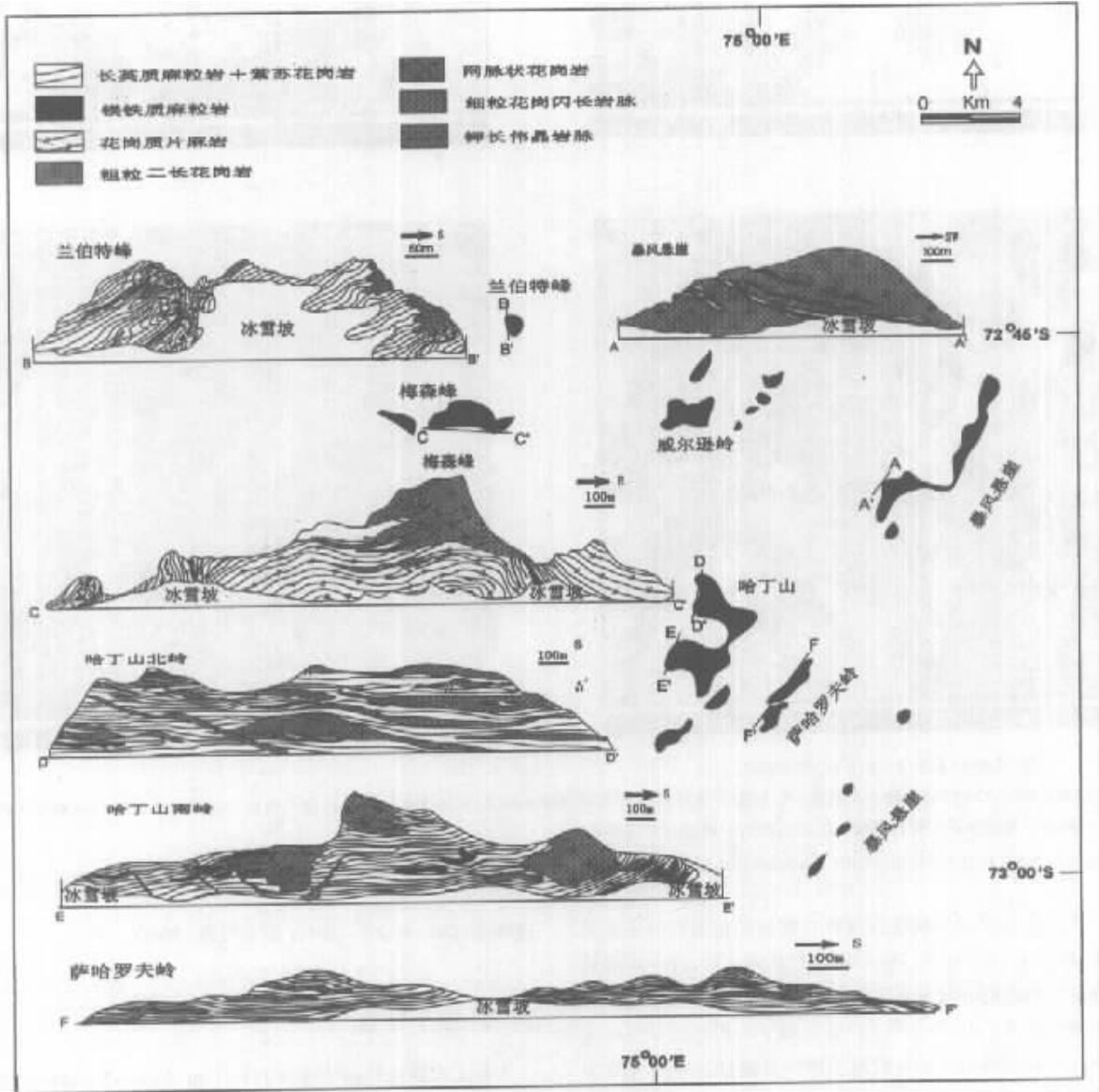


图2 格罗夫山主要露头信手剖面图(据刘小汉等,2002)

Fig.2 Topographical features of major nunataks in GMs and their schematic cross section (after Liu XH *et al.*, 2002)

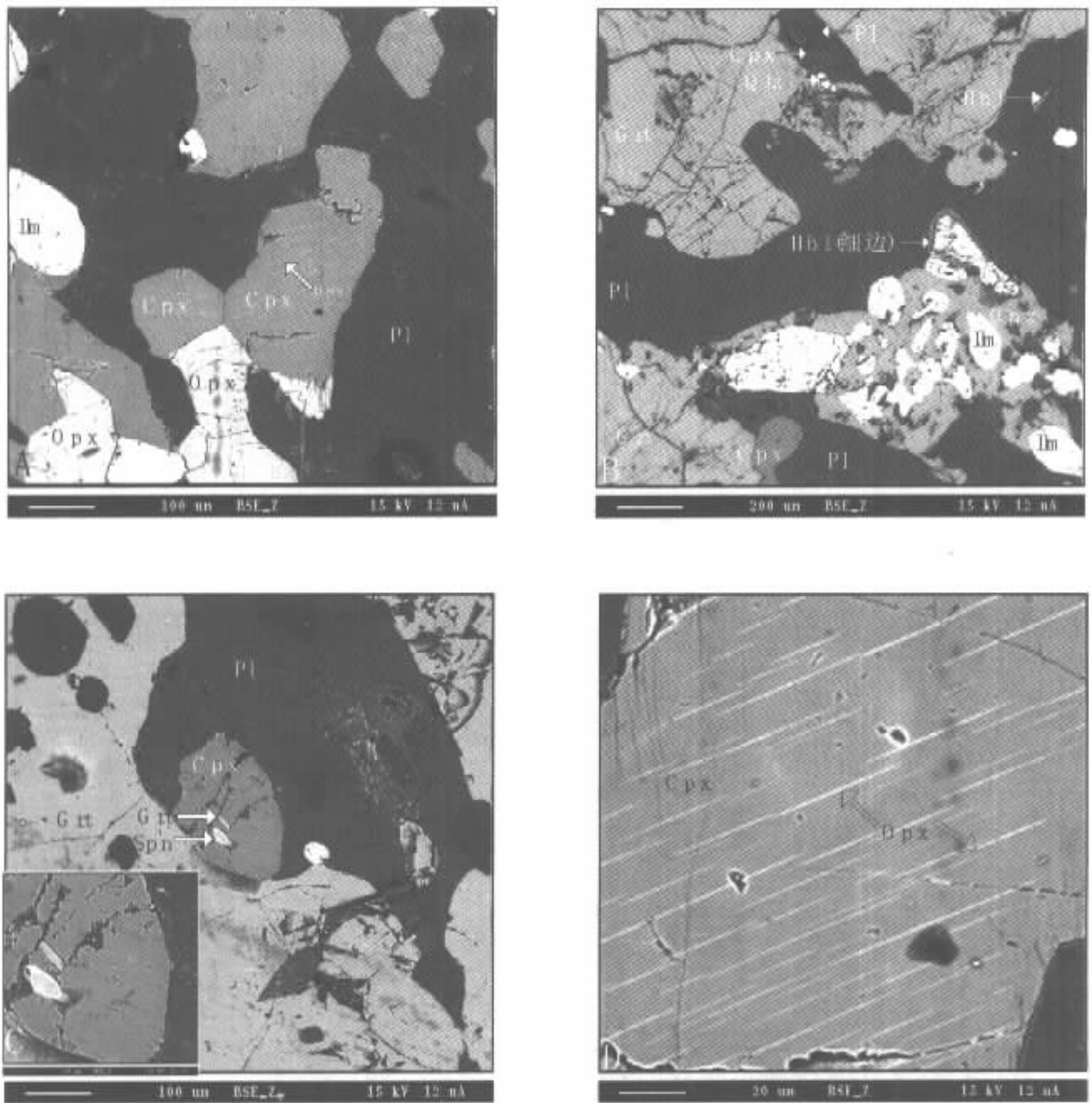


图3 镁铁质麻粒岩中的变质反应结构图

A. 矿物之间呈120度的平衡共生结构; B. 石榴石变质斑晶被后成的冠状体包围, 内部含包体; C. 作为石榴石内包体的单斜辉石包裹粒状石榴石和榍石及出熔斜方辉石条纹; D. 单斜辉石出熔斜方辉石条纹。

Fig. 3 Back scattered electron micrographs showing significant metamorphic reaction textures

本文重点研究的镁铁质麻粒岩和斜长角闪岩的主量元素组成(SiO_2 : 46.4%~49.9%)和玄武岩一致,进一步的稀土和微量元素的研究表明它们属于两类玄武岩,即洋岛型和洋中脊型玄武岩(俞良军等,2002)。格罗夫山有代表性的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 $529 \pm 14 \text{ Ma}$, 花岗岩侵位年龄为 $534 \pm 5 \text{ Ma}$, 细晶岩脉年龄为 $501 \pm 7 \text{ Ma}$ (Zhao *et al.*, 2000)。这些年代学数据清楚地显示了格罗夫山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(Zhao *et al.*, 2000; 刘小汉等,2002)。

2 岩相学特征

本文所研究样品主要采自哈丁山(Mount Harding)、戴维岛峰群(Davey Nunataks)和阵风悬崖(Gale Escarpment)(图1),主要有以下几种岩石类型^①。

① 本文的矿物缩写据 Kretz(1983)。

斜长角闪二辉麻粒岩：岩石呈灰黑色，主要矿物为紫苏辉石(15%~40%)、角闪石(棕色, 15%~65%)、斜长石(20%)、单斜辉石、黑云母及石英等，副矿物主要有钛铁矿、磁铁矿、磷灰石和锆石。细-中细粒状柱状变晶结构，块状构造或弱片麻状构造，局部因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(图3A)。常见紫苏辉石发育有角闪石(绿色)的环边。Liu *et al.* (2001)指出大多数镁铁质麻粒岩显示了平衡共生结构，然在其研究的两个样品中见到了单斜辉石被斜方辉石包围，角闪石被斜方辉石和不透明氧化物替代，表示了第二阶段的斜方辉石的生长。

含石榴石的斜长角闪二辉麻粒岩：除含石榴子石外，其矿物组合与斜长角闪二辉麻粒岩基本一致。石榴石变斑晶被后成的斜长石、斜长石+斜方辉石、斜长石+斜方辉石+角闪石冠状体/集合体包围(图3B)，为典型的减压结构(Brodie, 1995)，俗称“白眼圈”。局部，石榴石完全被斜长石、斜方辉石、单斜辉石和角闪石(棕色)代替而呈假象。在石榴石中有单斜辉石、斜长石和石英的包裹体(图3B)，局部这些包裹体矿物呈现“S”型结构，显示了早期面理的残留。值得提及的是，作者发现了在石榴石内作为包裹体矿物的单斜辉石又包裹了粒状的石榴石和榍石并有条纹状斜方辉石的出熔(图3C)。同时，在基质中与斜方辉石保持平衡共生结构的单斜辉石中也普遍出熔了明显的条纹状斜方辉石(图3A, D)。浑圆状的石英与钛铁矿作为包裹体出现在后成的斜长石晶体中。

研究区内还出露有超镁铁质麻粒岩-橄辉方辉麻粒岩，其矿物组合为：橄榄石-斜方辉石-角闪石-斜长石-尖晶石-钛铁矿。

斜长角闪岩：以角闪石(65%)和斜长石(30%)为主，少量紫苏辉石(<5%)、石英和黑云母等，矿物定向排列组成面理，粒状柱状变晶结构，块状构造。岩石中矿物组合以平衡共生结构为主。

含石榴石紫苏花岗质片麻岩：矿物组合有黑云母(20%)、石榴石(<10%)、紫苏辉石(5%)，钾长石含量高于斜长石，少量的石英。斑状斑晶结构，变斑晶石榴石被反应残留成港湾状，但也有与紫苏辉石平衡接触；基质为鳞片粒状斑晶结构，黑云母为细片状，定向排列构成片麻理。

总之，在研究区内石榴石仅在个别的镁铁质麻粒岩、麻粒岩相的泥质片麻岩和花岗质片麻岩中出露，而紫苏辉石则广泛出现，无论是在镁铁质麻粒岩、长英质麻粒岩和紫苏花岗岩(紫苏花岗质片麻岩)中都有产出而且含量较高，这也表明了这套深变质杂岩普遍经历了麻粒岩相变质作用。本文将重点研究含或不含石榴石的斜长角闪二辉麻粒岩。

综上，虽然大部分样品的变质反应结构多显示为平衡共生结构，表明该区多为单一的区域性麻粒岩相变质作用(M₁)(Liu *et al.*, 2001)，但是在对少量的含石榴石斜长角闪二辉麻粒岩的深入研究中识别出三期变质矿物组合，表明其经历

了至少三个阶段的变质作用，分别为：

M₁: Grt_c+Cpx_{in}+Pl_{in}+Qtz，即石榴石变斑晶核部成分和其内部的包裹体；

M₂: Grt_r+Opx+Pl+Cpx+Hbl(棕色)+Ilm，以石榴石边部成分及围绕其的矿物为代表；

M₃：以围绕辉石的Hbl(绿色)为代表。后面将分别对这三期变质作用的温压条件进行详细讨论。

3 矿物学特征

样品是利用中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈开放实验室CAMEBAX SX51型电子探针仪分析了其中的主要变质矿物成分，工作电压为15kV，电流12nA，误差小于1%，分析数据见表1。

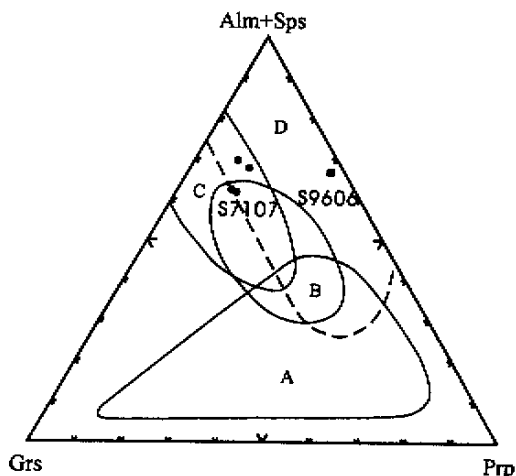


图4 麻粒岩中石榴石的(Alm+Sps)-Grs-Prp图解
(据 Lovering and White, 1969)

A、B、C分别为科尔曼三种榴辉岩成因类型中石榴石成分区；D为麻粒岩相石榴石成分区

Fig. 4 (Alm+Sps)-Grs-Prp diagram for garnet in the granulites (after Lovering and White, 1969)

石榴石：多以变斑晶出现，粒度较大，最大可达5.0mm，内含长石、石英、单斜辉石和磷灰石等矿物包裹体。镁铁质麻粒岩中的石榴石以铁铝榴石为主($X_{Fe}=0.59\sim0.68$)， X_{Ca} 的含量较高(0.21~0.26)，而 X_{Mg} 和 X_{Mn} 很低(分别为0.09~0.12和0.02~0.04)。在石榴石的(Alm+Sps)-Grs-Prp三角图解(Lovering and White, 1969)中落入麻粒岩相D区(图4)。由于分析点较少，所以对于石榴石是否具有成分环带不清楚，但是石榴石变斑晶的核部和边部成分与作为单斜辉石包体的石榴石的成分有明显的差异。相比之下，紫苏花岗质片麻岩中的石榴石的 X_{Mg} 明显较高，而 X_{Ca} 明显偏低， X_{Fe} 和 X_{Mn} 变化不大。

表1 矿物电子探针分析结果(%)

Table 1 Microprobe analyses of minerals

样品号	S7107-1			S7107-3	S9606	样品号	S7107-1		S7107-2	S7107-3		S9108-1	S9108-2
	Gr _{tc}	Gr _{tr}	Gr _{tin}	Gr _{tc}	Gr _t		矿物	Op _{x1}	Op _{x2}	Op _x	Op _{x1}	Op _{x2}	Op _x
SiO ₂	38.12	37.75	37.53	37.50	38.78	SiO ₂	50.07	49.85	49.77	49.56	49.19	49.93	49.70
TiO ₂	0.08	0.03	0.11	0.05	0.09	TiO ₂	0.15	0.09	0.07	0.09	0.13	0.10	0.13
Al ₂ O ₃	21.43	20.98	21.20	21.42	22.26	Al ₂ O ₃	0.70	0.70	0.62	0.54	0.75	0.52	0.63
Cr ₂ O ₃	0.01	0.04	0.00	0.04	0.05	Cr ₂ O ₃	0.05	0.00	0.02	0.01	0.00	0.05	0.01
Fe ₂ O ₃	0.49	0.72	0.00	0.23	0.00	Fe ₂ O ₃	0.29	0.23	1.24	2.04	2.13	1.00	0.92
MgO	3.23	3.05	2.21	2.91	7.77	MgO	12.78	12.42	12.75	13.07	12.69	14.34	14.49
CaO	9.48	7.52	7.31	9.56	1.05	CaO	0.78	0.77	0.75	0.62	0.86	0.79	0.89
MnO	0.75	1.12	1.18	1.68	0.74	MnO	0.38	0.53	0.31	0.44	0.40	0.72	0.83
FeO	27.82	29.26	30.09	27.42	30.45	FeO	35.51	35.58	35.32	34.59	34.61	32.32	31.64
Na ₂ O	0.04	0.08	0.01	0.03	0.05	Na ₂ O	0.06	0.08	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02
K ₂ O	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Tol.	101.5	100.6	99.7	100.8	101.3	Tol.	100.8	100.3	100.9	101.0	100.9	99.8	99.3
			O=12						O=6				
Si	2.976	2.988	3.001	2.956	2.984	Si	1.977	1.981	1.967	1.956	1.948	1.971	1.968
Ti	0.005	0.002	0.006	0.003	0.005	Ti	0.005	0.003	0.002	0.003	0.004	0.003	0.004
Al	1.972	1.957	1.998	1.991	2.019	Al	0.032	0.033	0.029	0.025	0.035	0.024	0.030
Cr	0.001	0.002	0.000	0.002	0.003	Cr	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000
Fe ³⁺	0.029	0.043	0.000	0.014	0.000	Fe ³⁺	0.009	0.007	0.037	0.061	0.063	0.030	0.027
Fe ²⁺	1.816	1.936	2.012	1.808	1.959	Fe ²⁺	1.172	1.182	1.167	1.142	1.146	1.067	1.048
Mg	0.376	0.360	0.263	0.342	0.891	Mg	0.752	0.736	0.751	0.769	0.749	0.843	0.855
Ca	0.793	0.638	0.626	0.807	0.087	Ca	0.033	0.033	0.032	0.026	0.037	0.033	0.038
Mn	0.050	0.075	0.080	0.112	0.048	Mn	0.013	0.018	0.011	0.015	0.014	0.024	0.028
Na	0.006	0.013	0.001	0.005	0.008	Na	0.005	0.007	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002
K	0.000	0.002	0.002	0.000	0.002	K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Tol.	8.023	8.017	7.995	8.040	8.005	Tol.	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Adr	1.6	2.2	0.2	0.8	0.2	Wo	1.7	1.7	1.6	1.4	1.9	1.7	1.9
Grs	24.5	18.8	20.7	25.4	2.5	En	38.2	37.4	38.3	39.4	38.5	42.9	43.5
Prp	12.4	12.0	8.9	11.2	29.9	Fs	60.2	61.0	60.1	59.3	59.6	55.1	54.6
Sps	1.6	2.5	2.7	3.7	1.6								
Alm	59.9	64.4	67.6	58.9	65.7								
X _{Mg}	0.124	0.119	0.088	0.111	0.298	X _{Mg}	0.391	0.384	0.391	0.403	0.395	0.441	0.449
X _{Fe}	0.598	0.644	0.675	0.589	0.656								
X _{Ca}	0.261	0.212	0.210	0.263	0.029								
X _{Mn}	0.016	0.025	0.027	0.037	0.016								
Al ^{IV}	0.025	0.013	0.000	0.044	0.016	Al ^{IV}	0.023	0.019	0.029	0.025	0.035	0.024	0.030
Al ^{VI}	1.947	1.944	1.998	1.947	2.003	Al ^{VI}	0.009	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

续表 1

Continued table 1

样品号 矿物	S9108-2	S9108-3	S9306	S7606	S9606	S7107-1		S7107-2	S7107-3	S9108-1	S9108-2	S9108-3	S9306
	Op _{x2}	Opx	Opx	Opx	Opx	Cpx _{in}	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx
SiO ₂	50.37	50.35	50.04	50.33	50.03	51.84	51.72	51.82	52.37	51.29	50.77	51.47	51.50
TiO ₂	0.10	0.16	0.15	0.12	0.16	0.23	0.19	0.16	0.08	0.28	0.28	0.00	0.30
Al ₂ O ₃	0.69	0.70	0.58	0.57	4.47	1.35	1.35	1.54	0.73	1.69	1.73	1.58	1.28
Cr ₂ O ₃	0.04	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.05	0.01	0.04	0.00	0.00	0.03	0.00
Fe ₂ O ₃	0.96	0.24	0.45	0.69	0.28	0.47	0.23	0.25	0.58	1.97	2.18	0.93	0.46
MgO	14.74	14.51	13.22	13.00	17.91	10.07	9.93	9.75	10.79	10.94	11.05	10.69	11.21
CaO	0.77	0.79	0.94	0.82	0.09	21.18	21.28	21.90	22.14	21.33	20.87	21.24	14.81
MnO	0.82	0.78	1.54	1.25	0.26	0.24	0.20	0.22	0.11	0.38	0.40	0.35	0.85
FeO	32.15	32.38	33.48	34.66	27.55	15.39	15.62	14.78	13.74	12.93	12.40	13.69	20.24
Na ₂ O	0.02	0.04	0.02	0.03	0.02	0.32	0.25	0.35	0.26	0.31	0.35	0.27	0.37
K ₂ O	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01
Tol.	100.7	100.0	100.5	101.5	100.8	101.1	100.9	100.8	100.9	101.1	100.1	100.2	101.1
			O=6							O=6			
Si	1.967	1.978	1.976	1.974	1.892	1.968	1.970	1.970	1.982	1.938	1.936	1.961	1.970
Ti	0.003	0.005	0.004	0.004	0.005	0.007	0.005	0.005	0.002	0.008	0.008	0.000	0.009
Al	0.032	0.032	0.027	0.026	0.199	0.060	0.061	0.069	0.033	0.075	0.078	0.071	0.058
Cr	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
Fe ³⁺	0.028	0.007	0.013	0.020	0.008	0.013	0.007	0.007	0.017	0.056	0.063	0.027	0.013
Fe ²⁺	1.050	1.064	1.106	1.137	0.871	0.489	0.498	0.470	0.435	0.409	0.395	0.436	0.647
Mg	0.858	0.849	0.778	0.760	1.010	0.570	0.564	0.553	0.609	0.616	0.628	0.607	0.639
Ca	0.032	0.033	0.040	0.034	0.004	0.862	0.869	0.892	0.898	0.864	0.853	0.867	0.607
Mn	0.027	0.026	0.052	0.042	0.009	0.008	0.007	0.007	0.004	0.012	0.013	0.011	0.028
Na	0.001	0.003	0.001	0.002	0.001	0.023	0.019	0.026	0.019	0.023	0.026	0.020	0.028
K	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Tol.	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Wo	1.6	1.7	2.0	1.7	0.2	44.7	44.9	46.4	46.2	45.4	45.1	45.1	31.6
En	43.6	43.1	39.4	38.5	53.4	29.6	29.1	28.8	31.3	32.4	33.3	31.6	33.3
Fs	54.8	55.3	58.6	59.7	46.5	25.7	26.0	24.8	22.5	22.1	21.6	23.3	35.1
X _{Mg}	0.450	0.444	0.413	0.401	0.537	0.538	0.531	0.540	0.583	0.601	0.614	0.582	0.497
Al ^{IV}	0.032	0.022	0.024	0.026	0.108	0.032	0.030	0.030	0.018	0.062	0.065	0.039	0.030
Al ^{VI}	0.000	0.010	0.004	0.001	0.091	0.029	0.030	0.039	0.015	0.013	0.013	0.032	0.028

注: S7107 含石榴石的斜长角闪二辉麻粒岩, S9108 斜长角闪二辉麻粒岩, S9306 角闪二辉麻粒岩, S7606 含紫苏辉石的斜长角闪岩, Z004 黑云斜长角闪岩, S9606 为含石榴石的紫苏花岗质片麻岩; c-晶体核部, r-边缘, in-包体, Pl_{ca} 为钾长石中出熔的斜长石, Op_{x1} 代表其中的一点, 不代表期次, Hbl_{M3} 代表 M₃ 期矿物; 石榴石的 X_{Mg} = Mg / (Fe²⁺ + Mg + Ca + Mn), 其它矿物的 X_{Mg} = Mg / (Mg + Fe²⁺).

续表 1

Continued table 1

样品号	S7107-1			S7107-2	S7107-3	S9108-1	S9108-2	S9108-3	S7606	S9306	Z004	S9606		
	Pl ₁	Pl _{in}	Pl ₂	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl _{ex}	Kf
SiO ₂	56.27	53.79	57.43	56.57	54.98	55.65	54.72	55.19	60.60	61.79	58.46	62.82	62.93	65.08
TiO ₂	0.06	0.04	0.00	0.04	0.00	0.07	0.00	0.00	0.05	0.00	0.03	0.00	0.10	0.04
Al ₂ O ₃	28.14	28.93	27.36	28.15	27.75	27.89	28.59	27.54	25.21	24.50	26.06	23.87	22.52	18.58
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.02	0.03	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.04	0.00	0.09
MgO	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04
CaO	10.42	12.17	9.90	10.07	10.72	10.85	10.73	10.98	7.19	6.36	8.50	5.39	4.09	0.09
MnO	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.02	0.10	0.00	0.03	0.00	0.02
FeO	0.04	0.12	0.11	0.12	0.11	0.08	0.54	0.06	0.10	0.11	0.13	0.03	0.00	0.14
Na ₂ O	5.83	4.75	6.16	5.95	5.73	5.41	5.26	5.37	7.34	8.22	6.46	8.79	8.09	1.27
K ₂ O	0.16	0.15	0.23	0.14	0.20	0.35	0.26	0.29	0.49	0.24	0.30	0.11	2.85	14.92
Tol.	100.9	100.0	101.3	101.1	99.5	100.4	100.2	99.5	101.0	101.4	100.1	101.1	100.6	100.3
								O=8						
Si	2.510	2.436	2.551	2.517	2.494	2.501	2.470	2.503	2.677	2.715	2.614	2.757	2.798	2.988
Ti	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.004	0.001
Al	1.480	1.544	1.432	1.476	1.484	1.477	1.521	1.472	1.313	1.269	1.374	1.234	1.180	1.005
Cr	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.001	0.000	0.003
Mg	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.003
Ca	0.498	0.590	0.471	0.480	0.521	0.523	0.519	0.534	0.340	0.300	0.407	0.254	0.195	0.005
Mn	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.001	0.004	0.000	0.001	0.000	0.001
Fe ²⁺	0.002	0.005	0.004	0.004	0.004	0.003	0.020	0.002	0.004	0.004	0.005	0.001	0.000	0.005
Na	0.504	0.417	0.531	0.514	0.504	0.472	0.460	0.472	0.628	0.700	0.560	0.748	0.698	0.114
K	0.009	0.009	0.013	0.008	0.012	0.020	0.015	0.017	0.028	0.014	0.017	0.006	0.162	0.874
Tol.	5.005	5.004	5.005	5.004	5.021	5.003	5.008	5.005	4.993	5.007	4.984	5.002	5.038	5.000
Ab	49.9	41.0	52.3	51.3	48.6	46.5	46.3	46.2	63.1	69.1	56.9	74.2	66.2	11.4
Or	1.0	1.0	1.3	1.0	1.1	2.0	1.5	1.7	2.8	1.3	1.7	0.6	15.3	88.1
An	49.2	58.1	46.4	48.0	50.3	51.5	52.2	52.2	34.2	29.6	41.4	25.2	18.5	0.5
样品	S7107-1			S7107-2	S7107-3			S9108-1	S9108-2	S7606	Z004			
矿物	Hbl _{M₃}	Hbl _{M₃}	Hbl	Hbl	Hbl	Hbl _{M₃}	Hbl	Hbl	Hbl	Hbl	Hbl	Hbl	Hbl	
SiO ₂	43.89	43.92	44.02	43.28	42.64	43.32	43.58	43.35	42.16					
TiO ₂	1.60	1.57	1.86	1.94	1.72	1.66	1.84	2.06	2.07					
Al ₂ O ₃	10.83	10.85	10.25	10.51	10.60	10.12	10.01	9.40	10.39					
Cr ₂ O ₃	0.13	0.05	0.03	0.09	0.04	0.11	0.13	0.01	0.02					
MgO	8.43	8.38	8.19	8.34	8.30	10.88	11.19	10.10	10.45					
CaO	11.38	10.95	11.36	10.81	11.21	11.38	11.69	11.38	11.55					
MnO	0.12	0.11	0.09	0.12	0.07	0.18	0.17	0.32	0.33					
FeO	19.72	20.21	20.26	20.36	20.43	16.45	16.31	17.92	16.63					
Na ₂ O	1.48	1.53	1.42	1.50	1.53	1.56	1.52	1.75	1.91					
K ₂ O	0.56	0.61	0.71	0.63	0.63	1.88	1.73	1.57	1.69					
Tol.	98.2	98.3	98.2	97.7	97.1	97.5	98.2	97.9	97.2					
								O=23						
Si	6.613	6.618	6.650	6.582	6.536	6.547	6.536	6.573	6.425					
Ti	0.182	0.179	0.211	0.222	0.198	0.189	0.207	0.235	0.237					
Al	1.923	1.928	1.825	1.883	1.915	1.803	1.770	1.680	1.866					
Cr	0.016	0.005	0.004	0.011	0.005	0.014	0.015	0.001	0.002					
Mg	1.894	1.883	1.844	1.890	1.896	2.451	2.501	2.283	2.373					
Ca	1.837	1.768	1.838	1.762	1.841	1.842	1.879	1.849	1.887					
Mn	0.016	0.014	0.012	0.015	0.009	0.023	0.021	0.041	0.042					
Fe ²⁺	2.485	2.547	2.559	2.590	2.618	2.079	2.045	2.273	2.120					
Na	0.432	0.447	0.416	0.442	0.455	0.457	0.442	0.515	0.565					
K	0.108	0.117	0.137	0.121	0.124	0.362	0.332	0.305	0.329					
Tol.	15.50	15.52	15.50	15.53	15.60	15.77	15.75	15.76	15.85					
X _{Mg}	0.432	0.425	0.419	0.422	0.420	0.541	0.550	0.501	0.528					
Al ^{IV}	1.387	1.382	1.351	1.418	1.464	1.453	1.464	1.427	1.575					
Al ^{VI}	0.537	0.546	0.475	0.465	0.451	0.350	0.305	0.253	0.291					

斜方辉石：它形粒状，以(铁)紫苏辉石为主， $En=32.4 \sim 43.6$ ，平均为 40.2， $Fs=54.6 \sim 61.0$ ，平均为 58.0， $Wo=0.4 \sim 2.0$ ， $X_{Mg}=0.38 \sim 0.45$ ，平均为 0.42， Al_2O_3 较低，0.52%~0.75%。相比之下，紫苏花岗质片麻岩中的斜方辉石的 MgO 和 Al_2O_3 偏高，而 FeO 和 CaO 低。

单斜辉石：端元组分的平均值分别为 $Wo=45.4$ ， $En=32.4$ ， $Fs=22.1$ ，而 Al_2O_3 较低，1.28%~1.73% (除 S7107-2)。

斜长石：以中长石为主，但在石榴石内作为包体的斜长石的 An 达 58.1，为拉长石。在花岗质片麻岩中为更长石。

角闪石：棕色-绿色，它们均为钙质角闪石，并且 $B_{Na}=0$ ，

表现为 $Si^T=6.446 \sim 6.675$ ， $(K+Na)^A > 0.5$ ， $Ti < 0.5$ ， $Fe^{3+} < Al^{VI}$ ， $X_{Mg} (= Mg / (Mg + Fe^{2+}))$ 为 0.4~0.6。按照 Leake (1997) 的角闪石分类，它们分别属于含铁浅闪石质角闪石、浅闪石质角闪石和亚铁韭闪石质角闪石。在同一样品中，角闪石的成分差别不大；但是在不同样品中略有差别，如在含石榴石的镁铁质麻粒岩中 $X_{Mg} < 0.5$ ，而在其余的样品中 $X_{Mg} > 0.5$ 。在 $Ti-Al^{IV}$ 图解和 $(Na+K)-Ti$ 图解 (据萨克路特金, 1968, 转引自靳是琴和李鸿超, 1986) (图 5) 中，棕色的角闪石落入麻粒岩相范围；绿色的角闪石基本落入接近麻粒岩相区的角闪岩相范围，表明其形成温度较高。

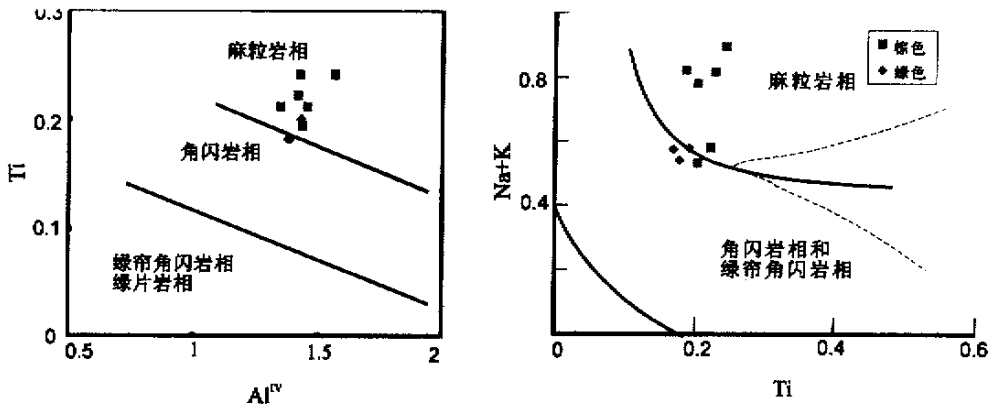


图 5 $Ti-Al^{IV}$ 图解和 $(Na+K)-Ti$ 图解 (据萨克路特金, 1968, 转引自靳是琴和李鸿超, 1986)

Fig. 5 $Ti-Al^{IV}$ and $(Na+K)-Ti$ diagrams for hornblende in the granulites (after Jin S Q and Li H C, 1986)

4 变质作用演化

4.1 变质温度、压力估算

相对于泥质岩而言，镁铁质麻粒岩的矿物组合比较简单，各个矿物皆为多个端元固溶体。目前，虽已建立了许多热力学模型来讨论镁铁质麻粒岩的变质温压条件，但由于多个端元矿物混合的热力学效应较复杂因而不能保证所有情况下获得准确的热力学参数 (郭敬辉等, 1998)。因此，主要利用热力学参数进行温压计算的方法有很大的局限性 (如 TWQ 方法, Berman, 1991)。此外，由于矿物相对少，所以矿物成因格子方法也很难得到满意的效果。与麻粒岩有关的地质温压计很多，而且不同学者依据不同标定条件对同一个矿物对或矿物组合中的反应又提出了不同的公式。如石榴石-单斜辉石之间的 $Fe-Mg$ 交换温度计就多达十多种 (如 Ellis & Green, 1979; Ganguly, 1979; Powell, 1985; Krogh, 1988; Patison & Newton, 1989)。本文主要选择了那些经过实验资料校正的矿物温压计，虽仍有不足之处，但是相对可靠和可行。根据格罗夫山含石榴石镁铁质麻粒岩的变质矿物组合，

可以分为三个阶段的变质作用，下面将分别讨论它们的变质温压条件。

M_1 ：利用 Grt_c-Cpx_{in} 矿物对之间的 $Fe-Mg$ 交换温度计得到 M_1 的变质温度在 800 C 以上， $Grt_c-Cpx_{in}-Pl_{in}-Qtz$ 压力计得到变质压力在 0.882~0.969GPa，平均为 0.93GPa (表 2)。由于早期矿物组合保留较少，因此仅仅得到非常有限的宝贵的数据。

M_2 ：相对 M_1 而言， M_2 的温压数据就丰富得多。显示平衡共生结构的矿物组合即为该期产物。利用 Grt_r-Opx 、 Grt_r-Cpx 、 $Cpx-Opx$ 及 $Hbl-Pl$ 等温度计得到的温度多在 733~850 C 之间，利用 $Grt_r-Cpx-Pl-Qtz$ 、 $Grt_r-Cpx-Pl-Opx$ 及 $Grt-Opx$ 压力计得到压力在 0.601~0.699GPa，平均为 0.65GPa。

M_3 ：根据 $Ti-Al^{IV}$ 图解和 $(Na+K)-Ti$ 图解 (图 5)， M_3 组合的 (绿色) 角闪石的形成温度在高角闪岩相。在多类火成岩和变质岩中，角闪石常是组成岩石的基本矿物，特别在角闪岩相变质岩中是经常出现的矿物。实验研究合成角闪石的温压范围为 0.1~2.3GPa 和 400~1150 C。因此，无论在地质温度计还是在地质压力计方面，角闪石都是一个可能的指示矿物。然而，角闪石成分的复杂性阻碍了它的精确的热动力

表2 格罗夫山镁铁质麻粒岩的变质温压估算

Table 2 P - T of mafic granulites from Grove Mountains

M ₁ 温压估算								
S7107-1 的温度	Gr _t c-Cpx _{in}	Ellis & Green, 1979	Ganguly, 1979	Powell, 1985	Krogh, 1988	Patison & Newton, 1989		
lnKd=1.729	P=1.0GPa	814 C	874 C	798 C	789 C	781 C		
lnKd=1.729	P=0.8GPa	808 C	870 C	792 C	783 C	770 C		
S7107-1 的压力	Gr _t c-Cpx _{in} -Pl _{in} -Qtz		lnKd		$P(T=800\text{ C})$			
	Powell & Holland, 1988		8.452		0.912 GPa			
	Eckert <i>et al.</i> , 1991		-2.940		0.969 GPa			
M ₂ 温压估算								
样品号	温压计		lnKd ($P=0.7\text{GPa}$)		温度/压力			
S7107-1	Gr _t -Opx ₁		Dahl, 1980		1.240			
	Gr _t -Opx ₂				1.209			
	Gr _t -Cpx		Ganguly, 1979		1.809			
	Cpx-Opx ₁				-1.564			
S7107-3	Cpx-Opx ₂		Wood & Banno, 1973		-1.613			
	Cpx-Opx ₁				-1.696			
Cpx-Opx ₂		-1.748						
Cpx-Opx		-1.394						
Cpx-Opx ₁		-1.596						
Cpx-Opx ₂		-1.602						
Cpx-Opx		-1.709						
Cpx-Opx		-0.654						
Gr _t -Opx		Harley, 1984			0.936			
					734			
S7107-3	Hbl-Pl		Blundy & Holland, 1990		759			
S9108-1					-1.122		815	
S9108-2					-0.205		819	
S7606					-0.221		821	
Z004					-0.129		733	
					-0.132		785	
S7107-1	Gr _t -Cpx-Pl ₁ -Qtz		Perkins & Newton, 1981		$-3.300(T=800\text{ C})$			
	Gr _t -Cpx-Pl ₂ -Qtz		Newton & Perkins, 1982		-3.215			
	Gr _t -Cpx-Pl ₁ -Opx ₁		Paria <i>et al.</i> , 1988		lnKd-Mg=2.194			
	Gr _t -Cpx-Pl ₂ -Opx ₂				lnKd-Mg=2.059			
S 9606	Gr _t -Opx		Nickel & Green, 1985		$(T=750\text{ C})$			
			Brey & Kohler, 1990		2.452			
M ₃ 压力估算								
样品号	Hammarstorm & Zen, 1986		Hollister <i>et al.</i> , 1987		Johnson & Rutherford, 1988			
S7107-1-1	0.575GPa		0.609		0.468			
S7107-1-2	0.578		0.611		0.469			
S7107-3	0.571		0.604		0.464			

学估算。Hammarstorm and Zen (1986)、Hollister *et al.*

(1987)、Johnson and Rutherford (1988)提出了经验的角闪石地质压力计,利用角闪石中的 Al 含量来估算压力,分别为 $P(\text{kb})=5.03\text{Al}^{\text{Tot}}-3.92$, $P=5.64\text{Al}^{\text{Tot}}-4.76$, $P=4.28\text{Al}^{\text{Tot}}-3.54$ 。本文利用上述压力计来估算 M₃ 的压力条件,得到 0.464~0.611GPa。

4.2 变质作用 PT 轨迹

根据前述资料,东南极格罗夫山镁铁质麻粒岩的 PT 轨迹如图(图6)。M₁ 的矿物组合以石榴石变斑晶核部成分和其内部的包裹体(斜长石+单斜辉石+石英)为特征,温压条件为:0.93GPa 和 $>800\text{ C}$ 。

M_2 的矿物组合以石榴石边部成分及围绕其的矿物(斜方辉石+斜长石+单斜辉石+角闪石(棕色)+钛铁矿)为代表,温度为 733~850°C,压力为 0.65GPa。

M_3 的矿物组合以围绕辉石的角闪石(绿色)为代表,压力为 0.46~0.61GPa,角闪岩相变质。

从 PT 轨迹图上可见,格罗夫山镁铁质麻粒岩变质作用演化的早期阶段(从 M_1 到 M_2)具有较陡的降压过程,具有 0.2~0.3GPa 的压力降,而温度为近等温或略有升高;后期阶段(从 M_2 到 M_3)为相对平缓的降压冷却。整个反应过程为顺时针 PT 演化轨迹,具有近等温降压(ITD)的演化趋势,这种轨迹与造山带型 PT 轨迹相同(England & Thompson, 1984),推测可能与格罗夫山造山带在泛非期发生的碰撞所导致的地壳增厚和随后的剥蚀抬升及构造减薄有关。

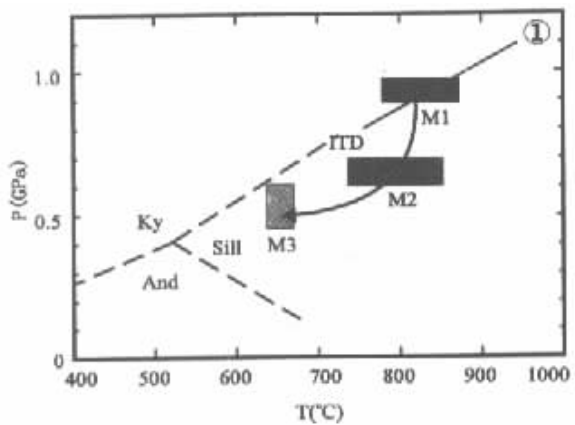


图 6 东南极格罗夫山镁铁质麻粒岩变质作用 PT 轨迹
铝硅酸盐稳定区的资料引自 Salje (1986)。图中曲线①为 Alm 开始出现;由石英拉斑玄武岩形成石榴麻粒岩 $P-T$ 低限(Green and Ringwood, 1967)

Fig. 6 Metamorphic $P-T$ paths of mafic granulites from Grove Mountain

4.3 讨论

石榴镁铁质麻粒岩的石榴石变斑晶周围出现 $Pl+Opx+Hbl$ 后成合晶冠状体的现象已有很多报道,如国内的恒山地区(王仁民等,1991),国外的东南极的 Sostrene 岛(Thost *et al.*, 1991)、Rauer 群岛(Harley, 1988)和斯里兰卡(Sandiford *et al.*, 1988)等地。对于这种形成在含石英的镁铁质麻粒岩中的冠状体通常用下面两个反应来解释: $Grt+Qtz=Pl+Opx$, $Grt+Cpx+Qtz=Pl+Opx$ (Harley, 1989)。本文描述的从 M_1 到 M_2 的过程也可以用上述两个反应来解释。在基性岩中,石英不能以独立矿物存在,Harley(1988, 1989)认为,相邻长英质片麻岩中的流体对基性岩的渗透可使硅活度增强而满足以上反应。 $Grt+Qtz=Pl+Opx$, 普遍被认为代表减压过程,并反映了顺时针演化的 $P-T$ 轨迹(Harley, 1988),在本文中,从 M_1 到 M_2 即为近等温减压过程。

南极 Napier 杂岩的单斜辉石和斜方辉石发育显著的出

熔结构,指示变质温度高于 980°C(Harley and Black, 1987; Frost and Chacko, 1989);张建新等(2001)在研究柴达木北缘基性麻粒岩时指出,单斜辉石中具有针状的斜方辉石出熔片晶代表了高温条件下的出熔结构(720~925°C);Liu *et al.* (2002)在研究同区的镁铁质麻粒岩中,根据出熔辉石成分得到了约 850°C 的峰期变质温度。本文的镁铁质麻粒岩中的单斜辉石也明显出熔了条纹状斜方辉石,这是否也暗示了该区镁铁质麻粒岩也经历了高温作用。

Liu *et al.* (2001)在研究该区的样品后指出,根据含石榴石片麻岩中的 $Grt-Opx$ 温度计显示变质峰期温度为 780 ± 50 °C,根据与石榴石共生的斜方辉石中的 Al 的可溶性得到压力为 0.55~0.68GPa。该温压条件与本文的 M_2 温压条件比较接近。

5 讨论与结论

5.1 地质事件与变质作用

在拉斯曼丘陵,一般认为在 1000Ma 左右的格林威尔事件经历了低压麻粒岩相变质作用,其峰期温压条件为 0.45 GPa 和 750°C,以后发生近等温降压(0.05~0.1GPa)的绿片岩相叠加变质,与发生在 500Ma 左右的泛非事件有关(Sheraton *et al.*, 1984; Black *et al.*, 1987; Stüwe and Powell, 1989)。近年来根据详细的变质变形及年代学数据研究表明,该区主要有早期残留的麻粒岩相变质作用(1000Ma)和一系列后期的角闪岩相-麻粒岩相变质作用(500Ma)(Dirks *et al.*, 1993),并提出峰期低压麻粒岩相变质事件形成于 500Ma 而不是 1000Ma(Zhao *et al.*, 1992, 1995; Ren *et al.*, 1992; 赵越等,1993; Dirks and Wilson, 1995; Hensen and Zhou, 1995),而且 500Ma 事件以低中压变质作用为特征并具有顺时针的 PT 演化轨迹(Ren *et al.*, 1992; Carson *et al.*, 1995)。

然而,最近在拉斯曼丘陵识别出一批早期中压(甚至高压)麻粒岩相构造变质事件。Carson *et al.* (1995)报道了具有 0.7GPa 和 780°C 的峰期变质条件(M_2);王彦斌等(1994)报道了早期中压麻粒岩相变质条件为 0.63 ± 0.05 GPa 和 747 ± 48 °C;Ren *et al.* (1992)则推测早期(M_1)为高压变质作用,具有 0.9GPa 和 850°C 的峰期变质温压条件;Tong and Liu (1997)和全来喜等(1997)报道了早期 M_1 更高的峰期变质条件 0.95GPa 和 870°C。此外,最近有报道该区经历了复杂的多期构造变质演化历史,至少由两个无关的主要构造热事件(即 1000Ma 和 500Ma)组成,进一步的构造变形分析识别出至少四期变形作用,其中 D_2 代表了早期的具有 0.7GPa 和 780°C 的中压麻粒岩相变质事件,而 D_3 - D_4 代表了具有 0.4~0.5GPa 和 750°C 的低压麻粒岩相变质事件及其后的减压,而更早期的 D_1 构造则代表了残留的可能形成于 1000Ma 期间的事件(Dirks *et al.*, 1993; Carson *et al.*, 1995)。

Thost *et al.* (1991)在研究普里兹湾 Sostrene 岛(拉斯

曼丘陵以西 25km) 含石榴石镁铁质麻粒岩时, 从石榴石残留体得到了更高的峰期温压条件 (M_1): 1.0GPa 和 980°C (Grt-Opx-Cpx-Hbl), 峰期后的变质事件 (M_2) 的温压条件为: 0.7GPa 和 850°C, 并且认为该较低的温压条件可能与影响广泛的 1100Ma 的变质事件有关联, 而上述 M_1 的高温高压可能与太古代的高级变质事件有关 (Thost *et al.*, 1991)。Dirks and Hand (1995) 认为 Sostrene 岛的石榴石-斜方辉石矿物对计算得到的 P - T 条件 (1.0GPa 和 980°C) 反应的是峰期 (D_2) 的变质条件, 并且根据区域地质认为 D_2 的挤压作用发生在 1000Ma, 得到的峰期变质的石榴石的 Sm-Nd 年龄为 990Ma 也被认为代表了早期 1000Ma 事件的残留 (Hensen and Zhou, 1995)。

所有上述表明, 在拉斯曼丘陵及其附近地区 500Ma 是一个重要的构造热事件, 同时也证实了 1000Ma 事件在该区的存在。Liu *et al.* (2001) 认为格罗夫山只存在影响整个东南极地盾的泛非期的中压 M_1 变质作用 (530Ma), 而降压的 M_2 事件没有影响该区。而本文通过对含石榴石镁铁质麻粒岩变质作用演化的研究得到了从 M_1 到 M_2 到 M_3 的不同的温压条件, 这三期变质温压条件反映的是互不相干的变质事件, 至于 M_2 是否代表泛非事件, M_1 是否代表了早期格林威尔事件的残留, 还是同一变质期的不同阶段, 还需要更加详细的包括年代学的后续工作。

根据本文计算得到的温压数据, 格罗夫山含石榴石镁铁质麻粒岩变质条件大致可以与 Sostrene 岛对比; 而斜方辉石出熔体经常是高温麻粒岩的特征, 因此 800°C 只是反应了 M_2 再平衡的温度, 而 M_1 的真正的温度可能高达 950~1000°C, 而且压力则可能等于或者超过 1.0GPa (全来喜, 个人通讯)。

5.2 PT 轨迹

降压变质反应结构在整个东南极晚元古代麻粒岩中很普遍, 并且已有大量详细的报道 (Ellis, 1983; Harley, 1988; Harley and Hensen, 1990; Nichols and Berry, 1991; Thost *et al.*, 1991; Asami *et al.*, 1992; Dirks and Hand, 1995)。在东南极观察到的降压结构通常与顺时针的 P - T 轨迹有关 (Harley, 1988; Stüwe and Powell, 1989; Harley and Hensen, 1990; Dirks and Hand, 1995), 并且根据与从理想化的地球物理模式演绎而来的 P - T - t 曲线对比而作了构造解释 (England and Thompson, 1984; Thompson and England, 1984; Harley, 1989; Sandiford and Powell, 1991)。格罗夫山镁铁质麻粒岩的整个反应过程为近等温降压 (ITD) 的顺时针 PT 演化轨迹, 这与普遍发育在整个东南极晚元古代麻粒岩中的降压结构和顺时针的 P - T 演化轨迹 (Ellis, 1983; Stüwe and Powell, 1989) 很一致, 这可以用增厚地壳的拉张坍塌和剥蚀作用的模式来解释 (Harley, 1989; Sandiford, 1989)。由此可见, 格罗夫山变质作用演化历史无论是温压条件还是顺时针 PT 演化轨迹与拉斯曼丘陵、甚至整个

东南极都有一定的相似性和可比性。

5.3 高压麻粒岩相变质作用

Green & Ringwood (1967) 在实验研究的基础上把石榴石+单斜辉石+斜长石+石英等矿物组合定义为高压麻粒岩, Opx+Pl=Grt+Cpx+Qtz 为中压麻粒岩向高压麻粒岩转变的反应; Harley (1989) 估计全世界约有四分之一的麻粒岩相当于高压麻粒岩, 即变质温压条件分别为 800°C 时, 压力超过 0.9GPa。近来, 国内对华北高压麻粒岩也有不少报道 (王仁民等, 1991; 翟明国等, 1992, 1998; 李江海等, 1998; 郭敬辉等, 1999; 刘福来等, 2002), 成为一研究热点。

格罗夫山镁铁质麻粒岩的 M_1 的变质压力达 0.88~0.97GPa, 属高压麻粒岩范畴。此外, 作者判定该区岩石遭受高压变质作用并不是单纯依据温压计算结果, 还依据其早期高压矿物组合和成分、结构特征及反应历史。

石榴石镁铁质麻粒岩发育的冠状体结构与国内宣化的顺时针近等温减压型高压麻粒岩发育的“白眼圈”结构完全相同。再从成分上看, 该石榴石以高 Ca 为特征, 钙铝榴石分子在 18.8%~25.4% 之间, 平均为 22.34%, 这与 Faulhaber and Raith (1991) 在研究斯里兰卡高压麻粒岩后所指出的在有斜长石和石英存在的条件下, 高压麻粒岩中石榴石的钙铝榴石分子在 20% 以上完全符合, 是曾遭受过高压麻粒岩相变质的有力佐证。宣化大东沟的高压麻粒岩中的石榴石的钙铝榴石分子一般为 20%~23%, 最高达 40% (王仁民等, 1994); 华北克拉通桑干构造带中的高压麻粒岩的石榴石斑晶内部钙铝榴石含量高达 25%~28% (郭敬辉等, 1998); 胶东莱西高压基性麻粒岩中的石榴石的钙铝榴石含量为 20%~34% (刘文军等, 1998)。翟明国等 (1992, 1998) 和李江海等 (1998) 对华北克拉通的高压麻粒岩 (桑干-承德变质带) 的研究表明, 它们经历了 3 个变质作用阶段, 第一阶段为高压变质阶段, 以石榴石+单斜辉石+石英组合为特征, 第二阶段为麻粒岩相减压变质阶段, 以早期的石榴石和单斜辉石转变为斜方辉石、单斜辉石和斜长石组成的后成合晶为特征, 第三阶段为后期的交代作用。本区的矿物组合酷似华北克拉通高压麻粒岩的矿物组合, 而且在早期矿物组合中有原生斜长石出现。因此, 格罗夫山镁铁质麻粒岩可能为高压麻粒岩。华北克拉通高压麻粒岩是在大洋岛弧碰撞形成陆块时形成的 (翟明国, 1998), 那么格罗夫山的高压麻粒岩是否也有着与华北高压麻粒岩相似的演化历史呢? 这有待今后进一步研究。

5.4 冈瓦纳缝合带

镁铁质麻粒岩及与其共生的超镁铁质岩 (石榴斜长单斜辉石岩和超镁铁质麻粒岩) 可能共同组成与泛非期碰撞造山作用有关的构造混杂带。这样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, 也暗示了另一条与莫桑比克带

相当的泛非期缝合带,很可能是东、西冈瓦纳最终拼合的缝合线(俞良军等,2002;刘小汉等,2002)。

致谢 本文工作是在国家海洋局极地考察办公室 1998—2000 野外专项经费资助下完成的。在论文的修改过程中得到了李继亮研究员、王凯怡研究员、叶凯研究员和郭敬辉副研究员的指导和帮助,在此深表谢意。

References

- Asami M, Osanmi Y, Shiraishi K and Makimoto H. 1992. Metamorphic evolution of the Sor Rondane Mountains, East Antarctica. In: Yoshida Y. *et al.* (eds.). Recent Progress in Antarctic Earth Science. Tokyo: TERRAPUB, 7—15
- Berman R G. 1991. Thermobarometry using multi-equilibrium calculations: a new technique with petrologic applications. *Canadian Mineralogist*, 29: 833—855
- 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 and 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 and Kinny P D. 1992. Archaean Events in Antarctica. In: Yoshida Y. *et al.* (eds.). Recent Progress in Antarctic Earth Science. Tokyo: TERRAPUB, 1—6
- Brodie K H. 1995. The development of oriented symplectites during deformation. *J. Metamorphic Geol.*, 13: 499—508
- Carson C J, Dirks P H G M, Hand M, Sims J P and Wilson C J L. 1995. Compressional and extensional tectonics in low-medium pressure granulites from the Larsemann Hills, East Antarctica. *Geol. Mag.*, 132: 151—170
- 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. *Antarct. Sci.*, 5: 179—192
- Dirks P H G M, Hoek J D, Wilson C J L and 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
- 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 and Hand M. 1995. Clarifying temperature-pressure paths via structures in granulite from the Bolingen Islands, Antarctica. *Austral. J. Earth Sci.*, 42: 157—172.
- Ellis D J and Green D H. 1979. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 71: 13—22
- Ellis D J. 1983. The Napier and Rayner complexes of Enderby Land, Antarctica: Contrasting styles of metamorphism and tectonism. In: Oliver R L *et al.* (eds.). Antarctic Earth Science, Australian Academy of Science, Canberra, 20—24
- England P C and Thompson A B. 1984. Pressure-temperature-time path of regional metamorphism. I. Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust. *J. Petrol.*, 25: 894—928
- Faulhaber S and Raith M. 1991. Geothermometry and Geobarometry of high-grade rocks: a case study on garnet-pyroxene granulites in southern Sri Lanka. *Mineral. Mag.*, 55: 33—56
- Frost B R and Chacko T. 1989. The granulite uncertainty principle: limitations on thermobarometry in granulites. *J. Geology*, 97: 435—450
- Ganguly J. 1979. Garnet and clinopyroxene solid solutions, and geothermometry based on Fe-Mg distribution coefficient. *Geochim. Cosmoch. Acta*, 43: 1021—1029
- Green D H and Ringwood A E. 1967. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. *Geochim. Cosmoch. Acta*, 31: 767—833
- Grew E S 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 Res.*, 33: 123—137
- Guo Jinghui, Zhai Mingguo, Li Yonggang and Yan Yuehua. 1998. Contrasting metamorphic *P-T* paths of Archaean high-pressure granulites from the North China Craton: metamorphism and tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 430—448 (in Chinese with English abstract)
- Guo Jinghui, Zhai Mingguo, Li Yonggang and Li Jianghai. 1999. Metamorphism, *P-T* paths and tectonic significance of garnet amphibolite and granulite from Hengshan, North China Craton. *Scientia Geologica Sinica*, 34(3): 311—325 (in Chinese with English abstract)
- Hammarstorm J M and Zen E-an. 1986. Aluminium in hornblende: an empirical geobarometer. *Am. Mineral.*, 71: 1297—1313
- Harley S L and Black L P. 1987. The Archaean geological evolution of Enderby land, East Antarctica. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 27: 285—296
- 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—1095
- Harley S L. 1989. The origins of granulites: a metamorphic perspective. *Geol. Mag.*, 126(3): 215—247
- Harley S L and Hensen R J. 1990. Archaean and Proterozoic high-grade terranes of East Antarctica (40—80°E): a case study of diversity in granulite facies metamorphism. In: Ashworth J R and Brown M (eds.). High-temperature Metamorphism and Crustal Anatectesis. London, Unwon Hyman, 320—370

- Harley S L, Snape I and 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
- Hensen B J and Zhou B. 1995. A Pan-African granulite facies metamorphic episode in Prydz Bay, Antarctica: evidence from Sm-Nd garnet dating. *Austral. J. Earth Sci.*, 42: 249-258
- Hollister L S *et al.* 1987. Confirmation of the empirical correlation of aluminium in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *Am. Mineral.*, 72: 231-239
- Jin Shiqin and Li Hongchao. 1986. The generality of genetic mineralogy (The second volume). Changchun: Jilin University Press, 1-318 (in Chinese)
- Johnson M C and Rutherford M J. 1988. Experimental calibration of an Aluminum-in-Hornblende geobarometer applicable to calc-alkaline rocks. *EOS.*, 69: 1511
- 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 and Sheraton J W. 1997. Zircon U-Pb ages and geochemistry of igneous and metamorphic rocks in the northern Prince Charles Mountains, Antarctica. *J. Aust. Geol. Geophys.*, 16(5): 637-654
- Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. *Am. Mineral.*, 68: 277-279
- Krogh E J. 1988. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer — a reinterpretation of existing experimental data. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 99: 44-48
- Leake B E. 1997. Nomenclature of amphiboles: report of subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. *Am. Mineral.*, 82: 1019-1037
- Li Jianghai, Zhai Mingguo, Li Yonggang and Zhang Yigang. 1998. The discovery of Neoproterozoic high-pressure granulites in Lianping-Chengde area, Northern Hebei, and their tectono-geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 34-41 (in Chinese with English abstract)
- Liu Fulai, Shen Qihan, Zhao Ziran, Geng Yuansheng and Katayama I. 2002. Identification of high-pressure mineral assemblages in garnet mafic granulites, Northwestern Hebei Province: evidence from mineral inclusions in zircons. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 209-216 (in Chinese with English abstract)
- Liu Wenjun, Zhai Mingguo and Li Yonggang. 1998. Metamorphism of the high-pressure basic granulites in laixi, Eastern Shandong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 449-459 (in Chinese with English abstract)
- Liu X C, Zhao Y and Liu X H. 2001. The Pan-African granulite facies metamorphism and syn-tectonic magmatism in the Grove Mountains, East Antarctica. *Abstract Vol. of EUGXI, LS08*, 379
- Liu X C, Zhao Z, Zhao Y, Cheb J and Liu X H. 2002. Pyroxene exsolution in mafic granulites from the Grove Mountains, East Antarctica: constraints on the Pan-African metamorphic conditions. *Eur. J. Mineral.* (Accepted)
- Liu Xiaohan, Zhao Yue, Liu Xiaochun and Yu Liangjun. 2002. Geology of the Grove Mountains in East Antarctica — new evidence for the final suture of Gondwana Land. *Science in China (Series D)*, 32(6): 457-468 (in Chinese)
- Lovering J F and White A J R. 1969. Granulite and eclogitic inclusions from basic pipes at Delegate, Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 21: 9-52
- Moores E M. 1991. Southwest U. S. — East Antarctica (SWEAT) connection: a hypothesis. *Geology*, 19: 425-428
- Nichols G T and Berry R F. 1991. A decompressional *P-T* path. Reinbolt Hills, East Antarctica. *J. Metamorphic Geol.*, 9: 257-266
- Patison D R M and Newton R C. 1989. Reversed experimental calibration of the garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 101: 87-103
- Powell R. 1985. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer / geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited. *J. Metamorphic Geol.*, 3: 231-243
- Ren L, Y Zhao, X Liu and T Chen. 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, 145-155
- Salje E. 1986. Heat capacities and entropies of andalusite and sillimanite: The influence of fibrolitisation on the phase diagram of the Al_2SiO_5 polymorphs. *Am. Mineral.*, 71: 1366-1371
- Sandiford M, Powell R, Martin F S and Perera L R K. 1988. Thermal and baric evolution of garnet granulites from Sri Lanka. *J. Metamor. Geol.*, 6: 273-304
- Sandiford M and Powell R. 1991. Isostatic and thermal constraints on the evolution of high temperature-low pressure metamorphic terrains in convergent orogens. *J. Metamorphic Geol.*, 9: 333-340
- Sheraton J W, Black LP and McCulloch MT. 1984. Regional geochemical and isotopic characteristics of high-grade metamorphism 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. *J. Aust. Geol. Geophys.*, 16: 345-370
- 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
- Thompson A B and England P C. 1984. Pressure-temperature-time path of regional metamorphism. II. Their inference and inter-

- pretation using mineral assemblages in metamorphic rocks. *J. Petrol.*, 25: 928—955
- Thost D E, Hensen B J and Motoyoshi Y. 1991. Two-stage decompression in garnet-bearing mafic granulites from Sostrene Island, Prydz Bay, East Antarctica. *J. Metamorphic. Geol.*, 9: 245—256
- 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, Mgsadison, 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*. Oxford, Clarendon Press, 1—78
- Tong L and Liu X. 1997. The prograde metamorphism of Late Proterozoic high-grade metamorphic terrain of the Larsemann Hills, East Antarctica: Evidence for an anticlockwise *P-T* path. The Antarctic region: geological evolution and processes. *Terra Antarctic Publication*, 105—114
- Tong Laixi, Liu Xiaohan, Zhang Liansheng, Chen Haihong, Ren Liudong, Wang Yanbin and Zhao Yue. 1997. Characteristics of the early remnant mineral associations in granulite-facies rocks from the Larsemann Hills, East Antarctica and their metamorphic conditions. *Acta Petrologica Sinica*, 13(2): 127—138 (in Chinese with English abstract)
- Wang Renmin, Chen Zhenzhen and Chen Fei. 1991. Grey tonalitic gneiss and high-pressure granulite inclusions in Hengshan, Shanxi Province, and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 11(4): 36—45 (in Chinese with English abstract)
- Wang Renming, Lai Xingyun, Dong Weidong, Ma Jun and Tang Bin. 1994. Some evidence of the late Archaean collision zone in northwest Hebei Province. In: Qian Xiangling and Wang Renmin (eds.). *Geological evolution of the granulite terrain in north part of the North China Craton*. Beijing: Seismological Press, 7—20 (in Chinese with English abstract)
- Wang Yanbin, Zhap Yue, Ren Liudong, Chen Tingyu, Liu Xiaohan and Tong Laixin. 1994. Geochemical characteristics and medium pressure granulite facies metamorphism of mafic granulite rocks from the Larsemann Hills, East Antarctica. *Antarctica Research (Chinese Edition)*, 6(3): 1—11 (in Chinese with English abstract)
- Yu L J, Liu X H, Zhao Y and 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
- Yu Liangjun, Liu Xiaohan, Liu Xiaochun, Zhao Yue, Fang Aimin and Ju Yitai. 2002. Geochemical characteristics of the metabasic volcanic rocks in the Grove Mountains, East Antarctica. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 91—99 (in Chinese with English abstract)
- Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Yan Yuehua, Li Yonggang and Zhang Wenhua. 1992. The discovery and preliminary study of high-pressure basic granulite of Archaean from North China. *Science in China(Series B)*, 22(12): 1325—1330 (in Chinese)
- Zhai Mingguo. 1998. Three important high-pressure and high-temperature metamorphic zones in China and their geotectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 419—429 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Jianxin, Wan Yusheng, Xu Zhiqin and Meng Fancong. 2001. Discovery of basic granulite and its formation age in Delingha area, North Qaidam Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 453—458 (in Chinese with English abstract)
- 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)
- 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, Liu X C, Fanning C M and Liu X H. 2000. The Grove Mountains, a segment of a Pan-African orogenic belt in East Antarctica. *Abstract Vol. of 31th I. G. C.*, 9—7 section. Rio de Janeiro, Brazil (CD)

附中文参考文献

- 郭敬辉, 瞿明国, 李永刚, 李江海. 1999. 恒山西段石榴石角闪岩和麻粒岩的变质作用、*PT* 轨迹及构造意义. *地质科学*, 34(3): 311—325
- 郭敬辉, 瞿明国, 李永刚, 阎月华. 1998. 华北太古宙高压基性麻粒岩的两类 *PT* 轨迹及其构造意义: 矿物化学和变质作用研究. *岩石学报*, 14(4): 430—448
- 李江海, 瞿明国, 李永刚, 张毅刚. 1998. 冀北滦平-承德一带晚太古宙高压麻粒岩的发现及其构造地质意义. *岩石学报*, 14(1): 34—41
- 刘文军, 瞿明国, 李永刚. 1998. 胶东莱西地区高压基性麻粒岩的变质作用. *岩石学报*, 14(4): 449—459
- 刘福来, 沈其韩, 赵子然, 耿元生, Katayama I. 2002. 冀西北石榴角闪二辉麻粒岩早期高压变质矿物组合的确定及其形成的温压条件——来自锆石中矿物包裹体的信息. *地质学报*, 76(2): 209—216
- 刘小汉, 赵越, 刘晓春, 俞良军. 2002. 东南极格罗夫山地质特征—冈瓦纳最终缝合带的新证据. *中国科学(D)*, 32(6): 457—468
- 靳是琴和李鸿超. 1986. *成因矿物学概论(下册)*. 长春: 吉林大学出版社, 1—318
- 全来喜, 刘小汉, 张连生, 陈海泓, 任留东, 王彦斌, 赵越. 1997. 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. *岩石学报*, 13(2): 127—138

- 王仁民, 陈珍珍, 陈飞. 1991. 恒山灰色片麻岩和高压麻粒岩包体及其地质意义. 岩石学报, 11(4): 36-45
- 王仁民, 赖兴运, 董卫东, 马军, 唐滨. 1994. 冀西北晚太古宙碰撞带的一些证据. 见: 钱祥麟, 王仁民主编. 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 7-20
- 王彦斌, 赵越, 任留东, 陈廷愚, 刘小汉, 仝来喜. 1994. 东南极拉斯曼丘陵镁铁质麻粒岩的地球化学特征及其中压变质作用. 南极研究(中文版), 6(3): 1-11
- 俞良军, 刘小汉, 刘晓春, 赵越, 方爱民, 据宜太. 2002. 东南极格罗夫山变质基性岩地球化学特征. 岩石学报, 18(1): 91-99
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 李永刚, 张雯华. 1992. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及初步研究. 中国科学(B), 22(12): 1325-1330
- 翟明国. 1998. 中国三条高温高压变质带及其地质意义. 岩石学报, 14(4): 419-429
- 张建新, 万渝生, 许志琴, 杨经绥, 孟繁聪. 2001. 柴达木北缘德令哈地区基性麻粒岩的发现及其形成时代. 岩石学报, 17(3): 453-458
- 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