第 27 卷第 5 期
2021 年 10 月

地 质 力 学 学 报
JOURNAL OF GEOMECHANICS

Vol. 27 No. 5
Oct. 2021

DOI：10. 12090/j. issn. 1006-6616. 2021. 27. 05. 060

文章编号：1006-6616（2021）05-0736-11

东南极拉斯曼丘陵长英质片麻岩的深熔作用与铁钛氧化物的聚集机制

任留东
REN Liudong

中国地质科学院地质研究所，北京 100037
Institute of Geology, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*

REN L D, 2021. Anatexis and enrichment mechanism of the Fe-Ti oxide minerals in the quartzofeldspathic gneisses from the Larsemann Hills, East Antarctica [J]. Journal of Geomechanics, 27 (5): 736-746. DOI: 10. 12090/j. issn. 1006-6616. 2021. 27. 05. 060

Abstract: Fe-Ti oxide minerals can be locally aggregated or enriched in the quartzofeldspathic gneisses from the Larsemann Hills, East Antarctica. The enrichment is related to anatexis and subsequent high-grade metamorphism, not inherited from the protolith. The partial melting process was responsible for the residues or local enrichment of the inert Fe-Ti-Al elements and the migration of mobile components, and the volatiles were preferentially incorporated in the melt. In the water-deficient system, the local "melt" in anatexis crystallized to form the leucosomes without melt texture or minimum eutectic composition, suggesting the meta-melt feature, not real melt. The coarse leucosome or pegmatite occurred in anataxis as pre-granitic vein or body and had nothing to do with the late stage differentiation of the granitic magma. Together with the presence of the meta-melt, the substantial differentiation of the components resulted in solid residues and corresponding meta-melt phases, with the former enriched in Al, Fe elements and sillimanite, Fe-Ti oxide minerals occurred. On the contrary, the leucosomes with possible short distance migration of components were poor in Fe, Ti compositions, and seldom formed garnet and Fe-Ti oxides. The volatile-unsaturated anatexis was an essentially closed system and the total dehydration effect was not obvious. The presence of some typical minerals in high-grade metamorphism of the quartzofeldspathic gneisses, such as sillimanite, garnet, cordierite and spinel, was derived from component differentiation in partial melting of the rocks. However, the components migration was limited, and the evolving stages of metamorphism and differentiation could be preserved. Voluminous Fe-Ti oxides and sillimanite in the quartzofeldspathic gneisses suggest the possible local or differential uplifting of the area, the heterogeneity of deformation and accompanying components differentiation, corresponding to the reactivation of the earlier structures in the Pan-African event.

Key words: Fe-Ti oxides; anatexis; component differentiation; Pan-African event; Larsemann Hills

摘　要：东南极拉斯曼丘陵高级变质长英质岩石中铁钛氧化物的局部聚集与高级变质作用过程中的深熔作用有关，并非原岩富集这些组分。深熔作用造成惰性组分如铁钛氧化物滞留原地或略有聚集及活动性组分的迁移，而流体挥发组分优先聚集于熔体之中。当体系中水含量较低、处于不饱和状态时，深熔作用过程中形成局部"熔体"，其结晶所成的浅色体不具低共结组分，没有熔体结晶结构，不是真正的熔体，可能是（准）熔体。较粗粒的浅色体或伟晶岩也是与深熔作用有关的产物，其形成早于花岗岩脉或

基金项目：国家自然科学基金项目（41941004，41472172）
This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41941004, 41472172)
第一作者简介：任留东（1965—），男，博士，研究员，从事南极地质研究工作。E-mail：ldren@ cags. ac. cn
收稿日期：2021-06-30；**修回日期**：2021-08-25；**责任编辑**：范二平
引用格式：任留东，2021. 东南极拉斯曼丘陵长英质片麻岩的深熔作用与铁钛氧化物的聚集机制［J］. 地质力学学报，27（5）：736-746. DOI：10. 12090/j. issn. 1006-6616. 2021. 27. 05. 060

岩体，而与花岗质岩浆分异无关。伴随（准）熔体的出现，体系中组分的萃取、分异效果较为明显，即可造成组分分异，形成截然不同的异地、二相分异结构，分别形成固相残留物（组成可以不固定）和（准）熔体相。固相残留体中富铝、铁组分，形成矽线石和铁钛氧化物团块，其中少或无挥发分；与此对应，短距离迁移浅色体中往往贫铁钛组分，可见石榴子石、偶见铁钛氧化物矿物。这种挥发分不饱和状态下的深熔作用基本属于封闭体系，整体失水不显著，高级变质岩中的一些特征矿物如矽线石、石榴子石、堇青石、尖晶石的形成也与这种分异作用有关，但组分迁移范围有限，并可保存组分分异各阶段的产物。拉斯曼丘陵长英质岩系中大量铁钛氧化物和矽线石类矿物组合的形成，反映了临界状态下的局部或差异抬升，变形作用的非均匀性及相伴随的组分分异作用，很可能相当于早期格林维尔期构造的泛非期再活动。

关键词：铁钛氧化物；深熔作用；组分分异；泛非期构造；拉斯曼丘陵

中图分类号：P588.345　　**文献标识码：**A

在水分较为缺乏的高角闪岩相-麻粒岩相变质条件下的深熔作用（亦称部分熔融作用）中，大量出现浅色体条带或团块，往往与之相伴的是非均匀分布的铁钛氧化物（如磁铁矿、铁钛矿和赤铁矿等）、矽线石（偶尔伴随有尖晶石、刚玉等）（任留东等，2009），甚至堇青石（偶尔出现假蓝宝石）（仝来喜等，1996）等变质矿物的集中。由于这些岩石的成分较为特殊，人们往往根据变质作用的封闭体系或矿物的化学性质，反推这些岩石原岩本身富铁、富镁，如富镁泥质岩（Harley，2008；Grew et al.，2013）。对东南极拉斯曼丘陵地区——中国南极中山站所在地——变质岩研究发现，在高级变质作用条件下，由于强烈的深熔作用，体系很难保持组分的封闭性，会发生一系列的组分调整，本次研究将重点讨论高级变质作用中这些铁钛氧化物的形成过程。

1　区域地质

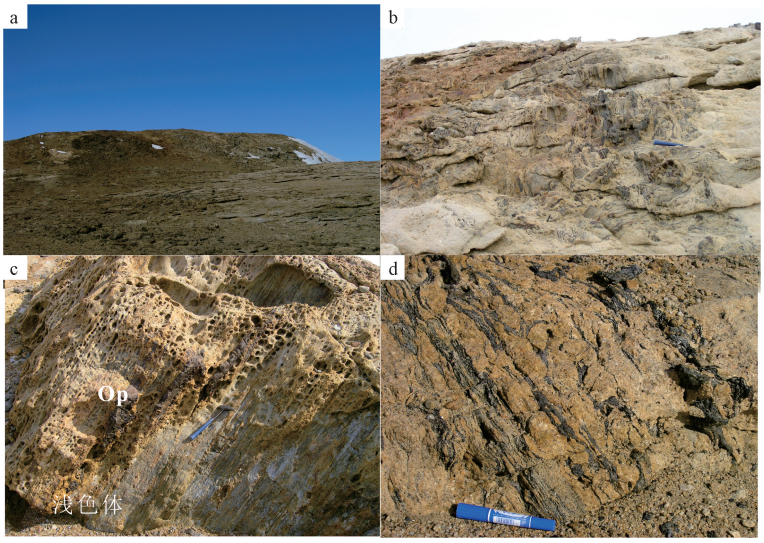
拉斯曼丘陵位于东南极普里兹湾地区，该区主要由两套岩类组成，一套是复合片麻岩杂岩，包括镁铁质麻粒岩和长英质正片麻岩；另一套是变沉积岩序列，主要产出含石墨的矽线石榴片麻岩、长英质片麻岩以及极少量的钙硅酸盐岩，间夹（角闪）二辉麻粒岩、辉石黑云斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩和少量的花岗质片麻岩等（Stüwe et al.，1989）。变形作用分出 3 期，早期（D_1）由格林维尔期的地壳增厚而成，泛非期的压剪（D_2）和随后的伸展变形（D_3）造成了该区高应变带的形成（仝来喜等，2012），与 D_2 基本同时的变质峰期之后深熔作用强烈发育，并形成相当数量的伟晶岩脉、混合岩和含榴花岗岩，局部为正长花岗斑岩、二长花岗岩，与之有关的变质事件发生于泛非期（Ren et al.，1992；Zhao et al.，1992；Carson et al.，1996；Liu et al.，2013）。

2　铁钛氧化物的产状

拉斯曼丘陵的长英质片麻岩中常见富铁钛氧化物集合体，中国中山站区附近的进步花岗岩（正长花岗岩）西侧尤其丰富（图 1a）。铁钛氧化物集合体野外多呈深灰色、黑色，不规则、不均匀的透镜状或团块状（图 1b—1d），可大可小，自 1~2 cm 至数米均可见；富含磁铁矿、赤铁矿、铁钛矿等铁钛氧化物（表 1），可含有一定的矽线石、石榴子石和堇青石及伟晶岩（图 2）。富铁钛氧化物片麻岩中石榴子石往往较少甚至缺失。

含铁钛氧化物的岩石多呈非均一结构，其产出可伴随 Sil-Grt-Mgt-Crd 透镜（图 3a—3c），常与富黑云母片麻理、伟晶岩或浅色体密切相伴（图 2a、2b，图 3d）。含榴浅色体及铁钛氧化物受控但不限于片麻理（图 2c—2e）。浅色体可呈近伟晶质的粗粒石英、长石，并伴随铁钛氧化物集合体（图 2a、2b、2e，图 3e、3f），一起呈雁列状排列（图 1c）。

野外可见铁钛氧化物由黑云（石英）斜长片麻岩转化而来（图 1c，图 2e），含矽线黑云片麻岩可以转化为浅色体或浅色岩石，在伟晶岩中可包裹早期不定向的 Sil、Spl 及 Sil±Op 细脉（沿片麻理方向），Sil-Bt 与 Op-Kfs（钾长石）-Qtz 脉可以分离，含榴伟晶岩脉中有矽线石的形成，出现于浅色体（脉）或伟晶岩的边部，表明矽线石可能是浅色体或伟晶岩的初期产物，铁钛氧化物见于



Op—不透明矿物

a—拉斯曼丘陵米洛半岛铁钛氧化物富集区；b—淡色花岗岩中铁钛氧化物不规则团块；c—雁列状排列铁钛氧化物和浅色体；d—浅色体中夹有铁钛氧化物

图 1 拉斯曼丘陵铁钛氧化物的野外宏观产状

Fig. 1 Mesoscopic occurrence of the Fe-Ti oxides in the Larsemann Hills

(a) Fe-Ti oxide minerals abundant in Mirror Peninsula, Larsemann Hills; (b) Irregular patches of Fe-Ti oxides within the leucocratic granite; (c) En echelon Fe-Ti oxides and leucosomes; (d) Fe-Ti oxide minerals interlayered with leucosomes

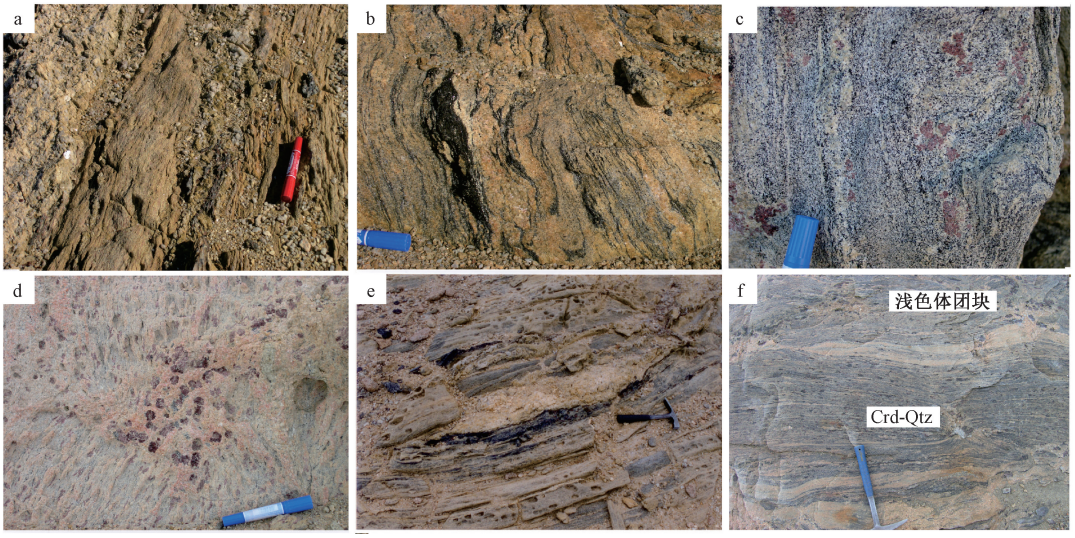
Op-opaque mineral

表 1 拉斯曼丘陵赤铁-钛铁矿及相关矿物的电子探针成分分析

Table 1 Microprobe composition of Fe-Ti oxides and related minerals in the Larsemann Hills

矿物成分/%	Sil	Mgt	Hem-Ilm	Ilm-Hem	Spr	Spl	Bt_1	Bt_2
SiO_2	35.81	0.02	0.02	0.02	10.84	0.03	37.91	38.27
TiO_2	0.01	0.03	45.63	18.48	0.03	0.01	4.36	4.40
Al_2O_3	63.11	0.10	0.00	0.02	64.41	62.61	14.75	14.94
Cr_2O_3	0.04	0.28	0.03	0.15	0.11	0.31	0.05	0.04
MgO	0.12	0.08	0.87	0.26	14.30	12.07	17.57	17.94
CaO	0	0	0	0	0	0	0	0
MnO	0	0	0.02	0	0.01	0	0.01	0
FeO	0.49	92.63	53.05	75.18	10.19	25.71	10.37	9.80
ZnO		0.005	0	0	0.027	0.068	0	0.017
Na_2O	0	0.04	0	0	0	0.01	0.12	0.11
K_2O	0	0	0	0	0	0	10.57	10.45
Total	100.54	93.18	99.62	94.09	99.92	100.83	95.70	95.96
O	5	4	3	3	20	4	11	11
Si	0.9741	0.0009	0.0005	0.0006	1.3092	0.0008	2.7754	2.7814
Ti	0.0002	0.0012	0.9001	0.4567	0.0029	0.0002	0.2402	0.2406
Al	2.0238	0.0060		0.0008	9.1689	1.9590	1.2729	1.2802
Cr	0.0043	0.0111	0.0004	0.0039	0.0102	0.0064	0.0031	0.0022
Fe^{3+}	0.0100							
Mg	0.0049	0.0061	0.0006	0.0128	2.5749	0.4777	1.9179	1.9441
Ca					0			
Mn			0.0005		0.0010		0.0004	
Fe^{2+}		3.9618	1.1635	2.0655	1.0291	0.5709	0.6353	0.5958
Zn		0.0002			0.0022	0.0013		0.0009
Na		0.0040			0	0.0005	0.0172	0.0157
K							0.9860	0.9671

注：电子探针 WDS（波谱仪）分析在中国地质科学院地质研究所电子探针室完成，仪器型号 JXA-8230，电压 15KV，电流 20nA，束斑直径 5 μm，标样为天然或合成的矿物和氧化物，主要氧化物的分析误差约为 1%。其中 Hem-Ilm、Ilm-Hem 为铁、钛氧化物混溶体，前者以赤铁矿（Hem）为主，后者以钛铁矿（Ilm）为主。矿物缩写：Sil—矽线石；Mgt—磁铁矿；Hem—赤铁矿；Ilm—钛铁矿；Spl—尖晶石；Bt—黑云母（Bt_1 和 Bt_2 分别为早期和晚期黑云母）；Spr—假蓝宝石



Crd—堇青石；Qtz—石英

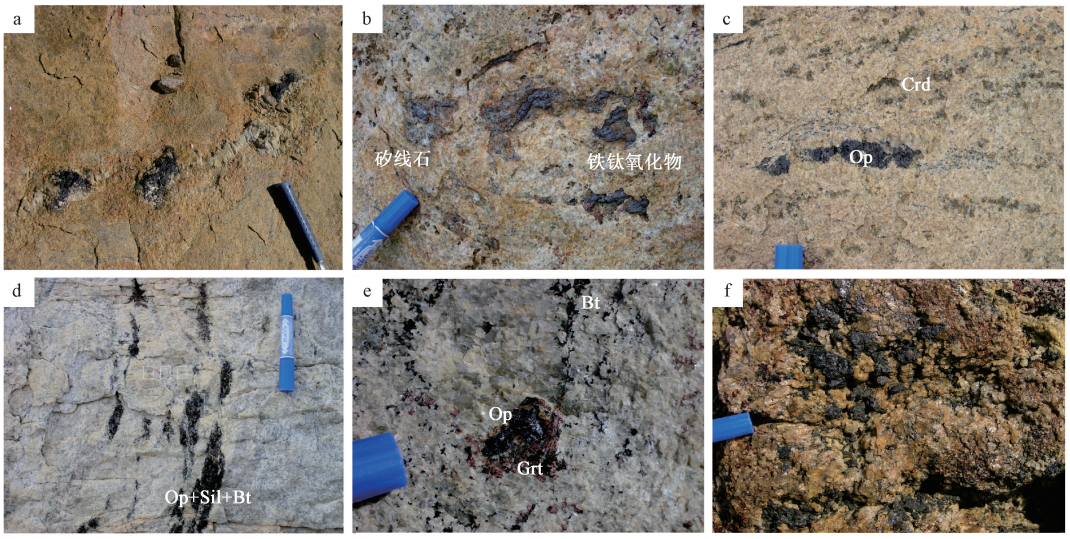
a—铁钛氧化物与伟晶岩相邻；b—铁钛氧化物-富黑云母条带与伟晶岩相邻；c—原地深熔形成含石榴子石的浅色体团块；d—深熔形成不规则含石榴子石的浅色体团块；e—透镜状伟晶岩一侧有铁钛氧化物；f—布丁状张裂处充填堇青石-石英，附近为不规则浅色体

图 2　拉斯曼丘陵与铁钛氧化物有关的岩石结构和矿物

Fig. 2　Minerals related to the Fe-Ti oxides in the Larsemann Hills

(a) Fe-Ti oxides with adjacent pegmatite; (b) Fe-Ti oxide and biotite-rich band with pegmatitic leucosome; (c) In situ anatexis with garnet-bearing leucosome patch; (d) Irregular garnet-bearing leucosome; (e) Fe-Ti oxide band with granitic lens; (f) Crd-Qtz emplaced between boudin fissure and nearby leucosome patch

Crd-cordierite; Qtz-quartz



Bt—黑云母；Grt—石榴子石；Sil—矽线石；其他矿物缩写同图 2

a—铁钛氧化物及矽线石、石英；b—铁钛氧化物及矽线石；c—与浅色体相伴的堇青石；d—浅色体中的铁钛氧化物、石榴子石和黑云母条带；e—铁钛氧化物及石榴子石；f—伟晶质铁钛氧化物及长石、石英

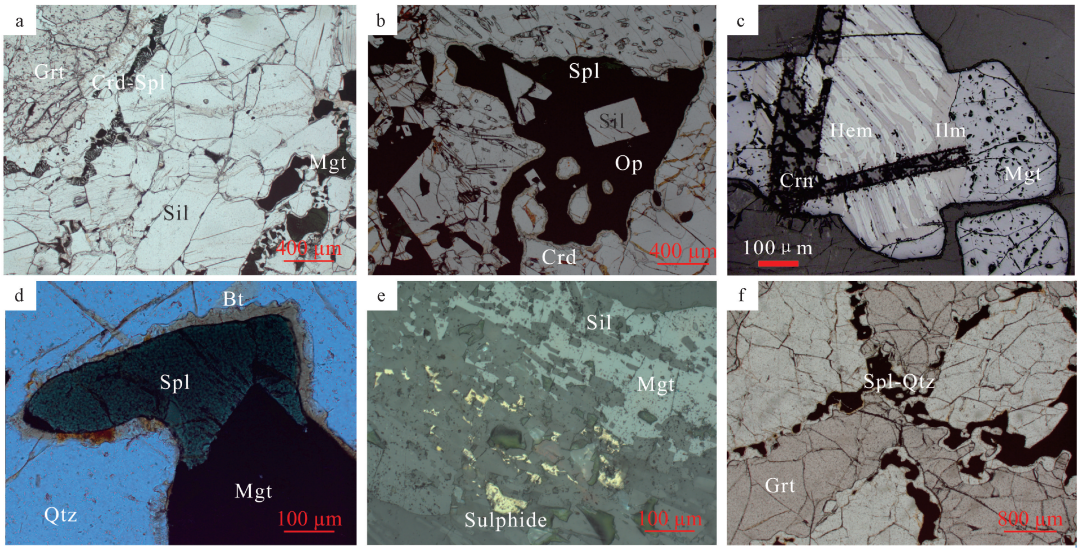
图 3　拉斯曼丘陵铁钛氧化物的露头产状

Fig. 3　Outcrops of the Fe-Ti oxides in the Larsemann Hills

(a) Fe-Ti oxides with sillimanite and quartz; (b) Fe-Ti oxides and sillimanite; (c) Leucosome and accompanying cordierite; (d) Fe-Ti oxides, garnet and biotite bands within leucosome; (e) Fe-Ti oxides and garnet; (f) Pegmatitic Fe-Ti oxides and feldspar, quartz

Bt-biotite; Grt-garnet; Sil-sillimanite; Abbreviations for other minerals are shown in Fig. 2

浅色体边部、中部（图 3e）；石榴子石主要形成于浅色体的中部（图 2c、2d，图 3e，图 4a），可能对应峰期变质，与之不同的是堇青石形成于（原地）边部或围岩混合花岗质片麻岩中（图 3c），从而有 Sil→Op→Grt→Peg（伟晶岩）→Crd 的形成顺序（图 3b、3e，图 4b）。



Spl—尖晶石；Crn—刚玉；Hem—赤铁矿；Ilm—钛铁矿；Mgt—磁铁矿；Sulphide—硫化物；其他矿物缩写同图 2，图 3

a—部分的矽线石转化为堇青石、尖晶石；b—矽线片麻岩中的尖晶石、堇青石；c—铁钛氧化物和刚玉；d—磁铁矿、尖晶石和黑云母的先后关系；e—与铁钛氧化物相伴的硫化物；f—石榴子石边缘转化为尖晶石、石英

图 4 与铁钛氧化物有关的显微结构

Fig. 4 Microscopic textures with Fe-Ti oxides

(a) Sillimanite partially transformed into cordierite and spinel; (b) Spinel and cordierite in the sillimanite gneiss; (c) Fe-Ti oxides and corundum; (d) The successive magnetite, spinel and biotite; (e) Sulphides accompanying the Fe-Ti oxides and sillimanite; (f) Garnet rim retrograded to spinel and quartz. a, b, d, f-plane polarized in transmitted light; c, e-plane polarized in reflection light. Spl-spinel; Crn-corundum; Hem-hematite; Ilm-ilmenite; Mgt-magnetite; Sulphide-sulfide; Abbreviations for other minerals are shown in Fig. 2 and Fig. 3

3 变质、深熔作用中的水分含量变化

拉斯曼丘陵高级变质岩系中深熔作用强烈发育。在水不饱和的深熔作用体系中，内部不同部位之间水含量有差别，即水分的空间转移，而这种转移可以是升温脱水，亦可有其他方式，即水在“熔体”和矿物之间的转换。深熔作用中，水和挥发分同为“熔体”的组成部分，且水可优先进入“熔体”（Thompson，1983；Vielzeuf and Holloway，1988）。因此，在水分含量总体较低的深熔作用过程中，水分基本被“熔体”吸收，使得体系中其他部位水分含量显著降低，这种差异性失水很大程度上属于物理脱水或渗透式失水，而体系整体失水并不明显，如在浅色体中既可有铁钛氧化物亦可有一定量的黑云母存在，局部甚至有富黑云母集合体（图 3d），并伴有石英、斜长石的分别聚集。含石榴子石的浅色体基本无黑云母，则可能属于化学脱水：体系升温过程中的脱水作用，主要伴随钾长石和石英的形成。不论何种方式，水迁移的同时结合并迁出一定量的硅质组分，形成近饱和的少量“熔体”，而剩余组分相对富 Al_2O_3 及其他铁钛组成，少部分残留形成 Al、Fe、Si 等铁钛氧化物、矽线石；硅质组分的迁出或“熔体”的萃取导致剩余（残留）组分硅不饱和，可出现刚玉等矿物（图 4c）。

体系不同部位经历了多次的水分迁出、迁入过程，从而有阶段性的矿物组合（Pl—斜长石；Opx—斜方辉石；Dis——一水硬铝石）：

Sil-Crn-Op→Bt-Pl-Qtz→Grt-Opx-Kfs→Crd-Spl→Sil±Dis-Bt

构造分异　第一次水化　干化　第二次水化（退变）

其中，第一次水化是构造调整过程中的局部富水，之后为早期的“干化”（相当于峰期变质），如石榴子石、斜方辉石形成；不同阶段的黑云母

结构、成分有所差别；晚期的水化形成一水硬铝石及黑云母。这些过程中，水在“熔体”和基质中的转换很可能以自由水的形式发生渗透式迁移，最终体现为含水矿物（如黑云母）的结晶。

拉斯曼丘陵长英质变质岩中矽线石的形成，是富含挥发分组分的溶液或“熔体”快速迁移、丢失挥发分的结果，此时处于深熔作用的初期，即（升温）脱水阶段。可能由于应力的作用，导致裂隙形成、“熔体”因压力突然降低导致失稳脱水，出现一些类似淬火结构的毛发状矽线石（fibrolite）集合体残留物，并于矽线石边缘或中部伴以铁钛氧化物（图 4b），即在矽线石形成的同时形成（镁）铁钛氧化物（磁铁矿-铁钛矿-赤铁矿±尖晶石±刚玉），之后才出现其他的镁铁质矿物（黑云母-石榴子石-堇青石）和长英质矿物（钾长石-斜长石-白云母-石英）等，大量的岩相结构证明，尽管石榴子石可能在进变质阶段开始结晶，但是其主要的形成阶段为变质峰期（Grt + Kfs ± Opx）的脱水阶段。

研究区堇青石的出现则意味着开始进入了降温阶段（仝来喜等，1997）。局部“熔体”结晶形成浅色体和局部脱水（图 2c、2d，图 3d），或熔体结晶过程中组分可局部富集，如 MgO（FeO）的集中形成堇青石，并释放出挥发分，造成挥发分回流和重新集中，形成黑云母，如堇青石旁的粗粒黑云母。尽管这里经历了多次局部脱水阶段，但整体上并没有明显的脱水过程，甚至开始了水化过程，如堇青石周边的类似水渍（?）结构（边缘块云母），反映了深熔作用晚期冷却、水分局部集中的现象。

黑云母的重新形成则代表了进一步降温过程中的水化晚期阶段，即第二次水化，属于降温冷却过程（Mgt→Bt+Qtz，Ilm→Bt），即金属氧化物集合体边缘出现黑云母等含水矿物，有时伴随矽线石（图 4d）。

4　关于深熔作用及“熔体”

拉斯曼丘陵长英质岩石中矿物的先后出现是变质、深熔不同阶段的产物，浅色体中相对粗粒、自形的石榴子石、偶尔半自形的斜长石，表明浅色体形成过程中有一定的自由空间，而不是纯固相结晶，可能相当于深熔作用中的转熔现象：石榴子石及一些铁钛氧化物（磁铁矿+铁钛矿±矽线石±石榴子石+堇青石）（图 3b、3e）属于转熔而成的包晶，类似熔体部分结晶形成浅色体，即铁钛氧化物的形成与无水深熔残余有关。

深熔浅色体组成不固定，常以石英为主，可有一种或两种长石，偶见石榴子石甚至不透明金属氧化物。露头上还有这样的情况：变质岩原位转化为浅色体，即经历了“全熔”。“全熔”可以局限于片麻理的某一段（图 2c、2d），但未能流动或迁移，形成“准熔体”（meta-melt），即原岩中的几乎全部矿物进入熔体（或塑性体）状态，部分熔融形成的熔体与尚未熔融的固相残留物交织在一起，未能形成真正的熔体，只是有部分组分相对集中到一起，其成分、物理性质与熔体迥然不同。“全熔体”极难或不能迁移，不具有熔体的流动性；多数的浅色体并不具有低共结矿物组成（给定温压条件下的特定比例的 Kfs-Ab-Qtz 组合；其中 Ab—钠长石）、浅色体中的锆石没有振荡环带，即没有经历真正的岩浆状态。因此，浅色体的结构和矿物组成均不支持其曾有岩浆过程，浅色体前身没有达到真正的熔融程度，不是真正的岩浆结晶形成。包含石榴子石（或磁铁矿）的浅色体团块更是如此。类似的情形也发生在内蒙古大青山石榴混合花岗质岩石中，其形成与深熔作用及随后熔体与残留体的逐渐分离有关，残留矿物相成分富镁铁质（宋海峰等，2005）。

无水岩石体系的熔点很高，一般的变质温度下无法熔融（魏春景等，2021）；当体系中具有少量水分时，可局部出现初始熔融团块，但难以形成真正的熔体，形成的“熔体”黏度较大且不容易迁移，形成近原地结晶的浅色体条带或“无根”浅色团块，更像是分异作用。即体系中水含量较低（不饱和）情况下，深熔作用可导致二相分离：（准）熔体当作一个相，而残留物是一个固体相（组成可以不固定），二相分离导致浅色体、富铝铁组分和组合的形成（图 3c、3d），即深熔作用具有显著的“分异作用”效果，有微团状的（准）熔体，也有转熔固相矿物。这种过程介于固相和熔融之间的状态，其间有（准）熔体的迁移，更有活动性组分、挥发分组分的迁移和局部富集，但体系中的挥发分并没有逸失（如脱水），而是仍旧保留在体系中，只是保存的方式或位置不断调整或转换。

深熔“准熔体”的稳定性、迁移性往往较差，条件稍有变化，很容易分解、沉淀（结晶）。通常的表现就是含水矿物（黑云母）的分解，形成“全熔体”，水和挥发分优先进入类熔体部分，先形成“准熔体”，并可有一定的聚集（图 2a、2b）。在降压抬升或冷却过程中，降压使得熔融（点）温度升高，促使挥发分更易逸失，这种去挥发分继而加剧了熔融（点）温度的上升。其结果是，深熔作用形成的非低共熔组分发生解体，把硅、铝质组分均“卸载”而滞留下来，形成残留体及矽线石团块或矽线石-石英球，甚至石榴子石、堇青石等（图 3c、3d），其中少、无挥发分。原岩转化为浅色体（非熔体）的过程，伴随着岩石结构和矿物组成、化学成分上的变化，特别是活动性或挥发分组分容易迁出，使得岩石不均匀。

另外，较深层次的深熔体系水较少，难以形成典型的含水花岗岩，只能形成较小的花岗岩体，且其中的岩浆结构（Vernon and Collins，1988）并不典型，如拉斯曼丘陵 516～514 Ma 正长花岗岩（Carson et al.，1996）、内蒙大青山的（粗粒含榴）花岗岩（宋海峰等，2005；吴新伟等，2013）。

熔体或易迁移组分优先向低压（裂隙）部位迁移，且迁移较远。一旦挥发分被转移并集中，如果水含量足够高（饱和或过饱和），部分熔融形成的熔体能够在一个特定部位聚集，形成一个熔体集中、甚至真正的熔体，或高温形成真正的熔体团块，呈网脉状相连形成岩浆熔体，可以出现较大规模的普通花岗岩，如拉斯曼丘陵以东偏南 6 km 的 Dalkoy 岛上产出的 501±11 Ma 二长花岗岩（Wang et al.，2008）。

5 深熔作用与伟晶岩

如前所述，拉斯曼丘陵长英质岩石深熔作用过程中，流体挥发分容易向（水不饱和）类熔体集中，其原地、半原地结晶形成浅色体或伟晶质脉体。伟晶岩的形成与矽线石的形成有密切联系，矽线石代表“熔体”生成之处，而伟晶岩则是“熔体”就位、结晶的位置。

浅色体的形成伴随着组分的迁移变化，先是较富足的惰性组分的结晶，随着结晶作用的不断进行，原先含量较低的一些（活动）组分逐渐迁移、富集，并开始结晶；作为一个热异常体，其外围温度较低的边缘先结晶，或者出现较多的伟晶岩、与片麻理平行的花岗岩脉，进而平行或切割片麻理的花岗岩体形成，如正长花岗岩（Zhao et al.，1992；Carson et al.，1996）。花岗岩的围岩中出现了较多的堇青石等（图 3c），即“蓝色片麻岩”（Stüwe et al.，1989），这样就形成了一个封闭性的边缘或“外壳”，实质性阻碍了热流、组分（尤其是后者）的迁移，即变成一个封闭体系，造成一些活动性组分、挥发性组分的集中。一些伟晶岩周围可产出较多的堇青石（Dirks et al.，1993），说明堇青石的结晶与伟晶岩有关，某种意义上说堇青石相当于蚀变（带）产物，在（准）岩浆开始结晶时相关组分释放出来，现在看到的伟晶岩矿物组成只是最后保留下来的产物。

浅色体的前身（类熔体）挥发分含量较高，使浅色体有相当程度的活动性从而有一定的迁移，沿特定裂隙聚集即可形成伟晶岩，如伟晶质的辉石、石榴子石。因此，这类伟晶岩的形成应与深熔作用有关（Robles et al.，1999），即伟晶岩形成于岩浆之前的深熔作用阶段，而不是岩浆晚期由于分异作用形成。

6 深熔作用中的组分分异

深熔作用中，与水等挥发分组分的含量变化相对应，其他组分也有相应的活动变化。有限尺度封闭体系下的深熔、隆升，造成组分分异和铁钛氧化物的聚集，挥发分不饱和状态下的深熔作用、组分迁移范围有限，从而保存了组分分异的各阶段矿物组成。

6.1 铝铁残留

随着深熔作用的进行，体系出现了组分的分异，体系对水和 K_2O、Na_2O 和 MgO（部分）活动组分开放，形成一些富含 K、Na 和 Ca 组分的硅质浅色体，这些接近熔体状态的物质优先吸收了有限的水分，造成剩余主要组分的顺序结晶：伴随组分 MgO（FeO）的迁移，Fe_2O_3 的迁移要差一些，形成磁铁矿；Al_2O_3、FeO 和 TiO_2 形成矽线石和不透明铁钛氧化物，如赤铁矿-钛铁矿-磁铁矿聚片结构（图 4c）。这些组分的聚集相当于变质作用过程中的惰性组分滞留；前期可有富铝过程（Sil±Op±Crn），富铝的同时，多富 SiO_2，亦可贫 SiO_2 形成刚玉等（Riesco et al.，2004），显然，这

些矿物的形成并非原岩富铁钛和铝组分所致。

另外，矽线石的形成亦与分异作用有关，组分分解（分异）为两种极端：惰性组分与活性组分，其中惰性组分包括 Sil-Mgt-Ilm，矽线石可出现于裂隙中，多数情况下，矽线石呈相对富集的片（麻）理，并表现为“断层”：其两侧的矿物颗粒基本不连续。矽线石形成于浅色体（脉）的（边部）初期（Sil→Kfs→Crd），其中钾长石（Kfs）显微脉体矿物中可包裹矽线石，且该脉中的矽线石除平行脉壁排列外，可呈任意方向延伸，说明矽线石的定向与类似流体物质的流动有关，而不是应力下的变形定向。换言之，体系中矽线石集中的“面理”反映了微观尺度的破裂、断裂，甚至剪切带，并伴随某种临界状态下的差异性抬升，而不是简单的泥质岩原岩富铝而成。

组分分异过程中，MgO 和 FeO 之间亦有分化。少量可迁移的铁组分以 Fe^{2+} 为主，如主要的含铁矿物黑云母；残留体则以 Fe^{3+} 为主，至少二者相当（形成 Mgt 或 Hem-Ilm）。伴随着富 Al-Si±Fe 残余组分与其他（Mg±Fe-Ca-K-Na）组分的分异过程，残留硅、铁组分析出矽线石和铁钛氧化物。作为残留体的一部分，锆石、独居石、甚至硫化物可与铁钛氧化物一起形成（图 4e），并与矽线石伴生。当类熔体结晶殆尽，原先的活动组分沦为封闭体系之下的局部残余，形成尖晶石、堇青石（图 3c），即 Grt→Crd 稍晚。

6.2　镁组分富集

在深熔作用前期富 Al_2O_3 的基础上，晚期逐渐富集 MgO 及挥发分，形成堇青石、甚至假蓝宝石等富镁矿物，类似 H_2O 等挥发分的“回流”造成逆反应发生，其中的 MgO、K_2O 和 H_2O 等组分亦可在熔体结晶晚期局部相对富集，结晶形成黑云母。

“全熔体”冷却结晶或时，伴随 H_2O 及 MgO 活性组分的逸出，随着深熔作用的进行，结晶矿物逐渐富镁，即说明了 MgO 和 FeO 组分的活性差异。在铁钛氧化物之后出现石榴子石和长石。随着峰期这些无或贫 MgO 矿物的结晶，剩余 MgO 相对集中，如在拉斯曼丘陵中部岛屿可以形成紫苏辉石，一定温度下的水致深熔和分异，有利于分异作用的发生，形成丰富的浅色体（脉）。

一般来说，长英质岩石中 MgO 为少量或次要组分，假蓝宝石、堇青石等富镁矿物的出现可能是原岩富镁造成（Harley，2008）。但是，如同研究区表现的一样，变质—深熔作用过程中所经历的镁富集过程同样可以形成 Grt、Opx、Crd 和 Bt 等矿物，如最后 MgO 和 H_2O 回流或局部富集形成堇青石等，或迁移至异地形成堇青石、黑云母等（图 2e、2f，图 3c、3d），因此，假蓝宝石、堇青石之类矿物的形成，可能仅为深熔作用过程中的一种组分调整，而未必是原岩富镁。一些高温、超高温变质组合的形成亦可能具有类似的机制，不一定是所谓的富镁泥质岩所致。也就是说，长英质岩石中不同组分开放程度不同，体现在迁移组分的差别上。惰性组分迁移距离最短，往往形成残留，滞留的矿物分别有铁钛氧化物、矽线石，即深熔初期的残留或富集。组分 CaO、MgO、K_2O、Na_2O 和 H_2O 则发生迁移（图 2c），尤其是 MgO、H_2O 组分的迁移，且 Mg（Fe）迁移稍远。随着分异作用逐渐减弱，活动性组分开始聚集形成石榴子石，此时，分异程度稍弱，MgO 部分迁出或 FeO 迁入，CaO、K_2O、Na_2O 和 H_2O 发生迁移。有堇青石时伴随着 MgO 迁入，有黑云母时 MgO、K_2O 和 H_2O 迁入或不变：从早到晚，开放程度递减。

铁钛氧化物被尖晶石、刚玉叠加（Op→Spl、Crn）表明了 Mg、Fe、Al 对 Fe 和 Ti 的置换，或 Mg、Al 对 Ti 的置换。而 Sil→Spl+Crd 则是 Mg、Fe 对 Si 的置换，或 Mg、Fe 对 Si、Al 的置换。在活动性组分迁移过程中裹挟了少量的惰性组分，热液失却挥发分或伴随 P、B 的结晶，偶见铁钛氧化物的形成。早期形成铁钛氧化物的环境与晚期 Mg-Fe 环境不一致，晚期发生各种可能的逆反应（任留东，2005）及蚀变。且这种活动多次或幕式发生，造成类熔体的多次侵位；或伴随幕式活动下的短暂冷却、降压过程，并出现或强或弱的流体挥发分活动。

6.3　挥发分组分的集中

深熔作用中活动组分除水（H_2O）外，还包括 B、F、Cl 和 P 等挥发分。作为活动组分的挥发分组分，可以有较长距离的迁移，迁移越远越容易分散或富集。这些组分的分异、聚集形成硼硅酸盐矿物组合，硅硼镁铝矿位于堇青石的内部或界面上，受“MgO+挥发分”双重控制。而硼柱晶石长于岩性界面上，表明其生长受挥发分控制。B 和 P 组分不易溶于熔体，而很容易分异出来沿通道富

集，但总体上对硅酸盐熔融影响不大（任留东等，2021）。硅硼镁铝石的产出，结合含水矿物分解为“干”矿物组合，表明高级变质作用及伴随的深熔作用基本属于封闭体系（其中 Prs—碱柱晶石；Trn—电气石）。

Spr→Prs±melt；a little melt→Crd；little melt→Bt-Trn

活动性组成 MgO 等的迁移往往与挥发分相伴，伴随挥发分凝结之后 MgO 结晶：挥发分可与 MgO 组分结合并一起迁移，挥发分的离解导致 MgO 沉淀。MgO、H_2O 组分同步迁移（Prs→Crd），Mg、Ca 开始聚集，尤其是 Mg，形成逐渐富镁的矿物。之后，若伴有挥发分 P、B、F 和 Cl 等，则可穿插形成含这些组分的矿物，同时确定了事件顺序。

7 构造意义

地质单元或岩石差异性（如底劈式）上升过程中，降压（可能伴随有一定的降温）使得挥发分自体系或部分熔融（准）熔体中释放出来，造成惰性残留组分、活动性迁移组分的分异作用，组分的流动性或渗透性表现为晚期反应往往局限于裂隙或特定边缘，而不是遍布所有矿物或边缘（如 Grt→Crd）（图 4a）。这种变质反应结构可能与降压有关，但与流体挥发分的变化关系更为密切，因为同一视域中的石榴子石只有尖晶石、石英反应边（图 4f），可以无堇青石。另外，矽线石、铁钛氧化物和黑云母等矿物亦可出现堇青石退变边，即 Grt、Sil→Crd、Spl，体现的是结晶组分或成分梯度的变化，如晚期逆反应过程中 MgO 组分的聚集，未必是体系降压（Tong et al.，2014）的结果。至于 Crd→Bt 则是逆反应或最后水化所致，均说明强调流体挥发分的作用，而不仅是温度、压力的控制。

从这个意义上说，不论其变质 *P-T* 轨迹是 ITD 或 IBC 型式，堇青石等矿物的形成需要活动组分保持封闭，即体系有一定程度的冷却，而不是加热，而且在存在流体（挥发分）组分梯度的地质体内才可以形成，即在一端流体很少，另一端流体稍多。边缘结晶后使得内部活动性组分回流（矽线石裂隙成为流体“回流”的通道，并发生“逆反应”），在合适的位置结晶，甚至溶蚀、取代先存矿物：如 Spl-Crd 的形成，属于准熔体（浅色体前身）结晶的晚期活跃组分聚集所致。

与拉斯曼丘陵周围广泛出露“基底”式岩石单元相比，以长英质副片麻岩为主的部位发育较多的剪切带，整体变形不均匀。拉斯曼丘陵及邻区深熔作用强烈，其中的剪切带可经熔体强化（Piazolo et al.，2020），体系中矽线石类矿物组合的形成即与临界状态下的差异抬升有关，以长英质成分为主的伟晶质浅色体密度较小，可能位于上部，而镁铁质组分集中于下部（图 2e）。如果存在隆起，中山站区东部处于相对下部，而西部处于相对上部的位置。研究区内分布有或大或小的花岗岩体或岩脉，其中轻的花岗质物质集中上升，形成穹窿，重的表壳岩下沉，伴随区域缩短事件，出现类似 Dome and Keel 的构造（Marshak et al.，1992）。泛非构造即这种收缩构造的显示，早期为张性构造，伴随热流异常，片麻理产状较为紊乱，没有固定的方向，产状变化舒缓且片麻理呈曲面状，说明岩石经历了塑性为主的活动（Dirks et al.，1993）。后期挤压造成褶皱和剪切活动，差异上升使得深熔作用形成熔体的过程未能充分演化，没能形成典型的熔体，表现为大量伟晶岩和断续出现的大致平行片麻理的花岗岩透镜或脉体。大部分泛非期花岗岩类表现出与碰撞造山作用相关的 A 型（或 S 型）花岗岩的特征，与碰撞后岩石圈减薄、岩浆底侵或上地壳的伸展垮塌可能有联系，似乎显示碰撞造山带的构造演化特点（李淼等，2010），但是，早期与洋壳活动有关的岩石如斜长花岗岩还未见报道。

拉斯曼丘陵变形和变质作用没有一般宏观上角闪岩相、麻粒岩相变质强度的分带或分区，也没有区域性的差异，整体上体系为非均匀变形和加热（壳内热异常），体系内部不同岩石间的分化占据主导地位。变质和深熔过程中不是整体脱水，反映了体系整体的封闭性，有脱水、吸水的时空差异，深熔作用的这种差异性可伴随一些组分的惰性滞留形成铁钛氧化物与另一些组分（如挥发分）的活动迁移。因此，拉斯曼丘陵变形作用的这种非均匀性及相伴随的组分分异作用，与早期构造的再活动有关。拉斯曼丘陵地区泛非期构造局限于先前（格林维尔期甚至更早）活动带的壳内层次，应该是在早期格林维尔期基础上的泛非期再活化，其中较为均匀分布、延伸较为稳定的混合岩浅—暗条带可能对应早期构造（图 2f），而切割了条带状混合岩的非均匀深熔团块及低压区的堇青石富集则可能对应泛非期的事件。

8 结论

东南极拉斯曼丘陵高级变质长英质岩石中铁钛氧化物的局部聚集与水不饱和体系高级变质作用过程中的深熔作用或部分熔融作用有关，并非原岩富集这些组分。深熔作用过程中形成的浅色体不具低共结组分，没有熔体结晶结构，不是真正的熔体。较粗粒的浅色体或伟晶岩也是与深熔作用有关的产物，其形成早于花岗岩脉或岩体，而与花岗质岩浆分异无关。

深熔作用造成惰性组分如铁钛氧化物滞留和聚集以及活动性组分的迁移，其中的一些特征矿物如矽线石、石榴子石、堇青石、尖晶石的形成也与组分分异作用有关，但组分迁移范围有限，并可保存组分分异的各阶段产物，其特征为，①开始阶段，裂隙、热液（溶液）均有作用，较为活跃的 MgO、K_2O 和 Na_2O 组分短距离部分迁移，深熔初期惰性组分残留、滞留，形成矽线石，局部定向排列的毛发状矽线石与溶液或（准）熔体流向有关，与应变关系不大。②渗滤减缓，FeO、Fe_2O_3、TiO_2 和 Al_2O_3 形成铁钛氧化物或 Sil-Op 聚集或熔融残余，是转熔、包晶的产物。③裂隙逐渐愈合，但仍有少量热液传输，体系中水含量较低，优先进入（准）熔体而迁移，其他组分迁移距离变短，未迁移部分强烈脱水进入峰期变质，Fe（Mg）组分形成石榴子石，偶见斜方辉石；伴随一定量的长石、石英的结晶。④峰后期，长英质组分结晶末期，由于活动组分的迁移，易挥发分结晶或逸失，Mg（Fe）组分沉淀，形成（准）熔体结晶残余堇青石；对于堇青石的形成，降压过程不是必要条件。拉斯曼丘陵地区一些传统的减压结构、水变化反应及富含挥发分矿物组合的出现，同样可以采用组分的活动性变化来解释。⑤最终冷却阶段水分固结形成黑云母等。

与周围广泛出露“基底式”单元相比，拉斯曼丘陵内部发育较多的剪切带，整体变形不均匀。有限尺度封闭体系下的隆升、深熔及温压、挥发分含量的变化造成一定程度上的组分分异和铁钛氧化物非均匀性聚集，体系中不透明铁钛氧化物和矽线石类矿物组合的形成，均反映了临界状态下的局部或差异抬升。拉斯曼丘陵这种变形作用的非均一性及相伴随的矿物组合、岩石组分分异作用，很可能相当于早期构造的再活动，即拉斯曼丘陵地区泛非活动很可能是壳内局部早期格林维尔期构造基础上的泛非期再活化。

致谢：感谢国家海洋局极地考察办公室和中国极地研究中心在南极考察期间给与的后勤支持和保障。感谢特邀主编刘晓春研究员邀约撰写本文及对本文的重要修改建议。审稿人仝来喜教授和匿名审稿人认真、细致地对本文做了审阅并提出了很好的修改意见，在此一并表示感谢。

References

ARSON C J, FANNING C M, WILSON C J L, 1996. Timing of the progress granite, Larsemann hills: additional evidence for early Palaeozoicorogenesis within the east Antarctic shield and implications for Gondwanaassembly [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 43 (5): 539-553.

DIRKS PHGM, CARSON C J, WILSON C J L, 1993. The deformational history of the Larsemann Hills, Prydz Bay: the importance of the Pan-African (500 Ma) in East Antarctica [J]. Antarctic Science, 5 (2): 179-192.

GREW E S, CARSON C J, CHRISTY A G, et al., 2013. Boron- and phosphate-rich rocks in the Larsemann Hills, Prydz Bay, East Antarctica: tectonic implications [J]. Geological Society, London, Special Publications, 383 (1): 73-94.

HARLEY S L, 2008. Refining the *P-T* records of UHT crustal metamorphism [J]. Journal of Metamorphic Geology, 26 (2): 125-154.

LI M, LIU X C, ZHAO Y, 2010. A review of research on late Neoproterozoic-early Paleozoic (Pan-African) granitoids from East Antarctica [J]. Chinese Journal of Polar Research, 22 (4): 348-374. (in Chinese with English abstract)

LIU X C, ZHAO Y, HU J M, 2013. The c. 1000~900 Ma and c. 550~500 Ma tectonothermal events in the Prince Charles Mountains-Prydz Bay region, East Antarctica, and their relations to supercontinent evolution [M] //HARLEY S L, FITZSIMONS I C W, ZHAO Y. Antarctica and supercontinent evolution. Geological Society, London, Special Publications, 383 (1): 95-112.

MARSHAK S, ALKMIM F, JORDT-EVANGELISTA H, 1992. Proterozoic crustal extension and the generation of dome-and-keel structure in an Archaean granite-greenstone terrane [J]. Nature, 357 (6378): 491-493.

PIAZOLO S, DACZKO N R, SILVA D, et al., 2020. Melt-present shear zones enable intracontinental orogenesis [J]. Geology, 48 (7): 643-648.

REN L D, ZHAO Y, LIU X H, et al., 1992. Re-examination of the metamorphic evolution of the Larsemann Hills, East Antarctica [M] //YOSHIDA Y, KAMINUMA K, SHIRAISHI K. Recent progress in Antarctic earth science. Tokyo: Terra Scientific Publishing: 145-153.

REN L D, 2005. On back reaction [J]. Earth Science Frontiers, 12

(4): 630-636. (in Chinese with English abstract)

REN L D, YANG C H, WANG Y B, et al., 2009. Formation of sillimanite in the high-grade quartzofeldspathic gneisses and its relations with deformation-metamorphism-anatexis: a case study in the Larsemann Hills, east Antarctica [J]. ActaPetrologicaSinica, 25 (8): 1937-1946. (in Chinese with English abstract)

REN L D, ZONG S, WANG Y B, et al., 2021. Formation process and petrological implication of the borosilicate assemblage grandidierite, prismatine and tourmaline in the high-grade quartzofeldspathic gneisses in the Larsemann Hills, East Antarctica [J]. ActaPetrologicaSinica, 37 (2): 575-588. (in Chinese with English abstract)

RIESCO M, STÜWE K, RECHE J, et al., 2004. Silica depleted melting of pelites. Petrogenetic grid and application to the Susqueda Aureole, Spain [J]. Journal of Metamorphic Geology, 22 (5): 475-494.

RODAROBLES E R, PEREZ A P, ROLDAN F V, et al., 1999. The granitic pegmatites of the Fregeneda area (Salamanca, Spain): Characteristics and petrogenesis [J]. Mineralogical Magazine, 63 (4): 535-558.

SONG H F, XU Z Y, LIU Z H, 2005. Geochemical characteristics and origin of garnet migmatitic granites in Daqingshan area, Inner Mongolia [J]. Acta Petrologicaet Mineralogica, 24 (5): 489-495. (in Chinese with English abstract)

STÜWE K, BRAUN H M, PEER H, 1989. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 36 (2): 219-241.

THOMPSON AB, 1983. Fluid-absent metamorphism [J]. Journal of the Geological Society, 140 (4): 533-547.

TONG L X, LIU X H, XU P, et al., 1996. Occurrence of sapphirine-bearing hyperthine-quartzite in the Larsemann Hills, east Antarctica and its geological implication [J]. Chinese Science Bulletin, 41 (13): 1205-1208. (in Chinese)

TONG L X, ZHANG Z Y, LIU X H, et al., 1997. Mineralogical characteristics of cordierites in Krn-Hy-Crdgranulites from the Larsemann Hills, East Antarctica [J]. ActaPetrologicaSinica, 13 (3): 395-405. (in Chinese with English abstract)

TONG L X, LIU X H, WANG Y B, et al., 2012. Metamorphism evolution of peliticgranulites from the Larsemann Hills, East Antarctica [J]. ActaGeologicaSinica, 86 (8): 1273-1290. (in Chinese with English abstract)

TONG L X, LIU X H, WANG Y B, et al., 2014. Metamorphic P-T paths of metapeliticgranulites from the Larsemann Hills, East Antarctica [J]. Lithos, 192-195: 102-115.

VERNON R H, COLLINS W J, 1988. Igneous microstructures in migmatites [J]. Geology, 16 (12): 1126-1129.

VIELZEUF D, HOLLOWAY J R, 1988. Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the peliticsystem [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 98 (3): 257-276.

WANG Y B, LIU D Y, CHUNG S L, et al., 2008. SHRIMP zircon age constraints from the Larsemann Hills region, Prydz Bay, for a late Mesoproterozoic to early Neoproterozoic tectono-thermal event in East Antarctica [J]. American Journal of Science, 308 (4): 573-617.

WEI C J, ZHANG Y Y, DONG J, 2021. Some advances and research approaches on granulite [J]. ActaPetrologicaSinica, 37 (1): 52-64. (in Chinese with English abstract)

WU X W, XU Z Y, LIU Z H, et al., 2013. Geology and petrography of the garnet granite in Daqingshan area, Inner Mongolia [J]. Geology and Resources, 22 (5): 347-354, 359. (in Chinese with English abstract)

ZHAO Y, SONG B, WANG Y B, et al., 1992. Geochronology of the late granite in the Larsemann Hills, East Antarctica [M] // YOSHIDA Y, KAMINUMA K, SHIRAISHI K. Recent progress in Antarctic earth science. Tokyo: Terra Scientific Publishing: 153-169.

附中文参考文献

李淼, 刘晓春, 赵越, 2010. 东南极新元古代晚期-早古生代（泛非期）花岗岩类研究综述 [J]. 极地研究, 22 (4): 348-374.

任留东, 2005. 论逆（熔）反应 [J]. 地学前缘, 12 (4): 630-636.

任留东, 杨崇辉, 王彦斌, 等, 2009. 长英质高级片麻岩中夕线石的形成与变形-变质-深熔作用的关系: 以南极拉斯曼丘陵区为例 [J]. 岩石学报, 25 (8): 1937-1946.

任留东, 宗师, 王彦斌, 等, 2021. 东南极拉斯曼丘陵硼硅酸盐矿物组合硅硼镁铝矿-硼柱晶石-电气石的形成过程及其岩石学意义 [J]. 岩石学报, 37 (2): 575-588.

宋海峰, 徐仲元, 刘正宏, 2005. 内蒙古大青山地区石榴混合花岗质岩石地球化学特征及成因 [J]. 岩石矿物学杂志, 24 (5): 489-495.

仝来喜, 刘小汉, 徐平, 等, 1996. 东南极拉斯曼丘陵含假蓝宝石紫苏辉石石英岩的发现及其地质意义 [J]. 科学通报, 41 (13): 1205-1208.

仝来喜, 张振禹, 刘小汉, 等, 1997. 东南极拉斯曼丘陵柱晶紫苏堇青麻粒岩中堇青石的矿物学特征 [J]. 岩石学报, 13 (4): 395-405.

仝来喜, 刘小汉, 王彦斌, 等, 2012. 东南极拉斯曼丘陵泥质麻粒岩的变质作用演化 [J]. 地质学报, 86 (8): 1273-1290.

魏春景, 张媛媛, 董杰, 2021. 麻粒岩的研究进展与方法 [J]. 岩石学报, 37 (1): 52-64.

吴新伟, 徐仲元, 刘正宏, 等, 2013. 内蒙古大青山地区石榴花岗岩的地质特征和岩相学特征 [J]. 地质与资源, 22 (5): 347-354, 359.

开放科学（资源服务）标识码（OSID）:

可扫码直接下载文章电子版，也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯