

长英质片麻岩中堇青石的一种可能的形成机制^{*}

——以南极拉斯曼丘陵高级区为例

任留东 王彦斌 陈廷愚 赵 越

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

主题词 南极拉斯曼丘陵 长英质片麻岩 深熔作用 堇青石

提 要 本文通过对南极拉斯曼丘陵长英质片麻岩变质过程中堇青石与其它矿物之间结构关系的研究, 识别出明显不同的两种组合 $Pl + Kfs + Qtz(Gr)$ 和 $Crd + Opx + Spl \pm Qtz$, 认为区内高级变质作用向深熔作用转化过程中发生了长英质组分和镁铁质组分的分凝。分凝出的长英质熔体与堇青石的形成没有直接关系; 镁铁质组分较富 Mg, Fe , 贫 Si, Ca , 当镁铁质组分达到一定的富集程度时即形成堇青石。时间上, 堇青石形成于降压过程中发生的深熔作用的晚期。

人们在讨论高级变质作用及与之相关的深熔作用或低共熔作用时, 往往把注意力放在浅色组分上, 以期探究矿物-岩石组成及其与低共熔的关系, 而对暗色组分, 由于组分系统的复杂性, 则很少有人涉及。

在深熔作用强烈发育的地区, 不同研究者对于与长英质脉体密切相关的堇青石的成因往往认识不一: 有人认为它是一种岩浆矿物^[1, 2]; Clarke^[3]则提出, 堇青石在过铝质岩浆熔体结晶的晚期以一种共结相出现, 或者是升温或降压时发生包晶反应的结果; 也有人认为系熔融残余^[4, 5]。

在南极拉斯曼丘陵地区, 出露一套孔兹岩系。该高级变质岩建造中广泛发育花岗岩和多种浅色脉体。其中的暗色矿物, 如 $Crd - Spl - Opx$, 有人认为是熔融残余^[6], 也有人提出是与深熔作用有关的固相变质反应产物^[7]。

通过详细的野外观察和显微结构分析, 笔者注意到了一种特殊现象, 即浅色矿物组合与暗色矿物组合的明显分离。在暗色矿物组合中, 堇青石往往是含量最高的矿物。进一步的研究发现, 堇青石在拉斯曼丘陵高级区地质演化中具有一定的特殊性: 既与深熔作用过程密切相关, 又与典型的岩浆作用中的结晶有所不同。本文将尝试对暗色组分的主要矿物堇青石的形成机制进行探讨。

1 区域地质概况

在大地构造上, 拉斯曼丘陵位于冈瓦纳古陆的泛非构造带, 大约 550 Ma 前的泛非构造

^{*} 原地质矿产部青年地质学家基金、南极办和国家自然科学基金(49702033 和 49772154)项目资助。

第一作者简介 任留东, 男, 1965 年出生, 研究员, 博士, 主要从事变质岩岩石学及南极地质研究。

收稿日期 2000-07-17, 改回日期 2000-12-20

运动在此表现得十分强烈^[8]。区内主要出露一套高角闪岩相—麻粒岩相的高级变质岩系,相当于传统意义上的孔兹岩系。该套岩系主要由辉石黑云斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩、(含)夕线石片麻岩等长英质副片麻岩以及少量长英质或镁铁质的正片麻岩^[7]组成,其间可见伟晶岩脉和花岗岩体。研究表明,这些含夕线石和堇青石的各种片麻岩的原岩相当于泥质岩、砂岩^[9]。

2 岩石学特征

在本区,长英质片麻岩是指黑云斜长片麻岩和含夕线片麻岩。黑云斜长片麻岩一般呈中、薄层与其他岩石互层产出,分布较为普遍。矿物组成以黑云母(15%~30%)和斜长石(30%~60%, $An_{34\sim 40}$)为主,常含少量的石榴石、石英、钾长石、堇青石和磁铁矿,副矿物有磷灰石、锆石等。

(含)夕线石片麻岩中的夕线石含量变化很大,少到微量,多至近乎纯的夕线石岩。夕线石含量较少的岩石具花岗变晶结构,主要有石英、斜长石、钾长石和含量多变的石榴石、黑云母,一般堇青石含量很低。夕线石含量较多的片麻岩一般特征是层厚,矿物组合及矿物含量变化大。常见的矿物有夕线石、钾长石、斜长石、石英、黑云母、堇青石、石墨、尖晶石、磁铁矿、钛铁矿,有时见石榴子石巨晶,局部夹有富硫化物石英岩层。常有硼硅酸盐矿物的聚集(硅硼镁铝矿—柱晶石—电气石)。

在拉斯曼丘陵,与夕线石片麻岩 S_2 片理形成有关的变形具非透入性,表现为夕线堇青片麻岩中片理的分布很不均匀。矿物组成上,片理(S_2^p)内的组合 $Sil+ Spl(Hcy)+ Crd+ Opq$ 与片理外的组合 $Grt+ Bt+ Pl+ Qtz \pm Kfs \pm Sil+ Opq$ 明显不同,从而可在同一手标本甚至薄片范围内形成变形、变质组合截然不同的两种域^[10]。

3 岩相学特征

在同时含长石和堇青石的长英质片麻岩中,钾长石和/或斜长石之间呈三联晶, $Pl-Kfs-Qtz$ 明显与以堇青石为主的暗色矿物分属不同的区域。富浅色矿物与富暗色矿物部分大致沿片麻理方向相间排列,有时呈长透镜状或似脉状切割片麻理。通过浅、暗两部分矿物接触部位的反应或切割关系可知,在时间顺序上, $Sil(Fib)$ 最早出现,然后大量形成 $Pl+ Kfs+ Qtz$,而少量的 $Crd+ Spl+ Opq \pm Rt$ 出现最晚。在铁镁质相团块($Crd+ Spl+ Opq \pm Rt$)中的矿物基本为同一阶段的产物,但仍有一个开始结晶的大致顺序: $Sil \rightarrow Opq \rightarrow Spl \pm Rt \rightarrow Crd \rightarrow Gdd$ 。

堇青石,通常情况下还有铁尖晶石,与主期(M_2^p)甚至更早阶段形成的钾长石、斜长石、石英呈明确的切割或反应关系(图1a、c、d、e、f、h)。堇青石、铁尖晶石可溶蚀早期矿物,围绕早期夕线石可形成 $Crd-Hcy$ 合晶,并形成新的矿物组合 $Sil+ Opq+ Spl+ Crd$ 。

注: Bt—黑云母; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Qtz—石英; Crd—堇青石; Ky—蓝晶石; Rt—金红石; Gdd—硅硼镁铝矿; Melt—熔体; Sil—夕线石; Grt—石榴子石; Opq—不透明矿物; Spl—尖晶石; fibrolite—纤维状夕线石; Hcy—铁尖晶石; Opx—斜方辉石; Vapour—挥发分; Kfs—钾长石; Pl—斜长石

4 与堇青石有关的变质演化及堇青石的成因机制

4.1 堇青石的形成与变质作用和深熔作用的关系

在长英质片麻岩中, 可识别出至少两期变质作用。早期变质作用(M_1) 对应的矿物组合保存在晚期变形弱的部位或包体之中, 缺失典型的富铝矿物(如铝硅酸盐矿物), 常见组合为 $Bt+Pl+Qtz+Opx$, $Bt+Pl+Kfs+Qtz$, $Bt+Pl+Qtz \pm Kfs \pm Grt$, $Bt+Pl+Qtz \pm Kfs \pm Opq$, 斜长石牌号较低, 而黑云母具有较高的钛组分。该期组合的温压较高, 可达 850°C , 9 kbar ^[11]。

晚期变质作用(M_2) 可分出多个阶段: 初期(图 1c d) 的矿物组合为 $fibrolite+Bt+Qtz+Opq \pm Ky$, $Bt+Pl+Qtz$, 分布不均匀; 随后为主期变质阶段, 柱状夕线石及石榴石大量出现, 有时为斜方辉石(图 1a b)。其温压条件为 750°C , 4.5 kbar 。堇青石通常被认为是主期变质矿物组合之一^[7, 12]:



堇青石有时也被认为是不一致熔融的结果:



熔体结晶形成钾长石等浅色矿物^[6]。

笔者通过详细的野外和室内研究发现, 堇青石的分布极不均匀, 其产出往往与区内广泛存在的浅色体或花岗伟晶质岩脉密切相伴, 表明堇青石的形成与深熔作用密切相关。

4.2 堇青石形成过程中矿物组分的转化

在长英质片麻岩中, 长英质组分的含量远远大于镁铁质组分, 根据矿物组合及其成分的限定, 最初析出的 $Mg-Fe^{2+}$ 组分主要来源于黑云母的分解。Carson 等^[7] 已经说明, 本区深熔作用发生在降压过程中, 并指出, $Bt+Grt \rightarrow Crd+Spl$ 代表了一种减压反应, 但是却未见到 $Bt \rightarrow Crd$ 的直接证据。笔者研究认为, $Grt \rightarrow Crd$ 和 $Bt \rightarrow Crd$ 的现象均可发生(图 1a), 但是, 石榴石 $\rightarrow$ 堇青石之间的溶蚀转化往往很轻微, 而黑云母向堇青石的转化则更难见到, 说明堇青石的出现并不是黑云母、石榴石直接就近转化造成的。

在以镁铁质组分为主的区域, 不透明矿物(Opq) 首先出现, 然后结晶含 Mg 矿物。由于堇青石的 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 比值($0.61 \sim 0.72$) 较高^[7], 且高于其它含 $Mg-Fe^{2+}$ 矿物, 而由黑云母直接分解出的组分 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 比值较低, 因而不足以生成堇青石。随着石榴石、不透明矿物(Opq , 主要为铁质矿物) 以及含少量 Mg 的矿物——尖晶石(Spl) 的晶出, 剩余组分中 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 比值不断增大, Mg 趋于饱和而结晶出堇青石, 伴随着 SiO_2 相对含量的增加, 近结束阶段可出现极少量石英(图 1b g h)。

根据岩相观察知道, 在变质作用直至深熔作用过程中, 能够提供镁铁质组分的黑云母的净消耗量较低, 说明由反应(1)或(3)所释放的 $Mg-Fe^{2+}$ 组分, 经过一定距离的迁移、局部积累(富集), 尤其当 $Mg-Fe^{2+}$ 组分达到一定浓度时, 才局部结晶形成暗色或不透明矿物含量较高的团块状的 $Crd-Spl-Opq$ 组合。由此导致本区长英质片麻岩中富长英质矿物和镁铁质矿物两种矿物组合的明显分离。

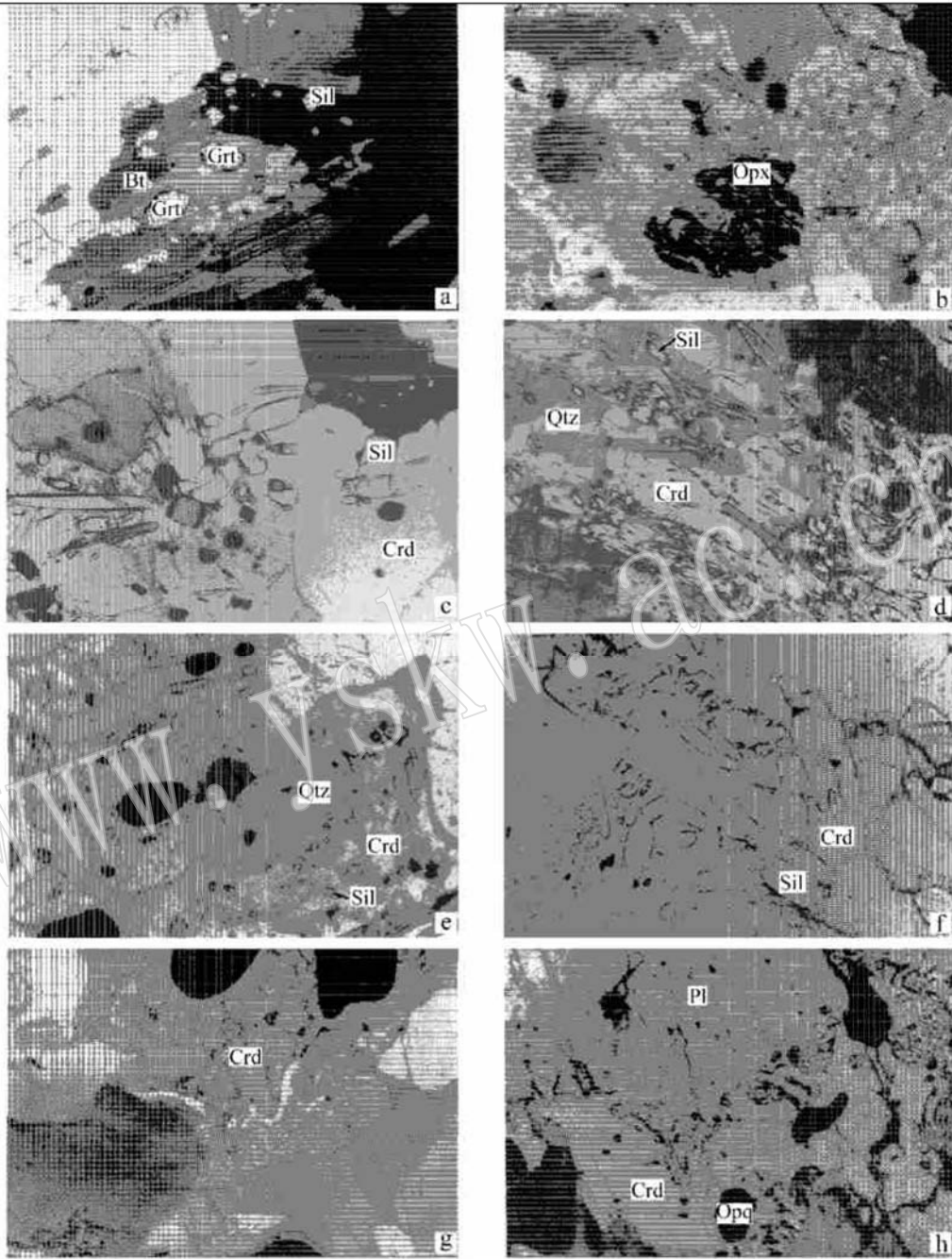


图 1 长英质片麻岩中变质显微结构

Fig. 1 Metamorphic microstructure in quartzofeldspathic gneiss

(a) 一堇青石(Crd)中包裹石榴石(M_2^1)、夕线石和黑云母,并切割黑云母,正交偏光; (b) 一堇青石包裹并溶蚀斜方辉石(M_2^1),正交偏光; (c) 一堇青石中的夕线石明显比斜长石中的粗大,正交偏光; (d) 一堇青石中的夕线石、不透明矿物定向排列,且比石英中的颗粒粗大,正交偏光; (e) 一堇青石中的夕线石比石英中的粗大,平行脉壁排列,并与石英中的夕线石方向不一致,单偏光; (f) 一堇青石灌入石英和长石之间,且包裹的夕线石较粗,单偏光; (g) 一堇青石灌入石英和长石之间,并与晚期的石英共生,正交偏光; (h) $-Crd-Opx \pm Qtz$

切割、交代斜长石。放大倍数:图 a d h -4×25 ; c e g -10×25 ; 图 b f -20×25

4.3 堇青石形成时介质状态的分析

与堇青石出现密切相关的黑云母、夕线石、尖晶石和石榴石等,都是较富或很富 Al 的矿物,那么堇青石的形成必然牵涉到 Al 组分的活动。除了一般的夕线堇青石榴石片麻岩外,堇青石还可出现于以石英为主的岩石中,其中没有夕线石或石榴石等富 Al 矿物,仅有少量的黑云母和斜长石,而堇青石本身是一种较富 Al 组分的矿物,说明在石英为主的岩石中,必然有富 Al 组分的显著迁入,才能形成堇青石。

通过野外观察及显微镜镜下结构分析得知,堇青石、尖晶石及有关不透明矿物和夕线石富集团块可在先存组构的基础上加粗(图 1c),或明显切割先存矿物(图 1a、d、e),有时沿石英中的裂隙产出(图 1g)。此外,有时堇青石团块自身的矿物组合有平行脉壁排列的趋势(图 e),表明其形成可能经历了流动过程,至少不是一般的变质重结晶,即堇青石与其它造岩矿物的关系不是简单的固相间组分扩散所形成的平衡关系,与溶液或熔体的关系可能更为密切。事实上,本区具有较高的温度条件^[7],与之有关的液态相可能是挥发分流体或熔体。有人通过研究指出,一般大规模的富 Al 组分的迁移系熔体的可能性较大,因为富 Al 组分在含水溶液中难溶,而在熔体中的迁移则要容易得多;但是,熔体结晶与含水流体结晶造成的结构却很难区分^[13]。

堇青石有时可成自形晶,或灌入其它矿物粒间,自身颗粒之间可呈三联晶等。这些形态及结构特征与长石尤其钾长石非常相似。后者即浅色体的主要组成,一般认为是由熔体结晶形成的。Jung et al^[14]通过对非洲泛非造山带 Damara Belt 混合岩的研究认为,堇青石究竟是暗色体的一种成分,还是黑云母不一致熔融分解的结果,目前尚无法确定,但结构证据表明一些堇青石的确形成于熔体。另外,本区堇青石中常可大量包裹其它矿物(图 1a、e),如石榴石、长石和石英等,这些矿物均有一定程度的溶蚀、圆化,说明在堇青石形成过程中熔体的组成较为复杂,至少在成分和温度上,尚未达到镁铁质或超镁铁质硅酸盐岩浆的程度,很可能是介于岩浆与溶液之间的一种粥状体。

4.4 堇青石形成的可能机制

根据矿物组合、成分及其间的结构关系推论,石榴石既可以是固相变质反应也可以是不一致熔融的结果,而堇青石的形成所需组分必然有一部分是由黑云母(或石榴石)提供的。

应该说,本区堇青石的形成与深熔作用密不可分,正是由于深熔作用造成了长英质矿物组合和镁铁质组合分别在不同的部位结晶、聚集, $Kfs + Pl + Qtz \pm Opq$ 的结晶可能反映了较富 SiO_2 并偏碱性熔体的性质,在长英质矿物组合的基础上可以沉淀少量的不透明矿物;而富堇青石矿物组合($Crd + Spl + Opq$, 矿物之间也是三联晶关系,有时也表现出一定的顺序: $Opq \rightarrow Spl \rightarrow Crd$) 的出现则说明了较基性的特征。堇青石不与钾长石共生,仅仅在镁铁质组分结晶的晚期,才局部出现 $Crd - Qtz$ 的同时生长(图 1g)。因此, $Kfs + Pl + Qtz (Grt)$ 组合域与 $Crd + Spl + Opq$ 组合域代表了截然不同的两种组分环境。时间上,虽然后者结晶略晚,但二者形成的阶段仍大致相当,均为深熔作用的产物。也就是说,变质作用初期,变质矿物的形成主要是固相条件下化学组分扩散的结果,首先发生的是固相变质(脱水)反应,如本区黑云母向石榴石的转化就很容易发生^[12]:



当变质温度进一步升高,并伴随着压力的降低,熔体出现。另外,本区堇青石一般不与石榴石共生,二者之间呈反应关系。这一点,与不一致熔融反应(3)所表述的显然不同,堇青

石可能直接由熔体结晶形成,即实际反应以如下的形式发生:



从形式上看,所形成的熔体如果直接结晶,其产物应具有相当含量的镁铁质尤其镁质组分。实际上,我们并没有观察到与期望出现的熔体相对应的结晶组合,所见到的只是相互分离的浅色脉体($\text{Kfs} + \text{Pl} + \text{Qtz} \pm \text{Opq}$)和富镁铁质团块($\text{Crd} + \text{Spl} + \text{Opq}$),即表现出相互分离的两种矿物集合体。这些矿物组合显然不是酸性岩浆的共结产物^[1,2]或过铝质岩浆熔体的晚期共结相^[3]。

也可以说,堇青石等暗色矿物与一些浅色长英质脉体矿物一样,是由深熔作用形成的熔体或类似物结晶所成;而暗色矿物的结晶与浅色矿物的结晶又表现出明显的相对独立性。由此可以看出,随着深熔作用的发生,除了形成固相产物石榴石之外,还曾发生过深熔熔体(粥状体)逐渐分离或分凝的过程,正是这种分离或分凝过程,才导致了暗色矿物和浅色矿物分别出现于不同的域,或者说,由反应(5)形成的熔体经过了进一步的分凝:



进而分别结晶形成了上述浅、暗两部分明显不同的两类矿物组合:



长英质熔体与石榴石基本同时结晶,可以看到二者的共生关系,而镁铁质组分的结晶相对晚一些,从而造成了堇青石与石榴石之间的反应关系;尽管形成堇青石的化学成分(尤其是镁铁组分)相当一部分是由黑云母提供的,但是由于堇青石是黑云母经过深熔作用,进而分凝出的镁铁质熔体结晶形成的,所以很少能够见到黑云母直接向堇青石转化的现象。

5 结论与意义

1) 在拉斯曼丘陵高级变质作用进一步发展的深熔作用中发生了镁铁质与长英质熔体组分的分凝。

2) 堇青石与分凝出的长英质熔体组分没有直接关系,其形成主要受镁铁质组分影响,分凝出的镁铁质组分较富 Mg、Fe, 贫 Si、Ca, 结晶形成 $\text{Crd} + \text{Opq} + \text{Spl} \pm \text{Qtz}$; 堇青石不与 $\text{Pl} + \text{Kfs} + \text{Qtz}(\text{Grt})$ 共生。

3) 堇青石是在降压过程中发生的深熔作用的晚期形成的。

尽管上述认识是非常初步的,甚至一些提法或认识可能存在纰漏。但是,作者深深意识到,高级变质作用向深熔作用的转化过程是非常复杂的。正像本文所讨论的那样,石榴石和堇青石之间的关系,用二者平衡共生或由石榴石降压反应所无法解释的。因此,所有这些问题的提出与解决,将对了解长英质片麻岩高级变质作用和深熔作用过程中矿物之间的平衡与转化关系、变质温压环境的估算以及花岗岩的成因都有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Georget Y, Fourcade S. REE partitioning in magmatic cordierite: Implications for cordierite-bearing granitoids as exemplified by the Huelgoat intrusion (Brittany France). N. Jb. Min. Abh., 1988, 158: 225~ 240.

- 2 Phillips G N, Wall V J, Clemens J D. Petrology of the Strathbogie batholith—a cordierite bearing granite. *Canadian Mineralogist*, 1981, 19: 47~ 63.
- 3 Clark D B. Cordierite in felsic igneous rocks, a synthesis. *Mineralogical Magazine*, 1995, 59: 311~ 325.
- 4 Clemens J D and Wall V J. Origin and crystallization of some peraluminous(s_type) granitic magmas. *Canadian Mineralogist*, 1981, 19: 111~ 131.
- 5 Hensen B J and Green D H. Experimental study of the stability of cordierite and garnet in pelitic compositions at high pressures and temperatures, Synthesis of experimental data and geological applications. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1973, 38: 151~ 166.
- 6 Stuwe K and Powell R. Low_pressure granulite facies metamorphism in the Larsemann Hills area, East Antarctica; Petrology and tectonic implications for the evolution of the Prydz Bay area. *Journal of Metamorphic Geology*, 1989, 7: 465~ 483.
- 7 Carson C J, Dirks P H G M, Hand M, *et al.* Compressional and extensional tectonics in low_medium pressure granulites from the Larsemann Hills, East Antarctica, 1995, 132: 151~ 170.
- 8 Zhao Y, Song B, Wang Y, *et al.* Geochronology of the late granite in the Larsemann Hills, East Antarctica. In: Yoshida Y, *et al.* eds. *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Terrapub, Tokyo, 1992, 155~ 161.
- 9 Zhao Y, Liu X, Song B, *et al.* Constraints on stratigraphic age of metasedimentary rocks of the Larsemann Hills, East Antarctica: possible implication for Neo_proterozoic tectonics. *Precambrian Research*, 1995, 75: 175~ 188.
- 10 任留东. 南极拉斯曼丘陵及邻区高级区变形变质特征: [博士学位论文]. 中国地质科学院, 1997.
- 11 Ren L, Zhao Y, Liu X, *et al.* Re_examination of the metamorphic evolution of the Larsemann Hills, East Antarctica. In: Yoshida Y, *et al.* eds. *Recent Progress in Antarctic Earth Science*, Terrapub, Tokyo, 1992, 145~ 153.
- 12 Stuwe K and Powell R. Metamorphic segregation associated with garnet and orthopyroxene porphyroblast growth: two examples from the Larsemann Hills, East Antarctica. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1989, 103: 523~ 530.
- 13 Nabelek P I. Quartz_sillimanite leucosomes in high_grade schists, Black Hills, South Dakota, A perspective on the mobility of Al in high_grade metamorphic rocks. *Geology*, 1997, 25: 995~ 998.
- 14 Jung S, Hoernes S and Mezger K. Geochronology and petrology of migmatites from the Proterozoic Damara Belt—importance of episodic fluid_present disequilibrium melting and consequences for granitic petrology, *Lithos*, 2000, 51: 153~ 179.

A Possible Mechanism of Cordierite Formation in the Quartzofeldspathic Gneisses: A Case Study on the High_grade Region of the Larsemann Hills, East Antarctica

Ren Liudong, Wang Yanbin, Chen Tingyu, Zhao Yue
(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037)

Key words: the Larsemann Hills; quartzofeldspathic gneisses; anatexis; cordierite

Abstract

Based on an investigation of the texture relationships between cordierite and other minerals of the Quartzofeldspathic gneisses in the Larsemann Hills, East Antarctica, especially the corrosion and crosscutting relationships between cordierite and other minerals, the authors discerned two distinct assemblages, viz., the felsic assemblage $Pl + Kfs + Qtz (Grt)$ and the mafic assemblage $Crd + Opq + Spl \pm Qtz$. Texture and composition analysis suggests that cordierite

(下转第 41 页) (to be continued on p. 41)

www.yskw.ac.cn

(上接第 35 页) (Continued from p. 35)

might have been derived from the media quite likely in the melt state. That is, during the transformation from high-grade metamorphism to anatexis of the high grade rocks in the study area, the melt appeared first: $Bt + Sil + Qtz \rightarrow Grt + Melt$, followed by the segregation of felsic and mafic components. The two components in the melt were immiscible and differentiated into two parts, $Melt_1$ and $Melt_2$, which crystallized separately and formed the felsic and mafic mineral assemblages, respectively. Cordierite was not formed as a cotectic magmatic phase relatively late in peraluminous melts and the presence of the mineral had no direct relation with the felsic melt. The mafic components rich in Mg and Fe but poor in Si and Ca may have been concentrated to form cordierite. Although the mafic component was substantially derived from biotite, the contact of biotite and cordierite can rarely be found due to the fact that there existed a time gap between biotite decomposition and the final crystallization of cordierite. Temporally the cordierite crystallized at the late stage of anatexis essentially brought about in the decompression process.