

南极拉斯曼丘陵长英质变质岩中磷灰石-斜方辉石组合的岩石学意义

任留东, 刘平

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 南极拉斯曼丘陵高级长英质变质岩中出现的磷灰石-斜方辉石(Ap-OpX)组合表明岩石经历了麻粒岩相条件下的变质作用,长英质片麻岩发生了强烈的脱水深熔作用。随着熔体的迁出,长英质片麻岩中的残留或者镁铁质岩石中的分异产物,均可形成Ap-OpX组合。残留矿物如磷灰石、金属氧化物等具有丰富的稀土元素,强烈影响着岩石中的稀土元素配分型式。磷灰石-斜方辉石组合的存在说明体系中有适量但不是很充足的有效钙质组分。由磷灰石、磁铁矿-钛铁矿、石榴石,直至斜方辉石,一方面反映了活动组分-残留组分的不断变化,另一方面,也说明高级变质作用过程中体系的失水程度逐渐增加,变质作用中富含该组合的岩石是经变质过程形成的特有岩石,没有固有的原岩可对应。

关键词: 磷灰石,斜方辉石,深熔作用,残留体,组分活动,南极

中图分类号: P588.34⁺5; P571

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)05-0961-06

Petrological implications of the apatite-orthopyroxene association in the high-grade felsic gneiss of the Larsemann Hills, East Antarctica

REN Liu-dong and LIU Ping

(Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract: The existence of the special apatite-orthopyroxene association in the felsic gneiss of the Larsemann Hills, east Antarctica, suggests the granulite facies metamorphism of the gneiss. The concomitant fluid-absent partial melting in the felsic gneiss was responsible for the melt segregation and residues which were favorable for the formation of Ap-OpX. The residual minerals like apatite and ilmenite are enriched in REE and have strongly affected the REE patterns of the rocks. The presence of the Ap-OpX assemblage implies the existence of appropriate but insufficient effective CaO component in the system. The crystallization of minerals in order of apatite, magnetite-ilmenite, garnet and orthopyroxene has demonstrated the changing mobile-residual components and progressive dehydration in the high-grade metamorphism. The metamorphic felsic rock rich in Ap-OpX is the unique rock derived in metamorphism, with no corresponding protolith.

Key words: apatite; orthopyroxene; anatexis; residues; component activity; East Antarctica

东南极拉斯曼丘陵高级区普遍经历了麻粒岩相变质作用(Stüwe and Powell, 1989; Ren *et al.*, 1992),在长英质片麻岩中产出较高温的假蓝宝石(全来喜等,1996,1997),同时遭受了强烈的深熔作用改造(Carson *et al.*, 1997;任留东等,2009),形成一些特殊的残留组合,如夕线石-石榴子石-堇青石

收稿日期: 2011-07-05; 修订日期: 2011-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41072053); 国家极地年中国行动计划项目(AB2908); 国土资源大调查资助项目(1212010711509, 1212011120176)

作者简介: 任留东(1965-),男,博士,研究员,研究方向为变质岩石学和极地地质, E-mail: ldren@cags.ac.cn

组合(任留东等,2001),富含金属氧化物磁铁矿、赤铁矿、钛铁矿和尖晶石、刚玉组合以及特殊的硼硅酸盐矿物组合(任留东等,2004)和磷酸盐矿物组合(Ren *et al.*,2003)。富磷矿物中,磷灰石的产出最为普遍。通过进一步的观察与分析发现,在经历过高级变质作用和强烈深熔作用改造的长英质岩石中可出现斜方辉石和磷灰石的密切伴生,而且,该组合的出现与岩石的成分、变质温压条件及挥发分活动具有紧密的联系。

1 区域地质

在大地构造上,我国南极中山站及其周围的拉斯曼丘陵位于冈瓦纳古陆的泛非构造带,约550 Ma的泛非构造运动表现得十分强烈,出露一套高级变质岩系(Zhao *et al.*,1992;Ren *et al.*,1992;Dirks and Wilson,1995;Carson *et al.*,1997),主要产出含石墨的夕线石榴片麻岩、长英质片麻岩以及极少量的钙硅酸盐岩,与传统意义上的孔兹岩系相当,间夹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、(角闪)二辉麻粒岩等,峰期变质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。

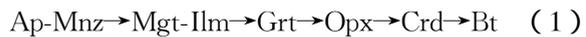
2 相关矿物组合与结晶顺序

通常,长英质岩石和镁铁质岩石中都可出现少量的磷灰石。在经过了深熔作用改造的长英质片麻岩中,常见一些同时含磷灰石、斜方辉石的矿物组合: Bt-Qtz-Pl ± Opx-Ap-Mgt, Bt-Pl-Hbl-Opx-Ap-Mgt-Qtz(矿物缩写代号参见Kretz,1983)。

磷灰石与不透明金属氧化物(主要是磁铁矿、钛铁矿)的关系较为密切,可见Op-Ap边界平直接接触,表明其共生关系(图1a)。即使镁铁质岩石中的浅色体,亦可见到较多的磷灰石以及Ap-Opx组合,如Opx-Ap-Pl-Qtz, Opx-Pl-Qtz-Op-Ap ± Hbl ± Bt组合。

长英质片麻岩中与磷灰石相伴的矿物往往还有

独居石,随后出现金属氧化物及密切伴生的尖晶石(图1b),金属氧化物之后是石榴石的形成(图1c),最后出现的斜方辉石可包裹先期的各种矿物(图1c、1d),即具有Op-Ap → Grt → Opx的结晶顺序。与磷酸盐矿物-斜方辉石有关的矿物结晶顺序总结如下:



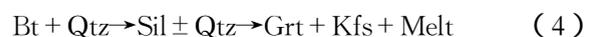
随着脱水熔融作用的发生,可形成两种产物:一定量的深熔熔体迁移,形成一些浅色脉体和伟晶岩;同时造成一些难熔组分残留,如夕线片麻岩、Hem-Mgt-Ilm ± Spl, Spr-Opx-Op ± Qtz, Grt-Hbl-Pl, Opx-Qtz-Ap- ± Trn-Op等组合(任留东等,2009)。

3 变质深熔过程中矿物组合及磷组分的变化

在长英质片麻岩中,尤其是经过强烈深熔作用改造的片麻岩中,可发生一些脱水熔融反应。Patiño Douce和Harri(1998)对喜马拉雅结晶岩系的变泥质岩进行了实验,结果表明,脱水熔融实验中先是黑云母(H₂O, K)分解,介质趋于碱性,形成夕线石的同时,出现磷灰石、独居石等副矿物:



矿物顺序(1)的前半部直至堇青石(Crd)的形成与“干”体系下的脱水熔融有关(任留东等,2009),发生如下无水部分熔融:



岩石中大部分的磷赋存在磷灰石中,只有少部分以类质同像的形式出现。从岛状结构到架状结构的硅酸盐,可替代硅的磷离子数是逐渐下降的(刘英俊等,1984),造成岩浆期和岩浆期后磷灰石趋于富集。磷在过铝质熔体中的溶解度与铝饱和指数(ASI = molar Al/[Na + K + 2Ca])强烈正相关,并以AlPO₄形式存在(Bea *et al.*,1992;Gan and Hess,1992;Pichivant *et al.*,1992;Wolf and London,1994)。在相同的温度压力条件下,磷在(超)镁铁质熔体中的溶解度最高,而在花岗质熔体中的溶解度最小(Watson,1979;Ryerson and Hess,1980),因

① 矿物缩写: Ap—磷灰石; Bt—黑云母; Crd—堇青石; Fib—纤维状夕线石; Fsp—长石; Grt—石榴石; Hbl—角闪石; Hem—赤铁矿; Ilm—钛铁矿; Kfs—钾长石; Mgt—磁铁矿; Melt—熔体; Mnz—独居石; Op—不透明矿物; Opx—斜方辉石; Pl—斜长石; Qtz—石英; Sil—夕线石; Spl—尖晶石; Spr—假蓝宝石; Trn—电气石; Xnt—磷钇矿; 下同。

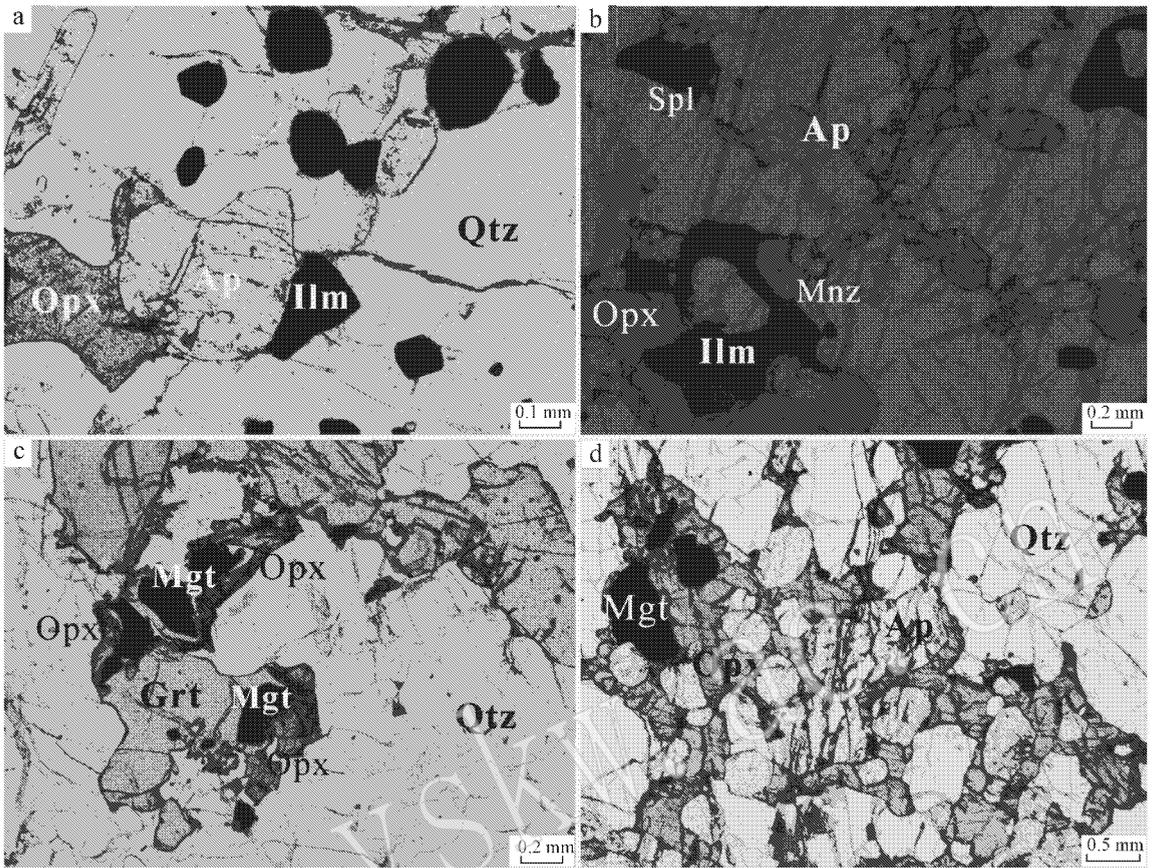


图 1 磷灰石-斜方辉石组合的显微照片

Fig. 1 Microphotographs of apatite-orthopyroxene in the Larsemann Hills

- a—磷灰石与铁钛氧化物的共生；b—磷灰石-独居石、钛铁矿-尖晶石、斜方辉石的递进演化；c—金属氧化物、石榴石、斜方辉石的演化；d—斜方辉石包裹磷灰石和金属氧化物
- a—co-existence of apatite and Fe-Ti oxides；b—progressive crystallization of apatite-monazite, ilmenite-spinel and orthopyroxene；c—progressive crystallization of Fe-Ti oxides, garnet and orthopyroxene；d—apatite and Fe-Ti oxides wrapped in orthopyroxene

此磷主要集中在基性岩或暗色岩而不是酸性岩中，并易向挥发分中迁移。在含 SiO_2 和 Al_2O_3 的岩石系列中，磷趋向于富集在相对富含 MgO 、 FeO 和 TiO_2 以及相对贫 K_2O 和 SiO_2 的岩石类型中。

在长英质岩浆和岩石中，熔体中磷的含量与温度成正比，与 SiO_2 含量成反比，而与 CaO 、 F 、 f_{O_2} 关系不大 (Pichavant *et al.*, 1992; Wolf and London, 1994)。 P_2O_5 的活度是控制磷灰石稳定性的关键因素。磷灰石的溶解作用受磷的扩散速率控制，一般扩散速率很小，但随着水的加入可明显增大 (Harrison and Watson, 1984)。随着造岩矿物结晶作用的进行，尤其是当深熔作用造成残留相中水分的缺失，导致磷在生长晶体表面周围的熔体相很快达到局部饱和，尽管熔体相整体上仍可处于磷不饱和状态。

4 矿物稀土元素特征

采用 LA-ICP-MS 技术对磷灰石、斜方辉石及相关的独居石、石榴石、钛铁矿的稀土元素含量进行了分析。分析结果显示，磷灰石中的稀土元素是球粒陨石中的 1 000 倍左右，远远高于一般的造岩矿物，必然强烈影响着岩石中的稀土元素配分型式。由独居石、磷灰石、钛铁矿、石榴石直至斜方辉石，稀土元素总量依次减少 (图 2)。

磷灰石与独居石的稀土元素配分型式非常类似，轻稀土元素略有富集，明显负钕异常，反映它们具相似的晶体结构，并且处于大致同时的结晶阶段；钛铁矿的稀土元素含量明显减少，轻稀土元素略有

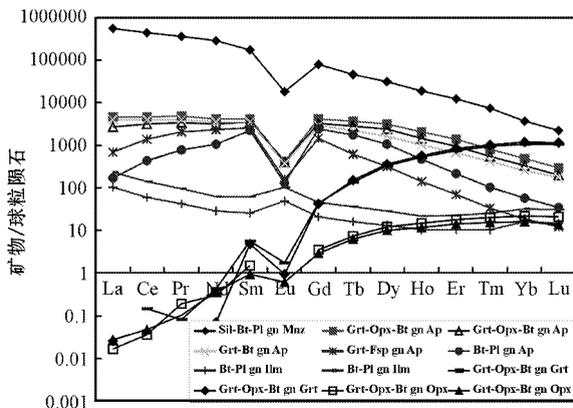


图 2 磷灰石-斜方辉石及相关矿物的
稀土元素配分

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns of Ap-Opx
and related minerals

图中 Grt-Opx-Bt gn Ap 表示“含石榴紫苏黑云片
麻岩中的磷灰石”其他同

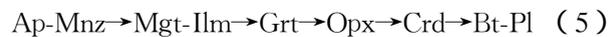
富集,正铈异常明显。配分型式与磷灰石有一定的互补性,与二者近于同期或钛铁矿稍晚于磷酸盐矿物结晶是一致的。石榴石和斜方辉石的稀土元素含量与配分则较为接近,显示强烈的轻稀土元素亏损、重稀土元素富集和负铈异常,从而与磷酸盐矿物、钛铁矿等有较大的区别。石榴石和斜方辉石的稀土元素配分特征恰与一般的花岗质组分富集轻稀土元素形成鲜明对照,与深熔作用条件下浅色组分迁出、形成镁铁质残留相一致。

5 变质深熔过程中活动组分的变化

经历过深熔改造的变质岩中残留体的矿物组成表明 P 组分的聚集与 Mg、Fe、Ca 组分的活动变化密切相关, P 属于亲基性元素。而在变基性岩中形成的浅色体或分异产物富含斜长石, 有较高的铝含量, 往往出现较多的磷灰石, 因为磷含量与铝正相关 (Pichavant *et al.*, 1992; Wolf and London, 1994)。

深熔作用残留的阳离子主要有 Fe^{2+} (Fe^{3+} , Ti) 和 Ca、Mg 组分, 阴离子则是与 P、F、B、 H_2O 有关的组分, 两者的结合形成了特定的矿物组合。随着残留组分的变化, 形成不同的组合, Fe^{2+} (Fe^{3+}) 和 Ca-P 组分较多时形成 Op-Ap ($\pm \text{Mnz} \pm \text{Xnt}$), 残留 Mg、Al、 Fe^{2+} (Fe^{3+} , Ti)- H_2O 组分较多时依次形成 Grt-Opx-Qtz-Ap-Opx、Crd-Spl $\pm \text{Mnz} \pm \text{Xnt}$ 和 Bt-Pl 等, 如同式 (1) 所示。

变质反应的平衡明显受粒间溶液活动组分影响。Korzshinski (1970) 提出的变质作用元素地球化学活动性平均顺序中, 磷的活动性比较低, 甚至比 CO_2 、S、 SO_3 、Cl、F 和 SiO_2 都要低, 迁移距离有限。控制磷变质行为的最重要因素是粒间溶液中磷灰石的溶解度, 或者磷与其他元素形成易迁移的络合物或化合物, 变质作用使岩石失去 H_2O 和 CO_2 , 化合物分解, 促使磷沉淀。



磷灰石的形成与 Ca 组分关系极为密切, P 的活动阶段很短暂, 一般同时有一定的 Ca 组分相伴, 从而形成磷灰石, 若 P 很富足, P/Ca 比值较大, 则形成氟磷镁石等。体系中水的多少直接影响到磷的溶解量 (Harrison and Watson, 1984), 因此, 体系中水分的减少会引起磷灰石溶解度的明显降低, 若磷组分呈过饱和, P-F 形成磷灰石之后仍有富余 (Ca 相对严重不足), 甚至可形成独居石、氟磷镁石等含磷矿物的沉淀。在麻粒岩相变质条件下, 随着体系的持续失水, 其他原本可以活动的组分, 如 Fe^{2+} 、Mg 等, 活动范围逐渐减小, 若同时 Ca 含量不是很充足的话, 磷灰石消耗大量的 Ca 后, 剩余的 Ca 不足以形成单斜辉石、斜长石等, 而只能形成斜方辉石。即使体系内含斜长石, 亦可出现磷灰石-独居石-磷钇矿 (Ap-Mnz-Xnt) 组合 (Zhu and O'Nions, 1999), 但是很难见到 Mnz-Xnt 与 Pl 的共生, Mnz-Xnt 尤其 Mnz 多与黑云母有关, 此时的斜长石为非活动组分。

由 Ap 至 Mgt 至 Opx, 残留组分由 P_2O_5 -F-OH 而 Fe_2O_3 -FeO 至 FeO-MgO, 失水程度逐渐增加。越是向后, 沉淀组分的活动性越强, 说明流体的活动性逐渐降低, 换句话说, 流体在逐渐减少。同时, 富 Fe-Ti 组分的结晶, 使得剩余组分相对富集 Mg (任留东等, 2001)。

可以说, 残留体中磷灰石及相关磷酸盐矿物的结晶意味着体系失水的开始。这种体系失水与典型的无水麻粒岩相变质作用的发生相一致, 因为, 深熔熔体可以优先汲取体系中有限的水分 (Thompson, 1983; Vielzeuf and Holloway, 1988)。

由于变质岩中涉及更多的组分差异性活动, 出现夕线石、刚玉、磷酸盐组合、赤铁矿-钛铁矿-磁铁矿 (HIM) 组合等更多阶段的矿物演化。一般长英质岩石中可含少量的磷, 与火成岩一样, 在变质岩系列, 磷经过组分的活动与迁移, 并在局部聚集, 尤其

趋向于在基性组分的岩石(尤其是镁铁组分)中聚集(刘英俊等, 1984)。有合适的挥发分时, P 等元素是活动组分, 若无水, P、Zr 等可能是比 Si、Al 还要惰性的组分, 优先形成磷灰石、锆石等副矿物。这些矿物是少量特殊“组分”的聚集与残留, 而斜方辉石是一般氧化物组分(FeO、MgO、CaO、Al₂O₃、SiO₂)活动、迁移之后的部分残留, 熔体迁移过后的残留体较富镁铁质或铝质组分, 相对分散的磷组分可集中出现在这些残留体内, 形成较多的磷灰石甚至其他磷酸盐矿物, 如 Op-Ap ± Mnz ± Grt ± Opx 组合。由磷灰石→斜方辉石(Ap→Opx), 反映了残留组分的演化。

随着深熔过程的发生、发展, 可以出现两种趋势: 深熔熔体越来越多, 逐渐汇聚成花岗质的浅色体, 还有一种就是伴随深熔作用可残留一些不共熔或难熔组分, 形成一些特殊的矿物或矿物组合, 一般为暗色岩石, 这样的岩石是变质作用演变至深熔作用所特有的, 它没有固有的所谓原岩可以与之对应。

6 结论

(1) 长英质变质岩中 Ap-Opx ± Op 组合的形成表明了麻粒岩相的变质作用, 尤其是脱水深熔作用的发生。随着深熔熔体的迁出, 长英质片麻岩中的残留, 或者镁铁质岩石中的分异产物, 均可形成 Ap-Opx 组合。磷灰石及相关磷酸盐矿物具有丰富的稀土元素含量, 强烈影响着岩石中的稀土元素的配分型式;

(2) 变质过程中有效活动组分分析表明, 深熔过程初期有挥发分 P、F、B、H₂O 的活动, 此时 P 等元素是活动组分, 体系是开放的; 复杂的阴离子、阳离子的组合可造成复杂的残留组合, 磷灰石-斜方辉石组合的存在说明体系中有适量但不是很充足的有效钙质组分;

(3) 由磷灰石、磁铁矿-钛铁矿、石榴石, 直至斜方辉石, 一方面反映了活动组分-残留组分的不断变化, 另一方面, 也说明麻粒岩相变质作用过程中, 体系的失水程度逐渐增加;

(4) 长英质变质岩中富含 Ap-Opx ± Op 组合的岩石是因变质作用所形成的特有岩石, 即变质成岩作用所致, 它没有固有的原岩可对应。

致谢 两位审稿人对论文初稿进行了认真的审阅并提出了具体的修改意见, 在此一并表示感谢。

谨以此文祝贺沈其韩先生 90 华诞, 祝愿沈先生健康长寿!

References

- Bea F, Fershtater G and Corretge L G. 1992. The geochemistry of phosphorus in granite rocks and the effect of aluminum [J]. *Lithos*, 29: 43~56.
- Carson C J, Powell P, Wilson C J L, *et al.* 1997. Partial melting during tectonic exhumation of a granulite terrane: an example from the Larsemann Hills, East Antarctica [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 15: 105~126.
- Dirks P H G M and Wilson C J L. 1995. Crustal evolution of the East Antarctic mobile belt in Prydz Bay: continental collision at 500 Ma? [J]. *Precambrian Research*, 75: 189~207.
- Gan H and Hess P C. 1992. Phosphate speciation in potassium aluminosilicate glass [J]. *American Mineralogist*, 77: 495~506.
- Harrison T M and Watson E B. 1984. The behavior of apatite during crustal anatexis: Equilibrium and kinetic considerations [J]. *Geochimica et Cosmochimica*, 48: 1467~1477.
- Korzhinskii D S. 1970. *Theory of Metasomatic Zoning* [M]. Oxford: Clarendon Press, 111~146.
- Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals [J]. *American Mineralogist*, 68: 277~279.
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, *et al.* 1984. *Elements Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 548 (in Chinese).
- Patino Douce A E and Harris N. 1998. Experimental constraints on Himalayan anatexis [J]. *Journal of Petrology*, 39: 689~710.
- Pichavant M, Montel J M and Richard L R. 1992. Apatite solubility in peraluminous liquids: Experimental data and an extension of the Harrison-Watson model [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56: 3855~3861.
- Ren L D, Grew E S, Xiong M, *et al.* 2003. Wagnerite-Ma5bc, a new polytype of Mg₂(PO₄)X(F,OH), from granulite-facies paragneiss, Larsemann Hills, Prydz Bay, East Antarctica [J]. *The Canadian Mineralogist*, 41: 393~411.
- Ren Liudong, Wang Yanbin, Chen Tingyu, *et al.* 2001. A possible mechanism of cordierite formation in the quartzofeldspathic gneisses—a case study on the high-grade region of the Larsemann Hills, East Antarctica [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(1): 29~35 (in Chinese with English abstract).
- Ren Liudong, Yang Chonghui, Wang Yanbin, *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]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1937~1946 (in Chinese with English abstract).
- Ren Liudong and Zhao Yue. 2004. Occurrence of prismatine at the Zhongshan Station area, East Antarctica, and the changes of its definition [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 759~763 (in Chinese with English abstract).

- Ren L D, Zhao Y, Liu X H, *et al.* 1992. Re-examination of the metamorphic evolution of the Larsemann Hills, East Antarctica[A]. Yoshida Y. Recent Progress in Antarctic Earth Science[M]. Tokyo : Terra Scientific Publishing Company , 145~153.
- Ryerson F J and Hess P C. 1980. The role of P_2O_5 in silicate melts[J]. *Geochim Cosmochim Acta* , 44 : 611~624.
- Stüwe K and Powell R. 1989. Low-pressure granulite facies metamorphism in the Larsemann Hills area , East Antarctica ; Petrology and tectonic implications for the evolution of the Prydz Bay area[J]. *Journal of Metamorphic Geology* , 7 : 465~483.
- Thompson A B. 1983. Fluid-absent metamorphism[J]. *Journal of Geological Society of London* , 40 : 533~547.
- Tong Laixi, Liu Xiaohan, Xu Ping, *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) : 1 205~1 208(in Chinese).
- Tong Laixi, Liu Xiaohan, Zhang Liansheng, *et al.* 1997. Assemblage and metamorphic feature of the earlier residue minerals in the granulite facies rocks of the Larsemann Hills , east Antarctica[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 13(2) : 127~138(in Chinese with English abstract).
- Vielzeuf D and Holloway J R. 1988. Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology* , 98 : 257~276.
- Watson E B 1979. Apatite saturation in basic to intermediate magmas [J]. *Geophys Research Letter* , 6 : 937~940.
- Wolf M B and London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts : an experimental study of solubilities and mechanism[J]. *Geochim Cosmochim Acta* , 58 : 4 127~4 145.
- Zhao Y, Song B, Wang Y, *et al.* 1992. Geochronology of the late granite in the Larsemann Hills , East Antarctica[A]. Yoshida Y, Kaninuma K and Shiraishi K. Recent Progress in Antarctic Earth Science [C]. Tokyo : Terra Scientific Publishing Company , 153~169.
- Zhu X K and O 'Nions R K. 1999. Monazite chemical composition : some implications for monazite geochronology[J]. *Contrib Mineral Petrol.* , 137 : 351~363.

附中文参考文献

- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 1984. 元素地球化学[M]. 北京 : 科学出版社.
- 任留东, 王彦斌, 陈廷愚, 等. 2001. 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[J]. *岩石矿物学杂志* , 20(1) : 29~35.
- 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) : 1 937~1 946.
- 任留东, 赵 越. 2004. Prismaticine 含义的变化及其在南极中山站区的产出[J]. *岩石学报* , 20(3) : 759~763.
- 全来喜, 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) : 1 205~1 208.
- 全来喜, 刘小汉, 张连生, 等. 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[J]. *岩石学报* , 13(2) : 127~138.