

苏鲁造山带东部荣成榴辉岩中蓝晶石 及绿辉石的分解^{*}

——一种可能的新成因解释

杨天南

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

张子军

(山东省第八地质队, 日照 276826)

主题词 榴辉岩 蓝晶石 绿辉石 分解 苏鲁东部

提 要 在麻粒岩相条件下, 荣成含蓝晶石榴辉岩发生退变质, 其中的绿辉石退变质成透辉石+ 中长石组成的后成合晶, 蓝晶石大部分被冠状体取代。基于详细探针分析结果的成分迁移估算显示, 冠状体的形成需要从绿辉石的分解中获取 CaO 、 MgO 、 FeO 。绿辉石的分解包含两个反应: 一个为绿辉石中的硬玉分子与石英结合形成钠长石; 另一个发生在绿辉石内部各端员组分之间。后者不但形成后成合晶, 而且为蓝晶石周围冠状体的形成提供 CaO 、 MgO 、 FeO 。蓝晶石的分解未能给后成合晶的形成提供 SiO_2 。绿辉石与蓝晶石在分解时并不形成一个封闭体系, 它们均从周围环境中获取 SiO_2 。

秦岭—大别—苏鲁造山带由我国扬子与华北两大板块碰撞形成。大别—苏鲁段由于大陆深俯冲作用, 形成以含柯石英榴辉岩为代表的超高压变质岩。这些超高压变质岩见证了地壳俯冲至上地幔, 尔后又返回地表的复杂过程。这类岩石, 特别是含柯石英榴辉岩, 包含有大量矿物演化信息, 提取这些信息不仅可以加深人们对矿物反应机理的了解, 而且可以为研究造山带的热演化提供制约。

蓝晶石榴辉岩是超高压变质岩的主要岩石类型之一。欧洲大陆某些高压—超高压带中蓝晶石榴辉岩的退变质结构研究揭示, 绿辉石常形成透辉石+ 钠长石组成的后成合晶, 而蓝晶石则变为钙长石+ 尖晶石(+ 假蓝宝石+ 刚玉)组成的冠状体或后成合晶^[1, 2]。由于这两类退变质结构密切伴生, 因而 Godard & Mabit (1998) 提出在蓝晶石榴辉岩退变质过程中(麻粒岩相条件下), 蓝晶石与绿辉石的分解是成对(coupled)出现的, 蓝晶石的分解需要绿辉石的分解提供 Mg 、 Ca 、 Fe , 而绿辉石的分解又需要前者提供 $\text{Si}^{[3]}$ 。

荣成地区的榴辉岩普遍具有麻粒岩相退变质作用^[4~6], 退变质结构十分发育, 但后成合晶的结构特点与前人提出的形成模式并不完全吻合。本文将详细描述荣城某榴辉岩内退变质结构的特点, 估算其形成过程中相关组分的迁移, 并推测可能发生的变质反应。

1 露头及岩相学特征

本文研究的榴辉岩体位于荣成以西 4 km 处的荣—乳公路南侧, 由人工揭露。在 40 m

^{*} 本文为原地质矿产部重点基础项目“大别造山带动力学及成矿”(9501102)的部分成果。

第一作者简介 杨天南, 男, 1966 年生, 副研究员, 主要从事构造地质学研究。

收稿日期 2000-07-10, 改回日期 2000-10-11

×40 m 范围内出露 6 条 20~500 cm 宽的层状榴辉岩,岩层倾向东,倾角 40~50°,南北延伸达 100 m,后被覆盖。围岩为含石榴石花岗质片麻岩。该榴辉岩呈暗红色,由红色石榴石斑晶及暗绿色基质组成。镜下观察发现,以斑晶形式存在的矿物除了石榴石外,还有蓝晶石。基质为蠕虫状透辉石+中长石组成的后成合晶(据长石成分推测,后成合晶为绿辉石假象),以及条带状钙长石。这类后成合晶呈拉长的条带状,有一圈薄薄的中长石环绕。蓝晶石周围具有极明显的冠状体,由两个环带组成,内环为放射状排列的针状尖晶石+钙长石,外环为钙长石。部分蓝晶石甚至被尖晶石+钙长石后成合晶完全置换。虽然在与绿辉石假象接触的一侧,沿蓝晶石边部形成很好的冠状体,但在与石榴石接触处却未见及,表明蓝晶石周围的冠状体是其与绿辉石反应的结果(图 1)。

在后成合晶的边部,部分透辉石被角闪石取代,角闪石完全保留透辉石的形态,表明角闪石是后期流体作用的结果。

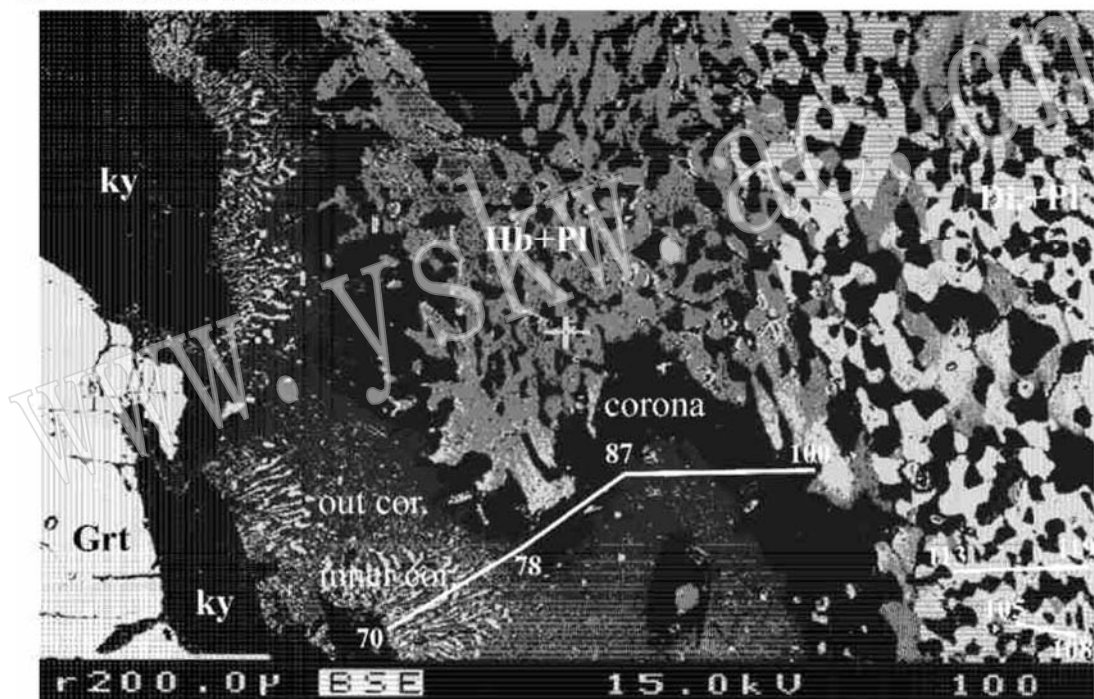


图 1 绿辉石、蓝晶石分解的背散射图像

Fig. 1 Back-scattered electron image demonstrating the microtexture of the Rongcheng retro-eclogite
环绕蓝晶石的冠状体仅发育于紧靠后成合晶一侧,白线为成分分析剖面位置,数字为分析点号

2 矿物化学成分

从残余蓝晶石到相邻中长石+透辉石后成合晶之间具有如下矿物(或组合)相:

$\text{Kyl Spl} + \text{Anl Andl Hb} + \text{Andl And} + \text{Dil}$ ①

对以上各相中的矿物进行电子探针成分分析(表 1),成分特点如下:

① Ky—蓝晶石; Spl—尖晶石; An—钙长石; And—中长石; Hb—角闪石; Di—透长石。后同。

表 1 与蓝晶石、绿辉石分解相关的矿物成分分析结果
Table 1 Mineral composition of the Rongcheng retro-eclogite

	钙长石(7)	中长石(6)	尖晶石(3)	蓝晶石(4)	透辉石(11)	角闪石(8)
SiO ₂	43.673	59.735	0.538	36.742	53.907	50.466
TiO ₂	0.004		0.274	0	0.091	0.42
Al ₂ O ₃	35.649	25.386	62.077	63.44	1.478	7.122
FeO	0.251		24.850	0.184	4.332	8.180
MnO	0.011		0.215	0	0.123	0.098
MgO	0.163		10.621	0.046	15.447	17.052
CaO	19.206	6.98	0.432	0.07	23.691	12.099
Na ₂ O	0.619	7.708	0.06	0	0.579	0.965
K ₂ O	0.011	0.045	0.023	0	0.004	0.183
Total	99.629	99.95	99.09	100.482	99.652	96.583
Si	2.0331	2.6635	0.0122	0.9809	TSi: 1.9771	
Cr			0.0071	0	M1Cr: 0.0031	
Al	1.9545	1.333	1.9599	2.0044	TAl: 0.0229 M1Al: 0.0407	
Ti			0.0014	0	M1Ti: 0.0024	
Fe ³⁺			0.0088		M1Fe ³⁺ : 0.0152	
Fe ²⁺			0.5687	0.0041	M1Fe ²⁺ : 0.0938 M2Fe ²⁺ : 0.0239	
Mn			0.0048	0	M2Mn: 0.0038	
Mg			0.4191	0.0018	M1Mg: 0.8445	
Ca	0.9579	0.335	0.0125	0.0020	M2Ca: 0.9309	
Na	0.0558	0.6665	0.0113	0	M2Na: 0.0411	
K	0.0006	0.0005	0.0003	0		
Σcation	5.0019	5.0025	3.0054	2.9932	3.9994	
O	8	8	4	5	6	
Ab	5.503	66.5				
An	94.414	33.3				
Or	0.057	0.2				

分析单位: 德国海得堡大学矿物研究所, CAMACA SX100, 加速电压 15 kV, 每元素测时 20 s, 电流 10 nA。括号内数字表示样品数。

长石: 上述六个相中除蓝晶石外均含斜长石, 对这些斜长石进行的连续的成分分析结果见图 2, 探针点位(剖面)见图 1。

从图 2 可以看出, 位于不同相中的长石成分不同, 而且各相间界限截然但各相内却相对均一(见图 1, 2)。环绕蓝晶石冠状体(内、外环)的斜长石为钙长石($An_{89\sim 97}Ab_{1\sim 3}Or_{0\sim 1}$); 环绕后成合晶的斜长石为中长石($An_{35\sim 38}Ab_{62\sim 65}Or_{0\sim 1}$)。替代绿辉石的后成合晶中的斜长石也为中长石, 但钙长石分子含量略低($An_{30\sim 33}Ab_{66\sim 69}Or_{0\sim 1}$)。由此可知, 从围绕蓝晶石的冠状体开始, 到后成合晶, 钙长石分子含量变低, 而钠长石分子含量渐高, 表现出明显的趋势性。尖晶石为主要由镁-铝尖晶石(摩尔分数为 43.7%)与铁-铝尖晶石(摩尔分数为 56.08%)组成的固溶体。

蓝晶石与透辉石的成分见表 1。

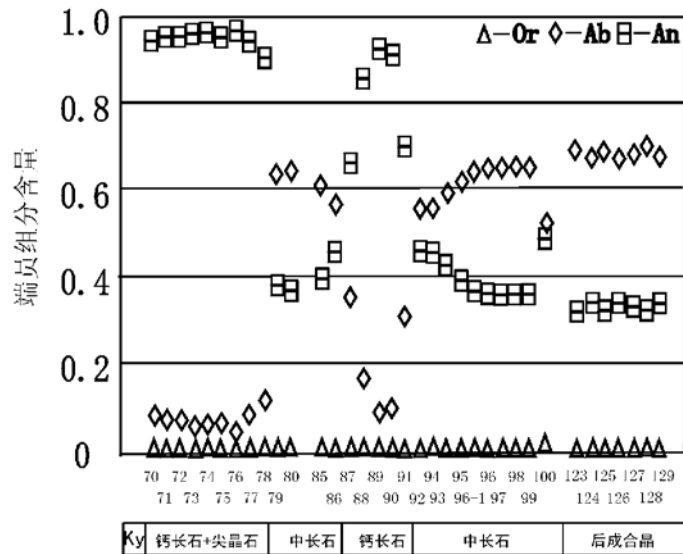


图 2 矿物相组合中斜长石成分剖面

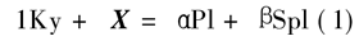
Fig. 2 Compositional profile of plagioclase in mineral assemblages

图中两行数字为点号排序

3 成分迁移估算

由于蓝晶石具有较简单而且确定的成分,因而可以通过一定的数学方法估算其形成冠状体过程中的元素迁移^[3],并进而确定反应式。

蓝晶石形成冠状体可由下式表述:



这里 α 和 β 是化学计量系数。 $\mathbf{X}$ 是矢量 ($X_{\text{Si}}, X_{\text{Al}}, \dots, X_{\text{Na}}$), 代表反应体系与周围环境间的物质交换。如果 $X_i = 0$, 该系统对元素 i 是封闭的; X_i 为正值表明系统从周围获取该

元素; 为负值表明系统向环境提供该元素。

根据 Troiliard 等 (1987), Cottonian 等 (1988) 及 Joanny 等 (1991) 的研究, 对于任一元素 i , X_i 可由下式计算 (转引自 Godard & Mabit 1998)^[3]:

$$X_i = F_v \left(V_{\text{ky}} \left(X_{\text{vol}}^{\text{pl}} N_i^{\text{pl}} / V_{\text{pl}} + X_{\text{vol}}^{\text{spl}} N_i^{\text{spl}} / V_{\text{spl}} \right) - N_i^{\text{ky}} \right) \quad (2)$$

N_i (如 N_i^{pl}) 表示元素 i 在相应矿物中的原子数; $V_{\text{spl}}, V_{\text{ky}}$ 及 V_{pl} 表示矿物的摩尔体积, 本文用 Holland & Powell (1998) 的数据^[7]; $X_{\text{vol}}^{\text{pl}}$ 和 $X_{\text{vol}}^{\text{spl}}$ 为矿物的体积分数, 可在单位面积内数点获取。 F_v 是体积变化系数, 定义为 $(\Delta V / V) + 1$ 。

涉及冠状体形成的元素有 Si, Al, Mg, Fe, Ca, Na, O。将相应数据代入式 (2) 中可以得到七个方程, 求解该方程组便可了解物质迁移情况。

由于冠状体由内、外环组成, 故可以同时分别估算整体和单一内环涉及的成分迁移, 以判定数据及计算过程的可靠性。后者即内环尖晶石与斜长石的体积分数分别为 24.68%、75.32%, 前者尖晶石与斜长石的体积分数分别为 15.6%、84.4%。将其与探针数据一起代入公式 (3) 可得两个反映物质迁移量的方程组。

这两个方程组中有两个反映体积变化的参数: F_{v1} 为整个冠状体涉及的体积变化, F_{v2} 表示内环涉及的体积变化。

由于外环为单矿物相, 仅含斜长石, 不涉及镁铁质交换, 因而 $X_{\text{Fe}1} = X_{\text{Fe}2}$, $X_{\text{Mg}1} = X_{\text{Mg}2}$ 。据此得到两个近相等的 F_{v1}/F_{v2} 比值: 1.5833 和 1.5837, 表明上述数据及计算程序是可靠的, 同时也指示上述两个方程组并不独立。

从理论上讲, 物质迁移需要能量, 最小的总物质迁移量 ($\sum |X_i|$) 是最可能的迁移量^[4]。因而可以通过分析总物质迁移量的变化趋势求得最可能的 F_{v1} 或 F_{v2} , 进而求解各元素的

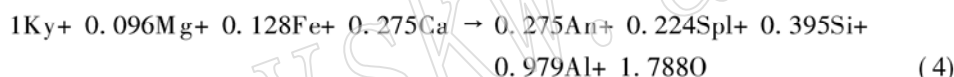
迁移量。图3显示了所有可能的总物质迁移量, 当 $F_{v1} = 1.376$ ($F_{v2} = 0.869$) 时, 总物质迁移量 ($\sum |X_{ij}|$) 最小。将 $F_{v1} = 1.376$ 、 $F_{v2} = 0.869$ 分别代入两个方程组, 可得到各元素的迁移量 (见表2)。

4 矿物反应

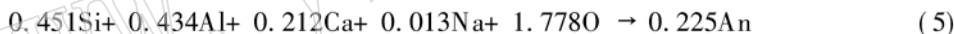
根据成分迁移数据可以推算出矿物反应式。

4.1 蓝晶石的分解反应

内环的形成: 将 X_{i2} 的值代入(1)式就可得到内环的形成反应式:



外环的形成: $X_{i1} - X_{i2}$ 的值 (见表2) 表示形成外环的物质消耗, 其正好合成斜长石:



形成的斜长石成分与探针分析结果基本一致, 表明上述计算程序是可取的。

4.2 绿辉石的分解反应

由于绿辉石初始成分的不确定性, 与绿辉石分解相关的成分迁移难以估算, 只能通过与蓝晶石分解相关的物质迁移进行大致推断。从微结构看, 后成合晶与冠状体是蓝晶石与绿辉石反应的结果, 因而, 形成冠状体所需的物质大部分来自绿辉石的分解, 同时绿辉石的分解也可能从蓝晶石的分解中得到部分物质。

从前述与蓝晶石分解相关的成分迁移计算结果看, 绿辉石的分解不但要形成 $Di + Pl$ 的后成合晶, 而且要为蓝晶石的分解提供 CaO 、 MgO 、 FeO 。该计算结果还表明, 蓝晶石的分解

表2 与蓝晶石分解相关的物质迁移量估算结果

Table 2 Material transfer calculation for the corona around kyanite

内环+ 外环		内 环		外环	
$F_{v1} = 1.376$		$F_{v2} = 0.869$			
X_{vol}^{Pl}	0.844	X_{vol}^{Pl}	0.753		
X_{vol}^{Spl}	0.156	X_{vol}^{Spl}	0.247		
X_{Si1}	0.056	X_{Si2}	- 0.395	$X_{Si1} - X_{Si2}$	0.451
X_{Al1}	- 0.545	X_{Al2}	- 0.979	$X_{Al1} - X_{Al2}$	0.434
X_{Mg1}	0.096	X_{Mg2}	0.096	$X_{Mg1} - X_{Mg2}$	0
X_{Fe1}	0.128	X_{Fe2}	0.128	$X_{Fe1} - X_{Fe2}$	0
X_{Ca1}	0.488	X_{Ca2}	0.275	$X_{Ca1} - X_{Ca2}$	0.213
X_{Na1}	0.032	X_{Na2}	0.019	$X_{Na1} - X_{Na2}$	0.013
X_{O1}	0	X_{O2}	- 1.778	$X_{O1} - X_{O2}$	1.778

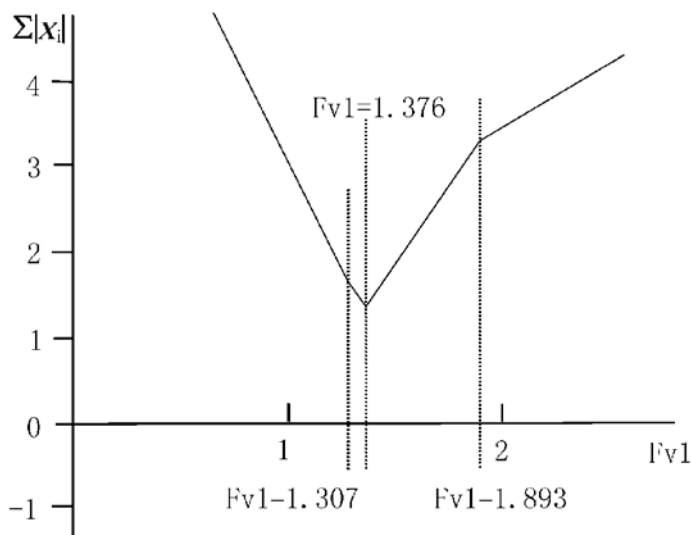


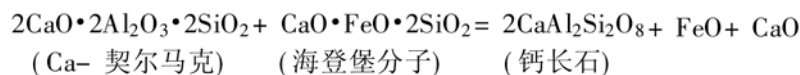
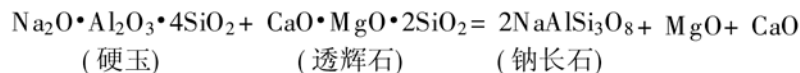
图3 物质总迁移量与 F_v 的关系

Fig. 3 Relationship between total material transfer and F_v

当 $F_{v1} = 1.376$ 时, 总迁移量最小, 此时为最可能的物质迁移

解并未如前人所说的那样为绿辉石的分解提供 SiO_2 ^[4], 而是正相反, 从环境获取 SiO_2 (表 2 中的 X_{SiO_2} 为正值)。因而前人对后成合晶及冠状体结构的成因解释与本文的计算结果不符。

从结构上看, 荣成榴辉岩中代替绿辉石的后成合晶更像是出熔结构。一般而言, 一个矿物与外来物质反应形成的结构应为冠状体或具有从外到内渐变的特点^[8]。而本文论及的后成合晶内的蠕虫状斜长石均匀地分布于后成合晶内部, 并没有与边界连接。笔者趋向于认为, 这类后成合晶形成于矿物内部的反应。本文为绿辉石的分解设计了如下反应:



上述反应发生在绿辉石内部各端员组分间, 形成的斜长石与残余的透辉石组成后成合晶, 而 $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{FeO}$ 则扩散到后成合晶体外, 与蓝晶石结合形成围绕蓝晶石的冠状体。

蓝晶石与绿辉石的相关分解并没有在封闭体系内进行。如果是, 根据前述反应, 后成合晶中钠长石与钙长石的比值应与冠状体中镁铝尖晶石与铁铝尖晶石比值相同, 但实测结果表明前者(1.99)远大于后者(0.74) (见表 1), 亦即后成合晶中的钠长石并非全形成于上述反应。我们推测有石英加入到该体系中, 与绿辉石中的硬玉分子结合形成钠长石, 这是一个已被广泛接受的降压反应^[9]。同时蓝晶石的分解也需要有 SiO_2 的补充。

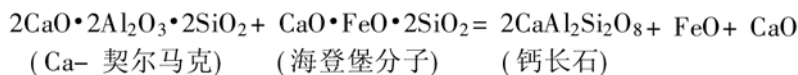
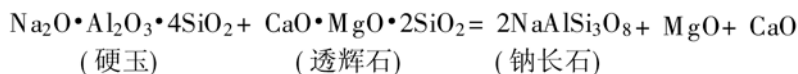
5 讨论

本文论及的绿辉石与蓝晶石的分解在含蓝晶石退变榴辉岩中比较普遍。斜长石+透辉石后成合晶代替绿辉石更是榴辉岩地区的常见现象。前人往往把这种后成合晶视为绿辉石中硬玉或 Ca- 契尔马克分子与外来石英反应的结果^[10]。但矿物与外来物质反应形成的结构应该更像冠状体, 因为这种反应总是从外向内发生的。而蠕虫状交生结构往往归因于矿物内部反应, 正如本文所提出的那样。需要同时指出的是, 本文提出的反应涉及到大量生成物质的迁出, 如果没有合适的迁移通道, 生成物的积累将阻止反应继续进行。荣成退变榴辉岩中后成合晶即绿辉石假象成明显的长条状, 表明绿辉石经历过极强的变形。因而笔者趋向于认为, 绿辉石变形形成的晶格缺陷, 特别是线状缺陷为物质的迁移提供了通道, 使得部分生成物能够及时迁出。虽然有了迁出通道, 若生成物不能及时消耗, 大量积累于反应颗粒边界也将阻碍反应继续进行。生成物与蓝晶石的及时反应使绿辉石内外始终存在化学势, 促使反应继续进行。因而绿辉石的分解与蓝晶石周围冠状体的形成相辅相成, 同时发生。

6 结论

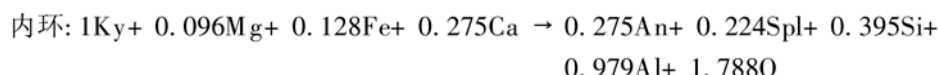
6.1 绿辉石的分解

在麻粒岩相变质条件下, 荣成含蓝晶石榴辉岩中经过变形的绿辉石发生分解。组成绿辉石的端员组分间发生反应, 形成透辉石+斜长石组成的后成合晶, 并产生多余的 CaO 、 MgO 、 FeO 。绿辉石的分解可由下式表达:



6.2 蓝晶石的分解

绿辉石分解形成的 CaO 、 MgO 、 FeO 迁移至蓝晶石边界, 与之结合, 形成环绕蓝晶石的尖晶石+ 钙长石冠状体。形成过程可由如下两个反应式表示:



上述两个反应相互关联, 互相推动, 但并不形成一个封闭系统。两者的分解均需外界 SiO_2 的补充、加入。

致 谢 杨建军博士为本文提出了许多中肯的意见。在此深表感谢。

参 考 文 献

- 1 Anthi Liati and Eberhard Seidel. Metamorphic evolution and geochemistry of kyanite eclogite in central Rhodope, Northern Greece. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1996, 123: 293~ 307.
- 2 Möller C. Decompressed eclogites in the Sveconorwegian (- Grevillian) orogen of SW Sweden: Petrology and tectonic implications. *J. Metamorphic Geol.*, 1998, 16, 641~ 656.
- 3 Godard G and Jean-Luc Mabit. Peraluminous sapphirine formed during retrogression of a kyanite-bearing eclogite from Pays de Leon, Armorican Massif, France. *Lithos*, 1998, 43: 15~ 29.
- 4 Nakamura D and Hirajima T. Granulite-facies overprinting of Ultrahigh pressure metamorphic rocks, Northeastern Su-Lu Region, Eastern China. *Journal of Petrology*, 2000, 41(4): 563~ 582.
- 5 Wang Q, Ishiwatari A, Zhao Z, *et al.* Coesite-bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China. *Eur. J. Mineral.*, 1994, 5: 141~ 152.
- 6 Yao Y, Ye K, Liu J B, *et al.* A transitional eclogite to high-pressure granulite-facies. *Lithos*, 2000, 52: 109~ 120.
- 7 Holland T J B & Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *J. Metamorphic Geol.*, 1998, 16: 309~ 343.
- 8 Rubie D C. Role of kinetics in the formation and preservation of eclogites. In: Carswell D A ed. *Eclogite facies Rocks* Blackie Glasgow: Blackie, 1990, 111~ 140.
- 9 Holland T J B. The reaction albite = jadeite + quartz determined experimentally in range 600~ 1200 °C. *American Mineralogist*, 1980, 65: 129~ 134.
- 10 Anovitz L M. Al zoning in pyroxene and plagioclase: window on late pro-grade to early retrograde $P-T$ paths in granulite terrains. *American Mineralogist*, 1991, 76: 1328~ 1343.

Decomposition of Kyanite and Omphacite in the Rongcheng Kyanite Eclogite, Eastern Sulu UHPM Terrane

Yang Tiannan

(Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037)

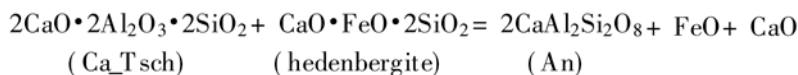
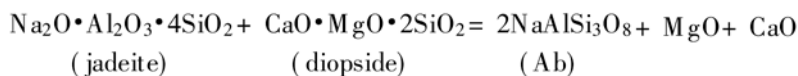
Zhang Zijun

(No. 8 Geological Party of Shandong Province, Rizhao 276826)

Key words: eclogite; kyanite; omphacite; decomposition

Abstract

Decomposition of kyanite and omphacite occurred during the decompression of kyanite-bearing eclogite at Rongcheng County, forming coronas around kyanite and symplectite after omphacite. The coronas are composed of intergrowth of anorthite and radial vermicular Fe-Mg spinel in the inner part (inner corona) and anorthite along the rim (outer corona). The symplectite is made up of intergrowth of myrmekitic diopside and plagioclase (An₃₀). Textural criteria suggest that the corona and the symplectite are coupled. The quantification of material transfer indicates that the formation of the corona gained Ca, Mg and Fe from the breakdown of the omphacite but provided no silica for the symplectization of the omphacite. The formation of the corona included two reactions, which took place simultaneously at different sites: reaction 1: 1Kyanite + 0.096Mg + 0.128Fe + 0.275Ca = 0.275An + 0.224Sp + 0.395Si + 0.979Al + 1.778O; reaction 2: 0.451Si + 0.434Al + 0.212Ca + 0.013Na + 1.778O = 0.225An. The silica, Al and O in reaction 2 were part of the products of the reaction 1. Two reactions between end-members of the omphacite are assumed, which provided Ca, Fe and Mg for the coronization of the kyanite, and produced symplectite after omphacite:



These two coupled decomposed minerals do not constitute a closed system. The decomposition of both omphacite and kyanite obtained silica from their surroundings.