

豫南中温榴辉岩中角闪石的变质演化

王晓燕

(首都师范大学地理系, 北京 100037)

崔文元

(北京大学地质系, 北京 100871)

主题词 角闪石 变质演化 中温榴辉岩 豫南地区

提 要 在该区中温榴辉岩的各个演化阶段中, 出现了不同成分的角闪石。石榴石环带及其核部的角闪石等矿物包裹体记录了前榴辉岩阶段及其进变质演化的特征。在榴辉岩阶段晚期, 蓝闪石稳定出现, 其成分环带反映了后期压力降低的连续过程; 角闪石-斜长石后成合晶为石榴石和绿辉石的退变质产物; 退变质后期, 钙质闪石大量出现。角闪石的矿物组合及其成分变化, 反映了中温榴辉岩的顺时针变质演化过程。

1 前言

角闪石作为变质基性岩中最常见的造岩矿物之一, 其矿物成分受原岩成分、变质作用条件等影响。角闪石矿物间复杂的代换, 记录了岩石的变质相及 $P-T$ 轨迹。近年来, 不同变质条件下的相平衡、矿物共生组合及闪石成分的研究进展表明, 角闪石的成分变化反映了变质作用的特征^[1-6]。

该区中温榴辉岩的各演化阶段中出现了多种闪石, 因此, 本文试图通过对不同阶段闪石的成分及组合变化, 来探讨榴辉岩的变质演化特征。

2 区域地质及榴辉岩特征

研究区位于河南省新县与湖北省大悟县的交界处, 其东界由商城-麻城断裂限定, 其它边界也由断裂所限。该区出露的地层由老至新为大别群、宿松群七角山组、苏家河群(图1)。晚太古代-早元古代的大别群出露于新县卡房一带, 西段称为桐柏群。其岩性主要为白云母斜长(二长)片麻岩夹浅粒岩、角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩及白云母石英片岩, 普遍混合岩化。中元古代宿松群七角山组分布于湖北大悟一带, 不整合覆盖于大别群之上^[6]。

该区榴辉岩分布广泛, 以成群产出为主, 聚集成带, 主要产于大别群和七角山组中。分为中温榴辉岩($T=640\pm 40^{\circ}\text{C}$, $P=27\times 10^8\text{Pa}-30\times 10^8\text{Pa}$)和低温榴辉岩($T=550\pm 50^{\circ}\text{C}$,

• 本文为国家自然科学基金项目(49372100)的部分研究成果。
本文于1995年8月1日收到, 1995年10月30日改回。

$P=11\times 10^8\text{Pa}-12\times 10^8\text{Pa}$)^①。

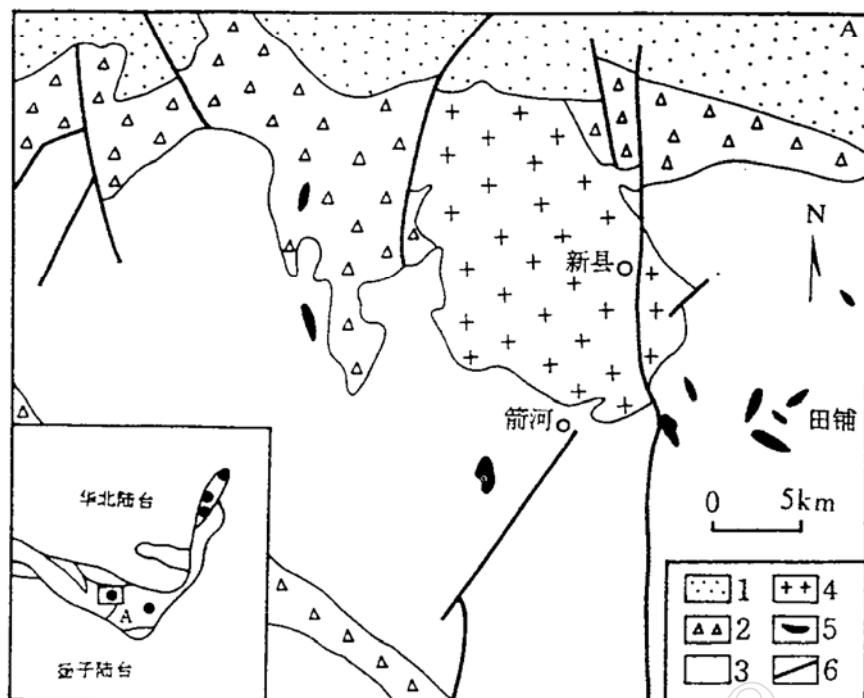


图1 豫南地区区域地质简图

Fig. 1 Diagrammatic regional geological map of southern Henan

1—苏家河群；2—宿松群七角山组；3—大别群新县组；4—花岗岩；5—榴辉岩；6—断裂

中温榴辉岩产于大别群中，主要呈似层状、团块状产于白云母斜长片麻岩中。向东与湖北、安徽大别榴辉岩连成一体。新鲜的榴辉岩常为暗绿色，其中的白云母、蓝晶石与自形石榴石呈无规则分布。岩石一般略有退变，有些手标本上，可见蓝黑色闪石晶体；为致密块状构造，粒状变晶结构。薄片可见柯石英或其假象呈包裹体产于石榴石、蓝晶石等矿物内。有些样品中的石榴石成分环带明显，包裹体发育，后者主要有闪石、帘石、金红石和磷灰石等。石榴石一般具有绿色退变边，由角闪石+斜长石±磁铁矿±绿帘石±绿泥石合晶组成；绿辉石退变强烈，呈角闪石+斜长石后成合晶；蓝晶石多呈不规则残余状，退变为钠云母，最外围为钠长石边；偶见蓝晶石出现珍珠云母退变边。

该区中温榴辉岩的显著特征是出现蓝闪石，这不同于苏鲁地区含柯石英的榴辉岩。蓝闪石呈较大晶体包围石榴石，局部与之平衡；自核部向边部颜色由浅变深，最后与绿色后成合晶闪石一致。蓝闪石中常有石榴石、绿辉石、蓝晶石包裹体，还有不规则状滑石，滑石具有透闪石边^[6]。

3 角闪石的特征

角闪石的化学成分分析结果见表1，以23个氧为基础，改变 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值，使阳离子

① 王晓燕. 鄂北、豫南榴辉岩的岩石学及变质演化. 北京大学博士学位论文, 1994.

表 1 角闪石的化学成分 (wt%)
Table 1 Chemical composition of representative amphiboles (wt%)

样号	24-5a	24-5b	24-5e	24-5c	24-5d	24-5 ^l	22-4a	22-4b	22-4c	22-4d	2H16a	2H12a	2H12b	23-3	
产地	福田河						箭河						酒店		
名称	蓝闪石	蓝闪石	蓝闪石	冻蓝闪石	镁绿钙闪石	镁绿闪石	冻蓝闪石	青铝闪石	冻蓝闪石	镁绿闪石	镁绿闪石	浅闪石	镁绿钙闪石	蓝透闪石	
	Amp 2	Amp 2	Amp 2	Amp 3	Amp 4	Amp 1	Amp 3	Amp 2	Amp 1	Amp 1	Amp 1	Amp 1	Amp 4	Amp 5	Amp 3
SiO ₂	56.19	54.63	55.11	50.85	43.12	43.95	46.93	53.68	49.22	41.51	42.60	45.90	40.37	55.24	
TiO ₂	0.03	0.03	0.03	0.10	0.16	0	0.06	0.03	0.19	0.19	0.18	0.12	0.35	0.12	
Al ₂ O ₃	9.85	10.02	10.18	10.49	11.51	17.22	16.03	10.86	12.49	16.98	31.01	14.50	17.18	7.36	
FeO	7.76	8.59	8.68	12.30	16.35	12.23	12.40	10.49	11.04	15.53	6.36	10.50	15.95	9.04	
MnO	0.02	0.04	0.02	0.08	0.14	0.11	0.12	0.14	0.06	0	0.02	0.04	0.15	0	
MgO	13.12	13.34	12.33	12.77	10.61	12.79	10.12	12.06	12.58	9.95	5.10	13.20	9.35	15.58	
CaO	3.49	3.48	3.46	6.87	10.65	7.72	6.72	4.08	6.13	7.17	6.52	8.94	8.71	6.57	
Na ₂ O	6.33	6.32	6.45	4.89	3.04	4.99	5.24	5.54	5.40	5.47	6.13	4.68	5.40	4.29	
K ₂ O	0.08	0.09	0.08	0.25	1.04	0.05	0.04	0	0.02	0.01	0.07	0.33	0.26	0	
总和	6.87	96.54	96.34	98.60	96.62	99.06	97.66	96.88	97.13	96.81	97.99	98.21	97.72	98.20	
Si ^{IV}	97.78	7.59	7.72	7.13	6.49	6.10	6.67	7.47	6.95	6.03	6.01	6.50	5.94	7.58	
Al ^{IV}	0.22	0.41	0.28	0.87	1.51	1.90	1.33	0.53	1.05	1.97	1.99	1.50	2.06	0.42	
T 位	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
Al ^{VI}	1.39	1.23	1.40	0.87	0.53	0.92	1.36	1.26	1.02	0.94	3.16	0.94	0.93	0.77	
Fe ³⁺	0.08	0.42	0.07	0.54	0.43	1.33	0.46	0.55	0.66	1.22	0.75	0.48	0.71	0.50	
Ti	0	0	0	0.01	0.02	0	0.01	0	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04	0.01	
Mg	2.71	2.76	2.58	2.67	2.38	2.65	2.15	2.50	2.65	2.15	1.07	2.79	2.05	3.19	
Fe ²⁺	0.82	0.58	0.95	0.90	1.63	0.09	1.02	0.67	0.65	0.67	0	0.77	1.25	0.47	
Mn	0	0	0	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0	0	0	0.02	0	
M1,2,3 位	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
Ca	0.52	0.52	0.52	1.03	1.72	1.15	1.02	0.61	0.93	1.12	0.98	1.36	1.37	0.97	
Na	1.48	1.48	1.48	0.97	0.28	0.85	0.98	1.39	1.07	0.88	1.02	0.64	0.63	1.03	
M4 位	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Na	0.22	0.22	0.27	0.36	0.60	0.49	0.47	0.10	0.40	0.66	0.66	0.64	0.92	0.11	
K	0.01	0.02	0.01	0.04	0.02	0.01	0.01	0	0	0	0.01	0.06	0.05	0	
A 位	0.23	0.24	0.28	0.40	0.80	0.50	0.48	0.10	0.40	0.66	0.67	0.70	0.97	0.11	
O	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	
MF	0.77	0.83	0.73	0.75	0.59	0.97	0.68	0.79	0.80	0.76	1	0.78	0.62	0.87	
FA	0.05	0.25	0.04	0.38	0.45	0.59	0.25	0.31	0.39	0.56	0.19	0.34	0.44	0.42	

MF=Mg/(Mg+Fe²⁺), FA=Fe³⁺/(Fe³⁺+Al^{VI})

测试仪器及条件: EPM-810Q 电子探针, 加速电压 15kV, 束流 15mA, 回应时间 10 秒, 天然矿物为标样。

测试单位及测试者: 北京大学地质系探针室舒桂明、李小风。

总数等于13（不包括K、Na、Ca），计算其结构式，然后根据Leake (1978)⁽⁷⁾的角闪石分类进行命名。

对中温榴辉岩中的角闪石，据其生成阶段及产状，按照演化顺序将其分为五种：

(1) Amp 1，主要为钠钙质闪石，有冻蓝闪石、镁绿闪石。具有较高的MF (0.76—1.00)、 Al^N (1.09—1.99) 和 $(Na+K)_A$ (0.41—0.66)。Amp 1 呈细粒包裹体产于石榴石核部（照片1），这些包裹体代表榴辉岩形成之前的矿物组合。

(2) Amp 2，主要为蓝闪石，偶有青铝闪石，具有较高 Na_{M4} 。Amp 2 一般围绕石榴石、绿辉石，有时包裹石榴石、绿辉石、蓝晶石、绿帘石等榴辉岩阶段的矿物，与石榴石、绿辉石局部平衡，为浅色大斑晶（照片2）。这种大斑晶的出现，是榴辉岩变质过程中水加入的良好标志，但此时斜长石未出现，仍属榴辉岩相变质条件。Amp 2 常显示出明显的环带，从核部向边部，颜色由浅变深，成分由钠质闪石变为钠钙质闪石，至边部为绿色钙质闪石。如表1中的24-5a至24-5d，即是同一闪石颗粒从核部至边部的成分，22-4b至22-4a也是如此（图2a）。从核部至边部， Na_{M4} 、 Al^N 、MF降低，Ca、 Na_A 及 Al^N 增加，表明蓝闪石替代 $(NaAlCa_{-1}Mg_{-1})$ 降低，而浅闪石替代 $(NaAlSi_{-1})$ 和 Fe 替代 Mg_{-1} 增强，但 $Ca+Na$ 保持不变，这说明闪石环带并非由 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值变化所造成。从 Amp 1 至 Amp 2， Al^N 、FA 降低， Na_{M4} 增高，表明蓝闪石替代增大。这一替代主要受形成压力变化的控制，在高压下，有利于替代进行^(8,9)。因此，这一变化反映了压力的升高。

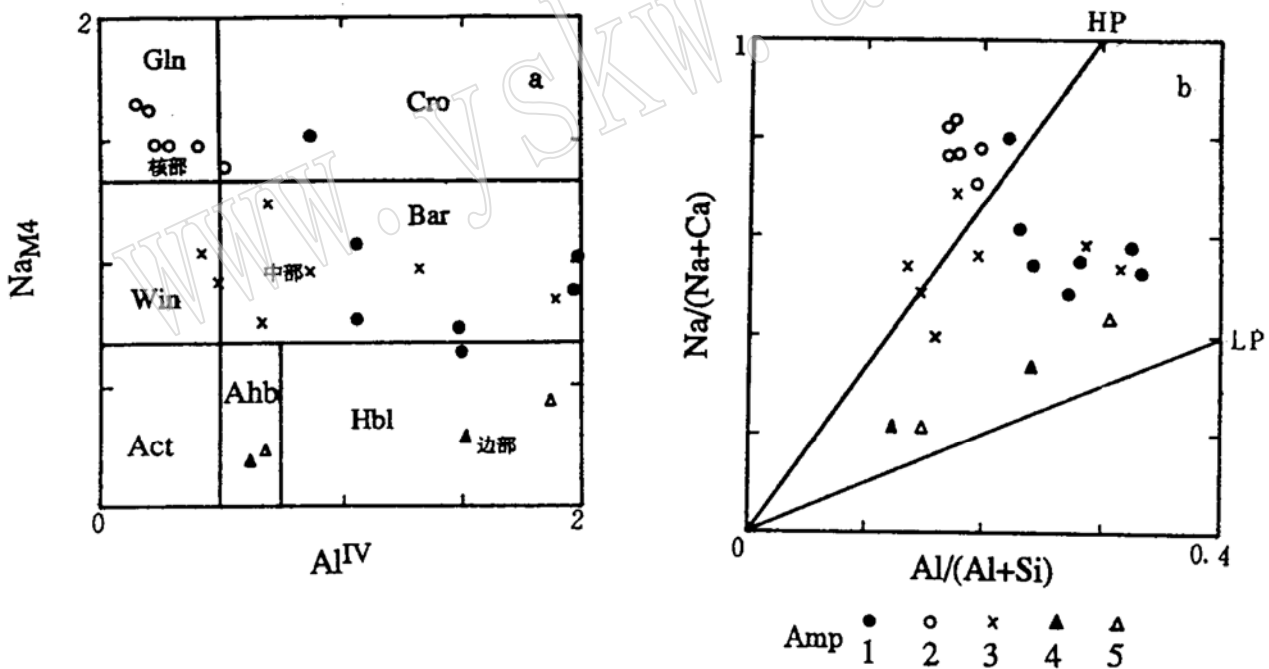


图2 角闪石成分图解

Fig. 2 Composition of amphiboles

a— Na_{M4} - Al^N 图解⁽¹²⁾; b— $Na/(Na+Ca)$ - $Al/(Al+Si)$ 图解⁽¹³⁾; Gln—蓝闪石; Cro—青铝闪石; Win—蓝透闪石; Bar—冻蓝闪石; Act—阳起石; Hbl—普通角闪石; Ahb—阳起石质角闪石

(3) Amp 3，为钠钙质闪石，主要有冻蓝闪石、蓝透闪石、镁绿闪石，其 Na_A 值低 (0.36—0.47)。Amp 3 常为在 Amp 2 边部生长的颜色较深的楔状闪石（照片2），有时以退

变闪石出现于石榴石边部, 呈变斑晶状。与 Amp 2 相比, Amp 3 的 Al^{IV} 增加, Na_{M4} 减少, Al^{IV} 明显降低, 蓝闪石替代减少, 表明压力开始降低。

(4) Amp 4, 为钙质闪石, 如浅闪石、镁绿钙闪石等, A 位充填较多。Amp 4 出现于石榴石、绿辉石的退变边处, 与斜长石组成 Amp-Pl 后成合晶, 在石榴石边部呈蠕虫状 (照片 1 及照片 2)。从 Amp 3 至 Amp 4, Na_{M4} 及 MF 值降低, 主要为浅闪石替代和契尔马克替代。

(5) Amp 5, 以阳起石质角闪石及镁绿钙闪石为主, Al^{IV} 、 Na_{M4} 降低。Amp 5 在退变后期, 由于 Amp-Pl 后成合晶逐渐变大、完全重结晶而形成, 此时绿辉石已经消失 (照片 3)。Amp 5 的 Na_{M4} 、 Al^{IV} 最低, Ca_{M4} 、 Al^{IV} 增加, A 位空缺减少, 这些特征与低压结晶条件下的闪石一致^[9-11]。因此, Amp 4→Amp 5 反映了压力降低的过程。

图 2b 中, HP 及 LP 分别为 Laird 和 Albee (1981)^[13] 研究划分的基性岩中高压闪石和低压闪石的成分分区。Amp 2 的成分落在高压区, Amp 1→Amp 2→Amp 3→Amp 4→Amp 5 反映出低压原岩经受高压变质然后压力降低的轨迹。

4 讨论

钠质闪石作为原生矿物出现于超高压岩石中, 如蓝闪石仅发现于含柯石英假像的 Parigi, Dora Maira 的钠质白片岩中^[14]。Wang Xiaomin 等 (1992)^[15] 报道了蓝闪石出现于不含柯石英的榴辉岩中。在本次研究的蓝闪石的成分中, 其 Na_{M4} 和 Si 值与上述产地的蓝闪石相似, 但 $(Na+K)_A$ 略高。蓝闪石的特点表明其稳定压力范围很高。另外, 蓝闪石大斑晶及不同成分闪石在各阶段的出现, 表明该区榴辉岩形成于高水活度条件下。

根据显微镜观察发现, 滑石或呈包裹体残留于蓝闪石中, 或呈不规则状与蓝晶石平衡共生。用高分辨透射电镜观察到蓝闪石中有滑石的残留体, 滑石层非常规则, 与后期蚀变所形成的滑石明显不同 (照片 4), 说明该滑石为早期原生矿物, 现已大部分转变为蓝闪石。滑石与绿辉石中的硬玉分子反应形成蓝闪石, 与绿辉石中的透辉石分子反应形成透闪石。这与显微镜下观察到滑石具有透闪石边的现象完全吻合。这些组合的变化显示出榴辉岩的形成与水有密切关系。

在该区普遍可见不同成分的闪石共存于同一颗粒, 均以钠质闪石 (Amp 2) 为核, 以钠钙质闪石、钙质闪石 (Amp 3) 为边, 未见相反的现象。结构显示出 Amp 3 的生成晚于榴辉岩阶段。这种生长环带为不平衡生长, 不能用于计算钠质闪石与钙质闪石的混溶间隔。Liknoidor 和 Plyusnina (1992) 据实验认为, 蓝闪石的环带记录了流体的变化^[16]。总之, 闪石环带的出现表明变质条件的复杂性。

另外, 根据中温榴辉岩变质演化 $P-T$ 轨迹的研究, 可估算榴辉岩组合的形成条件。根据 Graham 和 Powell (1984) 的石榴石-角闪石的 Fe-Mg 互换温度计^[17], 得到了石榴石核部与角闪石包裹体 (Amp 1) 的形成温度为 401℃; 而石榴石边部与基质角闪石 (Amp 2) 之间的温度为 490—610℃。根据绿辉石的硬玉分子含量, 可估算最低形成压力^[18,19]。石榴石边部的辉石包裹体, 其硬玉分子含量约为 40 mol%, 估算其形成压力为 $15 \times 10^8 \text{ Pa}$, 温度为 460℃; 根据滑石反应形成蓝闪石, Amp 2 的形成压力 $< 25 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。根据 Spear (1980)^[20] 和 Plyusnina (1982)^[21] 的 Amp-Pl 温度计, 可估算出 Amp 4 和 Amp 5 的形成条件分别为

470—510°C, $6 \times 10^8 \text{Pa}$ — $8 \times 10^8 \text{Pa}$ 和 450°C, $4 \times 10^8 \text{Pa}$ ^[6]。

根据上述角闪石的成分变化及温压条件的估算, 作者认为, 该区的榴辉岩具有多阶段的顺时针演化过程(图3)。

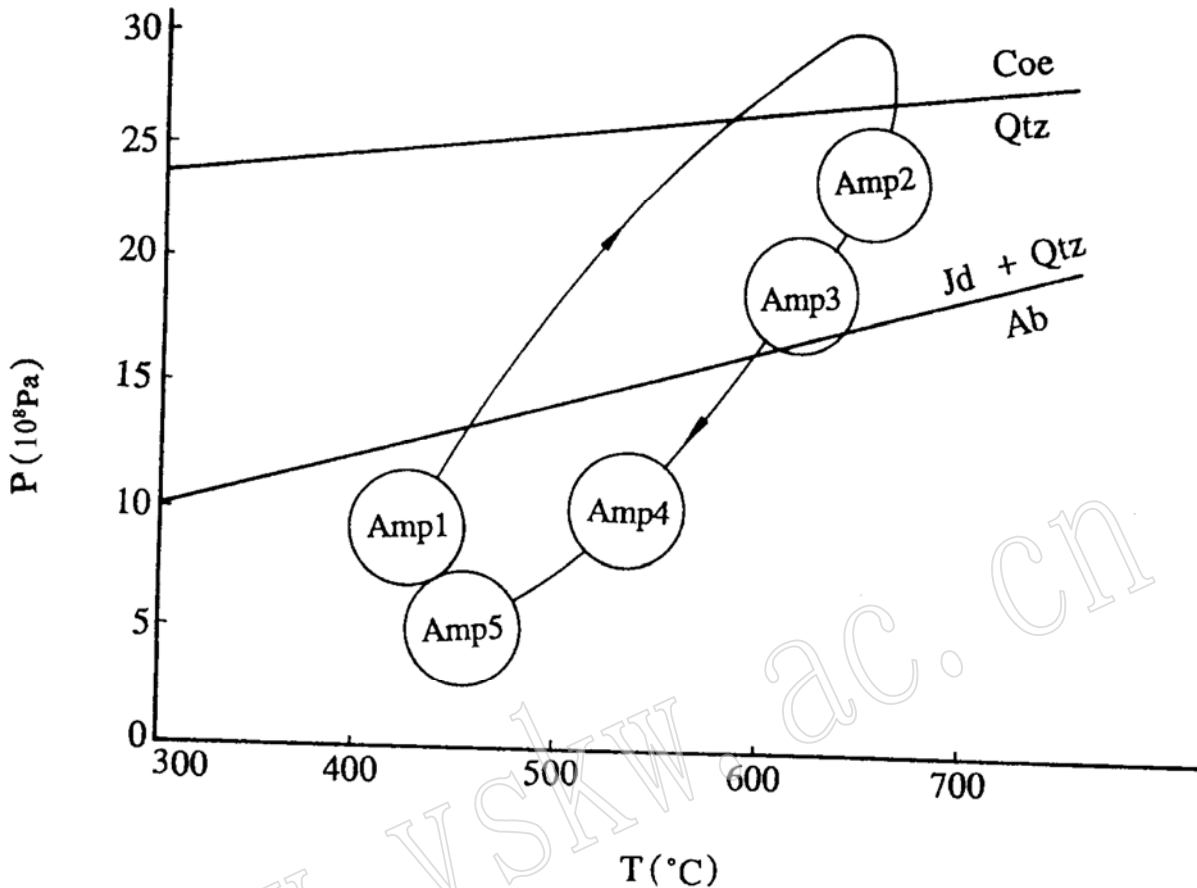


图3 榴辉岩的演化过程

Fig. 3 Evolutionary process of eclogite

Coe—柯石英; Qtz—石英; Jd—硬玉; Ab—钠长石

5 结论

(1) 在中温榴辉岩中, 根据角闪石的生长阶段及产状, 将角闪石按照演化顺序分为五种。

(2) 角闪石的成分环带反映了不平衡生长, 不能用以计算混溶间隔。

(3) 各阶段闪石的出现及环带特点, 反映了水在该区榴辉岩的形成演化过程中具有一定作用。

(4) 闪石的矿物组成及微结构关系表明, 该区的榴辉岩经历了多阶段的顺时针变质演化。

本项研究是在导师董申保教授指导下完成的。野外工作得到了张立飞博士和刘树忠同学的大力帮助; 王启明博士、舒桂明老师、李小风老师对样品进行了测试分析。在本文撰写过程中, 作者与魏春景博士进行了有益的讨论。作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Liou J and Maruyama S. Parageneses and compositions of amphiboles from Franciscan jadeite-glaucophane type facies series metabasites at Cazadero, California. *Journal of Metamorphic Geology*, 1987, 5: 371—385.
- 2 Thieblemont D, Triboulet C and Godard G. Mineralogy and petrology and $P-T-t$ path of Ca-Na amphibole assemblages, Saint-Martin des Noyers formation, Vende, France. *J. Metamorphic Geol.*, 1988, 6: 697—715.
- 3 Reynard K, Balleve M. Coexisting amphiboles in an eclogite from the western Alps; new constraints on the miscibility gap between sodic and calcic amphiboles. *J. Metamorphic Geol.*, 1988, 6: 333—350.
- 4 Messiga B, Tribuzio R, Cancia F. Amphibole evolution in Variscan eclogite-amphibolites from the Savona crystalline massif (Western Ligurian Alps, Italy); controls on the decompressional $P-T-t$ path. *Lithos*, 1992, 27: 215—230.
- 5 河南省地质矿产局. 河南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989.
- 6 Wang Xianyan. Two contrasting types of eclogites in Southern Henan and Northern Hubei Provinces. In: Dong S B. The glaucophane-schist belt of Northern Yangtze Craton. Beijing: Science Press, 1996 (in press).
- 7 Leake B E. Nomenclature of amphiboles. *Mineral. Mag.*, 1978, 42: 533—563.
- 8 Brown E H. The crossite content of Ca-amphiboles as a guide to pressure of metamorphism. *J. Petrol.*, 1977, 18: 53—72.
- 9 Ungaretti L, Smith D C, Rossi G. Crystal-chemistry by X-ray structure refinement and electron microprobe analyses of a series of sodic-calcic to alkali amphiboles from the Nybø eclogite pod, Norway. *Bull. Mineral.*, 1981, 104: 400—412.
- 10 Ungaretti L, Lombardo B, Domeneghetti C, Rossi G. Crystal-chemical evolution of amphiboles from eclogitic rocks of the Sesia-Lanzo Zone, Italian western Alps. *Bull. Mineral.*, 1983, 106: 645—672.
- 11 Rossi G, Ungaretti L. The crystal-chemistry of clinopyroxenes and amphiboles in high pressure metamorphism. *Atti Convegno Lincei*, 1989, 80: 298—323.
- 12 Ridley J, Dixon J E. Reaction pathways during the progressive deformation of a blueschist metabasite; the role of chemical disequilibrium and restricted range equilibrium. *J. Metamorphic Geol.*, 1984, 2: 115—128.
- 13 Laird J, Albee A L. Pressure, temperature and time indicators of mafic schists: their application to reconstruction the polymetamorphic history of Vermont. *Am. J. Sci.*, 1981, 281: 127—175.
- 14 Kienast J R, Lombardo B, Biino G, Pinardon J L. Petrology of very-high-pressure eclogitic rocks from the Brossasco-Isasca Complex, Dora Maita Massif, Italian Western Alps. *J. Metamorphic Geol.*, 1991, 9: 19—34.
- 15 Wang Xiaomin, Lion J G, Maruyama S. Coesite-bearing eclogites from the Dabie mountains, Central China: petrogenesis, $P-T$ paths and implications to tectonics. *J. Geology*, 1992, 100: 231—250.
- 16 Liknodov G G, Plyusnina L P. Fluid regime of glaucophane metamorphism. *Water-rock interaction*. Balkema, Rotterdam, 1992, 1519—1522.
- 17 Graham C M, Powell R. A garnet-hornblende geothermometer; calibration, testing and application to the Pelone schist, Southern California. *J. Metamorphic Geol.*, 1984, 2: 13—31.
- 18 Holland T J B. The reaction albite=jadeite+quartz determined experimentally in the range 600—1200°C. *Am. Mineral.*, 1980, 65: 129—134.
- 19 Holland T J B. The experimental determination of activities in disordered and short-range ordered jadeitic pyroxenes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1983, 82: 214—220.
- 20 Spear F S. NaSi-CaAl exchange equilibrium between plagioclase and amphibole. An empirical model. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1980, 72: 33—41.
- 21 Plyusnina L P. Geothermometry and geobarometry of plagioclase-hornblende bearing assemblages. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1982, 80: 140—146.

Metamorphic Evolution of Amphiboles in Medium-Temperature Eclogite from Southern Henan

Wang Xiaoyan

(Department of Geography, Capital Normal University, Beijing 100037)

Cui Wenyuan

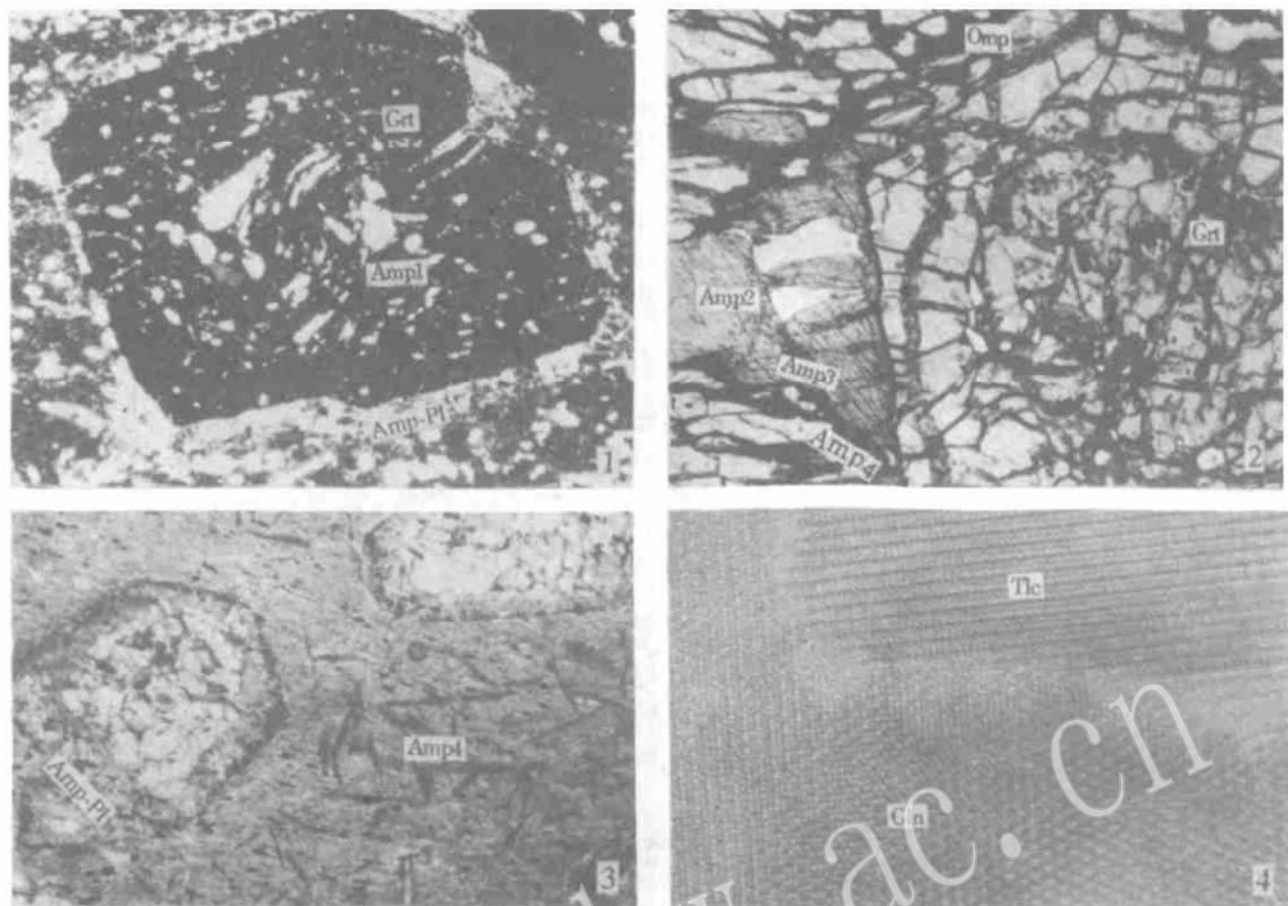
(Department of Geology, Peking University, Beijing 100871)

Key words: amphibole; metamorphic evolution; medium-temperature eclogite; southern Henan

Abstract

Microtextural relations and mineral compositions indicate that medium-temperature eclogite in southern Henan underwent a clockwise $P-T$ path.

A prograde evolutionary stage of the eclogite is recorded by composition zoning and inclusions in garnet. The eclogitic event produced the assemblage of garnet, omphacite, rutile and coesite. The composition zoning of matrix eclogitic amphibole (Amp 2) reveals that the subsequent evolution of the eclogitic facies must have experienced a late reequilibration under reduced pressure. The formation of Amp-P1 symplectite represents the early result of the destabilization of omphacites and garnets in the amphibolite facies. Subsequent retrogression resulted in the complete breakdown of omphacite recorded by amphibole growth, with no relict of the high pressure assemblage preserved.



图版说明

- 1 中温榴辉岩中角闪石 (Amp 1) 等包裹体的分布, 石榴石边部出现 Amp-Pl 合晶 正交偏光 $\times 12.5$
- 2 中温榴辉岩中蓝闪石 (Amp 2) 与石榴石、绿辉石平衡共生, 蓝闪石由核部向外, 为 Amp 2 \rightarrow Amp 3 \rightarrow Amp 4 单偏光 $\times 25$
- 3 中温榴辉岩中石榴石退变, 核部保持完整, 边部出现 Amp-Pl 合晶, 最外圈是 Amp+Pl+Ep+Mag 退变边。基质中出现 Amp 4 微晶, 不透明矿物为钛铁矿 单偏光 $\times 100$
- 4 中温榴辉岩中滑石层包裹于蓝闪石中 $\times 500K$ 测试仪器及测试条件: H9000 高分辨透射电镜; 加速电压 300kV。测试单位及测试者: 北京大学电镜室 王启明