

文章编号: 1000- 6524 (2003) 02- 0157- 05

大别山榴辉岩富流体退变质阶段的白云母

赵成浩¹, 顾连兴¹, 杜建国², 翟建平¹, 张光辉¹

(1. 南京大学地球科学系 成矿作用国家重点实验室, 江苏 南京 210093; 2. 安徽省地质调查研究院, 安徽 合肥 230001)

摘要: 大别山榴辉岩的退变质过程可分为贫流体、弱流体和富流体3个阶段。贫流体阶段的主要作用是榴辉岩造岩矿物的重结晶、同质多象转变和固溶体出溶; 弱流体阶段有少量流体参与, 并且其压力、温度较高, 形成的白云母主要为多硅白云母; 富流体阶段在大量流体参与下, 形成大量的低压含水矿物, 其中包括多种白云母。富流体阶段早期的白云母主要为多硅白云母, 其Si原子数介于6.5 pfu和7.2 pfu之间; 晚期白云母成分复杂, 包括钠云母、白云母和珍珠云母。黑云母是退变质作用最晚期形成的云母。退变质云母具环带结构, 其内带为钠云母, 中带为白云母和珍珠云母, 外带为黑云母。

关键词: 白云母; 多硅白云母; 榴辉岩; 退变质作用; 大别山

中图分类号: P578.959

文献标识码: A

White micas formed at the fluid rich retrograde stage of the Dabieshan eclogites

ZHAO Cheng_hao¹, GU Lian_xing¹, DU Jian_guo², ZHAI Jian_ping¹ and ZHANG Guang_hui¹

(1. Department of Earth Sciences, State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Anhui Academy of Geological Survey and Research, Hefei 230001, China)

Abstract: The retrograde metamorphism of eclogites in Dabieshan area can be divided into fluid_poor, fluid_bearing and fluid_rich stages. Recrystallization, polymorphous conversion and exsolution of rock_forming minerals of the eclogites seem to have been the main processes of the fluid_poor stage. The fluid_bearing stage proceeded at high temperatures and pressures, and is characterized by the participation of minor fluids. White mica formed at this stage is dominated by phengite. Due to the participation of large quantities of fluids, the fluid_rich stage is characterized by the formation of various low_pressure and hydrous minerals including a variety of white micas. White mica formed at earlier fluid_rich stage is dominantly phengite, with atom number of Si varying between 6.5 and 7.2 pfu. White mica of the late fluid_rich stage is markedly variable in composition, consisting of paragonite, muscovite and margarite. Biotite is the last kind of mica formed in the process of diaphthoresis. Also studied in this paper is a zoned structure of retrograde mica, which consists of an inner zone of paragonite, an intermediate zone of muscovite_margarite intergrowths and an outer zone of biotite.

Key words: white mica; phengite; eclogite; retrograde metamorphism; Dabie Mountain

大别山榴辉岩在折返过程中经历了多阶段退变质和流体作用。Gu Lianxing等(2002)根据流体参与程度的不同,将整个退变质过程分为贫流体、弱流体和富流体3个阶段。贫流体阶段发生于榴辉岩相环境中,是退变质的最早阶段,流体相对贫乏,主要作用是榴辉岩原生造岩矿物(石榴子石、绿辉石和柯石英等)的同质多象转变、重结晶和固溶体出溶;弱流体阶段发生于榴辉岩相退变质晚期,有大量流体参与,其产物

以蓝晶石、金红石、富钠辉石和高压含水矿物多硅白云母、黝帘石(斜黝帘石)等为特征,并形成了相当数量的含金红石脉体,而角闪石和其他含水矿物很少或不出现;富流体阶段发生于低角闪岩相至近地表环境下,形成了大量含水和挥发分的矿物,如白云母、黑云母、闪石、帘石、磷灰石、硫化物、碳酸盐等。前人的研究表明,榴辉岩中由退变质作用形成的白云母主要是多硅白云母(Liou *et al.*, 1994; 张泽明等, 1995;

收稿日期: 2002- 04- 28; 修订日期: 2002- 12- 17

基金项目: 原地质矿产部“九五”攻关资助项目(9501102- 04- 1)

作者简介: 赵成浩(1977-), 男, 硕士研究生, 矿床学专业。

张希道等, 1999; 王清晨等, 1999; 顾连兴等, 2001), 在榴辉岩相退变质晚期(弱流体阶段)所形成的白云母主要也是多硅白云母(Gu Lianxing *et al.*, 2002)。但是, 对于有大量流体参与的富流体阶段所形成的白云母成分目前尚缺乏系统研究。本文将在大别山退变质榴辉岩中云母类矿物电子探针测定的基础上, 总结富流体阶段白云母的成分特征, 并进一步探讨其演化规律及其成因。

1 富流体阶段退变质榴辉岩岩相学

富流体阶段以形成大量含水退变质矿物为特征。在露头上, 含水矿物及其集合体主要呈两种方式产出: 脉状充填和面型交代。最常见的脉有角闪石±绿帘石+斜长石、白云母+石英+阳起石、绿帘石+白云母+石英、白云母+黑云母+石英和石英+碳酸盐±黄铁矿等。这些脉通常两壁平整, 与围岩界限清楚, 宽度多为几至几十厘米, 延伸可达数米以上, 脉中矿物常垂直脉壁生长, 表明这些脉是大量流体在隆升、减压和扩容环境下在较大范围内运移的产物。一些直径数十厘米到数米的较小榴辉岩体, 其边部常首先发生退变质, 形成面型退变质分带, 即从内部红褐色的新鲜榴辉岩往外过渡为灰褐色的角闪岩化榴辉岩, 再往外渐变为暗绿色角闪岩或斜长角闪岩。

镜下可见面型交代的典型结构, 包括次变边结构、后成合晶次变边结构、斑杂状后成合晶结构和弥散型交代结构等。次变边结构包括金红石的钛铁氧化物次变边、白云母的黑云母次变边和石榴石、绿辉石和角闪石次变边等。有时次变边中的角闪石与斜长石交生, 形成后成合晶次变边结构(张泽明, 1996; Gu Lianxing *et al.*, 2002)。斑杂状后成合晶则是由大量含水镁铁矿物与斜长石微晶构成的文象状或蠕虫状显微交生体, 在岩石中呈斑杂状或不规则状分布, 其含水镁铁矿物成分以角闪石为主, 次为绿帘石, 有时可见黑云母。合晶矿物可因重结晶而形成较粗粒的变晶。

大别山榴辉岩中的退变质角闪石均属于钙质角闪石, 其中包括阳起石质角闪石、镁角闪石、硅质浅闪石、浅闪石、浅闪石质角闪石、铁浅闪石质角闪石、含铁韭闪石质角闪石和含铁韭闪石(Gu Lianxing *et al.*, 2002)。与次变边后成合晶相比, 斑杂状后成合晶中斜长石更贫钙, 角闪石较贫钠(张泽明等, 1996), 因此, 斑杂状后成合晶是退变质作用更晚阶段、温度和压力更低条件下的产物。

2 白云母结构和成分

白云母是榴辉岩富流体退变质阶段的典型产物之一。该阶段的白云母又可分为早、晚两期。早期白云母颗粒较大, 多呈鳞片状, 片径通常为0.05~0.2 mm, 常与角闪石、绿帘石、钠长石、石英和碳酸盐等一起, 直接交代榴辉岩中石

榴石、蓝晶石和绿辉石等原生超高压矿物或充填岩石中的开放裂隙。交代成因者多具弯曲的“冻结”边界(Spry, 1979), 表明界面能尚未达到平衡。晚期白云母主要呈毛毡状集合体, 常交代富流体阶段早期形成的各种含水矿物(包括早期形成的鳞片状白云母)。集合体中的微细鳞片直径多为几到几十微米。在出现毛毡状白云母的岩石中, 石榴石和绿辉石等超高压矿物已几无残存。有时, 毛毡状白云母中可以出现由微细鳞片重结晶而形成的较大鳞片, 其片径可达数十微米以上。这两期白云母均可被黑云母所交代。对富流体阶段早期白云母所做的测试及分析可参见顾连兴等(2001), 在此不再赘述。电子探针成分测定在南京大学内生金属矿床成矿作用国家重点实验室JXA-8800M型仪器上完成, 加速电压15 kV, 束流 1×10^{-8} A, 标样来自美国国家标准局。

标本Db-51取自于石马乡天台医院湖道中。榴辉岩呈块状, 暗绿色, 镜下可见石榴石具角闪石次变边。绝大部分绿辉石已经消失, 毛毡状白云母强烈交代角闪石和绿帘石等含水矿物, 因而这种毛毡状白云母是富流体阶段晚期的产物(富流体阶段早期是角闪石(绿帘石等))。在该标本中, 笔者选择富流体阶段晚期毛毡状白云母中鳞片较大者做了电子探针分析, 并将测定值以24个氧原子、2个氢氧根离子为基准做了成分计算, 其结果(表1)为 $\text{Si}_{6.18} \text{Al}_{5.79} \text{Ca}_{0.03} \text{Na}_{1.40} \text{K}_{0.18}$ 。由此可知, 该白云母的 $\text{Na}/(\text{K} + \text{Na})$ 值为0.89, 属钠云母。此外, 在该标本的毛毡状白云母中还发现了具有环带结构的白云母颗粒(图1)。不同环带的电子探针成分测定和原子数计算结果列于表1, 并将白云母和黑云母的成分分别投影于图2和图3(图2中阴影表示固溶体混溶区)。

内带的白云母在图2中落入钠云母区, 为典型的钠云母, 其 $\text{Na}/(\text{K} + \text{Na})$ 值为0.90~0.95, 这与自然界钠云母的 $\text{Na}/(\text{K} + \text{Na})$ 值不低于0.85(Burnham *et al.*, 1964; Gomez-Pugnaire, 1979; Karabinos, 1981)一致。该钠云母的 $(\text{Fe} + \text{Mg})$ 为0.09~0.11 pfu, 也与自然界中钠云母 $(\text{Fe} + \text{Mg})$ 不超过0.237 pfu且大多数小于0.10 pfu(Guidotti *et al.*, 1998)的规律相一致。外带成分为黑云母, 其成分在 $^{IV}\text{Al}-\text{Fe}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 分类图(图3)中接近铁叶云母。

中带的成分较为复杂, 两个测点的特征是低钙, 其 $\text{Na}/(\text{Na} + \text{K})$ 值均未超过白云母中该比值的最大值0.38(Guidotti *et al.*, 1998), 在图2中很接近白云母区。然而, 另有5个测点的CaO含量较高, 最高者达6.55%, 以22个氧原子为基准所算得的Ca原子数高达0.86, 在图1中的投点落于Mrg-Mus-Pg的不混溶区内。笔者等未见到过天然白云母落入该区的报道, 因此, 这几个数据可能既不代表纯粹的白云母, 也不代表纯粹的珍珠云母, 很可能代表了白云母与珍珠云母的超显微交生结构。据Feenstra(1996)的研究, 白云母中可以存在珍珠云母超显微的交生叶片。这些叶片在进行电子探针测定时很容易被电子束所击穿, 致使所获得的分析

表 1 晚期白云母成分电子探针测定(w_B%)和原子数计算结果

Table 1 Electron microprobe analyses and atom number calculations of white mica at the late stage

带 点号	毛毡状白云母					内 带					中 带					外 带	
	2	4	11	12	13	5	6	7	8	14	15	16	9	10			
SiO ₂	49.65	47.35	47.98	46.87	45.96	49.06	37.36	49.52	49.59	39.08	41.33	45.17	34.56	33.11			
TiO ₂	0.06	0.09	0.04	0.10	0.06	0.05	0.00	0.02	0.00	0.00	0.09	0.05	0.25	0.39			
Al ₂ O ₃	39.53	41.36	40.95	40.44	42.56	35.70	44.46	35.54	34.12	46.61	40.03	36.63	24.12	22.97			
FeO	0.87	0.65	0.54	0.66	0.67	0.98	0.83	0.80	1.39	1.09	0.73	1.43	15.59	16.34			
MnO	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.11	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04	0.11			
MgO	0.15	0.17	0.25	0.15	0.12	0.51	0.49	0.34	0.85	0.51	0.45	0.87	11.61	12.36			
CaO	0.23	0.32	0.32	0.31	0.34	0.66	6.55	1.55	0.65	6.31	4.90	2.91	0.01	0.02			
Na ₂ O	5.81	7.48	7.06	6.98	7.59	2.27	1.63	3.10	1.99	2.43	2.00	1.68	0.19	0.08			
K ₂ O	1.15	0.65	0.94	1.13	0.96	9.08	3.79	7.77	8.59	3.60	5.10	7.37	10.37	10.21			
Total	97.45	98.08	98.07	96.63	98.25	98.35	95.11	98.74	97.19	99.62	94.65	96.11	96.74	95.57			
矿物	Pg	Pg	Pg	Pg	Pg	Mus	Mrg	Mus	Mus	Mrg	Mrg	Mus	Bio	Bio			
Si	6.18	5.89	5.96	5.93	5.73	6.29	4.96	6.30	6.42	4.95	5.50	5.95	5.32	5.21			
^{IV} Al	1.82	2.11	2.04	2.07	2.27	1.71	3.04	1.70	1.59	3.05	2.50	2.05	2.68	2.79			
^{VI} Al	3.97	3.95	3.96	3.95	3.99	3.68	3.91	3.63	3.61	3.91	3.77	3.63	1.70	1.46			
Ti	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.05			
Fe ²⁺	0.09	0.07	0.06	0.07	0.07	0.11	0.09	0.09	0.15	0.12	0.08	0.16	2.01	2.15			
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02			
Mg	0.03	0.03	0.05	0.03	0.02	0.10	0.10	0.07	0.16	0.10	0.09	0.17	2.67	2.90			
Ca	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.09	0.93	0.21	0.09	0.86	0.70	0.41	0.00	0.00			
Na	1.40	1.80	1.70	1.71	1.84	0.56	0.42	0.76	0.50	0.60	0.52	0.43	0.06	0.02			
K	0.18	0.10	0.15	0.18	0.15	1.49	0.64	1.26	1.42	0.58	0.87	1.24	2.04	2.05			
Fe+ Mg	0.12	0.10	0.10	0.10	0.09	0.20	0.19	0.15	0.32	0.21	0.17	0.33	0.43	0.43			
Ca/(Ca+ K+ Na)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.47	0.09	0.04	0.42	0.33	0.20	0.00	0.00			
Na/(K+ Na)	0.89	0.95	0.92	0.90	0.92	0.27	0.39	0.38	0.26	0.51	0.37	0.26	0.03	0.01			

注: Pg—钠云母; Mus—白云母; Mrg—珍珠云母; Bio—黑云母。

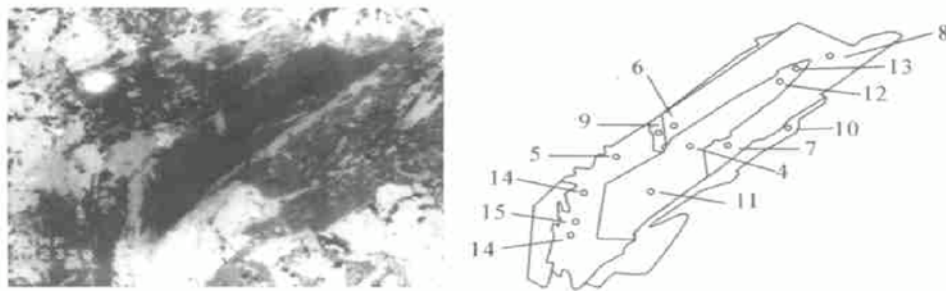


图 1 环带状白云母背散射电子图象(左)和电子探针测点分布图

Fig. 1 Back_scattered image and distribution of EM analyses on a zoned white mica flake
测点号同表 1

Location numbers are as same as those in Table 1

数据代表了白云母与珍珠云母的混合产物, 故在图 2 中将其标注为混合云母。有些测点的 Na/(Na+ K) 值较高, 如在 14 号点中其值达 0.51, 这可能是因为珍珠云母中钠的溶解度大于白云母(Guidotti, 1984) 而珍珠云母几乎不含钾的缘故。

上述环带结构由内向外不同带中的云母成分变异, 大体上反映了榴辉岩在富流体阶段晚期, 云母成分由钠云母经白云母和珍珠云母到黑云母的演化规律。

3 讨论和结论

综上所述, 大别山富流体阶段形成了不同成分的白云母, 早期是多硅白云母, 晚期是钠云母、白云母和珍珠云母, 最晚期形成黑云母, 这是退变质过程中压力和温度降低、流体活动加剧等因素综合作用的产物。在富流体阶段早期, 由于相

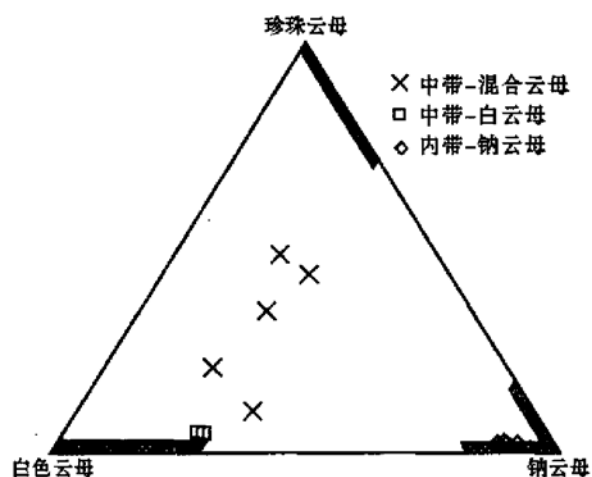
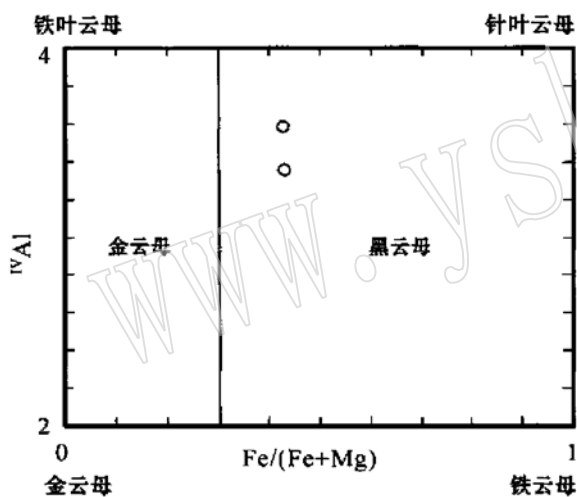


图 2 白云母分类图(仿 Guidotti, 1984)

Fig. 2 Plots on Mrg- Mus- Pg triangular diagram for white mica(model after Guidotti, 1984)

图 3 暗色云母分类图(仿 Deer *et al.*, 1963)Fig. 3 Classification of dark micas(model after Deer *et al.*, 1963)

对较高的压力和一定流体的参与,多硅白云母是最稳定的云母种族。压力的降低使白云母中 Si 和 FeO+ MgO 的溶解度减少,因而多硅白云母渐为白云母所替代。Si 和 FeO+ MgO 的减少又促使白云母中 Na 的溶解度加大(Guidotti *et al.*, 1994, 1998; Sassi *et al.*, 1994),使晚期形成的白云母具有富钠特征。环带状云母中带两个白云母的 Na/(K+ Na) 值已达到或接近天然白云母的最大 Na/(K+ Na) 值(0.38),且其硅含量显著低于同一标本中的多硅白云母(顾连兴等,2001),意味着这种白云母以及与之相伴的整个环带中的钠云母和珍珠云母的形成应当晚于多硅白云母,即形成于富流体阶段较晚期、压力已显著降低的条件之下。这与岩石中两种云母的结构关系相一致。

$\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 体系的相关系(Sassi *et al.*, 1994)表明,富含钾长石的铝硅质岩石的退变质可形成白云母,而富含斜长石的铝硅质岩石的退变质可形成钠云母;在成分介于其间的岩石中,随着温度的降低首先形成白云母,然后斜长石消失,钠云母和珍珠云母出现。大别地区退变质榴辉岩中富含斜长石,因而钠云母可以先于白云母出现。在低级变质过程中,白云母的 Na 含量往往随温度增高而显著增加(Guidotti *et al.*, 1998),因此,上述环带状云母中 Na 含量甚高的白云母,是否还意味着富流体阶段退变质作用晚期石马地区地温的短暂回升,这一问题值得进一步探讨。

在有钠云母的岩石中,钠质辉石和斜长石已完全绝迹,富钠闪石也受到了不同程度的交代,这表明流体中钠的富集可能同先存岩石中钠质辉石、富钠闪石和斜长石等矿物的分解有关。

在大别山榴辉岩中,黑云母通常与最晚期的退变质矿物相伴生,并广泛交代各类白云母(Gu LianXing *et al.*, 2002)。这似乎表明,在富流体阶段早期较高的压力下,榴辉岩镁铁质高压矿物分解所析出的铁和镁,除了形成闪石、帘石等深色矿物外,还可以以铝绿磷石分子的形式进入白云母。但是,随着压力的降低,铁和镁在白云母中的溶解度显著降低,因而在晚阶段只能与溶液中残留的钾结合而形成黑云母。黑云母的稳定存在表明当时流体的氧逸度低于黑云母-磁铁矿的平衡氧逸度。

Reference

- Burnham C W, Radoslovich E W. 1964. Crystal structure of coexisting muscovite and paragonite[J]. *Yb. Carnegie Inst. Wash.*, 63: 232~236.
- Deer W A, Howie R A, Zussman J. 1962. *Rock-forming Minerals*. V. 3, Sheet Silicates[M]. New York: John Wiley, 1~379.
- Feenstra A. 1996. An EMP and TEM-AEM study of margarite, muscovite and paragonite in polymetamorphic metabasites of Naxos (Cyclades, Greece) and the implications of fine-scale mica interlayering and multiple mica generations[J]. *J. Petrology*, 37(2): 201~233.
- Gomez-Pugnaire M T. 1979. Some considerations on the highest temperature reached in the outcropping rocks of the Nevado-Filabride complex in the Sierra de Baza during Alpine metamorphism[J]. *N. Jb. Miner. Abh.*, 135: 75~87.
- Gu Lianxing, Du Jianguo, Zhai Jianping. 2001. Composition of retrogressive phengites from eclogites of the Dabie Region: Implication for the applicability of phengite geobarometer[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(2): 149~152(in Chinese with English abstract).
- Gu Lianxing, Du Jianguo, Zhai Jianping, *et al.* 2002. Retrograde metamorphism and fluid effects on eclogites in the Dabie region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 166~182.
- Guidotti C V. 1984. Micas in metamorphic rocks[A]. Bailey S W. *Micas. Rev. Mineralogy[C]*, Min. Soc. Amer., 13: 357~468.

- Guidotti C V, Sassi F P, Sassi R, Blencoe J G. 1994. The effects of ferromagnesian components on the paragonite– muscovite solvus: a semiquantitative analysis based on chemical data for natural paragonite– muscovite pairs[J]. *J. Metamorphic Geol.*, 12: 779~ 788.
- Guidotti C V, Sassi F P. 1998. Petrogenetic significance of Na– K white mica mineralogy: recent advances for metamorphic rocks[J]. *Eur. J. Mineral.* 10: 815~ 858.
- Karabinos P. 1981. Deformation and metamorphism of Cambrian and Precambrian rocks on the east limb of the Green Mountains Anticlinorium near Jamaica, Vermont[D]. Maryland: The Johns Hopkins University.
- Liou J G, Zhang R, Ernst W G. 1994. An introduction to ultrahigh– pressure metamorphism[J]. *The Island Arc*, 3: 1~ 24.
- Sassi F P, Guidotti C V, Reider M, *et al.* 1994. On the occurrence of metamorphic 2M1 phengites: some thoughts on polytypism and crystallization conditions of 3T phengites[J]. *Eur. J. Mineral.*, 6: 151~ 160.
- Spry A. 1979. *Metamorphic Textures*[M]. Oxford: Pergamon Press, 1~ 350.
- Wang Qingchen, Cong Bolin, Massonne H.J. 1999. Temperature increase metamorphism along the south boundary of the Dabie eclogite terrain, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 338~ 349 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xidao, Wang Shiguang, Liu Jianwen, *et al.* 1999. *PTt* path of metamorphism of Lanshantou eclogite in south eastern Shandong and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 37~ 47 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zeming. 1996. Disequilibrium reactions and kinetics of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie Mountains[J]. *Earth Science– Journal of China University of Geosciences*, 21(5): 501~ 507 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zeming, You Zhendong, Han Yujing, *et al.* 1995. Petrology, metamorphic process and genesis of the Dabie– Sulu eclogite belt, east– central China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 69(4): 306~ 325 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 顾连兴, 杜建国, 翟建平. 2001. 大别山榴辉岩退变质多硅白云母及地压计可用性讨论[J]. *矿物学报*, 21(2): 149~ 152.
- 王清晨, 从柏林, Massonne H.J. 1999. 大别山太湖– 石马断裂带两侧变质地体的增温变质作用[J]. *岩石学报*, 15(3): 338~ 349.
- 张希道, 王式, 刘建文, 等. 1999. 鲁东南岚山头榴辉岩的变质作用演化 *PTt* 轨迹及其地质意义[J]. *岩石学报*, 15(1): 37~ 47.
- 张泽明. 1996. 大别山地区超高压变质岩的不平衡退变质反应及动力学[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 21(5): 501~ 507.
- 张泽明, 游振东, 韩郁菁, 等. 1995. 大别– 苏鲁榴辉岩带的岩石学、变质作用过程及成因研究[J]. *地质学报*, 69(4): 306~ 325.