

缅甸帕敢地区含硬玉富钙榴辉岩的发现*

李平 崔文元

北京大学地质系, 北京 100871

施光海

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100037

摘要 在缅甸帕敢地区新发现一种榴辉岩, 其全岩化学成分中 $\text{CaO} > 15\%$, 主要组成矿物石榴石的 $X_{\text{Ca}} > 0.9$, 另一主要组成矿物绿辉石中硬玉端员含量约 40%, 结构为粒状柱状变晶结构. 温压计算结果(750 °C, 2.7 GPa)说明其形成于高温高压的环境. 建议称其为“钙铝榴辉岩”, 以与相对富铁镁的榴辉岩和辉榴蓝晶岩相区分. 钙铝榴辉岩的发现丰富了榴辉岩的研究内容, 且进一步证明印度板块东部与扬子板块的碰撞带是一高压变质带.

关键词 钙铝榴辉岩 绿辉石 钙铝石榴石 硬玉 缅甸

迄今为止, 榴辉岩的研究对变质岩石学和板块构造学说都产生了重要影响. 榴辉岩的成分基本上是玄武岩质的^[1,2], 其主要组成矿物石榴石则是相对富镁的^[3-6]. 根据地质产状可将榴辉岩分为 3 类^[7]: A 类, 产于超基性岩中; B 类, 产于斜长角闪岩或片麻岩中; C 类, 产于蓝片岩中. 本文在缅甸帕敢地区新发现的钙铝榴辉岩, 高度富钙贫镁. 钙铝榴辉岩在蛇纹岩化橄榄岩中的发现, 为 A 类榴辉岩增加了一个新品种.

1 区域地质概况

缅甸西北部的帕敢地区出产世界上质量最优的翡翠, 该区位于印度板块和欧亚板块的碰撞带上. 印度板块自 71 Ma 以来大规模向北俯冲, 50 Ma 年时与欧亚板块发生碰撞^[8-10], 而且仍在向北俯冲^[11]. 受扬子刚性板块的阻挡, 印度板块东部边界的活动后期形成实皆走滑断裂带. 实皆走滑断裂带为南北向, 长达数千公里^[12]; 其东边和西边分别是那加阿拉干缝合带和密支那缝合带, 这两条缝合带均被后期形成的实皆走滑断裂带错开. 在两条缝合带之间, 实皆走滑断裂带以西, 有一条南北向展布的蛇纹岩带, 缅甸帕敢市即位于该带的帕敢超基性岩体内. 帕敢超基性岩体呈南北向的条带状, 长约 50 km, 宽 5~10 km, 其内赋存有许多脉状、透镜状的硬玉岩. 在硬玉岩和蛇纹岩之间是钠质和钠钙

质角闪岩、钠铬辉石岩、绿辉石岩等. 帕敢超基性岩体的围岩主要有结晶片岩类、石英岩、大理岩、斜长角闪岩等^[13]. 钙铝榴辉岩样品即采自帕敢超基性岩体内部, 由于风化, 其与蛇纹岩之间的接触关系不明确.

2 岩石学研究

2.1 岩相学研究

手标本为球状风化物, 新鲜面呈绿色到深绿色, 有淡黄绿色斑点, 块状构造. 实测密度 3.32 g/cm³. 主要组成矿物是石榴石、绿辉石, 次要矿物是硬玉, 没有发现石英与长石, 为粒状柱状变晶结构(图 1).

石榴石约含 35%, 大部分为拉长的条带状或不规则形状, 个别为粒状, 大部分有明显异常消光. 粒径 4~5 mm, 半自形-它形晶, 部分含硬玉或绿辉石包体. 绿辉石约含 60%, 呈柱状, 板状, 粒状, 半自形-它形晶, 长 2~2.5 mm, 宽 1~2 mm; 局域绿辉石颗粒很小(0.2~0.3 mm), 个别颗粒较大(长 4~5 mm, 宽 3~4 mm).

硬玉约含 5%, 呈柱状, 粒状, 半自形-它形晶, 长 0.2~0.5 mm, 宽 0.2~0.3 mm, 几乎全为石榴石(见图 2)或绿辉石的包体(见图 3), 表明石榴石和绿辉石很可能形成于硬玉之后. 个别绿辉石中

2003-03-26 收稿, 2003-04-17 收修改稿

* 国家教育部博士点基金资助项目(批准号: 20010001017 和 20020001108)

E-mail: pkulp@sohu.com

的硬玉包体出现环带，内核 Na₂O 含量高于外层。

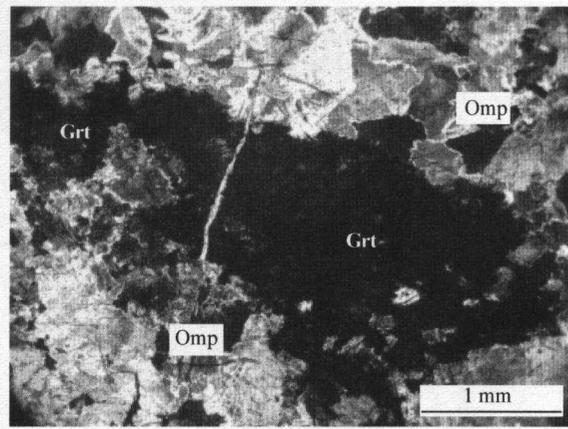


图1 钙铝榴辉岩显微照相

Grt-石榴石, Omp-绿辉石, Jd-硬玉, 下同; 正交偏光

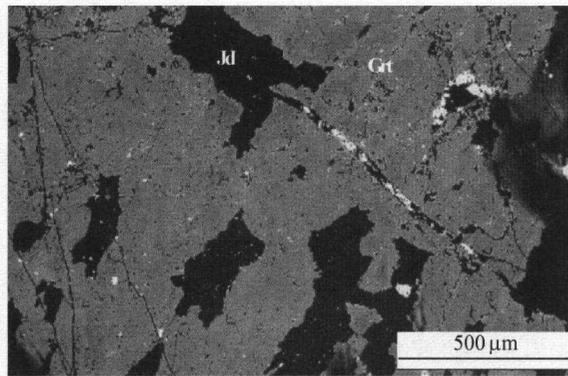


图2 含硬玉包体的石榴石的背散射照相

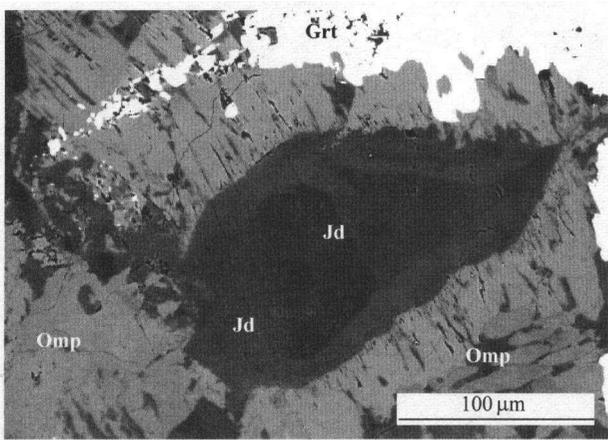


图3 含硬玉包体的绿辉石背散射照相

2.2 岩石化学分析

所采钙铝榴辉岩样品(21, 22)的全岩化学分析结果见表1.

表1 全岩化学分析结果及与相关岩石对比^{a)}

样号	21	22	12 ^[15]	3 ^[16]	8 ^[15]	11 ^[17]
岩石名称	钙铝榴 辉岩	钙铝榴 辉岩	辉榴蓝 晶岩	榴辉岩	蓝晶石 榴辉岩	刚玉榴 辉岩
SiO ₂	50.49	51.01	43.73	45.67	43.46	40.26
TiO ₂	0.12	0.09	—	0.42	0.35	0.18
Al ₂ O ₃	16.22	15.40	27.48	17.85	24.11	29.43
Cr ₂ O ₃	0.94	0.87	0.01	0.07	0.02	0.04
Fe ₂ O ₃	2.44	2.20	1.67	2.88	1.99	0.23
FeO	1.31	2.79	2.77	8.46	4.82	2.5
MnO	0.10	0.11	0.00	0.17	0.17	0.06
MgO	4.02	4.56	7.53	11.90	9.05	9.48
CaO	15.45	15.22	12.14	7.35	10.55	14.02
Na ₂ O	6.83	6.23	1.53	2.01	1.87	1.63
K ₂ O	0.04	0.04	0.66	0.39	0.53	0.18
烧失量	1.47	1.12	2.28	3.08	2.65	1.55
P ₂ O ₅	<0.01	0.01	0.08	0.04	0.11	0.05
总计	99.43	99.65	99.88	100.29	99.92	99.61

a) 样品21全岩化学分析由中国地质科学院矿产资源研究所完成, 22为中国科学院地质研究所测试中心完成, 样品12是平均成分

钙铝榴辉岩与表1中所列各种榴辉岩成分相比较, Na₂O大大高于其他种类的榴辉岩, 而MgO远低于其他种类, CaO明显偏高, Al₂O₃则偏低, SiO₂也较高. 在榴辉岩中Cr₂O₃含量一般<0.25%^[14], 而钙铝榴辉岩的含量高达0.87%以上, 而Cr₂O₃常富集于超基性岩中, 所以该岩石形成肯定与帕敢超基性岩体关系比较密切.

3 矿物成分分析

对矿物进行探针分析结果见表2, 表3. 探针分析由北京大学地球与空间科学学院电子探针实验室完成, 探针型号JXA-8100.

表2 辉石成分探针分析及计算结果^{a)}

矿物名称	绿辉石					硬玉	
	样号	212	2141	2132	2164	2166	2211
SiO ₂	57.07	56.75	56.38	56.47	56.85	59.81	58.88
TiO ₂	0.13	—	0.29	0.07	0.06	0.06	0.05
Al ₂ O ₃	14.15	12.96	13.17	13.98	15.87	22.40	22.49
Cr ₂ O ₃	0.57	0.57	0.68	0.58	0.52	0.19	0.38
MgO	6.29	6.44	6.14	6.15	4.77	1.07	0.92
CaO	9.68	9.77	9.29	8.83	7.21	1.46	1.46
MnO	—	0.03	0.11	0.07	0.07	0.06	—
FeO	3.16	3.18	3.46	3.44	2.97	1.19	1.14
NiO	0.07	—	—	—	—	—	0.02
Na ₂ O	9.63	9.31	9.46	10.05	11.02	14.52	14.70
K ₂ O	—	0.01	—	0.02	—	0.01	0.01
总计	100.75	99.02	99.10	99.66	99.34	100.77	100.04

续表

矿物名称	绿辉石					硬玉	
	212	2141	2132	2164	2166	2211	2217
Si	1.978	2.004	1.993	1.972	1.982	2.015	1.994
Ti	0.003	-	0.008	0.002	0.002	0.002	0.001
Al	0.578	0.539	0.541	0.547	0.633	0.889	0.897
Cr	0.016	0.016	0.019	0.016	0.014	0.005	0.010
Fe ³⁺	0.089	-	0.079	-	-	0.020	-
Mg	0.325	0.339	0.324	0.320	0.248	0.002	0.047
Ca	0.359	0.370	0.352	0.330	0.269	0.054	0.053
Mn	-	0.001	0.003	0.002	0.002	0.002	-
Fe ²⁺	0.002	0.094	0.024	0.100	0.087	0.013	0.032
Ni	0.002	-	0.003	-	-	-	-
Na	0.647	0.637	0.648	0.681	0.745	0.948	0.965
K	-	-	-	0.001	-	-	-
JD	41.653	37.411	40.144	38.209	46.959	83.170	81.157
X _{Na} ^{b)}	0.647	0.637	0.648	0.681	0.745	0.948	0.965

a) 绿辉石的硬玉端员计算根据文献[18], b) X_{Na}表示 Na 在绿辉石中 M1 位置的比例

表3 石榴石化学成分探针分析及计算结果^{a)}

样号	214	2147	2133	2163	2165
SiO ₂	39.12	38.98	39.89	39.62	39.65
TiO ₂	0.16	0.10	0.22	0.14	0.10
Al ₂ O ₃	19.38	18.47	21.41	20.85	20.78
Cr ₂ O ₃	1.30	1.72	0.69	0.98	0.95
MgO	0.02	0.01	0.08	0.07	0.05
CaO	35.88	36.28	35.43	34.04	34.06
MnO	0.12	-	0.23	0.25	0.23
FeO	3.05	3.81	1.73	3.35	3.15
NiO	-	-	-	-	-
Na ₂ O	-	0.04	-	-	0.04
K ₂ O	-	0.04	-	-	-
Total	99.03	99.45	99.67	99.30	99.01
Si	3.003	2.989	3.024	3.029	3.038
Ti	0.009	0.006	0.012	0.008	0.006
Al	1.752	1.668	1.911	1.877	1.875
Cr	0.079	0.104	0.041	0.059	0.058
Fe ³⁺	0.139	0.239	-	-	-
Mg	0.002	0.002	0.009	0.008	0.006
Ca	2.951	2.981	2.878	2.788	2.796
Mn	0.008	-	0.015	0.016	0.015
Fe ²⁺	0.057	0.005	0.110	0.214	0.202
Ni	-	-	-	-	-
Na	-	0.006	-	-	0.005
K	-	-	-	-	-
钙铝榴石	88.634	82.528	93.472	89.079	93.362
X _{Ca} ^{b)}	0.978	0.998	0.956	0.921	0.916

a) 石榴石的钙铝榴石端员计算据[19], b) X_{Ca}表示 Ca 在石榴石中 A 位置的比例

由表 2, 3 可见, 绿辉石的硬玉端员约 40%, 硬玉中硬玉端员在 80% 以上, 两者的 X_{Na} 均较高, 但由于 M2 位 Al 的含量低, 使硬玉端员的值不高. 石榴石中 CaO 约占 35%, 钙铝榴石端员最低值超过 80%, 最高超过 90%, X_{Ca} 均大于 0.9, 而 MgO 小于 0.1%, FeO 不超过 4%, 为高度富钙贫铁镁的石榴石.

4 压力(P)-温度(T)计算

4.1 PT 计算方法选择

本岩石中共生矿物只有石榴石和绿辉石, 所以温度压力都通过石榴石-绿辉石矿物对来计算. 石榴石中 X_{Ca}(石榴石 A 位置 Ca 的比例)对 Kd 有明显影响, 迄今所作校正的 X_{Ca} < 0.5^[20-22]. 由于钙铝榴辉岩的石榴石中 X_{Ca} > 0.9, 远超过以前所作校正中的 X_{Ca}, 所以不能使用现有的石榴石-单斜辉石 Fe-Mg 交换温度计. 另外现有的石榴石-单斜辉石型压力计中, 有的适用于石榴石-单斜辉石岩^[23], 有的则适用于富镁石榴石(镁铝榴石端员 > 0.8)^[24], 对本文涉及的富 CaO, NaO, 低 MgO, FeO 体系也没有可用的压力计. 所幸的是有学者提出了一个石榴石和绿辉石的 Margules 参数数据的组合, 并用这些热力学数据对以前发表的多个榴辉岩的温度压力数据重新进行计算, 得出了数值相近或者更为合理的温度压力值^[25,26]. 在研究 Alpe Arami 所产榴辉岩而没有可用压力计的情况下, 也采用该石榴石和绿辉石的 Margules 参数数据的组合, 计算出了合理的温度压力值^[27].

4.2 PT 计算

由上可见, 这套石榴石和绿辉石的 Margules 参数数据的组合较为可靠, 所以本文也采用它, 结合使用热力学软件^[28], 计算已经广泛研究的变质反应 2 Gr(钙铝榴石) + Alm(铁铝榴石) = 3 Hed(钙铁辉石) + 3 Cats(钙契尔马克分子)和 2 Gr(钙铝榴石) + Py(镁铝榴石) = 3 Di(透辉石) + 3 Cats(钙契尔马克分子)的温度压力交点(对这两个反应的详细介绍见文献[27]). 选择相邻的处于平衡状态的石榴石和绿辉石作矿物对, 用电子探针测相邻边缘的成分(见表 2 中 2132~2133, 2165~2166, 2163~2164)作温压计算, 求出结果 P = 2.7 GPa, T = 750 °C. 这与本岩石的特征相符: (i) 背散射检查时, 只有一个有硬玉包体的石榴石中发现小块残留的环带,

其他石榴石成分均一,表明岩石形成温度大于石榴石均一化的最低温度(700℃)^[29]。(ii)本岩石产于蛇纹岩中,为A类榴辉岩^[7],石榴石极少有环带也为A类榴辉岩的特征^[30]。计算的温度压力值与A类榴辉岩的温度压力特征基本一致。(iii)已在同一蛇纹岩岩体内的硬玉岩和蛇纹岩之间的角闪岩中发现了氟镁钠闪石、蓝闪石、镁红闪石和尼镁铝钠闪石组合^[31]。该组合在实验室中合成时的最低压力是2.2 GPa,稳定温度范围为600~900℃^[32],与本文计算结果一致。

5 讨论

(1) 以上研究表明该岩石主要组成矿物为石榴石和绿辉石,形成的温度压力条件属于榴辉岩相,该岩石为榴辉岩。由于这种榴辉岩的CaO含量很高,石榴石中钙铝榴石端员含量很高,所以建议称其为钙铝榴辉岩(指主要由石榴石和绿辉石组成,且石榴石中 $X_{Ca} > 0.5$,无共生富铝相的岩石;英文名用gro(代表grossular)和eclogite(榴辉岩)组成:Groeclogite)与辉榴蓝晶岩和以前的相对富铁镁的榴辉岩相区分。该榴辉岩产于超基性岩中,为A类榴辉岩^[7],主要矿物组成简单,PT计算及密度也都符合A类榴辉岩特征。

(2) 在矿物成分上,钙铝榴辉岩与辉榴蓝晶岩最接近,两者的石榴石都富钙,主要区别是钙铝榴辉岩没有蓝晶石。从全岩化学成分的角度看,辉榴蓝晶岩富 Al_2O_3 贫 SiO_2 ^[33],而钙铝榴辉岩富 SiO_2 贫 Al_2O_3 ,也不可能出现富铝相。

(3) 迄今为止,所发现的榴辉岩中石榴石的 X_{Ca} 基本都小于0.5,远小于钙铝榴辉岩中石榴石的 $X_{Ca} (> 0.9)$,钙铝榴辉岩的CaO含量也较高。钙铝榴辉岩的发现明显扩大了榴辉岩中石榴石的成分范围。目前榴辉岩的成因可分两大类:板块俯冲变质和上地幔岩浆结晶。根据钙铝榴辉岩全岩化学成分高度富钙贫镁的成分特征,推测其原岩可能是斜长岩,钙铝榴辉岩与斜长岩成分的差距则可能是斜长岩非等化学变质所致;由于采样区位于印度板块向欧亚板块俯冲的碰撞带上,推测钙铝榴辉岩很可能是俯冲变质成因:斜长岩在随印度板块俯冲到上地幔深度时发生变质而形成钙铝榴辉岩。

(4) 在帕敢超基性岩体中钙铝榴辉岩的发现与高压闪石组合的发现^[31],均表明印度板块东部与扬子板块的碰撞带是一高压变质带。该高压闪石组合

在实验室出现的最低压力(2.2 GPa)对应深度达到70 km,而钙铝榴辉岩的形成压力(2.7 GPa)对应深度超过80 km,这意味着印度板块向欧亚板块俯冲的深度达到80 km以上,到达上地幔,从而为形成榴辉岩创造了条件。位于印度板块和欧亚板块碰撞带上的喜马拉雅山脉的榴辉岩中已经发现柯石英,榴辉岩的变质条件为2.7~2.9 GPa(对应俯冲深度90~100 km)、690~750℃^[34],这与本文的分析是一致的。在钙铝榴辉岩中未发现退变质产生的特征矿物如斜长石、角闪石、绿帘石、蓝闪石等,说明赋存钙铝榴辉岩的地体从地幔上升到地表的速率较快或缺少流体参与使退变质作用难以发生。

(5) 缅甸帕敢的蛇纹岩既赋存有钙铝榴辉岩也赋存有硬玉岩,且钙铝榴辉岩中的石榴石和绿辉石中均含有硬玉包体,这表明硬玉岩和钙铝榴辉岩可能存在成因联系,但尚待进一步查明;无独有偶,危地马拉的莫塔瓜(Motagua)断裂带中不同点的蛇纹岩分别含有榴辉岩和硬玉岩^[35]。这两地的构造环境比较相似。缅甸帕敢蛇纹岩位于印度板块和扬子板块的碰撞带内,危地马拉的蛇纹岩位于北美板块和加勒比板块的碰撞带内。相似的大地构造环境,相似的蛇纹岩、榴辉岩和硬玉岩的共生,表明蛇纹岩、榴辉岩和硬玉岩的共生组合与板块碰撞之间可能存在密切联系,这个问题有待研究。

致谢 电子探针分析得到北京大学地质系舒桂明高级工程师的支持,在研究工作中得到魏春景教授,宋述光博士的帮助,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Yoder H S, et al. Origin of basalt magmas: An experimental study of natural synthetic rock systems. *J Petrol*, 1962, 3: 342
- 2 Green D H, et al. A comparison of recent experimental data on the gabbro-garnet granulite-eclogite transition. *J Geol*, 1972, 80: 277
- 3 Church W R. Eclogite. In: *Basalts: The Poldervaart Treatise on Rocks of Basaltic Composition*. New York: John Wiley, 1968. 755~798
- 4 Escola P. On the eclogites of Norway, *Vidensk-SelskSkrIMat. Nature*, 1921, K18: 1
- 5 Miyashiro A. *A Metamorphism and Metamorphic Belts*. New York: John Wiley, 1973. 492
- 6 Smith D C, et al. Eclogites and their problems; An introduction to the first International Eclogite Conference(FIEC). *Terra Cognita*, 1982, 2: 283
- 7 Coleman R G, et al. Eclogites and eclogites: Their difference and

- similarities. *Geol Soc Amer Bull*, 1965, 76: 483
- 8 Molnar A R, et al. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 1984, 189: 419
 - 9 Patriat P, et al. India-Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plate. *Nature*, 1984, 311: 615
 - 10 Powell C M, et al. India-Eurasia collision chronology. *Nature*, 1985, 316: 86
 - 11 Larson K M, et al. Kinematics of the India-Eurasia collision zone from GPS measurements. *J Geophys Res*, 1999, 104: 1077
 - 12 张文佑. 中国及邻区海陆大构造图. 北京: 科学出版社, 1983
 - 13 施光海, 等. 缅甸含硬玉的蛇纹岩化橄榄岩及其围岩的岩石学研究. *岩石学报*, 2001, 17(3): 483
 - 14 Dawson J B. *Kimberlites and Their Xenoliths*. Berlin: Springer Press, 1980
 - 15 Sobolev N V, et al. The petrology of grosspydite xenoliths from the Zagadochnaya kimberlite pipe in Yakutia. *J Petro*, 1968, 19: 253
 - 16 Kushiro I, et al. Origin of some eclogite inclusions in kimberlite. *Amer Mineral*, 1968, 53: 1347
 - 17 Sobolev N V, et al. More facts on the mineralogy of eclogite from Yakutian kumberlite pipes. *Dokl Akad Nauk SSSR, Earth Sci Sect*, 1965, 163: 137
 - 18 Cawthorn R G, et al. The Recalculation of pyroxene end-member parameters and the estimation of ferrous and ferric iron content from electron microprobe analysis. *American Mineralogist*, 1974, 59: 1203
 - 19 Rickwood P C. On recasting analyses of garnet into endmember molecules. *Contributions to Mineral and Petrology*, 1968, 18(2): 175
 - 20 Ellis D J, et al. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contrib Mineral Petrol*, 1979, 71: 13
 - 21 Pattison D R M, et al. Reversed experimental calibration of the garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange thermometer. *Contrib Mineral Petrol*, 1989, 101: 87
 - 22 Krough E J. The garnet-clinopyroxene Fe^{2+} -Mg geothermometer: An updated calibration. *J Metamorphic Geol*, 2000, 18: 211
 - 23 Mukhoahyay B. Garnet-clinopyroxene geobarometry: The problems, prospects and an approximate solution with some applications. *Amer Mineral*, 1991, 76: 512
 - 24 Brey G P, et al. Garnet-clinopyroxene equilibria in the system CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS): Prospects for simplified ("T-dependent") lherzolite barometry and an eclogite-barometer. *Contrib Mineral Petrol*, 1986, 92: 448
 - 25 Massonne H J. Thermochemical determination of water activity relevant to eclogite rocks. In: Kharaka Y K, et al. eds. *Water-rock interaction WRI × 7 Proceedings of the 7th International Symposium*. Rotterdam: A A Balkema, 1992. 1523~1526
 - 26 Massonne H J. Experimental and petrogenetic study of UHPM. In: Coleman R G, et al. eds. *Ultrahigh Pressure Metamorphism*, 33~95. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 33~95
 - 27 Dobrzhinetskaya L F, et al. Silica precipitates in omphacite from eclogite at Alpe Arami, Switzerland: Evidence of deep subduction *J Metamorphic Geol*, 2002, 20: 481
 - 28 Powell R, et al. An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 3 Application methods, worked examples and a computer program. *Journal of Metamorphic Geology*, 1988, 6: 173
 - 29 Spear F S. On the interpretation of peak metamorphic temperatures in light of garnet diffusion during cooling. *J Metamorph Geol*, 1991, 9: 379
 - 30 Smith D C. *Eclogites and Eclogitic Rocks*. Amsterdam: Elsevier, 1988
 - 31 Shi G H, et al. The petrology of a complex sodic-and sodic-calcic amphibole association and its implications for the metasomatic process in the jadeitite area in northwestern Myanmar (formerly Burma). *Contrib Mineral Petrol*, 2003, 145(3): 355
 - 32 Pawley A R. Experimental-study of the compositions and stabilities of synthetic nyboite and nyboite-glaucophane amphiboles. *Eur J Mineral*, 1992, 4(1): 171
 - 33 Carswell D A. *Eclogitic Facies Rocks*. New York: Chapman and Hall New York Press, 1990. 315~349
 - 34 O'Brien P J, et al. Coesite in Himalayan eclogite and implications for models of India-Aisa collision. *Geology*, 2001, 29(5): 435
 - 35 McBirney A R, et al. Eclogites and jadeite from the Motagua fault zone, Guatemala. *American Mineralogist*, 1967, 52: 908