

文章编号: 1000- 6524(2002)04- 0371- 16

新疆西天山超高压变质榴辉岩

张立飞¹, David J. Ellis², 艾永亮¹, 姜文波¹, 魏春景¹

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100873; 2. Department of Geology,
Australian National University, Australia)

摘要: 在新疆西天山 3 类榴辉岩中均发现了超高压变质矿物: 在第 I 类与蓝片岩互层的榴辉岩中发现了柯石英假像; 在第 II 类枕状榴辉岩的绿辉石中发现了石英出溶叶片; 在第 III 类产于大理岩中呈透镜状的方解石/白云石榴辉岩中发现了变质成因的菱镁矿。详细的岩石矿物学研究表明, 第 I 类榴辉岩 3 个阶段的变质演化温压条件为: UHP 前变质阶段(356~ 433 °C, 0.8~ 1.0 GPa)、峰期 UHP 榴辉岩相阶段(496~ 598 °C, 2.572~ 2.666 GPa)和退变绿帘蓝片岩相阶段(500~ 530 °C, 1.0~ 1.2 GPa), 并建立了在 NCMASCH (Na₂O-CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-CO₂-H₂O) 体系中出现蓝闪石、石榴石、绿辉石、菱镁矿、白云石、黝帘石、柯石英、CO₂ 和 H₂O 的相平衡关系。经变质反应分析和相平衡理论计算西天山含菱镁矿的蓝闪石榴辉岩的变质峰期温压条件为: 2.7~ 2.8 GPa 和 525~ 607 °C, X_{CO₂} 低于 0.006。超高压变质矿物的发现表明西天山榴辉岩经历了超高压变质作用, 所谓的南天山造山带可能是世界上规模最大的由洋壳俯冲形成的超高压变质带。

关键词: 柯石英假像; 绿辉石中石英出溶叶片; 菱镁矿; 超高压变质作用; 榴辉岩; 新疆西天山
中图分类号: P588.3 **文献标识码:** A

Ultra_high pressure metamorphic eclogite in western Tianshan Mountains, Xinjiang

ZHANG Li_fei¹, David J. Ellis², AI Yong_liang¹, JIANG Wen_bo¹ and WEI Chun_jing¹

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Department of
Geology, Australian National University, Australia)

Abstract: Ultra_high pressure metamorphic minerals were found in three types of eclogite in western Tianshan Mountains, inclusions of coesite pseudomorphs in garnets were detected in type I eclogites interlayered with mafic blueschists and carbonate eclogites, quartz exsolution lamellae in omphacites were recognized in type II eclogites with pillow structure, and magnesite of metamorphic origin was discovered in type III lenticular calcite/dolomite eclogites within

收稿日期: 2002- 06- 14; 修订日期: 2002- 10- 23

基金项目: 国家基础科学发展规划资助项目(G1999075508); 国家自然科学基金资助项目(49972028)

作者简介: 张立飞(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事岩石学专业研究。

marbles. Based on the study of mineralogy and petrology, the metamorphic evolution of type I eclogites can be divided into three stages, i. e. pre-peak ultra-high pressure (UHP) metamorphic stage (356~ 433 °C, 0.8~ 1.0 GPa), peak UHP eclogite_facies stage (496~ 598 °C, 2.572~ 2.666 GPa) and retrograde epidote blueschist_facies stage (500~ 530 °C, 1.0~ 1.2 GPa). The authors have set up phase equilibrium in NCMASCH system ($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$), and the calculation shows that the peak metamorphism of magnesite-bearing glaucophane eclogites in western Tianshan Mountains occurred at 2.7~ 2.8 GPa and 525~ 607 °C, $X_{\text{CO}_2} < 0.006$. Consequently, the eclogites from western Tianshan Mountains have obviously undergone UHP metamorphism, and southern Tianshan orogenic belt might be the largest UHP metamorphic belt formed by subduction of oceanic crust in the world.

Key words: coesite pseudomorphs; quartz exsolution in omphacite; magnesite; UHP metamorphism; eclogite; western Tianshan Mountains

超高压变质作用是近年来变质地质学领域取得的最具突破性的成果, 目前已在世界范围内十几个造山带中发现了超高压变质矿物, 它们大多集中在欧亚大陆造山带中, 并且大都以具有相似的大陆地壳成分的原岩为特征 (Coleman, *et al.*, 1995; Schreyer, 1995; Liou *et al.*; 1998), 洋壳岩石经过超高压变质的较为少见 (Schreyer, 1995; Liou *et al.*, 1998)。根据最新工作, 笔者在新疆西天山榴辉岩中发现了一些超高压变质矿物, 本文集中报道了这一研究成果。

1 地质产状和岩石学特征

新疆西天山榴辉岩出露于伊犁-中天山板块和塔里木板块间 200 km 长的造山带中 (高俊等, 1997)。该造山带向西延入吉尔吉斯斯坦与含柯石英假像的 Atbasy 和含有柯石英的 Makbal 榴辉岩-蓝片岩带 (Dobretsov *et al.*, 1987; Tagiri *et al.*, 1995) 相接 (图 1)。该高压低温变质带主要由榴辉岩、蓝片岩、多硅白云母片岩和绿片岩组成, 其北以韧性剪切带为界与由斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩和夕线石片麻岩所组成的前寒武纪地块为邻; 南缘也以韧性剪切带为界与互层状的大理岩和绿泥石白云母片岩相邻 (图 1)。据笔者对榴辉岩中锆石的初步 SHRIMP 分析, 该 UHP 变质作用年龄小于 $310 \text{ Ma} \pm 5 \text{ Ma}$ 。该变质带通常被认为是南天山古洋盆在古生代闭合过程中由塔里木板块向伊犁-中天山板块俯冲发生高压低温变质作用形成的 (Gao *et al.*, 1999)。

据其野外地质产状和岩石学特征, 西天山榴辉岩可以分为 3 种类型 (张立飞等, 2000)。

第 I 类榴辉岩呈扁豆状 (15~ 25 cm)、布丁状 (20 cm × 50 cm)、薄层状 (宽 2~ 50 cm)、厚层状 (宽约 50 m) 和巨型岩块 (近 2 km^2) 产于基性蓝片岩中, 含石榴石 (15%~ 20%)、绿辉石 (25%~ 30%)、黝帘石 (15%~ 20%)、蓝闪石 (10%~ 15%)、钠云母 (5%~ 10%)、石英和少量榍石及金红石。具斑状变晶结构: 石榴石变斑晶粒度 0.1~ 4 mm, 其中包含较多绿辉石、黝帘石、钠云母和蓝色角闪石包体, 边部则仅见柯石英假像包体。该类榴辉岩中石榴石具明显环带结构, 自核部至边部 Prp 和 Grs 含量增加而 Alm 和 Sps 含量降低, 为递增环带, 组

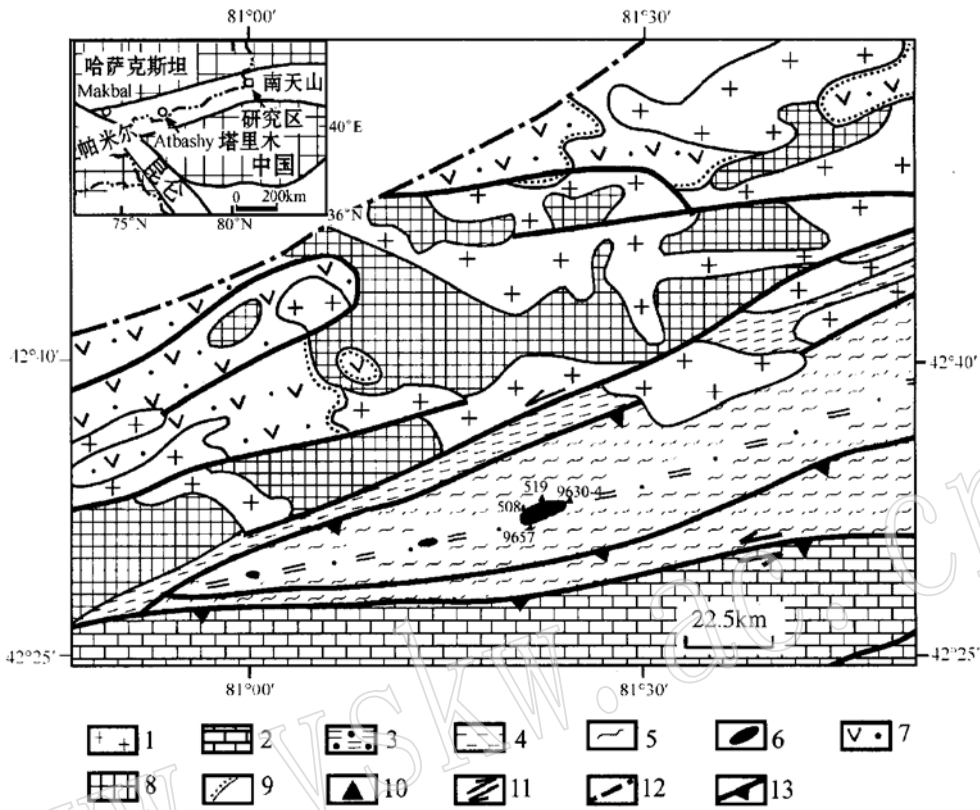


图1 新疆西天山高压低温变质带地质简图(改自 Gao et al, 1999)

Fig. 1 Sketch geological map of high *p*/low *T* metamorphic belt in western Tianshan Mountains, Xinjiang
1—花岗质岩石; 2—大理岩; 3—蓝片岩; 4—糜棱岩; 5—绿片岩; 6—榴辉岩; 7—石炭纪火山岩; 8—前寒武纪角闪岩相变质岩; 9—不整合; 10—取样位置; 11—走滑断裂; 12—推测断裂; 13—断层倾向; 左上角插图为欧亚大陆中南天山造山带分布略图(改自 Volkova and Budanov, 1999)

分变化范围为 $Alm_{59-70} Prp_{6-13} Grs_{17-24} Sps_{1-4}$ (缩写据 Kretz, 1983), 与柯石英假像包体仅出现于石榴石边部的特征一致。可见两种绿辉石: 一种在石榴石变斑晶中呈短柱状包体产出(绿辉石 I, 成分为 $Jd_{35-37} WEF_{50-55} Ae_{10-14}$); 另一种带有蓝闪石反应边, 产于基质中(绿辉石 II, $Jd_{44-45} WEF_{49-52} Ae_{4-5}$)。该类榴辉岩中有两种蓝色角闪石: 在石榴石中作为包体的细粒蓝色角闪石(少量)和作为绿辉石、石榴石次变边的中到粗粒蓝色闪石(大量), 分别属于 Leake 等(1997)分类中的冻蓝闪石和蓝闪石。

第 II 类榴辉岩与第 I 类榴辉岩共生, 多呈 $40\text{ cm} \times 80\text{ cm}$ 的枕状构造, 含石榴石(10%~15%)、绿辉石(20%)、蓝闪石(20%~30%)、黝帘石(20%)、方解石(10%~15%)、钠云母(5%~10%)和少量金红石及楣石。可见两种绿辉石: 一种具强定向针状石英包体的变斑晶; 另一种为不含任何包体的基质。一些绿辉石变斑晶已退变为蓝色角闪石。与第 I 类榴辉岩不同的是该类榴辉岩中石榴石均作为基质出现且基本上不含任何包体, 其成分变化范围为 $Alm_{60-66} Prp_{5-9} Grs_{20-25} Sps_{1-9}$ 。该类榴辉岩原岩可能为枕状玄武岩。

第 III 类榴辉岩为条带状方解石/白云石榴辉岩, 呈透镜状产于大理岩之中, 其特征矿物

组成为: 碳酸盐矿物 > 30%、石榴石 15%、绿辉石 20%、蓝闪石 20%、黝帘石 10%、钠云母 5% 和少量的榍石及金红石。条带状构造是由方解石/白云石纹层及石榴石+绿辉石层构成, 其原岩可能为泥灰质碳酸盐岩类。

2 超高压变质矿物学特征

根据最新详细的岩石学研究, 在西天山榴辉岩中发现了柯石英假像、绿辉石中的石英出溶叶片和变质成因的菱镁矿矿物包体等超高压变质矿物。

2.1 石榴石中柯石英假像

柯石英假像主要发现于第 I 类和第 III 类榴辉岩中, 它们以周围具有明显的放射状裂纹为特征出现在寄主矿物石榴石中, 并且均出现于石榴石的边部, 石榴石的核部则含有绿辉石、蓝色角闪石、钠云母和黝帘石等包体(图 2a)。柯石英假像包体呈椭圆形(图 2b), 直径 50 ~ 400 μm , 探针分析结果表明其成分为纯 SiO_2 。一些包体具有沿核心作放射状排列的极细粒多晶集合体结构(图 2c)。这些特征与 Smith (1997)、Chopin (1984) 和 Enami and Zang

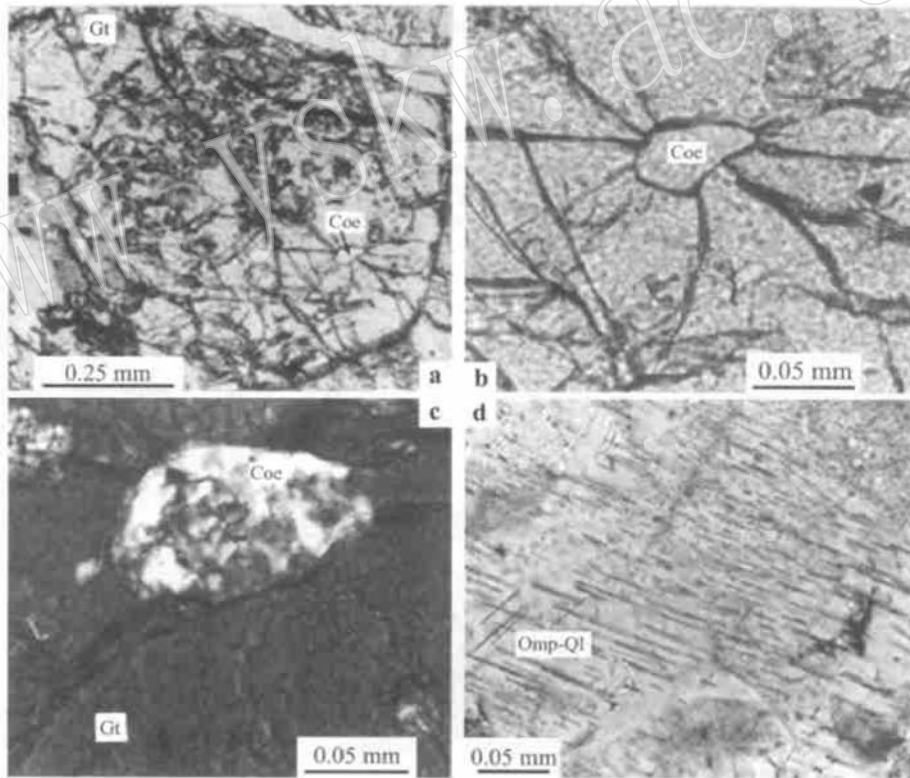


图 2 西天山榴辉岩中柯石英假像和绿辉石中出溶石英叶片的显微镜照片

Fig. 2 Microphotographs of coesite pseudomorphs in eclogites and quartz exsolution lamellae in omphacite from western Tianshan Mountains

a—柯石英假像 (Coe) 出现在石榴石 (Gt) 的边部, 石榴石中心含有大量的矿物包裹体, 单偏光, 样品 9657; b—图 a 中的放大部分, 柯石英假像周围的石榴石具有明显的放射状裂纹, 单偏光, 样品 9657; c—多晶石英集合体呈柯石英假像, 正交偏光, 样品 9657; d—绿辉石 (Omp-Q1) 中强烈定向的石英出溶叶片, 单偏光, 样品 9630-4

(1990) 所述十分相似。含柯石英榴辉岩中代表性矿物的电子探针成分分析见表 1。

表 1 含柯石英榴辉岩中代表性矿物的电子探针成分 (Sample 9657) w_B/ %
Table 1 Compositions of representative minerals in coesite pseudomorph bearing eclogites

矿物	石榴石				绿辉石				蓝色闪石		白云母		
	核部	核部	边缘	边缘	Omp(I)	Omp(I)	Omp(II)	Omp(II)	Gl(I)	Gl(II)	Ph(I)	Ph(II)	Pg
SiO ₂	36.89	37.43	37.83	37.89	55.02	55.11	55.79	55.75	49.68	57.30	51.35	50.01	44.91
TiO ₂	0.18	0.15	0.00	0.05	0.02	0.10	0.15	0.18	0.09	0.09	0.36	0.31	0.05
Al ₂ O ₃	20.52	20.45	21.19	21.61	8.60	9.73	10.64	10.76	9.86	11.37	26.09	26.73	39.97
Cr ₂ O ₃	0.07	0.15	0.01	0.04	0.08	0.00	0.14	0.01	0.10	0.00	0.10	0.07	0.03
FeO [*]	31.99	32.32	27.96	28.22	8.44	8.19	5.31	5.33	12.58	9.57	1.73	1.75	0.60
MnO	1.35	1.24	0.26	0.44	0.13	0.02	0.00	0.00	0.02	0.05	0.04	0.06	0.00
MgO	1.69	1.55	3.54	3.26	7.78	7.56	7.60	7.75	12.17	10.40	3.84	3.70	0.07
CaO	7.45	7.28	9.00	9.11	13.62	12.67	13.32	12.33	8.13	0.64	0.09	0.01	0.97
Na ₂ O	0.03	0.09	0.02	0.05	6.38	7.19	7.11	7.30	3.87	7.10	0.69	0.59	7.51
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	10.04	10.15	0.08
Total	100.10	100.51	99.80	100.63	100.07	100.57	99.96	99.41	96.63	96.52	94.33	93.38	94.19
Si ⁴⁺	2.97	2.99	2.99	2.97	1.99	1.97	1.99	2.00	7.17	7.90	6.89	6.80	5.83
Al ^{IV}	0.04	0.01	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.00	0.83	0.10	1.11	1.21	2.17
Al ^{VI}	1.90	1.92	1.96	1.96	0.36	0.38	0.43	0.45	0.84	1.74	3.02	3.07	3.93
Fe ³⁺	0.10	0.08	0.04	0.04	0.10	0.14	0.04	0.05	0.32	0.25	0.00	0.00	0.00
Ti ⁴⁺	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04	0.03	0.00
Cr ³⁺	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00
Fe ²⁺	2.04	2.08	1.80	1.81	0.14	0.09	0.11	0.10	1.20	0.85	0.19	0.20	0.06
Mg ²⁺	0.20	0.19	0.42	0.38	0.42	0.40	0.42	0.42	2.62	2.14	0.77	0.75	0.01
Mn ²⁺	0.09	0.08	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Ca ²⁺	0.64	0.62	0.76	0.77	0.53	0.49	0.51	0.47	1.26	0.09	0.01	0.00	0.14
Na ⁺	0.01	0.01	0.00	0.01	0.45	0.50	0.49	0.51	1.08	1.90	0.18	0.16	1.89
K ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	1.72	1.76	0.01
Cations	8.00	8.00	8.00	8.00	6.00	6.00	6.00	6.00	14.38	14.99	13.94	14.00	14.04
Alm	60.50	70.05	59.98	60.35									
And	6.90	3.40	2.60	3.11									
Grs	19.89	5	22.86	22.58									
Prp	8.54	6.20	13.95	12.85									
Sps	3.88	2.82	0.58	0.99									
WEF					55.03	49.47	51.54	49.35					
Jd					35.09	36.81	44.53	45.32					
Ae					9.88	13.73	3.93	5.33					

由澳大利亚国立大学 (ANU) 的 Jeol 6400 测试, 实验条件: 15V 加速电压, 20nA 射速电流, 2s 计时; 标准物质: 合成硅 (Si)、天然 Prp (Mg)、天然 Adr (Fe, Ca)、天然 Ab (Na, Al)、合成 Sps (Mn) 和天然 San (K); 使用 ZAF 校正法对最后结果进行订正。注: * 全铁为 FeO, Fe³⁺ 用电价平衡计算 (下同), WEF = Wo + En + Fs; I: 石榴石中的包体矿物, II: 基质矿物; 分子式计算中氧原子数: 绿辉石为 6, 石榴石为 12, 角闪石为 23, 白云母为 24, 黝帘石为 12.5。

2.2 绿辉石中的石英出溶叶片

石英出溶片晶出现在第 II 类榴辉岩中的绿辉石变斑晶中, 强烈定向的石英针状晶体长 30 μm, 宽 2~ 3 μm, 具一致的平行于寄主矿物辉石结晶轴的光性方位, 并且出现于中心部位 (图 2d), 探针分析结果表明其成分为纯 SiO₂。含石英针状晶体的绿辉石其组分较之不含石

英针状晶体的绿辉石富 Si 和 Na(见表 2 中的绿辉石- 1 和绿辉石- 2), 以 $Si+ Ti > Ca+ Mg + Fe^{2+} + Mn+ Ni- 2Na$ 为特征, 属硅过剩的单斜辉石(Smith *et al.*, 1980)。Smith(1988) 提出过硅单斜辉石存在于高温高压条件下, 然而若干实验和岩石学研究结果表明压力才是最重要因素(Angel *et al.*, 1988; Tsai *et al.*, 2000), 因而石英出溶叶片可视为某种在峰期变

表 2 含石英出溶叶片的榴辉岩中代表性矿物的电子探针成分分析

w % / %

Table 2 Compositions of representative minerals in quartz exsolution omphacite bearing eclogites

	绿辉石- Q1	绿辉石- Q2	绿辉石- 1	绿辉石- 2	石榴石核	石榴石边	角闪石	白云母	绿帘石
SiO ₂	56.40	56.48	55.78	54.93	37.20	37.46	54.02	46.06	38.93
TiO ₂	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.10	0.11	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	10.13	10.11	8.58	8.52	20.24	20.54	5.96	37.59	29.66
FeO [*]	4.03	4.35	7.30	7.52	28.56	30.79	8.41	0.47	4.16
MgO	8.49	8.68	7.55	8.06	1.12	2.11	16.17	0.26	0.16
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	4.11	0.92	0.00	0.00	0.00
CaO	13.66	13.61	13.43	14.24	8.99	8.14	9.72	0.19	23.36
Na ₂ O	6.95	6.77	6.73	6.29	0.00	0.00	2.52	6.76	0.07
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07	1.03	0.00
Total	99.66	100.03	99.38	99.56	100.22	100.06	96.98	92.44	96.38
Si ⁴⁺	2.01	2.00	2.00	1.98	2.98	2.99	7.61	6.07	3.02
Al ^{IV}	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.39	1.93	0.00
Al ^{VI}	0.42	0.42	0.36	0.35	1.90	1.93	0.60	3.91	2.71
Ti ⁴⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.04	0.03	0.07	0.11	0.11	0.06	0.86	0.00	0.27
Fe ²⁺	0.08	0.10	0.15	0.12	1.80	2.00	0.00	0.05	0.00
Mg ²⁺	0.45	0.46	0.41	0.43	0.13	0.25	3.40	0.05	0.02
Mn ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.06	0.00	0.00	0.00
Ca ²⁺	0.52	0.52	0.52	0.55	0.77	0.70	1.47	0.03	1.94
Na ⁺	0.48	0.47	0.47	0.440.00	0.00	0.69	1.73	0.01	
K ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.17	0.00
Cations	4.00	4.00	4.00	4.00	8.00	8.00	15.17	13.94	7.97
WEF	52.24	53.56	53.22	55.62					
Jd	43.46	43.26	38.85	33.83					
Ae	4.29	3.18	7.93	10.55					
En [#]	19.65	19.39							
Es [#]	10.53	16.97							
Fs [#]	4.64	4.67							
Jd [#]	41.34	39.45							
Ts [#]	0.00	0.00							
Wo [#]	24.00	19.39							
Alm					60.34	66.37			
Grs					20.27	20.04			
Prp					4.48	8.36			
Sps					9.34	2.07			
And					5.58	3.16			

注: [#] Ca_Eskola 辉石端员计算, En= Mg₂Si₂O₆, Wo= Ca₂Si₂O₆, Fs= Fe₂Si₂O₆, Jd= NaAlSi₂O₆, Es= Ca_{0.5}AlSi₂O₆, Ts= CaAl₂Si₂O₆; 绿辉石- Q1 和绿辉石- Q2 为含石英出溶叶片的绿辉石; 绿辉石- 1 和绿辉石- 2 为不含石英叶片的绿辉石; 分子式计算同表 1。

质压力条件下含过量硅的早期的先驱矿物(一种非理想配分的绿辉石质单斜辉石)。以石英针状晶体积分数分别为 1% 和 4%、密度 2.65 g/cm^3 , 单斜辉石密度 3.3 g/cm^3 计算, Ca-Na 辉石中过量硅质量分数在 2.6% 和 3.8% 之间。包含 6 个辉石单元分子的 6 个线性方程的计算结果(Tsai *et al.*, 2000; Spear *et al.*, 1982) 表明, 两个样品的 Ca_Escola($\text{Ca}_{0.5}\text{AlSi}_2\text{O}_6$) 摩尔分数分别为 11% 和 17%。据 Gasparik(1985) 对 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系统的实验研究, 如此高的 Ca_Escola 含量的单斜辉石应当稳定于 2.5 GPa 的压力条件下。

2.3 变质成因的菱镁矿

菱镁矿和白云石出现在西天山第 II 类榴辉岩中。该类榴辉岩中变斑晶石榴石有柯石英假像, 其边部为蓝闪石和白云石所取代(图 3a)。原生绿辉石呈细小的短柱状包体出现于白云石中(图 3a) 或以短棱柱状中粒矿物集合体与石榴石共生为后期的蓝闪石所取代。菱镁矿在榴辉岩中仅以残留状晶体出现, 呈圆形到半自形包体(0.01~0.1 mm) 于白云石之中(图 3a) 或者在蓝闪石中呈带有白云石反应边的圆形包体出现(图 3b), 许多菱镁矿颗粒具暗红色氧化边。这些结构特征显示绿辉石+菱镁矿+柯石英为峰期矿物组合, 为后期的蓝片岩相矿物组合白云石+蓝闪石+黝帘石所替代。

矿物化学组分如表 3 和表 4 所示。菱镁矿中 Ca 含量低, 与其他地区石榴石橄榄岩、二辉石岩和榴辉岩(Yang *et al.*, 1993; Zhang and Liu, 1994; Messiga *et al.*, 1999) 中所见菱镁矿相似, 有一定量的 Mg^{2+} 为 Fe^{2+} 所替代。在西天山榴辉岩中菱镁矿以 $\text{Mg}^{2+} 0.79$ 、 $\text{Fe}^{2+} 0.19 \sim 0.20$ 和 $\text{Ca}^{2+} 0.01$ (p. f. u) 为特征, 含镁量高于大别榴辉岩(Zhang *et al.*, 1995, 1996) 但低于西阿尔卑斯榴辉岩(Messiga *et al.*, 1999)。白云石阳离子构成为 $\text{Ca}^{2+} 0.92 \sim 0.94$ 、 $\text{Mg}^{2+} 0.88 \sim 0.90$ 和 $\text{Fe}^{2+} 0.14$ (p. f. u), 石榴石为富铁铝榴石 ($\text{Alm}_{65.26} \sim 67.70$ $\text{Grs}_{15.26} \sim 19.50$ $\text{Py}_{9.93} \sim 12.27$), 绿辉石中 Jd 含量变化于 38.26% ~ 41.34% 之间(表 3), 蓝闪石的 $\text{Fe}^{3+} / (\text{Fe}^{3+} + \text{Al}^{\text{VI}})$ 和 $\text{Mg} / (\text{Fe}^{2+}$

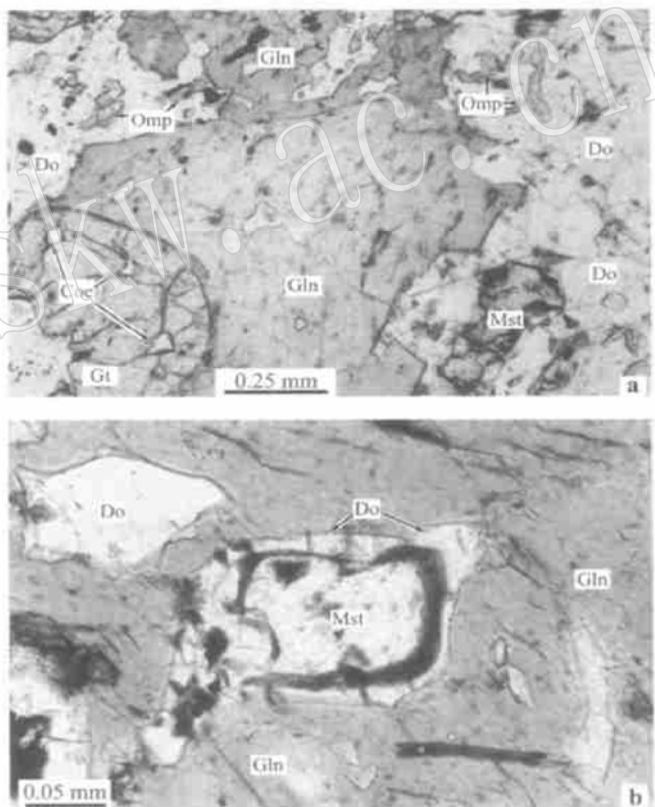


图 3 西天山含菱镁矿榴辉岩的显微照片

Fig. 3 Microphotographs of magnesite-bearing eclogites in western Tianshan Mountains

a—菱镁矿 (Mst) 以残留状退变为白云石 (Do), 绿辉石 (Omp) 呈短柱状保留在白云石中, 石榴石 (Gt) 含有柯石英假像 (Coe) 为蓝闪石 (Gln) 替代, 样号 519-1; b—浑圆状的菱镁矿包体具有白云石的反应边, 被包裹在蓝闪石中, 样号 519-2

表 3 含菱镁矿的榴辉岩中代表性矿物的电子探针成分分析
 Table 3 Compositions of representative minerals in magnesite-bearing eclogites

w_B/%

样品号	石榴石			绿辉石			蓝闪石			白云母
	519- 1	519- 2	508	519- 1	519- 2	508	519- 1	519- 2	508	519- 1
SiO ₂	37.42	37.80	37.85	55.71	55.84	55.47	56.75	57.83	57.05	49.73
TiO ₂	0.01	0.00	0.05	0.00	0.19	0.45	0.11	0.04	0.00	0.39
Al ₂ O ₃	21.02	21.38	21.45	9.04	9.59	8.89	10.57	10.78	10.69	27.08
Cr ₂ O ₃	0.03	0.11	0.00	0.10	0.27	0.00	0.16	0.00	0.11	0.11
FeO	30.31	30.20	30.70	12.90	11.10	9.80	11.08	10.31	9.56	2.83
MnO	0.40	0.80	0.27	0.10	0.00	0.03	0.08	0.02	0.00	0.00
MgO	3.01	2.50	2.94	4.08	5.00	5.92	9.73	10.02	10.27	3.09
CaO	7.32	7.79	6.93	8.19	9.34	10.88	0.92	0.72	0.62	0.09
Na ₂ O	0.25	0.12	0.18	9.96	9.04	8.07	7.22	7.38	7.32	0.74
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06	0.00	0.04	9.91
Total	99.74	100.59	100.37	100.08	100.37	99.57	96.52	97.10	95.55	93.97
Si ⁴⁺	2.97	2.98	2.99	2.00	2.00	2.00	7.91	7.99	7.97	6.75
Al ^{IV}	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.09	0.01	0.03	1.25
Al ^{VI}	1.94	1.97	1.99	0.38	0.40	0.38	1.65	1.74	1.73	3.07
Fe ³⁺	0.12	0.05	0.04	0.31	0.21	0.16	0.16	0.08	0.11	0.00
Ti ⁴⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04
Cr ³⁺	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01
Fe ²⁺	1.90	1.95	1.99	0.08	0.13	0.14	1.13	1.12	1.01	0.32
Mg ²⁺	0.36	0.29	0.35	0.22	0.27	0.32	2.02	2.06	2.14	0.63
Ca ²⁺	0.62	0.66	0.59	0.32	0.36	0.42	0.14	0.11	0.09	0.01
Mn ²⁺	0.03	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Na ⁺	0.04	0.02	0.03	0.69	0.63	0.56	1.86	1.89	1.91	0.20
Cations	8.01	8.00	8.01	4.00	4.01	3.99	15.10	15.08	15.08	14.00
Alm	65.26	65.69	67.70							
And	6.09	2.38	1.79							
Grs	15.26	19.50	18.13							
Py	12.27	9.93	11.76							
Spe	0.93	1.80	0.61							
WEF				30.71	37.42	43.80				
Jd				38.26	41.34	39.80				
Ae				31.04	21.25	16.40				

注: 计算同表 1。

+ Mg) 分别变化于 0.04~ 0.19 和 0.56~ 0.65 之间(表 3)。

3 变质作用 pT 条件计算

3.1 第 I、II 类榴辉岩的 pT 条件

在矿物学和岩石学的基础上, 第 I 类榴辉岩(965- 7) 可划分出 3 个变质阶段: UHP 前变质阶段、UHP 榴辉岩相变质阶段和退变绿帘蓝片岩相阶段。变质作用 pT 条件和 pT 轨迹分别如表 5 和图 4 所示。UHP 前变质阶段特征为: 出现矿物组合石榴石(核部: Prp + Grs = 23mol% ~ 28mol%) + 绿辉石(在石榴石变斑晶中作为包体的绿辉石: Jd = 35

表 4 含菱镁矿的榴辉岩中菱镁矿、白云石和绿帘石矿物成分的电子探针分析 $w_B/\%$
 Table 4 Compositions of magnesite, dolomite and epidote in magnesite-bearing eclogites

样品号	菱镁矿			白云石			绿帘石		
	519- 1	519- 2	508	519- 1	519- 2	508	519- 1	519- 2	508
SiO ₂	0.24	0.13	0.11	0.36	0.06	0.17	38.38	38.48	38.44
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.11	0.16
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26.13	26.49	26.23
Cr ₂ O ₃	0.25	0.12	0.04	2.38	0.00	0.00	0.06	0.00	0.05
FeO*	16.18	14.73	16.38	4.77	4.93	11.39	9.73	9.39	9.90
MnO	0.39	0.18	0.16	0.15	0.18	0.42	0.03	0.12	0.16
MgO	35.13	35.63	35.50	17.90	18.38	14.01	0.12	0.15	0.20
CaO	0.57	0.76	0.47	26.16	26.55	27.12	23.27	23.32	22.77
Na ₂ O	0.34	0.43	0.19	0.31	0.19	0.26	0.10	0.12	0.05
Total	53.10	51.98	52.85	52.03	50.29	53.37	98.09	98.18	97.96
Si ⁴⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	2.98	2.98	2.99
Al ^{IV}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01
Al ^{VI}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.37	2.40	2.39
Ti ⁴⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Cr ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	0.61	0.64
Fe ²⁺	0.20	0.18	0.20	0.14	0.14	0.32	0.00	0.00	0.00
Mg ²⁺	0.79	0.80	0.79	0.88	0.90	0.70	0.01	0.02	0.02
Ca ²⁺	0.01	0.01	0.01	0.92	0.94	0.96	1.94	1.94	1.90
Mn ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01
Na ⁺	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01
Cations	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00	7.99	8.00	7.98
Ps							0.20	0.20	0.20

注: 碳酸盐矿物分子式根据阳离子数计算菱镁矿为 1, 白云石为 2。

表 5 利用 Cpx- Grt 矿物对温压计计算平衡温度表

℃

Table 5 The result of temperature calculation by Cpx- Grt geothermometers

样品	超高压变质峰前阶段 (1.0 GPa)					超高压变质峰期阶段 (2.5 GPa)				
	lnkd	T_e	T_p	T_k	T_{kr}	lnkd	T_e	T_p	T_k	T_{kr}
9657- 1	3.89	380.28	356.97	317.24	292.19	2.96	571.18	547.75	513.74	495.56
9657- 2	3.42	443.18	419.85	379.85	355.42	2.79	598.63	575.30	547.91	528.76

T_e 引自 Ellis and Green(1979); T_p 引自 Power(1985); T_k 引自 Krogh(1988); T_{kr} 引自 Krogh_Ravna(2000)。

mol% ~ 37 mol%) + 黝帘石 + 钠云母 ± 透蓝闪石 + 钠长石 + 石英。利用石榴石核部和石榴石内绿帘石包体组成的单斜辉石-石榴石地质温度计计算的温度值(Ellis and Green, 1979; Powell, 1985) 如表 5 所示。据 $K_D = (X_{Fe^{2+}}/X_{Mg})^{Grt} / (X_{Fe^{2+}}/X_{Mg})^{Cpx}$ 计算的 K_D 值介于 30~45, 与平衡反应钠长石 = 硬玉(Jd₃₀₋₄₀) + 石英(Holland, 1980; Krogh, 1988) 相交得出温压条件为 356~433 °C, 0.8~1.0 GPa(图 4)。峰期 UHP 榴辉岩相变质 pT 条件计算: 由石榴石和绿帘石中分别含有柯石英假像和石英出溶叶片推知 $p > 2.5$ GPa; 采用由含有柯石英假像的石榴石边部(Prp + Grs = 35 mol% ~ 37 mol%) 与基质绿帘石(Jd = 44 mol% ~ 45 mol%) 组成的地质温度计(Brey *et al.*, 1983; Ellis and Green, 1979; Holland, 1983; Krogh, 1988) 计算

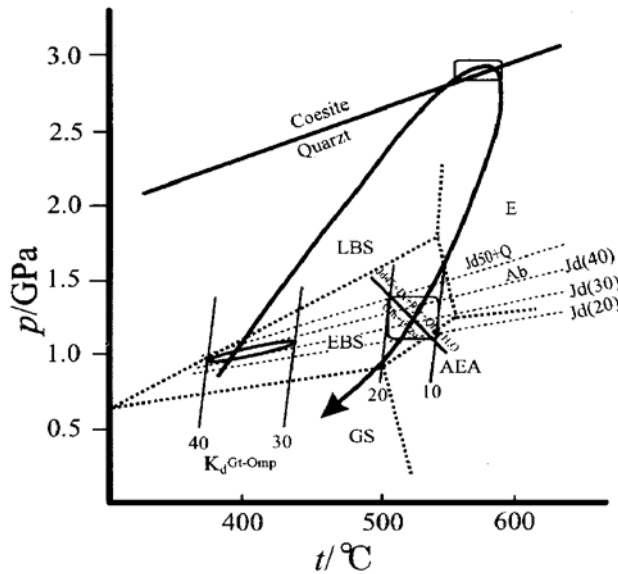
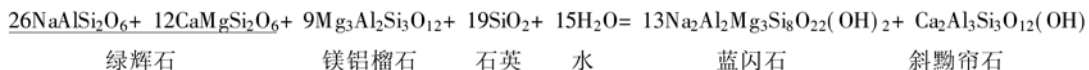


图 4 西天山第 I 类榴辉岩超高压变质 pT 轨迹图

Fig. 4 The ultra-high pressure metamorphic pT path of type I eclogite in western Tianshan Mountains

变质反应: $\text{Coe} = \text{Qtz}$ (Hemingway *et al.*, 1998); $\text{Ab} = \text{Jd} + \text{Qtz}$ (Holland, 1980, 1983). 相图据 Evans, 1990; LBS—硬柱石蓝片岩相; EBS—绿帘石蓝片岩相; AEA—钠长绿帘石角闪岩相; E—榴辉岩相; GS—绿片岩相; Kd 据 Ellis and Green (1979) 和 Powell (1985) 计算的石榴石-绿辉石平衡成分分配系数

结果温度为 598~496 °C (表 5)。值得注意的是利用 Ellis and Green (1979) 和 Powell (1985) 校正标准计算所得温度较 Krogh (1988) 和 Krogh-Ravna (2000) 的结果高 50~70 °C (表 5)。运用 Waters and Martin (1993) 和 Carswell 等 (1997) 提出的石榴石-单斜辉石-多硅白云母压力计即 $p = 26.9 + 0.0159T(\text{K}) - 0.00249T(\text{K}) \ln K \pm 0.1 \text{ GPa}$, $\ln K = 6 \ln a_{\text{di}} - \ln a_{\text{prp}} - 2 \ln a_{\text{grs}} + 3 \ln a_{\text{inv,ph}}$, 并利用 Holland 等 (1990) 的 Na 质绿辉石的 Di-Hd-Jd-Acm 四组分非理想活度模型计算绿辉石活度和 Berman (1990) 的石榴石 Mg-Ca-Fe-Mn 四组分混合模型计算石榴石活度, 得出西天山榴辉岩 (965-7) 在温度为 598~496 °C 条件下其压力变化于 2.572~2.666 ± 0.1 GPa。退变绿帘蓝片岩相代表组合为蓝闪石+绿帘石+钠云母±绿泥石±石英, 使用 TWQ 软件和 Berman (1988, 1991) 的内部一致性矿物热力学数据、不同的矿物组分及其活度模型 (张立飞, 2000), 计算出形成绿帘蓝片岩相的退变反应如下:



其平衡温压条件为 500~530 °C、1.0~1.2 GPa。

3.2 第 II 类含菱镁矿蓝闪石榴辉岩的 pT 条件

有关高温榴辉岩和超基性岩中出现菱镁矿的相平衡关系已有许多学者做了深入的研究 (Brey *et al.*, 1983; Olafsson and Eggler, 1983; Yaxley and Green, 1994; Knoche *et al.*, 1999), 但有关在低温含蓝闪石榴辉岩中出现菱镁矿, 其相平衡关系尚没有开展任何工作。本文以新疆西天山低温含蓝闪石榴辉岩中出现菱镁矿为例, 建立了这一矿物组合的相平衡关系。因多硅白云母是惟一的含钾矿物相可以不参与相平衡计算, 这样西天山含菱镁矿/白云石的蓝闪石榴辉岩中其余主要矿物相 (端员组分) 可用 NCMASCH (Na₂O-CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-CO₂-H₂O) 体系来表示。运用 THERMOCALC 软件 (v2.75) 和 Holland and Powell (1998) 最新的内部一致性矿物热力学数据库, 并设定 H₂O 和 CO₂ 为二元非理想混合物, 笔者计算了在 NCMASCH 体系中出现蓝闪石、钙铝榴石、硬玉、菱镁矿、白云石、黧帘石、柯石英、CO₂ 和 H₂O 的 pT 格子 (图 5), 6 个反应交于不变点 [C], 在该点发射出由 7 个固态相和

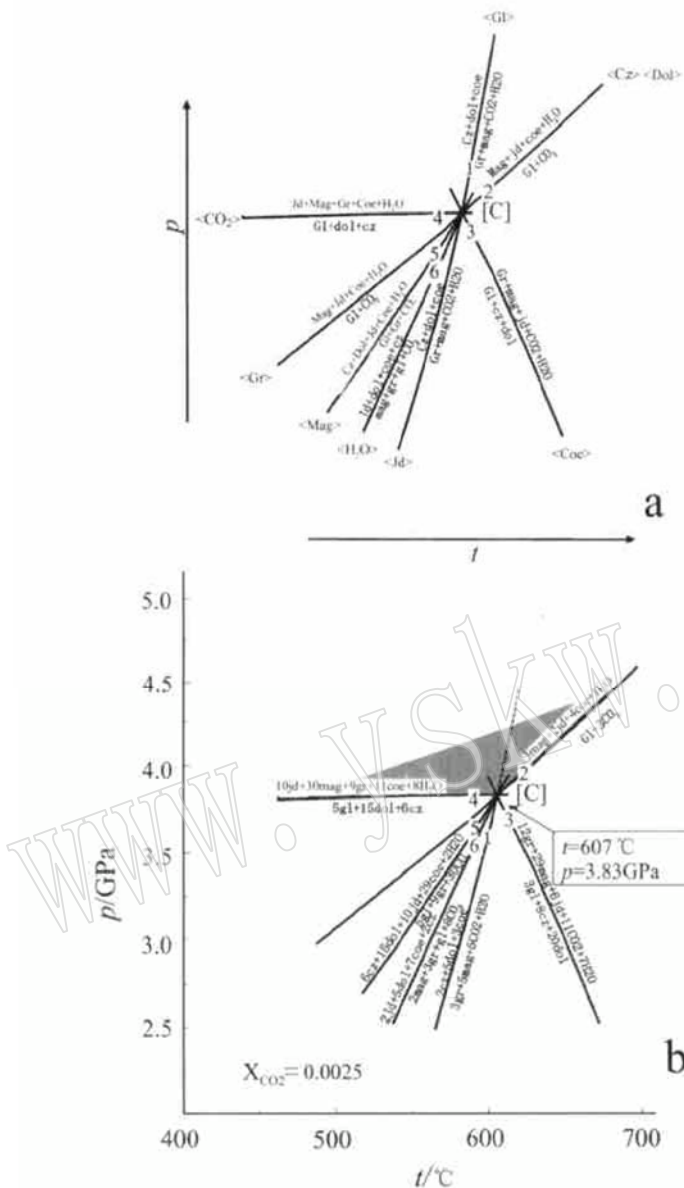


图 5 含菱镁矿的蓝闪石榴辉岩在 NCMASH 体系中的 pt 格子图
 Fig. 5 pt grid of magnesite-bearing glaucophane eclogite in the system of NCMASH

a—Schrenemarkers 线束分布关系; b—利用 Thermocalc (v2. 75) 和最新的矿物热力学数据 (Holland *et al.*, 1998) 计算的端员矿物的相平衡关系, 阴影部分为菱镁矿-硬玉-柯石英-石榴石稳定区

H_2O 、 CO_2 组成的 7 个单变反应 (图 5a)。图中可见菱镁矿-绿辉石 (Jd)-石榴石 (Grs)-柯石英矿物组合为一高压矿物组合, 稳定于由单变反应 (2) 和 (4) 限定的双变区内 (图 5b)。该组合最低平衡压力受控于反应 (4): 5 蓝闪石 + 6 黝帘石 + 15 白云石 = 9 钙铝榴石 + 30 菱镁矿 + 10 硬玉 + 11 柯石英 + 8 H_2O 。计算所得上述反应的 $p-t$ 斜率与 t 轴近乎平行, 说明该平衡反应可以作为较理想的地质压力计。当 $X_{CO_2} = 0.0025$ 时, 不变点的平衡温压条件是 $607 \pm 10^\circ C$ 、 3.83 ± 0.07 GPa。如图 6 所示, 不变点温度随 X_{CO_2} 值增加而增加, 但平衡压力在 X_{CO_2} 值增加时近乎保持不变。

西天山含菱镁矿榴辉岩的变质结构显示峰期的矿物组合石榴石+绿辉石+菱镁矿+柯石英为白云石+蓝闪石+斜黝帘石所替代。运用 THERMOCALC 软件 (v2. 75) 和 Holland and Powell (1998) 最新的内部一致性矿物热力学数据, 退变反应 (4) 的计算结果如图 7 所示。端员矿物反应平衡 $p > 3.8$ GPa, 利用天山榴辉岩中这些实际矿物相成分 (表 3 和表 4), 此缓冲变质反应平衡压力变化于 $p = 2.7 \sim 2.8$ GPa, 该反应线与柯石英 = 石英转变反应线相交。

峰期的平衡温度根据石榴石-单斜辉石地质温度计计算 (Ellis and Green, 1979; Krogh, 1988; Krogh-Ravna, 2000; Powell and Holland, 1985), 变质温度变化于 $525^\circ C$ 至 $607^\circ C$ 之间, 与含有柯石英假像的第 I 类榴辉岩的石榴石-单斜辉石温度计推定的温度值相似。相平

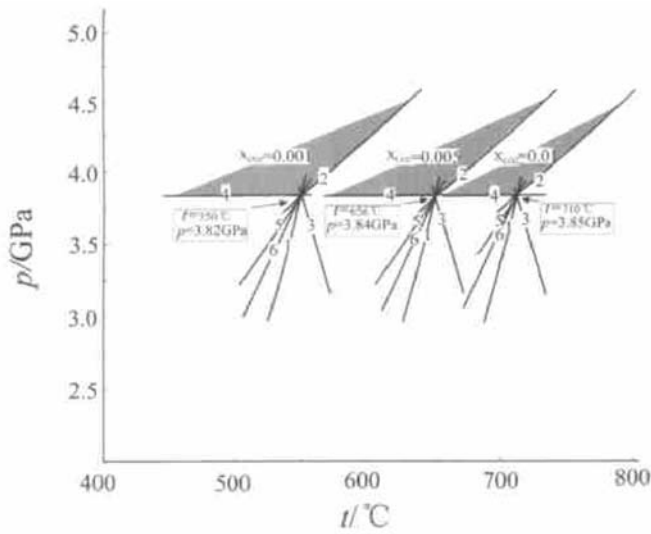


图 6 在不同 X_{CO_2} 条件下菱镁矿-硬玉-柯石英-石榴石稳定的 pt 区间

Fig. 6 pt grid showing the stable field of Mag-Jd-Coe-Gr at varying X_{CO_2} in the system of NCMASH
阴影部分为菱镁矿-硬玉-柯石英-石榴石稳定区

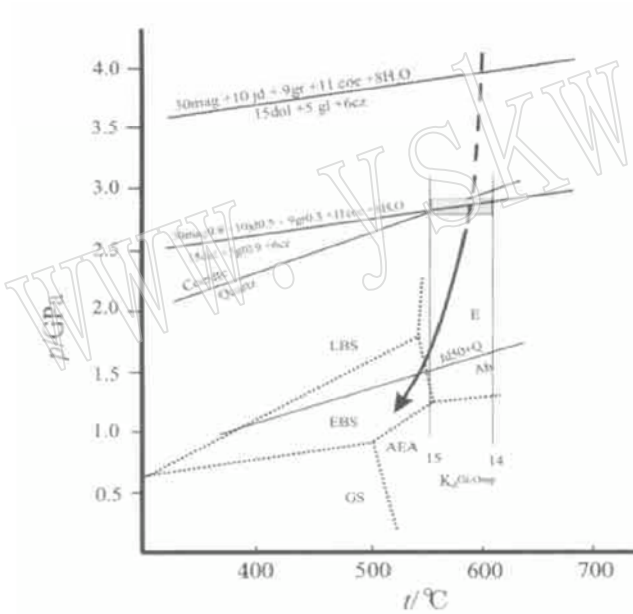


图 7 西天山第 III 类含菱镁矿蓝闪石榴辉岩变质 pt 轨迹

Fig. 7 Metamorphic pt paths of type III magnesite-bearing glaucophane eclogite from western Tianshan Mountains

变质反应: $Coe = Qtz$ (Hemingway *et al.*, 1998); $Ab = Jd + Qtz$ (Holland, 1980, 1983); 相图据 Evans (1990); LBS—硬柱石蓝片岩相; EBS—绿帘石蓝片岩相; AEA—钠长绿帘石角闪岩相; E—榴辉岩相; GS—绿片岩相; Kd—计算的石榴石-绿辉石平衡成分分配系数, 据 Ellis and Green (1979) 和 Powell (1985)

衡关系表明菱镁矿-硬玉-钙铝榴石-柯石英组合的稳定的 pt 条件是受反应(2)和(4)控制, 利用退变反应(4)与反应(2)相交可以确定西天山榴辉岩峰期变质矿物组合菱镁矿-硬玉-钙铝榴石-柯石英的稳定 X_{CO_2} 低于 0.006 (图 8)。如果假定流体只是由 H_2O 和 CO_2 组成, 则变质峰期的流体主要是由 H_2O 组成, 这可能是柯石英等超高压矿物难于保留的主要原因。图 7 显示退变 pt 轨迹为等温降压 (ITD) 型, 与第 I、II 类榴辉岩的 pt 轨迹相似。此类 ITD 型退变 pt 轨迹表明退变过程中存在快速构造抬升回返。西天山榴辉岩的 pt 轨迹与西 Alps 的 UHP 变质榴辉岩相似 (Reinecke, 1991)。

菱镁矿在地幔俘虏体 (McGetchin and Besancon, 1973; Rovetta and Mathez, 1982; Berg, 1982) 和金刚石矿物包体 (Leung, 1990; Wang *et al.*, 1996) 中的发现和有关菱镁矿稳

定性的实验热力学研究 (Ross *et al.*, 1992; Gillet, 1993; Redfern *et al.*, 1993; Biellmann *et al.*, 1993; Liu and Lin, 1995; Zhang and Liou, 1998) 均表明菱镁矿乃地幔中主要稳定碳酸盐矿物相。目前菱镁矿作为超高压变质的特征变质矿物已在大别- 苏鲁超高压变质带 (Yang *et al.*, 1993; Zhang and Liou, 1994) 和意大利的西阿尔卑斯榴辉岩中 (Messiga *et al.*, 1997) 发现。这些超高压变质地体都产于经历过中- 高温榴辉岩相变质地区, 新疆西天山含蓝闪石榴辉岩中出现菱镁矿是目前唯一报道的在低温榴辉岩相中出现菱镁矿的超高压变质事例, 对于探讨洋壳俯冲发生超高压变质过程中流体的性状和作用都具有重要意义。

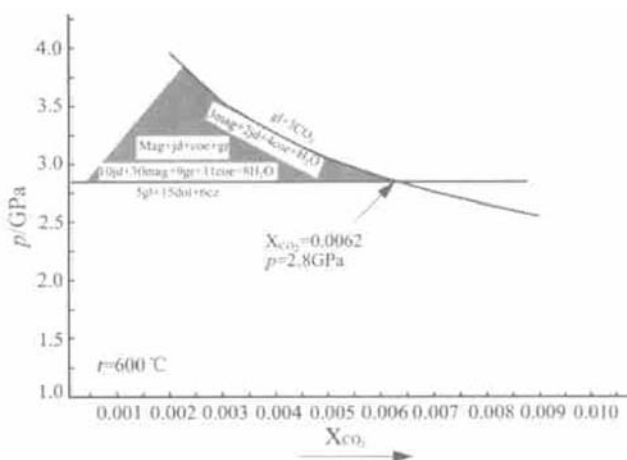


图8 西天山榴辉岩中平衡矿物共生组合菱镁矿-硬玉-柯石英-石榴石的 $p - X_{CO_2}$ 图

Fig. 8 $p - X_{CO_2}$ diagram for the mineral assemblage of mag-Jd - Coe - Gr in eclogites from western Tianshan Mountains

4 结论和讨论

虽然地球物理和深源地震研究表明洋壳岩石可以俯冲到 600 km 深的地幔 (Widiyantoro and Hirt, 1996), 但由于洋壳比重较大, 俯冲的洋壳与陆壳断开后向地幔深处俯冲, 很难再返回到地表而保存下来 (Davies *et al.*, 1995; Liou *et al.*, 1997)。因此, 到目前为止洋壳岩石经历过超高压变质的有报道的只有西阿尔卑斯的 Zermatt-Saas 带 (Reinecke, 1998) 和吉尔吉斯斯坦境内的 Atbashy 和 Makbal 榴辉岩- 蓝片岩带 (Tagiri *et al.*, 1995)。中国境内的西天山超高压变质榴辉岩- 蓝片岩带西延与哈萨克斯坦境内的 Atbashy、Makbal 的榴辉岩- 蓝片岩带相连, 长达 400 多公里, 相关的超高压变质早就有报道 (Tagiri *et al.*, 1995), 最近又在 Makbal 的榴辉岩相变质岩石中发现了柯石英 (Tagiri *et al.*, 2001)。新疆西天山 3 种类型的榴辉岩中都发现了超高压变质矿物: 第 I 类与基性蓝片岩、碳酸岩榴辉岩互层的榴辉岩中的柯石英假像, 具枕状构造的第 II 类榴辉岩中的绿辉石中石英出溶叶片和第 III 类大理岩中呈夹层的含碳酸岩的榴辉岩中的菱镁矿。这说明新疆西天山榴辉岩经历了超高压变质作用。西天山向西一直延入塔吉克斯坦和哈萨克斯坦境内构成了长达 400 km 的所谓南天山造山带 (Tagiri *et al.*, 1995; Volkava and Budanov, 1999)。岩石地球化学研究表明中国西天山具枕状构造的榴辉岩原岩为 E- MORB 和 OIB 型 (Gao *et al.*, 1999), 与南天山 E- MORB 型高压低温变基性岩 (Volkava *et al.*, 1997) 相似。有关学者认为南天山地区存在一个古洋盆, 该洋盆于晚古生代当塔里木克拉通、喀喇昆仑克拉通与哈萨克斯坦板块及 Kyzylkum 板块完全碰撞时闭合, 且已在认为属于古生代的哈萨克斯坦南天山 Makbal 和 Atbashy UHP 变质地体中发现了柯石英假像包体 (Tagiri *et al.*, 1995)。据笔者对榴辉岩

中锆石的初步 SHRIMP 分析结果, 天山榴辉岩的变质年龄小于 $310 \text{ Ma} \pm 5 \text{ Ma}$, 与 Atbashy 榴辉岩 270 Ma 的 Rb- Sr 等时线年龄(Tarigi *et al.*, 1995) 较为接近, 这意味着南天山造山带可能是世界上由洋壳俯冲形成的最大的 UHP 变质带。

仅以此文献给沈其韩院士 80 寿辰, 祝先生健康长寿!

Reference

- Angel R J, Gasparik T, Ross N L, *et al.* 1988. Silica-rich pyroxene phase with six-coordinated silicon[J]. *Nature*, 335, 156 ~ 158.
- Berg G W. 1982. Evidence for carbonate in the mantle[J]. *Nature*, 324: 50~ 51.
- Berman R G. 1988. Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ [J]. *Journal of Petrology*, 29: 445~ 522.
- Berman R G. 1990. Mixing properties of Ca- Mg- Fe- Mn garnets[J]. *American Mineralogist*, 75: 328~ 344.
- Berman R G. 1991. Thermobarometry using multi-equilibrium calculations: a new technique with petrological applications[J]. *Canadian Mineralogist*, 29: 833~ 855.
- Biellmann C, Gillet P, Guyot F, *et al.* 1993. Experimental evidence for carbonate stability in the Earth's lower mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*[J]. 118: 31~ 41.
- Brey G, Brice, W R, Ellis D J, *et al.* 1983. Pyroxene-carbonate reactions in the upper mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 62: 63~ 74.
- Carswell D A, O'Brien P J, Wilson R N, *et al.* 1997. Thermobarometry of phengite-bearing eclogites in the Dabie Mountains of central China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 15: 239~ 252.
- Chopin C. 1984. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps, a first record and some consequences [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 86: 107~ 118.
- Coleman R G and Wang X. 1995. Overview of the geology and tectonics of UHPM[A]. Coleman R G and Wang X. *Ultrahigh-pressure Metamorphism* [C]. Cambridge, 1~ 32.
- Davies J H and von Blanckenburg F. 1995. Slab breakoff, a model of lithospheric detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 129: 85~ 102.
- Dobretsov N L, Coleman R G, Liou J C, *et al.* 1987. Blueschist belt in Asia and possible periodicity of blueschist facies metamorphism[J]. *Ophioliti*, 12: 445~ 456.
- Ellis J D and Green D. 1979. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 71: 13~ 22.
- Enami M and Zang Q. 1990. Quartz pseudomorphs after coesite in eclogites from Shandong Province, east China[J]. *American Mineralogist*, 75: 381~ 386.
- Evans B W. 1990. Phase relations of epidote blueschists[J]. *Lithos*, 25: 3~ 23.
- Gao J, Klemd R, Zhang L, *et al.* 1999. PT path of high-pressure metamorphic rocks and its tectonic implication in western Tianshan, northwest China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 17: 621~ 636.
- Gao Jun, Zhang Li fei, Wang Zong xiu, *et al.* 1997. Metamorphic minerals and evolution of the western Tianshan high-pressure low-temperature metamorphic belt, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(3): 248~ 254(in Chinese with English abstract).
- Gasparik T. 1985. Experimental study of subsolidus phase relations and mixing properties of pyroxene and plagioclase in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 71: 13~ 22.
- Gillet P. 1993. Stability of magnesite (MgCO_3) at mantle pressure and temperature conditions: A Raman spectroscopic study [J]. *American Mineralogist*, 78: 1328~ 1331.
- Hemingway S B, Bohlen S R, Hankins W B. 1998. Heat capacity and thermodynamic properties for coesite and jadeite, reex-

- amination of the quartz-coesite equilibrium boundary[J]. *American Mineralogist*, 83: 409~ 418.
- Holland T J B. 1980. The reaction albite = jadeit + quartz determinately in the range 600~ 1200 °C[J]. *American Mineralogist*, 65: 129~ 134.
- Holland T J B. 1983. The experimental determination of activities in disordered and short-range ordered jadeitic pyroxenes[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 82: 214~ 220.
- Holland T J B and Powell R. 1990. An enlarged and updated internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: the system K₂O- Na₂O- CaO- MgO- MnO- FeO- Fe₂O₃- Al₂O₃- TiO₂- SiO₂- C- H₂- O₂[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 8: 89~ 124.
- Holland T J B and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16: 309~ 343.
- Knoche R, Sweeney J S and Luth R W. 1999. Carbonation and decarbonation of eclogites: the role of garnet[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 135: 332~ 339.
- Kretz R. 1983. Symbols of rock-forming minerals[J]. *American Mineralogist*, 68: 277~ 279.
- Krogh E J. 1988. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer—a reinterpretation of existing experimental data[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 99: 44~ 48.
- Krogh-Ravna E. 2000. The garnet-clinopyroxene Fe²⁺-Mg geothermometer: an updated calibration[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 211~ 219.
- Leake B E, Wooley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles; report of the subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names[J]. *European J. of Mineralogy*, 9: 623~ 651.
- Leung I S. 1990. Silicon carbide cluster entrapped in a diamond from Fuxian, China[J]. *American Mineralogist*, 75: 1110~ 1119.
- Liou J G, Maruyama S and Ernst W G. 1997. Seeing a mountain in a grain of garnet[J]. *Science*, 276: 48~ 49.
- Liou J G, Zhang R Y, Ernst W G, *et al.* 1998. High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks[A] Ribbe P L. *Ultrahigh-pressure Mineralogy, Physics and Chemistry of the Earth Deep Interior*[C]. Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy*. 37: 33~ 138.
- Liu L G and Lin C C. 1995. High-pressure phase transformations of carbonates in the system CaO-MgO-SiO₂-CO₂[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 134: 297~ 305.
- McGetchin T R and Besancon J R. 1973. Carbonate inclusions in mantle derived pyropes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 305~ 315.
- Messiga B, Kienast J R, Rebay G, *et al.* 1999. Cr-rich magnesiochloritoid eclogites from the Monviso ophiolites, Western Alps, Italy[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 17: 287~ 299.
- Olafsson M and Eggler D H. 1983. Phase relations of amphibole-carbonate, and phlogopite-carbonate peridotite: petrologic constraints on the asthenosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 305~ 315.
- Powell R. 1985. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration, the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 3: 231~ 243.
- Powell R and Holland T J. 1985. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration, the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 3: 231~ 243.
- Redfern S A T, Wood B J and Henderson C M B. 1993. Static compressibility of magnesite to 20 GPa: implications for MgCO₃ in the lower mantle[J]. *Geophysical Research Letters*, 20: 2099~ 2102.
- Reinecke T. 1991. Very-high-pressure metamorphism and uplift of coesite-bearing metasediments from the Zermatt-Saas zone, Western Alps[J]. *European Journal of Mineralogy*, 3: 7~ 17.
- Reinecke T. 1998. Prograde high- to ultrahigh-pressure metamorphism and exhumation of oceanic sediments at Lago di Cignana, Zermatt-Saas Zone, western Alps[J]. *Lithos*, 42: 147~ 189.
- Ross N L and Reeder R J. 1992. High-pressure structural study of dolomite and ankerite[J]. *American Mineralogist*, 77: 412~ 421.

- Rovetta M R and Mathez E R. 1982, Magnesite and other minerals in fluid inclusions in a lherzolite xenolith from an alkali basalt [J]. *Terra Cognita*, 2: 229.
- Schreyer W. 1995. Ultradeep metamorphic rocks, the retrospective view point[J]. *Journal of Geophysical Research*, 100: 8 353 ~ 8 366.
- Smith D C. 1988. A review of the peculiar mineralogy of the Norwegian coesite- eclogite province, with crystal_chemical, petrological and geodynamical notes and an extensive bibliography[A]. Smith D C. *Eclogites and Eclogite_facies Rocks* [C], 1~ 206.
- Smith D C and Cheeney J. 1980. Oriented needles of quartz in clinopyroxene: evidence for exsolution of SiO₂ from a non_stoichiometric supersilicic "clinopyroxene"[A]. Paris, France. 26th Int'l Geol. Cong[C]. 145.
- Smith J R. 1977. Quartz pseudomorphs after coesite[J]. *American Mineralogist*, 62: 828~ 830.
- Spear F S, Rumble III D and Ferry J M. 1982. Linear algebraic manipulation of N_dimensional composition space[A]. *Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy*[C], 10: 53~ 104.
- Tsai C_H and Liou J G. 2000. Eclogite_facies relics and inferred ultrahigh_pressure metamorphism in the North Dabie Complex, central eastern China[J]. *American Mineralogist*, 85: 1~ 8.
- Tagiri M, Yano T, Bakirov A, *et al.* 1995. Mineral parageneses and metamorphic P- T paths of ultrahigh_pressure eclogites from Kyrgyzstan Tien_Shan[J]. *The Island Arc*, 4: 280~ 292.
- Tagiri, *et al.* 2001. HP- UHP eclogitic rocks included in ULPM pelitic schists, Makbal Kyrgyzstan: imply tectonic mélange by ascending of UHPMR[A]. *Abstract of Sixth International Eclogite Conference*[C]. 158.
- Volkava N I and Budanov V I. 1999. Geochemical discrimination of metabasalt rocks of the Fan_Karategin transitional blueschist/greenschist belt. South Tianshan, Tajikistan. seamount volcanism and accretionary tectonics[J]. *Lithos*, 47: 201~ 216.
- Wang A L, Pasteris J D, Henry O A M, *et al.* 1996. Magnesite_bearing inclusion assemblage in natural diamond[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 141: 293~ 306.
- Waters D J and Martin H N. 1993. Geobarometry of phengite_bearing eclogites[J]. *Terra Abstracts*, 5: 410~ 411.
- Widiyantoro S and Hiss R. 1996. Structure and evolution of lithospheric slab beneath the Sunda Arc, Indonesia[J]. *Science*, 271: 1 566~ 1 570.
- Yang J, Godard, G, Kienast J R, *et al.* 1993. Ultrahigh_pressure (60 kbar) magnesite_bearing garnet peridotites from north-eastern Jiangsu, China[J]. *Journal of Geology*, 101: 541~ 554.
- Yaxley G M and Green D H. 1994. Experimental demonstration of refractory carbonate- bearing eclogite and siliceous melt in the subduction regime[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 128: 313~ 325.
- Zhang Li fei, Gao Jun, Aikebeier, *et al.* 2000. Low_temperature eclogite facies metamorphism in Xinjing[J]. *Science in China*, 30(4): 345~ 354(in Chinese).
- Zhang R Y and Liou J G. 1994. Significance of magnesite paragenesis in ultrahigh_pressure metamorphic rocks[J]. *American Mineralogist*, 79: 397~ 400.
- Zhang R Y and Liou J G. 1996. Significance of coesite inclusions in dolomite from eclogite in the southern Dabie mountains, China[J]. *American Mineralogist*, 80: 181~ 186.
- Zhang R Y and Liou J G. 1998. Ultrahigh pressure metamorphism of the Sulu terrane, eastern China, a prospective view[J]. *Continental Dynamics*, 3(1~ 2): 32~ 53.
- Zhang R Y, Liou J G and Cong B L. 1995. Ultrahigh_pressure metamorphosed talc-, magnesite- and Ti-clinohumite_bearing mafic-ultramafic complex, Dabie Mountains, east central China[J]. *Journal of Petrology*, 36: 1 011~ 1 038.

附中文参考文献

- 高 俊, 张立飞, 王宗秀, 等. 1997. 新疆西天山高压变质带的变质矿物与变质作用演化[J]. *岩石矿物学杂志*, 16(3): 244~ 254.
- 张立飞, 高 俊, 艾克拜尔, 等. 2000. 新疆西天山低温榴辉岩相变质作用[J]. *中国科学(D 辑)*, 30(4): 345~ 354.