

新疆西天山高压变质带的 变质矿物与变质作用演化*

高俊¹ 张立飞² 王宗秀¹ 艾克拜尔²

(1 中国地质科学院地质所, 北京 100037, 2 北京大学地质学系, 北京 100871)

主题词 西天山 高压变质带 变质矿物 变质作用

提 要 新疆西天山高压变质带主要由石榴石、角闪石、绿辉石、多硅白云母、钠云母、绿帘石、绿泥石、钠长石、石英、榍石和金红石等组成。石榴石主要含铁铝榴石组份。角闪石有蓝闪石、亚铁蓝闪石、青铝闪石、冻蓝闪石等类型。变质矿物组合显示高压变质带曾经历了由硬柱石蓝片岩相、榴辉岩相、绿帘蓝片岩相至绿片岩相的变质作用演化进程。

1 高压变质带的空间分布与区域地质概况

我国新疆西天山造山带分布一条近东西向延伸约200km的高压低温变质带(图1)。它的西边与吉尔吉斯国南天山Atbashi蓝闪榴辉岩带相连^[1], 东边则与天山中段库米什蓝片岩薄层相连^[2]。高压变质带由蓝片岩、榴辉岩、绿片岩和少量大理岩夹层、蛇绿岩推覆岩片构成, 并被视作一条形成于伊犁中天山板块南缘早古生代末期增生楔内的变质俯冲杂岩带^[3,4]。它的南侧出露塔里木板块早古生代被动大陆边缘中上志留统大理岩化灰岩和碎屑岩^[5]、塔里木板块晚古生代被动大陆边缘中泥盆统一下石炭统复理石、滑混岩、硅质岩和灰岩及少量晚古生代蛇绿混杂岩推覆岩片^[4]。北侧中天山南缘断裂是一条宽约1—8km的大型韧性左行平移剪切带^[6]。再向北出露由前寒武纪角闪岩相变质岩、古生代花岗岩、上志留统岛弧型火山岩和下石炭统火山岩、碎屑岩构成的伊犁中天山板块活动大陆边缘。

蓝片岩呈透镜体、条带状、薄层状或厚层状产于绿片岩中。个别露头蓝片岩连续出露宽度在2km以上, 如阿克牙孜河科普尔特剖面(图1-②)。榴辉岩则呈透镜状、薄层状或层状出露在科普尔特剖面的蓝片岩围岩中, 两者之间为渐变过渡关系, 非断层接触。高压变质岩的原岩有古洋壳岩石圈碎块、古陆源沉积物及古陆缘陆壳基底岩石等^[4]。本文旨在通过对横穿高压变质带三条剖面(图1)中蓝片岩和榴辉岩变质矿物的研究, 初步讨论变质作用的演化进程。

2 变质矿物特征

* 国家自然科学基金项目(49402036, 49632240)和国家三〇五项目(969150301)成果
本文于1997年5月12日收到, 6月12日改回。

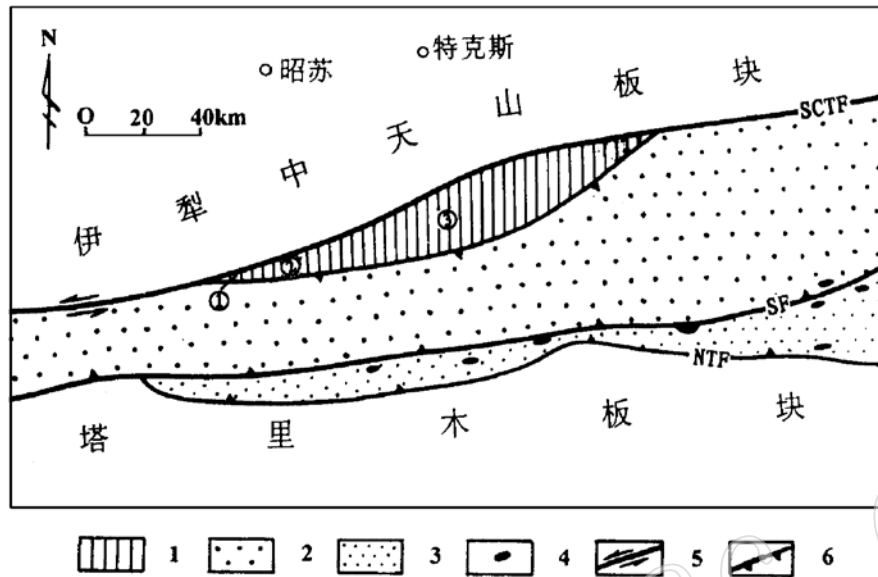


图1 西天山高压变质带分布及大地构造略图

Fig.1 Distribution and geotectonic sketch map of the western Tianshan high P/T metamorphic belt

- 1—高压变质带; 2—早古生代被动大陆边缘; 3—晚古生代被动大陆边缘; 4—晚古生代蛇绿岩推覆岩片;
5—走滑断裂; 6—推覆断裂; SCTF—中天山南缘断裂; SF—南天山山脊断裂; NTF—塔里木北缘断裂;
①—木札尔特河长阿吾子剖面; ②—阿克牙孜河科普尔特剖面; ③—科克苏河剖面

组成高压变质带的主矿物有石榴石、角闪石类、绿帘石类、绿辉石、绿泥石、多硅白云母、钠云母、钠长石和石英,副矿物有方解石、榍石、钛铁矿和金红石等。

2.1 石榴石

石榴石呈1-3mm斑晶颗粒产于蓝片岩和榴辉岩中。榴辉岩的石榴石斑晶内含黝帘石、钠云母、珍珠云母、冻蓝闪石(照片1)、绿辉石(照片1)、金红石、榍石、方解石、石墨和石英包体,外与绿辉石、金红石、角闪石、黝帘石、白云母等共生,并有轻微的绿泥石化。石榴石成分(表1)显示其主要为铁铝榴石组份(53.15% - 79.25%),其次为钙铝榴石(8.54% - 29.7%)、镁铝榴石(5.03% - 23.63%)和锰铝榴石(0.57% - 12.91%)组份(图2-b)。少数石榴石具成分环带,由矿物中心至边部,镁铝榴石组份升高,由6.36%升至13.12%;锰铝榴石组份降低,由12.92%降至0.88%(表1,95a5样品)。

蓝片岩的石榴石斑晶内含黝帘石+钠长石+钠云母包体(照片2)和蓝闪石、方解石等包体,个别含少量绿辉石;外与蓝闪石类、绿帘石类、多硅白云母、钠长石、石英、榍石等共生;并有绿泥石化退变。石榴石成分(表1,图2-a、b、c)亦主要为铁铝榴石组份(45.10% - 71.50%),其次为钙铝榴石(13.72% - 35.94%)、锰铝榴石(0.11% - 26.55%)和镁铝榴石(1.71% - 5.76%)组份。长阿吾子、科普尔特和科克苏河三条剖面的石榴石成分相似,无明

表1 西天山高压变质带石榴石代表成分
Table 1 Representative chemical compositions of garnets from the western Tianshan high P/T metamorphic belt

样品号	952511		95a5		9525-8		9525-6		9514-3 9514-8		TK3-6④		TK3-5④		TK3-3④		C1-1		C1-1⑩		C1-1⑩		
	C	R	C	R	C	R	C	R	M	M	C	R	C	R	C	R	C	R	C	M	R	C	R
产地	科普尔特剖面																						
岩性	榴辉岩																						
SiO ₂	37.06	38.07	37.07	37.50	37.51	38.30	38.52	38.83	37.60	36.89	36.84	36.90	36.55	36.52	37.07	36.84	36.94	37.82	36.92	37.28	37.40	36.39	36.92
TiO ₂	0.09	0.18	0.15	0.07	0.16	0.09	0.02	0.04	0.07	0.11	0.12	0.07	0.15	0.24	0.18	0.16	0.21	0.05	0.23	0.22	0.09	0.13	0.13
Cr ₂ O ₃	0.07	0.18	0	0.01	0.02	0.05	0.09	0.06	0.03	0	0.06	0	0.04	0.04	0.03	0.07	0	0	0.03	0	0	0.06	0.03
Al ₂ O ₃	21.10	21.61	20.76	21.27	20.74	21.24	21.90	21.85	20.45	20.31	20.26	20.31	20.10	19.87	20.42	20.44	20.01	20.69	20.37	20.42	20.86	20.07	20.50
MgO	2.12	5.04	1.23	2.55	1.28	2.50	5.92	6.12	1.26	1.43	0.53	0.43	1.08	1.41	0.58	0.86	0.35	1.09	0.58	0.77	1.03	0.72	1.08
CaO	3.22	8.54	6.24	7.03	7.96	8.31	8.57	7.65	7.28	4.93	9.36	9.55	6.33	5.84	10.49	10.28	9.31	11.61	9.78	9.76	12.27	8.81	10.85
MnO	1.44	0.48	4.40	0.30	1.19	0.36	0.45	0.39	1.68	1.50	1.85	0.91	9.57	7.41	0.51	0.17	13.69	0.59	5.60	1.10	0.64	4.39	0.52
FeO*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fe ₂ O ₃	0.10	0.15	0.41	0	0.82	0.59	0.10	0	1.27	1.08	0.97	1.17	1.14	1.03	0.94	0.65	1.33	0.96	0.79	0.94	0.71	1.17	0.95
FeO	36.08	26.43	30.05	31.28	31.83	30.37	25.04	24.96	31.84	34.54	29.86	30.94	25.01	26.29	30.07	29.84	18.09	27.51	25.51	29.71	27.28	27.97	29.04
Ni ₂ O	0.04	0.01	0.08	0.01	0	0.02	0.03	0.05	0.01	0	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02	0.03	0.08	0.03	0	0.03
K ₂ O	0	0	0.01	0.01	0	0.02	0.01	0	0	0	0.03	0	0.02	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H ₂ O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
总量	101.32	100.54	100.40	100.03	101.54	101.85	100.65	99.95	101.49	100.79	99.89	100.31	100.02	98.71	100.32	99.37	99.94	100.34	99.84	100.28	100.31	99.71	100.05
Si	2.96	2.96	2.98	2.99	2.98	3.00	2.97	3.01	2.99	2.98	2.98	2.97	2.96	2.99	2.97	2.99	2.99	3.00	2.98	2.99	2.97	2.95	2.96
Al ^{IV}	0.04	0.04	0.02	0.01	0.02	0	0.03	0	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.01	0.03	0.01	0.01	0	0.02	0.01	0.03	0.05	0.05
Al ^{VI}	1.94	1.93	1.95	1.98	1.92	1.96	1.95	1.99	1.91	1.89	1.91	1.90	1.88	1.91	1.90	1.95	1.89	1.94	1.91	1.92	1.93	1.87	1.89
Ti	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0	0	0.01	0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0	0.01	0	0.01	0.01	0.01
Cr	0.00	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ³⁺	0.01	0.01	0.03	0	0.05	0.04	0.01	0	0.08	0.01	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.03	0.08	0.06	0.05	0.01	0.04	0.07	0.06
Fe ²⁺	2.41	1.96	2.02	2.09	2.11	1.99	1.61	1.62	1.99	1.96	2.02	2.08	1.70	1.80	2.02	2.03	1.22	1.83	1.72	1.99	1.81	1.90	1.94
Mg	0.25	0.58	0.15	0.30	0.15	0.29	0.70	0.71	0.15	0.17	0.06	0.05	0.13	0.17	0.07	0.11	0.04	0.13	0.07	0.09	0.12	0.09	0.13
Mn	0.10	0.03	0.30	0.02	0.08	0.02	0.03	0.03	0.11	0.10	0.13	0.06	0.66	0.52	0.04	0.02	0.94	0.04	0.38	0.08	0.04	0.30	0.04
Ca	0.28	0.71	0.54	0.60	0.68	0.70	0.71	0.64	0.62	0.43	0.81	0.82	0.55	0.51	0.90	0.85	0.81	0.99	0.85	0.84	1.05	0.77	0.93
Na	0.01	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0.01
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

测试单位: 由中国科学院地质研究所岩石圈构造演化开放实验室电子探针室, 仪器型号: CAMECA SX50;

FeO*为全铁; R - 矿物边缘, C - 矿物中心; M - 矿物中间

表2 西天山高压变质带角闪石代表成分

Table2 Representative chemical compositions of amphiboles from the western Tianshan high P/T metamorphic belt

样品号	95251		952511			95a5		514-3		9520-5		9522-2		TK3-6①						
	M	M	M	M	M	M	M	C	R	C	R	C	R	C	C	C	R	R	R	R
产地	科普尔特剖面												科克苏河剖面							
岩性	榴辉岩						蓝片岩						石榴钠闪石钠长片岩							
矿物	蓝透闪石	冻蓝闪石	浅闪石	浅闪角闪石	冻蓝闪石	含铁非闪角闪石	阳起石	蓝闪石	青铝闪石	蓝闪石	冻蓝闪石	蓝闪石	冻蓝闪石	亚铁蓝闪石	亚铁蓝闪石	亚铁蓝闪石	钠闪石			
SiO ₂	54.80	53.48	45.88	46.62	48.85	42.91	53.10	56.48	53.46	55.64	49.66	58.86	49.81	53.74	55.34	55.35	41.02	44.59	41.83	42.17
TiO ₂	0.03	0.04	0.24	0.04	0.15	0.15	0.09	0.08	0.15	0.23	0.20	0.03	0.14	0.03	0	0	0.31	0.36	0.40	0.41
Cr ₂ O ₃	0.08	0.06	0.01	0	0.05	0	0	0.07	0	0	0.03	0.02	0	0	0	0.05	0.02	0.01	0.06	0.04
Al ₂ O ₃	5.53	6.43	11.73	12.14	11.45	14.70	5.87	9.53	8.01	11.54	6.22	11.68	9.95	10.90	8.68	9.43	14.46	10.33	14.23	13.79
MgO	10.11	14.94	9.67	9.69	11.46	6.05	15.54	7.90	7.72	8.39	10.56	9.38	11.71	3.79	4.82	4.71	2.49	2.71	2.59	2.43
CaO	17.53	8.83	9.98	9.06	8.33	8.94	9.96	0.70	1.75	1.57	9.09	0.08	8.54	0.90	0.26	0.26	6.41	5.10	6.07	5.98
MnO	0.07	0.02	0.07	0.04	0.11	0.06	0	0.05	0.07	0	0.03	0.01	0.07	0.01	0.03	0.06	0.02	0.05	0.05	0.01
FeO*	8.21	10.51	16.94	15.47	12.95	20.29	9.89	16.04	19.55	13.90	18.94	11.24	15.25	21.05	20.79	20.29	25.93	28.37	25.74	26.11
Na ₂ O	4.45	2.98	3.29	3.63	3.87	3.67	2.50	7.02	6.56	6.97	3.00	7.64	3.63	6.52	7.01	6.99	5.04	4.98	5.04	4.97
K ₂ O	0	0.15	0.24	0.25	0.25	0.34	0.13	0.02	0.11	0.01	0.19	0.02	0.17	0.08	0	0.02	0.72	0.53	0.73	0.74
H ₂ O	0	2.11	0	0	0	1.97	2.10	2.12	2.05	2.15	2.02	2.21	2.09	2.05	2.06	2.07	1.90	1.91	1.91	1.91
总量	100.81	99.52	98.05	96.94	97.47	99.08	99.18	100.01	99.43	100.40	99.94	101.16	101.36	99.07	98.99	99.23	98.30	98.93	98.59	98.56
Si	7.42	7.47	6.74	6.86	7.00	6.46	7.54	7.89	7.65	7.73	7.14	7.97	7.05	7.79	7.98	7.96	6.13	6.69	6.23	6.40
Al ^{IV}	0.58	0.53	1.26	1.14	1.00	1.54	0.46	0.11	0.35	0.27	0.86	0.03	0.95	0.21	0.02	0.04	1.87	1.31	1.77	1.60
Al ^{VI}	0.30	0.52	0.77	0.96	0.97	1.06	0.53	1.46	0.99	1.62	0.19	1.83	0.70	1.65	1.45	1.55	0.68	0.51	0.73	0.74
Ti	0	0	0	0	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0	0.02	0	0	0	0.04	0.04	0.05	0.05
Cr	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0.01	0.01
Fe ³⁺	0.93	0.78	0.32	0.24	0.32	0.42	0.16	0.51	0.95	0.25	1.42	0.17	0.61	0.37	0.53	0.43	2.44	2.06	2.25	2.16
Fe ²⁺	0	0.45	1.76	1.67	1.23	2.13	1.01	1.37	1.39	1.37	0.86	1.10	1.20	2.16	1.98	2.00	0.80	1.50	0.95	1.11
Mg	2.04	3.11	2.12	2.13	2.45	1.36	3.29	1.65	1.65	1.74	2.26	1.89	2.47	0.82	1.04	1.01	0.56	0.61	0.56	0.54
Mn	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0	0	0.01	0.01	0	0	0	0.01	0	0	0.01	0	0.01	0.01	0
Ca	2.54	1.32	1.57	1.43	1.28	1.44	1.52	0.11	0.27	0.23	1.40	0.01	1.29	0.14	0.04	0.04	1.03	0.82	0.97	0.96
Na	1.17	0.80	0.94	1.03	1.08	1.07	0.70	1.90	1.82	1.88	0.84	2.00	0.99	1.83	1.96	1.95	1.46	1.45	1.46	1.44
K	0	0.03	0.05	0.05	0.05	0.07	0.02	0	0.02	0	0.04	0	0.03	0.02	0	0	0.14	0.10	0.14	0.14
O	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23

测试单位：由中国科学院地质所岩石圈构造演化开放实验室电子探针室，仪器型号：CAMECA SX50；
FeO*为全铁；R-矿物部 M-矿物中间；C-矿物中心；I-包体矿物

显差异(图2)。长阿吾子(图2-a)的石榴石具成分环带,由矿物中心至边部,锰铝榴石组份降低,如由31.14%降至1.33%;镁铝榴石组份升高,由1.40%升至4.32%;铁铝榴石由40.62%升至61.77%(表1,C1-1样品)。

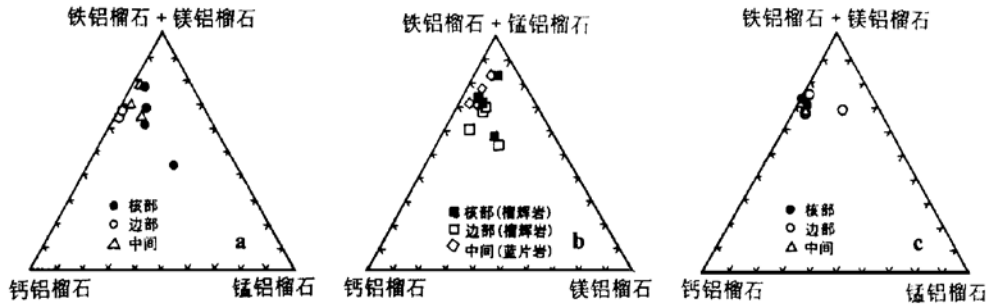


图2 西天山高压变质带的石榴石成分图

Fig. 2 Chemical composition of garnets from the Western Tianshan high P/T metamorphic belt

a—木札尔特河长阿吾子剖面; b—阿克牙孜河科普尔特剖面; c—科克苏河剖面

2.2 角闪石类

高压变质带的角闪石类有钠质闪石、钠钙闪石和钙闪石类型。榴辉岩和蓝片岩中的角闪石类型有明显差异。榴辉岩的角闪石为钠钙闪石和钙闪石类,如冻蓝闪石、浅闪石、浅闪角闪石,含铁非闪角闪石、蓝透闪石和阳起石(表2)。其中阳起石只产于基质或细脉中,少数阳起石晶体中含绿辉石残晶包体;而其它类型闪石在基质和石榴石斑晶中均有产出,与石榴石、绿辉石等共生。角闪石粒度以0.3–0.8mm居多。钠钙闪石类 Na_2O 含量2.91%–4.45%,平均3.51%,钙闪石类 Na_2O 含量1.09%–2.50%,平均1.80%(表2)。

蓝片岩的角闪石有钠质闪石(亚铁蓝闪石、蓝闪石、青铝闪石、钠闪石、镁钠闪石)、钠钙闪石(冻蓝闪石、蓝透闪石)和钙闪石(阳起石)三类(表2,图3)。冻蓝闪石和蓝透闪石一般构成蓝闪石、亚铁蓝闪石或青铝闪石的退变质反应边(照片3,表2,9520–5和9522–2样品)。少数样品中产出的阳起石以 $0.1 \times 0.8\text{mm}$ 左右的长柱状颗粒与 $0.01–0.03\text{mm}$ 的微粒蓝闪石共生(照片4)。钠质闪石类以蓝闪石、青铝闪石和亚铁蓝闪石为主,钠闪石和镁钠闪石仅在个别样品中以蓝闪石或亚铁蓝闪石的反应边产出(照片5;表2,TK3–6⑥样品;图3–b)。蓝闪石类既有 $0.5 \times 2\text{mm}$ 的斑晶颗粒,也有 $0.1 \times 0.03\text{mm}$ 的毛发状集合体,但以 $0.1–0.5\text{mm}$ 细粒为主。蓝闪石斑晶中含石榴石、绿帘石、白云母、磁铁矿等包体(照片6)。长柱状蓝闪石类一般密集定向排列指示 a 线理方向(照片7)。细粒颗粒往往与多硅白云母、绿帘石等一起分布于钠长石斑晶中(照片8)。毛发状微粒蓝闪石类集合体密集分布在具不规则边界的钠长石斑晶中或与长柱状阳起石共生(照片4)。此外,部分绿帘蓝片岩的致密状蓝闪石类集合体呈棉絮状产出,可能是原岩火山物质经初步脱玻化变质的产物,很难辨别晶形。钠质闪石一般与石榴石、多硅白云母、绿帘石、钠长石、榍石等共生,部分发育向绿泥石退变现象^[4]。高压变质带三条剖面的钠质闪石的成分差异不甚明显,主要为蓝闪石,其次为亚铁蓝闪石和青铝闪石(图3)。钠闪石和镁钠闪石仅在科克苏河剖面出现。由矿物中心向边部,总体呈现 $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Al}^{3+\text{VI}})$ 值增大趋势,其中TK3–6⑥样品尤为明显,

平均由 0.20 增至 0.78, 即由中心亚铁蓝闪石转变为边部钠闪石和镁钠闪石(图 3-b, 照片 5)。

2.3 绿帘石类

绿帘石类有黝帘石和绿帘石两种(表 3, 1-5)。石榴石斑晶所含 0.02-0.1mm 黝帘石包体的 Ps 值 10.11-16.44 ($Ps = 100Fe^{3+}/(Al + Fe^{3+})$), 与蓝片岩基质黝帘石的 Ps 值(平均值 14.03)相当, 而与榴辉岩中黝帘石斑晶的 Ps 值(3.01)有较大差别。榴辉岩中只产出黝帘石, 无绿帘石; 而蓝片岩基质以绿帘石为主, 出现少量黝帘石。绿帘石的 Ps 值 11.52-25.48, 部分斑晶(0.3×3mm)具成分环带, Ps 值由矿物中心的 25.48, 降至边部的 16.48。榴辉岩中黝帘石斑晶(1×3mm-2×5mm)内含石榴石、绿辉石、珍珠云母、金红石、石英等包体, 外与石榴石、绿辉石、白云母、角闪石等共生。蓝片岩的绿帘石斑晶一般不含包体, 与石榴石、钠质闪石、白云母、钠长石等共生。

2.4 绿辉石

绿辉石多呈细粒(0.05-0.5mm)产于榴辉岩基质或石榴石、黝帘石斑晶中, 短柱状晶形或细粒化粒状颗粒(0.02-0.07mm), 硬玉分子含量 39.38%-54.14%, 平均 45.48%(表 3, 6-9; 图 4)。作为包体矿物和基质矿物产出的绿辉石在成分上无明显差异。个别露头蓝片岩层中产出有 2-10cm 宽的绿辉石脉或绿辉石-石英脉, 脉中绿辉石一般为 0.1-0.3mm, 硬玉分子含量 34.52%-51.25%, 平均 41.84%(表 3, 10), 与榴辉岩的绿辉石相当(图 4)。

2.5 白云母

白云母类有钠云母和多硅白云母两种(表 3, 11-15)。钠云母可呈 0.02×0.1mm 左右的包体矿物产于石榴石、黝帘石斑晶中, 也可呈 0.5×2mm 左右的斑晶颗粒产出。蓝片岩的钠云母斑晶一般横切片理方向生长; 榴辉岩的钠云母斑晶内含绿辉石和金红石包体, 无定向性。多硅白云母多以细粒鳞片状定向颗粒构成蓝片岩的片理。钠云母 SiO₂ 含量 45.66%-50.26%, 平均 47.64%;

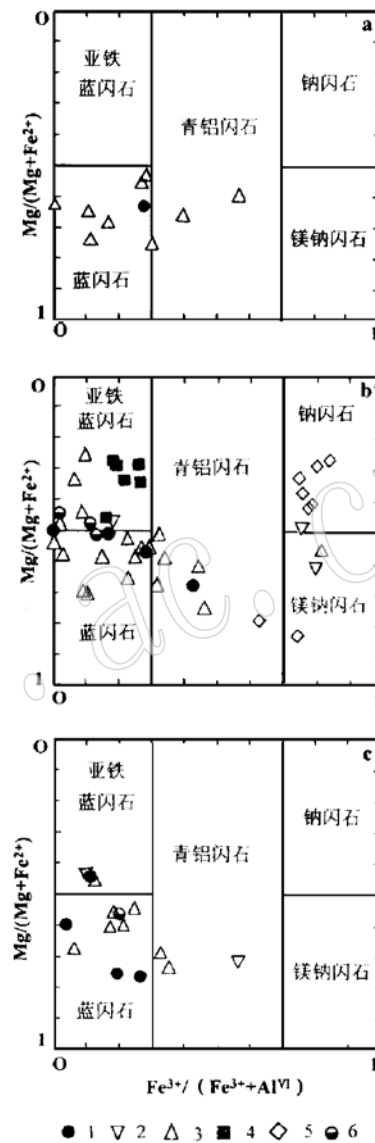


图 3 西天山高压变质带的钠质闪石成分图
Fig. 3 Composition of sodic amphiboles from the Western Tianshan high *P/T* metamorphic belt

a—阿克牙孜河科普尔特剖面; b—科克苏河剖面; c—木札尔特河长阿吾子剖面; 1—石榴石斑晶中的蓝闪石; 2—矿物中心; 3—矿物中间; 4—矿物边部; 5—TK3-6⑤样品钠质闪石的中心; 6—TK3-6⑥样品钠质闪石的边部

Na_2O 含量 5.76% – 7.96%，平均 6.92%；Si 阳离子数 2.98 – 3.11，平均 3.05；Na 阳离子数 0.64 – 0.98，平均 0.85。包体钠云母和斑晶钠云母无明显成分差异。多硅白云母 SiO_2 含量 49.95% – 55.38%，平均 52.41%； K_2O 含量 6.84% – 10.67%，平均 8.99%；Si 阳离子数 3.31 – 3.57，平均 3.41。

2.6 绿泥石

绿泥石有两类(表 3, 16 – 17)，一类与钠质闪石、绿帘石、多硅白云母、钠长石共生，另一类为石榴石(照片 7)和蓝闪石的退变产物。前者 $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ 值为 0.44 – 0.51；平均 0.47；后者 $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ 值则为 0.70 – 0.77，平均 0.74。

2.7 钠长石、石英、榍石和金红石

钠长石一般呈 1 – 3mm 斑晶产于蓝片岩中，内含 0.02 – 0.1mm 的蓝闪石类、多硅白云母、绿帘石等包体(照片 8)，形态和边界不规则， Na_2O 含量可达 11.85%(表 3, 18)。钠长石未在榴辉岩中出现。

石英多呈 0.1 – 1mm 细粒颗粒构成蓝片岩的基质，少数以绿辉石 – 石英脉贯穿蓝片岩层。榴辉岩的石榴石斑晶含 0.05 – 0.2mm 的石英包体，个别石英颗粒外围的石榴石主晶发育放射状裂纹结构。

榍石和金红石是高压变质带中的主要副矿物，粒度为 0.03 – 0.1mm，个别为 0.5mm。榍石的 TiO_2 含量为 34.76%， Al_2O_3 含量为 3.64%， $X_{\text{Al}}(\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe}^{3+} + \text{Ti}))$ 值 0.14(表 3, 20)。金红石的 TiO_2 含量高达 96.34%(表 3, 19)。

3 变质作用演化

石榴石 + 绿辉石 + 黝帘石 + 角闪石 + 白云母 + 金红石组合代表的榴辉岩相变质作用，利用 Ellis 和 Green(1979)石榴石 – 单斜辉石温度计^[7]估算温度为 $520 \pm 80^\circ\text{C}$ ，利用 Holland(1985)绿辉石中硬玉分子含量压力计^[8]估计压力最小值为 1.2 – 1.4GPa。该榴辉岩相温压条件可能代表西天山高压变质带的峰期变质作用。石榴石变斑晶中黝帘石、钠云母、绿辉石、钠长石和石英等包体矿物可能指示榴辉岩相变质作用之前曾发生过如下变质反应：硬玉 + 4 硬柱石 = 2 黝帘石 + 钠云母 + 石英 + $6\text{H}_2\text{O}$ ^[9]或 4 硬柱石 + 钠长石 = 2 黝帘石 + 钠云母 + 2 石英 + $6\text{H}_2\text{O}$ ^[10]，即证实峰期变质之前，高压变质带曾经历过硬柱石 – 蓝片岩相进变质作用。

榴辉岩呈夹层状产于蓝片岩岩层中、蓝片岩岩层内残存少量榴辉岩透镜体、石榴蓝闪钠



图 4 西天山高压变质带的绿辉石成分图

Fig. 4 Composition of omphacites from the Western Tianshan high P/T metamorphic belt

1—榴辉岩基质绿辉石；2—榴辉岩石榴石斑晶中的包体；3—蓝片岩中脉内绿辉石

长片石榴石斑晶中保存绿辉石包体等地质现象说明石榴石 + 蓝闪石 + 绿帘石 + 多硅白云母 + 钠长石 + 榍石代表的绿帘蓝片岩相变质作用为退变质作用早期阶段。由榴辉岩相向绿帘蓝片岩相退变的变质反应可能为: $9 \text{ 镁铝榴石} + 26 \text{ 硬玉} + 12 \text{ 透辉石} + 19 \text{ 石英} + 16\text{H}_2\text{O} = 13 \text{ 蓝闪石} + 6 \text{ 斜黝帘石}^{[11]}$ 和 $3 \text{ 硬玉} + \text{镁铝榴石} + 2 \text{ 石英} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{蓝闪石} + \text{钠云母}^{[11]}$ 。而石榴石斑晶绿泥石化、绿辉石阳起石化、蓝闪石绿泥石化、蓝闪石冻蓝闪石化等则表明退变质作用晚期阶段为绿片岩相。可能的退变质反应有: $\text{蓝闪石} + \text{水} = \text{绿泥石} + \text{钠长石}^{[12]}$, $\text{青铝闪石} + \text{绿帘石} + \text{水} = \text{钙闪石} + \text{钠长石} + \text{绿泥石} + \text{铁氧化物}^{[13]}$, $\text{绿帘石} + \text{青铝闪石} + \text{CO}_2 = \text{钠长石} + \text{绿泥石} + \text{铁氧化物}^{[14]}$ 和 $\text{蓝闪石} + \text{斜黝帘石} + \text{石英} + \text{水} = \text{透闪石} + \text{绿泥石} + \text{钠长石}^{[15]}$ 。总之, 西天山高压变质带经历了由硬柱石 - 蓝片岩相、榴辉岩相、绿帘蓝片岩相至绿片岩相的变质作用演化过程。

致谢 笔者感谢中国科学院地质所岩石圈构造演化开放实验室电子探针室徐平同志和韩秀伶同志精心测试样品, 感谢新疆伊犁哈萨克自治州党委贾伊生同志协助解决野外工作中的困难。

参 考 文 献

- 1 Dobretsov N L, Coleman R G, Liou J G and Maruyama S. Blueschist belts in Asia and possible periodicity of blueschist facies metamorphism. *Ophiolite*, 1987, 12: 445—456.
- 2 Gao J, Tang Y, Zhao M and Wang J. Blueschists discovered in Kumishi, south Tianshan and their tectonic significance. Proceedings of the 29th International Geological Congress (Part B), 1994, 115—118.
- 3 高俊, 肖序常, 汤耀庆, 赵民, 王军. 新疆西南天山蓝片岩的变质作用 PTDt 轨迹及构造演化. *地质论评*, 1994, 40(6): 544—553.
- 4 Gao J, He G, Li M, Xiao X, Tang Y, Wang J and Zhao M. The mineralogy, petrology, metamorphic PTDt trajectory and exhumation mechanism of blueschists, south Tianshan, northwestern China. *Tectonophysics*, 1995, 250: 151—168.
- 5 高俊, 何国琦, 李茂松. 西天山造山带的古生代造山过程. *地球科学*, 1997, 22(1): 27—32.
- 6 高俊, 何国琦, 李茂松, 肖序常, 汤耀庆, 赵民, 王军. 新疆南天山高压变质岩石的抬升机制. *地质科学*, 1996, 31(4): 365—374.
- 7 Ellis D J and Green D H. An experimental study of the effect of Ca upon Garnet - Clinopyroxene Fe - Mg exchange equilibria. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979, 71: 13—22.
- 8 Holland T J B. The experimental determination of activities in disordered and short - range ordered jadeitic pyroxenes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1983, 82: 214—220.
- 9 Holland T J B. Experimental determination of the reaction $\text{paragonite} = \text{jadeite} + \text{kyanite} + \text{H}_2\text{O}$ and thermodynamic data for part of the system $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$, with application to eclogites and blueschists. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979, 68: 293—301.
- 10 Heinrich W and Athaus E. Die obere stabilitätsgrenze von Lawsonit plus Albit bzw. Jadeit. *Fortschritte der Mineralogie*, 1980, 58: 49—50.
- 11 Evans B W. Phase relations of epidote - blueschists. *Lithos*, 1990, 25: 1—25.
- 12 贺同兴, 卢良, 李树勋, 兰玉琦. 变质岩石学. 北京: 地质出版社, 1987.
- 13 Brown E H. Geology of the Shuksan Suite, Northwest Cascades, Washington, USA. *Geological Society of American Memoir*, 1986, 164: 143—154.
- 14 Mark A H. Deformation and high P/T metamorphism in central part of the Condrey Mountain window, north - central Klamath Mountains, California and Oregon. *Geological Society of American Memoir*, 1986, 164: 125—142.
- 15 Maruyama S, Cho M and Liou J G. Experimental investigations of blueschist - greenschist transition equilibria: Pressure de-

pendence of Al_2O_3 contents in sodic amphibole – a new geobarometer. Geological Society of American Memoir, 1986, 164: 1–16.

Metamorphic Minerals and Evolution of the Western Tianshan High – Pressure Low – Temperature Metamorphic Belt, Xinjiang

Gao Jun¹, Zhang Lifei², Wang Zhongxiu¹, Aikebeier²

(1 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

(2 Department of Geology, Peking University, Beijing 100871)

Key words: western Tianshan; high P/T metamorphic rocks; metamorphic mineral; metamorphism

Abstract

The western Tianshan high – pressure low – temperature metamorphic belt in Xinjiang, extending west – east for about 200 km along the Paleozoic suture between the Yili – Central Tianshan and Tarim plates, is mainly composed of garnet, amphibole, omphacite, phengite, paragonite, epidote, chlorite, albite, quartz, sphene, rutile etc. Garnets comprise predominantly almandine component (Alm_{45-72}) and, next, grossular (Gro_{9-36}), pyrope (Py_{2-24}) and spessartine (Spe_{0-27}). The garnet porphyroblasts contain zoisite, paragonite, albite, sodic amphibole, omphacite and quartz inclusions, and are retrograded to chlorites along the margin. Amphibole might be classified into three types, namely sodic amphibole (glaucophane, ferro – glaucophane, crossite, riebeckite, magnesio – riebeckite), sodic – calc amphibole (barroisite and winchite) and calc amphibole (actinolite). The sodic amphiboles assume coarse – , medium – , fine – grained and fibrous assemblages, with the majority being fine – grained (0.1 – 0.5 mm) in size. A few sodic amphiboles are slightly retrograded to chlorites or actinolites. The jadeite content of omphacites in eclogites is between 39.38% and 54.14%, averagely 45.48%. The cation number of Si of phengites changes from 3.31 to 3.57, averaging 3.41. The cation number of Na of paragonites changes from 0.64 to 0.90, 0.85 on the average. The conditions of peak eclogite facies metamorphism are estimated to be 520 ± 80 °C and 1.2 – 1.4 GPa. The metamorphic mineral assemblages reveal that the high P/T belt has undergone a metamorphic evolution process from lawsonite – blueschist facies through eclogite facies and epidote – blueschist facies to greenschist facies.