

阿尔金英格利萨依花岗质片麻岩超高压变质*

刘良 孙勇 罗金海 王焰 陈丹玲 张安达

(西北大学大陆动力学教育部重点实验室, 地质学系, 西安 710069)

摘要 岩相学和矿物化学研究显示, 阿尔金英格利萨依一带含石榴子石花岗质片麻岩经历了复杂多阶段的变质演化, 其早期变质矿物组合是 Grt+Per(出溶前)+Tit(出溶前)+Ky+Zoi+Qz/Coe±Cpx, 副矿物为 Ap 和 Ru, 其中粗粒榴石含有斜长石+角闪石的棒状出溶物, 计算的榴石出溶前(Tit)的成分含六次配位的 Si^{VI} , 单位分子式中 Si 值介于 1.032 ~ 1.047 之间, 即含 CaSi_2O_5 组分为 3.1%~4.6%. 利用实验岩石学资料和三元碱性长石温度计, 获早期变质条件为 3.7~4.3 GPa 和约 1000°C, 结合石榴子石包裹的高 Al-榴石, 共同证实该岩石经历了超高压变质. 岩石化学特征显示, 该片麻岩的 SiO_2 含量 >70%, Al_2O_3 含量为 12.58 ~ 14.08%, K_2O 含量很高(>5%), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值介于 0.4~0.6 之间, 稀土配分呈 LREE 富集型, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值介于 4.3 ~ 9.1 之间, 具有明显的负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.06\sim0.59$), 其原岩可能为中、上地壳重熔的产物. 同时, 考虑与其呈互层状或间层状产出的石榴子石二辉橄榄岩和含石榴子石中基性片麻岩都经历了超高压变质的研究成果, 共同证实区内超高压岩石的形成是陆壳深俯冲作用的产物, 这对深入探讨区内超高压岩石形成与折返的动力学机制提供了重要的约束.

关键词 阿尔金 花岗质片麻岩 超 Si-榴石 超高压变质 陆壳深俯冲

随着阿尔金高压-超高压榴辉岩以及超高压石榴子石二辉橄榄岩的陆续发现^[1,2]和深入研究^[1~8], 人们开始关注的焦点问题是这些高压-超高压岩石的直接围岩是否也经历了高压-超高压变质, 这对认识区内高压-超高压岩石与围岩的关系, 探讨其形成与折返机制以及是否存在陆壳深俯冲作用至关重要. 本文首次报道了区内超高压石榴子石二辉橄榄岩的直接围岩-含石榴子石花岗质片麻岩经历超高压变质的岩石学和矿物学证据.

1 地质产状

阿尔金高压-超高压榴辉岩呈透镜体状出露在阿尔金阿帕-茫崖构造混杂岩带的北部边缘(图 1), 西起且末县江格萨依-玉石沟一带向东断续可追索到茫崖石棉矿西北的米兰河上游一带, 东西向展布 200 多公里, 构成阿尔金南缘高压-超高压变质岩带. 江格萨依-玉石沟一带榴辉岩的峰期变质时代约为(475~504 Ma)^[4~7].

新近发现的超高压石榴子石二辉橄榄岩^[2], 与含石榴子石中基性片麻岩和本文重点研究的含石榴子石花岗质片麻岩, 共同出露在阿尔金南缘高压-超高压变质岩带中段英格利萨依

2003-03-15 收稿, 2003-06-12 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划(编号: G1999075508)、国家自然科学基金(批准号: 49972063, 140032010)、教育部骨干教师基金(编号: 40133020)和中国地质大学岩石圈构造深部过程及探测技术重点实验室(武汉)开放课题基金共同资助项目

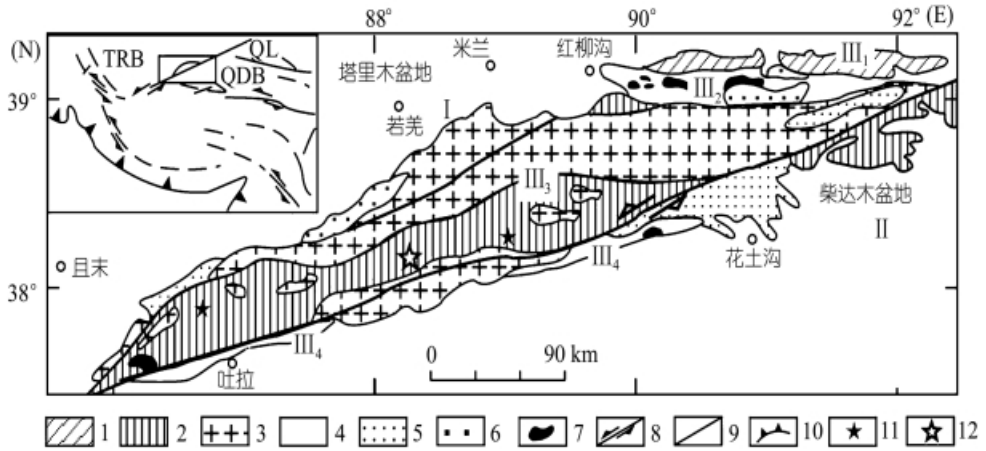


图 1 阿尔金造山带构造地质图(据文献[3]修改)

1. 太古界; 2. 下元古界(阿尔金群); 3. 中-上元古界; 4. 古生界; 5. 中-新生界; 6. 花岗岩; 7. 超基性岩; 8. 走滑断裂; 9. 断裂; 10. 逆冲断裂; 11. 榴辉岩产地; 12. 石榴石橄榄岩和含石榴子石花岗质片麻岩产地. TRB 示塔里木盆地; QL 示祁连山; QDB 示柴达木盆地. I 示塔里木地块; II 示柴达木地块; III 示阿尔金造山带; III₁ 示阿北变质地块; III₂ 示红柳沟-拉配泉混杂岩带; III₃ 示米兰河-金雁山地块; III₄ 示阿帕-茫崖构造混杂岩带

巴什瓦克石棉矿一带. 露头上石榴石二辉橄榄岩或石榴子石辉石岩(暗色条带)与含石榴石花岗质片麻岩(浅色条带)以及含石榴子石中基性片麻岩(深灰色条带)呈互层状或间层状产出(图 2(a)); 一些地段浅色花岗质片麻岩与深灰色中基性片麻岩构成条带状构造, 条带的单层厚度变化在数十公分到几公分之间(图 2(b)), 其中浅色条带与深灰色条带中矿物的拉伸线理相互平行; 局部见深灰色中基性片麻岩呈透镜体状包裹在浅色花岗质片麻岩之中(图 2(c)~(d)), 透镜体被拉长、变形; 含石榴子石花岗质片麻岩受深层次构造变形作用改造明显, 强变形带中常见剪切流变褶皱(图 2(d)). 这些特征显示, 区内含石榴子石的不同岩石类型可能共同经历了相同或相似的变形变质. 同时, 它们一起构成一个复合型的较大的透镜体(南北宽约 800 m, 东西向长约 2500 m), 产于原认为是元古界的阿尔金群的片麻岩之中^[9], 该透镜体的长轴与区域片麻理的走向基本一致^[2]. 区域片麻理的走向为 290°~330°, 与阿尔金南缘主断裂(NEE)走向呈斜切关系. 阿尔金群的片麻岩主要由含榴长英质片麻岩、含榴斜长角闪片麻岩、含榴黑云斜长片麻岩、二云母片岩等组成, 目前尚未发现高压-超高压变质的线索.

2 岩相学特征

岩石呈灰白色, 组成矿物明显可分为 2 个粒级. 粗粒斑状矿物主要有石榴子石(5% ~ 20%)、条纹长石(10% ~ 15%)和纹带状石英(10% ~ 20%)以及少量楣石(±3%)、角闪石(±3%)、单斜辉石(<3%)和蓝晶石(<2%)或黑云母(±5%)和黝帘石(<1%); 细粒基质矿物主要有石英、钠长石、微斜长石、黑云母和角闪石等, 副矿物有锆石、金红石、磷灰石、钛铁矿和褐帘石等. 岩石中粗粒斑状矿物通常被晚期退变质矿物或被细粒基质矿物分离隔开, 如石榴子石常被晚期退变质细粒黑云母或斜长石包绕, 蓝晶石被斜长石环绕, 粗粒条纹长石被细粒斜长石+石英包绕等. 粗粒石榴子石常见条纹长石或由条纹长石+多晶石英(图 3(a))或仅由多晶石英集合体(图 3(b))组成的包裹体并发育放射状裂纹, 这一特征与超高压石榴子石中的“栅栏状”透长石+石

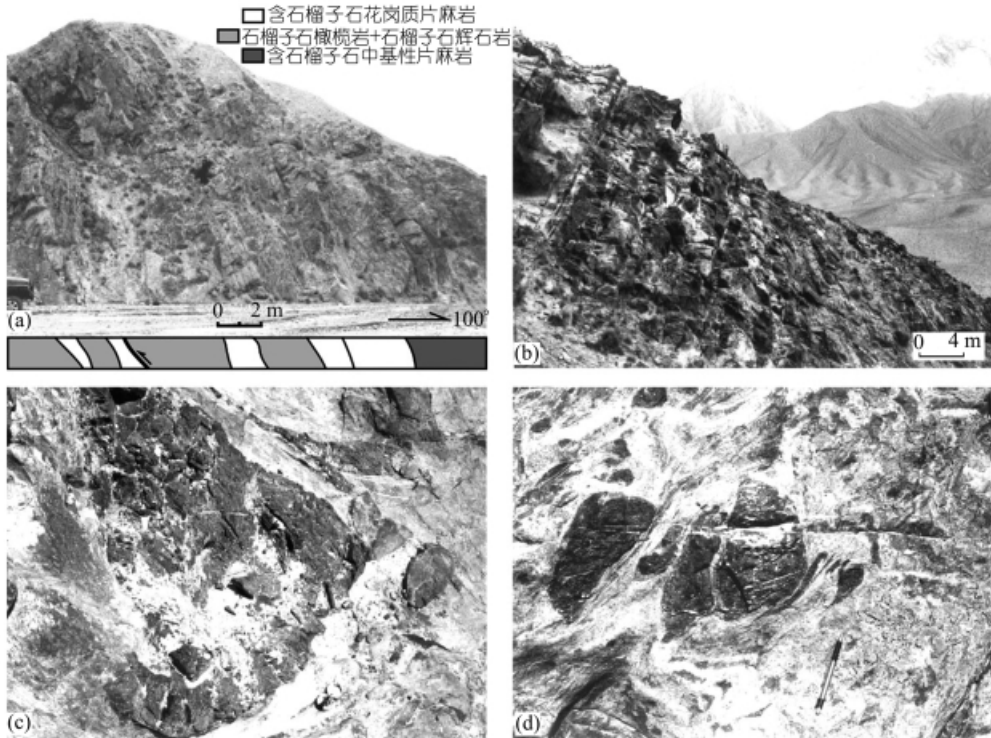


图 2 花岗质片麻岩与其伴生岩石产出的相互关系

(a)石榴子石花岗质片麻岩(浅色)与石榴子石二辉橄榄岩+石榴子石辉石岩(暗色)和含石榴子石中基性片麻岩(深灰色)呈互层状或间层状产出;(b)石榴子石花岗质片麻岩(浅色条带)与含石榴子石中基性片麻岩(深灰色条带)呈互层状产出;(c)~(d)含石榴子石中基性片麻岩呈透镜体状(深灰色)包裹在浅色花岗质片麻岩之中,(d)图右下角见浅色石榴子石花岗质片麻岩的剪切流变褶皱

英包体和柯石英假象极为相似^[10-12];一些粗粒石榴子石还常见榍石、金红石、黝帘石、磷灰石或蓝晶石矿物包体,少数样品见石榴子石与蓝晶石、榍石、黝帘石、磷灰石或单斜辉石共生(图 3(c)).基质中的角闪石多分布在石榴子石或单斜辉石的外围,显然是其退变质的产物.

岩石中磷灰石普遍出溶棒状独居石(图 3(d)).粗粒榍石沿两个方向见由斜长石+角闪石组成的棒状出溶物(图 3(e)~(f)),榍石外围有由钛铁矿和磁铁矿组成的反应边(图 3(e)),出溶矿物的鉴别是通过电子探针分析证实的.磷灰石出溶独居石的现象广泛见于挪威西部片麻岩区^[13]、大别山^[14]和哈萨克斯坦 Kokchetav massif^[15]等地超高压岩石中,但由于缺乏实验岩石学资料目前尚不能给出这种出溶及其出溶前所对应的温压条件.榍石出溶角闪石并与单斜辉石出溶钾长石一起产出最早报道于 Bohemian massif 的钙硅酸盐大理岩^[16].新近,榍石出溶柯石英见于 Kokchetav massif 超高压不纯方解石大理岩中^[17],这一发现不仅表明该岩石曾稳定在>6 GPa 的压力条件,而且证实其抬升折返导致榍石出溶是在柯石英的稳定条件下发生的(即>2.8 GPa 的超高压条件).

上述特征表明,阿尔金含石榴子石花岗质片麻岩经历了复杂多阶段变质演化,早期变质矿物组合可能是 $Grt + Per$ (出溶前)+ Tit (出溶前)+ $Ky + Zoi + Qz/Coe \pm Cpx$,副矿物为 Ap 和 Ru .

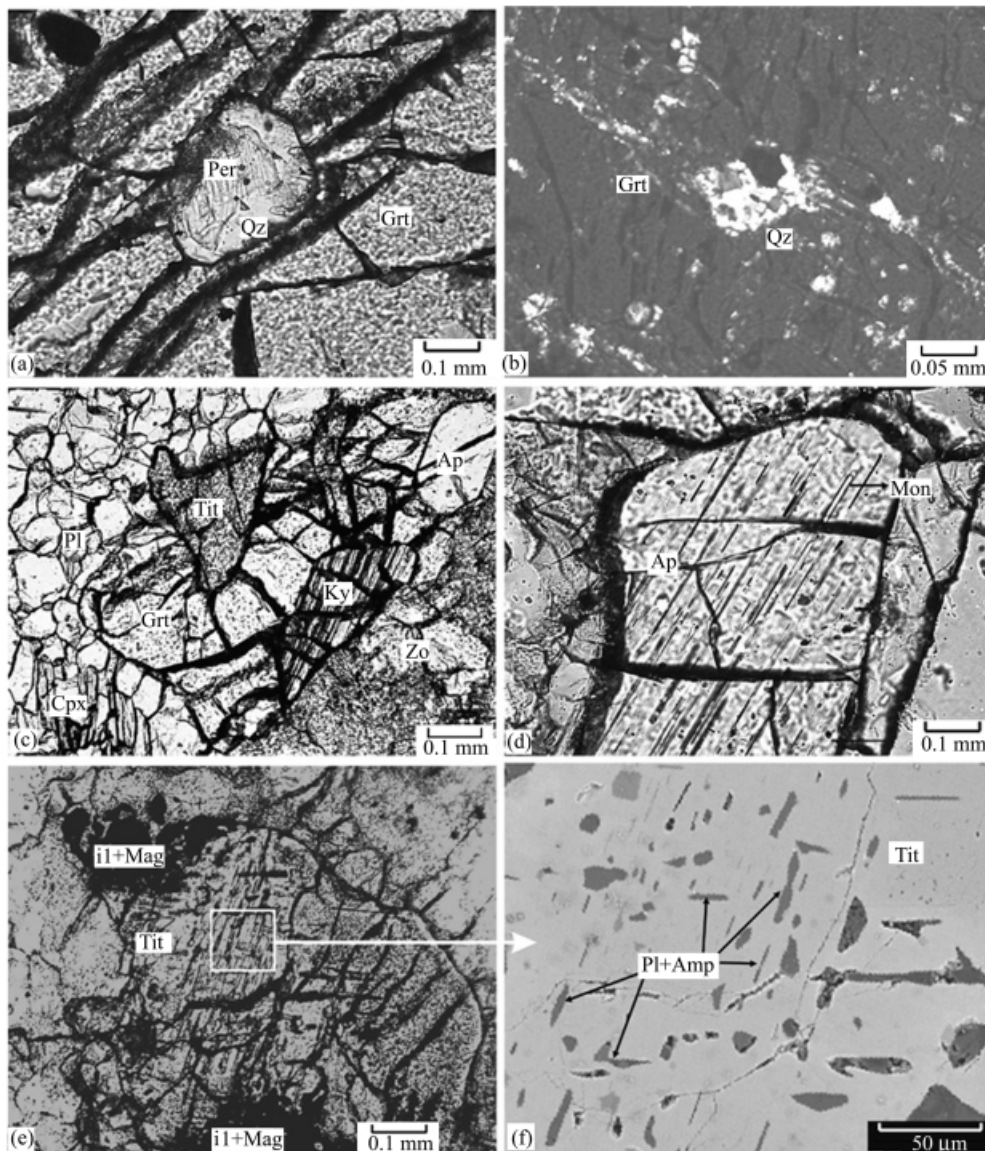


图 3 花岗质片麻岩的显微结构

(a) 石榴子石中的条纹长石和石英包裹体并伴有放射纹, 单偏光; (b) 石榴子石中的多晶石英集合体, 正交偏光; (c) 石榴子石与蓝晶石、榍石、黝帘石、磷灰石或单斜辉石共生, 单偏光; (d) 磷灰石出溶棒状独居石, 单偏光; (e) 榍石的核部沿两个方向出溶斜长石和角闪石, 榍石颗粒外围(正下方和右上角)见由钛铁矿和磁铁矿组成的反应边, 单偏光; (f) (e)图局部放大的背散射电子像. Grt 示石榴子石, Cpx 示单斜辉石, Tit 示榍石, Per 示条纹长石, Pl 示斜长石, Amp 示角闪石, Ap 示磷灰石, Mon 示独居石, Zo 示黝帘石, il 示钛铁矿, Mag 示磁铁矿, Ky 示蓝晶石, Qz 示石英

3 岩石化学

岩石的主量和微量元素测定在西北大学大陆动力学实验室完成. 分析结果表明, 区内花岗质片麻岩具有较高的 SiO_2 含量(>70%, 介于 71.9% ~ 76.6%之间), Al_2O_3 含量为 12.58% ~

14.08%, 岩石的 K_2O 含量很高($>5\%$), Na_2O/K_2O 比值介于 0.4 ~ 0.6 之间, 因此, 判断其原岩可能与陆壳岩石有关. 在 SiO_2 - TiO_2 变质原岩判别图解上(图 4(a)), 样品投在变质火成岩与变质沉积岩的过渡区, 在其他原岩判别图解上(图略)也具有相同的特征. 岩石的稀土含量较高, REE 总量介于 139~385 $\mu\text{g/g}$ 之间, 在球粒陨石标准化的 REE 配分图解上, 岩石呈 LREE 富集型, $(La/Yb)_N$ 比值介于 4.3~9.1 之间, 具有明显的负 Eu 异常(图 4(b)), δEu 值介于 0.06 ~ 0.59 之间. 总体来看, 该套岩石的原岩可能为中、上地壳重熔的产物.

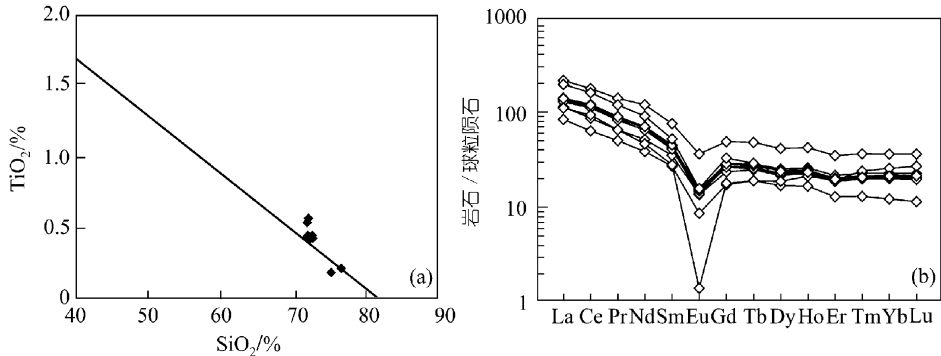


图 4 花岗质片麻岩的原岩恢复图解(a)和球粒陨石标准化的 REE 配分图(b)

4 矿物化学

区内岩石的矿物成分主要是用北京大学 JXA-8100 型电子探针仪分析的, 工作条件: 加速电压 15 kV, 电流 20 nA, 束斑直径通常为 3 μm , 对出溶矿物束斑直径采用 1 μm ; 部分矿物成分是用中国科学院地质与地球物理所 CAMBX -SX51 型电子探针仪分析完成的, 工作条件: 加速电压 15 kV, 电流 20 nA, 束斑直径 3 μm ; 独居石的测定是南京大学 JEOL-JXA8800M 型电子探针仪完成的, 工作条件: 加速电压 15 kV, 束斑电流 20 nA, 束斑直径 1 μm . 所用标样均为美国国家标样局矿物标样. 其中主要代表性矿物的成分列于表 1, 它们的特征分别如下: (i) 石榴子石. 石榴子石的成分基本稳定, MgO 含量为 6.27% ~ 7.33%, CaO 为 8.25% ~ 9.71%, 端员组分以铁铝榴石(Alm)为主, 摩尔百分数为 48% ~ 52%, 镁铝榴石(Prp)组分与钙铝榴石(Grs)组分几乎相等, 摩尔百分数分别为 24% ~ 28% 和 23% ~ 27%. 成分环带分析显示, 粗粒石榴子石核部的钙铝榴石组分(27%)最高. (ii) 榍石. 包裹在石榴子石中不含出溶物的榍石的 $Al_2O_3 = 10.58\% \sim 10.77\%$, $F = 3.21\% \sim 4.00\%$, $X_{Al} = 0.39 \sim 0.41$, $X_F = 0.39 \sim 0.48$, 为高 Al, 高 F 榍石^[18]; 而具有出溶物的榍石(Ttn₂)的 $Al_2O_3 = 4.70\% \sim 5.71\%$, $F = 1.55\% \sim 1.90\%$, $X_{Al} = 0.19 \sim 0.23$, $X_F = 0.33 \sim 0.39$. 这些榍石中的 Ti 与 $(Al+Fe^{3+})$ 均呈负相关, 而 F 与 $(Al+Fe^{3+})$ 均呈正相关, 表明存在 $Al+F = Ti+O$ 耦合替代关系^[19~21]. 前一类高 Al 榍石的成分与大别山-苏鲁^[21~23]、Western Norway^[18]和 Tauern Window^[18]等地超高压榴辉岩或大理岩中的高 Al 榍石相似, 后一类榍石的成分与大别超高压正片麻岩中的榍石相似^[12]. 其次, 区内高 Al 榍石含有少量 MgO (0.15% ~ 0.28%), 在已有报道的高铝榍石中, 只有高压或超高压榍石才或多或少含 MgO ^[18~23]. 另外, 对于具有出溶物的粗粒榍石, 本文在 BES 图像和电子探针分析的基础上, 选取矿物出溶出露较好的不同区域, 利用 Photoshop 程序中统计其出溶的斜长石、角闪石以及出溶后的榍石(Tit)的面积比例, 并依据这些矿物的化学成分计算各自的矿物端员组分, 再利用矿物端员组分的

表 1 阿尔金花岗质片麻岩代表性矿物的电子探针分析数据(质量百分数)^{a)}

矿物产出状态	Grt	Grt	Grt	Cpx	Cpx	Tit		Tit		Ky	Zo	Bi	Bi	Amp Sph 出溶	Amp 反应边	Pl Sph 出溶	Pl 反应边	条纹长石		
						无出溶物	有出溶物	无出溶物	有出溶物									Kf	Ab	
SiO ₂	39.77	39.09	39.05	50.55	50.06	31.73	31.67	31.96	30.20	30.24	37.02	38.74	34.27	37.51	43.34	41.32	56.18	57.98	63.72	66.53
TiO ₂	0.14	0.07	0.08	0.33	0.46	24.21	23.06	23.38	30.83	29.80	0.00	0.06	5.68	3.54	1.99	1.94	0.20	0.00	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	21.63	21.98	22.19	3.15	4.55	10.62	10.77	10.58	5.09	5.70	62.59	31.92	13.52	14.71	12.38	12.34	26.37	27.37	18.45	21.51
Cr ₂ O ₃	0.10	0.05	0.00	0.00	0.00	0.08	0.11	0.06	0.00	0.04	0.13	0.00	1.12	0.05	0.03	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00
Fe ₂ O ₃ ^①	-	-	-	-	-	1.65	1.53	2.05	1.48	1.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	6.79	6.27	7.33	13.04	11.74	0.28	0.15	0.28	0.12	0.07	0.01	0.10	11.53	16.20	12.27	11.02	0.01	0.00	0.34	0.02
FeO	22.40	24.68	22.66	9.44	9.79	*	*	*	*	*	1.77	2.00	16.35	15.47	12.28	14.67	0.00	0.26	0.48	0.60
MnO	0.00	0.00	0.68	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.07	0.05	0.00	0.00	0.00
CaO	9.71	8.78	8.25	22.09	20.69	28.92	29.17	28.73	27.87	28.07	0.03	23.83	1.82	0.26	12.07	11.20	9.18	8.99	0.08	1.48
NiO	0.02	0.00	0.05	0.00	0.08	0.02	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.06	0	0.02	0.08	0.00
Na ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.48	0.80	0.04	0.00	0.00	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	2.20	1.27	6.38	6.49	0.07	10.11
K ₂ O	0.02	0.00	0.00	0.03	0.02	0.02	0.04	0.06	0.03	0.00	0.01	0.06	5.93	8.23	0.12	1.90	0.18	0.15	17.01	0.09
F	-	-	-	-	-	3.21	4.00	3.45	1.51	1.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
平均	100.58	100.92	100.29	99.11	98.24	100.79	100.52	100.55	97.18	97.00	101.58	96.74	90.30	96.01	99.68	95.78	98.58	101.32	100.24	100.34
Si ^②	3.037	2.993	2.987	1.899	1.901	1.005	1.012	1.019	1.006	1.007	0.993	2.983	2.713	2.768	6.410	6.275	2.561	2.568	2.963	2.907
Ti	0.008	0.004	0.005	0.009	0.013	0.577	0.554	0.561	0.772	0.747	0.000	0.003	0.338	0.197	0.221	0.221	0.007	0.000	0.001	0.000
Al	1.947	1.984	2.000	0.139	0.204	0.397	0.405	0.398	0.200	0.224	1.979	2.898	1.261	1.279	2.158	2.210	1.417	1.429	1.011	1.108
Cr	0.006	0.003	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	0.001	0.000	0.001	0.003	0.000	0.070	0.003	0.003	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.000	0.019	0.018	0.080	0.027	0.020	0.018	0.025	0.019	0.014	+	+	+	+	0.062	0.254	+	+	+	+
Mg	0.773	0.716	0.835	0.730	0.665	0.013	0.007	0.013	0.006	0.004	0.000	0.011	1.360	1.782	2.705	2.495	0.001	0.000	0.023	0.001
Fe ²⁺	1.431	1.561	1.431	0.216	0.284	*	*	*	*	*	0.040	0.129	1.082	0.955	1.457	1.609	0.000	0.010	0.018	0.022
Mn	0.000	0.000	0.044	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.009	0.002	0.000	0.000	0.000
Ca	0.795	0.720	0.676	0.889	0.842	0.982	0.998	0.981	0.994	1.002	0.001	1.967	0.154	0.021	1.913	1.822	0.448	0.427	0.004	0.069
Ni	0.001	0.000	0.003	0.000	0.003	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.007	0.000	0.001	0.003	0.000
Na	0.000	0.000	0.001	0.035	0.059	0.002	0.000	0.000	0.002	0.002	0.001	0.003	0.002	0.006	0.630	0.374	0.564	0.557	0.006	0.857
K	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.000	0.000	0.006	0.599	0.775	0.023	0.368	0.011	0.008	1.009	0.005
平均	8.000	8.000	8.000	4.000	4.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.017	8.000	7.584	7.785	15.583	15.643	5.010	5.000	5.038	4.969
F	-	-	-	-	-	0.322	0.404	0.348	0.159	0.201	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

a) 表中①榭石中的 Fe 全部作为 Fe³⁺处理; ② Grt(石榴子石)、Cpx(单斜辉石)、Ky(蓝晶石)、Bi(黑云母)、Amp(角闪石)及长石矿物的阳离子数分别以 O = 12, 6, 5, 11, 23, 8 为基础计算, Tit(榭石)、Zo(黝帘石)分别以阳离子总数为 3 和 5 计算; 表中“-”表示没有分析; “*”表示 Fe 全部作为 Fe³⁺处理; “+”表示没有计算 Fe³⁺

摩尔体积^[24]换算重建出溶前榭石(Tit)的化学成分见表 2. 在表 2 中, Tit 单位分子式中的 Si 值介于 1.032 ~ 1.047 之间, 证实榭石出溶前超 Si. 然而, 不同区域重建的 Tit 的成分(表 2)有一定差异, 说明出溶相(包括斜长石和角闪石)分布不均匀或与出溶前榭石成分的不均匀性有关. (iii) 单斜辉石. 单斜辉石的 Al_2O_3 含量变化于 3.15% ~ 4.55% 之间, Na_2O 为 0.48% ~ 0.80%, 硬玉组分介于 4% ~ 11%, 并含少量的 K_2O (0.02% ~ 0.03%). (iv) 蓝晶石. 岩石中蓝晶石含 $\text{SiO}_2 = 36.56\% \sim 37.02\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 62.59\% \sim 65.74\%$, 并含少量 $\text{FeO} (<1.77\%)$ 及微量 $\text{CaO} (<0.2\%)$. (v) 帘石. 与蓝晶石共生的帘石的核部为黝帘石, 绿帘石端员组分为 14%, 其边部为绿帘石, 绿帘石端员组分为 90%. (vi) 长石. 条纹长石中钾长石叶片的成分为 $\text{Or}_{87}\text{Ab}_{12}\text{An}_1$, 钠长石为 $\text{Or}_4\text{Ab}_{81}\text{An}_{15}$, 依据 BES 图像统计条纹长石中钾长石与钠长石的面积比大致为 1 : 1, 结合探针分析数据估算固溶体分离前该长石的成分为 $\text{Or}_{45.5}\text{Ab}_{46.5}\text{An}_8$, 属三元碱性长石. 榭石出溶的斜长石为中长石($\text{An} = 44$); 而分布在石榴子石与单斜辉石反应边中的斜长石为更-中长石($\text{An} = 26 \sim 43$). (vii) 黑云母. 黑云母的 TiO_2 含量普遍偏高, 介于 3.54% ~ 5.68% 之间, $\text{Fe}/\text{Mg} = 0.5 \sim 0.8$.

表 2 重建计算出溶前榭石(Tit)的化学成分

面积比(%)	Pl	6.84	9.06	10.21	面积比(%)	Pl	6.84	9.06	10.21
	Amp	0.76	2.33	1.02		Amp	0.76	2.33	1.02
	Tit	92.76	88.60	88.78		Tit	92.76	88.60	88.78
摩尔数比(%)	Pl	3.71	5.33	5.96	摩尔数比(%)	Pl	3.71	5.33	5.96
	Amp	0.15	0.49	0.21		Amp	0.15	0.49	0.21
	Tit	96.13	94.19	93.82		Tit	96.13	94.19	93.82
	SiO_2	31.23	31.69	31.82		Si	1.032	1.044	1.047
	TiO_2	28.66	28.08	27.97		Ti	0.713	0.696	0.692
	Al_2O_3	6.48	6.84	6.95		Al	0.253	0.265	0.269
	Cr_2O_3	0.04	0.04	0.04		Cr	0.001	0.001	0.001
	$\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{a}}$	1.12	1.14	1.10		Fe^{3+}	0.014	0.014	0.014
	MgO	0.02	0.06	0.03		Mg	0.001	0.003	0.001
	MnO	0.00	0.00	0.00		Mn	0.000	0.000	0.000
	CaO	27.34	26.98	26.91		Ca	0.969	0.952	0.949
	NiO	0.00	0.00	0.00		Ni	0.000	0.000	0.000
	Na_2O	0.27	0.38	0.41		Na	0.017	0.024	0.026
	K_2O	0.01	0.01	0.01		K	0.000	0.000	0.000
	F	1.83	1.79	1.78		合计	3.000	3.000	3.000
	合计	96.99	97.01	97.03		F	0.191	0.186	0.185

a) 表中铁全部作为三价铁处理

角闪石. 按 Leake 等的分类^[25], 石榴石反应边中的角闪石为镁角闪石; 榭石出溶的角闪石为非闪石, Na_2O 为 2.20%~2.85%, K_2O 变化于 0.01% ~ 0.34% 之间, 指示出溶前的榭石不仅含 Na、含 K, 而且含水.

独居石. 磷灰石出溶的独居石含 P_2O_5 为 34.89%, CaO 19.27%, La_2O_5 14.77%, Ce_2O_5 25.05%, Nd_2O_5 5.5%.

5 温压条件

近年来, 实验岩石学对 CaTiSiO_5 - CaSi_2O_5 体系在 1350℃ 温度和压力变化于 3.5 ~ 16.0 GPa 之间的相平衡研究(图 5)^[26]认为, 榭石晶体结构式($\text{CaTi}^{\text{VI}}\text{Si}^{\text{IV}}\text{O}_5$)中可出现 Si 对八面体位置中 Ti 的类质同像替换, 即形成超 Si-榭石或表达为 $\text{Ca}(\text{Ti}_{1-x}, \text{Si}_x)^{\text{VI}}\text{Si}^{\text{IV}}\text{O}_5$, 当压力 > 5.3 GPa 后, 该体系中 CaSi_2O_5 组分会明显增加, 二者的完全类质同象固溶体稳定在 > 8 GPa 的压力条件下.

阿尔金花岗质片麻岩中榭石出溶前(Tit)成分超 Si, 单位分子式中 Si 值为 1.032 ~ 1.047, 说明含 CaSi_2O_5 组分为 3.1% ~ 4.6%, 依据图 5 获得的压力介于 3.7 ~ 4.3 GPa 之间. 另外, 选取包

裹在石榴子石中的条纹长石估算的固溶体离溶前的成分($\text{Or}_{45.5}\text{Ab}_{46.5}\text{An}_8$), 利用三员碱性长石温度计^[27]获其形成温度约为 1000℃. 已有研究表明, 区内与该岩石伴生的超高压石榴子石二辉橄榄岩的峰期变质条件为 3.8~5.1 GPa 和 880~970℃^[2]. 据此分析, 本文估算的花岗质片麻岩的早期变质压力介于 3.7~4.3 GPa 之间是合理的. 同时, 结合石榴子石包裹的高 Al-榧石的特征, 可认为区内花岗质片麻岩的早期变质是在 3.7 ~ 4.3 GPa 和约 1000℃ 的超高压条件下发生的.

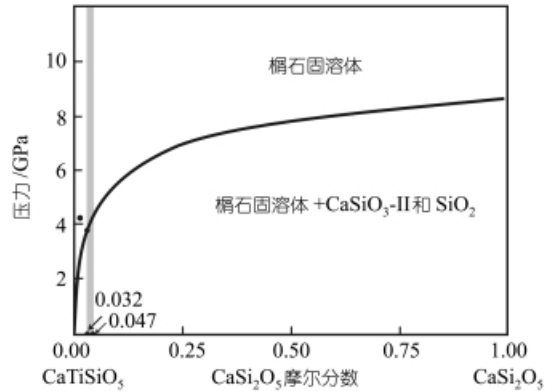


图 5 CaTiSiO_5 - CaSi_2O_5 体系 1350℃ 的 P-X 图解^[17,26]

6 结论和讨论

(1) 上述资料表明, 阿尔金超高压石榴子石二辉橄榄的直接围岩-含石榴子石花岗质片麻岩经历了复杂多阶段变质演化, 其早期变质矿物组合可能是 $\text{Grt}+\text{Per}$ (出溶前)+ Tit (出溶前)+ $\text{Ky} + \text{Zoi} + \text{Qz}/\text{Coe} \pm \text{Cpx}$. 其中粗粒榧石含有斜长石 + 角闪石的棒状出溶物, 重建的榧石出溶前(Tit)的成分超 Si, 单位分子式中 Si 值为 1.032 ~ 1.047, 即含 CaSi_2O_5 端员组分在 3.1% ~ 4.6% 之间. 利用实验岩石学资料和三元碱性长石温度计, 获岩石形成条件在 3.7 ~ 4.3 GPa 和约 1000℃, 结合石榴子石包裹的高 Al-榧石, 共同证实该岩石早期经历了超高压变质.

(2) 地球化学特征显示, 超高压花岗质片麻岩的 SiO_2 含量 >70%, Al_2O_3 含量为 12.58% ~ 14.08%, K_2O 含量很高(>5%), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值介于 0.4~0.6 之间, 呈 LREE 富集型, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值介于 4.3~9.1 之间, 具有明显的负 Eu 异常, δEu 值介于 0.06~0.59 之间, 其原岩可能为中、上地壳重熔的产物.

(3) 阿尔金超高压花岗质片麻岩的确定, 以及与其呈互层状或间层状产出的超高压石榴子石二辉橄榄岩^[2]和含石榴子石中基性片麻岩亦经历了超高压变质(刘良等, 待刊)的研究成果, 共同表明区内超高压岩石的形成是陆壳深俯冲作用的产物. 这对深入探讨区内超高压岩石形成与折返的动力学机制提供了重要的约束.

致谢 北京大学地质学系舒桂明高级工程师、中国科学院地质与地球物理研究所徐平博士和南京大学地球科学系王汝成教授等分别协助进行了矿物成分的电子探针分析, 北京大学地质学系韩宝福、魏春景教授和中国科学院地质与地球物理研究所柏林先生、杨建军研究员、刘景波博士提供了多方面的指点与帮助, 西北大学张国伟教授审阅了本文初稿, 在此一并致谢.

参 考 文 献

- 1 刘 良, 车自成, 罗金海, 等. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义. 科学通报, 1996, 41(16): 1485~1488
- 2 刘 良, 孙 勇, 肖培喜, 等. 阿尔金发现超高压(>3.8 GPa)石榴二辉橄榄岩. 科学通报, 2002, 47(9): 657~662
- 3 刘 良, 车自成, 王 焰, 等. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义. 岩石学报, 1999, 15: 57~64
- 4 Liu L, Che Z C, Wang Y, et al. A discussion on the structure and tectonic evolution of the Altyn Tagh orogenic Zone. Earth sci

- Fron, 2000, 7 (Suppl): 206
- 5 Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. Petrology and geochronology of eclogite from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China. *Lithos*, 2001, 56: 187~206
 - 6 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. *地质学报*, 1995, 73: 193~205
 - 7 张建新, 张泽明, 许志琴, 等. 阿尔金构造西段榴辉岩的 Sm-Nd 及 U-Pb 年龄——阿尔金构造带中加里东期山根存在的证据. *科学通报*, 1999, 44(10): 1109~1112
 - 8 张建新, 张泽明, 许志琴, 等. 阿尔金西段孔兹岩系的发现及岩石学、同位素年代学初步研究. *中国科学, D 辑*, 1999, 29: 298~305
 - 9 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1993
 - 10 Yang J J, Godard G, Smith D C. K-feldspar-bearing coesite pseudomorphs in an eclogite from Lanshantou(Eastern China). *Eur J Mineral*, 1998, 10: 969~985
 - 11 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据. *科学通报*, 2002, 47(3): 231~234
 - 12 Carswell D V, Wilson R N, Zhai M G. Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermobarometry of schists and orthogneisses hosting ultrahigh pressure eclogites in the Dabieshan of central China. *Lithos*, 2000, 52: 121~155
 - 13 Smith D C. A review of the peculiar mineralogy of the "Norwegian coesite-eclogite province", with crystal-chemical, petrological, geochemical, and geodynamical notes and an extensive bibliography. in: Smith D V, ed. *Eclogites and eclogite-facies rocks*. Amsterdam: Elsevier, 1988. 1~206
 - 14 Zhang R Y, Liou J G. Exsolution lamellae in minerals from Ultrahigh-pressure rocks. *International Geology Review*, 1999, 41: 981~993
 - 15 Katayama I, Parkinson C D, Okamoto K, et al. Supersilicic clinopyroxene and silica exsolution in UHP eclogite and pelitic gneiss from the Kokchetav massif, Kazakhstan. *American Mineralogist*, 2000, 85: 1368~1374
 - 16 Recker H, Altherr R. Evidence from ultra-high-pressure marbles for recycling of sediments into the mantle. *Nature*, 1992, 358: 745~748
 - 17 Ogasawara Y, Fukasawa K, Maruyama S. Coesite exsolution from supersilicic titanite in UHP marble from the Kokchetav Massif, northern Kazakhstan. *American Mineralogist*, 2002, 87: 454~461
 - 18 Smith D C. Highly aluminous Titanite (titanite) in natural high-pressure hydrous eclogite facies rocks from Norway and Italy, and experimental runs at high pressure (abstr). Paris: 26th Inter Geol Congr, 1980. 145
 - 19 Franz G, Spear F S. Aluminous titanite (Titanite) from the eclogite zone, south-central Tauern Window, Austria. *Chemical Geology*, 1985, 50: 33~46
 - 20 Enami M, Suzuki K, Liou J G, et al. Al-Fe³⁺ and F-OH substitutions in titanite and constraints on their P-T dependence. *Eur J Mineral*, 1993, 5: 219~231
 - 21 Cong B L, Zhai M G, Carswell D A, et al. Petrogenesis of ultrahigh-pressure rocks and their country rocks at Shuanghe in Dabieshan, central China. *Eur J Mineral*, 1995, 7: 111~138
 - 22 Carswell D A, Wilson R N, Zhai M G. Ultra-high pressure aluminous titanites in Carbonate-bearing eclogites at Shuanghe in Dabieshan, central China. *Mineralogical Magazine*, 1996, 60: 461~471
 - 23 叶 凯, 叶大年. 高铝榴辉石中 P+Mg+F=Si+Al+OH 特殊替代的高压效应. *科学通报*, 1996, 41(9): 881~814
 - 24 Holland T J B, Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *J Meta Geol*, 1998, 16: 309~343
 - 25 Leak B E, Woolley A R, Aros C E S, et al. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineralogical Magazine*, 1997, 61: 295~321
 - 26 Knoche R, Angel R J, Seifert F, et al. Complete substitution of Si for Ti in Titanite Ca(Ti_{1-x}Si_x)^{VI}Si^{IV}O₅. *American Mineralogist*, 1998, 83: 1168~1175
 - 27 Fuhrman M L, Lindsley D H. Ternary feldspar modeling and thermometry. *American Mineralogist*, 1988, 73: 201~215