

* 北京大学地质学系 2002 年度学术研讨会优秀论文选 *

新疆西天山长阿吾子蛇绿混杂岩中与榴辉岩伴生的
异剥钙榴岩的发现及其地质意义*

李旭平 张立飞** 艾永亮

北京大学地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

摘要 在西天山长阿吾子蛇绿岩中的蛇纹石化超基性岩中, 首次发现了由原榴辉岩相岩石经异剥钙榴岩化作用形成的异剥钙榴岩. 该异剥钙榴岩主要由钙铝榴石、透辉石、葡萄石、绿泥石和少量榴辉岩相变质矿物绿辉石和铁镁铝榴石等组成. 详细的岩石学研究表明, 该异剥钙榴岩是在超基性岩二次蛇纹岩化过程中由榴辉岩相岩石经异剥钙榴岩化作用形成. 异剥钙榴岩化过程开始于 $370\sim 410\text{ }^{\circ}\text{C}/650\sim 850\text{ MPa}$; 大规模的异剥钙榴岩化出现在 $200\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}/400\sim 600\text{ MPa}$ 的温压条件. 在 P - T 图上由榴辉岩相到异剥钙榴岩构成了明显的退变轨迹, 这表明西天山长阿吾子异剥钙榴岩是由原榴辉岩相变质岩石抬升、回返过程中发生异剥钙榴岩化作用形成的. 异剥钙榴岩并不只限于洋底变质的构造环境中, 也可以形成于俯冲带中.

关键词 异剥钙榴岩 榴辉岩 蛇纹岩 俯冲带 新疆西天山

异剥钙榴岩是富钙、硅不饱和的岩石. 它在成因上与蛇纹岩有特殊伴生关系, 是蛇纹岩化的副产品. 异剥钙榴岩化是超基性岩在蛇纹岩化过程中, 产生的富含 Ca 和 Mg 的流体对包裹在其中的铁镁质岩石或其他岩石进行交代的过程. 它大多是在蛇纹岩化过程中由基性岩被 Ca 交代形成. 到目前为止, 世界上报道的异剥钙榴岩多形成于洋底变质作用环境. 典型的异剥钙榴岩的矿物组成是含水钙铝榴石、含水钙铁榴石、绿帘石、府山石、绿泥石和透辉石, 有时还有金云母、葡萄石和绿纤石等矿物. 然而也有经历高温高压变质作用的变质异剥钙榴岩, 新近在乌拉尔南部发现的异剥钙榴岩中含有硬柱石分解后留下的假象, 其经历的峰值温压条件为 $520\sim 540\text{ }^{\circ}\text{C}/1.8\sim 2.1\text{ GPa}$ ^[1]. 但至今还没有报道在俯冲后折返过程中(俯冲带)中形成的异剥钙榴岩.

本文首次在新疆西天山长阿吾子蛇绿混杂岩中

发现了由榴辉岩经异剥钙榴岩化作用形成的异剥钙榴岩, 详细介绍了其岩石矿物学特征, 计算了其形成的温压条件, 并探讨了其地质意义.

1 区域地质

南天山蛇绿岩大体沿南天山主脊断裂延伸, 西起哈尔克山北坡的长阿吾子, 经古骆沟、乌瓦门至库米什硫磺山、铜花山和榆树沟一带, 该蛇绿混杂岩与蓝片岩共同构成了伊犁中天山板块南缘的增生楔^[2]. 长阿吾子蛇绿岩产于北木扎尔特河长阿吾子沟(断层)南侧北半山坡(图 1). 蛇绿岩套组合保存极不完整, 蛇纹岩化的超基性岩块呈夹层状南倾夹于蓝闪片岩层和绿片岩地层中. 超基性岩、基性岩和以及与之伴随的片岩类一起经历了绿片岩相和蓝片岩相变质作用的改造. 长阿吾子的蛇绿混杂岩代表了志留纪存在于伊犁中天山板块南缘的弧后盆地拉张到一定规模的洋盆环境^[3~5]. 对于这一洋盆性

2003-03-26 收稿, 2003-04-18 收修改稿

* 国家重大基础研究发展规划(G1999075508)、高校青年教师教学科研奖励计划、国家自然科学基金(批准号: 40228003)和留学归国人员基金(EJ20030033)联合资助项目

** 联系人, E-mail: Lfzhang@pku.edu.cn

岩是早期洋底变质作用形成的蛇纹岩经历高压变质作用而成的。后期的蛇纹岩化作用发生在俯冲变质之后向地表抬升的过程中。由于后期的蛇纹石与水

镁石共生(图 2(f)), 蛇纹石矿物应主要由叶蛇纹石组成。

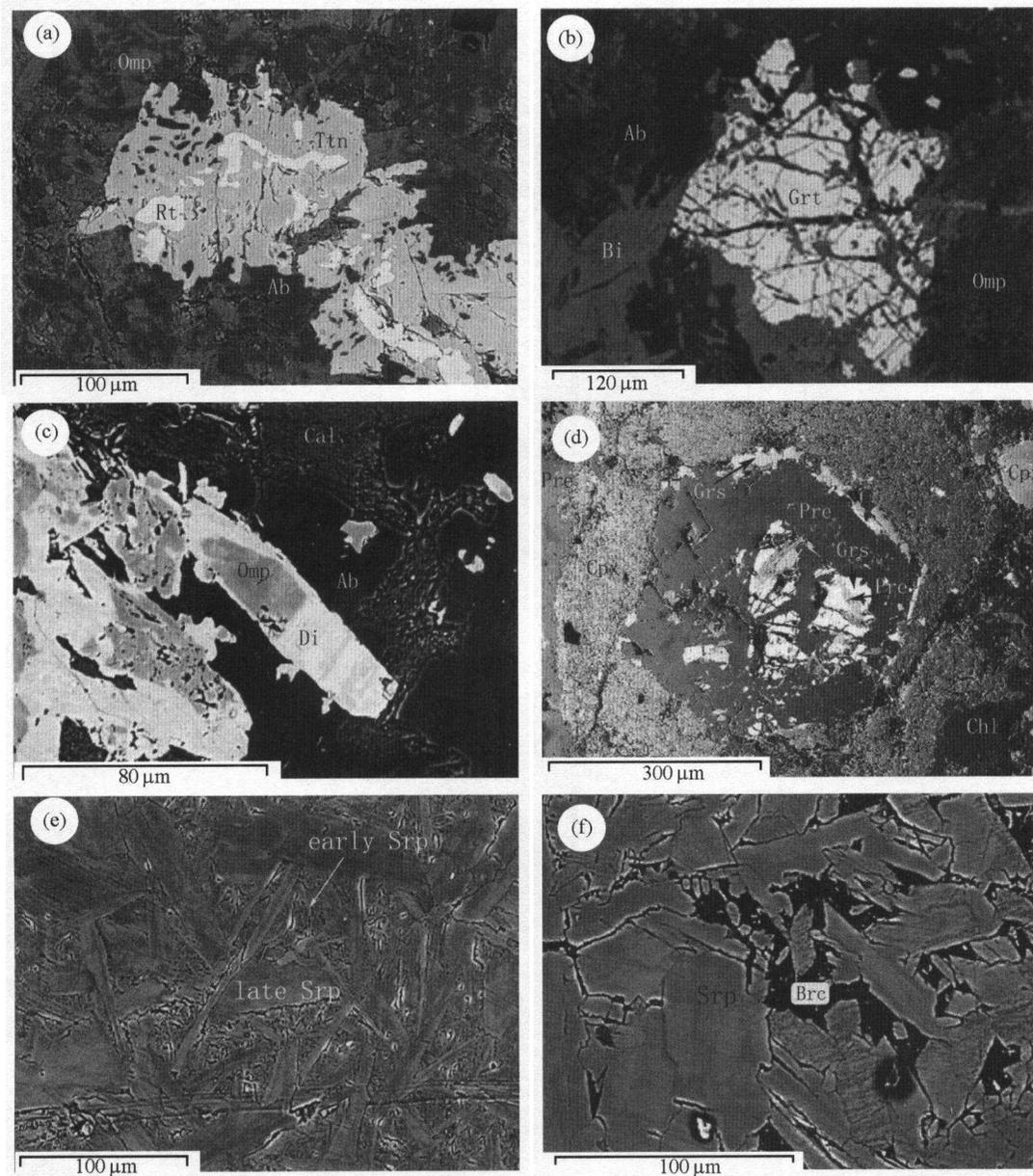


图 2 西天山长阿吾子异剥钙榴岩和榴辉岩的显微结构关系

(a) 榴辉岩相岩石中榴石(Ttn)里的金红石(Rt)残留; (b) 榴辉岩中石榴石(Grt)的形态; (c) 异剥钙榴岩中绿辉石(Omp)为后期透辉石(Di)交代; (d) 具石榴石假象的葡萄石(Pre); (e) 晚期板柱状蛇纹石(Srp)和残留的早期蛇纹石的糜棱结构; (f) 板柱状蛇纹石与水镁石(Brc)伴生

3 矿物学特征

矿物的探针分析数据是在北京大学地质系探针室完成的。榴辉岩相岩石和异剥钙榴岩中主要出现的矿物有石榴石、单斜辉石、钠长石, 钾长石、葡萄石、斜黝帘石、绿泥石、钙质闪石、黑云母等。

单斜辉石 有绿辉石和透辉石两种, 粒径变化在 0.2~1.0 mm 之间, 从榴辉岩到异剥钙榴岩, 单斜辉石成分变化如图 3(a)所示。绿辉石中 Jd 分子的含量为 53% 到几乎为零(表 1)。长阿吾子榴辉岩中绿辉石的成分与西天山其他高压、超高压带榴辉岩中的绿辉石^[7-9]相似。透辉石是交代绿辉石而

来, 其结构中都含有一定量的 Na_2O . 从绿辉石到透辉石成分变化不是逐渐过渡的. BSE 图形揭示了这两种辉石的转化关系(图 2(c)).

石榴石 呈变斑晶形式出现, 粒径在 0.1~0.5 mm 范围内, 成分分布均匀. 榴辉岩阶段的石榴石由 55%~57% 的铁镁铝榴石、19%~21% 的钙铝榴石、14%~16% 的锰铝榴石和 6%~8% 的镁铝榴石组成(表 1), 也与西天山其他高压、超高压带榴辉岩中的石榴石^[7-9] 基本相同. 石榴石不具环带结构, 有时被黑云母颗粒包围并有黑云母脉穿插其中; 有时呈孤岛状存在于钠长石颗粒中. 异剥钙榴岩中的石榴石主要由 80%~87% 的钙铝榴石, 1%~7% 的铁镁铝榴石、小于 1% 的锰铝榴石和小于

5% 的镁铝榴石组成. 少数钙铝榴石中包含有榴辉岩相高含量铁镁铝榴石的残留, 其铁镁铝榴石的含量可达 50%. 从榴辉岩相的石榴石演化为异剥钙榴岩中的石榴石, 其成分从富铁镁铝榴石的石榴石向钙铝榴石转变(图 3), 但在单一的石榴石颗粒上没有过渡的环带结构.

葡萄石 葡萄石在异剥钙榴岩中作为变斑晶和脉体出现. 它直接交代石榴石而形成自形变斑晶石榴石假象晶体(图 2(d))或以他形晶、集合体的形式出现在单一由葡萄石组成的脉中, 脉的大小和分布看上去与榴辉岩中钠长石脉的分布很相象. 其化学成分如表 2 中所示.

表 1 新疆西天山东阿吾子榴辉岩相变质和异剥钙榴化形成的代表性石榴石和单斜辉石成分分析

样品	12971	12972	129821	129822	129932	129911	129912	12991	129932	12971	12974	12982	12984	12991	12992	12993	12997
	榴辉岩相石榴石				异剥钙榴岩中的石榴石					榴辉岩相绿斜辉石				异剥钙榴岩中的单斜辉石			
SiO ₂	37.13	37.65	37.78	37.63	38.50	38.35	39.27	39.16	39.21	56.52	56.76	56.29	56.97	54.23	54.60	51.64	51.90
TiO ₂	0.00	0.06	0.16	0.16	0.25	0.39	1.01	0.65	1.31	0.32	0.05	0.11	0.05	0.33	0.07	0.62	0.63
Al ₂ O ₃	21.67	21.17	21.15	21.23	21.10	21.45	20.01	20.70	19.09	12.00	12.14	11.51	11.95	4.73	2.43	3.65	3.02
Cr ₂ O ₃	0.00	0.02	0.21	0.44	0.13	0.05	0.32	0.31	0.01	0.04	0.07	0.56	0.34	0.00	0.15	0.71	0.34
FeO ^{a)}	28.31	28.22	25.57	25.70	20.94	21.03	3.77	5.17	4.15	4.25	4.08	4.62	4.22	6.64	6.03	6.69	8.04
MnO	3.89	3.92	6.66	6.96	2.75	3.01	0.91	2.09	0.28	0.02	0.11	0.34	0.00	0.29	0.13	0.17	0.25
MgO	2.05	1.83	1.68	1.61	0.59	0.82	0.04	0.08	0.04	7.57	7.09	7.29	7.12	11.00	12.90	16.36	16.44
CaO	6.59	7.00	7.51	7.30	16.43	15.78	35.25	32.59	36.65	12.02	12.01	12.01	11.65	21.36	22.40	20.06	19.01
Na ₂ O	0.00	0.03	0.02	0.04	0.07	0.01	0.02	0.04	0.00	7.77	7.86	7.69	7.96	2.41	1.60	0.35	0.22
K ₂ O										0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02
Total	99.64	99.93	100.75	101.07	100.76	100.89	100.61	100.78	100.73	100.54	100.17	100.44	100.32	100.99	100.38	100.29	99.87
Si	2.98	3.02	3.00	2.99	3.01	3.00	2.97	2.97	2.97	1.99	2.00	1.99	2.01	1.98	2.00	1.89	1.91
Al	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.11	0.09
AlVI	2.03	2.00	1.98	1.97	1.95	1.98	1.76	1.82	1.67	0.48	0.50	0.47	0.50	0.18	0.11	0.05	0.05
Ti	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.06	0.04	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02
Cr	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.12	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	1.90	1.89	1.70	1.71	1.37	1.38	0.11	0.21	0.05	0.13	0.12	0.14	0.12	0.20	0.19	0.20	0.25
Mg	0.25	0.22	0.20	0.19	0.07	0.10	0.01	0.01	0.01	0.40	0.37	0.38	0.37	0.60	0.71	0.89	0.90
Mn	0.26	0.27	0.45	0.47	0.18	0.20	0.06	0.13	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
Ca	0.57	0.60	0.64	0.62	1.38	1.32	2.86	2.65	2.97	0.45	0.45	0.46	0.44	0.83	0.88	0.79	0.75
Na	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.53	0.54	0.53	0.54	0.17	0.11	0.03	0.02
K										0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Alm	63.84	63.43	56.83	57.15	45.69	45.93	3.56	6.98	1.72								
Adr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.65	5.93	10.77								
Grs	19.04	20.09	20.74	19.41	45.51	43.99	86.63	81.21	86.73								
Pyr	8.24	7.33	6.67	6.38	2.30	3.21	0.15	0.31	0.15								
Sps	8.88	8.92	15.00	15.68	6.09	6.67	1.93	4.46	0.60								
Uvr	0.00	0.06	0.66	1.39	0.40	0.16	0.99	0.92	0.03								
WEF										47.93	46.92	48.31	46.31	82.83	88.63	97.44	98.38
JD										52.08	53.08	51.69	53.69	17.17	11.37	2.56	1.62
AE										0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

a) 全铁含量, NiO<0.05, 结构式计算时离子数目基于: 石榴石 12 个氧, 单斜辉石 6 个氧

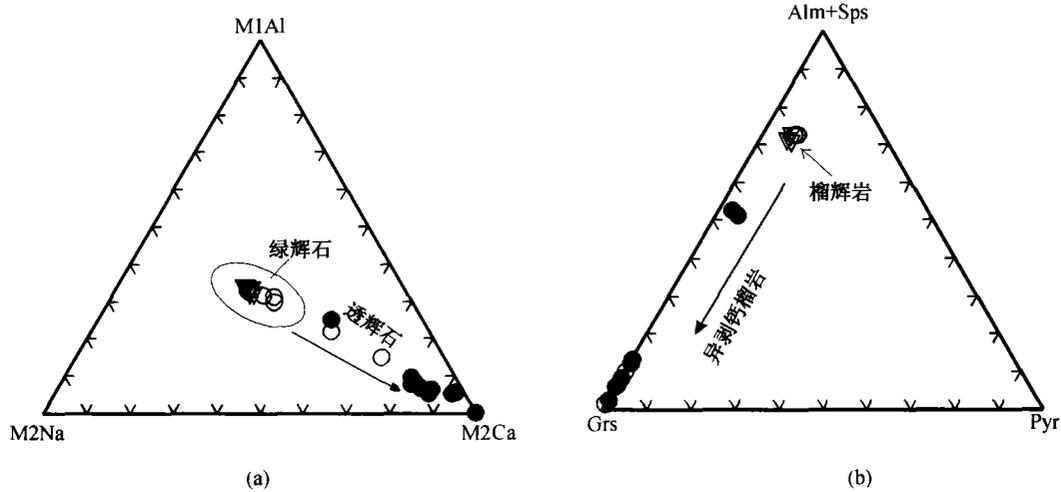


图3 单斜辉石和石榴石的成分变化

△表示榴辉岩相阶段辉石和石榴石, ●表示异剥钙榴岩中的辉石和石榴石, ○表示榴辉岩向异剥钙榴岩过渡岩石的辉石和石榴石

表2 新疆西天山长阿吾子榴辉岩相岩石和异剥钙榴岩中代表性矿物成分分析^{a)}

样品	129741	12983	12973	12974	12981	12971	129821	129911	129921	129931	12982	12987	129872	129743	12983	12991
	长石		角闪石			云母		葡萄石		斜黝帘石			绿泥石			
SiO ₂	68.38	68.85	48.31	47.2	42.3	38.76	37.21	44.03	44.09	43.85	39.26	39.29	39.14	28.27	28.56	28.75
TiO ₂	0.01	0.01	0.079	0.076	0.251	0.45	0.11	0.09	0.04	0.13	0.09	0.06	0.04	0.02	0.45	0.03
Al ₂ O ₃	19.57	19.66	9.9	10.82	18.01	15.81	18.40	25.04	24.90	24.63	28.56	28.88	28.82	20.74	19.28	20.13
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.028	0.055	0.24	0.11	0.16	0.00	0.14	0.00	0.24	0.10	0.08	0.21	0.40	0.11
FeO	0.23	0.07	12.50	12.93	14.22	14.50	14.46	0.28	0.16	0.18	6.21	5.26	5.79	18.55	17.58	18.29
MnO	0.05	0.02	0.26	0.31	0.19	0.17	0.30	0.00	0.04	0.03	0.05	0.02	0.06	0.33	0.29	0.28
MgO	0.03	0.08	12.89	12.61	8.72	15.56	14.25	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	20.30	19.59	18.92
CaO	0.01	0.29	10.43	10.36	8.63	0.06	0.05	27.20	27.09	27.01	23.87	24.20	23.96	0.22	0.31	0.18
Na ₂ O	0.11	11.59	3.27	2.66	5.19	0.14	0.15	0.00	0.02	0.04	0.03	0.00	0.02	0.17	0.07	0.08
K ₂ O	11.76	0.02	0.43	0.49	0.69	9.39	9.88	0.00	0.02	0.00	0.07	0.02	0.03	0.02	0.84	0.56
NiO	0.00	0.00	0.08	0.06	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.06	0.08
Total	100.15	100.60	98.18	97.57	98.45	94.937	94.97	96.69	96.50	95.86	98.40	97.84	97.96	88.83	87.43	87.42
Si	12.21	11.96	7.07	6.92	6.21	5.76	5.55	5.98	6.00	6.01	3.02	3.03	3.01	5.66	5.82	5.85
Al	4.11	4.02	0.93	1.08	1.79	2.24	2.45	2.02	2.00	1.99	0.98	0.97	0.99	2.34	2.18	2.15
AlVI			0.78	0.78	1.33	0.54	0.79	1.99	2.00	1.99	1.60	1.65	1.63	2.54	2.44	2.67
Ti	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.05	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07	0.01
Cr	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03	0.06	0.02
Fe ³⁺			0.05	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	0.31	0.35	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.03	0.01	1.48	1.36	1.75	1.80	1.80	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	3.10	2.99	3.11
Mg	0.01	0.02	2.81	2.75	1.91	3.45	3.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.05	5.95	5.74
Mn	0.01	0.00	0.03	0.04	0.02	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.05	0.05
Ca	0.00	0.05	1.64	1.63	1.36	0.01	0.01	3.96	3.95	3.97	1.96	2.00	1.98	0.05	0.07	0.04
Na	0.04	3.90	0.93	0.76	1.48	0.04	0.04	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07	0.03	0.03
K	2.68	0.00	0.08	0.09	0.13	1.78	1.88	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.22	0.15
Ni	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Ab	1.40	98.50														
An	0.10	1.40														
Or	98.50	0.10														
Ps											0.27	0.24	0.26			
Fe-FeMg														0.34	0.33	0.35
Mg-FeMg														0.66	0.67	0.65

a) 全铁含量, 结构式计算时离子数目基于: 长石 32 个氧, 角闪石 23 个氧, 黑云母 22 个氧, 葡萄石 12 个氧, 斜黝帘石 12.5 个氧, 绿泥石 28 个

长石主要是钠长石，偶见钾长石。钠长石主要以脉状穿插在异剥榴辉岩化的榴辉岩矿物组合的基质中，少数呈颗粒出现，粒径在 0.1~1.0 mm 范围内。

榴辉岩中的普通角闪石主要是浅闪石和富铁韭闪石。以细小的颗粒与黑云母和绿泥石共同出现在基质中。异剥钙榴岩中未发现角闪石存在。

黑云母只出现在未完全异剥钙榴岩化的榴辉岩相岩石中。显微镜下观察到它可从角闪石转变成而保留角闪石假象。扫描电子显微镜中也观察到同一颗粒中角闪石被黑云母交代。

斜黧帘石是自形变晶结构，其 P_s 为 24~26，与辉石、石榴石平衡共生，也见到交代成因的斜黧帘石形成晚于钠长石。

绿泥石化学成分在所有样品中都很均匀，属于密绿泥石到斜绿泥石的镁铁绿泥石系列。

4 发生变质作用的温压条件

从榴辉岩转变到异剥钙榴岩的温度压力路径表示在图 4 上。榴辉岩相的温压(A 点)计算是基于 Holland & Powell 的内部一致性热力学数据库 (1998) 和榴辉岩样品中矿物成分实测值(表 2)，用 Thermocalc 软件计算出的平均温压为 540 °C /

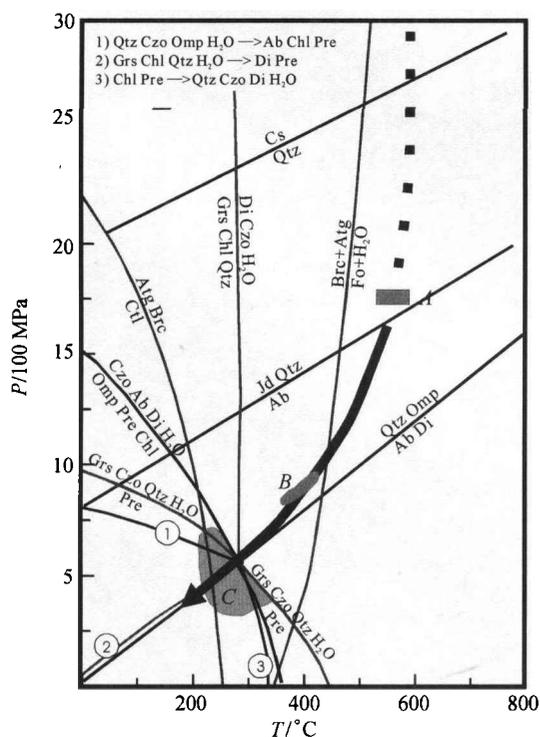


图 4 西天山长阿吾子异剥钙榴岩及其伴生榴辉岩的 P-T 轨迹

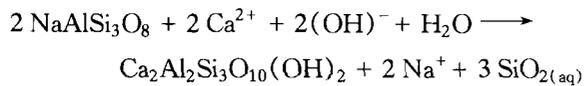
1.7 GPa。根据异剥钙榴岩中残留的榴辉岩相矿物的成分，石榴石($Prp + Alm$ 为 50~56)和绿辉石($Jd = 17$)，用 Grt-Cpx 温度计^[10]计算出的 $K_D = (X_{Fe^{2+}} / X_{Mg})_{Grt} / (X_{Fe^{2+}} / X_{Mg})_{Cpx}$ 在 55~60 之间与平衡反应 $Ab = Jd_{15-20} + Qtz$ ^[11] 相交得出 B 点的温压范围为 370~410 °C 和 650~850 MPa，它代表初始异剥钙榴岩化的温压范围。大规模异剥钙榴岩化的温压条件(C 区)是由钙铝榴石和绿辉石形成葡萄石、水镁石和叶蛇纹石转变为纤蛇纹石的反应限定的(图 4)，大约在(200~350)°C/(400~600)MPa。具体地说 C 的温压范围是由图 4 上 $Grs + Czo + Qtz + H_2O \rightarrow Pre$, $Czo + Ab + Di + H_2O \rightarrow Omp + Pre + Chl$ 和 $Atg + Brc \rightarrow Ctl$ 的反应限定的。

5 结果和讨论

异剥钙榴岩化通常被认为是洋底变质过程中标志性产物。虽然研究表明一些异剥钙榴岩可进一步经历进变质作用，如阿尔卑斯的一些异剥钙榴岩在洋底变质作用形成后，又经历俯冲变质作用和后期区域变质作用的改造^[12,13]。但至今没有在俯冲带形成异剥钙榴岩的报道。西天山长阿吾子的异剥钙榴岩是在俯冲带中以榴辉岩为原岩，伴随二次蛇纹岩化过程形成的。这种构造环境下异剥钙榴岩的发现表明，异剥钙榴岩的形成不只限于洋底变质环境，也可在俯冲带中形成。

长阿吾子蛇绿岩带与高压-超高压变质带相伴生^[7,8]。俯冲的洋壳经历高压-超高压变质作用后形成了榴辉岩，榴辉岩的原岩或榴辉岩由于构造作用被包裹在蛇纹岩化的超基性岩中，在抬升到约 30 km 处开始发生异剥钙榴岩化直到 15 km 处左右异剥钙榴岩化作用结束，表明在俯冲岩片抬升回返过程中存在大量的流体，导致了二次蛇纹岩化和异剥钙榴岩化。蛇纹岩化过程中，单斜辉石分解产生的 Ca 不能被蛇纹石晶体所容纳而进入流体中，这种富 Ca 流体对榴辉岩进行交代导致形成异剥钙榴岩。在异剥钙榴岩化的过程中，原榴辉岩失去 K, Na 和 Si。钾和钠常常与存在的铝相结合在初始异剥钙榴岩化时形成钠长石、黑云母和钾长石^[14]。这种现象在本文中体现在富含钠长石脉的榴辉岩原岩中。由于原岩中富含铁镁，异剥钙榴岩化过程中形成了葡萄石和绿帘石族矿物。从异剥钙榴岩中广泛发育的葡萄石脉与原榴辉岩中钠长石脉分布的相似性，可以合理的推测出由于在异剥钙榴岩化过程

中, Ca 的加入和 Na, Si 的流失, 使原本流体畅通的钠长石脉体被葡萄石脉所替代. 其化学反应式如下:



由于榴辉岩中的矿物化学特征与天山其他曾经历高压和超高压变质的榴辉岩相似, 长阿吾子榴辉岩也应由古海洋洋底的基性岩体俯冲到地幔深部时形成, 并由于构造作用进入到超基性岩体中. 因此榴辉岩和异剥钙榴岩形成于同一俯冲-折返造山过程. 它们形成的确切时代还需要进一步工作确定.

其次, 由于异剥钙榴岩化发生在二次蛇纹岩化过程中而非洋底变质时期, 与洋底变质过程相比, 流体的流量仍然有限, 以至脱硅作用尚未完全, 致使含硅较高的葡萄石普遍出现, 并占主导地位. 相比之下通常异剥钙榴岩中丰富的钙铝榴石和斜黝帘石含量却没有葡萄石高. 因此长阿吾子的异剥钙榴岩是一种在成因和矿物成分上都极为特殊的异剥钙榴岩. 其研究可望建立新的异剥钙榴岩成因类型, 为探讨俯冲带中的流体作用过程提供新的研究途径. 此外, 流体的来源和异剥钙榴岩的形成时代等进一步的研究将对确定古洋盆的生成时限及其闭合都具有重要意义.

致谢 工作中曾与魏春景教授、宋述光博士进行讨论交流, 舒桂明先生帮助进行电子探针分析, 在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- Schulte B, et al. K-rich fluid metasomatism at high-pressure metamorphic conditions: Lawsonite decomposition in rodingitized ultramafite of the Maksyutovo Complex, Southern Urals (Russia). *J Metamorphic Geol*, 2002, 20: 529
- 张 旗, 等. 中国蛇绿岩. 北京: 科学出版社, 2001
- 肖序常, 等. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 1992
- 李茂松, 等. 中国西南天山的蛇绿岩带. 见: 张旗主编. 蛇绿岩与地球动力学研究. 北京: 地质出版社, 1996. 99~103
- 汤耀庆, 等. 西南天山蛇绿岩和蓝片岩. 北京: 地质出版社, 1995
- 李继亮, 碰撞造山带大地构造相. 现代地质学研究文集(上). 南京: 南京大学出版社, 1992
- Zhang L F, et al. Ultrahigh pressure metamorphism in western Tianshan, China, part I: Evidences from the inclusion of coesite pseudomorphs in garnet and quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogites. *American Mineralogist*, 2002, 87: 853
- Zhang L F, et al. Ultrahigh pressure metamorphism in western Tianshan, China, part II: Evidence from magnesite in eclogite. *American Mineralogist*, 2002, 87: 861
- Gao Jun, et al. P-T path of high-pressure/low-temperature rocks and tectonic implications in the western Tianshan Mountains, NW China. *J Metamorphic Geol*, 1999, 17: 621
- Ravna K. The garnet-clinopyroxene Fe^{2+} -Mg geothermometer: A updated calibration. *J Metamorphic Geol*, 2000, 18: 211
- Holland T J B. The experimental determination of activities in disordered and short-range ordered jadeitic pyroxenes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1983, 82: 214
- Li X-P. Petrology, geochemistry and metamorphic evolution of the serpentinites, rodingites and ophicarbonates of the Zermatt-Saas ophiolites. *Freiburger Geowissen -schaftliche Beiträge*. Germany, University of Freiburg, 2002. 193
- Schandl E S et al. Rodingites in serpentinitized ultramafic rocks of the Abitibi greenstone belt, Ontario. *Canadian Mineralogist*, 1989, 27: 579
- O'Hanley D S. *Serpentinites Records of Tectonic and Petrological History*. New York: Oxford University Press, 2000. 277

1 Schulte B, et al. K-rich fluid metasomatism at high-pressure meta-