

# 北祁连和北阿尔金含硬柱石榴辉岩：冷洋壳俯冲作用的证据

张建新 孟繁聪

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037. E-mail: zjx66@yeah.net)

**摘要** 通过大量岩相学和矿物化学研究, 在北祁连和北阿尔金高压低温变质带中发现有含硬柱石的榴辉岩. 硬柱石包裹在石榴子石中, 并与绿辉石和多硅白云母共生. 应用 Grt-Omp-Phe 矿物压力计和 Grt-Omp 矿物温度计, 获得北祁连榴辉岩中含硬柱石共生组合的变质条件为 420~510°C 和 2.1~2.4 GPa, 估算的温压条件处于硬柱石榴辉岩相稳定区域, 据此推断榴辉岩形成的地温梯度为 6~8°C/km, 属于典型冷洋壳俯冲带变质产物. 北祁连和北阿尔金均产出含硬柱石的榴辉岩, 进一步证明了北阿尔金高压/低温变质带可能是北祁连高压/低温变质带的西延部分.

**关键词** 北祁连 北阿尔金 硬柱石 榴辉岩

根据实验岩石学研究和热模拟推断, 含硬柱石榴辉岩应是洋壳俯冲带深部的典型岩石类型<sup>[1,2]</sup>. 但是, 到目前为止, 含硬柱石榴辉岩仅在世界上少数几个地方被发现<sup>[3-6]</sup>. 在中国, 虽然已有含硬柱石蓝片岩的报道<sup>[7,8]</sup>, 但还没有发现含硬柱石的榴辉岩. 最近, 我们在大量的岩相学研究基础上, 在北祁连和北阿尔金高压/低温变质带的榴辉岩中, 发现与石榴子石和绿辉石共生的硬柱石. 本文报道了这些含硬柱石榴辉岩的岩相学特征及矿物化学, 并简要讨论了其地质意义.

## 1 地质背景及野外关系

北祁连高压/低温变质带呈 NWW-SEE 分布在祁连县清水沟-百经寺一带(图 1(a)), 被认为是早古生代与洋壳俯冲有关的增生楔的深部组成部分<sup>[9-11]</sup>, 其中含有蓝片岩和低温榴辉岩<sup>[12]</sup>, 其形成时代为 440~465 Ma<sup>[13,14]</sup>. 本文所报道的含硬柱石榴辉岩产出在祁连县(图 1(a)), 在空间上与各种成分的蓝片岩和石榴子石多硅白云母片岩等伴生.

北阿尔金地区的蓝片岩和低温榴辉岩分布在北阿尔金俯冲增生杂岩之中(图 1(b)), 其基本特征与北祁连的同类型岩石相似<sup>[15]</sup>. 初步的年代学工作显示其形成时代为早古生代(张建新等, 未刊资料). 因此, 北阿尔金高压/低温变质带被认为是北祁连高压/低温变质带的西延部分<sup>[15]</sup>. 本文所报道的北阿尔金含硬柱石榴辉岩分布在红柳泉一带(图 1(b)), 与蓝片岩和多硅白云母片岩共生<sup>[15]</sup>.

## 2 岩相学

北祁连含硬柱石榴辉岩主要由石榴子石、绿辉石、蓝闪石、多硅白云母、绿帘石和石英所组成(石榴子石和绿辉石含量之和小于 70%). 硬柱石仅被发现包裹在石榴子石的边部, 其粒径在 5~50  $\mu\text{m}$  之间, 没有裂隙与之相连. 类似于硬柱石, 绿辉石也仅发育在石榴子石变斑晶的边部(图 2(a)~(d)). 而在石榴子石变斑晶的不同部位, 均发育有大量绿帘石、石英和多硅白云母等包体矿物. 在石榴子石变斑晶中, 还发现大量绿帘石+钠云母+多硅白云母组成的矿物集合体, 它们多呈“盒子”状或柱状产出, 这种特征被普遍认为是硬柱石的假像<sup>[16]</sup>. 我们在其中的绿帘石中发现残留的硬柱石颗粒(图 2(b)), 进一步证明了这一推断. 绿辉石还呈残余变斑晶产出在基质中, 它与石榴子石一样, 均被定向分布的蓝闪石、绿帘石、多硅白云母和石英等基质矿物所围绕(图 2(c), (d)).

类似于北祁连的含硬柱石榴辉岩, 在北阿尔金的含硬柱石榴辉岩中, 硬柱石作为矿物包体产出在石榴子石中, 且与绿辉石包体共生(图 3(a), (b)). 部分硬柱石的边部已被绿帘石取代(图 3(b)). 与北祁连的含硬柱石榴辉岩相比, 在阿尔金的榴辉岩中, 硬柱石和绿辉石包体含量很低. 值得注意的是, 北阿尔金榴辉岩发育密集的裂隙, 且在裂隙附近发育大量绿帘石+钠云母+多硅白云母组成的矿物集合体, 沿裂隙的流体渗滤可能使多数硬柱石和绿辉石包体发生了分解. 在阿尔金的榴辉岩中, 绿辉石仅以包体形式存在, 在基质中没有发现绿辉石残留. 基质主要由蓝闪

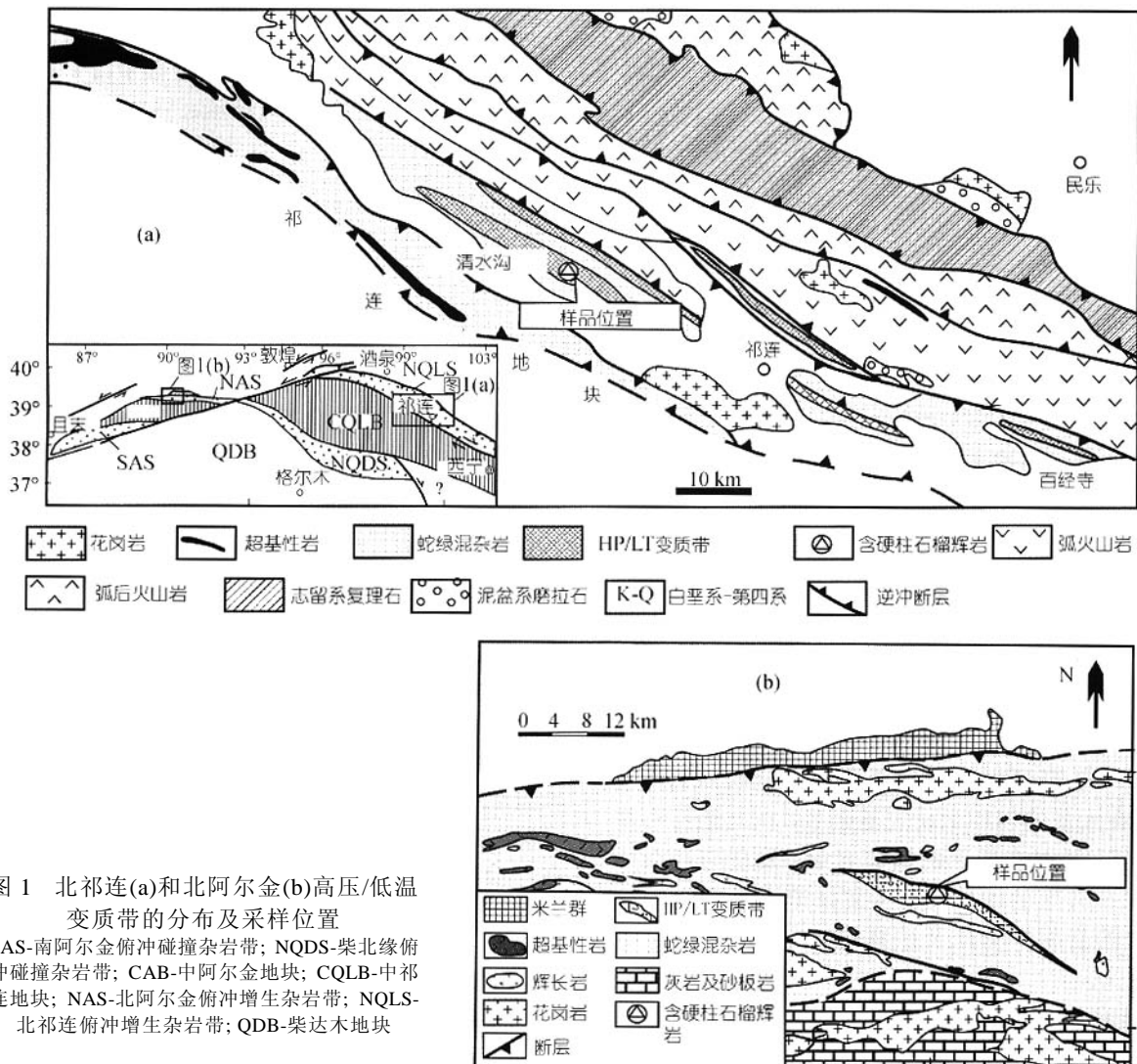


图1 北祁连(a)和北阿尔金(b)高压/低温变质带的分布及采样位置  
 SAS-南阿尔金俯冲碰撞杂岩带; NQDS-柴北缘俯冲碰撞杂岩带; CAB-中阿尔金地块; CQLB-中祁连地块; NAS-北阿尔金俯冲增生杂岩带; NQLS-北祁连俯冲增生杂岩带; QDB-柴达木地块

石组成, 在基质蓝闪石边部发育有冻蓝闪石生长边。此外, 沿石榴子石中的裂隙, 发育有绿泥石和钠长石 (图 3(a))

### 3 矿物化学成分

矿物的电子探针成分分析在中国地质科学院矿产资源研究所完成。所用探针型号为 JXA8800, 测试条件为: 加速电压 20 kV, 电流  $2 \times 10^{-8}$  A, 电子束斑 5  $\mu\text{m}$ , 部分小的包体矿物用 2  $\mu\text{m}$  的束斑测定。代表性的矿物成分列在表 1 中。除特殊标注外, 本文的矿物缩写遵循 Kretz<sup>[17]</sup>。

北祁连榴辉岩中硬柱石的 FeO 含量小于 1%, 其成分接近端元组分  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(2\text{H}_2\text{O})$ 。石榴子石的成分为:  $\text{Alm}_{52-60}\text{Prp}_{7-13}\text{Grs}_{24-27}\text{Sps}_{1-13}$ 。从核部到边部, 锰铝榴石含量明显减少, 而镁铝榴石含量明显增加, 显

示出生长环带特征(图 4)。绿辉石中硬玉端元组分的含量为 30~42 mol%, 另外含有少量霓辉石 ( $\text{Aeg}=8\sim 10$  mol%), 绿辉石包体和变斑晶的成分没有明显的区别, 但从变斑晶的核部到边部, 硬玉含量略微增加, 霓石含量略微减少。多硅白云母的 Si 含量在 3.35~3.45 p.f.u 之间变化, 其中基质中的 Si 含量略高于包体。蓝闪石的 Na (B) 含量在 1.8~1.9 之间。与北祁连榴辉岩相比, 北阿尔金榴辉岩中硬柱石的 FeO 含量略高, 在 1%~1.2% 之间。石榴子石的成分为  $\text{Alm}_{62-70}\text{Prp}_{6-10}\text{Grs}_{23-27}\text{Sps}_{1-6}$ 。从核部到边部, 镁铝榴石端元升高、锰铝榴石降低, 但其差别没有北祁连榴辉岩明显, 而铁铝榴石和钙铝榴石端元组分含量无明显变化。绿辉石的硬玉含量为 26~32 mol%, 霓辉石含量为 15~20 mol%, 蓝闪石的 Na (B) 含量在 1.7~1.9 之间。

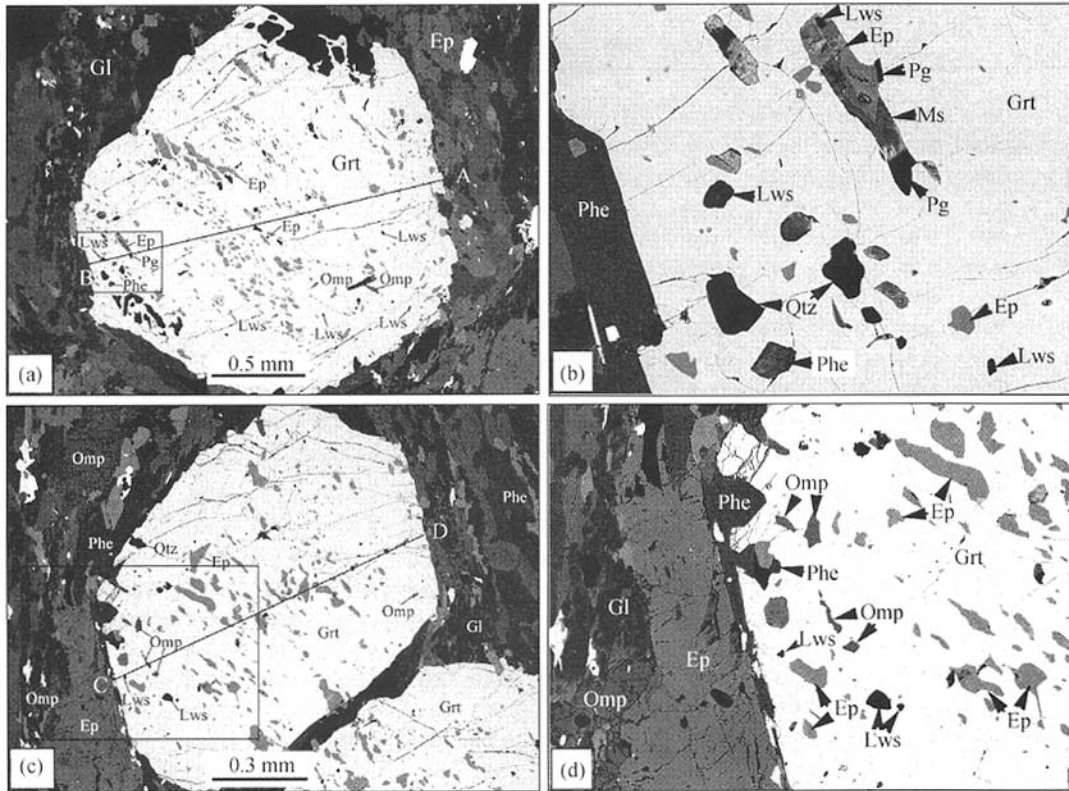


图 2 北祁连含硬柱石榴辉岩的显微结构(BSE 图像)

(a) 石榴子石变斑晶的边部包裹硬柱石、多硅白云母和石英, 石榴子石核部的包裹体主要为绿帘石, A-B 为成分剖面位置; (b) 图 1(a)中石榴子石边部的局部放大, 图中长柱状矿物集合体为 Ep+Pg+Phe, 有裂隙与之相连, 注意绿帘石中有硬柱石残留; (c) 石榴子石变斑晶的边部包裹硬柱石、绿帘石、多硅白云母和石英, 基质为蓝闪石、绿辉石、多硅白云母和绿帘石, C-D 为成分剖面位置; (d) 图 1(c)中石榴子石边部的局部放大

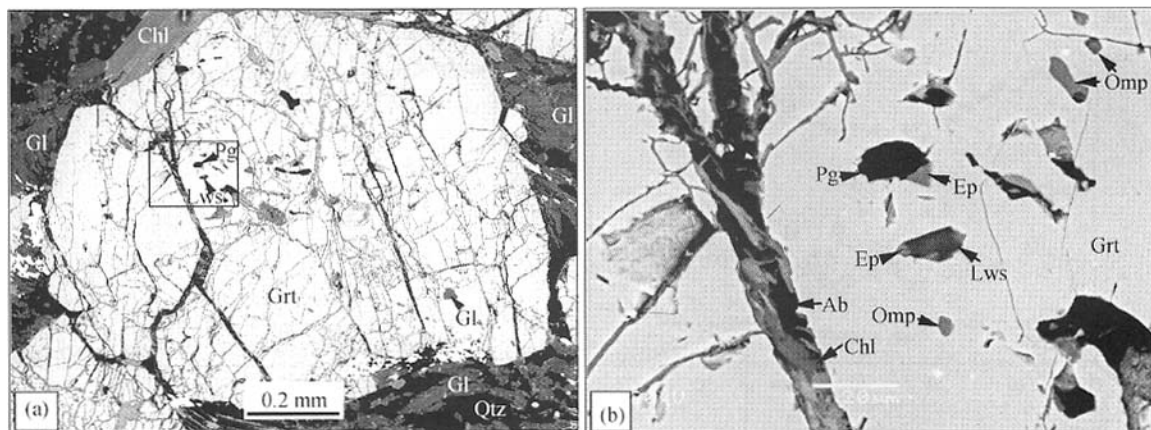
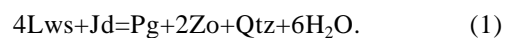


图 3 北阿尔金含硬柱石榴辉岩的显微结构(BSE 图像)

(a) 石榴子石变斑晶包裹硬柱石, 基质以蓝闪石为主; (b) 图 2(a)的局部放大, 石榴子石包裹硬柱石、绿辉石, 注意硬柱石的边部已转变成绿帘石或钠云母和绿帘石集合体

#### 4 形成的 PT 条件及变质演化

硬柱石+绿辉石的稳定存在说明, 所研究榴辉岩形成的温压条件位于下述反应的低温/高压一侧(图 5)



通过 THERMOCALC(3.1)计算, 获得了此反应发生的温压条件(图 5), 其中 Jd 为绿辉石的硬玉端元组分含量, 其活度由 THERMOCALC(3.1)中的 ax 程

表1 北祁连和北阿尔金含硬柱石榴辉岩的代表性矿物电子探针成分<sup>a)</sup>

产地	北祁连											北阿尔金						
	Grt-c	Grt-r	Omp-m	Omp-in	Phe-m	Phe-in	Gl	Ep	Lws	Lws	Lws	Grt-r	Grt-c	Omp-in	Gl	Bar	Lws	Lws
SiO <sub>2</sub>	37.89	38.36	56.23	55.61	51.94	49.86	57.63	38.36	38.33	37.63	37.60	38.74	37.19	54.55	58.43	49.82	39.81	38.4
TiO <sub>2</sub>	0.08	0.05	0.04	0.03	0.23	0.20	0.03	0.13	0.06	0.08	0.02	0.13	0.16	0.04	0.03	0.12	0.06	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.50	21.12	10.48	9.19	27.27	26.79	11.51	26.06	31.13	30.75	31.18	21.21	20.58	7.50	11.78	10.21	31.57	30.22
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.05	0.00	0.03	0.12	0.00	0.04	0.02	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01
FeO	24.36	26.80	4.50	5.28	1.42	1.10	7.42	7.95	0.84	0.58	0.70	28.83	29.20	10.20	9.02	13.16	1.18	1.27
MnO	5.04	0.45	0.06	0.06	0.01	0.00	0.02	0.13	0.03	0.05	0.02	0.13	1.55	0.08	0.00	0.03	0.03	0.02
MgO	1.75	3.50	8.49	9.03	3.34	3.70	11.73	0.02	0.03	0.01	0.07	2.41	1.12	7.10	10.85	12.12	0.23	0.07
CaO	10.51	10.06	13.56	15.10	0.28	0.04	1.21	23.63	17.5	17.91	17.76	9.72	9.59	13.58	0.75	8.15	17.08	17.21
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.00	6.97	6.21	0.71	0.79	7.02	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.01	6.80	6.88	3.64	0.00	0.03
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	10.47	11.26	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.24	0.01	0.00
总量	100.18	100.39	100.33	100.54	95.80	93.75	96.59	96.32	87.97	87.04	87.39	101.20	99.43	99.85	97.76	97.51	89.99	87.28
O	12	12	6	6	11	11	23	12.5	8	8	8	12	12.0	6.0	23	23	8	8
Si	3.011	3.005	1.988	1.975	3.433	3.389	7.900	3.039	2.026	2.014	2.004	3.030	2.992	1.977	7.909	7.113	2.052	2.049
Ti	0.005	0.003	0.001	0.001	0.011	0.010	0.003	0.008	0.002	0.003	0.001	0.008	0.010	0.001	0.003	0.013	0.002	0.002
Al	1.919	1.950	0.437	0.385	2.125	2.147	1.860	2.434	1.938	1.938	1.957	1.955	1.952	0.321	3.139	3.117	1.917	1.899
Cr	0.002	0.003	0.000	0.001	0.006	0.000	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
Fe <sup>3+</sup>	0.045	0.031	0.062	0.091	0.000	0.000	0.060	0.419	0.037	0.026	0.031	0.000	0.044	0.200	0.272	0.484	0.051	0.057
Fe <sup>2+</sup>	1.574	1.725	0.071	0.066	0.078	0.063	0.791	0.108	0.000	0.000	0.000	1.886	1.932	0.109	0.749	1.088	0.000	0.000
Mn	0.339	0.030	0.002	0.002	0.001	0.000	0.002	0.009	0.001	0.002	0.001	0.009	0.106	0.002	2.189	2.580	0.000	0.000
Mg	0.207	0.409	0.447	0.478	0.329	0.375	2.396	0.002	0.002	0.001	0.006	0.281	0.134	0.384	0.000	0.004	0.018	0.006
Ca	0.895	0.845	0.514	0.575	0.020	0.003	0.178	2.008	0.991	1.027	1.014	0.815	0.827	0.527	0.109	1.247	0.943	0.984
Na	0.003	0.000	0.478	0.428	0.091	0.104	1.866	0.000	0.002	0.000	0.003	0.000	0.002	0.478	1.806	1.008	0.000	0.003
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.884	0.977	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.044	0.001	0.000
总量	8.000	8.000	4.000	4.000	6.978	7.068	15.075	8.027	4.999	5.011	5.017	7.984	8.000	4.000	14.918	15.298	4.984	5.000

a)表中 Grt-c: 石榴子石核; Grt-r: 石榴子石边; Omp-m: 基质中的绿辉石; Omp-in: 石榴子石中绿辉石包体; Phe-m: 基质中的多硅白云母; Phe-in: 石榴子石中的多硅白云母包体

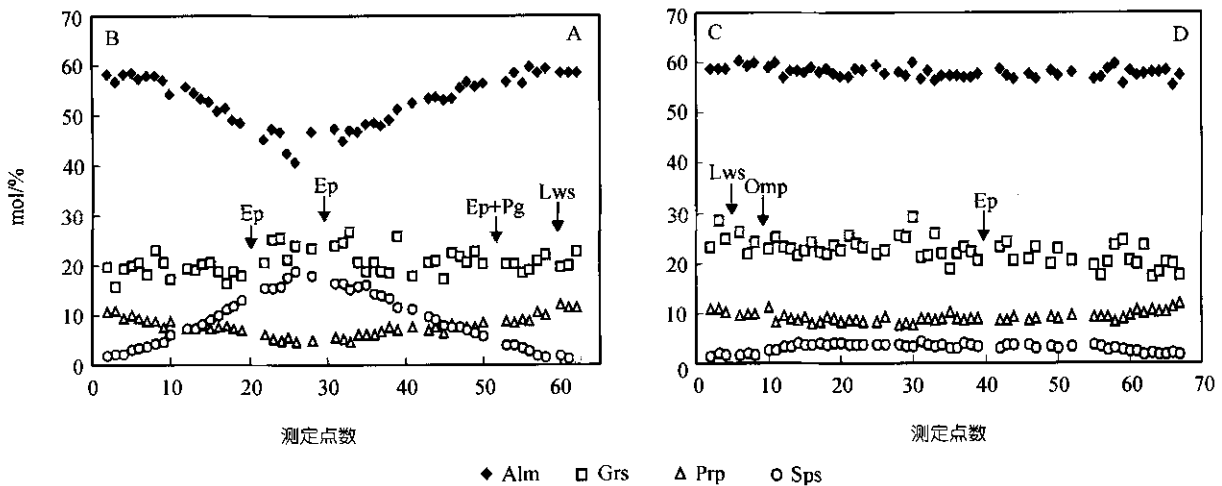


图4 北祁连含硬柱石榴辉岩中石榴子石的成分剖面(剖面位置见图2(a)和(c))

序计算得出, 在计算过程中假定其他组分的活度均为1.

对于北祁连榴辉岩, 石榴子石边部与硬柱石共生的矿物有绿辉石和多硅白云母, 我们利用

Grt-Cpx-Phe 矿物压力计<sup>[18]</sup>和 Grt-Cpx 矿物温度计<sup>[19]</sup>估算了其形成的温压条件. 在计算过程中, 假定单斜辉石的 Fe<sup>3+</sup> = Na-(Al+Cr), 石榴子石的全 Fe 被视为 Fe<sup>2+</sup>. 通过上述计算, 包裹于石榴子石边部的绿辉

石、多硅白云母和石榴子石主晶形成的温压条件为 420~510°C 和 2.1~2.4 GPa(图 5). 另外, 根据基质中绿辉石、多硅白云母和石榴子石边部成分估算出的温压条件为 430~520°C 和 2.0~2.5 GPa, 在误差范围内与石榴石边部包体组合得出的温压条件相似. 因此, 我们推断基质中的绿辉石及多硅白云母可能也是峰期变质作用的产物, 其中可能也曾有硬柱石存在, 但未保存下来. 目前, 尚没有合适的矿物温压计适合来估算进变质和退变质阶段的温压条件, 但根据石榴子石核部包裹有含蓝闪石的矿物组合, 我们推断在榴辉岩相变质之前, 榴辉岩应经历了蓝片岩相前期变质. 基质中大量蓝闪石围绕绿辉石和石榴子石定向分布, 反映在退变质过程中也经历蓝片岩相变质, 与裂隙相连的 Ep+Pg+Ms 集合体显示退变质过程穿过了反应(1). 由于没有发现与退变质作用有关的钙钠闪石(如冻蓝闪石)<sup>[20]</sup>, 退变质阶段可能没有经过绿帘角闪岩相变质, 而直接由榴辉岩和蓝片岩相进入绿片岩相(图 5).

由于阿尔金榴辉岩中没有发现与石榴子石、绿辉石和硬柱石共生的多硅白云母, 无法定量估算含硬

柱石峰期组合的温压条件, 但我们已估算了与含硬柱石榴辉岩互层的其他类型榴辉岩的峰期温压条件(430~540°C,  $P = 2.0 \sim 2.3$  GPa)<sup>[15]</sup>, 与北祁连含硬柱石榴辉岩的峰期条件一致. 基质中的蓝闪石部分转变成冻蓝闪石, 反映在降压过程中经历了绿帘角闪岩相退变质<sup>[15]</sup>(图 5).

### 5 地质意义

已有的研究显示, 北祁连和北阿尔金高压/低温变质带是早古生代洋壳俯冲作用的产物, 属于早古生代增生楔的一部分<sup>[9~15]</sup>. 我们对含硬柱石榴辉岩的稀土元素及 Sr 和 Nd 的同位素研究也表明, 它们的原岩具有 MORB 性质(张建新等, 未刊资料), 这与硬柱石榴辉岩主要产出在洋壳俯冲形成的增生楔中的报道一致. 以上岩相学特征及温压估算表明, 含硬柱石榴辉岩的峰期变质条件已进入硬柱石榴辉岩相稳定区域, 其地温梯度大约为 6~8°C/km, 反映在俯冲过程中具有很低的地温梯度, 是典型冷洋壳俯冲带的特点. 值得注意的是, 在北祁连和北阿尔金榴辉岩中, 硬柱石均作为矿物包体保存在石榴子石中, 硬柱

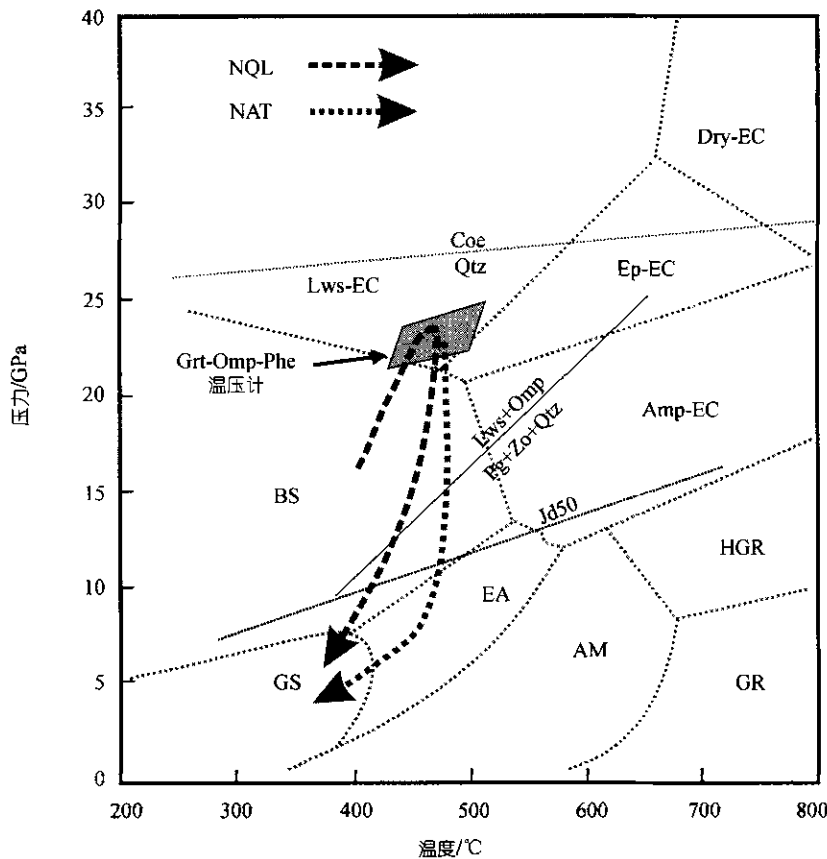


图 5 北祁连和北阿尔金含硬柱石榴辉岩的 P-T 轨迹

4Lws+Jd=Pg+2Zo+Qtz+6H<sub>2</sub>O 是根据 THERMOCALC(3.1)程序和文献[21]的热力学数据计算所得; 相关系据文献[22]. 北阿尔金榴辉岩质岩石的 PT 曲线据文献[15]. GS-绿片岩相; EA-绿帘角闪岩相; BS-蓝片岩相; AM-角闪岩相; GR-麻粒岩相; HGR-高压麻粒岩相; Amp-EC-角闪石榴辉岩相; Lws-EC-硬柱石榴辉岩相; Ep-EC-绿帘石榴辉岩相; Dry-EC-干榴辉岩相. NQL-北祁连; NAT-北阿尔金

石包体周围无裂隙,而在石榴子石中发育的大量  $\text{Ep}+\text{Pg}+\text{Ms}(\text{Phe})$  集合体均与裂隙相连,这显示在折返过程中变形及流体渗滤可能是导致硬柱石分解的一个重要因素.可以推断许多与洋壳俯冲有关的榴辉岩可能都曾经经历过硬柱石榴辉岩相阶段,但在折返过程中没有合适的保存条件,硬柱石难以保存下来,这可能是自然界榴辉岩中硬柱石非常少见的重要原因.

此外,北祁连和北阿尔金高压/低温变质带中均产出含硬柱石的榴辉岩,而且它们的变质时代相近,进一步证明了北阿尔金高压/低温变质带可能是北祁连高压/低温变质带的西延部分(图 1(a)),它们同为早古生代洋壳俯冲作用的产物,被阿尔金断裂所切割.

致谢 参加野外工作还有杨经绥、史仁灯.对两位审稿人、特邀编辑及编委提出的建设性修改意见,在此一并表示感谢.本文受国家自然科学基金项目(批准号:40472102,40272095)国土资源部百名优秀青年人才计划和地质调查局地质调查项目(批准号:200313000058)资助.

## 参 考 文 献

- 1 Poli S, Schmidt M W.  $\text{H}_2\text{O}$  transport and release in subduction zones-Experimental constraints on basaltic and andesitic systems. *J Geophys Res*, 1995, 100: 22299—22314
- 2 Schmidt M W, Poli S. Experimentally based water generation. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 163: 361—379
- 3 Caron J M, Pequignot G. The transition between blueschists and lawsonite-bearing eclogites based on observations from Corsican metabasites. *Lithos*, 1986, 19: 205—218
- 4 Ghent E D, Stout M Z, Erdmer P. Pressure-temperature evolution of lawsonite-bearing eclogites, Pinchi Lake, British Columbia. *J Metamorph Geol*, 1993, 11: 279—290
- 5 Shibakusa H, Maekawa H. Lawsonite-bearing eclogitic metabasites in the Cazadero area, northern California. *Mineral Petrol*, 1997, 61: 163—180
- 6 Zack T, Rivers T, Brumm R, et al. Cold subduction of oceanic crust: Implication from a lawsonite eclogite from the Dominican Republic. *Eur J Mineral*, 2004, 16: 909—916
- 7 颜竹筠, 唐克东. 温都尔庙中发现硬柱石. *沈阳地质矿产研究所所刊*, 1982, 第3号, 217—219
- 8 吴汉泉, 冯益民, 霍有光. 北祁连山中段甘肃南奥陶系变质硬柱石蓝闪片岩的发现及其意义. *地质论评*, 1990, 36 (3): 277—280
- 9 张建新, 许志琴, 徐惠芬, 等. 北祁连加里东俯冲-增生楔及动力学. *地质科学*, 1998, 33: 290—299
- 10 Song S G, Zhang L F, Niu Y, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study of the Northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data. *J Petrol*, 2006, 47: 435—455
- 11 宋述光, 吴汉泉, 冯益民. 北祁连俯冲杂岩带的构造演化. *地球科学进展*, 1997, 14(4): 151—165
- 12 Wu H Q, Feng Y M, Song S G. Metamorphic and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian mountains, China. *J Metamorph Geol*, 1993, 11: 523—536
- 13 张建新, 许志琴, 徐惠芬, 等. 北祁连中段俯冲杂岩、火山弧的时代探讨. *岩石矿物学杂志*, 1997, 16: 112—119
- 14 宋述光, 张立飞, Niu Y, 等. 北祁连山榴辉岩 SHRIMP 定年及其构造意义. *科学通报*, 2004, 49(6): 592—595
- 15 Zhang J, Meng F, Yang J. A new HP/LT metamorphic terrane in the northern Altyn Tagh, western China. *Int Geol Rev*, 2005, 47: 371—386
- 16 Altherr R, Topuz G, Marschall H, et al. Evolution of a tourmaline-bearing lawsonite eclogite from Elekdag area (Central Pontides, N Turkey): evidence for infiltration of slab-derived B-rich fluids during exhumation. *Contrib Mineral Petrol*, 2004, 148(4): 409—425
- 17 Kretz R. Symbols for rock-forming mineral. *Am Mineral*, 1983, 68: 277—279
- 18 Ravna E J K, Terry M P. Geothermobarometry of phengite-kyanite-quartz/coesite eclogites. *Eleventh Annual V. M. Goldschmidt Conference*, 2001. 3145
- 19 Ravna E K. The garnet-clinopyroxene  $\text{Fe}^{2+}$ -Mg geothermometer: an updated calibration. *J Metamorph Geol*, 2000, 18: 211—219
- 20 Matsumoto M, Wallis S, Aoya M, et al. Petrological and constraints on the formation conditions and retrograde P-T path of the Kotsu eclogite unit, central Shikoku. *J Metamorph Geol*, 2003, 21: 363—176
- 21 Powell R, Holland T J B, Worlry B. Calculating phase diagram involving solid solutions via non-linear equations, with examples using Thermocalc. *J Metamorph Geol*, 1998, 16: 327—342
- 22 Liou J G, Zhang R Y, Ernst W G. High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks. *Rev Mineral*, 1998, 37: 33—96

(2006-02-06 收稿, 2006-03-22 接受)