

东准噶尔扎河坝超高压变质成因石英菱镁岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年代学信息及地质意义*

牛贺才 单强 张海祥 于学元
NIU HeCai, SHAN Qiang, ZHANG HaiXiang and YU XueYuan

中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2007-03-20 收稿, 2007-04-28 改回.

Niu HC, Shan Q, Zhang HX and Yu XY. 2007. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the ultrahigh-pressure metamorphic quartz-magnetitite in Zaheba, eastern Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7):1627-1634

Abstract High-ultrahigh pressure lherzolite, garnet-pyroxenite, quartz-magnetitite and retrograde eclogite occur in the Zaheba-Almantai ophiolites. The Si content (pfu) of phengite in quartz-magnetitites is more than 3.35 with the maximum up to 3.77, indicating they are the products of high-ultrahigh pressure metamorphism. K₂O contents of quartz-magnetitite and its wall rocks i. e. serpentinized lherzolite are extremely low, and the ratio of Na/(Na + K) of phengite is less than 0.04. These geochemical characteristics show that the phengite should not contain any excess Ar and hence be an ideal mineral for ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating. The precise ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of the phengite in quartz-magnetitite is 281.6 ± 2.5Ma. The characteristics of mineral chemistry display the phengite had undergone retrograde metamorphism which represents the exhumation age of metamorphism. This study shows that the exhumation of the Zaheba-Almantai ophiolites took place in early Permian.

Key words Zaheba-Almantai ophiolites, Quartz-magnetitite, Phengite, Ultrahigh pressure metamorphism, ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating

摘要 在扎河坝-阿尔曼泰蛇绿岩岩块内分布着高压-超高压成因的二辉橄榄岩、石榴辉石岩、石英菱镁岩及榴闪岩。石英菱镁岩内多硅白云母的 Si(pfu) 值均大于 3.35, 最高可达 3.77, 是典型高压-超高压成因的矿物。石英菱镁岩及其围岩蛇纹石化二辉橄榄岩的 K₂O 含量极低, 且多硅白云母的 Na/(Na + K) 比值小于 0.04, 这些地球化学特征显示, 扎河坝多硅白云母不应含有过剩 Ar, 是一个理想的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年对象。精确的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究结果表明, 扎河坝石英菱镁岩中多硅白云母的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年龄为 281.6 ± 2.5Ma。而矿物化学特征表明, 扎河坝石英菱镁岩中的多硅白云母曾经历了退变质作用的改造, 因此, 它代表的应该是超高压变质石英菱镁岩的折返年龄。多硅白云母的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究结果表明, 扎河坝-阿尔曼泰蛇绿混杂岩内超高压石英菱镁岩的折返事件应发生在早二叠世。

关键词 扎河坝-阿尔曼泰蛇绿岩; 石英菱镁岩; 超高压变质; 多硅白云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年

中图分类号 P597.3

* 国家自然科学基金(40673036)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-107)和国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B02)联合资助。

第一作者简介: 牛贺才, 男, 1963 年生, 研究员, 地球化学专业, E-mail: niuhc@gig.ac.cn

1 引言

中亚地区的地质演化历史复杂,蛇绿混杂岩带广泛出露(何国琦等,2001;朱永峰和徐新,2006;Windley *et al.*, 2007),在许多蛇绿混杂岩带中发现了高压-超高压变质岩,例如我国西南天山地区(高峻,1997;张立飞等,2005)、西准噶尔(郭义华,1983;Zhang,1997)和哈萨克斯坦的 Kokchetav 地区(Sobolev and Schatsky, 1990; Zhu and Ogasawara, 2002a, b)。这些地区超高压变质岩的研究新进展对理解中亚地区的地质和大地构造演化具有及其重要的意义。

扎河坝-阿尔曼泰蛇绿岩位于新疆北部东准噶尔中亚造山带内,主要由蛇纹岩(原岩为方辉橄榄岩、纯橄榄岩、二辉橄榄岩)、辉长岩、辉绿岩、玄武岩、斜长花岗岩和硅质岩等组成,它呈北西西向断续产出,总长约 130km,宽约 3~5km(何国琦等,2001)。扎河坝-阿尔曼泰蛇绿岩被认为是早古生代古亚洲洋的洋壳残块(李锦铁,1995;2004),也有人认为它是古生代洋内弧的一部分(肖文交等,2006)。

本文报道在扎河坝蛇绿混杂岩岩块内首次发现了一些高压-超高压岩石,它们分别是:二辉橄榄岩(橄榄石含有定向分布的磁铁矿出溶体)、含超硅和超钛石榴石的石榴辉石岩、含多硅白云母的石英菱镁岩和榴闪岩。石榴辉石岩、石英菱镁岩和榴闪岩呈透镜体产于蛇纹岩内(图1),透镜体与围岩呈断层接触,具有明显的构造侵位特征。在大的石英菱镁岩透镜体内也分布着一些小的榴闪岩透镜体。在超高压成因的透镜体中,以石英菱镁岩的透镜体分布最广,且体积最大(最大的石英菱镁岩透镜体长约 130m,宽约为 3~20m)。矿物学、岩石学及地球化学研究显示,石榴辉石岩、石英菱镁岩及榴闪岩是高压-超高压变质岩,是洋壳中不同岩石及其上沉积物超深俯冲至深地幔变质再折返至地表的产物。

扎河坝高压-超高压岩石的形成机制和时代的研究对于揭示新疆北部中亚造山带形成的动力学机制、探讨准噶尔东北缘古生代壳幔相互作用、阐述该区大地构造演化均具有重要的启示意义。扎河坝石英菱镁岩内多硅白云母是一个典型的高压-超高压变质成因矿物,同时它也是⁴⁰Ar/³⁹Ar定年的较理想矿物。本文对石英菱镁岩内多硅白云母进行了坪年龄和等时线年龄测定,并对其所代表的地质意义进行了初步探讨。

2 石英菱镁岩岩石及地球化学特征

扎河坝石英菱镁岩的化学组成相对简单,主要由 CO₂ (30.90%~34.38%), SiO₂ (27.28%~34.30%), MgO (27.28%~30.51%) 和 FeO(30.90%~34.38%) 组成,含有少量的 CaO(0.19%~0.44%), MnO(0.05%~0.07%),

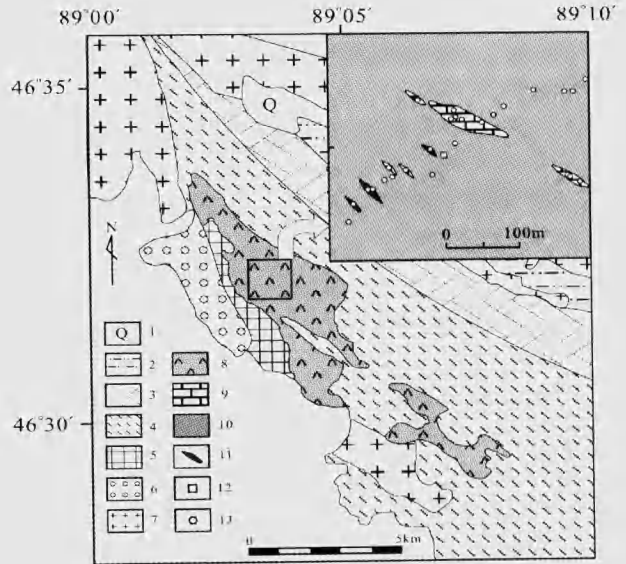


图1 东准噶尔扎河坝地区地质简图(据袁超等 2006 改编)

1-第四系; 2-石炭系; 3-中泥盆统蕴都喀拉组; 4-下泥盆统托让格库都克组; 5-下泥盆统卡希翁组; 6-下泥盆统江孜库都克组; 7-花岗岩体; 8-蛇绿混杂岩体; 9-石英菱镁岩; 10-蛇纹岩; 11-石榴辉石岩或榴闪岩脉; 12-超高压成因二辉橄榄岩; 13-采样点

Fig. 1 Simplified geological map of the Zhaheba area, eastern Junggar(Modified from Yuan *et al.*, 2006)

1-Quaternary; 2-Carboniferous; 3-Middle Devonian Wendukala Formation; 4-Lower Devonian Tuoranggekuduke Formation; 5-Lower Devonian Kawengda Formation; 6-Lower Devonian Jiangzierkuduke Formation; 7-Granite; 8-Ophiolites; 9-Quartz-magnetite; 10-Serpentinite; 11-Garnet-pyroxenite and retrograde eclogite; 12-High-ultrahigh pressure lherzolite; 13-Sampling location

Al₂O₃ (0.52%~0.94%), Cr₂O₃ (0.21%~0.32%) 和 K₂O (0.09%~0.21%)。石英菱镁岩矿物组成也比较简单,它主要由菱镁矿(65%~70%)、石英(15%~20%)、多硅白云母(5%~8%)和铬尖晶石(2%~3%)组成,同时也含有少量的橄榄石、方解石等矿物。石英呈他形粒状,具有典型的放射状(radiating)和马赛克状结构(mosaic),与柯石英转变为石英的中一晚阶段的马赛克状结构以及齿状(highly dentate)边缘结构一致,它很可能是超高压相 SiO₂(柯石英)在退变质过程中相变的产物(Smyth, 1977; Mosenfeldwe and Bohlen, 1997)。菱镁矿呈他形一半自形粒状产出。多硅白云母主要呈长条状分布在菱镁矿和石英颗粒之间,有少量的多硅白云母围绕着铬尖晶石颗粒分布。

电子探针分析结果显示,扎河坝石英菱镁岩中多硅白云母的 SiO₂ 含量从 50.11%变化到 55.98%(图 2a), Al₂O₃ 的含量在 18.93%到 29.15%之间(图 2b), Cr₂O₃ 的含量由 0.82%变化到 6.86%(一般都大于 3%),属铬多硅白云母(图 2c),而 K₂O 的含量则由 4.64%变化到 10.39%(图 2d)。

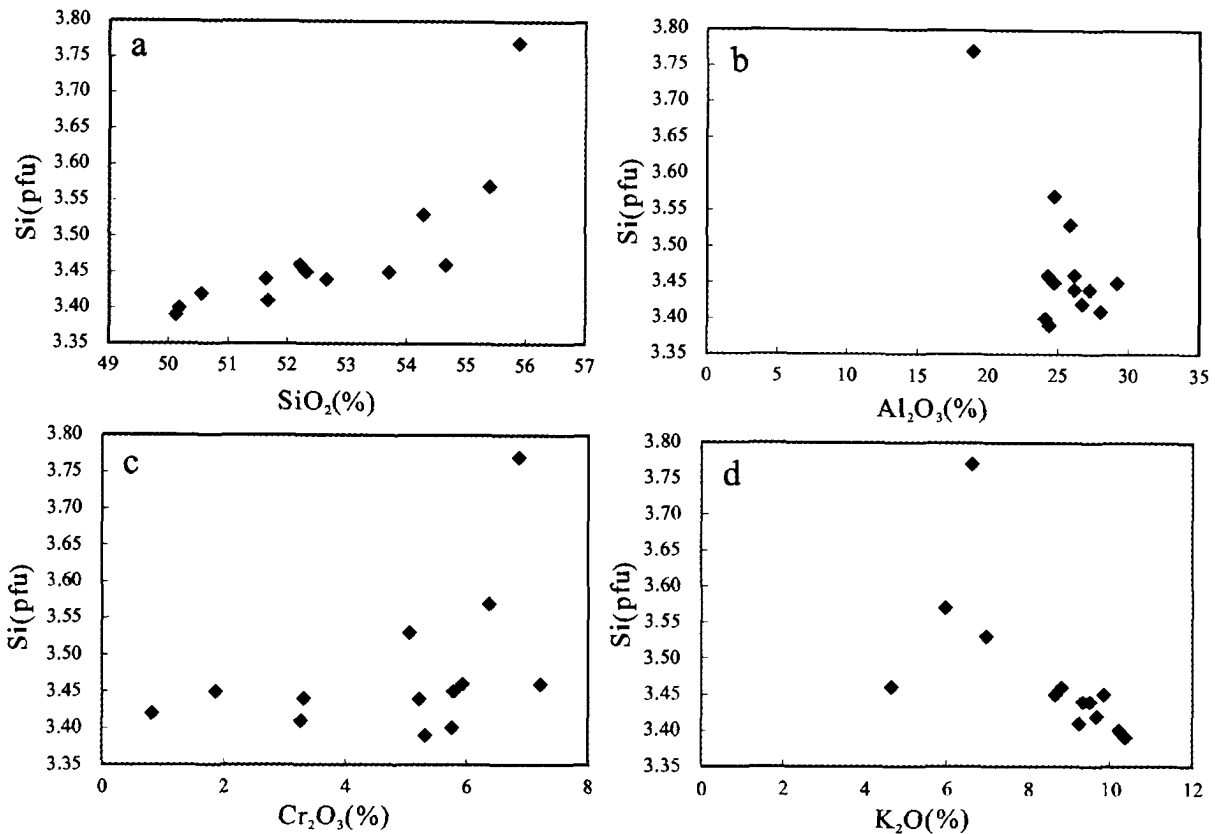


图2 扎河坝石英菱镁岩多硅白云母的 SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Cr₂O₃ 与 Si pfu 关系图

Fig. 2 Plots of SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Cr₂O₃ with Si pfu of phengite in quartz-magnetite from Zaheba

图2显示,在以11个氧原子为单位的结构式中,多硅白云母的Si(pfu)值介于3.40和3.77之间,均大于3.35,是典型的高压-超高压条件下形成的多硅白云母(Grimmer *et al.*, 2003)。该图还显示,扎河坝石英菱镁岩内多硅白云母的Cr₂O₃含量与Si(pfu)呈正相关,而K₂O含量和Al₂O₃含量则与Si(pfu)呈负相关。

碳、氧同位素研究结果显示,扎河坝石英菱镁岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 介于-2.46‰和1.56‰之间,而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 的变化范围则为13.63‰~15.33‰,与原始岩浆成因碳酸岩及岩浆热液成因方解石的碳、氧同位素组成有明显的差别(Smith *et al.*, 2000),而与正常海相沉积碳酸盐岩的碳、氧同位素成分十分相似,反映其原岩应为海相沉积的碳酸盐岩。尖晶石等矿物的存在也表明,扎河坝石英菱镁岩的原岩应为沉积碳酸盐岩(Le Bas *et al.*, 2002)。

超高压成因的多硅白云母往往含过剩Ar,从而影响其在定年方面的应用。超高压成因的多硅白云母是否含有过剩Ar取决于矿物本身的化学组成及所处的地球化学环境。Boundy *et al.*(1989)通过对挪威Holsnoy岛加里东期超高压榴辉岩的研究发现,当白云母Na/(Na+K)比值小于0.18时,其内不含过剩Ar。扎河坝高压-超高压成因多硅白云母的Na/(Na+K)介于0.01~0.04之间,矿物化学组成本身不利

于容纳过剩Ar; Wang *et al.*(1999)通过对南大别石马榴辉岩的研究表明,围岩的性质和化学组成对多硅白云母是否含有过剩Ar的影响可能超过了矿物化学组成本身的影响。石马榴辉岩的直接围岩是大理岩,由于灰岩中钾的含量极低,致使超高压变质过程中从灰岩释放出来的Ar很少,造成流体介质中贫Ar,使多硅白云母失去了接纳过剩Ar前提(Wang *et al.*, 1999)。扎河坝石英菱镁岩的K₂O含量极低,仅为0.09%~0.21%,而石英菱镁岩的围岩即蛇纹石化二辉橄榄岩的K₂O含量则更低,它低于分析的检测限。因此,扎河坝高压-超高压成因的多硅白云母所处的地球化学环境不利于其储存过剩Ar。

综上所述,无论是矿物化学组成本身,还是所处的地球化学环境都决定了扎河坝石英菱镁岩多硅白云母不应含有过剩Ar,是一个理想的⁴⁰Ar/³⁹Ar定年对象。

3 分析方法及结果

多硅白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素定年测试在中国科学院广州地球化学研究所Ar-Ar实验室完成。分析所用的质谱计为英国GV Instruments公司生产的5400Ar稀有气体质谱计,质谱计灵敏度为 1.64×10^{-15} mol/mV;激光器为美国New

Wave 公司生产的 MIR10-50W 二氧化碳激光器; 纯化系统为英国 GV Instruments 公司生产的自动化激光纯化系统。将双目镜下挑选好的样品用铝箔包装, 标准样品用铜箔包装。每 5 个样品间插 1 个标准样品(底顶各有 1 个标样)装入石英玻璃管中, 几根石英玻璃管样品组成 1 批样品, 外用铝罐密封, 再用锡包裹, 送入核反应堆辐照。样品在北京 49-2 堆照射 51h25min。标准样品为 ZBH-2506 (计算时取值 132.5Ma)。干扰 Ar 同位素校正参数 ($^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}$)_{Ca}、($^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}$)_{Ca} 和 ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)_K 分别为: 8.98×10^{-4} 、 2.67×10^{-4} 和 5.97×10^{-3} 。将照射好的样品装入铝质样品盘, 用红外灯烘烤 20 h, 样品温度估计 > 150℃ (法兰盘控制点温度 105℃)。管道用加热带烘烤, 温度约为 160℃。为准确扣除仪器本底贡献, 实验以本底分析开始, 每 3~4 个阶段的样品分析必须间插 1 个(冷)本底分析。激光束光斑大小为 3mm, 加热时间一般为 30~50s (不含前面 10s 缓慢升温时间)。采用 2 个 SAES Advanced Technologies 生产的 Sorb-AC NP10 铅铝吸气泵作为纯化器, 其中 1 个在室温下工作, 另 1

个在 400℃ 左右工作, 纯化时间一般为 5 min。纯化后的气体送入质谱计, 平衡时间为 45s。质谱计自动进行 ^{40}Ar 和 ^{36}Ar 峰扫描, 锁定峰中心。质谱分析按 $m/e = 40, 39.5, 39, 38.5, 38, 37.5, 37, 36.5, 36$ 和 35.5 的顺序进行测定, 一般测定 11 个循环(即 11 组数据)。采用 Koppers(2002)编写的软件 ArArCALC ver. 2. 2c 进行 Ar-Ar 数据处理。表 1 所列 Ar 同位素测定值均进行了本底校正, $^{37}\text{Ar}_{Ca}$ 、 $^{38}\text{Ar}_{Cl}$ 、 $^{39}\text{Ar}_K$ 分别为 Ca、Cl、K 元素在中子活化照射过程产生的相应 Ar 同位素, 计算 K/Ca 比值的转换系数为 0.56。实验流程参见邱华宁(2006)和 Qiu and Jiang (2007)。

分析结果见表 1 及图 3。扎河坝石英菱镁岩多硅白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄和反等时线年龄相等, 为 $281.6 \pm 2.5\text{Ma}$, MSWD 为 0.80。多硅白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 的坪年龄为 $280.9 \pm 0.6\text{Ma}$, 与等时线年龄十分接近; 分析结果还表明, 扎河坝多硅白云母样品的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 292 ± 14 , 与大气的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的初始值 295.5 接近。上述分析结果显示, 所获得的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄值具有较高的可信度。

表 1 扎河坝石英菱镁岩多硅白云母 Ar 同位素分析结果

Table 1 Ar isotopic data of phengite in quartz-magnesitite from Zaheba

激光能量	$^{36}\text{Ar}_a$	$^{37}\text{Ar}_{Ca}$	$^{38}\text{Ar}_{Cl}$	$^{39}\text{Ar}_K$	$^{40}\text{Ar}_t$	年龄 (Ma)	\pm (Ma) (1 σ)	$^{40}\text{Ar}^*$ (%)	$^{39}\text{Ar}_{(K)}$ (%)	K/Ca	\pm K/Ca (1 σ)
1.14W	0.359	0.128	0	30.591	445.91	291.4	0.9	80.8	15.0	133.3	6.2
1.59W	0.136	0.367	0	21.294	302.74	284.7	1.1	88.3	10.5	32.5	1.1
1.82W	0.120	0.143	0	13.921	194.46	280.1	1.4	84.6	6.8	54.6	2.7
2.04W	0.099	0.094	0	11.225	156.72	280.0	1.4	84.3	5.5	67.1	4.4
2.26W	0.101	0.066	0	9.353	130.47	279.8	1.5	81.3	4.6	79.6	5.4
2.48W	0.121	0.060	0	10.156	141.94	280.3	1.5	79.9	5.0	94.7	7.8
2.69W	0.061	0.040	0	5.884	81.84	279.0	1.5	82.0	2.9	82.3	10.5
2.95W	0.112	0.085	0	10.690	149.80	280.9	1.6	81.9	5.3	70.2	4.1
3.17W	0.125	0.037	0	9.519	134.30	282.7	1.7	78.4	4.7	145.3	20.3
3.55W	0.961	0.039	0	8.249	115.83	281.5	1.8	80.3	4.1	118.3	13.7
3.76W	0.096	0.054	0	10.129	142.59	282.2	1.6	83.4	4.9	105.3	9.4
3.97W	0.061	0.017	0	4.359	60.54	278.7	2.4	77.1	2.1	140.4	39.2
4.27W	0.089	0.043	0	9.399	133.05	283.6	1.8	83.5	4.6	122.7	14.8
4.68W	0.096	0.054	0	12.121	170.96	282.7	1.4	85.7	5.9	125.2	13.3
5.19W	0.096	0.076	0	13.782	193.46	281.4	1.6	87.1	6.8	101.9	6.1
5.78W	0.075	0.056	0	7.266	101.13	279.2	1.9	82.1	3.6	72.7	6.4
6.36W	0.112	0.073	0	14.530	203.50	280.8	1.5	86.0	7.2	111.4	1.1
7.02W	0.036	0.002	0	0.842	11.02	263.6	7.0	50.9	0.4	215.0	40

注: Ar 同位素单位为 mV, CV5400 质谱计电子倍增器灵敏度为 $1.64 \times 10^{-15} \text{mol/mV}$

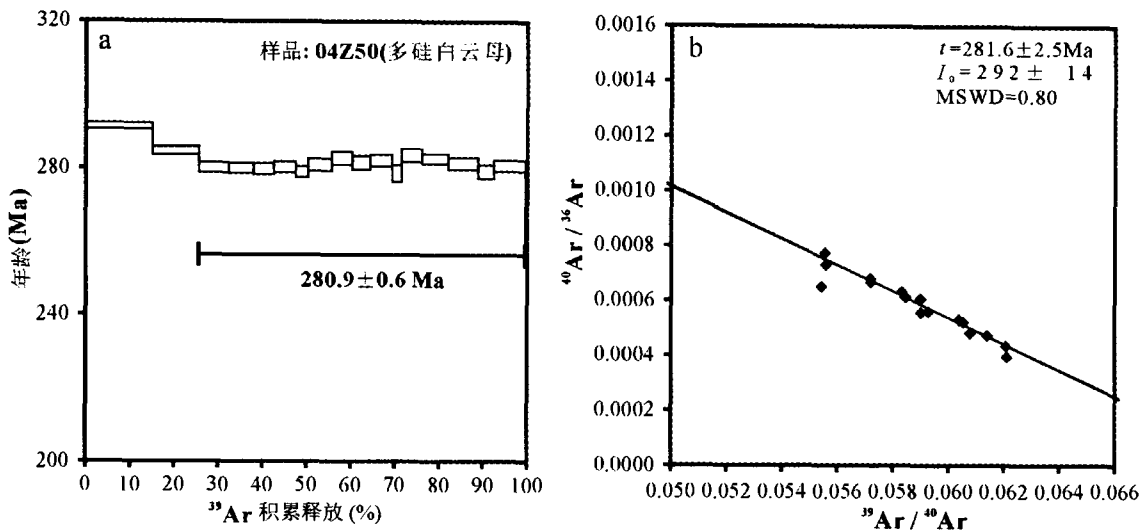


图3 石英菱镁岩中多硅白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱(a)和多硅白云母 Ar-Ar 等时线(b)

Fig.3 Age spectrum of phengite in quartz-magnesitite based on the Ar-Ar dating results (a), and isochron of phengite in quartz-magnesitite based on the Ar-Ar dating results (b)

4 讨论

东准噶尔古生代中亚造山带地处阿尔泰山造山带和天山造山带之间,对于揭示古亚洲洋演化及显生宙古大陆增生机制的研究具有重要意义。同时,人们对于东准噶尔造山带蛇绿岩的形成时代、构造环境及就位机制给予了高度重视(李锦轶,1995;2004;刘伟和张湘炳,1993;Hu *et al.*,2000;何国琦等,2001;Wang *et al.*,2003;简平等,2003;肖文交等,2006)。近十几年来,人们通过各种方法对扎河坝-阿尔曼泰蛇绿岩带形成时代进行了研究。刘伟等(1993)通过蛇纹石化橄榄岩和斜辉橄榄岩的 Sm-Nd 测年认为,扎河坝-阿尔曼泰蛇绿岩带主体的形成年龄为 $479 \pm 27\text{Ma}$;黄萱等(1997)通过堆晶辉长岩、辉绿岩与安山玢岩等 Sm-Nd 全岩等时线的研究,确定扎河坝-阿尔曼泰蛇绿岩形成的年龄为 $561 \pm 41\text{Ma}$;金成伟等(2001)报道了扎河坝地区堆晶橄榄岩的全岩、辉石和长石矿物等时线年龄为 478.9Ma ;肖文交等(2006)的研究结果表明,扎河坝-阿尔曼泰蛇绿岩带内斜长花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $503 \pm 7\text{Ma}$ 。上述研究成果表明,扎河坝-阿尔曼泰蛇绿岩带主体是形成于寒武纪—奥陶纪的洋壳碎块。

简平等(2003)对扎河坝蛇绿混杂岩中层状辉长岩、斜长花岗岩和块状辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄进行了系统的测定。分析显示,蛇绿混杂岩中层状辉长岩的年龄为 $489 \pm 4\text{Ma}$;斜长花岗岩的年龄为 $481 \pm 5\text{Ma}$;块状辉长岩的分析结果则较复杂,较老的一组年龄为 $468 \sim 511\text{Ma}$,发育清晰韵律环带结构锆石的年龄为 $396 \sim 419\text{Ma}$,加权平均年龄为 $406 \pm 4\text{Ma}$,而内部结构复杂且有阴极发光强的晶域穿插锆石的

年龄为 $328 \sim 381\text{Ma}$,经本文计算其加权平均年龄为 $351 \pm 29\text{Ma}$ 。显然,简平等(2003)在肯定扎河坝蛇绿混杂岩主体是早古生代地质体的同时,也暗示了它可能受到晚古生代的地质事件的影响,揭示了该蛇绿混杂岩体形成、演化过程的复杂性。

本研究获得的多硅白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄与已发表的有关扎河坝-阿尔曼泰蛇绿岩内层状辉长岩、斜长花岗岩和块状辉长岩的同位素年龄值有明显差别,那么多硅白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄所代表的地质事件是什么?其地质意义如何?

扎河坝石英菱镁岩中的多硅白云母的 Si (pfu) 为 $3.40 \sim 3.77$,变化范围较大,其上界超出了榴辉岩变质相多硅白云母的稳定区域,而最低值则落在蓝片岩变质相多硅白云母的稳定区域内(Federico, *et al.*,2004)。根据 Domanik and Holloway(1996,2000)的实验资料估算,扎河坝石英菱镁岩中多硅白云母形成的最高压力应不小于 6.5GPa ,其形成深度不小于 180km 。碳、氧同位素分析结果显示,扎河坝石英菱镁岩的原岩是表壳环境形成的海相沉积碳酸盐岩。在洋壳深俯冲过程中覆盖在其上的冷的蚀变的玄武岩、基性岩和超基性岩及沉积物可以形成高压-超高压变质岩(Liou *et al.*,2004),钙交代的玄武岩、基性岩形成了扎河坝含超硅和超钛石榴石的石榴辉石岩及榴辉岩(已退变质为榴闪岩),而富硅的海相沉积碳酸盐沉积物则经超高压变质形成了扎河坝的石英菱镁岩。已有的研究显示,沉积碳酸盐可以俯冲到大于 $>200\text{km}$ 深度的地幔并折返至地表(Zhu and Ogasawara,2002;朱永峰,2005)。

在许多高压-超高压变质岩中多硅白云母的化学组成明显不均匀。如西阿尔卑斯 Dora-Maira 榴辉岩,其多硅白云母

的 Si (pfu) 从 3.2 变化到 3.6, 其中大颗粒多硅白云母核部的 Si (pfu) 高于其边缘 (Nowlan *et al.*, 2000)。王勇生和朱光 (2004) 在对大别山东缘和苏鲁造山带高压-超高压岩石研究时也发现, 岩石中多硅白云母成分不均匀, 其核部的 Si (pfu) 高于其边缘, 从核部向两侧, 多硅白云母的 Si (pfu) 变化并不对称。上述研究成果显示, 退变质过程中流体的活动常会改变原有多硅白云母的成分, 最终会导致岩石中多硅白云母的成分不均匀 (Nowlan *et al.*, 2000; 王勇生和朱光, 2004)。扎河坝多硅白云母的化学组成变化较大, 特别是随着 Si (pfu) 的降低 Al_2O_3 和 K_2O 含量明显增大 (图 2b、d), 其变化规律与受流体改造的多硅白云母相同 (王勇生和朱光, 2004), 这表明它经历了后期折返、抬升作用的影响, 发生了受流体改造的退变质作用。考虑到多硅白云母的 Ar-Ar 同位素的封闭温度比较低 (Wang *et al.*, 1999), 作者认为 $281.6 \pm 2.5\text{Ma}$ 的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄是扎河坝多硅白云母遭受流体改造的退变质年龄, 而不超高压变质多硅白云母的形成年龄。显然, 本文测定的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄仅是超高压变质石英菱镁岩的折返年龄, 而不是其变质年龄, 变质与退变质 (折返) 年龄一般相差 5 ~ 50Ma (Liou *et al.*, 2004)。多硅白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定显示, 扎河坝超高压变质石英菱镁岩的折返事件发生在早二叠世, 但它的折返是与弧后伸展作用有关 (Ueda *et al.*, 2004), 还是与后造山板块伸展作用有关对揭示新疆北部大地构造演化具有重要意义, 有待深入研究。

在石英菱镁岩的围岩即蛇纹石化二辉橄榄岩中作者也发现了超高压作用的矿物学证据。尽管二辉橄榄岩在后期地质过程中发生了较强的蛇纹石化, 但仍残留和保存了一些橄榄石, 在某些橄榄石颗粒内定向地分布着出溶的金属矿物。激光拉曼和电子探针分析表明, 橄榄石中出溶的金属矿物为磁铁矿。近年来有关橄榄石含有针状、棒状 (或片状) 钛铁矿、磁铁矿等出溶体的报道较多, 大多数研究者认为这种矿物结构特征指示其寄主岩石曾经历了超高压地质过程, 其形成压力不小于 6GPa (Dobrzhinetskaya *et al.*, 1996; Hacker *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 1999; Zhu and Ogasawara, 2002b; Zhu, 2003; 朱永峰和 Massonne, 2005)。尽管该发现可以确认在扎河坝存在着超高压成因的二辉橄榄岩, 但不能由此推断该蛇绿混杂岩内所有的蛇纹石化二辉橄榄岩都有超高压成因特征。在扎河坝蛇绿混杂岩内还分布着含超硅、超钛石榴石的石榴辉石岩, 其形成压力不小于 5GPa (Van Roermund, 2001)。含磁铁矿出溶结构的二辉橄榄岩、含超硅超钛石榴石的石榴辉石岩及含多硅白云母石英菱镁岩厘定表明在扎河坝蛇绿混杂岩内确实存在着超高压地质体, 其中石榴辉石岩和石英菱镁岩是典型的超高压变质岩, 它是洋壳超深俯冲过程的产物。同时, 在扎河坝蛇绿混杂岩内也存在着变形、变质程度很弱的层状辉长岩、斜长花岗岩和块状辉长岩, 这些岩石与超高压变质的石榴辉石岩及石英菱镁岩共存也表明该蛇绿混杂岩带形成、演化过程的确十分复杂。本文认为扎河坝蛇绿混杂岩体是典型的构造混杂岩体, 它的主体

是早古生代的洋壳, 但不排除其中含有晚古生代定位的地质体, 如超高压变质的石英菱镁岩, 这些地质体通过构造作用定位在以早古生代洋壳为主体的扎河坝蛇绿混杂岩内。

5 结论

(1) 矿物本身的化学组成特征及围岩的岩石化学特征显示, 扎河坝石英菱镁岩中的多硅白云母几乎不含过剩氩, 所获得的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄值具有较高的可信度。分析显示, 扎河坝石英菱镁岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄为 $281.6 \pm 2.5\text{Ma}$, 与其坪年龄 $280.9 \pm 0.6\text{Ma}$ 十分接近。

(2) 矿物化学组成特征显示, 在扎河坝超高压变质石英菱镁岩折返过程中多硅白云母发生了退变质作用, 其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄代表了石英菱镁岩折返的年龄, 其折返事件发生在早二叠世。

致谢 本文野外考察和资料收集工作得到新疆维吾尔自治区 305 项目办公室的大力支持, 在样品分析和成文过程中得到中国科学院广州地球化学研究所邱华宁博士的真诚帮助, 特邀主编朱永峰教授和三名匿名评审专家对本文提出了宝贵意见, 谨致谢忱!

References

- Boundy TM, Hall CM, Li G *et al.* 1997. Fine-scale isotopic heterogeneities and fluids in the deep crust: A $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser ablation and TEM study of muscovites from a granulite-eclogite transition zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 223 - 242
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by the melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662 - 665
- Dobrzhinetskaya L, Green HW and Wang W. 1996. Alpe Arami: A peridotite massif from depth of more than 300 kilometers. *Science*, 271: 1841 - 1845
- Domanik KJ and Holloway JR. 1996. The stability and composition of phengitic muscovite and associated phases from 5.5 GPa to 11 GPa: Implications for deeply subducted sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 4133 - 4150
- Domanik KJ and Holloway JR. 2000. Experimental synthesis and phase relations of phengitic muscovite from 6.5 GPa to 11 GPa in a calcareous metapelite from the Dabie Mountains, China. *Lithos*, 52: 51 - 77
- Federico L, Capponi G, Crispini L *et al.* 2004. Exhumation of alpine high-pressure rock: Insights from petrology of eclogite clasts in the Tertiary Piedmontese basin (Ligurian Alps, Italy). *Lithos*, 74: 21 - 40
- Gao J. 1997. The discovery of eclogite in Southwest Tianshan and its tectonic significance. *Chinese Science Bulletin*, 42(7): 733 - 739 (in Chinese)
- Guo YH. 1983. The glaucophane schist belt in Tangbale of Xinjiang. In: *The collection of papers on the tectonic plate in North China*. Beijing: Geological Publishing House, 89 - 104 (in Chinese)
- Hacker BR, Sharp T, Zhang RY *et al.* 1997. Determining the origin of ultra high-pressure lherzolites. *Science*, 278: 702 - 704

- He GQ, Li MS, Jia JD *et al.* 2001. A discussion on age and tectonic significance of ophiolite in eastern Junggar, Xinjiang. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis*, 37 (6): 852 - 858 (in Chinese with English abstract)
- Hu AQ, Jahn BM, Zhang GX *et al.* 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nb isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rock. *Tectonophysics*, 328: 15 - 51.
- Huang X, Jin CW, Sun BH *et al.* 1997. Study on the age of Armantai ophiolite, Xinjiang by Nd-Sr isotopic geology. *Acta Petrologica Sinica*, 13: 85 - 91 (in Chinese with English abstract)
- Jian P, Liu DY, Zhang Q *et al.* 2003. SHRIMP dating of ophiolite and leucocratic rocks within ophiolite. *Earth Science Frontiers*, 10: 439 - 456 (in Chinese with English abstract)
- Jin CW, Huang X, Xu YC *et al.* 2001. Hongguleleng-Aermantai Ophiolites and their relation to mineralization. In: Zhao ZH, Shen YC and Tu GZ (eds.), *The fundamental research of metal resources in Xinjiang*. Beijing: Science Press, 21 - 57 (in Chinese)
- Koppers AAP. 2002. ArArCALC: Software for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age calculations. *Comput. Geosci.*, 28(5): 605 - 619
- Le Bas MJ, Subbarao KV and Walsh JN. 2002. Metacarbonite or marble?: The case of the carbonate, pyroxenite, calcite-apatite rock complex at Borra, Eastern Ghats, India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20: 127 - 140
- Li JY. 2004. Late Neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China. *Geological Review*, 50: 304 - 322 (in Chinese with English abstract)
- Li JY. 1995. Main characteristics and emplacement processes of the East Junggar ophiolites, Xinjiang China. *Acta Petrologica Sinica*, 11 (suppl.): 73 - 84 (in Chinese with English abstract)
- Liou JG, Tsujimori T, Zhang RY *et al.* 2004. Global UHP metamorphism and continental subduction/collision: The Himalayan model. *International Geology Review*, 46: 1 - 27
- Liu W and Zhang XB. 1993. The characteristics and geological significance of Ulungur-Zhaisangpo tectonic setting. In: Tu GZ (ed). *New improvement of solid geosciences in northern Xinjiang*. Beijing: Science Press, 217 - 228 (in Chinese)
- Mosenfeldwe JL and Bohlen SR. 1997. Kinetics of the coesite to quartz transformation. *Earth and Planetary Science Letters*, 153: 133 - 147
- Nowlan EU, Schertl HP and Schreyer W. 2000. Garnet-omphacite-phengite thermobarometry of eclogites from the coesite-bearing unit of the southern Dora-Maira Massif, Western Alps. *Lithos*, 52: 197 - 214
- Qiu HN. 2006. Construction and development of new Ar-Ar laboratories in China: Insight from GV-5400 Ar-Ar laboratory in Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. *Geochimica*, 35: 133 - 140 (in Chinese with English abstract)
- Qiu HN and Jiang YD. 2007. Sphalerite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ progressive crushing and stepwise heating techniques. *Earth and Planetary Science Letters*, 256: 224 - 232
- Smyth JR. 1977. Quartz pseudomorphs after coesite. *American Mineralogist*, 62: 828 - 837
- Sobolev NV and Schatsky VS. 1990. Diamond inclusions in garnet from metamorphic rocks: A new environment for diamond formation. *Nature*, 343: 742 - 745
- Ueda H, Usuki T and Kuramoto Y. 2004. Intraoceanic unroofing of eclogite facies rocks in the Omachi Seamount, Izu-Bonin frontal arc. *Geology*, 32: 849 - 852
- Van Roermund HLM. 2001. Non-silicate inclusions in garnet from an ultra-deep orogenic peridotite. *Geological Journal*, 35(3 - 4): 209 - 229
- Wang ZH, Sun S, Li JL *et al.* 2003. Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang, China: Geochemical and geochronological constrains from the ophiolites. *Tectonics*, 22 (2): 10. 1029/2002TC001396
- Wang YS and Zhu G. 2004. Discussion on stability of phengite geobarometry in retrograde metamorphism. *J. Mineral. Petrol.*, 24: 20 - 27 (in Chinese with English abstract)
- Wang SS, Ge NJ, Sang HQ *et al.* 1999. Genesis of Excess argon in phengite and significance of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra for omphacite: A case study on UHP eclogite of South Dabie terrain in China. *Chinese Science Bulletin*, 44: 2607 - 2613
- Windley BF, Alexeiev D, Xiao WJ *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society, London*, 164: 31 - 47
- Xiao WJ, Windley BF, Yan QR *et al.* 2006. SHRIMP Zircon age of the aermantai ophiolite in the north Xinjiang area, China and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 80: 32 - 37 (in Chinese with English abstract)
- Yuan C, Xiao WJ, Chen HL *et al.* 2006. Zhaheba potassic basalt, Eastern Junggar (NW China): Geochemical characteristics and tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 80: 254 - 263 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LF. 1997. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ metamorphic ages of Tangbale blueschists and their geological significance in West Junggar of Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 42(22): 1902 - 1904
- Zhang LF, Ai YL, Li XP *et al.* 2005. The formation and tectonic evolution of UHP metamorphic belt in southwestern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 1029 - 1038 (in Chinese with English abstract)
- Zhang RY, Shu JF, Mao HK *et al.* 1999. Magnetite lamellae in olivine and clinohumite from Dabie UHP ultramafic rocks, central China. *American Mineralogist*, 84: 564 - 569
- Zhu YF and Ogasawara Y. 2002a. Carbon recycled into deep Earth: Evidence from dolomite dissociation in subduction-zone rocks. *Geology*, 30: 947 - 950
- Zhu YF and Ogasawara Y. 2002b. Phlogopite and coesite exsolution from super-silicic clinopyroxene. *International Geology Review*, 44: 831 - 836.
- Zhu YF. 2003. Comments on Crystal-melt equilibria involving potassium-bearing clinopyroxene as indicator of mantle-derived ultrahigh-potassic liquids: An analytical review" by Perchuk LL, Safonov OG, Yapaskurt VO and Barton Jr JM. [*Lithos* 60 (2002) 89 111]: K-feldspar in metamorphic clinopyroxene, from exsolution to potassium replacement. *Lithos* 68: 115 - 119.
- Zhu YF. 2005. Dolomite decomposition texture in ultrahigh pressure metamorphic marble: New evidence for the deep recycling of continental materials. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 347 - 354 (in Chinese with English Abstract)
- Zhu YF and Massonne HJ. 2005. Discovery of pyrrhotite exsolution in apatite. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 405 - 410 (in Chinese with English Abstract)
- Zhu YF and Xu X. 2006. The discovery of Early Ordovician ophiolite m langle in Taerbahatai Mts., Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2833 - 2842 (in Chinese with English Abstract)

附中文参考文献

- 高俊. 1997. 西南天山榴辉岩的发现及其大地构造意义. *科学通报*, 42(7): 733 - 739
- 郭义华. 1983. 新疆唐巴勒地区的蓝片岩. 见: 中国北方板块构造论文集. 北京: 地质出版社, 89 - 104
- 何国琦, 李茂松, 贾进斗等. 2001. 论新疆东准噶尔蛇绿岩的时代及其意义. *北京大学学报(自然科学版)*, 37(6): 852 - 858
- 黄萱, 金成伟, 孙宝山等. 1997. 新疆阿尔曼泰蛇绿岩时代的 Nd、Sr 同位素研究. *岩石学报*, 13: 85 - 91

- 金成伟, 黄萱, 徐永生等. 2001. 洪古勒楞-阿尔曼泰蛇绿岩及其与成矿作用的关系. 见: 赵振华, 沈远超, 涂光炽主编, 新疆矿产资源基础研究, 北京: 科学出版社, 27-51
- 简平, 刘敦一, 张旗等. 2003. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U-Pb 年龄. 地学前缘, 10: 439-456
- 李锦轶. 1995. 新疆东准噶尔蛇绿岩的主要特征及其侵位历史. 岩石学报, 11(增刊): 73-84
- 李锦轶. 2004. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变. 地质论评, 50(3): 304-322
- 刘伟, 张湘炳. 1993. 乌伦古-斋桑泊构造杂岩带特征及其地质意义. 见: 涂光炽主编, 新疆北部固体地球科学进展, 北京: 科学出版社, 217-228
- 邱华宁. 2006. 新一代 Ar-Ar 实验室建设与发展趋势: 以中国科学院广州地球化学研究所 Ar-Ar 实验室为例. 地球化学, 35: 133-140
- 王男生, 朱光. 2004. 多硅白云母压力计在退变质作用中的稳定性探讨. 矿物岩石, 24(4), 20-27
- 肖文交, Windle BF, 阎全人等. 北疆地区阿尔曼太蛇绿岩锆石 SHRIMP 年龄及其大地构造意义. 地质学报, 80: 32-37
- 袁超, 肖文交, 陈汉林等. 2006. 新疆东准噶尔扎河坝钾质玄武岩的地球化学特征及其构造意义. 地质学报, 80: 254-263
- 张立飞, 艾永亮, 李强等. 2005. 新疆西南天山超高压变质带的形成与演化. 岩石学报, 21: 1029-1037
- 朱永峰. 2005. 高压变质大理岩中的白云石分解结构: 大陆地壳物质深循环的新证据. 岩石学报, 21: 347-354
- 朱永峰, Massonne HJ. 2005. 磷灰石中磁黄铁矿出溶结构的发现. 岩石学报, 21: 405-410
- 朱永峰, 徐新. 2006. 新疆塔尔巴哈台山发现早奥陶世蛇绿混杂岩. 岩石学报, 22: 2833-2842