

西昆仑塔什库尔干布伦阔勒群的岩石地球化学特征及变质 $P-T$ 轨迹*

刘文平^{1 2} 王核³ 全来喜^{1**} 吴玉峰^{2 3} 黄朝阳^{2 3} 胡军^{2 3}

LIU WenPing^{1 2}, WANG He³, TONG LaiXi^{1**}, WU YuFeng^{2 3}, HUANG ChaoYang^{2 3} and HU Jun^{2 3}

1. 同位素地球化学国家重点实验室,中国科学院广州地球化学研究所,广州 510640

2. 中国科学院大学,北京 100039

3. 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室,中国科学院广州地球化学研究所,广州 510640

1. State Key Lab of Isotope Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3. CAS Key Lab of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2011-10-30 收稿, 2011-11-25 改回.

Liu WP, Wang H, Tong LX, Wu YF, Huang CY and Hu J. 2013. Geochemical characteristics and metamorphic $P-T$ paths of the Bulunkuole Group in Taxkorgan, western Kunlun. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 923–937

Abstract The Bulunkuole Group is an important metamorphic terrain exposed in the Western Kunlun Orogen but is debatable about its genesis. It is mainly composed of Grt-Pl-Hbl gneiss and khondalite at Maryang in Taxkorgan, western Kunlun. According to the geochemical characteristics, the Grt-Pl-Hbl gneiss may be subdivided into two types: the first type has higher content of total REE ($\sum \text{REE} = 190.2 \times 10^{-6} \sim 359.1 \times 10^{-6}$) than that of the other type of Grt-Pl-Hbl gneiss ($\sum \text{REE} = 89.28 \times 10^{-6} \sim 113.1 \times 10^{-6}$), and gets poorer from LREE to HREE ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 4.28 \sim 5.79$), with the feature of E-MORB; the second is poor in LREE ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.59 \sim 0.84$) and horizontal HREE pattern ($(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 0.99 \sim 1.07$) with the feature of N-MORB. However, both kinds of the Grt-Pl-Hbl gneiss exhibit positive Ba but negative Sm, Cr, Zr, Hf and Ti anomalies with slightly negative Nb and Ta anomalies, showing the feature of the island arc tholeiite. Discrimination diagrams indicate that the protoliths of the khondalites are shale and greywacke formed in an island arc. Thus, the protoliths of the Grt-Pl-Hbl gneisses and the khondalites were likely developed in the island arc setting. Further petrography and mineral chemical data, combined with $P-T$ estimates, indicate three metamorphic stages in the Grt-Pl-Hbl gneiss: M1 is a high-pressure metamorphic stage, with a mineral assemblage of Grt + Hbl1 + Pl1 + Qtz and the $P-T$ conditions of around 850 ~ 870°C with 12.9 ~ 13.3 kb; the retrograde stages M2 and M3 have mineral assemblages of Hbl2 + Pl2 + Qtz and Hbl3 + Pl3 + Kfs + Bt + Qtz respectively, and the $P-T$ estimates are respectively 730 ~ 770°C / 7.3 ~ 7.8 kb and 680 ~ 740°C / 4.7 ~ 5.7 kb. Whereas the khondalite is considered to have undergone three metamorphic stages: the $P-T$ condition of the early M1 stage is implied to be same with that of peak assemblage in the Grt-Pl-Hbl gneiss (850 ~ 870°C / 12.9 ~ 13.3 kb); its peak M2 stage and post-peak M3 assemblages are respectively Grt2 + Pl2 + Bt2 + Sil + Qtz and Grt3 + Pl3 + Bt3 + Sil + Mus + Qtz, with the corresponding $P-T$ estimates of 800 ~ 830°C / 7.9 ~ 9.2 kb and 670 ~ 700°C / 5.1 ~ 5.6 kb. The three metamorphic stages of the khondalite are interpreted to match with the M1, M2 and M3 of the Grt-Pl-Hbl gneiss. The calculated results suggest clockwise $P-T$ paths with a peak high-pressure stage overprinted by an upper amphibolite- or mid-pressure granulite facies metamorphism followed by a lower amphibolite facies metamorphism, which are interpreted to form in the Hercynian collision-related tectonic setting. They are possibly associated with the closure of Paleo-Tethyan Ocean, followed by the intracontinental shearing during the Indosinian tectonic uplift.

Key words Grt-Pl-Hbl gneiss; Khondalite; $P-T$ paths; Bulunkuole Group; Western Kunlun

摘要 西昆仑布伦阔勒群变质岩是西昆仑造山带的重要组成部分,但其成因一直存在争议。在塔什库尔干县的马尔洋

* 本文受“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAB06B05)、国家 973 项目(2011CB808901)和中科院广州地化所项目(0807011001)联合资助。

第一作者简介: 刘文平,男,1987 年生,硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: csulwp2@163.com

** 通讯作者: 全来喜,男,博士,研究员,主要从事变质地质学研究, E-mail: lxtong@gig.ac.cn

地区,布伦阔勒群主要由石榴斜长角闪片麻岩和孔兹岩组成。根据地球化学特征,石榴斜长角闪片麻岩稀土元素配分曲线可以分为两种类型:一种稀土总量较高($\sum \text{REE} = 190.2 \times 10^{-6} \sim 359.1 \times 10^{-6}$),从轻稀土到重稀土逐渐亏损($(\text{La}/\text{Yb})_N = 4.28 \sim 5.79$),与 E-MORB 类似;另一种稀土总量较低($\sum \text{REE} = 89.28 \times 10^{-6} \sim 113.0 \times 10^{-6}$),轻稀土亏损($(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.59 \sim 0.84$),重稀土曲线平坦($(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 0.99 \sim 1.07$),与 N-MORB 类似。微量元素蛛网图中石榴斜长角闪片麻岩具有 Ba 正异常,Sm、Cr、Zr、Hf 和 Ti 的负异常,轻微的 Nb、Ta 的负异常,显示为岛弧拉斑玄武岩的特征。孔兹岩的原岩判别图解显示其原岩可能为岛弧环境沉积的页岩和硬砂岩。因此,推测塔什库尔干布伦阔勒群的石榴斜长角闪片麻岩和孔兹岩的原岩形成于岛弧环境。根据岩相学观察、矿物化学分析和温压计算,石榴斜长角闪片麻岩经历了三个变质阶段: M1 为高压变质阶段,矿物组合为 Grt + Hbl1 + Pl1 + Qtz,变质温压条件为 850 ~ 870°C / 12.9 ~ 13.3 kb; M2 和 M3 为两期角闪岩相退变质阶段,矿物组合分别为 Hbl2 + Pl2 + Qtz 和 Hbl3 + Pl3 + Kfs + Bt + Qtz,变质温压条件分别为 730 ~ 770°C / 7.3 ~ 7.8 kb 和 680 ~ 740°C / 4.7 ~ 5.7 kb。孔兹岩也经历了三个变质阶段,推测其早期 M1 阶段变质温压条件可能与石榴斜长角闪片麻岩的峰期变质阶段相同(850 ~ 870°C / 12.9 ~ 13.3 kb);峰期 M2 和峰期后 M3 阶段变质矿物组合分别为 Grt2 + Pl2 + Bt2 + Sil + Qtz 和 Grt3 + Pl3 + Bt3 + Sil + Mus + Qtz,温压计算结果分别为 800 ~ 830°C / 7.9 ~ 9.2 kb 和 670 ~ 700°C / 5.1 ~ 5.6 kb。孔兹岩的 M1、M2 和 M3 变质阶段对应于石榴斜长角闪片麻岩的 M1、M2 和 M3 变质阶段。上述温压计算结果形成顺时针的 *P-T* 轨迹,表现为峰期高压变质作用后叠加了由高角闪岩相-中压麻粒岩相到低角闪岩相的退变质作用,反映了西昆仑与碰撞相关的大地构造背景,这可能与海西期古特提斯洋的闭合有关,之后叠加了印支期构造抬升过程中的剪切作用。

关键词 石榴斜长角闪片麻岩;孔兹岩;*P-T* 轨迹;布伦阔勒群;西昆仑
中图分类号 P588.345

1 引言

西昆仑造山带是一个典型的长期复杂演化的增生造山带,比较好地保存多期发展演化阶段的地质记录。该地区是目前研究古亚洲构造域和古特提斯洋关系的关键地区(曲军峰等 2007)。前人认为西昆仑康西瓦断裂带形成于岛弧环境(潘裕生,1990),但一直缺乏相关的地球化学证据。康西瓦断裂带的西向延伸部分——瓦恰断裂带被认为代表瓦恰俯冲增生混杂岩带的东部边界(王建平,2008),但瓦恰混杂岩带中的变质岩还缺乏深入的岩石学研究,这在一定程度上影响了对西昆仑造山带演化历史的全面认识。

自郭坤一等(2003)在康西瓦东北部发现二辉麻粒岩以来,人们陆续对康西瓦断裂带沿线的变质岩进行了相关研究(任留东和陈炳蔚,2003;许志琴等,2004;杨坤光等,2003),但是对沿康西瓦断裂分布的塔什库尔干布伦阔勒群变质岩的研究还不够全面深入。布伦阔勒群发育有基性高压麻粒岩(曲军峰等,2007)和泥质高压麻粒岩(王建平,2008)。基性高压麻粒岩具有两期变质作用:峰期的高压麻粒岩相变质作用和之后的角闪岩相退变质作用,两期变质作用形成顺时针的 *P-T* 轨迹(曲军峰等,2007),但其变质年龄似乎仍存在争议(曲军峰等,2007;王建平,2008)。含钾长石蓝晶石的泥质高压麻粒岩和基性高压麻粒岩经历了相似的峰期变质条件(王建平,2008),但对其围岩石榴斜长角闪片麻岩和石榴黑云斜长片麻岩是否也经历了高压变质历史,至今还不清楚。

本文对塔什库尔干布伦阔勒群代表性石榴斜长角闪片麻岩和石榴黑云斜长片麻岩进行岩石化学分析和变质 *P-T* 轨迹研究。根据地球化学特征,对其进行了原岩恢复。通过

岩相学分析和不同阶段矿物组合温压计算,重建了该群可能的多阶段变质演化 *P-T* 轨迹。

2 地质背景和采样位置

西昆仑造山带位于青藏高原的西北边缘,一般认为是古特提斯洋消亡闭合的结果(潘裕生,1989,1990;李锦轶和肖序常,1999;肖文交等,2000)。西昆仑造山带一般分为北昆仑地体、南昆仑地体和甜水海-喀喇昆仑地体(图 1)。北昆仑和南昆仑以及南昆仑和甜水海-喀喇昆仑的分界分别为库地早古生代缝合带(Mattern *et al.*,1996;潘裕生,1996;Mattern and Schneider,2000)和康西瓦断裂(张传林等,2007)。康西瓦断裂主体呈东西向,向西经麻扎后转向北北西,经班迪转向北,然后逐渐转向近东西向,延伸至帕米尔构造结。孙海田等(2003)指出康西瓦断裂在瓦恰一带产出一套具有明显岛弧特征的古生代火山岩系和沉积建造组合。王建平(2008)则认为该处属于西昆仑塔什库尔干构造混杂岩带,由古元古代基底岩片、震旦纪大陆板内裂谷玄武岩、奥陶纪-志留纪复理石岩片、石炭纪-二叠纪火山弧岩片及高压麻粒岩组成。

本研究采样位置位于塔什库尔干瓦恰南 20 km 处马尔洋达坂附近的一条近南北向的河沟的两侧,即被前人认为的布伦阔勒群地层中。通过野外观察,岩层整体北倾,倾角 30° ~ 80°。从南向北出露的主要岩层依次为石榴斜长角闪片麻岩、石榴角闪斜长片麻岩和石榴黑云斜长片麻岩。石榴斜长角闪片麻岩和石榴角闪斜长片麻岩在局部地区互层,层位中发育有石榴黑云斜长片麻岩薄层夹层。石榴斜长角闪片麻岩含有杏仁状构造、气孔状构造和变余层理构造,层位中可见拉伸作用产生的石香肠构造,且深色层和浅色层呈条带状

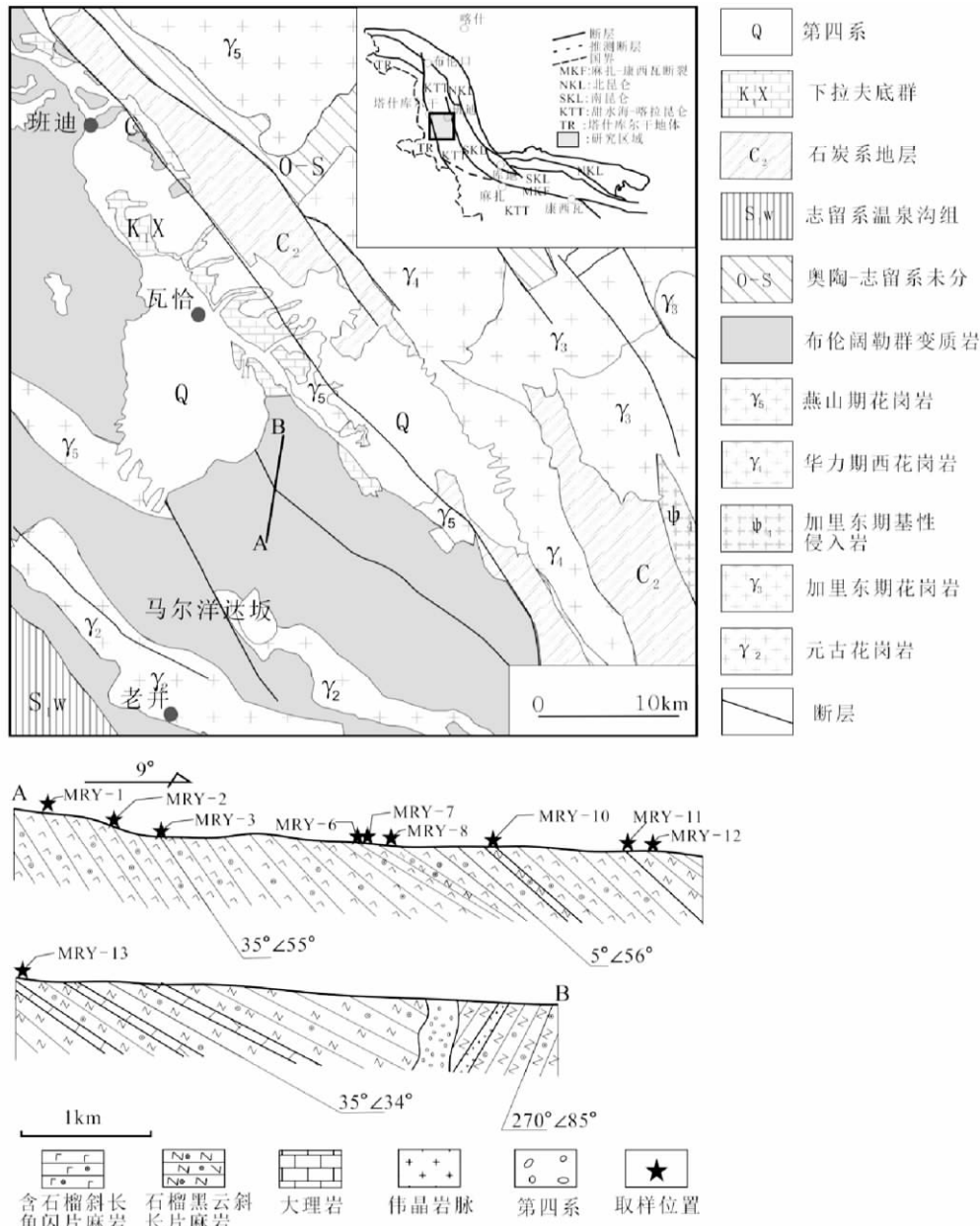


图 1 西昆仑塔什库尔干县马尔洋一带地质图(据张传林等 2007 和河南省地质调查院 2004^①修改)及采样位置剖面图
 Fig.1 The geologic map of Maryang in Taxkorgan of western Kunlun (after Zhang *et al.*, 2007) and the geologic section with sampling locations

交替出现(图 2a)。石榴斜长黑云片麻岩中石榴子石斑晶发育,斑晶直径最大可达 1.5cm,局部石榴子石增多形成斜长黑云石榴片麻岩。石榴黑云斜长片麻岩层含有大理岩,石英岩夹层(图 2c),局部被后期伟晶岩脉顺层侵入,岩脉宽 20~40m。区内出露大量晚古生代花岗岩和少量中生代花岗岩。

本研究选取的 5 个石榴斜长角闪片麻岩(MRY-1, MRY-2, MRY-3, MRY-6, MRY-7)和 5 个石榴黑云斜长片麻岩(MRY-8, MRY-10, MRY-11, MRY-12, MRY-13)分别为基性变

质岩和泥质变质岩,用于地球化学分析(图 1)。其中两个代表性样品(MRY-2 和 MRY-11)用于重建围岩片麻岩的变质 $P-T$ 轨迹。

3 地球化学分析

本次的地球化学分析是在中国科学院广州地球化学研

① 河南地质调查院. 2004. 中华人民共和国地质矿产及成矿预测图-克图鲁克幅(1:250000)和塔什库尔塔吉克自治县幅(1:250000)

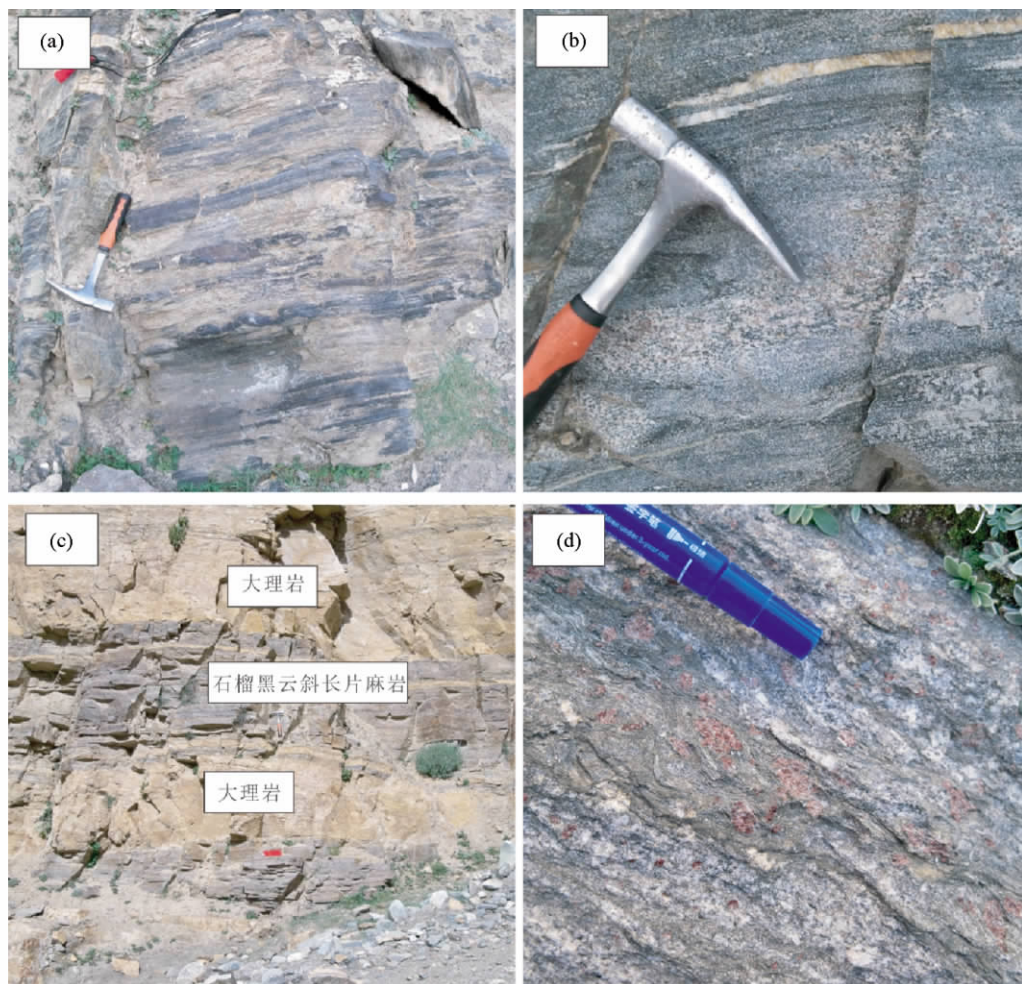


图2 马尔洋布伦阔勒群变质岩的野外露头照片

(a,b) 石榴斜长角闪片麻岩的条带状构造; (c,d) 孔兹岩的变余层理构造

Fig. 2 Photographs of metamorphic rocks of the Bulunkuole Group at Maryang

(a, b) banded structure of Grt-Pl-Hbl gneisses; (c, d) relict bedding structure of the khondalites

究所同位素地球化学国家重点实验室完成的。主量元素分析之前要进行样品的烧失量测定,准确称取约 1g 的粉末样品置于干净的干燥陶瓷坩埚中,分别记录坩埚重、样品重和坩埚 + 样品重。将盛有样品的坩埚置于马沸炉中 900℃ 烧蚀 90min 后取出立即放入干燥器中,于常温下置待其自然冷却后称量坩埚 + 样品的重量。在假设坩埚烧蚀前后质量不变的情况下计算各样品的烧失量(LOI)。主量元素的分析采用碱熔玻璃片在 Rigaku RIX2000 型荧光光谱仪(XRF)上测定,准确称取 0.5g 的样品和 4g $\text{Li}_2\text{B}_2\text{O}_7$ 助溶剂于塑料瓶中,震荡使其均匀混合后倒入铂金坩埚中,并加入少量的 LiBr 混合助溶剂,在高频制饼机器内 1200℃ 加热熔融为玻璃片,然后上机测定元素含量。样品的含量由 36 种涵盖硅酸盐样品范围的参考标准物质双变量拟合的工作曲线确定。详细实验步骤见 Li *et al.* (2002), 分析精度优于 2% ~ 5%。

微量元素测量采用酸溶法,在 Per-Ekmer Sciex Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上完成。在 Bomb 中

称取约 35 ~ 45mg 粉末样品以及标准样品,加入 1 : 1 纯化 HNO_3 、HF 以及 HClO_4 超声波激化 1h 后,置于电热板上保温 3d。之后蒸干,加入 4mL 4N HNO_3 ,进入高压阀置于恒温电热箱内 170℃ 保温 4h。最后稀释 2000 倍,加入一倍的 Rh 内标来校正信号飘移。使用 USGS 标准 W-2 和 G-2 以及国家岩石标样 GSR-1、GSR-2 和 GSR-3 来校正所测元素的含量。具体流程见刘颖等(1996),分析结果见表 1。

3.1 主量元素特征

石榴斜长角闪片麻岩的 SiO_2 含量为 46.99% ~ 52.12%, TiO_2 含量为 1.07% ~ 2.42%, Fe_2O_3 含量为 10.30% ~ 13.39%, Al_2O_3 含量为 13.84% ~ 22.38%, CaO 含量为 7.10% ~ 12.24%, 全碱含量为 2.67% ~ 5.09%, 显示了高铁铝的基性岩特征。

石榴黑云斜长片麻岩样品 SiO_2 含量在 49.82% ~ 70.12% 之间, Al_2O_3 含量在 12.98% ~ 22.51% 之间, 样品除

表1 马尔洋石榴斜长角闪片麻岩和石榴黑云斜长片麻岩的主量(wt%)、微量和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 1 Major (wt%), trace and rare earth element ($\times 10^{-6}$) compositions of the Grt-Pl-Hbl gneisses and the Grt-Bt-Pl gneisses from Maryang

样品号	MRY-1	MRY-2	MRY-3	MRY-6	MRY-7A	MRY-8B	MRY-10	MRY-11	MRY-12	MRY-13
岩性	石榴斜长角闪片麻岩					石榴黑云斜长片麻岩				
SiO ₂	49.58	52.12	46.99	49.48	49.87	51.19	57.98	63.33	49.82	70.12
TiO ₂	1.44	2.42	1.22	1.23	1.07	2.11	1.20	0.79	1.79	0.79
Al ₂ O ₃	17.41	13.84	14.30	17.46	22.38	19.11	16.02	15.95	22.51	12.98
Fe ₂ O ₃	10.84	13.39	12.72	12.85	10.30	13.36	13.52	7.84	12.74	5.80
MnO	0.16	0.29	0.19	0.25	0.14	0.31	0.37	0.13	0.24	0.09
MgO	5.27	3.14	7.84	4.54	3.98	4.04	3.43	3.47	3.65	3.02
CaO	9.80	7.80	12.24	10.19	7.10	2.75	2.55	2.20	0.65	1.48
Na ₂ O	3.42	3.13	2.13	1.97	2.66	2.49	1.38	2.51	1.57	2.06
K ₂ O	0.42	1.96	0.71	0.70	1.43	3.31	2.43	2.49	6.04	2.63
P ₂ O ₅	0.24	1.01	0.10	0.11	0.12	0.04	0.03	0.07	0.14	0.15
LOI	0.85	0.35	1.01	0.67	0.40	0.73	0.53	0.65	0.28	0.30
Total	99.44	99.44	99.45	99.45	99.44	99.45	99.44	99.44	99.44	99.44
Sc	31.99	20.7	41.89	40.53	33.67	32.34	36.66	19.13	24.92	15.32
Ti	9362	15200	7932	7896	6218	13310	7247	4423	11110	4517
V	236.5	66.01	296.8	265.7	185.3	237.9	209.6	128.9	185.5	114.8
Cr	195.7	103.6	220.6	491.3	424	364.1	355.8	331.9	334.3	317.3
Mn	1270	2296	1489	2017	1087	2494	2865	1006	2023	714.2
Co	32.11	19.64	49.63	54.99	46.08	29.46	29.71	20.3	23.25	15.68
Ni	54.18	22.08	82.1	166.7	116.3	74.68	73.07	60.01	48.03	46.36
Cu	340.3	27.06	25.33	88.84	10.42	32.01	55.78	29.57	37.1	13.47
Zn	275.3	151.2	102.2	75.05	90.27	158.0	154.4	96.51	133.2	82.65
Ga	14.99	28.86	13.81	9.593	13.07	35.15	36.72	23.12	62.31	28.47
Ge	1.458	1.732	1.409	1.515	1.479	1.79	1.79	1.373	2.198	1.178
Rb	2.412	19.11	4.048	7.999	41.95	134.1	102.9	108	173.3	91.85
Sr	385	326	134	79.8	238	259	290	111	176	73.3
Y	30.5	58.91	28.79	27.15	21.72	66.98	69.53	28.62	52.87	24.06
Zr	54.38	65.16	36.02	35.89	37.27	182.4	143.1	59.32	90.73	118.5
Nb	8.814	36.65	1.412	2.593	2.521	88.07	14.8	10.17	30.62	11.8
Cs	0.069	0.132	0.094	0.246	2.03	2.91	1.87	1.598	2.656	1.011
Ba	186	609	226	62.9	174	820	919	454	1728	704
La	19.85	43.6	2.625	3.759	2.618	30.47	47.48	45.12	85.2	44.96
Ce	47.02	99.38	7.154	9.512	6.786	56.88	79.84	85.33	170	87.06
Pr	6.343	14.02	1.337	1.635	1.157	6.662	8.554	9.906	20.47	10.36
Nd	26.74	62.14	7.833	8.671	6.218	25.13	30.34	36.55	78.98	39.75
Sm	5.384	13.35	2.827	2.906	2.034	4.257	4.909	6.184	14.41	7.227
Eu	1.885	4.644	1.081	1.142	1.01	1.897	1.086	1.472	3.39	1.452
Gd	5.476	13.38	3.93	3.725	3.034	5.162	6.114	5.23	12.24	6.389
Tb	0.91	2.101	0.771	0.744	0.597	1.205	1.372	0.806	1.826	0.908
Dy	5.562	11.86	5.252	5.062	4.08	10.59	11.17	4.838	10.31	4.804
Ho	1.161	2.341	1.183	1.12	0.895	2.746	2.796	1.114	2.068	0.937
Er	3.24	5.965	3.263	3.107	2.459	8.221	8.316	3.393	5.781	2.648
Tm	0.497	0.839	0.469	0.462	0.363	1.24	1.336	0.531	0.852	0.39
Yb	3.124	5.081	2.994	3.035	2.284	7.787	8.908	3.532	5.32	2.579
Lu	0.496	0.76	0.474	0.465	0.357	1.189	1.426	0.539	0.798	0.401
Hf	1.955	2.214	1.391	1.342	1.068	5.194	4.06	1.712	2.64	3.333
Ta	0.476	2.384	0.107	0.176	0.168	7.175	0.596	0.56	1.397	0.664
Pb	10.39	6.694	6.692	3.317	21.22	21.87	15.81	14.08	41.6	22.68
Th	0.388	3.212	0.244	0.299	0.271	7.395	13.65	15.03	25.76	16.57
U	0.218	0.98	0.138	0.081	0.068	0.885	0.839	1.249	2.423	1.765

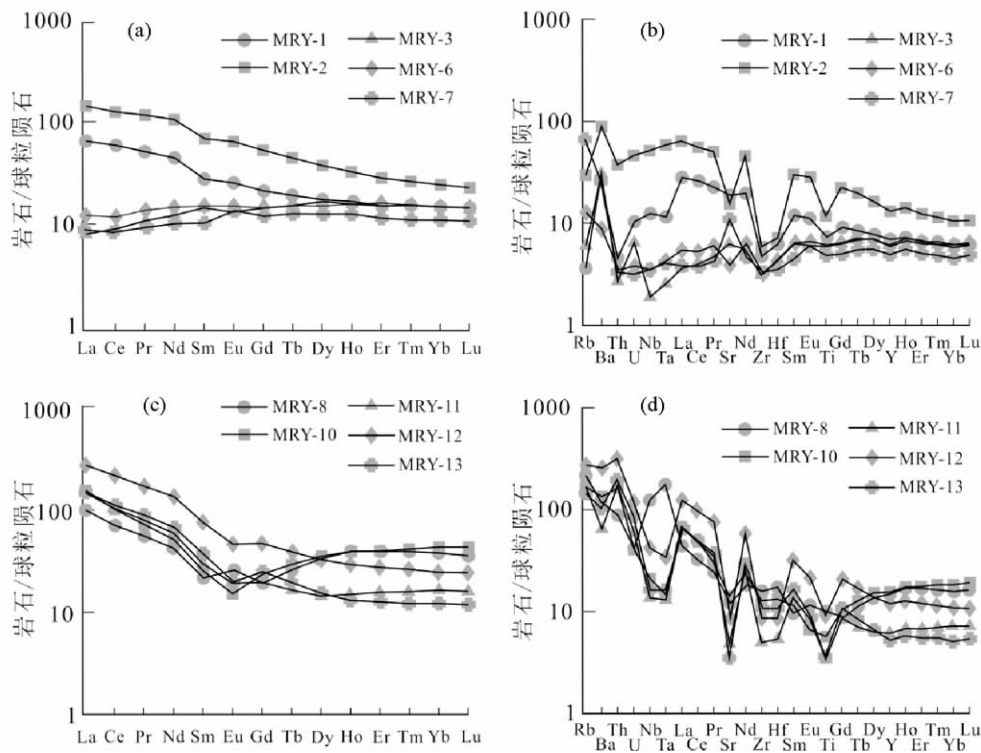


图3 马尔洋布伦阔勒群变质岩稀土配分型式图和微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

石榴斜长角闪片麻岩稀土配分型式图(a)和微量元素蛛网图(b);石榴黑云斜长片麻岩稀土元素配分型式图(c)微量元素蛛网图(d)

Fig. 3 The REE distribution patterns and spider diagrams of metamorphic rocks of the Bulunkuole Group from Maryang (normalizing values after Sun and McDonough, 1989)

REE distribution pattern (a) and spider diagram (b) of the Grt-Pl-Hbl gneisses; REE distribution pattern (c) and spider diagram (d) of the Grt-Bt-Pl gneisses

MRY-13 外 Al_2O_3 含量均大于等于 16%, CaO 含量较低 (0.65% ~ 2.75%), 显示了古大陆边缘环境的富铝沉积岩特征。

3.2 微量元素特征

石榴斜长角闪片麻岩可以分为两类: 含石英的石榴斜长角闪片麻岩 (MRY-1 和 MRY-2) 和不含石英的石榴斜长角闪片麻岩 (MRY-3、MRY-6 和 MRY-7)。含石英的石榴斜长角闪片麻岩中的稀土总量较高 ($\sum REE = 406.5 \times 10^{-6} \sim 880.7 \times 10^{-6}$), 稀土配分型显示弱的轻稀土富集 ($(La/Yb)_N = 4.28 \sim 5.79$), 稀土元素从轻到重逐渐亏损 ($(Gd/Yb)_N = 1.41 \sim 2.12$), 无 Eu 异常, 具有显著的 E-MORB 特征 (图 3a)。不含石英的石榴斜长角闪片麻岩稀土具有较弱的轻稀土亏损 ($(La/Yb)_N = 0.59 \sim 0.84$), 重稀土平坦 ($(Gd/Yb)_N = 0.99 \sim 1.07$), 具有与 N-MORB 类似的特征。在微量元素蛛网图中 (图 3b) 含石英的石榴斜长角闪片麻岩相对于不含石英的石榴斜长角闪片麻岩微量元素含量较高, 同时二者具有一些类似的特征: 贫 Rb ($2.41 \times 10^{-6} \sim 41.95 \times 10^{-6}$), 低的 Rb/Sr 比值 (0.006 ~ 0.176), 明显的 Th、Sm、Cr、Zr、Hf 和 Ti 负异常, 轻微的 Nb、Ta 负异常和明显的 Ba 正异常, Th/Nb

比值为 0.37 ~ 1.45, Nb/La 比值为 0.68 ~ 1.51, 显示出岛弧拉斑玄武岩的特征。样品的微量元素特征与阿尔金西段的石榴角闪二辉麻粒岩 (张建新等, 1999) 具有高度的一致性。

石榴黑云斜长片麻岩富集轻稀土 (轻稀土为球粒陨石含量的 10 ~ 300 倍, 重稀土为 10 ~ 50 倍), REE 图解右倾 (图 3c), 具有明显的 Eu 负异常, 轻稀土由重到轻逐渐亏损, 而重稀土曲线平坦 ($(La/Yb)_N = 2.6 \sim 11.75$, $(Gd/Yb)_N = 0.53 \sim 2.00$) 显示为中上地壳的 REE 特征。在微量元素蛛网图中 (图 3d) 样品富集不相容元素 Rb、Ba 和生热元素 Th、U, 亏损 Sr、Ti, 也为中上地壳微量元素特征。这些特征与许志琴等 (2004) 在康西瓦附近所采的孔兹岩以及张建新等 (1999) 在阿尔金西段发现的孔兹岩具有很好的对比性, 这从另外一层面暗示马尔洋的孔兹岩和康西瓦以及阿尔金西段的孔兹岩可能形成于同一构造环境。

3.3 原岩恢复

石榴斜长角闪片麻岩在野外呈层状分布, 深色层和暗色层呈条带状交替出现, 层理大致平行于片麻理。在岩层中可见到变余杏仁构造、变余气孔构造和变余层理构造。在 Simonen (1953) 的 $(al + fm) - (c + al) - Si$ 图解中, 石榴斜长角

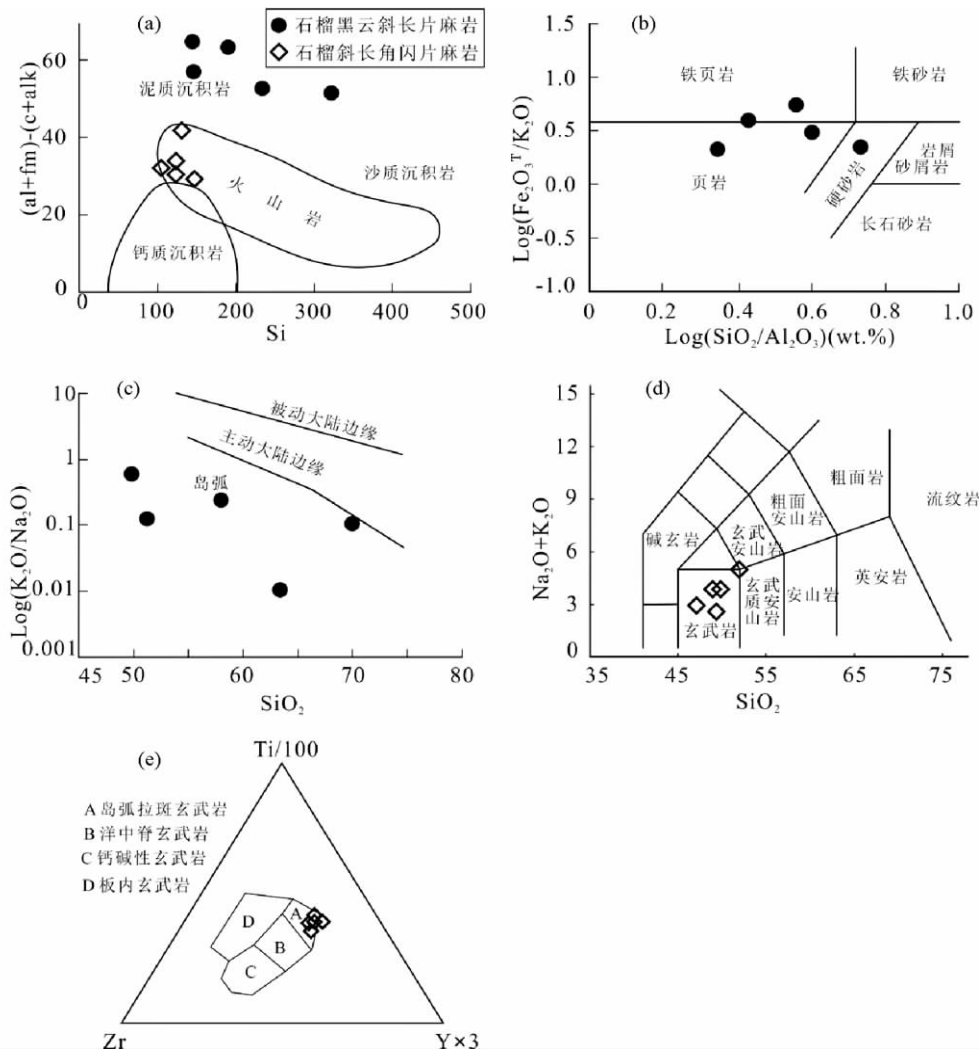


图4 马尔洋布伦阔勒群变质岩原岩判别图解

(a) -马尔洋石榴黑云斜长片麻岩和石榴斜长角闪片麻岩的 $(al + fm) - (c + alk) - Si$ 图解(据 Simonen ,1953) ; (b) -石榴黑云斜长片麻岩的 $Log(SiO_2 / Al_2O_3) - Log(Fe_2O_3^T / K_2O)$ 图解(据 Herron ,1988) ; (c) -石榴黑云斜长片麻岩的 $Log(K_2O / Na_2O) - SiO_2$ (据 Roser and Korsch ,1986) ; (d) -石榴斜长角闪片麻岩的 $Na_2O + K_2O - SiO_2$ 图解(据 Le Maitre ,1989) ; (e) -石榴斜长角闪片麻岩的 $Zr - Y \times 3 - Ti / 100$ 图解(据 Pearce and Cann ,1973)

Fig.4 Discrimination diagrams of metamorphic rocks of the Bulunkuole Group from Maryang

闪片麻岩均投点在火成岩区域;在 $Na_2O + K_2O - SiO_2$ 图解(Le Maitre ,1989) 中 4 个样品落入玄武岩区,其中样品 MRY-2 落在玄武岩与玄武安山岩的分界处;在 $Zr - Y \times 3 - Ti / 100$ 图解(Pearce and Cann ,1973) 中落入岛弧拉班玄武岩区,其中一个样品(MRY-2)较酸性 Zr 含量稍高,落在岛弧玄武岩外侧附近(图4)。由此可以判定石榴斜长角闪片麻岩的原岩为岛弧拉班玄武岩。石榴黑云斜长片麻岩的微量元素特征显示为中上地壳来源特征。在 $(al + fm) - (c + alk) - Si$ 图解(Simonen ,1953) 中 5 个石榴黑云斜长片麻岩样品均投入泥质岩和沙质沉积岩区域;在 $Log(SiO_2 / Al_2O_3) - Log(Fe_2O_3^T / K_2O)$ 图解(Herron ,1988) 中 4 个样品落入页岩区,一个投在硬砂岩区域;在 $Log(K_2O / Na_2O) - SiO_2$ 图解(Roser and

Korsch ,1986) 中均投点到岛弧区(图4)。又因为石榴黑云斜长片麻岩和石榴斜长角闪片麻岩互层,由此可以判定其原岩为页岩和硬砂岩,且和石榴斜长角闪片麻岩一样形成于岛弧环境。马尔洋与康西瓦的孔兹岩无论在岩石组合上还是微量和稀土元素特征上都具有很好的一致性,可能为同构造背景的孔兹岩。综上所述,西昆仑塔什库尔干布伦阔勒群变质岩形成于岛弧环境。

4 岩相学及变质阶段划分

4.1 基性片麻岩样品(MRY-2)

样品 MRY-2 为石榴斜长角闪片麻岩,青灰色,中细粒变

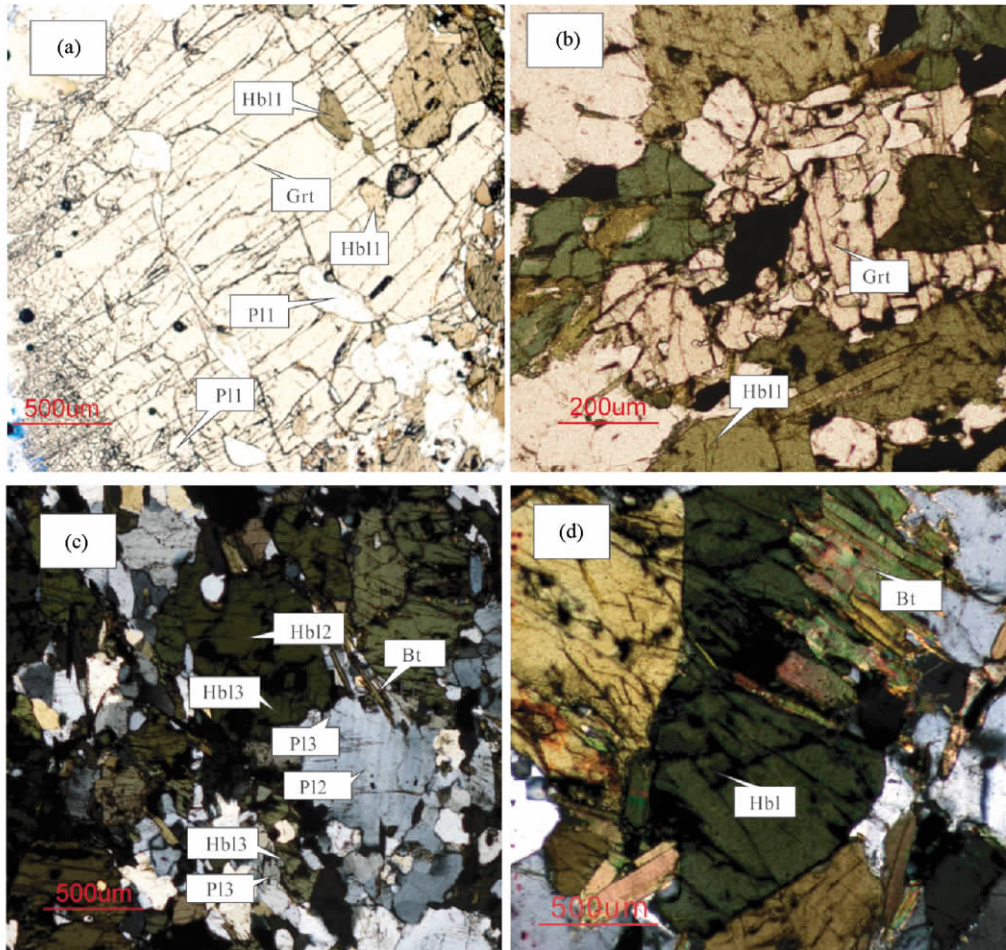


图5 样品 MRY-2 显微照片

(a) -石榴子石中的角闪石和斜长石包体; (b) -残留状石榴子石; (c) -斑晶和基质; (d) -角闪石被黑云母交代

Fig.5 Photomicrographs of the sample MRY-2

(a) -hornblende and plagioclase included in garnet; (b) -residual garnet; (c) -phenocrysts and matrix; (d) -hornblende altered by biotite

晶结构,片麻状构造。手标本上可见斜长石石英条带,条带宽1~2mm之间(图2b)。岩石的主要组成矿物有石榴子石(4%)、角闪石(35%)、黑云母(15%)、斜长石(25%)、钾长石(10%)和石英(10%),及少量金红石、钛铁矿和榍石等副矿物。石榴子石粒径0.2~2mm,在成分上不存在明显差异,大部分石榴子石颗粒被斜长石、角闪石等矿物交代呈残余状,部分保存较完整,发育有斜长石、角闪石包体,包裹体粒径0.05~0.1mm(图5a,b)。角闪石和斜长石斑晶发育,粒径0.5~1mm,多与基质矿物一致定向排列。角闪石单偏光下绿色至棕褐色(图5c),半自形-他形,斑晶中含有石英、斜长石、磁铁矿、钛铁矿等包裹体。角闪石和斜长石斑晶具有核边结构,其边部成分与对应的基质矿物成分相近。基质矿物主要由角闪石、斜长石、黑云母、钾长石和石英组成。基质粒径在0.1~0.3mm之间,成分均一,多定向排列。部分黑云母交代角闪石斑晶,并保留有角闪石假象结构(图5d)。

根据岩相学,样品 MRY-2 可以划分三个变质阶段:(1) 峰期变质阶段矿物组合由石榴子石核部及其包裹体矿物

(Grt + Pl1 + Hbl1 + Qtz) 组成;(2) 第二期变质阶段矿物组合由斜长石斑晶和角闪石斑晶的核部成分组成(Pl2 + Hbl2 + Qtz);(3) 最后一个变质阶段的矿物组合由基质矿物组成(Pl3 + Hbl3 + Kfs + Bt + Qtz)。

4.2 孔兹岩样品(MRY-11)

样品 MRY-11 为夕线石榴斜长二云片麻岩,中细粒斑状结构,片麻状构造(图6a)。主要组成矿物有石榴子石(10%)、黑云母(35%)、白云母(5%)、斜长石(30%)、石英(15%)和夕线石(3%),及少量金红石、方解石等副矿物。石榴子石斑晶粒径约2mm,含有黑云母、夕线石等包体,部分石榴子石核部被后期斜长石、石英等矿物交代呈筛状结构,在矿物成分上核部、幔部和边部有明显差异,其边部成分与基质中的细粒石榴子石(图6b)的成分相近。斜长石斑晶粒径也约2mm,含有黑云母包裹体,具有旋转碎斑结构,在压力较低一侧发育新生斜长石发育,存在核幔边结构,且其边部成分与基质斜长石的成分相近。基质矿物主要有斜长石、黑

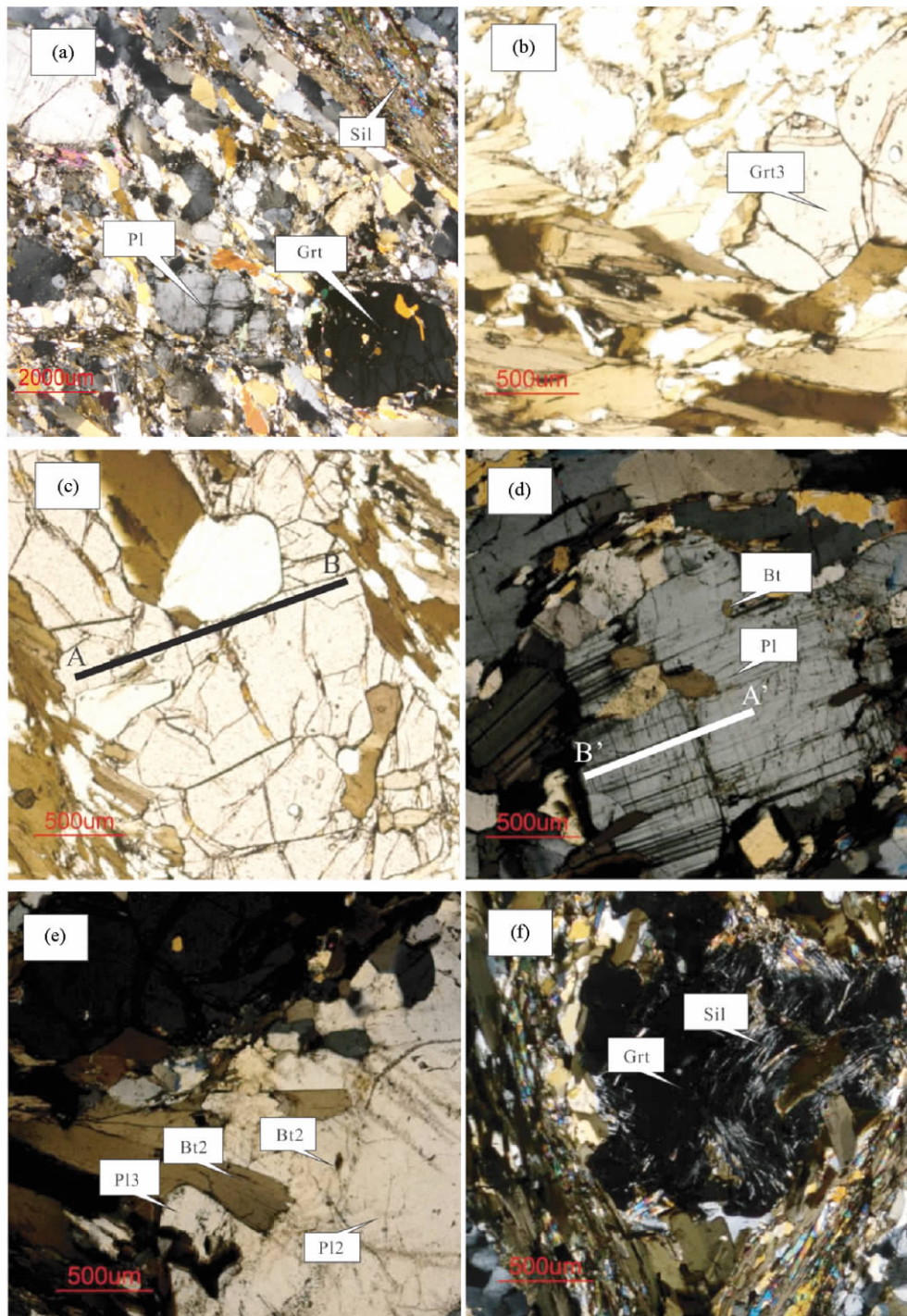


图6 样品 MRY-11 的显微照片

(a) -石榴子石斑晶和斜长石斑晶; (b) -基质黑云母; (c) -他形石榴子石斑晶; (d) -他形的斜长石斑晶; (e) -他形的斜长石斑晶及黑云母包裹体; (f) -残留石榴子石及矽线石包体的反“S”构造

Fig. 6 Photomicrographs of the sample MRY-11

(a) -a garnet phenocryst and plagioclase phenocrysts; (b) -euhedral garnet and biotite in the matrix; (c) -a garnet phenocryst altered by biotite, plagioclase and so on; (d) -a plagioclase phenocryst and its biotite inclusions; (e) -anhedral plagioclase and its biotite inclusions; (f) -residual garnet and sillimanite inclusions arranged as anti-S

云母、白云母、夕线石和石英。部分基质矿物交代石榴子石，形成石榴子石假象。夕线石在基质中和石榴子石包体中均

有存在; 包体夕线石呈针状, 被石榴子石包裹呈反“S”形排列 (图 6f), 为夕线石和石榴子石同构造期生长所致。

表2 基性片麻岩(样品 MRY-2)各阶段矿物化学成分(wt%)

Table 2 The chemical compositions (wt%) of minerals for different metamorphic stages of basic gneiss (sample MRY-2)

变质阶段	M1			M2			M3		
	Gr1	Hbl1	Pl1	Hbl2	Pl2	Hbl3	Pl3	Kfs	Bt
SiO ₂	37.08	39.45	62.18	39.98	63.42	41	63.31	63.85	35.51
TiO ₂	0.14	1.5	0.01	1.68	0	1.26	0.012	0	3.12
Al ₂ O ₃	20.1	11.93	23.18	12.01	22.88	11.99	22.42	18.2	15.03
FeO	22.58	23.06	0.06	21.58	0.1	21.06	0.22	0.04	23.46
MnO	5.78	0.38	0.02	0.41	0.02	0.56	0.04	0	0.37
MgO	1.64	6.06	0	6.71	0	6.99	0	0	8.46
CaO	11.81	11.4	5.13	11.01	4.53	11.46	4.407	0.01	0.01
Na ₂ O	0.09	2.22	9.21	1.99	9.1	1.74	9.421	1.33	0.21
K ₂ O	0.03	2.24	0.19	1.78	0.2	1.61	0.129	15.97	10.32
总量	99.25	98.24	99.98	97.15	100.25	97.67	99.96	99.39	96.49
O	12	23	8	23	8	23	8	8	11
Si	2.978	6.186	2.765	6.257	2.802	6.347	2.811	2.981	2.758
Ti	0.009	0.177	0	0.197	0	0.147	0	0	0.182
Al	1.902	2.205	1.215	2.215	1.191	2.187	1.173	1.002	1.376
Fe ³⁺	0.107	0	0	0.082	0	0.167	0	0	0.101
Fe ²⁺	1.409	3.023	0	2.742	0	2.56	0	0	1.422
Mn	0.393	0.05	0	0.055	0	0.073	0	0	0.024
Mg	0.196	1.416	0	1.565	0	1.613	0	0	0.979
Ca	1.016	1.916	0.244	1.846	0.214	1.901	0.21	0	0.001
Na	0	0.674	0.794	0.605	0.78	0.523	0.811	0.12	0.032
K	0	0.449	0.011	0.354	0.011	0.318	0.007	0.951	1.023
合计	8.009	16.09	5.029	15.918	4.998	15.836	5.012	5.054	7.899

根据岩相学 样品 MRY-11 可以划分三个变质阶段: (1) 早期变质阶段的矿物组合由石榴子石斑晶核部、斜长石斑晶核部、石榴子石核部黑云母包体、石榴子石夕线石包裹体和石英组成(Grt1 + Pl1 + Bt1 + Sil + Qtz); (2) 第二期变质阶段的矿物组合为石榴子石幔部、斜长石斑晶幔部、斜长石斑晶边部黑云母包裹体、石榴子石夕线石包裹体和石英(Grt2 + Pl2 + Bt2 + Sil + Qtz); (3) 晚期变质阶段的矿物组合为石榴子石斑晶边部、斜长石斑晶边部、定向排列的斜长石、黑云母、白云母、夕线石和石英组成(Grt3 + Pl3 + Bt3 + Sil + Qtz)。

5 矿物化学

矿物化学成分分析由中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室的 JEOL 公司出产的 JXA-8100 电子探针分析完成。其分析条件为: 加速电压 15kV, 束流 $3.000 \pm 0.002E-0.8(A)$, 束斑 $1\mu m$, 大部分元素的分析时间为 10s, 采用 ZAF 校正方法。电子探针分析结果见表 2 和表 3。

5.1 基性片麻岩样品(MRY-2)

石榴子石 Alm 含量 46.74% ~ 47.53%, Gro 含量 27.13% ~ 27.92%, Spe 含量 12.68% ~ 13.04%, Pyr 含量 5.50% ~ 6.37%, 各石榴子石颗粒间不存在明显的成分

差异。

角闪石 $X_{Mg} (= Mg / (Mg + Fe^{2+}))$ 值在 0.32 ~ 0.41 之间, Si 离子数在 6.18 ~ 6.35 之间, Ti 离子数在 0.138 ~ 0.256 之间。根据 Leake(2004) 的角闪石分类, 角闪石为铁契尔马克闪石。根据岩相学和矿物化学数据可以把角闪石划分为三期: 第一期角闪石为石榴子石包裹, Na₂O 和 K₂O 含量较高, Na₂O 含量在 2.03% ~ 2.39% 之间, K₂O 含量在 1.97% ~ 2.24% 之间; 第二期角闪石和第三期角闪石为角闪石斑晶的核部和边部, 它们的 Na₂O 和 K₂O 含量分别在 1.74% ~ 2.02% 和 1.61% ~ 1.90% 之间, 但角闪石的边部 Ti₂O 比核部要低, 边部 1.24% ~ 1.53%, 核部为 1.43% ~ 1.75% 之间。

黑云母 Al^{VI} 含量在 0.17 ~ 0.20 之间, 核部含量稍高; TiO₂ 含量 0.35% ~ 0.33%, 核部稍高。Fe 含量核部和边部差别较小。Mg 和 $X_{Fe} (= Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg))$ 值在核部和边部分别为 1.80 和 1.88, 0.63 和 0.62。

斜长石 斜长石为更长石, An 含量稍大于 20%, Ab 含量在 75% ~ 77% 之间, Or 含量约 1%。角闪石包体中的斜长石比基质中的斜长石稍富集 An。斜长石有 4 种不同的存在状态: (1) 第一类斜长石斑晶, 半自形, 双晶条纹较窄, 粒径 1mm 左右; (2) 石榴子石包体斜长石; (3) 第二类斜长石斑晶, 粒径 1mm 左右, 双晶条带较宽; (4) 基质斜长石, 细粒他形, 定向排列。第一类斜长石斑晶核部和石榴子石包体斜长石成分相近, 可能为同期斜长石; 第二类斑晶自形程度比第一类稍好。第一类斑晶的边部成分与第二类斑晶的核部成分相当。第二类斑晶的边部成分和基质斜长石的成分相当。如此斜长石可分为三期: 第一期为第一类斜长石斑晶核和石榴子石包体斜长石(Pl1), An 含量 22.8% ~ 23.7%; 第二期为第二类斜长石斑晶核(Pl2), An 含量 21.3% ~ 21.9%; 第三期为基质斜长石(Pl3), An 含量 20.3% ~ 20.9%。这三期斜长石中 An 含量逐渐降低, 可能反映了退变质过程中温度和压力逐渐降低的情况。

钾长石 Or 含量约 85%, Ab 含量约 14%。

5.2 孔兹岩样品(MRY-11)

石榴子石 石榴子石斑晶具有成分环带, 根据环带成分(图 7a) 从核部到边部石榴子石可以分为三期: 第一期(Grt1) 为石榴子石斑晶核部, Pyr 含量最高; 第二期(Grt2) 为石榴子石斑晶幔部, Pyr 含量中等, Alm 含量最低; 第三期(Grt3) 为石榴子石斑晶边部, Pyr 含量最低, Alm 含量最高。

黑云母 Al^{VI} 含量在 0.27 ~ 0.34 之间, X_{Fe} 值在 0.26 ~ 0.44 之间, TiO₂ 含量在 2.81% ~ 3.50% 之间, 石榴子石包体黑云母的 TiO₂ 含量稍高; 根据岩相学可将黑云母分为三个期次: (1) 石榴子石核部包体黑云母(Bt1), MgO 含量较高, FeO 含量较低, 含量分别为 13.1% ~ 13.9% 和 11.7% ~ 14.2%。推测是和石榴子石发生的离子交换反应, 达到新的化学平衡; (2) 斜长石斑晶边部黑云母包体(Bt2), MgO 含量较低, 在 10.2% ~ 10.6% 之间; FeO 含量较高, 在 16.5% ~

表3 孔兹岩(样品 MRY-11)各阶段矿物化学成分(wt%)

Table 3 The chemical compositions (wt%) of minerals for different metamorphic stages of khondalite (sample MRY-11)

变质阶段	M1			M2			M3			
	Grt1	Pl1	Bt1	Grt2	Pl2	Bt2	Grt3	Pl3	Bt3	Mus
SiO ₂	38.99	60.50	36.13	38.51	60.71	35.91	38.18	59.84	36.38	45.21
TiO ₂	0.00	0.04	2.43	0.00	0.00	2.82	0.02	0.04	2.97	0.56
Al ₂ O ₃	21.54	24.35	18.14	22.60	24.15	17.84	21.36	24.52	17.95	33.23
FeO	28.46	0.00	14.26	27.18	0.01	16.31	31.24	0.03	15.59	2.48
MnO	1.08	0.00	0.00	1.12	0.00	0.03	1.76	0.01	0.03	0.02
MgO	8.14	0.00	13.12	8.69	0.01	11.77	6.26	0.00	11.40	0.58
CaO	1.24	6.13	0.00	1.24	5.99	0.00	1.18	6.32	0.00	0.12
Na ₂ O	0.48	8.32	0.39	0.07	8.70	0.10	0.37	8.47	0.21	0.90
K ₂ O	0.25	0.21	10.26	0.01	0.00	10.75	0.12	0.15	10.78	11.11
总量	100.25	99.55	94.72	99.50	99.74	95.60	100.48	99.46	95.39	94.23
O	12	8	11	12	8	11	12	8	11	11
Si	3.031	2.707	2.715	2.981	2.712	2.710	3.005	2.688	2.739	3.088
Ti	0.000	0.000	0.137	0.000	0.000	0.160	0.001	0.000	0.168	0.029
Al	1.974	1.284	1.606	2.062	1.272	1.587	1.981	1.298	1.593	2.675
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.135	0.000	0.000	0.138	0.014	0.000	0.171	0.142
Fe ²⁺	1.851	0.000	0.761	1.759	0.000	0.891	2.042	0.000	0.811	0.000
Mn	0.071	0.000	0.000	0.073	0.000	0.002	0.117	0.000	0.002	0.001
Mg	0.944	0.000	1.470	1.003	0.000	1.324	0.735	0.000	1.280	0.059
Ca	0.103	0.294	0.000	0.103	0.287	0.000	0.099	0.304	0.000	0.008
Na	0.000	0.722	0.057	0.000	0.754	0.015	0.000	0.738	0.030	0.120
K	0.000	0.012	0.983	0.000	0.009	1.035	0.000	0.009	1.035	0.968
合计	7.974	5.019	7.864	7.981	5.034	7.862	7.996	5.036	7.829	7.090

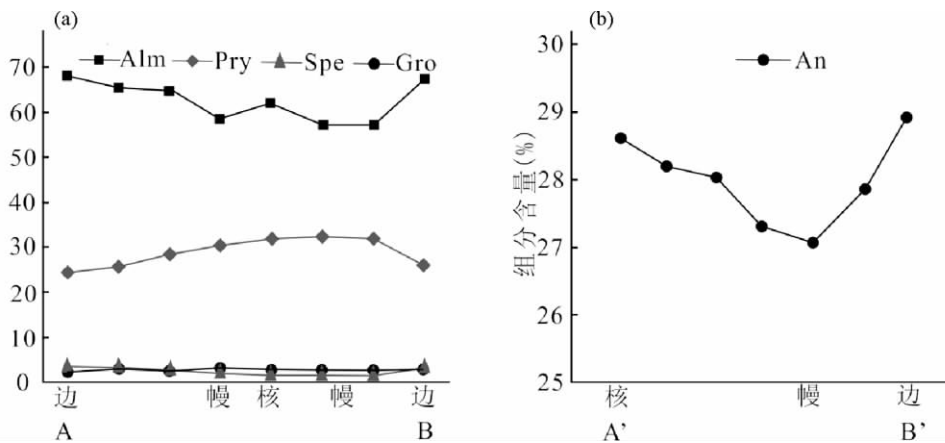


图7 样品 MRY-11 中的石榴子石斑晶 (a) 和斜长石斑晶 (b) 的成分剖面图

图 7a 对应的剖面为图 6c 中 AB 剖面; 图 7b 对应图 6d 中 A' B' 剖面

Fig. 7 Compositional profiles of a garnet porphyroblast and a plagioclase porphyroblast in the sample MRY-11

The Fig. 7a corresponds to the section from A to B in Fig. 6c; the Fig. 7b corresponds to the section from A' to B' in Fig. 6d

17.3% 之间; (3) 基质黑云母 (Bt3) ,MgO 含量在 11.5% ~ 11.7% 之间 ,FeO 含量在 15.4% ~ 15.7% 之间。与石榴子石接触的黑云母 MgO 含量有所升高 ,可能和石榴子石发生了离子交换反应。

白云母 白云母成分较均一 ,Si 含量约 3.09 ,Na 含量在 0.06 ~ 0.12 之间 ,Mg 含量在 0.06 ~ 0.08 之间。

斜长石 斜长石为更长石 ,Ab 含量在 70% ~ 72% 之间 , An 含量在 26% ~ 29% 之间。斜长石斑晶从核部到边部 Ab 含量从 70% 增加到 73% ,然后又降低到 70% (图 7b); 因此斜长石可以分为三期: 第一期 (Pl1) 为斜长石斑晶核部; 第二期 (Pl2) 为斜长石斑晶幔部; 第三期 (Pl3) 为斜长石斑晶边部和基质斜长石。

表4 样品 MRY-2 和 MRY-11 各变质阶段的矿物组合及 $P-T$ 条件Table 4 Mineral assemblages and $P-T$ conditions of the different stages of the sample MRY-2 and the sample MRY-11

样品号	变质阶段	矿物组合	T ($^{\circ}\text{C}$)	P (kb)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	ΔP (kb)
MRY-2	M1	Grt + Hbl1 + Pl1 + Qtz	850 ~ 870	12.9 ~ 13.3	35	1.1
	M2	Hbl2 + Pl2 + Qtz	730 ~ 770	7.3 ~ 7.8	40	2
	M3	Hbl3 + Pl3 + Kfs + Bt + Qtz	680 ~ 740	4.7 ~ 5.7	40	2
MRY-11	M1	Grt1 + Pl1 + Bt1 + Sil + Qtz	850 ~ 870	12.9 ~ 13.3	35	1.1
	M2	Grt2 + Pl2 + Bt2 + Sil + Qtz	800 ~ 830	7.9 ~ 9.2	25	1.2
	M3	Grt3 + Pl3 + Bt3 + Sil + Mus + Qtz	670 ~ 700	5.1 ~ 5.6	25	1.2

注: 1. ΔT , ΔP 分别为地质温压计的系统温度和压力误差; 2. 采用了石榴子石-角闪石-斜长石-石英温压计(Graham and Powell, 1984; Kohn and Spear, 1990), 角闪石-斜长石温压计(Holland and Blundy, 1994), 角闪石-斜长石-石英压力计(Bhadra and Bhattacharya, 2007) 和石榴子石-斜长石-黑云母-石英温压计(Wu *et al.*, 2004)

6 变质条件计算

根据岩相学观察和矿物化学数据分析, 石榴斜长角闪片麻岩样品 MRY-2 和孔兹岩样品 MRY-11 均可划分为三个变质阶段。采用实验资料校正的矿物对温压计对样品各变质阶段矿物组合的温压条件进行计算, 计算结果见表 4。

6.1 基性片麻岩样品(MRY-2)

第一阶段(M1) 的矿物组合为: Grt + Hbl1 + Pl1 + Qtz, 该组合代表了峰期变质矿物组合。采用石榴子石-角闪石-斜长石-石英温压计(Graham and Powell, 1984; Kohn and Spear, 1990) 进行计算, 计算所产生的温压结果为 850 ~ 870 $^{\circ}\text{C}$ / 12.9 ~ 13.3kb。计算结果暗示了峰期 M1 组合达到了高压麻粒岩相变质作用条件。

第二阶段(M2) 矿物组合为: Hbl2 + Pl2 + Qtz。采用角闪石-斜长石温压计(Holland and Blundy, 1994) 和角闪石-斜长石-石英压力计(Bhadra and Bhattacharya, 2007) 计算出变质条件为 730 ~ 770 $^{\circ}\text{C}$ / 7.3 ~ 7.8kb, 代表了高角闪岩相的退变质阶段的变质条件。

第三阶段(M3) 的矿物组合为: Hbl3 + Pl3 + Kfs + Bt + Qtz。计算方法与第二阶段的方法一致。计算结果为 680 ~ 740 $^{\circ}\text{C}$ / 4.7 ~ 5.7kb, 为低角闪岩相退变质阶段。

6.2 孔兹岩样品(MRY-11)

采用石榴子石-斜长石-黑云母-石英温压计(Wu *et al.*, 2004) 进行计算, M1 的变质条件为 702 ~ 716 $^{\circ}\text{C}$ / 6.5 ~ 6.8kb, 属于角闪岩相变质作用; M2 为 800 ~ 830 $^{\circ}\text{C}$ / 7.9 ~ 9.2kb, 属于中压麻粒岩相变质作用; M3 为 670 ~ 700 $^{\circ}\text{C}$ / 5.1 ~ 5.6kb, 属于低角闪岩相退变质作用。

计算所得的孔兹岩的第一期变质作用较石榴斜长角闪片麻岩的峰期变质作用温压偏低, 这种现象在赞皇等地方也有出现(Xiao *et al.*, 2011), 为前期的麻粒岩相变质作用受到后期退变质所致, 证据如下: (1) 被石榴子石包裹的黑云母颗

粒较小, 易受离子交换反应影响; (2) 互层的石榴斜长角闪片麻岩中发现有高压麻粒岩相变质作用(850 ~ 870 $^{\circ}\text{C}$ / 12.9 ~ 13.3kb); (3) 曲军峰等(2007) 和王建平(2008) 在塔什库尔干旧水电站附近的石榴斜长角闪片麻岩中分别发现有基性高压麻粒岩和泥质高压麻粒岩, 峰期麻粒岩相变质作用条件分别为 760 ~ 820 $^{\circ}\text{C}$ / 10 ~ 12kb 和 800 ~ 900 $^{\circ}\text{C}$ / 10 ~ 12kb。以上证据说明塔什库尔干沿瓦恰岛弧带的布伦阔勒群变质岩经历了高压麻粒岩相的变质作用。由此推测马尔洋的孔兹岩计算的第一阶段温压条件过低可能是矿物组合在峰期后受到叠加改造而重新达到平衡。其峰期温压条件可能与石榴斜长角闪片麻岩的峰期温压条件一致。

7 讨论

根据野外产状和岩石学结构可以判断两类岩石的 M3 形成于同一期剪切作用, 且石榴斜长角闪片麻岩的 M2 和 M3 阶段的温压条件分别和孔兹岩的 M2 和 M3 阶段的温压条件相近, 又因为石榴斜长角闪片麻岩和孔兹岩的三个变质阶段为连续的, 所以推测石榴斜长角闪片麻岩的 M1、M2 和 M3 阶段分别对应于孔兹岩的 M1、M2 和 M3。西昆仑塔什库尔干布伦阔勒群中石榴斜长角闪片麻岩(MRY-2) 和孔兹岩(MRY-11) 共同经历了峰期的高压变质作用(850 ~ 870 $^{\circ}\text{C}$ / 12.9 ~ 13.3kb), 随后的高角闪岩相-中压麻粒岩相变质作用(730 ~ 830 $^{\circ}\text{C}$ / 7.3 ~ 9.2kb) 和晚期的角闪岩相变质作用(670 ~ 740 $^{\circ}\text{C}$ / 4.7 ~ 5.7kb)。两个样品的 $P-T$ 轨迹均表现为峰期高压变质作用后发生近等温降压(ITD) 过程, 形成一个顺时针的 $P-T$ 轨迹(图 8)。这样的 $P-T$ 轨迹一般形成于碰撞有关的大地构造过程(England and Thompson, 1984; Thompson and England, 1984)。这一过程可以描述为: 随着陆壳增厚, 变质压力迅速升高温度缓慢上升, 之后由于构造剥蚀作用(Harley, 1989), 陆壳发生抬升, 经历近等温降压过程。

在塔什库尔干县水库至班迪(本次采样位置北 20km 处) 一带的布伦阔勒群孔兹岩主要存在四组年龄值: 大于 600Ma(锆石残核年龄), 400 ~ 460Ma, 240 ~ 270Ma, 200Ma(张传林等 2007)。另外, 康西瓦附近的孔兹岩也存在四组

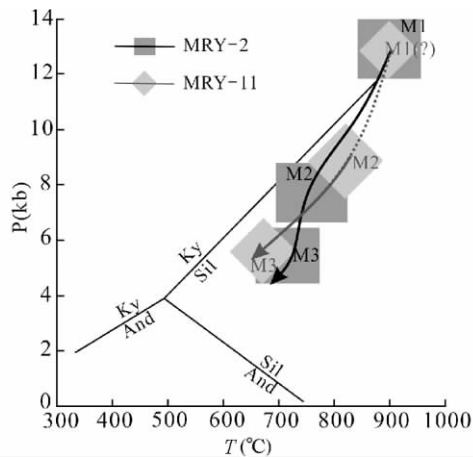


图8 塔什库尔干马尔洋石榴斜长角闪片麻岩和孔兹岩的 $P-T$ 轨迹

深色部分为石榴斜长角闪片麻岩 MRY-2 的 $P-T$ 轨迹, 浅色部分为孔兹岩 MRY-11 的 $P-T$ 轨迹. Al_2SiO_5 三相点据 Holdaway (1971)

Fig. 8 Metamorphic $P-T$ paths of the Grt-Pl-Hbl gneiss and the khondalite from Maryang

The dark sections refer to the $P-T$ path of the Grt-Pl-Hbl gneiss of the sample MRY-2, while the light sections refer to the $P-T$ path of the khondalite of the sample MRY-11. Three-phase point of Al_2SiO_5 after Holdaway (1971)

年龄值, 其中的锆石残核年龄为 618 ~ 718Ma, 其中三组年龄值为 428 ~ 492Ma、245 ~ 256Ma、197 ~ 214Ma (许志琴等, 2004)。因为康西瓦孔兹岩被 505Ma 的英云闪长岩 (其变质年龄 240Ma) 侵入 (张传林等 2007), 因此推测出大于 505Ma 的年龄为碎屑锆石年龄, 而小于 505Ma 三组年龄即为变质年龄。在康西瓦北侧的夕线石榴片麻岩的变质锆石也存在至少两组谐和年龄 420 ~ 460Ma 和 230 ~ 280Ma (郭坤一等, 2003)。在塔什库尔干呈包裹体状体赋存于石榴斜长角闪片麻岩中的高压麻粒岩曾报道过存在两个年龄值 456 ± 30 Ma 和 177 ± 6 Ma (曲军峰等 2007)。由此可见, 康西瓦孔兹岩具有三期变质年龄峰值 (428 ~ 492Ma、230 ~ 280Ma、177 ~ 214Ma)。

基于以上分析, 笔者认为塔什库尔干布伦阔勒群很可能在 428 ~ 492Ma 之间发生一次变质事件。引发变质事件的原因可能有两种: (1) 已有证据证明布伦阔勒群的主体形成于古元古代, 在马尔洋西的达布达尔发育古元古火成岩 (计文化等 2011), 推测马尔洋附近的形成于岛弧环境的火山沉积岩系在加里东期和布伦阔勒群的主体部分拼合, 发生变质作用; (2) 在库地北和苏巴什存在大量 420 ~ 490Ma 的消减带性质的闪长岩和花岗闪长岩 (Robertson, 1994; 许荣华等, 1994; 崔建堂等 2006), 在库地和康西瓦之间存在形成于 426 ~ 451Ma 之间的韧性剪切带 (周辉等 2000), 推测原特提斯洋在加里东期发生汇聚俯冲 (崔建堂等 2006), 其远程效应

相关促使马尔洋布伦阔勒群发生变质作用。由于后期变质改造作用使得该期变质矿物很少保留。

而 230 ~ 280Ma 可能代表了高压变质阶段 M1 (850 ~ 870°C / 12.9 ~ 13.3kb) 以及随后的高角闪岩-中压麻粒岩相 (730 ~ 830°C / 7.3 ~ 9.2kb) 退变质作用时间。该期变质作用可能和古特提斯洋的闭合有关。王建平 (2008) 在瓦恰断裂带中发现晚石炭纪-二叠纪具有消减带性质的火山弧岩片。姜春发等 (1992) 和刘训等 (1997) 认为古特提斯洋在晚二叠纪-三叠纪闭合形成以康西瓦为代表的地壳结合带。古特提斯洋的闭合造成南昆仑地体和甜水海-喀喇昆仑地体的碰撞, 碰撞带地壳增厚, 地壳的温度和压力升高, 岩石发生进变质作用, 变质作用的温压条件可达到 850 ~ 870°C / 12.9 ~ 13.3kb; 随后发生构造抬升, 陆壳减薄温度和压力迅速降低, 岩石发生近等温降压过程。

另外由于在库地和康西瓦之间存在石榴斜长角闪片麻岩的韧性剪切带中发育有 231 ± 9.8 Ma 的片麻状花岗岩和 183 ~ 196Ma 的花岗岩 (中国科学院青藏高原综合科学考察队, 2000), 在库地和麻扎之间的片岩中发现有 229Ma 的热扰动 (计文化等 2007), 由此可以推测在 196 ~ 231Ma 之间发生过剪切作用使花岗岩发生片麻岩化。塔什库尔干的基性高压麻粒岩存在一组 177 ± 6 Ma 的锆石 U-Pb 年龄值 (曲军峰等, 2007)。因此 177 ~ 231Ma 可能对应于石榴斜长角闪片麻岩和孔兹岩的 M3 阶段 (680 ~ 740°C / 4.7 ~ 5.7kb), 可能与南昆仑地体和甜水海-喀喇昆仑地体碰撞后的地壳抬升过程中的剪切作用有关。

综上所述, 在加里东期和塔什库尔干变质岩和布伦阔勒群的主体部分碰撞拼接或者原特提斯洋闭合的远程效应, 引发塔什库尔干布伦阔勒群的变质作用。在晚二叠纪至三叠纪古特提斯洋闭合, 塔什库尔干布伦阔勒群发生碰撞作用。从而引发进变质作用和峰期高压变质作用, 而后构造抬升产生近等温降压过程。在晚三叠纪, 碰撞带继续抬升并发生剪切作用, 塔什库尔干布伦阔勒群再次发生角闪岩相退变质作用。

此外, 西昆仑的孔兹岩可以和阿尔金西段的孔兹岩进行很好的对比。首先, 两处具有完全一样的岩石组合类型, 和几乎完全一致的微量元素与稀土元素特征。其次阿尔金的基性麻粒岩峰期变质作用条件为 700 ~ 850°C / 8 ~ 12kb (张建新等, 1999), 这与马尔洋的孔兹岩峰期变质作用基本一致。另外, 阿尔金孔兹岩中具有一组 447 ~ 450Ma 的变质年龄值, 这也与西昆仑孔兹岩具有很好的一致性。许志琴等 (2004) 也曾从地球化学、年代学和卫星影像的角度论证甜水海-喀喇昆仑地体和阿尔金地体曾经为同一地体。

8 结论

本文对西昆仑塔什库尔干马尔洋附近布伦阔勒群变质岩进行了详细的地球化学分析, 分析表明孔兹岩的原岩为形

成于岛弧环境的页岩和硬砂岩;石榴斜长角闪片麻岩的原岩为岛弧拉斑玄武岩,并具有 E-MORB 和 N-MORB 的特征。通过和阿尔金的孔兹岩对比,再次为甜水海-喀喇崑仑地体和阿尔金地体曾经为同一地体这一观点提供支持。

矿物组合分析和变质温压计算表明石榴斜长角闪片麻岩和孔兹岩存在三个变质阶段,两类岩石的三个变质阶段分别对应。石榴斜长角闪片麻岩的 M1 变质温压条件为 850 ~ 870°C /12.9 ~ 13.3 kb, M2 为 730 ~ 770°C /7.3 ~ 7.8 kb, M3 为 680 ~ 740°C /4.7 ~ 5.7 kb。孔兹岩的 M1 变质温压条件为 850 ~ 870°C /12.9 ~ 13.3 kb, M2 为 800 ~ 830°C /7.9 ~ 9.2 kb, M3 为 670 ~ 700°C /5.1 ~ 5.6 kb。结合已有年龄资料,三个阶段变质作用可能发生于海西期(230 ~ 280 Ma)和印支期(177 ~ 231 Ma)。

西昆仑布伦阔勒群变质岩的 *P-T* 轨迹表现为峰期高压变质作用后发生近等温降压过程,形成了顺时针的变质 *P-T* 演化轨迹,反映了西昆仑与碰撞相关的大地构造背景,这可能与海西期古特提斯洋的闭合有关,之后叠加了印支期构造抬升过程中的剪切作用。

致谢 本文矿物化学成分的电子探针分析是在中科院广州地化所同位素地球化学国家重点实验室陈林丽工程师的指导下完成;吴春明教授、任留东研究员和一位匿名审稿人提出了建设性修改意见;李孟江、刘建平、唐功建、姜子琦等也给予了很多帮助;在此一并致以谢意。

References

Bhadra S and Bhattacharya A. 2007. The barometer tremolite + tschermakite + 2 albite = 2 pargasite + 8 quartz: Constraints from experimental data at unit silica activity, with application to garnet-free natural assemblages. *American Mineralogist*, 92(4): 491–502

Cui JT, Wang JC, Bian XW and Zhu HP. 2006. Geological characteristics of Early Paleozoic quartz diorite in the vicinity of Kangxiwar, West Kunlun, China and its zircon SHRIMP U–Pb dating. *Geological Bulletin of China*, 25(12): 1–11 (in Chinese with English abstract)

England PC and Thompson AB. 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism I. Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust. *Journal of Petrology*, 25(4): 894–928

Graham CM and Powell R. 1984. A garnet hornblende geothermometer-calibration, testing, and application to the Pelona Schist, Southern California. *Journal of Metamorphic Geology*, 2(1): 13–31

Guo KY, Zhang CL, Wang AG and Dong YG. 2003. Discovery of pyrgamite in western Kunlun. *Volcanology & Mineral Resources*, 24(2): 79–81 (in Chinese with English abstract)

Harley SL. 1989. The origins of granulites: A metamorphic perspective. *Geological Magazine*, 126(3): 215–247

Herron MM. 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58(5): 820–829

Holdaway MJ. 1971. Stability of andalusite and the aluminum silicate phase diagram. *American Journal of Science*, 271(2): 97–131

Holland T and Blundy J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116(4): 433–447

Ji WH, Zhou H, Li RS, Chen SJ and Zhao ZM. 2007. The deformation age of Palaeozoic-Mesozoic tectonic along North Xin-Zang Road in West Kunlun. *Earth Science*, 32(5): 671–680 (in Chinese with English abstract)

Ji WH, Li RS, Chen CJ, He SP, Zhao ZM, Bian XW, Zhu HP, Cui JG and Ren JG. 2011. The discovery of Palaeoproterozoic volcanic rocks in the Bulunkuoler Group from the Tianshuihai Massif in Xinjiang of Northwest China and its geological significance. *Science China (Earth Sciences)*, 54(1): 61–72

Jiang CF, Yang JS and Feng BG. 1992. *The Tectonic Evolution of Kunlun*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

Kohn MJ and Spear FS. 1990. Two new geobarometers for garnet amphibolites, with applications to southeastern Vermont. *American Mineralogist*, 75(1–2): 89–96

Leake BE, Woolley AR, Birch WD, Burke EAJ, Ferraris G, Grice JD, Hawthorne FC, Kisch HJ, Krivovichev VG and Schumacher JC. 2004. Nomenclature of amphiboles: Additions and revisions to the International Mineralogical Associations Amphibole Nomenclature. *American Mineralogist*, 89(5–6): 295–321

Le Maitre RW. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. Oxford: Blackwell Scientific Publications

Li JY and Xiao XC. 1999. Brief reviews on some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang crust, NW China. *Chinese Journal of Geology*, 34(4): 409–415 (in Chinese with English abstract)

Li XH, Li ZX, Zhou HW, Liu Y and Kinny Peter D. 2002. U–Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia. *Precambrian Research*, 113(1–2): 135–154

Liu X, Yao JX and Wang Y. 1997. Further study of belonging of the Tarim plate. *Geological Review*, 43(1): 1–9 (in Chinese with English abstract)

Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP–MS. *Geochimica*, 31(6): 552–558 (in Chinese with English abstract)

Mattern F, Schneider W, Li Y and Li X. 1996. A traverse through the western Kunlun (Xinjiang, China): Tentative geodynamic implications for the Paleozoic and Mesozoic. *Geologische Rundschau*, 85(4): 705–722

Mattern F and Schneider W. 2000. Suturing of the Proto- and Paleozoic Tethys oceans in the western Kunlun (Xinjiang, China). *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6): 637–650

Pan YS. 1989. A preliminary study on the regionalization of the structures in the Kunlun mountains region. *Journal of Natural Resources*, 4(3): 196–203 (in Chinese with English abstract)

Pan YS. 1990. Tectonic features and evolution of the western Kunlun mountain region. *Chinese Journal of Geology*, 4(3): 224–232 (in Chinese with English abstract)

Pang YS. 1996. *Geology Evolution of Karakorum–Kunlun Mountains*. Beijing: Seismic Press, 211–233 (in Chinese)

Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290–300

Qu JF, Zhang LF, Ai YL, Lü Z, Wang JP, Zhou H and Wang S. 2007. Discovery and *P-T* path of high-pressure granulite in Taxkorgan, western Kunlun and its tectonic significance. *Science in China (Series D)*, 37(4): 429–441 (in Chinese)

Ren LD and Chen WM. 2003. The metamorphic process in the formation of garnet amphibolite along the China–Pakistan Highway profile, West Kunlun Orogen. *Earth Sciences*, 24(3): 219–224 (in Chinese)

Robertson AHF. 1994. Role of the tectonic facies concept in orogenic analysis and its application to Tethys in the Eastern Mediterranean region. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4): 139–213

Roser BP and Korsch RJ. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *Journal of Geology*, 94(5): 635–650

Simonen A. 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic,

- Early Archaean supracrustal rocks in Southwestern Finland. Bull. Comm. Geol. Finlande, 64
- Sun HT, Li CJ, Wu H, Wang HJ, Qi SJ, Chen GM, Liu ZT and Gao P. 2003. Overview of Metallogenesis on West Kunlun Mountain. Beijing: Geological Publishing House, 36–46 (in Chinese)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Thompson AB and England PC. 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism II. Their inference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks. Journal of Petrology, 25(4): 929–955
- Tibetan Plateau Combined Sciences Expedition, Chinese Academy of Sciences. 2000. Geology Evolution of Karakorum-Kunlun District. Beijing: Science Press, 324–349 (in Chinese)
- Wang JP. 2008. Geological features and tectonic significance of melange zone in the Taxkorgan area, West Kunlun. Geological Bulletin of China, 27(12): 2057–2066 (in Chinese)
- Wu CM, Zhang J and Ren LD. 2004. Empirical garnet-biotite-plagioclase-quartz (GBPQ) geobarometry in medium- to high-grade metapelites. Journal of Petrology, 45(9): 1907–1921
- Xiao LL, Wu CM, Zhao GC, Guo JH and Ren LD. 2011. Metamorphic $P-T$ paths of the Zhanhuang amphibolites and metapelites: Constraints on the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Trans-North China Orogen. International Journal of Earth Sciences, 100(4): 717–739
- Xiao WJ, Hou QL, Li JL, Windley BF, Hao J, Fang AM, Zhou H, Wang ZH, Chen HL, Zhang GC and Yuan C. 2000. Tectonic facies analysis and the process of multi-island accretion of Western Kunlun. Science in China (Series D), 20(Z1): 22–28 (in Chinese)
- Xu RH, Zhang YQ, Xie YW, Chen FK, Zhang QD and Zhao DM. 1994. A discovery of an Early Paleozoic tectonomagmatic belt in the northern part of West Kunlun Mountains. Chinese Journal of Geology, 29(4): 313–327 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Qi XX, Liu FL, Yang JS, Wu FL, Zeng LH and Liang FH. 2004. The Kangxiwar Caledonian khondalite series in West Kunlun, China, and its geological significance. Acta Geologica Sinica, 78(6): 733–743 (in Chinese with English abstract)
- Yang KG, Liu Q, Zhang CL, Dong YG, Wang AG and Guo KY. 2003. New discovery of granulite at Kangxiwa fault, western Kunlun. Geological Science and Technology Information, 22(1): 100–104 (in Chinese)
- Zhang CL, Lu SN, Y HF and Ye HM. 2007. Tectonic evolution on Western Kunlun Orogen, northern margin of the Tibetan Plateau. Science in China (Series D), 37(2): 145–154 (in Chinese)
- Zhang JX, Zhang ZM, Xu ZQ, Cui WJ and Yang JS. 1999. Discovery, petrology and geochronology study of khondalite in the west segment of Aierhchin Mountains. Science in China (Series D), 29(4): 298–305 (in Chinese)
- Zhou H, Chu ZY, Li JL, Hou QL, Wang ZH and Fang AM. 2000. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of ductile shear zone in Kuda, western Kunlun, Xinjiang. Chinese Journal of Geology, 35(2): 233–239 (in Chinese with English abstract)
- 段古-中生代多期次构造-热事件年龄确定. 地球科学, 32(5): 671–680
- 计文化, 李荣社, 陈守建, 何世平, 赵振明, 边小卫, 朱海平, 崔继岗, 任娟刚. 2011. 甜水海地块古元古代火山岩的发现及其地质意义. 中国科学(地球科学), 41(9): 1268–1280
- 姜春发, 杨经绥, 冯炳贵. 1992. 昆仑开合构造. 北京: 地质出版社
- 李锦轶, 肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述. 地质科学, 34(4): 409–415
- 刘训, 姚建新, 王永. 1997. 再论塔里木板块的归属问题. 地质论评, 43(1): 1–9
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 31(6): 552–558
- 潘裕生. 1989. 昆仑山区构造区划初探. 自然资源学报, 4(3): 196–203
- 潘裕生. 1990. 西昆仑山构造特征与演化. 地质科学, 4(3): 224–232
- 潘裕生. 1996. 喀喇昆仑-昆仑山地质演化. 北京: 地震出版社
- 曲军峰, 张立飞, 艾永亮, 吕增, 王建平, 周辉, 王世炎. 2007. 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩 PT 轨迹-SHRIMP 锆石定年及其大地构造意义. 中国科学(D 辑), 37(4): 429–441
- 任留东, 陈炳蔚. 2003. 西昆仑造山带中巴公路段石榴角闪岩形成的变质地质过程. 地球学报, 24(3): 219–224
- 孙海田, 李纯杰, 吴海, 王宏君, 祁世军, 陈贵民, 刘振涛, 高鹏. 2003. 西昆仑金属成矿省概论. 北京: 地质出版社, 36–46
- 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 2000. 喀喇昆仑山-昆仑山地区地质演化. 北京: 科学出版社, 324–349
- 王建平. 2008. 西昆仑塔什库尔干混杂岩的地质特征及其大地构造意义. 地质通报, 27(12): 2057–2066
- 肖文交, 侯泉林, 李继亮, Windley BF, 郝杰, 方爱民, 周辉, 王志洪, 陈汉林, 张国成, 袁超. 2000. 西昆仑大地构造相解剖及其多岛增生过程. 中国科学(D 辑), 30(Z1): 22–28
- 许荣华, 张玉泉, 谢应雯, 陈福坤, 张巧大, 赵敦敏. 1994. 西昆仑山北部早古生代构造-岩浆带的发现. 地质科学, 29(4): 313–327
- 许志琴, 戚学祥, 刘福来, 杨经绥, 吴才来, 曾令森, 梁凤华. 2004. 西昆仑康西瓦加里东期孔兹岩系及地质意义. 地质学报, 78(6): 733–743
- 杨坤光, 刘强, 张传林, 董永观, 王爱国, 郭坤一. 2003. 西昆仑康西瓦断裂带新发现的麻粒岩. 地质科技情报, 22(1): 100–104
- 张传林, 陆松年, 于海峰, 叶海敏. 2007. 青藏高原北缘西昆仑造山带构造演化: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据. 中国科学(D 辑), 37(2): 145–154
- 张建新, 张泽明, 许志琴, 崔军文, 杨经绥. 1999. 阿尔金西段孔兹岩的发现及岩石学、同位素年代学初步研究. 中国科学(D 辑), 29(4): 298–305
- 周辉, 储著银, 李继亮, 侯泉林, 王志洪, 方爱民. 2000. 西昆仑库地韧性剪切带的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄. 地质科学, 35(2): 233–239

附中文参考文献

- 崔建堂, 王炬川, 边小卫, 朱海平. 2006. 西昆仑康西瓦一带早古生代石英闪长岩的地质特征及其锆石 SHRIMP U-Pb 测年. 地质通报, 25(12): 1–11
- 郭坤一, 张传林, 王爱国, 董永观. 2003. 西昆仑首次发现石榴二辉麻粒岩. 资源调查与环境, 24(2): 79–81
- 计文化, 周辉, 李荣社, 陈守建, 赵振明. 2007. 西昆仑新藏公路北