

祁连山地区东段马衔山群及其邻区岩石学研究

林宜慧¹, 蔡金郎², 张立飞¹, 杨宏仪²

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 成功大学 地球科学系, 台湾 台南 701)

摘要: 祁连造山带是中国主要造山带之一, 大致分为北祁连、中祁连、南祁连和拉鸡山4个变质区。本文研究的中祁连地块前震旦纪马衔山群及其邻近的震旦纪地层与奥陶纪地层位于距兰州市东北150 km处, 由东向西依次为寺儿沟、铁成沟、天祝三峡森林公园、北山国家公园(那新沟)和岗口子北等剖面。对上述剖面进行的矿物组合、微构造和矿物化学成分研究结果表明, 马衔山群变质作用过程为: 峰期角闪岩相变质, 矿物组合为黑云母+角闪石, 温压分别为618°C和0.65 GPa; 绿帘角闪岩相变质, 矿物组合为绿帘石+钠长石+钙质角闪石; 绿片岩相变质, 矿物组合为阳起石±脆绿泥石+方解石。马衔山群的石榴石具生长环带, 从核心到边缘, Mn含量减少, Fe含量渐增, 在压力不变的情况下此种成分变化指示温度的上升, 核心和边缘的温度分别为418°C和545°C。钙质角闪石不具化学环带。Ar-Ar法定年结果显示, 角闪岩中角闪石与花岗岩中黑云母的坪年龄分别为 340.0 ± 0.50 Ma和 323.4 ± 0.65 Ma, 反映了前震旦纪马衔山群在石炭纪受区域变质活动发生再活化作用的下限年龄。震旦纪地层的岩石类型主要为绿片岩, 矿物组合为绿泥石+钠长石+赤铁矿+方解石+石英, 局部受韧性剪切带影响而产生糜棱岩化作用。奥陶纪地层主要岩石类型为大理岩, 碳酸盐类矿物主要为方解石和白云石, 其中除有磷灰石夹层外, 还有高镁的金云母。

关键词: 祁连造山带; 马衔山群; 温压途径; Ar-Ar法定年; 坪年龄

中图分类号: P588.3; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)-0264-13

A petrological study of the Maxianshan Group and its adjacent areas in East Qilian fold belt, Northwest China

LIN Yi-hui¹, TSAI Ching-lang², ZHANG Li-fei¹ and YANG Hong-yi²

(1. MOE Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University, Tainan 701, China)

Abstract: The Qilian fold belt is one of the major orogenic belts in China. Traditionally, it is divided into north Qilian fold belt, central Qilian uplift, south Qilian fold belt and Lajishan area. The study area is located at 150 km northeast of Lanzhou City, and its major part belongs to the Maxianshan Group and the adjacent Sinian and Ordovician strata (including Siergou, Tiechenggou, Tianzhusanxia Forest Park, Naxingou and Gangkouzibei). According to the mineral assemblages, micro-tectonics and mineral chemistry, the Pre-Sinian metamorphic rocks, i. e., the Maxianshan Group, have experienced a complex history of three stages of metamorphism. Stage I (amphibolite facies) is the peak metamorphism, whose mineral assemblage is biotite + calcium amphibole, with the conditions being 618°C and 0.65 GPa. Stage II is epidote amphibolite facies with the mineral assemblage epidote + albite + calcium amphibole. Stage III is greenschist facies with the mineral assemblage actinolite ± corundophilite + calcite. The compositions of calcium amphiboles are homogeneous. The core and rim temperatures of garnets are 418°C and 545°C, respectively. The Sinian metamorphic rocks are greenschist facies with the mineral assemblage chlorite +

收稿日期: 2007-09-27; 修订日期: 2009-02-18

基金项目: “国科会”研究项目资助(NSC912116M006012)

作者简介: 林宜慧(1979-), 女, 在读博士研究生, 岩石学专业; 通讯作者: 蔡金郎, E-mail: tsaicl@mail.ncku.edu.tw。

albite + hematite + calcite + quartz. The Ordovician metamorphic rocks are marbles, which contain apatite layers and phlogopite. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating of hornblende and biotite separated from amphibolite and granite yields plateau ages of $340 \pm 0.5\text{Ma}$ and $323.4 \pm 0.65\text{Ma}$, respectively, which may represent the re-active ages of the Maxianshan Group.

Key words: Qilian Orogen; Maxianshan Group; $p-t$ paths; $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating; plateau age

研究区位于兰州市近郊马衔山西北约 157.5 km 处,甘肃省地质局(1969)^①将其定为前震旦纪马衔山群,呈北西南东向分布,海拔平均在 3 000 m 以上。本次研究对象主要为前震旦纪马衔山群及其邻近的震旦纪地层及奥陶纪地层。这些地层大都经过多期变质和变形作用形成了结晶片岩,并发生过不同程度的混合岩化作用。付学明等(1983)提出吕梁运动结束了马衔山群的沉积,并使其受到挤压作用而褶皱,同时由于区域性的热动力变质作用而形成本区的变质岩,吕梁运动后期随着变质作用的增强,形成区域性的混和岩化作用。根据新的研究成果,原马衔山群中存在许多花岗质岩石,它们不属于马衔山群(Wan *et al.*, 2000)。本文着重对马衔山群及其邻近地区地层的岩石学、变质变形作用和变质温压环境进行了研究,结合氩氩定年的结果,以探讨本区的变质作用演化历史。

1 地质概况

祁连山脉为中朝古陆西南边缘加里东期的增生褶皱带,即中朝古陆与柴达木古陆间的缝合带。祁连山由北祁连、中祁连、南祁连和拉鸡山 4 个变质区呈西北、西东、南东相间分布所组成(图 1)。中祁连变质带的特点为具有递增变质带和多相变质、混合岩化与混合花岗岩等发育(王云山等,1987)。位于中祁连隆起带东南的马衔山群,以前寒武纪变质岩为主。马衔山群及祁连造山带的形成年代研究,早期根据岩石组合的区域对比、上覆地层年代和同位素测年,认为其形成于古元古代,时限为 2.0 ~ 2.2 Ga(肖林等,1997)。近年研究通过变质火成岩的锆石 U-Pb 年龄分析和区域地质背景,认为其形成于新元古代,时限为 0.8 ~ 1.0 Ga(郭进京等,1999,2000; Smith *et al.*, 2000; Wan *et al.*, 2001, 2006)。马衔山群原岩为中基性和中酸性的火成岩、泥质岩和粉砂岩,受区域热动力变质作用影响,原先的沉积物发

生了变质作用,又经历了再结晶、变质结晶、变质分异和交代作用,并受到各种变形、破裂作用的影响,形成了现在的区域变质岩。

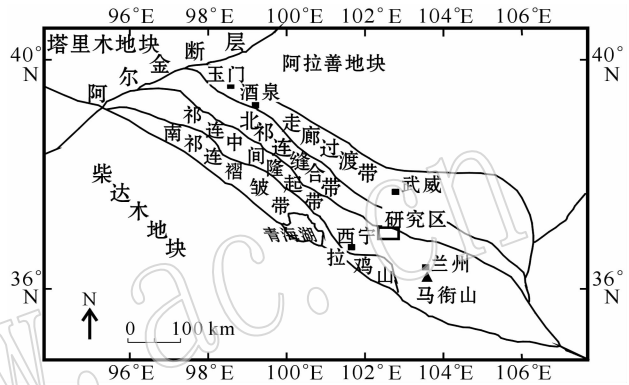


图 1 祁连褶皱造山带构造简图

Fig. 1 Simplified geological map of the Qilian orogenic belt

2 岩石矿物学特征

本次研究的野外采样路线依次为寺儿沟、铁成沟、天祝三峡森林公园、北山国家公园(那新沟)和岗口子北,其中除了寺儿沟出露震旦纪地层及少数奥陶纪地层外,其他剖面都属于前震旦纪地层(图 2)。经综合观察,将各剖面的岩石矿物生长变形条件列于表 1 中。

2.1 寺儿沟剖面

寺儿沟主要为震旦纪地层,图 3a 为其路线地质图,出露的岩石有绿泥石片岩、绿帘角闪岩、千枚岩、白云母石英片岩。

2.1.1 绿泥石片岩

主要矿物有斜长石、绿泥石、石英、不透明矿物、方解石、白云母和少量楣石。矿物结晶先后顺序以下角标表示,如云母₁、云母₂。镜下观察发现,基质由不透明矿物、绿泥石、少量白云母₂及方解石₂等多种矿物组成,且顺向排列形成叶理。组成变斑晶的石英₂、斜长石₁的排列方向不受基质的顺向排列影

① 甘肃省地质局第一区域测量队. 1969. 1:20 万永登幅区域地质矿产报告.

表1 矿物生长变形条件

Table 1 Main mineral assemblages of the samples

剖面	岩石	生长顺序	矿物组合	温度/℃	压力/GPa	附注
寺儿沟	绿泥石片岩	I	白云母 ₁ + 石英 ₁ + 方解石 ₁			绿片岩相
		II	斜长石 ₁ + 绿泥石 + 白云母 ₂ + 不透光矿物 ₁ + 方解石 ₂			
		III	应力作用 石英 ₂ + 斜长石 ₂ + 不透光矿物 ₂			
	绿帘角闪岩	I	阳起石 + 斜长石 + 绿帘石 ± 金红石			绿片岩相
		II	榍石 + 绿泥石			
	千枚岩	白云母石英片岩	I	白云母 + 磁铁矿 + 石英 ₁ + 长石 ₁		
II			应力作用 赤铁矿 + 黄铁矿 + 石英 ₂ + 长石 ₂			
铁成沟	双云母片岩	I	白云母 ₁ + 黑云母 ₁ + 石英 ₁ + 应力作用(糜棱岩化)			云母片岩
		II	白云母 ₂ + 黑云母 ₂ + 绿帘石 ± 绿泥石			花岗岩侵入
		III	石英 ₂ + 长石			
	大理岩	I	透闪石 ± 金云母			绿帘角闪岩相
		II	应力作用 方解石 + 白云石 + 磷灰石 + 滑石			
	天祝三峡森林公园	石英岩	I	石英 + 奥长石 + 钠长石 + 钾长石 + 绿帘石 ± 磷灰石		
II			阳起石 + 绿帘石 ₂ + 黑云母 + 白云母 ± 榍石			
III			绿泥石			
眼球片麻岩		I	钾长石 ₁ + 奥长石 ₁ + 石英 ₁ + 磷灰石 + 钛铁矿 + 锆石	> 500		
		II	应力作用 + 黑云母 ₁ + 白云母 ₁ + 钾长石 ₂ + 奥长石 ₂ + 石英 ₂			
		III	黑云母 ₂ + 白云母 ₂ + 绿泥石			
角闪岩	I	角闪石 + 斜长石 + 黝帘石 ± 石英 + 黑云母	618 676	0.65 -	(C03-1) (C17-1)	
	II	应力作用 绿泥石 + 方解石	-	-		
北山国家公园	云母石英片岩	I	石英 + 中钠长石 ± 磷灰石			糜棱岩化
		II	黑云母 + 白云母			
		III	应力作用 绢云母			
	黑云角闪石片岩	I	黑云母 + 角闪石	640	0.43 ~ 0.75	(D04-2)
		II	斜长石 + 钾长石	-	-	
	绿帘角闪石片岩	I	石英 + 钾长石 + 榍石 + 磷灰石			
II		绿帘石				
III		阳起石 ± 脆绿泥石				
石榴黑云角闪岩	I	铁铝榴石 + 黑云母 + 角闪石	418(核) 545(边)	0.57 ~ 0.75	(D28-2) (D28-2)	
	II	斜长石 + 钾长石 + 绿泥石 + 金红石	-	-		
变质玄武岩	I	透辉石 + 钠长石	-	-	(D16)玄武岩	
	II	绿帘石 + 钠长石 + 铁镁钙闪石质普通角闪石	-	0.68	(D16)绿帘角闪岩相	
岗口子北	石英岩	I	石英 + 斜长石 ₁ + 榍石			
		II	角闪石 + 黑云母 + 斜长石 ₂			
	花岗岩	I	黑云母 ₁ + 绿帘石			
		II	石英 + 斜长石 ± 榍石			
III	黑云母 ₂ + 角闪石 ± 绿泥石 ± 绢云母					

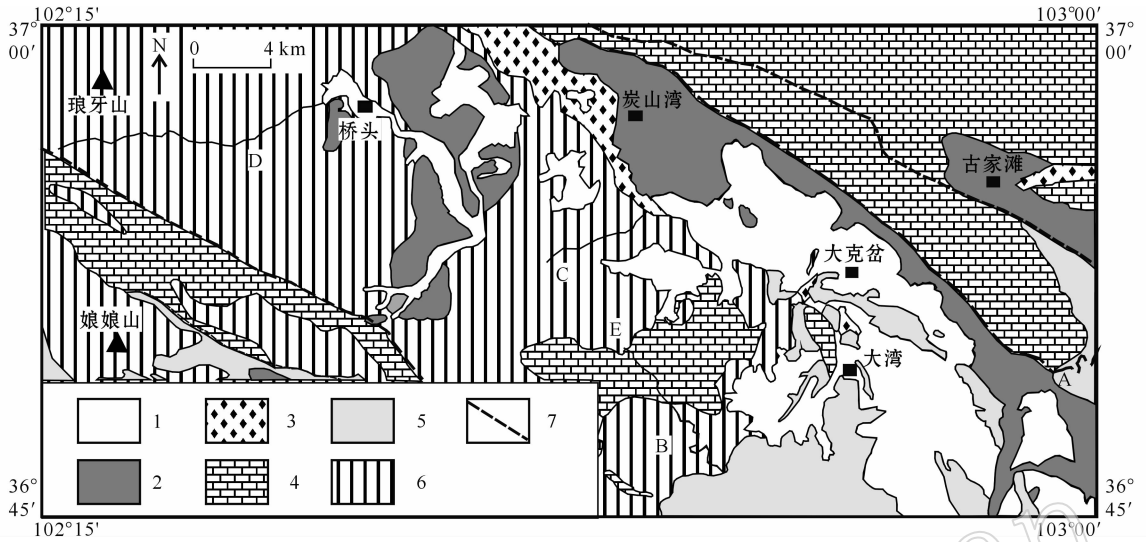


图2 祁连山地区东段马衔山群及其邻近地区地质构造略图
(据甘肃省地震局第一区域测量队, 1969^① 1972^②)

Fig. 2 Sketch map of the Maxianshan Group and its adjacent areas in eastern Qilian fold belt
(modified after No. 1 Regional Geological Surveying Party of Gansu Province, 1969^①, 1972^②)

A—寺儿沟; B—铁成沟; C—天祝三峡森林公园; D—北山国家森林公园(那新沟); E—岗口子北; 1—第四系;
2—白垩纪河口群; 3—侏罗系; 4—奥陶系; 5—震旦系; 6—马衔山群; 7—断层
A—Siergou; B—Tiechenggou; C—Tianzhusanxia Forest Park; D—Naxingou; E—Gangkouzibei; 1—Quaternary;
2—Cretaceous Hekou Group; 3—Jurassic; 4—Ordovician; 5—Sinian; 6—Maxianshan Group; 7—fault

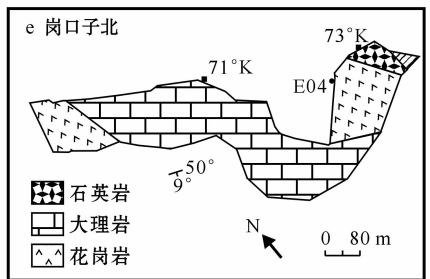
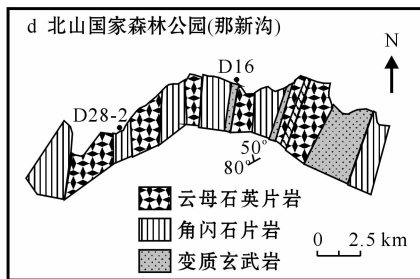
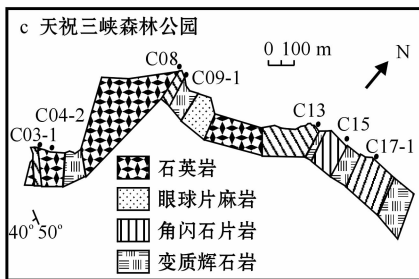
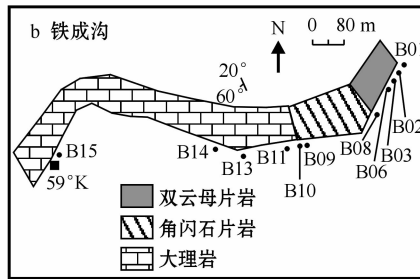
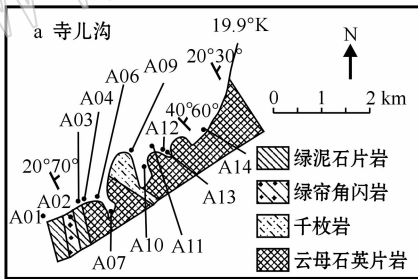


图3 研究区路线地质图

Fig. 3 Structural profile and sampling number in sections

① 甘肃省地质局第一区域测量队. 1969. 1:20 万永登幅区域地质矿产报告.
② 甘肃省地质局第一区域测量队. 1972. 1:20 万天祝幅区域地质测量报告.

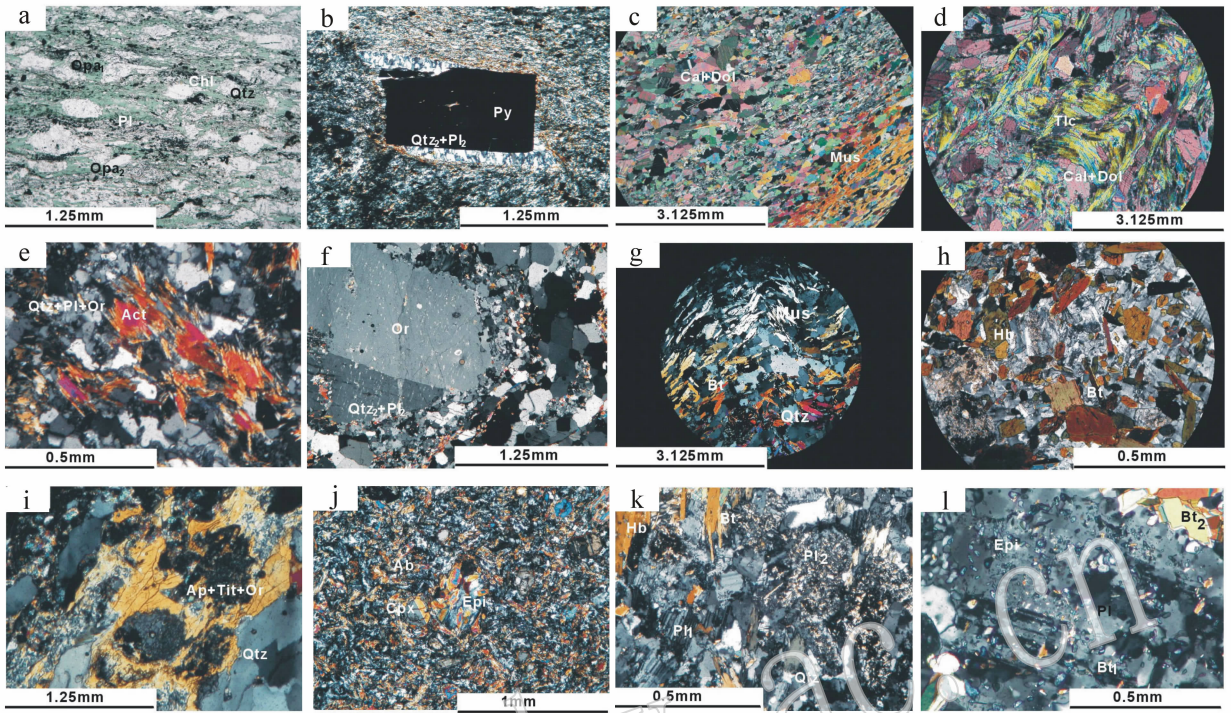


图4 研究剖面中样品显微照片

Fig. 4 Photomicrographs of samples, all are cross-polarized light except a

a—斜长绿泥石片岩,碎斑生长晚于基质(寺儿沟,A01-1,单偏光);b—千枚岩,黄铁矿颗粒边缘的应变前缘受到“面”的控制因素所影响的长英质矿物生长(寺儿沟,A09,正交偏光);c—大理岩,小颗粒的方解石及白云石周围有云母生长(铁成沟,B10,正交偏光);d—大理岩,滑石因应力作用而折曲(铁成沟,B11,正交偏光);e—石英岩,纤维状阳起石的生长不受石英和长石影响(天祝三峡森林公园,C08,正交偏光);f—眼球状片麻岩,石英和长石变斑具有“核幔构造”(天祝三峡森林公园,C06-1,正交偏光);g—云母石英片岩,褶皱翼处云母多(那新沟,D28-3,正交偏光);h—黑云角闪片岩岩,自形晶的黑云母常与角闪石伴生被包裹于钾长石中(那新沟,D04-2,正交偏光);i—绿帘角闪石片岩,磷灰石、榍石、石英和钾长石被包裹于阳起石中(那新沟,D10-1,正交偏光);j—变质玄武岩,透辉石与钠长石占薄片70%(那新沟,D16,正交偏光);k—石英岩,第一期生成的矿物为石英和现已受蚀变的斜长石₁,之后生长自形晶黑云母和斜长石₂(岗口子北,E01,正交偏光);l—花岗岩,长石颗粒中包裹绿帘石及黑云母(岗口子北,E04,正交偏光)

a—plagioclase-chlorite schist with assemblage Pl + Qtz + Chl + Opa, the growth of colorless quartz and plagioclase porphyroblasts is later than the matrix (Siergou, A01-1); b—phyllite with face-controlled deforming strain fringe (Siergou, A09); c—marble with assemblage Cal + Dol + Mus (Tiechenggou, B10); d—strongly foliated talc of sample (Tiechenggou, B11); e—fibrous actinolite (Tianzhushanxia Forest Park, C08); f—augen gneiss with “core and mantle structure” (Tianzhushanxia Forest Park, C06-1); g—texture of muscovite-biotite-quartz schist (Naxingou, D28-3); h—photomicrograph showing euhedral biotite often associated with amphibole (Naxingou, D04-2); i—Ap + Tit + Qtz + Or inclusions in Act (Naxingou, D10-1); j—meta-basalt dominantly composed of diopside and albite (Naxingou, D16); k—quartzite with assemblage of Bt + Pl₁ + Pl₂ + Qtz, of which Pl₁ is altered (Gangkouzei, E01); l—Epi + Bt inclusions in Pl (Gangkouzei, E04)

响,在其颗粒边缘并没有形成压力影或应变帽(strain cap),这表示变斑晶的生长时间晚于基质(图4a)。变斑晶颗粒边缘不具明显棱角,基质顺排呈叶理,基质占总组成的50%~90%,由此可以推论此绿泥石片岩在后期受塑性剪切带作用而形成糜棱岩。斜长石₁和斜长石₂的矿物化学成分相似,均具有相当高的钠长石端员成分含量($Ab = 97.6\% \sim 99\%$,摩尔分数)。绿泥石为铁绿泥石。

2.1.2 绿帘角闪岩

主要矿物有角闪石、榍石、绿帘石、铁绿泥石、金

红石和斜长石。角闪石、绿帘石和斜长石3种矿物总含量大于70%,多为自形半自形晶,矿物颗粒排列不具方向性且相伴出现。由矿物化学分析得知角闪石成分为阳起石,斜长石的钠长石端员成分含量为95.6%~98.2%(摩尔分数),帘石端员成分含量 $P_s [P_s = Fe^{3+} / (Al + Fe^{3+})]$ 为0.19。薄片可见含有金红石包裹体的榍石随机分布,部分阳起石退变为铁绿泥石。

2.1.3 千枚岩

主要矿物有长石、石英、赤铁矿、黄铁矿和磁铁

矿。黄铁矿呈自形晶半自形晶,在其颗粒边缘的应变前缘(strain fringe,应变影的一种,压力影系由块状或相等大小的矿物结晶组成,若为纤维状则称之为应变前缘)有长英质矿物生长,垂直于黄铁矿(图4b),显示在其生长过程中受到“面”的控制因素影响(face-controlled deforming,常发生于低度变质岩中),并且应变前缘与黄铁矿之间是个平滑的面,应变前缘张开速率远大于应变前缘长英质的生长速率(Urai *et al.*, 1991)。镜下观察发现,细颗粒的磁铁矿、白云母、长石₁和石英₁所组成的早期矿物群皆具方向性排列。大颗粒(>0.3 mm)黄铁矿中包裹着在其应变前缘生长的长石₂和石英₂。依据 Passchier 和 Trouw(1996)对晶体和构造作用的时序关系分类法,可判定本区千枚岩中的黄铁矿、长石₂和石英₂为同构造期生长产物或在两次构造期之间生长。最后生成的赤铁矿在薄片上呈随机分布。

2.1.4 白云母石英片岩

白云母石英片岩依据 Powell(1979)提出的叶理型态分类法,为不具微劈石(microlithon)的连续叶理。石英₁、斜长石和白云母的长轴方向多沿单一方向顺排,赤铁矿和黄铁矿在薄片则略呈顺排且均匀散布,判断其在应力作用之后沿叶理生长,与大颗粒(>0.375 mm)不具方向性排列的石英₂为同期矿物。

2.2 铁成沟剖面

铁成沟位于马衔山群的南部,剖面穿过奥陶纪地层直到岩体中部(图2中B)。图3b为其路线地质图,出露的岩石类型有双云母片岩、角闪石片岩和大理岩。

2.2.1 双云母片岩

主要矿物有钾长石、石英、斜长石、黑云母、白云母、绿泥石、方解石和少量不透明矿物。基质由动力再结晶的石英₁、黑云母、绿帘石和白云母等矿物组成,这些矿物呈细颗粒且顺向排列而形成叶理。基质中的黑云母和白云母具有两期不同的生长方向,黑云母₁和白云母₁的矿物颗粒平行叶理的方向排列,因此推断黑云母₁和白云母₁的生长与构造期同时。少部分黑云母退变为绿泥石。具高突起的绿帘石大多出现在黑云母₁附近,与黑云母₂和白云母₂的排列较无方向性,推断黑云母₂、绿帘石和白云母₂的生长是在构造期之后。由大颗粒石英₂及长石所组成的碎斑不具方向性排列,部分碎斑中包裹组成叶理的云母,这表示其生长不受构造期影响。

2.2.2 角闪石片岩

岩石露头新鲜,基本没有风化,其特征是出现大

量自形程度很好的角闪石,镜下略呈带状分布,角闪石不具化学环带。

2.2.3 大理岩

主要矿物有方解石、白云石、透闪石、滑石、金云母和磷灰石。具顺向排列的方解石及白云石2种矿物总含量大于50%,其矿物长轴多沿单一方向顺排。透闪石受应力作用的挤压而呈碎斑结构,在颗粒边缘形成裂纹,方解石及白云石颗粒常沿裂纹生长。小颗粒(<0.125 mm)方解石及白云石周围有顺排的云母生长,而在大颗粒(0.175~0.25 mm)方解石及白云石周围则无。这表示在应力作用发生之后,方解石及白云石沿早期生成云母的优选方向生长(图4c),生长过程中必须藉由颗粒边界面积减小来降低晶体中的自由能(Spear, 1993),因此方解石及白云石的颗粒大小与其生长空间成正比。滑石则因应力作用影响而折曲,常与方解石及白云石共生(图4d)。磷灰石常集中成层并重复出现在方解石及白云石的夹层中。金云母的 $Mg^* = 0.98 [Mg^* = Mg / (Mg + Fe^{2+})]$ 。

2.3 天祝三峡森林公园剖面

天祝三峡森林公园的采样路线位于马衔山群的中部(图2C、3d),出露的岩石类型有石英岩、眼球片麻岩、角闪石片岩和变质辉石岩。

2.3.1 石英岩

主要矿物有石英、斜长石、黑云母、阳起石、钾长石、绿帘石和榍石、白云母及少量绿泥石和磷灰石。斜长石以钠长石到奥长石为主,自形晶-半自形晶,具条纹双晶和聚片双晶,沿其双晶有呈自形晶的黑云母和白云母生长,甚至长满整个长石颗粒。本区出现的绿帘石依产状可以分为两期,具有相似的绿帘石 P_s 值0.1~0.2。早期小颗粒绿帘石₁呈半自形粒状,常与长石伴生;后期大颗粒绿帘石₂则具有石英和长石的包裹体。榍石和纤维状阳起石(图4e)的生长不受石英、斜长石和钾长石($Or = 94.1\%$,摩尔分数)的影响,这种产状表示其生长过程中经历了快速的结晶生长作用。椭圆形磷灰石颗粒周围具有裂纹,在其周围后期生长的黑云母则不具此现象。部分阳起石退变为绿泥石。

2.3.2 眼球片麻岩

主要矿物有石英、斜长石、钾长石、黑云母、白云母、锆石和磷灰石。黑云母₁和白云母₁为构成叶理的主要矿物,其生长与构造期同时;黑云母₂和白云母₂的排列较无方向性,这表示其生长在构造期之后。在黑云母中有椭圆形的锆石、磷灰石和钛铁矿

包裹体。少部分黑云母蚀变为绿泥石。斜长石成分为奥长石;碱性长石具非常高的钾长石端员含量($Or = 95.5\%$, 摩尔分数)。组成眼球构造(直径 > 2 mm)的石英和长石碎斑具有核幔构造(图 4f),受动力再结晶作用影响,石英和长石碎斑颗粒边缘被与其成分相同的细粒集合体包围。这表示石英₁和长石₁碎斑至少经过一次构造期的变形作用,细粒集合体的石英₂和长石₂在此构造期同时生成。镜下观察发现,除了核幔构造外长石碎斑亦具有蠕虫状构造及变形双晶,显示岩石受到温度 $> 500^\circ\text{C}$ 的中高级变形(Spear, 1993)。

2.3.3 角闪石片岩

主要矿物有角闪石、黑云母、斜长石、绿泥石、黝帘石和方解石。大颗粒角闪石常和斜长石、黝帘石($P_s = 0$)和黑云母伴生。角闪石不具化学环带,核心到边缘的成分差异不大。脆绿泥石、密绿泥石和铁斜绿泥石为角闪石退变而成。末期有细粒方解石充填在所有前期矿物之间。斜长石以钠长石到倍长石为主。

2.3.4 变质辉石岩

主要矿物有斜辉石、阳起石、绿帘石、石英、绿泥石、榍石和方解石。火成来源的斜辉石($0.04 \sim 2$ mm)颗粒破碎,生长于其中的阳起石常与绿帘石伴生。斜辉石不具环带变化。由石英颗粒中有斜辉石包裹体推论石英的生长时间早于斜辉石;阳起石中有石英包裹体,部分阳起石发生绿泥石化作用,细颗粒方解石充填在所有前期矿物间。

2.4 北山国家公园(那新沟)剖面

北山国家公园的采样路线位于马街山群的北部(图 2 中 D),图 3d 为其路线地质图,出露的岩石类型有云母石英片岩、角闪石片岩、变质玄武岩。

2.4.1 云母石英片岩

主要组成矿物有石英、中钠长石($An = 31\%$, 摩尔分数)、白云母和黑云母。石英及长石被拉长而具波状消光,石英、长石颗粒直径可达 0.1 cm 以上。长石在后期先发生绢云母化再发生糜棱岩化作用,这些绢云母不具方向性排列。黑云母和白云母是构成叶理的主要部分,受应力作用使其颗粒具有波状消光及褶皱弯曲(图 4g)。由于石英比云母类更容易被溶移且褶皱翼处的正应力大于褶皱轴部的正应力,因此褶皱翼处云母的量较石英多(Gray and Durney, 1979)。

2.4.2 角闪石片岩

本区有 3 种角闪石片岩:①黑云角闪石片岩,主要组成矿物是角闪石、黑云母、斜长石和钾长石。自形晶

的黑云母(铁率 $Fe^* = 0.47$)常与角闪石伴生,并被后期生长的斜长石和钾长石($Or = 93.4\%$, 摩尔分数)颗粒包裹(图 4h)。斜长石以奥长石到拉长石为主。角闪石为不具化学环带的钙质角闪石。②绿帘角闪石片岩,主要组成矿物是石英、钾长石、绿帘石、阳起石、榍石、磷灰石和脆绿泥石。磷灰石、榍石和被绿帘石($P_s = 0.1$)取代的石英和钾长石($Or = 100\%$, 摩尔分数)颗粒被包裹于阳起石中(图 4i)。绿帘石退变为脆绿泥石。③石榴石黑云角闪岩,主要组成矿物是黑云母、钠长石、钾长石、角闪石和石榴石。

斜长石与钾长石($Or = 93.6\%$, 摩尔分数)生长于石榴石、角闪石和黑云母颗粒的缝隙中。斜长石以奥长石和钠长石为主。黑云母(铁率 $Fe^* = 0.58$)中有后期析离出来的针状金红石,部分黑云母退变为绿泥石。石榴石没有变形,成分以铁铝榴石为主,呈自形到半自形,石榴石核心成分为 $Alm_{33}Sps_8Grs_{35}Prp_4$, $X_{Mg} = 0.10[X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe)]$,从核心到边缘锰含量减少而铁含量渐增(图 5, Tracy *et al.*, 1976),其成分剖面图锰铝榴石端员成分呈钟形外貌(Tracy, 1982),这是石榴石典型的生长环带特征。

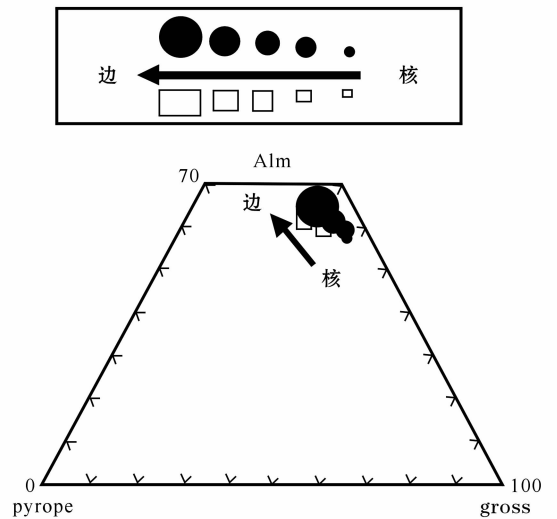


图 5 石榴石 Fe - Mg - Ca 端点成分三角图

Fig. 5 Fe - Mg - Ca diagram of garnets

2.4.3 变质玄武岩

主要组成矿物有斜辉石、钠长石、角闪石和绿帘石。斜辉石直径大于 0.1 mm,部分具两组相交约 90° 的解理,与细小矿物结晶的钠长石($Ab = 98\%$, 摩尔分数),由此推论其前身为玄武岩,经变质作用达到绿帘角闪岩相,在原玄武岩孔隙处生长绿帘石($P_s = 0.2$)和铁镁钙闪石质普通角闪石(图 4j)。

2.5 岗口子北剖面

图3e为岗口子北剖面(图2中E)路线地质图,该剖面中主要岩石类型有石英岩、花岗岩和大理岩。

2.5.1 石英岩

主要组成矿物有角闪石、黑云母、石英、斜长石、楣石和少量不透明矿物。第一期生成的矿物为石英和现已受蚀变的斜长石₁。黑云母和角闪石为完好自形晶且其颗粒中含有包裹体楣石,没受蚀变作用的斜长石₂生长时间与其相同(图4k)。

2.5.2 花岗岩

主要组成矿物有绿帘石、黑云母、石英、斜长石、方解石、白云母、绿泥石和少量不透明矿物。长石颗粒中有前期生长外型椭圆的绿帘石包裹体及任意方向排列、呈自形晶的细颗粒黑云母₁(图4l)。黑云母₂中含有楣石包裹体。最后,长石蚀变为绿泥石和绢云母,方解石沿所有前期矿物颗粒边缘生长。角闪石常与黑云母₂伴生。

2.5.3 大理岩

主要组成矿物为方解石。方解石受应力作用而呈顺向排列,靠近花岗岩体,被流体带走其中的碳酸盐类矿物,因此在薄片下观察发现其矿物组成除了方解石为主外,还有占30%的硅化作用产物。

3 矿物化学成分分析

矿物化学成分分析运用成功大学地球科学系 JEOL JSM840A 型扫描式电子显微镜,附加 Oxford X 射线能量分散分析系统(Energy Dispersive Xray Spectrometer, EDS),实验条件为:加速电压 20 kV、电流 0.4 nA、电子束直径 1~2 μm,每次分析接收 X 光谱时间为 100 s。研究区中两个剖面的矿物电子探针分析数据如表 2、表 3 所示。

4 氩氩同位素定年

由于氩为一气态同位素,本身具低封温度的特性,常将其定年数据视为最后一期热事件发生的时间,因此适用于探讨如马衙山群之前震旦纪岩层的再活化作用。实验使用台湾大学地质科学系 Varian-MAT GD150 型气态质谱仪进行传统高温炉加热法分析(conventional step-heating method),结果见表 4。通过对天祝三峡森林公园样品 C13 角闪岩中角闪石 Ar-Ar 同位素的定年分析,得到一坪年龄 340 ± 0.5

Ma,综合年龄与反等时线年龄分别为 330.6 ± 1.3 Ma 和 346 ± 14.6 Ma(表 4、图 6)。岗口子北样品 E04 花岗岩中黑云母的 Ar-Ar 同位素定年分析得到一坪年龄 323.4 ± 0.65 Ma(表 4b),综合年龄为 289.9 ± 1 Ma(图 7)。由于其反等时线无法得一可信年龄,故不采用反等时线年龄,而使用坪年龄。

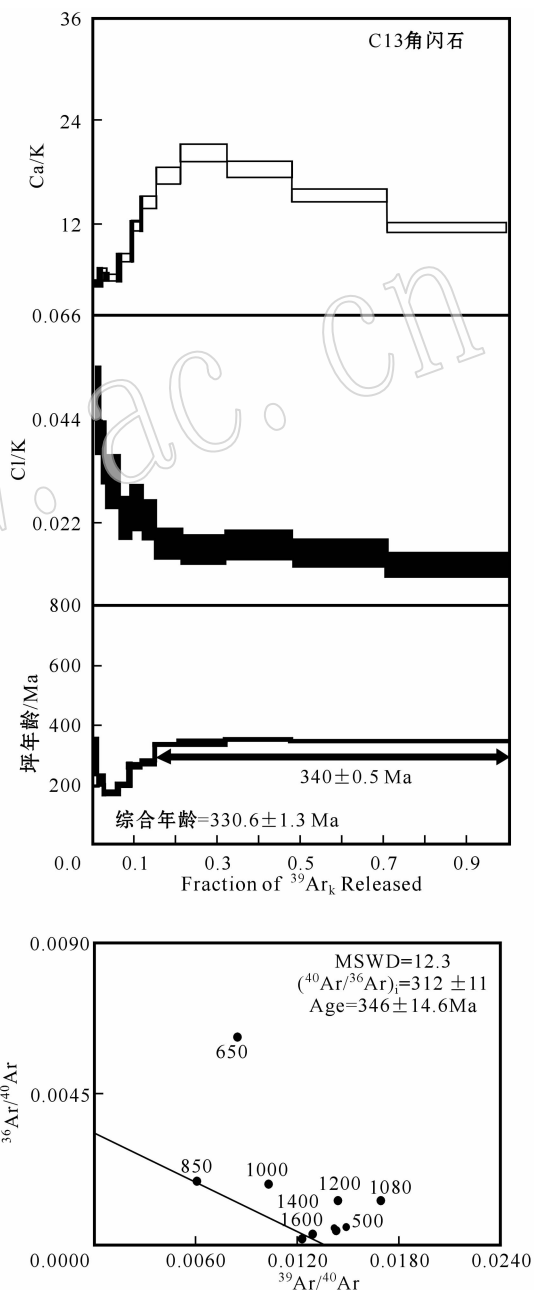


图6 天祝三峡公园角闪岩中角闪石样品(C13)的 Ca/K 比值谱、Cl/K 比值谱、⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄谱和反等时线图
Fig.6 Apparent age spectra with Ca/K ratios, Cl/K ratios and isochrons of hornblende grains from sample C13

表2 天祝三峡森林公园电子探针分析结果

Table 2 Representative data for electron microprobe analyses of minerals from Tianzhushanxia Forest Park

样品 矿物 生长顺序	C03-1		C03-1		C03-1		C03-1		C03-1		C17-1		C17-1		样品 矿物 生长顺序
	Amp	I	Amp	I	Amp	I	Amp	I	Chl	II	Pl	I	Pl	I	
SiO ₂	43.39	44.15	44.15	43.60	49.95	52.43	44.82	SiO ₂	26.7	68.08	49.62	51.69	SiO ₂	37.87	SiO ₂
TiO ₂	0.79	0.81	0.81	0.68	0.38	0.28	0.00	TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	TiO ₂	1.84	TiO ₂
Al ₂ O ₃	11.23	10.96	11.36	11.61	7.72	5.32	33.92	Al ₂ O ₃	19.63	19.32	31.94	30.32	Al ₂ O ₃	16.90	Al ₂ O ₃
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00	Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	Cr ₂ O ₃	0.33	Cr ₂ O ₃
FeO	15.81	15.29	15.49	15.66	9.70	8.90	0.26	FeO	25.70	0.00	0.00	0.00	FeO	13.61	FeO
MnO	0.33	0.00	0.00	0.00	0.30	0.33	0.00	MnO	0.33	0.00	0.00	0.00	MnO	0.00	MnO
MgO	9.98	9.90	9.88	9.94	14.77	15.96	0.25	MgO	15.92	0.00	0.00	0.00	MgO	0.00	MnO
CaO	11.99	12.24	11.85	12.29	12.68	12.81	18.71	CaO	0.00	0.00	15.05	13.34	CaO	0.00	CaO
Na ₂ O	1.55	1.76	1.46	1.71	0.85	0.72	1.23	Na ₂ O	0.48	0.00	2.90	3.98	Na ₂ O	0.00	Na ₂ O
K ₂ O	1.23	1.33	1.27	1.28	0.22	0.00	0.00	K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	K ₂ O	9.52	K ₂ O
Total	96.30	96.36	96.27	96.77	97.20	96.75	99.19	Total	88.76	99.07	99.51	99.33	Total	94.56	Total
以23个氧计算															
T Si	6.60	6.74	6.71	6.61	7.21	7.55	3.27	Si	5.57	11.99	9.09	9.44	Si	5.60	以22个氧计算
T Al	1.40	1.26	1.30	1.39	0.79	0.46	0.00	Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	Al ^{IV}	2.40	Al ^{IV}
C Al	0.61	0.71	0.74	0.69	0.52	0.45	2.92	Al ^{IV}	2.43	4.01	6.89	6.52	Al ^{VI}	0.55	Al ^{VI}
C Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	Al ^{VI}	2.39	0.00	0.00	0.00	Ti ^{IV}	0.20	Ti ^{IV}
C Fe ³⁺	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	Cr	0.04	Cr
C Ti	0.09	0.09	0.09	0.08	0.04	0.03	0.01	Fe ³⁺	0.48	0.00	0.00	0.00	Fe ²⁺	1.68	Fe ²⁺
C Mg	2.26	2.25	2.24	2.25	3.18	3.42	0.00	Mn	0.06	0.00	0.00	0.00	Mn	0.00	Mn
C Fe ²⁺	2.00	1.95	1.93	1.99	1.17	1.07	0.03	Mg	1.95	0.00	2.95	2.61	Mg	3.30	Mg
C Mn	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	1.46	Ca	0.00	3.99	1.03	1.41	Ca	0.00	Ca
C Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	Na	0.48	0.00	0.00	0.00	Na	0.00	Na
B Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	K	0.00	19.99	19.97	19.99	K	1.80	K
B Fe ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.86	Sum	20.36	0.00	74.10	64.90	Sum	15.57	Sum
B Mn	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	Fe ²⁺ /(Mg+We ²⁺)	0.48	100	25.90	35.10	Fe [*]	0.34	Fe [*]
B Ca	2.00	2.00	1.93	2.00	1.96	1.97	0.00	Mg/(We ²⁺ +Mg)	0.52	0.00	0.00	0.00	Or		Or
B Na	0.02	0.00	0.04	0.00	0.02	0.01									
A Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									
A Na	0.43	0.51	0.39	0.5	0.22	0.19									
A K	0.24	0.26	0.25	0.25	0.04	0.00									
Sum	15.67	15.77	15.64	15.75	15.26	15.19									
位置	边——核——边														

Ab—钠长石; Amp—普通角闪石; An—钙长石; Ap—磷灰石; Bt—黑云母; Chl—绿泥石; Cr—石榴石; Crt—斜长石; Pl—正长石; Pl—斜长石; Zo—黝帘石。

表4 矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测定结果
Table 4 Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for samples

$t/^\circ\text{C}$	累积 $^{39}\text{Ar}_k$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	年龄/Ma
C13 角闪石							
650	0.003	4.55E-01	2.48E-01	9.45E+00	1.10E+02	2.42E+02	-129.0 ± 32.3
850	0.012	2.43E-01	1.55E+00	1.94E-01	1.41E+02	5.78E+02	323.6 ± 36.0
1 000	0.028	1.51E-01	2.00E+00	1.59E-01	8.99E+01	5.95E+02	219.9 ± 16.2
1 080	0.061	7.61E-02	1.69E+00	1.36E-01	5.83E+01	7.66E+02	176.0 ± 5.6
1 200	0.088	9.38E-02	2.42E+00	9.97E+00	6.90E+01	7.36E+02	201.9 ± 4.1
1 300	0.114	4.78E-02	3.51E-02	1.10E-01	6.91E+01	1.44E+03	264.2 ± 8.6
1 400	0.148	5.14E-02	4.37E-02	9.82E-02	7.27E+01	1.41E+03	275.8 ± 6.7
1 500	0.207	1.77E-02	5.29E-02	7.75E-02	7.64E+01	4.32E+03	336.0 ± 1.4
1 560	0.318	2.34E-02	6.07E-02	6.98E-02	7.96E+01	3.41E+03	342.9 ± 9.3
1 600	0.476	1.77E-02	5.47E-02	7.61E-02	8.09E+01	4.57E+03	355.4 ± 1.5
1 640	0.706	2.89E-02	4.59E-02	7.04E-02	8.25E+01	2.86E+03	347.5 ± 0.6
1 660	1.000	2.80E-02	3.53E-02	5.88E-02	8.25E+01	2.95E+03	348.2 ± 0.9
Sample mass = 95.0 mg				J-value = 0.003 334 849 ± 0.000 123 454 8			
Integrated date = 330.6 ± 1.3 Ma				^{39}Ar volume = 0.235 5E - 10 ccSTP/g			
$^{40}\text{Ar}^*$ volume = 0.166 1E - 08 ccSTP/g							
E04 黑云母							
550	0.005	6.07E+00	4.60E-01	1.81E-01	2.03E+01	3.34E+02	12.0 ± 3.7
600	0.017	1.98E+00	4.42E-01	1.63E-01	1.08E+01	5.48E+02	25.5 ± 1.3
640	0.031	2.12E+00	3.95E-01	1.22E-01	2.93E+01	1.38E+03	114.9 ± 3.2
680	0.075	1.02E-02	4.75E-01	1.34E-01	2.72E+01	2.67E+03	120.3 ± 1.8
720	0.15	1.61E-03	3.35E-01	7.91E-02	5.09E+01	3.16E+04	242.5 ± 1.8
760	0.225	9.14E-04	1.81E-01	6.01E-02	6.07E+01	6.64E+04	286.8 ± 1.1
800	0.286	1.05E-04	1.15E-01	4.54E-02	6.77E+01	6.44E+05	318.2 ± 1.0
850	0.345	2.19E-06	1.18E-01	4.22E-02	6.86E+01	3.14E+07	322.3 ± 1.4
900	0.409	2.06E-06	1.19E-01	3.95E-02	7.00E+01	3.40E+07	328.3 ± 0.7
940	0.478	2.59E-03	1.40E-01	3.61E-02	7.04E+01	2.72E+04	326.8 ± 2.1
980	0.573	2.52E-03	1.85E-01	4.09E-02	6.93E+01	2.75E+04	321.9 ± 0.7
1 020	0.688	2.06E-03	1.13E-01	3.51E-02	7.12E+01	3.46E+04	330.7 ± 0.6
1 080	0.886	6.60E-07	1.95E-01	7.06E-02	6.20E+01	9.40E+07	293.6 ± 4.2
1 150	0.911	1.49E-03	1.99E-01	5.15E-02	6.42E+01	4.32E+04	301.2 ± 5.4
1 200	0.933	3.43E-03	3.22E-01	5.17E+00	6.65E+01	1.94E+04	308.9 ± 5.3
1 400	0.957	1.18E-02	4.83E-01	6.29E+00	6.16E+01	5.24E+03	276.9 ± 1.5
1 600	1.000	4.06E-03	4.79E-01	6.78E+00	6.06E+01	1.49E+04	282.2 ± 1.1
Sample mass = 80.0 mg				J-value = 0.003 334 849 ± 0.000 123 454 8			
Integrated date = 289.9 ± 1.0 Ma				^{39}Ar volume = 0.200 5E - 09 ccSTP/g			
$^{40}\text{Ar}^*$ volume = 0.122 6E - 07 ccSTP/g							

5 变质作用的温压条件

5.1 地质温度计

(1) 石榴石黑云母地质温度计(简称 T_{CB}): 本文使用 Indares 和 Martignole(1985) 提出的 T_{CB} 计算方法来计算地质温度, 得出那新沟石榴石角闪石片岩(D28-2)的核心温度为 418 $^\circ\text{C}$, 边缘温度为 545 $^\circ\text{C}$ 。

(2) 普通角闪石黑云母地质温度计(简称

T_{HB}): 在缺乏石榴石或缺乏白云母的角闪石变质中基性火山碎屑岩中, 倘若不考虑钙角闪石的非理想性与钙离子在角闪石中所涉足的反应, 则可使用 T_{HB} 进行温度计算。天祝三峡森林公园角闪岩(样品 C17-1)的计算结果为 676 $^\circ\text{C}$, 那新沟角闪石片岩 D04-2 计算结果为 640 $^\circ\text{C}$ 。

(3) 角闪石斜长石地质温度计(简称 T_{HP}): 对同一生长期的角闪石和斜长石作温度的估算, 利用 Holland 和 Blundy(1994) 发表的 T_{HP} 公式, 天祝三峡森林公园角闪岩(C03-1)计算结果为 618 $^\circ\text{C}$ 。

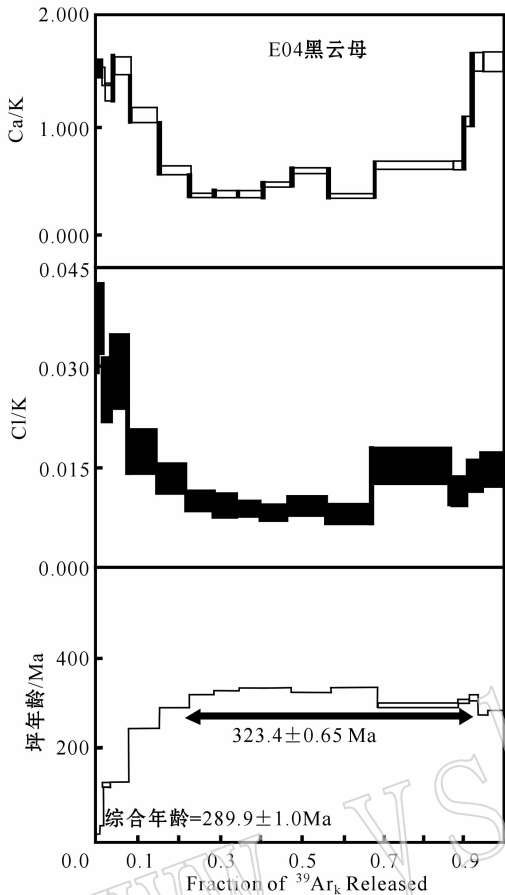


图7 岗口子北花岗岩中黑云母样品(E04)的Ca/K比值谱、Cl/K比值谱图和⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄谱
Fig.7 Apparent age spectra with Ca/K ratios, Cl/K ratios and isochrons of biotite grains from Sample E04

5.2 地质压力计

角闪石地质压力计(简称 P_H):Hammarstrom和Zen(1986)、Hollister等(1987)、Johnson和Rutherford(1989)利用闪石类矿物的铝含量(Al^I)估算出其结晶时的压力。利用上述方法,天祝三峡森林公园角闪岩(C03-1、C15)计算结果分别为0.65 GPa和0.24~0.77 GPa,那新沟角闪石片岩(D04-2)计算结果为0.43~0.75 GPa,那新沟石榴石角闪石片岩、变质玄武岩(D28-2、D16)计算结果分别为0.57~0.75 GPa和0.68 GPa。

将马衔山群(天祝三峡森林公园及那新沟)的温压计算结果投入压力对温度的坐标图及区域地质图中,得到其温压演化路径图(图8)。从图中可以看出,峰期变质为角闪岩相变质阶段,经绿帘角闪岩相后为绿片岩相。图8上的数据点分布并无很好的规律,推测可能是马衔山群在323~340 Ma后期构造活化的结果。

6 结论

(1) 岩相学研究发现,邻近白垩纪河口群的震旦纪地层(寺儿沟)最西边的露头受韧性剪切带影响,而产生糜棱岩化作用,其变质作用为绿片岩相,矿物组合为绿泥石+钠长石+赤铁矿+方解石+石英。

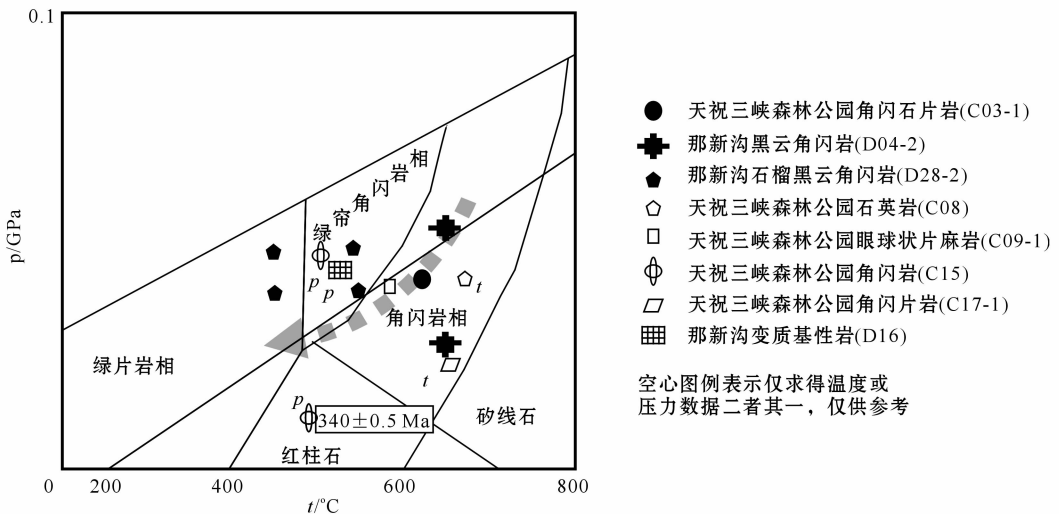


图8 马衔山群变质岩的温压演化路径图

Fig.8 $p-t$ path of the Maxianshan Group in Eastern Qilian fold belt, Northwest China
马衔山群变质作用过程为:(1)峰期角闪岩相变质,其矿物组合为黑云母+角闪石,温压为618℃、0.65 GPa;
(2)绿帘角闪岩相,矿物组合为绿帘石+钠长石+钙质角闪石;(3)最后为绿片岩相

The Maxianshan Group has experienced three stages of metamorphism. At the first stage, amphibolite facies is the peak metamorphism, whose temperature and pressure are 618℃ and 0.65 GPa, respectively. The second stage is epidote-amphibolite facies. The third stage is greenschist facies

(2) 前震旦纪马衔山群南部铁成沟露头最西边的露头受韧性剪切带影响而出现糜棱岩,最后被花岗岩侵入。在铁成沟采集的奥陶纪大理岩,其碳酸盐类矿物为方解石和白云石,这些大理岩中除了具磷灰石夹层外,探针分析发现此处的金云母具有相当高的镁分率。

(3) Ar-Ar 同位素定年结果,角闪石及黑云母的坪年龄分别为 340 ± 0.5 Ma 和 323.4 ± 0.65 Ma。这些角闪石和黑云母是早期变质作用的产物,但在后期作用中已完全重叠,受到此热事件的影响,而产生氩同位素的重置作用。结合区域构造地质,可知马衔山群在 323 ~ 340 Ma 受动力变质作用影响(断层活动)使其与邻近的奥陶纪、白垩纪地层多呈不整合及逆冲断层接触。

(4) 马衔山群的石榴石具生长环带,从核心到边缘,锰含量减少,铁含量渐增。此成分变化在压力不变的情形下指示温度的上升。钙质角闪石不具化学环带。马衔山群的峰期变质为角闪岩相变质,经绿帘角闪岩相后为绿片岩相。

(5) 前震旦纪马衔山群的沉积作用在经历了前震旦纪的吕梁运动后便告结束,奥陶纪时生物碎屑在此沉积并在稍晚时受应力作用形成含磷灰石大理岩,Ar-Ar 同位素定年结果得知在石炭纪受区域断层活动而使其发生再活化作用。

References

Gray D R and Durney D W. 1979. Crenulation cleavage differentiation: implication of solution-deposition processes[J]. *J. Struct. Geol.*, 1: 73 ~ 80.

Guo Jinjing, Zhao Fengqing and Li Huaikun. 1999. Jinningian collisional granite belt in the eastern sector of the Central Qilian massif and its implication[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(1): 10 ~ 15 (in Chinese with English abstract).

Guo Jinjing, Zhao Fengqing and Li Huaikun. 2000. New chronological evidence of the age of Huangyuan Group in the eastern segment of Mid-Qilian massif and its geological significance[J]. *Regional Geology of China*, 19(1): 26 ~ 31 (in Chinese with English abstract).

Hammarstrom Jane M and Zen E-an. 1986. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer[J]. *American Mineralogist*, 71: 1 297 ~ 1 313.

Holland T and Blundy J. 1994. Non-idea interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry[J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 116: 433 ~ 447.

Hollister L S, Grissom G C, Stowell E K, *et al.* 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons[J]. *American Mineralogist*, 72: 231

~ 239.

Indares A and Martignole J. 1985. Biotite-garnet geothermometry in the granulite facies: the influence of Ti and Al in biotite[J]. *American Mineralogist*, 70: 272 ~ 278.

Johnson M C and Rutherford M J. 1989. Experimental calibration of the Al-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley Caldera, Calif., volcanic rocks[J]. *Geology*, 17: 837 ~ 841.

Passchier C W and Trouw R A. 1996. *Microtectonics*[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Powell C M A. 1979. A morphological classification of rock cleavage[J]. *Tectonophysics*, 54: 21 ~ 34.

Smith A D, Wen D J, Huang L Y, *et al.* 2000. Constraints from gneisses in the Qilian fold belt for the position of the north china block in the Proterozoic[J]. *J. Geol. Soc. China*, 43(1): 81 ~ 93.

Spear F S. 1993. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*[M]. Washington D. C.: Mineralogical Society of America.

Tracy R J, Robinson P and Thompson. 1976. Garnet composition and zoning in determination of temperature and pressure of metamorphism, central Massachusetts[J]. *American Mineralogist*, 61: 762 ~ 775.

Tracy R J. 1982. Compositional zoning and inclusions in metamorphic minerals[J]. *Rev. Mineral.*, 10: 355 ~ 397.

Urai J L, Williams P F and Roermund H L M. 1991. Kinematics of crystal growth in syntectonic fibrous veins[J]. *J. Struct. Geol.*, 13: 823 ~ 826.

Wan Yusheng, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, *et al.* 2001. Ages and compositions of the Precambrian high-grade basement of the Qilian terrane and its adjacent areas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 375 ~ 384.

Wan Yusheng, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, *et al.* 2000. Geochemical characteristics of the Maxianshan complex and Xinglongshna Group in the eastern segment of the Qilian orogenic belt[J]. *Journal of the Geological Society of China*, 43(1): 52 ~ 68.

Wan Yusheng, Zhang Jianxin and Yang Jingsui. 2006. Geochemistry of high-grade metamorphic rocks of the North Qaidam Mountains and their geological significance[J]. *JAES*, 28: 174 ~ 184.

Xiao Lin and Deng Yinghui. 1997. Characters of Maxianshan deformation granite rock body and its genetical type[J]. *Acta Geologica Gansu*, 6(1): 37 ~ 43 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

付学明,王征明,郭原生. 1983. 马衔山混和岩[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社.

郭进京,赵风清,李怀坤. 1999. 中祁连中段晋宁期碰撞型花岗岩及其地质意义[J]. *地球学报*, 20(1): 10 ~ 15.

郭进京,赵风清,李怀坤. 2000. 中祁连东段湟源群的年代学新证据及其地质意义[J]. *中国区域地质*, 19(1): 26 ~ 31.

王云山,陈基娘. 1987. 青海省及毗邻地区变质岩带和变质作用[M]. 北京:地质出版社,4 ~ 8,113 ~ 130.

肖林,邓颖晖. 1997. 马衔山变形花岗岩体特征及成因类型[J]. *甘肃地质学报*, 6(1): 37 ~ 43.