

新疆阿尔泰造山带低压变质作用相平衡研究

张翠光¹ 魏春景² 侯荣玖³ 后立胜⁴ 卜小平⁵

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;
3. 中油测井技术服务有限责任公司, 北京 100043; 4. 中国地质调查局, 北京 100011;
5. 国土资源部油气资源战略研究中心, 北京 100034)

摘要:通过对阿尔泰造山带低压型变质序列中典型泥质岩石进行详细的岩相学及相平衡研究, 获得黑云母带变质作用的温度为 445~550°C 和压力为 0.2~0.6 GPa; 石榴石带为 480~566°C、0.54±0.22 GPa; 十字石带 601±20°C、0.8±0.25 GPa; 十字石-红柱石带 540±20°C、0.32±0.05 GPa, 而 632.4°C、0.785 GPa 这个值不是红柱石的稳定范围, 这可能是其早期中压变质作用条件; 矽线石带为 640°C、0.43 GPa 左右, 由于石榴石中有蓝晶石包体, 因此其早期也可能经历中压条件的变质; 蓝晶石-矽线石带 740~800°C、0.4~0.7 GPa。阿尔泰造山带低压变质序列不是一个正常的变质序列, 其野外变质梯度呈现“Z”字型特征。阿尔泰造山带低压变质作用可能形成于早期中压变质岩的挤压抬升和以此相关的大量花岗岩侵入的构造环境中。

关键词: 低压变质作用; 相平衡; 阿尔泰造山带; 新疆

中图分类号: P588.3; P586 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2007)01-0034-08

新疆阿尔泰造山带中发育典型的蓝晶石型与红柱石型变质带, 庄育勋^[1]认为二者是同时的, 其压力类型差异与热穹隆不同部位在递增变质过程中抬升隆起速度与深部热流供给状况不同有关, 在假定深部热流的扩散率在热穹隆的不同部位都相同的情况下, 那么, 抬升速度快则形成红柱石型变质序列, 抬升速度相对小则形成蓝晶石序列; 何国琦等^[2]认为红柱石型变质早于蓝晶石型变质, 红柱石序列产生在拉伸的环境, 蓝晶石序列产生于挤压环境。隋静霞^[3]认为区域动力热流变质作用导致阿尔泰呈中压型、低压型、中低压型变质作用。

上世纪 90 年代以来, 利用热力学数据库^[4]和 THERMOCAL 程序, 可以在模式体系中定量计算一系列相图^[5]。笔者试图利用这一种方法, 在张翠光等^[6]对阿尔泰地区变质作用研究的基础上, 讨论阿尔泰造山带低压变质作用相平衡关系。

1 区域地质背景

阿尔泰造山带是中亚一个重要的造山带, 从俄罗斯到东哈萨克斯坦、经中国新疆北部到蒙古西南和南部, 延伸约 2 500 km, 其北为西伯利亚及相关的造山带, 南为准噶尔带^[7],

本文研究地区由 5 个构造单元构成(图 1): (1) 阿尔泰山区大部分由晚泥盆至早石炭的低级变质沉积岩组成。(2) 中部阿尔泰区形成中国阿尔泰造山带的中心部分, 该地区广泛分布高级变质岩石和丰富的花岗岩, 地质时代为新元古代至志留纪。(3) 琼库勒—阿巴宫区主要包含康布铁堡组和阿勒泰组。该组分布广泛, 主要为上志留到下泥盆弧型火山岩和火山碎屑岩(1~2 km 厚)、少量基性火山岩及细碧岩组成。中泥盆的阿勒泰组覆盖在康布铁堡组之上, 主要由浊积的砂页岩及少量的枕状玄武岩、酸性火山岩组成。(4) 额尔齐斯区主要位于额尔齐斯断裂与区琼库勒—阿巴宫之间的区域。这一区域有高级片麻岩、片岩的前寒武纪基底, 被晚石炭的沉积物所覆盖及二叠纪花岗岩所侵入。其西部由北准噶尔盆地的第四系沉积物所覆盖。(5) 布尔津—二台区, 分布在额尔齐斯断裂以南, 为泥盆纪岛弧组成, 主要由长英质与基性相间的熔岩、凝灰岩、安山岩、英安流纹岩和钙碱性花岗岩侵入体, 以及一些未变质的沉积岩系组成。

整个地区存在低压红柱石型与中压蓝晶石型变质序列(图 1)。蓝晶石型变质序列出现在阿克哈仁、库威等地(图 1), 在阿勒泰西的红柱石序列中也有蓝晶石出现。蓝晶石序

收稿日期: 2006-07-12; 改回日期: 2006-09-01

项目资助: 国家自然科学基金项目(40525006)资助。

作者简介: 张翠光, 男, 1967 年生, 博士, 副研究员, 从事地质资料管理和研究; E-mail: zcuiguang@mail.cgs.gov.cn。

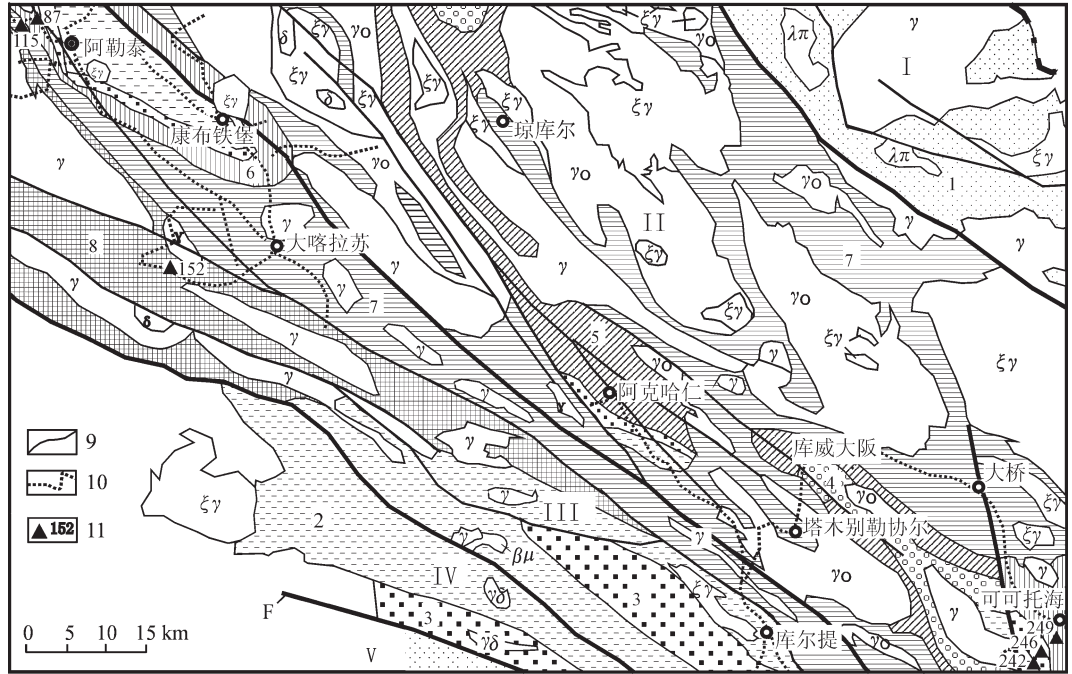


图 1 阿勒泰-富蕴变质地质图

(据庄育勋^[8]、Windley et al.^[7]及新疆地质矿产局^[9]略有改动)

- 1—绿泥石带;2—黑云母带;3—石榴石带;4—十字石带;5—蓝晶石带;6—红柱石(蓝晶石)-十字石带;7—矽线石带;8—矽线石-堇青石带;
- 9—地质界线;10—野外地质路线;11—采样位置及样品编号;F—断裂;I—阿尔泰山区;II—中阿尔泰山区;III—琼库勒—阿巴宫区;
- IV—额尔齐斯区;V—布尔津—二台区;λπ—石英斑岩;γ—二长或黑云母花岗岩;ξγ—钾长花岗岩;γo—斜长花岗岩;
- δo—石英闪长岩;v—辉长岩;δ—闪长岩;βμ—辉绿岩-辉绿玢岩;ηo—石英二长岩;γδ—花岗闪长岩

Fig.1 Metamorphic map of Aletai-Fuyun

(modified from Zhuang Yuxun^[8], Windley et al.^[7] and Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources^[9])

- 1-Chlorite zone;2-Biotite zone;3-Garnet zone;4-Staurolite zone;5-Kyanite zone;6-Staurolite - andalusite (kyanite) zone;7-Sillimanite zone;
- 8-Cordierite-sillimanite zone;9-Geological boundary;10-Field geological route;11-Sampling location and sample number;F-fault;
- I-Altay Mountains area;II-Central Altay Mountains area;III-Qongkur-Abagong area;IV-Ertix area;V-Burqin-Ertai terrane;
- λπ-quartz porphyry; γ-monzogranite or biotite granite;ξγ-moyite; γo-plagiogranite; δo-quartz diorite;v-gabbro; δ-diorite;
- βμ-diabase-diabase porphyrite;ηo-quartz monzonite; γδ-granodiorite

列包括:(1)黑云母带;(2)石榴石带;(3)十字石带;(4)蓝晶石带;(5)矽线石带。这些递增变质带一般出露不全,如阿克哈仁出现黑云母带、石榴石带、蓝晶石带及矽线石带,没有十字石带。红柱石序列分布在大喀拉苏、可可托海、阿勒泰东北、西北及西南(图 1)。在阿勒泰市西南、西北、阿克哈仁可见红柱石与蓝晶石同时出现,见有红柱石交代蓝晶石的现象^[1]。在阿尔泰地区低压红柱石序列包括:(1)黑云母带;(2)石榴石带;(3)十字石带;(4)红柱石-十字石带;(5)矽线石带;(6)堇青石-矽线石带。红柱石序列一般出露不全,如可可托海出现黑云母带、石榴石带、十字石-红柱石带、矽线石带。笔者将重点对低压红柱石型变质序列进行研究。

2 矿物学特征

前面叙述了研究区出现了蓝晶石中压型递增变质序列和红柱石型低压变质序列,本文选择区内低压型红柱石递增变质序列中的典型岩石(表 1);黑云母带中黑云片岩、石榴石

带中石榴黑云片岩、十字石带中十字石榴黑云片岩、红柱石-十字石带中石榴红柱十字黑云片岩、矽线石带中石榴矽线黑云片岩、堇青石-矽线石带中矽线堇青石榴黑云片岩,将重点研究低压递增变质序列峰期变质作用矿物特点及变质作用。

2.1 黑云母

黑云母是泥质变质岩中最广泛的变质矿物。在黑云母带中,黑云母为绿褐色、浅褐色,细小,长轴 0.03~0.13 mm,稍具定向性,随变质程度增高,定向性明显增强,黑云母粒度也变大,矽线石带可达 0.5 mm×1.5 mm,颜色也变成较深的褐色。黑云母成分特征见表 2,黑云母中 Mg/(Mg+Fe) 值为 0.482~0.565, TiO₂ 为 1.33%~2.56%。

2.2 石榴石

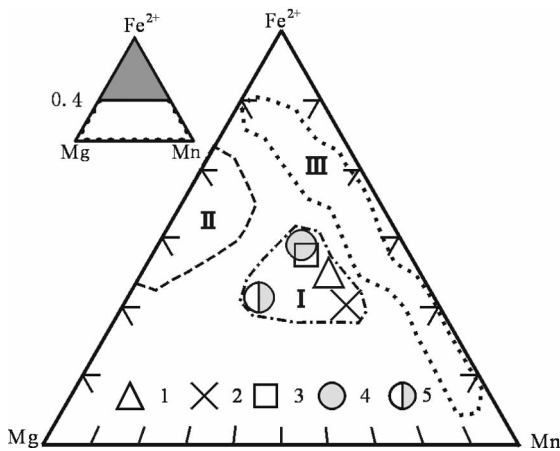
一般呈自形、半自形晶体。在石榴石带低温部分石榴石晶体细小,向石榴石带高温部分,岩石中石榴石晶体逐渐变粗。在十字石带中,石榴石的粒度往往与十字石粒度有关,石榴石粒度大时,十字石粒度反而变小。石榴石中包体一般多

表 1 阿尔泰山带低压变质岩石显微镜下矿物体积百分含量

Table 1 Volume percentages of minerals in low-pressure metapelites in the Altai

岩石名称	样品号	g	bi	mu	st	chl	cd	pl	kf	q	and	sill	ky	mt	tour	pyri	ap	spn
黑云片岩	242	-	20	5	-	3	-	10	-	60	-	-	-	<1	<1			
石榴黑云片岩	246	8	25	8	-	3	-	8	-	47	-	-	-			<1	<1	
十字石榴黑云片岩	87	2	13	3	6	5	-	20	-	48	-	-	-	<1			<1	
石榴红柱十字黑云片岩	249	7	20	6	8	4	-	10	-	35	8.1	-	-	<1	<1			
石榴矽线黑云片岩	115	5	20	10	-	-	-	10	-	35		18	<1	<1	<1			
矽线堇青石榴黑云片岩	152	12	12	-	-	-	12	15	5	40	-	3	-	<1	<1			

注:q-石英;pl-斜长石;kf-钾长石;mu-白云母;bi-黑云母;st-十字石;ky-蓝晶石;and-红柱石;sill-矽线石;
als-Al₂SiO₅(and,sill,ky);opx-斜方辉石;ctd-硬绿泥石;g-石榴石;chl-绿泥石;cd-堇青石;mt-磁铁矿;
tour-电气石;pyri-黄铁矿;ap-磷灰石;spn-榍石;H₂O-水;liq-熔体。

图 2 石榴石 Fe²⁺-Mg-Mn 图解

I—阿尔泰山带低压变质泥质岩石; II—加拿大地盾东 Grenville 地区高压高温变质泥质岩石^[10]; III—南 Calabria 的 Aspromonte 地区低压变质泥质岩石^[11]; 1—石榴石带; 2—十字石带; 3—十字石-红柱石带; 4—矽线石带; 5—堇青石-矽线石带

Fig.2 Fe²⁺-Mg-Mn diagram of garnet

I—Low-P metapelites in the Altai; II—High-P-T metapelites in the eastern Grenville Province, Canadian Shield^[10]; III—Low-P metapelites in the Aspromonte, southern Calabria^[11]; 1—Garnet zone; 2—Staurolite zone; 3—Staurolite-andalusite zone; 4—Sillimanite zone; 5—Cordierite-sillimanite zone

为石英、钛铁矿及少量的长石、云母。石榴石环带一般不明显。本区石榴石中 MnO 含量普遍较高,为 7.21%~11.12%(表 2)。石榴石带中 Mg/(Mg+Fe) 值一般较其他各带低。与世界其他地方泥质岩石中石榴石相比,本区石榴石成分介于高压和低压泥质岩石之间(图 2)。与加拿大地盾东 Grenville 地区高压高温变质泥质岩石^[10]相比,阿尔泰地区的石榴石比较富 Mn,而且 Mn 值变化较大;与南 Calabria 的 Aspromonte 地区低压变质泥质岩石^[11]相比,阿尔泰地区石榴石中 Mg 值稍高且 Mn 值变化范围比较小。

2.3 十字石

该矿物在十字石带和十字石-红柱石(蓝晶石)带中分布广泛。一般呈自形,粒度大小不一,一般为 0.5~2 mm,大者可达 1~4 cm,粒度大小不等的十字石岩相特征及化学成分(表 2)没有明显的差异变化,为同期变质产物。十字石里的包体矿物为石英及少量斜长石、钛铁矿、黑云母、绿泥石等。包体呈定向排列,一般与晶体外晚期片理相连,而且大角度相交。反映特征的两期构造变形。镜下常见退变为绢云母。较新鲜的十字石晶体边部有毛发状矽线石。Mg/(Mg+Fe) 比值为 0.214~0.223(表 2)。

2.4 白云母

本区白云母有 3 种类型,第一种为细小鳞片状,广泛发育在黑云母带中,石榴石带、十字石带、红柱石带中也有少量;第二种呈较大片状,发育在十字石带至矽线石带、矽线石-堇青石带中,无定向排列或稍具定向性;第三种表现为与绿泥石及少量黑云母沿晚期变形的剪切方向排列。在同一变质带中,3 种类型白云母化学成分没有明显的变化(表 2),白云母中 Si 为 6.126~6.266,Na 为 0.134~0.461。其中黑云母带中 Si 较高,且 Na 较低,其他各带无明显规律。

2.5 绿泥石

在黑云母带中,绿泥石呈小片状与绢云母均呈定向排列。随变质级别的增高,绿泥石呈宽大的片状,这种绿泥石一般与较宽大的白云母共生,有时定向不明显。另外一种绿泥石与晚期退变质作用有关。这里主要研究与主期变质作用有关的绿泥石。其成分特征见表 2, Mg/(Mg+Fe) 为 0.562~0.615。

2.6 堇青石、矽线石、红柱石及蓝晶石

在中阿尔泰山区、琼库尔-阿巴宫区的递增变质带中有与矽线石共生的堇青石。堇青石中的 Mg/(Mg+Fe) 比值为 0.750(表 2)。矽线石一种呈毛发状,另一种呈柱状。矽线石有的可由红柱石、蓝晶石转变而成。红柱石常成筛状,包体一般为石英、十字石、钛铁矿、黑云母等。在红柱石周围常见线状矽线石环绕。在阿尔泰的红柱石序列中的矽线石带里的石榴石见蓝晶石包裹体出现,据庄育勋^[8]在阿勒泰市南及阿克哈仁发现红柱石由蓝晶石发生相转变而成,这些说明蓝晶石

型变质可能早于红柱石型变质。

3 相平衡关系

中低压泥质岩石的相平衡关系可在 KMnFMASH 体系模拟^[2]。笔者根据 Wei et al^[2]发表的 KMnFMASH 中低压泥质岩石的岩石成因格子为基础,讨论研究区低压型变质序列的相平衡关系。选择中黑云片岩、石榴黑云片岩、十字石榴黑云片岩、石榴红柱十字黑云片岩、石榴矽线黑云片岩、矽线堇青石榴黑云片岩,根据岩石中主要矿物含量(表 1)及其矿物化学成分(表 2),在 KMnFMASH 体系中固相线以下的平衡组合假设水、石英过量,计算求得样品有效成分 $Al_2O_3:MgO:FeO:K_2O:MnO$ 分别为:27.60:31.69:27.79:12.66:0.26;29.72:24.19:31.63:10.56:3.91;37.71:25.56:27.78:7.45:1.50;45.80:20.02:24.09:6.67:3.42;56.77:13.89:19.55:8.29:1.50;33.35:23.91:31.47:6.06:5.22。固相线以上的平衡组合假设石英过量,水不过量,其有效成分 $H_2O:Al_2O_3:MgO:FeO:K_2O:MnO$ 分别为:23.99:20.98:24.09:21.12:9.62:0.20;22.78:22.95:18.68:24.42:8.15:3.02;22.90:29.07:19.71:21.42:5.74:1.16;23.55:35.02:15.31:18.42:5.10:2.61;22.94:43.75:10.70:15.07:6.39:1.16;15.60:28.15:20.18:26.56:5.11:4.41。所计算的结果如图 3 所示。

黑云母带中黑云片岩的稳定矿物组合为 bi+chl+mu+pl+q,图 3-A 中相应的组合为 bi+mu+chl(KMnFMASH 体系没有 pl),在图中的稳定区域较宽,主要在较低温区域部分,变化范围为 450~570℃、0.05~1.20 GPa,在野外观察到明显的递增变质现象,根据递增变质带的特点以及前人^[8,13]的结果,黑云母带的变质条件为 450~550℃、0.2~0.6 GPa(表 3)。

石榴石带中石榴黑云片岩的矿物组合为 g+bi+mu+chl+pl+q,图 3-B 中相对应的组合为 g+mu+chl+bi。该图中对于 g+mu+chl+bi 组合,如果稍微升高温度,可能出现的矿物组合为 g+mu+bi、g+mu+chl+bi+st、g+mu+chl+bi+als 及 g+mu+chl+bi+cd。g+mu+chl+bi 在图 3-B 中的较低温部分稳定,大致范围为 450~590℃、0.05~1.20GPa。通过其他温压计计算结果(表 3)表明温度可在 480~566℃、压力在 0.54±0.22 GPa 的范围变化。

十字石带中十字石榴黑云片岩稳定的矿物组合为 st+g+bi+mu+chl+pl+q,与图 3-C 中 g+mu+chl+bi+st 相对应。图中 g+mu+chl+bi+st 为一狭长的双变域,大致在 550~620℃、0.4~1.0 GPa 范围稳定,如果稍微升温,g+mu+chl+bi+st 可能变成的矿物组合有:g+mu+bi+st+ky、g+mu+bi+st、g+

chl+bi+st、g+chl+bi+st+sill 等;稍微降温,就有 g+mu+chl+st 组合产生。利用 Thermocal 程序计算获得平均温压为 601±20℃、0.8±0.25 GPa,再结合图 3-C 中 g+bi+mu+chl+st 组合稳定范围,十字石榴黑云片岩的 P-T 范围大致在图 3-C 中的椭圆范围内,这个结果可能记录早期中压变质条件。

十字石-红柱石带中石榴红柱十字黑云片岩矿物组合为 g+bi+mu+chl+st+and+pl+q,在图 3-D 中 g+bi+mu+chl+st+and 组合与其相对应,见图中小椭圆范围,大致在 540±20℃和 0.32±0.05 GPa 范围。该组合为单变组合,对应的反应线为 mu+chl+st=g+bi+als^[12]。从图 3-D 中可看出,对于 g+bi+mu+chl+st+and 组合,温度稍增加十字石会消失,若降低温度 bi 会消失,如果降低压力就会有 g+mu+chl+and 的三变组合。利用 Holdway^[14,15]的温压计计算为 632.4℃、0.785 GPa,这个范围不在红柱石稳定范围,而是蓝晶石的稳定范围,因此这个温度和压力可能记录的是早期中压变质条件,故变质作用温度在 540±20℃和压力在 0.32±0.05 GPa 范围记录了晚期低压变质作用条件(图 3-D)。

矽线石带中石榴矽线黑云片岩中石榴石中保留有早期蓝晶石包体。其稳定矿物组合为 g+mu+bi+sill+pl+q,在图 3-E 中 g+mu+bi+sill 组合与其相对应。从图 3-E 中可以看出,g+mu+bi+sill 为一个三变组合,稳定范围为 550~730℃、压力在 0.3~0.85 GPa。对于 g+mu+bi+sill 组合,升高温度,有熔体或钾长石出现;降低温度,会出现十字石或绿泥石;升高压力,矽线石相变为蓝晶石;降低压力,矽线石相变为红柱石或者有堇青石生成。利用 Thermocal 程序计算样品 115 号的平均温压为 591±103℃、0.57±0.15 GPa,利用 Hollandway^[14,15]的温压计获得 640℃、0.43 GPa,综合这些结果得出样品 115 号变质条件为 640℃和 0.43 GPa,见图 4-A 中②的椭圆范围。由于样品 115 石榴石中包含有蓝晶石,因此早期可能在蓝晶石的稳定域范围(见图 3-E 中①位置)。可见样品 115 号记录了一个由①到②的降压降温过程。

堇青石-矽线石带中矽线堇青石榴黑云片麻岩稳定矿物组合为 g+bi+cd+als+kf+pl+q,从野外观察来看,该带有大量的浅色脉体出现,也说明其达到了部分熔融的条件。图 3-F 中与其对应的矿物组合为 g+bi+cd+als+kf+liq,是一个很窄的双变域,稳定范围在 740~800℃、0.5~0.7 GPa,与 Holdway^[14,15]温压计结果 713.8℃、0.424 GPa 基本一致。从图 3-F 中可以看出,对于 g+bi+cd+als+kf+liq 组合,如果升高温度,sill 熔融而消失,如果降低温度,则 kf 消失。

表 3 阿尔泰造山带红柱石型变质序列各变质带变质峰期 P-T 条件

Table 3 P-T conditions of various metamorphic zones in the andalusite sequence in the Chinese Altaiides						
项目	黑云母带	石榴石带	十字石带	红柱石-十字石带	矽线石带	堇青石-矽线石带
T (°C)	445~550 ^[8] ; <450 ^[13]	484.4, 557.7 ^[16] ; 524, 566.5 ^[17] ; 620±116 ^[4] ; 530~580 ^[13]	601±20 ^[4]	632.4 ^[14] ; 540±20 ^[4]	591±103 ^[4] ; 640 ^[4]	740~800 ^[4] ; 713.8 ^[14]
P (Gpa)	0.4~0.5 ^[13] ; 0.2~0.6(估计)	0.4~0.6 ^[13] ; 0.54±0.22 ^[4]	0.8±0.25 ^[4]	0.785 ^[15] ; 0.32±0.05 ^[4]	0.57±0.15 ^[4] ; 0.431 ^[15]	0.50~0.70 ^[4] ; 0.424 ^[15]

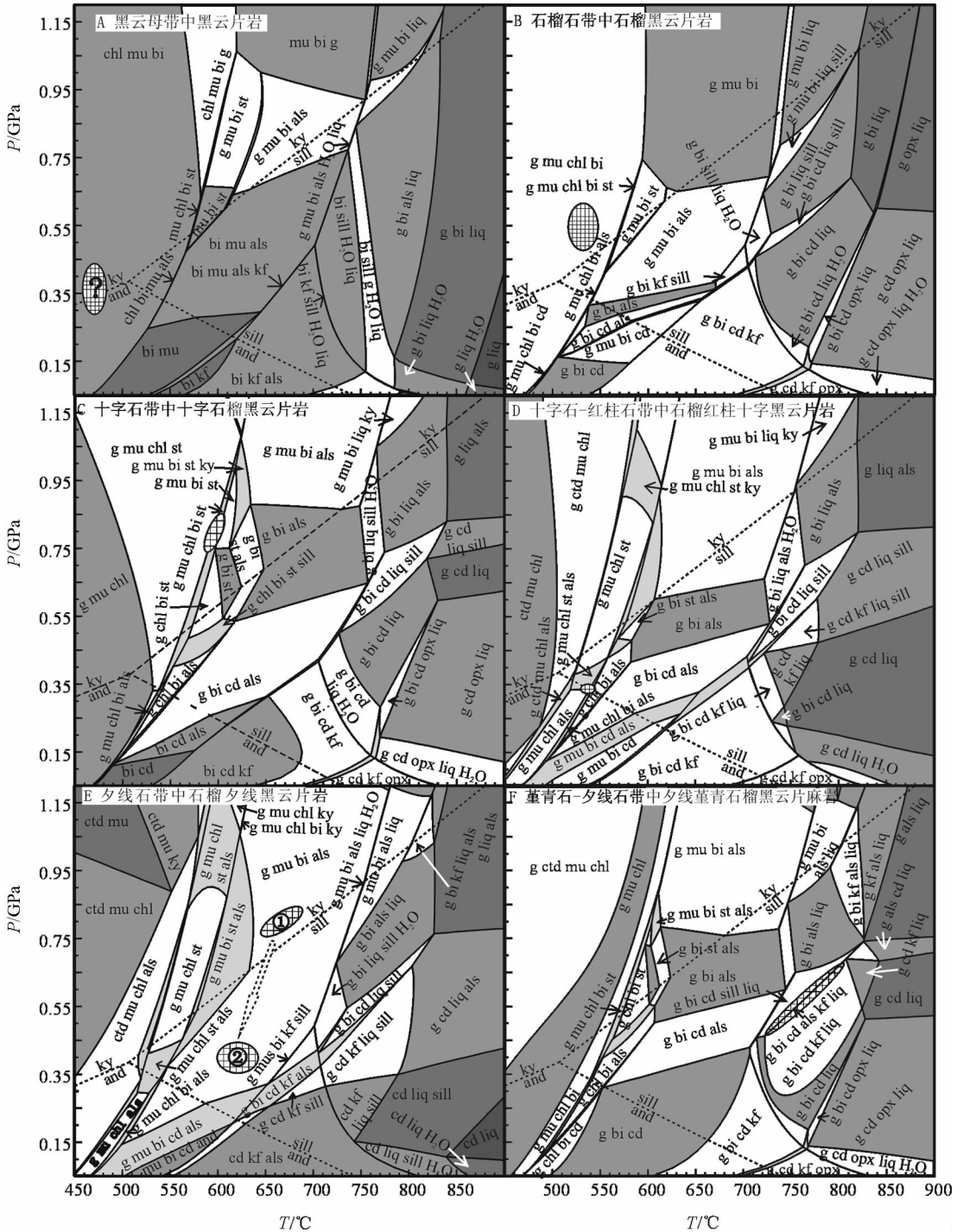


图 3 阿尔泰地区变质泥质岩 P-T 视剖面图

Fig.3 P-T Pseudo section of metapelites in the Altaides

4 变质作用探讨

从前面各变质带的研究可知(表 3 和图 4),黑云母带的变质作用温度、压力估算在 445~550°C 和 0.2~0.6 GPa 范围;石榴石带温度在 480~566°C、压力在 0.54±0.22 GPa 的范围;

十字石带的范围为 601±20°C、0.8±0.25 GPa;十字石-红柱石带中利用视剖面图得到的条件为 540±20°C、0.32±0.05 GPa, 而利用 Holdway^[14,15]的温压计得到的值较高,为 632.4°C、压力为 0.785 GPa,这个值不是红柱石的稳定范围,因此其记录的可能是其早期中压变质条件;矽线石带的变质作用温度为

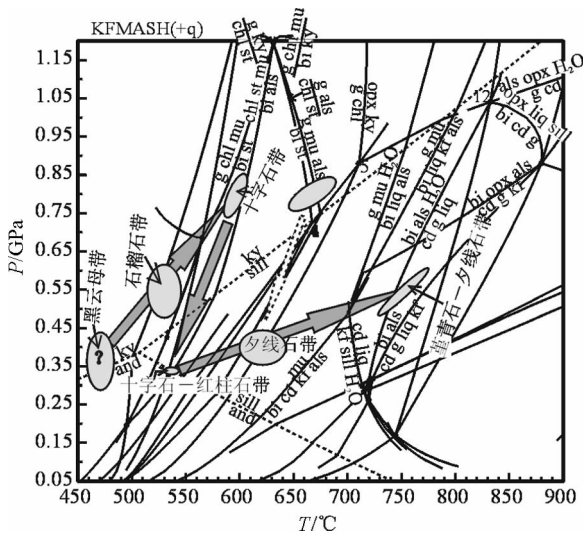


图4 阿尔泰地区低压变质序列野外变质梯度图

(图中 P - T 投影图据 Wei et al.^[12])

Fig.4 Field metamorphic gradients of the low- P metamorphic sequence in the Altaides

(The petrogenetic grid modified from Wei et al.^[12])

640°C、压力 0.43 GPa 左右,由于其石榴石中有蓝晶石包体,因此其早期也可能有中压条件的变质;堇青石-矽线石带变质作用温度和压力范围分别为 740~800°C、0.4~0.7 GPa。

显微镜下在红柱石低压变质序列中的矽线石带里的石榴石包体中发现了蓝晶石,另外庄育勋^[1]也报道发现有红柱石代替蓝晶石的现象;野外在低压型变质序列变质梯度(图4)中,从黑云母带到石榴石带和十字石带,随变质温度增高,压力也增高,显示中压型的特点;而从十字石-红柱石开始,变质压力明显降低,十字石-红柱石带与矽线石带、堇青石-矽线石带同时呈现低压型的特点,其中矽线石带的石榴石中保留有早期中压型的残余。故认为中压型变质早于低压型变质,低压型变质是在早期中压型变质的基础上进行的。

笔者认为阿尔泰造山带低压变质作用可能是在挤压抬升过程中形成的(图4),从图4中可以看出,阿尔泰低压红柱石型变质序列不是一个正常的变质序列,其野外梯度呈现“Z”字型特征:黑云母带、石榴石及十字石带变质条件呈现一个较低的地热梯度;十字石带至十字石-红柱石带体现一个明显的降温降压过程,这可能是快速上升过程中升温率小于散热率所致;十字石-红柱石带、矽线石带及堇青石带呈现较高的地热梯度,但十字石-红柱石带至堇青石-矽线石带温度和压力都有所提高,压力呈现递增趋势。如果是在拉伸的构造环境,十字石带至十字石-红柱石带就不会有明显的降温降压过程,而会有降压升温的趋势;十字石-红柱石带至矽线石-堇青石带的野外梯度也会有降压升温的趋势。挤压造山作用仍可产生大量的花岗岩侵入,如北 Appalachians 中寒武

世(或泥盆级)的陆-陆碰撞产生大量的花岗岩侵入导致低压变质作用^[8],阿尔泰在碰撞造山期间也产生了大量的花岗岩,能为低压变质作用提供足够的热源。因此认为阿尔泰造山带的低压变质作用产生于拉伸构造环境的可能性较小,而更可能形成于挤压抬升的构造环境中。

参考文献(References):

- [1] 庄育勋. 中国阿尔泰造山带热动力时空演化和造山过程[M]. 长春:吉林科学技术出版社,1994:1-280.
Zhuang Yuxun. The Thermal Dynamical Time-space Evolution and Orogenic Process in Chinese Altaides [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1994: 1-280 (in Chinese with English abstract).
- [2] 何国琦, 韩宝福, 岳永君, 等. 中国阿尔泰造山带的构造分区[C]//新疆地质科学(第二辑). 北京:地质出版社,1990:72-85.
He Guoqi, Han Baofu, Yue Yongjun, et al. Tectonic Division and Crustal Evolution of Altay Orogenic Belt in China [C]//Xinjiang Geologic Science(2). Beijing: Geological Publishing House. 1990: 72-85 (in Chinese with English abstract).
- [3] 隋静霞. 新疆北部额尔齐斯构造带变质作用分析[C]//见:涂光炽主编. 新疆北部固体地球科学新进展[C]. 北京:科学出版社,1993:281-291.
Sui Jingxia. The Analysis on Metamorphism of Ertix Structural Belt in North Xinjiang [C]//Tu Guangzhi (ed.). New Improvement of Solid Geosciences in Northern Xinjiang. Beijing: Science Press, 1993: 281-291 (in Chinese).
- [4] Holland T J B, Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest [J]. J Metamorphic Geol, 1998, 16: 309-343.
- [5] Powell R, Holland T, Worley B. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using thermocalc [J]. J Metamorphic Geol, 1998, 16: 577-588.
- [6] 张翠光, 魏春景, 邱林. 新疆阿尔泰造山带变质作用演化及其地质意义[J]. 新疆地质, 2004, 22(1): 16-23.
Zhang Cuiguang, Wei Chunjing, Qiu Lin. Evolution of metamorphism and its geological significance in Altaides, Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 2004, 22(1): 16-23 (in Chinese with English abstract).
- [7] Windley B F, Kröner A, Guo J, et al. Neoproterozoic to Paleozoic of the Altai orogen, NW China: new zircon age data and tectonic [J]. The Journal of Geology, 2002, 110: 719-737.
- [8] 庄育勋. 中国阿尔泰造山带变质作用 PTSt 演化和热-构造-片麻岩穹隆形成机制[J]. 地质学报, 1994, 68(1): 35-47.
Zhuang Yuxun. The pressure-temperature-space-time (PTSt) evolution of metamorphism and development mechanism of the thermal-structural-gneiss in the Chinese Altaides [J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68(1): 35-47 (in Chinese with English abstract).
- [9] 新疆地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1993.
Xinjiang Geology and Mineral Resources Bureau. Regional

- Geology of Xinjiang Uygur Automous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993 (in Chinese).
- [10] Indares A. Metamorphic interpretation of high -pressure - temperature metapelites with preserved growth zoning in garnet, eastern Grenville Province, Canadian Shield [J]. *J Metamorphic Geol*, 1995, 13: 475-486.
- [11] Graessner T, Schenk V. Low-pressure metamorphism of Palaeozoic pelites in the Aspromonte, southern Calabria; constraints for the thermal evolution in the Calabrian crustal cross-section during the Hercynian orogeny [J]. *J Metamorphic Geol*, 1999, 17(2): 157-172.
- [12] Wei C J, Powell R, Clarke G. Calculated phase equilibria for low- and medium-pressure metapelites in the KFMASH and KMnFMASH systems [J]. *J Metamorphic Geol*, 2004, 22(5): 495-508.
- [13] 韩宝福. 中国阿尔泰造山带地壳组成、构造和地壳成熟度的研究 (D). 北京: 北京大学, 1988: 109.
Han Baofu. The Study of the Earth Crust Composition, Structure and Maturity in Chines Altaides [D]. Beijing: Peking University, 1988: 109 (in Chinese with English abstract).
- [14] Holdway M J. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer [J]. *American Mineralogist*, 2000, 85: 881-892.
- [15] Holdway M J. Recalibration of the GASP geobarometer in light of recent garnet and plagioclase activity models and versions of the garnet-biotite geothermometer [J]. *American Mineralogist*, 2001, 86 (10): 1117-1129
- [16] Ferry J M, Spear F S. Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1978, 66: 113-117.
- [17] Perchuk L L, Lavrent'eva. Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite-garnet-biotite [C] // Saxena S K (ed.). *Kinetics and Equilibrium in Mineral Reactions, Advances in Physical Geochemistry*. New York: Springer, 1983. 3: 199-239.
- [18] Miyashiro. *Metamorphic Petrology* [M]. England: University College London Press, 1994: 198-201, 216-238.

Phase equilibrium of low-pressure metamorphism in the Altaides, Xinjiang

ZHANG Cui-guang¹, WEI Chun-jing², HOU Rong-jiu³,
HOU Li-sheng⁴, BO Xiao-ping⁵

(1. *Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;*

2. *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;*

3. *China National Logging Corporation, Beijing 100043, China;* 4. *China Geological Survey, Beijing 100011, China;*

5. *Petroleum Resources Strategic Research Center, Ministry of Land and resources, Beijing 100034, China)*

Abstract: Study of the petrography and phase equilibria of typical metapelites from the low-pressure metamorphic sequence in the Altaides indicates that the $P-T$ conditions are 445-550°C and 0.2-0.6 GPa for the biotite zone, 480-566°C and 0.54±0.22 GPa for the garnet zone, 601±20°C and 0.8±0.25 GPa for the staurolite zone, 540±20°C and 0.32±0.05 GPa for the staurolite-andalusite zone, 640°C and 0.43 GPa for the sillimanite zone and 740-800°C and 0.4-0.7 GPa for the cordierite-sillimanite zone. However, 632.4°C and 0.785 GPa are not in the stable range of the andalusite but probably the medium-pressure metamorphic conditions of the orogenic belt in the early stage. For the 640°C and 0.43 GPa of the sillimanite zone, as the garnet in the zone contains kyanite inclusions, it may also have undergone medium-pressure metamorphism. The low-pressure metamorphic sequence of the Altaides is not a normal metamorphic sequence and its field metamorphic gradient shows the "Z"-shaped character. The low-pressure metamorphism in the Altaides may have formed by compressional uplift of the medium-pressure metamorphic rocks at the early stage in a tectonic environment of extensive intrusion of collision-related granites.

Key words: low-pressure metamorphism; phase equilibrium; Altaides, Xinjiang

About the first author: ZHANG Cui-guang, male, born in 1967, Ph.D and associate senior researcher, mainly engages in geological data management and research; E-mail: zcuiguang@mail.cgs.gov.cn.