

阿尔泰造山带花岗片麻岩穹窿 的形成与演化

庄育勋

陈斌

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

(北京大学地质系, 北京 100871)

主题词 阿尔泰造山带 混合花岗片麻岩穹窿 混合岩化 花岗岩化 造山带演化

提 要 在中国阿尔泰造山带中, 沿各区域热动力异常中心发育了巨大的混合花岗片麻岩穹窿。由变质围岩到混合花岗片麻岩, 在地质产状、变形作用、变质作用、岩石学和地球化学等方面都表现出连续性和继承性的变化特点。可以划分为两个岩石系列: 变质酸性火山岩—浅粒岩—浅色混合花岗片麻岩系列和千枚岩—云母片岩—黑云混合花岗片麻岩系列。以区域热动力异常为中心, 形成了递进变质热穹窿—递进变质构造穹窿—混合花岗片麻岩穹窿这种具有密切成生联系、时空演化过程统一的三位一体的热—构造—片麻岩(Thermal—Structural—Gneiss)穹窿(简称 TSG 穹窿)。它们是在造山挤压缩短、沿区域热动力异常中心深部热流上涌和发生差异性塑性底辟隆起、剥蚀的过程中形成的。

1 中国阿尔泰造山带花岗岩概况

中国阿尔泰造山带(图1)位于西伯利亚地台的西南缘, 额尔齐斯断裂的南侧属准噶尔地块及周缘地槽区(Ⅱ)。中国阿尔泰造山带可以进一步划分为三个构造—变质单元。

中国阿尔泰造山带中花岗质岩石出露面积达两万余平方公里, 占总面积的 $\frac{1}{3}$ 。这些花岗质岩石是多重成因的^[1]。分布于准噶尔地块北缘优地槽中的花岗质岩石是与辉长岩、闪长岩共生的富碱质的幔壳重熔型花岗岩^[2]。在中国阿尔泰造山带北部的库尔木图带(I¹)以及阿尔泰带(I²)的西北部的低绿片岩相区, 主要发育地壳重熔型花岗岩。此类岩体出露可达数千平方公里, 侵入接触, 岩体内部较均匀, 有闪长岩浑圆残留体。主要岩石为花岗闪长岩和花岗岩。岩石呈均粒、粗粒, 块状, 无明显的片麻状构造, 交代作用不强。在阿尔泰带(I²)和喀拉额尔齐斯带(I³)的递进变质作用热穹窿和递进变质构造穹窿中心, 发育了大规模的混合花岗片麻岩和混合岩, 构成混合花岗片麻岩穹窿。它们是沉积岩和酸性火山岩经区域变质和混合岩化、花岗岩化作用形成的^[3], 相当于陆壳改造型花岗岩^[4]。此类花岗质岩石占阿尔泰造山带花岗质岩石的85%。

亦证明混合花岗片麻岩形成于海西中期^[6]。而在花岗质岩石中获得的个别加里东期年龄^[7]可能代表加里东期少量侵入体在海西期花岗质岩石中被改造的残余。

3 变质围岩与混合花岗片麻岩变质作用、变形作用的连续性

在中国阿尔泰造山带主体的阿尔泰带中,主要发育了震旦纪一早奥陶世哈巴河群的泥质、泥砂质碎屑岩建造,早泥盆世康布铁堡组酸性火山岩建造和中泥盆世阿勒泰镇组含碳酸盐、基性火山岩的碎屑岩建造。它们经历了三幕变质、变形作用。

早期变质、变形幕发生于海西早期,形成了全区的单相低绿片岩相的矿物组合和以变泥质岩、千枚岩为主的变质岩。晚期变质、变形幕以叠瓦状推覆和动力退化变质作用为特征。

在主期变质、变形、混合岩化、花岗岩化幕(简称主期幕)中,形成了以区域热动力异常为中心的递增变质带、递进变形带和混合花岗片麻岩岩田。

3.1 递增变质作用特征

在主期幕中,由外部向区域热动力异常中心,依次发育了绢云母—绿泥石带、黑云母带、石榴石带、十字石带、蓝晶石(红柱石)带、矽线石—堇青石带。进一步向区域热动力异常中心方向,出现混合岩带和位于异常中心的混合花岗片麻岩岩田。由低级变质带至区域热动力异常中心,变质作用峰期温度由440℃连续上升至700℃,而变质作用压力则由1.05 GPa下降至0.1 GPa^[8](表1)。各递增变质带的形成是不等时的。其形成、演化顺序与由

表1 中国阿尔泰造山带递增变质作用温压条件
Table 1 *P-T* conditions for progressive metamorphism in Altaides, China

测定方法	变质带						矽线石—堇青石带	
	黑云母带	石榴石带	十字石带	蓝晶石带	红柱石带		矽线石—石榴石带	矽线石—堇青石带
<i>T</i> (°C)	矿物对温度计	445—550		460—560	580—654	607—650	590—642	669—681
	实验资料	440—520	500—565	530—630	600—680	560—630	630—700	600—700
<i>P</i> (GPa)	矿物对	红柱石型	1.05—0.72		0.67—0.63		0.51—0.34	0.46—0.01
	压力计	蓝晶石型	1.05—0.72	1.0—0.55	0.40—0.35	0.75—0.35		0.60—0.24
	实验资料					>0.48	<0.48	>0.35

外部向区域热动力异常中心、变质带在空间上的排布顺序一致^[9]。这些特征表明,由主期幕的初期至峰期和由外部向区域热动力异常中心,变质作用温度连续增加,而变质作用压力逐渐下降。这表现出以区域热动力异常为中心,热流和构造流连续地中心式上升和剥蚀的统一的时空演化过程。

3.2 递进变形作用特征

与主期递增变质作用过程相伴发生了主期递进变形作用。在造山侧向挤压和沿区域热动

力异常中心构造流持续上涌的动力条件下,形成递进变质构造穹窿。由低级变质带至混合花岗片麻岩穹窿中心连续地发育五个递进变形序次(deformation succession)和相应的五个变形带。每个变形序次和变质构造是以前一变形序次的面理构造作为变形面发生褶皱。向异常中心方向,褶皱由开阔逐渐紧闭,原有片理向新生轴面片理的置换程度亦逐渐加强,最终产生贯透的轴面片理。至此一个变形序次和一个变形带结束。在连续的进一步的递进变形中,这些轴面片理又作为下一变形序次的变形面被褶皱。这些贯透片理带是递进变质构造穹窿周围正向伸展滑移运动的主要部位。由外部向穹窿中心,岩石经历的变形序次越多,变形作用演化亦越长,隆起幅度亦越大。这与变质作用压力向穹窿中心方向逐渐降低的趋势是一致的。

4 变质围岩与混合花岗片麻岩在岩石学、岩石化学上的连续性

混合花岗片麻岩穹窿主要由两类混合花岗片麻岩组成。一类是粗粒黑云混合花岗片麻岩,另一类是中粒等粒浅色混合花岗片麻岩。它们与变质围岩在矿物含量、组构、岩石化学、稀土元素地球化学方面都表现出明显的连续性和继承性,可以划分为两个岩石系列。

4.1 千枚岩—云母片岩—黑云混合花岗片麻岩系列

由外部向混合花岗片麻岩穹窿中心,可以划分为三个岩带:变质岩带、混合岩带和混合花岗片麻岩岩田。

在变质岩带,随变质作用递增,依次出现绢云千枚岩、绢云黑云片岩、石榴黑云片岩、十字红柱黑云片岩、矽线堇青黑云片岩。它们的平均粒度依次为0.05—0.1 mm, 0.1—0.5 mm, 0.5—1 mm, 1—1.5 mm, 1.5—2 mm。岩石中石英和黑云母含量基本不变,斜长石含量逐渐增加,绢云母(白云母)含量逐渐减少(表2)。岩石由千枚状逐渐变为片状、片麻状。

进入到混合岩带以后,主要岩石类型为混合矽线黑云片岩,混合十字矽线堇青黑云片麻岩等条带状混合岩。混合岩脉体具浅灰色、中细粒粒状镶嵌变晶结构,宽数毫米至数厘米,由钠长石、石英及少量黑云母组成。顺层分布并与基体一起组成复杂和谐的揉皱。随混合岩化增强,岩石中出现粉红色长英质脉,其形态不规则,多切穿片理及浅灰色脉体。脉体由微斜长石、斜长石、石英、黑云母组成,具有明显的交代结构。

混合岩带的岩石中斜长石含量剧增,而黑云母含量明显降低。岩石中的斜长石、石英和黑云母分别呈同种矿物的聚合体,并进一步聚合重结晶,使岩石组构加粗,并出现片麻状构造。

黑云混合花岗片麻岩和似斑状黑云混合花岗片麻岩是这一岩石系列在混合花岗片麻岩岩田范围的主要岩石类型。条带状混合矽线堇青黑云片麻岩、片岩在其中呈残留层状间杂分布。黑云混合花岗片麻岩在逐渐加强钾交代作用下,斜长石被微斜长石化。微斜长石含量逐渐增加,这些微斜长石可以进一步生长成巨斑,使岩石变为似斑状黑云混合花岗片麻岩。岩石中发育广泛而且强烈的交代作用。缝合线状、穿孔状、港湾状交代结构、蠕英交代结构十分普遍。

此岩石系列由变质岩至混合岩再到混合花岗片麻岩,岩石的 SiO_2 含量逐渐升高,(分别为64.38%, $N=8$; 68.36%, $N=2$; 72.32%, $N=6$)。而 Al_2O_3 则显出降低趋势(15.07%,

表2 千枚岩—云母片岩—黑云混合花岗片麻岩系列矿物含量
Table 2 Modal abundance of phyllite-mica schist-biotite
migmatitic granitic gneiss series

序号	岩石名称	Pl	Mic	Q	Bi	Ms	Gar	Stau	And (Ky)	Sill	Cord	Mt	样号
1	绢云黑云片岩	5.0		20.0	45.0	30.0							B ⁸⁵ -4
2	石榴黑云片岩	5.3		5.9	58.1	3.8	24.5					0.2	B747
3	十字黑云片岩	10.7		16.9	47.8	3.2		26.5					B1119
4	红柱十字黑云片岩	3.4		22.3	43.0	3.6		0.4	25.3				B1154
5	矽线红柱十字黑云片岩	7.2		26.0	48.5	0.4		10.7	4.4	1.2		2.1	B1125
6	石榴十字蓝晶红柱矽线 黑云片岩	10.3		31.5	48.4	0.8	0.3	3.4	3.8	1.3			B756
7	红柱矽线堇青黑云片岩	18.1		8.7	42.4				2.6	14.5	13.4	0.25	B40
8	条带状混合十字黑云片 岩	50.1		24.1	24.5	0.3		0.8				0.2	B1173
9	石榴黑云片麻岩	61.8		17.2	17.1	1.3	2.1					0.2	B824
10	黑云斜长片麻岩	67.8		11.4	17.7	1.8							B1082
11	二云斜长片麻岩	54.2		34.7	2.3	8.5							B1261
12	黑云混合花岗片麻岩	53.7	5.6	35.0	5.3	0.4							B1236
13	黑云混合花岗片麻岩	59.0	5.7	25.6	8.5								B1188
14	黑云混合花岗片麻岩	35.0	20.0	30.0	15.0								B1191
15	黑云混合花岗片麻岩	43.0	36.1	14.7	5.3	0.2							B1239

14.50%, 13.90%)。Fe₂O₃+FeO+ $\frac{1}{2}$ (MgO+CaO)值、Al₂O₃/K₂O+Na₂O+CaO值随变质程度增强而增大, 而随混合岩化和花岗岩化增强又逐渐下降。这与岩石中随变质作用增强出现大量铁镁质铝硅酸盐矿物, 再随混合岩化、花岗岩化作用增强这些矿物减少直至消失的变化是一致的。

此类岩石系列的化学成分绝大部分位于交代(或变造)型花岗岩区, 属S型花岗岩(图2)。随混合岩化、花岗岩化作用的增加, Ca值(原子数)有明显增加的趋势。

云母片岩、混合岩、黑云混合花岗片麻岩的稀土配分模式显示出相同的特点(图3)。富轻稀土右倾型, Eu/Eu*值在0.15—0.47之间。ΣREE、LREE/HREE及Eu/Eu*无明显变化规律。

4.2 变质酸性火山岩—浅粒岩—浅色混合花岗片麻岩系列

这一岩石系列随变质作用、混合岩化、花岗岩化作用增强, 依次出现变质酸性火山岩、浅粒岩、混合质浅粒岩和浅色混合花岗片麻岩。这一岩石系列岩石风化面粉红色, 新鲜面灰白色, 等粒粒状变晶结构。黑云母或角闪石含量多在5%以下。岩石呈厚层状, 常夹有角闪变粒岩、斜长角闪岩和磁铁石英岩。随混合岩化和花岗岩化作用增强, 微斜长石含量逐渐增加

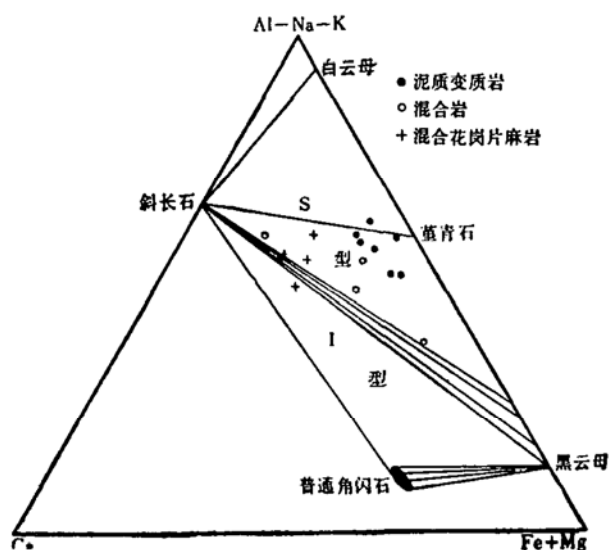


图 2 (Al—Na—K)—Ca—(Fe²⁺ + Mg) 图
(仿 Hinc 等, 1978)

Fig. 2 (Al—Na—K)—Ca—(Fe²⁺ + Mg)
diagram

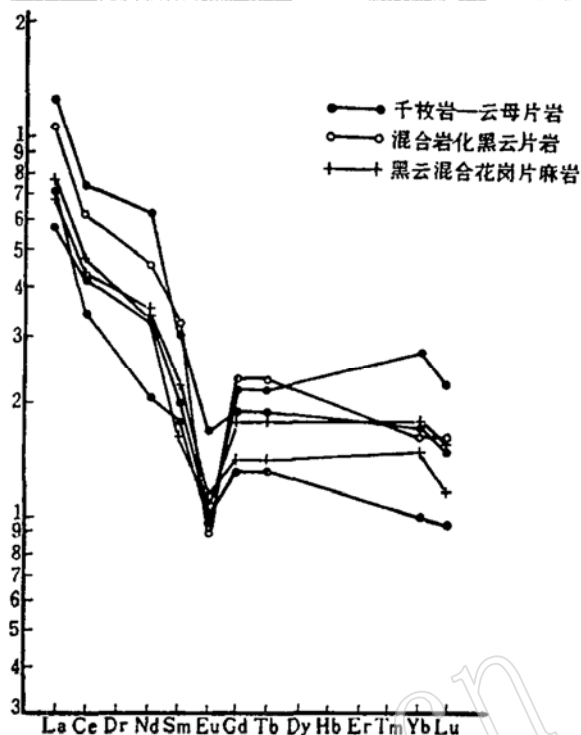


图 3 千枚岩—云母片岩—黑云混合花岗岩片麻岩系列
岩石稀土配分模式

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of
phyllite—mica-schist—biotite migmatitic granitic
gneiss series

表 3 变质酸性火山岩—浅粒岩—浅色混合花岗岩片麻岩系列矿物含量

Table 3 Modal abundances of meta-rhyolite-leuco
leptite-leuco migmatitic granitic gneiss

序号	岩石名称	Pl	Mic	Bi	Q	Am	Mt	Cc	样号
1	透闪浅粒岩	48.0		0.28	47.5	3.9	0.35		B 801
2	角闪浅粒岩	48.4			47.3	3.4	0.22		B 842
3	黑云浅粒岩	51.4		4.47	44.1		0.03		B 780
4	混合浅粒岩	49.5	7.2	1.9	44.4		0.2		B 888
5	浅色混合花岗岩片麻岩	44.3	14.4	1.1	39.9			0.2	B 870

(表 3)。随变质程度和混合岩化、花岗岩化程度增高, 岩石由显微粒状变晶结构 (粒度 0.06 mm) 的变质酸性火山岩变为细—中粒等粒粒状镶嵌平衡变晶结构的浅粒岩。进一步在混合岩化流体作用下发生聚合重结晶作用, 数个斜长石颗粒聚合形成具有统一解理和双晶的粗大的斜长石, 混合质浅粒岩仍保持镶嵌平衡结构。在混合花岗岩片麻岩中, 由斜长石、石英、黑云母组成的镶嵌平衡结构被改造成齿状、缝合线状结构。斜长石强烈微斜长石化, 石英拉长、

穿孔。

此岩石系列的 SiO_2 75%—79%, Al_2O_3 9%—13%, MgO 0.7%—1%, Fe_2O_3 0.4%—2%, FeO 0.4%—2%。随混合岩化、花岗岩化增强, 岩石的 Na_2O 由浅粒岩的 5.917% ($N=26$) 降至浅色混合花岗片麻岩的 4.324% ($N=11$), 而 K_2O 则由 0.942% 上升至 3.138%。此岩石系列的岩石化学成分落在同熔型 (I 型) 花岗岩区和交代型 (S 型) 花岗岩区。落入 S 型花岗岩区的岩石多属变质酸性火山凝灰岩。随混合岩化、花岗岩化作用增强, 岩石成分亦有 Ca 值 (原子数) 相对增加的趋势 (图 4)。

变质酸性火山岩、浅粒岩、浅色混合花岗片麻岩的稀土配分模式基本相同, 属轻稀土富集右倾型。Eu/Eu* 值 0.095—0.274, 负 Eu 异常强烈 (图 5)。

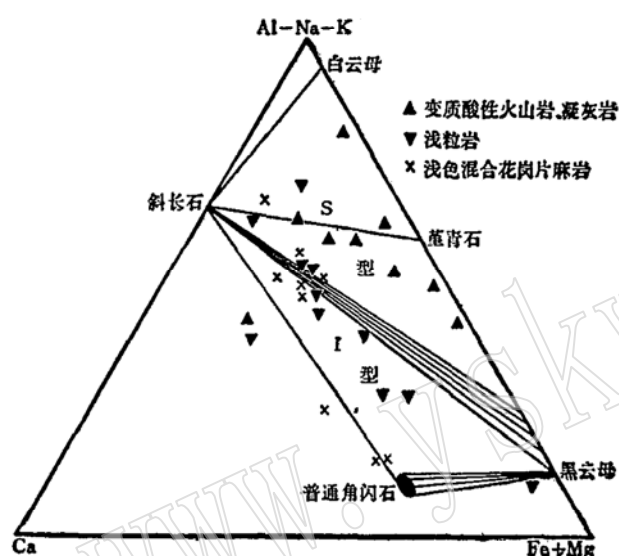


图 4 变质酸性火山岩—浅粒岩—浅色混合花岗片麻岩系列岩石 (Al—Na—K)—Ca—(Fe²⁺ + Mg) 图解

Fig. 4 (Al—Na—K)—Ca—(Fe²⁺ + Mg) diagram of meta-rhyolite-leptite-leuco-migmatitic granitic gneiss series

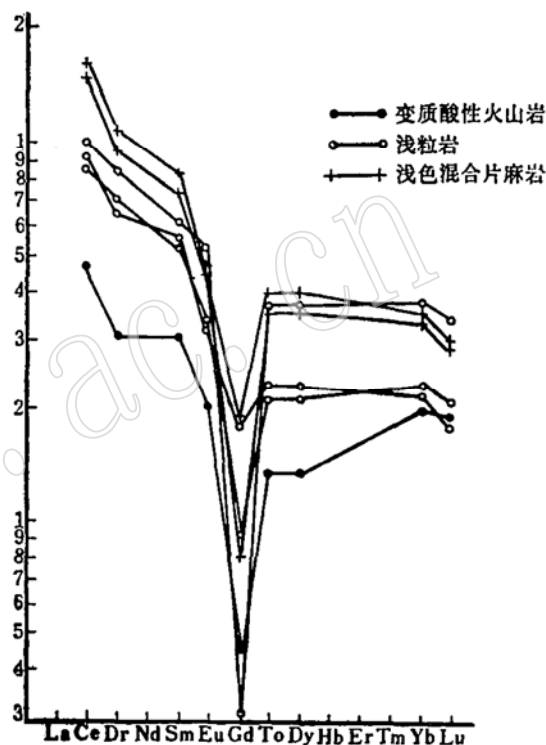


图 5 变质酸性火山岩—浅粒岩—浅色混合花岗片麻岩系列稀土配分模式

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of meta-rhyolite-leptite-leuco-migmatitic granitic gneiss series

两岩石系列的野外宏观地质特征、岩石组构、矿物量、岩石化学等诸方面特点表明, 混合花岗片麻岩是由变质岩在进一步的混合交代作用下形成的, 主要经历三个演化阶段: (1) 变质结晶、重结晶阶段 随变质作用由低绿片岩相向高角闪岩相递进变化, 岩石由显微粒状、显微鳞片变晶结构逐渐变为中粒等粒镶嵌平衡结构、中粗粒粒状鳞片变晶结构, 并形成高角闪岩相矿物组合; (2) 混合岩化阶段 在钠硅质、钙硅质流体作用下, 岩石发生聚合重结晶作用; (3) 花岗岩化阶段 发生强烈的钾质、硅质交代作用, 导致强烈而广泛的微斜长石化和石英活化, 形成微斜长石 + 石英 + 黑云母稳定组合。这三个阶段是一个连续的, 由

封闭系统逐渐变为开放系统的过程。

5 混合花岗岩的成因系列

随着混合岩化、花岗岩化作用的演化,继混合花岗片麻岩穹窿形成之后,在TSG穹窿周围形成了整合混合花岗岩和不整合混合花岗岩。

5.1 整合混合花岗岩 如哈拉苏岩体、可可托海岩体、阿拉尕特岩体等,岩体呈卵圆形,沿造山带走向方向略有拉长,区域性构造走向与接触面协调,属典型的整合深成岩体(Castro, 1987)。此类岩体 $5 \times 10 \text{ km}^2 \pm$,呈岩株或大的岩基外部的分枝。岩体外部有数十米宽的混合岩带,其中发育1—2m的席状混合花岗岩岩墙。岩体与变质围岩界线清晰、截然。接触界面与围岩片理方向一致。岩体内有 $1 \text{ km} \pm$ 宽的似斑状混合花岗岩内带。向岩体中心方向逐渐变为均匀、粗粒的混合花岗片麻岩。岩体内有较多的变质岩残余条带,宽数米至数百米。这些变质岩残余层与混合花岗片麻岩的片麻理方向一起显示出岩体具有同心环状构造。在卫片上,围绕此类岩体亦有明显的环状构造。变质作用强度向岩体方向表现出递增变化,并与区域变质带连续、协调一致。

5.2 不整合混合花岗岩 呈岩株状, $5 \times 5 \text{ km}^2 \pm$,浑圆或不规则状。岩体明显切穿区域片理,多侵位于绿片岩相区。岩体外部并无角岩化或烘烤边现象。岩石块状,中细粒等粒结构,具弱片麻理。岩石中交代现象显著。可可托海西北部的铁买克岩体、康布铁堡岩体、将军山岩体均属此类。

混合花岗岩成因系列的各类岩体在空间上有规律分布。混合花岗片麻岩穹窿分布于TSG穹窿的核部,整合混合花岗岩分布于TSG穹窿的核外部,而不整合混合花岗岩则分布于TSG穹窿的更外部。前两者是在主期递增变质、变形幕的高峰期形成、定位。而后者则是主期变质、变形幕峰期之后的弱应变阶段形成的。

6 讨论与结论

A 本区的混合花岗片麻岩主要由泥质变质岩、酸性火山岩变质岩进一步经混合岩化、花岗岩化作用改造形成的。这就造成同一岩体中既有S型又有I型花岗岩的现象。对于这种与变质作用有密切成生联系的混合花岗片麻岩来说,按物质来源分为S型和I型花岗岩^[10]并不具有很大意义。

B 由外部向TSG穹窿中心,变质围岩与混合花岗片麻岩在产状、组构、矿物含量、岩石化学、稀土元素地球化学诸方面特征上表现出连续变化和继承性;变质构造表现出连续的递进演化;变质作用温度上升、压力下降。这一系列特点表明,递增变质作用热穹窿—递进变质构造穹窿—混合花岗片麻岩穹窿(TSG)是在主期变质、变形幕中,沿区域热动力异常中心,热能和具强化学能的钠、钾、硅质流体上涌,对已形成的变质岩进一步交代、改造,同时发生底辟式塑性差异递进隆起这一系列作用下,在统一的时空热动力过程中产生的(图6)。

多数岩石学家认为发育于中高级变质岩区的花岗质岩石与变质作用有密切的成生联系,但一般认为它们是主期变质、变形幕之后的一次较晚的、独立的、次要的构造事件中形

成、定位的^[11]。我们的研究表明,中国阿尔泰山带的混合花岗片麻岩与递增变质带、递进变形带都是在海西中期主期变质、变形幕中经时空上统一、相互间有密切成生联系的热动力过程形成的。混合花岗片麻岩的形成与递增变质作用、递进变形作用是一个统一的热动力作用整体,只有从它们统一的时空演化过程才能客观合理和全面地认识混合花岗片麻岩的成因和定位机制。

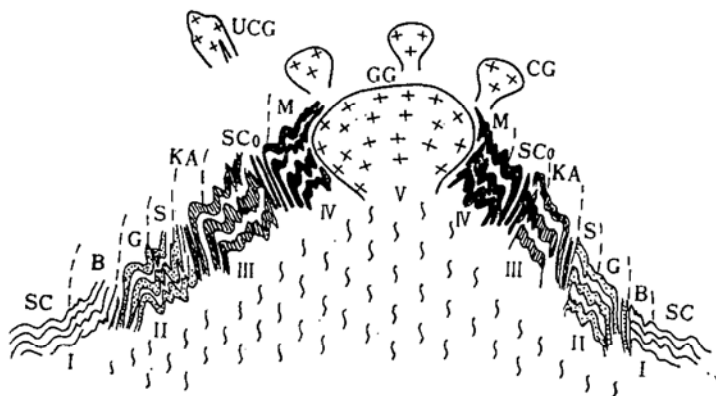


图6 混合花岗片麻岩穹窿形成模式

Fig. 6 Genetic model of migmatitic granitic gneiss dome

递进变形带: I—Fd¹-Sd¹; II—Fd²-Sd²; III—Fd³-Sd³; IV—Fd⁴-Sd⁴; V—Fd⁵-Sd⁵

递增变质带: SC—绢云母—绿泥石带; B—黑云母带; G—石榴石带; S—十字石带;

KA—蓝晶石(红柱石)带; SC0—矽线石—簪青石带; GG—混合花岗片麻岩穹窿; CG—整合混合花岗岩体; UCG—不整合混合花岗岩体

C 随混合岩化、花岗岩化作用的进一步演化,在混合花岗片麻岩穹窿周围又依次形成整合混合花岗岩体和不整合混合花岗岩体,构成混合花岗岩成因系列。

中国阿尔泰山带中发育了与变质作用有密切成生联系的混合花岗片麻岩,其成因和演化过程是十分典型的。本文的目的是为这方面研究提供一个典型实例。

本文工作得到了国家教委博士点科研基金、博士后科研基金、国家自然科学基金的资助。董申保教授、卢良兆教授给予了悉心指导。新疆地矿局第四地质大队给予了大力支持。特致谢意!

参 考 文 献

- 1 王中刚、赵振华,阿尔泰山花岗岩的成因与演化,见:305项目《新疆地质科学》编委会编,新疆地质科学,第1辑,北京:地质出版社,1990.69—77.
- 2 南京大学地质系,华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系,北京:科学出版社,1981.1—395.
- 3 芮行健、吴玉金,中国阿尔泰山花岗岩成因,见:徐克勤、涂光炽主编,花岗岩地质与成矿关系,南京:江苏科技出版社,1984.180—190.
- 4 徐克勤、孙鼎、王德滋、胡受奚、刘英俊、季寿元,华南花岗岩成因与成矿,见:徐克勤、涂光炽主编,花岗岩地质与成矿关系,南京:江苏科技出版社,1984.1—20.
- 5 卡斯特罗 A.花岗岩类的侵位与相关的构造的述评,吕贻峰译,地质科学译丛,1989,(2):28—35.
- 6 新疆区测队,新疆同位素地质年龄数据汇编,新疆地质,1987,5(4):16—105.
- 7 邹天仁、曹惠志、吴柏青,新疆阿尔泰山花岗岩和非造山花岗岩及其判别标志,地质学报,1988,62(3):228—245页.
- 8 庄育勋,阿尔泰山海西活动带中东段变质作用研究,长春地质学院学报,1987,变质地质专辑,147—164.

- 9 庄育勋. 变斑晶形成的相对时间标志与阿尔泰变质带变质带形成演化. 长春地质学院学报, 1991, 21(1): 17—24.
- 10 查佩尔 B W, 怀特 A J R. 澳大利亚东南部莱克兰褶皱带的 I 型和 S 型花岗岩. 见: 徐克勤, 涂光炽主编. 花岗岩地质和成矿关系. 南京: 江苏科技出版社, 1984, 58—68
- 11 Soula J C. Characteristics and mode of emplacement of gneiss domes and plutonic dome in central-eastern Pyrenees. *J. Structural Geol.* 1982, 4(3): 313—342.

The Formation and Evolution of Migmatitic Granite-Gneiss Domes in Altaides, China

Zhuang Yuxun

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Chen Bin

(Department of Geology, Peking University)

Key words: Gneiss dome; migmatization; granitization

Abstract

The migmatitic granite-gneiss dome has the following characteristics:

1. It looks elliptic in plane and funnel-shaped in profile, being 50—100 km long and 20—40 km wide.

2. With the gradual intensification of metamorphism, migmatization and granitization from the low-grade area to the center of the migmatitic granite-gneiss dome, there appear in turn sericite-chlorite zone, biotite zone, garnet zone, staurolite zone, kyanite (andalusite) zone, sillimanite-cordierite zone, migmatite zone and migmatitic granite-gneiss dome, indicating an increase in temperature from 400℃ to 700℃ and drop in pressure from 0.85 GPa to 0.35 GPa.

3. From the low-grade area to the center of the dome, a progressive sequence of metamorphic structures can be observed, which finds expression in a series of prograde folds and schistosity. The nearer the rocks are to the center of the dome, the higher grade of tectonism and more deformation they have undergone.

4. The migmatitic granite-gneiss dome consists mainly of biotite migmatitic granite-gneiss and leuco-migmatitic granite-gneiss intercalated with migmatized mica schist. In such aspects as attitudes, rock types, modal abundances,

fabrics, petrochemistry and rare earth elements, there exist continuous and gradual variations from phyllite, mica schist, migmatized mica schist to biotite migmatitic granite-gneiss and from metamorphic rhyolite, leptonite, migmatized leptonite to leuco-migmatitic granite-gneiss, suggesting that the two sorts of migmatitic granite-gneiss are genetically related to meta-pelite and metamorphic acid volcanic rocks respectively and should attribute their formation to metamorphism, migmatization and granitization.

The thermal dome of progressive metamorphism, the structural dome of progressive deformation and the migmatitic granite-gneiss dome constitute a thermal-structural-gneiss (TSG) trinity dome. The unified temporal-spatial evolutionary process of progressive metamorphism, deformation, migmatization and granitization implies that the formation of the TSG dome is attributed to heat flow, upward gushing of fluids rich in K, Na and Si, and differential diapiric uprise around the center of the regional thermodynamic anomaly.

www.yskw.ac.cn