

新疆阿尔泰高级变质带中淡色花岗质脉体的特征及成因模拟

邱林, 魏春景, 娄玉行, 田伟

(造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 在新疆阿尔泰地区的高级变质带中广泛发育着一系列规模不等的透镜状和条带状的浅色脉体, 主要有含 Al_2SiO_5 的淡色花岗岩脉、白云母斜长花岗岩脉和白云母二长花岗岩脉。主量元素分析表明这3类脉体的 $A/CNK = 1.1 \sim 2.14$, 属于S型花岗岩。从白云母二长花岗岩脉 \rightarrow 白云母斜长花岗岩脉 \rightarrow 含 Al_2SiO_5 的淡色花岗岩脉, SiO_2 的含量增高, Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 的含量降低。在NKFMASH体系中的 pT 视剖面图上进行相平衡分析和熔体成分计算表明, 含 Al_2SiO_5 的浅色花岗岩脉和白云母斜长花岗岩脉的熔体形成与蓝晶石型变质带的抬升降压过程有关, 其熔融温度没有超过白云母脱水熔融反应, 并且含 Al_2SiO_5 的淡色花岗岩脉不是由生成的熔体直接结晶形成的, 而需要经历一定的碱性组分随流体迁移丢失; 白云母二长花岗岩脉的熔体形成主要以增温为主, 并与白云母脱水熔融反应有关。十字石的脱水熔融反应对熔体形成有明显贡献。

关键词: 深熔作用, 淡色脉体, 变质相平衡, THERMOCALC, 阿尔泰造山带

中图分类号: P588.3, P588.12⁺, P581; **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6524(2007)01-0027-08

Characteristics and petrogenetic simulation of leucogranitic veins in the Altay high-grade metamorphic zones, Xinjiang

QIU Lin, WEI Chun-jing, LOU Yu-xing and TIAN Wei

(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: A series of leucogranites occur in lenticular and banded forms in the Altay high-grade metamorphic zone, Xinjiang. According to their mineral assemblages, these leucogranites can be divided into three groups: Al_2SiO_5 -bearing leucogranites, muscovite-plagioclase leucogranites and muscovite monzo-leucogranites. An analysis of major elements shows that these leucogranites belong to S-type with A/CNK being $1.1 \sim 2.14$. From the muscovite monzo-leucogranites through muscovite-plagioclase leucogranites to Al_2SiO_5 -bearing leucogranites, SiO_2 contents increase and Al_2O_3 , Na_2O and K_2O contents decrease. The phase relations in pT pseudosection for the NKFMASH system and the calculation of melt composition at different pressures and temperatures show that the melts of Al_2SiO_5 -bearing and muscovite-plagioclase leucogranites might have originated from an uplifting process of the kyanite-type metamorphic zone, with no relation to the muscovite dehydration-melting reaction. Moreover, the Al_2SiO_5 -bearing leucogranites were probably not directly crystallized from the melt, but had to do with some losses of alkaline components through fluids. The muscovite monzo-leucogranites probably originated from a heating process through the muscovite dehydration-melting reaction. The modeling of phase relations also

收稿日期: 2006-06-23; 修订日期: 2006-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40525006, 40372032)

作者简介: 邱林(1980-), 男, 硕士研究生, 变质岩石学专业; 通讯作者: 魏春景, 电话: 010-62754157, E-mail: cjwei@pku.edu.cn.

indicates that the staurolite dehydration-melting reaction must have played a very important role in the melt formation.

Key words: anatexis; leucogranites; metamorphic phase equilibrium; THERMOCALC; Altay

自上世纪初以来,地质学家们一直对变质带中分布的浅色花岗质脉体有着浓厚的兴趣,多数学者认为这些脉体的产生与深熔作用有关。地质学家们从岩石学(Brown *et al.*, 1995; Sawyer, 2001)、地球化学(Greenfield *et al.*, 1998, Mengel *et al.*, 2001)、实验岩石学(Huang and Wyllie, 1974; Le Breton and Thompson 1988; Patin, Douce and Johnston 1991; Vielzeuf and Montel, 1994; Carington and Harley, 1995)等不同角度对变质沉积岩中的深熔作用进行了研究。并以此为基础建立了变质沉积岩固相线以上的岩石成因格子(Grant, 1985; Powell and Downes, 1990; Spear *et al.*, 1999; Thompson, 2001; White *et al.*, 2001, Wei *et al.*, 2004)。一般认为,在高级变质岩中通过前进变质(深熔)反应形成的熔体相具有很强的活动性,它可以在岩石体系特定部位集中,发生分凝作用,也可以从体系中分离出去,形成岩浆脉体和侵入体。White 等(2001)首次利用变质相平衡的方法定量研究变质泥质岩中的变质深熔反应、熔体分凝机理和结晶过程,从而大大加深了人们对高级变质过程的理解。本文试图以新疆阿尔泰造山带高级变质带中的浅色脉体为例,利用 NKFMAH 体系中的变质相平衡关系,对不同浅色脉体的成因及演化过程做一初步研究。

1 区域地质

新疆阿尔泰造山带位于西伯利亚板块和哈萨克斯坦-准噶尔板块之间,相当于西伯利亚板块西南缘,为典型的显生宙增生造山带,早古生代到晚古生代发生了洋壳俯冲与碰撞造山作用(何国琦等, 1994; 许继锋等, 2001; Windley *et al.*, 2002)。阿尔泰地区发育典型的递增变质带,可分为两种类型:蓝晶石型和红柱石型(庄育勋, 1994)。前者从低向高出现黑云母带→石榴石带→十字石带→蓝晶石带→夕线石带→石榴石-堇青石带,后者出现黑云母带→石榴石带→十字石带→红柱石带→夕线石带→石榴石-堇青石带。Wei 等(2006)认为蓝晶石型变质带的形成与晚泥盆世开始的弧陆碰撞事件有关,红柱

石型变质带是由蓝晶石型变质带在抬升过程中叠加变质形成的。在蓝晶石带以上的高级变质带中广泛发育着一系列规模不等的浅色花岗质脉体(图 1)脉体的围岩主要为(石榴、夕线)黑云斜长片岩和片麻岩,二者之间呈渐变或者侵入接触关系。阿尔泰造山带中约有 40% 的面积为各种均质-片麻状花岗岩体,其成分以黑云母花岗岩、花岗闪长岩和英云闪长岩为主,时代上主要为晚加里东期(307~408 Ma)和海西期(290~344 Ma, 邹天人等, 1988)。成因上这些花岗岩主要与弧岩浆演化有关(Chen and Jahn, 2002),但其中 S 型二云母花岗岩为与高级变质作用密切相关的地壳深熔作用所致(庄育勋, 1994)。

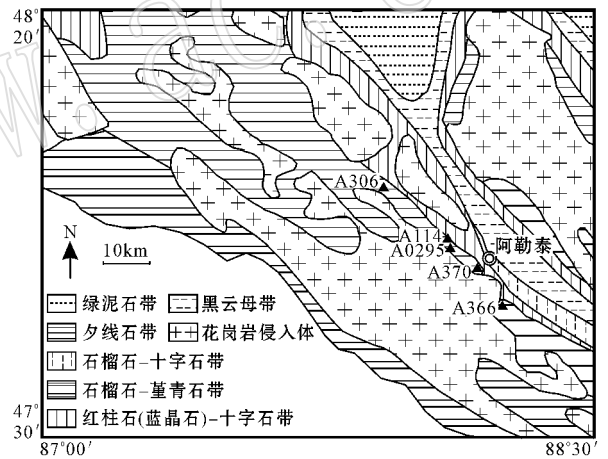


图 1 阿尔泰地区变质带及样品分布图[根据庄育勋(1994)和 Wei 等(2006)修改]

Fig. 1 Sketch map of Altay area, showing distribution of metamorphic zones and sampling sites [modified after Zhuang Yuxun (1994) and Wei *et al.* (2006)]

2 岩相学特征

本文研究的浅色花岗质脉体采自夕线石带中,脉体的围岩主要为夕线黑云片岩、夕线石榴黑云片麻岩,脉体与围岩呈较明显的侵入接触关系。围岩中主要含有黑云母、斜长石和石英,以及少量石榴石和夕线石。夕线石带中除了含有这种浅色花岗岩脉体外,还含有一些伟晶岩脉(前人对伟晶岩脉的研究较多,但是对这些浅色花岗岩脉的研究较少)。根据矿物组合特征,可以将脉体分为 3 类:含 Al_2SiO_5 的

淡色花岗岩脉、白云母斜长花岗岩脉和白云母二长花岗岩脉,其矿物组成列于表 1。

表 1 阿尔泰高级变质带中淡色花岗质脉体的矿物组成及体积百分含量 $\varphi_B/\%$

Table 1 Mineral assemblage and volume percentage of leucogranites from the Altay high-grade metamorphic zone

脉体	含 Al_2SiO_5 浅色花岗岩脉		白云母斜长花岗岩脉		白云母二长花岗岩脉	
	A0295	A114	A366	A370	A306	
石榴石	10	10	-	5	-	
黑云母	-	-	-	-	-	
白云母	25	20	25	5	20	
蓝晶石	2	-	-	-	-	
夕线石	5	-	-	-	-	
斜长石	20	35	25	20	20	
钾长石	-	-	15	30	30	
石英	35	32	35	35	30	
锆石	<1	<1	<1	<1	<1	
磷灰石	<1	<1	<1	-	-	

(1) 含 Al_2SiO_5 的淡色花岗岩脉: 规模较小, 呈透镜状产出, 宽 10~30 cm, 长不过 1 m, 脉体长轴平行围岩片理。岩石发育鳞片状粒状结构, 块状、片麻状构造(图 2a)。蓝晶石为他形粒状, 粒度约为 0.3 mm; 夕线石呈毛发状、针柱状分布在白云母周围。白云母(0.1~0.5 mm)具有一定的定向性, 部分云母中还含有细小的粒状白云母包体(0.02 mm)。石榴石呈(0.5~1 mm)半自形至自形, 个别含有少量的石英包体。从石榴石核部到边部, 铁铝榴石为 52.5%~54.4%, 锰铝榴石 40.9%~38.8%, 镁铝榴

石 1.4%~1.6%, 钙铝榴石 0.0~0.3%, 没有明显的环带。斜长石(0.3~0.6 mm)呈粒状或半自形柱状, 主要为钠长石, $An = 6.4$, 少量为更长石, $An = 21.6$ 。副矿物为锆石、磷灰石。

(2) 白云母斜长花岗岩脉: 呈脉状产出, 宽数十厘米至数米, 长十几米, 与围岩的片麻理平行, 为不等粒花岗结构, 块状构造(图 2b)。石榴石(0.25~0.55 mm)呈半自形-自形粒状, 部分含有少量的石英包体, 成分上从核部到边部含铁铝榴石 62.79%~61.18%, 锰铝榴石 28.4%~28.6%, 镁铝榴石 8.1%~9.5%, 钙铝榴石 0.7%~0.0%, 没有明显环带。白云母大小为 0.1~0.3 mm。斜长石(0.25~0.5 mm)呈它形粒状半自形柱状, $An = 4.8\sim 11.7$ 。副矿物为锆石、磷灰石。

(3) 白云母二长花岗岩脉: 呈脉状产出, 宽 1~5 m, 长数十米。岩石为不等粒花岗结构, 块状构造(图 2c)。白云母大小为 0.1~0.5 mm, 钾长石呈半自形柱状(0.5~1 mm), $Or = 91.7\sim 92$, $Ab = 8\sim 8.3$ 。有些钾长石晶体内有条状或是焰火状的钠长石出溶条纹, 说明其形成温度较高。斜长石呈(0.5~1 mm)粒状-半自形柱状, $An = 5.8$ 。副矿物为锆石。

3 脉体地球化学特征

该区花岗岩脉的主量元素成分见表 2 和图 3。其总体变化规律为从白云母二长花岗岩脉→白云母

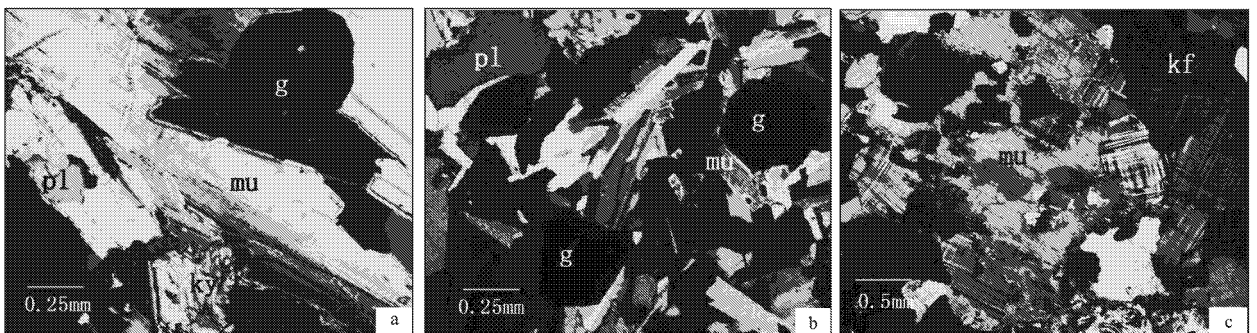


图 2 阿尔泰淡色花岗质脉体显微照片

Fig. 2 Photomicrographs of Altay leucogranites

a—含 Al_2SiO_5 的淡色花岗岩(A0295, 正交偏光); b—白云母斜长花岗岩(A114, 正交偏光); c—白云母二长花岗岩(A306, 正交偏光);

g—石榴石; kf—钾长石; ky—蓝晶石; mu—白云母; pl—斜长石

a— Al_2SiO_5 -bearing leucogranite(A0295, +); b—muscovite plagiogranite(A114, +); c—muscovite adamellite(A306, +);

g—garnte; kf—K-feldspar; ky—kyanite; mu—muscovite; pl—plagioclase

表 2 阿尔泰变质带中淡色花岗岩主量元素组成

 $w_B/\%$

Table 2 Major element compositions of leucogranites in the Altay metamorphic zone

脉体	含 Al_2SiO_5 的脉		白云母斜长花岗岩脉		白云母二长花岗岩脉		高喜马拉雅	
	样号	A0295	A114	A366	A306	A370	二云母	白云母
SiO ₂		79.34	76.34	77.18	72.42	75.07	72.89	74.77
TiO ₂		0.01	0.11	0.04	0.05	0.06	0.08	0.05
Al ₂ O ₃		12.38	14.82	13.37	15.18	13.37	15.01	14.47
FeO		0.60	0.85	0.43	0.57	0.50	0.98	0.91
MnO		0.25	0.16	0.05	0.07	0.03	0.01	0.02
MgO		0.21	0.35	0.21	0.27	0.19	0.13	0.09
CaO		0.94	0.36	1.16	1.21	0.67	0.61	0.73
Na ₂ O		0.89	1.77	2.83	4.12	3.72	4.18	3.82
K ₂ O		2.85	3.09	2.43	4.58	5.31	4.69	4.04
P ₂ O ₅		0.64	0.14	0.63	0.59	0.05	0.22	0.09
LOI		1.81	1.92	1.62	0.89	1.18	0.95	0.69
Total		99.99	100.00	100.00	100.01	100.21	99.86	99.78
A/CNK		1.98	2.14	1.42	1.10	1.25	1.15	1.21

测试单位为北京大学地球与空间学院主量元素分析实验室,采用 X 荧光法,测试者杨斌,高喜马拉雅数据引自 Visona and Lombardo (2002)。

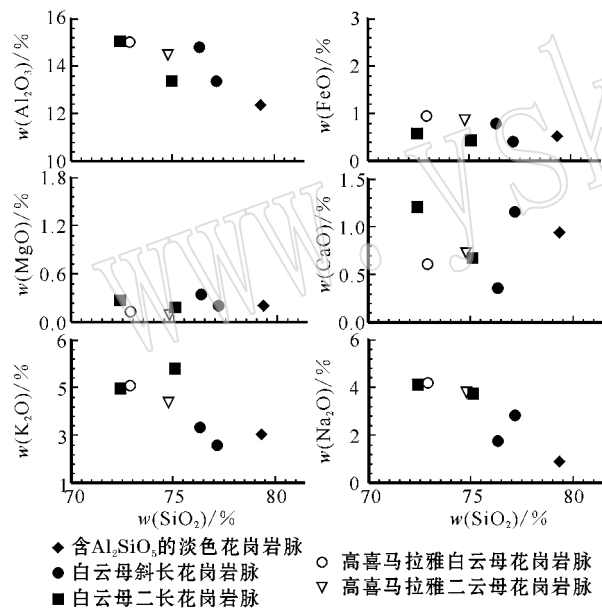


图 3 阿尔泰高级变质带中淡色花岗质脉体主要元素哈克图解

Fig. 3 Harker diagram of major elements in leucogranites from the Altay high-grade metamorphic zone

斜长花岗岩脉→含 Al_2SiO_5 的淡色花岗岩脉 SiO_2 的含量增高, Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 含量降低, $A/CNK = 1.10 \sim 2.14$ 相当于 S 型花岗岩。其中白云母二长花岗岩脉的主量元素特征与高喜马拉雅淡色花岗岩脉相似 (Visona and Lombardo, 2002)。

4 脉体的相平衡关系与成因

White 等 (2001) 首次在 NCKFMASH 体系中计算了矿物熔体平衡关系,指出在全体系的视剖面图上,矿物熔体平衡关系受亚体系中低变度平衡控制。如全体系中的固相线受着 NKASH 亚体系控制,全体系中铁镁矿物的平衡关系受着 KFMASH 亚体系控制, Ca、Mn 等组分对固相线以上的相平衡影响不大 (Wei *et al.*, 2004)。因此,本文利用 THERMOCALC 3.23 程序 (Powell *et al.*, 1998) 在 NCKFMASH 体系中模拟本区脉体的成因。

4.1 pT 视剖面图与熔体成分

计算视剖面图时需要选择特定的全岩成分。考虑到阿尔泰地区的淡色花岗质脉体主要出现于蓝晶石带以上的高级变质岩中,这里选择在区内分布广泛、尚未发生熔融的石榴黑云片岩 (B85-5) 为源岩模拟其过程。根据庄育勋 (1994) 发表的数据,样品 B85-5 在 NCKFMASH 体系中的摩尔分数为 $Na_2O = 1.01$, $K_2O = 3.11$, $FeO = 7.73$, $MgO = 6.43$, $Al_2O_3 = 14.81$, $SiO_2 = 70.00$, $H_2O = 8.50$ 。其中水含量代表岩石在中压 (0.4~0.6 GPa) 条件下接近固相线时岩石中的最低饱和水含量。在计算固相线以下相平衡关系时假设水和石英过量,计算固相线以上相平衡关系时假设石英过量。所计算得出的视剖面图如

图 4 (图中矿物代号见 Holland & Powell, 1998)。图 4 中有 4 个不变点 (圆圈), 15 条单变线 (实线), 以双变域 (白色) 和三变域 (浅灰色) 为主, 有一个四变域 (深灰色), 固相线 (①) 的温度范围在 650°C 左右, 固相线以上熔体开始出现。为了阐明熔体成分与温压条件的关系, 本文结合 Wei 等 (2006) 提出的本区变质作用具有从递增升温到抬升减压的演化历史和具体 pT 条件设计两种 pT 轨迹。轨迹 1 从饱和水固相线开始经过十字石脱水熔融和白云母脱水熔融反应后终止的增温增压的轨迹 (图 4 中点 A→G, 图中 ②为十字石脱水熔融线, ③为白云母脱水熔融线)。轨迹 2 模拟从蓝晶石带的温压条件降温降压到接近固相线的过程 (图 4 中点 H→N)。在这两条 pT 轨迹上选取特征点计算不同矿物组合中熔体的含量和成分 (见表 3 和图 5)。沿着轨迹 1 的 A→G 点产生

的熔体含量从 0.1%→9.1% (以 1 个氧化物为基础的摩尔分数), 当通过饱和水固相线时, 岩石中熔体含量不到 1%, 十字石脱水熔融反应对熔体含量有明显贡献 (从 0.6%→4.4%), 以后随着温度升高熔体含量增加, 白云母脱水熔融反应对熔体含量的贡献并不十分明显 (从 8.6%→9.1%)。沿着轨迹 1 升温, 熔体中 SiO_2 含量减少, $\text{FeO} + \text{MgO}$ 的含量升高, Na_2O 降低, K_2O 升高。沿着轨迹 2 从 H→N 点, 熔体含量也增加 (4.6%→9.0%), 随着温压的降低, SiO_2 含量升高, $\text{FeO} + \text{MgO}$ 含量略有降低, Na_2O 含量降低, K_2O 含量升高, 但 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 总量变化不大。模拟计算的熔体成分与本区实测脉体的成分相比, 除含 Al_2SiO_5 的淡色花岗质脉体外, 其余的脉体成分与计算成分较接近。

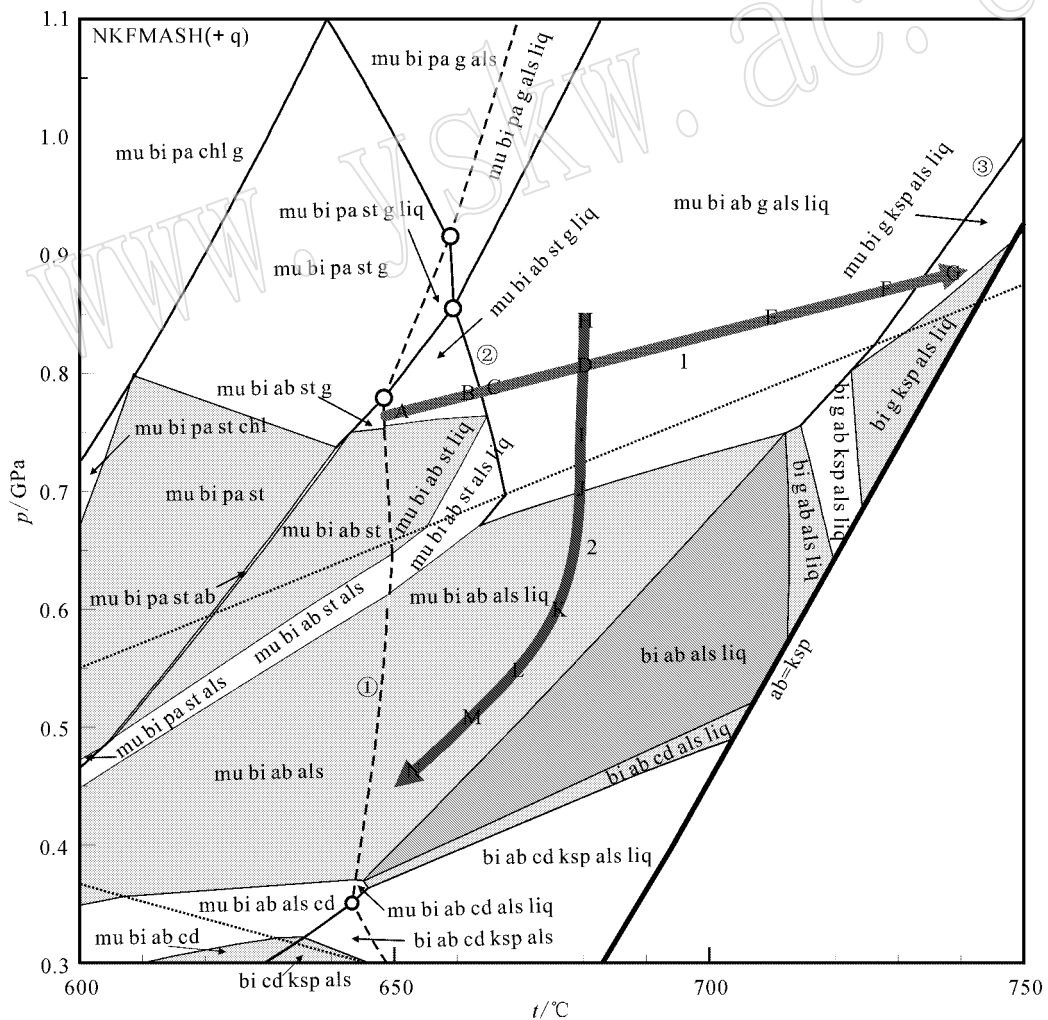


图 4 阿尔泰变质带石榴黑云片岩样品 (B85-5) p - T 视剖面图

Fig. 4 p - T pseudosection of garnet-biotite schist (sample B85-5) from the Altay metamorphic zone

表 3 不同 pT 条件下模拟计算的熔体含量 ($x_B/\%$) 及熔体中主要元素成分 ($w_B/\%$)
Table 3 Calculated melt mod($x_B/\%$) and composition ($w_B/\%$) under different $p-T$ conditions

矿物组合	点	p/GPa	$t/^\circ\text{C}$	熔体含量*	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	MgO	FeO
轨迹 1										
mu bi ab	A	0.77	650	0.1	75.31	15.01	7.59	1.86	0.05	0.19
st g liq	B	0.78	664	0.6	75.06	15.20	7.46	2.03	0.05	0.19
	C	0.78	665	4.4	75.16	15.06	7.48	2.05	0.05	0.19
mu bi ab	D	0.80	680	5.4	74.82	15.27	7.25	2.40	0.05	0.21
g ky liq	E	0.83	710	7.2	74.42	15.35	6.57	3.35	0.06	0.25
	F	0.84	728	8.6	74.25	15.36	6.04	4.01	0.06	0.27
mu bi g ksp ky liq	G	0.86	735	9.1	74.18	15.35	5.93	4.20	0.07	0.27
轨迹 2										
mu bi ab	H	0.85	680	4.6	74.59	15.46	7.52	2.18	0.06	0.20
g ky liq	D	0.80	680	5.4	74.82	15.27	7.25	2.40	0.05	0.21
	I	0.75	680	6.2	75.01	15.13	6.94	2.65	0.05	0.22
mu bi ab g sill liq	J	0.67	680	7.3	75.27	14.90	6.30	3.26	0.04	0.23
	K	0.60	675	8.4	75.74	14.57	5.82	3.68	0.03	0.16
mu bi ab	L	0.55	670	8.9	75.95	14.46	5.51	3.92	0.03	0.13
sill liq	M	0.50	660	8.9	76.42	14.14	5.41	3.89	0.02	0.11
	N	0.45	650	9.0	76.72	14.05	5.28	3.85	0.02	0.09

熔体含量为 1 个氧化物为基础的摩尔分数,表中矿物代号见 Holland and Powell(1998),下同。

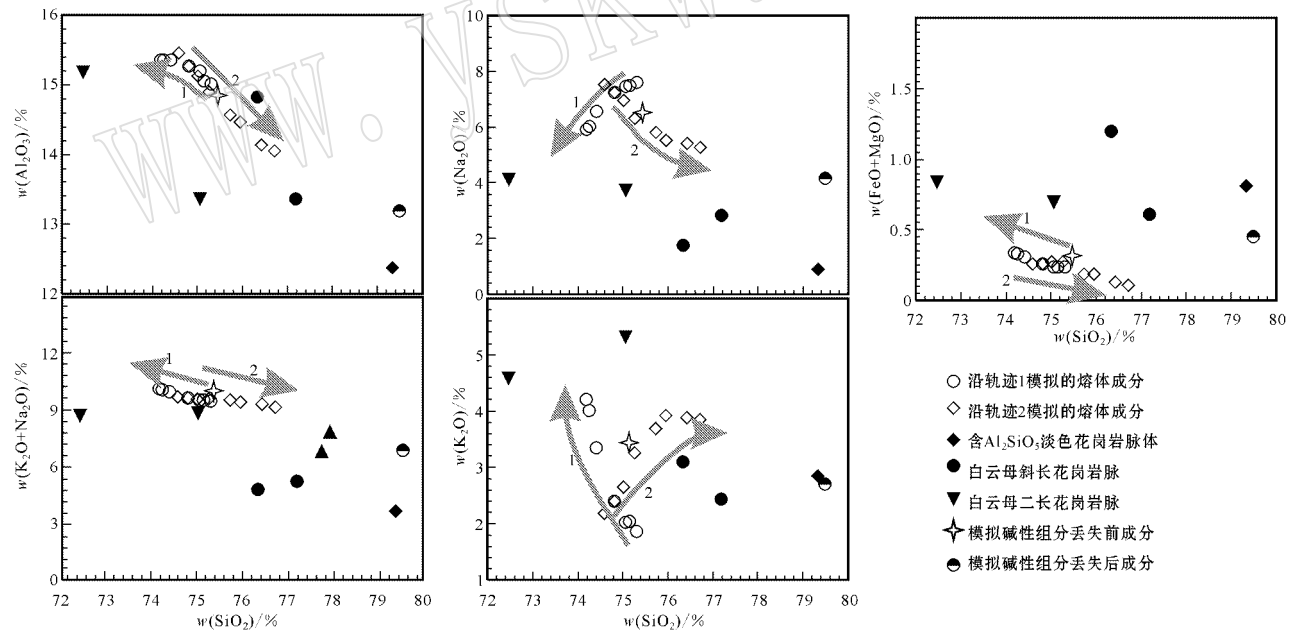


图 5 所计算的熔体成分随温压变化及其与实测脉体成分的对比

Fig. 5 Calculated melt compositions under different $p-T$ conditions and comparison with the measured compositions of leucogranites

4.2 各种脉体的成因

白云母斜长花岗岩脉中含有白云母、石榴石、钠长石, 不含有钾长石, 说明在其形成过程中, 变质深熔作用没有经过白云母的脱水熔融反应, 否则大量的白云母将消失形成钾长石 ($g + mu + ab = bi + ksp$

+ als + liq)。轨迹 2 所经过的变质反应没有经过白云母脱水熔融反应, 而且从图 5 可以看出, 轨迹 2 的熔体成分变化趋势是趋近于这种脉体的实测成分的, 表明轨迹 2 反映了白云母花岗岩脉的熔体形成过程。

白云母二长花岗岩脉区别于上述白云母斜长花岗岩脉的主要特征是含有较多的钾长石,并且含有少量残留的白云母,说明该脉体在熔体形成的作用过程中白云母脱水熔融反应,大量的白云母转变为钾长石。视剖面图中(图 4)轨迹 1 就是经过了这样一个经过白云母脱水熔融线的增温增压的过程,成分图中(图 5)轨迹 1 熔体成分的变化趋势趋近于这种脉体的实测成分。这种增温跨过白云母脱水熔融反映的方式也是包括高喜马拉雅花岗岩脉在内的大多数花岗岩脉的成因模式(Visona and Lombardo, 2002)

含 Al_2SiO_5 的淡色花岗岩脉的主要矿物组合与白云母斜长花岗岩脉相似,含有大量白云母,不含钾长石,所以也没有经过白云母的脱水熔融反应,应该由轨迹 2 的过程形成熔体。但是该种脉体中含有 Al_2SiO_5 ,并且实测脉体成分与轨迹 2 计算熔体成分差别较大,说明这种脉体不是由生成的熔体直接冷却结晶形成的,而是在熔体形成后经过了更为复杂的过程。从脉体中含有蓝晶石、夕线石来看,该熔体是在蓝晶石型变质带抬升过程中发生叠加变质作用时,经过了夕线石带的峰期变质条件时形成的(0.67GPa, 680°C, Wei *et al.*, 2006),所以熔体中的夕线石可能由蓝晶石转化形成,模拟熔体成分与实测脉体成分差别较大说明熔体中的部分组分可能发生了迁移丢失。Nabelek(1997)指出含 Al_2SiO_5 的淡色脉体形成的流体介质中往往富含 H、F 等,易于带走碱性组分,本区含 Al_2SiO_5 的淡色花岗岩脉体的形成很可能与这种机理有关。借助视剖面图的熔体成分计算可以定量模拟这一过程。首先以夕线石带的温压条件(0.67 GPa, 680°C)计算的熔体成分作为初始熔体成分(图 4 中 J 点,图 5 中星点),如果在其中加入 0.5(体积分数)的蓝晶石,并有 60% Na_2O , 50% K_2O 以碱性长石的组分随流体迁移丢失,那么剩余的熔体成分接近于含 Al_2SiO_5 的花岗岩脉的实测成分。

5 结论

(1)新疆阿尔泰造山带高级变质带中的花岗质脉体主要有含 Al_2SiO_5 淡色花岗岩脉、白云母斜长花岗岩脉和白云母二长花岗岩脉,其化学成分特点为富 SiO_2 、 Al_2O_3 , 贫铁、镁。其中 Al_2SiO_5 淡色花岗岩脉、白云母斜长花岗岩脉 Na_2O 、 K_2O 含量相对较低。

这 3 类脉体成分相当于 S 型花岗岩成分($A/\text{CNK} = 1.10 \sim 2.14$)。

(2) pT 视剖面图上的相平衡分析表明,含 Al_2SiO_5 的浅色花岗岩脉和白云母斜长花岗岩脉的熔体的形成与蓝晶石型变质带的抬升降压过程有关,且没有经过白云母脱水熔融的反应。其中含 Al_2SiO_5 的淡色花岗岩脉体不是由生成的熔体直接结晶形成的,而需要经历一定的碱性组分随流体迁移丢失;白云母二长花岗岩脉的熔体的形成主要以增温为主,并经过了白云母脱水熔融反应。

References

- Brown M, Averkina Y A, McLellan E L, *et al.* 1995. Melt segregation in migmatites [A]. Brown M, Rushmer T and Sawyer E W. Mechanisms and Consequences of Melt Segregation from Crustal Protolith [C]. J. Geophys Res B100 : 15 655 - 15 679.
- Carrington D P and Harley S L. 1995. Partial melting and phase relations in high-grade metapelites: an experimental petrogenetic grid in the KFMASH system [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 120 : 270 - 291.
- Chen B and Jahn B M. 2002. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of NW China and their tectonic implications [J]. Geol. Mag., 139 : 1 - 13.
- Grant J A. 1985. Phase equilibria in low-pressure partial melting of pelitic rocks [J]. Am. J. Sci., 285 : 409 - 435.
- Greenfield J E, Clarke G L and White R W. 1998. A sequence of partial melting reactions at Mt Staford, central Australia [J]. J. Metamorphic Geol., 16 : 363 - 378.
- He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan, *et al.* 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China [M]. Urumqi : Xinjiang People's Publishing House and Hongkong : Educational and Cultural Press Ltd., 437 (in Chinese with English abstract)
- Holland T J B and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest [J]. J. Metamorphic Geol., 16 : 309 - 343.
- Huang W L and Wyllie P J. 1974. Melting relations of muscovite with quartz and sanidine in the $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ system to 30 kilobars and an outline of paragonite melting relations [J]. Am. J. Sci., 274 : 378 - 395.
- Le Breton N and Thompson A B. 1988. Fluid-absent (dehydration) melting of biotite in metapelites in the early stages of crustal anatexis [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 99 : 226 - 237.
- Mengel K, Richter M and Johannes W. 2001. Leucosome-forming small scale geochemical processes in the metapelitic migmatites of the Turku area, Finland [J]. Lithos, 56 : 47 - 73.
- Nabelek P I. 1997. Quartz-sillimanite leucosomes in high-grade schists, Black Hills, South Dakota: a perspective on the mobility of Al in high-grade metamorphic rocks [J]. Geology, 25 : 995 - 998.
- Patin Douce A E and Johnston A D. 1991. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites [J]. Contrib.

- Mineral. Petrol. , 107 : 202~218.
- Powell R and Downes J. 1990. Garnet porphyroblast-bearing leucosomes in metapelites : mechanisms , phase diagrams and an example from Broken Hill , Australia[A]. Ashworth J R and Brown M. High-temperature Metamorphism and Crustal Anatexis[C]. London : Unwin Hyman , 105~123.
- Powell R, Holland T and Worley B. 1998. Calculating phase diagram involving solid solutions via non-linear equations , with examples using THERMOCALC[J]. J. Metamorphic Geol. , 16 : 577~586.
- Sawyer E W. 2001. Melt segregation in the continental crust : distribution and movement of melt in anatectic rocks[J]. J. Metamorphic Geol. , 19 : 291~309.
- Spear F S, Kohn M J and Cheney J T. 1999. *p-t* paths from anatectic pelites[J]. Contrib. Mineral Petrol. , 134 : 17~32.
- Thompson A B. 2001. Clockwise *P-T* paths for crustal melting and H₂O recycling in granite source regions and migmatite terrains[J]. Lithos , 56 : 47~74.
- Vielzeuf D and Montel J M. 1994. Partial melting of metagreywackes. I. Fluid-absent experiments and phase relationships[J]. Contrib. Mineral. Petrol. , 117 : 375~393.
- Visona D and Lombardo B. 2002. Two-mica and tourmaline leucogranites from the Everest-Makalu region (Nepal-Tibet). Himalayan leucogranite genesis by isobaric heating[J]. Lithos , 62 : 25~150.
- Wei C J, Clarke G, Tian W, *et al.* 2006. Kyanite- and andalusite-type metamorphic zones from the Altai orogen , Xinjiang , China [J]. Lithos (in press).
- Wei C J, Powell R and Clarke G L. 2004. Calculated phase equilibria for low-and medium-pressure metapelites in the KFMASH and KMnFMASH systems[J]. J. Metamorphic Geol. , 22 : 495~508.
- White R W, Powell R and Holland T J B. 2001. Calculation of partial melting equilibria in the system Na₂O-CaO-K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O (NCKFMASH) [J]. J. Metamorphic Geol. , 19 : 139~153.
- Windley B F, Kroner A, Guo J H, *et al.* 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen , NW China : new zircon age data and tectonic evolution[J]. The Journal of Geology , 110 : 719~737.
- Xu Jifeng, Chen Fanrong, Yu Xueyuan, *et al.* 2001. Kuerti ophiolite in Altai area of North Xinjiang : Magmatism of an ancient back-arc basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica , 20(3) : 344~352(in Chinese with English abstract).
- Zhuang Yuxun. 1994. Tectonothermal Evolution in Space and Time and Orogenic Process of Altaide , China[M]. Changchun : The Science and Technology Publishing Company of Jilin Province , 402(in Chinese with English abstract).
- Zou Tianren, Cao Huizhi and Wu Baiqing. 1988. Orogenic and anorogenic granitoids of the Altai mountains , Xinjiang and their discrimination criteria[J]. Acta Geologica Sinica , 62(3) : 228~45 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 何国琦、李茂松、刘德全等. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿 [M]. 乌鲁木齐 : 新疆人民出版社和香港文化教育出版社 , 437.
- 许继锋、陈繁荣、于学元等. 2001. 新疆北部阿尔泰山地区库尔提蛇绿岩 : 古弧后盆地系统的产物 [J]. 岩石矿物学杂志 , 20(3) : 344~352.
- 庄育勋. 1994. 中国阿尔泰山带热动力学时空演化和造山过程 [M]. 长春 : 吉林科技出版社 , 402.
- 邹天人、曹惠志、吴柏青. 1988. 新疆阿尔泰山花岗岩和非造山花岗岩及其判别标志 [J]. 地质学报 , 62(3) : 228~245.

致 谢

2006 年度 ,许多地质学及相关学科的专家在百忙之中抽出时间 ,配合编辑部为本刊评审了稿件 ,为提高刊物质量做出了重要贡献。没有这些专家的辛勤劳动 ,本刊是不可能多方面取得进步的。为此 ,本刊编辑部向他们表示衷心的感谢 !

这些专家有(以姓名的汉语拼音排序) :

白文吉	陈江峰	陈 鸣	陈培荣	陈 文	陈小明	丁 林	樊祺诚	冯子辉
葛文春	洪大卫	姜洪启	廖立兵	陆松年	苗建宇	秦 善	芮宗瑶	沈其韩
史仁灯	万渝生	汪 灵	王立本	王 涛	王希斌	王新社	魏海泉	吴必豪
吴才来	吴福元	吴宏海	夏林圻	夏群科	闫全人	杨崇辉	于炳松	於祖相
袁洪林	袁忠信	张德全	张海祥	张立飞	张 旗	张同钢	张泽明	张招崇
张宗清	郑建平	支霞臣	周金城	周新民	朱金初			