

文章编号: 1000-4734(2021)06-0713-11

# 新疆东准噶尔后碰撞花岗岩成因的实验研究

邵小月<sup>1,2</sup>, 唐红峰<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 地球内部物质高温高压重点实验室, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 新疆东准噶尔地区发育大面积的后碰撞花岗岩, 依据其地球化学特征可以分为 I 型花岗岩和 A 型花岗岩。为了探讨这些花岗岩的成因, 我们以研究区内卡拉麦里蛇绿岩套基性岩 (蚀变玄武岩、辉长岩) 和代表沉积物的东准噶尔泥质岩的混合物 (基性岩: 泥质岩质量比 9:1) 为初始物, 开展了高温高压条件下的部分熔融实验研究。结果表明, 90% 蚀变玄武岩 + 10% 沉积物的混合物在 925 °C、1.0 GPa、加水量 0%~4% 条件下部分熔融形成了准铝质花岗闪长质熔体, 与熔体共存的矿物主要为角闪石, 熔体具有低 SiO<sub>2</sub>、A/CNK, 高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO\*、CaO 的特征, 在成分上与研究区内后碰撞 I 型花岗岩类似; 而 90% 辉长岩 + 10% 沉积物的混合物在相同条件下加水量 2%~4% 部分熔融形成了弱过铝质英闪长质熔体, 与熔体共存的矿物相为角闪石, 熔体具有低 SiO<sub>2</sub>, 高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO\*、CaO、A/CNK 的特征, 与研究区内后碰撞 I 型花岗岩存在着明显的差异。因此, 东准噶尔地区 I 型花岗岩岩浆可能是蚀变玄武岩加沉积物在上述实验条件下部分熔融所形成, 而高 SiO<sub>2</sub> 含量的 A 型花岗岩岩浆不能在上述实验条件下通过部分熔融形成。

**关键词:** 后碰撞花岗岩; 混合初始物; 部分熔融; 东准噶尔; 新疆

**中图分类号:** P581; P589.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.079

**第一作者:** 邵小月, 男, 1993 年生, 硕士研究生, 实验岩石学研究. E-mail: shaoxiaoyue@mail.gyig.ac.cn

## Experimental study on the genesis of post-collisional granites in the eastern Junggar, Xinjiang Autonomous Region, China

SHAO Xiao-yue<sup>1,2</sup>, TANG Hong-feng<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of High Temperature & High Pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Numerous post-collisional granites developed in the eastern Junggar of Xinjiang can be classified into I-type and A-type ones based on their geochemical characteristics. In order to explore the genesis of these granites. In this paper, we have carried out partial melting experiments, under high temperature and high pressure conditions, of an starting material which was composed of the basic rocks (altered basalt, gabbro) collected from the Kalamaili ophiolite and the argillaceous rock (representing sediments) collected from the eastern Junggar, with the mass ratio of 9:1 for the mixing of basic rock and argillaceous rock. The results show that the partial melting of the mixture of 90% altered basalt plus 10% sediment with 0%—4% added water under 925 °C and 1.0 GPa had produced the metaluminous granodioritic melt, which was coexisted with main mineral of amphibole, and was characterized with low SiO<sub>2</sub> content and low A/CNK value, but high contents of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO\*, and CaO. The melt has similar chemical compositions to those of the post-collisional I-type granites in the eastern Junggar. However, the melt generated by the partial melting of the mixture of 90% gabbro plus 10% sediment with 2%—4% added water under the same high temperature and high pressure conditions belongs to the slight peraluminous tonalitic melt, which was coexisted with mineral phase of amphibole and was characterized with low contents of SiO<sub>2</sub>, but high contents of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO\*, and CaO and high A/CNK value. The melt has obvious different

收稿日期: 2020-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 41172071)

通讯作者, E-mail: tanghongfeng@mail.gyig.ac.cn

chemical compositions from those of the post-collisional I-type granites in the area. Therefore, the post-collisional I-type granites in the eastern Junggar could be formed by the partial melting of the mixture of altered basalt plus sediments under the above experimental conditions, while the A-type granites with high SiO<sub>2</sub> contents cannot be formed by the partial melting of the above starting material under these experimental conditions.

**Keywords:** Post-collisional granite; mixed starting material; partial melting; the eastern Junggar; Xinjiang

中亚造山带位于西伯利亚板块与中朝、塔里木板块之间, 是显生宙陆壳增生和改造最显著的大陆造山带, 新疆东准噶尔地区位于中亚造山带中部, 发育有大面积的花岗岩, 是研究中亚造山带岩浆活动的理想区域<sup>[1-3]</sup>。系统的野外调查、岩石学和地球化学研究<sup>[4-11]</sup>表明: 1) 这些花岗岩在空间上与区域内的蛇绿岩带紧密相连, 在形成时间上属于碰撞造山作用结束之后, 是典型的造山带后碰撞花岗岩; 2) 这些花岗岩可分为 A 型花岗岩和 I 型花岗岩, 其中 A 型花岗岩具有高 SiO<sub>2</sub>、高碱、低 FeO\*、低 CaO 等特征, 而 I 型花岗岩则具有低 SiO<sub>2</sub>、低碱、高 FeO\*、高 CaO 等特征; 3) 两类花岗岩有一致的同位素组成, 均具有高的正  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 其源岩很可能主要是基性岩石加少量沉积物的混合物。

尽管前人对东准噶尔地区花岗岩的成因开展了大量研究, 但得到的结论大多是基于野外观察和花岗岩地球化学组成反演推定的, 缺乏直接的高温高压实验证据。为此, 我们在前人研究基础上, 参照基性岩石通过部分熔融可以形成花岗质熔体的事实<sup>[12-15]</sup>, 并结合前人的实验结果和实验方案<sup>[16-17]</sup>, 设计了新疆东准噶尔地区蛇绿岩套基性岩石加少量沉积物的高温高压部分熔融实验研究。通过实验熔体与东准噶尔地区后碰撞花岗岩组成上的对比, 为这些花岗岩的成因提供直接证据, 并确定花岗岩浆形成的温度、压力条件。

## 1 实验及分析方法

### 1.1 实验初始物

实验初始物为基性岩石和泥质岩(代表沉积物)的混合物, 其中基性岩石是采自卡拉麦里蛇绿岩套中的蚀变玄武岩(QS08-1)<sup>[16]</sup>、辉长岩(KL16)<sup>[18]</sup>, 泥质岩(SJ41)<sup>[16]</sup>采自卡拉麦里地区中泥盆统地层, 其岩相学镜下特征详见文献[17]。蚀变玄武岩的主要矿物组成为角闪石(60%)、斜长石(38%), 辉长岩的主要矿物为单斜辉石(50%)、斜长石(30%), 上述岩石的主量元素组成见表 1。

实验前将用作初始物的岩石粉碎、碾磨至 5~20  $\mu\text{m}$ , 然后将岩石粉末按照基性岩石:泥质岩质量比 9:1 混合, 再置于 105°C 烘箱中进行干燥备用。

表 1 实验初始物的主量元素组成 ( $w_B/\%$ )

Table 1. Compositions of major elements of the starting materials used in the experiments

样品	岩性	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失量	总量
QS08-1 <sup>①</sup>	蚀变玄武岩	51.99	1.36	14.44	12.99	0.21	5.09	7.66	4.75	0.33	0.1	1.71	100.63
KL16 <sup>②</sup>	辉长岩	46.55	0.68	20.25	12.67	0.11	5.64	4.57	3.73	2.08	0.03	3.68	99.99
SJ41 <sup>①</sup>	泥质岩	58.65	0.83	18.18	8.16	0.08	2.29	1.21	2.71	2.7	0.17	5.66	100.64
SC	混合物	52.66	1.31	14.81	12.51	0.2	4.81	7.02	4.55	0.57	0.11	2.11	100.63
HC	混合物	47.76	0.7	20.04	12.22	0.11	5.31	4.23	3.63	2.14	0.04	3.88	100.06

注: ① 数据据文献[17]; ② 数据据文献[18]; SC: 90%QS08-1+10%SJ41; HC: 90%KL16+10%SJ41.

### 1.2 实验过程

将干燥后的初始物用粉末压片机压成形状规则的圆柱放入石墨样品仓内, 再将石墨样品仓置于铂金管内, 然后将铂金管用氩弧焊焊封。石墨样品仓为实验提供了 C-CO 氧逸度缓冲条件, 接近于下地壳的还原环境并保证了样品中 Fe 不会与铂金管反应而流失, 具体实验样品组装见图 1。实验利用的中

国科学院地球化学研究所地球内部物质高温高压院重点实验室的 LPC 250-300/50 活塞圆筒压机进行, 其工作原理和压力标定详见文献[19]。温度监控采用 C 型钨铼热电偶, 温度误差 $\leq 0.5\%$ , 压力误差为 $\pm 0.1$  GPa, 实验条件和产物列于表 2。

实验结束后淬火、取出铂金管, 用金刚石线切割机将铂金管切开, 然后小心地取出实验产物, 用环氧树脂将产物进行注胶制靶。再用金刚石线切割机将环氧树脂样品靶沿产物柱体纵向对半切开, 然后把样品靶表面磨平、抛光用于后续的物质鉴定和成分分析。

### 1.3 实验产物分析方法

实验产物通过扫描电镜进行物相鉴定、由电子探针物相进行元素组成分析。扫描电镜分析和观察是在中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心完成的, 扫描电镜工作条件为加速电压 15~20 kV、束电流 0.4~0.8 nA。电子探针分析是在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室的 JXA8230 型场发射电子探针上完成的, 分析时加速电压 20~25 kV、束电流 10 nA、束斑直径 5~10  $\mu\text{m}$ 。

## 2 实验结果

### 2.1 实验产物的物相组成及成分

物相组成及部分熔融程度列于表 2, 其中部分熔融程度是依据背散射照片的面积进行估算的。如表 2 所列, 2 个系列实验的产物, 其物相组成主要是熔体和角闪石、单斜辉石、石榴子石等矿物其主量元素含量列于表 3, 在部分条件下出现黑云母、钛铁矿, 实验产物代表性的背散射照片如图 2。

在 1.0 GPa、925  $^{\circ}\text{C}$  条件下, SC (90%蚀变玄武岩+ 10%沉积物) 系列实验的初始物发生了明显的部分熔融且熔体含量为 47%~65%, 熔体完全连通, 与熔体共存的矿物是角闪石, 粒径一般为 10~20  $\mu\text{m}$  (图 2A 和 2B), 成分上与初始物中的角闪石存在着一定差异, 可能是属于蚀变玄武岩经过部分熔融反应之后的矿物; 在 2.0 GPa、925  $^{\circ}\text{C}$  条件下, SC 系列实验的初始物也发生了明显的部分熔融, 与熔体共存的矿物相没有角闪石残留而主要为新生的石榴子石和单斜辉石。石榴子石自形程度高、粒径大 (一般为 100  $\mu\text{m}$  左右, 少数可达 200  $\mu\text{m}$  以上)。单斜辉石则主要分布于石榴子石边缘或熔体中, 自形程度为半自形—自形, 粒径一般在 20  $\mu\text{m}$  左右。此外, 有少量钛铁矿, 粒径一般小于 10  $\mu\text{m}$ , 零星地分布于熔体中 (图 2C)。

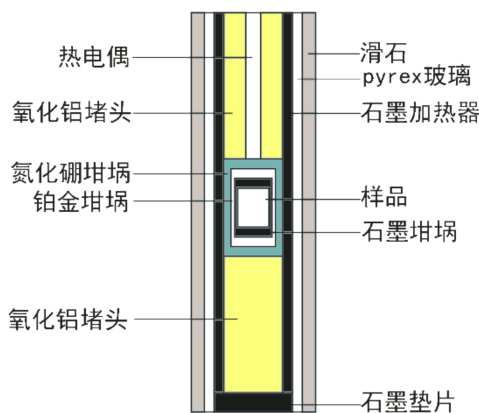


图 1 实验样品组装示意图

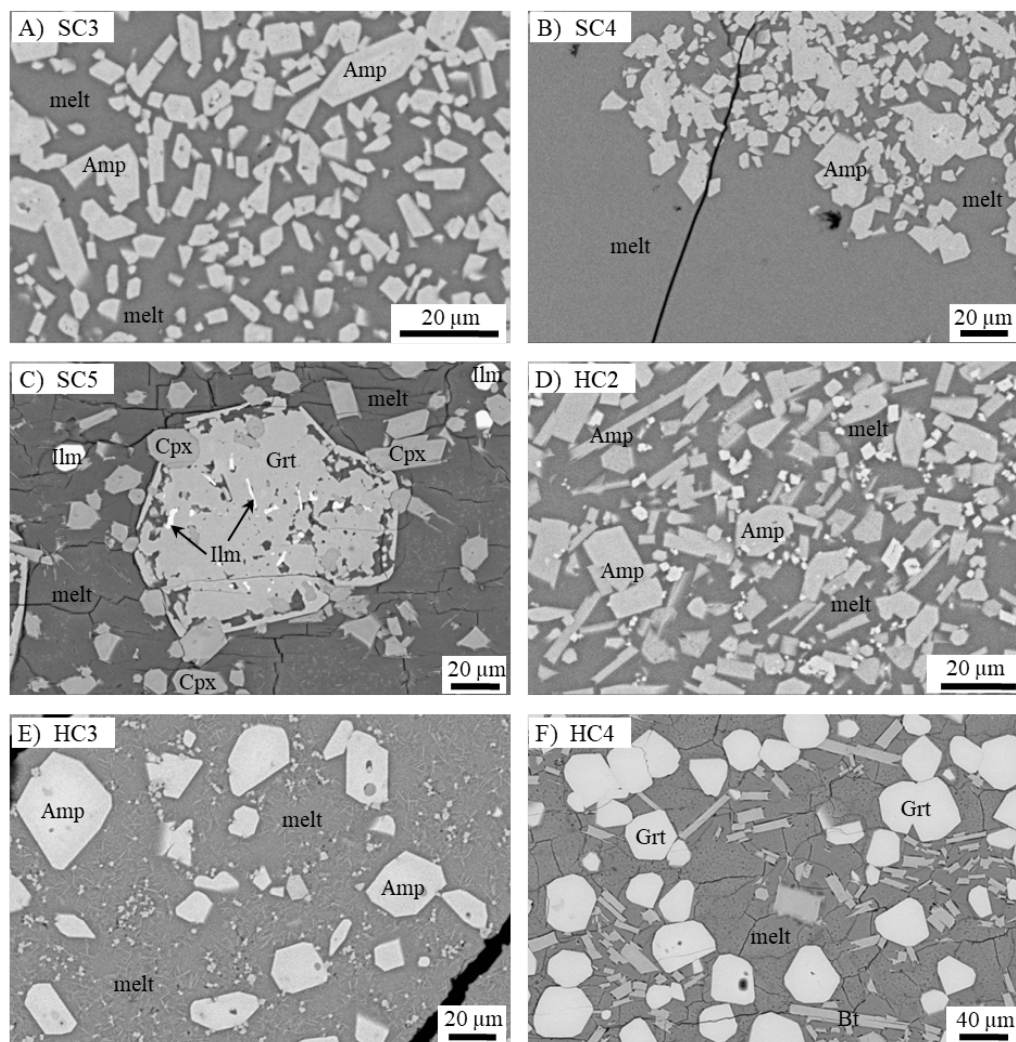
Fig. 1 Schematic diagram of sample assembly for the experiment.

表 2 实验条件及实验产物的主要物相组成

Table 2. Experimental conditions and major mineral phases of the run products

实验编号	压力/GPa	温度/ $^{\circ}\text{C}$	加水量/%	时间/h	主要物相组成	熔体比例/%
SC1	1.0	925	0	24	Melt+Amp	48
SC2	1.0	925	4	57	Melt+Amp	54
SC3	1.0	925	0	96	Melt+Amp	58
SC4	1.0	925	4	96	Melt+Amp	65
SC5	2.0	925	2	96	Melt+Cpx+Grt	51
HC2	1.0	925	2	96	Melt+Amp	54
HC3	1.0	925	4	96	Melt+Amp	86
HC4	2.0	925	2	96	Melt+Grt+Bt	50

注: SC 和 HC 实验的初始物含义同表 1; Melt-熔体, 矿物代号 Amp-角闪石、Cpx-单斜辉石、Grt-石榴子石、Bt-黑云母。



melt-熔体、Amp-角闪石、Cpx-单斜辉石、Grt-石榴子石、Ilm-钛铁矿、Bt-黑云母

图 2 实验产物代表性的背散射照片

Fig. 2. Representative BSE images for the run products.

表 3 实验产物矿物相的主量元素组成 ( $w_B/\%$ )

Table 3. Compositions of major elements in mineral phases of the run products

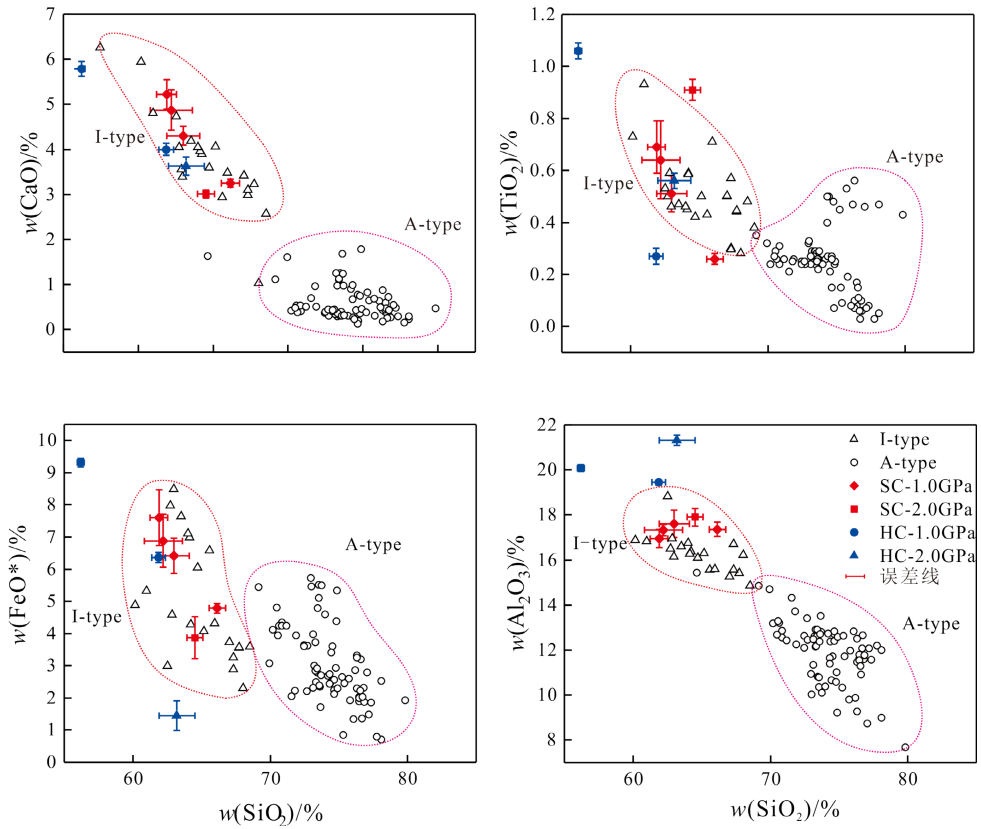
样品.	<i>n</i>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	总量	
SC1	Amp	5	44.53(0.84)	2.23(0.39)	9.91(1.54)	17.24(1.32)	0.28(0.05)	9.50(0.29)	9.70(0.20)	2.67(0.21)	0.22(0.04)	0.03(0.03)	96.31(0.49)
SC2	Amp	6	44.09(2.12)	2.28(0.63)	10.37(2.21)	17.21(1.91)	0.28(0.04)	8.81(1.51)	9.40(0.85)	2.98(0.23)	0.23(0.10)	0.05(0.02)	95.70(0.64)
SC3	Amp	6	44.68(3.39)	2.30(0.57)	10.71(1.97)	16.48(0.29)	0.25(0.06)	9.00(1.49)	9.71(0.88)	2.61(0.27)	0.23(0.08)	0.06(0.04)	96.02(0.87)
SC4	Amp	6	43.32(0.73)	2.59(0.37)	10.92(0.99)	16.27(1.04)	0.25(0.05)	9.77(0.16)	10.03(0.18)	2.87(0.11)	0.20(0.03)	0.04(0.04)	96.25(0.04)
SC5	Grt	8	38.20(0.35)	0.64(0.10)	21.93(0.20)	22.59(0.44)	0.68(0.09)	7.53(0.62)	7.88(0.37)	0.05(0.04)			99.49(0.29)
	Cpx	4	50.10(0.66)	0.58(0.12)	4.13(1.30)	14.64(1.86)	0.28(0.11)	10.68(0.70)	17.28(0.24)	1.21(0.34)	0.01(0.01)	0.06(0.05)	99.48(0.73)
HC2	Amp	4	41.59(0.50)	1.54(0.24)	14.93(0.20)	15.34(0.28)	0.19(0.01)	11.09(0.05)	7.70(0.24)	2.65(0.09)	0.45(0.04)	0.02(0.03)	95.49(0.71)
HC4	Grt	3	37.01(0.56)	1.19(0.22)	21.07(0.38)	25.39(2.04)	0.47(0.24)	7.26(0.69)	6.97(0.51)	0.04(0.03)			99.40(0.41)
	Bt	6	37.32(0.71)	2.05(0.20)	18.63(0.63)	9.09(0.37)	0.01(0.00)	17.71(0.36)	0.06(0.09)	1.02(0.09)	8.47(0.34)	0.00(0.00)	94.10(0.77)

注：矿物代号含义同表 2、图 2，*n* 表示分析点数量，所列数值为电子探针数据的平均值，括弧内为标准差；FeO\* 表示全铁含量。

在 1.0 GPa、925 °C 条件下，HC（90%辉长岩+10%沉积物）系列实验的初始物发生了明显的部分熔融，其熔体含量为 50%~86%，部分熔融程度与水含量之间存在明显的正相关性。加水量 2% 时部分熔融程度约为 50%，熔体完全连通，与熔体共存的矿物相为角闪石，其自形程度为半自形-自形，粒径



在 10~20 μm (图 2D); 加水量 4% 时部分熔融程度提升到约 86%, 与熔体共存的矿物主要是角闪石, 粒径一般约 20 μm 少数达 50 μm 及以上 (图 2E)。当压力增加到 2.0 GPa 时, HC 系列实验的产物中与熔体共存的矿物相为自形程度好的石榴子石和黑云母, 该条件下部分熔融程度约为 54%, 石榴子石为半自形-自形、粒径一般在 50~100 μm, 黑云母的粒径在 10~20 μm (图 2F)。



东准噶尔后碰撞花岗岩的数据来源于文献[5-6, 20-31]

图 3 实验熔体与东准噶尔后碰撞花岗岩主要元素组成对比

Fig. 3. Comparison between compositions of major elements of the experimental melts and those of post-collisional granites in the eastern Junggar.

### 2.2 实验熔体的化学组成

2 个系列实验的部分熔融熔体的主要元素组成分析结果列于表 4。2 种混合初始产物在 1.0~2.0 GPa, 925 °C 条件下部分熔融形成的都为中酸性熔体, 总体上表现出低的 SiO<sub>2</sub>、全碱 (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O), 高的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO\*、CaO 含量特征。随着熔融程度的升高呈现出 SiO<sub>2</sub> 含量降低, 而 FeO\*、CaO 含量升高的趋势 (图 3)。熔体的铝饱和指数 (A/CNK) 在 1 附近、碱指数 (A/NK) 均大于 1。其中 SC 系列实验的熔体属于准铝质, 与典型 I 型和新疆东准噶尔地区后碰撞 I 型花岗岩类似, 而 HC 系列实验的熔体属于弱过铝质, 与 I 型花岗岩不同 (图 4)。

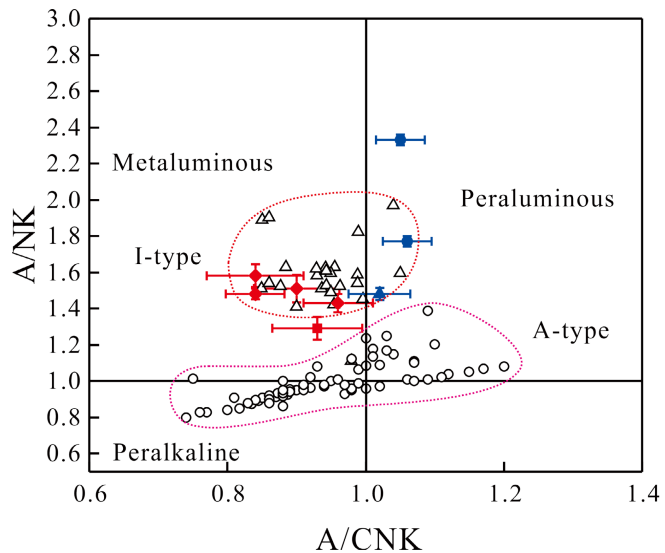


图 4 实验熔体和东准噶尔后碰撞花岗岩的 A/NK-A/CNK 图 (图中符号含义同图 3)

Fig. 4. The A/NK vs. A/CNK diagram for the experimental melts and the post-collisional granites in the eastern Junggar.

表 4 实验熔体主量元素组成 ( $w_B/\%$ )

Table 4. Compositions of major elements of the experimental melts

样品	$t/^\circ\text{C}$	$p/\text{GPa}$	$\text{H}_2\text{O}$	$t/\text{h}$	$n$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}^*$	$\text{MnO}$
SC1	925	1	0	24	6	66.14(0.61)	0.26(0.02)	17.36(0.32)	4.79(0.15)	0.11(0.01)
SC2	925	1	4	57	8	63.00(1.10)	0.51(0.07)	17.61(0.60)	6.41(0.55)	0.14(0.01)
SC3	925	1	0	96	8	62.21(1.40)	0.64(0.15)	17.33(0.26)	6.88(0.82)	0.16(0.01)
SC4	925	1	4	96	8	61.89(0.66)	0.69(0.10)	16.95(0.41)	7.60(0.86)	0.16(0.02)
SC5	925	2	2	96	4	64.51(0.57)	0.91(0.04)	17.90(0.40)	3.87(0.65)	0.06(0.01)
HC2	925	1	2	96	5	61.88(0.49)	0.27(0.03)	19.44(0.11)	6.37(0.16)	0.09(0.01)
HC3	925	1	4	96	5	56.21(0.25)	1.06(0.03)	20.07(0.15)	9.31(0.13)	0.11(0.01)
HC4	925	2	2	96	4	63.20(1.30)	0.56(0.03)	21.32(0.22)	1.45(0.46)	0.01(0.01)
样品	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	总量	A/CNK	A/NK		
SC1	0.25(0.02)	3.25(0.09)	6.82(1.26)	0.85(0.07)	0.16(0.04)	92.57(1.93)	0.96	1.43		
SC2	0.53(0.12)	4.30(0.21)	6.63(0.54)	0.71(0.09)	0.16(0.04)	93.30(1.93)	0.90	1.51		
SC3	0.44(0.09)	4.87(0.45)	6.74(0.10)	0.56(0.03)	0.16(0.03)	88.79(0.53)	0.84	1.48		
SC4	0.62(0.12)	5.22(0.33)	6.15(0.16)	0.56(0.03)	0.16(0.04)	89.00(1.46)	0.84	1.58		
SC5	0.88(0.22)	3.01(0.09)	7.84(0.22)	0.88(0.06)	0.14(0.01)	89.94(0.39)	0.93	1.29		
HC2	0.73(0.08)	4.00(0.13)	5.76(0.12)	1.40(0.08)	0.06(0.04)	87.39(0.71)	1.06	1.77		
HC3	1.72(0.11)	5.79(0.16)	4.40(0.12)	1.28(0.09)	0.05(0.01)	89.28(0.43)	1.05	2.33		
HC4	0.42(0.15)	3.63(0.20)	7.47(0.27)	1.92(0.20)	0.02(0.01)	82.70(0.87)	1.02	1.48		

注:  $n$  表示分析点数量, 所列数值为电子探针数据按照 100%换算后的平均值, 括弧内为标准差;  $\text{FeO}^*$  表示全铁含量, 总量为换算前的主量元素氧化物总和。

## 3 讨论

### 3.1 实验平衡

前人研究表明, 在大于  $900^\circ\text{C}$  条件下恒温 96 h, 玄武质岩石发生部分熔融能够接近热力学平衡<sup>[32-33]</sup>。本文实验的温度为  $925^\circ\text{C}$ , 略高于  $900^\circ\text{C}$ , 而且初始物中加入了 10% 的沉积物, 在部分实验中还加入了水, 这些因素能促进熔融和使实验达到热力学平衡, 因此可以认为本文的实验达到或接近热力学平衡。该判断也可以由以下依据进一步确认: 实验产物中矿物颗粒结晶程度较好, 表明其经历了充分的结晶且不同区域的矿物之间的成分相差不大而且矿物颗粒之间、矿物-熔体边界均不见溶蚀边或反应边, 说明其经历了足够的实验反应时间, 熔融和矿物结晶接近热力学平衡。另外, 通过前人单斜辉石地质温度计对 SC5 进行温度估算, 结果与实际实验温度相差不大<sup>[34]</sup>, 说明 SC5 在该恒温时间下接近热力学平衡。

### 3.2 影响熔体成分的因素

研究表明温度、水含量、压力以及实验时长均会对部分熔融程度和熔体成分产生一定的影响, 由于本次实验均是在  $925^\circ\text{C}$  条件下进行的, 因此在此不讨论温度对熔融程度和熔体成分的影响。

#### 3.2.1 水含量

研究表明水含量能够降低固相线温度、促进部分熔融的发生<sup>[32, 35]</sup>。本文的实验结果也是如此 (图 2)。相同初始物在加水量时, 部分熔融形成熔体的量明显增加 (图 2A-B、D-E)。在 SC 系列的实验中, SC3 与 SC4 实验的温度、压力、恒温时间相同, 但加水量不同, 未加水的 SC3, 其部分熔融程度为 58%, 而加了 4.0% 的 SC4, 其部分熔融程度则升高至 65%, 加水明显促进了部分熔融。随着熔融程度的增加, 熔体的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  含量降低而  $\text{FeO}^*$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  含量升高, 其它氧化物含量的变化幅度不大 (图 5)。在 HC 系列的实验中, 水含量的加入也对部分熔融程度及熔体成分有明显的影

温度、压力、恒温时间相同, 加水量由 2% (HC2) 增加至 4% (HC3), 其部分熔融程度由 50% 剧增至 86%, 熔体成分也因此受到了明显的影响, 随着加水量的增加熔体的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量明显降低, 而  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}^*$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$  升高, 这一变化规律与前人实验结果一致<sup>[15, 33]</sup>, 即水的加入使得富含  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}^*$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$  的矿物固相线温度降低发生部分熔融 (图 6)。但是, 臧春娟等的实验结果中水含量的变化对熔体成分和部分熔融程度几乎没有影响<sup>[16-17]</sup>, 可能是由于其组装方式采用铂金子母扣进行密封而并未采取焊封, 可能导致实验环境并未密封因此水可能在高温高压实验过程中而挥发。

总体而言, 水的加入能促进部分熔融程度并使熔体的成分发生一定程度的改变, 主要表现为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}^*$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  等主要氧化物含量的变化。

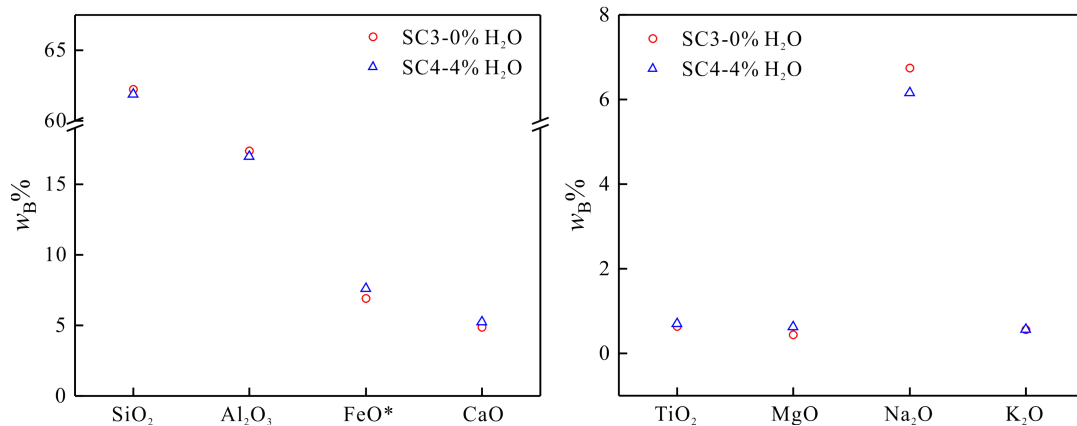


图 5 SC 实验系列不同水含量条件下的熔体成分

Fig. 5. Compositions of experimental melts for the SC experimental series with different water contents.

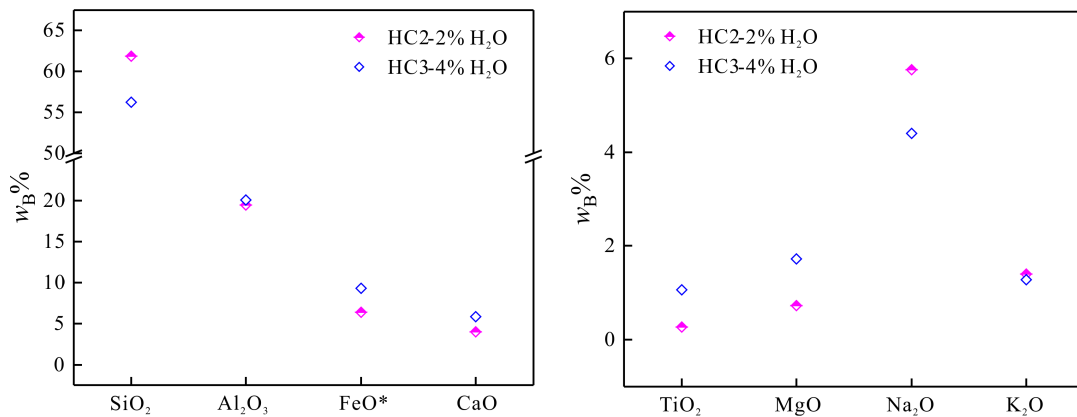


图 6 HC 实验系列不同水含量条件下的熔体成分

Fig. 6. Melt composition of HC experimental series under different water content.

### 3.2.2 压力

压力是影响矿物稳定性的重要参数, 压力的变化使得一些矿物稳定性发生变化从而影响部分熔融程度和熔体成分。相同初始物在 1.0 GPa、2.0 GPa 条件下部分熔融实验结果的对比显示, 1.0 GPa 的实验产物中的矿物主要是残留的角闪石 (图 2A, 2B), 而当压力增加至 2.0 GPa 时不仅主要残留相变成了单斜辉石, 而且形成了新的大颗粒石榴子石 (图 2C, 2F)。

由于 SC 系列实验中的加水量对熔融程度存在着一定的促进作用且熔体成分的变化不大, 因此选取 SC3 和 SC4 分别与 SC5 作为对比。可以发现压力对部分熔融程度的影响较小 (图 2A-C), 但对熔体成分的影响较为显著。从图 7 中可以看出 SC3 和 SC4 随着压力的升高熔体的  $\text{FeO}^*$ 、 $\text{CaO}$  含量降低,

而  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  含量升高, 两者具有相同的变化趋势和相近的变化幅度, 说明水含量对 SC 实验系列的影响较小。

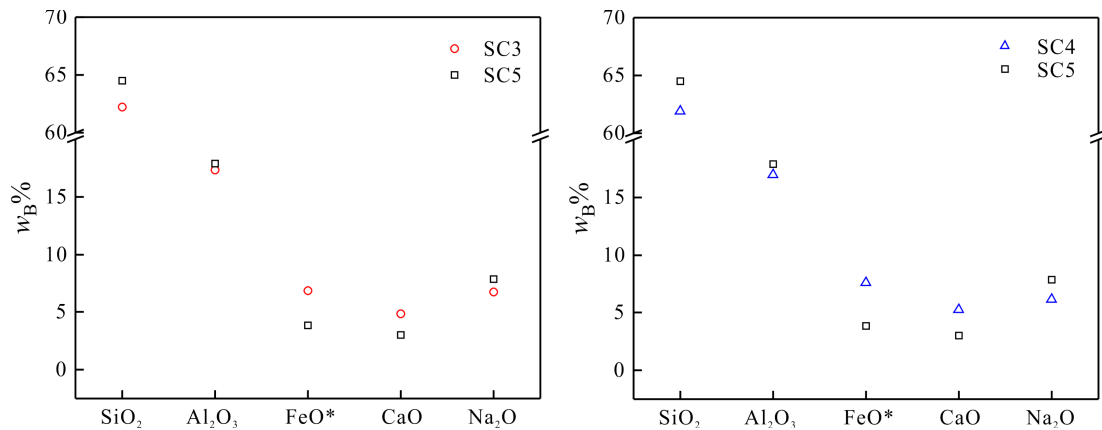


图 7 SC 实验系列不同含水量下不同压力的熔体成分

Fig. 7. Compositions of experimental melts for the SC experiment series with different water contents under conditions of different pressures.

在 HC 实验系列中, 在 1.0 GPa 条件下与熔体共存的主要矿物为角闪石, 而在 2.0 GPa 条件下与熔体共存的矿物为石榴子石和黑云母, 共存矿物发生了相变导致熔体成分也存在着一定的变化, 但部分熔融程度变化较小。从图 8 中可以看出, HC2 和 HC3 随着压力的升高熔体的  $\text{FeO}^*$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量降低, 而  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  含量升高。两者虽具有相同的变化趋势但 HC3 变化幅度远大于 HC2, 也说明水含量对 HC 实验系列的影响较大。上述熔体成分随压力的变化趋势与前人的研究结果具有很好的一致性<sup>[16-17, 36-37]</sup>。

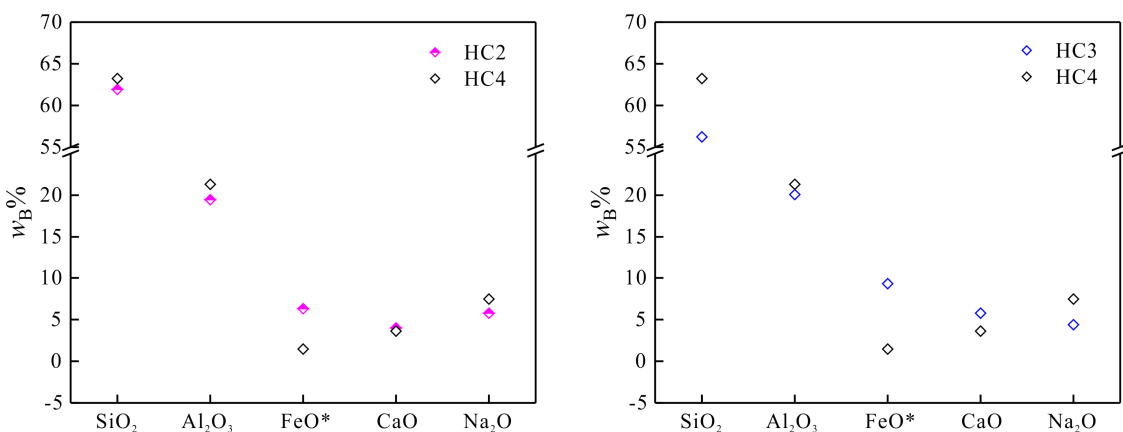


图 8 HC 实验系列不同水含量下不同压力的熔体成分

Fig. 8. Compositions of experimental melts for the HC experiment series with different water contents under different pressures.

总体看压力对部分熔融程度的影响较小, 主要是通过矿物相的影响改变熔体成分。当压力从石榴子石和单斜辉石稳定域以外进入石榴子石和单斜辉石的稳定域以内, 可导致熔体  $\text{FeO}^*$ 、 $\text{CaO}$  含量的降低和  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  含量的升高而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量则表现出较为复杂的变化趋势, 主要受控于富铝矿物。

### 3.2.3 实验时长

本次实验随着实验恒温时间的增加, 部分熔融程度增大, 导致其熔体在成分上也存在着一定的变化, 但变化幅度均不大, 随着反应时间的增加熔体中  $\text{SiO}_2$  含量略微降低,  $\text{FeO}^*$ 、 $\text{CaO}$  含量略有升高,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  含量变化较小(图 9)。这是由于熔体的生成不是一个匀速的过程而是一个先快后慢的过

程, 在实验的初期形成了大量的熔体, 而在实验的后期所形成的熔体较少, 因此对熔体成分的影响也较小。

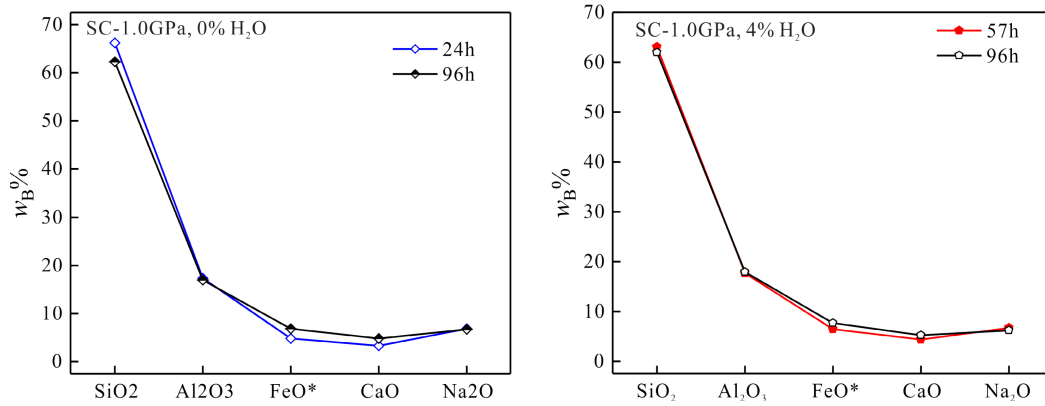


图 9 不同实验时长条件下的熔体成分

Fig. 9. Compositions of experimental melts produced under different experimental duration conditions.

### 3.3 东准噶尔 I 型花岗岩的成因

为了探讨新疆东准噶尔地区后碰撞花岗岩的成因, 可以将实验所生成熔体与花岗岩进行主量元素组成及其特征的对比, 从而约束花岗岩的源岩和岩浆的形成条件。

在实验熔体与东准噶尔地区后碰撞花岗岩的主量元素哈克图解上 (图 3), 本次实验的所有熔体均与东准噶尔地区 A 型花岗岩存在着较大的差异。其中, 蚀变玄武岩加沉积物 (SC) 实验系列在压力为 1.0 GPa, 加水量 0%~4% (SC1-SC4) 条件下, 实验熔体在主量元素哈克图解上与 I 型花岗岩存在很好的一致性; 而压力为 2.0 GPa, 加水量 2% 条件下的实验熔体除 TiO<sub>2</sub> 含量略高, 其余主量元素也与 I 型花岗岩存在着较好的一致性。在辉长岩加沉积物 (HC) 实验系列中, 在压力为 1.0 GPa, 加水量 2% (HC2) 条件下的实验熔体在 CaO、FeO\* 含量上与 I 型花岗岩存在着较好的一致性, 而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 含量表现出明显的偏差其中

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量偏高 TiO<sub>2</sub> 偏低; 加水量为 4% (HC3) 条件下的实验熔体与 I 型花岗岩相比则表现出明显差异, 表现在 SiO<sub>2</sub> 含量明显偏低, FeO\*、CaO、TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量明显偏高。在压力为 2.0 GPa, 加水量 2% 的条件下, 实验熔体 CaO 和 TiO<sub>2</sub> 含量与 I 型花岗岩表现出了很好的一致性, 但在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 FeO\* 含量上则明显存在着差异其中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量偏高, 而 FeO\* 含量偏低

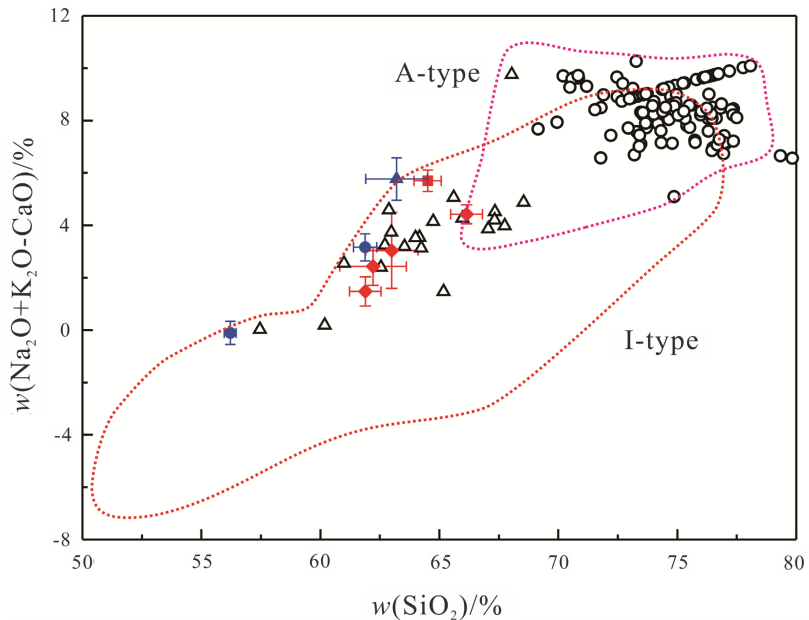


图 10 花岗岩的 SiO<sub>2</sub>-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O-CaO) 分类图 (底图据文献 [38], 图中符号含义同图 3)

Fig. 10. The (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O-CaO) vs. SiO<sub>2</sub> classification diagram for granites.

在 A/CNK-A/NK 图解中 (图 4), 实验熔体均与东准噶尔地区 A 型花岗岩存在着较大的差异。其中, 蚀变玄武岩加沉积物 (SC) 在 1.0 GPa, 加水量 0%~4% (SC1-SC4) 条件下, 实验熔体与东准噶尔地区 I 型有着很好的一致性, 且随着反应时间的增加, 误差逐渐变小; 在 2.0 GPa 加水量 2% (SC5) 条件下, 实验熔体与 I 型花岗岩存在着一定差异, 其 A/NK 值明显偏低。辉长岩加沉积物 (HC) 在 1.0 GPa, 加水量 2% (HC2) 条件下实验熔体落在 I 型花岗岩的边缘, 但是误差较大, 随着水含量增加至 4% (HC3) 熔体的 A/NK 值升高, 明显高于 I 型花岗岩; 在 2.0 GPa, 加水量 2% (HC4) 条件下的实验熔体也落在了 I 型花岗岩的边缘, 也存在着较大的误差。此外, 在 Frost 等<sup>[38]</sup> (2001) 总结的 I 型花岗岩和 A 型花岗岩分类图中 (图 10), 本次实验条件下部分熔融的熔体 (包括 SC-1.0 GPa 条件下的熔体) 和新疆东准噶尔后碰撞 I 型花岗岩一致地落入 I 型花岗岩类的范围, 而与 A 型花岗岩完全不同。综上所述, 本次实验的熔体与新疆东准噶尔地区的 I 型花岗岩成分相似, 且蚀变玄武岩加沉积物 (SC) 在 925 °C, 1.0 GPa, 加水量 0%~4% 条件下部分熔融所形成的熔体在主量元素、碱指数、铝饱和指数以及  $\text{SiO}_2\text{-(Na}_2\text{O+K}_2\text{O-CaO)}$  分类图上都与新疆东准噶尔地区后碰撞 I 型花岗岩具有很好的一致性, 表明以 90% 蚀变玄武岩 (QS08-1) 加 10% 泥质岩 (SJ41) 的混合物为初始物, 在上述实验条件下通过部分熔融能够形成与东准噶尔地区后碰撞 I 型花岗岩成分一致的岩浆。

## 4 结 论

1) 90% 发育角闪石的蚀变玄武岩加 10% 泥质岩的混合物, 在 925 °C、1.0 GPa、加水量 0~4% 条件下发生部分熔融, 可以产生与东准噶尔地区后碰撞 I 型花岗岩成分类似的准铝质花岗闪长质熔体。

2) 90% 辉长岩加 10% 泥质岩在相同条件下部分熔融的熔体与东准噶尔地区后碰撞 I 型花岗岩的组成相差较大。

3) 2 种初始物在上述条件下的部分熔融均不能产生与东准噶尔地区后碰撞 A 型花岗岩组成相似的熔体。

## 参 考 文 献:

- [1] 肖序常, 汤跃庆, 冯益民, 等. 新疆北部及临区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [2] 韩宝福, 王世洸, 江博明, 等. 新疆乌伦古河碱性花岗岩 Nd 同位素特征及其对显生宙地壳生长的意义[J]. 科学通报, 1997, 42(17): 1829-1831.
- [3] 李锦轶. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变[J]. 地质论评, 2004, 50(3): 304-322.
- [4] 赵振华, 王中刚, 邹天人, 等. 新疆乌伦古富碱侵入岩成因探讨[J]. 地球化学, 1996, 25(3): 205-220.
- [5] Han B F, Wang S G, Jahn B M, et al. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth[J]. *Chemical Geology*, 1997, 138(5): 135-159.
- [6] Chen B, Jahn B M. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23(5): 691-703.
- [7] Chen B, Arakawa Y. Elemental and Nd-Sr isotopic geochemistry of granitoids from the West Junggar fold belt (NW China), with implications for Phanerozoic continental growth[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(5): 1307-1320.
- [8] 唐红峰, 屈世俊, 苏玉平, 等. 新疆萨惹什克锡矿与萨北碱性 A 型花岗岩成因关系的年代学制约[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 1989-1997.
- [9] 唐红峰, 赵志琦, 黄荣生, 等. 新疆东准噶尔 A 型花岗岩的锆石 Hf 同位素初步研究[J]. 矿物学报, 2008, 28(4): 335-342.
- [10] 苏玉平, 唐红峰, 丛峰. 新疆东准噶尔黄羊山碱性花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄和岩石成因[J]. 矿物学报, 2008, 28(2): 117-126.
- [11] 韩宇捷, 甘林. 东准贝勒库都克岩体锆石 Hf-O 同位素研究[J]. 新疆地质, 2012, 30(2): 157-160.
- [12] Rushmer T. Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid-absent conditions[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1991, 107(1): 41-59.
- [13] Wolf M B, Wyllie P J. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1994, 115: 369-383.
- [14] Sisson T W, Ratajeski K, Hankins W B, et al. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2005, 148(6): 635-661.
- [15] Qian Q, Hermann J. Partial melting of lower crust at 10–15 kbar: constraints on adakite and TTG formation[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2013, 165(6): 1195-1224.



- [16] Zang C J, Tang H F, Wang M L. Effects of sediment addition on magma generation from oceanic crust in a post-collisional extensional setting: Constraints from partial melting experiments on mudstone-amphibolite/basalt at 1.0 and 1.5 GPa[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 188 (104111): 1-17.
- [17] 臧春娟. 新疆东准噶尔地区陆壳组成和后碰撞花岗岩岩浆起源的高温高压实验研究[D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所,2015.
- [18] 刘希军, 许继峰, 侯青叶, 等. 新疆东准噶尔克拉麦里蛇绿岩地球化学: 洋脊俯冲的产物[J]. *岩石学报*, 2007, 23(7): 1591-1602.
- [19] 李瑞. 碳酸岩熔体与地幔矿物反应的实验研究及其对华北克拉通岩石圈地幔演化的意义[D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所, 2019.
- [20] 毕承思, 沈湘元, 徐庆生, 等. 新疆贝勒库都克锡矿带含锡花岗岩地质特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 1993, 12(3): 213-223.
- [21] 苏玉平, 唐红峰, 刘丛强, 等. 新疆东准噶尔苏吉泉铝质 A 型花岗岩的确立及其初步研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(3): 175-184.
- [22] 林锦富, 喻亨祥, 余心起等. 新疆东准噶尔萨北富碱花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8): 1876-1884.
- [23] 李月臣, 杨富全, 赵财胜, 等. 新疆贝勒库都克岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10): 2483-2492.
- [24] 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 等. 东准噶尔地区晚古生代向南增生: 来自 A 型花岗岩的启示[J]. *岩石学报*, 2008, 24(4): 733-742.
- [25] 闫存兴, 杨高学, 李永军, 等. 东准库布苏南岩体岩石学化学特征及其地质意义[J]. *新疆地质*, 2008, 26(3): 220-224.
- [26] 甘林, 唐红峰, 韩宇捷. 新疆东准噶尔野马泉花岗岩体的年龄和地球化学特征[J]. *岩石学报*, 2010, 26(8): 2374-2388.
- [27] 郭芳放, 姜常义, 卢荣辉, 等. 新疆北部卡拉麦里地区黄羊山碱性花岗岩的岩石成因[J]. *岩石学报*, 2010, 26(8): 2357-2373.
- [28] 杨高学, 李永军, 司国辉, 等. 东准库布苏南岩体和包体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质意义[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2010, 35(4): 597-610.
- [29] Yang G X, Li Y J, Wu H E, et al. . Geochronological and geochemical constrains on petrogenesis of the Huangyangshan A-type granite from the East Junggar, Xinjiang, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(3): 722-736.
- [30] 韩宇捷, 唐红峰, 甘林. 新疆东准噶尔老鸦泉岩体的锆石 U-Pb 年龄和地球化学组成[J]. *矿物学报*, 2012, 32(2): 193-199.
- [31] 高山林, 马庆佑. 准噶尔卡拉麦里奥塔乌克尔希花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. *新疆地质*, 2013, 31(1): 1-5.
- [32] Sen C, Dunn T. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1. 5 and 2. 0 GPa: implications for the origin of adakites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1994, 117(4): 394-409.
- [33] Bread J S, Lofgren G E. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3 and 6. 9kbar[J]. *Journal of Petrology*, 1991, 32(2): 365-401.
- [34] Taylor W R. An experimental test of some geothermometer and geobarometer formulations for upper mantle peridotites with application to the thermobarometry of fertile lherzolites and garnet websterite[J]. *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Abhandlungen*, 1998, 172: 381-408.
- [35] Gaetani G A, Grove T L, Bryan W B. The influence of water on the petrogenesis of subduction-related igneous rocks[J]. *Nature*, 1993, 365(23): 332-334.
- [36] Xiong X L, Adam J, Green T H, et al. Trace element characteristics of partial melts produced by melting of metabasalts at high pressures: Constraints on the formation condition of adakitic melts[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(9): 915-925.
- [37] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4): 891-931.
- [38] Frost B R, Barnes C G, Collins W J. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(11): 2033-2048.