

# 内蒙古解放营子花岗闪长岩岩浆混合机制

——来自斜长石和角闪石的矿物化学证据

吕前露<sup>1,2</sup>, 刘建峰<sup>1</sup>, 赵 硕<sup>1</sup>, 郭春丽<sup>3</sup>, 车亚文<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘要:** 为揭示华北克拉通北缘中晚三叠世解放营子花岗闪长岩的岩浆混合机制, 对寄主岩石和镁铁质包体中斜长石和角闪石开展了电子探针分析。分析结果显示, 多斑和少斑包体边部的斜长石斑晶发育 An 值增加的突变环带, 环带的 An 值为 32~46, 明显高于核部和边部斜长石的 An 值(18~31), 而核部的 An 值与寄主岩石中斜长石的 An 值一致, 该特征指示突变环带结构是镁铁质岩浆捕获并改造寄主岩石中斜长石的结果。少斑包体中心部位的斜长石斑晶核部具有熔蚀结构, 残余部位的 An 值(40~47)高于熔蚀部位的 An 值(32~36), 但总体大于边部和基质中细粒斜长石的 An 值(17~35), 反映包体的中心部位受到了长英质成分的改造。另一方面, 寄主岩石中角闪石斑晶 TiO<sub>2</sub> 含量(0.50%~1.10%)明显低于包体角闪石 TiO<sub>2</sub> 含量(1.17%~2.47%), 而寄主岩石基质中细粒角闪石 TiO<sub>2</sub> 含量(1.58%~2.26%)与包体角闪石 TiO<sub>2</sub> 含量相近, 指示寄主岩石演化晚期有富 TiO<sub>2</sub> 的镁铁质成分混入。综合分析表明, 解放营子岩体形成过程中, 镁铁质和长英质岩浆之间既存在宏观尺度上的机械混合, 也存在微观尺度上的以矿物间元素迁移为特征的化学混合。

**关键词:** 解放营子岩体; 矿物化学; 岩浆混合; 暗色包体

中图分类号: P588.12<sup>+</sup>2; P588.11<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)02-0322-17

## Magma mixing mechanism of the Jiefangyingzi granodiorite in Inner Mongolia: Evidence from mineral chemistry of plagioclase and hornblende

LÜ Qian-lu<sup>1,2</sup>, LIU Jian-feng<sup>1</sup>, ZHAO Shuo<sup>1</sup>, GUO Chun-li<sup>3</sup> and CHE Ya-wen<sup>1</sup>

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** In order to reveal the magma mixing mechanism of the Mid-late Triassic Jiefangyingzi Pluton on the northern margin of the North China Craton, this paper carried out electron microprobe analyses of plagioclase and hornblende in host rock and mafic enclaves. The results show that the plagioclase phenocrysts in rich-phenocrysts enclaves and the edges of poor-phenocrysts enclaves develop the spike zone of increased An value. The spike zone of An value (32~46) is higher than those of the core and rim in same plagioclase grain, and the An value of the core is consistent with that of plagioclase in host rock, indicating the spike zone was the result of the mafic magma capturing and modifying the plagioclase from host rock. The core of plagioclase at the central part of poor-phenocrysts

收稿日期: 2021-08-24; 接受日期: 2022-01-11; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0601301); 国家自然科学基金项目(41472055); 中国地质调查局项目(DD20190004, DD20160201-01)

作者简介: 吕前露(1996-), 女, 硕士研究生, 地球化学专业, E-mail: 3050230655@qq.com; 通讯作者: 刘建峰(1981-), 男, 研究员, 从事岩石学和岩石地球化学研究, E-mail: wenjv@aliyun.com。

enclaves has an erosion sieve structure, and the An value of the residual part (40~47) is higher than that of the erosion part (32~36) in the core of the plagioclase grain, but generally higher than that of rim in the phenocryst and fine-grained plagioclase in the matrix (17~35), indicating the central part of the enclaves has been modified by felsic composition. On the other hand, the  $\text{TiO}_2$  content of hornblende phenocrysts in host rocks (0.50%~1.10%) is significantly lower than that of hornblende in enclaves (1.17%~2.47%), while the  $\text{TiO}_2$  content of fine-grained hornblende in the matrix (1.58%~2.26%) is similar to that of hornblende in enclave, indicating that there was a mixture of mafic components at the late stage of host rocks evolution. The above studies show that magma mingling on a macroscopic scale and the migration of minerals and elements of magma mixing on a microscopic scale occurred between mafic and felsic magma during the formation of Jiefangyingzi Pluton.

**Key words:** Jiefangyingzi Pluton; mineral chemistry; magma mixing; mafic enclaves

**Fund support:** National Key Research and Development Program of China(2017YFC0601301); National Natural Science Foundation of China(41472055); Project of China Geological Survey(DD20190004, DD20160201-01)

中酸性花岗岩体中常发育镁铁质暗色包体,被认为是岩浆发生混合作用的重要标志(Sisson *et al.*, 1996; Barbarin, 2005; Mo *et al.*, 2005),而岩浆混合作用作为岩浆演化的一种重要表现形式,广泛形成于活动大陆边缘、碰撞造山带及大陆裂谷等多种构造背景,是造成火成岩多样性的主要机制之一,对于分析和探讨花岗岩成因以及地球构造动力学过程有着重要意义(Barbarin, 2005; McLeod *et al.*, 2011; 李昌年, 2002; 王德滋等, 2004; 肖庆辉等, 2009; 莫宣学, 2011)。自20世纪以来,岩浆混合作用的机制一直是岩石学家研究的热点和焦点问题(Huppert and Sparks, 1988; 周珣若, 1994; 李昌年, 2002; 齐有强等, 2008; Huang *et al.*, 2012)。

根据混合作用的特征,岩浆混合通常被分为以存在各种不平衡结构和暗色包体为特征的机械混合(magma mingling)和不同成分的岩浆混合形成新的化学成分均一的岩浆为特征的化学混合(magma mixing)(张旗等, 2007; 莫宣学, 2011)。更多情况下,受岩浆的温度差、密度差、流变学性质差以及相对数量的影响,岩浆混合作用往往介于机械混合和化学混合之间(Troll and Schmincke, 2002; Kumar and Rino, 2006; 张旗等, 2007; 王玉往等, 2012),常出现矿物间的明显不平衡结构,如斜长石的熔蚀结构(Castro, 2001; 谢磊等, 2004)、大量暗色包体(Yang *et al.*, 2003, 2006; 周珣若, 1994)以及暗色包体中出现高Ti角闪石和针状磷灰石(Wyllie *et al.*, 1962; Hibbard, 1991)。前人研究表明,在岩浆多期混合和演化过程中,全岩地球化学、同位素等易发生均一化,给恢复岩浆演化机制带来一定的困难(Belousova *et al.*, 2001; Chu *et al.*, 2009)。斜长石和角闪石作为岩浆

岩的主要造岩矿物,往往发育复杂的结构和化学成分环带特征,记录了结晶过程中熔体成分等结晶环境的变化,是研究岩浆混合过程中物质扩散规律的重要对象(Nelson and Montana, 1992; Kuritani, 1998; Blundy and Cashman, 2001; Stewart and Pearce, 2004; Ginibre and Wörner, 2007)。

近年来研究表明,内蒙古赤峰市解放营子岩体中发育大量镁铁质包体,其中偏基性的玄武质包体具有较高的 $\text{TiO}_2$ 含量(1.68%~2.46%)及Nb、Ta等高场强元素含量, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为+3.84~+4.94,显示软流圈来源的板内玄武岩的微量元素和同位素地球化学特征,明显区别于寄主岩石花岗闪长岩所具有的较低的 $\text{TiO}_2$ 含量(0.42%~1.03%),明显Nb、Ta元素负异常及 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为-1.0~-0.4等地球化学特征(Liu *et al.*, 2012, 2020)。上述元素和同位素组成的差异在目前有关岩浆混合的报道中是非常罕见的。野外观察发现,除同位素组成的差异外,暗色包体可以分为含明显长石斑晶的多斑包体以及矿物粒度相对均匀的少斑包体,它们可能代表不同混合程度或阶段的产物,是混合过程尚未达到平衡的表现,为研究岩浆混合过程中物质的迁移提供了理想的研究对象。因此,本文在以往工作的基础上,分别采集了多斑和少斑包体以及寄主岩石的典型样品,对其中斜长石和角闪石进行电子探针分析,对比它们的成分变化,进而探讨岩浆混合机制和过程等科学问题。

## 1 区域地质概况

研究区位于内蒙古赤峰市以北解放营子镇一

带,大地构造位置处于华北克拉通北缘(图 1b, 1c) (Liu *et al.*, 2012, 2020; Wang *et al.*, 2016)。区内出露的最老地质单元为新太古代石英闪长岩(Wang *et al.*, 2016),呈东西向展布的长条状产出在研究区北部(图 1c),代表华北克拉通基底(Zhang *et al.*, 2021)。之后广泛发育古生代以来的火山沉积岩系和侵入岩,其中古生代地层被划分为中志留世—早泥盆世浅变质板岩、片岩及大理岩和二叠纪海相砂岩、板岩、灰岩夹火山岩;其上覆盖了中生代陆相火山岩和沉积岩以及新生代玄武岩和堆积物(图 1c) (Wang *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2020)。解放营子岩

体侵入于晚志留世—早泥盆世地层,出露面积超过 140 km<sup>2</sup>,呈北东东向不规则椭圆形展布,经历了较强的 NEE 向韧性变形,岩体中部被第四系和河流切断,分为东西两部分岩体。锆石 U-Pb 定年表明,岩体的形成时代为中晚三叠世(230.4±2 Ma),属于高钾钙碱性系列岩浆岩(Liu *et al.*, 2020)。与区域上同时代的沙德盖、光头山及喀喇沁岩体一样,被认为是与华北克拉通和西伯利亚板块在古生代末发生拼合后的伸展及岩石圈拆沉作用有关(顾枫华等, 2015; Liu *et al.*, 2012, 2020; Jia *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020)。

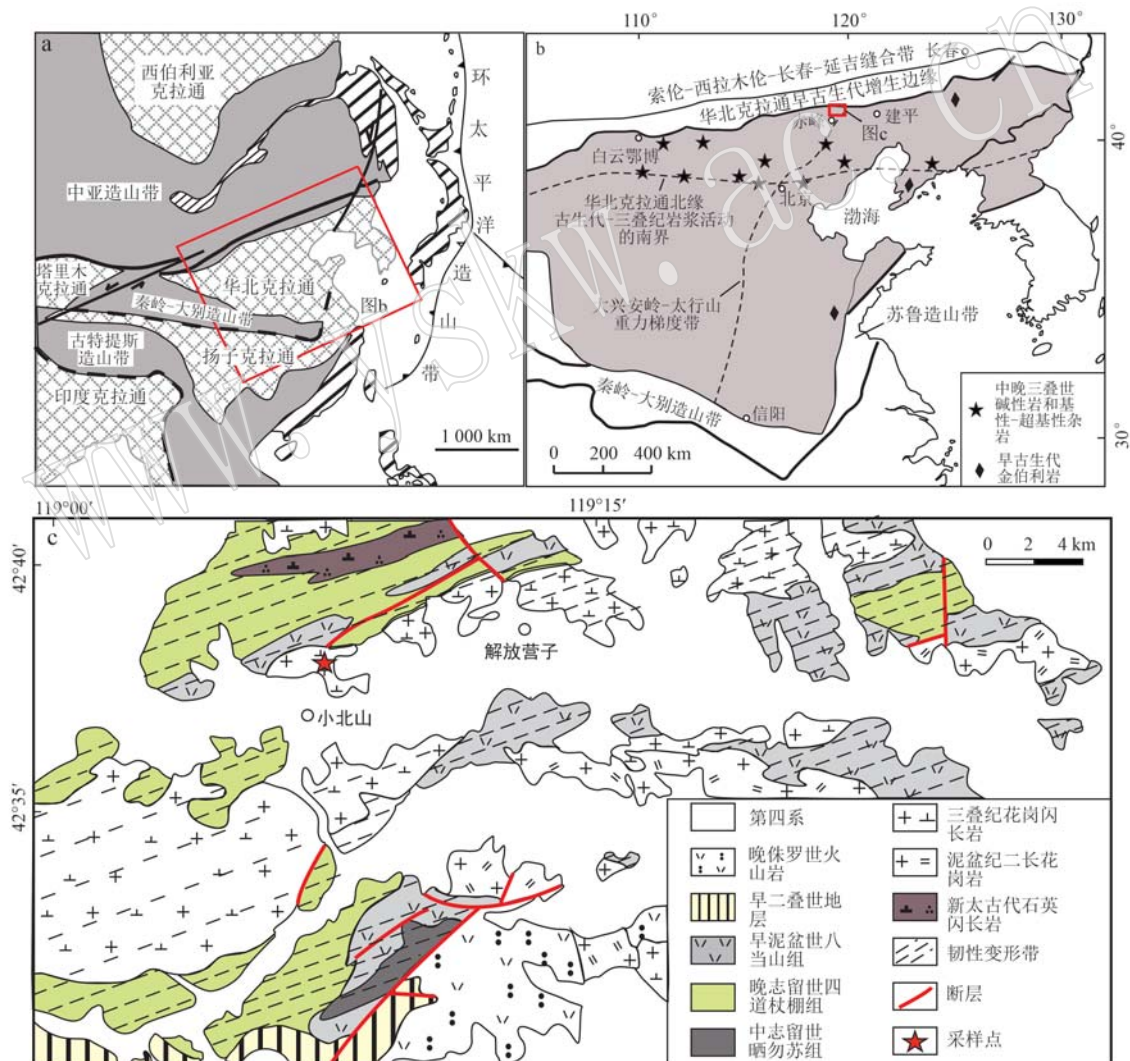


图 1 欧亚大陆东部构造简图(a, 据 Li, 2006)、华北克拉通早古生代金伯利岩及中晚三叠世碱性和基性-超基性杂岩分布图(b, 据 Liu *et al.*, 2020)和解放营子地区地质图(c, 据 Wang *et al.*, 2016)

Fig. 1 Tectonic subdivision sketch map of East Asia (a, modified after Li, 2006), sketch map showing the distribution of Early Paleozoic kimberlite and Mid-Late Triassic alkaline and mafic-ultramafic complexes of NCC (b, modified after Liu *et al.*, 2020) and geological map of Jiefangyingzi area of Chifeng city, Inner Mongolia (c, after Wang *et al.*, 2016)

## 2 岩体地质特征

解放营子岩体主体由中粗粒花岗闪长岩、花岗岩组成,二者呈渐变接触,风化面为灰黑色,新鲜面为灰白色(图2a)。岩石发育弱糜棱岩化构造,似斑状结构,斑晶的粒径为0.5~2.0 cm,包括宽板状或粒状的灰白色斜长石和浅粉红色的碱性长石以及长柱状的深黑色角闪石。其中,斜长石(35%~40%,体积分数)发育聚片双晶,偶见韵律状环带结构,部分颗粒表面发生轻微绢云母化(图3b);角闪石(5%~10%)呈浅黄绿色,发育菱形解理,偶见简单双晶(图3a~3c)。基质为细粒的黑云母、角闪石、长英质矿物及少量锆石、榍石等副矿物,围绕斑晶定向排列,构成糜棱岩化构造,糜棱面理走向 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。

岩体中普遍发育镁铁质包体,但这些包体在空间上分布并不均匀,在解放营子和小北山北侧山坡附近分布密度较大。本次工作重点对小北山北侧山

坡的包体群开展了野外观察和采样分析。镁铁质包体总体呈灰黑色,长条状、纺锤状、浑圆状及不规则形状等(图2a),直径从数厘米到数十厘米不等,大者可达数十米,在较大包体中可见灰白色花岗闪长岩反向脉(图2b),为典型的机械混合特征(李昌年,2002)。

根据镁铁质包体中矿物的结构特征,可以将其分为多斑和少斑包体两种类型(图2c,2d)。多斑包体为石英二长闪长岩,斑晶为中粗粒灰白色斜长石和黑色角闪石,其中斜长石斑晶呈较自形宽板状,粒径为0.5~2.0 cm,含量约10%~15%,角闪石斑晶呈自形短柱状,粒径为0.3~0.5 cm,含量为3%~5%。镜下观察,斜长石斑晶发育环带结构,部分颗粒具有熔蚀结构和嵌晶结构,包含小颗粒角闪石和黑云母(图3f)。基质的矿物组成与寄主岩相近,但角闪石等暗色矿物以及磷灰石含量相对较多。少斑包体为石英闪长岩,直径可达数十米,包体中心未见明显斑晶,仅边部见少量斜长石和角闪石斑晶。显微镜下观察,少斑包体的矿物组成与多斑包

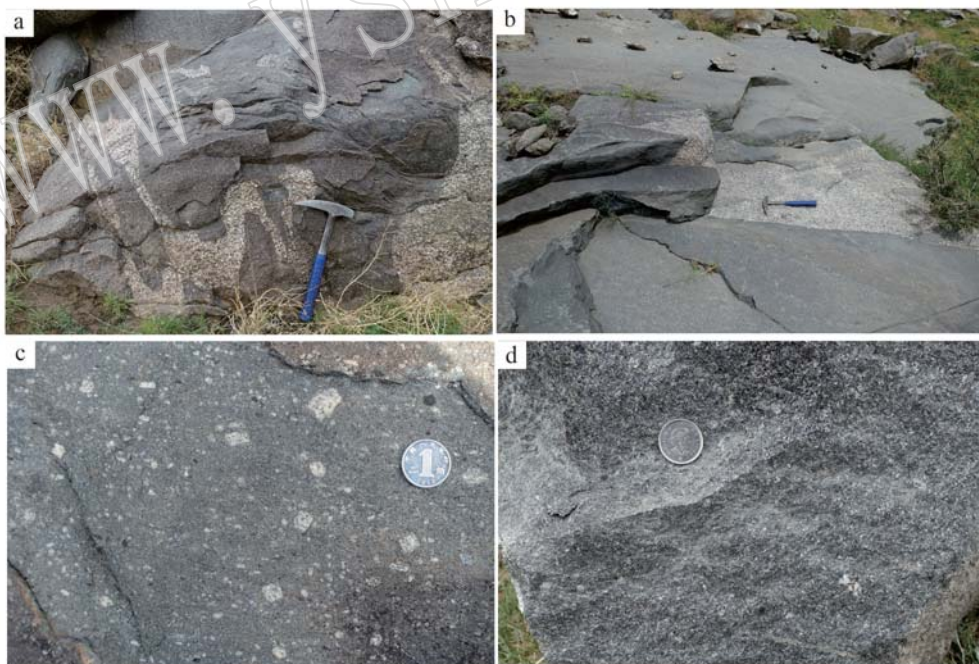


图2 解放营子岩体中寄主岩(花岗闪长岩)与多斑包体、少斑包体的野外地质特征

Fig. 2 The field geological characteristics of the host rock (granodiorite), the rich-phenocrysts enclaves and poor-phenocrysts enclaves in the Jiefangyingzi Pluton

a—形态不规则直径约0.5~2.0 m的多斑包体; b—直径约10 m的少斑包体,内含花岗闪长岩脉; c—多斑包体中斜长石捕虏晶;

d—少斑包体的块状构造

a—irregular shape of rich-phenocrysts enclaves with a diameter of about 0.5~2.0 m; b—poor-phenocrysts enclaves with a diameter of about 10 m, containing granodiorite veins; c—plagioclase xenocrysts in rich-phenocrysts enclaves; d—massive structure of poor-phenocrysts enclaves

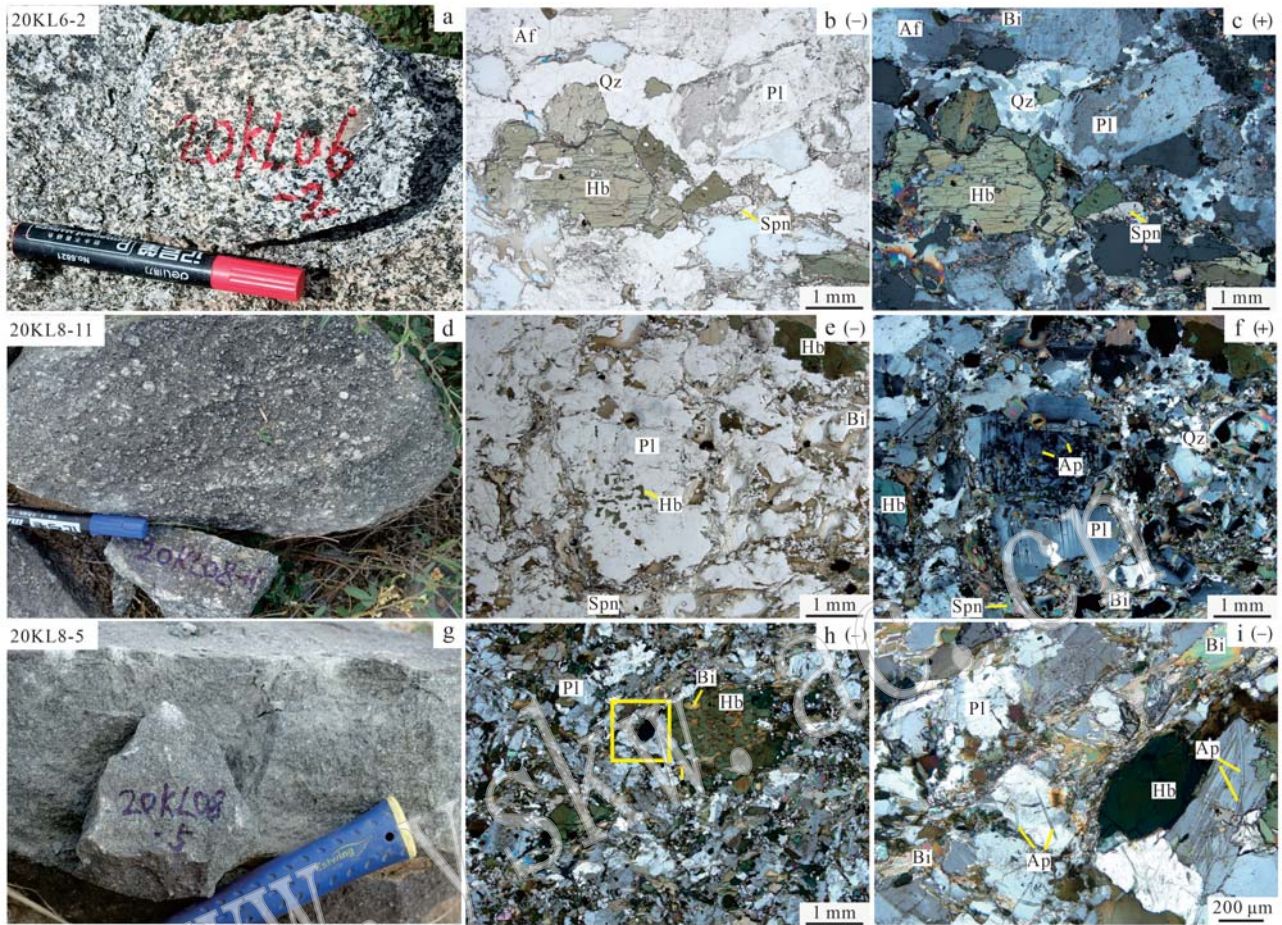


图3 解放营子岩体寄主岩石与多斑包体、少斑包体的野外及岩相学特征照片

Fig. 3 Field and petrographical features of host rock, the rich-phenocrysts enclaves and poor-phenocrysts enclaves

a~c—寄主岩的矿物类型与结构特征；d~f—多斑包体的矿物类型与斜长石的熔蚀结构与嵌晶结构；g~i—少斑包体的矿物类型与结构特征；

Pl—斜长石；Af—碱性长石；Hb—角闪石；Qz—石英；Bi—黑云母；Ap—磷灰石；Spn—榍石

a~c—the mineral type and structural characteristics of host rock；d~f—mineral types of rich-phenocrysts enclaves and the resorption structure and poikilitic structure of plagioclase phenocrysts；g~i—mineral type and structural characteristics of poor-phenocrysts enclaves；Pl—plagioclase；

Af—alkali feldspar；Hb—hornblende；Qz—quartz；Bi—biotite；Ap—apatite；Spn—sphene

体相近(图2d),除偶见斜长石和角闪石斑晶外(<3%),主要由细粒斜长石(20%~25%)、碱性长石(3%~5%)、角闪石(35%~40%)、石英(5%~10%)及少量黑云母和副矿物组成(图3h,3i)。角闪石斑晶中包裹细粒不规则的黑云母和斜长石(图3h)。磷灰石常呈针状发育在角闪石和长石中,最长达300 μm(图3i)。

### 3 分析方法

本次研究对象包括寄主花岗闪长岩(20KL06-2)、多斑包体(20KL08-9、JF01-4)及少斑包体(20KL08-6、JF1-9、20KL08-5)。所有样品均采自地

表,坐标为42°37'10"N、119°06'45"E,具体位置如图1c所示。

为揭示解放营子岩体中寄主花岗闪长岩和包体之间的成因联系,选取寄主岩和不同类型包体中斜长石和角闪石的斑晶和基质进行电子探针分析。电子探针分析工作在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室完成的,仪器型号为JXA-8100电子探针分析仪,分析参数:加速电压15 kV,束流 $2 \times 10^{-8}$  A,摄谱时间10 s,束斑5 μm,采用ZAF校正方法,标准样品为美国SPI矿物。为揭示成分的变化,对斑晶矿物进行了剖面扫描分析,分析点由核部到边部等距分布,间距为25~60 μm;此外,在斑晶周围的基质中选取部分小颗粒斜长石

和角闪石与斑晶进行分析对比。

寄主岩石花岗闪长岩(20KL06-2)中斜长石在显微镜下光性相对均匀,斜长石牌号 An 值为 13~31,变化范围较小,总体属于更长石(图 4a, 4b)。从核部到边部, An 值缓慢降低,表现为正常成分环带的特征(图 5a)。

## 4 矿物化学特征

### 4.1 斜长石矿物化学特征

斜长石电子探针测试结果见表 1。

表 1 解放营子岩体斜长石电子探针成分测试结果

$w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyzed results of plagioclase in Jiefangyingzi Pluton

位置	点号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ab	An	Or
寄主岩石(花岗闪长岩)													
斑晶	20KL06-2-1	64.36	0.00	22.39	0.05	0.00	0.00	3.33	9.19	0.12	83	17	1
	20KL06-2-2	63.26	0.00	22.92	0.04	0.00	0.00	4.02	8.95	0.12	80	20	1
	20KL06-2-3	62.85	0.00	23.09	0.01	0.02	0.00	4.36	8.51	0.12	77	22	1
	20KL06-2-4	62.19	0.00	23.82	0.10	0.00	0.01	5.32	8.15	0.14	73	26	1
	20KL06-2-5	61.07	0.04	24.07	0.06	0.00	0.00	5.27	8.07	0.22	73	26	1
	20KL06-2-6	62.11	0.00	23.72	0.09	0.00	0.00	4.81	8.19	0.17	75	24	1
	20KL06-2-7	60.02	0.02	23.65	0.09	0.02	0.00	5.82	7.98	0.21	70	28	1
	20KL06-2-8	60.30	0.00	23.54	0.08	0.00	0.00	5.84	7.88	0.21	70	29	1
	20KL06-2-9	61.11	0.00	22.89	0.06	0.00	0.00	4.85	8.59	0.18	75	24	1
	20KL06-2-10	59.41	0.00	24.18	0.09	0.01	0.00	6.55	7.73	0.21	67	32	1
	20KL06-2-11	59.99	0.02	23.85	0.05	0.00	0.00	6.06	7.77	0.19	69	30	1
	20KL06-2-12	60.66	0.00	23.43	0.08	0.00	0.01	5.36	7.99	0.20	72	27	1
	20KL06-2-13	60.44	0.00	23.58	0.07	0.02	0.00	5.62	8.17	0.22	72	27	1
	20KL06-2-14	61.49	0.01	24.02	0.09	0.03	0.00	5.36	7.89	0.27	72	27	2
	20KL06-2-15	62.31	0.00	23.51	0.06	0.01	0.01	5.01	8.23	0.30	74	25	2
	20KL06-2-16	60.70	0.03	23.23	0.14	0.03	0.01	5.41	8.09	0.26	72	27	2
	20KL06-2-17	62.14	0.00	23.35	0.11	0.00	0.01	4.92	8.30	0.31	74	24	2
	20KL06-2-18	61.17	0.00	22.99	0.11	0.01	0.00	4.72	8.49	0.28	75	23	2
	20KL06-2-19	61.76	0.00	22.59	0.07	0.00	0.01	4.49	8.89	0.19	77	22	1
	20KL06-2-20	65.38	0.04	21.30	0.02	0.00	0.00	2.78	10.14	0.09	86	13	0
多斑包体(石英二长闪长岩)													
斑晶	20KL08-9-1	59.12	0.00	25.43	0.06	0.01	0.00	7.72	7.00	0.12	62	38	1
	20KL08-9-2	56.77	0.02	27.68	0.07	0.00	0.01	9.14	5.67	0.52	51	46	3
	20KL08-9-3	57.26	0.04	27.19	0.07	0.01	0.02	8.82	6.29	0.13	56	43	1
	20KL08-9-4	59.20	0.00	25.78	0.04	0.01	0.01	6.94	6.94	0.10	64	35	1
	20KL08-9-5	62.35	0.00	23.21	0.05	0.00	0.01	4.98	9.01	0.15	76	23	1
	20KL08-9-6	62.08	0.00	23.34	0.08	0.00	0.00	5.22	8.87	0.13	75	24	1
	20KL08-9-7	57.00	0.00	27.47	0.07	0.00	0.00	5.01	6.14	0.08	77	23	1
	20KL08-9-8	62.65	0.00	23.46	0.06	0.02	0.00	4.57	8.44	0.11	77	22	1
	20KL08-9-9	62.95	0.00	22.80	0.06	0.03	0.00	4.71	9.09	0.21	73	26	1
	20KL08-9-10	62.04	0.02	24.11	0.02	0.00	0.00	5.24	8.15	0.20	70	27	3
	20KL08-9-11	60.75	0.04	24.04	0.56	0.00	0.16	5.33	7.69	0.44	73	25	1
	20KL08-9-12	61.68	0.00	24.08	0.11	0.02	0.00	5.11	8.21	0.24	76	23	1
	20KL08-9-13	62.35	0.00	23.32	0.06	0.03	0.01	4.90	8.91	0.16	75	24	1
	20KL08-9-14	61.96	0.00	23.76	0.01	0.00	0.01	4.87	8.40	0.17	73	26	1
	20KL08-9-15	62.62	0.00	23.27	0.02	0.01	0.02	5.30	8.37	0.15	71	28	1
	20KL08-9-16	61.28	0.01	24.50	0.04	0.00	0.00	5.67	7.93	0.14	57	42	1
	20KL08-9-17	57.62	0.00	26.92	0.14	0.02	0.01	8.42	6.33	0.12	53	46	1
	20KL08-9-18	56.70	0.01	26.83	0.06	0.00	0.00	9.36	6.01	0.11	68	32	1
	20KL08-9-19	60.63	0.00	24.59	0.06	0.01	0.00	6.64	7.81	0.13	75	24	1
	20KL08-9-20	62.60	0.00	23.86	0.06	0.00	0.01	4.74	8.29	0.14	67	32	1
基质	20KL08-9-22	60.31	0.06	25.15	0.09	0.00	0.02	6.43	7.49	0.15	69	30	1
	20KL08-9-23	60.91	0.00	24.72	0.06	0.00	0.00	5.98	7.62	0.15	77	22	1
	20KL08-9-24	63.10	0.00	23.51	0.05	0.00	0.00	4.53	8.52	0.17	77	22	1
	20KL08-9-25	62.88	0.02	23.31	0.16	0.01	0.01	4.68	8.69	0.19	76	23	1

续表 1  
Continued Table 1

位置	点号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ab	An	Or
		少斑包体(石英闪长岩)											
斑晶	20KL08-6-1	63.22	0.00	22.77	0.02	0.00	0.00	4.58	8.88	0.04	78	22	0
	20KL08-6-2	62.29	0.00	22.84	0.06	0.02	0.00	4.55	9.30	0.02	79	21	0
	20KL08-6-3	63.66	0.00	22.87	0.07	0.01	0.00	3.86	9.28	0.04	81	19	0
	20KL08-6-4	62.79	0.00	23.85	0.04	0.00	0.00	4.36	8.79	0.02	78	21	0
	20KL08-6-5	63.44	0.00	22.50	0.06	0.00	0.00	3.89	9.57	0.02	82	18	0
	20KL08-6-6	59.08	0.06	25.30	0.12	0.00	0.00	7.34	7.31	0.03	64	36	0
	20KL08-6-7	57.55	0.00	26.64	0.04	0.01	0.00	8.24	6.55	0.03	59	41	0
	20KL08-6-8	58.01	0.00	26.91	0.04	0.02	0.01	8.22	6.57	0.00	59	41	0
	20KL08-6-9	58.47	0.01	26.26	0.00	0.00	0.00	7.60	6.86	0.02	62	38	0
	20KL08-6-10	62.10	0.01	23.38	0.06	0.03	0.00	5.06	8.91	0.03	76	24	0
	20KL08-6-11	60.08	0.00	25.38	0.02	0.00	0.00	6.27	7.56	0.02	69	31	0
	20KL08-6-12	62.38	0.00	24.00	0.00	0.00	0.00	4.75	8.44	0.03	76	24	0
	20KL08-6-13	61.90	0.02	24.11	0.03	0.00	0.00	5.04	8.28	0.03	75	25	0
	20KL08-6-14	62.61	0.00	23.65	0.00	0.06	0.00	4.67	8.69	0.03	77	23	0
	20KL08-6-15	60.92	0.00	24.49	0.30	0.00	0.06	5.29	7.94	0.08	73	27	0
	20KL08-6-16	61.35	0.00	24.36	0.06	0.00	0.00	5.67	7.90	0.02	72	28	0
	20KL08-6-17	61.68	0.00	24.10	0.07	0.00	0.00	5.33	8.11	0.02	73	27	0
	20KL08-6-18	60.95	0.03	23.96	0.03	0.04	0.00	5.62	8.54	0.03	73	27	0
	20KL08-6-19	60.96	0.00	24.12	0.04	0.02	0.00	6.15	8.12	0.02	70	29	0
	20KL08-6-20	61.83	0.02	24.04	0.04	0.00	0.01	5.15	8.17	0.02	74	26	0
	20KL08-6-21	60.30	0.00	24.92	0.06	0.00	0.01	6.25	7.78	0.01	69	31	0
	20KL08-6-22	63.07	0.00	23.52	0.06	0.00	0.00	4.40	8.64	0.02	78	22	0
	20KL08-6-23	61.19	0.01	24.27	0.08	0.00	0.01	5.30	8.27	0.13	73	26	1
	20KL08-6-24	60.78	0.01	25.21	0.08	0.00	0.00	6.04	7.65	0.01	70	30	0
	20KL08-6-25	62.12	0.06	23.42	0.11	0.00	0.00	4.81	9.05	0.02	77	23	0
	20KL08-6-26	58.45	0.01	25.91	0.07	0.00	0.01	8.51	6.31	0.01	57	43	0
	20KL08-6-27	58.79	0.02	25.85	0.08	0.02	0.01	7.26	7.10	0.03	64	36	0
	20KL08-6-28	62.46	0.00	23.33	0.07	0.03	0.00	4.51	8.65	0.03	78	22	0
	20KL08-6-29	63.35	0.00	23.19	0.13	0.00	0.03	4.38	8.67	0.03	78	22	0
斑晶	JF1-9-1	63.93	0.00	22.82	0.06	0.00	0.00	3.68	9.24	0.12	81	18	1
	JF1-9-2	62.53	0.00	23.95	0.06	0.03	0.00	4.33	8.35	0.22	77	22	1
	JF1-9-3	62.63	0.03	22.67	0.08	0.00	0.00	4.14	9.64	0.18	80	19	1
	JF1-9-4	62.63	0.00	22.89	0.06	0.00	0.01	4.59	9.33	0.16	78	21	1
	JF1-9-5	61.17	0.00	23.76	0.06	0.00	0.01	5.49	8.61	0.18	73	26	1
	JF1-9-6	60.19	0.05	24.77	0.05	0.02	0.00	6.13	8.24	0.15	70	29	1
	JF1-9-7	59.08	0.02	25.33	0.03	0.00	0.01	7.23	7.74	0.08	66	34	0
	JF1-9-8	60.13	0.00	24.71	0.07	0.01	0.00	6.57	8.18	0.10	69	31	1
	JF1-9-9	60.96	0.03	24.25	0.04	0.00	0.00	5.75	8.73	0.10	73	27	1
	JF1-9-10	60.56	0.03	24.35	0.06	0.00	0.00	5.98	8.41	0.07	72	28	0
	JF1-9-11	61.28	0.01	24.66	0.06	0.00	0.00	5.88	7.83	0.11	70	29	1
	JF1-9-12	62.50	0.00	23.79	0.02	0.00	0.00	4.71	8.68	0.10	77	23	1
	JF1-9-13	60.62	0.00	24.97	0.06	0.00	0.00	6.12	7.81	0.14	69	30	1
	JF1-9-14	55.89	0.00	27.74	0.04	0.05	0.00	9.85	6.16	0.09	53	47	0
	JF1-9-15	56.72	0.02	27.21	0.06	0.04	0.00	9.10	6.61	0.09	57	43	0
	JF1-9-16	57.50	0.01	26.51	0.09	0.02	0.01	8.63	7.04	0.10	59	40	1
	JF1-9-17	58.67	0.00	25.74	0.05	0.00	0.00	7.47	7.41	0.12	64	36	1
	JF1-9-18	58.52	0.00	25.92	0.06	0.00	0.00	7.60	7.35	0.13	63	36	1
	JF1-9-19	58.64	0.02	25.57	0.05	0.02	0.00	7.52	7.25	0.15	63	36	1
	JF1-9-20	58.53	0.04	25.67	0.02	0.00	0.00	7.59	7.38	0.12	63	36	1
	JF1-9-21	59.26	0.00	25.32	0.08	0.00	0.01	6.82	7.93	0.10	67	32	1
	JF1-9-22	57.70	0.00	26.12	0.04	0.00	0.02	8.47	6.92	0.06	59	40	0
	JF1-9-23	56.45	0.03	28.01	0.05	0.00	0.00	9.44	5.93	0.06	53	47	0
	JF1-9-24	56.65	0.03	27.34	0.07	0.02	0.01	9.15	6.12	0.10	54	45	1
	JF1-9-25	59.92	0.03	24.76	0.05	0.00	0.00	6.59	8.05	0.09	69	31	1
基质	JF1-9-26	62.62	0.00	23.23	0.12	0.00	0.00	4.73	9.17	0.10	77	22	1
	JF1-9-27	62.65	0.02	22.70	0.08	0.01	0.01	4.31	9.50	0.09	80	20	0
	JF1-9-28	62.81	0.00	22.73	0.06	0.01	0.00	4.20	9.63	0.12	80	19	1
	JF1-9-29	61.95	0.00	23.45	0.03	0.00	0.00	4.88	8.84	0.11	76	23	1

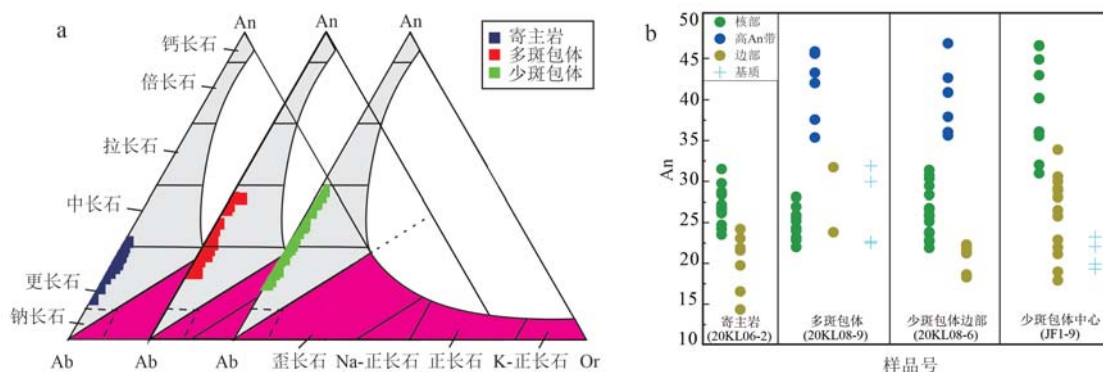


图 4 斜长石分类图解(a, after Smith, 1974)与 An 成分对比图(b)

Fig. 4 Diagram of plagioclase classification (a, after Smith, 1974) and comparison of An components (b)

镁铁质包体中斜长石多发育港湾状、补丁状等熔蚀结构(图 5c, 5d)。其中, 多斑包体(20KL08-9)核部 An 值总体变化不大, 介于 23~28 之间, 与寄主岩石中斜长石斑晶核部 An 值相近; 靠近边部发育一个宽约 150 μm 颜色较浅的 An 值增加的突变环带, 其 An 值为 31~46, 属于中长石; 边部 An 值呈现明显降低(22~31)的特征。基质中细粒斜长石的成分为更长石 (An = 22~31), 与斑晶边部的 An 值相近(图 4b, 5b)。

少斑包体中存在两种类型的斜长石斑晶。靠近包体边部样品(20KL08-6)中斜长石斑晶特征与多斑包体中的斜长石斑晶相近, 表现为核部具有与寄主岩石近似的 An 值(22~31), 靠近晶体边部发育 An 增加的值突变环带 (An = 32~46), 到边部 An 值明

显降低 (An = 18~22) (图 4b, 5c)。包体中心部位样品中(JF1-9)的斜长石显微镜下可见明显的核边结构, 核部发育熔蚀现象, 在同一消光位下, 核部残余部位的颜色较深, 熔蚀部位和边部颜色较浅。探针分析表明, 核部 An 值较高(30~47), 属于中长石, 其中残余部位的 An 值(40~47)高于熔蚀部位的 An 值(32~36); 边部 An 值介于 17~35 之间, 属于更长石(图 4); 由核部到边部 An 总体呈振荡下降的趋势。斑晶周围基质中的细粒斜长石为更长石, An 值(19~23)与斑晶边缘相近(图 4, 5d)。

#### 4.2 角闪石矿物化学特征

角闪石的电子探针分析结果见表 2, 以 23 个氧原子为基准, 计算出不同岩石类型中角闪石的阳离子数及其他参数。

表 2 解放营子岩体角闪石电子探针成分测试结果

w<sub>B</sub>/%

Table 2 Electron microprobe analyzed results of amphiboles in Jiefangyingzi Pluton

位置	点号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total	t/°C
寄主岩石(花岗闪长岩)												
	2KL06-2-1	41.08	0.85	10.80	24.24	0.45	6.44	11.59	1.80	0.28	97.53	810
	2KL06-2-2	42.17	0.76	9.64	23.68	0.50	7.05	11.27	1.55	0.29	96.91	784
	2KL06-2-3	42.43	0.81	9.58	23.69	0.52	7.00	11.37	1.69	0.25	97.34	780
	2KL06-2-4	41.33	0.96	10.27	23.62	0.45	7.07	11.34	2.05	0.31	97.40	804
	2KL06-2-5	42.67	0.92	9.27	22.67	0.41	7.67	11.41	2.00	0.24	97.25	775
	2KL06-2-6	42.49	1.00	9.29	23.03	0.48	7.39	11.47	2.12	0.23	97.49	778
	2KL06-2-7	42.91	1.03	9.26	21.61	0.43	8.57	11.12	1.81	0.22	96.96	777
斑晶	2KL06-2-8	42.46	1.10	9.35	22.28	0.47	8.07	11.39	2.05	0.29	97.46	784
	2KL06-2-9	43.07	1.10	9.11	22.01	0.43	8.07	11.42	1.83	0.27	97.30	770
	2KL06-2-10	43.67	1.04	8.79	21.83	0.42	8.44	11.37	1.91	0.20	97.67	763
	2KL06-2-11	43.19	1.04	8.79	21.71	0.41	8.41	11.50	1.82	0.25	97.12	767
	2KL06-2-12	43.16	0.91	8.89	21.71	0.52	8.25	11.54	1.78	0.24	96.99	767
	2KL06-2-13	42.95	0.50	9.47	23.72	0.50	7.31	11.75	1.32	0.20	97.73	778
	2KL06-2-14	43.12	0.89	7.83	22.51	0.50	8.17	11.73	1.47	0.22	96.43	778
	2KL06-2-15	42.34	0.65	9.57	23.03	0.44	7.65	11.76	1.50	0.23	97.16	787



续表 2  
Continued Table 2

位置	点号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total	t/°C
斑晶	2KL06-2-16	42.87	0.83	9.10	22.66	0.46	7.94	11.50	1.68	0.24	97.27	775
	2KL06-2-17	42.43	1.05	9.20	22.68	0.46	7.80	11.44	1.74	0.26	97.04	781
	2KL06-2-18	43.57	0.97	8.56	21.81	0.46	8.36	11.39	1.85	0.22	97.18	759
	2KL06-2-19	42.83	1.01	8.58	21.66	0.47	8.15	11.32	1.95	0.18	96.15	764
	2KL06-2-20	42.31	1.00	8.85	21.34	0.43	8.22	11.26	1.98	0.24	95.62	771
	2KL06-2-21	42.89	0.80	9.36	21.55	0.44	8.18	11.45	1.88	0.27	96.82	772
	2KL06-2-22	42.74	0.84	9.10	22.01	0.47	8.09	11.59	1.75	0.19	96.77	774
	2KL06-2-23	43.09	0.88	8.97	23.15	0.49	7.69	11.71	1.67	0.21	97.85	773
	2KL06-2-24	42.37	0.81	8.89	22.56	0.41	7.73	11.84	1.44	0.23	96.26	775
	2KL06-2-25	42.33	0.87	9.71	22.92	0.43	7.45	11.64	1.69	0.26	97.30	785
基质	2KL06-2-27	39.73	1.58	10.47	24.85	0.45	6.32	11.32	1.29	1.53	97.54	831
	2KL06-2-28	40.91	2.08	9.57	23.44	0.44	6.65	11.71	1.61	1.40	97.82	803
	2KL06-2-29	41.27	2.27	9.73	22.58	0.47	6.64	11.68	1.81	1.37	97.83	794
多斑包体(石英二长闪长岩)												
斑晶	JF01-4-22	42.68	1.17	9.29	23.46	0.49	7.48	10.96	1.64	0.23	97.39	780
	JF01-4-23	42.12	2.47	9.50	23.28	0.46	7.22	10.86	1.74	0.23	97.88	793
	JF01-4-24	41.75	1.86	10.40	23.65	0.43	6.97	11.48	1.45	0.28	98.28	820
	JF01-4-25	42.15	2.35	8.98	23.33	0.50	7.24	10.34	1.63	0.25	96.78	784
	JF01-4-26	42.65	2.24	8.96	23.39	0.49	7.16	11.10	1.50	0.20	97.68	780
	JF01-4-27	41.27	1.93	10.31	22.70	0.39	7.03	11.25	1.68	0.28	96.84	803
	JF01-4-28	41.17	1.93	10.41	23.91	0.42	6.83	11.30	1.12	0.30	97.39	814
	JF01-4-29	41.11	1.78	10.44	22.93	0.43	6.85	11.57	1.53	0.26	96.90	807
	JF01-4-30	41.77	1.38	10.55	22.82	0.45	6.98	11.13	1.66	0.30	97.01	795
	少斑包体(石英闪长岩)											
斑晶	20KL08-5-1	41.65	1.66	8.81	23.11	0.40	7.49	11.53	1.16	1.08	96.87	790
	20KL08-5-2	40.85	1.34	10.77	23.94	0.39	6.85	11.39	1.20	1.17	97.91	818
	20KL08-5-3	42.23	2.00	9.04	21.74	0.37	7.93	11.57	1.25	1.06	97.19	783
	20KL08-5-4	42.44	2.04	9.06	21.34	0.36	7.98	11.41	1.22	1.11	96.95	777
	20KL08-5-5	43.25	2.20	8.55	21.49	0.43	7.95	11.29	1.50	0.97	97.62	763
	20KL08-5-6	42.74	1.49	8.97	22.07	0.43	8.02	11.41	1.31	1.05	97.49	776
	20KL08-5-7	42.37	1.35	9.57	22.07	0.37	7.28	11.51	1.16	1.10	96.78	775
	20KL08-5-8	41.71	1.42	9.40	23.33	0.38	7.08	11.65	1.08	1.04	97.08	790
	20KL08-5-9	42.91	1.50	8.68	22.38	0.39	8.03	11.62	1.20	1.02	97.73	774
	20KL08-5-10	41.90	1.85	9.19	23.16	0.35	7.57	11.52	1.22	1.17	97.93	794
	20KL08-5-11	42.25	2.11	8.90	21.70	0.45	7.90	11.47	1.28	1.06	97.09	781
	20KL08-5-12	41.81	2.18	9.03	22.06	0.43	7.46	11.53	1.34	1.20	97.03	785
	20KL08-5-13	41.98	1.15	9.89	23.48	0.35	7.16	11.26	1.21	1.12	97.61	792
	20KL08-5-14	42.16	1.92	9.08	22.05	0.38	7.80	11.33	1.36	1.16	97.23	783
	20KL08-5-15	42.56	1.87	8.85	21.73	0.38	7.89	11.40	1.35	1.06	97.09	774
	20KL08-5-16	42.59	1.87	8.83	21.49	0.39	7.66	11.58	1.35	1.22	96.98	768
	20KL08-5-17	42.46	1.96	8.91	21.36	0.41	8.03	11.56	1.36	1.09	97.14	776
	20KL08-5-18	42.59	1.59	8.96	22.39	0.39	7.99	11.43	1.27	1.11	97.73	780
	20KL08-5-19	40.99	1.28	10.05	23.63	0.42	7.15	11.51	1.23	1.20	97.44	810
	20KL08-5-20	39.76	1.08	10.57	24.72	0.37	6.87	11.20	1.11	1.13	96.79	834
基质	20KL08-5-22	41.11	1.46	10.39	23.31	0.36	6.93	11.46	1.28	1.36	97.66	807
	20KL08-5-23	41.04	2.00	10.08	22.65	0.34	7.01	11.47	1.28	1.36	97.23	804
	20KL08-5-24	39.72	1.96	10.73	23.05	0.40	6.49	11.51	1.44	1.34	96.65	825

寄主岩石花岗闪长岩(20KL06-2)中角闪石斑晶发育简单双晶,其CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、Na<sub>2</sub>O和TiO<sub>2</sub>含量分别为11.12%~11.84%、7.83%~10.80%、

6.44%~8.57%、1.32%~2.12%和0.50%~1.10%(表2)。根据Leake等(1997)的分类,总体属于铁镁钙闪石-铁角闪石(图6)。从核部向边部,角闪石

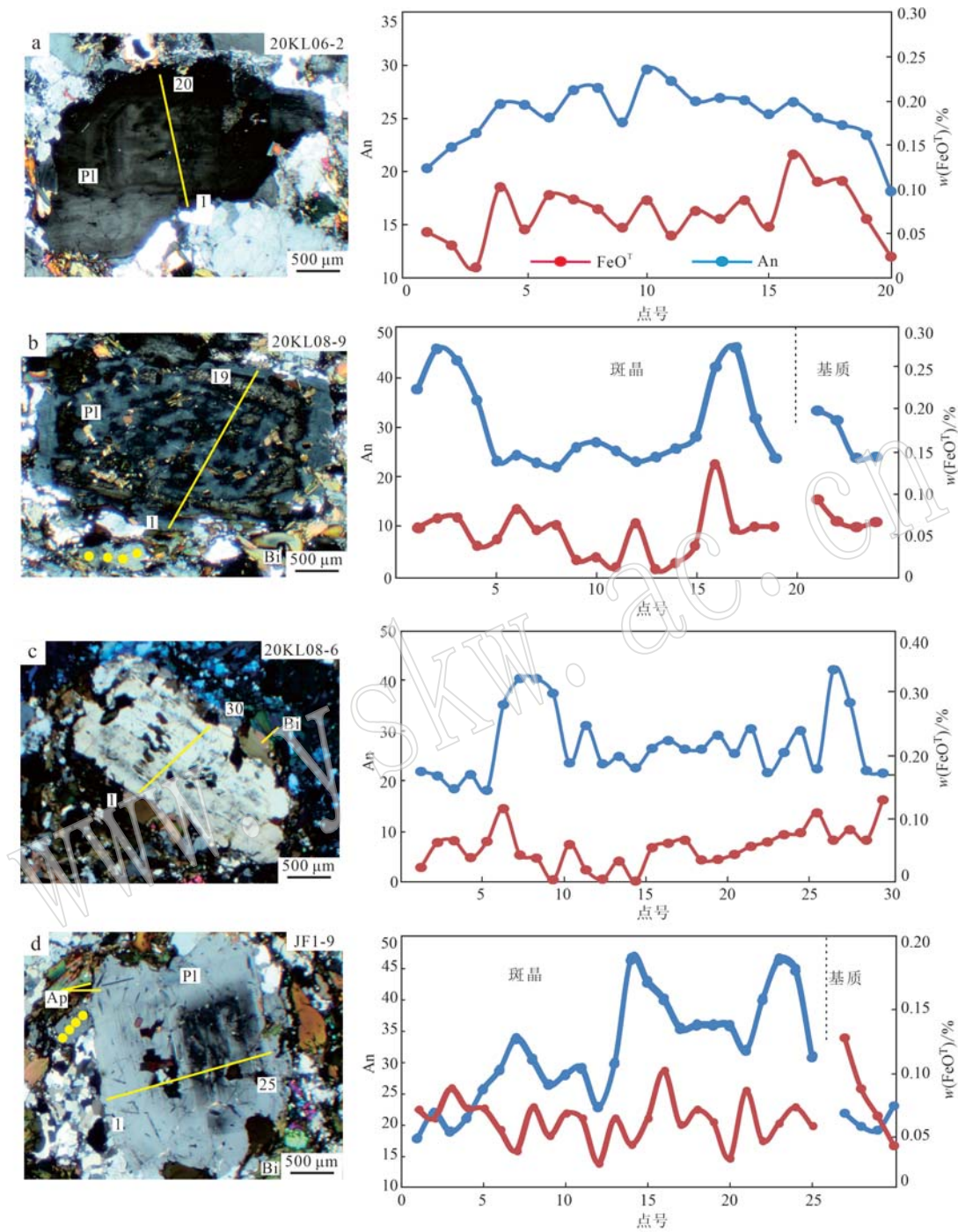


图 5 解放营子岩体中斜长石显微特征(左)和 An、FeO<sup>T</sup> 成分剖面(右)

Fig. 5 Microscopic characteristics of plagioclase in Jiefangyingzi Pluton (left) and An-FeO<sup>T</sup> composition profiles (right)

a—寄主岩中斜长石特征；b—多斑包体中斜长石捕虏晶与基质特征；c—少斑包体边部的斜长石捕虏晶特征；d—少斑包体中心部位的斜长石斑晶与基质特征；图中横线与圆圈分别为斑晶和基质中电子探针分析的位置

a—characteristics of plagioclase in host rock; b—plagioclase xenocrysts and matrix characteristics in rich-phenocrysts enclaves; c—plagioclase xenocrysts characteristics at the edge of poor-phenocrysts enclaves; d—plagioclase phenocrysts characteristics at the central part of poor-phenocrysts enclaves; the horizontal line and the circle in the figure are the positions of the electron probe analysis in the phenocryst and the matrix respectively

斑晶的 MgO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量分别显示降低和升高的特征(图 7a)。基质中细粒角闪石 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO 和 Na<sub>2</sub>O

等含量与斑晶边部相似(图 7c)，但 TiO<sub>2</sub> 含量明显升高(1.58%~2.27%)。

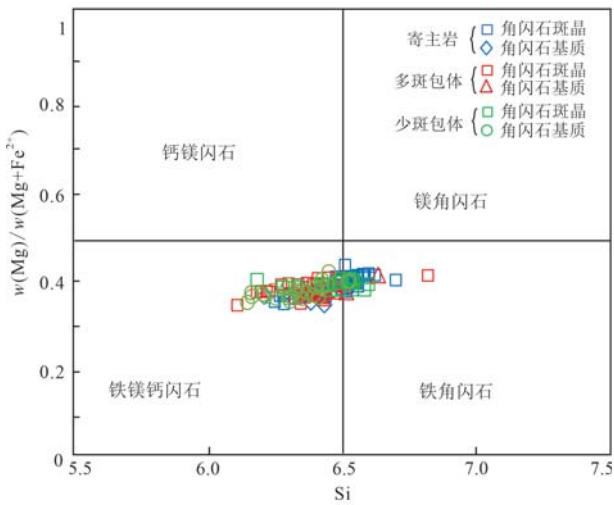


图6 角闪石分类图解(据 Leake *et al.*, 1997)  
Fig. 6 Classification diagram of hornblende (after Leake *et al.*, 1997)

多斑包体(JF01-4)中角闪石斑晶在显微镜下光性相对均匀,其CaO(10.34%~11.57%)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(8.96%~

10.55%)、MgO(6.83%~7.48%)、Na<sub>2</sub>O(1.12%~1.74%)等主量元素含量与寄主岩石中角闪石相近,也属于铁镁钙闪石(图6),但TiO<sub>2</sub>含量(1.17%~2.47%)较寄主岩中角闪石斑晶明显偏高,与寄主岩石基质中细粒角闪石含量相近。

少斑包体(20KL08-5)中角闪石斑晶的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、Na<sub>2</sub>O和TiO<sub>2</sub>元素含量与多斑包体近似(表2),属于铁镁钙闪石-铁角闪石(图6a)。基质角闪石为铁镁钙闪石,主量元素含量与斑晶角闪石相似(图6)。少斑包体与多斑包体中角闪石TiO<sub>2</sub>含量相近,明显高于寄主岩中斑晶角闪石,但与寄主岩中基质角闪石TiO<sub>2</sub>含量近似(图7c, 7f, 7i)。

## 5 讨论

### 5.1 暗色包体成因

目前,关于花岗岩中暗色包体具有几种不同的

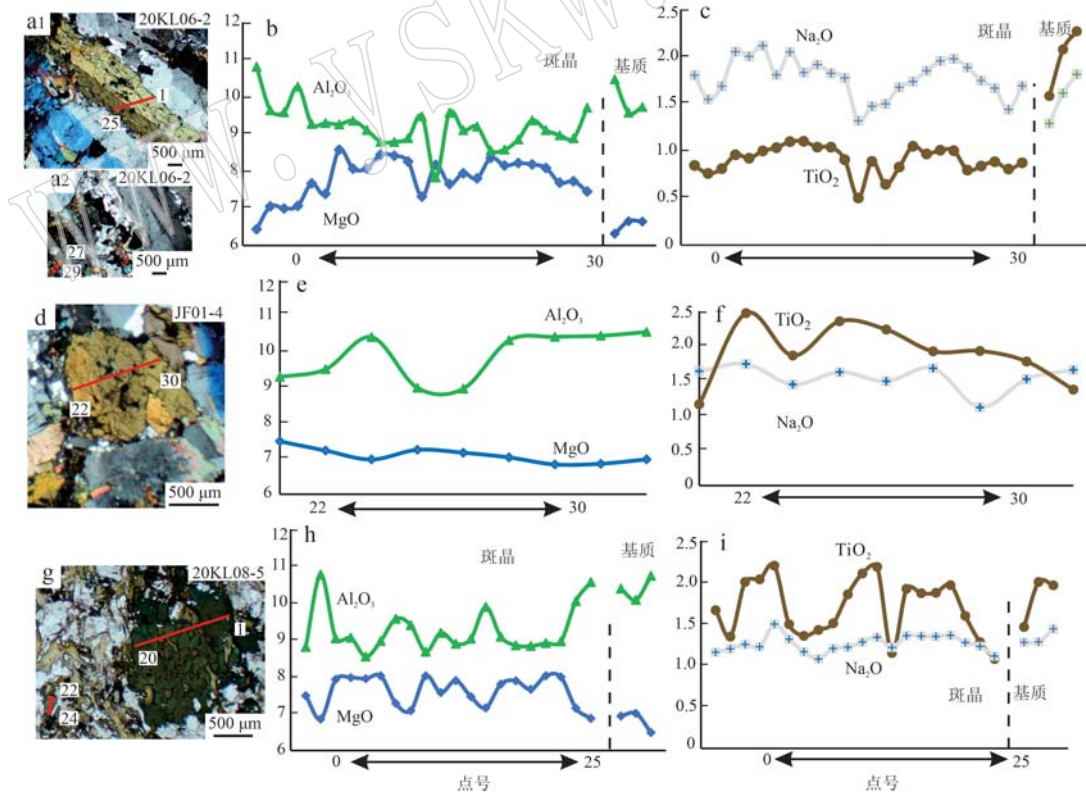


图7 角闪石的显微特征及电子探针分析结果

Fig. 7 Microscopic characteristics and electron probe analysis results of hornblende

a~c—花岗岩中角闪石斑晶与基质特征; d~f—多斑包体中角闪石斑晶特征; g~i—少斑包体中角闪石斑晶和基质特征  
a~c—characteristics of hornblende phenocryst and matrix in granodiorite; d~f—characteristics of hornblende phenocrysts in rich-phenocrysts enclaves; g~i—characteristics of hornblende phenocrysts and matrix in poor-phenocrysts enclaves

成因,即源区残留的耐熔物质、同源包体、围岩捕掳体和岩浆混合产物等(Vernon, 1984, 2014; White and Chappell, 1977; Chappell *et al.*, 1987; Barbarin, 2005; Shellnutt *et al.*, 2010)。Liu 等(2012, 2020)研究表明,解放营子岩体中寄主岩与暗色包体的锆石 U-Pb 年龄近似(230 Ma),包体具有典型的岩浆结构特征,排除了包体为残留体与围岩捕掳体的可能性;包体没有明显的堆晶结构,包体与寄主岩在 Sr-Nd 同位素上具有明显差异 [ $\epsilon\text{Nd}(t)$  值分别为 3.84~4.94、-1.0~-0.4],排除同源包体、残留体的可能性,因此暗色包体为岩浆混合成因。暗色包体在寄主岩中呈椭圆状、透镜状和纺锤状产出,表明包体是塑性变形产物(图 2a)(莫宣学等, 2002)。包体中斜长石、角闪石和黑云母矿物常含针状磷灰石,表明形成于快速冷凝结晶环境(图 3i)(Wyllie *et al.*, 1962)。此外,包体中见反向脉,其成因为温度相对较高的镁铁质岩浆进入较低温的长英质岩浆中快速冷却而产生的裂隙被长英质岩浆进入而形成,也是反映岩浆混合的证据之一(朱金初等, 2006)。

## 5.2 斜长石环带的成因

斜长石环带的形成反映了结晶过程中熔体成分、温度和压力等复杂变化。由于元素在斜长石中扩散速率极低,能较好的保存环带结构,从而记录整个岩浆演化机制(Nelson and Montana, 1992; Blundy and Cashman, 2001; 覃锋等, 2006; 罗照华等, 2007)。

寄主岩石中斜长石斑晶 An 值由核部向边部逐渐降低,  $\text{FeO}^T$  含量无系统性变化(图 6a)。这种环带特征反映了岩浆分离结晶过程中,早期晶出的偏基性斜长石晶体未与残余岩浆达到完全平衡,随着温度的降低,在每一温度区间都保留一部分斜长石,但后期结晶的斜长石较先晶出者偏酸性,而形成正常的斜长石环带(Stimac and Pearce, 1992; 吴平等, 1997; Couch *et al.*, 2003; 谢磊等, 2004; 牛之建等, 2014)。

相比寄主岩石中斜长石斑晶的正常环带,多斑和少斑镁铁质包体边部均发育具有突变环带的斜长石斑晶。这类斜长石斑晶核部 An 值(23~28)与寄主岩石中斜长石斑晶核部的 An 值(25~31)相近(图 4b),靠近边部存在 An 值增加的突变环带(31~46),同时环带内  $\text{FeO}^T$  含量增加,之后 An 值向边部又逐渐降低(22~31)(图 5b)。对于斜长石 An 值增加的突变环带,一些学者认为可能是岩浆快速上

升、压力突然降低造成的(Humphreys *et al.*, 2006; Coote and Shane, 2016),另一些学者则认为其代表了岩浆不平衡的结构,是不同化学成分和物理性质的岩浆发生混合形成的(Tepley *et al.*, 1999, 2000; Barbarin, 2005; Browne *et al.*, 2006)。从岩石的似斑状结构特征来看,属于典型的中深成侵入岩的结构,可以排除突变环带是岩浆快速上升,压力突然降低而造成的。此外,作为斜长石中的微量元素,  $\text{FeO}^T$  含量在相对封闭的岩浆系统中常保持相对稳定,而在开放系统中会随熔体成分的改变而发生明显变化(Bindeman *et al.*, 1998; Wilke and Behrens, 1999)。考虑到突变环带的熔蚀特征以及斜长石核部 An 值与寄主岩石一致,因此,笔者认为它们是由于高温的镁铁质岩浆注入长英质岩浆过程中,捕掳早期结晶的酸性斜长石斑晶并发生熔蚀,当混合熔体的温度不足以使斜长石完全熔融时,仅在晶体周围形成 An 值增加的突变环带,随着温度降低在斑晶边部和基质中进一步晶出富钠的斜长石。

除突变环带的斜长石斑晶外,少斑包体中心部位还发育具有明显核边结构的斜长石斑晶(图 5d)。这类斜长石在显微镜下核部发育岛状或环状结构,而边部光性相对均匀(图 5d)。斜长石的岛状、环状和多孔状熔蚀结构通常被认为是早期镁铁质岩浆结晶出的具有高 An 值的斜长石,在随岩浆快速上升、降压和注入长英质岩浆过程中,岩浆中水和挥发分的大量逸出导致斜长石晶体的结构性失稳而遭受部分熔蚀,由于受到长英质岩浆的改造,核部的熔蚀孔洞被晶出的相对富钠的斜长石充填的结果(李武显等, 1999; Baxter and Feely, 2002; Martel *et al.*, 2006)。从电子探针分析结果来看,具有岛状或环状结构的斑晶核部 An 值(30~47)明显高于边部 An 值(17~35),同时也明显高于发育突变环带的斜长石斑晶核部 An 值(23~28),排除它们与发育突变环带的斜长石斑晶核部同属于寄主岩石的捕掳晶,而可能代表镁铁质岩浆早期结晶的产物。另一方面,核部的熔蚀孔洞中 An 值(32~36)小于残余部位的 An 值(40~47),但比边部 An 值(17~35)略高,指示它们可能是与长英质岩浆反应不完全的结果。该类斜长石边部 An 值与发育突变环带的斜长石边部 An 值(22~31)以及基质中细小斜长石 An 值(19~23)相近,代表在岩浆结晶晚期相同温压的条件下形成的产物。

### 5.3 角闪石 Ti 含量变化及地质意义

前人研究表明,角闪石中 Ti 含量既与结晶时的温度有关(Gilbert *et al.*, 1982; King *et al.*, 1999; Niida and Green, 1999),也受到岩浆化学成分的控制(Molina *et al.*, 2009)。根据角闪石温度计公式,计算出包体角闪石、寄主岩中斑晶角闪石及基质角闪石的结晶温度分别为 762~834℃、760~810℃和 794~830℃(Ridolfi *et al.*, 2010),三者温度相近,表明在解放营子岩体结晶过程中,温度对角闪石中 Ti 含量的影响较小,更与熔体成分相关。解放营子寄主岩石(花岗闪长岩)的全岩 TiO<sub>2</sub> 含量为 0.42%~1.03%,其中角闪石斑晶 TiO<sub>2</sub> 含量为 0.50%~1.10%;而镁铁质包体具有较高的全岩 TiO<sub>2</sub> 含量(1.68%~2.46%),和较高的角闪石斑晶 TiO<sub>2</sub> 含量(1.17%~2.47%)(Liu *et al.*, 2020),也指示在解放营子岩体中熔体成分对角闪石 TiO<sub>2</sub> 的含量起主要的控制作用。

在寄主岩石花岗闪长岩中,基质中角闪石 TiO<sub>2</sub> 含量(1.58%~2.26%)明显高于角闪石斑晶 TiO<sub>2</sub> 含量(0.50%~1.10%),且与包体中角闪石斑晶 TiO<sub>2</sub> 含量(1.17%~2.47%)相近,指示花岗闪长岩结晶晚期存在富 Ti 熔体的加入。另一方面,少斑包体的角闪石斑晶 TiO<sub>2</sub> 含量呈凹凸分布的特征(图 7i),指示镁铁质岩浆的角闪石斑晶形成过程中应存在与贫 Ti 熔体的反应,而角闪石斑晶包裹黑云母的不平衡共生现象也可能与长英质岩浆的反应有关(Grogan and Reavy, 2002; Xiong *et al.*, 2012; 陆天宇等, 2016)。上述特征指示岩浆混合过程中存在 TiO<sub>2</sub> 从浓度较高的镁铁质岩浆向浓度较低的长英质岩浆的迁移。

### 5.4 岩浆混合机制的讨论

解放营子岩体形成于中晚三叠世西伯利亚和中朝古板块之间从碰撞造山到造山晚期伸展的转变阶段(Liu *et al.*, 2012, 2020),岩体中广泛发育长条状、浑圆状、纺锤状及不规则状镁铁质包体,宏观上指示岩体形成过程中存在岩浆的机械混合作用(图 2)。元素和同位素地球化学分析表明,其中基性端员具有较高的 TiO<sub>2</sub> 含量(1.68%~2.46%)以及 Nb、Ta 等高场强元素含量,εNd(*t*)为+3.84~+4.94,显示软流圈来源的特征;长英质端员具有较低的 TiO<sub>2</sub> 含量(0.42%~1.03%),明显 Nb、Ta 元素负异常以及 εNd(*t*)为-1.0~-0.4,显示地壳来源的特征;而多数样品主量元素和 εNd(*t*)同位素含量介于两个端

员之间(Liu *et al.*, 2012, 2020),指示岩体中也存在以元素扩散和迁移为特征的化学混合作用。

尽管以往的研究表明解放营子岩体形成过程中存在广泛的岩浆混合,但对于岩浆混合的机制缺少约束。作为寄主岩石和包体中重要的矿物组成,斜长石和角闪石成分的变化为揭示岩浆混合机制提供了关键的证据。从电子探针分析结果来看,镁铁质包体中发育突变环带的斜长石斑晶代表较高温的镁铁质岩浆捕获并改造的斜长石捕虏晶(图 5b, 5c),少斑包体中核部具有岛状、环状和多孔状熔蚀结构的斜长石斑晶是镁铁质岩浆中早期晶出的斜长石与长英质岩浆反应的结果(图 5d),结合少斑包体角闪石斑晶 TiO<sub>2</sub> 含量呈凹凸不平的分布特征(图 7g~7i),它们共同指示了镁铁质岩浆在形成过程中同化和吸收了大量的长英质岩浆。另一方面,寄主岩石基质中结晶晚期的细粒角闪石 TiO<sub>2</sub> 含量明显高于斑晶角闪石的 TiO<sub>2</sub> 含量,而与镁铁质包体中角闪石 TiO<sub>2</sub> 含量相近(图 7c, 7f, 7i),指示长英质岩浆结晶晚期同化并吸收了镁铁质组分。以往的研究认为,镁铁质岩浆具有高温、低黏度特征,容易同化和吸收长英质岩浆成分,而长英质岩浆由于低温、高黏度特征,即使镁铁质岩浆加入,使岩浆温度升高,也不易同化镁铁质岩浆(Castro, 2001; 张旗等, 2007; Pistone *et al.*, 2016)。从解放营子花岗闪长岩的岩相学、地球化学和矿物化学特征来看,该岩体形成过程中既存在机械混合,也存在化学混合,而且岩浆混合过程中元素的迁移是双向的。

## 6 主要认识

(1) 解放营子岩体的镁铁质包体中发育具有 An 值增加的突变环带和核部具有岛状或环状熔蚀结构的两种斜长石斑晶,它们分别代表镁铁质岩浆从长英质岩浆中捕获并改造的斜长石捕虏晶和镁铁质岩浆自身晶出并受长英质岩浆改造的斜长石斑晶。

(2) 寄主岩石基质中结晶晚期的细粒角闪石 TiO<sub>2</sub> 含量明显高于斑晶角闪石的 TiO<sub>2</sub> 含量,而与镁铁质包体中角闪石 TiO<sub>2</sub> 含量相近,指示长英质岩浆结晶晚期同化并吸收了富 TiO<sub>2</sub> 的镁铁质组分。

(3) 解放营子岩体形成过程中,镁铁质和长英质岩浆之间既存在宏观尺度上的机械混合,也存在微观尺度上的以矿物间元素迁移为特征的化学混

合, 且岩浆混合过程中元素的迁移是双向的。

**致谢** 本文发表恰逢沈其韩院士百岁寿诞, 谨以此文表达美好祝愿和敬仰之情。感谢刘福来研究员组织本专辑, 感谢中国地质科学院地质研究所毛小红老师在电子探针实验中的帮助, 感谢匿名审稿专家的细致审稿, 提出诸多宝贵的意见。

## References

- Barbarin B. 2005. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: Nature, origin, and relations with the hosts[J]. *Lithos*, 80(1~4): 155~177.
- Baxter S and Feely M. 2002. Magma mixing and mingling textures in granitoids: Examples from the Galway Granite, Connemara, Ireland [J]. *Mineralogy and Petrology*, 76: 63~74.
- Belousova E A, Walters S, Griffin W L, *et al.* 2001. Trace element signatures of apatites in granitoids from the Mt Isa Inlier, northwestern Queensland[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 603~619.
- Bindeman I N, Davis A M and Drake M J. 1998. Ion microprobe study of plagioclase-basalt partition experiments at natural concentration levels of trace elements[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(7): 1 175~1 193.
- Blundy J and Cashman K. 2001. Ascent driven crystallization of dacite magmas at Mount St. Helens, 1980~1986[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1 140: 631~650.
- Browne B L, Eichelberger J C, Patino L C, *et al.* 2006. Magma mingling as indicated by texture and Sr/Ba ratios of plagioclase phenocrysts from Unzen volcano, SW Japan[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154(1~2): 103~116.
- Castro A. 2001. Plagioclase morphologies in assimilation experiments. Implications for disequilibrium melting in the generation of granodiorite rocks[J]. *Mineralogy and Petrology*, 71: 31~49.
- Chappell B W, White A J R and Wyborn D. 1987. The importance of residual source material (restitute) in granite petrogenesis[J]. *Journal of Petrology*, 28: 1 111~1 138.
- Chu M F, Wang K L, Griffin W L, *et al.* 2009. Apatite composition: Tracing petrogenetic processes in transhimalayan granitoids[J]. *Journal of Petrology*, 50: 1 829~1 855.
- Coote A C and Shane P. 2016. Crystal origins and magmatic system beneath Ngauruhoe volcano (New Zealand) revealed by plagioclase textures and compositions[J]. *Lithos*, 260: 107~119.
- Couch S, Sparks R S J and Carroll M R. 2003. The kinetics of degassing induced crystallization at Soufriere Hills Volcano, Montserrat [J]. *Journal of Petrology*, 44(8): 1 477~1 502.
- Gilbert M C, Helz R T, Popp R K, *et al.* 1982. Experimental studies of amphibole stability: Mineralogical society of America[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 9B: 231~268.
- Ginibre C and Wörner G. 2007. Variable parent magmas and recharge regimes of the Parinacota magma system (N. Chile) revealed by Fe, Mg and Sr zoning in plagioclase[J]. *Lithos*, 98: 118~140.
- Grogan S E and Reavy R J. 2002. Disequilibrium textures in the Leinster granite complex, SE Ireland: Evidence for acid-acid magma mixing [J]. *Mineralogical Magazine*, 66: 929~939.
- Gu Fenghua, Zhang Yongmei, Liu Ruiping, *et al.* 2015. Magma mixing and mingling of the Shadegai granite in Inner Mongolia: Evidence from petrography, mineral chemistry and geochronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1 374~1 390 (in Chinese with English abstract).
- Hibbard M J. 1991. Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid systems[A]. Didier J and Barbarin B. *Enclaves and Granite Petrology*[C]. Amsterdam: Elsevier, 431~444.
- Huang H, Zhang Z C, Kusky T, *et al.* 2012. Geochronology and geochemistry of the Chuanwulu complex in the South Tianshan, western Xinjiang, NW China: Implications for petrogenesis and Phanerozoic continental growth[J]. *Lithos*, 140~141: 66~85.
- Humphreys M C S, Blundy J D and Sparks R S J. 2006. Magma evolution and open system processes at Shiveluch volcano: Insights from phenocryst zoning[J]. *Journal of Petrology*, 47(12): 2 303~2 334.
- Huppert H E and Sparks R S J. 1988. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust[J]. *Journal of Petrology*, 29(3): 599~624.
- Jia L Q, Wang L, Wang G H, *et al.* 2019. Petrogenesis of the Late Triassic shoshonitic Shadegai pluton from the northern North China Craton: Implications for crust-mantle interaction and post-collisional extension[J]. *Geoscience Frontiers*, 10(2): 595~610.
- King P L, Hervig R L, Holloway J R *et al.* 1999. Oxy-substitution and dehydrogenation in mantle-derived amphibole megacrysts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(21): 3 635~3 651.
- Kumar S and Rino V. 2006. Mineralogy and geochemistry of microgranular enclaves in Palaeoproterozoic Malanjhand granitoids, central India: Evidence of magma mixing, mingling, and chemical equilibra-

- tion[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(5): 591~609.
- Kuritani T. 1998. Boundary layer crystallization in a basaltic magma chamber: Evidence from Rishiri Volcano, northern Japan[J]. *Journal of Petrology*, 39: 1 619~1 640.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on new minerals and mineral names[J]. *Mineralogical Magazine*, 61: 219~246.
- Li Changnian. 2002. Comment on the magma mixing and their research [J]. *Geological Science and Technology Information*, 21(4): 49~54(in Chinese with English abstract).
- Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3~4): 207~224.
- Li R, Yang J H, Wang H, *et al.* 2020. Triassic lithospheric modification of the northern North China Craton: Evidences from the composite Kalaqin Batholith and ultramafic-mafic Heiluhe Intrusive Complex in Inner Mongolia[J]. *Lithos*, 362~378.
- Li Wuxian, Dong Chuanwan and Zhou Xinmin. 1999. Plagioclase xenocryst and magma mingling in Pingtan and Zhangzhou complexes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 286~290(in Chinese with English abstract).
- Liu J F, Li J Y, Chi X G, *et al.* 2012. Petrogenesis of Middle Triassic post-collisional granite from Jiefangyingzi area, Southeast Inner Mongolia: Constraint on the Triassic tectonic evolution of the north margin of the Sino-Korean paleoplate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 147~159.
- Liu J F, Li J Y, Chi X G, *et al.* 2020. Destruction of the northern margin of the North China Craton in Mid-Late Triassic: Evidence from asthenosphere derived mafic enclaves in the Jiefangyingzi granitic pluton from the Chifeng Area, Southern Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 94(4): 1 071~1 092.
- Lu Tianyu, He Zhenyu, Zhang Zeming, *et al.* 2016. Magma mixing of the Nyemo post-collisional granite from the Gangdese magmatic belt, Tibet: Evidence of microstructures[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(12): 3 613~3 623(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Huang Zhongmin and Ke Shan. 2007. An overview of granitoid[J]. *Geological Review*, 53(S1): 180~226(in Chinese with English abstract).
- Martel C, Radadi A A, Poussineau S, *et al.* 2006. Basalt-inherited microclites in silicic magmas: Evidence from Mount Pelée (Martinique, French West Indies)[J]. *Geology*, 34(11): 905~908.
- McLeod G W, Dempster T J and Faithfull J W. 2011. Deciphering magma mixing processes using zoned titanite from the ross of Mull granite, Scotland[J]. *Journal of Petrology*, 52: 55~82.
- Mo Xuanxue. 2011. Magmatism and evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Geological Journal of China Universities*, 17(3): 351~367(in Chinese with English abstract).
- Mo X X, Dong G C, Zhao Z D, *et al.* 2005. Timing of magma mixing in the Gangdisé magmatic belt during the India-Asia collision: Zircon SHRIMP U-Pb dating[J]. *Acta Geologica Sinica English Edition*, 79(1): 66~76.
- Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Xiao Qinghui, *et al.* 2002. Cognition of magma hybrid in granites and its research methods[A]. Xiao Qinghui and Deng Jinfu. *The Ways of Investigation on Granitoids*[C]. Beijing: Geological Publishing House, 53~70(in Chinese).
- Molina J F, Scarrow J H, Montero P G, *et al.* 2009. High Ti-Al amphibole as a petrogenetic indicator of magma chemistry: Evidence for mildly alkalic-hybrid melts during evolution of Variscan basic-ultrabasic magmatism of Central Iberia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(1): 69~98.
- Nelson S T and Montana A. 1992. Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression[J]. *American Mineralogist*, 77: 1 242~1 249.
- Niida K and Green D H. 1999. Stability and chemical composition of pargasitic amphibole in MORB pyroxene under upper mantle conditions [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135(1): 18~40.
- Niu Zhijian, Liu Yue, Di Yongjun, *et al.* 2014. Zoning characteristics of the plagioclase from the Mesozoic trachyandesite in Wuchagou area of the Da Hinggan Mountains and its geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(1): 102~108(in Chinese with English abstract).
- Pistone M, Blundy J D, Brooker R A, *et al.* 2016. Textural and chemical consequences of interaction between hydrous mafic and felsic magmas: All experimental study[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171: 8~24.
- Qi Youqiang, Hu Ruizhong, Liu Shen, *et al.* 2008. Review on magma mixing and mingling[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(4): 409~416(in Chinese with English abstract).
- Qin Feng, Xu Xiaoxia and Luo Zhaohua. 2006. Mixing and mingling in petrogenesis of the Fangshan intrusion, Beijing[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2 957~2 970(in Chinese with English abstract).

- Ridolfi F, Renzulli A and Puerini M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1): 45~66.
- Shellnutt J G, Jahn B M and Dostal J. 2010. Elemental and Sr-Nd isotope geochemistry of microgranular enclaves from peralkaline A-type granitic plutons of the Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Lithos*, 119(1~2): 34~36.
- Sisson T W, Grove T L and Coleman D S. 1996. Hornblende gabbro sill complex at Onion Valley, California, and a mixing origin for the Sierra Nevada batholith[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 126(1~2): 81~108.
- Smith J V. 1974. *Feldspar Mineral*[M]. New York: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg, 1~200.
- Stewart M L and Pearce T H. 2004. Sieve-textured plagioclase in dacitic magma: Interference imaging results [J]. *American Mineralogist*, 89: 348~351.
- Stimac J A and Pearce T H. 1992. Textural evidence of mafic-felsic magma interaction in dacite lavas, Clear Lake, California[J]. *American Mineralogist*, 77: 795~809.
- Tepley F, Davidson J, Tilling R, *et al.* 2000. Magma mixing, recharge and eruption histories recorded in plagioclase phenocrysts from El Chichon Volcano, Mexico[J]. *Journal of Petrology*, 41(9): 1397~1411.
- Tepley III F J, Davidson J P and Clyne M A. 1999. Magmatic interactions as recorded in plagioclase phenocrysts of Chaos Crags, Lassen volcanic center California[J]. *Journal of Petrology*, 40(5): 787~806.
- Troll V R and Schmincke H-U. 2002. Magma mixing and crustal recycling recorded in ternary feldspar from compositionally zoned peralkaline ignimbrite A', Gran Canaria, Canary Islands[J]. *Journal of Petrology*, 2: 243~270.
- Vernon R H. 1984. Microgranitoid enclaves in granites-globules of hybrid magma quenched in a plutonic environment [J]. *Nature*, 309(5967): 438~439.
- Vernon R H. 2014. Microstructures of microgranitoid enclaves and the origin of S-type granitoids[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61(2): 227~239.
- Wang Dezi and Xie Lei. 2008. Magma mingling: Evidence from enclaves [J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(1): 16~21 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuwang, Wang Jingbin, Long Lingli, *et al.* 2012. Type, indicator, mechanism, model and relationship with mineralization of magma mixing: A case study in North Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2317~2330 (in Chinese with English abstract).
- Wu Pingxiao, Wu Jinping, Xiao Wending, *et al.* 1997. Genetic mechanism of plagioclase zoning[J]. *Geology Geochemistry*, 25(4): 40~49 (in Chinese with English abstract).
- Wang X A, Li S C, Xu Z Y, *et al.* 2016. Neoproterozoic quartz diorites in the Jiefangyingzi area, Central Asian Orogenic Belt: Geological and tectonic significance[J]. *International Geology Review*, 58(3): 358~370.
- White A J R and Chappell B W. 1977. Ultrametamorphism and granitoid genesis[J]. *Tectonophysics*, 43: 7~22.
- Wilke M and Behrens H. 1999. The dependence of the partitioning of iron and europium between plagioclase and hydrous tonalitic melt on oxygen fugacity[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 137(1~2): 102~114.
- Wyllie P J, Cox K G and Biggar G M. 1962. The habit of apatite in synthetic systems and igneous rocks[J]. *Journal of Petrology*, 3(2): 238~243.
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Qiu Ruizhao, *et al.* 2009. A preliminary study of the relationship between granitoids and the growth of continental crust: A case study of the formation of key orogen granitoids in China [J]. *Geology in China*, 36(3): 594~622 (in Chinese with English abstract).
- Xie Lei, Wang Dezi, Wang Rucheng, *et al.* 2004. Complex zoning in plagioclases from the quartz diorite enclave in the Putuo texture granitic complex, Zhejiang province: Record of magma mixing[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1397~1408 (in Chinese with English abstract).
- Xiong F H, Ma C Q, Zhang J Y, *et al.* 2012. The origin of mafic microgranular enclaves and their host granodiorites from East Kunlun, Northern Qinghai-Tibet Plateau: Implications for magma mixing during subduction of Paleo-Tethyan lithosphere[J]. *Mineralogy Petrology*, 104(3~4): 211~224.
- Yang J H, Wu F Y, Simon A W, *et al.* 2006. Tracing magma mixing in granite genesis: In situ U-Pb dating and Hf isotope analysis of zircons [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153: 177~190.
- Yang J H, Wu F Y and Wilde S A. 2003. Geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: An association with lithospheric thinning[J]. *Ore Geology Reviews*, 23: 125~152.



- Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, *et al.* 2007. Granitic magma mixing versus basaltic magma mixing: New viewpoints on granitic magma mixing process: Some crucial questions on granite study (1) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1 141~1 152(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q Q, Zhang S H, Zhao Y, *et al.* 2021. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Neoproterozoic magmatism in the Jiefangyingsi area, northern North China Craton: Implications for crustal growth and tectonic affinity[J]. *Precambrian Research*, 357: 106~144.
- Zhou Xunruo. 1994. Hybridization in the genesis of granitoids[J]. *Earth Science Frontiers*, 1 (1/2): 87~97(in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinchu, Zhang Peihua, Xie Caifu, *et al.* 2000. Magma mixing origin of the mafic enclaves in Lisong Granite, NE Guangxi, western Nanling Mountains[J]. *Geochimica*, 35(5): 506~516(in Chinese with English abstract).
- 莫宣学. 2011. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. *高校地质学报*, 17(3): 351~367.
- 莫宣学, 罗照华, 肖庆辉, 等. 2002. 花岗岩类岩石中岩浆混合作用的认识与研究方法[A]. 肖庆辉, 邓晋福. 花岗岩研究思维与方法[C]. 北京: 地质出版社, 53~70.
- 牛之建, 刘跃, 狄永军. 2014. 大兴安岭五岔沟地区中生代粗安岩中斜长石环带特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(1): 102~108.
- 齐有强, 胡瑞忠, 刘 燊, 等. 2008. 岩浆混合作用研究综述[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 27(4): 409~416.
- 覃 锋, 徐晓霞, 罗照华. 2006. 北京房山岩体形成过程中的岩浆混合作用证据[J]. *岩石学报*, 22(12): 2 957~2 970.
- 王德滋, 谢 磊. 2008. 岩浆混合作用: 来自岩石包体的证据[J]. *高校地质学报*, 14(1): 16~21.
- 王玉往, 王京彬, 龙灵利, 等. 2012. 岩浆混合作用的类型、标志、机制、模式及其与成矿的关系——以新疆北部为例[J]. *岩石学报*, 28(8): 2 317~2 330.
- 吴平霄, 吴金平, 高文丁, 等. 1997. 斜长石环带的成因机制[J]. *地质地球化学*, 25(4): 40~49.
- 肖庆辉, 邓晋福, 邱瑞照, 等. 2009. 花岗岩类与大陆地壳生长初探——以中国典型造山带花岗岩类岩石的形成为例[J]. *中国地质*, 36(3): 594~622.
- 谢 磊, 王德滋, 王汝成, 等. 2004. 浙江普陀花岗岩体中的石英闪长质包体: 斜长石内部复杂环带研究与岩浆混合历史记录[J]. *岩石学报*, 20(6): 1 397~1 408.
- 张 旗, 潘国强, 李承东, 等. 2007. 花岗岩混合问题: 与玄武岩对比的启示——关于花岗岩研究的思考之一[J]. *岩石学报*, 23(5): 1 141~1 152.
- 周珣若. 1994. 花岗岩混合作用[J]. *地学前缘*, 1(Z1): 87~97.
- 朱金初, 张佩华, 谢才富, 等. 2006. 桂东北里松花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因[J]. *地球化学*, 35(5): 506~516.

## 附中文参考文献

- 顾枫华, 章永梅, 刘瑞萍, 等. 2015. 内蒙古沙德盖花岗岩岩浆混合作用: 岩相学、矿物化学和年代学证据[J]. *岩石学报*, 31(5): 1 374~1 390.
- 李昌年. 2002. 岩浆混合作用及其研究评述[J]. *地质科技情报*, 21(4): 49~54.
- 李武显, 董传万, 周新民. 1999. 平潭和漳州深成杂岩中斜长石捕虏晶与岩浆混合作用[J]. *岩石学报*, 15(2): 286~290.
- 陆天宇, 贺振宇, 张泽明, 等. 2016. 西藏冈底斯尼木后碰撞花岗岩的岩浆混合作用: 显微结构证据[J]. *岩石学报*, 32(12): 59~69.
- 罗照华, 黄忠敏, 柯 珊. 2007. 花岗质岩石的基本问题[J]. *地质论评*, 53(S1): 180~226.