

滇西北拉巴燕山晚期花岗岩岩石成因及其成矿指示

——黑云母和角闪石矿物化学证据

向 坤, 薛传东, 谢志鹏, 来瑞娟

(昆明理工大学 地球科学系, 云南 昆明 650093)

摘 要: 在滇西北香格里拉拉巴地区, 近年通过钻探新发现了燕山晚期花岗岩体及伴生的超大型钼(-铜)-多金属矿床。调查发现, 岩浆成因黑云母和角闪石记录了其形成时的岩浆温度、压力、氧逸度以及物质来源等岩石成因信息, 这些物理化学条件制约了成矿元素在熔体相与流体相之间的分配, 成为约束岩浆过程、岩石成因及成矿机制的重要因素。本文对拉巴矿区花岗岩中黑云母和角闪石进行了详细的矿相学和成分分析, 据此厘定了岩石形成的物理化学条件, 探讨其岩石成因及成矿效应。结果显示, 花岗岩中黑云母的 $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$ 值较为均一, 具有无钙或贫钙的特点, Ti 阳离子数为 0.31~0.52, 属于岩浆成因; 角闪石的 Si 阳离子数为 6.68~7.20, Ti 阳离子数为 0.09~0.13, 属于岩浆成因; 计算获得岩浆结晶温度为 705~903℃, 结晶压力为 59~449 MPa, 侵位深度为 2.2~17.0 km。黑云母和角闪石的矿物化学特征指示, 寄主花岗岩体为 I 型花岗岩, 具有幔源物质参与特点, 形成于较高的氧逸度环境中; 黑云母的卤族元素(F、Cl)含量为 0.17%~0.58%, 指示岩浆出溶流体为富含 F、Cl 的流体, 利于 Mo、Cu 等元素的富集成矿, 暗示本区具有很大的成矿潜力。

关键词: 斑状花岗岩; 黑云母; 角闪石; 成矿效应; 拉巴钼(-铜)-多金属矿床; 滇西北

中图分类号: P575.1; P581; P611

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)01-0034-13

Petrogenesis of the late Yanshanian Laba granite in northwestern Yunnan Province and its metallogenic implications: Evidence from mineral chemistry of biotites and amphiboles

XIANG Kun, XUE Chuan-dong, XIE Zhi-peng and LAI Rui-juan

(Department of Earth Sciences, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The late Yanshanian Laba porphyritic granite, associated with a superlarge Mo(-Cu)-polymetallic deposit, was recently identified by drilling exploration in Shangrila area of northwestern Yunnan Province. The magmatic biotites and amphiboles have recorded the detailed petrogenesis information including the temperature, pressure, oxygen fugacity, and the source origin of the parent magma. The authors investigated the mineralogical composition of the biotites and amphiboles in the porphyritic granite from the Laba Mo(-Cu) deposit, and constrained the physico-chemical conditions of the ore-bearing magmatic rocks as well as the metallogenic potential. Electron microprobe analyses (EMPA) show that the biotites have uniform $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$ values, without or with minor CaO, and the Ti cation number is 0.31~0.52, indicating that they are of magmatic origin. The Si, Ti cation num-

收稿日期: 2018-04-17; 接受日期: 2018-11-07; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC06003); 国家自然科学基金项目(41373049, 40772067)

作者简介: 向 坤(1990-), 男, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业, E-mail: xiangk@aliyun.com; 通讯作者: 薛传东(1971-), 男, 博士, 教授, 主要从事基础地质和矿床学的教学和科研, E-mail: xuechuandong@kmust.edu.cn, cdxue001@aliyun.com。

网络首发时间: 2018-12-14; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20181213.1716.003.html>

bers of the amphiboles are 6.68 ~ 7.20 and 0.09 ~ 0.13 respectively, indicating that they are also of magmatic origin. The authors have reached the conclusion that the formation temperature, pressure and depth of the porphyritic granite are 705 ~ 903 °C, 59 ~ 449 MPa and 2.2 ~ 17.0 km respectively. The features of mineral geochemistry of the biotites and amphiboles suggest that the porphyritic granite belongs to the I-type granite with the addition of mantle-derived materials, and was formed in an environment with high oxygen fugacity. The values of F and Cl in the biotites are 0.17% ~ 0.58%, showing that the fluids exsolved from the granitic magmas were rich in F and Cl, which was beneficial for enrichment and mineralization of Mo and Cu. These results shed light on the correlation between the rock-forming and ore-forming processes for the superlarge Laba Mo(-Cu)-polymetallic deposit. Meanwhile, they also indicate that the Laba orefield has a giant potential for future exploration.

Key words: porphyritic granite; biotite; amphibole; metallogenic implication; Laba Mo(-Cu)-polymetallic deposit; northwestern Yunnan Province

Fund support: National Key Research and Development Project of China (2016YFC06003); National Natural Science Foundation of China (41373049, 40772067)

滇西北拉巴 Mo(-Cu)-多金属矿床是近年来勘查发现的一个超大型燕山晚期斑岩-矽卡岩型矿床,也是西南“三江”成矿带上的重大找矿突破,有望成为我国又一个重要的钼多金属矿产资源基地。近年来实施的大量钻探工程揭露表明,区内发育一个巨大的隐伏斑状花岗岩岩基。前人已对该矿区进行了包括矿床地质、岩石地球化学、同位素年代学等方面的研究(李文昌等, 2012; 余海军等, 2015; Yang *et al.*, 2017),然而关于岩浆形成的物理化学条件及其成矿效应等方面研究不足,更缺乏矿物化学方面的证据,大大限制了对矿床成因的理解和找矿勘查工作的部署。

黑云母和角闪石是花岗质岩石中普遍存在的暗色造岩矿物,其成分特征能够记录并保存有关矿物形成时的岩浆温度、压力、氧逸度、岩浆来源等岩石成因的信息(Abdel-Rahman, 1994; Henry *et al.*, 2005; Uchida *et al.*, 2007; Ridolfi *et al.*, 2010),这些条件也制约着成矿元素在熔体相、矿物相与流体相之间的分配(Stemprok, 1990; Kepper *et al.*, 1991; Linnen *et al.*, 1996)。因而,通过对花岗质岩石中黑云母、角闪石矿物成分的研究,不仅能示踪岩浆成因及形成环境,也能提供岩体出溶流体性质方面的信息,并可以对岩体的成矿性进行评价。本文选择拉巴矿区含矿斑状花岗岩体中黑云母和角闪石为研究对象,对其开展详细的矿物化学研究,以确定该花岗岩形成的物理化学条件及成矿效应。

1 地质背景

拉巴矿区位于云南省香格里拉县城105°方向38 km处,地处青藏高原东南缘“三江”成矿带北段的义敦弧、甘孜-理塘缝合带与扬子地块西缘过渡部位,偏向扬子地块一侧(Burchfiel and Chen, 2012; Yang *et al.*, 2014)(图1a)。已有研究表明,在香格里拉地区发育一条近南北向分布的燕山晚期休瓦促-铜厂沟花岗质岩浆岩带,北部主体位于义敦弧岩浆岩带内,南东部跨至扬子地块,并伴生有大规模的斑岩-矽卡岩型 Mo(-Cu)-多金属矿化(Wang *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2017)。

拉巴矿区出露地层主要有上二叠统黑泥哨组(P₂h)玄武岩夹火山角砾岩和中三叠统北衙组(T₂b)碳酸盐岩偶夹少量碎屑岩,第三系砾岩仅在局部地段零星出露。黑泥哨组与北衙组以断层接触(图1b、1c)。区内断层主要为铜厂断裂(F₁),沿铜厂坪—铜厂—拉巴河展布,总体走向NE,倾向NW,倾角56°~72°。斑状花岗岩体仅有零星露头,且面积很小。钻探资料表明,在矿区南部存在一个隐伏的斑状花岗岩基(图1b)。目前,已有的钻探工程尚未有效地控制该岩体的边界。最近研究表明,该地区斑状花岗岩体形成于晚白垩世(87.4 ~ 84.1 Ma, Wang *et al.*, 2014; 余海军等, 2015)。钻探揭露显示,矿体主要产于岩体顶部、岩体与围岩接触部位以

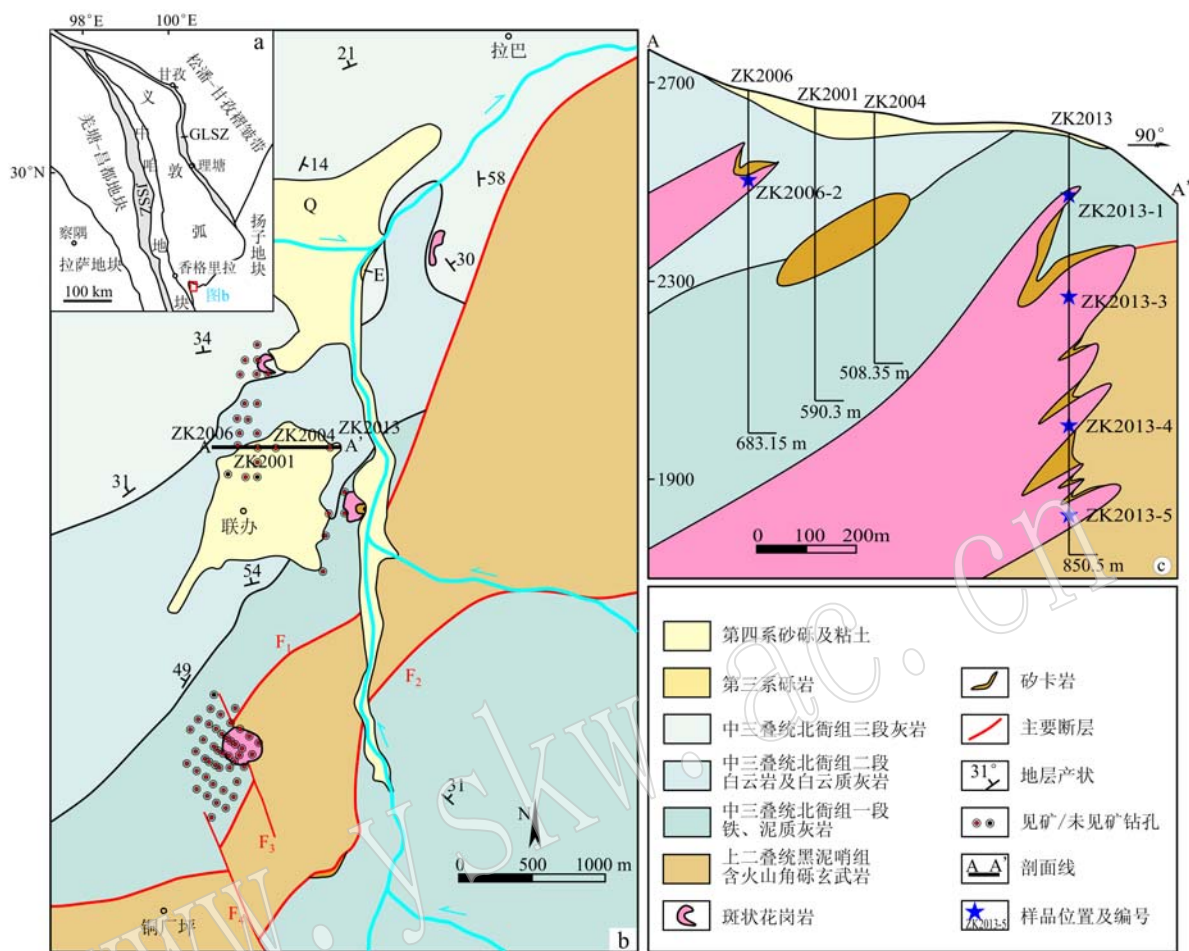


图1 拉巴 Mo(-Cu)矿区构造位置图(a, 据 Reid *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2016)、矿区地质简图 [b, 据余海军等(2015)修测]及勘探线剖面图(c)

Fig. 1 The tectonic location (a, after Reid *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2016), simplified geological map (b, modified after Yu Haijun *et al.*, 2015) and geological section of the Laba Mo(-Cu) deposit (c)

GLSZ—甘孜理塘缝合带; JSSZ—金沙江缝合带

GLSZ—Garze-Litang suture zone; JSSZ—Jinshajiang suture zone

及碳酸盐岩和玄武岩围岩中,多呈浸染状、脉状形式产出。勘探线剖面图(图1c)显示,在岩体与围岩接触部位多发育砂卡岩化,围岩多遭受岩体侵入的影响,普遍发育大理岩化。已有研究认为,拉巴 Mo(-Cu)-多金属矿床是与岩浆热液有关的斑岩-砂卡岩型矿床(余海军等, 2015; Yang *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2017)。

2 样品描述及分析

镜下观察表明,矿区含矿斑状花岗岩呈浅灰-浅红色,中-粗晶粒状结构。斑晶主要有斜长石(15%~25%)、钾长石(5%~10%)、石英(15%)、黑云母(5%)、角闪石(1%~5%),基质主要包括斜长石、

石英、黑云母、角闪石(图2a、2b),副矿物主要有锆石、磷灰石、榍石、磁铁矿和钛铁矿。其中,黑云母多为自形-半自形,呈片状、鳞片状,镜下为褐色-黄褐色,解理较发育,多色性明显,粒径一般为0.2~0.5 mm,常包裹有磷灰石、褐帘石、金红石等副矿物,黑云母斑晶的边部或内部多可见有黄铁矿(图2c)。角闪石则多呈菱形状或柱状,镜下为褐绿色,多色性明显,粒径约0.1~0.3 mm(图2d),常包裹有斜长石。这些矿物包裹体,可作为岩浆成因标志。

研究样品均采自A—A'勘探线剖面(图1c)的5件岩石样品,其中ZK2006-2样品取自该钻孔的191 m处,ZK2013-1、ZK2013-3、ZK2013-4、ZK2013-5样品分别取自对应钻孔的125、330、590和771 m处。在镜下优选未遭受蚀变或流体作用影响的且颗粒较大

的岩浆成因黑云母和角闪石进行测试。矿物成分分析在中国地质大学(北京)电子探针实验室采用日本岛津公司生产的 EPMA-1720 型电子探针仪完成,测试条件为:加速电压 15 kV,束流 10 nA,束斑直径 1 μm ,采用的标样主要有:Si、Al(斜长石)、Ti(金红

石)、Fe(铁铝榴石)、Mn(蔷薇辉石)、Mg(橄榄石)、Ca(方解石)、Na(钠长石)及 K(透长石)等。主要氧化物的分析误差约为 0.01%,F、Cl 的分析误差分别为 0.11% 和 0.02%。

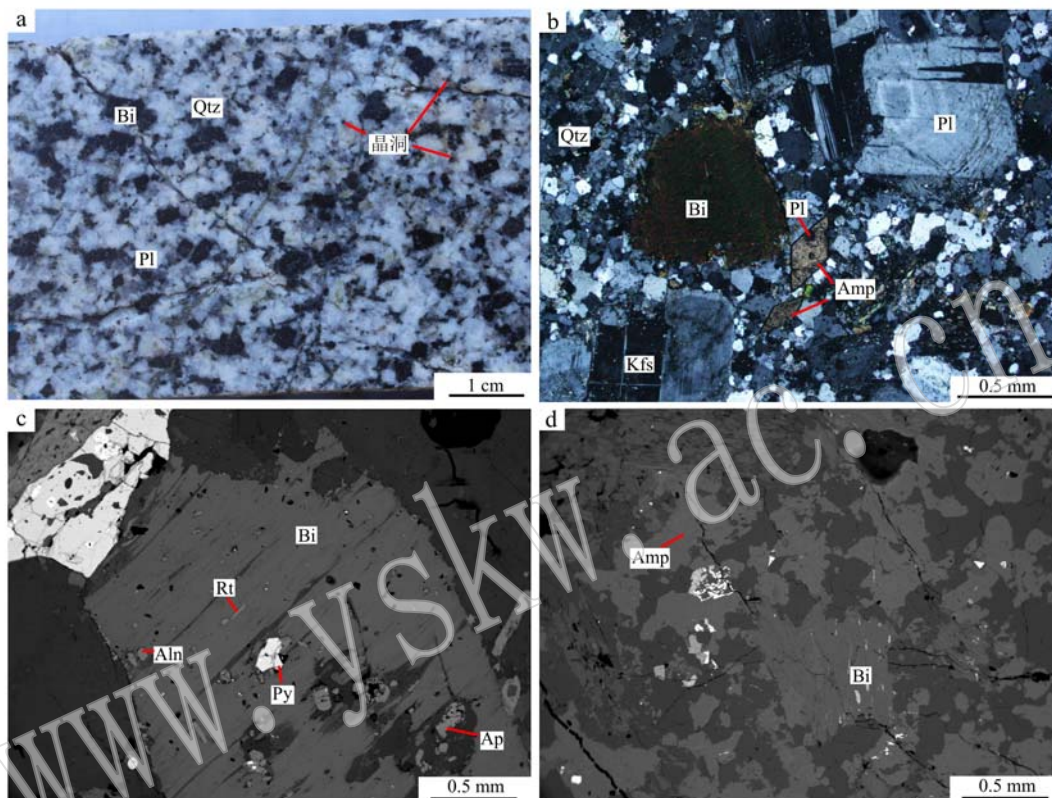


图2 拉巴斑状花岗岩手标本(a)、正交偏光照片(b)及背散射图像(c、d)

Fig. 2 Photographs showing hand specimen (a), microphotograph (b) and BSE images (c, d) of the Laba porphyritic granite
Aln—褐帘石; Amp—角闪石; Ap—磷灰石; Bi—黑云母; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Rt—金红石
Aln—allanite; Amp—amphibole; Ap—apatite; Bi—biotite; Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Py—pyrite; Qtz—quartz; Rt—rutile

3 分析结果

拉巴斑状花岗岩中代表性黑云母和角闪石的电子探针成分分析结果见表1和表2。表中 FeO、Fe₂O₃ 含量采用林文蔚等(1994)的方法进行计算,分别以 22 和 23 个氧原子为基础计算黑云母和角闪石的阳离子系数及相关参数。

3.1 黑云母分析结果

黑云母中氧化物的总含量介于 94.44% ~ 98.60% 之间,均在含水矿物黑云母电子探针数据的允许误差之内。从表1可以看出,黑云母的 MgO 含量介于 12.77% ~ 15.22% 之间, TiO₂ 含量 2.83% ~ 4.68%, K₂O 含量 9.29% ~ 11.24%, FeO^T 变化于

14.57% ~ 17.37% 之间, Al₂O₃ 介于 13.23% ~ 14.98% 之间, CaO 含量最高为 0.03%, Na₂O 含量最高为 0.28%, 总体表现为富 Mg、Ti、K, 低 Ca、Na 的特点。据 Rieder 等(1998)提出的黑云母分类方法,所有样品均为富镁黑云母。

根据 Henry 等(2005)的黑云母的 Ti 温度计计算公式: $t(^{\circ}\text{C}) = \{ [\ln(\text{Ti}) + 2.3594 + 1.7283(X_{\text{Mg}})^3] / (4.6482 \times 10^{-9}) \}^{0.333}$ (式中, Ti 为以 22 个氧原子为基础计算的 Ti 阳离子数, $X_{\text{Mg}} = 0.275 \sim 1.000$, $\text{Ti} = 0.04 \sim 0.60$, $t = 400 \sim 800^{\circ}\text{C}$ 为准确的校正范围)计算得到,花岗岩中黑云母的形成温度为 705 ~ 777 $^{\circ}\text{C}$ (图3、表1)。

Uchida 等(2007)研究表明,黑云母中的全铝含量同花岗岩的固结压力具有正相关性,其关系式为:

表 1 拉斑状花岗岩中黑云母的电子探针分析结果($w_B/\%$)及特征参数
Table 1 Electron microprobe analyses ($w_B/\%$) and characteristic parameters of biotites from the Laba porphyritic granite

样品号 序号	ZK2006-1($n=4$)				ZK2013-1($n=5$)				ZK2013-3($n=5$)				ZK2013-4($n=3$)				ZK2013-5($n=2$)			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
SiO ₂	37.16	37.67	37.44	37.91	37.68	38.83	37.59	37.19	38.78	36.85	36.57	36.36	38.25	37.87	37.59	38.66	38.37	36.78	36.96	
TiO ₂	3.71	3.92	4.03	3.47	3.73	3.80	3.83	4.20	3.68	3.80	3.96	4.13	3.92	4.01	4.20	2.83	4.44	4.68	3.32	
Al ₂ O ₃	14.29	13.81	14.00	14.02	13.92	14.03	13.99	14.04	14.22	14.37	14.52	14.48	14.26	14.73	13.23	14.98	14.96	14.46	13.57	
FeO ^T	16.13	15.47	16.99	17.09	17.37	17.31	17.26	17.30	16.32	16.49	16.93	16.87	15.44	15.94	16.21	15.65	14.57	14.74	14.79	
MnO	0.59	0.60	0.38	0.50	0.28	0.23	0.13	0.19	0.19	0.41	0.39	0.16	0.16	0.13	0.33	0.33	0.33	0.16	0.37	
MgO	13.66	13.83	13.15	12.77	13.85	13.81	13.60	13.77	13.96	13.28	13.22	14.28	13.45	15.22	13.27	15.14	13.36	14.92	13.41	
CaO	-	-	-	-	-	0.02	0.03	0.03	-	0.01	-	0.01	-	0.02	-	-	0.03	-	0.01	
Na ₂ O	0.04	0.24	0.18	0.28	0.17	0.18	0.20	0.17	0.21	0.18	0.22	0.18	0.21	0.22	0.14	0.11	0.15	0.18	0.23	
K ₂ O	10.26	10.27	10.35	9.43	9.87	9.91	10.09	10.07	10.25	9.70	10.68	10.15	10.12	10.20	10.05	10.18	10.29	9.29	11.24	
F	0.31	0.37	0.32	0.30	0.22	0.31	0.51	0.25	0.42	0.16	0.27	0.48	0.33	0.26	0.54	0.30	0.28	0.35	0.42	
Cl	0.07	0.10	0.10	0.14	0.12	0.08	0.07	0.05	0.01	0.01	0.09	0.05	0.03	0.01	0.02	0.00	0.01	0.11	0.12	
Total	96.22	96.28	96.94	95.91	97.22	98.52	97.27	97.26	98.03	95.26	96.85	97.15	96.17	98.60	95.58	98.08	96.79	95.67	94.44	
Fe ₂ O ₃ (cal)	3.11	3.33	3.18	4.18	3.12	3.95	3.44	2.90	3.81	3.21	2.17	2.55	4.19	2.73	4.08	3.07	4.67	4.13	2.15	
FeO(cal)	13.33	12.47	14.13	13.33	14.56	13.75	14.17	14.69	12.89	13.60	14.98	14.57	11.67	13.49	12.54	12.89	10.37	11.03	12.85	
以 22 个氧为基础计算的黑云母阳离子数及参数																				
Si	5.57	5.63	5.60	5.69	5.60	5.68	5.59	5.54	5.68	5.58	5.49	5.42	5.69	5.51	5.67	5.63	5.65	5.48	5.59	
Al ^{IV}	2.43	2.37	2.40	2.31	2.40	2.32	2.41	2.46	2.32	2.42	2.51	2.54	2.31	2.49	2.33	2.37	2.35	2.52	2.41	
Al ^{VI}	0.10	0.06	0.06	0.18	0.04	0.09	0.04	0.00	0.13	0.14	0.06	0.00	0.19	0.04	0.02	0.21	0.24	0.02	0.01	
Ti	0.42	0.44	0.45	0.39	0.42	0.42	0.43	0.47	0.41	0.43	0.45	0.46	0.44	0.44	0.48	0.31	0.49	0.52	0.38	
Fe ³⁺	0.35	0.37	0.36	0.47	0.35	0.43	0.38	0.32	0.42	0.37	0.25	0.29	0.47	0.30	0.46	0.34	0.52	0.46	0.18	
Fe ²⁺	1.67	1.56	1.77	1.67	1.81	1.68	1.76	1.83	1.58	1.72	1.88	1.82	1.45	1.64	1.58	1.57	1.28	1.37	1.95	
Mn	0.07	0.08	0.05	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.02	0.05	
Mg	3.05	3.08	2.93	2.86	3.07	3.01	3.01	3.06	3.05	3.00	2.96	3.17	2.98	3.30	2.98	3.29	2.93	3.31	3.02	
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Na	0.01	0.07	0.05	0.08	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.04	0.03	0.04	0.05	0.07	
K	1.96	1.96	1.97	1.81	1.87	1.85	1.91	1.91	1.91	1.87	2.05	1.93	1.92	1.89	1.93	1.89	1.93	1.77	2.17	
Al ^{VI} + Fe ³⁺ + Ti	0.44	0.44	0.44	0.52	0.41	0.47	0.43	0.40	0.48	0.47	0.38	0.37	0.55	0.39	0.48	0.43	0.63	0.50	0.28	
Fe ²⁺ / (Fe ²⁺ + Mg)	1.75	1.64	1.81	1.74	1.85	1.71	1.78	1.85	1.60	1.77	1.93	1.84	1.47	1.66	1.62	1.60	1.32	1.39	2.00	
Fe ²⁺ / (Fe ²⁺ + Fe ³⁺)	0.35	0.34	0.38	0.37	0.37	0.36	0.37	0.37	0.34	0.36	0.39	0.36	0.33	0.33	0.35	0.32	0.30	0.29	0.39	
Mg [#]	0.64	0.65	0.62	0.62	0.62	0.64	0.63	0.62	0.66	0.63	0.61	0.63	0.67	0.67	0.65	0.67	0.69	0.70	0.60	
X _{Mg}	0.60	0.61	0.58	0.57	0.59	0.59	0.58	0.59	0.60	0.59	0.58	0.60	0.61	0.63	0.59	0.63	0.62	0.64	0.59	
F/FM	0.55	0.53	0.57	0.58	0.56	0.56	0.56	0.56	0.54	0.56	0.56	0.55	0.54	0.52	0.56	0.51	0.53	0.50	0.56	
t/°C	738	748	743	722	734	734	737	749	734	739	742	751	746	751	752	705	763	777	730	
p/MPa	113	84	94	99	86	79	90	94	90	124	126	118	104	113	59	126	133	117	80	
H/km	4.3	3.2	3.6	3.7	3.3	3.0	3.4	3.5	3.4	4.7	4.7	4.5	3.9	4.3	2.2	4.8	5.0	4.4	3.4	

注: FeO^T 为全铁质量分数, Fe₂O₃(cal)、FeO(cal) 为计算值, Mg[#] = Mg/(Mg + Mn + Fe²⁺), X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe), F/FM = (Fe₂O₃ + FeO)/(Fe₂O₃ + FeO + MgO), - 表示低于检测限。

$p(100 \text{ MPa}) = 3.03 \text{ }^T\text{Al} - 6.53(\pm 0.33)$, 式中, ^TAl 是以 22 个氧原子为基础计算的黑云母中 Al 阳离子的总数。已有研究指出, 花岗岩中若存在角闪石 + 黑云母的矿物组合且角闪石含量少, 则结晶程度较差; 而黑云母结晶完好时, 选择黑云母作为全铝压力计的计算结果才比较可靠(康志强等, 1994)。拉巴花岗岩黑云母结晶较好, 均为较好的自形晶, 并且含少量的角闪石, 符合运用黑云母全铝压力计的前提条件, 本文据此估算出拉巴斑状花岗岩黑云母的形成压力为 59 ~ 133 MPa, 形成深度约为 2.2 ~ 5.0 km(表 1)。

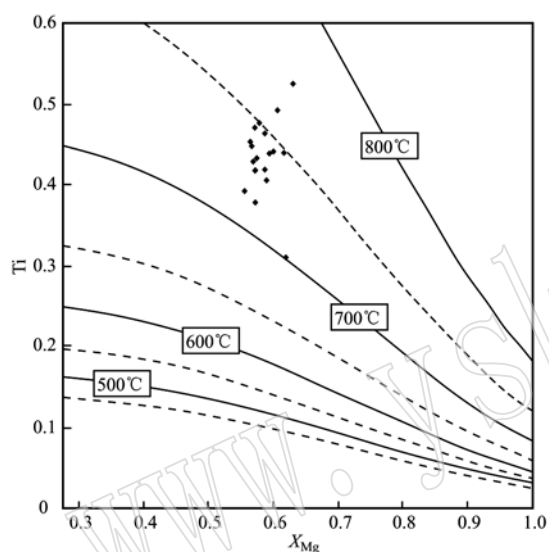


图 3 拉巴斑状花岗岩中黑云母结晶温度的 Ti - X_{Mg} 图解
(底图据 Henry 等, 2005)

Fig. 3 Temperature isotherms calculated from the surface-fit equation on the Ti versus X_{Mg} diagram (original diagram after Henry *et al.*, 2005)

3.2 角闪石分析结果

从表 2 可以看出, 所测试角闪石 MgO 含量介于 10.55% ~ 15.63% 之间, TiO_2 含量 0.83% ~ 1.19%, K_2O 含量 0.46% ~ 1.18%, FeO^T 则变化于 13.53% ~ 19.20% 之间, Al_2O_3 则介于 5.26% ~ 8.97% 之间, CaO 含量为 11.67% ~ 12.33%, Na_2O 含量为 1.03% ~ 1.79%, 表现为富 Mg、Ca、K, 低 Ti、Na 的特点。根据 1997 年国际矿物学会(IMA)及矿物命名委员会的角闪石分类方案(Leake *et al.*, 1997), $\text{Ca}_B + \text{Na}_B \geq 1.34$, $\text{Na}_B < 0.67$, 该区角闪石均属于钙质角闪石亚类。

Ridolfi 等(2010)提出的角闪石温度计计算公式

为: $t(^{\circ}\text{C}) = -151.487 \text{ Si}^* + 2041$, 式中, $\text{Si}^* = \text{Si} + [^4\text{Al}/15 - 2[^4\text{Ti} - [^6\text{Al}/2 - [^6\text{Ti}/1.8 + \text{Fe}^{3+}/9 + \text{Fe}^{2+}/3.3 + \text{Mg}/26 + ^B\text{Ca}/5 + ^B\text{Na}/1.3 - ^A\text{Na}/15 + ^A[\text{空位}]/2.3]$, 空位和 K 仅出现在 A 位。采用该公式计算得到花岗岩中角闪石的形成温度为 836 ~ 903 $^{\circ}\text{C}$ (表 2)。

Schmidt (1992) 提出的角闪石压力计计算公式为: $p(100 \text{ MPa}) = 4.76 \text{ }^T\text{Al} - 3.01$, 式中, ^TAl 指以 23 个氧原子为基础计算的角闪石中 Al 阳离子的总数。据此计算得到花岗岩中角闪石的形成压力介于 121 ~ 449 MPa 之间, 对应深度约为 4.6 ~ 17.0 km(表 2)。

4 讨论

4.1 成岩物理化学条件

利用黑云母和角闪石的化学成分来指示寄主花岗岩岩石成因信息的前提, 是确保所测试的矿物为岩浆结晶矿物, 未遭受蚀变或流体作用的影响。由表 1 可见, 本次测试黑云母中 CaO 的含量极低, 表现为贫钙或无钙的特点, 表明其不受绿泥石化或碳酸盐化影响(Kumar and Pathak, 2010)。黑云母的 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ 值介于 0.29 ~ 0.39 之间, 较为均一, 显示测试黑云母未遭受后期流体作用改造(Stone, 2000)。马昌前等(1994)统计了国内外文献中 120 个黑云母成分后发现, 岩浆成因黑云母中 Ti (以 22 个氧原子为基础计算的 Ti 阳离子数) 介于 0.2 ~ 0.55 之间。从拉巴地区花岗岩中黑云母的 Ti 含量看, 该花岗岩中的黑云母应属岩浆成因。因此, 可以认为本次测试黑云母均为原生岩浆黑云母, 上述温度、压力等计算结果可以代表黑云母结晶温度、压力。据角闪石成因图解(图 4), 本次所测试的角闪石样品全部落在结晶角闪石区域, 而且背散射图像也未见明显的成分变化(图 2d), 可排除蚀变交代作用的影响, 因此本次测试角闪石属于岩浆结晶角闪石, 计算结果也可反映角闪石结晶温度、压力。黑云母和角闪石是花岗岩中常见的造岩矿物, 其化学成分对寄主岩浆冷却结晶的物理化学条件变化(如温度、压力、氧逸度等)十分敏感(Wones and Eugster, 1965; Ridolfi *et al.*, 2010), 因而可以用其化学成分来指示岩浆的结晶条件。

上述计算结果显示, 角闪石结晶温度明显高于黑云母。已有研究指出, 富 F 环境可明显降低岩浆

表2 拉巴斑状花岗岩中角闪石的电子探针分析结果($w_B/\%$)及特征参数
Table 2 Electron microprobe analyses ($w_B/\%$) and characteristic parameters of amphiboles from the Laba porphyritic granite

样品号	ZK2013-4($n=5$)					ZK2013-5($n=5$)				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	50.36	45.22	45.71	44.78	45.29	47.85	48.35	46.85	48.39	47.35
TiO ₂	0.84	1.06	1.12	1.05	1.11	0.99	0.89	1.19	0.83	0.85
Al ₂ O ₃	5.26	8.77	8.92	8.97	8.54	7.48	7.16	8.48	8.24	8.16
FeO ^T	13.53	17.76	18.42	19.20	17.74	14.95	14.53	14.95	14.23	14.79
MnO	0.37	0.55	0.65	0.66	0.57	0.77	0.37	0.73	0.39	0.67
MgO	15.63	11.30	11.24	10.55	11.22	13.01	15.63	13.01	13.63	12.21
CaO	12.33	11.89	11.67	11.69	11.89	12.07	12.33	12.07	11.73	12.09
Na ₂ O	1.13	1.79	1.52	1.72	1.63	1.13	1.12	1.03	1.12	1.32
K ₂ O	0.46	1.03	1.02	1.18	0.93	0.62	0.76	0.72	0.68	0.87
以23个氧为基础计算的黑云母阳离子数及参数										
Si _T	7.20	6.72	6.73	6.68	6.75	6.99	6.90	6.85	6.99	6.97
Al _T	0.80	1.28	1.27	1.32	1.25	1.01	1.10	1.15	1.01	1.03
Al _C	0.09	0.25	0.28	0.25	0.25	0.28	0.10	0.31	0.39	0.38
Fe _C ³⁺	0.54	0.25	0.32	0.22	0.30	0.53	0.37	0.49	0.56	0.50
Ti _C	0.09	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.10	0.13	0.09	0.09
Mg _C	3.33	2.50	2.47	2.34	2.49	2.83	3.32	2.83	2.93	2.68
Fe ²⁺ C	0.95	1.88	1.82	2.07	1.83	1.25	1.11	1.23	1.02	1.32
Mn _C	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Fe ²⁺ B	0.13	0.08	0.14	0.11	0.08	0.05	0.25	0.10	0.14	0.00
Mn _B	0.04	0.07	0.08	0.08	0.07	0.10	0.04	0.09	0.05	0.06
Ca _B	1.82	1.85	1.78	1.81	1.85	1.85	1.70	1.81	1.82	1.91
Na _B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
Ca _A	0.07	0.04	0.06	0.06	0.05	0.04	0.18	0.08	0.00	0.00
Na _A	0.31	0.52	0.43	0.50	0.47	0.32	0.31	0.29	0.31	0.34
K _A	0.08	0.20	0.19	0.22	0.18	0.12	0.14	0.13	0.13	0.16
Si/(Si + Ti + Al)	0.88	0.80	0.80	0.80	0.81	0.83	0.84	0.81	0.82	0.82
$t/^\circ\text{C}$	836	890	892	886	889	878	864	903	889	879
p/MPa	121	430	436	449	413	312	272	394	367	372
H/km	4.6	16.2	16.5	17.0	15.6	11.8	10.3	14.9	13.9	14.1
ΔNNO	2.0	0.6	0.6	0.4	0.6	1.2	2.0	1.2	1.3	0.9

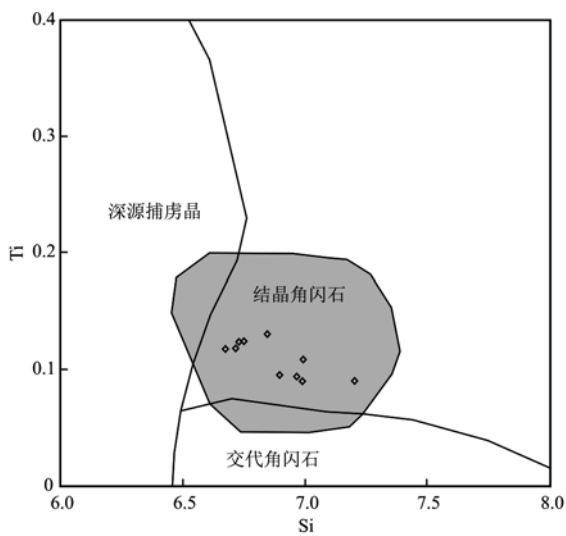


图4 拉巴斑状花岗岩中角闪石 Ti-Si 成因图解 (底图据马昌前等, 1994)

Fig. 4 Ti-Si diagram of amphiboles from the Laba porphyritic granite (original diagram after Ma Changqian *et al.*, 1994)

的固相线温度 (Manning *et al.*, 1984; 张德会等, 2004), 而黑云母中普遍存在 F, 可引起其结晶温度降低。另据 Bowen 反应序列, 随着岩浆的冷却, 角闪石会先于黑云母结晶, 也会造成角闪石结晶温度高于黑云母的情况。矿物结晶的过程一直贯穿于岩浆结晶过程中, 黑云母的结晶温度可代表花岗岩固结温度的上限, 因此认为本区斑状花岗岩的成岩温度约为 705 ~ 903 $^\circ\text{C}$ 。

Wones 和 Eugster (1965) 利用与磁铁矿和钾长石共生的黑云母 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Mg 的原子分数估算了黑云母结晶时的氧逸度。对于拉巴斑状花岗岩中的黑云母, 均存在与斜长石-钾长石-磁铁矿共生的现象, 符合此方法计算氧逸度的前提条件。在黑云母的 $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+} - \text{Mg}$ 图解 (图 5) 中, 该岩体中黑云母数据投点均落在缓冲线 $\text{NNO}(\text{Ni} - \text{NiO}$ 缓冲线) 与 HM (赤铁矿-磁铁矿缓冲线) 之间, 表明其结晶于较高的氧逸度环境里。另外, 拉巴花岗岩中 Ti 的含量

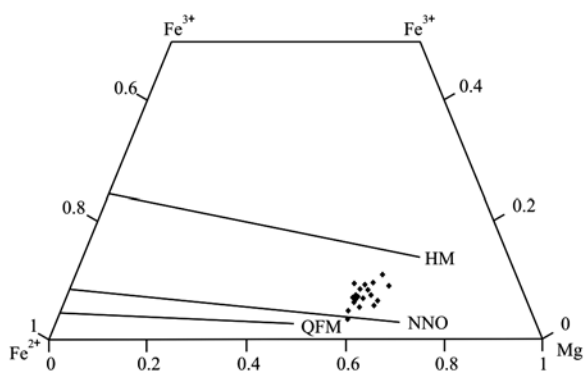


图 5 拉巴斑状花岗岩中黑云母 $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg$ 图解 (底图据 Wones and Eugster, 1965)

Fig. 5 $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg$ diagram of biotites from the Laba porphyritic granite (original diagram after Wones and Eugster, 1965)

较高,而结构式中 Al^V 值较低,这种高 Ti 低 Al^V 特征也可以说明拉巴花岗岩形成于氧逸度较高的环境下 (Albuquerque, 1973)。根据 Wones 和 Eugster (1965) 在 $p_{H_2O} = 2070 \times 10^5$ Pa 的条件下,将花岗岩中黑云母投影到黑云母的 $\log f_{O_2}-t$ 图解 (图 6a) 中,可以估算出拉巴地区花岗岩形成的氧逸度为 $-11.8 \sim -10.6$ 。Ridolfi 等 (2010) 研究指出,利用角闪石化学成分可以估算岩浆的 ΔNNO 值 ($\Delta NNO = 1.644 Mg^* - 4.01, Mg^* = Mg + Si/47 - [^{6}Al/9 - 1.3 [^{4}Ti + Fe^{3+} + 3.7 + Fe^{2+}/5.2 - ^B Ca/20 - ^A Na/2.8 + ^A [空位]/9.5]$)。将花岗岩中角闪石的温度以及 ΔNNO 值投影到角闪石的 $\log f_{O_2}-t$ 图解 (图 6b) 中,可以估算花岗岩形成的氧逸度为 $-11.7 \sim -10.5$ 。利用角闪石方法估算的氧逸度略高于黑云母方法,反映在岩浆结

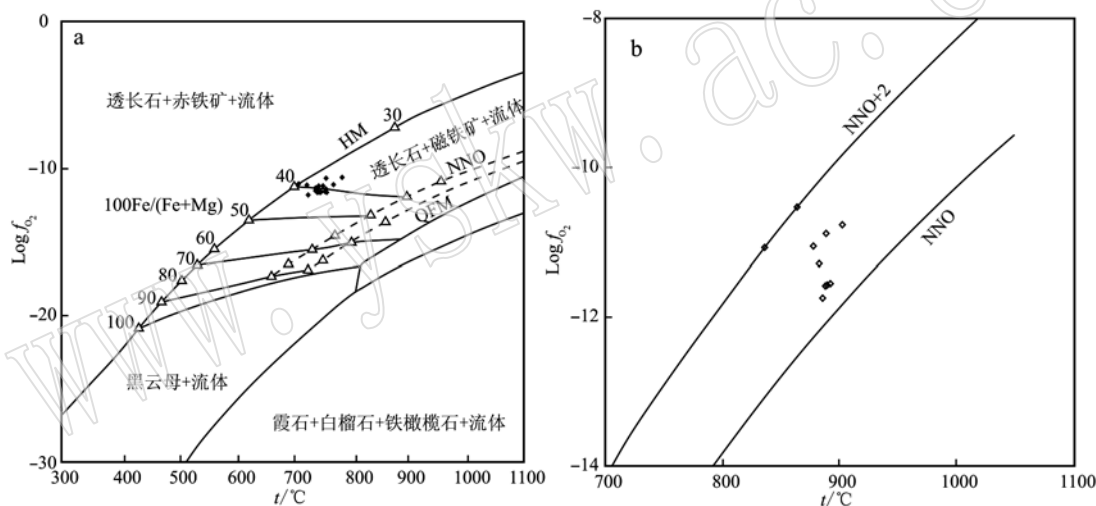


图 6 拉巴斑状花岗岩中黑云母在总压力为 2070×10^5 Pa 条件下的 $\log f_{O_2}-t$ 图解 (a, 底图据 Wones 和 Eugster, 1965) 和角闪石 $\log f_{O_2}-t$ 图解 (b, 底图据 O'Neil 和 Pownceby, 1993)

Fig. 6 The $\log f_{O_2}$ versus t diagram for the biotites at $p_{total} = 2070 \times 10^5$ Pa (a, original diagram after Wones and Eugster, 1965) and the $\log f_{O_2}$ versus t diagram for the amphiboles (b, original diagram after O'Neil and Pownceby, 1993) of the Laba porphyritic granite

晶过程中,其氧逸度均较高,且从早到晚略为降低。

近年来,利用花岗岩体中角闪石和黑云母的地质压力计探讨其成岩成矿深度的方法已有广泛应用 (李鸿莉等, 2007; Ridolfi *et al.*, 2010; 汪欢等, 2011)。黑云母计算结果显示其结晶压力为 $59 \sim 133$ MPa, 估算的深度为 $2.2 \sim 5.0$ km; 而角闪石计算结果为 $121 \sim 449$ MPa 和 $4.6 \sim 17.0$ km。角闪石的结晶压力与深度明显大于黑云母,而黑云母结晶晚于角闪石,代表了岩浆结晶的上限。结合二者的数据

分析表明,拉巴地区花岗岩岩浆房的深度至少在 17.0 km, 而由岩浆房上升侵位的岩枝最浅深度约在 2.2 km。

4.2 岩石成因探讨

已有研究 (Abdel-Rahman, 1994) 指出, I 型花岗岩的黑云母相对富镁, S 和 A 型花岗岩分别富铝和富铁。拉巴花岗岩的黑云母均为富镁黑云母, 指示其为 I 型花岗岩。Whalen 和 Chappel (1988) 认为, I 型花岗岩中的黑云母具有较低的 Al^V 值 (< 0.224),

S型花岗岩中的黑云母 Al^VI 值较高(0.353~0.561)。此外,徐克勤等(1986)指出黑云母的 $Mg^{\#}$ 值及氧化系数 $[Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})]$ 也可用于划分 I 型、S 型花岗岩。I 型花岗岩中黑云母具较高 $Mg^{\#}$ 值(0.384~0.626)和氧化系数(0.121~0.252),结合拉巴花岗岩黑云母的低 Al^VI 值(0~0.24)、高 $Mg^{\#}$ 值(0.61~0.70)、高氧化系数(0.12~0.29)的特点,认为其为 I 型花岗岩。这与目前对该地区花岗岩的认识也相吻合(Wang *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2016)。

花岗质岩浆的来源主要可分为壳源、壳幔混染、幔源 3 种。前已述及,本区角闪石均为钙质角闪石,马润则等(1997)认为钙质角闪石的成分与岩浆来源

密切相关,幔源区角闪石的 $Si/(Si+Ti+Al)$ 值不高于 0.765。姜常义等(1984)认为幔源角闪石中的 Al_2O_3 含量一般不低于 10%。本次测得角闪石的 $Si/(Si+Ti+Al)$ 值(0.80~0.88)和 Al_2O_3 含量(5.26%~8.97%)排除了其幔源的可能性。Yang 等(2017)据该地区花岗岩全岩的 Sr-Nd-Pb 和锆石 Hf 同位素特征提出,该花岗岩起源于下地壳的部分熔融,但对其是否具有幔源物质参与未作说明。在黑云母 $FeO^T/(FeO^T+MgO)-MgO$ 图解和角闪石 $TiO_2-Al_2O_3$ 图解(图 7)中可以看出,本次获取的拉巴花岗岩体中黑云母和角闪石均落于壳幔混染区,因此认为该套花岗岩的源区应有地幔物质的参与。

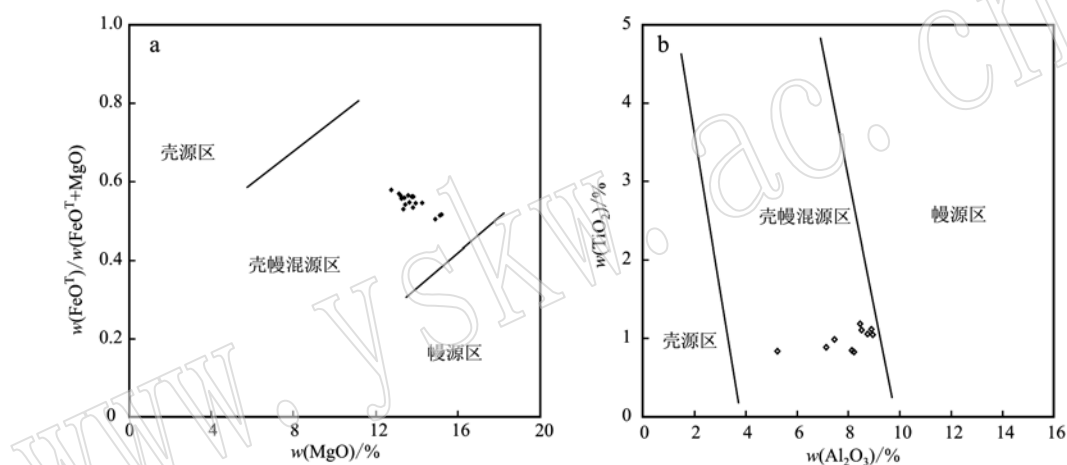


图 7 拉巴斑状花岗岩中黑云母的 $FeO^T/(FeO^T+MgO)-MgO$ (a, 底图据周作侠, 1986)和角闪石的 $TiO_2-Al_2O_3$ 图解 (b, 底图据姜常义等, 1984)

Fig. 7 $FeO^T/(FeO^T+MgO)$ diagram of biotite (a, after Zhou Zuoxia, 1986) and $TiO_2-Al_2O_3$ diagram of amphibole (b, after Jiang Changyi *et al.*, 1984) for the Laba porphyritic granite

4.3 对成矿的指示

花岗质岩浆的氧化还原条件与和岩浆热液有关的斑岩-矽卡岩型矿床成矿元素的富集有紧密的关系,如氧化性岩浆多与 Cu、Au、Mo 伴生(Hou *et al.*, 2013),而还原性岩浆多与 W、Sn 伴生(Sato, 2012)。前已述及,拉巴地区花岗质岩浆在上升侵位、冷却结晶时,均保持了较高的氧逸度,该情形下岩浆中的硫以 SO_2 的形式存在,而不会以还原性的 S^{2-} 或强氧化性的 SO_4^{2-} 的形式与 Mo 结合,这样 Mo 就可以随着熔体运移,并最终进入流体相卸载而沉淀成矿。由上面的讨论可知,拉巴地区花岗岩岩浆房的深度至少在 17.0 km,由岩浆房上升侵位的岩枝最浅深度约为 2.2 km,岩浆房深度范围大,为提供丰富的成矿元

素提供了可能的条件,高温的岩浆活动也能为最终的成矿流体提供热源。正由于以上的因素,才导致拉巴矿床的形成。

黑云母的 Al^VI 在区别含矿与不含矿花岗岩方面也有很好的指示作用。基于黑云母地质压力计,刘学龙等(2013)估算了 Cu-Fe 和 Mo 矿床的形成压力为 100~200 MPa,而无矿化的花岗质岩体的固结压力在 300 MPa 以上。相对于典型的斑岩型钼多金属矿床,成岩成矿的就位深度一般为 2~6 km,这与 Uchida 等(2007)建立的黑云母 Al^VI 压力计具有良好的适应性。因此,从计算的花岗岩体侵位深度结果来看,拉巴斑状花岗岩体极有可能是拉巴钼多金属矿床的成矿岩体,而非赋矿围岩。

黑云母中的 F、Cl 可以用来确定与花岗岩共存流体中的 HF、HCl 逸度 (Munoz, 1992)。中酸性岩浆上升侵位时,随着结晶分离作用和温度、压力的改变,可使岩浆中含水的挥发分过饱和,进而出溶形成独立的流体(刘伟, 2001)。拉巴花岗岩中发育石英晶洞构造(图 2a),晶洞中充填的颗粒结晶较好,明显不同于石英斑晶,提供了流体出溶的证据。笔者对拉巴花岗岩的全岩分析及 Sr 同位素数据(另文发表)表明,该地区的岩浆是在封闭系统中冷却结晶的,另外中温蚀变脉体中石英流体包裹体激光拉曼分析(另文)证实也有 F、Cl 成分的存在,因此认为,这种与花岗岩共存的流体与最终出溶的流体性质相同。

岩浆成因黑云母成分既能反映岩浆挥发分的性质(张德会等, 2001),也能反映岩浆出溶流体的性质(Webster and Holloway, 1990; Munoz, 1992),为深入理解岩浆-热液过程提供了契机。本次测定的黑云母成分中普遍存在 F、Cl 且含量普遍较高。从表 1 中可以看出,黑云母中 F、Cl 含量及变化范围大致相同,所对应的流体成分基本一致,指示为同一岩浆出溶的流体。赵博等(2015)认为, F 必须有大量进入与花岗质熔体共存的含水流体相才具有一定的成矿意义。即使岩浆允许萤石等含 F 矿物完全结晶,活动态的 F 仍会有剩余,高度富 F 的参与熔体相极有可能导致富 F 成矿流体的最终出溶。HF 具有强的腐蚀性,因而十分有利于水岩反应的发生。而 Cl 的成矿效应比 F 更加显著(Railsback, 2003)。Cl 大量进入与花岗质熔体共存的含水流体相的现象是非常普遍的(鲍波等, 2014),这是因为 Cl 在熔体-流体系统中,它偏向分配进入流体而不是熔体相中(Webster *et al.*, 2009)。熔体中残留的 Cl 可促使流体从含水量很少的熔体中直接出溶,致使流体出溶的时间提早,出溶的深度增加,具有更长的时间来萃取熔体中的金属,也就有效避免成矿元素分布在早期结晶的矿物相中(张德会等, 2001);而 F 的增加可促使 Cl 进入到熔体相中(Dingwell, 1988)。Kepper 和 Wyllie (1991)通过模拟认为, Cl 可使 Cu 的分配系数升高,最终出溶的流体将会含大量的 Cu,使得 Cu 基本从熔体相中萃取出来, Mo 在低酸强碱、且富 F 的体系中易分配进入热液中,这与拉巴地区花岗岩特征相吻合。

黑云母和角闪石所有样品均取自钻孔,因此其抬升的高度计算应该是通过估算的深度再减去钻孔

取样的深度,可得出该花岗岩抬升至少 2.1 km。拉巴斑状花岗岩呈隐伏岩体产出,从深部钻孔揭露情况来看,岩体产出良好,且浅部蚀变类型多以绿泥石、绿帘石化为主,表现为典型斑岩型矿床的青磐岩化带,暗示着深部应有良好的矿化。

5 结论

(1) 拉巴斑状花岗岩中黑云母和角闪石均属原生岩浆成因,指示寄主岩体成岩温度约为 705 ~ 903°C,成岩压力及深度分别为 59 ~ 449 MPa、2.2 ~ 17.0 km。

(2) 拉巴斑状花岗岩为 I 型花岗岩,具壳幔混源的特点;其具有恒定的较高氧逸度、较大的岩浆上升侵位范围以及富含 F、Cl 的出溶流体,均有利于 Mo、Cu 等矿化元素的富集与成矿,成矿潜力大。

致谢 野外工作得到了香格里拉县宝峰矿业公司及云南省地质调查局地质矿产勘查院相关技术人员的大力支持,黑云母和角闪石电子探针测试工作得到了中国地质大学(北京)电子探针实验室郝金华博士的指导;同时承蒙审稿人的认真审阅,并提出宝贵的修改意见,在此一并深表感谢!

References

- Abdel-Rahman A M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous magmas[J]. *Journal of Petrology*, 35: 525 ~ 541.
- Albuquerque A C. 1973. Geochemistry of biotites from granitic rocks, northern Portugal[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37: 1779 ~ 1802.
- Bao Bo, Zhao Bo, Zhang Dehui, *et al.* 2014. The behavior of chlorine in the evolution of magmatic-hydrothermal system[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(4): 540 ~ 547 (in Chinese).
- Burchfiel B C and Chen Z L. 2012. Tectonics of the Southeastern Tibetan Plateau and Its Adjacent Foreland[M]. *Geological Society of America Memoir* 210, 9 ~ 62.
- Dingwell D B. 1988. The structures and properties of fluorine-rich magmas: A review of experimental studies[A]. Taylor R P and Strong D F. *Recent Advances in the Geology of Granite-Related Mineral Deposits*[C]. Quebec: Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 1

- ~12.
- Henry D J, Guidotti C V and Thomson J A. 2005. The Ti- saturation surface for low- to medium-pressure metapelite biotites: Implications for geothermometry and Ti- substitution mechanisms[J]. *American Mineralogist*, 90(2~3): 316~328.
- Hou Z Q, Zheng Y C, Yang Z M, *et al.* 2013. Contribution of mantle components within juvenile lower-crust to collisional zone porphyry Cu systems in Tibet[J]. *Mineralium Deposita*, 48: 173~192.
- Jiang C Y and An S Y. 1984. On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 3: 1~9.
- Kang Zhiqiang, Feng Zuohai and Wang Rui. 1994. Reliability comparison of Al-in-hornblende and biotite barometer: A case study of Guposhan-Huashan granite in north Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 30(4): 474~479(in Chinese).
- Kepper H and Wyllie P J. 1991. Partitioning of Cu, Sn, Mo, W, U and Th between melt and aqueous fluid in the system haplogranite H₂O-HCl and haplogranite H₂O-HF[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 109: 139~150.
- Kumar S and Pathak M. 2010. Mineralogy and geochemistry of biotites from Proterozoic granitoids of western Arunachal Himalaya: Evidence of bimodal granitogeny and tectonic affinity[J]. *Journal of Geological Society of India*, 75(5): 715~730.
- 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]. *American Mineralogist*, 82: 1 019~1 037.
- Li Hongli, Bi Xianwu, Tu Guangchi, *et al.* 2007. Mineral chemistry of biotite from Yanbei pluton: Implication for Sn-metallogeny[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 27(3): 49~54(in Chinese).
- Li W C, Yu H J, Gao X, *et al.* 2017. Review of Mesozoic multiple magmatism and porphyry Cu-Mo(W) mineralization in the Yidun Arc, eastern Tibet Plateau[J]. *Ore Geology Reviews*, 90: 795~812.
- Li Wenchang, Yu Haijun, Yin Guanghou, *et al.* 2012. Re-Os dating of molybdenite from Tongchanggou Mo-polymetallic deposit in northwest Yunnan and its metallogenic environment[J]. *Mineral Deposits*, 31(2): 282~292(in Chinese).
- Lin Wenwei and Peng Lijun. 1994. The estimation of Fe³⁺ and Fe²⁺ contents in amphibole and biotite from MEMP data[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(2): 155~162(in Chinese).
- Linnen R L, Pichavant M and Holtz F. 1996. The combined effects of f_{O_2} and melt composition on SnO₂ solubility and tin diffusivity in haplogranitic melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(24): 4 965~4 976.
- Liu Xuelong, Li Wenchang and Yin Guanghou. 2013. The indosinian crust uplift-denudation in Geza arc of Yunnan Province and its geological significance: Evidence from biotite geobarometer[J]. *Geoscience*, 27(3): 537~546, 628(in Chinese).
- Liu Wei. 2001. The role of magmatic fluid in the ore-formation of hydrothermal deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 203~215(in Chinese).
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Tang Zhonghua, *et al.* 1994. Granite and Magmatic Kinetics-Theoretical Method and Case Study on the Edong Granite[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 210~212(in Chinese).
- Ma Runze, Xiao Yuanfu, Wei Xiangui, *et al.* 1997. Research on the geochemical property and genesis of basic and ultrabasic rocks of Jinning Preiod in the Mocangshan area, Sichuan Province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 51: 38~50(in Chinese).
- Manning D A C and Henderson P. 1984. The behavior of tungsten in granite melt vapour systems[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 86: 286~293.
- Munoz J Z. 1992. Calculation of HF and HCl fugacities from biotite compositions: Revised equations[J]. *Geological Society of America Abstract Programs*, 24: A221.
- O'Neill H St C and Pownceby M L. 1993. Thermodynamic data from redox reactions at high temperatures. I. An experimental and theoretical assessment of the electrochemical method using stabilized zirconia electrolytes, with revised values for the Fe- "FeO", Co-CoO, Ni-NiO, and Cu-Cu₂O oxygen buffers, and new data for the W-WO₂ buffer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 114: 296~314.
- Railsback L B. 2003. An earth scientist's periodic table of the elements and their ions[J]. *Geology*, 31(9): 737~740.
- Reid A J, Wilson C J L, Shun L, *et al.* 2007. Mesozoic plutons of the Yidun Arc, SW China: U/Pb geochronology and Hf isotopic signature[J]. *Ore Geology Reviews*, 31: 88~106.
- 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: 45~66.
- Rieder M, Cavazzini G, D'yakonov, *et al.* 1998. Nomenclature of the micas[J]. *The Canadian Mineralogist*, 36(3): 905~912.
- Sato K. 2012. Sedimentary crust and metallogeny of granitoid affinity: Im-

- plication from the geotectonic histories of Circum-Japan sea region, central Andes and Southeastern Australia[J]. *Resource Geology*, 62(4): 329 ~ 351.
- Schmidt M W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 304 ~ 310.
- Stemprok M. 1990. Solubility of tin, tungsten and molybdenum oxides in felsic magmas[J]. *Mineralium Deposita*, 25(3): 205 ~ 212.
- Stone D. 2000. Temperature and pressure variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, Berens River area, northwest Superior Province, Ontario, Canada[J]. *The Canadian Mineralogist*, 38(2): 455 ~ 470.
- Uchida E, Endo S and Makino M. 2007. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits [J]. *Resource Geology*, 57(1): 47 ~ 56.
- Wang Huan, Wang Jianping, Liu Jiajun, *et al.* 2011. Mineralogy of the Xiba granitoid pluton in the southern Qinling orogenic belt and its implications for petrogenesis[J]. *Geoscience*, 25(3): 489 ~ 502 (in Chinese).
- Wang X S, Hu R Z, Bi X W, *et al.* 2014. Petrogenesis of Late Cretaceous I-type granites in the southern Yidun terrane: New constraints on the Late Mesozoic tectonic evolution of the eastern Tibetan Plateau [J]. *Lithos*, 208 ~ 209: 202 ~ 219.
- Webster J D and Holloway J R. 1990. Partitioning of F and Cl between magmatic hydrothermal fluids and highly evolved granitic magmas [J]. *The Geological Society of America Special Papers*, 246: 21 ~ 34.
- Webster J D, Sintoni M F and De Vivo B. 2009. The partitioning behavior of Cl, S, and H₂O in aqueous vapor-± saline-liquid saturated phonolitic and trachytic melts at 200 MPa[J]. *Chemical Geology*, 263(1 ~ 4): 19 ~ 36.
- Whalen J B and Chappell B W. 1988. Opaedue mineralogy and mafic mineral chemistry of I- type and S- type granites of Lachlan fold belt, southeast Australia[J]. *American Mineralogist*, 73(3): 281 ~ 296.
- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite: Experiment, theory and application[J]. *American Mineralogist*, 50: 1 228 ~ 1 272.
- Xu Keqin and Tu Guangchi. 1986. Relationship between Granitic Rocks and Mineralization[M]. Nanjing: Science and Technology of Jiangsu Press, 657(in Chinese).
- Yang L Q, Deng J, Dilek Y, *et al.* 2016. Melt source and evolution of I-type granitoids in the SE Tibetan Plateau: Late Cretaceous magmatism and mineralization driven by collision-induced transtensional tectonics[J]. *Lithos*, 245: 258 ~ 273.
- Yang L Q, Deng J, Gao X, *et al.* 2017. Timing of formation and origin of the Tongchanggou porphyry-skarn deposit: Implications for Late Cretaceous Mo-Cu metallogenesis in the southern Yidun Terrane, SE Tibetan Plateau[J]. *Ore Geology Reviews*, 81: 1 015 ~ 1 032.
- Yang T N, Ding Y, Zhang H R, *et al.* 2014. Two-phase subduction and subsequent continent-continent collision defines the Paleotethyan tectonics of northeast Tibet: Evidence from zircon U-Pb dating, geochemistry, and structural geology of the Sanjiang belt, southwest China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 126(11 ~ 12): 164 ~ 168.
- Yu Haijun, Li Wenchang, Yin Guanghou, *et al.* 2015. Geochronology, geochemistry and geological significance of the intrusion from the Tongchanggou Mo-Cu deposit, northwestern Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3 217 ~ 3 233(in Chinese).
- Zhang Dehui, Zhang Wenhui and Xu Guojian. 2001. Exsolution and evolution of magmatic-hydrothermal fluids and their constrains on the porphyry ore-forming system[J]. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 193 ~ 202(in Chinese).
- Zhang Dehui, Zhang Wenhui and Xu Guojian. 2004. The ore fluid geochemistry of F-rich silicate melt-hydrous fluid system and its metallogeny: The current status and problems[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 479 ~ 490(in Chinese).
- Zhao Bo, Zhang Dehui, Zhang Rongzhen, *et al.* 2015. The progress of geochemical properties and metallogenic effect of F-rich silicate melt-solution fluid system[J]. *Chinese Journal of Geology*, 50(1): 222 ~ 240(in Chinese).
- Zhou Zuoxia. 1986. The origin of intrusive mass in Fengshandong, Hubei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2(1): 59 ~ 70(in Chinese).

附中文参考文献

- 鲍波, 赵博, 张德会, 等. 2014. 氟在岩浆-热液系统演化过程中的行为[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 33(4): 540 ~ 547.
- 康志强, 冯佐海, 王睿. 1994. 角闪石黑云母全铝压力计的可靠性对比——以广西姑婆山-花山花岗岩为例[J]. *桂林理工大学学报*, 30(4): 474 ~ 479.
- 姜常义, 安三元. 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义[J]. *矿物岩石*, 3: 1 ~ 9.
- 李鸿莉, 毕献武, 涂光炽, 等. 2007. 岩背花岗岩黑云母矿物化学研究及其对成矿意义的指示[J]. *矿物岩石*, 27(3): 49 ~ 54.
- 李文昌, 余海军, 尹光侯, 等. 2012. 滇西北铜厂沟钨多金属矿床辉

- 钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿环境[J]. 矿床地质, 31(2): 282 ~ 292.
- 林文蔚, 彭丽君. 1994. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} [J]. 长春地质学院学报, 24(2): 155 ~ 162.
- 刘学龙, 李文昌, 尹光侯. 2013. 云南格咱岛弧印支期地壳隆升与剥蚀及其地质意义: 来自黑云母矿物压力计的证据[J]. 现代地质, 27(3): 537 ~ 546, 628.
- 刘伟. 2001. 岩浆流体在热液矿床形成中的作用[J]. 地学前缘, 8(3): 203 ~ 215.
- 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 等. 1994. 花岗岩类与岩浆动力学理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 210 ~ 212.
- 马润泽, 肖渊甫, 魏显贵, 等. 1997. 四川米仓山地区晋宁期基性超基性岩地球化学性质及其成因研究[J]. 矿物岩石, S1: 38 ~ 50.
- 汪欢, 王建平, 刘家军, 等. 2011. 南秦岭西坝花岗质岩体矿物学特征及成岩意义[J]. 现代地质, 25(3): 489 ~ 502.
- 徐克勤, 涂光炽. 1986. 花岗岩地质和成矿关系[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 657.
- 余海军, 李文昌, 尹光侯, 等. 2015. 滇西北铜厂沟 Mo-Cu 矿床岩体年代学、地球化学及其地质意义[J]. 岩石学报, 31(11): 3 217 ~ 3 233.
- 张德会, 张文淮, 许国建. 2001. 岩浆热液出溶和演化对斑岩成矿系统金属成矿的制约[J]. 地学前缘, 8(3): 193 ~ 202.
- 张德会, 张文淮, 许国建. 2004. 富 F 熔体-溶液体系流体地球化学及其成矿效应——研究现状及存在问题[J]. 地学前缘, 11(2): 479 ~ 490.
- 赵博, 张德会, 张荣臻, 等. 2015. 富 F 熔体-溶液体系体系的地球化学性状及成矿效应研究进展[J]. 地质科学, 50(1): 222 ~ 240.
- 周作侠. 1986. 湖北丰山洞岩体成因探讨[J]. 岩石学报, 2(1): 59 ~ 70.

致 谢

2018 年度,许多专家们在百忙之中抽出时间,接受编辑部邀请为本刊评审了稿件,他们对文章的学术质量进行了严格把关,付出了辛勤的劳动,也为提高刊物质量做出了贡献。在此,编辑部特代表主编及主办单位,向这些专家表示衷心的感谢!

这些专家有(以姓氏拼音为序):

白志达 柏道远 蔡剑辉 柴凤梅 陈华勇 陈家富 陈建林 陈鸣 陈天虎 陈岳龙 党志
 董发勤 杜利林 范宏瑞 高剑峰 高翔 耿元生 郭春丽 郭庆银 胡应模 黄菲 蒋少涌
 旷红伟 李斌 李厚民 李怀坤 李锦轶 李胜荣 李旭平 李艳 李永军 刘彬 刘平华
 鲁安怀 毛建仁 彭海波 彭进平 戚学祥 钱青 任留东 申俊峰 施光海 史仁灯 宋忠宝
 苏本勋 覃小锋 唐冬梅 唐菊兴 田作林 王安东 王保弟 王超 王登红 王洪作 王立本
 王世炎 王晓霞 王长明 王长秋 吴柏林 吴宏海 吴鹏 吴泰然 夏群科 项新葵 徐九华
 薛传东 闫臻 杨进辉 杨瑞东 杨天南 杨晓勇 杨志明 杨竹森 叶霖 衣龙升 于红梅
 于玉帅 余晓艳 曾令森 张德贤 张华 张济华 张建新 张立飞 张万良 张招崇 章荣清
 赵希林 钟大康 周跃飞 周征宇 朱建喜 祝新友