

# 铜官山岩体矿物学-矿物化学特征： 岩浆结晶动力学意义

赵乘乘<sup>1)</sup>, 杨晓勇<sup>1)</sup>, 冯敏<sup>1)</sup>, 孙卫东<sup>2)</sup>, 洪长春<sup>3)</sup>, 孙健<sup>3)</sup>, 胡俊杰<sup>3)</sup>, 唐树平<sup>4)</sup>

1) 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥, 230026;

2) 中国科学院广州地球化学研究所矿物与成矿重点实验室, 同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州, 510640;

3) 安徽省地质勘察局 332 地质队, 安徽黄山, 245000;

4) 铜陵有色集团公司凤凰山铜矿, 安徽铜陵, 244000

**内容提要:**本文对铜官山岩体开展详细的显微镜观察鉴定, 利用电子探针和 LA-ICP-MS 技术对岩浆岩典型矿物斜长石、角闪石和榍石进行了主量和微量元素测定。显微镜鉴定表明, 铜官山岩体中存在着大量的岩浆不平衡结构: 如斜长石和角闪石嵌晶结构以及针状磷灰石等。这些现象的存在表明铜官山岩体在形成过程中曾发生过一次或多次岩浆混合作用。电子探针分析结果显示, 斜长石的成分环带是震荡环带, 而大尺度的震荡环带可能代表了大规模的岩浆混合作用; 角闪石成分  $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  图解、 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  图解和  $\text{Mg}-(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})-\text{LiNaKCa}$  角闪石成因矿物族三角图解指示铜官山岩体中角闪石很可能为壳-幔混合成因。LA-ICP-MS 技术对主要造岩矿物的微量和稀土元素分析表明, 角闪石很可能为幔源或壳幔混合源, 斜长石可能为不同分异程度岩浆的混合形成。本研究比较明确地反映了铜官山岩体的形成过程中岩浆来源和结晶动力学过程, 即壳幔源区的混合交代作用, 与前人通过元素-同位素手段获得的信息比较吻合。

**关键词:**铜官山岩体; 岩浆不平衡结构; 斜长石环带; 岩浆混合

安徽沿江地区位于长江中下游岩浆带中段, 燕山期岩浆活动强烈, 类型复杂。前人对其展开了大量的研究(Chen et al., 1985, 2001; 杨学明等, 1988; 毛建仁等, 1990; 常印佛等, 1991; 邓晋福等, 1992, 2001; 周珣若等, 1994; 马昌前等, 1994; 邢凤鸣等, 1995, 1996a, 1996b; 邢凤鸣, 1997, 1998; 吴才来等, 1996, 2003; 唐永成等, 1998; 吴言昌等, 1999; Chen et al., 1998; 张德全等, 2002; 狄永军等, 2003; 王强, 2003; 杜杨松等, 2004; 赖小东等, 2012; 谢建成等, 2012), 取得了诸多成果。但是其形成机制尚无定论, 需要进一步研究。因此, 笔者在前人研究的基础上, 挑选安徽沿江地区的代表性岩体——铜陵铜官山岩体进行了详细的岩相学、矿物学研究以及单矿物稀土元素分析, 以期对该区岩石成因提供新的证据或约束。

## 1 区域地质背景

铜陵地区岩浆活动强烈, 成岩时代集中于晚侏罗世—白垩纪, 大量中酸性岩体总体上呈近东西向及北西向的带状展布, 与铜、金、铁、硫等矿床关系密切。区内侵入岩主要分布在铜官山和狮子山矿区以及新桥和凤凰山矿区。

铜官山岩体(图 1)位于铜官山矿区中部, 平面形态近椭圆形, 出露面积约 1.5 km<sup>2</sup>。岩体呈北东向延长的岩株, 侵位于铜官山(倒转)背斜北西翼泥盆纪—二叠纪地层中。该岩体深部与天鹅抱蛋山和金口岭岩体相连(刘文灿等, 1996)。岩体内部无明显分相, 主要岩石类型为石英二长闪长岩。

## 2 分析测试方法

通过详细的显微镜下观察, 挑选具有代表性的

注: 本文为中国科学院知识创新项目(编号 KZCX1-YW-15-3)和国家自然科学基金项目(编号 41173057, 41093072, 40921002)资助成果。

收稿日期: 2011-09-04; 改回日期: 2012-02-20; 责任编辑: 周健。

作者简介: 赵乘乘, 女, 1988 年生。硕士研究生。通讯作者: 杨晓勇, 通讯地址: 230026, 安徽合肥中国科学技术大学地球和空间科学学院; 电话: 0551-3606871; Email: xyyang555@163.com。

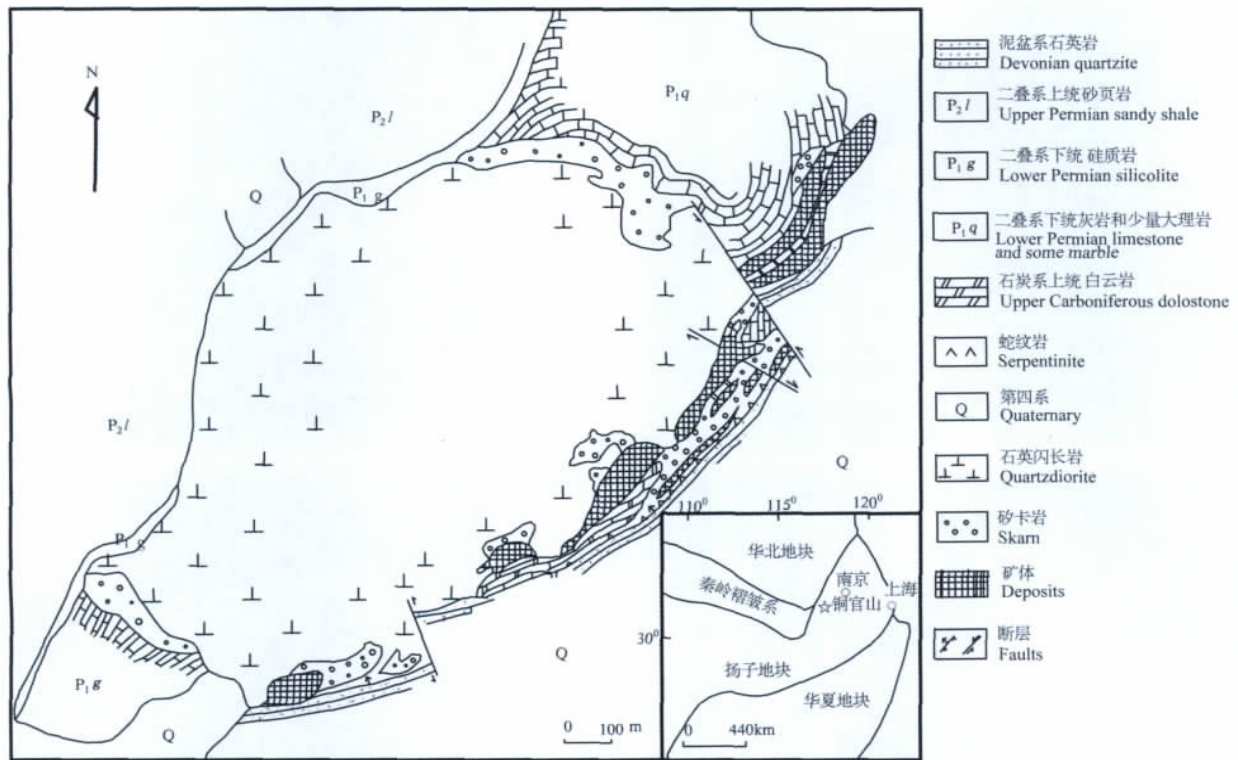


图 1 安徽铜官山地区地质-矿产简图(据常印佛等,1991)

Fig.1 Simplified map of geology and ore deposit in the Tongguanshan district (after Chang et al. ,1991)

斜长石、角闪石和榴石颗粒进行主量和微量元素的测定工作。该工作在中国科学院和中国科学技术大学壳幔物质与环境重点实验室的电子探针室和激光室完成。

电子探针分析仪为日本岛津的 EPMA1600,工作条件是电压 15 kV,电流 15 nA,电子束直径 5 μm。对斜长石我们进行了背散射电子图像分析以获得斜长石环带的背散射电子图像,目的查明斜长石的核部位置及裂隙和包裹体的分布;使扫描线通过斜长石的核部位置并尽量避免裂隙和不平整的地方,在扫描线的不同位置上定点定量分析,以获得不同点位上的各元素的含量。对斜长石边部的未知矿物我们进行了定性分析。对角闪石我们则在不同的位置上,在避开杂质的基础上,直接进行定点定量分析。矿物阳离子系数计算以标准硅酸盐矿物氧原子数为准。

激光分析所用仪器为 ELAN DRC- II 型的 LA-ICP-MS,标准样用美国国家标准技术研究院研究的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NISTSR610,采用 He 作为剥蚀物质的载气。样品切成小块的薄片放置在 80 cm<sup>3</sup> 的剥蚀池中,剥蚀激光为 193 nm 波长的 ArF 激发态激光,剥蚀速率为 10 Hz,每次脉冲的剥蚀深度为 0.1~0.2 μm,剥蚀的物质送到

ELAN 6000 四级杆质谱仪中首先在高温等离子体中进行离子化,然后在四级杆质谱中进行测定。本次分析的激光束直径为 60 μm。

### 3 岩相学特征

岩石呈灰色,块状构造,不等粒结构或似斑状结构。主要矿物成分为斜长石(约 40%)、碱性长石(约 35%)、角闪石(约 10%)、石英(8%~15%),次要矿物为自形程度较好的榴石、针柱状磷灰石和磁铁矿等不透明矿物。其中斜长石呈半自形—自形板状,发育聚片双晶和环带结构,并包裹有一个或多个熔蚀斜长石(图 2a)或者石英(图 2b),也可见斜长石里面包裹有角闪石颗粒(图 2c)或针柱状磷灰石(图 2d);碱性长石呈不规则板状,大颗粒的碱性长石嵌晶状包裹着角闪石、黑云母、斜长石等;角闪石包裹有斜长石、石英和金属矿物等(图 2e、f);石英呈不规则他形粒状,沿颗粒之间充填。

前人研究表明,环带斜长石包裹多个孤岛状的斜长石熔蚀核、针状磷灰石、嵌晶状钾长石结构、角闪石嵌晶结构等岩浆不平衡组构的出现可能代表着岩浆混合作用(Hibbard,1981,1991; Baxter et al. ,2002)。

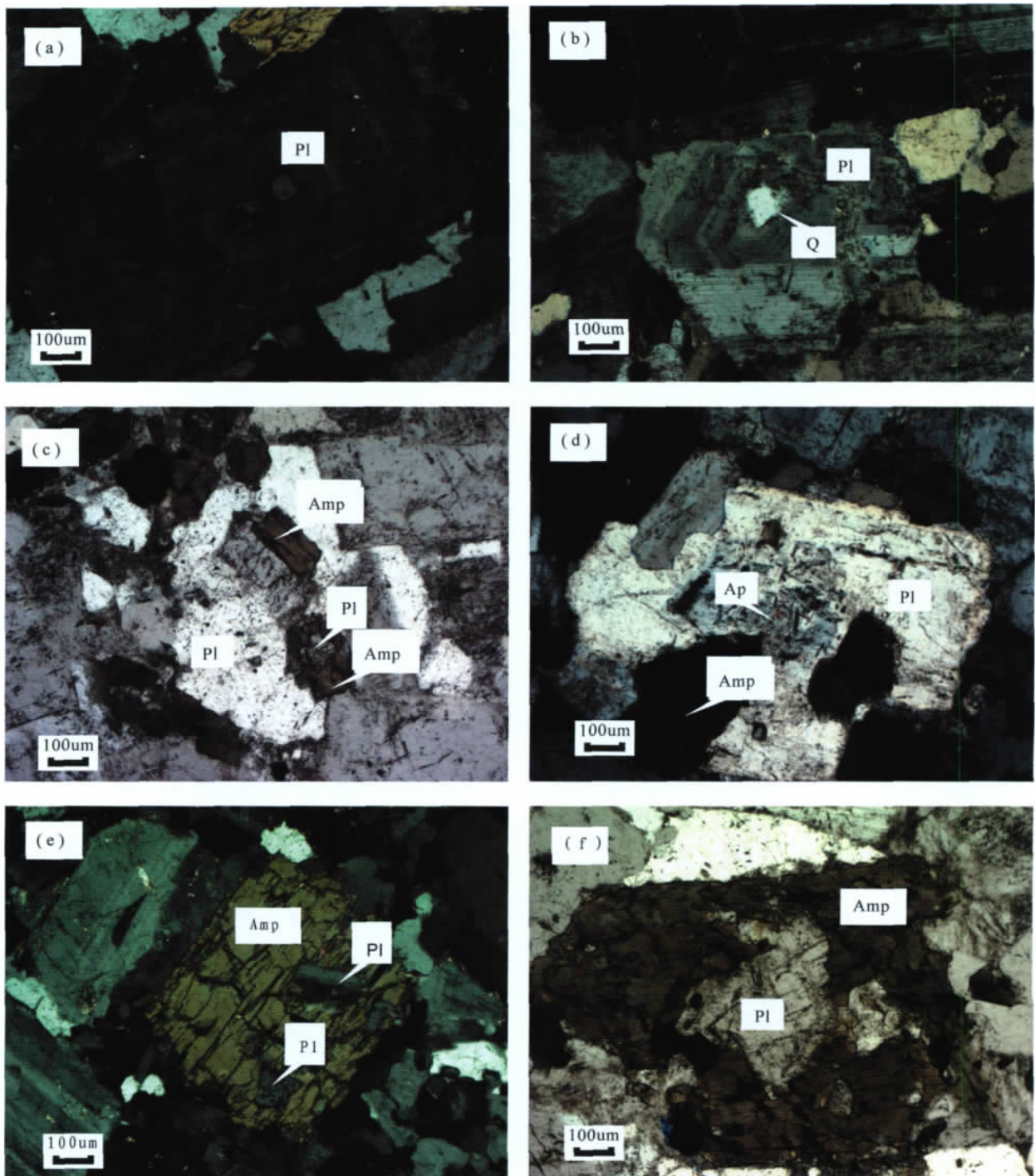


图 2 铜官山岩体的显微影像特征

Fig. 2 Photomicrographs of typical textures in the Tongguanshan pluton

(a) 斜长石包裹多个熔蚀斜长石(正交偏光);(b) 斜长石包裹石英颗粒(正交偏光);(c) 斜长石包裹角闪石,角闪石内又包裹斜长石(单偏光);(d) 斜长石包裹针状磷灰石(正交偏光);(e) 角闪石包裹多个熔蚀斜长石晶体(正交偏光);(f) 角闪石包裹突起较高的斜长石(单偏光);Pl—斜长石;Q—石英;Amp—角闪石;Ap—磷灰石

(a)—Plagioclase phenocryst displaying patchy-zoned core (cross polarized light); (b)—plagioclase phenocryst displaying a quartz core (cross polarized light); (c)—plagioclase phenocryst encapsulating amphibole containing a plagioclase core (plane polarized light); (d)—plagioclase phenocryst with several tiny acicular apatite crystals in the core (cross polarized light); (e)—amphibole phenocryst encapsulating several re-absorbed plagioclases (cross polarized light); (f)—plagioclase encapsulated in amphibole phenocryst exhibiting relatively high relief (plane polarized light); Pl—plagioclase; Q—quartz; Amp—amphibole; Ap—apatite



## 4 矿物化学特征

为了对研究区的岩相以及岩石成因有一个更为深入细致的了解,我们对样品中具有代表性的一些矿物进行了电子探针分析,以求知道其主量元素的特征及变化特征,便于对其成因做出更合理有效的解释。

### 4.1 主量元素化学特征

#### 4.1.1 斜长石

研究区斜长石的环带非常发育。关于斜长石环带的成因,前人作了大量的研究。一般认为,斜长石的环带记录了岩浆熔体在结晶过程中物理、化学条件的变化;斜长石的环带与其形成的地质环境和地质过程密切相关。所以我们挑选了若干个长石对其环带进行了主量元素分析,分析测试结果见表 1。对于围绕长石边部生长的,在背散射图像上颜色较暗的未知矿物,我们进行了定性分析,分析结果表明它们都为石英,其 SiO<sub>2</sub> 含量依次为 100%、99.86%和 99.94%。

由此可知,08TGS-1(2)-5 中的斜长石核部为奥长石,随后 An 含量逐渐升高结晶出中长石形成反环带,9 号和 11 号点附近 An 含量有较大波动,边部迅速变为钾长石和石英。TGS-16-3 中的斜长石核部为石英(图 3b),石英边部为较酸性的奥长石,再往外 An 含量增高为中长石,随后 An 含量降低为酸性斜长石,接着 An 含量又大幅度增加为中性斜长石,边部为酸性长石。TGS-16(2)-5 中的斜长石核部为中长石,幔部变为酸性斜长石,快到边部的时候 An 的含量有一个突然的升高,之后 An 含量迅速降低,边部为石英(图 3c)。

对矿物的电子探针分析结果表明,铜官山岩体中的斜长石环带是震荡环带,并具有以下特征:①斜长石围绕着石英小颗粒发生结晶(图 3),这一现象用正常的鲍文反应序列是无法很好解释的;②斜长石的边部有结晶出的非常狭窄的钾长石边(表 1)或者没有,探针很难打到,并迅速变为石英边;③斜长

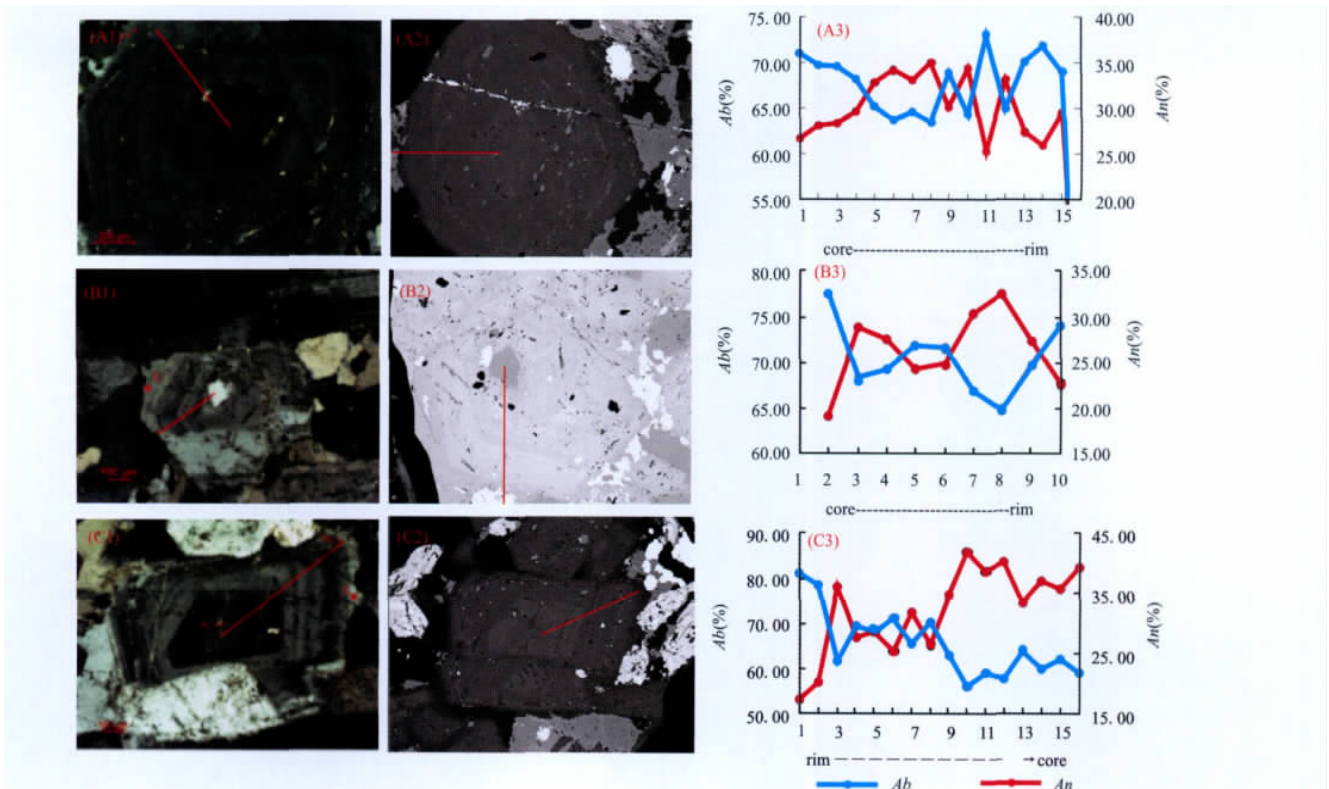


图 3 铜官山岩体中斜长石环带的成分变化和环带特征(左边为正交偏光下照片,中间为其背散射图片)

Fig. 3 Composition variation and zonal features of plagioclases from the Tongguanshan pluton

(left: taken under cross-polarized light; middle: BSE pictures)

图中红线为电子探针打的剖面线; a, b, c 分别为各个长石颗粒的电子探针定性分析点位置;

(A)—08TGS-1(2)-5; (B)—TGS-16-3; (C)—TGS-16(2)-5

Red lines are electron microprobe (EMP) analyses lines; a, b, c is qualitative analysis points of EMP;

(A)—08TGS-1(2)-5; (B)—TGS-16-3; (C)—TGS-16(2)-5

表 1 铜官山岩体斜长石电子探针分析结果(%)  
Table 1 Chemical compositions (%) of plagioclase by EPMA from the Tongguanshan pluton

08TGS-1(2)-5														
点号	PL-1	PL-2	PL-3	PL-4	PL-5	PL-6	PL-7	PL-8	PL-9	PL-10	PL-11	PL-12	PL-13	PL-14
Na <sub>2</sub> O	8.08	7.93	7.91	7.71	7.41	6.91	7.14	7.12	7.88	7.26	8.34	7.28	7.76	8.29
K <sub>2</sub> O	0.40	0.41	0.38	0.38	0.34	0.36	0.39	0.29	0.17	0.24	0.35	0.32	0.45	0.4
CaO	5.50	5.77	5.81	6.04	6.75	6.69	6.60	7.10	6.22	7.00	5.21	6.7	5.47	5.42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.91	22.96	23.86	24.17	24.31	24.28	24.10	24.79	23.47	24.48	22.31	24.36	22.94	23.17
SiO <sub>2</sub>	62.87	62.01	62.56	62.70	60.73	61.48	61.91	60.70	61.84	60.70	63.40	60.29	62.79	61.59
BaO	0.04	0.02	0.03	0.04	0.09	0.06	0.06	0.05	0.00	0.00	0.06	0.06	0.05	0.05
Total	99.8	99.1	100.55	101.04	99.63	99.78	100.2	100.05	99.58	99.68	99.67	99.01	99.46	98.92
Si	2.79	2.78	2.76	2.75	2.71	2.73	2.74	2.70	2.76	2.71	2.82	2.71	2.79	2.76
Al	1.20	1.21	1.24	1.25	1.28	1.27	1.26	1.30	1.23	1.29	1.17	1.29	1.20	1.23
Ca	0.26	0.28	0.28	0.28	0.32	0.32	0.31	0.34	0.30	0.34	0.25	0.32	0.26	0.26
Na	0.70	0.69	0.68	0.66	0.64	0.60	0.61	0.61	0.68	0.63	0.72	0.63	0.67	0.72
K	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02
Ba	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
An	26.71	27.99	28.24	29.54	32.83	34.09	33.01	34.92	30.09	34.30	25.15	33.07	27.29	25.93
Ab	71.01	69.62	69.58	68.26	65.20	63.70	64.65	63.36	68.92	64.32	72.85	65.03	70.06	71.77
Or	2.28	2.39	2.18	2.20	1.97	2.21	2.34	1.72	0.99	1.38	2.00	1.90	2.65	2.30
08TGS-1(2)-5			TGS-16-3										TGS-16(2)-5	
点号	PL-15	PL-16	PL-1	PL-2	PL-3	PL-4	PL-5	PL-6	PL-7	PL-8	PL-9	PL-10	PL-1	PL-2
Na <sub>2</sub> O	7.83	0.87	0	8.84	7.53	7.76	8.05	7.88	7.55	7.35	8.06	8.49	9.26	8.23
K <sub>2</sub> O	0.28	15.31	0.01	0.56	0.43	0.5	0.65	0.6	0.48	0.44	0.48	0.53	0.25	0.18
CaO	6.04	0	0	3.95	5.75	5.61	4.93	4.94	6.19	6.66	5.72	4.72	3.61	3.83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.04	17.22	0.04	21.83	22.95	22.23	21.87	22.17	23.4	24.18	22.4	22.02	20.92	21.79
SiO <sub>2</sub>	62.1	65.64	101.91	65.25	62.76	63.17	63.15	63.18	62.15	61.32	63.02	62.4	66.13	65.03
BaO	0.03	0.58	0.01	0	0.04	0.1	0.11	0.08	0.09	0.07	0.11	0.13	0	0
Total	99.32	99.62	101.97	100.43	99.46	99.37	98.76	98.85	99.86	100.02	99.79	98.29	100.17	99.06
Si	2.77	3.04		2.86	2.79	2.82	2.83	2.83	2.76	2.73	2.80	2.81	2.90	2.88
Al	1.21	0.94		1.13	1.20	1.17	1.16	1.17	1.23	1.27	1.17	1.17	1.08	1.14
Ca	0.29	0.00		0.19	0.27	0.27	0.24	0.24	0.30	0.32	0.27	0.23	0.17	0.18
Na	0.68	0.08		0.75	0.65	0.67	0.70	0.68	0.65	0.63	0.70	0.74	0.79	0.71
K	0.02	0.91		0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01
Ba	0.00	0.02		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
An	29.41	0.00		19.16	28.93	27.72	24.32	24.82	30.32	32.51	27.40	22.76	17.45	20.23
Ab	68.95	7.94		77.61	68.52	69.36	71.85	71.61	66.89	64.92	69.87	74.19	81.11	78.63
Or	1.63	92.06		3.23	2.56	2.92	3.83	3.57	2.78	2.57	2.73	3.06	1.44	1.14
TGS-16(2)-5														
点号	PL-3	PL-4	PL-5	PL-6	PL-7	PL-8	PL-9	PL-10	PL-11	PL-13	PL-14	PL-15	PL-16	PL-17
Na <sub>2</sub> O	7.01	7.94	7.69	8.16	7.45	7.85	7.19	6.06	6.7	6.38	7.24	6.34	7.07	6.75
K <sub>2</sub> O	0.33	0.5	0.48	0.53	0.4	0.52	0.38	0.29	0.38	0.28	0.42	0.41	0.36	0.27
CaO	7.4	5.73	5.81	5.29	6.52	5.38	7.16	8.17	7.94	8.03	6.81	7.12	7.35	8.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.72	22.91	23.31	22.33	23.38	23.53	23.77	25.79	25.61	25.46	24.59	24.32	23.94	25.71
SiO <sub>2</sub>	59.72	62.88	62.78	63.58	61.8	62.39	61	58.55	60.28	60.19	61.03	60.68	60.71	59.5
BaO	0.04	0	0.04	0.12	0.07	0.08	0.06	0.02	0.04	0.06	0.03	0.04	0.02	0.03
Total	99.22	99.96	100.11	100.01	99.62	99.75	99.56	98.88	100.95	100.4	100.12	98.91	99.45	100.41
Si	2.68	2.79	2.78	2.82	2.76	2.77	2.73	2.64	2.66	2.67	2.71	2.72	2.72	2.65
Al	1.31	1.20	1.22	1.17	1.23	1.23	1.25	1.37	1.33	1.33	1.29	1.29	1.26	1.35
Ca	0.36	0.27	0.28	0.25	0.31	0.26	0.34	0.39	0.38	0.38	0.32	0.34	0.35	0.39
Na	0.61	0.68	0.66	0.70	0.64	0.68	0.62	0.53	0.57	0.55	0.62	0.55	0.61	0.58
K	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Ba	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
An	36.11	27.70	28.64	25.59	31.85	26.63	34.71	41.94	38.70	40.36	33.36	37.29	35.71	39.41
Ab	61.97	69.42	68.56	71.35	65.84	70.33	63.09	56.29	59.10	57.98	64.20	60.14	62.20	59.04
Or	1.92	2.87	2.80	3.07	2.32	3.04	2.19	1.77	2.20	1.66	2.43	2.56	2.10	1.55

石的环带结构不是正环带也不是反环带,而是大尺度的震荡环带中夹着小尺度的震荡环带。

4.1.2 角闪石

铜官山的角闪石做了电子探针分析,结果见表 2。

表 2 铜官山岩体角闪石电子探针分析结果(%)  
Table 2 Chemical compositions (%) of amphibole by EPMA from the Tongguanshan pluton

样品号	08TGS	08TGS	08TGS	08TGS	TGS
	-1-4	-1(2)-1	-1(2)-3	-1(2)-4	-16(2)-1
Na <sub>2</sub> O	1.30	1.29	1.22	0.92	1.68
K <sub>2</sub> O	0.46	0.55	0.41	0.25	1.00
SiO <sub>2</sub>	50.56	49.96	51.32	53.51	45.40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.63	4.94	4.41	3.01	8.17
MgO	15.23	14.64	15.51	16.45	11.53
CaO	12.31	12.20	12.18	12.56	11.72
TiO <sub>2</sub>	0.65	0.87	0.77	0.36	1.12
F	0.17	0.08	0.21	0.26	0.15
MnO	0.68	0.48	0.46	0.50	0.46
FeO	11.73	12.38	11.69	11.34	16.61
Total	97.72	97.39	98.18	99.16	97.84
Si	7.34	7.30	7.39	7.59	6.80
Al <sup>IV</sup>	0.66	0.70	0.61	0.41	1.20
Al <sup>VI</sup>	0.14	0.15	0.14	0.09	0.25
Ti	0.07	0.10	0.08	0.04	0.13
Fe <sup>3+</sup>	0.62	0.61	0.69	0.79	0.35
Fe <sup>2+</sup>	0.80	0.91	0.72	0.56	1.74
Mn	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06
Mg	3.30	3.19	3.33	3.48	2.58
Ca	1.92	1.91	1.88	1.91	1.88
Na	0.37	0.37	0.34	0.25	0.49
K	0.09	0.10	0.08	0.05	0.19
Total	15.38	15.39	15.31	15.22	15.65
Mg/(Mg+Fe <sup>2+</sup> )	0.80	0.78	0.82	0.86	0.60
CaO/NaO	9.47	9.46	9.98	13.65	6.98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	7.12	5.68	5.73	8.36	7.29

根据国际矿物协会和矿物名称委员会对角闪石的分类(Leake, 1997),样品角闪石均属于钙质角闪石亚类((Ca+Na)<sub>B</sub>≥1.00, Na<sub>B</sub><0.50)。在钙质角闪石的分类图解上(图 4)(Leake, 1978, 1997),铜官山中的角闪石一个点落在阳起石和浅闪石,其余点均落在镁闪石内。在钙质角闪石的(Na+K)-Al<sup>IV</sup>分类图和(Al<sup>VI</sup>+Fe<sup>3+</sup>+Ti)-Al<sup>IV</sup>分类图(图 5)中,样品落在普通角闪石、透闪石和浅闪石之间。

在 Leake (1978)的角闪石 Si-Ti 图解上(图 6a)除两个点落在变质岩区域内,其余点落在火成岩区内,靠近火成岩区与变质岩区的分界线。在马昌前等(1994)的角闪石 Si-Ti 图解上(图 6b),本区样品主要落在结晶角闪石区域内或附近,一个样品落在交代角闪石区域。说明了本区角闪石成因复杂。

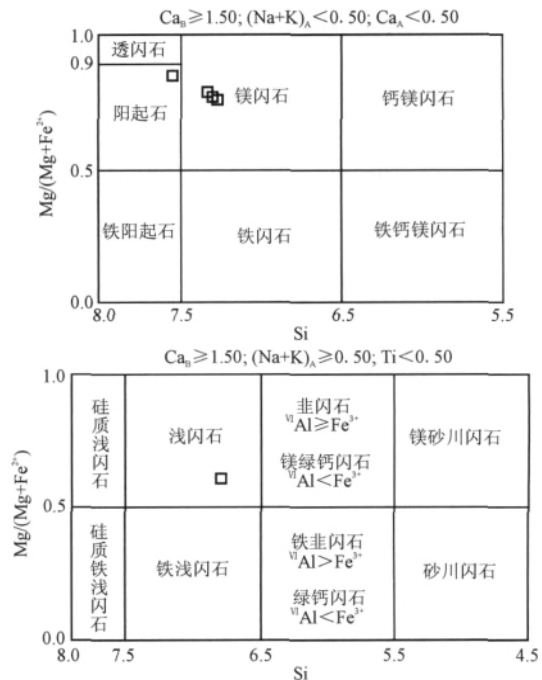


图 4 铜官山岩体中角闪石成分分类图 (据 Leake, 1978,1997)

Fig. 4 Classified diagram of amphiboles from the Tongguanshan pluton (after Leake, 1978,1997)

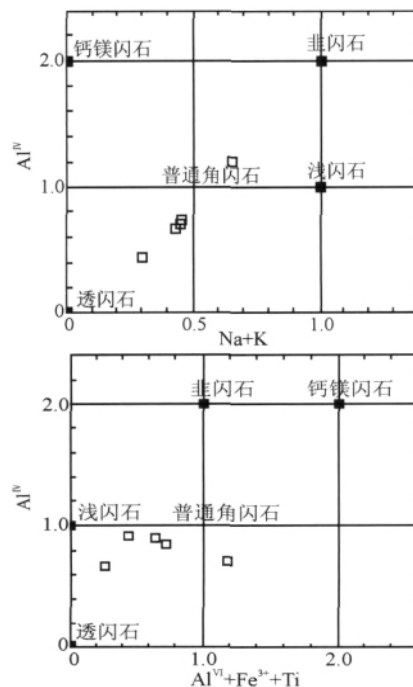


图 5 钙质角闪石的(Na+K)-Al<sup>IV</sup>分类图和(Al<sup>VI</sup>+Fe<sup>3+</sup>+Ti)-Al<sup>IV</sup>分类图(据 Deer 等,1963)  
Fig. 5 (Na+K)-Al<sup>IV</sup> diagram and (Al<sup>VI</sup>+Fe<sup>3+</sup>+Ti)-Al<sup>IV</sup> diagram of amphiboles from the Tongguanshan pluton (after Deer et al., 1963)

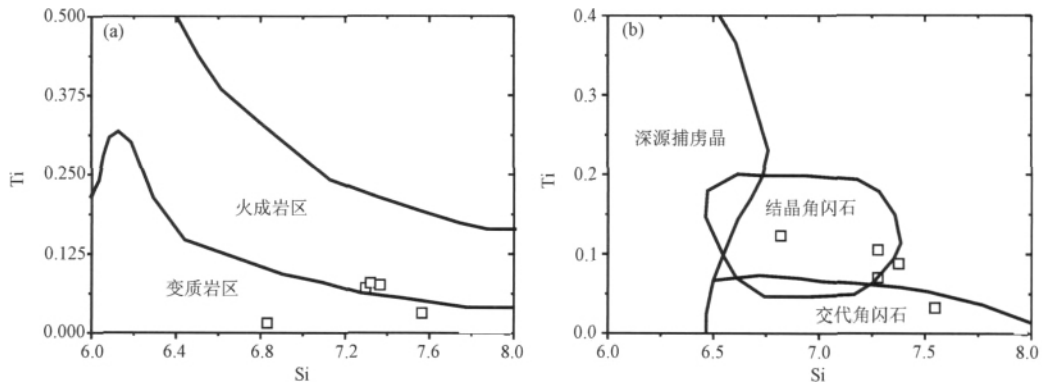


图 6 铜官山岩体角闪石的 Ti-Si 变异图解(a 据 Leake, 1978; b 据马昌前等, 1994)

Fig. 6 Ti-Si variation diagram of amphiboles from the Tongguanshan pluton (a after Leake, 1978; b after Ma et al., 1994)

4.2 稀土及微量元素特征

微量元素的研究已经成为现代岩石学的一个关键组成部分,某些元素的特殊地球化学性质使它们在判别岩浆作用过程中具有独特的示踪作用,比主量元素更能有效地区分岩石成因过程(Rollison, 2000)。因此我们对研究岩体的榍石、角闪石和斜长石分别做了单矿物稀土元素分析(图 7),分析结果见表 3、4。

4.2.1 榍石和角闪石稀土元素特征

铜官山岩体中榍石样品的稀土总量在  $7519.70 \times 10^6 \sim 17261.06 \times 10^6$  之间变化,轻重稀土分异变化较大( $(La/Yb)_N = 3.79 \sim 16.40$ ),强烈富集轻稀土,没有明显的 Eu 异常。

角闪石的稀土总量在  $106.45 \times 10^6 \sim 636.41 \times 10^6$  之间变化,轻重稀土分异较弱( $(La/Yb)_N = 1.81 \sim 5.71$ ),出现明显的 Eu 负异常。谢应雯等(1990)研究表明稀土元素在不同类型花岗岩中的角闪石分配是不一样的:壳型角闪石稀土元素最富集( $\sum REE > 900 \times 10^{-6}$ ),而幔型及壳幔型中则较贫。因此从稀土元素总量来看,铜官山的角闪石应该属于幔源或壳幔混合成因。

4.2.2 斜长石稀土元素特征

斜长石样品的稀土总量在  $5.28 \times 10^6 \sim 475.79 \times 10^6$  之间变化,轻重稀土分异强烈,极度亏损重稀土和 Sm,出现明显的 Eu 正异常。稀土元素总量从核部到边部不等,可分为核部高、边部低,核部低、边部高和核部与边部近相等三种。其中 TGS-16(2)-6 核部 REE 含量特别高,可能是由于其中包裹有针状的磷灰石引起。对斜长石的 Ce 异常( $Ce/Ce^* = 2Ce_N / (La_N + Pr_N)$ )计算表明样品没有明显的 Ce 异常,说明斜长石是新鲜未受蚀变的原生长石。对斜长石的  $\delta Eu$  计算表明,大部分斜长石核部和边部  $\delta Eu$  存在较大差异,如  $\delta Eu(08TGS-2) = 14.87 \sim 50.07$  和  $\delta Eu$

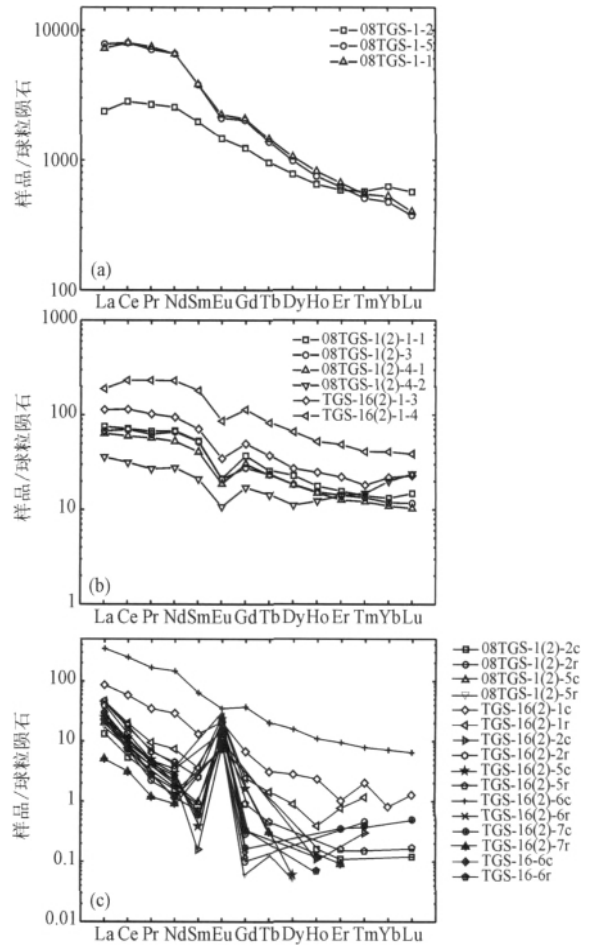


图 7 铜官山岩体中单矿物稀土元素配分模式图

Fig. 7 Distribution patterns of the rare earth elements of mineral from the Tongguanshan pluton (a) — Sphene; (b) — amphibole; (c) — plagioclase

(TGS-3) =  $2.24 \sim 8.47$ (表 4)。不同斜长石核部和边部  $\delta Eu$  变化的差异很大,也分为三类,分别是核部高、边部低,核部低、边部高和核部与边部近相等,可能反

表 3 铜官山岩体榍石、角闪石稀土元素 LA-ICP-MS 分析结果( $\times 10^6$ )Table 3 REE compositions of ( $\times 10^6$ ) sphenes and amphiboles by LA-ICP-MS from the Tongguanshan pluton

矿物 样品号	榍石			角闪石					
	08TGS-1-2	08TGS-1-5	08TGS-1-1	08TGS-1(2)-1-1	08TGS-1(2)-3	08TGS-1(2)-4-1	08TGS-1(2)-4-2	TGS-16(2)-1-3	TGS-16(2)-1-4
La	734.50	2421.20	2244.18	23.43	21.02	19.77	11.17	35.09	58.48
Ce	2277.00	6445.10	6443.47	57.90	56.76	48.44	25.48	92.53	187.04
Pr	326.43	864.76	903.90	8.19	7.65	6.97	3.29	12.49	28.26
Nd	1532.00	3943.28	3933.90	40.77	39.87	31.68	16.69	56.91	138.46
Sm	384.11	740.97	747.11	10.35	10.16	7.95	4.10	13.87	35.17
Eu	107.99	154.15	163.83	1.56	1.54	1.38	0.79	2.55	6.37
Gd	319.62	525.13	538.16	9.64	7.14	7.85	4.44	12.84	29.38
Tb	45.36	65.43	68.76	1.22	1.11	1.10	0.68	1.77	3.92
Dy	251.53	317.69	341.24	7.39	5.93	5.88	3.58	8.73	21.38
Ho	46.67	53.88	58.88	1.27	1.10	1.08	0.88	1.78	3.75
Er	123.44	130.39	140.29	3.29	2.97	2.65	2.96	4.64	10.21
Tm	18.60	16.45	17.68	0.45	0.43	0.39	0.48	0.59	1.32
Yb	130.66	99.52	109.98	2.77	2.48	2.28	4.17	4.56	8.53
Lu	18.28	12.09	12.92	0.48	0.38	0.33	0.77	0.74	1.25
Y	1203.52	1394.01	1536.75	35.44	30.76	29.67	26.97	48.19	102.88
total	7519.71	17184.05	17261.05	204.15	189.30	167.42	106.45	297.28	636.40

映了斜长石晶出时岩浆成分的差异。包志伟等(1995)对长石的稀土元素研究表明,随着花岗岩分异指数的增加,长石稀土元素总量增加, $\delta\text{Eu}$ 值和 LREE/HREE 值变小。对表 4 的数据分析可知,铜官山斜长石的 REE 总量、 $\delta\text{Eu}$  和 LREE/HREE 值从核部到边部不同且呈现一致性变化,分别指示了斜长石在结晶过程中岩浆的分异程度不同。除样品 TGS-16(2)-2 和 TGS-16-6 从核部到边部分异程度增大外,其余样品从核部到边部分异程度变小。这种非正常情况可能指示了岩浆混合作用。

#### 4.2.3 斜长石微量元素特征

斜长石斑晶中的微量和痕量元素环带能够指示岩浆房的物理、化学演化过程(Singer et al., 1995; Anderson et al., 2000)。当晶体在平衡条件下生长,它们的微量元素含量主要由熔体中该元素含量以及分配系数控制,而扩散作用能使晶体中的元素含量均一化(Ginibre et al., 2002)。

Ba 在斜长石中的扩散速率很慢,因此其 Ba 成分环带变化是最好的指示岩浆演化过程指标之一。在没有遭受后期更高温度的岩浆或变质作用的情况下,除非晶体生长环境中的 Ba 含量发生变化,晶体中 Ba 含量不会明显改变(Cherniak, 2001)。Sr 的性质与 Ba 相似。由图 8b、c 可见铜官山斜长石核部、边部 Ba、Sr 含量差异显著,与正常的连续分异不符。形成这种现象最可能的方式是最初结晶的斜长石颗粒在后来结晶过程中被带入了更富或贫 Ba、Sr 的熔体。

实验数据表明斜长石 Ti 含量与 An 含量成负相关关系。铜官山边部高 Ti 含量(图 8a)的斜长石意味着晶体被带入更富 Ti 的熔体中,说明晶体从相对富 Si(贫 Ti)的岩浆进入了另一个相对贫 Si(富 Ti)、温度更高的岩浆中(Muller et al., 2004)。反之亦然。

另外,不同斜长石颗粒的核、边的 Fe 含量也有差别(图 8d)。从核到边 Fe 含量的降低可能与氧逸度的急剧下降或者温度和 An 含量的升高有关。但是以上三种情况在正常的分异作用过程中是不会发生的(Ginibre et al., 2002)。因此,铜官山斜长石中 Fe 含量的降低只可能反映了熔体中 Fe 含量的降低,即与低 Fe 含量的岩浆混合。而 3 号点 Fe 急剧升高可能跟它边部被角闪石包裹有关(图 2f)。

Ginibre 等(2002)指出斜长石核部到边部 An、Fe、Ti、Sr 含量的减少说明岩浆与另一个分异程度较高的岩浆发生混合,而 An、Fe、Ti、Sr 含量的增加则说明岩浆与另一个分异程度较低、更基性的岩浆发生混合。因此铜官山斜长 An、Fe、Ti、Sr 含量从核部到边部的系统变化说明了本区岩浆至少曾发生过两次岩浆混合作用,分别是与分异程度较高的和分异程度较低的两种岩浆混合。

## 5 讨论

镜下鉴定表明,铜官山岩体在形成过程中曾发生过一次或多次岩浆混合作用。主要证据如下:铜官山岩体中的斜长石普遍发育有斜长石嵌晶结构:



表 4 铜官山岩体斜长石 LA-ICP-MS 稀土及微量元素分析结果 ( $\times 10^{-6}$ )Table 4 REE and Trace element compositions ( $\times 10^{-6}$ ) of plagioclases by LA-ICP-MS from the Tongguanshan pluton

样品号	08TGS-1(2)-2		08TGS-1(2)-5		TGS-16(2)-1		TGS-16(2)-2		TGS-16(2)-5
	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core
La	4.09	9.15	6.3	5.43	26.69	14.32	7.33	14.21	7.76
Ce	4.36	5.93	6.78	6.11	47	16.18	7.72	14.91	9.26
Pr	0.33	0.28	0.5	0.48	4.26	1.16	0.57	0.82	0.61
Nd	0.94	0.76	1.19	1.3	17.51	4.44	1.3	2.69	1.8
Sm	0	0	0.19	0.13	2.57	0.7	0.03	0.49	0.08
Eu	0.56	0.56	0.61	0.72	1.55	1.85	0.72	1.54	1.73
Gd	0	0.03	0.08	0.01	1.74	0.64	0	0.07	0.43
Tb	0	0	0	0.01	0.15	0.07	0	0	0
Dy	0	0	0	0.01	0.9	0.29	0	0	0.02
Ho	0.01	0	0	0	0.17	0.03	0.01	0	0
Er	0.02	0	0	0	0.21	0.16	0	0	0
Tm	0	0.01	0	0	0.07	0.04	0.01	0	0
Yb	0	0	0	0	0.17	0	0	0	0
Lu	0	0	0	0	0.04	0	0	0	0
Y	0.09	0	0.19	0.04	3.67	1.59	0.08	0	0.16
total	10.4	16.72	15.84	14.24	106.7	41.47	17.77	34.73	21.85
LREE	10.28	16.68	15.57	14.17	99.58	38.65	17.67	34.66	21.24
HREE	0.03	0.04	0.08	0.03	3.45	1.23	0.02	0.07	0.45
LREE/HREE	342.67	417.00	194.63	472.33	28.86	31.42	883.50	495.14	47.20
$\delta$ Eu	—	—	14.87	50.07	2.24	8.47	—	24.7	29.21
Ce/Ce	0.68	0.46	0.69	0.71	0.96	0.72	0.68	0.7	0.76
Ti	26.98	41.68	29.93	39.87	19.10	215.67	38.12	55.30	52.44
Sr	2020.93	1331.19	1619.58	2419.59	1816.90	1722.33	2720.22	2694.59	4593.18
Ba	488.60	487.28	293.91	474.03	646.13	323.10	594.19	1246.42	461.45
Fe	1794.97	2365.32	3023.06	1163.73	1188.03	13966.18	1680.68	1714.93	4514.50
样品号	TGS-16(2)-5	TGS-16(2)-6		TGS-16(2)-7		TGS-16-6			
	rim	core	rim	core	rim	core	mantle	rim	
La	12.4	108.16	13.73	9.3	1.58	7.15	6.57	9	
Ce	10.84	199.85	14.01	6.86	2.5	6.18	6.1	8.99	
Pr	0.55	20.4	0.87	0.35	0.14	0.34	0.41	0.56	
Nd	2.08	88.27	2.56	0.72	0.55	0.7	1.33	1.59	
Sm	0	12.4	0	0.14	0	0	0.19	0.12	
Eu	1.07	2.58	1.52	0.68	0.65	0.56	1.05	0.96	
Gd	0.24	9.62	0.03	0.04	0	0.08	0	0.09	
Tb	0.02	0.97	0	0	0.01	0	0	0	
Dy	0	5.1	0	0	0	0	0	0	
Ho	0	0.79	0	0	0	0.01	0	0	
Er	0.03	1.98	0	0.07	0.02	0	0	0	
Tm	0	0.25	0	0.01	0	0	0	0	
Yb	0	1.49	0	0	0	0	0	0	
Lu	0.01	0.21	0	0.02	0	0	0	0	
Y	0	23.73	0.04	0	0.07	0	0.04	0	
total	27.24	475.8	32.76	18.19	5.52	15.02	15.69	21.31	
LREE	26.94	431.66	32.69	18.05	5.42	14.93	15.65	21.22	
HREE	0.3	20.41	0.03	0.14	0.03	0.09	0	0.09	
LREE/HREE	89.80	21.15	1089.67	128.93	180.67	165.89	—	235.78	
$\delta$ Eu	—	0.72	—	26.58	—	—	—	28.92	
Ce/Ce	0.6	0.96	0.67	0.52	0.98	0.59	0.62	0.66	
Ti	59.45	14.22	46.08	37.67	23.82	31.38	37.13	44.54	
Sr	2987.81	960.30	2312.08	2755.67	3699.87	1932.86	1891.11	1463.29	
Ba	1068.39	149.65	1181.36	1071.13	777.89	777.62	702.19	647.31	
Fe	1898.37	3306.48	1457.50	2093.93	1804.95	1601.07	1104.93	1131.65	

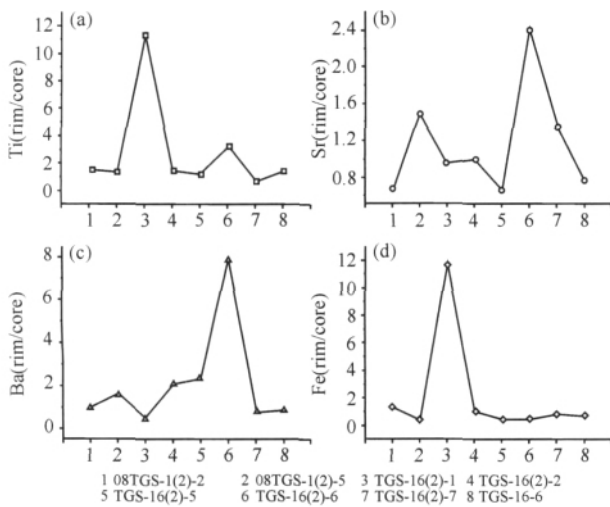


图 8 铜官山斜长石微量元素变化特征(纵坐标单位为矿物边部对核部的比值,横坐标 1~8 为样品编号)

Fig. 8 Trace element variations of plagioclases from the Tongguanshan pluton (vertical coordinate means the ratio of rim to core of certain element, horizontal coordinate means the number of samples)

斜长石中包裹的斜长石熔蚀核说明先期形成的斜长石颗粒在遇到更高温度的岩浆后被部分熔蚀至平衡再沿其边缘生长;斜长石中包裹的针状磷灰石的发育是岩浆快速冷却结晶的产物,是温度较高的偏基性岩浆和温度较低的偏酸性岩浆发生混合的标志特征之一。而对于斜长石围绕着石英颗粒生长和斜长石颗粒中包裹着的角闪石中又包裹有斜长石小颗粒,这用正常的鲍文反应序列是无法解释的。但是岩浆混合作用则能够很好地解释这些不平衡结构。包裹的矿物不同,代表了不同的岩浆混合过程。

如图 2a 中大的斜长石颗粒包裹熔融孤岛状斜长石,可解释为在岩浆混合的情况下,当热量从偏基性岩浆传输进来后,偏酸性岩浆系统的斜长石被部分熔蚀,其熔蚀残余又被从混合岩浆中结晶的斜长石包裹从而形成新的完整的斜长石。图 2b 中斜长石包裹着石英颗粒,这种结构可解释为偏长英质的岩浆与偏镁铁质的岩浆混合导致偏镁铁质岩浆淬火,引起斜长石在源于偏长英质岩浆的石英生长面上外延生长,形成了斜长石外壳。图 2c 斜长石包裹着角闪石,而熔蚀的角闪石颗粒中又包裹小颗粒的斜长石,则反映区内岩浆形成过程中发生了多次或多端元组分的岩浆混合。图 2d 斜长石中的富磷灰石带则说明了在斜长石的结晶过程中曾发生过淬火,是热的基性岩浆进入相对冷的长英质岩浆迅速冷却的结果,即发生了岩浆混合作用。

Pearce 等(1990)指出斜长石存在着的两种类型的‘韵律’环带:一种为小尺度的韵律环带,多数呈现组分变化范围<5%,环带之间的分界面平滑自形且具有规则性和周期性,几乎没有什么侵蚀迹象;另一种为大尺度的韵律环带,组分变化范围大多在 10%~25%,一般没有规律的周期性(有少数例外),带与带的分界平滑,港湾状或复杂的形态,通常在一次可确定的溶解事件之后形成。吴平霄等(1998)认为小尺度的韵律环带可能源于斜长石的自组织,而大尺度的环带对应着大规模的岩浆活动,即系统在某一温、压条件下持续了一段时间以后,当环境的温度、压力发生波动时,系统的平衡浓度发生了变化。因此铜官山的斜长石大幅度的震荡环带特征极有可能指示了该地区曾发生了一次或多次岩浆混合作用,而岩浆混合作用也恰好能解释围绕着石英颗粒生长的斜长石及斜长石边部突变为石英边这一现象。

如图 3 中三个斜长石颗粒,我们都能很明显地看到至少两次 An 成分的剧烈变化(10%~25%),这样大尺度的环带对应着大规模的岩浆活动如岩浆混合作用。而其边部迅速变为钾长石或石英,可能的情形是正在结晶出偏基性斜长石的岩浆充填进偏酸性的岩浆房与之混合,使基性长石的结晶出现间断,混合岩浆迅速朝着结晶出酸性长石的方向演化。

铜官山角闪石样品的  $M=0.60\sim 0.86$ 。谢应雯等(1990)研究发现角闪石中的 M 值 [ $M=Mg/(Mg+Fe^{2+})$ ] 是区分壳型、壳幔型和幔型花岗岩的可靠标志,幔型花岗岩中角闪石的 M 值大于 0.7,壳型花岗岩中角闪石的 M 值小于 0.5,壳幔型花岗岩中角闪石的 M 值介于 0.5~0.7 之间。因此铜官山角闪石表现出壳幔型或幔型花岗岩的特征。其值与世界上地幔非闪石 M 值(约 0.89)接近,反映了地幔成因特征(樊祺诚等, 1992)。

在角闪石的  $CaO/Na_2O-Al_2O_3/TiO_2$  图解(图 9)上,角闪石样品全都落入或靠近钙碱性煌斑岩区,说明本区角闪石与幔源成因的煌斑岩角闪石有一定联系,但不是简单的幔源成因。在  $Mg-(Fe^{2+}+Fe^{3+})-LiNaKCa$  角闪石成因矿物族三角图解(图 10)中,角闪石样品落入中酸性壳源岩浆成因区、碱性成因区与接触交代成因区交界处,说明它们并非简单的壳源成因。在角闪石的  $TiO_2-Al_2O_3$  图解(图 11)上,除了一个点落入地壳区,其余点均落入壳幔混合区。以上说明铜官山的角闪石很可能为壳幔混合源。

上述讨论表明研究区的角闪石为壳幔混合源。这在一定程度上也反映出研究区岩体的岩浆混合特

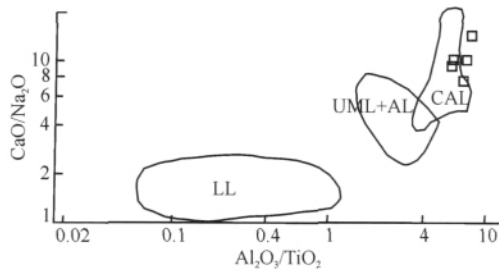


图9 铜官山角闪石的  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  图解(据 Rock, 1987)

Fig. 9  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  diagram of amphiboles from the Tongguanshan pluton (after Rock, 1987)  
 LL—钾镁煌斑岩中的角闪石; UML+AL—超镁铁质和碱性煌斑岩中的角闪石; CAL—钙碱性煌斑岩中的角闪石  
 LL—Amphiboles from lamproites; UML+AL—amphiboles from ultramafic and alkaline lamprophyres; CAL—amphiboles from calc-alkaline lamprophyres

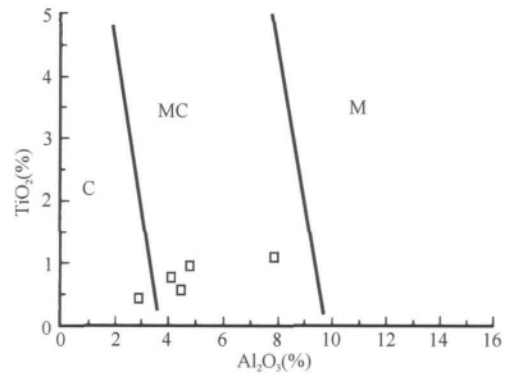


图11 铜官山岩体角闪石  $\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$  图解 (据姜常义等, 1984)

Fig. 11  $\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$  diagram of amphiboles from the Tongguanshan pluton (after Jiang et al., 1984)  
 C—壳源; MC—壳幔混合源; M—幔源  
 C—Crust resource; MC—crust-mantle mixing source; M—mantle source

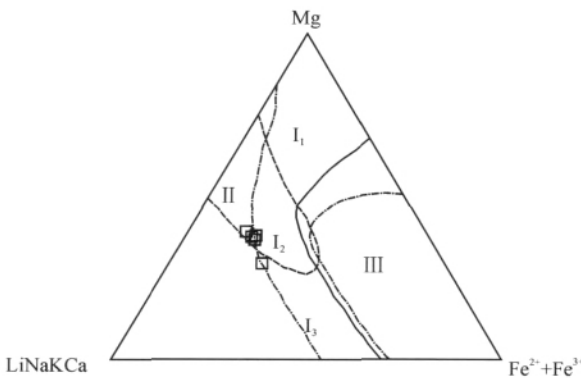


图10 角闪石成因矿物族三角图解(据陈光远等, 1987)

Fig. 10 Triangular diagram of amphiboles genesis from the Tongguanshan pluton (after Chen et al., 1987)  
 岩浆成因区、区域正变质成因区、超变质成因区: I<sub>1</sub>—超基性—基性成因区; I<sub>2</sub>—中—酸性成因区; I<sub>3</sub>—碱性成因区; II—接触交代成因区; III—区域副变质成因区  
 Magma genesis area, regional genesis of orthometamorphism area, ultra-metamorphic genesis area; I<sub>1</sub>—basic-ultrabasic genesis area; I<sub>2</sub>—intermediate-acidic genesis area; I<sub>3</sub>—alkaline genesis area; II—contact metasomatic genesis area; III—regional parametamorphic genesis area

征。

对角闪石的稀土元素分析表明铜官山角闪石总的稀土量比壳型角闪石低,应该属于幔型或壳幔混合型。对斜长石的 Sr、Ba、Fe、Ti 等微量元素分析结果表明,斜长石在结晶过程中曾与不同分异程度的岩浆发生过混合。对斜长石的稀土元素分析结果表明,斜长石后期未受蚀变,大部分样品核、边 REE 总量、 $\delta\text{Eu}$  和 LREE/HREE 值的系统变化指示斜长石在结晶过程中岩浆分异程度的减小。而正常的岩浆演化是朝分异程度增大的方向发展。因此这种情

况可能指示了斜长石结晶过程中发生过不同的分异程度的岩浆混合。

综上所述,我们认为铜官山地区的岩石很可能在初期经历了与不同分异程度的岩浆发生岩浆混合作用,在后期进一步与地壳物质发生相互作用而形成。岩浆混合作用为本区岩石的主要成因。

## 6 结论

(1)安徽沿江地区的铜官山岩体中存在着大量的岩浆不平衡结构,如环带斜长石包裹多个孤岛状的斜长石熔蚀核、针状磷灰石、嵌晶状钾长石结构、角闪石嵌晶结构等。这些结构的存在支持研究区岩浆岩在形成过程中曾发生过岩浆混合作用。

(2)对长石、角闪石电子探针分析表明,斜长石的环带结构是大尺度的震荡环带中夹着小尺度的震荡环带,可能指示了该地区曾发生了一次或多次岩浆混合作用,角闪石主要为壳幔混合成因。

(3)角闪石稀土元素分析也同时表明铜官山岩体角闪石总稀土比壳型角闪石低,应该属于幔型或壳幔混合型。斜长石微量和稀土元素分析表明,大部分样品岩浆分异程度从核部到边部不同,可能指示了斜长石结晶过程中不同分异程度的岩浆的混合。

(4)铜官山岩体主要造岩矿物的主微量元素及显微构造特征,比较明确地反映了该岩体的形成中的物质来源和结晶动力学过程,即壳幔物质的混合交代作用,与前人通过元素同位素手段获得的信息一致。

## 参 考 文 献

- 包志伟,王一先,钱志鑫. 1995. 若干华南花岗岩中长石的稀土元素特征. *广东地质*, 10(4): 6~12.
- 常印佛,刘湘培,吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京:地质出版社.
- 陈光远,孙岱生,殷辉安. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学. 重庆:重庆出版社.
- 邓晋福,叶德隆,赵海玲. 1992. 下扬子地区火山作用、深部过程与盆地形成. 武汉:中国地质大学出版社, 1~184.
- 邓晋福,吴宗黎. 2001. 下扬子克拉通岩石圈减薄事件与长江中下游 Cu-Fe 成矿带. *安徽地质*, 11(2): 86~91.
- 狄永军,赵海玲,张贻全,赵建华,杨龙. 2003. 安徽铜陵地区燕山期花岗岩类岩石中的岩浆混合结构. *北京地质*, 15(1): 12~16.
- 杜杨松,李铨具. 2004. 安徽铜陵岩浆岩中辉长质岩石包体的发现及其地质意义. *高校地质学报*, 10(3): 332~340.
- 樊祺诚,刘若新,马宝林. 1992. 中国上地幔角闪石及其成因意义. *矿物学报*, 12(4): 353~358.
- 姜常义,安三元. 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成及岩石学意义. *矿物岩石*, 4(3): 1~9.
- 赖小东,杨晓勇,孙卫东,曹晓生. 2012. 铜陵舒家店岩体年代学、岩石地球化学特征及成矿意义. *地质学报*, 86(3): 470~485.
- 刘文灿,高德臻,储国正. 1996. 安徽铜陵地区构造变形分析及成矿预测. 北京:地质出版社.
- 马昌前,杨坤光,唐仲华. 1994. 花岗岩类岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析. 武汉:中国地质大学出版社.
- 毛建仁,苏郁香,陈三元. 1990. 长江中下游中酸性侵入岩与成矿. 北京:地质出版社, 1~190.
- Rollison H R. 2000. 岩石地球化学. 杨学明,杨晓勇,陈双喜译. 合肥:中国科学技术大学出版社.
- 唐永成,吴言昌,储国正. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京:地质出版社, 1~351.
- 王强,许继峰,赵振华,熊小林,包志伟. 2003. 安徽铜陵地区燕山期侵入岩的成因及其对深部动力学过程的制约. *中国科学(D辑)*, 33(4): 323~334.
- 吴才来,周珣若. 1996. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究. *岩石矿物学杂志*, 15(4): 299~305.
- 吴才来,陈松永,史仁灯,郝美英. 2003. 铜陵中生代中酸性侵入岩特征及成因. *地球学报*, 24(1): 41~48.
- 吴平霄,吴金平,李才伟,肖文丁. 1998. 斜长石韵律环带的结晶速率方程及其动力学机制. *岩石学报*, 14(3): 388~394.
- 吴言昌,曹奋扬,常印佛. 1999. 初论安徽沿江地区成矿系统的深部构造岩浆控制. *地学前缘*, 6(2): 285~295.
- 邢凤鸣,徐祥. 1995. 安徽沿江地区中生代岩浆岩的基本特点. *岩石学报*, 11(4): 409~422.
- 邢凤鸣,徐祥. 1996a. 铜陵地区高钾钙碱系列侵入岩. *地球化学*, 25(1): 29~38.
- 邢凤鸣,徐祥. 1996b. AFC 混合与铜陵地区侵入岩的分因. *岩石矿物学杂志*, 15(1): 10~20.
- 邢凤鸣. 1997. 安徽省铜陵地区侵入岩成因的实验研究. *中国区域地质*, 16(3): 267~274.
- 邢凤鸣. 1998. 安徽沿江地区岩浆岩的深部构造信息. *中国区域地质*, 17(2): 195~200.
- 谢应雯,张玉泉. 1990. 横断山区花岗岩类中角闪石的标型特征及其成因意义. *矿物学报*, 10(1): 35~45.
- 谢建诚,杨晓勇,肖益林,杜建国,孙卫东. 2012. 铜陵矿集区中生代侵入岩成因及成矿意义. *地质学报*, 86(3): 423~459.
- 杨学明,林文通. 1988. 铜官山火成杂岩体成岩机理研究. *地质论评*, 34(1): 25~35.
- 张德全,徐洪林. 2002. 长江中下游花岗岩类地质地球化学对比研究. *华南地质与矿产*, 3: 66~77.
- 周珣若,任进. 1994. 长江中下游中生代花岗岩. 北京:地质出版社.
- Anderson A T, Davis A M, Lu F. 2000. Evolution of Bishop tuff rhyolitic magma based on melt and magnetite inclusions and zoned phenocrysts. *J. Petrol.*, 41: 449~473.
- Baxter S, Feely M. 2002. Magma mixing and mingling textures in granitoids: examples from the Galway Granite, Connemara, Ireland. *Mineralogy and Petrology*, 76: 63~74.
- Chen J F, Foland K A, Zhou T X. 1985. Mesozoic granitoids of the Yangtze fold belt, China: isotopic constrains on the magma sources. In: Wu L R, ed. *The Crust—the Significance of Granitic Gneisses in Lithosphere*. Athens: Theophrastus, 217~237.
- Chen J F, Jahn B. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284(1~2): 101~133.
- Chen J F, Yan J, Xie Z, Xu X, Xing F. 2001. Nd and Sr isotopic compositions of igneous rocks from the Lower Yangtze region in eastern China: constraints on sources. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26(9~10): 719~731.
- Cherniak D J. 2001. Ba diffusion in feldspar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(9): 1641~1650.
- Deer W A, Howice R A, Zussman J. 1963. *Rocking Forming Minerals: Bouble-chain Silicates*. Oxford, UK: Alden Press.
- Ginibre C, Worner G, Kronz A. 2002. Minor- and trace-element zoning in plagioclase: implications for magma chamber processes at Parinacota volcano, northern Chile. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143: 300~315.
- Hibbard M J. 1981. The magma mixing origin of mantled feldspars. *Mineral. Petrol.* 76: 158~170.
- Hibbard M J. 1991. Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid systems. *Developments in Petrology*, 13: 431~444.
- Leake B E. 1978. Nomenclature of amphiboles. *The Canadian Mineralogist*, 16: 501~520.
- Leake B E. 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219~246.
- Muller A, Breiter K, Seltmann R, Pecskey Z. 2004. Quartz and feldspar zoning in the eastern Erzgebirge volcano-plutonic complex (Germany, Czech Republic): evidence of multiple magma mixing. *Lithos*, 80: 201~227.
- Pearce T H, Kolisnik A M. 1990. Observation of plagioclase zoning using interference imaging. *Earth Science Reviews*, 29(1~4): 9~26.
- Rock N M S. 1987. The nature and origin of lamprophyres: an overview. *Geological Society, London, Special Publication*, 30: 191~226.
- Singer B S, Dungan M A, Layne G D. 1995. Textures and Sr, Ba,

Mg, Fe, K and Ti compositional profiles in volcanic plagioclase:  
clues to the dynamics of calc-alkaline magma chambers. *Am.*

*Mineral.*, 80:776~798.

## Mineralogical and Geochemical Characteristic of the Tongguanshan Pluton and Significance of Magma Crystallization Kinetics

ZHAO Chengcheng<sup>1)</sup>, YANG Xiaoyong<sup>1)</sup>, FENG Min<sup>1)</sup>, SUN Weidong<sup>2)</sup>,  
HONG Changchun<sup>3)</sup>, SUN Jian<sup>3)</sup>, HU Junjie<sup>3)</sup>, TANG Shuping<sup>4)</sup>

1) *School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026;*

2) *CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry,  
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640;*

3) *No. 332 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration of Anhui Province,  
Huangshan, Anhui, 245000;*

4) *Fenghuangshan Copper Mine, Tongling Non-Ferrous Company, Tongling, Anhui, 244000*

### Abstract

This study presents detailed microscopic observations for the Tongguanshan pluton distributed along the Yangtze River region in south Anhui Province. Electron Microprobe and LA-ICP-MS techniques were used to analyze major and trace elements of typical minerals such as plagioclase, hornblende and sphene. Microscopic identification shows a large number of magma unbalanced structures occur in the Tongguanshan pluton, for example, embedded crystal structure of plagioclases and hornblendes, and acicular apatites. These phenomena reveal that the Tongguanshan pluton had experienced one or several times of magma mixing during its formation. EPMA results show that the plagioclase composition zoning is an oscillatory one and the large-scale zoning may represent a large-scale magmatic activity. Diagrams of  $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO/NaO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  and  $\text{Mg-(Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})\text{-LiNaKCa}$  of hornblende suggest that amphiboles of the Tongguanshan pluton are likely crust-mantle in origin. Using LA-ICP-MS method, trace elements and REE analyses for main rock forming minerals indicate that amphiboles may be mantle or crust-mantle mixing sources and plagioclase may form from the mixing of magma of different magmatic differentiation. Our study positively reflects that during the formation of the Tongguanshan pluton, magma source and crystallization kinetic process, i. e. mixing metasomatism of crust and mantle, coincide with previous data using elements and isotopic means.

**Key words:** Tongguanshan pluton; unbalanced structure; plagioclase zoning; amphibole; magma mixing