

文章编号: 1000-6524(2004)02-0109-08

## 安徽铜陵地区中生代幔源岩浆底侵作用 ——来自矿物巨晶和岩石包体的证据

杜杨松<sup>1,2</sup>, 秦新龙<sup>2</sup>, 李铨具<sup>3</sup>

(1. 岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 韩国忠南大学 地质系, 大田 305\_764)

**摘要:** 安徽铜陵地区中生代的岩浆岩体中产有多种矿物巨晶和岩石包体。笔者对产于曹山辉石闪长玢岩和鸡冠石花岗闪长岩中的辉石和角闪石巨晶及其堆积岩或堆积晶进行了详细的岩相学和矿物化学研究, 并在此基础上估算了矿物平衡结晶的温压条件, 讨论了安徽铜陵地区中生代幔源岩浆底侵作用问题。研究表明, 铜陵地区大约在140 Ma以前发生了碱性橄榄玄武质岩浆的底侵作用, 辉石巨晶和角闪石巨晶及其堆积晶是由底侵的碱性橄榄玄武质岩浆在28~33 km深处的深位岩浆房中与下地壳发生同化混染作用形成的中基性岩浆经结晶分异作用形成的, 而辉石堆积岩是由中基性岩浆在19~21 km深处的浅位岩浆房中与中地壳的浅变质岩系发生同化混染作用形成的中基性岩浆经结晶分异作用形成的。

**关键词:** 岩浆底侵作用; 矿物巨晶; 岩石包体; 中生代; 安徽铜陵

**中图分类号:** P588.1; P542+.5

**文献标识码:** A

## Mesozoic mantle derived magma underplating in Tongling, Anhui Province: evidence from megacrysts and xenoliths

DU Yang\_song<sup>1,2</sup>, QIN Xin\_long<sup>2</sup> and Lee Hyunkoo<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Lithosphere Tectonics & Prospecting, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. Faculty of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Department of Geology, Chungnan National University, Taejon 305\_764, Republic of Korea)

**Abstract:** The Caoshan and Jiguanshi intrusions composed of pyroxene dioritic porphyrite and granodiorite are exposed in the Shizishan orefield, Tongling, Anhui Province, eastern China. Based on new petrographic observations and microprobe analyses of pyroxene and hornblende megacrysts and cumulates from the intrusions, in combination with mineral crystallization temperature and pressure calculations, the authors found some evidence for the Mesozoic mantle-derived magma underplating in this area. The petrographic and mineralogical data presented in this paper suggest the existence of alkali-olivine basalt magma underplating before 140 Ma  $\pm$  in this area. The formation of the pyroxene megacrysts and the hornblende megacrysts as well as cumulates resulted from crystallization differentiation of intermediate-basic magma in the deep magma chamber at the depths of 28 km to 33 km through the assimilation of the underplated alkaline basaltic magma with the lower sima crust. The formation of the pyroxene cumulates resulted from the crystallization differentiation of intermediate magma

收稿日期: 2003-11-10; 修订日期: 2004-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40272034, 40133020); 教育部科学技术研究重点资助项目(03178); 韩国科学与工程基金资助项目(KOSEF\_20005\_131\_03\_02)

作者简介: 杜杨松(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩浆岩(火山岩)及其岩石包体方面的研究工作, E-mail: ydsu@cugb.edu.cn。

in the shallow magma chamber at the depths of 19 km to 21 km, through the assimilation of the intermediate basic magma with the epimetamorphic rocks.

**Key words:** magma underplating; megacrysts; xenoliths; Mesozoic; Tongling in Anhui Province

作为壳幔相互作用的主要方式之一,幔源岩浆的底侵作用与盆地形成、地壳增生、岩浆演化和流体迁移以及区域变质和区域成矿等多种地质作用过程密切相关,因而一直受到广大地球科学工作者的重视(杜杨松等, 2003)。除区域地质调查和野外直接观察外,前人主要利用地震学、岩石学、地球化学和地热学方法,特别是包体岩石学和地球化学方法研究幔源岩浆底侵作用。从已经发表的文献资料来看,在利用包体岩石学和地球化学方法研究幔源岩浆底侵作用方面,前人的工作主要集中在玄武岩中的麻粒岩包体上(周新民等, 1992; 徐夕生等, 1995; 樊祺诚等, 1996, 1998, 2001; 于津海等, 1998, 2002; Sachs *et al.*, 2000; Zheng Jianping *et al.*, 2001),而对中-酸性或中基性岩浆岩中的岩石包体涉及较少(邵济安等, 1999, 2000)。

安徽铜陵地区地处扬子岩浆-成矿带中段,中生代岩浆活动强烈,形成了大量的侵入岩。在这些侵入岩中,特别是在曹山辉石闪长玢岩和鸡冠石花岗

闪长岩中,产有多种矿物巨晶及其堆积岩或堆积晶包体(图1)。曹山岩体和鸡冠石岩体均位于铜陵地区著名的狮子山铜、金矿田内。其中曹山岩体主要由石英二长闪长岩和辉石二长闪长岩组成,其边缘相岩石为辉石闪长玢岩。该岩体的形成时代与毗邻的白芒山岩体基本一致,后者的黑云母 Ar-Ar 年龄为  $136.6 \pm 1.1$  Ma(吴才来等, 1996)。辉石闪长玢岩具斑状(多斑)结构,斑晶成分主要为斜长石(含量约为 50%),次为辉石(8%~10%),角闪石(4%~5%)和黑云母(1%~2%)、钾长石(约 1%)及极少量的石英;基质几乎均由细-微晶针柱状斜长石组成。副矿物有磁铁矿(1%~2%)和少量磷灰石。鸡冠石岩体为花岗闪长岩,具半自形粒状结构,主要由石英(28%~29%)、斜长石(44%~45%)、钾长石(16%~17%)和角闪石(3%~4%)组成。岩体的形成时代与毗邻的胡村岩体基本一致,后者的黑云母 Ar-Ar 年龄为  $139.8 \pm 0.8$  Ma(吴才来等, 1996)。

笔者从民采矿井爆破碎石和钻孔岩芯中的辉石

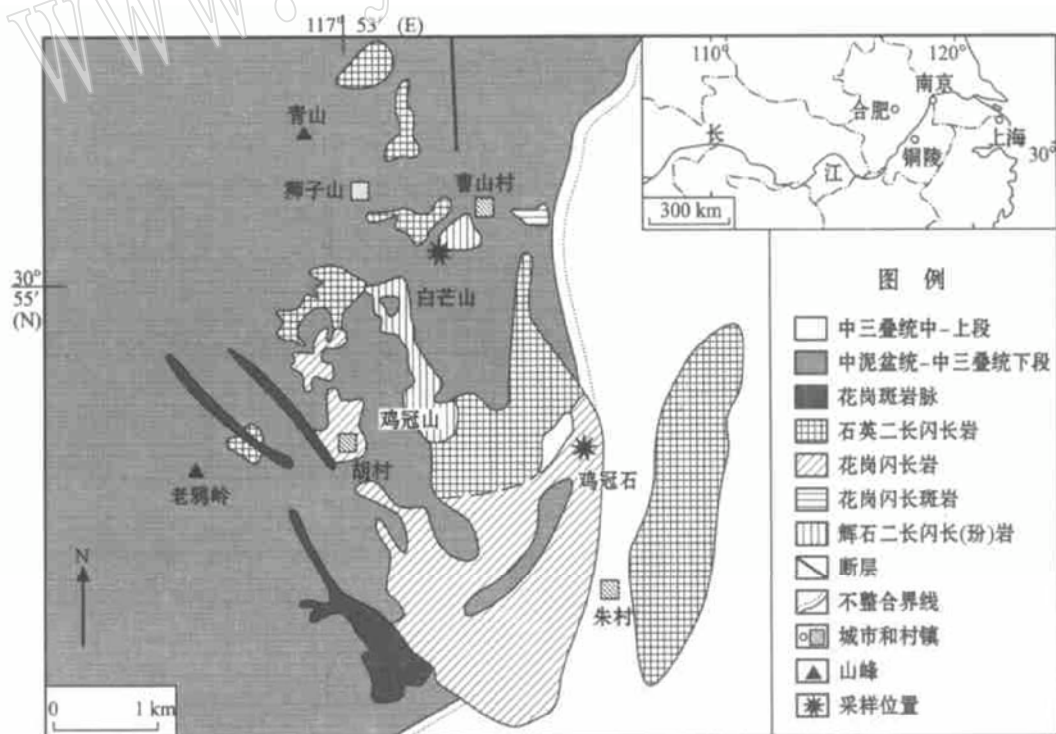


图1 铜陵狮子山矿区地质略图

Fig. 1 Geological map of the Shizishan orefield, Tongling

闪长玢岩以及采矿坑道爆破碎石中的花岗闪长岩内采集了大量辉石和角闪石巨晶及其堆积岩或堆积晶包体。本文主要论述这些辉石和角闪石巨晶及其堆积岩或堆积晶的特征,并在此基础上讨论安徽铜陵地区中生代幔源岩浆底侵作用问题。

## 1 岩相学特征

### 1.1 辉石和角闪石巨晶

见于曹山辉石闪长玢岩中。辉石巨晶大小  $0.6\text{ cm} \times 0.7\text{ cm} \sim 0.8\text{ cm} \times 1.0\text{ cm}$ , 内部裂纹发育(图 2a), 有些巨晶的外部边缘已碎裂成小块, 其间的裂隙被寄主岩的矿物充填。角闪石巨晶大小  $0.5\text{ cm} \times 0.8\text{ cm} \sim 1.4\text{ cm} \times 3.1\text{ cm}$ , 与寄主岩界线清楚。常能见到角闪石巨晶边缘的熔蚀(图 2b)或破碎蚀变现象。

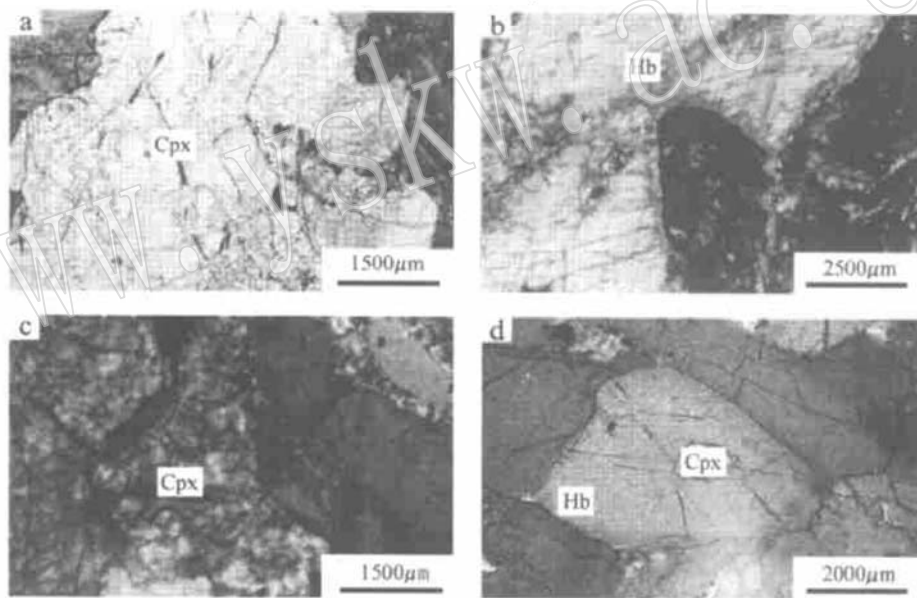


图 2 矿物巨晶和岩石包体的显微照片(正交偏光)

Fig. 2 Microphotos of megacrysts and xenoliths(cross polarized)

a—辉石巨晶, 内部裂纹发育, 边缘熔蚀明显, 曹山; b—角闪石巨晶, 边缘熔蚀明显, 曹山; c—辉石堆积岩, 曹山;

d—角闪石堆积晶, 具镶嵌结构, 辉石在角闪石中呈残留晶出现, 且无扭折和出溶现象, 鸡冠石

a—clinopyroxene megacryst with well developed internal cracks and a resorption border, Caoshan; b—hornblende megacryst with a resorption border, Caoshan; c—pyroxene cumulate, Caoshan; d—hornblende cumulate with mosaic texture, clinopyroxene with no kink bands or exsolutions occurs as a residual crystal in a hornblende, Jiguanshi

$1.9\text{ cm} \times 3.6\text{ cm}$ , 与主岩接触带界线清楚, 附近的角闪石常发生绿帘石化或黑云母化。

## 2 矿物化学和平衡温压估算

利用中国地质大学(北京) Superprobe 733 型电

### 1.2 辉石堆积岩

主要分布在曹山辉石二长闪长岩及辉石闪长玢岩中, 主要矿物为单斜辉石(80%~90%), 次为角闪石(5%~15%), 金属矿物为磁铁矿和黄铁矿, 有时可见到粗粒磷灰石。岩石具堆积结构, 局部为镶嵌结构。辉石堆积岩包体  $0.9\text{ cm} \times 1.2\text{ cm} \sim 1.6\text{ cm} \times 3.4\text{ cm}$ , 与寄主岩间的界线清楚, 有时可见到包体的边缘被寄主岩浆冲碎(图 2c)。

### 1.3 角闪石堆积晶

在本区的中-酸性和中基性岩体中均有发现, 在鸡冠石花岗闪长岩和曹山辉石闪长玢岩中尤为丰富。主要矿物为角闪石(90%~95%), 另有少量磷灰石(2%~6%)和辉石(1%~2%), 副矿物主要为磁铁矿。辉石在角闪石中呈残留晶出现, 无扭折和出溶现象。岩石具堆积结构, 局部为镶嵌结构(图 2d)。角闪石堆积晶包体大小为  $1.1\text{ cm} \times 1.4\text{ cm} \sim$

子探针分析仪, 在加速电压 15 kV、电流 0.02 mA 的实验条件下, 对辉石和角闪石巨晶及其堆积岩或堆积晶中的辉石和角闪石的成分进行了分析(表 1)。各元素的标样均采用天然矿物。辉石和角闪石的阳离子系数分别按氧6和氧23求出, 其三价铁则分别

表1 矿物电子探针分析结果( $w_B/\%$ )及晶体化学计算结果

Table 1 Electron microprobe analyses of minerals and crystal chemistry data

矿物 产地	辉石				曹山				鸡冠石				角闪石				角闪石					
	曹山		辉石		鸡冠石		角闪石		曹山		鸡冠石		角闪石		角闪石		曹宁		辉南		亚利桑那	
	产状	巨晶	巨晶	巨晶	产状	巨晶	巨晶	巨晶	产状	巨晶	巨晶	巨晶	产状	巨晶	巨晶	巨晶	产状	巨晶	巨晶	巨晶	巨晶	
样号	7-8	2-11	12-6	3-2-1	3-2-6	HA21-2	H11-3-2	7-3	7-10	7z-4	3-1-2	hb-2	HA1-2	HA8-3	HA21-4	H11-3-1	B2-1	1-4*	6-7*	8-9*		
SiO <sub>2</sub>	52.01	50.76	48.68	50.60	50.16	48.57	49.37	41.78	40.14	39.48	41.20	41.15	49.80	50.00	40.83	42.25	39.66	39.74	40.18	40.78		
TiO <sub>2</sub>	0.39	0.56	1.39	0.79	0.63	1.25	0.86	3.83	2.57	2.32	2.89	2.61	0.67	1.35	2.40	2.91	2.91	2.99	6.18	4.32		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.38	3.64	4.27	4.37	4.74	5.32	5.93	11.39	13.73	14.34	14.17	13.94	5.18	5.27	13.57	14.39	14.37	14.25	15.20	15.26		
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.23	0.02	0.16			0.15		0.01	0.27				0.02			0.02		0.08	0.06			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>																		5.96				
FeO	6.88	6.53	7.81	7.70	7.49	7.28	7.12	12.93	12.21	12.57	13.13	13.95	12.76	12.93	13.09	11.29	12.37	7.41	10.14	10.14		
NiO		0.10				0.44			0.13					0.21	0.03			0.01				
MnO	0.21	0.11	0.11	0.18	0.16	0.35	0.17	0.36	0.15	0.05	0.01	0.03	0.23	0.95	0.14	0.05	0.34	0.14	0.05	0.09		
MgO	15.33	14.56	15.05	13.93	14.32	12.67	12.48	12.65	12.89	12.81	12.52	11.46	15.55	14.91	12.06	12.66	12.44	13.29	11.92	12.67		
CaO	20.92	23.06	21.84	22.64	22.88	21.87	23.34	11.34	11.95	11.56	11.66	11.06	11.35	10.74	11.29	12.29	11.75	10.88	9.78	10.36		
Na <sub>2</sub> O		0.33	0.47	0.54	0.32	0.18	0.66	2.44	2.20	2.18	1.93	2.54	0.64	0.84	1.68	1.93	2.40	2.15	3.00	2.96		
K <sub>2</sub> O		0.05	0.14					1.35	1.49	1.16	1.17	1.25	0.59	0.67	1.08	1.14	0.80	1.40	1.55	1.53		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.37	0.25				0.65			0.43	0.31	0.45			0.53	0.29			0.09				
总和	98.35	99.57	99.93	100.89	100.70	98.73	99.93	98.08	97.33	97.30	98.68	98.30	97.24	98.40	96.46	98.93	97.04	98.39	95.06	98.11		
				O=6					O=23													
Si	1.954	1.878	1.796	1.854	1.839	1.829	1.845	6.214	5.986	5.901	6.052	6.115	7.197	7.174	6.167	6.152	5.923	5.886	5.971	5.909		
Ti	0.011	0.016	0.039	0.022	0.017	0.024	0.036	0.428	0.288	0.261	0.319	0.292	0.073	0.146	0.319	0.272	0.327	0.333	0.476	0.684		
Al	0.105	0.159	0.186	0.189	0.205	0.259	0.238	1.966	2.413	2.526	2.453	2.441	0.882	0.891	2.476	2.410	2.529	2.488	2.633	2.635		
Cr	0.007	0.001	0.005				0.005	0.001	0.032				0.002		0.002			0.009		0.007		
Fe <sup>3+</sup>		0.076	0.176	0.105	0.105	0.083	0.010		0.096	0.196			0.598	0.599			0.069	0.250				
Fe <sup>2+</sup>	0.216	0.126	0.068	0.131	0.124	0.137	0.235	1.608	1.427	1.391	1.613	1.734	0.944	0.978	1.378	1.653	1.476	1.304	1.242	1.247		
Mn	0.007	0.003	0.003	0.006	0.005	0.005	0.011	0.045	0.019	0.006	0.001	0.004	0.028	0.115	0.006	0.018	0.043	0.018	0.011	0.006		
Mg	0.858	0.803	0.828	0.761	0.783	0.689	0.717	2.805	2.866	2.855	2.742	2.539	3.350	3.189	2.755	2.709	2.770	2.935	2.765	2.614		
Ca	0.842	0.914	0.863	0.889	0.899	0.926	0.890	1.811	1.915	1.862	1.844	1.766	1.769	1.663	1.924	1.832	1.888	1.740	1.628	1.542		
Na		0.024	0.034	0.038	0.023	0.047	0.013	0.705	0.638	0.636	0.552	0.734	0.180	0.235	0.547	0.493	0.698	0.622	0.842	0.856		
K			0.002	0.007				0.257	0.284	0.223	0.220	0.238	0.109	0.123	0.212	0.209	0.153	0.267	0.286	0.291		
Al <sup>IV</sup>	0.046	0.122	0.186	0.146	0.161	0.171	0.155	1.706	2.014	2.099	1.948	1.885	0.803	0.826	1.833	1.848	2.077	2.114	2.029	2.091		
Al <sup>VI</sup>	0.059	0.037		0.043	0.044	0.088	0.083	0.290	0.399	0.427	0.505	0.556	0.079	0.065	0.643	0.562	0.452	0.374	0.604	0.544		
种属	普通辉石	次透辉石	普通辉石	次透辉石	次透辉石	次透辉石	次透辉石	非闪石	非闪石	非闪石	非闪石	非闪石	非闪石	非闪石	非闪石	非闪石	非闪石	非闪石	非闪石	非闪石	非闪石	
t <sub>QZ</sub> /℃	1152	1200	1195	1228	1242	1272	1291	985	900	880	940	905	605	725	895	946	945	948	>1000	>1000		
t <sub>EL</sub> /℃																						
p <sub>QZ</sub> /kPa	1.9	6.3	5.8	8.7	10.0	12.7	14.4															
p <sub>EL</sub> /kPa								6.5	8.5	9.0	8.7	8.6	1.2	1.2	8.4	8.8	9.0	8.5	8.6	9.1		
D/km	6.3	20.8	19.2	28.9	33.2	42.0	47.7	21.4	28.0	29.7	28.6	28.4	3.9	4.1	27.8	29.0	29.7	28.1	28.4	30.0		

D 为根据压力计算的深度; \* 数据引自池际尚(1987), 其中曹宁为4个样品平均值, 辉南和亚利桑那均为2个样品平均值。

按电价差值法(郑巧荣, 1984)以及平均电价差法(叶慧文, 1992)求出(表1)。为便于对比,表1还列出了中国东部典型地区碱性橄榄玄武岩中角闪石巨晶的电子探针分析(池际尚, 1987)及其矿物晶体化学式计算结果。

各类样品中的辉石均富钙(CaO含量为20.92%~23.34%),属钙辉石亚族中的次透辉石和普通辉石( $\text{Wo}_{44\sim 53}\text{En}_{39\sim 47}\text{Fs}_{4\sim 13}$ )。从矿物化学成分来看,除鸡冠石角闪石堆积晶中的辉石相对富铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量为5.32%~5.93%)、贫硅( $\text{SiO}_2$ 含量为48.57%~49.37%)和贫镁(MgO含量为12.48%~12.67%)及曹山辉石闪长玢岩中的细粒斑晶辉石相对贫铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量为2.38%)、富硅( $\text{SiO}_2$ 含量为52.01%)和富镁(MgO含量为15.33%)外,其余样品均与中国东部典型地区碱性橄榄玄武岩中的辉石斑晶成分相近(池际尚, 1987)。在单斜辉石的 $\text{Al}^{\text{VI}}-\text{Al}^{\text{IV}}$ 图解(邱家骧等, 1991)中,除曹山辉石闪长玢岩中的细粒斑晶辉石外,其余样品均落入Warren (1979)圈定的玄武岩中斑晶及微晶单斜辉石区中,其中鸡冠石角闪石堆积晶中的辉石还同时落入邱家骧等(1987)圈定的高压相单斜辉石区中(图3)。

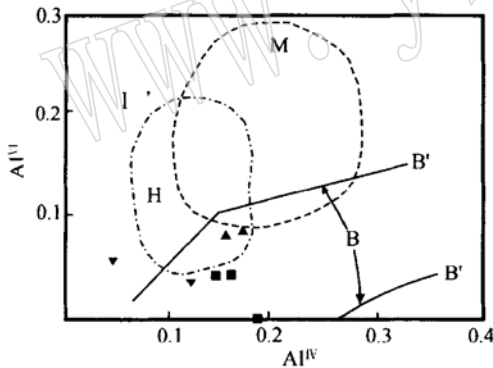


图3 单斜辉石的 $\text{Al}^{\text{VI}}-\text{Al}^{\text{IV}}$ 关系图

[据邱家骧等(1991)简化]

Fig. 3  $\text{Al}^{\text{VI}}-\text{Al}^{\text{IV}}$  diagram for clinopyroxenes (simplified from Qiu Jiaxiang *et al.*, 1991)

B(B' - B')为玄武岩中斑晶及微晶单斜辉石(低压相)范围;M为中压相巨晶范围,而H为高压相范围;▼—曹山辉石闪长玢岩中的细粒和中粒斑晶辉石;■—曹山辉石堆积岩中的辉石和巨晶辉石;▲—鸡冠石角闪石堆积晶中的残留晶辉石

B(B' - B') is lower-pressure phase phenocryst and microlite clinopyroxenes in basalt; M is medium-pressure phase megacryst clinopyroxenes, and H is high-pressure phase clinopyroxenes; ▼—fine and medium-grained phenocryst pyroxenes from the Caoshan pyroxene dioritic porphyritic pluton; ■—pyroxenes in the pyroxene cumulates and megacryst pyroxenes from the Caoshan pluton; ▲—residual pyroxenes in the hornblende cumulates from the Jiguanshi pluton

各类样品中的角闪石均富钙和镁(CaO含量为10.74%~12.29%, MgO含量为11.46%~15.55%)。根据最新的角闪石命名法(Leake *et al.*, 1997; IMA\_CNMMN角闪石专业委员会, 2001),除鸡冠石花岗闪长岩中的角闪石( $\text{Na} + \text{K})_{\text{A}} < 0.50$ 为镁角闪石外,其余样品中的角闪石 $\text{Ca}_{\text{B}} \geq 1.50$ , ( $\text{Na} + \text{K})_{\text{A}} \geq 0.50$ ,  $\text{Si} > 5.5$ 而 $< 6.5$ ,  $\text{Ti} < 0.5$ ,  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) > 0.5$ ,  $\text{Al}^{\text{VI}} > \text{Fe}^{3+}$ ,属钙闪石组中的韭闪石。有意义的是,中国东部典型地区碱性橄榄玄武岩中的角闪石巨晶也都为韭闪石。在角闪石的Ti-Al图解(图4)上,除鸡冠石花岗闪长岩中的角闪石外,其余各类样品中的角闪石(包括中国东部典型地区碱性橄榄玄武岩中的巨晶角闪石)均落入幔源角闪石成分区中。

就辉石的成分来看,鸡冠石角闪石堆积晶中的熔蚀残留晶辉石相对富铝富钛而贫镁贫硅,曹山辉石闪长玢岩中的中粒斑晶辉石,特别是细粒斑晶辉石,相对贫铝贫钛而富镁富硅,而曹山辉石堆积岩和巨晶辉石基本上介于两者之间。就角闪石的成分来看,曹山辉石闪长玢岩中的中粒斑晶角闪石,特别是鸡冠石花岗闪长岩中的角闪石贫铝富硅,而曹山和鸡冠石的角闪石堆积晶和巨晶都富铝贫硅。笔者利

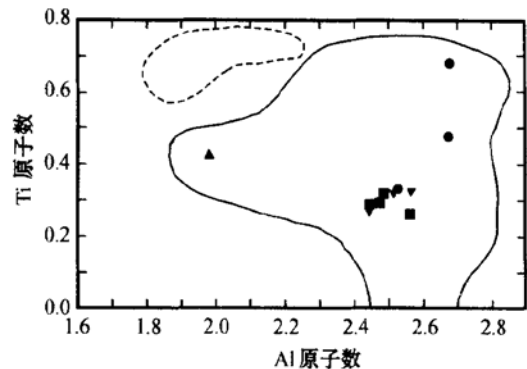


图4 角闪石Ti-Al关系图(据Best, 1974)

Fig. 4 Ti-Al diagram for hornblende (after Best, 1974)

虚线为浅部地壳侵入体中钛角闪石成分范围,实线为幔源角闪石成分范围;▲—曹山辉石闪长玢岩中的中粒斑晶角闪石;■—曹山巨晶角闪石和角闪石堆积晶中的角闪石;▼—鸡冠石角闪石堆积晶中的角闪石和巨晶角闪石;●—普宁、辉南和亚利桑那巨晶角闪石  
dotted line area represents Ti-hornblende in the intrusion in shallow crust, actual line represents mantle-derived hornblende; ▲—medium-grained phenocryst hornblende from the Caoshan pyroxene dioritic porphyritic pluton; ■—megacryst hornblende and hornblende in the hornblende cumulates from the Caoshan pyroxene dioritic porphyritic pluton; ▼—hornblende in the hornblende cumulates and megacryst hornblende from the Jiguanshi granodioritic pluton; ●—megacryst hornblende from Puning, Huinan and Arizona



用邱家骧等(1987)的单斜辉石中Al地质温度计和地质压力计以及Ernst等(1998)的角闪石中的Al和Ti地质温度计和地质压力计等方法对本区辉石和角闪石巨晶及其堆积岩或堆积晶形成的温压条件进行了估算,结果在表1中分别用 $t_{QZ}$ 、 $p_{QZ}$ 和 $t_{EL}$ 、 $p_{EL}$ 表示。为了便于比较,采用相同的方法对中国东部典型地区碱性橄榄玄武岩中的角闪石巨晶形成的温压条件也进行了估算,结果如表1。从表列资料可以看出,鸡冠石角闪石堆积晶中的熔蚀残留晶辉石结晶的温度约为1270~1290℃,压力约为12.7~14.4 kPa,相当于42~48 km深;鸡冠石花岗闪长岩中的角闪石结晶的温度约为605~725℃,压力约为1.2 kPa,相当于4 km深;曹山辉石闪长玢岩中的细粒斑晶辉石的结晶温度约为1150℃,压力约为1.9 kPa,相当于6 km深;曹山辉石闪长玢岩中的中粒斑晶辉石和角闪石以及曹山辉石堆积岩中的辉石的结晶温度约为985~1200℃,压力约为5.8~6.5 kPa,相当于19~21 km深;其余样品中的辉石和角闪石结晶的温度为880~1240℃,压力为8.4~10.0 kPa,相当于28~33 km深,与中国东部典型地区碱性橄榄玄武岩中的辉石和角闪石巨晶的结晶温压条件一致(池际尚,1987)。

### 3 讨论和结论

唐永成等(1998)对铜陵地区鸡冠石岩体(相近岩体黑云母的Ar-Ar年龄为139.8±0.8 Ma,吴才来等,1996)中的角闪石岩和辉石岩(可能就是角闪石堆积晶和辉石堆积岩)等岩石包体进行了锆同位素分析,获得Rb-Sr等时线年龄约为140 Ma,锆同位素初始比值为0.7067~0.7069。邢凤鸣等(1996,1997)通过比较系统的岩石学、岩石化学、同位素地球化学和实验岩石学研究,认为铜陵地区的侵入岩是在下地壳条件下由幔源高钾碱性玄武岩岩浆同化太古宙麻粒岩相下地壳酸性组分而成的演化岩浆,在分离结晶出辉石、角闪石、磁铁矿和磷灰石后,侵入地壳浅部结晶形成的。

安徽铜陵地区的辉石堆积岩和角闪石堆积晶都具有典型的堆积结构,其边缘常被寄主岩冲碎。辉石和角闪石巨晶的边缘常被熔蚀,有时其外部边缘已碎裂成小块,其间的裂隙被寄主岩矿物充填。角闪石堆积晶中的角闪石有一定蚀变,在与寄主岩的接触带附近蚀变尤为强烈。这些现象都表明它们是

在寄主岩之前形成的。角闪石堆积晶中的辉石在角闪石中呈残留晶出现,且无扭折和出溶现象,表明这些辉石是在堆晶角闪石结晶之前从玄武岩浆中结晶出来的,而不是由地幔岩解体形成的。除曹山辉石闪长玢岩中的细粒斑晶辉石和鸡冠石花岗闪长岩中的角闪石外,其余各类样品中的辉石和角闪石大多与中国东部碱性橄榄玄武岩中的辉石斑晶和角闪石巨晶成分相近。在单斜辉石的Al<sup>VI</sup>-Al<sup>IV</sup>图上,除曹山辉石闪长玢岩中的细粒斑晶辉石外,其余样品点都落入(碱性橄榄)玄武岩中斑晶及微晶单斜辉石区中,而鸡冠石角闪石堆积晶中的熔融残留晶辉石还同时落入高压相单斜辉石区中。在角闪石的Ti-Al图解上,除鸡冠石花岗闪长岩中的角闪石外,其余各类样品中的角闪石(包括中国东部典型地区碱性橄榄玄武岩中的巨晶角闪石)均落入幔源角闪石成分区中。此外,本区鸡冠石角闪石堆积晶中的熔蚀残留晶辉石结晶的温度约为1270~1290℃,深度为42~48 km;鸡冠石花岗闪长岩中的角闪石结晶的温度约为605~725℃,深度约为4 km;曹山辉石闪长玢岩中的细粒斑晶辉石的结晶温度约为1150℃,深度约为6 km;曹山辉石闪长玢岩中的中粒斑晶辉石和角闪石以及曹山辉石堆积岩中的辉石的结晶温度约为985~1200℃,深度为19~21 km;其余样品中的辉石和角闪石结晶的温度为880~1240℃,深度为28~33 km,这与周珣若等(1993)和吴才来等(1997)估算的白芒山辉石二长闪长岩中的辉石堆积岩和角闪石堆积岩的矿物平衡结晶条件是一致的(最高温度达1130℃,最大深度达31 km)。

已有的深地震反射剖面资料显示,安徽沿江地区在伸展构造环境下于晚中生代发生过强烈而复杂的多层次岩浆底侵作用(吕庆田等,2003)。同时,从地球物理和区域地质资料(陈沪生等,1988;吕庆田等,2003)来看,安徽沿江地区的莫霍面最大深度为32 km左右,最小深度约30~31 km。

对前述资料进行综合分析可以认为,三叠纪时扬子和华北陆块间的陆-陆碰撞及后期的大陆伸展,使区域构造体制从早期(T<sub>2</sub>~T<sub>3</sub>)挤压经中期松弛(J<sub>1</sub>~J<sub>2</sub>)转换为后期(J<sub>3</sub>~K<sub>1</sub>)拉张和断陷(李曙光,1992),引发区域碱性橄榄玄武岩浆活动。碱性橄榄玄武岩浆起源于上地幔(深度至少达到42~48 km),大约在140 Ma之前底侵于28~33 km深处,构成深位岩浆房。此后,底侵的碱性橄榄玄武岩浆与下地壳硅镁层(陈沪生,1988)发生同化混染作用,

形成中基性岩浆。这种中基性岩浆一方面在深位岩浆房中发生结晶分异作用, 形成辉石巨晶和角闪石巨晶及其堆积晶, 另一方面又可以因构造脉动而上升, 在 19~21 km 深处积聚, 并与中地壳的浅变质岩系(陈沪生, 1988) 发生同化混染作用, 形成浅位中性岩浆房。当浅位岩浆房中的中性岩浆因构造脉动上升侵位到 6 km 深处时, 可以结晶形成辉石闪长玢岩(包括其中的细粒辉石斑晶)。如果浅位岩浆房中的中性岩浆发生结晶分异作用则可以形成辉石堆积岩或辉石斑晶, 而由中性岩浆结晶分异形成的花岗闪长质岩浆上升侵位到 4 km 深处时可以结晶形成花岗闪长岩(包括其中的角闪石)。

综上所述, 可以得到以下结论:

(1) 铜陵地区大约在 140 Ma 以前发生了碱性橄榄玄武质岩浆的底侵作用。

(2) 铜陵地区的辉石巨晶和角闪石巨晶及其堆积晶是由底侵的碱性橄榄玄武岩浆在 28~33 km 深处的深位岩浆房中与下地壳发生同化混染作用形成的中基性岩浆经结晶分异作用形成的, 而辉石堆积岩是由中基性岩浆在 19~21 km 深处的浅位岩浆房中与中地壳的浅变质岩系发生同化混染作用形成的中性岩浆经结晶分异作用形成的。

**致 谢** 本项研究由中国国家自然科学基金项目和教育部科学技术研究重点项目以及韩国科学与工程基金资助; 野外工作期间, 储国正博士以及张成火和刘光华高级工程师提供了大力支持; 论文成文期间, 王德滋院士、周新民教授和樊祺诚研究员给予了热情指导, 在此一并致谢!

## References

- Best M G. 1974. Mantle-derived amphibole within inclusions in alkali basaltic lavas[J]. *Journal of Geophysical Research*, 79: 2 107~ 2 113.
- Chen Husheng. 1988. Outline of comprehensive demonstration for geophysical and geological data from HQ\_13 line in the Lower Yangtze Basin, Yangtze Metaplatform[A]. Chen Husheng. No. 2 Proceedings of Exploring in New Fields of Gas and Oil Surveying in South China[C]. Beijing: Geological Publishing House, 65~ 73 (in Chinese).
- Chi Jishang (editor in chief). 1987. The Study of Cenozoic Basalts and Upper Mantle Beneath Eastern China (attachment: kimberlites) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~ 277 (in Chinese with English abstract).
- Du Yangsong, Liu Jinhui, Qin Xinlong, *et al.* 2003. Progresses in magmatic underplating research[J]. *Progress in Natural Science*, 13: 237~ 242 (in Chinese with English abstract).
- Ernst W G and Liu J. 1998. Experimental phase-equilibrium study of Al and Ti contents of calcic amphibole in MORB—A semiquantitative thermobarometer[J]. *American Mineralogist*, 83: 952~ 969.
- Fan Qicheng and Liu Ruoxin. 1996. The high-temperature granulite xenoliths from Hannuoba basalts[J]. *Chinese Science Bulletin*, 41 (3): 235~ 238 (in Chinese).
- Fan Qicheng, Liu Ruoxin, Li Huimin, *et al.* 1998. Zircon chronology and REE geochemistry of granulite xenolith at Hannuoba[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(2): 133~ 137 (in Chinese).
- Fan Qicheng, Sui Jianxin, Liu Ruoxin, *et al.* 2001. Eclogite facies garnet pyroxenite at Hannuoba—new evidence for magmatic underplating[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 1~ 6 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang. 1992. On the time of collision between North China and Yangtze landmasses—Principal and application of isotope chronological methods[J]. *Geology of Anhui*, 2(4): 13~ 23 (in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Hou Zengqian, Zhao Jinhua, *et al.* 2003. Deep seismic reflection profiling reveals complex crustal structure of Tongling ore district [J]. *Science in China (Series D)* 33(5): 442~ 449 (in Chinese).
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphibole[J]. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219~ 246.
- Qiu Jiaxiang and Zeng Guangce. 1987. Mineralogical chemistry and petrological significance of low pressure clinopyroxenes in Cenozoic basalts in East China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 3(4): 1~ 9 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiaxiang, Wang Renjing, Li Changnian, *et al.* 1991. Potassium-rich Volcanic Rocks in Wudalianchi-Keluo-Erkeshan [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~ 219 (in Chinese with English).
- Sachs P M and Hansteen T H. 2000. Pleistocene underplating and metasomatism of the lower continent crust: a xenolith study[J]. *Journal of Petrology*, 41(3): 331~ 356.
- Shao Ji'an, Han Qingjun, Zhang Lúqiao, *et al.* 1999. Discovery of the early Paleozoic xenoliths of cumulates in East Inner Mongolia[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(5): 478~ 485 (in Chinese).
- Shao Ji'an, Han Qingjun and Li Huimin. 2000. Discovery of the early Mesozoic granulite xenoliths in North China Craton[J]. *Science in China (Series D)*, 30(Supplement): 148~ 153 (in Chinese).
- Tang Yongcheng, Wu Yanchang, Chu Guozheng, *et al.* 1998. Geology of Copper-gold Polymetallic Deposits along the Yangtze River, Anhui Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~ 351 (in Chinese with English abstract).
- Warren R G, Kudo A M and Keil K. 1979. Geochemistry of lithic and single-crystal inclusions in basalt and characterization of upper mantle—lower crust in the Engle basin, Rio Grande Rift, New Mexico [A]. Riecker R E. Rio-Grande Rift: Tectonics and Magmatism [C]. Washington D C: American Geophysical Union, 393~ 415.
- Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xuchen, *et al.* 1996.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronology of intrusive rocks from Tongling[J]. *Acta Petrologica et*

- Mineralogica, 15(4): 299~306 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xuchen, *et al.* 1997. Enclave petrology of intermediate acid intrusive rocks in Tongling district, Anhui [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(2): 182~191 (in Chinese with English abstract).
- Xing Fengming and Xu Xiang. 1996. High potassium calc alkaline intrusive rocks in Tongling area, Anhui Province [J]. *Geochimica*, 25(1): 29~38 (in Chinese with English abstract).
- Xing Fengming, Zhao Bin, Xu Xiang, *et al.* 1997. Experimental study on the genesis of intrusive rocks in the Tongling area, Anhui [J]. *Regional Geology*, 16(3): 267~274 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng and Zhou Xinmin. 1995. The xenoliths from Qilin Cenozoic basaltic pipe, Guangdong [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(4): 441~448 (in Chinese with English abstract).
- Ye Huiwen. 1992. Calculation of  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  in amphiboles [A]. Zhang Yixia, Lu Liangzhao, Yan Hongquan, *et al.* Collected Works of Institute of Geology, Changchun College of Geology [C]. Beijing: Seismic Publishing House, 63~74 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jinhai, Fang Zhong, Lai Mingyuan, *et al.* 1998. Discovery of garnet granulite facies xenoliths in Cenozoic basalts, Leizhou, Guangdong Province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(18): 1988~1991 (in Chinese).
- Yu Jinhai, Xu Xisheng and Zhou Xinmin. 2002. Late Mesozoic crust-mantle interaction and lower crust components in SE China: a geochemical study of mafic granulite xenoliths from Cenozoic basalts [J]. *Science in China (Series D)*, 32(5): 383~393 (in Chinese).
- Zheng Jianping, Sun Min, Lu Fengxiang, *et al.* 2001. Garnet-bearing granulite facies rock xenoliths from Late Mesozoic volcanoclastic breccia, Xinyang, Henan Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 445~451.
- Zheng Qiaorong. 1984. Calculation of  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  from electronprobe analyzing data [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 4(1): 55~62 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinmin, Yu Jinhai and Xu Xisheng. 1992. Granulite xenoliths from Nüshan basalts [J]. *Chinese Science Bulletin*, 37(13): 198~1201 (in Chinese).
- Zhou Xunruo, Wu Cailai, Huang Xuchen, *et al.* 1993. Characteristics of cognate inclusions in intermediate acid intrusive rocks of Tongling area and their magmatic dynamics [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(1): 20~31 (in Chinese with English abstract).
- 杜杨松, 刘金辉, 秦新龙, 等. 2003. 岩浆底侵作用研究进展 [J]. *自然科学进展*, 13(3): 237~242.
- 樊祺诚, 刘若新. 1996. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体 [J]. *科学通报*, 41(3): 235~238.
- 樊祺诚, 刘若新, 李惠民, 等. 1998. 汉诺坝麻粒岩的锆石年代学及稀土元素地球化学 [J]. *科学通报*, 43(2): 133~137.
- 樊祺诚, 隋建新, 刘若新, 等. 2001. 汉诺坝榴辉岩相石榴辉石岩——岩浆底侵作用新证据 [J]. *岩石学报*, 17(1): 1~6.
- IMA\_CNMMN 角闪石专业委员会全体成员 (王立本译). 2001. 角闪石命名法——国际矿物学协会新矿物及矿物命名委员会角闪石专业委员会的报告 [J]. *岩石矿物学杂志*, 21(1): 84~100.
- 李曙光. 1992. 论华北与扬子陆块的碰撞时代——同位素年代学方法的原理及应用 [J]. *安徽地质*, 2(4): 13~23.
- 吕庆田, 侯增谦, 赵金花, 等. 2003. 深地震反射剖面揭示的铜陵矿集区复杂地壳结构形态 [J]. *中国科学(D辑)*, 33(5): 442~449.
- 邱家骧, 王人镜, 李昌年, 等. 1991. 五大连池—科洛—二克山富钾火山岩 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 邱家骧, 曾广策. 1987. 中国东部新生代玄武岩中低压单斜辉石的矿物化学及岩石学意义 [J]. *岩石学报*, 3(4): 1~9.
- 邵济安, 韩庆军, 李惠民. 2000. 华北克拉通中生代麻粒岩捕虏体的发现 [J]. *中国科学(D辑)*, 30(增刊): 148~153.
- 邵济安, 韩庆军, 张履桥, 等. 1999. 内蒙古东部早古生代堆积杂岩捕虏体的发现 [J]. *科学通报*, 44(5): 478~485.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 等. 1998. 安徽沿江地区铜多金属矿床地质 [M]. 北京: 地质出版社.
- 吴才来, 周珣若. 1997. 铜陵地区中酸性侵入岩的包体岩石学研究 [J]. *地球学报*, 18(2): 182~191.
- 吴才来, 周珣若, 黄许陈, 等. 1996. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 15(4): 299~306.
- 邢凤鸣, 徐祥. 1996. 铜陵地区高钾钙碱系列侵入岩 [J]. *地球化学*, 25(1): 29~38.
- 邢凤鸣, 赵斌, 徐祥, 等. 1997. 安徽省铜陵地区侵入岩成因的实验研究 [J]. *中国区域地质*, 16(3): 267~274.
- 徐夕生, 周新民. 1995. 广东麒麟新生代玄武岩角砾岩筒中岩石包体的研究 [J]. *岩石学报*, 11(4): 441~448.
- 叶慧文. 1992. 角闪石族矿物探针分析值中  $\text{Fe}^{3+}$  与  $\text{Fe}^{2+}$  的配分研究 [A]. 张贻侠, 卢良兆, 阎鸿铨, 等. 长春地质学院地质研究所文集 [C]. 北京: 地震出版社, 63~74.
- 于津海, 方中, 赖鸣远, 等. 1998. 广东雷州新生代玄武岩中石榴麻粒岩相岩石捕虏体的发现 [J]. *科学通报*, 43(18): 1988~1991.
- 于津海, 徐夕生, 周新民. 2002. 华南沿海基性麻粒岩捕虏体的地球化学研究和下地壳组成 [J]. *中国科学(D辑)*, 32(5): 383~393.
- 郑巧荣. 1984. 由电子探针分析值计算  $\text{Fe}^{3+}$  与  $\text{Fe}^{2+}$  [J]. *矿物学报*, (1): 55~62.
- 周新民, 于津海, 徐夕生. 1992. 女山玄武岩中麻粒岩捕虏体的发现与意义 [J]. *科学通报*, 37(13): 1988~1201.
- 周珣若, 吴才来, 黄许陈, 等. 1993. 铜陵中酸性侵入岩同源包体特征及岩浆动力学 [J]. *岩石矿物学杂志*, 12(1): 20~31.

## 附中文参考文献

- 陈沪生. 1988. 扬子准地台下扬子盆地 HQ<sub>13</sub> 线地球物理-地质解释纲要 [A]. 陈沪生. 中国南方油气勘探新领域探索论文集 (第二辑) [C]. 北京: 地质出版社.
- 池际尚. 1987. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究 (附金伯利岩) [M]. 北京: 地质出版社.