云南腾冲黑空山、马鞍山和打莺山火山粗安岩显微结构特征及其火山学意义*

于红梅[1,2] 许建东[1] 林传勇[1] 潘波[1] 赵波[1] 林旭东[1] 万园[1]

YU HongMei[1,2], XU JianDong[1], LIN ChuanYong[1], PAN Bo[1], ZHAO Bo[1], LIN XuDong[1] and WAN Yuan[1]

1. 中国地震局地质研究所,活动构造与火山重点实验室, 北京 100029
2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081
1. *Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing* 100029, *China*
2. *Institute of Geophysic, China Earthquake Administration, Beijing* 100081, *China*

2011-12-11 收稿, 2012-02-25 改回.

Yu HM, Xu JD, Lin CY, Pan B, Zhao B, Lin XD and Wan Y. 2012. Microstructural characteristics of trachyandesite lavas in Heikongshan, Ma'anshan and Dayingshan volcanoes, Tengchong, Yunnan Province and its volcanological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4):1205 – 1216

Abstract The products of volcanic eruption record the whole activity history of magma, and hence they may provide abundant information about the magmatic activity characteristics. In this paper, the lavas of three Holocene volcanoes in Tengchong volcanic field, Heikongshan volcano, Ma'anshan volcano and Dayingshan volcano, were studied in detail, including the compositions of bulk rocks and phenocrysts, texture features and crystal size distribution (CSD) of phenocrysts. The study shows that the lavas in Heikongshan, Ma'anshan and Dayingshan volcanoes are mainly trachyandesite, and the compositions of phenocrysts in trachyandesite are similar. The textures of the trachyandesite in these three volcanoes, however, are different obviously, which reflects different magma environments, so we speculate that they are from different magma chamber. The CSD curves of plagioclase phenocrysts in Heikongshan trachyandesite lavas show slightly concave, which reflect a small scale of magma mixing. The CSD curves of plagioclase micro-phenocrysts in Ma'anshan and Dayingshan lavas are good linear, indicating the formation environment of micro-phenocrysts is relatively stable. We speculate that these micro-phenocrysts were formed because of the cooling of the surrounding rocks, after the magma rising and then remaining in the crust and forming a small magma chamber. The analysis aforementioned shows that there are at least two magma chambers in the horizontal and vertical directions respectively under Tengchong volcanic field.

Key words Trachyandesite; Texture; Crystal size distribution; Heikongshan volcano; Ma'anshan volcano; Dayingshan volcano

摘 要 火山喷发物记录了岩浆的整个活动历史,对火山喷发物的研究可以了解大量的岩浆活动特征信息。本文对腾冲火山区的三座全新世火山——黑空山、马鞍山和打莺山火山熔岩进行了详细的研究,包括熔岩和斑晶的成分、显微结构特征和斑晶的晶体大小分布(CSD)分析。研究发现,黑空山、马鞍山和打莺山火山熔岩以粗安岩为主,三座火山粗安岩中的斑晶成分范围接近,但它们的显微结构特征具有一定的差异,反映了不同的岩浆环境,推测来自不同的岩浆囊。黑空山粗安岩中斜长石斑晶的 CSD 曲线呈微上凹形,反映了小规模的岩浆混合作用。马鞍山和打莺山粗安岩的微斑晶 CSD 曲线呈很好的线性关系,说明微斑晶形成时的环境相对稳定,推测这些微斑晶是在岩浆上升过程中,停留在地壳的某处并形成一个小型的岩浆囊后受围岩的冷却作用形成。根据以上的分析,认为腾冲火山区下在横向和纵向上均至少存在两个岩浆囊。

关键词 粗安岩;显微结构;晶体大小分布;黑空山火山;马鞍山火山;打莺山火山

中图法分类号 P575; P588.143

关于火山熔岩,尽管已开展了长期的研究工作,但多是集中在岩石学方面。最近,岩石结构(微构造)的定量化已经

* 本文受地震行业专项(200708-27)和国家自然科学基金项目(40972209)联合资助.

第一作者简介: 于红梅,女,1981 年生,博士后,主要从事火山岩显微构造研究,E-mail:yuhongmei188@163.com

变得很重要,应用也越来越普遍(Armienti *et al.*, 2007; Higgins and Roberge, 2007; Fornaciai *et al.*, 2009; Zandomeneghi *et al.*, 2010; Higgins, 2006a, 2011; Voltolini *et al.*, 2011)。由于主要的岩石学过程,例如晶体成核、生长和变粗过程不会改变岩石整体的化学成分(Marsh, 1988, 1998; Higgins, 2006b; Higgins and Roberge, 2007),所以岩石结构的定量化对研究岩浆的运动学和动力学特征具有十分重要的意义。

目前,研究岩石结构定量化最普遍的方法是晶体大小分布理论,或 CSD 理论。它是利用一个经验公式(基于定态粒度平衡的概念)和一些简单的参数(晶体长度、面积或体积)来确定溶液中晶体的成核速率、生长速率、岩浆存储时间等重要的物理参数。某一岩石的晶体大小分布(CSD)与密度或成分一样,是岩石的内在性质,岩石中的每一相只有一个 CSD(Higgins, 2006b)。Marsh(1984)和 Cashman and Marsh(1984)首次提议把 CSD 理论应用于地质体系中的结晶作用。此后,Cashman(1988)、Cashman and Marsh(1988)、Cashman and Ferry(1988)、Marsh(1988)成功地把该方法应用于估计自然环境中不同的岩浆和变质条件下的晶体成核和生长速率。Armienti *et al.*(1994)测量了意大利埃特纳(Mount Etna)火山岩中斜长石的晶体大小分布(CSD),结果显示强烈弯曲的 CSD 图,他们把其归因于结晶过程中环境的变化。Higgins(1996, 2000, 2002a, b, 2003, 2006b)也对此做了大量研究,并编制了 CSDCorrections 软件。利用该软件,只要我们测得斑晶在薄片中的长、宽就可以得到斑晶的 CSD 分布图。国内,徐文艺等(1997)、成中梅和路凤香(1997)、徐晓春等(2001)及袁峰等(2006)曾讨论花岗岩和较老的火山岩内晶体大小分布(CSD)特征所反映的结晶动力学特征,但是目前,对于我国活动火山产生的火山喷发物还未曾有过这方面的研究。

云南省腾冲火山是我国主要的活动火山之一(刘若新, 2000),前人研究(姜朝松, 1998; 樊祺诚等, 1999; 刘若新, 2000; 皇甫岗和姜朝松, 2000)显示该火山具有很高的潜在喷发危险性,所以对其岩浆活动特征的研究具有重要的意义。为此,本文对腾冲火山区的三座全新世火山—黑空山、马鞍山和打莺山火山熔岩进行了详细的研究,包括熔岩和斑晶的成分、显微结构和斑晶的 CSD 分析,讨论了三个活动火山不同的岩浆运动学和动力学特征。

1 地质概况及样品采集

腾冲火山区位于青藏高原东南缘(Tapponnier *et al.*, 1990),怒江右旋走滑断裂带西侧的腾冲地块(图 1a)。印度板块的侧向挤压作用使腾冲及邻近地区发生强烈的地壳变形,并产生了大量的火山活动。该火山区(98°15′~98°45′E, 24°40′~25°30′N)在近南北方向 90km×50km 的范围内分布有 68 座新生代火山(姜朝松, 1998; 姜朝松等, 2000)。其中,打莺山、马鞍山和黑空山火山被认为是全新世火山(刘若新, 2000; Wei *et al.*, 2003)。这三座火山均以溢流式喷发为主,在该区产生了大面积的熔岩流(图 1b)。本次研究在三个火山的熔岩流中采集了大量的样品,并以刘若新等(2000①)等划分的熔岩流流动单元为底图,标出了采样位置(图 1c)。

2 熔岩和斑晶成分的对比分析

2.1 熔岩成分

首先对在三个火山采集的部分样品进行了全岩的主量元素成分分析,测试结果见表 1。结果显示,SiO_2、K_2O、CaO 和 MgO 含量范围分别为 52.5% ~66.3%, 2.35% ~4.54%, 3.17% ~6.96% 和 1.81% ~5.33%。另外引用樊祺诚等(1999)、赵勇伟和樊祺诚(2010)的测试结果,把全岩成分投点到 TAS 图中(图 2),可以看到熔岩成分范围较广,主要投点在粗面玄武岩、玄武质粗安岩、粗安岩和粗面岩中,但是以粗安岩为主。本次采集的黑空山样品包含有玄武质粗安岩、粗安岩和粗面岩,而采集到的马鞍山和打莺山样品主要为粗安岩(表 1),所以本文主要对比三座火山中粗安岩的成分和结构的异同。

2.2 斑晶成分

对粗安岩中主要的斑晶进行了电子探针测试,其中大部分测试是在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室完成,仪器为 CAMECA SX-51 型电子探针仪,工作条件为加速电压 15kV,电子束流 20nA,束斑直径 1~2μm(测定长石时束斑直径 7~8μm);日本 JEOL JXA-8100 型电子探针仪,工作条件为加速电压 15kV,电子束流 10nA,束斑直径 5μm。少量电子探针测试是在中国地质大学(北京)电子探针实验室完成,仪器为 SHIMADZU EPMA-1600,工作条件为加速电压 15kV,电子束流 8nA,束斑直径 2μm。

测试结果(数据略)显示,黑空山、马鞍山和打莺山粗安岩中斜长石斑晶 An(=100Ca/(Ca+Na+K))范围分别为 27~70(73 个点)、21~69(50 个点)和 28~62(46 个点),均以拉长石和中长石为主,并含少量更长石(图 3)。三个火山粗安岩中辉石斑晶 $Mg^{\#}$(=100×Mg/(Mg+ΣFe))范围分别为 70~83(78 个点)、74~83(15 个点)和 72~78(12 个点),单斜辉石主要为普通辉石,斜方辉石为古铜辉石和紫苏辉石。黑空山和马鞍山粗安岩中橄榄石斑晶 Fo(=100×Mg/(Mg+ΣFe))值分别为 71~79(4 个点)和 70~82(32 个点),只测定一个打莺山粗安岩中橄榄石斑晶,Fo 值为 68。以上数据显示三个火山粗安岩中斑晶的成分并无明显差异。

① 刘若新, 李荫孝, 樊祺诚等. 2000.《三个火山区的喷发规模、物理及化学过程研究》项目报告

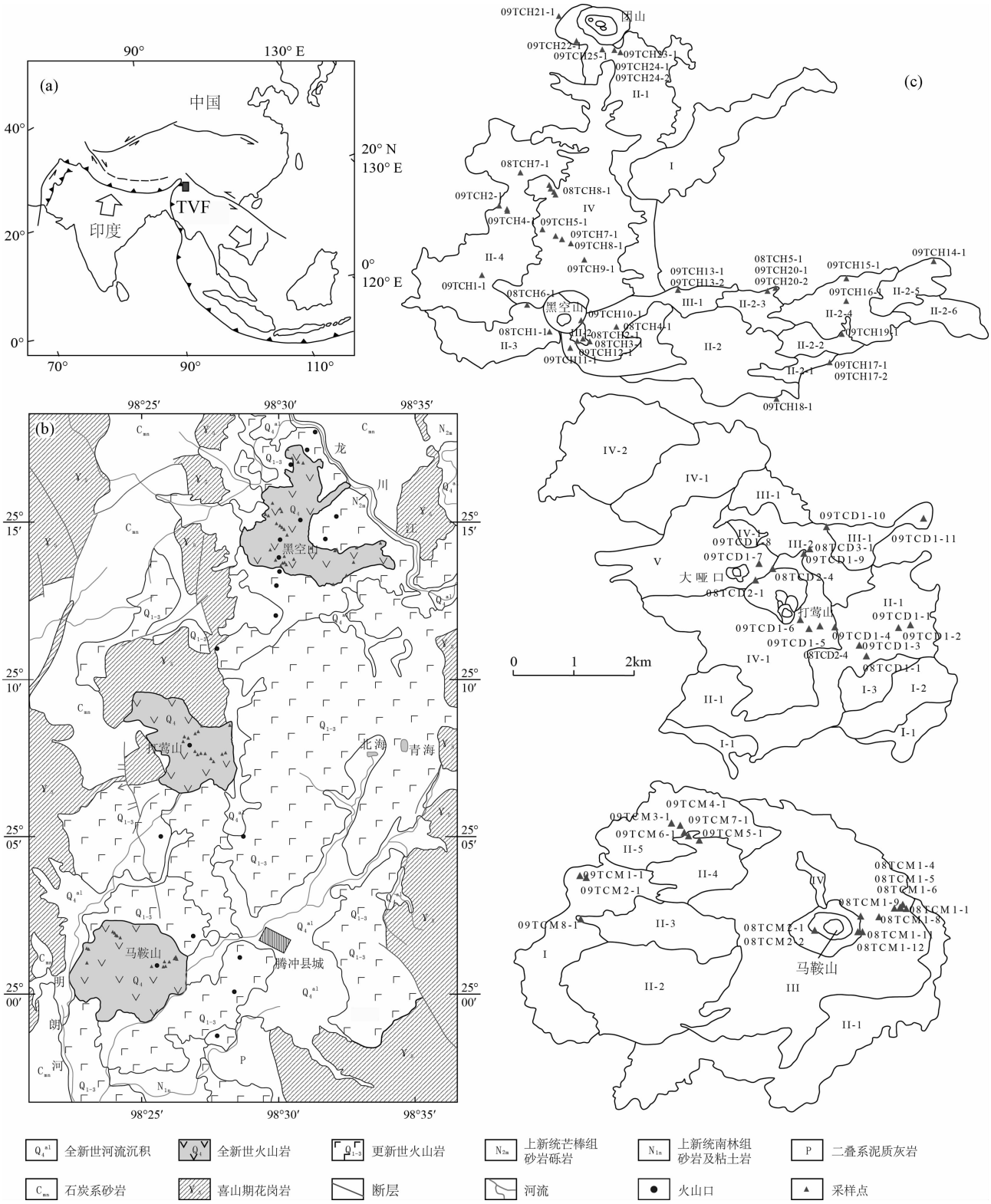


图 1 亚洲主要构造特征简图(a，据 Tapponnier *et al.*，1990；TVF 为腾冲火山区)、腾冲火山地质图(b，据赵勇伟和樊祺诚，2010 修改)和黑空山、马鞍山、打莺山火山流动单元划分及采样位置图(c，底图引自刘若新等，2000)

Fig. 1 Schematic map of major tectonic features in Asia (a, after Tapponnier *et al.*, 1990; TVF-Tengchong volcanic filed), volcanic geological map of Tengchong (b, modified after Zhao and Fan, 2010) and map showing the division of lava flow units of the Heikongshan volcano, Ma'anshan volcano and Dayingshan volcano and the sample locations (c)

表 1 黑空山、马鞍山和打莺山火山全岩成分分析(wt%)

Table 1 Bulk rock chemical analysis of Heikongshan, Ma'anshan and Dayingshan lavas (wt%)

样品号	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	MnO	P_2O_5	灼失量	总和
09TCH1-2	58.20	16.45	0.94	1.45	4.77	5.40	4.15	3.31	3.35	0.11	0.43	1.08	99.63
09TCH2-1	54.58	17.43	1.17	1.64	6.01	6.96	4.63	2.59	3.49	0.13	0.30	1.03	99.95
09TCH4-1	58.76	16.42	1.08	1.05	4.98	5.70	3.93	3.42	3.52	0.11	0.44	0.41	99.83
09TCH5-2	59.04	16.42	0.87	1.55	4.14	5.51	3.93	3.42	3.42	0.10	0.38	0.98	99.76
09TCH8-4	58.52	16.14	1.04	4.79	1.51	5.44	3.99	3.35	3.45	0.11	0.42	0.70	99.45
09TCH9-1	58.12	16.60	1.09	1.16	4.89	5.62	3.99	3.35	3.42	0.11	0.42	0.76	99.52
09TCH10-1	66.34	14.86	0.66	0.78	2.92	3.17	1.81	4.40	3.42	0.08	0.22	0.70	99.34
09TCH11-3	60.03	15.90	1.05	1.22	4.20	5.18	3.57	3.74	3.66	0.11	0.41	0.65	99.72
09TCH12-2	65.92	15.05	0.61	0.85	2.95	3.20	1.85	4.54	3.59	0.08	0.23	0.52	99.37
09TCH13-1	57.68	16.53	1.07	0.84	5.01	5.66	3.96	3.42	3.59	0.11	0.43	1.01	99.30
09TCH14-1	57.38	16.96	1.15	1.08	4.98	5.77	3.41	3.38	3.49	0.11	0.45	1.27	99.44
09TCH15-1	57.22	17.02	1.18	1.54	4.60	5.85	3.63	3.42	3.52	0.11	0.44	1.03	99.55
09TCH16-1	57.15	17.08	1.17	1.13	4.94	5.82	3.41	3.26	3.60	0.11	0.46	1.40	99.53
09TCH17-1	57.94	16.61	1.06	2.30	3.86	5.59	3.95	3.35	3.49	0.11	0.41	1.06	99.72
09TCH18-2	58.50	16.33	1.00	1.15	4.98	5.66	3.69	3.35	3.49	0.12	0.43	0.70	99.39
09TCH19-2	52.50	17.63	1.24	1.31	6.25	6.55	5.33	2.35	3.38	0.14	0.28	2.65	99.60
09TCH20-2	57.82	16.88	1.15	1.31	4.84	5.77	3.41	3.42	3.52	0.11	0.47	0.77	99.46
09TCH23-1	57.40	16.91	1.10	2.25	3.90	5.92	3.77	3.17	3.31	0.11	0.42	1.14	99.42
08TCH6-2	57.92	16.48	1.15	0.97	5.03	5.81	3.92	3.38	3.49	0.11	0.42	0.77	99.44
09TCM2-2	58.42	16.27	1.10	1.02	4.96	5.51	3.60	3.24	3.59	0.12	0.44	1.07	99.33
09TCM3-1	58.38	16.13	1.14	1.23	4.79	5.25	3.85	3.37	3.69	0.11	0.48	1.15	99.57
09TCM5-1	57.86	16.56	1.17	1.02	4.99	5.58	3.93	3.30	3.65	0.11	0.42	1.36	99.95
09TCM7-1	58.22	16.34	1.17	1.14	4.79	5.55	4.46	3.44	3.73	0.11	0.46	1.01	100.42
09TCM8-1	58.38	15.98	1.14	1.32	4.74	5.32	4.07	3.37	3.73	0.11	0.46	0.91	99.53
09TCM1-4	57.78	16.39	1.21	1.55	4.72	5.55	4.12	3.37	3.69	0.11	0.51	1.03	100.03
09TCM2-1	57.32	16.57	1.28	1.59	4.74	6.02	4.20	3.27	3.73	0.11	0.43	0.85	100.11
09TCM3-1	56.79	16.82	1.25	1.48	4.86	5.82	3.92	3.06	3.73	0.11	0.45	1.21	99.50
09TCD1-1	58.46	16.70	1.20	1.39	4.62	5.40	3.40	3.48	3.58	0.11	0.45	0.95	99.74
09TCD1-3	58.36	16.69	1.22	1.57	4.43	5.32	3.38	3.48	3.62	0.10	0.46	0.73	99.37
09TCD1-6	62.08	16.02	0.96	1.03	3.86	4.20	2.52	4.16	3.50	0.09	0.36	1.15	99.93
09TCD1-7	61.76	15.78	0.97	1.80	3.33	4.28	2.74	4.08	3.50	0.09	0.38	0.90	99.61
09TCD1-9	59.36	16.47	1.15	1.64	4.12	5.05	3.20	3.65	3.58	0.10	0.50	0.84	99.66
09TCD1-10	58.98	16.66	1.15	1.13	4.77	5.21	3.40	3.51	3.54	0.10	0.44	0.97	99.86
09TCD1-11	61.40	15.89	1.04	0.71	4.53	4.55	2.97	4.01	3.65	0.09	0.40	0.53	99.78

注:河北省区域地质矿产调查研究所实验室分析,主要监测仪器为电子分析天平、分光光度计、WFX-110B-原子吸收分光光度计等

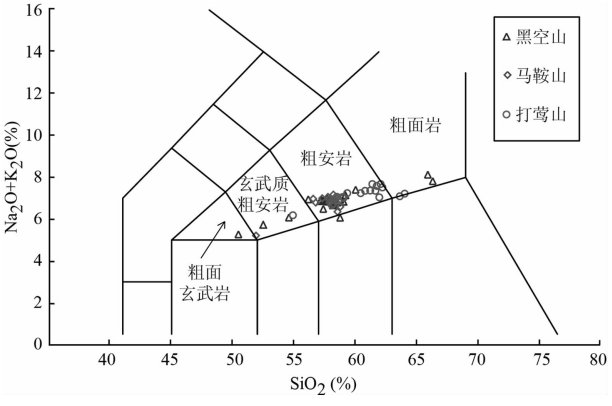


图 2 黑空山、马鞍山和打莺山火山熔岩全岩成分 TAS 图(据 Le Maitre *et al.*,1989)

部分数据来自樊祺诚等(1999)、赵勇伟和樊祺诚(2010)

Fig. 2 Total alkalis-silica (TAS) diagram (after Le Maitre *et al.*, 1989) for bulk composition of Heikongshan, Ma'anshan and Dayingshan lavas

Part of the data are after Fan *et al.* (1999), Zhao and Fan (2010)

3 粗安岩显微结构特征对比

三座火山粗安岩宏观上比较相近,均呈灰黑色,表现为渣状熔岩、结壳熔岩和块状熔岩等,气孔发育。但通过在显微镜下的详细观察,发现它们的显微结构具有一定的差异。为了进行对比,利用线统计法统计了样品中基质、气孔和主要斑晶的百分含量,结果列于表 2 中。

3.1 黑空山粗安岩显微结构特征

黑空山粗安岩呈斑状结构,由斑晶和基质组成,气孔发育程度不同。斑晶含量不等,从 4% ~12%,主要为斜长石和辉石,极少量为橄榄石(图 4)。斜长石斑晶含量约 3% ~6%,呈长板状(图 4a),自形或半自形,少量内部熔蚀,斜长石斑晶长轴主要范围在 300 ~800μm 之间,大着可达 1 ~3mm。辉石斑晶含量 1% ~7%,包括有单斜辉石和斜方辉

表 2 熔岩显微结构特征统计结果(%)

Table 2 Statistical results of microstructural characteristics of lavas(%)

样品号	G	V	Pl	Py	Ol	样品号	G	V	Pl-B	Pl-S	Ol	Py
09TCH23-1	82.9	12.5	3.5	1.1		09TCM1-2	59.8	18.3	6.0	15.3	0.6	
09TCH24-1	68.0	25.3	4.3	2.5		09TCM2-1	70.0	10.9	4.2	14.5	0.4	
09TCH25-1	45.8	49.2	3.3	1.8		09TCM3-2	53.9	26.0	3.0	14.8	2.0	0.3
09TCH14-1	62.0	31.2	4.9	1.8		09TCM4-1	68.8	10.7	3.3	15.3	1.1	0.8
09TCH15-1	69.9	21.9	6.1	2.2		09TCM5-1	65.8	8.8	5.6	17.8	2.0	
09TCH15-2	67.9	26.9	3.6	1.4	0.3	09TCM6-1	62.3	16.5	2.6	17.0	1.6	
09TCH16-1	61.6	34.0	2.4	1.9	0.1	09TCM7-1	63.5	15.7	3.6	15.8	1.4	
09TCH17-1	76.7	11.3	6.2	4.3	1.6	09TCM8-1	60.0	14.0	4.7	19.3	2.0	
09TCH18-1	60.4	31.8	3.2	3.4	1.2	08TCM2-1	53.5	30.0	3.1	12.0	0.8	0.6
09TCH18-2	58.4	32.2	4.3	5.4		08TCM1-10	58.0	32.0	1.7	7.0	1.3	
09TCH20-1	56.4	37.3	4.2	2.5		08TCM1-1	62.4	13.6	3.6	18.0	2.4	
08TCH1-1	82.7	6.6	4.6	6.2		08TCD1-1	98.0	~1	<1			
08TCH6-1	75.7	16.7	4.0	3.6		08TCD2-1	74.0	~25	<1			
09TCH1-1	68.0	24.8	4.5	2.9		08TCD2-4	65.6	20.7	2.7	11.0		
09TCH1-2	55.0	37.1	3.4	4.4		09TCD1-1	75.0	~34	<1			
09TCH13-1	72.2	17.9	5.3	4.6		09TCD1-3	79.0	~20	<1			
09TCH5-1	73.3	14.7	4.8	7.1		09TCD1-4	62.0	36.0	2.0			
09TCH6-1	79.2	10.7	4.3	5.9		09TCD1-6	75.0	~15	<1	10.0		
09TCH7-1	65.8	28.3	2.7	2.7	0.5	09TCD1-9	75.0	23.0	~2.0			
09TCH9-1	59.4	33.6	5.1	1.8		09TCD1-11	61.0	21.0	3.0	15.0		

注：G 为火山玻璃，V 为气孔，Pl 为斜长石，Py 为辉石，Ol 为橄榄石，Pl-B 为大的斜长石斑晶，Pl-S 为斜长石微斑晶

石，呈柱状、短柱状，自形或半自形，如图 4b。辉石斑晶大小范围主要在 200 ~ 600μm 之间，大者可达 1mm。此外，熔岩中还含有较多的辉长岩和辉石岩堆积体碎片，以及很少量的二辉橄榄岩包体(图 4c)(Yu *et al.*，2010)。基质以玻璃质为主，正交偏光下呈黑色(图 4a-c)，部分内部含有细小的斜长石、辉石和橄榄石微晶。

3.2 马鞍山粗安岩显微结构特征

马鞍山粗安岩，镜下亦为斑状结构，由斑晶和基质组成，但斑晶的大小具有三种尺度。一种是较大的斑晶，含量约 3% ~8%，主要为斜长石和橄榄石，以及少量的辉石。斜长石斑晶含量约 2% ~6%，长轴最大可达 2mm，他形或是半自形，熔蚀强烈，大多数边部有反应边，构成筛状结构(图 4d)。橄榄石斑晶含量少于斜长石，约 0.4% ~2.4%，粒度最大为 1.6mm，半自形或他形，亦熔蚀强烈(图 4e)。辉石斑晶则以单斜辉石为主，多呈半自形或他形，短柱状。第二种为微斑晶(图 4f)，含量较多，约 12% ~20%，以斜长石为主，少量为辉石。斜长石微斑晶大小不等，主要范围 100 ~ 300μm，呈长板状、骨骼状，反映了快速生长的特征。辉石微斑晶大小主要在 30 ~ 40μm 之间，一般呈短柱状。部分熔岩基质中还含有大量的微晶，一般在 10 ~ 30μm 之间，主要为针状斜长石和粒状辉石。基质主要为玻璃质。熔岩中还含有一些石英颗粒，一般熔蚀成港湾状或圆状，为捕虏的围岩晶体(图 4f)。熔岩中的气孔大小、形态和含量都有所变化，大部分为圆形，但也见拉长状。

3.3 打莺山粗安岩显微结构特征

打莺山粗安岩气孔发育程度不同，镜下呈斑状结构。大斑晶含量略少，一般少于 3%，主要为斜长石，个别样品中可见橄榄石和辉石。斜长石斑晶长轴集中在 500 ~ 2000μm 之间，他形或是半自形，熔蚀强烈，大多数边部有反应边，构成筛状结构(图 4g，h)。少部分熔岩基质中含有斜长石微斑晶(图 4i)，大小集中在 40 ~ 100μm 之间，含量约 10% ~15%，略少于马鞍山熔岩中的微斑晶。熔岩基质中还含有 10 ~ 30μm 的针状斜长石微晶和柱状的辉石微晶。另外，熔岩中还含有一些石英颗粒，一般熔蚀成港湾状，为捕虏的围岩晶体。

3.4 黑空山、马鞍山和打莺山粗安岩显微结构特征的差异

显微结构分析表明，黑空山、马鞍山和打莺山粗安岩熔岩均具有斑状结构，但它们具有下列不同：

(1)斑晶熔蚀特征：马鞍山和打莺山粗安岩中斜长石斑晶多发育有反应边或构成筛状结构，黑空山粗安岩中只有少部分样品具有这种现象；

(2)斑晶类型和含量：黑空山粗安岩中辉石斑晶与斜长石斑晶含量相近，而马鞍山和打莺山样品中辉石斑晶很少；马鞍山样品中含有相对较多的橄榄石斑晶，而黑空山样品中极少；

(3)微斑晶：马鞍山粗安岩中普遍含有较多的微斑晶，打莺山粗安岩中少量具有微斑晶，而黑空山粗安岩中很少；

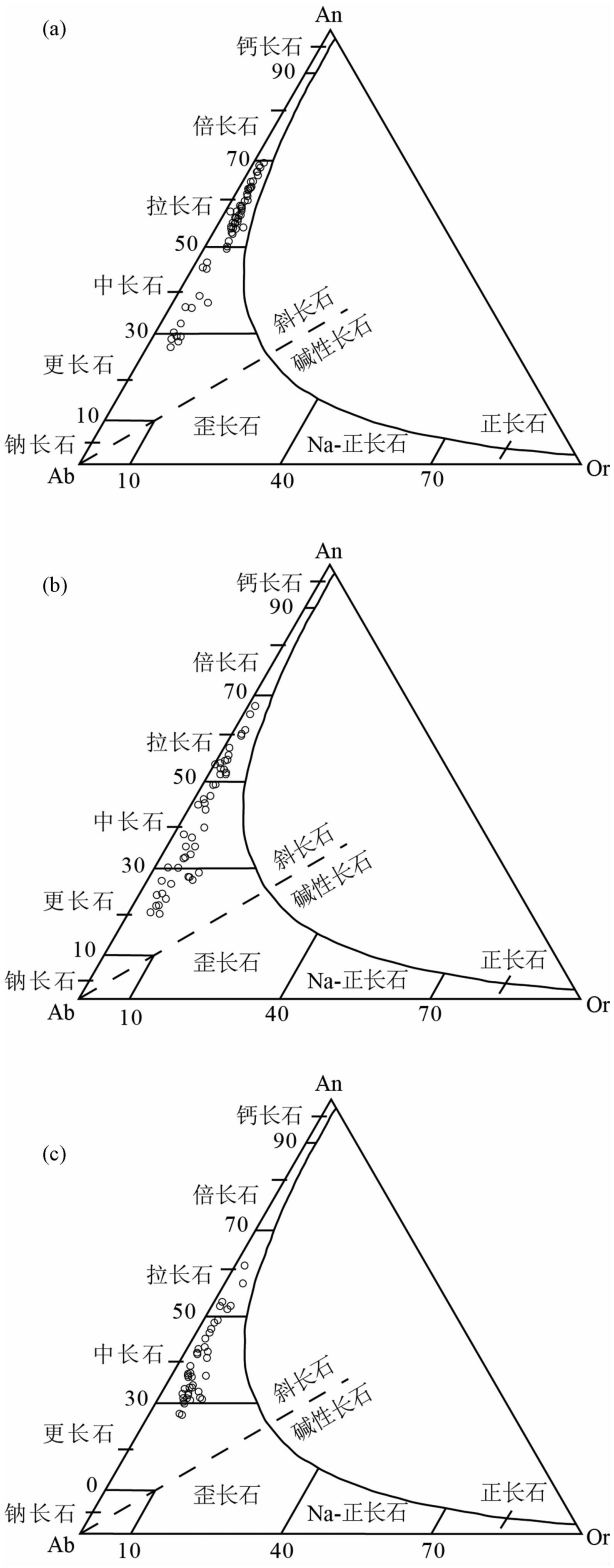


图 3 黑空山(a)、马鞍山(b)和打莺山(c)粗安岩中斜长石斑晶 Ab-Or-An 图(据 Smith,1974)

Fig. 3 Ab-Or-An plots of plagioclase phenocrysts in Heikongshan(a), Ma'anshan(b) and Dayingshan (c) trachyandesite lavas (after Smith, 1974)

(4)石英捕虏晶:马鞍山和打莺山样品中还有少量的石英颗粒,可能为捕虏的围岩碎片,而黑空山样品中石英颗粒极少。

熔岩的显微结构反映了熔岩形成环境的差异,亦即岩浆作用过程的差异。斑晶的大小、形态、含量取决于结晶环境条件,包括温度、压力、结晶时间的长短(岩浆停留时间的长短)、过冷度等。因此,这三个火山显微结构的差异反映了上述条件的不同。

4 斜长石斑晶大小分布(CSD)特征

4.1 CSD 理论

CSD 理论由 Marsh(1988)和 Cashman and Marsh(1988)引进地球科学,目的是定量研究结晶过程。该理论假设岩石中晶体大小分布取决于晶体的成核速率、生长速率和停留时间(Piochi *et al.*, 2005)。CSD 理论简介如下(Marsh, 1988; Higgins and Roberge, 2007):

在一定条件下,晶体群体密度的自然对数(即单位体积中某一粒度范围内的晶体数目除以间距的宽度)与晶体长度呈线性的关系。对于火山岩,直线的斜率通常等于 $-1/$(晶体的平均生长速率 × 停留时间),斜率的倒数为晶体的特征长度,它等于一个线性 CSD 上所有晶体的平均长度(Marsh, 1988),而其截距对应晶体的成核密度。根据成核密度和晶体的生长速率可以获得晶体的成核速率。即:

$$\ln(n) = \ln(n^0) - L/G\tau \quad (1)$$

$$J = n^0 G \quad (2)$$

$$L_D = G\tau \quad (3)$$

其中,n 为晶体的群体密度,L 为晶体的长度,G 为晶体的平均生长速率,τ 为晶体停留时间,n^0 为晶核密度,J 为成核速率,L_D 为晶体特征长度。

4.2 CSD 测量方法

对于大多数火山岩样品,统计和测量三维体积内的晶体很难,所以一般方法都是统计和测量二维岩石薄片中的晶体,然后利用一些数学方法或是立体测量学方法,将二维数据转换为三维 CSD 数据。本次对腾冲火山岩中斜长石的 CSD 分析沿用 Higgins (2000,2002a,2007) 给出的方法,并应用 CSDCorrection1.3 软件(Higgins,2000)得到斜长石晶体的 CSD。该方法利用立体测量学,考虑了切割效应和切割概论的问题,减小了二维数据转换为三维数据时的误差,得到了广泛的应用(Piochi *et al.*,2005;Noguchi *et al.*,2006;Fornaciai *et al.*,2009;Jerram *et al.*,2009;Brugger and Hammer,2010;Higgins,2011;D'Oriano *et al.*,2011)。

首先在显微镜下测量薄片中斑晶的长度和宽度,一般每个样品至少需要测定 250 个晶体才能得到较好的 CSD 分析结果(Morgan and Jerram,2006)。如果熔岩中斑晶含量较低,可通过一个样品切制多个薄片,或将同一个采样点的样品的

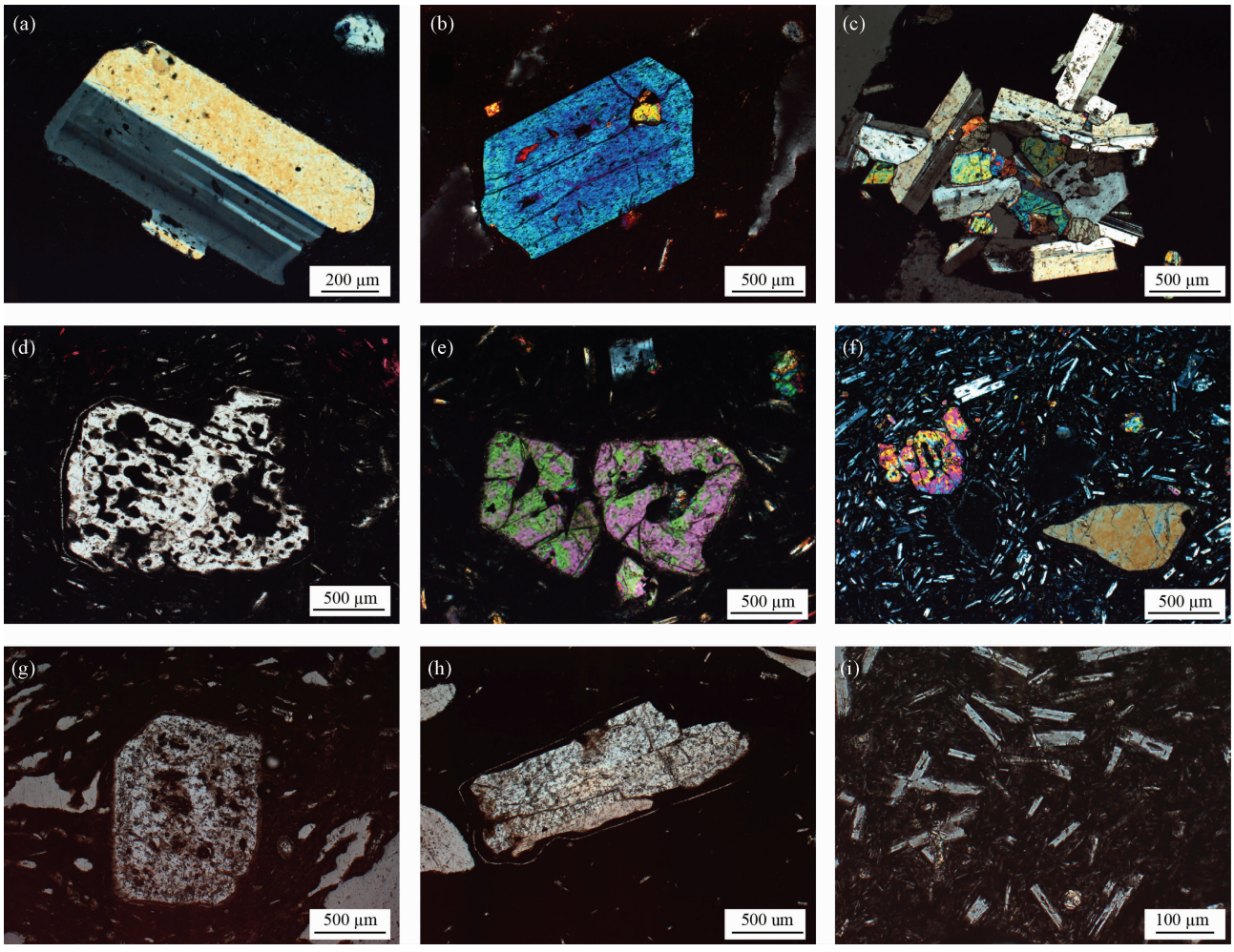


图 4　黑空山、马鞍山和打莺山粗安岩显微照片

(a)-08TCH2-5 样品，自形斜长石斑晶，复合双晶，正交偏光；(b)-09TCH7-1 样品，自形辉石斑晶，正交偏光；(c)-08TCH4-7 样品，辉长岩堆积体碎片，正交偏光；(d)-08TCM1-2 样品，筛状结构的斜长石样品，黑色基质中含有大量的微晶，单偏光；(e)-08TCM1-2 样品，内部熔蚀的橄榄石，黑色基质中含有微晶，正交偏光；(f)-08TCM1-8 样品，辉石斑晶和石英捕虏晶，黑色基质中含有大量的微斑晶，正交偏光；(g)-样品 09TCD1-6，斜长石斑晶熔蚀强烈，单偏光；(h)-样品 09TCD1-11，具反应边的长石斑晶，单偏光；(i)-样品 09TCD1-11，基质中含有大量的斜长石微斑晶和微晶，单偏光

Fig. 4　Microphotographs of Heikongshan, Ma'anshan and Dayingshan trachyandesite lavas

(a)-Sample 08TCH2-5, an euhedral plagioclase phenocryst, crossed polarized light; (b)-Sample 09TCH7-1, an euhedral pyroxene phenocryst, crossed polarized light; (c)-Sample 08TCH4-7, a gabbro xenolith fragment, crossed polarized light; (d)-Sample 08TCM1-2, a plagioclase phenocryst with sieve texture, a large number of microlites in the black glass, plane polarized light; (e)-Sample 08TCM1-2, an internal resorbed olivine phenocryst, some microlites in the black glass, crossed polarized light; (f)-Sample 08TCM1-8, pyroxene phenocryst s and a quart xenocryst, a large number of micro-phenocrysts in the matrix, crossed polarized light; (g)-Sample 09TCD1-6, a strongly resorbed plagioclase phenocryst, plane polarized light; (h)-Sample 09TCD1-11, a plagioclase phenocryst with reactive rim, plane polarized light; (i)-Sample 09TCD1-11, a large number of micro-phenocrysts and microlites in the matrix, plane polarized light

测定结果进行归并来解决。然后应用 CSDCorrection 1.3 软件(Higgins, 2000, 2002a)把获得的截面长、宽数据转化为 CSD。CSD 图解采用对数长度间距，每个间距为前一个间距尺寸的 $10^{0.2}$ 倍。如果在 CSD 图中没有空缺，说明每个间距内都有晶体。如果某一间距内的晶体少于 5 个，会造成 CSD 结果不精确，所以在 CSD 图中被剔除。CSD 图的长度下限为所能测定的最小晶体(30um)，而不是岩石中实际存在的最小晶体。

应用 CSDCorrection1.3 从 2D 测量结果计算 CSD 需要确定晶体的平均形状，并且以晶体轴比 S：I：L(短轴：中间轴：长轴)来表示。晶体的 S/I 由在显微镜下测量的斑晶的长宽比的众数或平均值来确定(Higgins, 1994)，而 I/L 由平行于岩石薄片的斜长石晶体 010 面的长宽比确定最为准确(Higgins, 2006a, 2011)。应用 CSDCorrections 1.3 还需要知

表 3 黑空山不同流动单元熔岩中斜长石斑晶 CSD 参数

Table 3 CSD parameters of plagioclase phenocrysts in different flow units of Heikongshan lavas

喷发期次	样品号	去除气孔后面积 (mm^2)	测量斑晶个数 (N)	斜率 (K)	截距 (D)	特征长度 (L_D) (mm)	拟合度 (Q)	停留时间 (t) (a)	成核速率 (J) ($10^{-10}mm^{-3}s^{-1}$)
II-1	09TCH24-1, 09TCH24-2, 09TCH25-1	1269	219	-3.22	1.01	0.311	0.01	98	2.75
II-2	09TCH14-1, 09TCH14-2, 09TCH15-1, 09TCH15-2, 09TCH15-3, 09TCH16-1, 09TCH16-2, 08TCH5-1, 09TCH20-1, 09TCH20-2	4495	837	-2.97	0.90	0.340	0.09	107	2.46
II-3	08TCH6-1, 08TCH6-2	843	205	-4.11	1.63	0.240	-	77	5.10
II-4	09TCH1-2, 09TCH1-3, 09TCH4-1, 09TCH4-2, 09TCH4-3	2386	476	-4.00	1.85	0.250	0.01	79	6.36
III	08TCH4-1, 08TCH4-2, 08TCH4-3	1284	582	-3.48	1.64	0.287	-	91	5.16
IV	08TCH8-1, 08TCH8-3, 09TCH7-1, 09TCH7-2	2344	727	-3.43	1.81	0.292	0.002	92	6.11

道晶体的"圆度",但该值不会对计算造成很大的影响。为了得到正确的气泡化前岩浆(等效致密岩石)中矿物的 CSD,气孔的面积要在总的测量面积中去除。CSD 的斜率和截距的平均值可以应用 Higgins(2006b)的方法通过线性回归确定。拟合度 Q 为描述数据拟合成一条直线的程度,在每点上都考虑了误差。Q 值大于 0.1 指示拟合非常好,但是大于 0.01 的值也是可取的(Higgins,2006b)。强烈弯曲的 CSD 将会有非常小的 Q 值。

4.3 黑空山粗安岩中斜长石斑晶 CSD 分析

本次对黑空山熔岩中的 27 件样品中的斜长石斑晶进行了 CSD 测定,由于斜长石斑晶含量多小于 10%,所以对同一期的 CSD 进行了合并,结果如表 3。根据镜下的观察和测量,斜长石斑晶的三轴比确定为 1∶2.8∶4,等于 Morgan and Jerram(2006)确定的值。斜长石斑晶多呈自形或半自形,圆度设为零。应用 CSDCorrection 1.3 软件获得斜长石斑晶的 CSD 图,如图 5 所示。从图 5 和表 3 中可见,部分熔岩样品中斜长石 CSD 图呈线性,即 Q 值大于 0.01,部分则呈微弱的上凹形。这种上凹形也被称为扇形(Higgins and Roberge),其成因将在下文中进行讨论。

如果给定斜长石的平均生长速率,那么根据公式(1)、(2)和(3)就可以计算晶体在岩浆房的停留时间、成核速率和特征长度。根据前人研究(Higgins,1996; Armienti *et al.*, 2007),斜长石晶体平均生长速率约为 10^{-10} mm/s(3mm/ka),本文也应用该值,计算得到的结果也列于表 3 中。结果显示斜长石晶体停留时间在 77 ~ 107a 之间,成核速率在 2.46 ~ 4.36 × $10^{-10}mm^{-3}s^{-1}$之间。

4.4 马鞍山和打莺山粗安岩中斜长石微斑晶 CSD 分析

由于马鞍山和打莺山粗安岩中的斑晶熔蚀强烈,对其进行 CSD 分析误差较大,所以本次研究未统计斑晶的大小,而是对熔岩中部分斜长石微斑晶进行了晶体大小分布(CSD)分析(表 4)。

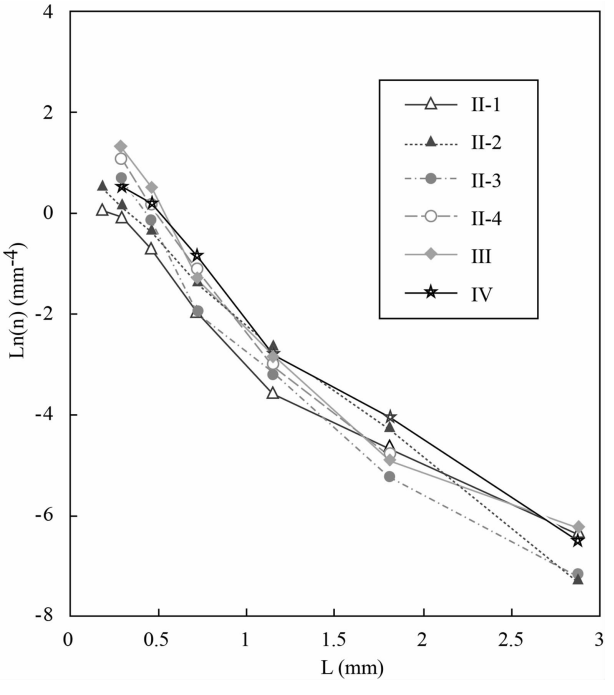


图 5 黑空山粗安岩中不同流动单元熔岩中斜长石斑晶 CSD 图

Fig. 5 CSD diagrams of plagioclase phenocrysts in different flow units of Heikongshan lavas

首先在光学显微镜下测量斜长石微斑晶的长宽比平均值为 4∶1,根据上面介绍的方法,三轴比选择为 1∶4∶8。微斑晶自形较好,圆度设为零。然后应用 CSDCorrection 1.3 软件得到马鞍山和打莺山粗安岩中的微斑晶的大小分布

表 4 马鞍山和打莺山粗安岩中斜长石微斑晶 CSD 参数表

Table 4 CSD parameters of plagioclase micro-phenocrysts in Ma'anshan and Dayingshan trachyandesite lavas

样品号	面积 (mm^2)	晶体数量 (N)	斜率 (K)	截距 (D)	特征长度 (L_D) (μm)	拟合度 (Q)	停留时间 (t) (a)	成核速率 (J) ($10^{-10}mm^{-3}s^{-1}$)
08TCM1-5	34.37	298	-14.40	8.99	69.40	0.89	22	8022
08TCM2-1	10.40	462	-16.80	10.84	59.50	0.59	19	51021
09TCM2-1	8.26	265	-17.60	10.64	56.80	0.01	18	41773
09TCM5-1	80.90	581	-8.47	7.28	118.10	0.01	37	1451
09TCM6-1	33.11	289	-8.87	7.73	112.70	0.22	36	2276
08TCD2-4	29.37	292	-10.10	8.05	99.00	0.31	31	3134
09TCD1-11	21.54	451	-19.90	10.50	50.30	0.61	16	36316

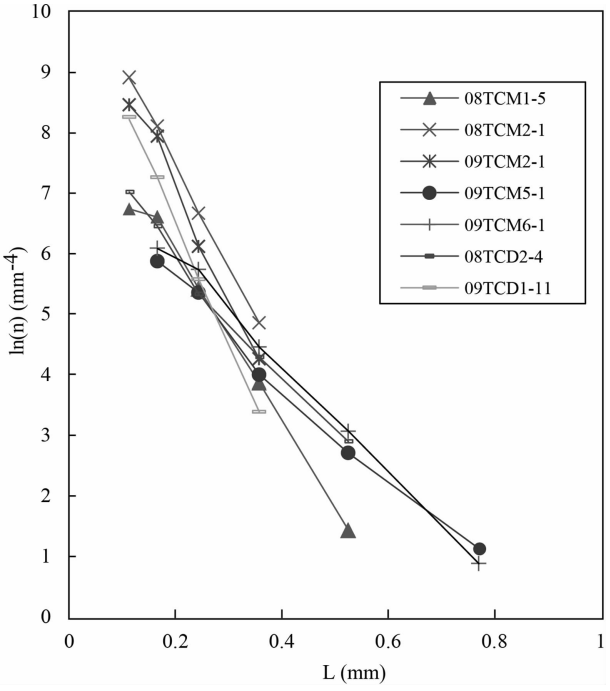


图 6 马鞍山和打莺山粗安岩中斜长石微斑晶 CSD 图

Fig. 6 CSD diagrams of plagioclase micro-phenocrysts in Ma'anshan and Dayingshan trachyandesite lavas

(CSD)图,见图 6。由于黑空山粗安岩中微斑晶较少,没有统计其 CSD 特征。

由图 6 可见,斜长石微斑晶的 CSD 曲线呈较好的线性关系,由表 4 也可以看出,Q 值均大于 0.01。不同期次熔岩中斜长石微斑晶 CSD 曲线的斜率、截距和特征长度变化范围较大,例如马鞍山微斑晶 CSD 的斜率变化范围在 -8.47 ~ -17.6 之间,截距在 7.28 ~ 10.84 之间,特征长度在 56.8 ~ 118.1μm 之间,打莺山两个样品的微斑晶 CSD 的斜率分别为 -10.1 和 -19.9,截距分别为 8.05 和 10.5,特征长度为 99μm 和 50.3μm。但相同期次熔岩中斜长石微斑晶的 CSD 参数较一致,例如马鞍山 09TCM5-1 样品和 09TCM6-1 样品(表 4)。

若斜长石晶体平均生长速率也按 10^{-10}mm/s(3mm/ka)计算,得到的结果列于表 4 中。可以看到马鞍山粗安岩中斜长石微斑晶的停留时间变化在 18 ~ 37a 之间,成核速率变化在 1451 ~ 58105 × 10^{-10} $mm^{-3}s^{-1}$之间,打莺山粗安岩中斜长石微斑晶的停留时间变化在 16 ~ 31a 之间,成核速率变化在 3134 ~ 36316 × 10^{-10} $mm^{-3}s^{-1}$之间。

5 讨论

黑空山、马鞍山和打莺山熔岩成分包括有粗面玄武岩、玄武质粗安岩、粗安岩和粗面岩,但均以粗安岩为主,三个火山粗安岩中的斑晶成分范围一致,根据樊祺诚等(1999)、赵勇伟和樊祺诚(2010),它们具有相同岩浆起源。但是黑空山粗安岩与马鞍山和打莺山粗安岩的显微结构特征、斑晶含量和大小具有较大的差异,这些均反映了不同的岩浆过程,推测它们来自不同的岩浆房。赵慈平等(2006)利用地热梯度推断黑空山与马鞍山和打莺山下分别存在一个岩浆囊,这也证实了的本文的推测。

黑空山熔岩具有微上凹形的 CSD 图形,产生这种 CSD 图的原因有:(1)晶体的堆积作用(Marsh,1988);(2)两种或多种岩浆的混合(Higgins,1996;Higgins and Roberge,2007);(3)岩浆上升和侵位时的冷却作用(Armienti *et al.*,1994);(4)粗化作用(coarsening),或称为退火(annealing)、Ostwald 成熟和结构平衡(Higgins and Roberge,2003,2007)。据樊祺诚等(1999)、赵勇伟和樊祺诚(2010)可知黑空山岩浆演化与辉石结晶分离有关,而不是斜长石,所以堆积和分离结晶作用不是影响斜长石 CSD 曲线发生变化的主要因素。粗化作用产生的 CSD 图中左侧细粒部分会产生倒转(Higgins and Roberge,2007),而黑空山熔岩中斜长石 CSD 图并无该现象,所以粗化作用也不是影响斜率的主要因素。赵勇伟和樊祺诚(2010)的研究结果指出,岩浆在上升过程中较少受到地壳物质的混染,这指示着岩浆上升的速率可能很快,由冷却作用产生斜长石 CSD 弯曲的可能很小。前面提到,熔岩中存在二辉橄榄岩包体,说明黑空山岩浆房存在幔源岩浆的补给,所以此处 CSD 曲线呈微上凹形应该是岩浆房内残留岩浆与幔源岩浆发生了小规模的混合作用造成。

镜下分析发现,部分马鞍山和打莺山粗安岩样品中存在三种大小的斜长石,一种是较大的斑晶,直径一般为 1 ~ 3mm,另一种为较小的微斑晶,直径在 30μm ~ 1mm 之间,还有一种为斜长石针状微晶,直径一般小于 30μm。这些斜长石针状微晶含量较高是熔岩在喷出后,与大气或地面接触,温度快速降低,产生较高的过冷度而形成的。所以微斑晶的形成不可能是喷发后形成的,只能在喷发之前形成,即在岩浆房内部或是上升过程中形成。这些微斑晶比较大的斑晶的含量多,直径小,并具有骨骼状结构,说明它们形成时的过冷度要比较大斑晶形成时高,但停留时间较短,由表 4 中的结果也可以看出,停留时间只有 16 ~ 37a 左右,成核速率远大于较大斑晶形成时的成核速率(表 4),说明岩浆受到的过冷度相对较高。如此高的过冷度在岩浆房内很难达到,所以很可能是岩浆上升后,周围较冷的围岩造成。也就是说岩浆从岩浆房上升时,可能并未直接喷出地表而是停留在地壳的某处,形成一个小型的岩浆囊,停留一段时间后又喷出地表。前面提到熔岩中的筛状结构被认为是晶体部分熔融产生,可能是解压作用的一种反映(Nelson and Montana,1992),这是由于岩浆的上升,压力下降使得较大的斑晶熔蚀,而后岩浆受到围岩的冷却作用,所以产生了大量的微斑晶。由微斑晶的 CSD 曲线呈很好的线性关系,说明微斑晶形成时的环境相对稳定。黑空山粗安岩中很少含有微斑晶,说明黑空山大部分岩浆在上升时可能未曾停留。根据地球物理资料:秦嘉政等(2000)得到腾冲火山区下存在上下两个低速体,分别在约 3 ~ 9km 深度处和 16 ~ 24km 深度处;叶建庆等(2003)认为在打莺山火山以南地区的地壳上部深度 14km 内存在 2 个岩浆囊体,上部岩浆囊体位于老龟坡和马鞍山 2 个火山之间,深度约 4 ~ 6km,下部岩浆囊体位于马鞍山与腾冲县城、沙坝、热海一带,深度约 8 ~ 14km 以下。这也佐证了以上的推论。

熔岩中微斑晶停留时间和成核速率的不同,反映每期岩浆受到的过冷度不同,推测是由于随着岩浆的喷出,岩浆房内的压力发生变化,使得岩浆上升速率不同所致。虽然还不能确定不同期次的岩浆是否停留在同一个位置,但根据以上的推论可知,腾冲火山区下在横向和纵向上均存在至少两个岩浆房。

6 结论

黑空山、马鞍山和打莺山火山熔岩以粗安岩为主,三座火山粗安岩中的斑晶成分范围接近,具有同源性,但它们的显微结构特征具有一定的差异,反映了不同的岩浆环境,推测来自不同的岩浆囊。黑空山粗安岩中斜长石斑晶的 CSD 曲线呈微上凹形特征,反映了小规模的岩浆混合作用。马鞍山和打莺山粗安岩的微斑晶 CSD 曲线呈很好的线性关系,说明微斑晶形成时的环境相对稳定,推测这些微斑晶是在岩浆上升过程中,停留在地壳的某处并形成一个小型的岩浆囊后受围岩的冷却作用形成。根据以上的分析,腾冲火山区下在横向和纵向上均至少存在两个岩浆囊。

致谢 衷心感谢中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室的毛骞、马玉光老师和中国地质大学(北京)电子探针实验室的尹京武老师在电子探针分析过程中的热情支持和帮助。

References

Armienti P, Pareschi MT, Innocenti F and Pompilio M. 1994. Effects of magma storage and ascent on the kinetics of crystal growth: The case of the 1991 – 93 Mt. Etna eruption. Contributions to Mineralogy and Petrology, 115(4): 402 – 414

Armienti P, Francalanci L and Landi P. 2007. Textural effects of steady state behaviour of the Stromboli feeding system. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 160: 86 – 98

Brugger CR and Hammer JE. 2010. Crystal size distribution analysis of plagioclase in experimentally decompressed hydrous rhyodacite magma. Earth Planet. Sci. Lett., 300: 246 – 254

Cashman KV and Marsh BD. 1984. Crystal-size spectra and kinetics of crystal growth in magmas II. Application. Geological Society of America. Abstracts Programs, 16: 465

Cashman KV. 1988. Crystallization of Mount St. Helens dacite: A quantitative textural approach. Bulletin of Volcanology, 50: 194 – 209

Cashman KV and Ferry JM. 1988. Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization III. Metamorphic crystallization. Contributions to Mineralogy and Petrology, 99: 401 – 405

Cashman KV and Marsh BD. 1988. Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization II. Makaopuhi lava lake. Contributions to Mineralogy and Petrology, 99: 292 – 305

Cheng ZM and Lu FX. 1997. Crystal size distribution in volvanic rocks in Laoshangou of Gunggar basin and significance of crystallization kinetics. Geosicence, 11(2): 149 – 156(in Chinese with English abstract)

D'Oriano C, Cioni R, Bertagnini A, Andronico D and Cole PD. 2011. Dynamics of ash-dominated eruptions at Vesuvius: The post-512 AD AS1a event. Bulletin of Volcanology, 73(6): 699 – 715

Fan QC, Liu RX, Wei HQ, Shi LB and Sui JL. 1999. The magmatic evolution of the active volcano in the Tengchong Area. Geological Review, 45(Suppl.): 895 – 904(in Chinese with English abstract)

Fornaciai A, Landi P and Armienti P. 2009. Dissolution/crystallization kinetics recorded in the 2002 ~ 2003 lavas of Stromboli (Italy). Bulletin of Volcanology, 71(6): 631 – 641

Higgins MD. 1996. Crystal size distributions and other quantitative textural measurements in lavas and tuff from Mt Taranaki (Egmont volcano), New Zealand. Bulletin of Volcanology, 58(2 – 3): 194 – 204

Higgins MD. 2000. Measurement of crystal size distributions. American Mineralogist, 85: 1105 – 1116

Higgins MD. 2002a. Closure in crystal size distributions (CSD), verification of CSD calculations, and the significance of CSD fans. American Mineralogist, 87(1): 171 – 175

Higgins MD. 2002b. A crystal size-distribution study of the Kiglapait layered mafic intrusion, Labrador, Canada: Evidence for textural coarsening. Contributions to Mineralogy and Petrology, 144(3): 314 – 330

Higgins MD and Roberge J. 2003. Crystal size distribution (CSD) of plagioclase and amphibole from Soufriere Hills volcano, Montserrat: Evidence for dynamic crystallization/textural coarsening cycles. Journal of Petrology, 44: 1401 – 1411

Higgins MD. 2006a. Quantitative Textural Measurements in Igneous and Metamorphic Petrology. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1 – 260

Higgins MD. 2006b. Use of appropriate diagrams to determine if crystal size distributions (CSD) are dominantly semi-logarithmic, lognormal or fractal (scale invariant). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 154: 8 – 16

Higgins MD and Roberge J. 2007. Three magmatic components in the 1973 eruption of Eldfell volcano, Iceland: Evidence from plagioclase crystal size distribution (CSD) and geochemistry. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 161: 247 – 260. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2006.12.002

Higgins. 2011. Quantitative petrological evidence for the origin of K-feldspar megacrysts in dacites from Taapaca volcano, Chile. Contributions to Mineralogy and Petrology, 162(4): 709 – 723, DOI: 10.1007/s00410-011-0620-9

Huangfu G and Jiang CS. 2000. Research on Tengchong Volcano. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 417 – 418 (in Chinese)

Jerram DA, Mock A, Davis GR and Field M. 2009. 3D crystal size distributions: A case study on quantifying olivine populations in kimberlites. Lithos, 112(1): 223 – 235

Jiang CS. 1998. Distribution characteristics of Tengchong volcano in the Cenozoic era. Journal of Seismological Research, 21: 309 – 319 (in Chinese with English abstract)

Jiang CS, Zhou RQ, Zhou ZH *et al.* 2000. Division of tectonic elements in west Yunnan and its neighboring regions and their features. Journal of Seismological Research, 23: 21 – 29 (in Chinese with English abstract)

Le Maitre RW, Bateman P, Dudek A *et al.* 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Oxford: Blackwell, 1 – 193

Liu RX. 2000. Active Volcanoes in China. Beijing: Seismological Press, 32 – 44 (in Chinese)

Marsh BD. 1984. Crystal-size spectra and kinetics of crystal growth in magma: I. Theory. Application. Geological Society of America. Abstracts Programs, 16: 585

Marsh BD. 1988. Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization I. Theory. Contributions to Mineralogy and Petrology, 99(3): 277 – 291

Marsh BD. 1998. On the interpretation of crystal size distributions in magmatic systems. Journal of Petrology, 39(4): 553 – 599

Morgan DJ and Jerram DA. 2006. On estimating crystal shape for crystal size distribution analysis. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 154(1 – 2): 1 – 7

Nelson ST and Montana A. 1992. Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. American Mineralogist, 77: 1242 – 1249

Noguchi S, Toramaru A and Shimano T. 2006. Crystallization of microlites and degassing during magma ascent: Constraints on the fluid mechanical behavior of magma during the Tenjo Eruption on Kozu Island, Japan. Bulletin of Volcanology, 68(5): 432 – 449

Piochi M, Mastrolorenzo G and Pappalardo L. 2005. Magma ascent and eruptive processes from textural and compositional features of Monte Nuove pyroclastic products, Campl Flegrei, Italy. Bulletin of Volcanology, 67: 663 – 678

Qin JZ, Huangfu G, Li Q *et al.* 2000. 3-D chromatography of velocity structure in Tengchong volcano areas and nearby. Journal of Seismological Research, 23(2): 157 – 164 (in Chinese with English abstract).

Smith JV. 1974. Feldspar Minerals. New York: Springer-Verlag, 447

Tapponnier P, Lacassin R, Leloup PH, Scharer U, Zhong DL, Wu HW, Liu XH, Ji SC, Zhang LS and Zhong JY. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left lateral shear between Indochina and South China. Nature, 343: 431 – 437. DOI: 10.1038/343431a0

Voltolini M, Zandomeneghi D, Mancini L and Polacci M. 2011. Texture analysis of volcanic rock samples: Quantitative study of crystals and vesicles shape preferred orientation from X-ray microtomography data. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 202: 83 – 95

Wei HQ, Sparke RSJ, Liu RX, Fan QC, Wang Y, Hong HJ, Zhang H, Chen H, Jiang C, Dong J, Zheng Y and Pan Y. 2003. Three active volcanoes in China and their hazards. Journal of Asian Earth Sciences, 21: 515 – 526. doi: 10.1016/S1367-9120(02)00081-0

Xu WY, Fu B, Ren QJ *et al.* 1997. Size statistics of plagioclase phenocrysts in mineralized and barren porphyries in Shaxi porphyry copper-gold deposit, Anhui Province and its significance for studying magma-crystallization kinetics and ore-forming process. Acta Petrologica Sinica, 13(2): 180 – 188 (in Chinese with English abstract)

Xu XC, Yue SC, Pan CR and Xie QQ. 2001. The magmatic dynamics of the Laowan granite and its relations with mineralization in Tonghai Henan. Acta Petrologica Sinica 17(2): 245 – 253 (in Chinese with English abstract)

Ye JQ, Cai SP, Liu XJ *et al.* 2003. Characteristics of earthquake cluster activity in Tengchong volcanic area. Seismology and Geology, 25 (Suppl.): 128 – 137 (in Chinese with English abstract)

Yu HM, Lin CY, Shi LB *et al.* 2010. Characteristics and origin of mafic and ultramafic xenoliths in trachyandesite lavas from Heikongshan volcano, Tengchong, Yunnan Province, China. Science China (Earth Sciences), 53: 1295 – 1306, doi: 10.1007/s11430-010-4044-6

Yuan F, Zhou TF, Tan LG *et al.* 2006. Dynamics of magma evolvement of Atishi granite body in Nurt area, Xinjian. Geological Science and Technology Information, 25(1): 14 – 18 (in Chinese with English abstract)

Zandomeneghi D, Voltolini M, Mancini L, Brun F. Dreossi D and Polacci M. 2010. Quantitative analysis of X-ray microtomography images of geomaterials: Application to volcanic rocks. Geosphere, 6: 793 – 804

Zhao CP, Ran H and Chen KH. 2006. Present-day magma chambers in Tengchong volcano area inferred from relative geothermal gradient. Acta Petrologica Sinica, 22(6): 1517 – 1528 (in Chinese with English abstract)

Zhao YW and Fan QC. 2010. Magma origin and evolution of Maanshan volcano, Dayingshan volcano and Heikongshan volcano in Tengchong area. Acta Petrologica Sinica, 26(3): 1133 – 1140 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

成中梅，路凤香. 1997. 准格尔盆地老山沟火山岩晶体粒度分布及其结晶动力学意义. 现代地质，11(2)：149 – 156

樊祺诚，刘若新，魏海泉，史兰斌，隋建立. 1999. 腾冲活火山的岩浆演化. 地质论评，45(增刊)：895 – 904

皇甫岗，姜朝松. 2000. 腾冲火山研究. 昆明：云南科技出版社，417 – 418

姜朝松. 1998. 腾冲新生代火山分布特征. 地震研究, 21: 309 – 319
姜朝松, 周瑞琦, 周真恒等. 2000. 滇西地区及邻区构造单元划分及其特征. 地震研究, 23: 21 – 29
刘若新. 2000. 中国的活火山. 北京: 地震出版社, 32 – 34
秦嘉政, 皇甫岗, 李强等. 2000. 腾冲火山及邻区速度结构的三维层析成像. 地震研究, 23(2): 157 – 164
徐文艺, 傅斌, 任启江等. 1997. 安徽沙溪含和不含铜(金)矿斑岩斜长石斑晶粒度统计及其岩浆结晶动力学和成矿意义. 岩石学报, 13(2): 180 – 188
徐晓春, 岳书仓, 潘成荣, 谢巧勤. 2001. 河南桐柏老湾花岗岩岩浆动力学与成矿. 岩石学报, 17(2): 245 – 253
叶建庆, 蔡绍平, 刘学军等. 2003. 腾冲火山区地震群的活动特征. 地震地质, 25(增刊): 128 – 137
袁峰, 周涛发, 谭绿贵等. 2006. 新疆诺尔特地区阿提什花岗岩体岩浆演化动力学. 地质科技情报, 25(1): 14 – 18
赵慈平, 冉华, 陈坤华. 2006. 由相对地热梯度推断的腾冲火山区现存岩浆囊. 岩石学报, 22(6): 1517 – 1528
赵勇伟, 樊祺诚. 2010. 腾冲马鞍山、打赢山、黑空山火山岩浆来源与演化. 岩石学报, 26(4): 1133 – 1140