

# 云南腾冲新时期火山岩矿物及其熔体包裹体研究\*

李霓 张柳毅

LI Ni and ZHANG LiuYi

中国地震局地质研究所,北京 100029

*Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*

2011-05-30 收稿, 2011-08-22 改回.

**Li N and Zhang LY. 2011. A study on volcanic minerals and hosted melt inclusions in newly-erupted Tengchong volcanic rocks, Yunnan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10):2842–2854**

**Abstract** Tengchong volcanic clusters are located at the border area of western Yunnan Province and Myanmar. They consist of Heikong Mountain, Dakong Mountain, Xiaokong Mountain, Daying Mountain and Ma'an Mountain, etc., which are famous Quaternary volcanic clusters in our country and are divided by oldly- and newly-erupted volcanoes. Previous work testified Daying, Ma'an and Heikong Mountains are newly-erupted ones, which had eruption activities in Late Pleistocene and Holocene epochs. The phenocrysts in these volcanic rocks are pyroxene, olivines and feldspars. The melt inclusions are found in hosted phenocrysts which have different shapes, randomly distributed and have some variations after entrapment. The compositional variation of melt inclusion in newly-erupted volcanic rocks is larger than that of matrix glass. The chemical compositions of melt inclusion and matrix glass have covered basaltic trachyandesite, trachyandesite, trachyte and rhyolite etc., which are consistent with those of Late Pleistocene and Holocene volcanic rocks in Tengchong. According to EMP analyses of melt inclusions in hosted phenocrysts, microcrystals and matrix glass, the content of volatile chlorine doesn't show large variations in melt inclusions and matrix glass, but those of volatile fluorine and SO<sub>3</sub> do have more variations in melt inclusions than in matrix glass. In general, the degassing rate of newly-erupted Tengchong volcanic rocks was low and they didn't emitted more gas to the atmosphere, thus had small effect on the climate and environment by speculation. Nevertheless, future disaster shouldn't be ignored.

**Key words** Newly-erupted volcanic rocks; Phenocryst; Melt inclusion; Matrix glass; Tengchong, Yunnan

**摘要** 腾冲火山群位于我国云南省西部和缅甸的交界处,由黑空山、大空山、小空山、打鹰山、马鞍山等一系列火山组成,是我国著名的第四纪火山群,从喷发活动时间上可分为老期火山和新期火山。前人研究证实,打鹰山、马鞍山和黑空山为新期火山,它们在全新世都有过喷发活动。这些新期火山岩的主要斑晶矿物为辉石、橄榄石和长石,主要的斑晶矿物中都含有熔体包裹体,它们形态多样,分布不规则,且部分显示后期有变化。探针分析表明,新期火山岩矿物中熔体包裹体成分的变化范围大于其基质玻璃成分的变化范围,它们的化学成分分布范围涵盖了玄武粗安岩、粗面安山岩、粗面岩和流纹岩等岩石类型,与腾冲火山区晚更新世以来火山岩的成分分布范围基本一致。根据对新期火山岩斑晶和微晶矿物中熔体包裹体及基质玻璃成分的测试研究,其中挥发分 Cl 的含量在包裹体和基质中变化不大,但 F、SO<sub>3</sub> 在熔体包裹体中的含量高于基质,总体上腾冲新期火山喷发时岩浆的脱气率较低,喷发时并未向空中喷出大量气体,推测对当时的气候环境影响不大,但未来喷发的灾害效应不容忽视。

**关键词** 新期火山岩;斑晶矿物;熔体包裹体;基质玻璃;云南腾冲

中图法分类号 P588.14

\* 本文受中国地震局地震行业专项项目(201108001、200708-27)资助。

第一作者简介:李霓,女,1967年生,研究员,从事火山岩岩石学与地球化学研究,E-mail: lini8589@hotmail.com

## 1 引言

腾冲火山区位于云南西部,滇缅弧形构造带东缘的中缅交界地区,距葡萄-密支那现代缝合线约 300km,其间夹持缅甸孤板块(阚荣举和赵晋明,1994)。该区火山众多,不大的范围内分布着 8 个火山群 70 多座火山,地震活动频繁,地热资源也相当丰富,目前热海热田地区仍有水热活动,这在我国境内除长白山天池火山以外是不多见的。这种火山、地震及地热共生的现象,是板缘构造活动的产物及重要佐证。在腾冲火山区,有数条近南北到北北东向的断裂,其中以近南北向的腾冲断裂为主体,由北至南贯穿火山区,全区 80% 以上的火山、地震沿该断裂分布(皇甫岗,1997;皇甫岗和姜朝松,2000)。

多位学者的研究认为(穆治国等,1987; Nakai *et al.*, 1993; 廖志杰,1999),腾冲火山活动始于中新世,上新世后活动增强,晚更新世达到高潮。虽然喷发时限不一,但总体上腾冲火山可以分为老期火山(包括上新世、早更新世、中更新世三期)和新期火山(晚更新世-全新世),火山活动时序具有从南北、东西两侧向中间逐渐变新的特征,其中马鞍山、黑空山和打鹰山就是腾冲火山区最新一期火山活动的产物,王非等(1999)和李大明等(2000)曾给出了这 3 座火山在更新世晚期和全新世活动的年龄结果。

腾冲火山的活动与印度板块和亚欧板块 2 个大陆板块俯冲、碰撞有关,但与早期板块的俯冲没有动力或成因上的关系,不属于大陆边缘板块俯冲作用的产物(王瑜,1999),而是陆内壳幔相互作用导致的岩浆起源。腾冲火山岩是一套与陆内板块碰撞带环境有关的高钾钙碱性火山岩,岩性为玄武岩-粗面玄武岩-玄武质粗安岩-粗安岩,并非岛弧或弧后环境的安山岩。由岩浆演化趋势推测,腾冲火山区之下的壳幔边界或壳内岩浆房的岩浆将向更具爆炸性和灾害性的富硅、碱的酸性岩浆演化(樊祺诚等,1999)。

呈近南北向分布的马鞍山、打鹰山、黑空山火山是腾冲火山群中少数几座新期火山(图 1),其喷发活动从晚更新世延续到全新世,都经历过多次喷发,并且有逐渐向南迁移的趋势,最新喷发活动发生在约 7500yr 前的马鞍山(王非等,1999),它们的岩性以粗安岩为主,较早期的底部喷发物岩性有粗面玄武岩和玄武质粗安岩等。

多年来,许多学者对腾冲火山群进行过多方面的研究,但大多集中在地震、构造、地球物理、年代学和气体同位素研究等方面(白登海等,1994;姜朝松,1985a,b,1998;姜朝松和梁秀英,1990;阚荣举和赵晋明,1994;李大明等,1999,2000;秦嘉政等,1996,1997;上官志冠,2000;上官志冠等,1999,2000;上官志冠和霍卫国,2001;孙洁等,1989;王非等,1999;王瑜,1999;赵崇贺和陈廷方,1992),虽然对其岩浆演化及成因也有人做过研究(穆治国等,1987;樊祺诚等,1999;赵勇伟和樊祺诚,2010;Yu *et al.*, 2010),但对其火山岩矿物及其中的熔体包裹体几乎没有做过专门研究,而熔体包裹体带有岩

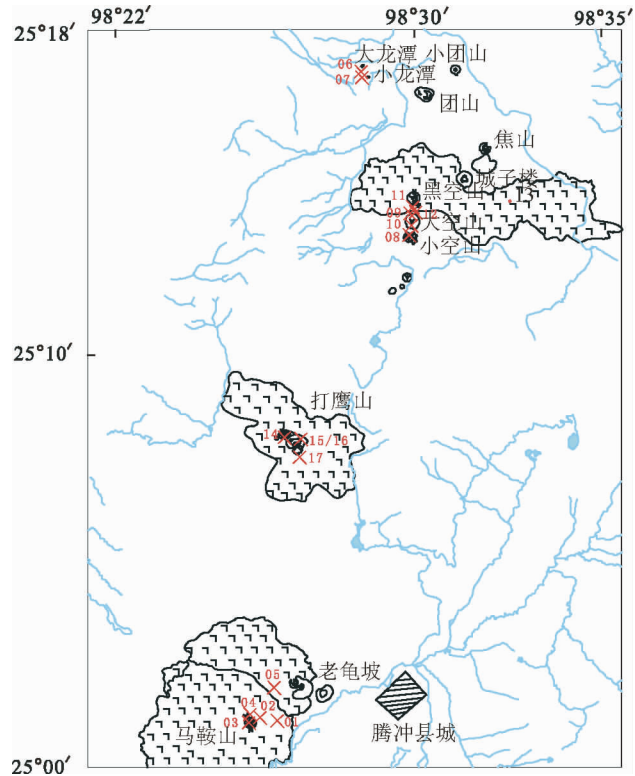


图 1 腾冲新时期火山岩分布及采样图

图中数字为采样点号

Fig. 1 Distribution map of newly-erupted Tengchong volcanic rocks and sampling sites

Numbers stand for sampling sites

浆喷发前的重要信息。由于腾冲火山群中火山众多,本次工作通过野外详细踏勘和采样(表 1),重点选择马鞍山、打鹰山和黑空山这三座火山锥和火口都保存得很完整的新期火山的火山岩矿物及其中的熔体包裹体以及基质玻璃为研究对象,了解挥发分 F、Cl、S 含量和岩浆脱气情况,分析腾冲新期火山岩喷发时对环境气候可能造成的影响。

## 2 新期火山野外考察

马鞍山、打鹰山和黑空山 3 座火山在腾冲火山群中是火山锥和火山口保存最完整的,熔岩流也无风化层,这些都是年轻的近代火山之地貌特征(樊祺诚等,1999)。马鞍山火山位于腾冲县城西侧约 6km,是距县城最近的活火山。火山锥为双生岩渣锥,火口缘南高北低,北侧有熔岩溢出口及熔岩塌陷坑。打鹰山火山是 3 座火山中规模最大、活动历史最长、高度最高的 1 座活火山,由多期熔岩流复合而成,顶部有岩渣锥。野外考察中发现打鹰山火山西北侧山腰上有 1 座寄生火山,海拔 2462m,名为大哑口火山。此寄生火山顶部相对较平坦,杂草丛中不时有大块灰黑色熔岩出露,火口中间还可见熔岩冢,整体上熔岩流流动方向为南西向。火山熔

表1 腾冲新时期火山岩样品采样记录

Table 1 Sample collection records of newly-erupted Tengchong volcanic rocks

样品号	采样地点	GPS 座标	样品简述
08YTC01	马鞍山东坡下	98°26'32E 25°01'02N	黑色气孔状熔岩
08YTC02	马鞍山东坡上	98°26'03E 25°01'05N	灰色气孔状熔岩, 气孔略少
08YTC03	马鞍山南溢出口	98°25'43E 25°01'00N	灰色致密块状熔岩
08YTC04	马鞍山北坡山腰	98°25'41E 25°01'18N	灰黑色块状熔岩
08YTC11	黑空山南侧山脚	98°29'58E 25°13'38N	黑色结壳熔岩
08YTC12	黑空山南侧山脚	98°30'08E 25°13'30N	黑色结壳熔岩
YTC9719*	黑空山仙人洞	无	黑色结壳熔岩
08YTC13	曲石境内黑空山岩流前锋	98°32'38E 25°13'52N	灰黑色气孔状结壳熔岩
08YTC14	打鹰山西北侧大哑口火山口	98°26'38E 25°08'01N	黑色块状熔岩
08YTC15	打鹰山山顶最晚期熔岩流	98°26'55E 25°07'53N	灰黑色块状熔岩, 较致密
08YTC16	打鹰山山顶	98°26'55E 25°07'53N	紫红色火山渣块
08YTC17	打鹰山东坡山腰	98°27'02E 25°07'44N	灰黑色块状熔岩, 较致密, 可见长石斑晶

注: \* YTC9719 来自樊祺诚以前所采样品

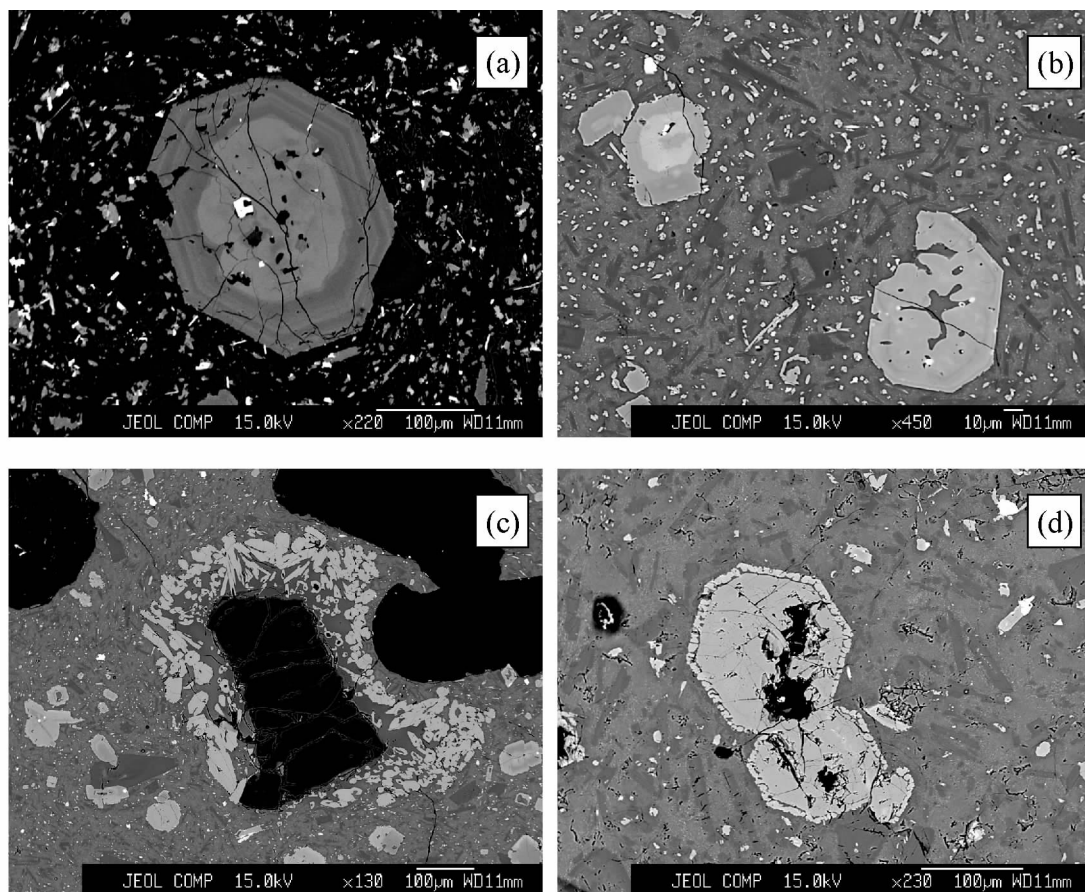


图2 火山岩中环带状和“镶边”辉石

(a)-样品 08YTC03; (b, c)-样品 08YTC15; (d)-样品 YTC9719

Fig. 2 Zoning and encircled pyroxene in Tengchong volcanic rocks

(a)-sample 08YTC03; (b, c)-sample 08YTC15; (d)-sample YTC9719

岩外貌较新鲜, 似是最新一期火山活动的产物。在其西侧还有另外 1 个规模更小、不知名的火山锥。打鹰山山顶可见火山弹, 但数量少, 分布范围也很有限, 显示熔岩喷发溢流时也

曾有过规模不大的爆炸喷发。黑空山火山是马站“北斗星”火山链最北部的一座火山, 火口缘完整无缺口。黑空山火山熔岩流前锋流动较远, 熔岩新鲜, 气孔沿流动方向定向排列,

表2 新期火山岩中辉石化学成分(wt%)

Table 2 Chemical composition of pyroxene in newly-erupted Tengchong volcanic rocks(wt%)

样品号	采样地点	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total	Wo	En	Fs	种类
YTC9719-1 C6 边	黑空山仙人洞	54.15	0.39	0.02	1.90	18.42	0.58	19.46	3.83	0.44	0.24	99.47	8.4	59.2	32.4	opx
08YTC12-1 C1	黑空山南侧山脚	54.10	0.33	0.09	2.08	13.71	0.31	28.05	1.64	0.06	0	100.46	3.2	75.6	21.2	opx
08YTC12-1 C2	黑空山南侧山脚	54.18	0.27	0.13	2.09	12.68	0.34	28.08	1.78	0.07	0	99.64	3.5	76.6	19.9	opx
08YTC12-1 C2*	黑空山南侧山脚	52.86	0.32	0.13	2.32	18.34	0.42	24.60	1.73	0.10	0	100.84	3.4	67.6	29.0	opx
08YTC12-1 C3	黑空山南侧山脚	50.91	0.71	0.17	3.28	7.45	0.21	16.01	19.30	0.47	0	98.52	40.6	46.8	12.6	epx
08YTC12-1 C4	黑空山南侧山脚	50.85	0.82	0.03	4.07	8.30	0.21	15.38	18.69	0.52	0	98.90	40.0	45.8	14.2	epx
08YTC12-1 C5	黑空山南侧山脚	53.93	0.27	0.35	3.77	11.16	0.21	28.78	1.80	0.09	0	100.45	3.6	78.9	17.5	opx
08YTC12-1 C6	黑空山南侧山脚	50.66	0.91	0.06	3.90	9.92	0.22	14.68	18.44	0.74	0.03	99.64	39.4	43.6	16.9	epx
08YTC13-1 C4	曲石黑空山岩流前锋	51.52	0.77	0.18	4.07	6.89	0.15	15.82	20.03	0.41	0.01	99.84	42.1	46.3	11.6	epx
08YTC13-2 mC1*	曲石黑空山岩流前锋	55.30	0.99	0.01	11.52	10.86	0.11	12.76	3.04	2.99	3.20	100.89	10.4	60.5	29.2	opx
08YTC13-2 mC3*	曲石黑空山岩流前锋	45.25	0.09	0.01	11.69	14.84	0.26	21.34	3.78	2.45	0.42	100.15	8.4	65.6	26.0	opx
08YTC13-2 mC5	曲石黑空山岩流前锋	54.12	0.99	0	11.18	11.27	0.20	15.09	2.21	3.72	1.79	100.66	6.9	65.3	27.8	opx
08YTC13-2 C9	曲石黑空山岩流前锋	54.37	0.32	0.08	1.98	13.46	0.31	28.06	1.57	0.07	0	100.26	3.1	76.0	20.9	opx
08YTC13-2 C10	曲石黑空山岩流前锋	54.31	0.32	0.25	2.36	12.26	0.31	28.70	1.68	0.05	0	100.31	3.3	77.6	19.1	opx
08YTC14-1 C1	打鹰山西北侧大哑口火山口	53.45	0.25	0.01	0.81	19.92	0.53	23.84	1.61	0.04	0.02	100.55	3.2	65.4	31.5	opx
08YTC14-1 C2	打鹰山西北侧大哑口火山口	51.28	0.20	0	0.92	26.75	0.98	17.46	1.53	0.07	0.01	99.23	3.2	51.2	45.6	opx
08YTC14-1 C4	打鹰山西北侧大哑口火山口	51.62	0.16	0.01	0.31	28.95	1.25	15.74	1.22	0.01	0	99.34	2.6	46.9	50.5	opx
08YTC15-1 C	打鹰山山顶	54.03	0.38	0.08	2.03	13.86	0.38	26.63	1.75	0.07	0	99.20	3.5	74.2	22.3	opx
08YTC15-2 mC1	打鹰山山顶	52.01	0.23	0.02	0.98	15.92	0.59	11.64	18.70	0.32	0	100.48	39.1	33.9	27.0	epx
08YTC15-2 mC2	打鹰山山顶	54.69	0.22	0.03	1.05	15.83	0.37	26.89	1.67	0.03	0	100.84	3.2	72.3	24.4	opx
08YTC15-2 mC2	打鹰山山顶	54.70	0.24	0.02	0.88	15.52	0.29	26.73	1.84	0.02	0.03	100.30	3.6	72.4	24.0	opx
08YTC15-2 mC3	打鹰山山顶	50.56	0.79	0.06	3.28	9.07	0.25	15.38	18.50	0.38	0.03	98.33	39.2	45.4	15.4	epx
08YTC15-2 mC4	打鹰山山顶	53.14	0.32	0	1.37	18.27	0.42	25.08	1.54	0.03	0	100.20	3.0	68.4	28.6	opx
08YTC15-2 mC4*	打鹰山山顶	52.50	0.39	0	1.36	20.09	0.57	22.36	1.60	0.07	0.05	99.00	3.3	63.7	33.0	opx
08YTC15-2 mC4*	打鹰山山顶	51.38	0.28	0	1.36	25.16	0.79	20.31	1.45	0.05	0.04	100.85	2.9	56.5	40.5	opx
08YTC15-2 mC5	打鹰山山顶	51.41	0.71	0.04	2.86	9.47	0.27	15.52	18.84	0.31	0.01	99.45	39.2	44.9	15.8	epx
08YTC15-2 mC5*	打鹰山山顶	51.59	1.07	0.03	5.39	9.62	0.28	13.12	16.83	0.97	0.46	99.37	39.3	42.6	18.1	epx
08YTC03-1 mC2	马鞍山南溢出口	51.75	0.46	0	1.82	10.02	0.38	14.54	19.39	0.47	0	98.81	40.6	42.4	17.0	epx
08YTC03-1 C4 边	马鞍山南溢出口	48.71	1.61	0.04	5.48	9.99	0.23	13.89	18.89	0.47	0	99.37	40.9	41.8	17.3	epx
08YTC03-1 C4 核	马鞍山南溢出口	52.26	0.32	0.07	1.37	12.59	0.43	13.07	19.75	0.39	0.01	100.28	41.1	37.8	21.1	epx
08YTC03-1 C5	马鞍山南溢出口	49.82	0.99	0.60	4.58	7.29	0.16	15.50	19.10	0.42	0.02	98.48	41.1	46.4	12.5	epx
08YTC04-1 C4	马鞍山北坡山腰	50.14	1.07	0.30	4.18	7.76	0.20	15.33	19.17	0.43	0	98.59	41.0	45.7	13.3	epx

注: C-斑晶; mC-微晶(后表同); 带\* 的为熔体包裹体中辉石

钢灰色的熔岩外貌与我国五大连池火山中的老黑山新期火山熔岩非常相似。

腾冲新期马鞍山、黑空山、打鹰山火山活动至少可以追溯到中更新世, 分布于火山的底部或外围, 现在黑空山、马鞍山、打鹰山火山地表主要为晚更新世-全新世喷发的粗安岩所覆盖, 岩浆成分从中更新世粗面玄武岩或玄武质粗安岩演化到晚更新世-全新世粗安岩(樊祺诚和史兰斌, 2000<sup>①</sup>)。

### 3 火山岩矿物

显微镜下薄片观察发现, 腾冲新期火山岩样品为斑状结构, 斑晶数量少, 为辉石、橄榄石和长石等, 约占总体积的5%以下, 基质大部分为隐晶质, 也含有微晶, 因矿物中铁质成分析出较多而出现大量钛(磁)铁矿“黑点”。镜下观察还发现, 打鹰山顶部熔岩流样品及其西北侧大哑口火山样品新鲜

清晰, 矿物较少蚀变现象, 比腾冲火山区内其它火山岩样品明显年轻, 暗示它们的喷发活动可能是腾冲火山群中的最新活动。

对这几座新期火山岩中斑晶矿物橄榄石、辉石、长石和其中熔体包裹体进行的电子探针测试工作, 是在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针室完成的, 仪器型号为JXA-8100M(JEOL), 工作条件为加速电压15kV, 探针电流20nA, 束斑直径6μm, ZAF校正法。

#### 3.1 辉石

辉石是腾冲新期火山岩矿物中主要的斑晶矿物, 数量相

① 樊祺诚, 史兰斌, 2000. 长白山天池火山区、腾冲火山区、五大连池火山区现代岩浆演化与火山区古地温模型. “九五”火山课题总结报告. 1-77

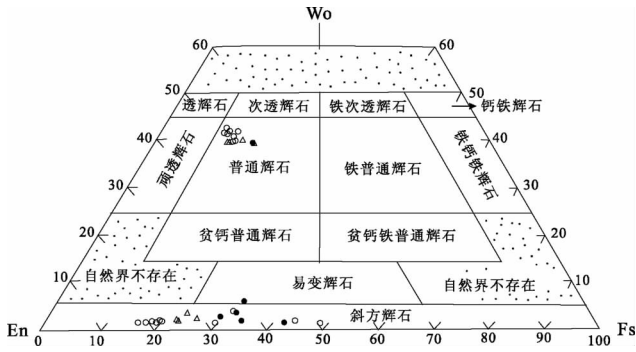


图3 辉石成分梯形投影图

○-斑晶; △-微晶; ●-熔体包裹体

Fig. 3 Ternary projections of the pyroxene composition in Tengchong volcanic rocks

○-phenocryst; △-microcrystal; ●-melt inclusion

对较多,镜下淡黄色,晶体较大,可见八边形横切面。镜下观察到有些辉石斑晶有环带现象(图2a,b),还有的围绕或包裹了早期生长的斑晶而形成环绕、镶边现象(图2c,d),但更多的是作为微晶存在。图2d中斑晶矿物具有明显的辉石横切面外观,但电子探针测试表明,边部成分为斜方辉石,而中心成分则为斜长石,可能是后期斜长石填充交代了先期结晶的辉石而留下辉石轮廓假象。无论是辉石斑晶、微晶还是熔体包裹体成分,在辉石成分投影图上都是既有斜方辉石也有单斜辉石(表2、图3)。Yu *et al.* (2010)在黑空山火山岩中发现有辉长岩和辉石岩小捕虏体,其中也是含有斜方辉石和单斜辉石,而且其成分与斑晶中的很相近,认为这些小捕虏体与挟带的岩浆是同一成因。

新期火山岩矿物中环带辉石的成分是从核部到边部的硅、铁质成分减少;而熔体包裹体中辉石成分代表着较早期的辉石成分,其种类主要是含钙低、镁铁高的斜方辉石,这也

表3 新期火山岩中橄榄石斑晶及微晶化学成分(wt%)

Table 3 Chemical composition of olivine in newly-erupted Tengchong volcanic rocks (wt%)

样品号	采样地点	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total	Fo
08YTC13-1 mC1	曲石黑空山岩流前锋	38.22	0.06	0.01	0.02	24.09	0.43	36.48	0.24	0.01	0.03	99.66	73.0
08YTC13-1 mC2	曲石黑空山岩流前锋	38.54	0.08	0.01	0.23	23.99	0.41	36.36	0.30	0.03	0.09	100.10	73.0
08YTC13-1 mC3	曲石黑空山岩流前锋	37.92	0.06	0.01	0.02	23.77	0.38	35.60	0.25	0.03	0.05	98.14	72.7
08YTC13-2 mC1	曲石黑空山岩流前锋	38.58	0.08	0	0.26	23.61	0.38	36.28	0.35	0.07	0.11	99.87	73.3
08YTC13-2 mC2	曲石黑空山岩流前锋	37.85	0.06	0	0.05	23.73	0.39	36.47	0.26	0.02	0.03	98.92	73.3
08YTC13-2 mC3	曲石黑空山岩流前锋	37.88	0.04	0.01	0.02	23.69	0.41	36.15	0.26	0.01	0.04	98.59	73.1
08YTC13-2 mC4	曲石黑空山岩流前锋	38.72	0.11	0.04	0.74	23.66	0.39	35.70	0.37	0.16	0.10	100.00	72.9
08YTC13-2 mC6	曲石黑空山岩流前锋	38.16	0.06	0	0.08	23.82	0.36	36.18	0.28	0.03	0.04	99.15	73.0
08YTC13-2 mC7	曲石黑空山岩流前锋	38.04	0.05	0.02	0.06	23.96	0.40	36.59	0.23	0	0.01	99.45	73.1
08YTC13-2 mC8	曲石黑空山岩流前锋	37.72	0.04	0.02	0.06	23.74	0.39	36.28	0.28	0	0.03	98.62	73.1
08YTC14-1 mC	打鹰山西北侧大哑口火山口	37.98	0	0	0.03	21.40	0.33	38.81	0.16	0.05	0.04	99.06	76.4
08YTC14-1 C2	打鹰山西北侧大哑口火山口	35.25	0.16	0	0.05	26.22	0.36	35.29	0.08	0.03	0.02	97.48	70.6
08YTC14-1 C2	打鹰山西北侧大哑口火山口	35.39	0.12	0.02	0.09	26.11	0.37	35.30	0.08	0.02	0.03	97.53	70.7
08YTC14-1 mC	打鹰山西北侧大哑口火山口	38.47	0.03	0.01	0.04	21.53	0.34	38.81	0.16	0.06	0.02	99.74	76.3
08YTC14-1 mC	打鹰山西北侧大哑口火山口	38.57	0.05	0.01	0.04	22.99	0.42	36.88	0.17	0.05	0.03	99.35	74.1
08YTC15-1 mC	打鹰山山顶	37.43	0.06	0	0.08	26.91	0.52	33.30	0.29	0.03	0.04	98.83	68.8
08YTC03-1 C1	马鞍山南溢出口	36.47	0.05	0.02	0.02	32.75	0.62	28.87	0.24	0.04	0	99.14	61.1
08YTC04-1 C1	马鞍山北坡山腰	38.35	0.03	0.60	0.35	17.00	0.31	42.06	0.21	0.02	0	99.12	81.5
08YTC04-1 C2	马鞍山北坡山腰	39.24	0	0	0.03	17.51	0.26	43.12	0.13	0	0.02	100.60	81.4
08YTC04-2 C1	马鞍山北坡山腰	39.16	0	0.01	0.02	17.18	0.28	42.26	0.15	0	0	99.23	81.4
08YTC04-2 mC2	马鞍山北坡山腰	37.25	0.03	0	0	30.57	0.59	31.59	0.22	0.02	0.02	100.32	64.8
08YTC04-2 mC3	马鞍山北坡山腰	37.29	0.07	0.05	0.04	25.51	0.40	35.44	0.14	0.02	0.03	99.03	71.2

说明岩浆后期是向含钙高、镁铁低的单斜辉石演化的。据研究,腾冲火山岩 MgO 对主要氧化物 FeO、CaO、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O 的变化、低的 Eu 负异常反映了岩浆的演化经历了岩浆房阶段辉石的结晶分离过程(樊祺诚等,1999;赵勇伟和樊祺诚,2010),而在显微镜下观察到的现象也证实单斜和斜方辉石是腾冲火山岩中最主要的斑晶和微晶矿物,支持了上述观点。

### 3.2 橄榄石

腾冲新期火山岩中橄榄石斑晶个体不大,数量也很少,

不到总体积的1%,更多是作为微晶存在。有的具良好的板柱状晶形,有的呈不规则粒状,镜下观察到晶体都有“亮白边”现象(图4),其边部比核部明显含铁量高,显示了不同时期岩浆成分的变化,即后期岩浆铁含量增高。电子探针分析结果显示,这些橄榄石(Fo<sub>61.1-81.4</sub>,表3)无论是斑晶还是微晶,其成分变化范围不大,大多为含镁较高的贵橄榄石,仅有少量为透铁橄榄石。

### 3.3 长石

腾冲新期火山岩矿物中虽然长石斑晶数量较少,但个体

表4 新时期火山岩长石化学成分 (wt%)

Table 4 Chemical composition of feldspar in newly-erupted Tengchong volcanic rocks (wt%)

样品号	采样地点	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total	An	Ab	Or
YTC9719-1 mC1	黑空山仙人洞	62.21	0	0	23.15	0.14	0.02	0	5.56	7.09	1.75	99.94	27.2	62.7	10.2
YTC9719-1 mC2	黑空山仙人洞	55.37	0.05	0	27.82	0.63	0.01	0.08	10.56	4.87	0.69	100.11	52.3	43.6	4.1
YTC9719-1 C3 边	黑空山仙人洞	58.98	0.37	0.03	23.81	1.32	0.04	0.22	8.20	4.41	2.41	99.81	43.1	41.9	15.0
YTC9719-1 C3 核	黑空山仙人洞	61.36	0	0	24.37	0.23	0.02	0.02	6.17	7.64	0.73	100.56	29.6	66.3	4.2
YTC9719-1 C4	黑空山仙人洞	61.70	0.03	0.10	23.75	0.27	0.03	0.03	5.77	7.57	0.86	100.16	28.2	66.8	5.0
YTC9719-1 mC5	黑空山仙人洞	54.71	0.08	0.01	27.97	0.41	0	0.07	10.96	4.82	0.64	99.67	53.6	42.7	3.7
YTC9719-1 C6 核	黑空山仙人洞	54.97	0.12	0	28.04	0.71	0	0.15	11.19	4.52	0.66	100.36	55.5	40.6	3.9
YTC9719-1 C 边	曲石黑空山岩流前缘	54.71	0.09	0.02	27.96	0.71	0.02	0.11	11.22	4.60	0.66	100.09	55.2	40.9	3.9
YTC9719-1 C 核	曲石黑空山岩流前缘	55.04	0.06	0.02	28.17	0.40	0.01	0.05	11.04	4.78	0.66	100.23	53.9	42.3	3.8
08YTC13-1 C2	曲石黑空山岩流前缘	54.13	0.06	0.03	28.76	0.44	0	0.11	12.19	4.09	0.46	100.28	60.5	36.8	2.7
08YTC14-1 C1	打鹰山西北侧大哑口火山口	57.56	0	0.04	23.38	0.21	0	0.01	6.31	7.09	0.93	95.55	31.2	63.4	5.5
08YTC14-1 C2	打鹰山西北侧大哑口火山口	61.13	0	0	23.54	0.16	0	0	5.65	7.86	0.81	99.17	27.1	68.3	4.6
08YTC14-1 pl 边	打鹰山西北侧大哑口火山口	60.70	0.01	0.05	24.40	0.21	0.01	0	6.45	7.42	0.56	99.87	31.4	65.3	3.3
08YTC14-1 pl 核	打鹰山西北侧大哑口火山口	54.12	0.04	0.02	28.54	0.20	0.02	0	11.17	4.99	0.23	99.37	54.6	44.1	1.3
08YTC15-1 pl 边	打鹰山山顶	54.59	0.04	0	27.27	0.59	0.01	0.09	10.37	4.85	0.79	98.70	51.6	43.7	4.7
08YTC15-1 pl 核	打鹰山山顶	57.20	0.01	0	26.28	0.28	0	0.00	8.53	6.13	0.43	98.89	42.3	55.1	2.5
08YTC15-1 pl 核	打鹰山山顶	52.85	0.10	0	28.89	0.49	0	0.13	11.92	4.16	0.44	98.98	59.7	37.7	2.6
08YTC15-1 pl	打鹰山山顶	52.91	0.12	0	28.75	0.48	0.01	0.10	12.35	4.27	0.43	99.45	60.0	37.5	2.5
08YTC04-1 C3 边	马鞍山北坡山腰	64.63	0.69	0	15.15	4.25	0.08	0.82	3.21	4.26	5.05	98.29	18.9	45.5	35.5
08YTC04-1 C3 核	马鞍山北坡山腰	59.63	0.07	0.06	23.73	0.25	0.03	0.02	5.95	7.62	0.58	97.92	29.1	67.5	3.4
08YTC04-1 C5	马鞍山北坡山腰	61.50	0.01	0.07	22.38	0.23	0.02	0	5.12	7.79	1.07	98.19	25.0	68.8	6.2

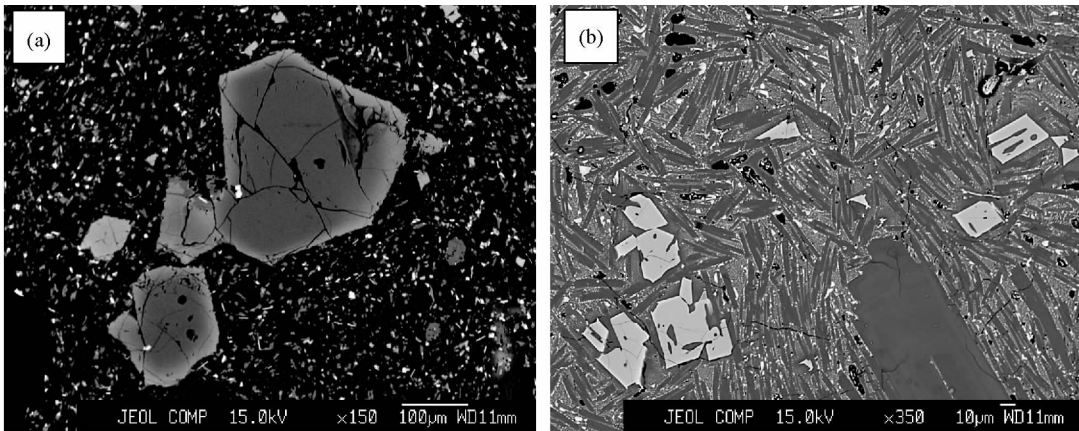


图4 背散射图像中带“亮白边”的橄榄石斑晶和微晶

(a)-样品 08YTC03; (b)-样品 08YTC13

Fig. 4 'Bright-white-rim' olivine phenocrysts and microcrystals in BSE images

(a)-sample 08YTC03; (a)-sample 08YTC13

表5 火山岩中钛铁矿化学成分 (wt%)

Table 5 Chemical composition of ilmenite in newly-erupted Tengchong volcanic rocks (wt%)

样品号	采样地点	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total
08YTC14-1 子晶	打鹰山西北侧大哑口火山口	0.19	46.21	0.06	0.25	49.40	0.58	3.18	0.12	0.03	0.04	100.05
08YTC14-1	打鹰山西北侧大哑口火山口	0.10	46.26	0.07	0.30	49.48	0.44	3.51	0.01	0.03	0.02	100.22
08YTC14-1 子晶	打鹰山西北侧大哑口火山口	16.96	24.89	0.02	0.53	43.77	0.88	6.53	4.09	0.13	0.15	97.98
08YTC14-1	打鹰山西北侧大哑口火山口	0.09	47.59	0.04	0.36	48.01	0.47	3.69	0.03	0.01	0.01	100.30
08YTC14-1	打鹰山西北侧大哑口火山口	0.09	47.27	0.04	0.35	48.16	0.39	3.47	0.05	0.04	0	99.88
08YTC15-1	打鹰山山顶	0.16	13.22	0.11	2.90	78.79	0.34	2.79	0.03	0.03	0.01	98.39



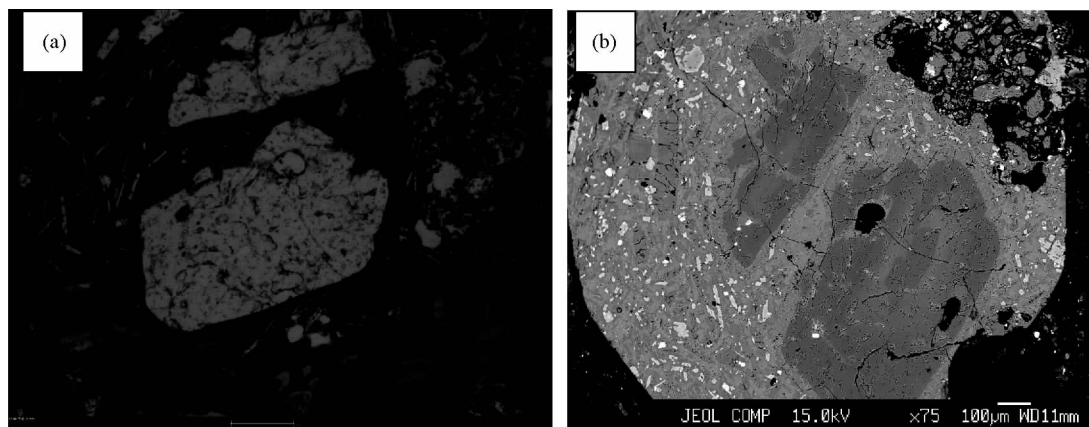


图5 黑空山火山岩中的反应边长石

(a)-显微镜下照片;(b)-电子探针背散射照片. 样品 YTC9719

Fig.5 Feldspars with reaction rim in Heikong volcanic rocks

(a)-under microscope; (b)-BSE image. Sample YTC9719

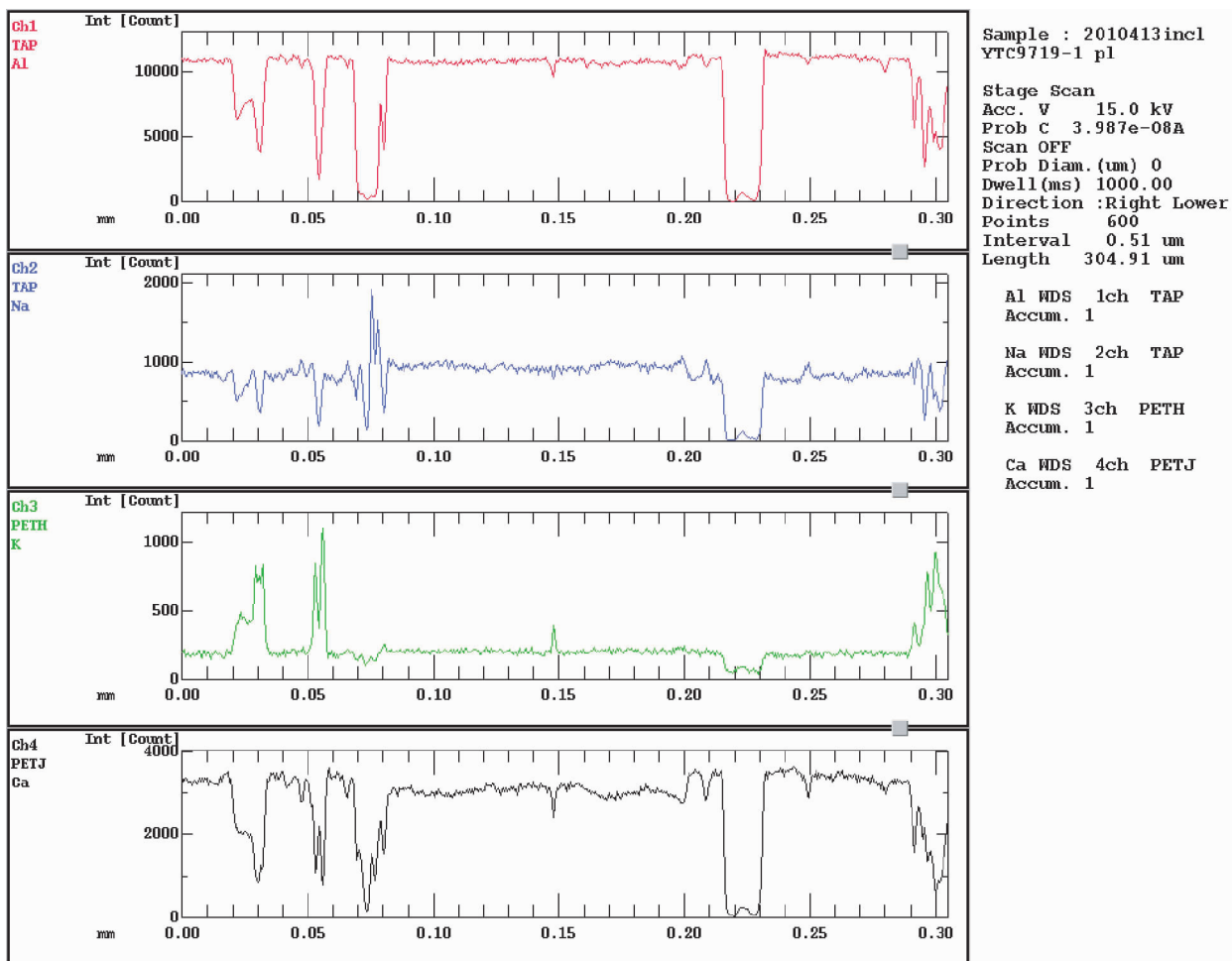


图6 黑空山长石成分连续分析图

Fig.6 Consecutive compositional profile of feldspar in Heikong volcanic rocks

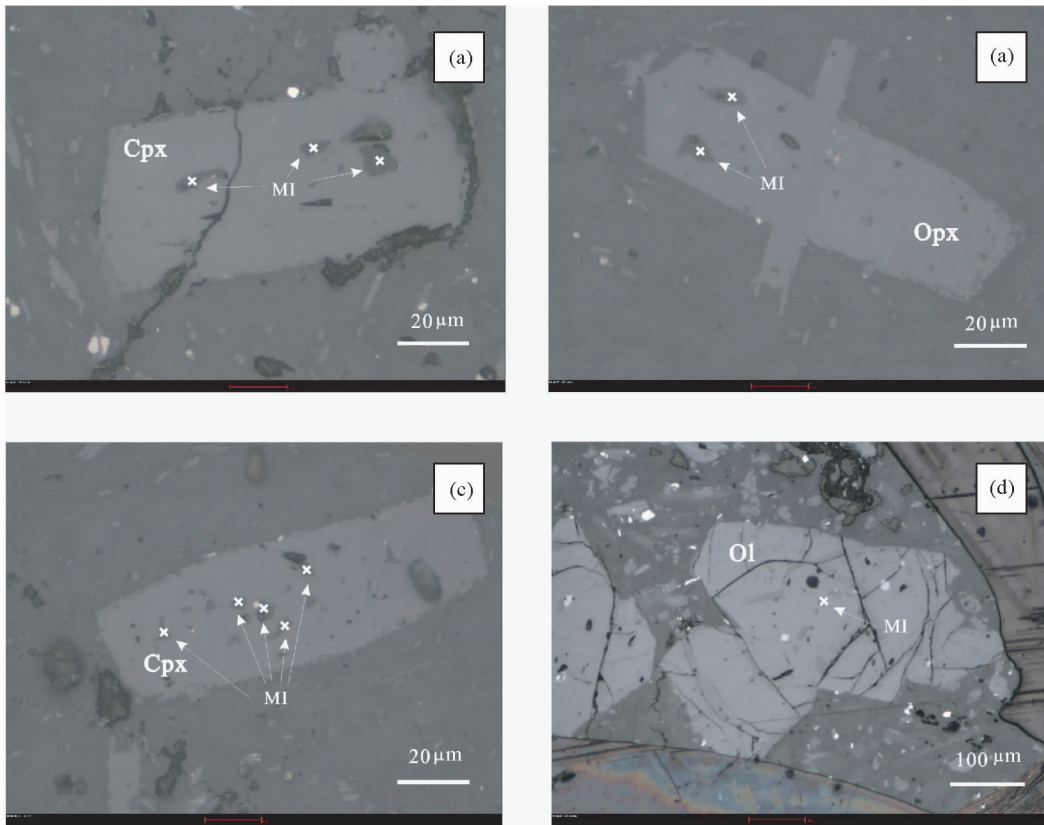


图7 腾冲新时期火山岩斑晶和微晶中的熔体包裹体

(a, b, c) 均来源于样品 08YTC15; (d)-样品 08YTC01. cpx-单斜辉石; opx-斜方辉石; ol-橄榄石; MI-熔体包裹体; x-探针测试点

Fig. 7 The melt inclusions in phenocrysts and microcrystals of newly-erupted Tengchong volcanic rocks

(a, b, c)-sample 08YTC15; (d)-08YTC01

表6 火山岩斑晶及微晶中熔体包裹体特点

Table 6 Characteristics of melt inclusions in hosted phenocrysts and microcrystals

样品号	主晶成分	主晶特点	MI 颜色	MI 形态	MI 气泡数	子晶	其他特点
08YTC01	橄榄石	透明,少量脏	浅褐色	椭圆,不规则	1	无	气泡大的 MI 有泄露现象
08YTC03	橄榄石	较干净	无色,浅褐色	椭圆,不规则,圆角四边形	1	无	MI 少
08YTC03	辉石	透明有环带	无色	不规则	0~1	无	MI 多而杂乱
08YTC04	橄榄石	较干净	褐色	椭圆	1,个别多	无	因气泡多呈“麻点”状
08YTC04	辉石	较干净	无色	椭圆	1	无	—
08YTC04	长石	大,有泥化边	无色	椭圆,近方形	1	无	MI 数量多,似假次生,气泡占比大
08YTC12	辉石	透明	无色,浅褐色	椭圆,不规则,近方形	1	无	MI 数量较多,气泡占比大
08YTC13	橄榄石	多是微晶	无色	椭圆,不规则	0~1	无	MI 数量稍多
08YTC13	辉石	大,半透明	褐色	椭圆	1	无	—
08YTC14	辉石	干净透明	褐色	不规则,椭圆	0~1	钛铁矿	MI 数量较多,个别含铁质成分
08YTC15	辉石	多是微晶	无色	不规则	0~2,个别多	无	MI 数量多,分布无规律,气泡多

注:MI:熔体包裹体

较大,约占总体积的2%~3%。大部分长石斑晶都有熔蚀现象,部分还具有反应边(图5)、泥化现象,后者表现为厚厚的泥化边或中心部位发生泥化而边缘透明,在镜下显得混浊不清,似是早期的捕虏晶。支持这一观点的是对其中一颗长石斑晶横切面所做的成分连续分析,从切线的一端到另一端 Al、Na、K、Ca 含量曲线波动较大(图6),化学成分这样剧烈

的起伏显然与岩浆熔体成分变化不符,从另一方面证明这样的长石可能是捕虏晶。镜下鉴定特征及电子探针测试都表明这些长石均为斜长石(拉长石和中长石),仅测到一颗斜长石斑晶反应边成分为钾长石(表4),这说明早期结晶的斜长石受到晚期碱性熔体成分影响而在外围生成了钾长石,即晚期岩浆成分更富碱质。



表 7 腾冲新时期火山岩斑晶及微晶中熔体包裹体化学成分 (wt%)

Table 7 Chemical composition of melt inclusions in newly-erupted Tengchong volcanic rocks (wt%)

样品号	寄主晶	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	F	Cl	SO <sub>3</sub>	Total
08YTC12-1 C1 MI(2)	opx	55.91	0.60	0.06	23.24	2.25	0.07	0.34	8.98	3.70	2.20	0.02	0.09	0.41	97.85
08YTC12-1 C2 MI(1)	opx	61.27	1.19	0.01	17.81	5.57	0.09	0.49	2.93	4.12	5.65	0.04	0.16	0.03	99.35
08YTC12-1 C3 MI(2)	cpx	64.10	1.13	0.01	18.58	1.75	0.05	0.75	2.63	4.56	4.27	0.11	0.17	0.39	98.44
08YTC12-1 C4 MI(2)	cpx	65.05	1.29	0	18.56	1.53	0.05	0.77	2.30	4.34	4.31	0.07	0.15	0.26	98.62
08YTC12-1 C5 MI(4)	opx	62.95	1.17	0.01	17.74	3.77	0.06	0.67	3.77	4.47	4.07	0.03	0.14	0.29	99.11
08YTC12-1 C6 MI(2)	cpx	63.98	1.21	0.02	17.48	3.26	0.06	0.57	2.70	4.76	4.29	0.04	0.15	0.18	98.64
08YTC13-1 C3 MI(5)	cpx	64.57	1.18	0.01	18.71	1.69	0.06	0.80	2.91	4.50	4.30	0.01	0.18	0.25	99.14
08YTC13-2 mC6 MI(1)	ol	63.16	1.89	0.03	15.00	3.25	0.05	1.27	4.17	3.53	5.42	0.11	0.17	0.02	97.99
08YTC13-2 mC8 MI(1)	ol	61.54	1.87	0	15.57	3.70	0.07	0.91	5.06	5.08	2.80	0	0.12	0.01	96.71
08YTC13-2 C9 MI(1)	opx	62.27	1.25	0.02	17.92	3.90	0.05	0.85	3.46	4.59	4.23	0.04	0.15	0.19	98.86
08YTC14-1 C1 MI(1)	opx	66.10	0.76	0	15.14	3.60	0.05	1.32	1.77	3.12	6.38	0.02	0.15	0	98.36
08YTC15-1 mC3 MI(4)	ilm	64.84	1.10	0.01	13.99	6.30	0.07	1.14	2.98	3.23	5.87	0	0.14	0.04	99.70
08YTC15-1 C7 MI(1)	opx	64.04	1.03	0	18.23	2.95	0.08	0.28	3.24	4.39	4.57	0.01	0.15	0.24	99.18
08YTC15-2 mC1 MI(2)	cpx	71.16	0.24	0	10.94	2.82	0.08	1.23	2.40	2.70	4.36	0	0.07	0.03	96.06
08YTC15-2 mC2 MI(2)	opx	64.04	1.03	0.03	17.12	3.35	0.08	1.14	2.49	3.83	4.64	0.03	0.15	0.10	98.00
08YTC15-2 mC3 MI(3)	cpx	61.97	0.81	0.01	13.01	3.26	0.11	5.12	7.07	3.08	3.11	0.02	0.10	0.06	97.70
08YTC03-1 mC2 MI(1)	cpx	56.45	0.70	0.04	8.22	6.41	0.25	9.63	14.31	2.25	1.28	0	0.05	0.09	99.67
08YTC03-1 C4 MI(3)	cpx	68.04	0.26	0.02	15.31	1.01	0.03	0.45	1.99	3.22	6.33	0.08	0.08	0.02	96.81
08YTC03-1 C5 MI(4)	cpx	62.23	0.59	0.10	12.39	3.16	0.15	5.45	8.69	2.98	2.51	0.01	0.10	0.04	98.37
08YTC04-1 C1 MI(2)	ol	59.01	1.58	0.02	21.02	1.93	0.04	0.52	4.37	5.71	3.72	0.10	0.16	0.06	98.18
08YTC04-1 C2 MI(1)	ol	58.91	1.22	0.05	22.03	1.99	0.06	0.55	3.12	6.14	4.16	0.04	0.16	0.04	98.42
08YTC04-1 C3 MI(2)	pl	66.11	0.43	0	15.41	3.18	0.06	0.46	1.38	4.99	5.92	0	0.08	0.01	98.03
08YTC04-1 C4 MI(1)	cpx	62.66	0.85	0	18.33	2.42	0.04	0.17	1.51	4.95	6.30	0.15	0.18	0.06	97.56
08YTC04-1 C5 MI(2)	pl	66.55	0.52	0	14.23	3.86	0.05	0.87	2.08	4.76	5.35	0.01	0.09	0.01	98.37
08YTC04-2 C1 MI(2)	ol	57.83	0.86	0.01	23.67	1.21	0.02	0.38	7.25	5.17	2.49	0.06	0.08	0.01	99.00
08YTC04-2 mC3 MI(1)	ol	61.90	1.80	0.04	16.67	2.29	0.02	0.41	2.64	4.86	5.97	0.04	0.16	0.02	96.76
平均值(53)		62.95	1.02	0.02	16.78	3.09	0.07	1.41	4.08	4.19	4.40	0.04	0.13	0.11	98.26

注:括号中数字为测试点数,数值为平均值

### 3.4 钛铁矿

钛铁矿是腾冲新时期火山岩中出现较多的矿物,在岩石中自形晶少,大多呈他形填隙状分布在基质中,还有少量被包裹在斑晶中而成为子晶。钛铁矿由于数量较多而使薄片在镜下观察中可见众多“黑点”,其化学成分见表5,其中个别子晶的成分与其它钛铁矿相比有较大差异,二氧化硅含量较高,也有个别已达钛磁铁矿的成分。

## 4 矿物中熔体包裹体

腾冲新时期火山岩矿物中虽然斑晶不多,但在镜下仔细观察还是可以发现辉石、橄榄石、长石等几种主要的斑晶中都含有熔体包裹体(图7),在钛铁矿中也有发现,但以辉石中数量最多。它们颜色、形态各异,分布很不规律,有的熔体包裹体中气泡空洞很大,显示后期有气体泄露等成分变化。对腾冲火山岩矿物中熔体包裹体的观察与特征总结见表6。

从理论上讲,矿物中原生熔体包裹体的成分代表着岩浆房中较早期的熔体成分,而基质成分则相应代表着岩浆喷发

脱气后的熔体成分。分析结果显示(表7),3座新时期火山中,黑空山火山岩矿物中熔体包裹体成分相对均匀,变化不大,在TAS图上分布跨度最小;而马鞍山火山包裹体成分则跨度最大,显示其被捕获为包裹体的早期熔体成分最为复杂;总体上3火山晚期岩浆成分更富碱质。但从图8看,无论是黑空山、打鹰山还是马鞍山,矿物中熔体包裹体成分的变化范围都远远大于其基质成分的变化范围,显示出熔体包裹体成分的复杂性。对熔体包裹体中主量元素的协变关系研究表明(图9),SiO<sub>2</sub>与K<sub>2</sub>O显示正相关,而CaO与K<sub>2</sub>O显示明显的负相关关系;而MgO与FeO、MgO与CaO大致表现为正相关,MgO与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO与(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)的协变关系图则非常相似,都大致表现为负相关。这说明随着腾冲新时期火山岩岩浆化学成分的逐渐演变,SiO<sub>2</sub>含量增加,MgO与CaO含量减少,碱质成分(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)也不断增加。有意义的是,腾冲新时期火山岩矿物中熔体包裹体和基质的化学成分分布范围涵盖了玄武粗安岩、粗面安山岩、粗面岩以及英安岩等岩石类型,仅有一个样品落在流纹岩范围内,这与腾冲火山区晚更新世以来火山岩的成分分布范围(樊祺诚等,1999;图2)略有不同,即熔体包裹体的成分有粗面岩和少量英安

表 8 腾冲新期火山岩基质玻璃(MG)化学成分(wt%)

Table 8 Chemical composition of matrix glass in newly-erupted Tengchong volcanic rocks(wt%)

样品号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	F	Cl	SO <sub>3</sub>	Total
08YTC12-1 MG1	64.74	1.94	0.04	13.31	6.28	0.12	1.15	2.29	3.31	5.94	0.04	0.16	0.01	99.27
08YTC12-1 MG2	62.21	1.76	0.02	13.92	6.84	0.10	1.13	2.20	3.84	5.69	0	0.14	0	97.80
08YTC12-1 MG1	61.37	1.62	0.02	14.23	6.88	0.08	1.28	3.02	4.38	5.06	0	0.13	0.01	98.04
08YTC12-1 MG2	62.07	1.61	0.03	14.33	6.88	0.10	1.43	2.96	4.58	4.71	0	0.14	0	98.80
08YTC13-2 MG1	62.83	2.00	0.01	12.90	7.31	0.13	1.94	2.68	3.22	4.77	0	0.21	0.03	97.96
08YTC13-2 MG2	60.84	1.65	0	13.40	7.46	0.11	2.68	4.42	3.47	4.19	0	0.17	0.03	98.41
08YTC13-2 MG3	59.22	1.83	0.01	13.92	7.29	0.11	2.63	3.98	3.95	4.23	0	0.24	0.03	97.39
08YTC14-1 MG1	68.73	1.02	0	13.66	3.72	0.05	0.47	1.71	3.37	5.77	0.05	0.09	0	98.60
08YTC14-1 MG2	68.67	1.03	0.01	13.46	3.54	0.04	0.42	1.24	3.24	6.34	0.06	0.10	0	98.10
08YTC14-1 MG3	68.39	1.02	0.03	13.66	3.75	0.07	0.48	1.41	3.19	6.06	0.05	0.09	0.03	98.21
08YTC14-1 MG	69.04	1.06	0.01	13.56	3.90	0.03	0.53	1.38	3.42	6.62	0.01	0.12	0	99.66
08YTC15-1 MG1	66.94	1.12	0.03	14.37	4.09	0.05	0.55	2.03	3.82	5.85	0	0.09	0.02	98.98
08YTC15-1 MG2	59.88	0.63	0	21.39	3.01	0.01	0.59	6.91	5.02	2.34	0	0.06	0.03	99.85
08YTC15-2 MG1	67.36	0.95	0	13.85	4.20	0.05	0.85	1.62	3.48	6.47	0	0.06	0	98.93
08YTC15-2 MG2	66.93	1.05	0.02	14.03	4.57	0.08	0.86	1.87	3.72	5.89	0	0.09	0	99.07
08YTC15-2 MG3	65.95	1.17	0	14.95	4.20	0.06	0.64	1.92	3.64	6.19	0	0.08	0.02	98.79
08YTC15-2 MG4	62.84	1.17	0.02	16.75	4.61	0.07	1.30	3.53	4.10	4.93	0	0.07	0	99.36
08YTC03-1 MG2	53.00	0.12	0	27.79	0.98	0	0.09	10.65	4.95	0.53	0	0.01	0.02	98.14
08YTC03-1 MG3	57.89	0.25	0.00	23.54	1.11	0.01	0.07	7.76	5.91	1.19	0	0.03	0	97.75
08YTC04-1 MG2	54.68	0.13	0.02	26.00	0.77	0.00	0.08	9.54	5.27	0.82	0	0	0.02	97.33
08YTC04-2 MG1	57.92	0.27	0.00	24.41	1.06	0.01	0.12	7.87	5.68	1.42	0.03	0.01	0	98.78
08YTC04-2 MG2	54.51	0.16	0.03	26.59	0.91	0.00	0.10	10.09	5.06	0.66	0	0	0	98.13
平均值(22)	62.55	1.07	0.01	17.00	4.24	0.06	0.88	4.14	4.12	4.35	0.01	0.09	0.01	98.52

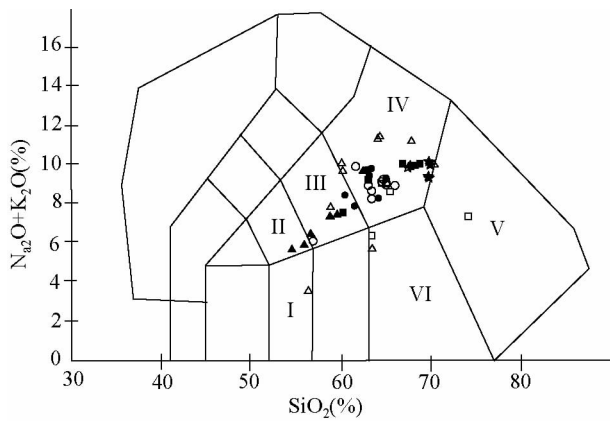


图 8 腾冲新期火山岩斑晶和微晶中的熔体包裹体及基质玻璃成分 TAS 图(底图据 Middlemost,1994)

○●黑空山; ☆★大哑口火山; □■打鹰山; △▲马鞍山; 空心为 MI, 实心为 MG. I-玄武安山岩; II-玄武粗安岩; III-粗面安山岩; IV-粗面岩; V-流纹岩; VI-英安岩

Fig. 8 TAS classification of melt inclusions in hosted crystals and matrix glass in newly-erupted Tengchong volcanic rocks (after Middlemost, 1994)

○●Heikong volcano; ☆★Dayakou volcano; □■Daying volcano; △▲Ma' an volcano; open circle: melt inclusion; filled circle: matrix glass. I-basaltic andesite; II-basaltic trachandesite; III-trachandesite; IV-trachyte; V-rhyolite; VI-dacite

岩,而上述全新世的新期火山全岩成分并没有,可是腾冲早更新世火山岩却是有粗粗面岩和英安岩成分,这充分显示了熔体包裹体的成分确实代表了早期岩浆熔体的成分,它们就是矿物在岩浆房生长时捕获的不同演化阶段的早期熔体。最近研究还证实,腾冲黑空山、打鹰山、马鞍山高钾钙碱性岩浆经历了岩浆房阶段辉石、钛铁矿的结晶分离作用和岩浆上升过程中斜长石的结晶分离作用(赵勇伟和樊祺诚,2010)。

通过对腾冲新期火山岩斑晶和微晶中熔体包裹体和基质的化学成分分析发现,总体上挥发分 Cl 的含量在二者中变化不大,但 F、SO<sub>3</sub> 在熔体包裹体中的平均含量稍高于基质中平均含量,尤其是腾冲新期火山岩中 S 的脱气率为(0.11%~0.01%)×32/80=0.04%,要比天池火山千年大喷发时 S 的脱气率 0.014% (李霓,2007) 高近 2 倍,这在腾冲火山区南侧热海热田地区可闻到强烈的硫磺气味、地表喷发物也有硫磺附着等现象中得到佐证,说明腾冲火山区 S 的脱气率相对较高。而天池火山千年爆炸式大喷发以卤素脱气为主,其中 Cl 的脱气量可达惊人的千万吨数量级。

值得注意的是,基质中挥发分含量不均匀,差异非常大(表 7、表 8)。据电子探针“差异法”估算的挥发分总量在熔体包裹体(1.74%)和基质(1.48%)中的差值并不算大,甚至有些基质中的挥发分含量还略高于熔体包裹体中的,说明腾冲新期火山喷发时岩浆的脱气率较低,这也与腾冲新期火山岩主要为中性的粗安岩、其中挥发分含量并不高相吻合,因此喷发时并未向空中喷出大量气体,从而推测对当时的气

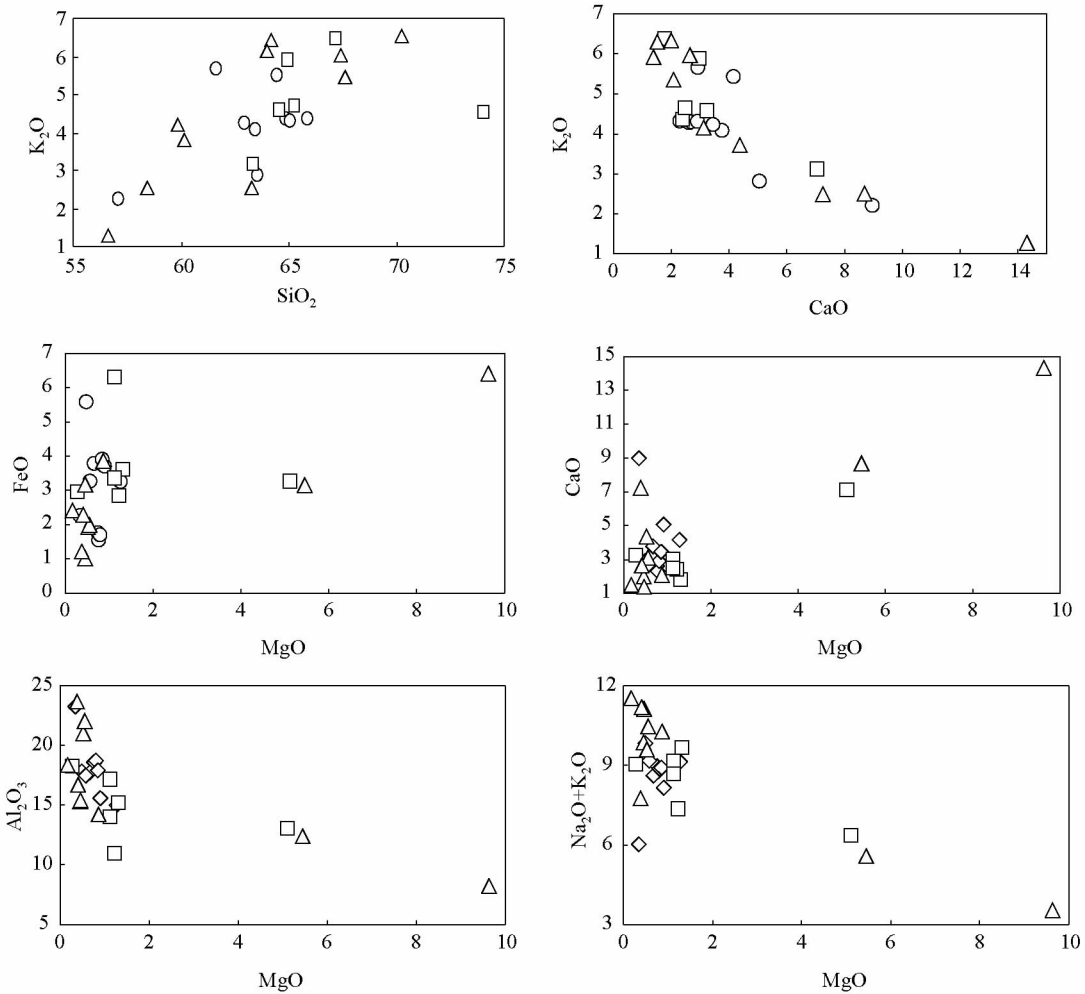


图9 熔体包裹体中主量元素协变图

图例同图8

Fig. 9 Diagram of major elements variations for melt inclusions

Symbols as those in Fig. 8

候环境影响不大,这与我国长白山天池火山碱流岩千年大喷发时喷出的巨量气体形成了鲜明对比。但前文已述及,由岩浆演化趋势推测的腾冲火山区之下岩浆房的岩浆将向更具爆炸性和灾害性的富硅、碱的酸性岩浆演化,因此未来喷发灾害不容忽视。

## 5 结论

(1)通过对腾冲火山区马鞍山、黑空山、打鹰山三座新期火山岩的镜下研究,发现火山岩斑晶矿物辉石、橄榄石和长石中都含有熔体包裹体,对其详细研究可以了解地下岩浆在喷发前的成分;根据熔体包裹体和基质玻璃中挥发分含量差值,还可以对当时喷发的脱气量进行估算。

(2)根据本文测试分析结果,腾冲新期火山岩矿物中熔体包裹体成分的变化范围远大于其基质成分的变化范围,显

示出熔体包裹体成分的复杂性。它们的化学成分分布范围涵盖了玄武粗安岩、粗面安山岩、粗面岩和流纹岩等岩石类型,与腾冲火山区晚更新世以来火山岩的成分分布范围基本一致。

(3)根据腾冲火山岩斑晶和微晶中熔体包裹体和基质的化学成分测试结果,挥发分Cl的含量在二者中变化不大,但F、SO<sub>3</sub>在熔体包裹体中的平均含量稍高于基质中平均含量,腾冲火山区S脱气率明显高于天池火山的千年大喷发,而后者以卤素脱气为主。

(4)据电子探针“差异法”估算的挥发分总量在熔体包裹体(1.74%)和基质(1.48%)中差值不大,推测腾冲新期火山喷发时岩浆的总体脱气率较低,因此喷发时并未向空中喷出大量气体,因而对当时的气候环境影响不大,但未来喷发灾害不容忽视。

致谢 樊祺诚、赵勇伟、隋建立、孙谦等共同参加了野外工

作,中国科学院地质与地球物理研究所电子探针室毛骞和白玉光在探针测试中提供了帮助,在此一并致谢!

## References

- Bai DH, Liao ZJ, Zhao GZ and Wang XB. 1994. Deductive magma heat resources of Tengchong geothermal field from MT exploration. *Chinese Science Bulletin*, 39(4): 344 - 347 (in Chinese)
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37: 215 - 224
- Fan QC, Liu RX, Wei HQ, Shi L B 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)
- Huangfu G. 1997. Review of studies on Tengchong volcanoes. *Journal of Seismological Research*, 20(4): 431 - 437 (in Chinese with English abstract)
- Huangfu G and Jiang CS. 2000. Research on Tengchong Volcano. Kunming: Yunnan Scientific and Technology Publisher, 1 - 418 (in Chinese)
- Jiang CS. 1985a. Taking Yubishan earthquake as a case, study once again the volcanic earthquake in Tengchong. *Journal of Seismological Research*, 8(1): 62 - 70 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CS. 1985b. Volcanoes and earthquakes in Tengchong area, Yunnan Province, China. *Journal of Seismological Research*, 8(3): 352 - 358 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CS and Liang XY. 1990. Wave motion features of volcanic earthquake taking Tengchong event as an example. *Seismological Research of Northeast China*, 6(1): 55 - 62 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CS. 1998. Period division of volcano activities in the Cenozoic era of Tengchong. *Journal of Seismological Research*, 21(4): 320 - 329 (in Chinese with English abstract)
- Kan RJ and Zhao JM. 1994. Crust and mantle structure in Tengchong volcanic area. In: *Progress in Solid Geophysics of China*. Beijing: Ocean press, 23 - 30 (in Chinese)
- Li DM, Li Q and Chen WJ. 1999. Excess argon in plagioclase phenocryst of Tengchong volcanics and the related volcano erupting stages. *Geological Review*, 45 (Suppl.): 892 - 894 (in Chinese with English abstract)
- Li DM, Li Q and Chen WJ. 2000. Volcanic activities in the Tengchong volcano area since Pliocene. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 362 - 370 (in Chinese with English abstract)
- Li N. 2007. A study on magma degassing effect of Holocene explosive eruptions of the Tianchi volcano, Changbai Mountains. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 1 - 102 (in Chinese with English summary)
- Liao ZJ. 1999. Volcanism and geothermals in Tengchong County, Yunnan Province, China. *Geological Review*, 45 (Suppl.): 934 - 939 (in Chinese with English abstract)
- Mu ZG, Tong W and Curtis GH. 1987. Times of volcanic activity and origin of magma in Tengchong geothermal area, West Yunnan Province. *Chinese Journal of Geophysics*, 30(3): 261 - 270 (in Chinese with English abstract)
- Nakai S, Xu S, Wakita H, Fujii N, Nagao K, Orihashi Y, Wang X, Chen J and Liao Z. 1993. K-Ar ages of young volcanic rocks from Tengchong area, western Yunnan, China. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 38(5): 167 - 171
- Qin JZ, Qiang XD and Huangfu G. 1996. The seismicity feature of the volcanic area in Tengchong. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 17(4): 19 - 27 (in Chinese with English abstract)
- Qin JZ, Huang FG, Wang SJ and Qian XD. 1997. Intensity decay in Tengchong volcanic active area and characteristics of environmental stress field. *Journal of Seismological Research*, 20(2): 212 - 217

(in Chinese with English abstract)

- Shangguan ZG, Sun ML and Li HZ. 1999. Active types of modern geothermal fluids at the Tengchong region, Yunnan Province. *Seismology and Geology*, 21(4): 435 - 442 (in Chinese with English abstract)
- Shangguan ZG. 2000. Structure of geothermal reservoirs and the temperature of mantle-derived magma hot source in the Rehai area, Tengchong. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 83 - 90 (in Chinese with English abstract)
- Shangguan ZG, Bai CH and Sun ML. 2000. Gas emission characteristics of modern mantle-derived magma in Tengchong geothermal field. *Science in China (Series D)*, 30(4): 407 - 414 (in Chinese)
- Shangguan ZG and Huo WG. 2001.  $\delta D$  of emitted  $H_2$  and its genesis in Tengchong geothermal field. *Chinese Science Bulletin*, 46(15): 1316 - 1319 (in Chinese)
- Sun J, Xu CF, Jiang Z *et al.* 1989. The electrical structure of the crust and upper mantle in the west part of Yunnan Province and its relation to crustal tectonics. *Seismology and Geology*, 11(1): 35 - 45 (in Chinese with English abstract)
- Wang F, Chen WJ, Peng ZC, Zhang ZL and Hu YT. 1999. Chronology of young volcanic rocks of Changbaishan Tianchi and Tengchong, China, by using the uranium-series TIMS method. *Geological Review*, 45 (Suppl.): 914 - 925 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y. 1999. Tectonic settings of Late Cenozoic volcanism in Tibet and Tengchong area, China. *Geological Review*, 45 (Suppl.): 905 - 913 (in Chinese with English abstract)
- Yu HM, Lin CY, Shi LB, Xu JD and Chen XD. 2010. Characteristics and origin of mafic and ultramafic xenoliths in trachyandesite lavas from Heikongshan volcano, Tengchong, Yunnan Province, China. *Science China (Earth Science)*, 53(9): 1295 - 1306
- Zhao CH and Chen TF. 1992. A discussion on magma-tectonic type of Cenozoic volcanism from Tengchong area (Yunnan Province): A new type of post-collision arc-volcanism. *Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 6(2): 119 - 129 (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(4): 1133 - 1140 (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

- 白登海, 廖志杰, 赵国泽等. 1994. 从 MT 探测结果推论腾冲热海热田的岩浆热源. *科学通报*, 39(4): 344 - 347
- 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. 1997. 腾冲火山研究综述. *地震研究*, 20(4): 431 - 437
- 皇甫岗, 姜朝松. 2000. 腾冲火山研究. 昆明: 云南科技出版社, 1 - 418
- 姜朝松. 1985a. 以腾冲玉壁山火山为例再论腾冲火山地震. *地震研究*, 8(1): 62 - 70
- 姜朝松. 1985b. 腾冲火山与地震. *地震研究*, 8(3): 352 - 358
- 姜朝松, 梁秀英. 1990. 火山地震波动特征——以腾冲火山为例. *东北地震研究*, 6(1): 55 - 62
- 姜朝松. 1998. 腾冲地区新生代火山活动分期. *地震研究*, 21(4): 320 - 329
- 阚荣举, 赵晋明. 1994. 腾冲火山地区的壳幔构造. *中国固体地球物理学进展*, 北京: 海洋出版社, 23 - 30
- 李大明, 李齐, 陈文寄. 1999. 腾冲火山岩斜长石斑晶的过剩氩兼论火山活动的分期. *地质论评*, 45(增刊): 892 - 894
- 李大明, 李齐, 陈文寄. 2000. 腾冲火山区上新世以来的火山活动. *岩石学报*, 16(3): 362 - 370

- 李霓. 2007. 长白山天池火山全新世爆炸喷发的岩浆脱气作用研究. 博士学位论文. 中国地震局地质研究所, 1-102
- 廖志杰. 1999. 腾冲火山和地热. 地质论评, 45(增刊): 934-939
- 穆治国, 佟伟, Gammis CH. 1987. 腾冲火山活动的时代和岩浆来源问题. 地球物理学报, 30(3): 261-270
- 秦嘉政, 钱晓东, 皇甫岗. 1996. 腾冲火山地区的地震活动特征. 地震地磁观测与研究, 17(4): 19-27
- 秦嘉政, 皇甫岗, 王绍晋, 钱晓东. 1997. 腾冲火山活动区的烈度衰减及环境应力场特征. 地震研究, 20(2): 212-217
- 上官志冠, 孙明良, 李恒忠. 1999. 云南腾冲地区现代地热流体活动类型. 地震地质, 21(4): 435-442
- 上官志冠. 2000. 腾冲热海地热田热储结构与岩浆热源的温度. 岩石学报, 16(1): 83-90
- 上官志冠, 白春华, 孙明良. 2000. 腾冲热海地区现代幔源岩浆气体释放特征. 中国科学(D辑), 30(8): 407-414
- 上官志冠, 霍卫国. 2001. 腾冲热海地热区逸出 H<sub>2</sub> 的  $\delta D$  值及其成因. 科学通报, 46(15): 1316-1319
- 孙洁, 徐常芳, 江钊等. 1989. 滇西地区地壳上地幔电性结构与地壳构造运动的关系. 地震地质, 11(1): 35-45
- 王非, 陈文寄, 彭子成, 张仲禄, 胡玉台. 1999. 腾冲、长白山年轻火山岩铀系不平衡热电质谱法年代学研究. 地质论评, 45(增刊): 914-925
- 王瑜. 1999. 西藏及腾冲地区晚新生代火山作用的构造背景. 地质论评, 45(增刊): 905-913
- 赵崇贺, 陈廷方. 1992. 腾冲新生代火山作用构造-岩浆类型的探讨——一种滞后型的弧火山. 现代地质, 6(2): 119-129
- 赵勇伟, 樊祺诚. 2010. 腾冲马鞍山、打鹰山、黑空山火山岩浆来源与演化. 岩石学报, 26(4): 1133-1140