

# 天池火山千年大喷发的岩浆混合作用与喷发机制初步探讨\*

樊祺诚<sup>1</sup> 隋建立<sup>2</sup> 孙谦<sup>1</sup> 李霓<sup>1</sup> 王团华<sup>1</sup>

FAN QiCheng<sup>1</sup>, SUI JianLi<sup>2</sup>, SUN Qian<sup>1</sup>, LI Ni<sup>1</sup>, WANG TuanHua

1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2005-07-08 收稿, 2005-11-07 改回.

Fan QC, Sui JL, Sun Q, Li N and Wang TH. 2005. Preliminary research of magma mixing and explosive mechanism of the Millennium eruption of Tianchi volcano. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1703–1708

**Abstract** Studies on magma evolution and on geophysical observations indicate that there are two magma chambers beneath Tianchi volcano. Continuous basaltic magma influx from mantle chamber to crust chamber are essential to the keep Tianchi volcano active over a million years, and are also important to interpret the magma evolution of Tianchi volcano. In this paper, we present evidence of magma influx and magma mixing from the gray pumice of the Millennium eruption of Tianchi volcano. The breccias in the gray pumice and the banded structures indicate the occurrence of magma mixing. The petrological, mineralogical and chemical studies of these samples reveal the story of magma influx and mixing, which may trigger the Millennium eruption of Tianchi volcano.

**Key words** magma mixing, the Millennium eruption, Tianchi volcano

**摘要** 根据岩浆演化和地球物理深部探测, 天池火山之下存在地壳和地幔双层岩浆房。地幔玄武质岩浆向地壳岩浆房的补给, 保持了天池火山逾百万年持续不断的喷发活动。本文从天池火山千年大喷发浮岩中的玄武质粗安岩-粗安岩角砾和条带状岩浆的岩相学、矿物学和岩石化学研究, 提出地幔的粗面玄武质岩浆向地壳岩浆房的注入, 触发千年大喷发, 初步探讨了天池火山千年大喷发的岩浆混合作用与喷发机制。

**关键词** 浮岩; 角砾和岩浆条带; 岩浆混合作用; 千年大喷发; 天池火山

中图法分类号 P588.145

## 1 长白山天池火山概况

笔者曾根据火山活动地质背景、时空分布和岩浆演化特点, 特别是火山地貌、水系、影像特征分析, 提出长白山天池火山、望天鹅火山及望天鹅火山之东约 45km 的朝鲜境内南胞台山火山三个巨型复式火山的活动顺序为: 南胞台山火山-望天鹅火山-天池火山(Fan *et al.*, 1999; 樊祺诚等, 2001)。关于天池火山距今约一千年的碱流质岩浆大喷发

(下文称千年大喷发), 迄今累积了数以百计的碳化木<sup>14</sup>C 年龄, 尽管对千年大喷发尚存年代学争议, 但这次大喷发的全球意义却毋庸置疑(Gill *et al.*, 1992; 刘若新等, 1997; Horn *et al.*, 2000)。在千年大喷发之后, 相继还有 1668 年、1702 年和 1903 年等多期中小规模历史喷发活动(金东淳等, 1999)。围绕天池诸峰顶部披覆的近代喷发物, 提供了开展天池火山喷发地层学、年代学和岩石学研究的最佳场所。在天池火山北坡和南坡千年大喷发的灰色碱流质浮岩之上

\* 国家自然科学基金资助项目(No. 40372044)

第一作者简介: 樊祺诚, 男, 1948 年生, 研究员, 从事火山与地球内部物质研究, E-mail: fq@ies.ac.cn

覆盖了厚约几十公分 - 1 米多厚的天池火山最晚期喷发的黑色粗面质熔结凝灰岩(樊祺诚等, 1999), 是否为历史记载的 1668 年或 1702 年喷发的产物尚待考证。

长白山天池火山经历了粗面玄武岩浆造盾、粗面质岩浆造锥和近代碱流质岩浆爆破喷发三个阶段, 是一座巨型层状复式火山。根据天池火山主体岩石类型(粗面玄武岩、粗面岩和碱流岩)以双峰式火山岩分布为特征, 过渡类型( $\text{SiO}_2$  52 ~ 64%) 的玄武质粗安岩-粗安岩很少。近些年我们在中朝两国的天池火山周边地区(天池公路、五十岗北坡、朝鲜鲤明水等地)发现少数露头(图 1a, b), 其岩石化学成分为玄武质粗安岩和粗安岩(表 1), 这些地表喷发物记录了岩浆房经历了复杂的岩浆结晶演化和/或岩浆混合过程。

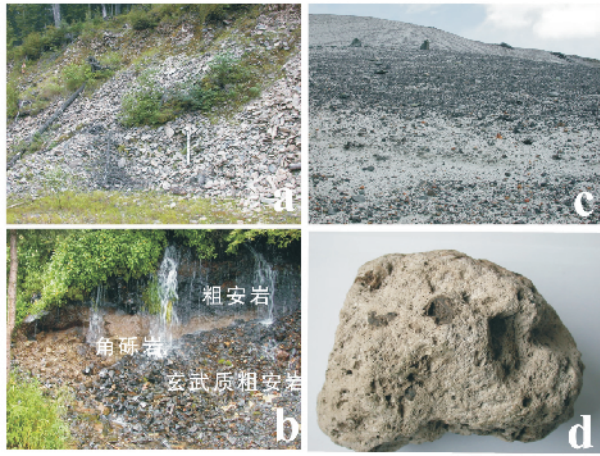


图 1 天池火山玄武质粗安岩-粗安岩露头

Fig. 1 Outcrop of basaltic trachyandesite and trachyandesite of the Tianchi Volcano

- 天池火山南五十岗北坡瓦片状风化玄武质粗安岩
- 天池火山东坡朝鲜鲤明水瀑布玄武质粗安岩 - 粗安岩
- 散落南坡顶部 4 号界东的黑色玄武质粗安岩 - 粗安岩角砾
- 北坡天文峰附近灰色浮岩中黑色玄武质粗安岩 - 粗安岩角砾

## 2 岩浆混合作用 - 天池火山千年大喷发的岩石学证据

天池火山顶部诸峰披覆的喷发物残存了近代喷发的火山地层层序, 为我们恢复和研究天池火山近代喷发历史和岩浆演化与喷发机制提供了重要的地质基础。作为全球意义的天池火山千年大喷发, 它的喷发年代与喷发机制是研究天池火山过去和预测未来的关键问题。根据天池火山岩浆演化和地球物理深部探测结果, 刘若新等(1998)曾提出天池火山下面存在地壳和地幔双层岩浆房, 认为由于地幔玄武质岩浆注入地壳岩浆房而触发了千年大喷发, 出现玄武质粗安岩浆与碱流岩浆共喷发的事实。通过这些年的深入考察和研究, 本文从千年大喷发浮岩中的角砾和条带状岩浆混合现象, 初步探讨千年大喷发的岩浆混合作用与喷发机制。

### 2.1 千年大喷发浮岩中的角砾

在天池火山千年大喷发的浮岩中常见各种大小不一的黑色角砾状岩块, 其大小随着离天池火口渐远而粒径渐小。由于天池火山千年大喷发时刮西风, 在南坡 5 号界一带堆积了巨厚浮岩, 浮岩中 3 ~ 5cm 大小的黑色角砾状岩块十分常见, 由于比重大, 多数角砾已从浮岩中脱落散布于浮岩之上(图 1c) 粒径较小者仍包裹于浮岩中。在天池以东的园池、双目峰以及朝方三池渊等地浮岩中见到的角砾仅厘米级乃至更小(图 1d)。以往都将这些黑色捕虏体误认为玄武岩, 经成分测定绝大多数为天池火山地表少见的玄武质粗安岩或粗安岩, 少数粗面岩(表 2)。

### 2.2 千年大喷发的条带状岩浆混合

天池火山千年大喷发的碱流质灰色浮岩中除了含有丰富的玄武质粗安岩和粗安岩角砾外, 还发现碱流质灰色浮岩与黑色浮岩呈条带状包裹关系, 提供了两种岩浆混合的证据

表 1 天池火山某些玄武质粗安岩 - 粗安岩主量元素分析结果(Wt%)

Table 1 The analysis results of major element (%) of basaltic trachyandesite and trachyandesite of the Tianchi Volcano

样号	采样点	岩性	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失量	总量
02WSG-1	五十岗北坡	玄武质粗安岩	50.43	2.55	17.31	10.71		0.16	6.14	3.73	5.00	2.85	0.86	0.00	99.75
P-44 *	天池公路	粗安岩	58.60	0.93	17.72	3.13	3.93	0.19	2.69	1.22	5.66	4.38	0.53	0.44	99.42
03LMS01	朝鲜鲤明水	玄武质粗安岩	51.95	1.83	16.98	10.07		0.19	4.81	2.69	5.29	3.23	1.34	0.00	98.39
03LMS02	朝鲜鲤明水	粗安岩	55.42	1.64	17.40	9.37		0.18	4.43	2.61	5.15	3.54	1.21	0.00	100.95

分析者: 中国科学院广州地球化学研究所分析, 带 \* 者为中国科学院地质与地球物理研究所分析

表2 千年大喷发浮岩及其角砾化学成分( wt% )

Table 2 The chemical composition ( wt% ) of pumice and breccia of the Millennium eruption

样号	采样点	岩性	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失量	总量
02NP-1	天池南坡顶	碱流岩	71.11	0.24	11.32	2.03	2.35	0.08	0.01	0.40	5.03	4.53	0.02	2.21	99.33
02BYFX-1	白岩峰	碱流岩	71.16	0.23	11.16	1.61	2.54	0.08	0.00	0.31	4.76	4.52	0.01	2.95	99.33
02BYFX-2	白岩峰	碱流岩	72.16	0.22	11.25	1.29	2.80	0.08	0.00	0.29	5.02	4.58	0.01	1.68	99.38
02YC-1	园池	碱流岩	71.00	0.25	10.95	1.26	3.06	0.08	0.02	0.39	4.80	4.44	0.02	3.16	99.43
02SCY-2	朝鲜三池渊	碱流岩	71.41	0.26	10.50	0.54	3.77	0.08	0.03	0.36	4.71	4.32	0.02	3.45	99.45
SM-17 *	双目峰	粗面岩	65.50	0.43	15.92	4.91		0.12	0.23	1.07	5.57	5.78	0.05	0.31	99.89
SM-16 *	双目峰	粗安岩	59.20	1.57	16.07	7.33		0.13	2.50	4.75	4.83	3.71	0.28	0.26	100.62
SM-18 *	双目峰	玄武质粗安岩	52.73	2.05	18.69	7.40		0.10	3.32	8.12	4.27	2.18	0.39	0.09	99.33
02NP2-2 *	天池南坡顶	粗安岩	58.38	1.42	16.60	6.49		0.11	2.17	4.50	5.12	3.93	0.27	0.17	99.15
02NP2-1	天池南坡顶	玄武质粗安岩	54.80	1.96	17.12	1.43	6.20	0.12	3.28	6.15	4.27	3.08	0.39	0.69	99.49

除 \* 号由中国科学院广州地球化学研究所分析,其余由中国科学院地质与地球物理研究所 X 荧光光谱实验室分析

表3 两种岩浆接触带基质玻璃电子探针分析结果( wt% )

Table 3 Microprobe analysis results ( % ) of matrix glass in the bandary of two kind magma

样号	接触带	岩浆类型	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	总量
SM-1	灰色条带	碱流岩	74.36	0.17	0.18	9.43	3.83	0.05	0.03	0.38	3.57	4.23	96.23
	灰色条带 *	粗面岩	59.96	2.40	0.24	18.34	3.72	0.08	0.27	2.72	7.49	3.12	98.32
	黑色条带	粗面岩	61.00	0.83	0.03	18.70	1.77	0.05	0.08	3.10	7.09	3.46	96.12
	黑色条带	粗面岩	60.60	1.13	0.76	16.28	3.45	0.06	0.38	2.92	6.45	3.29	95.32
SM-2	灰色条带	碱流岩	74.55	0.28	0.01	10.19	3.78	0.12	0.05	0.44	2.59	4.54	96.56
	灰色条带 *	粗面岩	60.47	1.18	0.06	15.66	5.86	0.10	1.07	0.00	4.27	5.33	94.00
	黑色条带	粗安岩	57.62	0.23	0.00	24.49	0.92	0.00	0.10	7.58	6.82	1.04	98.80
SM-4	灰色条带	碱流岩	75.02	0.22	0.00	10.08	4.17	0.08	0.01	0.17	3.24	4.60	97.58
	灰色条带	碱流岩	73.57	0.28	0.09	9.94	4.13	0.10	0.05	0.15	3.09	4.34	95.76
	黑色条带	粗面岩	64.02	1.00	0.29	16.09	3.29	0.04	0.77	1.96	4.30	5.24	97.01
	黑色条带	粗面岩	60.72	0.45	0.00	21.00	2.09	0.10	0.42	5.37	5.69	2.94	98.78
	黑色条带	玄武质粗安岩	55.81	0.25	0.00	25.47	1.05	0.00	0.12	9.54	6.18	0.67	99.08
	黑色条带	玄武质粗安岩	55.23	0.20	0.19	26.43	1.18	0.06	0.17	9.82	5.84	0.72	99.85
SM-5	灰色条带	碱流岩	74.47	0.30	0.09	10.25	4.23	0.17	0.05	0.30	2.89	4.22	96.96
	灰色条带	碱流岩	70.04	0.60	0.13	12.45	3.78	0.12	0.15	0.59	3.53	4.58	95.97
	灰色条带	碱流岩	70.89	0.38	0.25	11.77	3.68	0.13	0.18	0.63	3.16	4.42	95.51
	黑色条带	粗安岩	60.34	1.20	0.18	17.32	4.82	0.14	0.93	4.15	7.64	2.41	99.13

中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室分析;仪器型号: Cameca SX51;

分析条件: 电压 15kv, 电流 1 × 20nA, 束斑 1 ~ 1.5 μm; \* 歪长石斑晶中熔融包裹体

表4 灰色浮岩中黑色条带的矿物电子探针分析结果(wt%)

Table 4 Microprobe analysis results (%) of minerals in black band of grey pumice

样号	SM-1	SM-3	SM-4	SM-4	SM-1	SM-3	SM-6	SM-1	SM-2	SM-3	SM-4	SM-6
SiO <sub>2</sub>	39.26	38.19	37.49	37.86	43.61	43.64	50.74	51.56	58.89	50.60	53.32	0.10
TiO <sub>2</sub>	1.29	0.00	0.15	0.02	1.64	4.08	0.65	0.01	0.16	0.12	0.13	25.52
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.05	0.05	0.06	0.00	0.23	0.00	0.00	0.09	0.09	0.00	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.64	0.02	0.01	0.03	5.47	6.84	1.17	29.52	24.58	28.45	27.87	1.88
FeO	33.16	20.02	24.13	21.89	14.22	12.04	14.04	0.43	0.42	0.51	0.44	67.30
MnO	0.43	0.15	0.33	0.24	0.33	0.25	0.47	0.00	0.03	0.00	0.00	0.81
MgO	23.97	41.51	37.61	39.71	13.20	9.73	11.72	0.10	0.07	0.11	0.11	2.06
CaO	1.02	0.16	0.31	0.23	18.17	21.46	19.93	12.95	7.27	13.04	11.37	0.02
NiO	0.00	0.13	0.12	0.14	0.00	0.01	0.12	0.07	0.00	0.00	0.00	0.03
Na <sub>2</sub> O	1.04	0.00	0.00	0.01	0.52	0.69	0.43	3.77	6.74	3.94	4.77	0.08
K <sub>2</sub> O	0.57	0.00	0.02	0.00	0.06	0.16	0.00	0.31	1.39	0.32	0.42	0.02
总量	103.38	100.23	100.22	100.19	97.22	99.13	99.27	98.72	99.64	97.18	98.43	97.87
Fo	56.3	78.7	73.5	76.4								
Wo					37.9	48.1	41.9					
En					38.3	30.4	34.3					
Fs					23.7	21.5	23.8					
An								64.3	34.4	63.5	55.5	
Ab								33.9	57.7	34.7	42.1	
Or								1.8	7.8	1.9	2.4	

分析者:中国科学院地质与地球物理所电子探针实验室;仪器型号: Cameca SX51;

分析条件:电压 15kv, 电流 1 × 20nA, 束斑 1 ~ 1.5mm; ol-橄榄石, cpx-单斜辉石, pl-斜长石, il-钛铁矿

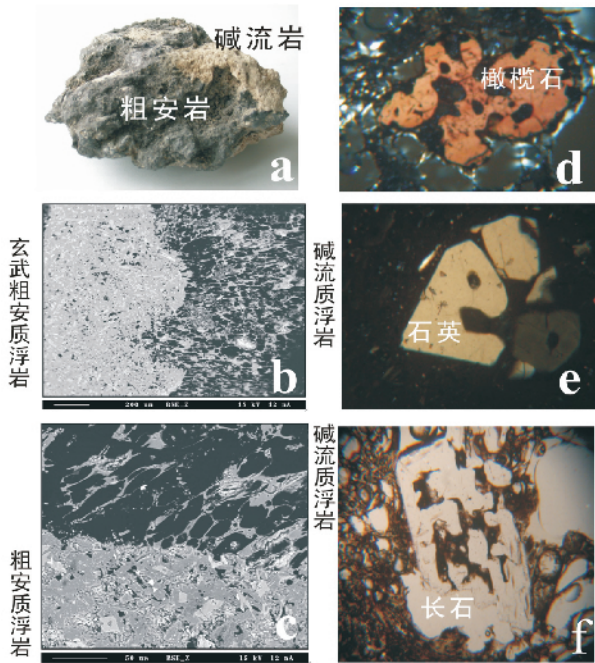


图2 天池火山千年大喷发岩浆混合现象

Fig. 2 Magma mixing of the Millennium eruption of Tianchi volcano

- 灰色浮岩与黑色浮岩呈条带状混合
- 碱流质岩浆与玄武粗安质岩浆接触带电子探针背散射图像
- 碱流质岩浆与粗安质岩浆接触带电子探针背散射图像
- 碱流质浮岩中橄榄石熔蚀现象
- 碱流质浮岩中石英熔蚀现象
- 碱流质浮岩中歪长石斑晶熔蚀现象

(图2a)。从岩石薄片的电子探针贝散射图像清晰可见两种岩浆的接触关系,暗区为灰色岩浆条带,亮区为黑色岩浆条带(图2b、c)。两种岩浆接触带基质玻璃和矿物电子探针分析结果列于表3和表4,灰色岩浆条带的基质玻璃成分为碱流岩(即千年大喷发的浮岩),黑色岩浆条带的基质玻璃成分变化于玄武质粗安岩-粗安岩-粗面岩,特别是对于同一样品的黑色条带基质玻璃显示了不同的过渡成分,显然是两种岩浆混合的结果。其中两个千年大喷发的灰色岩浆条带中歪长石斑晶的熔融包裹体玻璃成分为粗面岩,指示了碱流质岩浆从粗面质岩浆结晶分异演化过程中,歪长石斑晶捕获其粗面质母岩浆的证据。我们对天池火山千年大喷发的碱流质浮岩及其矿物成分作过初步研究(樊祺诚等,1999;李霓等,2004),浮岩成分为碱流岩,主要矿物长石为透长石和歪长石( $An_{0-1}Ab_{58-60}Or_{40-42}$ ),辉石( $Wo_{41-43}En_{0-4}Fs_{53-55}$ )为富铁钙铁辉石,橄榄石为高铁铁橄榄石( $Fe_{0.5-2.5}$ ),少数内部还有镁铁橄榄石残核( $Fe_{10-20}$ )。千年大喷发碱流质浮岩中存在橄榄石与石英非平衡共生现象,以及长石、石英和橄榄石矿物普遍遭强烈熔蚀,常见呈筛状散晶(图2),也提供了两种岩浆混合的证据。黑色条带中的矿物成分分别为贵橄榄石-透铁橄榄石( $Fe_{56-79}$ )、普通辉石( $Wo_{38-48}En_{30-38}Fs_{22-24}$ )和中-拉长石( $An_{34-64}$ ) (表4),这与基质玻璃成分一致反映了黑色条带为玄武质粗安岩-粗安岩-粗面岩成分。

### 2.3 混合岩浆成分

在火山岩 TAS 分类图上(图3),从天池周边不同地点采

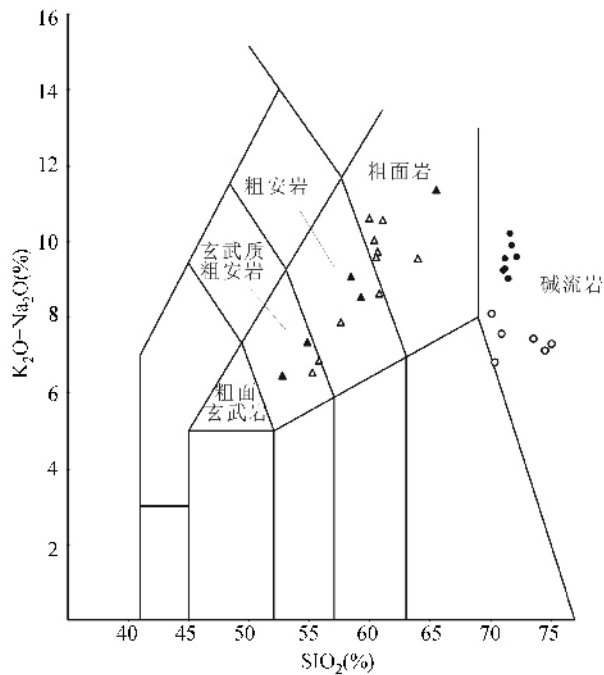


图3 火山岩 TAS 分类图

Fig. 3 TAS diagram of volcanic rocks

- 千年大喷发浮岩                      ▲ 千年大喷发浮岩中角砾  
 △ 黑色岩浆条带基质玻璃              ○ 灰色浮岩条带基质玻璃

集的千年大喷发的灰色浮岩及其基质玻璃均为碱流岩,而浮岩中的角砾和黑色岩浆条带的基质玻璃成分跨越了玄武质粗安岩、粗安岩和粗面岩区,推测是来自地幔粗面玄武质岩浆注入地壳岩浆房,与碱流质岩浆不同程度混合的产物,不同于由结晶分异形成的天池火山双峰式火山岩。

### 3 讨论

天池火山之下存在地幔和地壳双层岩浆房,地幔的粗面玄武质岩浆不断向地壳岩浆房的注入和补充,是天池火山长寿的秘诀,使它保持了百万年以上的喷发历史。天池火山不同阶段火山岩相似的同位素组成说明它们是同源岩浆-玄武质岩浆演化的产物(解广轰等,1988; Basu *et al.*, 1991; 刘若新等,1998)。根据岩浆结晶演化规律,天池火山造锥阶段粗面岩和千年大喷发的碱流质岩浆,属于基性玄武质岩浆演化的晚阶段或最终端元,如此巨量的酸性粗面质-碱流质岩浆不可能由岩浆混合形成,只能是岩浆结晶分异的产物,符合 O'Hara(1977, 1981)提出的岩浆周期性补充、抽出和分离结晶作用的模型(RTF),所以分离结晶作用主导了天池火山岩浆演化,形成双峰式火山岩的分布。

天池火山千年大喷发浮岩中包含的角砾和条带为玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩过渡成分,提供了天池火山岩浆混合作用的证据。根据混合过程中岩浆的流体动力学状态,可将岩浆混合方式划分为喷泉式、层状对流式和接触剪切式。

喷泉式岩浆混合是酸性岩浆房底部有镁铁质(或玄武质)岩浆从下向上注入与酸性岩浆混合形成镁铁质(或玄武质)包体和条带(李昌年,2002)。Campbell *et al.*(1989)的岩浆机械混合机理认为,密度大的镁铁质岩浆(或玄武质)快速注入长英质(酸性)岩浆房,便可形成喷泉式的岩浆混合。天池火山千年大喷发的岩浆混合即属于喷泉式的岩浆混合。由于地幔粗面玄武质岩浆注入地壳岩浆房触发了天池火山千年大喷发,高温( $T=1100-1200^{\circ}\text{C}$ )玄武质岩浆进入相对低温( $T=850-900^{\circ}\text{C}$ )的碱流质岩浆而淬火和混合作用,淬火形成各种大小不一的角砾。随着玄武质岩浆的大量注入,地壳岩浆房的温度升高,局部出现玄武质岩浆与碱流质岩浆呈条带状混合。千年大喷发的碱流质浮岩中发现的铁橄榄石与石英非平衡共生,以及大量蚀蚀状矿物等岩相学特征,也为玄武质岩浆与碱流质岩浆发生强烈混合作用,导致碱流质岩浆与玄武质粗安岩-粗安岩共喷发提供了证据。

岩浆分离结晶作用和混合作用都是火成岩多样性的原因,也是我们认识天池火山岩浆演化的基础。岩浆的分离结晶作用导致天池火山双峰式火山岩(粗面玄武岩与粗面岩-碱流岩)分布特征,而地幔粗面玄武质岩浆注入地壳岩浆房与碱流质岩浆的混合形成了过渡类型的玄武粗安岩-粗安岩,并触发了天池火山的千年大喷发。天池火山周边地表出露的玄武粗安岩-粗安岩,到底是岩浆分离结晶作用还是岩浆混合作用的产物尚待深入研究。

### References

- Basu AR, Wang JW, Huang WK, Xie GH, Tatsumoto M. 1991. Major element, REE, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of their origin from suboceanic-type mantle reservoirs. *Earth Planet Sci. Lett.*, 105: 149-169
- Campbell IH, Turner JS. 1989. Fountain in magma chambers. *J. Petrol.*, 30: 885-923
- Fan QC, Liu RX, Li DM and Li Q. 1999. Significance of K-Ar age of bimodal volcanic rocks at Wangtian'e volcano, Changbaishan area. *Chinese Science Bulletin* 44(7): 660-663
- Fan QC, Liu RX, Wei HQ, Sui JL and Li N. 1999. Petrogeochemical characteristics of Holocene Eruption of the Tianchi Volcano, Changbai Mountains. *Geological Review*, 45(Sup): 263-271 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC, Liu RX, Sui JL. 2001. Volcanic activities and magma evolution in Changbaishan area. In: Lu Y C *et al.* (eds.). *New tectonics and environment*. Beijing: Seismology Press, 366-371
- Gill G, Dunlap C, McCurry M. 1992. Volcanism and global change, March 23-27, Hill, Hawaii
- Horn H, Schmincke H-S. 2000. Volatile emission during the eruption of Baitoushan Volcano (China/North Korea) ca. 969 AD. *Bull. Volcano.* 61: 537-555
- Li CN. 2002. Comment on the magma mixing and their research. *Geological science and technology information*, 21(4): 49-54 (in Chinese with English abstract)
- Li N, Fan QC, Sun Q and Zhang WL. 2004. Magma evolution of Changbaishan Tianchi volcano: Evidences from the main phenocrystal minerals. *Acta Petrologica Sinica* 20(3): 575-582 (in Chinese with English abstract)

- Liu RX, Chou SH, Cai NZ, Wei HQ, Yang QF. 1997. Chronology study of the last time eruption of Changbaishan Tianchi volcano and its characteristics. *Science in China Series D: Earth Sciences* 27(5): 437 - 441
- Liu RX, Fan QC, Zheng XS, Zhang M and Li N. 1998. The magma evolution of Tianchi volcano, Changbaishan. *Science in China Series D: Earth Sciences* 28(3): 226 - 231
- O'Hara MJ. 1977. Geochemical evolution during fractional crystallization of a periodically refilled magma chamber. *Nature* 266: 503 - 507
- O'Hara MJ, Mathews RE. 1981. Geochemical evolution in an advancing, periodically replenished, periodically tapped, continuously fractionated magma chamber. *J. Geol. Soc.* 138: 237 - 277
- Xie GH, Wang JW. 1988. Petrochemistry and Sr, Nd, Pb-isotopic geochemistry of Cenozoic rocks, Changbaishan area, Northeast China. *Acta Petrologica Sinica* 4: 1 - 13 (in Chinese with English abstract)
- 樊祺诚, 刘若新, 隋建立, 李齐, 李大明. 2001. 长白山地区火山活动与岩浆演化. 新构造与环境(卢演侑等主编), 北京: 地震出版社, 366 - 371
- 金东淳, 崔钟燮. 1999. 长白山天池火山喷发历史文献记载的考究. *地质论评* 45(Sup): 304 - 307
- 李昌年. 2002. 岩浆混合作用及其研究评述. *地质科技情报* 21(4): 49 - 54
- 李霓, 樊祺诚, 孙谦, 张文兰. 2004. 长白山天池火山岩浆演化 - 来自主矿物成分的证据. *岩石学报* 20(3): 575 - 582
- 刘若新, 仇士华, 蔡莲珍, 魏海泉, 杨清福. 1997. 长白山天池火山最近一次大喷发年代研究及其意义. *中国科学(D辑)*, 27(5): 437 - 441
- 刘若新, 樊祺诚, 郑祥身, 张明, 李霓. 1998. 长白山天池火山的岩浆演化. *中国科学(D辑)*, 28(3): 226 - 231
- 解广轰, 王俊文. 1988. 长白山地区新生代火山岩的岩石化学及 Sr, Nd, Pb 同位素地球化学研究. *岩石学报* 4: 1 - 12

#### 附中文参考文献

- 樊祺诚, 刘若新, 魏海泉, 隋建立, 李霓. 1999. 长白山天池火山全新世喷发与岩石地球化学特征. *地质论评* 45: 263 - 271