

长白山天池火山粗面岩成因与岩浆房系统演化

郭文峰^{1,2)}, 刘嘉麒²⁾, 吴才来¹⁾, 雷敏¹⁾, 秦海鹏¹⁾, 王楠¹⁾, 张昕¹⁾, 陈红杰¹⁾, 王峰¹⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037;

2) 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室, 北京, 100029

内容提要: 长白山天池火山是典型的大陆板内碱性火山, 岩石组合以玄武岩盾和粗面岩、碱流岩等碱性岩为主。为厘清天池火山粗面岩的形成过程, 本文在综合前人研究的基础上, 结合本文新发表数据, 检验了粗面岩的成因。研究结果显示天池火山粗面岩不可能由古老的华北克拉通下地壳部分熔融形成, 也不符合造盾玄武岩部分熔融的模式。通过主量元素、微量元素定性和定量计算后认为粗面岩是由进化玄武质岩浆(玄武粗安岩)经历了分离结晶作用所形成, 粗面岩形成过程中岩浆遭受了地壳混染, 并且具有高 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 和低 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 两种截然不同的混染趋势。结合岩相和层序信息, 作者认为两种演化趋势是上地壳岩浆房系统变化的反映。早期玄武质岩(头道白山期)上侵至上地壳演化, 因与上地壳直接接触, 沿高 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 趋势演化。随着岩浆房接受补给, 岩浆房逐渐增大, 新侵入的岩浆与地壳被早期岩浆房结晶形成的岩浆房壁所隔挡, 使得年轻粗面岩和碱流岩只与早期粗面质岩浆的残留体等进行物质交换, 最终沿着低 Sr 同位素比值趋势演化。

关键词: 粗面岩和碱流岩; 分离结晶; 地壳混染; 岩浆演化路径; 天池火山; 长白山

粗面岩和响岩等碱性岩是大陆裂谷(板内)或洋岛环境双峰式火山岩中常见的酸性岩。而这些岩石的成因较为复杂。理清这些碱性和超碱性岩的成因非常重要, 因为多数碱性岩属于高危险性火山, 如意大利的埃特纳火山和维苏威火山。当前粗面岩的成因模式有古老下地壳部分熔融(Trua et al., 1999)、年轻底侵玄武岩部分熔融(Bohrson and Reid, 1997)、过渡碱性玄武岩分离结晶(Peccerillo et al., 2003; Peccerillo et al., 2007)等。

长白山天池火山是典型的大陆板内火山, 也是中国最具威胁性的火山。它有以玄武岩盾和粗面岩碱流岩为主体的岩石组合特征(刘嘉麒和王松山, 1982; 解广轰等, 1988; 田丰和汤德平, 1989; 金伯禄和张希友, 1994; 刘若新等, 1998a; 樊祺诚等, 2007b)。针对天池火山岩的成因, 前人已有大量的研究。Sr—Nd 同位素的研究显示天池火山酸性岩与玄武岩是同源岩浆(Basu et al., 1991)。主量、微量元素等地球化学和矿物学的研究认为同源岩浆的分离结晶作用是粗面岩形成的原因(解广轰等,

1988; 田丰和汤德平, 1989; 刘若新等, 1998a; 樊祺诚等, 1999; Hsu et al., 2000; 李霓等, 2004; 樊祺诚等, 2007b)。斜长石的分离结晶被认为是产生过碱性岩浆的主要机制, 而玄武岩至粗面岩的演化缺失中间成分的主要原因与铁钛氧化物和橄榄石的分离结晶作用有关(汤德平和田丰, 1989)。学者提出了壳幔双层岩浆房的模式来解释天池火山双峰式岩石组合的成因(刘若新等, 1998a; 樊祺诚等, 2007a)。然而, 有关天池火山粗面岩的成因还存在一些亟待解决的问题, 如, ①粗面岩的其他成因模式没有有效的检验和排除, 同位素不能区分年轻底侵玄武岩熔融形成粗面岩的可能; ②粗面岩母岩浆及演化过程还不清楚, 不同的演化起点和演化过程会造成演化路径的差异(Davidson and Wilson, 2011)。③粗面岩的岩浆系统还不清楚。

为厘清天池火山粗面岩的成因, 本文综合前人数据和本文新发表数据, 试图检验当前粗面岩的成因模式, 约束粗面岩的母岩浆/母岩, 讨论玄武岩至粗面岩的演化趋势和过程, 结合火山岩层序年代提

注: 本文为公益性行业科研专项课题(编号: 201211095-4)和国家自然科学基金资助项目(编号: 41302266, 41272369, 40930314)的成果。

收稿日期: 2015-03-05; 改回日期: 2016-04-22; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2016.03.007

作者简介: 郭文峰, 男, 1984年生。博士, 岩石学、矿物学及矿床学专业, 火山地质学方向。Email: guowenfeng@cags.ac.cn; guowenfeng@mail.iggcas.ac.cn。

出简单的粗面岩岩浆系统演化模式。

1 地质背景

长白山地处吉林省东部的中朝边界地区,在板块单元上位于中朝克拉通的东北缘。新生代至今处于日本海弧后盆地和中国东部大陆裂谷断陷盆地之间的隆起区。火山区的基底由太古宙到中一新元古代的变质岩、古生代至中生代沉积地层和中生代的安山岩和花岗岩组成(Wang Yu et al. , 2003)。地球物理探测显示本区地壳厚度 30 ~ 40km,上地壳厚约 20km(Pak et al. , 1993; Zhang Xiankang et al. , 2002)。区内主要发育平行于西太平洋俯冲带

NE—SW 向的构造断裂,如敦化—密山断裂、天池—图们江断裂等,以及 NW—SE 向的断裂,如天池—白山断裂、红旗河断裂。天池火山位于 NE—SW 和 NW—SE 断裂交汇的地带(Wang Yu et al. , 2003)。本区火山的活动历史划分为 4 个主要阶段:渐新世至中新世期间碱性玄武质岩浆的喷发形成了长白山区甑峰山、奶头山等地的玄武岩,其中奶头山和黄松蒲等地的玄武岩中含有地幔橄榄岩包体。上新世火山活动形成规模巨大的熔岩盾。在鸭绿江和图们江流域大面积出露的巨厚熔岩流台地均属于此期,如沿江村玄武岩、平顶村玄武岩、军舰山玄武岩等,其喷发时间主要介于距今 5 ~ 2Ma(刘嘉麒和王松山,

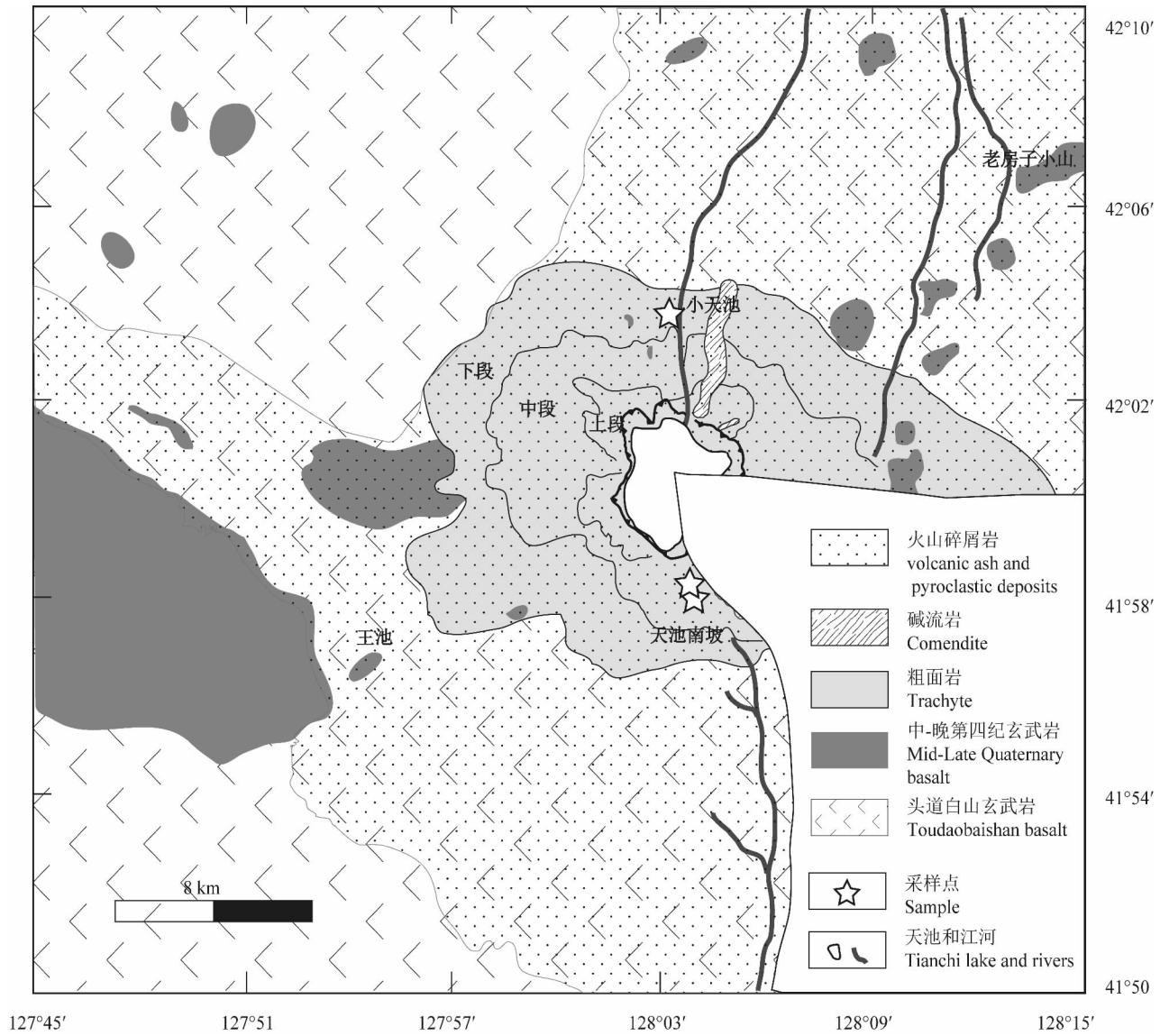


图 1 长白山天池火山锥体地质简图(据金伯禄和张希友, 1994; 魏海泉, 2014 有修改)

Fig. 1 A simplified geological map of Tianchi volcano, Changbai Mountain
(modified from Jin and Zhang, 1994#; Wei Haiquan, 2014&)

1982; 金伯禄和张希友, 1994; Wei Haiquan et al. , 2007; 樊祺诚等, 2007b; Kuritani et al. , 2009)。有学者称其为军舰山期(刘嘉麒和王松山, 1982; 金伯禄和张希友, 1994; 刘若新等, 1998b), 也有人称其为头道期(Wei Haiquan et al. , 2007)。更新世时期(2 ~ 1 Ma), 长白山玄武质火山喷发活动继续进行, 主要分布在天池火山和图们江流域等地, 形成了天池火山白山期熔岩盾。约 1 Ma 在天池火山锥体底部和南侧小白山形成粗面安山质—粗面质熔岩。1 Ma 之后, 粗面质岩浆火山喷发构成了天池火山南北两侧的粗面岩锥及碱流质熔岩流(0.61 ~ 0.019 Ma), 形成了长白山天池火山锥体的主体(魏海泉, 2014)。天池粗面岩的主造锥层序分为三段(图 1; 魏海泉等, 2005): 下段(0.52 ~ 0.61 Ma)分布在锥

体海拔高度约 1000 ~ 1900 m 之间; 中段(0.25 ~ 0.44 Ma)分布在约 1900 ~ 2200 m 之间; 上段(0.019 ~ 0.197 Ma)分布在近天池顶部, 海拔约 2200 ~ 2600 m。在粗面岩造锥的同时还伴有玄武质岩浆的喷发, 如老房子小山、双目峰、王池、老虎洞等中至晚第四纪玄武岩(金伯禄和张希友, 1994)。全新世期间天池火山发生的多次爆炸式喷发形成了广布于天池火山四周的火山碎屑堆积物和天池破火山口。

在天池火山岩中基性岩斑晶含量一般小于 10%, 斑晶矿物由橄榄石、斜长石和辉石以及钛铁矿和磷灰石等副矿物组成。粗面岩和碱流岩等酸性岩斑晶含量达 30%, 斑晶矿物主要由透长石组成, 钙铁辉石、铁橄榄石次之, 副矿物为钛铁矿和磷灰石(图 2)。上段粗面岩和碱流岩甚至含有石英斑晶。

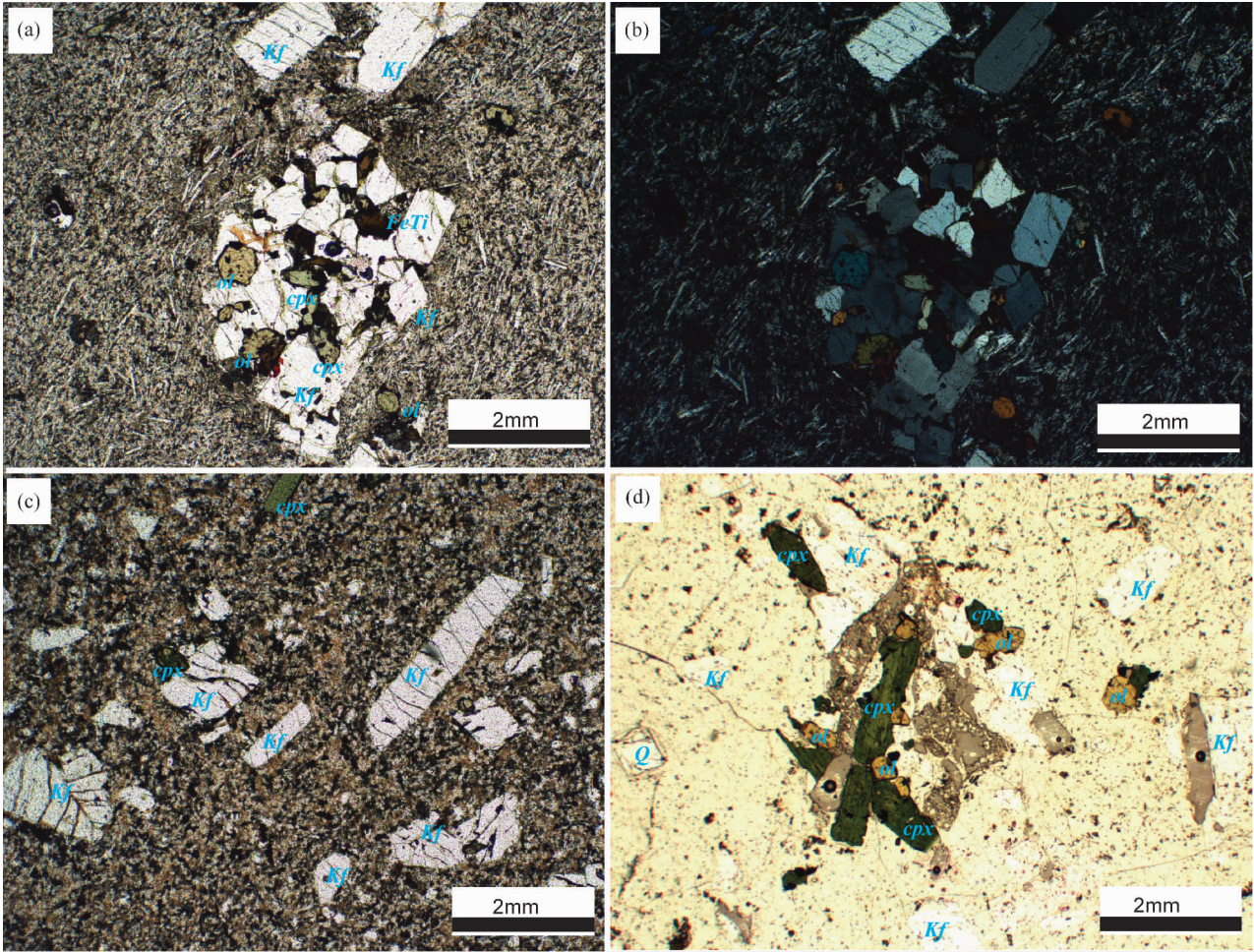


图 2 长白山天池粗面岩和碱流岩的岩相图

Fig. 2 Representative photomicrographs of trachyte and comendite in Tianchi volcano, Changbai Mountain

(a)、(b) 粗面岩下段岩相, (a) 单偏光, (b) 正交偏光; (c) 粗面岩中段粗面岩岩相, 单偏光;

(d) 碱流岩岩相, 单偏光。ol—橄榄石; cpx—单斜辉石 Kf—碱性长石; FeTi—铁钛氧化物

(a), (b) the lower unit trachyte, (a) monocular, (b) crossed polarizer; (c) the middle unit trachyte, monocular;

(d) the upper unit comendite, monocular. ol—olivine; cpx—clinopyroxene; Kf—K—feldspar; FeTi—FeTi oxide; Q—Quartz

粗面岩相中斑晶矿物自形程度好,无熔蚀结构,镁铁质矿物有暗化边结构。钙铁辉石、铁橄榄石和碱性长石之间的交叉共生现象较为常见,下段粗面岩中出现较大粒径的聚斑结构,且聚斑矿物种类多,橄榄石、辉石、长石和钛铁矿均有(图 2a)。

2 岩石化学和同位素特征

鉴于天池粗面岩下段和中段岩石化学数据不足,作者挑选新鲜的中一下段粗面岩做了补充分析。样号为:TCNP002,TCNP003, XTC001。样点分布位置见图 1,分析方法参见(郭文峰等, 2014),数据结果见表 1 和表 2。本文综合天池火山 5 Ma 以来的基性和酸性岩的岩石地球化学和同位素数据,并对其做了质量评估,剔除了烧失量大于 2% 的样品。由于稀土元素中相邻元素除 Eu 外化学性质非常相似,但严重蚀变造成相邻稀土元素的解耦。本文利用 Ce 与 Ce * (La 和 Pr 的几何平均值)的相关图,剔除明显偏离主要数据的样点成分。岩石化学成分按照岩性分组,并且为考虑时间因素将造盾玄武岩以 1 Ma 为界分为头道白山玄武岩(5 ~ 1 Ma)和中一晚第四纪玄武岩(< 1 Ma)两组。其中前者包

含了头道期和白山期喷发的玄武岩,而后者包含了在粗面岩造锥同时伴随喷发的玄武岩,如老房子小山、双目峰、王池、老虎洞等。

2.1 主量元素特征

主量元素的 TAS 图上显示天池玄武岩跨越了过渡碱性和亚碱性两个系列,而粗面岩和流纹岩仅仅落在了碱性系列(图 3a)。过碱性和过铝性指数分类图中显示天池酸性岩主体落在了过碱性的区域(图 3b)。主量 Hark 图上(图 4),各主量元素与 SiO₂ 呈现较好的相关性。K₂O 和 Na₂O 随着 SiO₂ 的增加呈现增加趋势至粗面岩后开始减小。MgO、CaO、TFeO、P₂O₅、TiO₂ 随着 SiO₂ 的增加呈现降低趋势,而 Na₂O、K₂O 和 Al₂O₃,随着 SiO₂ 的增加呈现先增加后减小的趋势。除 Al₂O₃ 之外其他氧化物都显示了缺少中性岩成分,即,有 Daly gap 的特点。

2.2 微量元素特征

粗面岩和碱流岩相容元素含量远远小于玄武岩的对应元素含量。Ni 的含量玄武岩在 4 × 10⁻⁶ ~ 175 × 10⁻⁶ 范围变化,粗面岩和碱流岩变化范围为 0.5 × 10⁻⁶ ~ 49 × 10⁻⁶。玄武岩 Cr 和 Sc 变化范围分别为 2 × 10⁻⁶ ~ 269 × 10⁻⁶ 平均 86 × 10⁻⁶, 11 ×

表 1 长白山天池粗面岩主量元素(%)和微量(×10⁻⁶)元素测试结果

Table 1 Sample compositions of major elements(%) and trace elements(×10 ⁻⁶) of trachyte in Tianchi volcano, Changbai Mountain														
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失	总量	TFeO	Na ₂ O + K ₂ O
TCNP003	67.08	0.41	13.68	5.58	0.13	0.11	0.89	5.78	5.21	0.04	0.00	98.91	5.07	11.11
XTC001	66.20	0.38	15.08	4.47	0.10	0.17	0.97	5.89	5.63	0.05	0.00	98.94	4.06	11.64
TCNP002	67.14	0.40	13.79	5.69	0.13	0.08	0.75	5.66	5.16	0.04	0.22	99.06	5.18	10.95
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
TCNP003	126	235	26.3	99.7	19.0	0.59	17.2	2.87	14.4	2.7	6.59	1.0	6.08	0.80
XTC001	103	188	22.0	81.7	15.4	0.54	13.7	2.30	11.9	2.2	5.80	0.9	5.70	0.74
	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y			
TCNP003	4.2	3.3	0.9	0.5	1.2	7.2	184	42	185	4.5	71.9			
XTC001	4.8	1.9	0.6	0.5	0.6	5.5	142	37	167	3.0	59.9			
	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U	ΣREE	δEu	La/Yb			
TCNP003	1112	156	16.8	28.0	9.2	20.6	19.5	2.8	558	0.03	1.75			
XTC001	1275	144	10.7	28.9	8.8	18.7	18.6	3.6	454	0.04	1.72			

注:样品在中国科学院地质与地球物理研究所分析。TFeO = FeO + 0.89 · Fe₂O₃

表 2 长白山天池粗面岩 Sr—Nd—Pb 同位素测试结果

Table 2 Sample compositions Sr—Nd—Pb isotopes of trachyte in Tianchi volcano, Changbai Mountain										
	n(⁸⁷ Sr)/ n(⁸⁶ Sr)		n(¹⁴³ Nd)/ n(¹⁴⁴ Nd)		n(²⁰⁶ Pb)/ n(²⁰⁴ Pb)		n(²⁰⁷ Pb)/ n(²⁰⁴ Pb)		n(²⁰⁸ Pb)/ n(²⁰⁴ Pb)	
	测值	2σ	测值	2σ	测值	2σ	测值	2σ	测值	2σ
TCNP003	0.706613	0.000009	0.512578	0.000014	17.525	0.002	15.526	0.002	37.887	0.004
XTC001	0.706224	0.000013	0.512617	0.000010	17.521	0.003	15.523	0.003	37.879	0.008

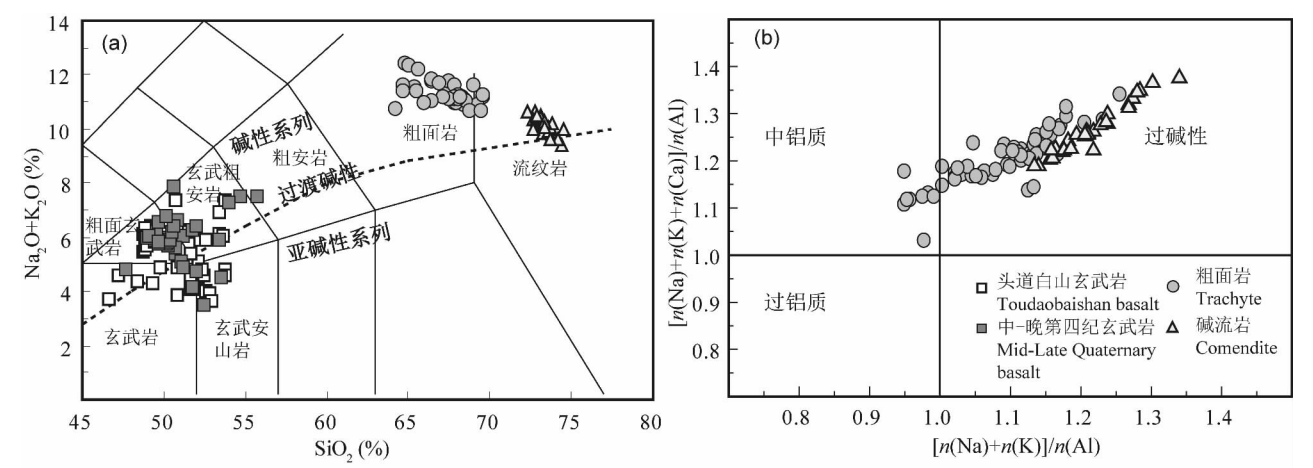


图 3 天池粗面岩分类图解: (a) TAS 图; (b) $[n(\text{Na}) + n(\text{K})]/n(\text{Al}) - [n(\text{Na}) + n(\text{K}) + n(\text{Ca})]/n(\text{Al})$ 图

Fig. 3 Classification diagram of Tianchi volcanic rocks: (a) TAS diagram; (b) $[n(\text{Na}) + n(\text{K})]/n(\text{Al}) - [n(\text{Na}) + n(\text{K}) + n(\text{Ca})]/n(\text{Al})$ diagram

主量元素氧化物含量经过去水校正. 数据来源: 本文; 解广轰等, 1988; 刘若新等, 1998b; Hsu Chunan et al., 2000; 樊祺诚等, 2001; 魏海泉等, 2005; Chen Yang et al., 2007; 樊祺诚等, 2007b; 史延升, 2007; Zou Haibo et al., 2008; 孙春强, 2008; Kuritani et al., 2009; 郭文峰等, 2014

Data source: Xie Guanghong et al., 1988&; Liu Ruoxin et al., 1998b&; Hsu Chunan et al., 2000; Fan Qicheng et al., 2001&; Wei Haiquan et al., 2005&; Chen Yang et al., 2007; Fan Qicheng et al., 2007b&; Shi Yansheng, 2007&; Zou Haibo et al., 2008; Sun Chunqiang, 2008&; Kuritani et al., 2009; Guo Wenfeng et al., 2014&

$10^{-6} \sim 29 \times 10^{-6}$ 平均 18×10^{-6} ; 粗面岩和碱流岩 Cr 和 Sc 变化范围分别为 $0.6 \times 10^{-6} \sim 53 \times 10^{-6}$ 平均 11.8×10^{-6} , $0.5 \times 10^{-6} \sim 36 \times 10^{-6}$ 平均 4.6×10^{-6} 。 ΣREE 含量范围从玄武岩 ($64 \times 10^{-6} \sim 287 \times 10^{-6}$) 到粗面岩和流纹岩 ($318 \times 10^{-6} \sim 818 \times 10^{-6}$) 依次升高。稀土配分图解上 (图 5a) 所有岩石显示总体一致的右倾型式, 斜率没有明显变化, 玄武岩的 La/Yb_N [球粒陨石标准化, 数据来自 Sun and McDonough (1989)]: $4.6 \sim 17.1$, 平均 12.0 , 粗面岩和碱流岩 La/Yb_N : $7.9 \sim 20.7$ 平均 12.1 。玄武岩显示正 Eu 异常 Eu/Eu^*_N 为 $1.0 \sim 2.1$, 粗面岩和碱流岩显示负 Eu 异常, $\text{Eu}/\text{Eu}^*_N = 0.06 \sim 0.58$ 。除 Eu 外, 各稀土含量从基性岩到酸性岩显著升高。

微量元素蛛网图上 (图 5b), 除 Ba、K、Pb、Sr、P、Eu、Ti 元素外, 其他元素均显示出由玄武岩 $\rightarrow$ 粗面岩 $\rightarrow$ 碱流岩元素含量连续增大的趋势, 没有出现主量和相容元素上出现的 Daly gap。玄武岩显示 Ba、K、Pb 的正异常, 粗面岩和碱流岩显示 Ba、Sr、P、Eu、Ti 的负异常。微量元素和 Th 的变异图中 (图 6) 可见相容元素 (如 Ni 和 Cr) 以及 Sr、Eu、Ba、Ti 随 Th 的增加含量显著降低, 且玄武岩至粗面岩段降低明显, 粗面岩至碱流岩降低缓慢。REE、Rb、Pb、HFSE (如 Nb、Ta、Zr 和 Hf) 与 Th 呈线性正相关趋

势, 部分元素显示从玄武岩至酸性岩斜率的变化 (与 Th 比值的变化), 如 Th/La 可以从 0.1 升高至 0.36 , Th/Zr 由 0.01 到 0.04 。

2.3 同位素特征

由于本文所有火山岩年龄均小于 5Ma , 因此, 由放射性累积对初始同位素比值的改变可以忽略不计, 因此, 文中所用初始同位素成分均使用原始测试值, 未经年龄校正。由图 7 可见, 酸性岩的 Sr 同位素比值不均一, 变化范围非常大 ($0.7050 \sim 0.7104$), 明显大于玄武岩 ($0.7048 \sim 0.7055$)。酸性岩的 Nd 同位素比值范围 ($0.5125 \sim 0.5126$) 在玄武岩范围内 ($0.5125 \sim 0.5128$)。酸性岩 Pb 同位素比值变化不大, 且集中在玄武岩的变化范围内 (图 7d)。 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr}) - n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$ 与 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr}) - n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 图中显示粗面岩和碱流岩的同位素变化分布在玄武岩与上下地壳的三元混合面上, 且受上地壳的影响明显 (图 7a ~ d)。

3 讨论

3.1 粗面岩成因

粗面岩的成因观点当前主要分为三种: ① 幔源岩浆底侵造成下地壳的低程度部分熔融形成; ② 年

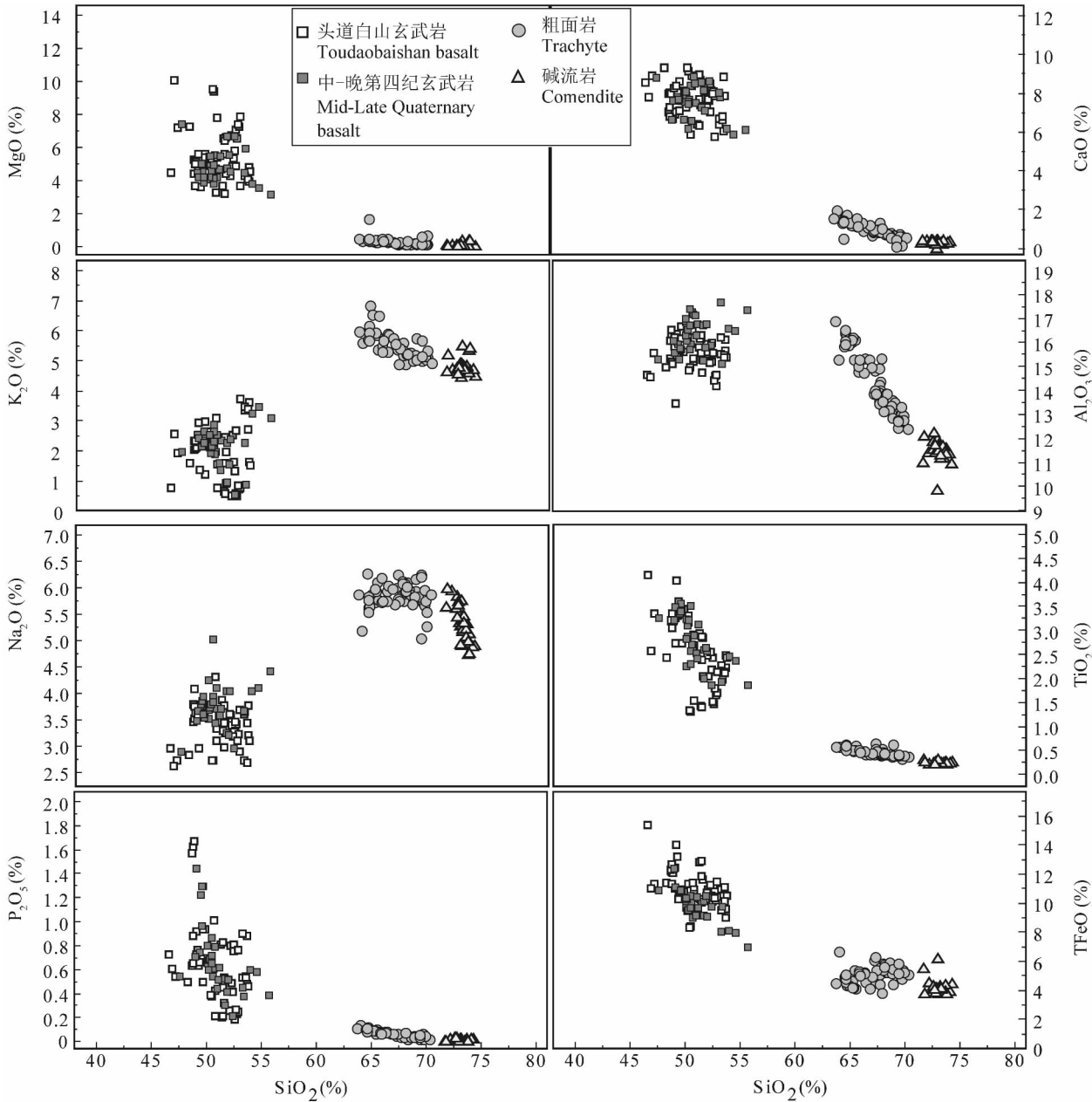


图 4 长白山天池火山岩主量元素哈克图解(数据来源同图 3)

Fig. 4 Various oxide plots against SiO₂ for Tianchi volcanic rocks [see Fig. 3 for data references]

轻的辉长岩部分熔融产生碱性粗面岩 (Socorro Island, Mexico; Bohrsen and Reid, 1997); ③ 碱性玄武岩低压分离结晶 (Main Ethiopian Rift; Barberi et al., 1975; Peccerillo et al., 2003; Peccerillo et al., 2007)。天池火山处于华北克拉通北缘, 基底出露有前寒武纪的片麻岩地层, 而根据地壳包体的研究显示古老下地壳的 Nd 同位素 (0.5108 ~ 0.5114) 远低于粗面岩的 Nd 同位素范围 (图 7a)。因此, 同位素不支持古老下地壳部分熔融形成粗面岩的成因,

但同位素不能区分年轻底侵玄武岩熔融形成粗面岩的可能。

3.1.1 造盾玄武岩部分熔融

从同位素上看, 造盾玄武岩的部分熔融是一个可能机制, 因为玄武岩和粗面岩及碱流岩同位素范围有重叠 (图 7)。玄武岩熔融产生酸性岩也被用来解释 Daly gap, 有计算显示过渡碱性玄武岩很小的部分熔融程度 (约 5%) 即可产生这些酸性熔体, 残留体是斜长石和辉石 (Barberi et al., 1975; Thy et

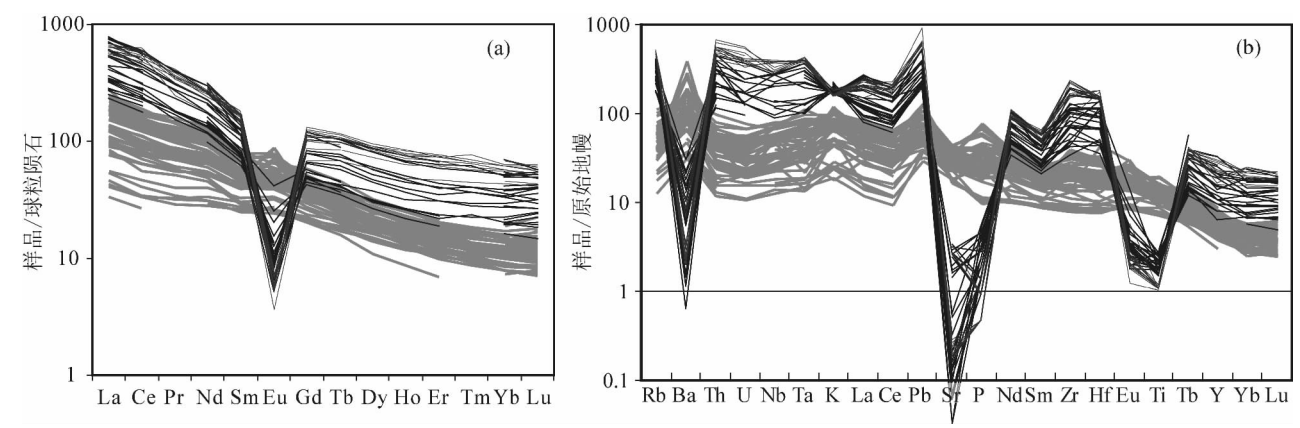


图 5 长白山天池火山岩稀土元素配分图 and 微量元素蛛网图 (灰线为玄武岩, 黑线为粗面岩和碱流岩) (数据来源同图 3)
Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns diagram (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) for Tianchi volcanic rocks [normalization values after Sun and McDonough, 1989, see Fig. 3 for data references]

al., 1990; Garland et al., 1995; Hay and Wendlandt, 1995)。但是一些岩石学与地球化学证据与此假说相悖。首先,粗面岩的岩相中未发现玄武岩或辉长岩熔融的残留体,也未见遭蚀的玄武岩残留晶(图 2)。其次,玄武岩(辉长岩)部分熔融产生粗面岩或流纹岩时会有约 30% 的单斜辉石残留,而单斜辉石对 Nb 和 Zr 有分异作用 ($D_{\text{cpx}}^{\text{Nb}} = 0.005$, $D_{\text{cpx}}^{\text{Zr}} = 0.1$ 引自 (Rollinson, 1993)), 因此,部分熔融辉长岩使得岩浆中的 Nb/Zr 显著升高。我们近似假设辉长岩熔融时 70% 的单斜辉石和 30% 的斜长石计算全岩分配系数 ($D_{\text{Nb}} = 0.006$, $D_{\text{Zr}} = 0.084$), 利用模式熔融计算玄武岩部分熔融趋势。结果显示(图 8a)部分熔融玄武岩使岩浆中 Nb/Zr 显著高于母岩,且随着部分熔融程度的增大 Nb/Zr 减小,而这样的趋势完全与天池粗面岩样点的分布趋势不同。用同样的方法模拟计算发现,熔融玄武岩也不能产生相容元素异常低的特点(图 8b),而天池粗面岩和碱流岩中的 Ni、Cr、V、Sc、Sr 相比玄武岩都非常低(图 6 和 8b)。值得一提的是,Legendre 等(2005)发现部分熔融形成粗面岩时会造成 Pb—Th 相关图上 Pb 的突变,而天池火山岩未发现此类特征(图 6)。因此,天池火山的粗面岩和流纹岩的微量元素特点与玄武岩部分熔融的成因模式不符。

3.1.2 分离结晶

玄武岩晶—液分离是符合天池火山岩成分演化特征的成因模式。首先,火山岩岩相中所含橄榄石、单斜辉石、斜长石、钛铁矿、碱性长石等矿物与岩石化学所反映的分离结晶趋势一致。随着 SiO₂ 和 Th 等不相容元素增加(岩浆演化程度增加), MgO、

CaO、TFeO、P₂O₅、TiO₂ 和 Ni、Sc、Sr 等相容元素降低(图 4、6 和 8b),反映有橄榄石、单斜辉石、斜长石、钛铁矿、磷灰石的结晶分离。稀土配分图和微量元素蛛网图上随着岩性从基性到酸性演化,多数微量和不相容元素连续增大符合晶液分离的趋势,且从玄武岩 Eu、Ba、K、Pb 正异常,到粗面岩和碱流岩 Ba、Sr、P、Eu、Ti 的负异常也显示了长石、钛铁矿等矿物的分离结晶作用(图 5)。不相容元素的比值(如 Nb/Zr)随着含量增加而不变的特点也都符合分离结晶趋势(图 8a)。

为定量检验从玄武岩至粗面岩分离结晶的可行性,我们用质量守恒计算来衡量分离结晶过程。在计算之前需要确定粗面岩的母岩浆成分,因为长白山玄武岩岩石化学和同位素成分以及喷发年龄变化范围较大(郭文峰等, 2014)。Th—n(⁸⁷Sr)/n(⁸⁶Sr) 和 La—n(⁸⁷Sr)/n(⁸⁶Sr) 相关图(图 9a、b)中天池火山岩明显的区分出两条岩浆演化的路径:高 n(⁸⁷Sr)/n(⁸⁶Sr) 组和低 n(⁸⁷Sr)/n(⁸⁶Sr) 组。高 n(⁸⁷Sr)/n(⁸⁶Sr) 组是由较老的造盾玄武岩(头道白山组, 1 ~ 5 Ma)演化至下段和中段的粗面岩的演化组,而低 n(⁸⁷Sr)/n(⁸⁶Sr) 组粗面岩和碱流岩是由较年轻的中—晚第四纪玄武岩演化而来(图 9a、b)。两组演化过程经历不同的地壳端元的混染控制(详见下节)。根据图 9 中选出两组中演化程度较高的玄武岩(Haku32b, WCH003)作为母岩浆,以粗面岩 XTC001 和 P4 作为子岩浆。选取天池玄武岩矿物代表成分(李霓等, 2004; 魏海泉, 2014)作为参数,进行质量守恒计算(Stormer Jr and Nicholls, 1978)。模拟残量的平方差($\sum r^2$)均小于等于 1(表 3),说明

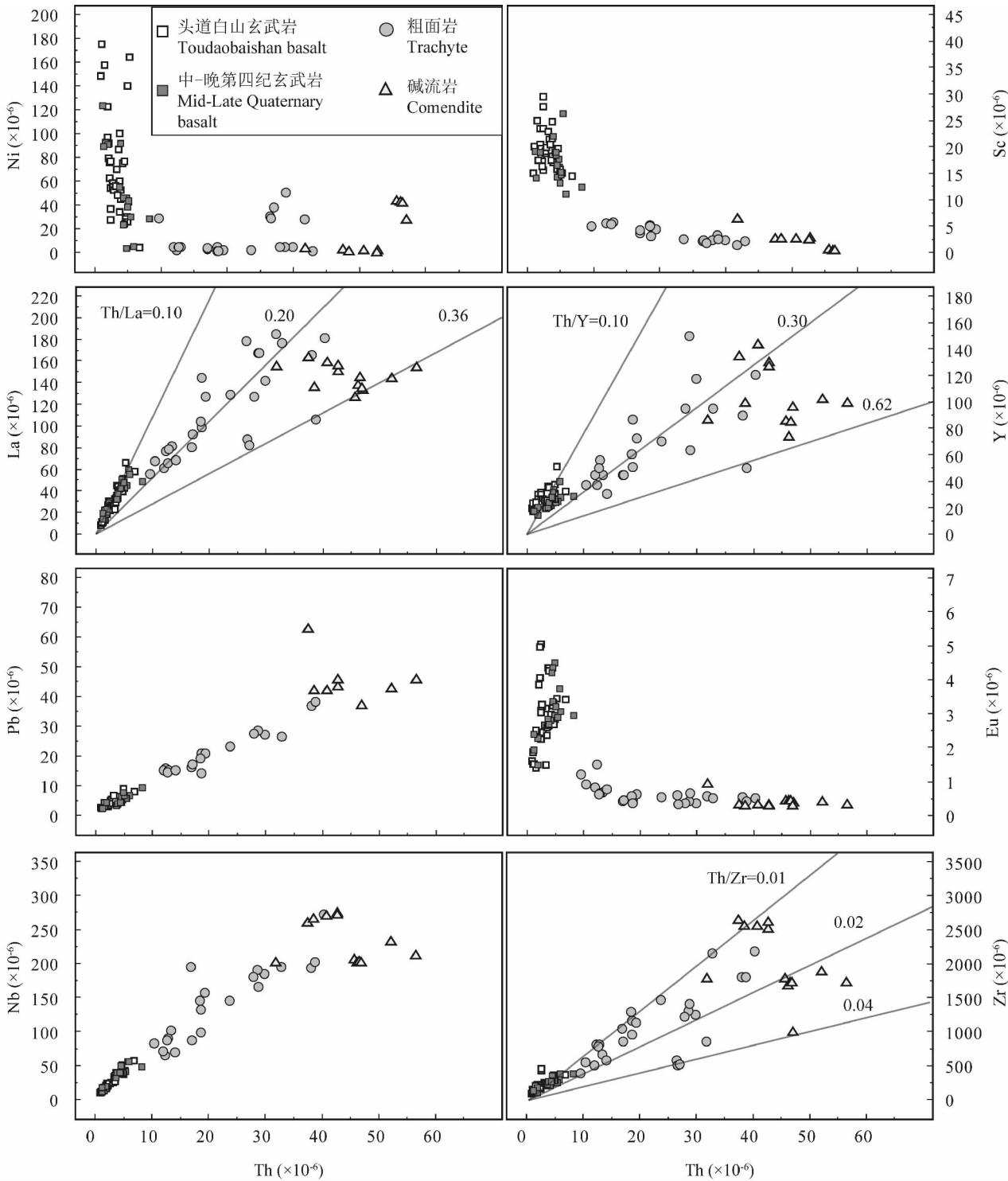


图 6 长白山天池火山岩微量元素与 Th 的协变图(数据来源同图 3)

Fig. 6 Various plots of trace elements against Th for Tianchi volcanic rocks [see Fig. 3 for data references]

计算结果在统计上较为可靠。高 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 组由老造盾玄武岩经受了约 12% 橄榄石、6% 的单斜辉石、58% 的斜长石、24% 的钛铁矿和磷灰石分离结晶形成。而低 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 组由中—晚第四纪玄

武岩分离结晶了约 5% 橄榄石、26% 单斜辉石、54% 斜长石、15% 钛铁矿和磷灰石形成。两种趋势总晶体分离量为 50 % ~ 55 %。此范围的晶体含量接近岩浆有效晶液分离的阈值 (Dufek and Bachmann,

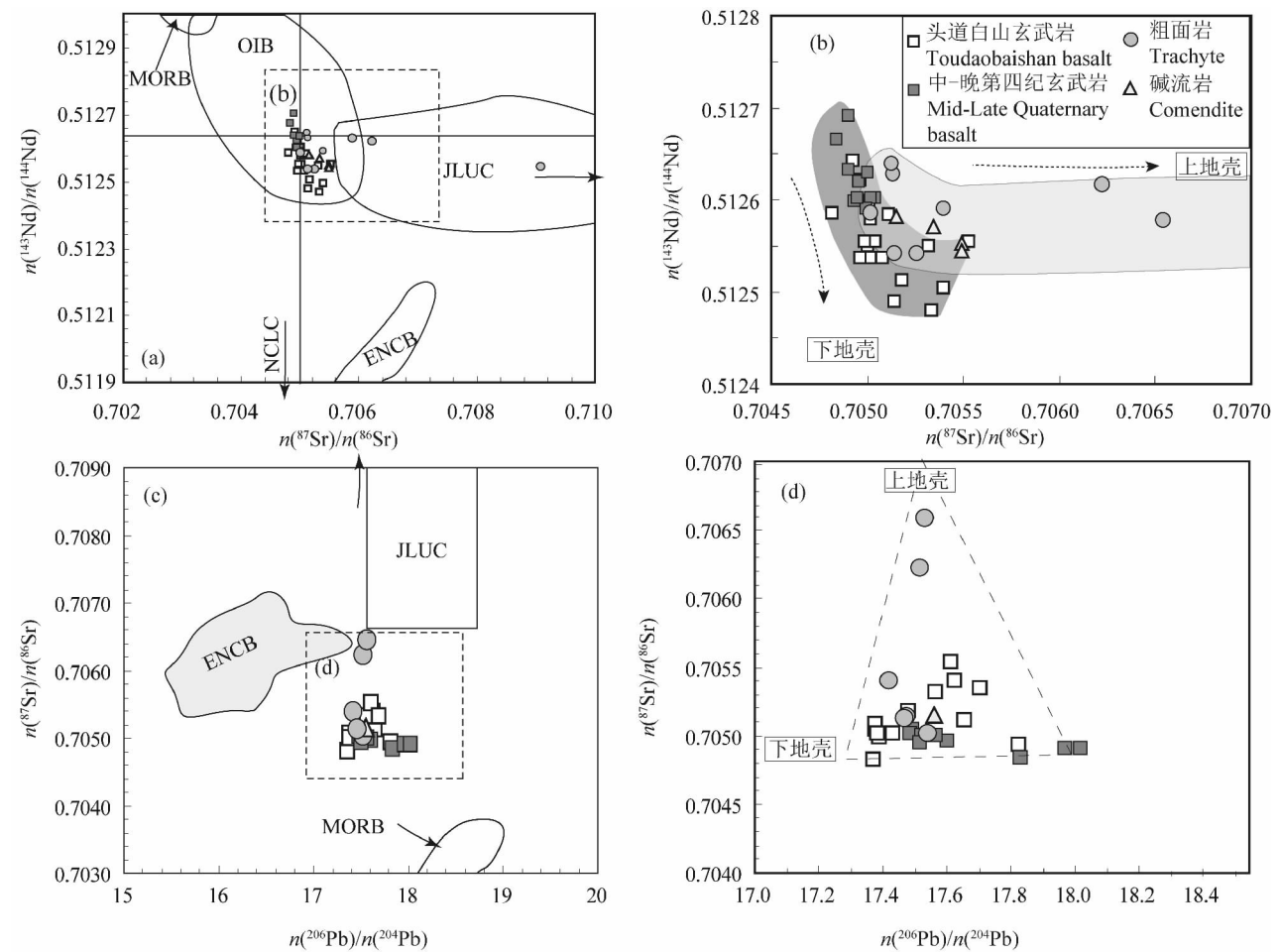


图 7 Sr—Nd—Pb 同位素比值相关图

Fig. 7 Sr—Nd—Pb isotopic diagrams

[MORB 和 OIB 范围来自 Hofmann(1997); 东部中生代下地壳来源火山岩 (ENCB) 和中生代花岗岩同位素范围 (JLUC) 据李超文 (2006) 和 Guo Feng et al. (2010); 华北克拉通古老下地壳 (NCLC) 来自 Huang et al. (2004), 数据来源同图 3; 文中所有火山岩由于年龄 < 5Ma, 同位素成分均使用原始测试值, 未经年龄校正]

[MORB and OIB fields from Hofmann (1997); Lower crust (ENCB) and Upper crust (JLUC) fields from Li Chaowen (2006&) and Guo Feng et al. (2010); Lower crust of North Craton (NCLC) from Huang Xiaolong et al. (2004); see Fig. 3 for data references]

2010)。如果选择高 MgO 玄武岩为母岩浆, 要达到粗面质岩浆, 其分离晶体所需的量会远大于 55%, 而此时晶体间会连接形成稳定的格架阻碍晶液分离 (Dufek and Bachmann, 2010)。为进一步验证主量模拟结果的可靠性, 将计算所得的矿物比例, 利用瑞利分馏方程, 进行微量模拟计算。矿物分配系数见表 3。计算结果显示 (图 8b), 分离晶体的趋势线基本符合了玄武岩和粗面岩样点分布趋势。尽管 Sr 的含量略高于实际值, 但是分离结晶完全重建了 Th 的变化范围, 且子岩浆 (XTC001 和 P4) 也落在了约 50% ~ 70% 分离结晶程度范围内 (图 8b)。应当指出, 前人研究中 (汤德平和田丰, 1989; Hsu Chunan et al., 2000) 也有天池火山类似的计算模拟, 但是

都未区分岩浆演化路径, 也没有进行主量模拟和微量模拟的一致性检验。因此, 模拟计算的结果支持玄武岩分离结晶产生粗面岩的成因观点, 但是至少分为两种演化趋势, 即老造盾玄武岩至粗面岩下段及中段, 中—晚第四纪玄武岩至粗面岩中段及上段。另外, 本文也再次确定 Daly gap 特点是岩浆结晶分离造成, 因为只有和结晶矿物相关的元素出现了中性成分缺少的现象 (图 4、5、6) 其他元素如 Zr、Th 等不相容元素没有出现成分缺少。

3.2 地壳混染及岩浆系统

长白山地处华北克拉通的东北缘, 上地壳主体由古生代和中生代形成的大量花岗岩组成, 厚度约 15 ~ 20km。花岗岩 Sr 同位素成分变化范围 (JLUC:

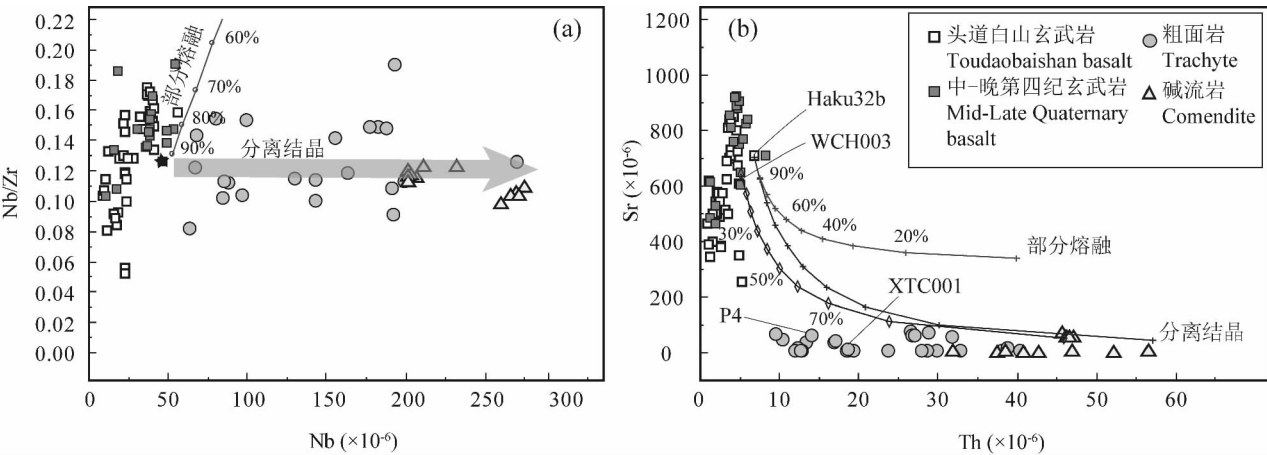


图 8 Nb/Zr 与 Nb 相关图(a),Sr 与 Th 相关图(b) (数据来源同图 3)
Fig. 8 Nb/Zr Vs. Nb diagram (a) and Sr Vs. Th diagram (b) [see Fig. 3 for data references]

0. 70791 ~0. 74430; Guo Feng et al. , 2010) 明显大于天池玄武岩的范围(图 7a)。尽管粗面岩中没有发现地壳包体的报道,但粗面岩经历地壳混染有以下证据支持:

- (1)Th/La,Th/Y 等比值显示(图 6),从玄武岩到粗面岩比值增大,且后者比值范围远远大于前者,这也表明岩浆经历了上地壳物质的混染(Pearce and Peate, 1995)。
- (2)粗面岩 Sr 同位素比值范围远大于玄武岩的范围,且粗面岩的 Sr—Pb 同位素比相关图上落在玄武岩和上下地壳的三元混合面上(图 7c、d),表明在

粗面岩形成和演化过程中岩浆经历了下地壳和上地壳双重混染的影响,本文认为受下地壳混染是继承玄武质母岩浆的特点,因为粗面岩的 Nd 同位素比值范围最低也没有超越玄武岩的范围(图 7b)。

然而,同一座火山的岩石,为何不相容元素与 Sr 同位素比值相关图显示高 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 和低 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 两种截然不同的混染演化趋势(图 9a、b)。可能是两个因素共同作用导致:① 母岩浆(玄武粗安岩)同位素不同;② 演化过程中混染端元不同。对于前者,天池火山的玄武质岩石的同位素在 5 Ma 以来经历了先增加后减小的起伏变化(郭

表 3 质量守恒计算结果及微量模拟参数

Table 2 Results of the mass – balance and fractional crystallization models

	母岩浆		子岩浆		结晶矿物比例		母岩浆		子岩浆		结晶矿物比例		矿物分配系数	
	Haku32b 1.3 Ma	XTC001 0.61 Ma	结晶矿物比例 (%)		WCH003 <0.3 Ma	P4 <0.1 Ma	结晶矿物比例 (%)		Sr		Th			
SiO ₂	51.39	67.24	橄榄石	11.7	54.58	65.11	橄榄石	4.6	0	0.0001				
TiO ₂	2.67	0.39	单斜辉石	6.6	2.48	0.58	单斜辉石	26.3	0.08	0.01				
Al ₂ O ₃	16.68	15.32	斜长石	57.7	16.70	15.95	斜长石	54.4	3.7	0.01				
TFeO	11.48	4.04	钛铁矿	19.3	8.18	4.69	钛铁矿	12.0	0	0.0005				
MnO	0.16	0.10	磷灰石	4.7	0.12	0.10	磷灰石	2.7	1.2	1.5				
MgO	3.26	0.17			3.80	1.61								
CaO	5.89	0.99	斑晶总量:	54.4	6.21	0.43	斑晶总量:	48.7						
Na ₂ O	4.35	5.98			4.07	5.78								
K ₂ O	3.10	5.72			3.26	5.65	全岩 K _d :	Haku32b	0.08	2.20				
P ₂ O ₅	1.02	0.05			0.60	0.10		WCH003	0.05	2.07				
总量	100	100			100	100								
Σr ²			0.5				1.0							

注: 母子岩浆数据引自 Zou Haibo et al. , 2008; Kuritani et al. , 2009; 郭文峰等, 2014;K_d 为矿物分配系数,引自 Geochemical Earth Reference Model 网站 <http://www.earthref.org>

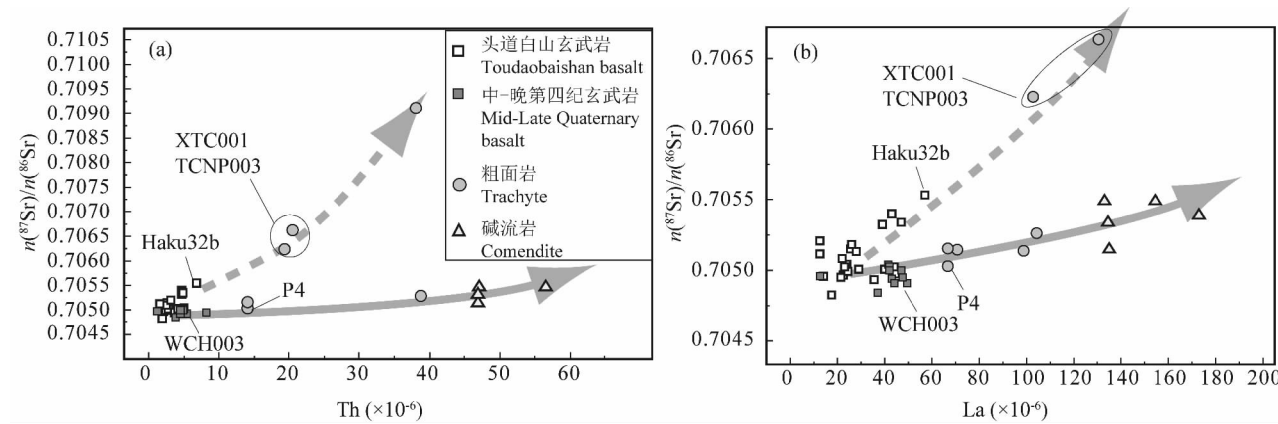


图 9 Th 和 La 与 Sr 同位素比值相关图 (数据来源同图 3)
Fig. 9 Plots of $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ against Th and La [see Fig. 3 for data references]

文峰等, 2014), 确实存在高 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 玄武岩 (头道白山期) 和低 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 玄武岩 (中—晚第四纪)。因此, 高 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 粗面岩可能是由头道白山期的高 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 玄武质母岩浆经历分离结晶且与古老上地壳混染后喷出地表形成。但是, 对于低 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 粗面岩, 在继承了中—晚第四纪玄武岩低 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 的特点后仍然受控于低 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 端元的控制, 即, 未受上地壳老地层的混染。同时, 天池火山粗面岩中含有两类碱性长石甚至是含有石英 (刘若新等, 1998a), 属于 Ab—Or—Q—H₂O 演化体系。实验岩石学研究表明

(Blundy and Cashman, 2008) Ab—Or—Q—H₂O 体系中向石英过饱和方向的演化轨迹发生于 < 500 MPa, 约 15 km。这就排除了粗面岩由下地壳直接喷出 (未受上地壳混染) 的可能。众所周知, 粗面质岩浆在地壳岩浆房形成的过程中不可避免会与地壳岩石发生物质和能量的交换。而低 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 粗面岩更合理的解释是低 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 的中—晚第四纪玄武质母岩浆与上地壳老地层间被先前岩浆房冷却形成的岩浆壁所隔挡 (Fowler et al., 2004), 没有与上地壳进行直接的物质交换。因此, 两种演化趋势可以用以下岩浆系统的演化解释 (图 10): 玄

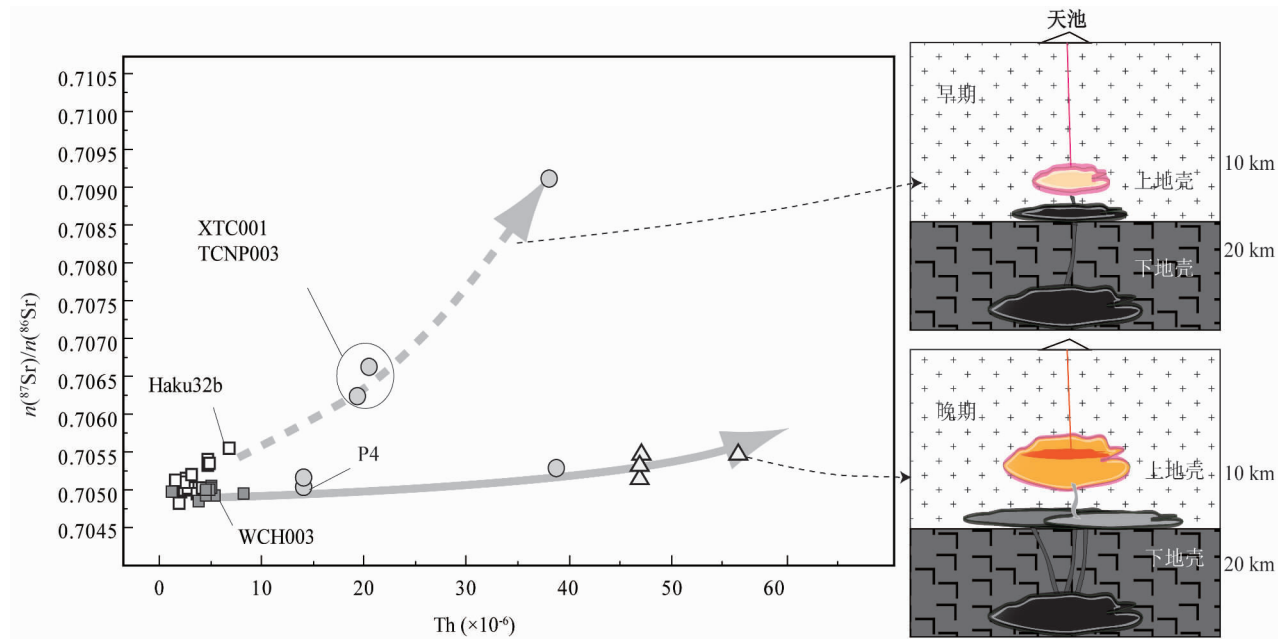


图 10 天池碱性岩岩浆系统演化示意图
Fig. 10 Schematic illustration of a possible Changbai magmatic plumbing system

武质岩浆早期上侵到上地壳形成岩浆房时直接与上地壳接触造成早期岩浆演化路径沿着高 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 趋势演化。随着岩浆房接受补给,岩浆房逐渐增大,新侵入的岩浆与地壳被早期岩浆房原位结晶形成的岩浆房壁所阻挡,使得年轻粗面岩和碱流岩只与早期粗面质岩浆的残留体等进行物质交换,最终沿着低Sr同位素比值趋势演化。

4 结论

天池火山粗面岩不能由古老的华北克拉通下地壳或年轻玄武岩部分熔融形成,而是由进化玄武质岩浆(玄武粗安岩)经历分离结晶和地壳混染后形成。

在粗面岩的形成过程中至少有高 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ (头道白山玄武岩→下段和中段粗面岩演化组)和低 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ (中—晚第四纪玄武岩→中段和上段粗面岩演化组)两种截然不同的混染演化的趋势。这两个趋势是粗面岩岩浆房系统变化的反映。玄武质岩浆早期上侵到上地壳演化形成粗面岩时直接与上地壳接触造成早期高 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 粗面岩。随着岩浆房接受补给,岩浆房逐渐增大,新侵入的岩浆与地壳被早期岩浆房原位结晶形成的岩浆房壁所阻挡,使得年轻粗面岩和碱流岩只与早期粗面质岩浆的残留体等进行物质交换,形成低 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 粗面岩。

致谢:野外曾得到伍婧博士,张磊硕士,刘嘉丽硕士,孙春青硕士,陈双双硕士和高金亮硕士的帮助。成文过程中曾与魏海泉研究员、张亮亮博士进行了有意义的讨论。实验中得到李禾工程师、李潮峰研究员的帮助,白志达教授给予了宝贵的审稿意见,章雨旭研究员对文稿进行了细致修改,在此一并表示感谢。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is Chinese without English abstract)

- 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(增刊): 263~271.
- 樊祺诚,隋建立,李霓,孙谦,徐义刚. 2007a. 长白山天池火山双岩房岩浆作用与互动式喷发. 矿物岩石地球化学通报, 26(4): 315~318.
- 樊祺诚,隋建立,刘若新. 2001. 五大连池、天池和腾冲火山岩Sr、Nd同位素地球化学特征与岩浆演化. 岩石矿物学杂志, 20(3): 233~238.
- 樊祺诚,隋建立,王团华,李霓,孙谦. 2007b. 长白山火山活动历史、岩浆演化与喷发机制探讨. 高校地质学报, 13(2): 175~190.

- 郭文峰,刘嘉麒,郭正府. 2014. 长白山上新世以来玄武岩成分演变规律及其成因. 岩石学报, 30(12): 3595~3611.
- 解广轰,王俊文, Basu A R, Tatsumoto M. 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(4): 1~13.
- 金伯禄,张希友. 1994. 长白山火山地质研究. 延吉: 东北朝鲜民族教育出版社, 1~223.
- 李超文. 2006. 吉林省东南部晚中生代火山作用及其深部过程研究. 北京: 中国科学院研究生院, 1~121.
- 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.
- 刘嘉麒,王松山. 1982. 长白山火山与天池的形成时代. 科学通报, 27(21): 1312~1315.
- 刘若新,樊祺诚,郑祥身,张明,李霓. 1998a. 长白山天池火山的岩浆演化. 中国科学(D辑: 地球科学), 28(3): 226~231.
- 刘若新,魏海泉,李继泰. 1998b. 长白山天池火山近代喷发. 北京: 科学出版社, 1~165.
- 史延升. 2007. 长白山天池火山气象站期晚期碱流质熔岩流的特征及其成因. 北京: 首都师范大学, 1~63.
- 孙春强. 2008. 长白山天池火山岩石学与岩浆演化特征研究. 北京: 中国地震局地质研究所, 1~82.
- 汤德平,田丰. 1989. 吉林省白头山火山岩的微量元素及其岩石学意义. 岩石矿物学杂志, 8(1): 33~42.
- 田丰,汤德平. 1989. 吉林省长白山地区新生代火山岩的特点及其成因. 岩石学报, 5(2): 49~64.
- 魏海泉,李春茂,金伯禄,靳晋瑜,高玲. 2005. 长白山天池火山造锥喷发岩浆演化系列与地层划分. 吉林地质, 24(1): 22~27.
- 魏海泉. 2014. 长白山天池火山. 北京: 地震出版社, 1~448.
- Barberi F, Ferrara G, Santacroce R, Treuil M, Varet J. 1975. A transitional basalt—panterite sequence of fractional crystallization, the Boina Centre (Afar Rift, Ethiopia). Journal of Petrology, 16: 22~56.
- Basu A R, Wang J, Huang W, Xie G, Tatsumoto M. 1991. Major element, REE, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs. Earth and Planetary Science Letters, 105: 149~69.
- Blundy J, Cashman K. 2008. Petrologic Reconstruction of Magmatic System Variables and Processes. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 69: 179~239.
- Bohrson W A, Reid M R. 1997. Genesis of silicic peralkaline volcanic rocks in an ocean island setting by crustal melting and open-system processes: Socorro Island, Mexico. Journal of Petrology, 38: 1137~66.
- Chen Yang, Zhang Youxue, Graham D, Su Shangguo, Deng Jinfu. 2007. Geochemistry of Cenozoic basalts and mantle xenoliths in Northeast China. Lithos, 96: 108~26.
- Davidson J, Wilson M. 2011. Differentiation and Source Processes at Mt Pelée and the Quill. Active Volcanoes in the Lesser Antilles Arc. Journal of Petrology, 52: 1493~531.
- Dufek J, Bachmann O. 2010. Quantum magmatism: Magmatic compositional gaps generated by melt—crystal dynamics. Geology, 38: 687~90.
- Fan Qicheng, Sui Jianli, Li Ni, Sun Qian, Xu Yigang. 2007a&. The Magmatism and Interactive Eruption of the Two Magma Chambers in the Tianchi Volcano, Changbaishan. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 26(4): 315~318.
- Fan Qicheng, Sui Jianli, Liu Ruoxin. 2001&. Sr—Nd isotopic

- geochemistry and magma evolutions of Wudalianchi Volcano, Tianchi Volcano and Tengchong Volcano. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3):233~238.
- Fan Qicheng, Liu Ruoxin, Wei Haiquan, Sui Jianli, Li Ni. 1999&. Petrogeochemical Characteristics of Holocene Eruption of the Tianchi Volcano, Changbai Mountains. *Geological Review*, 45(S1):263~271.
- Fan Qicheng, Sui Jianli, Wang Tuanhua, Li Ni, Sun Qian. 2007b&. History of Volcanic Activity, Magma Evolution and Eruptive Mechanisms of the Changbai Volcanic Province. *Geological Journal of China Universities*, 13(2):175~190.
- Fowler S J, Bohron W A, Spera F J. 2004. Magmatic Evolution of the Skye Igneous Centre, Western Scotland; Modelling of Assimilation, Recharge and Fractional Crystallization. *Journal of Petrology*, 45:2481~505.
- Garland F, Hawkesworth C, 1995. Mantovani M. Description and Petrogenesis of the Paraná Rhyolites, Southern Brazil. *Journal of Petrology*, 36:1193~227.
- Guo Feng, Fan Weiming, Gao Xiaofeng, Li Chaowen, Miao Laicheng, Zhao Liang, Li Hongxia. 2010. Sr—Nd—Pb isotope mapping of Mesozoic igneous rocks in NE China: Constraints on tectonic framework and Phanerozoic crustal growth. *Lithos*, 120:563~78.
- Guo Wenfeng, Liu Jiaqi, Guo Zhengfu. 2014&. Temporal variations and petrogenetic implications in Changbai basaltic rocks since the Pliocene. *Acta Petrologica Sinica*, 30(12):3595~3611.
- Hay D E, Wendlandt RF. 1995. The origin of Kenya rift plateau-type flood phonolites: Results of high-pressure/high-temperature experiments in the systems phonolite—H₂O and phonolite—H₂O—CO₂. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978~2012), 100:401~10.
- Hofmann A. 1997. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature*, 385:219~29.
- Hsu Chunan, Chen Juchin, Ho Kungsuan. 2000. Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks from Kirin Province, northeast China. *Geochemical Journal*, 34:33~58.
- Huang Xiaolong, Xu Yigang, Liu Dunyi. 2004. Geochronology, petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from Nushan, east China: implication for a heterogeneous lower crust beneath the Sino—Korean Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68:127~49.
- Jin Bolu, Zhang Xiyu. 1994#. Researching volcanic geology in Changbai Mt Northeast Korea. *Yanbian: Nation Education Press*, 1~223.
- Kuritani T, Kimura J I, Miyamoto T, Wei H, Shimano T, Maeno F, Jin X, Taniguchi H. 2009. Intraplate magmatism related to deceleration of upwelling asthenospheric mantle: Implications from the Changbaishan shield basalts, northeast China. *Lithos*, 112:247~58.
- Legendre C, Maury R, Caroff M, Guillou H, Cotten J, Chauvel C, Bollinger C, H mond C, Guille G, Blais S. 2005. Origin of exceptionally abundant phonolites on Ua Pou Island (Marquesas, French Polynesia): partial melting of basanites followed by crustal contamination. *Journal of Petrology*, 46:1925~62.
- Li Chaowen. 2006&. Petrogenesis and geodynamic processes of Late Mesozoic volcanic rocks in the southeastern Jilin Province, NE China. *Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences*.
- Li Ni, Fan Qicheng, Sun Qian, Zhang Wenlan. 2004&. Magma evolution of Changbaishan Tianchi Volcano: Evidences from the main phenocrystal minerals. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3):575~582.
- Liu Jiaqi, Wang Songshan. 1982#. Age of Changbaishan Volcano and Tianchi Lake. *Chin Sci Bull*, 27(21):1312~1315.
- Liu Ruoxin, Fan Qicheng, Zheng Xiangshen, Zhang Min, Li Ni. 1998a#. The magma evolution of Tianchi Volcano. *Science in China (Series D)*, 28(3):226~231.
- Liu Ruoxin, Wei Haiquan, Li Jitai. 1998b#. The Modern Eruption of Changbaishan Tianchi Volcano. *Beijing: Science Press*.
- Pak CS, In TO, Phyo YS. 1993. A study for exploration of the deep earth crustal structure in the Paekdusan region. *Geol. Sci.*, 33~5.
- Pearce J, Peate D. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23:251~86.
- Peccerillo A, Barberio M, Yirgu G, Ayalew D, Barbieri M, Wu T. 2003. Relationships between mafic and peralkaline silicic magmatism in continental rift settings: a petrological, geochemical and isotopic study of the Gedemsa volcano, Central Ethiopian Rift. *Journal of Petrology*, 44:2003~32.
- Peccerillo A, Donati C, Santo AP, Orlando A, Yirgu G, Ayalew D. 2007. Petrogenesis of silicic peralkaline rocks in the Ethiopian rift: Geochemical evidence and volcanological implications. *Journal of African Earth Sciences*, 48:161~73.
- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. *Harlow: Longman*; 1~352.
- Shi Yansheng. 2007&. Study on Characteristics and Petrogenesis of Qixiangzhan stage Lava flow of Tianchi volcano, Changbaishan. *Beijing: Capital Normal University*.
- Stormer J C, Nicholls J. 1978. XLFRAC: a program for the interactive testing of magmatic differentiation models. *Computers & Geosciences*, 4:143~59.
- Sun Chunqiang. 2008&. Study on Characteristics of Petrology and Magma Evolution of the Tianchi Volcano in Changbai Mountain. *Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration*.
- Sun Shensu, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42:313~45.
- Tang Deping, Tian Feng. 1989&. The Trace Elements of Volcanic Rocks in Baitoushan, Jilin and Their Bearing on Petrogenesis. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 8(1):33~42.
- Thy P, Beard J, Lofgren G. 1990. Experimental constraints on the origin of Icelandic rhyolites. *The Journal of Geology*, 417~21.
- Tian Feng, Tang Deping. 1989&. Petrogenesis of the Cenozoic volcanic rocks in the Changbaishan region. *Acta Petrologica Sinica*, 1989, 5(2):49~64.
- Trua T, Deniel C, Mazzuoli R. 1999. Crustal control in the genesis of Plio—Quaternary bimodal magmatism of the Main Ethiopian Rift (MER): geochemical and isotopic (Sr, Nd, Pb) evidence. *Chemical Geology*, 155:201~31.
- Wang Yu, Li Chunfeng, Wei Haiquan, Shan Xinjian. 2003. Late Pliocene—recent tectonic setting for the Tianchi volcanic zone, Changbai Mountains, northeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21:1159~70.
- Wei Haiquan, Wang Yu, Jin Jinyu, Gao Ling, Yun Sung-Hyo, Jin Bolu. 2007. Timescale and evolution of the intracontinental Tianchi volcanic shield and ignimbrite-forming eruption, Changbaishan, Northeast China. *Lithos*, 96:315~24.
- Wei Haiquan, Li Chunmao, Jin Bolu, Jin Jinyu, Gao Ling. 2005&. The

Tianchi forming cone eruptive magmatic evolutionary series of the Changbaishan and stratigraphic division. *Jinlin Geology*, 24 (1) :22 ~ 27.

Wei Haiquan. 2014&. Tianchi Volcano, Changbaishan. Beijing: Seismological Press, 1 ~ 448.

Xie Guanghong, Wang Junwen, Basu A R, M. Tatsumoto. 1988&. Petrochemistry and Sr, Nd, Pb-isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks, Changbaishan area, Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 4 (4) :1 ~ 13.

Zhang Xiankang, Zhang Chengke, Zhao Jinren, Yang Zhuoxin, Li Songlin, Zhang Jianshi, Liu Baofeng, Cheng Shuangxi, Sun Guowei, Pan Suzhen. 2002. Deep seismic sounding investigation into the deep structure of the magma system in Changbaishan-Tianchi volcanic region. *Acta Seimol Sin*, 15:143 ~ 51.

Zou Haibo, Fan Qicheng, Yao Yupeng. 2008. U - Th systematics of dispersed young volcanoes in NE China: Asthenosphere upwelling caused by piling up and upward thickening of stagnant Pacific slab. *Chemical Geology*, 255:134 ~ 42.

Petrogenesis of Trachyte and the Felsic Magma System at Tianchi Volcano :
Trace Elements and Isotopic constraints

GUO Wenfeng^{1, 2)}, LIU Jiaqi²⁾, WU Cailai¹⁾, LEI Min¹⁾, QIN Haipeng¹⁾, WANG Nan¹⁾,
ZHANG Xin¹⁾, CHEN Hongjie¹⁾, WANG Zheng¹⁾

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*
2) *Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029*

Abstract: Tianchi volcano located on the China/North Korea border is a composite volcano with typical bimodal suites (trachybasalt shield, a trachyte stratocone and a comendite ignimbrite sheet). The petrogenesis of trachyte and the relationship between the mafic and the felsic suite are ambiguous. In this paper, we combined both new and literature data examined the petrogenesis of Tianchi felsic rocks and developed a possible petrological and geochemical model. We found that Tianchi trachytes can neither be formed by partial melting of the old lower crust of the North China craton nor by partial melting of the newly intruded basalts. The results of qualitative and quantitative geochemical modeling suggest that the felsic rocks are formed by fractional crystallization from the shield basalts with assimilation the crust. In addition, at least two different evolve paths exist in Tianchi felsic rocks: the high and low ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr path. We believe that the two differentiation paths are related to the development of crustal plumbing systems. In the early stage, the evolved magma directly encountered with the upper crust, therefore, had high ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr. In contrast, at the late stage, the differentiation magma evolved along the low ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr trend since the fresh magma was isolated from the upper crust by the previous cooled magma body.

Key words: Trachytes and comedites, Fractional crystallization, Crustal contamination, Evolution paths, Tianchi volcano, Changbaishan

Acknowledgements: This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41302266, 41272369, 40930314), and the Special Scientific Research Fund for Public Welfare Industry (Grant Nos. 201211095-4)

First author: GUO Wenfeng, male; born in 1984 in Yulin City, Shaanxi Province, graduated from the Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences in 2015 and received his Ph. D. degree. Now he is a postdoc in The Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (CAGS). His research concerns the magmatic processes and mechanisms of eruption of the active volcanoes in China. Address: No. 26, Baiwanzhuang Road, Xicheng District, 100037, Beijing, China; Email: guowenfeng@cags.ac.cn; guowenfeng@mail.iggcas.ac.cn

Manuscript received on: 2015-03-05; Accepted on: 2016-04-22; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi: 10.16509/j.georeview.2016.03.007