

文章编号: 1000- 6524 (2001) 03- 0233- 06

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

樊祺诚, 隋建立, 刘若新

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要: 在近年来对长白山天池火山、五大连池火山和腾冲火山三个火山区火山岩石学和主、微量元素研究的基础上, 新做出 18 个火山岩 Sr-Nd 同位素数据, 进一步讨论地幔源区特征与岩浆成因演化。五大连池富钾火山岩浆源区由原始地幔与 EM I 两个地幔端元混合而成, 岩浆直接来自地幔, 未受地壳物质明显混染和分离结晶作用影响; 天池火山各阶段火山岩一致的似原始地幔特征, 可能指示存在巨大的壳内岩浆房和持续的幔源岩浆的补给; 腾冲火山岩的高钾钙碱性岩浆源区为由陆内壳-幔相互作用导致的原始地幔与 EM II 两个地幔端元不同程度混合而成。

关键词: 天池火山; 五大连池火山; 腾冲火山; Sr-Nd 同位素; 岩浆成因演化

中图分类号: P597; P588. 11

文献标识码: A

五大连池火山、天池火山和腾冲火山是我国大陆境内有过历史喷发记载的近代活动火山, 80 年代以来对上述 3 个不同喷发类型和构造背景的近代活动火山相继开展了包括岩石学、年代学和地球化学在内的研究^[1-12]。五大连池火山和腾冲火山分别由 14 座和近 70 座火山构成火山群^[17], 主要是第四纪火山活动的产物。不论是五大连池火山群, 还是腾冲火山群, 就单个火山而言, 大部分不是一次喷发形成, 而是多期喷发活动的产物, 如五大连池一些火山是在熔岩盾之上重新喷发, 并形成复锥状火山(如老黑山)。由于五大连池火山区和腾冲火山区的新期火山具玄武质成分, 所以都以弱爆发和熔岩溢流为特点。长白山天池火山则是一座中央式巨型复合火山, 高度演化的酸性岩浆导致了灾害性爆破喷发, 成为我们今天最为关注的、具潜在喷发危险的活动火山。本文在近年来对上述 3 个火山区岩石学和主、微量元素研究的基础上^[13-16], 新做出 18 个 Sr-Nd 同位素数据, 进一步讨论岩浆起源演化及其构造背景。

1 火山活动历史

结合已有资料, 我们将五大连池(包括科洛火山群、二克山火山群等组成的富钾火山岩带)和腾冲火山岩浆活动分别划分为新期 and 老期两个大的发展阶段, 新期火山岩浆活动包含了全新世以来的喷发活动, 其主要特征如表 1 和表 2 归纳^①。天池火山在第四纪以来经历了约 2.0 Ma~1.2 Ma 的造盾阶段、1.17~0.02 Ma 的造锥阶段和全新世多期(距今 5 000 年和 4 000 年, 公元 1199 年、1668 年和 1702 年)喷发, 属巨型复合火山。

收稿日期: 2001- 05- 28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40072026)

作者简介: 樊祺诚(1948-), 男, 研究员, 主要从事岩浆岩岩石学与地球化学研究工作。

① 樊祺诚, 等. 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(研究报告), 2000.

表 1 五大连池-科洛火山岩分期及喷发物主要特征

Table 1 Periods and major characteristics of volcanic rocks in Wudalianchi- Keluo Volcano

分期	时代	地点	岩石	$w(\text{SiO}_2)/\%$
第四纪	晚更新世(0.13~ 0.09 Ma) — 全新世(公元 1719~ 1721, 1776)	五大连池老黑山、火烧山; 科洛大椅山、南山、孤山	白榴玄武岩	48~ 54
	中更新世(0.6~ 0.2 Ma)	五大连池笔架山、东焦得布山、西焦得布山、东龙门山、西龙门山、莫拉布山、尾山、小孤山; 科洛小椅山、卡山、469 高地、莫河东南山; 二克山		
	早更新世(1.3~ 0.8 Ma)	五大连池卧虎山、药泉山、北格拉球山、南格拉球山		
晚第三纪	上新世(9.6~ 7 Ma)	科洛荡子山、平顶山、黑山、莫河南山、西山、东山、619 高地	白榴碧玄武岩	43~ 45

表 2 腾冲火山岩分期及喷发物主要特征

Table 2 Periods and major characteristics of volcanic rocks in Tengchong Volcano

分期	时代	地点	岩石	$w(\text{SiO}_2)/\%$
新期	中、晚更新世—全新世—0.0070 Ma	马鞍山	早期玄武质粗安岩 晚期粗安岩	52~ 58
	中、晚更新世—全新世?—0.0300 Ma	打鹰山	早期粗面玄武岩 晚期粗安岩	55~ 62
	中、晚更新世—全新世?—0.033 Ma	黑空山	早期玄武质粗安岩 晚期粗安岩	50~ 59
老期	上新世	龙川江流域盲棒盆地和大盈江流域一带	玄武岩	46~ 50
	早更新世	余家大山、清凉山、北来凤山等地	英安质熔结凝灰岩	61~ 66
	中更新世	鸦乌山、曲石、大空山、团山、老龟坡等地	玄武质粗安岩为主	48~ 55

2 火山岩组合特征

全岩硅碱数据是火山岩分类的主要依据, 将我们近些年对上述 3 个火山区分析数据和已发表的资料投影在火山岩 TAS 图上, 它们各自位于不同的岩区(图 1)。五大连池富钾火山岩主要为响岩质碱玄武岩和碧玄武两种类型, 有一小部分位于玄武质粗安岩-粗安岩-碱玄武岩响岩区。考虑到五大连池富钾火山岩已有的习惯叫法, 结合晚第三纪和第四纪两个大的岩浆活动期及其相应的岩石化学特点, 以 TAS 分类为基础, 分别命名为晚第三纪白榴碧玄武岩和第四纪白榴玄武岩。

腾冲火山岩中除了早更新世火山岩以爆炸成因的火山碎屑岩(熔结凝灰岩)为主外, 其它各期火山岩均以溢流相熔岩为主。老期火山岩组合包括上新世玄武岩、早更新世英安质熔结凝灰岩、中更新世玄武质粗安岩。新期火山岩组合从中更新世粗面玄武岩、玄武质粗安岩向晚更新世—全新世粗安岩演化。除上新世玄武岩外, 所有腾冲火山岩均属高钾钙碱性火山岩系列。

天池火山经历了由地幔岩浆房造盾粗面玄武岩向壳内岩浆房造锥和全新世喷发的粗面岩和碱流岩的演化, 缺失中性火山岩, 构成典型的双峰式火山岩组合。根据最近的研究, 以往认为的军舰山玄武岩可能已不属于天池火山的造盾玄武岩范围^[16]。在造锥阶段间有与造盾阶段成分相似的老虎洞期粗面玄武岩浆喷发, 这给天池火山岩浆演化与喷发机制的研究提出了新的问题, 有待进一步研究。

3 主、微量元素和 REE 地球化学特征

上述 3 个火山区岩石主、微量元素地球化学特征^[8, 13-15]可归纳如下:

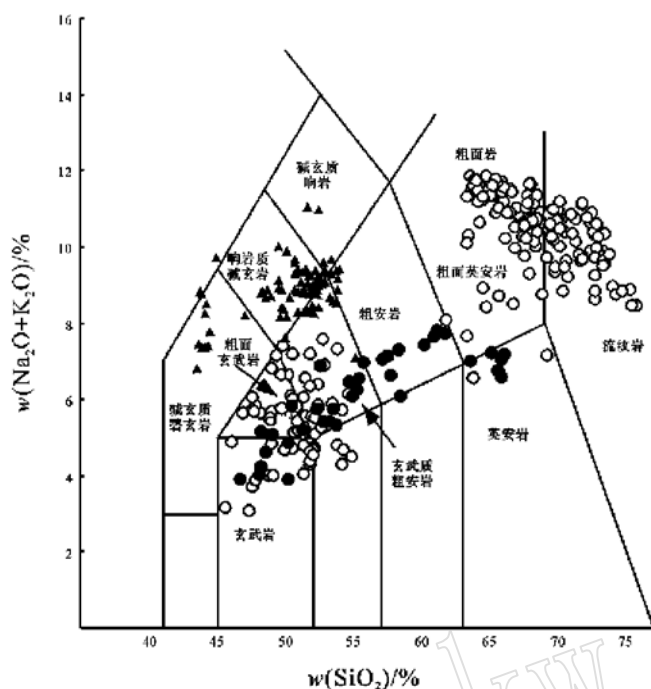


图 1 五大连池火山、天池火山和腾冲火山 3 个火山区火山岩 TAS 图解

Fig. 1 TAS diagram of volcanic rocks in Wudalianchi Volcano, Tianchi Volcano and Tengchong Volcano

▲—五大连池火山; ○—天池火山; ●—腾冲火山

五大连池富钾火山岩带两类火山岩中,科洛晚第三纪白榴碧玄武岩的 SiO₂ 含量变化于 43%~45% 之间,五大连池第四纪白榴玄武岩的 SiO₂ 含量为 48%~54%。它们都具有极为相似乃至重叠的 LREE 强烈富集的稀土元素配分型式和 K、Ba、Rb、Sr 富集的不相容元素配分型式。科洛晚第三纪白榴碧玄武岩和第四纪白榴玄武岩的 ΣREE 分别为 411 × 10⁻⁶ 和 397 × 10⁻⁶,五大连池第四纪白榴玄武岩的 ΣREE 略低,为 364 × 10⁻⁶。它们的 (La/Yb)_N 变化于 52~57 之间,La/Sm 变化于 7.5~8.8 之间。上述关键地球化学参数的相似意味着它们具有共同的岩浆源区和相似的地球化学演化轨迹。

腾冲老期上新世玄武岩的 SiO₂ 含量为 46%~50%,早更新世英安质熔结凝灰岩的 SiO₂ 含量为 61%~66%,中更新世玄武质粗安岩(为主)的 SiO₂ 含量为 48%~55%。新期火山岩从中更新世粗面玄武岩、玄武质粗安岩(SiO₂ 含量为 50.47%~54.93%)向晚更新世—全新世粗安岩(SiO₂ 含量为 56%~62%)演化。除了上新世玄武岩外,腾冲火山

岩同样具有极为相似的富集 LREE、Rb、Th、U、K 和亏损 Nb、Ta、Ti 的地球化学特征。新期粗安岩比粗面玄武岩和玄武质粗安岩具有更高的 REE、不相容元素和更微弱的 Eu 负异常,这与 Sr-Rb/Sr 未显示明显消长关系一致表明,岩浆演化不受斜长石的分离结晶作用控制,或者说岩浆离开岩浆房上升过程中斜长石分异作用很微弱。MgO 与主要氧化物的变化关系反映了岩浆的演化主要与岩浆房内辉石的分离结晶作用有关。

天池火山造盾粗面玄武岩的 SiO₂ 含量为 48%~51%,造锥和全新世喷发的粗面岩-碱流岩的 SiO₂ 含量为 65%~77%。二者 REE 和微量元素分布模式存在明显差别,前者无 Eu 异常或只有低度正 Eu 异常,后者有显著的 Eu、Sr、Ba 负异常,恰恰是斜长石分离结晶作用的证据。而造盾粗面玄武岩的 Mg[#] [100 Mg/(Mg+Fe)] 均小于 60,并非原始玄武岩浆,而是来自地幔岩浆房中经历了富 Mg、Fe 矿物(如橄榄石、辉石等)分异的岩浆。

4 Sr-Nd 同位素地球化学特征与岩浆成因

根据最新的 18 个火山岩 Sr-Nd 同位素数据(表 3),结合已发表的资料^[1,2,4,5,10],可以看出 3 个火山区 Sr-Nd 同位素组成和岩浆源区地幔特征的显著差别。

五大连池富钾火山岩的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 高于洋中脊玄武岩、洋岛玄武岩和中国东部新生代钠质系列火山岩(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 一般 < 0.70500),而它们的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 却低于后者(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 一般 > 0.512500)。在 Sr-Nd 同位素变化图(图 2)上,富钾火山岩都偏离原始地幔,趋向于 EM I 富集地幔端员,不同于趋向于 EM II 富集

表3 五大连池、天池和腾冲火山火山岩 Sr- Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd components of volcanic rocks in Wudalianchi Volcano, Tianchi Volcano and Tengchong Volcano

火山	样号	采样点	岩性	Rb Sr		$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$		Sm Nd		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$		$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	
				$w_B/10^{-6}$				$w_B/10^{-6}$					
五池 大火山	HL9709	老黑山	白榴玄武岩	96.844	1375.122	0.203304	0.705325	10.691	64.678	0.099975	0.512348		
	HL9712	老黑山	白榴玄武岩	86.707	593.821	0.421505	0.705072	11.307	66.564	0.102737	0.512396		
	HK9724	大椅山	白榴玄武岩	100.419	1755.337	0.165144	0.705197	13.886	84.453	0.099441	0.512399		
天池 火山	P1	白岩峰	碱流质浮岩	282.670	110.943	7.357890	0.709076	27.250	135.775	0.121381	0.512547		
	P2	白岩峰	碱流质浮岩	346.651	5.308	188.5400	0.705343	26.245	121.965	0.130144	0.512571		
	P3	白岩峰	碱流质熔结 凝灰岩	292.512	10.932	77.2442	0.705255	17.149	86.205	0.120312	0.512542		
	P4	白岩峰	碱流质熔结 凝灰岩	130.371	66.880	5.627160	0.705145	11.334	59.472	0.115261	0.512542		
	P5	白岩峰	碱流质熔结 凝灰岩	356.316	7.502	137.1200	0.705494	27.725	133.111	0.125971	0.512545		
	P6	白岩峰	碱流质碎成 熔岩	354.465	3.339	306.4480	0.705493	26.050	125.011	0.126031	0.512553		
	P38	黑风口	粗面岩	229.317	1.290	513.5680	0.710860	13.412	69.685	0.116403	0.512547		
	P39	苔原带	粗面玄武岩	82.606	768.561	0.310262	0.704956	8.028	37.827	0.128356	0.512551		
	P44	天池公路	粗安岩	89.752	578.150	0.448132	0.705008	10.604	59.025	0.108658	0.512609		
	腾冲 火山	YTC9724_5	打鹰山	粗安岩	348.613	435.937	2.309340	0.708971	9.028	56.019	0.097471	0.512121	
YTC9738_1		黑空山	粗面玄武岩	31.517	1407.757	0.064638	0.706583	8.149	27.937	0.176426	0.512370		
YTC9738_10		黑空山	粗安岩	132.077	527.784	0.722564	0.707509	5.196	46.172	0.068059	0.512226		
YTC9740_1		马鞍山	玄武粗安岩	111.842	383.265	0.842433	0.705723	5.343	27.554	0.117287	0.512410		
YTC9740_8B		马鞍山	粗安岩	150.278	559.807	0.775183	0.708482	8.578	52.145	0.099487	0.512184		
YTC9741_1		芒棒	玄武岩	62.569	399.185	0.452520	0.706266	4.137	20.080	0.124592	0.512457		

分析者: 中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室。

地幔端员的腾冲、青藏高原周边及东非裂谷等的钾质火山岩^[3, 18, 19]。另外, 样品 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值 < 0.1976 与 $\epsilon\text{Nd} < 0$ 表明源区为轻稀土元素富集型地幔, 暗示源区曾发生壳源混染与交代作用。该区钾质火山岩中还不同程度含有金云母地幔橄辉岩捕虏体, 也提供了岩浆直接来自富钾交代的EMI地幔部分熔融的证据, 由此推测该区钾质火山岩由金云母石榴石二辉橄辉岩地幔约1%的熔融而形成^[20]。全球的许多钾质火山岩都与裂谷有关, 表明钾质岩浆的来源很深。五大连池富钾火山岩带近SN向展布(小古里河—科洛—五大连池—二克山), 位于松辽裂谷北端, 其西侧为嫩江深断裂, 富钾火山岩的起源显然与这一近SN向的大陆板内裂谷环境有关。五大连池富钾火山岩长时间(整个第四纪)保持主、微量元素和同位素地球化学的

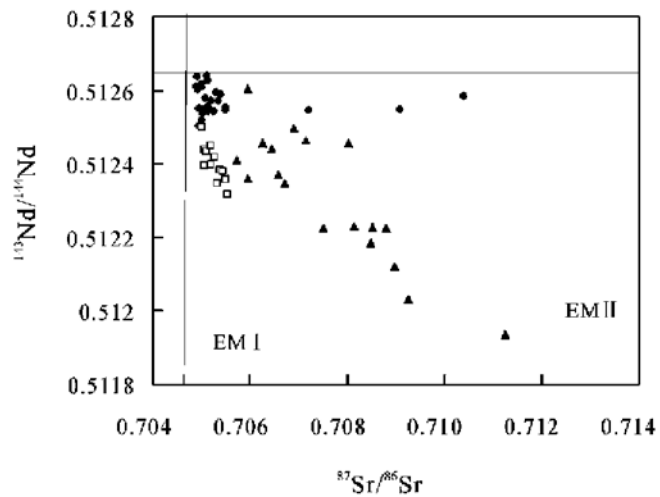


图2 五大连池火山、天池火山和腾冲火山火山岩 Sr- Nd 图
Fig. 2 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ diagram of volcanic rocks in Wudalianchi Volcano, Tianchi Volcano and Tengchong Volcano
□—五大连池火山; ●—天池火山; ▲—腾冲火山

均一, 是岩浆直接来自地幔及岩浆上升过程中未受地壳物质明显混染或地壳岩浆房阶段分离结晶作用影响的最好证据。

天池火山除个别样品明显受地壳物质混染导致 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 明显偏高外, 其余所有造盾、造锥和全新世喷发火山岩的 Sr-Nd 同位素组成都围绕原始地幔分布, 表明它们来自同一地幔源区, 是同源岩浆演化的产物。本文提供的 9 个 Sr-Nd 同位素数据, 除了老虎洞期(P39)粗面玄武岩, 其它 8 个样品均为经壳内岩浆房强烈结晶分异形成的粗面质或碱流质岩石。除了 2 个样品可能受到岩浆房内地壳物质混染, 导致 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 偏高(分别为 0.709076 和 0.710860), 其它 6 个样品均保持其近原始地幔的特征。这可能与天池火山有一个巨大的壳内岩浆房, 并有持续的幔源岩浆的补给, 没有造成明显的地壳混染有关。

腾冲火山岩 Sr-Nd 同位素组成的显著特点是, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的变化范围很大。仅本文的 6 个数据, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 变化于 0.512121~0.512457, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化于 0.705723~0.708971, 且二者具有极好的负相关, 指示了腾冲火山岩源区存在明显的壳-幔混合作用, 受原始地幔(PM)与富集 II 型地幔(EM II)两个地幔端元不同程度的混合作用控制。如果从经典的同位素组成特征解释, 这一作用类似于俯冲和再循环的大陆壳物质与地幔岩发生混合。但从腾冲地块上新世-第四纪时期明显是陆内的构造环境和 Zr-Y 图上所指示的大陆板内环境^[15], 季建清认为腾冲上新世以来火山活动与腾冲地区 5~8 Ma 以来的岩石圈拆沉作用有关^[21]; 王瑜等也认为, 腾冲地区不存在真正意义上的成熟岛弧构造环境, 腾冲火山的活动与其早期板块的俯冲没有动力或成因上的联系, 不是大陆边缘板块俯冲作用的产物^①。因此, 我们更倾向于认为腾冲火山区的高钾钙碱性岩浆起源可能与陆内壳-幔相互作用有关。

参考文献:

- [1] 邱家骧等著. 五大连池—科洛—二克山富钾火山岩[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1991.
- [2] Zhang M., Paul S., Robert N T., *et al.* Potassic volcanic rocks in NE China: Geochemical constraints on mantle source and magma genesis[J]. *J. Petrol.*, 1995, 36(5): 1275~1303.
- [3] 王俊文, 解广轰. 五大连池钾质熔岩的地球化学[A]. 刘若新. 中国新生代火山岩年代学与地球化学[C]. 北京: 地震出版社, 1992. 213~217.
- [4] 解广轰, 王俊文. 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[J]. *岩石学报*, 1988, 4: 1~12.
- [5] Basu A R, Wang Junwen, Huang Wankang, *et al.* Major element, REE, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of their origin from suboceanic type mantle reservoirs[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1991, 105: 149~169.
- [6] 刘嘉麒. 中国东北地区新生代火山岩的年代学研究[J]. *岩石学报*, 1987, 4: 21~31.
- [7] 金伯禄, 张希友. 长白山火山地质研究[M]. 延边: 东北朝鲜民族教育出版社, 1994, 20~77.
- [8] 刘若新, 樊祺诚, 郑祥身, 等. 长白山天池火山的岩浆演化[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(3): 226~231.
- [9] 刘若新, 魏海泉, 李继泰. 长白山天池火山近代喷发[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [10] 朱炳泉, 毛存孝. 印度与欧亚东部碰撞边界——腾冲火山岩的 Nd-Sr 同位素与微量元素研究[J]. *地球化学*, 1983, 1: 1~14.
- [11] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 腾冲地热[M]. 北京: 科学出版社, 1989, 13~19.
- [12] Cong Bolin, Chen Qiuyuan, Zhang Ruyuan, *et al.* Petrogenesis of Cenozoic volcanic rocks in Tengchong region of western Yunnan Province, China[J]. *Science in China(Series B)*, 1994, 37(10): 1264~1271.
- [13] 樊祺诚, 刘若新, 隋建立. 五大连池裂谷型富钾火山岩带的岩石学与地球化学[J]. *地质论评*, 1999, 45(增刊): 358~368.
- [14] 樊祺诚, 刘若新, 魏海泉, 等. 长白山天池火山全新世喷发与岩石地球化学特征[J]. *地质论评*, 1999, 45(增刊):

① 王瑜, 等. 三个地区火山活动的构造地质背景(研究报告), 1998.

- 263~ 271.
- [15] 樊祺诚, 刘若新, 魏海泉, 等. 腾冲活火山的岩浆演化[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 895~ 904.
- [16] 樊祺诚, 刘若新, 隋建立, 等. 长白山地区火山活动与岩浆演化[A]. 丁国瑜等. 新构造与环境[C]. 北京: 地震出版社, 2001.
- [17] 姜朝松. 腾冲新生代火山分布特征[J]. 地震研究, 1998, 21(4): 309~ 319.
- [18] 解广轰, 刘从强, 增田彰正. 青藏高原周边地区新生代火山岩的地球化学特征——古老富集地幔存在的证据[A]. 刘若新. 中国新生代火山岩年代学与地球化学[C]. 北京: 地震出版社, 1992, 400.
- [19] Vollmer R, Norry M J. Possible origine of K-rich volcanic rocks from Virunga, East Africa, by metasomatism of continental crustal material: Pb, Nd and Sr isotopic evidence[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1983, 64: 374~ 386.
- [20] Fan Q C, Hooper P R. The Cenozoic basaltic rocks of eastern China: Petrology and chemical composition[J]. J. Petrology, 1991, 32: 765~ 810.
- [21] 季建清. 滇西南腾冲—盈江—那邦地区岩石学与新生代岩石圈构造演化[D]. 北京: 中国科学院地质研究所, 1998.

Sr– Nd Isotopic Geochemistry and Magmatic Evolutions of Wudalianchi Volcano, Tianchi Volcano and Tengchong Volcano

FAN Qi_cheng, SUI Jian_li, LIU Ruo_xin

(Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029)

Abstract: Studies on petrology and major and trace elements of Tianchi Volcano, Wudalianchi Volcano and Tengchong Volcano have been reported in recent years. This paper presents 18 sets of Sr– Nd isotopic data about these three volcanoes, and then discuss the nature of mantle sources and magma evolutions. Magma of Wudalianchi Volcano directly comes from mantle chamber, without any significant fractional crystallization and crustal contamination, and its mantle source is a mixture of EMI and PM. Samples from Tianchi Volcano of various stages show similar features close to PM, which suggests that there probably exist a huge crustal magma chamber beneath Tianchi Volcano, with continual mantle-derived magma replenishment. As to Tengchong Volcano, its high potassic calc_alkali magma source is a mixture of PM and EMII, resulting from crust– mantle interaction within the plate.

Key words: Sr– Nd isotopic geochemistry; magma genesis and evolution; Tianchi Volcano; Wudalianchi Volcano; Tengchong Volcano