

·专题研究·

藏北蚕眉山地区中新世火山岩地球化学特征 及成岩过程研究

贾宝华, 柏道远, 孟德保, 陈必河

(湖南省地质调查院, 湖南长沙 410011)

摘要:青藏高原北部蚕眉山地区中新世火山熔岩属于可可西里新生代火山岩带中段的羌巴欠岩省, 从早到晚由玄武粗安岩、粗安岩、粗面英安岩等3类岩石组成, 全岩 K-Ar 法年龄为 12.81~14.51 Ma。玄武粗安岩、粗安岩和粗面英安岩的 SiO₂ 含量分别为 53.85%~56.02%、59.22%~61.84%、64.81%~67.70%。火山岩 K₂O+Na₂O 含量为 6.21%~8.20%, K₂O 含量为 3.17%~4.94%, K₂O/Na₂O=1.01~1.52, TiO₂ 含量为 0.77%~1.88%, 属钾玄岩系列, ACNK=0.54~0.90, KNA=0.57~0.72, 属偏铝质岩石。LREE 强烈富集, ΣREE=297×10⁻⁶~939×10⁻⁶, (La/Yb)_N=45.1~127.4, δEu=0.73~0.95, 高度富集 LILE(K, Rb, Cs, Sr, Ba, U, Th), 相对贫 HFSE(Nb, Ta, Zr, Hf)。根据地球化学特征并结合区域对比, 认为岩浆应来源于 EM II 型地幔的部分熔融。氧化物 Harker 图解、Mg[#] 值对微量元素协变图解、La/Sm-La 图解以及 Mg[#] 值和稀土元素含量变化特征等表明玄武粗安岩和粗安岩属同源岩浆演化产物, 并经历了较高级别的结晶分异演化, 而粗面英安岩则属于另一岩浆系列, 由先期经一定程度演化的岩浆在地壳深部冷却固结的岩石后期经再次部分熔融所形成。据此认为, 青藏北部新生代深部地幔熔融等岩浆作用过程应有比地表火山岩更宽的时、空尺度, 区域挤压构造体制使部分幔源岩浆被封闭在深部而冷却成岩, 因此, 新生代火山岩的时空分布规律, 一定程度上与区域构造体制的发展和迁移有关。

关键词:藏北 蚕眉山 中新世火山岩 地球化学特征 成岩机制

中图分类号: P588.14 P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)04-0261-12

Geochemistry and rock-forming process of Miocene volcanic rocks in Canmeishan area, north Tibet

JIA Bao-hua, BAI Dao-yuan, MENG De-bao and CHEN Bi-he

(Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410011, China)

Abstract: The Miocene volcanic lava in Canmeishan area, belonging to Qiangbaqian rock province of Hoh Xil rock belt, occurs in north Tibet and is composed from early to late of basalt latite, latite and trachytic dacite, with the K-Ar whole-rock ages in the range of 12.81~14.51 Ma. The SiO₂ contents of basalt latite, latite and trachytic dacite are 53.85%~56.02%, 59.22%~61.84% and 64.81%~67.70%, respectively. The rocks belong to the shoshonite series and are sub-aluminous: K₂O+Na₂O 6.21%~8.20%, K₂O 3.17%~4.94%, K₂O/Na₂O=1.01~1.52, TiO₂ 0.77%~1.88%, ACNK=0.54~0.90 and KNA=0.57~0.72. ΣREE 297×10⁻⁶~939×10⁻⁶ and (La/Yb)_N 45.1~127.4 point to intensely-concentrated LREE, with δEu being 0.73~0.95. The LILE (K, Rb, Cs, Sr, Ba, U, Th) are highly concentrated, while the HFSE (Nb, Ta, Zr, Hf) are comparatively less concentrated. Geochemical characteristics and regional contrast indicate that the source of

收稿日期: 2005-09-23; 修订日期: 2005-12-28

基金项目: 国土资源部地质大调查资助项目(19991300009051)

作者简介: 贾宝华(1957-), 男, 汉族, 教授级高级工程师, 研究方向: 岩石学、构造学、成矿学; 通讯作者: 柏道远, 高级工程师, 研究方向: 构造学、岩石大地构造学, E-mail: Daoyuanbai@sina.com。

Miocene volcanic rocks in Canmeishan area was EM II -mantle. Harker diagrams of selected major oxides, $Mg^{\#}$ versus trace element variation diagrams, La/Sm - La diagram and variation of $Mg^{\#}$ values and ΣREE all show that basalt latites and latites belong to the comagmatic evolutionary series, and have obviously experienced a high degree of crystallization differentiation. The trachytic dacites belong to another magmatic series produced by partial melting of the rocks formed from the earlier evolved magma. It is thus concluded that the spatial-temporal scale of deep magmatism should be larger than that of the upper volcanic rocks in north Tibet in Cenozoic. Under the compressive tectonic regime, some mantle-derived magma was confined in the depth and turned into rock through cooling. Consequently, the space-time distribution of Cenozoic volcanic rocks in north Tibet must have been related to the evolution of the regional tectonic regime.

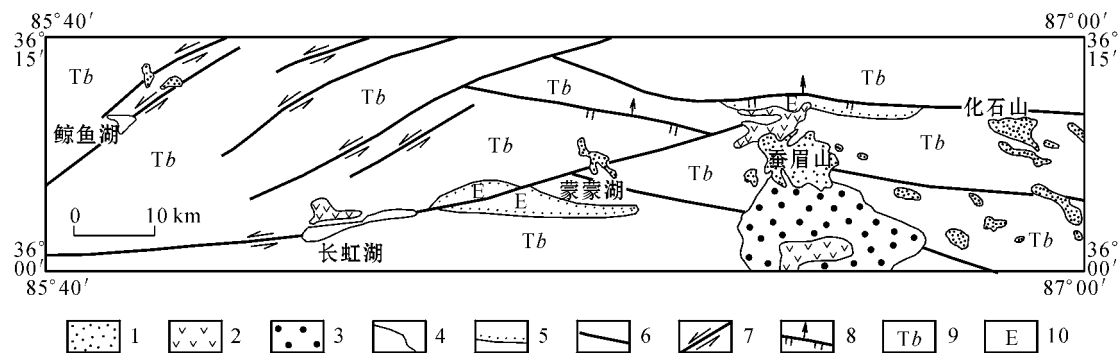
Key words: North Tibet; Canmeishan; Miocene volcanic rocks; geochemical characteristics; rock-forming mechanism

青藏高原北部新生代火山岩出露面积大,岩性、岩相复杂,其时空分布规律、岩浆来源、形成机制及其与高原隆升的关系等,一直是青藏高原地质研究的热点(邓万明,1989,1991,1993,1998; Arnaud *et al.*, 1992; 孙延贵,1992; 邓万明等,1996,1998,1999; 赖绍聪等,1996,2001,2002; 郑祥身等,1996; Yang *et al.*, 1997; Chung *et al.*, 1998; 迟效国等,1999; 丁林等,1999; 赖绍聪,1999; 李光明,2000; 谭富文等,2000; 张玉泉等,2000; 刘燊等,2001; 孟繁聪等,2002; 杨经纬等,2002; 陈必河等,2003; 李佑国等,2005)。鉴于青藏高原北部地域广,地质背景与构造发展过程复杂,关于新生代火山岩成岩过程及形成的构造机制也尚存争议,因此进一步深入研究不同地区新生代火山岩具有重要意义。蚕眉山地区位于昆南断裂与金沙江缝合线之间,属于可可西里新生代火山岩带(迟效国等,1999; 刘燊等,2001)中段的羌巴欠岩省(邓万明等,

1998)。近年来笔者在该地区进行 1:25 万区域地质调查中,对区内中新世火山岩的组成及地质地球化学特征进行了研究,对成岩过程进行了探讨并取得新的认识,兹发表以与同行交流。

1 火山岩的喷发时代及岩性特征

蚕眉山地区(此指北纬 36° 以北的笔者调查区)中新世火山岩出露面积较大,共约 314 km^2 ,分布在长虹桥、蒙蒙湖、蚕眉山、化石山等地(图 1),其中以蚕眉山火山岩规模最大,出露最完整。火山岩呈层状残留于地势较高的山头,出露标高一般 $5200 \sim 5600 \text{ m}$,火山熔岩地貌主要有熔岩低丘、熔岩方山和残留火山锥(李金冬等,2004)。熔岩下伏地层主要为三叠系巴颜喀拉山群砂岩、板岩。综合调查表明中新世火山岩为 3 次喷发产物,从早到晚依次为玄武粗安岩、粗安岩及粗面英安岩,3 次喷发岩石之



1—中新世粗面英安岩 2—中新世粗安岩 3—中新世玄武粗安岩 4—地层界线 5—角度不整合地质界线 6—性质不明断裂;
7—左旋平移断裂 8—逆断裂 9—三叠纪巴颜喀拉山群; 10—古近纪地层

图 1 蚕眉山地区中新世火山岩分布图

Fig. 1 Geological sketch map showing the distribution of Miocene volcanic rocks in Canmeishan area

间呈微倾斜的阶梯状叠覆,接触关系较清楚,下伏岩石有几厘米褐红、紫红色烘烤边。在玄武粗安岩和粗面英安岩中分别获得全岩 K-Ar 年龄为 12.81 ± 0.4 Ma、 12.85 ± 0.56 Ma 和 14.51 ± 0.23 Ma(表 1),说明该套火山岩形成于中新世中期。以上年龄值与可可西里地区可考湖和黑驼峰等岩区大面积出露的安粗岩[主喷发期 K-Ar 年龄 11.7~14.5 Ma(邓万明,1998)]、雄鹰台中新世橄榄安粗岩[K-Ar 年龄为 11.1~12.8 Ma(孟繁聪等,2002)]以及雄鹰台东面鲸鱼湖地区安粗岩[K-Ar 年龄为 13.53~15.47 Ma(杨经绥等,2002)]的年龄值高度吻合,属高原北部主要的一期新生代火山喷发产物(邓万明,1998a)。

火山岩相以溢流相为主,熔岩被单层厚几米~百余米不等。爆发岩相在蚕眉山岩体火山口附近见及。各次喷发溢流相火山岩主要特征如下:

第 1 次喷发主要岩性为灰黑色、灰紫色、紫红色块状、气孔状、斑状玄武粗安岩,主要分布于蚕眉山南侧缓坡地带(图 1)。岩石的主要特点是斑晶中有 0.5%~3% 的橄榄石和少量辉石(图 2a),无角闪石;基质中含 14%~33% 的辉石,斜长石斑晶 An 值 62,

为拉长石,辉石由单斜辉石及斜方辉石组成。

第 2 次喷发主要岩性为黑色、深色、灰紫色、紫红色块状、气孔状粗安岩,分布于长虹湖、蚕眉山等地。主要特点是斑晶中有 0.5%~3% 的透辉石,斜长石 An 值为 53,属拉长石。

第 3 次喷发主要岩性为黑色、灰紫色、紫红色、褐黄色粗面英安岩。与前 2 次火山熔岩比较,斜长石 An 值略有降低,一般为 46~48,属中长石。熔岩顶部局部保存有绳状构造、千层饼状构造(图 2b)、渣状构造等熔浆流动、冷凝的表面构造。

3 次火山熔岩中,深源包体、围岩包体和捕虏晶较发育。包体一般较小,数毫米~几厘米,个别达 15 cm 次圆状。主要包体类型有辉长岩、石榴石麻粒岩、透辉石石英岩、透辉石斜长变粒岩、花岗片麻岩等。主要捕虏晶有铁铝榴石、斜长石、石英。常见副矿物有磁铁矿、磷灰石、石榴石。另有少量斜长石、辉石、角闪石等晶屑,呈棱角状。斑晶熔蚀现象较发育。

爆发相火山岩位于蚕眉山山顶(海拔 5 597 m)火山锥内。火山锥东西长约 2 km,南北宽约 1.5 km,高出地表约 80 m,大部分为积雪覆盖,呈椭圆锥状凸于火山岩之上,四周为坡度渐缓的粗面英安质气孔

表 1 全岩 K-Ar 同位素年龄分析

Table 1 K-Ar data of rocks

岩体	样品号	岩性	K/%	$^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}/\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}/\%$	表面年龄 $\pm 1\sigma/\text{Ma}$
蚕眉山	28	玄武粗安岩	3.00	3.146×10^{-12}	55.20	12.85 ± 0.56
蚕眉山	27	玄武粗安岩	2.78	2.77×10^{-12}	65.05	12.81 ± 0.40
蚕眉山	36	粗面英安岩	4.34	5.08×10^{-12}	77.96	14.51 ± 0.29

注 K-Ar 法测年由 中国地质科学院地质研究所完成,计算时采用的常数 $\lambda_c = 0.581 \times 10^{-10}/\text{a}$, $\lambda_{\beta} = 4.962 \times 10^{-10}/\text{a}$, $^{40}\text{K}/\text{K} = 1.167 \times 10^{-4}$ (原子数比)。

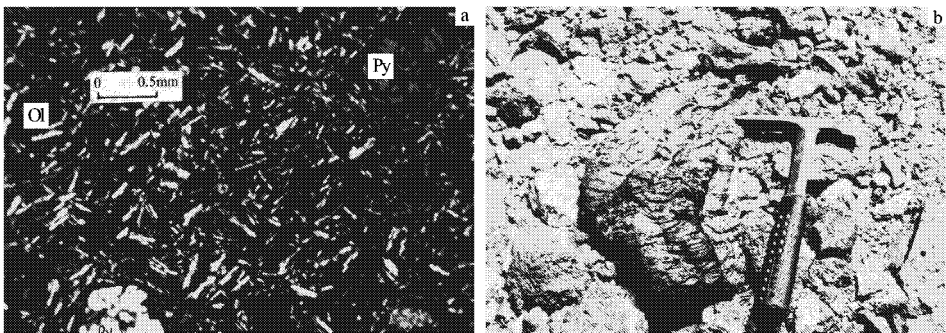


图 2 火山岩的野外及显微照片

Fig. 2 Field photo and microphoto of volcanic rocks

a—玄武粗安岩中橄榄石(Ol)与辉石(Py)斑晶,正交偏光;b—岩浆流动形成的熔岩顶部千层饼状构造

a—Olivine and pyroxene in basalt latite, cross polarized;b—Layered cake-like structure resulting from flowing of magma

状、渣状熔岩。火山角砾岩呈灰紫、紫红、暗紫色,角砾含量 90%~95%,砾径 2 cm×3 cm~4 cm×6 cm,呈棱角-次棱角状,主要成分为紫红色、黑色粗面英安岩、粗安岩及少量辉绿岩、花岗斑岩、变质砂岩等。

2 岩石地球化学

2.1 主元素

主元素和微量元素测试由湖北武汉综合岩矿测试中心完成,结果见表 2。

在 TAS 图(图 3)氧化物经无水化处理,下同)上,蚕眉山地区中新世火山岩清楚分为 3 组,按酸性程度由低到高依次为玄武粗安岩、粗安岩和粗面英安岩,与岩矿定名一致。在硅-钾图中均位于钾玄武岩系列范围内(图 4),表明该组岩石具陆内造山带钾玄武岩系列火山岩特征(邓晋福等,1996)。ACNK = 0.54~0.90, KNA = 0.57~0.72, 属偏铝质岩石。因此,蚕眉山地区中新世火山岩属于强碱性岩石组合。玄武粗安岩、粗安岩和粗面英安岩的 SiO₂ 含量分别为 53.85%~56.02%(平均 54.93%), 59.22%~61.84%(平均 60.97%), 64.81%~67.70%(平均 65.46%); K₂O + Na₂O 含量分别为 6.21%~6.53%(平均 6.37%), 7.41%~8.01%(平均 7.73%), 7.81%~8.20%(平均 7.99%); K₂O 含量分别为 3.17%~3.28%(平均 3.23%), 3.91%~4.63%(平均 4.34%), 4.40%~4.94%(平均 4.65%); Na₂O 含量分别为 3.04%~3.25%(平均 3.14%), 3.22%~3.75%(平均 3.40%), 3.26%~3.53%(平均

3.35%) K₂O/Na₂O 比值分别为 1.01~1.04、1.04~1.34、1.24~1.52。上述 K₂O 与 Na₂O 含量与国外橄榄安粗岩(K₂O、Na₂O 含量分别为 4.47% 和 3.35%)(邓晋福等,1996)、雄鹰台中新世火山岩(分别为 3.26%~4.42%、2.95%~4.36%)(孟繁聪等,2002)、雄鹰台东面鲸鱼湖火山岩(分别为 2.27%~3.99%、2.72%~3.58%)(杨经绥等,2002)的 K₂O 和 Na₂O 含量类似。玄武粗安岩、粗安岩和粗面英安岩的 TiO₂ 含量分别为 1.57%~1.64%(平均 1.60%), 1.57%~1.88%(平均 1.70%)及 0.77%~1.52%(平均 1.29%), 高于国外岛弧橄榄安粗岩的 TiO₂ 含量,后者 56 个样品的 TiO₂ 平均含量为 0.77%(邓晋福等,1996),但低于五大连池大陆裂谷型火山岩的 TiO₂ 含量,后者 TiO₂ 含量大于 2.20%(邓晋福等,1996),显示陆内造山带火山岩的特征。玄武粗安岩、粗安岩和粗面英安岩的 P₂O₅ 含量分别为 0.70%~0.72%(平均 0.71%), 0.81%~1.89%(平均 1.15%)和 0.46%~0.65%(平均 0.56%)。

从上述数据及氧化物 Harker 图解(图 5)可以看出,尽管由玄武粗安岩→粗安岩→粗面英安岩,随着 SiO₂ 含量升高, K₂O 含量明显规律增加, CaO、FeO^T 和 MgO 含量规律减少,但 TiO₂、P₂O₅ 和 Al₂O₃ 则呈低→高→低的非单调变化, Na₂O 含量总体变化不明显。这种变化特征暗示 3 类岩石并非属于一个同源岩浆火山岩系列。

玄武粗安岩、粗安岩和粗面英安岩的 Mg[#] 值平均分别为 0.56、0.32 和 0.33,但由玄武粗安岩→粗

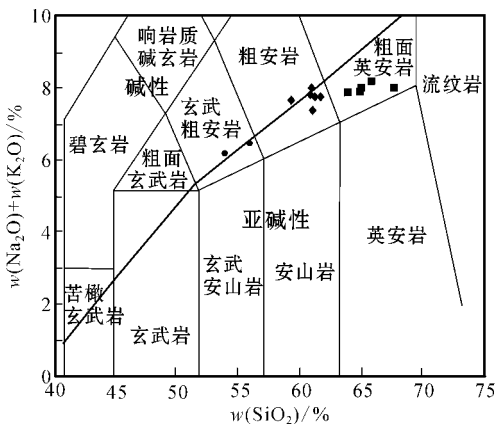


图 3 蚕眉山地区中新世火山岩 TAS 图解(据 Le Maitre 等,1989)

Fig. 3 TAS diagram for Miocene volcanic rocks in Canmeishan area (after Le Maitre *et al.*, 1989)

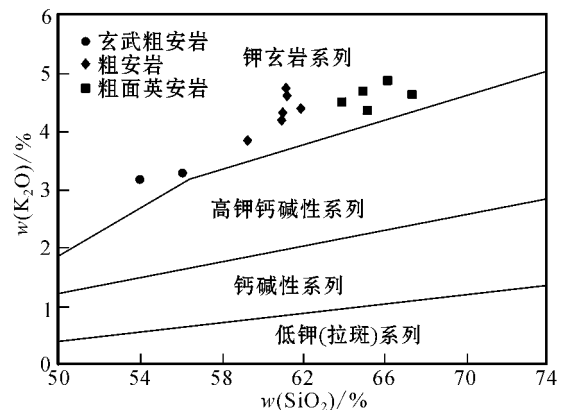


图 4 中新世火山岩 K₂O-SiO₂ 图解(据 Middlemost, 1994)

Fig. 4 K₂O-SiO₂ diagram of Miocene volcanic rocks (after Middlemost, 1994)

表 2 蚕眉山地区中新世火山岩的主量元素 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) analyses of Miocene volcanic rocks from Canmeishan area

岩性 样品号 地点	粗面英安岩					粗安岩					玄武粗安岩		
	384-2 鲸鱼湖	1831 蒙蒙湖	36 蚕眉山	35-1 蚕眉山	206 化石山	968-4 蚕眉山	968-3 蚕眉山	968-2 蚕眉山	968-1 蚕眉山	21 蚕眉山	189-2 长虹湖	27-1 蚕眉山	27-2 蚕眉山
SiO ₂	65.98	63.91	65.33	63.75	63.02	60.22	60.62	60.61	59.75	60.56	58.4	55.36	52.63
TiO ₂	0.75	1.27	1.35	1.50	1.50	1.66	1.65	1.67	1.68	1.55	1.85	1.62	1.53
Al ₂ O ₃	14.35	14.87	14.67	14.50	14.71	15.12	14.62	14.82	14.79	15.03	15.44	14.66	13.76
Fe ₂ O ₃	2.11	2.83	3.24	1.02	2.70	5.79	4.22	5.07	6.04	1.64	3.64	4.46	3.70
FeO	1.23	2.63	1.48	4.17	3.20	1.98	2.55	1.45	0.47	3.97	2.87	3.80	4.10
MnO	0.04	0.04	0.07	0.07	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.07	0.06	0.12	0.12
MgO	1.56	1.21	0.79	1.37	1.41	1.16	2.00	1.15	1.27	3.03	1.63	5.06	5.66
CaO	3.16	3.38	3.28	3.53	3.80	3.81	4.26	4.53	5.04	4.99	5.30	6.59	9.49
Na ₂ O	3.27	3.48	3.22	3.26	3.24	3.37	3.38	3.25	3.15	3.21	3.70	3.21	2.97
K ₂ O	4.56	4.33	4.88	4.61	4.47	4.53	4.26	4.32	4.53	4.12	3.86	3.24	3.10
P ₂ O ₅	0.45	0.56	0.51	0.59	0.64	0.89	1.11	1.08	1.03	0.80	1.86	0.71	0.68
灼失	2.18	0.70	0.68	0.82	0.48	0.53	0.53	1.15	1.65	0.25	0.58	0.47	1.55
总和	99.64	99.21	99.50	99.19	99.22	99.12	99.26	99.16	99.45	99.22	99.19	99.30	99.29
K ₂ O+Na ₂ O	7.83	7.81	8.10	7.87	7.71	7.90	7.64	7.57	7.68	7.33	7.56	6.45	6.07
K ₂ O/Na ₂ O	1.39	1.24	1.52	1.41	1.38	1.34	1.26	1.33	1.44	1.28	1.04	1.01	1.04
ACNK	0.89	0.90	0.89	0.86	0.86	0.87	0.81	0.81	0.77	0.80	0.77	0.7	0.54
KNA	0.72	0.70	0.72	0.71	0.69	0.69	0.70	0.68	0.68	0.65	0.57	0.60	0.60
Mg [#]	0.47	0.30	0.24	0.32	0.31	0.23	0.36	0.25	0.28	0.5	0.32	0.54	0.58
Cr	13	26	25.4	83.2	12	35	30	25	12	79.7	18	141	122
Ni	14.5	22.8	10.9	14.8	21.5	28.0	29.6	33.0	25.0	52.4	19.5	77.7	77.6
Co	9.6	14.0	8.5	9.4	15.6	17.1	18.0	17.8	16.5	16.0	16.3	26.5	26.9
V	53.2	99.9	80.4	94.9	124.9	111.6	123.6	118.8	88.9	132.0	133.3	149.0	143.0
Rb	292.8	187.7	198.0	190	193.8	144.7	139.5	129.1	139.4	129	104.5	78.6	84.5
Sr	540	947	761	792	869	1353	1388	1376	1326	1060	1657	1020	1080
Ba	1093	2824	1620	1520	2311	2581	2622	3418	2534	1850	3028	1470	590
Cs	32	16	9	8	15	15	15	14	13	25	14	13	11
Sc	4.2	6.6	4.9	4.9	7.9	8.2	8.3	8.9	8.0	10.5	8.5	14.6	13.9
Ga	22.8	19.5	26.8	28.5	23.0	22.1	23.5	21.0	21.6	15.9	20.1	19.9	13.4
Zr	197	430	538	503	568	458	407	433	469	381	362	315	296
Hf	5.7	9.9	14.4	13.4	12.8	10.8	9.6	9.9	10.2	10.1	8.4	8.7	8.1
Nb	21.8	30.2	37.0	36.0	37.4	44.2	43.3	43.0	43.2	38.8	36.9	35.5	31.0
Ta	1.3	1.5	2.7	2.7	1.8	2.3	3.0	1.3	3.2	2.6	2.3	2.1	2.8
Th	21.9	32.5	51.7	47.8	44.5	25.7	22.5	22.5	25.3	25.9	24.7	19.7	18.4
U	8.3	4.8	4.9	8.1	5.7	4.0	4.0	3.1	4.2	4.5	3.6	3.5	4.1
La	68.22	158.2	145.5	130.2	185.0	166.4	179.5	168.3	176.9	115.7	218.6	92.07	94.23
Ce	136.8	293.0	301.0	277.5	369.0	333.7	358.6	335.4	341.7	263.2	434.1	194.6	189.0
Pr	14.61	30.71	27.89	27.03	35.06	36.43	39.99	37.62	38.84	25.03	46.27	19.67	18.40
Nd	49.87	90.89	93.86	90.22	121.00	123.2	135.70	128.00	131.90	87.97	170.50	68.48	66.27
Sm	7.71	13.31	12.43	12.06	16.20	17.74	18.01	18.04	17.94	12.01	21.95	9.91	9.60
Eu	1.41	2.62	2.54	2.55	3.16	3.78	3.60	3.71	3.63	2.87	4.55	2.48	2.31
Gd	4.53	7.28	7.45	7.27	8.85	9.69	10.44	10.27	10.18	7.91	11.74	6.80	6.47
Tb	0.60	0.95	0.82	0.83	1.09	1.26	1.36	1.29	1.33	0.93	1.45	0.82	0.81
Dy	2.62	4.12	3.57	3.76	4.41	5.36	5.64	5.20	5.73	4.33	6.14	4.15	3.93
Ho	0.38	0.66	0.59	0.59	0.77	0.87	0.91	0.89	0.92	0.76	0.93	0.70	0.70
Er	0.80	1.31	1.32	1.29	1.63	1.74	1.79	1.83	1.88	1.76	1.81	1.69	1.70
Tm	0.11	0.18	0.17	0.18	0.22	0.22	0.23	0.252	0.25	0.25	0.22	0.25	0.24
Yb	0.61	0.99	0.81	0.81	1.19	1.28	1.14	1.28	1.30	1.38	1.11	1.32	1.32
Lu	0.0820	0.1330	0.11	0.12	0.16	0.17	0.15	0.17	0.18	0.20	0.15	0.20	0.19
Y	9.17	14.20	13.79	14.12	18.90	20.62	19.12	20.47	20.04	19.74	20.18	18.35	17.94
ΣREE	297.52	618.55	611.85	568.53	766.64	722.05	776.19	732.73	752.72	544.04	939.70	421.49	413.11
Nb/La	0.32	0.1910	0.2540	0.28	0.20	0.27	0.24	0.25	0.24	0.33	0.17	0.38	0.33
δEu	0.73	0.80	0.81	0.83	0.79	0.86	0.80	0.82	0.81	0.92	0.84	0.95	0.92
(La/Yb) _N	72.3	103.4	116.2	104.0	100.6	84.1	101.9	85.1	88.0	54.2	127.4	45.1	46.2
(Dy/Yb) _N	3.1	3.1	3.2	3.4	2.7	3.1	3.6	3.0	3.2	2.3	4.1	2.3	2.2

样品由湖北武汉综合岩矿测试中心完成,主元素采用 ICP-AES 分析,除 SiO₂ 采用碱溶法测定外,其他氧化物采用酸溶法测定,分析精度优于 2%。微量元素采用 PE Elan 6000 型等离子体质谱测定(ICP-MS),除稀土元素与 Nb、Ta 采用碱溶法外测定外,其他微量元素均采用酸溶法测定,分析精度优于 1%~3%。ACNK = Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O) (分子比),KNA = (K₂O + Na₂O) / Al₂O₃ (分子比),Mg[#] = Mg / (Mg + Fe) (原子比)。

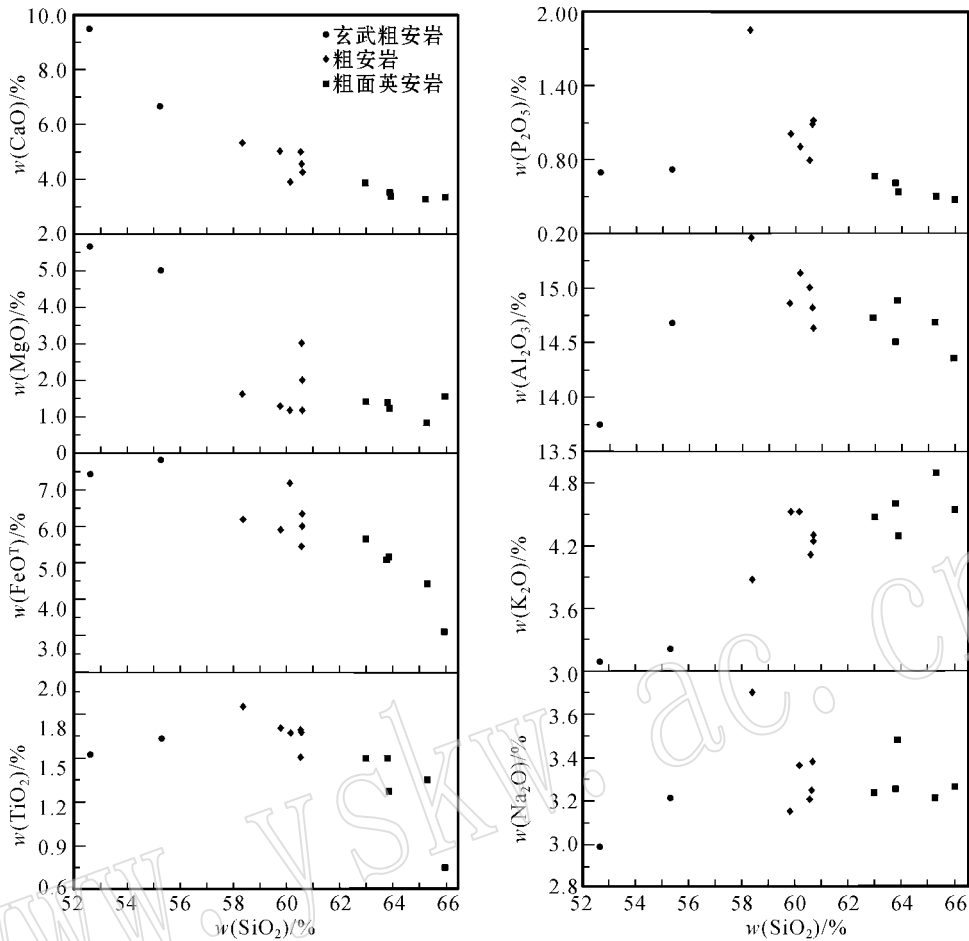


图 5 蚕眉山地区中新世火山岩主要氧化物 Harker 图解

Fig. 5 Harker diagrams of selected major oxides in Miocene volcanic rocks from Canmeishan area

安岩 $Mg^\#$ 值明显降低,从粗安岩→粗面英安岩 $Mg^\#$ 值基本没有变化(图 6),甚至稍有升高。通常将玄武岩类的 $Mg^\#$ 值作为识别原生玄武岩浆的一个重要标志,一般认为原生玄武岩浆的 $Mg^\#$ 值应为 0.68~0.75(Frey, 1978),而原生玄武岩浆经结晶分异演化, $Mg^\#$ 值一般会逐渐变小。本区玄武粗安岩的 $Mg^\#$ 值稍低于原生岩浆的 $Mg^\#$ 值范围,表明玄武粗安岩类应为原生岩浆经过较低程度的演化衍生而成。而粗安岩和粗面英安岩的 $Mg^\#$ 值明显低于原生岩浆的范围,说明它们是原生碱性岩浆经过较强烈的结晶分异演化而成。就玄武粗安岩和粗安岩这两类岩石而言,随着 $Mg^\#$ 值降低, CaO 和 FeO^T 含量降低, SiO_2 含量升高, K_2O 的含量则呈明显迅速增高的趋势(图 6),表明二者可能属于一套同源岩浆火山岩岩石系列(Wilson, 1989);但 TiO_2 和 P_2O_5 的含量并未按一般规律降低,而是略有升高,可能是由于玄武粗安岩岩浆向粗安岩岩浆演化阶段没有出现磷

灰石和钛铁氧化物等矿物的分离结晶作用所致。就粗安岩和粗面英安岩而言, $Mg^\#$ 值并未显示出明显的差别,说明二者不大可能为同源岩浆演化关系,这与上述氧化物 Harker 图解(图 5)反映的信息一致。

2.2 稀土元素

蚕眉山地区中新世火山岩中玄武粗安岩的 ΣREE 为 $413 \times 10^{-6} \sim 421 \times 10^{-6}$; $(La/Yb)_N = 45.1 \sim 46.2$, 平均 45.6×10^{-6} $(Dy/Yb)_N = 2.2 \sim 2.3$, 平均 2.25; $\delta Eu = 0.92 \sim 0.95$, 平均 0.93。粗安岩 ΣREE 为 $544 \times 10^{-6} \sim 939 \times 10^{-6}$ $(La/Yb)_N = 54.2 \sim 127.4$, 平均 90.1 $(Dy/Yb)_N = 2.3 \sim 4.1$, 平均 3.2 $\delta Eu = 0.80 \sim 0.92$, 平均 0.84。粗面英安岩的 ΣREE 为 $297 \times 10^{-6} \sim 766 \times 10^{-6}$ $(La/Yb)_N = 72.3 \sim 116.2$, 平均 99.3 $(Dy/Yb)_N = 2.7 \sim 3.4$, 平均 3.1 $\delta Eu = 0.73 \sim 0.83$, 平均 0.79。这表明,本区中新世火山岩均属轻稀土元素强烈富集型,并基本不显示 Eu 异常(玄武粗安岩),或仅显示微弱的 Eu 负

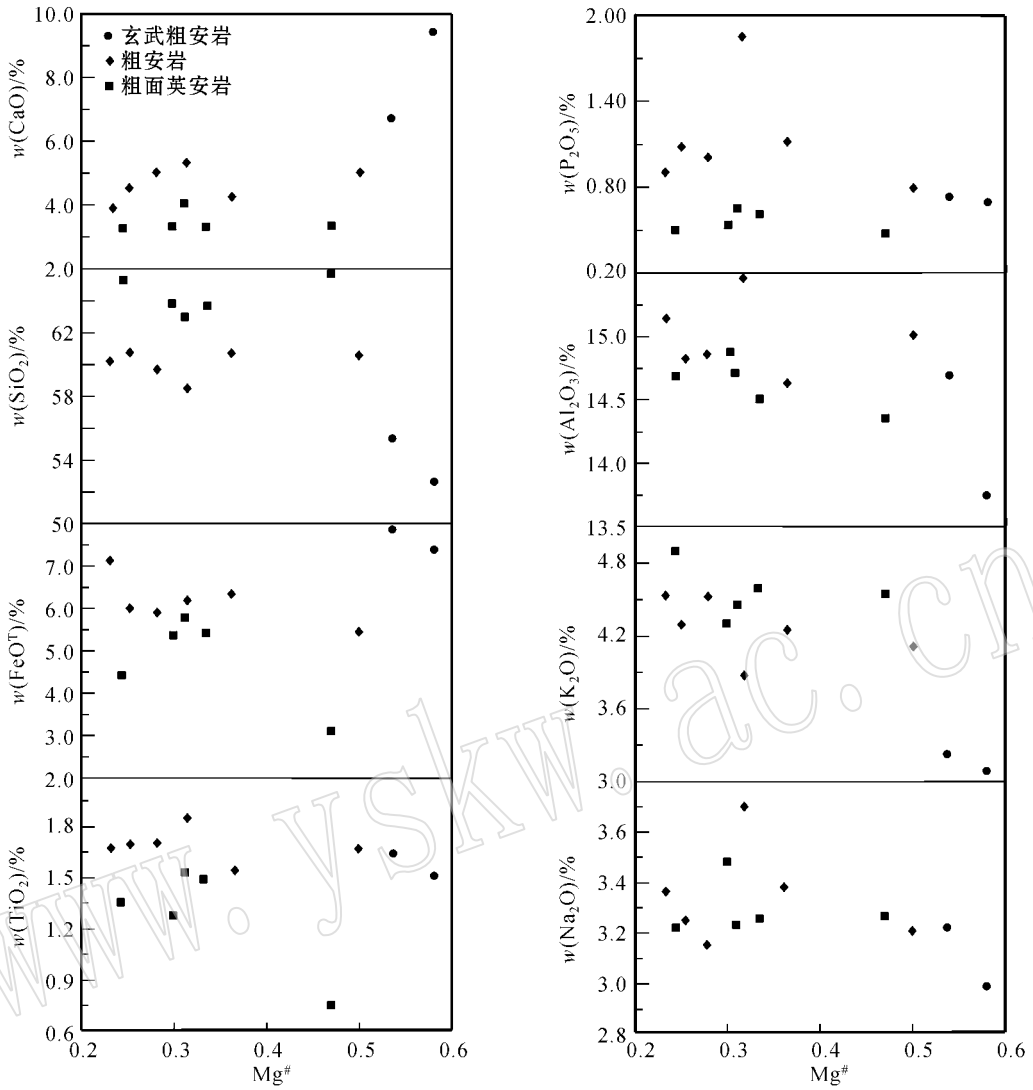


图 6 火山岩氧化物与 $Mg^{\#}$ 值标绘图解

Fig. 6 $Mg^{\#}$ versus major element variation diagrams

异常(粗安岩和粗面英安岩),重稀土元素分馏相对较弱。从稀土元素球粒陨石标准化配分型式图(图 7)也可以看出,各类岩石的曲线总体近于平行并强烈右倾斜,显示轻稀土元素强烈富集, Eu 基本无异常或微弱异常。Eu 异常特征表明玄武粗安岩岩浆未经斜长石的分离结晶作用,而粗安岩和粗面英安岩岩浆形成过程中发生过少量的斜长石分离结晶。稀土配分曲线形态与雄鹰台(孟繁聪等, 2002)和鲸鱼湖(杨经绥等, 2002)的中新世火山岩极为相似。

值得指出的是,在图 7 中,总体上玄武粗安岩和粗安岩分别位于下部和上部(ΣREE 平均分别为 417×10^{-6} 和 744×10^{-6}),而酸性程度最高的粗面英安岩则位于中部(ΣREE 平均为 573×10^{-6}),暗示粗面

英安岩不是前两者岩浆连续演化的产物,这与上述主元素分析结果一致。

2.3 微量元素

蚕眉山地区中新世火山岩普遍富集大离子亲石元素(LILE)(K、Rb、Cs、Sr、Ba、U、Th),相对贫非活动性元素(HFSE)(Nb、Ta、Zr、Hf)(表 2)。在原始地幔标准化蛛网图(图 8)上,曲线为右倾型且斜率较大,存在 Ba、Th、La 和 Ce 的正异常和 Ta、Nb、Sr、P 和 Ti 的负异常,表明源区的形成与俯冲作用有关(孟繁聪等, 2002)。富集强不相容元素,指示火山岩源区为富集地幔。上述微量元素特征与雄鹰台和鲸鱼湖源于富集地幔的中新世火山岩特征(孟繁聪等, 2002;杨经绥等, 2002)基本一致。相对玄武

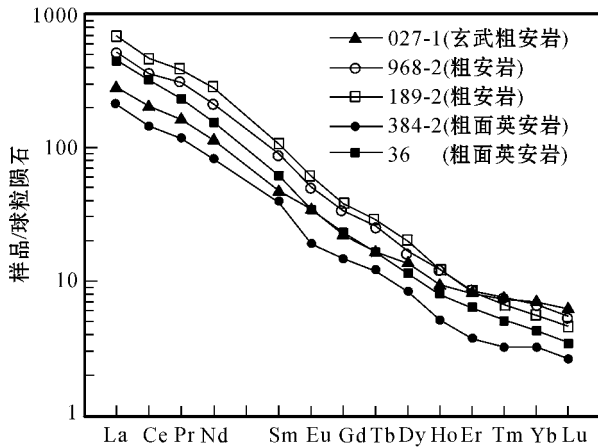


图 7 火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分图解

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of volcanic rocks
球粒陨石数据据赫尔曼(1971), 转引自高秉璋等(1991)
Chondrite data from Herrman(1971), after Gao Bingzhang
et al. (1991)

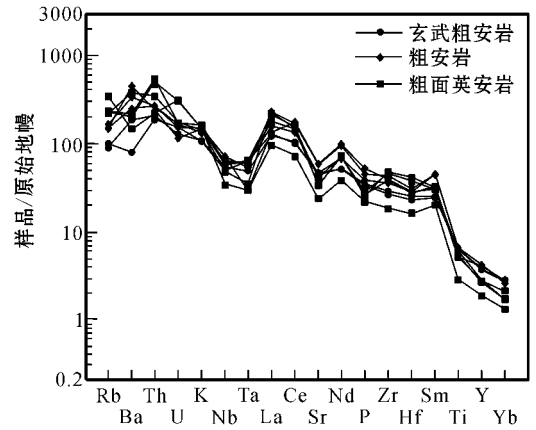


图 8 火山岩不相容元素原始地幔标准化配分图解

Fig. 8 Primary mantle-normalized incompatible element
patterns of volcanic rocks
原始地幔据 Wood(1979) 转引自李昌年(1992)
Primitive mantle data from Wood(1979) after
Li Changnian(1992)

粗安岩和粗安岩而言,粗面英安岩具有更为明显的 Ta、Nb、Sr、P 负异常,说明其经历了自原始玄武岩浆开始更高分异演化。

从表 2 和图 9 中可以看到,本区中新世火山岩中 Cr 和 Ni 与 $Mg^\#$ 值总体呈正相关关系,玄武粗安岩具有最高的 Cr 和 Ni 含量,说明其性质更接近原生玄武岩浆性质(Wilson, 1989)。玄武粗安岩和粗安岩这两类岩石,随着 $Mg^\#$ 值降低, Ni 和 Cr 明显规律性降低, Ba、Zr、Nd 显著增加, Rb、Sr、Th 缓慢增加,反映出二者系同源岩浆连续演化产物(图 9)。而粗安岩和粗面英安岩的成分点并未一道构成与 $Mg^\#$ 值的相关性。这和主元素与 $Mg^\#$ 值关系分析结果一致,亦说明粗安岩和粗面英安岩之间不具同源岩浆演化关系。

3 源区性质和岩浆演化

如前所述,蚕眉山地区中新世火山岩高度富集 LREE 和强不相容元素,指示火山岩源区为富集地幔。它们的形成时代、 K_2O 和 Na_2O 含量、稀土元素球粒陨石标准化配分曲线以及微量元素原始地幔标准化配分曲线特征,与源于 EM II 型富集地幔的雄鹰台和鲸鱼湖的中新世火山岩(孟繁聪等, 2002; 杨经绥等, 2002)极为相似。尽管关于藏北高钾系列岩浆源区的演化存在两种主要不同观点,一种认为是高原陆壳下长期孤立的富集地幔(Arnaud *et al.*, 1992),一种认为是塔里木地块向高原的 A 型俯冲过

程中形成的壳幔混合层(邓万明, 1989, 1993, 1998; 孟繁聪等, 2002),但经大量岩石学、地球化学及 Sr-Nd-Pb 同位素研究,对其源区具有 EM II 富集交代地幔特征已基本达成共识(邓万明, 1989, 1991, 1993, 1998; Arnaud *et al.*, 1992; 郝祥身等, 1996; Chung *et al.*, 1998; 邓万明等, 1998; 丁林等, 1999; 张玉泉等, 2000; 孟繁聪等, 2002; 杨经绥等, 2002)。鉴此,蚕眉山地区中新世钾玄质火山岩应源于 EM II 富集地幔。

前述分析表明蚕眉山地区中新世火山岩中的玄武粗安岩和粗安岩属同源岩浆演化产物,并经历了较高分异的演化, $La/Sm-La$ 图解(图 10)也清楚显示其岩浆过程为结晶分异,因此可以认为它们是地幔部分熔融所产生的原始岩浆演化至中-后期的产物。作为来源于另一岩浆源的粗面英安岩, $La/Sm-La$ 图解则明确显示其岩浆作用过程为部分熔融(图 10),但低 $Mg^\#$ 值又表明它们是原生玄武岩浆较高分异演化的产物。因此,可以推断粗面英安岩的源区是先期经一定程度演化的岩浆在地壳深部冷却固结的岩石。

EM II 被普遍认为是俯冲和再循环的大陆壳物质与地幔岩发生混合作用的产物。鉴于青藏北部在新生代因受到南面印度板块和北面塔里木板块双向挤压,因此蚕眉山地区中新世钾玄质火山岩形成的最大可能是由于新生代陆内俯冲作用(邓万明, 1998)使地壳物质俯冲到地幔内部以及陆壳增厚引

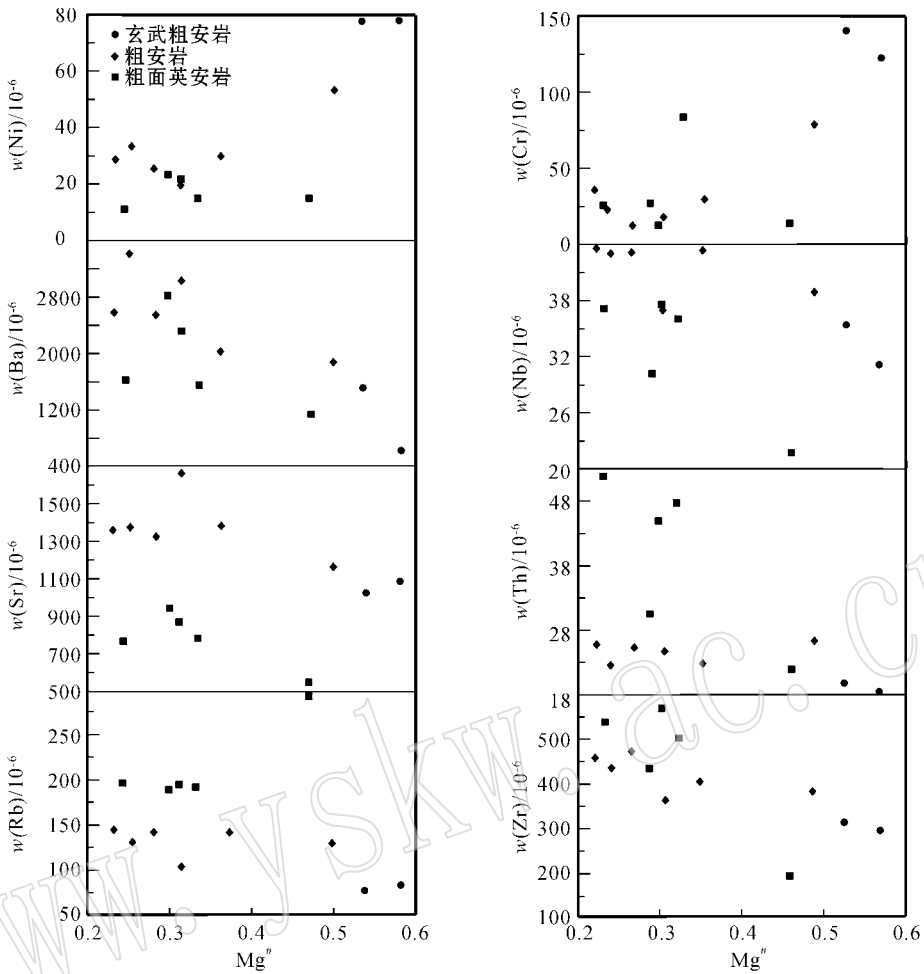


图 9 火山岩微量元素与 $Mg^\#$ 值标绘图解

Fig. 9 $Mg^\#$ versus selected trace element variation diagrams of volcanic rocks

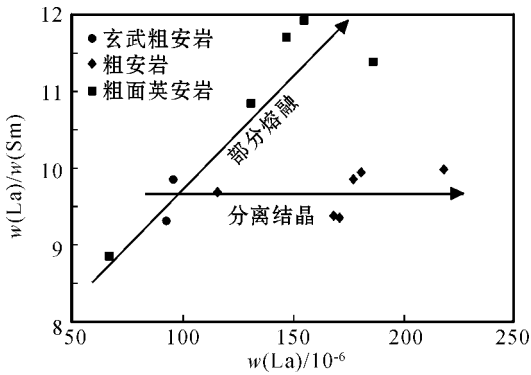


图 10 中新世火山岩 $La/Sm - La$ 图解

Fig 10 $La/Sm - La$ diagram for Miocene volcanic rocks

4 动力学意义讨论

研究表明,藏北新生代火山岩的成岩机制既有部分熔融机制,也有分离结晶机制存在(刘燊等, 2001)。结合蚕眉山地区粗面英安岩的演化过程来看,现今出露地表的幔源火山岩不仅可以受单一的部分熔融或部分熔融→分离结晶作用过程,即一次岩浆-热事件控制,而且可以经历由地幔部分熔融产生原始岩浆→分离结晶作用→深部冷却成岩→部分熔融(→分离结晶作用)→喷出地表的更为复杂的演化过程,即可能是一次以上的岩浆-热事件的产物。笔者以为,这种复杂过程与新生代青藏北部的构造环境密切相关。当高原内部因各块体运动速率和上升速率不同,在各板块结合部位或某些块体内部造

发壳-幔混合作用使陆壳物质进入地幔所致。这也是目前为大多数研究者所接受的动力学模式。

成局部的拉张应力场时(刘燊等, 2001), 由富集地幔部分熔融并经结晶分异作用所形成的酸性程度(或演化程度)不一的演化岩浆就有可能沿张裂通道喷发, 形成如蚕眉山地区中新世玄武粗安岩和粗安岩之类的火山岩。当不存在足够的引张应力场时, 演化岩浆就会在深部冷却成岩, 如后期受到更强烈的热扰动, 这些冷却岩石又有可能再次部分熔融, 形成演化程度更高的岩浆, 并在局部引张条件下喷出地表, 从而形成具蚕眉山地区中新世粗面英安岩演化特征的岩石。

上述关于岩浆演化动力学机理的认识, 对深入研究青藏北部新生代地球动力学背景及构造发展过程具有一定启示作用。地表火山岩时代并不能完全反映深部岩浆作用过程, 就某一地区而言, 在火山活动间歇期, 同样可能存在于地幔熔融与玄武岩浆的分异演化等深部岩浆作用过程, 只是这些岩浆在区域挤压构造体制及厚的陆壳所造成的封闭作用下未能上移喷出地表。因此, 尽管青藏北部新生代火山岩在时空上总体呈现自南而北火山岩时代逐渐变新的规律(邓万明, 1998; 迟效国等, 1999; 刘燊等, 2001), 但不能简单将其理解为深部地幔熔融等岩浆作用过程也存在与之完全吻合的规律, 深部岩浆过程应有比地表火山岩更宽的时、空尺度; 火山岩总体上南老北新的时间分带, 除与深部岩浆作用时代有关外, 一定程度上还与区域构造体制的发展、迁移相关。全面认识区域构造体制的发展与迁移规律, 对研究与青藏高原隆升相关的岩石圈板块运动无疑具有十分重要的意义。

以蚕眉山地区为例, 除中新世中期(12.81~14.51 Ma)的钾玄质火山岩外, 没有更早的新生代基性-中酸性火山岩发育。但中新世中期粗面英安岩的形成过程明确反映出存在更早的深部地幔熔融与岩浆演化过程, 由此可大致推断早期岩浆形成时地壳或中上陆壳处于挤压构造体制下, 导致岩浆被封闭在深部并冷却成岩。事实上, 笔者调查发现蚕眉山及其以北地区自中新世开始区域构造体制总体确实为南北向挤压, 主要构造表现有 EW 向逆断裂的发育及其逆冲活动导致断块的差异抬升、渐新世阿克塔什组中两期挤压褶皱构造、新构造平移断裂的发育及其形成的多种类型的走滑成因型湖泊等(柏道远等, 2003a, 2003b)。由此可见, 根据岩浆作用得出的挤压构造体制的推断与地表构造研究所获得的认识相互提供了一定支持。需要指出的是, 蚕眉

山地区中新世火山岩以及该地区北面的金顶山更新世火山岩(陈必河等, 2003), 都是整体挤压构造背景之上的局部或短期拉张体制的产物。

5 结论

(1) 青藏高原北部蚕眉山地区的偏铝质钾玄岩系列玄武粗安岩、粗安岩、粗面英安岩等形成于中新世中期。岩石的形成时代、主元素、微量元素及稀土元素地球化学特征与源于 EM II 型富集地幔的雄鹰台和鲸鱼湖的中新世火山岩一致, 说明岩浆来源于 EM II 型地幔的部分熔融。

(2) 地球化学特征表明玄武粗安岩和粗安岩属同源岩浆演化产物, 并经历了较高级别的结晶分异演化, 而粗面英安岩则属于另一岩浆系列, 由先期经一定程度演化的岩浆在地壳深部冷却固结的岩石后期经再次部分熔融所形成。

(3) 蚕眉山地区中新世火山岩研究表明, 青藏北部新生代深部地幔熔融等岩浆作用过程应有比地表火山岩更宽的时、空尺度, 青藏北部新生代火山岩的时空分布规律, 一定程度上与区域构造体制的发展和迁移有关。

Reference

- Allegre C J and Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 38(1): 1~25.
- Arnaud N O, Vidal P, Tapponnier P, *et al.* 1992. The high K₂O volcanism of northwestern Tibet: Geochemistry and tectonic implication [J]. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 111: 351~367.
- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Peng Heqiu, *et al.* 2003a. The mechanisms of different uplifts in the Yinshishan area, northern edge of Qinghai-Tibet plateau [J]. *Resources Survey & Environment*, 24(4): 235~243 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Wu Nengjie and Xiao Donggui. 2003b. Study on the strike-slip lakes in the Changhonghu area, northern Qinshai-Tibet Plateau [J]. *Xinjiang Geology*, 21(4): 455~458 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bihe, Liu Yaorong, Xiao Donggui, *et al.* 2003. Characteristics and tectonic environments of Quaternary volcanic rocks in Jingding-shan, North Tibet Plateau [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(2): 125~130 (in Chinese with English abstract).
- Chi Xiaoguo, Li Cai, Jin Wei, *et al.* 1999. The Cenozoic volcanism evolutionary and uplifting mechanism of the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Geological Review*, 45(Supp.): 978~986 (in Chinese with

English abstract).

- Chung S L , Lo C H , Lee T Y , *et al.* 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Ma ago [J]. *Nature* , 394 : 769 ~ 773.
- Deng Jinfu , Zhao Hailing , Mo Xuanxue , *et al.* 1996. Continental Roots-plume Tectonics of China—Key to the Continental Dynamics [M]. Beijing : Geological Publishing House , 1 ~ 10 (in Chinese).
- Deng Wanming. 1989. Features of the Cenozoic volcanic rocks from north Ali , Tibet plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica* , (3) : 1 ~ 11 (in Chinese with English abstract).
- Deng Wanming. 1991. The geology , geochemistry and forming age of the shoshonites from middle Kunlun Mountain [J]. *Scientia Geologica Sinica* , 26 (3) : 201 ~ 213 (in Chinese with English abstract).
- Deng Wanming. 1993. Trace element and Sr , Nd isotopic features of the Cenozoic potassium-volcanic rocks from northern Qinghai-Tibet plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 9 (4) : 379 ~ 387 (in Chinese with English abstract).
- Deng Wanming. 1998. Cenozoic Intraplate Volcanic Rocks in the Northern Qinghai-Xizang plateau [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese).
- Deng Wanming and Sun Hongjuan. 1998. Isotopic geochemistry and source of intraplate volcanic rocks in north Tibet , China [J]. *Earth Science Frontiers* , 5 (4) : 307 ~ 317 (in Chinese with English abstract).
- Deng Wanming and Sun Hongjuan. 1999. The Cenozoic volcanism and the uplifting mechanism of the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Geological Review* , 45 (Supp.) : 952 ~ 958 (in Chinese with English abstract).
- Deng Wanming , Zheng Xilan and Matsumoto Yukio. 1996. Petrological characteristics and age of Cenozoic volcanic rocks from the Hoh Xil , Qinghai Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 15 (4) : 289 ~ 298 (in Chinese with English abstract).
- Ding Lin , Zhang Jinjiang , Zhou Yong , *et al.* 1999. Tectonic implication on the lithosphere evolution of the Tibet Plateau : Petrology and geochemistry of sodic and ultrapotassic volcanism in Northern Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 15 (3) : 408 ~ 421 (in Chinese with English abstract).
- Frey F A. 1978. Integrated models of basalt petrogenesis : a study of quartz tholeiites to okivine melisities from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data [J]. *Journal of Petrology* , 119 : 463 ~ 513.
- Gao Bingzhang , Hong Dawei , Zheng Jijian , *et al.* 1991. A Guide to the Method of the 1 : 50000 Regional Geological Survey in Igneous Granite Area [M]. Beijing : China University of Geosciences Press , 33 (in Chinese).
- Lai Shaocong. 1999. Petrogenesis of the Cenozoic volcanic rocks from the northern part of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 15 (1) : 98 ~ 104 (in Chinese with English abstract).
- Lai Shaocong , Deng Jinfu and Zhao Hailing. 1996. Volcanism and Tectonic Evolution in the Northern Margin of Qinghai-Tibet plateau [M]. Xi ' an : Science and Technology Press of Shanxi Province , 95 ~ 133 (in Chinese).
- Lai Shaocong and Liu Chiyang. 2001. Enriched upper mantle and eclogitic lower crust in north Qiangtang , Qinghai-Tibet Plateau : petrological and geochemical evidence from the Cenozoic volcanic rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 17 (3) : 459 ~ 468 (in Chinese with English abstract).
- Lai Shaocong , Yi Haisheng , Liu Chiyang , *et al.* 2002. Trace element geochemistry and classification of amphiboles of the Cenozoic high-potassium calc-alkaline volcanic rock series from north Qiangtang , Qinghai-Tibet plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 18 (1) : 17 ~ 24 (in Chinese with English abstract).
- Le Maitre R W , Bateman P , Dudek A , *et al.* 1989. A classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms [M]. Oxford : Blackwell.
- Li Changnian. 1992. Trace Element Lithology of Magmatic Rock [M]. Wuhan : China University of Geoscience Press , 179 (in Chinese).
- Li Guangming. 2000. Petrologic features and genesis of cenozoic volcanic rocks , qiangtang area , northern tibetan plateau [J]. *Geology-geochemistry* , 28 (2) : 38 ~ 43 (in Chinese with English abstract).
- Li Jindong , Bai Daoyuan and Wang Xianhui. 2004. Ages of volcanic rocks and planation surface in the Canmei Mountain area , northern Tibet [J]. *Geological Bulletin of China* , 23 (7) : 670 ~ 675 (in Chinese with English abstract).
- Li Youguo , Mo Xuanxue , Yi Haisheng , *et al.* 2005. Research on the Cenozoic volcanic rocks in the Cuoli area of Qiangtang [J]. *J Mineral Petro.* , 25 (2) : 27 ~ 34 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shen , Chi Xiaoguo , Li Cai , *et al.* 2001. Geochemistry and genesis of Cenozoic volcanic rock series in northern Tibet [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology* , 31 (3) : 230 ~ 235 (in Chinese with English abstract).
- Meng Fancong , Yang Jingsui , Shi Rendeng , *et al.* 2002. Origin of Miocene shoshonitic volcanic rocks from Xiongyingtai , Hoh Xil , North Xizang [J]. *Geochimica* , 31 (3) : 243 ~ 252 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth-Sci. Rev.* , 37 : 215 ~ 224.
- Sun Yangui. 1992. Characteristics of the Miocene epoch volcanic rock zone in the north margin of Hoh Xil area [J]. *Geology of Qinghai* , (2) : 13 ~ 25 (in Chinese with English abstract).
- Tan Fuwen , Pan Guitang and Xu Qiang. 2000. The uplift of Qinghai-Xizang plateau and geochemical characteristics of Cenozoic volcanic rocks from the center of Qiangtang , Xizang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 19 (2) : 121 ~ 130 (in Chinese with English abstract).
- Wilson M. 1989. Igneous petrogenesis [M]. London : Unwin Hyman Press , 295 ~ 323.
- Yang Jingsui , Wu Cailai , Shi Rendeng , *et al.* 2002. Miocene and Pleistocene shoshonitic volcanic rocks in the Jingyuhu area , north of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 18 (2) : 161 ~ 176 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui , Xu Zhiqin , Bai Wenji , *et al.* 1997. Cenozoic volcanism on the Qinghai-Tibet plateau and its genesis [J]. *Contin Geodynam* , 2 (1) : 1 ~ 11.
- Zhang Yuquan , Xie Yingwen , Li Xianhua , *et al.* 2000. Isotopic characteristics of shoshonitic rocks in eastern Qinghai-Tibet Plateau : Pet-

- rogenesis and its tectonic implicatiol[J]. Science China(D), 30(5): 493~498(in Chinese).
- Zheng Xiangshen, Bian Qiantao and Zheng Jiankang. 1996. On the Cenozoic volcanic rocks in Hoh Xil district, Qinghai Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 12(4): 530~545(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 柏道远, 贾宝华, 彭和球, 等. 2003a. 青藏高原北缘银石山地区差异隆升机制[J]. 资源调查与环境, 24(4): 235~243.
- 柏道远, 吴能杰, 肖冬贵. 2003b. 青藏高原北部长虹湖地区走滑成因湖泊研究[J]. 新疆地质, 21(4): 455~458.
- 陈必河, 刘耀荣, 肖冬贵, 等. 2003. 藏北高原金顶山第四纪火山岩特征及构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 22(2): 125~130.
- 迟效国, 李才, 金巍, 等. 1999. 藏北新生代火山作用的时空演化与高原隆升[J]. 地质论评, 45(增刊): 978~986.
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 1996. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社.
- 邓万明. 1989. 西藏阿里地区北部新生代火山岩——兼论陆内俯冲作用[J]. 岩石学报, (3): 1~11.
- 邓万明. 1991. 中昆仑造山带钾玄质火山岩的地质、地球化学和时代[J]. 地质科学, 2(3): 201~213.
- 邓万明. 1993. 青藏北部新生代钾质火山岩微量元素和 Sr, Nd 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 9(4): 379~387.
- 邓万明. 1998. 青藏高原北部新生代板内火山岩[M]. 北京: 地质出版社.
- 邓万明, 孙宏娟. 1998. 青藏北部板内火山岩的同位素地球化学与源区特征[J]. 地学前缘, 5(4): 307~317.
- 邓万明, 孙宏娟. 1999. 青藏高原新生代火山活动与高原隆升关系[J]. 地质论评, 45(增刊): 952~958.
- 邓万明, 郑锡澜, 松本征夫. 1996. 青海可可西里地区新生代火山岩的岩石特征与时代[J]. 岩石矿物学杂志, 15(4): 289~298.
- 丁林, 张进江, 周勇, 等. 1999. 青藏高原岩石圈演化的记录: 藏北超钾质及钠质火山岩的岩石学与地球化学特征[J]. 岩石学报, 15(3): 408~421.
- 高秉璋, 洪大卫, 郑基俭, 等. 1991. 花岗岩类 1:5 万区域地质填图方法指南[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 33.
- 赖绍聪. 1999. 青藏高原北部新生代火山岩的成因机制[J]. 岩石学报, 15(1): 98~104.
- 赖绍聪, 邓晋福, 赵海玲. 1996. 青藏高原北缘火山作用与构造演化[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 95~133.
- 赖绍聪, 刘池阳. 2001. 青藏高原北羌塘榴辉岩质下地壳及富集型地幔源区——来自新生代火山岩的岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 17(3): 459~468.
- 赖绍聪, 伊海生, 刘池阳, 等. 2002. 青藏高原北羌塘新生代高钾钙碱岩系火山岩角闪石类型及痕量元素地球化学[J]. 岩石学报, 18(1): 17~24.
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学[M]. 中国地质大学出版社, 179.
- 李光明. 2000. 藏北羌塘地区新生代火山岩岩石特征及其成因探讨[J]. 地质地球化学, 28(2): 38~43.
- 李金冬, 柏道远, 王先辉. 2004. 藏北蚕眉山地区火山和夷平面的时代[J]. 地质通报, 23(7): 670~675.
- 李佑国, 莫宣学, 伊海生, 等. 2005. 羌塘错尼地区新生代火山岩研究[J]. 矿物岩石, 25(2): 27~34.
- 刘燊, 迟效国, 李才, 等. 2001. 藏北新生代火山岩系列的地球化学及成因[J]. 长春科技大学学报, 31(3): 230~235.
- 孟繁聪, 杨经绥, 史仁灯, 等. 2002. 可可西里雄鹰台中新世橄榄安粗质火山岩的成因[J]. 地球化学, 31(3): 243~252.
- 孙延贵. 1992. 可可西里北缘中新世火山活动带的基本特征[J]. 青海地质, (2): 13~25.
- 谭富文, 潘桂棠, 徐强. 2000. 羌塘腹地新生代火山岩的地球化学特征与青藏高原隆升[J]. 岩石矿物学杂志, 19(2): 121~130.
- 杨经绥, 吴才来, 史仁灯, 等. 2002. 青藏高原北部鲸鱼湖地区中新世和更新世两期橄榄玄粗质系列火山岩[J]. 岩石学报, 18(2): 161~176.
- 张玉泉, 谢应雯, 李献华, 等. 2000. 青藏高原东部钾玄岩系岩浆岩同位素特征: 岩石成因及其构造意义[J]. 中国科学(D 辑), 30(5): 493~498.
- 郑祥身, 边千韬, 郑健康. 1996. 青海可可西里地区新生代火山岩研究[J]. 岩石学报, 12(4): 530~545.