

# 青藏高原新生代火车头山碱性及钙碱性两套火山岩的地球化学特征及其物源讨论\*

赖绍聪 秦江锋 李永飞 隆平

LAI ShaoCong, QIN JiangFeng, LI YongFei and LONG Ping

西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安 710069

State Key Laboratory of Continental Dynamics; Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

2006-02-26 收稿, 2007-03-04 改回.

Lai SC, Qin JF, Li YF and Long P. 2007. Geochemistry and petrogenesis of the alkaline and calc-alkaline series Cenozoic volcanic rocks from Huochetou mountain, Tibetan plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 709–718

**Abstract** The Cenozoic volcanic rocks in Huochetou mountain, North Qiangtang can be divided into two different series. The calc-alkaline series belongs to a typical basic-intermediate-silicic rock association. The main rock type is basalt-andesite-dacite. They show  $\text{SiO}_2 = 49\% \sim 70\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 10\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$ . In addition, the basalt shows  $\text{LREE}/\text{HREE} = 1.3 \sim 1.8$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.87 \sim 4.45$ ,  $\delta\text{Eu} = 0.96 \sim 1.09$ . It indicates that the basalt is just slightly enriched in light rare earth elements (LREE) and without remarkable Eu depletion. The  $\text{Mg}^\#$ - $\text{SiO}_2$  and La/Sm-La diagrams as well as the Sm/Yb ( $\text{Sm}/\text{Yb} = 1.53 \sim 5.35$ ) indicate that this group of calc-alkaline volcanic rocks originated from the partial melting of the spinel-lherzolite at the upper part of the lithospheric mantle, Tibetan plateau. The alkaline volcanic rock association belongs to a typical potassium-rich shoshonitic series. The main rock type is tephrite-pollenite-phonolite. They exhibit  $\text{SiO}_2 = 44\% \sim 59\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 14\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.47 \sim 1.51$ , and  $\text{LREE}/\text{HREE} = 13.20 \sim 15.76$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 50.44 \sim 91.99$ , indicating distinct geochemical feature of strongly enrichment in light rare earth elements. On the  $\text{Mg}^\#$ - $\text{SiO}_2$  diagram, samples of the alkaline volcanic rock association plot between the mantle melt (basalts) and the amphibolitic-eclogitic melt (1–3 GPa), and accord with the crustal AFC evolutionary trend. The La/Sm-La diagram which exhibit the closely relationship between the magmatophile element and ultra-magmatophile element indicate that this group of volcanic rocks belongs to the fractional crystallization result of a basaltic comagmatic system. The features of the basic-intermediate-silicic rock association imply that this group of volcanic rocks should be originated from the partial melting of upper mantle. On the other hand, the distinctive geochemistry characteristics of high in Sm/Yb ( $\text{Sm}/\text{Yb} = 2.63 \sim 13.98$ , slight depletion in Eu and strong depletion in element Nb and Ta as well as strong enrichment in some lithophile elements (such as Th and U) highlight the importance of crustal anatexis in the generation of the Huochetou mountain alkaline volcanic rock association. Especially, on the La/Co-Th/Co and La/Co-Sc/Th diagrams, samples of the alkaline volcanic rock association plot as straight line and hyperbola respectively, which indicate that the magma source of the alkaline volcanic rock association should be crust-mantle mixed layer. These suggest a primitive alkaline magma generation process of partial melting of the special crust-mantle mixed layer of the Tibetan plateau.

**Key words** Geochemistry, Magma source region, Mantle partial melting, Crust-mantle mixed layer, Cenozoic volcanic rock, Tibetan plateau

**摘要** 藏北羌塘火车头山新生代火山岩可区分为钙碱性及碱性两个不同的系列。钙碱性火山岩主要岩石组合为玄武岩-安山岩-英安岩, 其  $\text{SiO}_2$  介于 49% ~ 70% 之间,  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 10\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$ ; 其中玄武岩具平坦型稀土配分型式,  $\text{LREE}/\text{HREE}$  为 1.3 ~ 1.8,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  为 2.87 ~ 4.45, 无明显铕异常,  $\delta\text{Eu}$  为 0.96 ~ 1.09; 该套岩石的  $\text{Mg}^\#$  与  $\text{SiO}_2$  相关关系以及 La/Sm-La 等亲岩元素与超亲岩元素协变关系表明, 它们应为幔源岩浆经分离结晶演化的产物, 其岩石组合类型以及低的 Sm/Yb 值 ( $\text{Sm}/\text{Yb} = 1.53 \sim 5.35$ ) 表明它们的原始岩浆应来源于岩石圈地幔尖晶石二辉橄辉岩的局部熔融。本区碱性火山岩为一套典

\* 本文由国家自然科学基金(批准号: 40572050, 40272042)和高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划(批准号: 教人司[2002]383号)联合资助。

第一作者简介: 赖绍聪, 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 岩石学及地球化学专业, E-mail: shaocong@nwu.edu.cn

型的钾质岩石系列,主要岩石组合类型为碱玄岩-碱玄质响岩-响岩,其  $\text{SiO}_2$  介于 44% ~ 59% 之间,  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 14\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  介于 0.47 ~ 1.51 之间;岩石轻稀土强烈富集,  $\text{LREE}/\text{HREE}$  为 13.20 ~ 15.76,  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 50.44 \sim 91.99$ ;其岩石组合类型以及  $\text{Mg}^\#$  与  $\text{SiO}_2$  相关关系以及  $\text{La}/\text{Sm}$ - $\text{La}$  协变关系同样表明它们为同源岩浆分离结晶演化的产物;然而,其较高的  $\text{Sm}/\text{Yb}$  值 ( $\text{Sm}/\text{Yb} = 2.63 \sim 13.98$ ) 表明它们并非地幔橄榄岩直接局部熔融的产物,岩石弱的负 Eu 异常 ( $\delta\text{Eu} = 0.77 \sim 0.85$ ) 以及 Th、U 的强烈富集和 Nb、Ta 的相对亏损,又反映了原始岩浆中有显著的地壳物质的贡献;该套钾质碱性系列岩石在  $\text{La}/\text{Co}$ - $\text{Th}/\text{Co}$  同分母协变图上呈直线型分布,而在  $\text{La}/\text{Co}$ - $\text{Sc}/\text{Th}$  异分母协变图上呈显著的双曲线分布,从而表明其源区为二源混合型,是青藏高原特殊的壳幔混合层局部熔融的产物,这些特征是新生代青藏高原壳幔层圈物质交换的重要岩石学证据。

**关键词** 地球化学; 源区性质; 地幔局部熔融; 壳幔层圈物质交换; 新生代火山岩; 青藏高原

**中图法分类号** P588.15; P594.1

青藏高原北部新生代火山岩的形成与青藏高原的隆升有着密切的成因联系(邓万明, 1998; Ding *et al.*, 2003; Muller *et al.*, 1999; Lai *et al.*, 2001), 长期以来,国内外学者针对青藏高原广泛出露的新生代火山岩已做了大量细致的研究工作,提出了 II 型富集地幔源区、加厚地壳下部榴辉岩相源区及加厚地壳中部麻粒岩相源区等几种不同的新生代火山岩起源层(邓万明, 1998; Ding *et al.*, 2003; Miller *et al.*, 1999; Chung *et al.*, 1998; Lai *et al.*, 2003)。然而目前对不同火山岩系列的源区属性和地球化学模型,尤其是育藏高原颇具特色的、特殊的加厚地壳下部壳幔混合层的局部熔融过程、可能产生的原生岩浆类型及其地球化学性质的特异性却仍然缺乏深入的研究(焕绍聪等, 2006)。青藏高原北部火车头山地区分布有大量新生代火山岩(李佑国等, 2005), 前人已对该区火山岩进行初步研究(刘红英等, 2004; 李佑国等, 2005), 刘红英等(2004)对该区火山岩进行的 K-Ar 年代学研究表明,该区火山岩的形成时代为 18.8(碱玄岩) ~ 32.4Ma(碧玄岩), 李佑国等(2005)对该区火山岩进行的矿物学及  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  年代学研究表明,火车头山地区新生代火山岩为一套碱性火山岩,其形成时代可分为三期:第一期(34 ~ 32Ma)主要为白榴碧玄岩,第二期(29 ~ 26Ma)主要为响岩质碱玄岩、白榴石响岩和粗斑状霞石响岩;第三期(24 ~ 19Ma)主要为白榴碱玄岩和白榴碱玄质响岩。

本文对火车头山地区的新生代火山岩进行的进一步的地球化学研究表明,该区火山岩可以划分为碱性和钙碱性两个不同岩石系列,并提出它们可能分别是青藏高原岩石圈地幔尖晶石二辉橄榄岩以及特殊的壳幔混合层局部熔融的产物。

## 1 地质背景

羌塘-冈底斯位于青藏高原的核部,是我国目前研究程度相当低的地区之一,因而对该区研究具有重要意义。羌塘地区新生代火山岩较为发育,主要见于羌北地层分区的新近系石坪组,在羌塘中央隆起带以及南羌塘很少出露。火山岩大多呈厚 50 ~ 200m 的熔岩被覆盖在古近系纳湖组( $N_1$ )或中侏罗统石坪组( $J_2$ )之上,呈陆相中心式喷发的溢流火山岩。岩石类型以熔岩为主,偶见火山碎屑岩。这些

火山岩与羌塘前古近系沉积地层呈超覆关系,在火山中心呈侵入关系(邓万明, 1998)。

火车头山新生代火山岩位于西藏双湖镇西北约 240km 处(图 1),属于北羌塘西段地层分区。火山岩出露面积较大,主要由岩丘、岩脊和岩流组成。野外可见火山岩不整合覆盖在古近系砂砾岩之上,本文的样品主要取自火车头山南

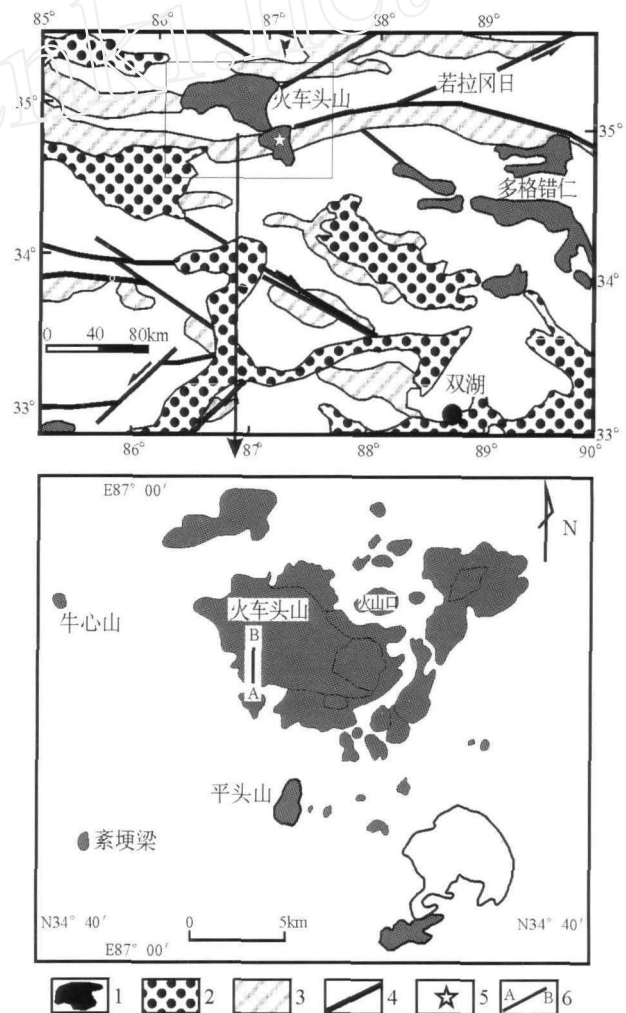


图 1 藏北羌塘火车头山地区新生代火山岩分布简图

1-新生代火山岩; 2-第四纪盆地; 3-中新世盆地; 4-断裂; 5-取样位置; 6-火车头山地区采样剖面位置

Fig. 1 Regional distribution of the Cenozoic volcanic rocks in the Huochetou mountain area, Qiangtang region.

部的岩流及岩丘中 (E87°07'04", N34°46'08" ~ E87°07'37", N34°47'59")。岩石大多呈灰黑色、浅灰色和灰白色,斑状结构或无斑隐晶质结构,块状构造,十分新鲜,无任何蚀变和交代现象。主要岩石类型包括玄武岩、安山岩、英安岩、碱玄岩及响岩。玄武岩为斑状结构,斑晶主要为发育聚片双晶的基性斜长石,基质为玻璃质;安山岩为砖红色,斑状结构,斑晶主要为发育环带的斜长石;英安岩为灰黑色,斑状结构,斑晶主要为钠长石及少量石英。碱玄岩发育斑状结构,斑晶主要为透辉石、金云母、透长石及白榴石组成,基质为玻璃质;响岩为灰褐色-深绿色,斑状结构,斑晶主要由似长石、透长石、单斜辉石和少量黑云母组成,基质由细小的透长石及单斜辉

石微晶组成。在野外剖面上,玄武岩-安山岩-英安岩构成一个喷发旋回,处于下部层位,碱玄岩-响岩构成一个喷发旋回,处于上部层位。

## 2 火山岩岩石化学特征

火车头山地区新生代火山岩岩石化学、稀土及微量元素分析结果列于表1。从表1和图2中可以看到,研究区内火山岩可以区分为亚碱性和碱性两个岩石系列组合(图2a)。其中,亚碱性系列火山岩主要岩石组合为玄武岩-安山岩-英

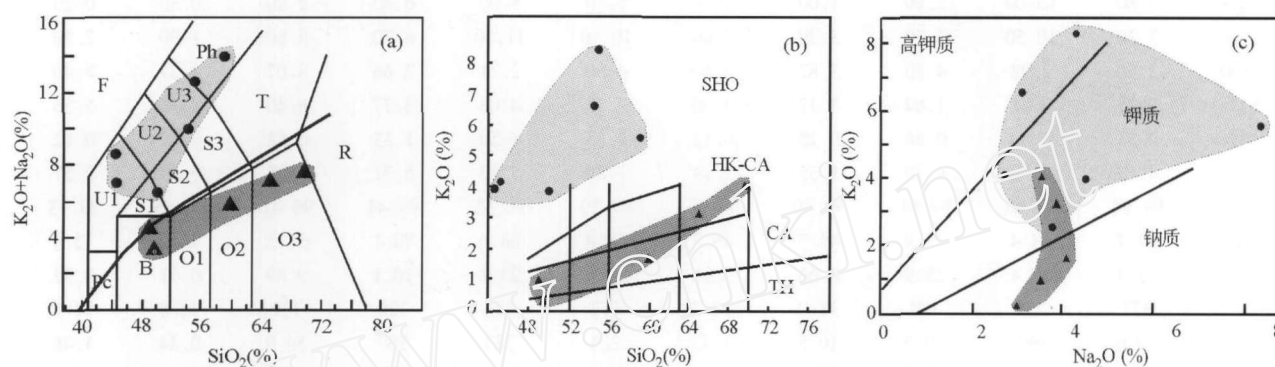


图2 火车头山新生代火山岩的 $\text{SiO}_2$ -( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ )系列划分图解(a),  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$ 分类命名图解(b)及 $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{K}_2\text{O}$ 图解(c)

Alkaline-碱性系列; Subalkaline-亚碱性系列; F-似长岩; U1-碱玄岩( $\text{Ol} < 10\%$ ), 碧玄岩( $\text{Ol} > 10\%$ ); U2-响岩质碱玄岩; U3-碱玄质响岩; Ph-响岩; S1-粗面玄武岩; S2-玄武粗安岩; S3-安粗岩; T-粗面岩( $q < 20\%$ ), 粗面英安岩( $q > 20\%$ ); Pc-苦橄玄武岩; B-玄武岩; O1-玄武安山岩; O2-安山岩; O3-英安岩; R-流纹岩;

▲-本区亚碱性系列火山岩; ●-本区碱性系列火山岩

Fig. 2 The  $\text{SiO}_2$ -( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ) of classification (a),  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  (b) and  $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{K}_2\text{O}$  (c) diagrams for the Huochetou Mountain Cenozoic volcanic rocks

安岩类,为一套典型的基性-中性-中酸性岩石组合。该套火山岩 $\text{SiO}_2$ 为48.94%~69.55%, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 均大于10%且变化大,在10.86%~18.18%之间。以 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 为主, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 变化很大,介于0.90~14.19之间,平均为4.53,在 $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$ 图解中(图2b),样品投点落于钙碱性-高钾钙碱性区内,而在 $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{K}_2\text{O}$ 图解中(图2c)则显示了由钠质向偏钾质过渡的特征。 $\text{SiO}_2$ - $\text{Mg}^\#$ 协变关系(图3)表明它们乃是幔源熔体经分离结晶的火山岩。

本区碱性系列火山岩主要岩石类型为碱玄岩-碱玄质响岩-响岩(图2a),同样属一套典型的碱性基性-中性-中酸性岩石组合。该套火山岩 $\text{SiO}_2$ 为44.33%~59.09%, $\text{Al}_2\text{O}_3$ (14.17%~18.78%)含量较高。以 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ 为主, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 介于0.47~1.51之间,平均为0.69。在 $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$ 图解中(图2b)样品点落于钾玄岩区内,而在 $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{K}_2\text{O}$ 图解中(图2c)则显示了典型的钾质系列特征,表明它们属于一套钾质到高钾系列岩石。该套岩石基性端元 $\text{SiO}_2$ 含量小于45%,且其基性端元(碱玄岩)具有很高的 $\text{Mg}^\#$ 值(68.4~70.1)。通常认为由下部陆壳玄武质岩石局部熔融形成的熔

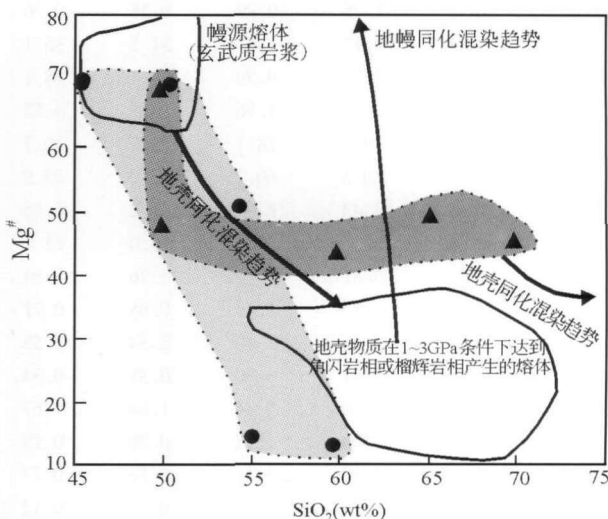


图3 火车头山新生代火山岩的 $\text{SiO}_2$ - $\text{Mg}^\#$ 图解(Stern and Kilian, 1996),图例同图2

Fig. 3 The  $\text{SiO}_2$ - $\text{Mg}^\#$  diagram for the volcanic rocks (Stern and Kilian, 1996)

表1 火山岩常量(wt%)及微量元素( $\times 10^{-6}$ )分析结果Table 1 Chemical composition (wt%) and trace elements ( $\times 10^{-6}$ ) analyses result for the volcanic rocks

系列	钙碱性系列						碱性系列				
岩石	玄武岩	玄武岩	安山岩	英安岩	英安岩	碱玄岩	碱玄岩	粗面玄武岩	碱玄质响岩	响岩	响岩
编号	QZ01	QZ02	QZ03	QZ04	QZ05	QZ06	QZ07	QZ08	QZ9	QZ10	QZ11
SiO <sub>2</sub>	48.94	49.54	59.78	64.98	69.55	44.33	44.93	50.11	54.33	55.04	59.09
TiO <sub>2</sub>	1.60	1.75	0.95	0.40	0.22	1.15	1.02	1.00	0.75	0.38	0.22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.18	10.86	13.46	17.95	15.11	16.06	14.17	14.64	17.47	18.78	18.42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.00	4.70	6.01	1.70	1.20	3.60	3.40	4.20	3.44	3.00	2.28
FeO	6.21	4.20	0.99	0.30	0.20	4.00	3.80	1.00	1.56	0.80	0.52
MnO	0.17	0.16	0.12	0.03	0.02	0.15	0.14	0.12	0.11	0.11	0.17
MgO	4.80	10.00	2.80	1.00	0.60	8.30	8.00	6.40	2.70	0.30	0.20
CaO	7.20	10.50	2.70	3.20	2.60	10.10	11.00	8.70	5.80	1.90	2.30
Na <sub>2</sub> O	3.50	2.98	4.10	3.87	3.60	4.50	2.71	2.46	3.07	4.27	8.40
K <sub>2</sub> O	0.91	0.21	1.64	3.17	4.00	3.93	4.03	3.77	6.60	8.30	5.56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.33	0.30	0.36	0.15	0.12	1.63	1.50	1.33	0.63	0.20	0.12
LOI	4.10	4.70	6.70	2.55	2.74	1.84	4.82	5.71	2.95	6.59	2.57
Total	99.94	99.90	99.61	99.30	99.96	99.59	99.52	99.44	99.41	99.65	99.75
Mg <sup>#</sup>	47.7	68.4	42.9	48.7	45.3	68.4	68.6	70.1	51.3	13.5	12.4
Sc	41.4	27.4	25.9	6.66	5.36	19.6	23.1	18.1	9.49	6.71	8.97
V	377	255	194	38.0	26.2	158	153	120	102	76.8	47.3
Cr	30.6	962	39.5	10.5	4.42	228	387	267	59.9	0.34	1.46
Co	46.8	68.8	35.5	83.2	109	47.8	53.3	39.0	40.1	25.1	40.3
Ni	16.5	478	11.2	6.18	1.34	133	138	133	47.4	0.46	1.34
Cs	0.45	1.76	0.70	6.54	5.82	4.29	7.05	11.2	39.1	53.9	30.6
Rb	28.8	7.01	49.0	148	206	116	228	167	207	296	355
Ba	368	334	419	1127	1117	5663	3784	4519	3553	802	221
Sr	283	141	166	605	387	4768	3591	3728	3607	4260	942
Y	30.8	23.7	27.4	7.30	7.81	45.6	39.3	37.8	36.0	48.2	45.0
Zr	101	156	190	129	130	403	466	485	493	1082	1977
Nb	4.91	18.6	14.4	5.14	5.20	36.6	29.7	32.2	39.0	57.1	92.4
Hf	3.15	4.97	5.93	4.44	4.73	10.4	12.5	13.2	14.0	25.2	45.9
Ta	0.32	1.25	0.99	0.58	0.76	1.72	1.24	1.57	1.75	1.71	2.01
Pb	5.54	4.17	15.1	31.5	36.1	108	92.7	101	192	339	522
Th	2.44	2.77	9.59	18.4	28.1	76.6	79.9	84.0	110	182	240
U	0.54	0.62	1.76	5.85	4.52	9.26	11.8	6.15	7.31	33.0	63.4
La	12.1	10.5	28.1	28.7	36.7	289	277	266	331	336	347
Ce	28.5	30.5	60.2	52.9	65.9	584	536	473	552	571	529
Pr	3.69	4.43	6.94	5.62	6.65	70.9	58.4	54.8	59.5	55.1	41.5
Nd	16.4	20.9	26.6	19.0	22.7	256	213	196	199	165	105
Sm	4.63	5.81	5.77	3.26	3.54	39.0	32.9	30.2	29.0	22.6	13.0
Eu	1.74	1.82	1.43	0.85	0.77	9.30	7.75	7.26	6.74	5.60	2.92
Gd	5.10	5.61	5.40	2.34	2.53	25.4	21.7	20.3	19.1	16.5	9.59
Tb	0.88	0.91	0.90	0.31	0.34	2.59	2.35	2.23	2.15	2.05	1.26
Dy	5.80	5.10	5.34	1.64	1.67	11.5	9.77	9.48	9.14	9.77	7.08
Ho	1.32	0.98	1.12	0.29	0.29	1.69	1.49	1.43	1.42	1.68	1.40
Er	3.50	2.43	3.15	0.86	0.77	4.18	3.42	3.51	3.50	4.33	4.27
Tm	0.55	0.31	0.45	0.10	0.12	0.49	0.43	0.41	0.40	0.62	0.72
Yb	3.02	1.70	2.90	0.61	0.70	2.79	2.36	2.29	2.58	3.76	4.93
Lu	0.49	0.24	0.39	0.10	0.10	0.37	0.32	0.33	0.38	0.53	0.81
(La/Yb) <sub>N</sub>	2.87	4.45	6.96	33.81	37.56	74.39	84.29	83.59	91.99	64.02	50.44
(Ce/Yb) <sub>N</sub>	2.63	4.99	5.77	24.08	26.15	58.19	63.09	57.51	59.44	42.16	29.77

常量化学组分由中国科学院地球化学研究所湿法分析;微量和稀土元素丰度由中国科学院地球化学研究所 ICP-MS 法分析

体,其  $Mg^\#$  小于 50,而地幔橄榄岩局部熔融形成的熔体却具有较高的  $Mg^\#$  值(Rapp *et al.*, 1999)。然而,从图 3 中可以看到,本区碱性火山岩的  $SiO_2$ - $Mg^\#$  协变关系既不同于幔源熔体,也不同于 1~3GPa 条件下角闪岩相及榴辉岩相陆壳物质的局部熔融熔体的变化趋势,而是介于二者之间,符合地幔熔体分离结晶和受陆壳污染的演化趋势(Stern and Kilian, 1996),说明该套火山岩具有其化学成分的特异性,表明它们并非青藏高原加厚陆壳下部局部熔融的产物,也不是高原岩石圈地幔简单熔融的结果,而应是壳幔物质交换、相互作用的最终产物。

### 3 微量及稀土元素地球化学特征

从图 4 中可以看到,火车头山亚碱性火山岩的不相容元素原始地幔标准化配分型式图总体呈右倾型式。玄武岩配分曲线较为平坦,从玄武岩→安山岩→英安岩,曲线右倾负斜率逐渐增高,大离子亲石元素富集度逐渐增加,Nb 和 Ta 由无明显亏损→弱亏损,Ti 谷逐渐加深,说明 Ti 的相对亏损可能与岩浆分异过程有关,归因于钛铁氧化物的分离结晶。

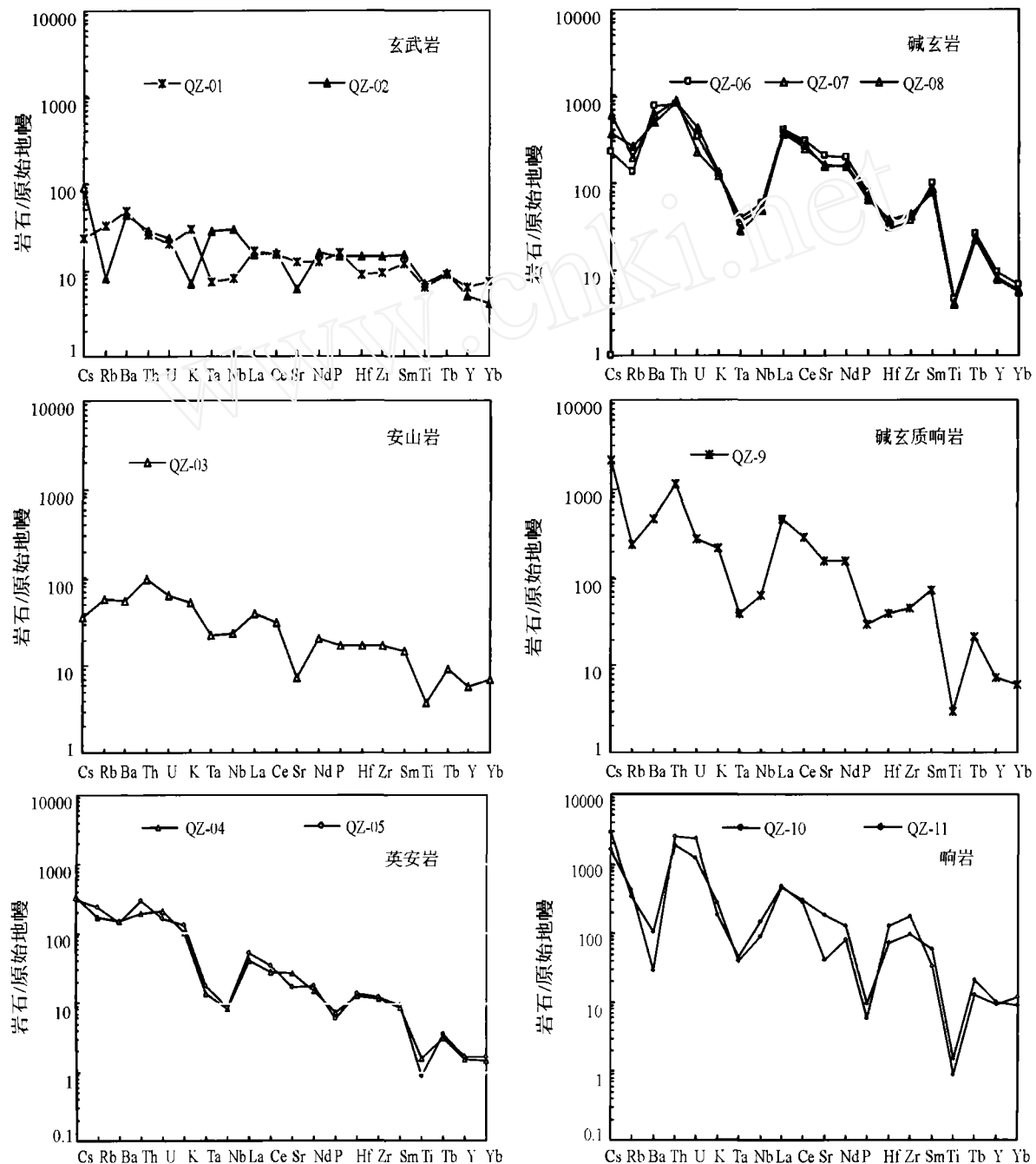


图 4 火车头山新生代火山岩的不相容元素原始地幔标准化配分图解,原始地幔标准值据 Wood *et al.*, 1979; 图中编号对应于表 1 中的样品编号

Fig. 4 The primary mantle normalized trace element distributions

该套火山岩  $(La/Yb)_N$  介于 2.87 ~ 37.56 之间,  $(Ce/Yb)_N$  介于 2.63 ~ 26.15 之间,  $\delta Eu$  为 0.75 ~ 1.09, 仅有微弱的负铕异常。其中, 基性端元(玄武岩)总体呈平坦型稀土配分型式(图 5), 轻重稀土分异弱 ( $(La/Yb)_N = 2.87 \sim 4.55$ ,  $(Ce/Yb)_N = 2.63 \sim 4.99$ ,  $\delta Eu = 0.96 \sim 1.09$ ), 与微量元素显示的地球化学特征完全一致。从玄武岩→安山岩→英安岩, 岩石轻稀土相对重稀土的富集度逐渐增加, 轻重稀土分异逐渐加强,  $Eu$  由无异常→弱负异常(图 5), 这种稀土元素变化特征完全符合钙碱系列岩浆的正常递进演化趋势(Wilson, 1989)。

碱性系列火山岩不相容元素原始地幔标准化配分型式与钙碱系列火山岩相比明显不同: (1) 岩石强烈富集大离子

亲石元素, 有显著的  $Th$ 、 $U$  峰; (2) 岩石有明显的  $Ti$  谷; (3) 无论是基性端元(碱玄岩)还是中酸性端元(碱玄质响岩和响岩)均显示了十分显著的  $Nb$ 、 $Ta$  强烈亏损。表明其  $Th$ 、 $U$  的富集和  $Nb$ 、 $Ta$  的亏损反映了源区性质, 而不能简单地归因于岩浆分异和演化。说明其岩浆源区存在壳源物质的明显贡献。然而, 该套火山岩的  $Y$  和  $Yb$  丰度值十分稳定, 分别在  $36.0 \times 10^{-6} \sim 48.2 \times 10^{-6}$  和  $2.29 \times 10^{-6} \sim 4.93 \times 10^{-6}$  之间变化, 平均值分别为  $41.9 \times 10^{-6}$  和  $3.12 \times 10^{-6}$ , 明显高于地壳物质局部熔融形成的埃达克岩的相应值(王强等, 2001; Defant and Drummond, 1990)。这又表明它们并非青藏高原加厚陆壳下部地壳物质直接局部熔融的产物(赖绍聪, 2003; Lai et al., 2003)。因此, 该套火山岩应该是高原下部特殊的

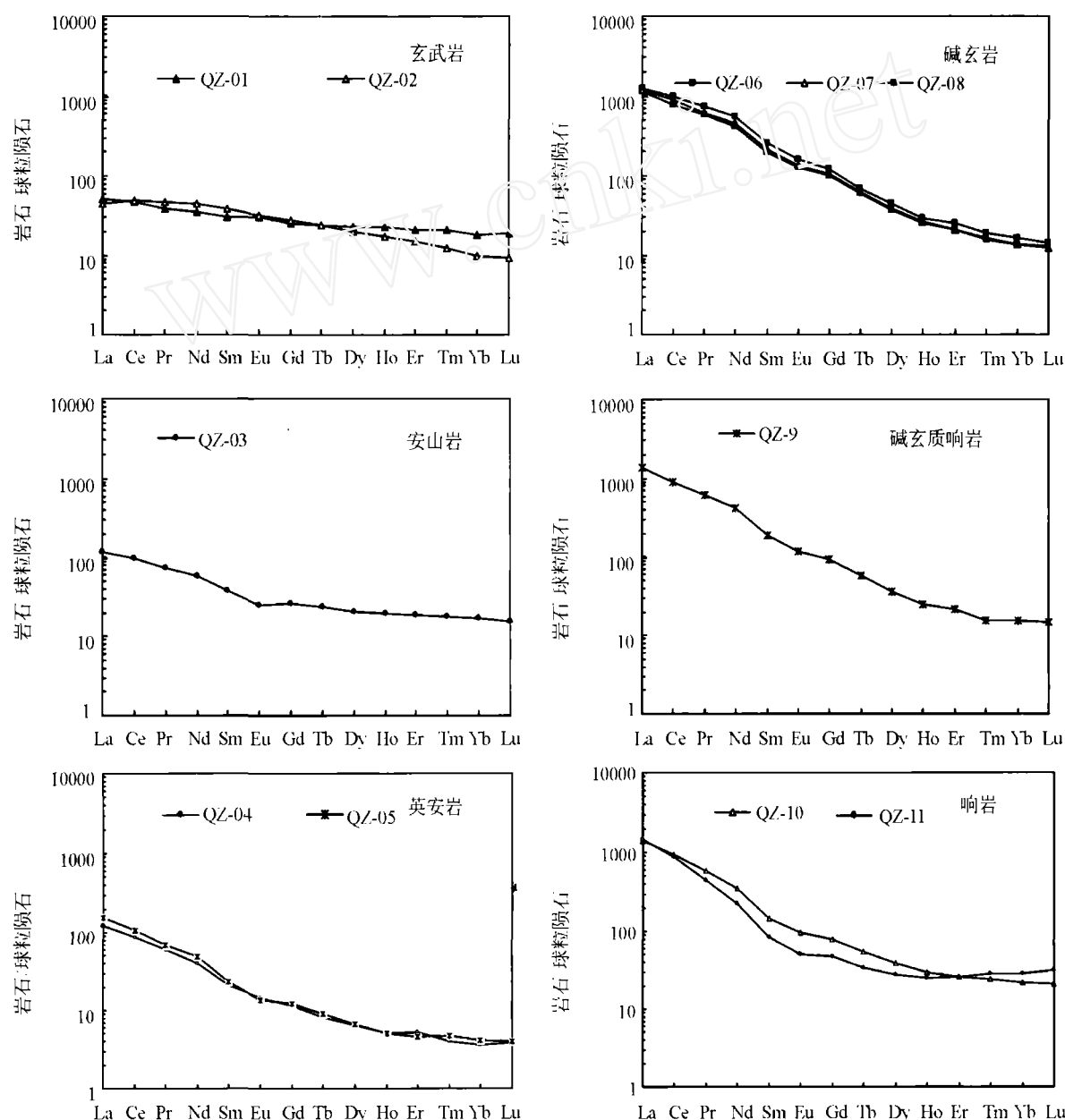


图 5 火车头山新生代火山岩的稀土元素球粒陨石标准化配分图解, 球粒陨石标准值据 Sun and McDonough, 1989; 图中编号对应于表 1 中的样品编号

Fig. 5 The chondrite normalized rare earth element distributions

壳幔混合层局部熔融的结果。本区碱性系列火山岩 ( $\text{La}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 介于 50.44 ~ 91.99 之间, 平均为 74.79; ( $\text{Ce}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 介于 29.77 ~ 63.09 之间, 平均为 51.69, 岩石仅有微弱的负铕异常,  $\delta\text{Eu}$  介于 0.77 ~ 0.85 之间, 平均为 0.83。稀土元素球粒陨石标准化配分图解中 (图 5) 碱性火山岩均为右倾负斜率轻稀土强烈富集型, 其轻稀土富集度大大高于钙碱系列火山岩, 表明这两套火山岩的源区性质存在明显区别。

#### 4 岩浆起源和源区性质

根据 Allegre and Minster (1978) 的研究, 岩浆在分离结晶作用中随着超亲岩浆元素的富集, 亲岩浆元素丰度也几乎同步增长。因此,  $\text{La}/\text{Sm}$  基本保持为一常数。相反, 在平衡部分熔融过程中, 随着  $\text{La}$  的快速进入熔体,  $\text{Sm}$  也会在熔体中富集, 但其增长的速度要慢。这是因为  $\text{La}$  在结晶相和熔体之间的分配系数比  $\text{Sm}$  小, 即不相容性更强。因此,  $\text{La}/\text{Sm}$ - $\text{La}$  图解可以很容易地判别一组相关岩石的成岩作用方式。从图 6a 中可以看到, 本区无论是碱性系列火山岩还是亚碱性钙碱系列火山岩, 它们随着  $\text{La}$  丰度的增高,  $\text{La}/\text{Sm}$  值均呈逐渐增大的趋势, 说明它们分别为各自独立的岩浆源区部分熔融的产物。 $\text{Zr}/\text{Sm}$ - $\text{Zr}$  图解 (图 6b) 也同样表明了这一规律。另外, 值得注意的是, 本区无论是碱性系列火山岩还是亚碱性钙碱系列火山岩, 它们均为一套基性-中性-中酸性岩石组合, 其  $\text{SiO}_2$  含量分别在 44.33% ~ 59.09% 和 48.94% ~ 69.55% 之间。也就是说, 它们的基性端元的  $\text{SiO}_2$  含量均明显 < 53%。实验岩石学研究结果表明 (Patino and McCarthy, 1998; Yardley and Valley, 1997), 大陆地壳局部熔融不能产生比安山岩更基性的原生岩浆, 陆壳局部熔融产物的  $\text{SiO}_2$  含量通常应大于 56%。很显然, 火车头山两套不同的新生代火山岩系列均不能由青藏高原加厚陆壳直接局部熔融产生。

从  $\text{La}/\text{Co}$ - $\text{Th}/\text{Co}$  和  $\text{La}/\text{Co}$ - $\text{Sc}/\text{Th}$  图解中 (图 6c - f), 我们可以更加清楚地看到, 本区亚碱性钙碱系列火山岩在  $\text{La}/\text{Co}$ - $\text{Th}/\text{Co}$  同分母和  $\text{La}/\text{Co}$ - $\text{Sc}/\text{Th}$  异分母痕量元素协变关系图上均呈线性变化, 表明它们为单一岩浆源的产物。结合其岩石组合类型、稀土及微量元素地球化学特征以及低的  $\text{Sm}/\text{Yb}$  值 ( $\text{Sm}/\text{Yb} = 1.53 \sim 5.35$ ), 初步判断其应来源于青藏高原岩石圈地幔尖晶石二辉橄榄岩的局部熔融。本区碱性系列火山岩在  $\text{La}/\text{Co}$ - $\text{Th}/\text{Co}$  协变关系图上呈线性变化, 而在  $\text{La}/\text{Co}$ - $\text{Sc}/\text{Th}$  痕量元素协变关系图上却呈明显的双曲线分布型式, 表明其源区为典型的二源混合型。该套碱性火山岩较高的  $\text{Sm}/\text{Yb}$  值 ( $\text{Sm}/\text{Yb} = 2.63 \sim 13.98$ ) 表明它们并非地幔橄榄岩直接局部熔融的产物, 岩石弱的负  $\text{Eu}$  异常 ( $\delta\text{Eu} = 0.77 \sim 0.85$ ) 和强烈的轻稀土富集, 以及  $\text{Th}$ 、 $\text{U}$  富集和  $\text{Nb}$ 、 $\text{Ta}$  的相对亏损, 反映了壳源物质的参与。因此, 该套碱性火山岩应为青藏高原特殊的壳-幔混合层局部熔融的产物, 乃是新生代青藏高原壳-幔层圈物质交换的重要岩石学证据。

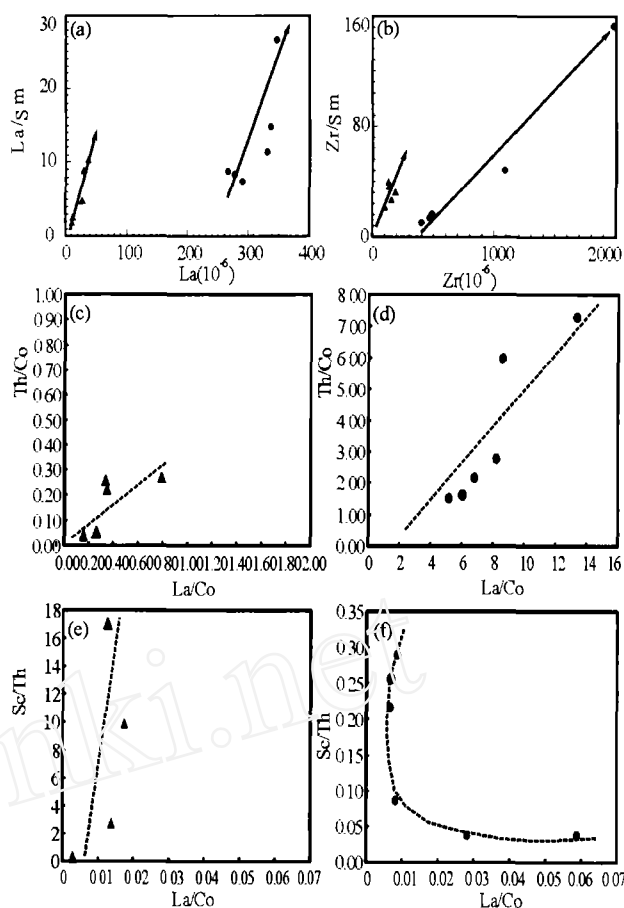


图 6 火车头山新生代火山岩的  $\text{La}$ - $\text{La}/\text{Sm}$  (a) 和  $\text{Zr}$ - $\text{Zr}/\text{Sm}$  (b) 图解 (Allegre and Minster, 1978) 和  $\text{La}/\text{Co}$ - $\text{Th}/\text{Co}$  (c, d)、 $\text{La}/\text{Co}$ - $\text{Sc}/\text{Th}$  (e, f) 图解

图例同图 2。

Fig. 6 The  $\text{La}$ - $\text{La}/\text{Sm}$  (a)、 $\text{Zr}$ - $\text{Zr}/\text{Sm}$  (b)  $\text{La}/\text{Co}$ - $\text{Th}/\text{Co}$  (c, d) and  $\text{La}/\text{Co}$ - $\text{Sc}/\text{Th}$  (e, f) diagrams for the volcanic rocks

#### 5 讨论

以上研究结果表明, 本区新生代两个不同系列的火山岩应来自其各自不同的岩浆源区, 具有显著的地球化学特性差异, 分别起源于青藏高原岩石圈地幔尖晶石二辉橄榄岩和高原特殊的壳-幔混合层的局部熔融。

新生代火山岩与青藏高原的隆升有着密切的成因联系 (邓万明, 1998; Ding et al., 2003; Miller et al., 1999; Lai et al., 2001)。近年来, 岩石构造组合、岩浆活动、岩浆起源与演化已成为研究大陆构造及其动力学的重要支柱和基础。火成岩化学特征直接依赖于源区的性质、局部熔融条件与岩浆演化机理。浅部构造形态是对壳-幔深部构造的一种响应, 壳-幔岩石学结构是大陆构造演化的重要记录, 而深部构造与浅部构造的某些不协调是物质-热-力的传递过程的记录 (Deng et al., 2004)。因此, 深部与浅部构造的不协调, 正是

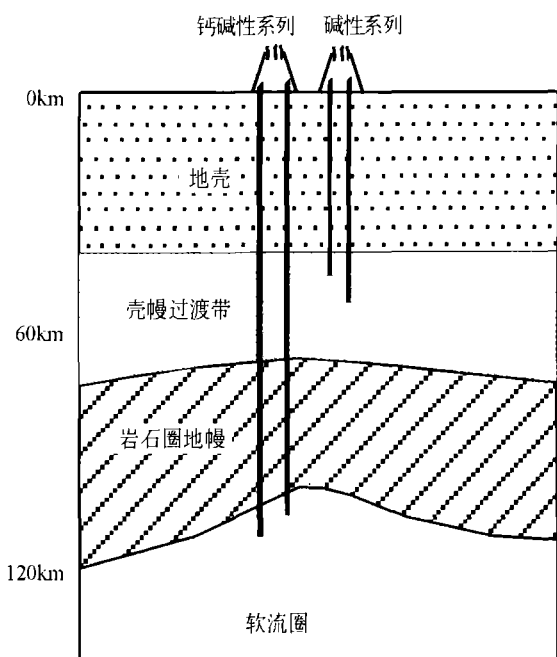


图7 青藏高原北部火车头山新生代火山岩形成模式示意图

Fig. 7 Suggested petrogenesis model for the Huochetou Mountain Cenozoic volcanic rocks in Northern Tibetan Plateau.

我们追溯下地壳及上地幔物质组成、热状态、壳-幔层圈间相互作用以及它们对造山带深部动力学过程约束的重要依据。本文研究表明,青藏高原北部火车头山地区新生代火山岩中包括碱性和钙碱性两个系列,系统的地球化学研究表明,钙碱性系列为典型的幔源岩浆,起源于尖晶石二辉橄榄岩地幔的部分熔融,碱性系列表现出壳-幔混源的岩石系列的特征,起源于青藏高原壳-幔过渡带的部分熔融(图7)。

值得注意的是,青藏高原具有一个特殊的、最厚可达30km的壳-幔过渡带,这已成为一个不争的事实(Holbrook *et al.*, 1992; Kind *et al.*, 2002; 赵俊猛等, 1999; 赖晓玲等, 2004)。然而,长期以来,在高原新生代岩浆作用研究过程中,未能对高原特有的壳-幔过渡带引起足够的重视。壳-幔过渡带不仅是一个地质或地震波的异常带,也是一个复杂的相变带、流变分层带和化学异常带,是壳-幔物质交换的重要场所。目前,对壳-幔过渡带的物质组成提出了一些初步解释(邓万明, 1998; 陈立辉, 2001; 吴福元, 1998; 张国辉等, 1998; Daniel *et al.*, 2004; Sensarma *et al.*, 2002; Korenaga, 2004): (1) 为壳内再调整的产物。如地壳底部岩石发生部分熔融,当岩浆移出后,形成基性的残留物。(2) 为后期热平衡事件的产物。(3) 主体物质是幔源岩浆侵入体,该岩浆的早期结晶形成超镁铁质的堆晶岩,同时岩浆遭受周围地壳物质的混染,岩浆的侵入还使原先的地壳物质发生改变等。(4) 对壳-幔过渡带形成的另一种模式是,因软流圈物质上涌而导致岩浆的板下“热垫托作用”,也就是上地幔和下地壳物

质在来自深部熔体的热力作用下产生了混合,而软流圈物质上涌引起的高热流又将进一步诱发壳-幔混合层的局部熔融,从而产生一套具特殊地球化学特征的钾质碱性火山岩类(邓万明, 1998; Hacker *et al.*, 2000)。如果说上述关于壳-幔过渡带的解释为我们提供了初步的理论依据的话,那么以下几个关键科学问题将可能是对其进行更加深入和精细研究的重要方面:

(1) 热源问题。壳-幔过渡带局部熔融的热动力来源,局部熔融的温度究竟有多高。与下地壳物质局部熔融和岩石圈地幔物质局部熔融的区别是什么?

(2) 壳-幔过渡带岩石学组成模型及其地球化学模型。如何评价地幔物质和地壳物质对过渡带特殊的局部熔融岩浆的分别贡献? 如何从岩石学、地球化学、同位素地球化学、矿物化学、矿物-熔体平衡模型等方面的精细解析提出建立壳-幔过渡带岩石地球化学模型的确切依据?

(3) 如何根据新生带钾质碱性火山岩岩石地球化学资料,评估地幔热、地幔物质与地壳物质的相互作用、混合和物质交换,及其对过渡带岩浆局部熔融过程和成因的贡献?

(4) 幔源岩浆底侵,导致陆壳增生并形成壳-幔过渡带,对青藏高原双倍陆壳形成的贡献是什么?

而这一系列的重要科学问题尚未能在已有的研究工作中得到解决。因此,我们认为将青藏高原特殊的壳-幔过渡带作为一个独立的、特殊的岩浆源区来研究乃是当前青藏高原新生代岩浆作用研究中的重要新任务。对壳-幔过渡带物质组成、热状态、地球化学性质、局部熔融特征及岩浆作用过程的详细研究,将对高原隆升机理及其大陆动力学过程的探讨产生重要影响。

## References

- Allegre CJ and Minster JF. 1978. Quantitative method of trace element behavior in magmatic processes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 38: 1-25
- Chen LH. 2001. Vertical accretion of continental crust. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(1): 26-30 (in Chinese with English abstract)
- Chung SL, Liu DY, Ji JQ, Zhou MF, Lee HY, Wen DJ, Lo CH, Lee TY, Qian Q and Zhang Q. 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology*, 31: 1021-1024
- Chung SL, Lo ZH, Lee TY, Zhang YQ, Xie YW, Li XH, Wang KL and Wang PL. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago. *Nature*, 394(20): 769-773
- Daniel JS, Ben H and John WV. 2004. Evidence of subduction and crust mantle mixing from a single diamond. *Lithos*, 77: 349-358
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662-665
- Deng JF, Mo XX, Zhao HL, Wu ZX, Luo ZH and Su SG. 2004. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: Continental roots-plume tectonics. *Earth Science Reviews*, 65: 223-275
- Deng WM. 1998. Cenozoic intraplate volcanic rocks in the Northern Qinghai-Xizang plateau. Beijing: Geological Publishing House, 1-168 (in Chinese)



- Deng WM. 2003. Cenozoic volcanic activity and its geotectonic background in west China-Formative excitation mechanism of volcanic rocks in Qinghai-Xizang and adjacent districts. *Earth Science Frontiers*, 10 (2): 471 - 478 (in Chinese with English abstract)
- Ding L, Kapp P, Zhong DL and Deng WM. 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction. *Journal of Petrology*, 44(10):1833 - 1865
- Hacker BR, Edwin G, Ratschbacher L, Grove M, McWilliams M, Sobolev S, Jiang W and Wu ZH. 2000. Hot and dry deep crustal xenoliths from Tibet. *Science*, 287: 2463 - 2466
- Holbrook WS, Mooney WD and Christensen NT. 1992. The seismic velocity structure of the deep continental crust. In: Fountain D M *et al.* (eds.). *Continental Lower Crust*. Amsterdam: Elsevier, 1 - 43
- Kind R, Yuan X and Saul J. 2002. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: Evidence for Asian plate subduction. *Science*, 298:1219 - 1221
- Korenaga J. 2004. Mantle mixing and continental breakup magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 218:463 - 473
- Lai SC, Liu CY and O'Reilly SY. 2001. Petrogenesis and its significance to continental dynamics of the Neogene high-potassium calc-alkaline volcanic rock association from north Qiangtang, Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 44(Supp.), 45 - 55
- Lai SC, Liu CY and Yi HS. 2003. Geochemistry and Petrogenesis of Cenozoic Andesite - dacite Associations from the Hoh Xil Region, Tibetan Plateau. *International Geology Review*, 45 (11): 998 - 1019
- Lai SC. 2003. Identification of the Cenozoic adakitic rocks association from Tibetan plateau and its tectonic significance. *Earth Science Frontiers*, 10(4):407 - 415 (in Chinese with English abstract)
- Lai SC, Qin JF, Li YF, Liu X. 2006. Geochemistry and petrogenesis of the Cenozoic volcanic rocks from Bilongcuo region, Tibetan plateau: Evidence for the partial melting of the mantle-crust transition zone. *Geological Bulletin of China*, 25 (1): 64 - 69 (in Chinese with English abstract)
- Lai XL, Zhang XK and Fang SM. 2004. Study of crust-mantle transitional zone along the northeast margin of Qinghai-Xizang plateau. *Acta Seismologica Sinica*, 26(2):132 - 139 (in Chinese with English abstract)
- Liu S, Hu RZ, Feng CX, Chi XG, Li C, Yang RH, Wang TW and Jin W. 2003. Cenozoic adakite-type volcanic rocks in Qiangtang, Tibet and its significance. *Acta Geologica Sinica*, 77(2):187 - 194
- Liu HY, Xia B, Deng WM and Zhang YQ. 2004. Study of the K-Ar and  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  dating on the high-K volcanics from Bamaoqiongong to Qiangbaqian area, North Tibet. *Journal of Petrology and Mineralogy*, 24(1):71 - 75
- Li YG, Mo XX, Ma RZ, Yin HS, Lu XF and Liu DZ. 2005. Petrology and age of the Cenozoic volcanics in Huochetoushan, North Tibet, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology edition)*, 32(5):441 - 446
- Miller C, Schuster R, Klotzli U, Frank W and Purtscheller F. 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: geochemical and Sr, Nd, Pb, O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. *J. Petrol.* 40: 1399 - 1424
- Patino DAE and McCarthy TC. 1998. Melting of crustal rocks during continental collision and subduction. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 27 - 55
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D and Applegate. 1999. Reaction between slab-derived melt and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335 - 356
- Sensarma S, Palme H and Mukhopadhyay D. 2002. Crust - mantle interaction in the genesis of siliceous high magnesian basalts: evidence from the Early Proterozoic Dongargarh Supergroup, India. *Chemical Geology*, 187: 21 - 37
- Shi LC, Guo TZ, Yang YX and Bao GP. 2004. Isotopic geochemistry and volcanic genesis and magmatic origin of the Cenozoic volcanic rocks in Hoh Xil lake area. *Northwestern Geology*, 37(1):19 - 25 (in Chinese with English abstract)
- Stern CR and Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral volcanic zone. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123:263 - 281
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, In: A. D. Saunders, M. J. Norry (ed), *Magmatism in the Ocean Basin*. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 42: 313 - 345
- Turner S, Arnaud N, Liu JQ, Rogers N, Hawkesworth CJ, Harris N, Kelley S, Van Calsteren P and Deng WM. 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau: implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *Journal of Petrology*, 37(1): 45 - 71
- Wang Q, Xu JF and Zhao ZH. 2001. The summary and comment on research on a new kind of igneous rock-adakite. *Advance in Earth Sciences*, 16(2):201 - 208 (in Chinese with English abstract)
- Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis*. London: Unwin Hyman Press, 295 - 323
- Wood DA, Joron JL, Treuil M, Norry M and Tamey J. 1979. Elemental and Sr isotope variations in basic lavas from Iceland and the surrounding sea floor. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 70:319 - 339
- Wu LY. 1998. The material exchange at the crust-mantle boundary: evidence from igneous petrology. *Earth Science Frontiers*, 5(3):95 - 103 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF and Wang Q. 2003. Tracing the thickening process of continental crust through studying adakitic rocks: evidence from volcanic rocks in the north Tibet. *Earth Science Frontiers*, 10(4):401 - 406 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Wu CL, Shi RD, Li HB, Xu ZQ and Meng FC. 2002. Miocene and Pleistocene shoshonitic volcanic rocks in the Jingyuhu area, north of the Qinghai-Tibet plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 18 (2):161 - 176
- Yardley BWD and Valley JW. 1997. The petrologic case for a dry lower crust. *Journal of Geophysical Research*, 102: 12173 - 12185
- Zhang GH, Zhou XH, Sun M, Chen SH and Feng JL. 1998. Highly chemical heterogeneity in the lower crust and crust-mantle transitional zone: geochemical evidences from xenoliths in Hannuoba basalt, Hebei province. *Geochimica*, 27(2):153 - 169 (in Chinese with English abstract)
- Zhao JM, Zhang XK, Zhao GZ, Liu GD and Lu ZX. 1999. Structure of crust-mantle transitional zone in different tectonic environments. *Earth Science Frontiers*, 6(3):165 - 172 (in Chinese with English abstract)

# 附中文参考文献

- 陈立辉. 2001. 陆壳的垂向增生. *矿物岩石地球化学通报*, 20(1):26 - 30
- 邓万明. 1998. 青藏高原北部新生代板内火山岩. 北京:地质出版社, 1 - 168
- 邓万明. 2003. 中国西部新生代火山活动及其大地构造背景-青藏及邻区火山岩的形成机制. *地学前缘*, 10(2):471 - 478
- 赖绍聪. 2003. 青藏高原新生代埃达克质岩的厘定及其意义. *地学前缘*, 10(4):407 - 415
- 赖绍聪, 秦江锋, 李永飞, 刘鑫. 2006. 青藏高原北隆错新生代火山岩:壳幔过渡带局部熔融的岩石地球化学证据. *地质通报*, 25(1 ~ 2):64 - 69

- 赖晓玲,张先康,方盛明. 2004. 青藏高原东北缘壳幔过渡带研究. 地震学报, 26(2): 132 - 139
- 李佑国,莫宣学,马润则,尹海生,陆小凤,刘登忠. 2005. 藏北火车头山新生代火山岩的岩石学特征与时代. 成都理工大学学报(自然科学版), 32(5): 441 - 446
- 刘红英,夏斌,邓万明,张玉泉. 2004. 藏北巴毛穷宗-羌巴欠地区火山岩 K-Ar 和  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  年代学研究. 矿物岩石, 24(1): 71 - 75
- 史连昌,郭通珍,杨延兴,保广普. 2004. 可可西里湖地区新生代火山岩同位素地球化学特征及火山成因、源区性质讨论. 西北地质, 37(1): 19 - 25
- 王强,许继峰,赵振华. 2001. 一种新的火成岩-埃达克岩的研究综述. 地球科学进展, 16(2): 201 - 208
- 吴福元. 1998. 壳-幔物质交换的岩浆岩石学研究. 地学前缘, 5(3): 95 - 103
- 许继峰,王强. 2003. Adakitic 火成岩对大陆地壳增厚过程的指示: 以青藏北部火山岩为例. 地学前缘, 2003, 10(4): 401 - 406
- 杨经绥,吴才来,史仁灯,李海兵,许志琴,孟繁聪. 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. 岩石学报, 18(2): 161 - 176
- 张国辉,周新华,孙敏,陈绍海,冯家麟. 1998. 下地壳及壳幔过渡带化学不均一性. 地球化学, 27(2): 153 - 169
- 赵俊猛,张先康,赵国泽,刘国栋,卢造勋. 1999. 不同环境下的壳幔过渡带结构. 地学前缘, 6(3): 165 - 172

www.cnki.net