

·基础地质·

藏北羌塘比隆错一带新生代火山岩的成因： 壳幔过渡带局部熔融的地球化学证据

赖绍聪, 秦江锋, 李永飞, 刘 鑫

LAI Shao-cong, QIN Jiang-feng, LI Yong-fei, LIU Xin

西北大学大陆动力学教育部重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069

Key Laboratory of Continental Dynamics, Ministry of Education; Department of Geology,

Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China

摘要:羌塘比隆错新近纪火山岩主要岩石类型为安粗岩—粗面岩, 为一套中基性—中性的碱性系列岩石组合, SiO_2 含量介于 52%~62% 之间, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$, $\text{MgO} < 3.30\%$ 。岩石轻稀土元素较强富集, $\text{LREE}/\text{HREE} = 10 \sim 13$ (La/Yb)_N = 15~19, 弱负 Eu 异常, $\delta\text{Eu} = 0.71 \sim 0.89$ 。 $\text{Mg}^\#$ 与 SiO_2 的相关关系和 La/Sm — La 、 Cr — Tb 等亲岩浆元素与超亲岩浆元素协变关系表明, 该套岩石为同源岩浆分离结晶的产物。岩石组合类型和低的 Sm/Yb 值 (3.23~3.97) 表明, 它们应来源于岩石圈地幔尖晶石二辉橄榄岩的局部熔融; 弱的负 Eu 异常和 Nb、Ta、Ti 的相对亏损, 又反映了陆源岩浆的特征, 可见, 比隆错新近纪碱性火山岩应为青藏高原特殊的壳幔过渡带局部熔融的产物。

关键词: 常量和微量元素; 新生代火山岩; 壳幔过渡带; 青藏高原

中图分类号: P534.6; P588.14 文献标识码: A 文章编号: 1671-2552(2006)01-02-0064-06

Lai S C, Qin J F, Li Y F, Liu X. Cenozoic volcanic rocks in the Bêlog Co area, Qiangtang, northern Tibet, China: Petrochemical evidence for partial melting of the mantle-crust transition zone. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(1-2): 64-69

Abstract Neogene volcanic rocks in the Bêlog Co area, Qiangtang, northern Tibet, are represented by a typical intermediate-basic and intermediate alkaline rock association and the main rock type is latite-trachyte. Their chemical composition is characterized by $\text{SiO}_2 = 52 \sim 62\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$ and $\text{MgO} < 3.30\%$. In addition, the volcanic rocks are LREE-enriched with $\text{LREE}/\text{HREE} = 10 \sim 13$ and $(\text{La}/\text{Yb})_N = 15 \sim 19$ and show a weak negative Eu anomaly with $\delta\text{Eu} = 0.71 \sim 0.89$. The close relationship between $\text{Mg}^\#$ and SiO_2 and co-variation of the magmatophile elements and ultra-magmatophile elements such as La/Sm — La and Cr — Tb indicate that this association of volcanic rocks is the product of comagmatic fractional crystallization. The rock association type and lower Sm/Yb values ($\text{Sm}/\text{Yb} = 3.23 \sim 3.97$) imply that this association of volcanic rocks should originate from partial melting of spinel lherzolite in the lithospheric mantle. On the other hand, the weak negative Eu anomaly and relative depletion in Nb, Ta and Ti reflect the features of terrigenous magma. So the Neogene Bêlog Co alkaline volcanic rocks should be the production of partial melting of the special crust-mantle transition zone on the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words major and trace elements; Cenozoic volcanic rock; mantle-crust transition zone; Qinghai-Tibet Plateau

新近的研究结果, 尤其是深地震反射成果表明, 世界上一些典型的造山带莫霍面并不是一个简单的界面, 也不是传统的地壳底面, 而是一个厚度可达数十公里的过渡带^[1~11], 即

壳幔过渡带。这一观点逐渐得到了地球物理学和岩石地球化学等方面的初步证实^[12~15]。目前, 壳幔过渡带的概念已逐渐被人们认识和接受, 并被作为一个特殊的“单元层”来研究^[6]。青

收稿日期: 2005-08-03; 修订日期: 2005-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 40572050), 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助。

作者简介: 赖绍聪(1963-)男, 教授, 博士生导师, 从事岩石学及地球化学研究和教学工作。E-mail: shaocong@pub.xaonline.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

藏高原广泛发育波速 $v_p=7.36\sim7.42$ km/s的波速过渡带,在当雄以北厚度达到30 km,是目前世界上壳幔过渡带最厚的地区之一^[16]。因此,对青藏高原壳幔过渡带的性质、局部熔融特征及岩浆作用过程的详细研究,对高原隆升机理及其大陆动力学过程的探讨将具有重要意义。中国科学家已就青藏高原壳幔过渡带的属性及其局部熔融特征进行了详细研究和初步归纳,取得了重要成果^[6-10,12-13]。本文对分布在羌塘核部比隆错地区的新近纪火山岩进行了详细研究,提出该套火山岩是青藏高原特殊的壳幔过渡带局部熔融的产物。

1 地质背景

羌塘—冈底斯位于青藏高原的核部,是中国目前研究程度相当低的地区之一。羌塘地区新近纪火山岩较为发育,主要见于羌北地层分区的新近纪石坪组,在羌塘中央隆起带和南羌塘很少出露。火山岩大多呈厚50~200 m的熔岩被覆盖在新近纪喇纳湖组(N_{1s})或侏罗纪雁石坪组(J_2ys)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纪沉积地层呈超覆关系,在火山中心呈侵入关系。

比隆错新生代火山岩位于西藏双湖镇以南约40 km($E88^{\circ}52'$ 、 $N32^{\circ}55'$) (图1),处在羌塘中央隆起带南缘,由近东西向展布的4个小岩丘、岩脊和岩流组成。野外可见火山岩不整合覆盖在新近纪砂砾岩之上,火山岩的K—Ar年龄为 $38.3\text{ Ma}\pm3.3\text{ Ma}$ 。本文的样品取自比隆错湖南侧的小岩丘。岩石呈灰黑色,斑状结构,块状构造,十分新鲜,无任何蚀变和交代现象。斑晶成分主要为斜长石($15\%\pm$)、碱性长石($8\%\pm$)、角闪石($3\%\pm$)、黑云母($2\%\pm$)及少量辉石。基质为玻晶交织结构,可见少量针状长石微晶。

2 火山岩岩石化学特征

比隆错新生代火山岩岩石化学、稀土元素和微量元素分析结果列于表1。该套火山岩主要岩石类型为安粗岩—粗面岩(图2-a),为一套典型的中基性—中性岩石组合。从表1可见,火山岩 $\text{SiO}_2=52.86\%\sim61.29\%$, Al_2O_3 均大于15%,在15.35%~19.13%之间变化。 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=1.02\sim3.25$,平均为1.86。而 MgO 大多小于3.00%。在 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 图解中(图2-a),该套火山岩位于碱性区内,而在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解中(图2-b)则位于高钾钙碱和钾玄岩区内。通常由下部陆壳玄武质岩石局部熔融形成的熔体,其 $\text{Mg}^{\#}$ 小于50,而地幔橄榄岩局部熔融形成的熔体却具有较高的 $\text{Mg}^{\#}$

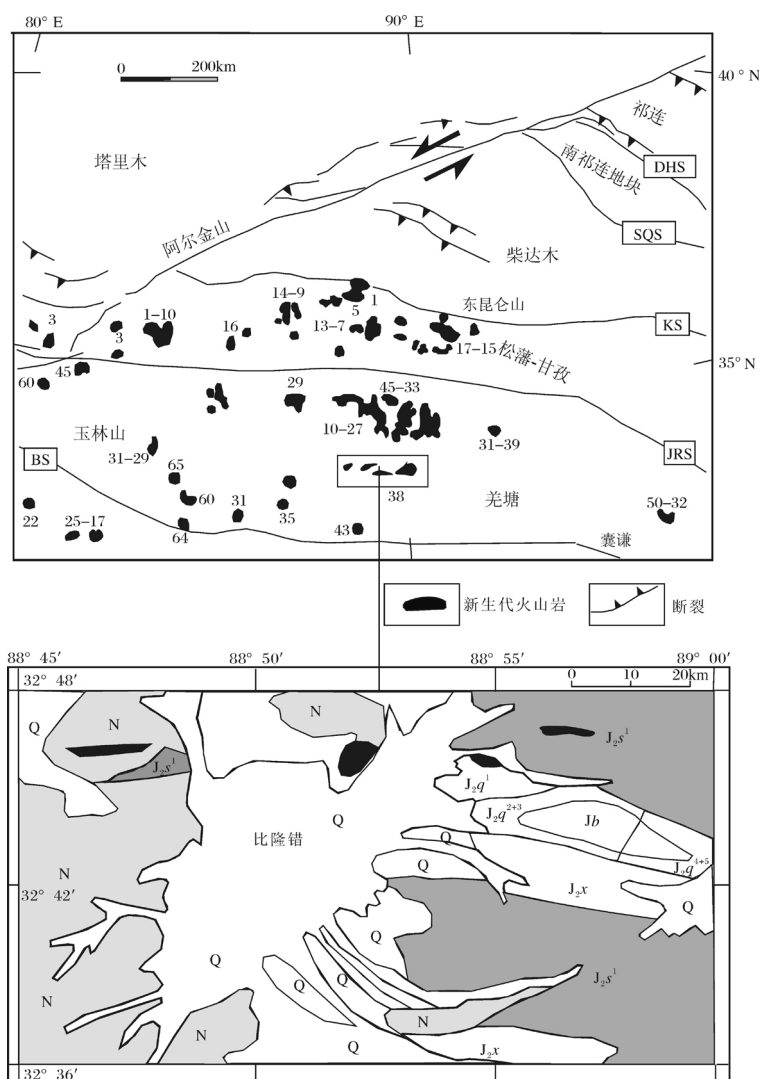


图1 藏北羌塘比隆错地区新生代火山岩分布简图

Fig.1 Regional distribution of Cenozoic volcanic rocks in the Bêlog Co area, Qiangtang, northern Tibet

J_2s^1 —中侏罗统索瓦组 J_2x —中侏罗统夏里组 J_2q^1 —中侏罗统雀莫错组
下阶 J_2q^{2+3} —中侏罗统雀莫错组中阶 J_2q^{4+5} —中侏罗统雀莫错组上阶;
 Jb —中侏罗统布曲组 N —新近系沉积岩 Q —第四纪沉积物;
DHS—党河南山断裂 SQS—南祁连缝合带 KS—昆仑缝合带;
JRS—金沙江缝合带 BS—班公错—怒江缝合带

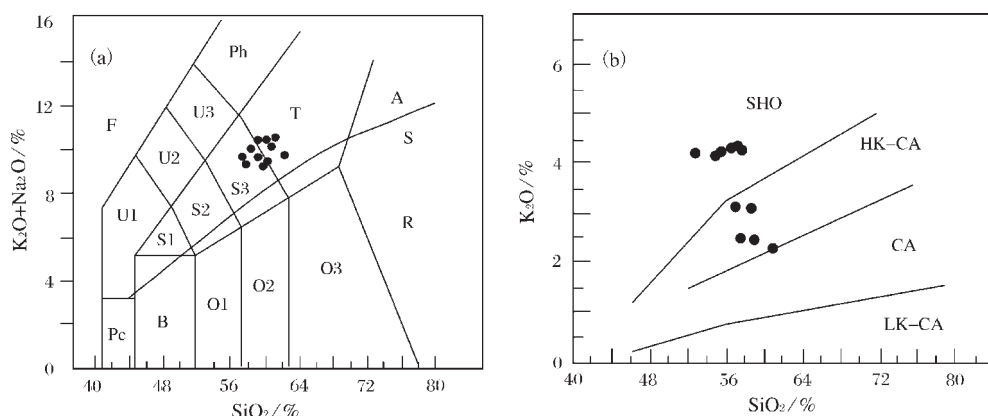
值。从图3中可以看到,比隆错火山岩组合的 $\text{Mg}^{\#}$ 与 SiO_2 的协变关系,既不同于幔源熔体,也不同于1~3 GPa条件下角闪岩相及榴辉岩相陆壳物质的局部熔融产物,而是介于二者之间,且投影点符合地幔熔体分离结晶和受陆壳混染的演化趋势^[17]。这说明比隆错新生代火山岩存在化学成分的特异性,它们并非青藏高原加厚陆壳下部局部熔融的产物,也不是高原岩石圈地幔简单熔融的结果,而是壳幔物质交换、相互作用和岩浆混合的最终产物。

表1 比隆错新生代火山岩的主元素和微量元素分析结果

Table 1 Major and trace element analyses of Cenozoic volcanic rocks in the Bêlog Co area

编号 岩性	BL03 安粗岩	BL13 安粗岩	BL12 安粗岩	BL02 安粗岩	BL18 安粗岩	BL08 安粗岩	BL17 安粗岩	BL11 安粗岩	BL15 粗面岩	BL30 粗面岩	BL24 粗面岩
SiO ₂	52.86	54.98	55.55	56.56	56.90	57.22	57.72	57.75	58.60	59.10	61.29
TiO ₂	0.72	0.75	0.80	0.77	0.77	0.75	0.70	0.90	0.75	0.82	0.80
Al ₂ O ₃	17.95	17.48	17.47	18.18	18.89	15.59	18.42	15.35	18.18	19.13	17.47
Fe ₂ O ₃	4.90	5.90	6.00	5.33	5.40	6.83	5.45	5.00	5.20	5.80	5.70
FeO	1.50	0.60	0.71	1.77	1.60	0.27	1.85	1.60	1.40	0.90	0.80
MnO	0.09	0.13	0.13	0.07	0.15	0.13	0.13	0.11	0.14	0.13	0.14
MgO	1.50	3.30	3.00	1.80	1.60	3.10	2.30	2.50	1.50	1.10	1.80
CaO	3.60	3.00	2.00	1.90	0.70	3.10	0.50	1.30	0.60	0.60	0.80
Na ₂ O	4.62	4.70	5.30	4.95	6.90	4.50	6.60	5.60	6.80	7.80	7.30
K ₂ O	4.20	4.22	4.26	4.29	3.12	4.40	2.46	4.30	3.09	2.40	2.26
P ₂ O ₅	0.43	0.43	0.31	0.36	0.43	0.12	0.40	0.33	0.36	0.33	0.36
LOI	7.52	3.96	4.44	3.30	2.95	3.50	3.40	5.20	2.77	1.43	1.10
Total	99.89	99.45	99.97	99.28	99.41	99.51	99.93	99.94	99.39	99.57	99.82
Mg [#]	0.35	0.54	0.51	0.36	0.34	0.50	0.42	0.46	0.34	0.27	0.39
Sc	25.8	25.0	26.5	24.4	31.5	24.9	28.7	24.9	25.9	30.2	22.4
V	187	157	181	142	99.8	167	123	146	106	99.8	112
Cr	290	165	168	262	203	162	214	165	180	218	186
Co	37.5	50.4	51.2	46.9	44.3	44.2	67.0	63.5	53.9	44.1	64.9
Ni	39.9	46.5	44.5	44.1	51.7	41.6	52.3	42.2	48.2	40.9	46.3
Cu	6.29	15.8	14.8	7.02	32.1	25.8	22.6	92.8	31.6	34.3	44.8
Zn	64.8	77.3	90.3	67.9	89.5	83.7	120	157	82.9	69.0	82.1
Ga	17.9	19.5	20.3	19.2	21.1	18.7	21.0	18.8	20.4	21.5	22.5
Rb	84.7	121	130	87.1	74.8	118	61.4	113	74.5	58.9	60.0
Sr	779	855	947	860	298	898	310	859	310	290	322
Y	24.5	23.2	23.0	24.9	23.8	23.0	19.4	19.8	23.5	20.8	26.8
Zr	207	198	209	208	211	181	196	202	203	210	203
Nb	12.8	13.0	13.9	13.2	13.0	12.8	12.8	13.4	13.2	13.1	13.46
Mo	1.01	0.93	0.91	0.52	0.54	1.00	0.35	1.04	0.39	0.70	0.51
Sn	1.85	1.66	1.83	2.17	2.67	1.96	1.02	1.52	1.34	1.08	0.88
Sb	0.40	0.25	0.25	0.43	0.29	0.44	0.19	0.27	0.20	0.40	0.28
Cs	1.41	1.79	2.01	1.61	0.55	1.74	0.70	1.29	0.62	0.59	0.70
Ba	1267	1839	1689	1329	688	1701	482	17.05	701	358	427
Hf	6.01	6.02	6.43	5.81	6.44	5.20	5.94	6.10	6.47	6.50	5.83
Ta	0.79	0.92	0.91	0.84	0.84	0.94	0.81	0.94	0.87	0.80	0.88
Pb	34.2	25.5	27.3	34.5	14.4	28.8	13.2	26.4	13.7	13.3	13.5
Th	22.8	21.6	22.6	22.3	22.6	19.3	21.1	22.6	22.5	20.2	21.8
U	2.15	4.14	3.63	1.86	3.25	4.15	3.02	2.90	3.03	2.90	2.61
La	49.1	54.9	54.3	50.3	59.8	49.1	50.1	44.6	50.9	48.4	56.1
Ce	78.9	113	112	84.4	105	103	94.0	94.1	109	108	111
Pr	10.8	12.9	12.6	11.7	13.8	11.7	11.2	10.7	13.3	11.6	13.6
Nd	41.8	49.0	47.0	45.0	52.2	46.5	41.1	40.3	50.5	43.9	51.9
Sm	7.36	8.71	8.52	8.14	9.06	8.60	7.12	6.89	9.25	7.68	9.40
Eu	1.97	2.28	2.07	2.16	2.22	1.92	1.51	1.52	2.42	1.66	2.35
Gd	6.24	6.62	6.45	6.40	6.89	6.31	5.44	5.22	6.81	5.74	7.21
Tb	0.88	0.92	0.89	0.91	0.97	0.87	0.79	0.75	0.98	0.77	0.99
Dy	4.87	4.94	4.85	5.16	5.58	4.68	4.27	3.95	4.99	4.50	5.28
Ho	0.93	0.96	0.88	0.99	0.99	0.81	0.88	0.77	0.97	0.88	1.02
Er	2.33	2.60	2.41	2.62	2.64	2.35	2.33	2.10	2.83	2.36	2.72
Tm	0.35	0.38	0.35	0.36	0.43	0.33	0.32	0.31	0.39	0.33	0.41
Yb	2.22	2.37	2.20	2.21	2.36	2.24	2.21	1.99	2.37	2.16	2.37
Lu	0.38	0.38	0.33	0.33	0.41	0.32	0.35	0.31	0.38	0.35	0.35
δEu	0.87	0.88	0.82	0.88	0.82	0.76	0.71	0.75	0.89	0.73	0.84
(La/Yb) _N	15.88	16.64	17.71	16.31	18.21	15.76	16.29	16.04	15.39	16.08	17.00
(Ce/Yb) _N	9.88	13.28	14.12	10.60	12.42	12.80	11.85	13.11	12.81	13.83	13.01

注. 由中国科学院贵阳地球化学研究所湿法(SiO₂-P₂O₅)和ICP-MS法(Sc~Lu)分析(2001)主元素含量%, 微量元素含量10⁻⁶.

图2 火山岩 SiO_2 -($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)图解(a)和 SiO_2 - K_2O 图解(b)Fig.2 SiO_2 -($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) (a) and SiO_2 - K_2O (b) diagrams for volcanic rocks

A—碱性系列 S—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 LK-CA—低钾钙碱岩系 CA—钙碱系列 HK-CA—高钾钙碱岩系 SHO—钾玄岩系

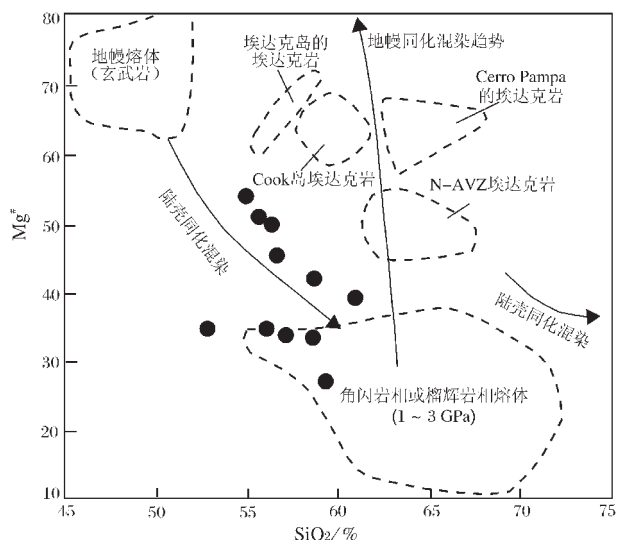
3 微量和稀土元素地球化学特征

本区新生代火山岩不相容元素原始地幔标准化配分型式图总体呈右倾型(图4)。Ti谷明显,说明Ti的相对亏损可能与岩浆分异过程有关,归因于铁钛氧化物的分离结晶。Rb、Th、U等大离子亲石元素的富集度高。而高场强元素丰度值较低。需要指出的是,本区新生代火山岩中均存在明显的Nb、Ta谷,这与典型的岛弧火山岩的地球化学特征十分类似^[18]。此外,样品的Y和Yb丰度值十分稳定,分别在 19.43×10^{-6} ~ 26.79×10^{-6} 和 1.99×10^{-6} ~ 2.37×10^{-6} 之间变化,平均值分别为 22.98×10^{-6} 和 2.24×10^{-6} ,高于地壳物质局部熔融形成的埃达克岩的相应值^[19,20]。这表明比隆错新生代火山岩并非青藏高原加厚陆壳下部局部熔融的产物^[21-23]。

本区新生代火山岩的(La/Yb)_N为15.39~18.21,平均为16.48 [(Ce/Yb)_N为9.88~14.12,平均为12.52,岩石 δEu 介于0.71~0.89之间,平均为0.81,仅有微弱的负Eu异常。该火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(图5)均为右倾负斜率,轻稀土为强烈富集型,而重稀土部分曲线较为平缓。

4 岩浆起源和源区性质

根据Alleger等^[24]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, La/Sm 基本保持为一常数。相反,在平衡部分熔融过程中,随着La快速进入熔体,Sm也会在熔体中富集,但其增长的速度要慢。这是因为La在结晶相和熔体之间的分配系数比Sm小,即不相容性更强。因此, La/Sm -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6中可以看到,本区新生代火山岩随着La丰度的增高, La/Sm 值十分稳定,变化不大,基

图3 火山岩 SiO_2 - $\text{Mg}^\#$ 图解Fig.3 SiO_2 - $\text{Mg}^\#$ diagram for volcanic rocks

本保持为一常数,充分说明它们为岩浆分离结晶而形成的火山岩组合类型。Cr-Tb图解(图7)也同样表明,本区火山岩为玄武质岩浆结晶分异作用的产物。另外,值得注意的是,本区火山岩主体为一套中基性—中性岩石, SiO_2 含量在52.86%~61.29%之间。也就是说,基性端元的 SiO_2 含量小于53%。实验岩石学研究结果表明^[25,26],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 SiO_2 含量通常应大于56%。很显然,比隆错新生代火山岩不能由青藏高原加厚陆壳直接局部熔融产生。

需要指出的是,这套火山岩不同于通常的消减带或碰撞

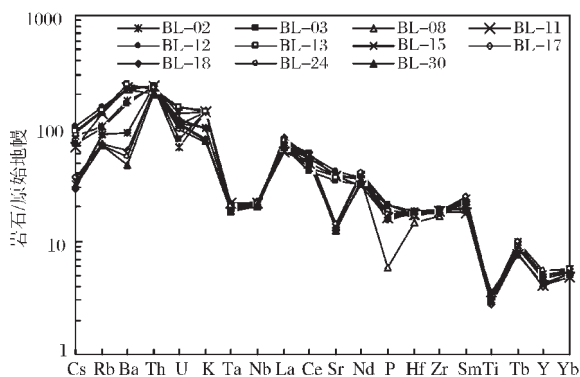


图4 火山岩不相容元素原始地幔标准化配图解

Fig.4 Primitive mantle-normalized incompatible element distribution patterns for volcanic rocks

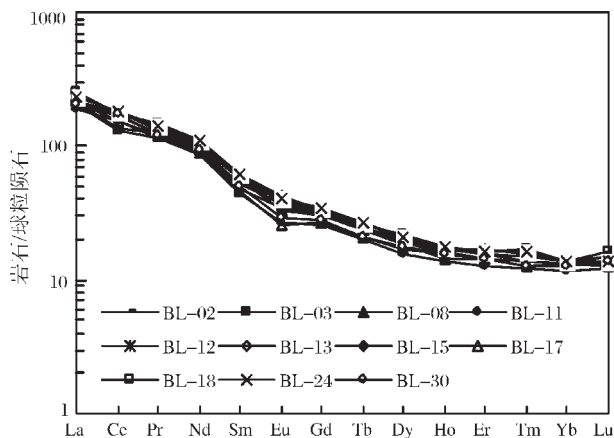


图5 火山岩稀土元素球粒陨石标准化配图解

Fig.5 Chondrite-normalized REE distribution patterns for volcanic rocks

带钙碱性火山岩系,它们在成分上相当于碱性玄武质-玄武安山质-安山岩岩浆系列,岩石中不仅显著地富集有酸性岩特征的大离子亲石元素(图4),而且在地幔源岩中富集的一些过渡族金属元素也有相当的富集度(表1),如Cr元素(Cr 丰度值介于 $160 \times 10^{-6} \sim 290 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 201.11×10^{-6})。从稀土元素Sm和Yb的丰度看,本区火山岩具有较低的Sm/Yb值($Sm/Yb=3.23 \sim 3.97$)。这表明它们有可能来源于岩石圈地幔尖晶石橄榄岩的局部熔融。然而,该组火山岩又具有轻稀土强烈富集型稀土配分型式,但并不显示明显的Eu亏损,说明成岩岩浆并非幔源玄武岩浆在基性斜长石分离结晶后的残余熔体。这一重要特征无疑指示该组火山岩不能由正常的地幔橄榄岩部分熔融产生。

综上所述,可以清楚地看到,比隆错新生代火山岩具有 SiO_2 含量低,低Sm/Yb值,不仅强烈富集大离子亲石元素和轻稀土,同时也富集部分幔源元素,负Eu异常不明显,且Nb、Ta

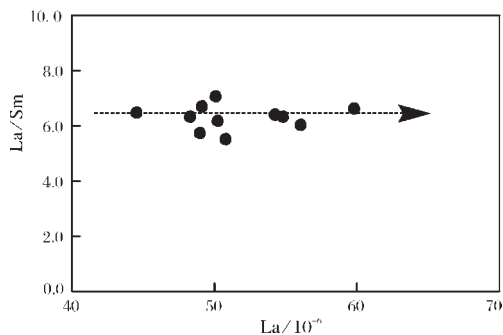


图6 火山岩的La-La/Sm图解

Fig.6 La-La/Sm diagram of volcanic rocks

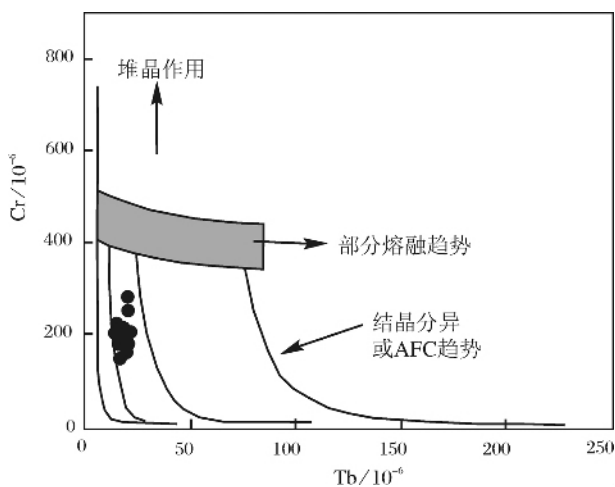


图7 火山岩的Cr-Tb图解

Fig.7 Cr-Tb diagram of volcanic rocks

和Ti强烈亏损等一系列特殊的地球化学特征。指示其既非岩石圈地幔尖晶石二辉橄榄岩简单局部熔融的产物,也非青藏高原加厚陆壳下部榴辉岩相陆壳物质局部熔融的结果,而是兼具它们二者的共同特点。这恰恰表明,比隆错新生代火山岩应来源于青藏高原加厚陆壳之下与岩石圈地幔之上的特殊壳幔过渡带。其成因机理归因于源自尖晶石二辉橄榄岩局部熔融的原生碱性岩浆在底侵过程中与加厚地壳下部地壳物质或壳源岩浆发生了较充分的混合,而形成具有特殊地球化学属性的壳幔过渡带岩浆体系。该岩浆体系在上升及喷发过程中产生共源岩浆的结晶分异和演化,从而形成比隆错新近系安粗岩-粗面岩岩石系列和组合。

5 关于岩石成因及其大陆动力学意义的讨论

以上研究结果表明,本区新近纪火山岩具有显著的地球化学特异性,乃是源自青藏高原特殊的壳幔过渡带局部熔融的产物。

青藏高原具有一个特殊的、最厚可达30 km的壳幔过渡带,这已成为一个不争的事实^[1-11]。邓万明等^[6-10]对藏北新生代

钾质火山岩和滇西富钾斑岩的地球化学及成因岩石学的研究,已经证实它们均来自壳幔过渡带的部分熔融。这与本文的研究结果相印证。

壳幔过渡带在高原隆升过程中具有重要的动力学意义,它为垂向增厚提供了重要的物质场所。地幔物质的底侵和壳幔过渡带的部分熔融、岩浆混合及其向中上地壳的进一步底侵,可以导致地壳在垂向上的大幅度增厚,进而诱发高原的隆升。因此,对青藏高原新生代火山岩中源自壳幔过渡带局部熔融、具有特殊地球化学属性的火山岩系列及组合的详细研究,将有助于反演青藏高原特殊的加厚陆壳下部及岩石圈地幔上部的物质组成和热状态,这对于进一步探讨青藏高原的隆升机理及其深部动力学过程具有重要的理论意义。

参考文献:

- [1] Holbrook W S, Mooney W D, Christensen N T. The seismic velocity structure of the deep continental crust[A]. In: Fountain D M et al, eds. Continental lower crust[C]. Amsterdam: Elsevier, 1992. 1-43.
- [2] Kind R, Yuan X, Saul J. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: evidence for Asian plate subduction[J]. Science, 2002, 298: 1219-1221.
- [3] 赵俊猛, 张先康, 赵国泽. 不同环境下的壳幔过渡带结构[J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 165-172.
- [4] 赖晓玲, 张先康, 方盛明. 青藏高原东北缘壳幔过渡带研究[J]. 地震学报, 2004, 26(2): 132-139.
- [5] Doin M P, Henry P. Subduction initiation and continental crust recycling: the roles of rheology and eclogitization [J]. Tectonophysics, 2001, 342: 163-191.
- [6] 邓万明, 钟大赉. 壳-幔过渡带及其在岩石圈构造演化中的地质意义[J]. 科学通报, 1997, 42(23): 2474-2482.
- [7] 邓万明, 黄萱, 钟大赉. 滇西新生代富碱斑岩的岩石特征与成因[J]. 地质科学, 1998, 33(4): 412-425.
- [8] 邓万明, 孙宏娟. 青藏高原新生代火山活动与高原隆升关系[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 952-958.
- [9] 邓万明, 孙宏娟, 张玉泉. 囊谦盆地新生代钾质火山岩成因岩石学研究[J]. 地质科学, 2001, 36(3): 304-318.
- [10] 肖庆辉. 当代地质科学前沿[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993. 7-16.
- [11] Meissner R. The Moho as the transition zone[J]. Geophys. Survays, 1973, 1: 195-216.
- [12] 邓万明. 青藏高原北部新生代板内火山岩[M]. 北京: 地质出版社, 1998. 1-168.
- [13] 邓万明. 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[J]. 地学前缘, 2003, 10(2): 471-478.
- [14] 肖序常, 李廷栋, 李光岑. 喜马拉雅岩石圈构造演化总论[M]. 北京: 地质出版社, 1988. 141-159.
- [15] 吴功建, 肖序常, 李廷栋. 青藏高原亚东-格尔木地学断面[J]. 地质学报, 1989, 63(4): 285-296.
- [16] 吕庆田, 姜枚, 高锐. 青藏高原莫霍面形态的重力模拟及其对探讨高原隆升机制的意义[J]. 地球学报, 1997, 18(1): 78-86.
- [17] Stern C R, Kilian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral volcanic zone[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1996, 123: 263-281.
- [18] Wilson M. Igneous petrogenesis[M]. London: Unwin Hyman Press, 1989. 295-323.
- [19] 王强, 许继峰, 赵振华. 一种新的火成岩——埃达克岩的研究综述[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 201-208.
- [20] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. Nature, 1990, 347: 662-665.
- [21] 赖绍聪. 青藏高原新生代埃达克质岩的厘定及其意义[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 407-415.
- [22] Lai Shaocong, Liu Chiyang, Yi Haisheng. Geochemistry and petrogenesis of Cenozoic andesite-dacite associations from the Hoh Xil Region, Tibetan Plateau[J]. International Geology Review, 2003, 45(11): 998-1019.
- [23] Lai Shaocong, Yi Haisheng, Lin Jinhui. Discovery of the granulite xenoliths in Cenozoic volcanic rocks from Hoh Xil, Tibetan plateau[J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(9): 712-715.
- [24] Allegre C J, Minster J F. Quantitative method of trace element behavior in magmatic processes[J]. Earth Planet Sci. Lett., 1978, 38: 1-25.
- [25] Patino Douce A E, McCarthy T C. Melting of crustal rocks during continental collision and subduction [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998. 27-55.
- [26] Yardley B W D, Valley J W. The petrologic case for a dry lower crust [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 12173-12185.