

文章编号: 1009-3850(2003)03-0001-11

青藏高原及邻区新生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素特征

朱弟成¹, 潘桂棠¹, 莫宣学², 段丽萍¹, 廖忠礼¹, 王立全¹

(1. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 笔者在综合分析最近十多年来的Sr、Nd、Pb同位素资料基础上, 重点研究了青藏高原及邻区新生代火山岩岩浆源区在时空上的变化规律。结果表明: ①冈底斯中段火山岩的岩浆源区逐渐从普通地幔向 EM II 方向演化; 西段晚期火山岩源区的演化方向为俯冲带壳幔混合源→造山带上地壳源→下地壳源。②西羌塘岩浆源区主要为不具富集或亏损的幔源物质; 囊谦盆地、大理海东火山岩源区较深, 为大洋型软流圈地幔+消减组分混合源; 藏北羊湖、雄鹰台-鲸鱼湖、西昆仑以及北羌塘巴毛穷宗火山岩的岩浆源区为 EM II; 鱼鳞山超钾质火山岩为经历了大陆地壳物质强烈交代作用的 EM II 型岩浆源区; 西秦岭火山岩源于亏损地幔, 腾冲新生代火山岩源区为受到地壳物质交代的 EM II。③西羌塘、可可西里、西昆仑和腾冲新生代火山岩具两种演化趋势——鱼鳞山、普鲁、雄鹰台-鲸鱼湖岩区和腾冲火山群向 EM II 方向演化, 而泉水沟、黑石北湖、阿什库勒则分别沿O_{Ma}的地幔-上地壳混合线方向演化。④青藏高原及邻区新生代火山岩至少存在 4 种不同的岩浆源区。

关键词: 多元同位素示踪; 岩浆源区; 演化趋势; 新生代火山岩; 青藏高原及邻区

中图分类号: P597.3

文献标识码: A

利用火山岩的 Sr、Nd、Pb 同位素组成来研究火山作用的源区特征和深部过程是现代成因岩石学研究的重要手段, 可为源区部分熔融以及浅部岩浆房中的分离结晶、同化混染作用提供大量信息, 因而在岩石学成因研究中得到了广泛应用。

青藏高原东邻稳定的扬子克拉通, 北接塔里木盆地, 西与柴达木盆地相连。自印度大陆持续向北漂移俯冲直至与欧亚大陆发生碰撞以来, 在这些接触部位发生了非常强烈的火山活动, 沿冈底斯带、羌塘地区、昆仑山、可可西里以及三江-滇西等地分布了非常广泛的新生代火山岩(图 1)。构造底图据潘桂棠等^[1, 2]; 西昆仑地区资料据迟效国等, 1999; 冈底斯地区资料据张双全, 1996; 90°E以东可可西里地区资料据郑祥身等, 1996; 90°E以西可可西里地区资

料据邓万明等, 1996; 北羌塘地区资料据赖绍聪等^[3], 囊谦盆地火山岩资料据邓万明等, 1999; 贡觉、芒康资料据吕伯西, 1995; 八宿地区资料据向天秀等, 1987; 剑川-鹤庆火山岩资料据钱祥贵, 1999; 洱海东部火山岩资料据谢应雯等, 1995; 腾冲火山岩区资料据李大明等, 2000)。

以邓万明为主的一批地质工作者先后对青藏高原北部的新生代火山岩进行了系统研究和归纳。这些研究在探讨藏北岩石圈深部过程、演变历史及高原隆升机制等方面具有重要的理论和实际意义。然而目前仍缺乏从整个青藏高原及邻区的角度, 对印度大陆与欧亚大陆碰撞以来的火山活动进行归纳和总结。

笔者利用最近十多年来发表的Sr、Nd、Pb同位

收稿日期: 2003-07-14

资助项目: 973 项目“印度与亚洲大陆主碰撞成矿带作用”(2002CB412600)下属课题“成功潜力评估与战略新区预测”; 中国地质调查局青藏高原地质研究综合项目“青藏高原地质构造及资源环境效应研究”(200113900069); “青藏高原南部空白区基础地质调查与研究”实施项目(1212010310102)资助。

第一作者简介: 朱弟成, 1972年生, 博士, 研究方向为构造地质学与地球动力学。

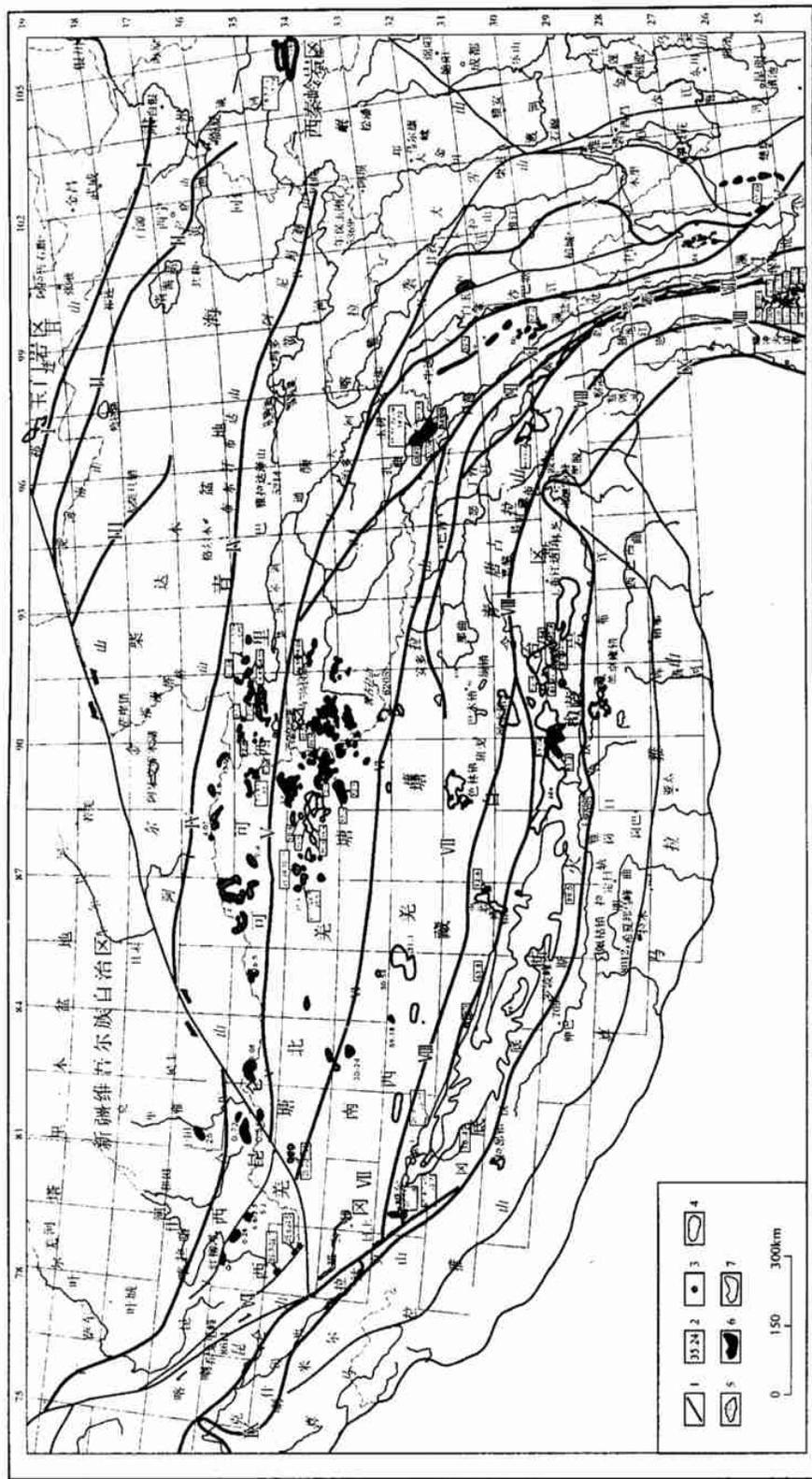


图1 青藏高原及邻区新生代火山岩分布图

1. 断层; 2. 同位素年龄 (Ma); 3. 采样点; 4. 中-高钾钙碱性系列; 5. 橄榄粗玄岩系列; 6. 碱性超基性火山岩; 7. 野马山-木里-拉脊山缝合带; Ⅲ. 赛什腾山-瓦洪山缝合带; Ⅳ. 奥依塔格-库地-昆仑南缘缝合带; Ⅴ. 可可西里-金沙江-哀牢山缝合带; Ⅵ. 红其拉浦-茶桑-茶布-昌宁缝合带; Ⅶ. 班公湖-怒江缝合带; Ⅷ. 狮泉河-申孔-嘉黎缝合带; Ⅷ. 印度河-雅鲁藏布江缝合带; Ⅸ. 耿武-甘孜-理塘缝合带; Ⅹ. 北澜沧江缝合带

Fig. 1 Distribution of the Cenozoic volcanic rocks from the Qinghai-Xizang Plateau and its adjacent areas

1 = fault; 2 = isotopic age (Ma); 3 = sampling site; 4 = intermediate- to high-potassic calc-alkaline series; 5 = shoshonite series; 6 = high-potassic calc-alkaline series and shoshonite series; 7 = alkaline ultrabasic volcanic rocks. I = North Qilian suture zone; II = Yemashan-Muli-Lajishan suture zone; III = Serteng-Wahongshan suture zone; IV = Oytog-Kuda-south-ern Kunlun suture zone; V = Hoh Xil-Jinshajiang-Ailaoashan suture zone; VI = Kunjirap-Chasang-Chabu-Changning suture zone; VII = Bangong-Nujiang suture zone; VIII = Shiquanhe-Xainza-Lhari suture zone; IX = Indus-Yarlung Zangbo suture zone; X = Xiwu-Garze-Litang suture zone; XI = North Lancangjiang suture zone

素资料^[1~24],结合年代学研究成果,对青藏高原及邻区自印度-欧亚大陆碰撞以来火山作用的源区特征和时空变异规律进行初步探讨和归纳。

1 新生代火山岩的基本特征

1.1 构造划分

从青藏高原及邻区的地质结构考虑,由北到南,北祁连缝合带(I)、奥依塔格-库地-昆仑南缘缝合带(IV)、可可西里-金沙江-哀牢山缝合带(V)、班公湖怒江缝合带(VII)、印度河-雅鲁藏布江缝合带(IX)将青藏高原及邻区分成塔里木地块、昆仑地块、巴颜喀拉地块、羌塘地块、拉萨地块和喜马拉雅地块^[23],与此相对应,位于这些地块边缘的新生代火山岩也依次分为玉门岩区、昆仑岩区、可可西里岩带、羌塘岩带和冈底斯岩带(图1)。

1.2 新生代火山岩的年代学特征

为了探讨青藏高原新生代火山活动的年龄约束,笔者综合分析了最近十多年来公开发表的200多个年代学数据,对火山活动的峰期和时空变化规律有了初步了解(受篇幅所限,这里只给出主要结果)。

1. 火山活动的峰期

青藏高原火山活动峰期具有如下特点(图2):

(1)冈底斯新生代火山岩的年龄主要集中分布于55~50Ma和17.5~10Ma两个区间,分属古新世末(塔内提期)—始新世最早期(伊普雷斯期)和中新世中期(波尔多期—塞拉瓦尔期,即 $N_1^3-N_1^4$)。前者是整个冈底斯带火山活动的高峰时期,高峰期持续时间较短,不到5Ma,沿整个冈底斯带均有活动;后者高峰活动时间持续较长,达8Ma左右,沿冈底斯带零星断续分布。

(2)西羌塘年龄数据较少,但也可以看出火山活动主要集中在45Ma左右(即始新世早期),与冈底斯带的峰期火山活动相比略显滞后。

(3)南羌塘火山岩年龄数据则主要集中在30~28Ma,即南羌塘的火山活动在渐新世(鲁珀利期)达到顶峰,明显不同于冈底斯的峰期活动。

(4)北羌塘火山岩年龄数据主要分布在45~35Ma,表明北羌塘在始新世中晚期(卢台特期—普里阿帮期,即 $E_2^2-E_2^4$)火山活动也达到了顶峰。

(5)西昆仑火山岩年龄数据集中分布在1~0Ma,说明第四纪该区火山活动最为强烈,直到近代还有火山事件发生。

(6)可可西里火山岩年龄数据集中分布在15~10Ma,说明在中新世($N_1^3-N_1^4$)火山活动达到顶峰,

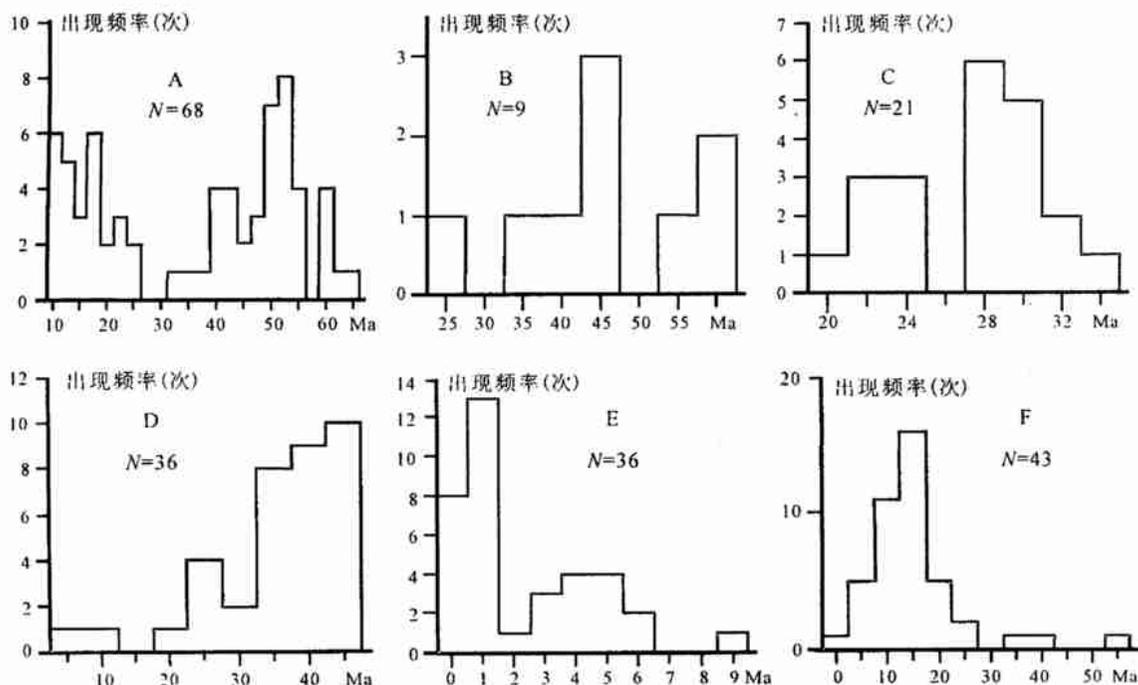


图2 青藏高原新生代火山岩年龄分布频率图(图中 N 代表样品数)

A. 冈底斯; B. 西羌塘; C. 南羌塘; D. 北羌塘; E. 西昆仑; F. 可可西里

Fig. 2 Frequency distribution of the ages of the Cenozoic volcanic rocks on the Qinghai-Xizang Plateau (N = sample number)

A=Gangdise; B= western Qiangtang; C= southern Qiangtang; D= northern Qiangtang; E= western Kunlun; F= Hoh Xil

该峰期年龄与冈底斯同阶段的峰期年龄一致。

2. 火山活动的时空变化

从已经获得的年龄数据看,在冈底斯火山岩带,从藏东八宿→中段拉萨附近→西段狮多,新生代早期火山活动的同位素年龄是基本一致的。而中新世中期可能与高原的隆升及地壳加厚有联系的火山活动则表现出一定差异,虽然冈底斯带的不同部位在中中新世时都发生了火山活动,但冈底斯西段的火山活动要早于中段,分别为20.14Ma和13~9Ma(表1),中段比西段要滞后近10Ma。

表1 冈底斯火山岩年龄在空间上的变化

Table 1 Spatial variations in the ages of the Gangdise volcanic rocks

火山岩产地	样品数	测试方法	年龄/Ma	来源
羊八井	6	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	15.8~10.1(12.65)	[7]
麻江西南	2	Rb-Sr	13.7~11.8(12.75)	
当雄羊应乡	3	K-Ar	11.53~9.05	[22]
南木林索青乡	1	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	11.20	[8]
亚热东	3	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	18.5~15.5(17.43)	[9]
雄巴	4	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	23.0~18.1(21.23)	
邦巴	2	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	25.4~23.3(24.35)	*
	2	K-Ar	23.1~19.0(21.05)	
狮泉河	3	K-Ar	20.0~16.0(18.00)	[10]

*1:20万《噶大克幅》、《谢通门南林林幅》;括号内数据为平均值

从南到北,青藏高原及邻区新生代火山活动出现由老到新的变化趋势。北羌塘从东向西,火山活动时代逐渐变新;且至少可以分为三期:始新世中晚期(40~35Ma)、渐新世晚期(25Ma左右)、中新世中晚期(10Ma左右),火山峰期活动的时间间隔在10Ma左右,其强度从早到晚逐渐减弱。在可可西里地区的火山活动具有东西两端老而中部新的特点。西昆仑地区的火山活动时代新,主要发生于第四纪(1~0Ma)。

1.3 新生代火山岩的岩石系列

(1)冈底斯火山岩。其位于拉萨地体南部,狭义的冈底斯中酸性侵入岩带的北侧。火山岩呈近东西向展布,东起八宿,向西通过拉萨、申扎、措勤,直至狮泉河。火山活动主要集中在古新世末—始新世最早期(55~50Ma)和中新世中期(17.5~10Ma),前者为玄武岩-(粗面)安山岩-粗面岩-英安岩-流纹岩组合,属中钾-高钾钙碱性系列,后者为(粗面)安山岩-粗面岩-流纹岩,属橄榄粗玄岩系列。

(2)西羌塘火山岩。其主要分布在通天桥、红山湖和邦达错等地,主要为钠质基性火山岩,岩石组合

为粗面玄武岩-(粗面)安山岩,属中钾、高钾钙碱性系列和橄榄粗玄岩系列。

(3)南羌塘火山岩。其主要分布在鱼鳞山、纳丁错、拉嘎拉、走构油茶沟、康托等地。岩石组合极为复杂,鱼鳞山主要由白榴斑岩、响岩、霓石粗面岩、霓霞粗面岩、黝方石粗面岩等组成,纳丁错岩区主要为安山岩、玄武岩、安粗岩、流纹岩、英安岩以及火山碎屑岩,拉嘎拉主要为含橄榄石斑晶的玄武岩,走构油茶沟主要为高钾钙碱性安山岩-粗安岩。

(4)北羌塘火山岩。其主要分布在巴毛穷宗、多格错仁、太平湖-波涛湖、乱青山、永波湖和枕头崖等地,岩石组合有碧玄岩-碱玄岩-响岩、安山岩-粗面岩-英安岩-流纹岩,主要属高钾钙碱性系列和橄榄粗玄岩系列。

(5)西昆仑火山岩。其主要分布在康西瓦、大红柳滩、泉水沟、普鲁、阿什库勒、阿塔木帕下以及黑石北湖等地,岩石组合为玄武质粗面安山岩-粗面安山岩-粗面岩-流纹岩,部分为碱玄岩-响岩组合,属高钾钙碱性系列和橄榄粗玄岩系列。

(6)沿昆仑山南缘和可可西里分布了大量火山岩,主要包括羊湖、强巴欠、涌波错、木孜塔格、鲸鱼湖-雄鹰台、向阳湖、黑驼峰、五雪峰、可考湖及大帽山等,岩石组合为粗面安山岩-粗面岩-流纹岩,鲸鱼湖出现了响岩质碱玄岩,主要属橄榄粗玄岩系列。

(7)玉门火山岩。该岩区地处北西西向的祁连山构造带与北东东向的阿尔金构造带的交汇部位^[19],属青藏高原的北部边缘,主要由红柳峡和早峡两地的新生代晚期火山岩体所组成,岩石组合主要由碱玄岩和粗玄岩组成,属橄榄粗玄岩系列。

(8)西秦岭火山岩。其分布于甘肃省礼县、宕昌、西和等地,为一种含地幔岩包体和巨晶的碱性超基性火山岩。岩石类型有熔岩、角砾熔岩、球状火山集块岩、火山砾岩、脉岩和次火山岩等;岩石组合为似长石-苦橄质玄武岩-碱玄岩组合,属碱性系列。

(9)在西藏东部,沿北澜沧江、金沙江-哀牢山、红河走滑断裂系分布有大量的碱性、偏碱性火山岩,规模巨大,构成了北起青海,中经藏东、川西、滇西,南止于越南北部的火山岩带,绵延1800km。三江-滇西北段主要是粗面安山岩-粗面岩组合,个别为响岩质组合,属碱性系列橄榄粗玄岩系列;中段主要是玄武质粗面安山岩-粗面安山岩-粗面岩组合和安山岩-英安岩-流纹岩组合,属高钾、橄榄粗玄岩系列;南段岩石组合复杂,出现了响岩质组合,主要属橄榄粗玄岩系列。

(10)腾冲火山岩。该岩群主要分布于龙川江与槟榔江之间的近南北向地带内,岩石组合为(粗面)玄武岩-(粗面)安山岩-粗面岩-英安岩,主要属高钾钙碱性系列。

2 Sr、Nd、Pb 同位素组成及时空变化

为了表示源区特征随时间的演化,笔者结合不同地质体的同位素年龄进行讨论^[1~21],表2列出了部分新生代火山岩的同位素地球化学数据。

冈底斯中段早期安山岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb值略大于流纹质熔结凝灰岩,铅同位素值均低于晚期麻江和南木林索青乡,后两者的同位素值非常接近,表明火山岩向同位素值增高的方向演化。在冈底斯西段,Sr同位素值在0.71481~0.73841之间,平均0.722854,²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb为39.1361~39.7556(平均39.53),大大高于

冈底斯中段早晚期火山岩的同位素值,也明显有别于亏损地幔(DMM)、I型富集地幔(EM I)和HIMU,可能与II型富集地幔(EM II)有关。另外,麻江地区的 ϵ Nd(t)变化范围较大,在-3.28~+1.4之间,具有弱亏损地幔源区和弱富集地幔源区或壳源区双重属性^[24]。典中-马区的 ϵ Nd(t)介于+1.12~+9.24之间,平均为+3.83,主要显示了亏损地幔源区的特征。西段 ϵ Nd(t)在-14.5~-11.08之间,平均为-13.105,明显具富集地幔源区特征。由此可见,在冈底斯火山岩带,岩浆源区从早到晚有逐渐富集的趋势。

西羌塘红山湖岩区除Sr同位素外,Nd、Pb同位素值都低于通天桥和邦达错岩区,暗示红山湖岩浆源区复杂,西羌塘岩省的 ϵ Nd(t)在-0.8~+0.8之间,接近于0,表明其岩浆源区具原始地幔特征。南羌塘拉嘎拉钠质碱性橄榄玄武岩的Sr、Pb同位素

表2 青藏高原及邻区新生代火山岩同位素组成

Table 2 Isotopic compositions for the Cenozoic volcanic rocks from the Qinghai Xizang Plateau and its adjacent areas

编号	岩带	产地	样数	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	资料来源
1	冈底斯	拉萨附近	4	0.706028	0.512633	18.599750	15.620750	38.845500	[9]
2		南木林索青乡	5	0.706563	0.512550	18.532000	15.565200	38.854600	[10]
3		西段超钾火山岩	4	0.720163	0.511930	18.536150	15.708600	39.578450	[11]
4		西段钾质火山岩	2	0.735925	0.511915	18.693000	15.717000	39.309100	
5		狮泉河	2	0.715165	0.512050	18.707000	15.775000	39.654000	[12]
6		典中-马区流纹质熔结凝灰岩	2	0.707729	0.512793	18.144350	15.532550	38.246800	*
7		典中-马区安山岩	3	0.705727	0.512811	17.243200	15.462967	37.690667	
8	西羌塘	通天桥	2	0.706205	0.512600	17.957000	15.478000	38.032000	[4, 5]
9		红山湖	2	0.708715	0.512438	16.901000	15.301000	36.768500	
10		邦达错	2	0.705065	0.512656	18.228500	15.373000	38.415500	
11	南羌塘	拉嘎拉	2	0.705995	0.512450	18.850500	15.580500	38.926500	[13]
12		鱼鳞山	19	0.709033	0.512213	18.986217	15.715822	39.373909	
13	可可西里	羊湖	2	0.708440	0.512286	18.691000	15.696500	39.092000	[4, 5]
14		雄鹰台-鲸鱼湖	8	0.708846	0.512301	18.738250	15.695500	39.177375	[3, 14]
15	西昆仑	黑石北湖	2	0.708370	0.512301	18.712500	15.670500	39.492000	[4, 5]
16		普鲁	7	0.708775	0.512271	18.646857	15.635571	38.725571	[4, 16]
17		阿什库勒	1	0.710340	0.512263	18.834000	15.689000	39.190000	[4, 5]
18		泉水沟	8	0.708111	0.512347	18.727250	15.691500	39.117375	[12]
19		泉水沟	1	0.713700	0.512353	18.887000	15.674000	39.013000	
20	三江-滇西	囊谦盆地	15	0.705395	0.512568	18.846933	15.575200	38.712133	[7]
21		大理海东	9	0.706530	0.512455	18.619667	15.562444	38.559667	[18]

注: *引自张双全, 1996, 中国地质大学(北京), 博士论文

值均低于鱼鳞山超钾质火山岩, 随时间演化, Sr、Pb同位素值表现出逐渐增大的特点。并且鱼鳞山的各种同位素值与EM II非常接近, 暗示其岩浆源区可能与EM II有关。

可可西里从羊湖→雄鹰台-鲸鱼湖, Sr同位素值增加。Nd、Pb同位素值也表现出相似的特点。羊湖两个样品的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 分别为-6.14、-7.6, 平均-6.87, 雄鹰台-鲸鱼湖 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 范围在-7.71~-5.7, 平均值为-6.584, 略高于羊湖, 但均表现出富集地幔源区的特点。

西昆仑岩省同位素值大, 整个西昆仑岩区Nd、Pb同位素值的分布都非常集中, 反映它们具有统一的岩浆源区, 个别样品表现出的差异可能暗示岩浆上升过程中受到了地壳物质的混染。西昆仑岩区 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 范围在-8.4~-4.7987, 平均为-6.37146, 与可可西里接近, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 的这种特征表明其岩浆可能源于富集地幔。考虑到西昆仑岩省、可可西里火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 都大于0.7065, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 接近0.5125, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别接近19.0、15.7和39.5的特征, 可以初步推论西昆仑-可可西里火山岩带的岩浆源区与EM II有关。

青海囊谦盆地(34.32Ma)和大理海东(34Ma)火山岩的Sr、Nd、Pb同位素组成非常相似, 并且囊谦盆地的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(范围在-3.2~-0.6之间, 平均为-1.38625)与大理海东(-6.34~0之间, 平均-3.64125)接近, 都表现出弱富集地幔岩浆源区的特征, 这些现象表明三江-滇西地区始新世中晚期的火山活动具有相似的岩浆源区。

腾冲新生代火山岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为0.705775~0.714372, 平均0.707988; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 范围为0.511936~0.512604之间, 平均为0.512318, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为-12.3~+0.7, 平均-4.8; Pb同位素变化不大, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为17.895~18.394(平均18.118)、15.612~15.735(平均15.668)和38.809~39.439(平均39.136), 与西昆仑-可可西里相似, 主要表现出II型富集地幔的特征^[19]。

西秦岭岩区 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在0.70412~0.70525之间(平均0.70442), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为0.512768~0.512911(平均0.512818), $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为1.8209~2.1002(平均1.918567), 暗示其岩浆源区为亏损地幔^[20]。

3 二元同位素体系示踪及时空变化

在同位素地球化学研究中, 两种同位素结合使

用, 能直观地表达岩石成因的大量信息, 二元同位素体系在示踪岩浆源区、反映成岩过程、揭示壳-幔相互作用的信息等方面, 得到了广泛运用^[1~18, 25~28]。

3.1 Sr-Nd同位素体系

在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图中(图3), 冈底斯新生代火山岩具有如下特征: 中段早期火山岩(典中-马区安山岩、流纹质熔结凝灰岩)位于地幔趋势线附近, 晚期南木林索青乡火山岩和麻江火山岩位于全硅酸盐地球区(BSE区)附近, 从典中-马区的安山岩(63.32Ma)→流纹质熔结凝灰岩(38.7Ma左右)^[29]→麻江火山岩(14.37Ma)^[9]→南木林索青乡粗面岩(大约11Ma)^[10], 岩浆源区逐渐从普通地幔(PRE-MA)向EM II方向演化。西段从雄巴-邦巴钾质火山岩(25~23Ma)→雄巴-亚热东超钾质火山岩(23~18Ma)^[11]→狮泉河高钾火山岩(18~16Ma)^[12]→西段钙碱性火山岩(17Ma)^[11], 据再循环模式计算出的壳幔同位素组成范围^[23], 其岩浆源区从俯冲带壳幔混合源→造山带上地壳源→下地壳源方向演化。在同位素组成上, 沿此演化方向, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、

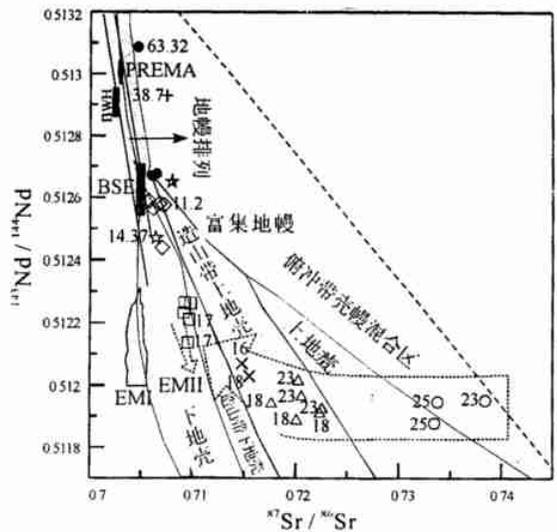


图3 冈底斯新生代火山岩Sr-Nd同位素相关图

☆麻江; ◇南木林索青乡; △西段超钾质火山岩; ○西段钾质火山岩; □西段钙碱性火山岩; ×狮泉河; +典中-马区流纹质熔结凝灰岩; ●典中-马区安山岩。符号中数字为同位素年龄(Ma)

Fig. 3 Sr-Nd isotopic correlation for the Gangdise Cenozoic volcanic rocks

☆ Majiang; ◇ Suoqingxiang in Nanmulin; △ ultrapotassic volcanic rocks in western part; ○ potassic volcanic rocks in western part; □ calc-alkaline volcanic rocks in western part; × Shiquanhe; + Dianzhong-Maqu rhyolitic ignimbrite; ● Dianzhong-Maqu andesite. The figures in the symbols represent isotopic ages (Ma)

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值逐渐降低(图3,表2)。众所周知,大陆上部地壳具有高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值和相对低的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值($\epsilon\text{Nd}(t) < 0$),同时还具有高的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 同位素比值。同位素地质学家普遍认为,具有高放射成因Sr和低非放射成因Nd特点的EM II型富集地幔可能是上地幔与沿古俯冲带被带入地幔楔的壳源物质、大洋沉积物发生了混合交代作用的产物。因此冈底斯西段火山岩的Sr、Pb同位素从雄巴-邦巴钾质到钙碱性火山岩方向逐渐降低的事实意味着岩浆源区壳源物质组分的减弱、岩浆房深度是逐渐变深的。据研究^[9],西段晚期超钾质火山岩中含地幔捕虏晶(橄榄石+金红石/镁钛铁矿),这表明西段晚期火山岩的岩浆源区变深了,明显具幔源特征。

在图4中,西秦岭岩区位于普通地幔(PREMA)和全硅酸盐地球(BSE)区之间,与广西三水盆地相似,属于亏损地幔端员。西羌塘、可可西里、西昆仑和腾冲新生代火山岩接近于II型富集地幔源区(EM II),囊谦盆地和大理海东火山岩位于西秦岭岩区和西羌塘、西昆仑-可可西里火山岩之间,不同的是前者更接近全硅酸盐地球区(BSE),后者更接近藏北火山岩区。按照Norman等(1989)同位素组成范围^[27],囊谦盆地和大理海东火山岩岩浆源区为大洋型软流圈地幔+消减组分混合源区,表明火山岩的源区较深。

值得指出的是,西羌塘、可可西里、西昆仑和腾冲新生代火山岩明显表现出了两种演化趋势(图4):鱼鳞山、普鲁、雄鹰台-鲸鱼湖岩区和腾冲火山群向EM II型方向演化,岩浆源区属上地壳物质再循环富集地幔;而泉水沟(6.4~3.6Ma)、黑石北湖(9.23~1.43Ma)、阿什库勒(1.65~0.31Ma)则分别沿OMa的地幔-上地壳混合线方向演化^[26],暗示岩浆源区壳源组分的增加。

3.2 铅同位素体系

在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上(图5,底图数据转引自Rollison^[25](上)和Norman^[27](下)),冈底斯中段早期流纹质熔结凝灰岩位于PREMA附近,马区安山岩位于下部陆壳并接近于EM I区,表明岩浆源区可能为受到软流圈流体作用的交代地幔;晚期火山岩位于软流圈地幔+消减组分,意味着岩浆源区很深;西段晚期火山岩则位于EM II区和陆下岩石圈地幔+下地壳区,说明岩浆源区较浅,而在Pb同位素演化线上,西段晚

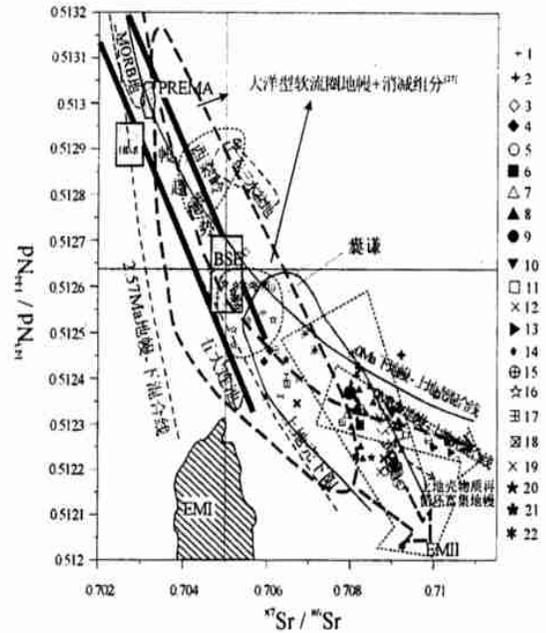


图4 青藏高原及邻区新生代火山岩 Sr-Nd 同位素相关图
1. 通天桥; 2. 红山湖; 3. 邦达错; 4. 拉嘎拉; 5. 鱼鳞山; 6. 巴毛穷宗; 7. 羊湖; 8. 雄鹰台-鲸鱼湖; 9. 可考湖东; 10. 向阳湖; 11. 黑石北湖; 12. 普鲁; 13. 阿什库勒; 14. 泉水沟; 15. 康西瓦; 16. 囊谦盆地; 17. 大理海东; 18. 西秦岭; 19. 腾冲 Q₄; 20. 腾冲 Q₃; 21. 腾冲 Q₁; 22. 腾冲 N₂

Fig. 4 Sr-Nd isotopic correlation for the Cenozoic volcanic rocks from the Qinghai-Xizang Plateau and its adjacent areas

1 = Tongtianqiao; 2 = Hongshanhu; 3 = Bamdaco; 4 = Lakala; 5 = Yulinshan; 6 = Bamaoqiongzong; 7 = Yanghu; 8 = Xiongyingtai-Jingyuhu; 9 = eastern Kekaohu; 10 = Xiangyanghu; 11 = Heishi-beihu; 12 = Pulu; 13 = Ashikule; 14 = Quanshuigou; 15 = Kangxiwa; 16 = Nangqian Basin; 17 = Haidong in Dali; 18 = western Qinling; 19 = Tengchong Q₄; 20 = Tengchong Q₃; 21 = Tengchong Q₁; 22 = Tengchong N₂

期部分样品位于上部陆壳演化线(A)之上或附近,暗示其岩浆源区具有壳源成分。同时冈底斯晚期(包括中段南木林索青乡、西段雄巴、邦巴等地)火山岩表现出线性排列的趋势也证实岩浆源区受到了地壳物质的混染。

西羌塘情况比较复杂,在亏损地幔(DMM)、MORB区均有分布,Pb同位素演化线上位于地幔线附近,没有明显的亏损和富集现象,主要反映地幔岩石对其岩浆成分的影响。拉嘎拉钠质碱性橄榄玄武岩(59.18Ma)^[11]位于软流圈地幔+消减组分,鱼鳞山超钾质火山岩(30~18Ma)^[30]主要位于EM II

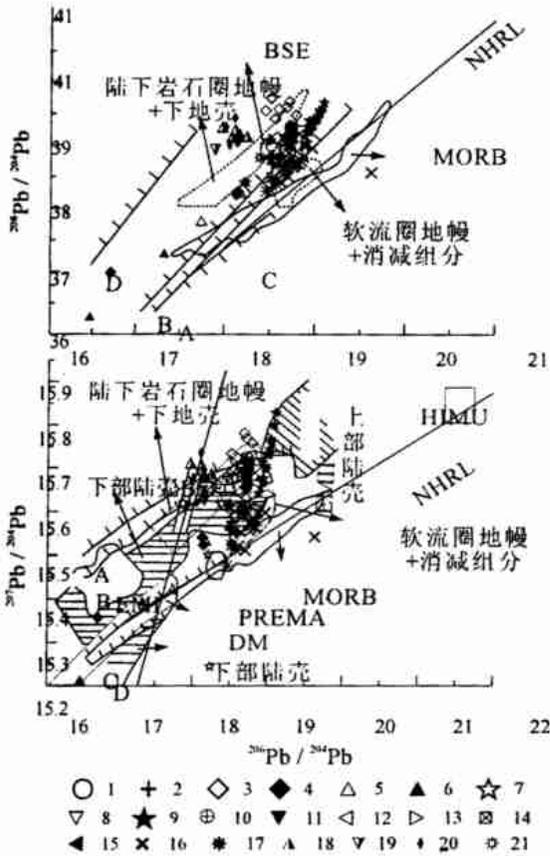


图5 青藏高原及邻区新生代火山岩 Pb 同位素图

1. 麻江; 2. 南木林索青乡; 3. 冈底斯西段晚期; 4. 典中-马区; 5. 通天桥; 6. 红山湖; 7. 邦达错; 8. 拉嘎拉; 9. 鱼鳞山; 10. 巴毛穷东; 11. 羊湖; 12. 雄鹰台-鲸鱼湖; 13. 普鲁; 14. 阿什库勒; 15. 泉水沟; 16. 囊谦盆地; 17. 大理海东; 18. 腾冲 Q₄; 19. 腾冲 Q₃; 20. 腾冲 Q₁; 21. 腾冲 N₂. DM. 亏损地幔; BSE. 全硅酸盐地球; EM I. 富集 I 型地幔; EM II. 富集 II 型地幔; PREMA. 普通地幔; HIMU. 高 U/Pb 比值地幔; NHRL. 北半球参照线. A. 上地壳; B. 造山带; C. 地幔; D. 下地壳

Fig. 5 Pb isotopic diagram for the Cenozoic volcanic rocks from the Qinghai-Xizang Plateau and its adjacent areas

1= Majiang; 2= Suoqingxiang in Namulin; 3= western Gangdise; 4= Dianzhong-Maqu; 5= Tongtianqiao; 6= Hongshanhu; 7= Bamdaco; 8= Lakala; 9= Yulinshan; 10= Bamaoqiongzong; 11= Yanghu; 12= Xiongyingtai-Jingyuhu; 13= Pulu; 14= Ashikule; 15= Quanshuigou; 16= Nangqian Basin; 17= Haidong in Dali; 18= Tengchong Q₄; 19= Tengchong Q₃; 20= Tengchong Q₁; 21= Tengchong N₂. DM= depleted mantle; DSE= total silicate earth; EM I= enrichment I-type mantle; EM II= enrichment II-type mantle; PREMA= general mantle; HIMU= high U/Pb mantle; NHRL= northern hemisphere reference line. A= upper crust; B= orogenic zone; C= mantle; D= lower crust

区, 部分位于上部陆壳区, 反映随火山活动进程岩浆源区逐渐变浅, 陆壳物质对岩浆源区成分的影响增强; 同时鱼鳞山火山岩还很好地构成一条直线, 与地球等时线平行, 反映岩浆源区经历了强烈的交代作用的影响。北羌塘巴毛穷宗火山岩分布在 EM II 区。可可西里羊湖、雄鹰台-鲸鱼湖火山岩全部位于 EM II 区和陆下岩石圈地幔+下地壳区, 主要反映了深部地幔物质对其岩浆源区成分的影响。西昆仑泉水沟、阿什库勒、普鲁全部位于 EM II 区并靠近陆下岩石圈地幔+下地壳区, 反映岩浆源区深度较大, 再循环壳源物质的影响较弱。

青海囊谦盆地火山岩位于软流圈地幔+消减组分区, 个别样品位于北半球参照线之下, 并且火山岩落点表现出线性排列的趋势, 反映岩浆源区受到交代作用的影响。

大理海东表现情况与囊谦盆地极为相似, 位于软流圈地幔+消减组分区, 并表现出线性排列的趋势, 同样揭示其岩浆源区受到交代作用的影响。

腾冲新生代火山岩位于陆下岩石圈地幔+下部陆壳区, 分布并不具明显的线性趋势, 表明岩浆源区受地壳物质的影响较弱。

3.3 Pb-Nd、Pb-Sr 同位素体系

在²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 图上(图 6), 冈底斯中段早期火山岩位于几个地幔端员之间, 源区地壳物质的混染不是很强烈; 与中段相比, 西段晚期火山岩接近 EM II 区, 反映了俯冲和再循环的陆壳物质对其岩浆源区的影响。

西羌塘火山岩分布在几个地幔端员之间, 暗示其源区具未分异的地幔源性质, 鱼鳞山、羊湖、普鲁、泉水沟、阿什库勒、雄鹰台-鲸鱼湖均位于 EM II 附近, 表明其岩浆源区为被大洋沉积物和陆壳物质强烈混合的富集源区。

囊谦盆地火山岩位于 EM II 上方, 靠近 εNd(t)=0, 揭示其岩浆源区的富集程度较低。大理海东与囊谦盆地相似。

运用²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 图解也可以得到上述结论。

3.4 多元同位素示踪及时空变化

为了避免低维处理带来的片面性, 笔者对火山岩的⁸⁶Sr/⁸⁷Sr、¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd、²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 同位素组成进行了如下处理: 首先对其进行因子分析, 发现只取两个主因子(F₁、F₂)就可以很好地反映出样品的内在联系(累积百分率为 89.47%), 然后再以 F₁、F₂ 的因子得分为坐标作

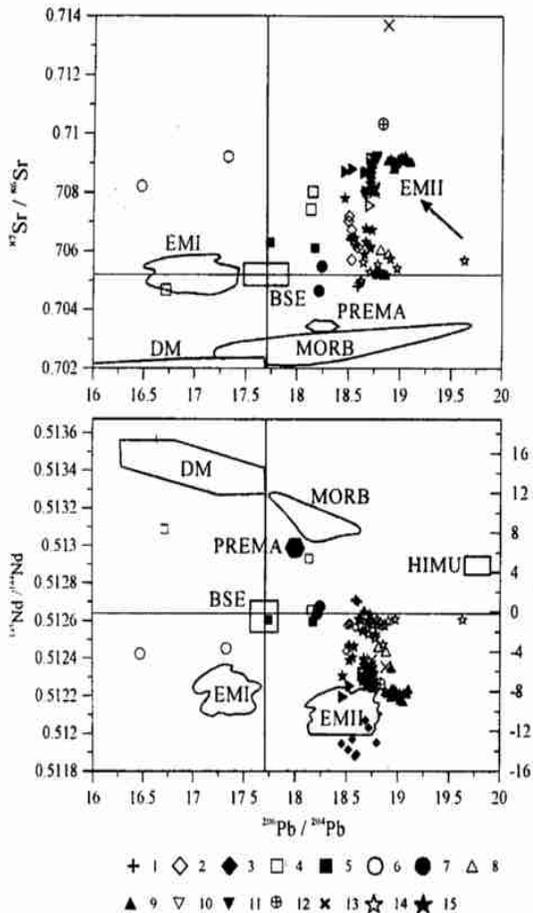


图 6 青藏高原及邻区 Pb-Nd, Pb-Sr 同位素相关图

1. 麻江; 2. 南木林索青乡; 3. 冈底斯西段晚期; 4. 典中-马区; 5. 通天桥; 6. 红山湖; 7. 邦达错; 8. 拉嘎拉; 9. 鱼鳞山; 10. 羊湖; 11. 雄鹰台-鲸鱼湖; 12. 阿什库勒; 13. 泉水沟; 14. 囊谦盆地; 15. 大理海东。DM. 亏损地幔; BSE. 全硅酸盐地球; EM I . 富集 I 型地幔; EM II . 富集 II 型地幔; PREMA. 普通地幔; NHRL. 高 U/Pb 比值地幔

Fig. 6 Pb-Nd and Pb-Sr isotopic correlation for the Cenozoic volcanic rocks from the Qinghai-Xizang Plateau and its adjacent areas

1= Majiang; 2= Suoqingxiang in Namulin; 3= western Gangdise; 4= Dianzhong-Maqu; 5= Tongtianqiao; 6= Hongshanhu; 7= Bamdaco; 8= Lakala; 9= Yulinshan; 10= Yanghu; 11= Xiongyingtai-Jingyuhu; 12= Ashikule; 13= Quanshuigou; 14= Nangqian Basin; 15= Haidong in Dali. DM= depleted mantle; DSE= total silicate earth; EM I = enrichment I -type mantle; EM II= enrichment II-type mantle; PREMA= normal mantle; HIMU= high U/Pb mantle

第一类由冈底斯中段早期的典中-马区、西羌塘通天桥、红山湖、邦达错等地的火山岩组成(图 7 中 A 区), 代表岩浆源区具有未分异的地幔源性质。

第二类由囊谦盆地、大理海东、拉嘎拉、冈底斯中段晚期的南木林索青乡和麻江火山岩组成(图 7 中 B 区), 代表了大洋型软流圈地幔+消减组分混合的岩浆源区。

第三类由藏北西昆仑、可可西里及南羌塘火山岩组成(图 7 中 C 区), 代表的岩浆源区为 EM II 型富

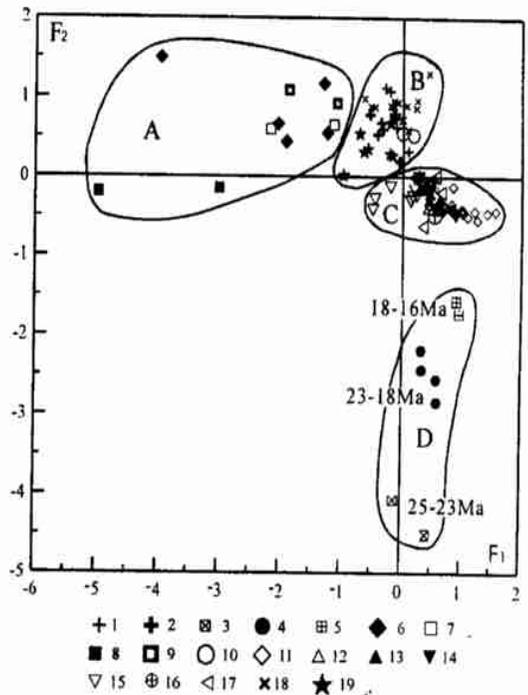


图 7 青藏高原及邻区新生代火山岩 Sr, Nd, Pb 同位素因子得分图解

1. 麻江; 2. 南木林索青乡; 3. 西段晚期钾质火山岩; 4. 西段晚期超钾火山岩; 5. 狮泉河高钾火山岩; 6. 典中-马区; 7. 通天桥; 8. 红山湖; 9. 邦达错; 10. 拉嘎拉; 11. 鱼鳞山; 12. 羊湖; 13. 雄鹰台-鲸鱼湖; 14. 黑石北湖; 15. 普鲁; 16. 阿什库勒; 17. 泉水沟; 18. 囊谦盆地; 19. 大理海东;

Fig. 7 Sr, Nd and Pb isotopic factor scores for the Cenozoic volcanic rocks from the Qinghai-Xizang Plateau and its adjacent areas

1= Majiang; 2= Suoqingxiang in Namulin; 3= potassic volcanic rocks in western part; 4= ultrapotassic volcanic rocks in western part; 5= Shiquanhe high potassic volcanic rocks; 6= Dianzhong-Maqu; 7= Tongtianqiao; 8= Hongshanhu; 9= Bamdaco; 10= Lakala; 11= Yulinshan; 12= Yanghu; 13= Xiongyingtai-Jingyuhu; 14= Heishibeihu; 15= Pulu; 16= Ashikule; 17= Quanshuigou; 18= Nangqian Basin; 19= Haidong in Dali

图(图 7)。由图可见, 青藏高原及邻区新生代火山岩明显可以分成 4 类, 可能代表了 4 种不同类型的岩浆源区。

集地幔。

第四类由冈底斯西段晚期火山岩组成(图7中D区),岩浆源区为富集Rb、低Sm/Nd比值的岩石圈^[9]。

随时间演化,第一类到第三类火山岩的岩浆源区逐渐变浅,壳源物质所占比例逐渐增高;第四类火山岩的岩浆源区从早到晚逐渐变深,壳源物质所占比例逐渐减小。至于每类岩浆源区揭示的大陆动力学意义,将另文讨论。

4 结 语

由上的分析可以看出,青藏高原及邻区新生代火山岩的岩浆源区及时空变化具有如下特点:

(1)冈底斯中段火山岩的岩浆源区逐渐从普通地幔(PREMA)向EM II方向演化,同位素逐渐富集;西段火山岩源区的演化方向为俯冲带壳幔混合源→造山带上地壳源→下地壳源;西段火山岩岩浆源区逐渐变深,壳源物质所占比例逐渐减小;中段火山岩的岩浆源区逐渐变浅,壳源物质所占比例逐渐增高。

(2)西羌塘岩浆源区主要为不具富集或亏损的幔源物质;囊谦盆地、大理海东火山岩源区较深,为大洋型软流圈地幔+消减组分混合源区;藏北羊湖、雄鹰台-鲸鱼湖、西昆仑以及北羌塘巴毛穷宗火山岩的岩浆源区为EM II型富集地幔;鱼鳞山超钾质火山岩为经历了大陆地壳物质的强烈交代作用的EM II型岩浆源区;西秦岭火山岩源于亏损地幔,腾冲新生代火山岩为受到地壳物质交代的II型富集地幔源区。

(3)西羌塘、可可西里、西昆仑和腾冲新生代火山岩具两种演化趋势,其中鱼鳞山、普鲁、雄鹰台-鲸鱼湖岩区和腾冲火山群向EM II方向演化,岩浆源区为上地壳物质再循环富集地幔,而泉水沟、黑石北湖、阿什库勒则分别沿0Ma的地幔-上地壳混合线方向演化。

(4)青藏高原及邻区新生代火山岩至少存在4种不同的岩浆源区:未分异的地幔源区、大洋型软流圈地幔+消减组分的混合源区、EM II型富集地幔源区和富集Rb、低Sm/Nd比值的岩石圈。第一类到第三类火山岩的岩浆源区逐渐变浅,壳源物质所占比例逐渐增高。第四类火山岩的岩浆源区从早到晚逐渐变深,壳源物质所占比例逐渐减小。

致谢:成文过程中,得到了黄朋、赵霞等同志的帮助。

参考文献:

- [1] 潘桂棠等. 青藏高原新生代构造演化[M]. 北京:地质出版社, 1990.
- [2] 潘桂棠,李兴振,王立全等. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J]. 地质通报, 2002, 701—707.
- [3] 赖绍聪等. 北羌塘第三纪高钾钙碱性火山岩系的成因及其大陆动力学意义[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(增刊): 34—42.
- [4] 邓万明等. 西藏北部板内火山岩的同位素地球化学与源区特征[J]. 地质前缘, 1998, 5(4): 307—317.
- [5] 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.
- [6] 邓万明. 西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, 1993, 9(4): 379—387.
- [7] 邓万明. 西羌塘第三纪钠质基性火山岩的地球化学特征及成因探讨[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(增刊): 43—54.
- [8] 赖绍聪. 青藏高原新生代火山岩矿物化学及其岩石学意义——以玉门、可可西里及芒康岩区为例[J]. 矿物学报, 1999, 19(2): 236—244.
- [9] COULON C et al. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1986, 79(3—4): 281—302.
- [10] 赵志丹等. 西藏中部乌郁盆地碰撞后岩浆作用——特提斯洋壳俯冲再循环的证据[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(增刊): 20—26.
- [11] MILLER C et al. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis [J]. Journal of Petrology, 1999, 40(9): 1399—1424.
- [12] ARMAUD N O et al. The high K₂O volcanism of northwestern Tibet: Geochemistry and tectonic implications [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1992, 111(2—4): 351—367.
- [13] 丁林等. 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, 1999, 15(3): 408—421.
- [14] TURNER S et al. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts [J]. Journal of Petrology, 1996, 37(1): 45—71.
- [15] TURNER S et al. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks [J]. Nature, 1993, 364(1): 50—54.
- [16] 解广森等. 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]. 刘若新等. 新生代火山岩年代学与地球化学[C]. 北京:地震出版社, 1992, 400—427.
- [17] 邓万明等. 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.
- [18] 朱炳泉等. 滇西洱海东第三纪超钾质火山岩系的Nd-Sr-Pb同位素特征与西南大陆地幔演化[J]. 地球化学, 1992, (3): 201—211.
- [19] 周真恒等. 腾冲、长白山、五大连池新生代火山岩Sr、Nd、Pb同位素地球化学特征[J]. 地震研究, 1998, 21(4): 379—387.

- [20] 喻学惠, 等. 甘肃西秦岭新生代碱性火山岩的 Sr、Nd 同位素及微量元素地球化学特征[J]. 地学前缘, 1998, 5(4): 319—328.
- [21] 樊祺诚, 隋建立, 等. 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[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3): 233—238.
- [22] 周真恒, 杨海林. 腾冲火山岩同位素地球化学研究[J]. 地震研究, 2000, 23(2), 194—200.
- [23] 陈延方. 腾冲火山岩岩浆源区性质探讨[J]. 建材地质, 1997, (6): 7—9.
- [24] 李家振, 等. 西藏当雄羊应乡地热田新生代火山岩特征及其成因探讨[J]. 现代地质, 1992, 6(1): 96—109.
- [25] ROLLINSON H. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation [M]. New York: Longman Science and Technology Press, 1993.
- [26] 于津生. 中国同位素地球化学研究[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 202—211.
- [27] NORMAN M D et al. Geochemical evolution of Cenozoic-Cretaceous magmatism and its relation to tectonic setting, Southwestern Idaho, USA [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1989, 94(1—2): 78—96.
- [28] 周新华, 等. 中生代火山岩源区特征的多元同位素制约——以华北北缘为例[J]. 科学通报, 1998, 43(23): 2483—2488.
- [29] 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 等. 西藏林周盆地林子宗火山岩研究近况[J]. 地学前缘, 2002, 9(1): 153—153.
- [30] 丁林, 等. 藏北鱼鳞山新生代火山岩及风化壳复合堆积物的组成和时代[J]. 科学通报, 2000, 45(14): 1475—1481.

Sr-Nd-Pb isotopic variations of the Cenozoic volcanic rocks from the Qinghai-Xizang Plateau and its adjacent areas

ZHU Di-cheng¹, PAN Gui-tang¹, MO Xuan-xue², DUAN Li-ping¹, LIAO Zhong-li¹, WANG Li-quan¹

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The highlights in the present paper are placed on the spatio-temporal evolution of the Cenozoic volcanic rocks from the Qinghai-Xizang Plateau and its adjacent areas in the light of Sr, Nd and Pb isotopic data issued in recent years. The results of research are generalized as follows. (1) There are gradations from PREMA to EM II for the magmatic sources of the volcanic rocks in central Gangdise, and from the mixed crust-mantle sources in subduction zones through upper crust sources in orogenic zones to lower crust sources in western Gangdise. (2) The magmatic sources in western Qiangtang are represented by depleted mantle-derived rocks. The Nangqian Basin and volcanic sources in Haidong, Dali are relatively deeper, suggesting a mixed source of oceanic asthenospheric mantle and subduction components. The magmatic sources of northern Xizang, western Kunlun and northern Qiangtang are represented by EM II-type enrichment mantle; The Yulinshan ultrapotassic volcanic rocks represent the EM II-type magmatic sources that have been subjected to intense metasomatism of the continental crustal matter. The western Qinling volcanic rocks are derived from the depleted mantle. The Tengchong Cenozoic volcanic rocks occur in the EM II-type enrichment mantle source areas. (3) There are two evolutionary trends for the Cenozoic volcanic rocks from western Qiangtang, Hoh Xil, western Kunlun and Tengchong: towards the EM II type for the Yulinshan, Pulu, Xiongyingtai-Jingyuhu and Tengchong volcanic rocks, and along the 0 Ma mantle-upper crust line for the Quanshuigou, Heishibeihu and Ashikule volcanic rocks. (4) At least four types of magmatic sources may be recognized for the Cenozoic volcanic rocks on the Qinghai-Xizang Plateau and its adjacent areas.

Key words: multivariate isotope tracing; magmatic source; evolutionary trend; Cenozoic volcanic rock; Qinghai-Xizang Plateau and its adjacent areas