

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

## 西藏高原西北缘钾质火山岩地球化学特征 及其地质涵义

鲍佩声<sup>1)</sup>, 肖序常<sup>1)</sup>, 苏犁<sup>2)</sup>

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

2) 中国地质大学实验中心, 北京, 100083

**内容提要:** 西藏高原西北缘钾质火山岩属橄辉玄粗岩(shoshonite)系列。其 K-Ar 同位素年龄变化于 0.28~7.79 Ma, 属中新世末—更新世; 其  $K_2O/Na_2O$  几乎均  $> 1$ ,  $Mg^{\#}$  值有较宽的范围(从 0.51~0.64), 且具有较低的 Cr, Ni 含量(均  $\leq 326 \times 10^{-6}$ )。它们代表着经历了不同程度分异演化的岩浆结晶产物。研究区钾质火山岩(shoshonites)以高度富集 LREE 和 LILE (K, Rb, Sr, Ba, Th) 以及高度亏损 HREE 和 HFSE (Nb, Ta, Zr, Hf, Ti) 等元素为特征。(La/Yb)<sub>n</sub> 高达 29.82~84.94。钾质火山岩对球粒陨石标准化的 REE 配分型式均为向右陡倾的 LREE 富集型。对原始地幔标准化的微量元素蛛网图均具有明显的 Nb, Ta, Ti 负异常。钾质火山岩具有较高的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  (0.707755~0.710426) 和较低的  $^{143}Nd/^{144}Nd$  (0.51196~0.512439) 比值。上述特征表明这些火山岩来源于富集的地幔源区。钾质火山岩较高的 Ba/Nb 比值 (40.84~97.28)、较高的 Th/Ta 及 Ce/Yb 比值 (131~366)、和较低的 Nb/Y 比值 (0.9~3.3), 结合 Th/Yb-Ta/Yb 及 (Th $\times$ 100)/Zr-(Nb $\times$ 100)/Zr 判别图, 提示了它们也形成于活动大陆边缘, 但与其伴生的钙碱性火山岩为早期与俯冲作用有关的火山岩, 而钾质火山岩则为晚期岩石圈拆沉作用的产物。

**关键词:** 西藏高原; 钾质火山岩; 富集地幔; 活动大陆边缘; 岩石圈拆沉

西藏高原西北缘的钾质火山岩属 Shoshonite 系列, 该系列曾被 Joplin (1964, 1965) 扩展到包括硅酸饱和和硅酸不饱和的非单一岩浆分异的一组岩石; 认为在年轻岛弧中 shoshonite 为三种岩石组合之一, 其它两组合为拉斑质和钙碱质岩石 (Jake & White, 1972)。Peccerillo (1985) 在研究意大利中南部钾质岩石时指出: 钾质系列 (potassic series) 为近于饱和或轻度不饱和的、既有钙碱性又具有碱性属性的岩石应划归 shoshonite, 以粗面玄武岩、安粗岩、粗面岩为代表; 深钻资料表明钙碱性安山岩位于富钾岩石之下 (Morrison, 1980; Peccerillo, 1985)。在现代造山区 shoshonite 有特定的构造部位, 识别 shoshonite 组合有助于阐明老造山区的构造历史。即产于大陆边缘的 shoshonite 与高钾钙碱性岩或钙碱性岩相比, 具有较年轻、地层层位较高、且距大洋海沟更远的特点 (Morrison, 1980)。Shoshonite 系列的岩石呈岩流和岩墙产出, 经常作为火山角砾岩产出, 有些岩流与安山质凝灰岩和角砾岩互层。

本文讨论的西藏高原西北缘的钾质火山岩包括康西瓦、大红柳滩、泉水沟、甜水海、阿什库勒及普鲁等地。除了普鲁区火山岩位于塔里木克拉通南部的新生代凹陷区之外, 其余火山岩均位于西昆仑—喀喇昆仑造山带内, 且沿康西瓦走滑断裂南缘分布 (图 1)。研究区的钾质火山岩主要由橄辉粗安岩、安粗岩、粗面安山岩组成, 其次为碱玄岩、歪长粗面岩和玄武岩。其 K-Ar 同位素年龄变化于 0.28~7.79 Ma, 属中新世末—更新世 (表 1)。

### 1 钾质火山岩的岩石学矿物学

#### 1.1 岩石学特征

该系列岩石呈隐晶质—显晶质, 暗色, 类似玄武质岩石, 致密块状或多空状; 具斑状结构, 以含橄榄石和普通辉石斑晶为特征, shoshonite 系列尚含拉长石斑晶。该系列岩石基质可由暗色玻璃质—几乎全晶质, 由钾长石 (透长石)、斜长石、普通辉石、黑云母、磁铁矿、磷灰石等组成, 可含少量玻璃质

注: 本文为国土资源部国际合作与科技司项目 (编号 2001010205, 2001010201), 中国地质调查局项目 (编号 200313000059) 以及国家科技部 (MOST) (编号 2001CB71001) 项目资助的成果。

收稿日期: 2006-05-22; 改回日期: 2006-08-20; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 鲍佩声, 女, 1934 年生。研究员, 从事蛇绿岩及铬铁矿研究。通讯地址: 100037, 中国地质科学院地质研究所; 电话: 010-68999661。

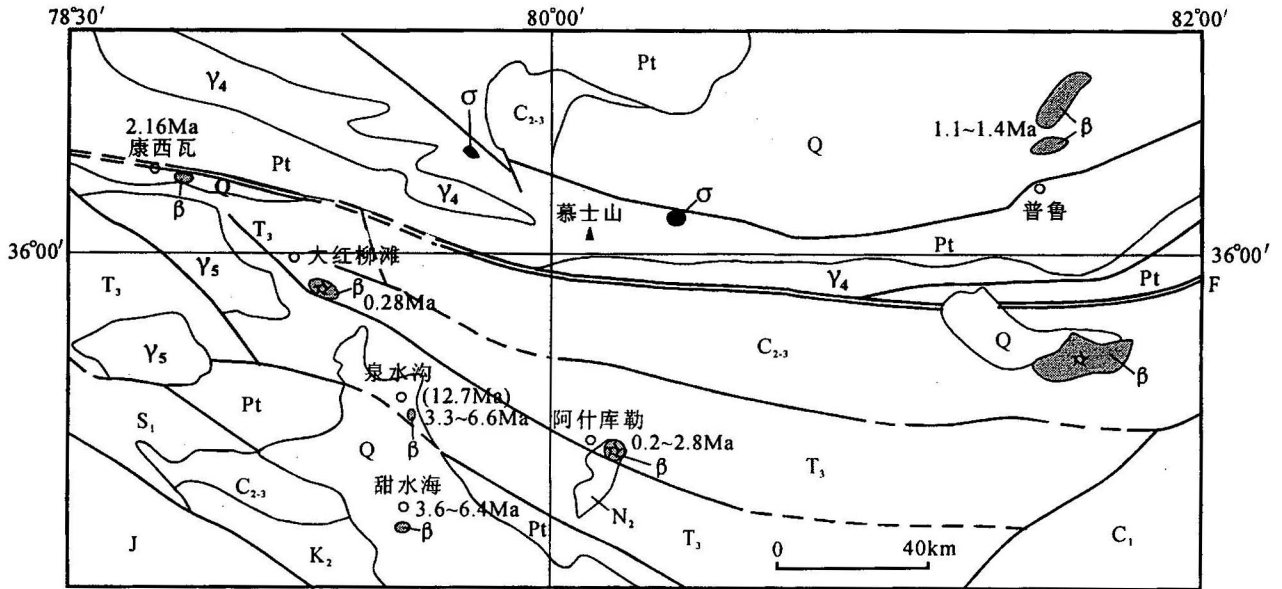


图 1 西藏高原西北部地质简图(示研究区钾质火山岩的分布, 据青藏高原及邻区 1 : 1500000 地质图简化)

Fig. 1 Simplified geological map of the northwestern Tibet Plateau(modified after the 1 : 1500000 Geological map of Qinghai—Tibet Plateau and adjacent area)

Q—第四系; N<sub>2</sub>—上新世; K<sub>2</sub>—上白垩世(碎屑岩, 火山岩); J—侏罗系(碎屑岩, 石灰岩); T<sub>3</sub>—上三叠世(火山岩, 板岩); C<sub>2-3</sub>—中—上石炭世(碎屑岩, 碳酸盐岩); C<sub>1</sub>—下石炭世(碎屑岩, 与煤和火山岩间层); S<sub>1</sub>—下志留世(碎屑岩, 具间层火山岩和石灰岩); Pt—元古代(变质岩); Y<sub>5</sub>—燕山旋回花岗岩; Y<sub>4</sub>—海西旋回花岗岩; β—钾质火山岩(含钾质基性火山岩); σ—超镁铁岩; ☆—火山口; F—康西瓦走滑断裂; 数字—示钾质火山岩的同位素年龄

Q—Quaternary System; N<sub>2</sub>—Pliocene Series; K<sub>2</sub>—Upper Cretaceous (detrital rock, volcanocs); J—Jurassic System (detrital rock, limestone); T<sub>3</sub>—Upper Triassic Series (volcanics, plate); C<sub>2-3</sub>—Mid-Upper Carboniferous Series (detrital rock, carbonate rock); C<sub>1</sub>—Lower Carboniferous series (Detrital rock, intercalation of coal or volcanics); S<sub>1</sub>—Lower Silurian Series (detrital rock, intercalation of volcanics and limestone); Pt—Proterozoic group (Metamorphic rock); Y<sub>5</sub>—Yenshan Cycle granite; Y<sub>4</sub>—Variscian Cycle granite; β—basic volcanics (including potassic basic volcanics); σ—ultramafic rock; ☆—crater; F—Kangxiwa large strike-slip fault; numeral—showing the isotopic age of the potassic volcanics

表 1 西藏高原西北缘钾质火山岩的同位素测年  
Table 1 Isotopic age of the potassic volcanics in the northwestern Tibet Plateau

地区	年龄 (Ma)	时代	测试方法	资料来源
康西瓦	1.98~ 2.4±0.3	晚更新世	Ar-Ar	本文
普鲁北	1.1~1.4	早更新世	K-Ar	刘嘉麒等(1990) 刘从强等(1989)
普鲁东	5.14±0.12	上新世	K-Ar	张招崇(2003)
阿什库勒	0.2~2.8	中—晚更新世	K-Ar	刘嘉麒等(1990)
大红柳滩	0.28	中更新世	热释光法	邓万明(2000)
	7.97±0.14	上新世	K-Ar	张招崇(2003)
泉水沟	3.3~6.6	上新世	K-Ar	Arnaud等(1992)

(Iddings, 1895; Joplin, 1968)。

研究区的钾质火山岩以褐紫色或灰紫色, 块状构造为特征, 斑状间粒结构或斑状隐晶质结构。在不同的火山岩中斑晶分别由单斜辉石、金云母、橄榄石和斜长石组成。基质通常由上述矿物的微晶、隐晶质

和钛磁铁矿等组成。单斜辉石斑晶常呈聚晶状出现, 具很窄的反应边。需指出, 在康西瓦和普鲁东火山岩中有同源包裹体(enclaves)产出, 如单斜辉石聚晶包体、单斜辉石和斜长石聚晶包体或单斜辉石、斜长石以及橄榄石的聚晶包体(图版 I-1~3)。此外, 在康西瓦火山岩中尚有幔源单斜辉石聚晶捕虏体和幔源橄榄石捕虏晶, 前者显示定向拉长的变形组构, 后者以高 MgO 含量(Fo = 96~97)为特征(图版 I-4、5)。有时单斜辉石捕虏体显示清晰的波状纹理, 可能为火山碎屑经变形和重结晶作用形成的(图版 I-6)。

研究区钾质火山岩具有不同的 MgO (变化于 3.04%~8.90%) 和 SiO<sub>2</sub> (变化于 44.83%~60.63%) 含量。Mg<sup>#</sup> 值具有较宽的范围(从 0.51~0.64), 且具有较低的 Cr, Ni 含量(均 ≤ 326 × 10<sup>-6</sup>)。因此, 它们不同于幔源原始岩浆, 后者应具有较高的 Mg<sup>#</sup> 值(70±)和较高的 Cr, Ni 含量(分别 >

1000×10<sup>-6</sup>和>500×10<sup>-6</sup>(Foley et al., 1987),也不是橄榄岩平衡条件下局熔形成的原始岩浆(Frey et al., 1978)。所以研究区钾质火山岩代表着经历了不同程度分异演化的岩浆结晶的产物。需指出,康西瓦地区火山岩的 Mg<sup>#</sup>值偏高(0.62~0.64),曾发现有二辉橄榄岩地幔包体(罗照华等, 2000)。计算表明,钾质火山岩较高的平衡压力变化于 11.06~15.67kb,相应的深度为 36.5~51.7km,而平衡温度为 1114.2~1260℃。根据 Mg/(Mg+Fe)-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub>-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 判别图(图 2a,b),它们属富铝的火山岩。康西瓦钾质火山岩以较高的 Mg<sup>#</sup>值(0.62~0.64)和较低的 SiO<sub>2</sub>含量(44.83%~47.66%)区别于研究区其它火山岩。在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 图(图 3)上,可见其 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 几乎均> 1,且成分点落在世界某些钾质火山岩的平均成分区。据 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 判别图,研究区的钾质火山岩均属 shoshonite 系列,为钾质基性火山岩(图 4)。

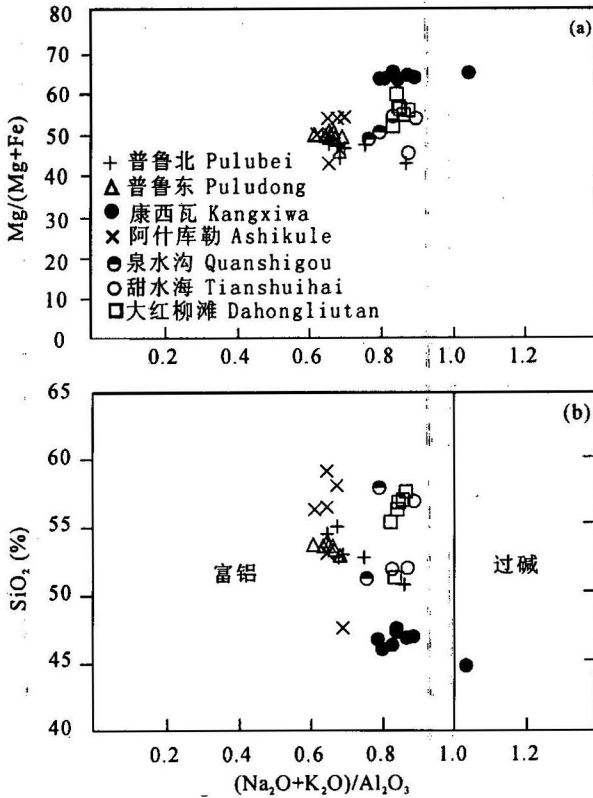


图 2 青藏高原西北部钾质火山岩的 Mg/(Mg+Fe)-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(a)和 SiO<sub>2</sub>-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(b)图解

Fig. 2 Mg/(Mg+Fe)-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (a) and SiO<sub>2</sub>-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b) diagrams for the potassic volcanics in the Northwest Tibet plateau

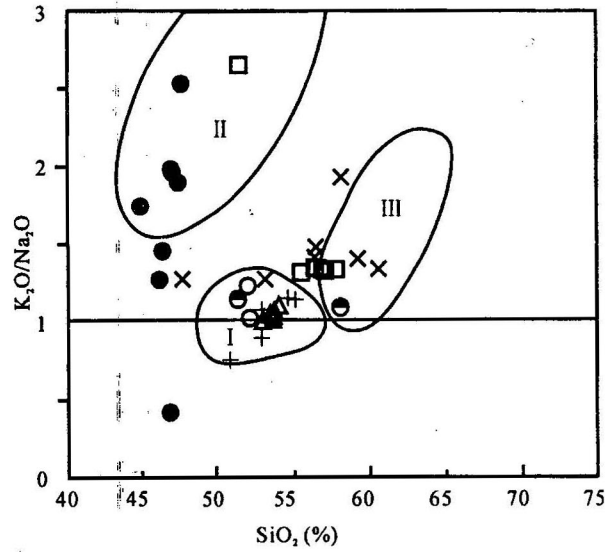


图 3 青藏高原西北部钾质火山岩的 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解

Fig. 3 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> diagram for the potassic volcanics in the Northwest Tibet plateau

I—世界某些橄榄玄粗岩(shoshonite)的平均成分; II—世界某些橄榄粒玄岩的平均成分; III—世界某些粗面岩和安粗岩的平均成分  
I—Average composition of some shoshonites; II—average composition of some absorakites; III—average composition of some trachytes and latites of the World

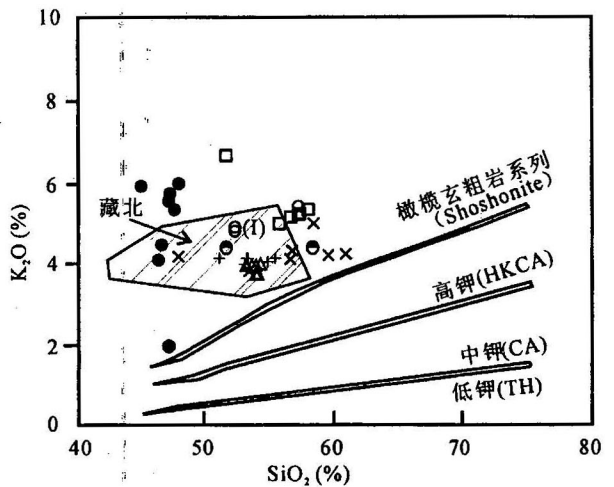


图 4 青藏高原西北部钾质火山岩的 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>图解  
Fig. 4 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> diagram for the potassic volcanics in the Northwest Tibet plateau  
阴影区为藏北碰撞后钾质火山岩的成分区  
(据 Turner et al., 1996)

Shadow area showing the composition area of the post-collision potassic volcanics in the North Tibet  
(after Turner et al., 1996)

1.2 矿物学特征

单斜辉石: 为火山岩中最常见的矿物, 作为斑晶既可呈单晶也可呈聚晶出现, 后者常具熔蚀边或反应边。此外, 尚有具变形组构的单斜辉石聚晶, 它们可能系地幔捕虏体(见图版 I-4~6)。电子探针分析结果表明, 聚晶单斜辉石包体(enclaves)的成分为  $En_{41.23\sim51.254} Wo_{40.12\sim49.96} Fs_{5.57\sim13.87}$ , 属透辉石-普通辉石, 近似于斑晶中呈单晶出现的单斜辉石成分。

橄榄石: 在普鲁区火山岩中, 既可作为斑晶又可

作为包体(enclaves), 斑晶成分为  $FO_{61\sim79} Fa_{39\sim58}$ , 包体成分为  $FO_{69\sim77} Fa_{23\sim31}$ , 两者很近似故均为岩浆分离结晶作用的产物(张招崇等, 2002)。在康西瓦未见橄榄石斑晶, 细粒柱状具褐色蚀变边的橄榄石常出现在基质中, 其成分为  $FO_{76\sim90} Fa_{10\sim24}$ 。此外, 尚见少量富 MgO 的橄榄石( $FO_{97} Fa_3$ ), 它们应属地幔捕虏晶。

金云母: 为钾质火山岩斑晶和基质中常见矿物, 常发育暗化边。

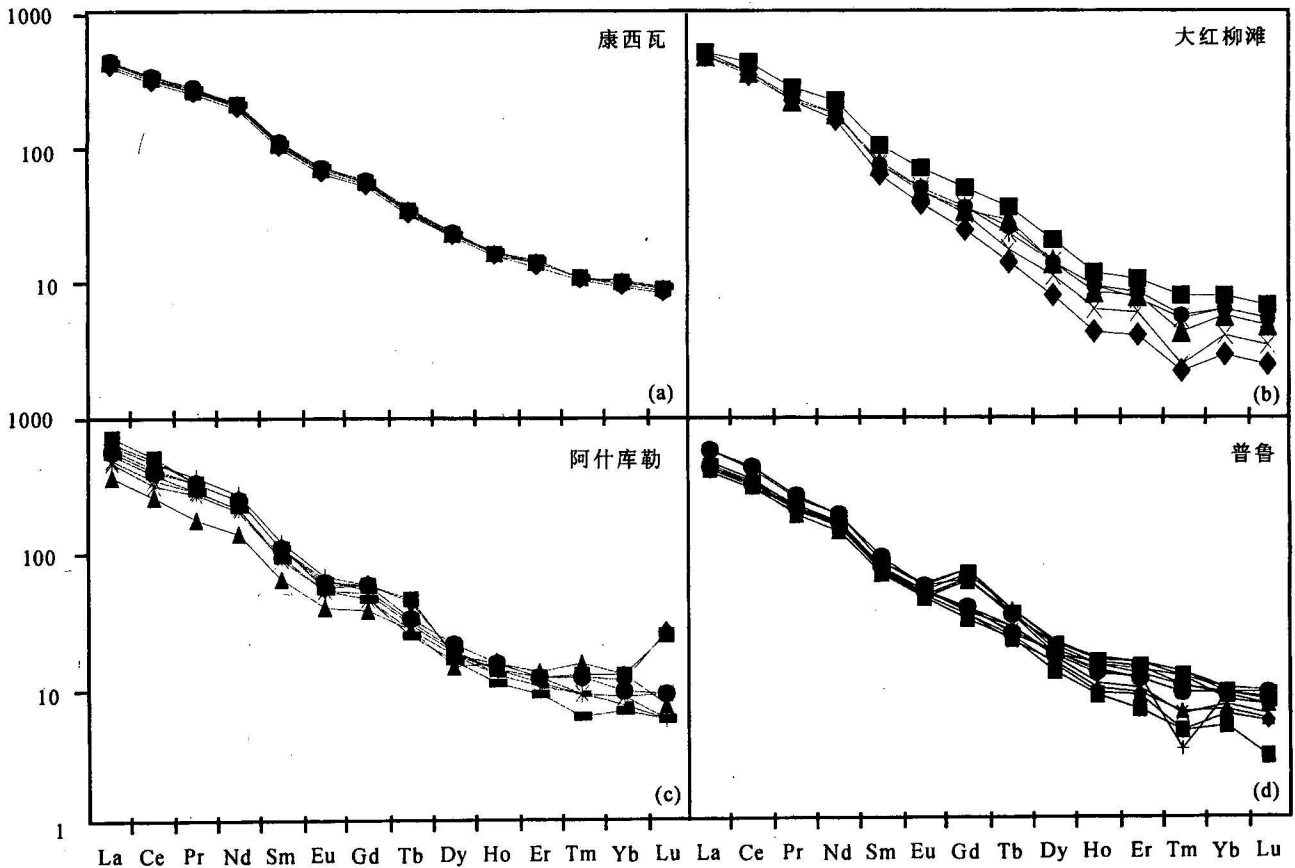


图 5 西藏高原西北部钾质火山岩对球粒陨石标准化的 REE 配分型式

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns for the potassic volcanics in the Northwest Tibet plateau

表 2 钾质火山岩微量元素丰度( $\times 10^{-6}$ )及主要地球化学参数

Table 2 Major geochemical data and trace element abundance( $\times 10^{-6}$ ) of the potassic volcanics

地区	康西瓦	大红柳滩	甜水海	阿什库勒	普鲁东	普鲁北
LREE	549.71~613.69	566.54~707.7	663~799.4	451.3~842.5	502.94~539.51	500.72~691.2
HREE	28.12~30.7	11.12~25.86	22.7~30	23.1~31.2	16.7~22.7	29~34.8
LREE/HREE	19.55~20.13	27.34~50.95	26.65~29.21	23.1~31.2	16.7~22.7	14.39~22.23
(La/Yb) <sub>n</sub>	43.5~46.7	63.54~170.44	71.24~78.44	29.82~59.87	44.95~84.941	45.79~70.45
LILE	42036~53589	46003~62510	46514~50123	35791~46583	33766~36981	35221~38640
HFSE	11721~12689	8258~10883	8611~19913	12575~21624	12116~24380	12234~13988
LILE/HFSE	3.22~4.57	4.23~5.94	2.34~5.7	1.66~3.05	1.47~2.95	2.61~3.09
$\delta Eu$	0.13~0.19	0.88~0.99	0.22~0.23	0.27~1.13	0.9~1.01	0.71~1

注: 球粒陨石丰度据 Boynton, 1984, 原始地幔的丰度 据 Sun 等, 1982。

长石:在普鲁区斜长石的成分为  $Ab_{40\sim48}An_{44\sim55}$   $Or_{3\sim8}$ , 属中长石—拉长石, 少量钾长石为透长石。康西瓦区未见斜长石斑晶, 基质中斜长石成分为  $Ab_{2.5\sim70.8}An_{1.6\sim45.7}Or_{3.1\sim97.4}$ 。聚晶状长石可能为晚期充填矿物, 其成分变化较宽  $Ab_{3.2\sim68.5}An_{0.2\sim26.6}Or_{7.9\sim62.2}$ 。

## 2 钾质火山岩的地球化学

青藏高原西北缘钾质火山岩 (shoshonites) 以高度富集 LREE 和 LILE (K, Rb, Sr, Ba, Th) 以及高度亏损 HREE 和 HFSE (Nb, Ta, Zr, Hf, Ti) 等元素为特征。LREE 的丰度由  $451.3 \times 10^{-6} \sim 842.5 \times 10^{-6}$ , 等于球粒陨石的 214~400 倍; HREE 的丰度由  $11.12 \times 10^{-6} \sim 34.8 \times 10^{-6}$ , 仅为球粒陨石的 10~30 倍。其  $(La/Yb)_n$  高达 29.82~84.94 (不含两个最高值 123.1 和 170.44)。上述特征表明研究区的钾质火山岩应来自一强烈富集不相容元素的地幔源区 (Foley et al., 1992)。高的 LILE/HFSE 提示了在钾质岩浆形成时, 两组元素发生了分离, 这种分离作用似应与源区内富 HFSE 的残余相有关 (Conticelli et al., 1992; Peccerillo, 1999)。钾质火山岩痕量元素的丰度及主要地球化学参数如表 2 所示。

钾质火山岩对球粒陨石标准化的 REE 配分型

式均为向右陡倾的 LREE 富集型, 仅在某些地区 (如大红柳滩及普鲁区) 具有 HREE 的轻度分离 (图 5)。钾质火山岩的  $\delta Eu$  值 (0.13~1.01),  $\delta Eu$  近于 1 者示斜长石的分离作用不明显,  $\delta Eu < 1$  者可能系源区受地壳混染引起的负 Eu 异常 (Turner et al., 1999)。钾质火山岩对原始地幔标准化的痕量元素蛛网图均具有明显的 Nb, Ta, Ti 负异常 (图 6), 一般认为是造山成因钾质火山岩的典型特征 (Turner et al., 1996; Wilson et al., 1999; Gill et al., 2004; Dungen et al., 2005)。

## 3 钾质火山岩的岩石成因

### 3.1 形成的构造部位

钾质火山岩的痕量元素特征为其岩石成因提供了有力的证据。钾质火山岩高度富集 LILE 和高度亏损 HFSE, 以及由此产生的较高的 Ba/Nb 比值 (40.84~97.28), 明显高于 28 和较低的 Nb/Y 比值 (0.9~3.3) 均表现了活动陆缘岩浆作用的特征 (Fitton et al., 1988; Temel et al., 1998)。前已述及, 研究区钾质火山岩属 shoshonite 系列, 该系列岩石常与钙碱性火山岩伴生, 并形成于活动的大陆边缘 (Morrison, 1980; Peccerillo, 1992)。在  $Th/Yb-Ta/Yb$  及  $(Th \times 100)/Zr - (Nb \times 100)/Zr$  判别图上, 研究区钾质火山岩均位于造山成因火山岩区 (图 7)。

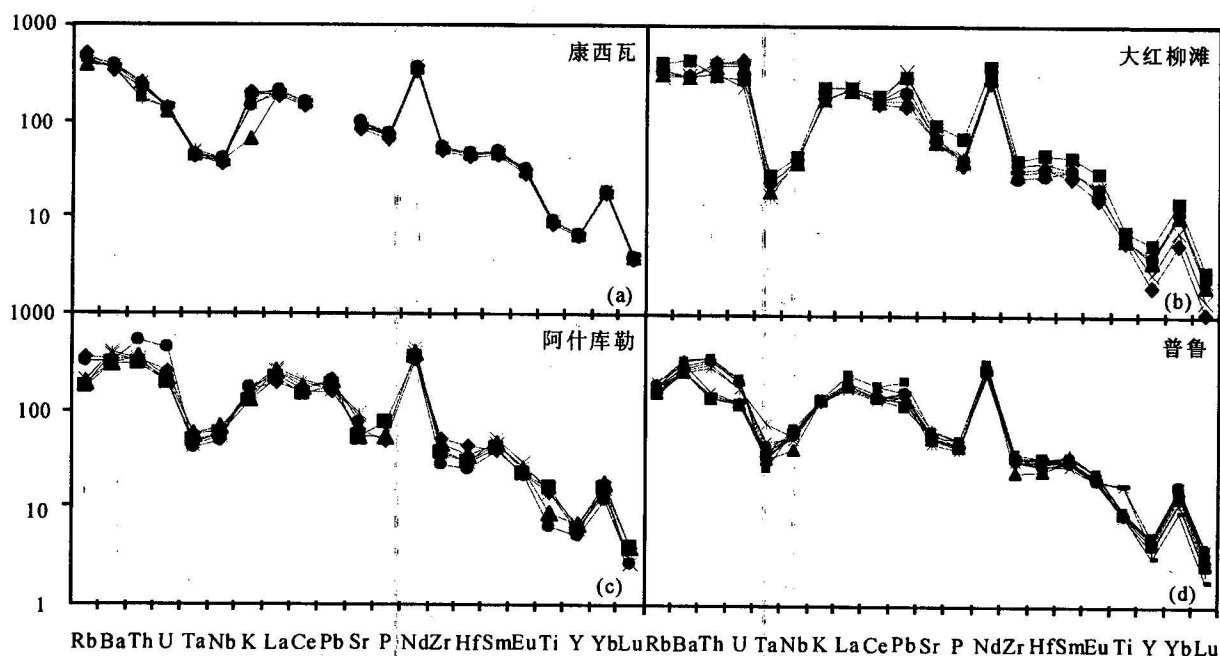


图 6 青藏高原西北部钾质火山岩对原始地幔标准化痕量元素蛛网图

Fig. 6 Primitive mantle-normalized spider diagrams for trace elements of the potassic volcanics in the Northwest Tibet plateau

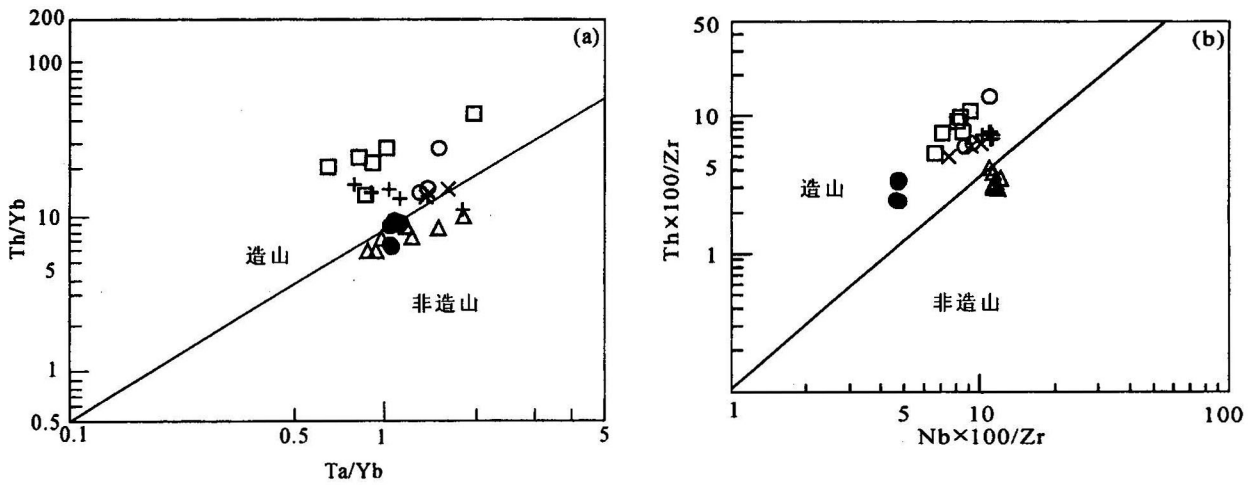


图 7 青藏高原西北部钾质火山岩的 Th/Yb-Ta/Yb 图(a) 和 Th×100/Zr-Nb×100/Zr(b)图解(据 Wilson et al., 1999)  
 Fig. 7 Th/Yb-Ta/Yb (a) and Th×100/Zr-Nb×100/Zr(b) diagrams for the potassic volcanics in the Northwest Tibet plateau (after Wilson et al., 1999)

较高的 Ce/Yb 比值(131~366)表明它们属于大陆弧或碰撞后弧火山岩,而区别于大洋弧钾质火山岩(Ce/Yb 比值均 < 45)(图 8)(Gill et al., 2004)。根据 K/Ba-K/Rb 图可知研究区钾质火山岩区别于岛弧和洋岛火山岩。正如 Turner 等(1996)所指出的“西藏钾质火山岩属碰撞后造山部位(图 9)。

### 3.2 地幔源区特征

从 3 个地区(康西瓦,普鲁北和阿什库勒)18 个样品所作的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  同位素分析得知,

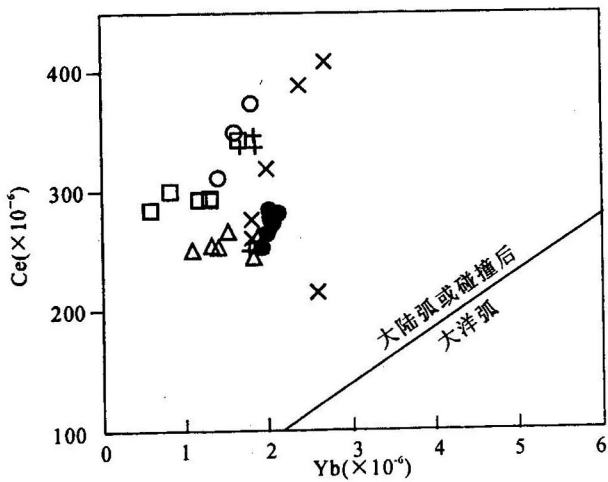


图 8 青藏高原西北部钾质火山岩的 Ce/Yb-Yb 图解(据 Gill et al., 2004)

Fig. 8 Ce/Yb diagram for the potassic volcanics in the Northwest Tibet plateau (after Gill et al., 2004)

大陆与大洋分界线在 Ce/Yb 比值为 46.5 处  
 Continental/ocean dividing line lies at a  
 Ce/Yb ratios of 46.5

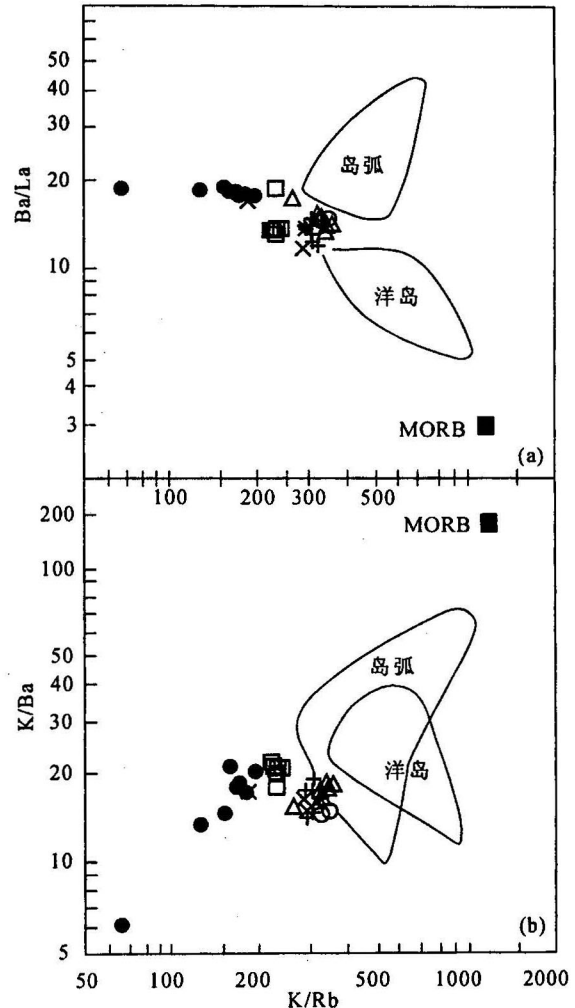


图 9 青藏高原西北部钾质火山岩的 Ba/La-K/Rb(a)和 K/Ba-K/Rb(b)图解

Fig. 9 Ba/La-K/Rb(a) and K/Ba-K/Rb(b) diagram for the potassic volcanics in the Northwest Tibet plateau  
 MORB—洋岛和岛弧(据 Nelson, 1992)  
 MORB—Ocean island and island arc (after Nelson, 1992)

研究区的钾质火山岩具有较高的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 和较低的<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 比值(表 3),上述特征均反映了地幔的富集作用,说明这些火山岩形成于富 Rb、且低 Sm/Nd 比值的岩石圈源区(Wilson et al., 1999; Miller et al., 1999)。

表 3 研究区某些钾质火山岩 Sr-Nd 同位素比值  
Table 3 Sr-Nd isotopic data of the potassic volcanics in the different area

地区	康西瓦	普鲁北	阿什库勒
样数	8	6	4
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	0.708072~ 0.708216	0.708628~ 0.708974	0.707755~ 0.0.710426
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	0.512216~ 0.512315	0.512192~ 0.512403	0.51196~ 0.512439

在<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr-<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 图上,18 个样品的投影点均远离 DM, HIUM 和 EAR 区,而介于 EM I, EM II 和 地壳成分区之间,示其来自一富集地幔源区(图 10)。上述投影区与前人取得的藏北火山岩的同位素成分区(Williams, 2004) 大体相符,而有别于意大利中部钾质火山岩的同位素成分区(Peccerillo, 2003)。在 Rb/Y-Nb/Y 图上 Rb/Y 比显

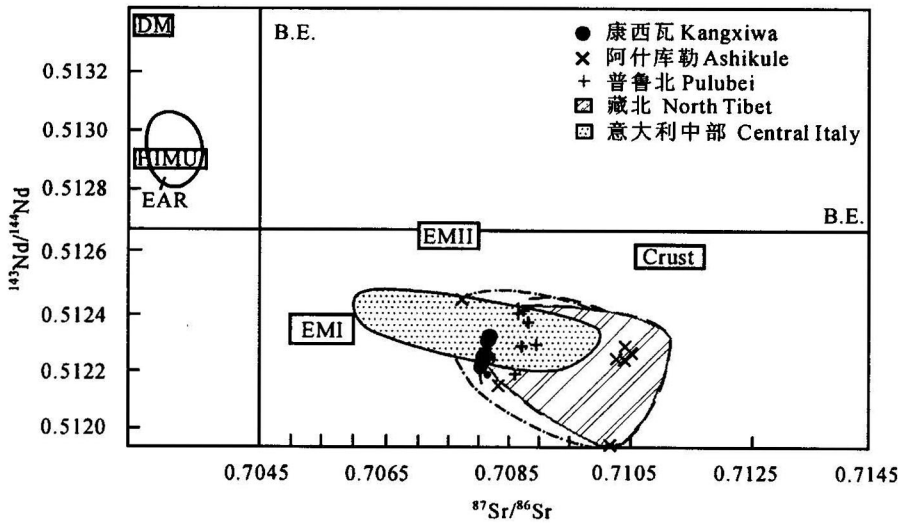


图 10 青藏高原西北部钾质火山岩的 Sr-Nd 同位素图解(据 Wilson 等,1999)  
Fig. 10 Sr-Nd isotopic diagram for the potassic volcanics in the Northwest Tibet plateau (after Wilson et al., 1999)

DM—亏损地幔; HIUM—具有高(<sup>238</sup>U/<sup>204</sup>Pb)比值的源区; EAR—东大西洋脊; EM I—富集地幔 I; EM II—富集地幔 II; Crust—地壳; B. E.—地球总体;(据 Wilson et al., 1999); 阴影区—藏北(据 Williams, 2004); 点区—意大利中部(据 Peccerillo, 2003)  
DM—Depleted mantle; HIUM—mantle source having a high (<sup>238</sup>U/<sup>204</sup>Pb) ratio; EAR—East Atlantic Ridge; EM I—enriched mantle I; EM II—enriched II; ; B. E.—Bulk Earth (after Wilson et al., 1999); Shadow area—North Tibet (after Williams, 2004); Dotted area—Central Italy (after Peccerillo, 2003)

示垂直变化趋势,这表明幔源受到外来物质的交代(图 11)(Temel et al., 1998)。我们认为交代营力为来自蚀变洋壳或俯冲沉积物释放的含 H<sub>2</sub>O 流体或熔体,它们自身富含不相容元素,而亏损高场强元素(HFSE),在钾质岩浆形成之前就已交代了大陆岩石圈之下(Suncontinental lithosphere)的地幔而产生富集地幔,这种壳—幔储库之间的混合可能经历了长时期的历史(Nelson et al., 1992; Pe-Piper et al., 1992),从而较好的解释了钾质火山岩富集 LILE、LREE、Nb-Ta-Ti 负异常以及高 Sr、低 Nd 的同位素等地球化学特(Foley, 1992; Peccerillo, 1992; Wilson et al., 1999)。该富集地幔经极低程度(1%~3%)的部分熔融即可形成钾质岩浆(Foley et al., 1987)。

曾有学者认为钾质火山岩 Nb-Ta-Ti 负异常的出现与地幔的残余矿物学有关,地幔中的金红石或钛铁矿对 Nb, Ta, Ti 有较高的分配系数,当地幔局熔时它们稳定在残余相中,并获得 HFSE,从而导致火山岩中出现 Nb-Ta-Ti 负异常(Foley et al., 1990; Pearce et al., 1994; Foley et al., 2000)。研究区中火山岩的高 Ce/Yb 比值暗示了源区的残余

相含石榴石(Gill et al., 2004),这与 Turner 等(1996)得出的结论“藏北钾质火山岩的源区含石榴石”相符。从 Yb-La/Yb 图可知,研究区钾质火山岩都来自于富集的地幔源区,其中一些可能来自尖晶石相和石榴石相混合幔源区(图 12)。

#### 4 钾质火山岩的成因模式

如前所述,青藏高原西北缘钾质火山岩主要位于西昆仑—喀喇昆仑造山带内,且沿康西瓦走滑断裂南缘分布,其北为塔里木地块(见图 1)。这些属 shoshonite 系列的钾质基性火山岩形成于活动的大陆边缘。前人通过深地震反射剖面,宽频天然深地震探测以及广角折射和反射剖面等资料提出,青藏高原西北部陆-陆碰撞造山、盆山的形成受“南北双向挤压模式”的控

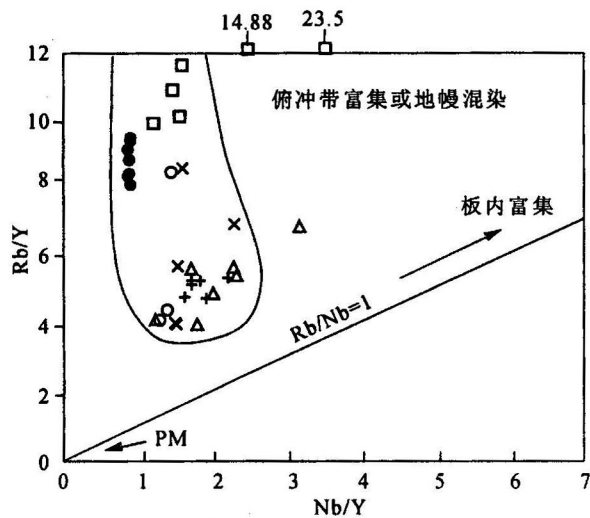


图 11 青藏高原西北部钾质火山岩的 Nb/Y-Nb/Y 图解—示由俯冲带富集或地壳混染引起的 Rb/Y 值的垂直变异趋势 (据 Temel et al., 1998)

Fig. 11 Nb/Y-Nb/Y diagram for the potassic volcanics in the Northwest Tibet plateau—showing vertical variation trend produced by subduction zone or by crustal contamination (after Temel et al., 1998)

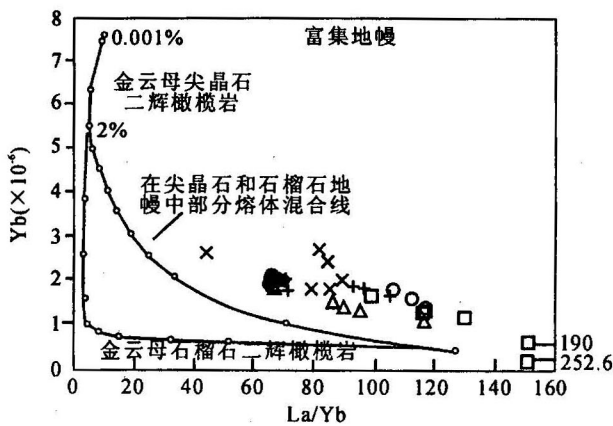


图 12 青藏高原西北部钾质火山岩的 Yb-La/Yb 图解 (据 Miller et al., 1999)

Fig. 12 Yb-La/Yb diagram for the potassic volcanics in the Northwest Tibet plateau (after Miller et al., 1999)

制,也是造成青藏高原西北缘新生代后期地壳加厚、隆升的重要动力因素(Xiao Xuchang et al., 2001;肖序常等, 2002, 2004)。青藏高原西北缘钾质火山岩的形成模式如图所示(图 13)。

南北向水平挤压使岩石圈密度增大并缩短,当缩短量超过临界百分比时将引起岩石圈增厚且密度

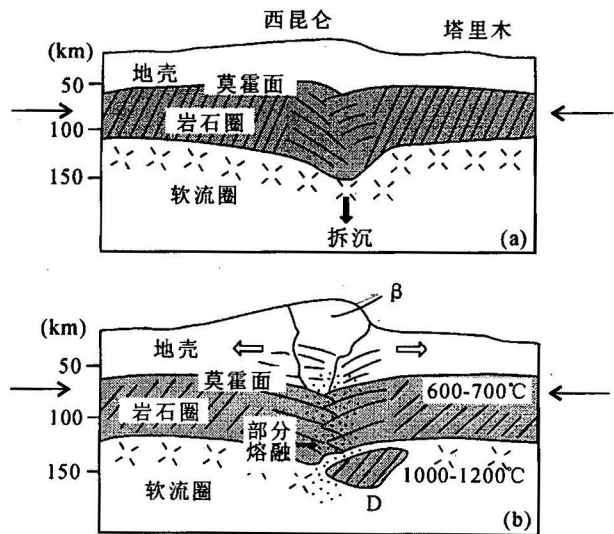


图 13 青藏高原西北部岩石圈拆沉及钾质火山岩成因模式(据肖序常等, 2001)

Fig. 13 The model of lithosphere delamination and generation of the potassic volcanics in the Northwest Tibet plateau (after Xiao Xuchang et al. 2001)

加大,这是岩石圈不稳定的先决条件。增厚超过临界值(近 50 km),则密度大的岩石圈沉陷到密度小而热的软流圈中,从而引起岩石圈的拆沉(delamination)及软流圈的上涌。鉴于塔里木克拉通岩石圈根的阻挡,则造山带下部的软流圈物质沿着边界面上涌,促使壳-幔之间的边界层受热而发生低度局部熔融。随之而来的是地壳的拉张和抬升,并伴钾质基性火山岩的喷发(England et al., 1989; Kay et al., 1993; 赖绍聪, 1999; Xiao xuchang et al., 2001)。地震的衰减(attenuation)以及地震波速的研究表明,青藏高原北部之下的软流圈已达到较浅的深度,符合拆沉的假说,西藏的地震观察曾预测到现今会发生拆沉(kay et al., 1993)。大约在 8Ma 高原抬升明显增强,并有藏北钾质火山岩的活动,这意味着存在迅速的热传导至岩石圈中部(Miller et al., 1999)。据康西瓦钾质火山岩内深源包体的计算得知其形成深度约 55~60km (罗照华等, 2000),故碱性基性岩浆形成于地壳-地幔之间。可见,研究区钾质火山岩为青藏高原北部新生代陆-陆造山碰撞后拆沉岩浆作用的产物。

### 5 结论

(1) 青藏高原西北缘钾质基性火山岩来源于富集的大陆之下的地幔(subcontinental mantle),该地



幔在局熔之前的陆-陆碰撞时期曾已被来自俯冲物质的流体(或熔体)所交代。

(2) 据普鲁区火山岩包体的温-压计算得知,其形成温度为 1210~1260°C, 压力为 5.34~11.06 kb, 相当于 17~36km; 康西瓦幔源包体的温-压计算可知其形成温度为 1146.3~1308.8°C, 最高压力为 16 kb, 相应深度为 55~60 km。

(3) 研究区伴生的早期钙碱性火山岩与俯冲作用有关, 而后期的钾质火山岩则为新生代塔里木地块(盆地)与西昆仑地块之间岩石圈拆沉岩浆作用的产物。

**致谢:** 本文标本采集由国土资源部国际合作与科技司和中国地质调查局西昆仑及邻区有关项目同志提供, 撰写本文引用了本项目张招崇和罗照华等同志的研究成果; 翟庆国同志积极协助计算机制图, 在此一并致谢。

### 参 考 文 献

- 赖绍聪. 1999. 青藏高原北部新生代火山岩的成因机制, 岩石学报, 15(1): 98~104.
- 张招崇, 肖序常, 王军. 2002. 西昆仑山普鲁新生代火山岩中包体的发现及其地质意义. 地球科学—中国地质大学学报, 27(4): 386~390.
- 罗照华, 张文会, 等. 2000. 西昆仑新生代火山岩中的深源包体. 地质前缘, 7(1): 295~298.
- 肖序常, 刘训, 等. 2002. 西昆仑及邻区岩石圈结构构造演化——塔里木南—西昆仑多学科地质断面简要报道. 地质通报, 21(2): 63~68.
- 肖序常, 王军. 2004. 西昆仑—喀喇昆仑及其邻区岩石圈结构、演化中几个问题的探讨. 地质论评, 50(3): 285~294.
- Corticelli S, Pecerrillo A. 1992. Petrology and geochemistry of potassic and ultrapotassic volcanism in Central Italy: Petrogenesis and inference on the evolution of the mantle source. Lithos, 28(3): 221~240.
- Duggen S, Hoenle K, et al. 2005. Post-collisional transition from subduction-to intraplate-type magmatism in the westernmost Mediterranean: Evidence for continental edge delamination of subcontinental lithosphere. Jour. Petrol., 46(6): 1155~1201.
- England P, Houseman G. 1989. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan plateau. J. Geophys. Res., 94: 17561~17579.
- Fitton J G, James D, Kempton P D, et al. 1988. The role of lithospheric mantle in the generation of Late Cenozoic basic magmas in the Western United State. Journal of Petrology. Special lithosphere issue, 331~349.
- Foley S F, Venturelli G, Green D H, et al. 1987. The ultrapotassic rocks: characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models. Earth Science Reviews, 24: 81~134.
- Foley S F, Wheller G E, et al. 1990. Parallels in the origin of the geochemical signatures of island arc volcanics and continental potassic igneous rocks: the role of residual titanates. Chemical Geology, 85: 1~18.
- Frey F A, Green D H, et al. 1978. Integrated models of basalt petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from South Eastern Australia utilising geochemical and experimental petrological data. Jour. Petrol., 19: 463~513.
- Foley S F, Venturelli G, Green D H, et al. 1987. The ultrapotassic rocks: characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models. Earth Science Reviews, 24: 81~134.
- Foley S F. 1992. Veins plus wall-rock melting mechanisms in the lithosphere and the origin of potassic alkaline magmas. Lithos, 28: 435~453.
- Foley S F, Barth M G, et al. 2000. Rutile/ melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas. Coschi. Cosmochi. Acta, 64: 933~938.
- Gill R C O, Aparicio A, et al. 2004. Depleted arc volcanism in the Alboran Sea and shoshonitic volcanism in Morocco: geochemical and isotopic constraints on Neogene tectonic processes. Lithos, 78: 363~388.
- Idding J P. 1895. Absarokite — shoshonite — Banakite series. The Journal of Geology, 935~959.
- Joplin Joplin G A. 1968. The shoshonite association: A Review. Jour. Geol. Soc. Aust., 15(2): 275~294.
- Jakes P, White A J R. 1972. Major and trace element abundance in volcanic rocks of orogenic areas. Geol. Soc. Am. Bull., 83: 29~39.
- Joplin G A. 1964. A petrography of Australian igneous rocks. Angus & Robertson, Sydney.
- Joplin G A. 1965. The problem of the potash-rich basaltic rocks. Mineralogical Magazine, 34: 266~275.
- Kay R W, Kay S M. 1993. Delamination and delamination magmatism. Tectonophysics, 219: 177~189.
- Luo Zhaohua, Zhang Wenhui, Deng Jinfu. 2000. Implications of the deep-saeted xenoliths in Cenozoic basalt in Kangxiwa, W. Kunlun Mts., China. Earth Sci. Frontiers, 7 (Suppl.): 76~78.
- Miller C, Schuster R, et al. 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in the SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. Jour. Petrol., 40 ( 9 ): 1399~1424.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. Lithos, 13: 97~108.
- Nelson D R. 1992. Isotopic characteristics of potassic rocks: evidence for the involvement of subducted sediments in magma genesis. Lithos, 28: 403~420.
- Pearce J A, Peate D W. 1994. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 123: 251~285.
- Pecerrillo A, Manett P. 1985. The Roman cognomagic province: a review of the data relevant to petrogenesis and geodynamic significance. Transactions of the Geological Society of South Africa, 88: 133~152.
- Pecerrillo A. 1992. Potassic and ultrapotassic rocks: Compositional characteristics, petrogenesis, and geological significance. Episodes, 15(4): 243~251.
- Pecerrillo A. 1999. Multiple mantle metasomatism in central-southern Italy: geochemical effects, timing and geodynamic implications. Geology, 27(4): 315~318.
- Pe-Piper G, Piper D J W. 1992. Geochemical variation with time in the Cenozoic high-K volcanic rocks of the island of Lesbos,

- Greece: significance for shoshonite petrogenesis, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 53: 371~387.
- Temel A, Gündoğdu M N. 1998. Petrological and geochemical characteristics of Cenozoic high-K calc-alkaline volcanism in Konya, Central Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85: 327~354.
- Turner S P, Platt J P, et al. 1999. Magma associated with orogenic collapse of the Betic-Alboran Domain, SE Spain. *Jour. Petrol.*, 40(6): 1011~1036.
- Turner S, Arnaud N. 1996. Post collision, shoshonitic volcanism on the plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the spurce of ocean island basalts. *Jour. Petrol.*, 37(1): 45~71.
- Wilson M, Bianchini G. 1999. Tertiary—Quaternary magmatism within the Mediterranean and surrounding regions. *Geological Society, London. Special Publications*. 156: 141~168.

Xiao Xuchang, Liu Xun et al. 2001. Collision tectonics between the Tarim block (Basin) and the Northwestern Tibet plateau: New observations from a multidisciplinary geoscientific investigation in the Western Kunlun Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 126~132.

### 图 版 说 明

1. 聚斑状结构, 斑晶仅由单斜辉石的聚晶包体组成, 康西瓦 xw-16, 正交偏光。
2. 聚晶包体由单斜辉石和金云母组成, 康西瓦 xw-15-1, 单偏光。
3. 聚晶包体由单斜辉石、橄榄石和斜长石组成, 普鲁区, 正交偏光。
4. 幔源包体由具变形组构的单斜辉石聚晶组成, 康西瓦 xw-8, 正交偏光。
5. 幔源橄榄石捕虏晶(Fo=97), 康西瓦 xw-16, 正交偏光。
6. 幔源捕虏晶由具波状纹理的单斜辉石组成, 康西瓦 xw-9, 正交偏光。

## Geochemical Characteristics of the Potassic Volcanics in the Northwestern Tibet Plateau and Its Implications

BAO Peisheng<sup>1)</sup>, XIAO Xuchang<sup>1)</sup>, SU Li<sup>2)</sup>

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing, 100037*

2) *Geological Lab center, China University of Geosciences, Beijing, 100083*

### Abstract

The potassic volcanics of the Northwest Tibet plateau belongs to Shoshonite series. The K/Ar isotope age varies from 0.28~7.79 Ma, being a part of Late Miocene-Pleistocene. The K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratios are almost more than one and Mg<sup>#</sup> ratios have a wide range from 0.51~0.64 as well as have lower contents of Cr, Ni (all less than 326×10<sup>-6</sup>). They represent the products of magmatic differentiation of varying degree. The potassic volcanics of the Northwest Tibet plateau are characterized by highly enriched in LREE and LILE (K, Rb, Sr, Ba, Th), and highly depleted in HREE and HFSE (Nb, Ta, Zr, Hf, Ti). The (La/Yb)<sub>n</sub> is as high as 29.82~84.94. The chondrite-normalized REE patterns are LREE-riched type of dipping steeply to right. The primitive-normalized spider diagrams have distinctly negative anomalies of Nb, Ta, Ti. Besides, the potassic volcanics have higher <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios (0.708101 to 0.72002) and lower <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd ratios (512192~0.512439). The geochemical characters mentioned-above indicate that potassic volcanics in study areas should be derived from enriched mantle sources. Their higher Ba/Nb (40.84~97.28), Th/Ta and Ce/Yb (131~366) ratios and lower Nb/Y ratio (0.9~3.3), as well as other characters shown in discriminant diagrams of Th/Yb-Ta/Yb and Th×100/Zr-Nb×100/Zr all suggest that the Cenozoic potassic volcanics are orogenic volcanics formed at active continental margin. Even though the calci-alkalic volcanics associated with potassic volcanics also formed at active continental margin, but the former are related to subduction in early stage of orogeny and the later are products formed by lithospheric delamination in later stage of orogeny.

**Key words:** Tibet plateau; potassic volcanics; enriched mantle; active continental margin; lithosphere delamination

