

# 青藏高原北缘红柳峡富锆安山岩脉的成因： 钙长石分离结晶作用和锆石的异常溶解

曾令森 杨经绥 李海兵

(中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037)

**摘要:**在阿尔金走滑断裂与祁连山北缘逆冲断裂带交汇的酒西盆地出露年龄约为 85Ma 的富锆安山岩脉, 切割年龄大约为 105 Ma 的基性熔岩(粗面玄武岩和玄武安粗岩)。这条安山岩脉具有十分特殊的地球化学特征, 具体表现为(1)强烈过碱性,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  达 11.8%,  $\text{A}/\text{CNK}$  比值为 0.5540; (2)强烈富集高场强元素(HFSE), 如  $\text{Zr}(1421\mu\text{g}/\text{g})$ ,  $\text{Hf}(26.4\mu\text{g}/\text{g})$ ,  $\text{Y}(48.2\mu\text{g}/\text{g})$ ,  $\text{Nb}(104.0\mu\text{g}/\text{g})$ ,  $\text{Ta}(8.5\mu\text{g}/\text{g})$  等; (3)明显的 Ce 正异常; (4)近平直的 MREE 和 HREE 稀土配分模式; (5)与基性熔岩相似的初始 Sr 但明显较低的 Nd 同位素比值(大于  $2\varepsilon_{\text{Nd}}$  单位)。这些差异性不仅反映了它们各自源区地球化学特征的差异性, 而且反映了部分熔融和岩浆后期演化过程中主要矿物和副矿物溶解或结晶行为的差异性。分析表明, 钙长石的结晶分离作用和部分熔融过程中锆石溶解程度的升高是导致该岩脉异常地球化学特征的主控因素。该岩脉所揭示的地球化学过程有助于解释青藏高原内部中生代以来的相似中酸性碱性火山岩的成因。

**关键词:**红柳峡; 安山岩; 部分熔融; 高场强元素; 青藏高原北缘

**中图分类号:** P588.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)02-0326-06

## 1 引言

青藏高原内部和周缘地区发育着一系列中生代以来的基性和中酸性火山岩。尽管它们的规模较小, 但分布范围广, 引起了广泛注意。与新生代以来的火山岩的研究相比, 对中生代火山岩的研究要薄弱的多。近年来, 随着对阿尔金断裂的研究程度的提高, 在阿尔金断裂的两侧陆续发现了一系列中生代基性和中性火山岩<sup>[1]</sup>。这些火山岩为研究青藏高原北缘和东北缘岩石圈地幔的特征, 火山作用与区域构造之间的关系提供了一个窗口。但要较合理地限定这些火山岩所代表的深部地壳或上地幔的物质组成和地球化学特征, 首先需要对这些火山岩的地球化学特征进行细致的解剖, 确立它们的成岩过程(部分熔融、岩浆后期分异等特征)。

在阿尔金走滑断裂与祁连山北缘逆冲断裂带交汇的酒西盆地出露两套年龄分别为~85 Ma 的岩脉和~105 Ma 的基性熔岩<sup>[1]</sup>。该岩脉切割基性熔岩(图 1)。杨经绥等<sup>[2]</sup>研究表明, 这些基性熔岩在主要元素组成上可以分为粗面玄武岩和玄武安粗岩, 而岩脉为粗面安山岩。这些火山岩的成因可能与中生代区域伸展或古阿尔金断裂中生代活动所导致的局部

伸展相关<sup>[1]</sup>。基性熔岩的元素地球化学和 Sr-Nd 同位素系统特征表明它们是经过化学交代作用的富集岩石圈地幔部分熔融的产物<sup>[2]</sup>, 反映了酒西盆地地区岩石圈地幔精细尺度的不均一性。而~85 Ma 的岩脉具有非常特殊的地球化学特征(高  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 、Zr、Hf、Y、HREE 等), 和 Turner et al<sup>[3]</sup>所研究的青藏高原内部的部分火山岩具有某些相似性。但该岩脉所反映的岩浆过程与~105 Ma 的基性熔岩之间存在显著的差异, 有必要作详细、单独的讨论。同时, 该岩脉在主要元素地球化学特征上与青藏高原内部的许多中酸性火山岩相似, 通过详细解剖该岩脉对深入认识青藏高原新生代以来的钾质和钙碱性火山岩的成因和地球化学过程也有所帮助, 进一步限定这些火山岩所代表的地球动力学意义。

## 2 安山岩脉的岩石特征

杨经绥等<sup>[2]</sup>对该粗面岩脉岩进行了单矿物斜长石的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年, 得到  $(82.05\pm 0.8)\text{Ma}$  坪年龄和  $(82.05\pm 2.87)\text{Ma}$  等时线年龄, 接近样品的全氩释放年龄(85.3 Ma)。因此, 该值代表脉岩的侵位年龄。

所研究的安山质脉岩具有全晶质等粒结构, 粒度  $>1\text{mm}$ ,

收稿日期: 2005-11-25; 改回日期: 2006-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(40272096, 40572122)资助。

作者简介: 曾令森, 男, 1970年生, 留美博士, 从事构造地质、构造地球化学与构造地貌学研究; E-mail: lzeng@ccsd.org.cn。

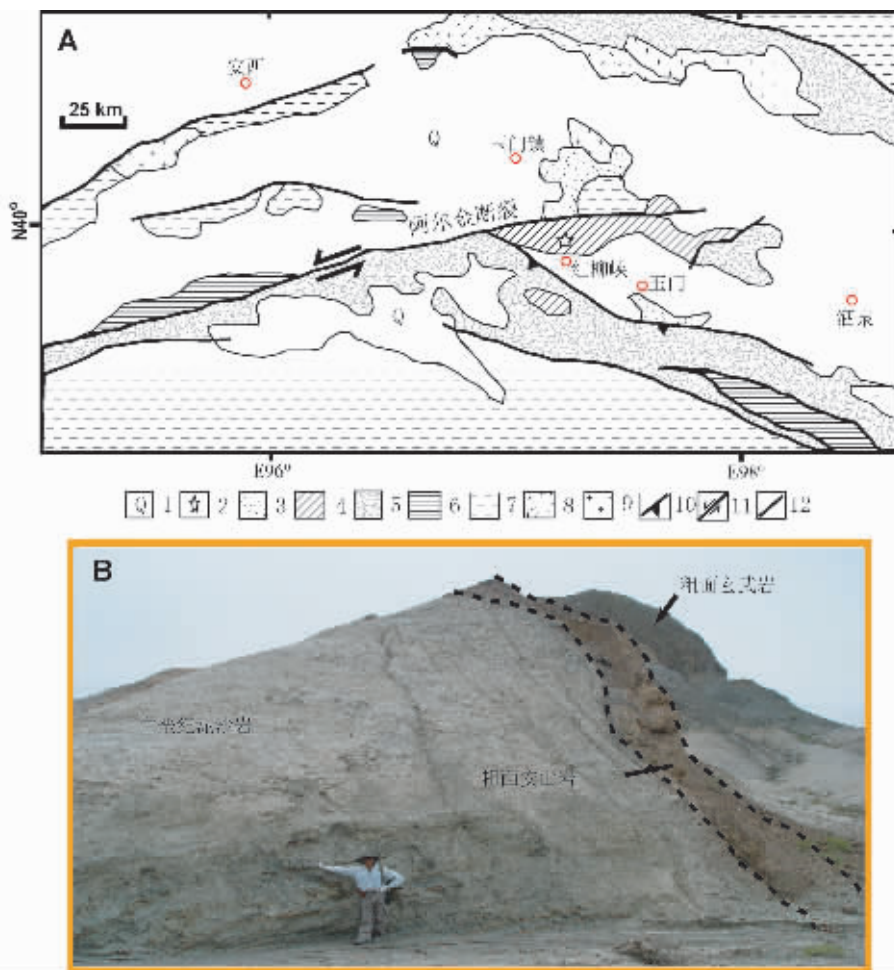


图 1 青藏高原北缘红柳峡火山岩位置及区域地质简图(A)和野外照片(B)

1—第四纪沉积物;2—红柳峡火山岩;3—新近系陆相碎屑岩;4—白垩系泥沙岩;5—早古生界造山带;6—前寒武纪变质基底;  
7—古生界;8—闪长岩类;9—花岗岩类;10—逆冲断层;11—走滑断裂;12—断层

Fig.1 Geological sketch map (A) and field photograph (B) showing the location of the Hongliuxia volcanic field and the relationship between the andesitic dike and the shoshonitic basaltic flow on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau

1-Quaternary;2-Hongliuxia volcanic field;3-Neogene terrestrial clastic rocks;4-Cretaceous argillaceous-arenaceous rocks;  
5-Early Paleozoic orogenic belt;6-Precambrian metamorphic basement rocks;7-Paleozoic;8-Granodioritic rocks;9-Granitic rocks;  
10-Thrust fault;11-Strike-slip fault;12-Fault

块状构造。岩石主要呈辉长结构或辉绿结构,矿物中长石占 70%~80%,单斜辉石 10%~20%,少量黑云母、角闪石及一些金属矿物。成分测定表明宽板状长石为钠长石:  $Ab_{03.4}Or_{1.4}An_{5.2}$ 。单斜辉石为透辉石  $Wo_{45-46}En_{36-43}Fs_{11-21}$ 。与粗玄武岩相比,脉岩中辉石的 En 较低,但斜长石中 Ab 高。据其化学成分定名为粗面安山岩<sup>[1]</sup>。

### 3 全岩元素和 Sr-Nd 同位素地球化学分析方法

为确定该岩脉的地球化学特征,笔者对该岩脉和附近的 10 个基性熔岩(5 个粗面玄武岩和 5 个玄武安粗岩)进行了全岩主要和微量元素地球化学成分分析,同时对其中的 6 个

基性熔岩(3 个粗面玄武岩和 3 个玄武安粗岩)和该岩脉进行了 Sr 和 Nd 同位素测量。主要及微量元素的测试在国土资源部国家地质实验测试中心进行。主要元素通过 XRF(X 荧光光谱仪 3080E)方法测试,分析精度为 5%。微量元素和稀土元素(REE)通过等离子质谱仪(ICP-MS-Excell)分析,含量大于  $10 \times 10^{-6}$  的元素的测试精度为 5%,而小于  $10 \times 10^{-6}$  的元素精度为 10%。个别在样品中含量低的元素,测试误差大于 10%。全岩 Sr 和 Nd 同位素成分测试在美国加州理工学院 Saleeby 教授的放射性同位素实验室进行,具体的样品准备、处理和测试流程和 Pickett and Saleeby<sup>[19]</sup> 和 Zeng et al<sup>[5, 6]</sup> 描述的一样。Nd 和 Sr 测试结果分别按  $^{146}Nd/^{142}Nd = 0.63615$  和

表 1 青藏高原北缘红柳峡中-基性火山岩的主要和微量元素组成特征

Table 1 Major and trace element compositions of basaltic and andesitic rocks in the Hongliuxia area, northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau

样品	A组	B组	99Y632
SiO <sub>2</sub> /10 <sup>-2</sup>	48.84	50.07	57.34
TiO <sub>2</sub>	1.67	1.91	0.74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.72	16.67	14.64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.10	4.24	1.63
FeO	3.81	4.38	1.46
MnO	0.16	0.15	0.11
MgO	7.69	5.54	2.58
CaO	8.13	7.10	5.65
Na <sub>2</sub> O	3.59	4.02	5.95
K <sub>2</sub> O	1.87	3.08	5.88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.52	0.91	0.09
LOI	0.88	0.89	3.55
Total	99.95	99.67	99.62
A/CNK	0.6925	0.7289	0.5540
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O (μg/g)	5.46	7.11	11.83
Sc	25.65	21.85	5.36
V	170.00	158.00	13.80
Cr	233.87	130.97	4.96
Ni	89.54	55.63	3.28
Co	49.58	46.53	3.92
Cu	28.67	30.79	7.36
Zn	99.26	105.76	56.50
Ga	20.21	21.63	15.30
Rb	27.88	55.03	114.00
Sr	750.00	1184.67	529.00
Y	21.57	23.78	48.20
Zr	210.32	255.93	1421.00
Nb	21.28	34.31	104.00
Ba	748.33	1296.67	577.00
La	39.95	60.90	148.00
Ce	80.97	130.60	312.00
Pr	9.48	15.26	29.70
Nd	38.34	58.60	97.00
Sm	7.28	9.39	14.00
Eu	2.23	2.53	0.70
Gd	6.09	6.95	10.80
Tb	0.94	0.99	1.60
Dy	4.77	5.03	8.85
Ho	0.82	0.91	1.75
Er	2.22	2.63	5.65
Tm	0.29	0.36	0.85
Yb	1.80	2.24	5.77
Lu	0.26	0.33	0.87
Hf	4.93	6.01	26.40
Ta	1.77	2.88	8.48
W	79.24	141.69	1.03
Pb	8.91	15.95	19.00
Th	3.53	5.66	39.80
U	0.69	1.15	7.33

注:A组(粗面玄武岩)和B组(玄武安粗岩)岩石地球化学成分分别为5个样品的平均值;A/CNK为Al/(Ca+Na+K)的摩尔比值。

<sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr = 0.1194进行标准化,以校正质量分馏的效应。所用的Sr和Nd同位素测试标准分别为NBS987和La Jolla

Nd标样,标准值分别为0.710252和0.511859。在测试过程中测试精度Sr同位素为±0.000013 (n=25),Nd同位素为±0.000017 (n=25)。ε<sub>Nd</sub>(t)依据下述公式计算:

$$\varepsilon_{Nd}(t) = \left[ \frac{(^{143}Nd/^{144}Nd)_{sample}(t)}{(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR}(t)} - 1 \right] \times 10^4 (1)$$

其中,  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR}(0) = 0.512635$ ,  $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR}(0) = 0.1966$ ,  $t$ 为样品的年龄。对于基性熔岩和粗面安山岩, Sr和Nd同位素比值分别按  $t = 100$  Ma和  $t = 85$  Ma进行校正。分析结果见表1(表1中A和B组基性熔岩的成分为平均值, N=5)。

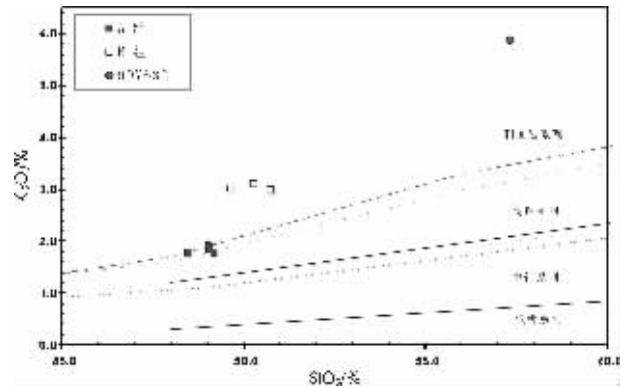


图2 红柳峡火山岩的K<sub>2</sub>O与SiO<sub>2</sub>关系图(据参考文献[7-8])

Fig.2 K<sub>2</sub>O versus SiO<sub>2</sub> covariation diagram of the Hongliuxia volcanic rocks (after references [7-8])

#### 4 安山岩脉的地球化学特征

岩石化学成分显示红柳峡基性熔岩与脉岩两者差别十分明显。根据杨经绥等<sup>[1]</sup>的前期研究结果,在K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O和SiO<sub>2</sub>含量变化图上,红柳峡基性熔岩落在粗玄武岩和玄武粗安岩区间。粗面安山质岩脉SiO<sub>2</sub>为57.34%,K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O为11.8%,Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O比值较低为1.01,A/CNK比值为0.5540,但岩石的TiO<sub>2</sub>含量低(0.74%),MgO也低(2.58%)。相对于岩脉,基性熔岩的SiO<sub>2</sub>含量相对低(48.47%~50.29%),K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O总量较低(5.3%~7.2%),Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O比值高(1.3~2.0)和A/CNK比值较高(0.6925~0.7289),并且,岩石中的TiO<sub>2</sub>高(1.6%~2.0%)和MgO高(5.4%~7.9%)(图2、表1)。粗面安山岩脉具有较低的A/CNK比值,反映了该岩脉强烈的过碱性。

根据它们的Sr、Nd放射性同位素和元素地球化学组成,红柳峡基性熔岩可以分为A和B两组<sup>[2]</sup>(表1、表2)。A组岩石的初始<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr和ε<sub>Nd</sub>范围分别为0.70616~0.70620和-4.48~-5.34,低于B组的0.70649~0.70666和-4.11~-4.43。在元素地球化学特征上,与B组岩石相比,A组岩石同时具有较低的LREE,Nb,Ta,Sr,Rb,SiO<sub>2</sub>,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,K<sub>2</sub>O和Na<sub>2</sub>O含量和(La/Gd)<sub>N</sub>(其中N为球粒陨石标准化,标准化值采用Sun and McDough<sup>[6]</sup>及Rb/Sr比值,但MgO,Th/U和

表 2 青藏高原北缘红柳峡中-基性火山岩 Sr、Nd 同位素及重要元素比值特征

Table 2 Isotope ratios of Sr, Nd and other important elements in the Hongliuxia intermediate-basic volcanic rocks on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau

元素比值	A 组	B 组	99Y632
Rb/Sr	0.0372	0.0467	0.2155
Sm/Nd	0.1882	0.1604	0.1443
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	0.706366	0.706795	0.707945
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr(t)	0.706181	0.706569	0.706539
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	0.512336	0.512350	0.512207
$\epsilon_{Nd}(t)$	-4.77	-4.29	-6.94
Na <sub>2</sub> O/CaO	0.44	0.57	1.05
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1.92	1.30	1.01
Na/Ta	12.03	11.95	12.26
Zr/Hf	43.1346	43.68	53.83
Th/U	5.12	4.91	5.43
Y/Zr	0.1069	0.0935	0.0339
LREE	184.34	284.23	612.20
Eu/Eu*	1.0147	0.9500	0.1729
Ce/Ce*	0.9982	1.0283	1.1282
(La/Gd) <sub>N</sub>	5.4935	7.3454	11.4791
(La/Yb) <sub>N</sub>	17.5655	18.8333	17.7593

注:Ce 异常 (Ce/Ce\*) 和 Eu 异常 (Eu/Eu\*) 分别按公式  $Ce/Ce^* = (Ce)_N / [(La)_N \times (Pr)_N]^{1/2}$  和  $Eu/Eu^* = (Eu)_N / [(Sm)_N \times (Gd)_N]^{1/2}$  来计算。

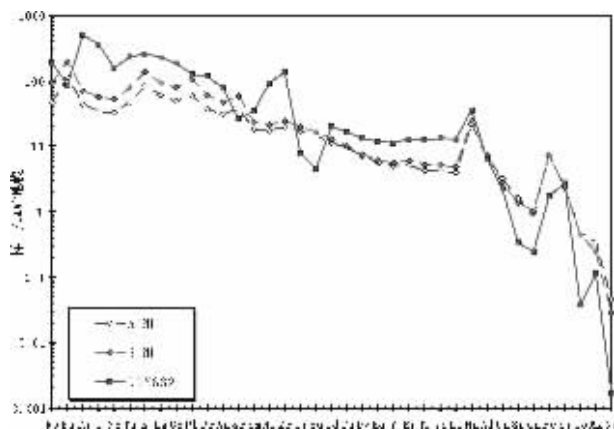


图 3 微量元素蜘蛛图解<sup>[7]</sup>

Fig.3 Spidergram showing the trace element geochemistry of the Hongliuxia volcanic rocks<sup>[7]</sup>

Sm/Nd 较高<sup>[4]</sup>。

基性熔岩与粗面安山岩脉除了主元素含量显然不同之外,二者的稀土元素及微量元素上也存在明显差别。基性岩类稀土元素总量为 190~333 μg/g,而粗面安山岩脉 REE 总量达 709 μg/g。二者都为 LREE 强烈富集性,但粗面安山岩脉的富集程度更高些(图 3)。在 REE 球粒陨石标准化模式上还可以看出粗面岩显示显著的 Eu 负异常,反映了斜长石分

离结晶的效应。和附近的 A 组和 B 组基性熔岩相比(图 3),该岩脉具有异常高的 Zr (1421.0 μg/g), Hf (26.4 μg/g), Nb (104 μg/g), Ta (8.5 μg/g), Y (48.2 μg/g), Th (39.8 μg/g), U (3.7 μg/g)和 Rb/Sr(0.215 5),但较低的 TiO<sub>2</sub>。尽管该岩脉具有异常高的 Nb 和 Ta 含量,但它的 Na/Tb 比值与典型大陆地壳岩石的相当,为 12.26。在 Sr-Nd 同位素系统特征上,它具有和粗面玄武岩及玄武安粗岩相似的初始 Sr 同位素成分,但明显较低的初始 Nd 同位素比值(表 2)。在球粒陨石标准化的稀土分布模式图上(图 4),该岩脉具有:(1)明显的铈(Ce)正异常,Ce/Ce\*=1.1282;(2)LREE 相对于 MREE 和 HREE 相对富集;(3)MREE 和 HREE 近乎平直;(4)从 MREE 到 HREE 存在细微但有意义的变化,具体表现在 (Gd/Ho)<sub>N</sub>=1.745 3 变化到 (Ho/Yb)<sub>N</sub>=0.886 4,这种稀土配分曲线斜率变化反映了重稀土相对于中稀土富集。

### 5 成因讨论及意义

从上述数据中,可以看出该安山岩脉具有非常特殊的地球化学特征,具体表现在:(1)强烈过碱性;(2)强烈富集高场强元素(HFSE),如 Zr, Hf, Y, Nb, Ta 等;(3)明显的 Ce 正异常;(4)近平直的 MREE 和 HREE 稀土配分模式;及(5)与粗面玄武岩相似的初始 Sr 但明显较低的 Nd 同位素比值(大于 2ε<sub>Nd</sub> 单位)。

在 Sr-Nd 同位素系统特征上,和基性熔岩相比,该岩脉具有相对降低的初始 Nd 比值,大于 2ε<sub>Nd</sub> 单位,这种 Nd 同位素组成似乎是地壳混染造成的。但和典型地壳岩石相比,该岩脉具有:(1)异常高的 Nd 浓度(97.0 μg/g),高于典型地壳的 Nd 浓度(10~30 μg/g);(2)较高的 Sr 含量(529.0 μg/g)和初始 Sr 同位素比值(0.706 539);(3)异常高的 Nb 和 Ta 含量。这些特征都很难是地壳混染的结果,因此,该岩脉的 Nd 同位素比

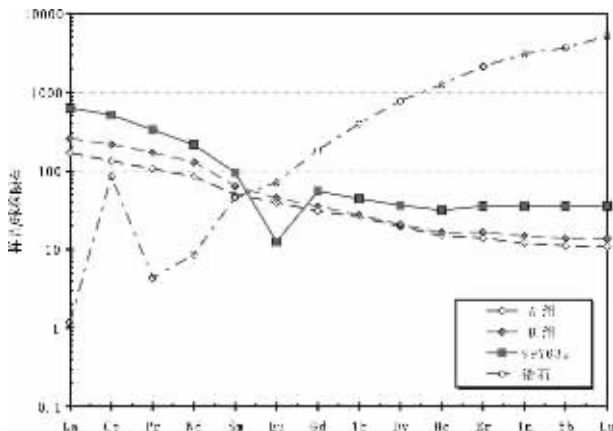


图 4 球粒陨石标准化红柳峡粗面火山岩的稀土元素配分模式图(据参考文献[14~15])

Fig.4 Chondrite-normalized REE distribution patterns for the Hongliuxia trachytic volcanic rocks (after Rubatto, 2002; Heaman et al., 1990) [14,15]

值代表着源区的 Nd 同位素特征。大量野外和实验观测表明变沉积岩部分熔融产生的熔体的 SiO<sub>2</sub> 含量应大于 65%<sup>[6,10-12]</sup>, 而该岩脉的 SiO<sub>2</sub> 含量为 57.34%, 远远低于 65%, 因此可以排除变沉积岩部分熔融在该岩脉形成中的作用, 源区可能为基性下地壳或富集型岩石圈上地幔。

在深部地壳的部分熔融或源于地幔岩石圈的岩浆后期结晶分离过程中, 斜长石是重要组分之一, 直接控制着熔体的 Sr 和 LREE 含量及 Na<sub>2</sub>O/CaO 比值。因此对斜长石在部分熔融或岩浆后期分离结晶过程中行为的认识是理解部分熔融岩浆地球化学成分特征的重要一环。在恒温条件下, 随压力的升高, 斜长石逐渐往钠长石转化; 在所有压力条件下, 随温度的升高, 斜长石往钙长石转化。斜长石的这种成分变化趋势说明钠长石在高压下比钙长石稳定, 及在部分熔融中, 随温度的升高和部分熔融程度的增加, 钠长石相对于钙长石优先溶解于熔体中<sup>[13]</sup>。在部分熔融或岩浆的后期分异结晶过程中, 钠质斜长石的优选熔融作用或钙质长石的结晶分异都可能导致最后岩浆的 Na<sub>2</sub>O 含量的升高, 使岩浆向碱性或过碱性发展。由于 Zr<sup>4+</sup> 与熔体中不与 Al 结合的自由碱离子 (K<sup>+</sup> 或 Na<sup>+</sup>) 形成络合物, Zr 在过碱性岩浆中的溶解度增加, 促使岩浆的 Zr 含量升高<sup>[14,15]</sup>。但钠质斜长石的优先熔融不能解释岩脉的显著的 Eu 负异常。相反地, 钙质长石的分离结晶作用可以解释岩脉中的 Eu 负异常、碱性升高、相对高的 Rb/Sr 比值和较高的 Zr 含量, 并且和岩脉中的斜长石主要为钠长石相吻合。在原始地幔标准化的蛛网图上 (图 3), 该岩脉具有明显的 Th、U、Hf、Zr、Na 正异常, 微弱的 Pb 但明显的 Sr 和 Eu 负异常。岩脉中 Na 正异常和 Pb、Sr、Eu 的负异常的相关性在一定程度上也表明钙长石分离结晶作用。但是, 这种过程不能解释该岩脉中异常高的 Hf、Nb、Ta 和 Y 的含量和明显的 Ce 正异常。因此, 除了这种因素之外, 该岩脉特殊的地球化学特征更反映了源区或部分熔融过程的特殊性。

锆石是地壳岩石的重要副矿物之一, 大量的研究都揭示了锆石具有明显的 Ce 正异常 (Ce/Ce\* >> 10)、Eu 负异常或没有异常, 并且高度富集 HREE 和 Hf、Y<sup>[16-18]</sup>。在部分熔融过程中或在岩浆后期结晶分异过程中, 如果大量锆石作为熔融过程中的残留相或从岩浆中分离结晶, 那么最终的岩浆会具有 Ce 负异常且 HREE 高度亏损。由于岩浆作用不可能产生岩浆的 Ce 异常<sup>[19-20]</sup>, 该岩脉的 Ce 正异常和平直的 MREE 和 HREE 稀土配分模式 (图 3) 可以排除上述两种过程, 而要求锆石在部分熔融中高度的溶解。同时, 该岩脉的几乎平直的 MREE 和 HREE 稀土配分模式也要求源区不含石榴石, 或部分熔融过程中石榴石不以残留相的形式存在。

上述分析表明, 钙长石的分离结晶作用和锆石在部分熔融过程中溶解程度的升高是导致该岩脉异常地球化学特征的主控因素。在主要元素和某些微量元素及 Sr、Nd 放射性同位素地球化学特征上, 该岩脉与青藏高原内部中生代以来的碱性甚至钾质中性火山岩相似, 如 (1) 相对于亏损地幔, 较高

的 Sr 和较低的 Nd 同位素组成; (2) 较高的 Sr 和 K<sub>2</sub>O 含量; (3) 较高的 Zr 含量等。该岩脉所反映的岩浆地球化学过程可能代表着大陆内部岩浆作用的共性, 即在青藏高原内部, 中性火山岩的形成过程中, 钙长石和某些副矿物的异常行为可能是导致所观测到的碱性元素 (Na 和 K) 和某些微量元素 (Sr、Ba、Zr 等) 的异常地球化学特征。

#### 参考文献 (References):

- [1] 杨经绥, 孟繁聪, 张建新, 等. 重新认识阿尔金断裂东段红柳峡火山岩的时代及构造意义[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(增刊): 83~89. Yang Jingsui, Meng Fancong, Zhang Jianxin, et al. The Shoshonitic volcanic rocks at Hongliuxia: Pulses of the Altyn Tagh fault in Cretaceous? [J]. Science in China (Series D), 2001, 44 (supp.): 94~102 (in Chinese).
- [2] Zeng L, Yang J, Xu Z, et al. Melting a fine-scale heterogeneous mantle source and the formation of the Hongliuxia shoshonitic volcanic rocks, NW China: Constraints from Sr and Nd isotope and trace element studies. Eos, Trans. AGU, 2005, 86(47), Fall Meet. Suppl., Abstract V41C-1453.
- [3] Turner S, Arnaud N, Liu J, 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
- [4] Pickett D A, Saleeby J B. Nd, Sr and Pb isotopic characteristics of Cretaceous intrusive rocks from deep levels of the Sierra Nevada batholith Tehachapi Mountains California [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1994, 118: 198~215.
- [5] Zeng L, Saleeby J B, Asimow P. Nd isotope disequilibrium during crustal anatexis: A record from the Goat Ranch migmatite complex southern Sierra Nevada batholith (SNB) California [J]. Geology, 2005, 33: 53~56.
- [6] Zeng L, Saleeby J B, Ducea M. Geochemical characteristics of crustal anatexis during the formation of migmatite at the Southern Sierra Nevada, California [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2005, 150(4): 386~402.
- [7] Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms [M]. Blackwell, Oxford, 1989.
- [8] Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and trace elements [J]. Lithos, 1989, 22: 247~263.
- [9] Sun S-S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes [A]. In: Saunders A and Norry M (eds.). Magmatism in the Ocean Basins [C]. Geological Society London Special Publication, 1989, 42: 313~345.
- [10] Patiño-Douce A E, Harris N. Experimental constraints on Himalayan Anatexis [J]. Journal of Petrology, 1998, 39: 689~710.
- [11] Le Breton N, Thompson A B. Fluid-absent (dehydration) melting of biotite in metapelite in the early stages of crustal anatexis

- [11]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1988,99:226~237.
- [12] Vielzeuf D, Holloway J R. Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1988,98:257~276.
- [13] Skjerlie K P, Patino-Douce A E. The fluid-absent partial melting of a zoisite-bearing quartz eclogite from 1.0 to 3.2 GPa: Implications for melting in thickened continental crust and for subduction-zone process[J]. Journal of Petrology, 2002,43:291~314.
- [14] Watson E B. Zircon saturation in felsic liquids: Experimental results and applications to trace element geochemistry [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1979,70:407~419.
- [15] Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983,64:295~304.
- [16] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [J]. Chemical Geology, 2002,184:123~138.
- [17] Heaman L M, Bowins R C, Crocket-James H. The chemical composition of igneous zircon suites: Implications for geochemical tracer studies [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990,54:1597~1607.
- [18] Hoskin P W. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005,69:637~648.
- [19] Schreiber H D, Lauer H V, Thanyasir T. The redox state of cerium in basaltic magmas: An experimental study of iron-cerium interaction in silicate melts [J]. Geochimica Cosmochimica Acta, 1980,44:1599~1612.
- [20] 曾令森, Mihai Ducea, Jason Saleeby. 变泥质岩的深熔作用与铈(Ce)负异常的熔体的成因[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(5): 425~430.
- Zeng Lingsen, Ducea Mihai, Saleeby Jason. The formation of leucosomes with pronounced Ce anomalies from metasediments partial melting: Implications for the origins of Ce anomalies in oceanic island arc lavas [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2005,24(5): 425~430(in Chinese with English abstract).

## Genesis of the Cretaceous HFSE-enriched Hongliuxia andesitic dike on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau: Anorthite fractional crystallization and enhanced dissolution of zircon

ZENG Ling-sen, YANG Jing-sui, LI Hai-bing

(Key Laboratory of Continental Dynamics of the Ministry of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The Hongliuxia volcanic field is located at the junction of the Altyn Tagh strike-slip fault and the northern Qilian Shan frontal thrust fault. In this area, an andesitic dike, ~85 Ma old, cuts through ~105 Ma shoshonitic and basaltic lavas. Major and trace element studies and Sr and Nd isotopic analyses of this suite of rocks show that this younger dike has anomalous geochemistry, as compared to nearby basalts. This dike has the following salient features: (1) peralkaline with  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=11.8\%$  and  $\text{A}/\text{CNK}=0.5540$ ; (2) highly enriched in HFSE (e.g.  $\text{Zr}=1421 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Hf}=26.4 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Y}=48.2 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Nb}=104.0 \mu\text{g/g}$  and  $\text{Ta}=8.5 \mu\text{g/g}$ ); (3) a pronounced positive Ce anomaly ( $\text{Ce}/\text{Ce}^*=1.128$ ); (4) nearly flat chondrite-normalized MREE and HREE distribution patterns; and (5) similar initial Sr but notably low Nd (by  $>2 \epsilon_{\text{Nd}}$  units) isotope ratios, as compared to those in the Hongliuxia shoshonitic basalts. These differences reflect not only the difference in geochemistry of their respective source regions but also the difference in behaviors of dissolution or crystallization of dominant minerals and accessory minerals during partial melting and magmatic evolution. Fractional crystallization of anorthite and enhanced dissolution of zircons in its source regions are the main controlling factors responsible for the anomalous geochemistry of this dike. The geochemical processes recorded by this dike may help the interpretation of similar intermediate-acid alkaline volcanic rocks since the Mesozoic on the Qinghai-Tibet Plateau.

**Key words:** Hongliuxia; andesitic dike; partial melting; HFSE; northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau

**About the first Author:** ZENG Ling-sen, male, born in 1970, Ph.D in geology with the California Institute of Technology, his research interests include structural geology, geochemistry and tectonics; E-mail: lzeng@ccsd.org.cn.