

# 河北下堡基性岩墙地球化学特征及源区性质

杨毓红<sup>1,2</sup>, 刘 燊<sup>1</sup>, 胡瑞忠<sup>1</sup>, 冯彩霞<sup>1</sup>, 冯光英<sup>1,2</sup>, 齐有强<sup>1</sup>, 杨朝贵<sup>1,2</sup>, 唐 亮<sup>1,2</sup>  
YANG Yu-hong<sup>1,2</sup>, LIU Shen<sup>1</sup>, HU Rui-zhong<sup>1</sup>, FENG Cai-xia<sup>1</sup>, FENG Guang-ying<sup>1,2</sup>,  
Qi You-qiang<sup>1</sup>, YANG Chao-gui<sup>1,2</sup>, Tang Liang<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

1. *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China;*

2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

**摘要:**通过对河北后城基性岩墙进行系统研究,  $\text{SiO}_2=47.07\%\sim 50.28\%$ ,  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  在  $2.83\%\sim 3.75\%$  之间变化。具有明显的轻稀土元素富集  $((\text{La}/\text{Yb})_N=4.40\sim 4.86)$  和大离子亲石元素 (Rb、Th 和 U 等) 富集现象, 亏损高场强元素 Nb 和 Ta。地球化学特征表明, 岩墙产于板内拉张的构造环境, 经过了橄榄石、单斜辉石、角闪石和黑云母等矿物的分离结晶作用。对 La/Sm、Ta/La、Nb/La 的分析表明, 本区岩浆在上升过程中受到地壳物质的混染作用影响不明显, 岩墙的源区与深俯冲作用引起的地幔交代作用有关。通过对微量元素及稀土元素比值的研究证明, 基性岩墙源区为过渡型地幔源区, 岩墙的母亲岩浆来自石榴子石二辉橄榄岩地幔, 主要经历了石榴子石+尖晶石二辉橄榄岩部分熔融, 熔融程度在  $10\%\sim 20\%$  之间, 岩浆的起源深度在 75km 左右。

**关键词:**基性岩墙; 主量元素; 微量元素; 源区; 河北省下堡村

中图分类号: P595 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2013)04-0607-10

**Yang Y H, Liu S, Hu R Z, Feng C X, Feng G Y, Qi Y Q, Yang C G, Tang L. Geochemical features and petrogenesis of Houcheng mafic dyke in Hebei: Evidence from major and trace elements. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(4):607-616**

**Abstract:** Systemic studies of major elements and trace elements of the mafic dyke from Houcheng in Hebei Province indicate that  $\text{SiO}_2=47.07\%\sim 50.28\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  of the mafic dyke vary from  $2.83\%$  to  $3.75\%$ ,  $\text{LREE}((\text{La}/\text{Yb})_N=4.40\sim 4.86)$ , with the enrichment of LILE (Rb, Th and U) and depletion of HFSE (Nb and Ta). The geochemical features of the mafic dykes show that they were derived from an intraplate extensional setting and experienced fractional crystallization of olivine + pyroxene + hornblende + biotite during the magmatic evolution. In addition, the La/Sm, Ta/La and Nb/La ratios suggest indistinct crustal contamination during the upward migration of the magma. Based on the ratios of trace elements and REE, the authors hold that the magma source belonged to transitional mantle. The parental magma of the mafic dykes was formed in the garnet + spinel mantle with  $10\%\sim 20\%$  partial melting; moreover, the magma came from about 75km lithosphere mantle.

**Key words:** mafic dyke; major and trace elements; source; Houcheng; Hebei Province

燕山地区位于华北克拉通北缘, 北邻兴蒙造山带, 其独特的构造位置对解析华北和北方造山带的演化具有重要的科学意义。目前, 虽然对燕山地区岩浆岩的研究较多且成果丰富<sup>[1-3]</sup>, 但主要集中在火山

岩方面。基性岩墙分布少且规模较小, 导致对燕山地区基性岩墙的研究还很薄弱<sup>[4]</sup>。本文所研究的赤城县后城镇下堡基性岩墙之前一直未进行过研究探讨。由于基性岩墙中用以精确定年的锆石数量较少,

收稿日期: 2012-05-25; 修订日期: 2012-09-10

资助项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 40673029、40773020) 和西北大学大陆动力学国家重点实验室开放课题 (编号: 08LCD08)

作者简介: 杨毓红 (1985-), 女, 在读博士, 地球化学专业。E-mail: yangyuhong1111@163.com

通讯作者: 刘燊 (1974-), 男, 博士, 研究员, 从事岩石学和地球化学研究。E-mail: liushen@vip.gyig.ac.cn

虽进行了一定的测年,但未获得很好的测年数据。本文从主、微量元素入手,重点对后城基性岩墙的构造特征及源区进行了分析。

1 地质概况

本文研究的基性岩墙位于河北省赤城县后城镇下堡村,地处华北克拉通北缘,内蒙台背斜与燕山沉陷带的交界,丰宁-隆化、尚义-平泉和上黄旗-乌龙岗 3 条深断裂交接部位<sup>[5]</sup>。出露地层主要包括中元古界蓟县系雾迷山组白云岩、铁岭组白云岩、竹叶状泥晶粒屑灰岩,中生界上侏罗统土城子组砖红色砂岩、粉砂岩夹含砾岩透镜体和中侏罗统下花园组砾岩。1:5 万区域地质图和地质资料研究表明,研究区侵入岩分布广泛(潜流纹岩,142Ma 和石英闪长岩,164Ma)<sup>[6]</sup>。基性岩墙侵入新元古界青白口系及中侏罗统下花园组砾岩和上侏罗统土城子组砂岩中,推断其侵入时代可能为侏罗纪。该岩体出露规模较大,呈弧形向东突出(图 1),岩墙倾向 260°,倾角 87°,近直立,发育柱状节理(图 2-a),出露宽度约 200m,高度约 60m。

2 样品分析和岩相学特征

本文研究的 18 块新鲜样品均采自岩墙西部。对所采的样品均做了主、微量元素分析。主、微量元素测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。主量元素测试采用 Axios PW4400 型 X 荧光光谱仪(XRF),分析精度优于 3%;微量元素采用型号为 ELAN DRC-e 的 ICP-MS 完成,精度优于 10%。下堡基性岩墙的岩石组成主要为

辉绿岩,具有典型的辉绿结构,块状构造,主要矿物为单斜辉石(40%~35%)和基性斜长石(58%~63%),含少量黑云母和 Fe-Ti 氧化物(磁铁矿或钛铁矿)(1%~2%)(图 2-b)。

3 地球化学特征

3.1 主量元素地球化学特征

主量元素分析结果如表 1,所有样品的 SiO<sub>2</sub> 含量介于 47.07%~50.28%之间,在全碱-硅(TAS)分类图解(图 3-a)中,研究样品主要投入拉斑玄武岩区,属亚碱性系列。由于蚀变过程中 K 和 Na 等碱金属元素较活泼,TAS 图解可能会产生偏差,所以采用不活泼元素组成的 Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y 图解(图 3-b)做进一步判别,结果与 TAS 判别图一致。其中,MgO=4.22%~6.44%(Mg<sup>#</sup>=39.2~50.8),K<sub>2</sub>O/(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)的平均比值为 0.26。另外,富 TiO<sub>2</sub>(1.71%~2.42%),K<sub>2</sub>O=0.71%~0.93%,Na<sub>2</sub>O>K<sub>2</sub>O,Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O=2.83%~3.75%。在 Harker 图解(图 4)中,MgO 和 SiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Zr、K<sub>2</sub>O 及 TiO<sub>2</sub> 呈明显的负相关,与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 呈明显的正相关,但与 CaO 无明显的相关性。

3.2 微量元素地球化学特征

微量元素分析结果见表 2,样品中的 Cr=53.9×10<sup>-6</sup>~102×10<sup>-6</sup>(平均为 71.29×10<sup>-6</sup>),Ni=33.6×10<sup>-6</sup>~99.7×10<sup>-6</sup>(平均为 64.08×10<sup>-6</sup>)。在原始地幔标准化蛛网图(图 5-a)中,Rb、Th 和 U 相对富集,Nb 和 Ta 相对亏损,Pb 明显富集,Sr 明显亏损。

3.3 稀土元素特征

稀土元素分析结果见表 2,样品的 ΣREE=100×

表 1 后城岩墙主量元素分析结果  
Table 1 Major elements analyses of Houcheng mafic dykes

|                                | %     |        |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 样品号                            | XB-1  | XB-2   | XB-3   | XB-4  | XB-5  | XB-6  | XB-7  | XB-8  | XB-9  | XB-10 | XB-11 | XB-12 | XB-13 | XB-14 | XB-15 | XB-16 |
| SiO <sub>2</sub>               | 48.52 | 49.26  | 48.00  | 50.28 | 48.15 | 47.89 | 47.84 | 47.30 | 49.43 | 48.48 | 49.07 | 48.82 | 48.60 | 48.88 | 47.07 | 48.12 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.29 | 14.23  | 15.11  | 13.61 | 13.66 | 14.92 | 14.73 | 14.65 | 13.07 | 14.03 | 13.61 | 13.69 | 13.58 | 13.76 | 14.59 | 13.83 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.68 | 14.40  | 13.94  | 14.43 | 14.14 | 13.47 | 13.71 | 13.52 | 14.19 | 13.75 | 14.25 | 14.10 | 14.04 | 14.05 | 13.59 | 13.82 |
| MgO                            | 5.82  | 5.70   | 6.44   | 4.22  | 5.64  | 6.25  | 6.42  | 6.43  | 4.23  | 5.46  | 4.71  | 4.56  | 4.36  | 4.48  | 6.37  | 5.68  |
| CaO                            | 8.60  | 9.05   | 8.84   | 8.08  | 8.60  | 8.71  | 8.83  | 8.78  | 8.15  | 8.60  | 8.90  | 9.05  | 8.91  | 8.95  | 8.76  | 9.06  |
| Na <sub>2</sub> O              | 2.30  | 2.18   | 2.26   | 2.37  | 2.11  | 2.24  | 2.13  | 2.18  | 2.42  | 2.19  | 2.83  | 2.40  | 2.23  | 2.24  | 2.35  | 2.50  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.86  | 0.81   | 0.74   | 0.93  | 0.83  | 0.77  | 0.70  | 0.71  | 0.94  | 0.81  | 0.92  | 0.88  | 0.87  | 0.88  | 0.70  | 0.77  |
| MnO                            | 0.19  | 0.19   | 0.18   | 0.20  | 0.19  | 0.18  | 0.18  | 0.18  | 0.20  | 0.17  | 0.19  | 0.19  | 0.19  | 0.19  | 0.18  | 0.18  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.19  | 0.18   | 0.15   | 0.20  | 0.17  | 0.15  | 0.15  | 0.15  | 0.21  | 0.18  | 0.19  | 0.19  | 0.19  | 0.19  | 0.15  | 0.16  |
| TiO <sub>2</sub>               | 2.04  | 2.02   | 1.75   | 2.42  | 2.03  | 1.68  | 1.71  | 1.71  | 2.39  | 2.02  | 2.23  | 2.23  | 2.26  | 2.21  | 1.75  | 1.98  |
| LOI                            | 2.34  | 2.29   | 2.71   | 3.19  | 3.69  | 3.33  | 3.36  | 3.51  | 3.90  | 3.66  | 2.65  | 3.16  | 3.65  | 3.27  | 3.64  | 3.24  |
| Total                          | 99.82 | 100.31 | 100.13 | 99.94 | 99.20 | 99.58 | 99.75 | 99.12 | 99.12 | 99.35 | 99.55 | 99.27 | 98.88 | 99.10 | 99.14 | 99.36 |
| Mg <sup>#</sup>                | 48.02 | 46.56  | 50.42  | 39.16 | 46.75 | 50.53 | 50.76 | 51.14 | 39.62 | 46.64 | 42.11 | 41.58 | 40.60 | 41.24 | 50.78 | 47.50 |

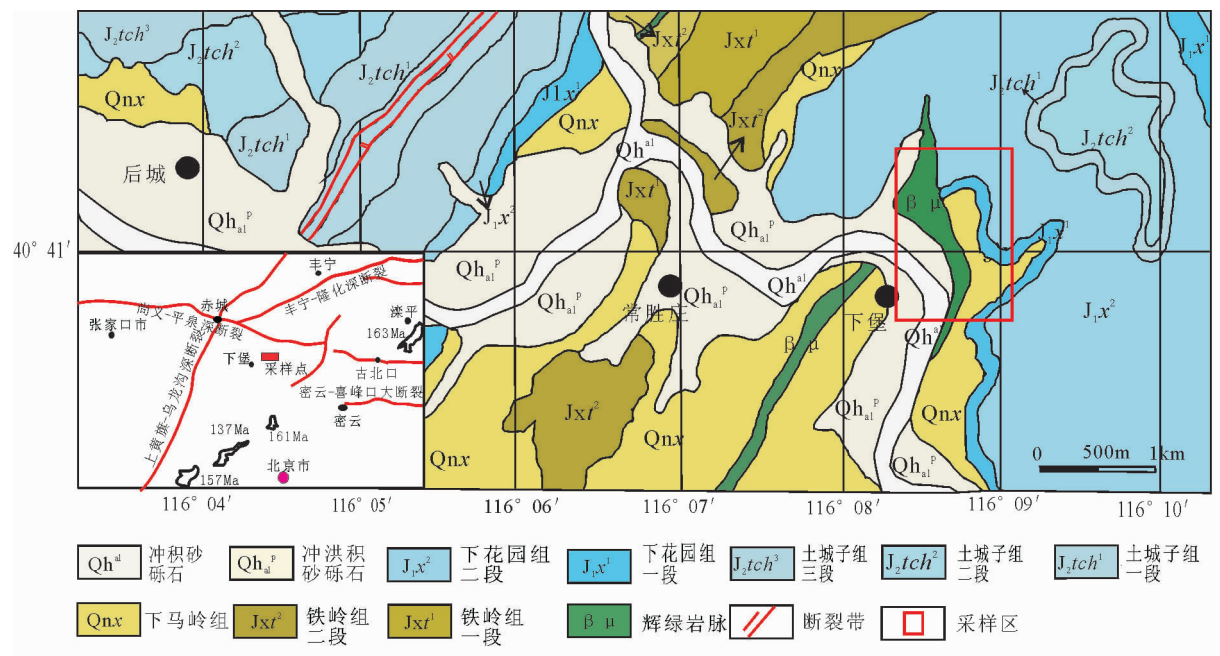


图 1 后城岩墙地质图

Fig. 1 Geological map of Houcheng mafic dyke

$10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$  (平均为  $126 \times 10^{-6}$ ),  $\Sigma \text{LREE} = 66.2 \times 10^{-6} \sim 99.1 \times 10^{-6}$ ,  $\Sigma \text{HREE} = 34.5 \times 10^{-6} \sim 53.1 \times 10^{-6}$ ,  $\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE} = 1.8 \sim 2.1$ , 轻重稀土元素分异不明显。球粒陨石标准化图解(图 5-b)显示, 轻稀土元素中等富集 ( $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 4.40 \sim 4.86$ )。另外,  $\delta \text{Eu} = 0.94 \sim 1.82$  (平均为 1.04), 暗示 Eu 异常不明显,  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 2.05 \sim 2.23$ , 轻稀土元素内部富集<sup>[9]</sup>,  $\delta \text{Ce} \approx 1$ , 暗示基性岩墙没受到低温蚀变作用的影响<sup>[9]</sup>。

4 讨论

4.1 构造环境分析

从主量元素分析结果看, 所有样品在 TAS 分类图解(图 3-a)及  $\text{Zr}/\text{TiO}_2\text{-Nb}/\text{Y}$  图解(图 3-b)中均投于拉斑玄武岩区, 而且稀土元素分析结果(表 2)同样显示拉斑玄武岩的特点(稀土元素总量较低, Eu 无异常、轻稀土元素中等富集 ( $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 5^{[10-11]}$ )。

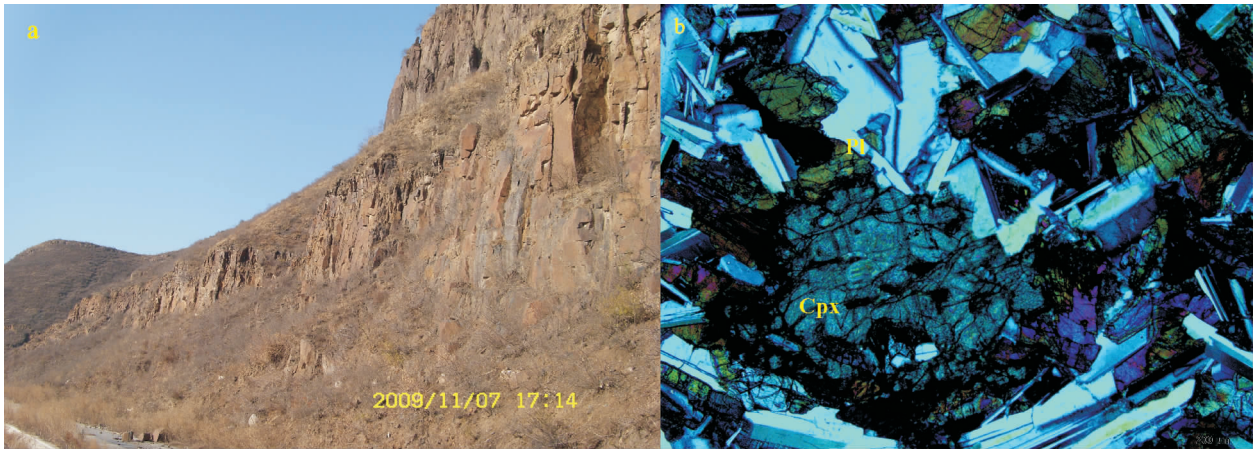


图 2 岩墙野外照片(a)和样品正交偏光镜下照片(b)

Fig. 2 Field photograph (a) and microscope photograph (b) of Houcheng mafic dyke

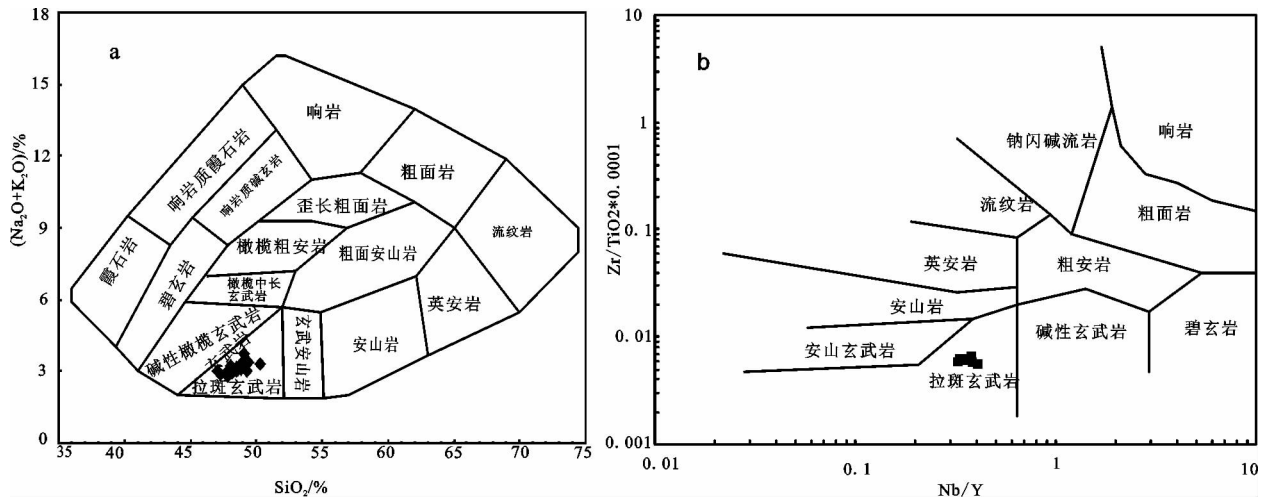


图 3 后城基性岩墙的全碱-硅(TAS)图解(a)<sup>[6]</sup>和  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$ -Nb/Y 图解(b)<sup>[7]</sup>

Fig. 3 Classification of rock types: TAS diagram of Houcheng basic dyke (a) and  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$ -Nb/Y diagram (b)

由以上特征可知,后城基性岩墙属拉斑玄武岩系列。拉斑玄武岩又分为大陆拉斑玄武岩和大洋拉斑玄武岩,从球粒陨石标准化图解(图 5-b)和原始地幔标准化蛛网图(图 5-a)中可看出,岩墙富集大离子亲石元素(LILE、K 和 Rb 等)和轻稀土元素,相对亏损高场强元素(Nb 和 Ta)和重稀土元素,以上都为板内拉斑玄武岩的特征<sup>[8,12]</sup>。要判别玄武岩的构造环境,应该选择在岩浆演化过程中能保持一定连续性,不易受后期地质作用干扰的元素,Zr、Y 和 Nb 等为不活动元素,用它们来判断基性岩的大地构造背景比较有效<sup>[13]</sup>。本文选择  $2\text{Nb}-\text{Zr}/4-\text{Y}$  图(图 6-a)和  $\text{Zr}/\text{Y}-\text{Zr}$  图解(图 6-b)来判别岩墙产出的构造背景,从图 6 可以看出,样品都位于大陆板内玄武岩和火山弧玄武岩范围,或直接落入板内玄武岩区域,这些证据都表明后城基性岩墙形成于大陆板内拉张环境中。

#### 4.2 分离结晶作用

研究表明,在  $\text{La}-\text{La}/\text{Sm}$  图中,平衡部分熔融的轨迹是一条斜线,而分离结晶作用则为一水平线<sup>[14-16]</sup>。本岩墙所采样品在  $\text{La}-\text{La}/\text{Sm}$  图(图 7)中为一水平线分布,且岩墙  $\text{Mg}^\#$  (39.16~50.78)降低,低于原始岩浆的参考数值(65<sup>[17-19]</sup>),  $\text{TiO}_2$  含量在 1.68%~2.42% (平均含量为 2.03%)之间,明显高于活动大陆边缘玄武岩(0.85%)<sup>[13]</sup>,暗示后城基性岩墙主要是通过分

离结晶作用形成的。在 Harker 图解中,  $\text{FeO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  与  $\text{MgO}$  的负相关关系反映了橄榄石、单斜辉石及 Ti-Fe 氧化物及磷灰石的分离结晶<sup>[14]</sup>。另外,样品中 Cr 含量为  $53.9 \times 10^{-6} \sim 102 \times 10^{-6}$  (平均为  $71.29 \times 10^{-6}$ ),  $\text{Ni} = 33.6 \times 10^{-6} \sim 99.7 \times 10^{-6}$  (平均为  $64.08 \times 10^{-6}$ ),与板内拉斑玄武岩( $\text{Ni} = 70 \times 10^{-6}$ )接近, Cr 却低于板内拉斑玄武岩( $\text{Cr} = 352 \times 10^{-6}$ )<sup>[20]</sup>,但二者的值都远低于原始岩浆值( $\text{Cr} > 1000 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Ni} > 400 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$ )<sup>[9]</sup>,表明岩墙是原始岩浆强烈演化后的产物,也说明岩浆在演化过程中可能有橄榄石和单斜辉石的分离结晶作用。Nb 和 Ta 的亏损及 Th 的富集,可能与角闪石和黑云母等矿物的分离结晶有关<sup>[21]</sup>。岩墙不具有 Eu 的负异常,暗示在岩浆演化过程中斜长石的分离结晶作用不明显,推测岩浆的分异作用发生在较深的层位,很可能在源区附近<sup>[17]</sup>。

#### 4.3 地壳混染

研究表明,地壳混染可能导致  $\text{La}/\text{Sm}$  值迅速增高,一般在 5.0 以上<sup>[22]</sup>。本区岩墙具有变化不大的  $\text{La}/\text{Sm}$  (3.18~3.45),说明地壳混染作用在岩浆演化过程中的影响不大<sup>[23]</sup>。用  $\text{Nb}/\text{Ta}-\text{La}/\text{Yb}$  相互关系做进一步检验,如果岩浆在上升侵位过程中存在明显的地壳混染,基性岩墙在该图上的标绘点应当呈现出负相关关系<sup>[14]</sup>,但研究区岩墙在  $\text{Nb}/\text{Ta}-\text{La}/\text{Yb}$  相关图(略)中呈现出很微弱的负相关关系,可以说明地壳

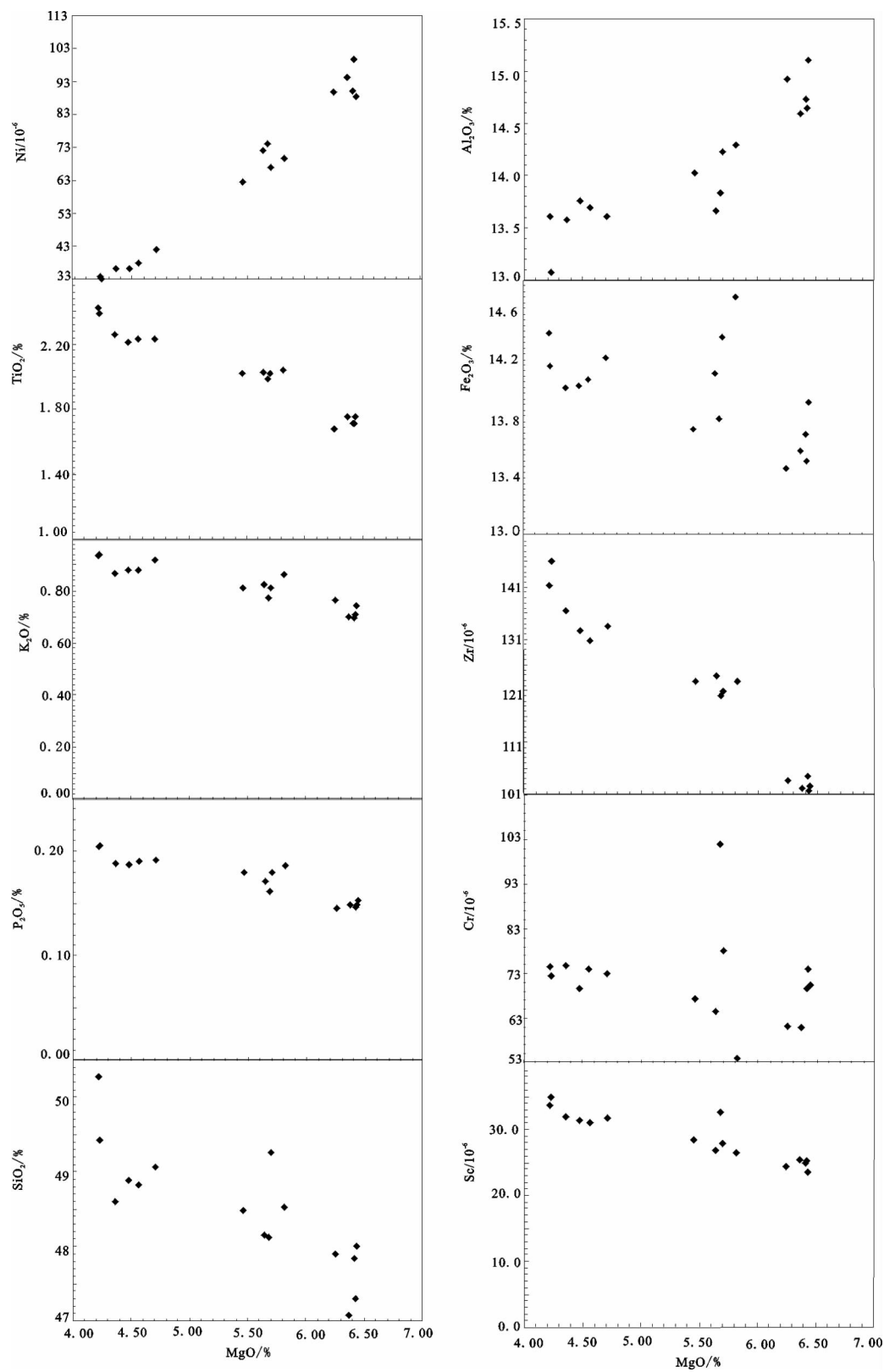


图 4 MgO 相对氧化物和元素的图解

Fig. 4 Correlative diagrams of MgO versus oxides and elements of mafic dyke from Houcheng

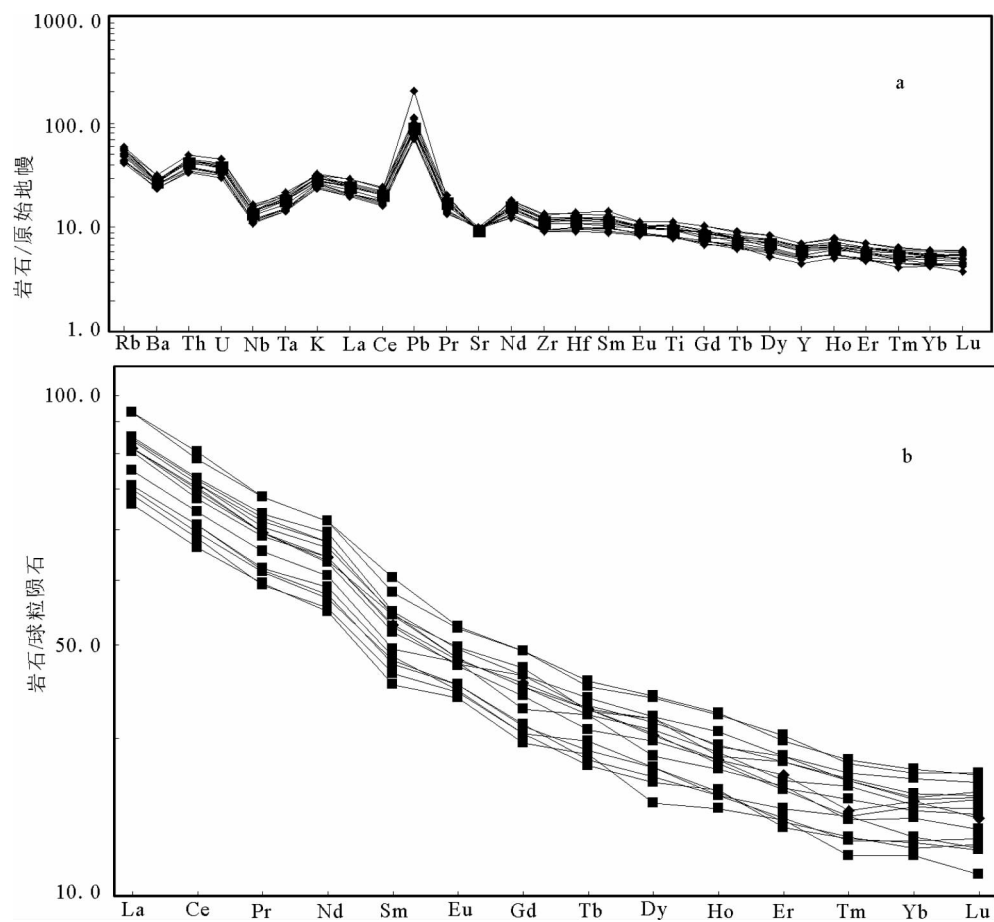


图 5 微量元素原始地幔标准化图解(a)和稀土元素球粒陨石标准化图解(b)  
Fig. 5 Primitive-mantle-normalized spider diagrams(a) and chondrite-normalized REE patterns of Houcheng mafic dykes(b)

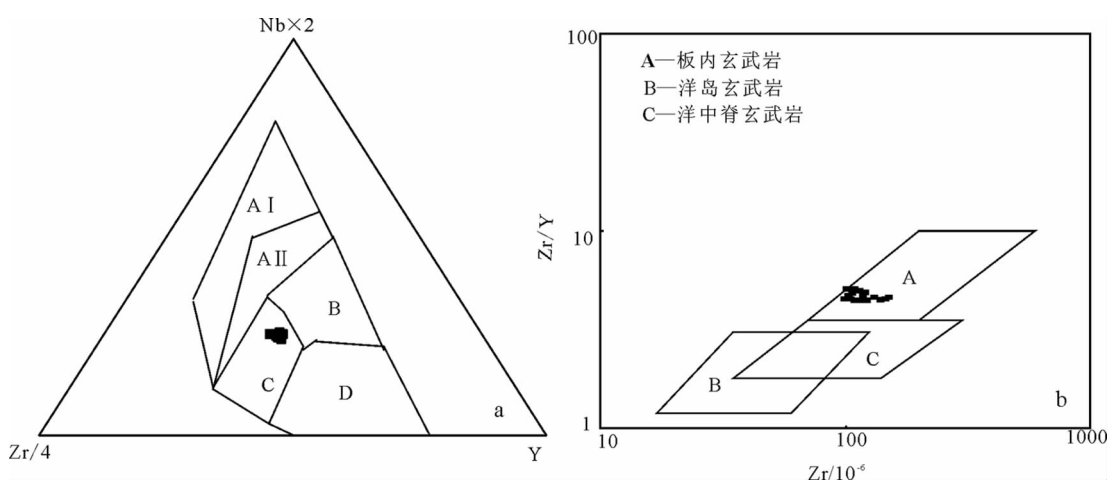


图 6 2×Nb-Zr/4-Y 图(a)和 Zr/Y-Zr 图解(b)  
Fig. 6 Tectonic discriminant diagrams of mafic dykes from Houcheng  
a 图: AI—板内钙碱性玄武岩; AII—板内拉斑和碱性玄武岩; B—受地幔羽影响的洋中脊玄武岩;  
C—板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩; D—火山弧玄武岩和正常洋中脊玄武岩

混染的影响很小。固结指数 SI 与 SiO<sub>2</sub> 含量呈负相关关系,也反映了陆壳对岩墙的混染作用不强<sup>[19]</sup>,而且,岩墙具有与原始地幔(Ta/La=0.06)基本一致的 Ta/La 比值(0.04~0.05),同样排除了地壳物质的混染作用的影响<sup>[24]</sup>。那么,岩墙所显示的地球化学特征应该是继承了源区的特征。研究区岩墙具有较低的 Nb/La 比值(0.55~0.62,平均为 0.58)和较低的 Ce/Pb(2.76~6.27),说明岩墙的地球化学特征可能反映岩浆源区继承了受前俯冲-交代过程(源区混合作用)改造的地幔源区<sup>[25]</sup>。另外,Nb 与 Ta、Zr 与 Hf 是地球化学性质相近的不相容元素对,在岩浆部分熔融及结晶过程中不发生分异,但是在遭受来自消减板片流体或熔体改造的地幔中,将发生明显的分异。岩墙的 Nb/Ta 为 12.37~14.11、Zr/Hf 为 33.13~37.26,表明其源区性质与俯冲作用有关<sup>[2]</sup>。岩墙富集大离子亲石元素(Rb、Th 和 U 等),亏损高场强元素 Nb 和 Ta 等,同样说明岩墙的源区与深俯冲作用引起地幔交代作用有关。

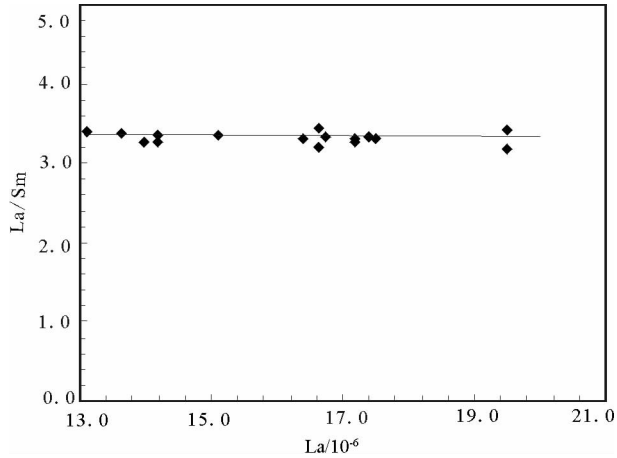


图 7 La-Sm-La 分离结晶图解  
Fig. 7 La/Sm-La discriminant diagram of mafic dykes from Houcheng

4.4 源区特征

上述讨论说明后城基性岩墙的地球化学特征反映其源区的地球化学特征。岩墙富集轻稀土元素、大

表 2 后城岩墙微量元素及稀土元素分析结果  
Table 2 Trace elements and REE analyses of Houcheng mafic dykes

| 样品号       | XB-1   | XB-2   | XB-3   | XB-4   | XB-5   | XB-6   | XB-7   | XB-8   | XB-9   | XB-10  | XB-11  | XB-12  | XB-13  | XB-14  | XB-15  | XB-16  |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Rb        | 31.58  | 30.22  | 27.14  | 33.92  | 31.70  | 26.27  | 26.52  | 26.40  | 36.14  | 29.98  | 35.03  | 33.55  | 34.66  | 33.43  | 25.10  | 29.40  |
| Ba        | 185.87 | 180.43 | 172.82 | 214.13 | 183.69 | 173.91 | 160.87 | 172.82 | 217.39 | 179.35 | 185.87 | 190.22 | 192.39 | 192.39 | 159.00 | 176.00 |
| Th        | 3.61   | 3.45   | 3.04   | 4.04   | 3.42   | 3.13   | 2.85   | 2.89   | 4.07   | 3.57   | 3.59   | 3.63   | 3.69   | 3.60   | 2.77   | 3.14   |
| U         | 0.77   | 0.74   | 0.67   | 0.91   | 0.76   | 0.67   | 0.64   | 0.65   | 0.93   | 0.78   | 0.81   | 0.79   | 0.84   | 0.78   | 0.60   | 0.69   |
| Nb        | 9.82   | 9.42   | 8.30   | 10.70  | 9.29   | 7.74   | 8.05   | 8.12   | 11.48  | 9.82   | 10.02  | 10.21  | 10.80  | 10.31  | 7.75   | 9.20   |
| Ta        | 0.76   | 0.72   | 0.61   | 0.86   | 0.72   | 0.58   | 0.59   | 0.60   | 0.82   | 0.73   | 0.80   | 0.74   | 0.78   | 0.73   | 0.57   | 0.66   |
| La        | 16.74  | 16.63  | 14.19  | 19.51  | 16.40  | 14.19  | 13.63  | 13.97  | 19.51  | 16.63  | 17.40  | 17.18  | 17.51  | 17.18  | 13.10  | 15.10  |
| Ce        | 36.33  | 35.43  | 30.83  | 42.38  | 34.65  | 30.72  | 29.04  | 29.71  | 41.15  | 36.10  | 37.56  | 37.00  | 37.90  | 37.00  | 28.00  | 32.60  |
| Pb        | 5.68   | 6.32   | 4.93   | 6.70   | 6.08   | 4.90   | 4.81   | 5.68   | 7.58   | 6.80   | 7.55   | 5.91   | 13.73  | 7.50   | 5.03   | 6.11   |
| Pr        | 4.63   | 4.62   | 3.93   | 5.41   | 4.56   | 3.95   | 3.68   | 3.90   | 5.41   | 4.62   | 4.93   | 4.73   | 5.02   | 4.87   | 3.72   | 4.27   |
| Sr        | 203.27 | 203.27 | 199.08 | 195.93 | 195.93 | 201.17 | 204.32 | 209.56 | 186.50 | 194.89 | 195.93 | 199.08 | 206.41 | 198.03 | 202.00 | 199.00 |
| Nd        | 20.55  | 20.00  | 17.38  | 23.83  | 20.44  | 18.03  | 16.39  | 17.16  | 23.83  | 20.22  | 21.86  | 21.31  | 22.84  | 21.86  | 16.20  | 18.80  |
| Zr        | 122.90 | 120.97 | 102.58 | 141.29 | 123.87 | 103.55 | 104.51 | 101.61 | 146.13 | 122.90 | 133.55 | 130.64 | 136.45 | 132.58 | 102.00 | 120.00 |
| Hf        | 3.69   | 3.35   | 3.04   | 4.12   | 3.46   | 2.93   | 2.97   | 2.85   | 4.08   | 3.49   | 3.67   | 3.67   | 3.77   | 3.56   | 2.75   | 3.33   |
| Sm        | 5.01   | 4.82   | 4.22   | 6.13   | 4.96   | 4.35   | 4.04   | 4.28   | 5.72   | 5.20   | 5.22   | 5.27   | 5.30   | 5.20   | 3.85   | 4.49   |
| Eu        | 1.63   | 1.60   | 1.46   | 1.88   | 1.59   | 1.42   | 1.41   | 1.46   | 1.86   | 1.64   | 1.72   | 1.64   | 1.70   | 1.64   | 1.38   | 1.61   |
| Gd        | 5.20   | 5.39   | 4.30   | 5.98   | 4.92   | 4.18   | 4.17   | 4.34   | 6.01   | 5.14   | 5.54   | 5.23   | 5.37   | 5.11   | 4.01   | 4.66   |
| Tb        | 0.84   | 0.85   | 0.71   | 0.96   | 0.78   | 0.74   | 0.66   | 0.68   | 0.93   | 0.82   | 0.84   | 0.86   | 0.89   | 0.84   | 0.70   | 0.83   |
| Dy        | 5.13   | 5.15   | 4.46   | 6.08   | 5.02   | 4.47   | 4.18   | 4.29   | 6.03   | 5.26   | 5.54   | 5.41   | 5.58   | 5.51   | 3.83   | 4.67   |
| Y         | 26.78  | 26.32  | 22.48  | 31.63  | 26.89  | 23.27  | 22.37  | 22.94  | 31.75  | 27.79  | 29.49  | 28.81  | 29.37  | 28.58  | 20.20  | 24.30  |
| Ho        | 1.03   | 1.01   | 0.90   | 1.26   | 1.03   | 0.88   | 0.90   | 0.88   | 1.25   | 1.06   | 1.08   | 1.09   | 1.16   | 1.04   | 0.83   | 0.98   |
| Er        | 2.81   | 2.64   | 2.29   | 3.27   | 2.66   | 2.43   | 2.24   | 2.33   | 3.34   | 2.74   | 3.06   | 2.97   | 3.06   | 2.98   | 2.31   | 2.67   |
| Tm        | 0.37   | 0.36   | 0.33   | 0.46   | 0.39   | 0.36   | 0.33   | 0.33   | 0.46   | 0.41   | 0.42   | 0.43   | 0.44   | 0.42   | 0.30   | 0.36   |
| Yb        | 2.58   | 2.52   | 2.09   | 2.96   | 2.48   | 2.20   | 2.16   | 2.17   | 2.92   | 2.54   | 2.61   | 2.66   | 2.85   | 2.59   | 2.04   | 2.40   |
| Lu        | 0.36   | 0.37   | 0.32   | 0.43   | 0.36   | 0.31   | 0.31   | 0.33   | 0.44   | 0.39   | 0.40   | 0.39   | 0.42   | 0.39   | 0.28   | 0.34   |
| ΣREE      | 130.00 | 127.70 | 109.90 | 152.20 | 127.10 | 111.50 | 105.50 | 108.80 | 150.60 | 130.60 | 137.70 | 129.00 | 139.40 | 135.20 | 100.80 | 118.10 |
| LREE      | 84.90  | 83.10  | 72.00  | 99.10  | 82.60  | 72.70  | 68.20  | 70.50  | 97.50  | 84.40  | 88.70  | 87.10  | 90.30  | 87.70  | 66.20  | 76.90  |
| HREE      | 45.10  | 44.60  | 37.90  | 53.00  | 44.50  | 38.80  | 37.30  | 38.30  | 53.10  | 46.20  | 49.00  | 41.90  | 49.10  | 47.50  | 34.50  | 41.20  |
| LREE/HREE | 1.88   | 1.86   | 1.90   | 1.87   | 1.85   | 1.87   | 1.83   | 1.84   | 1.84   | 1.83   | 1.81   | 2.08   | 1.84   | 1.85   | 1.92   | 1.87   |

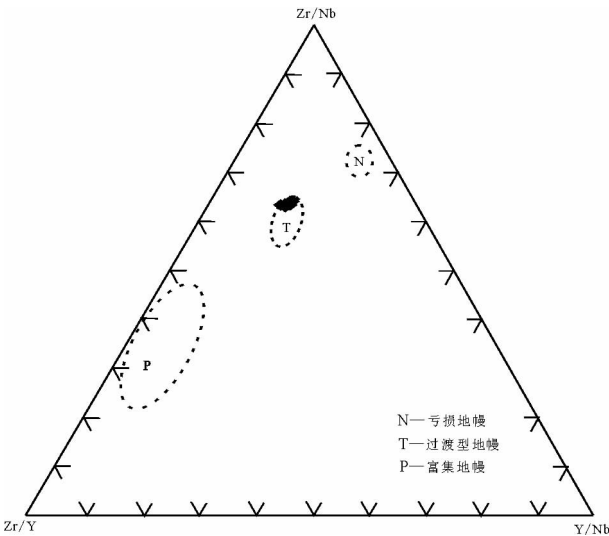


图 8 后城基性岩墙 Zr/Nb-Zr/Y-Y/Nb 图解  
Fig. 8 Zr/Nb-Zr/Y-Y/Nb diagram of Houcheng mafic dykes

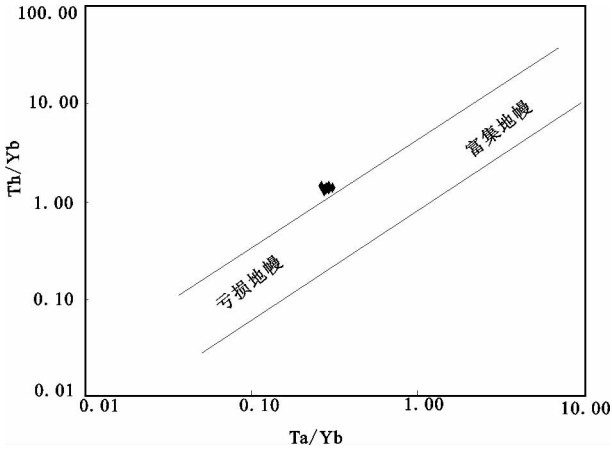


图 9 后城基性岩墙 Th/Yb-Ta/Yb 图解  
Fig. 9 Th/Yb-Ta/Yb diagram of Houcheng mafic dykes

离子亲石元素、亏损高场强元素等特征,均表明岩浆不可能来源于亏损的软流圈地幔与原始地幔,要产生后城基性岩墙这样富集的 LREE 和不相容元素的岩浆,正常地幔的部分熔融程度要小于 1%,但是根据地幔动力学熔融模式,该熔体不可能从地幔中分离出来<sup>[26]</sup>,那么后城基性岩墙的源区就只能是富集地幔或过渡型地幔。另外,原始地幔 Zr/Nb 值等于 18,而富集地幔和过渡型地幔的 Zr/Nb 值小于 18,亏损地幔的 Zr/Nb 值大于 18<sup>[20]</sup>。本区基性岩样品的 Zr/Nb 为 12.33~13.34(平均为 12.88),也说明

后城基性岩墙的地幔源区是过渡型或富集型地幔,在 Zr/Nb-Zr/Y-Y/Nb 图解(图 8)中,样品同样投在了过渡型地幔区域,而在 Th/Yb-Ta/Yb 图解(图 9)中,样品落在亏损-富集端元过渡区边缘外侧,这是少量陆壳物质混染所致<sup>[27]</sup>。

由上述讨论可知,研究区样品的源区是过渡型地幔。这种过渡型地幔源区特征又如何呢?研究表明,全岩稀土元素含量主要受地幔组成及部分熔融程度控制,所以稀土元素的丰度和比值可以被广泛应用于对幔源岩石源区特征及地幔熔融程

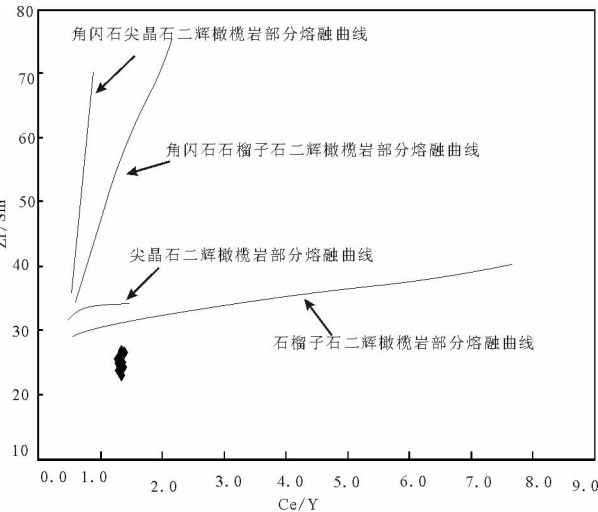


图 10 Zr/Sm-Ce/Y(原图据参考文献[25])  
Fig. 10 Zr/Sm-Ce/Y diagram of mafic dykes from Houcheng

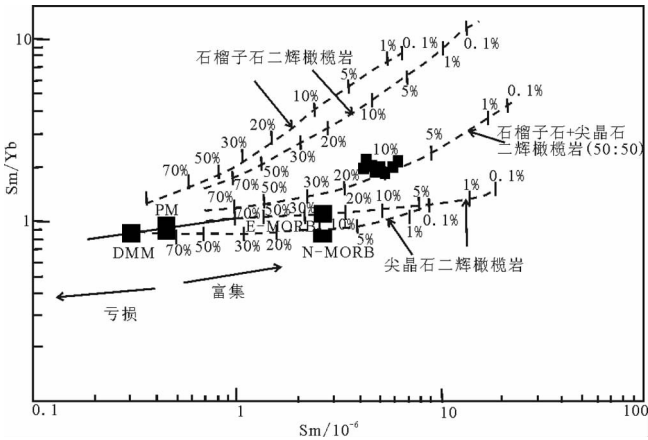


图 11 后城基性岩墙 Sm-Sm/Yb 图解  
Fig. 11 Sm versus Sm/Yb diagram of mafic dykes from Houcheng

度的限定<sup>[28-31]</sup>。稀土元素在地幔橄榄岩的熔融过程中属于中等不相容元素<sup>[29]</sup>,所以它们的浓度和比值不会受地幔亏损和流体混入的明显影响<sup>[32]</sup>,所以稀土元素比率可用来限定与矿物学和化学组成有关的源区的部分熔融程度<sup>[33]</sup>。笔者用 Zr/Sm-Ce/Y 图和 Sm-Sm/Yb 图解对源区的组成和部分熔融程度加以确定。在 Zr/Sm-Ce/Y 图解(图 10)中,样品落在石榴子石二辉橄榄岩地幔部分熔融区域;在 Sm/Yb-Sm 图解中(图 11),研究区基性岩墙样品的 Sm/Yb 比值与石榴子石+尖晶石二辉橄榄岩熔融曲线相一致,熔融程度在 10%~20%之间,表明后城基性岩墙来源于石榴子石+尖晶石二辉橄榄岩地幔源区,地幔中的石榴子石相通常在 75km 以上<sup>[33]</sup>,由此推测后城基性岩墙的源区深度在 75km 左右。

## 5 结 论

(1)本次研究的基性岩墙为板内拉斑玄武岩系列,地球化学特征显示轻重稀土元素明显分异、大离子亲石元素(如 Rb、Th 和 K)富集、高场强元素(Nb 和 Ta)明显亏损。

(2)岩墙形成于板内拉张环境,经历了橄榄石、单斜辉石、Ti-Fe 氧化物及磷灰石的分离结晶作用,岩浆上升过程中受地壳混染作用很小,岩墙源区与深俯冲作用引起的地幔交代作用有关。

(3)形成岩墙的岩浆产生于过渡型地幔源区。源区为石榴子石二辉橄榄岩地幔,主要经历了石榴子石+尖晶石二辉橄榄岩部分熔融,熔融程度在 10%~20%之间,岩浆的起源深度在 75km 左右。

**致谢:**资料收集过程中,得到河北地矿局的大力支持,中科院地球化学研究所胡晓燕、漆亮在主、微量元素测试中给予大力帮助,在此表示感谢。

## 参考文献

- [1]汪洋,姬广义,孙善平,等.北京西山沿河城东岭台组火山岩成因及其地质意义[J].地质评论,2009,55(2):191-214.
- [2]李晓勇,范蔚茗,郭锋,等.北京西山东狼沟组钾质火山岩成因及其动力学机制[J].地球化学,2004,33(4):353-360.
- [3]李伍平,路凤香,李献华.北京西山晚侏罗世粗安岩的成因及其地质意义[J].岩石矿物学志,2001,20(3):247-254.
- [4]邵济安,张履桥.华北北部中生代岩墙群[J].岩石学报,2002,18(3):312-318.
- [5]河北省地矿局.天津市区域地质志[M].北京:地质出版社,1989:566-615.

- [6]Cox K. G. The interpretation of igneous rocks[M]. Allen and Unwin, 1979.
- [7]Winchester J A, Floyd P A. Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed basic igneous rocks [J]. Earth Planet Sc. Lett., 1976,28:459-469.
- [8]王存智,杨坤光,徐扬,等.北大巴基性岩墙群地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其大地构造意义[J].地质科技情报,2009,28(3):19-26.
- [9]刘燊,胡瑞忠,赵军红,等.山东中生代基性脉岩的元素地球化学及其成因[J].地球化学,2005,34(4):339-349.
- [10]王中刚,于学元,赵振华,等.稀土元素地球化学[M].北京:科学出版社,1989:133-190.
- [11]朱勤文,王方正,路凤香,等.湘南中生代玄武岩类地球化学特征[J].现代地质,1996,10(4):461-469.
- [12]贾大成,胡瑞忠,谢桂青,等.湘东北中生代基性岩脉岩石地球化学特征[J].矿物岩石,2002,22(3):37-41.
- [13]刘燊,胡瑞忠,赵军红,等.鲁西青山组火山岩形成的构造背景及其成因探讨:主元素和微量元素证据[J].地球化学,2003,32(4):306-315.
- [14]刘燊,胡瑞忠,赵军红,等.鲁西晚中生代基性脉岩的成因和源区性质:岩石学和地球化学[J].地质评论,2004,50(6):577-586.
- [15]刘燊,胡瑞忠,赵军红,等.胶北晚中生代煌斑岩的岩石地球化学特征及其成因研究[J].岩石学报,2005,21(3):947-958.
- [16]韩吟文,马振东.地球化学[M].北京:地质出版社,2003:202-205.
- [17]欧阳健,周鼎武,林晋炎,等.博格达山白杨河地区中基性岩墙地球化学特征及其地质意义[J].大地构造与成矿学,2006,30(4):495-503.
- [18]冯光英,刘燊,钟宏,等.吉林晚古生代榆木川基性岩的地球化学特征及其岩石成因[J].地球化学,2010,39(5):427-438.
- [19]夏宗强,李建红.桃山—诸广—贵东地区基性岩脉岩石化学特征及其地质意义[J].世界核地质科学,2008,25(4):203-21.
- [20]李昌年.火成岩微量元素岩石学[M].武汉:中国地质大学出版社,1992:74-121.
- [21]赵太平,金成伟,翟明国,等.华北陆块南部熊耳群火山岩的地球化学特征与成因[J].岩石学报,2002,18(1):59-69.
- [22]张招崇,王福生,郝艳丽,等.峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束[J].地质学报,2004,78(2):171-180.
- [23]张玉涛,张连昌,英基丰,等.大兴安岭北段塔河地区早白垩世火山岩地球化学特征及源区特征[J].岩石学报,2007,23(11):2811-2822.
- [24]Wood D A, Tarney J, Varet J, et al. Geochemistry of basalts drilled in the North Atlantic by IPOD Leg 49: Implications for mantle heterogeneity[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1979,42(1):77-97.
- [25]Miller C, Schuster R, Klotzli U, et al. Post collisional potassic and ultra-potassic 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.
- [26]徐学义,夏林圻,夏祖春,等.崑崙早古生代碱质煌斑岩地球化学特征及成因探讨[J].地球学报,2001,22(1):55-60.
- [27]阎国翰,谭林坤,许保良,等.阴山地区印支期碱性侵入岩岩石地球

化学特征[J].岩石矿物学杂志,2001,20(3):281–292.

[28]Andrey A, Gurenko, Chaussidon M. Enriched and depleted primitive melts included in olivine from Icelandic tholeiites Origin by continuous melting of a single mantle column[J]. Geochimica et Cosmochem Acta,1995,59(14):2905–2917.

[29]Johnson K T M. Experimental determination of partition coefficients for rare earth and high –field –strength elements between clinopyroxene , garnet, and basaltic melt at high pressure[J]. Contrib Mineral Petrol, 1998, 133(1/2): 60–68.

[30]Zhao Junhong, Zhou Meifu. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzihua district (Sichuan Province,SW China):Implications for subduction–related metasomatism in the upper mantle[J]. Precamb Res, 2007,152 (1/2):27–47.

[31]Liu Shen, Su Wenchao, Hu Ruizhong,et al. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of alkaline ultramafic dykes from southwest Guizhou Province, SW China[J]. Lithos, 2010,114(1/2):253–264.

[32]Pearce J A, Peate D W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. Annu Rev Earth Planet. Sci.,1995,23:251–285.

[33]张文慧, 韩宝福,杜蔚,等. 内蒙古集宁新生代玄武岩的地幔源区特征元素及 Sr–Nd–Pb 同位素地球化学证据[J].岩石学报,2005,21 (6):1569–1582.



《地质通报》第 32 卷第 5 期要目预告

|                                                                                            |                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Pterosaur Tracks from the early Late Cretaceous of Dongyang City, Zhejiang Province, China | Chen Rongjun Lü Junchang Yoichi Azuma |
| 地壳地幔岩石矿物物性参数                                                                               | 彭 聪                                   |
| 山西南部中条山古元古代花岗质片麻岩白云母 <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar 测年及其地质意义                           | 肖 兵等                                  |
| 大-小兴安岭接合部早—中侏罗世侵入岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 定年及成因                                                    | 李仰春等                                  |
| 青海共和盆地猛犸象化石的发现及意义                                                                          | 韩建恩等                                  |
| 四川盆地古近纪古风向恢复与大气环流样式重建                                                                      | 江卓斐等                                  |
| 西藏班公湖–怒江缝合带北缘多龙矿集区晚三叠世—侏罗纪增生杂岩结构及其对成矿地质背景的约束                                               | 段志明等                                  |
| 西昆仑造山带中带提热艾力组沉积环境及物源区构造背景                                                                  | 杜 涛等                                  |
| 贵州金沙长岩沟牛蹄塘组生物群组成特征                                                                         | 王平丽等                                  |
| 西藏班戈县拉青铜多金属矿床地球化学特征及意义                                                                     | 董 磊                                   |
| 新疆西天山博罗科努成矿带岩浆岩时空分布、构造演化与成矿响应                                                              | 王新利等                                  |
| 广西平桂地区锡矿土壤离子电导率异常特征和离子成分及找矿预测                                                              | 文美兰                                   |
| 陕北直罗油田延长组长 6 储层成岩作用与有利成岩相带                                                                 | 白 嵩等                                  |
| 鄂尔多斯盆地合水地区延长组长 63 三维储集                                                                     | 李 渭等                                  |
| 鄂尔多斯盆地中部地区长 8—长 6 湖泊—三角洲沉积演化与油藏特征                                                          | 王 岚等                                  |
| 鄂尔多斯盆地东南缘长 8 段砂岩储层成岩作用与孔隙演化                                                                | 刘春雷等                                  |
| 鄂尔多斯盆地陕北地区长 101 高渗储层控制因素                                                                   | 朱 静等                                  |
| 南襄盆地襄樊–枣阳凹陷白垩系油气资源前景初步评价                                                                   | 张 惠等                                  |