

河北省北部杨树沟基性岩墙年代学和地球化学研究

唐 亮^{1, 2}, 刘 燊³, 冯彩霞³, 冯光英⁴, 杨毓红^{1, 2}, 齐有强²

1. 中国科学院大学, 北京 100039; 2. 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, 贵阳 550002;
3. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室和地质学系, 西安 710069; 4. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037

摘 要:基性岩墙是研究大陆伸展裂解很好的证据, 华北克拉通北缘在晚中生代发生了显著的拉伸作用, 广泛分布着基性岩墙, 河北省北部杨树沟基性岩墙就是其中的代表。锆石 U-Pb 年龄显示, 基性岩墙的形成时代约为 134.9 ± 9.2 Ma, 为早白垩世岩浆事件的产物。在岩石化学组成上, SiO_2 (52.02%~57.79%) 位于碱性和亚碱性过渡区, 另外, 基性岩墙的 Na_2O (3.77%~5.26%) 大于 K_2O (2.17%~3.32%), MgO (1.88%~3.46%) 含量较低, 富集轻稀土元素 (LREE) 和大离子亲石元素 (LILEs, Rb, Ba 和 Sr) 和轻微的 Eu 正异常 ($\delta\text{Eu}=0.98\sim 1.19$, 平均 1.08), 亏损高场强元素 (HFSEs, Nb 和 Ta) 及重稀土元素 (HREE)。地球化学系统研究表明, 研究区基性岩墙来源于富集岩石圈地幔的部分熔融作用, 源区存在橄榄石、尖晶石、榴辉岩和角闪岩相的残余, 同时, 基性岩墙的形成可能与造山后伸展作用有密切联系。

关 键 词:基性岩墙; 年代学; 地球化学; 河北省; 华北克拉通

中图分类号: P619.14 文献标志码: A 文章编号: 1007-2802(2014)01-0082-09 doi:10.3969/j.issn.1007-2802.2014.01.016

Zircon U-Pb Geochronology, Geochemical Compositions of the Mafic Dykes From Yangshugou, Northern Hebei Province: Constraints on the Age and Petrogenesis

TANG Liang^{1, 2}, LIU Shen³, FENG Cai-xia³, FENG Guang-ying⁴, YANG Yu-hong^{1, 2}, QI You-qiang²

1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
3. Department of geology and State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China; 4. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: Mafic dykes are very important to research continental extension. The Northern boundary of North China Craton (NNCC) experienced extension during later Mesozoic and the Yangshugou mafic dykes is very representative in NNCC. The zircon U-Pb age of the mafic dykes provides an age of 134.9 ± 9.2 Ma, indicating that the mafic dykes were the result of the earlier Cretaceous magmatism. The SiO_2 contents of the rocks range from 52.02% to 57.79%, straddling the fields of alkaline and sub-alkaline series. In addition, the mafic dykes are characterized by having higher Na_2O (3.77%~5.26%) than K_2O (2.17%~3.32%), depletion in MgO (1.88%~3.46%), enriching light rare earth elements (LREEs) and large ion lithophile elements (LILEs, Rb, Ba, and Sr) and having weak positive Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.98\sim 1.19$, average in 1.08), as well as depletion in heavy rare earth elements (HREEs) and high field strength elements (HFSEs, Nb and Ta). Systemic geochemistry research indicates that the mafic dykes, in this study, were derived from partial melting of enriched lithospheric mantle, however, there were remnant of olivine, Cr-spinel, eclogite and amphibolite faces in the source. In summary, the origin of the studied dykes is related to the post-collision extension of the Xing-Meng Orogeny.

Key words: mafic dykes; geochronology; geochemistry; Hebei Province; North China Craton (NCC)

收稿日期: 2013-03-09 收到, 04-03 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41373028)

第一作者简介: 唐亮 (1986-), 男, 硕士研究生, 专业方向: 岩石地球化学. E-mail: tangliang16686@163.com

通讯作者: 刘燊 (1974-), 男, 教授, 博士, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: liushen@vip.gyig.ac.cn.

华北板块和西伯利亚板块在二叠纪末-三叠纪初最终拼合^[1~4],随后进入造山阶段,形成世界上最大的中亚造山带^[5]。兴蒙造山带位于中亚造山带东南部,该区在中生代经历了造山和造山后拉伸-再挤压等复杂的地质过程,通过该区花岗岩^[6,7]、基性岩^[8]和构造^[9]等的研究,揭示在晚侏罗世-早白垩世,该区发生了典型的造山后伸展作用^[10,11]。

华北克拉通北缘中生代岩性方面的研究,目前主要有堆积杂岩、煌斑岩、碳酸岩、玄武岩^[8,11~14]和中酸性岩^[7,15,16],并已取得了很多重要的成果。基性岩墙是在岩石圈伸展背景下,从上地幔直接侵入到地表的地质体,它对地球内部岩石圈地幔的性质以及区域动力学背景具有很重要的指示意义^[17]。对华北克拉通基性岩墙的研究,前人主要集中在克拉通中东部^[18,19]和南缘^[20],对克拉通北缘基性岩墙的研究目前相对比较薄弱^[11,21,22],所以对华北克拉通北缘基性岩墙的研究具有以下3方面的重要意义:(1)对兴蒙造山带晚中生代拉伸事件提供时间和空间上的制约^[23];(2)有助于探讨华北克拉通北缘壳幔相互作用等深部动力学问题^[17,18,24~32];(3)有助于了解华北克拉通北缘的伸展作用对克拉通减薄的影响^[28,33]。

1 地质概况及岩石学特征

河北省北部围场位于华北克拉通北缘,是华北板块北缘与西伯利亚板块晚古生代一早中生代碰撞缝合的隆起区。在晚侏罗世一早白垩世,兴蒙造山带处于碰撞后伸展阶段^[34],围场就处于华北克拉通和兴蒙造山带双影响区,不仅受华北克拉通稳定板块的控制,还同时受兴蒙造山带活动构造的控制(图1)^[35]。该区位于康保-围场和丰宁-隆化断裂之间,北东侧分布有乌龙沟-上黄旗北东向深大断裂^[36],外围有大庙-娘娘庙和平泉-古北口等断裂^[37,38]。150~120 Ma 期间,冀北-辽西地区发育了髫髻山组、土城子组、张家口组和义县组火山岩及沉积盆地^[9,39~41]。

围场-隆化一带发育有古元古代呈东西向的中酸性和酸性侵入岩^[42]。1:5万区域地质资料显示,杨树沟发育大片的中新统棋盘山期玄武岩及第四系沉积岩,基性岩墙侵位于这些地层中,暗示该基性岩墙的时代应晚于中新世。然而,年代学结果显示,杨树沟基性岩墙的侵位时代为早白垩世,因此,该区地层年龄仍需要进一步研究论证(图1)。

杨树沟基性岩墙以深黑色为主,手标本上,可明显看到呈长条状的斜长石斑晶,斑晶之间有较多肉眼

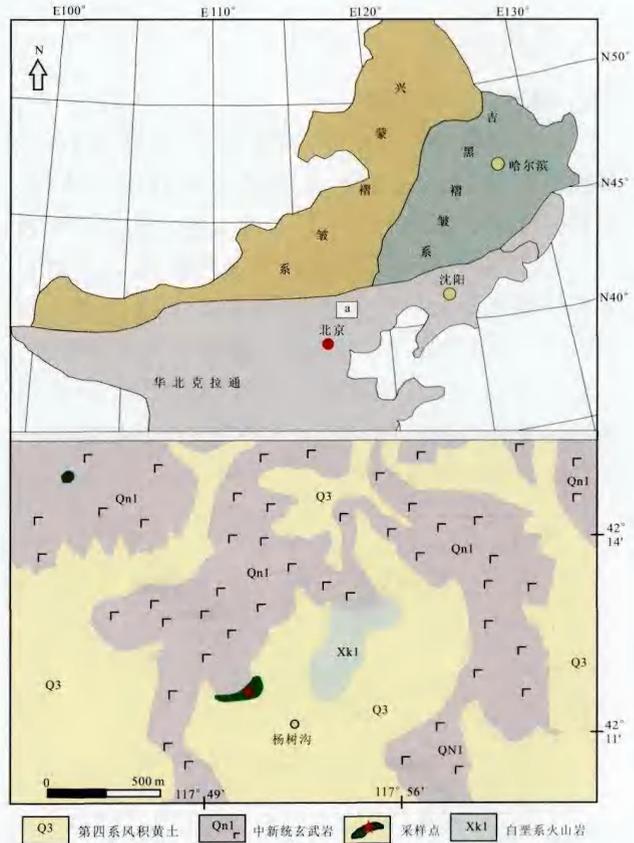


图1 河北围场杨树沟地区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of Yangshugou, Hebei Province

难分辨的深色矿物,另外,还存在少量粒度大小与斜长石相近的辉石斑晶。显微观察结果显示,研究区基性岩石主要由自形斜长石和辉石组成,斜长石含量40%~55%,辉石35%~40%,其他矿物(如黑云母,角闪石和石英等)含量较少(5.0%~15%)。

2 分析方法

2.1 锆石挑选和 U-Pb 年龄测试

锆石挑选工作在河北廊坊区调院完成,阴极发光实验在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。详细仪器操作条件和数据处理方法见^[43~45]。

2.2 主微量元素分析

主量元素在中国科学院地球化学研究所采用 Axios PW 4400 型 X 射线荧光光谱仪上完成,分析精度优于 3.0%,微量元素在中国科学院地球化学研究所电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上完成,分析精度优于 5.0%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

基性岩墙的锆石较小,粒度在 100 μm 左右,大多数锆石具较好的晶形和岩浆的典型环带结构。锆石的 Th/U 比值为 0.52~1.82,平均为 0.80(表 1),均大于 0.50,为典型的岩浆成因锆石^[46]。锆石分析结果可分为 2 个年龄阶段(134.9 \pm 9.2 Ma 和 375 \pm 4.0 Ma)(图 2)。都位于谐和线上或者附近,134.9 \pm 9.2 Ma 代表基性岩浆的侵入年龄,是早白垩世岩浆事件的产物;375 \pm 4.0 Ma 代表早期的一次岩浆事件的锆石年龄。

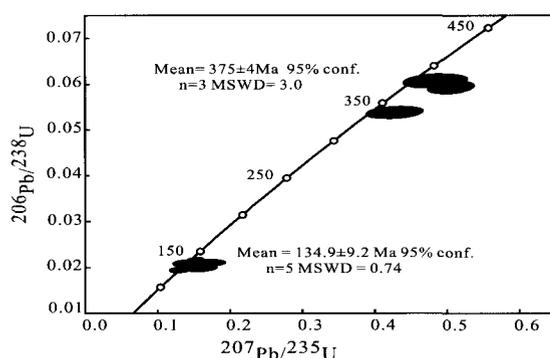
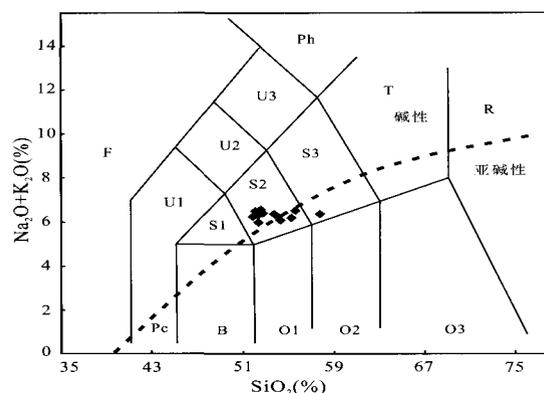


图 2 基性岩墙锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 谐和年龄

Fig. 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb Concordia ages for the mafic dykes

3.2 主微量元素

13 个代表性样品的主微量测试数据见表 2。在全碱-SiO₂ 相关图(图 3)解中,研究区基性岩墙落入碱性和亚碱性过渡区,岩石类型上除一个样品(YSG-10)落在粗面安山岩区域外,其他样品都位于玄武质粗面安山岩范围内。另外,在 SiO₂-K₂O 图(图 4)上,研究区基性岩墙全部投影于高钾钙碱性



S2-玄武质粗面安山岩;S3-粗面安山岩;虚线上方为碱性,下方为亚碱性

图 3 河北杨树沟基性岩墙岩石分类图解

Fig. 3 Classification of mafic dykes from Yangshugou, Hebei Province

系列范围。

基性岩墙 SiO₂ 含量为 52.02%~57.79%,平均 53.78%,Na₂O (3.77%~5.26%) 大于 K₂O (2.17~3.32%),Al₂O₃ = 16.41~18.86%,P₂O₅ 为 0.31%~0.36%和 MgO=1.88%~3.46% (Mg[#] = 28.73~47.39,平均 38.98)。另外,杨树沟基性岩墙具有较低的 Cr(11.3~26.0 $\mu\text{g/g}$),Co(20.3~25.5 $\mu\text{g/g}$)和 Ni(14.2~22.7 $\mu\text{g/g}$)含量,暗示岩浆在上升过程中发生了强烈的分离结晶作用(如橄榄石、单斜辉石和尖晶石)或岩浆分异过程,这些元素大部分保留在残留相中。在 Harker 图解(图 5)中,Ni、Cr 随 MgO 增加无明显变化,可能表明岩浆上侵过程中橄榄石和尖晶石等无明显结晶分异作用。在稀土元素球粒陨石标准化^[47]图解(图 6)中,稀土配分模式表现出典型的右倾型,所有样品都具有轻稀土富集和重稀土亏损(La/Yb)_N = 14.9~15.8)以及 Eu 整体显示弱的正异常(δEu = 0.98~

表 1 河北省杨树沟基性岩墙锆石 U-Pb 测试结果

Table 1 Zircon U-Pb compositions of the Yangshugou mafic dykes, Hebei Province

| 取 样 点 | 含量($\times 10^{-6}$) | | | | 同位数值 | | | | | | 年龄/Ma | | | | | |
|-------------|------------------------|------|-----|------|-------------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|
| | Th | U | Pb | Th/U | $\frac{207\text{Pb}}{206\text{Pb}}$ | 1σ | $\frac{207\text{Pb}}{235\text{U}}$ | 1σ | $\frac{206\text{Pb}}{238\text{U}}$ | 1σ | $\frac{207\text{Pb}}{206\text{Pb}}$ | 1σ | $\frac{207\text{Pb}}{235\text{U}}$ | 1σ | $\frac{206\text{Pb}}{238\text{U}}$ | 1σ |
| 1 | 723 | 1428 | 63 | 0.51 | 0.0492 | 0.0034 | 0.15 | 0.0102 | 0.0222 | 0.0003 | 167 | 143 | 142 | 9 | 141 | 2 |
| 2 | 1127 | 1208 | 73 | 0.93 | 0.0482 | 0.0026 | 0.1391 | 0.0073 | 0.0212 | 0.0003 | 109 | 122 | 132 | 6 | 135 | 2 |
| 3 | 643 | 826 | 43 | 0.78 | 0.0539 | 0.0033 | 0.1468 | 0.0085 | 0.0202 | 0.0003 | 369 | 132 | 139 | 8 | 129 | 2 |
| 4 | 5263 | 2891 | 290 | 1.82 | 0.0505 | 0.0017 | 0.1549 | 0.0053 | 0.0222 | 0.0002 | 220 | 47 | 146 | 5 | 141 | 1 |
| 5 | 1015 | 1973 | 79 | 0.51 | 0.0499 | 0.0023 | 0.1341 | 0.0059 | 0.0197 | 0.0003 | 187 | 112 | 128 | 5 | 126 | 2 |
| 6 | 435 | 627 | 93 | 0.69 | 0.0583 | 0.0022 | 0.4851 | 0.018 | 0.0607 | 0.0006 | 543 | 81 | 402 | 12 | 380 | 4 |
| 7 | 1650 | 2497 | 357 | 0.66 | 0.0618 | 0.0015 | 0.5065 | 0.013 | 0.0593 | 0.0006 | 733 | 54 | 416 | 9 | 371 | 3 |
| 8 | 905 | 1729 | 204 | 0.52 | 0.0578 | 0.0022 | 0.4291 | 0.016 | 0.0538 | 0.0005 | 524 | 83 | 363 | 11 | 378 | 3 |

测试者:中国地质大学(武汉)

表 2 河北省杨树沟基性岩墙主量元素 (wt. %) 和微量元素 (μg/g) 分析结果

Table 2 Major (wt. %) and trace element (μg/g) compositions of the Yangshugou mafic dykes, Hebei Province

| 样品 | YSG-1 | YSG-2 | YSG-3 | YSG-4 | YSG-5 | YSG-6 | YSG-7 | YSG-8 | YSG-9 | YSG-10 | YSG-11 | YSG-12 | YSG-13 |
|----------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 55.62 | 52.31 | 54 | 52.02 | 53.88 | 52.72 | 52.47 | 52.27 | 54.07 | 57.79 | 55.26 | 52.42 | 54.3 |
| TiO ₂ | 1.16 | 1.12 | 1.13 | 1.09 | 1.12 | 1.12 | 1.12 | 1.14 | 1.15 | 1.17 | 1.14 | 1.13 | 1.11 |
| Al ₂ O ₃ | 17.29 | 16.41 | 16.76 | 16.38 | 16.58 | 16.69 | 17.61 | 16.86 | 16.69 | 16.57 | 16.32 | 16.22 | 16.68 |
| Fe ₂ O ₃ | 7.68 | 7.49 | 7.74 | 7.62 | 7.43 | 7.9 | 7.64 | 7.79 | 7.83 | 7.49 | 7.35 | 7.46 | 7.64 |
| MnO | 0.1 | 0.12 | 0.1 | 0.13 | 0.12 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 0.14 | 0.12 | 0.14 | 0.13 | 0.13 |
| MgO | 3.02 | 2.38 | 3 | 2.54 | 2.25 | 2.54 | 2.38 | 2.46 | 2.04 | 2.09 | 2.34 | 1.88 | 2.49 |
| CaO | 6.38 | 6.87 | 6.12 | 6.99 | 6.73 | 7.24 | 6.03 | 7.26 | 7.42 | 5.85 | 6.52 | 6.81 | 5.59 |
| Na ₂ O | 4.26 | 4.11 | 4.1 | 4.07 | 4.14 | 4.14 | 4.26 | 4.16 | 3.85 | 3.95 | 3.82 | 3.63 | 3.77 |
| K ₂ O | 2.26 | 2.21 | 2.17 | 2.2 | 2.26 | 2.25 | 2.25 | 2.27 | 2.43 | 2.43 | 2.37 | 2.36 | 2.32 |
| P ₂ O ₅ | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.32 | 0.31 | 0.34 | 0.32 | 0.34 | 0.34 | 0.33 | 0.33 | 0.36 |
| LOI | 2.37 | 5.45 | 4.04 | 5.42 | 5.11 | 5.5 | 5.23 | 5.67 | 5.38 | 4.25 | 5.17 | 6.32 | 5.3 |
| 总值 | 100.43 | 98.77 | 99.47 | 98.77 | 99.92 | 100.55 | 99.47 | 100.34 | 101.33 | 102.04 | 100.76 | 98.7 | 99.68 |
| Mg [#] | 43.4 | 38.25 | 43.04 | 39.39 | 37.12 | 38.53 | 37.79 | 38.11 | 34.57 | 36.14 | 39.24 | 33.82 | 39.8 |
| Sc | 18 | 16.6 | 18.1 | 16.1 | 15.3 | 17.4 | 19.1 | 18.1 | 15.1 | 15.8 | 15.3 | 15.4 | 15.4 |
| V | 143 | 136 | 142 | 137 | 129 | 136 | 146 | 138 | 145 | 152 | 148 | 150 | 153 |
| Cr | 13.8 | 14.9 | 13.8 | 18.5 | 14.4 | 16 | 11.3 | 11.7 | 16.3 | 18.3 | 17.6 | 16.1 | 26 |
| Co | 24 | 20.3 | 24.1 | 22.6 | 19.9 | 22 | 24.1 | 20.4 | 21.4 | 21.2 | 23.4 | 21 | 25.5 |
| Ni | 20.1 | 18.3 | 19.2 | 20.5 | 17.8 | 20.5 | 22.7 | 14.2 | 20.2 | 18.7 | 19.7 | 19 | 25.4 |
| Cu | 24.7 | 22 | 23.3 | 22.6 | 22 | 23.3 | 21.2 | 23.3 | 18.3 | 20 | 19.7 | 17.9 | 19.1 |
| Zn | 98.7 | 104 | 114 | 102 | 91.3 | 101 | 106 | 104 | 105 | 130 | 116 | 105 | 112 |
| Ga | 19.6 | 18.3 | 19.4 | 18.5 | 17.7 | 18.6 | 19 | 19 | 19.7 | 20.2 | 19.8 | 19.7 | 20.2 |
| Rb | 41.9 | 42.1 | 42.9 | 42.6 | 39.4 | 43.3 | 40.2 | 42.8 | 47.1 | 49.9 | 47.9 | 48.2 | 46.1 |
| Sr | 821 | 861 | 834 | 872 | 799 | 879 | 916 | 903 | 868 | 870 | 865 | 894 | 934 |
| Y | 18.7 | 18.1 | 18.9 | 18 | 16.7 | 18.1 | 17.9 | 18.3 | 16.6 | 17.2 | 16.5 | 16.9 | 16.9 |
| Zr | 178 | 173 | 180 | 174 | 162 | 170 | 172 | 175 | 159 | 166 | 160 | 163 | 163 |
| Nb | 8.98 | 8.65 | 9.04 | 8.85 | 8.2 | 8.57 | 8.04 | 8.64 | 8.85 | 9.18 | 8.78 | 8.93 | 8.4 |
| Cs | 0.72 | 0.57 | 0.68 | 0.56 | 0.55 | 0.6 | 0.72 | 0.63 | 0.7 | 0.77 | 0.68 | 0.68 | 0.8 |
| Ba | 945 | 925 | 956 | 943 | 864 | 938 | 976 | 948 | 964 | 982 | 957 | 959 | 1028 |
| La | 31 | 30.2 | 31.9 | 30.8 | 28.5 | 31.2 | 30.4 | 31.2 | 31.1 | 31.2 | 30.2 | 30.9 | 30.9 |
| Ce | 63.5 | 62.2 | 65.2 | 62.8 | 58.3 | 63.1 | 62.6 | 63.2 | 59.2 | 59.5 | 58 | 59.1 | 60.3 |
| Pr | 7.33 | 7.01 | 7.41 | 7.08 | 6.56 | 7.09 | 7.19 | 7.22 | 7.43 | 7.33 | 7.18 | 7.34 | 7.55 |
| Nd | 28.4 | 27.8 | 28.7 | 28.1 | 25.9 | 27.6 | 28.2 | 28.1 | 28.3 | 28.6 | 27.2 | 27.4 | 29.3 |
| Sm | 4.99 | 4.95 | 5 | 5.06 | 4.58 | 4.99 | 4.96 | 5.02 | 5.2 | 5.47 | 4.98 | 4.85 | 5.31 |
| Eu | 1.8 | 1.74 | 1.78 | 1.76 | 1.61 | 1.72 | 1.85 | 1.68 | 1.54 | 1.59 | 1.46 | 1.46 | 1.49 |
| Gd | 4.36 | 4.34 | 4.47 | 4.45 | 4.13 | 4.5 | 4.4 | 4.47 | 3.71 | 3.8 | 3.46 | 3.7 | 3.7 |
| Tb | 0.65 | 0.62 | 0.64 | 0.63 | 0.58 | 0.62 | 0.64 | 0.65 | 0.64 | 0.68 | 0.64 | 0.64 | 0.65 |
| Dy | 3.01 | 2.92 | 3.05 | 2.95 | 2.82 | 2.93 | 3.05 | 3.03 | 3.11 | 3.21 | 3.07 | 3.04 | 3.12 |
| Ho | 0.65 | 0.62 | 0.64 | 0.62 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.63 | 0.64 | 0.67 | 0.63 | 0.65 | 0.67 |
| Er | 1.69 | 1.66 | 1.69 | 1.66 | 1.56 | 1.68 | 1.71 | 1.71 | 1.79 | 1.77 | 1.62 | 1.69 | 1.8 |
| Tm | 0.23 | 0.21 | 0.24 | 0.22 | 0.2 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.23 | 0.24 | 0.21 | 0.22 | 0.24 |
| Yb | 1.47 | 1.39 | 1.47 | 1.44 | 1.3 | 1.49 | 1.42 | 1.5 | 1.47 | 1.44 | 1.43 | 1.41 | 1.49 |
| Lu | 0.21 | 0.21 | 0.21 | 0.21 | 0.2 | 0.2 | 0.21 | 0.21 | 0.22 | 0.21 | 0.21 | 0.22 | 0.23 |
| Hf | 4.56 | 4.47 | 4.41 | 4.45 | 4.23 | 4.51 | 4.28 | 4.59 | 3.93 | 3.95 | 3.93 | 3.87 | 3.88 |
| Ta | 0.53 | 0.49 | 0.52 | 0.49 | 0.45 | 0.49 | 0.44 | 0.49 | 0.5 | 0.5 | 0.49 | 0.49 | 0.44 |
| Pb | 10.6 | 10.6 | 11 | 10.8 | 10.2 | 10.6 | 10.6 | 11 | 10.3 | 10.4 | 10 | 10.3 | 9.9 |
| Th | 3.86 | 3.89 | 4 | 3.86 | 3.57 | 3.85 | 3.31 | 3.82 | 3.89 | 3.99 | 3.79 | 3.86 | 3.33 |
| U | 0.86 | 0.85 | 0.88 | 0.86 | 0.84 | 0.85 | 0.73 | 0.93 | 0.92 | 0.99 | 0.95 | 0.92 | 0.73 |
| ΣREE | 149 | 146 | 152 | 148 | 137 | 148 | 147 | 149 | 145 | 146 | 140 | 143 | 147 |
| LREE | 137 | 134 | 140 | 136 | 125 | 136 | 135 | 136 | 133 | 134 | 129 | 131 | 135 |
| HREE | 12.3 | 12 | 12.4 | 12.2 | 11.4 | 12.3 | 12.3 | 12.4 | 11.8 | 12 | 11.3 | 11.6 | 11.9 |
| LREE/HREE | 11.2 | 11.2 | 11.3 | 11.1 | 11 | 11.1 | 11 | 11 | 11.2 | 11.1 | 11.5 | 11.3 | 11.3 |
| La _N /Yb _N | 15.1 | 15.6 | 15.6 | 15.3 | 15.7 | 15 | 15.4 | 14.9 | 15.2 | 15.6 | 15.2 | 15.8 | 14.9 |
| δEu | 1.15 | 1.12 | 1.13 | 1.11 | 1.11 | 1.09 | 1.19 | 1.06 | 1.02 | 1.01 | 1.02 | 1.01 | 0.98 |
| Nb/Ta | 17 | 17.6 | 17.5 | 18.2 | 18.2 | 17.7 | 18.4 | 17.7 | 17.6 | 18.5 | 17.9 | 18.4 | 19.1 |

注: 烧失量(LOI); Mg[#] = 100 × (MgO/40) / (MgO/40 + 0.8998 × Fe₂O₃T/73)^[7]; 测试者: 中科院地球化学研究所。

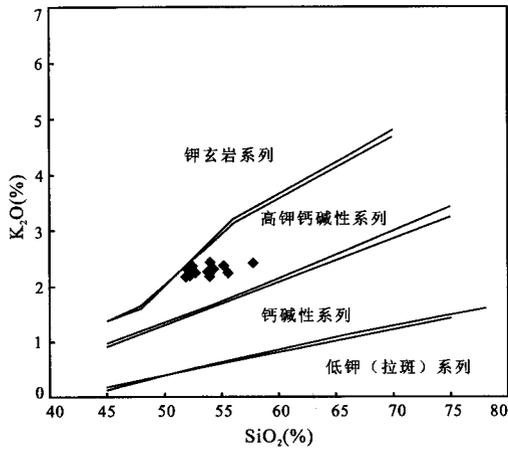


图4 河北省杨树沟基性岩墙的 SiO₂-K₂O 图解

Fig. 4 SiO₂-K₂O diagram of the mafic dykes from Yangshugou, Hebei Province

1.19, 平均 1.08) 特征, 表明在岩浆上升过程中, 斜长石分离结晶的强度相对较弱。在微量元素原始地幔标准化^[47] 蛛网图中(图 7), 所有样品都显示 Ba、K 和 Sr 富集以及 Nb、Ta、Th、U 和 Ti 亏损的特征。

4 讨 论

4.1 部分熔融和源区特征

Harker 图(图 5) 显示, CaO、Cr、Ni 并没有随 MgO 含量的变化而变化, 证明岩浆在上升过程中, 并没有发生明显(如斜长石、尖晶石等)的结晶分异作用, 岩浆的性质主要反映源区的特征, 说明该岩浆为部分熔融作用的产物^[49]。另外, 杨树沟基性岩墙具有以下特征: 斜长石为 40%~55%、较高的 Sr 含量、Eu 弱正异常和重稀土含量较低, 暗示源区可

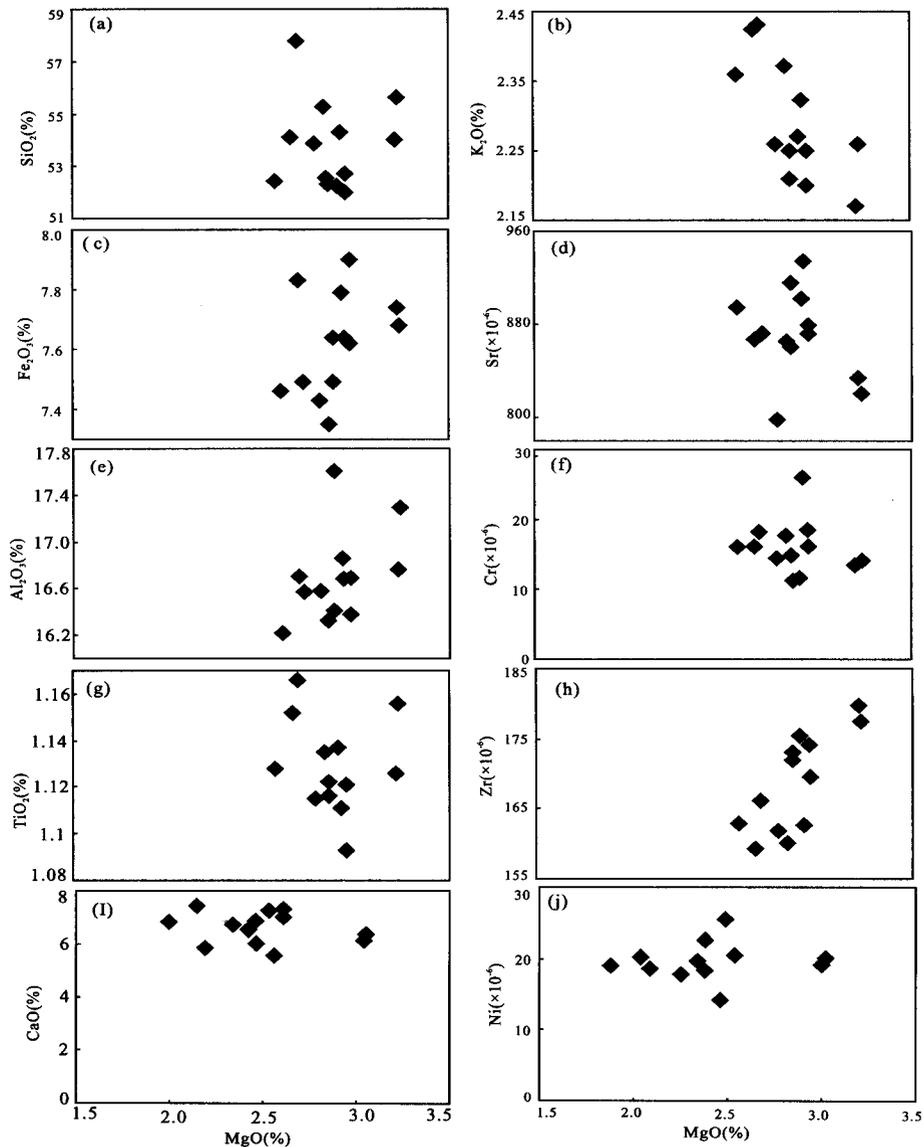


图5 河北省杨树沟基性岩墙的 Harker 图解

Fig. 5 Harker plots of the mafic dykes from Yangshugou, Hebei Province

能同时存在斜长石、榴辉岩和角闪岩相,在岩浆形成过程中,斜长石进入熔体,石榴子石和角闪石保留在残余相中。因为 Yb 和 Lu 在石榴子石中的分配系数较大,而 Dy 和 Ho 在角闪石中的分配系数较大^[50]。源区中有石榴子石存在需要有厚的地壳(大于 40 km)^[50~52],正常下地壳的深度为 17~23 km,说明该区受到了造山带的影响,地壳厚度大于普通地壳。在晚中生代早期,索伦—鄂霍茨克洋消减缝合,在晚侏罗世以前最终碰撞造山^[7],这就很好的解释了为何该区有加厚地壳的原因。

4.2 地壳混染

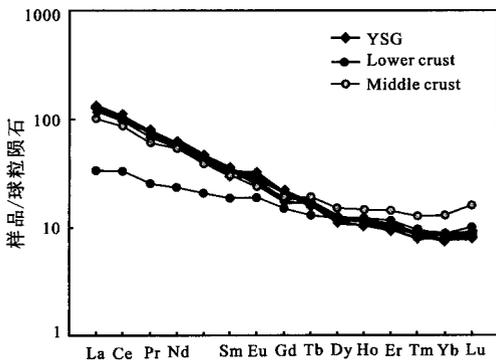
从稀土元素配分图(图 6)和微量元素蛛网图(图 7)可见,杨树沟基性岩墙富集轻稀土元素和大离子亲石元素(Ba、Zr、Hf、Sr 和 Rb),亏损高场强元素(Nb、Ta 和 Ti),暗示基性岩浆在上升侵位过程中受到了地壳物质的作用。该区 Zr、Hf、Sr、Nd、K 和 Rb 等微量元素的比值和下地壳值相近(Zr/Hf=38

~42、Sr/Nd=29~32、K/Rb=420~516),或位于下地壳和中地壳之间(Th/U=4.0~4.6、Rb/Sr=0.044~0.057、U/Pb=0.074~0.095)^[51],表明研究区基性岩墙中可能存在来自下地壳和中地壳的物质。另外,杨树沟基性岩墙的 $K^* [= 2K_N(Nb_N + La_N)]$ 介于 2.44~3.88 之间,平均为 2.76, $Nb^* [= 2Nb_N(K_N + La_N)] = 0.15 \sim 0.21$,平均 0.20, K^* 大于 1 和 Nb^* 小于 1 反映岩石成因与富集地幔有关,并且岩浆上升和侵位过程中又受到壳源物质的混染^[53]。地壳物质可以通过俯冲和拆沉作用进入岩石圈地幔,也可以在岩浆上升过程中同化地壳。基性岩墙作为地幔物质快速上升的产物,一般受地壳物质混染的程度都不会太大^[23],本文认为该基性岩浆与下地壳的拆沉作用有关(下一节将具体论述),拆沉带入了地壳物质的混入,使基性岩墙显示壳源物质混染的性质。

4.3 结晶分离作用和简单形成机制

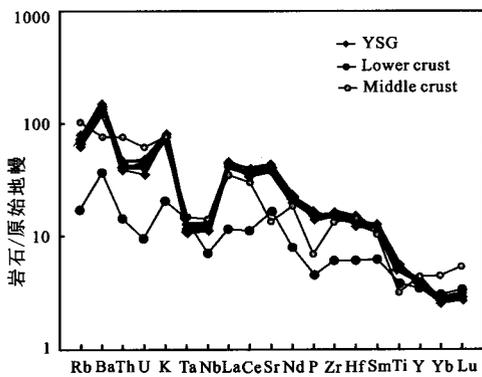
在 Harker 图解(图 5)中,Cr 和 Ni 随 MgO 的增加无明显变化且他们的含量都较低,表明橄榄石和尖晶石更多存在于部分熔融的残留相中,在岩浆上升侵位过程中,橄榄石和尖晶石的结晶分离作用不明显。Eu 弱的正异常(图 6)以及 Sr、Ba 富集(图 7),表明基性岩墙中斜长石的分离作用也不明显,而且可能会存在斜长石的堆晶作用。K₂O 和 MgO 呈负相关(图 5),暗示岩浆上升侵位过程中,不存在部分含钾矿物(如,钾长石,黑云母,和角闪石)的结晶分离。总之,杨树沟基性岩墙在形成过程中,岩浆的结晶分离作用不明显。

本区基性岩墙在 Zr-Zr/Y 相关图^[54]和 Nb×2-Zr/4-Y 三角图^[55](图 8A、B)中,都落入了板内玄武岩和板内碱性玄武岩范围内,Th/Ta 比值在 7~8 之间,位于陆内拉张裂谷玄武岩比值范围(Th/Ta=4~10)内,与利用 Th/Hf-Ta/Hf 构造环境判别图(图略)的结果一直^[56]。以上说明杨树沟基性岩墙是在伸展环境下产生的。事实上,华北克拉通北缘以及兴蒙造山带地区晚中生代的伸展作用已经得到了广泛的认可^[35,57]。从中侏罗世到晚侏罗世早期,整个兴蒙造山带处于一个挤压环境中,该挤压作用与索伦—鄂霍茨克洋消减缝合有关,在晚侏罗世后期,挤压环境转换为伸展背景,在此背景下,产生了大量的 A 型花岗岩、变质核杂岩和基性岩墙^[8,35,58,59]。但是对于岩浆侵入的动力学机制,仍存在比较大争议,其主要观点有:(1)与底侵作用有关^[6,21,58,60,61]; (2)与造山后重力垮塌作用有



中地壳和下地壳数据来自文献[48],原始地幔标准化值来自文献[47]

图 6 杨树沟基性岩墙球粒陨石标准化稀土元素配分图
Fig. 6 Chondrite-normalized REE pattern of the mafic dykes from Yangshugou, Hebei province



中地壳和下地壳数据来自文献[48],原始地幔标准化值来自文献[47]

图 7 杨树沟基性岩墙原始地幔标准化蛛网图
Fig. 7 Primitive mantle (PM) normalized spidergrams of the mafic dykes from Hebei Yangshugou, Hebei province

关^[58,62]; (3)与地幔柱或者亚地幔柱有关^[63~66]。地幔柱一般会产生大面积的岩浆喷发,然而在研究区并没有发现这种情况,因此可以排除地幔柱的影响;虽然底侵作用得到了很多人的支持,然而并没有人解释清楚底侵作用的热来源以及动力学原因,所以暂时不考虑底侵作用;作者认为该区的岩浆事件可

能和造山后的重力垮塌作用有关。总之,杨树沟地区在早中侏罗世时产生了挤压作用,形成了加厚的地壳,加厚地壳由于伸展作用而重力失衡,发生拆沉作用,产生了富集的岩石圈地幔,从而产生了岩浆的侵入或喷发,这与本文的富集的地幔岩浆特征相同,同时也和其他研究成果一致^[67]。

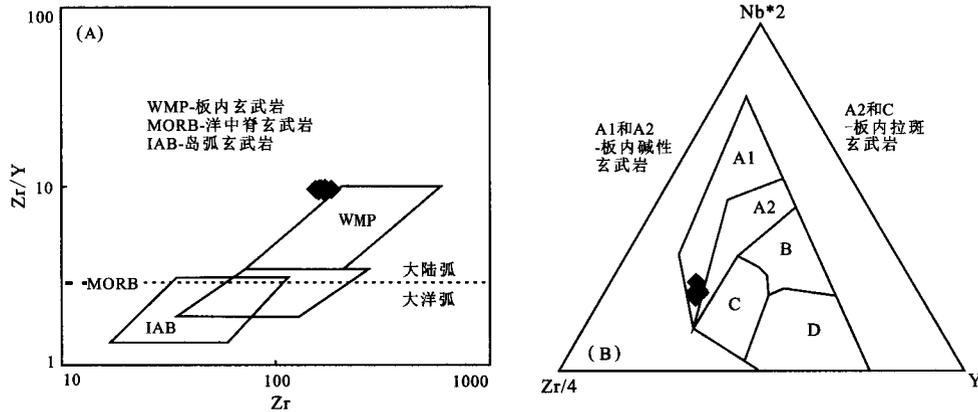


图8 河北省杨树沟基性岩墙的构造判别图^[57,58]

Fig. 8 Tectonic discriminant diagrams for the mafic dykes from Yangshugou, Hebei Province

在泥盆纪时期,以阿尔泰^[68]、准格尔—吐哈^[69]和东天山^[70]为代表的中亚造山带的岩浆活动表现为同造山特点^[71],是显生宙陆壳增生的证据之一。杨树沟基性岩墙的早期年龄(374 ± 4 Ma)可能与该次岩浆事件有关。该岩浆事件产生了新地壳,新的下地壳在早白垩世时活化随地幔岩浆一起上侵到地表,这就解释了为什么存在泥盆纪时期(374 ± 4 Ma)和白垩纪时期(134.9 ± 9.2 Ma)2个年龄的原因。

5 结论

(1)研究区内基性岩墙位于碱性和亚碱性过渡区域,形成年龄为 134.9 ± 9.2 Ma, 374 ± 4 Ma 代表早期的一次岩浆事件;

(2)杨树沟基性岩墙有较低的 MgO、Cr、Ni 和 HREE 含量,基性岩浆产生的残留相中橄榄石和尖晶石发生熔融作用的程度较低,有榴辉岩和角闪岩相的残余,另外,岩浆在上升过程中结晶分异作用以及地壳混染作用不明显;

(3)杨树沟基性岩墙的形成可能与造山后重力垮塌作用有关。

致谢:感谢中国科学院矿床地球化学国家重点实验室和西北大学大陆动力学国家重点实验室,中国地质大学(武汉)地质过程与地质资源国家重点实验室的科研人员对本文的指导与帮助。

参考文献 (References):

- [1] 王玉净, 樊志勇. 内蒙古西拉木伦河北部蛇绿岩带中二叠纪放射虫的发现及其地质意义[J]. 古生物学报, 1997, 36(1): 58-69.
- [2] 江思宏, 梁清玲, 刘翼飞, 刘研. 内蒙古大井矿区及外围岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其对成矿时间的约束[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 495-513.
- [3] 叶翎松, 廖群安, 葛梦春. 内蒙古锡林浩特-林西地区三叠纪过铝质花岗岩的成因及构造意义[J]. 地质科技情报, 2011, 30(3): 57-64.
- [4] 张松, 王永彬, 褚少雄. 华北克拉通北缘东段海沟岩体的锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 544-556.
- [5] Sengor A M, Burtman V S. Evolution of the Altai tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. Nature, 1993, 364: 299-307.
- [6] 解洪晶, 武广, 朱明田, 刘军, 张连昌. 内蒙古道郎呼都格地区 A 型花岗岩年代学-地球化学及地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 483-494.
- [7] 孙德有, 荀军, 任云生, 付长亮, 王晰, 柳小明. 满洲里南部玛尼吐组火山岩锆石 U-Pb 年龄与地球化学研究[J]. 岩石学报, 2012, 27(10): 3083-3094.
- [8] 邵济安, 贾文, 储著银, 张履桥, 牟保磊. 内蒙古喀喇沁早白垩世榴辉岩岩体年代学[J]. 岩石学报, 2003, 19(3): 429-434.
- [9] 孟庆任, 胡健民, 袁选俊, 靳久强. 中蒙边界地区晚中生代伸展盆地的结构、演化和成因[J]. 地质通报, 2002, 21(4-5): 224-231.
- [10] 邵济安, 卢造勋, 路凤香, 袁学诚. 辽西中生代的壳幔过渡带的形成、破坏与改造[J]. 岩石学报, 2006, 22(12): 2825

- 2832.
- [11] 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.
- [12] Feng G Y, Liu S, Zhong H, Feng C X, Coulson I M, Qi Y Q, Yang Y H, Yang C G. U-Pb zircon geochronology, geochemical, and Sr-Nd isotopic constraints on the age and origin of basaltic porphyries from western Liaoning Province, China [J]. *International Geology Review*, 2011; 1—19.
- [13] 邵济安, 张永北, 张履桥, 牟保磊, 王佩瑛, 郭峰. 大同地区早中生代煌斑岩-碳酸岩岩墙群[J]. 岩石学报, 2003, 19(1): 93—104.
- [14] 邵济安, 韩庆军, 张履桥, 牟保磊. 内蒙古东部早中生代堆积杂岩捕虏体的发现[J]. 科学通报, 1999, 44(5): 478—485.
- [15] 孙德有, 吴福元, 李惠民, 林强. 小兴安岭西北部造山后 A 型花岗岩的时代及与索伦山-贺根山-扎赉特碰撞拼合带东延的关系[J]. 科学通报, 2000, 45(20): 2217—2222.
- [16] 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 何国琦, 谭林坤, 赵晖, 何中甫, 张任祐, 乔广生. 燕辽-阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr、Nd、Pb 同位素特征及意义[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(4): 383—387.
- [17] Halls H C. The importance and potential of mafic dyke swarms in studies of geodynamic processes[J]. *Geoscience Canada*, 1982, 9(3): 145—154.
- [18] Liu S, Hu R Z, Gao S, Feng C X, Qi L, Zhong H, Xiao T F, Qi Y Q, Wang T, Coulson I. Zircon U-Pb geochronology and major, trace elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of mafic dykes in western Shandong Province, East China: Constrains on their petrogenesis and geodynamic significance [J]. *Chemical Geology*, 2008, 255(3-4): 329—345.
- [19] Liu S, Zou H B, Hu R Z, Zhao J H, Feng C X. Mesozoic mafic dike from Shandong Peninsula, North China Craton: Petrogenesis and tectonic implication[J]. *Geochem. J.*, 2006, 40: 181—195.
- [20] Xu H J, Ma C Q, Song Y R, Zhang J F, Ye K. Early cretaceous intermediate-mafic dykes in the Dabie orogen, eastern China: Petrogenesis and implications for crust-mantle interaction[J]. *Lithos*, 2012, 154(1): 83—99.
- [21] Xu H J, Song Y R, Ye K, Zhang J F, Wang H R. Petrogenesis of mafic dykes and high-Mg adakitic enclaves in the Late Mesozoic Fangshan low-Mg adakitic pluton, North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, (54-55): 143—161.
- [22] 邵济安, 翟明国, 张履桥, 李大明. 晋冀蒙交界地区五期岩墙群的界定及其构造意义[J]. 地质学报, 2005, 79(1): 56—67.
- [23] 刘桑, 胡瑞忠, 冯光英, 杨毓红, 冯彩霞, 齐有强, 王涛. 华北克拉通中生代以来基性岩墙群的分布及研究意义[J]. 地质通报, 2010, 29(2-3): 1—9.
- [24] Halls H C, Fahrig W F. Mafic dyke swarms[M]. Canada: Geological Assn of Canada, 1987.
- [25] Liu S, Hu R Z, Gao S, Feng C X, Yu B B, Feng G Y, Qi Y Q, Wang T, Coulson I M. Petrogenesis of Late Mesozoic mafic dykes in the Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton and implications for the foundering of lower crust[J]. *Lithos*, 2009, 113(3-4): 621—639.
- [26] Liu S, Zou H B, Hu R Z, Zhao J H, Feng C X. Mesozoic mafic dikes from the Shandong Peninsula, North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Geochemical Journal*, 2007, 40: 181—195.
- [27] Liu S, Hu R Z, Gao S. U-Pb zircon age, geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on age and origin of alkaline intrusions and associated mafic dikes from Sulu orogenic belt, Eastern China[J]. *Lithos*, 2008, 106: 365—379.
- [28] Williams H, Turner S, Kelley S, Harris N. Age and composition of dikes in Southern Tibet: New constraints on the timing of east-west extension and its relationship to postcollisional volcanism[J]. *Geology*, 2001, 29(4): 339—342.
- [29] Zhao J H, Hu R Z, Liu S. Geochemistry, petrogenesis, and tectonic significance of Mesozoic mafic dikes, Fujian province, southeastern China[J]. *International Geology Review*, 2004, 46(6): 542—557.
- [30] 刘桑, 胡瑞忠, 赵军红, 冯彩霞. 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]. 地质论评, 2004, 50(6): 577—586.
- [31] 刘桑, 胡瑞忠, 赵军红, 冯彩霞, 曹建劲. 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—350.
- [32] 刘桑, 胡瑞忠, 赵军红, 冯彩霞, 钟宏, 曹建劲, 史丹妮. 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.
- [33] Ernst R E, Buchan K L, Palmer H C. Giant dyke swarms: Characteristics, distribution and geotectonic applications. [J]. Rotterdam: AA Balkema, 1995: 3—21.
- [34] Yang J H, Wu F Y, Shao J, Wilde S A, Xie L W, Liu X M. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, 246(3): 336—352.
- [35] Meng Q R. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract[J]? *Tectonophysics*, 2003, 369(3-4): 155—174.
- [36] 张华, 张玉领, 史新民. 河北围场幅 1:20 万化探方法技术讨论[J]. 物探与化探, 2004, 28(1): 35—38.
- [37] 李承东, 张旗, 苗来成, 孟宪锋. 冀北中生代高 Sr 低 Y 和低 Sr 低 Y 型花岗岩: 地球化学、成因及其与成矿作用的关系[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 269—284.
- [38] 胡健民, 刘晓文, 杨之青. 辽西地区燕山板内造山带早中生代构造变形的年代学限定[J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 605—616.
- [39] 张宏, 王明新, 柳小明. LA-ICP-MS 测年对辽西-冀北地区髫髻山组火山岩上限年龄的限定[J]. 科学通报, 2008, 53(15): 1815—1824.
- [40] 张宏, 韦忠良, 柳小明, 李栋. 冀北-辽西地区土城子组的 LA-ICP-MS 测年[J]. 中国科学(D 辑), 2008, 38(8): 960—970.
- [41] 韦忠良, 张宏, 郭文敏, 柳小明. LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测

- 年对辽西-冀北地区晚中生代区域性角度不整合时代的约束[J]. 自然科学进展, 2008, 18(10): 1119-1127.
- [42] 许洪才, 赵华平, 彭晓, 姚宝刚, 李增水, 郭毅平, 杜金利. 河北省围场-隆化一带古元古代岩浆活动[J]. 地质调查与研究, 2007, 30(4): 241-251.
- [43] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C, Zong K, Wang D. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1-2): 537-571.
- [44] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Guenther D, Xu J, Gao C G, Chen H H. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1-2): 34-43.
- [45] Liu Y S, Zong K Q, Kelemen P B, Gao S. Geochemistry and magmatic history of eclogues and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: Subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247(1-2): 133-153.
- [46] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [47] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society (London Special Publications)*, 1989, 42(1): 313-345.
- [48] Rudnick R L, Gao S. *Composition of the Continental Crust* [M]. USA: Treatise on Geochemistry, 2003.
- [49] Onuma N, Ninomiya S, Nagasawa H. Mineral/groundmass partition coefficients for nepheline, melilite, clinopyroxene and perovskite in melilitenepheline basalt, Nyiragongo, Zaire [J]. *Geochemical Journal*, 1981, 15(4): 221-228.
- [50] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4): 891-931.
- [51] Petford N, Atherton M. Na-rich Partial Melts from Newly Underplated Basaltic Crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(6): 1491-1521.
- [52] 刘荣, 胡瑞忠, 冯彩霞, 冯光英, 于晓飞, 李才, 贾大成, 齐有强, 王涛. 吉林东部大蒲河 adakites 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(12): 3137-3148.
- [53] 程小久, 程景平. 胶东蓬家乔金矿区钾玄质煌斑岩的元素地球化学研究[J]. 地球化学, 1998, 27(1): 91-100.
- [54] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 69(1): 33-47.
- [55] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 1986, 56(3): 207-218.
- [56] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 413-421.
- [57] Zhu R X, Yang J H, Wu F Y. Timing of destruction of the North China Craton[J]. *Lithos*, 2012, 149: 51-60.
- [58] Davis G A, Darby B J, Ya D Z, Spell T L. Geometric and temporal evolution of an extensional detachment fault, Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China[J]. *Geology*, 2002, 30(11): 1003-1006.
- [59] Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Chen F K, Liu X M, Xie L W. Petrogenesis of an Alkali Syenite-Granite-Rhyolite Suite in the Yanshan Fold and Thrust Belt, Eastern North China Craton: Geochronological, Geochemical and Nd-Sr-Hf Isotopic Evidence for Lithospheric Thinning[J]. *Journal of Petrology*, 2007, 49(2): 315-351.
- [60] 邵济安, 张履桥, 储著银. 冀北早白垩世火山-沉积作用及构造背景[J]. 地质通报, 2003, 22(6): 384-390.
- [61] Jahn B, Wu F Y, Hong D. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia[J]. *Journal of Earth System Science*, 2000, 109(1): 5-20.
- [62] Graham S, Hendrix M, Johnson C, Badamgarav D, Badarch G, Amory J, Porter M, Barsbold R, Webb L, Hacker B. Sedimentary record and tectonic implications of Mesozoic rifting in southeast Mongolia[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, 113(12): 1560-1579.
- [63] 许保良, 阎国翰, 黄福生. 华北地区中生代地质作用及其地球动力学问题[M]. 北京: 地震出版社, 1994.
- [64] 李红阳, 侯增谦, 王国富. 试论华北地台中生代超变质作用与地幔热柱作用[J]. 地球学报, 1996, 17(4): 376-392.
- [65] 李红阳, 王金锁. 试论冀西北金银多金属矿产富集区地幔热柱[J]. 地球学报, 1996, 17(4): 401-412.
- [66] 牛树根, 孙爱群, 李红阳, 张建珍, 罗殿文, 叶东虎, 王金锁. 河淮地幔亚热柱的演化及其对华北地区成矿的控制作用[J]. 地球学报, 1996, 17(4): 413-423.
- [67] 许保良, 韩宝福, 阎国翰, 何中甫. 富集性和亏损性 A 型花岗岩—以华北燕山和新疆乌伦古河地区岩石为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(Z1): 220-230.
- [68] Wang T, Hong D W, Jahn B, Tong Y, Wang Y B, Han B F, Wang X X. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen[J]. *The Journal of Geology*, 2006, 114(6): 735-751.
- [69] 韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 张磊. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1077-1086.
- [70] 王涛, 李伍平, 李金宝, 洪大卫, 童英, 李舫. 东天山东段同造山到后造山花岗岩幔源组分的递增及陆壳垂向生长意义: Sr, Nd 同位素证据[J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 762-772.
- [71] 李舫, 王涛, 童英, 王彦斌, 洪大卫, 欧阳志侠. 北山辉铜山泥盆纪钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄成因及构造意义[J]. 岩石学报, 2012, 27(10): 3055-3070.