

冀西北早白垩世岩浆岩的地球化学特征 及其地球动力学背景

李创举^{1,2}, 包志伟^{1*}

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 冀西北张家口地区晚中生代发生了大规模的中酸性岩浆活动, 通过精确的锆石 U-Pb 年代学研究, 获得东坪金矿东侧北栅子碱性花岗岩的侵位年龄为(130.5±1.5) Ma, 其周围出露的张家口组粗面质火山岩的喷发年龄为(127.8±3.9) Ma, 为早白垩世同期岩浆作用的产物。这些岩浆岩总体属于高钾钙碱性-钾玄质系列, 富碱, 低 Mg[#] (30~43); 微量元素组成上具有大离子亲石元素(LILE)、轻稀土元素(LREE)相对富集 ($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE} = 14.1\sim 23.0$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 20.8\sim 42.2$), Eu 弱负异常($\delta\text{Eu} = 0.62\sim 0.97$), 高场强元素(Nb、Ta、Ti 和 P)不同程度亏损的地球化学特征, 显示出同源岩浆演化的趋势。火山岩和花岗岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 平均值分别为 0.7075 和 0.7078, 全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值差别明显, 火山岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -15.9\sim -13.6$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -18.7\sim -13.5$, 而花岗岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 及 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 则显著低于火山岩, 分别为 $-16.8\sim -15.9$ 和 $-24.7\sim -18.4$ 。地球化学以及同位素特征表明它们是经历过强烈改造的前寒武纪下地壳与中生代底侵形成的玄武质下地壳部分熔融的产物, 花岗岩岩浆主要源于经历过强烈改造的前寒武纪下地壳部分熔融, 而张家口组粗面质火山岩的源区可能含有相对较多的年轻地幔物质, 两者可能存在源区混合作用。北栅子碱性长石花岗岩和大面积张家口组火山岩的喷发, 反映了该地区在早白垩世构造体制从挤压-伸展的转折, 这种构造体制转变可能与早白垩世燕山构造带开始垮塌以及岩石圈强烈伸展减薄有关。

关键词: 早白垩世; 花岗岩; 中生代; 岩石圈减薄; 北栅子岩体; 河北省

中图分类号: P594; P59 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2012)04-0343-16

Geochemical characteristics and geodynamic implications of the Early Cretaceous magmatism in Zhangjiakou region, northwest Hebei Province, China

LI Chuang-ju^{1,2} and BAO Zhi-wei^{1*}

1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Late Mesozoic intermediate-acidic magmatism is widespread in Zhangjiakou region, northwest Hebei Province. Precise zircon U-Pb chronological study shows that both of the widespread trachytic volcanic rocks of Zhangjiakou Formation and the Beizhazi alkali granite located to the east of the Dongping gold deposit were approximately contemporary magmatism, which were formed in (127.8±3.9) Ma and (130.5±1.5) Ma, respectively. The rocks are of high K calc-alkaline to shoshonitic, high in alkali, and low in Mg[#] (30~43), and are characterized by relatively enrichments of LILE and LREE ($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 20.8\sim 42.2$), weak negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.62\sim 0.97$), and depletions of HFSEs, e.g., Nb, Ta, Ta and P. The major and trace element geochemistry of volcanic rocks and granites shows crystallization fractionation trends. Even though the volcanic rocks and granites have similar Sr isotope compositions, with average ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i values of 0.7075 and 0.7078, respectively, Nd

收稿日期(Received): 2011-11-18; 改回日期(Revised): 2012-02-27; 接受日期(Accepted): 2012-04-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB416602); 国家自然科学基金(40773018)

作者简介: 李创举(1984-), 男, 博士研究生, 地球化学专业。E-mail: lichuangju123@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): BAO Zhi-wei, E-mail: baozw@gig.ac.cn, Tel: +86-20-85290105

LI Chuang-ju et al.: Early Cretaceous magmatism in Zhangjiakou region

and zircon Hf isotope compositions are significantly different, i.e., $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -15.9 \sim -13.6$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -18.7 \sim -13.5$ for the volcanic rocks, while $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -16.8 \sim -15.9$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -24.7 \sim -18.4$ for the granites. Element and isotope geochemical characteristics of the rocks demonstrate that they were derived from partial melting of the Precambrian lower crust which was strongly overprinted by Mesozoic underplating and metamorphism. The sources of trachytic volcanic magmas of the Zhangjiakou Formation is likely to contain more juvenile mantle material of Mesozoic underplated basaltic lower crust, and magma mixing in deep source might be involved in the generation of the volcanic-magmatic series. The occurrence of the widespread Zhangjiakou Formation and Beizhazi alkali granite suggests a tectonic regime of transition from compression to extension in the Early Cretaceous, which probably related to the collapse of the Yanshanian orogen and intensive lithospheric thinning in eastern China.

Key words: Early Cretaceous; granite; Mesozoic; lithospheric thinning; Beizhazi rock; Hebei Province

0 引言

晚中生代华北克拉通北缘燕山构造带内发育了大面积的中酸性花岗岩和火山岩^[1-5], 这些岩浆随着时间演化显示出不同的特点, 其中晚侏罗世-早白垩世中基性-酸性岩浆岩通常具有高 Sr、低 Y 类似埃达克质岩石的特点, 如高锆花岗岩^[2], 而在早白垩世以后形成了大面积的碱性岩浆, 如正长岩-碱性花岗岩、碱性粗面岩-流纹岩组合^[5]。这些岩浆岩类型的演化可能暗示了早白垩世(约 130 Ma)区域构造体制的转换, 标志着燕山构造带垮塌, 进入强烈伸展的构造环境^[4]。开展这一构造转折期岩浆活动的详细研究, 对深入理解燕山陆内造山带的构造演化、晚中生代岩石圈壳幔相互作用以及区域动力学背景都具有重要意义。

冀西北张家口地区早白垩世爆发了强烈的中酸性岩浆活动, 其中张家口组火山岩在该地区出露最为广泛。前人曾对冀西北至辽西一带的张家口组火山岩进行过一些年代学研究, 但对其喷发时代仍存在不同的认识^[6-11]。张家口地区还出露了早白垩世的碱性长石花岗岩(如北栅子岩体), 其年龄和地球化学特征显示可能与张家口组火山岩为同期岩浆作用的产物。对张家口地区的张家口组火山岩和碱性长石花岗岩的地球化学以及同位素研究相对较少^[3,6,11], 本文拟通过对张家口东北部的北栅子岩体以及附近出露的张家口组火山岩进行系统的地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Sr、Nd 以及锆石 Hf 同位素研究, 揭示研究区早白垩世构造转折期岩浆活动的地球化学特征、岩石成因以及形成机制, 并结合前人研究资料, 进一步探讨该地区下地壳特征以及这

些岩浆形成的构造背景。

1 地质背景

张家口地区位于华北克拉通北缘、燕山构造带的西部(图 1)。区内广泛发育早前寒武纪麻粒岩相变质体, 主要为太古宙和古元古代角闪岩相-麻粒岩相变质岩系^[12-13]。显生宙以来, 区内岩浆活动频繁, 其中早泥盆世的水泉沟碱性杂岩体^[14-15]出露面积达 340 km², 其形成与晚加里东期-早海西期华北克拉通北侧的一次弧-陆碰撞事件相呼应^[16]; 早中生代红花梁黑云母花岗岩和谷嘴子花岗岩以及小张家口超基性岩产于水泉沟碱性杂岩体周围, 可能与古亚洲洋的最终闭合有关^[17-18]; 晚中生代上水泉碱性花岗岩、转枝莲辉石闪长岩以及北栅子花岗岩体侵入^[17,19-20], 伴随着大规模的安山质-流纹质的火山岩喷出活动^[11]; 新生代汉诺坝碱性玄武岩喷发, 这些玄武岩携带的下地壳麻粒岩以及地幔橄榄岩包体的研究为探讨区域下地壳和岩石圈地幔特征提供了重要信息^[21]。

北栅子岩体位于张家口东北部东坪金矿东侧, 出露面积约 20 km²。岩体北端侵入古生代水泉沟杂岩体, 南部侵入太古宙变质岩, 东西两侧为张家口组火山岩覆盖。北栅子岩体主要由碱性长石花岗岩组成, 普遍具有花岗结构。主要造岩矿物为碱性长石、石英和斜长石, 暗色矿物为黑云母, 角闪石少见。区内张家口组火山岩为一套中酸性的火山岩、火山碎屑岩, 由安山岩-英安岩-流纹岩组成。本次采集样品主要集中在张家口组二段-三段, 岩性主要为粗面岩-流纹岩, 大多样品显示斑状结构, 斑晶矿物主要为斜长石、钾长石、黑云母、石英等, 基质由微晶质-玻璃质组成。

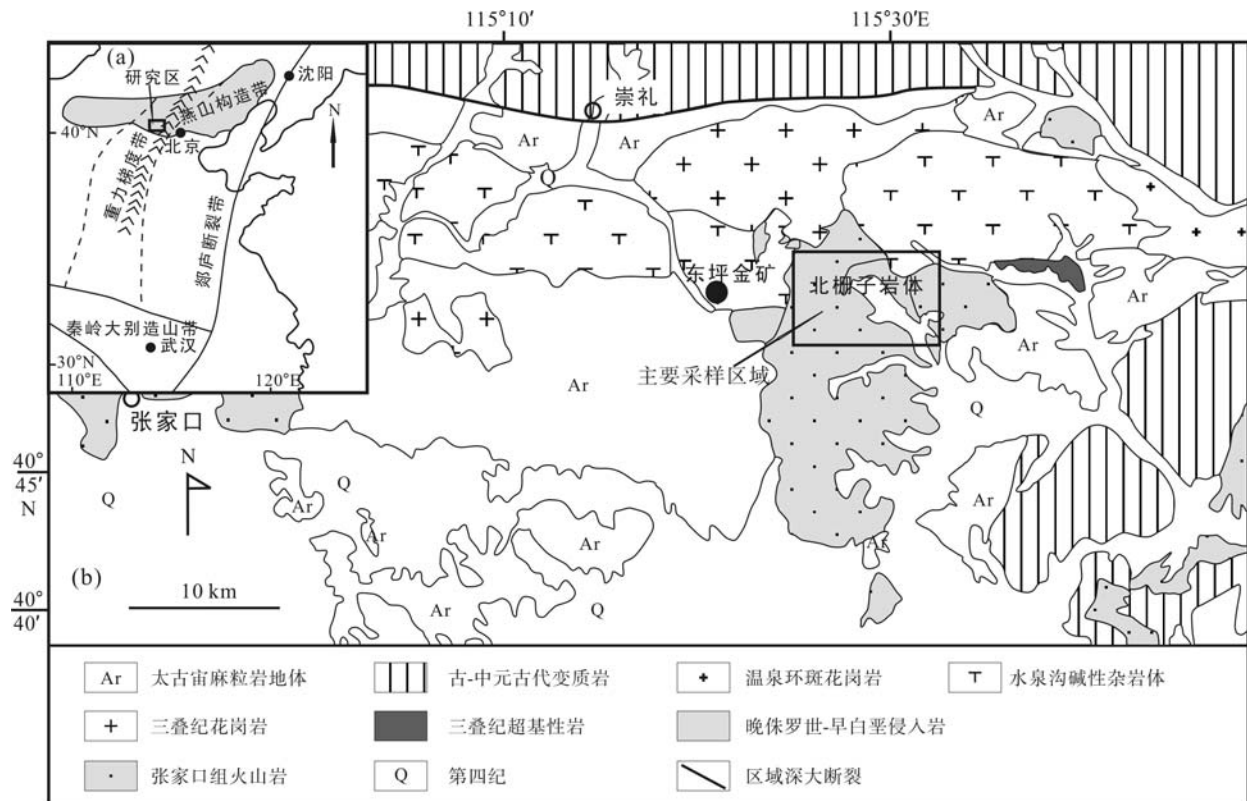


图1 张家口地区地质简图(a)及研究区位置图(b)

Fig.1 Simplified geological map of the Zhangjiakou region (a) and location of the study area (b)

2 分析方法

样品主元素、微量元素和 Sr、Nd 同位素的分析测试在中国科学院同位素年代学和地球化学国家重点实验室完成。主元素、微量元素分析分别是在 Rigaku ZSX 100e 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)和 PE Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)上完成,其中主元素的分析误差总体为 1%,微量元素的分析误差为 5%~8%,详细分析流程以及方法见刘颖等^[22]。Sr、Nd 同位素分析在 MicroMass ISOPROBE 型多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)上完成。Sr-Nd 同位素分析的样品预处理中,笔者采用了酸淋滤方法,以减少后期蚀变作用对同位素比值的影响。取约 130 mg 全岩粉末样品,加入纯化 HF-HClO₄ 酸,在高温下完全溶解。Rb-Sr 和 REE 的分离和纯化是在装有 5 mL AG 50W-X12 交换树脂(200~400 目)的石英交换柱上进行的,而 Sm 和 Nd 的分离和纯化是在石英交换柱上用 1.7 mL Teflon[®]粉末为交换介质完成的。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值分别用 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.1194 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 校正。精度优于

0.002%, 具体分析方法以及流程见 Li *et al.*^[23]。

用常规方法对待定年岩石样品进行锆石分选,然后在双目镜下挑纯。将挑纯的锆石颗粒置于 DEVCON 环氧树脂中,待固结后抛磨至粒径的大约二分之一,使锆石内部充分暴露,然后进行锆石显微(反射光和透射光)照相。锆石阴极发光图像研究在中国科学院广州地球化学研究所电子探针实验室完成。

样品 D-60 的 SHRIMP U-Pb 年龄测定在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成。测试过程采用的一次离子流强度约 10 nA,离子束斑直径约 30 μm,标样为 SL13 (572 Ma, ²³⁸U = 238 μg/g) 和 TEM (417 Ma)。详细实验流程和原理参见刘敦一等^[24]。样品 D-89 锆石 U、Th 和 Pb 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所的 Cameca SIMS-1280 离子探针(SIMS)上进行。实验流程和数据处理详见 Li *et al.*^[25],单点分析的同位素比值及年龄误差为 1σ,加权平均年龄误差为 95% 置信度。

锆石微区 Hf 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所 Neptune 多接受器电感耦合等离子体质谱仪和 193nm 激光取样系统上进行,分析时激

光斑束直径为 40 μm 或 60 μm, 激光剥蚀时间为 26 s。测定时采用国际标样 91500 作为外标, 激光脉冲速率为 6-8Hz, 激光束脉冲能量为 100 mJ。仪器运行条件和详细的分析流程见徐平等^[26], 实验测定过程中, 标样 91500 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282318±0.000012, 与文献报道^[27]的数据在误差范围内基本一致。

3 实验结果

3.1 锆石年龄

碱性长石花岗岩样品 D-60 中的锆石, 晶型比较

完好, 多呈短柱状(长宽比为 1.5 : 1), CL 图像显示清晰的韵律环带, 明显为岩浆成因锆石(图 2a)。用 SHRIMP 方法对这些锆石进行 Th、U、Pb 同位素测定, 结果见表 1。所测锆石中并未发现继承性锆石, Th、U 含量变化较大, 分别在 62~2058 μg/g、57~952 μg/g 之间, Th/U 比值介于 1.12~2.23 之间。11 个数据点均集中在 ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U 的 U-Pb 谐和线上或其附近(图 3a), ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中在 126.1~137.9 Ma 之间, 其加权平均值为(130.5±1.5) Ma (MSWD=1.5), 此年龄值应代表岩体的结晶年龄。

粗面质火山岩样品 D-89 的锆石颗粒较小, 长柱状到短柱状, CL 图像显示了清晰的韵律环带, 为典

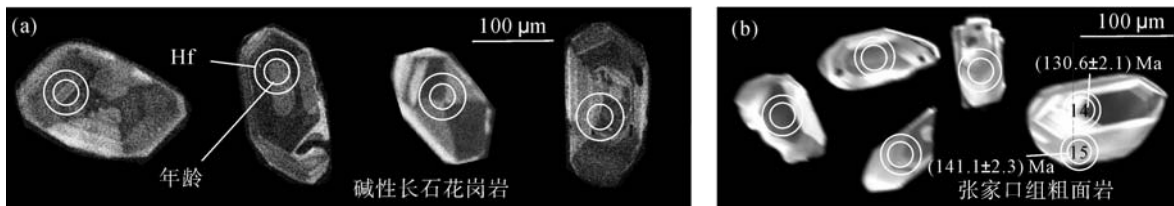


图2 锆石CL图像

Fig.2 CL images of representative zircons from the analytical samples

表1 北栅子碱性长石花岗岩(D-60)锆石 SHRIMP U-Pb 测年分析结果

Table 1 SHRIMP U-Pb zircon results for the Beizhazi granites (sample D-60)

分析点	²⁰⁶ Pb _c (%)	U (μg/g)	Th (μg/g)	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* (μg/g)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±%	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄 (Ma)	1σ
D-60-1.1	0.08	164	222	1.40	2.91	0.0558	5.9	0.159	6.2	0.0206	2.0	131.7	2.6
D-60-2.1	0.43	403	698	1.79	7.28	0.0515	6.7	0.149	6.9	0.0209	1.7	133.5	2.3
D-60-3.1	1.97	279	549	2.03	5.04	0.0480	12	0.136	13	0.0206	2.0	131.4	2.6
D-60-4.1	3.24	57	62	1.12	1.10	0.0540	36	0.161	36	0.0216	4.2	137.9	5.7
D-60-5.1	0.55	237	409	1.79	4.23	0.0551	6.5	0.157	6.8	0.0207	1.8	131.9	2.4
D-60-6.1	0.68	952	2058	2.23	17.2	0.0494	4.2	0.142	4.5	0.0208	1.6	133.0	2.1
D-60-7.1	1.32	241	419	1.80	4.17	0.0476	6.4	0.130	6.7	0.0199	1.8	126.8	2.3
D-60-8.1	0.15	302	349	1.20	5.13	0.0585	4.8	0.160	5.1	0.0198	1.8	126.1	2.2
D-60-9.1	0.31	453	758	1.73	7.72	0.0560	4.5	0.153	4.8	0.0198	1.7	126.3	2.1
D-60-10.1	1.34	278	593	2.20	4.99	0.0479	4.1	0.136	4.4	0.0206	1.8	131.6	2.3
D-60-11.1	1.46	263	465	1.83	4.80	0.0460	12	0.133	12	0.021	1.9	133.6	2.5

注: 误差为 1σ, Pb_c 和 ²⁰⁶Pb* 分别代表普通铅和放射成因铅; 普通铅校正用 ²⁰⁴Pb 实测值。

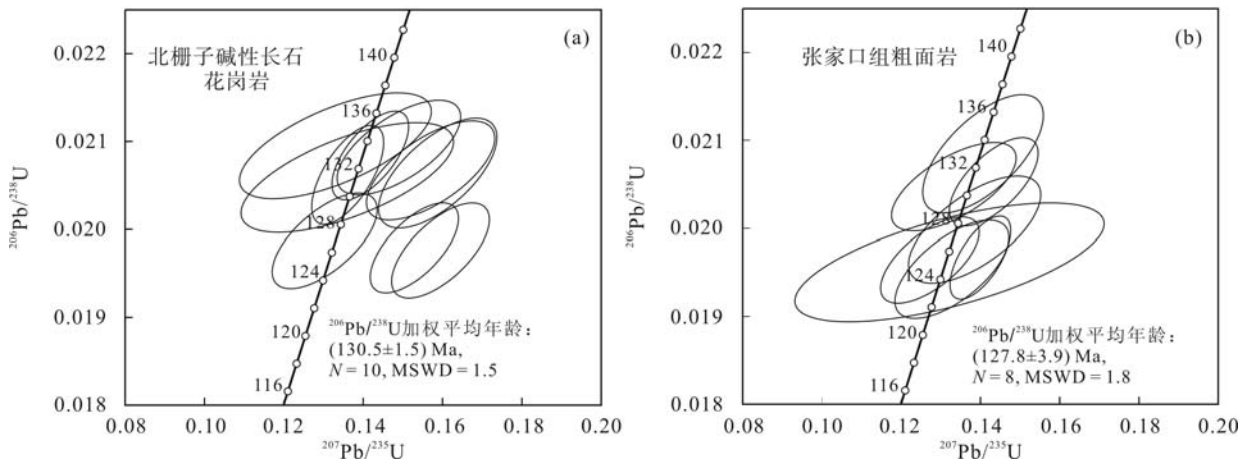


图3 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.3 U-Pb concordant diagrams of zircon grains from the analyzed samples (sample D-60 and D-89)

型岩浆成因锆石(图 2b)。用 SIMS 方法对这些锆石的 Th、U、Pb 同位素测定结果见表 2。锆石的 Th、U 含量变化范围较小, 分别在 20~233 $\mu\text{g/g}$ 和 40~300 $\mu\text{g/g}$ 之间, Th/U 比值介于 0.30~1.76 之间。所测锆石中有一颗锆石显示了老的年龄, 其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为 2326 Ma, 锆石特征显示可能为捕获的锆石; 另外有两颗锆石显示了 140 Ma 左右的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 其中一位于岩浆锆石的增生边上的分析点所给出的年龄老于位于岩浆锆石核部分分析点的年龄(130 Ma), 这可能为后期热事件对岩浆锆石的改造且有放射成因铅加入; 而另一颗锆石具有较好的环带, 但是和其他岩浆锆石特征不同, 可能为上侵过程中捕获的锆石。在锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的 U-Pb 谐和图上, 所有数据点均集中在谐和线上或其附近(图 3b), 其中 8 个数据点给出了 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均年龄为(128 \pm 4) Ma, 这一结果与杨进辉等^[6]对张家口组二段的测年结果(126 Ma)基本一致, 应为早白垩世岩浆作用的产物。

3.2 主元素特征

分析样品的主元素和微量元素组成见表 3。从表 3 可以看出, 张家口组火山岩 SiO_2 含量具有较大的变化范围(58%~70%), 岩石从粗面安山岩-粗面岩-流纹岩; 而北栅子岩体具有相对均一的 SiO_2 含量(约 70%), 与张家口组的流纹岩组成相当, 属于碱性长石花岗岩。这些岩石总体富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 8.34%~10.30%), 在 TAS 图解中, 均落在碱性演化线的上方, 属于偏碱性-碱性岩石系列(图 4a)。岩石整体富钾(K_2O 含量为 3.70%~5.78%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.76\sim$

1.15), 属于高钾-钾玄质岩石系列(图 4b)。 $A/\text{CNK} = 0.87\sim 1.05$, $A/\text{NK} = 1.10\sim 1.39$, 属于准铝质-弱过铝质系列。岩石具有中等程度的 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 比值(2.41~4.14), 中等低的 $\text{Mg}^{\#}$ 值(30~43), 在 $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$ - SiO_2 图解中主要落在镁质岩石系列中(图 4c)。与粗面安山岩、粗面岩相比, 流纹岩和碱性长石花岗岩样品相对贫 CaO 、 TiO_2 、 FeO^{T} 、 MnO 、 MgO 和 P_2O_5 。在 Harker 图解(图 4d)中, TiO_2 、 FeO^{T} 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 的含量随着 SiO_2 含量的增高而降低, K_2O 含量与 SiO_2 含量呈正相关关系。

3.3 微量和稀土元素特征

样品总体上显示了较高的 REE 含量(255~356 $\mu\text{g/g}$), 球粒陨石标准化模式为右倾平滑型(图 5a 和 5c)。LREE 相对富集, 轻稀土和重稀土分馏明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值为 20.8~42.2, 重稀土分馏较弱, $(\text{Dy}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 1.20~1.58。样品整体具有较弱的 Eu 负异常, δEu 比值主体在 0.62~0.97 之间(样品 D-89 显示了 Eu 的正异常, δEu 为 1.33)。

微量元素组成上, 这些样品总体显示了大离子亲石元素(LILE; K、Rb、Ba)和 Pb 富集, 高场强元素(Nb、Ta、Ti 和 P)不同程度亏损的特征(图 5b 和 5d)。其中粗面安山岩和粗面岩样品相对高 Sr、Ti、P, 低 Rb、Th、U, Sr、P、Ti 亏损不显著的特征, 而流纹岩和碱性长石花岗岩样品则显著亏损 Sr、P、Ti。与火山岩和碱性长石花岗岩在主元素组成上连续变化的特征相似, 两者在微量元素组成及比值上亦有着同样的变化趋势: Sr 含量随 SiO_2 含量增加而逐渐降低(图 6a); 和 P_2O_5 随 SiO_2 增加而降低所显示出的火

表 2 张家口组粗面岩锆石 SIMS U-Pb 测年分析结果

Table 2 SIMS zircon U-Pb results for the Zhangjiakou Formation trachyte (sample D-60)

分析点	U ($\mu\text{g/g}$)	Th ($\mu\text{g/g}$)	$^{232}\text{Th}/$ ^{238}U	f_{206}^{\dagger} (%)	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄 (Ma)	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (Ma)	1 σ
D-89.1	15	51	0.298	0.07	8.50296	1.8	0.4159	1.5	2286	17	2242	29
D-89.3	300	171	1.757	0.96	0.13997	3.6	0.0197	1.6	133.0	4.5	125.6	2.0
D-89.4	24	20	1.209	2.24	0.13219	19	0.0196	2.3	126.1	23	125.2	2.8
D-89.6	110	69	1.605	0.00	0.14337	5.2	0.0205	1.6	136.0	6.6	131.0	2.1
D-89.8	41	26	1.596	0.00	0.13854	7.9	0.0200	2.0	131.7	9.9	127.6	2.5
D-89.9	40	36	1.094	1.24	0.13280	7.2	0.0195	1.9	126.6	8.5	124.7	2.3
D-89.10	63	36	1.751	0.00	0.16309	7.1	0.0211	2.5	153.4	10	134.5	3.3
D-89.11	51	35	1.464	0.00	0.14066	7.1	0.0208	2.1	133.6	9.0	133.0	2.8
D-89.12	56	46	1.202	0.00	0.12725	6.5	0.0196	1.6	121.6	7.4	125.4	2.0
D-89.13	126	233	0.539	0.00	0.14785	3.0	0.0220	1.5	140.0	3.9	140.1	2.1
D-89.14	48	55	0.874	0.52	0.13328	7.8	0.0205	1.6	127.0	9.3	130.6	2.1
D-89.15	89	76	1.176	0.57	0.14420	5.9	0.0221	1.6	136.8	7.6	141.1	2.3

注: 误差为 1 σ , f_{206}^{\dagger} 为 ^{206}Pb 中普通 ^{206}Pb 的百分含量。

表3 张家口组火山岩和北栅子岩体的主元素(%)和微量元素($\mu\text{g/g}$)分析结果Table 3 Major (%) and trace element ($\mu\text{g/g}$) compositions for the Beizhazi granites and Zhangjiakou Formation volcanic rocks

样号	D-84	D-85	D-89	D-90	D-91	D-92	D-93	D-58	D-59	D-60	D-61	D-96
岩石类型	张家口组粗面岩-流纹岩						碱性长石花岗岩					
SiO ₂	63.84	57.89	66.32	70.64	70.08	67.92	67.38	70.54	70.33	70.79	70.33	70.61
TiO ₂	1.09	1.63	0.88	0.50	0.53	0.46	0.48	0.36	0.47	0.36	0.40	0.38
Al ₂ O ₃	15.04	15.28	16.20	14.77	15.02	16.13	16.44	15.21	14.79	15.11	15.21	15.30
Fe ₂ O ₃	5.11	7.94	3.27	1.84	1.93	2.42	2.21	1.63	2.27	1.69	1.76	1.81
MnO	0.09	0.10	0.09	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.09	0.05
MgO	1.57	2.96	0.83	0.48	0.53	0.57	0.49	0.36	0.62	0.41	0.38	0.47
CaO	1.83	3.59	1.57	0.77	0.78	1.43	1.88	0.98	1.46	1.08	0.78	0.54
Na ₂ O	4.31	4.25	5.20	4.37	4.44	4.54	4.67	4.86	4.16	4.42	5.00	4.68
K ₂ O	4.03	3.70	4.89	5.78	5.64	5.70	5.64	5.19	4.97	5.28	5.02	5.37
P ₂ O ₅	0.40	0.62	0.19	0.07	0.08	0.09	0.09	0.08	0.12	0.09	0.10	0.08
LOI	2.48	1.72	0.46	0.63	0.80	0.57	0.54	0.33	0.35	0.31	0.53	0.62
Total	99.78	99.68	99.89	99.89	99.89	99.88	99.87	99.59	99.60	99.59	99.59	99.93
Mg [#]	0.38	0.43	0.34	0.34	0.35	0.32	0.31	0.31	0.35	0.32	0.30	0.34
A/CNK	1.02	0.87	0.97	0.99	1.01	0.99	0.95	0.99	0.99	1.01	1.01	1.05
La	76.8	63.0	75.6	81.4	80.0	83.2	91.8	75.0	61.6	71.9	82.7	83.8
Ce	141	119	141	150	149	154	170	136	116	135	151	149
Pr	15.7	13.8	15.8	16.2	16.6	14.9	16.2	15.4	12.8	15.7	18.0	15.2
Nd	59.4	54.7	61.4	59.9	59.9	51.2	54.2	52.6	44.3	53.1	62.2	51.2
Sm	9.51	9.27	10.2	9.67	9.85	7.73	7.90	7.22	6.39	7.81	8.81	7.66
Eu	2.33	2.66	3.98	2.08	2.28	1.39	1.43	1.61	1.47	1.73	1.96	1.79
Gd	7.54	7.58	8.24	8.01	8.18	5.92	6.39	5.30	4.67	5.54	6.38	6.60
Tb	1.03	1.00	1.09	1.09	1.14	0.79	0.79	0.70	0.61	0.72	0.86	0.85
Dy	4.56	4.42	4.90	5.30	5.23	3.27	3.35	3.69	3.35	3.86	4.37	3.85
Ho	0.90	0.84	0.94	1.02	1.02	0.62	0.61	0.69	0.64	0.73	0.81	0.76
Er	2.48	2.27	2.55	2.91	2.93	1.69	1.69	1.82	1.75	1.97	2.19	2.25
Tm	0.33	0.28	0.33	0.42	0.41	0.24	0.23	0.25	0.25	0.28	0.31	0.30
Yb	2.04	1.87	2.16	2.81	2.67	1.58	1.56	1.69	1.67	1.81	2.02	2.13
Lu	0.30	0.27	0.32	0.42	0.39	0.24	0.24	0.26	0.26	0.27	0.30	0.33
Y	25.2	22.1	25.5	28.1	28.0	17.6	17.6	17.4	16.3	18.4	20.5	24.3
Rb	118	88.4	102	144	134	101	88.9	120	156	142	137	151
Sr	400	929	391	150	156	423	396	173	317	206	205	207
Ba	1275	2200	5980	2060	1980	1190	1245	1354	1256	1523	1571	1485
Pb	18.0	16.0	20.0	31.0	27.0	25.0	49.0	16.4	23.6	30.4	21.6	39.0
Th	8.64	5.80	8.29	13.4	12.4	9.23	8.55	10.9	10.5	10.4	10.6	12.1
U	1.56	1.21	1.49	2.76	2.51	1.63	1.58	1.14	1.27	1.37	1.44	1.53
Nb	18.6	14.9	19.7	23.7	23.1	10.1	9.20	14.9	14.2	14.9	15.4	19.1
Ta	1.10	0.80	1.10	1.50	1.40	0.70	0.60	1.21	1.14	1.15	1.15	1.30
Zr	323	276	366	397	411	352	389	215	210	243	227	340
Hf	8.20	7.20	9.20	10.9	10.8	8.50	8.70	6.29	6.23	6.77	6.41	8.90
Ga	21.7	21.9	22.5	21.4	22.2	19.1	19.1	16.2	18.0	17.7	18.7	19.3
Cr	10.0	10.0	9.00	9.10	8.10	8.20	7.40	4.27	6.00	6.42	5.77	10.0
Co	25.1	32.7	73.5	24.0	31.9	31.7	31.2	14.9	26.2	30.6	21.7	28.0
Ni	11.0	8.10	5.40	4.00	3.89	3.40	3.60	1.25	2.10	2.08	1.91	5.00
Zn	96.0	109	86.0	70.0	70.0	63.0	39.0	38.0	66.7	88.5	65.6	119
V	87.0	148	39.0	25.0	26.0	35.0	39.0	8.05	21.2	11.0	13.5	20.0
(La/Yb) _N	27.0	24.2	25.1	20.8	21.5	37.8	42.2	31.8	26.5	28.5	29.4	28.2
δEu	0.84	0.97	1.33	0.72	0.78	0.63	0.62	0.80	0.82	0.81	0.80	0.77
REE	324	280	328	341	339	327	356	302	255	300	342	325

注: LOI-烧失量; Total-岩石化学总量; A/CNK = Al/(Na+K+Ca)(摩尔比); Mg[#] = 100 × (Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺)), Fe²⁺据全铁计算; δEu -球粒陨石标准化后 Eu/(Sm × Gd)^{1/2} 值。

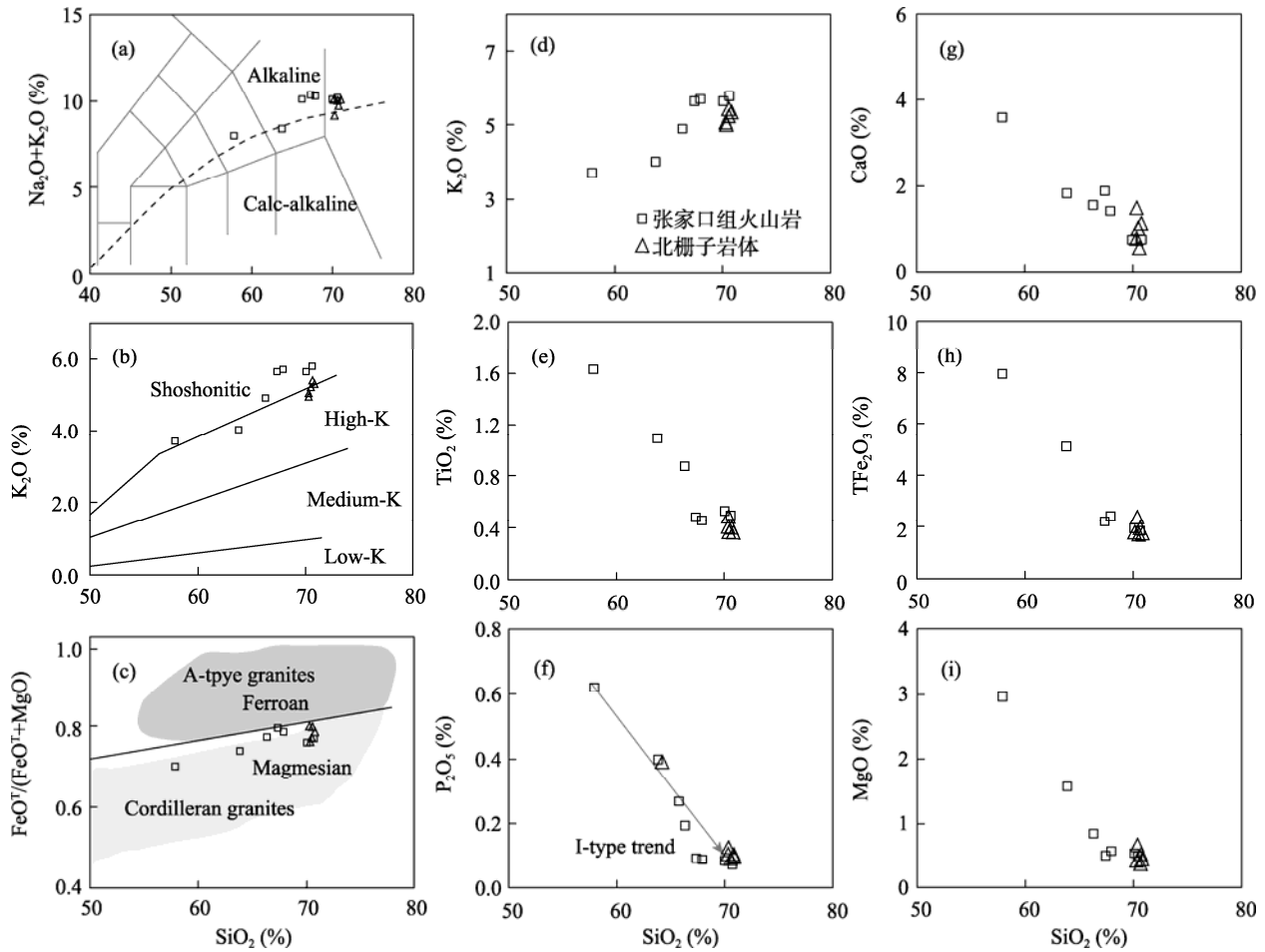


图 4 张家口组火山岩和北栅子岩体的岩石化学特征以及主元素-SiO₂关系图解

Fig.4 Maps showing major characteristics of the Beizhazi rocks and Zhangjiakou Formation volcanic rocks
(a) TAS 图解; (b) K₂O vs. SiO₂ 图解; (c) FeO^T/(FeO^T+MgO) vs. SiO₂ 图解; (d)~(i) Harker 图解(据文献[28-30]).

山岩-花岗岩 I 型特征一致, 图 6b 显示出岩石 Rb 含量随 Th 含量的增加而增加, 表现出与 Lachlan 褶皱带 I 型花岗岩相似的演化趋势; Ba 含量与 δEu 及 Rb 与 Sr 之间的变化关系显示出结晶分异作用在岩石微量元素组成演化中可能起着重要作用(图 6c 和 6d); 另外, Nb-Ta、Zr-Hf 协变关系亦显示出火山岩和花岗岩微量元素组成上连续演化的特征(图 5e-5f), 表明它们可能为同源岩浆演化的产物。

张家口组火山岩中的流纹岩显示了 A 型花岗岩的特征, 如高的 Na₂O+K₂O、Zr、Nb 含量以及 Ga/Al 比值等, 但是所有样品均具有较高的 Al₂O₃ 含量, 相对低的 FeO^T/MgO 比值(2.41~4.14), FeO^T/(FeO^T+MgO)比值(0.71~0.81), 明显低于 A 型花岗岩(氧化型 0.80~0.94; 还原型大于 0.88)^[30]; Ga/Al×10000 比值为 2.01~2.79, 也显著低于 A 型花岗岩的平均值 3.75^[35]; 高 Ba 含量, 没有强烈的 Sr 亏损, 稀土元素显示了弱

的 Eu 负异常(δEu = 0.62~0.97), 与典型 A 型花岗岩的特征也明显不同; 同时这些样品总体为准铝质, Rb 含量低于 160 μg/g, 又与 S 型花岗岩不同。因此这些火山岩和花岗岩应属于高钾钙碱性-钾玄质的 I 型花岗岩(或火山岩)。

3.4 Sr-Nd-Hf 同位素特征

张家口火山岩和北栅子岩体的 Sr-Nd 同位素分析结果见表 4。张家口组火山岩与北栅子碱性长石花岗岩的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始值变化范围分别为 0.70726~0.70806 和 0.70756~0.70799, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 初始值分别为 0.511655~0.511772 和 0.511609~0.511654, 对应的 ε_{Nd}(t)值分别为-15.9~-13.6 和-16.8~-15.9。

锆石 Hf 同位素分析结果见表 5, 所有锆石颗粒的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值均很低(小于 0.001)说明锆石形成后放射成因 Hf 同位素积累量很低, 能有效地代表岩石

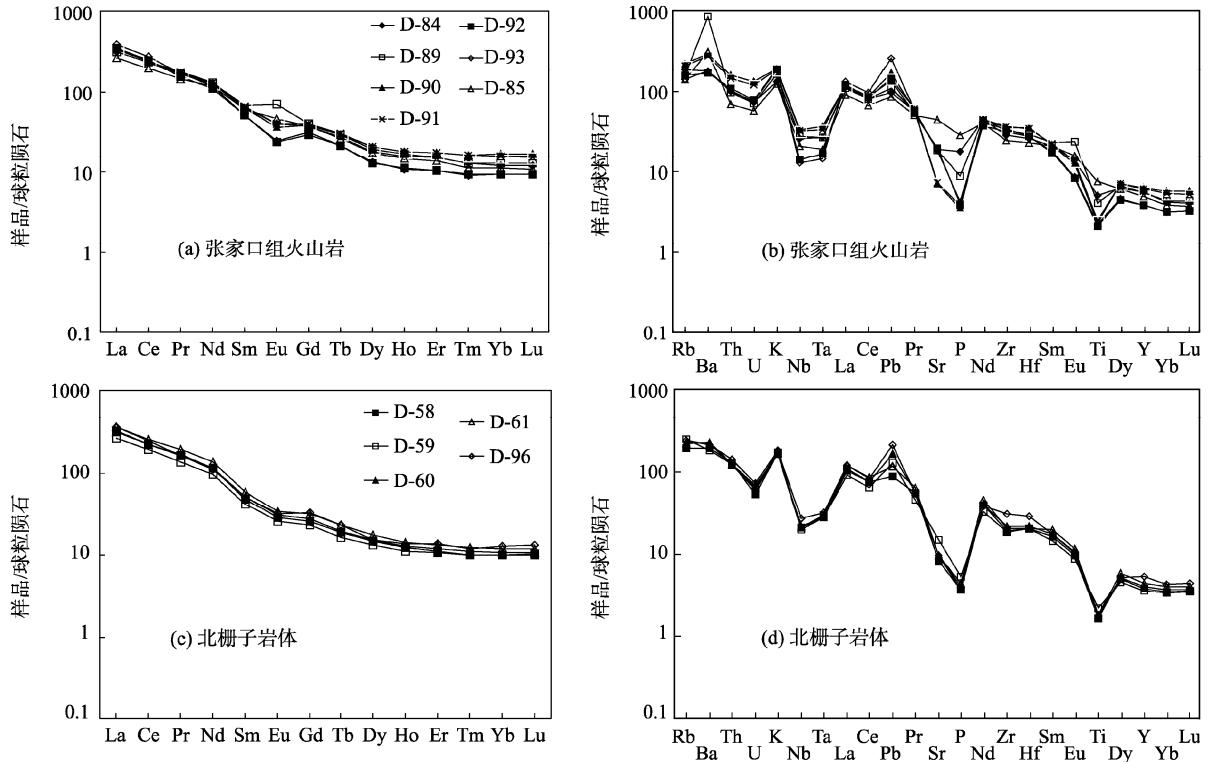


图5 张家口组火山岩和北栅子岩体的 REE 分布模式和微量元素蛛网图(球粒陨石值和初始地幔值引自 Sun *et al.*^[31])
Fig.5 Chondrite normalized REE patterns and trace elements spider diagrams for the Beizhazi granites and Zhangjiakou Formation volcanic rocks

源区性质^[36-38]。其中,碱性长石花岗岩(D-60)锆石分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值在 0.281999~0.282178 之间,较为均一。取 $T = 130 \text{ Ma}$ 计算, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的值为 -24.7~-18.4, 平均值为 -22.2; 单阶段 Hf 模式年龄为 1.58~1.85 Ga, 二阶段 Hf 模式年龄为 2.34~2.74 Ga。粗面质火山岩样品(D-89)分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的初始值在 0.282170~0.282374 之间,也较为均一。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的值为 -18.7~-11.3, 平均值为 -16.0; 单阶段 Hf 模式年龄为 1.24~1.54 Ga, 二阶段 Hf 模式年龄为 1.90~2.36 Ga。由于这些锆石的 Lu/Hf 比值显著小于大陆地壳 Lu/Hf 比值,二阶段模式年龄能更好的反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间或其源区物质在地壳的存留年龄。

这些样品的同位素特征和该地区 140 Ma 左右出露的酸性侵入岩(上水泉花岗岩)以及相对基性的辉石闪长岩(转枝莲岩体)相似^[17],并且在 Sr-Nd 同位素图解(图 7a)中它们都投在汉诺坝下地壳基性麻粒岩包体的范围,这说明该地区早白垩世岩浆活动与区域下地壳关系密切。

4 讨论

4.1 岩石源区

区内张家口组火山岩从粗面安山岩-粗面岩到流纹岩-碱性长石花岗岩其主要元素含量总体上显示了从中性到酸性岩浆的结晶分异特征(图 4d~4i)。TiO₂、FeO、MgO、CaO、P₂O₅ 含量随着 SiO₂ 含量的增高而逐渐减少,可能与岩浆演化过程中角闪石、铁钛氧化物以及磷灰石的分离结晶作用有关。其微量元素组成也显示出结晶分异作用的影响。张家口组火山岩和北栅子岩体在 Sr、Y 含量, K₂O/Na₂O、Sr/Y 比值,重稀土亏损程度等特征上与东部燕山期高 Sr 低 Y 的埃达克质中酸性火成岩有着显著的不同,反映其熔融条件(如温度,压力,水含量,氧逸度以及残留相)存在较大的差异。区内张家口组火山岩和北栅子花岗岩形成深度可能较东部燕山期埃达克质中酸性火成岩略浅^[42]。微量元素蛛网图上显著的 Nb、Ta 亏损表明残留相中可能存在钛铁矿等,但是

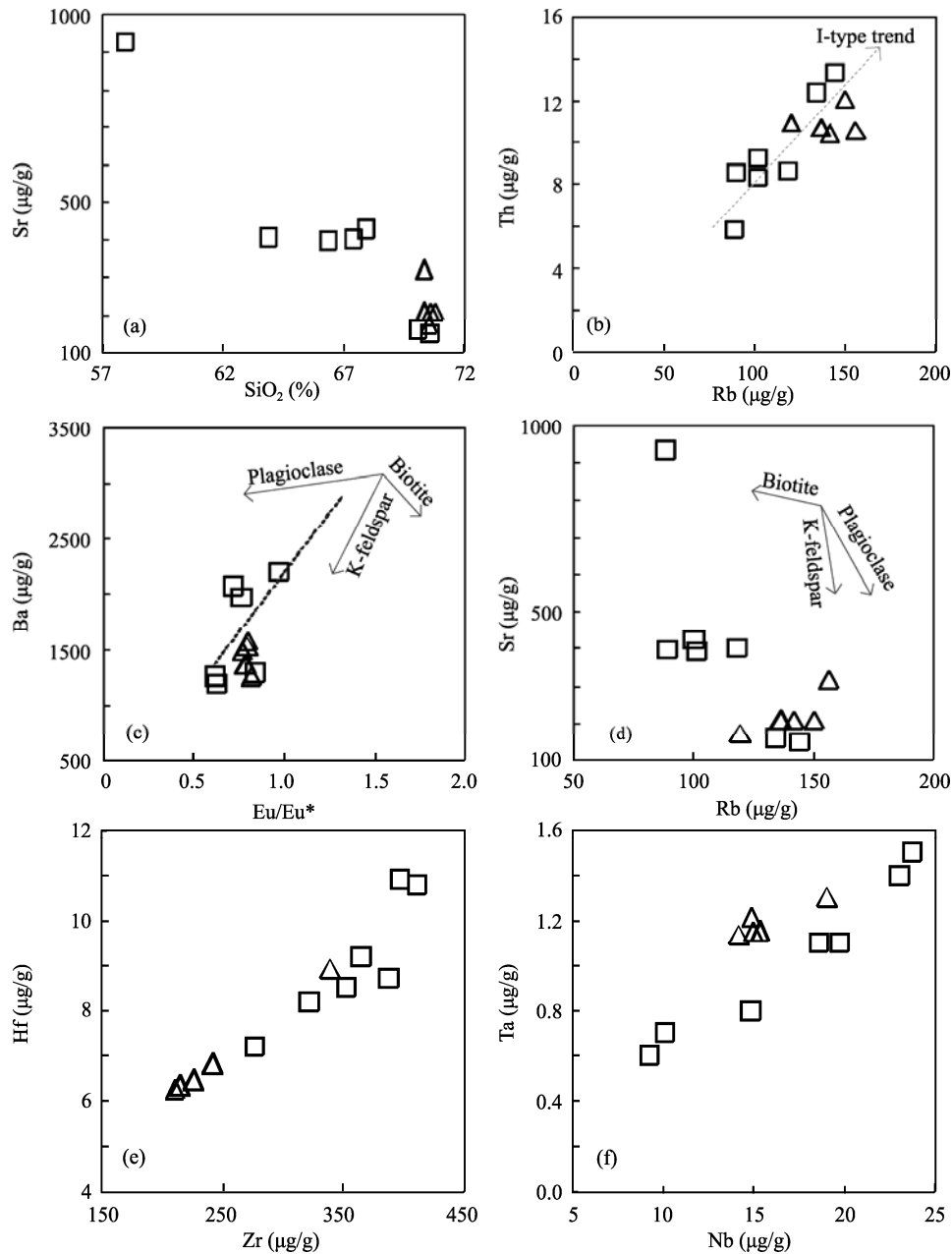


图 6 火山岩和花岗岩微量元素含量及比值变化图解(据文献[32-34])

Fig.6 Diagrams of trace element concentration and ratio variations for the volcanic rocks and granites (from references [32-34])

表 4 张家口组火山岩和北栅子岩体的 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 4 Sr-Nd isotope compositions of the Beizhazi granites and Zhangjiakou Formation volcanic rocks

样号	Rb	Sr	Sm	Nd	Rb/Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	I _{Sr}	Sm/Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd (t = 130 Ma)	ε _{Nd} (t = 130 Ma)	t _{DM} (Ga)
北栅子岩体												
D-58	120	173	7.22	52.6	1.95	0.711586±14	0.70799	0.08	0.511681±12	0.511609	-16.8	1.73
D-59	156	317	6.39	44.3	1.38	0.710309±16	0.70776	0.09	0.511700±08	0.511625	-16.5	1.76
D-60	142	206	7.81	53.1	1.93	0.711271±11	0.70771	0.09	0.511715±10	0.511638	-16.2	1.77
D-61	137	205	8.81	62.2	1.87	0.711013±14	0.70756	0.09	0.511729±12	0.511654	-15.9	1.71
张家口组火山岩												
D-84	118	400	9.51	59.4	0.82	0.709578±14	0.70806	0.10	0.511742±08	0.511658	-15.9	1.86
D-90	144	150	9.67	59.9	2.69	0.712283±12	0.70731	0.10	0.511856±06	0.511772	-13.6	1.72
D-92	101	423	7.73	51.2	0.67	0.708495±14	0.70726	0.09	0.511734±06	0.511655	-15.9	1.78

注: 误差为 2σ。

表5 北栅子岩体和张家口组火山岩的锆石 Hf 同位素分析结果
Table 5 Zircon Hf isotope compositions of the Beizhazi granites and Zhangjiakou Formation volcanic rocks

分析点	Age (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
北栅子碱性长石花岗岩											
D60 01	130	0.062	0.0021	0.282061	0.000028	0.282056	-25.1	-22.5	1726	2597	-0.94
D60 02	130	0.049	0.0017	0.282149	0.000023	0.282145	-22.0	-19.3	1585	2401	-0.95
D60 03	130	0.044	0.0016	0.282036	0.000015	0.282032	-26.0	-23.3	1738	2651	-0.95
D60 04	130	0.052	0.0019	0.282068	0.000022	0.282064	-24.9	-22.2	1707	2581	-0.94
D60 05	130	0.058	0.0021	0.282095	0.000017	0.282090	-24.0	-21.3	1680	2524	-0.94
D60 06	130	0.042	0.0015	0.282113	0.000018	0.282110	-23.3	-20.6	1626	2480	-0.96
D60 07	130	0.082	0.0029	0.282013	0.000015	0.282006	-26.8	-24.2	1835	2708	-0.91
D60 08	130	0.077	0.0027	0.281999	0.000024	0.281992	-27.4	-24.7	1846	2739	-0.92
D60 09	130	0.068	0.0024	0.282086	0.000029	0.282080	-24.3	-21.6	1704	2544	-0.93
D60 10	130	0.077	0.0027	0.282178	0.000024	0.282171	-21.0	-18.4	1586	2343	-0.92
D60 11	130	0.054	0.0019	0.282102	0.000019	0.282097	-23.7	-21.0	1661	2508	-0.94
D60 12	130	0.036	0.0013	0.282044	0.000015	0.282040	-25.8	-23.0	1716	2633	-0.96
D60 13	130	0.035	0.0013	0.282033	0.000016	0.282029	-26.1	-23.4	1732	2658	-0.96
D60 14	130	0.038	0.0014	0.282063	0.000016	0.282059	-25.1	-22.4	1695	2592	-0.96
D60 16	130	0.023	0.0009	0.282079	0.000017	0.282077	-24.5	-21.7	1648	2553	-0.97
D60 17	130	0.037	0.0014	0.282014	0.000014	0.282010	-26.8	-24.1	1761	2700	-0.96
D60 18	130	0.072	0.0025	0.282062	0.000013	0.282056	-25.1	-22.5	1744	2598	-0.93
D60 19	130	0.055	0.0020	0.282084	0.000014	0.282079	-24.3	-21.7	1689	2547	-0.94
D60 20	130	0.054	0.0020	0.282024	0.000015	0.282019	-26.4	-23.8	1776	2680	-0.94
D60 21	130	0.052	0.0019	0.282047	0.000013	0.282043	-25.6	-23.0	1737	2628	-0.94
D60 23	130	0.057	0.0021	0.282088	0.000015	0.282083	-24.2	-21.5	1689	2539	-0.94
张家口组粗面质火山岩											
D89 01	2326	0.006	0.0003	0.281332	0.000022	0.281321	-50.9	0.700	2630	2819	-0.99
D89 02	128	0.029	0.0011	0.282237	0.000022	0.282235	-18.9	-16.2	1435	2204	-0.97
D89 03	128	0.054	0.0019	0.282244	0.000024	0.282239	-18.7	-16.0	1458	2194	-0.94
D89 04	128	0.031	0.0011	0.282252	0.000021	0.282249	-18.4	-15.7	1416	2172	-0.97
D89 05	128	0.033	0.0012	0.282245	0.000022	0.282243	-18.6	-15.9	1427	2187	-0.96
D89 06	128	0.051	0.0018	0.282201	0.000024	0.282197	-20.2	-17.5	1515	2288	-0.95
D89 07	128	0.035	0.0013	0.282250	0.000023	0.282247	-18.4	-15.8	1424	2176	-0.96
D89 08	128	0.038	0.0016	0.282174	0.000023	0.282170	-21.2	-18.5	1544	2347	-0.95
D89 09	128	0.020	0.0008	0.282282	0.000021	0.282281	-17.3	-14.6	1361	2103	-0.98
D89 10	128	0.030	0.0011	0.282166	0.000023	0.282164	-21.4	-18.7	1537	2362	-0.97
D89 11	128	0.023	0.0008	0.282221	0.000024	0.282219	-19.5	-16.8	1450	2240	-0.97
D89 12	128	0.020	0.0007	0.282205	0.000021	0.282203	-20.1	-17.3	1467	2275	-0.98
D89 13	128	0.029	0.0010	0.282376	0.000023	0.282374	-14.0	-11.3	1237	1895	-0.97
D89 14	128	0.021	0.0008	0.282282	0.000023	0.282281	-17.3	-14.6	1362	2103	-0.98
D89 15	128	0.038	0.0014	0.282248	0.000023	0.282245	-18.5	-15.8	1434	2182	-0.96
D89 16	128	0.026	0.0010	0.282194	0.000023	0.282191	-20.5	-17.7	1493	2301	-0.97
D89 17	128	0.169	0.0049	0.282323	0.000024	0.282311	-15.9	-13.5	1462	2032	-0.85

注: 表中锆石 Hf 同位素成分的计算所用的参数: Lu 衰变常数 $A = 1.856 \times 10^{11}$, 球粒陨石 Lu/Hf = 0.0332, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772^{[33]}$, 亏损地幔 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325^{[34]}$, t_{DM2} 所取的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 为地壳平均值的 $-0.55^{[35]}$ 。

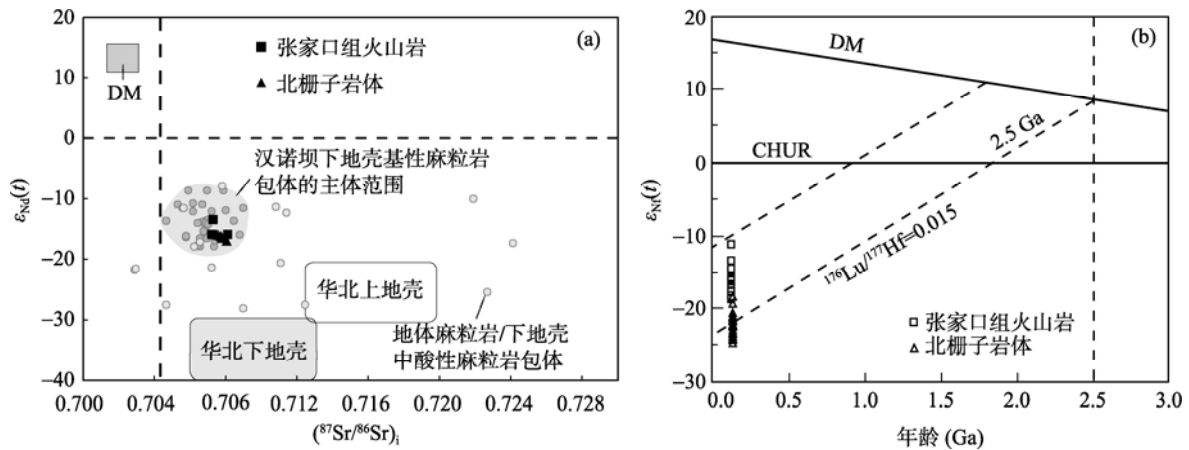


图7 张家口组火山岩和北栅子岩体的 Sr-Nd 同位素(a)与锆石 Hf 同位素图解(b)

Fig.7 Sr-Nd and Hf isotopic features of the Beizhazi rocks and Zhangjiakou Formation volcanic rocks
汉诺坝下地壳麻粒岩包体数据引自文献[39-41], 区内麻粒岩据文献[17,41].

根据粗面安山岩较弱的 Ti 负异常, Nb、Ta 亏损更可能是对源区特征的继承。

尽管张家口组火山岩和北栅子花岗岩在主元素和微量元素组成及演化上显示出同源岩浆结晶分异的趋势, 但全岩 Nd 同位素组成及锆石 Hf 同位素特征存在显著的差异。火山岩和花岗岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值差别较小, 其平均值分别为 0.7075 和 0.7078; 但在全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 及锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 特征上有明显差别: 火山岩 $\epsilon_{Nd}(t) = -15.9 \sim -13.6$ 、 $\epsilon_{Hf}(t) = -18.7 \sim -13.5$, 而花岗岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 及 $\epsilon_{Hf}(t)$ 则显著低于火山岩, 分别为 $\epsilon_{Nd}(t) = -16.8 \sim -15.9$ 和 $-24.7 \sim -18.4$ 。这些样品同位素特征与 SiO_2 含量无明显的线性关系, 说明中上地壳物质的混染不显著, 全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素的差异可能反应了源区组成的不同。

张家口组火山岩和北栅子岩体整体较高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值 (0.70726~0.70806) 和低的全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ ($-13.6 \sim -16.8$) 及锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ ($-24.7 \sim -11.3$) 的同位素特征, 表明其源区可能为下地壳物质或者富集的岩石圈地幔。而火山岩和花岗岩样品高 SiO_2 , 低 Cr, Ni 含量以及 $Mg^\#$ 值的特征表明其主体不太可能来源于富集的岩石圈地幔。在 Sr-Nd 同位素图解(图 7a)中, 张家口组火山岩和北栅子岩体的投影位置偏离华北古老下地壳^[43], 而落在汉诺坝下地壳基性麻粒岩包体的范围。依据其锆石 Hf 同位素特征, 张家口组火山岩和北栅子岩体显示了相对较老锆石 Hf 模式年龄 ($t_{2DM} > 1.8$ Ga), 在 $\epsilon_{Hf}(t)-t_{DM}$ (age) 图解中, 这些样品均落在新太古代到古元古代下地壳演化线之间(图 7b)。

区内大面积出露的张家口组火山岩、北栅子花

岗岩及早白垩世侵入岩的地球化学以及同位素特征表明, 它们主要来源于基性下地壳的部分熔融, 这些岩石的同位素特征表明部分熔融的下地壳应是经历了强烈改造的下地壳。前人资料显示^[44-45], 华北克拉通最下部地壳部分或大部已经被中生代的下地壳置换(或称换底作用)。邻区的新生代汉诺坝玄武岩下地壳麻粒岩包体的研究表明该地区下地壳包括中生代底侵的玄武质岩石和强烈改造的前寒武纪下地壳物质^[21,39-41,46-51]。

综合火山岩和花岗岩密切的时空联系和主元素、微量元素特征演化趋势及其在 Nd、Hf 同位素组成上的差异, 笔者认为可能存在不同源区岩浆混合过程^[52-53]。由中生代的底侵玄武质岩浆形成的下地壳物质部分熔融形成的中酸性岩浆与经历强烈改造的前寒武下地壳物质部分熔融为主的酸性岩浆端元混合而形成了这种在主元素、微量元素特征上连续演化的岩浆岩组合。其中张家口组中相对基性的火山岩源区含有较多的新生地幔物质, 而酸性程度较高的流纹岩和花岗岩则相对的以经受过强烈改造的前寒武纪古老下地壳为主。另外, 实验岩石学研究结果亦表明, 中基性变质火山岩或者基性变质岩的部分熔融可以形成这类高钾的中酸性岩浆^[54-55]。

4.2 早白垩世构造背景

前人研究资料显示, 高钾钙碱性岩浆可形成于多种构造背景, 但通常是与区域构造体制的转变有关^[56-58]。北栅子岩体以及近同期的张家口组火山岩显示了高钾钙碱性-钾玄质岩浆岩特征, 一些流纹岩样品显示了 A 型花岗岩的地球化学特征, 这些岩浆

的大面积出露表明当时的构造体制可能由挤压构造格局转变为伸展构造格局。燕山地区晚中生代变质变形构造研究资料亦显示,晚侏罗世到早白垩世主要为挤压构造背景,发育NNE(NE)展布的深层次韧性剪切带、逆冲推覆构造以及一系列褶皱变形^[59-63]。如张长厚等^[62]对燕山西段以及北京西山地区晚中生代逆冲构造的研究显示,逆冲构造变形主要发生在140~130 Ma;而在白垩世初期强烈的收缩变形之后,130~110 Ma发育了一系列的变质核杂岩、断陷盆地等伸展变形构造^[61]。而区域岩浆活动资料显示,燕山构造带埃达克质岩浆活动结束和碱性岩浆活动开始时间为130~120 Ma^[4],在130 Ma以后区域上开始出现大量碱性-偏碱性的岩浆活动,如冀北白查A型花岗岩、八达岭杂岩中的碱性花岗岩以及燕山大面积的碱性系列的火山岩^[5,64,65]。130 Ma之后变质核杂岩、断陷盆地的发育以及大面积的碱性岩浆活动的出现表明,130 Ma左右区域岩石圈开始进入强烈伸展背景,也标志着燕山构造带的垮塌。张家口组火山岩和北栅子岩体形成时代(约130 Ma)以及地球化学特征说明,它们是在这一挤压向伸展转折期岩浆活动的产物。

早白垩世是华北东部构造转折的关键时期,这一时期(130~110 Ma)也是华北克拉通减薄(或破坏)的高峰期^[45,66-68]。燕山构造带在这一时间开始垮塌,并由挤压向伸展转变可能与整个华北东部构造体制的转折是一致的。已有研究表明,华北东部晚侏罗世整体性抬升和早白垩世构造体制的转变与华北-蒙古板块和西伯利亚碰撞、Izanaqi板块运动方向以及速度的转变有关,是邻近块体综合作用的结果^[45,68]。

总体来说,北栅子岩体以及早白垩世张家口组火山岩形成于早白垩世由挤压向伸展转折的构造背景。这一时期燕山构造带的陆壳挤压增厚结束并开始垮塌,强烈的岩石圈减薄导致幔源玄武质岩浆底侵诱使下地壳发生部分熔融作用是这些岩浆形成的主要机制。同时这些大面积火成岩的同位素特征暗示基性下地壳源区中明显存在幔源玄武质组分的贡献,这也印证了晚中生代区域上发生了强烈的壳幔相互作用。

5 结 论

(1) 北栅子岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为

(130.5±1.5) Ma, 张家口组粗面岩的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄为(127.8±3.5) Ma, 为早白垩世岩浆作用的产物。

(2) 张家口组火山岩与北栅子花岗岩体属于高钾钙碱性-钾玄质系列,富碱,准铝质-弱过铝质,中等低的 $Mg^{\#}$ 值; LREE 相对富集((La/Yb)_N 比值为 20.8~42.2),弱的 Eu 负异常(δEu 为 0.62~0.97); 微量元素上 LILE 相对富集和高场强元素(Nb、Ta、Ti 和 P)不同程度亏损。火山岩和花岗岩的 Sr 同位素组成差别较小,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始值的平均值分别为 0.7075 和 0.7078,但两者 $\epsilon_{Nd}(t)$ 和锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 的差异显著,火山岩 $\epsilon_{Nd}(t) = -15.9 \sim -13.6$ 、 $\epsilon_{Hf}(t) = -18.71 \sim -13.49$,而花岗岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 及 $\epsilon_{Hf}(t)$ 则显著低于火山岩,分别为 $-16.8 \sim -15.9$ 和 $-24.7 \sim -18.4$ 。同位素以及地球化学特征表明,形成张家口组火山岩及北栅子花岗岩的岩浆可能存在源区混合过程,它们均主要源于经强烈改造的下地壳物质的部分熔融,但张家口组粗面岩可能含有较多的年轻地幔物质。

(3) 张家口组火山岩与北栅子花岗岩体是燕山构造带挤压向伸展转变过程中,岩石圈强烈减薄导致的玄武质岩浆底侵所诱发的下地壳部分熔融作用的结果。

赵振华研究员参加了部分野外工作;室内研究阶段得到张绍立、陈林丽、胡光黔等老师的支持和帮助;两位审稿专家提出了建设性的修改意见,在此谨致谢忱。

参考文献(References):

- [1] 许保良, 阎国翰, 徐振邦, 何中甫, 赵晖. 冀北燕山期三个系列花岗岩质岩石的地球化学特征及其成因学意义[J]. 岩石学报, 1999, 15(2): 208-216.
Xu Bao-liang, Yan Guo-han, Xu Zhen-bang, He Zhong-fu, Zhao Hui. Geochemistry and genetic implication of three series of Yanshanian granite in northern Hebei Province [J]. Acta Petrol Sinica, 1999, 15(2): 208-216 (in Chinese with English abstract).
- [2] 刘红涛, 翟明国, 刘建明, 孙世华. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山[J]. 岩石学报, 2002, 18(4): 433-448.
Liu Hong-tao, Zhai Ming-guo, Liu Jian-ming, Sun Shi-hua. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of North China Craton: Evolution from post-collisional to anorogenic settings [J]. Acta Petrol Sinica, 2002, 18(4): 433-448 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李晓勇. 燕山地区中生代火山作用成因及其对深部过程的制约[D]. 广州: 广州地球化学研究所, 2003.

- Li Xiao-yong. Mesozoic volcanism and constraint on deep geological process in Yanshan Area [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2003 (in Chinese with English abstract).
- [4] Davis G A. The Yanshan belt of North China: Tectonics, adakitic magmatism, and crustal evolution [J]. *Earth Sci Front*, 2003, 10(4): 373-384.
- [5] Yang Jin-hui, Wu Fu-yuan, Wilde S A, Chen Fu-kun, Liu Xiao-ming, Xie Lie-wen. Petrogenesis of an alkalic 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]. *J Petrol*, 2008, 49(2): 315-351.
- [6] 杨进辉, 吴福元, 邵济安, 谢烈文, 柳小明. 冀北张-宣地区后城组、张家口组火山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素[J]. *地球科学*, 2006, 31(1): 71-80.
- Yang Jin-hui, Wu Fu-yuan, Shao Ji-an, Xie Lie-wen, Liu Xiao-ming. In-situ U-Pb dating and Hf isotopic analyses of zircons from volcanic rocks of the Houcheng and Zhangjiakou Formations in the Zhang-Xuan area, Northeast China [J]. *Earth Sci*, 2006, 31(1): 71-80 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张宏, 柳小明, 张晔卿, 袁洪林, 胡兆初. 冀北滦平-辽西凌源地区张家口组火山岩顶、底的单颗粒锆石 U-Pb 年龄及意义[J]. *地球科学*, 2005, 30(4): 387-401.
- Zhang Hong, Liu Xiao-ming, Zhang Ye-qing, Yuan Hong-lin, Hu Zhao-chu. Zircon U-Pb ages and significance of bottom and top beds of Zhangjiakou Formation in Liaoning and Hebei Provinces [J]. *Earth Sci*, 2005, 30(4): 387-401 (in Chinese with English abstract).
- [8] 牛宝贵, 和政军, 宋彪, 任纪舜. 张家口组火山岩 SHRIMP 定年及其重大意义[J]. *地质通报*, 2003, 22(2): 140-141.
- Niu Bao-gui, He Zheng-jun, Song Biao, Ren Ji-shun. SHRIMP geochronology of volcanic of the Zhangjiakou Formation and its significance [J]. *Geol Bull China*, 2003, 22(2): 140-141 (in Chinese).
- [9] 柳永清, 李佩贤, 田树刚. 冀北滦平晚中生代火山碎屑(熔)岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(3): 237-244.
- Liu Yong-qing, Li Pei-xian, Tian Shu-gang. SHRIMP zircon age of Late Mesozoic tuff (lava) in Luanping basin, northern Hebei, and its implications [J]. *Acta Petrol Mineral*, 2003, 22(3): 237-244 (in Chinese with English abstract).
- [10] Niu Baogui, He Zhengjun, Song Biao, Ren Jishun, Xiao Liwei. SHRIMP geochronology of volcanics of the Zhangjiakou and Yixian Formations, Northern Hebei Province, with a discussion on the age of the Xing'anling Group of the Great Hinggan Mountains and volcanic strata of the southeastern coastal area of China [J]. *Acta Geol Sinica (Eng Ed)*, 2004, 78(6): 1214-1228.
- [11] 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]. *地质学报*, 2003, 22(6): 384-390.
- Shao Ji-an, Zhang Lü-qiao, Chu Zhu-yin. Early Cretaceous volcanism-sedimentation in northern Hebei and its tectonic setting: A discussion [J]. *Geol Bull China*, 2003, 22(6): 384-390 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘敦一, 耿元生, 宋彪. 冀西北地区晚太古代大陆地壳的增生和再造——同位素年代学证据[J]. *地球学报*, 1997, 18(3): 226-232.
- Liu Dun-yi, Geng Yuan-sheng, Song Biao. Late Archean crustal accretion and reworking in northwestern Hebei Province: Isochronology evidence [J]. *Acta Geosci Sinica*, 1997, 18(3): 226-232 (in Chinese with English abstract).
- [13] 钱祥麟, 王仁民. 华北北部麻粒岩带地质演化[M]. 北京: 地震出版社, 1994: 1-234.
- Qian Xiang-lin, Wang Ren-min. Geological Evolution of the Granulite Terrain in North Part of the North China Craton [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1994: 1-234 (in Chinese).
- [14] 包志伟, 赵振华, 张佩华, 王一先. 张家口水泉沟正长岩杂岩体成因的 REE 和 Sr、Nd、Pb 同位素证据[J]. *地质论评*, 2003, 49(6): 621-627.
- Bao Zhi-wei, Zhao Zhen-hua, Zhang Pei-hua, Wang Yi-xian. REE, Sr, Nd, and Pb isotopic evidence for the petrogenesis of the Shuiquangou syenite complex in northwest Hebei Province, China [J]. *Geol Rev*, 2003, 49(6): 621-627 (in Chinese with English abstract).
- [15] Jiang Neng. Petrology and geochemistry of the Shuiquangou syenitic complex, northern margin of the North China Craton [J]. *J Geol Soc London*, 2005, 162(1): 203-215.
- [16] 罗镇宽, 苗来成, 关康, 裘有守, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 河北张家口水泉沟岩体 SHRIMP 年代学研究及其意义[J]. *地球化学*, 2001, 30(2): 116-122.
- Luo Zhen-kuan, Miao Lai-cheng, Guan Kang, Qiu You-shou, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. SHRIMP chronological study of Shuiquangou intrusive body in Zhangjiakou area, Hebei Province and its geochemical significance [J]. *Geochimica*, 2001, 30(2): 116-122 (in Chinese with English abstract).
- [17] Jiang Neng, Liu Yongsheng, Zhou Wenge, Yang Jinhui, Zhang Shuangquan. Derivation of Mesozoic adakitic magmas from ancient lower crust in the North China craton [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2007, 71(10): 2591-2608.
- [18] 田伟, 陈斌, 刘超群, 张华锋. 冀北小张家口超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2007, 23(3): 583-590.
- Tian Wei, Chen Bin, Liu Chao-qun, Zhang Hua-feng. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the Xiaozhangjiakou ultramafic pluton in northern Hebei [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2007, 23(3): 583-590 (in Chinese with English abstract).
- [19] Miao Laicheng, Qiu Yumin, McNaughton N J, Luo Zhenkuan, David G A, Zhai Yusheng, Fan Weiming, Zhai Mingguo, Guan Kang. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of granitoids from Dongping area, Hebei Province, China: Constraints

- on tectonic evolution and geodynamic setting for gold metallogeny [J]. *Ore Geol Rev*, 2002, 19(3/4): 187–204.
- [20] Jiang Neng, Zhang Shuangquan, Zhou Wenge, Liu Yongsheng. Origin of a Mesozoic granite with A-type characteristics from the North China craton: Highly fractionated from I-type magmas? [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2009, 158(1): 113–130.
- [21] 郑建平, 路凤香, 余淳梅, 汤华云. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩捕虏体锆石 Hf 同位素、U-Pb 定年和微量元素研究: 华北下地壳早期演化的记录[J]. *科学通报*, 2004, 49(4): 375–383. Zheng Jianping, Lu Fengxiang, Yu Chunmei, Tang Huayun. An *in situ* zircon Hf isotope, U-Pb age and trace element study of banded granulite xenoliths from Hannuoba basalt: Tracking the early evolution of the lower crust in the North China Craton [J]. *Chinese Sci Bull*, 2004, 49(3): 277–285.
- [22] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. *地球化学*, 1996, 25(6): 552–558. Liu Ying, Liu Hai-chen, Li Xian-hua. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements using ICP-MS [J]. *Geochimica*, 1996, 25(6): 552–558 (in Chinese with English abstract).
- [23] Li Xian-hua, Li Zheng-xiang, Zhou Han-wen, Liu Ying, Kinny P D. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia [J]. *Precamb Res*, 2002, 113(1/2): 135–154.
- [24] 刘敦一, 简平, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据[J]. *地质学报*, 2003, 77(3): 317–327. Liu Dun-yi, Jian Ping, Zhang Qi, Zhang Fu-qin, Shi Yu-ruo, Shi Guang-hai, Zhang Lü-qiao, Tao Hua. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic subduction [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2003, 77(3): 317–327 (in Chinese with English abstract).
- [25] Li Xian-hua, Liu Yu, Li Qiu-li, Guo Chun-hua, Chamberlain, Kevin R.. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multi-collector SIMS without external standardization [J]. *Geochem Geophys Geosyst*, 2009, 10(4), Q04010, doi: 10.1029/2009GC002400.
- [26] 徐平, 吴福元, 谢烈文, 杨岳衡. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素[J]. *科学通报*, 2004, 49(14): 1403–1410. Xu Ping, Wu Fuyuan, Xie Liewen, Yang Yueheng. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating [J]. *Chinese Sci Bull*, 2004, 49(15): 1642–1648.
- [27] Wu Fu-yuan, Yang Yue-heng, Xie Lie-wen, Yang Jin-hui, Xu Ping. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. *Chem Geol*, 2006, 234(1/2): 105–126.
- [28] Le Maitre R W. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms [M]. Oxford: Blackwell, 1989: 1–193.
- [29] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, Arculus R J, Ellis D J, Frost C D. A geochemical classification of granitic rocks [J]. *J Petrol*, 2001, 42(11): 2033–2048.
- [30] Dall'Agnol R, de Oliveira D C. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: Implications for classification and petrogenesis of A-type granites [J]. *Lithos*, 2007, 93(3/4): 215–233.
- [31] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [M]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313–345.
- [32] Chappell B W. Aluminum saturation in I and S-type granites and the characterization of fractionated halogranites [J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 535–551.
- [33] Breaks F W, Moore J M. The Ghost Lake batholith, Superior Province of northwestern Ontario: A fertile, S-type, peraluminous granite-rare-element pegmatite system [J]. *Can Mineral*, 1992, 30(3): 835–876.
- [34] Landerberger B, Collins W J. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lowercrust: Evidence from the Chaelundi Complex, eastern Australia [J]. *J Petrol*, 1996, 37(1): 145–170.
- [35] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1987, 95(4): 407–419.
- [36] Blichert-Toft J, Albarède F. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148(1/2): 243–258.
- [37] Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, van Acherbergh E, O'Reilly S Y, Shee S R. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64(1): 133–147.
- [38] Griffin W L, Wang Xiang, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu Xisheng, Zhou Xinmin. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: *In-situ* analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 2002, 61(3/4): 237–269.
- [39] Zhou Xinhua, Sun Min, Zhang Guohui, Chen Shaohai. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: Isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton [J]. *Lithos*, 2002, 62(3/4): 111–124.
- [40] Liu Yongsheng, Gao Shan, Yuan Hongling, Zhou Lian, Liu Xiaoming, Wang Xuance, Hu Zhaochu, Wang Linsen. U-Pb zircon ages and Nd, Sr, and Pb isotopes of lower crustal xenoliths from North China Craton: Insights on evolution of lower continental crust [J]. *Chem Geol*, 2004, 211(1/2): 87–109.
- [41] 樊祺诚, 张宏福, 隋建立, 翟明国, 孙谦, 李霓. 岩浆底侵作用与汉诺坝现今壳-幔边界组成——捕虏体岩石学与地球化学证据[J]. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(1): 1–14. Fan Qicheng, Zhang Hongfu, Sui Jianli, Zhai Mingguo, Sun Qian, Li Ni. Magma underplating and Hannuoba present crust-mantle transitional zone composition: Xenolith petrological

- and geochemical evidence [J]. *Sci China (D)*, 2005, 48(8): 1089–1105.
- [42] 葛小月, 李献华, 陈志刚, 李伍平. 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约[J]. *科学通报*, 2002, 47(6): 474–480.
Ge Xiaoyue, Li Xianhua, Chen Zhigang, Li Wuping. Geochemistry and petrogenesis of Jurassic high Sr/low Y granitoids in eastern China: Constraints on crustal thickness [J]. *Chinese Sci Bull*, 2002, 47(11): 962–968.
- [43] John B M, Wu Fu-yuan, Lo Ching-hua, Tsai Chin-ho. Crust-mantle Interaction Induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd Isotopic evidence from post-collisional mafic ultramafic Intrusions of the Northern Dabie Complex, central China [J]. *Chem Geol*, 1999, 157(1/2): 119–146.
- [44] 翟明国, 樊祺诚. 华北克拉通中生代地壳置换: 非造山过程的壳幔交换[J]. *岩石学报*, 2002, 18(1): 1–8.
Zhai Ming-guo, Fan Qi-cheng. Mesozoic replacement of bottom crust in North China Craton: Anorogenic mantle-crust interaction [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2002, 18(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [45] 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(10): 913–920.
Zhai Mingguo, Zhu Rixiang, Liu Jianming, Meng Qingren, Hou Quanlin, Hu Shengbiao, Li Zhong, Zhang Hongfu, Liu Wei. Time range of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China Block [J]. *Sci China (D)*, 2004, 47(2): 151–159.
- [46] Zhai Mingguo, Fan Qicheng, Zhang Hongfu, Sui Jianli, Shao Jian. Lower crustal processes leading to Mesozoic lithospheric thinning beneath eastern North China: Underplating, replacement and delamination [J]. *Lithos*, 2007, 96(1/2): 36–54.
- [47] Jiang Neng, Guo Jinghui. Hannuoba intermediate-mafic granulite xenoliths revisited: assessment of a Mesozoic underplating model [J]. *Earth and Planet Sci Lett*, 2010, 293(3/4): 277–288.
- [48] 樊祺诚, 刘若新, 李惠民, 李霓, 隋建立, 林卓然. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土元素地球化学[J]. *科学通报*, 1998, 43(2): 133–137.
Fan Qicheng, Liu Ruoxin, Li Huimin, Li Ni, Sui Jianli, Lin Zhuoran. Zircon chronology and REE geochemistry of granulite xenoliths at Hannuoba [J]. *Chinese Sci Bull*, 1998, 43(18): 1510–1515.
- [49] Wilde S A, Zhou Xinhua, Nemchin A A, Sun Min. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China Craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia [J]. *Geology*, 2003, 31(9): 817–820.
- [50] Zheng J P, Griffin W, Qi L, O'Reilly S Y, Sun M, Zheng S, Pearson N, Gao J F, Yu C M, Su Y P, Tang H Y, Liu Y S, Wu X L. Age and composition of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba Basalts reflect paleogene underplating beneath the North China Craton [J]. *Chem Geol*, 2009, 264(1–4): 266–280.
- [51] Liu Yongsheng, Gao San, Gao Changgui, Zong Keqing, Hu Zhaochu, Ling Wenli. Garnet-rich granulite xenoliths from the Hannuoba Basalts, North China: Petrogenesis and implications for the Mesozoic crust-mantle interaction [J]. *J Earth Sci*, 2010, 21(5): 669–691.
- [52] Yang Jin-hui, Wu Fu-yuan, Wilde S A, Xie Lie-wen, Yang Yue-heng, Liu Xiao-ming. Tracing magma mixing in granite genesis: In situ U-Pb dating and Hf isotope analysis of zircons [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2007, 153(2): 177–190.
- [53] Chappell B W. Magma mixing and the production of compositional variation within granite suites: Evidence from the granites of Southeastern Australia [J]. *J Petrol*, 1996, 37(3): 449–470.
- [54] Helz R T. Phase relations of basalts in their melting ranges at $P(\text{H}_2\text{O}) = 5$ kb. Part II. Melt compositions [J]. *J Petrol*, 1976, 17(2): 139–193.
- [55] Sisson T W, Ratajeski K, Hankins W B, Glazner A F. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2005, 148(6): 635–661.
- [56] Bonin B. From orogenic to anorogenic settings: Evolution of granitoid suites after a major orogenesis [J]. *J Geol*, 1990, 25(3/4): 261–270.
- [57] Liégeois J P, Navez L, Hertogen J, Black R. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline peralkaline granitoids: The use of sliding normalization [J]. *Lithos*, 1998, 45(1–4): 1–28.
- [58] Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments [J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 605–626.
- [59] 郑亚东, Davis G A, 王琮, Darby B J, 张长厚. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题[J]. *地质学报*, 2000, 74(4): 289–302.
Zheng Ya-dong, Davis G A, Wang Cong, Darby B J, Zhang Chang-hou. Major Mesozoic tectonic events in the Yanshan Belt and the plate tectonic setting [J]. *Acta Geol Sinica*, 2000, 74(4): 289–302 (in Chinese with English abstract).
- [60] Davis G A, Darby B J, Zheng Yadong, 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.
- [61] Davis G A, Zheng Yadong, Wang Cong, Darby B J. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China [J]. *Geol Soc Am Memoir*, 2001, 194: 171–197.
- [62] 张长厚, 张勇, 李海龙, 吴淦国, 王根厚, 徐德斌, 肖伟峰, 戴凇. 燕山西段及北京西山晚中生代逆冲构造格局及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2006, 13(2): 165–183.
Zhang Chang-hou, Zhang Yong, Li Hai-long, Wu Gan-guo, Wang Gen-hou, Xu De-bin, Xiao Wei-feng, Dai lin. Late Mesozoic thrust tectonics frame work in the western part of

- the Yanshan orogenic belt and the Western Hills of Beijing: Characteristics and significance [J]. *Earth Sci Front*, 2006, 13(2): 165–183 (in Chinese with English abstract).
- [63] 张长厚, 李程明, 邓洪菱, 刘阳, 刘磊, 魏波, 李寒滨, 刘孜. 燕山-太行山北段中生代收缩变形与华北克拉通破坏[J]. *中国科学(D 辑)*, 2011, 41(5): 593–617.
- Zhang Changhou, Li Chengming, Deng Hongling, Liu Yang, Liu Lei, Wei Bo, Li Hanbin, Liu Zi. Mesozoic contraction deformation in the Yanshan and northern Taihang mountains and its implications to the destruction of the North China Craton [J]. *Sci China Earth Sci*, 2011, 54(6): 798–822.
- [64] 汪洋. 北京白查 A 型花岗岩的地球化学特征及其成因与构造指示意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25(1): 13–24.
- Wang Yang. Geochemistry of the Baicha A-type granite in Beijing Municipality: Petrogenetic and tectonic implications [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2009, 25(1): 13–24 (in Chinese with English abstract).
- [65] 王焰, 张旗. 八达岭花岗岩的组成、地球化学特征及其意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 533–540.
- Wang Yan, Zhang Qi. A granitoid complex from Badaling area, North China: Composition, geochemical characteristics and its implications [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2001, 17(4): 533–540 (in Chinese with English abstract).
- [66] 翟明国, 孟庆任, 刘建民, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟, 邵济安, 朱日祥. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨[J]. *地学前缘*, 2004, 11(3): 285–298.
- Zhai Ming-guo, Meng Qing-ren, Liu Jian-min, Hou Quan-lin, Hu Sheng-biao, Li Zhong, Zhang Hong-fu, Liu Wei, Shao Ji-an, Zhu Ri-xiang. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China and implication for Geodynamics [J]. *Earth Sci Front*, 2004, 11(3): 285–298 (in Chinese with English abstract).
- [67] Wu Fu-yuan, Lin Jing-qian, Wilde S A, Zhang Xiao-ou, Yang Jin-hui. Nature and significance of the early cretaceous giant igneous event in Eastern China [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 233(1/2): 103–119.
- [68] 徐义刚, 李红颜, 庞崇进, 何斌. 论华北克拉通破坏的时限[J]. *科学通报*, 2009, 54(14): 1974–1999.
- Xu Yigang, Li Hongyan, Pang Chongjin, He Bin. On the timing and duration of the destruction of the North China Craton [J]. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54(19): 3379–3396.