

内蒙赤峰楼子店拆离断层带下盘变形花岗质岩石 的时代、成因及其地质意义 ——锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据

王彦斌¹, 韩娟¹, 李建波¹, 欧阳志侠¹, 童英¹, 侯可军²

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 对内蒙赤峰楼子店拆离断层带下盘前人划为前寒武纪岩石的糜棱状花岗质岩石中锆石进行了 U-Pb 年龄测定和 Hf 同位素测试, 结果显示其时代为晚古生代至中生代。楼子店扎兰营子片麻状花岗岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 253.6 ± 1.2 Ma, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-8.6 \sim -14.6$, 锆石 Hf 同位素地壳模式年龄为 $1.8 \sim 2.2$ Ga; 朝阳沟糜棱岩化片麻状花岗岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 150.43 ± 0.79 Ma, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-5.6 \sim -14.9$, 锆石 Hf 同位素地壳模式年龄为 $1.6 \sim 2.1$ Ga; 莫里海沟片麻状闪长岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 127.6 ± 3.1 Ma, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-5.1 \sim -13.9$, 锆石 Hf 同位素地壳模式年龄为 $1.5 \sim 2.1$ Ga。不同岩性、不同形成年龄的 3 个样品的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要为负值, 说明这些岩石主要来自地壳岩石的部分熔融。2.2~1.5 Ga 的锆石 Hf 同位素两阶段模式年龄表明它们可能主要来源于华北克拉通下地壳物质的部分熔融。结合该区已经获得的锆石 U-Pb 年龄, 将该区古生代至中生代花岗质岩浆作用划分为 4 个时期: 早石炭世 (327 Ma)、二叠纪 (285~252 Ma)、中三叠世—早侏罗世 (241~184 Ma)、中侏罗世—早白垩世 (163~125 Ma)。早石炭世喇嘛洞混合花岗岩的产出对应于古亚洲洋古生代向南俯冲于华北板块的时期, 二叠纪花岗岩是古亚洲洋最后闭合、蒙古弧与华北陆块北缘拼合与伸展有关的岩浆活动的产物, 大面积的中三叠世—早侏罗世的花岗岩是西伯利亚与华北陆块碰撞后地壳伸展的记录, 中侏罗世—早白垩世 (163~125 Ma) 岩浆活动则发育在伸展构造背景中, 与岩石圈减薄存在密切的成因联系。这些新年龄资料将为华北陆块北缘古生代—中生代的地质构造演化提供重要的年代学制约。

关键词: 锆石年龄; Hf 同位素; 花岗岩; 楼子店变质核杂岩; 内蒙赤峰

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标志码: A

文章编号: 1000-6524(2010)06-0763-16

Age, petrogenesis and geological significance of the deformed granitoids in the Louzidian metamorphic core complex, southern Chifeng, Inner Mongolia: evidence from zircon U-Pb dates and Hf isotopes

WANG Yan-bin¹, HAN Juan¹, LI Jian-bo¹, OUYANG Zhi-xia¹, TONG Ying¹ and HOU Ke-jun²

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Located in the northern margin of the North China Craton, the Louzidian metamorphic core complex is one of the important areas with widely distributed Palaeozoic-Mesozoic granitoid rocks. The deformed plutonic intrusions in the Louzidian core complex area have not yet been precisely constrained by reliable isotopic ages. The plutons have long been considered to be Precambrian rocks. Recent studies have revealed that the deformed and metamorphosed rocks with protoliths of plutonic intrusions were genetically related to late ductile shear events.

收稿日期: 2010-04-19; 修订日期: 2010-06-09

基金项目: 国家自然科学基金重点基金项目资助 (90714006)

作者简介: 王彦斌 (1966-), 男, 博士, 研究员, 从事同位素地质年代学和地球化学研究工作, E-mail: yanbinw@cags.ac.cn

This paper presents newly obtained zircon U-Pb ages of the deformed granitoids from Zhalanyingzi (253.6 ± 1.2 Ma), Chaoyanggou (150.42 ± 0.98 Ma), Molihaigou (127.6 ± 3.1 Ma) of the Liuzidian metamorphic core complex area in Chifeng, on the northern margin of the North China Plate. Hafnium analyses show that the three deformed granitoids have negative and variable $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (-5.1 to -14.9) and Meso-Palaeoproterozoic (1.5 to 2.2 Ga) depleted-mantle model ages, suggesting the probable derivation from an isotopically heterogeneous old crust source. The source region for these magmas might have been related to Meso-Palaeoproterozoic material of the North China Craton underlying Chifeng. Based on zircon U-Pb data, the authors identified four stages of granitic magmatism, i. e., Late Carboniferous (327 Ma), Permian (285~252 Ma), Early Jurassic-Middle Triassic (241~184 Ma) and Early Cretaceous-Middle Jurassic (163~125 Ma). The new ages indicate that these plutons were emplaced in the late Palaeozoic-Mesozoic period. Early Carboniferous granite implies the existence of an Andean-style continental arc along the northern margin of the North China Block. The Permian granitic magmatism was probably related to the extension due to the final closure of the Paleo-Asian Ocean and the amalgamation of the Mongolian arc terrain with the northern North China Block. These events were followed by post-collisional/post-orogenic extension and large-scale magmatism during Triassic. Early Cretaceous-Middle Jurassic (163~125 Ma) magmatism in the Louzidian core complex area was developed in an extensional setting, possibly induced by lithospheric thinning in the North China Block. The geochronological framework provides important information for the constraint of the Paleozoic-Mesozoic tectonic evolution in the northern margin of the North China Block.

Key words: zircon ages; Hf isotope; granitoid, Louzidian metamorphic core complex; Chifeng, Inner Mongolia

内蒙赤峰楼子店变质核杂岩位于华北陆块北缘,该区域的总体构造格架以楼子店拆离断层系为主体(图1),其核部岩体主要由各类花岗质岩石和古老的结晶基底组成(Han, 2001; 邵济安, 2001; 王新社等, 2007)。该区出露的花岗质岩石与兴蒙造山带关系密切。兴蒙造山带为一古生代造山带,一般被认为是蒙古或西伯利亚陆块与华北陆块的缝合带。众所周知,岩浆作用会记录与此相关的构造演化信息,地质构造过程产生的与俯冲有关的岩浆作用、与碰撞造山和地壳熔融有关的岩浆作用以及随后与伸展作用有关的岩浆作用一般也会被锆石记录,分析锆石年龄可帮助厘清区域地质构造发展的时空演化(Hawkesworth *et al.*, 2010)。以往的年代学资料表明,内蒙赤峰楼子店变质核杂岩区的一个重要特征是在核杂岩形成前和形成过程中均伴有强烈的构造岩浆活动,其中花岗岩的形成与该区构造演化的发展具十分密切的关系,且区域构造演化的时间可以通过与其相关的花岗岩锆石 U-Pb 年龄记录下来。楼子店拆离断层带内韧性变形的糜棱状岩石的原岩为太古宙的花岗质片麻岩与中生代的花岗质岩石(王新社等, 2007),迄今为止,这些糜棱状花岗质岩石还缺乏精确的同位素年龄制约,对其侵位时代还存在疑问,这些阻碍了对该区地质构造及

其演化的认识。因此,笔者对内蒙赤峰楼子店拆离断层带下盘糜棱状花岗质岩石的锆石进行了 U-Pb 年龄和 Hf 同位素测定,以期对该拆离带下盘变形花岗质岩石的侵位时代给予精确的厘定,并深入了解区域花岗质岩浆作用的形成时代。笔者还另外收集了该区域 31 个花岗质岩石样品的锆石 U-Pb 年龄,对该区岩浆活动的年龄做了初步总结。这些结果可为探讨楼子店变质核杂岩的形成时代以及理解研究区的地质构造演化提供新的同位素年代学制约。

1 区域地质、侵入岩概况及样品特征

1.1 区域地质、侵入岩概况

内蒙赤峰地区位于华北陆块北缘,在大地构造位置上,赤峰-开原断裂带以北属兴蒙造山带,南部为华北陆块。楼子店韧性剪切拆离断层带沿赤峰南部楼子店—大城子一线出露(图1),断层带走向北东-南西向,低角度倾向南东,西侧变质及岩浆杂岩构成北东向延伸的构造和地形隆起;东侧白垩纪碎屑岩、火山碎屑岩组成拆离断层系的上叠盆地(王新社等, 2007)。

断层下盘变质核由前寒武系变质结晶岩系及岩浆侵入体组成。结晶变质岩系占变质核的40%左

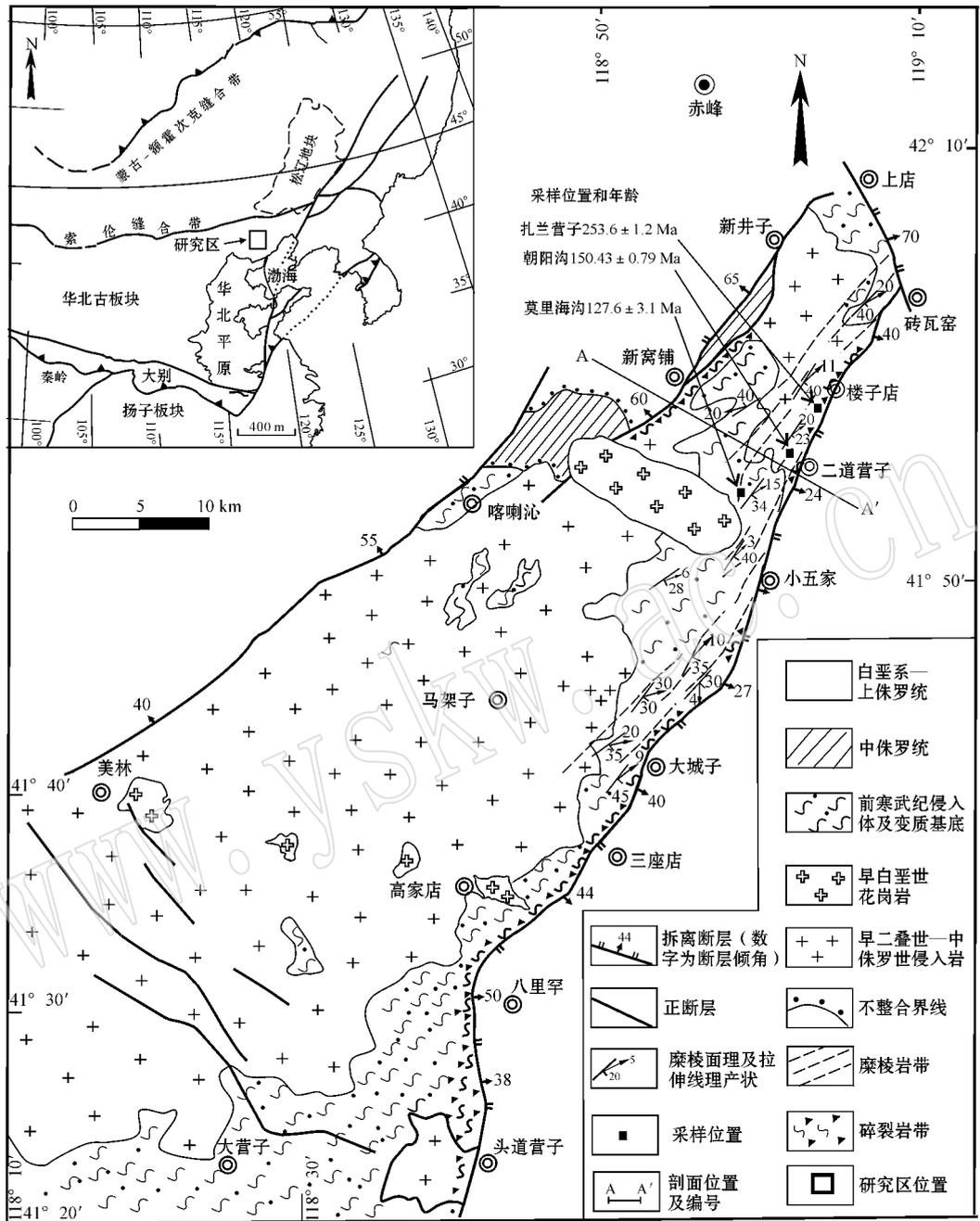


图 1 赤峰南部地质构造简图 [据王新社等(2007)修改]

Fig. 1 Simplified geological and structural map of southern Chifeng (modified after Wang Xinshe, 2007)

右, 岩浆侵入体约占变质核的 60% 左右, 形成时代为古元古代、晚古生代和中生代(李建波等, 2010)。古元古代侵入体主要为中酸性的花岗闪长岩和二长花岗岩, 岩体普遍糜棱岩化, 出露于上店南高角度正断层的下盘和大城子拆离带的下盘(图 2)。古生代侵入体主要是中酸性二长花岗岩, 包括锅底山、扎兰营子和美林等地的大面积二叠纪花岗岩以及位于拆离

带以东的喇嘛洞早石炭世花岗岩。中生代侵入体在本区占主导, 呈 NE 向大面积分布, 其中三叠纪侵入体的岩石类型为角闪闪长岩-角闪石英闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩, 除岩体边部具韧性变形外, 内部定向组构不发育, 早白垩世侵入体为二长花岗岩, 主要是安家营子花岗岩体, 呈 NW 向分布, 侵入于二叠纪、侏罗纪花岗岩中。需要注意的是, 在原来面积

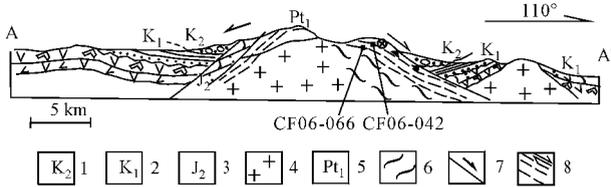


图 2 横穿楼子店核杂岩的剖面图

Fig. 2 Geological section across the metamorphic core complex

- 1—上白垩统砾岩; 2—下白垩统英安岩、火山集块岩; 3—中侏罗统中酸性火山岩; 4—二叠—中侏罗世侵入体; 5—新太古代基底岩石; 6—古元古代基底岩石; 7—拆离断层面; 8—糜棱岩带
 1—Upper Cretaceous conglomerate; 2—Lower Cretaceous dacite, volcanic agglomerate; 3—Middle Jurassic intermediate-acidic volcanic rocks; 4—Permian-Middle Jurassic intrusive rocks; 5—Neoproterozoic rocks; 6—Paleoproterozoic rocks; 7—detachment fault plane; 8—mylonitic zone

二叠纪花岗岩(美林附近)中测得约 240 Ma 的中三叠世年龄花岗岩样品;美林东 12 km 原划为大面积的白垩纪花岗岩中新样品(GPS: N 41°42.210', E 118°34.755')锆石 U-Pb 测年为 220 Ma(晚三叠世),表示该区侵入岩的时空分布还不十分清楚,需要进一步详细的工作。

楼子店韧性剪切拆离带的主体岩石为初糜棱岩和糜棱岩,局部出现超糜棱岩。该拆离带内糜棱岩形成年龄介于 126~134 Ma 之间(张晓晖, 2002; 刘伟等, 2003; 王新社等, 2005),脆性拆离形成于晚白垩世(Han *et al.*, 2001)。一般认为糜棱岩带原岩是前寒武纪深成岩及早二叠世—中侏罗世花岗岩,主要依据楼子店西南约 8 km 处的牛家营子片麻岩的

锆石 U-Pb 一致线年龄 $2579 \pm \frac{117}{108}$ Ma 推断楼子店

韧性剪切带区域存在前寒武纪的岩石,但该数据可信度不高,本文的同位素资料显示对此需要十分谨慎,因为以前按片麻理命名的岩石,除可能存在部分为前寒武纪变质深成侵入体外,一部分实际上是晚古生代—中生代的变形花岗质岩体。区分开前寒武纪变质深成侵入体和晚古生代—中生代变形花岗质岩体是该区进一步研究的关键。

1.2 样品特征

在楼子店变质核杂岩伸展拆离系下盘的变形花岗质岩石中采集了 3 个样品,在朝阳沟糜棱岩化片麻状花岗岩(CF06-042)和莫里海沟片麻状闪长岩(CF06-066)样品采样点可见横切楼子店变质核杂岩

的剖面(图 2)。在核杂岩西侧,可观察到拆离带上盘白垩纪孙家湾组灰绿—黄绿色砂砾岩、侏罗纪土城子组砂砾岩以及拆离断面;在核杂岩东侧,可见楼子店拆离断层带,拆离带内从靠近核部岩体到拆离断面依次可见糜棱岩、微角砾岩、楼子店拆离断面以及拆离带上盘白垩纪孙家湾组的灰绿—黄绿色砂砾岩。剖面核部为中生代二长花岗岩体以及太古宙、元古宙的结晶基底。剖面图显示,楼子店核杂岩具有对称分布结构,显示伴随核部岩体的侵位,核杂岩两侧的拆离带渐次出露地表。

CF06-065-2 采自楼子店西北的扎兰营子西南处(N41°58.178', E119°3.486'),岩性为花岗质糜棱岩,灰白色,眼球状、片麻状构造,石英拉长,钾长石呈眼球状,糜棱面理发育,面理产状 140°/50°,拉伸线理 La: 225°/12°,主要矿物成分为斜长石、钾长石、石英、黑云母及磁铁矿、磷灰石、锆石等。

CF06-042 采自朝阳沟(N41°56.274', E119°3.031'),岩性为眼球状糜棱岩,原岩为花岗岩。岩石呈肉红色,眼球状构造,糜棱面理发育,面理产状 145°/18°,拉伸线理 La: 70°/15°,由斜长石、钾长石、黑云母、石英、磁铁矿、磷灰石、锆石等组成,可见钾长石呈眼球状,脆韧性剪切面发育在眼球状花岗片麻岩中,滑动面产状 140°/20°,剪切面上发育擦痕。

CF06-066 采自莫里海沟(N41°54.985', E118°58.893'),岩性为糜棱状闪长岩,黑灰色,眼球状构造,主要矿物为角闪石、斜长石、黑云母、石英、锆石。角闪石、斜长石定向排列,片麻理产状面理产状 150°/43°。

2 实验方法

2.1 SHRIMP U-Pb 锆石 U-Pb 定年实验方法

将锆石从 0.5 至几 kg 的样品中分选出来,在双目镜下挑纯。将待测锆石与澳大利亚国立大学地球科学研究所(RSES)的一片锆石标样 SL13 及数粒锆石标样 TEM 置于环氧树脂中做成样品靶(Mount)。将靶上的锆石磨至约一半,以使锆石内部暴露。接着进行照相、阴极发光(CL)分析、抛光、清洗、镀金,然后进行 SHRIMP 分析。CL 图像在北京离子探针中心电镜室完成,其目的在进行 SHRIMP U-Pb 分析时,需参考锆石颗粒剖面的阴极发光图像,以便对锆石颗粒的不同区域 U、Th、Pb 同

位素成分进行分析。

莫里海沟变形闪长岩中锆石 SHRIMP U-Pb 分析在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的 SHRIMP II 上完成。详细分析流程和原理参考 Williams(1998)。一次离子源气体为氧气,将其电离后,由 O_2^- 打击锆石颗粒,激发出锆、铅、铀、钍的氧化物离子或金属离子。测定 $^{196}Zr_2O$ 、 ^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb 、 ^{238}U 、 ^{248}ThO 、 ^{254}UO 质量峰的强度,每个峰的积分时间分别为 2.0、10.0、10.0、10.0、15.0、5.0、5.0、2.0、2.0 s,每个点的数据由 5 次扫描组成。一次离子为约 4.5 nA、10 kV 的 O_2^- ,打到锆石上束斑的直径为 25~30 μm ,质量分辨率约 5 400(1% 峰高)。待分析未知点与标样 TEM 的点交叉进行分析。应用 RSES 的锆石 SL13(572 Ma, 238×10^{-6}) 标定样品的 U、Th、Pb 含量,应用 Temora(417 Ma) 进行年龄校正。数据处理采用 Ludwig 的 SQUID1.02 及 ISOPLOT 程序。普通铅根据实测的 ^{204}Pb 进行校正,加权平均年龄具 95% 的置信度 (2σ)。

2.2 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析实验方法

扎兰营子西南变形花岗岩和朝阳沟变形花岗岩锆石激光剥蚀等离子体质谱 U-Pb 定年在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成,所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为 25 μm ,频率为 10 Hz,能量密度约为 2.5 J/cm²,以 He 为载气。信号较小的 ^{207}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{204}Pb (+ ^{204}Hg)、 ^{202}Hg 用离子计数器(multi-ion-counters)接收, ^{208}Pb 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 信号用法拉第杯接收,实现了所有目标同位素信号的同时接收并且不同质量数的峰基本上都是平坦的,进而可以获得高精度的数据。均匀锆石颗粒 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 、 $^{206}Pb/^{238}U$ 、 $^{207}Pb/^{235}U$ 的测试精度(2σ)均为 2% 左右,对锆石标准的定年精度和准确度在 1%(2σ)左右。LA-MC-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,数据分析前用锆石 GJ-1 进行调试仪器,使之达到最优状态。锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标,U、Th 含量以锆石 M127(U 含量为 923×10^{-6} ,Th 含量为 439×10^{-6} ,Th/U=0.475, Nasdala *et al.*, 2008) 为外标进行校正。测试过程中每测定 5~7 个样品前后重复测定两个锆石 GJ-1 对样品进行校正,并测量一个锆石 Plesovice,观察仪器的状态以保证测试

的精确度。数据处理采用 ICPMS DataCal 4.3 程序(Liu *et al.*, 2008),数据进行普通铅校正, ^{204}Pb 由离子计数器检测, ^{204}Pb 含量异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响,对 ^{204}Pb 含量异常高的分析点在计算时剔除,锆石年龄谐和图用 Isoplot 3.0 程序获得。详细实验测试过程可参见侯可军等(2009)。样品分析过程中,将 Plesovice 标样作为未知样品进行测定,得到的 4 个数据的加权平均值为 337.0 ± 2.3 Ma(2σ),MSWD=0.09,与对应的推荐值 337.13 ± 0.37 (2σ)(Slama *et al.*, 2008)在误差范围内完全一致。

Hf 同位素分析也在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成。Hf 同位素测试使用激光束斑直径为 40 μm ,激光剥蚀时间为 27 s,测定采用锆石 GJ-1 和 TEM 做外标, $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值分别为 $0.282 013 \pm 19$ (2σ)(Elhrou *et al.*, 2006)和 $0.282 680 \pm 31$ (2σ)(Wu *et al.*, 2006)。本次实验测试 GJ-1 的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 的平均值为 $0.282 004 \pm 0.000 032$ (2σ , $n=30$)和 $0.282 672 \pm 0.000 044$ (2σ , $n=54$),分析流程及校正参见侯可军等(2007)。

3 锆石 U-Pb 定年实验结果

扎兰营子眼球状片麻状花岗岩、朝阳沟糜棱岩化片麻状花岗岩、莫里海沟片麻状闪长岩样品锆石的阴极发光图像见图 3,U-Pb 同位素测定结果见表 1 和表 2,其谐和图见图 4。

扎兰营子眼球状片麻状花岗岩(CF06-065-2)中的锆石为浅黄色透明,粒径约 200~300($100 \mu m$),主要为长柱状,四方双锥发育,晶面平直,阴极发光照片可见振荡环带,具岩浆结晶锆石的特点(图 3)。对 20 个锆石颗粒进行了 U-Pb 同位素分析(表 1)。这些锆石的 U=65~2 354($\times 10^{-6}$),Th=63~1 426($\times 10^{-6}$),Th/U=0.45~1.78,具岩浆锆石的地球化学特征(Williams, 1998)。锆石的 20 个分析点在一致曲线中成群分布, $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均值年龄为 253.6 ± 1.2 Ma(图 4),可解释为楼子店扎兰营子西南片麻状花岗岩的侵位年龄。

朝阳沟糜棱岩化片麻状花岗岩(CF06-042)中的锆石为浅黄色透明,粒径约 150~200($50 \mu m$),主要为长柱状,四方双锥发育,晶面平直,阴极发光照片可见振荡环带,具岩浆结晶锆石的特点(图 3)。对 18

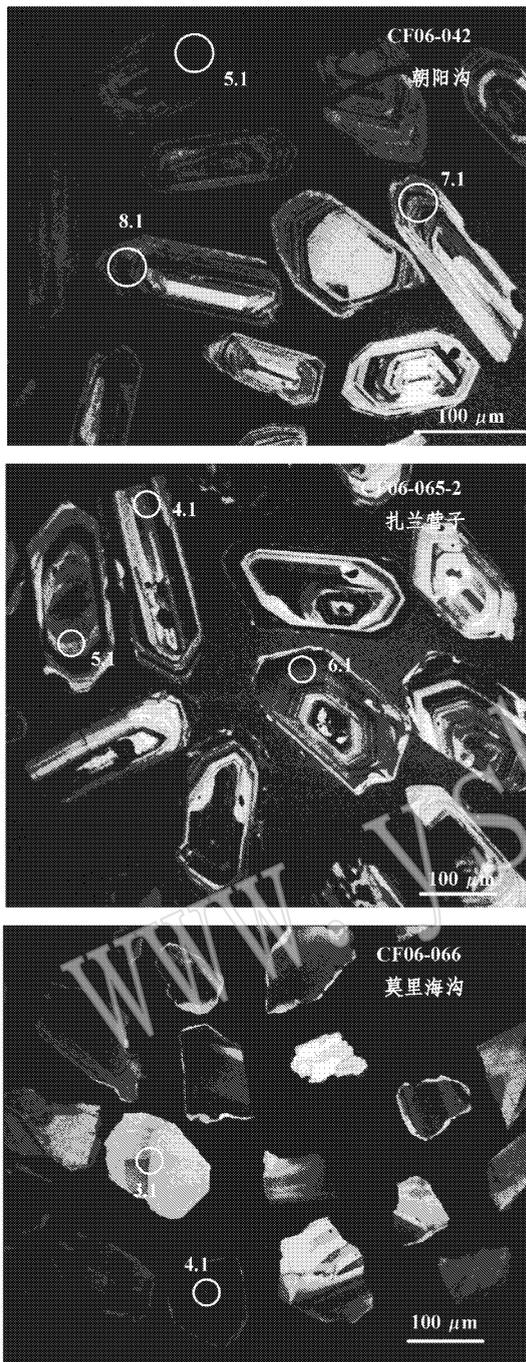


图 3 楼子店变形花岗质岩石中部分锆石阴极发光照片
Fig. 3 CL images of zircons from deformed granitoids in Louzidian

个锆石颗粒进行了 U-Pb 同位素分析(表 1)。这些锆石的 $U = 84 \sim 434 (\times 10^{-6})$, $Th = 85 \sim 1120 (\times 10^{-6})$, $Th/U = 0.75 \sim 2.70$, 具岩浆锆石的地球化学特征(Williams, 1998)。锆石的 18 个分析点在一致曲线中成群分布, $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均值年龄为 $150.43 \pm 0.79Ma$ (图 4), 解释为朝阳沟糜棱岩化片

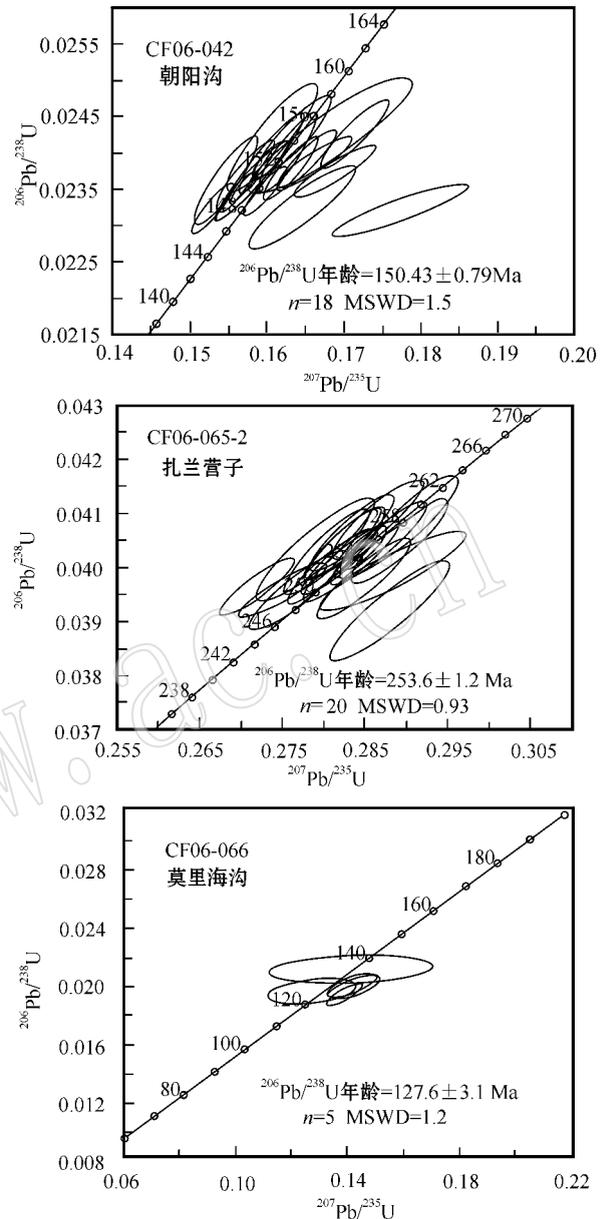


图 4 楼子店变形花岗质岩石锆石一致曲线图
Fig. 4 U-Pb concordia diagrams showing U-Pb data of deformed granitoids from Louzidian

麻状花岗岩的侵位年龄。显然该岩石年龄不是 1:5 万区域地质调查报告中认为的新太古代年龄, 原先根据楼子店西南约 8 km 处牛家营子片麻岩锆石晚太古代 U-Pb 一致线年龄 $2579 \pm 117_{108}Ma$ 的年龄推断的岩石时代(地矿部内蒙古地质矿产勘查开发局, 1996)需要慎重。应区分该区前寒武纪变质深成侵入体和中生代变形花岗质岩体, 对该区岩石的时代需持审慎的原则。

莫里海沟片麻状闪长岩(CF06-066)的锆石为浅黄色透明 粒经约 $100 \mu m \sim 80 \mu m$ 主要为短柱状 阴

表 1 楼子店变形花岗质岩石锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 分析数据

Table 1 LA-MC-ICPMS U-Pb isotopic analytical data of deformed granitoids from Louzidian

编号	$w_B/10^{-6}$			U-Th-Pb 同位素比值							年龄/Ma					
	Pb	Th	U	Th/U	^{207}Pb		^{207}Pb		^{206}Pb			^{207}Pb		^{206}Pb		
					$/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$/^{235}\text{U}$	1 σ	$/^{238}\text{U}$	1 σ	$/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$/^{235}\text{U}$	1 σ	$/^{238}\text{U}$	1 σ
CF06-042 朝阳沟																
1.1	8	127	91	1.39	0.051 5	0.000 9	0.169	0.004	0.023 8	0.000 2	264	29	158	3	151	2
2.1	7	108	90	1.20	0.050 2	0.001 6	0.168	0.007	0.024 2	0.000 5	206	57	158	6	154	3
3.1	16	334	361	0.92	0.048 6	0.000 5	0.161	0.003	0.024 0	0.000 4	127	18	151	2	153	2
4.1	14	304	283	1.07	0.055 1	0.001 5	0.177	0.006	0.023 2	0.000 2	416	54	166	5	148	2
5.1	14	341	296	1.15	0.047 8	0.000 4	0.153	0.002	0.023 3	0.000 2	88	12	145	2	148	1
6.1	8	200	211	0.95	0.050 1	0.000 6	0.165	0.002	0.023 9	0.000 3	201	17	155	2	152	2
7.1	11	294	264	1.11	0.049 7	0.000 5	0.163	0.002	0.023 8	0.000 3	183	15	153	2	152	2
8.1	15	407	340	1.20	0.051 3	0.001 0	0.165	0.005	0.023 3	0.000 4	254	36	155	4	148	2
9.1	24	753	398	1.89	0.048 3	0.000 4	0.156	0.002	0.023 4	0.000 2	114	13	147	2	149	1
10.1	9	214	285	0.75	0.048 6	0.000 4	0.159	0.002	0.023 7	0.000 3	128	17	150	2	151	2
11.1	5	85	84	1.02	0.050 5	0.000 9	0.166	0.003	0.023 9	0.000 2	218	26	156	3	152	2
12.1	16	426	284	1.50	0.049 2	0.000 4	0.163	0.002	0.024 0	0.000 4	159	16	153	2	153	2
13.1	8	192	210	0.92	0.048 1	0.000 7	0.161	0.004	0.024 2	0.000 5	105	26	151	3	154	3
14.1	15	338	434	0.78	0.049 4	0.000 3	0.160	0.002	0.023 5	0.000 2	165	12	151	2	150	1
15.1	34	1120	415	2.70	0.047 6	0.000 4	0.155	0.003	0.023 6	0.000 4	77	19	146	2	151	3
16.1	10	200	152	1.32	0.051 3	0.000 6	0.171	0.003	0.024 3	0.000 3	253	18	161	3	154	2
17.1	13	345	275	1.26	0.048 1	0.000 5	0.157	0.002	0.023 7	0.000 3	103	17	148	2	151	2
18.1	18	499	316	1.58	0.048 9	0.000 7	0.163	0.003	0.024 2	0.000 4	143	22	154	3	154	2
CF06-065-2 扎兰营子																
1.1	17	216	122	1.78	0.050 3	0.000 5	0.275	0.003	0.039 6	0.000 3	211	15	247	3	250	2
2.1	16	174	215	0.81	0.049 7	0.000 4	0.272	0.003	0.039 7	0.000 4	183	12	244	2	251	2
3.1	26	308	487	0.63	0.051 8	0.000 3	0.289	0.004	0.040 5	0.000 5	278	14	258	3	256	3
4.1	31	317	671	0.47	0.050 6	0.000 2	0.283	0.003	0.040 6	0.000 5	221	12	253	3	257	3
5.1	30	354	617	0.57	0.050 9	0.000 2	0.282	0.003	0.040 1	0.000 4	237	11	252	2	254	2
6.1	49	595	1189	0.50	0.050 6	0.000 2	0.283	0.003	0.040 4	0.000 5	224	12	253	3	256	3
7.1	12	116	256	0.45	0.050 8	0.000 3	0.287	0.004	0.040 9	0.000 5	232	13	256	3	258	3
8.1	26	360	582	0.62	0.050 1	0.000 3	0.279	0.005	0.040 3	0.000 6	201	18	250	4	255	4
9.1	13	137	175	0.78	0.050 7	0.000 4	0.277	0.004	0.039 6	0.000 5	229	14	248	3	250	3
10.1	6	63	65	0.96	0.052 6	0.001 0	0.288	0.006	0.039 9	0.000 5	311	25	257	5	252	3
11.1	43	577	948	0.61	0.050 6	0.000 2	0.282	0.003	0.040 4	0.000 4	224	11	253	2	256	3
12.1	36	467	816	.57	0.050 5	0.000 2	0.280	0.003	0.040 3	0.000 5	219	13	251	3	255	3
13.1	16	194	252	0.77	0.051 6	0.000 4	0.290	0.004	0.040 8	0.000 6	268	15	259	3	258	4
14.1	83	1189	1897	0.63	0.051 0	0.000 1	0.283	0.003	0.040 2	0.000 4	241	10	253	2	254	2
15.1	34	421	776	0.54	0.051 5	0.000 3	0.287	0.003	0.040 5	0.000 5	262	13	256	3	256	3
16.1	20	272	417	0.65	0.051 9	0.000 4	0.285	0.004	0.039 8	0.000 5	281	13	255	3	252	3
17.1	66	900	1369	0.66	0.050 8	0.000 2	0.280	0.003	0.039 9	0.000 4	233	10	251	2	252	2
18.1	23	231	567	0.41	0.051 3	0.000 2	0.285	0.003	0.040 3	0.000 4	256	10	255	2	255	2
19.1	15	203	232	0.87	0.053 4	0.000 7	0.288	0.005	0.039 2	0.000 6	344	17	257	4	248	4
20.1	103	1426	2354	0.61	0.051 1	0.000 1	0.283	0.003	0.040 1	0.000 5	246	12	253	3	253	3

表 2 楼子店变形花岗质岩石锆石 SHRIMP U-Pb 分析数据
Table 2 SHRIMP U-Pb isotopic analytical data of deformed granitoids from Louzidian

点号	$^{206}\text{Pb}_c$ /%	$w_B/10^{-6}$				年龄/Ma					同位素比值						
		U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	% Dis	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm \%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm \%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm \%$	err corr
CF06-066 莫里海沟																	
1.1	0.00	614	732	10.5	1.23	127.5	3.4	278	71	54	0.0518	3.1	0.143	4	0.020 0	2.7	0.7
2.1	0.17	3 413	3 991	57.1	1.21	124.2	3.1	279	40	56	0.051 9	1.7	0.139	3	0.019 5	2.5	0.8
3.1	1.20	264	180	4.51	0.70	125.5	3.7	52	180	-140	0.047 1	7.5	0.128	8	0.019 7	3	0.4
4.1	0.00	662	698	11.4	1.09	128.3	3.4	249	69	49	0.051 2	3	0.142	4	0.020 1	2.6	0.7
5.1	1.25	198	212	3.65	1.10	134.9	4.0	123	310	-10	0.048 5	13	0.141	14	0.021 2	3	0.2

注: Pb_c 和 Pb^* 分别表示普通铅和放射成因铅, 标准校正值的误差为 1.03%; 普通铅校正应用 ^{204}Pb 实测值。

极发光照片可见条带状、板状结构, 其边缘具白色窄的条带, 具中基性岩浆结晶锆石的特点(图 3), 其边缘白色窄的条带可能代表后期重结晶作用。对 5 个锆石颗粒进行了 U-Pb 同位素分析(表 2)。这些锆石的 $U=182\sim 3\,991(\times 10^{-6})$, $Th=198\sim 3\,413(\times 10^{-6})$, $Th/U=0.70\sim 1.23$, 具岩浆锆石的地球化学特征(Williams, 1998)。锆石的 5 个分析点在一致曲线中成群分布, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值年龄为 127.6 ± 3.1 Ma(图 4), 解释为莫里海沟片麻状闪长岩的侵位年龄。该岩石以前被认为属新太古代岩石^①, 看来, 对该区产出的岩石也要依据高精度的同位素定年来区分前寒武纪变质深成侵入体和中生代变形花岗质岩体。

4 花岗闪长岩锆石的 Hf 同位素特征

扎兰营子片麻状花岗岩、朝阳沟糜棱岩化片麻状花岗岩和莫里海沟片麻状闪长岩的 58 粒锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围分别为 $0.015\,554\sim 0.161\,236$ 和 $0.000\,388\sim 0.004\,462$ (表 3), 除少数点外, 大部分颗粒锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值非常接近或小于 0.002, 表明这些锆石在形成以后仅具有较少的放射成因 Hf 的积累, 因而可以用初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值代表锆石形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值(吴福元等, 2007)。这些不同年龄的变形花岗质岩石样品中 57 粒锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围相似, 为 $-5.1\sim -14.9$, 主体为 ~ -10 , 模式年龄范围为 $1\,509\sim 2\,205$ Ma, 主体为 $1.8\sim 1.9$ Ga(表 3), 只有朝阳沟糜棱岩化片麻状花岗岩样品 CF06-042 颗粒 13.1 的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -25.4 , 模式年龄为 $2\,807$ Ma。

扎兰营子片麻状花岗岩(CF06-065-2)中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $-8.6\sim -14.6$ 之间, 其主体为 -9.70 ± 0.26 , 模式年龄为 $1\,822\sim 2\,205$ Ma, 主体为 ~ 1.9 Ga(表 3, 图 5)。朝阳沟糜棱岩化片麻状花岗岩(CF06-042)中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值除上述的颗粒 13.1 外范围在 $-5.6\sim -14.9$ 之间, 其主体为 -10.37 ± 0.21 , 模式年龄为 $1\,559\sim 2\,145$ Ma, 主体为 ~ 1.8 Ga(表 3, 图 5)。莫里海沟片麻状闪长岩(CF06-066)中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $-5.1\sim -13.9$ 之间, 其主体为 -9.53 ± 0.24 , 模式年龄为 $1\,509\sim 2\,062$ Ma, 主体为 ~ 1.8 Ga(表 3, 图 5)。其中 Hf 同位素变化范围明显高于数据测试过程中所引起的变化范围, 因此, 这些变形花岗质岩石样品中锆石具有不均一的 Hf 同位素组成。

5 讨论与结论

5.1 楼子店变质核杂岩拆离带的起始变形年龄

楼子店拆离断层下盘由韧性剪切带、韧-脆性剪切带以及脆性断裂带组成。韧性剪切带自下而上依次发育糜棱岩化岩石、糜棱岩和初糜棱岩。张晓晖等(2002)对采自楼子店剪切带的黑云母单矿物进行了 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 测年, 认为黑云母坪年龄 133 Ma 记录了该左行走滑韧性剪切带的形成时间。王新社等(2005)对韧性剪切带中角闪石、黑云母进行的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 测年表明楼子店韧性剪切作用的时限为 $126\sim 134$ Ma。楼子店拆离断层系绿泥石化带形成时间为 121 Ma, 且在 $112\sim 114$ Ma 经历了由北东向剪切到倾向下滑的运动学转换(王新社等, 2007)。

内蒙赤峰楼子店变质核杂岩区域分布较广的前

① 地矿部内蒙古地质矿产勘查开发局, 1996. 中华人民共和国太平幅 1:5 0000 地质图。

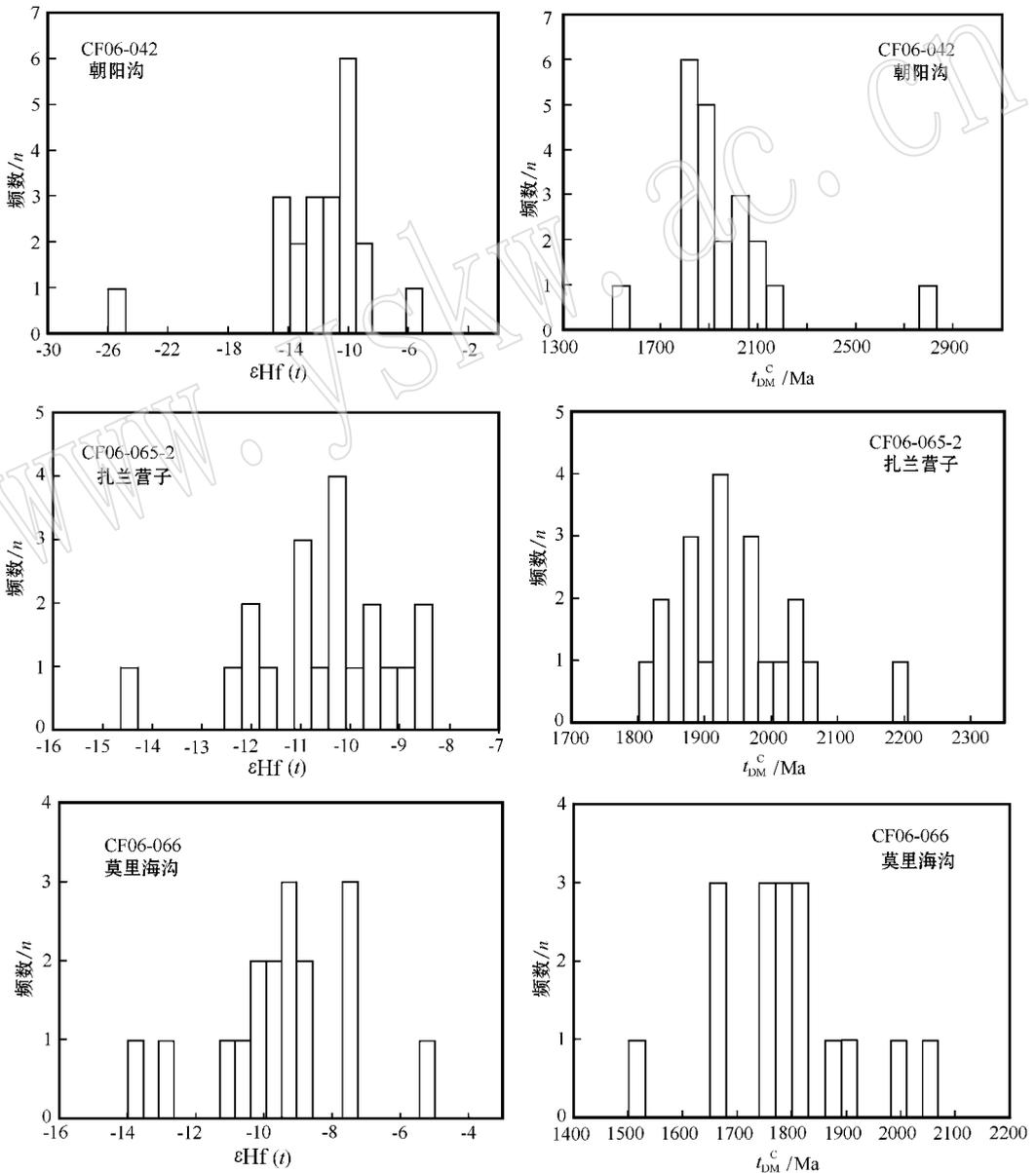
表 3 楼子店变形花岗质岩石锆石 Hf 同位素分析结果
Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of deformed granitoids from Louzidian

点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma_m$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_\lambda$	$\epsilon \text{Hf}(0)$	$\epsilon \text{Hf}(t)$	2σ	t_{DM}/Ma	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
CF06-042 朝阳沟												
1.1	150	0.042 231	0.001 241	0.282 523	0.000 038	0.282 520	-8.8	-5.6	1.4	1 038	1 559	-0.96
2.1	150	0.049 006	0.001 562	0.282 382	0.000 019	0.282 378	-13.8	-10.6	0.7	1 247	1 876	-0.95
3.1	150	0.057 550	0.001 900	0.282 416	0.000 024	0.282 411	-12.6	-9.5	0.8	1 209	1 802	-0.94
4.1	150	0.042 784	0.001 716	0.282 284	0.000 029	0.282 279	-17.3	-14.1	1.0	1 393	2 098	-0.95
5.1	150	0.055 239	0.001 573	0.282 289	0.000 026	0.282 284	-17.1	-14.0	0.9	1 380	2 086	-0.95
6.1	150	0.065 971	0.002 221	0.282 373	0.000 024	0.282 366	-14.1	-11.0	0.8	1 283	1 902	-0.93
7.1	150	0.056 399	0.001 987	0.282 332	0.000 026	0.282 326	-15.6	-12.5	0.9	1 334	1 992	-0.94
8.1	150	0.050 541	0.001 757	0.282 400	0.000 026	0.282 395	-13.1	-10.0	0.9	1 228	1 837	-0.95
9.1	150	0.067 261	0.002 310	0.282 399	0.000 036	0.282 392	-13.2	-10.1	1.3	1 248	1 844	-0.93
10.1	150	0.066 798	0.002 383	0.282 343	0.000 026	0.282 336	-15.2	-12.1	0.9	1 332	1 969	-0.93
11.1	150	0.065 358	0.002 210	0.282 321	0.000 039	0.282 315	-15.9	-12.9	1.4	1 358	2 017	-0.93
12.1	150	0.058 478	0.001 734	0.282 388	0.000 029	0.282 383	-13.6	-10.4	1.0	1 244	1 865	-0.95
13.1	150	0.071 387	0.001 846	0.281 964	0.000 022	0.281 959	-28.6	-25.4	0.8	1 851	2 807	-0.94
14.1	150	0.030 542	0.000 924	0.282 413	0.000 021	0.282 411	-12.7	-9.5	0.7	1 183	1 804	-0.97
15.1	150	0.028 240	0.000 863	0.282 398	0.000 024	0.282 395	-13.2	-10.0	0.8	1 203	1 839	-0.97
16.1	150	0.066 896	0.002 101	0.282 334	0.000 032	0.282 328	-15.5	-12.4	1.1	1 335	1 987	-0.94
17.1	150	0.034 619	0.001 151	0.282 388	0.000 020	0.282 385	-13.6	-10.4	0.7	1 225	1 861	-0.97
18.1	150	0.051 180	0.001 628	0.282 306	0.000 026	0.282 302	-16.5	-13.3	0.9	1 357	2 047	-0.95
19.1	150	0.056 654	0.001 540	0.282 262	0.000 025	0.282 258	-18.0	-14.9	0.9	1 417	2 145	-0.95
20.1	150	0.057 185	0.001 739	0.282 378	0.000 023	0.282 374	-13.9	-10.8	0.8	1 258	1 886	-0.95
21.1	150	0.104 560	0.003 305	0.282 417	0.000 052	0.282 408	-12.6	-9.6	1.8	1 257	1 810	-0.90
CF06-065-2 扎兰营子												
1.1	254	0.048 767	0.001 024	0.282 371	0.000 015	0.282 366	-14.2	-8.8	0.5	1 245	1 837	-0.97
2.1	254	0.041 922	0.000 889	0.282 328	0.000 021	0.282 324	-15.7	-10.3	0.7	1 300	1 931	-0.97
3.1	254	0.088 539	0.001 872	0.282 379	0.000 016	0.282 370	-13.9	-8.6	0.6	1 262	1 827	-0.94
4.1	254	0.111 876	0.002 910	0.282 215	0.000 028	0.282 201	-19.7	-14.6	1.0	1 540	2 205	-0.91
5.1	254	0.046 139	0.001 098	0.282 281	0.000 021	0.282 276	-17.4	-12.0	0.7	1 373	2 039	-0.97
6.1	254	0.064 564	0.001 586	0.282 355	0.000 018	0.282 347	-14.8	-9.5	0.6	1 287	1 880	-0.95
7.1	254	0.063 335	0.001 623	0.282 359	0.000 021	0.282 351	-14.6	-9.3	0.7	1 282	1 870	-0.95
8.1	254	0.090 988	0.002 330	0.282 384	0.000 029	0.282 373	-13.7	-8.6	1.0	1 271	1 822	-0.93
9.1	254	0.050 476	0.001 032	0.282 331	0.000 020	0.282 326	-15.6	-10.2	0.7	1 301	1 927	-0.97
10.1	254	0.039 409	0.000 856	0.282 339	0.000 023	0.282 335	-15.3	-9.9	0.8	1 284	1 907	-0.97
11.1	254	0.134 327	0.003 553	0.282 328	0.000 033	0.282 311	-15.7	-10.7	1.2	1 399	1 960	-0.89
12.1	254	0.117 392	0.002 990	0.282 289	0.000 026	0.282 274	-17.1	-12.0	0.9	1 435	2 041	-0.91
13.1	254	0.161 236	0.004 462	0.282 306	0.000 035	0.282 285	-16.5	-11.7	1.2	1 469	2 017	-0.87
14.1	254	0.105 887	0.002 580	0.282 315	0.000 025	0.282 303	-16.2	-11.0	0.9	1 380	1 978	-0.92
15.1	254	0.103 876	0.002 580	0.282 278	0.000 022	0.282 266	-17.5	-12.3	0.8	1 434	2 061	-0.92
16.1	254	0.053 856	0.001 101	0.282 350	0.000 012	0.282 345	-14.9	-9.5	0.4	1 277	1 885	-0.97
17.1	254	0.078 329	0.001 784	0.282 314	0.000 019	0.282 305	-16.2	-10.9	0.7	1 352	1 973	-0.95
18.1	254	0.053 800	0.001 174	0.282 307	0.000 016	0.282 302	-16.4	-11.1	0.6	1 340	1 981	-0.96
19.1	254	0.070 974	0.001 691	0.282 331	0.000 024	0.282 323	-15.6	-10.3	0.8	1 325	1 934	-0.95
20.1	254	0.112 478	0.002 344	0.282 339	0.000 018	0.282 328	-15.3	-10.1	0.6	1 337	1 922	-0.93
CF06-066 莫里海沟												
1.1	128	0.049 311	0.001 136	0.282 390	0.000 024	0.282 387	-13.5	-10.8	0.8	1 222	1 870	-0.97
2.1	128	0.072 309	0.001 783	0.282 449	0.000 021	0.282 445	-11.4	-8.8	0.7	1 159	1 742	-0.95
3.1	128	0.033 221	0.000 782	0.282 435	0.000 031	0.282 434	-11.9	-9.2	1.1	1 147	1 767	-0.98
4.1	128	0.073 056	0.001 700	0.282 487	0.000 030	0.282 483	-10.1	-7.4	1.1	1 102	1 656	-0.95
5.1	128	0.043 998	0.001 178	0.282 335	0.000 021	0.282 332	-15.5	-12.8	0.7	1 301	1 994	-0.96
6.1	128	0.044 834	0.001 078	0.282 431	0.000 024	0.282 429	-12.0	-9.3	0.9	1 162	1 778	-0.97
7.1	128	0.042 196	0.000 880	0.282 410	0.000 018	0.282 408	-12.8	-10.1	0.7	1 186	1 825	-0.97
8.1	128	0.058 473	0.001 514	0.282 485	0.000 024	0.282 482	-10.1	-7.5	0.8	1 099	1 659	-0.95
9.1	128	0.024 402	0.000 720	0.282 551	0.000 029	0.282 549	-7.8	-5.1	1.0	985	1 509	-0.98
10.1	128	0.062 186	0.001 363	0.282 420	0.000 024	0.282 417	-12.4	9.8	0.8	1 187	1 804	-0.96
11.1	128	0.0155 54	0.000 388	0.282 442	0.000 024	0.282 441	-11.7	-8.9	0.8	1 127	1 751	-0.99

续表 3
Continued Table 3

点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma_m$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\lambda}$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$
12.1	128	0.079 941	0.001 623	0.282 489	0.000 021	0.282 485	-10.0	-7.4	0.8	1 098	1 652	-0.95
13.1	128	0.023 189	0.000 534	0.282 424	0.000 020	0.282 423	-12.3	-9.6	0.7	1 156	1 791	-0.98
14.1	128	0.066 960	0.001 827	0.282 306	0.000 037	0.282 301	-16.5	-13.9	1.3	1 366	2 062	-0.94
15.1	128	0.088 646	0.002 253	0.282 436	0.000 022	0.282 430	-11.9	-9.3	0.8	1 193	1 774	-0.93
16.1	128	0.043 285	0.000 961	0.282 408	0.000 020	0.282 406	-12.9	-10.1	0.7	1 191	1 829	-0.97
17.1	128	0.055 463	0.001 341	0.282 378	0.000 027	0.282 375	-13.9	-11.2	1.0	1 246	1 898	-0.96

a) $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 10\,000 \times \left\{ \left[\left(\frac{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{s}} - \left(\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{s}} \times (e^{\lambda t} - 1) \right] / \left[\left(\frac{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{CHUR}} - \left(\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1) \right] - 1 \right\}$; $t_{\text{DM}} = 1 / \lambda \ln \{ 1 + [\left(\frac{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{s}} - \left(\frac{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{DM}}] / [\left(\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{s}} - \left(\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{DM}}] \}$; $f_{\text{DM}}^{\text{C}} = t_{\text{DM}} - t \times [(f_{\text{CC}} - f_{\text{S}}) / (f_{\text{CC}} - f_{\text{DM}})]$; $f_{\text{Lu}/\text{Hf}} = \left(\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{s}} / \left(\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{CHUR}} - 1$; 其中 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} / \text{a}$ (Soderlund *et al.*, 2004); $\left(\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{s}}$ 和 $\left(\frac{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{s}}$ 为样品测量值, $\left(\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{CHUR}} = 0.033\,2$, $\left(\frac{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{CHUR}} = 0.282\,772$ (Blichert-Toft *et al.*, 1997); $\left(\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{DM}} = 0.038\,4$, $\left(\frac{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{DM}} = 0.283\,25$ (Griffin *et al.*, 2000); $\left(\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{平均地壳}} = 0.015$; $f_{\text{CC}} = [\left(\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{平均地壳}} / \left(\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{CHUR}}] - 1$, $f_{\text{S}} = f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$; $f_{\text{DM}} = [\left(\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{DM}} / \left(\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{\lambda} \right)_{\text{CHUR}}] - 1$.

图 5 楼子店变形花岗质岩石锆石地壳模式年龄 t_{DM}^{C} 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 柱状图Fig. 5 Zircon t_{DM}^{C} and Hf isotopic compositions of deformed granitoids from Louzidian

晚侏罗世花岗质岩石遭受了脆-韧性剪切变形,分布在变质核杂岩中心的安家营子早白垩世花岗岩体的长轴呈NW向,它们未经受任何脆-韧性变形的改造。变质核杂岩和深源岩浆的上涌引起的热隆有关,岩浆侵入引起地壳伸展。在岩浆热作用下的围岩在应力作用下可以发生糜棱岩化和韧性剪切(Lister and Baldwin, 1993)。Aoya等(2005)、Lee和Whitehouse(2007)研究喜马拉雅藏南拆离系时认为岩浆活动强烈驱动着与藏南拆离系相关的地壳伸展变形。内蒙赤峰楼子店变质核杂岩形成过程中岩浆侵位也可能是变质核杂岩发育的重要原因(Lister and Baldwin, 1993)。根据本文新的同位素年代学资料(朝阳沟糜棱岩化片麻状花岗岩侵位年龄 150.43 ± 0.79 Ma),笔者推测楼子店变质核杂岩区拆离断层早期的变形及伸展构造可能与150 Ma时期开始的岩浆侵入和变形有关,与侵入有关的热可以弱化地壳并激发伸展作用,其变形可能从150 Ma就开始启动。

近期研究表明,华北克拉通中生代以来发生了明显的由挤压到伸展的构造体制转折,总体上,构造体制转折始于150~140 Ma,终于110~100 Ma,峰期是120~110 Ma(翟明国等,2004;汪涛等,2007)。同位素年代学资料表明,楼子店韧性剪切拆离带形成于这一构造体制转折时期。

5.2 岩浆源区及成因

本文Hf同位素测试结果显示,研究区不同年龄的变形花岗质岩石样品锆石具相似低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 范围分布为 $-5.1 \sim -14.9$,主体为 -10 ,具有中元古代-古元古代的两阶段Hf同位素模式年龄(1.5~2.2 Ga),主体为1.8~1.9 Ga。锆石Hf二阶段模式年龄反映其源区物质从亏损地幔被抽取的地壳平均存留年龄,也就是地壳生长的时间(Nebel *et al.*, 2007)。在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解(图6)上,这些锆石的Hf同位素位于元古宙地壳演化范围内,这一特征可能被解释为古老地壳物质(如早元古代明安山岩群,侵入其中的花岗闪长岩锆石U-Pb年龄为 1825 ± 12 Ma)再熔融的产物。我们注意到朝阳沟糜棱岩化片麻状花岗岩样品CF06-042颗粒13.1的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -25.4 ,模式年龄为2807 Ma,反映源区也可能是太古宙的古老地壳物质熔融产物的信息,但本次分析只发现这一粒锆石具此特征。晚侏罗世朝阳沟糜棱岩化片麻状花岗岩(CF06-042)和早白垩世莫里海沟片麻状闪长岩(CF06-066)与晚

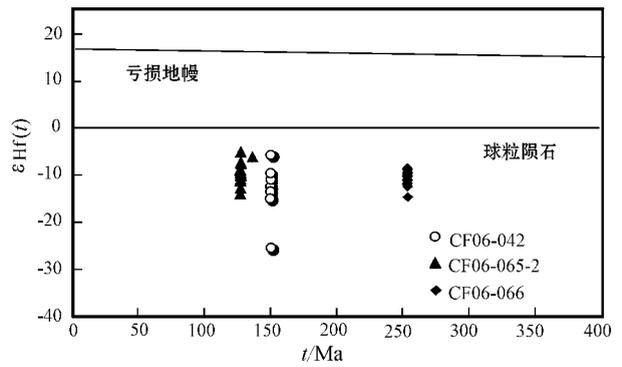


图6 楼子店变形花岗质岩石锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解

Fig. 6 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ plot for zircons from deformed granitoids in Louzidian

二叠世扎兰营子片麻状花岗岩(CF06-065-2)相比, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显偏高一些,Hf同位素模式年龄也稍年轻一些,可能表明有更多的新生物质参与。显然,不同岩性、不同形成年龄的3个样品的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要为负值揭示其源区可能主要与古老地壳物质的再循环有关。锆石Hf同位素数据显示其时代为中元古代-古元古代(1.5~2.2 Ga),表明它们可能主要来源于华北克拉通下地壳物质的部分熔融。

5.3 古生代-中生代花岗质岩浆作用的锆石U-Pb年代学框架

内蒙赤峰楼子店变质核杂岩区的花岗质岩石的时代,为研究西伯利亚地块与华北地块关系的构造演化提供了重要的同位素年代制约。作者把已有的31个锆石U-Pb年龄数据依据GPS位置标注到赤峰南部地质简图中(图7)。到目前为止,除本文获得的花岗质岩石锆石U-Pb年龄外(图7中标注为①的年龄),Davis等(1998)报道了锅底山晚二叠世花岗岩锆石U-Pb年龄为 253 ± 3 Ma(采样位置 $N42^{\circ}00'$, $E119^{\circ}05'$,图7中标注为②的年龄)。李永刚等(2003)报道了应用TIMS方法测得的安家营子花岗岩U-Pb年龄 132 ± 5 Ma(图7中标注为③的年龄),贾文(1999)报道了楼子店东南喇嘛洞混合花岗岩体(东经 $119^{\circ}12'27''$,北纬 $41^{\circ}55'37''$,图7中标注为④的年龄)的锆石U-Pb年龄 327 ± 1 Ma(TIMS方法)。欧阳志侠(2010)报道研究区牡牛坝东北安家营子岩体内的花岗岩(样品CF06-57)锆石SHRIMP U-Pb年龄为 125 ± 2 Ma,郎营子南的马鞍山花岗岩(样品CF06-56)锆石SHRIMP U-Pb年龄为 156 ± 2 Ma,西南沟里西部和研究区西南部大面积原划为侏罗和白垩纪的花岗岩中4个新采集的花岗岩样品年

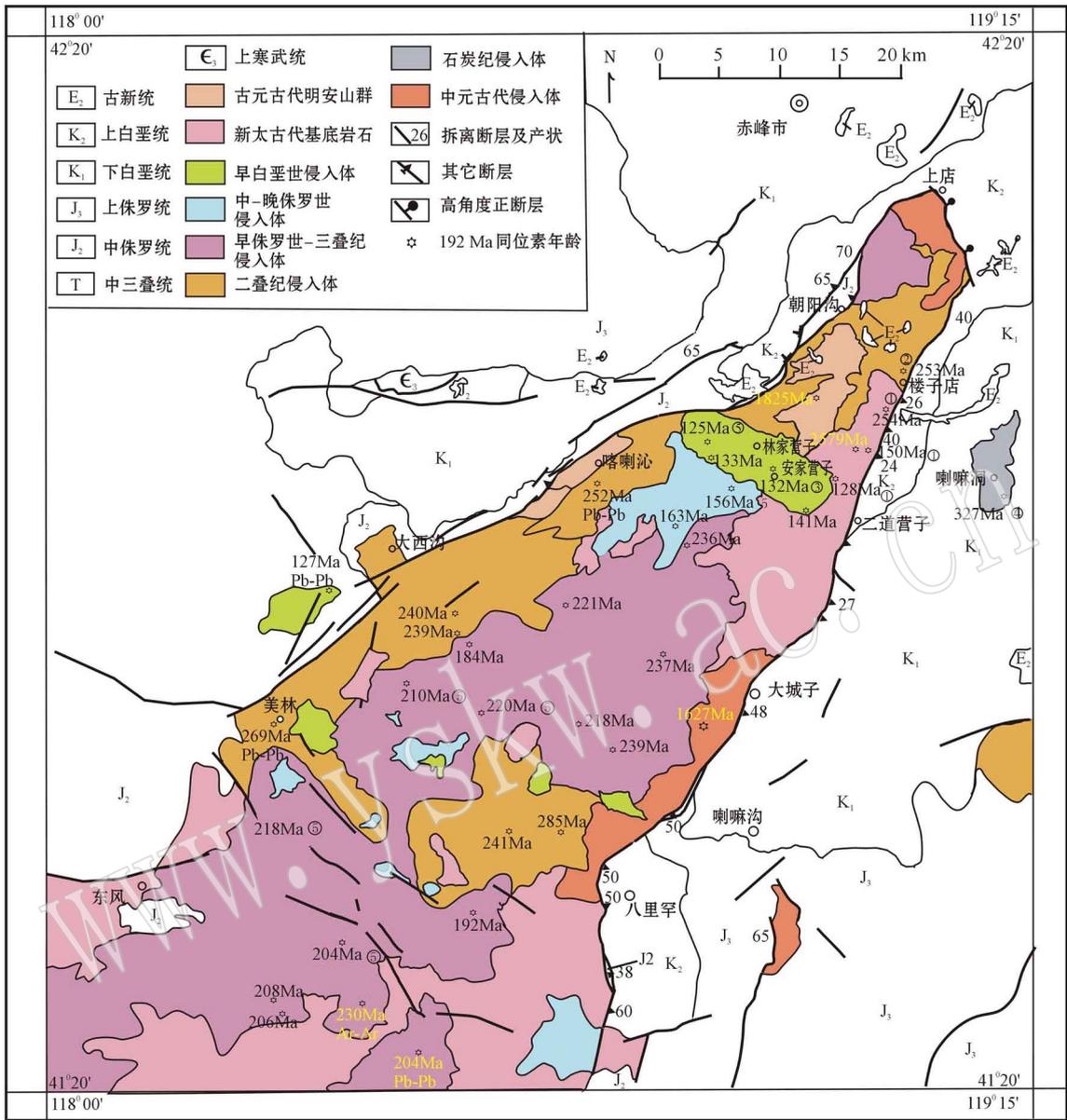


图 7 赤峰南部地质简图(花岗质岩石标注锆石 U-Pb 年龄)(据王新社等,2005 修改)

Fig. 7 Simplified geological map showing U-Pb ages of zircon from plutons in southern Chifeng (modified after Wang Xinshe *et al.*, 2005)

龄为晚三叠世,它们的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄分别为 210 ± 2 Ma, 220 ± 2 Ma, 205 ± 1 Ma, 204 ± 2 Ma(图 7 中标注为⑤的年龄)。其余收集到的古生代-中生代的花岗质岩石样品的锆石 U-Pb 年龄皆为应用锆石 TIMS 方法发表在 1:5 万区域地质调查报告上的 U-Pb 年龄(地矿部内蒙古地质矿产勘查开发局,1996)。

根据研究区已有的 31 个锆石 U-Pb 年龄数据,笔者将该区古生代-中生代花岗质岩浆作用主要划

分为 4 个时期(图 8): 早石炭世(327 Ma)、二叠纪(285~252 Ma)、中三叠世-早侏罗世(241~184 Ma)和中侏罗世-早白垩世(163~125 Ma)。显然,位于华北地块北缘的这些不同时代的岩浆作用反映着该区域的地质构造演化历史。兴蒙造山带是蒙古或西伯利亚地块与华北地块的缝合带,其前身是由一些较小的洋盆、微陆岛链和中间地块组成的复杂系统(任纪舜等,1990)。地处古老克拉通与显生宙造山带过渡区域的华北陆块北缘,古生代时期古亚

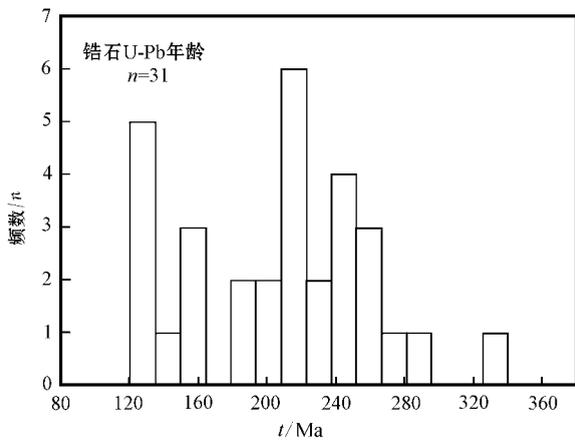


图8 赤峰南部花岗质岩石锆石 U-Pb 年龄频率分布图

Fig. 8 Probability of zircon U-Pb ages of granitic rocks from southern Chifeng

洲洋的裂解-扩展-消亡和汇聚大陆边缘的俯冲-碰撞-伸展构成了板块体制下其大陆演化的基本形式,并在不同时代花岗岩的锆石中留下年龄记录。近年来,张拴宏等(2004)在华北地块北缘发现大量石炭纪至二叠纪的中酸性侵入杂岩,确定华北地块北缘为一安第斯型活动大陆边缘(张拴宏等,2004; Zhang *et al.*, 2007a, 2007b, 2007c, 2009a, 2009b; Liu *et al.*, 2010)。李锦轶等(2007)认为华北与西伯利亚两个古板块的碰撞是从二叠纪中期延续至三叠纪中期的一个比较长时期的地质过程,属碰撞造山带动力学演化的后碰撞阶段,该时期强烈的褶皱变形、韧性剪切作用、变质作用和岩浆作用等相继发生。随着古亚洲洋的消失,华北板块和西伯利亚板块对接,晚三叠世岩浆活动形成于后造山地壳伸展环境,并持续到早侏罗世。也就是说,晚三叠世岩浆活动是侏罗纪板内地壳演化的开始(李锦轶等, 2007)。自此开始,赤峰南部地壳深部一直处于过热状态,发生了多次岩浆侵入和火山喷发(邵济安等, 1999, 2001; 周新华等, 2001)。中侏罗世末期一次南北向的强烈挤压,在华北地块的北缘地区出现了大规模的逆冲推覆构造(郑亚东等, 2000; Davis *et al.*, 2001)。晚侏罗世—早白垩世,岩石圈伸展减薄,进入伸展构造的演化阶段(王涛等, 2007)。

研究区早石炭世喇嘛洞混合花岗岩(锆石 U-Pb 年龄 327 ± 1 Ma) 产于古亚洲洋古生代向南俯冲于华北板块时期。晚二叠世锅底山和扎兰营子变形花岗岩(锆石 U-Pb 年龄分别为 253 ± 3 Ma、 253.6 ± 1.2 Ma) 代表了华北与西伯利亚两个陆块拼合演化

过程的后碰撞阶段的岩浆活动,该岩浆活动可能与辽北法库的岩浆作用一样呈现后碰撞型花岗岩的元素地球化学特征(Davis *et al.*, 1998; 张晓晖等, 2002; Zhang *et al.*, 2010)。本区大面积的早侏罗世—中三叠世花岗岩的侵入则是西伯利亚与华北陆块碰撞后地壳伸展的记录。接着伴随中侏罗世蒙古—额霍次克海闭合进入陆内造山阶段,西伯利亚板块的持续南向运动导致了自北向南的地壳缩短增厚(160~140 Ma),这一事件使岩石圈或下地壳折沉进而诱发了华北克拉通伸展减薄与破坏(高山等, 2009),推测可能制约紧随其后的以变质核杂岩为代表的伸展构造的发生,即在早白垩世—中侏罗世(125~163 Ma)期间的岩浆活动发育在伸展构造背景,与岩石圈减薄存在密切的联系。

近期研究证实,华北东部中生代以来发生了明显的由挤压到伸展的构造体制转折,晚侏罗至早白垩世(150~127 Ma)岩浆作用表示华北克拉通内部克拉通破坏后的地壳伸展发生,研究区韧性剪切作用主体发生的时代 128~117 Ma 对应于晚中生代华北陆块岩石圈减薄和伸展作用的主要时期(张晓晖等, 2002; 刘伟等, 2003; 翟明国等, 2004; 王新社等, 2005)。莫里海沟片麻状闪长岩($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 127.6 ± 3.1 Ma)可能就是该时期的岩浆作用记录。

5.4 花岗质岩浆作用与成矿的时代关系

内蒙赤峰楼子店变质核杂岩区花岗岩与成矿的关系是一个令人瞩目的问题。早白垩世林家营子环状花岗岩体,长轴呈 NW 向展布,侵位于 NNE 走向的喀喇沁隆断带中段,它以独特的形态特征以及与金矿的密切关系引起人们关注。该环状岩体内及与太古宙片麻岩接触带附近,金矿点众多,位于华北陆块北缘金矿成矿带的安家营子中型金矿即是赋存于安家营子花岗岩岩体内的石英脉金矿床。安家营子金矿赋矿围岩安家营子花岗岩和穿切矿体的流纹斑岩岩脉的锆石 U-Pb 年龄分别为 (132 ± 5) Ma 和 (126 ± 1) Ma,因此安家营子金矿成矿时代应在 132~126 Ma 之间,与变质核杂岩糜棱岩形成年龄(126~134 Ma)几乎一致(张晓晖, 2002; 刘伟等, 2003; 李永刚等, 2003; 王新社等, 2005)。这说明早中生代前后华北东部曾发生了动力学机制的重大转折,如挤压向伸展转变和岩石圈的减薄达到高峰导致岩浆作用增强。金矿形成于这一转折时期暗示成矿作用可能与深部作用过程有关,即早白垩世岩浆强烈上涌的同时,使金等成矿元素活化迁移至地壳层次,并在

有利的构造部位富集成矿(贾文等,2001;李永刚等,2003)。

当然,内蒙赤峰楼子店变质核杂岩区古生代-中生代多期岩浆活动与区域构造演化密切的时空、成因联系有待我们对该区变形花岗岩岩石的年龄、地球化学和构造等方面进行更详细更深入的研究。

致谢 野外工作期间,得到王新社研究员、吴春明教授的指导和帮助,同时该文还得到王涛研究员的鼓励和多方面的讨论,两位匿名审稿人和编辑对本文提出了很好的建设性修改意见,使本文得以完善,作者对以上诸位表示诚挚的敬意和感谢。

References

- Aoya M, Wallis S R, Terada K, *et al.* 2005. North-South extension in the Tibetan crust triggered by granite emplacement[J]. *Geology*, 33: 853~856.
- Blichert-Toft J and Albarède F. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148: 243~258.
- Davis G A, Zheng Y, Wang C, *et al.* 1998. Geometry and geochronology of Yanshan belt tectonics[A]. Department of Geology, Peking University. Collected Works of International Symposium on Geological Science[C]. 100th Anniversary Celebration of Peking University. Beijing: Seismological Publishing House, 275~292.
- Davis, G A, Zheng Y, Wang C, *et al.* 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, northern China[A]. Hendrix M S and Davis G A. Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution of central Asia: From continental assembly to intracontinental deformation[C]. *Geol. Soc. of Am. Memoir*, 194: 171~198.
- Elhous S, Belousova E, Griffin WL *et al.* 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, suppl: A158.
- Gao Shan, Zhang Junfeng, Xu Wenliang, *et al.* 2009. Delamination and destruction of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(19): 3367~3378(in Chinese).
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 64: 133~147.
- Han B F, Zheng Y D, Gang J W, *et al.* 2001. The louzidian normal fault near Chifeng, Inner Mongolia: Master fault of a quasi-metamorphic core complex[J]. *Int. Geol. Rev.*, 43: 254~264.
- Hawkesworth C J, Dhuime B, Pietranik A B, *et al.* 2010. The generation and evolution of continental crust[J]. *Journal of the Geological Society London*, 167: 229~248.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595~2604(in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481~492(in Chinese with English abstract).
- Jia Wen. 1999. Found of Migmatitic Granite in Lamadong Chifeng, Inner Mongolia[J]. *Inner Mongolia Geology*, 1: 29~33(in Chinese with English abstract).
- Jia Wen, Zheng Guangrui and Zhu Huizhong. 2001. A Typical hot balloon type granite body: The Linjiayingzi granite intrusion from Kalaqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 4: 62~66(in Chinese with English abstract).
- Lee J and Whitehouse M J. 2007. Onset of mid-crust extensional flow in southern Tibet: Evidence from U/Pb zircon age[J]. *Geology*, 35: 45~48.
- Lister G S and Baldwin S L. 1993. Plutonism and the origin of the metamorphic core complex[J]. *Geology*, 21: 607~610.
- Li J B, Wang T and Ouyang Z X. 2010. Strain and kinematic vorticity analysis of the Louzidian low-angle ductile shear detachment zone in Chifeng, Inner Mongolia, China[J]. *Sci China Earth Sci.*, doi: 10.1007/s11430-010-4041-9.
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, *et al.* 2007. Shuangjingzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565~582(in Chinese with English abstract).
- Li Yonggang, Zhai Mingguo, Miao Laicheng, *et al.* 2003. Relationship between intrusive rocks and gold mineralization of the Anjiayingzi gold deposit, Inner Mongolia and implications for geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 808~816(in Chinese with English abstract).
- Liu Wei, Yang Jinhui and Li Chaofeng. 2003. Thermochronology of three faults in the Chifeng area, Inner Mongolia of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 717~728(in Chinese with English abstract).
- Liu Jiangmin, Zhao Yue, Sun Yali, *et al.* 2010. Recognition of the latest Permian to Early Triassic Cu-Mo mineralization on the northern margin of the North China block and its geological significance[J]. *Gondwana Research*, 17: 125~134.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34~43.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, *et al.* 2008. Zircon M257-A Homogeneous Natural Reference Material for the Ion Microprobe U-Pb Analysis of Zircon[J]. *Geoanalytical Research*, 32: 247~265.
- Nebel O, Nebel-Jacobsen Y, Mezger K, *et al.* 2007. Initial Hf isotope compositions in magmatic zircon from early Proterozoic rocks from

- the Gawler Craton, Australia: A test for zircon model ages[J]. *Chemical Geology*, 241: 23~37.
- Ouyang Zhixia. 2010. Time, petrogenesis and tectonic implication of late Mesozoic granite from the metamorphic core complexes, the northern margin of the North China Craton[D]. Beijing: Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Chen Tingyu, Niu Baogui, *et al.* 1990. Tectonic Evolution of the Continental Lithosphere and Metallogeny in Eastern China and Adjacent Areas[M]. Beijing: Science Press, 1~20(in Chinese).
- Shao Ji'an, Han Qingjun, Zhang Luqiao, *et al.* 1999. Cumulate complex xenoliths in the Early Mesozoic in eastern Inner Mongolia[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(14): 1 272~1 279(in Chinese).
- Shao Ji'an, Zhang Lujiao, Jia Wen, *et al.* 2001. Harkin metamorphic core complex in Inner Mongolia and its upwelling mechanism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 283~290(in Chinese with English abstract).
- Sláma J, Kosler J, Condon D J, *et al.* 2008. Plesovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 249: 1~35.
- Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, 2004. *et al.* The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Pre-cambrian mafic intrusions[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 219: 311~324.
- Wang Tao, Zheng Yadong, Zhang Jinjiang, *et al.* 2007. Some problems in the study of Mesozoic extensional structure in the North China craton and its significance for the study of lithospheric thinning[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1 154~1 166(in Chinese with English abstract).
- Wang Xinshe and Zheng Yadong. 2005. ^{40}Ar - ^{39}Ar age constraints on the ductile deformation of the detachment system of the Louzidian core complex, Southern Chifeng, China[J]. *Geological Review*, 51(5): 574~582(in Chinese with English abstract).
- Wang Xinshe, Zheng Yadong and Wang Tao. 2007. Strain and shear type of Louzidian low angle ductile shear zone in southern Chifeng, Inner Mongolia[J]. *Science in China Series D*, 50(4): 487~495(in Chinese).
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe[A]. McKibben M A, Shanks III W C and Ridley W I. Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes [C]. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1~35.
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, *et al.* 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. *Chem. Geol.*, 234: 105~126.
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220(in Chinese with English abstract).
- Yan Guohan, Mu Baolei, Xu Baoliang, *et al.* 1999. Triassic alkaline intrusives in the Yanliao-Yinshan area: their chronology, Sr, Nd and Pb isotopic characteristics and their implication[J]. *Science in China Series D*, 42(6): 582~587.
- Zhai Mingguo, Meng Qingren, Liu Jianming, *et al.* 2004. Geological features of Mesozoic regime inversion in Eastern North China and implication for geodynamics[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 285~297(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao, *et al.* 2004. The Late Paleozoic gneissic granodiorite pluton in Early Pre-Cambrian high-grade metamorphic terrains near Longhua County in northern Hebei Province, North China: result from zircon SHRIMP U-Pb dating and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 621~626(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao, *et al.* 2007a. Zircon SHRIMP U-Pb and in-situ Lu-Hf isotope analyses of a tuff from western Beijing: evidence for missing Late Paleozoic arc volcano eruptions at the northern margin of the North China block[J]. *Gondwana Research*, 12: 157~165.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao, *et al.* 2007b. Petrogenesis of the Middle Devonian Gushan diorite pluton on the northern margin of the North China block and its tectonic implications[J]. *Geol. Mag.*, 144(3): 1~16.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao, *et al.* 2007c. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: implications for a Late Paleozoic active continental margin [J]. *Journal of the Geological Society London*, 164(2): 451~463.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Alfred Kroner, *et al.* 2009a. Early Permian plutons from the northern North China block: constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian orogenic belt[J]. *Int. J. Earth Sci(Geol Rundsch)*, 98(6): 1 441~1 467.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao, *et al.* 2009b. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: geochronology, petrogenesis, and tectonic implications[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 121: 181~200.
- Zhang Xiaohui, Li Tiesheng and Pu Zhiping. 2002. ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of Louzidian-Dachengzi ductile shear zone in Chifeng, Inner Mongolia and its tectonic significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 12: 951~956(in Chinese).
- Zhang Xiaohui, Zhang Hongfu, Simon A, *et al.* 2010. Late Permian to early Triassic mafic to felsic intrusive rocks from North Liaoning, North China: Petrogenesis and implications for Phanerozoic continental crustal growth[J]. *lithos*, doi: 10. 1016/j. lithos. 2010. 03. 005.
- Zheng Yadong, Davis G A, Wang Cong, *et al.* 2000. Major Mesozoic tectonic events in the Yanshan belt and the plate tectonic setting [J]. *Acta Geologica Sinica*. 74(4): 289~302(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinhua, Zhang Guohui, Yang Jinhui, *et al.* 2001. Sr-Nd-Pb isotope mapping of late Mesozoic volcanic rocks across northern margin of North China Craton and implications to geodynamic processes [J]. *Geochimica*, 30(1): 10~23(in Chinese with English

abstract)。

附中文参考文献

- 高山,章军锋,许文良,等. 2009. 拆沉作用与华北克拉通破坏[J]. 科学通报, 54(14):1962~1973.
- 侯可军,李延河,邹天人,等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10):2595~2604.
- 侯可军,李延河,田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4):481~492.
- 贾文. 1999. 赤峰市喇嘛洞混合花岗岩的发现[J]. 内蒙古地质, 1:29~33.
- 贾文,郑广瑞,朱慧忠. 2001. 一个典型的热气球式侵位花岗岩体——内蒙喀喇沁旗林家营子花岗岩[J]. 华南地质与矿产, 4:62~66.
- 李建波,王涛,欧阳志侠. 2010. 内蒙古赤峰楼子店低角韧性剪切拆离带的应变与动力学涡度分析[J]. 中国科学, 40(7):840~854.
- 李锦轶,高立明,孙桂华,等. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. 岩石学报, 23(3):565~582.
- 李永刚,翟明国,苗来成,等. 2003. 内蒙古安家营子金矿与侵入岩的关系及其地球动力学意义[J]. 岩石学报, 19(4):808~816.
- 刘伟,杨进辉,李超峰. 2003. 内蒙赤峰地区若干断裂带的构造热年代学[J]. 岩石学报, 19(4):717~728.
- 欧阳志侠. 2010. 华北北缘变质核杂岩中的晚中生代花岗岩时代、成因类型对比及意义[D]. 北京:中国地质科学院地质研究所.
- 任纪舜,陈廷愚,牛宝贵,等. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京:科学出版社,1~205.
- 邵济安,韩庆军,张履桥,等. 1999. 内蒙古东部早中生代堆积杂岩捕虏体的发现[J]. 科学通报, 44(5):178~485.
- 邵济安,张履桥,贾文,等. 2001. 内蒙古喀喇沁变质核杂岩及其隆升机制探讨[J]. 岩石学报, 17(2):283~290.
- 王新社,郑亚东. 2005. 楼子店变质核杂岩韧性变形作用的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学约束[J]. 地质论评, 51(5):574~581.
- 王新社,郑亚东,王涛. 2007. 内蒙赤峰南部楼子店韧性剪切带应变与剪切作用类型[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 37(2):160~166.
- 王涛,郑亚东,张进江,等. 2007. 华北克拉通中生代伸展构造研究的几个问题及其在岩石圈减薄研究中的意义[J]. 地质通报, 26(9):1154~1166.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2):185~220.
- 阎国翰,牟保磊,许保良,等. 2000. 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:地球科学, 30(4):383~387.
- 翟明国,孟庆任,刘建明,等. 2004. 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, 11(3):285~297.
- 张拴宏,赵越,宋彪,等. 2004. 冀北隆化早前寒武纪高级变质区内的晚中生代片麻状花岗闪长岩——锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 岩石学报, 20(3):621~626.
- 张晓晖,李铁胜,蒲志平,等. 2002. 内蒙古赤峰楼子店-大城子韧性剪切带的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其构造意义[J]. 科学通报, 47(12):951~956.
- 郑亚东, Davis G A, 王琮,等. 2000. 燕山代中生代主要构造事件与板块构造背景问题[J]. 地质学报, 74(4):290~301.
- 周新华,张国辉,杨进辉,等. 2001. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义[J]. 地球化学, 30(1):10~23.