

五台杂岩晚太古代花岗质岩石中斜长角闪岩包体的年代学和地球化学研究*

刘超辉 刘福来 施建荣

LIU ChaoHui, LIU FuLai and SHI JianRong

中国地质科学院地质研究所,北京 100037

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2013-12-18 收稿, 2014-03-15 改回.

Liu CH, Liu FL and Shi JR. 2014. Geochronological and geochemical studies on the amphibolite enclaves of the Neoproterozoic granitoids in the Wutai Complex. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10):2857–2871

Abstract The Trans-North China Orogen (TNCO) is considered to be a continent-continent belt, along which the Eastern Block and Western Block collided. The Hengshan-Wutai-Fuping belt is located in the middle segment of the TNCO and is the largest and lithologically representative basement exposure. The Wutai Complex can be divided into supracrustal rocks and granitoids. The former has been subdivided into the Wutai and Hutuo groups and the latter have been subdivided into the 2560 ~ 2520Ma strongly deformed diorite-tonalite-trondhjemite-granodiorite suits, the 2176 ~ 2084Ma weakly deformed porphyritic syenogranites and the ~ 1810Ma undeformed A-type granites. Amphibolites occur as lenticular or elliptical enclaves in the Wutai granitoids, outcrops of which vary in sizes from several meters to several tens of meters and in color from green to black. Geochemical features indicate that their protoliths are igneous and similar to tholeiite. Zircon U-Pb dating results suggest that their protoliths crystallized at ~ 2.7Ga and are metamorphosed at ~ 1.85Ga. Their whole-rock $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values are -3.1 to +3.5 and t_{DM} ages are 2.83Ga to 3.65Ga. In the primitive mantle-normalized spider diagram, they are characterized by Nb, Ta and Ti negative anomalies. On the other way, in the chondrite-normalized REE diagram, they exhibit slightly LREE enrichment [$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.36 \sim 3.52$] and flat HREE [$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.94 \sim 1.38$]. Geochemical and isotopic results suggest that their protoliths may have formed by partial melting of spinel-bearing lherzolites from a slightly enriched mantle, which had been metasomatized by subduction-related fluids. More importantly, similarities of the zircon U-Pb age and t_{DM} ages of 2.7 ~ 2.8Ga indicate an important crustal growth event in the North China Craton.

Key words Wutai Complex; Amphibolite enclave; Zircon U-Pb age; Geochemistry; North China Craton

摘要 华北克拉通中部造山带被认为是由东西部陆块碰撞而产生的陆陆碰撞带,而恒山-五台-阜平地区位于中部造山带的中部,是该地区最大也是最具代表性的基底岩石剖面。总体上,五台杂岩可以分为变质表壳岩和花岗质岩体两大类,前者又被划分为五台群和滹沱群,而后者可划分为 2560 ~ 2520Ma 侵位的强烈变形的闪长岩-英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩系列,2176 ~ 2084Ma 侵位的弱变形的斑状正长-钾质花岗岩以及约 1810Ma 侵位的未变形的 A 型花岗岩。在晚太古代花岗岩中普遍发育有斜长角闪岩包体,它们在露头上不连续分布,呈绿色到黑色,强烈拉伸成扁条状或透镜状,直径一般在几米到十几米之间。根据地球化学特征恢复它们的原岩为拉斑玄武岩。锆石 U-Pb 定年结果表明它们的结晶时代为 2.7Ga,变质时代为 1.85Ga。全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -3.1 ~ +3.5,亏损地幔模式年龄为 2.83 ~ 3.65Ga。原始地幔均一化蛛网图解上,斜长角闪岩具有明显的 Nb、Ta 和 Ti 的负异常,而在球粒陨石均一化稀土元素配分图解中它们具有轻稀土弱富集 [$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.36 \sim 3.52$] 以及重稀土平坦 [$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.94 \sim 1.38$] 的特征。地球化学以及同位素特征表明它们很可能来自于受到俯冲板片流体改造的轻度富集地幔中尖晶石二辉橄辉岩的部分熔融。更重要地,这些斜长角闪岩包体的锆石 U-Pb 年龄与全岩 Nd 亏损地幔模式年龄相似,都为 27 ~ 28 亿年左右,这说明在华北克拉通中部造山带很可能存在过大量的 27 亿年左右的新生地壳岩石,它

* 本文受国家 973 项目(2012CB416603)、国家自然科学基金项目(41372195)和中国地质科学院地质研究所“黄汲清青年人才引进计划”项目联合资助。

第一作者简介:刘超辉,男,1982 年生,助理研究员,前寒武纪地质学专业,E-mail: denverliu82@gmail.com

们代表了一期重要的地壳生长事件。

关键词 五台杂岩;斜长角闪岩包体;锆石 U-Pb 定年;地球化学;华北克拉通

中图法分类号 P588.34; P597.3

1 引言

华北克拉通是中国最古老也是最大的克拉通之一,是探索地球早期地质演化历史的重点地区(Zhao *et al.*, 2001, 2005, 2007; Kusky and Li, 2003; Wilde *et al.*, 2004a, b; Wilde and Zhao, 2005)。自二十世纪九十年代末以来,很多学者对于华北克拉通的构造演化历史以及构造划分提出了不同的模式。例如,伍家善等(1998)将华北克拉通基底划分为胶辽陆块、迁怀陆块、晋冀陆块、豫皖陆块和蒙陕陆块五个微陆块,而胶辽陆块与迁怀陆块在 25 亿年左右碰撞形成了一个较大的陆块,该陆块则在 18 亿年与其它陆块拼合形成了统一的基底;Zhai and Santosh(2011)则将华北克拉通基底划分为胶辽陆块、迁怀陆块、鄂尔多斯陆块、集宁陆块、许昌陆块、徐淮陆块以及阿拉善陆块七个微陆块,而克拉通化则在 25 亿年完成。近年来,对于华北克拉通构造演化研究的重要进展之一是在其中识别出了一条早元古代的碰撞造山带,称为中部造山带。两个独立的陆块(东部陆块和西部陆

块)沿着这条造山带碰撞拼合从而最终形成了华北克拉通的统一基底(图 1;Zhao *et al.*, 2001, 2005; Wilde, 2002; Guo *et al.*, 2002, 2005; Kusky and Li, 2003; Wilde and Zhao, 2005; Kröner *et al.*, 2005a, b, 2006; Polat *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2006; Faure *et al.*, 2007; Li and Kusky, 2007; Trap *et al.*, 2007)。然而,对于这两个陆块碰撞拼合的时间以及详细的构造过程还存在着很多争议。一部分学者认为俯冲的方向是向西的,而碰撞事件发生在 25 亿年左右(Kusky and Li, 2003; Polat *et al.*, 2005; Li and Kusky, 2007);相反地,另一部分学者则认为俯冲方向是向东的,而最终的碰撞事件发生在 18.5 亿年左右(Zhao *et al.*, 2001; Wilde *et al.*, 2002; Kröner *et al.*, 2005a, b, 2006; Zhang *et al.*, 2007, 2009, 2012)。Faure *et al.* (2007)和 Trap *et al.* (2007)提出了第三种模式,他们认为俯冲方向是向西的,并且在 21 亿年和 18.5 亿年发生了两次碰撞事件。Wang (2009)及 Wang *et al.* (2010)则认为恒山-五台-阜平弧地体是在 25 亿年拼合的,而它们在 21 亿年与西部陆块拼合在一起,华北克拉通最终的克拉通化则是在 18 亿年。

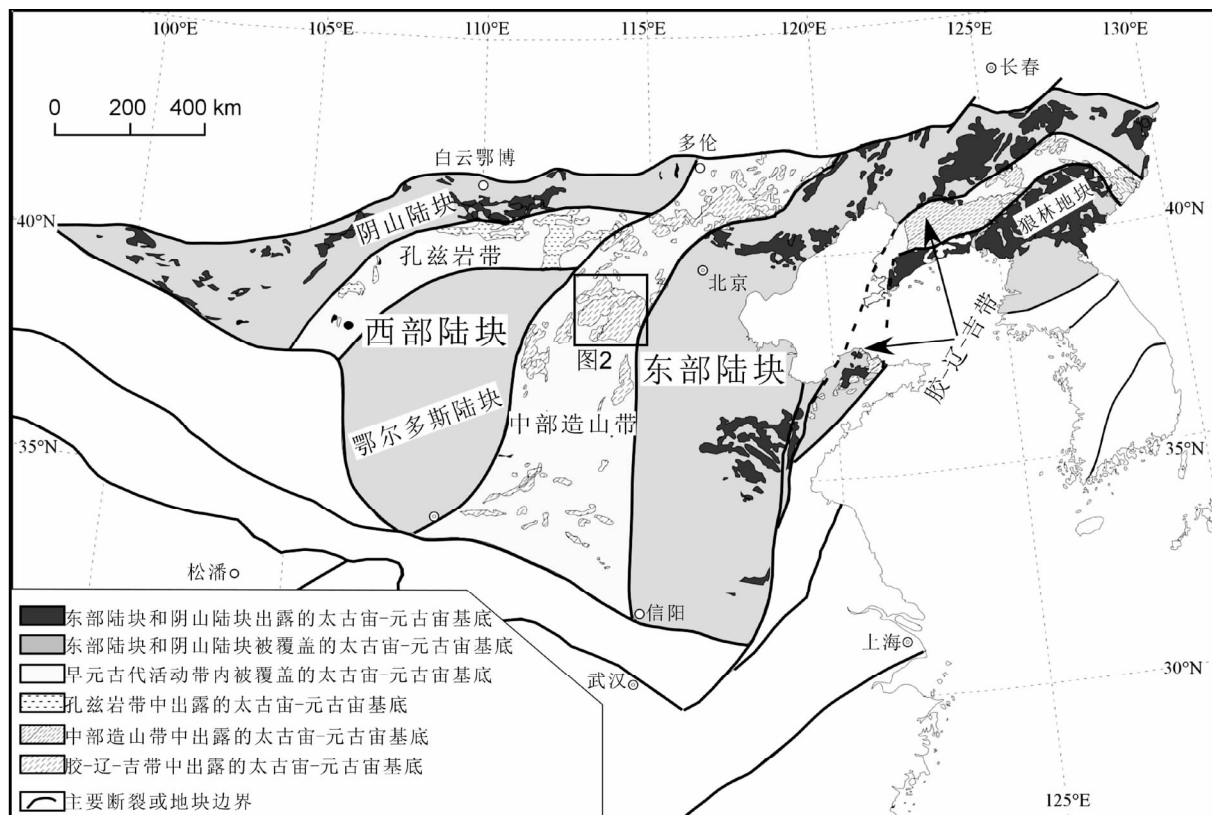


图 1 华北克拉通构造划分图(据 Zhao *et al.*, 2005 修改)

Fig. 1 Tectonic subdivision of the North China Craton (after Zhao *et al.*, 2005)

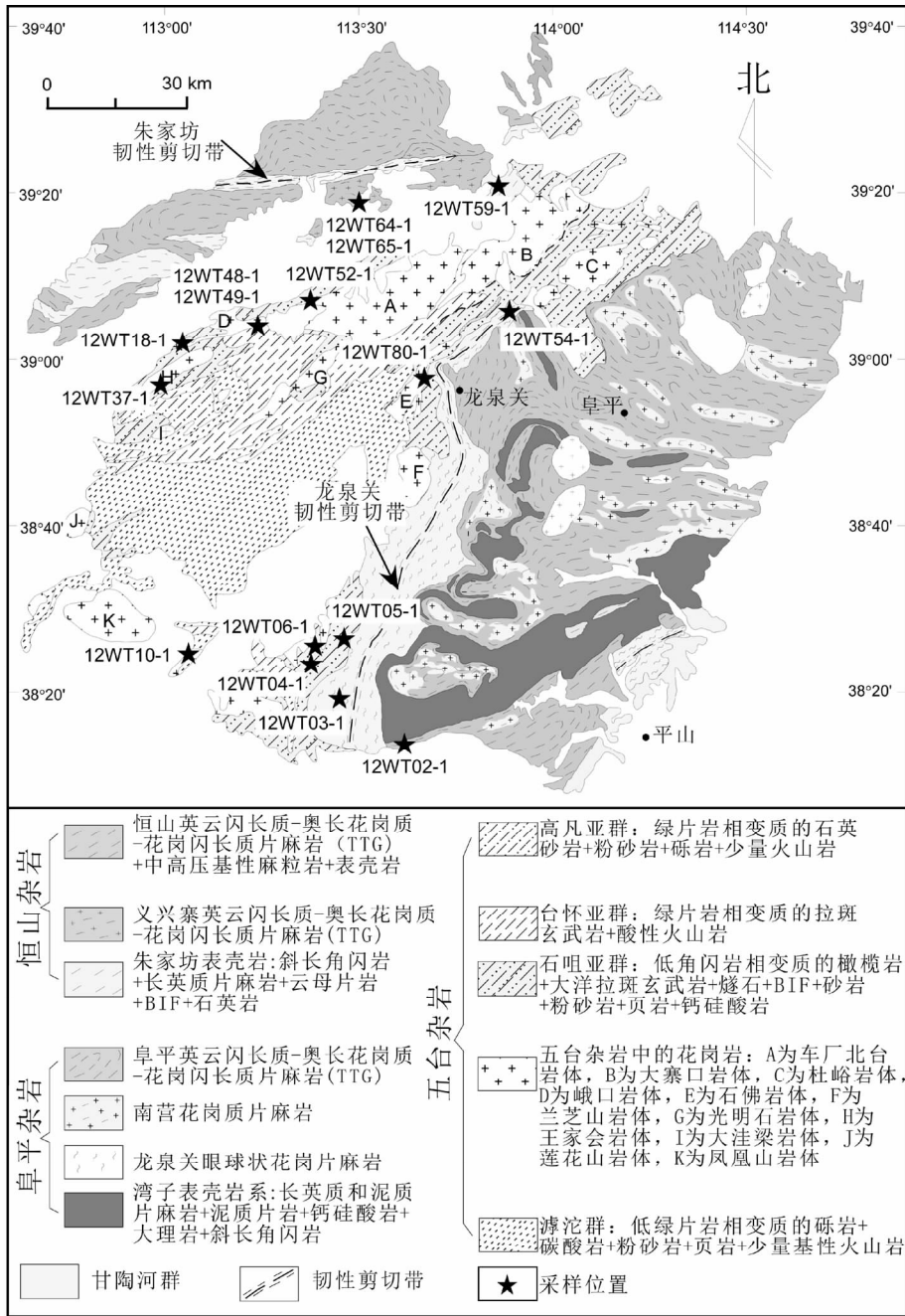


图2 恒山-五台-阜平地区地质简图 (据 Zhao *et al.* , 2007 修改)

Fig.2 Geological map of the Hengshan-Wutai-Fuping belt (after Zhao *et al.* , 2007)

恒山-五台-阜平地区是中部造山带中部最具代表性的基底岩石剖面,因此被认为是解析华北克拉通不同构造模式最理想的地区。特别值得我们注意的是,在这一地区两个高级变质片麻岩地体(阜平杂岩和恒山杂岩)分别位于东南和西北,而它们中间则被一个低级花岗绿岩带(五台杂岩)所分隔(图2)。田永清(1991)认为恒山杂岩和阜平杂岩曾是一个陆块,它在晚太古代经历了裂谷作用从而形成了五台绿岩带,而该裂谷在元古代闭合。刘树文等(2002)则认为阜平杂岩和恒山杂岩在华北克拉通演化早期为同一构造单元,相

当于东部陆块的西部活动陆缘,经历了东西陆块的碰撞作用。然而,另一种模式则认为恒山-五台-阜平地区是一个晚太古代陆-弧-陆碰撞带,恒山杂岩和阜平杂岩分别代表了两个不同的太古宙陆块,五台花岗-绿岩带则是其中的岛弧(白瑾, 1986; 李继亮等, 1990; Wang *et al.* , 1996; Polat *et al.* , 2005)。近年来,根据恒山、五台和阜平杂岩中大量发表的同位素年代学数据整体上的相似性,Zhao *et al.* (2007)提出这三个杂岩代表了一个晚太代末到元古代长期发展的岩浆弧体系,其中五台杂岩可能代表了上地壳岩石组合而恒山杂

岩和阜平杂岩则为下地壳山根带。

恒山-五台-阜平地区最主要的岩石组合为 25.6 亿年到 24.8 亿年与俯冲作用相关的花岗质岩石 (Liu *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2004; Kröner *et al.*, 2005a, b)。在这些花岗质岩石中普遍发育着斜长角闪岩包体,而这些包体是我们研究这一地区更早期构造演化的重要依据。近年来,前人对于阜平地区 TTG 片麻岩中的斜长角闪片麻岩包体进行了年代学和地球化学研究 (Guan, 2000; Guan *et al.*, 2002),认为它们的形成时代为 2.7Ga。然而,对于五台地区花岗类岩石中的斜长角闪岩包体的研究几乎还是空白,我们仍然不能很好地回答以下问题:(1)这些斜长角闪岩包体的原岩是什么;(2)它们是什么时代形成的;(3)它们的源区性质如何。本文试图通过新获得的五台地区花岗质岩石中斜长角闪岩包体的锆石 U-Pb 年龄、全岩地球化学和 Nd 同位素数据对以上问题进行一些初步的探讨。

2 地质背景

恒山-五台-阜平地区位于中部造山带中部,呈北东-南西向展布(图 1)。位于西北部的恒山杂岩与五台杂岩之间由桑干河和滹沱河冲积所形成的宽阔河谷所分隔(图 2)。位于东南部的阜平杂岩与五台杂岩之间则为构造接触关系,它们被龙泉关韧性剪切带所分隔(图 2; 李江海和钱祥麟, 1991; Zhang *et al.*, 2009)。恒山杂岩和阜平杂岩的主体岩石组合相似,都为晚太古代末到早元古代的灰色英云闪长质-奥长花岗质-花岗闪长质(TTG)片麻岩、基性麻粒岩以及表壳岩(火山岩和沉积岩),变质程度达到了角闪岩相到麻粒岩相(Tian *et al.*, 1996; Zhao *et al.*, 2001; Kröner *et al.*, 2005a, b; O' Brien *et al.*, 2005)。五台杂岩主要由晚太古代末到早元古代的花岗岩类岩石以及变质表壳岩组成,后者传统上被划分为五台群和滹沱群(白瑾, 1986; 李继亮等, 1990; 苗培森等, 1999)。花岗岩类侵入体大体上可划分为 2560 ~ 2520Ma 侵位的强烈变形的闪长岩-英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩系列(包括车厂-北台、大寨口、峨口、石佛、兰芝山、光明寺岩体以及王家会岩体的灰色相; Wilde *et al.*, 2004a; Wilde and Zhao, 2005), 2176 ~ 2084Ma 侵位的弱片麻状-块状的正长-钾质花岗岩(大洼梁岩体以及王家会岩体的粉色相; Wilde and Zhao, 2005; 黄金山花岗斑岩, Du *et al.*, 2013)以及 1810Ma 侵位的未变形的 A 型花岗岩(凤凰山和莲花山岩体; 白瑾, 1986)。

早期研究根据岩石组合以及变质程度的不同将五台群划分为三个亚群。最下部的石咀亚群由橄榄岩、大洋拉斑玄武岩、英安岩、条带状铁建造(BIF)、斜长角闪岩、砂岩以及少量石灰岩组成,变质程度达到了角闪岩相。其中的橄榄岩、大洋拉斑玄武岩以及硅质岩的组合被认为代表了残余的洋壳,而其它的沉积岩则代表了大陆或者弧后盆地的沉积物(李继亮等, 1990; 吴昌华和钟长汀, 1998)。中部的台怀亚群

主体岩石组合为绿片岩相变质的酸性火山岩和拉斑玄武岩,地球化学特征类似于现代的弧相关火山岩组合(白瑾, 1986)。上部的高凡亚群则包含了绿片岩相变质的石英岩、变质粉砂岩、变质砂岩以及千枚岩(白瑾, 1986; 田永清, 1991),它们被认为可能是浊积岩组合(白瑾, 1986)。前人曾经认为五台群被晚太古代五台花岗岩所切穿,但是 SHRIMP 锆石年代学研究表明五台群不同层位的中酸性火山岩都形成于 2530 ~ 2515Ma,与 2560 ~ 2515Ma 侵位的晚太古代五台花岗岩几乎同时或稍晚(Wilde and Zhao, 2005)。这些年代学数据还说明前人所认为的具有上下层位关系的石咀、台怀和高凡亚群为几乎同时形成的火山-沉积岩组合,很可能是后期构造活动把它们肢解后又沿着北东-南西向韧性剪切带并置在一起的(Wilde *et al.*, 2004a; Wilde and Zhao, 2005; Kröner *et al.*, 2005a)。然而, Wan *et al.* (2010)在高凡亚群中获得了 2.47Ga 的最年轻碎屑锆石年龄,因此认为高凡亚群应形成于古元古代,应从五台群中解体出来。

滹沱群不整合覆盖在五台花岗岩、五台群以及阜平杂岩之上(图 2),被认为是恒山-五台-阜平地区长城系之前最年轻的岩石地层单元。滹沱群位于五台杂岩的南部,几乎占据了整个杂岩出露面积的四分之一,自下而上被划分为豆村亚群、下东冶亚群、上东冶亚群和郭家寨亚群(山西省地质矿产局, 1989)。豆村亚群包括四集庄组、南台组和大石岭组,岩石类型主要为砾岩、石英岩、板岩、千枚岩以及火山碎屑岩,变质程度为绿片岩相。这些陆源沉积物在垂向上呈现了从粗粒硅质碎屑岩到细粒硅质碎屑岩的变化,被认为沉积于与地堑相关的构造背景中(苗培森等, 1999)。之上的下东冶亚群包括了青石村组、文山组和河边村组,主体岩石为浊积岩以及变质火山岩和白云岩夹层。前人对于豆村亚群和下东冶亚群中变质火山岩的地球化学研究认为它们喷发于裂谷相关的环境中(杜利林等, 2009)。上东冶亚群包括了建安村组、北大兴组和天蓬隘组,主体岩石组合为厚层白云岩以及硅质碎屑岩夹层。最上部的郭家寨亚群主要由磨拉石类沉积岩组成,从下部西河里组的千枚岩到黑山背组的粗粒长石英岩再到上部雕王山组的砾岩(白瑾, 1986)。这些陆相磨拉石类沉积物整体上呈楔状,向上变粗的岩石序列,在北北西处最厚可达 900m,向南南东向迅速尖灭(苗培森等, 1999)。近年来,对于滹沱群的年代学研究取得了很大进展。Wilde *et al.* (2004b)从滹沱群下部的酸性凝灰岩中获得了 2180Ma 和 2087Ma 两组年龄。Du *et al.* (2010)从四集庄组底砾岩中的火山岩夹层中获得了 2140Ma 的锆石结晶年龄。类似的, Liu *et al.* (2011)和杜利林等(2011)分别在豆村亚群中得到了 2106Ma 和 2134Ma 的最年轻的碎屑锆石年龄。此外, Liu *et al.* (2011)还在上东冶亚群中获得了 1877Ma 的最年轻的碎屑锆石年龄。综合以上数据,前人认为豆村亚群初始形成时代为 21 ~ 22 亿年左右,而郭家寨亚群开始沉积的时代则在 19 ~ 18 亿年左右(杜利林等, 2011; Liu *et al.*, 2011)。滹沱群碎屑岩的物源则以 25 亿年左右的五台花岗

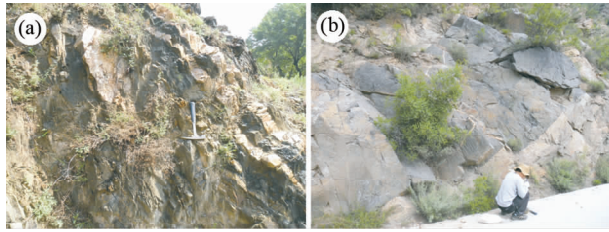


图3 斜长角闪岩包体的野外照片

(a)为样品 12WT10-1; (b)为样品 12WT54-1

Fig. 3 Field photographs of the amphibolite enclaves

(a)-sample 12WT10-1; (b)-sample 12WT54-1

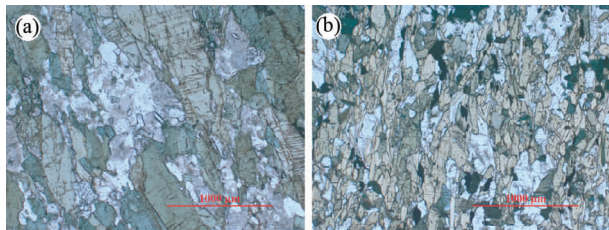


图4 斜长角闪岩包体的镜下照片

(a)为样品 12WT04-1; (b)为样品 12WT49-1

Fig. 4 Microscope photographs of the amphibolite enclaves

(a)-sample 12WT04-1; (b)-sample 12WT49-1

岩以及恒山和阜平 TTG 片麻岩为主,以 21 亿年左右的早元古代花岗岩为辅(Wan *et al.*, 2010; 杜利林等, 2011; Liu *et al.*, 2011; Du *et al.*, 2012)。

五台地区晚太古代花岗质岩石中的斜长角闪岩包体主要分布在强烈变形的闪长岩-英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗岩中,岩石类型以斜长角闪岩为主,与围岩接触处观察不到明显的“烘烤边”结构,露头上不连续分布,呈绿色到黑色,强烈拉伸成扁条状或透镜状,大小一般在几米到十几米之间,与围岩变形协调(图 3)。镜下显示为细粒、粒状变晶结构,块状到弱片麻状构造。主要矿物组合为角闪石 40% ~ 60%,斜长石 40% ~ 60%,含或不含石英,副矿物有金红石、磁铁矿、锆石、磷灰石、榍石和褐帘石等,斜长石常出现绢云母化(图 4)。

3 样品采集及分析方法

本次研究共选取了 3 个斜长角闪岩样品(12WT10-1, 12WT18-1 和 12WT54-1)进行了锆石 U-Pb 定年。锆石的分选是经过标准的重液及电磁方法后从重矿物中手工挑选出来。随后锆石被固定在透明胶带上,再通过灌入环氧树脂的方法使锆石颗粒固定并抛光到二分之一,最后在透射光和反射光下进行显微照相,从而获得关于锆石表面和内部结构的初步信息。锆石的阴极发光显微照相(CL)是通过 JSM65100 型扫描电子显微镜以及配套的 Gatan 阴极发光系统完成的。

锆石的 U-Pb 同位素测定是在中国地质科学院矿产资源研究所通过 Thermo Finnian Neptune MC-ICP-MS 以及配套的 Newwave UP 213nm 激光剥蚀系统完成的。实验中采用的束斑直径为 32 μm ,频率为 10Hz,采用国际标准锆石 GJ-1 作为外标,使用 ICPMSDataCal 8.4 (Liu *et al.*, 2010) 进行校正。仪器运行的具体环境和分析过程见侯可军等(2009)。年龄计算及谐和图的绘制使用 ISOPLLOT (version 3.0; Ludwig, 2003) 软件完成。

本次研究我们共采集了 16 个斜长角闪岩包体样品进行全岩主、微量元素测试。在去除受到后期风化以及热液蚀变影响的部分后,样品新鲜的部分被粉碎到 200 目后溶解。常量元素分析采用了国家地质实验测试中心扫描型波长色散 X 射线荧光光谱仪(XRF, Rigaku-2100)。微量元素(包括稀土元素)的测试也是在国家地质实验测试中心完成的,采用的方法为电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, TJA-PQ-Excel)。全岩地球化学数据的处理使用了 Excel 插件“GeoPlot”(Zhou and Li, 2006)。全岩 Nd 同位素测定是在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素实验室的 Triton Plus 型质谱仪上完成的,详细的实验流程和分析方法见 Li *et al.* (2011, 2012)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

斜长角闪岩包体 12WT10-1 的锆石多为短柱状,长宽比在 1 ~ 2 之间,粒度多在 40 ~ 80 μm ,个别可达 110 ~ 130 μm 。CL 图像显示大部分锆石内部发育环带结构,显示岩浆成因特征(图 5),部分锆石则显示它们经历了强烈的后期重结晶

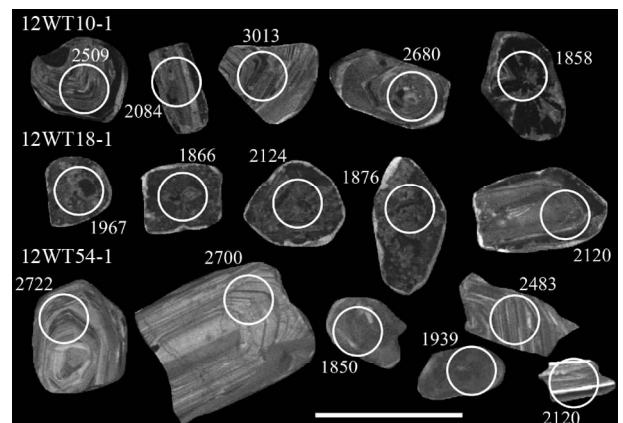


图5 斜长角闪岩包体中锆石的 CL 图像

圆圈代表了 U-Pb 测试的位置, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄也在相应位置标出。图中标尺为 100 μm

Fig. 5 CL images of zircons from the amphibolite enclaves
Circles show position of U-Pb analytical sites, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages are also plotted, the scale bar is 100 μm long

表1 斜长角闪岩包体的锆石 U-Pb 同位素数据

Table 1 U-Pb isotopic compositions of zircons from the amphibolite enclaves

测点号	同位素比值						年龄(Ma)					谐和度 (%)		
	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ
12WT10-1:斜长角闪岩														
4	4.20	0.18690	0.00159	8.68846	0.59197	0.33884	0.02456	2717	14	2306	62	1881	118	69
5	2.27	0.18276	0.00131	8.42209	0.09103	0.33576	0.00517	2680	12	2278	10	1866	25	70
8	2.58	0.18214	0.00080	9.28715	0.05702	0.37012	0.00256	2673	7	2367	6	2030	12	76
10	5.42	0.18378	0.00338	10.30555	0.34789	0.41450	0.01806	2687	31	2463	31	2235	82	83
11	3.15	0.22443	0.00079	12.65046	0.12399	0.40878	0.00369	3013	6	2654	9	2209	17	73
12	2.06	0.16500	0.00215	6.18169	0.08436	0.27177	0.00238	2509	21	2002	12	1550	12	62
14	2.97	0.13081	0.00149	5.27374	0.03858	0.29423	0.00407	2109	20	1865	6	1663	20	79
15	6.01	0.12896	0.00042	4.94195	0.04072	0.27791	0.00209	2084	10	1809	7	1581	11	76
18	4.43	0.11359	0.00109	4.31874	0.04813	0.27577	0.00212	1858	18	1697	9	1570	11	85
19	0.99	0.18353	0.00104	4.92304	0.07724	0.19492	0.00373	2685	10	1806	13	1148	20	43
24	9.19	0.11373	0.00069	3.80233	0.05082	0.24245	0.00267	1861	11	1593	11	1399	14	75
27	3.49	0.19107	0.00270	11.64661	0.08692	0.44220	0.00946	2752	24	2576	7	2361	42	86
28	2.40	0.18346	0.00171	6.93577	0.06939	0.27446	0.00322	2684	15	2103	9	1563	16	58
31	4.84	0.11230	0.00051	2.97486	0.01842	0.19212	0.00139	1837	13	1401	5	1133	8	62
12WT18-1:斜长角闪岩														
5	4.57	0.11357	0.00116	3.02590	0.05508	0.19331	0.00191	1857	19	1414	14	1139	10	61
8	2.28	0.12608	0.00058	4.97801	0.03980	0.28681	0.00225	2044	9	1816	7	1626	11	80
9	3.97	0.11487	0.00097	3.44599	0.03877	0.21771	0.00111	1880	16	1515	9	1270	6	68
11	3.58	0.11320	0.00055	3.93129	0.03117	0.25216	0.00273	1852	9	1620	6	1450	14	78
12	3.43	0.12456	0.00059	6.35700	0.03702	0.37035	0.00173	2033	9	2026	5	2031	8	100
13	4.54	0.11368	0.00088	3.30758	0.03184	0.21112	0.00116	1859	9	1483	8	1235	6	66
14	2.55	0.13168	0.00052	5.93941	0.03202	0.32731	0.00142	2121	7	1967	5	1825	7	86
15	1.74	0.13156	0.00055	6.23883	0.09496	0.34398	0.00458	2120	3	2010	13	1906	22	90
17	3.24	0.11997	0.00061	5.40085	0.04392	0.32663	0.00163	1967	9	1885	7	1822	8	93
19	2.95	0.11373	0.00057	3.91331	0.02294	0.24977	0.00121	1861	9	1616	5	1437	6	77
20	3.44	0.11378	0.00073	3.68433	0.01847	0.23530	0.00145	1861	11	1568	4	1362	8	73
22	1.84	0.11476	0.00129	5.26296	0.07728	0.33282	0.00637	1876	20	1863	13	1852	31	99
23	3.19	0.13196	0.00208	5.22692	0.02549	0.28954	0.00492	2124	27	1857	4	1639	25	77
24	3.86	0.11471	0.00062	4.27568	0.03727	0.27048	0.00210	1876	10	1689	7	1543	11	82
26	5.20	0.11223	0.00053	3.54834	0.02014	0.22939	0.00090	1836	8	1538	4	1331	5	73
27	4.02	0.11410	0.00070	4.33518	0.02739	0.27567	0.00113	1866	11	1700	5	1569	6	84
28	4.09	0.13147	0.00090	7.02901	0.04481	0.38838	0.00283	2118	13	2115	6	2115	13	100
35	6.03	0.11234	0.00065	3.00993	0.02755	0.19550	0.00236	1839	10	1410	7	1151	13	63
36	2.89	0.12627	0.00039	6.49762	0.05249	0.37348	0.00321	2047	6	2046	7	2046	15	100
38	3.55	0.13123	0.00093	4.75557	0.04483	0.26296	0.00250	2115	13	1777	8	1505	13	71
39	3.07	0.11301	0.00074	3.21161	0.02888	0.20702	0.00275	1850	12	1460	7	1213	15	66
12WT54-1:斜长角闪岩														
1	0.16	0.11305	0.00056	5.17284	0.06765	0.33182	0.00408	1850	9	1848	11	1847	20	100
2	0.17	0.11406	0.00055	5.29431	0.04452	0.33693	0.00316	1865	8	1868	7	1872	15	100
3	2.30	0.13163	0.00058	7.07294	0.05117	0.38950	0.00210	2120	3	2121	6	2120	10	100
4	0.57	0.11363	0.00046	4.48286	0.03472	0.28698	0.00254	1858	7	1728	6	1626	13	88
5	0.12	0.11482	0.00040	5.35201	0.05127	0.33804	0.00307	1877	6	1877	8	1877	15	100
6	0.47	0.11164	0.00046	3.89428	0.04578	0.25298	0.00286	1828	7	1612	9	1454	15	80
7	0.16	0.11264	0.00062	5.13135	0.08325	0.33039	0.00508	1842	11	1841	14	1840	25	100
8	0.02	0.11194	0.00065	5.07638	0.05915	0.32912	0.00416	1831	11	1832	10	1834	20	100
9	0.11	0.11280	0.00055	5.18792	0.03232	0.33360	0.00139	1856	9	1851	5	1856	7	100
10	3.09	0.13353	0.00050	6.37496	0.04974	0.34628	0.00269	2146	6	2029	7	1917	13	89
11	0.19	0.11517	0.00056	5.26487	0.04737	0.33156	0.00247	1883	9	1863	8	1846	12	98
12	0.06	0.11402	0.00176	4.65646	0.06510	0.29697	0.00290	1865	28	1759	12	1676	14	90

续表 1

Continued Table 1

测点号	同位素比值						年龄 (Ma)						谐和度 (%)	
	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		1 σ
13	0.11	0.11265	0.00031	4.76865	0.03258	0.30673	0.00156	1842	4	1779	6	1725	8	94
14	0.03	0.11306	0.00064	4.26976	0.02665	0.27460	0.00260	1850	11	1688	5	1564	13	85
15	1.45	0.16238	0.00053	9.18913	0.04921	0.41055	0.00204	2481	6	2357	5	2217	9	89
16	2.75	0.11500	0.00057	3.59980	0.05803	0.22714	0.00384	1880	8	1549	13	1319	20	70
17	0.19	0.11196	0.00035	5.07379	0.04271	0.32869	0.00250	1832	7	1832	7	1832	12	100
18	0.10	0.11332	0.00036	4.84423	0.03507	0.31002	0.00171	1854	6	1793	6	1741	8	94
19	1.57	0.16264	0.00056	10.42629	0.16692	0.46507	0.00791	2483	11	2473	15	2462	35	99
20	0.13	0.11468	0.00048	5.74244	0.03817	0.36322	0.00195	1876	-25	1938	6	1997	9	106
21	0.09	0.11286	0.00024	5.17938	0.02772	0.33286	0.00169	1856	4	1849	5	1852	8	100
22	0.07	0.11409	0.00041	4.90833	0.02556	0.31203	0.00134	1866	6	1804	4	1751	7	94
23	1.02	0.18406	0.00035	13.20971	0.07211	0.52038	0.00255	2700	4	2695	5	2701	11	100
24	1.43	0.16228	0.00085	6.86599	0.03090	0.30711	0.00128	2479	8	2094	4	1726	6	70
25	0.02	0.11346	0.00044	3.49740	0.01873	0.22366	0.00122	1855	6	1527	4	1301	6	70
26	0.06	0.11312	0.00031	5.18232	0.04909	0.33227	0.00308	1850	0	1850	8	1849	15	100
27	0.06	0.11386	0.00038	5.25190	0.02859	0.33477	0.00182	1862	38	1861	5	1861	9	100
28	0.12	0.11459	0.00040	5.28520	0.02664	0.33446	0.00104	1874	-27	1866	4	1860	5	99
29	1.35	0.16014	0.00075	10.29529	0.33818	0.46621	0.01506	2457	8	2462	30	2467	66	100
30	0.06	0.11346	0.00127	4.89171	0.06339	0.31284	0.00266	1857	20	1801	11	1755	13	94
31	0.08	0.11339	0.00038	5.11664	0.02578	0.32723	0.00123	1855	6	1839	4	1825	6	98
32	0.99	0.18445	0.00039	9.12299	0.04325	0.35880	0.00178	2694	4	2350	4	1976	8	73
33	0.13	0.11428	0.00032	5.28707	0.04489	0.33615	0.00321	1869	4	1867	7	1868	15	100
34	0.11	0.11880	0.00059	5.16240	0.03494	0.31521	0.00218	1939	9	1846	6	1766	11	91
35	0.07	0.11321	0.00039	4.31112	0.06077	0.27639	0.00413	1852	1	1695	12	1573	21	85
36	1.20	0.18768	0.00059	10.09138	0.07303	0.38995	0.00282	2722	5	2443	7	2123	13	78
37	0.16	0.11333	0.00039	4.77732	0.03601	0.30559	0.00170	1853	7	1781	6	1719	8	93
38	1.68	0.16927	0.00053	10.27907	0.16191	0.44029	0.00634	2550	10	2460	15	2352	28	92
39	0.07	0.11282	0.00040	4.52146	0.03480	0.29062	0.00189	1856	6	1735	6	1645	9	89
40	0.43	0.11231	0.00093	4.72891	0.05884	0.30537	0.00293	1839	16	1772	10	1718	14	93

注: 谐和度 = $100 \times (\frac{^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}}{^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}})_{\text{age}} / (\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}})_{\text{age}}$

作用(图5)。本次测试共选取了14颗锆石进行了LA-ICP-MS分析,由于锆石普遍较小,因此每颗锆石仅选取了具有代表性且满足激光束斑大小要求的一个点进行了分析。岩浆锆石共11个数据点,均显示了不同程度的铅丢失(图6a),其中7个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄较为集中,它们组成的不一致线的上交点年龄为 $2709 \pm 68\text{Ma}$,其它4个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄则分散在3013Ma、2509Ma、2109Ma和2084Ma(表1)。此外还有3个点的数据采集自经历了强烈重结晶作用的锆石,它们也具有不同程度的铅丢失,这3个点构成的不一致线与谐和线的上交点年龄为 $1870 \pm 28\text{Ma}$,可能代表了斜长角闪岩经历后期高级变质作用的时间。

斜长角闪岩包体12WT18-1的锆石多为短柱状到浑圆状,长宽比在1~2之间,粒度多在50~90 μm 。锆石内部结构较为复杂,在一些颗粒较大的锆石中还可见到保留的振荡环带(图5),较小的锆石则显示受到后期重结晶作用的完全改造(图5),此外绝大部分的锆石具有较亮的变质边,但是

由于宽度都小于10 μm ,因此无法进行测试。对该样品的21颗锆石进行了21个点的分析。从谐和图中可以看出,除一个点具有较老年龄(1967Ma)以外,其它被完全改造锆石的分析点构成了一条不一致线,其中1个点落在谐和线上,上交点年龄为 $1876 \pm 16\text{Ma}$,应代表后期变质作用的时间(表1)。8个改造不完全还部分保留振荡环带的锆石的分析点也构成了一条不一致线,其中有3个点落在谐和线上,上交点年龄为 $2080 \pm 52\text{Ma}$ (图6b)。

斜长角闪岩包体12WT54-1中的锆石多为浑圆状到短柱状,长宽比1~2,粒度在40~60 μm ,个别锆石可以达到100 μm 。CL图像表明大部分锆石(边)具有扇区结构,为典型变质锆石(边),而少部分锆石还保留了环带结构(图5)。与样品12WT18-1类似,除一个较老的分析点(1939Ma)以外,本样品中其它的29个变质锆石(边)的分析点构成了一条不一致线,上交点的年龄为 $1857 \pm 6\text{Ma}$,应代表了后期变质作用的时间(表1)。10个位于保留了振荡环带的锆石之

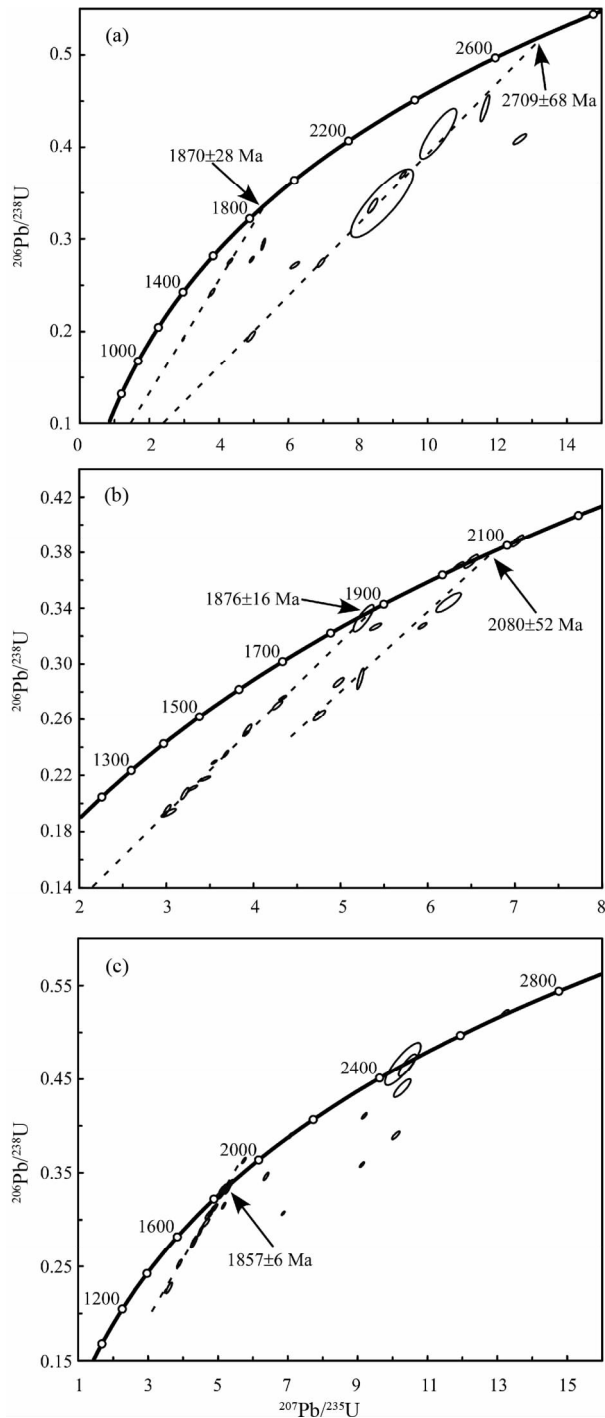


图6 斜长角闪岩包体的锆石 U-Pb 年龄谐和图 (a) 为样品 12WT10-1; (b) 为样品 12WT18-1; (c) 为样品 12WT54-1

Fig. 6 Concordia plots of zircon U-Pb ages of the amphibolite enclaves

(a)-sample 12WT10-1; (b)-sample 12WT18-1; (c)-sample 12WT54-1

上的点又可分为三组, 它们的年龄分别为 ~2.7Ga、~2.5Ga 和 ~2.1Ga(图 6c)。

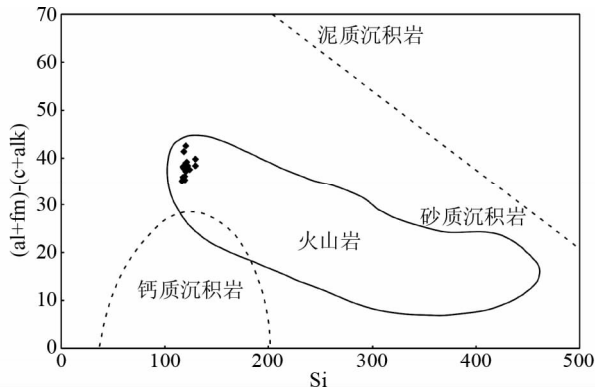


图7 斜长角闪岩包体的 (al + fm)-(c + alk) 对 Si 图解 (据 Simonen, 1953)

Fig. 7 Diagram of (al + fm)-(c + alk) vs. Si for amphibolite enclaves (after Simonen, 1953)

4.2 主量元素特征

主微量元素数据详见表 2。五台地区斜长角闪岩包体 SiO₂ 含量比较均一, 为 48.43% ~ 50.77%, 较富 Fe₂O₃^T (12.8% ~ 16.85%)、Al₂O₃ (12.64% ~ 13.83%) 和 Mg[#] (4.92% ~ 7.26%), 低 TiO₂ (0.79% ~ 1.86%) 和 Mg[#] (23 ~ 36)。在 si 对 (al + fm)-(c + alk) 原岩恢复图解中, 斜长角闪岩样品均落入了火成岩区域(图 7), 说明它们属于正变质岩 (Simonen, 1953)。

更进一步地, 斜长角闪岩包体的主量元素特征显示它们属于亚碱性玄武岩系列, 具有拉斑玄武岩特征(表 2)。考虑到可能的后期元素迁移, 我们再利用高场强元素图解如 Zr 对 Y 进行了投图, 本次研究的样品依然显示了拉斑玄武岩特征(图 8)。类似的, 在 Nb/Y 对 Zr/TiO₂ × 0.0001 图解中, 所有的斜长角闪岩也都落入了玄武岩以及亚碱性玄武岩区域(图 8)。综上所述, 我们认为五台地区晚古代花岗类岩石中的斜长角闪岩包体为正变质岩, 原岩很可能为拉斑玄武岩。

4.3 微量元素特征

斜长角闪岩样品的稀土元素显示较宽的总稀土变化范围(40.43 × 10⁻⁶ ~ 118.0 × 10⁻⁶), Mg[#] 与总稀土含量呈现负相关关系。在球粒陨石标准化的稀土图谱上, 这些斜长角闪岩样品表现了一致的稀土配分模式(图 9a): 轻重稀土弱分异 [(La/Yb)_N = 1.36 ~ 3.52], Eu 异常不明显 (Eu[#] = 0.85 ~ 1.01), 重稀土平坦 [(Gd/Yb)_N = 0.94 ~ 1.38]。在原始地幔均一化蛛网图中, 所有的斜长角闪岩样品都表现了右倾型配分模式, 具有明显的大离子亲石元素 (LILE) 富集以及 Nb、Ta、P 和 Ti 的亏损(图 9b)。

4.4 Nd 同位素特征

本次研究样品的 Nd 同位素分析结果见表 3。4 件斜长

表2 斜长角闪岩包体的主量(wt%)、微量元素和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 2 Major (wt%), trace and rare earth element ($\times 10^{-6}$) compositions of the amphibolite enclaves

样品号 (12WT)	02-1	03-1	04-1	05-1	06-1	10-1	18-1	37-1	48-1	49-1	52-1	54-1	59-1	64-1	65-1	80-1
SiO ₂	48.66	49.75	49.29	49.06	50.24	48.43	49.06	50.77	50.05	49.55	49.62	49.83	50.08	49.80	50.23	50.12
Al ₂ O ₃	13.56	12.83	12.73	12.65	13.40	12.64	13.07	12.89	12.96	13.22	13.35	13.83	13.52	13.63	13.58	13.32
CaO	9.39	8.23	8.89	9.40	9.32	9.25	8.34	7.88	9.54	10.15	10.04	10.68	9.70	10.92	10.09	9.77
Fe ₂ O ₃ ^T	16.31	15.30	16.81	16.80	14.98	16.85	16.46	14.29	15.34	14.49	13.95	14.03	12.80	13.37	12.93	13.73
K ₂ O	0.79	1.13	0.89	0.67	1.10	0.41	1.02	2.30	0.92	0.67	0.72	0.36	1.24	0.37	1.52	0.64
MgO	4.92	4.94	5.31	5.43	5.75	5.77	5.93	5.97	6.05	6.55	7.01	7.05	7.06	7.14	7.23	7.26
MnO	0.24	0.25	0.22	0.22	0.25	0.24	0.21	0.22	0.22	0.21	0.22	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Na ₂ O	2.28	2.43	2.34	2.06	2.08	1.92	2.20	2.02	1.89	2.26	1.82	1.56	2.46	2.00	1.77	2.38
P ₂ O ₅	0.24	0.20	0.25	0.22	0.13	0.18	0.19	0.23	0.13	0.10	0.09	0.10	0.08	0.09	0.08	0.10
TiO ₂	1.80	1.48	1.84	1.86	1.22	1.84	1.64	1.63	1.20	0.95	0.91	0.91	0.81	0.81	0.79	0.84
LOI	0.79	3.77	0.43	2.29	0.83	1.38	1.35	1.46	1.06	0.72	1.65	0.85	1.40	0.78	0.85	1.55
Total	98.98	100.31	99.00	100.66	99.30	98.91	99.47	99.66	99.36	98.87	99.38	99.40	99.35	99.11	99.27	99.91
Mg [#]	23	24	24	24	28	25	26	29	28	31	33	33	35	35	36	34
FeO ^T	14.68	13.77	15.13	15.12	13.48	15.17	14.81	12.86	13.81	13.04	12.56	12.63	11.52	12.03	11.64	12.36
Sc	49.4	40.2	52.3	52.1	52.6	54.4	57.1	51.1	52.8	53.5	53.2	48.1	51.7	53.4	53.8	49.8
Cr	84.5	50.0	88.3	72.3	94.0	99.7	105.0	76.4	73.8	88.2	135.0	126.0	154.0	126.0	157.0	162.0
Co	47.3	48.1	51.4	51.5	50.7	56.3	58.4	53.7	46.6	56.6	60.1	53.0	56.7	58.7	51.2	52.4
Ni	37.4	39.7	38.5	35.6	40.4	57.3	49.6	38.4	34.4	47.3	64.7	64.4	57.6	59.8	70.9	67.4
Rb	13.1	34.4	31.1	16.1	47.0	4.8	59.5	86.1	37.5	22.2	44.5	5.6	83.1	9.0	93.1	18.1
Sr	207	162	141	219	136	103	160	167	129	123	156	139	147	156	208	180
Ba	297	295	131	297	154	77	383	526	120	99	150	66	289	122	270	70
Pb	2.39	14.30	1.43	2.01	4.77	6.36	3.30	6.02	2.97	6.60	2.61	1.54	2.48	2.04	13.50	2.00
Th	1.37	4.02	1.44	2.17	1.57	2.52	1.54	1.45	1.44	0.44	0.71	0.42	0.64	0.35	0.80	0.49
U	0.35	1.12	0.41	0.46	0.41	0.55	0.60	0.93	0.36	0.20	0.24	0.18	0.72	0.12	0.24	0.15
Nb	6.64	6.37	6.87	8.63	4.20	6.97	6.06	6.38	4.04	2.57	2.62	2.28	3.11	2.28	2.31	2.17
Hf	4.01	4.28	4.32	3.89	2.70	4.47	3.63	3.84	2.79	1.81	2.02	1.47	1.56	1.47	1.54	1.62
Ta	0.40	0.40	0.42	0.53	0.28	0.44	0.35	0.36	0.26	0.17	0.17	0.31	0.32	0.14	0.15	0.35
Zr	131	132	142	122	84	139	121	126	86	54	64	44	46	44	48	48
V	406	343	377	406	334	421	415	379	325	295	298	262	269	282	272	264
Ti	10788	8870	11028	11148	7312	11028	9829	9769	7192	5694	5454	5454	4855	4855	4735	5034
P	1048	873	1092	961	568	786	830	1004	568	437	393	437	349	393	349	437
La	16.6	18.3	15.5	13.6	10.2	12.7	13.2	17.8	10.4	5.5	6.3	5.2	5.6	4.4	6.2	6.4
Ce	36.9	38.3	37.3	33.9	24.6	30.3	31.3	41.5	24.4	13.3	15.1	11.9	12.0	10.9	14.0	13.8
Pr	5.0	4.7	4.8	4.5	3.1	3.9	3.9	5.1	3.1	1.9	2.0	1.9	1.7	1.5	1.8	2.1
Nd	21.5	20.4	21.8	20.7	13.8	17.7	17.5	22.6	13.8	9.1	9.5	8.9	8.2	7.7	8.7	9.5
Sm	5.9	5.2	5.6	5.6	3.8	5.1	4.9	5.8	3.8	2.7	2.9	2.7	2.5	2.3	2.5	2.7
Eu	1.9	1.6	1.8	1.7	1.3	1.7	1.5	1.6	1.3	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9
Gd	6.7	5.4	6.0	6.6	4.7	6.6	5.6	5.6	4.5	3.1	3.1	3.0	2.8	2.8	2.9	3.0
Tb	1.3	1.0	1.2	1.3	0.8	1.2	1.0	1.1	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6
Dy	7.2	6.4	7.2	7.6	5.4	7.7	6.3	6.4	5.1	4.3	4.0	3.9	3.7	3.6	3.1	3.8
Ho	1.4	1.3	1.5	1.6	1.1	1.5	1.3	1.3	1.1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8
Er	4.5	3.8	4.5	4.6	3.3	4.8	4.1	4.1	3.3	2.8	2.5	2.5	2.4	2.2	2.1	2.3
Tm	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
Yb	4.0	3.5	4.1	4.5	3.1	4.4	3.6	3.9	2.9	2.6	2.4	2.3	2.3	2.2	1.9	2.2
Lu	0.6	0.5	0.6	0.7	0.4	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
Y	40.7	33.5	42.2	43.4	28.7	44.1	38.5	36.6	28.7	26.8	25.3	20.9	21.0	22.1	19.7	19.4
Ce [#]	0.98	1.00	1.04	1.05	1.06	1.04	1.05	1.05	1.03	1.00	1.04	0.92	0.93	1.03	1.00	0.92
(La/Yb) _N	2.83	3.52	2.58	2.03	2.25	1.96	2.48	3.11	2.46	1.42	1.75	1.52	1.66	1.36	2.25	1.99
(Gd/Yb) _N	1.38	1.24	1.20	1.17	1.23	1.21	1.26	1.16	1.26	0.94	1.04	1.07	1.01	1.05	1.26	1.12
Eu [#]	0.92	0.90	0.92	0.85	0.94	0.89	0.85	0.85	0.94	0.96	0.96	1.01	0.98	1.00	1.01	0.98
ΣREE	114	111	112	107	76	99	95	118	75	48	51	45	44	40	46	49
Th/U	3.91	3.59	3.51	4.72	3.83	4.58	2.57	1.56	4.00	2.20	2.96	2.33	0.89	2.92	3.33	3.27
Zr*	0.68	0.68	0.74	0.63	0.43	0.72	0.63	0.65	0.45	0.28	0.33	0.23	0.24	0.23	0.25	0.25
Hf*	0.76	0.81	0.82	0.73	0.51	0.84	0.68	0.72	0.53	0.34	0.38	0.28	0.29	0.28	0.29	0.31

注: Mg[#] = MgO/40.3/(MgO/40.3 + Fe₂O₃^T/79.845 × 2) × 100; Zr* = Zr/193; Hf* = Hf/5.3

表3 斜长角闪岩包体的Nd同位素分析结果

Table 3 Nd isotopic compositions of the amphibolite enclaves

样品号	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	t_{DM} (Ga)	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$
12WT02-1	5.87	21.50	0.165168	0.511980	8	3.65	-1.89	-0.16
12WT05-1	5.58	20.70	0.163076	0.512090	7	3.18	1.01	-0.17
12WT18-1	4.86	17.50	0.168006	0.511969	7	3.91	-3.10	-0.15
12WT65-1	2.50	8.67	0.174441	0.512420	7	2.83	3.51	-0.11

注: $\lambda = 6.54 \times 10^{-12}$, $t = 2.7\text{Ga}$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1967$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$

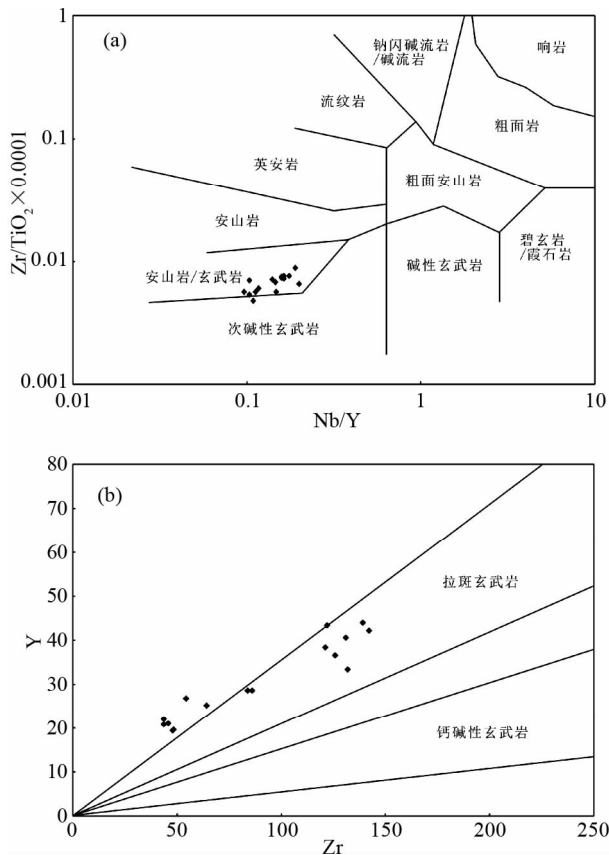


图8 斜长角闪岩包体的高场强元素地球化学分类图 (据 Winchester and Floyd, 1977; Barrett and MacLean, 1994)

Fig. 8 Chemical classification of the amphibolite enclaves based on the HFSEs (after Winchester and Floyd, 1977; Barrett and MacLean, 1994)

角闪岩包体样品 12WT02-1、12WT05-1、12WT18-1 和 12WT65-1 中,前 2 个样品采自五台杂岩和阜平杂岩交界处的龙泉关眼球状花岗岩片麻岩中,第 3 个采自峨口岩体中,最后 1 个样品采自五台杂岩和恒山杂岩交界处的 TTG 片麻岩中。它们的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值分别为 0.511980、0.512090、0.511969 和 0.512420, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值分别为 0.1652、0.1631、0.1680 和 0.1744, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值分别为 -0.16、-0.17、-0.15 和 -0.11。根据锆石定年得到的斜长角闪岩结晶年龄 2.7Ga 计算,得到 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -3.1 ~ +3.5, t_{DM} 为 2.83 ~ 3.91Ga。

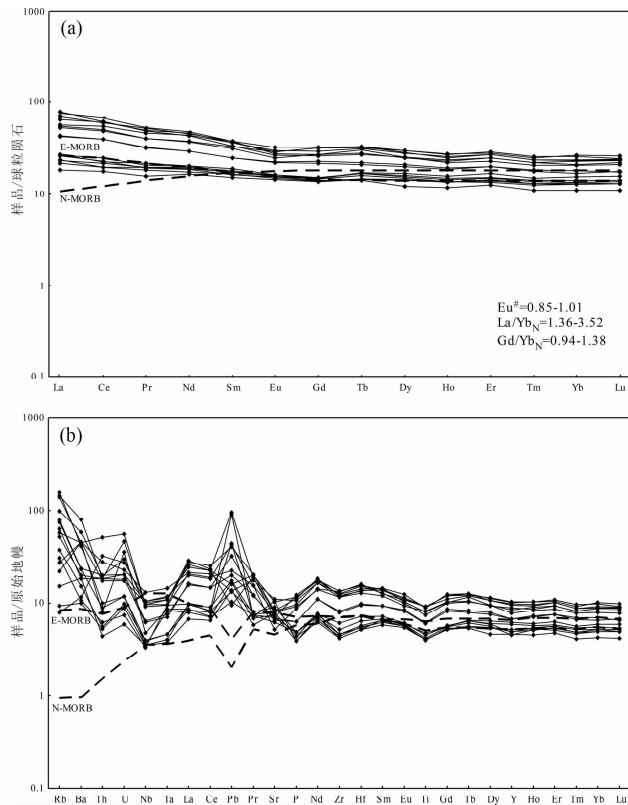


图9 斜长角闪岩包体的球粒陨石均一化稀土元素配分图 (a)和原始地幔均一化微量元素蛛网图(b) (均一化值,N-MORB 值和 E-MORB 值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagrams (b) for the amphibolite enclaves (normalizing values, N-MORB, E-MORB after Sun and McDonough, 1989)

5 讨论

5.1 形成时代

前人对于五台杂岩,以及邻近的恒山和阜平杂岩的 TTG 片麻岩以及花岗类岩石已经做了大量的年代学工作 (Guan *et al.*, 2002; Wilde, 2002; Wilde *et al.*, 2004a; Wilde and Zhao, 2005; Kröner *et al.*, 2005b),然而对于其中普遍发育的斜长角闪岩包体的工作则相对较少。Guan *et al.* (2002)

在阜平杂岩东部黑云片麻岩中的斜长角闪片麻岩包体获得了 2708Ma 和 2520Ma 两组年龄,并将前者解释为斜长角闪片麻岩原岩的结晶时代,而后者代表了锆石受到 2.5Ga 围岩侵位时的再生长。此外,Guan(2000)和 Sun *et al.* (1992)还对阜平地区的斜长角闪岩以及基性麻粒岩包体进行了 Sm-Nd 同位素研究,结果表明最年轻的 t_{DM} 集中在 2.6 ~ 2.7Ga 左右,这也为斜长角闪岩的原岩形成于晚太古代并老于其围岩提供了佐证。此外,前人对于华北克拉通中部造山带南部登封杂岩 TTG 片岩中的斜长角闪岩包体也进行了相关的年代学研究。其中,周艳艳等(2009)利用 Sm-Nd 同位素方法得到了 2.57 ~ 2.72Ga 的 t_{2DM} 值,Zhang *et al.* (2013)则在石牌河片麻岩的两个斜长角闪岩包体中分别得到了 2502Ma 和 2506Ma 的年龄,并将它们解释为原岩的结晶年龄,这与他们同时得到的其围岩的结晶年龄 2504 ~ 2506Ma 基本一致,此外他们还在其中一个斜长角闪岩样品中得到了 2639Ma 的较老锆石年龄。

本次研究我们共对五台地区 TTG 片麻岩中的 3 个斜长角闪岩样品进行了 U-Pb 锆石定年,结合 CL 图像特征我们认为:(1)2.7Ga 的锆石普遍较大且保存了较好的显示岩浆锆石特征的振荡环带结构,地球化学数据显示斜长角闪岩的原岩经历的地壳混染很少,因此我们将 2.7Ga 左右的锆石解释为斜长角闪岩的原岩在结晶时形成的岩浆锆石,而不是捕掳锆石;(2)1.85Ga 的锆石颗粒较小且显示了强烈的后期重结晶特征或者扇区结构,这很可能与五台地区同时期的变质作用有关(Liu *et al.*, 2006),2 个 1.95Ga 的变质锆石年龄则与五台群的变质锆石年龄一致(Qian *et al.*, 2013);(3)部分保留振荡环带结构的锆石记录了 ~ 2.5Ga 和 ~ 2.1Ga 两组年龄,这两组年龄很可能是由于五台地区两期重要的晚太古代到早元古代的岩浆作用导致的锆石再生长或者重结晶作用,~ 2.5Ga 这组年龄也与斜长角闪岩围岩的年龄一致(Guan *et al.*, 2002; Wilde, 2002; Wilde *et al.*, 2004a; Wilde and Zhao, 2005; Kröner *et al.*, 2005b)。

5.2 后期改造及地壳混染

总体来说,五台杂岩晚太古代花岗质岩石中的斜长角闪岩包体随着围岩一起经历了 19.5 ~ 18.5 亿年左右的区域变质作用(Liu *et al.*, 2006; Qian *et al.*, 2013)。因此,我们在利用斜长角闪岩的地球化学数据探讨它们的岩石成因之前必须要剔除后期改造及变质作用的影响(Polat *et al.*, 2005; Manikyamba *et al.*, 2009)。烧失量(LOI)通常被用来评估在后期改造中元素活动性的大小(Polat *et al.*, 2005; Farahat, 2010)。本次研究中除了 2 个样品(12WT03-1 和 12WT05-1)具有较大的烧失量以外(3.77% 和 2.29%),其他样品的烧失量均小于 2%,说明在后期改造中元素的活动是十分有限的。此外,Ce 异常的缺失(0.92 ~ 1.06)以及几乎平行的球粒陨石均一化稀土配分图解以及原始地幔均一化的蛛网图解也说明了后期改造对于岩石成分的影响是很小的,特别是

对于稀土元素以及高场强元素来说(图 9)。然而,如果利用在后期改造中最不活动的元素 Zr 相对于 Na_2O 、 K_2O 、Rb、Sr 以及 Ba 作图就可以发现,这些大离子亲石元素都显示了不同程度的元素迁移。因此,以下对于岩石成因的讨论将主要基于稀土元素以及高场强元素,因为它们几乎不受后期改造以及变质事件的影响。

斜长角闪岩样品在原始地幔均一化的蛛网图解中都显示了比较明显的 Nb 和 Ta 的负异常(图 9),这一特征有可能反映了源区的特征也可能是岩浆在上升过程中受到了地壳混染所造成的(Polat *et al.*, 2011)。然而,太古宙上地壳的平均组分几乎不具有 Zr 和 Hf 的异常(0.98 和 1.09, Taylor and McLennan, 1995),这与本次研究中斜长角闪岩普遍具有 Zr 和 Hf 的负异常不符(0.23 ~ 0.74 和 0.28 ~ 0.84)。此外,这些斜长角闪岩的 Th/U 比值在 1.56 ~ 4.72 之间,普遍低于地壳岩石的 5.0(Rudnick and Fountain, 1995),而与大洋中脊玄武岩(MORB)的 3.0 以及洋岛玄武岩(OIB)的 3.4 比较接近。以上这些数据都说明在这些斜长角闪岩的形成过程中受到的地壳混染是很小的。

5.3 源区性质

来自五台杂岩不同地区晚太古代花岗质岩石中的斜长角闪岩包体的地球化学数据表明它们没有受到强烈的地壳混染,而且球粒陨石均一化稀土元素图解以及原始地幔均一化的蛛网图解也基本平行,这说明他们很可能来自性质类似的地幔源区。Zr/Nb 比值由于不受到后期结晶分异的影响因此常被用来指示岩浆岩源区的性质。本次研究样品的 Zr/Nb 比值在 14 到 24 之间,平均值为 20,略小于典型 N-MORB 的 30(Weaver, 1991),这说明地幔源区相比于 N-MORB 有一定程度的富集。位于当时亏损地幔以及球粒陨石均一储库之间的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 也说明地幔源区性质为轻度富集的,再考虑到明显的 Nb、Ta 和 Ti 的负异常(图 9),我们认为斜长角闪岩的地幔源区受到了一定程度的俯冲来源的流体改造。此外,轻微的轻稀土富集 [$(La/Yb)_N = 1.36 \sim 3.52$] 以及重稀土平坦 [$(Gd/Yb)_N = 0.94 \sim 1.38$] 的特征说明轻重稀土分异的原因不是源区残留了石榴石而很可能是在深度小于 90km 的情况下产生了尖晶石二辉橄榄岩的熔体(图 10)。综上所述,我们认为五台地区晚太古代花岗类岩石中的斜长角闪岩包体很可能来自于受到俯冲板片流体或熔体改造的轻度富集地幔中尖晶石二辉橄榄岩的分熔。

5.4 华北克拉通 ~ 27 亿年地壳生长事件

本次研究取得的数据对于我们理解华北克拉通地壳生长及其改造具有一定的指示意义。近几年在东部陆块发现了大量 27 亿年左右的土地壳岩石,并且他们的锆石 Hf 亏损地幔模式年龄也为 27 亿年左右,说明这一期构造热事件代表了华北克拉通的一期重要的地壳生长事件(杜利林等, 2010; Jiang *et al.*, 2010; Wan *et al.*, 2011)。在中部造山带

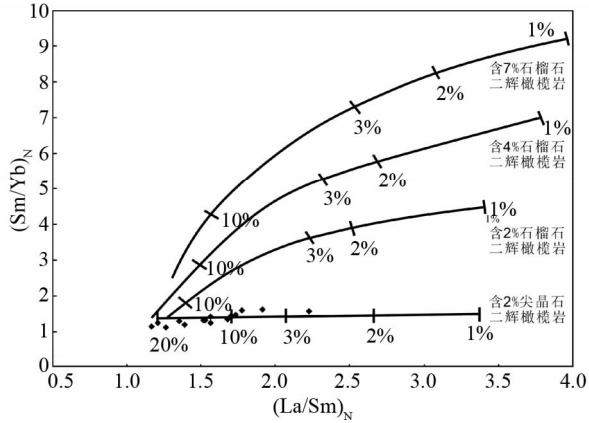


图10 斜长角闪岩包体的 $(La/Sm)_N$ - $(Sm/Yb)_N$ 图解 (据 Wang *et al.*, 2013)

Fig. 10 Plots of $(La/Sm)_N$ vs. $(Sm/Yb)_N$ for the amphibolite enclaves (after Wang *et al.*, 2013)

中,虽然前人的工作已经证实存在着 25 亿年左右的基性到超基性岩石,并认为这一时期为华北克拉通的地壳生长时期 (Polat *et al.*, 2006; Wang, 2009)。然而,占据了中部造山带前寒武纪基底岩石出露面积 80% 左右的都为 25 亿年左右的花岗质岩石 (包括 TTG 片麻岩; Guan *et al.*, 2002; Wilde, 2002; Wilde *et al.*, 2004a; Wilde and Zhao, 2005; Kröner *et al.*, 2005b), 这些花岗质岩石可能来自 27 亿年玄武岩的部分熔融 (Liu *et al.*, 2004), 这说明 25 亿的地质事件为地壳再造。此外,在恒山-五台-阜平地区发现的少量的 27 亿年左右的 TTG 片麻岩 (Kröner *et al.*, 2005b; Han *et al.*, 2012) 及继承锆石 (Wilde *et al.*, 2004b)、赞皇地区发现的锆石结晶年龄为 2692Ma、全岩 Nd 亏损地幔模式年龄为 2.7Ga 的 TTG 片麻岩 (Yang *et al.*, 2013) 以及中条地区发现的锆石结晶年龄以及 Hf 模式年龄都为 2.7Ga 左右的 TTG 片麻岩 (Zhu *et al.*, 2013), 都说明在这一地区很可能存在过 27 亿年的地壳岩石。

此次研究中我们在五台地区晚太古代花岗质岩石中发现的斜长角闪岩包体锆石结晶年龄为 ~ 2.7 Ga, 与它们的最年轻的全岩 Nd 亏损地幔模式年龄 2.83Ga 相差不大。此外,前人在邻近的阜平杂岩中也曾报道了英云闪长质片麻岩中角闪片麻岩包体的锆石结晶年龄为 2708Ma (Guan *et al.*, 2002) 以及高度集中在 2.7~2.8Ga 的全岩 Nd 亏损地幔模式年龄 (Guan, 2000), 以上这些证据都说明在华北克拉通中部造山带很可能曾经存在过 27 亿年左右的岩石, 它们为一期重要的地壳生长事件的产物。

6 结论

(1) 五台杂岩晚太古代花岗质岩石中的斜长角闪岩包体镜下显示为细粒、粒状变晶结构, 块状到弱片麻状构造, 主要

矿物组合为角闪石和斜长石。根据地球化学特征恢复它们的原岩为拉斑玄武岩。锆石 U-Pb 定年结果表明它们的结晶时代为 2.7Ga, 并且受到了后期 2.5Ga、2.1Ga 岩浆事件以及 1.85Ga 变质事件的改造。它们的全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 $-3.1 \sim +3.5$, 亏损地幔模式年龄为 2.75~3.29Ga。

(2) 斜长角闪岩的地球化学特征说明它们的稀土元素以及高场强元素几乎没有受到后期改造以及变质事件的影响而且在形成过程中受到地壳混染的影响很小。再结合同位素数据判断, 这些斜长角闪岩包体很可能来自于受到俯冲板片流体或熔体改造的轻度富集地幔中尖晶石二辉橄榄岩的部分熔融。

(3) 五台地区晚太古代花岗质岩石中斜长角闪岩包体的锆石结晶年龄以及全岩 Nd 亏损地幔模式年龄相似, 都为 27 亿年左右, 这说明在华北克拉通中部造山带很可能存在过 27 亿年左右的岩石, 它们代表了一期重要的地壳生长事件。

致谢 感谢中国地质科学院矿产资源研究所的侯可军以及中国科学院地质与地球物理研究所李潮峰在实验测试方面提供的帮助; 两位审稿人对全文提出了宝贵的意见, 让笔者受益匪浅, 在此表示衷心感谢!

References

- Bai J. 1986. The Early Precambrian Geology of Wutaishan. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1-475 (in Chinese)
- Barrett TJ and MacLean WH. 1994. Chemostratigraphy and hydrothermal alteration in exploration for VHMS deposits in greenstone and younger volcanic rocks. In: Lentz DR (ed.). Alteration and Alteration Processes Associated with Ore-Forming Systems. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 11: 433-467
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Shanxi Province. 1989. Regional Geology of Shanxi Province. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Du LL, Yang CH, Ren LD, Wan YS and Wu JS. 2009. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the metabasalts of the Hutuo Group, Wutai Mountains, Shanxi, China. Geological Bulletin of China, 28(7): 867-876 (in Chinese with English abstract)
- Du LL, Yang CH, Guo JH, Wang W, Ren LD, Wan YS and Geng YS. 2010. The age of the base of the Paleoproterozoic Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton; SHRIMP zircon U-Pb dating of basaltic andesite. Chinese Science Bulletin, 55(17): 1782-1789
- Du LL, Yang CH, Zhuang YX, Wei RZ, Wan YS, Ren LD and Hou KJ. 2010. Hf isotopic compositions of zircons from 2.7Ga metasedimentary rocks and biotiteplagioclase gneiss in the Mengjiatun Formation complex, western Shandong Province. Acta Geologica Sinica, 84(7): 991-1001 (in Chinese with English abstract)
- Du LL, Yang CH, Wang W, Ren LD, Wan YS, Song HX, Geng YS and Hou KJ. 2011. The re-examination of the age and stratigraphic subdivision of the Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton: Evidence from geology and zircon U-Pb geochronology. Acta Petrologica Sinica, 27(4): 1037-1055 (in Chinese with English abstract)
- Du LL, Yang CH, Wang W, Ren LD, Wan YS, Song HX, Gao LZ, Geng YS and Hou KJ. 2012. Provenance of the Paleoproterozoic Hutuo Group basal conglomerates and Neoproterozoic crustal growth in the Wutai Mountains, North China Craton: Evidence from granite

- and quartzite pebble zircon U-Pb ages and Hf isotopes. *Science China (Earth Sciences)*, 55(11): 1796–1814
- Du LL, Yang CH, Wang W, Ren LD, Wan YS, Wu JS, Zhao L, Song HX, Geng YS and Hou KJ. 2013. Paleoproterozoic rifting of the North China Craton: Geochemical and zircon Hf isotopic evidence from the 2137Ma Huangjinshan A-type granite porphyry in the Wutai area. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 190–202
- Farahat ES. 2010. Neoproterozoic arc-back-arc system in the Central Eastern Desert of Egypt: Evidence from supra-subduction zone ophiolites. *Lithos*, 120(3–4): 293–308
- Faure M, Trap P, Lin W, Monie P and Bruguier O. 2007. Polyorogenic evolution of the Paleoproterozoic Trans-North China Belt, new insights from the Liliangshan-Hengshan-Wutaishan and Fuping massifs. *Episodes*, 30(2): 96–107
- Guan H. 2000. Fuping Complex and its significance in Early Precambrian crustal evolution of Sino-Korean Craton. Ph. D. Dissertation. Hong Kong: University of Hong Kong
- Guan H, Sun M, Wilde SA, Zhou XH and Zhai MG. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: Implications for formation and assembly of the North China Craton. *Precambrian Research*, 113(1–2): 1–18
- Guo JH, O'Brien PJ and Zhai MG. 2002. High-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: Metamorphic evolution, *P-T* paths and geotectonic significance. *Journal of Metamorphic Geology*, 20: 741–756
- Guo JH, Sun M, Chen FK and Zhai MG. 2005. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic continental collision. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 629–642
- Han BF, Xu Z, Ren R, Li LL, Yang JH and Heng Y. 2012. Crustal growth and intracrustal recycling in the middle segment of the Trans-North China Orogen, North China Craton: A case study of the Fuping Complex. *Geological Magazine*, 149(4): 729–742
- Hou KJ, Li YH and Tian YR. 2009. In situ U-Pb zircon dating using LA-MC-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481–492 (in Chinese with English abstract)
- Jiang N, Guo JH, Zhai MG and Zhang SQ. 2010. 2.7Ga crust growth in the North China craton. *Precambrian Research*, 179(1–4): 37–49
- Kröner A, Wilde SA, Li JH and Wang KY. 2005a. Age and evolution of a Late Archaean to Early Palaeozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 577–595
- Kröner A, Wilde SA, O'Brien PJ, Li JH, Passchier CW, Walte NP and Liu DY. 2005b. Field relationships, geochemistry, zircon ages and evolution of a Late Archaean to Paleoproterozoic lower crustal section in the Hengshan Terrain of northern China. *Acta Geologica Sinica*, 79(5): 605–629
- Kröner A, Wilde SA, Zhao GC, O'Brien PJ, Sun M, Liu DY, Wan YS, Liu SW and Guo JH. 2006. Zircon geochronology of mafic dykes in the Hengshan Complex of northern China: Evidence for late Palaeoproterozoic rifting and subsequent high-pressure event in the North China Craton. *Precambrian Research*, 146: 45–67
- Kusky TM and Li JH. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383–397
- Li CF, Li XH, Li QL, Guo JH and Li XH. 2011. Directly determining $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ isotope ratios using thermal ionization mass spectrometry for geological samples without separation of Sm-Nd. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(10): 2012–2022
- Li CF, Li XH, Li QL, Guo JH, Li XH and Yang YH. 2012. Rapid and precise determination of Sr and Nd isotopic ratios in geological samples from the same filament loading by thermal ionization mass spectrometry employing a single-step separation scheme. *Analytica Chimica Acta*, 727: 54–60
- Li JH and Qian QL. 1991. A study on the Longquanguan shear zone in the northern part of the Taihang Mountains. *Shanxi Geol.*, 6(1): 17–29 (in Chinese)
- Li JH and Kusky TM. 2007. A Late Archean foreland fold and thrust belt in the North China Craton: Implications for early collisional tectonics. *Gondwana Research*, 12(1–2): 47–66
- Li JL, Wang KY, Wang QC, Liu XH and Zhao ZY. 1990. Early Proterozoic collision belt in the Wutaishan area, China. *Scientia Geologica Sinica*, 25(1): 1–11 (in Chinese)
- Liu CH, Zhao GC, Sun M, Zhang J, Yin CQ, Wu FY and Yang JH. 2011. U-Pb and Hf isotopic study of detrital zircons from the Hutuo Group in the trans-north China orogen and tectonic implications. *Gondwana Research*, 20(1): 106–121
- Liu SW, Li JH, Pan YM, Zhang J and Li Q. 2002. An Archean continental block in the Taihangshan and Hengshan regions: Constraints from geochronology and geochemistry. *Progress in Natural Science*, 12(8): 568–576 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW, Pan PM, Xie QL, Zhang J and Li QG. 2004. Archean geodynamics in the Central Zone, North China Craton: Constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutai complexes. *Precambrian Research*, 130(1–4): 229–249
- Liu SW, Zhao GC, Wilde SA, Shu GM, Sun M, Li QG, Tian W and Zhang J. 2006. Th-U-Pb monazite geochronology of the Liliang and Wutai complexes: Constraints on the tectonothermal evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 148(3–4): 205–225
- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571
- Ludwig KR. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel, Special Publication 4a, Berkeley Geochronology Center, Berkeley, California
- Manikyamba C, Kerrich R, Khanna TC, Satyanarayanan M and Krishna AK. 2009. Enriched and depleted arc basalts, with Mg-andesites and adakites: A potential paired arc-back-arc of the 2.6Ga Hutti greenstone terrane, India. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(6): 1711–1736
- Miao PS, Zhang ZF, Zhang JZ, Zhao ZX and Xu SC. 1999. Paleoproterozoic stratigraphic sequence in the Wutai Mountain area. *Regional Geology of China*, 18(4): 405–413 (in Chinese)
- O'Brien PJ, Walte N and Li JH. 2005. The petrology of two distinct granulite types in the Hengshan Mts, China, and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 615–627
- Polat A, Kusky TM, Li JH, Fryer B, Kerrich R and Patrick K. 2005. Geochemistry of Neoproterozoic (ca. 2.55–2.50Ga) volcanic and ophiolitic rocks in the Wutaishan greenstone belt, central orogenic belt, North China Craton: Implications for geodynamic setting and continental growth. *Geological Society of America Bulletin*, 117(11–12): 1387–1399
- Polat A, Herzberg C, Münker C *et al.* 2006. Geochemical and petrological evidence for a suprasubduction zone origin of Neoproterozoic (ca. 2.5Ga) peridotites, central orogenic belt, North China craton. *Geological Society of America Bulletin*, 118(7–8): 771–784
- Polat A, Appel PWU and Fryber BJ. 2011. An overview of the geochemistry of Eoarchean to Mesoarchean ultramafic to mafic volcanic rocks, SW Greenland: Implications for mantle depletion and petrogenetic processes at subduction zones in the early Earth. *Gondwana Research*, 20(2–3): 255–283
- Qian JH, Wei CJ, Zhou XW and Zhang YH. 2013. Metamorphic *P-T* paths and new zircon U-Pb age data for garnet-mica schist from the Wutai Group, North China Craton. *Precambrian Research*, 233: 282–296
- Rudnick RL and Fountain DM. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267–309
- Simonen A. 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofenidic, Early Archean supracrustal rocks in south-western Finland. *Bull. Comm. Geol. Finl.*, 160: 64

- Sun M, Armstrong RL and St J Lambert R. 1992. Petrochemistry and Sr, Pb and Nd isotopic geochemistry of Early Precambrian rocks, Wutaishan and Taihangshan areas, China. *Precambrian Research*, 56(1-2): 1-31
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313-345
- Taylor SR and McLennan SM. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33: 241-265
- Tian YQ. 1991. *Geology and Gold Mineralization of Wutai-Hengshan Greenstone Belt*. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 1-25 (in Chinese)
- Tian YQ, Ma ZH, Yu KR, Liu ZH and Peng QM. 1996. The Early Precambrian geology of Wutai-Hengshan Mts., Shanxi, China. In: *Field Trip Guide T315, 30th International Geological Congress*. Beijing, China; Geol. Publ. House, 52
- Trap P, Faure M, Lin W and Monié P. 2007. Late Paleoproterozoic (1900~1800Ma) nappe stacking and polyphase deformation in the Hengshan-Wutaishan area: Implications for the understanding of the Trans-North-China Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 156: 85-106
- Wan YS, Miao PS, Liu DY, Yang CH, Wang W, Wang HC, Wang ZJ, Dong CY, Du LL and Zhou HY. 2010. Formation ages and source regions of the Palaeoproterozoic Gaofan, Hutuo and Dongjiao groups in the Wutai and Dongjiao areas of the North China Craton from SHRIMP U-Pb dating of detrital zircons: Resolution of debates over their stratigraphic relationships. *Chinese Science Bulletin*, 55: 1278-1284
- Wan YS, Liu DY, Wang SY, Yang EX, Wang W, Dong CY, Zhou HY, Du LL, Yang YH and Diwu CR. 2011. 2.7Ga juvenile crust formation in the North China Craton (Taishan-Xintai area, western Shandong Province): Further evidence of an understated event from U-Pb dating and Hf isotopic composition of zircon. *Precambrian Research*, 186(1-4): 169-180
- Wang H, Wu YB, Qin ZW, Zhu LQ, Liu Q, Liu XC, Gao S, Wijbrans JR, Zhou L, Gong HJ and Yuan HL. 2013. Age and geochemistry of Silurian gabbroic rocks in the Tongbai orogen, central China: Implications for the geodynamic evolution of the North Qinling arc-back-arc system. *Lithos*, 179: 1-15
- Wang KY, Li JL, Hao J, Li JH and Zhou SP. 1996. The Wutaishan mountain belt within the Shanxi Province, northern China: A record of Late Archean collision tectonics. *Precambrian Research*, 78: 95-103
- Wang ZH, Wilde SA, Wang KY and Yu LJ. 2004. A MORB-arc basalt-andakite association in the 2.5Ga Wutai greenstone belt: Late Archean magmatism and crustal growth in the North China Craton. *Precambrian Research*, 131(3-4): 323-343
- Wang ZH. 2009. Tectonic evolution of the Hengshan-Wutai-Fuping complexes and its implication for the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 170(1-2): 73-87
- Wang ZH, Wilde SA and Wan JL. 2010. Tectonic setting and significance of 2.3~2.1Ga magmatic events in the Trans-North China Orogen: New constraints from the Yanmenguan mafic-ultramafic intrusion in the Hengshan-Wutai-Fuping area. *Precambrian Research*, 178(1-4): 27-42
- Weaver BL. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letter*, 104(2-4): 381-397
- Wilde SA. 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Wutai Complex. In: Kröner A, Zhao GC, Wilde SA, Zhai MG, Passchier CW, Sun M, Guo JH, O'Brien PJ and Walte N (eds.). *A Late Archean to Palaeoproterozoic Lower to Upper Crustal Section in the Hengshan-Wutaishan Area of North China*. Guidebook for Penrose Conference Field Trip. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 32-34
- Wilde SA, Cawood PA, Wang KY, Nemchin A and Zhao GC. 2004a. Determining Precambrian crustal evolution in China: A case-study from Wutaishan, Shanxi Province, demonstrating the application of precise SHRIMP U-Pb geochronology. In: Malpas J, Fletcher CJ, Aitchison JC and Ali J (eds.). *Aspects of the Tectonic Evolution of China*. Geological Society London Special Publications, 226: 5-26
- Wilde SA, Zhao GC, Wang KY and Sun M. 2004b. First precise SHRIMP U-Pb zircon ages for the Hutuo Group, Wutaishan: Further evidence for the Palaeoproterozoic amalgamation of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 49(1): 83-90
- Wilde SA and Zhao GC. 2005. Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 519-522
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325-343
- Wu CH and Zhong CT. 1998. The Paleoproterozoic SW-NE collision model for the central North China Craton. *Progress in Precambrian Research*, 21(3): 28-50 (in Chinese)
- Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wan YS, Liu DY and Song B. 1998. *Archean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of Sino-Korea Paleo-continent*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Yang CH, Du LL, Ren LD, Song HX, Wan YS, Xie HQ and Geng YS. 2013. Delineation of the ca. 2.7Ga TTG gneisses in the Zanhuang Complex, North China Craton and its geological implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 178-189
- Zhai MG and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Research*, 20(1): 1-20
- Zhang J, Zhao GC, Li SZ, Sun M, Liu SW, Wilde SA, Kroner A and Yin CQ. 2007. Deformation history of the Hengshan Complex: Implications for the tectonic evolution of the Trans-North China Orogen. *Journal of Structural Geology*, 29(6): 933-949
- Zhang J, Zhao GC, Li SZ, Sun M, Liu SW and Yin CQ. 2009. Deformational history of the Fuping Complex and new U-Th-Pb geochronological constraints: Implications for the tectonic evolution of the Trans-North China Orogen. *Journal of Structural Geology*, 31: 177-193
- Zhang J, Zhao GC, Li SZ, Sun M and Liu SW. 2012. Structural and aeromagnetic studies of the Wutai Complex: Implications for the Tectonic Evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 222-223: 212-229
- Zhang J, Zhang HF and Lu XX. 2013. Zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotope constraints on Precambrian evolution of continental crust in the Songshan area, the south-central North China Craton. *Precambrian Research*, 226: 1-20
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood P and Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107(1-2): 45-73
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177-202
- Zhao GC, Kroner A, Wilde SA, Sun M, Li SZ, Li XP, Zhang J, Xia XP and He YH. 2007. Lithotectonic elements and geological events in the Hengshan-Wutai-Fuping belt: A synthesis and implications for the evolution of the Trans-North China Orogen. *Geological Magazine*, 144(5): 753-775
- Zhou JB and Li XH. 2006. GeoPlot: An Excel VBA program for geochemical data plotting. *Computers and Geosciences*, 32(4): 554-560
- Zhou YY, Zhao TP, Xue LW and Wang SY. 2009. Geochemistry and origin of Neoproterozoic amphibolites in Songshan, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3043-3056 (in Chinese with English abstract)
- Zhu XY, Zhai MG, Chen FK, Lv B, Wang W, Peng P and Hu B. 2013. ~2.7Ga crustal growth in the North China craton: Evidence from zircon U-Pb ages and Hf isotopes of the Sushui complex in the Zhongtiao terrane. *The Journal of Geology*, 121: 239-254

附中文参考文献

- 白瑾. 1986. 五台山早前寒武纪地质. 天津: 天津科技出版社, 1-475
- 杜利林, 杨崇辉, 任留东, 万渝生, 伍家善. 2009. 山西五台山区滹沱群变质玄武岩岩石学、地球化学特征及其成因意义. 地质通报, 28(7): 867-876
- 杜利林, 杨崇辉, 庄育勋, 韦汝征, 万渝生, 任留东, 侯可军. 2010. 鲁西新泰孟家屯 2.7Ga 变质沉积岩与黑云斜长片麻岩锆石 Hf 同位素特征. 地质学报, 84(7): 991-1001
- 杜利林, 杨崇辉, 王伟, 任留东, 万渝生, 宋会侠, 耿元生, 侯可军. 2011. 五台地区滹沱群时代与地层划分新认识: 地质学与锆石年代学证据. 岩石学报, 27(4): 1037-1055
- 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. 矿床地质, 28(4): 481-492
- 李江海, 钱祥麟. 1991. 太行山北段龙泉关剪切带研究. 山西地质, 6(1): 17-29
- 李继亮, 王凯怡, 王清晨, 刘小汉, 赵中岩. 1990. 五台山早元古代碰撞造山带初步认识. 地质科学, 25(1): 1-11
- 刘树文, 李江海, 潘元明, 张健, 李秋根, 黄雄南. 2002. 太行山-恒山太古代古老陆块: 年代学和地球化学制约. 自然科学进展, 12(8): 826-833
- 苗培森, 张振福, 张建中, 赵祯祥, 续世朝. 1999. 五台山区早元古代地层层序探讨. 中国区域地质, 18(4): 405-413
- 山西省地质矿产局. 1989. 山西省区域地质志. 北京: 地质出版社
- 田永清. 1991. 五台山-恒山绿岩带地质及金的成矿作用. 太原: 山西科技出版社, 1-44
- 吴昌华, 钟长汀. 1998. 华北陆台中段吕梁期的 SW-NE 向碰撞-晋蒙高级区孔兹岩系进入下地壳的构造机制. 前寒武纪研究进展, 21(3): 28-50
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 万渝生, 刘敦一, 宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社
- 周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 王世炎. 2009. 河南嵩山地区新太古代斜长角闪岩的地球化学特征与成因. 岩石学报, 25(11): 3043-3056