

doi:10.3799/dqkx.2012.S1.003

内蒙古大青山北麓 2.7 Ga 花岗质片麻岩的发现及其地质意义

董晓杰, 徐仲元*, 刘正宏, 沙 茜

吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

摘要: 本文报道了在内蒙中部大青山北麓西乌兰不浪地区早前寒武纪基底中发现的太古宙变质深成体—黑云母花岗质片麻岩的 SHRIMP U-Pb 定年结果. 样品的锆石特征较为一致, 阴极发光图像上具明显核—幔—边结构. 核部锆石发育密集的岩浆环带, 年龄数据分布区间较小, 其加权平均年龄 ($2\,697 \pm 11$ Ma) 代表了原岩形成时间, 为区内有报道的最古老的高精度岩石年龄, 表明区内存在一期 2.7 Ga 左右的岩浆活动. 幔部及边部锆石具变质重结晶成因, 两者除了在阴极发光图像上的差异外, 其加权平均年龄(幔部 $2\,561 \pm 18$ Ma; 边部 $2\,539 \pm 34$ a) 及 Th、U 含量特征极为接近. 笔者认为它们共同反映了区域内 ~2.5 Ga 的构造—热事件. 大量证据表明华北克拉通 ~2.5 Ga 的构造—热事件是华北克拉通形成演化过程中所经历的重要地质事件, 该事件之前的岩石在这一地质过程中遭受了强烈改造.

关键词: 西乌兰不浪; 黑云花岗质片麻岩; 锆石; 地球化学; 构造.

中图分类号: P588.34; P597.3

文章编号: 1000-2383(2012)S1-0020-08

收稿日期: 2011-06-27

2.7 Ga Granitic Gneiss in the Northern Foot of Daqingshan Mountain, Central Inner Mongolia, and Its Geological Implications

DONG Xiao-jie, XU Zhong-yuan*, LIU Zheng-hong, SHA Qian

College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract: This study presents the SHRIMP U-Pb dating results of Archean biotite granitic gneiss found in the Early Precambrian metamorphic basement in Xi Ulanbulang area in northern foot of Daqingshan Mountain in central Inner Mongolia. Zircon characteristic of the rock is consistent and it obviously shows core-mantle-boundary structure from cathodoluminescence images. The core of zircons not only has intensive magmatic zoning but also has a smaller range of age distribution. The weighted average age ($2\,697 \pm 11$ Ma) represents the diagenetic age of rock which is the oldest one of all rocks reported in the region. It shows that a magmatism occurred to 2.7 Ga years ago in the region. The mantle and of zircons is considered to be featured with metamorphic recrystallization causes. Both the weighted average age (mantle $2\,561 \pm 18$ Ma; rige $2\,539 \pm 34$ a) and Th, U content features of them are very close except for different cathodoluminescence images. Therefore, we consider that the ages of the mantle and boundary together reflect the tectono-thermal event which occurred to 2.5 Ga ago that has been proved to be an important geological event by substantial evidences during the formation and evolution of the North China craton and a large number of pre-rocks have been strongly transformed.

Key words: Xi Ulanbulang; biotite granitic gneiss; zircon; geochemistry; tectonics.

0 引言

内蒙古中部的大青山—乌拉山地区的早前寒武纪地层发育完好, 高级变质地层的组合类型多样, 岩

层出露良好, 是进行前寒武纪地质研究的理想区域(杨振升等, 2006). ~25 亿年地质事件是华北克拉通基底形成演化所经历的重要地质过程. 在这一大规模构造—热事件中, 记录了华北克拉通早期地质

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 90814006, 40972135); 中国地质调查局地质调查项目(No. 1212010510515).

作者简介: 董晓杰(1984—), 男, 博士生, 构造地质学专业, E-mail: geo320@163.com. * **通讯作者:** 徐仲元, E-mail: xuzhy@mail.jlu.edu.cn

信息的岩石遭到了破坏,致使探索研究华北克拉通早期演化有一定困难.然而这并未阻碍地质学者的研究热情,自 20 世纪 Liu *et al.* (1992, 2008) 在鞍山地区发现 3.8 Ga 的岩石以来,大量记录了华北克拉通早期演化信息的岩石被发现.其中著名的包括冀东黄柏峪 3.8 Ga 的铬云母石英岩(Liu *et al.*, 1992; Wilde *et al.*, 2008) 以及信阳鲁山地区 2.8 Ga 的 TTG 和表壳岩(Kröner *et al.*, 1988; Polat *et al.*, 2006). 万翁生等(2009)对这些古老岩石进行了验证及总结,这极大地丰富了研究者对华北克拉通早期演化的认识.作为华北克拉通早前寒武纪基底重要组成部分的内蒙古大青山地区,至今还未发现有精确测年数据的 2.5 Ga 地质事件之前的古老地质体或岩石.王惠初等(2001)在该区分布在村空山附近的麻粒岩中,通过稀释法获得了单颗粒锆石 U-Pb $2\ 648.5 \pm 4.6$ Ma 的上交点年龄和 2 673 Ma 的表面年龄,认为这是该区最后一次麻粒岩相的变质年龄.陶继雄和许立权(2002)在召河庙北角闪斜长片麻岩中获得单颗粒锆石 U-Pb 不一致线上的交点年龄 $2\ 750 \pm 46$ Ma 和 $2\ 519 \pm 4$ Ma,以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄 $3\ 049 \pm 1.4$ Ma,认为兴和岩群形成年龄应远大于 3 049 Ma;张玉清等(2003)在西乌兰不浪北的变质深成体(紫苏斜长麻粒岩)中获得单颗粒锆石 U-Pb 不一致线上交点年龄 $2\ 511.4 \pm 4.9$ Ma,认为是古花岗岩侵入体上侵就位时代.张维杰等(2000)报道了研究区西北侧固阳地区花岗绿岩带中形成于 2 400~2 500 Ma 的 TTG 岩石;简平等(2005)进一步从 TTG 中解体出一套形成于 2 520~2 556 Ma 的赞歧岩,并报道了其中 2.91~3.48 Ga 的残余锆石.如此看来,研究者对本区太古宙基底岩石的形成时代还存在很大争议.因此精确确定本区高级变质岩的形成时代,并从中寻找古老地质体显得极为重要.本文主要报道了在该区发现的最古老侵入体——2.7 Ga 的花岗质片麻岩.

1 地质概况

内蒙古中部的大青山—乌拉山地区位于华北克拉通北缘太古宙麻粒岩相带的中西部,是我国早前寒武纪岩石地层保留最好的区域之一,也是华北克拉通基底的重要组成部分(图 1). 酒馆一下湿壕近东西向断裂带将区内早前寒武纪基底划分为太古代片麻岩—变质表壳岩和古元古代孔兹岩带两个主要岩石构造单元. 断裂带北侧主要为太古宙变质岩系,

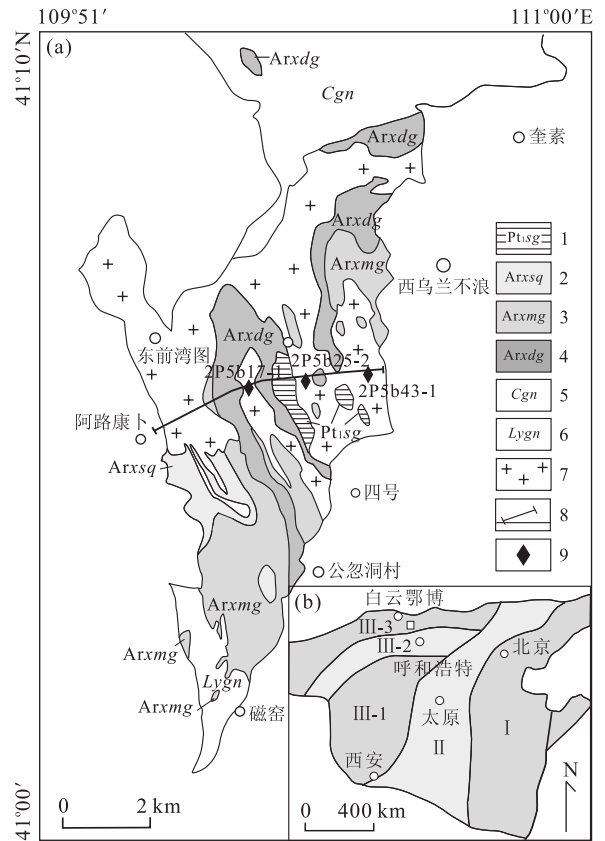


图 1 西乌兰不浪地区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Xi Ulanbulang area

1. 石榴蓝晶石英岩组合; 2. 石榴石英岩组合; 3. 中性麻粒岩组合; 4. 基性麻粒岩组合; 5. 村空山片麻岩; 6. 狼牙山片麻岩; 7. 黑云斜长片麻岩; 8. 实测剖面位置; 9. 采样位置及编号; 图 b 为华北克拉通早前寒武纪构造区划, 其中: I. 东部陆块; II. 中部造山带; III. 西部陆块; III-1. 鄂尔多斯地块; III-2. 孔兹岩带; III-3. 阴山地块(据 Zhao *et al.*, 2005 简化); 图 b 中方框表示图 a 所在位置

根据变质程度可划分为低级变质的花岗—绿岩带和高级变质的紫苏花岗岩—麻粒岩杂岩; 南侧主要为古元古代孔兹岩系. 西乌兰不浪高级变质岩位于酒馆一下湿壕断裂带以北的太古宙高级变质区的北缘, 主要由兴和岩群麻粒岩系及与其密切伴生的深熔(紫苏)片麻岩组成. 兴和岩群变质地层包含 3 个岩石组合: 基性麻粒岩组合、中性麻粒岩组合和石榴石英岩组合. 基性麻粒岩组合由深灰色的石榴斜长辉石岩、石榴透辉斜长角闪岩和石榴角闪二辉麻粒岩夹磁铁石英岩组成; 中性麻粒岩岩组由浅灰褐色黑云二辉斜长麻粒岩、石榴二辉斜长麻粒岩、角闪二辉斜长麻粒岩和长英片麻岩组成; 石榴石英岩组合以与石榴二辉麻粒岩、(角闪)二辉麻粒岩呈不等厚互层为特征. 西乌兰不浪高级变质地体北侧与晚太古宙花岗绿岩带相接, 东侧主要为中生代沉积地层, 西侧被显生宙花岗岩侵入. 本文所研究的黑云花

岗质片麻岩产于西乌兰不浪镇西侧,与该区出露的形成于~2.5 Ga 的麻粒岩—紫苏花岗质片麻岩相伴生(Dong *et al.*, 2012),并有少量元古代石榴蓝晶石英岩出露.该岩体出露面积约 15 km²(图 1).

2 岩石特征

本文样品黑云花岗质片麻岩(图 2)取自西乌兰不浪西侧,3 个样品分别取自该岩体的不同位置(取样位置见图 1).样品新鲜面浅灰白色,矿物组成黑云母 5%~10%、斜长石 25%~30%、条纹长石 35%~40%和石英 25%~30%.中粒变晶结构,弱片麻一块状构造.黑云母,呈褐色—浅褐色、细小鳞片状、多呈集合体形式产出;斜长石主要呈板柱状,部分由于变形而呈透镜状,少量发育聚片双晶,大部分具明显的绢云母化和绿帘石化、粒度不均匀(0.25~2.00 mm),分类主要为更长石—中长石;条纹长石呈它形不规则粒状(0.25~1.50 mm),与斜长石接触部位可见交代蠕虫结构;石英呈不规则粒状(0.3~2.0 mm),部分有塑性拉长,具波状消光.

样品的主微量元素地球化学分析在国家地质试验测试中心完成,全岩常量元素用 X 荧光法测定,稀土和微量元素采用等离子质谱测定.其地球化学特征见表 1,具有高 SiO₂ (67.11%~72.75%)、富 Al₂O₃ (12.25%~15.64%),贫铁、锰、钛的特征.稀土及微量元素特征复杂,可能与后期变质作用的改造有关.稀土元素总量变化较大($\sum\text{REE}=49.89 \times 10^{-6} \sim 163.66 \times 10^{-6}$),轻重稀土分馏有一定差异($(\text{La}/\text{Yb})_N=9.58 \sim 106.63$),具铕正异常或无明显铕异常(表 1,图 3a).在微量元素蛛网图解上(图



图 2 样品 B1001 的野外露头特征
Fig. 2 Filed characteristic of B1001

3b),大离子亲石元素 K、Ba、Sr 富集;高场强元素 Nb、Tb 亏损.

3 锆石特征及年代学

年龄样品 B1001 与地球化学样品 2p5b43-1 为同一标本不同编号,采样坐标 110°56′24″E、41°6′2″N.样品锆石的分离在河北省地矿局廊坊实验研究中心完成.样品的具体处理过程是破碎、淘洗和重液分离,然后进行电磁分离,最后锆石重砂样在镜下挑选后与标准样(TEM)一起制成标准离子探针样靶.锆石阴极发光图像在北京离子探针中心电镜室采集;锆石定年在该中心 SHRIMP II 上完成,定年具体操作流程参照 Williams(1998).束斑大小为 25~30 μm.所有测年都为 5 组扫描,标准样(TEM)用于校正²⁰⁶Pb/²³⁸U 的年龄,标准样和测年样品测试比为 1:3~1:4.所有标准锆石都为 5 组扫描,用²⁰⁴Pb 进行普通铅年龄校正.数据采用 SQUID11.3d 和 ISOPLOT 程序.单个数据的误差为 1σ,加权平均年龄误差为 2σ.

样品锆石多呈长柱状,少量短柱状.粒径 200~400 μm,长宽比在 1:2~1:4.阴极发光图像中,具典型的核—幔—边结构(图 4).核部锆石呈自形柱状,通常具有密集的岩浆结晶环带结构,部分环带结构因受后期改造已不明显.幔部锆石呈深灰—灰黑色,结构均匀,部分蚕食核部锆石,显示出变质重结晶成因,部分颗粒不发育幔部锆石;边部主要呈灰白色,云雾状,各颗粒间结构一致但发育宽度不一.

对 21 颗锆石完成了 32 个数据点分析(表 2).由于获得的年龄数据较老,并有后期变质作用的改造,因此采用对子体铅丢失及母体铀丢失反应不灵敏的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄进行讨论.8 个核部锆石数据点分析,U、Th 含量和 Th/U 比值分别为 $35 \times 10^{-6} \sim 167 \times 10^{-6}$ 、 $10 \times 10^{-6} \sim 38 \times 10^{-6}$ 和 0.10~0.44,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄在 2 672~2 761 Ma 之间.其中,测点 12.1C 和 13.1C 的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄较老,分别为 2 761 Ma 和 2 746 Ma,可能为捕获的更古老锆石,其余 6 个核部锆石数据点²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为 $2 697 \pm 11$ Ma(MSWD=0.73).14 个幔部变质锆石数据点的 U、Th 含量和 Th/U 比值分别为 $49 \times 10^{-6} \sim 450 \times 10^{-6}$ 、 $1 \times 10^{-6} \sim 479 \times 10^{-6}$ 和 0.01~1.10,多数锆石 Th/U 比值 > 0.16,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄在 2 462~2 617 Ma 之间,除去 2 个异常年龄数据点外,其余 12 个在谐和线上的幔部锆石数据

表 1 西乌兰不浪黑云花岗质片麻岩的地球化学分析结果

Table 1 Geochemical data of the biotite granitic gneiss in Xi Ulanbulang area

样号	2p5b25-2	2p5b17-1	2p5b43-1	样号	2p5b25-2	2p5b17-1	2p5b43-1	样号	2p5b25-2	2p5b17-1	2p5b43-1
Na ₂ O	3.50	4.38	3.21	La	47.00	14.60	15.50	Y	4.15	2.21	8.41
MgO	0.60	1.22	2.85	Ce	78.30	21.40	19.70	Zr	194.00	48.00	118.00
Al ₂ O ₃	13.76	15.64	12.25	Pr	7.61	2.49	2.15	Hf	4.62	1.25	3.04
SiO ₂	72.75	70.73	67.11	Nd	22.90	8.13	6.42	V	23.10	36.30	123.00
P ₂ O ₅	0.08	0.03	0.01	Sm	2.69	0.97	0.83	Cr	146.00	419.00	334.00
K ₂ O	3.69	0.41	1.44	Eu	0.81	0.97	0.91	Co	4.40	8.00	22.40
CaO	2.23	4.09	3.12	Gd	2.52	0.80	0.96	Ni	7.62	30.00	70.40
TiO ₂	0.36	0.04	0.63	Tb	0.19	0.06	0.14	Rb	40.00	2.65	30.90
MnO	0.01	0.02	0.08	Dy	0.77	0.26	1.01	Sr	248.00	331.00	454.00
Fe ₂ O ₃	1.00	0.07	2.86	Ho	0.12	0.04	0.24	Nb	2.76	0.38	5.11
FeO	1.37	1.99	5.23	Er	0.37	0.12	0.89	Ba	955.00	201.00	554.00
H ₂ O ⁺	0.50	0.80	0.62	Tm	0.04	0.02	0.15	Ta	0.06	0.04	0.20
CO ₂	0.20	0.37	0.29	Yb	0.31	0.09	1.09	Th	5.06	0.12	5.34
LOI	0.52	0.76	0.27	Lu	0.05	0.02	0.19	U	0.24	0.09	0.32
A/CNK	1.00	1.04	0.97	Eu/Eu*	0.93	3.27	3.10	Sc	2.26	2.65	13.90
K ₂ O/Na ₂ O	1.05	0.09	0.44	∑REE	163.66	49.89	50.25				
(La/Yb) _N	103.28	106.63	9.58								

注:常量元素的单位为%;稀土和微量元素单位为 10⁻⁶.

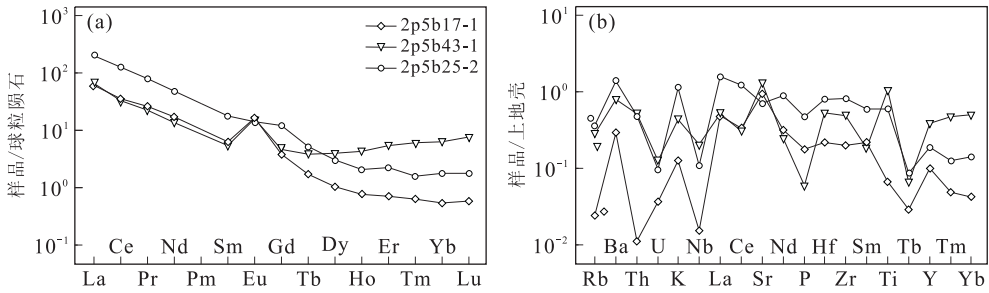


图 3 黑云花岗质片麻岩球粒陨石标准化稀土元素分布(a)和上地壳标准化微量元素蛛网图(b)(球粒陨石标准化数值引自 Sun and McDonough, 1989;上地壳标准化数值引自 Taylor *et al.*, 1981)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b) of the biotite granitic gneiss

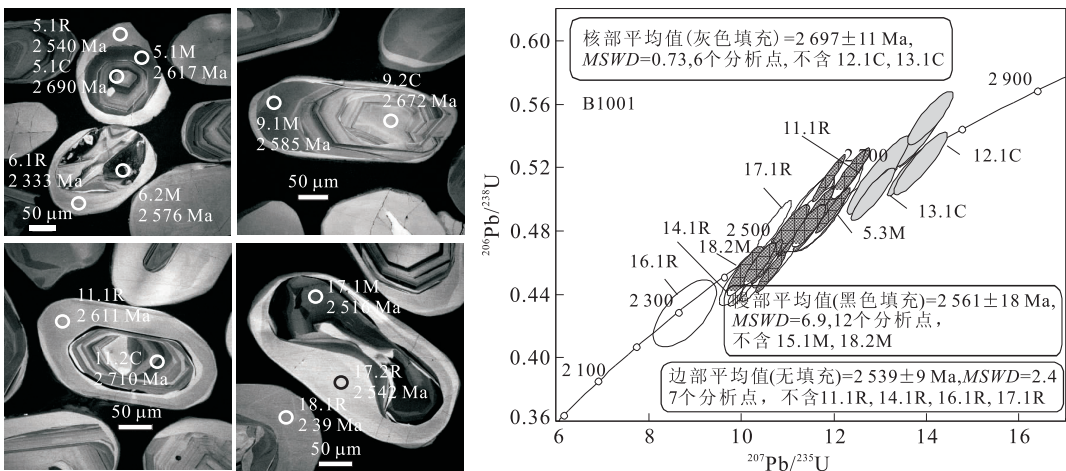


图 4 样品 B1001 的锆石阴极发光图与锆石 SHRIMP U-Pb 谐和图

Fig. 4 CL images and concordant diagrams of zircons from sample B1001

点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\,561 \pm 18\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=6.9$). 10 个边部变质锆石数据点的 U、Th 含量和 Th/U 比值分别为 $21 \times 10^{-6} \sim 70 \times 10^{-6}$ 、 $8 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$ 和 $0.17 \sim 0.91$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄在 $2\,333 \sim 2\,540\text{ Ma}$ 之间, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\,539 \pm 34\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=2.44$). 幔部和边部年龄较为接近, 共同反映了后期变质—深熔作用时限.

4 讨论与结论

4.1 黑云花岗质片麻岩的原岩成岩时间及其意义

目前, 一般认为岩浆结晶锆石的 Th/U 比值较高 (Hoskin, 2000; Belousova *et al.*, 2002). 本文黑云花岗质片麻岩核部锆石的 Th/U 比值在 $0.10 \sim 0.44$ 之间, 指示它们可能为岩浆成因. 在锆石阴极发光图像上也可以看出, 虽然核部锆石已被后期变质成因锆石部分改造, 但多数依旧保留着密集的岩浆结晶环带, 表明它们为岩浆结晶成因. 所以, 笔者把核部锆石 $2\,697 \pm 11\text{ Ma}$ 的加权平均年龄解释为黑云花岗质片麻岩的原岩结晶年龄, 这成为目前该区太古宙麻粒岩相高级变质地体中发现的最古老岩石年龄, 也成为该区域内首次发现的早于 $\sim 2.5\text{ Ga}$ 的确切侵入岩岩石记录. 这一证据表明该区至少在 $\sim 2.7\text{ Ga}$ 就已经存在花岗质地壳, 为华北克拉通早前寒武纪地质演化的对比研究提供了有益参考.

华北克拉通东部陆块 $\sim 2.5\text{ Ga}$ 的基底变质作用与区域上广泛分布的 TTG 片麻岩原岩及镁铁质麻粒岩的原岩关系密切, 其变质年龄一般与岩浆作用时间间隔在 50 Ma 左右, 被认为是同一构造事件的产物 (Jahn and Zhang, 1984; Geng *et al.*, 2006; Grant *et al.*, 2009; 赵国春, 2009). 对西部陆块而言, 这一现象还未被指出过. 本文岩体 A/CNK 在 $0.97 \sim 1.04$ 之间, 高 Ba、Sr, REE 丰度不高, 具有 TTG 片麻岩的特征. 然而轻重稀土分馏程度却不像 TTG 岩系那样强烈, 暗示该岩体在麻粒岩相变质作用过程中发生过部分熔融, 并有围岩基性物质的加入. 将该岩体的岩浆结晶年龄与变质作用年龄相比, 两者相差 150 Ma 左右, 显然不能把该岩体的岩浆事件与变质作用事件视为同一构造事件. 表明在华北克拉通 ~ 25 亿年地质事件之前, 阴山陆块存在一期 ~ 27 亿年的岩浆事件.

4.2 华北克拉通 25 亿年地质事件在该岩石中的体现

华北克拉通基底高级变质岩系在 25 亿年左右

经历了绿片岩相—麻粒岩相区域变质作用, 部分甚至发生过熔融作用 (金巍等, 1991; Liu *et al.*, 1993; 金巍和李树勋, 1996; Zhao *et al.*, 1999, 2001). 本文幔部锆石 Th/U 比值仅个别小于 0.10 , 大多数大于 0.16 , 甚至出现了 1.10 的极大值, 这与变质成因锆石 Th/U 比值一般低于 0.10 的特征 (Hoskin, 2000; Rubatto, 2002) 相悖; 然而其阴极发光特征却具有明显的变质增生成因 (陈道公等, 2001). 研究表明, 快速生长的变质锆石也会含相对高的 Th/U 比值 (Vavra *et al.*, 1999; Whitehouse and Kamber, 2002), Th/U 比值高达 0.70 的变质锆石的实例同样被报道过 (Song *et al.*, 1996). 因此, 笔者认为该样品的幔部锆石年龄代表了后期变质作用时代. 边部锆石除阴极发光特征与幔部明显不同外, 其 Th/U 比值范围与幔部接近, 加权平均年龄与幔部也仅差 20 Ma 左右, 因此笔者认为边部变质增生锆石与幔部是同一构造—热事件的产物. 结合该岩体周围存在大量 $\sim 2.5\text{ Ga}$ 左右的麻粒岩—紫苏花岗岩系, 笔者认为幔部和边部锆石年龄正是华北克拉通 ~ 25 亿年构造—热事件在该岩体中的体现. 该岩体岩石样品地球化学特征的不完全一致性极可能是变质作用过程中周围基性麻粒岩混入的结果, 暗示 ~ 25 亿年地质事件对该岩体进行了强烈改造, 同时也验证了 ~ 25 亿年地质事件是华北克拉通形成和演化过程中的一次影响广泛的重要地质事件, 该地质事件前形成的地质体在这一规模巨大的构造—热事件中遭到了不同程度的改造.

References

- Belousova, E. A., Griffin, W. L., O'Rilly, S. Y., et al., 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143 (5): 602–622. doi:10.1007/s00410-002-0364-7
- Chen, D. G., Li, B. X., Xia, Q. K., et al., 2001. An evaluation of zircon U-Pb dating for metamorphic rocks and comments on zircon ages of Dabie orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (1): 129–138 (in Chinese with English abstract).
- Dong, X. J., Xu, Z. Y., Liu, Z. H., et al., 2012. Zircon U-Pb geochronology of Archean high-grade metamorphic rocks from Xi Ulanbulang area, central Inner Mongolia. *China Earth Sciences (Ser. D)*, 55 (2): 204–212. doi:10.1007/s11430-011-4360-5
- Geng, Y. S., Liu, F. L., Yang, C. H., 2006. Magmatic event at the end of the Archean in eastern Hebei Province and its geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 80 (6): 819–833.

- doi:10.1111/j.1755-6724.2006.tb00305.x
- Grant, M. L., Wilde, S. A., Wu, F. Y., et al., 2009. The application of zircon cathodoluminescence imaging, Th-U-Pb chemistry and U-Pb ages in interpreting discrete magmatic and high-grade metamorphic events in the North China craton at the Archean/Proterozoic boundary. *Chemical Geology*, 261(1-2): 155-171. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.11.002
- Hoskin, P. W. O., 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *Geology*, 28(7): 627-630. doi: 10.1130/0091-7613(2000)28<627:REECOZ>2.0.CO;2
- Jahn, B. M., Zhang, Z. Q., 1984. Archean granulite gneisses from eastern Hebei Province, China: rare earth geochemistry and tectonic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 85(3): 224-243. doi: 10.1007/BF00378102
- Jian, P., Zhang, Q., Liu, D. Y., et al., 2005. SHRIMP dating and geological significance of Late Archean high-Mg diorite (sanukite) and hornblende-granite at Guyang of Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 151-157 (in Chinese with English abstract).
- Jin, W., Li, S. X., Liu, X. S., 1991. A study on characteristics of Early Precambrian high-grade metamorphic rock series and their metamorphic dynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 7(4): 27-35 (in Chinese with English abstract).
- Jin, W., Li, S. X., 1996. *PTt* path and crustal thermodynamic model of Late Archean-Early Proterozoic high grade metamorphic terrain in North China. *Acta Petrologica Sinica*, 12(2): 209-221 (in Chinese with English abstract).
- Kröner, A., Compston, W., Zhang, G. W., et al., 1988. Age and tectonic setting of Late Archean greenstone-gneiss terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating. *Geology*, 16(3): 211-215. doi: 10.1130/0091-7613(1988)016<0211:AATSOL>2.3.CO;2
- Liu, D. Y., Nutman, A. P., Compston, W., et al., 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20(4): 339-342. doi: 10.1130/0091-7613(1992)020<0339:ROMCIT>2.3.CO;2
- Liu, D. Y., Wilde, S. A., Wan, Y. S., et al., 2008. New U-Pb and Hf isotopic data confirm Anshan as the oldest preserved segment of the North China craton. *American Journal of Science*, 308(3): 200-231. doi: 10.2475/03.2008.02
- Liu, X. S., Jin, W., Li, S. X., et al., 1993. Two types of Precambrian high-grade metamorphism, Inner Mongolia, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 11(4): 499-510. doi: 10.1111/j.1525-1314.1993.tb00167.x
- Polat, A., Li, J. H., Fryer, B., et al., 2006. Geochemical characteristics of the Neo-Archean (2800-2700 Ma) Taishan greenstone belt, North China craton: evidence for plume-craton interaction. *Chemical Geology*, 230(1-2): 60-87. doi: 10.1016/j.chemgeo.2005.11.012
- Rubatto, D., 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184(1-2): 123-138. doi: 10.1016/S0009-2541(01)00355-2
- Song, B., Nutman, A. P., Liu, D. Y., et al., 1996. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, Northeastern China. *Precambrian Research*, 78(1-3): 79-94. doi: 10.1016/0301-9268(95)00070-4
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publications*, 42: 313-345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., Armstrong, R. L., et al., 1981. The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A*, 301(1461): 381-399. doi: 10.1098/rsta.1981.0119
- Tao, J. X., Xu, L. Q., 2002. U-Pb age of zircon on gneiss in north Zhaohemiao area, central Inner Mongolia. *Geology of Inner Mongolia*, (3): 5-9 (in Chinese with English abstract).
- Vavra, G., Schmid, R., Gebauer, D., 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibole to granulite facies zircons: geo-chronology of the Ivren zone (Southern Alps). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(4): 380-404. doi: 10.1007/s004100050492
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Dong, C. Y., et al., 2009. The oldest rocks and zircons in China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1793-1807 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. C., Yuan, G. B., Xin, H. T., 2001. U-Pb single zircon ages for granulites in Cunkongshan area, Guyang Inner Mongolia and enlightenment for its geological significance, China. *Progress in Precambrian Research*, 24(1): 28-34 (in Chinese with English abstract).
- Wilde, S. A., Valley, J. W., Kita, N. T., et al., 2008. SHRIMP U-Pb and CAMECA 1280 oxygen isotope result from ancient detrital zircons in the Caozhuang quartzite, eastern Hebei, North China craton: evidence for crustal reworking 3.8 Ga ago. *American Journal of Science*, 308(3): 185-199. doi: 10.2475/03.2008.01
- Williams, I. S., 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: Mickibben, M. A., Shanks III, W. C., Ridley,

- W. I., eds., Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing process. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1—35.
- Whitehouse, M. J., Kamber, B. S., 2002. A rare earth element study of complex zircons from Early Archaean Amitsoq gneisses, Godthåbsfjord, south-west Greenland. *Precambrian Research*, 126(3—4): 363—377. doi: 10.1016/S0301-9268(03)00105-0
- Yang, Z. S., Liu, Z. H., Xu, Z. Y., et al., 2006. Major progress in Early Precambrian research in the Daqing Shan-Wula Shan region, central Inner Mongolia, China, and some suggestions for stratigraphic work in high-grade metamorphic areas. *Geological Bulletin of China*, 25(4): 427—433 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. J., Li, L., Geng, M. S., 2000. Petrology and dating of Neo-Archaean intrusive rocks from Guyang area, Inner Mongolia. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(3): 221—226 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Q., Wang, T., Jia, H. Y., et al., 2003. U-Pb ages of zircons from the Xi Ulanbulang hypersthene-plagioclase granulite in the north Daqing Mountain, central Inner Mongolia. *Geology in China*, 30(4): 394—399 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 1999. Tectonothermal history of the basement rocks in the western zone of the North China craton and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 310(1—4): 37—53. doi: 10.1016/S0040-1951(99)00152-3
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 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. doi: 10.1016/S0301926800001546
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China craton: key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177—202. doi: 10.1016/j.precamres.2004.10.002
- Zhao, G. C., 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China craton: key issues and discussion. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1772—1792 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈道公, 李彬贤, 夏群科, 等, 2001. 变质岩中锆石 U-Pb 计时问题评述——兼论大别造山带锆石定年. *岩石学报*, 17(1): 129—138.
- 简平, 张旗, 刘敦一, 等, 2005. 内蒙古固阳晚太古代赞岐岩 (sanukite) 一角闪花岗岩的 SHRIMP 定年及其意义. *岩石学报*, 21(1): 151—157.
- 金巍, 李树勋, 刘喜山, 1991. 内蒙大青山地区早前寒武纪高级变质岩系特征和变质动力学. *岩石学报*, 7(4): 27—35.
- 金巍, 李树勋, 1996. 华北晚太古代—早元古代高级变质区的变质 *PTt* 轨迹及其地壳热动力学演化模式. *岩石学报*, 12(2): 209—221.
- 陶继雄, 许立权, 2002. 内蒙古中部召河庙北部片麻岩的锆石 U-Pb 年龄. *内蒙古地质*, (3): 5—9.
- 万渝生, 刘敦一, 董春燕, 等, 2009. 中国最古老岩石和锆石. *岩石学报*, 25(8): 1793—1807.
- 王惠初, 袁桂邦, 辛后田, 2001. 内蒙古固阳村空山地区麻粒岩的锆石 U-Pb 年龄及其对年龄解释的启示. *前寒武纪研究进展*, 24(1): 28—34.
- 杨振升, 徐仲元, 刘正宏, 等, 2006. 内蒙古中部大青山—乌拉山地区早前寒武系研究的重要进展及对高级变质区开展地层工作的几点建议. *地质通报*, 25(4): 427—433.
- 张维杰, 李龙, 耿明山, 2000. 内蒙古固阳地区新太古代侵入岩的岩石特征及时代. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(3): 221—226.
- 张玉清, 王攸, 贾和义, 等, 2003. 内蒙古中部大青山北西乌兰不浪紫苏斜长麻粒岩锆石 U-Pb 年龄. *中国地质*, 30(4): 394—399.
- 赵国春, 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论. *岩石学报*, 25(8): 1772—1792.