

# SHRIMP U-Pb Zircon Age and Its Implications of Quartz Syenite in Hadamengou, Inner Mongolia\*

Kangxu Ren<sup>1,2#</sup>, Guohan Yan<sup>2</sup>, Jianhui Cai<sup>3</sup>, Tianren Zou<sup>4</sup>, Baolei Mu<sup>2</sup>, Fengtang Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing

<sup>2</sup>School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing

<sup>3</sup>Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing

<sup>4</sup>Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing

Email: #renkangxu@163.com

Received: Oct. 19<sup>th</sup>, 2012; revised: Oct. 27<sup>th</sup>, 2012; accepted: Nov. 11<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** Based on dating zircon TIMS and SHRIMP U-Pb ages for the ore-controlling quartz syenite of Hadamengou large gold deposit, Inner Mongolia, the authors confirmed that the quartz syenite intruded upon during the early of Paleoproterozoic. Its zircon SHRIMP U-Pb concordant point age was  $(2483 \pm 10) \text{ Ma}(1\sigma)$  and the upper intersection age given  $(2508 \pm 41) \text{ Ma}(1\sigma)$  on the disaccording line respectively. The quartz syenite in Hadamengou was proved the oldest Paleoproterozoic alkali-rich intrusive rock in China till now. Its old age and its distribution of the alkali-rich intrusive rock had important tectonic significance. It revealed that after the amalgamation at the end period of Archean, the crust of North China Craton had reached some thickness and had transformed into a kind of extensional tectonic settings since the intrusion of the alkali-rich intrusive rock in Hadamengou.

**Keywords:** TIMS; SHRIMP; Zircon U-Pb Age; Hadamengou Gold Deposit; Alkali-Rich Intrusive Rock; Paleoproterozoic

## 内蒙古哈达门沟石英正长岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义\*

任康绪<sup>1,2#</sup>, 阎国翰<sup>2</sup>, 蔡剑辉<sup>3</sup>, 邹天仁<sup>4</sup>, 牟保磊<sup>2</sup>, 李凤棠<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国石油勘探开发研究院, 北京

<sup>2</sup>北京大学地球与空间科学学院, 北京

<sup>3</sup>中国地质科学院矿产资源研究所, 北京

<sup>4</sup>中国地质科学院地质研究所, 北京

Email: #renkangxu@163.com

收稿日期: 2012年10月19日; 修回日期: 2012年10月27日; 录用日期: 2012年11月11日

**摘要:** 采用同位素稀释法(TIMs)和二次离子探针法(SHRIMP)对内蒙古哈达门沟大型金矿床主矿体控矿岩石进行了锆石测年研究, 最终确定了石英正长岩形成于古元古代早期, 其锆石 SHRIMP U-Pb 谐和年龄为 $(2483 \pm 10) \text{ Ma}(1\sigma)$ , 上交点年龄为 $(2508 \pm 41) \text{ Ma}(1\sigma)$ 。哈达门沟石英正长岩是国内迄今报道的元古代最古老的富碱侵入岩, 其时空分布具有重要大地构造意义, 指示了华北古陆在经历太古代末的碰撞拼合事件已经结束, 地壳具有一定厚度, 并已经开始向拉张性构造环境转变。

**关键词:** TIMS; SHRIMP; 锆石 U-Pb 年龄; 哈达门沟金矿; 富碱侵入岩; 古元古代

\*本文研究受国家自然科学基金(批准号: 40072024)资助。

#通讯作者。

## 1. 引言

内蒙古哈达门沟(也有文献称哈德门沟)金矿是中国著名的与碱性流体有关的大型金矿床<sup>[1,2]</sup>,由于大地构造位置地处华北克拉通北缘西段、矿床地质特征特殊,该金矿自发现以来,吸引了很多学者的注意力<sup>[1-9]</sup>。该金矿矿化区及外围出露了不同规模的侵入岩体及脉岩类,岩石类型有伟晶岩、黑云母花岗岩、碱性正长岩、花岗闪长岩、闪长岩和细晶岩等,时代从古元古代到中生代都有分布<sup>[10]</sup>。

关于上述侵入岩早期活动时间或成岩时代,不同研究者获得的结果不完全一致:邹天人等报道与金矿成矿作用密切相关的山前两个钾化带为岩浆岩,其锆石蒸发年龄为(1975 ± 12) Ma(北带)和(1981 ± 14) Ma(南带)<sup>[11]</sup>;苗来成等报道 13 号矿脉附近伟晶岩的锆石 SHRIMP 年龄为(1836 ± 5) Ma<sup>[10]</sup>;聂凤军等报道金矿化区黑云母-磁铁矿伟晶岩脉的 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄为(1992.73 ± 38.94) Ma,等等。上述年龄数据分布范围大,且缺乏对深源低程度熔融岩石类型即碱性岩的过硬测年数据,因此对矿区早期岩浆活动规律研究缺乏完整性。碱性岩类岩石以其来源深、产出构造环境独特而为广大学者所瞩目,是洞悉地球深部信息的重要窗口<sup>[12,13]</sup>。为明确这一地区前寒武纪碱性岩时空分布特征,本文以哈达门沟金矿矿化区最具代表性的 13 号矿脉群<sup>[11]</sup>的控矿岩石即石英正长岩为研究对象,开展高精度锆石 U-Pb 年龄测定,并对其大地构造意义进行探讨。

## 2. 地质概况和样品特征

内蒙古哈达门沟金矿位于包头市西约 15 km 处,矿床围岩主要为太古宙乌拉山群变质岩,岩性主要为紫苏二长片麻岩、黑云石榴斜长片麻岩、紫苏石榴麻粒岩<sup>[14]</sup>。主矿体 13 号矿脉群位于矿区东部,是一条近东西走向的脉带,总长近 7500 m,其中 13 号主脉长约 2200 m(图 1)。控矿岩石类型主要为细晶正长岩、细晶石英正长岩,呈脉状产出,具有富碱(主要是钾)侵入岩特有的锆石和碳酸盐矿物,在细晶正长岩和细晶石英正长岩分布带顶部,有细粒黑云母碱长花岗岩脉和霓辉石微斜长石伟晶岩及霓辉石磁铁矿微斜长石伟晶岩小脉<sup>[1]</sup>。

样品采自 13 号矿脉,手标本比较新鲜,呈灰红-

暗肉红色,岩性为细晶石英正长岩,具有细粒结晶结构,主要由约 70%的钾长石(微斜长石 + 条纹长石)和约 30%的石英组成,有少量方解石,偶见斜长石,副矿物有磁铁矿、锆石等(图 2)。邹天人等详细研究过 13 号矿脉中石英正长岩的岩石化学特征,并通过 CIPW 标准矿物计算出现了锥辉石和似长石类矿物,按照当代碱性岩分类方案属于碱性岩类无疑,通过构造环境判别属于典型的非造山碱性岩<sup>[1]</sup>。

样品采用钢笨手工碎样,锆石经重选 + 电磁选重矿物分离,然后在双目镜下人工挑选获得。挑选出的锆石绝大多数为浅褐色-暗红褐色,短柱状,半透明-透明,晶面光滑,但因棱角有一定的熔蚀现象使锆石外形显现出似浑圆状,粒度一般 100~200 μm,极

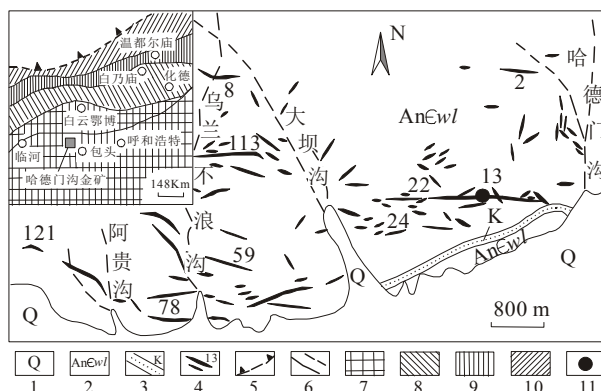


Figure 1. Sketch geological map of Hademengou gold deposit (modified after reference [1]): 1: Quaternary; 2: Wulashan group; 3: Piedmont potassic zone; 4: Vein and serial number; 5: Ancient oceansuture zone; 6: Measured and presumed fault; 7: Archean-Paleoproterozoic strata; 8: Meso-Lateproterozoic strata; 9: Early-Paleozoic strata; 10: Late-Paleozoic strata; 11: Sample location

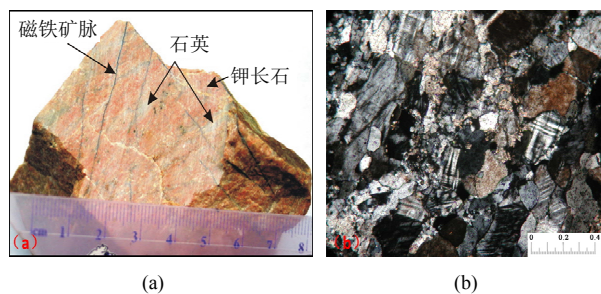


Figure 2. Petrological features of the studied quartz syenite: (a) Sample macroscopic fabric characteristics; (b) Microscopic fabric characteristics

图 2. 研究区石英正长岩岩石学特征: (a) 手标本宏观结构特征; (b) 显微结构特征

个别锆石颗粒较大(>200 μm)且颜色也比较深(深褐色)、半透明状。

### 3. 分析方法和结果

#### 3.1. 锆石 TIMS 法测年分析

TIMS 法(同位素稀释法)测年实验在中科院地质与地球物理研究所同位素实验室完成。样品处理前先在双目镜下将锆石筛分成不同粒级,然后挑选出若干个晶形较好、无包裹体和连生体的颗粒,分别用 5 N 的 HNO<sub>3</sub> 和 3 N 的 HCL 溶液低温洗涤 30 min,再用蒸馏水清洗,烘干。经过上述处理后分选出若干组锆石,然后在每组中选择数粒锆石置入清洗干净的聚四氟乙烯高压釜内,称量加入大约 130 mg 的 <sup>205</sup>Pb-<sup>235</sup>U 混合稀释剂溶液,蒸干后再加入约 0.25 ml 的浓 HF,在 200℃条件下加热 7 昼夜。U、Pb 的分离和提纯在 AGI × 8 (200~800 目)阴离子树脂上进行,采用氢溴酸体系。U、Pb 同位素测定用硅胶做发射剂,在 VG354 固体源质谱计上进行计量测定。Pb 的全流程本底小于 50 × 10<sup>-12</sup> g。获得的数据和拟合年龄结果见表 1 和图 3,数据拟合采用 Isoplot 软件<sup>[15]</sup>。

TIMS 法分析结果表明 4 组锆石测试数据 U 含量都比较高(117~685 μg·g<sup>-1</sup>)(表 1),反映出高铀锆石的特征,并且 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 表面年龄非常接近,每组数据都显示出 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb > <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U > <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 的不一致表面年龄。出现这种特征是由于锆石放射成因铅近期不同程度丢失引起的<sup>[16]</sup>,这种情况下的 <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U 和 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 表面年龄不能直接代表锆石形成的同位素混合年龄,采用谐和图交点法可获得锆石样品的混合年龄。根据上述 4 组数据拟合出一条不一致线,数据基本集中在该直线上,获得与谐和线的上交点年龄为 (2352 ± 49) Ma(2σ), MSWD = 108, 下交点年龄接近

零(图 3)。由于 MSWD 值偏大,且在光学显微镜下观察发现锆石晶体表面棱角熔蚀呈浑圆状,怀疑有可能受到过后期热事件影响,需通过阴极发光开展锆石形貌及内部结构研究,在此基础上开展单颗粒锆石测年。

阴极发光(CL)图像分析在北京大学采用 FEI PHILIPS XL30 型扫描电镜完成。通过阴极发光对锆石颗粒的观察,发现该锆石样品内部主体部分发育岩浆成因的振荡环带<sup>[17,18]</sup>,外部常发育一层很薄的增生边,阴极发光下呈白色(图 4)。因此本文 TIMS 法获得的(2352 ± 49) Ma 的数据可能代表锆石岩浆成因年龄与后期热变质壳年龄的混合值,不具有代表性,但能指示出锆石的寄主岩石成岩年龄应该比这一数值要大。为了获得过硬的 U-Pb 同位素年代学数据,本文进一步采用 SHRIMP 法对该批锆石样品进行高精度微区原位测年分析。

#### 3.2. 锆石 SHRIMP 法测年分析

锆石样品的 CL 图像显示其晶体外层增生壳很薄(约 5~10 μm),SHRIMP 方法还无法对其进行微区测年分析,因此仅对岩浆成因环带部分进行测定。测年分析在中国地质科学院北京离子探针中心 SHRIMP II 型仪器上完成,采用的锆石标样为 SL13 (572 Ma)和 TEMORA (417 Ma)<sup>[19]</sup>,实验分析结果列于表 2,数据拟合<sup>[15]</sup>谐和图见图 5。

从表 2 可见,SHRIMP 分析获得的 11 组数据 U、Th 含量都在数百 μg·g<sup>-1</sup> 以上,且 Th/U 比值大于 0.4,这些数据再次支持是岩浆锆石成因<sup>[18]</sup>。11 组数据的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U、<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U 均不一致,投射镜下见锆石裂缝也比较多,表明锆石形成后遭受了不同程度的铅丢失。11 个数据中获得一个谐和点年龄(测点 BT-1.2,谐和度 > 99%),其 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 表面年龄为(2483 ± 10)

Table 1. TIMS zircon age data for the studied quartz syenite  
表 1. 哈达门沟金矿石英正长岩 TIMS 锆石年龄分析结果<sup>1</sup>

| 组别   | U/μg·g <sup>-1</sup> | Pb/μg·g <sup>-1</sup> | <sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | <sup>207</sup> Pb*/ <sup>235</sup> U | 2σ%  | <sup>206</sup> Pb*/ <sup>238</sup> U | 2σ%  | <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb* | 2σ%  | 表面年龄/Ma                             |                                     |                                      |
|------|----------------------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------|--------------------------------------|------|---------------------------------------|------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
|      |                      |                       |                                      |                                      |      |                                      |      |                                       |      | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb |
| No.1 | 555.71               | 340.91                | 251                                  | 8.3532                               | 1.35 | 0.3999                               | 1.33 | 0.1515                                | 0.20 | 2270.1                              | 2168.6                              | 2362.8                               |
| No.2 | 685.16               | 199.70                | 490                                  | 4.3375                               | 3.50 | 0.2128                               | 3.47 | 0.1479                                | 0.43 | 1700.5                              | 1243.5                              | 2321.3                               |
| No.3 | 362.08               | 13.82                 | 680                                  | 0.5931                               | 0.92 | 0.0286                               | 0.85 | 0.1503                                | 0.35 | 472.8                               | 181.9                               | 2349.1                               |
| No.4 | 117.05               | 47.98                 | 678                                  | 6.3607                               | 0.27 | 0.3088                               | 0.27 | 0.1494                                | 0.04 | 2026.9                              | 1734.7                              | 2339.1                               |

<sup>1</sup>Pb\*表示放射成因铅。

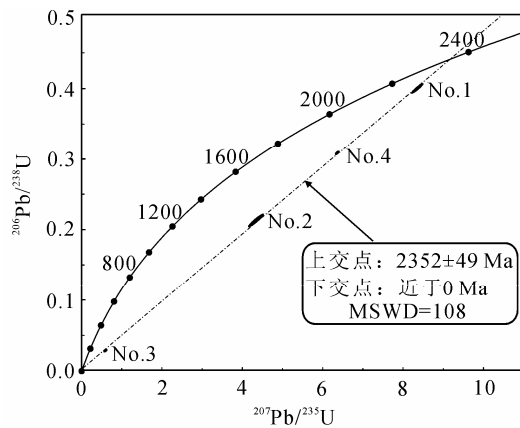


Figure 3. Concordia diagram for TIMS zircon ages of the studied quartz syenite  
图 3. 石英正长岩 TIMS 锆石年龄图

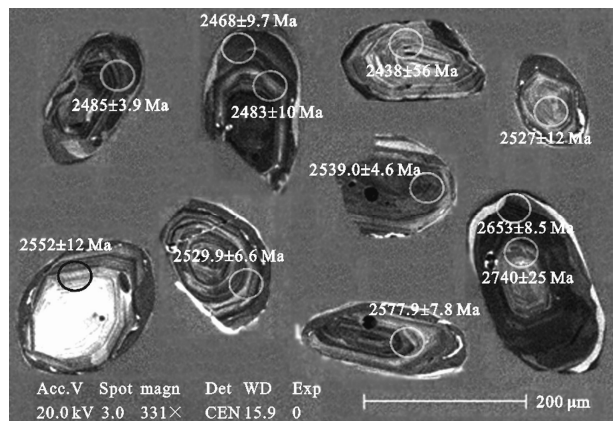


Figure 4. CL images and dating positions on zircons of the studied quartz syenite  
图 4. 石英正长岩锆石样品 CL 图像及 SHRIMP 测点位置

Table 2. SHRIMP zircon age data for the studied quartz syenite of Hadamengou gold deposit<sup>2</sup>  
表 2. 哈达门沟金矿石英正长岩 SHRIMP 锆石年龄分析结果<sup>2</sup>

| 测点编号   | U/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | Th/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | Th/U | Pb <sup>*</sup> / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | <sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> /% | <sup>204</sup> Pb 校正的数据             |              |                                     |              | <sup>204</sup> Pb 校正的表面年龄/Ma        |               |                                      |               |
|--------|------------------------------------|-------------------------------------|------|---|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------|-------------------------------------|---------------|--------------------------------------|---------------|
|        |                                    |                                     |      |   |                                   | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U | 1 $\sigma$ % | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | 1 $\sigma$ % | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | $\pm 1\sigma$ | <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb | $\pm 1\sigma$ |
| BT-1.1 | 731                                | 461                                 | 0.65 | 251.2   | 0.02                              | 8.8864                              | 1.87         | 0.3998                              | 1.78         | 2168                                | 33            | 2468                                 | 10            |
| BT-1.2 | 653                                | 298                                 | 0.47 | 264.1   | 0.01                              | 10.5457                             | 1.86         | 0.4704                              | 1.76         | 2486                                | 36            | 2483                                 | 10            |
| BT-2.1 | 227                                | 144                                 | 0.65 | 68.2  | 0.04                              | 8.1663                              | 1.97         | 0.3495                              | 1.84         | 1932                                | 31            | 2552                                 | 12            |
| BT-3.1 | 686                                | 306                                 | 0.46 | 287.3   | 0.01                              | 10.9491                             | 1.77         | 0.4875                              | 1.75         | 2560                                | 37            | 2485                                 | 4             |
| BT-4.1 | 312                                | 268                                 | 0.89 | 139.1   | 0.05                              | 11.3262                             | 4.44         | 0.5187                              | 2.95         | 2694                                | 65            | 2438                                 | 56            |
| BT-5.1 | 477                                | 306                                 | 0.66 | 186.6   | 0.01                              | 10.5578                             | 1.78         | 0.4555                              | 1.76         | 2420                                | 35            | 2539                                 | 5             |
| BT-6.1 | 269                                | 123                                 | 0.47 | 106.8   | 0.04                              | 12.0821                             | 2.82         | 0.4618                              | 2.38         | 2447                                | 48            | 2740                                 | 25            |
| BT-6.2 | 1750                               | 922                                 | 0.54 | 316.8   | 0.03                              | 5.2289                              | 1.82         | 0.2107                              | 1.75         | 1232                                | 20            | 2653                                 | 9             |
| BT-7.1 | 198                                | 142                                 | 0.74 | 87.4  | 0.01                              | 12.2138                             | 1.84         | 0.5148                              | 1.78         | 2677                                | 39            | 2578                                 | 8             |
| BT-8.1 | 411                                | 225                                 | 0.56 | 132.2   | 0.00                              | 8.6272                              | 1.83         | 0.3742                              | 1.79         | 2049                                | 32            | 2530                                 | 7             |
| BT-9.1 | 239                                | 214                                 | 0.92 | 74.3  | 0.00                              | 8.3267                              | 1.95         | 0.3619                              | 1.82         | 1991                                | 31            | 2527                                 | 12            |

<sup>2</sup>Pb\*表示放射成因铅, <sup>206</sup>Pb<sub>c</sub>(%)为普通<sup>206</sup>Pb在整体<sup>206</sup>Pb中占的比例, 普通铅用<sup>204</sup>Pb校正。

Ma(1 $\sigma$ )。由于锆石 U-Pb 同位素谱和年龄数据铅丢失非常微小, 因此可以代表寄主岩石的成岩年龄。在谱和图解上, 其他测点由于铅丢失导致 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄不同程度偏差谱和线(图 4), 9 组数据点(BT-6 除外, 另行讨论)的上交点年龄值为(2508 ± 41) Ma(1 $\sigma$ ), 且它们的 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 表面年龄很集中(加权平均值 2515 ± 27Ma(1 $\sigma$ )), 表明为同期成因锆石, 这一年龄数据在误差范围内与(2483 ± 10) Ma 的谱和年龄吻合。上述几组年龄数据比较接近, 据此可将哈达门沟金主矿区石英正长岩的成岩年龄限定在 2.48~2.51 Ga 左右。对于编号为 BT-6 的锆石, 显然与分析的其他锆石不是同

期形成的, CL 分析表明该锆石颗粒具有核-幔-边结构及成分的不均一性(图 4): 核-幔部分具有规则振荡环带表明其为岩浆成因, 核部 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 表面年龄值(2740 ± 25) Ma 可能指示了源区残留锆石年龄信息, 不能代表石英正长岩的成岩年龄。

#### 4. 讨论和结论

本文采用目前最有效的测年方法即锆石 SHRIMP U-Pb 法限定了哈达门沟金矿区石英正长岩的成岩时代, 不仅对探讨该矿床的控矿岩石时空分布具有重要意义, 更重要的是通过对该碱性岩的研究能深入了解

华北克拉通北缘古元古代早期大地构造演化特征及克拉通深部的信息。

按照涂光炽院士的学术观点<sup>[20]</sup>, 石英正长岩这类富碱侵入岩起源于地球深部, 是上地幔部分熔融产生的富碱岩浆, 顺着区域性大断裂上升, 与硅铝层发生混染较多时形成的岩石类型, 这类岩石的出现一般代表着非挤压构造环境。但正如前文所述, 此前该金矿床控矿岩石之一的石英正长岩由于缺乏过硬的年代学数据, 其时空分布意义未能在前寒武纪尤其是古元古代大地构造研究中引起重视。

综合分析前人对哈达门沟金矿区有关的年代学研究<sup>[2,8]</sup>, 早期主要应用 K-Ar、Rb-Sr 法来进行测年, 虽然获得了多组年龄信息, 但由于该方法的局限性, 对于比较古老且又遭受过后期热事件影响的地质体测年通常难以凑效, 往往揭示的是后期强烈热事件干扰信息。苗来成等<sup>[11]</sup>、聂凤军等<sup>[10]</sup>用 SHRIMP 法获得了高精度的数据, 但都没有针对该矿床主体控矿岩石的石英正长岩, 而测定的是矿脉两侧的钾化蚀变岩和伟晶岩。本文研究表明, 该矿区的碱性岩脉形成于古元古代早期。由此进一步揭示出该金矿区控矿岩石时空分布的复杂性。

前人资料表明, 华北克拉通 2.5 Ga 左右有一期强烈的地壳增生事件<sup>[21,22]</sup>, 时限范围 2550~2475 Ma, 表现为巨型麻粒岩带、岩浆构造热事件、沉积建造开始和环境变化等, 是华北陆块一次重要的拼合事件<sup>[23]</sup>。本文获得哈达门沟石英正长岩 2.48~2.51 Ga 的锆石 U-Pb 年龄, 一方面表明哈达门沟金矿区发育国内迄今最古老的元古代富碱侵入岩, 另一方面也揭示这一时期的克拉通地壳已经达到相当的厚度, 华北陆块太古宙末期的碰撞拼合事件已经结束并开始向拉张环境转变, 揭示这种变化的文献还有郎殿有<sup>[24]</sup>(揭示本区 2500~2400 Ma 有一次深层塑性变形事件)及 Kusky 等<sup>[25]</sup>(华北克拉通北缘 2.50~2.40 Ga 处于拉张裂陷盆地的构造格局)学者。

综上所述, 本文得出如下结论: 1) 哈达门沟金矿区石英正长岩形成于古元古代早期, 锆石 SHRIMP U-Pb 谱和年龄为 $(2483 \pm 10) \text{ Ma}$ , 上交点年龄值为 $(2508 \pm 41) \text{ Ma}$ ; 2) 哈达门沟金矿区发育国内最古老的元古代富碱侵入岩, 它的时代限定具有重要的大地构造意义, 指示了华北古陆太古宙末期碰撞事件的结

束并开始向拉张环境转变。

## 5. 致谢

本文完成过程中北京大学刘树文教授、李江海教授提供了具体的修改意见, 在此表示感谢!

## 参考文献 (References)

- [1] 邹天人, 徐珏, 夏凤荣. 内蒙古自治区乌拉山金矿床的成因[J]. 矿床地质, 1998, 17(增刊): 373-376.
- [2] 中国人民武装黄金部队指挥部. 内蒙古自治区哈达门沟伟晶岩金矿地质[M]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [3] 李强之, 陈衍景, 徐登科等. 内蒙古哈达门沟金矿床单矿物金浸出实验研究及其地质意义[J]. 矿床地质, 2003, 22(3): 271-277.
- [4] 周坤. 内蒙古哈达门沟金矿床地质特征及成因探讨[J]. 黄金, 1995, 16(10): 5-8.
- [5] 梁海军, 赵春荣. 内蒙古哈达门沟金矿床成矿条件及控矿因素[J]. 黄金地质, 1999, 5(2): 42-46.
- [6] 张庆辉. 哈德门沟金矿区矿体定位规律研究[J]. 黄金, 1997, 18(11): 15-18.
- [7] 郭砚田. 内蒙古乌拉山“哈德门沟式”金矿床成矿地质特征[J]. 贵金属地质, 1992, (2-3): 191-195.
- [8] 孟伟, 陈小伍, 李蒙文. 内蒙古哈达门沟金矿成矿时代及成矿阶段研究[J]. 黄金地质, 2002, 8(4): 13-17.
- [9] 王彦君, 刘明成. 哈德门沟金矿床地质若干特点[J]. 采矿技术, 2006, 6(4): 91-93.
- [10] 聂凤军, 江思宏, 刘妍等. 再论内蒙古哈达门沟金矿床的成矿时限问题[J]. 岩石学报, 2005, 21(6): 1719-1728.
- [11] 苗来成, 裘有守, 关康等. 哈达门沟金矿床成岩成矿时代的定点定年研究[J]. 矿床地质, 2000, 19(2): 182-190.
- [12] H. Sørensen. The Alkaline Rocks. London: John Wiley & Sons, 1974: 1-276.
- [13] 任康绪, 阎国翰, 蔡剑辉等. 华北克拉通北部古-中元古代富碱侵入岩的 Nd、Sr、Pb 同位素地球化学: 岩石圈地幔富集的证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(2): 2933-2944.
- [14] 甘盛飞. 内蒙古大青山太古宙麻粒岩带的变质构造演化及金的成矿[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1992: 57.
- [15] K. R. Ludwig. ISOPLOT/Ex, Version 2.49: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2001: 21-28.
- [16] 蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊等. 辽宁盖县梁屯-矿洞沟碱性正长岩杂岩体的 U-Pb 和 Sm-Nd 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2002, 18(3): 349-354.
- [17] A. P. Nutman, D. H. Green, C. A. Cook, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of the exhumation of the Lizard Peridotite and its emplacement over crust rocks: Constraints for tectonic models. Journal of the Geological Society, 2001, 158(5): 809-820.
- [18] 钟玉芳, 马昌前, 余振兵. 锆石地球化学特征及地质应用研究综述[J]. 地质科技情报, 2006, 25(1): 28-34.
- [19] L. P. Black, S. L. Kamo, C. M. Allen, et al. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. Chemical Geology, 2003, 200(1-2): 155-170.
- [20] 涂光炽. 关于富碱侵入岩[J]. 矿产与地质, 1989, 13: 1-4.
- [21] 耿元生, 万渝生, 沈其韩. 华北克拉通早前寒武纪基性火山作用与地壳增生[J]. 地质学报, 2002, 76(2): 199-208.
- [22] 翟明国, 卞爱国. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(12): 129-137.
- [23] 彭澎, 翟明国. 华北陆块前寒武纪两次重大地质事件的特征

内蒙古哈达门沟石英正长岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义

- 和性质[J]. 地球科学进展, 2002, 17(6): 818-825.
- [24] 郎殿有. 内蒙古乌拉山金矿成矿流体来源、性质和演化[J]. 黄金地质, 1997, 3(2): 24-30.
- [25] T. M. Kusky, J. H. Li. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 22 (4): 383-397.