

河北滦平周台子条带状铁矿地质特征、围岩时代及其地质意义*

相鹏^{1,2} 崔敏利³ 吴华英⁴ 张晓静¹ 张连昌¹

XIANG Peng^{1,2}, CUI MinLi³, WU HuaYing⁴, ZHANG XiaoJing¹ and ZHANG LianChang¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所,中国科学院矿产资源研究重点实验室,北京 100029

2. 中国科学院大学,北京 100049

3. 中国地质调查局发展研究中心,北京 100037

4. 中国冶金地质总局矿产资源研究院,北京 100025

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

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

3. Development Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China

4. Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 100025, China

2012-07-21 收稿, 2012-10-08 改回.

Xiang P, Cui ML, Wu HY, Zhang XJ and Zhang LC. 2012. Geological characteristics, ages of host rocks and its geological significance of the Zhoutaizi iron deposit in Luanping, Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11):3655–3669

Abstract Zhoutaizi iron deposit lies on the northern margin of the North China Craton, which is located in Luanping, Hebei Province. The iron deposit occurred in the metamorphic rocks, Dantazi Group of Precambrian. And the deposit which has obvious banded iron formations is an Anshan type iron deposit. The banded structure is obvious in ore rock, whereas striate and massive structure is rare. The quartz magnetite type is the main ore rock type which contains 30% ~ 35% irons. The main wall rock is the metamorphic rocks in Precambrian including biotite plagiogneiss, amphibolite and granitic gneiss. The granitic gneiss is characterized as $\text{SiO}_2 > 56\%$, $\text{MgO} < 3\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$, $\text{Sr} > 500 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 1.9 \times 10^{-6}$, obvious fractionation between HREE and LREE, HREE depleted strongly, inconspicuous negative Eu anomalies. It is indicated that the granitic gneiss is geochemically similar to adakite. Zircon U-Pb analysis has shown several different ages, which are $2512 \pm 21\text{Ma}$, $2452 \pm 9.6\text{Ma}$, $2394 \pm 55\text{Ma}$, respectively. First of all, the ages around 2512Ma represent the volcanic eruption event and the sedimentary age of BIF deposit. Secondly, the ages around 2452Ma represent the crystallization age of TTG granitic gneiss. At last the ages around 2394Ma represent a metamorphic event which resulted in the modification of original rocks and ore rocks. The Hf isotope data indicates that the magma source of amphibolite and TTG granitic gneiss may be contaminated by ancient crustal material. And therefore the tectonic setting of Zhoutaizi iron deposit was extensional related to rifts.

Key words Banded Iron Formation; Hf isotope; Zircon U-Pb ages; TTG; Zhoutaizi iron deposit; The northern margin of the North China Craton

摘要 河北滦平县周台子铁矿位于华北克拉通北缘,是产于前寒武纪单塔子群变质岩系中的鞍山式铁矿,具有条带状铁建造(BIF)特征。矿石主要呈条带状构造,有的呈条纹和致密块状构造。矿石类型主要以石英磁铁矿型为主,含铁介于30%~35%。前寒武纪变质岩是矿床的主要围岩,出露有黑云母(角闪)斜长片麻岩和斜长角闪岩,局部见花岗片麻岩。原岩恢复表明,黑云母(角闪)斜长片麻岩的原岩为英安岩-流纹岩,斜长角闪岩原岩为玄武岩。花岗片麻岩的 SiO_2 含量大于56%, MgO

* 本文受国家重点基础研究发展计划 973 项目(2012CB416601)和中国科学院知识创新工程重要方向项目群(KZCX-2YW-Q04-07)联合资助。

第一作者简介:相鹏,男,1984年生,博士生,矿床学专业,E-mail:xiangpeng@mail.iggcas.ac.cn

含量小于3%, Al_2O_3 含量大于15%, Sr 含量大于 500×10^{-6} , Yb 含量均小于 1.9×10^{-6} , 轻重稀土元素分异明显, 重稀土元素强烈亏损, 并且 Eu 负异常不明显, 表明该片麻岩具埃达克质岩石的地球化学特征。锆石 U-Pb 定年结果显示出几组年龄, 分别是 2512 ± 21 Ma, 2452 ± 9.6 Ma, 2394 ± 55 Ma。大体看, 2512 Ma 代表了火山喷发和周台子铁矿 BIF 沉淀年龄, 2452 Ma 左右的锆石年龄代表了 TTG 质花岗片麻岩的侵位结晶年龄, 2394 Ma 锆石年龄代表了周台子铁矿经历了一次变质作用, 并对原有的岩石和矿石进行了改造。锆石 Hf 同位素特征显示斜长角闪岩和 TTG 质片麻岩的岩浆源区受到过古老地壳物质的混染。周台子铁矿构造环境可能是与裂谷有关的张性环境。

关键词 条带状铁建造; Hf 同位素; 锆石 U-Pb 年龄; TTG; 周台子铁矿; 华北克拉通北缘

中图法分类号 P597.3; P618.31

1 引言

在我国, 鞍山式铁矿多赋存于前寒武纪变质岩系条带状铁建造(BIF)中, 是一种具有条带状层理构造的变质岩石建造, 其条带状矿化一般呈三种类型: 单一条带状、复合条带状和束状条带状(刘洪波, 1994)。条带状硅铁建造的主要矿物是以铁和硅的氧化物为主, 有时含有一些铁的硫化物和碳酸盐岩。在空间上, BIF 主要分布在鞍本、冀东、五台-吕梁和舞阳-霍邱地区等, 同时经历了不同程度的区域变质作用(从绿片岩相到麻粒岩相)和变形(Zhai and Windley, 1990); 在时间上, BIF 的形成时代跨度较大, 但主体形成于新太古代晚期, 比较精确的形成时代大多是用变质岩系的锆石年代学进行限定的, 如冀东的石人沟铁矿和水厂铁矿的形成时代分别为 2.55 Ga 和 2.54 Ga (Zhang *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012; 张连昌等, 2011)。同时, 前人对太古代与 BIF 密切共生的片麻岩、斜长角闪岩也进行了较为详细的岩石学成因研究, 限定其形成环境、时代以及大地构造背景(Zhai *et al.*, 1990)。

周台子铁矿位于河北省滦平县张百湾镇, 西距县城 29 km, 东距承德市 40 km。在 20 世纪 70 年代, 河北省地质局第四地质队曾经在该区进行了初步地质勘查工作, 认为周台子铁矿为产于前寒武纪单塔子群凤凰咀组变质岩系中的鞍山式铁矿。单塔子群自下而上划分为燕窝铺组、白庙组及不整合面之上的凤凰咀组、刘营组。前人对单塔子群的地层划分有较大的争议, 主要有三种观点。第一种观点认为单塔子群为新太古代地层(赵宗溥等, 1993); 第二种观点认为单塔子群为古元古代地层(钱祥麟等, 1985); 第三种观点将原单塔子群分为上下两个部分, 上部地层(凤凰咀组、刘营组)应被划分到古元古代的红旗营子群中去, 下部地层(燕窝铺组、白庙组)为解体后的单塔子群(王启超, 1992; 王启超和张少卿, 1995), 而新太古代和古元古代之间的界线就是单塔子群与红旗营子群之间的不整合面(胡学文等, 1996b)。另一个争论的问题是单塔子群的地质属性问题, 传统观点认为单塔子群是一个地层单元, 但王仁民等(2002)认为, 从构造单元角度将单塔子群划分为古蛇绿岩混杂带、弧前绿岩带、中间地块和弧后拉张带更为合理。李龙等(1996)将单塔子群解体为变质表壳岩和变质侵入体。由于单塔子群主体岩性是

高角闪岩相-麻粒岩相变质的英云闪长质、奥长花岗质、花岗闪长质片麻岩(TTG 岩套)和麻粒岩、斜长角闪岩、斜长变粒岩等表壳岩, 所以又被称之为单塔子杂岩(刘树文等, 2007a)。

前人也做了一些关于单塔子群和红旗营子群年代学方面的工作, 王启超等(2002)认为单塔子群(燕窝铺组、白庙组)的时限为 2800 ~ 2650 Ma, 属于新太古代早期。而红旗营子群(凤凰咀组、刘营组)的时限有两种认识, 一种是 2650 ~ 2560 Ma, 属于新太古代中期(王启超等, 2002), 另一种是 2450 ~ 2000 Ma, 属于古元古代(胡学文等, 1996a)。红旗营子杂岩中还记录有 2026 ~ 1978 Ma、1859 ~ 1848 Ma 不同年龄的花岗质侵入体(胡学文等, 1996a; 王启超, 1992)。因此, 本文希望通过对周台子铁矿年代学的研究, 能够限定赋矿地层凤凰咀组的形成时代, 进而对单塔子群和红旗营子群的形成提供年代学方面的依据。

前人对周台子铁矿的勘探以及研究工作主要集中于 20 世纪 60 ~ 70 年代, 工作重点主要是找矿勘探以及矿产地质方面, 对于矿区的岩石地球化学以及年代学未作研究。因此, 本文对周台子铁矿的矿石以及围岩进行了主量元素、微量元素地球化学分析, 以及锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素的测定, 为探讨周台子铁矿的成岩成矿时代及其地质意义提供依据。

2 区域地质与矿床地质特征

2.1 区域地质特征

周台子铁矿位于华北克拉通北缘, Zhai (2004) 认为太古代末华北克拉通存在 6 个微陆块(集宁陆块、迁怀陆块、胶辽陆块、阜平陆块、许昌陆块、阿拉善陆块)。在新太古代晚期, 华北各微陆块以陆-陆、陆-弧以及弧-弧碰撞的形式拼贴在一起, 期间可能还有更小的游离于上述微陆块之间的弧或陆的拼贴。不同微陆块的缝合带为新太古代晚期的绿岩带, 其变质火山岩大多具有岛弧、弧后盆地或陆内火山岩的地球化学特征。而周台子铁矿位于迁怀陆块的北部(图 1), 区域地层为早前寒武纪单塔子群和红旗营子群变质杂岩, 前寒武纪花岗岩侵入体也有出露。另外还有侏罗系火山岩和燕山期花岗岩侵入体分布。

单塔子群位于华北太古宙角闪岩-麻粒岩相带以北的承

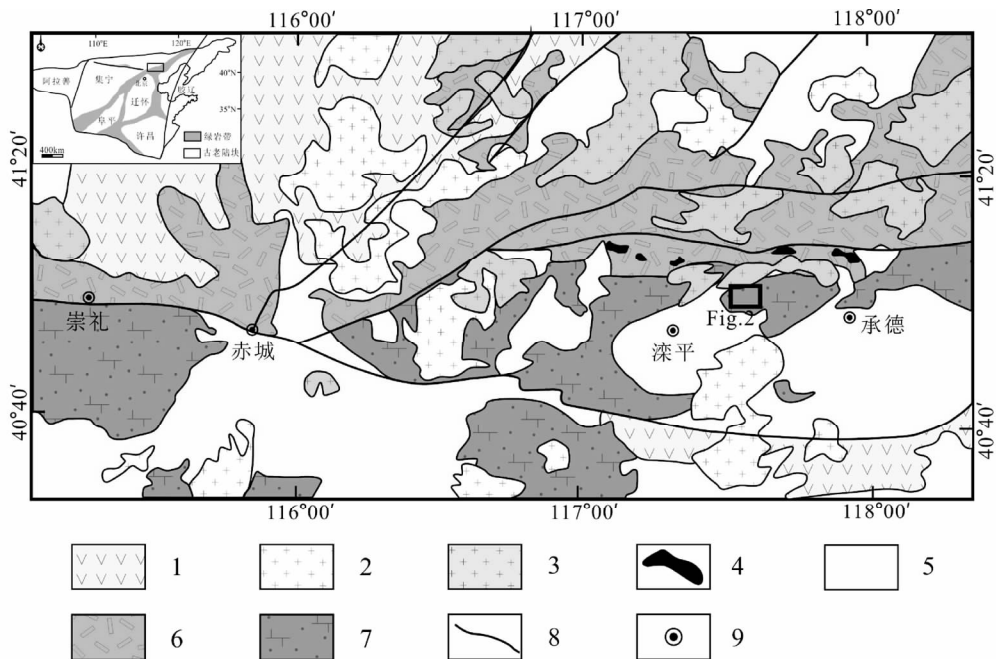


图1 冀北前寒武系变质杂岩地质简图(据刘树文等,2007b 修改)

1-中生代火山岩-火山沉积岩;2-中生代闪长岩-花岗岩侵入体;3-晚古生代闪长岩-花岗岩侵入体;4-晚古生代镁铁质-超镁铁质侵入体;5-中元古代-古生代未变质沉积盖层;6-早前寒武纪红旗营子群变质杂岩;7-早前寒武纪单塔子群变质杂岩;8-主要断裂;9-城镇

Fig.1 Geological sketch map of the Precambrian metamorphic complexes in northern Hebei (after Liu *et al.*, 2007b)

1-Mesozoic volcanic and volcanic-sedimentary rock; 2-Mesozoic diorite and granite intrusions; 3-Neopaleozoic diorite and granite intrusions; 4-Neopaleozoic mafic and ultramafic intrusions; 5-unmetamorphosed sedimentary cover in Mesoproterozoic-Paleozoic; 6-metamorphic complexes of the Hongqiyingzi Group in the Early Precambrian; 7-metamorphic complexes of the Dantazi Group in the Early Precambrian; 8-major faults; 9-cities and towns

德、平权一带,由一套高角闪岩相变质和区域重熔型混合岩化片麻岩和斜长角闪岩组成,单塔子群自下而上依次为燕窝铺组、白庙组、凤凰咀组和刘营组。根据前人资料,周台子铁矿主要赋矿地层为凤凰咀组。白庙组下伏地层为燕窝铺组,是一套黑云母化角闪岩夹斜长角闪岩,局部夹黑云斜长质混合岩及层状含角闪石磁铁石英岩。而白庙组可以分为两个岩性段,第一岩性段以绿帘石化蚀变角闪斜长片麻岩、浅粒岩为主,黑云斜长片麻岩、石榴斜长片麻岩次之,夹斜长角闪岩等。底部夹有层状、似层状、透镜状磁铁角闪石英岩,其底部岩性为黑云母斜长片麻岩;第二岩性段以混合岩化黑云斜长片麻岩为主,斜长浅粒岩及浅红色钾长石浅粒岩、二长浅粒岩次之。底部夹角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩以及层状、透镜状磁铁石英岩,上部为钾长浅粒岩夹二长浅粒岩及少量黑云母斜长片麻岩。赋矿地层凤凰咀组为一套低角闪岩相到高绿片岩相的变质岩,可分为三个岩性段,第一岩性段以斜长角闪岩为主,混合岩化黑云斜长片麻岩次之,夹黑云斜长变粒岩,顶部为一层含白云母透闪大理岩标志层;第二岩性段以中细粒斜长角闪岩为主,黑云斜长变粒岩次之,夹黑云母片岩及大理岩,顶部为含透辉石大理岩;第三岩性段以斜长角闪岩为主,夹黑云母斜长变粒岩及少量黑云二长片麻

岩。刘营组位于单塔子群最上部,为一套高绿片岩相到低角闪岩相变质岩,主要岩性为黑云斜长变粒岩,黑云角闪斜长变粒岩等。原红旗营子群的标准剖面在崇礼县北部,主要的岩石组合为黑云斜长片麻岩、角闪黑云斜长片麻岩、黑云变粒岩、夕线黑云变粒岩、石榴黑云斜长片麻岩、石榴黑云母片岩和不纯的大理岩等。

2.2 矿床地质特征

矿区内地层较为简单,前寒武纪变质岩是矿床的主要围岩,出露黑云母斜长片麻岩、斜长角闪岩和花岗岩片麻岩(图2),局部地段可见薄层黑云母片岩、绿泥石片岩等。上述各片麻岩往往沿走向、倾向方向变化很大。片麻岩的矿物成分主要是长石、角闪石、黑云母以及少量石英和磁铁矿、绿泥石。矿区受到不同程度的混合岩化作用,其中长英质脉体主要呈混入式,有的呈混染或混合状式。

矿区南部滦河以南出露有较大面积的花岗闪长岩体,在矿区周围的片麻岩中有黑云母闪长岩小岩枝侵入,对东南段矿体有一定破坏作用。矿区北部有较大面积的区域性花岗岩侵入,外观呈淡红色-褐灰色,具不明显的片麻状构造和中

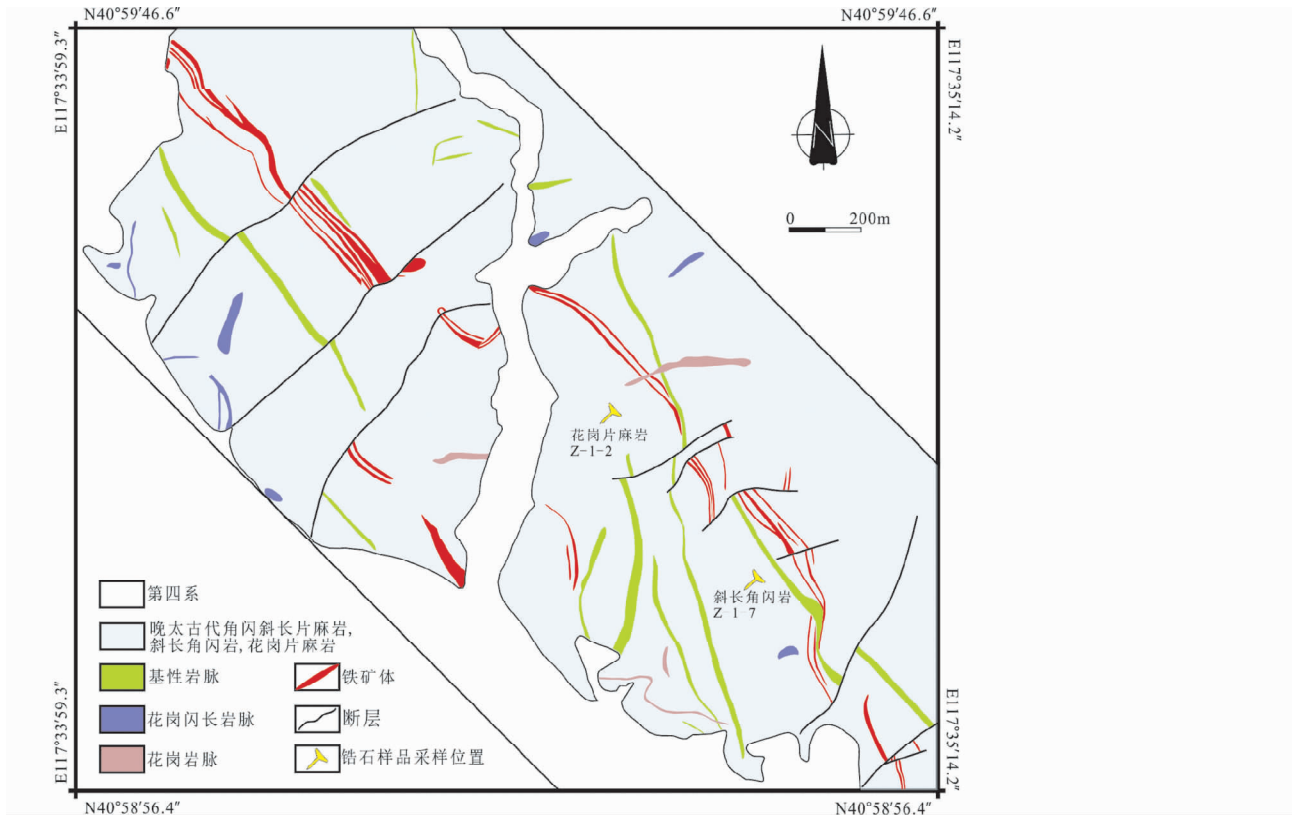


图2 周台子铁矿地质图

Fig. 2 Geological map of Zhoutaizi iron deposit

粗粒结构,主要成分为长石、石英、黑云母以及少量其他暗色矿物。与上述片麻岩接触处,片麻岩遭受不同程度的花岗岩化作用。矿区各种岩脉广泛发育,常见的岩脉有花岗伟晶岩脉、辉绿岩脉、石英斑岩脉、石英脉等。花岗伟晶岩脉分布虽广,但规模不大,也不够规则,多为断续脉状产出;而辉绿岩脉多呈脉状、切割矿体分布。

矿区构造复杂,其中片理产状有两种,分别为 $45^{\circ} \angle 60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 和 $225^{\circ} \angle 60^{\circ} \sim 80^{\circ}$,从钻孔中发现以39号勘探线为分界线,往西矿层倾向为南西,往东矿层倾向倒转成北东;断裂为压扭性平行断层,断层产状为 $135^{\circ} \angle 60^{\circ} \sim 80^{\circ}$,有的近于直立,断层走向大体垂直矿体,东南盘向北东推移,将矿体切割成若干矿块,对于矿体有破坏作用(图2)。

矿区分南北两个矿带,北矿带矿体较多,南矿带矿体较少,两个矿带的走向都呈北西向。北矿带东起杏树下,西至周台子村老达子沟西,延长约3100m左右。南矿带东起窑岑沟口,沿走向断续延长约800m。铁矿床基本呈层状产出,矿体与围岩界线清楚,且两者有着大体一致的产状。南部矿带经槽探控制地表出露长约380m,经磁法物探方法查明其东段在第四系覆盖层下延长150m左右,西段延长250~300m,总体延长约800m左右,通过深部钻探结果,发现有几个盲矿体。北部矿带东段矿层较薄,一般只见两层主要矿体,局部

变为多层,中间夹石一般2~10m不等。中段地表矿体连续,品位较稳定,向下延伸较大。西段地表矿体被第四系覆盖。

矿石具有明显的条带状构造特征,有的呈条纹构造或块状构造。矿区典型的矿石、围岩、野外露头及显微照片如图3所示。磁铁矿自形到半自形,粒径一般0.5~0.8mm,与脉石矿物石英和角闪石共生,呈镶嵌结构。

矿石类型主要有两种,一种是石英磁铁矿类型,含铁介于30%~35%,极少数达40%以上;脉石矿物以石英为主,含少量角闪石、黑云母,局部可见暗红色石榴石,石榴石富集部分磁铁矿粒度较粗,这类矿石是本区的主要矿石类型。另一种是黑云母角闪石石英磁铁矿型,含铁20%~30%,脉石矿物以角闪石、石英、黑云母为主,黄铁矿星散分布其中。黄铁矿中有斑铜矿、黄铜矿包体。此类型矿石分布于矿体顶底板,厚约1~20cm不等。此部位上常有热液富集的磁铁矿细条带,表现为磁铁矿变粗变富,石英减少而角闪石和磷灰石变多。

3 分析方法

主量元素、微量和稀土元素分析、锆石 U-Pb 定年及锆石

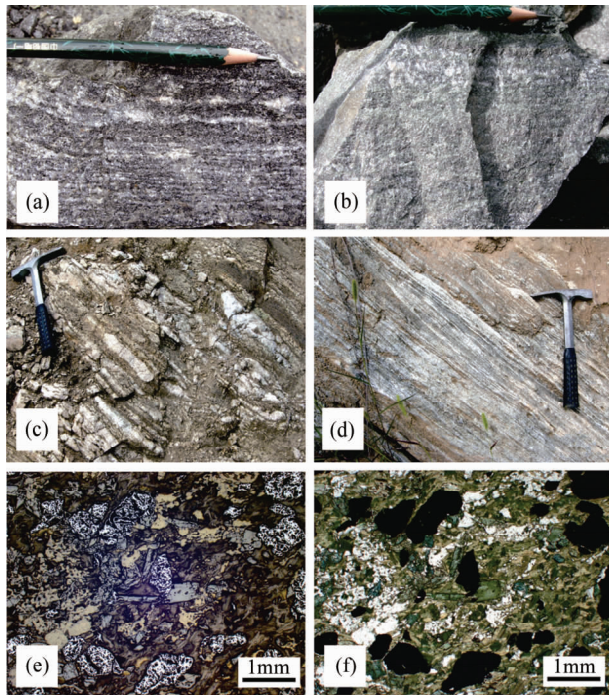


图3 研究区岩石、矿石、野外露头及显微照片

(a)-条带状矿石;(b)-斜长角闪岩;(c)-花岗岩片麻岩;(d)-斜长角闪片麻岩;(e)-条带状磁铁矿;(f)-斜长角闪岩

Fig.3 Photos of rocks, ore rocks, outcrops and microphotographs in the study area

(a)-banded ore rock;(b)-amphibolite;(c)-granitic gneiss;(d)-plagioclase hornblende gneiss;(e)-banded magnetite;(f)-amphibolite

Hf 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成。主量元素采用熔片 XRF 方法,其中 FeO 采用容量滴定法,分析精密度 RSD 为 0.1% ~ 1.0%。微量和稀土元素先采用 Teflon 熔样罐进行熔样,然后采用美国 FINNIGAN MAT 公司生产的 ELEMENT ICP-MS 仪器进行测定,仪器 RSD < 2.5%。本次研究所涉及到的两件锆石样品的 U-Pb 定年分别在中国科学院地质与地球物理研究所多接收等离子质谱仪实验室,和中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室完成。多接收等离子质谱仪实验室采用 Neptune 多接受电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)和 193nm 激光剥蚀系统进行测试的,激光束斑大小为 40 ~ 50 μm ,剥蚀深度为 30 ~ 50 μm ,实验中采用氦气作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研究的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化,采用 91500 标准锆石作为外部校正。普通 Pb 的校正采用 Andersen (2002) 的方法,样品的同位素比值和元素含量计算采用 Glitter(Macquarie University)程序,年龄计算和年龄谱图的绘制采用 ISOPLLOT 程序完成(Ludwig, 2003)。离子探针实验室采用 CAMECA IMS-1280 二次离子质谱仪(SIMS)进行锆石 U、Th、Pb 的测定,详细分析方法见 Li *et al.* (2009),锆石标样与锆石样品以 1 : 3 比例交替测定,U-Th-Pb 同位素比值用标准锆石 Plésovice (337Ma, Sláma

et al., 2008)校正获得,U 含量采用标准锆石 91500 (81×10^{-6} , Wiedenbeck *et al.*, 1995)校正获得,以长期监测标准样品获得的标准偏差(1SD = 1.5%, Li *et al.*, 2010)和单点测试内部精度共同传递得到样品单点误差,以标准样品 Qinghu (159.5 Ma, Li *et al.*, 2009)作为未知样监测数据的精确度。普通 Pb 校正采用实测 ^{204}Pb 值。由于测得的普通 Pb 含量非常低,假定普通 Pb 主要来源于制样过程中带入的表面 Pb 污染,以现代地壳的平均 Pb 同位素组成(Stacey and Kramers, 1975)作为普通 Pb 组成进行校正。同位素比值及年龄误差均为 1σ 。数据结果处理采用 ISOPLLOT 软件(Ludwig, 2003)。锆石 Hf 同位素锆石原位分析也在多接收等离子质谱仪实验室进行,采用 Neptune 多接受电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)和 193nm 激光剥蚀系统进行测试的,分析中所用的激光脉冲频率为 8Hz,激光束脉冲能量为 100mJ。详细的运行条件以及分析过程见 Wu *et al.* (2006)。锆石的阴极发光图像(CL 图像)是在中国科学院地质与地球物理研究所的扫描电镜实验室完成的,所用仪器为德国生产的 LEO 1450VP 扫描电子显微镜(SEM)。

4 测试结果

4.1 主量元素

周台子铁矿有 10 件样品进行了主量元素,稀土元素和微量元素分析,分析结果见表 1。主量元素分析显示,斜长角闪岩(Z-1-7、Z-1-8)的 SiO_2 含量较低,分别为 47.08% 和 48.76%, Na_2O 含量大于 K_2O 含量,且 K_2O 含量偏低,分别为 1.03% 和 0.30%, Al_2O_3 含量小于 15%。角闪斜长片麻岩(Z-1-5 和 Z-1-6)的 SiO_2 含量介于 56% ~ 70% 之间, Na_2O 含量大于 3.5%, K_2O 含量 2.0%。花岗岩片麻岩(Z-1-1、Z-1-2、Z-2-9)的 SiO_2 含量在 62.46% ~ 63.48% 之间, Na_2O 含量(3.45% ~ 3.74%)稍大于 K_2O 含量(2.25% ~ 2.47%), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值在 1.5 左右, Al_2O_3 含量大于 15%, Ti_2O 含量低于 0.7%。矿石(Z-2-2, Z-2-3, Z-2-8) SiO_2 含量相对较低,在 48.05% ~ 55.61% 之间, Na_2O 和 K_2O 含量较低,分别为 0.12% ~ 0.14%,0.02% ~ 1.70%, Al_2O_3 含量在 0.16% ~ 5.21% 之间,FeO 和 Fe_2O_3 含量较高,分别为 17.40% ~ 18.15%,33.89% ~ 38.53%。

4.2 微量元素

周台子铁矿样品微量元素含量见表 1。花岗岩片麻岩(Z-1-1, Z-1-2, Z-2-9) Σ REE 含量整体偏低,且主要集中于 93.28×10^{-6} ~ 98.63×10^{-6} ,LREE/HREE 比值为 12.21 ~ 13.05,(La/Yb)_N 值 21.2 ~ 23.7,说明轻重稀土元素分异明显, δEu 变化范围不大,集中在 1.18 ~ 1.25, Eu 正异常不明显,说明源区无或仅有微量斜长石残留。从微量元素蛛网图(图 4a)中可见,大离子亲石元素(LILE)相对富集,高场强元素(HFSE)相对亏损,其中元素 Ta 和 Nb 呈现负异常,Sr 含量

表1 周台子铁矿主量元素(wt%)和铁矿微量元素($\times 10^{-6}$)含量Table 1 Major elements (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) contents of Zhoutaizi iron deposit

样品号	Z-1-1	Z-1-2	Z-2-9	Z-1-5	Z-1-6	Z-1-7	Z-1-8	Z-2-2	Z-2-3	Z-2-8
岩性	花岗片麻岩			斜长角闪(片麻)岩				矿石		
SiO ₂	62.46	62.93	63.48	58.22	68.77	48.76	47.08	48.68	48.05	55.61
TiO ₂	0.61	0.55	0.62	0.99	0.42	0.73	1.30	0.27	0.19	0.02
Al ₂ O ₃	15.19	15.12	13.31	16.42	14.47	14.50	13.14	5.21	2.25	0.16
Fe ^T	8.22	7.90	8.34	8.79	4.39	13.08	19.01	33.89	37.64	38.53
MnO	0.09	0.10	0.11	0.09	0.05	0.17	0.27	0.25	0.11	0.09
MgO	3.04	3.00	2.63	2.85	1.89	8.31	6.27	7.06	6.59	3.64
CaO	3.71	3.86	3.91	5.11	2.33	9.78	9.91	1.72	4.06	1.64
Na ₂ O	3.45	3.54	3.74	3.54	4.44	3.12	2.29	0.14	0.16	0.12
K ₂ O	2.47	2.31	2.25	2.21	2.16	1.03	0.30	1.70	0.17	0.02
P ₂ O ₅	0.19	0.19	0.22	0.30	0.06	0.05	0.12	0.10	0.61	0.03
LOI	0.62	0.58	1.15	1.02	0.80	0.62	0.38	0.86	0.10	0.10
TOTAL	100.05	100.08	99.76	99.54	99.77	100.14	100.07	99.88	99.93	99.95
FeO	5.72	5.21	5.70	5.50	2.93	8.45	11.98	18.15	17.80	17.40
Fe ₂ O ₃	1.93	2.17	8.34	2.74	1.17	3.79	5.83	13.93	18.06	19.39
Na ₂ O + K ₂ O	5.92	5.85	5.99	5.75	6.60	4.15	2.59	1.84	0.33	0.14
Na ₂ O/K ₂ O	1.40	1.53	1.66	1.60	2.06	3.03	7.63	0.08	0.94	5.00
Ba	923	834	830	880	454	286	43.3	93.9	31.0	4.43
Rb	64.2	59.6	59.4	52.7	78.4	24.6	3.38	174	4.84	0.48
Sr	534	521	526	611	325	170	113	21.9	82.4	26.5
Zr	138	172	176	186	150	34.9	70.0	6.17	3.47	0.37
Nb	4.74	4.62	4.59	9.77	5.03	2.05	4.46	4.13	0.59	0.29
Ni	44.43	45.26	44.81	36.76	40.68	148.8	63.48	17.48	20.46	8.52
Co	21.89	22.39	22.07	24.41	17.74	50.97	57.21	6.32	7.57	5.16
Zn	85.07	83.13	81.16	98.42	62.04	103.7	141.7	118.7	53.67	13.36
Cr	330	348	377	165	260	353	112	135	238	223
La	22.57	20.81	21.59	32.15	38.71	2.09	3.89	6.61	14.24	0.51
Ce	41.13	38.70	39.83	70.97	74.52	5.18	10.88	13.66	27.36	1.05
Pr	5.05	4.80	4.87	9.49	8.68	0.86	1.85	1.91	3.30	0.16
Nd	18.04	17.20	17.22	36.74	29.62	4.50	9.65	7.71	12.71	0.65
Sm	3.50	3.47	3.42	7.55	5.20	1.60	3.12	1.61	2.71	0.17
Eu	1.32	1.24	1.24	1.84	1.31	0.65	1.08	0.33	0.63	0.09
Gd	2.80	2.80	2.77	5.90	4.09	2.25	4.17	1.47	2.43	0.19
Tb	0.35	0.36	0.35	0.84	0.53	0.41	0.81	0.24	0.36	0.03
Dy	1.80	1.80	1.77	4.50	2.85	2.96	5.75	1.55	2.10	0.22
Ho	0.33	0.33	0.33	0.84	0.55	0.67	1.23	0.34	0.42	0.05
Er	0.84	0.85	0.84	2.14	1.47	1.93	3.60	1.00	1.11	0.14
Tm	0.11	0.12	0.12	0.31	0.23	0.30	0.55	0.15	0.16	0.02
Yb	0.68	0.70	0.70	1.87	1.45	1.96	3.58	1.02	0.99	0.12
Lu	0.11	0.11	0.11	0.27	0.23	0.30	0.56	0.17	0.16	0.02
Y	8.10	8.13	8.20	21.10	14.31	16.44	31.13	8.48	11.16	1.87
Cs	0.70	0.67	0.67	0.68	0.90	0.52	0.26	4.13	0.17	0.03
Ta	0.20	0.21	0.21	0.45	0.23	0.15	0.30	0.18	0.04	0.01
Hf	3.80	4.99	5.05	4.82	4.39	1.13	2.15	0.25	0.18	0.01
Th	0.37	0.37	0.40	0.35	14.19	0.08	0.03	0.28	1.30	0.01
V	117.8	111.5	109.0	108.1	69.12	263.2	384.4	37.84	57.17	5.28
∑REE	98.63	93.28	95.15	175.4	169.4	25.66	50.73	37.76	68.66	3.40
LREE	91.61	86.21	88.16	158.7	158.0	14.88	30.48	31.82	60.95	2.62
HREE	7.02	7.06	6.99	16.66	11.38	10.78	20.25	5.94	7.72	0.78
LREE/HREE	13.05	12.21	12.62	9.53	13.88	1.38	1.51	5.36	7.90	3.36
(La/Yb) _N	23.7	21.2	22.1	12.4	19.2	0.77	0.78	4.65	10.4	2.99
δEu	1.25	1.18	1.19	0.81	0.84	1.05	0.92	0.64	0.73	1.57
Eu/Eu*	2.16	2.02	2.06	1.35	1.43	1.70	1.45	1.02	1.21	2.54
Ce/Ce*	0.89	0.89	0.90	0.93	0.94	0.85	0.88	0.88	0.92	0.85
Pr/Pr*	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	0.99	0.99	1.09	1.04	1.09
Gd/Gd*	1.15	1.09	1.13	1.06	1.15	1.10	1.04	1.06	1.10	1.12

注: Eu/Eu* = [Eu/(Sm × Sm × Tb) 1/3]_{PAAS}; Ce/Ce* = [Ce/(0.5La + 0.5Pr)]_{PAAS}; Pr/Pr* = [Pr/(0.5Ce + 0.5Nd)]_{PAAS}; Gd/Gd* = [Gd/(2Tb - 1Dy)]_{PAAS} (Frei and Polat, 2007)

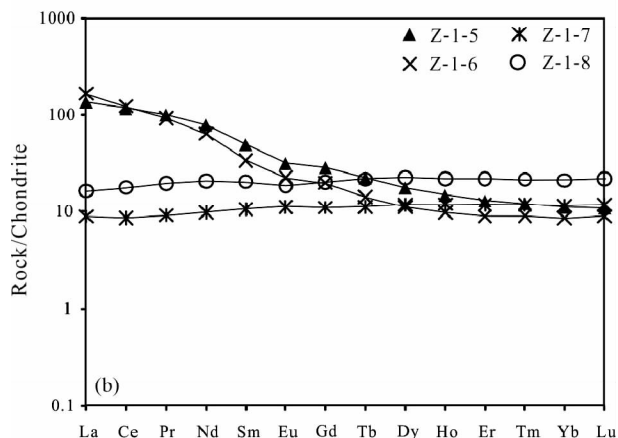
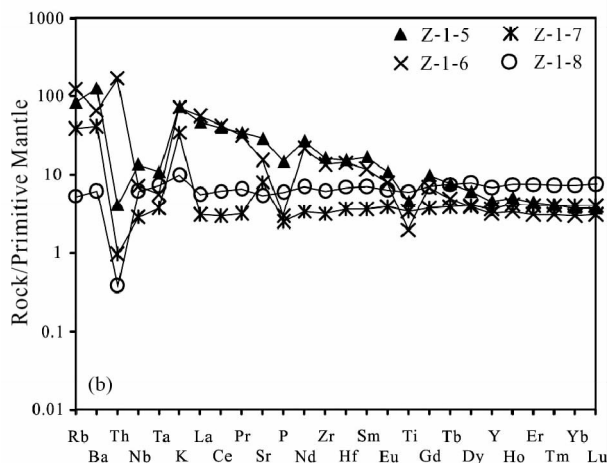
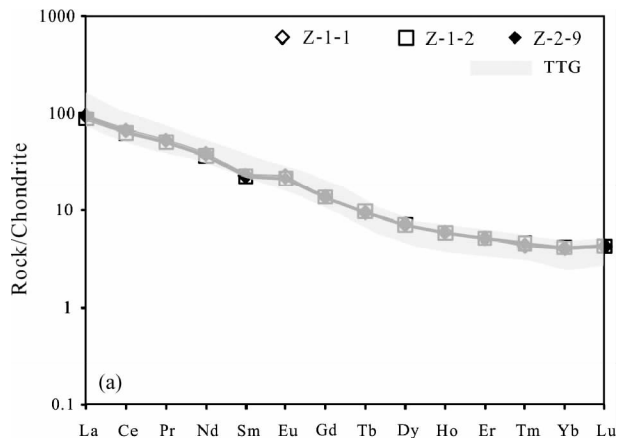
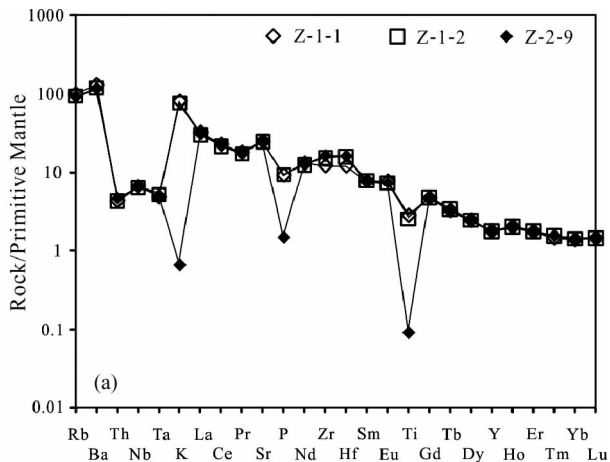


图4 周台子铁矿变质岩微量元素原始地幔标准化蛛网图解(原始地幔标准化值据 Thompson, 1982)

(a)-花岗片麻岩;(b)-斜长角闪岩

Fig.4 Primitive mantle-normalized spidergram pattern of metamorphic rocks in Zhoutaizi iron deposit (primitive mantle values after Thompson, 1982)

(a)-granitic gneiss; (b)-amphibolite

图5 周台子铁矿变质岩稀土元素球粒陨石标准化图解 (球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

(a)-花岗片麻岩;(b)-斜长角闪岩

Fig.5 Chondrite-normalized REE pattern of metamorphic rocks in Zhoutaizi iron deposit (chondrite values after Sun and McDonough, 1989)

(a)-granitic gneiss; (b)-amphibolite

均大于 500×10^{-6} , Yb 含量均小于 1.9×10^{-6} , Y 含量均小于 9×10^{-6} , MgO 含量小于 3%, SiO₂ 含量大于 60%。从稀土元素球粒陨石标准化图解(图 4a)可见,配分图呈现轻稀土轻微富集,重稀土轻微亏损的型式,轻重稀土元素的分异明显,除 Eu 出现轻微正异常以外,其他元素未见明显的异常,同时稀土元素配分型式与 TTG 岩石相比具有很大的相似性(图 4a 中 TTG 数据据万渝生等,2005),由此表明周台子铁矿花岗片麻岩具有 TTG 特征。

斜长角闪岩和斜长角闪片麻岩(Z-1-5, Z-1-6, Z-1-7, Z-1-8)的ΣREE 含量变化很大,根据变质原岩恢复,Z-1-5 的原岩为偏中性的安山岩,Z-1-6 的原岩为偏酸性的英安岩,Z-1-7 和 Z-1-8 的原岩为偏基性的玄武岩。因此,微量元素蛛网图(图 5b)和稀土元素球粒陨石标准化图(图 5b)中各微量元

素未见一致的分布规律,反映斜长角闪岩原岩的不一致性和复杂性。

矿石样品(Z-2-2, Z-2-3, Z-2-8)的稀土元素 PAAS (Post Archean Average Shale) 标准化图(图 6),其特征为:具轻稀土相对亏损、重稀土相对富集的配分型式,相对明显的 Eu 正异常($Eu/Eu^* = 1.02 \sim 2.54$,见表 1),无明显的 Ce 负异常($Ce/Ce^* = 0.95 \sim 0.94$),Pr 无明显异常($Pr/Pr^* = 0.99 \sim 1.09$),Gd/Gd* 介于 1~2 之间,这些稀土元素特征与典型 BIF 具有很大的相似性,说明周台子铁矿的 BIF 与典型 BIF 具有相同成因,都是海相沉积的产物(Derry and Jacobsen, 1990; Horstmann and Hålbich, 1995; Frei and Polat, 2007)。

4.3 锆石 U-Pb 定年

周台子铁矿斜长角闪岩(Z-1-7)和花岗片麻岩(Z-1-2)

表2 周台子铁矿斜长角闪岩(Z-1-7) 锆石 U-Th-Pb 分析数据(SIMS 法)

Table 2 Zircon U-Th-Pb data of amphibolite (Z-1-7) in Zhoutaizi iron deposit

测点号	Th U		Th/U	同位素比值								同位素年龄 (Ma)					
	$(\times 10^{-6})$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	比值	1σ (%)		比值	1σ (%)	比值	1σ (%)	比值	1σ (%)	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ		
01	83	115	0.72	0.1625	0.63	9.8847	1.63	0.4410	1.50	0.1180	3.33	2482.3	10.6	2424.1	15.1	2355.3	29.7
02	113	108	1.05	0.1500	0.52	8.3742	1.59	0.4050	1.50	0.1073	2.94	2345.4	8.9	2272.4	14.5	2192.1	27.9
03	198	261	0.76	0.1595	0.61	9.9289	1.62	0.4516	1.50	0.1210	2.89	2449.8	10.3	2428.2	15.0	2402.5	30.2
04	32	1062	0.03	0.1556	0.31	9.2595	1.58	0.4315	1.54	0.1244	3.90	2408.6	5.3	2364.0	14.5	2312.6	30.1
05	644	534	1.21	0.1661	0.21	11.0399	1.53	0.4821	1.51	0.1366	2.87	2518.6	3.6	2526.5	14.3	2536.4	31.8
06	83	323	0.26	0.1612	0.27	10.3585	1.52	0.4659	1.50	0.1303	2.94	2468.7	4.6	2467.3	14.2	2465.7	30.8
07	115	939	0.12	0.1623	0.25	9.9378	1.52	0.4440	1.50	0.1230	2.79	2479.9	4.2	2429.0	14.1	2368.7	29.8
08	53	58	0.92	0.1532	0.67	8.8015	1.65	0.4166	1.51	0.1126	2.92	2382.1	11.3	2317.6	15.2	2245.2	28.7
09	83	930	0.09	0.1493	0.29	8.0733	1.55	0.3921	1.52	0.1089	2.92	2338.1	5.0	2239.3	14.1	2132.7	27.7
10	179	140	1.28	0.1659	0.40	11.0465	1.55	0.4830	1.50	0.1250	2.79	2516.4	6.7	2527.1	14.6	2540.4	31.6
11	67	225	0.30	0.1586	0.93	9.4281	1.96	0.4312	1.72	0.1295	3.02	2440.6	15.7	2380.6	18.1	2311.1	33.5
12	59	73	0.81	0.1507	0.69	9.1296	1.65	0.4394	1.50	0.1222	2.92	2353.6	11.7	2351.1	15.2	2348.2	29.6
13	45	31	1.47	0.1688	0.87	11.6031	1.74	0.4986	1.51	0.1355	3.00	2545.6	14.5	2572.9	16.4	2607.8	32.4
14	102	127	0.80	0.1466	0.65	8.3969	1.64	0.4155	1.51	0.1157	2.83	2306.1	11.2	2274.8	15.0	2240.2	28.5
15	156	130	1.20	0.1488	0.46	8.7263	1.57	0.4254	1.50	0.1160	2.88	2332.1	7.8	2309.8	14.4	2284.7	28.9
16	16	32	0.50	0.1720	0.76	11.8892	1.78	0.5014	1.61	0.1329	3.27	2577.1	12.7	2595.7	16.9	2619.6	34.8
17	53	116	0.46	0.1652	0.79	10.8187	1.75	0.4750	1.56	0.1349	3.66	2509.5	13.3	2507.7	16.4	2505.4	32.4
18	48	68	0.71	0.1628	0.58	10.3444	1.62	0.4609	1.51	0.1226	3.29	2484.7	9.7	2466.1	15.1	2443.5	30.8
19	36	36	1.00	0.1454	1.09	8.0485	1.87	0.4016	1.52	0.1080	3.02	2292.1	18.6	2236.5	17.0	2176.2	28.1
20	118	536	0.22	0.1639	0.20	10.5402	1.52	0.4663	1.51	0.1269	2.80	2496.6	3.4	2483.5	14.2	2467.5	30.9
21	71	207	0.34	0.1619	0.36	10.4996	1.54	0.4704	1.50	0.1283	2.90	2475.4	6.1	2479.9	14.4	2485.3	31.0
22	74	337	0.22	0.1630	0.29	9.4487	1.70	0.4205	1.67	0.1200	3.21	2486.6	4.9	2382.6	15.7	2262.9	32.0
23	86	707	0.12	0.1614	0.37	10.1901	1.55	0.4579	1.51	0.1268	2.84	2470.6	6.3	2452.2	14.5	2430.1	30.6
24	62	128	0.48	0.1618	0.48	9.3770	1.59	0.4203	1.51	0.1220	3.16	2474.7	8.1	2375.6	14.7	2261.8	28.9

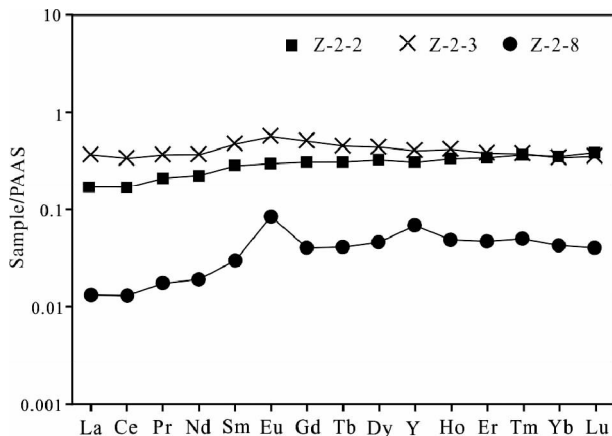


图6 周台子铁矿矿石稀土元素 PAAS 标准化图解 (PAAS 值据 McLennan, 1989)

Fig. 6 PAAS-normalized REE pattern of metamorphic rocks in Zhoutaizi iron deposit (PAAS data after McLennan, 1989)

锆石 U-Pb 定年结果见表 2、表 3。锆石的阴极发光图 (CL 图) 能够很好的反映出锆石的内部结构特征, 不同成因的锆石具有不同的结构特征 (图 7、图 8)。

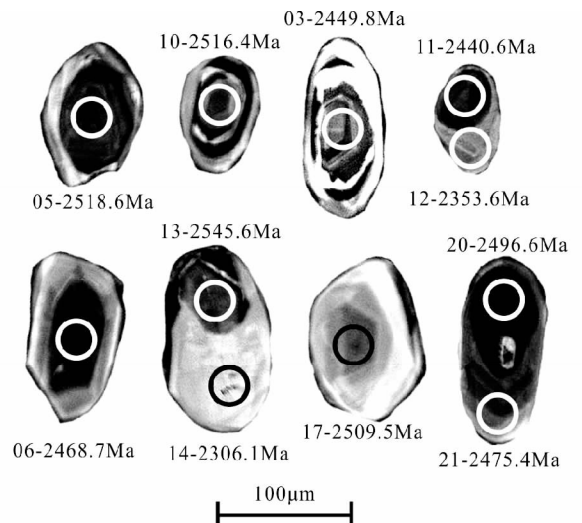


图7 周台子铁矿斜长角闪岩(Z-1-7) 锆石阴极发光图以 01 ~ 2482.3Ma 为例, 其中 01 代表分析点号, 2482.3Ma 代表锆石年龄

Fig. 7 CL images of zircon grains for amphibolite (Z-1-7) in Zhoutaizi iron deposit

Take 01 ~ 2482.3Ma as an example. 01 represents the analyzed data; 2482.3Ma represents the zircon age

表3 周台子铁矿花岗片麻岩(Z-1-2)锆石 U-Th-Pb 分析数据(LA-MC-ICPMS 法)

Table 3 Zircon U-Th-Pb data of granitic gneiss (Z-1-2) in Zhoutaizi iron deposit

测点号	Th U		Th/U	同位素比值								同位素年龄 (Ma)					
	($\times 10^{-6}$)			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
01	125.28	169.96	0.74	0.1576	0.0015	9.8391	0.0882	0.4527	0.0053	0.1106	0.0016	2430.5	16.0	2407.2	23.4	2419.8	8.3
02	104.40	163.36	0.64	0.1590	0.0011	10.1170	0.0689	0.4616	0.0049	0.1173	0.0013	2444.6	12.1	2446.7	21.5	2445.5	6.3
03	86.85	138.72	0.63	0.1615	0.0014	10.4951	0.0882	0.4712	0.0054	0.1198	0.0018	2471.8	14.8	2488.9	23.6	2479.5	7.8
04	97.53	144.16	0.68	0.1612	0.0013	10.3724	0.0798	0.4666	0.0051	0.1158	0.0015	2468.7	13.6	2468.6	22.6	2468.6	7.1
05	160.24	185.55	0.86	0.1569	0.0012	9.8513	0.0704	0.4554	0.0049	0.1160	0.0012	2422.5	12.7	2419.2	21.7	2421.0	6.6
06	95.23	136.99	0.70	0.1599	0.0013	10.2043	0.0796	0.4630	0.0051	0.1157	0.0015	2454.1	13.8	2452.8	22.6	2453.5	7.2
07	116.95	173.58	0.67	0.1626	0.0013	10.5307	0.0805	0.4698	0.0052	0.1234	0.0015	2482.7	13.5	2482.7	22.8	2482.6	7.1
08	77.76	148.57	0.52	0.1595	0.0016	10.1664	0.0988	0.4625	0.0057	0.1172	0.0021	2449.8	17.2	2450.5	25.0	2450.0	9.0
09	71.52	119.83	0.60	0.1611	0.0015	10.3538	0.0941	0.4661	0.0056	0.1240	0.0020	2467.5	16.0	2466.5	24.4	2466.9	8.4
10	127.25	202.92	0.63	0.1583	0.0016	10.0145	0.0955	0.4590	0.0056	0.1184	0.0019	2437.1	16.9	2435.2	24.7	2436.1	8.8
11	65.86	108.02	0.61	0.1576	0.0021	9.9437	0.1232	0.4575	0.0064	0.1120	0.0025	2430.5	22.1	2428.7	28.2	2429.6	11.4
12	103.98	185.51	0.56	0.1598	0.0015	10.2034	0.0922	0.4632	0.0055	0.1232	0.0020	2453.6	16.0	2453.4	24.3	2453.4	8.4
13	111.38	178.75	0.62	0.1597	0.0014	10.1799	0.0876	0.4625	0.0054	0.1221	0.0018	2452.2	15.2	2450.4	23.8	2451.3	8.0
14	166.49	218.11	0.76	0.1594	0.0012	10.1445	0.0743	0.4618	0.0051	0.1184	0.0013	2448.9	12.8	2447.3	22.4	2448.0	6.8
15	46.49	99.40	0.47	0.1591	0.0017	10.1202	0.1008	0.4613	0.0058	0.1226	0.0024	2446.5	17.6	2445.3	25.4	2445.8	9.2

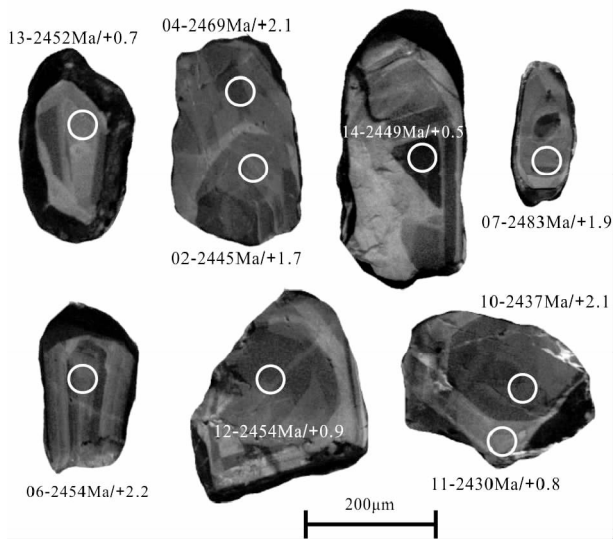


图8 周台子铁矿花岗片麻岩(Z-1-2)锆石阴极发光图以13~2454Ma/+0.9为例,其中13代表分析点号,2454Ma代表锆石年龄,+0.9代表 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$

Fig. 8 CL images of zircon grains for granitic gneiss (Z-1-2) in Zhoutaizi iron deposit

Take 13~2454Ma/+0.9 as an example. 13 represents the analyzed data; 2454Ma represents the zircon age; +0.9 represents $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$

周台子铁矿斜长角闪岩Z-1-7锆石样品CL图(图7),可以看到锆石颗粒长约50~120 μm ,宽约25~75 μm ,长宽比都大于1,多为长柱状或短柱状,形态以半自形为主,锆石的棱角不鲜明。其内部结构多为弱环带结构、面状分带结构,环带结构的连续性不明显,大多数锆石存在明显的核部,有些锆石核部呈深色,而有些锆石核部呈浅色,个别锆石核部具

有弱的振荡环带特征(如Z-1-7 05号分析点),边部特征不明显或不均匀。锆石的Th含量 $16 \times 10^{-6} \sim 644 \times 10^{-6}$,U含量 $31 \times 10^{-6} \sim 1062 \times 10^{-6}$,Th/U比值变化很大,在0.03~1.47之间,大部分锆石集中在0.48~1.47之间,还有一些集中在0.03~0.12之间。从以上这些特征,可见样品Z-1-7锆石的结构比较复杂,既有岩浆成因的锆石,也有变质成因的锆石。因此,在讨论锆石U-Pb年龄的时候,将这些锆石根据不同的结构特征、Th和U含量及比值进行分组讨论更加合理。从大约200粒锆石中,按照不同的颜色、形态等特征,挑选了24粒锆石进行SIMS测试,这24个锆石分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄范围 $2292.1 \pm 18.6\text{Ma} \sim 2577.1 \pm 12.7\text{Ma}$,从锆石U-Pb谐和图上可以看出所有锆石分析点均落在谐和线上或谐和线以下。从CL图像看出,大概有2类锆石:第一类是锆石整体颜色较暗,核边结构不明显,个别年龄较老的锆石具有浅色的核和深色的幔或边(如Z-1-7, 10和16号分析点),这些锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于 $2449.8 \pm 10.8\text{Ma} \sim 2577.1 \pm 12.7\text{Ma}$ 之间,其上交点年龄为 $2512 \pm 21\text{Ma}$,MSWD = 6.8(图9);第二类锆石整体颜色较浅,具有长柱状特征,锆石的核边结构相对明显,一般具有深色的核和浅色的幔或边,这些锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于 $2292.1 \pm 18.6\text{Ma} \sim 2474.7 \pm 8.1\text{Ma}$ 之间,其加权平均值为 $2394 \pm 55\text{Ma}$,MSWD = 0.54(图9)。

周台子铁矿花岗片麻岩Z-1-2锆石样品CL图(见图8),锆石颗粒长约100~400 μm ,宽约100~200 μm ,长宽比大于1,锆石形态为不规则柱状,棱角不突出,半自形到他形。其内部结构比较一致,均可见弱环带特征,未见变质锆石特征的云雾状和斑杂状等结构,Th/U比值较大,介于0.47~0.86之间,具有岩浆锆石的特征。从大约200粒锆石中,按照不同的颜色、形态等特征,挑选了15粒锆石进行LA-MC-ICPMS

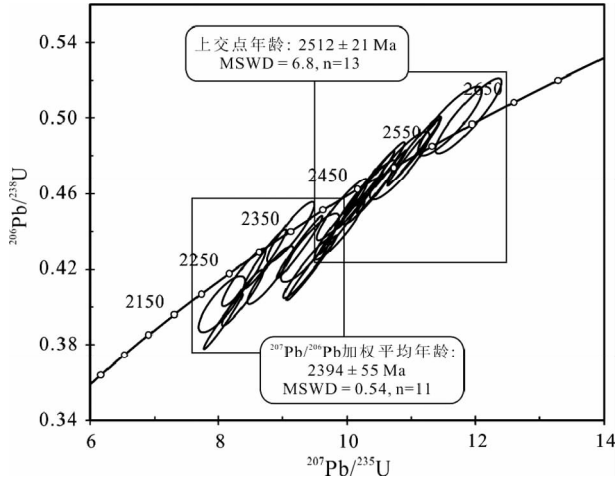


图9 周台子铁矿斜长角闪岩(Z-1-7)锆石U-Pb年龄协和曲线图

Fig. 9 U-Pb concordia diagram of zircons for amphibolite (Z-1-7) in Zhoutaizi iron deposit

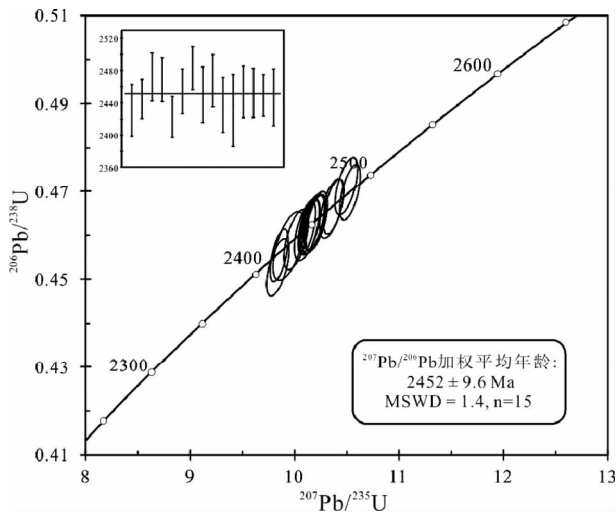


图10 周台子铁矿花岗片麻岩(Z-1-2)锆石U-Pb年龄协和曲线图

Fig. 10 U-Pb concordia diagram of zircons for granitic gneiss (Z-1-2) in Zhoutaizi iron deposit

测试, 锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄集中于2423~2483Ma之间, 所有15个分析点的U-Pb谐和图(图10)可见, 年龄分布比较集中, 15粒锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 加权平均值为 $2452 \pm 9.6\text{Ma}$, $\text{MSWD} = 1.4$ 。

4.4 锆石Hf同位素

斜长角闪岩(Z-1-7)锆石样品的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值相对较低, 分布范围分别是0.004685~0.041070和0.000189~0.001579(表4), $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值也很低, 分布范围是0.281068~0.281312。计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和平均地壳模式年

龄 t_{DMc} 所取的 t 为Z-1-7锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值2462Ma, 为 $-1.5 \sim +2.4$, 平均值为 $+0.47$, 大部分 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值, 分布在 $+0.6 \sim +2.4$ 之间, 亏损地幔模式年龄 t_{DM} 在3013~2693Ma之间, 平均地壳模式年龄 t_{DMc} 在3347~2825Ma之间, 可见 t_{DM} 和 t_{DMc} 都明显大于锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄。

花岗片麻岩(Z-1-2)锆石样品的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 、 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值相对较低, 分布范围分别是0.009635~0.024021, 0.000352~0.000862和0.281247~0.281325(表4), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $+0.1 \sim +2.2$ 之间, 平均值为 $+1.3$, 主要集中在两个范围内: $+0.4 \sim +1.0$ 和 $+1.6 \sim +2.1$, 亏损地幔模式年龄 t_{DM} 分布在2762~2674Ma之间, 平均地壳模式年龄 t_{DMc} 分布在3164~2983Ma之间, 同样品Z-1-7类似, 样品Z-1-2的 t_{DM} 和 t_{DMc} 都明显大于锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄。

5 讨论

5.1 矿区变质岩原岩恢复及成岩与变质时代

原岩恢复是研究变质岩原岩类型的重要手段之一, 但任何一种原岩恢复方法都有其局限性, 加之各种不同原岩本身的化学成分存在重叠, 所以只有针对研究对象选择合适的原岩恢复方法, 并结合岩石学、岩相学及元素的地球化学性质等进行综合判断, 才能得到合理可靠的结果。对斜长角闪岩和斜长角闪片麻岩原岩恢复(图11), 从图11a中可以看出, 矿区变质岩大部分投影在火成岩区; 从图11b中可以看出, 变质岩主要落于安山岩或石英闪长岩附近, 另有2个样品稍微有些偏离, 但仍然在火成岩范围内。同时, 这2个样品与其他样品相比, 在主要元素特征上, 具有明显偏高的 TFe_2O_3 、 MgO 、 CaO 含量, Na_2O 、 K_2O 含量也高于其他样品; 在微量元素特征上, 大离子亲石元素(LILE)Ba、Rb、Sr含量明显偏低, ΣREE 也明显低于其他样品, 可能受到了后期变质作用的影响。从图11c中, 主要落于正斜长角闪岩范围内, 副斜长角闪岩(变质沉积岩)比正斜长角闪岩(变质火山岩)具有较大的 Zr/MgO 比值, 说明矿区的斜长角闪岩和斜长角闪片麻岩主要是变质火山岩。

根据以上分析, 将原岩为火山岩的变质岩进行火山岩分类, 由于在变质作用过程中, 主要元素易受影响而发生迁移, 故选择不易迁移的微量元素投影到 $\text{Zr}/\text{TiO}_2\text{-Nb}/\text{Y}$ 图中(图11d), 可以看到斜长角闪岩(Z-1-7、Z-1-8)的原岩是玄武岩, 斜长角闪片麻岩(Z-1-5和Z-1-6)的原岩是英安岩或安山岩。

通过对周台子铁矿斜长角闪岩和花岗片麻岩的锆石U-Pb定年结果的分析, 结合锆石的形态、结构以及Th/U比值等特征, 可以得到几组不同的年龄, 分别是 $2512 \pm 21\text{Ma}$ 、 $2452 \pm 9.6\text{Ma}$ 和 $2394 \pm 55\text{Ma}$ 。综合斜长角闪岩和花岗片麻岩的野外产状和岩石地化特征, 及其锆石的外观形态、内部结构、Th/U比值、U-Pb谐和图等, 2512Ma锆石年龄代表了原岩为玄武岩的斜长角闪岩的形成年龄, 同时也代表了火山喷

表4 周台子铁矿斜长角闪岩(Z-1-7)和花岗片麻岩(Z-1-2) Hf 同位素分析数据

Table 4 Hf isotope data of amphibolite (Z-1-7) and granitic gneiss (Z-1-2) in Zhoutaizi iron deposit

测点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DMc}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
斜长角闪岩(Z-1-7) 锆石 Hf 数据									
01	0.019674	0.000784	0.281312	0.000019	0.281276	2.3	2693	2832	-0.98
02	0.028103	0.001189	0.281267	0.000026	0.281212	0.0	2784	2972	-0.96
03	0.010708	0.000446	0.281268	0.000018	0.281247	1.3	2729	2893	-0.99
04	0.028429	0.001180	0.281328	0.000018	0.281275	2.1	2700	2839	-0.96
05	0.004685	0.000189	0.281279	0.000023	0.281270	2.1	2697	2844	-0.99
06	0.013248	0.000575	0.281256	0.000018	0.281230	0.6	2755	2933	-0.98
07	0.018387	0.000734	0.281204	0.000021	0.281170	-1.5	2836	3061	-0.98
08	0.027903	0.001222	0.281299	0.000018	0.281243	1.0	2743	2907	-0.96
09	0.006477	0.000250	0.281256	0.000016	0.281246	1.1	2732	2900	-0.99
10	0.041070	0.001575	0.281353	0.000023	0.281282	2.4	2694	2825	-0.95
11	0.016672	0.000676	0.281215	0.000024	0.281182	-1.0	2818	3033	-0.98
12	0.025158	0.001031	0.281288	0.000019	0.281239	1.0	2744	2911	-0.97
13	0.022568	0.000932	0.281280	0.000021	0.281237	0.8	2748	2918	-0.97
14	0.009842	0.000393	0.281291	0.000017	0.281273	2.1	2695	2839	-0.99
15	0.038875	0.001579	0.281271	0.000018	0.281197	-0.5	2807	3002	-0.95
花岗片麻岩(Z-1-2) 锆石 Hf 数据									
01	0.023773	0.000862	0.281303	0.000014	0.281263	1.1	2711	3066	-0.97
02	0.015736	0.000578	0.281299	0.000012	0.281272	1.7	2697	3021	-0.98
03	0.015052	0.000543	0.281281	0.000015	0.281255	1.8	2719	3036	-0.98
04	0.015266	0.000560	0.281293	0.000015	0.281266	2.1	2704	3007	-0.98
05	0.021426	0.000758	0.281325	0.000014	0.281290	1.9	2674	2994	-0.98
06	0.014052	0.000515	0.281304	0.000014	0.281280	2.2	2686	2984	-0.98
07	0.016579	0.000604	0.281279	0.000015	0.281250	1.9	2726	3037	-0.98
08	0.014099	0.000511	0.281247	0.000022	0.281223	0.1	2762	3164	-0.98
09	0.016820	0.000602	0.281259	0.000017	0.281231	0.8	2752	3118	-0.98
10	0.015674	0.000565	0.281314	0.000016	0.281288	2.1	2676	2983	-0.98
11	0.011719	0.000436	0.281274	0.000015	0.281254	0.8	2721	3096	-0.99
12	0.014478	0.000525	0.281269	0.000017	0.281244	0.9	2734	3095	-0.98
13	0.019105	0.000689	0.281269	0.000020	0.281237	0.7	2745	3120	-0.98
14	0.023283	0.000815	0.281273	0.000016	0.281235	0.5	2748	3128	-0.98
15	0.009635	0.000352	0.281276	0.000016	0.281260	1.3	2712	3057	-0.99

注: t_{DM} 代表亏损地幔模式年龄, t_{DMc} 代表平均地壳模式年龄。计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值。计算锆石 Hf 同位素采用如下参数:($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$) $_{\text{CHUR}}=0.0332$, ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$) $_{\text{CHUR}}=0.282772$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997), ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$) $_{\text{DM}}=0.0384$, ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$) $_{\text{DM}}=0.28325$ (Griffin *et al.*, 2000), ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$) $_{\text{平均地壳}}=0.015$ (Veevers *et al.*, 2005), $\lambda=1.867 \times 10^{-11} \text{ year}^{-1}$ (Söderlund *et al.*, 2004)

发和周台子铁矿 BIF 沉积年龄;2452Ma 锆石年龄可能代表周台子铁矿具有 TTG 特征花岗片麻岩的侵位结晶年龄;2394Ma 锆石年龄可能是变质重结晶作用导致 Pb 丢失引起年龄降低,代表了后期变质改造的年龄,表明周台子铁矿在2394Ma 左右经历了一次变质作用,并对原有的岩石和矿石进行了改造。

刘树文等(2007a)总结了单塔子杂岩的形成主要分7个阶段。2600~2530Ma 之间形成了镁铁质表壳岩,即单塔子杂岩的围岩;2516~2505Ma 和 2494~2473Ma 为 TTG 岩浆侵位结晶;2417~2404Ma 之间发生了麻粒岩相变质作用和深熔混合岩化作用;1859Ma 为镁铁质岩浆侵位,形成了镁铁质岩株和岩脉;1834~1793Ma 和 1730Ma 经历了强烈的变质作

用改造和流体作用。根据本文获得的锆石年龄数据看,本区的大部分锆石的年龄范围在 2577~2292Ma 之间,本文认为研究区 TTG 质花岗岩的侵位时间为 2452Ma 左右,同时研究区与成矿有关的火山喷发的时限为 2512Ma 左右,与刘树文等(2007a)对镁铁质表壳岩和 TTG 岩浆侵位结晶阶段的划分,在误差范围内基本一致;而研究区 2394Ma 左右的变质事件与刘树文等(2007a)对单塔子杂岩在 2417~2404Ma 发生变质作用的时限划分基本一致。

5.2 岩浆源区性质

斜长角闪岩 Z-1-7 的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -1.5~+2.4,平均值为 +0.47,大部分 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值,分布在 +0.6~+2.4

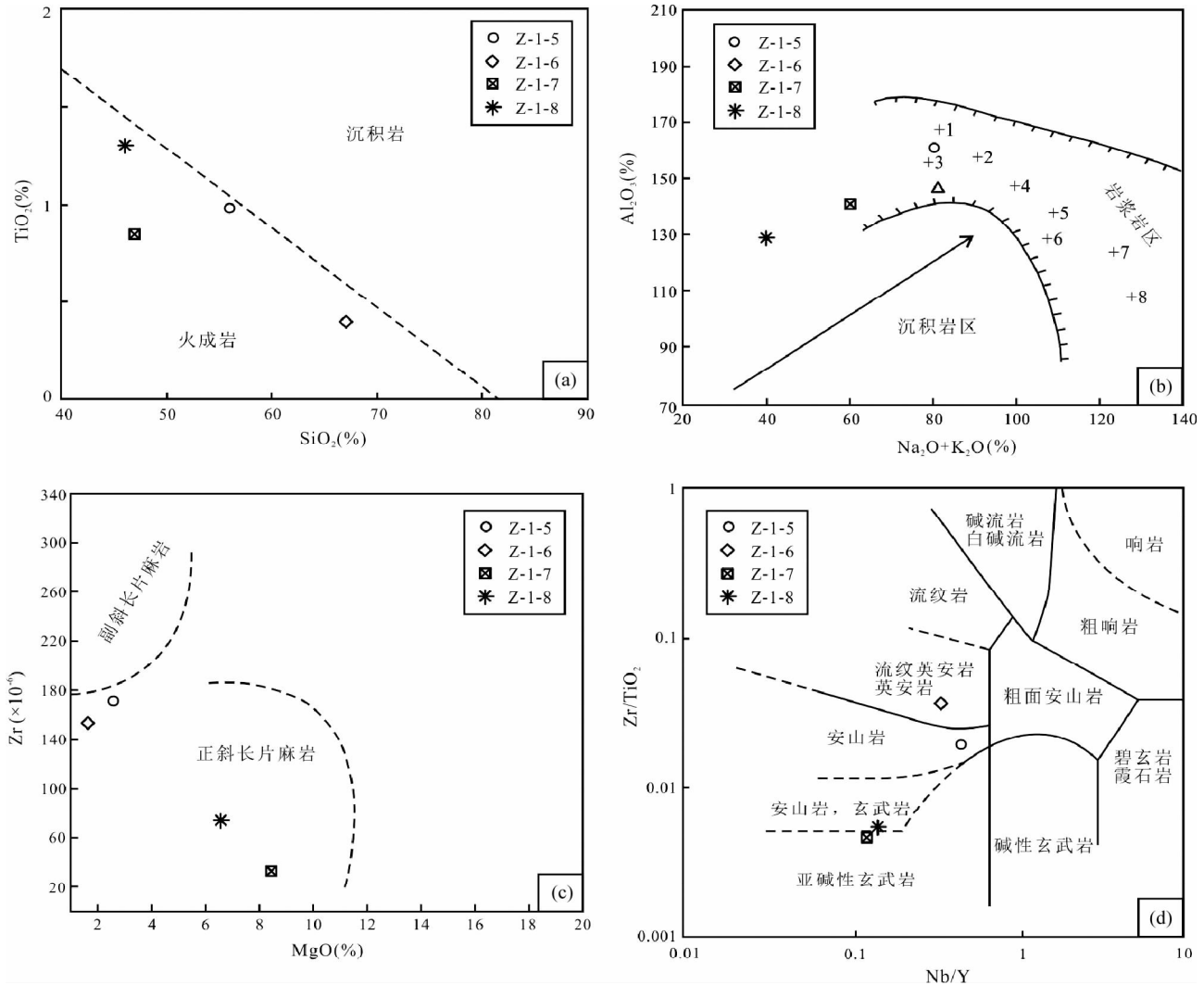


图 11 周台子铁矿变质岩原岩恢复图

(a)- SiO_2 - TiO_2 图(据 Tamey, 1977); (b)- $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ - Al_2O_3 图(据 Предопский, 1980): 1-安山岩;2-英安岩;3-石英闪长岩;4-流纹英安岩;5-石英粗安岩;6-流纹岩;7,8-碱性花岗岩;箭头方向表示亚杂砂岩和长石砂岩中石英含量降低的方向;纵横坐标为计算出的分子数乘以 1000; (c)- MgO -Zr 图(据 Geringer, 1979); (d)- Zr/TiO_2 - Nb/Y 图(据 Pearce and Cann, 1973)

Fig. 11 Protolith restoration diagrams of metamorphic rocks in Zhoutaizi iron deposit

(a)- SiO_2 - TiO_2 diagram (after Tamey, 1977); (b)- $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ - Al_2O_3 diagram (after Предопский, 1980): 1-andesite; 2-dacite; 3-quartz diorite; 4-rhyolite; 5-quartz trachyandesite; 6-rhyolite; 7, 8-alkaline granite. The direction of arrowhead represents the direction of lower concentration of sub-greywacke and feldspar sandstone. The molecular number calculated by coordinates multiplied by 1000; (c)- MgO -Zr diagram (after Geringer, 1979); (d)- Zr/TiO_2 - Nb/Y diagram (after Pearce and Cann, 1973)

之间。Hf 同位素亏损地幔模式年龄 t_{DM} 在 3013 ~ 2693Ma 之间,平均地壳模式年龄 t_{DMC} 在 3347 ~ 2825Ma 之间,而其锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄在 2577 ~ 2292Ma 范围内,可以看出其亏损地幔模式年龄和平均地壳模式年龄均大于锆石的形成年龄,说明其岩浆源区受到过古老地壳物质的混染。花岗片麻岩 Z-1-2 的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 +0.1 ~ +2.2 之间,平均值为 +1.3,落在 3.0Ga 和 2.8Ga 平均地壳演化线范围内(图 12)。Hf 同位素亏损地幔模式年龄 t_{DM} 在 2762 ~ 2674Ma 之间,平均地壳模式年龄 t_{DMC} 分布在 3164 ~ 2983Ma 之间,其锆

石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄在 2483 ~ 2423Ma 范围内,同样其亏损地幔模式年龄和平均地壳模式年龄均大于锆石形成年龄,表明其岩浆源区受到过古老地壳物质的混染。

TTG 质花岗岩片麻岩样品的 SiO_2 含量大于 56%, MgO 含量小于 3%, Al_2O_3 含量大于 15%,Sr 含量均大于 500×10^{-6} ,Yb 含量均小于 1.9×10^{-6} ,大部分样品 Y 含量低于 9×10^{-6} ,轻重稀土元素分异明显,重稀土元素强烈亏损,并且 Eu 负异常不明显,表明研究区花岗岩片麻岩与埃达克岩在地球化学特征上(Defant and Drummond, 1990; Castillo, 2006),具有一

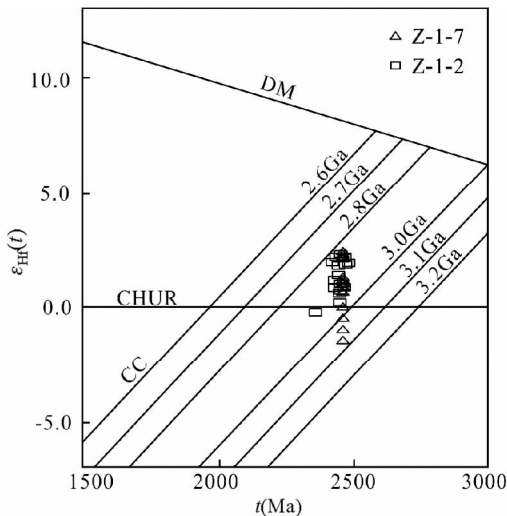


图 12 周台子铁矿斜长角闪岩 (Z-1-7) 和花岗片麻岩 (Z-1-2) 锆石 Hf 同位素特征

DM-亏损地幔; CHUR-球粒陨石; CC-平均地壳

Fig. 12 Zircon Hf isotope features of amphibolite (Z-1-7) and granitic gneiss (Z-1-2) in Zhoutaizi iron deposit
DM-depleted mantle; CHUR- chondrite uniform reservoir; CC- mean crustal value of $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$

定的相似性。

5.3 构造环境

很多学者认为太古代 TTG 岩石与埃达克岩关系密切,一些学者认为太古代 TTG 的地球化学特征与埃达克岩相似,可以用岛弧埃达克岩来解释太古代 TTG 的形成 (Drummond and Defant, 1990; Martin, 1999); 此外,大多数学者认为太古代 TTG 与板片熔融的埃达克岩明显不同,是加厚下地壳熔融形成的 (Simithies and Champion, 2000; Condie, 2005)。周台子铁矿中与 TTG 岩石具有地球化学亲和性的花岗片麻岩形成时代为 2452Ma, 而研究区的变质岩原岩以玄武质、安山质、英安质等火山 (沉积) 岩为主, 并发育少量超基性岩 (脉) 和不同成熟度的陆源碎屑沉积岩, 岩石组合、地球化学组成以及锆石 Hf 同位素特征揭示其岩浆源区为新生的加厚下地壳熔融形成, 并受到过古老地壳物质的混染。前人对华北克拉通大地构造时空演化和华北克拉通北缘 BIF 型铁矿的研究 (李铁胜, 1999; 翟明国等, 2001; 刘富等, 2009) 颇为成熟, 结合本文的研究结果, 研究区所属的构造环境可能是与裂谷有关的张性环境。

6 结论

(1) 周台子铁矿是产于前寒武纪单塔子群变质岩系中的鞍山式铁矿。该矿区花岗片麻岩的岩石学属性是太古代单塔子杂岩中的 TTG 岩系, 地球化学属性与埃达克岩相似。变

质岩原岩为一套中基性火山岩 (英安岩, 安山岩和玄武岩)。同时, 周台子条带状铁建造的稀土元素特征与典型 BIF 相似, 具有海底火山喷发-喷流沉积成矿的特征。

(2) 锆石定年结果显示出几组年龄: $2512 \pm 21\text{Ma}$, $2452 \pm 9.6\text{Ma}$, $2394 \pm 55\text{Ma}$ 。2512Ma 锆石年龄代表了原岩为玄武岩的斜长角闪岩的形成年龄, 同时也代表了火山喷发和周台子铁矿 BIF 沉淀年龄; 2452Ma 锆石年龄可能代表周台子铁矿具有 TTG 特征花岗片麻岩的侵位结晶年龄; 2394Ma 锆石年龄代表了后期变质改造的年龄, 表明周台子铁矿在 2394Ma 左右经历了一次变质作用, 并对原有的岩石和矿石进行了改造。

(3) 锆石 Hf 同位素特征显示 2452 ~ 2512Ma 期间的岩浆活动具有陆壳增生的特征, TTG 花岗片麻岩具有埃达克岩的地球化学特征, 岩浆源区为新生的加厚下地壳熔融形成, 但其岩浆源区受到过古老地壳物质的混染。

(4) 周台子铁矿构造环境可能是与裂谷有关的张性环境。

致谢 感谢审稿专家给本文提出宝贵意见; 文中主量元素、微量元素以及锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素数据的准确测定离不开实验人员的辛勤劳动, 表示感谢。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243-258
- Castillo PR. 2006. An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 257-268
- Condie KC. 2005. TTGs and adakites: Are they both slab melts? *Lithos*, 80(1-4): 33-44
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665
- Derry LA and Jacobsen SB. 1990. The chemical evolution of Precambrian seawater: Evidence from REEs in banded iron formations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(11): 2965-2977
- Drummond MS and Defant MJ. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95(B13): 21503-21523
- Frei R and Polat A. 2007. Source heterogeneity for the major components of ~3.7Ga banded iron formations (Isua greenstone belt, Western Greenland): Tracing the nature of interacting water masses in BIF formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 253(1-2): 266-281
- Geringer GJ. 1979. The origin and tectonic setting of amphibolites in part of the Namaqua Metamorphic Belt, South Africa. *Transactions of the Royal Society of South Africa*, 82: 287-303
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Achterbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133-147
- Horstmann UE and Hålbich IW. 1995. Chemical composition of banded iron-formations of the Griqualand West Sequence, Northern Cape

- Province, South Africa, in comparison with other Precambrian iron formations. *Precambrian Research*, 72(1–2): 109–145
- Hu XW, Zhang JM and Quan H. 1996a. The isotopic ages of the Hongqiyingzi Group in northern Hebei and its age assignment. *Regional Geology of China*, (2): 186–192 (in Chinese with English abstract)
- Hu XW, Zhang JM and Quan H. 1996b. The discovery of unconformity between the Archean and the Lower Proterozoic in the Yanliao area and its geological significance. *Geological Review*, 42(3): 245–250 (in Chinese with English abstract)
- Li L, Zhu YH, Wen CS and Du ZT. 1996. Break up of Dantazi Group in Northwest Hebei Province. *Geoscience*, 10(1): 50–59 (in Chinese with English abstract)
- Li QL, Li XH, Liu Y, Tang GQ, Yang JH and Zhu WG. 2010. Precise U-Pb and Pb-Pb dating of Phanerozoic baddeleyite by SIMS with oxygen flooding technique. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25(7): 1107–1113
- Li TS. 1999. Taipingzai-Zunhua Neo-archean island arc terrain and continental growth in eastern Hebei, North China. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English Summary)
- Li XH, Liu Y, Li QL, Guo CH and Chamberlain KR. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10: Q04010, doi: 10.1029/2009GC002400
- Liu F, Guo JH, Lu XP and Diwu CR. 2009. Crustal growth at 2.5 Ga in the North China Craton; Evidence from whole-rock Nd and zircon Hf isotopes in the Huai'an gneiss terrane. *Chinese Science Bulletin*, 54(17): 2517–2526 (in Chinese)
- Liu HB. 1994. Geochemical self-organization developed in Anshan-type iron deposits. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 15(5): 481–484 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW, Lu YJ, Feng YG, Zhang C, Tian W, Yan QR and Liu XM. 2007a. Geology and zircon U-Pb isotopic chronology of Dantazi complex, northern Hebei Province. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 484–497 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW, Lu YJ, Feng YG, Liu XM, Yan QR, Zhang C and Tian W. 2007b. Zircon and monazite geochronology of the Hongqiyingzi complex, northern Hebei, China. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1086–1100 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. User's manual for Isoplot/Ex, v.3.0, a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1–70
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429
- McLennan SB. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin BR and McKay GA (eds.). *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21(1): 169–200
- Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290–300
- Pearce JA. 1983. Role of the subcontinental lithosphere in magma genesis at active continental margin. In: Hawkesworth CJ and Norry MJ (eds.). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Nantwich: Shiva, 230–249
- Qian XL, Cui WY and Wang SQ. 1985. Evolution of Inner Mongolia-eastern Hebei Archean granulite belt. In: Geology Department, Peking University (ed.). *Special Volume of Geoscience*. Beijing: Peking University Press, 20–29 (in Chinese with English abstract)
- Simithies RH and Champion DC. 2000. The Archean high-Mg diorite suite: Links to tonalite-trondhjemite-granodiorite magmatism and implications for early Archean crustal growth. *Journal of Petrology*, 41(12): 1653–1671
- Sláma J, Košler J, Condon DJ, Crowley JL, Gerdes A, Hanchar JM, Horstwood MSA, Morris GA, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett MN and Whitehouse MJ. 2008. Plešovice zircon-A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1–2): 1–35
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3–4): 311–324
- 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 Oceanic Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Stacey JS and Kramers JD. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26(2): 207–221
- Tarney J. 1977. Petrology, mineralogy and geochemistry of the Falkland Plateau basement rocks, site 330, Deep sea and Drilling project. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 36: 893–921
- Thompson RN. 1982. Magmatism of the British Tertiary Volcanic Province. *Scottish Journal of Geology*, 18: 49–107
- Veevers JJ, Saeed A, Belousova EA and Griffin WL. 2005. U-Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace-element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the palaeogeographical and denudational history of the Yilgarn Craton. *Earth Science Reviews*, 68(3–4): 245–279
- Wan YS, Song B, Geng YS and Liu DY. 2005. Geochemical characteristics of Archean basement in the Fushun-Qingyuan area, northern Liaoning Province and its geological significance. *Geological Review*, 51(2): 128–137 (in Chinese with English abstract)
- Wang QC. 1992. On the age of Hongqiyingzi group and geological thermal events in undergone. *Scientia Geologica Sinica*, (Suppl.): 17–24 (in Chinese with English abstract)
- Wang QC and Zhang SQ. 1995. The ages of the Hongqiyingzi Group: A future discussion. *Regional Geology of China*, (2): 173–180 (in Chinese with English abstract)
- Wang QC, Niu SG, Xiao WX, Wang LS, Zhang SQ and Wang QT. 2002. Some problems of Archean strata in Yinshan. *Journal of Stratigraphy*, 26(1): 55–61, 72 (in Chinese with English abstract)
- Wang RM, Ni ZY and Tong Y. 2002. Stratigraphic unit or tectonic unit? *Chinese Geology*, 29(3): 281–285 (in Chinese with English abstract)
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, Vonquadt A, Roddick JC and Speigel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1–23
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1–2): 105–126
- Zhai MG and Windley BF. 1990. The Archean and Early Proterozoic banded iron formations of North China: Their characteristics, geotectonic relations, chemistry and implications for crustal growth. *Precambrian Research*, 48(3): 267–286
- Zhai MG, Windley BF and Sills JD. 1990. Archean gneisses, amphibolites and banded iron-formations from the Anshan area of Liaoning Province, NE China: Their geochemistry, metamorphism and petrogenesis. *Precambrian Research*, 46(3): 195–216
- Zhai MG, Guo JH and Zhao TP. 2001. Study advances of Neoproterozoic tectonic evolution in the North China Craton. *Progress in Precambrian Research*, 24(1): 17–27 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG. 2004. Precambrian tectonic evolution of the North China Craton. In: Malpas J, Fletcher CJN, Ali JR and Aitchison C (eds.). *Aspects of the Tectonic Evolution of China*. Geological Society, London, Special Publication, 226(1): 57–72
- Zhang LC, Zhang XJ, Cui ML, Dai YP, Wang CL, Liu L and Wan YS. 2011. The formation age and tectonic setting of BIF iron deposits in North China Craton. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(Suppl. 1): 666

-667 (in Chinese)

- Zhang LC, Zhai MG, Zhang XJ, Xiang P, Dai YP, Wang CL and Pirajno F. 2012. Formation age and tectonic setting of the Shirengou Neoproterozoic banded iron deposit in eastern Hebei Province: Constraints from geochemistry and SIMS zircon U-Pb dating. *Precambrian Research*, doi: 10.1016/j.precamres.2011.09.007
- Zhang XJ, Zhang LC, Xiang P, Wan B and Pirajno F. 2011. Zircon U-Pb age, Hf isotopes and geochemistry of Shuichang Algoma-type banded iron-formation, North China Craton: Constraints on the ore-forming age and tectonic setting. *Gondwana Research*, 20(1): 137-148
- Zhao ZP *et al.* 1993. *Precambrian Crustal Evolution of the Sino-Korean Paraplatform*. Beijing: Science Press, 391-392 (in Chinese)
- Предопский АА. 1980. Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего доксибрия. п. Наука, с. 9-32

附中文参考文献

- 胡学文, 张江满, 权恒. 1996a. 冀北红旗营子群同位素年龄及其时代归属. *中国区域地质*, (2): 186-192
- 胡学文, 张江满, 权恒. 1996b. 燕辽地区太古宇与下元古界间不整合面的发现及其意义. *地质论评*, 42(3): 245-250
- 李龙, 朱云海, 温长顺, 杜子图. 1996. 冀西北单塔子群的解体. *现代地质*, 10(1): 50-59
- 李铁胜. 1999. 冀东太平寨-遵化新太古代古岛弧地体及其大陆生长. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质研究所
- 刘富, 郭敬辉, 路孝平, 第五春荣. 2009. 华北克拉通 2.5Ga 地壳生长事件的 Nd-Hf 同位素证据: 以怀安片麻岩地体为例. *科学通报*, 54(17): 2517-2526
- 刘洪波. 1994. 鞍山式铁矿的地球化学自组织作用. *东北大学学报* (自然科学版), 15(5): 481-484
- 刘树文, 吕勇军, 凤永刚, 张臣, 田伟, 闫全人, 柳小明. 2007a. 冀

北单塔子杂岩的地质学和锆石 U-Pb 年代学. *高校地质学报*, 13(3): 484-497

- 刘树文, 吕勇军, 凤永刚, 柳小明, 闫全人, 张臣, 田伟. 2007b. 冀北红旗营子杂岩的锆石、独居石年代学及地质意义. *地质通报*, 26(9): 1086-1100
- 钱祥麟, 崔文元, 王时麟. 1985. 内蒙-冀东太古界麻粒岩相带演化. 见: 北京大学地质学系编. *地质科学论文集*. 北京: 北京大学出版社, 20-29
- 万渝生, 宋彪, 耿元生, 刘敦一. 2005. 辽北抚顺-清原地区太古宙基底地球化学组成特征及其地质意义. *地质论评*, 51(2): 128-137
- 王启超. 1992. 红旗营子群的时代归属及所经历的地质热事件. *地质科学*, (增刊): 17-24
- 王启超, 张少卿. 1995. 再论红旗营子群的时代问题. *中国区域地质*, (2): 173-180
- 王启超, 牛树银, 肖文暹, 王礼胜, 张少卿, 王琴廷. 2002. 阴山东段(冀北及冀晋内蒙古接壤地带)的太古宙地层问题讨论. *地层学杂志*, 26(1): 55-61, 72
- 王仁民, 倪志耀, 童英. 2002. 是地层单元还是构造单元? *中国地质*, 29(3): 281-285
- 翟明国, 郭敬辉, 赵太平. 2001. 新太古-古元古代华北陆块构造演化的研究进展. *前寒武纪研究进展*, 24(1): 17-27
- 赵宗溥等. 1993. *中朝准地台前寒武纪构造演化*. 北京: 科学出版社, 391-392
- 张连昌, 张晓静, 崔敏利, 代堰镔, 王长乐, 刘利, 万渝生. 2011. 华北克拉通 BIF 铁矿形成时代与构造环境. *矿物学报*, 31(增刊): 666-667