

华北克拉通 ~2.7Ga 的 BIF: 来自莱州-昌邑地区含铁建造的年代学证据*

王惠初 康健丽 任云伟 初航 陆松年 肖志斌

WANG HuiChu, KANG JianLi, REN YunWei, CHU Hang, LU SongNian and XIAO ZhiBin

中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

2015-07-05 收稿, 2015-09-09 改回.

Wang HC, Kang JL, Ren YW, Chu H, Lu SN and Xiao ZB. 2015. Identification of ~2.7Ga BIF in North China Craton: Evidence from geochronology of iron-bearing formation in Laizhou-Changyi area, Jiaobei terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (10):2991–3011

Abstract Abundant previous studies show the Early Neoproterozoic (~2.7Ga) is an important continental crust growth period within the North China Craton. However, ~2.7Ga banded iron formation (BIF), which were well developed as huge iron deposits in other major cratons worldwide, has not yet been identified within the North China Craton. The BIF iron deposit occurred in the Xiaosong Formation of Laizhou-Changyi area, Jiaobei terrane, is commonly considered as the bottom layer of the Paleoproterozoic Fenzishan Group. As previous and present studies, the iron-bearing assemblage within the Xiaosong Formation consists mainly of biotite-plagioclase leucite, amphibolites, garnet-bearing biotite schist with thin layers of hornblende-magnetite quartzite and magnetite-bearing leucocleptite. Geochemical data reveal that the amphibolite and meta-acidic volcanic rock show protolith characteristics of island arc basalt and adakitic rock, respectively. These features imply that the iron-bearing formation in Laizhou-Changyi area was likely generated within an island-arc setting similar to the modern regime, but distinguished from the rift environment of Paleoproterozoic Fenzishan Group. Geochronological data display that the magmatic zircons from a meta-acidic volcanic rock (biotite-plagioclase leucite) sample present a protolith age of 2726 ± 10 Ma. In contrast, detrital zircons separated from a metamorphic sandstone sample show two major inherited age peaks of ~2.73Ga and ~2.9Ga, and zircons from an amphibolite sample record a meaningful ~1850Ma metamorphic age with a few >2.68Ga ages recorded in inherited or captured zircons. However, three samples mentioned above are lack of a record of ~2.5Ga tectonic-thermal event as the basement of the Jiaobei terrane. In combination with the zircon U-Pb ages, rock association and geochemical features, it is inferred that the BIF in Laizhou-Changyi area was formed at the Early Neoproterozoic (~2.7Ga), and subsequently kept in a relatively stable tectonic environment at Late Neoproterozoic (~2.5Ga). In addition, the iron-bearing formation was intruded by ~2.17Ga biotite-bearing monzonitic granite and jointly involved in the Late Paleoproterozoic (~1.85Ga) metamorphism and deformation. The distinct difference of rock assemblage and zircon geochronology of iron formation in Laizhou-Changyi and Qixia area, reveal the distinct discrepancy of tectonic environments in both areas at Early Neoproterozoic (~2.7Ga), and also provide some important information of ancient plate evolution in Jiaobei terrane.

Key words ~2.7Ga BIF; Early Neoproterozoic; Zircon U-Pb age; Jiaobei terrane; North China Craton

摘要 越来越多的研究资料显示 ~2.7Ga 是华北克拉通陆壳生长的一个重要阶段,但缺少同时期的世界主要克拉通上广泛发育的 BIF 铁矿。胶北莱州-昌邑地区的 BIF 铁矿赋存在原划分的粉子山群小宋组含铁建造中,含铁建造的岩石组合主要为黑云斜长变粒岩、斜长角闪岩、含石榴黑云片岩夹角闪磁铁石英岩、磁铁浅粒岩。岩石地球化学分析显示,斜长角闪岩具有岛弧玄武岩的地球化学特点,变质酸性火山岩具有埃达克质岩的地球化学特点,故推测莱州-昌邑地区的含铁建造形成于与岛弧相关的构造环境,而与粉子山群形成的裂谷构造背景无关。锆石同位素年代学研究表明,含铁建造中变质酸性火山岩(埃达克质火山岩)的岩浆结晶年龄为 2726 ± 10 Ma,在变质泥砂岩中获得了 ~2.73Ga 和 ~2.9Ga 两组碎屑锆石 U-Pb 年龄,并缺少新太古代晚期(~2.5Ga)的构造岩浆热事件信息;在斜长角闪岩中获得的变质锆石年龄为 ~1850Ma,并有 >2.68Ga 的继承

* 本文受中国地质调查局地质调查项目(1212011120154、12120114034201)和国家自然科学基金重点项目(41430210)联合资助。

第一作者简介:王惠初,男,1963年生,博士,研究员,主要从事区域地质和前寒武纪地质研究,E-mail: tjwhuichu@163.com

或捕获锆石年龄信息;因此推断莱州-昌邑地区的 BIF 铁建造有可能形成于新太古代早期 (~2.7Ga),而在新太古代晚期 (~2.5Ga)则处于相对稳定的构造背景。含铁建造被 ~2.17Ga 的二长花岗岩侵入,并共同卷入胶北古元古代晚期 (~1.85Ga)的变质变形作用改造。莱州-昌邑地区含铁建造的岩石组合和锆石年龄信息与胶北地块栖霞地区比较有所不同,这可能揭示出胶北地块在新太古代早期 (~2.7Ga)构造环境差异和古板块构造演化的重要信息。

关键词 ~2.7Ga 条带状铁建造;新太古代早期;锆石 U-Pb 年龄;胶北;华北克拉通

中图法分类号 P597.3; P618.31

BIF 型铁矿床是地球上最重要的铁矿类型,根据其产出环境和岩石组合一般划分为阿尔戈马型和苏必利尔湖型两类,其中新太古代阿尔戈马型尤为重要。地球上最早的 BIF 形成于 3.8Ga,2.7Ga 达到峰值,到 1.8Ga 年左右大规模 BIF 趋于结束 (Klein,2005)。华北克拉通是我国 BIF 型铁矿床的主要产区,占华北克拉通铁矿总探明储量的 84% 以上 (沈保丰,2012)。华北克拉通上 BIF 铁矿床主要分布在鞍山-本溪、冀东、五台-吕梁、霍邱-舞阳、鲁西和固阳等地,其中鞍本和冀东地区是我国最重要的两个铁矿资源基地。前人研究认为华北克拉通上的 BIF 型铁矿床在古太古代 (3.6 ~ 3.2Ga)、中太古代 (3.2 ~ 2.8Ga)、新太古代 (2.8 ~ 2.5Ga)、古元古代 (2.5 ~ 1.8Ga) 均有产出 (Zhai and Windley, 1990; 沈保丰等,2006),但主要形成于新太古代-古元古代。最近的研究表明,华北克拉通早前寒武纪条带状铁建造的成矿时代主要集中在新太古代晚期 2.6 ~ 2.5Ga (万渝生等,2012b; 张连昌等,2012; Li *et al.*, 2014),可确定的时代最古老的 BIF 位于鞍山地区,存在于 ~3.3Ga 陈台沟表壳岩之中,但规模很小,不构成工业矿体。华北克拉通上形成时代最新的 BIF 矿床位于吉南的临江地区,产于老岭群大栗子组的浅变质碎屑岩-碳酸盐中。

全球范围内,~2.7Ga 构造热事件十分发育,导致陆壳在短期内大量形成 (Condie, 2000; Condie *et al.*, 2009)。华北克拉通以 ~2.5Ga 的构造热事件为特色,而不同于地球上大多数以 ~2.7Ga 构造热事件为标志的早前寒武纪克拉通。这一时期的地质体广泛分布于华北克拉通不同地区。在华北克拉通早前寒武纪基底的锆石年龄直方图上,存在一个明显的 ~2.5Ga 年龄峰值 (Wan *et al.*, 2011a, 2014)。这一阶段的地质体包括不同类型表壳岩和 (变质)深成岩,既有直接来自亏损地幔的物质,也有壳内再循环产物。近年来的研究表明,华北克拉通不仅存在一些 ~2.7Ga 变质岩系 (变质表壳岩和变质深成岩)和广泛分布的 ~2.7Ga 碎屑锆石和残余锆石 (Liu *et al.*, 2002; Guan *et al.*, 2002; 程裕淇等, 2004; Jahn *et al.*, 2008; 陆松年等,2008; Zheng *et al.*, 2009; Jiang *et al.*, 2010; Wan *et al.*, 2011b; 万渝生等,2012a; 董晓杰等, 2012; Han *et al.*, 2012; Zhu *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2013),而且许多壳内再循环或受陆壳物质影响的 ~2.5Ga 岩石具有 2.7 ~ 2.9Ga 的全岩 Nd 同位素和锆石 Hf 同位素亏损地幔模式年龄 (Wu *et al.*, 2005; Geng *et al.*, 2011; Wang and Liu, 2012; Wan *et al.*, 2014),显示 ~2.7Ga 也是华北克拉通重要的陆壳形成期之一。

国际上 BIF 成矿作用与 ~2.7Ga 的全球构造热事件密切相关。与国际上 ~2.7Ga BIF 的形成峰期相比,到目前为止,无确切证据表明华北克拉通存在新太古代早期 ~2.7Ga 的 BIF (万渝生等,2012b)。杨晓勇等 (2012)虽提出霍邱含铁建造形成于 ~2.7Ga 的认识,但尚未获得令人信服的年代学证据。作者等最近几年借助“华北克拉通对哥伦比亚超大陆事件的响应与大地构造格架”等地质调查项目的支持,对沂沭 (郯庐)断裂东侧莱州-昌邑地区的变质岩系及其中的含铁建造开展了调查研究工作。研究结果表明,昌邑地区的 BIF 铁矿形成于 ~2.7Ga,为华北克拉通 ~2.7Ga 的成矿作用和地壳演化提供了新证据。

1 区域成矿背景

胶北地区的 BIF 铁矿主要分布在沂沭 (郯庐)断裂带东侧的莱州市西南部、平度市西北部、昌邑市东部及安丘市东北部一带,是莱州-安丘铁成矿带的主要矿床类型。铁矿带总体呈 NE 向带状展布,长 100km,宽 10 ~ 20km,面积约 1200km²,是山东省重要的铁矿分布区。这一带的铁矿勘查起步于 20 世纪 50 年代末期,当时主要围绕“祥山式”铁矿开展工作;20 世纪 70 ~ 80 年代发现了东辛庄-莲花山铁矿、郑家坡铁矿;近年先后探明了东宋、洼子、大泥河、毛家寨、南任、常家屯、盘马埠、任家疃等数十处中小型铁矿床 (图 1)。目前,该区已成为山东省新兴的铁矿资源后备基地 (徐洪岩等,2011)。莱州-安丘铁成矿带的铁矿根据成因类型可划分沉积变质型、岩浆熔离型和热液改造型。其中岩浆熔离型主要产于侵入荆山群和粉子山群的古元古代变质基性-超基性岩体中,代表性矿床为昌邑高戈庄铁矿和平度于埠铁矿。热液改造型主要是在沉积变质型和岩浆熔离型的基础上经后期岩浆热液改造的结果,前者以大泥河铁矿为代表,后者以南任铁矿为代表。大多数铁矿床为沉积变质型 (BIF),其中的东辛庄-莲花山铁矿规模最大,累计提交资源量六千多万吨。

BIF 铁矿主要产于粉子山群底部的小宋组中。在莱州附近的粉子山-游优山一带,粉子山群构成一个近东西向的向形构造,南北两侧和西端均有小宋组出露;20 世纪 90 年代该地的早前寒武纪岩石单元划分为粉子山群、胶东群 (即后来的小宋组)和太古宙 TTG 片麻岩,并认为粉子山群不整合于胶东群之上,两者之间多呈韧性剪切或断层接触,粉子山群底部局部见有变质砾岩。在灰埠南部含铁建造与粉子山群祝

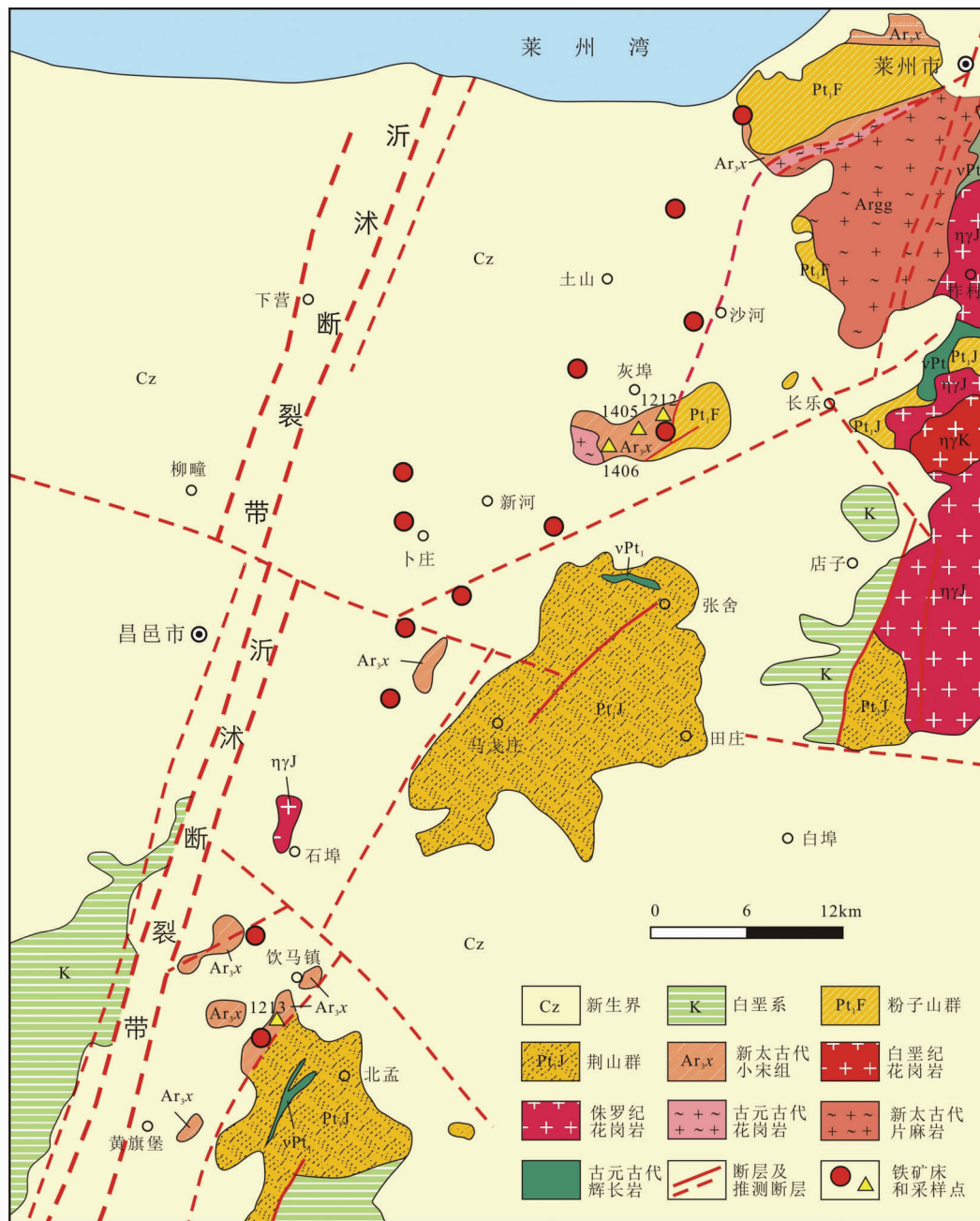


图 1 胶北莱州-昌邑地区地质图 (据山东省地质调查院, 2004^① 修改)

Fig. 1 Geological map of the Laizhou-Changyi area showing distribution of the BIF iron deposits

家夼组为断层接触; 在饮马镇南侧小宋组含铁建造与荆山群野头组和古元古代变质辉长岩呈韧性剪切接触。总体上含铁建造出露于粉子山群和荆山群的北西侧, 可与不同的变质建造接触。这种接触关系与辽南鞍山-本溪地区辽河群和鞍山群之间的接触关系相似。

平度灰埠一带发育的这套以变粒岩为主的含铁岩系, 前人认为其特征与粉子山群有别, 故归于胶东群。20 世纪 80

~90 年代开展的区域地质调查及地层对比发现这套以黑云变粒岩为主的变质碎屑岩系, 在原粉子山群祝家夼组之下普遍存在。为此, 区调报告建议建立“小魏家组”或“五个庄组”。于志臣(1996)在进行区域地层对比研究时认为出露于灰埠一带的这套变质地层层序最全, 岩性特征明显。其岩石组合较之“小魏家组”和“五个庄组”更具代表性, 且认为这套变质碎屑岩与胶东群截然不同, 而与粉子山群较为连续,

① 山东省地质调查院. 2004. 1:25 万潍坊市幅地质图

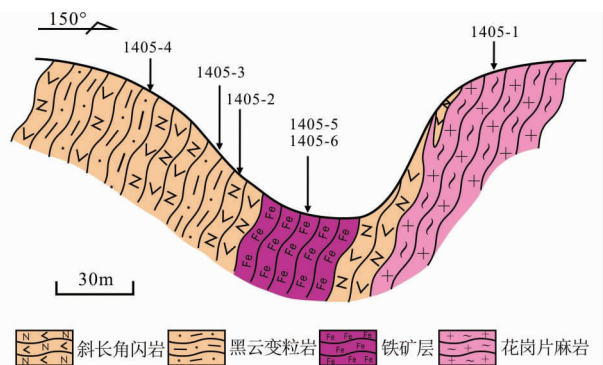


图2 平度灰埠镇南铁矿采坑地质剖面示意图

Fig. 2 Schematic geological section of iron mining pit in south of Huibu, Pingdu

故建立小宋组, 归属于粉子山群, 并将其置于粉子山群祝家乔组之下。山东地矿局四队在小宋组中曾获得 2429Ma (U-Pb, 五个庄, 莱州菱镁矿附近)、2271Ma (单颗粒锆石年龄, 平度灰埠) (于志臣, 1996)。

小宋组被划分为三个岩性段, 分别为长石石英岩段、含铁岩系段和黑云变粒岩段。其中含铁岩系段是区内 BIF 型铁矿赋存层位, 岩石组合以变粒岩、斜长角闪岩为主夹磁铁石英岩、磁铁浅粒岩、角闪磁铁变粒岩、含石榴黑云片岩; 在变粒岩和斜长角闪岩中偶见含透辉石。目前对小宋组以及其中的铁矿成矿时代尚有分歧, 早期多认为这些变质沉积型铁矿与太古宙胶东群相关, 现今多将其归属于古元古代 (曾广湘等, 1998; 王松涛等, 2007; 蓝廷广等, 2012; Lan *et al.*, 2014b)。

2 岩石组合特征

本次工作主要是围绕条带状铁建造及其与围岩的接触关系、含铁建造的形成时代开展了相关研究工作。在莱州西侧的东宋、灰埠南侧和昌邑南部的饮马镇一带进行了野外考察, 其中在东宋观察了采掘的矿石和散落的岩芯, 在饮马镇洪秋铁矿附近观察了废弃的采坑, 在灰埠镇南侧的岭西王家村和任家疃附近观察了正在采矿的露天采坑。

在灰埠镇南侧的岭西王家村和任家疃附近铁矿采坑观察到的岩石组合略有不同。岭西王家村东侧采坑中 (图 2), 铁矿层厚约 30m, 主要岩石类型为角闪磁铁石英岩夹角闪黑云变粒岩, 铁矿层呈条带状构造, 由富磁铁矿和角闪石的暗色条带和富石英的浅色条带构成, 暗色条带中角闪石含量可达 20% ~ 30%, 磁铁矿占 40% ~ 60%, 石英含量 10% ~ 20%; 浅色条带中也有少量角闪石和磁铁矿。铁矿层底板 (东南侧) 主要为黑云母二长花岗岩, 少量斜长角闪岩和黑云斜长变粒岩, 二长花岗岩侵入到斜长角闪岩和黑云母变粒岩之中, 在二长花岗岩片麻岩中见有片理化较强烈的斜长角闪岩和黑云斜长变粒岩夹层或透镜体, 因共同遭受了变形变质作用, 产状上已平行化, 二长花岗岩已变为黑云二长花岗岩片麻

岩, 并发育一组与片麻理产状相近的拉伸线理构造。在采坑北东的一个探槽中, 见有含石榴石的黑云片岩岩芯, 石榴石呈变斑晶存在, 粒度一般 3 ~ 6mm, 最大可达 10mm; 表明岩石组合中存在富铝的泥砂质岩; 该地的石榴黑云片岩应位于目前开采的铁矿层之下。铁矿层上盘主要为斜长角闪岩夹黑云斜长变粒岩, 往上逐渐过渡为以黑云斜长变粒岩为主; 岩石中偶见暗色矿物较少的黑云斜长浅粒岩薄层。

任家疃铁矿采坑中, 主要观察了铁矿层的上盘, 铁矿层厚约 20m, 产状为 $275^{\circ} \angle 38^{\circ}$, 铁矿层往上可观察露头约 80m, 自下而上岩性组合为斜长角闪片岩、黑云变粒岩、含石榴黑云片岩、白云母石英片岩、白云母片岩等。其中斜长角闪片岩为糜棱岩化的斜长角闪岩, 岩石呈“L”构造岩的形式产出, 拉伸线理近水平。采坑边见有零散的岩芯, 采样薄片鉴定其中 1 块样品为角闪二长片麻岩, 有可能是铁矿层下伏的变质深成岩。

洪秋矿业附近采坑已废弃, 只能观察到零星露头, 观察到的岩石类型有斜长角闪岩、黑云斜长角闪岩、黑云斜长变粒岩、角闪磁铁石英岩, 岩石均呈中细粒变晶结构, 薄层状或条带状构造, 互层状产出。黑云斜长变粒岩中黑云母含量变化较大, 偶见含石榴石。地层产状约 $120^{\circ} \angle 50^{\circ}$ 。根据矿区钻孔资料, 岩性组合主要为黑云变粒岩、磁铁黑云变粒岩、黑云透辉变粒岩、磁铁浅粒岩、角闪磁铁石英岩、斜长角闪岩、长石石英岩等。

从区域上含铁建造的产状观察, 走向总体以北东向至近东西向为主, 但倾角变化较大, 有近水平的也有近直立的。如在灰埠镇南侧一带岭西王家村附近采坑产状 $350^{\circ} \angle 60^{\circ}$, 任家疃采坑为 $275^{\circ} \angle 38^{\circ}$, 而在任家疃东一个小采坑内见产状为 $290^{\circ} \angle 85^{\circ}$ 。在昌邑东部的东辛庄一带的勘探线剖面揭示产状总体向东南缓倾, 并可能存在紧闭平卧褶皱 (图 3); 莲花山矿区第 2 勘探线剖面则指示铁矿层向北缓倾。这表明含铁建造总体上呈现为较宽缓的片理褶皱和后期韧性剪切变形改造。

从岩石组合看, 莱州-安丘地区的条带状铁建造与区域上以富铝碎屑岩-碳酸盐岩建造为主的粉子山群和荆山群存在较明显差异。

3 岩石地球化学特征

在含铁建造中采集了一批岩石化学分析样品, 其中斜长角闪岩 4 件, 变粒岩 7 件, 铁矿石 3 件, 片岩类 5 件。另外在侵入含铁建造的花岗片麻岩中采集了 1 件。在天津地质矿产研究所实验测试室分析, 化学分析结果见表 1。

3.1 岩石化学特征及原岩恢复

野外观察斜长角闪岩呈层状与 BIF 共生, 其原岩应属于基性火山岩。斜长角闪质岩石总体 SiO_2 含量较高 (50.3% ~ 52.1%), $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量较低 (2.4% ~ 4.21%), 在 TAS

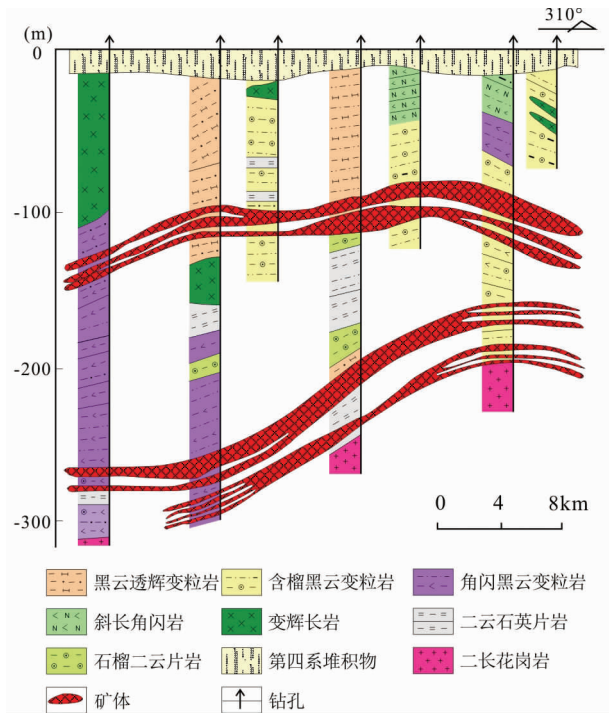


图3 昌邑东辛庄铁矿区第102勘探线地质剖面图(据王松涛等,2007修改)

Fig. 3 Profile map of drill holes along exploration line 102 from the Dongxinhuang iron deposit area (modified after Wang et al., 2007)

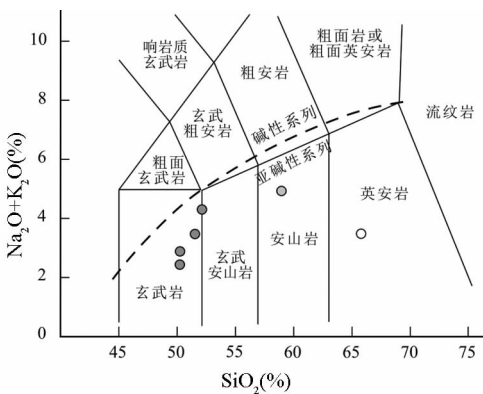


图4 莱州-昌邑地区含铁建造中变质火山岩的TAS图
Fig. 4 TAS diagram of metamorphic volcanic rocks from iron-bearing formation in Laizhou-Changyi area

图上均属亚碱性系列(图4),投影到FAM图上,显示出拉斑系列演化趋势。Lan et al. (2014a)采自东辛庄和莲花山铁矿的斜长角闪岩样品具有类似特征。

变粒岩类岩石化学成分变化较大, SiO₂ 含量为 59% ~ 71.68%, K₂O + Na₂O 含量变化在 3.49% ~ 6.77% 之间。野外观察,与片岩类互层状产出的黑云斜长变粒岩属变质碎屑岩的可能性大,而与斜长角闪岩互层状产出的黑云斜长变粒

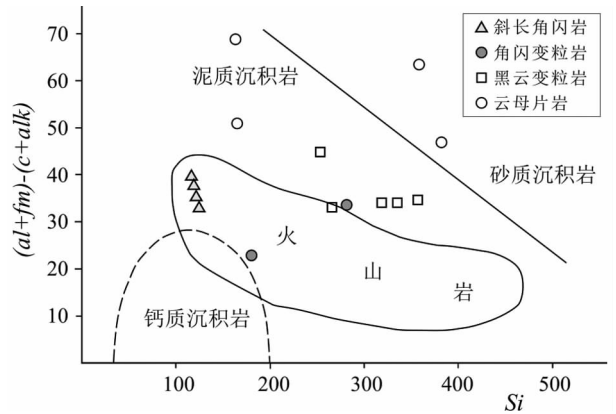


图5 样品的 $(al+fm)-(c+alk)$ 对Si图解
Fig. 5 $(al+fm)-(c+alk)$ vs. Si diagram of samples from iron-bearing formation in Laizhou-Changyi area

岩的原岩性质较难判断。借助岩石化学数据投图有一定效果,在 $(al+fm)-(c+alk)$ 对Si图上,斜长角闪岩均落在火成岩区,角闪变粒岩有1个样品(1405-2)落在火成岩区,另1个落在火山岩区边缘;黑云斜长变粒岩中的1个样品(1213-1)落在火山岩区边界线内侧,其它均落在沉积岩区(图5);在Si-mg图上斜长角闪岩也落在火成岩区(图略),但黑云变粒岩和角闪变粒岩也多落在火成岩区。结合岩石的矿物成分判断,变粒岩类除样品1213-1外,其它应是以碎屑岩为主,可能不同程度地混入了一些火山凝灰质组份;而角闪变粒岩的原岩属火山岩可能性较大。

含石榴石的黑云片岩、白云母片岩和白云母石英片岩等属于典型的变质泥砂质碎屑岩。化学分析结果显示 SiO₂ 含量变化较大,为 55.24% ~ 82.56%, Al₂O₃ 含量为 10.65% ~ 17.6%, K₂O + Na₂O 为 3.25% ~ 5.98%。

铁矿石样品均为角闪磁铁石英岩, SiO₂ 含量为 39.45% ~ 53.81%, Al₂O₃ 含量 0.44% ~ 1.08%, FeO^T 为 37.85% ~ 50.64%, 因矿石中含 10% ~ 15% 的角闪石, CaO 和 MgO 均有一定含量(1.4% ~ 2.6%)。

3.2 稀土及微量元素特征

斜长角闪岩的稀土总量较低 ($36.1 \times 10^{-6} \sim 63.6 \times 10^{-6}$), 轻重稀土分馏程度较低, $(La/Yb)_N$ 为 1.85 ~ 2.42, $(La/Sm)_N$ 为 1.51 ~ 1.96, $(Gd/Yb)_N$ 为 1.01 ~ 1.16, 轻稀土分馏程度略高于重稀土。δEu 为 0.94 ~ 1.10, 基本无铕异常(图6)。稀土图谱介于岛弧拉斑玄武岩和岛弧钙碱性玄武岩之间(参见 Wilson, 1993, p177)。变粒岩样品的稀土图谱显示轻稀土明显富集(图7), 铕异常不明显, 角闪变粒岩与黑云变粒岩差异不大。铁矿石的稀土含量总量低, 并显示出明显的铕正异常。

斜长角闪岩的微量元素在初始地幔标准化图谱上具有明显的 Nb、Ta、Ti 负异常, Pb、K 也显示出陆壳物质混染的特

表1 莱州-昌乐地区铁建造样品化学分析结果(主量元素:wt%;稀土和微量元素: $\times 10^{-6}$)Table 1 The geochemical data of the iron-bearing formation samples from Laizhou-Changyi area, Jiaobei terrane (major elements: wt%; trace elements: $\times 10^{-6}$)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
样品号	1212-1	1213-2	1405-2	1406-1	1212-2	1405-10	1212-3	1213-1	1405-3	1405-4	1406-4	1405-5	1405-6	1406-2	1405-7	1405-7	1406-3	1406-5	1406-6	1405-1	
采样地点	灰埠镇 镇南	北孟镇 北西	灰埠镇 西南	新河镇 西南	灰埠镇 镇南	莱州灰埠 镇西南	灰埠镇 镇南	灰埠镇 北西	灰埠镇 西南	灰埠镇 西南	灰埠镇 西南	灰埠镇 西南	灰埠镇 西南	新河镇 西南	灰埠镇 西南	灰埠镇 西南	新河镇 西南	新河镇 西南	新河镇 西南	新河镇 西南	灰埠镇 西南
岩石名称	斜长角闪岩	斜长角闪岩	含石英斜长角闪岩	斜长角闪岩	含榴角闪二长变粒岩	角闪斜长变粒岩	黑云斜长变粒岩	黑云斜长变粒岩	黑云斜长变粒岩	黑云斜长变粒岩	含榴黑云斜长变粒岩	角闪磁铁矿英岩	角闪磁铁矿英岩	角闪磁铁矿英岩	含石榴黑云片岩	含石榴黑云片岩	含榴二云斜长片麻岩	含榴二云母片岩	白云母石英片岩	白云母石英片岩	黑云二长花岗岩片麻岩
SiO ₂	52.10	50.30	51.65	50.30	59.00	67.97	71.40	66.00	71.68	70.71	66.36	43.27	53.81	39.45	55.30	55.24	70.03	68.52	82.56	76.04	
TiO ₂	0.68	1.00	0.65	0.79	0.50	0.38	0.42	0.49	0.38	0.25	0.53	0.02	0.01	0.03	0.37	0.62	0.31	0.44	0.29	0.33	
Al ₂ O ₃	13.10	14.20	14.73	14.90	13.40	13.20	10.80	15.80	13.06	13.95	14.80	1.07	0.44	1.08	13.08	17.60	15.46	17.32	10.65	12.32	
Fe ₂ O ₃	1.71	3.15	1.75	2.61	2.36	1.97	0.93	0.65	0.66	0.79	1.26	30.55	25.50	37.18	8.43	4.28	0.71	0.84	0.32	1.34	
FeO	9.80	9.30	8.14	8.00	6.00	4.83	4.92	3.40	3.52	3.90	4.90	17.62	14.93	17.22	12.82	8.72	3.04	3.87	0.79	0.41	
MnO	0.25	0.20	0.18	0.18	0.25	0.07	0.07	0.07	0.04	0.01	0.11	0.06	0.07	0.03	0.06	0.15	0.07	0.03	0.02	0.01	
MgO	6.77	7.06	7.71	8.24	3.34	1.90	2.44	2.56	1.55	1.30	3.32	2.53	1.74	1.40	2.27	2.62	0.78	0.98	0.32	0.32	
CaO	9.52	10.10	10.11	10.40	8.19	4.70	4.20	2.62	1.36	1.86	3.20	2.67	1.63	1.41	2.16	3.22	1.54	0.43	0.19	0.66	
Na ₂ O	3.15	2.12	2.61	1.41	2.36	1.41	2.12	3.51	2.75	3.73	3.08	0.11	0.04	0.08	1.50	2.90	2.02	0.67	0.39	3.20	
K ₂ O	1.06	0.72	0.79	0.99	2.50	2.33	1.37	3.26	3.88	2.18	1.31	0.04	0.01	0.10	2.42	3.08	2.05	3.79	2.86	4.68	
P ₂ O ₅	0.09	0.14	0.06	0.08	0.11	0.10	0.05	0.19	0.06	0.07	0.10	0.05	0.06	0.02	0.08	0.16	0.03	0.06	0.03	0.05	
LOI	0.54	0.52	0.71	1.21	1.16	0.61	0.59	0.93	0.68	0.82	0.50	0.06	0.11	0.10	0.10	0.44	3.62	2.62	1.49	0.60	
Total	98.77	98.81	99.09	99.11	99.17	99.47	99.32	99.48	99.62	99.57	99.47	98.05	98.35	98.10	98.59	99.03	99.66	99.58	99.91	99.96	
La	7.42	9.25	5.36	5.39	23.60	34.10	18.40	36.80	14.50	24.20	19.40	2.05	1.48	1.33	13.40	32.30	44.90	59.50	16.20	25.10	
Ce	16.10	20.20	10.70	10.50	40.00	59.20	30.10	64.70	27.00	41.80	34.30	3.49	2.30	2.31	23.80	58.90	81.00	118.00	26.60	38.20	
Pr	2.19	2.77	1.53	1.80	4.73	6.72	3.40	8.01	3.43	4.51	4.24	0.42	0.30	0.29	2.64	7.11	10.20	13.70	3.06	5.88	
Nd	9.37	12.10	7.01	8.38	17.40	23.60	12.20	30.30	12.50	15.80	16.30	1.80	1.26	1.27	9.37	27.80	38.00	51.70	11.00	21.10	
Sm	2.51	2.97	1.77	2.24	3.02	3.47	2.24	4.98	2.20	2.36	2.82	0.34	0.24	0.29	1.57	4.74	6.75	9.12	1.58	3.49	
Eu	0.86	1.01	0.66	0.84	0.83	1.09	0.64	1.54	0.66	0.58	0.82	0.24	0.14	0.14	0.70	1.36	1.01	1.28	0.52	0.84	
Gd	2.98	3.66	1.98	2.45	2.66	3.18	2.28	4.06	2.14	2.06	2.54	0.36	0.32	0.34	1.62	4.38	6.01	8.07	1.41	3.34	
Tb	0.51	0.64	0.37	0.48	0.40	0.39	0.36	0.55	0.31	0.22	0.36	0.07	0.06	0.05	0.22	0.62	0.86	1.15	0.16	0.56	
Dy	3.26	4.11	2.60	3.38	2.20	2.10	2.18	2.48	1.91	0.96	2.13	0.49	0.48	0.37	1.28	3.54	4.93	6.42	0.82	3.66	
Ho	0.71	0.88	0.54	0.70	0.44	0.41	0.44	0.47	0.36	0.16	0.43	0.12	0.12	0.09	0.24	0.69	0.98	1.19	0.14	0.76	
Er	2.03	2.61	1.59	2.01	1.22	1.25	1.27	1.19	1.04	0.46	1.24	0.37	0.38	0.26	0.73	2.00	2.91	3.49	0.37	2.31	

续表 1

Continued Table 1

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
样品号	1212-1	1213-2	1405-2	1406-1	1212-2	1405-10	1212-3	1213-1	1405-3	1405-4	1406-4	1405-5	1405-6	1406-2	1405-7	1405-7	1406-3	1406-5	1406-6	1405-1	
采样地点	灰埠镇南	北孟镇北	灰埠西南	新河镇西南	灰埠镇南	莱州灰埠西南	灰埠镇南	北孟镇北	灰埠西南	灰埠西南	新河镇西南	灰埠西南	灰埠西南	新河镇西南	灰埠西南	灰埠西南	新河镇西南	新河镇西南	新河镇西南	灰埠西南	
岩石名称	斜长角闪岩	斜长角闪岩	含石英斜长角闪岩	斜长角闪岩	黑云角闪岩	黑云角闪岩	黑云角闪岩	黑云角闪岩	黑云角闪岩	黑云角闪岩	含榴黑云斜长变粒岩	角闪磁铁矿英岩	角闪磁铁矿英岩	角闪磁铁矿英岩	含石榴黑云片岩	含石榴黑云片岩	含榴二云斜长片麻岩	含榴二云斜长片麻岩	白云母石英片岩	白云母石英片岩	灰埠西南
Tm	0.31	0.38	0.23	0.30	0.18	0.19	0.20	0.17	0.14	0.07	0.18	0.06	0.06	0.04	0.11	0.29	0.45	0.51	0.05	0.36	
Yb	2.07	2.65	1.55	1.96	1.24	1.32	1.32	1.11	0.94	0.44	1.25	0.38	0.44	0.29	0.70	1.92	3.19	3.30	0.35	2.34	
Lu	0.30	0.40	0.24	0.29	0.19	0.21	0.21	0.17	0.14	0.07	0.20	0.07	0.07	0.06	0.11	0.30	0.49	0.51	0.06	0.34	
ΣREE	50.62	63.63	36.13	40.72	98.11	137.2	75.24	156.5	67.27	93.68	86.21	10.25	7.65	7.13	56.49	146.0	201.7	277.9	62.32	108.3	
(La/Yb) _N	2.42	2.35	2.33	1.85	12.83	17.42	9.40	22.35	10.40	37.08	10.46	3.64	2.27	3.09	12.91	11.34	9.49	12.16	31.21	7.23	
(La/Sm) _N	1.86	1.96	1.90	1.51	4.92	6.18	5.17	4.65	4.15	6.45	4.33	3.79	3.88	2.88	5.37	4.29	4.18	4.10	6.45	4.52	
(Gd/Yb) _N	1.16	1.11	1.03	1.01	1.73	1.94	1.39	2.95	1.84	3.78	1.64	0.76	0.59	0.95	1.87	1.84	1.52	1.97	3.25	1.15	
δEu	0.96	0.94	1.08	1.10	0.90	1.00	0.87	1.05	0.93	0.80	0.94	2.10	1.54	1.36	1.34	0.91	0.48	0.46	1.07	0.75	
Pb	9.65	6.10	7.44	6.57	8.70	18.10	9.76	26.00	11.90	24.90	5.48	3.68	3.56	4.88	11.40	18.10	85.30	34.90	11.40	12.70	
Cr	178.0	248.0	114.0	245.0	189.0	53.50	81.30	22.30	59.60	23.30	212.0	3.80	3.62	8.77	47.00	124.0	18.00	33.50	42.80	5.29	
Ni	61.40	77.50	59.60	78.50	83.90	34.10	36.10	17.50	42.10	14.10	103.0	2.76	2.40	6.49	26.50	66.70	13.60	20.60	6.97	3.88	
Co	40.90	52.30	47.20	50.10	21.50	10.40	15.60	13.10	13.90	5.49	21.40	1.07	1.06	7.26	10.30	19.20	6.85	11.20	3.28	1.82	
Rb	29.3	16.2	15.1	31.6	76.1	103	70.8	114	99.5	79.1	36.9	2.30	2.60	3.70	78.9	110	114	158	60.7	112	
Sr	284	291	178	156	220	471	249	486	147	273	115	18.8	20.4	20.4	113	227	132	67.5	36.0	172	
Ba	203	138	103	194	463	733	240	1520	472	554	110	3.50	2.60	10.5	434	652	467	790	459	1640	
Sc	36.60	42.90	43.50	41.40	10.90	12.10	11.00	10.30	14.20	11.50	16.80	2.30	1.11	2.04	9.64	23.20	10.90	18.30	6.52	12.40	
Nb	2.61	4.03	2.02	2.73	4.51	5.56	4.00	5.37	3.35	4.36	5.20	0.46	0.18	0.31	4.29	6.31	13.60	16.20	3.25	17.30	
Ta	0.16	0.24	0.15	0.19	0.35	0.52	0.44	0.40	0.34	0.48	0.48	0.06	0.02	0.04	0.35	0.52	1.15	1.31	0.32	1.24	
Zr	52.9	63.1	43.5	53.2	99.0	106	87.9	133	99.6	112	141	4.94	2.02	3.78	102	126	192	200	88.1	299	
Hf	1.69	2.06	1.26	1.63	3.04	3.11	2.74	4.08	2.72	3.30	3.80	0.16	0.05	0.11	2.88	3.58	6.11	6.33	2.48	8.13	
Ga	14.50	16.40	15.80	17.30	16.30	16.50	16.40	19.80	13.00	18.00	15.80	1.67	1.85	2.81	21.10	21.50	16.60	25.60	12.00	12.30	
U	0.24	0.23	0.15	0.15	2.20	2.61	2.30	2.58	1.36	4.75	2.07	0.17	0.07	0.14	1.19	2.06	6.08	4.36	0.86	1.00	
Th	0.96	0.83	0.59	0.53	6.85	10.70	6.96	8.17	4.36	11.40	6.36	0.65	0.12	0.50	6.20	7.98	19.40	22.60	6.28	7.30	
Y	18.70	23.10	14.40	17.70	12.00	12.10	12.80	11.30	10.50	4.81	11.40	6.56	5.54	4.65	7.62	20.00	26.30	32.50	3.55	20.30	
Zr/Y	2.83	2.73	3.02	3.01	8.25	8.76	6.87	11.77	9.49	23.28	12.37	0.75	0.36	0.81	13.39	6.30	7.30	6.15	24.82	14.73	
Th/Yb	0.46	0.31	0.38	0.27	5.52	8.11	5.27	7.36	4.64	25.91	5.09	1.71	0.27	1.72	8.86	4.16	6.08	6.85	17.94	3.12	
Ta/Yb	0.08	0.09	0.10	0.10	0.28	0.39	0.33	0.36	0.36	1.09	0.38	0.16	0.05	0.14	0.50	0.27	0.36	0.40	0.91	0.53	

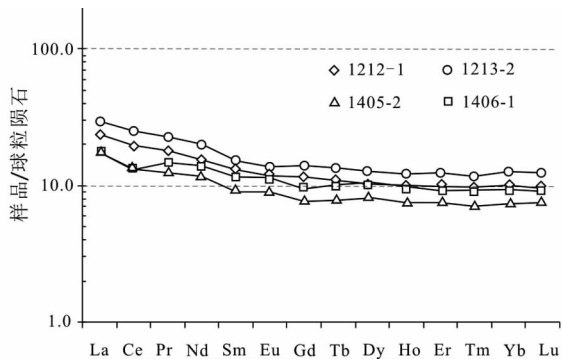


图6 斜长角闪岩的稀土图谱(标准化值据 Sun and MacDonough, 1989)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of amphibolites (normalization values after Sun and MacDonough, 1989)

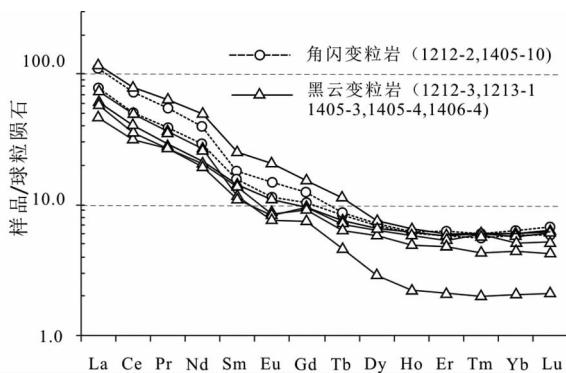


图7 变粒岩的稀土图谱(标准化值据 Sun and MacDonough, 1989)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns of leptites (normalization values after Sun and MacDonough, 1989)

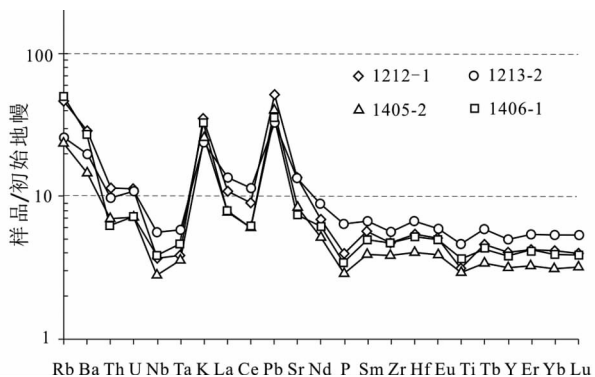


图8 斜长角闪岩的微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and MacDonough, 1989)

Fig.8 Primitive mantle normalized trace element patterns for amphibolites (normalization values after Sun and MacDonough, 1989)

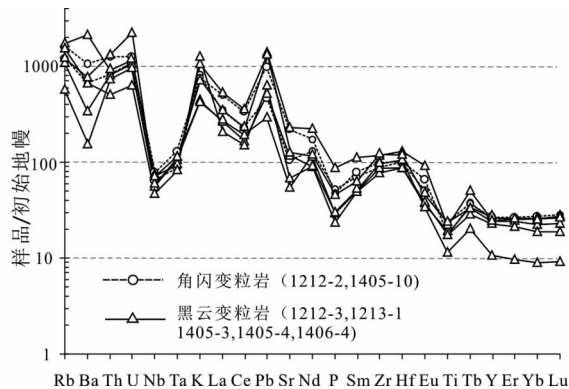


图9 变粒岩的微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and MacDonough, 1989)

Fig.9 Primitive mantle normalized trace element patterns for leptites (normalization values after Sun and MacDonough, 1989)

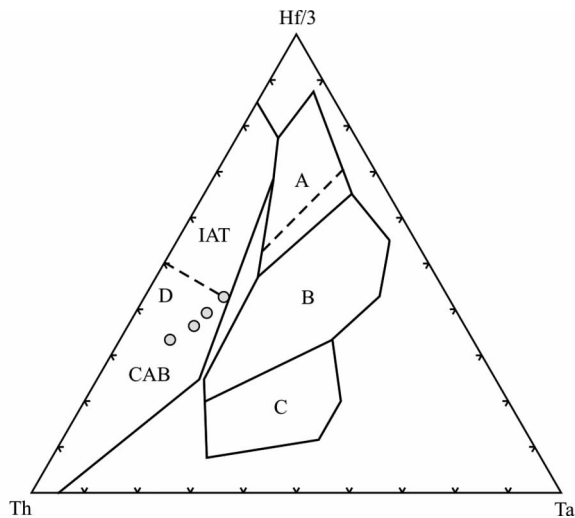


图10 斜长角闪岩的 Hf/3-Th-Ta 图解(据 Wood, 1980)

A: N型洋脊玄武岩; B:富集型洋脊玄武岩+板内拉斑玄武岩; C:板内碱性玄武岩; D:岛弧拉斑玄武岩+岛弧钙碱性玄武岩

Fig.10 Th-Hf-Ta diagram of amphibolite (after Wood, 1980)

A: N-type MORB; B: E-type MORB and within-plate tholeiites; C: alkaline within-plate basalts; D: volcanic-arc basalts

征(图8)。与大陆地壳比较, Th、U、Nb、Ta及轻稀土含量均明显更低, 而与岛弧拉斑玄武岩更为接近。变粒岩的微量元素初始地幔标准化图谱与大陆地壳相似(图9)。在 Hf/3-Th-Ta 图解上, 斜长角闪岩样品数据点投在岛弧玄武岩区, 且靠近岛弧钙碱性玄武岩一侧(图10)。由于玄武岩受地壳混染易造成 Ti、Nb、Ta 含量下降, 利用包含有 Ti、Nb、Ta 等元素作为判别因子的玄武岩判别图解, 如 Th/Yb-Ta/Yb、Ti/100-Zr-Y × 3 和 Hf/3-Th-Ta 等图解时, 受到混染的大陆玄武岩样品也易投在岛弧玄武岩区, 而地壳混染作用对于岩石中 Zr

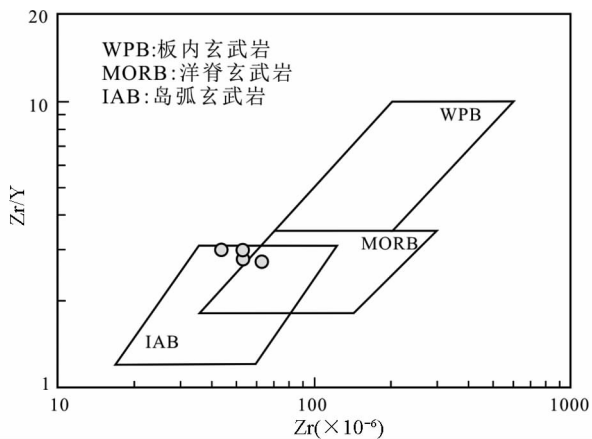


图 11 斜长角闪岩的 Zr-Zr/Y 图解 (据 Pearce, 1982)

Fig. 11 Zr-Zr/Y diagram of amphibolite (after Pearce, 1982)

和 Y 的含量影响不大 (夏林圻等, 2007)。故采用 Zr-Zr/Y 图解进一步判断, 本区斜长角闪岩样品均落入岛弧玄武岩区 (图 11)。

值得注意的是样品 1213-1 (黑云斜长变粒岩) 岩矿鉴定 (见后) 和原岩恢复均指示其原岩为酸性火山岩, 锆石测年亦佐证其原岩为岩浆岩。其岩石化学特征具有埃达克质岩特点, SiO_2 含量为 66%, Al_2O_3 为 15.8% ($> 15\%$), MgO 为 2.56%, 低 Y 和 Yb (分别为 11.3×10^{-6} 和 1.11×10^{-6}), 高 Sr (486×10^{-6}), δEu 为 1.05, 铕异常不明显, 重稀土亏损且平坦分布, 说明岩浆源区残留相为石榴石 + 角闪石 + 辉石, 属于高压下玄武质岩石部分熔融的产物 (张旗等, 2006)。 $\text{Mg}^\#$ 为 57.3 (> 50), 说明玄武岩部分熔融过程中有更基性物质的添加, 很可能是岩浆上升过程中遭受了地幔楔橄榄岩的混染。

莱州-昌邑地区含铁建造与鞍山地区新太古代鞍山式铁矿的含矿建造类似, 均由斜长角闪岩、黑云变粒岩、云母片岩、云母石英片岩等岩石类型构成, 变质程度略高于鞍山地区。莱州-昌邑地区含铁建造中酸性火山岩不发育, 并有中性的火山岩成分 (角闪斜长变粒岩), 双峰式火山岩组合特点不明显, 斜长角闪岩具有岛弧玄武岩的地球化学特征, 而酸性火山岩具有埃达克质岩特点, 故作者等倾向于认为这套含铁建造可能形成于与岛弧相关的构造背景, 属大陆裂谷环境的可能性不大。

4 同位素年代学

本次工作在平度灰埠镇南采集了 3 件同位素年龄样品, 分别是斜长角闪岩 (1212-1)、黑云斜长变粒岩 (1405-3) 和黑云母二长花岗片麻岩 (1405-1), 斜长角闪岩和黑云斜长变粒岩均位于铁矿层的上盘, 黑云母二长花岗片麻岩位于铁矿层的下盘, 侵入到铁矿层的围岩中 (图 2)。另外在饮马镇南侧

的洪秋矿业附近采集了 1 件黑云斜长变粒岩样品 (1213-1), 也位于铁矿层上盘。

4.1 样品岩石特征

样品 1212-1 (斜长角闪岩): 岩石为深灰色, 细粒粒柱状变晶结构, 片麻状 (薄层状) 构造, 由斜长石、角闪石、少量黑云母组成。斜长石呈他形粒状, 少量近半自形板状, 粒度一般 0.1 ~ 1mm; 集合体略显定向分布, 轻绢云母化、少帘石化、土化, 具聚片双晶, 含量约 50%。角闪石呈柱、粒状, 长轴多定向分布, 粒度一般 0.1 ~ 0.7mm; 集合体定向分布, 呈褐色, 含量约 45%, 黑云母呈鳞片状, 零星状分布, 含量 5%。

样品 1213-1 (黑云斜长变粒岩): 岩石呈深灰色, 细粒鳞片状变晶结构, 薄层状构造 (片麻状构造)。岩石由斜长石、石英、黑云母组成。斜长石呈他形粒状, 粒间镶嵌状分布, 粒度一般 0.1 ~ 0.6mm; 集合体定向分布, 局部轻绢云母化, 少量近半自形板状, 含量约 65%; 偶见微斜长石。石英呈他形粒状, 粒间镶嵌状分布, 粒度一般 0.1 ~ 1mm; 集合体略显定向分布, 粒内可见波状消光, 边界呈不规则状, 含量 20%。黑云母呈细小叶片状, 长轴定向, 粒度一般 0.1 ~ 0.6mm; 集合体定向分布, 含量约 15%。岩矿鉴定推测原岩为石英闪长质岩石, 根据化学成分则投在 An-Ab-Or 图解的花岗闪长岩区。

样品 1405-3 (黑云斜长变粒岩): 岩石呈棕灰色, 细粒鳞片状变晶结构, 片麻状构造。主要矿物成分为斜长石、石英、黑云母、少量磁铁矿和锆石。斜长石: 他形、粒状, 聚片双晶, An33, 主要粒径 0.5 ~ 1mm, 含量约 40% ~ 45%。石英: 他形、粒状, 压扁拉长, 长轴定向, 与片麻理方向一致, 主要粒径 0.1 ~ 0.5mm, 约占总量 40% ~ 45%。黑云母: 自形、柱状, 褐色, 主要片径 0.5 ~ 1mm, 断续定向排列呈片麻状构造, 含量约占总量 10% ~ 15%。磁铁矿: 自形、粒状, 粒径 0.1 ~ 0.2mm, 少量。

样品 1405-1 (黑云母二长花岗片麻岩): 岩石新鲜面呈灰色, 风化面土黄色, 中细粒鳞片状变晶结构, 片麻状构造。主要矿物成分为斜长石、石英、钾长石、黑云母, 副矿物为磁铁矿、锆石。钾长石: 他形、粒状, 主要为微斜长石、条纹长石, 主要粒径 0.5 ~ 1mm, 含量约 30 ~ 35%。斜长石: 他形、粒状, 聚片双晶, An28, 主要粒径 0.5 ~ 1mm, 含量约 20% ~ 25%。石英: 他形、粒状, 波状消光, 压扁、拉长长轴定向, 与片麻理方向一致, 主要粒径 0.1 ~ 5mm, 约占岩石总量 30% ~ 35%。黑云母: 自形、片状, 褐色, 断续性定向排列, 主要粒径 0.1 ~ 1mm, 含量 10% ~ 15%。

4.2 样品锆石特征

斜长角闪岩 (1212-1) 样品的锆石较少, 且大小不一 (粒度一般不足 100 μm), 形态各异 (图 12a)。多数颗粒呈不规则椭球状或长条状, 阴极发光图像内部斑纹暗淡或呈斑杂状色块, 应为变质锆石; 部分锆石具有岩浆结晶生长的震荡环

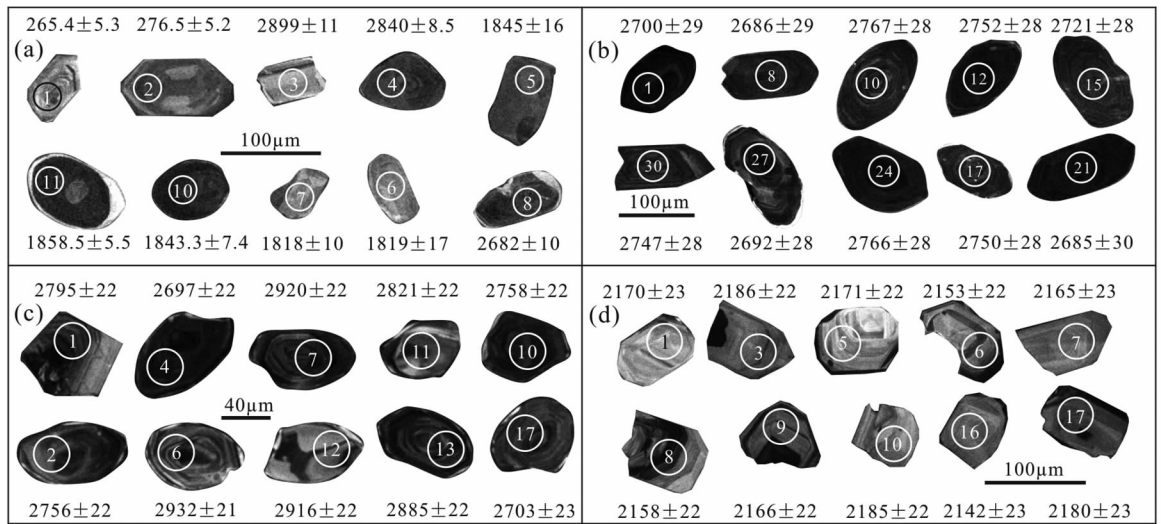


图 12 莱州-昌邑地区样品中部分锆石的阴极发光图像及测点数据

(a)斜长角闪岩(1212-1);(b)黑云斜长变粒岩(1213-1,变火山岩);(c)黑云斜长变粒岩(1405-3,变碎屑岩);(d)黑云二长花岗岩片麻岩(1405-1)

Fig. 12 CL image and dating spots of zircons in samples from iron-bearing formation in Laizhou-Changyi area

(a) amphibolites (Sample 1212-1); (b) Bi-Pl-leptite (Sample 1213-1, metamorphic volcanic rock); (c) Bi-Pl-leptite (Sample 1405-3, metamorphic clastic rock); (d) Bi-Granitic gneiss (Sample 1405-1)

带,少量具有中基性岩石中锆石的板状条纹。样品中还存在几颗晶型较好、晶体表面光洁,晶内生长环带较清晰的颗粒,测试数据显示出晚古生代的年龄,尚不清楚锆石来源。

黑云斜长变粒岩(1213-1)原岩恢复推测为变质英安质火山岩,从样品中选出的锆石较多,锆石颗粒多呈半自形,部分浑圆状;粒度介于 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 之间(图 12b)。阴极发光图像较暗淡,但仍可分辨出岩浆结晶生长的震荡环带,内部结构总体较均一,显示出同一成因锆石的特点。仅个别锆石具有不完整的窄的亮边。

黑云斜长变粒岩(1405-3)样品中的锆石多呈浑圆状,部分晶形残缺,粒度多在 $100 \mu\text{m}$ 左右,阴极发光图像显示锆石形态各异,绝大多数锆石内部具有不同形状的岩浆结晶生长震荡环带,大部分为同心环状,少数为板条状。多数锆石具有不完整的窄的生长边(图 12c)。

黑云母二长花岗岩片麻岩(1405-1)中的锆石多数形态不规则,晶型不完整,破碎较严重,粒度一般在 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 。阴极发光照片显示锆石有不同程度的残缺,内部具有较清晰的岩浆结晶生长的震荡环带,极少数具有不完整的变质生长边(图 12d)。

4.3 锆石年龄测试结果

样品 1212-1(斜长角闪岩)采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年,共测试了 15 个点(表 2),其中 1 个无效点,2 个给出晚古生代的年龄值,明显与样品的地质背景不符,可能是其它原因混入的锆石;其余 12 个测点中有 4 个给出了 $> 2.68 \text{ Ga}$ 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值($2682 \pm 10 \text{ Ma} \sim 2899 \pm 11 \text{ Ma}$),8 个测点

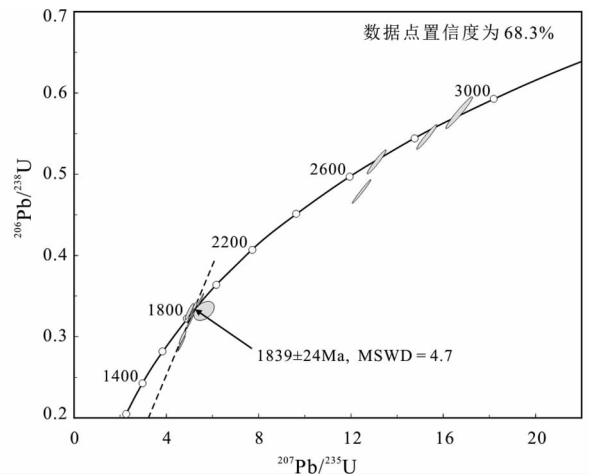


图 13 斜长角闪岩样品的锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 13 SHRIMP U-Pb concordia diagram for the zircon from amphibolite

给出的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于 $1778 \pm 23 \text{ Ma} \sim 1976 \pm 23 \text{ Ma}$ 之间,剔除离散程度较大的 2 个点后剩余的 6 个点构成的不一致线上交点年龄为 $1839 \pm 24 \text{ Ma}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均年龄为 $1850 \pm 17 \text{ Ma}$ (图 13);这 6 个锆石测点中有 3 个 Th/U 比值 < 0.10 。从锆石形态和阴极发光图像判断,斜长角闪岩中的锆石均为变质锆石或继承/捕获锆石,其原岩形成时的结晶锆石可能非常稀少。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 $> 2.68 \text{ Ga}$ 的锆石应为继承/捕获的岩浆锆石,变质作用的时代应在 1850 Ma 左右。

样品 1213-1(黑云斜长变粒岩)的锆石采用 LA-ICPMS

表2 斜长角闪岩样品(1212-1)的锆石 SHRIMP U-Pb 测年结果
Table 2 SHRIMP U-Pb age data of zircons separated from amphibolite (Sample 1212-1)

Spot No.	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 (Ma)	不谐和度 (%)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ 比值	± %	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ 比值	± %	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 比值	± %	方差		
1212-1.1	0.90	290	227	0.81	10.6	265.4	± 5.3	116.0	± 150	-129	0.0483	6.50	0.280	6.8	0.0420	2.1	.303
-2.1	—	306	217	0.73	11.5	276.5	± 5.2	310.0	± 92	11	0.0526	4.00	0.318	4.5	0.0438	1.9	.434
-3.1	0.06	104	59	0.59	51.8	2,942	± 52	2899.0	± 11	-1	0.2092	0.65	16.680	2.3	0.5780	2.2	.959
-4.1	0.02	164	108	0.68	76.9	2,804	± 44	2840.5	± 8.5	1	0.2018	0.52	15.160	2.0	0.5450	1.9	.965
-5.1	—	157	138	0.90	40.3	1,683	± 29	1845.0	± 16	9	0.1128	0.87	4.639	2.1	0.2984	1.9	.911
-6.1	0.09	212	6.0	0.03	60.5	1,850	± 31	1819.0	± 17	-2	0.1112	0.95	5.100	2.2	0.3323	1.9	.897
-7.1	0.00	381	390	1.06	107	1,818	± 29	1818.0	± 10	0	0.1112	0.56	4.992	1.9	0.3257	1.9	.958
-8.1	0.02	235	61	0.27	104	2,676	± 41	2682.0	± 10	0	0.1832	0.63	13.00	2.0	0.5146	1.9	.948
-9.1	4.35	52	32	0.63	15.5	1,846	± 38	1976.0	± 88	7	0.1213	5.00	5.550	5.5	0.3316	2.4	.430
-10.1	0.02	689	93	0.14	189	1,784	± 28	1843.3	± 7.4	3	0.1127	0.41	4.953	1.9	0.3187	1.8	.976
-11.1	—	1323	110	0.09	390	1,901	± 30	1858.5	± 5.5	-2	0.1136	0.31	5.376	1.8	0.3431	1.8	.986
-12.1	0.21	121	93	0.80	34.2	1,837	± 31	1778.0	± 23	-3	0.1087	1.30	4.940	2.3	0.3296	2.0	.841
-13.1	0.06	475	132	0.29	195	2,520	± 40	2719.6	± 5.3	7	0.1874	0.32	12.360	2.0	0.4783	1.9	.986
-14.1	0.06	1445	108	0.08	361	1,646	± 26	1860.8	± 6.2	12	0.1138	0.34	4.563	1.8	0.2908	1.8	.983

注:测试单位:北京 SHRIMP 中心,表中误差为 1σ; Pb_c 和 Pb* 分别代表普通 Pb 和放射性成因 Pb,普通 Pb 用测试的 ^{204}Pb 进行校正。

法进行年龄测试,共测试了 72 个测点(测试的锆石未经选择,在样品靶上依次测试)(表 3)。测试数据显示部分锆石铅丢失较严重,但所有 72 个测点可构成一条不一致线,其上交点年龄为 $2726 \pm 10\text{Ma}$ 。有 43 个测点的谐和度 $> 95\%$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄最大值为 $2783 \pm 28\text{Ma}$,最小值为 $2623 \pm 29\text{Ma}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2720 \pm 8.8\text{Ma}$ (图 14)。锆石的 Th/U 比值均大于 0.1,大多数介于 0.3~0.8 之间。年龄测试结果也印证样品应为变质中酸性火山岩,缺少捕获或继承锆石,且变质作用改造较弱,故 $\sim 2720\text{Ma}$ 的年龄值应代表样品的岩浆结晶年龄,亦即是地层的形成时代。

样品 1405-3(黑云斜长变粒岩)原岩恢复为变质碎屑岩,从中分选出的锆石较多,采用 LA-ICPMS 法进行了年龄测试,也测试了 72 个数据点(表 4),绝大多数数据点位于一致线附近(图 15),仅有 5 个测点数据谐和度 $< 95\%$ 。锆石的 Th/U 比值 > 0.16 ,最大为 1.44。67 个谐和度较高的数据点中 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄最小值为 2634Ma,最大为 2939Ma。可构成 2 组峰值,分别是 $2733 \pm 12\text{Ma}$ 和 $2899 \pm 8\text{Ma}$ (图 15);谐和程度较差的几个数据点与 $\sim 2.73\text{Ga}$ 的一组数据也可构成一条不一致曲线,上交点年龄为 $2734 \pm 16\text{Ma}$,与 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄一致。

样品 1405-1(黑云母二长花岗片麻岩)为侵入含铁建造的黑云二长花岗片麻岩,共测试了 32 个数据点(表 5),其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄基本一致,介于 2133~2206Ma 之间,不一致线上交点年龄为 $2170.6 \pm 6.4\text{Ma}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均值为 $2170 \pm 8\text{Ma}$ (图 16),两者极为一致。锆石的 Th/U 比值为 0.159~1.445,以 0.5~0.9 之间居多。 $\sim 2170\text{Ma}$ 可代表岩体的形成年龄。该年龄数据与 Lan *et al.* (2015) 在东辛庄铁矿区内钾长花岗岩和钠长花岗岩中获得的锆石 U-Pb 年龄在误差范围内一致。

Lan *et al.* (2014b) 从昌邑东南的东辛庄铁矿围岩中采集了 3 个样品,2 个为黑云斜长变粒岩(片麻岩)(CY2-01、CY2-83),1 个为含石榴黑云片岩(片麻岩)(CY2-40),利用 LA-ICP-MS 获得的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄除 1 个数据点为 $\sim 2.55\text{Ga}$ 外,其他均 $> 2.7\text{Ga}$,以 2.8~3.0Ga 居多。与灰埠南侧一带样品获得的结果一致。

上述测年结果表明,莱州-昌邑地区的含 BIF 变质建造形成时代应该在 2.72Ga 左右,变质碎屑岩的碎屑源区来自新太古代早期($\sim 2.73\text{Ga}$)和中太古代晚期($\sim 2.9\text{Ga}$)的地质体,没有明显的 $\sim 2.5\text{Ga}$ 的构造岩浆热事件记录,被 $\sim 2.17\text{Ga}$ 的花岗岩侵入,并不同程度地遭受了古元古代末期的变形变质作用改造。

5 讨论与结论

5.1 条带状铁建造的形成时代

莱州-昌邑地区的条带状铁建造最初归属于胶东群,在 20 世纪 90 年代的区域地质调查工作中厘定为小宋组,并归

表3 黑云斜长变粒岩(1213-1)锆石 U-Pb 测年结果

Table 3 LA-ICP-MS U-Pb age data of zircons separated from biotite-plagioclase leptyte (Sample 1213-1)

Spot No.	含量 ($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)						谐和度
	Pb	U		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	
1213-1-1	312	498	1.10	0.5004	0.0061	12.7752	0.2640	0.1852	0.0032	2616	32	2663	55	2700	29	96.9
-2	380	689	0.84	0.4644	0.0053	11.4231	0.2295	0.1784	0.0031	2459	28	2558	51	2638	29	93.2
-3	204	689	0.11	0.2885	0.0032	5.9603	0.1188	0.1499	0.0026	1634	18	1970	39	2344	29	69.7
-4	195	335	0.38	0.5195	0.0058	13.4252	0.2687	0.1874	0.0032	2697	30	2710	54	2720	28	99.2
-5	226	492	0.40	0.4132	0.0046	10.1903	0.2027	0.1789	0.0031	2230	25	2452	49	2642	28	84.4
-6	283	580	0.36	0.4382	0.0055	10.8226	0.2281	0.1791	0.0031	2343	29	2508	53	2645	29	88.6
-7	101	144	1.30	0.4938	0.0057	13.0625	0.2633	0.1919	0.0033	2587	30	2684	54	2758	28	93.8
-8	345	600	0.51	0.4988	0.0060	12.6309	0.2616	0.1837	0.0032	2609	32	2653	55	2686	29	97.1
-9	361	917	0.73	0.3286	0.0037	7.9053	0.1875	0.1745	0.0035	1832	21	2220	53	2601	33	70.4
-10	208	306	0.67	0.5515	0.0060	14.6707	0.2919	0.1929	0.0033	2832	31	2794	56	2767	28	102.3
-11	164	264	0.62	0.5117	0.0057	13.0353	0.2599	0.1847	0.0032	2664	30	2682	53	2696	28	98.8
-12	213	339	0.44	0.5429	0.0059	14.3104	0.2835	0.1912	0.0033	2796	31	2771	55	2752	28	101.6
-13	181	266	1.04	0.5228	0.0061	13.5174	0.2736	0.1875	0.0032	2711	32	2717	55	2721	28	99.6
-14	618	1667	2.28	0.2618	0.0053	6.7540	0.1948	0.1871	0.0033	1499	30	2080	60	2717	29	55.2
-15	337	584	0.32	0.5090	0.0062	13.1236	0.2748	0.1870	0.0032	2652	32	2689	56	2716	28	97.7
-16	355	721	0.41	0.4453	0.0062	10.6955	0.2346	0.1742	0.0030	2374	33	2497	55	2599	29	91.4
-17	250	420	0.47	0.5110	0.0058	13.4509	0.2703	0.1909	0.0033	2661	30	2712	54	2750	28	96.8
-18	157	256	0.51	0.5279	0.0059	13.7333	0.2747	0.1887	0.0032	2733	30	2731	55	2731	28	100.1
-19	278	644	0.52	0.3781	0.0043	9.0646	0.1840	0.1739	0.0030	2067	23	2345	48	2595	29	79.7
-20	480	973	0.80	0.4120	0.0048	9.7200	0.1981	0.1711	0.0029	2224	26	2409	49	2569	29	86.6
-21	31	64	0.19	0.4235	0.0052	10.7150	0.2320	0.1835	0.0033	2276	28	2499	54	2685	30	84.8
-22	355	652	0.54	0.4669	0.0052	12.0350	0.2393	0.1869	0.0032	2470	27	2607	52	2715	28	91.0
-23	Pb	U	0.34	0.5152	0.0059	13.1399	0.2653	0.1850	0.0032	2679	31	2690	54	2698	28	99.3
-24	312	498	0.78	0.5516	0.0062	14.6626	0.2945	0.1928	0.0033	2832	32	2794	56	2766	28	102.4
-25	380	689	0.80	0.5458	0.0065	14.6567	0.3054	0.1948	0.0034	2808	33	2793	58	2783	28	100.9
-26	204	689	0.29	0.4364	0.0053	10.7351	0.2562	0.1784	0.0034	2334	28	2500	60	2638	31	88.5
-27	195	335	1.08	0.4397	0.0051	11.1724	0.2264	0.1843	0.0032	2349	27	2538	51	2692	28	87.3
-28	226	492	0.81	0.5506	0.0062	14.4577	0.2887	0.1904	0.0033	2828	32	2780	56	2746	28	103.0
-29	283	580	1.89	0.2397	0.0034	5.4737	0.1252	0.1656	0.0029	1385	20	1896	43	2514	29	55.1
-30	101	144	0.46	0.5616	0.0062	14.7563	0.2928	0.1906	0.0033	2873	32	2800	56	2747	28	104.6
-31	345	600	0.37	0.5142	0.0067	12.9868	0.2795	0.1832	0.0032	2674	35	2679	58	2682	28	99.7
-32	361	917	0.46	0.5053	0.0059	13.1066	0.2664	0.1881	0.0032	2637	31	2687	55	2726	28	96.7
-33	208	306	0.47	0.5371	0.0061	13.7211	0.2763	0.1853	0.0032	2771	31	2731	55	2701	29	102.6
-34	164	264	0.84	0.5109	0.0057	13.2431	0.2660	0.1880	0.0032	2660	30	2697	54	2725	28	97.6
-35	213	339	0.48	0.5238	0.0059	13.3056	0.2673	0.1842	0.0032	2715	31	2702	54	2691	28	100.9

续表 3

Continued Table 3

Spot No.	含量($\times 10^{-6}$)			同位素比值						年龄(Ma)						谐和度
	Pb	U	Th/U	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	
-36	181	266	0.43	0.4328	0.0049	10.8374	0.2186	0.1816	0.0031	2318	26	2509	51	2667	29	86.9
-37	618	1667	0.45	0.5246	0.0060	13.5324	0.2734	0.1871	0.0032	2719	31	2718	55	2717	29	100.1
-38	337	584	0.40	0.5321	0.0060	13.4340	0.2734	0.1831	0.0032	2750	31	2711	55	2681	29	102.6
-39	355	721	0.64	0.5302	0.0058	13.8711	0.2807	0.1898	0.0033	2742	30	2741	55	2740	29	100.1
-40	250	420	0.86	0.4323	0.0049	10.2831	0.2131	0.1725	0.0031	2316	26	2461	51	2582	30	89.7
-41	157	256	0.70	0.5067	0.0056	12.9050	0.2644	0.1847	0.0033	2642	29	2673	55	2696	29	98.0
-42	278	644	1.43	0.4762	0.0056	11.6113	0.2410	0.1768	0.0031	2511	29	2574	53	2623	29	95.7
-43	480	973	0.32	0.4287	0.0054	10.0114	0.2137	0.1694	0.0030	2300	29	2436	52	2551	29	90.2
-44	31	64	0.54	0.4747	0.0057	12.0649	0.2505	0.1843	0.0032	2504	30	2609	54	2692	29	93.0
-45	355	652	0.37	0.5210	0.0059	13.2468	0.2690	0.1844	0.0032	2704	31	2697	55	2693	29	100.4
-46	280	485	0.20	0.4837	0.0057	11.8299	0.2449	0.1774	0.0031	2544	30	2591	54	2628	29	96.8
-47	241	352	0.24	0.4035	0.0048	10.1293	0.2128	0.1821	0.0032	2185	26	2447	51	2672	29	81.8
-48	270	391	0.45	0.5008	0.0057	12.7637	0.2618	0.1848	0.0033	2617	30	2662	55	2697	29	97.0
-49	228	463	0.45	0.4885	0.0055	12.4105	0.2530	0.1842	0.0033	2564	29	2636	54	2691	29	95.3
-50	328	574	0.58	0.4927	0.0057	12.5223	0.2566	0.1843	0.0032	2582	30	2644	54	2692	29	95.9
-51	136	197	0.61	0.5044	0.0058	12.8720	0.2616	0.1851	0.0032	2633	30	2670	54	2699	29	97.6
-52	499	1612	0.47	0.5289	0.0060	13.5855	0.2747	0.1863	0.0032	2737	31	2721	55	2710	29	101.0
-53	152	233	0.46	0.4471	0.0049	11.1242	0.2230	0.1805	0.0031	2382	26	2534	51	2657	29	89.7
-54	270	467	0.36	0.4671	0.0057	11.7129	0.2438	0.1819	0.0032	2471	30	2582	54	2670	29	92.5
-55	199	344	0.33	0.4805	0.0067	11.9218	0.2754	0.1799	0.0032	2530	35	2598	60	2652	29	95.4
-56	104	166	0.34	0.5128	0.0057	13.2924	0.2691	0.1880	0.0033	2669	29	2701	55	2725	29	97.9
-57	238	376	0.37	0.3795	0.0043	8.8593	0.1816	0.1693	0.0030	2074	23	2324	48	2551	29	81.3
-58	218	359	0.83	0.3839	0.0046	9.3705	0.1949	0.1770	0.0031	2095	25	2375	49	2625	29	79.8
-59	199	410	0.42	0.5331	0.0058	14.1110	0.2819	0.1920	0.0033	2755	30	2757	55	2759	28	99.8
-60	219	368	0.49	0.5217	0.0058	13.5143	0.2705	0.1879	0.0032	2706	30	2716	54	2724	28	99.4
-61	317	532	4.45	0.4545	0.0056	14.3244	0.2986	0.2286	0.0040	2415	30	2771	58	3042	28	79.4
-62	142	229	0.42	0.5008	0.0056	12.6823	0.2555	0.1837	0.0032	2617	29	2656	54	2686	29	97.4
-63	179	342	0.98	0.5428	0.0060	14.3506	0.2883	0.1917	0.0033	2795	31	2773	56	2757	29	101.4
-64	169	285	0.81	0.4688	0.0053	11.8572	0.2429	0.1835	0.0032	2478	28	2593	53	2684	29	92.3
-65	119	198	0.86	0.5369	0.0059	14.2039	0.2882	0.1919	0.0034	2770	31	2763	56	2758	29	100.4
-66	293	630	0.36	0.3903	0.0043	9.4056	0.1918	0.1748	0.0031	2124	23	2378	49	2604	29	81.6
-67	220	410	0.60	0.5253	0.0059	13.4950	0.2798	0.1863	0.0033	2722	31	2715	56	2710	29	100.4
-68	233	408	0.43	0.4077	0.0050	10.0396	0.2172	0.1786	0.0032	2204	27	2438	53	2640	30	83.5
-69	111	217	0.76	0.5011	0.0055	13.0218	0.2752	0.1885	0.0034	2619	29	2681	57	2729	30	96.0
-70	56	127	0.15	0.4453	0.0050	11.0473	0.2449	0.1799	0.0034	2374	26	2527	56	2652	31	89.5
-71	144	260	0.43	0.5091	0.0060	13.3311	0.3029	0.1899	0.0036	2653	31	2703	61	2741	31	96.8
-72	210	388	0.51	0.5409	0.0060	14.3202	0.3296	0.1920	0.0037	2787	31	2771	64	2760	32	101.0

注:表中所列误差均为 1σ 误差;测试单位:天津地质矿产研究所同位素实验室;下同

表4 黑云斜长变粒岩(1405-3)锆石 U-Pb 测年结果

Table 4 LA-ICP-MS U-Pb age data of zircons separated from biotite-plagioclase leptyte (Sample 1405-3)

Spot No.	含量 ($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)						谐和度
	Pb	U		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	
1405-3-1	435	819	0.21	0.4860	0.0057	13.1489	0.2039	0.1962	0.0026	2554	30	2690	42	2795	22	91.4
-2	222	368	0.42	0.5257	0.0058	13.8879	0.2069	0.1916	0.0026	2723	30	2742	41	2756	22	98.8
-3	142	233	0.38	0.5338	0.0059	14.4015	0.2152	0.1957	0.0026	2757	30	2777	41	2790	22	98.8
-4	379	617	0.67	0.5036	0.0057	12.8347	0.1966	0.1849	0.0025	2629	30	2668	41	2697	22	97.5
-5	187	312	0.49	0.5114	0.0057	13.2598	0.1980	0.1881	0.0025	2663	30	2698	40	2725	22	97.7
-6	249	346	0.71	0.5766	0.0063	16.9721	0.2523	0.2135	0.0029	2935	32	2933	44	2932	22	100.1
-7	316	455	0.52	0.5810	0.0063	16.9738	0.2530	0.2119	0.0028	2953	32	2933	44	2920	22	101.1
-8	214	330	0.33	0.5691	0.0062	16.4221	0.2467	0.2093	0.0028	2904	32	2902	44	2900	22	100.2
-9	240	357	0.43	0.5771	0.0063	16.9100	0.2527	0.2125	0.0029	2937	32	2930	44	2925	22	100.4
-10	204	305	0.70	0.5486	0.0060	14.5120	0.2159	0.1918	0.0026	2819	31	2784	41	2758	22	102.2
-11	118	160	0.98	0.5722	0.0062	16.2219	0.2408	0.2056	0.0028	2917	32	2890	43	2871	22	101.6
-12	102	142	0.57	0.6035	0.0065	17.5839	0.2609	0.2113	0.0028	3044	33	2967	44	2916	22	104.4
-13	423	609	0.42	0.6015	0.0065	17.1933	0.2556	0.2073	0.0028	3036	33	2946	44	2885	22	105.2
-14	300	414	0.54	0.6118	0.0067	17.4048	0.2617	0.2063	0.0028	3077	34	2957	44	2877	22	107.0
-15	468	760	0.46	0.5409	0.0059	13.6504	0.2060	0.1830	0.0025	2787	30	2726	41	2680	23	104.0
-16	545	872	0.55	0.5450	0.0059	13.7699	0.2098	0.1833	0.0025	2804	31	2734	42	2683	23	104.5
-17	187	291	0.68	0.5397	0.0059	13.8097	0.2114	0.1856	0.0026	2782	30	2737	42	2703	23	102.9
-18	797	1037	1.45	0.5476	0.0060	14.1543	0.2154	0.1875	0.0026	2815	31	2760	42	2720	23	103.5
-19	637	1187	1.03	0.4384	0.0049	10.7468	0.1659	0.1778	0.0024	2344	26	2501	39	2632	23	89.0
-20	294	450	0.31	0.5813	0.0063	16.4584	0.2481	0.2053	0.0028	2954	32	2904	44	2869	22	103.0
-21	566	979	0.33	0.5278	0.0058	13.3893	0.2009	0.1840	0.0025	2732	30	2708	41	2689	22	101.6
-22	271	483	0.65	0.5038	0.0055	13.8202	0.2084	0.1990	0.0027	2630	29	2737	41	2818	22	93.3
-23	495	739	0.45	0.5790	0.0065	16.3211	0.2471	0.2044	0.0027	2945	33	2896	44	2862	22	102.9
-24	202	314	0.63	0.5377	0.0058	13.9060	0.2063	0.1876	0.0025	2774	30	2743	41	2721	22	101.9
-25	281	438	0.70	0.5366	0.0059	13.8000	0.2061	0.1865	0.0025	2769	30	2736	41	2712	22	102.1
-26	202	324	0.59	0.5309	0.0059	13.7052	0.2053	0.1872	0.0025	2745	30	2730	41	2718	22	101.0
-27	544	940	0.81	0.5035	0.0056	12.4576	0.1877	0.1795	0.0024	2629	29	2640	40	2648	22	99.3
-28	546	819	0.45	0.5867	0.0064	17.0291	0.2528	0.2105	0.0028	2976	32	2936	44	2910	22	102.3
-29	432	1013	0.27	0.4058	0.0046	9.8858	0.1505	0.1767	0.0024	2196	25	2424	37	2622	22	83.7
-30	172	284	0.34	0.5360	0.0059	14.6218	0.2193	0.1978	0.0027	2767	30	2791	42	2809	22	98.5
-31	237	368	0.70	0.5355	0.0059	13.9988	0.2098	0.1896	0.0026	2765	30	2750	41	2739	22	101.0
-32	95	165	0.22	0.5256	0.0060	14.2440	0.2184	0.1966	0.0027	2723	31	2766	42	2798	22	97.3
-33	187	296	0.46	0.5518	0.0060	14.2564	0.2127	0.1874	0.0025	2833	31	2767	41	2719	22	104.2
-34	173	351	0.16	0.4612	0.0052	12.2583	0.1850	0.1928	0.0026	2445	28	2624	40	2766	22	88.4
-35	265	397	0.51	0.5615	0.0061	16.2389	0.2408	0.2098	0.0028	2873	31	2891	43	2904	22	98.9
-36	128	198	0.46	0.5509	0.0061	15.6986	0.2340	0.2067	0.0028	2829	31	2859	43	2880	22	98.2
-37	260	384	0.88	0.5382	0.0059	14.2186	0.2112	0.1916	0.0026	2776	30	2764	41	2756	22	100.7

续表 4

Continued Table 4

Spot No.	含量 ($\times 10^{-6}$)			同位素比值						年龄 (Ma)						谐和度
	Pb	U	Th/U	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	
-38	87	127	0.62	0.5729	0.0062	16.6494	0.2475	0.2108	0.0028	2920	32	2915	43	2911	22	100.3
-39	276	389	0.71	0.5804	0.0063	16.8397	0.2507	0.2104	0.0028	2950	32	2926	44	2909	22	101.4
-40	283	429	0.44	0.5664	0.0063	16.2236	0.2456	0.2077	0.0028	2893	32	2890	44	2888	22	100.2
-41	219	329	0.79	0.5360	0.0059	14.2313	0.2136	0.1925	0.0026	2767	30	2765	42	2764	22	100.1
-42	150	223	0.37	0.5889	0.0065	17.4067	0.2615	0.2144	0.0029	2985	33	2958	44	2939	22	101.6
-43	952	1819	0.30	0.4889	0.0056	12.5335	0.1923	0.1859	0.0025	2566	30	2645	41	2707	22	94.8
-44	398	679	0.50	0.5085	0.0056	13.1512	0.1948	0.1876	0.0025	2650	29	2691	40	2721	22	97.4
-45	391	690	0.25	0.5205	0.0057	13.5325	0.2003	0.1886	0.0025	2701	29	2718	40	2730	22	98.9
-46	187	303	0.75	0.5126	0.0056	13.1310	0.1970	0.1858	0.0025	2668	29	2689	40	2705	22	98.6
-47	185	289	0.42	0.5608	0.0061	16.1995	0.2396	0.2095	0.0028	2870	31	2889	43	2902	22	98.9
-48	185	272	0.58	0.5738	0.0062	16.5130	0.2454	0.2087	0.0028	2923	32	2907	43	2896	22	100.9
-49	114	174	0.38	0.5699	0.0062	16.5613	0.2473	0.2108	0.0028	2908	32	2910	43	2911	22	99.9
-50	211	321	0.44	0.5688	0.0063	16.2965	0.2428	0.2078	0.0028	2903	32	2894	43	2888	22	100.5
-51	38	63	0.59	0.5140	0.0056	12.8380	0.1915	0.1812	0.0024	2674	29	2668	40	2663	22	100.4
-52	538	832	0.35	0.5727	0.0063	16.5079	0.2441	0.2091	0.0028	2919	32	2907	43	2898	22	100.7
-53	967	1480	0.44	0.5685	0.0062	16.5567	0.2456	0.2112	0.0028	2901	32	2910	43	2915	22	99.5
-54	403	617	0.81	0.5365	0.0058	14.1474	0.2090	0.1913	0.0025	2769	30	2760	41	2753	22	100.6
-55	189	294	0.60	0.5555	0.0060	14.4976	0.2148	0.1893	0.0025	2848	31	2783	41	2736	22	104.1
-56	118	178	0.40	0.5838	0.0063	16.7840	0.2502	0.2085	0.0028	2964	32	2923	44	2894	22	102.4
-57	268	377	0.71	0.5870	0.0064	17.1782	0.2573	0.2122	0.0029	2977	33	2945	44	2923	22	101.9
-58	167	269	0.38	0.5554	0.0060	14.6751	0.2181	0.1916	0.0026	2848	31	2794	42	2756	22	103.3
-59	709	1143	0.59	0.5348	0.0059	14.1846	0.2108	0.1924	0.0026	2762	30	2762	41	2763	22	100.0
-60	253	419	0.30	0.5472	0.0060	15.2180	0.2251	0.2017	0.0027	2813	31	2829	42	2840	22	99.1
-61	282	434	0.48	0.5631	0.0061	16.4179	0.2434	0.2115	0.0028	2879	31	2901	43	2917	22	98.7
-62	357	553	0.48	0.5630	0.0061	15.9507	0.2361	0.2055	0.0027	2879	31	2874	43	2870	22	100.3
-63	281	475	0.35	0.5382	0.0058	14.0271	0.2087	0.1890	0.0025	2776	30	2752	41	2734	22	101.5
-64	439	693	0.74	0.5297	0.0058	14.0649	0.2110	0.1926	0.0026	2740	30	2754	41	2764	22	99.1
-65	216	331	0.42	0.5717	0.0063	16.7958	0.2532	0.2131	0.0029	2915	32	2923	44	2929	22	99.5
-66	304	469	0.69	0.5419	0.0059	14.5805	0.2176	0.1951	0.0026	2791	30	2788	42	2786	22	100.2
-67	244	375	0.90	0.5254	0.0058	13.9145	0.2098	0.1921	0.0026	2722	30	2744	41	2760	22	98.6
-68	297	452	0.74	0.5442	0.0060	14.6262	0.2178	0.1949	0.0026	2801	31	2791	42	2784	22	100.6
-69	631	1004	0.73	0.5231	0.0058	13.7341	0.2048	0.1904	0.0025	2713	30	2732	41	2746	22	98.8
-70	488	751	0.41	0.5670	0.0062	16.3785	0.2452	0.2095	0.0028	2896	32	2899	43	2902	22	99.8
-71	217	327	0.33	0.5941	0.0067	16.9008	0.2647	0.2063	0.0028	3006	34	2929	46	2877	22	104.5
-72	521	938	0.42	0.4915	0.0058	12.0573	0.1971	0.1779	0.0024	2577	31	2609	43	2634	23	97.9

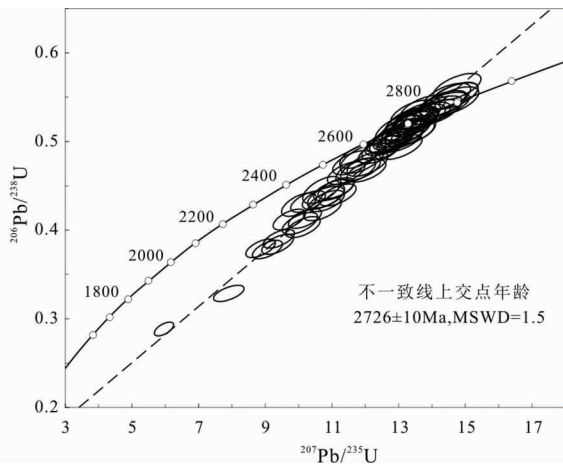


图 14 黑云斜长变粒岩(1213-1)的锆石 U-Pb 年龄

Fig. 14 Zircon U-Pb age of the Bi-Pl-leptite (Sample 1213-1)

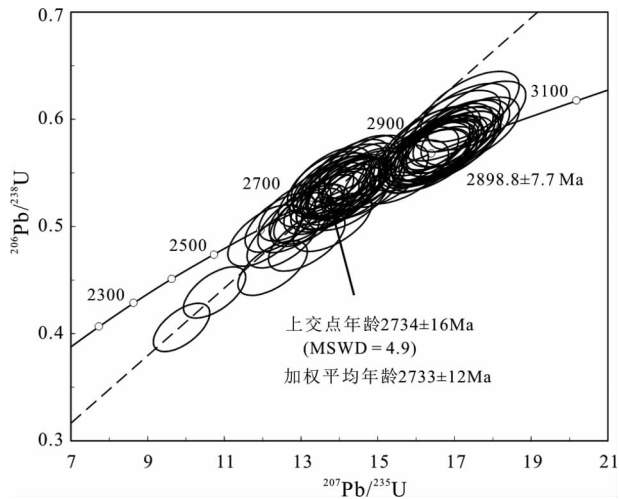
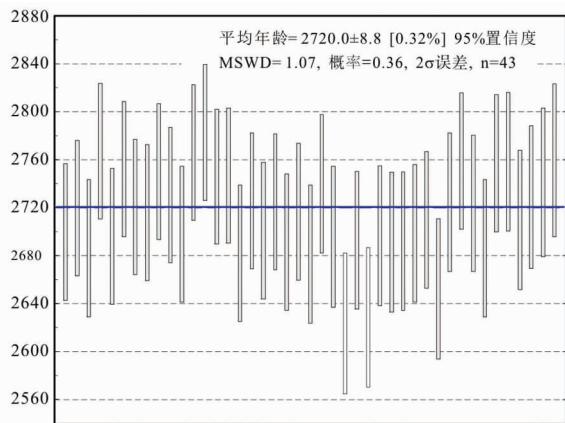


图 15 黑云斜长变粒岩(1405-3)的锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 15 Zircon U-Pb concordia diagram of the Bi-Pl-leptite (Sample 1405-3)

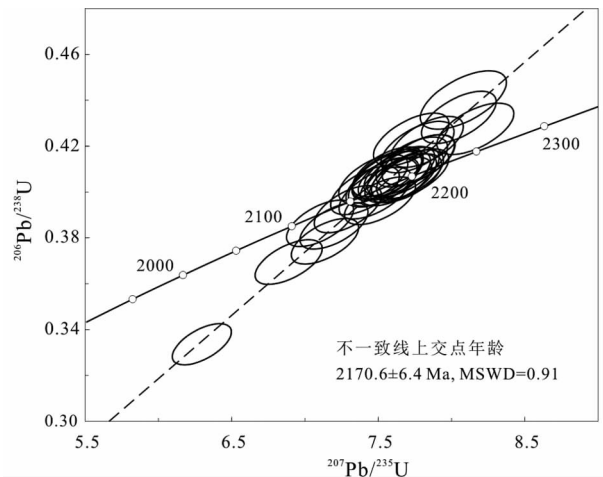


图 16 黑云二长花岗片麻岩(1405-1)的锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 16 Zircon U-Pb concordia diagram of the Bi-granitic gneiss (Sample 1405-1)

属于古元古代粉子山群,此后的地质矿产工作者均沿用这一划分方案(曾广湘等,1998;王松涛等,2007;王世进等,2009)。最近蓝廷广等对昌邑莲花山-东辛庄铁矿及其围岩开展了同位素年代学和地球化学研究(蓝廷广等,2012;Lan *et al.*, 2014a,b,2015)。Lan *et al.* (2014b)根据 1 个铁矿围岩黑云斜长变粒岩样品(CY2-65)中存在少量 2240 ~ 2446Ma 的锆石测年数据,认为昌邑铁矿的形成年龄在 2240 ~ 2193Ma 之间,并遭受了 ~1864Ma 变质作用的改造,是古元古代形成的袁家村式铁矿。但其报道的另外 3 个铁矿围岩样品除 1 个 ~2.55Ga 的数据外,其它均大于 ~2.7Ga (Lan *et al.*, 2014a)。胶东地区存在强烈而广泛的 ~2.5Ga 构造岩浆热事件(Tang *et al.*, 2007;Jahn *et al.*, 2008;刘建辉等,2011, 2012; Liu *et al.*, 2013),但碎屑锆石中并无该期构造岩浆热

事件的反映。Lan *et al.* (2014b)在样品 CY2-65 中获得的少量 2240 ~ 2446Ma 的锆石测年数据有可能是遭受后期变质作用叠加改造的结果,不一定具有制约碎屑锆石源区时代的地质意义。

本次工作在变质酸性火山岩(埃达克质岩)中获得了 2726 ± 10 Ma 的锆石 U-Pb 年龄;在变质泥砂岩中获得了 ~2.73Ga 和 ~2.9Ga 两组碎屑锆石 U-Pb 年龄,且缺少胶北地块广泛存在的新太古代晚期(~2.5Ga)构造岩浆热事件信息;在斜长角闪岩中获得的变质年龄为 ~1850Ma,并有 >2.68Ga 的继承锆石年龄信息。在含铁建造中获得的碎屑锆石年龄谱(本文及 Lan *et al.*, 2014a)与粉子山群和荆山群变质碎屑岩中获得的碎屑锆石年龄谱(Wan *et al.*, 2006; 谢士稳等,2014)截然不同。粉子山群底部祝家乔组长石石英

表 5 黑云二长花岗岩片麻岩 (1405-1) 锆石 U-Pb 测年结果

Table 5 LA-ICP-MS U-Pb age data of zircons separated from biotite-bearing monzonitic granite (Sample 1405-1)

Spot No.	含量 ($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	Pb	U		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ
1405-1-1	26	57	0.77	0.4073	0.0044	7.6098	0.1006	0.1355	0.0017	2203	24	2186	29	2170	22
-2	218	467	0.91	0.4088	0.0044	7.5637	0.0982	0.1342	0.0017	2210	24	2181	28	2153	22
-3	29	68	0.68	0.3785	0.0041	7.1369	0.0940	0.1367	0.0018	2069	22	2129	28	2186	22
-4	271	579	1.15	0.3925	0.0042	7.2925	0.0937	0.1347	0.0017	2134	23	2148	28	2161	22
-5	37	85	0.73	0.3852	0.0041	7.1983	0.0948	0.1355	0.0017	2101	23	2136	28	2171	22
-6	158	351	0.79	0.4007	0.0043	7.4101	0.0958	0.1341	0.0017	2172	23	2162	28	2153	22
-7	21	46	0.68	0.4040	0.0043	7.5225	0.0992	0.1350	0.0018	2188	23	2176	29	2165	23
-8	72	157	0.68	0.4079	0.0044	7.5654	0.0992	0.1345	0.0017	2205	24	2181	29	2158	22
-9	124	264	0.94	0.4045	0.0043	7.5359	0.0979	0.1351	0.0017	2190	24	2177	28	2166	22
-10	28	62	0.66	0.4046	0.0043	7.6208	0.0996	0.1366	0.0018	2190	23	2187	29	2185	22
-11	274	570	1.11	0.4091	0.0044	7.6439	0.0985	0.1355	0.0017	2211	24	2190	28	2171	22
-12	55	150	0.60	0.3336	0.0037	6.2966	0.0824	0.1369	0.0017	1856	20	2018	26	2188	22
-13	30	76	0.48	0.3695	0.0040	6.8887	0.0936	0.1352	0.0018	2027	22	2097	28	2167	23
-14	50	113	0.59	0.4057	0.0044	7.4661	0.0965	0.1335	0.0017	2195	24	2169	28	2144	22
-15	29	65	0.64	0.4087	0.0044	7.6704	0.1003	0.1361	0.0017	2209	24	2193	29	2178	22
-16	27	64	0.58	0.3863	0.0041	7.1029	0.0935	0.1333	0.0017	2106	23	2124	28	2142	23
-17	44	91	0.84	0.4140	0.0045	7.7751	0.1018	0.1362	0.0017	2233	24	2205	29	2180	22
-18	81	173	0.76	0.4080	0.0044	7.7344	0.1007	0.1375	0.0017	2206	24	2201	29	2196	22
-19	407	822	1.15	0.4075	0.0045	7.6996	0.1004	0.1370	0.0017	2203	24	2197	29	2190	22
-20	48	108	0.53	0.3995	0.0046	7.4791	0.1009	0.1358	0.0017	2167	25	2170	29	2174	22
-21	31	72	0.39	0.3962	0.0042	7.5123	0.0990	0.1375	0.0018	2151	23	2174	29	2196	22
-22	660	1229	1.45	0.4131	0.0045	7.7293	0.0995	0.1357	0.0017	2229	24	2200	28	2173	22
-23	236	483	0.89	0.4140	0.0045	7.7724	0.1010	0.1362	0.0017	2233	24	2205	29	2179	22
-24	54	111	0.71	0.4275	0.0046	8.1625	0.1074	0.1385	0.0018	2295	25	2249	30	2208	23
-25	42	91	0.52	0.4229	0.0047	7.7247	0.1053	0.1325	0.0017	2274	25	2199	30	2131	23
-26	48	103	0.66	0.4060	0.0043	7.6867	0.1003	0.1373	0.0018	2197	24	2195	29	2194	22
-27	130	274	0.85	0.4071	0.0044	7.5586	0.0973	0.1347	0.0017	2202	24	2180	28	2160	22
-28	74	159	0.83	0.4061	0.0044	7.6534	0.0996	0.1367	0.0017	2197	24	2191	29	2186	22
-29	59	120	0.87	0.4326	0.0047	8.0497	0.1041	0.1350	0.0017	2317	25	2237	29	2164	22
-30	323	633	0.98	0.4219	0.0045	7.8325	0.1013	0.1346	0.0017	2269	24	2212	29	2159	22
-31	446	840	1.19	0.4196	0.0046	7.7675	0.1020	0.1343	0.0017	2259	25	2204	29	2154	22
-32	71	153	0.16	0.4401	0.0052	8.0804	0.1200	0.1332	0.0017	2351	28	2240	33	2140	23

片岩中存在大量 2.1 ~ 2.2Ga 和 ~ 2.5Ga 的碎屑锆石, ~ 2.7Ga 和 ~ 2.9Ga 的碎屑锆石极少(谢士稳等, 2014)。这说明莱州-昌邑地区的含铁建造与粉子山群的碎屑源区截然不同, 并非同一沉积盆地的沉积建造, 而是不同时代的产物, 含铁建造的形成时代应为新太古代早期(~ 2.7Ga), 与胶东岩群的郭格庄岩组相当(Jahn *et al.*, 2008)。~ 2.73Ga 和 ~ 2.9Ga 的两组碎屑锆石年龄应代表碎屑源区的岩石年龄, 与胶东栖霞新太古宙早期-中太古代变质杂岩的物质组成相似(Jahn *et al.*, 2008; 王世进等, 2009; 刘建辉等, 2011; Liu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2014)。故含 BIF 的小宋组应从粉子山群中解体出来, 重新厘定为新太古代早期(~ 2.7Ga) 的沉积建造。

5.2 条带状铁建造的形成构造背景

条带状铁建造形成时代的分歧也制约着对其形成构造背景的认识。Lan *et al.* (2014a) 根据铁矿及其围岩样品的同位素年代学和岩石地球化学研究认为昌邑铁矿形成于古元古代中期的大陆裂谷环境, 昌邑铁矿中钾质和钠质花岗岩的年代学和地球化学研究进一步论证了 ~ 2.18Ga 的裂谷构造背景(Lan *et al.*, 2015)。但是莱州-昌邑地区的古元古代花岗岩明显侵入到含铁建造中, 条带状铁建造的形成应早于古元古代花岗岩的侵位时代, 其形成构造背景与胶-辽-吉构造带 2.1 ~ 2.2Ga 的裂谷背景没有必然的联系。莱州-昌邑地区 2.17 ~ 2.19Ga 的古元古代二长花岗岩与辽吉地区的“辽吉花岗岩”形成时代一致, 区域上目前未观察到该期岩浆作用与荆山群或粉子山群(小宋组含铁建造除外)的直接接触关系, 但可见侵入到新太古宙胶东岩群及其相伴的 TTG 片麻岩中(Liu *et al.*, 2014 及作者等的工作), 结合从粉子山群和荆山群中获得的碎屑锆石年龄(Wan *et al.*, 2006; 王世进等, 2009; 谢士稳等, 2014), 可以推测 2.17 ~ 2.19Ga 的古元古代花岗岩是荆山群和粉子山群沉积前或开始沉积时地壳伸展(裂解)产物, 而小宋组则形成于 ~ 2.19Ga 之前。含铁建造中的斜长角闪岩具有岛弧玄武岩的地球化学特点, 酸性火山岩具有埃达克质岩特点, 表明小宋组含铁建造更可能形成于与岛弧相关的构造环境, 而与粉子山群形成时的裂谷背景无关。

本次调查和研究结果显示莱州-昌邑地区的含铁建造岩石组合中含有较多的斜长角闪岩, 并含有一些中性和酸性火山岩, 这一特征与吕梁地区的“袁家村式”铁矿明显不同, 也不同于吉南临江老岭群中的“大栗子式”铁矿。含铁建造中变质泥砂质碎屑岩占相当大的比重, 与华北克拉通上广泛分布新太古代晚期的条带状铁建造比较也略有不同。岩石组合及其岩石地球化学特征均指示含铁建造可能形成于与岛弧相关的构造背景。蓝廷广等(2012)(Lan *et al.*, 2014a) 的研究也认为昌邑铁矿与华北克拉通太古宙 BIF 相比, 总体上没有显著差别, 但 Al_2O_3 、CaO、MgO 和 K_2O 含量相对偏高, Eu 正异常相对较弱, 应形成于具有更多碎屑物质和更少热液参

与的浅水环境; SiO_2/Al_2O_3 比值亦显示含矿建造总体上是以火山沉积为主, 但有大量碎屑物质的参与。这也许正是华北克拉通上 ~ 2.7Ga 条带状铁建造不同于新太古代晚期鞍山式(阿尔戈马型)和古元古代袁家村式(苏必利尔湖型) BIF 之处。

万渝生等(2012b)对栖霞苏家店镇固山水库附近胶东岩群中角闪变粒岩样品(S1108)进行了 SHRIMP 定年, 得出一组 ~ 2.52Ga 岩浆结晶年龄和一组 ~ 2.45Ga 的变质年龄, 认为胶东地区的胶东岩群至少一部分形成于新太古代晚期, 并推测这也代表了 BIF 形成时代, 但不排除存在 ~ 2.7Ga 的表壳岩系的可能性。莱州-昌邑地区的条带状铁建造中尚未观察到明显的新太古代晚期的变质作用记录, 但斜长角闪岩中记录了古元古代晚期 ~ 1.85Ga 的变质热事件。这可能意味着: (1) 莱州-昌邑地区的条带状铁建造与栖霞地区的含铁建造并非同一套岩石建造, 栖霞地区的含铁建造的组成更复杂; (2) 莱州-昌邑地区和栖霞地区在新太古代早期所处的构造背景不同, 前者可能为靠近古陆核(~ 2.9Ga) 的边缘盆地, 而后者为新太古代早期(~ 2.7Ga) 的岩浆弧; (3) 莱州-昌邑地区和栖霞地区在新太古代晚期(~ 2.5Ga) 所处的构造背景不同, 前者位于古陆块内部, 而后者为古陆块边缘的岩浆弧。

5.3 ~ 2.7Ga 含铁建造的地质意义

~ 2.7Ga BIF 的确认, 不仅填补了我国该时期铁矿床的空白, 而且对华北克拉通早期地壳演化具有重要的地质构造意义。研究结果表明华北克拉通与世界主要克拉通的演化历史相似, 存在 ~ 2.7Ga 的 BIF, 只是成矿规模远逊于地球上其它主要克拉通 ~ 2.7Ga 的 BIF 成矿作用; 莱州-昌邑地区的条带状铁建造确定为胶东地区建立新太古代早期(~ 2.7Ga) 地层序列提供了物质基础, 其物质组成与栖霞地区同时代岩石建造(郭格庄岩组)以及构造岩浆热事件演化的差异为新太古代早期构造环境研究提供了条件, 其形成大地构造背景的研究无疑将为华北克拉通该阶段地壳演化提供新证据。特别是含铁建造中发现有埃达克质火山岩, 有可能为早期板块构造体制研究提供新证据。含铁建造中碎屑锆石给出了 ~ 2.73Ga 和 ~ 2.9Ga 的两个峰值, 甚至有的样品中 ~ 2.9Ga 的峰值更强烈(Lan *et al.*, 2014a), 这意味着 ~ 2.7Ga 和 ~ 2.9Ga 均是胶北地块的重要生长期, ~ 2.9Ga 是胶北古陆核的初始形成阶段。莱州-昌邑地区的条带状铁建造中还存在一套成熟度较高的长石石英岩, 表明新太古代早期胶北地块已经是较成熟的陆块。

致谢 本文成文过程中与天津地质矿产研究所沈保丰研究员、中国地质科学院地质研究所万渝生研究员、刘福来研究员、山东省地质科学研究所李洪奎研究员等就相关问题进行过多次讨论, 受益匪浅。同时感谢审稿人提出的一些中肯意见。实验测试过程中得到了北京 SHRIMP 中心和天津地

质矿产研究所测试中心的大力支持和帮助,在此一并致谢。

References

- Cheng YQ, Yang CH, Wan YS, Liu ZX, Zhang XP, Du LL, Zhang SG, Wu JS and Gao JF. 2004. Early Precambrian Geological Characters and Anatectic Reconstruction of Crust in Northern Part of Middle Taihang Mountain. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 191 (in Chinese)
- Condie KC. 2000. Episodic continental growth models: After thoughts and extensions. *Tectonophysics*, 322(1–2): 153–162
- Condie KC, Belousova E, Griffin WL and Sircombe KN. 2009. Granitoid events in space and time: Constraints from igneous and detrital zircon age spectra. *Gondwana Research*, 15(3–4): 228–242
- Dong XJ, Xu ZY, Liu ZH and Sha Q. 2012. 2.7Ga granitic gneiss in the Northern Foot of Daqingshan Mountain, Central Inner Mongolia, and its geological implications. *Earth Science*, 37(Suppl.1): 20–27 (in Chinese with English abstract).
- Geng YS, Du LL and Ren LD. 2012. Growth and reworking of the Early Precambrian continental crust in the North China Craton: Constraints from zircon Hf isotopes. *Gondwana Research*, 21(2–3): 517–529
- 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
- Han BF, Xu Z, Ren R, Li LL, Yang JH and Yang YH. 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
- Jahn BM, Liu DY, Wan YS, Song B and Wu JS. 2008. Archean crustal evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry. *American Journal of Science*, 308(3): 232–269
- 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
- Klein C. 2005. Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origins. *American Mineralogist*, 90(10): 1473–1499
- Lan TG, Fan HR, Hu FF, Yang KF, Zheng XL and Zhang HD. 2012. Geological and geochemical characteristics of Paleoproterozoic Changyi banded iron formation deposit, Jiaodong Peninsula of eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3595–3611 (in Chinese with English abstract)
- Lan TG, Fan HR, Hu FF, Yang KF, Cai YC and Liu YS. 2014a. Depositional environment and tectonic implications of the Paleoproterozoic BIF in Changyi area, eastern North China Craton: Evidence from geochronology and geochemistry of the metamorphic wallrocks. *Ore Geology Reviews*, 61: 52–72
- Lan TG, Fan HR, Santosh M, Hu FF, Yang KF, Yang YH and Liu YS. 2014b. U-Pb zircon chronology, geochemistry and isotopes of the Changyi banded iron formation in eastern Shandong Province: Constraints on BIF genesis and implications for Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 56: 472–486
- Lan TG, Fan HR, Yang KF, Cai YC, Wen BJ and Zhang W. 2015. Geochronology, mineralogy and geochemistry of alkali-feldspar granite and albite granite association from the Changyi area of Jiao-Liao-Ji Belt: Implications for Paleoproterozoic rifting of eastern North China Craton. *Precambrian Research*, 266: 86–107
- Li HM, Zheng ZJ, Li LX, Zhang ZC, Chen J and Yao T. 2014. Types and general characteristics of the BIF-related iron deposits in China. *Ore Geology Reviews*, 57: 264–287
- Liu JH, Liu FL, Liu PH, Wang F and Ding ZJ. 2011. Polyphase magmatic and metamorphic events from Early Precambrian metamorphic basement in Jiaobei area: Evidences from the zircon U-Pb dating of TTG and granitic gneisses. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 943–960 (in Chinese with English abstract)
- Liu JH, Liu FL, Ding ZJ, Liu PH, Wang F and You JJ. 2012. The zircon Hf isotope characteristics of ~2.5Ga magmatic event, and implication for the crustal evolution in the Jiaobei terrane, China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2697–2704 (in Chinese with English abstract)
- Liu JH, Liu FL, Ding ZJ, Liu CH, Yang H, Liu PH, Wang F and Meng E. 2013. The growth, reworking and metamorphism of Early Precambrian crust in the Jiaobei terrane, the North China Craton: Constraints from U-Th-Pb and Lu-Hf isotopic systematics, and REE concentrations of zircon from Archean granitoid gneisses. *Precambrian Research*, 224: 287–303
- Liu JH, Liu FL, Ding ZJ, Liu PH, Guo CL and Wang F. 2014. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Paleoproterozoic granitoid rocks in the Jiaobei Terrane, North China Craton. *Precambrian Research*, 255: 685–698
- Liu SW, Pan PM, Li JH, Li QG and Zhang J. 2002. Geological and isotopic geochemical constraints on the evolution of the Fuping Complex, North China Craton. *Precambrian Research*, 117(1–2): 41–56
- Lu SN, Chen ZH and Xiang ZQ. 2008. The World Geopark of Taishan: Geochronological Framework of Ancient Intrusives. Beijing: Geological Publishing House, 1–90 (in Chinese)
- Pearce JA. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe RS (ed.). *Orogenic Andesites and Related Rocks*. Chichester: John Wiley and Sons, 525–548
- Shen BF, Zhai AM, Chen WM *et al.* 2006. The Precambrian Mineralization of China. Beijing: Geological Publishing House, 1–362 (in Chinese)
- Shen BF. 2012. Geological characters and resource prospect of the BIF type iron ore deposits in China. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1376–1395 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Sanders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Tang J, Zheng YF, Wu YB, Gong B and Liu XM. 2007. Geochronology and geochemistry of metamorphic rocks in the Jiaobei terrane: Constraints on its tectonic affinity in the Sulu orogen. *Precambrian Research*, 152: 48–82
- Wan YS, Song B, Liu DY *et al.* 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event. *Precambrian Research*, 149(3–4): 249–271
- Wan YS, Liu DY, Wang W, Song TR, Kröner A, Dong CY, Zhou HY and Yin XY. 2011a. Provenance of Meso-to Neoproterozoic cover sediments at the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: An integrated study of U-Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons and whole-rock geochemistry. *Gondwana Research*, 20(1): 219–242
- Wan YS, Liu DY, Wang SJ, Yang EX, Wang W, Dong CY, Zhou HY, Du LL, Yang YH and Diwu CR. 2011b. ~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
- Wan YS, Liu DY, Wang SJ, Jiao XM, Wang W, Dong CY, Xie HQ and

- Ma MZ. 2012a. Redefinition of Early Precambrian supracrustal rocks and formation age of BIF in western Shandong, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3457–3475 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Dong CY, Xie HQ, Wang SJ, Song MC, Xu ZY, Wang SY, Zhou HY, Ma MZ and Liu DY. 2012b. Formation ages of Early Precambrian BIFs in the North China craton: SHRIMP zircon U-Pb dating. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1447–1478 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Xie SW, Yang CH, Kröner A, Ma MZ, Dong CY, Du LL, Xie HQ and Liu DY. 2014. Early Neoproterozoic (~2.7 Ga) tectono-thermal events in the North China Craton: A synthesis. *Precambrian Research*, 247: 45–63
- Wang AD and Liu YC. 2012. Neoproterozoic (2.5–2.8 Ga) crustal growth of the North China Craton revealed by zircon Hf isotope: A synthesis. *Geoscience Frontiers*, 3(2): 147–173
- Wang SJ, Wan YS, Zhang CJ, Yang EX, Song ZY, Wang LF and Wang JG. 2009. Forming ages of Early Precambrian metamorphic strata in Shandong Province: Proofs of zircon SHRIMP U-Pb dating. *Shandong Land and Resources*, 25(10): 18–24 (in Chinese with English abstract)
- Wang ST, Gao MX, Wan ZJ and Sun SL. 2007. Geological characteristics of Paleoproterozoic metamorphic sedimentary iron deposit in east part of Changyi area in Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 23(1): 45–48 (in Chinese with English abstract)
- Wang W, Zhai MG, Li TS, Santosh M, Zhao L and Wang HZ. 2014. Archean-Paleoproterozoic crustal evolution in the eastern North China Craton: Zircon U-Th-Pb and Lu-Hf evidence from the Jiaobei terrane. *Precambrian Research*, 241: 146–160
- Wilson M. 1993. *Igneous Petrogenesis*. London: Chapman & Hall, 1–466
- Wood DA. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 11–30
- Wu FY, Zhao GC, Wilde SA and Sun DY. 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 523–545
- Wu ML, Zhao GC, Sun M, Li SZ, Bao ZA, Tam PY, Eizenhöfer PR and He YH. 2014. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of major lithologies from the Jiaodong Terrane: Implications for the crustal evolution of the Eastern Block of the North China Craton. *Lithos*, 190–191: 71–84
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM and Ma ZP. 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77–88 (in Chinese with English abstract)
- Xie SW, Wang SJ, Xie HQ, Liu SJ, Dong CY, Ma MZ, Liu DY and Wan YS. 2014. SHRIMP U-Pb dating of detrital zircons from the Fenzishan Group in eastern Shandong, North China craton. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2989–2998 (in Chinese with English abstract)
- Xu HY, Dong YF, Xu WX, Tian XL and Zhang DM. 2011. Geological characteristics and ore prospecting direction of iron deposits in Laizhou-Anqiu area in Shandong Province. *Shandong Land and Resource*, 27(3): 8–12 (in Chinese with English abstract)
- Yang CH, Du LL, Ren LD, Song HX, Wan YS, Xie HQ and Geng YS. 2013. Delineation of the ca. 2.7 Ga TTG gneisses in the Zanzhuang Complex, North China Craton and its geological implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 178–189
- Yang XY, Wang BH, Du ZB, Wang QC, Wang YX, Tu ZB, Zhang WL and Sun WD. 2012. On the metamorphism of the Huoqiu Group, forming ages and mechanism of BIF and iron deposit in the Huoqiu region, southern margin of North China craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3476–3496 (in Chinese with English abstract)
- Yu ZC. 1996. New progress of research on the Fenzishan Group in the Pingdu-Laizhou area in the west of Jiaobei region. *Shandong Geology*, 12(1): 24–34 (in Chinese with English abstract)
- Zeng GX, Lü C and Xu JF. 1998. *Shandong Iron Ore Geology*. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1–143 (in Chinese)
- 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
- Zhang LC, Zhai MG, Wan YS, Guo JH, Dai YP, Wang CL and Liu L. 2012. Study of the Precambrian BIF-iron deposits in the North China Craton: Progresses and questions. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3431–3445 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Li CD, Wang YL, Jin WJ and Jia XQ. 2006. Granitic classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249–2269 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Zhao JH, Wu YB, Liu GL, Pearson N, Zhang M, Ma CQ, Zhang ZH, Yu CM, Su YP and Tang HY. 2009. Neoproterozoic (2.7–2.8 Ga) accretion beneath the North China Craton: U-Pb age, trace elements and Hf isotopes of zircons in diamondiferous kimberlites. *Lithos*, 112(3–4): 188–202
- Zhu XY, Zhai MG, Chen FK, Lv B, Wang W, Peng P and Hu B. 2013. ~2.7 Ga 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(3): 239–254

附中文参考文献

- 程裕洪, 杨崇辉, 万渝生, 刘增效, 张西平, 杜利林, 张寿广, 伍家善, 高吉凤. 2004. 太行山中北段早前寒武纪地质和深熔作用对地壳岩石的改造. 北京: 地质出版社, 1–191
- 董晓杰, 徐仲元, 刘正宏, 沙茜. 2012. 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. *地球科学*, 37(增刊1): 20–27
- 蓝廷广, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎锋, 郑小礼, 张华东. 2012. 鲁东昌邑古元古代 BIF 铁矿矿床地球化学特征及矿床成因讨论. *岩石学报*, 28(11): 3595–3611
- 刘建辉, 刘福来, 刘平华, 王舫, 丁正江. 2011. 胶北早前寒武纪变质基底多期岩浆-变质热事件: 来自 TTG 片麻岩和花岗质片麻岩中锆石 U-Pb 定年的证据. *岩石学报*, 27(4): 943–960
- 刘建辉, 刘福来, 丁正江, 刘平华, 王舫, 游君君. 2012. 胶北 ~2.5 Ga 岩浆热事件的锆石 Hf 同位素特征及其对地壳演化的指示意义. *岩石学报*, 28(9): 2697–2704
- 陆松年, 陈志宏, 相振群. 2008. 泰山世界地质公园古老侵入岩系年代格架. 北京: 地质出版社, 1–90
- 沈保丰, 翟安民, 陈文明等. 2006. 中国前寒武纪成矿作用. 北京: 地质出版社, 1–362
- 沈保丰. 2012. 中国 BIF 型铁矿床地质特征和资源远景. *地质学报*, 86(9): 1376–1395
- 万渝生, 刘敦一, 王世进, 焦秀美, 王伟, 董春艳, 颜颂强, 马铭株. 2012a. 华北克拉通鲁西地区早前寒武纪壳岩系重新划分和 BIF 形成时代. *岩石学报*, 28(11): 3457–3475
- 万渝生, 董春艳, 颜颂强, 王世进, 宋明春, 徐仲元, 王世炎, 周红英, 马铭株, 刘敦一. 2012b. 华北克拉通早前寒武纪条带状铁

- 建造形成时代——SHRIMP 锆石 U-Pb 定年. 地质学报, 86(9): 1447-1478
- 王世进, 万渝生, 张成基, 杨恩秀, 宋志勇, 王立法, 王金光. 2009. 山东早前寒武纪变质地层形成年代——锆石 SHRIMP U-Pb 测年的证据. 山东国土资源, 25(10): 18-24
- 王松涛, 高美霞, 万中杰, 孙绍利. 2007. 山东昌邑东部地区古元古代变质沉积型铁矿地质特征. 山东国土资源, 23(1): 45-48
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩. 岩石矿物学杂志, 26(1): 77-88
- 谢士稳, 王世进, 颀颀强, 刘守偈, 董春艳, 马铭株, 刘敦一, 万渝生. 2014. 华北克拉通胶东地区粉子山群碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 岩石学报, 30(10): 2989-2998
- 徐洪岩, 董银峰, 徐伟祥, 田晓留, 张德明. 2011. 山东省莱州-安丘铁成矿带特征及找矿方向. 山东国土资源, 27(3): 8-12
- 杨晓勇, 王波华, 杜贞保, 王启才, 王玉贤, 涂政标, 张文利, 孙卫东. 2012. 论华北克拉通南缘霍邱群变质作用、形成时代及霍邱 BIF 铁矿成矿机制. 岩石学报, 28(11): 3476-3496
- 于志臣. 1996. 胶北西部平度、莱州一带粉子山群研究新进展. 山东地质, 12(1): 24-34
- 曾广湘, 吕昶, 徐金芳. 1998. 山东铁矿地质. 济南: 山东科学技术出版社, 1-143
- 张连昌, 翟明国, 万渝生, 郭敬辉, 代堰镭, 王长乐, 刘利. 2012. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究: 进展与问题. 岩石学报, 28(11): 3431-3445
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 22(9): 2249-2269