

鲁西新太古代济宁群含铁岩系形成时代 ——SHRIMP U-Pb 锆石定年*

王伟^{1,2} 王世进³ 刘敦一^{1,2} 李培远⁴ 董春艳^{1,2} 颀颀强^{1,2} 马铭株^{1,2} 万渝生^{1,2**}

WANG Wei^{1,2}, WANG ShiJin³, LIU DunYi^{1,2}, LI PeiYuan⁴, DONG ChunYan^{1,2}, XIE HangQiang^{1,2}, MA MingZhu^{1,2} and WAN YuSheng^{1,2**}

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2. 北京离子探针中心, 北京 100037

3. 山东省地质调查院, 济南 250013

4. 山东省物化探勘查院, 济南 250013

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

2. Beijing SHRIMP Center, Beijing 100037, China

3. Shandong Geological Survey Institute, Jinan 250013, China

4. Shandong Provincial Academy of Geophysical and Geochemical Prospecting, Jinan 250013, China

2009-11-26 收稿, 2010-03-30 改回.

Wang W, Wang SJ, Liu DY, Li PY, Dong CY, Xie HQ, Ma MZ and Wan YS. 2010. Formation age of the Neoarchean Jining Group (banded iron formation) in the western Shandong Province: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4):1175–1181

Abstract The Jining Group, located in the Jining area, western Shandong Province, is covered by young sediments and was once considered to be formed during the Early Palaeoproterozoic. Much attention was paid on the supracrustal rocks because of the discovery of a huge banded iron formation (BIF) through drilling and geophysical study in recent years. There were arguments about the formation age and origin of the BIF. This paper reports SHRIMP U-Pb zircon ages for the metamorphic rocks of the Jining Group. A pebble-bearing chlorite sericite phyllite sample has detrital zircons mainly of $\sim 2.7\text{Ga}$, with a grain with a believable age of $2.61 \pm 0.01\text{Ga}$. An upper intercept age of $2.56 \pm 0.02\text{Ga}$ was obtained for magmatic zircons from meta-felsic volcanic rock. These indicate that the Jining Group was formed at the end of Neoarchean, not Palaeoproterozoic, as thought before. In the North China Craton, BIFs were mainly formed during the Late Neoarchean. The Jining Group is different in rock association and metamorphism from the BIF-bearing supracrustal rocks in the Anshan, eastern Hebei and Wutai areas, but similar to ones in the Nanfen-Benxi area. This is important for the research and exploration of Archaean BIF-type iron deposits in China.

Key words Jining Group; Neoarchean; Felsic volcanic rock; BIF; SHRIMP dating; Western Shandong Province; North China Craton

摘要 济宁群以隐伏的地质体分布于华北克拉通鲁西地区, 以往被划归古元古代。近年来在济宁群的钻探和地球物理研究中, 发现存在较大规模条带状硅铁建造, 其形成时代引起地学界极大关注。本文对济宁群变质碎屑沉积岩和长英质火山岩进行了锆石 SHRIMP 年龄测定。含砾绿泥绢云千枚岩的碎屑锆石年龄主要集中在 $\sim 2.7\text{Ga}$, 可靠的最年轻碎屑锆石年龄为 $2.61 \pm 0.01\text{Ga}$ 。变质长英质火山岩岩浆锆石年龄为 $2.56 \pm 0.02\text{Ga}$ 。研究表明, 济宁群形成于新太古代晚期, 而不是以往认为的古元古代。华北克拉通条带状铁建造主要形成于新太古代晚期。济宁群在岩石组合、变质作用方面与鞍山、冀东以及五台地区同时代含硅铁建造的表壳岩系有差别, 但是与本溪南芬铁矿的岩石组合有相似之处。这些可能为我国的隐伏太古宙 BIF

* 本文受国家自然科学基金项目(40672127)、山东省地质系列图件编制与综合研究项目(1212010811029)、国土资源部重点项目(1212010711815)和北京离子探针中心基础研究项目联合资助。

第一作者简介: 王伟, 男, 1981 年生, 博士研究生, 地球化学专业, E-mail: wuchangyuww@sina.com

** 通讯作者: 万渝生, 男, 1958 年生, 研究员, 从事前寒武纪地质和同位素年代学研究, E-mail: wanyusheng@bjshrimp.cn

铁矿的研究与勘探提供了重要依据。

关键词 济宁群;新太古代;变质长英质火山岩;BIF;SHRIMP 定年;鲁西;华北克拉通

中图法分类号 P597.3

1 引言

济宁群是一套浅变质的含铁沉积-火山岩系,分布于鲁西济宁地区,但未出露地表。1976~1977年山东省地质局第二地质大队在对济宁磁异常进行钻探验证时,于异常北端千米盖层之下,发现一套浅变质的板岩、千枚岩、条带状假象赤铁矿层。对于这套变质地层当时没有好的定年方法,但认为层位应在泰山岩群之上,建立了济宁群。根据区域对比、岩石组合、变质变形、Rb-Sr 和 K-Ar 同位素年代学资料,曾认为济宁群形成时代为古元古代(曹国权,1996)。2006年以来,多次的2000m以下深部钻探工作证实,济宁群存在较大规模变质沉积铁矿(条带状硅铁建造,BIF),地面磁异常范围约400km²,矿体共有5层,平均品位15.9%~25.2%,预测铁矿的内蕴经济资源量约124亿吨,已探明的颜店镇矿段矿体埋藏深度为1020~2200m,资源量约10亿吨(韩玉珍等,2008)。

世界上的条带状硅铁建造(BIF),大致可以划分为新太古代与古元古代两个大的形成期,我国的前寒武纪铁矿在中太古代以及古太古代也有分布(Zhai and Windley, 1990)。新太古代的铁成矿多与火山作用有关,称为阿尔戈马型,古元古代的铁矿为沉积型,时代集中在2.3~2.0Ga。从世界范围看,包括BIF在内的古元古代(2.5~2.3Ga)岩石是缺乏的,表现出全球地质演化的一个静寂期(Condie and Kröner, 2008)。我国学者曾提出五台铁矿形成于2.5~2.3Ga(刘敦一等,1984),而后的研究确定它们是新太古代建造(沈保丰和毛德宝,2003)。华北克拉通古元古代苏必利尔型BIF不发育,仅吉林大栗子等少数铁矿被推测为苏必利尔型(张秋生,1984;翟安民和沈保丰,1994)。

鲁西地区泰山岩群主体形成于新太古代早期(2.75~2.7Ga)(曹国权,1996;王世进等,2008;Wan *et al.*, under review)。区域构造上,济宁群与冀东地区的青龙河群一道,被作为吉-辽-鲁碰撞带在洋盆消减最后阶段的弧陆对接之后,堆积于前陆基底之上的沉积柱(吴家善等,1998)。济宁群以沉积岩为主,少量变粒岩被确定为变质的中酸性火山岩。目前新的研究已经揭示(沈保丰等,2005),密云以北原划为红旗营子群的含BIF浅变质岩系、太行山中部原划为石家栏组含BIF的浅变质岩系和本溪地区大石峪组含BIF的浅变质岩系在岩石建造和变质程度等方面与济宁群有相似之处。因此济宁群形成时代的确定,其意义不仅是鲁西和华北东部岩石或成矿年代格架研究,而且对于华北克拉通早期演化、成矿背景以及华北克拉通深部铁矿的找矿潜力都很重要。

本文对济宁群变质火山岩进行了SHRIMP 锆石定年研究,表明济宁群形成于新太古代,而不是以往认为的古元古代。

2 地质背景

济宁群分布于鲁西济宁地区,地表未有出露,被寒武系及更年轻地层角度不整合覆盖于地表1000m之下。其地质认识主要来自地球物理和钻孔资料(曹国权,1996;韩玉珍等,2008)。济宁群主要由钙质、硅质、铁质成份的绢云千枚岩、绿泥绢云千枚岩、板岩和磁铁石英岩组成,低绿片岩相变质。方解石广泛分布,原岩中灰质成分含量普遍较高。中下部出现变质中酸性火山熔岩-火山碎屑岩。变质原岩为钙泥质岩、含火山碎屑的粉砂泥质岩、硅铁质岩和中酸性熔岩及凝灰岩,原岩沉积环境为浅海相到深海相的过渡带。铁矿层引起大规模的磁异常(图1),其单层厚度从数厘米到数十米。铁矿品位较低,通常小于30%。根据钻孔和物探资料所确定的铁矿层产出形态,推测济宁群浅变质岩存在褶皱构造。获得济宁群变英安玢岩K-Ar 年龄为1710Ma,灰绿色千枚岩Rb-Sr 等时线年龄为1753Ma(曹国权,1996),这是确定济宁群形成于古元古代的主要依据。未见济宁群与新太古代泰山岩群的接触关系,但是,济宁群磁异常方向为NNE

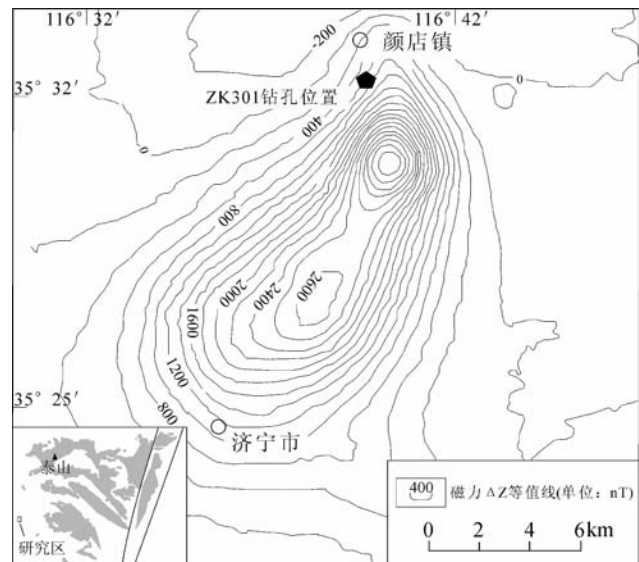


图1 鲁西济宁颜店地区济宁群铁矿磁异常(引自韩玉珍等,2008)

济宁群位于地表1000m以下,被寒武纪及更年轻地层覆盖

Fig.1 Magnetic anomaly caused by the iron deposit of the Jining Group in the Yandian area, Jinjing, western Shandong Province (after Han *et al.*, 2008)

The Jining Group is > 1000m below the surface and is covered uncomfortably by Cambrian and younger strata

向,与泰山岩群含铁建造引起的 NNW 磁异常方向不同,加之两者在岩石组合、变质变形方面存在差异,曾认为济宁群不整合于泰山岩群之上。

3 样品描述

本文进行 SHRIMP U-Pb 锆石定年的 2 个样品取自济宁铁矿 ZK301 钻孔(图 2)。含砾绿泥绢云千枚岩(S0844-1)位于钻孔深度 1679m,岩层厚约 20m。岩石新鲜面呈暗灰色,具层状构造(图 3a)。主要由石英、方解石、磁铁矿、绿泥石、绢云母组成,绢云母和绿泥石集合体定向分布,粒状矿物粒度细小,集合体呈层状、似层状、扁豆状、透镜状分布(图 3a)。出现由细粒石英、方解石 + 磁铁矿、方解石 + 石英构成的“层”。含少量砾石,粒度通常小于 0.5mm,主要为石英集合体。一些细粒石英集合体呈椭圆状、不规则状分布,它们不是砾石,而是构造变形使原细粒石英层拉断变形的结果。变质长英质火山岩(S0844-2)取自钻孔深度 1757m。岩层厚数米,与磁铁绿泥绢云千枚岩为过渡关系(图 3b)。岩石具斑状结构,斑晶含量 25% ~ 35%,主要为斜长石和石英,前者含量明显大于后者。石英斑晶为单晶,存在波状消光,呈港湾状,显示出被熔蚀特征,但是一些边部发生细粒化,显示构造变形特征(图 4b, c),个别石英斑晶发生强烈细粒化(图 4d)。斜长石斑晶呈自形、半自形和集合体形式存在,具不同类型双晶(图 4e, f, g)。一些斜长石双晶纹具波状消光。斜长石斑晶被方解石交代,但自形的外形仍保留(图 4h)。一些斜长石发生绢云母化和绿泥石化。部分斜长石斑晶两端

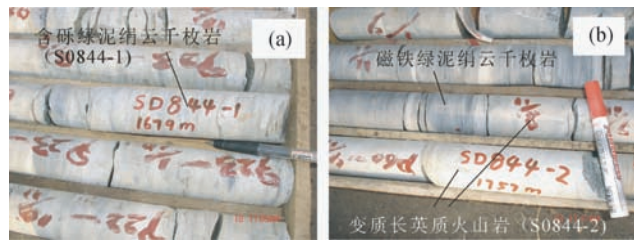


图 3 济宁群岩芯(ZK301 钻孔)照片

SHRIMP U-Pb 锆石定年样品取自这些岩芯。(a)-含砾绿泥绢云千枚岩(S0844-1),位于 1679 m 深位置;(b)-变质长英质火山岩(S0844-2),位于 1757 m 深位置,与磁铁绿泥绢云千枚岩为过渡关系

Fig. 3 Photography of drill cores of the Jining Group

Samples for SHRIMP U-Pb zircon dating were taken from those drill cores. (a)-Pebble-bearing chlorite sericite phyllite (S0844-1) at depth of 1679m; (b)-Meta-felsic volcanic rock (S0844-2) at depth of 1757m, showing a transitional relationship with magnetite chlorite sericite phyllite

存在由细粒粒状矿物组成的压力影(图 4e, g)。基质主要由石英、长石、方解石、绢云母、绿泥石组成,未见玻璃质。绢云母和绿泥石呈集合体定向分布(图 4d, f, h),粒状矿物呈它形。为低绿片岩相变质矿物组合。尽管基质中一些矿物(绿泥石和绢云母)定向分布,部分长石斑晶两侧存在压力影构造,但长石斑晶未发生破碎,仅个别石英斑晶明显细粒化。岩石未遭受强烈糜棱岩化改造,变质原岩为长英质火山岩。

4 分析方法

锆石定年在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成。分析流程与 Williams(1998)和 Wan *et al.* (2005)的类似。一次离子流 O^{2-} 强度为 4 ~ 5nA,束斑大小为 25 ~ 30 μ m。测年采用 5 组扫描。标准锆石 SL13 的 U 含量为 238×10^{-6} (Williams, 1998),TEM 的年龄为 417Ma (Black *et al.*, 2003),分别用于标定未知锆石样品的 U、Th 含量和年龄。使用实测 ^{204}Pb 和地壳演化模式铅 (Cumming and Richarda, 1975) 进行普通铅年龄校正。数据处理采用 SQUID 和 ISOPLOT 程序 (Ludwig *et al.*, 2001)。单个数据误差为 1σ ,加权平均年龄误差为 95% 置信度。

5 锆石特征和测年结果

5.1 绿泥绢云千枚岩(S0844-1)

锆石呈柱状或短柱状,一些锆石仍保留很好的晶棱晶面,表明未经过长距离搬运和长时间磨蚀。阴极发光图像

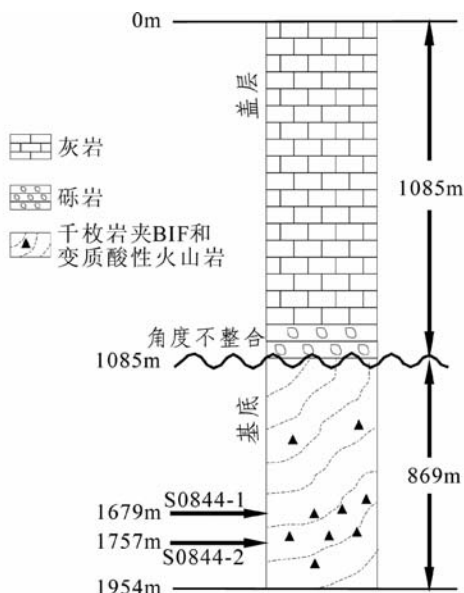


图 2 鲁西济宁颜店地区济宁群 ZK301 钻孔岩性柱示意图(据山东省物化探勘查院①)

Fig. 2 Simplified lithology column of ZK301 drill in the Yandian area, Jining, western Shandong Province

① 山东省物化探勘查院. 2009. 山东省兖州市颜店矿区洪福寺铁矿详查报告

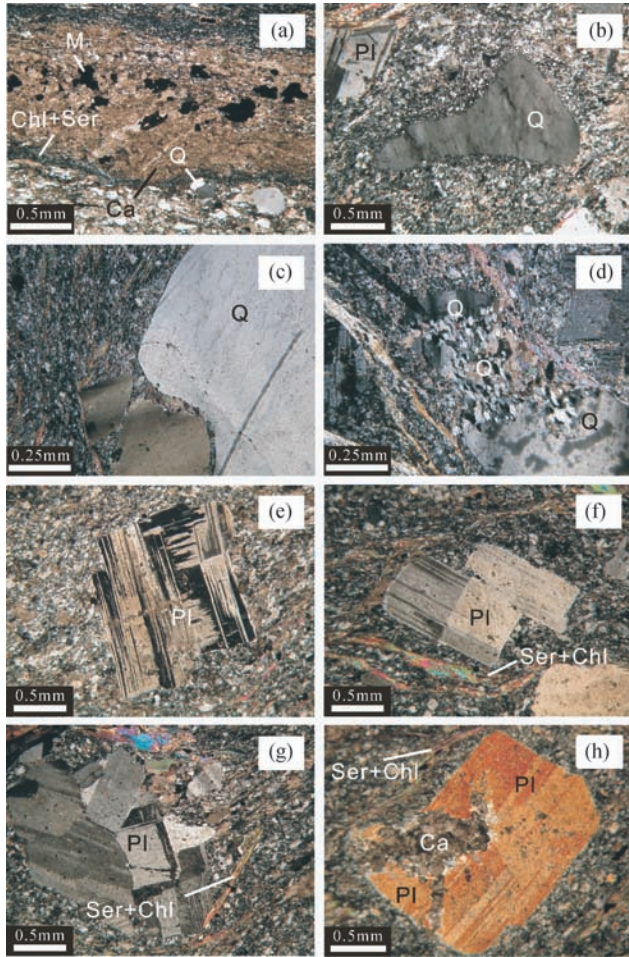


图4 济宁群变质岩岩相学照片

(a)-含砾绿泥绢云千枚岩(S0844-1),不同矿物呈层分布;(b-h)-变质长英质火山岩(S0844-2):(b)-石英斑晶呈港湾状,波状消光,注意右下侧仍保留平滑的边界;(c)-石英斑晶具平滑边界,左下部破碎,边界不平滑,具波状消光;(d)-石英斑晶发生糜棱岩化,波状消光;(e)-自形斜长石斑晶,发育双晶,具压力影;(f)-两个自形斜长石斑晶相连;(g)-斜长石斑晶集合体,具压力影;(h)-自形斜长石被方解石交代,干涉色高是薄片较厚的缘故.均为正交偏光.Q-石英,M-磁铁矿,Ca-方解石,Pl-斜长石,Ser-绢云母,Chl-绿泥石

Fig.4 Photography of metamorphic rocks of the Jining Group

(a)-Pebble-bearing chlorite sericite phyllite (S0844-1), showing layering; (b-h)-Meta-felsic volcanic rock (S0844-2): (b)-Quartz phenocryst with embayed boundary and wavy extinction, please note its right-down side still shows smooth boundary; (c)-Quartz phenocryst with smooth boundary, break quartz grains in its left-down portion show unsmooth boundary, with wavy extinction; (d)-Quartz phenocryst mylonitized, showing wavy extinction; (e)-Euhedral plagioclase phenocryst showing pressure shadow; (f)-Two euhedral plagioclase phenocrysts linking together; (g)-Plagioclase phenocryst aggregate with pressure shadow structure; (h)-Euhedral plagioclase phenocryst replaced by calcite, deviant high interference color is due to the thin section being too thick. Cross-polarized light. Q-quartz, M-magnetite, Ca-calcite, Pl-plagioclase, Ser-sericite, Chl-chlorite

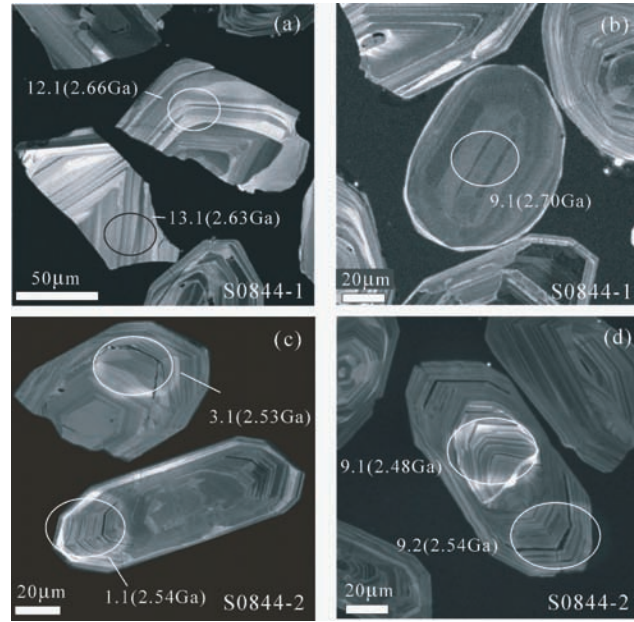


图5 济宁群变质岩锆石阴极发光图像

(a, b)-含砾绿泥绢云千枚岩(S0844-1);(c, d)-变质长英质火山岩(S0844-2)

Fig.5 Cathodoluminescence images of zircons from metamorphic rocks of the Jining Group

(a, b)-Pebble-bearing chlorite sericite phyllite (S0844-1); (c, d)-Meta-felsic volcanic rock (S0844-2)

中,锆石具密集平行环带(图5a, b),原为岩浆成因。在19颗锆石上进行了19个数据点分析,U、Th含量和Th/U比值分别为 $35 \times 10^{-6} \sim 1216 \times 10^{-6}$ 、 $15 \times 10^{-6} \sim 1191 \times 10^{-6}$ 和0.44~1.26(表1)。许多锆石存在不同程度铅丢失,但 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄集中在 $\sim 2.7\text{Ga}$ (图6a)。一个接近谐和线且误差较小的数据点, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2609 \pm 13\text{Ma}$ (1.1,不谐和度为-1%)。

5.2 变质长英质火山岩(S0844-2)

锆石呈短柱状,个别呈柱状,晶棱晶面保留完好。阴极发光图像中,大多数锆石具密集平行环带(图5c),个别锆石无明显内部结构。一些锆石内部存在颜色浅的成份域,看起来象残余核(图5d),但年龄与边部岩浆锆石相同,仍为岩浆成因。在21颗锆石上进行了24个数据点分析,除18.1外($U = 32 \times 10^{-6}$, $Th = 3 \times 10^{-6}$, $Th/U = 0.09$),其余数据点U、Th含量和Th/U比值分别为 $47 \times 10^{-6} \sim 370 \times 10^{-6}$ 、 $19 \times 10^{-6} \sim 260 \times 10^{-6}$ 和0.33~0.73(表1)。大多数锆石存在强烈铅丢失,去掉铅丢失最强的5个数据点(2.1, 12.2, 16.1, 17.1, 19.2),其余数据点构成不一致线的上交点年龄为 $2561 \pm 15\text{Ma}$ (MSWD = 1.4)。7个靠近谐和线的的数据点(6.1, 7.1, 12.1, 14.1, 18.1, 19.1, 21.1)给出 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2561 \pm 24\text{Ma}$ (MSWD = 1.6)。与上交点年龄相同,但误差更大一些。以 $2561 \pm 15\text{Ma}$ 作为长英质火山

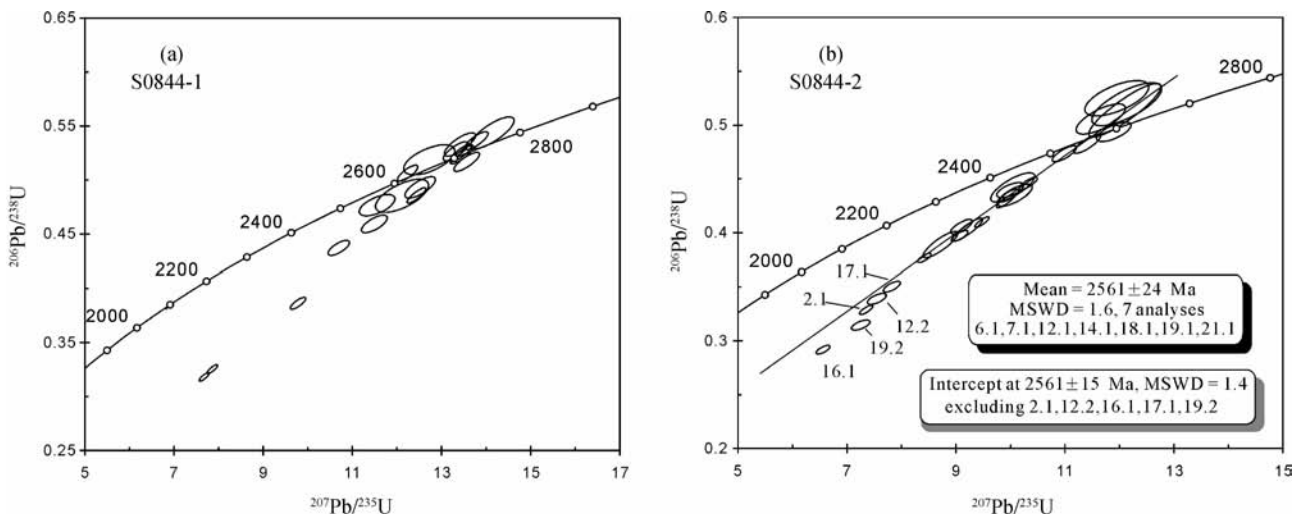


图 6 济宁群变质岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

(a)-含砾绿泥绢云千枚岩(S0844-1);(b)-变质长英质岩浆岩(S0844-2)

Fig. 6 Concordia diagrams of SHRIMP U-Pb data for zircons from metamorphic rocks of the Jining Group

(a)-Pebble-bearing chlorite sericite phyllite (S0844-1); (b)-Meta-felsic volcanic rock (S0844-2)

表 1 鲁西济宁群变质岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

Table 1 U-Pb data for zircons from metamorphic rocks of the Jining Group in western Shandong Province

Spot	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{(\times 10^{-6})}$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm \%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm \%$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm \%$	err corr	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ Age(Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age(Ma)	Discordant (%)
含砾绿泥绢云千枚岩(S0844-1)														
1.1	158	148	0.97	68.8	0.1753	0.76	12.23	1.2	0.5059	0.97	.786	2639 \pm 21	2609 \pm 13	-1
2.1	86	46	0.56	38.2	0.1904	0.83	13.56	1.4	0.5166	1.1	.806	2685 \pm 25	2745 \pm 14	2
3.1	362	441	1.26	99.3	0.1749	0.55	7.668	0.97	0.3180	0.80	.826	1780 \pm 12	2605 \pm 9	32
4.1	89	76	0.88	35.3	0.1815	1.2	11.48	1.7	0.4587	1.2	.699	2434 \pm 24	2666 \pm 20	9
5.1	145	106	0.76	65.7	0.1856	0.65	13.42	1.2	0.5247	10	.837	2719 \pm 22	2703 \pm 11	-1
6.1	145	158	1.12	67.0	0.1864	0.75	13.78	1.3	0.5362	1.0	.807	2767 \pm 23	2710 \pm 12	-2
7.1	113	63	0.58	51.5	0.1834	0.86	13.31	1.4	0.5262	1.1	.790	2726 \pm 25	2684 \pm 14	-2
8.1	67	35	0.55	30.6	0.1826	1.1	13.40	1.7	0.5325	1.3	.777	2752 \pm 30	2676 \pm 18	-3
9.1	197	123	0.65	82.4	0.1857	0.57	12.43	1.1	0.4856	0.96	.859	2552 \pm 20	2705 \pm 9	6
10.1	35	15	0.44	16.5	0.1886	1.4	14.13	2.3	0.5434	1.8	.778	2798 \pm 40	2730 \pm 24	-2
11.1	78	50	0.66	32.3	0.1758	1.8	11.51	2.3	0.4750	1.4	.601	2505 \pm 29	2613 \pm 31	4
12.1	36	23	0.65	15.2	0.1810	2.5	12.07	3.3	0.4840	2.1	.645	2544 \pm 44	2662 \pm 42	4
13.1	38	24	0.65	17.2	0.1779	2.4	12.67	3.0	0.5167	1.8	.597	2685 \pm 39	2633 \pm 40	-2
14.1	73	44	0.62	31.0	0.1841	1.2	12.50	1.8	0.4925	1.3	.734	2581 \pm 28	2690 \pm 20	4
15.1	124	125	1.04	55.5	0.1865	0.65	13.46	1.3	0.5236	1.1	.857	2714 \pm 24	2711 \pm 11	0
16.1	201	150	0.77	66.9	0.1836	0.69	9.770	1.2	0.3862	0.95	.807	2105 \pm 17	2685 \pm 12	22
17.1	1216	1191	1.01	144	0.1223	0.69	2.315	1.0	0.1373	0.75	.735	829 \pm 6	1989 \pm 12	58
18.1	440	442	1.04	123	0.1751	0.53	7.852	0.98	0.3252	0.82	.837	1815 \pm 13	2607 \pm 9	30
19.1	138	93	0.69	52.1	0.1774	1.0	10.68	1.5	0.4367	1.1	.714	2336 \pm 21	2629 \pm 17	11
变质长英质火山岩(S0844-2)														
1.1	278	96	0.36	107	0.1680	0.62	10.32	1.1	0.4456	0.88	.815	2376 \pm 17	2538 \pm 10	6
2.1	295	140	0.49	83.5	0.1622	0.66	7.348	1.1	0.3287	0.88	.796	1832 \pm 14	2478 \pm 11	26
3.1	328	155	0.49	121	0.16738	0.56	9.90	1.1	0.4291	0.97	.866	2302 \pm 19	2531 \pm 9	9
4.1	234	93	0.41	87.6	0.1665	0.71	9.97	1.2	0.4341	0.92	.790	2324 \pm 18	2523 \pm 12	8
5.1	301	118	0.41	103	0.1657	0.70	9.05	1.1	0.3963	0.87	.775	2152 \pm 16	2514 \pm 12	14
6.1	91	64	0.73	37.7	0.1715	0.79	11.41	1.4	0.4826	1.2	.835	2539 \pm 25	2572 \pm 13	1
7.1	91	59	0.68	38.6	0.1748	1.3	11.89	1.8	0.4933	1.2	.690	2585 \pm 26	2604 \pm 21	1

续表 1

Continued Table 1

Spot	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm\%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm\%$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm\%$	err corr	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ Age(Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age(Ma)	Discordant (%)
8.1	127	53	0.43	48.2	0.1650	1.3	9.97	1.6	0.4385	1.0	.639	2344 ± 20	2507 ± 21	6
9.1	369	174	0.49	121	0.16218	0.62	8.393	0.98	0.3755	0.76	.773	2055 ± 13	2478 ± 10	17
9.2	47	19	0.42	17.6	0.1681	1.4	10.07	2.1	0.4344	1.6	.739	2325 ± 30	2539 ± 24	8
10.1	276	98	0.37	97.3	0.16771	0.48	9.475	0.93	0.4098	0.79	.851	2214 ± 15	2535 ± 8	13
11.1	358	116	0.33	124	0.1659	0.92	9.20	2.0	0.4022	1.8	.888	2179 ± 33	2516 ± 15	13
12.1	63	46	0.75	27.3	0.1672	1.8	11.65	2.6	0.5053	1.8	.715	2637 ± 40	2530 ± 30	-4
12.2	273	116	0.44	80.1	0.1615	1.2	7.54	1.5	0.3385	0.99	.648	1880 ± 16	2471 ± 20	24
13.1	221	106	0.50	77.2	0.1627	0.95	9.10	1.5	0.4055	1.1	.758	2194 ± 20	2484 ± 16	12
14.1	250	87	0.36	102	0.1684	0.83	10.99	1.3	0.4733	1.0	.780	2498 ± 22	2542 ± 14	2
15.1	151	49	0.33	50.7	0.1625	1.3	8.71	2.4	0.3888	2.1	.856	2117 ± 38	2482 ± 21	15
16.1	370	260	0.73	92.8	0.1631	0.90	6.559	1.3	0.2917	0.92	.712	1650 ± 13	2488 ± 15	34
17.1	350	217	0.64	106	0.1620	0.92	7.82	1.3	0.3501	0.94	.715	1935 ± 16	2476 ± 16	22
18.1	32	3	0.09	14.4	0.1694	2.4	12.12	3.5	0.519	2.5	.725	2695 ± 56	2552 ± 40	-6
19.1	50	22	0.45	22.7	0.1651	2.5	11.94	3.2	0.525	2.1	.638	2719 ± 46	2509 ± 42	-8
19.2	284	123	0.45	77.3	0.1672	1.2	7.24	1.6	0.3141	1.0	.642	1761 ± 15	2529 ± 20	30
20.1	157	110	0.72	59.6	0.1647	1.7	10.04	2.7	0.4419	2.0	.766	2359 ± 40	2505 ± 29	6
21.1	59	38	0.67	26.1	0.1708	1.7	12.10	3.6	0.514	3.2	.885	2673 ± 70	2565 ± 28	-4

注: Pb* 代表放射性成因铅

岩形成时代。

6 讨论和结论

(1) 绿泥绢云千枚岩(S0844-1)碎屑锆石年龄测定, 一个无明显铅丢失锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄数据为 $2.61 \pm 0.01\text{Ga}$, 限定了济宁群的最大形成(沉积)时代。变质长英质火山岩(S0844-2)岩浆锆石年龄为 $2.56 \pm 0.02\text{Ga}$ 。给出了济宁群的形成时代。济宁群形成于新太古代, 而不是以往认为的古元古代。

(2) 在鲁西, 泰山岩群雁翎关岩组和柳杭岩组表壳岩系形成于新太古代早期($2.75 \sim 2.7\text{Ga}$) (曹国权, 1996; 王世进等, 2008; Wan *et al.*, under review), 山草峪岩组表壳岩系的形成时代还有待进一步确定(新太古代早期或晚期) (Wan *et al.*, under review)。济宁群形成时代的确定, 为鲁西地区存在新太古代晚期($2.6 \sim 2.5\text{Ga}$)表壳岩系提供了重要证据。济宁群主要由低绿片岩相变质的碎屑沉积岩、硅铁质岩石和中酸性火山岩组成; 泰山岩群主要由角闪岩相变质的基性火山岩、碎屑沉积岩组成。济宁群和泰山岩群在岩石组合、变质变形等方面都存在明显区别。济宁群与泰山岩群的接触关系还不清楚, 但是, 含砾绿泥绢云千枚岩(S0844-1)的碎屑锆石年龄集中在 $\sim 2.7\text{Ga}$, 表明新太古代早期泰山岩群和花岗质岩石可能是济宁群碎屑沉积物的主要物源区。

(3) 济宁群形成时代的确定, 表明华北克拉通条带状铁建造主要形成于新太古代晚期。根据现有资料, 与北美、西伯利亚等克拉通有差别, 华北克拉通早元古代苏必利尔型

BIF 不发育, 仅吉林大栗子等少数铁矿被推测为苏必利尔型(张秋生, 1984; 翟安民和沈保丰, 1994), 且以赤铁矿为主。大约为 $2.3 \sim 1.95\text{Ga}$ 的古元古代活动带(即辽河群、滹沱群、中条群、吕梁群等)都不发育 BIF, 与苏必利尔型铁矿的沉积环境相差甚远。

(4) 在华北克拉通太古宙基底, 近年来相继发现了一些重要的 BIF 型铁矿资源。以济宁群为代表的浅变质岩系在地下较深的部位出现或被中-晚元古代沉积盖层覆盖, 为探讨华北克拉通早期演化提供了重要资料, 对于进一步开展我国 BIF 型铁矿资源勘查研究也具有重要意义。

致谢 张玉海和杨之青保障 SHRIMP 仪器正常工作; 样品靶由陶华、叶青制作。锆石标准由 Ian Williams 和 Lance Black 提供; 研究过程中得到 Alfred Kröner、Allen Nutman、杨崇辉和杜利林的帮助; 翟明国院士对论文进行了精心修改和重要补充; 山东地质调查研究院的杨恩秀、宋志勇、王立法和倪振平几位工程师在样品及资料收集方面给予了极大的帮助, 在此表示感谢。

References

- Black LP, Kamo SL, Allen CM, Aleinikoff JK, Davis DW, Korsch RJ and Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200: 155 - 170
- Cao GQ. 1996. Early Precambrian Geology of Western Shandong. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 210 (in Chinese with

English abstract)

- Condie KC and Kröner A. 2008. When did plate tectonics begin? Evidence from the geologic record. *Geol. Soc. Ame. Spe. Pap.*, 440: 281 - 294
- Cumming G and Richarda JR. 1975. Ore lead isotope ratios in a continuously changing earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 28: 155 - 171
- Han YZ, Wang SJ and Li PY. 2008. Study on geological characteristics of Yandian iron deposit and ore-bearing property of Jining Group in Jining City. *Shandong Land and Resource*, 24: 1 - 8 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2001. *Squid 1.02: A user's manual*. Berkeley Geochronology Centre, Special Publication, 2: 1 - 19
- Liu DY, Page RW, Compston W and Wu JS. 1984. Isotope geochronological research of Precambrian metamorphic rocks in the Taihangshan and Wutaishan area. *Chinese Academy of Geological Science Bulletin*, 3: 57 - 79 (in Chinese)
- Shen BF and Mao DB. 2003. On Wutai Group geochronology. *Geological Survey and Research*, 26(2): 72 - 79 (in Chinese with English abstract)
- Shen BF, Zhai AM, Yang CL and Cao XL. 2005. Temporal spatial distribution and evolutionary characters of Precambrian iron deposits in China. *Geological Survey and Research*, 28(4): 197 - 206 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Liu DY, Wang SJ, Yang EX, Wang W, Dong CY, Zhou HY, Du LL, Yang YH and Diwu CR. ~2.7Ga juvenile crust formation in the North China Craton (Taishan-Xintai area, western Shandong Province): Further evidence of an understated event from zircon U-Pb dating and Hf isotope composition. *Precambrian Research* (under review)
- Wang SJ, Wan YS, Zhang CJ, Yang EX, Song ZY, Wang LF and Zhang FZ. 2008. Major advanced development gained in studying Early Cambrian geology in the Luxi area. *Shandong Land and Resource*, 24: 10 - 20 (in Chinese with English abstract)
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben MA, Shanks WC and Ridley WI (eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1 - 35
- Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wan YS, Liu DY and Song B. 1998. *Archaeon Geology Characteristics and Tectonic Evolution of China-Korea Paleo-Continent*. Beijing: Geological Publishing House, 1 -

212 (in Chinese)

- Zhai AM and Shen BF. 1994. Proterozoic tectonic evolution and Metallogeny in China. In: Zhang YX and Liu LD (eds.). *Precambrian Ore-deposits and Tectonics*. Beijing: Seosmological Press, 125 - 146 (in Chinese)
- Zhai MG and Windley BF. 1990. The Archaean and Early Proterozoic banded iron formations of North China; Their characteristics geotectonic relations chemistry and implications for crustal growth. *Precambrian Research*, 48: 267 - 286
- Zhang QS. 1984. *Geology and Metallogeny of the Early Precambrian in China*. Changchun: Jilin People's Press, 1 - 536 (in Chinese)

附中文参考文献

- 曹国权. 1996. 鲁西早前寒武纪地质. 北京:地质出版社, 1 - 210
- 韩玉珍, 王世进, 李培远. 2008. 济宁颜店铁矿地质特征及济宁群含矿性研究. *山东国土资源*, 24: 2 - 8
- 刘敦一, Page RW, Compston W, 伍家善. 1984. 太行山 - 五台山区前寒武纪变质岩系同位素地质年代学研究. *中国地质科学院院报*, 3: 57 - 79
- 沈保丰, 毛德保. 2003. 论五台群的地质时代. *地质调查与研究*, 26(2): 72 - 79
- 沈保丰, 翟安民, 杨春亮, 曹秀兰. 2005. 中国前寒武纪铁矿床时空分布和演化特征. *地质调查与研究*, 28(4): 197 - 206
- 王世进, 万渝生, 张成基, 杨恩秀, 宋志勇, 王立法, 张富中. 2008. 鲁西地区早前寒武纪研究新进展. *山东国土资源*, 24: 10 - 20
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 万渝生, 刘敦一, 宋彪. 1997. 中朝古大陆的地质特征及构造演化. 北京:地质出版社, 1 - 212
- 翟安民, 沈保丰. 1994. 中国元古宙构造演化与成矿作用. 见:张贻侠, 刘连登主编. *中国前寒武纪矿产和构造*. 北京:地震出版社, 125 - 146
- 张秋生. 1984. *中国早前寒武纪地质及成矿作用*. 长春:吉林人民出版社, 1 - 536