

doi: 10.12029/gc20160310

宋明春, 焦秀美, 张成基, 等. 山东省济宁群形成时代探讨[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 829–842.

Song Mingchun, Jiao Xiumei, Zhang Chengji, et al. An analysis of formation age of Jining Group in Shandong Province[J]. Geology in China, 2016, 43(3): 829–842(in Chinese with English abstract).

山东省济宁群形成时代探讨

宋明春^{1,2} 焦秀美^{1,2} 张成基¹ 张增奇³ 李世勇^{1,4} 李培远⁴

(1. 山东省地质矿产勘查开发局, 山东 济南 250013; 2. 山东省地质勘查工程技术研究中心, 山东 济南 250013;
3. 山东省地质科学研究院, 山东 济南 250013; 4. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013)

摘要: 济宁群是在铁矿勘查过程中发现的埋藏于地下近千米深度以下的全隐伏浅变质地层。通过对济宁群中变质火山岩同位素年龄测试和千枚岩中微体古生物分析, 结合区域地层和含铁建造对比, 探讨了济宁群的形成时代。结果表明, 翟村组变英安岩中的锆石成因比较复杂, 在 15 颗锆石上进行了 16 个数据点分析, 其中 7 个数据点构成不一致线的上交点年龄为 $(2\ 522\pm 7)\text{Ma}$, 最年轻锆石的年龄值为 $(2\ 487\pm 7)\text{Ma}$; 在 30 件岩石样品中, 发现 11 件样品含有微古植物化石, 为类型分异度不高的疑源类化石组合, 以简单球形的疑源类为主, 如光面球藻 (*Leiosphaeridia*)、鲛面球藻 (*Trachysphaeridium*)、线脊球藻 (*Stictosphaeridium*)。比较发现: 济宁群特征及变质程度, 与华北古-中元古代地层的相似程度大于与太古宙地层的相似程度; 含铁岩系特征与鲁西及华北克拉通其他新太古代 BIF 有明显差异, 而与山西袁家村 BIF 相似。综合分析认为, 济宁群是新太古代-古元古代过渡期的岩石地层单位, 对其深入研究可以揭示太古宙-元古宙过渡期的地质环境演变。

关键词: 济宁群; 形成时代; 同位素年龄; 微古植物; 新太古代-古元古代过渡期

中图分类号: P597.3; P535 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2016)03-0829-14

An analysis of formation age of Jining Group in Shandong Province

SONG Ming-chun^{1,2}, JIAO Xiu-mei^{1,2}, ZHANG Cheng-ji¹, ZHANG Zeng-qi³,
LI Shi-yong^{1,4}, LI Pei-yuan⁴

(1. Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan 250013, Shandong, China; 2. Shandong Engineering Research Center for Geological Exploration, Jinan 250013, Shandong, China; 3. Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, Shandong, China; 4. Shandong Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Jinan 250013, Shandong, China)

Abstract: The Jining Group is concealed low-grade metamorphosed strata in western Shandong Province. Based on isotopic ages and micropaleoplants analysis, combined with regional stratigraphic correlation and iron formations correlation, this paper discusses formation age of Jining Group. Results of isotopic age determination show that the genesis of zircon grains in dacite is complex, the upper intercept age of 7 points from 16 zircon analyzed points is $2522\pm 7\text{ Ma}$ and the youngest age is $2487\pm 7\text{ Ma}$. In 30 pieces of rock samples, 11 samples were found to contain the microplants, which are mainly lower diversity simple spherical acritarchs, such

收稿日期: 2016-02-25; 改回日期: 2016-03-14

基金项目: 泰山学者工程专项经费(ts201511076)资助。

作者简介: 宋明春, 男, 1963年生, 博士, 研究员, 构造地质专业, 主要从事矿产勘查、区域地质调查和相关研究; E-mail: mingchuns@163.com。

as *Leiosphaeridia*, *Trachysphaeridium* and *Stictosphaeridium*. After comparison, it is considered that stratigraphic characteristics and metamorphic grade of Jining Group are similar to features of Proterozoic and Mesoproterozoic strata in North China, and are different from things of Neoproterozoic strata. Characteristics of seam of iron ore in Jining Group are unlike Neoproterozoic BIF in western Shandong Province and North China Craton; nevertheless, they are very similar to features of Yuanjiacun BIF in Shanxi Province. Synthetic analysis shows that Jining Group was formed in the transitional period from Archaean to Proterozoic. The thorough study is helpful to understanding the evolution of the regional geological environment in Archaean-Proterozoic period.

Key words: Jining Group; formation age; isotopic age; microplants; transitional period of Archaean to Proterozoic

About the First author: SONG Ming-chun, male, born in 1963, doctor, majors in tectonics, engages in mineral exploration and regional geological survey; E-mail: mingchuns@163.com.

Fund support: Supported by Special Funds for Taishan Scholars Project of Shandong Province (No. ts201511076)

1 引 言

济宁群是全隐伏的浅变质海相火山-沉积地层,分布于山东省鲁西地区的济宁市兖州区颜店镇至任城区李营镇一带,是地质工作者为验证磁异常和开展铁矿勘查施工钻孔中发现的,地层顶界面埋深 899.90~1278.15 m。由济宁群含铁岩系引起的磁异常的面积约 150 km²,由 60 余个钻孔控制的济宁群分布面积约 24 km²。

由于缺少野外露头,对济宁群的研究资料相对较少。20 世纪,部分研究者利用 70 年代的磁异常验证钻孔对济宁群的地层划分和形成时代进行了初步探讨^[1-6]。21 世纪以来,随着大规模铁矿勘探的开展,获取了大量新的地质资料,地质工作者对济宁群的地层划分、形成时代、地球化学特征及其中的铁矿床特征进行了较深入研究^[7-13]。

济宁群的形成时代一直是地质工作者关注的重点。早期研究者^[1-3]测得的济宁群同位素年龄值为:1709.5 Ma(变英安玢岩全岩 K-Ar 法年龄)和 1753.5 Ma(千枚岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄),认为这 2 个年龄是济宁群的变质年龄,据此将济宁群形成时代确定为古元古代^[6]。近年王伟等^[12]在 ZK301 孔采集了 2 个同位素年龄样品,其中,含砾绿泥绢云千枚岩中碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄主要集中在 2700 Ma 左右,最年轻碎屑锆石年龄为(2609±13) Ma;变质长英质火山岩中岩浆结晶锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(2561±15) Ma。因此,提出济宁群形成于新太古代。综合考虑济宁群浅变质特征、区域对比和微古植物化石特征,山东省部分地质工作者仍然认为济宁群形成于古元古代或中元古代^[9]。

经过地质工作者对济宁群分布区进行的铁矿

普查、详查工作,已探获铁矿石资源量 18.22 亿 t,主要矿体磁性铁平均品位 20.10%~25.26%。勘查资料显示,济宁群除地层特征、岩石组合、变质变形明显不同于鲁西新太古代泰山岩群外,其含铁岩系及铁矿石特征也不同于华北克拉通太古宙 BIF 铁矿。济宁群含铁岩系类似于山西吕梁袁家村铁矿,具有苏比利尔湖型铁矿的特征。因此,探讨济宁群的形成时代,并对其进行区域地层对比,不仅对研究鲁西和华北克拉通东部岩石-年代格架和华北克拉通的重建具有重要启示作用,有利于深入分析华北克拉通的成矿环境,而且可以揭示新太古代晚期-古元古代早期的地质环境演变。

2 地质背景

济宁群所处的山东省鲁西地区位于华北克拉通东南部。鲁西地区的主要地质组成为前寒武纪变质基底岩系、古生代沉积盖层、中生代沉积盖层和岩浆岩。前寒武纪基底变质岩系以发育大量新太古代 TTG 花岗岩类为特点,少量由变质火山-沉积岩系组成的绿岩建造(泰山岩群),在鲁西地区东部沿郯庐断裂一带分布有新元古代沉积岩系(土门群)。鲁西新太古代岩浆活动强烈,大致可分为 3 期,早期岩浆活动发生于 2700~2740 Ma,中期同位素年龄是 2600~2650 Ma,晚期岩浆活动的时代为 2500~2550 Ma^[14-16]。泰山岩群下部雁翎关组的同位素年龄为(2 747±7) Ma,上部山草峪组和柳杭组中的锆石年龄则分别为(2544±6) Ma 和(2524±7) Ma^[17]。

研究区附近为第四系强覆盖区,仅个别地区出露寒武系-奥陶系。基岩地质单元自下而上有:新太古代变质岩系、寒武系、奥陶系、石炭系-二叠系、侏罗系、白垩系和古近系(图 1)。济宁群角度

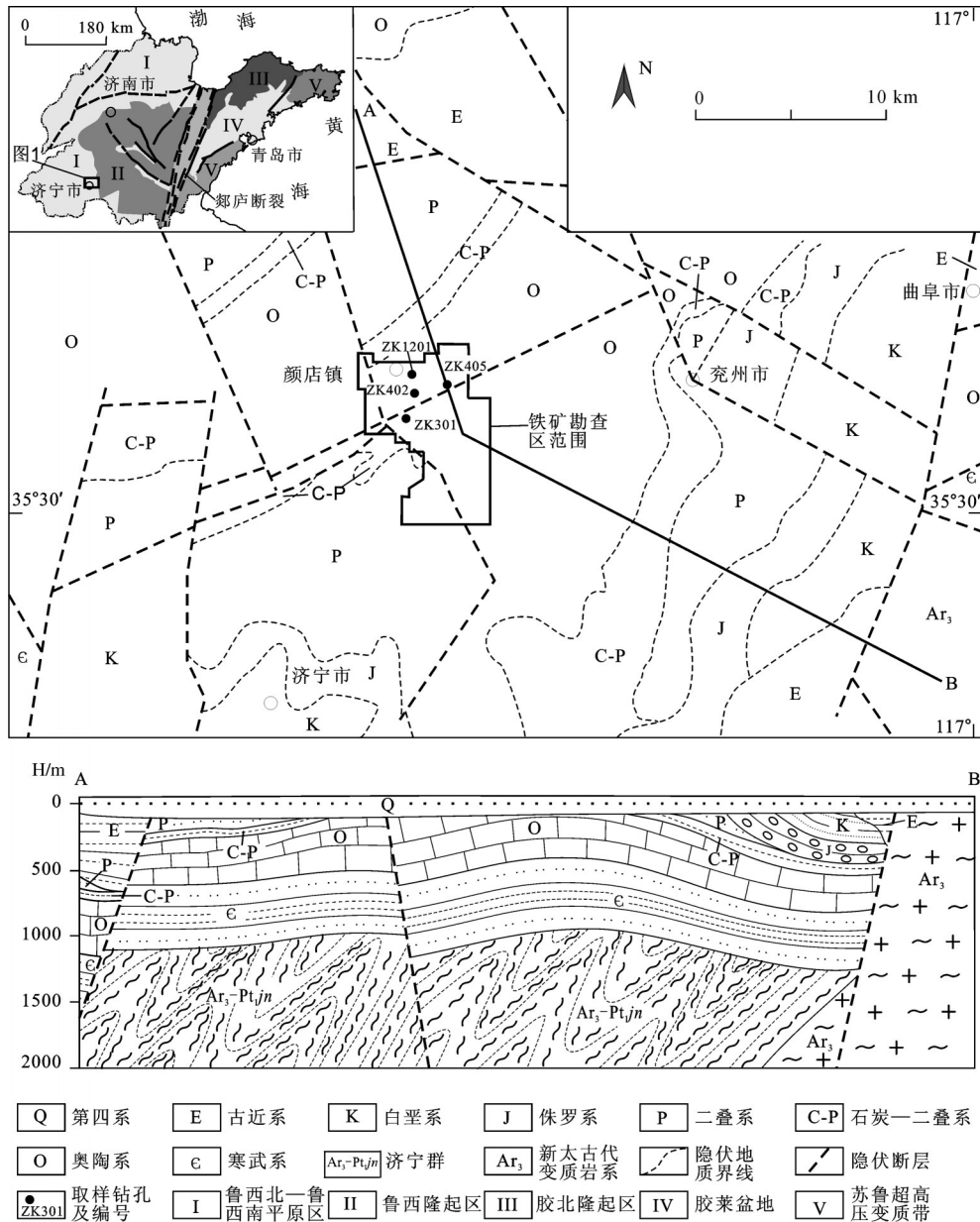


图1 济宁地区基岩地质图(据参考文献[9]修改)

Fig.1 Geological map of bedrocks of the Jining area(modified after reference [9])

不整合于寒武系之下,其下伏及周边出露的变质岩系主要为新太古代花岗岩。隐伏断裂按走向大致可分为两组,主要的一组为近SN-NW走向,另一组为近EW-NE走向。

济宁群为一套低级变质的海相火山-沉积岩系,主要岩石类型为:绿泥绢云千枚岩、变凝灰质砂岩、千枚状粉砂岩、变长石砂岩、炭质(绿泥)绢云千枚岩、方解绢云千枚岩、石英绢云凝灰质千枚岩、方解磁铁石英岩、千枚状变质砂岩、变英安岩等。下

部为变火山碎屑岩系,以出现变火山碎屑岩(含熔岩)和粒度相对粗的正常碎屑岩为特点,称为翟村组;中部为含铁岩系,以出现较多方解磁铁石英岩为特点,称为颜店组;上部为千枚岩系,以夹火山-正常细碎屑岩和炭质含量不等的千枚岩为特点,称为洪福寺组。根据岩石组合特征、变余结构构造等可以恢复济宁群的原岩性质,翟村组原岩主要为凝灰岩、凝灰质砂岩、泥岩、英安(斑)岩、安山岩,为海相火山沉积建造;颜店组原岩主要为含钙泥质岩、

含铁泥质岩、含钙铁硅质岩、凝灰岩、凝灰质砂岩,为海相沉积-火山硅铁质建造;洪福寺组原岩主要为泥质岩、粉砂岩和砂岩,偶有凝灰岩、凝灰质砂砾岩,为海相泥质-细碎屑沉积岩建造^[18]。

3 同位素年龄

济宁群下部有较多变英安岩、变凝灰岩等浅变质火山岩类,为了确定济宁群的形成时代,笔者选择济宁群下部翟村组中的变英安岩样品进行了同位素年龄测试,样品采自ZK402钻孔1 820 m孔深中。锆石定年由万渝生在北京离子探针中心SHRIMP II上完成。分析流程与Williams^[19]的类似。一次离子流O²⁻强度为6 nA,束斑大小为约30 μm。测年采用5组扫描。标准样TEM和待测样之比为1:3。数据处理采用SQUID和ISOPLLOT程序^[20]。单个数据误差为1σ,加权平均年龄误差为95%置信度。

锆石呈短柱状,个别呈柱状,晶棱晶面保留完好,但有熔蚀现象,阴极发光图像中锆石具密集平行环带(图2)。在15颗锆石上进行了16个数据点分析,除15.1外(U=76×10⁻⁶, Th=1×10⁻⁶, Th/U=0.01),其余数据点U、Th含量和Th/U比值分别为122×10⁻⁶~328×10⁻⁶、47×10⁻⁶~120×10⁻⁶、0.28×10⁻⁶~0.79×10⁻⁶(表1),除6个数据点Th/U比值≥0.4显示岩浆锆石特征外,其它数据点Th/U比值介于岩浆锆石与变质锆石之间,说明锆石成因的复杂性。16个

数据点中除1个数据点外,其他数据点的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄值较集中,变化范围为2487~2599 Ma。年龄值有较大偏差的数据点位于锆石内部颜色浅的成分域,为残余核,其²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄为(2666±7) Ma,而其边部年龄为(2527±13) Ma(图2-a)。一个具有较好晶形和震荡环带且无明显铅丢失锆石的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄为(2553±15) Ma(图2-b)。许多锆石存在强烈铅丢失,7个数据点构成不一致线的上交点年龄为(2522±7) Ma(图3)(MSWD=1.00)。

4 微古植物

前人在济宁群中发现了数种微古植物化石,有*Leiornucula* sp., *lophominuscula* sp., *Margominuscula* sp., *Leiopsophosphaera densa* sp.等,全部为球型藻类,以小于10 μm的光面球藻、厚缘小球藻及瘤面小球藻为主的超微体最多^[6]。

笔者在济宁群取了30件岩石样品,送至中国科学院南京地质古生物研究所,经尹磊明研究员鉴定,发现其中11件样品有疑源类化石(图4),各样品所含化石为:

ZK 301-W001 (1136 m): *Leiosphaeridia laminarita* (Timofeev)emend. Jankauskas, 1989; *Leiosphaeridia minutissima* (naumova) emend. Jankauskas, 1989。

ZK 402-W002 (1091 m): *Trachysphaeridium* sp.。

ZK402-W003 (1116.2 m): *Trachysphaeridium* sp.。
Stictosphaeridium sp.。 *Leiosphaeridia* spp.。

ZK 402-W011 (1400 m): *Leiosphaeridia* spp.。

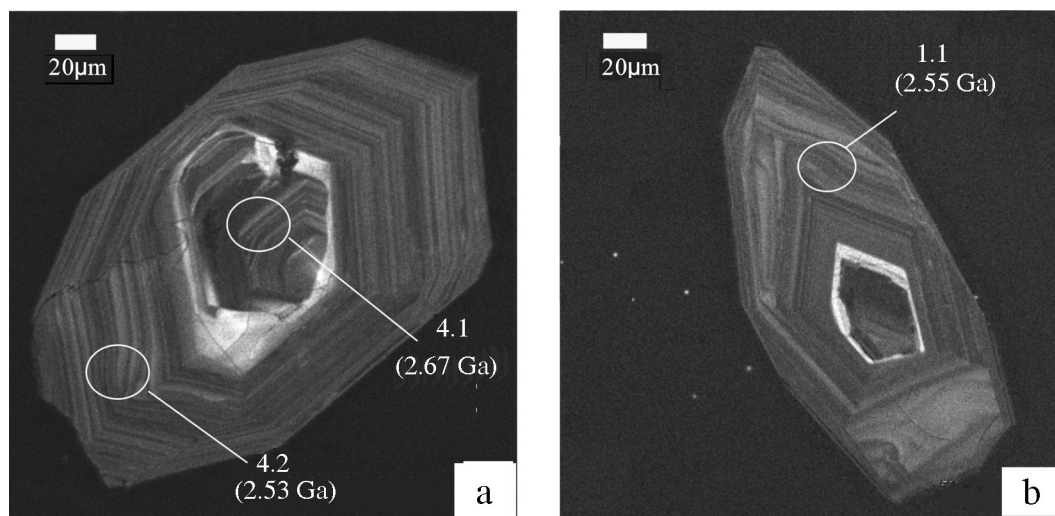


图2 济宁群变英安岩中锆石的阴极发光图像

Fig.2 Cathodoluminescence images of zircons from metamorphic rocks of the Jining Group

表1 济宁群变英安岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄
Table 1 SHRIMP U-Pb data for zircons from metamorphic rocks of the Jining Group

Spot	²⁰⁶ Pb _c /%	U /10 ⁻⁶	Th /10 ⁻⁶	Th/U	²⁰⁶ Pb* /10 ⁻⁶	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	±%	err corr	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U Age/Ma	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb Age/Ma	Discordant /%
ZK402-1.1	0.05	171	47	0.28	70.4	0.1696	0.92	11.19	3.6	0.479	3.5	.967	2521 ±73	2553 ±15	1
ZK402-2.1	0.04	199	62	0.32	83.2	0.16649	0.46	11.14	3.4	0.485	3.3	.991	2550 ±70	2523 ±8	-1
ZK402-3.1	0.21	190	69	0.38	72.1	0.16577	0.47	10.05	3.6	0.440	3.6	.991	2349 ±70	2515 ±8	7
ZK402-4.1	0.05	180	90	0.52	78.6	0.18142	0.41	12.73	3.4	0.509	3.3	.993	2653 ±73	2666 ±7	0
ZK402-4.2	0.13	199	68	0.35	78.7	0.1669	0.77	10.60	3.4	0.461	3.3	.974	2442 ±68	2527 ±13	3
ZK402-5.1	0.06	180	50	0.29	71.8	0.16532	0.48	10.56	3.4	0.463	3.4	.990	2455 ±69	2511 ±8	2
ZK402-6.1	0.08	157	120	0.79	65.3	0.16597	0.47	11.09	3.4	0.485	3.4	.990	2547 ±71	2517 ±8	-1
ZK402-7.1	0.25	295	115	0.40	95.5	0.16305	0.44	8.45	3.4	0.376	3.3	.991	2057 ±59	2487 ±7	17
ZK402-8.1	0.08	217	91	0.43	86.6	0.16773	0.42	10.73	3.4	0.464	3.4	.992	2457 ±69	2535 ±7	3
ZK402-9.1	0.27	328	109	0.34	72.3	0.16555	0.50	5.84	3.4	0.2558	3.3	.989	1468 ±44	2513 ±8	42
ZK402-10.1	0.06	170	98	0.59	60.7	0.1682	0.79	9.64	3.5	0.415	3.4	.974	2240 ±64	2540 ±13	12
ZK402-11.1	0.05	122	63	0.53	50.3	0.1743	0.70	11.52	3.5	0.479	3.4	.980	2524 ±71	2599 ±12	3
ZK402-12.1	0.10	196	59	0.31	79.9	0.1660	1.2	10.86	3.7	0.474	3.5	.948	2502 ±73	2518 ±20	1
ZK402-13.1	0.22	227	82	0.37	77.3	0.16547	0.47	9.02	3.4	0.396	3.3	.990	2148 ±61	2512 ±8	14
ZK402-14.1	0.20	201	68	0.35	72.8	0.16612	0.45	9.64	3.4	0.421	3.3	.991	2265 ±64	2519 ±8	10
ZK402-15.1	0.10	76	1	0.01	33.7	0.1661	0.73	11.71	3.5	0.511	3.4	.978	2663 ±75	2518 ±12	-6

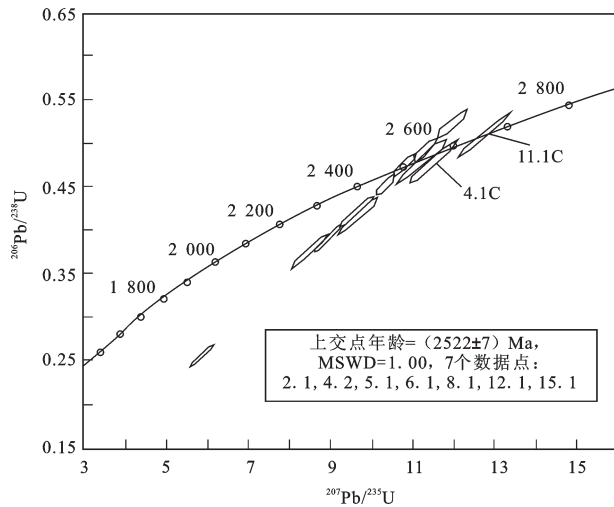


图3 济宁群变英安岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄
Fig.3 Concordia diagrams of SHRIMP U-Pb data for zircons from metamorphic rocks of the Jining Group

- ZK 402- W013 (1483 m): *Leiosphaeridia minutissima* (Naumova) emend. Jankauskas, 1989。
- ZK 402-W019 (1598 m): *Leiosphaeridia* sp.。
- ZK 405-W003 (1288.53~1 289.7 m): *Leiosphaeridia* sp.。
- ZK 1201- W002 (965 m): *Leiosphaeridia minutissima*

(Naumova) emend. Jankauskas, 1989。

ZK 1201- W004 (995 m): *Leiosphaeridia minutissima* (Naumova) emend. Jankauskas, 1989。

ZK 1201- W016 (1305~1307 m): *Leiosphaeridia* sp., *Eosynechococcus* sp.。

ZK 1201-W018 (1360~1367 m): *Leiosphaeridia* spp.。

上述11件样品所获微古化石数量不多,为类型分异度不高的疑源类化石组合,以简单球形的疑源类为主,如光面球藻 (*Leiosphaeridia*)、鲛面球藻 (*Trachysphaeridium*)、线脊球藻 (*Stictosphaeridium*)。

5 区域地层和含铁建造对比

济宁群全部隐伏于地下,在山东境内没有见到与这套地层特征一致的岩石地层单位出露。对济宁群岩石地层进行区域对比,将会为探讨地层形成时代、形成的地质背景等提供依据。岩石地层对比实际是在区域上比较、寻找相似的或一致的地层结构,延伸具有相似的或一致的岩石地层结构的岩石地层单位。

5.1 与山东省内的前寒武纪地层对比

山东最古老的地层形成于中太古代,为出露于

鲁西地层分区的沂水岩群和出露于鲁东地层分区的唐家庄岩群,是遭受麻粒岩相变质的火山-沉积岩系。呈面积较小的岛状、透镜状、不规则条带状包体产于早前寒武纪花岗岩中。

新太古代地层有出露于鲁西地层分区的泰山岩群和鲁东地层分区的胶东岩群,为遭受角闪岩相变质的火山-沉积岩系。地层出露大都不连续,在太古宙 TTG 质花岗岩中呈包体出现。

古-中元古代地层地表主要分布于鲁东地层分区和祁连-北秦岭地层分区(苏鲁超高压变质带),包括古元古代荆山群、粉子山群、胶南表壳岩组合和中元古代五莲群、芝罘群。荆山群、粉子山群、胶南表壳岩组合及五莲群岩性组合特征相似,均以高铝片岩、含石墨岩系和碳酸盐岩为特点,具孔兹岩系特点,变质程度为角闪岩相-麻粒岩相。芝罘群以低角闪岩相变质的石英岩、钾长石英岩夹磁铁矿层为主。

新元古代地层包括土门群、蓬莱群及朋河石岩组。土门群分布于鲁西地层分区靠近郯庐断裂带附近,为一套浅海相砂岩、页岩和灰岩建造。蓬莱群分布于鲁东地层分区蓬莱一带,主要岩性为千枚岩、板岩、石英岩、结晶灰岩及大理岩等,下部千枚岩较多,经历了低绿片岩相变质作用。朋河石岩组零星分布于祁连-北秦岭地层分区苏鲁超高压变质带中,为经历了低绿片岩相变质的千枚岩、变质石英砂岩和变质砂砾岩建造。

济宁群与中太古代地层在岩石组合、变质程度、形成环境等方面显然不同。济宁群与新太古代地层的相似之处为二者均富铁质,可形成贫铁矿。但二者也有明显的差别:泰山岩群、胶东岩群均含有较多基性火山岩系,为绿岩带组合,经历了角闪岩相变质;济宁群中的火山活动以中酸性为主,未见基性火山岩,经历了低绿片岩相变质作用。二者的含铁岩系特征和铁矿物特征也不同,泰山岩群含铁岩系为典型的 BIF 硅铁建造,铁矿物为粒度相对较粗的磁铁矿;济宁群含铁岩系中钙质含量较多,常形成方解石条带,铁矿物粒度较细,物相分析显示除磁铁矿外,还有少量菱铁矿。

济宁群与古-新元古代地层的相似之处是,均为含有较多细碎屑(泥质)的海相沉积,也有碳酸盐沉积。济宁群在含炭质、铁质、火山物质等方面相

似于古元古代荆山群、粉子山群、胶南表壳岩组合及中元古代五莲群、芝罘群,但济宁群变质程度明显低于古-中元古代地层,其碳酸盐岩含量显著偏少且没有形成具有一定厚度的碳酸盐岩层,其火山岩层中缺少基性岩类。济宁群的变质变形特征、所含微古植物与蓬莱群、朋河石岩组相似,但济宁群以含丰富的铁质、碳质和较多中酸性火山物质而区别于其他新元古代地层。

可见,在山东境内没有与济宁群特征明显相似的岩石地层。就变质变形程度和微古植物特征而言,济宁群与新元古代地层相似。从含碳质、铁质等方面分析,济宁群接近于古-中元古代地层。

5.2 与华北克拉通前寒武纪地层对比

华北克拉通古-中太古代地层为角闪岩-麻粒岩相变质表壳岩系,其原岩为火山-沉积岩系,含较多基性火山岩。济宁群显然与之没有可比性。

华北新太古代地层广泛发育,根据其物质来源、原岩建造和岩浆活动等特征,大致可划分为沉积型和火山-岩浆型两类^[21,22]。沉积型原岩以富含铝质、炭质和钙质的正常沉积岩组合为主体,中酸性岩浆活动微弱;火山-岩浆型原岩建造以火山岩、火山碎屑岩为主,常具“双峰式特征”,上部沉积岩逐渐增多,显示绿岩带的组合特点,酸性岩浆活动强烈^[23]。地层中多含 BIF,变质程度主要为角闪岩-麻粒岩相。济宁群以不含基性火山岩、变质程度低、含铁岩系不同于 BIF 等特征与华北新太古代岩石地层形成明显差异。

古元古代地层主要分布于华北克拉通北缘、东缘、南缘和中南部,西端仅零星出露。出露于北缘内蒙古大青山、河北承德-张北一带的古元古代地层称二道洼群;出露于冀东地区的称双山子群、朱杖子群;出露于东缘辽宁、吉南的分别称为辽河群-榆树砬子群、集安群-老岭群;分布于南缘秦岭-大别山地区西段和东段的分别称秦岭(岩)群和红安(岩)群;分布于中南部吕梁山区、五台山区、太行山区、中条山区和嵩山地区的分别称为吕梁群、岚河群-野鸡山群-黑茶山群、滹沱群、中条群-担山石群和嵩山群^[23]。古元古代地层形成的构造环境差异明显,导致它们在原岩建造、变质作用、岩浆活动和构造变形等方面有较大的差异。尽管如此,仍可大致归纳为两大类:一类为沉积型,发育在克

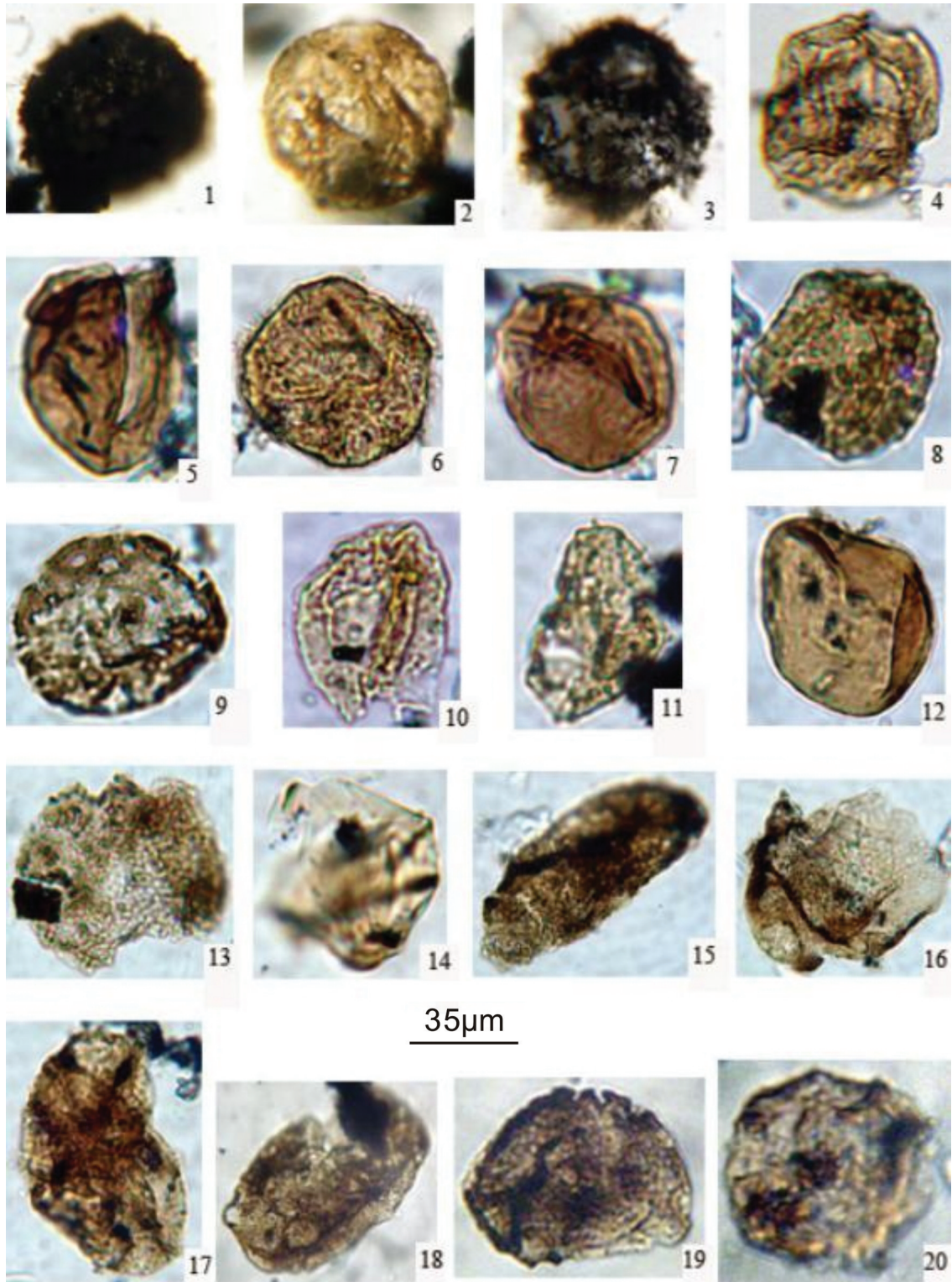


图4 济宁群中的微古植物化石
(所有照片皆放大850倍)

1—4, 9, 11—13, 16—18, 20—光面球藻(未定多种)*Leiosphaeridia* spp.; 5, 7, 14—微小光面球藻 *Leiosphaeridia minutissima* (Naumova) emend. Jankauskas, 1989; 6—薄膜光面球藻 *Leiosphaeridia laminaria* (Timofeev) emend. Jankauskas, 1989; 8, 19—鲛面球藻(未定种) *Trachysphaeridium* sp.; 10—线脊球藻(未定种) *Stictosphaeridium* sp.; 15—原始连球藻(未定种) *Eosynechococcus* sp.

Fig. 4 Microplants from Jining Group

拉通内部,以形成于晋豫裂陷带的溇沱群为代表;另一类为火山-沉积型,发育在克拉通周边,以辽宁的辽河群为代表^[23]。溇沱群原岩以粗碎屑岩、泥质岩和碳酸盐岩为主体,夹少量中基性火山岩,变质程度为低绿片岩相。该群下部为变质砾岩、石英岩和石英岩夹千枚岩;中部以千枚岩、板岩为主,夹石英岩、大理岩和轻微变质的中基性火山岩;上部以富含叠层石的白云质大理岩为主,夹少量千枚岩。辽河群下部由角闪岩相变质的变粒岩、浅粒岩、斜长角闪岩、钙镁硅酸盐类等岩石组成,为变质火山-沉积岩系;上部主要岩石组合为绿片岩相-角闪岩相的片岩、片麻岩、千枚岩、石英岩及大理岩,为变质碎屑岩-碳酸盐岩系组合。可见,济宁群在变质程度及含较多泥质变质岩(千枚岩)方面与溇沱群相似,但以不含基性火山岩和粗碎屑岩及碳酸盐岩较少与之区别。辽河群与山东的粉子山群可以对比,济宁群无论是岩石组合还是变质程度均与辽河群有明显差异。在含有较多千枚岩及铁矿特征方面,济宁群与山西吕梁群中部袁家村组和吉林老岭群顶部大栗子组相似,吕梁群下部以片麻岩、变粒岩、片岩为主夹斜长角闪岩、大理岩、石英岩、透闪岩,中部主要为千枚岩、变质砂岩、石英岩,上部以变质流纹岩为主夹黑云片岩,袁家村组主要由铁英岩、绿泥千枚岩、阳起片岩和千枚岩组成,所含铁矿为沉积变质型微细粒嵌布磁赤混合铁矿;老岭群变质程度为绿片岩相至低角闪岩相,以白云质大理岩、片岩(十字石片岩和石英片岩等)、石英岩及千枚岩为主,见有炭质板岩,顶部的大栗子组主要为青灰色千枚岩夹大理岩和褐色千枚岩,赋存于大栗子组中的铁矿可分为赤铁矿、磁铁矿、菱铁矿及混合矿。

华北中-新元古代地层形成于克拉通内部及其边缘性质不同的沉陷带内,主要充填了海相碎屑岩-碳酸盐岩建造,下部含有富碱的火山岩。前人多把这套岩系作为中朝陆块最古老的盖层,也有人认为这套岩系实际上形成于裂谷或拗拉槽及大陆边缘地区^[24-27],属于中朝陆块所属古超大陆分裂及分裂以后构造发展的地质记录^[28]。中-新元古代主要地层单位有:燕辽、山西地层分区的长城群、蓟县群、青白口群,豫陕、华北南缘地层分区的熊耳群、汝阳群、高山河群、官道口群、栾川群,辽东地层分区的细河群、五行山群、金县群,鲁西、鲁东地层分

区的土门群、蓬莱群,徐淮地层分区的淮南群、徐淮群,鄂尔多斯地层分区的汉高山群,阴山和华北北缘地层分区的渣尔泰山群、什那干群,华北西缘地层分区的黄旗口组、王全口组、正目观组。济宁群以富铁、含炭质、有较多中酸性火山岩、碳酸盐岩不发育而区别于上述大部分岩石地层单位,但在富含中酸性火山岩及整体高钾、富铁、低铝、少钙等方面与华北南缘的熊耳群相似,在以浅变质碎屑岩为主及含炭质方面与栾川群相似,在以碎屑岩为主、含炭质、变质程度等方面与华北北缘的渣尔泰山群接近(表2)。另外,济宁群在含较多细碎屑岩、含铁质及含火山物质等方面与华北克拉通内部的长城群相似,不同之处是后者含有较多碳酸盐岩及所含铁矿主要为赤铁矿。

总之,济宁群岩石组合特征及变质程度与华北大古-中元古代地层的相似程度大于与太古宙地层单位的相似程度,尤其是在变质程度、所含火山物质性质、炭质和铁质特征等方面与吕梁群袁家村组、老岭群大栗子组、熊耳群、栾川群、渣尔泰山群等地层单位有相似性,岩石组合特征、变质程度及微古植物特征与华北中元古代地层特征更为接近。

5.3 含铁建造对比

全球条带状铁建造(BIF)主要有阿尔戈马(Algoma)型和苏比利尔(Superior)湖型2类^[29],集中出现于新太古代至古元古代,1.8 Ga左右趋于结束^[30]。阿尔戈马型产于太古宙绿岩带中,与海底火山作用密切相关;苏比利尔湖型与正常沉积的细碎屑岩-碳酸盐岩共生,通常发育在被动大陆边缘或稳定克拉通盆地的浅海沉积环境,主要形成于古元古代。华北克拉通年龄最古老的BIF形成于古太古代,峰期为新太古代晚期(2.52~2.56 Ga),最年轻BIF形成于古元古代早期。新太古代BIF广泛分布于华北克拉通不同地区,包括鞍山-本溪、冀东、固阳、五台、舞阳、鲁西等^[31-33]。根据产出层位和岩石组合关系,鲁西的BIF主要包括两种类型,其一是赋存于泰山岩群雁翎关组顶部和柳杭组上部的韩旺式沉积变质型铁矿,典型岩石组合为斜长角闪岩、角闪片岩、含铁角闪石英片岩、黑云变粒岩、角闪变粒岩;其二是赋存于泰山岩群山草峪组中上部的苍峰式沉积变质型铁矿,典型岩石组合为黑云变粒岩、黑云角闪片岩夹磁铁矿石英岩、磁铁矿角闪石英

表2 济宁群与中新元古代相似地层对比

Table 2 Stratigraphic correlation between Jining Group and similar stratigraphic units

岩石地层单位	济宁群	熊耳群	栾川群	渣尔泰山群
岩石组合特征	海相火山-沉积岩系, 主要岩石组合为: 绿泥绢云千枚岩、变凝灰质砂岩、千枚状粉砂岩、变长石砂岩、炭质(绿泥)岩、变长石砂岩、炭质(绿泥)绢云千枚岩、方解绢云千枚岩、石英绢云凝灰质千枚岩、方解磁铁矿石英岩、千枚状变质砂岩、变英安岩等	陆相-海相中性为主的火山熔岩及少量碎屑岩。主要岩石组合为: 安山岩、玄武安山岩夹流纹岩及火山碎屑岩、砂砾岩、砂岩、页岩、灰岩等	碎屑岩-碳酸盐岩建造。主要岩石组合为: 千枚岩、石英岩、大理岩、片岩, 夹炭质千枚岩、变粒岩、石英岩、变粒岩、石煤层	陆相-浅海相碎屑岩-碳酸盐岩建造。主要岩石组合由向上变细再变粗的碎屑岩(砾岩-含砾砂岩-石英砂岩-粉砂岩-泥岩)、页岩、碳酸盐岩组成。中上部含炭质
变质程度	低绿片岩相	浅变质-未变质	浅变质	低绿片岩相
形成时代		中元古代	新元古代	中元古代
与济宁群对比标志		中酸性火山岩, 高钾、富铁、低铝、少钙	以浅变质碎屑岩为主, 含炭质	低绿片岩相变质碎屑岩, 含炭质

岩。韩旺式铁矿和苍峰式铁矿分别形成于新太古代早-中期和新太古代晚期,为阿尔戈马型BIF,赋矿地层的变质程度为角闪岩相,铁矿物相包括氧化物相和硅酸盐相。华北古元古代的BIF分布较少,主要有山西吕梁袁家村铁矿、吉林大栗子铁矿、山东昌邑赋存于古元古代粉子山群中的铁矿等^[34,35]。袁家村BIF产于吕梁群袁家村组变沉积岩系的下部,含铁岩系主要由绿泥片岩、绢云绿泥千枚岩、磁铁矿石英岩、绢云石英片岩、含铁石英岩组成,为苏比利尔湖型BIF^[31],形成时代为2.1~2.3 Ga,变质程度主体为低绿片岩相,铁矿物相包括氧化物相(60%)、硅酸盐相(30%)和碳酸盐相(10%)^[36]。

济宁群含铁岩系主要由千枚岩、(方解)磁铁矿石英岩组成,夹变粉砂岩、变凝灰岩,赋矿岩石主要为(方解)磁铁矿石英岩和含磁铁矿千枚岩,地层变质程度为低绿片岩相,矿石中所含铁矿物主要为细粒磁铁矿,另外有少量赤铁矿、菱铁矿。据矿床勘探中9件磁铁矿石样品物相分析结果(表3中序号1~9),磁性铁(mFe)含量17.84%~27.35%,平均23.53%;氧化铁(OFe)含量2.59%~5.81%,平均4.26%;碳酸铁(CFe)含量0.92%~3.17%,平均1.85%;硅酸铁(SiFe)含量0.011%~0.022%,平均0.013%;硫化铁(SFe)含量0.037%~0.825%,平均0.158%。3件赤铁矿石样品物相分析结果为(表3中序号10~12):磁性铁(mFe)含量0.22%~5.23%,平均1.91%;氧化铁

(OFe)含量20.68%~27.35%,平均24.26%;碳酸铁(CFe)含量1.05%~1.76%,平均1.30%;硅酸铁(SiFe)含量0.011%;硫化铁(SFe)含量0.305%~0.905%,平均0.692%。济宁群中含铁岩层与正常沉积的细碎屑岩共生,伴有较多碳酸盐岩条带,类似于苏比利尔湖型BIF,是华北克拉通中为数不多的苏比利尔湖型BIF铁矿之一。显然,济宁群中含铁岩系的地层特征、岩性组合、变质程度、矿石特征等与鲁西及华北克拉通其他新太古代BIF相比具有明显差异,而与山西袁家村BIF相似。

6 济宁群形成时代讨论

本文测试的部分锆石内部保留颜色浅的残余核,其同位素年龄值(2666±7)Ma应是济宁群下伏的早期地质体受剥蚀后的残余锆石年龄,不能指示济宁群的形成年龄。济宁群上部均由变质碎屑岩(千枚岩)组成,其内所含的锆石均为碎屑锆石,前人测试的含砾绿泥绢云千枚岩中碎屑锆石年龄为2700 Ma左右和(2609±13)Ma^[12],早于本文测试的变英安岩中锆石不一致线上交点年龄80 Ma以上,同样指示了济宁群源岩的时代。鲁西地区济宁群下伏的地质体主要是新太古代泰山岩群和TTG质花岗岩类。泰山岩群下部的雁翎关组、柳杭组下亚组和孟家屯岩组形成于2700~2750 Ma^[14,15,37,38],泰山岩群上部的柳杭组上亚组和山草峪组形成时代为2

表3 济宁群中铁矿石物相分析结果
Table 3 Phase analysis data for iron ores from Jining Group

序号	样品编号	取样孔深/m	样品名称	mFe/10 ⁻²	TFe/10 ⁻²	SFe/10 ⁻²	CFe/10 ⁻²	OFe/10 ⁻²	SiFe/10 ⁻²
1	ZK1201-10	1166.5	条带状磁铁矿石英岩	27.35	33.36	0.061	2.28	3.73	0.011
2	ZK1201-11	1192~1195	条带状磁铁矿石英岩	25.36	33.28	0.165	3.17	4.6	0.011
3	ZK1201-15	1272	磁铁矿石英岩	20.22	26.4	0.058	1.74	4.31	0.022
4	ZK1201-21	1573~1576	条带状磁铁矿石英岩	24.11	28.78	0.062	1.35	4.21	0.011
5	ZK402-14	1500	磁铁矿石英岩	27.39	33.25	0.037	2.05	3.83	0.011
6	ZK402-15	1578	磁铁矿石英岩	24.02	28.86	0.04	2.29	2.59	0.022
7	ZK402-24	1796.7~1799.7	条带状磁铁矿石英岩	17.84	24.91	0.09	1.83	5.22	0.011
8	ZK404-04	1138.8~1142.64	条带状磁铁矿石英岩	19.79	27.4	0.825	1.06	5.81	0.011
9	ZK404-14	1296~1300	磁铁矿石英岩	25.69	30.72	0.081	0.92	4.06	0.011
10	ZK404-01	1103.29~1110.4	赤铁矿石英岩	0.27	27.1	0.305	1.76	24.76	0.011
11	ZK404-02	1116.58~1119.0	赤铁矿石英岩	0.22	29.53	0.905	1.08	27.35	0.011
12	ZK404-03	1133~1136	赤铁矿石英岩	5.23	27.89	0.865	1.05	20.68	0.011

540~2600 Ma^[17,39];鲁西新太古代花岗岩类非常发育,可分为早期(泰山花岗岩)、中期(新甫山花岗岩)、晚期(峰山和傲徕山花岗岩)3个形成阶段,三者的同位素年龄分别是2700~2740 Ma、2600~2650 Ma和2500~2550 Ma^[14-16]。济宁群中锆石残余核及碎屑锆石的同位素年龄与泰山岩群下部和新太古代早、中期花岗岩的年龄值接近,指示前者来源于后者。对济宁群的地球化学研究同样指示了其碎屑物质来源于鲁西早前寒武纪基底变质岩系^[9]。

本文测试的变英安岩中锆石不一致线的上交点年龄为(2522±7)Ma,样品产自济宁群下部的翟村组,一些锆石显示明显的岩浆锆石特征,一个具有较好晶形和震荡环带且无明显铅丢失锆石的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄为(2553±15)Ma,年龄值与王伟等^[12]测试的同一层位的变质火山岩中锆石年龄(2561±15 Ma)一致。这些年龄数据应为锆石的结晶年龄,指示济宁群下部的火山岩系形成于新太古代末期;其中最年轻锆石的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄为2487 Ma(表1),指示火山活动可能延续到古元古代早期。

济宁群变质火山岩的同位素年龄与泰山岩群上部及鲁西新太古代晚期花岗岩类的形成时代一致,暗示它们存在一定的渊源。正常火山岩中的锆石一般具有较大的长宽比值(比值可以高达12),常为长柱状或针状的外形特征^[40],而本文测试的济宁

群变质火山岩的锆石呈短柱状,个别柱状,有熔蚀现象,与鲁西新太古代晚期花岗岩类锆石特征相似。另外,变质火山岩分布于济宁群下部的翟村组,该组的成分成熟度很低,存在大量来自于基底岩系的陆源碎屑沉积物,火山熔岩在地层中的数量较少。因此推测济宁群变质火山岩的大部分锆石来自于鲁西新太古代晚期花岗岩类,火山喷发将深部同期的花岗岩类中的锆石携带上来。采自于济宁群上部千枚岩的同位素年龄较老,而采自于济宁群下部变质火山岩的同位素年龄较新,这种上老下新的同位素年龄反序现象符合沉积地层的一般沉积规律,沉积地层下部岩系来源于下伏基岩顶部最年轻的地质体,沉积地层上部岩系则来源于下伏基岩下部较老的地质体。

本文的微古植物化石样品除ZK405-W003采自翟村组顶部,ZK402-W019、ZK1201-W016和ZK1201-W018采自颜店组外,其余样品采自洪福寺组,即所有样品均采自济宁群的中—上部。所含化石均为真核生物,常见于国内外元古宙乃至显生宙地层,一些样品(如ZK301-W001、ZK402-W013、ZK1201-W002、ZK1201-W004等)出现最早见于俄罗斯地台下里菲(中元古代至新元古代早期)的薄膜光面球藻(*Leiosphaeridia laminarita*)和微小光面球藻(*Leiosphaeridia minutissima*),以及通

常见于中元古代至新元古代早期地层的原始连球藻(*Eosynechococcus*)。前人在济宁群中采集的微古植物化石,鉴定者认为组合面貌简单,种属较少,可与长城系的微古植物组合对比,但较长城系原始^[6]。与山东已知前寒武纪疑源类组合比较,济宁群中的微古植物接近于蓬莱群底部(南华纪)的疑源类组合面貌,而较土门群佟家庄组的疑源类组合更为原始。以往研究表明,太古宙地层中生物化石很少,山东境内的太古宙地层中尚未发现生物化石,在中国的太古宙鞍山群中,有球状或其他形态的单细胞生物和极少丝状体,可能属于原核生物蓝藻门的分子;元古宙地层中出现较丰富的微古植物。济宁群中真核生物的存在,指示其形成时代应晚于新太古代。

李志红等^[41]研究发现,BIF沉积年龄不同,Eu正异常的大小不同,例如,中太古代Eu/Eu*平均值为3.65($n=4$)、新太古代Eu/Eu*平均值为2.84($n=8$)、古元古代Eu/Eu*平均值为2.01($n=10$),表明从中太古代到古元古代BIF的铕正异常逐渐减小。济宁群条带状磁铁矿石岩Eu/Eu*为1.36~2.52^[9],平均为1.81($n=9$),接近古元古代2.01的数值。本文的区域地层对比表明,济宁群的地层特征与山东和华北克拉通元古宙地层接近。在含炭质、铁质、火山物质等方面相似于山东的古元古代荆山群、粉子山群和胶南表壳岩组合,在岩石组合特征、变质程度及微古植物特征方面与华北中元古代地层特征更为接近。含铁岩系特征则与山西袁家村BIF相似,具有古元古代苏比利尔湖型BIF特点。

济宁群中变火山岩的锆石同位素年龄与微古植物化石及区域地层对比所指示的地层时代有差异,分析其原因有3种可能:(1)锆石同位素年龄代表了地层的形成时代,微古植物化石对地层时代的指示意义不明确,济宁群形成于新太古代;(2)微古植物化石及区域地层对比可以确定地层的时代归属,地层中的锆石为新太古代基底变质岩系的继承锆石,济宁群形成于元古宙;(3)锆石同位素年龄和微古植物化石均较准确地指示了地层形成时代,济宁群形成于新太古代—古元古代。本文测试的变火山岩中锆石虽然与新太古代基底变质岩系有一定的渊源关系,但不能排除在火山喷发过程中产生新生锆石的可能性;本文描述的微古植物化石虽然

不能指示确切的地层时代,但在新太古代地层中未见到类似的化石。因此,笔者认为济宁群应该是一个跨时代的岩石地层单位,其下部含较多火山岩的翟村组主要形成于新太古代末期,延续到古元古代早期;其中上部的颜店组和洪福寺组形成时代定为古元古代为宜,可能与吕梁群、粉子山群的形成时代相当。由于济宁群中的铁矿层均赋存于中上部的颜店组和洪福寺组,因此铁矿应当形成于古元古代。

以往的同位素年龄研究,除在鲁西地区测试到较多新太古代晚期年龄数据外,也识别出一部分形成于新太古代至古元古代过渡期的地质体。如:根据杨庄铁矿晚期花岗岩的锆石年龄(2469 ± 34 Ma),赖小东和杨晓勇^[42]认为泰山岩群柳杭组形成于新太古代至古元古代;庄育勋等^[43]认为中天门期中性—中酸性岩侵位时代为2490~2519 Ma,摩天岭期二长花岗岩侵位时代为2490 Ma;Jahn et al.^[44]指出傲徕山型花岗岩的侵位时代为2400~2500 Ma。鲁西地区新太古代至古元古代岩浆活动和沉积作用的存在,填补了全球地质演化的寂静期(2.5~2.3 Ga)。尤其是,济宁群展示了从新太古代末期至古元古代早期连续沉积的地层序列,对其进行进一步的深入研究,不仅对研究鲁西和华北克拉通东部岩石—年代格架和华北克拉通的重建具有重要启示作用,有利于深入分析华北克拉通的成矿环境,而且可以揭示新太古代晚期—古元古宙早期的地质环境演变。

7 结 论

通过对鲁西济宁群的锆石U—Pb定年、微古化石研究,结合区域地层对比、含铁建造对比和稀土元素地球化学特征,得出以下结论:

(1)济宁群下部变英安岩中锆石SHRIMP年龄不一致线的上交点为(2522 ± 7) Ma,最小年龄值为2487 Ma,指示济宁群下部翟村组含较多火山岩的层位主要形成于新太古代末期,延续到古元古代早期。

(2)济宁岩群下部变英安岩中锆石残余核的年龄及济宁群上部碎屑锆石的年龄,早于本文测试的变英安岩中锆石不一致线上交点年龄80 Ma以上,与鲁西泰山岩群下部和新太古代早、中期花岗岩的年龄值接近,指示济宁群来源于鲁西早前寒武纪基底变质岩系。

(3) 济宁群中-上部存在分异度不高的简单球形的疑源类微古植物化石,其地质时代应晚于新太古代。济宁群岩石组合特征及变质程度与华北古-中元古代地层的相似程度大于与太古宙地层的相似程度,含铁岩系特征与山西袁家村BIF相似,条带状磁铁石英岩的Eu/Eu*值接近古元古代BIF的值。综合认为,济宁群中上部层位及富铁岩层的形成时代定为古元古代为宜,与吕梁群、粉子山群的形成时代相当。

(4) 济宁群是新太古代-古元古代跨地质年代的岩石地层单位,鲁西地区尚存在其他形成于新太古代至古元古代过渡期的地质体,它们填补了全球地质演化的寂静期。

致谢: 本研究是在山东省物化探勘查院“山东省兖州颜店和翟村矿区详查”工作的基础上完成的,锆石SHIRIMP测年由 中国地质科学院地质研究所万渝生研究员完成,微古化石由中国科学院南京地质古生物研究所尹磊明研究员完成,论文编写过程中与万渝生研究员和中国科学院南京地质古生物研究所卢辉楠研究员进行了有益讨论,审稿专家及编辑部提出了宝贵意见和详细的修改建议,在此一并致谢。

参考文献(References):

- [1] 李森乔,李评. 山东济宁磁异常数据处理及找矿效果[C]// 国家地质总局书刊编辑室编辑. 金属矿物探电算文集. 北京:地质出版社,1979:1-211.
Li Senqiao, Li Ping. Data processing and prospecting effect of magnetic anomaly in Jining area, Shandong Province[C]// Books Newsroom of National Geological Administration(ed.). The Corpus for Geophysical Computing of Metallic Ore. Beijing: Geological Publishing House, 1979: 1-211 (in Chinese).
- [2] 南京地质矿产研究所变质铁矿组. 蚌埠、济宁两地区古元古代地层中与铁矿有关的变质火山岩[J]. 华东地质(地质矿产专辑), 1979, (2): 49.
The Group of Metamorphic Iron Ore Institute of Geology and Mineral Resources in Nanjing. Metamorphic volcanic rocks related to Paleoproterozoic iron ore in Bengbu and Jining area[J]. Huadong Geology(Album of Geology and Mineral Resources), 1979, (2): 149 (in Chinese).
- [3] 元润章. 鲁西前寒武纪地层划分及含铁建造地质特征[J]. 南京地质矿产研究所所刊, 1984, 5(3): 58-108.
Qi Runzhang. The Precambrian stratigraphic classification and iron formation geological characteristics in the western Shandong Province[J]. Bulletin of Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, 1984, 5(3): 58-108(in Chinese).
- [4] 宋志勇,张增奇,赵光华,等. 鲁西前寒武纪及岩石地层清理意见[J]. 山东地质, 1994, 10(增刊): 7-8.
Song Zhiyong, Zhang Zengqi, Zhao Guanghua, et al. Suggestions on the stratigraphic division and correlation on the Precambrian rocks in the western Shandong region[J]. Shandong Geology, 1994, 10(Supp.): 7-8(in Chinese with English abstract).
- [5] 曹国权. 鲁西早前寒武纪地质[M]. 北京:地质出版社, 1996: 30-32.
Cao Guoquan. Early Precambrian Geology in the Western Shandong Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 30-32(in Chinese with English abstract).
- [6] 张增奇,刘明渭. 山东省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1996:81-83.
Zhang Zengqi, Liu Mingwei. Lithostratigraphy in Shandong Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996: 81-83(in Chinese with English abstract).
- [7] 韩玉珍,王世进,李培远. 济宁颜店铁矿地质特征及济宁岩群含矿性研究[J]. 山东国土资源, 2008, 24(2): 3-8.
Han Yuzhen, Wang Shijin, Li Peiyuan. Study on geological characteristics of Yandian iron deposit and ore-bearing property of Jining Group in Jining City[J]. Shandong Land and Resources, 2008, 24(2): 3-8(in Chinese with English abstract).
- [8] 宋明春,李培远,熊玉新,等. 山东省济宁强磁异常区深部铁矿初步验证及其意义[J]. 地质学报, 2008, 82(9): 1285-1292.
Song Mingchun, Li Peiyuan, Xiong Yuxin, et al. Deep iron deposit of the Jining intense magnetic anomaly area in Shandong Province and its significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(9): 1285-1292(in Chinese with English abstract).
- [9] 宋明春,焦秀美,宋英昕,等. 鲁西隐伏含铁岩系——前寒武纪济宁岩群地球化学特征及沉积环境[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(4): 543-552.
Song Mingchun, Jiao Xiumei, Song Yingxin, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Precambrian Jining group in western Shandong Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(4): 543-552(in Chinese with English abstract).
- [10] 李培远,边荣春,曹秀华. 兖州市颜店矿区洪福寺铁矿床地质特征[J]. 山东国土资源, 2010, 26(10): 12-15.
Li Peiyuan, Bian Rongchun, Cao Xiuhua. Geological characteristics of Hongfusi iron deposit in Yandian mine area of Yanzhou city[J]. Shandong Land and Resources, 2010, 26(10): 12-15(in Chinese with English abstract).
- [11] 张成基,焦秀美,李世勇,等. 济宁岩群大量变质碎屑岩和碳质岩的发现及地层划分[J]. 山东国土资源, 2010, 26(7):1-3.
Zhang Chengji, Jiao Xiumei, Li Shiyong, et al. Discovery and strata division of a large number of metamorphic clastic rocks and carbonaceous rocks[J]. Shandong Land and Resources, 2010, 26(7): 1-3(in Chinese with English abstract).
- [12] 王伟,王世进,刘墩一,等. 鲁西新太古代济宁岩群含铁岩系形

- 成时代——SHRIMP U-Pb 定年[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1175-1181.
- Wang Wei, Wang Shijin, Liu Dunyi, et al. Formation age of the Neoproterozoic Jining Group (banded iron formation) in the western Shandong Province: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4): 1175-1181(in Chinese with English abstract).
- [13] 万渝生,董春艳,颜强,等. 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[J]. 地质学报, 2012, 86(9): 1447-1478.
- Wan Yusheng, Dong Chunyan, Xie Hangqiang, et al. Formation ages of Early Precambrian BIFs in the north China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(9): 1447-1478(in Chinese with English abstract).
- [14] 杜利林,庄育勋,杨崇辉,等. 山东新泰孟家屯岩组锆石特征及其年代学意义[J]. 地质学报, 2003, 77(3): 359-366.
- Du Lilin, Zhaung Yuxun, Yang Chonghui, et al. Characters of zircons in the Mengjiatun formation in Xintai of Shandong and their chronological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(3): 359-366 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王世进,万渝生,张成基,等. 鲁西地区早前寒武纪地质研究新进展[J]. 山东国土资源, 2008, 24(1): 10-20.
- Wang Shijin, Wan Yusheng, Zhang Chengji, et al. Major advanced development gained in studying Early Cambrian geology in Luxi area[J]. *Shandong Land and Resources*, 2008, 24(1): 10-20 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张增奇,张成基,王世进,等. 山东省地层侵入岩构造单元划分对比意见[J]. 山东国土资源, 2014, 30(3): 1-23.
- Zhang Zengqi, Zhang Chengji, Wang Shijin, et al. Views on classification and contrast of tectonic units in strata in Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 2014, 30(3): 1-23 (in Chinese with English abstract).
- [17] 王世进,万渝生,张增奇,等. 山东省主要地质遗迹形成时代及分布特征[J]. 山东国土资源, 2013, 29(2): 1-11.
- Wang Shijin, Wan Yusheng, Zhang Zengqi, et al. Forming age and distribution characteristics of major types of geological heritage in Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 2013, 29(2): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- [18] 宋明春,焦秀美,张成基,等. 山东省济宁群的地层序列和形成环境[J]. 地层学杂志, 2016, 40(1): 376-390.
- Song Mingchun, Jiao Xiumei, Zhang Chengji, et al. Stratigraphic sequence and tectonic setting for Jining group in Shandong Province[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2016, 40(1): 376-390 (in Chinese with English abstract).
- [19] Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe[C]// McKibben M A, Shanks W C and Ridley W I(ed.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Reviews in Economic Geology*, 1998, 7: 1-35.
- [20] Ludwig K R. *Squid 1.02: A Users Manual*[M]. Berkeley Geochronology Centre, Special Publication, 2001, 2: 1-19.
- [21] 马杏垣,白瑾,索书田,等. 中国前寒武纪构造格架及研究方法[M]. 北京:地质出版社,1987.
- Ma Xingyuan, Bai Jin, Suo Shutian, et al. *Precambrian Tectonic Framework and Research Methods in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987 (in Chinese).
- [22] 伍家善,耿元生,沈其韩,等. 华北陆台早前寒武纪重大地质事件[M]. 北京:地质出版社,1991: 1-115.
- Wu Jiashan, Geng Yuansheng, Sheng Qihan, et al. *Early Precambrian Important Geological Events in North China Platform*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-115 (in Chinese).
- [23] 陈晋镛,吴铁山,张鹏远,等. 华北区区域地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1997: 10-44.
- Chen Jinbiao, Wu Tieshan, Zhang Pengyuan, et al. *The Regional Strata of North China Craton*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 10-44 (in Chinese).
- [24] 和政军,孟祥化,葛铭. 燕山地区长城纪沉积演化及构造背景[J]. 沉积学报, 1994, 12(2): 1-19.
- He Zhengjun, Meng Xianghua, Ge Ming. Environmental evolutions and structural control of Changchengian of the Mid-Proterozoic in the Yanshan Basin, north China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(2): 1-19(in Chinese with English abstract).
- [25] 洪作民. 华北陆台北缘中晚元古代坳拉谷[J]. 化工矿产地质, 1997, 19(1): 43-48.
- Hong Zuomin. Middle-late Proterozoic depression in north margin of north China platform[J]. *Geology of Chemical Minerals* 1997, 19(1): 43-48(in Chinese with English abstract).
- [26] 李锦轶. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识[J]. 地质论评, 1998, 44(4): 339-347.
- Li Jinyi. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas[J]. *Geological Review*, 1998, 44(4): 339-347 (in Chinese with English abstract).
- [27] 周洪瑞,王自强. 华北大陆南缘中、新元古代大陆边缘性质及构造古地理演化[J]. 现代地质, 1999, 13(3): 262-267.
- Zhou Hongrui, Wang Ziqiang. Feature and tectonic paleogeography evolution of the southern margin of the north China continent in Mesoproterozoic and Neoproterozoic era[J]. *Geoscience*, 1999, 13(3): 262-267(in Chinese with English abstract).
- [28] 李锦轶. 中国大陆地壳“镶嵌与叠覆”的结构特征及其演化[J]. 地质通报, 2004, 23(9/10): 986-1004.
- Li Jinyi. Structural characteristics of crustal "mosaicking and superimposition" of the continent of China and its evolution[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(9/10): 986-1004(in Chinese with English abstract).
- [29] Gross G A. A classification of iron formations based on depositional environments[J]. *The Canadian Mineralogist*, 1980,

- 18(2): 215–222.
- [30] Klein C. Some Precambrian banded iron-formation (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origins[J]. *American Mineralogist*, 2005, 90(10): 1473–1499.
- [31] 张连昌, 翟明国, 万渝生, 等. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究: 进展与问题[J]. *岩石学报*, 2012, 28(11): 3431–3445.
Zhang Lianchang, Zhai Mingguo, Wan Yusheng, et al. Study of the Precambrian BIF-iron deposits in the north China Craton: Progresses and questions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(11): 3431–3445 (in Chinese with English abstract).
- [32] 刘明军, 李厚民, 于仕祥, 等. 辽宁鞍山地区铁矿床黄铁矿和辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. *中国地质*, 2014, 41(6): 1821–1832.
Liu Mingjun, Li Houmin, Yu Shixiang, et al. Re-Os isotopic dating of pyrite and molybdenite from the iron deposits in Anshan—Benxi area of Liaoning Province and its geological significances[J]. *Geology in China*, 2014, 41(6): 1821–1832 (in Chinese with English abstract).
- [33] 刘清泉, 黄自力, 张智慧, 等. 河南舞阳经山寺铁矿床 C-O-Si 同位素成矿物质来源示踪[J]. *中国地质*, 2015, 42(6): 1919–1930.
Liu Qingquan, Huang Zili, Zhang Zhihui, et al. Carbon, oxygen and silicon isotope composition tracing for the ore-forming material source of the Jingshansi iron deposit in Wuyang, Henan Province[J]. *Geology in China*, 2015, 42(6): 1919–1930 (in Chinese with English abstract).
- [34] 蓝廷广, 范宏瑞, 胡芳芳, 等. 鲁东昌邑古元古代 BIF 铁矿床地球化学特征及矿床成因讨论[J]. *岩石学报*, 2012, 28(11): 3595–3611.
Lan Tingguang, Fan Hongrui, Hu Fangfang, et al. Geological and geochemical characteristics of Paleoproterozoic Changyi banded iron formation deposit, Jiaodong Peninsula of eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(11): 3595–3611 (in Chinese with English abstract).
- [35] 李厚民, 王登红, 李立兴, 等. 中国铁矿成矿规律及重点矿集区资源潜力分析[J]. *中国地质*, 2012, 39(3): 559–580.
Li Houmin, Wang Denghong, Li Lixing, et al. Metallogeny of iron deposits and resource potential of major iron minerogenetic units in China[J]. *Geology in China*, 2012, 29(3): 559–580 (in Chinese with English abstract).
- [36] 王长乐, 张连昌, 兰彩云, 等. 山西吕梁袁家村条带状铁建造沉积相与沉积环境分析[J]. *岩石学报*, 2015, 31(6): 1671–1693.
Wang Changle, Zhang Lianchang, Lan Caiyun, et al. Analysis of sedimentary facies and depositional environment of the Yuanjiacun banded iron formation in the Lvliang area, Shanxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(6): 1671–1693 (in Chinese with English abstract).
- [37] 王世进, 万渝生, 张成基, 等. 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[J]. *山东国土资源*, 2009, 25(10): 18–24.
Wang Shijin, Wan Yusheng, Zhang Chengji, et al. Forming ages of early Precambrian metamorphic strata in Shandong Province —Proofs of zircon SHRIMP U-Pb dating[J]. *Shandong Land and Resources*, 2009, 25(10): 18–24 (in Chinese with English abstract).
- [38] 王伟, 杨恩秀, 王世进, 等. 鲁西泰山岩群变质枕状玄武岩相学和侵入的奥长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学[J]. *地质论评*, 2009, 55(5): 737–744.
Wang Wei, Yang Enxiu, Wang Shijin, et al. Petrography of the Metamorphic pillow basalt and SHRIMP U-Pb dating of zircons from the intruding trondhjemite in Archean Taishan “group”, Western Shandong[J]. *Geological Review*, 2009, 55(5): 737–744 (in Chinese with English abstract).
- [39] 王世进, 万渝生, 宋志勇, 等. 山东省前寒武纪地层形成时代——同位素地质测年的证据[J]. *山东国土资源*, 2011, 27(11): 1–6.
Wang Shijin, Wan Yusheng, Song Zhiyong, et al. Formation of Precambrian strata in Shandong Province isotopic dating evidences[J]. *Shandong Land and Resources*, 2011, 27(11): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- [40] Hoskin P W O and Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53: 27–55.
- [41] 李志红, 朱祥坤, 唐索寒, 等. 冀东、五台和吕梁地区条带状铁矿的稀土元素特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 2010, 24(5): 840–846.
Li Zhihong, Zhu Xiangkun, Tang Suohan, et al. Characteristics of rare earth elements and geological significations of BIFs from Jidong Wutai and Lvliang area[J]. *Geoscience*, 2010, 24(5): 840–846 (in Chinese with English abstract).
- [42] 赖小东, 杨晓勇. 鲁西杨庄条带状铁建造特征及锆石年代学研究[J]. *岩石学报*, 2012, 28(11): 3612–3622.
Lai Xiaodong, Yang Xiaoyong. Characteristic of the banded iron formation (BIF) and its zircon chronology in Yangzhuang, western Shandong[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(11): 3612–3622 (in Chinese with English abstract).
- [43] 庄育勋, 王新社, 徐洪林, 等. 泰山地区早前寒武纪主要地质事件与陆壳演化[J]. *岩石学报*, 1997, 13(3): 313–330.
Zhuang Yuxun, Wang Xinshe, Xu Honglin, et al. Main geological events and crustal evolution in early Precambrian of Taishan region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1997, 13(3): 313–330 (in Chinese with English abstract).
- [44] Jahn B M, Auvray B, Shen Q H, et al. Archean crustal evolution in China: The Taishan complex, and evidence for juvenile crustal addition from long-term depleted mantle[J]. *Precambrian Research*, 1988, 38(4): 381–403.