

华北克拉通鲁西地区早前寒武纪表壳岩系重新划分和 BIF 形成时代*

万渝生¹ 刘敦一¹ 王世进² 焦秀美³ 王伟⁴ 董春艳¹ 颀颀强¹ 马铭株¹

WAN YuSheng¹, LIU DunYi¹, WANG ShiJin², JIAO XiuMei³, WANG Wei⁴, DONG ChunYan¹, XIE HangQiang¹ and MA MingZhu¹

1. 中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心, 北京 100037

2. 山东省地质调查院, 济南 250013

3. 山东省地矿局, 济南 250013

4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

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

2. Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250013, China

3. Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan 250013, China

4. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2012-06-13 收稿, 2012-09-21 改回.

Wan YS, Liu DY, Wang SJ, Jiao XM, Wang W, Dong CY, Xie HQ and Ma MZ. 2012. Redefinition of Early Precambrian supracrustal rocks and formation age of BIF in western Shandong, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3457–3475

Abstract Western Shandong is one of the typical areas in the North China Craton where granite-greenstone belts were well developed. Supracrustal rocks in western Shandong include the Taishan Group (including the Yanlingguan, Shancaoyu and Liuhang formations), Jining Group and Mengjiatun Formation. The Taishan Group and Jining Group were once considered as being formed during the Early Neoproterozoic and Late Paleoproterozoic, respectively. Based on field observation and SHRIMP U-Pb zircon dating, we redefine the times of deposition of supracrustal rocks in western Shandong: 1) Supracrustal rocks deposited during the Early Neoproterozoic (2.75 ~ 2.70 Ga), including the Yanlingguan Formation and most of the lower part of the Liuhang Formation and the Mengjiatun Formation; 2) supracrustal rocks deposited during the Late Neoproterozoic (2.55 ~ 2.525 Ga), including the Shancaoyu Formation, the Jining Group, and the upper part and some of the lower part of the Liuhang Formation. They are different in rock association, metamorphism and deformation, with the banded iron formation belonging to the Late Neoproterozoic supracrustal rock. Western Shandong is the only terrane in the North China Craton where both early and late Neoproterozoic supracrustal rocks have been identified.

Key words BIF; SHRIMP dating; Neoproterozoic; Western Shandong; North China Craton

摘要 鲁西花岗-绿岩带是华北克拉通早前寒武纪变质基底典型代表。表壳岩系包括泰山岩群、孟家屯岩组和济宁岩群。其中,泰山岩群是鲁西地区规模最大的表壳岩系,曾认为形成于新太古代早期,而济宁岩群曾认为形成于古元古代。根据野外地质和表壳岩系及相关岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 定年,本文对表壳岩系形成时代进行了重新划分。1) 新太古代早期(2.70 ~ 2.75 Ga)表壳岩系,包括原泰山岩群的雁翎关岩组和柳行岩组下段的大部分及孟家屯岩组。2) 新太古代晚期(2.525 ~ 2.56 Ga)表壳岩系,包括原泰山岩群的山草峪岩组、柳行岩组上段和下段的一部分及济宁岩群。它们在岩石组合、变质变形等方面存在明显区别,BIF 形成于新太古代晚期。这是华北克拉通迄今唯一分辨出新太古代早期和晚期表壳岩系的地区。

关键词 BIF; SHRIMP 定年; 新太古代; 鲁西; 华北克拉通

中图法分类号 P534.1; P618.31

* 本文受国家 973 项目(2012CB416601)、国家自然科学基金项目(41172172)和中国地质调查局重点项目(1212010811033、1212011120151)联合资助。

第一作者简介: 万渝生,男,1958 年生,研究员,主要从事前寒武纪地质和同位素年代学研究, E-mail: wanyusheng@bjshrmp.cn

1 引言

鲁西是华北克拉通太古宙基底的典型出露区,我国早前寒武纪条带状铁建造(BIF)的重要分布区。鲁西也是华北克拉通开展早前寒武纪研究的最早地区之一。美国地质学家维尔斯和布莱克威尔德首先提出泰山地区主要由太古宙变质火成岩组成,称为“泰山杂岩”(见陆松年等,2008)。1958~1961年由原北京地质学院开展的1:20万区域调查,首次在鲁西地区建立了地层、构造和岩浆岩系统,发现多处矿产地。程裕淇先生等在20世纪60年代与山东地矿局合作对雁翎关地区泰山岩群雁翎关岩组、山草峪岩组和相关花岗质岩石

进行了研究,对雁翎关岩组进行了深入解剖,之后发表了专著(程裕淇等,1982)。其中对切割雁翎关岩组的伟晶岩的K-Ar定年获得年龄为2508Ma,是国内最早开展的同位素年代学研究之一。Jahn *et al.* (1988)对泰山杂岩的年代学和地球化学研究,在国内外早前寒武纪领域产生了重要的影响。20世纪90年代中期,以曹国权总工程师为首的山东地矿局对鲁西早前寒武纪地质和矿产研究进行了系统的总结,发表专著“鲁西早前寒武纪地质”(曹国权,1996)。对泰山岩群、孟家屯岩组和济宁岩群的地质特征、岩石组合、空间变化、形成时代和广泛分布的花岗质岩石的空间分布、地质特征、岩石学、地球化学和年代学进行了总结,阐述了鲁西早前寒武纪地壳演化历史。除此之外,许多人从不同角度对鲁西开展了基础

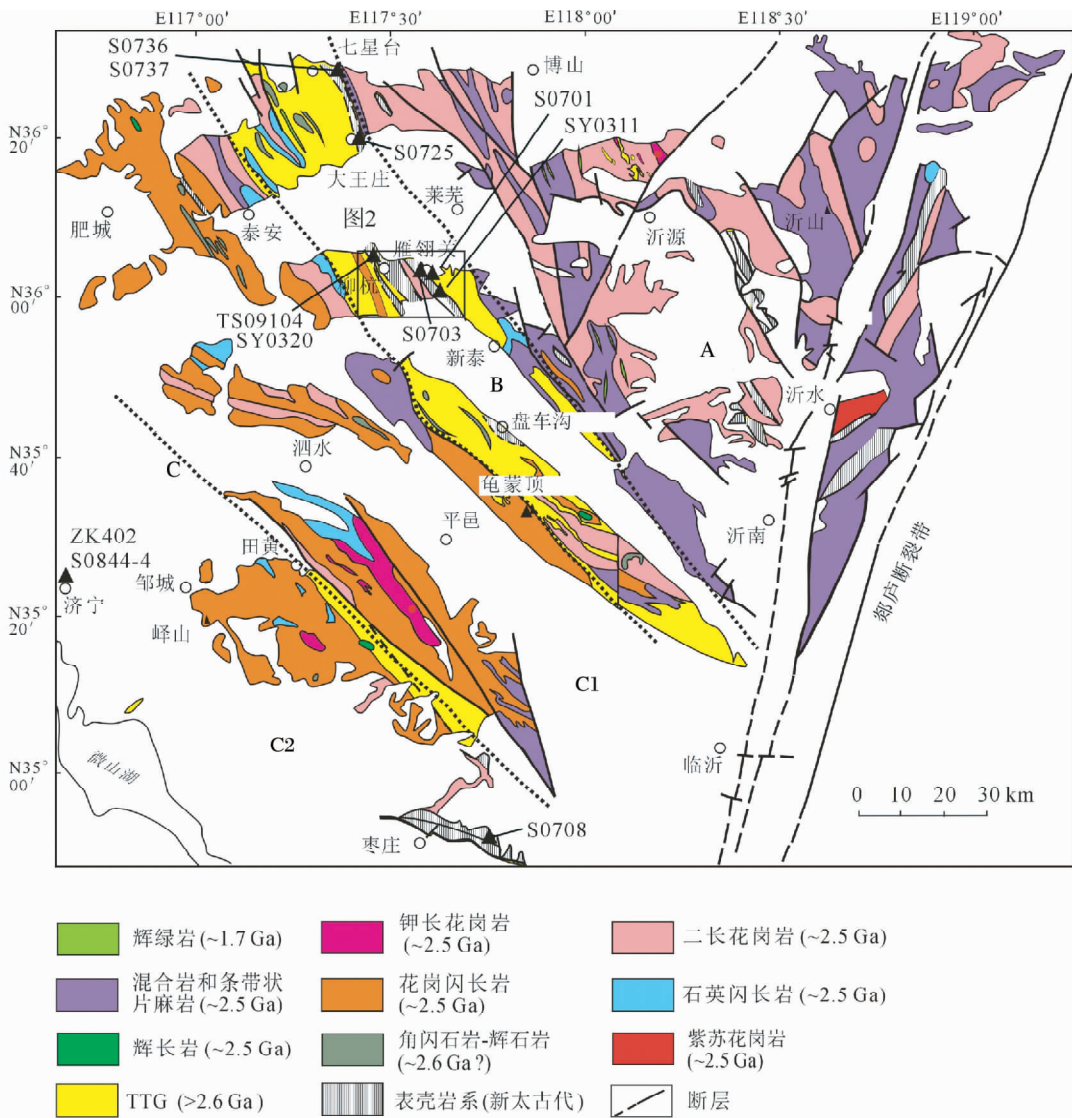


图1 华北克拉通鲁西太古宙花岗绿岩带地质简图(据曹国权,1996; Wan *et al.*, 2010)

图中标出了样品位置

Fig. 1 Geological map of western Shandong, eastern North China Craton (after Cao, 1996; Wan *et al.*, 2010)

Also shown are sample locations in this study

地质研究(沈其韩等, 2004, 2007; 王世进等, 2008; 曹国权, 1996; 庄育勋等, 1995, 1997; 伍家善等, 1998; 杜利林等, 2003, 2005, 2010; 陆松年等, 2008; 韩玉珍等, 2008; 杨恩秀等, 2008; 赵子然等, 2008, 2009a, b; 王伟等, 2009, 2010a, b; Jahn *et al.*, 1988; Hou *et al.*, 2006; Polat *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007, 2009; Wan *et al.*, 2010, 2011, 2012)。本文介绍了作者等近年来在鲁西地区早前寒武纪表壳岩系研究方面取得的进展, 并对 BIF 形成时代和构造环境进行了讨论。

2 地质背景

鲁西地区新太古代构造岩浆热事件十分发育, 岩浆岩(主要是花岗质岩石)和表壳岩广泛分布, 总面积约 40,000km², 称之为鲁西花岗绿岩带, 地质体大体沿 NW-SE 向展布, 在东部被郯庐断裂截切(图 1)。

表壳岩以透镜状、条带状出露于花岗岩和片麻岩“海”之中, 面积不足 10%。表壳岩系被划分为泰山岩群、孟家屯岩组和济宁岩群(曹国权, 1996)。泰山岩群规模最大, 认为形成于新太古代早期, 但新的年代学研究表明, 泰山岩群需进一步解体(Wan *et al.*, 2012)。孟家屯岩组出露于孟家屯地区很小范围, 形成于新太古代早期(杜利林等, 2003, 2005; 陆松年等, 2008)。济宁岩群分布于济宁地区, 以往认为形成时代为古元古代(曹国权, 1996), 但很可能形成于新太古代晚期(王伟等, 2010a)。

曹国权(1996)把鲁西地区广泛分布的花岗质岩石划分为三期: 新甫山期 TTG 岩类(2600 ~ 2700Ma)、中天门期闪长岩类(2500 ~ 2600Ma)和傲来山期花岗岩类(2400 ~ 2450Ma)。认为三期岩浆活动形成岩石的时间变化反映了岩浆活动的演化规律。傲来山期花岗岩类主要分布于东北部。新甫山期 TTG 花岗质岩石主要分布于西南部。三期岩浆岩时间上有从南西向东北由老而新的变化规律。新的研究表明, 西南部的 TTG 花岗质岩石(新甫山期)形成于新太古代晚期, 而不是新太古代早期; 新太古代早期地质体主要分布于中部带; 傲来山期花岗岩形成时代是新太古代(~2.5Ga), 而不是古元古代(2.4 ~ 2.45Ga)。从而将鲁西太古宙基底从东北到西南依次划分为 A、B、C 三个岩带: A 带为新太古代晚期的壳源花岗岩, B 带为新太古代早期的岩石, C 带为新太古代晚期的新生岩浆岩。后者又可以进一步分为 C1 带和 C2 带(图 1)。

3 表壳岩系

3.1 泰山岩群

泰山岩群被划分为雁翎关岩组、山草峪岩组和柳杭岩组。在泰山岩群分布最典型的雁翎关-柳杭地区, 它们从东北向西南依次出露(图 2)。一些人认为柳行岩组和雁翎关岩组

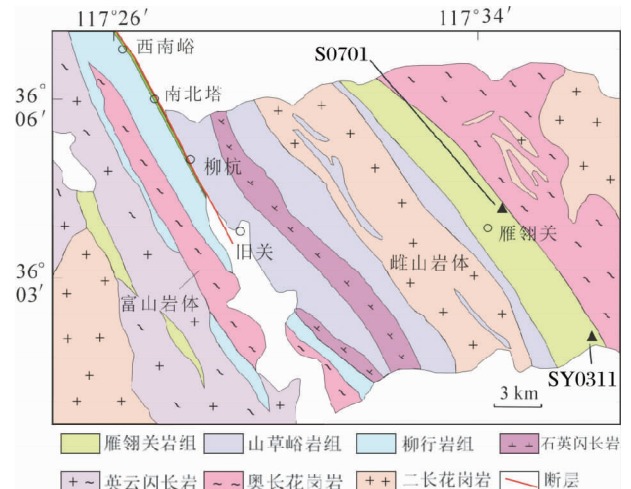


图 2 雁翎关-柳杭地区太古宙地质简图

图中标出了样品位置

Fig. 2 Geological map of the Yanglingguang-Liuhang area, western Shandong

Also shown are sample locations in this study

构成一向斜的两翼; 另一些人认为这三个岩组为单斜构造, 山草峪岩组新于雁翎关岩组而老于柳行岩组(曹国权, 1996)。

3.1.1 雁翎关岩组

主要分布于新泰市雁翎关、长清市界首、沂源县韩旺、沂水县胡同峪、安丘市崔巴峪、汶上县彩山等地。出露厚度 200 ~ 1500m。主要岩石类型为斜长角闪岩和变质超基性岩, 夹黑云变粒岩、角闪变粒岩、变质砾岩等(程裕淇等, 1982)。

雁翎关地区的雁翎关岩组最为典型, 研究也最为深入。岩层总厚度约 1500m。以块状斜长角闪岩为主(图 3a), 变质原岩可能为厚层玄武质熔岩。见变形玄武质枕状熔岩(图 3b)。在一些枕状熔岩中充填长英质脉体(图 3c), 这种构造在北美苏必利尔花岗绿岩带也可见到, 被解释为枕状熔岩在流动固结过程中不断拉张, 长英质物质充填进去的结果, 而不是后期变质变形作用过程中充填进去的。在岩枕的边部可见杏仁构造(图 3d)。“红顶绿底”等熔岩构造已被分辨出来(程裕淇等, 1982)。还存在条带状斜长角闪岩(图 3e), 可能为基性凝灰岩。斜长角闪岩中夹有黑云角闪变粒岩(S0701, 图 3f), 其边部的斜长角闪岩发育管虫状、纺锤虫状等变形的变余气孔充填构造(图 4a)(程裕淇等, 1982), 表明变质原岩为玄武质熔岩, 并遭受强烈变形改造。变质超基性岩也十分发育, 包括透闪片岩、阳起片岩、阳起透闪片岩、透闪阳起片岩、滑石片岩等。一些变质超基性岩的褶皱枢纽近于垂直, 可能为早期变形作用的结果。这些变质超基性岩具科马提岩的组成特征, 但未观察到可靠的鬃刺结构。一些放射状分布的闪石可能与热液蚀变有关。但是, 在蒙阴苏家沟地区, 确实存在具鬃刺结构的科马提岩(图 4b)。在雁翎关地区, 还见辉长岩和斜长岩侵入表壳岩系, 也发生变质。但它们的规模都不大。



图3 雁翎关地区泰山岩群雁翎关岩组表壳岩系岩石野外照片

(a)-块状斜长角闪岩,变质原岩可能为熔岩;(b)-变质变形枕状玄武岩;(c)-变质枕状玄武岩中的长英质脉体;(d)-变质枕状玄武岩边部的杏仁构造;(e)-条带状斜长角闪岩,变质原岩可能为基性凝灰岩;(f)-黑云角闪变粒岩(S0701),与斜长角闪岩互层

Fig. 3 Field photographs of metamorphic rocks of the Yanglingguan Formation of the Taishan Group in the Yanglingguan area, western Shandong

(a)-massive amphibolite, the protolith is considered to be basaltic lava; (b)-metamorphized and deformed basalt pillow; (c)-felsic veins in meta-basalt pillow; (d)-amygdaloidal structures occurring along the margin of meta-basalt pillow; (e)-banded amphibolite, the protolith is considered to be mafic tuff; (f)-fine-grained biotite hornblende gneiss (S0701) interbedded with amphibolite

根据岩石组合,程裕淇等(1982)把雁翎关地区的雁翎关岩组划分为十大层,三个岩性段。第一段为斜长角闪岩夹角闪变粒岩及黑云变粒岩,厚度664m。第二段为条带状细粒斜长角闪岩、角闪变粒岩夹薄层黑云变粒岩,厚度为365m。第三段为细粒薄层斜长角闪岩夹透闪阳起片岩及含榴黑云变粒岩,厚度146m。往东到天井峪,具科马提岩组成的变质超基性岩十分发育,厚300余米。雁翎关岩组的原岩主要为一套海底喷发的基性-超基性火山熔岩夹火山碎屑岩,构成典型的火山-沉积组合。雁翎关岩组在北东侧与~2.6Ga新甫山花岗闪长岩接触,两者关系多平行化,但在局部仍可见到侵入接触关系。侵入的石英闪长岩(SY0311,图4c)岩浆锆石年龄为2.74Ga,限定了该区雁翎关岩组的形成时代。雁翎关岩组在西南侧与山草峪组接触,原认为是整合关系,但

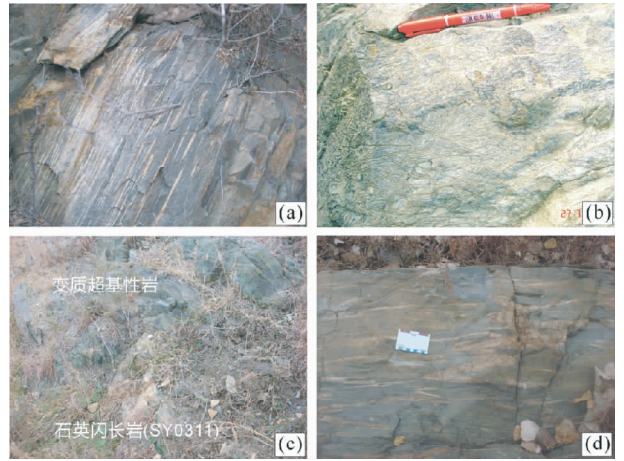


图4 泰山岩群雁翎关岩组表壳岩系及相关岩石野外照片

(a)-斜长角闪岩中的变形杏仁构造,雁翎关;(b)-科马提岩的鬃刺结构,苏家沟;(c)-石英闪长岩(SY0311)侵入雁翎关岩组变质超基性岩,天井峪;(d)-雁翎关岩组中的强变形长英质脉体,靠近与山草峪岩组的界线,雁翎关

Fig. 4 Field photographs of metamorphic rocks of the Yanglingguan Formation of the Taishan Group in western Shandong

(a)-deformed amygdaloidal bodies in amphibolite, Yanglingguan; (b)-spinifex structure of komatiite, Sujiagou; (c)-quartz diorite intruding the meta-ultrabasic rock of the Yanglingguan Formation of the Taishan Group, Tianjingyu; (d)-strongly deformed felsic veins in the Yanglingguan Formation near the boundary with the Shancaoyu Formation, Yanglingguan

在靠近接触带附近的岩石强烈变形(图4d),而山草峪岩组黑云变粒岩中存在许多年龄小于2.7Ga的碎屑锆石,雁翎关岩组和山草峪组是不同时代的产物,相互之间为构造接触。

3.1.2 山草峪岩组

山草峪岩组主要分布在新泰市山草峪、盘车沟、章丘市火贯、西麦腰、官营、沂水县胡同峪,安丘市常家岭,枣庄市太平村及东平等地。各地发育程度不一,厚度变化较大。在雁翎关-柳杭一带最为发育,厚2110m。被2.5Ga花岗质岩石侵入(图2)。山草峪岩组主要由黑云变粒岩组成,夹斜长角闪岩、角闪片岩、角闪黑云变粒岩、二云变粒岩、云母片岩和BIF。黑云变粒岩大都为碎屑沉积岩,具沉积构造(图5a-e)。在西南峪地区,与柳行岩组斜长角闪岩相距约15m的位置,山草峪岩组黑云变粒岩含有少量花岗质岩石砾石(图5f)。山草峪岩组变质程度总体为角闪岩相。黑云变粒岩主要由斜长石、石英、钾长石和黑云母组成,一些岩石中存在角闪石,变为角闪黑云变粒岩或黑云角闪变粒岩。一些岩石中含有石榴石。黑云母普遍定向分布,一些岩石中石英也强烈定向。但变形弱的岩石中,碎屑结构仍可以保留。一些黑云变粒岩以包体形式存在于混合岩和花岗质岩石中,也被认为属



图 5 泰山岩群山草峪岩组表壳岩系岩石野外照片

(a)-黑云变粒岩,显示斜层理,七星台;(b)-变质沉积岩,细粒砂岩和泥质粉砂岩互层显示沉积层理,七星台;(c)-变质沉积岩(S0737),显示沉积层理,七星台;(d)-黑云变粒岩(TS09105),显示递变层理,柳杭北;(e)-含电气石黑云变粒岩(S0708),显示沉积层理,枣庄东铁矿区;(f)-含砾黑云变粒岩,距柳行岩组上段斜长角闪岩约15m,西南峪;(g)-糜棱岩化含石榴黑云变粒岩(S0703),靠近雁翎关岩组界线,雁翎关南;(h)-BIF 铁矿被 2.5Ga 红色花岗岩侵入,韩旺铁矿区

Fig. 5 Field photographs of metamorphic rocks of the Shancaoyu Formation of the Taishan Group in western Shandong

(a)-fine-grained biotite gneiss, showing inclined bedding, Qixingtai; (b)-metasedimentary rock showing bedding with fine-grained sandstone interlayered with politic siltstone, Shancaoyu Formation in Qixingtai; (c)-metasedimentary rock showing bedding (S0737), Shancaoyu Formation in Qixingtai; (d)-fine-grained biotite gneiss showing graded bedding (TS09105) in Shancaoyu Formation north of Liuhan; (e)-fine-grained tourmaline-bearing biotite gneiss showing bedding (S0708) in Shancaoyu Formation east of Zhaozhuang; (f)-pebble-bearing fine-grained biotite gneiss of Shancaoyu Formation, occurring ~15m away from boundary with lower part of Liuhan Formation, Xinanyu; (g)-mylonitized fine-grained, garnet-bearing biotite gneiss (S0703), Shancaoyu Formation near boundary between Shancaoyu and Yanlingguan Formations, south of Yanlingguan; (h)-BIF intruded by 2.5Ga granite, Hanwang iron deposit area

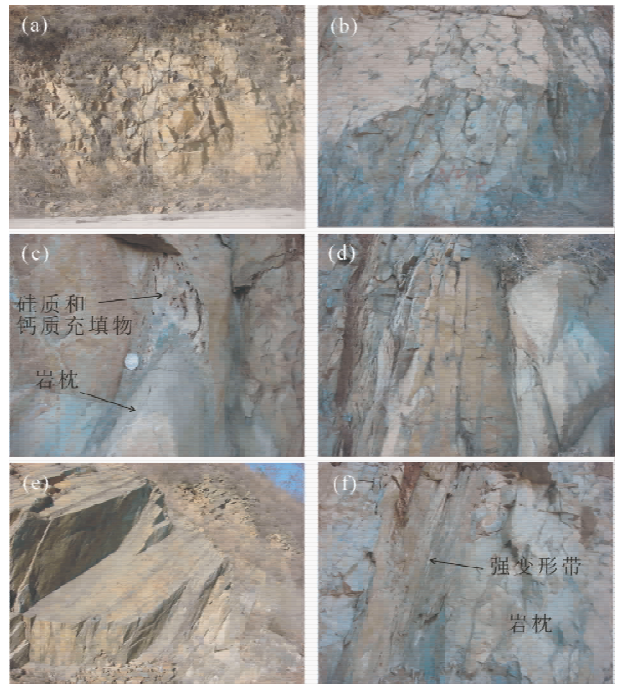


图 6 七星台地区泰山岩群柳行岩组下段壳岩系岩石野外照片

(a)-块状斜长角闪岩;(b)-变质枕状玄武岩;(c)-变质玄武岩岩枕之间的硅质和钙质充填物;(d)-变形变质枕状玄武岩;(e)-强变形变质枕状玄武岩,一些断面上已无法确定是否为变质枕状熔岩;(f)-变质枕状玄武岩之间的强变形带

Fig. 6 Field photographs of supracrustal rocks in the lower part of the Liuhan Formation of the Taishan Group in the Qixingtai area, western Shandong

(a)-massive amphibolite; (b)-meta-basalt pillows; (c)-quartz and calcite cement between meta basalt pillows; (d)-deformed meta-basalt pillows; (e)-strongly deformed meta-basalt pillows, the pillow structures cannot be clearly identified in some surfaces; (f)-strongly deformed belt between meta-basalt pillows

于山草峪岩组。一些混合岩和花岗岩的形成与它们密切相关,是其深熔作用的产物。在与雁翎关岩组和柳行岩组接触界线附近,山草峪岩组的岩石显示出强烈变形(图 5g),变形特征与相邻岩组的岩石类似。BIF 主要分布于枣庄、韩旺等地,被 2.5Ga 花岗岩侵入(图 5h)。

3.1.3 柳行岩组

柳行岩组主要分布在新泰柳杭、东牛家庄、盘车沟,泰安西南峪,莱芜香山,章丘七星台,沂水东虎崖,安丘崔岵峪等地,在柳杭、七星台一带最为发育。主要岩性为斜长角闪岩、绿泥片岩、黑云变粒岩、角闪黑云变粒岩、绢云石英片岩、中酸性变质火山角砾岩、变质沉积砾岩,夹有铁闪磁铁矿石岩。柳行岩组被划分为下段和上段,下段岩石以斜长角闪岩和变质超基性岩为主,岩石组合与雁翎关岩组类似。上段以黑云变粒岩和变质砾岩为主,岩石组合与山草峪岩组类似,但变



图7 七星台地区靠近山草峪岩组界线的柳行岩组上段强烈变形岩石

Fig.7 Rocks showing strong deformation near the boundary between the Shancaoyu Formation and upper part of the Liuhang Formation in Qixintai

质砾岩十分发育。

在七星台-大王庄岩带(图1),柳行岩组下段十分发育,以斜长角闪岩为主,被新太古代早期TTG花岗质岩石侵入。柳杭岩组地层北宽南窄,北部枣林至团员沟村一带地层厚度超过2000m,南部四角城至火贯村一带,地层减薄至~1000m。地层倾向 $220^{\circ} \sim 240^{\circ}$,倾角 $65^{\circ} \sim 80^{\circ}$,局部地层直立。根据原生构造(沉积构造和熔岩构造),地层层序向东变年轻。总体上,柳行岩组下段的下部块状斜长角闪岩更为发育,原岩为厚层玄武质熔岩(图6a),局部可见辉长岩(已变质)。上部斜长角闪岩变余枕状构造十分发育,厚度大于500米。在变形弱的地段,近于原始的枕状构造仍可保留(图6b)。新鲜面上,岩枕内部呈灰绿色,微晶结构,淬火边通常宽1~2cm,呈暗绿色或墨绿色,矿物粒度更细。岩枕内部和边部气孔杏仁构造都不发育。岩枕中自形的岩浆成因斜长石斑晶仍可保留(王伟等,2009)。在岩枕之间可见硅质

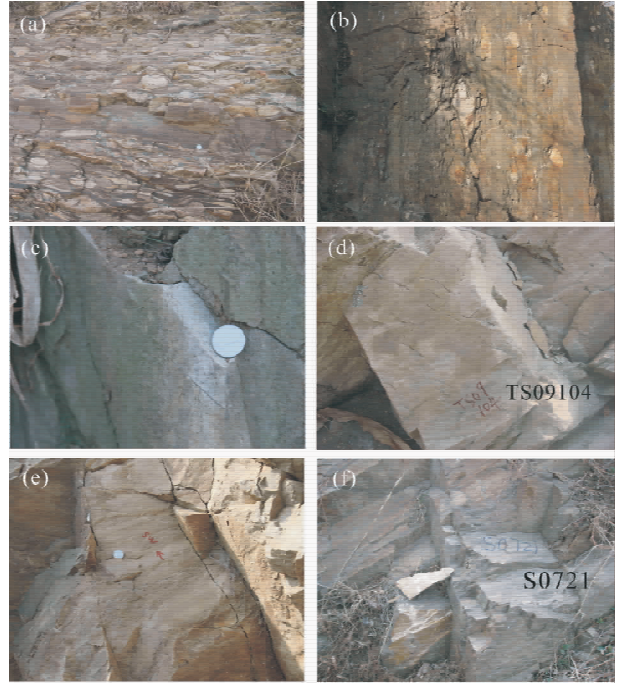


图8 泰山岩群柳行岩组上段表壳岩系岩石野外照片

(a)-砾岩与变质沉积岩互层,砾石主要为TTG和长英质火山岩,西南峪;(b)-砾岩与变质沉积岩互层,砾石主要为TTG岩石,柳杭西南约1km;(c)-砾岩中的长英质变质火山岩砾石,柳杭东南约1km;(d)-与砾岩互层的长英质变质火山沉积岩(TS09104),西南峪;(e)-下部变质沉积岩显示递变层理,柳杭东南约1km;(f)-黑云变粒岩(S0721)显示强烈变形,靠近山草峪岩组界线,盘车沟

Fig.8 Field photographys of supracrustal rocks in upper part of the Liuhang Formation of the Taishan Group in western Shandong

(a)-conglomerates interlayered with meta-sediments; pebbles are mainly TTG and felsic volcanic rocks, Xinyanu; (b)-conglomerates interlayered with meta-sediments; pebbles are mainly TTG rocks, ~1km southeast of Liuhang; (c)-a pebble of felsic metavolcanic rock, ~1km southeast of Liuhang; (d)-felsic metavolcano-sedimentary rock (TS09104) within conglomerates, Xinyanu; (e)-metasedimentary rock showing graded bedding, ~1km southeast of Liuhang; (f)-fine-grained biotite gneiss, showing strong deformation, Pancheguo

物质和碳酸盐岩充填(图6c)。陆源碎屑充填物的缺乏表明玄武质岩浆作用远离大陆区。硅质和钙质充填物与玄武质物质海水溶解有关。随着变形增强,岩枕被拉长(图6d),在强烈变形的情况下,岩枕完全平行化,岩石遭受强烈片理化(图6e),有时难以辨别是否为枕状熔岩。这一观察结果对于华北克拉通其它早前寒武纪地区变质枕状熔岩的鉴别具有一定的意义。在变质枕状熔岩之间,存在强片理化岩石(图6f),可能是变质变形的基性凝灰质岩石。

在柳行岩组下段的东侧,存在一宽十余米的黑云变粒岩,被作为柳行岩组上段,两者之间以厚几米的含砾黑云变粒岩为界线。早期认为柳行岩组上段是与山草峪岩组整合

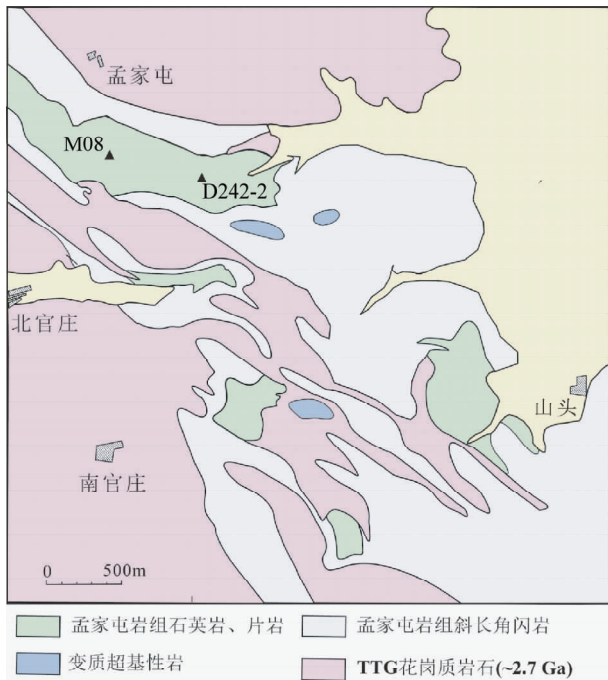


图9 孟家屯地区太古宙地质图(据杜利林等, 2010)

图中标出了样品位置

Fig. 9 Geological map of the Mengjiatun area, western Shandong (after Du *et al.*, 2010)

Also shown are sample locations in this study

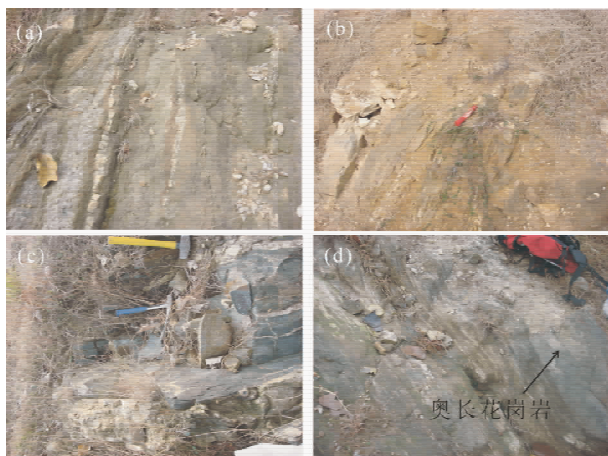


图10 孟家屯地区孟家屯岩组表壳岩系岩石野外照片

(a)-石榴石石英岩;(b)-黑云斜长片麻岩;(c)-辉长岩,被长英质脉体切割;(d)-孟家屯岩组表壳岩与奥长花岗质岩石一起强烈变形,片麻理一致

Fig. 10 Field photographys of supracrustal rocks of the Mengjiatun Formation in the Mengjiatun area, western Shandong

(a)-garnet quartzite; (b)-biotite plagioclase gneiss; (c)-gabbro cut by felsic veins; (d)-supracrustal rocks of the Mengjiatun Formation showing parallelization to trondhjemite due to strong deformation

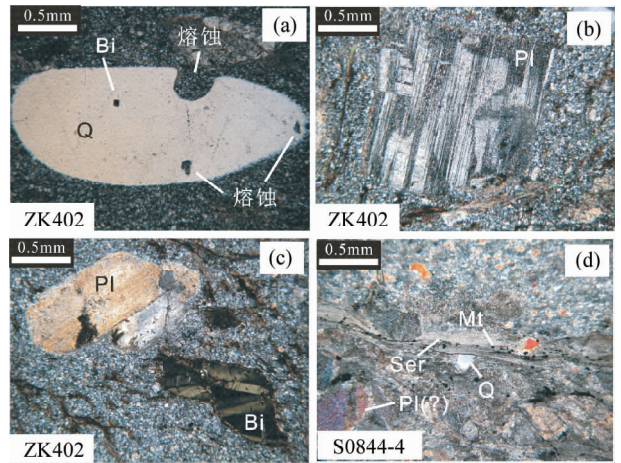


图11 济宁岩群变质岩的岩相学照片

(a-c)-变质长英质火山岩(ZK402):(a)-石英斑晶呈负晶形, 熔蚀所致, 存在熔蚀穿孔现象;(b)-斜长石斑晶, 双晶发育;(c)-斜长石斑晶两端被熔蚀圆滑, 存在黑云母斑晶;(d)-变质碎屑沉积岩(S0844-4), 岩石遭受后期蚀变, 显示强变形特征. 均为正交偏光. Q-石英; Pl-斜长石; Bi-黑云母; Mt-磁铁矿; Ca-方解石; Ser-绢云母; Chl-绿泥石

Fig. 11 Petrographical photos of felsic rocks of the Jining Group in western Shandong

(a-c)-meta-felsic volcanic rock (ZK02): (a)-quartz phenocryst showing embayed and smooth boundary; (b)-euhedral plagioclase phenocryst; (c)-plagioclase phenocryst showing smooth boundary at terminals, occurring together with biotite phenocryst; (d)-metasedimentary rock (S0844-4), showing strong deformation. Q-quartz; Pl-plagioclase; Bi-biotite; Mt-magnetite; Ser-sericite; Chl-chlorite

接触,但界线两侧岩石强烈变形(图7),两个岩组黑云变粒岩的差别难以辨别。

在柳杭地区(图2),柳行岩组上段和下段都十分发育。与七星台地区相比,该区柳行岩组下段斜长角闪岩枕状构造不发育,而发育块状斜长角闪岩和变质超基性岩,斜长角闪岩中局部存在杏仁构造。变质辉长岩更为发育。柳行岩组上段主要由变质砾岩和黑云变粒岩组成。变质砾岩厚度通常为几到数十米,北西-南东向延伸几到十余公里。变质砾岩中夹有黑云变粒岩,为碎屑沉积岩或长英质火山-碎屑沉积岩(图8a-c)。砾石大小存在变化,主要为TTG、二长花岗岩和细粒长英质火山岩。砾岩中夹有长英质变质火山沉积岩(图8d)。在夹于砾岩的碎屑沉积岩中,见清楚的粒级层,其指向与地层正向层序一致(图8e)。在柳杭地区,无直接的年代学资料确定柳行岩组下段的形成时代,但它们被2.6Ga富山奥长花岗岩岩体侵入,很可能形成于新太古代早期。与之不同,根据变质砾岩和相关岩石定年研究,柳行岩组的上段形成于新太古代晚期。在盘车沟地区,柳行岩组上段仅由黑云变粒岩组成(S0721,图8f),厚度约100m。它们与山草峪岩组的接触界线为几米厚的含砾黑云变粒岩。在

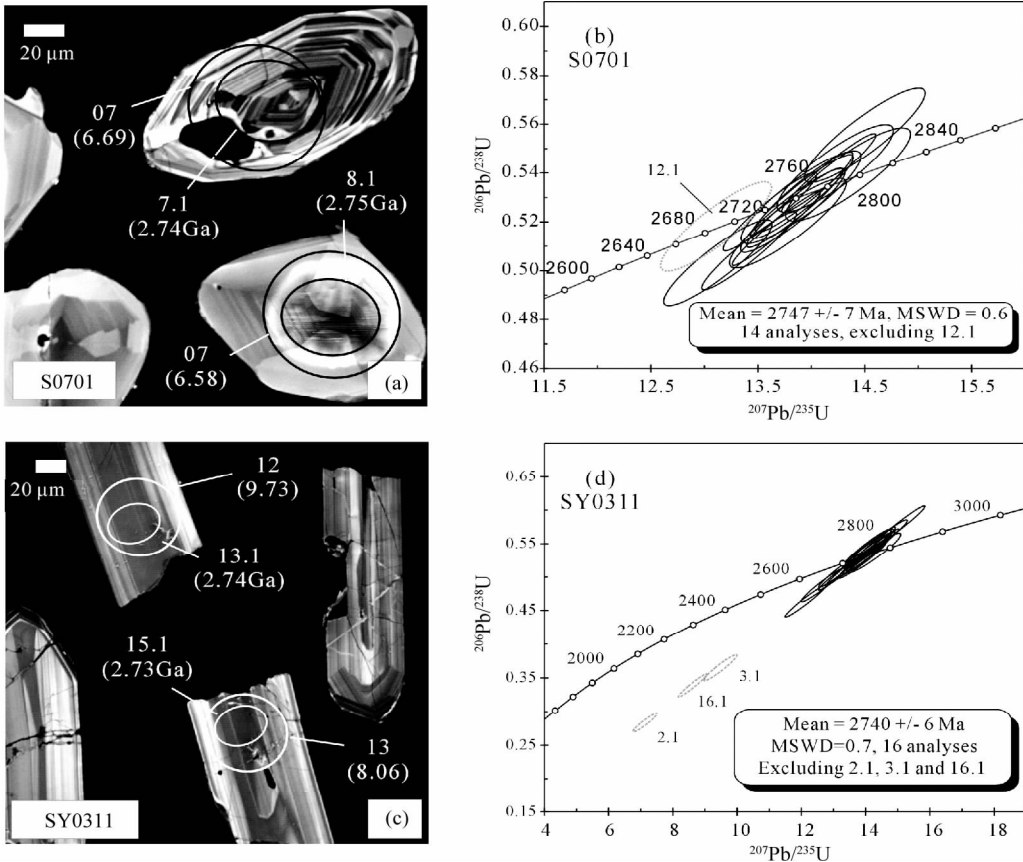


图 12 雁翎关岩组表壳岩系和相关岩石的锆石阴极发光图像和年龄

(a,b)-黑云角闪变粒岩(S0701),雁翎关;(c,d)-石英闪长岩(SY0311),石河庄

Fig. 12 Cathodoluminescence images and concordia diagrams for SHRIMP U-Pb data of zircons from supracrustal rocks of the Yanglingguan Formation, western Shandong

(a, b)-fine-grained biotite hornblende gneiss (S0701), Yanglingguan; (c, d)-quartz diorite (SY0311), Shihezhuang

含砾黑云变粒岩的两侧均为黑云变粒岩,岩石都显示出强烈变形,相互间无明显区别。其关系与七星台地区所见柳行岩组下段和山草峪岩组的接触关系类似。

3.2 孟家屯岩组

孟家屯岩组以残留体断续分布于新泰市孟家庄-山头一带,呈北西-南东向展布,在新太古代TTG花岗质岩石中呈规模不等的包体出现(图9)。在岩石组合、变质变形等方面与泰山岩群都有很大区别。孟家屯岩组由不同类型石英岩(以石榴石石英岩为主,图10a)、黑云母石英片岩、黑云母片岩、黑云斜长片麻岩(图10b)、斜长角闪岩、浅粒岩和变粒岩组成。一些斜长角闪岩可能为变质的辉长岩(图10c)。岩石普遍遭受强烈变形,奥长花岗质岩石与表壳岩平行化(图10d)。表壳岩形成于新太古代早期(杜利林等,2003,2005;陆松年等,2008)。

3.3 济宁岩群

济宁岩群分布于济宁市颜店地区,以存在较大规模变质

沉积铁矿(条带状铁建造,BIF)而闻名。济宁岩群在地表未有出露,被寒武纪长清群及更年轻地层角度不整合覆盖于地表1000m之下,南北长约20km,东西宽约10km。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)。济宁岩群主要由钙质、硅质、铁质成份的绢云千枚岩、绿泥绢云千枚岩、板岩和磁(赤)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。铁矿层引起大规模的磁异常,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,推测济宁岩群浅变质岩存在褶皱构造。未见济宁岩群与新太古代泰山岩群的接触关系,但是,济宁岩群磁异常方向为NNE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,认为济宁岩群不整合于泰山岩群之上(曹国权,1996)。根据岩石组合、变质变形、Rb-Sr和K-Ar同位素年代学资料,曾认为济宁岩群形成时代为古元古代(曹国权,1996)。王伟等(2010a)对济宁岩群变质长英质火山岩(S0844-2)进行锆石

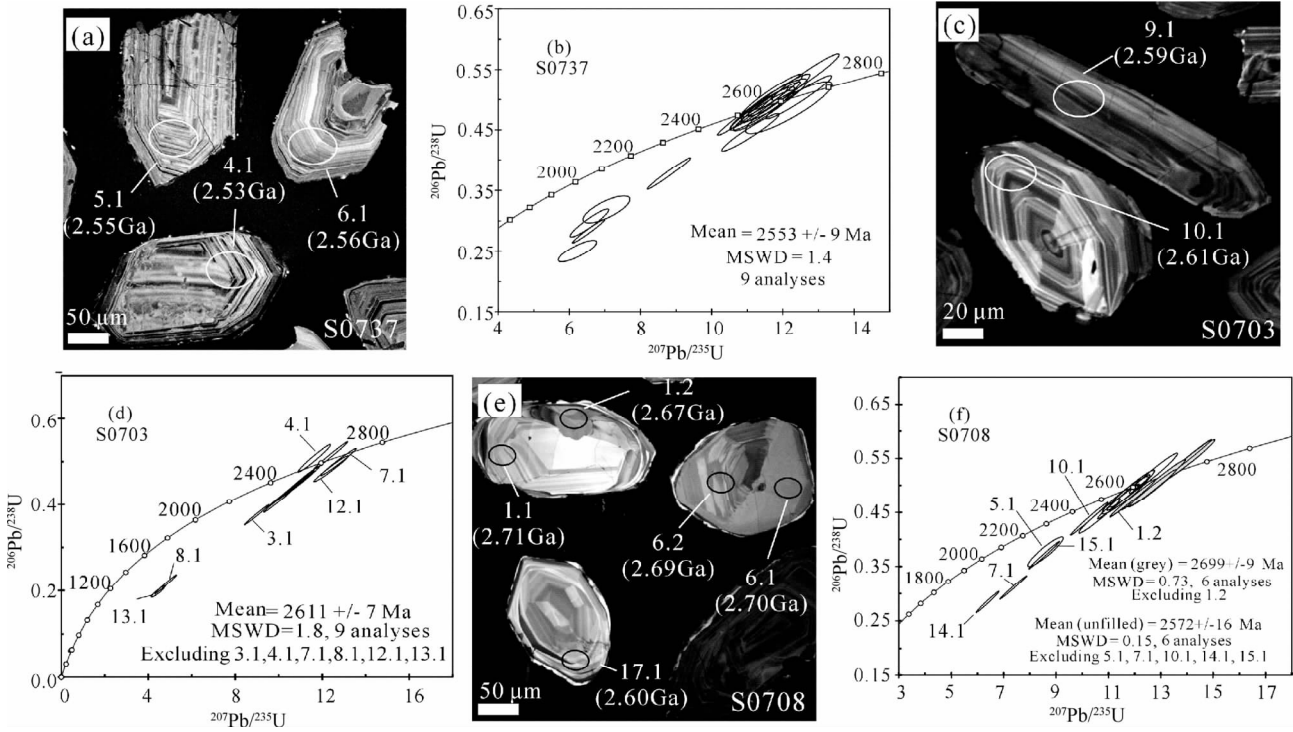


图 13 山草峪岩组表壳岩系岩石的锆石阴极发光图像和年龄

(a, b)-黑云变粒岩 (S0737), 七星台; (c, d)-含石榴石黑云变粒岩 (S0703), 雁翎关南; (e, f)-含电气石黑云变粒岩 (S0708), 枣庄东

Fig. 13 Cathodoluminescence images and concordia diagrams for SHRIMP U-Pb data of zircons from supracrustal rocks of the Shancaoyu Formation, western Shandong

(a, b)-fine-grained biotite gneiss (S0737), Qixingtai; (c, d)-fine-grained garnet-bearing biotite gneiss (S0703), south of Yanglingguan; (e, f)-fine-grained tourmaline-bearing biotite gneiss (S0708), east of Zhaozhuang

SHRIMP U-Pb 定年, 获得加权平均年龄为 2561 ± 24 Ma (MSWD = 1.6), 认为它们形成于新太古代晚期。

为了进一步验证这一结论, 对济宁岩群开展了新的同位素定年。样品 ZK402 为变质酸性火山岩, 由长石、石英、黑云母斑晶和基质组成, 火山结构十分清楚 (图 11a-c)。样品 S0844-4 为片岩, 主要由斜长石、石英、帘石、方解石和绢云母、绿泥石组成, 变质原岩为碎屑沉积岩。绢云母呈集体定向分布, 有细粒不透明矿物相伴分布 (图 11d)。

4 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

对鲁西地区表壳岩系及相关岩石进行过大量锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 以下对主要结果作简要介绍。

4.1 泰山岩群

4.1.1 雁翎关岩组

黑云角闪变粒岩 (S0701) 样品采自雁翎关地区雁翎关岩组北部, 与新甫山奥长花岗岩接触带不到 20m。黑云角闪变粒岩厚约 1m, 与斜长角闪岩互层 (图 3f), 变质原岩为安山质火山岩。多数锆石为等轴状, 在 CL 图像中有不明显环带

(图 12a)。还有一些呈短柱状, 有明显的振荡环带。两种锆石的组成和年龄一致。15 个数据点分析, 给出的 U 含量和 Th/U 比值分别为 $19 \times 10^{-6} \sim 71 \times 10^{-6}$ 和 $0.37 \sim 0.87$ 。分析结果大都集中在谐和线附近, 除去数据点 12.1, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2747 ± 7 Ma (MSWD = 0.6) (图 12b)。解释为火山岩形成时代。

石英闪长岩 (SY0311) 样品采自雁翎关地区切割雁翎关岩组变质超基性岩的岩脉 (图 4c)。利用锆石 TIMS U-Pb 方法曾获得岩石年龄为 2.72Ga (曹国权, 1996)。锆石为柱状, 具板状环带 (图 12c)。19 个数据点分析, U 含量和 Th/U 比值分别为 $31 \times 10^{-6} \sim 414 \times 10^{-6}$ 和 $0.28 \sim 1.14$ 。除 2.1, 3.1 和 16.1 外, 其余数据点给出 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2740 ± 6 Ma (MSWD = 0.7) (图 12d), 代表了石英闪长岩侵入年龄, 也限制了雁翎关岩组的形成时代。

4.1.2 山草峪岩组

黑云变粒岩 (S0737) 样品采自七星台地区, 岩石显示很好的沉积构造 (图 5c)。锆石为柱状或短柱状, 具振荡环带 (图 13a)。17 个数据点分析, 数据点大多位于或接近谐和线, 部分显示强烈铅丢失 (图 13b)。9 个位于或接近谐和线的数据点给出 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 2553 ± 9 Ma (MSWD = 1.4), 代表了物源区岩石形成时代。

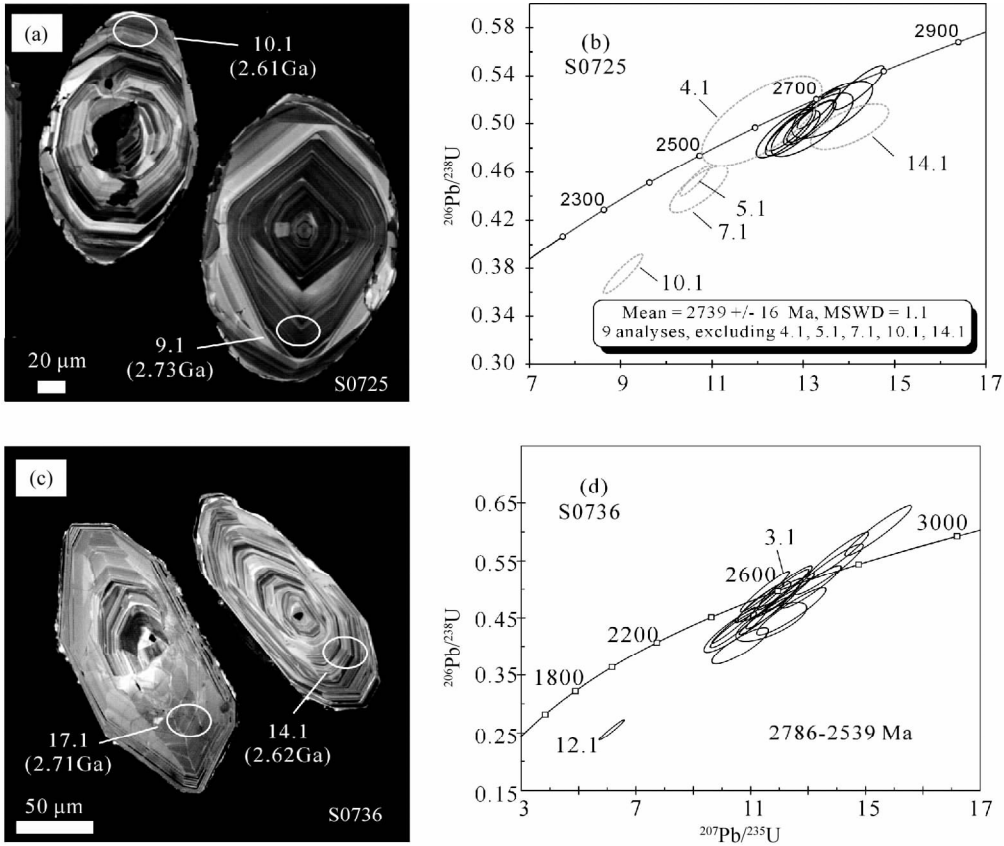


图 14 柳行岩组下段表壳岩系岩石的锆石阴极发光图像和年龄

(a, b)-黑云变粒岩(S0725), 大王庄; (c, d)-角闪黑云变粒岩(S0736), 七星台

Fig. 14 Cathodoluminescence images and concordia diagrams for SHRIMP U-Pb data of zircons from supracrustal rocks in lower part of the Liuhang Formation, western Shandong

(a, b)-fine-grained biotite gneiss (S0725), Dawangzhuang; (c, d)-fine-grained biotite hornblende gneiss (S0736), Qixingtai

含石榴石黑云变粒岩(S0703)样品采自雁翎关岩组和山草峪岩组的界线附近,岩石显示强烈变形(图5g)。锆石为柱状,部分在两端存在一定的圆滑,具震荡环带(图13c)。15个数据点分析,大多显示现代铅丢失,9个靠近谐和线的数据点给出 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 $2611 \pm 7\text{Ma}$ (MSWD = 1.8)(图13d)。2个数据点给出 $\sim 2.7\text{Ga}$ 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄(数据点7.1和12.1),一个反向分布数据点给出2.52Ga的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄(数据点4.1)。反映了物源区岩石的时代特征。

含电气石黑云变粒岩(S0708)枣庄附近存在较大规模的黑云变粒岩表壳岩,赋存BIF。黑云变粒岩具层状构造(图5e)。碎屑锆石呈柱状或短柱状,震荡环带,部分发生重结晶(图13e)。18个数据点分析,存在两组年龄, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄分别为 $2699 \pm 9\text{Ma}$ (6个数据点,MSWD = 0.73)和 $2572 \pm 16\text{Ma}$ (6个数据点,MSWD = 0.15)(图13f),解释为沉积岩物源区岩石时代。

4.1.3 柳行岩组

柳行岩组分为柳行岩组下段和柳行岩组上段。下段包

括黑云变粒岩(S0725)和角闪黑云变粒岩(S0736);上段包括长英质变质火山-沉积岩(TS09104)和砾岩中的基质(SY0320)。

黑云变粒岩(S0725)样品采自大王庄地区柳行岩组下段,该剖面出露的主要岩石为斜长角闪岩和黑云变粒岩。由于变形强烈,黑云变粒岩的变质原岩难以确定。锆石为短柱状,在CL图像中可见振荡环带(图14a)。13个数据点分析,U含量和Th/U比值分别为 $25 \times 10^{-6} \sim 291 \times 10^{-6}$ 和0.25~0.95。其中9个靠近谐和线的数据点给出 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2739 \pm 16\text{Ma}$ (MSWD = 1.1)(图14b)。一些锆石存在阴极发光较强的边,可能是变质成因。

角闪黑云变粒岩(S0736)样品采自七星台地区柳行岩组下段。碎屑锆石为柱状或短柱状,震荡环带(图14c)。一些锆石显示出重结晶特征,这种现象在该区 $\sim 2.7\text{Ga}$ 的TTG花岗质岩石也可见到。12个数据点分析,位于或靠近谐和线分布,但年龄存在很大变化,从2539Ma到2786Ma(图14d)。被解释为物源区岩石时代组成的不均匀性。

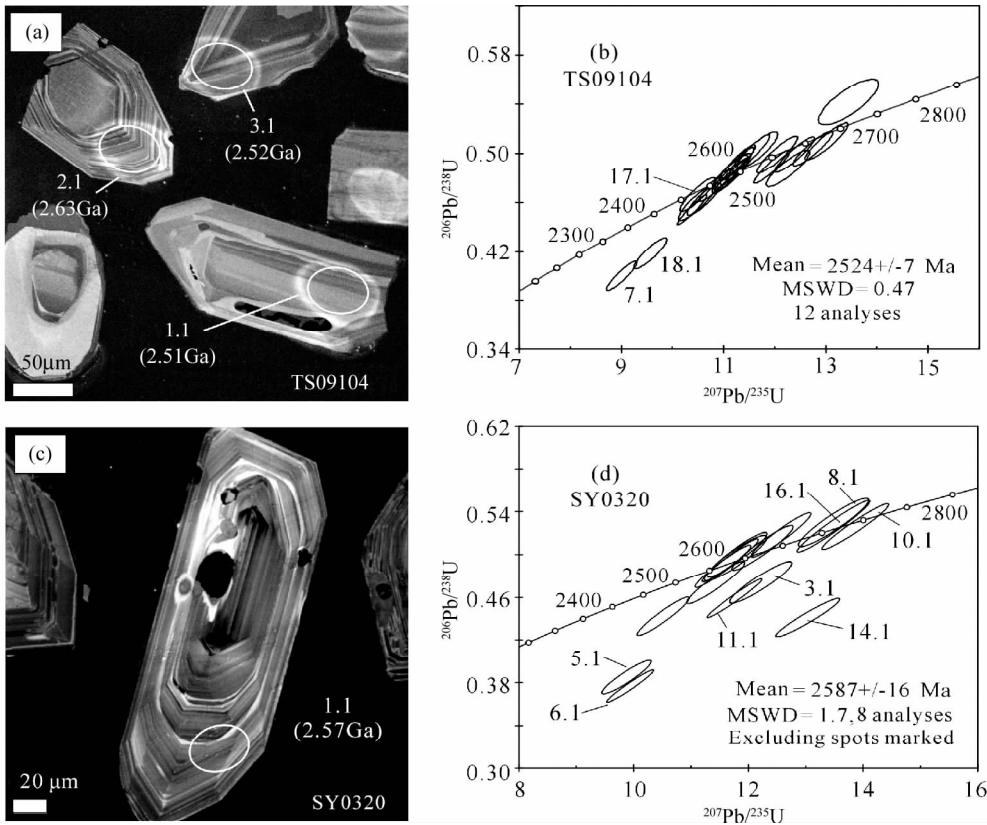


图 15 柳行岩组上段表壳岩系岩石的锆石阴极发光图像和年龄

(a,b)-长英质变质火山-沉积岩 (TS09104), 柳行北西; (c,d)-砾岩中的基质 (SY0320), 柳行

Fig. 15 Cathodoluminescence images and concordia diagrams for SHRIMP U-Pb data of zircons from supracrustal rocks in upper part of the Liuhang Formation, western Shandong

(a, b)-felsic metavolcano-sedimentary rock (TS09104) interlayered with metaconglomerate, northwest of Liuhang; (c, d)-matrix (SY0320) of metaconglomerate, Liuhang

长英质变质火山-沉积岩 (TS09104) 样品采自柳杭北西柳行岩组上段砾岩中的夹层 (图 8d)。锆石呈柱状或短柱状, 具震荡环带和板状环带 (图 15a)。22 个数据点分析, 其中 12 个位于谐和线上的数据点给出 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 $2524 \pm 7\text{Ma}$ (MSWD = 0.47) (图 15b), 解释为长英质火山作用的时期。其余数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2.7 ~ 2.6Ga, 为碎屑锆石年龄。

砾岩中的基质 (SY0320) 样品采自柳行地区柳行岩组上段砾岩中的基质。锆石呈柱状, 一些有很好的柱面和锥面, 震荡环带发育 (图 15c)。分析了 16 个数据点, 年龄存在大的变化, 其中 8 个数据点给出 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 $2587 \pm 16\text{Ma}$ (MSWD = 1.7) (图 15d)。7 个数据点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于 2.75 ~ 2.7Ga 之间。大的年龄变化与其碎屑成因相吻合。

4.2 孟家屯岩组

4.2.1 石榴石石英岩 (M08)

锆石呈椭圆状, 具核-边结构 (图 16a)。核部碎屑锆石具

震荡环带, 原为岩浆成因, 一些碎屑锆石具有良好的晶形。边部锆石结构不规则, 发光性强, 为典型的变质锆石。碎屑锆石 Th/U 比值为 0.6 ~ 1.1, 9 个数据点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2717 \pm 33\text{Ma}$ 。变质锆石 Th/U 比值通常小于 0.1, 7 个数据点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2616 \pm 19\text{Ma}$ (图 16b) (杜利林等, 2003)。陆松年等 (2008) 对类似岩石的锆石定年, 也得出同样的结果。

4.2.2 含十字石石榴黑云片岩 (D242-2)

锆石特征与样品 M08 的类似, 呈椭圆状, 具核-边结构 (图 16c)。核部碎屑锆石具震荡环带。边部锆石具不规则环带, 为变质/深熔成因。碎屑锆石 Th/U 比值通常大于 0.5, 12 个数据点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2742 \pm 23\text{Ma}$ 。变质锆石 Th/U 比值小于 0.1, 9 个数据点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2642 \pm 23\text{Ma}$ (图 16d) (杜利林等, 2003)。

4.3 济宁岩群

4.3.1 长英质变质火山岩 (ZK402)

锆石呈柱状, 具密集环带 (图 17a, b)。一些锆石包裹有

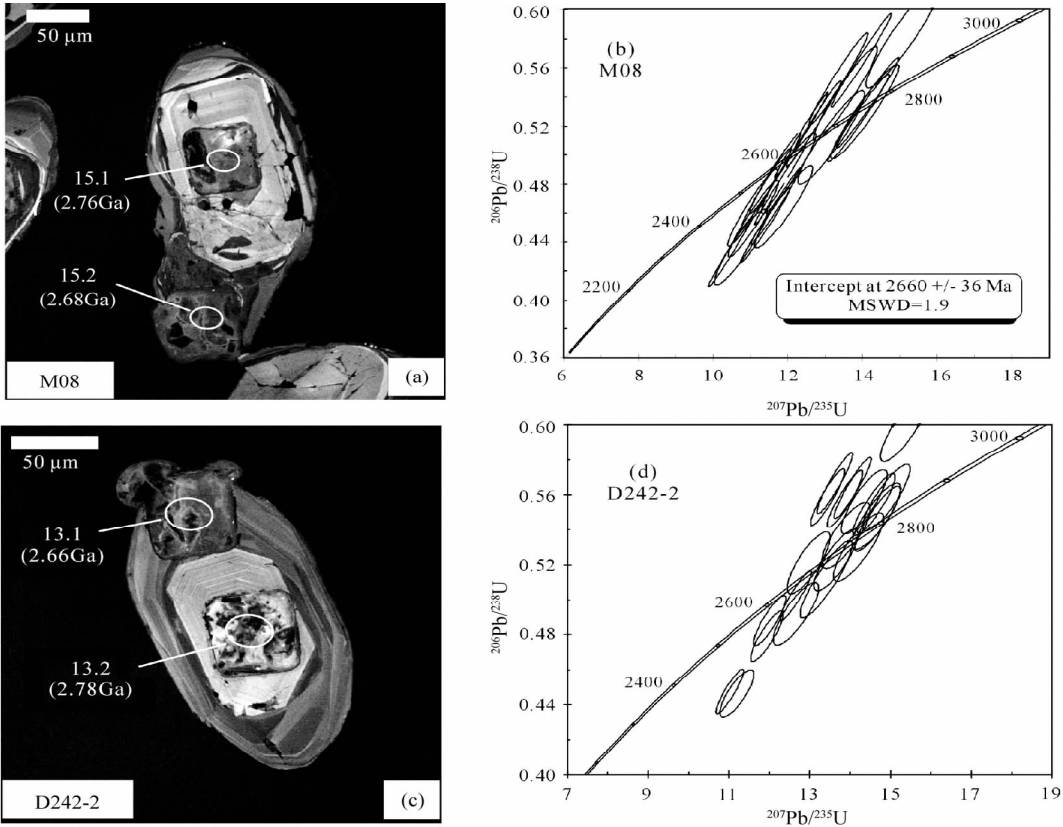


图 16 孟家屯地区孟家屯岩组表壳岩系岩石的锆石阴极发光图像和年龄(据杜利林等,2003)

(a,b)-石榴石石英岩(M08);(c,d)-含十字石石榴黑云片岩(D242-2)

Fig. 16 Cathodoluminescence images and concordia diagrams for SHRIMP U-Pb data of zircons from supracrustal rocks of the Mengjiatun Formation in the Mengjiatun area, western Shandong (after Du *et al.*, 2003)

(a, b)-garnet quartzite (M08); (c, d)-staurolite-bearing garnet biotite gneiss (D242-2)

老的锆石(图 17a),为源区残余锆石或岩浆作用过程中的捕获锆石。14 个岩浆锆石数据点分析,除 15.1 外($\text{Th}/\text{U} = 0.01$),其余数据点 U 含量和 Th/U 比值分别为 $157 \times 10^{-6} \sim 328 \times 10^{-6}$ 和 $0.28 \sim 0.79$ 。部分数据点显示不同程度铅丢失。靠近谐和线的 7 个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2522 \pm 7\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.0$) (图 18a),作为岩浆锆石结晶时代。2 个核部锆石数据点分析(4.1C, 11.1C),年龄分别为 2.60Ga 和 2.67Ga, Th/U 比值为 $0.52 \sim 0.52$ 。

4.3.2 变质碎屑沉积岩(S0844-4)

锆石呈柱状,具板状环带或封闭震荡环带(图 17c, d)。一些锆石呈不规则状,由于边部仍有其它矿物与之接触,这种不规则形态是锆石本身的,而不是锆石分选过程中造成的。14 个数据点分析,U 含量和 Th/U 比值分别为 $60 \times 10^{-6} \sim 134 \times 10^{-6}$ 和 $0.37 \sim 0.84$ 。2 个数据点的年龄为 $\sim 2.7\text{Ga}$,其余 12 个数据点集中分布在 $\sim 2.6\text{Ga}$ (图 18b)。

5 讨论

新太古代花岗质岩石分布的太古宙克拉通地区,通常都

有同时代的或时代稍早一些的表壳岩系相伴生,后者一般以很小的规模在“花岗岩海”中存在。在华北克拉通,如固阳、恒山、五台、阜平、登封、辽西、辽北、冀东、鞍山等地,都有新太古代晚期花岗质岩石和时代相同或稍早的表壳岩系存在(刘树文等, 2007; 杨崇辉等, 2004, 2009; 沈其韩等, 2005; 万渝生等, 2005, 2009; 刘富等, 2009; 周艳艳等, 2009; Kröner *et al.*, 1988, 1998, 2005, 2006; Zhao *et al.*, 2002, 2008; Wilde *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2011; Grant *et al.*, 2009; Nutman *et al.*, 2011; Zhai *et al.*, 2005; Zhai and Santosh, 2011; Jian *et al.*, 2012)。全球范围内,与华北克拉通类似而发育新太古代晚期构造岩浆热事件的地区不多,只有印度南部、南极和格陵兰等(Condie, 2000; Jayananda *et al.*, 2000, 2006; Chadwick *et al.*, 2000, 2007; Clark *et al.*, 2009; Condie *et al.*, 2009)。其它许多克拉通发育新太古代早期构造岩浆热事件,导致大规模的表壳岩系和花岗质岩石形成(Kröner *et al.*, 1999; Bateman *et al.*, 2001; Percival *et al.*, 2001; Polat and Kerrich, 2002; Polat, 2009; Tomlinson *et al.*, 2002; Bibikova *et al.*, 2005; Thrane, 2002; Poujol *et al.*, 2003; Hofmann *et al.*, 2004; Rino *et al.*, 2004;

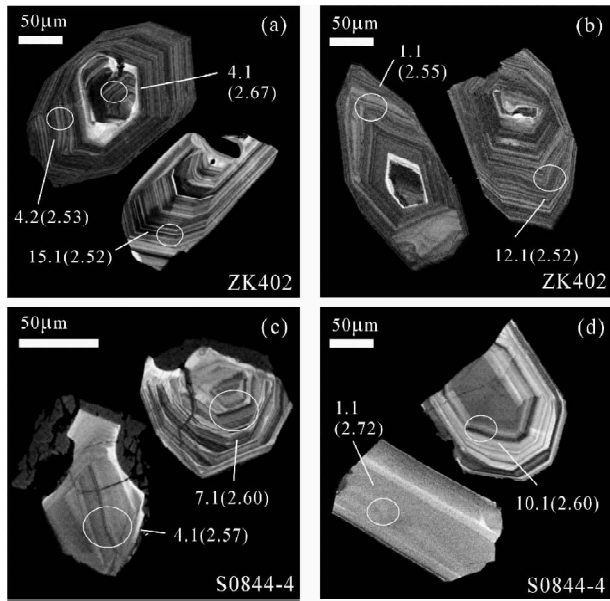


图 17 济宁地区济宁岩群表壳岩系岩石的锆石阴极发光图像

(a,b)-长英质变质火山岩 (ZK402); (c,d)-变质碎屑沉积岩 (S0844-4)

Fig. 17 Cathodoluminescence images for SHRIMP U-Pb data of zircons from supracrustal rocks of the Jining Group in the Jining area, western Shandong

(a,b)-felsic meta-volcanic rock (ZK402); (c,d)-metasedimentary rock (S0844-4)

Samsonov *et al.*, 2005; Halla, 2005; Rasmussen *et al.*, 2005; Sandeman *et al.*, 2006; Steenfelt *et al.*, 2005).

Jahn *et al.* (1988) 将泰山杂岩的斜长角闪岩和 TTG 岩石样品放在一起获得 Sm-Nd 等时线年龄 $2.70 \pm 0.04\text{Ga}$, 作

为泰山岩群形成时代的最好估计, 这和雁翎关地区切过雁翎关岩组的石英闪长岩脉的锆石 TIMS U-Pb 年龄 (2.72Ga) 一致 (曹国权, 1996)。新的锆石年代学研究表明, 在雁翎关地区, 雁翎关岩组角闪黑云变粒岩 (S0701) 的岩浆锆石年龄为 2.75Ga, 切割雁翎关岩组的石英闪长岩 (SY0311) 锆石年龄为 2.74Ga。在七星台地区, 切割柳行岩组下段斜长角闪岩的奥长花岗岩的岩浆锆石年龄为 2.71Ga, 限定了其最小形成年龄。雁翎关和七星台地区的泰山岩群雁翎关岩组和柳行岩组下段形成时代为新太古代早期 (2.70 ~ 2.75Ga)。在柳行地区, 柳行岩组下段被 2.6Ga 富山奥长花岗岩侵入 (万渝生等, 未发表资料), 它们的岩石组合与雁翎关岩组十分类似, 推测也形成于新太古代早期。在孟家屯地区, 孟家屯岩组表壳岩系存在于 2.70Ga 条带状英闪长质片麻岩之中, 两者之间很可能为侵入关系, 变质沉积岩碎屑锆石和变质锆石的年龄分别为 2.70 ~ 2.75Ga 和 2.60 ~ 2.64Ga, 孟家屯岩组形成时间为 ~2.7Ga, 遭受 2.60 ~ 2.62Ga 变质作用改造 (杜利林等, 2003, 2005; 陆松年等, 2008)。2.60 ~ 2.62Ga 变质作用是鲁西地区重要的构造热事件。

在七星台-大王庄地区, 对柳行岩组下段黑云变粒岩锆石定年, 样品 S0725 的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2.74Ga (图 14a, b), 由于岩石遭受强烈变形, 实际上难以确定它们的原岩类型, 如果锆石为碎屑成因, 其年龄并不代表表壳岩形成时代, 尽管岩石中仅有单一年龄的锆石存在。采自七星台地区柳行岩组下段的角闪变粒岩样品 S0736 的锆石年龄变化于 2.54 ~ 2.79Ga 之间 (图 14c, d), 变质原岩很可能为碎屑沉积岩。

在柳杭地区, 柳行岩组上段存在几层砾岩。夹于砾岩中的变质火山沉积岩的最年轻锆石年龄为 2.524Ga (TS09104, 图 15a, b), 砾岩中的基质最年轻锆石年龄为 2.59Ga, 此外还

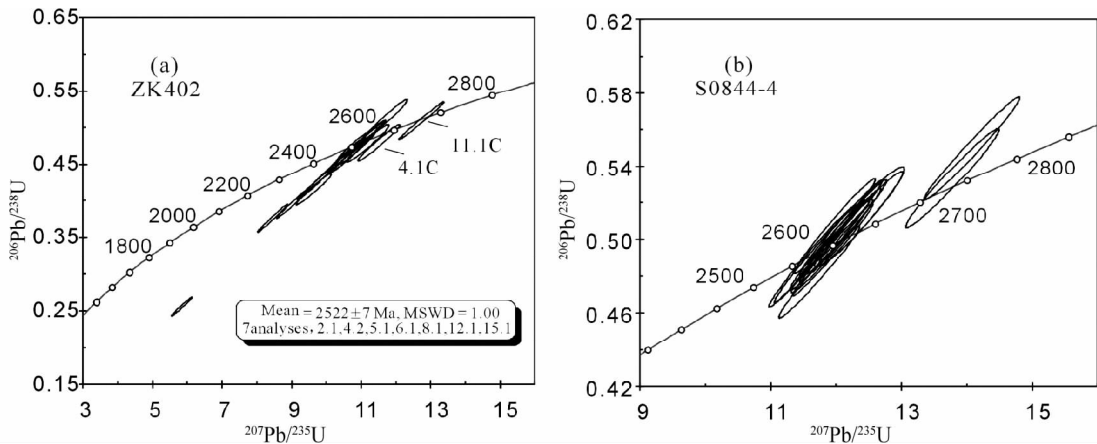


图 18 济宁地区济宁岩群表壳岩系岩石的锆石年龄

(a)-长英质变质火山岩 (ZK402); (b)-变质碎屑沉积岩 (S0844-4)

Fig. 18 Concordia diagrams for SHRIMP U-Pb data of zircons from supracrustal rocks of the Jining Group in the Jining area, western Shandong

(a)-felsic meta-volcanic rock (ZK402); (b)-metasedimentary rock (S0844-4)

有一些 ~2.7Ga 锆石存在(SY0320,图 15c, d)。这些资料表明砾岩形成于新太古代晚期。这一结论看来也适用于柳杭地区的整个柳行岩组上段。

作为泰山岩群的重要组成部分,山草峪岩组一直都认为与雁翎关岩组和柳行岩组形成时代相同。在研究初始阶段,我们获得山草峪岩组一些变质碎屑沉积岩样品的锆石年龄明显小于 2.7Ga。由于这涉及到鲁西地区是否存在时代不同的表壳岩系及 BIF 铁矿形成时代,我们对山草峪岩组进行了广泛的锆石年代学研究,主要对象是黑云变粒岩。一些情况下,由于遭受强烈变质变形,黑云变粒岩原岩类型难以确定。一些样品来自沉积构造清楚的岩石露头,但是,即使在这样的情况下,碎屑也可能来自同时代的火山物质。如果锆石为火山成因或来自同时代的火山岩,其年龄应解释为火山岩的形成时代,也就是表壳岩系的形成时代。如果锆石为碎屑成因,最年轻的碎屑锆石年龄限制了沉积岩的最大沉积时代。不论那种情况,表壳岩系形成时代都小于或等于锆石年龄。由于单个数据点的测定误差往往较大,使用最年轻锆石的加权平均年龄作为沉积时代限制。

十余个山草峪岩组岩石样品锆石定年,年龄变化于 2.525 ~ 2.75Ga 之间,大多数在 2.53 ~ 2.55Ga 之间。另一方面,山草峪岩组被 ~2.5Ga 二长花岗岩侵入(例如雌山岩体,图 2)。因此山草峪岩组沉积时代为新太古代晚期,而不是以往认为的新太古代早期(曹国权,1996)。长期认为山草峪岩组与雁翎关岩组和柳行岩组时代相同,一个重要原因是认为它们之间是整合接触关系。然而,在所有可观察到接触关系的地方,山草峪岩组和雁翎关岩组及山草峪岩组和柳行岩组之间几乎都为强烈变形,应为构造接触关系。在七星台大王庄岩带和盘车沟地区,柳行岩组和山草峪岩组相互之间以含有少量砾石的黑云变粒岩层作为界线,两者黑云变粒岩十分类似,且柳行岩组下段斜长角闪岩和黑云变粒岩界线附近变形强烈。在柳杭北西 4km 的西南峪,山草峪岩组黑云变粒岩和柳杭岩组下段斜长角闪岩之间也可见到类似的接触关系。在距柳行岩组下段约 15m 处,也存在一层含砾黑云变粒岩。我们认为柳行岩组下段的黑云变粒岩形成于新太古代晚期,以斜长角闪岩和黑云变粒岩的不同岩性作为柳行岩组下段和山草峪岩组的界线更为合理。

基于野外地质、岩石组成和锆石特征,山草峪岩组和柳行岩组上段用于定年的表壳岩大多为碎屑沉积成因,少数为火山成因。碎屑锆石通常呈自形的柱状,锥面清楚,表明碎屑物质来自近源。所有样品的锆石年龄变化于 2.54 ~ 2.75Ga 之间,但不同样品的锆石年龄分布模式存在变化。一些样品只存在大于或小于 2.6Ga 的锆石,另一些样品存在不同时代的锆石。新太古代晚期表壳岩系锆石在年龄分布模式上与该区新太古代深成侵入岩锆石的类似(图 19),但前者通常仅含有大于 2.525Ga 的锆石,小于 2.525Ga 碎屑锆石具有铅丢失或年龄误差很大。新太古代晚期表壳岩系岩石存在三个可能的物源区。1) 新太古代晚期侵入岩,包括花

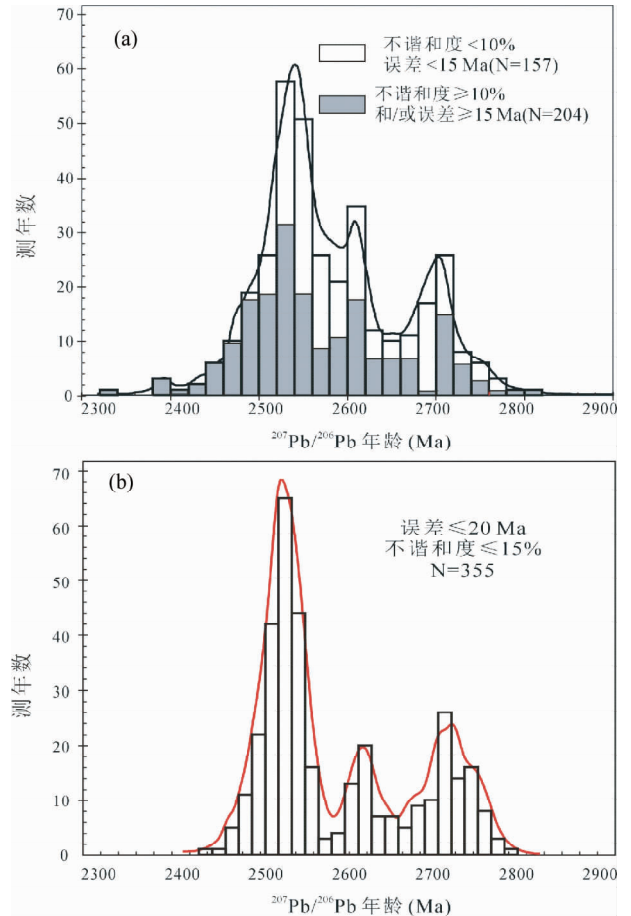


图 19 鲁西地区新太古代锆石年龄直方图(据 Wan *et al.*, 2010, 2012)

(a)-新太古代晚期表壳岩系岩石,数据主要来自山草峪岩组和柳行岩组上段的变质沉积岩和长英质变质火山岩;(b)-新太古代深成侵入岩

Fig. 19 Age distribution patterns for zircons from late Neoproterozoic supracrustal and intrusive rocks in western Shandong (after Wan *et al.*, 2010, 2012)

(a)-metasedimentary and felsic metavolcanic rocks, mainly from Shancaoyu Formation and upper part of Liuhang Formation; (b)-intrusive rocks of Neoproterozoic

岗质岩石和辉长岩等,它们主要分布于 C 带,是碎屑物质的主要供应物源区。2) 新太古代早期变质基底,提供大于 2.6Ga 碎屑物质,它们主要分布于 B 带。缺乏大于 2.8Ga 碎屑锆石表明该区变质基底更古老岩石稀少。3) 新太古代晚期火山岩,它们与同时代深成侵入岩时代相同。这种相似性在北美苏比利尔花岗岩绿岩带也存在。在那里,与火山岩同时代的深成侵入岩与火山岩在地球化学组成上类似。

济宁岩群长期被认为形成于古元古代(曹国权,1996)。对中酸性变质火山岩岩浆锆石定年,王伟等(2010a)认为济宁岩群形成于新太古代晚期。这一认识得到新的锆石年代学研究的支持。长英质变质火山岩样品(ZK402)岩浆锆石年

表 1 鲁西早前寒武纪表壳岩划分

Table 1 Division of early supracrustal rocks in the western Shandong area

早期划分(曹国权,1996)		本文划分	
早元古代晚期 (~1.80Ga)	济宁岩群	新太古代晚期 (2.52~2.55Ga)	山草峪-济宁岩系,包括山草峪岩组、柳行岩组上段和济宁岩群
晚太古代早期 (~2.80Ga)	泰山岩群,包括雁翎关岩组、山草峪岩组和柳行岩组	新太古代早期 (2.70~2.75Ga)	雁翎关-柳杭岩系,包括雁翎关岩组、柳行岩组下段大部分和孟家屯岩组

龄为 2.52 ± 0.01 Ga,比王伟等(2010a)获得的长英质变质火山岩样品(S0844-2)岩浆锆石年龄(2.56 ± 0.02 Ga)精度更高,更能代表济宁岩群的形成时代。所以,济宁岩群形成于新太古代晚期,而不是以往认为的古元古代。变质碎屑沉积岩样品(S0844-4)与王伟等(2010a)获得的类似样品(S0844-1)定年结果比较,两者都存在~2.7Ga和~2.6Ga碎屑锆石,但其比例明显不同,表明沉积过程中物源区发生了变化。鲁西地区新太古代早期变质基底由~2.7Ga和~2.6Ga岩石组成,虽然它们与济宁岩群的接触关系还不清楚,但无疑为济宁岩群碎屑沉积岩的主要物源区。

根据新的研究,鲁西地区表壳岩系形成时代可重新划分如下(表1)。

(1)新太古代早期(2.70~2.75Ga)表壳岩系。包括雁翎关岩组、柳行岩组下段(但不包括七星台-大王庄地区的柳行岩组下段)和孟家屯岩组。它们主要分布于B带,被新太古代早期TTG花岗质岩石切割。主要由斜长角闪岩、变质超基性岩组成。暂时把其称之为雁翎关-柳杭岩系。孟家屯岩组以存在成熟度较高的碎屑沉积岩为特征,形成时代可能比雁翎关岩组和柳行岩组下段更晚一些。

(2)新太古代晚期(2.525~2.56Ga)表壳岩系。包括山草峪岩组、柳行岩组上段(还包括七星台-大王庄地区的柳行岩组下段)和济宁岩群。它们在三个岩带都有分布,主要由黑云变粒岩、砾岩、BIF和长英质火山岩组成。我们暂时把其称之为山草峪-济宁岩系。原济宁岩群可能比山草峪岩组形成时代稍晚一些。

因此,鲁西地区存在新太古代早期和晚期表壳岩系,分别与新太古代早期和晚期花岗质岩石共生。这一现象在华北克拉通其它地区还未发现,全球范围内也十分少见。新太古代晚期表壳岩系原很可能不整合于新太古代早期基底之上,但是现所观察到接触关系都为构造接触。根据现有研究,新太古代晚期表壳岩系主要由变质沉积岩组成,缺乏斜长角闪岩和变质超基性岩。需开展进一步的野外和年代学研究,以确定鲁西地区新太古代晚期表壳岩系岩石组合及空间分布。

值得注意的是,在鲁西地区,原泰山岩群的BIF铁矿只存在于新太古代晚期表壳岩系中,而在新太古代早期表壳岩系中未发现。济宁岩群BIF形成于新太古代晚期,而不是古元古代。这与华北克拉通BIF主要形成于新太古代晚期的认识一致。山草峪岩组和柳行岩组上段,与BIF共生的岩石以黑云变粒岩为主,也存在砾岩、云母片岩、石英云母片岩等

变质沉积岩,角闪岩相变质。变质原岩以具粉砂岩或泥质粉砂岩为主,夹含铁硅质岩系,虽然长英质火山岩不发育,玄武质岩石和超基性岩稀少,但总体上仍为较活动的构造环境。济宁岩群与BIF共生的岩石主要为钙质、硅质、铁质成份的绢云千枚岩、绿泥绢云千枚岩、板岩和磁(赤)铁石英岩,存在变质中酸性火山熔岩-火山碎屑岩,低绿片岩相变质。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。与山草峪岩组和柳行岩组上段相比,其原岩沉积环境更为稳定。

如前所述,对于新太古代晚期华北克拉通的构造环境一直存在争议。主要有两个观点:岛弧岩浆作用和地幔柱作用。例如,作为华北中部带北段新太古代晚期重要岩片的恒山-五台-阜平杂岩,很多研究者认为它们形成于岛弧环境,虽然对于碰撞发生的具体时间还存在争议(Zhao *et al.*, 2002, 2005; Kröner *et al.*, 1998, 2005, 2006; Wilde *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2002);但也有一些作者认为新太古代末期强烈的岩浆作用和地幔柱作用有关(Zhao *et al.*, 1999a, b, 2001; Yang *et al.*, 2008)。

对于鲁西地区,我们更倾向于岛弧模型。主要理由如下:1)不同时代和组成的岩浆岩空间上存在分带性和不对称性;2)在新太古代晚期,时代稍老(2.525~2.56Ga)的岩石比时代稍晚(2.48~2.525Ga)的岩石遭受更强的变质变形;3)不同组成的岩浆岩都显示Nb-Ta亏损,显示了岛弧岩浆岩的组成特征;4)侵入作用和火山作用大致同时,侵入岩形成后被迅速抬升到地表,为新太古代晚期沉积盆地提供碎屑物质。有可能,山草峪岩组和柳行岩组上段BIF形成于碰撞拼合阶段,而济宁岩群BIF形成于碰撞拼合之后的伸展阶段。

6 结论

(1)鲁西花岗-绿岩带存在新太古代早期和晚期不同时代表壳岩系,它们在岩石组合、变质变形等方面存在明显区别。

(2)BIF形成时代为新太古代晚期,岩石组合包括原泰山岩群山草峪岩组和柳行岩组上段以及济宁岩群。

(3)在鲁西,新太古代晚期包括BIF在内的表壳岩系可能形成于岛弧形成演化的不同阶段。

致谢 研究过程中得到了杨崇辉研究员和杜利林研究员

的帮助,在此表示感谢。

References

- Bateman R, Costa S, Swe T and Lambert D. 2001. Archaean mafic magmatism in the Kalgoolie area of the Yilgarn Craton, Western Australia: A geochemical and Nd isotopic study of the petrogenetic and tectonic evolution of a greenstone belt. *Precambrian Research*, 108(1-2): 75-112
- Bibikova EV, Petrova A and Claesson S. 2005. The temporal evolution of sanukitoids in the Karelian Craton, Baltic Shield: An ion microprobe U-Th-Pb isotopic study of zircons. *Lithos*, 79(1-2): 129-145
- Cao GQ. 1996. Early Precambrian Geology of Western Shandong. Beijing: Geological Publishing House, 1-210 (in Chinese with English abstract)
- Chadwick B, Vasudev VN and Hegde GV. 2000. The Dharwar craton, southern India, interpreted as the result of Late Archaean oblique convergence. *Precambrian Research*, 99(1-2): 91-111
- Chadwick B, Vasudev VN, Hegde GV and Nutman AP. 2007. Structure and SHRIMP U/Pb zircon ages of granites adjacent to the Chitradurga Schist Belt: Implications for Neoproterozoic convergence in the Dharwar Craton, southern India. *Journal Geological Society of India*, 69(1): 5-24
- Cheng YQ, Sheng QH and Wang ZJ. 1982. Preliminary Study of the Metamorphosed Basic Volcano-Sedimentary Yanlinguan Formation of the Taishan Group of Xintai, Shandong. Beijing: Geological Publishing House, 1-84 (in Chinese with English abstract)
- Clark C, Collins AS, Timms NE, Kinny PD, Chetty TRK and Santosh M. 2009. SHRIMP U-Pb age constraints on magmatism and high-grade metamorphism in the Salem Block, southern India. *Gondwana Research*, 16(1): 27-36
- 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
- Du LL, Zhuang YX, Yang CH, Wan YS, Wang XS, Wang SJ and Zhang LF. 2003. Characters of zircons in the Mengjiatun Formation in Xintai of Shandong and their chronological significance. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 359-366 (in Chinese with English abstract)
- Du LL, Zhuang YX, Yang CH, Wan YS and Wang XS. 2005. SHRIMP U-Pb zircon chronology of fine-grained amphibolite in the Mengjiatun area, western Shandong. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(5): 429-434 (in Chinese with English abstract)
- Du LL, Yang CH, Guo JH, Wang W, Ren LD, Wan YS and Geng YS. 2010. The age of the base of the Paleoproterozoic Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating of basaltic andesite. *Chinese Science Bulletin*, 55(17): 1782-1789
- Du LL, Yang CH, Zhuang YX, Wei RZ, Wan YS, Ren LD and Hou KJ. 2010. Hf isotopic compositions of zircons from 2.7 Ga metasedimentary rocks and biotite-plagioclase gneiss in the Mengjiatun Formation Complex, western Shandong Province. *Acta Geologica Sinica*, 84: 991-1001 (in Chinese with English abstract)
- Grant ML, Wilde SA, Wu FY and Yang JH. 2009. The application of zircon cathodoluminescence imaging, Th-U-Pb chemistry and U-Pb ages in interpreting discrete magmatic and high-grade metamorphic events in the North China Craton at the Archean/Proterozoic boundary. *Chemical Geology*, 261(1-2): 155-171
- Halla J. 2005. Late Archean high-Mg granitoids (sanukitoids) in the southern Karelian domain, eastern Finland: Pb and Nd isotopic constraints on crust-mantle interactions. *Lithos*, 79(1-2): 161-178
- 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. *Land and Resources in Shandong Province*, 24(2): 3-8 (in Chinese with English abstract)
- Hofmann A, Dirks PHGM and Jelsma HA. 2004. Clastic sedimentation in a late Archean accretionary terrain, Midlands greenstone belt, Zimbabwe. *Precambrian Research*, 129(1-2): 47-69
- Hou GT, Liu YL and Li JH. 2006. Evidence for ~1.8 Ga extension of the Eastern Block of the North China Craton from SHRIMP U-Pb dating of mafic dyke swarms in Shandong Province. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(4): 392-401
- Jahn BM, Auvray B, Shen QH, Liu DY, Zhang ZQ, Dong YJ, Ye XJ, Zhang QZ, Cornichet J and Mace J. 1988. Archean crustal evolution in China: The Taishan complex, and evidence for juvenile crustal addition from long-term depleted mantle. *Precambrian Research*, 38(4): 381-403
- Jayananda M, Moyen JF, Martin H, Peucat JJ, Auvray B and Mahabaleswar B. 2000. Late Archean (2550-2520 Ma) juvenile magmatism in the Eastern Dharwar Craton, Southern India: Constraints from geochronology, Nd-Sr isotopes and whole rock geochemistry. *Precambrian Research*, 99(3-4): 225-254
- Jayananda M, Chardon D, Peucat JJ and Capdevila R. 2006. 2.61 Ga potassic granites and crustal reworking in the western Dharwar craton, southern India: Tectonic, geochronologic and geochemical constraints. *Precambrian Research*, 150(1-2): 1-26
- Jian P, Kröner A, Windley BF, Zhang Q, Zhang W and Zhang LQ. 2012. Episodic mantle melting-crustal reworking in the Late Neoproterozoic of the northwestern North China Craton: Zircon ages of magmatic and metamorphic rocks from the Yinshan Block. *Precambrian Research*, doi: 10.1016/j.precamres.2012.03.002
- Kröner A, Compston W, Zhang GW, Guo AL and Todt W. 1988. Age and tectonic setting of Late Archean greenstone-gneiss terrain in Henan Province, China, as revealed by single grain zircon dating. *Geology*, 16(3): 211-215
- Kröner A, Cui WY, Wang SQ, Wang CQ and Nemchin AA. 1998. Single zircon ages from high-grade rocks of the Jianping Complex, Liaoning Province, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16(5-6): 519-532
- Kröner A, Jaeckel P, Brandl G, Nemchin AA and Pidgeon RT. 1999. Single zircon ages for granitoid gneisses in the Central Zone of the Limpopo Belt, Southern Africa and geodynamic significance. *Precambrian Research*, 93(4): 299-337
- Kröner A, Wilde SA, Li JH and Wang KY. 2005. Age and evolution of a Late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 577-595
- Kröner A, Wilde SA, Zhao GC, O'Brien PJ, Sun M, Liu DY, Wan YS, Liu SW and Guo JH. 2006. Zircon geochronology and metamorphic evolution of mafic dykes in the Hengshan Complex of northern China: Evidence for Late Paleoproterozoic extension and subsequent high-pressure metamorphism in the North China Craton. *Precambrian Research*, 146(1-2): 45-67
- Li JH, Kusky TM and Huang X. 2002. Neoproterozoic podiform chromitites and harzburgite tectonite in ophiolitic melange, North China Craton, remnants of Archean oceanic mantle. *GSA Today*, 12(7): 4-11
- Liu F, Guo JH, Lu XP and Diwu CY. 2009. Crustal growth at ~2.5 Ga in the North China Craton: Evidence from whole-rock Nd and zircon Hf isotopes in the Huaian gneiss terrane. *Chinese Science Bulletin*, 54(24): 4704-4713
- Liu SW, Pan YM, Xie QL, Zhang J and Li QG. 2004. Archean geodynamics in the Central Zone, North China Craton: Constraints

- from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutai complexes. *Precambrian Research*, 130(1-4): 229-249
- Liu SW, Lv YJ, Feng YG, Zhang C, Tian W, Yan QR and Liu XM. 2007. Geology and zircon U-Pb isotopic chronology of Dantazi complex, northern Hebei. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 484-497 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW, Santosh M, Wang W, Bai X and Yang PT. 2011. Zircon U-Pb chronology of the Jianping Complex: Implications for the Precambrian crustal evolution history of the northern margin of North China Craton. *Gondwana Research*, 20(1): 48-63
- 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)
- Nutman AP, Wan YS, Du LL, Friend CRL, Dong CY, Xie HQ, Wang W, Sun HY and Liu DY. 2011. Multistage Late Neoproterozoic crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei. *Precambrian Research*, 189(1-2): 43-65
- Percival JA, Stern RA and Skulski T. 2001. Crustal growth through successive arc magmatism: Reconnaissance U-Pb SHRIMP data from the northeastern Superior Province, Canada. *Precambrian Research*, 109(3-4): 203-238
- Polat A and Kerrich R. 2002. Nd-isotope systematics of ~ 2.7 Ga adakites, magnesian andesites, and arc basalts, Superior Province: Evidence for shallow crustal recycling at Archean subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 202(2): 345-360
- Polat A, Li JH, Fryer B, Kusky T, Gagnon J and Zhang S. 2006. Geochemical characteristics of the Neoproterozoic (2800-2700 Ma) Taishan greenstone belt, North China Craton: Evidence for plume-craton interaction. *Chemical Geology*, 230(1-2): 60-87
- Polat A. 2009. The geochemistry of Neoproterozoic (ca. 2700 Ma) tholeiitic basalts, transitional to alkaline basalts, and gabbros, Wawa Subprovince, Canada: Implications for petrogenetic and geodynamic processes. *Precambrian Research*, 168(1-2): 83-105
- Poujol M, Robb LJ, Anhaeusser CR and Gericke B. 2003. A review of the geochronological constraints on the evolution of the Kaapvaal Craton, South Africa. *Precambrian Research*, 127(1-3): 181-213
- Rasmussen B, Blake TS and Fletcher IR. 2005. U-Pb zircon age constraints on the Hammersley spherule beds: Evidence for a single 2.63 Ga Jeerinah-Carawine impact ejecta layer. *Geology*, 33(9): 725-728
- Rino S, Komiya T, Windley BF, Katayama I, Motoki A and Hirata T. 2004. Major episodic increases of continental crustal growth determined from zircon ages of river sands: Implications for mantle overturns in the Early Precambrian. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 146(1-2): 369-394
- Samsonov AV, Bogina MM, Bibikova EV, Petrova AY and Shchipansky AA. 2005. The relationship between adakitic, calc-alkaline volcanic rocks and TTGs: Implications for the tectonic setting of the Karelian greenstone belts, Baltic Shield. *Lithos*, 79(1-2): 83-106
- Sandeman HA, Hanmer S, Tella S, Armitage AA, Davis WJ and Ryan JJ. 2006. Petrogenesis of Neoproterozoic volcanic rocks of the MacQuoid supracrustal belt: A back-arc setting for the northwestern Hearne subdomain, western Churchill Province, Canada. *Precambrian Research*, 144(1-2): 140-165
- Shen QH, Song B, Xu HF, Geng YS and Shen K. 2004. Emplacement and metamorphism ages of the Caiyu and Dashan igneous bodies, Yishui County, Shandong Province: Zircon SHRIMP chronology. *Geological Review*, 50(3): 275-284 (in Chinese with English abstract)
- Shen QH, Geng YS, Song B and Wan YS. 2005. New information from the surface outcrops and deep crust of Archean rocks of the North China and Yangtze blocks, and Qinling-Dabie Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 79(5): 616-627 (in Chinese with English abstract)
- Shen QH, Zhao ZR, Song B and Song HX. 2007. Geology, petrochemistry and SHRIMP zircon U-Pb dating of the Mashan and Xueshan granitoids in Yishui County, Shandong Province. *Geological Review*, 53(2): 180-186 (in Chinese with English abstract)
- Steenfelt A, Garde AA and Moyen JF. 2005. Mantle wedge involvement in the petrogenesis of Archean grey gneisses in West Greenland. *Lithos*, 79(1-2): 207-228
- Thrane K. 2002. Relationships between Archean and Palaeoproterozoic crystalline basement complexes in the southern part of the East Greenland Caledonides: An ion microprobe study. *Precambrian Research*, 113(1-2): 19-42
- Tomlinson KY, Davis DW, Percival JA, Hughes DJ and Thurston PC. 2002. Mafic to felsic magmatism and crustal recycling in the Obonga Lake greenstone belt, western Superior Province: Evidence from geochemistry, Nd isotopes and U-Pb geochronology. *Precambrian Research*, 114(3-4): 295-325
- Wan YS, Song B, Yang C and Liu DY. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of Archean rocks from the Fushun-Qingyuan area, Liaoning Province and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 78-87 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Liu DY, Wang SY, Zhao X, Dong CY, Zhou HY, Yin XY, Yang CX and Gao LZ. 2009. Early Precambrian crustal evolution in the Dengfeng area, Henan Province (eastern China): Constraints from geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon dating. *Acta Geologica Sinica*, 83(7): 982-999 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Liu DY, Wang SJ, Dong CY, Yang EX, Wang W, Zhou HY, Ning ZG, Du LL, Yin XY, Xie HQ and Ma MZ. 2010. Juvenile magmatism and crustal recycling at the end of the Neoproterozoic in western Shandong province, north China Craton: Evidence from SHRIMP zircon dating. *American Journal of Science*, 310(10): 1503-1552
- Wan YS, Liu DY, Wang SJ, Yang EX, Wang W, Dong CY, Zhou HY, Du LL, Yang YH and Diwu CR. 2011. ~ 2.7 Ga 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, Wang SJ, Liu DY, Wang W, Kröner A, Dong CY, Yang EX, Zhou HY, Xie HQ and Ma MZ. 2012. Redefinition of depositional ages of Neoproterozoic supracrustal rocks in western Shandong Province, China: SHRIMP U-Pb zircon dating. *Gondwana Research*, 21(4): 768-784
- Wang SJ, Wan YS, Zhang CJ, Yang EX, Song ZY, Wang LF and Zhang FZ. 2008. Major advance development gained in studying Early Cambrian geology in Luxi. *Shandong Geology*, 24(1): 10-20 (in Chinese with English abstract)
- Wang W, Yang EX, Wang SJ, Du LL, Xie HQ, Dong CY and Wan YS. 2009. Petrography of the metamorphic pillow basalt and SHRIMP U-Pb dating of zircons from the intruding Trondhjemitic in Archean Taishan "Group", western Shandong. *Geological Review*, 55(5): 737-744 (in Chinese with English abstract)
- Wang W, Wang SJ, Liu DY, Li PY, Dong CY, Xie HQ, Ma MZ and Wan YS. 2010a. Formation age of the Neoproterozoic Jining Group (banded iron formation) in the western Shandong Province: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1175-1181 (in Chinese with English abstract)
- Wang W, Wang SJ, Dong CY, Yang EX, Du LL, Xie HQ, Ma MZ and Wan YS. 2010b. SHRIMP U-Pb dating of zircons from Neoproterozoic crustal derived granites in the Lushan area, Shandong, China. *Geological Bulletin of China*, 29(7): 993-1000 (in Chinese with English abstract)

- Wang YJ, Zhao GC, Fan WM, Peng TP, Sun LH and Xia XP. 2007. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic mafic dykes from western Shandong Province: Implications for back-arc basin magmatism in the Eastern Block, North China Craton. *Precambrian Research*, 154(1-2): 107-124
- Wang YJ, Zhang YZ, Zhao GC, Fan WM, Xia XP, Zhang FF and Zhang AM. 2009. Zircon U-Pb geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Taishan sanukitoids (Shandong): Implications for Neoproterozoic subduction in the Eastern Block, North China Craton. *Precambrian Research*, 174(3-4): 273-286
- Wilde SA, Cawood PA, Wang KY and Nemchin AA. 2005. Granitoid evolution in the Late Archean Wutai Complex, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 597-613
- Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wan YS, Liu DY and Song B. 1998. Archean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of China-Korea Paleo-Continent. Beijing: Geological Publishing House, 1-212 (in Chinese with English abstract)
- Yang CH, Du LL, Wan YS and Liu ZX. 2004. SHRIMP zircon U-Pb chronology of tonalitic gneiss in Banqiaoou area, Pingshan County, Hebei Province. *Geological Journal of China Universities*, 10(4): 514-522 (in Chinese with English abstract)
- Yang CH, Du LL, Ren LD, Wan YS, Song HX, Yuan ZL and Wang SY. 2009. SHRIMP U-Pb ages and stratigraphic comparison of Angou Group, on the southern margin of North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1853-1862 (in Chinese with English abstract)
- Yang EX, Tao YB, Zhang XP, Zhu JT, Wan YS and Wang SJ. 2008. SHRIMP zircon dating of granitic gravel from Neoproterozoic Yanlingguan Formation in western Shandong and its geological significance. *Geochimica*, 37(5): 481-487 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Wu FY, Wilde SA and Zhao GC. 2008. Petrogenesis and geodynamics of Late Archean magmatism in eastern Hebei, eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Hf isotopic evidence. *Precambrian Research*, 167(1-2): 125-149
- Zhai MG, Guo JH and Liu WJ. 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 547-561
- Zhai MG and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6-25
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Lu LZ. 1999a. Tectonothermal history of the basement rocks in the western zone of the North China Craton and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 310(1-4): 37-53
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Lu LZ. 1999b. Thermal evolution of two textural types of mafic granulites in the North China craton: Evidence for both mantle plume and collisional tectonics. *Geological Magazine*, 136(3): 223-240
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107(1-2): 45-73
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping complex: Implications for Late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *American Journal of Science*, 302(3): 191-226
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177-202
- Zhao GC, Wilde SA, Sun M, Guo JH, Kröner A, Li SZ, Li XP and Zhang J. 2008. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Huai' an complex: Constraints on Late Archean to Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the Trans-North China Orogen. *American Journal of Science*, 308(3): 270-303
- Zhao ZR, Song HX, Shen QH and Song B. 2008. Geological and geochemical characteristics and SHRIMP U-Pb zircon dating of the Yinglingshan granite and its xenoliths in Yishui County, Shandong, China. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1551-1558 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZR, Song HX, Shen QH and Song B. 2009a. Geochemistry and age of a metapelite rock in the Yishui Complex, Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1863-1871 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZR, Song HX, Shen QH and Song B. 2009b. The Petrogeochemical characters and SHRIMP U-Pb zircon ages of meta-mafic rocks from the Yishui Complex, in Yishui County, Shandong Province. *Geological Review*, 55(2): 286-299 (in Chinese with English abstract)
- Zhuang YX, Xu HL, Wang XS, Xu HF, Zhang FZ and Ren ZK. 1995. New advances in the study of Neoproterozoic-Paleoproterozoic crustal evolution in the Taishan area. *Regional Geology of China*, 55(4): 360-366 (in Chinese with English abstract)
- Zhuang YX, Wang XS, Xu HL, Ren ZK, Zhang FZ and Zhang XM. 1997. Main geological events and crustal evolution in Early Precambrian of Taishan region. *Acta Petrologica Sinica*, 13(3): 313-330 (in Chinese with English abstract)
- Zhou YY, Zhao TP, Xue LW, Wang SY and Gao JF. 2009. Petrological, geochemical and chronological constraints for the origin and geological significance of Neoproterozoic TTG gneiss in the Songshan area, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 331-347 (in Chinese with English abstract)

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, 1-193
- 程裕淇, 沈其韩, 王泽九. 1982. 山东太古代雁翎关变质火山-沉积岩. 北京: 地质出版社, 1-84
- 杜利林, 庄育勋, 杨崇辉, 万渝生, 王新社, 王世进, 张连峰. 2003. 山东新泰孟家屯岩组锆石特征及其年代学意义. *地质学报*, 77(3): 359-366
- 杜利林, 庄育勋, 杨崇辉, 万渝生, 王新社. 2005. 鲁西孟家屯一种细粒斜长角闪岩的锆石 SHRIMP 年代学. *地球学报*, 26(5): 429-434
- 杜利林, 杨崇辉, 庄育勋, 韦汝征, 万渝生, 任留东, 侯可军. 2010. 鲁西新泰孟家屯 2.7Ga 变质沉积岩与黑云斜长片麻岩锆石 Hf 同位素特征. *地质学报*, 84(7): 991-1001
- 韩玉珍, 王世进, 李培远. 2008. 济宁颜店铁矿地质特征及济宁岩群含矿性研究. *山东国土资源*, 24(2): 3-8
- 刘富, 郭敬辉, 路孝平, 第五春荣. 2009. 华北克拉通 2.5Ga 地壳生长事件的 Nd-Hf 同位素证据: 以怀安片麻岩地体为例. *科学通报*, 54(17): 2517-2526
- 刘树文, 吕勇军, 凤永刚, 张臣, 田伟, 闫全人, 柳小明. 2007. 冀北单塔子杂岩的地质学和锆石 U-Pb 年代学. *高校地质学报*, 13(3): 484-497
- 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
- 沈其韩, 宋彪, 徐惠芬, 耿元生, 沈昆. 2004. 山东沂水太古宙紫岭和大山岩体 SHRIMP 锆石年代学. *地质论评*, 50(3): 275-284
- 沈其韩, 耿元生, 宋彪, 万渝生. 2005. 华北和扬子陆块及秦岭-大别

- 造山带地表和深部太古宙基底的新信息. 地质学报, 79(5): 616-627
- 沈其韩, 赵子然, 宋彪, 宋会侠. 2007. 山东沂水新太古代马山和雪山岩体的地质、岩石化学特征和 SHRIMP 锆石年代学研究. 地质论评, 53(2): 180-186
- 万渝生, 宋彪, 杨淳, 刘敦一. 2005. 辽宁抚顺-清原地区太古宙岩石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 地质学报, 79(1): 78-87
- 万渝生, 刘敦一, 王世炎, 赵逊, 董春艳, 周红英, 殷小艳, 杨长秀, 高林志. 2009. 登封地区早前寒武纪地壳演化——地球化学和锆石 SHRIMP U-Pb 年代学制约. 地质学报, 83(7): 982-999
- 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地质研究新进展. 山东国土资源, 24(1): 10-20
- 王伟, 杨恩秀, 王世进, 杜利林, 颜炳强, 董春艳, 万渝生. 2009. 鲁西泰山岩群变质枕状玄武岩岩相学和侵入的奥长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学. 地质论评, 55(5): 737-744
- 王伟, 王世进, 刘敦一, 李培远, 董春艳, 颜炳强, 马铭株, 万渝生. 2010a. 鲁西新太古代济宁群含铁岩系形成时代: SHRIMP U-Pb 锆石定年. 岩石学报, 26(4): 1175-1181
- 王伟, 王世进, 董春艳, 杨恩秀, 杜利林, 颜炳强, 马铭株, 万渝生. 2010b. 山东鲁山地区新太古代壳源花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 地质通报, 29(7): 993-1000
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 万渝生, 刘敦一, 宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 1-212
- 杨崇辉, 杜利林, 万渝生, 刘增效. 2004. 河北平山英云闪长质片麻岩锆石 SHRIMP 年代学. 高校地质学报, 10(4): 514-522
- 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 万渝生, 宋会侠, 原振雷, 王世炎. 2009. 华北克拉通南缘安沟群的 SHRIMP 年龄及地层对比. 岩石学报, 25(8): 1853-1862
- 杨恩秀, 陶有兵, 张新平, 朱继托, 万渝生, 王世进. 2008. 鲁西地区新太古界雁翎关组中花岗质“砾石” SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及地质意义. 地球化学, 37(5): 481-487
- 赵子然, 宋会侠, 沈其韩, 宋彪. 2008. 山东沂水地区英灵山花岗岩及其捕虏体的地质、岩石地球化学特征和锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 地质通报, 27(9): 1551-1558
- 赵子然, 宋会侠, 沈其韩, 宋彪. 2009a. 沂水杂岩中变泥沙质岩石的岩石化学特征及年代. 岩石学报, 25(8): 1863-1871
- 赵子然, 宋会侠, 沈其韩, 宋彪. 2009b. 山东沂水杂岩中变基性岩的岩石地球化学特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 地质论评, 55(2): 286-299
- 庄育勋, 徐洪林, 王新社, 徐惠芬, 张富中, 任志康. 1995. 泰山地区新太古代-古元古代地壳演化研究的新进展. 中国区域地质, 55(4): 360-366
- 庄育勋, 王新社, 徐洪林, 任志康, 张富中, 张锡明. 1997. 泰山地区早前寒武纪主要地质事件与陆壳演化. 岩石学报, 13(3): 313-330
- 周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 王世炎, 高剑峰. 2009. 河南嵩山地区新太古代 TTG 质片麻岩的成因及其地质意义: 来自岩石学、地球化学及同位素年代学的制约. 岩石学报, 25(2): 331-347