中国科学: 地球科学 2016 年 第 46 卷 第 7 期: 949 ~ 962
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

评 述

鲁西太古宙表壳岩的成因及其对地壳演化的制约

王伟[①*], 翟明国[②], M. SANTOSH[③④]

① 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
② 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
③ Centre for Tectonics, Resources and Exploration, Department of Earth Sciences, University of Adelaide, SA 5005, Australia;
④ 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083
* E-mail: wuchangyuww@sina.com

收稿日期: 2015-04-23; 接受日期: 2016-02-18; 网络版发表日期: 2016-06-28
国家自然科学基金重点项目(批准号: 41430210)、国家自然科学基金青年基金项目(批准号: 41302156)、国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2012CB416606)和中国地质科学院地质研究所基础科研项目(编号: J1508)资助

摘要 绿岩带是主要形成于太古宙的表壳岩系, 下部由大量超基性-基性火山岩构成, 上部中-酸性火山-沉积岩逐渐增加. 以绿岩带为代表的太古宙表壳岩系占克拉通总体的~30%, 记录了早期地球岩浆活动和表生环境的丰富信息, 是揭示地壳形成和演化规律的重要研究对象. 鲁西是华北克拉通太古宙表壳岩保留较好的地区之一, 其主体形成于~2.7 和~2.5Ga 两个时期, 早期表壳岩由泰山岩群下部变科马提岩-玄武岩、少量变碎屑沉积岩和孟家屯岩组变基性岩和变碎屑沉积岩组成, 原岩记录的火山岩浆作用与地幔柱有关, 反映鲁西在新太古代早期地壳形成具有垂向增生的特点. 晚期表壳岩由泰山岩群上部变长英质火山沉积岩、变碎屑沉积岩与少量 BIF 和济宁岩群变长英质火山岩、变碎屑沉积岩和大规模 BIF 组成, 其中泰山岩群变火山沉积岩的地球化学组成与现代岛弧环境产出的钙碱性岩系类似, 指示鲁西的大陆地壳在新太古代晚期可能已发生一定规模的水平运动; 鲁西七星台地区变碎屑沉积岩和周围混合岩浅色脉体记录区域高角闪岩相变质-深熔作用的时代可限定在 2.53~2.50Ga, 与大规模壳熔花岗岩的形成时代一致, 标志鲁西在新太古代末已形成统一的陆壳基底.

关键词 表壳岩, 绿岩带, 泰山岩群, 鲁西, 华北克拉通

1 引言

表壳岩(系)是火山岩和沉积岩经区域变质作用后形成的变质岩的统称. 受变质变形和构造运动影响, 多数早前寒武纪表壳岩的原岩层序和构造特征会遭到不同程度的破坏, 但表壳岩的原岩在地表条件下形成, 可以保留原岩形成时地球表生环境、火山活动和沉积-构造格局的信息, 是研究地壳演化历史的重要对象. 绿岩带是一类主要形成于太古宙(3.8~2.5Ga), "卷入到花岗质深成岩'海洋'中的表壳岩系"(Condie, 1981), 具有平面上呈线状, 横剖面上呈盆地形的空间展布特征, 地表出露的岩层厚度约

中文引用格式: 王伟, 翟明国, Santosh M. 2016. 鲁西太古宙表壳岩的成因及其对地壳演化的制约. 中国科学: 地球科学, 46: 949–962, doi: 10.1360/N072015-00049
英文引用格式: Wang W, Zhai M G, Santosh M. 2016. The genesis of Archean supracrustal rocks in the western Shandong Province of North China Craton: Constraints on regional crustal evolution. Science China Earth Sciences, 59: 1583–1596, doi: 10.1007/s11430-016-5300-1

© 2016《中国科学》杂志社

10~20km(Gorman, 1978). 绿岩带下部以超镁铁质-镁铁质火山岩为主, 其中发育鬣刺结构的科马提岩是判断绿岩带最重要的标志之一, 向上超基性-基性火山岩减少, 中-酸性火山-沉积岩增加, 可形成低钾钙碱性系列或双峰式不同的火山岩组合, 这两种火山石组合可能反映不同的构造环境(Jackson等, 1994; Nelson, 1997; Wyman, 1999; Samsonov等, 2005). 绿岩带顶部通常会发育碎屑沉积岩和包括燧石岩、碳酸盐岩及条带状硅铁建造(BIF)在内的一种或多种化学沉积岩, 沉积岩与下部的火山岩构成绿岩带整体的火山-沉积旋回. 除整体旋回特征外, 绿岩带在不同层位还会出现小尺度的旋回, 如基性熔岩层的底部常出现薄层超基性岩, 上部又会出现少量中-酸性火山岩, 这种旋回性也是绿岩带的一个重要特征(Jackson等, 1994; 曹国权, 1996; Nesbitt等, 2009). 绿岩带通常仅遭受中-低级变质作用, 在局部能保留原岩的构造特征, 但整体构造变形复杂, 同一地区还可能出现多期绿岩带共生的现象, 因而绿岩带与周围花岗质深成岩的关系不容易确定(Barnes, 1985; Jackson等, 1994; Swager, 1997; Swager和Nelson, 1997; Ayer等, 2002; Trofimovs等, 2004). 同位素研究表明绿岩带与周围花岗质深成岩很可能存在成因联系, 地质学家常常将狭义"绿岩带"代表的表壳岩系与周围花岗质深成岩作为整体研究. Viljoen兄弟在1969年发表的南非巴布顿绿岩带研究专著中已开始使用"granite-greenstone belt/terrain"一词来描述这类在太古宙基底中由表壳岩和花岗质深成岩紧密共生组成的构造单元.

现代大陆地壳由克拉通和造山带组成. 克拉通是早前寒武纪形成的, 具有圈层结构且长期稳定块体中的陆壳部分, 全球绝大多数克拉通形成于太古宙, 在新太古代晚期逐渐稳定(翟明国, 2011). 一方面, 虽然克拉通的主体是TTG(奥长花岗岩(trondhjemite)、英云闪长岩(tonalite)、花岗闪长岩(granodiorite)的缩写)为代表的高钠低钾花岗质深成岩, 绿岩带只占克拉通总体的~30%(翟明国, 2013), 但这类表壳岩的形成在新太古代(2.8~2.5Ga)达到高峰, 与全球大规模地壳增生以及新太古代重大地质事件的记录相对应(Pidgeon和Wilde, 1990; Nutman等, 1996; Nelson, 1997; Nelson等, 1999; Condie, 2000), 且蕴含大量重要的金属矿产资源, 它们记录了早期地球的岩浆作用、表生环境和成矿过程的丰富信息. 另一方面, 太古宙克拉通由具有多期叠加紧闭褶皱构造或穹窿状构造的高级变质区和环绕高级区呈点状或带状分布的绿岩带构成, 而后者一般只经历中-低级变质作用, 这样的构造样式与现代板块构造体制下, 高级变质的造山带发育在刚性板块边界, 而板块内部变质变形相对较弱完全不同. 所以, 绿岩带的研究对探讨大陆地壳形成和稳定化过程具体不可替代的作用.

统计显示, 全球克拉通记录的太古宙岩浆作用峰期出现在2.8~2.7Ga(Condie等, 2009), 华北克拉通是全球最古老的克拉通之一(Liu等, 1992; Song等, 1996; Wan等, 2005; Wu等, 2008), 与北美、西澳和南非等克拉通相比, 一方面华北克拉通最强烈的构造-热事件出现在新太古代晚期~2.5Ga(Kröner等, 1998; Zhao等, 2002, 2008; Wilde等, 2005; 沈其韩等, 2005; 万渝生等, 2005; Yang等, 2008; Wang等, 2009; Wan等, 2010, 2012; 王伟等, 2010a; Nutman等, 2011; Liu等, 2012; Peng等, 2012; Wang等, 2013b), 该时期形成的TTG和花岗岩约占太古宙基底的80%(Zhao和Cawood, 2013), 除鲁西和胶东外, 虽然~2.7Ga的岩石在太行山、中条山和内蒙古等地也被陆续发现(Jahn等, 2008; 陆松年等, 2008; Wan等, 2011; 马铭株等, 2013; Yang等, 2013; Zhu等, 2013), 但与~2.5Ga的岩石相比, 整体规模较小; 另一方面由于强烈的变质变形, 华北克拉通许多太古宙表壳岩原岩的层序和构造特征被破坏, 典型绿岩带组合特别是科马提岩在华北克拉通的分布并不广泛. 鲁西在构造位置上处于华北克拉通东部, 总面积>10000km^2, 区内的泰山岩群保留了较为典型的绿岩带组合, 因此鲁西的太古宙基底也被称为"鲁西花岗绿岩带"(徐惠芬, 1992). 基于对表壳岩和各类深成岩的年龄及成因的研究, 多数学者认为鲁西大陆地壳主体的形成时间为~2.7Ga(Jahn等, 1988; 曹国权, 1996; 庄育勋等, 1997; Wan等, 2011), 但对~2.7和~2.5Ga两期构造-热事件性质的差别, 及其在区域地壳演化中的作用的相关研究还相对缺乏. 鲁西太古宙表壳岩系包括泰山岩群、孟家屯岩组、济宁岩群和沂水岩群(图1), 出露于郯庐断裂附近的沂水岩群准确的形成时代尚存争议(沈其韩等, 1993; 赵子然等, 2009), 暂不作对比和讨论. 后文将主要通过对比泰山岩群与孟家屯岩组和济宁岩群的时代关系、原岩性质以及变质-深熔记录, 结合重大地质事件, 进一步恢复鲁西新太古代的火山-沉积序列, 揭示区域地壳演化历史.

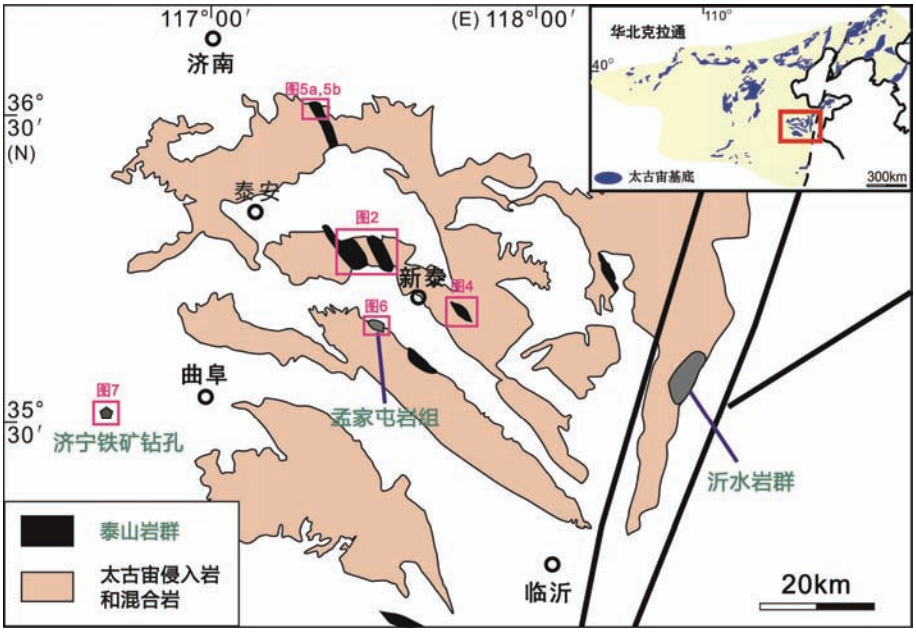

图 1　鲁西太古宙表壳岩分布图(据曹国权(1996)修改)

2　鲁西太古宙表壳岩的组成和时代

2.1　泰山岩群

泰山岩群主要受北西-南东向构造线控制, 广泛分布于鲁西中部, 在新泰雁翎关-柳杭和济南七星台出露的厚度最大. 以往公开发表的文献、书籍、区域地质志以及地质调查报告等资料都将泰山岩群分为雁翎关、山草峪和柳杭三个岩组(曹国权, 1996, 及其中参考文献), 但对各个岩组下的次级岩石地层单位的命名和划分尚未统一, 有“亚组”和“段”的不同命名方案(宋志勇等, 1994, 及其中参考文献), 本文仅按照所引用参考文献中采用的划分方案进行描述.

2.1.1　雁翎关岩组

雁翎关岩组由斜长角闪岩、透闪石-阳起石片岩和一些变粒岩及BIF组成, 原岩主体为超镁铁质-镁铁质熔岩. 在雁翎关一带总体出露宽度~1.2km(图2), 分为两个亚组, 代表两个由基性和超基性火山岩构成的喷发旋回(程裕淇等, 1982). 笔者认为具斑点状构造的斜长角闪岩, 可能是具杏仁构造的变质枕状玄武岩, 其中的石英与碳酸盐岩条带是岩枕内部眼眉构造变形的结果(图3a和b). 在天井峪村附近下亚组中的超基性岩层厚度达300m, 近百个岩石样品具有低SiO_2(41~50%)、高MgO(12~28%)和低稀土总量(<5ppm)的地球化学组成(程裕淇和徐惠芬, 1991). 虽然在天井峪一带未见有橄榄石或辉石组成的鬣刺构造, 但这些超基性岩的展布方式、岩性特征和地球化学性质表明其原岩为科马提岩(程裕淇等, 1982; 程裕淇和徐惠芬, 1991). 张荣隋等(2001)以及Cheng和Kusky(2007)报道了出露于苏家沟一带鬣刺构造保留较好的科马提岩, 张荣隋等(2001)将苏家沟地区的雁翎关岩组划分为一段和二段, 其中一段岩石主要包括大量变质超基性岩和一些变质安山岩-玄武岩, 科马提岩总体出露宽度20~50m, 由互层产出的块状和角砾状科马提岩和少量层状科马提岩构成(图3c和4), 它们的全岩地球化学特征可与全球其他克拉通内的典型科马提岩对比(Polat等, 2006), 二段岩石主体为变质玄武岩, 岩石特征与雁翎关地区类似. Wan等(2011)获得雁翎关地区超镁铁质-镁铁质熔岩中安山玄武岩夹层的SHRIMP锆石年龄为(2747±7)Ma, 表明超镁铁质-镁铁质熔岩的形成时代接近2.75Ga.

在济南七星台地区, 雁翎关岩组呈透镜体或包体状残留于太古宙二长花岗岩和混合岩中, 岩层出露宽度100~200m(图5a), 由底部斜长角闪岩夹透闪石片岩和顶部少量角闪变粒岩组成, 原岩为超基性-基性火山岩和安山质火山沉积岩, 大致相当于雁翎

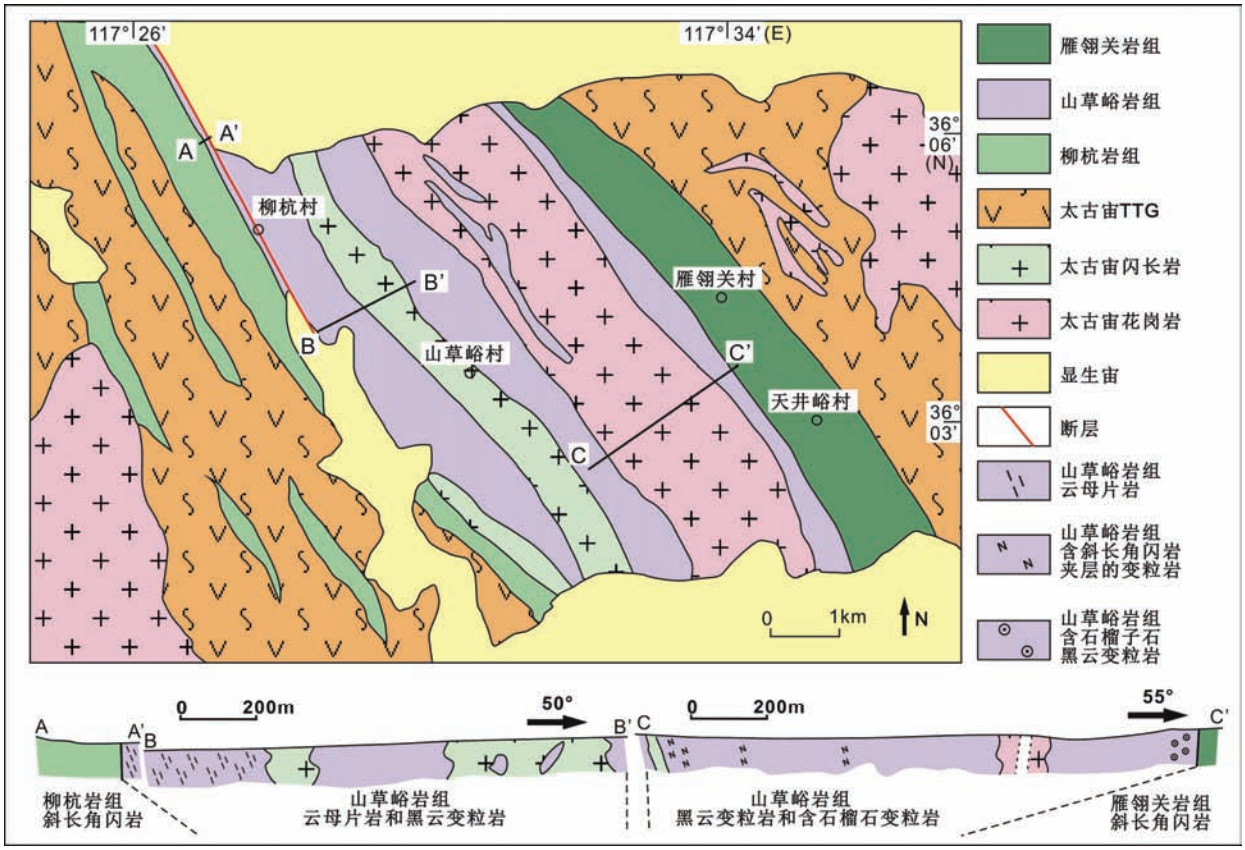

图 2　鲁西雁翎关地区地质简图(据 Wan 等(2012)修改)

关岩组上亚组. 在与斜长角闪岩的接触带附近, 角闪变粒岩变形强烈(图3d), Wan等(2012)获得角闪变粒岩形成时代为(2534±9)Ma, 结合野外产状, 雁翎关岩组上亚组顶部2.53Ga变安山质火山沉积岩与底部2.75Ga超镁铁质-镁铁质岩石应为构造接触关系.

2.1.2　柳杭岩组

柳杭岩组下部主要由斜长角闪岩和少量变粒岩及角闪石岩构成, 原岩主体为玄武质熔岩. 在七星台地区基性熔岩的出露宽度局部超过1.5km(图5a和b), 可识别出块状、层状、枕状等不同岩石构造(图3e~h), 枕状玄武岩层间还保留有若干层厚度为1~3m, 含较多金属硫化物的纹层状玄武质岩石(图3i), 它们是水下熔岩喷发间歇细火山碎屑在相对稳定环境中的沉积产物(Wang等, 2013a). 总体来看柳杭岩组下部与雁翎关岩组上亚组的岩石组合类似, 董一杰等曾提出柳杭岩组就是雁翎关岩组, 二者在空间上构成向斜的两翼(曹国权, 1996), 与雁翎关岩组相比, 柳杭岩组下部枕状玄武岩不发育眼眉和杏仁构造, 枕间胶结物为碳酸盐岩(图3i), 据此推断柳杭岩组下部的基性熔岩是在更深的水体中冷凝(与J Ayer和G Stott交流). 王伟等(2009)和Wang等(2013a)获得七星台地区侵入柳杭岩组下部变质层状和枕状玄武岩TTG质岩石的结晶年龄分别为(2707±9)和(2706±9)Ma, 间接证明柳杭岩组下部的玄武质熔岩形成时代不晚于2.71Ga.

柳杭岩组上部由角闪-黑云变粒岩夹薄层斜长角闪岩和变质砾岩及少量长英质片岩组成, 岩石组合与下部明显不同. 七星台地区柳杭岩组上部以角闪变粒岩为主, 在与下部斜长角闪岩接触带附近, 角闪变粒岩发生强烈的褶皱变形. Wang等(2013b)提出角闪-黑云变粒岩的原岩是安山-流纹质火山沉积岩, 角闪-黑云变粒岩主量元素间的协变关系和野外特征表明它们是同一系列钙碱质火山碎屑物质的沉积产物. 综合其他资料, 笔者认为柳杭岩组和雁翎关岩组上部形成于2.54~2.53Ga的变安山-英安质火山沉积岩与

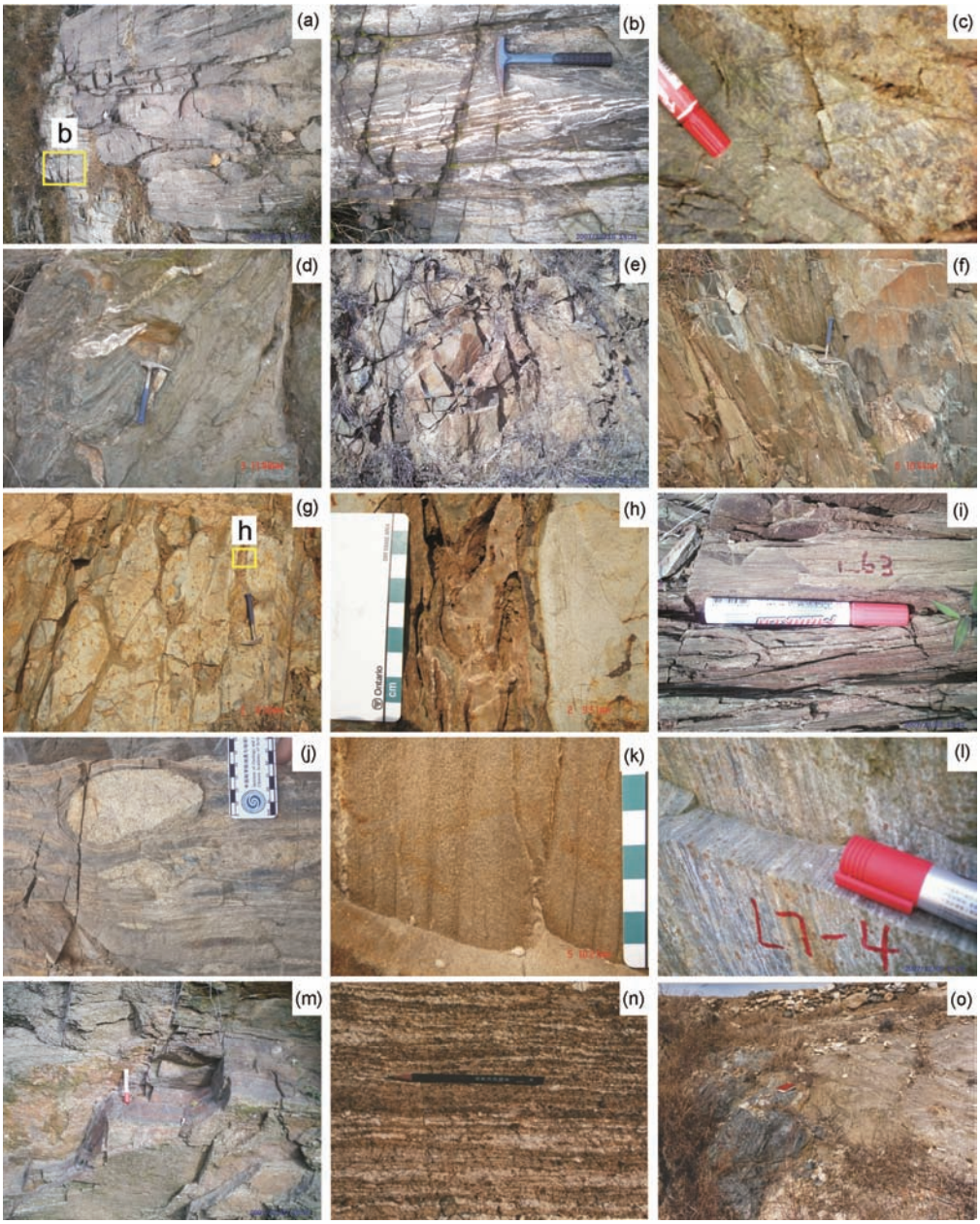

图 3　鲁西太古宙表壳岩野外地质特征

(a), (b) 雁翎关枕状熔岩, 可见杏仁和眼眉构造; (c) 苏家沟科马提岩鬣刺构造(左上至右下); (d) 七星台地区与基性岩共生强烈变形的角闪变粒岩; (e) 七星台柳杭岩组块状变玄武岩; (f) 星台柳杭岩组层状变玄武岩; (g) 七星台柳杭岩组枕状变玄武岩; (h) 柳杭岩组变质玄武岩岩枕间碳酸盐岩胶结物; (i) 柳杭岩组纹层状玄武质岩石; (j) 雁翎关地区柳杭岩组一段变质砾岩; (k) 七星台地区厚层黑云变粒岩; (l) 七星台石榴石黑云斜长片麻岩; (m) 七星台地区混合岩中 BIF 包体; (n) 孟家屯岩组石榴石石英岩; (o) 孟家屯岩组含十字石二云母片岩被粗粒变辉长岩侵入

下部>2.71Ga变超镁铁质-镁铁质火山岩系均为构造接触关系. 在新泰柳杭村附近, 柳杭岩组上部除含有角闪-黑云变粒岩以外, 还保留多层厚度为几十厘米至几米的变质砾岩, 砾石类型包括TTG片麻岩、斜长角闪岩、石英岩和变火山-沉积岩, 基质成分与黑云变粒岩类似(图3j). Wan等(2012)的年代学研究表明, 柳杭岩组上部变质砾岩基质中碎屑锆石的年龄峰值在2.59~2.58Ga, 其沉积时代不早于2.53Ga.

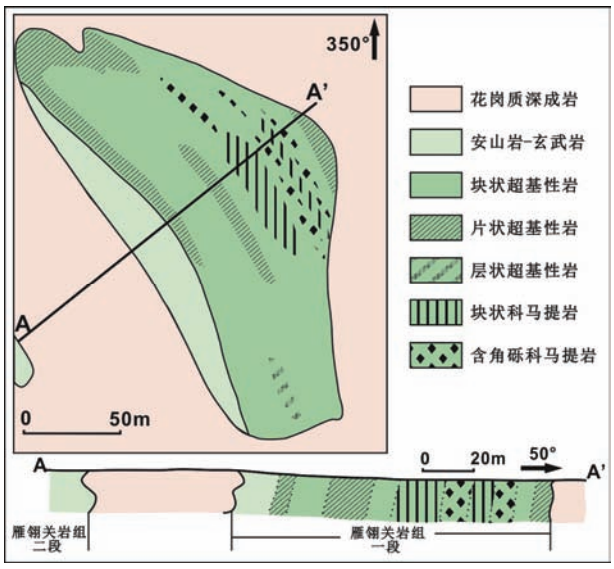

图 4　苏家沟科马提岩平面地质图(据张荣隋等(2001)修改)

2.1.3　山草峪岩组

山草峪岩组由大量角闪-黑云变粒岩夹薄层斜长角闪岩, 少量石榴石-夕线石片麻岩、二云母片岩及BIF组成, 原岩主体为长英质火山-沉积岩系, 岩石组合与柳杭岩组上部有类似之处. 七星台地区山草峪岩组出露宽度为1~2km, 主体为黑云变粒岩(图3k), 西侧与柳杭岩组上部角闪变粒岩直接接触且二者产状一致没有截然的界限, 二者为过渡关系(Wang等, 2013b). 受深熔作用影响, 黑云变粒岩中浅色脉体含量自西向东逐渐增加, 矿物粒度也逐渐加大并过渡为含浅色脉体的黑云斜长片麻岩和混合岩, 几类岩石的分布具有空间分带性(图5a). 在东侧混合岩中可识别的包体类型包括体积较小的黑云母片岩、体积较大的石榴石-夕线石片麻岩和BIF(图3l和m). 在新泰雁翎关-柳杭地区, 山草峪岩组地层出露宽度超过3km, 但岩石结构受深熔作用影响的变化趋势不明显, 东侧与雁翎关岩组的界限平直, 西侧与柳杭岩组上部的云母片岩界限不明显(图2).

年代学资料显示, 山草峪岩组角闪-黑云变粒岩中最年轻的锆石年龄峰值为2.55~2.53Ga, 这与雁翎关岩组顶部和柳杭岩组上部的角闪变粒岩时代一致(Wan等, 2012). 山草峪岩组中石榴石片麻岩与柳杭岩组上部变质砾岩基质的碎屑锆石年龄峰值一致均为2.58Ga, 且最年轻的一组碎屑锆石限定了山草峪岩组中变碎屑岩原岩的沉积时代不早于2.53Ga(Wang等, 2014). 在山草峪岩组上部还存在一定规模的BIF, 它们可与变粒岩和变泥砂质岩石共生, 其厚度在鲁西各地并不相同, 在韩旺地区规模较大, 野外地质关系限定BIF的沉积时代为2.53~2.50Ga.

2.2　孟家屯岩组

孟家屯岩组主要分布于新泰孟家屯村东南, 总体延北西-南东向展布(图6), 由产状基本一致的石榴石石英岩、含十字石石榴黑云片岩和中细粒斜长角闪岩构成. 其中石榴石石英岩的分布面积最大, 顺走向延伸超过2km, 具块状、片麻状和条带状构造, 主要矿物组成为石英(65~75%)和石榴石(20~25%), 局部含少量斜长石和黑云母等矿物(图3n), 碎屑锆石核部年龄集中于2.72Ga, 边部变质时代为2.62Ga. 含十字石石榴黑云片岩野外与石英岩互层产出, 具条带状构造, 主要矿物组成为石英(50%±)、黑云母(35%±)、石榴石(10%±)和十字石(5%±)(图3o), 碎屑锆石核部年龄集中于2.74Ga, 边部变质时代为2.64Ga(杜利林等, 2003). 斜长角闪岩具块状或条带状构造, 局部可见与石英岩互层, 由普通角闪石(65%±)、斜长石(35%±)和少量石英组成, 其中的锆石仅记录了~2.6Ga的变质事件, 根据野外侵入关系推测其形成时代不晚于2.70Ga(杜利林等, 2005; Wan等, 2012).

2.3　济宁岩群

济宁群被显生宙地层角度不整合覆盖于1000m之下, 在济宁颜店地区由铁矿层引起大规模的磁异常延北东-南西向展布(图7)(韩玉珍等, 2008). 地球物理和钻孔资料显示, 济宁岩群上部主要由钙质、硅质、铁质成分的绢云千枚岩、绿泥绢云千枚岩、板岩和单层厚度从数厘米到数十米的BIF组成, 方解石广泛分布, 中下部出现变质中酸性火山岩, 整体显示低绿片岩相变质特征(图8). 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. 年代学研究表明, 济宁岩群下部绢云千枚岩中变长英质火山岩夹层的SHRIMP锆石年龄为2.55~2.52Ga(王伟等, 2010b; 万渝生等, 2012), 限定济宁岩群的形成时代为新太古代晚期.

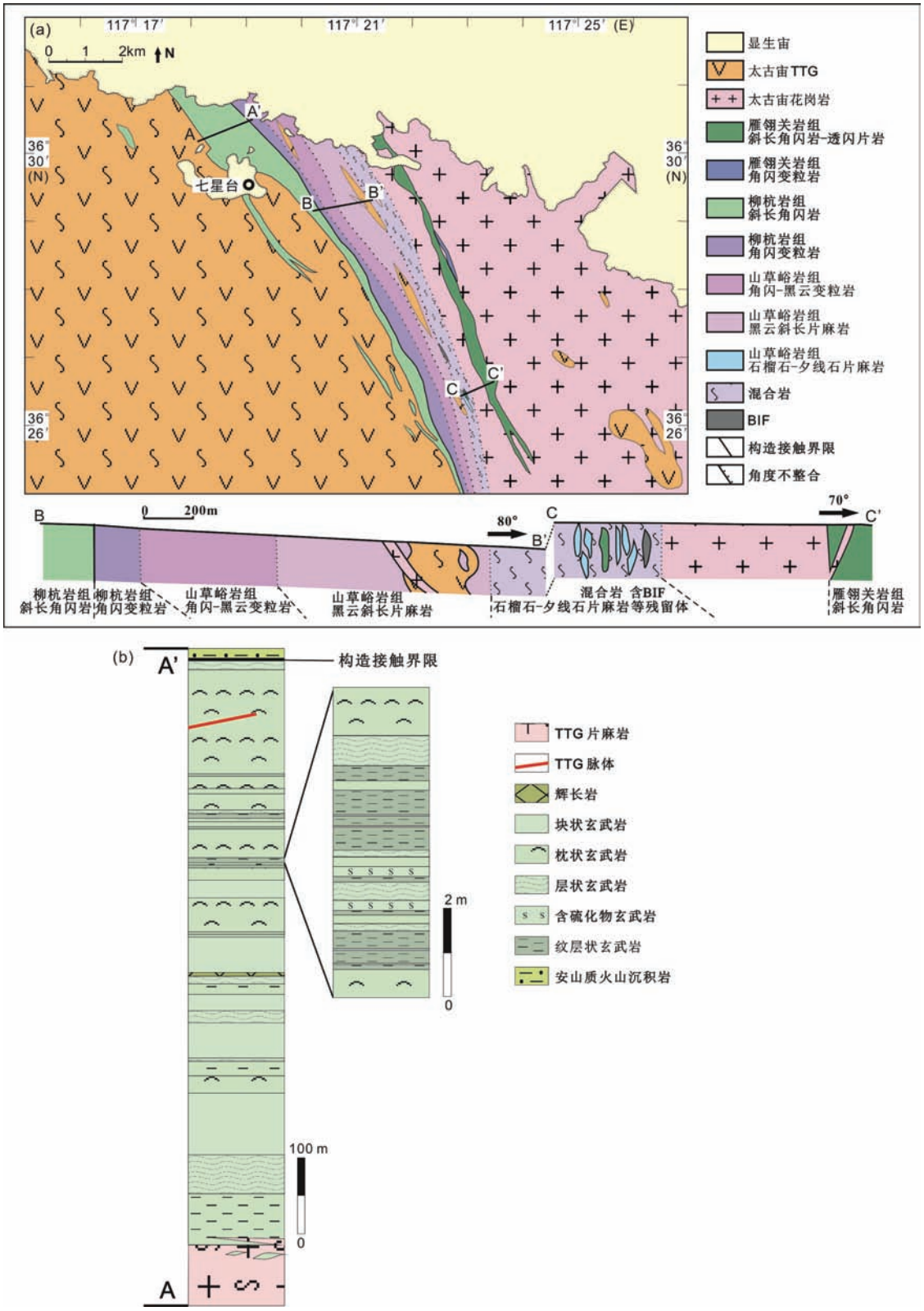

图 5　鲁西七星台地区地质简图(a)和柳杭岩组一段地层简图(b)(据 Wang 等(2013a)修改)

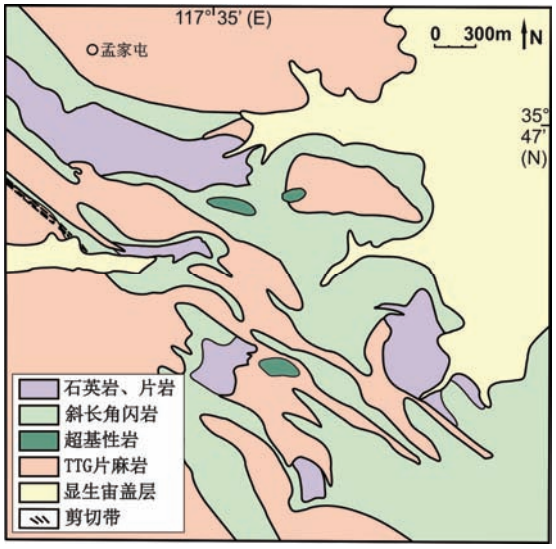

图 6　鲁西孟家屯地区地质简图(据杜利林等(2003)修改)

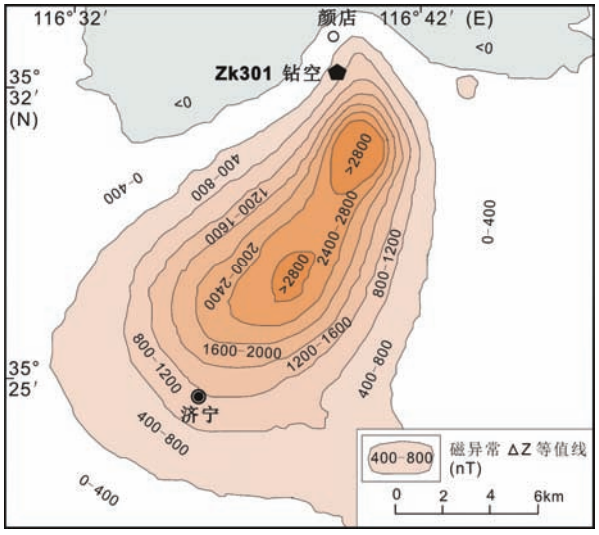

图 7　鲁西济宁铁矿磁异常简图(据韩玉珍等(2008)修改)

3　表壳岩的时代关系

以往认为泰山岩群各岩组的形成时代一致均为2.7Ga，其中雁翎关与山草峪岩组代表绿岩带的第一个火山-沉积旋回，柳杭岩组代表第二个和第三个不完整的旋回(曹国权，1996). 近年来的年代学研究已经证实，泰山岩群形成于新太古代2.75~2.71和2.53~2.50Ga两个时期，两部分表壳岩为构造接触关系. 下部形成于2.75~2.71Ga的岩石包括雁翎关岩组变科马提岩-玄武岩组合、一些变安山玄武岩、少量

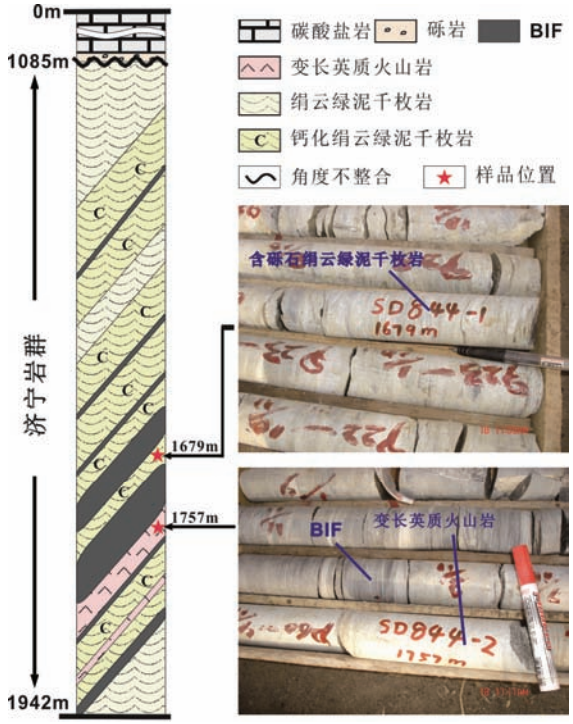

图 8　济宁铁矿 2000m 以上岩性分布简图(据韩玉珍等(2008)和实际观察修改)

变质沉积岩和柳杭岩组下部的变玄武质熔岩，上部形成于2.53~2.50Ga的岩石包括雁翎关岩组顶部变安山质火山沉积岩、柳杭岩组上部变安山质火山沉积岩和变质砾岩以及山草峪岩组变安山-流纹质火山沉积、变细碎屑沉积岩和BIF. 泰山岩群两部分表壳岩的形成时代、岩石组合和原岩成因都有明显差别，这与岩石地层单位命名中“群”或“岩群”的概念有很多矛盾之处，但目前还没有更准确的命名方案.

在鲁西与泰山岩群下部~2.7Ga变科马提岩-玄武岩组合形成时代接近的表壳岩系是孟家屯岩组，其中石英岩和片岩是一套源区为中酸性岩浆岩的近源碎屑沉积岩，变碎屑岩源区形成的时代为2.74~2.72Ga，侵入孟家屯岩组的TTG片麻岩限定其沉积时代为2.72~2.70Ga(杜利林等，2003). 由于泰山岩群与孟家屯岩组没有直接接触，根据变质程度，有学者将孟家屯岩组置于泰山岩群之下(杜利林等，2003). 泰山岩群变质科马提岩-玄武岩中玄武安山岩夹层的时代为2747Ma(Wan等，2011)，虽然存在分析误差，这一年龄仍要大于孟家屯岩组变质沉积岩原岩的沉积下限2.72Ga，笔者倾向于孟家屯岩组的地

层层位应在泰山岩群变科马提岩-玄武岩组合之上, 沉积环境可能是相对稳定的陆缘海盆. 与泰山岩群上部~2.5Ga变长英质火山-沉积岩形成时代基本一致的是济宁岩群, 但它与泰山岩群以及鲁西中西部出露的其他太古宙基底岩石在构造特征和变质变形等方面都存在差异, 济宁岩群主要受北东-南西向构造线控制, 且变质程度仅为绿片岩相, 暗示其原岩在沉积后所处的构造变形域与鲁西的太古宙基底岩石并不相同. 然而济宁岩群的主体绢云千枚岩和绿泥绢云千枚岩在矿物成分上相当于泥砂质沉积岩在低级变质作用下的产物, 与泰山岩群上部石榴石-夕线石片麻岩具有类似的原岩, 这种变泥砂质沉积岩与BIF共生的岩石组合在冀东和内蒙都有出露, 它们很可能是鲁西仍至华北克拉通新太古代晚期十分重要的一类沉积岩组合.

4 变质火山-沉积岩系的类型与陆壳演化

全球多数绿岩带由两类火山-沉积岩系构成, 第一类是科马提岩-拉斑玄武岩火山岩组合为主, 可出现基性泥质岩、深水浊积岩、页岩和燧石岩与之伴生, 火山岩以平坦或轻稀土弱亏损的稀土配分模式为主要的地球化学特征, 其全岩成分可与显生宙洋底高原型火山岩组合对比, 在北美、西澳、格棱兰和南非等克拉通大量发育(Hollings等, 1999; Wyman, 1999; Bateman等, 2001; Ayer等, 2002; Hofmann等, 2004; Manikyamba等, 2004; Polat, 2009; Said等, 2010), 与大规模地幔柱活动引发高温的地幔部分熔融有关(Condie, 2000; Condie等, 2001). 第二类火山-沉积岩系是拉斑玄武岩到钙碱性玄武岩与安山岩、英安岩及流纹岩构成的火山岩组合, 通常会有成分为中-酸性的浊积岩与它们共生, 有学者认为这样的组合可与板块构造体制下的沟-弧体系对比, 其中的火山岩主体具有与现代岛弧钙碱性火山岩系类似的地球化学特征, 如轻重稀土分异、亏损Nb、Ti和P等元素(Jachson等, 1994; Hollings等, 1999; Polat和Kerrich, 2001; Ayer等, 2002). 对全球各大克拉通内绿岩带的研究显示, 这两类火山-沉积岩系往往在空间上伴生(Manikyamba等, 2004; Polat, 2009), 有时甚至会出现在同一露头上不同的层位(Said和Kerrich, 2010), 有学者将这样的火山岩序列解释为在汇聚板块的边缘同时有地幔柱的活动(Wyman, 1999; Polat, 2009; Wyman和Kerrich, 2009), 也有学者认为这种共生玄武岩地球化学的差别来自于地幔源区的不均一性(Said和Kerrich, 2010; Said等, 2010).

以泰山岩群为代表的表壳岩系是鲁西新太古代早期~2.7Ga和晚期~2.5Ga两次火山-沉积作用的产物, 早期的表壳岩主体是变质科马提岩-玄武岩组合, 其中的科马提岩为铝亏损型(Polat等, 2006), 玄武岩由低钛和高钛两种类型组成(Wang等, 2013a), 这样的岩石组合和地球化学特征是地幔柱岩浆作用最主要的产物, 虽然近期在七星台一带发现一些向钙碱性系列过渡的玄武质岩石其时代为2.75Ga, 但露头的宽度和分布范围要小得多(王伟, 2015), 所以鲁西新太古代早期的变质火山岩系与全球同期其他绿岩带内第一类火山-沉积岩系可以对比. 晚期~2.5Ga表壳岩的主体包括变安山-流纹质火山岩或火山沉积岩、变质细碎屑岩和一些BIF, 目前来看这些岩层之间准确的层位关系是难以恢复的, 但通过年代学和野外地质信息可以推断在火山物质沉积之后(或同时)有陆源碎屑物质和含铁化学沉积物的加入, 它们代表一个由火山岩向碎屑和化学沉积岩过渡的系列. 其中的变火山岩系表现出明显的Nb、Ta和Ti负异常和其他钙碱性火山岩的地球化学特征(Wang等, 2013b). 与地幔柱构造背景下的高温岩浆作用不同, 钙碱性火山岩浆的形成需要大量流体的参与, 所以熔融的温度也要低很多. 从岩石矿物组合和地球化学特征对熔融残留矿物的反映来看, 地幔柱引发的熔融残留矿物相通常为石榴石相, 而钙碱性岩系的残留矿物相一般为橄榄石相. 虽然钙碱性岩石也可以由下地壳的镁铁质岩石在非岛弧的构造环境下部分熔融形成, 但泰山岩群上部~2.5Ga的变安山质火山沉积岩具有高镁岩系的地球化学特征(Wang等, 2013b), 结合~2.5Ga变火山-沉积岩系呈带状展布的特征, 笔者认为它们形成的构造环境可能与现代岛弧类似. 目前在七星台和雁翎关两个地区都还没有明确的年代学证据表明鲁西存在~2.5Ga的钙碱性玄武岩与安山-流纹质火山岩系共生, 但鲁西新太古代晚期~2.5Ga火山岩浆作用的性质与新太古代早期~2.7Ga是明显不同的, 总体表现为从早期到晚期由科马提质向钙碱质转变.

泰山岩群变质科马提岩-玄武岩的地球化学和Nd

同位素特征显示它们经历了一定程度的陆壳物质混染(Polat等, 2006; Wang等, 2013a), 锆石年代学研究表明, 泰山岩群变质沉积岩和泰山地区~2.5Ga花岗岩中存在>3.0Ga的碎屑和继承锆石(陆松年等, 2008), 可见鲁西最早的古陆核在新太古代之前已经形成, 但规模可能并不大, 至今在鲁西尚未发现>2.8Ga的岩石. 新太古代早期2.8~2.7Ga是鲁西地壳增生的一个主要时期, 不但有科马提岩-玄武岩组合的岩石记录, 还出现了大量同时代的TTG(陆松年等, 2008; 王世进等, 2008; 王伟等, 2009; Wan等, 2011), 它们与北美、西澳、格棱兰、南非和波罗的等克拉通内大规模绿岩带发育的时间一致, 是~2.7Ga全球性陆壳生长事件在华北克拉通的记录, 是新太古代早期地幔柱活动的产物, 鲁西在该时期很可能形成了多个微陆块并持续生长, 大陆地壳的生长方式以垂向增生为主. 新太古代晚期~2.5Ga在鲁西出现的一系列钙碱性火山岩系和高镁赞岐岩系(Wang等, 2009; Wang等, 2013b), 暗示在这一阶段大陆地壳开始发生一定程度的水平运动, 一些由洋壳和地幔楔熔融的产物以侧向拼贴的方式生长于大陆地壳边缘, 与板块构造控制下的现代陆壳增生方式有相似之处, 由于地幔楔和早期洋壳都参与了部分熔融过程, 因此这一时期既有新生地壳的形成也有地壳物质的再循环. 不仅鲁西, 在五台和登封等地也发育有同时期具钙碱性特征的变火山岩系(Wang等, 2004; Diwu等, 2011), 华北克拉通在新太古代晚期经历微陆块之间的相对运动并最终拼合可能是目前对上述岩石组合和地质记录一个较好的解释(Zhai和Santosh, 2011; Zhai, 2014; Yang等, 2015).

5 ~2.5Ga 变质-深熔作用与陆壳稳定化

鲁西的太古宙表壳岩系和其他岩石记录了~2.5Ga广泛的变质-深熔作用, 该时期形成的混合岩在济南七星台、新泰龙廷和蒙阴孟良崮等地广泛发育, 其中在七星台地区还保留了从表壳岩到出现混合岩的连续变化剖面, 而混合岩中还保留有BIF和石榴石-夕线石片麻岩等表壳岩包体, 可见表壳岩原岩的类型与深熔作用的发生有直接关系. 初步的野外研究表明这些混合岩中的浅色体通常以二长质或钾质为主, 一些地区局部有钠质为主的浅色体存在. 浅色体中的钾长石、石英和斜长石多为中-粗粒结构, 常与富黑云母的暗色体或长英质片麻岩共生. 根据产状特征, 浅色体可分为两类, 一类大小和形态都不规则且具有镶边构造, 这是熔体形成在原地或只发生微小迁移的证据; 另一类具有脉状特征, 与暗色体边界截然平直, 一般认为这些脉体经过一定距离的迁移后注入暗色体形成(Sawyer, 1998, 2001). 多数情况下由于强烈的变形, 浅色体与暗色体或共生的长英质片麻岩构成一系列密集且平行的条带, 很难判断它们是否为原地深熔的产物.

目前鲁西新太古代晚期变质-深熔作用的时代可限定在2.53~2.50Ga, 利用GBPQ联合温压计对七星台地区混合岩中石榴石片麻岩残留体的研究显示, 其中的石榴石与黑云母矿物对记录的变质条件为P=550~570 MPa, T=670~680℃(Wang等, 2014), 相当于中低压的高角闪岩相变质, 一种解释为该变质条件只反映的是深熔作用发生时固相线的P-T条件(与魏春景教授讨论). 对一些深熔作用实例的研究表明, 泥砂质岩石在变质条件升高到中-高角闪岩相的温度时, 会脱出大量流体, 与泥砂质原岩同沉积的砂岩和火山碎屑岩受到这些流体交代后, 岩石强度和熔融温度都被降低, 并最终发生深熔形成混合岩(White等, 2005; Brown, 2007). 在七星台地区, 混合岩西侧的泰山岩群变长英质火山岩(变粒岩), 其矿物粒度自西向东随浅色体逐渐增多而变粗大, 到混合岩带内靠近石榴石-夕线石片麻岩的区域, 很多地方出露的混合岩条带, 由粗粒-伟晶质浅色体和黑云母片麻岩在厘米尺度上平行交替排列构成. 根据这些野外现象, 七星台地区变泥砂质岩石在变质-深熔作用的过程中很可能也起到提供流体交代围岩的作用, 在高角闪岩相变质作用下, 变泥砂质岩石脱出的大量流体使周围并不易熔的钠质火山沉积岩和粗碎屑岩在较低的温度下发生深熔, 形成钾质浅色体和以黑云母集合体为主的暗色体. 而离泥砂质原岩较远的层位, 只因变质作用改变了岩石中矿物的结构, 形成黑云母片麻岩. 这种自西向东水平向变化的实质是反映了鲁西太古宙基底在~2.5Ga发生变质-深熔作用时局部地壳的垂向变化.

从鲁西长英质侵入岩的年龄分布图上可以看出, 在钙碱性火山岩系出现之前(>2.53Ga), 长英质侵入

岩以TTG为主，而后与深熔作用发生的同时出现大量壳熔二长-钾质花岗岩(2.52~2.50Ga)(图9)，早期钠质岩浆作用(TTG)在2.53~2.52Ga转变为晚期相对富钾的花岗岩浆作用，无论TTG能否指示俯冲作用的发生，钙碱性火山岩系的出现表明，在新太古代岩浆作用性质的转变过程中，出现了与岛弧背景类似的构造环境．在类似岛弧体系的构造背景结束之后(2.52~2.50Ga)，鲁西太古宙基底广泛记录的变质-深熔作用以及与深熔作用有关的大规模壳熔花岗岩浆作用所处的构造背景并不清楚，七星台地区混合岩带内与大量浅色体共生的除钠质片麻岩外，还有变泥砂质岩石和BIF，它们的原岩在变质-深熔作用发生前已沉积，这表明在钙碱性火山岩浆作用发生前后，鲁西存在一个短暂的稳定沉积环境．笔者推测副片麻岩记录的2.53~2.50Ga变质-深熔作用与弧陆或微陆块的拼合有关，同时形成的大规模壳熔花岗岩浆作用暗示鲁西在新太古代末已形成统一的陆壳基底．

6　结语

以绿岩带为代表的太古宙表壳岩系记录了地球早期大陆地壳形成和演化的重要信息，在鲁西已确认的新太古代~2.7和~2.5Ga两期表壳岩为进一步认识华北克拉通陆壳形成提供了物质基础．通过表壳岩记录的岩浆和变质作用可以初步确定，鲁西太古宙大陆地壳基底的形成和稳定化过程先后经历了地幔柱控制下大规模壳幔分异作用和陆壳的垂向增生、陆壳水平运动引发的类似岛弧火山岩浆作用以及广泛的变质-深熔作用导致的地壳部分熔融三个过程，一方面，鲁西~2.7Ga变科马提岩-玄武岩组合的岩石地球化学性质可与全球同期其他绿岩带对比，这表明华北在新太古代早期的陆壳演化过程应该与其他克拉通是相似的；另一方面，~2.5Ga变火山岩系显示出与现代岛弧火山岩类似的地球化学特征，这在华北具有一定的普遍性，它们很可能是微陆块水平向运动并发生拼合的产物．除对新太古代火山岩浆作用性质的研究外，另一个重要的进展是在鲁西确认~2.5Ga的富铝岩系，其中的矿物组合和成分特征初步限定鲁西新太古代晚期变质-深熔作用的*P-T*条件为高角闪岩相，与此同时发生了大规模地壳熔融形成一系列钾质和二长花岗岩，显然在新太古代晚期鲁西的大陆地壳已有一定的厚度．

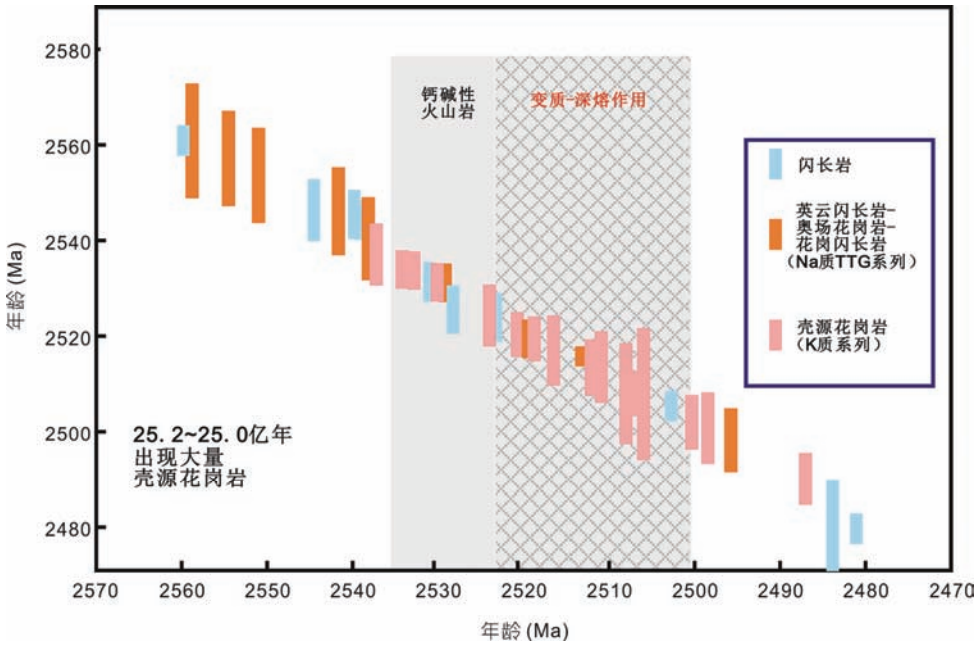

图 9　鲁西新太古代晚期长英质侵入岩年龄分布图

数据引自文献陆松年等(2008)、Wang 等(2009)、Wan 等(2010)、王伟等(2010a)和 Wang 等(2013b)

致谢 感谢万渝生、刘福来、陈福坤和范宏瑞研究员在不同研究阶段的讨论和帮助, 本文撰写过程中沈其韩院士提出宝贵建议, 同时感谢两位审稿专家和赵国春教授对本文提出的建设性意见. 孟家屯岩组野外照片由杜利林研究员提供.

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

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. 1–72

程裕淇, 徐惠芬. 1991. 对山东新泰晚太古代雁翎关组中科马提岩类的一些新认识. 中国地质, 4: 31–32

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: 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: 429–434

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: 3–8

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. 1–80

马铭株, 徐仲元, 张连昌, 董春艳, 董晓杰, 刘守偈, 刘敦一, 万渝生. 2013. 内蒙古武川西乌兰不浪地区早前寒武纪变质基底锆石SHRIMP定年及Hf同位素组成. 岩石学报, 29: 501–516

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: 617–627

沈其韩, 张宗清, 徐惠芬. 1993. 山东沂水杂岩中变基性岩类的Sm-Nd同位素年龄及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 12: 289–296

宋志勇, 张增祺, 赵光华, 张淑芳. 1994. 鲁西前寒武纪岩石地层清理意见. 山东地质, 10(增刊): 2–13

万渝生, 刘敦一, 王世进, 焦秀美, 王伟, 董春艳, 颉颃强, 马铭株. 2012. 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. 岩石学报, 28: 3457–3475

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 U-Pb年代学及其地质意义. 地质学报, 79: 78–87

王世进, 万喻生, 张成基, 杨恩秀, 宋志勇, 王立法, 张富. 2008. 鲁西地区早前寒武纪地质研究新进展. 山东国土资源, 24: 10–20

王伟. 2015. 鲁西泰山岩群变质玄武岩地球化学特征及地质意义. 岩石学报, 31: 2959–2973

王伟, 杨恩秀, 王世进, 杜利林, 颉颃强, 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: 737–745

王伟, 王世进, 董春艳, 杨恩秀, 杜利林, 颉颃强, 马铭株, 万渝生. 2010a. 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: 33–40

王伟, 王世进, 刘敦一, 李培远, 董春艳, 颉颃强, 万渝生. 2010b. 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: 1175–1181

徐惠芬. 1992. 鲁西花岗绿岩带. 北京: 地质出版社. 1–67

翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成. 中国科学: 地球科学, 41: 1037–1046

翟明国. 2013. 华北前寒武纪成矿系统与重大地质事件的联系. 岩石学报, 29: 1759–1773

张荣隋, 唐好生, 孔令广, 甘延景, 宋炳忠. 2001. 山东蒙阴苏家沟科马提岩的特征及其意义. 中国区域地质, 20: 236–244

赵子然, 宋会侠, 沈其韩, 宋彪. 2009. 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: 286–299

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: 313–330

Ayer J, Amelin Y, Corfu F, Kamo S, Ketchum J. 2002. Evolution of the southern Abitibi greenstone belt based on U-Pb geochronology: Autochthonous volcanic construction followed by plutonism, regional deformation and sedimentation. Precambrian Res, 115: 63–95

Barnes S J. 1985. The petrography and geochemistry of komatiite flows from the Abitibi Greenstone Belt. Lithos, 18: 241–270

Bateman R, Costa S, Swe T, Lambert D. 2001. Archaean mafic magmatism in the Kalgoorlie area of the Yilgarn Craton, Western Australia: A geochemical and Nd isotopic study of the petrogenetic and tectonic evolution of a greenstone belt. Precambrian Res, 108: 75–112

Brown M. 2007. Crustal melting and melt extraction, ascent and emplacement in orogens: Mechanisms and consequences. J Geol Soc, 164: 709–720

Cheng S H, Kusky T. 2007. Komatiites from west Shandong, North China Craton: Implications for plume tectonics. Gondwana Res, 12: 77–83

Condie K C. 1981. Archean Greenstone Belts. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company. 1–425

Condie K C. 2000. Episodic continental growth models: Afterthoughts and extensions. Tectonophysics, 322: 153–162

Condie K C, Des Marais D J, Abbot D. 2001. Rrecambrian superplumes and supercontinents: A record in black shales, carbon isotopes and paleoclimates. Precambrian Res, 106: 239–260

Condie K C, Belousova E, Griffin W L, Sircombe K N. 2009. Granidoid events in space and time: Constraints from igneous and detrital zircon age spectra. Gondwana Res, 15: 228–242

Diwu C R, Sun Y, Guo A L, Wang H L, Liu X M. 2011. Crustal growth in the North China Craton at ~2.5 Ga: Evidence from *in situ* zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the Dengfeng complex. Gondwana Res, 20: 149–170

Gorman B E. 1978. On the structure of Archean greenstone belts.

Precambrian Res, 6: 23–41
Hofmann A, Dirks P H G M, Jelsma H A. 2004. Clastic sedimentation in a late Archaean accretionary terrain, Midlands greenstone belt, Zimbabwe. Precambrian Res, 129: 47–69
Hollings P, Wyman D, Kerrich R. 1999. Komatiite-basalt-rhyolite volcanic associations in Northern Superior Province greenstone belts: Significance of plume-arc interaction in the generation of the proto continental Superior Province. Lithos, 46: 137–161
Jackson S L, Fyon J A, Corfu F. 1994. Review of Archean supracrustal assemblages of the southern Abitibi greenstone belt in Ontario, Canada: Products of microplate interaction within a large-scale plate-tectonic setting. Precambrian Res, 65: 183–205
Jahn B M, Auvray B, Shen Q H, Liu D Y, Zhang Z Q, Dong Y J, Ye X J, Zhang Q Z, Cornichet J, Macé J. 1988. Archean crustal evolution in China: The Taishan Complex, and evidence for juvenile crustal addition from long-term depleted mantle. Precambrian Res, 38: 381–403
Jahn B M, Liu D Y, Wan Y S, Song B, Wu J S. 2008. Archean crustal evolution of the Jiaodong Penisula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry. Am J Sci, 308: 232–269
Kröner A, Cui W Y, Wang S Q, Wang C Q, Nemchin A A. 1998. Single zircon ages from high-grade rocks of the Jianping Complex, Liaoning Province, NE China. J Asian Earth Sci, 16: 519–532
Liu D Y, Nutman A P, Compston W, Wu J S, Shen Q H. 1992. Remnants of ≥3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korea Craton. Geology, 20: 339–342
Liu F, Guo J H, Peng P, Qian Q. 2012. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the Huai'an gneisses terrane: Petrogenesis and implications for ~2.5 Ga crustal growth in the North China Craton. Precambrian Res, 212-213: 225–244
Manikyamba C, Kerrich R, Naqvi S M, Mohan M R. 2004. Ceochemical systematics of tholeiitic basalts from the 2.7 Ga Ramagiri-Hungund composite greenstone belt, Dharwar craton. Precambrian Res, 134: 21–39
Nelson D R. 1997. Evolution of the Archaean granite-greenstone terranes of the Eastern Goldfields, Western Australia: SHRIMP U-Pb zircon constraints. Precambrian Res, 83: 57–81
Nelson D R, Trendall A F, Altermann W. 1999. Chronological correlations between the Pilbara and Kaapvaal cratons. Precambrian Res, 97: 165–189
Nesbitt H W, Young G M, Bosman S A. 2009. Major and trace element geochemistry and genesis of supracrustal rocks of the North Spirit Lake Greenstone belt, NW Ontario, Canada. Precambrian Res, 174: 16–34
Nutman A P, Chadwich B, Krishna R B, Vasudev V N. 1996. SHRIMP U/Pb zircon ages of acid volcanic rocks in the Chitradurga and Sandur Groups and granites adjacent to the Sandur schist belt, Karnataka. J Geol Soc India, 47: 153–164
Nutman A P, Wan Y S, Du L L, Friend C R L, Dong C Y, Xie H Q, Wang W, Sun H Y, Liu D Y. 2011. Multistage late Neoarchean crustal evolution of the North China Craton, Eastern Hebei. Precambrian Res, 189: 43–65
Peng T P, Fan W M, Peng B X. 2012. Geochronology and geochemistry of late Archean adakitic plutons from the Taishan granite-greenstone Terrain: Implications for tectonic evolution of the eastern North China Craton. Precambrian Res, 208-211: 53–71
Pidgeon R T, Wilde S A. 1990. The distribution of 3.0 Ga and 2.7 Ga volcanic episodes in the Yilgarn Craton of Western Australia. Precambrian Res, 47: 157–167
Polat A. 2009. The geochemistry of Neoarchean (ca. 2700 Ma) tholeiitic basalts, transitional to alkaline basalts, and gabbros, Wawa Subprovince, Canad: Implications for petrogenetic and geodynamic processes. Precambrian Res, 168: 83–105
Polat A, Kerrich R. 2001. Geodynamic processes, continental growth, and mantle evolution recorded in late Archean greenstone belts of the southern Superior Province, Canada. Precambrian Res, 112: 5–25
Polat A, Li J, Fryer B, Kusky T, Gagnon J, Zhang S. 2006. Geochemical characteristics of the Neoarchean (2800–2700 Ma) Taishan greenstone belt, North China Craton: Evidence for plume-craton interaction. Chem Geol, 230: 60–87
Said N, Kerrich R. 2010. Elemental and Nd-isotope systematics of the Upper Basalt unit, 2.7 Kambalba Sequence: Quantitative modeling of progressive crustal contamination of plume asthenosphere. Chem Geol, 273: 193–211
Said N, Kerrich R, Groves D. 2010. Geochemical systematics of basalts of the lower Basalt Unit, 2.7 Ga Kambalda Sequence, Yilgarn craton, Australia: Plume impingement at a rifted craton margin. Lithos, 115: 82–100
Samsonov A V, Bogina M M, Bibikova E V, Petrova A Y U, Shchipansky A A. 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: 83–106
Sawyer E W. 1998. Formation and evolution of granite magmas during crustal reworking: The significance of diatexites. J Petrol, 39: 1147–1167
Sawyer E W. 2001. Melt segregation in the continental crust: Distribution and monvement of melt in anatectic rocks. J Metamorph Geol, 19: 291–309
Song B, Nutman A P, Liu D Y, Wu J S. 1996. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. Precambrian Res, 78: 79–94
Swager C P. 1997. Tectono-stratigraphy of late Archaean greenstone terranes in the southern Eastern Goldfields, Western Australia. Precambrian Res, 83: 11–42
Swager C P, Nelson D R. 1997. Extensional emplacement of a high-grade granite gneiss complex into low-grade greenstones,

Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Western Australia. Precambrian Res, 83: 203–219

Trofimovs J, Cas R A F, Davis B K, 2004. An Archaean submarine volcanic debris avalanche deposit, Yilgarn Craton, western Australia, with komatiite, basalt and dacite megablocks: The product of dome collapse. J Volcanol Geotherm Res, 138: 111–126

Wan Y S, Liu D Y, Song B, Wu J S, Yang C H, Zhang Z Q, Geng Y S. 2005. Geochemical and Nd isotopic compositions of 3.8 Ga meta-quartz dioritic and trondhjemitic rocks from the Anshan area and their geological significance. J Asian Earth Sci, 24: 563–575

Wan Y S, Liu D Y, Wang S J, Dong C Y, Yang E X, Wang W, Zhou H Y, Du L L, Yin X Y, Xie H Q, Ma M Z. 2010. Juvenile magmatism and crustal recycling at the end of Neoarchean in western Shandong Province, North China, Craton: Evidence from SHRIMP zircon dating. Am J Sci, 310: 1503–1552

Wan Y S, Liu D Y, Wang S J, Yang E X, Wang W, Dong C Y, Zhou H Y, Du L L, Yang Y H, Diwu C R. 2011. ~2.7 Ga juvenile crust formation in the North China Craton (Taishan-Xintaiarea, western Shandong Province): Further evidence of an understated event from U-Pb dating and Hf isotopic composition of zircon. Precambrian Res, 186: 169–180

Wan Y S, Wang S J, Liu D Y, Wang W, Kröner A, Dong C Y, Yang E X, Zhou H Y, Xie H Q, Ma M Z. 2012. Redefinition of depositional ages of Neoarchean supracrustal rocks in western Shandong Province, China: SHRIMP U-Pb zircon dating. Gondwana Res, 21: 768–784

Wang W, Yang E X, Zhai M G, Wang S J, Santosh M, Du L L, Xie H Q, Lv B, Wan Y S. 2013a. Geochemistry of ~2.7 basalts from Taishan area: Constraints on the evolution of early Neoarchean granite-greenstone belt in western Shandong Province, China. Precambrian Res, 224: 94–109

Wang W, Zhai M G, Wang S J, Santosh M, Du L L, Xie H Q, Lv B, Wan Y S. 2013b. Crustal reworking in the North China Craton at ~2.5 Ga: Evidence from zircon U-Pb age, Hf isotope and whole rock geochemistry of the felsic volcano-sedimenttary rocks from the western Shandong Province. Geol J, 48: 406–428

Wang W, Zhai M G, Tao Y B, Lü B, Zhao L, Wang S J. 2014. Late Neoarchean crustal evolution of the eastern North China Craton: A study on the provenance and metamorphism of paragneiss from the Western Shandong Province. Precambrian Res, 255: 583–602

Wang Y J, Zhang Y Z, Zhao G C, Fan W M, Xia X P, Zhang F F, Zhang A M. 2009. Zircon U-Pb geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Taishan sanukitoids (Shandong): Implications for Neoarchean subduction in the Eastern Block, North China Craton. Precambrian Res, 174: 273–286

Wang Z H, Wilde S A, Wang K Y, Yu L J. 2004. A MORB-arc basalt-adakite association in the 2.5 Ga Wutai greenstone belt: Late Archean magmatism and crustal growth in the North China Craton. Precambrian Res, 131: 323–343

White R W, Pomroy N E, Powell R. 2005. An *in situ* metatexite-diatexite transition in upper amphibolite facies rocks from Broken Hill, Australia. J Metamorph Geol, 23: 579–602

Wilde S A, Cawood P A, Wang K Y, Nemchin A A. 2005. Granitoid evolution in the Late Archean Wutai Complex, North China Craton. J Asian Earth Sci, 24: 597–613

Wu F Y, Zhang Y B, Yang J H, Xie L W, Yang Y H. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the Early Archean crustal evolution in Anshan of the North China Craton. Precambrian Res, 167: 339–362

Wyman D A. 1999. A 2.7 Ga depleted tholeiite suite: Evidence of plume-arc interaction in the Abitibi Greenstone Belt, Canada. Precambrian Res, 97: 27–42

Wyman D, Kerrich R. 2009. Plume and Arc magmatism in the Abitibi subprovince: Implications for the origin of continental lithospheric mantle. Precambrian Res 168: 4–22

Yang C H, Du L L, Ren L D, Song H X, Wan Y S, Xie H Q, Geng Y S. 2013. Delineation of the ca. 2.7 Ga TTG gneisses in the Zanhuang Complex, North China Craton and its geological implications. J Asian Earth Sci, 72: 178–189

Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Zhao, G C. 2008. Petrogenesis and geodynamics of late Archean magmatism in eastern Hebei, eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Hf isotopic evidence. Precambrian Res, 167: 125–149

Yang Q Y, Santosh M, Collins A S, Tenga X M. 2015. Microblock amalgamation in the North China Craton: Evidence from Neoarchaean magmatic suite in the western margin of the Jiaoliao Block. Gondwana Res, 31: 96–123

Zhai M G. 2014. Multi-stage crustal growth and cratonization of the North China Craton. Geosci Front, 5: 457-469

Zhai M G, Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. Gondwana Res, 20: 6–25

Zhao G C, Cawood P A. 2013. Precambrian geology of China. Precambrian Res, 222-223: 13–54

Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, 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. Am J Sci, 302: 191–226

Zhao G C, Wilde S A, Sun M, Guo J H, Kröner A, Li S Z, Li X P, 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. Am J Sci, 308: 270–303

Zhu X Y, Zhai M G, Chen F K, Lyu B, Wang W, Peng P, Hu B. 2013. ~2.7 Ga crustal growth in the North China Craton: Evidence from zircon U-Pb ages and Hf isotopes of the Sushui complex in the Zhongtiao terrane. J Geol, 121: 239–254