**引用格式**：唐巧婷，张健，张书慧，等，2025. 鲁西徂徕山地区地壳深熔–韧性变形叠加：对华北克拉通东部新太古代构造样式的约束[J]. 地质力学学报，31（4）：638−656. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025043

**Citation:** TANG Q T，ZHANG J，ZHANG S H，et al.，2025. Crustal anatexis and ductile superimposition in the Culai Mountain region, western Shandong Province: Constraints on the Neoarchean tectonic framework of the eastern North China Craton[J]. Journal of Geomechanics，31（4）：638−656. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025043

# 鲁西徂徕山地区地壳深熔–韧性变形叠加：对华北克拉通东部新太古代构造样式的约束

唐巧婷[1]，张　健[2]，张书慧[1]，尹常青[1]，吴启航[2]，赵　辰[3]，何明涛[1]，黄　葳[2]

TANG Qiaoting[1]，ZHANG Jian[2]，ZHANG Shuhui[1]，YIN Changqing[1]，WU Qihang[2]，ZHAO Chen[3]，HE Mingtao[1]，HUANG Wei[2]

1. 中山大学地球科学与工程学院，广东 珠海 519082；
2. 香港大学地球与行星科学系，香港 999077；
3. 中国地质调查局沈阳地质调查中心，辽宁 沈阳 110034

1. *School of Earth Sciences and Engineering*, *Sun Yat-sen University*, *Zhuhai* 519082, *Guangdong*, *China*;
2. *Department of Earth and Planetary Sciences*, *The University of Hong Kong*, *Hong Kong* 999077, *China*;
3. *Shenyang Center of Geological Survey*, *China Geological Survey*, *Shenyang* 110034, *Liaoning*, *China*

## Crustal anatexis and ductile superimposition in the Culai Mountain region, western Shandong Province: Constraints on the Neoarchean tectonic framework of the eastern North China Craton

**Abstract:** ［**Objective**］Western Shandong is located in the core area of the eastern North China Craton and represents a typical Archean basement exposure. It extends as an overall NW–SE trending linear belt. This area preserves not only multiple phases of magmatic records spanning the early to late Neoarchean but also abundant anatectic–rheological structures overprinted by ductile deformation fabrics. These features are of great significance for understanding the Neoarchean tectonic evolution of the North China Craton. The Culai Mountain region is one of the most promising areas for such geological studies. Situated in the core of the tectonic belt (Belt B) of western Shandong, it is characterized by well-developed anatexis and ductile deformation. This makes it an ideal location for investigating the spatial and temporal relationships between crustal anatexis and ductile deformation. ［**Methods**］In this study, we selected a representative migmatite outcrop at the Huangshiya Village and conducted systematic field structural analyses, petrographic observations, and LA–ICP–MS zircon U–Pb geochronology. ［**Results**］Field observations show that the structural lineaments in this region exhibit an overall NW–SE orientation. Numerous felsic melts developed within the amphibolites, mainly as bands along the foliation, with a few occurring in a network-like or disseminated pattern. Flow folds are well-developed. Petrographic observations demonstrate that quartz grains are distributed along the irregular, corroded boundaries of K-feldspar and plagioclase, containing small melt pockets, bead-like quartzs, and melt films. These features collectively indicate intense anatexis in the region. The newly generated melts reduced the overall rock strength, making it more susceptible to subsequent ductile deformation. Concurrently, NE–SW-oriented horizontal compressive stress further promoted NW–SE regional extension, consistent with the nearly vertical foliation and sub-horizontal mineral stretching lineations observed in the amphibolite. This suggests a deformation regime dominated by near-oblate strain. To constrain

**基金项目**：国家自然科学基金（42025204，42302221）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42025204 and 42302221).

**第一作者**：唐巧婷（1999—），女，在读硕士，构造地质学专业。Email：1376891666@qq.com

**通信作者**：张健（1978—），男，教授，主要从事构造地质学及前寒武纪地质学研究。Email：jian@hku.hk

**收稿日期**：2025−04−23；**修回日期**：2025−05−28；**录用日期**：2025−05−28；**网络出版日期**：2025−05−28；**责任编辑**：吴芳

the timing of the regional deformation, we conducted LA-ICP-MS zircon U-Pb dating on representative pre-, syn-, and post-tectonic samples of the area. The results indicate that the residual amphibolite records a melt crystallization age of ～2503 Ma, representing the timing of the regional anatexis event. The syn-tectonic monzogranite yields a crystallization age of ～2497 Ma, reflecting a syn-tectonic magmatic event, while the undeformed pegmatite veins formed at ～2465 Ma, bracketing the regional ductile deformation at 2497-2465 Ma.［**Conclusion**］In summary, the western Shandong region experienced intense anatexis in the late Neoarchean, which was rapidly overprinted by near-oblate strain-dominated shortening deformation under NE–SW-oriented horizontal compressive stress. The anatexis further facilitated the development of NW–SE-directed ductile deformation. The superimposition of these two events ultimately shaped the structural pattern of the Neoarchean crust of the western Shandong region.［**Significance**］This study provides new constraints that improve the understanding of the Neoarchean tectonic framework and structural patterns of the western Shandong region.

**Keywords:** North China Craton; western Shandong; Culai Mountain; Late Neoarchean; anatexis; ductile deformation

**摘　要：**鲁西位于华北克拉通东部，是太古宙基底典型分布区域之一，且整体呈北西—南东向带状展布。该地区不仅保留了新太古代不同阶段、不同类型的岩浆作用记录，同时保存了丰富的深熔–流变构造及韧性变形叠加记录，对深入了解华北克拉通该时期构造演化历史具有重要意义。徂徕山地区位于鲁西构造带中部（B 带），深熔作用和韧性变形均十分发育，是深入认识鲁西地壳深熔作用及叠加变形的最佳场所。因此，选择该地区黄石崖村典型露头的混合岩作为研究对象，通过系统的野外构造解析、室内岩相学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析，进而限定新太古代晚期深熔作用和韧性变形的时空耦合关系及其构造演化。野外观察显示该地区构造线整体呈北西—南东向展布，斜长角闪岩中发育大量长英质熔体，主要沿其面理呈条带状展布，少数呈网脉状或浸染状，揉流褶皱发育。岩相学观察可见石英颗粒沿着受到侵蚀的钾长石和斜长石的不规则边界分布，含有小熔体囊、串珠状石英和熔体膜。二者综合指示该区发生强烈深熔作用，且新生的熔体降低了整体的岩石强度，令其更容易受到后期韧性变形的叠加。同时，北东—南西向水平挤压应力又进一步促进了区域北西—南东向伸展，与斜长角闪岩形成一致的近直立面理和近水平矿物拉伸线理，显示出区域水平向近压扁型应变为主导的变形特征。为限定区域变形时代，文章选取该区域典型的残留体–熔体–脉体开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试。结果显示，残留相斜长角闪岩的熔体结晶年龄为～2503 Ma，代表了区域深熔作用的时代。同构造二长花岗岩获得了～2497 Ma 的结晶年龄，代表了区域同构造岩浆事件的时代，而未变形的伟晶岩脉体形成于～2465 Ma，进而限定了区域韧性变形时代为 2497～2465 Ma。综上所述，鲁西在新太古代晚期经历了强烈的深熔作用，并快速叠加了北东—南西水平向挤压应力场下以近压扁型应变为主的变形，深熔作用又促进了北西—南东向伸展韧性变形的发育。二者时空上密切协同作用，最终造就了鲁西地区新太古代地壳构造变形样式。

**关键词：**华北克拉通；鲁西；徂徕山；新太古代晚期；深熔作用；韧性变形

**中图分类号：**P548　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)04−0638−19

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025043

## 0　引言

深熔作用是指处于地壳中深层次的变质岩在温度升高、压力降低、流体加入或构造应力驱动下发生部分乃至全部熔融的地质作用和过程(程裕淇, 1987)。这一现象在造山带和前寒武古老地壳基底中广泛发育，一直备受学者关注(Sawyer, 2008; Xu and Zhang, 2017; Yu et al., 2019; Zhou et al., 2019)。作为连接地壳深部变质作用、岩浆活动与构造变形的纽带，深熔作用深刻影响大陆地壳的热力学结构、地球化学行为、流变学特征及变形行为(Sawyer et al., 2011; Hu et al., 2016; Li et al., 2021; Dong et al., 2022; Gu et al., 2022; Wang et al., 2022; Xu et al., 2022; Li et al., 2023)。未发生熔融的岩石变形特征遵循固态介质的弹塑性变形规律，而一旦岩石开始部分熔融并产生熔体时，岩石从单一固相转变为固–液两相介质，这一转变大幅度降低岩石强度，进而引发流变学性质和变形行为产生显著变化(Rosenberg and Handy, 2005; Gorczyk and Vogt, 2015; 陈震, 2017)。古老克拉通结晶基底岩石普遍经历了深熔–变质–变形的叠加改造，因而保存了丰富的构造流变信息

(Watts and Burov, 2003; Burov, 2011)。

华北克拉通记录了地球早期地质演化过程,是国际前寒武地质研究的重要地区之一(翟明国, 2019)。长期以来,国内外学者围绕华北克拉通开展了大量系统研究,但这些研究主要集中于大陆俯冲−碰撞−拼贴过程及其克拉通化机制(Zhai et al., 2000; Zhao et al., 2005; Zhai and Santosh, 2011, 2013; Kusky et al., 2016),对于太古宙古老大陆,特别是东部陆块基底的构造样式,仍缺乏清晰的认识。华北克拉通东部陆块的太古宙基底主要由高级变质的TTG片麻岩以及中−低级的花岗−绿岩带组成,广泛出露于冀东、辽北、鲁西、吉南、辽西、胶东、狼林和密云等地区(Zhao et al., 2005; 赵国春, 2009; Zhai and Santosh, 2013)。已有研究认为,该区域基底构造以TTG片麻岩穹隆构造为特征,在冀东、辽北、鞍山等地均有分布(Zhao and Zhai, 2013; Li et al., 2017)。然而,作为华北克拉通东部陆块的重要组成部分,鲁西花岗−绿岩带的构造特征显著不同。与冀东、鞍山等地区的穹隆构造相比,鲁西地区表现出鲜明的线性构造样式,整体呈北西—南东向带状展布(曹国权, 1996; Wan et al., 2010, 2011)。该区保存了新太古代早期至晚期多个阶段、类型各异的岩浆事件,是全球范围内罕见的同时记录~2.7 Ga与~2.5 Ga 2期强烈构造热事件且未受古元古代晚期构造热事件改造的区域之一(曹国权, 1996; Ren et al., 2016; 万渝生等, 2020, 2022)。这些事件不仅诱发了区域内广泛的变质深熔作用和韧性变形,也塑造了鲁西地区独特的新太古代构造格局(任鹏等, 2015; 万渝生等, 2015; 任鹏, 2016)。

尽管已有研究在岩石学、地球化学与年代学方面取得了重要成果(Wan et al., 2011, 2012a, 2012b; 万渝生等, 2012a, 2015; 任鹏等, 2015; 任鹏, 2016),但在构造地质学方面仍缺乏系统的证据支持(Zhang et al., 2022)。特别是关于深熔作用与韧性变形叠加对鲁西地区新太古代构造样式及大地构造格局的控制机制,尚未形成统一认识。因此,厘清深熔−韧性变形叠加作用,对于深入理解鲁西地区的新太古代构造演化过程,具有重要的科学意义。

针对上述问题,选取鲁西构造带中部徂徕山黄石崖村一处典型的深熔−韧性变形叠加露头的混合岩为研究对象,结合详细的野外地质观察、构造解析、显微构造分析及地质年代学研究,重点探讨深熔作用与韧性变形之间的时空耦合关系及其构造叠加机制,旨在为深入理解鲁西地区新太古代构造演化过程及其构造样式提供新的约束与科学依据。

## 1 地质背景

### 1.1 鲁西花岗−绿岩带早前寒武纪地质背景

作为华北克拉通东部的重要组成部分,鲁西地区经历了新太古代~2.7 Ga和~2.5 Ga的强烈构造热事件,广泛发育变质表壳岩和以花岗质岩石为主的深成侵入岩,共同构成鲁西花岗−绿岩带(曹国权, 1996),其总面积约40000 km$^2$,总体上呈北西—南东向展布,其东缘被郯庐断裂截切(图1)。鲁西太古宙表壳岩早先被划分为新太古代早期泰山岩群(雁翎关岩组、山草峪岩组和柳杭岩组)、孟家屯岩组和古元古代济宁岩群(曹国权, 1996)。泰山岩群是鲁西分布最广的一套表壳岩系,普遍经历了绿片岩相和角闪岩相变质作用(曹国权, 1996)。根据近年研究,表明泰山岩群由不同时代表壳岩组成,以2.60 Ga为界,将鲁西表壳岩重新划分为新太古代早期的雁翎关−柳杭岩系(约2.75~2.70 Ga,包括雁翎关组、柳杭组下段和孟家屯岩组),主要为变质基性岩和变质超基性岩、变质碎屑沉积岩(万渝生等, 2012a, 2012b, 2017; Wan et al., 2012a, 2012b);新太古代晚期山草峪−济宁岩系(约2.56~2.53 Ga,包括山草峪组、柳杭组上段和济宁岩群),主要由黑云母变粒岩、云母片岩、条带状含铁建造(BIF)、变质砾岩和变质中酸性火山沉积岩组成(万渝生等, 2012a, 2012b, 2017; Wan et al., 2012a, 2012b)。

根据年龄和不同岩石组合特征,已有研究成果把鲁西太古宙基底从东北到西南依次划分为A、B、C共3个构造带(图1b; Wan et al., 2010)。东北部A带以新太古代晚期(约2.52~2.48 Ga)的壳源花岗岩类和混合岩为主,主要岩性包括未变形的正长花岗岩和二长花岗岩,为早期表壳岩和花岗质岩石在2.5 Ga构造热事件期间的深熔作用所形成。中部B带由新太古代早期(2.75~2.60 Ga)的TTG片麻岩、变质表壳岩及新太古代晚期的花岗质岩石侵入构成(Wan et al., 2010, 2011, 2015; 任鹏等, 2015, 2017; 万渝生等, 2017)。西南部C带以新太古代晚期(2.55~2.50 Ga)的TTG、辉长−闪长岩及辉石岩为主,同样可见新太古代晚期二长花岗岩侵入,不同类型岩石之间存在典型的岩浆混合现象(Wan et al., 2010, 2011, 2012b)。A、B、C带的接触边界普遍遭受了强

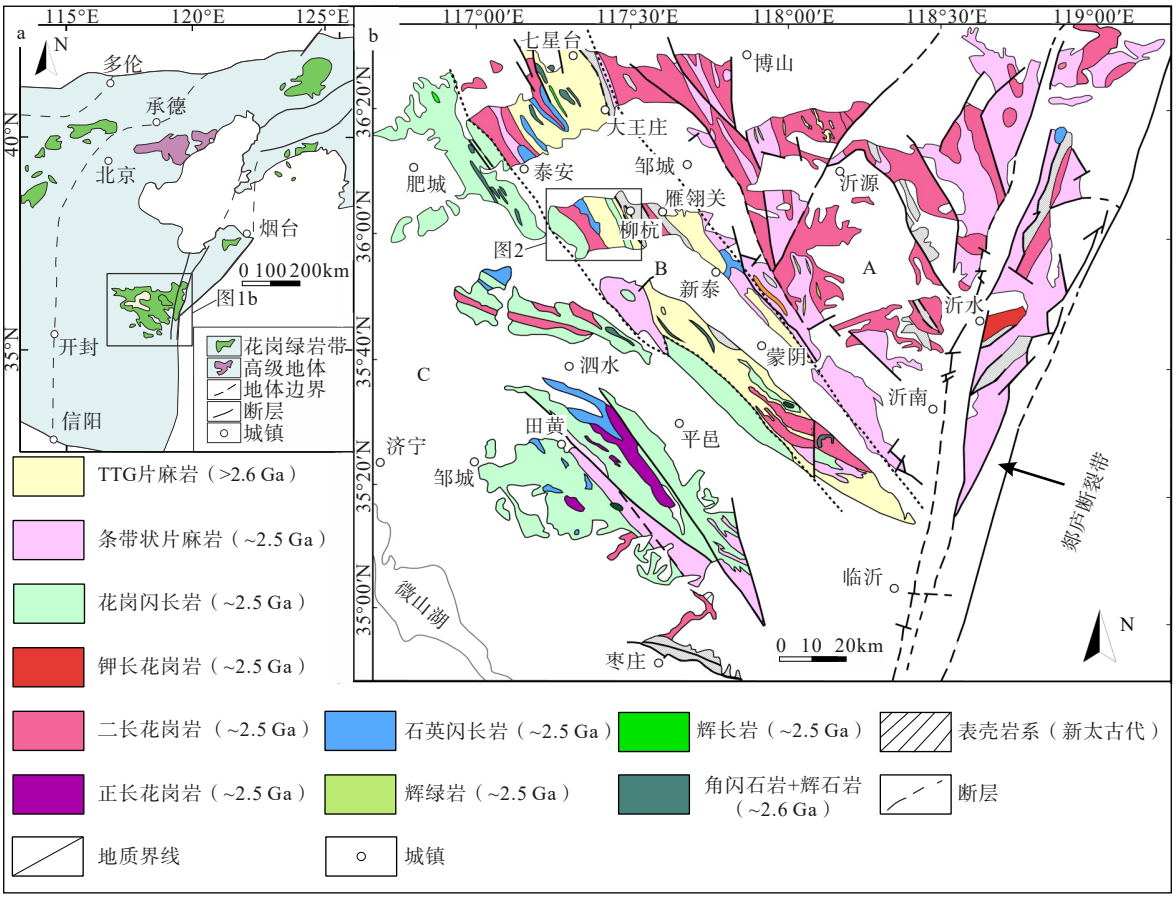



图 1b 中黑色虚线为 Wan et al.(2010, 2015)划分 A、B、C 三带的分界线；A 带为新太古代晚期壳源花岗岩(2525～2490 Ma)，B 带为新太古代早期岩石(2750～2600 Ma)，C 带为新太古代晚期新生岩浆岩(2550～2500 Ma)

a—华北克拉通东部陆块太古宙基底分布图(据 Wang et al., 2013 修改)；b—鲁西地区花岗–绿岩带地质图(据 Wan et al., 2010, 2015 修改)

图 1　华北克拉通东部陆块和鲁西地区地质图

Fig. 1　Geological maps of the Eastern Block of the North China Craton and western Shandong

(a) Distribution map of the Archean basement in the Eastern Block of North China Craton (modified after Wang et al., 2013); (b) Geological map of the granite-greenstone belts in western Shandong (modified after Wan et al., 2010, 2015)

In Fig.1b, the black dashed lines divide the basement into three zones as defined by(Wan et al., 2010, 2015) : A–late Neoarchean crust-derived granite (2525～2490 Ma); B–early Neoarchean rocks (2750～2600 Ma); C–late Neoarchean juvenile magmatism (2550～2500 Ma).

烈变质变形和深熔作用，其中 B 带变形最为强烈，其内部展现显著的岩石学分带特征，同时发育深熔作用(Wan et al., 2010; 任鹏等, 2015, 2017; 万渝生等, 2015)。

根据岩石学及年代学数据，众多研究者将鲁西地区发育的多期岩浆侵入事件划分为新太古代早期(2.75～2.60 Ga)和晚期(2.60～2.50 Ga)2 个阶段(万渝生等, 2012b; Wan et al., 2012b, 2014a; 王伟, 2015; Wang et al., 2016; Ren et al., 2016; 李源等, 2020)。新太古代早期广泛分布以 TTG 片麻岩为主的长英质侵入岩，具有明显的片麻理构造，呈北西走向在鲁西地块的中西部展布，构成该地区最具代表性的地质体(Wan et al., 2014b; 任鹏等, 2015; Ren et al., 2016; Wang et al., 2016)。这些新太古代早期的 TTG 片麻岩为主的长英质侵入岩由于受到～2.60 Ga 和～2.50 Ga 构造热事件的叠加，经历了广泛的变形、变质作用以及局部深熔作用(Wan et al., 2011, 2014b; 任鹏等, 2015; 任鹏, 2016; Ren et al., 2016; Wang et al., 2016; Li et al., 2022)。新太古代晚期(2560～2525 Ma)侵位的岩石，包括花岗闪长岩为主的 TTG、辉长岩、石英闪长岩、富钾花岗岩(二长花岗岩和正长花岗岩)，也经历了强烈的变形和变质作用；而晚期(2525～2480 Ma)侵入体虽具有相似的岩石组合，但基本未变形或仅发生微弱变形。这种变化表明该区构造体制在 2525～2480 Ma 时期发生了重大转变，即由挤压向伸展的转换(Wan et al., 2010, 2014b;

万渝生等, 2015)。

### 1.2 徂徕山地区

徂徕山地区位于B带的核部(图2; 万渝生等, 2015), 区内出露完整的新太古代岩石组合, 主要包括TTG片麻岩、变质石英闪长岩、片麻状二长花岗岩和二长花岗岩, 以及少量表壳岩。徂徕山整体岩性分布与区域构造线方向近一致, 呈北西—南东走向展布, 区内深熔作用和韧性变形十分发育, 是研究鲁西地区深熔、构造演化的最佳窗口。任鹏(2016)识别出徂徕山西侧的奥长花岗岩曾遭受~2.6 Ga的深熔作用。万渝生等(2015)识别出多期深熔作用, 包括斜长角闪岩被~2.7 Ga英云闪长岩片麻岩侵入, 二者一同遭受变质变形, 经历了~2.6 Ga的深熔作用, 然后侵入英云闪长片麻岩的~2.53 Ga的片麻状石英闪长岩也遭受了变质变形和~2.5 Ga的深熔作用改造。

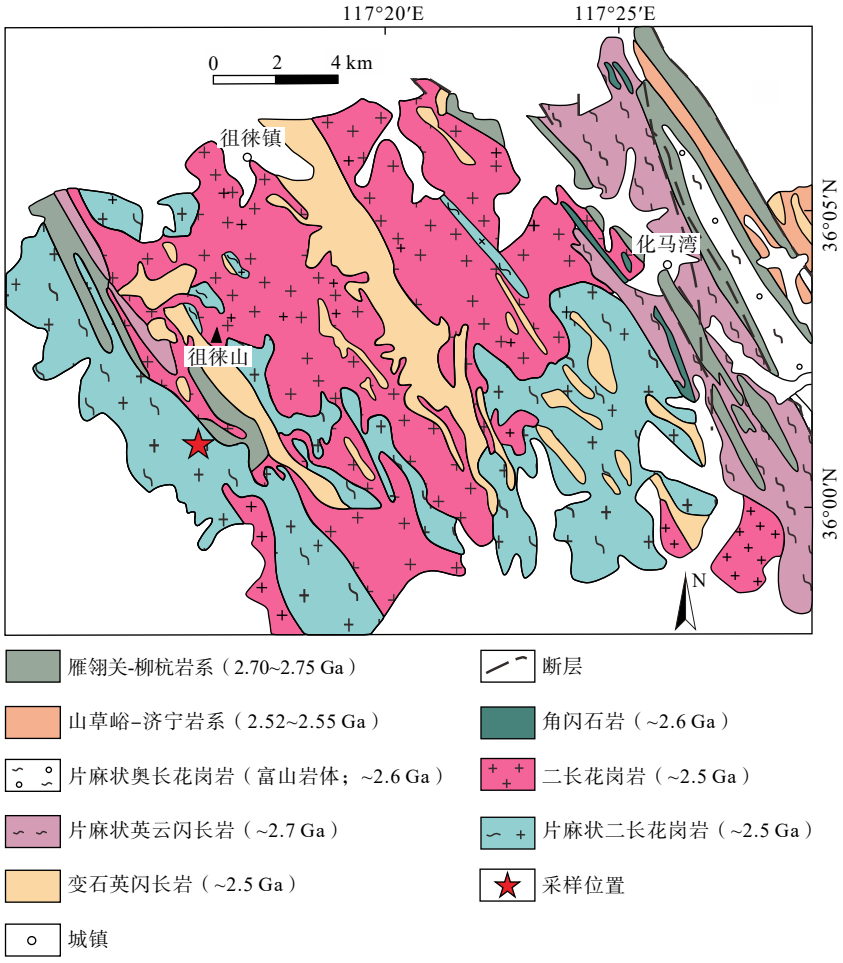



图2 鲁西徂徕山地区地质图(据万渝生等, 2015修改)

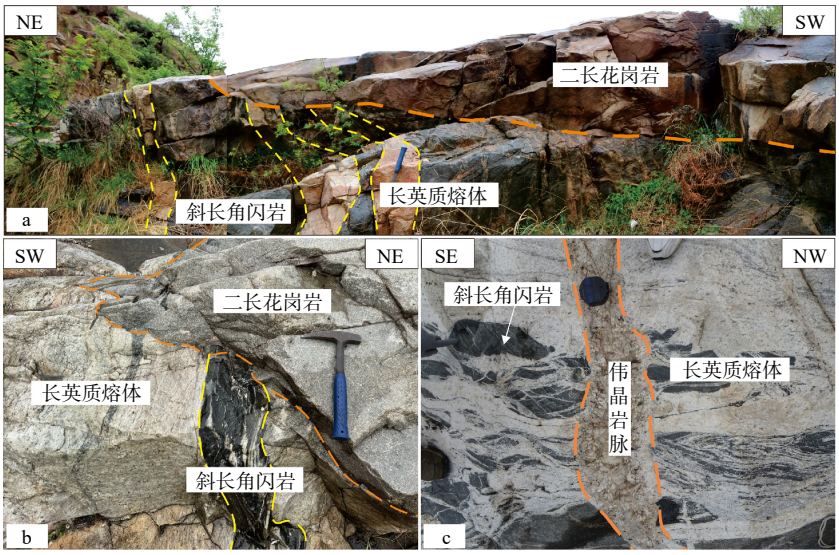
Fig. 2 Geological map of the Culai Mountain region, western Shandong (modified after Wan et al., 2015)

此次研究的大面积露头位于鲁西徂徕山黄石崖村沟底, 其主体岩性为混合岩, 野外看到大面积出露的斜长角闪岩中发育宽窄不一的长英质熔体, 表明岩体经历强烈的深熔作用(图3a)。后期块状的未变形新太古代晚期中粗粒二长花岗岩侵入了强烈变形的斜长角闪岩和长英质熔体, 两者界线较为截然(图3a、3b)。此外, 还见伟晶岩脉也截切了强烈变形的斜长角闪岩和长英质熔体的主体面理(图3c)。不同类型岩石之间穿切关系清晰可辨、接触界限截然、岩石类型分带明显, 是研究深熔作用与韧性变形叠加的最佳地点。

## 2 徂徕山野外深熔及韧性变形特征

### 2.1 深熔现象及流变学宏观特征

徂徕山黄石崖村露头发育强烈深熔作用和韧性变形叠加, 是区域上广泛发育深熔–韧性变形作用的典型地区(图4a)。区内岩石经历了大规模部




黄色与橙色虚线代表岩性分界线

a—多期岩浆事件截切关系剖面图；b—块状二长花岗岩截切斜长角闪岩和长英质熔体；c—未变形伟晶岩脉截穿斜长角闪岩和长英质熔体的主体面理

图 3　徂徕山黄石崖村沟底构造接触关系图

Fig. 3　Geological contact relationship at the bottom of a gully in the Huangshiya village, Culai Mountain region

(a) Cross-sections showing the truncation relationships of different generations of magmatism; (b) Massive monzongranite truncating amphibolite and felsic melts; (c) Undeformed pegmatite vein crosscutting the main foliation of amphibolite and felsic melts

Yellow and orange dashed lines represent lithological boundaries

分熔融形成典型的混合岩化特征。岩体经历部分熔融，浅色体呈浸染状分布在斜长角闪岩中，且不定向分布，显示原地深熔的特征(图 4b)。随着深熔作用的加强，熔体通过迁移与汇聚逐渐形成长英质脉体，这些脉体含量较高，显示其具有较高的熔融程度。脉体厚度从 3～10 cm 到 2 m 不等。局部可见浅色体脉相互交切，形成相互连通的网状结构(图 4c)。总体上浅色熔体呈条带状赋存于斜长角闪岩中(图 4d)，平行于斜长角闪岩的面理分布。浅色体还发育形态各异的揉流褶皱(图 4e)，无统一变形特征和方位，显示较强的流动性。局部可见脉体褶皱在转折端处显著增厚(图 4f)，表明熔体在流动过程中形成，指示浅色体在深熔过程中同时伴有构造挤压作用(Sawyer, 2008)。随着深熔作用的不断加强，长英质熔体逐渐占据主导位置，斜长角闪岩多呈包体残留在长英质熔体中，呈单个(图 4g)或者成群产出(图 4h)。

### 2.2　韧性变形特征

鲁西徂徕山地区出露的新太古代岩石主要呈北西—南东向带状展布，与区域构造线方位一致。研究区露头韧性变形构造十分丰富，根据岩石变形特征，呈现出弱应变域和强应变域分带明显的变形特征。在弱应变域，斜长角闪岩呈块状构造，未发生显著的定向排列或变形，浅色熔体在形成之后不定向分布，发育揉流褶皱，流变作用强(图 4e)。在强应变域，斜长角闪岩和深熔形成的长英质熔体遭受后期强烈的韧性变形叠加，多平行于斜长角闪岩的面理分布，整体呈条带状构造。二者具有相同变形特征，均发育倾角近直立、走向北西—南东向的面理 $S_2$(图 5a)和近水平的矿物拉伸线理 $L_2$(图 5b、5c)。浅色熔体表现出典型的 L 型构造岩(图 5c)，从示意图可以清楚地看到线理在 *XY* 和 *XZ* 平面上呈现出明显定向排列，在垂直 *X* 轴切面上矿物呈现出圆点状分布且未出现明显的面理特征。此外，可以看到早期 $S_1$ 面理在强烈的 $F_2$ 褶皱作用下被置换成近直立的 $S_2$ 面理(图 5d)。同时，可见长英质熔体强烈发育 A 型褶皱(图 5e、5f)，褶皱转折端处显著增厚，其褶皱枢纽产状与拉伸线理 $L_2$ 产状相一致，指示高温条件下的强烈韧性变形。除此之外，可见斜长角闪岩呈布丁体保留在长英质熔体中，大部分斜长角闪岩包体保留早期 $S_1$ 面理，与强应变域走向近平行，表示经历了强烈的挤压变形(图 5g、5h)。

斜长角闪岩和包体内均保留了早期深熔作用形成的面理 $S_1$，斜长角闪岩和长英质熔体均被后期




红色五角星为样品 24LX14-2 和 24LX14-9 的采样位置；橙色虚线代表揉流褶皱的轮廓线

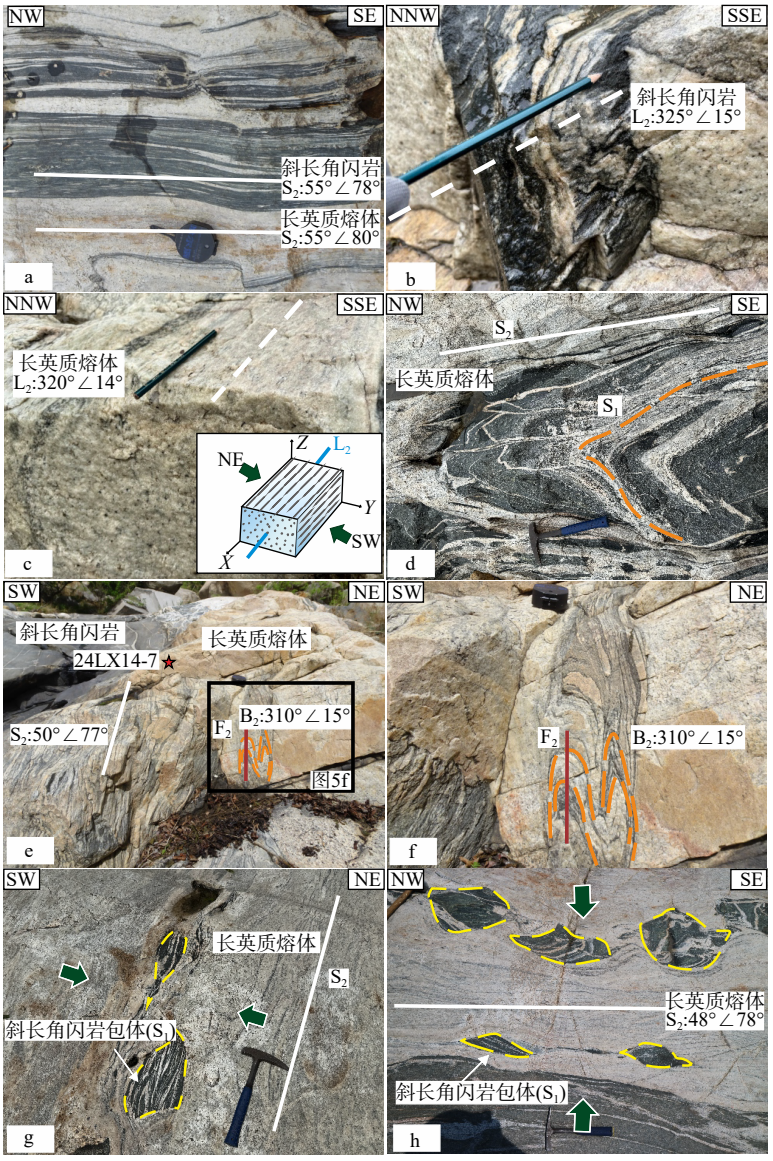
a—黄石崖村沟底露头俯瞰图；b—浅色体呈浸染状产于斜长角闪岩中（俯视）；c—浅色体呈相互贯穿的网状构造（俯视）；d—浅色体呈条带状产于斜长角闪岩中；e—长英质脉体发育揉流褶皱（俯视）；f—脉体褶皱转折端增厚，见红色箭头处（俯视）；g—斜长角闪岩包体单个产出；h—斜长角闪岩包体成群产出（俯视）

图 4 鲁西徂徕山地区深熔野外照片

Fig. 4 Field photos of anatexis in the Culai Mountain region, western Shandong

(a) Aerial view of the outcrop at the gully bottom in Huangshiya Village; (b) Disseminated leucosome melts within amphibolite (top view); (c) Leucosomes with interconnected network structure (top view); (d) Banded leucosomes in amphibolite; (e) Ptygmatic folds developed in felsic veins (top view); (f) Thickened fold hinge of veins, as indicated by the red arrows (top view); (g) Isolated amphibolite enclave within felsic melt; (h) Clustered amphibolite enclaves within felsic melt (top view)

The red pentagram marks the origin of samples 24LX14-2 and 24LX14-9; Orange dashed lines outline ptygmatic folds.




$S_1$—早期面理；$S_2$—晚期面理；$L_2$—晚期线理；$F_2$—区域第 2 期变形事件形成的褶皱；$B_2$—区域第 2 期变形事件的褶皱枢纽

白色实线代表晚期 $S_2$ 面理；白色虚线代表晚期 $L_2$ 线理；橙色虚线代表早期 $S_1$ 面理；红色五角星为样品 24LX14-7 的采样位置；红色实线代表轴迹；黄色虚线代表包体轮廓；绿色箭头代表挤压应力方向

a—强烈变形发育近直立面理的斜长角闪岩和长英质熔体；b—斜长角闪岩中发育的近水平线理；c—L 型构造岩及示意图，发育近水平线理；d—$S_1$ 在强烈的 $F_2$ 褶皱作用下被置换成近直立的 $S_2$；e—熔体发育 A 型褶皱和 $S_2$ 面理；f—A 型褶皱；g—呈布丁状构造的斜长角闪岩包体，可见残留 $S_1$ 面理；h—斜长角闪岩包体发育布丁构造，其内部可见残留 $S_1$ 面理

图 5　鲁西徂徕山地区韧性变形野外照片

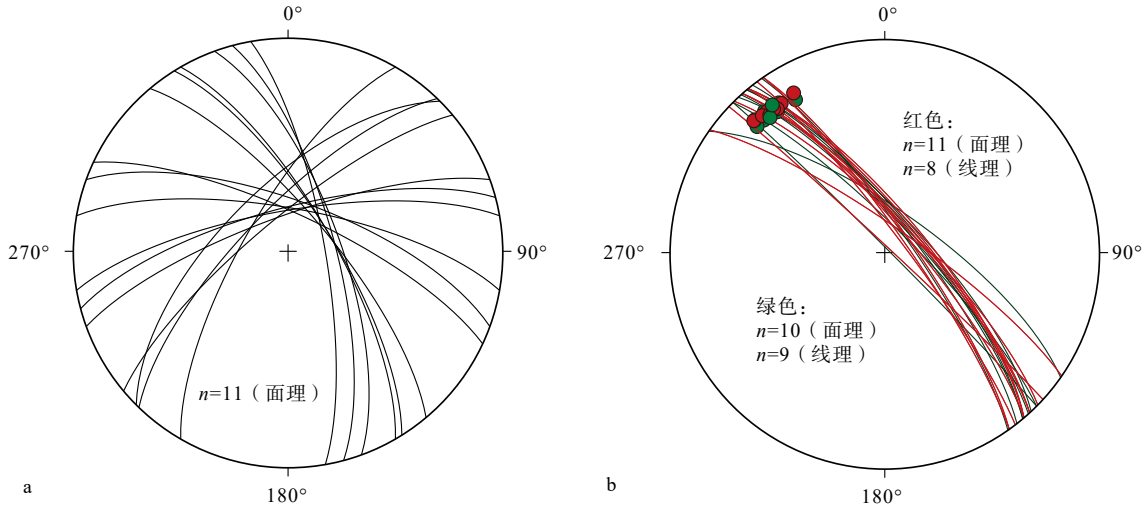
Fig. 5　Field photos of ductile deformation in the Culai Mountain region

(a) Intensely deformed amphibolite and felsic melts exhibit subvertical foliation; (b) Sub-horizontal mineral lineation in amphibolite; (c) L-tectonite (see schematic diagram) with sub-horizontal mineral lineations; (d) $S_1$ foliation replaced by nearly vertical $S_2$ foliation under intense $F_2$ folding; (e) Melts exhibiting Type A folds and $S_2$ foliation; (f) Type A folds; (g) Boudinaged amphibolite enclaves with relict $S_1$ foliation; (h) Amphibolite enclaves exhibiting boudinage structures with relict $S_1$ foliation

Solid white lines represent late-stage $S_2$ foliation; Dashed white lines represent late-stage $L_2$ lineation; Dashed orange lines represent early-stage $S_1$ foliation; The red pentagram marks the origin of sample 24LX14-7; Solid red lines represent fold axial traces; Dashed yellow lines represent enclave boundaries; Green arrows represent the orientation of compressional stress.

$S_1$–early foliation; $S_2$–late foliation; $L_2$–late lineation; $F_2$–folds formed during the regional second-phase deformation event; $B_2$–fold hinges of the second regional deformation event

直立水平 $F_2$ 褶皱所改造，置换为大规模走向北西的近直立 $S_2$ 面理，且具有低角度倾伏向北西的矿物拉伸线理 $L_2$。根据大量野外产状测量数据，对早期面理 $S_1$ 和后期面理 $S_2$、线理 $L_2$ 进行了极射赤平投影。早期面理 $S_1$ 散乱分布，无优选方位（图 6a）。斜长角闪岩和长英质熔体的面理 $S_2$ 和线理 $L_2$ 优选产状相似（图 6b），且和区域主构造线方位一致，说明二者共同经历了后期韧性变形叠加改造，形成方向一致的面理和线理构造。结合野外露头上缺乏明显剪切运动学标志的特征，综合判定该区域可能受控于强烈的北东—南西水平向挤压作用，以垂向缩短–侧向伸展的近压扁型应变为主。




a—早期面理 $S_1$ 投影图；b—受到韧性变形叠加的长英质熔体（红色）和斜长角闪岩（绿色）的面理（$S_2$）和拉伸线理（$L_2$）投影图（图为等角度下半球投影；大圆弧线为面理投影，圆点为线理投影）

图 6 徂徕山韧性变形极射赤平投影

Fig. 6 Stereographic projection of ductile deformation in the Culai Mountain region

(a) Stereogram of early-stage foliation $S_1$; (b) Stereogram showing foliation ($S_2$) and stretching lineation ($L_2$) in felsic melts (red) and amphibolite (green) overprinted by ductile deformation (lower-hemisphere, equal-angle projection; great circles represent foliation, circles denote lineation)

## 3 显微构造特征

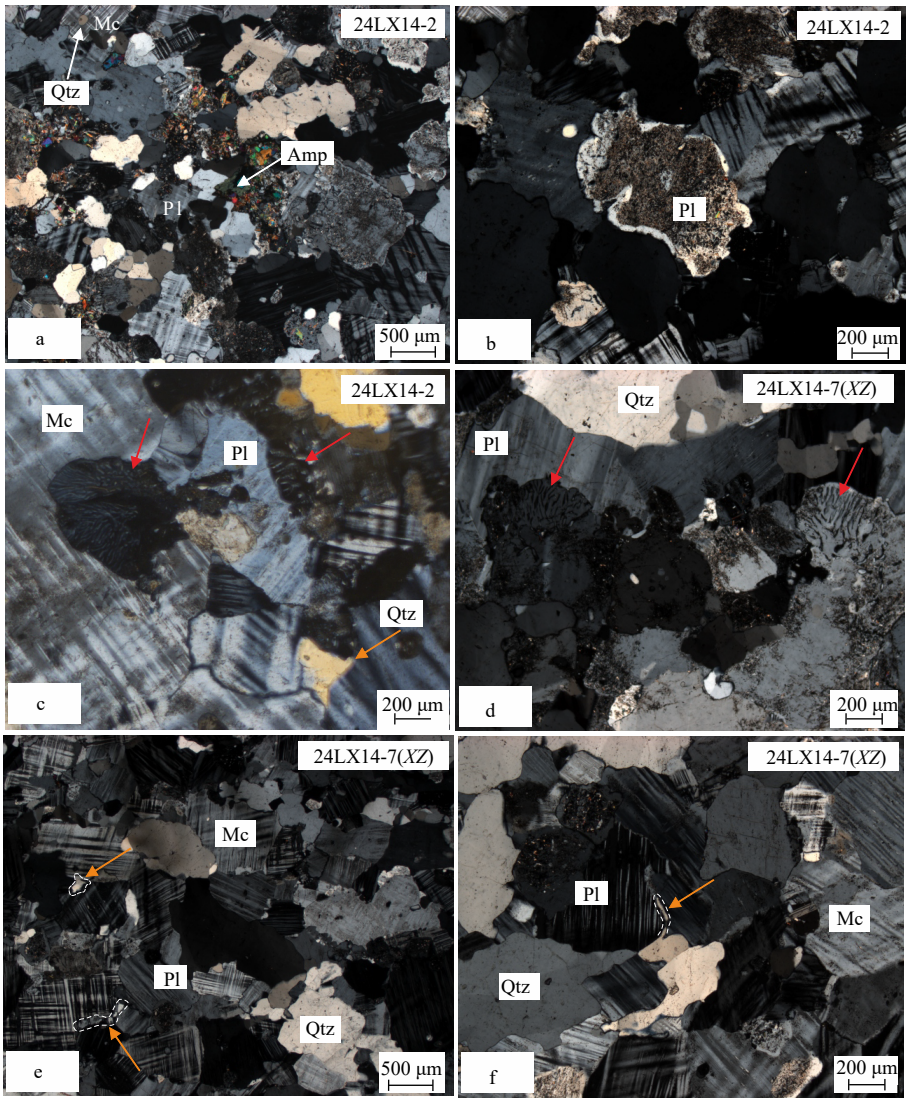
徂徕山地区岩石普遍遭受不同程度的变质–深熔–变形的影响，岩石的岩相学、深熔程度和显微构造特征各不相同。为此，对代表性样品（24LX14-2、24LX14-4、24LX14-5、24LX14-7、24LX14-9）进一步开展了镜下观察及岩相学分析。

### 3.1 深熔作用显微特征

深熔形成的浅色长英质熔体矿物组合以斜长石、石英、微斜长石为主，也含有少量角闪石等暗色矿物，矿物粒度明显变粗（图 7），可能为变质深熔过程中生长的结果。石英呈他形粒状嵌于微斜长石颗粒中，具有明显的交代结构（图 7a）。角闪石为他形粒状，边界遭受溶蚀，边部具有港湾状（图 7a），表明发生了部分熔融（Sawyer, 2010）。斜长石呈他形粒状，发育典型的聚片双晶，其受深熔作用的影响，晶体表面发生强烈的“糟化”和“暗化”现象，具有清晰的净边（图 7b）。微斜长石形成典型的格子双晶，可能为深熔熔体结晶的产物。长英质熔体中发育典型的蠕英结构（图 7c、7d），其特征表现为斜长石晶体内部发育蠕虫状石英交生体，显微结构特征显示，该结构系斜长石经历钾质交代作用的产物。此外，可以看到石英颗粒分布在被侵蚀的斜长石和钾长石的不规则接触边界处，粒间含有小熔体囊（图 7c、7e）、串珠状石英（图 7e）和熔体膜（图 7f），这是熔体侵蚀的痕迹（Sawyer, 2010），指示发生部分熔融。

### 3.2 韧性变形显微特征

韧性变形不同程度地叠加改造了发生变质深熔作用的岩石。斜长角闪岩内的角闪石、斜长石和少量的微斜长石、石英等均受到不同程度的韧性变形叠加和改造（图 8a—8d）。在弱应变域中的斜长角闪岩（样品 24LX14-9）矿物大体散乱分布，无定向




Amp—角闪石；Qtz—石英；Pl—斜长石；Mc—微斜长石；*XZ* 代表最大与最小主应变轴所确定的应变面

a—角闪石边界溶蚀，石英呈他形嵌于微斜长石颗粒中；b—斜长石增生净边结构；c—浅色体中发育的蠕英结构（红色箭头处），粒间发育熔体囊（橙色箭头处）；d—浅色体中发育的蠕英结构（红色箭头处）；e—钾长石边界发育有熔体囊、串珠状石英（橙色箭头处）；f—浅色体中矿物边界发育熔体膜（橙色箭头处）

图 7　深熔现象及流变学显微特征（样品 24LX14-2 和 24LX14-7）

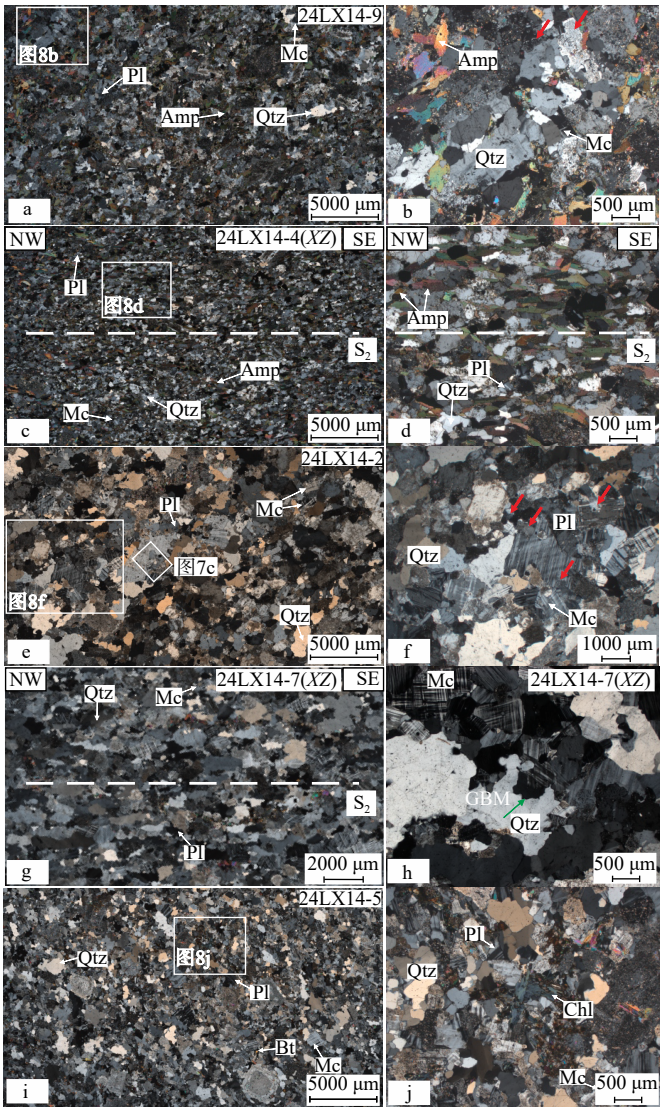
Fig. 7　Anatectic phenomena and rheological microscopic characteristics (sample 24LX14-2 and 24LX14-7)

(a) Amphibole boundary dissolution, anhedral quartz embedded within microcline grains; (b) Plagioclase overgrown by a clear rim; (c) Myrmekite texture in leucosome (red arrows), with intergranular melt pockets developed (orange arrow); (d) Myrmekite texture in leucosome (red arrows); (e) Melt pockets and bead-like quartzs along K-feldspar boundaries (orange arrows); (f) Melt film along mineral boundaries in leucosome (orange arrow)

Amp–amphibole; Qtz–quartz; Pl–plagioclase; Mc–microcline; *XZ* represents the strain plane determined by the maximum *X* and minimum *Z* principal strain

(图 8a)，局部可见蠕英结构(图 8b)，而强应变域中(样品 24LX14-4)可见角闪石等暗色矿物呈北西—南东定向排布(图 8c、8d)。斜长石呈他形粒状，发育典型的聚片双晶，局部绢云母化，边部发生溶蚀形成不规则状。石英颗粒呈他形粒状，具有明显波状消光的特征及定向排列(图 8d)，表明其经历了 $D_2$ 期韧性变形的叠加形成 $S_2$ 面理。

浅色体矿物组合以斜长石、石英、微斜长石为主，也含有少量角闪石等暗色矿物(图 8e—8h)。弱应变域中(样品 24LX14-2)浅色体矿物散乱分布，无




Amp—角闪石；Bt—黑云母；Qtz—石英；Pl—斜长石；Mc—微斜长石；Chl—绿泥石

a—弱应变域中块状斜长角闪岩（样品 24LX14-9）全薄片照片，矿物无规律随机分布；b—蠕英结构（红色箭头处）；c—强应变域斜长角闪岩（样品 24LX14-4）全薄片照片，角闪石沿北西—南东定向分布（白色虚线代表矿物面理方向）；d—局部放大照片，角闪石沿北西—南东定向分布（白色虚线代表矿物面理方向）；e—弱应变域中长英质熔体（样品 24LX14-2）全薄片照片，矿物不定向分布；f—蠕英结构（红色箭头处）；g—强应变域长英质熔体（样品 24LX14-7）全薄片照片，石英、长石多呈北西—南东定向展布，表现出波状消光的特征（白色虚线代表矿物面理方向）；h—长英质熔体（样品 24LX14-7）中可见石英动态重结晶（绿色箭头处）；i—二长花岗岩（样品 24LX14-5）全薄片照片，矿物定向明显；j—黑云母绿泥石化

图 8　韧性变形显微构造特征

Fig. 8　Microstructural characteristics of ductile deformation

(a) Whole thin-section image of a massive amphibolite (sample 24LX14-9) from a weakly-strained domain, showing randomly distributed minerals; (b) Myrmekite texture (red arrows); (c) Whole thin-section image of an amphibolite (sample 24LX14-4) from a highly-strained domain, with NW–SE oriented amphiboles (white dashed lines indicate mineral foliation); (d) Close-up view showing hornblende aligned along NW–SE orientation (white dashed lines indicate mineral foliation direction); (e) Whole thin-section image of felsic melt (sample 24LX14-2) from a weakly-strained domain with random mineral orientation; (f) Myrmekite texture (red arrows); (g) Whole thin-section image of felsic melt (sample 24LX14-7) from a highly-strained domain, exhibiting NW–SE aligned quartz and feldspar with undulatory extinction (white dashed lines mark foliation direction); (h) Dynamic quartz recrystallization in felsic melts (sample 24LX14-7) (green arrow); (i) Whole thin-section image of monzogranite (sample 24LX14-5), showing well aligned minerals; (j) Biotite chloritization

Amp–amphibole; Bt–biotite; Qtz–quartz; Pl–plagioclase; Mc–microcline; Chl–chlorite

定向(图 8e)，局部可见蠕英结构(图 8f)。强应变域中(样品 24LX14-7)石英、斜长石具有明显的定向排列(图 8g)，石英发育波状消光、带状消光、动态重结晶等。动态重结晶以颗粒边界迁移(GBM)为主(图 8h)，表明其受到 $D_2$ 期韧性变形的叠加，经历了强烈的塑性拉伸变形形成 $S_2$。

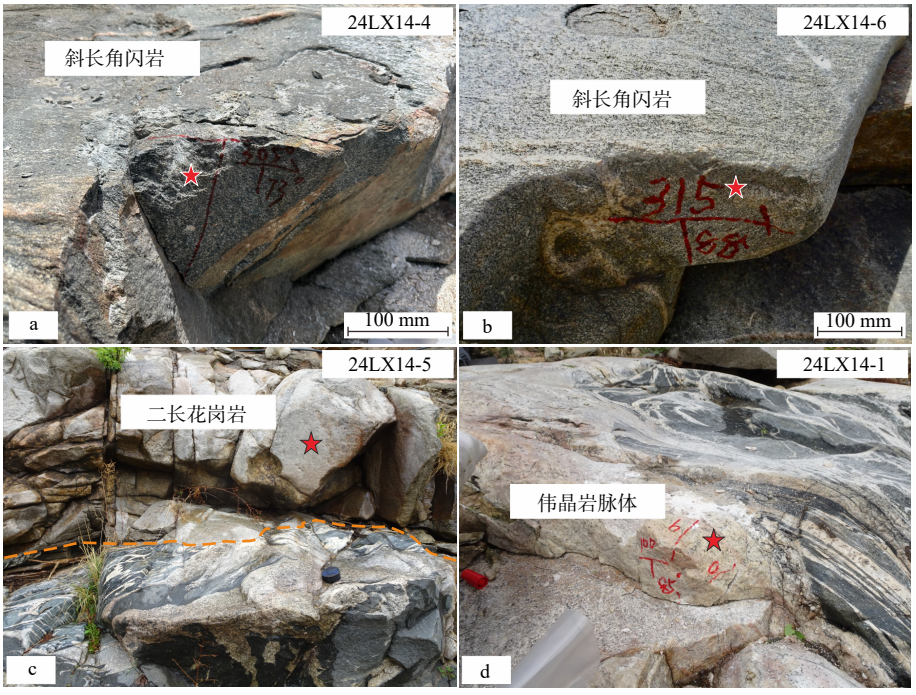
二长花岗岩(样品 24LX14-5)为后期侵入条带状斜长角闪岩且受变形叠加的岩石，矿物组成主要为斜长石、钾长石、石英、黑云母等，样品中矿物颗粒定向明显，颗粒边界较清晰，黑云母绿泥石化，斜长石表面绢云母化(图 8i、8j)。

## 4　锆石 U-Pb 年代学

为了恢复徂徕山地区构造演化过程，限定徂徕山深熔作用及韧性变形演化时间，文章采用经历了变质深熔的斜长角闪岩(样品 24LX14-4 和 24LX14-6)来确定深熔作用的时间，用同构造二长花岗岩(样品 24LX14-5)来确定韧性变形的时代，用未变形的伟晶岩脉体(样品 24LX14-1)来确定变形的最晚年龄。采样位置如图 9 所示，所有样品的测试结果详见文后 OSID 码中附表。

### 4.1　分析方法

测年样品(24LX14-4、24LX14-6、24LX14-5、24LX14-1)锆石的分选、制靶、阴极发光显微照相工作由广州市拓岩检测技术有限公司负责完成，锆石 U-Pb 测年和微量元素分析在南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)完成。锆石制靶流程首先是在双目镜下进行手工挑选，将挑选出的锆石固定在环氧树脂上，对其进行固结抛光。分析仪器为激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)。实验测试时的束斑直径为 32 μm，脉冲频率设置为 13 Hz。以单点剥蚀作为采样方式，以氦气作为剥蚀物质的载气，采用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器参数优化，确保达到仪器的最佳状态(Pearce et al., 1997)。U-Th-Pb 同位素分馏效应和仪器漂移校正通过外标标样 Plesovice 完成(Sláma et al., 2008)，




红色五角星代表样品采样位置；橙色虚线代表岩性分界线

a—斜长角闪岩(样品 24LX14-4)；b—斜长角闪岩(样品 24LX14-6)；c—同构造中粗粒二长花岗岩(样品 24LX14-5)；d—未变形伟晶岩脉体(样品 24LX14-1)

图 9　鲁西徂徕山地区定年样品野外照片

Fig. 9　Field photos of dating samples from the Culai Mountain region

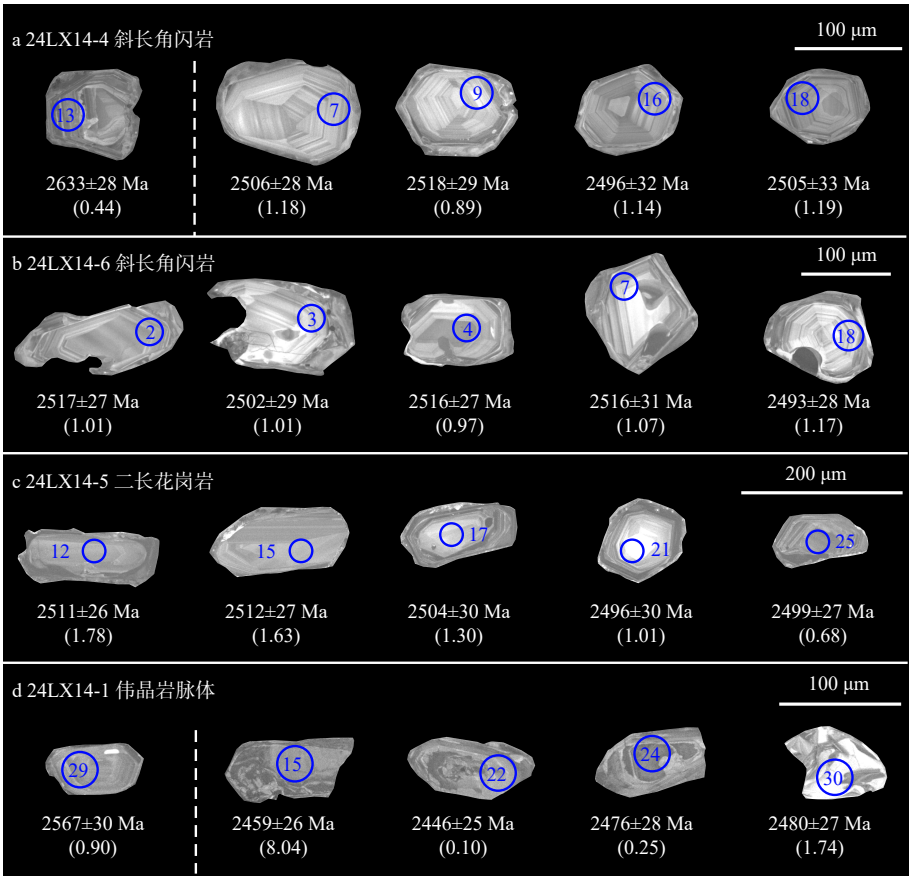
(a) Amphibolite (sample 24LX14-4); (b) Amphibolite (sample 24LX14-6); (c) Syn-tectonic medium-to-coarse-grained monzogranite (sample 24LX14-5); (d) Undeformed pegmatite vein (sample 24LX14-1)

Red pentagrams represent sample collection locations; Orange dashed lines represent lithological boundaries

仪器的监控通过内标标样 Qinghu 进行(Li et al., 2013)。采用 GLITTER ver4.0 程序对样品同位素比值进行处理,采用 Isoplot4.15 程序对样品的加权平均年龄进行计算和锆石 U-Pb 谐和图的绘制(Ludwig, 2012)。

### 4.2 分析结果

鲁西徂徕山地区锆石样品阴极发光图像及 U-Pb 年龄谐和图、加权平均年龄图和球粒陨石稀土元素配分图见图 10 和图 11。斜长角闪岩(24LX14-4)的锆石颗粒呈次浑圆状或短柱状,内部可见清晰且封闭的振荡环带,为典型的岩浆成因锆石(图 10a)。25 个岩浆锆石数据点的 Th/U 比值为 0.44～2.12。该样品获得的 24 个测试点在年龄谐和图上得到 1 条不一致线,对落在谐和线上的 13 个数据点进行$^{207}Pb/^{206}Pb$加权平均年龄计算,得到 2507±8 Ma(MSWD=0.39;图 11a)。其中 1 颗锆石的$^{207}Pb/^{206}Pb$表观年龄为 2633±28 Ma(图 11a),指示了继承锆石的信息。斜长角闪岩(24LX14-6)的锆石颗粒呈柱状或次浑圆状,内部显示典型的岩浆锆石振荡环带(图 10b)。22 个岩浆锆石数据点的 Th/U 比值为 0.66～1.63,该样品获得的 22 个测试点在年龄谐和图上得到 1 条不一致线,9 个锆石测试点结果落在谐和线上,计算得到$^{207}Pb/^{206}Pb$加权平均年龄为 2503±10 Ma(MSWD=0.56;图 11c)。2 个斜长角闪岩的稀土元素配分模式图较为相似,总体上均显示重稀土富集、Ce 正异常和 Eu 负异常明显等特征(图 11b、11d)。根据锆石 CL 图像及稀土元素特征综合考量,认为 2503±10 Ma 的锆石年龄最可能代表了熔融过程中新生熔体的结




蓝圈代表 U-Pb 年龄测试点位;括号内数字代表 Th/U

a—斜长角闪岩(样品 24LX14-4);b—斜长角闪岩(样品 24LX14-6);c—同构造中粗粒二长花岗岩(样品 24LX14-5);d—未变形伟晶岩脉体(样品 24LX14-1)

图 10 鲁西徂徕山地区锆石阴极发光图像

Fig. 10 Cathodoluminescence images of zircons from the Culai Mountain region, western Shandong

(a) Amphibolite (sample 24LX14-4); (b) Amphibolite (sample 24LX14-6); (c) Syn-tectonic medium-to- coarse-grained monzogranite (sample 24LX14-5); (d) Undeformed pegmatite vein (sample 24LX14-1)

Blue circles represent U–Pb dating spots; Numbers in parentheses represent Th/U ratios.

晶锆石年龄，代表了深熔作用的时代。

同构造二长花岗岩（24LX14-5）的锆石颗粒呈长柱状，内部可见振荡环带（图 10c），指示为岩浆成因。15 个岩浆锆石数据点的 Th/U 比值为 0.15～2.12，该样品获得的 15 个测试点在年龄谐和图上得到一条不一致线，其中 6 个锆石测点落在谐和线上或非常接近，得到$^{207}Pb/^{206}Pb$ 加权平均年龄为 2497±12 Ma（MSWD=0.61；图 11e）。在稀土元素配分模式图中，总体上显示重稀土略富集的特征（图 11f）。该年龄指示了同构造二长花岗岩的结晶年龄，也大体代表了韧性变形的时代。

伟晶岩脉体（24LX14-1）的锆石形态可分为 2 类：①类锆石以保留清晰的振荡环带为特征（图 10d）；②类锆石内部无明显结构或振荡环带不清晰，可能经历后期流体作用改造（图 10d）。其中①类锆石仅有一个数据点落在谐和线附近，其 Th/U 比值为 0.90，$^{207}Pb/^{206}Pb$ 表观年龄为 2567±30 Ma（图 11g），指示了继承锆石的信息。②类锆石的 Th/U 比值变化范围大，为 0.10～8.04，获得的上交点年龄为 2465±20 Ma（MSWD=7.1，*n*=6；图 11g）。在稀土元素配分模式图中，总体上显示重稀土略富集的特征，部分呈现 Eu 的正异常，代表了富含流体作用下的结晶现象（图 11h），因此该年龄可以指示区域韧性变形事件的最晚变形年龄。

## 5　讨论

### 5.1　徂徕山地区深熔作用和韧性变形叠加作用

鲁西徂徕山黄石崖村地区的岩石主要由斜长角闪岩、浅色长英质熔体和后期侵入的未变形–强变形二长花岗岩组成。根据野外观察，岩石均发育北西—南东走向近直立的面理，与区域构造线方向一致，总体呈现出弱应变域和强应变域分带特征。在弱应变域，斜长角闪岩局部保留了早前 $S_1$ 面理，长英质熔体局部呈浸染状或者网脉状分布。随着熔体的进一步富集，发育揉流褶皱，显示出明显的流变学特征（图 6a）。在长英质熔体占主导的区域韧性变形强烈。在强应变域，斜长角闪岩和长英质熔体均发育近直立面理 $S_2$ 和近水平的矿物拉伸线理 $L_2$（图 6b）。还可见熔体褶皱转折端明显加厚，是熔体在未完全固结流动过程中形成的，指示浅色体在深熔过程中伴有应力叠加（Sawyer, 2008）。

在微观尺度下，岩石也显示相同的深熔和变形特征。长英质熔体中广泛发育典型的蠕英结构，石英颗粒沿着受到侵蚀的钾长石和斜长石的不规则边界分布，粒间发育小熔体囊、串珠状石英和熔体膜结构。这些流变学特征表明该区域的岩石经历了广泛的部分熔融。斜长角闪岩和长英质熔体中的矿物呈定向分布，与岩石宏观的面理 $S_2$ 相平行。石英表现出波状消光等塑性变形特征，并发育颗粒边界迁移重结晶作用，表明岩石受到明显的韧性变形叠加影响。然而，该区域并未明显发育剪切运动学指示标志，如不对称旋斑等，表明这期变形作用主要为北东—南西向水平挤压应变，以近压扁型应变为主。

综上所述，徂徕山地区经历了广泛的深熔作用和韧性变形。当岩石发生部分熔融并出现熔体时，岩石转变为固–液两相介质，岩石的物理性质显著变化，强度大大降低，从而导致地壳的流变学性质发生巨大的变化（Cavalcante et al., 2016）。徂徕山黄石崖村变形发生在亚固相条件下，由于流变的各向异性，导致其面理产状多变。但随着熔体的富集，岩石整体刚度改变，使得应力更容易集中，岩石整体发生了韧性变形，发育近直立面理和近水平拉伸线理。同时，构造变形也对深熔作用的发展起到重要的促进作用。在新太古代晚期，徂徕山构造应力场表现为北东—南西向的水平挤压，促进整个区域沿着北西—南东向进一步发生伸展变形。

### 5.2　徂徕山地区深熔作用及韧性变形时代

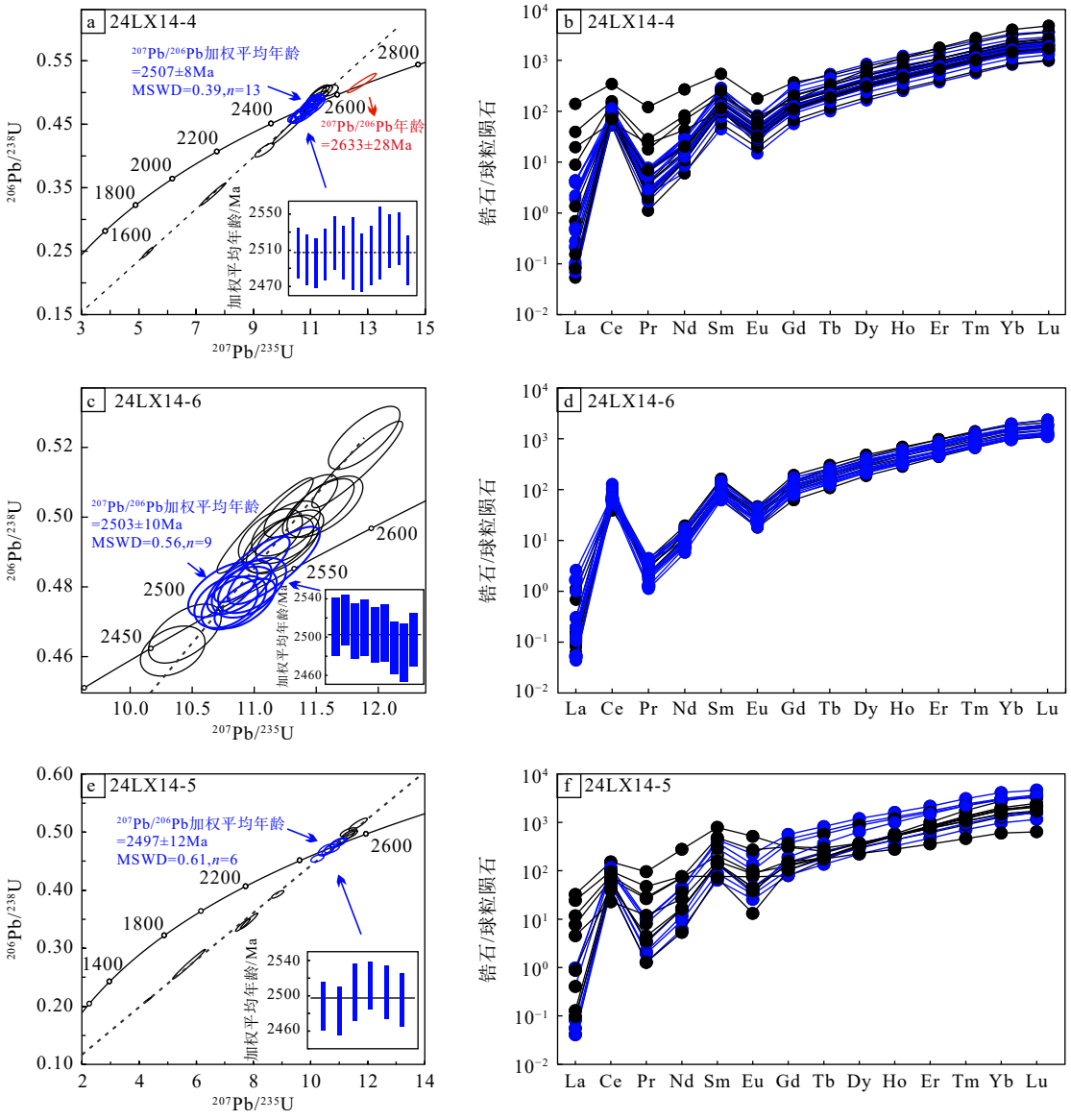
为进一步限定该地区的深熔作用及构造演化过程的时间，进行了精确的 LA-ICP-MS 锆石年代学研究。结合野外观察与镜下显微构造分析结果，表明该区域的深熔作用与韧性变形基本同期发生。斜长角闪岩样品（24LX14-4 和 24LX14-6）和同构造二长花岗岩（24LX14-5）的结晶年龄可以限定深熔作用的上限及韧性变形的时代。而未变形伟晶岩脉体（24LX14-1）截切了强烈变形的斜长角闪岩和长英质熔体，其年代学可以对韧性变形的下限起到很好的制约。斜长角闪岩（24LX14-4 和 24LX14-6）锆石 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 加权平均年龄分别为 2507±8 Ma 和～2503±10 Ma。综合锆石 CL 图像及稀土元素特征分析，认为～2503±10 Ma 年龄最可能代表了熔融过程中新生熔体的结晶锆石年龄，指示该地区在～2503 Ma 发生了一期较大规模的地壳深熔事件。同构造二长花岗岩（24LX14-5）锆石 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 加权平均年龄为～2497 Ma，解释为二长花岗岩的形成年龄，大体代

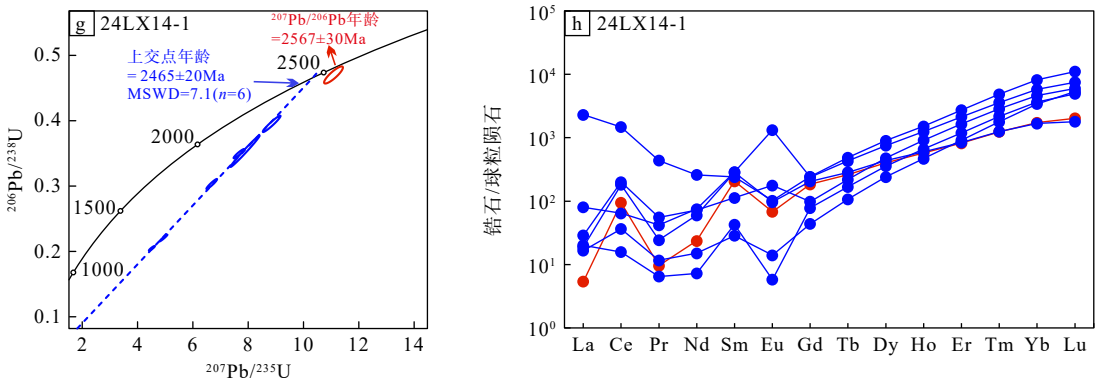
表了韧性变形的时代。伟晶岩脉体的上交点年龄为 2465±20 Ma, 限定区域韧性变形事件的最晚年龄。整体来看, 上述样品的年龄在误差范围内相互接近, 表明变质、深熔与韧性变形过程是在同一期构造事件中发生的。

### 5.3 深熔作用和韧性变形叠加的构造意义

鲁西地区是少数同时记录～2.7 Ga 和～2.5 Ga 强烈构造热事件且未明显受古元古代构造热事件改造的地区之一(曹国权, 1996; Ren et al., 2016; 万渝生等, 2020), 因而是研究新太古代地壳演化的关键地区。其中, ～2.5 Ga 构造热事件空间分布与作用机制研究尚存在争议。已有研究表明, ～2.5 Ga 构造热事件在鲁西 A 带发育广泛, 而 B 带则表现出明显的空间差异性(Dong et al., 2017)。其中 B 带西北部和中部主要记录～2.6 Ga 的深熔作用, ～2.5 Ga 的记录则较少, 仅在西南和局部发现有限的～2.5 Ga 变质深熔现象(Lu et al., 2008; Wan et al., 2011; Ren et al., 2016; Dong et al., 2017)。如万渝生等(2015)在徂徕山内识别出～2.53 Ga 的变质变形片麻状石英闪长岩, 为该地区～2.5 Ga 深熔作用的存在提供了初步证据。结合在徂徕山黄石崖地区的研究进一步印证了这一构造热事件的记录, 即广泛分布的浅色长英质熔体及伴生的韧性变形构造, 清晰指示该区在～2.5 Ga 期间经历了地壳大规模热驱动的构造重塑。

深熔作用不仅是构造热事件的重要反映, 更对后续的构造变形产生了深刻影响。研究表明, 深熔过程产生的熔体可显著降低岩石强度, 使得应力更容易集中, 为韧性变形的发生提供了有利条件(Rosenberg and Handy, 2005)。在徂徕山地区观察到






红点为继承锆石测点；蓝点为位于谐和线或附近的锆石测点；黑点为其他锆石测点

a—斜长角闪岩（样品 24LX14-4）的锆石 U-Pb 年龄谐和图和加权平均年龄图；b—斜长角闪岩（样品 24LX14-4）的球粒陨石稀土元素配分图；c—斜长角闪岩（样品 24LX14-6）的锆石 U-Pb 年龄谐和图和加权平均年龄图；d—斜长角闪岩（样品 24LX14-6）的球粒陨石稀土元素配分图；e—同构造中粗粒二长花岗岩（样品 24LX14-5）的锆石 U-Pb 年龄谐和图和加权平均年龄图；f—同构造中粗粒二长花岗岩（样品 24LX14-5）的球粒陨石稀土元素配分图；g—未变形伟晶岩脉体（样品 24LX14-1）的锆石 U-Pb 年龄谐和图；h—未变形伟晶岩脉体（样品 24LX14-1）的球粒陨石稀土元素配分图

图 11　鲁西徂徕山地区锆石 U-Pb 年龄谐和图、加权平均年龄图和球粒陨石稀土元素配分图

Fig. 11　Zircon U–Pb concordia diagrams, weighted mean age plot and chondrite-normalized REE patterns from the Culai Mountain region, western Shandong

(a) Zircon U–Pb concordia diagram and weighted mean age plot of amphibolite (sample 24LX14-4); (b) Chondrite-normalized REE pattern of amphibolite (sample 24LX14-4); (c) Zircon U–Pb concordia diagram and weighted mean age plot of amphibolite (sample 24LX14-6); (d) Chondrite-normalized REE pattern of amphibolite (sample 24LX14-6); (e) Zircon U–Pb concordia diagram and weighted mean age plot of syn-tectonic coarse-grained monzogranite (sample 24LX14-5); (f) Chondrite-normalized REE pattern of syn-tectonic coarse-grained monzogranite (sample 24LX14-5); (g) Zircon U–Pb concordia diagram of undeformed pegmatite vein (sample 24LX14-1); (h) Chondrite-normalized REE pattern of undeformed pegmatite vein (sample 24LX14-1)

Red circles represent inherited zircon analysis spots; Blue circles represent zircon analysis spots located on or near the Concordia curve; Black circles represent other zircon analysis spots.

的构造现象表明，～2.5 Ga 的深熔作用之后迅速叠加了韧性变形，发育有北西—南东向近直立面理及近水平矿物拉伸线理，但未明显发育不对称旋斑等简单剪切运动学指示标志。该构造组合特征表明该地区在新太古代晚期可能受控于强烈的北东—南西水平向挤压，揭示了深熔作用与韧性变形之间的时空耦合关系。

关于鲁西地区大地构造背景，以往研究普遍认为鲁西地区北西—南东向的线性构造样式为新太古代晚期水平构造体制下微陆块碰撞–拼合的产物（Wan et al., 2015; Gao et al., 2019; 刘树文等，2021）。已有研究通过系统的野外勘察，在鲁西地区识别出大量呈线状展布的韧性剪切带（～2.5 Ga; Zhang et al., 2022; Wang et al., 2024; 于萍等，2025）。这些剪切带主要集中分布于田黄、泰山、七星台、新泰、蒙山和沂水等区域，沿着鲁西的中部带及其两侧呈北西—北北西向带状延伸，发育近直立面理和近水平拉伸线理，剪切变形时代普遍为新太古代晚期（～2.5 Ga; Zhang et al., 2022; Wang et al., 2024; 于萍，2025），被视为微陆块间水平拼贴及地壳增厚的产物，标志着陆壳的克拉通化过程（王新社等，1999, 2005）。然而，张书慧等（2025）对七星台地区开展了宏观、显微构造解析、有限应变测量及锆石 U-Pb 年代学研究，认为鲁西地区不具备俯冲–碰撞造山带典型构造变形特征，如复杂的构造应力场的变化及变形叠加、大型逆冲推覆构造、构造混杂岩、前陆盆地以及高级变质作用等。因此，张书慧等（2025）认为该地区线性带构造变形样式更可能与某种特殊的构造位置有关，例如远离俯冲带的陆内应变集中区。这一观点在徂徕山地区的研究中被进一步佐证，区内未见典型的俯冲–碰撞造山带的构造变形特征，仅发育北东—南西向挤压和北西—南东向伸展的构造组合。更重要的是，该区～2.5 Ga 深熔与韧性变形作用在时间与空间上的紧密联系，揭示了其作为

一体化构造热事件对区域构造格局的共同塑造作用。综上,鲁西～2.5 Ga的地壳深熔作用与韧性变形在时空上紧密联系,二者协同造就了新太古代晚期鲁西地区主体北西—南东向展布的一级大地构造格局。

## 6 结论

通过对鲁西构造带中部的徂徕山黄石崖村典型露头的混合岩进行系统的野外宏观构造解析、室内岩相学、显微构造及LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学分析等工作,查明了徂徕山地区的深熔现象及流变学特征、韧性变形叠加构造样式及时限,并进一步探讨了二者的时空耦合关系及其构造背景。主要得出以下结论:

(1)鲁西徂徕山斜长角闪岩的熔体结晶年龄为～2503 Ma,代表新太古代晚期深熔作用的时代。同构造二长花岗岩的结晶年龄为～2497 Ma,未变形的伟晶岩脉体年龄为～2465 Ma,综合限定变形叠加时代为2497～2465 Ma。

(2)鲁西徂徕山变形以近压扁型应变为主,形成近直立的北西—南东向面理与近水平矿物拉伸线理,指示北东—南西向的水平挤压构造背景。

(3)鲁西徂徕山在新太古代末期经历强烈的地壳深熔作用,生成的熔体导致岩石强度显著降低,同时,北东—南西向水平挤压应力也促使熔体沿着北西—南东向伸展,揭示深熔作用与韧性变形之间的协同作用,共同造就了鲁西地区新太古代地壳构造变形样式。

## References


BUROV E B, 2011. Rheology and strength of the lithosphere[J]. Marine and Petroleum Geology, 28(8): 1402-1443.

CAO G Q, 1996. Early Precambrian geology of western Shandong[M]. Beijing: Geology Press: 1-210. (in Chinese)

CAVALCANTE G C G, VIEGAS G, ARCHANJO C J, et al., 2016. The influence of partial melting and melt migration on the rheology of the continental crust[J]. Journal of Geodynamics, 101: 186-199.

CHEN Z, 2017. Numerical simulations of crustal melting and rheology and theirs geological constraints[D]. Changchun: Jilin University. (in Chinese with English abstract)

CHENG Y Q, 1987. On migmatites and migmatization: half a century's recollection of certain related problems[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences(2): 5-19. (in Chinese)

DONG C Y, XIE H Q, KRÖNER A, et al., 2017. The complexities of zircon crystllazition and overprinting during metamorphism and anatexis: an example from the late Archean TTG terrane of western Shandong Province, China[J]. Precambrian Research, 300: 181-200.

DONG Y L, CAO S Y, ZHAN L F, et al., 2022. Tectono-magmatism evolution in the Gaoligong orogen belt during Neoproterozoic to Paleozoic: significance for assembly of east Gondwana[J]. Precambrian Research, 378: 106776.

GAO L, LIU S W, ZHANG B, et al., 2019. A Ca. 2.8 - Ga plume - induced intraoceanic arc system in the eastern North China Craton[J]. Tectonics, 38(5): 1694-1717.

GORCZYK W, VOGT K, 2015. Tectonics and melting in intra-continental settings[J]. Gondwana Research, 27(1): 196-208.

GU D X, ZHANG J J, LIN C, et al. , 2022. Anatexis and resultant magmatism of the Ama Drime Massif: implications for Himalayan mid-Miocene tectonic regime transition[J]. Lithos, 424-425: 106773.

HU Z P, ZHANG Y S, HU R, et al., 2016. Amphibole-bearing migmatite in North Dabie, eastern China: water-fluxed melting of the orogenic crust[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 125: 100-116.

KUSKY T M, POLAT A, WINDLEY B F, et al., 2016. Insights into the tectonic evolution of the North China Craton through comparative tectonic analysis: a record of outward growth of Precambrian continents[J]. Earth-Science Reviews, 162: 387-432.

LI J, LIU Y J, JIN W, et al., 2017. Neoarchean tectonics: insight from the Baijiafen ductile shear zone, eastern Anshan, Liaoning Province, NE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 139: 165-182.

LI J Y, CAO S Y, NEUBAUER F, et al. , 2021. Structure and spatial-temporal relationships of Eocene-Oligocene potassic magmatism linked to the Ailao Shan-Red River shear zone and post-collisional extension[J]. Lithos, 396-397: 106203.

LI W Y, CAO S Y, DONG Y L, et al., 2023. Crustal anatexis and initiation of the continental-scale Chongshan strike-slip shear zone on the southeastern Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 42(4): e2023TC007864.

LI X H, TANG G Q, GONG B, et al., 2013. Qinghu zircon: a working reference for microbeam analysis of U-Pb age and Hf and O isotopes[J]. Chinese Science Bulletin, 58(36): 4647-4654.

LI Y, REN P, XIE H Q, et al., 2020. Anatomy of a Neoarchean geological section in the Lihang area, western Shandong: field observation and SHRIMP U-Pb zircon dating[J]. Earth Science, 45(9): 3341-3352. (in Chinese with English abstract)

LI Y, XIE H Q, DONG C Y, et al., 2022. Zircon evolution from migmatite to crustally-derived granite: a case study of late Neoarchean migmatite in the Yishan area, western Shandong, North China Craton[J]. Gondwana Research, 112: 82-104.

LIU S W, BAO H, GAO L, et al., 2021. Late Neoarchean metavolcanics and geodynamics regime in central and eastern North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(1): 113-128. (in Chinese with English abstract)

LUDWIG K R, 2012. User's manual for isoplot version 3.75-4.15: a Geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkley: Berkeley Geochronological Centre Special Publication.

PEARCE N J G, PERKINS W T, WESTGATE J A, et al., 1997. A compilation of new and published major and trace element data for NIST SRM 610 and NIST SRM 612 glass reference materials[J]. Geostandards Newsletter, 21(1): 115-144.

REN P, XIE H Q, WANG S J, et al., 2015. 2.5 ～2.7 Ga tectono-thermal events in western Shandong geology and zircon SHRIMP dating of TTG rocks in Huangqian Reservoir, Taishan Mountain[J]. Geological Review,

61(5): 1068-1078. (in Chinese with English abstract)

REN P, 2016. ～2.6 Ga tectono-thermal event in western Shandong Province: geology, SHRIMP zircon dating and geochemistry[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)

REN P, XIE H Q, WANG S J, et al., 2016. A ca. 2.60 Ga tectono-thermal event in Western Shandong Province, North China Craton from zircon U–Pb–O isotopic evidence: plume or convergent plate boundary process[J]. Precambrian Research, 281: 236-252.

REN P, XIE H Q, WANG S J, et al., 2017. ～2.6 Ga anatexis in western Shandong: geology and geochemistry of leucosomes in the Taishan area[J]. Chinese Journal of Geology, 52(4): 1097-1119. (in Chinese with English abstract)

ROSENBERG C L, HANDY M R, 2005. Experimental deformation of partially melted granite revisited: implications for the continental crust[J]. Journal of Metamorphic Geology, 23(1): 19-28.

SAWYER E W, 2008. Atlas of migmatites[M]. Ottawa: NRC Research Press.

SAWYER E W, 2010. Migmatites formed by water-fluxed partial melting of a leucogranodiorite protolith: microstructures in the residual rocks and source of the fluid[J]. Lithos, 116(3-4): 273-286.

SAWYER E W, CESARE B, BROWN M, 2011. When the continental crust melts[J]. Elements, 7(4): 229-234.

SLÁMA J, KOŠLER J, CONDON D J, et al., 2008. Plešovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. Chemical Geology, 249(1-2): 1-35.

WAN Y S, LIU D Y, WANG S J, et al., 2010. Juvenile magmatism and crustal recycling at the end of the Neoarchean in western Shandong Province, North China Craton: evidence from SHRIMP zircon dating[J]. American Journal of Science, 310(10): 1503-1552.

WAN Y S, LIU D Y, WANG S J, et al., 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[J]. Precambrian Research, 186(1-4): 169-180.

WAN Y S, DONG C Y, LIU D Y, et al. , 2012a. Zircon ages and geochemistry of late Neoarchean syenogranites in the North China Craton: a review[J]. Precambrian Research, 222-223: 265-289.

WAN Y S, DONG C Y, XIE H Q, et al., 2012a. Formation ages of Early Precambrian BIFs in the North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. Acta Geologica Sinica, 86(9): 1447-1478. (in Chinese with English abstract)

WAN Y S, WANG S J, LIU D Y, et al., 2012b. Redefinition of depositional ages of Neoarchean supracrustal rocks in western Shandong Province, China: SHRIMP U–Pb zircon dating[J]. Gondwana Research, 21(4): 768-784.

WAN Y S, LIU D Y, WANG S J, et al., 2012b. Redefinition of Early Precambrian supracrustal rocks and formation age of BIF in western Shandong, North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(11): 3457-3475. (in Chinese with English abstract)

WAN Y S, DONG C Y, WANG S J, et al., 2014a. Middle Neoarchean magmatism in western Shandong, North China Craton: SHRIMP zircon dating and LA-ICP-MS Hf isotope analysis[J]. Precambrian Research, 255: 865-884.

WAN Y S, XIE S W, YANG C H, et al., 2014b. Early Neoarchean (～2.7 Ga) tectono-thermal events in the North China Craton: a synthesis[J]. Precambrian Research, 247: 45-63.

WAN Y S, LIU D Y, DONG C Y, et al. , 2015. Formation and evolution of Archean continental crust of the North China Craton[M]//ZHAI M G. Precambrian geology of China. Berlin: Springer: 59-136.

WAN Y S, WANG S J, REN P, et al., 2015. Neoarchean magmatism in the Culaishan Area, western Shandong: evidence from SHRIMP Zircon U-Pb dating[J]. Acta Geoscientica Sinica, 36(5): 634-646. (in Chinese with English abstract)

WAN Y S, DONG C Y, REN P, et al., 2017. Spatial and temporal distribution, compositional characteristics and formation and evolution of Archean TTG rocks in the North China Craton: a synthesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(5): 1405-1419. (in Chinese with English abstract)

WAN Y S, XIE H Q, DONG C Y, et al., 2020. Timing of tectonothermal events in Archean basement of the North China Craton[J]. Earth Science, 45(9): 3119-3160. (in Chinese with English abstract)

WAN Y S, DONG C Y, XIE H Q, et al., 2022. Huge growth of the late Mesoarchean-Early Neoarchean (2.6～3.0 Ga) continental crust in the North China Craton: a review[J]. Journal of Geomechanics, 28(5): 866-906. (in Chinese with English abstract)

WANG D M, HU J M, ZHAO Y F, et al., 2024. Kinematics and geochronology of the ductile shear zones in the western Shandong granite-greenstone belt: implications for the Neoarchean plate tectonics of the North China Craton[J]. Precambrian Research, 411: 107509.

WANG H B, CAO S Y, LI J Y, et al., 2022. High-pressure granulite-facies metamorphism and anatexis of deep continental crust: new insights from the Cenozoic Ailao Shan–Red River shear zone, Southeast Asia[J]. Gondwana Research, 103: 314-334.

WANG W, 2015. Geochemistry of the meta-basalts from the Taishan Group in the western Shandong Province and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(10): 2959-2973. (in Chinese with English abstract)

WANG W, YANG E X, ZHAI M G, et al., 2013. Geochemistry of ～2.7 Ga basalts from Taishan area: Constraints on the evolution of Early Neoarchean granite-greenstone belt in western Shandong Province, China[J]. Precambrian Research, 224: 94-109.

WANG W, ZHAI M G, WANG S J, et al., 2016. Neoarchean crustal evolution in western Shandong Province of the North China Craton: the role of 2.7-2.6 Ga magmatism[J]. Precambrian Research, 285: 170-185.

WANG X S, ZHUANG Y X, XU H F, et al., 1999. The implication of terminal Archean ductile shearing in continental crustal evolution of the Taishan Mountain region[J]. Regional Geology of China, 18(2): 57-63. (in Chinese with English abstract)

WANG X S, ZHANG S K, ZHANG F Z, et al., 2005. Kinematic vorticities and shear types of the Qingyi ductile shear zone in Western Shandong[J]. Acta Geoscientica Sinica, 26(5): 423-428. (in Chinese with English abstract)

WATTS A B, BUROV E B, 2003. Lithospheric strength and its relationship to the elastic and seismogenic layer thickness[J]. Earth and Planetary Science Letters, 213(1-2): 113-131.

XU H J, ZHANG J F, 2017. Anatexis witnessed post-collisional evolution of the Dabie orogen, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 145: 278-296.

XU J, XIA X P, YIN C Q, et al., 2022. Geochronology and geochemistry of the granitoids in the Diancangshan-Ailaoshan fold belt: implications on the Neoproterozoic subduction and crustal melting along the southwestern Yangtze Block, South China[J]. Precambrian Research, 383: 106907.

YU P, WANG D M, ZHANG Z G, et al., 2025. Dynamic characteristics in Late Neoproterozoic period of granite-greenstone belt in Luxi Area: evidence from deformation of structures in ductile shear belt[J]. Shandong Land and Resources, 41(1): 1-12. (in Chinese with English abstract)

YU S Y, LI S Z, ZHANG J X, et al., 2019. Multistage anatexis during tectonic evolution from oceanic subduction to continental collision: a review of the North Qaidam UHP Belt, NW China[J]. Earth-Science Reviews, 191: 190-211.

ZHAI M G, BIAN A G, ZHAO T P, 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archaean and its breakup during late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 43(S1): 219-232.

ZHAI M G, SANTOSH M, 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: a synoptic overview[J]. Gondwana Research, 20(1): 6-25.

ZHAI M G, SANTOSH M, 2013. Metallogeny of the North China Craton: link with secular changes in the evolving earth[J]. Gondwana Research, 24(1): 275-297.

ZHAI M G, 2019. Tectonic evolution of the North China Craton[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 722-745. (in Chinese with English abstract)

ZHANG H, HOU G T, ZHANG B, et al., 2022. Kinematics, temperature and geochronology of the Qingyi ductile shear zone: tectonic implications for late Neoarchean microblock amalgamation in the Western Shandong Province, North China craton[J]. Journal of Structural Geology, 161: 104645.

ZHANG S H, ZHANG J, ZHAO C, et al., 2025. Deformational characteristics of the Qixingtai ductile shear zone, western Shandong: implications for the Neoarchean tectonic evolution of the eastern North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 41(1): 237-259. (in Chinese with English abstract)

ZHAO G C, SUN M, WILDE S A, et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. Precambrian Research, 136(2): 177-202.

ZHAO G C, 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: key issues and discussion[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(8): 1772-1792. (in Chinese with English abstract)

ZHAO G C, ZHAI M G, 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: review and tectonic implications[J]. Gondwana Research, 23(4): 1207-1240.

ZHOU K, CHEN Y X, ZHENG Y F, et al., 2019. Migmatites record multiple episodes of crustal anatexis and geochemical differentiation in the Sulu ultrahigh - pressure metamorphic zone, eastern China[J]. Journal of Metamorphic Geology, 37(8): 1099-1127.

## 附中文参考文献

曹国权, 1996. 鲁西早前寒武纪地质[M]. 北京: 地质出版社: 1-210.

陈震, 2017. 陆壳熔融与流变的数值模拟及其地质约束研究[D]. 长春: 吉林大学.

程裕淇, 1987. 有关混合岩和混合岩化作用的一些问题: 对半个世纪以来某些基本认识的回顾[J]. 中国地质科学院院报(2): 5-19.

李源, 任鹏, 颉颃强, 等. 2020. 鲁西栗杭地区新太古代地质剖面的解剖: 野外研究和 SHRIMP U-Pb 锆石定年[J]. 地球科学, 45(9): 3341-3352.

刘树文, 包涵, 高磊, 等, 2021. 华北克拉通中东部新太古代晚期变质火山岩及动力学体制[J]. 岩石学报, 37(1): 113-128.

任鹏, 颉颃强, 王世进, 等, 2015. 鲁西 2.5～2.7Ga 构造岩浆热事件: 泰山黄前水库 TTG 侵入岩的野外地质和锆石 SHRIMP 定年[J]. 地质论评, 61(5): 1068-1078.

任鹏, 2016. 鲁西～2.6 Ga 构造热事件: 地质、SHRIMP 年代学及地球化学研究[D]. 北京: 中国地质科学院.

任鹏, 颉颃强, 王世进, 等, 2017. 鲁西～2.6 Ga 深熔作用: 泰山地区浅色脉体的野外地质和地球化学研究[J]. 地质科学, 52(4): 1097-1119.

万渝生, 董春艳, 颉颃强, 等, 2012a. 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, 86(9): 1447-1478.

万渝生, 刘敦一, 王世进, 等, 2012b. 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[J]. 岩石学报, 28(11): 3457-3475.

万渝生, 王世进, 任鹏, 等, 2015. 鲁西徂徕山地区新太古代岩浆作用: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年证据[J]. 地球学报, 36(5): 634-646.

万渝生, 董春艳, 任鹏, 等, 2017. 华北克拉通太古宙 TTG 岩石的时空分布、组成特征及形成演化: 综述[J]. 岩石学报, 33(5): 1405-1419.

万渝生, 颉颃强, 董春艳, 等, 2020. 华北克拉通太古宙构造热事件时代及演化[J]. 地球科学, 45(9): 3119-3160.

万渝生, 董春艳, 颉颃强, 等, 2022. 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期(2.6～3.0 Ga)巨量陆壳增生: 综述[J]. 地质力学学报, 28(5): 866-906.

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[J]. 岩石学报, 31(10): 2959-2973.

王新社, 庄育勋, 徐惠芬, 等, 1999. 泰山地区太古宙末韧性剪切作用在陆壳演化中的意义[J]. 中国区域地质, 18(2): 57-63.

王新社, 张尚坤, 张富中, 等, 2005. 鲁西青邑韧性剪切带运动学涡度及剪切作用类型[J]. 地球学报, 26(5): 423-428.

于萍, 王东明, 张志刚, 等, 2025. 鲁西花岗-绿岩带新太古代晚期动力学特征: 来自韧性剪切带构造变形的证据[J]. 山东国土资源, 41(1): 1-12.

翟明国, 2019. 华北克拉通构造演化[J]. 地质力学学报, 25(5): 722-745.

张书慧, 张健, 赵辰, 等, 2025. 鲁西七星台地区韧性剪切带变形特征及样式: 对华北克拉通东部新太古代演化的构造约束[J]. 岩石学报, 41(1): 237-259.

赵国春, 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论[J]. 岩石学报, 25(8): 1772-1792.

## 开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

扫码可查看文章中所有样品的测试结果信息，包括鲁西徂徕山地区锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果和鲁西徂徕山地区锆石微量元素测试结果，同时可下载文章相关信息