

河南鲁山地区太华杂岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义

董猛猛, 王长明, 姚恩亚, 贺昕宇, 夏锦胜, 王 乔, 陈晶源, 王长依,
杨立飞, 杜 斌, 石康兴

(中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 华北克拉通是我国最大且最古老的克拉通, 是研究太古宙岩浆活动和构造演化的理想区域, 一直备受地质学家的关注。太华杂岩是华北克拉通的重要组成部分, 主要分布在其南缘, 总体呈近北西西-南东东向分布。在详细野外地质调查的基础上, 对鲁山地区太华杂岩中的斜长角闪岩样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 以揭示其成岩及变质事件时代。样品的锆石 U-Pb 加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\,788 \pm 16$ 、 $2\,714 \pm 12$ 和 $1\,920 \pm 18$ Ma, 分别代表斜长角闪岩成岩年龄、早期变质事件年龄及晚期变质事件年龄。综合梳理前人的锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究数据, 分析并讨论了 3 次地质事件的地质意义: $2\,850 \sim 2\,700$ Ma 为一期重要的岩浆事件, 代表了太古宙新生地壳的形成; $2\,800 \sim 2\,600$ 和 $\sim 1\,900$ Ma 为两期变质事件, 期间太华杂岩分别遭受新太古代和古元古代两次变质变形改造。本次研究不仅可以解释太华杂岩的形成、变质时代及其地质意义, 而且为进一步研究华北克拉通南缘乃至整个华北克拉通的形成与演化过程提供了新的数据资料。

关键词: 锆石 U-Pb 年代学; 地质意义; 太华杂岩; 鲁山

中图分类号: P597+.3; P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)01-0001-18

LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the Taihua complex in Lushan area of Henan Province and its geological implications

DONG Meng-meng, WANG Chang-ming, YAO En-ya, HE Xin-yu, XIA Jin-sheng, WANG Qiao,
CHEN Jing-yuan, WANG Chang-nong, YANG Li-fei, DU Bin and SHI Kang-xing

(State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: As the largest and oldest craton in China, the North China Craton is an ideal region for investigating the magmatic activity and tectonic evolution of Archean period, and hence has attracted considerable interest among geologists in China. The Taihua complex is an important part of the North China Craton, distributed in WNW-ESE direction along its southern margin. In this study, the authors chose the Taihua complex in the Lushan area as the study object, investigated geological section in detail, and revealed formation age, metamorphic events age by LA-ICP-MS zircon U-Pb dating. Zircon U-Pb dating of the amphibolite yielded the weighted mean $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages of $2\,788 \pm 16$ Ma, $2\,714 \pm 12$ Ma, and $1\,920 \pm 18$ Ma, which represent the formation age of the amphibolite, first stage metamorphic age, and second stage metamorphic age, respectively. Together

收稿日期: 2017-02-18; 接受日期: 2017-07-17

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(2015CB452603); 高等学校学科创新引智计划(B07011); 中央高校基本科研业务费(ICZD16-16, 2652017223)

作者简介: 董猛猛(1991-), 男, 硕士生, 地质工程专业, E-mail: dongmengmengm@163.com; 通讯作者: 王长明(1974-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事矿床学研究, E-mail: wangcm@cugb.edu.cn。

网络优先出版时间: 2017-11-14; 网络优先出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20171114.1506.002.html>

with previous work about zircon U-Pb dating and Hf isotope, the authors analyzed and discussed the geological significance of the three geological events: 2 850~2 700 Ma is an important period of magmatic event, and represents the formation of Archean new crust; 2 800~2 600 Ma and ~1 900 represent the two metamorphic events and suggest that the Taihua complex was subjected to Neoproterozoic and Paleoproterozoic metamorphic alteration. The results obtained by the authors not only contribute to the interpretation of the formation age and the age of the metamorphic events of the Taihua complex and their geological significance but also provide new data for the further study of the formation and evolution of the southern margin of North China Craton and the whole North China Craton.

Key words: zircon U-Pb dating; geological implications; Taihua complex; Lushan

Fund support: National Basic Research Program of China (2015CB452603); 111 Project (B07011); Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (ICZD16-16, 2652017223)

华北克拉通是中国三大克拉通(华北、华南及塔里木克拉通)中最大且最古老的一个,广泛分布有太古宙-古元古代的岩石基底,经历了复杂的演化过程(Zhao *et al.*, 2001a, 2005, 2006, 2012b; Zhai *et al.*, 2005, 2010; Zhai and Santosh, 2013; Wan *et al.*, 2014; 万渝生等, 2015)。克拉通北界为中亚晚古生代造山带,南界为秦岭-大别中生代造山带,西侧为昆仑-祁连早古生代造山带,东侧为苏鲁超高压变质带(图 1)。许多研究者已对华北克拉通开展过大量的岩石学、构造地质学、地球化学、地质年代学以及变质作用等多方面的研究,并取得了相应的进展。华北克拉通早在太古宙已开始形成陆核,然后由多个微陆块拼合而成(白瑾等, 1993; 伍家善等, 1998; Zhai *et al.*, 2000),这一观点已被普遍接受,并且已基本建立早前寒武纪地质事件的主要年代学框架(Zhao *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015, 2016a, 2016b; 及引文)。但是,对其拼合时间和过程仍存在很大的争议。截至目前,主要存在以下 4 种观点: ① 华北克拉通东、西部陆块沿着近南北向的中部造山带在~1 850 Ma 发生碰撞(Zhao *et al.*, 1998, 2000, 2001a, 2005, 2012a; Zhang *et al.*, 2013); ② 赞同碰撞模型认识,但认为碰撞事件发生在~2 300 Ma(Kusky, 2011a, 2011b); ③ 中部造山带形成于太古宙连续的裂谷、俯冲、增生和碰撞过程,随后在 2 000~1 820 Ma 期间发生麻粒岩相变质作用和花岗质的岩浆作用(Zhai *et al.*, 2000, 2010); ④ 阜平和东部陆块在~2 100 Ma 合并,随后的第 2 次碰撞使西部陆块和阜平、东部陆块在~1 850 Ma 合并在一起(Liu *et al.*, 2002, 2004a, 2005; 刘树文等, 2004b; Faure *et al.*, 2007; Trap *et al.*, 2007, 2009a, 2009b)。对于古元古代变质作

用形成的高温、高压麻粒岩的原岩归属问题,既有侵入到 TTG 片麻岩和花岗片麻岩中的侵入岩,也有表壳岩系(沈其韩等, 1992; 郭敬辉等, 1993, 2002; 翟明国, 2009; Santosh *et al.*, 2007a, 2009a),限制了对其地壳生长与演化过程以及成因机制认识的统一(翟明国, 2009; 赵国春, 2009)。基于多方面的研究,Zhao 等(1998, 2000, 2001a, 2005, 2012a)将华北克拉通划分为东部陆块、西部陆块和近南北方向的中部造山带 3 个构造单元(图 1)。东部陆块经历了古元古代(2 200~1 900 Ma)裂谷事件,范围沿东部边缘一直到形成于~1 900 Ma 的胶-辽-吉带(Li *et al.*, 2004; Luo *et al.*, 2004; Li and Zhao, 2007);西部陆块是由北部的阴山地块和南部的鄂尔多斯地块沿着孔兹岩带在 1 950~1 920 Ma 合并而成(Zhao *et al.*, 2005; Santosh *et al.*, 2007a, 2007b, 2009a, 2009b);中部造山带拼合于~1 850 Ma,是由东部陆块和西部陆块之间的碰撞形成(Zhao *et al.*, 2005, 2006; Kröner *et al.*, 2005; Kusky *et al.*, 2007)。东、西部陆块的基底岩石主要包括新太古代的英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长质(TTG)片麻岩、变质的表壳岩系和少量的古、中太古代岩石(Jahn *et al.*, 1987; Zhao *et al.*, 2001b),又被未变质的中元古代-显生宙沉积岩覆盖(Jahn and Ernst, 1990);中部造山带为俯冲-碰撞造山带的证据包括洋壳、混合岩、高压麻粒岩、退变榴辉岩和地壳尺度的韧性剪切带等(Zhao *et al.*, 2001b)。

太华杂岩分布在华北克拉通南缘,其中鲁山地区是太华杂岩出露最为广泛的地区之一,近年来备受关注。鲁山地区太华杂岩大致以荡泽河为界分为两个部分,即出露于河东北侧的片麻岩系和西南侧的表壳岩系,均经历了角闪岩相和局部麻粒岩相变

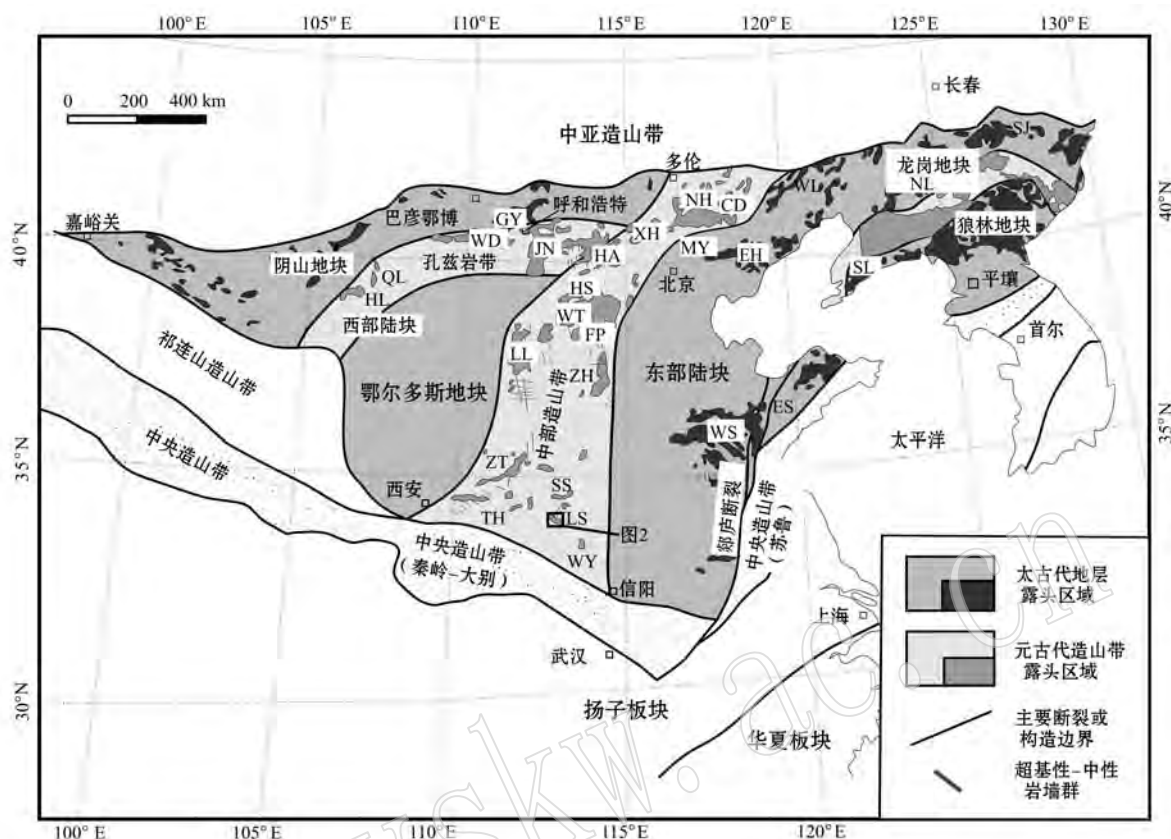


图1 华北克拉通构造框架图[依据 Zhao 等(2005)、Wang 等(2016b)修改]

Fig. 1 Tectonic framework of the North China Craton (modified after Zhao *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2016b)

主要基底露头的缩写: 承德(CD)、冀东(EH)、鲁东(ES)、阜平(FP)、固阳(GY)、怀安(HA)、贺兰山(HL)、恒山(HS)、济宁(JN)、吕梁(LL)、鲁山(LS)、密云(MY)、冀北(NH)、辽宁北部(NL)、祁连山(QL)、吉林南部(SJ)、辽宁南部(SL)、嵩山(SS)、太华(TH)、乌拉山-大青山(WD)、辽宁西部(WL)、鲁西(WS)、五台(WT)、舞阳(WY)、宣化(XH)、中条(ZT)、赞皇(ZH)

Abbreviations for main basement outcrops: Chengde (CD), Jidong (JD), Ludong (ES), Fuping (FP), Guyang (GY), Huai'an (HA), Helan-shan (HL), Hengshan (HS), Jining (JN), Liliang (LL), Lushan (LS), Miyun (MY), Jibei (NH), Northern Liaoning (NL), Qilianshan (QL), Southern Jilin (SJ), Southern Liaoning (SL), Songshan (SS), Taihua (TH), Wulashan-Daqingshan (WD), Western Liaoning (WL),

Luxi (WS), Wutai (WT), Wuyang (WY), Xuanhua (XH), Zhongtiao (ZT), Zhanhuang (ZH)

质作用(孙勇, 1983; Diwu *et al.*, 2010)。目前为止, 华北克拉通2 850~2 700 Ma 的岩石主要发现于河南鲁山(Kröner *et al.*, 1988; Sun *et al.*, 1994; 林慈奎, 2006; Liu Dunyi *et al.*, 2009; Diwu *et al.*, 2010; 卢俊生等, 2014; Zhou *et al.*, 2014b; Lu *et al.*, 2013, 2015)、山东西部(杜利林等, 2010; Wan *et al.*, 2011, 2014)、胶东地区(Jahn *et al.*, 2008; Wan *et al.*, 2014; 谢士稳等, 2015)以及五台、阜平、恒山、赞皇、中条等地区(Kröner *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2013; 路增龙等, 2014; Wan *et al.*, 2014)。这与全球其他许多典型克拉通2 700 Ma 的地壳增生、造山带的形成以及超级大陆的循环在时间上具有很强的 consistency (Condie, 1998, 2000; O'Neill *et al.*, 2007)。该地区前人测年工作主要针对中太古代晚

期、新太古代早期(2 850~2 750 Ma)的岩浆事件(Kröner *et al.*, 1988; Sun *et al.*, 1994; 林慈奎, 2006; Liu Dunyi *et al.*, 2009; Diwu *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2013, 2015; 卢俊生等, 2014; Zhou *et al.*, 2014b)以及古元古代(~1 900 Ma)的变质事件(Wan *et al.*, 2006; Lu *et al.*, 2013, 2015; 卢俊生等, 2014; Zhou *et al.*, 2014a, 2014b, 2014c), 但对于新太古代早期(2 800~2 700 Ma)的变质事件研究较少, 并且结果存在着多期性。因此, 对河南鲁山地区太华杂岩进行详细的年代学研究, 不仅可以解析太华杂岩的形成时代及其地质意义, 而且对限定华北克拉通地壳的增长和构造研究也具有重要意义。

本文在对华北克拉通南缘鲁山地区太华杂岩进行详细野外地质调查基础上, 开展了斜长角闪岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究, 解析太华杂岩

形成及其变质时代,并综合梳理了前人对锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究的数据,分析讨论了太华杂岩 3 次地质事件的地质意义,为进一步研究华北克拉通南缘乃至整个华北克拉通的形成与演化过程提供新的数据资料和参考。

1 区域地质背景

太华杂岩广泛出露于华北克拉通南缘,呈北西-南东东方向展布,从山西经过河南到安徽省,全长约 400 km,覆盖面积约 9 000 km²,主要包括华山、崤山、洛宁、鲁山、舞阳和安徽霍邱、蚌埠等(Diwu *et al.*, 2014)。其中,鲁山是太华杂岩出露最为广泛的地区之一,面积多达 300 km²(卢俊生等, 2014)。在鲁山岩体的东北端,太华杂岩以断层接触关系被中元古代汝阳群和寒武纪沉积岩所覆盖;在其西南端,

则被中元古代熊耳群不整合覆盖(图 2)。基于地层学的知识,前人将这套杂岩称为太华群,并且根据构造特征和岩石组成等方面的研究,大致沿着荡泽河将其分为上太华群和下太华群两个亚群,上太华群不整合上覆于下太华群之上(图 2)。上太华群位于荡泽河西南侧,包括铁山岭组、水底沟组和雪花沟组(图 2),岩石类型复杂,主要有石墨化或含石榴石的变质泥质片麻岩、大理岩、石英岩、片麻状花岗岩、斜长角闪岩和条带状铁建造(BIFs)等;下太华群(即荡泽河组)位于荡泽河东北侧,主要包括 TTG 片麻岩和包含于 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩。近年来,多数研究者将太华群这套杂岩称为太华杂岩,基于岩性、构造、变质和年代学的不同,也将其分为两个部分,即出露于荡泽河东北侧的片麻岩系和其西南侧的表壳岩系(如 Diwu *et al.*, 2010)。鉴于太华群并非单一岩群,改称为太华杂岩更为合适,为方便下文

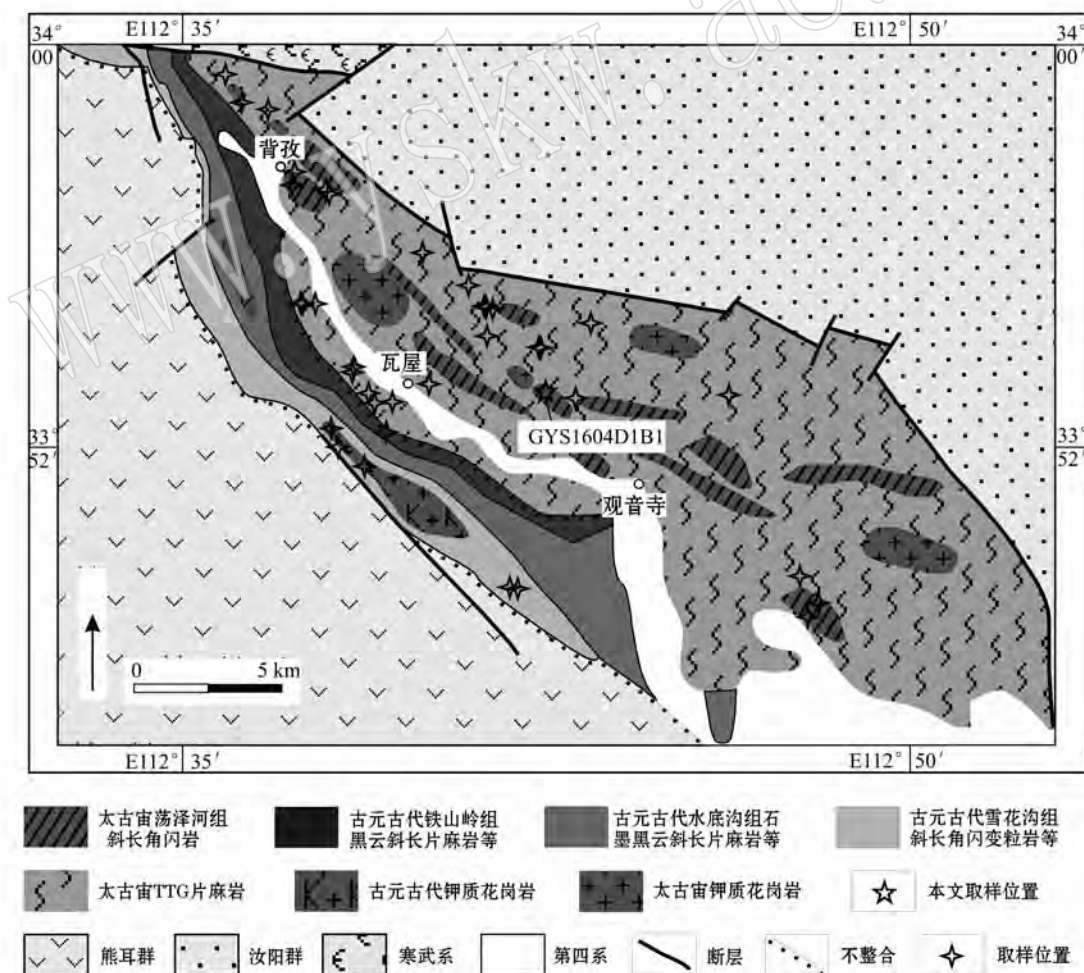


图 2 鲁山地区地质简图及采样点位置(依据 Zhou *et al.*, 2014a 修改)

Fig. 2 Geological sketch map of the Lushan area showing the sampling spots (modified after Zhou *et al.*, 2014a)

讨论, 本文采用太华杂岩这一称谓。前人(孙勇, 1983)研究表明, 鲁山地区太华杂岩经历了角闪岩相和局部麻粒岩相变质作用。

2 样品介绍和分析方法

2.1 样品介绍

本文研究的样品 GYS1604D1B1 为荡泽河组斜长角闪岩, 它与 TTG 片麻岩存在着密切的关系, 综合考虑前人研究(Zhou *et al.*, 2014b)以及本次野外工作, 认为斜长角闪岩呈夹层状或包体状分布于 TTG 片麻岩中(图 3a、3b)。本次采集的样品新鲜(图 3c), 位于观音寺乡马三庄村头, 坐标: 33°53′03.51″N, 112°42′36.88″E。样品整体呈墨绿色, 块状构造(图 3d), 中细粒结构(图 4a)。主要由角闪石(60%~70%)、斜长石(20%~30%)、石英(5%~10%)组成(图 4a、4b), 副矿物主要为锆石等。其中, 角闪石呈暗绿色, 自形-半自形、短柱状(图 4c), 大部分粒径在 0.5~1 mm 之间, 少数可达 2~3 mm(图 4a、4b); 斜长石呈半自形或他形, 具有聚片双晶(图 4d); 石英

含量较少, 乳白色, 大部分为自形晶, 在正交偏光下可见波状消光(图 4d)。显微镜下局部可见蚀变, 主要为角闪石蚀变为绿泥石(图 4e、4f)。

2.2 分析方法

首先对全岩样品进行无污染加工和锆石单矿物分选, 由河北廊坊实验室完成; 然后对锆石进行制靶、CL、背散射、透反射照相处理, 在北京锆年领航科技有限公司完成; 最后进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位定年分析, 该项测试工作在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石 U-Pb 定年工作在连接 GeoLas200M 型紫外激光剥蚀系统的 Agilent 7500a 型 LA-ICP-MS 上进行, 激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M。该系统由德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102ArF 准分子激光器(波长 193 nm)与 MicroLas 公司设计的光学系统组成, 斑束直径可以从 4 到 120 μm 逐档变化。单脉冲能量 200 mJ, 最高重复频率 20 Hz, 平均功率 4 W。经光学系统匀光和聚焦, 能量密度可达 20 J/cm²。LA-ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a, 该仪器独有的屏蔽炬(Shield Torch)可明

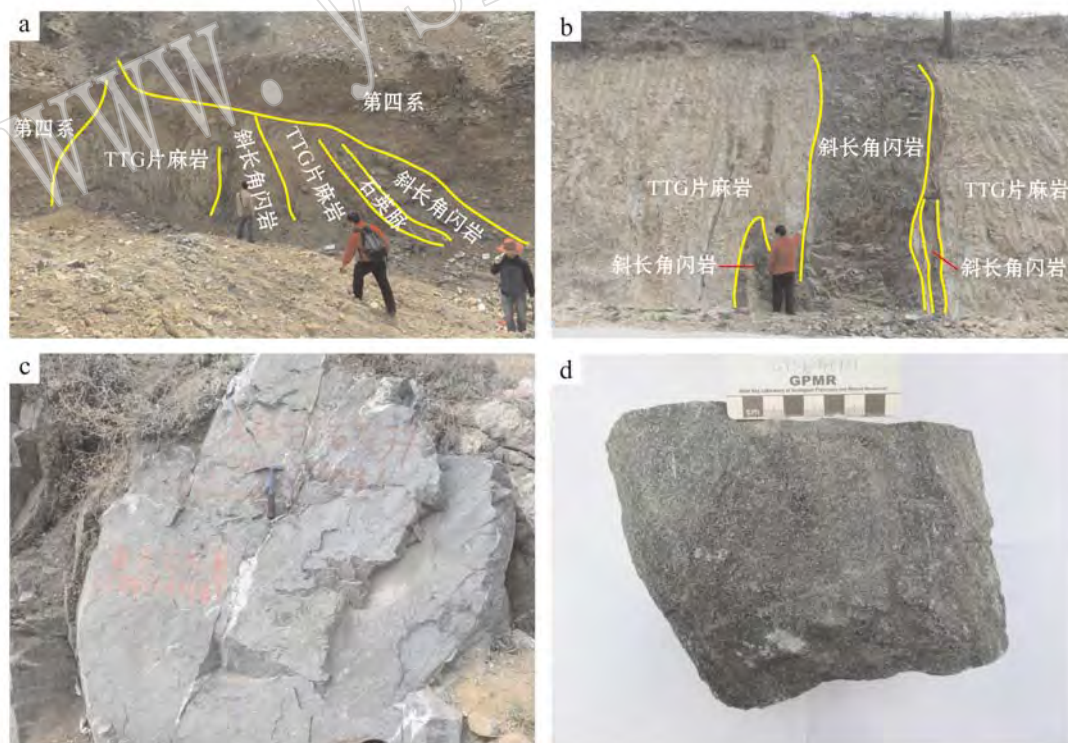


图3 野外照片

Fig. 3 Field photographs

a、b—斜长角闪岩与 TTG 片麻岩之间的关系; c—野外露头; d—手标本
a, b—the relation between amphibolite and TTG gneiss; c—outcrop; d—hand specimen

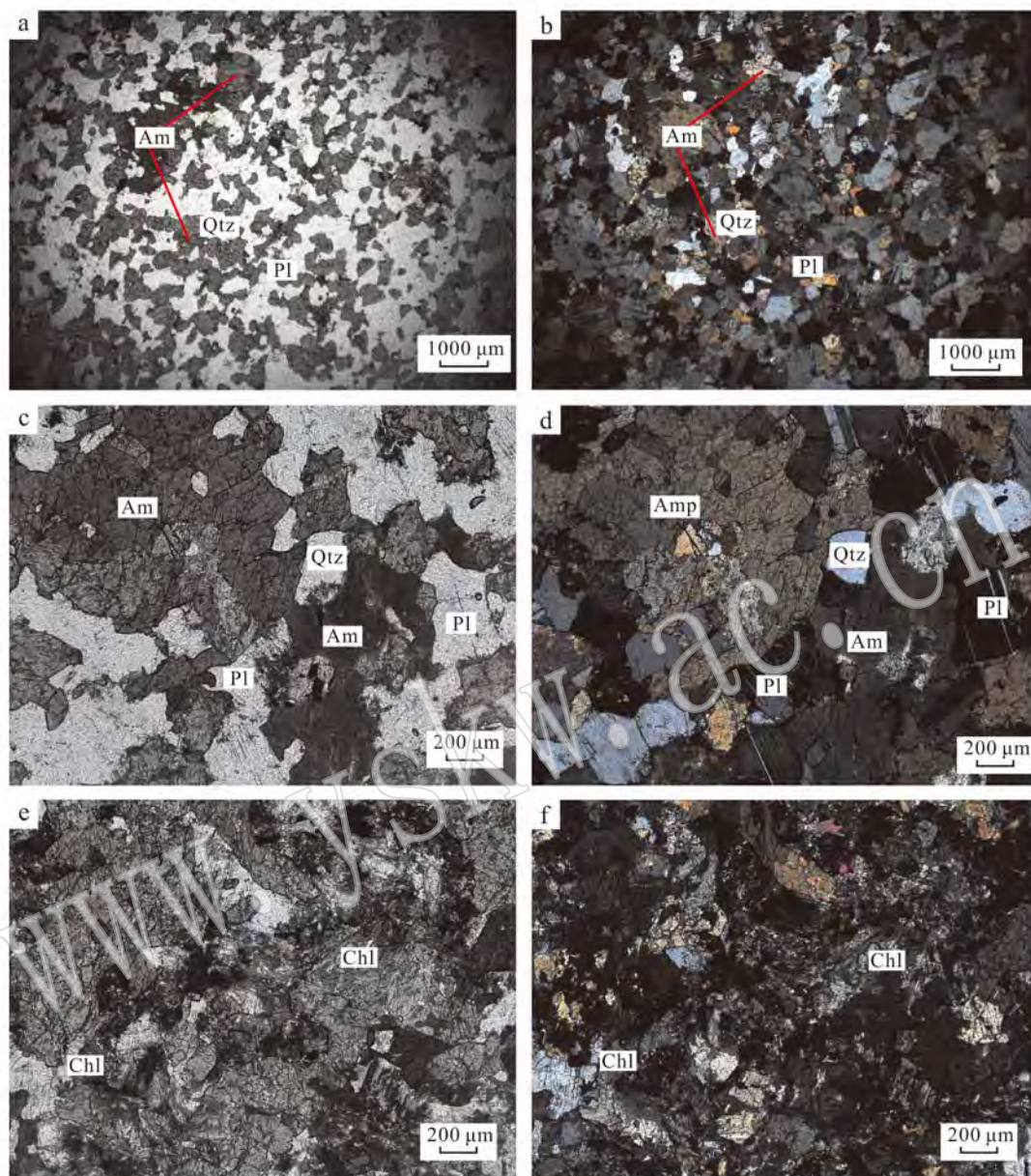


图 4 鲁山地区斜长角闪岩的显微照片

Fig. 4 Photomicrograph of amphibolite in the Lushan area

a、c、e—单偏光；b、d、f—正交偏光；Am—角闪石；Pl—斜长石；Qtz—石英；Chl—绿泥石

a, c, e—plainlight; b, d, f—crossed nicols; Am—amphibole; Pl—plagioclase; Qtz—quartz; Chl—chlorite

显提高分析灵敏度(^{238}U 在激光斑束直径为 $40\ \mu\text{m}$ 时为 $4\ 500\ \text{cps/ppm}$)。

测试时,先将待测样品和标准锆石(91500)及人工合成的硅酸盐玻璃(NIST SRM 610)分别粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后抛光至样品露出一个平面。样品测定之前用浓度为 3% 的 HNO_3 清洗样品表面,以除去样品表面的污染。激光剥蚀采用的斑束直径为 $20\ \mu\text{m}$,频率为 $10\ \text{Hz}$ 。采样为单点剥蚀方式,以 He 作为剥蚀物质的载气。由于采用高纯度的 Ar 气和 He 气, ^{204}Pb 和 ^{202}Hg 的背景均 $< 100\ \text{cps}$ 。LA-ICP-MS 数据采集选用 1 个质量峰 1 点的跳峰方式(peak jumping),单点停留时间(dwell time)分别设定 $15\ \text{ms}$ (^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb)和 $10\ \text{ms}$ (Th 和 U)。每测定 5 个样品点测定 1 个锆石 91500 和 1 个 NIST 610。每个样品点的气体背景采集时间为 $30\ \text{s}$,信号

μm ,频率为 $10\ \text{Hz}$ 。采样为单点剥蚀方式,以 He 作为剥蚀物质的载气。由于采用高纯度的 Ar 气和 He 气, ^{204}Pb 和 ^{202}Hg 的背景均 $< 100\ \text{cps}$ 。LA-ICP-MS 数据采集选用 1 个质量峰 1 点的跳峰方式(peak jumping),单点停留时间(dwell time)分别设定 $15\ \text{ms}$ (^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb)和 $10\ \text{ms}$ (Th 和 U)。每测定 5 个样品点测定 1 个锆石 91500 和 1 个 NIST 610。每个样品点的气体背景采集时间为 $30\ \text{s}$,信号

采集时间为 40 s。

数据处理采用 GLITTER (ver 4.0, Macquarie University) 程序, 年龄计算以标准锆石 (91500) 为外标进行同位素比值分馏校正。样品的谐和图、加权平均年龄计算及绘制均采用 Isoplot (ver3) 完成 (Ludwig, 2003)。元素含量计算时, 采用 NIST610 为外标, Si 为内标。在样品分析过程中, 获得国际标样 GJ-1 的年龄分析结果为 $(603.1 \pm 3.0) \text{ Ma}$ ($n = 14$, 2σ), 在误差范围内与对应的年龄推荐值完全一致 (Wiedenbeck *et al.*, 1995)。

3 分析结果

样品斜长角闪岩 (GYS1604D1B1) 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试数据列于表 1。对挑选的 19 颗锆石进行了 20 个分析点的 U-Pb 同位素年龄分析, 其阴极发光 (CL) 图像和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 数

据谐和图见图 5 和图 6。根据锆石的 U-Pb 年龄数据 (表 1) 及阴极发光 (CL) 图像特征 (图 5), 并结合锆石 U-Pb 年龄谐和图及柱状图 (图 6a、6b), 除了 1 颗较老的继承锆石 ($2\,838 \pm 21 \text{ Ma}$) 外, 可将该样品的锆石年龄分为 3 组:

第 1 组: 由 6 个分析点组成, 分别为 11、13、14、17、18、19 号。阴极发光 (CL) 图像 (图 5) 显示, 这些锆石颗粒形状呈半自形-自形、长柱状, 大小在 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 之间, 长宽比为 $1:1 \sim 3:1$ 之间。少数锆石颗粒 (17、18 号) 具有相对明显的震荡环带, 大部分均具有模糊的环带结构或均匀结构, Th 和 U 的含量分别为 $8.73 \times 10^{-6} \sim 32.34 \times 10^{-6}$ 和 $31.54 \times 10^{-6} \sim 90.06 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 $0.25 \sim 0.52$ (表 1), 属于岩浆成因锆石 (Hoskin and Schaltegger, 2003)。6 个分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于 $2\,813 \sim 2\,765 \text{ Ma}$ 之间, 其加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为 $2\,788 \pm 16 \text{ Ma}$ (图 6c), 可解释为斜长角闪岩的成岩年龄。

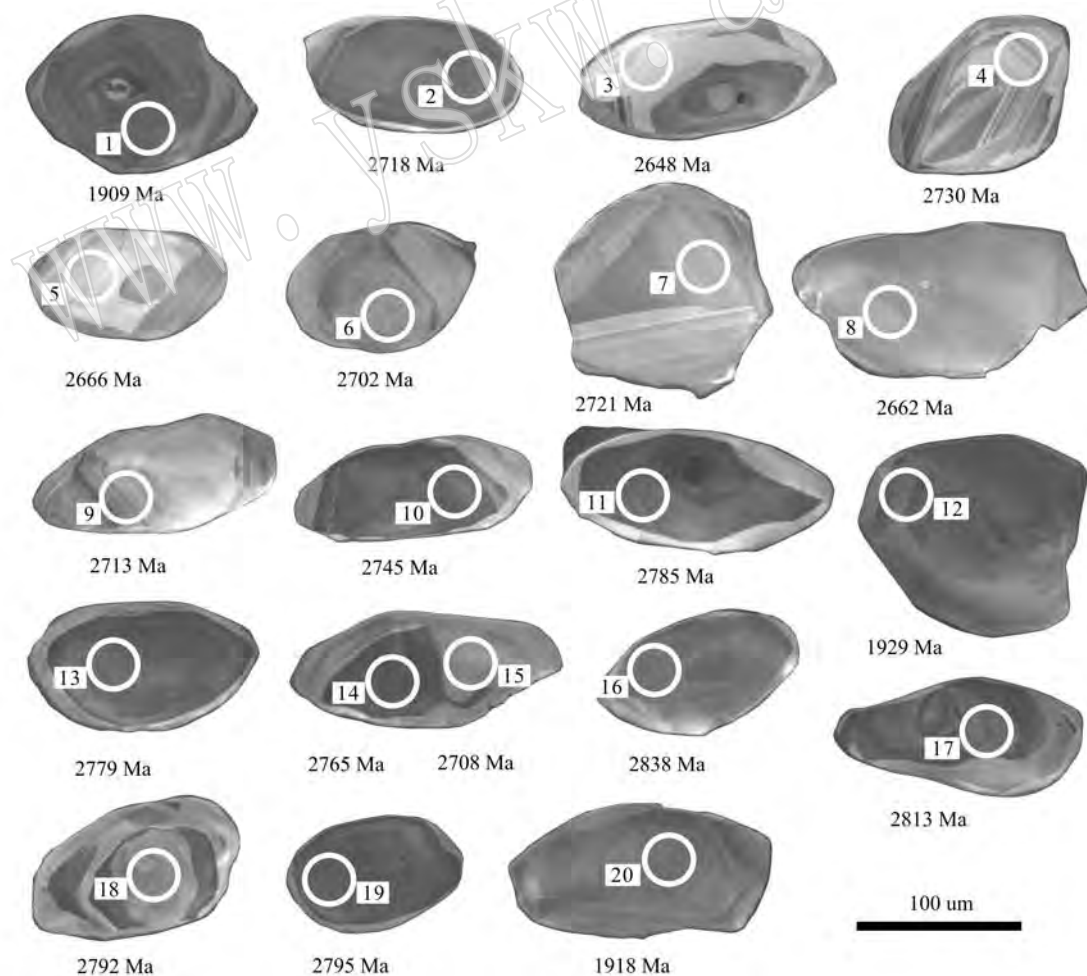


图 5 鲁山地区斜长角闪岩锆石阴极发光 (CL) 图像

Fig. 5 Zircon cathodoluminescence (CL) image of amphibolite in the Lushan area

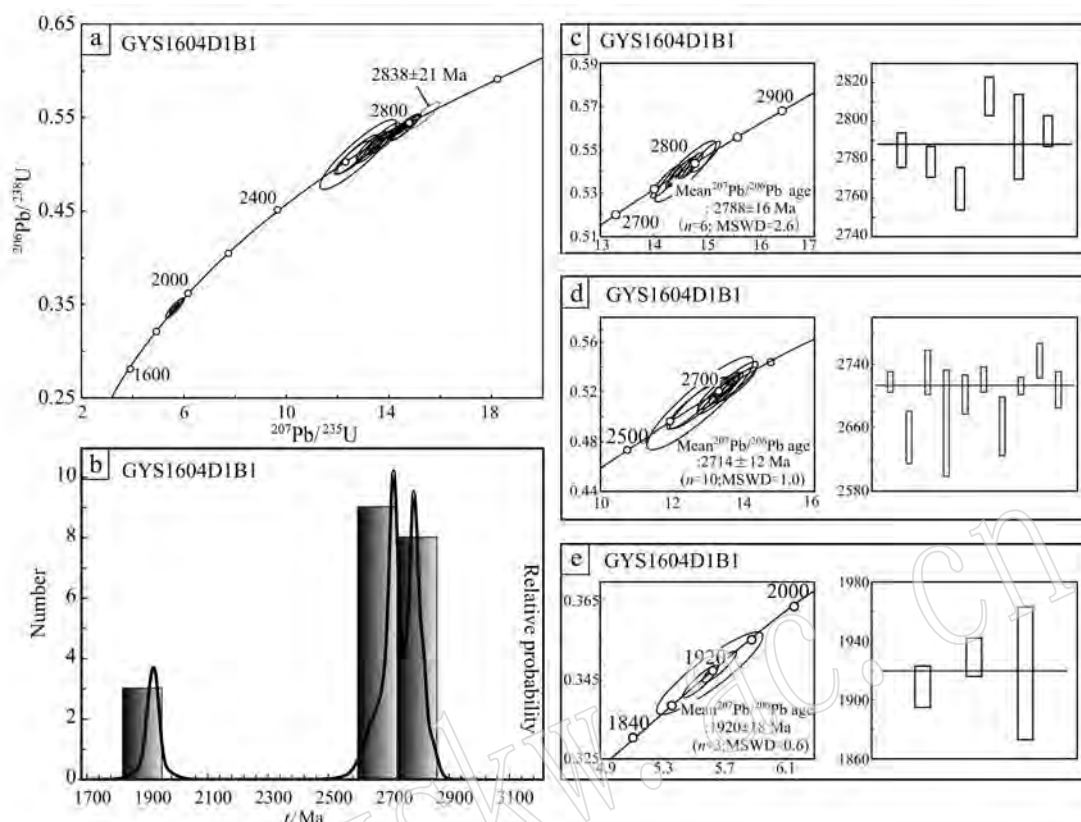


图 6 鲁山地区斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 LA-ICP-MS zircon U-Pb age concordia plot of amphibolite in the Lushan area

第 2 组: 由 10 个分析点组成, 分别为 02、03、04、05、06、07、08、09、10、15 号。阴极发光(CL)图像(图 5)显示, 这些锆石颗粒呈半自形-自形、长柱状或短而粗的形状, 大小在 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 之间, 长宽比为 $1:1 \sim 2:1$ 之间。部分锆石颗粒(04、07、09 号)具有相对明显的条带状或震荡环带, 大部分具有模糊的环带结构或均匀结构, 并具有增生边, Th 和 U 的含量分别为 $0.01 \times 10^{-6} \sim 14.49 \times 10^{-6}$ 和 $3.65 \times 10^{-6} \sim 43.12 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 $0.0001 \sim 0.38$ (表 1), 除了部分点大于 0.1 外, 其余均小于 0.1 或接近 0.1。虽然一般认为变质成因锆石的 Th/U 值小于 0.1 (Hoskin and Black, 2000), 但是 Vavra 等(1999)发现生长最快的麻粒岩相的变质增生锆石具有较低的 U 含量和较高的 Th/U 值(均大于 0.1, 最高可达 0.73), 因此, 认为该组锆石属于变质成因的锆石。10 个分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于 $2745 \sim 2648 \text{ Ma}$ 之间, 其加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为 $2714 \pm 12 \text{ Ma}$ (图 6d)。该年龄可解释为一次区域性变质事件的年龄。

第 3 组: 由 3 个分析点组成, 分别为 01、12、20

号。从阴极发光(CL)图像(图 5)来看, 该样品中锆石颗粒形状呈半自形-自形、长柱状或短柱状, 大小在 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 之间, 长宽比为 $1:1 \sim 2:1$ 之间; 锆石颗粒均具有相对明显或模糊的震荡环带或均匀结构。Th 和 U 的含量分别为 $0.53 \times 10^{-6} \sim 8.04 \times 10^{-6}$ 和 $30.96 \times 10^{-6} \sim 69.45 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 $0.02 \sim 0.13$, 整体小于 0.1(表 1), 与变质成因相一致 (Hoskin and Black, 2000; Belousova *et al.*, 2002)。虽然 3 颗锆石均有环带, 但并非所有具有这种特征的锆石都是岩浆锆石, 有些变质过程中形成的锆石可能具有震荡环带(吴元伟等, 2013), 综合地质因素和锆石特征认为这些锆石属于变质成因。3 个分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于 $1929 \sim 1909 \text{ Ma}$ 之间, 其加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为 $1920 \pm 18 \text{ Ma}$ (图 6e), 可解释为另一次区域性变质事件的年龄。

4 讨论

4.1 $2850 \sim 2700 \text{ Ma}$ 事件及其地质意义

从已有同位素年龄数据的报道来看, 华北克拉

表 1 鲁山地区斜长角闪岩(GYS1604DIB1)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年数据表
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data for amphibolite (GYS1604DIB1) from Lushan area

点号	$\varepsilon_{\text{Hf}}/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma				谐和度					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	
GYS1604DIB1																				
01(3)	25.16	8.04	62.89	0.13	0.11688	0.00189	5.55717	0.07658	0.34477	0.00274	0.11258	0.00288		1.909	14	1.909	12	1.910	13	100
02(2)	19.11	8.49	28.54	0.30	0.18723	0.00321	13.54180	0.21378	0.52446	0.00565	0.14824	0.00364		2.718	13	2.718	15	2.718	24	100
03(2)	3.18	0.67	4.96	0.13	0.17943	0.00649	12.56615	0.47150	0.50782	0.01188	0.20602	0.01887		2.648	33	2.648	35	2.647	51	100
04(2)	3.65	0.01	5.58	0.00	0.18862	0.00601	13.71758	0.45354	0.52735	0.01127	4.42712	1.79362		2.730	28	2.730	31	2.730	48	100
05(2)	2.20	0.31	3.65	0.09	0.18143	0.01309	12.78621	0.98323	0.51104	0.02456	0.13736	0.04184		2.666	67	2.664	72	2.661	105	100
06(2)	5.62	0.18	9.16	0.02	0.18539	0.00532	13.31019	0.39127	0.52060	0.00989	0.30749	0.08396		2.702	25	2.702	28	2.702	42	100
07(2)	14.65	8.08	21.53	0.38	0.18762	0.00376	13.59262	0.26303	0.52533	0.00679	0.14581	0.00390		2.721	16	2.722	18	2.722	29	100
08(2)	3.52	0.11	5.87	0.02	0.18100	0.00735	12.75748	0.54273	0.51110	0.01369	0.32799	0.07425		2.662	37	2.662	40	2.661	58	100
09(2)	18.48	0.38	28.94	0.01	0.18666	0.00294	13.46508	0.18613	0.52308	0.00499	0.41982	0.03374		2.713	11	2.713	13	2.712	21	100
10(2)	28.11	12.80	43.12	0.30	0.19031	0.00497	13.80026	0.36615	0.52583	0.00918	0.15078	0.00634		2.745	22	2.736	25	2.724	39	101
11(1)	34.02	24.49	46.65	0.52	0.19504	0.00276	14.52942	0.16905	0.54018	0.00452	0.14908	0.00202		2.785	9	2.785	11	2.784	19	100
12(3)	27.62	3.68	69.45	0.05	0.11822	0.00185	5.68111	0.07357	0.34846	0.00263	0.10867	0.00394		1.929	13	1.929	11	1.927	13	100
13(1)	41.32	19.14	59.74	0.32	0.19436	0.00257	14.44616	0.14761	0.53898	0.00406	0.14472	0.00212		2.779	8	2.779	10	2.779	17	100
14(1)	62.03	32.34	90.06	0.36	0.19264	0.00297	14.22622	0.18983	0.53552	0.00500	0.14479	0.00275		2.765	11	2.765	13	2.765	21	100
15(2)	28.08	14.49	42.83	0.34	0.18612	0.00491	13.23051	0.35208	0.51548	0.00887	0.14062	0.00557		2.708	23	2.696	25	2.680	38	101
16	14.51	6.58	20.78	0.32	0.20143	0.00505	15.35986	0.39040	0.55295	0.00944	0.16554	0.00656		2.838	21	2.838	24	2.837	39	100
17(1)	23.94	8.73	35.17	0.25	0.19837	0.00287	14.96194	0.17979	0.54695	0.00470	0.15923	0.00307		2.813	10	2.813	11	2.812	20	100
18(1)	20.99	12.74	31.54	0.40	0.19583	0.00502	14.58773	0.37829	0.54016	0.00926	0.12784	0.00416		2.792	22	2.789	25	2.784	39	100
19(1)	42.79	19.57	60.58	0.32	0.19617	0.00262	14.68158	0.15175	0.54269	0.00411	0.14968	0.00218		2.795	8	2.795	10	2.795	17	100
20(3)	12.02	0.53	30.96	0.02	0.11747	0.00482	5.61791	0.22890	0.34681	0.00690	0.09442	0.02274		1.918	45	1.919	35	1.919	33	100

注: 01(3)代表点号 01 属于第 3 组。

通基底主要形成于 $\sim 2\,500\text{ Ma}$ (Liu Fu *et al.*, 2009; Diwu *et al.*, 2011; Deng *et al.*, 2016)。但近年来华北克拉通也发现了大面积 $2\,850\sim 2\,700\text{ Ma}$ 的岩石年龄纪录, 主要分布在河南鲁山(Liu Dunyi *et al.*, 2009; Diwu *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2013, 2015; 卢俊生等, 2014; Zhou *et al.*, 2014b)、山东西部(杜利林等, 2010; Wan *et al.*, 2011, 2014)、胶东地区(Jahn *et al.*, 2008; Wan *et al.*, 2014; 谢士稳等, 2015)以及五台、阜平、恒山、赞皇、中条等地区(Kröner *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2013; 路增龙等, 2014; Wan *et al.*, 2014), 尤其是鲁山地区。近 10 年来, 一些研究者(林慈奎, 2006; Liu Dunyi *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2010; Diwu *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2013, 2015; Zhou *et al.*, 2014b; 卢俊生等, 2014)利用 SIMS、SHRIMP、LA-ICP-MS 等高精度定年方法对鲁山地区太古宙片麻岩系(TTG 片麻岩、斜长角闪岩)进行了年代学研究, 从表 2 中的数据可以看出, 除了 Lu 等(2015)测得该地区 TTG 片麻岩的岩浆年龄为 $2\,897\pm 28\text{ Ma}$ 、 $2\,928\pm 5.4\text{ Ma}$ 外, 其余年龄均在 $2\,845\sim 2\,723\text{ Ma}$ 之间(表 2), 并且大部分研究者将这些年龄解释为 TTG 片麻岩的岩浆结晶年龄或斜长角闪岩的成岩年龄, 本文测得的斜长角闪岩的成岩年龄 $2\,788\pm 16\text{ Ma}$ 也与其基本一致。这表明在该阶段内发生过一次重要的岩浆事件, 并且可能是华北克拉通一期重要的构造岩浆活动。

通过分析前人(Liu Dunyi *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2010; Diwu *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2014a, 2014b)的岩浆锆石 Hf 同位素数据, 发现其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分布在 $0.280\,855\sim 0.281\,234$ 范围内, 主要分布在 $0.281\,0\sim 0.281\,2$ 之间, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值分布在 $-5.5\sim 9.3$ 之间, 大部分岩浆锆石投点分布在球粒陨石线与亏损地幔线之间, 也有少部分位于球粒陨石线以下, 相应的二阶段模式年龄(t_{DM}^{C})值为 $3\,576\sim 2\,708\text{ Ma}$, 主要分布在 $3\,300\sim 2\,800\text{ Ma}$ 之间(图 7), 表明其原岩物质主要来源于 $3\,300\sim 2\,800\text{ Ma}$ 形成的亏损地幔, 并有少量地壳物质的加入。Huang 等(2010)通过对太华杂岩 Nd 同位素研究发现, 这些岩石大多数具有偏正的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值, 认为片麻岩系的原岩物质来源于 $3\,100\sim 2\,800\text{ Ma}$ 形成的亏损地幔, 与 Hf 同位素结果基本一致。

综上所述, $2\,845\sim 2\,723\text{ Ma}$ 的事件代表了中太古代晚期和新太古代早期地壳的形成, 也是太华杂

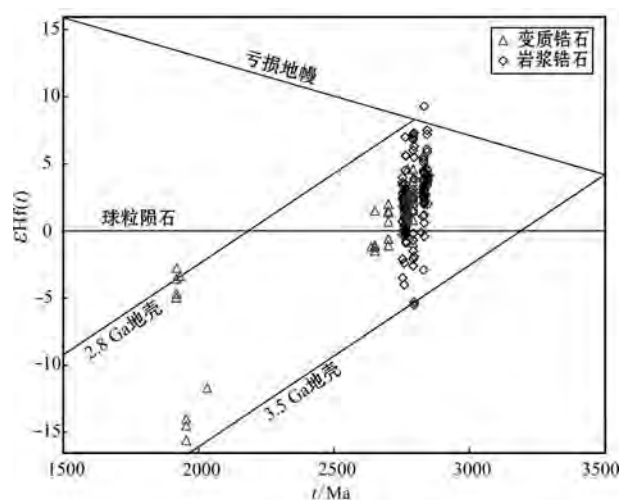


图 7 太华杂岩锆石 Hf 同位素组成

Fig. 7 Zircon Hf isotopic composition of Taihua Complex

数据来源于: Liu Dunyi *et al.* (2009), Diwu *et al.* (2010), Huang *et al.* (2010), Zhou *et al.* (2014a, 2014b)
Data from: Liu Dunyi *et al.* (2009), Diwu *et al.* (2010), Huang *et al.* (2010), Zhou *et al.* (2014a, 2014b)

岩乃至整个华北克拉通一期重要的构造岩浆活动。

4.2 $2\,800\sim 2\,700\text{ Ma}$ 事件及其地质意义

Liu 等(2009a)通过对锆石内部结构的详细研究, 并结合 SIMS 锆石 U-Pb 年代学、锆石 O 同位素和 Hf 同位素的分析, 在河南鲁山地区形成于 $2\,845\sim 2\,838\text{ Ma}$ 的斜长角闪岩中获得第 1 期为 $2\,792\sim 2\,776\text{ Ma}$ 、第 2 期为 $2\,671\sim 2\,651\text{ Ma}$ 的变质年龄, 在形成于 $2\,832\sim 2\,829\text{ Ma}$ 的 TTG 岩系中获得第 1 期为 $2\,772\text{ Ma}$ 、第 2 期为 $2\,638\text{ Ma}$ 的变质年龄, 这也是第一次在太华杂岩乃至整个华北中部造山带发现 $2\,792\sim 2\,638\text{ Ma}$ 的变质事件。随后, Diwu 等(2010)通过分析英云闪长质片麻岩的锆石内部结构及元素(Th、U)含量和 Th/U 值, 获得了一个变质年龄为 $2\,745\pm 16\text{ Ma}$; Zhou 等(2014b)通过分析片麻岩的锆石内部结构及元素(Th、U)含量和 Th/U 值, 获得了两组变质锆石的上交点年龄分别为 $2\,701\pm 28\text{ Ma}$ 、 $2\,679\pm 13\text{ Ma}$ 。综合这些数据和本文测得的斜长角闪岩 $2\,714\pm 12\text{ Ma}$ 的变质年龄, 表明太华杂岩在新太古代早期($2\,792\sim 2\,638\text{ Ma}$)确实发生过一次变质改造事件。另外, 杜利林等(2003, 2010)在研究山东孟家屯地区的变质沉积岩和片麻岩时, 发现 $2\,642\sim 2\,620\text{ Ma}$ 的变质年龄, 并认为是该区域的一期变质事件; Wan 等(2011)在研究山东泰山的奥长花岗质片麻岩时, 发现 $2\,663$ 和 $2\,644\text{ Ma}$ 的变质

表 2 河南鲁山太华杂岩体锆石 U-Pb 年龄信息汇总表
Table 2 Zircon U-Pb dating of Taihua Complex in Lushan area

样品号	岩性	坐标	分析方法	岩浆结晶/ 成岩年龄 (Ma)	变质年龄 1/Ma	变质年龄 2/Ma	参考文献
片麻岩系							
11ZH-13	TTG 片麻岩	112°35'10"/ 33°59'24"	LA-ICP-MS	2 842 ± 29	2 701 ± 28	1 920 ± 26	Zhou <i>et al.</i> , 2014b
11ZH-26	含钠-钾的花岗岩系	112°36'20"/ 33°58'40"	LA-ICP-MS	2 762 ± 20	2 679 ± 13		Zhou <i>et al.</i> , 2014b
PLS-37	含钠-钾的花岗岩系	112°38'39"/ 33°55'59"	LA-ICP-MS	2 758 ± 21			Zhou <i>et al.</i> , 2014b
L10	含石榴斜长角闪岩	112°40'05"/ 33°53'30"	SIMS	2 781 ± 18		1 927 ± 6.5 1 858 ± 32	Lu <i>et al.</i> , 2015
L56	含石榴斜长角闪岩	112°37'40"/ 33°55'00"	SIMS			1 918 ± 5	Lu <i>et al.</i> , 2015
L51	TTG 片麻岩	112°47'42"/ 33°49'50"	SIMS	2 897 ± 28		1 915 ± 14	Lu <i>et al.</i> , 2015
L54	TTG 片麻岩	112°39'00"/ 33°53'18"	SIMS	2 928 ± 5.4		1 934 ± 7	Lu <i>et al.</i> , 2015
L55	TTG 片麻岩	112°46'15"/ 33°53'15"	SIMS	2 778 ± 3.4		1 940 ± 15 1 922 ± 11	Lu <i>et al.</i> , 2015
TH-07	奥长花岗岩片麻岩	112°43'15"/ 33°53'10"	LA-ICP-MS	2 752 ± 5			Diwu <i>et al.</i> , 2010
TH-13	英云闪长质片麻岩	112°41'14"/ 33°54'56"	LA-ICP-MS	2 763 ± 4	2 745 ± 16		Diwu <i>et al.</i> , 2010
TH-05	斜长角闪岩	112°36'13"/ 33°57'17"	LA-ICP-MS	2 791 ± 7			Diwu <i>et al.</i> , 2010
TH-29	斜长角闪岩	112°36'09"/ 33°57'25"	LA-ICP-MS	2 794 ± 5			Diwu <i>et al.</i> , 2010
TH05-2	TTG 片麻岩	112°42'20"/ 33°54'10"	ICP-MS	2 765 ± 13			Huang <i>et al.</i> , 2010
TH05-21	TTG 片麻岩	112°42'20"/ 33°54'10"	ICP-MS	2 723 ± 9		1 917 ± 37	Huang <i>et al.</i> , 2010
L.S0417-1	斜长角闪岩	112°40'52"/ 33°55'21"	SHRIMP	2 838 ± 35	2 792 ± 11 2 651 ± 13	2 032 ± 78	Liu Danyi <i>et al.</i> , 2009
L.S0417-3	斜长角闪岩	112°41'14"/ 33°54'23"	SHRIMP	2 845 ± 23	2 776 ± 20 2 671 ± 25		Liu Danyi <i>et al.</i> , 2009
L.S0417-2	片麻状黑云英云闪长岩	112°41'13"/ 33°54'56"	SHRIMP	2829 ± 18	2 772 ± 22		Liu Danyi <i>et al.</i> , 2009
L.S0417-4	片麻状斜长黑云英云闪长岩	112°39'48"/ 33°53'52"	SHRIMP	2 832 ± 11	2 772 ± 17 2 638 ± 13		Liu Danyi <i>et al.</i> , 2009

续表 2
Continued Table 2

样品号	岩性	坐标	分析方法	岩浆结晶/ 成岩年龄 (Ma)	变质年龄 1/Ma	变质年龄 2/Ma	参考文献
Lsp07	奥长花岗岩	112°39'15.2"/33°53'9.4"	LA-ICP-MS	2 761 ± 11			林慈莹, 2006
Lsp08	奥长花岗岩	112°38'53.3"/33°53'8.7"	LA-ICP-MS	2 757 ± 59			林慈莹, 2006
Lsp13	英云闪长岩	112°41'13.5"/33°54'55.5"	LA-ICP-MS	2 766 ± 14			林慈莹, 2006
Lsp01	角闪斜长岩	112°36'9.4"/33°58'47.9"	LA-ICP-MS	2 754.6 ± 7.8			林慈莹, 2006
Lsp26	角闪斜长岩	112°43'23.9"/33°54'36.8"	LA-ICP-MS	2 759 ± 52			林慈莹, 2006
LSx04	斜长角闪岩	112°36'13.0"/33°57'17.6"	LA-ICP-MS	2 763 ± 13			林慈莹, 2006
LSx05	斜长角闪岩	112°36'13.0"/33°57'17.6"	LA-ICP-MS	2 812 ± 27			林慈莹, 2006
L29	斜长角闪岩	112°37'25"/33°55'00"	SIMS	2 747 ± 11		1 865 ± 64	卢俊生, 2014
L30	斜长角闪岩	112°37'25"/33°55'00"	SIMS	2 767 ± 10		1 930 ± 55	卢俊生, 2014
L39	斜长角闪岩	112°38'50"/33°53'45"	SIMS	2 787 ± 26		1 915 ± 34	卢俊生, 2014
L49	斜长角闪岩	112°38'50"/33°49'05"	SIMS	2 758 ± 11		1 926 ± 6	卢俊生, 2014
L31	斜长角闪岩	112°38'49"/33°49'02"	SIMS	2 730 ± 16		1 920 ± 12	Lu <i>et al.</i> , 2013
L40	斜长角闪岩	112°38'52"/33°53'48"	SIMS			1 919 ± 8	Lu <i>et al.</i> , 2013
GYSI604DIBI	斜长角闪岩	33°53'3.51"/112°42'36.88"	LA-ICP-MS	2 788 ± 16	2 714 ± 12	1 920 ± 18	本文
表壳岩系							
PLS-9	钾长花岗岩	112°38'3.5"/33°52'21.1"	LA-ICP-MS			1 918 ± 50	Zhou <i>et al.</i> , 2014a
LS-7	含石榴石英二长岩	112°38'3.5"/33°52'21.1"	LA-ICP-MS			1 919 ± 11 1 933 ± 11	Zhou <i>et al.</i> , 2014c
L50	片麻状花岗岩	112°41'56"/33°49'55"	SIMS			1 928 ± 5	Lu <i>et al.</i> , 2015
TWJ358/1	石榴钾长花岗质片麻岩	112°38'06"/33°52'38"	SHRIMP			1 871 ± 14	Wan <i>et al.</i> , 2006
TW0006/1	石墨砂线片麻岩	112°39'00"/33°52'35"	SHRIMP			1 844 ± 66	Wan <i>et al.</i> , 2006
L15	斜长角闪岩	112°41'58"/33°49'54"	SIMS			1 945 ± 25	Lu <i>et al.</i> , 2013

年龄。这些事实,表明2 800~2 600 Ma 的变质区域可能比想象的更为广泛,可能是华北克拉通的一期变质改造事件。

该期变质锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为0.280 988~0.281 188, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值在-1.5~4.6 之间,其投点分布在球粒陨石线附近或球粒陨石线与亏损地幔线之间,相应的二阶段模式年龄值为2 949~3 299 Ma(图7),表明片麻岩系原岩来源于亏损地幔并有少量地壳物质的加入。但这与岩浆锆石具有相似的 Hf 同位素特征,表明该次变质事件对 Hf 同位素系统有很少的或者根本就没有影响,可能是由于变质作用不够强烈导致的。

综上所述,2 800~2 600 Ma 事件为太华杂岩一期变质改造事件,这可能也是整个华北克拉通的一期变质事件。

4.3 ~1900 Ma 事件及其地质意义

近年来,古元古代的事件引起越来越多国内外研究者的关注,并仍存在很大争议。Kusky (2011a, 2011b) 提出,华北克拉通东、西部陆块约于2 300 Ma 左右碰撞拼合,而在1 850 Ma 后表现为陆内裂解事件;翟明国等(2007)推测,2 300~1 950 Ma 为华北克拉通基底陆块的拉伸-破裂事件期,大约在1 900 Ma 期间地幔岩浆底侵,发生高温麻粒岩相变质作用,在大约1 850 Ma 期间华北克拉通经历了一次挤压事件,形成陆-陆碰撞的造山带;Zhao 等(2000, 2005)及赵国春(2009)认为,在2 100~1 800 Ma 之间存在一个全球性的造山运动,1 950 Ma 的麻粒岩相变质事件是阴山地块与鄂尔多斯地块碰撞拼合的年龄纪录,而1 850 Ma 年龄的变质作用是华北克拉通东、西部陆块最终碰撞形成统一基底的结果。综合 Huang 等(2010)、Zhou 等(2014a, 2014b, 2014c)、Lu 等(2013, 2015)、卢俊生等(2014)等人的研究结果,发现对于太华杂岩的两类地质体而言,不论是古元古代表壳岩系还是太古宙片麻岩系,均有一些集中于~1 900 Ma 的变质锆石年龄(表2)。大多数研究者将这一年龄解释为一次区域性的变质事件,本次研究也测得样品斜长角闪岩 $1\,920 \pm 18$ Ma 的变质年龄,因此认为太华杂岩在~1 900 Ma 时应该经历了又一次的大规模变质改造事件。如前所述,前人得到的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.281 147~0.281 516, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值在-15.9~-2.8 之间,其投点分布在球粒陨石线之下,相应的二阶段模式年龄值为2 732~3 557 Ma(图7),表明其原岩物质来源于

古老物质的循环或改造。这可能与华北克拉通东西陆块的碰撞事件有关。

5 结论

本文对太华杂岩中斜长角闪岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,其锆石年龄分析结果约束了3 次地质事件,其中 $2\,788 \pm 16$ Ma 代表斜长角闪岩成岩年龄, $2\,714 \pm 12$ Ma 代表一期变质事件年龄; $1\,920 \pm 18$ Ma 则代表另一期变质事件年龄。结合前人年代学及 Hf 同位素结果,分析并讨论了3 次地质事件的地质意义,认为2 850~2 700 Ma 为一期重要的岩浆事件,代表了太古宙新生地壳的形成;2 800~2 600 Ma 和~1 900 Ma 为两期变质事件,代表了太华杂岩分别遭受新太古代和古元古代两次变质变形改造。

致谢 在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年工作中得到西北大学龚化栋老师给予的支持与帮助,审稿过程中各位审稿专家及编辑部老师对本文提出了宝贵的意见,在此一并表示感谢。

References

- Bai Jin, Huang Xueyuan, Dai Fengyan, *et al.*, 1993. The Precambrian Evolution of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 199~203(in Chinese with English abstract).
- Belousova E A, Griffin W L, Suzanne Y O' Reilly, *et al.* 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143: 602~622.
- Condie K C. 1998. Episodic continental growth and supercontinents: a mantle avalanche connection? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1): 97~108.
- Condie K C. 2000. Episodic continental growth models: After thoughts and extensions[J]. *Tectonophysics*, 322(1): 153~162.
- Deng Hao, Kusky T M, Polat A, *et al.* 2016. A 2.5 Ga fore-arc subduction-accretion complex in the Dengfeng Granite-Greenstone Belt, Southern North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 275: 241~264.
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Guo Anlin, *et al.* 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[J]. *Gondwana Research*, 20: 149~170.
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Lin Ciluan, *et al.* 2010. LA-(MC)-ICP-MS U-Pb zircon geochronology and Lu-Hf isotope compositions of the Taihua complex on the southern margin of the North China Craton [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(21): 2 112~2 123.
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Zhao Yan, *et al.* 2014. Early Paleoproterozoic (2.45-2.20 Ga) magmatic activity during the period of global magmatic shutdown: Implications for the crustal evolution of the southern North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 255: 627~640.
- Du Lilin, Yang Chonghui, Zhuang Yuxun, *et al.* 2010. Hf isotopic compositions of zircon from 2.7Ga Metasedimentary rocks and biotite-plagioclase gneiss in the Mengjiatun formation complex, western Shandong province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(7): 992~1 001 (in Chinese with English abstract).
- Du Lilin, Zhuang Yuxun, Yang Chonghui, *et al.* 2003. Characters of zircon in the Mengjiatun Formation in Xintai of Shandong and their chronological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 359~366(in Chinese with English abstract).
- Faure M, Trap P, Lin Wei, *et al.* 2007. Polyorogenic evolution of the Paleoproterozoic Trans-North China belt, new insights from the Lüliangshan-Hengshan-Wutaishan and Fuping massifs[J]. *Episodes*, 30(2): 1~12.
- Guo Jinghui, Zhai Mingguo and Xu Ronghua. 2002. Large scale granulite facies metamorphic age of Sanggan in North China Craton: Zircon U-Pb geochronology[J]. *Science in China(Series D)*, 32(1): 10~18(in Chinese with English abstract).
- Guo Jinghui, Zhai Mingguo, Zhang Yigang, *et al.* 1993. Early Precambrian Manjinggou high pressure granulite melange belt on the South edge of the Huaian Complex, North China Craton: Geological features, petrology and isotopic geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(4): 329~341(in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Xu Zhao, Ren Rong, *et al.*, 2012. Crustal growth and intracrustal recycling in the middle segment of the Trans-North China Orogen, North China Craton: a case study of the Fuping Complex [J]. *Geological Magazine*, 149(4): 729~742.
- Hoskin Paul W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423~439.
- Hoskin Paul W O and Schaltegger Urs. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27~62.
- Huang Xiaolong, Niu Yaoling, Xu Yigang, *et al.* 2010. Geochemistry of TTG and TTG-like gneisses from Lushan-Taihua complex in the southern North China Craton: Implications for late Archean crustal accretion[J]. *Precambrian Research*, 182(1~2): 43~56.
- Jahn Borming, Auvray B, Cornichet J, *et al.* 1987. 3.5 Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China: Field occurrence, petrography Sm-Nd isochron age and REE geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 34(3~4): 311~346.
- Jahn Borming and Ernst W G. 1990. Late Archean Sm-Nd isochron age for mafic-ultramafic supracrustal amphibolites from the Northeastern Sino-Korea Craton, China[J]. *Precambrian Research*, 46(4): 295~306.
- Jahn Borming, Liu Dahe and Wan Yusheng. 2008. Archean crustal evolution of the Jiaodong peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology elemental and Nd-isotope geochemistry[J]. *American Journal of Science*, 308(3): 232~269.
- Kröner Alfred, Compston William, Zhang Guowei, *et al.* 1988. Age and tectonic setting of Late Archean greenstone-gneiss terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating[J]. *Geology*, 16(3): 211~215.
- Kröner Alfred, Wilde Simon A and Li J H. 2005. Age and evolution of a Late Archean to paleo-proterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 577~595.
- Kusky T M. 2011a. Geophysical and geological tests of tectonic models of the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 20(1): 26~35.
- Kusky T M. 2011b. Comparison of results of recent seismic profiles with tectonic models of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(2): 250~259.
- Kusky T M, Windley B F and Zhai M G. 2007. Tectonic evolution of the North China Block: from orogen to craton to orogen[J]. *Geological Society London Special Publications*, 280(1): 1~34.
- Li Sanzhong and Zhao Guochun. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 158(1~2): 1~16.
- Li Sanzhong, Zhao Guochun, Sun Min, *et al.* 2004. Mesozoic, not Paleoproterozoic SHRIMP U-Pb zircon ages of two Liaoji granites,

- Eastern Block, North China Craton[J]. *International Geology Review*, 46(2): 162~176.
- Lin Ciluan. 2006. Geochemistry, Geochronology and Tectonic Settings of Archean gneisses in Lushan, Henan Province[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Liu Dunyi, Wilde Simon A, Wan Yusheng, *et al.* 2009. Combined U-Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the southern North China Craton reveal multiple events in the Late Mesoarchean-Early Neoarchean[J]. *Chemical Geology*, 261(1): 140~51.
- Liu Fu, Guo Jinghui, Lu Xiaoping, *et al.* 2009. Crustal growth at ~2.5 Ga in the North China Craton: evidence from whole-rock Nd and zircon Hf isotopes in the Huai'an gneiss terrane[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54: 4 704~4 713.
- Liu Shuwen, Pan Yuanming, Li Jianghai, *et al.* 2002. Geological and isotopic geochemical constraints on the evolution of the Fuping complex, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 117(1): 41~56.
- Liu Shuwen, Pan Yuanming, Xie Qianli, *et al.* 2004a. Archean geodynamics in the Central Zone, North China Craton: constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutaishan complexes[J]. *Precambrian Research*, 130(1~4): 229~249.
- Liu Shuwen, Pan Yuanming, Xie Qianli, *et al.* 2005. Geochemistry of the Paleoproterozoic Nanying granitic gneisses in the Fuping complex: implications for the tectonic evolution of the Central Zone, North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 643~658.
- Liu Shuwen, Shu Guiming, Pan Yuanming, *et al.* 2004b. Electron-microprobe dating of monazite and metamorphic age of Wutai Group, Wutai Mountains[J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 356~363(in Chinese with English abstract).
- Lu Junsheng, Wang Guodong, Wang Hao, *et al.* 2013. Metamorphic P-T-t paths retrieved from the amphibolites, Lushan terrane, Henan Province and reappraisal of the Paleoproterozoic tectonic evolution of the Trans-North China orogen[J]. *Precambrian Research*, 238: 61~77.
- Lu Junsheng, Wang Guodong, Wang Hao, *et al.* 2014. Metamorphic evolution of the Lushan terrane in the Precambrian Taihua complex, Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 3 062~3 074 (in Chinese with English abstract).
- Lu Junsheng, Wang Guodong, Wang Hao, *et al.* 2015. Zircon SIMS U-Pb geochronology of the Lushan terrane: dating metamorphism of the southwestern terminal of the Palaeoproterozoic Trans-North China orogen[J]. *Geological Magazine*, 152(2): 367~377.
- Lu Zenglong, Song Huixia, Du Lilin, *et al.* 2014. Delineation of the ca. 2.7 Ga TTG gneisses in the Fuping Complex, North China Craton and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2 872~2 884(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.0 A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 4: 1~70.
- Luo Yan, Sun Min, Zhao Guochun, *et al.* 2004. LA-ICP-MS U-Pb ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: constraint on the evolution of the Jiao-Liao-Ji belt[J]. *Precambrian Research*, 134(3~4): 349~371.
- O'Neill C, Lenardic A, Moresi L, *et al.* 2007. Episodic Precambrian subduction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3~4): 552~562.
- Santosh M, Sajeev K, Li J H, *et al.* 2009a. Counterclockwise exhumation of a hot orogen: The Paleoproterozoic ultrahigh-temperature granulites in the North China Craton[J]. *Lithos*, 110(1): 140~152.
- Santosh M, Tsunogae T, Li Jianghai, *et al.* 2007a. Discovery of sapphirine-bearing Mg-Al granulites in the North China Craton: implications for Paleoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism[J]. *Gondwana Research*, 11(3): 263~285.
- Santosh M, Wan Yusheng, Liu Dunyi, *et al.* 2009b. Anatomy of zircons from an ultra-hot orogen: The amalgamation of North China Craton within the supercontinent Columbia[J]. *The Journal of Geology*, 117(4): 429~443.
- Santosh M, Wilde Simon A and Li Jianghai. 2007b. Timing of Paleoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism in the North China Craton: evidence from SHRIMP U-Pb zircon geochronology[J]. *Precambrian Research*, 159(3~4): 78~196.
- Shen Qihan, Xu Huifen, Zhang Zongqing, *et al.* 1992. Early Precambrian Granulite in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 105~109(in Chinese with English abstract).
- Sun Yong. 1983. Rocks in the granulite facies of the Taihua Group at Lushan, Henan[J]. *Journal of Northwest University*, 38(1): 89~95(in Chinese with English abstract).
- Sun Yong, Yu Ziaping and Kröner Alfred. 1994. Geochemistry and sin-

- gle zircon geochronology of Archean TTG gneisses in the Taihua high-grade terrain, Lushan area, central China[J]. *Journal of South-east Asian Earth Sciences*, 10(3~4): 227~233.
- Trap Pierre, Faure Michel, Lin Wei, *et al.* 2007. Late Paleoproterozoic (1 900~1 800 Ma) nappe stacking and polyphase deformation in the Hengshan-Wutaishan area: implications for the understanding of the Trans-North-China belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 156(1~2): 85~106.
- Trap Pierre, Faure Michel, Lin Wei, *et al.* 2009a. The Lüliang massif: A key area for the understanding of the Palaeoproterozoic Trans-North China belt, North China Craton[J]. *Geological Society London Special Publications*, 323(1): 99~125.
- Trap Pierre, Faure Michel, Lin Wei, *et al.* 2009b. The Zhanhuang massif, the second and eastern suture zone of the Paleoproterozoic Trans-NorthChina orogen[J]. *Precambrian Research*, 172(1~2): 80~98.
- Vavra Gerhard, Schmid Rolf and Gebauer Dieter. 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps) [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134(4): 380~404.
- Wan Yusheng, Dong Chunyan, Xie Hangqiang, *et al.* 2015. Some progress in the study of Archean basement of the North China Craton[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 36(6): 685~700(in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Wang Shijin, *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: 169~180.
- Wan Yusheng, Wilde S A, Liu Dunyi, *et al.* 2006. Further evidence for ~1.85 Ga metamorphism in the Central Zone of the North China Craton: SHRIMP U-Pb dating of zircon from metamorphic rocks in the Lushan area, Henan Province[J]. *Gondwana Research*, 9(1): 189~197.
- Wan Yusheng, Xie Shiwen, Yang Chonghui, *et al.* 2014. Early Neoproterozoic (~2.7 Ga) tectono-thermal events in the North China Craton: A synthesis[J]. *Precambrian Research*, 247: 45~63.
- Wang Changming, Chen Liang, Bagas Leon, *et al.* 2016a. Characterization and origin of the Taishanmiao aluminous A-type granites: Implications for Early Cretaceous lithospheric thinning at the southern margin of the North China Craton[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 105(5): 1 563~1 589.
- Wang Changming, Deng Jun, Santosh M, *et al.* 2015. Timing, tectonic implications and genesis of gold mineralization in the Xincheng gold deposit, China: C-H-O isotopes, pyrite Rb-Sr and zircon fission track thermochronometry[J]. *Ore Geology Reviews*, 65(3): 659~673.
- Wang Changming, Lu Yongjun, He Xinyu, *et al.* 2016b. The Paleoproterozoic diorite dykes in the southern margin of the North China Craton: Insight into rift-related magmatism[J]. *Precambrian Research*, 277: 26~46.
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, *et al.* 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19(1): 1~23.
- Wu Jiashan, Geng Yuansheng, Shen Qihan, *et al.* 1998. Archean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of the China-Korea Paleo-continent[M]. Beijing: Geological Publishing House, 192~203(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanwei, Zhou Guangfa and Zeng Xianhu. 2013. Genetic type of Metamorphic zircon and its characteristics of Internal structure, Geochemistry[J]. *Technology Innovation and Application*, 26: 128(in Chinese with English abstract).
- Xie Shiwen, Wang Shijin, Xie Hangqiang, *et al.* 2015. Petrogenesis of ca. 2.7 Ga TTG rocks in the Jiaodong terrane, North China craton and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2 974~2 990(in Chinese with English abstract).
- Yang Chonghui, Du Lilin, Ren Liudong, *et al.* 2013. Delineation of the ca. 2.7 Ga TTG gneisses in the Zhanhuang Complex, North China Craton and its geological implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 178~189.
- Zhai Mingguo, Bian Aiguo and Zhao Taiping. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archean and its breakup during Late Palaeoproterozoic and Mesoproterozoic[J]. *Science in China(Series D): Earth Science*, 43(S1): 219~232.
- Zhai Mingguo, Guo Jinghui and Liu Wenjun. 2005. Neoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: a review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 547~561.
- Zhai M G, Li T S, Peng P, *et al.* 2010. Precambrian key tectonic events and evolution of the North China Craton[J]. *Geological Society of London*, 338: 235~262.

- Zhai Mingguo and Santosh M. 2013. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth[J]. *Gondwana Research*, 24: 275~297.
- Zhai Mingguo and Peng Peng. 2007. Paleoproterozoic event in the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2 665~2 687 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2009. Two kinds of granulites (HT-HP and HT-UHT) in North China Craton: Their genetic relation and geotectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1 753~1 771 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Juan, Zhang Hongfu and Lu Xinxiang. 2013. Zircon U-Pb age and Lu-Hf isotope constraints on Precambrian evolution of continental crust in the Songshan area, the south-central North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 226: 1~20.
- Zhao Guochun, Cawood Peter A, Wilde Simon A, *et al.* 2000. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 103(1~2): 55~88.
- Zhao Guochun, Cawood Peter A, Wilde Simon A, *et al.* 2001a. High-pressure granulites (retrograded eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: Petrology and tectonic implications[J]. *Journal of Petrology*, 42(6): 1 141~1 170.
- Zhao Guochun and Guo Jinghui. 2012a. Precambrian geology of china: preface[J]. *Precambrian Research*, 222~223: 1~12.
- Zhao Guochun, Peter A. Cawood, *et al.* 2012b. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Precambrian Research*, 222~223: 55~76.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde Simon A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136: 177~202.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde Simon A, *et al.* 2006. Composite nature of the North China granulite-facies belt: Tectonothermal and geochronological constraints[J]. *Gondwana Research*, 9(3): 337~348.
- Zhao Guochun, Wilde Simon A, Cawood Peter A, *et al.* 1998. Thermal evolution of the Archean basement rocks from the eastern part of the North China Craton and its bearing on tectonic setting[J]. *International Geology Review*, 40: 706~721.
- Zhao Guochun, Wilde Simon A, Cawood Peter A, *et al.* 2001b. Archean blocks and their boundaries in the North China craton: lithological, geochemical, structural and P-T constraints and tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 107(1~2): 45~73.
- Zhao Guochun. 2009. Metamorphic evolution of tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1 772~1 792 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yanyan, Zhai Mingguo, Zhao Taiping, *et al.* 2014a. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Early Paleoproterozoic potassic granite in the Lushan area, southern margin of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 94: 190~204.
- Zhou Yanyan, Zhao Taiping, Zhai Mingguo, *et al.* 2014b. Petrogenesis of the Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) and granites in the Lushan area, southern margin of the North China Craton: Implications for crustal accretion and transformation[J]. *Precambrian Research*, 255(2): 514~537.
- Zhou Yanyan, Zhao Taiping, Zhai Mingguo, *et al.* 2014c. Petrogenesis of the 2.1 Ga Lushan garnet-bearing quartz monzonite on the southern margin of the North China Craton and its tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 256: 241~255.
- Zhu Xiyun, Zhai Mingguo, Chen Fukun, *et al.* 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]. *Journal of Geology*, 121: 239~254.

附中文参考文献

- 白 瑾, 黄学元, 戴凤岩, 等. 1993. 中国早前寒武纪地壳演化[M]. 北京: 地质出版社, 199~203.
- 杜利林, 杨崇辉, 庄育勋, 等. 2010. 鲁西新泰孟家屯 2.7 Ga 变质沉积岩与黑云母片麻岩锆石 Hf 同位素特征[J]. *地质学报*, 84(7): 992~1 001.
- 杜利林, 庄育勋, 杨崇辉, 等. 2003. 山东新泰孟家屯岩组锆石特征及其年代学意义[J]. *地质学报*, 77(3): 359~366.
- 郭敬辉, 翟明国, 许荣华. 2002. 华北桑干地区大规模麻粒岩相变质作用的时代: 锆石 U-Pb 年代学[J]. *中国科学(D 辑)*, 32(1): 10~18.
- 郭敬辉, 翟明国, 张毅刚, 等. 1993. 怀安蔓菁沟早前寒武纪高压粒岩混合岩带地质特征、岩石学 and 同位素年代学[J]. *岩石学报*, 9(4): 329~341.
- 林慈奎. 2006. 河南鲁山地区太古代片麻岩系的地球化学锆石年代学及其构造环境[D]. 西安: 西北大学.

- 刘树文, 舒桂明, 潘元明, 等. 2004b. 电子探针独居石定年法及舞台群的变质时代[J]. 高校地质学报, 10(3): 356~363.
- 卢俊生, 王国栋, 王 浩, 等. 2014. 河南鲁山太华变质杂岩前寒武纪变质作用[J]. 岩石学报, 30(10): 3 062~3 074.
- 路增龙, 宋会峡, 杜利林, 等. 2014. 华北克拉通阜平杂岩中~2.7 Ga TTG 片麻岩的厘定及其地质意义[J]. 岩石学报, 30(10): 2 872~2 884.
- 沈其韩, 许惠芬, 张宗清, 等. 1992. 中国早前寒武纪-粒岩[M]. 北京: 地质出版社, 105~109.
- 孙 勇. 1983. 河南鲁山太华群的麻粒岩相变质岩[J]. 西北大学学报, 38(1): 89~95.
- 万渝生, 董春燕, 颜炳强, 等. 2015. 华北克拉通太古宙研究若干进展[J]. 地球学报, 36(6): 685~700.
- 吴元伟, 周广法, 曾现虎. 2013. 变质锆石成因类型及内部结构、地球化学特征[J]. 科技创新与应用, 26: 128.
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 192~203.
- 谢士稳, 王世进, 颜炳强, 等. 2015. 华北克拉通胶东地区~2.7 Ga TTG 岩石的成因及地质意义[J]. 岩石学报, 31(10): 2 974~2 990.
- 翟明国. 2009. 华北克拉通两类早前寒武纪 粒岩(HT-HP 和 HT-UHT)及相关问题[J]. 岩石学报, 25(8): 1 753~1 771.
- 翟明国, 彭 澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件[J]. 岩石学报, 23(11): 2 665~2 687.
- 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): 1 772~1 792.

2016 年度部分地质学类期刊主要计量指标一览表

序号	刊名	影响因子	总被引频次数	他引率	序号	刊名	影响因子	总被引频次数	他引率
1	地质学报	2.166	5595	0.84	16	地质通报	0.768	3902	0.90
2	地学前缘	1.947	4877	0.91	17	矿物岩石地球化学通报	0.764	1004	0.92
3	地球科学进展	1.781	3462	0.93	18	地质科技情报	0.736	1478	0.82
4	岩石学报	1.705	8951	0.82	19	岩石矿物学杂志	0.711	1285	0.92
5	中国科学 地球科学	1.639	4776	0.95	20	地球与环境	0.710	1003	0.92
6	地球学报	1.520	1958	0.91	21	地质科学	0.684	1590	0.96
7	地球科学	1.384	2657	0.84	22	地球化学	0.683	1772	0.95
8	地质论评	1.349	2710	0.93	23	矿物学报	0.598	1024	0.91
9	矿床地质	1.168	2369	0.89	24	高校地质学报	0.541	1429	0.97
10	沉积学报	1.098	3135	0.92	25	矿物岩石	0.513	867	0.92
11	大地构造与成矿学	0.971	1365	0.85	26	新疆地质	0.351	837	0.87
12	岩矿测试	0.944	1344	0.89	27	地质力学学报	0.340	418	0.93
13	吉林大学学报地球科学版	0.898	2383	0.89	28	地质找矿论丛	0.273	394	0.87
14	地层学杂志	0.840	786	0.82	29	矿产勘查	0.238	316	0.90
15	现代地质	0.783	1967	0.85	30	地质与资源	0.200	386	0.86

本表数据引自《2017年版中国科技期刊引证报告(核心版)》(中国科学技术信息研究所编)。