

华山太华变质杂岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年*

王国栋¹ 卢俊生¹ 王浩¹ 陈泓旭¹ 肖玲玲² 第五春荣³ 季建清⁴ 吴春明^{1**}

WANG GuoDong¹, LU JunSheng¹, WANG Hao¹, CHEN HongXu¹, XIAO LingLing², DIWU ChunRong³, JI JianQing⁴ and WU ChunMing^{1**}

1. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

3. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安 710069

4. 北京大学地质学系, 北京 100871

1. College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

4. Department of Geology, Peking University, Beijing 100871, China

2013-02-21 收稿, 2013-04-20 改回.

Wang GD, Lu JS, Wang H, Chen HX, Xiao LL, Diwu CR, Ji JQ and Wu CM. 2013. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of amphiboles of the Taihua Metamorphic Complex, Mt. Huashan, southern terminal of the Palaeoproterozoic Trans-North China Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9):3099–3114

Abstract The E-W-striking Huashan Taihua Metamorphic Complex, exposed in the southernmost terminal of the Palaeoproterozoic Trans-North China Orogen (TNCO), consists of a variety of metamorphic rocks and preserves metamorphic mineral assemblages of three stages. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons separated from metapelitic gneisses and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of hornblendes separated from amphibolitic gneisses show that: (1) one episode (~2.3Ga and ~2.5Ga) of magmatism was identified from the detrital zircons and one metamorphic event (1.87~1.85Ga) was confirmed from the metamorphic zircons of the biotite-plagioclase gneisses; (2) again, one episode (~2.33Ga and ~2.31Ga) of magmatism was detected from the detrital zircons and one metamorphic event (1.96Ga) was verified from the metamorphic zircons of the biotite-plagioclase-K-feldspar gneisses; and (3) one metamorphic event (~1.8Ga) had been justified in the amphibolites. The available geochronologic data imply that the Huashan Taihua Metamorphic Complex had evolved in the Late Palaeoproterozoic orogeny of the TNCO and the Precambrian metamorphism of the Huashan Taihua Metamorphic Complex not only occurred earlier than, but also lasted longer than the other metamorphic terranes within the middle and northern segments of the Trans-North China Orogen.

Key words Huashan; Taihua Metamorphic Complex; Trans-North China Orogen; Metapelitic gneiss; Amphibolite; U-Pb geochronology; ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology

摘要 太华变质杂岩出露于华北克拉通中部造山带最南缘, 整体呈近东西向展布。华山地区的太华变质杂岩区岩性复杂多样, 保存了至少三个阶段的变质矿物组合。本文对其中的黑云斜长片麻岩和黑云二长片麻岩中的锆石, 进行了详细的 LA-ICP-MS U-Pb 定年; 对斜长角闪片麻岩中的变质角闪石, 进行了常规⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年。定年结果表明: (1) 黑云斜长片麻岩中的碎屑锆石记录了两期 (~2.3Ga 和 ~2.5Ga) 明显的岩浆事件, 变质锆石记录了一期 (1.87~1.85Ga) 变质事件; (2) 黑云二长片麻岩中的岩浆锆石 U-Pb 年龄为 2.33Ga 和 2.31Ga, 变质锆石记录的变质年龄为 1.96Ga; (3) 两个斜长角闪片麻岩样品中, 变质角闪石的⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄和等时线年龄说明, 该地区经历了一期 ~1.8Ga 的变质热事件。这些数据说明, 太华变质杂岩也记录了华北克拉通东部陆块与西部陆块之间的碰撞造山过程, 不过比中部造山带其它变质杂岩区记录的时间更早, 变质作用持续的时间也 longer。这暗示了该地区在 1.96~1.80Ga 期间, 经历了一次比较漫长而复杂的构造-变质演化过程。

关键词 华山; 太华变质杂岩; 华北克拉通中部造山带; 变泥质片麻岩; 斜长角闪片麻岩; LA-ICP-MS U-Pb 定年; ⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年中图法分类号 P597.3

* 本文受国家自然科学基金项目(41225007, 40872125)资助。

第一作者简介: 王国栋, 男, 1987 年生, 博士生, 变质地质学专业, E-mail: wangguodong10@mails.ucas.ac.cn

** 通讯作者: 吴春明, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 变质地质学专业, E-mail: wucm@ucas.ac.cn

1 引言

华北克拉通长期以来受到国内外地质学家的广泛关注。关于华北克拉通前寒武纪基底的形成和演化方面的认识还存在争议,主要体现在对其前寒武纪结晶基底构造单元的划分方案以及其拼合的机制和时代方面(白瑾等,1993,1996;沈其韩和钱祥麟,1995;伍家善等,1998;翟明国和卞爱国,2000;Zhao *et al.*, 2000, 2005, 2007, 2010;Zhao *et al.*, 1998, 2001, 2005, 2012; Kuskys and Li, 2003; Kuskys *et al.*, 2007; Kuskys, 2011; Trap *et al.*, 2007, 2008, 2011, 2012; Faure *et al.*, 2007)。结合岩石组合、变质作用 $P-T-t$ 轨迹、地球化学以及年代学资料,Zhao *et al.* (1998, 2005) 将华北克拉通基底划分为三个基本单元:东部陆块(Eastern Block)、西部陆块(Western Block),以及两者碰撞形成的华北中部造山带(Trans-North China Orogen)。其中,西部陆块由鄂尔多斯地块和阴山地块,沿着近东西向的孔兹岩带于 $\sim 1.95\text{Ga}$ 碰撞拼合而成;东部陆块则在 $2.2 \sim 1.9\text{Ga}$ 期间,先经历了陆内裂解形成龙岗地块和狼林地块,之后盆地闭合,两个地块发生

俯冲碰撞,形成东部陆块的基底(Zhao *et al.*, 2012)。东部陆块、阴山地块的晚太古宙基底岩石,都记录了逆时针型的、包含近等压降温(IBC)退变质过程的变质作用 $P-T$ 轨迹,可能与大规模的地幔岩浆底侵作用有关。与之迥然不同的是,华北中部造山带中各个早元古代变质杂岩区,毫无例外地都记录了顺时针型的、包含近等温降压(ITD)退变质过程的变质作用 $P-T$ 轨迹,可能反映了东部陆块和西部陆块在早元古代末($\sim 1.85\text{Ga}$),发生了俯冲-碰撞及随后快速抬升的构造演化过程(Zhao *et al.*, 1998, 2005, 2012; 赵国春, 2009)。

上述论断,建立在对华北中部造山带的北段和中段各个变质地质体研究的基础之上。由于该造山带南段(中条山、嵩山、太华等变质杂岩区)变质作用演化及其地质年代学的研究比较薄弱,南段是否也同样记录了顺时针的含有 ITD 片段的 $P-T$ 轨迹,是否也是在早元古代末期发生了拼贴和造山过程? 这些问题对于完整认识华北中部造山带的构造演化过程,是非常关键的。为此,本文报道了出露于该造山带最南缘的华山地区太华变质杂岩(图 1)变质作用年代学的研究成果。

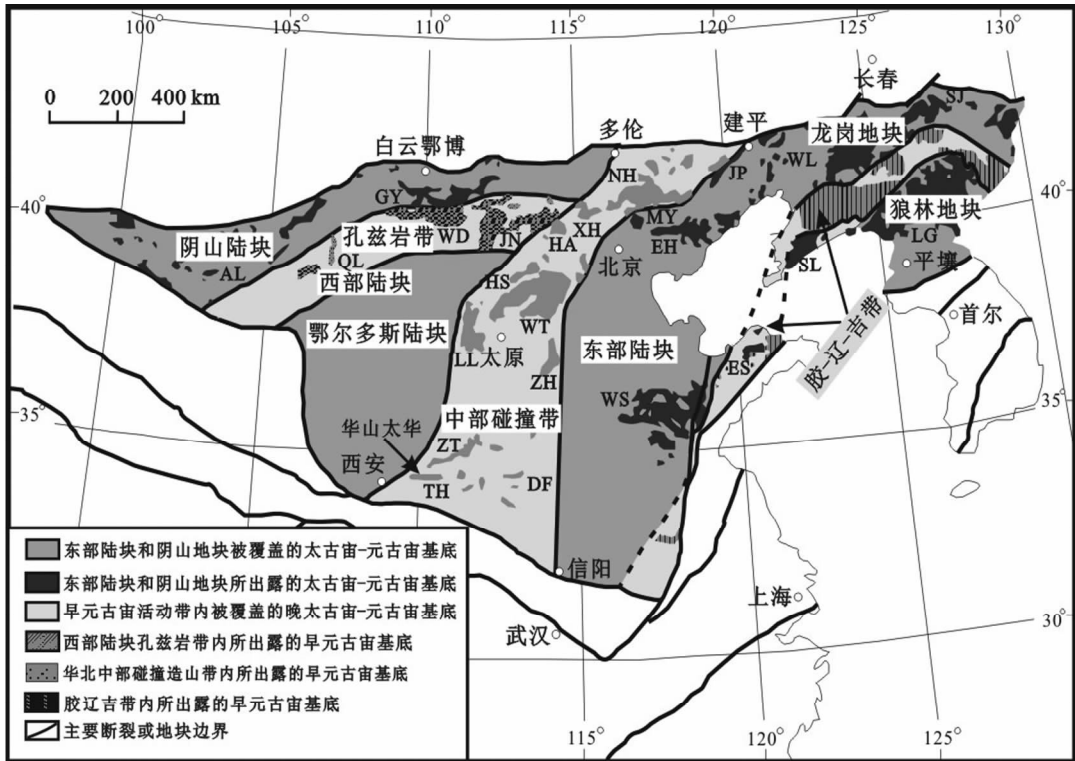


图 1 华北克拉通前寒武纪基底构造单元划分图(据 Zhao *et al.*, 1998, 2001, 2005, 2012)

图中变质杂岩区缩写标识:AL-阿拉善; CD-承德; DF-登封; EH-冀东; ES-鲁东; FP-阜平; GY-固阳; HA-怀安; HL-贺兰山; HS-恒山; JN-集宁; LG-狼林; LL-吕梁; MY-密云; NH-冀东; NL-辽北; QL-祁连山; SJ-吉南; SL-辽南; TH-太华; WD-乌拉山-大青山; WL-辽西; WS-鲁西; WT-五台; XH-宣化; ZH-赞皇; ZT-中条

Fig. 1 Tectonic subdivision of the Precambrian basement of the North China Craton (after Zhao *et al.*, 1998, 2001, 2005, 2012)

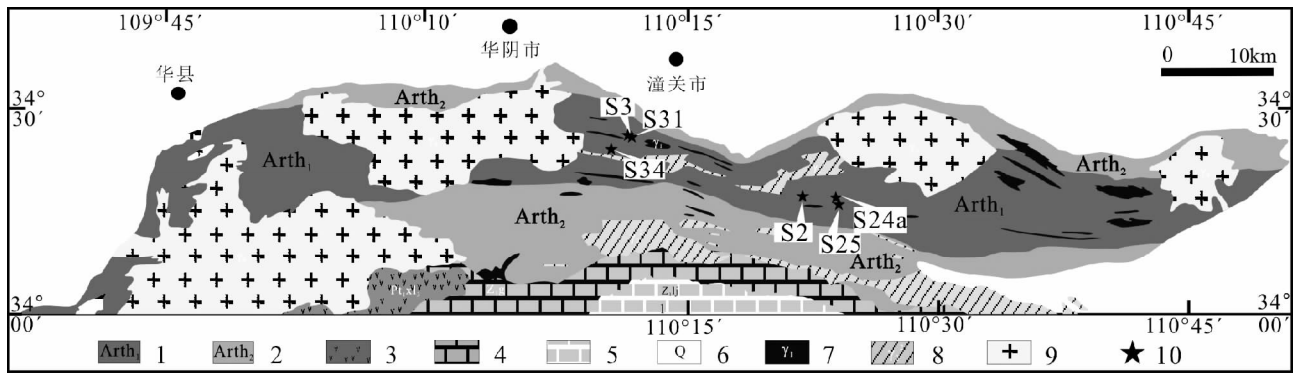


图2 华山太华变质杂岩区地质简图及采样点位置(据河南省地质局秦岭区域地质测量大队,1965^①;陕西省地质局秦岭区域地质测量大队,1966^② 修编)

1-下“太华群”(Arth₁);2-上“太华群”(Arth₂);3-上熊耳群(Pt₁x_{l3});4-高山河组(Z₁g);5-龙家园组(Z₁lj);6-第四系;7-太古代花岗岩;8-元古代花岗岩;9-中生代花岗岩;10-取样位置

Fig. 2 Geological sketch map of the Huashan Taihua Metamorphic Complex, showing representative sample locations

1-Lower Taihua Group (Arth₁); 2-Upper Taihua Group (Arth₂); 3-Upper Xiong'er Group (Pt₁x_{l3}); 4-Gaoshanhe Formation (Z₁g); 5-Longjiayuan Formation (Z₁lj); 6-Quaternary cover; 7-Archaean granite; 8-Proterozoic granite; 9-Mesozoic granite; 10-sample location

太华变质杂岩曾被称为“太华群”,出露于华北中部造山带南缘(图1),整体呈NW-SE向展布,主要分布于华山、三门峡南、洛宁、鲁山和舞钢等地域。目前,对太华变质杂岩变质演化和年代学方面的研究,主要集中于洛宁和鲁山地区。对洛宁地区斜长角闪片麻岩中岩浆锆石和变质锆石进行的U-Pb定年表明,该地区斜长角闪片麻岩原岩形成于2.34~2.30Ga,记录了1.97~1.94Ga期间的变质事件(蒋宗胜等,2011)。该地区的TTG片麻岩的锆石中,记录了两期(2.32~2.30Ga, 2.19~2.07Ga)岩浆事件(Huang *et al.*, 2012)。鲁山地区年代学方面的报道也比较多。目前测得该地区TTG片麻岩及斜长角闪片麻岩原岩形成于2.85~2.72Ga(第五春荣等,2010; Diwu *et al.*, 2010, Huang *et al.*, 2010, Liu *et al.*, 2009),记录的变质事件的时代为1.87~1.84Ga(Wan *et al.*, 2006; 杨长秀, 2008)。最近, Liu *et al.* (2009)通过锆石U-Pb定年,认为鲁山地区太华变质杂岩中的英云闪长岩,记录了两期变质事件(~2.77Ga、~2.64Ga),斜长角闪片麻岩也记录了两期变质事件(2.79~2.78Ga、2.67~2.65Ga)。这个认识与大多数研究者存在较大差异,值得进一步探讨。Yu *et al.* (2013)对华山地区太华变质杂岩中的花岗质片麻岩及穿插其中的伟晶岩和花岗岩脉,进行了锆石U-Pb定年,获得了2.35~2.33Ga和1.88~1.87Ga两组年龄,可能分别代表了原岩时代和变质时代,与我们之前的报道(王国栋等,2012)是一致的。

本文主要对华山地区太华变质杂岩中含榴(紫苏)黑云斜长片麻岩、含榴黑云二长片麻岩,进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb年代测定;同时,对含榴斜长角闪片麻岩中的变质角闪石,进行了⁴⁰Ar/³⁹Ar年代测定。

2 岩相学特征

华山地区太华变质杂岩整体呈东西走向,西起陕西临潼地区,东至河南灵宝境内,断续出露达百余公里(图2)。太华变质杂岩区岩性组成比较复杂,主要包括TTG片麻岩、斜长角闪岩、斜长角闪片麻岩、黑云斜长片麻岩、黑云斜长角闪片麻岩、石英岩和大理岩等。TTG片麻岩出露面积占全部变质岩石面积的一半以上。斜长角闪(片麻)岩以“透镜体”或“夹层状”产于TTG片麻岩和黑云斜长(角闪)片麻岩之中,有时呈现“布丁状”(王国栋等,2012)。

华山地区太华变质杂岩的变质程度较高,以角闪岩相为主,局部可达麻粒岩相(孙勇,1983; 康春华和李民贤,1988; 齐进英,1991, 1992; 陈陇刚等,1997; 王仁民等,1998; 周汉文等,1997, 1998)。部分斜长角闪片麻岩、黑云斜长片麻岩及黑云二长片麻岩中,含有石榴子石变斑晶(图3)。一些石榴子石变斑晶内部保留了早期进变质阶段的包裹体矿物组合,边部发育特征的“白眼圈”状退变质反应结构,说明这些岩石中保留了至少三个变质阶段的变质矿物组合(王国栋等,2012)。本文选择代表性变质岩石(S2、S3、S24a、S25、S31、S34),进行了岩相学及年代学研究。

含榴斜长角闪片麻岩(S2、S3) 岩石以大小不一的透镜体,产出于TTG片麻岩和黑云斜长片麻岩中,王国栋等(2012)已对这两个样品进行了岩相学和锆石U-Pb年代学研究。经中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室CAMECA1280型离子探针仪测定,样品S2中变质锆石U-Pb谐和年龄为1823±4Ma,样品S3中锆石变质增生边U-Pb谐

① 河南省地质局秦岭区域地质测量大队. 1965. 1:20万洛南幅地质图

② 陕西省地质局秦岭区域地质测量大队. 1966. 1:20万渭南幅地质图

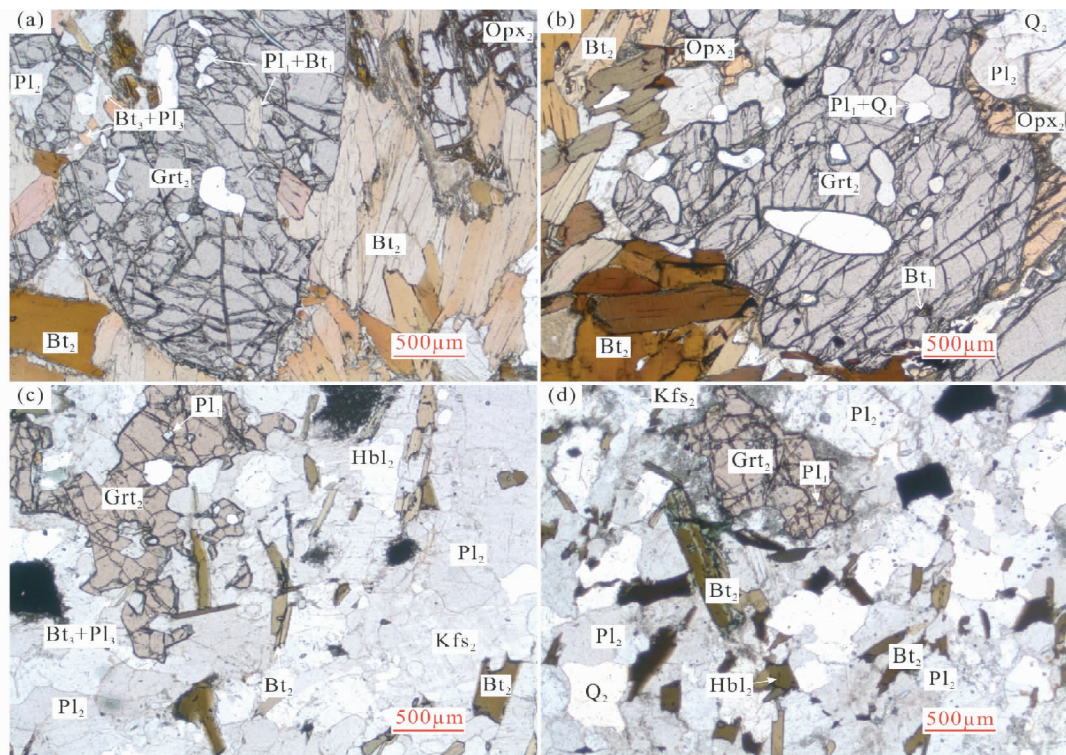


图3 华山地区变泥质片麻岩显微岩相特征

(a)-含榴黑云斜长片麻岩(S24a);(b)-含榴紫苏黑云斜长片麻岩(S25);(c)-含榴黑云二长片麻岩(S31);(d)-含榴黑云二长片麻岩(S34)。图中矿物缩写:Grt-石榴子石;Hbl-角闪石;Opx-斜方辉石;Bt-黑云母;Pl-斜长石;Kfs-钾长石;Q-石英

Fig. 3 Photomicrographs of metapelite (samples S24a (a), S25 (b)) and biotite two-feldspar gneiss (samples S31 (c), S34 (d)), respectively

Mineral abbreviations: Grt-garnet; Hbl-hornblende; Opx-orthopyroxene; Bt-biotite; Pl-plagioclase; Kfs-K-feldspar; Q-quartz

和年龄为 $1890 \pm 19\text{Ma}$ (王国栋等, 2012)。本文主要补充其中变质角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代测定结果。

含榴黑云斜长片麻岩(S24a) 岩石呈灰黑色,片麻状构造。主要组成矿物包括石榴子石(25%)、黑云母(20%)、斜长石(30%)、石英(18%)和少量的紫苏辉石(5%),以及其它副矿物(2%)。岩石中保留了至少三个阶段的矿物组合:石榴子石变斑晶内部含有包裹体矿物,主要由斜长石、石英和少量的黑云母组成,代表进变质阶段矿物组合(M_1);石榴子石变斑晶以及基质中的黑云母、斜长石、石英和紫苏辉石,构成了变质高峰期矿物组合(M_2);石榴子石变斑晶边部局部微区发育“白眼圈”状后成合晶矿物组合,主要由细粒的黑云母、斜长石和石英组成,代表退变质阶段矿物组合(M_3)。

含榴紫苏黑云斜长片麻岩(S25) 岩石呈灰黑色,片麻状构造。主要组成矿物包括石榴子石(20%)、紫苏辉石(25%)、黑云母(20%)、斜长石(22%)、石英(10%)和其它副矿物(3%)。岩石保留了至少三个阶段的矿物组合:部分石榴子石变斑晶内部含有包裹体,主要由石英、斜长石和少量的黑云母组成,代表进变质阶段矿物组合(M_1);石榴子石变斑晶以及基质中的紫苏辉石、黑云母、斜长石和石英等矿物组成了峰期矿物组合(M_2);部分石榴子石变斑晶边部发育黑云母、斜长石和石英等后成合晶,代表退变质阶段矿物组合(M_3)。

含榴黑云二长片麻岩(S31、S34) 岩石呈灰黑色,片麻状构造。主要组成矿物包括石榴子石(10%)、黑云母(15%)、钾长石(10%)、斜长石(35%)、石英(20%)、角闪石(5%)和其它副矿物(5%)。石榴子石颗粒较小,自形程度较差,部分含包裹体矿物,主要由石英和斜长石组成,代表进变质阶段矿物组合(M_1);石榴子石变斑晶以及基质中的斜长石、钾长石、石英、黑云母和角闪石组成峰期矿物组合(M_2);部分石榴子石变斑晶边部发育后成合晶,主要由细粒的黑云母、斜长石和石英组成,代表退变质阶段矿物组合(M_3)。

3 测试方法

3.1 锆石 U-Pb 定年

锆石的 U-Th-Pb 同位素测试,在西北大学大陆动力学国家重点实验室装备的 Geolas-193 紫外激光剥蚀系统的 Agilent 7500a 型 ICP-MS 离子探针仪上完成。激光剥蚀束斑直径为 $30\mu\text{m}$,频率为 8Hz,详细的仪器参数设置及分析技术参见 Liu *et al.* (2007) 的描述。原始数据处理采用 GLITTER 4.0 程序 (Macquarie University)。年龄计算时以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值分馏校正,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平

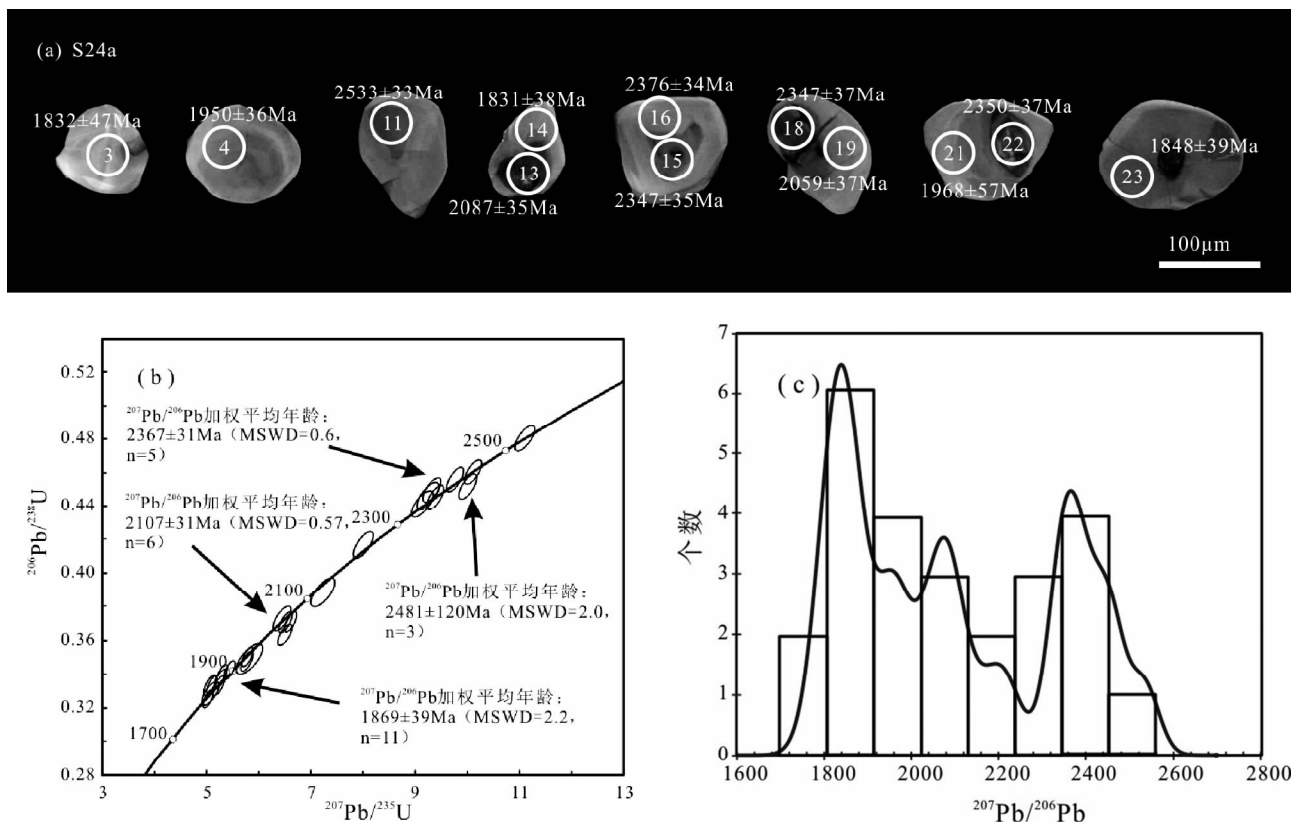


图4 黑云斜长片麻岩(样品 S24a)中锆石 U-Pb 年代学相关图

(a)-锆石 CL 图像;(b)- LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和曲线图;(c)-锆石年龄频度分布图

Fig.4 Representative cathodoluminescence image (a), U-Pb concordia diagram showing LA-ICP-MS analytical data (b) and the distribution map of age frequency (c) for zircons of metapelite gneiss (Sample S24a) from the Huashan Taihua Metamorphic Complex

均年龄的参考值为 $1064.1 \pm 3.2\text{Ma}$ ($n = 16, 2\sigma$) (Wiedenbeck *et al.*, 1995)。元素浓度计算采用 NIST610 作外标, Si 作内标。单点分析的同位素比值及年龄误差为 1σ , 加权平均年龄误差为 95% 置信度。采用 Isoplot ver 4.15 软件(Ludwig, 2003), 完成加权平均年龄的计算及谐和图绘制。

3.2 变质角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年

变质角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年,在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室常规⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年系统完成。对变质角闪石样品进行去离子水和丙酮超声波清洗之后,根据样品地质背景估计的年龄 (~1.9Ga) 和钾含量,称取 20 ~ 60mg, 用纯铅铂纸将 0.18 ~ 0.28mm 粒径的样品包装成直径约 6mm 的球形,封闭于石英玻璃瓶中。2011 年 10 月 17 日至 10 月 18 日,置于中国原子能科学研究院 49-2 反应堆 B4 孔道进行中子照射。照射时间为 24h,快中子通量为 2.2359×10^{18} 。用于中子通量监测的样品是 ZBH-25 (132.7Ma)、Bern 4M (18.6Ma)、FCs (28.2Ma)。同时对纯物质 CaF₂ 和 K₂SO₄ 进行同步照射,得出的校正因子为: (³⁶Ar/³⁷Ar)_{Ca} = 0.000271, (³⁹Ar/³⁷Ar)_{Ca} = 0.000652, (⁴⁰Ar/³⁹Ar)_K = 0.00703。

照射后的样品冷置后,装入圣诞树状的样品架中,密封去气 72h 以上。

样品测试在 2012 年 8 月进行,由北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室常规⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年系统完成。测定采用钽 (Ta) 熔样炉对样品进行阶步升温熔样,每个样品分为 12 步加热释气,温阶范围为 850 ~ 1400℃,每个加热点在恒温状态下保持 20min。系统分别用活性炭冷阱及锆钒铁吸气剂炉对气体进行纯化。活性炭冷阱的纯化时间为 10min,锆钒铁吸气剂炉的纯化时间为 15min。使用 RGA10 型质谱仪记录五组 Ar 同位素信号,信号强度以毫伏 (mV) 为单位记录。质谱峰循环测定 9 次。

采用该实验室编写的⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating 1.2 数据处理程序,对各组 Ar 同位素测试数据进行校正计算,再采用 Isoplot 3.0 软件(Ludwig, 2003) 计算坪年龄及等时线年龄。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年

各样品锆石 U-Pb 同位素测试结果见表 1。

表1 大华变质杂岩区代表性黑云斜长片麻岩(S24a、S25)和黑云二长片麻岩(S31、S34)中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronological data of representative metapelites (S24a, S25) and biotite two-feldspar gneisses (S31, S34) from the Taihua Metamorphic Complex

测点号	Pb* (×10 ⁻⁶)		Th/U	207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U		同位素比值		同位素年龄(Ma)				
	Pb*	Th		U	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ			
S24a 含榴黑云斜长片麻岩																
S24a-01	47	6	122	0.049	0.1127	0.0024	5.2867	0.071	0.3403	0.004	1843	37.6	1866.7	11.4	1888.3	18.1
S24a-02	37	1.7	99	0.017	0.1107	0.0023	5.0911	0.068	0.3335	0.004	1811.4	37.7	1834.6	11.3	1855.3	17.8
S24a-03	37	1.6	41	0.039	0.112	0.003	5.0743	0.108	0.3286	0.004	1832.4	47.5	1831.8	18	1831.5	21.7
S24a-04	44	11.4	110	0.104	0.1196	0.0025	5.7754	0.073	0.3503	0.004	1950.2	36.4	1942.7	11	1935.9	18.3
S24a-05	34	2.6	71	0.037	0.1391	0.0031	8.0361	0.122	0.419	0.005	2216.2	37.9	2235.1	13.7	2256	23
S24a-06	20	1.5	54	0.029	0.1102	0.0025	5.0639	0.079	0.3334	0.004	1820.3	40.6	1830.1	13.3	1854.8	18.9
S24a-07	140	130.1	231	0.563	0.1591	0.0031	10.1012	0.109	0.4605	0.005	2446.1	32.8	2444.1	10	2441.8	21.4
S24a-08	131	49.9	238	0.21	0.1554	0.0031	9.7671	0.109	0.4558	0.005	2406.5	33.3	2413	10.3	2420.9	21.5
S24a-09	33	2.7	77	0.035	0.1254	0.003	6.4438	0.113	0.3728	0.005	2033.9	41.5	2038.3	15.4	2042.8	22.2
S24a-10	39	8.7	98	0.089	0.1204	0.0026	5.7741	0.078	0.348	0.004	1961.5	37.4	1942.5	11.7	1924.9	18.6
S24a-11	149	49.2	251	0.196	0.1676	0.0033	11.096	0.125	0.4803	0.005	2533.3	33	2531.2	10.5	2528.7	22.5
S24a-12	134	43.3	244	0.179	0.1769	0.0035	10.4076	0.114	0.4268	0.005	2623.8	32.5	2471.7	10.1	2291.1	20.4
S24a-13	77	20.5	180	0.114	0.1292	0.0026	6.607	0.078	0.3709	0.004	2087	35.3	2060.3	10.5	2033.7	18.8
S24a-14	44	1.9	122	0.015	0.112	0.0024	5.0197	0.068	0.3252	0.004	1831.2	38.1	1822.7	11.4	1815	17.6
S24a-15	95	63	171	0.368	0.1501	0.0031	9.3092	0.114	0.4497	0.005	2347.5	34.6	2368.9	11.2	2393.8	22
S24a-16	108	41.5	203	0.204	0.1527	0.0031	9.3728	0.109	0.4452	0.005	2376	34.1	2375.2	10.7	2374	21.5
S24a-17	76	56.8	133	0.428	0.1606	0.0033	10.0023	0.116	0.4516	0.005	2462.1	33.8	2435	10.7	2402.4	21.7
S24a-18	117	99.6	164	0.608	0.1501	0.0033	9.1298	0.137	0.4411	0.005	2347.1	37.5	2351.1	13.8	2355.4	23.9
S24a-19	45	3	109	0.027	0.1272	0.0027	6.5023	0.085	0.3708	0.004	2059	36.8	2046.2	11.5	2033.1	19.4
S24a-20	48	5.1	128	0.04	0.115	0.0025	5.4329	0.073	0.3425	0.004	1880.1	37.9	1890.1	11.5	1898.7	18.3
S24a-21	12	0.8	29.3	0.026	0.12082	0.0039	5.8176	0.165	0.3491	0.006	1968.4	56.9	1949	24.6	1930.3	27.9
S24a-22	68	39.6	122	0.325	0.1503	0.0033	9.2453	0.136	0.4459	0.005	2349.7	37.2	2362.6	13.5	2376.9	23.8
S24a-23	37	1.7	99	0.018	0.113	0.0025	5.258	0.073	0.3373	0.004	1848.4	38.7	1862.1	11.8	1873.7	18.3
S24a-24	32	0.4	71	0.006	0.1349	0.0035	7.1844	0.144	0.3862	0.005	2162.2	44.3	2134.6	17.9	2105.2	24.8
S24a-25	56	17.6	137	0.129	0.1297	0.0028	6.4961	0.086	0.363	0.004	2093.8	37.1	2045.4	11.7	1996.5	19.3
S24a-26	27	0.5	75	0.007	0.1135	0.0026	5.2182	0.079	0.3331	0.004	1856.9	40.2	1855.6	12.9	1853.2	18.7
S25 含榴紫苏黑云斜长片麻岩																
S25-01	60	37	120	0.309	0.1483	0.0029	8.6406	0.094	0.4225	0.005	2326.8	33.2	2300.8	9.9	2271.6	20.5
S25-02	39	0.7	108	0.007	0.1129	0.0022	5.2281	0.057	0.3358	0.004	1846.8	35.2	1857.2	9.3	1866.4	17.2
S25-03	31	0.6	85	0.007	0.1103	0.0022	5.2092	0.06	0.3424	0.004	1805.1	35.9	1854.1	9.8	1898.1	17.7
S25-04	42	1.4	114	0.013	0.1124	0.0022	5.2139	0.057	0.3365	0.004	1838.2	35.2	1854.9	9.3	1869.8	17.3
S25-05	31	1	85	0.012	0.1115	0.0022	5.2296	0.058	0.3402	0.004	1824	35.4	1857.4	9.4	1887.4	17.4
S25-06	59	46.3	118	0.392	0.142	0.0028	8.1702	0.087	0.4173	0.004	2251.8	33.2	2250	9.6	2248.1	20.2
S25-07	65	52.4	108	0.485	0.1657	0.0032	10.9197	0.116	0.4778	0.005	2515.1	32.3	2516.3	9.9	2517.8	22.3
S25-08	77	42.6	159	0.268	0.1457	0.0028	8.3155	0.087	0.414	0.004	2295.9	32.9	2266	9.5	2233	20
S25-09	56	22	119	0.184	0.1414	0.0028	8.0973	0.087	0.4153	0.004	2244.5	33.3	2241.9	9.7	2239.1	20.1
S25-10	27	1.9	74	0.026	0.1126	0.0023	5.2997	0.061	0.3413	0.004	1842.1	35.8	1868.8	9.9	1892.9	17.7
S25-11	66	24.4	138	0.177	0.147	0.0029	8.4956	0.092	0.4191	0.004	2311.7	33.2	2285.5	9.9	2256.2	20.4
S25-12	77	64.4	125	0.515	0.1637	0.0032	10.7047	0.114	0.4743	0.005	2494.2	32.5	2497.8	9.9	2502.2	22.1

续表 1

Continued Table 1

测点号	$(\times 10^{-6})$			Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			同位素比值			同位素年龄 (Ma)					
	Pb*	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
S25-13	74	23.3	130	0.179	0.1593	0.0032	10.4528	0.117	0.476	0.005	2448	33.1	2475.7	10.4	2509.6	22.5
S25-14	52	31.7	103	0.307	0.1506	0.003	8.5921	0.094	0.4139	0.004	2352.2	33.3	2295.7	9.9	2232.7	20.2
S25-15	117	121.8	194	0.627	0.159	0.0031	9.9984	0.106	0.456	0.005	2445.3	32.7	2434.6	9.8	2421.8	21.4
S25-16	28	20.6	46	0.443	0.1673	0.0033	11.0706	0.124	0.48	0.005	2530.6	32.9	2529.1	10.4	2527.1	22.7
S25-17	30	1	85	0.012	0.1142	0.0023	5.1121	0.061	0.3247	0.004	1867.2	36.2	1838.1	10.1	1812.5	17.2
S25-18	40	1.4	96	0.014	0.1237	0.0025	6.2523	0.069	0.3665	0.004	2010.7	34.7	2011.8	9.6	2012.8	18.5
S25-19	26	1	71	0.014	0.1134	0.0023	5.1995	0.06	0.3325	0.004	1854.6	35.8	1852.5	9.8	1850.6	17.3
S25-20	52	1.8	137	0.013	0.1126	0.0022	5.2822	0.058	0.3403	0.004	1841.3	35.4	1866	9.3	1888.1	17.4
S25-21	23	0.7	60	0.012	0.114	0.0023	5.34	0.063	0.3397	0.004	1864.4	36.1	1875.3	10	1885	17.7
S25-22	30	1.3	80	0.016	0.1141	0.0023	5.2674	0.064	0.3347	0.004	1866.1	36.5	1863.6	10.4	1861.3	17.7
S25-23	19	0.8	52	0.015	0.1119	0.0023	5.0701	0.064	0.3288	0.004	1829.6	37.1	1831.1	10.6	1832.3	17.6
S25-24	58	9.9	149	0.066	0.116	0.0023	5.4617	0.058	0.3416	0.004	1894.7	34.9	1894.6	9.1	1894.4	17.3
S31 含榴黑云二长片麻岩																
S31-01	566	1047	1001	1.046	0.1448	0.003	7.8702	0.098	0.3942	0.004	2285.1	35.2	2216.3	11.2	2142.1	20.2
S31-02	202	204	360	0.567	0.1567	0.0032	9.3798	0.111	0.4341	0.005	2420.1	34.1	2375.9	10.8	2324.1	21.3
S31-03	186	79	400	0.198	0.1364	0.0027	7.5326	0.085	0.4004	0.004	2182.1	34.5	2176.9	10.1	2170.9	19.7
S31-04	311	42	819	0.051	0.1228	0.0025	5.866	0.072	0.3465	0.004	1996.7	36.1	1956.2	10.6	1917.8	18.1
S31-05	140	185	271	0.684	0.143	0.0029	7.9717	0.088	0.4044	0.004	2263.2	34	2227.8	10	2189.1	19.8
S31-06	333	230	645	0.356	0.1507	0.003	8.8295	0.101	0.4249	0.005	2353.5	34	2320.5	10.5	2282.8	20.8
S31-07	183	191	321	0.594	0.1531	0.0032	9.35	0.12	0.4428	0.005	2381.1	35.1	2372.9	11.7	2363	22.4
S31-08	155	166	281	0.589	0.1469	0.0029	8.7816	0.098	0.4336	0.005	2309.8	33.9	2315.6	10.2	2321.8	20.9
S31-09	166	151	305	0.496	0.1496	0.003	8.9276	0.1	0.4326	0.005	2341.8	33.8	2330.6	10.2	2317.5	20.9
S31-10	155	172	279	0.618	0.1448	0.0029	8.6849	0.1	0.4351	0.005	2284.9	34.3	2305.5	10.5	2328.5	21.2
S31-11	82	69	150	0.46	0.1461	0.0032	8.8545	0.125	0.4396	0.005	2300.3	36.6	2323.1	12.9	2348.8	23.2
S31-12	137	140	255	0.55	0.1453	0.003	8.6228	0.103	0.4303	0.005	2291.7	34.6	2299	10.9	2306.9	21.4
S31-13	93	100	171	0.586	0.1487	0.0031	8.6259	0.111	0.4207	0.005	2330.8	35.3	2299.3	11.8	2263.7	21.7
S31-14	107	139	205	0.678	0.1398	0.0038	7.8414	0.17	0.4068	0.006	2224.7	45.8	2213	19.6	2200.1	27.6
S31-15	143	182	249	0.733	0.148	0.0031	8.9021	0.114	0.4363	0.005	2322.5	35.2	2328	11.7	2334	22.3
S31-16	108	126	194	0.648	0.147	0.003	8.8141	0.107	0.4348	0.005	2311.5	34.6	2319	11	2327.2	21.7
S31-17	88	74	162	0.46	0.1473	0.0031	8.8679	0.115	0.4367	0.005	2314.5	35.4	2324.5	11.8	2335.7	22.4
S31-18	237	287	391	0.734	0.1561	0.0031	9.6988	0.106	0.4506	0.005	2413.9	33.1	2406.6	10.1	2397.9	21.5
S31-19	152	180	266	0.675	0.1467	0.003	8.828	0.109	0.4363	0.005	2308.1	34.7	2320.4	11.3	2334.2	22
S31-20	179	222	316	0.702	0.1459	0.003	8.7076	0.106	0.4329	0.005	2298.4	34.6	2307.9	11.1	2318.6	21.8
S34 含榴黑云二长片麻岩																
S34-01	339	116	763	0.153	0.1463	0.0029	7.6966	0.083	0.3816	0.004	2302.7	33.4	2196.2	9.7	2083.8	19
S34-02	292	246	587	0.42	0.1461	0.0029	8.0321	0.09	0.3987	0.004	2300.6	33.7	2234.6	10.1	2163.2	19.8
S34-03	438	19	1349	0.014	0.1242	0.0025	5.0554	0.055	0.2953	0.003	2016.9	34.6	1828.7	9.2	1667.8	15.7
S34-04	172	141	320	0.439	0.1474	0.0029	8.7776	0.1	0.4319	0.005	2315.9	33.9	2315.2	10.4	2314	21.2
S34-05	266	14	728	0.02	0.1211	0.0024	5.5542	0.06	0.3327	0.004	1972.1	34.7	1909	9.3	1851.4	17.1
S34-06	482	17	1393	0.012	0.1214	0.0024	5.294	0.057	0.3164	0.003	1976.2	34.6	1867.9	9.2	1771.9	16.5

续表 1

Continued Table 1

测点号	$(\times 10^{-6})$			Th/U	同位素比值			同位素年龄(Ma)								
	Pb*	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$					
					1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ						
S34-07	309	13	917	0.014	0.1279	0.0026	5.3853	0.063	0.3053	0.003	2069.6	35.2	1882.5	10	1717.5	16.4
S34-08	249	151	487	0.31	0.1452	0.0029	8.5063	0.094	0.4248	0.005	2290.3	33.7	2286.6	10.1	2282.2	20.7
S34-09	399	16	1117	0.014	0.1272	0.0025	5.677	0.059	0.3237	0.003	2059.2	34.1	1927.9	9	1808	16.6
S34-10	258	94	596	0.157	0.1349	0.0027	7.0117	0.077	0.3768	0.004	2163.2	34.1	2112.9	9.7	2061.4	18.8
S34-11	378	12	923	0.013	0.1248	0.0025	6.396	0.073	0.3717	0.004	2025.7	35	2031.7	10	2037.5	18.8
S34-12	311	212	617	0.344	0.1462	0.0029	8.1961	0.088	0.4065	0.004	2302.1	33.4	2252.9	9.7	2198.9	19.8
S34-13	636	60	1642	0.037	0.126	0.0025	6.0187	0.064	0.3463	0.004	2043.2	34.3	1978.6	9.3	1917	17.5
S34-14	738	30	1815	0.017	0.1475	0.0029	7.3802	0.077	0.3629	0.004	2316.6	33.1	2158.6	9.3	1996.1	18
S34-15	396	11	1138	0.01	0.1253	0.0025	5.4831	0.059	0.3172	0.003	2033.6	34.4	1898	9.2	1776.2	16.4
S34-16	416	51	1007	0.051	0.135	0.0026	6.8896	0.072	0.3702	0.004	2163.6	33.7	2097.3	9.3	2030.2	18.3
S34-17	304	10	781	0.013	0.1202	0.0025	5.9025	0.073	0.356	0.004	1959.5	36.3	1961.6	10.8	1963.3	18.6
S34-18	227	268	484	0.553	0.1491	0.003	7.5337	0.087	0.3663	0.004	2336	34	2177	10.3	2012.1	18.7
S34-19	321	16	883	0.018	0.121	0.0025	5.4859	0.069	0.3289	0.004	1970.4	36.5	1898.4	10.8	1832.9	17.6
S34-20	288	42	826	0.05	0.1274	0.0025	5.4887	0.06	0.3124	0.003	2062.7	34.6	1898.8	9.4	1752.3	16.3
S34-21	280	213	535	0.399	0.1465	0.0029	8.5953	0.091	0.4254	0.004	2305.9	33.32	2296.1	9.66	2284.7	20.31
S34-22	358	15	1053	0.015	0.1267	0.0025	5.3908	0.057	0.3086	0.003	2052.6	34.22	1883.4	9.04	1733.6	15.95
S34-23	129	115	242	0.474	0.1451	0.0029	8.5136	0.1	0.4256	0.005	2288.3	34.32	2287.4	10.63	2286	20.99
S34-24	356	35	1074	0.033	0.1259	0.0025	5.2098	0.058	0.3	0.003	2041.6	34.86	1854.2	9.53	1691.5	15.84
S34-25	225	322	380	0.848	0.1509	0.003	9.1401	0.099	0.4392	0.005	2356.2	33.31	2352.1	9.89	2347.1	20.86
S34-26	466	15	1361	0.011	0.1262	0.0025	5.4265	0.057	0.3117	0.003	2046.1	34.18	1889	8.96	1749.2	16.01
S34-27	396	13	1067	0.012	0.1253	0.0025	5.8632	0.061	0.3392	0.004	2033.6	34.15	1955.8	8.99	1882.8	17.02
S34-28	328	14	929	0.016	0.1214	0.0024	5.3994	0.057	0.3226	0.003	1976.7	34.5	1884.8	9.01	1802.2	16.43
S34-29	249	11	701	0.016	0.127	0.0025	5.6325	0.063	0.3216	0.003	2056.9	34.85	1921.1	9.67	1797.5	16.69
S34-30	230	149	408	0.366	0.1564	0.0031	9.777	0.105	0.4533	0.005	2417.1	33.09	2414	9.92	2409.8	21.29
S34-31	229	113	491	0.229	0.1461	0.0029	7.9054	0.087	0.3924	0.004	2300.4	33.72	2220.3	9.92	2134.1	19.31
S34-32	380	28	1054	0.026	0.1264	0.0025	5.6943	0.06	0.3266	0.003	2049.1	34.28	1930.5	9.12	1821.7	16.59
S34-33	355	209	776	0.269	0.1342	0.0026	7.1629	0.075	0.387	0.004	2153.6	33.76	2131.9	9.29	2109.1	18.76
S34-34	168	122	363	0.335	0.1483	0.0029	7.7744	0.083	0.3801	0.004	2326.3	33.37	2205.3	9.6	2076.9	18.66
S34-35	448	8	1244	0.006	0.1269	0.0025	5.7646	0.061	0.3295	0.003	2054.8	34.31	1941.1	9.17	1836.1	16.7
S34-36	269	16	781	0.021	0.1256	0.0025	5.4246	0.059	0.3131	0.003	2037.8	34.55	1888.7	9.25	1755.9	16.13
S34-37	179	91	378	0.242	0.1449	0.003	8.0371	0.098	0.4022	0.004	2286.6	34.85	2235.2	11	2179.1	20.32
S34-38	385	25	1170	0.021	0.1265	0.0025	5.2102	0.056	0.2986	0.003	2050.3	34.45	1854.3	9.12	1684.3	15.49
S34-39	142	117	266	0.441	0.1471	0.003	8.7647	0.103	0.432	0.005	2312.5	34.35	2313.8	10.69	2314.8	21.11
S34-40	176	63	390	0.163	0.1338	0.0027	7.2676	0.079	0.394	0.004	2147.8	34.23	2144.8	9.74	2141.3	19.2
S34-41	263	19	797	0.024	0.1244	0.0025	5.1377	0.056	0.2996	0.003	2019.5	34.74	1842.4	9.2	1689.3	15.56
S34-42	315	15	822	0.018	0.1264	0.0025	6.0749	0.065	0.3485	0.004	2048.4	34.49	1986.6	9.37	1927.4	17.43
S34-43	112	77	217	0.356	0.1429	0.0029	8.4988	0.099	0.4313	0.005	2262.2	34.46	2285.8	10.6	2311.8	20.99

注: 标有删除线的点表示数据无效

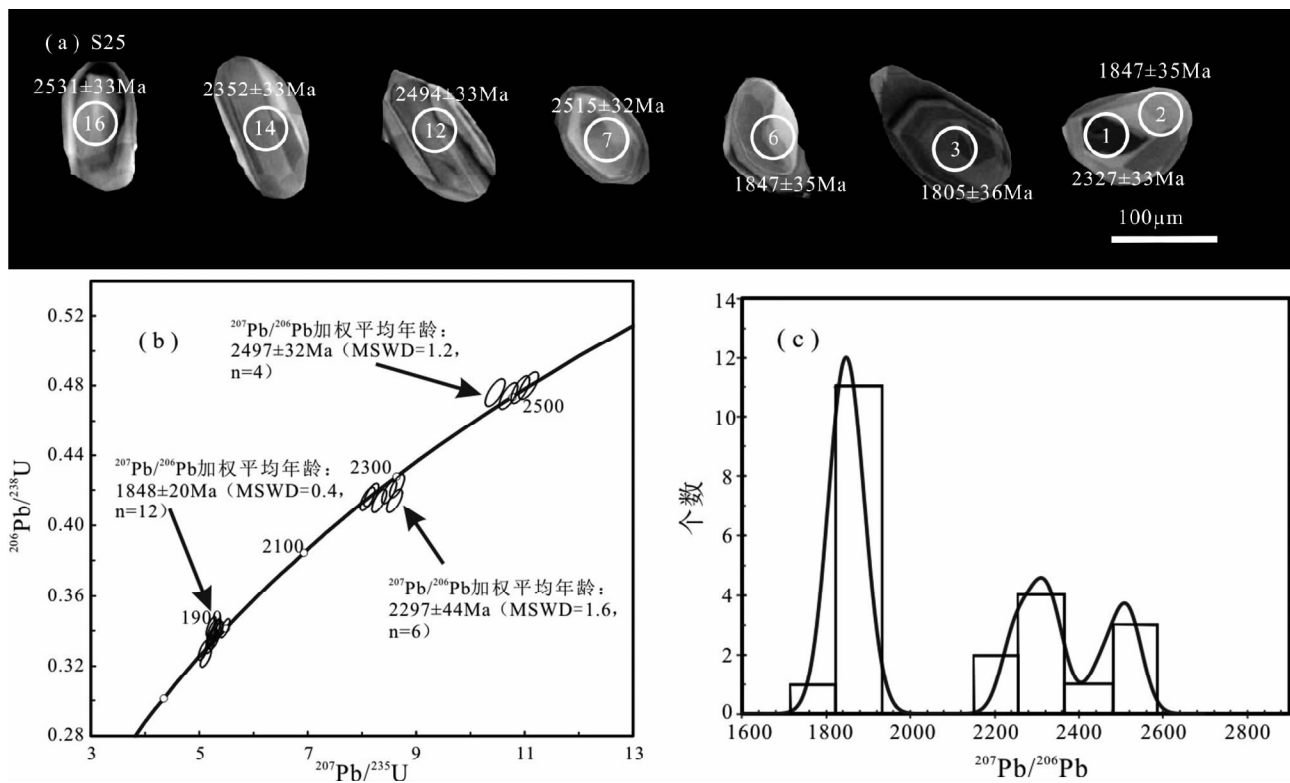


图5 黑云斜长片麻岩(样品 S25)中锆石 U-Pb 年代学相关图

(a)-锆石 CL 图像;(b)- LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和曲线图;(c)-锆石年龄频度分布图

Fig.5 Representative cathodoluminescence image (a), U-Pb concordia diagram showing LA-ICP-MS analytical data (b) and the distribution map of age frequency (c) for zircons of metapelitic gneiss (Sample S25) from the Huashan Taihua Metamorphic Complex

黑云斜长片麻岩(S24a) 锆石形态不规则,多数为浑圆状,少数呈短柱状,显示碎屑锆石特征。锆石粒径 50 ~ 100µm,少数大于 100µm。部分锆石发育较好的岩浆韵律环带,一些锆石还发育变质增生边(图 4a)。对样品中 20 颗锆石进行了 26 个点的测试(见表 1)。从锆石年龄谐和和图上看(图 4b),25 个有效数据点的 U-Pb 年龄沿谐和线分散分布,按年龄由老到新的顺序大致可分为四组。第一组锆石无明显韵律环带,Th 和 U 含量分别为 $49.2 \times 10^{-6} \sim 130.1 \times 10^{-6}$ 和 $133 \times 10^{-6} \sim 251 \times 10^{-6}$,Th/U 比值为 0.196 ~ 0.563,年龄分布于 2446 ~ 2533Ma,加权平均年龄为 $2481 \pm 120\text{Ma}$ (MSWD = 2.0, n = 3);第二组数据点均位于具有核-边结构的、发育岩浆韵律环带的锆石颗粒的核部(图 4a),Th 和 U 含量分别为 $39.6 \times 10^{-6} \sim 99.6 \times 10^{-6}$ 和 $171 \times 10^{-6} \sim 238 \times 10^{-6}$,Th/U 比值为 0.204 ~ 0.608,显示岩浆锆石特征,年龄分布于 2347 ~ 2406Ma,加权平均年龄为 $2361 \pm 31\text{Ma}$ (MSWD = 0.57, n = 5);第三组年龄主要分散在 2034 ~ 2216Ma 之间,加权平均年龄为 $2107 \pm 70\text{Ma}$ (MSWD = 3.0, n = 6),该组数据分布范围较广,具体地质意义尚不明确;第四组分析点位于具有核-边结构锆石的边部以及变质锆石的核部,Th 和 U 含量分别为 $0.5 \times 10^{-6} \sim 11.4 \times 10^{-6}$ 和 41×10^{-6}

~ 128×10^{-6} ,Th/U 比值为 0.007 ~ 0.104,显示变质锆石特征,年龄分布于 1802 ~ 1968 Ma,加权平均年龄为 $1869 \pm 39\text{Ma}$ (MSWD = 2.2, n = 11),可能代表一次变质事件的年龄。

紫苏黑云斜长片麻岩(S25) 锆石形态不规则,多为浑圆状,少数呈长柱状,显示碎屑锆石特征。锆石粒径 50 ~ 100µm,少数大于 100µm。部分锆石颗粒发育核-边结构(图 5a),核部有微弱的岩浆成因环带,边部为变质增生边。对样品中 22 颗锆石进行了 24 个点的测试(见表 1),其中 22 个有效数据点可分为三组(图 5b, c)。第一组发育韵律环带,Th 和 U 含量分别为 $20.6 \times 10^{-6} \sim 64.4 \times 10^{-6}$ 和 $46 \times 10^{-6} \sim 130 \times 10^{-6}$,Th/U 比值为 0.179 ~ 0.515,显示岩浆锆石特征,年龄分布于 2448 ~ 2530Ma,加权平均年龄为 $2497 \pm 32\text{Ma}$ (MSWD = 1.2, n = 4)。第二组部分分析点发育韵律环带,Th 和 U 含量分别为 $22 \times 10^{-6} \sim 46.3 \times 10^{-6}$ 和 $103 \times 10^{-6} \sim 159 \times 10^{-6}$,Th/U 比值为 0.177 ~ 0.392,显示岩浆锆石特征,年龄分布于 2245 ~ 2352Ma,加权平均年龄为 $2297 \pm 44\text{Ma}$ (MSWD = 1.6, n = 6)。第三组分析点无韵律环带,Th 和 U 含量分别为 $0.6 \times 10^{-6} \sim 9.9 \times 10^{-6}$ 和 $52 \times 10^{-6} \sim 149 \times 10^{-6}$,Th/U 比值为 0.007 ~ 0.066,显示变质锆石特征,年龄

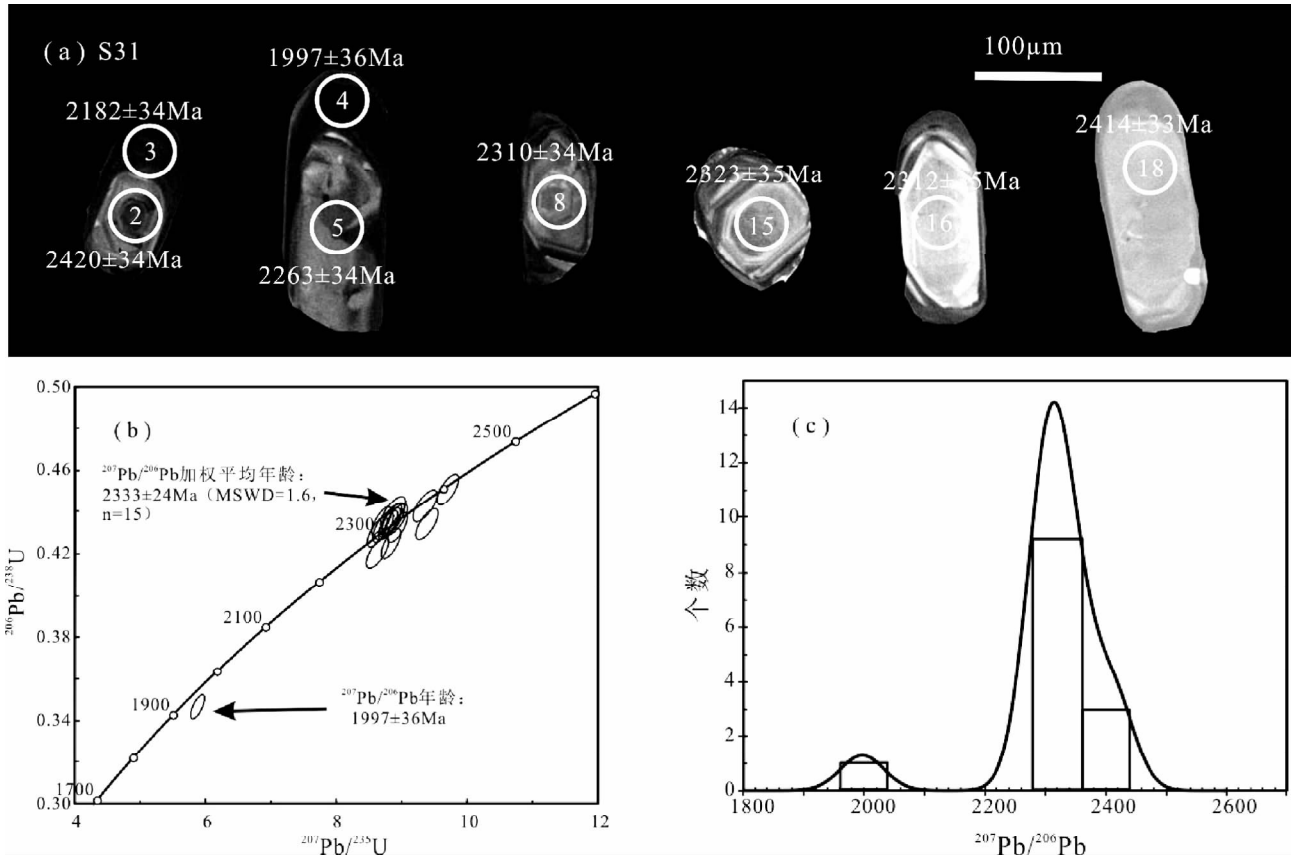


图6 黑云二长片麻岩(样品 S31)中锆石 U-Pb 年代学相关图

(a)-锆石 CL 图像;(b)- LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和曲线图;(c)-锆石年龄频度分布图

Fig. 6 Representative cathodoluminescence image (a), U-Pb concordia diagram showing LA-ICP-MS analytical data (b) and the distribution map of age frequency (c) for zircons of biotite two-feldspar gneiss (Sample S31) from the Huashan Taihua Metamorphic Complex

分布于 1805 ~ 1895Ma, 加权平均年龄为 $1848 \pm 20\text{Ma}$ (MSWD = 0.4, $n = 12$), 代表一期变质事件的年龄。

黑云二长片麻岩(S31) 锆石较自形, 多为短柱状, 长度为 $100 \sim 200\mu\text{m}$, 长宽比约为 2 : 1, 少数达 3 : 1 (图 6a)。对样品中 17 颗锆石进行了 20 个点的同位素测试 (见表 1), 其中 16 个有效数据点呈现出两组年龄 (图 6c)。第一组多数锆石发育韵律环带, Th 和 U 含量分别为 $69 \times 10^{-6} \sim 287 \times 10^{-6}$ 和 $150 \times 10^{-6} \sim 645 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.356 ~ 0.734, 显示岩浆锆石特征, 年龄分布于 2284 ~ 2420Ma, 加权平均年龄为 $2333 \pm 24\text{Ma}$ (MSWD = 1.6, $n = 15$)。第二组只有一个数据点, 从 CL 图像看出该锆石颗粒发育核-边结构 (图 6a), 该数据点为边部变质增生边年龄, 其 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 年龄为 $1997 \pm 36\text{Ma}$ 。鉴于该测点偏离了谐和线, 反映有明显的放射性子体 Pb 丢失过程, 因此该年龄仅有参考意义。

黑云二长片麻岩(S34) 锆石多为短柱状, 长度多为 $50 \sim 100\mu\text{m}$, 长宽比约为 2 : 1。多数锆石颗粒发育核-边结构, 核部发育岩浆韵律环带 (图 7a)。对样品中 27 颗锆石进行了 43 个点的同位素测试 (见表 1)。从锆石 U-Pb 年龄谐和图上

来看 (图 7b), 尽管多数的分析点结果没有落在谐和线上, 却明显构成了年龄由老到新的四条较好的不一致线。第一条不一致线上的分析点均位于锆石的核部, 其 Th 和 U 含量分别为 $11 \times 10^{-6} \sim 246 \times 10^{-6}$ 和 $320 \times 10^{-6} \sim 1815 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.01 ~ 0.439, 发育韵律环带 (图 7a), 显示岩浆锆石特征, 年龄分布于 2262 ~ 2336Ma, 其上交点年龄为 $2306 \pm 17\text{Ma}$ (MSWD = 2.5), $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2307 \pm 17\text{Ma}$ (MSWD = 0.44, $n = 15$)。第二条与第三条不一致线上的数据点年龄分别分布于 2148 ~ 2164Ma 和 2017 ~ 2070Ma, 其上交点年龄分别为 $2148 \pm 21\text{Ma}$ 和 $2047 \pm 18\text{Ma}$, 可能代表了一期变质热事件的年龄; 第四条不一致线上的分析点均位于锆石的变质增生边上 (图 7a), 其 Th 和 U 含量分别为 $15 \times 10^{-6} \sim 117 \times 10^{-6}$ 和 $217 \times 10^{-6} \sim 822 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.02 ~ 0.44, 年龄分布于 1959 ~ 1977Ma 其上交点年龄为 $1961 \pm 26\text{Ma}$ (MSWD = 0.02), $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $1971 \pm 31\text{Ma}$ (MSWD = 0.038, $n = 5$), 可能记录的是一期 $1961 \pm 26\text{Ma}$ 的变质事件。

表 2 太华变质杂岩区代表性斜长角闪片麻岩 (S2, S3) 中角闪石常规 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测试数据

Table 2 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data of metamorphic amphiboles (S2, S3) from the Taihua Metamorphic Complex

加热阶段	加热温度 ($^{\circ}\text{C}$)	$\left(\frac{^{40}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{36}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{37}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{38}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$^{39}\text{Ar}_k$ 10 ⁻¹⁵ mol	$\left(\frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{39}\text{Ar}_k}\right)_m$ $\pm 1\sigma$	$^{39}\text{Ar}_k$ (%)	视年龄 $t \pm 1\sigma$ (Ma)
S2 斜长角闪片麻岩									
S2-1	850	1373.42	0.317	263.894	0.095	0.394	1571.1 \pm 89.9	0.258	4286 \pm 94
S2-2	900	445.321	0.183	116.972	0.034	0.849	433.61 \pm 20.0	0.557	2357 \pm 61
S2-3	950	290.135	0.077	33.668	0.157	3.07	276.17 \pm 2.7	2.014	1802 \pm 11
S2-4	1000	284.253	0.031	2.187	0.149	23	275.53 \pm 0.6	15.089	1799 \pm 3
S2-5	1050	275.011	0.003	6.059	0.096	51.6	275.68 \pm 0.7	33.852	1800 \pm 3
S2-6	1100	274.477	0.005	5.951	0.092	42.3	274.43 \pm 2.3	27.751	1795 \pm 10
S2-7	1150	277.641	0.015	8.365	0.099	20.3	275.38 \pm 0.9	13.318	1799 \pm 4
S2-8	1200	288.456	0.07	29.371	0.102	3.29	275.46 \pm 1.5	2.158	1799 \pm 6
S2-9	1250	286.852	0.229	170.885	0.156	0.743	262.12 \pm 17.9	0.487	1743 \pm 76
S2-10	1300	291.565	0.219	102.155	0.134	1.29	251.64 \pm 12.5	0.846	1698 \pm 55
S2-11	1350	309.25	0.189	117.894	0.13	1.01	284.58 \pm 19.2	0.663	1836 \pm 78
S2-12	1400	285.757	0.055	37.261	0.094	4.58	279.12 \pm 6.1	3.005	1814 \pm 25
S3 斜长角闪片麻岩									
S3-1	850	199.384	0.54	48.398	0.271	0.323	45.13 \pm 10.9	0.214	446 \pm 96
S3-2	900	580.207	0.239	25.432	0.182	0.691	520.21 \pm 21.4	0.459	2601 \pm 57
S3-3	950	429.507	0.349	35.225	0.217	0.475	337.08 \pm 24.5	0.315	2036 \pm 89
S3-4	1000	306.648	0.011	1.1	0.096	41.5	303.71 \pm 0.9	27.555	1911 \pm 3
S3-5	1050	276.322	0.003	1.016	0.083	51.2	275.59 \pm 1.0	33.995	1799 \pm 4
S3-6	1100	281.341	0.021	1.952	0.098	15.8	275.59 \pm 2.3	10.491	1799 \pm 9
S3-7	1150	281.009	0.019	2.02	0.086	12.7	275.99 \pm 2.2	8.432	1800 \pm 9
S3-8	1200	275.53	0.006	7.265	0.018	4.35	275.60 \pm 1.5	2.888	1799 \pm 6
S3-9	1250	280.207	0.019	2.265	0.071	9.49	275.27 \pm 1.4	6.301	1797 \pm 6
S3-10	1300	284.32	0.033	4.181	0.099	4.86	275.76 \pm 3.5	3.227	1799 \pm 14
S3-11	1350	284.11	0.06	6.564	0.142	2.94	268.13 \pm 8.4	1.952	1768 \pm 35
S3-12	1400	277.046	0.028	3.053	0.099	6.28	269.69 \pm 3.0	4.17	1774 \pm 13

4.2 变质角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年

太华变质杂岩区代表性斜长角闪片麻岩中角闪石常规 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测试结果见表 2。

斜长角闪片麻岩 (S2) 对该样品中的变质角闪石进行了 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年, 温度从 850 $^{\circ}\text{C}$ 到 1400 $^{\circ}\text{C}$, 连续 12 个加热阶段分析, 分析结果见表 2 和图 8(a, b)。在初始的低温加热阶段 (850 ~ 950 $^{\circ}\text{C}$), 坪年龄由 4286 \pm 94Ma 迅速降低至 1802 \pm 11Ma, 随后从第 3 温阶 (950 $^{\circ}\text{C}$) 到第 9 温阶 (1250 $^{\circ}\text{C}$), 保持了连续稳定的年龄坪。期间 ^{39}Ar 累积析出量为 94.7%, 构成的稳定坪年龄为 1799 \pm 9Ma, 与其对应的等时线年龄 1793 \pm 3Ma 一致。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 224 \pm 150Ma, 在误差范围内与尼尔值 (295.5) 是一致的。最初的两个温阶 (850 ~ 900 $^{\circ}\text{C}$) 有明显的过剩氩出现。

斜长角闪片麻岩 (S3) 同样对样品中变质角闪石进行了 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年, 850 $^{\circ}\text{C}$ 到 1400 $^{\circ}\text{C}$ 连续 12 个加热阶段分析, 分析结果见表 2 和图 8(c, d)。在前 2 个低温加热阶段 (850 ~ 900 $^{\circ}\text{C}$), 坪年龄从 446 \pm 96Ma 迅速升高至 2601 \pm 57Ma。一直到第 5 个加热阶段 (1050 $^{\circ}\text{C}$), 坪年龄逐渐降低到 1799 \pm

4Ma。接着, 保持了一直到第 11 个加热阶段连续稳定的年龄坪。这期间连续的 7 个阶段累积 ^{39}Ar 析出量为 67.1%, 组成的稳定坪年龄为 1799 \pm 9Ma, 等时线年龄为 1795 \pm 7Ma, 二者是一致的。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 304 \pm 51Ma, 在误差范围内与尼尔值 (295.5) 也是一致的。最初四个温阶 (850 ~ 1000 $^{\circ}\text{C}$) 有明显的过剩氩出现。

两个样品变质角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄和等时线年龄, 说明该地区确实存在一期 1799Ma 左右的变质-热事件。

5 讨论

华山地区太华变质杂岩中变泥质片麻岩 (S24a, S25) 中含有大量碎屑锆石和变质锆石, 其中部分锆石核部发育韵律环带, 显示岩浆锆石特征, 暗示此类泥质片麻岩中碎屑锆石来自岩浆岩源区。其年龄沿锆石 U-Pb 年龄谱和线分布, 大致集中在两个年龄段 (2.36 ~ 2.30Ga, 2.50 ~ 2.48Ga)。变质锆石记录的变质年龄为 1.87 ~ 1.85Ga。此外, 样品 S24a 中部分数据点还出现了 2.22 ~ 2.03Ga 年龄, 年龄分布范围较广, 具体地质意义尚不明确。

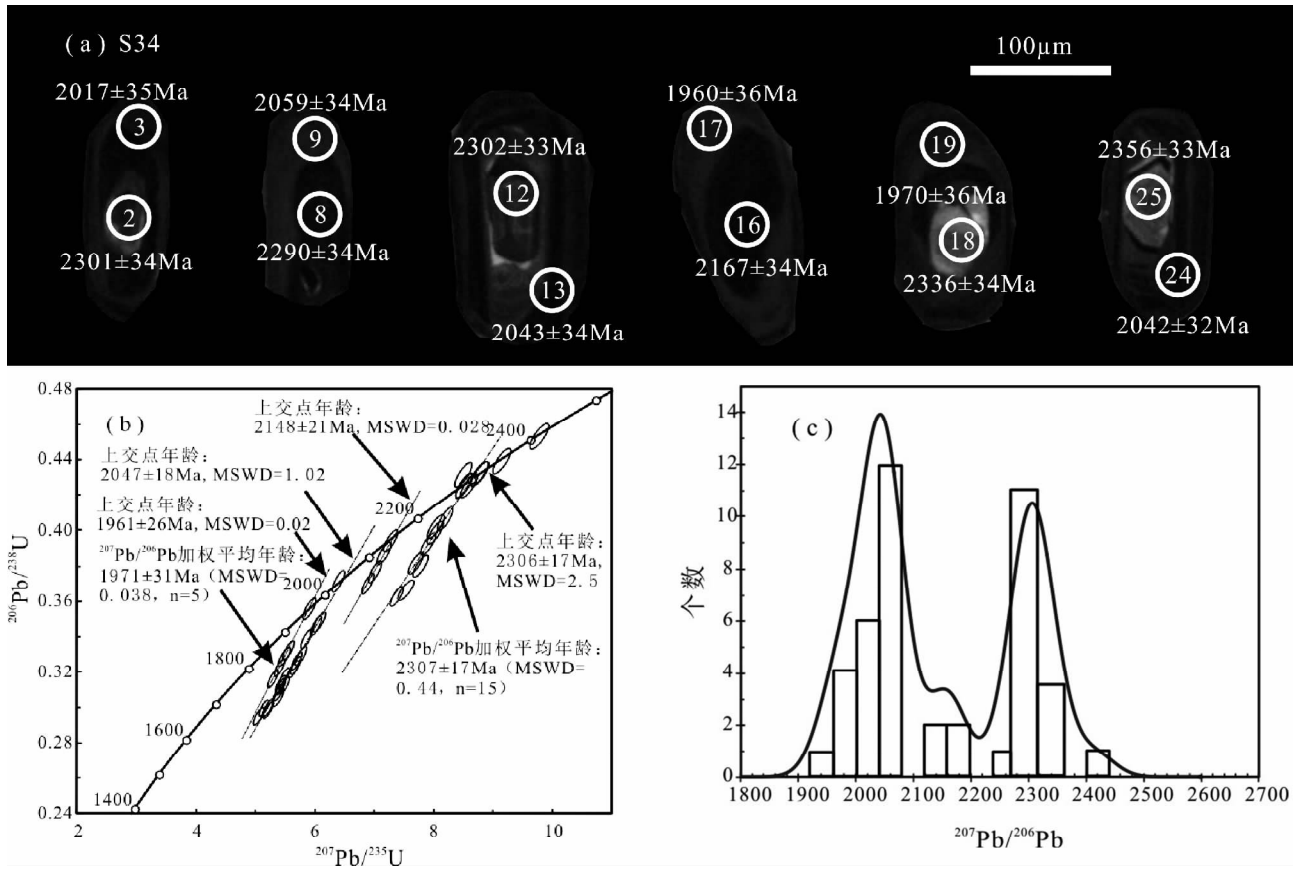


图7 黑云二长片麻岩(样品 S34)中锆石 U-Pb 年代学相关图

(a)-锆石 CL 图像;(b)- LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谱和曲线图;(c)-锆石年龄频度分布图

Fig. 7 Representative cathodoluminescence image (a), U-Pb concordia diagram showing LA-ICP-MS analytical data (b) and the distribution map of age frequency (c) for zircons of biotite two-feldspar gneiss (Sample S34) from the Huashan Taihua Metamorphic Complex

华山地区太华变质杂岩中黑云二长片麻岩(S31、S34)中含有岩浆锆石和变质锆石。岩浆锆石发育韵律环带,测得年龄分别为 $\sim 2.33\text{Ga}$ 和 $\sim 2.31\text{Ga}$ 。变质锆石记录的变质年龄为 $\sim 1.96\text{Ga}$ 。另外,样品 S34 中部分数据点还出现了 $\sim 2.15\text{Ga}$ 和 $\sim 2.05\text{Ga}$ 不一致曲线与谐和线的上交点年龄,这可能代表了一期变质热事件的年龄。

对斜长角闪片麻岩(S2、S3)中的变质角闪石,进行了常规 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年,同样说明该地区存在一期 $\sim 1.80\text{Ga}$ 左右的变质热事件。

通过对华山地区太华变质杂岩中的两类变质岩中锆石 U-Pb 定年,发现其中记录了至少两期岩浆事件: $\sim 2.5\text{Ga}$ 和 $\sim 2.3\text{Ga}$ 。 $\sim 2.5\text{Ga}$ 的岩浆事件可能代表了华北克拉通内广泛出现的地壳生长事件(刘富等,2009;伍家善等,1998;Zhao *et al.*, 2002, 2008;翟明国和卞爱国,2000;翟明国和彭澎,2007)。 $\sim 2.3\text{Ga}$ 对应于怎样的一期岩浆热事件呢?目前,太华变质杂岩的其它变质地质体中,也已陆续发现 $\sim 2.3\text{Ga}$ 的岩浆事件的记录,如洛宁地区(蒋宗胜等,2011;Huang *et al.*, 2012)、鲁山地区(第五春荣等,2010;黄道袞等,2012)、

中条山(赵凤清等,2006)、宜阳(第五春荣等,2007)和吕梁地区(耿元生等,2000)等。此次岩浆热事件对应于怎样的构造事件?反映了怎样的构造环境?这有待于我们进一步深入的研究和探讨。毋庸置疑,这期事件的性质,对整个华北克拉通古元古代构造演化的认识也将具有极其重要的意义。

近年来的研究表明,华北克拉通中部造山带中大部分变质杂岩区普遍经历了高角闪岩相-麻粒岩相的变质作用,普遍记录了 $\sim 1.85\text{Ga}$ 的变质事件(Guo *et al.*, 2002, 2005; Kröner *et al.*, 2005, 2006; 李江海等,1998;Liu *et al.*, 2006; 刘树文,1996; 刘树文等,2002,2007, 2009; O'Brien *et al.*, 2005; Trap *et al.*, 2007, 2008, 2009a, b; Wang ZH, 2009; Xiao *et al.*, 2011; 肖玲玲和王国栋,2011; 肖玲玲等,2011; Zhang *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2002, 2008, 2010)。Zhao *et al.* (1998, 2005, 2012)认为这是华北克拉通东部陆块和西部陆块,沿着中部造山带发生俯冲、碰撞造山并折返的结果。位于中部造山带最南缘的太华变质杂岩,与这些杂岩有所不同。洛宁地区记录的变质事件的时代为 $1.97 \sim 1.94\text{Ga}$ (蒋宗胜等,2011),鲁山地区变质事件的时代为 $2.03 \sim 1.84\text{Ga}$

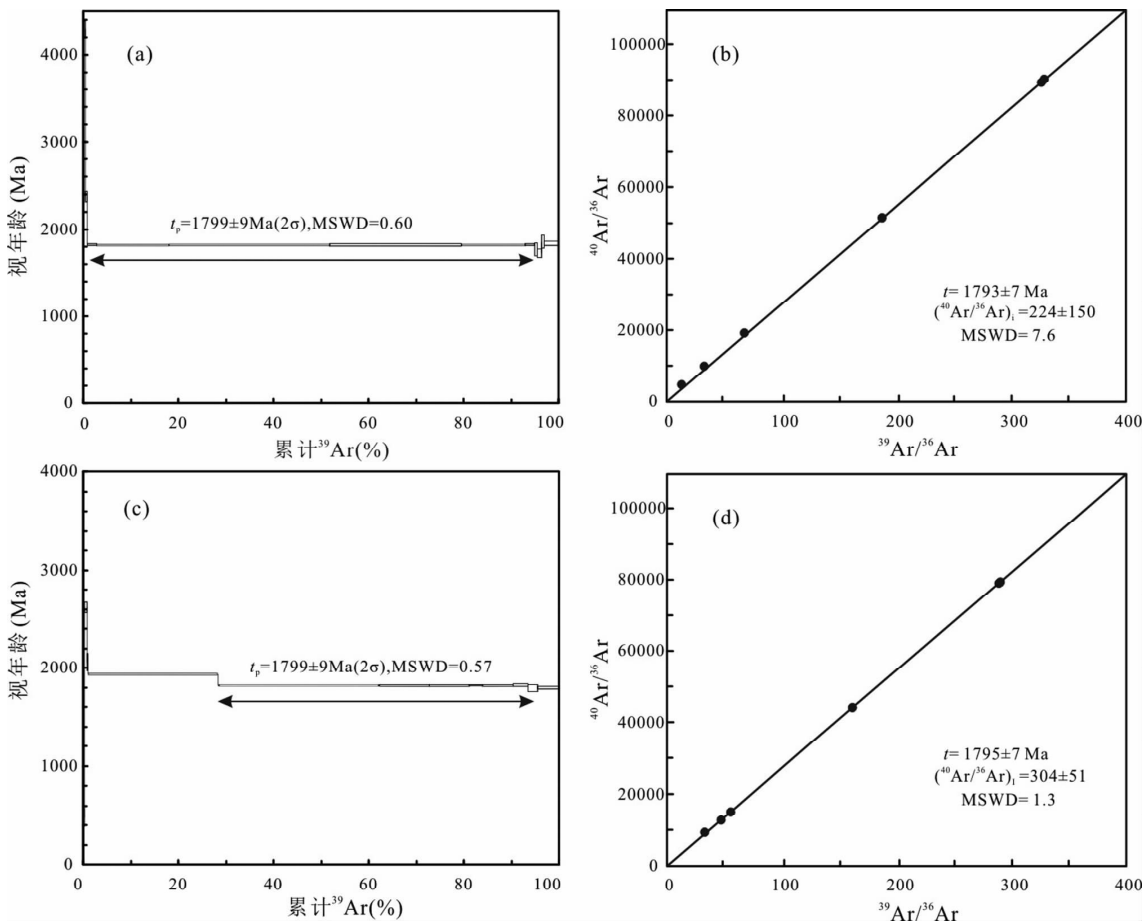


图 8 斜长角闪片麻岩中角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱图和等时线年龄

S2 中角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱图 (a) 和角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄 (b); S3 中角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱图 (c) 和角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄 (d)

Fig. 8 The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar plateau ages and isochron ages of metamorphic amphiboles from Sample S2 (a, b) and Sample S3 (c, d), respectively

(第五春荣等, 2010; Wan *et al.*, 2006; 杨长秀, 2008)。本次获得华山地区记录的变质事件的时代为 1.96 ~ 1.80Ga, 与之前的研究结果(王国栋等, 2012)一致。这些研究表明, 华北克拉通中部造山带最南缘, 可能经历了一次漫长的构造演化过程, 此次构造演化事件比中部造山带北段各个变质杂岩区不仅早了 ~100Myr, 持续时间也可能长达 ~110Myr。暗示了该地区比中部造山带北段各杂岩区更早地进入俯冲、碰撞的造山过程。

6 结论

本文通过对华山地区太华变质杂岩中变质片麻岩中变质锆石及锆石变质增生边的 U-Pb 定年, 以及斜长角闪片麻岩中变质角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 的定年, 取得了以下几点认识:

(1) 华北克拉通南缘的太华变质杂岩中泥质片麻岩中的碎屑锆石, 记录了至少两期岩浆事件(~2.3Ga 和 ~2.5Ga),

变质片麻岩的原岩应该沉积于 ~2.3Ga 之后。

(2) 通过对太华变质杂岩中锆石 U-Pb 定年和变质角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年的研究, 证实该地区存在一次 1.96 ~ 1.80Ga 的变质热事件。

(3) 太华变质杂岩可能也经历了华北克拉通东部陆块与西部陆块之间的碰撞造山过程, 而且比中部带其它杂岩区记录的时间更早, 持续时间也更长。这暗示了该地区在 1.96 ~ 1.80Ga 期间, 经历了一次更加漫长而复杂的构造-变质演化过程。

致谢 感谢西北大学大陆动力学实验室柳小明教授在实验测试过程中给予的指导和帮助。审稿专家石永红教授、李旭平教授和刘景波研究员, 提出了宝贵的修改建议。

References

Bai J, Huang XG, Dai FY and Wu CH. 1993. The Precambrian Crustal

- Evolution of China. Beijing: Geological Publishing House, 36–38 (in Chinese)
- Bai J, Huang XG, Wang HC, Guo JJ, Dai FY, Wang GF, Xiu QY, Xu WZ and Yan YY. 1996. The Precambrian Crustal Evolution of China. Beijing: Geological Publishing House, 1–60 (in Chinese)
- Chen LG, Wang BY and Xue YZ. 1997. The re-establishment of Taihua Group in Xiao Qinling, Shaanxi. *Geology of Shaanxi*, 15(1): 20–30 (in Chinese with English abstract)
- Diwu CR, Sun Y, Lin CL, Liu XM and Wang HL. 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan Province. China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 253–262 (in Chinese with English abstract)
- Diwu CR, Sun Y, Lin CL and Wang HL. 2010. LA-(MC)-ICPMS U-Pb zircon geochronology and Lu-Hf isotope compositions of the Taihua complex on the southern margin of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 55(23): 2557–2571
- Faure M, Trap P, Lin W, Monié P and Bruguier O. 2007. Polyorogenic evolution of the Paleoproterozoic Trans-North China Belt: New insights from the Lüliangshan-Hengshan-Wutaishan and Fuping massifs. *Episodes*, 30(2): 96–107
- Geng YS, Wan YS, Shen QH, Li HM and Zhang RX. 2000. Chronological framework of the Early Precambrian important events in the Lüliang area, Shanxi Province, 74(3): 216–223 (in Chinese with English abstract)
- Guo JH, O'Brien PJ and Zhai MG. 2002. High-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: Metamorphic evolution, *P-T* paths and geotectonic significance. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(8): 741–756
- Guo JH, Sun M, Chen FK and Zhai MG. 2005. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic continental collision. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 629–642
- Huang DM, Zhang DH, Wang SY, Zhang YX, Dong CY, Liu DY and Wan YS. 2012. 2.3Ga magmatism and 1.94Ga metamorphism in the Xiatang area, southern margin of the North China Craton: Evidence from whole-rock geochemistry and zircon geochronology and Hf isotope. *Geological Review*, 58(3): 565–576 (in Chinese with English abstract)
- Huang XL, Niu YL, Xu YG, Yang QJ and Zhong JW. 2010. Geochemistry of TTG and TTG-like gneisses from Lushan-Taihua complex in the southern North China Craton: Implications for late Archean crustal accretion. *Precambrian Research*, 182(1–2): 43–56
- Huang XL, Wilde SA, Yang QJ and Zhong JW. 2012. Geochronology and petrogenesis of gray gneisses from the Taihua Complex at Xiong'er in the southern segment of the Trans-North China Orogen: Implications for tectonic transformation in the Early Paleoproterozoic. *Lithos*, 134–135: 236–252
- Jiang ZS, Wang GD, Xiao LL, Diwu CR, Lu JS and Wu CM. 2011. Paleoproterozoic metamorphic *P-T-t* path and tectonic significance of the Luoning metamorphic complex at the southern terminal of the Trans-North China Orogen, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3701–3717 (in Chinese with English abstract)
- Kang CH and Li MX. 1988. Rehabilitation of the characteristics of the metamorphic original rocks under the Taihua Group in Tongguan region, Shaanxi Province. *Journal of Xi'an College of Geology*, 10(13): 1–13 (in Chinese with English abstract)
- Kröner A, Wilde SA, O'Brien PJ, Li JH, Passchier CW, Walte NP and Liu DY. 2005. Field relationships, geochemistry, zircon ages and evolution of a Late Archaean to Palaeoproterozoic lower crustal section in the Hengshan Terrain of Northern China. *Acta Geologica Sinica*, 79(5): 605–629
- Kröner A, Wilde SA, Zhao GC, O'Brien PJ, Sun M, Liu DY, Wan YS, Liu SW and Guo JH. 2006. Zircon geochronology and metamorphic evolution of mafic dykes in the Hengshan Complex of northern China: Evidence for Late Palaeoproterozoic extension and subsequent high pressure metamorphism in the North China Craton. *Precambrian Research*, 146(1–2): 45–67
- Kusky TM and Li JH. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383–397
- Kusky TM, Li JH and Santosh M. 2007. The Paleoproterozoic North Hebei orogen: North China Craton's collisional suture with the Columbia Supercontinent. *Gondwana Research*, 12(1–2): 4–28
- Kusky TM. 2011. Geophysical and geological tests of tectonic models of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20(1): 26–35
- Li JH, Zhai MG, Li YG and Zhang YG. 1998. The discovery of Neoproterozoic high-pressure granulites in Luoping-Chengde area, northern Hebei, and their tectono-geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 34–41 (in Chinese with English abstract)
- Liu DY, Wilde SA, Wan YS, Wang SY, Valley JW, Kita N, Dong CY, Xie HQ, Yang CX, Zhang YX and Gao LZ. 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 Mesoproterozoic-Early Neoproterozoic. *Chemical Geology*, 261(1–2): 140–154
- Liu F, Guo JH, Lu XP and Diwu CR. 2009. Crustal growth at ~2.5Ga in the North China Craton: Evidence from whole-rock Nd and zircon Hf isotopes in the Huai'an gneiss terrane. *Chinese Science Bulletin*, 54(17): 2517–2526 (in Chinese)
- Liu SW. 1996. Study on the *P-T* path of granulites in Fuping area, Hebei Province. *Geological Journal of China Universities*, 2(1): 75–84 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW, Li JH, Pan YM, Zhang J, Li QG and Huang XN. 2002. The Archean blocks in the Taihang and Hengshan regions: Geochronological and geochemical constraints. *Progress in Natural Science*, 12(8): 826–833 (in Chinese)
- Liu SW, Zhao GC, Wilde SA, Shu GM, Sun M, Li QG, Tian W and Zhang J. 2006. Th-U-Pb monazite geochronology of the Lüliang and Wutai Complexes: Constraints on the tectonothermal evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 148(3–4): 205–224
- Liu SW, Zhang C, Liu CH, Li QG, Lu YJ, Yu SQ, Tian W and Feng YG. 2007. EPMA Th-U-Pb dating of monazite for Zhongtiao and Lüliang Precambrian metamorphic complexes. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 64–74 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW, Li QG and Zhang LF. 2009. Geology, geochemistry of metamorphic volcanic rock suit in Precambrian Yejiashan Group, Lüliang Mountains and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 547–560 (in Chinese with English abstract)
- Liu XM, Gao S, Diwu CR, Yuan HL and Hu ZC. 2007. Simultaneous in-situ determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LAICP-MS in 20 μ m spot size. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 1257–1264
- Ludwig KR. 2003. *Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 4: 1–70
- O'Brien PJ, Walte N and Li JH. 2005. The petrology of two distinct granulite types in the Hengshan Mts, China, and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 615–627
- Qi JY. 1991. Amphiboles from basic metamorphic rocks in the Archeozoic Taihua Group and its genetic significance. *Journal of Hebei College of Geology*, 14(2): 144–157 (in Chinese with English abstract)
- Qi JY. 1992. Metamorphic rock series of Taihua Group and conditions for its formation in eastern Qinling. *Scientia Geologica Sinica*, 27(Suppl.): 95–107 (in Chinese with English abstract)
- Shen QH and Qian XL. 1995. Archean rock assemblages, episodes and tectonic evolution of China. *Acta Geoscientia Sinica*, 16(2): 113–120 (in Chinese with English abstract)
- Sun Y. 1983. Rocks in the granulite facies of the Taihua Group at Lushan, Henan. *Journal of Northwest University*, 13(1): 89–95 (in Chinese with English abstract)
- Trap P, Faure M, Lin W and Monié P. 2007. Late Paleoproterozoic (1900–1800Ma) nappe stacking and polyphase deformation in the Hengshan-Wutaishan area: Implication for the understanding of the

- Trans-North China Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 156 (1–2): 85–106
- Trap P, Faure M, Lin W, Monié P and Bruguière O. 2008. Contrasted tectonic styles for the Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Evidence for a ~2.1 Ga thermal and tectonic event in the Fuping Massif. *Journal of Structural Geology*, 30(9): 1109–1125
- Trap P, Faure M, Lin W, Monié P, Meffre S and Melletton J. 2009a. The Zanhuang Massif, the second and eastern suture zone of the Paleoproterozoic Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 172(1–2): 80–98
- Trap P, Faure M, Lin W and Meffre S. 2009b. The Lüliang Massif: A key area for the understanding of the Palaeoproterozoic Trans-North China Belt, North China Craton. *Journal of the Geological Society, London, Special Publications*, 323(1): 99–125
- Trap P, Faure M, Lin W, Augier R and Fouassier A. 2011. Syn-collisional channel flow and exhumation of Paleoproterozoic high pressure rocks in the Trans-North China Orogen: The critical role of partial-melting and orogenic bending. *Gondwana Research*, 20(2–3): 498–515
- Trap P, Faure M, Lin W, Le Breton N and Monié P. 2012. Paleoproterozoic tectonic evolution of the Trans-North China Orogen: Toward a comprehensive model. *Precambrian Research*, 222–223: 191–211
- Wan YS, Wilde SA, Liu DY, Yang CX, Song B and Yin XY. 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, He'nan Province. *Gondwana Research*, 9(1–2): 189–197
- Wang GD, Wang H, Chen HX, Lu JS, Xiao LL and Wu CM. 2012. U-Pb dating of zircons from metamorphic rocks of the Taihua Metamorphic Complex, Mt. Huashan, southern margin of the Trans-North China Orogen. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1541–1551 (in Chinese with English abstract)
- Wang RM, Qian Q and Fan TL. 1998. Discovery of high-pressure granulites in the southern margin of the North China Craton. *Proceedings of the International Geological Symposium Held in Peking University*. Beijing: Peking University Press, 568–572 (in Chinese)
- Wang ZH. 2009. Tectonic evolution of the Hengshan-Wutai-Fuping complexes and its implication for the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 170(1–2): 73–87
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, Vonquadt A, Roddick JC and Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1–23
- Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wan YS, Liu DY and Song B. 1998. *Archean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of Sino-Korea Paleo-continent*. Beijing: Geological Publishing House, 192–211 (in Chinese)
- Xiao LL and Wang GD. 2011. The geological significance of zircon U-Pb ages of metabasic rocks in the Zanhuang metamorphic complex. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(5): 781–794 (in Chinese with English abstract)
- Xiao LL, Wu CM, Zhao GC, Guo JH and Ren LD. 2011. Metamorphic *P-T* paths of the Zanhuang amphibolites and metapelites: Constraints on the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Trans-North China Orogen. *International Journal of Earth Sciences*, 100(4): 717–739
- Xiao LL, Jiang ZS, Wang GD, Wan YS, Wang T and Wu CM. 2011. Metamorphic reaction textures and metamorphic *P-T-t* loops of the Precambrian Zanhuang metamorphic complex, Hebei, North China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 980–1002 (in Chinese with English abstract)
- Yang CX. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages, geochemical characteristics and environmental evolution of the Early Precambrian metamorphic series in the Lushan area, Henan, China. *Geological Bulletin of China*, 27(4): 517–533 (in Chinese with English abstract)
- Yu XQ, Liu JL, Li CL, Chen SQ and Dai YP. 2013. Zircon U-Pb dating and Hf isotope analysis on the Taihua Complex: Constraints on the formation and evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 230: 31–34
- Zhai MG, Bian AG and Zhao TP. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-archean and its breakup during Late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic. *Science in China (Series D)*, 43(Suppl. 1): 219–232
- Zhai MG, Guo JH and Liu WJ. 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 547–561
- Zhai MG and Peng P. 2007. Paleoproterozoic events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665–2682 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Xiao WJ, Kusky TM and Santosh M. 2007. Tectonic evolution of China and adjacent crustal fragments. *Gondwana Research*, 12(1–2): 1–3
- Zhai MG, Li TS, Peng P, Hu B, Liu F, Zhang YB and Guo JH. 2010. Precambrian key tectonic events and evolution of the North China Craton. In: Kusky TM, Zhai MG and Xiao WJ (eds.). *The Evolving Continents*. Geological Society, London, Special Publications, 338(1): 235–262
- Zhang J, Zhao GC, Li SZ, Sun M, Wilde SA, Liu SW and Yin CQ. 2009. Polyphase deformation of the Fuping Complex, Trans-North China Orogen: Structures, SHRIMP U-Pb zircon ages and tectonic implications. *Journal of Structural Geology*, 31(2): 177–193
- Zhao FQ, Li HM, Zuo YC and Xue KQ. 2006. Zircon U-Pb ages of Paleoproterozoic granitoids in the Zhongtiao Mountains, southern Shanxi, China. *Geological Bulletin of China*, 25(4): 442–447 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Lu LZ. 1998. Thermal evolution of Archean basement rocks from the eastern part of the North China Craton and its bearing on tectonic setting. *International Geology Review*, 40(8): 706–721
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107(1–2): 45–73
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: Implications for Late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *American Journal of Science*, 302(3): 191–226
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177–202
- Zhao GC, Wilde SA, Sun M, Li SZ, Li XP and Zhang J. 2008. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Lüliang Complex: Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 160(3–4): 213–226
- Zhao GC. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1772–1792 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Yin CQ, Guo JH, Sun M, Li SZ, Li XP, Wu CM and Liu CH. 2010. Metamorphism of the Lüliang amphibolite: Implications for the tectonic evolution of the North China Craton. *American Journal of Science*, 310(10): 1480–1502
- Zhao GC, Cawood PA, Li SZ, Wilde SA, Sun M, Zhang J, He YH and Yin CQ. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion. *Precambrian Research*, 222–223: 55–76
- Zhou HW, Li XH, Zhong ZQ, Liu Y and Xu QD. 1997. Geochemistry of amphibolites within the Taihua complex from the Xiao Qinling area, western Henan and its tectonic implication. *Geochimica*, 26(2): 87–100 (in Chinese with English abstract)
- Zhou HW, Zhong ZQ, Ling WL, Zhong G L and Xu QD. 1998. Sm-Nd isochron for the amphibolites within Taihua complex from the Xiao Qinling area, western Henan and its geological implications. *Geochimica*, 27(4): 367–372 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 白瑾, 黄学光, 戴凤岩, 吴昌华. 1993. 中国前寒武纪地壳演化. 北京: 地质出版社, 36-38
- 白瑾, 黄学光, 王惠初, 郭进京, 戴凤岩, 王官福, 修群业, 徐文蒸, 颜耀阳. 1996. 中国前寒武纪地壳演化. 北京: 地质出版社, 1-60
- 陈陇刚, 王北颖, 薛焯洲. 1997. 陕西小秦岭地区太华群的重新厘定. 陕西地质, 15(1): 20-30
- 第五春荣, 孙勇, 林慈鑫, 柳小明, 王洪亮. 2007. 豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学. 岩石学报, 23(2): 253-262
- 第五春荣, 孙勇, 林慈鑫, 王洪亮. 2010. 河南鲁山地区太华杂岩 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成. 科学通报, 55(21): 2112-2123
- 耿元生, 万渝生, 沈其韩, 李惠民, 张如心. 2000. 吕梁地区早前寒武纪主要地质事件的年代框架. 地质学报, 74(3): 216-223
- 黄道袁, 张德会, 王世炎, 张毅星, 董春艳, 刘敦一, 万渝生. 2012. 华北克拉通南缘豫西下汤地区 2.3Ga 岩浆作用和 1.94Ga 变质作用——锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素组成及全岩地球化学研究. 地质评论, 58(3): 565-576
- 蒋宗胜, 王国栋, 肖玲玲, 第五春荣, 卢俊生, 吴春明. 2011. 河南洛宁太华变质杂岩区早元古代变质作用 $P-T-t$ 轨迹及其大地构造意义. 岩石学报, 27(12): 3701-3717
- 康春华, 李民贤. 1988. 陕西潼关地区太华群变质岩原岩性质的恢复. 西安地质学院学报, 10(3): 1-13
- 李江海, 翟明国, 李永刚, 张毅刚. 1998. 冀北滦平-承德一带晚太古代高压麻粒岩的发现及其构造地质意义. 岩石学报, 14(1): 34-41
- 刘富, 郭敬辉, 路孝平, 第五春荣. 2009. 华北克拉通 2.5Ga 地壳生长事件的 Nd-Hf 同位素证据: 以怀安片麻岩地体为例. 科学通报, 54(17): 2517-2526
- 刘树文. 1996. 阜平地区麻粒岩的 $P-T$ 路径研究. 高校地质学报, 2(1): 75-84
- 刘树文, 李江海, 潘元明, 张健, 李秋根, 黄雄南. 2002. 太行山-恒山太古代古老陆块: 年代学和地球化学制约. 自然科学进展, 12(8): 826-833
- 刘树文, 张臣, 刘超辉, 李秋根, 吕永军, 余盛强, 田伟, 凤永刚. 2007. 中条山-吕梁山前寒武纪变质杂岩的独居石电子探针定年研究. 地学前缘, 14(1): 64-74
- 刘树文, 李秋根, 张立飞. 2009. 吕梁山前寒武纪野鸡山群火山岩的地质学、地球化学及其构造意义. 岩石学报, 25(3): 547-560
- 齐进英. 1991. 太古代太华群基性变质岩角闪石及其成因意义. 河北地质学院学报, 14(2): 144-157
- 齐进英. 1992. 东秦岭太华群变质岩系及其形成条件. 地质科学, 27(增刊): 94-107
- 沈其韩, 钱祥麟. 1995. 中国太古宙地质体组成、阶段划分和演化. 地球学报, 16(2): 113-120
- 孙勇. 1983. 河南鲁山太华群的麻粒岩相变质岩. 西北大学学报(自然科学版), 13(1): 89-95
- 王国栋, 王浩, 陈泓旭, 卢俊生, 肖玲玲, 吴春明. 2012. 华北中部造山带南缘华山地区太华变质杂岩中锆石 U-Pb 定年. 地质学报, 86(9): 1541-1551
- 王仁民, 钱青, 范天立. 1998. 华北古陆南缘高压麻粒岩的发现. 见: 北京大学地质学系编. 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集, 北京: 地质出版社, 568-572
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 万渝生, 刘敦一, 宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 192-211
- 肖玲玲, 王国栋. 2011. 赞皇变基性岩中锆石的 U-Pb 定年及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 30(5): 781-794
- 肖玲玲, 蒋宗胜, 王国栋, 万渝生, 王涛, 吴春明. 2011. 赞皇前寒武纪变质杂岩区变质反应结构与变质作用 $P-T-t$ 轨迹. 岩石学报, 27(4): 980-1002
- 杨长秀. 2008. 河南鲁山地区早前寒武纪变质岩系的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及环境演化. 地质通报, 27(4): 517-533
- 翟明国, 卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解. 中国科学(D辑), 30(S1): 129-137
- 翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. 岩石学报, 23(11): 2665-2682
- 赵凤清, 李惠民, 左义成, 薛克勤. 2006. 晋南中条山古元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄. 地质通报, 25(4): 442-447
- 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. 岩石学报, 25(8): 1772-1792
- 周汉文, 李献华, 钟增球, 刘颖, 徐启东. 1997. 豫西小秦岭地区太华杂岩中斜长角闪岩地球化学及其大地构造意义. 地球化学, 26(2): 87-100
- 周汉文, 钟增球, 凌文黎, 钟国楼, 徐启东. 1998. 豫西小秦岭地区太华杂岩斜长角闪岩 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义. 地球化学, 27(4): 367-372