北京云蒙山地区中生代岩浆活动及构造演化

陈印[1)],朱光[2)],刘文刚[1)],陈路路[1)],奥琮[1)]

1)中国地质调查局天津地质调查中心,天津,300170; 2) 合肥工业大学,合肥,230009

内容提要:北京云蒙山地区位于华北克拉通北缘燕山褶断带中段。该地区发育大量中生代岩浆岩及近E—W向逆冲型四合堂剪切带和NE向伸展型大水峪剪切带。本次工作通过锆石年代学和单矿物(角闪石、黑云母)$^{40}Ar/^{39}Ar$年代学分析,进一步整理了云蒙山地区中生代岩浆活动及构造演化的时间,并分析了云蒙山岩基周边不同阶段的冷却速率。本次工作发现云蒙山地区经历了三期岩浆活动:晚三叠世、晚侏罗世和早白垩世。其中,206 Ma为捕获岩浆锆石年代学记录;在出露岩体中,沙陀子岩体为159~151 Ma,石城岩体为169~151 Ma,长园岩体为156~151 Ma,云蒙山岩基为146~141 Ma;冯家峪—西白莲峪花岗质岩体为130~124 Ma;冯家峪闪长质岩体为127 Ma;大东沟花岗质岩体为127 Ma。云蒙山地区经历了三次重要的构造事件。在早侏罗世,云蒙山地区表现为区域性角度不整合,并以挤压运动为主,缺乏岩浆活动。在早白垩世早期(143~135.5 Ma),云蒙山岩基北缘发育逆冲型四合堂剪切带。在早白垩世晚期(135~93.9 Ma),云蒙山地区发育以东南侧大水峪剪切带为主拆离剪切带的变质核杂岩。此外,云蒙山岩基的北侧和西侧,早期受四合堂剪切带影响,具有较高的冷却速率。云蒙山岩基的东侧,早期受四合堂剪切带影响较小,具有较小的冷却速率,以缓慢的均衡隆升为主,而晚期受大水峪剪切带强烈活动影响,为快速隆升阶段。总之,云蒙山地区在中生代经历了多期次的岩浆活动及构造运动,在不同地区呈现了阶段性不同程度的抬升剥蚀。

关键词:云蒙山变质核杂岩;华北克拉通;锆石U-Pb定年;$^{40}Ar/^{39}Ar$;剪切带

北京云蒙山地区位于华北克拉通北缘、燕山褶断带的中段。该地区先后发育了近E—W向弧形展布、上盘向SSW运动的四合堂剪切带和以NE向展布、向SE运动的大水峪剪切带为拆离断层的云蒙山变质核杂岩(图1)(Davis et al., 1996;陈印等,2013,2014;Zhu Guang et al.,2015)。该地区由于特殊的区域大地构造位置和构造演化特点,成为研究华北克拉通北部中生代构造演化的理想区域。同时,云蒙山地区发育了大量中生代岩浆活动,为进一步厘清该地区的岩浆活动和构造运动次序提供了条件。

对于云蒙山地区的构造事件,前人已经做了相关研究,并提出了不同的认识(Zheng Yadong et al., 1988; Davis et al., 1996; Passchier et al., 2005; Wang Tao et al.,2012)。Zheng Yadong等(1988)曾用热隆升导致的重力滑动构造解释云蒙山周围剪切带成因。Davis等(1988)早期认为大水峪剪切带为四合堂剪切带的南段,后期(1996)又认为属于伸展型的拆离剪切带。许继峰等(1994)、张建新等(1997)及朱大岗等(2000)皆主张云蒙山岩体的侵位隆升导致了其东缘大水峪剪切带的伸展运动。Passchier等(2005b)及张家声等(2007)认为伸展活动与云蒙山岩体的侵位共同导致了云蒙山变质核杂岩的形成,并将四合堂剪切带与大水峪剪切带解释为同期伸展剪切带。目前,该地区构造运动的争论主要集中于四合堂剪切带的性质和云蒙山变质核杂岩的发育机制(Passchier et al., 2005; Wang Tao et al.,2012; Zhu Guang et al., 2015)。此外,虽然前人对该地区的岩体进行了年代学研究(Davis et al., 1996; 刘翠等,2004; Shi Yuruo et al., 2009; Wang Tao et al., 2012),基本确定了该地区的岩浆活动时间,但受早期测试方法的限制,部分数据的准确性受到限制。本次工作主要通过对该地区岩体及相关岩脉的研究,进一步整理了岩浆演化次序和构造活动时

注:本文为国家青年自然科学基金资助项目(编号:41502195)的成果。

收稿日期:2017-08-29;改回日期:2018-06-11;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.04.004

作者简介:陈印,男,1984年生,博士,助理研究员,主要从事构造地质学和矿床学研究。通讯地址:300170,天津市河东区大直沽八号路4号天津地质调查中心。Email:chenyinchain@sina.com。

间,并在该地区首次发现了晚三叠世岩浆锆石记录。

通过对云蒙山地区单矿物$^{40}Ar/^{39}Ar$年代学的研究,前人已经开始关注云蒙山变质核杂岩的抬升冷却史(Wang Tao et al.,2012;陈印等,2014)。但这些工作依然缺乏足够的年代学证据,并缺乏对云蒙山岩基北侧冷却史演化和四合堂剪切带活动期间内冷却史演化的研究。

本文将通过对云蒙山地区年代学的研究,进一步整理该地区岩浆活动及构造运动的时间顺序,并深入分析云蒙山岩基周边不同构造演化阶段的冷却

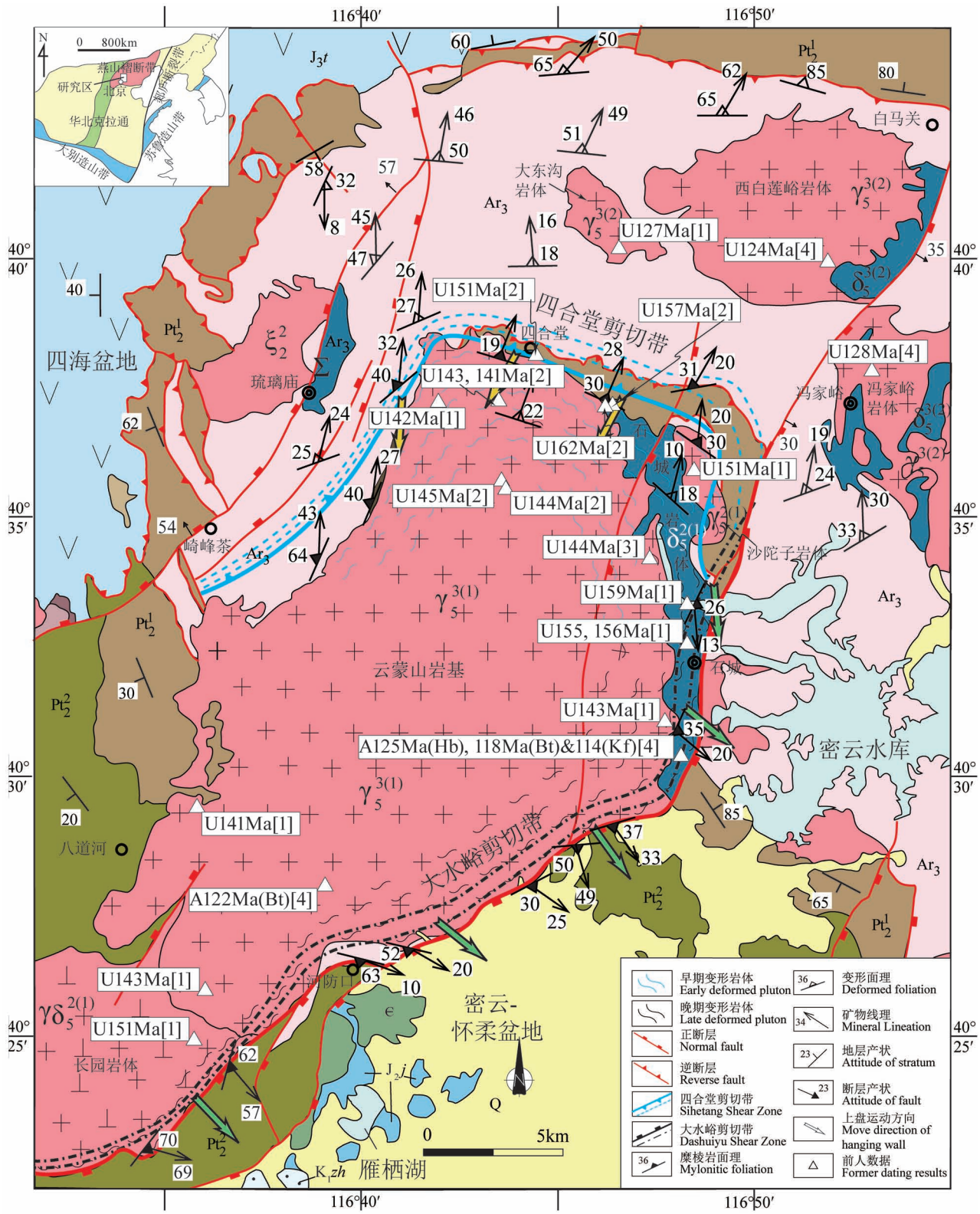


图 1 北京云蒙山地区地质简图(据北京市地质调查研究院 2000 年 1:25 万延庆幅地质图修改)

Fig. 1 Geological map of the Mount Yunmeng area, Beijing [modified from the 1:250000 Yanqing Geological Map (the Beijing Institute of Geological Survey, 2000)]

Q—第四系;K_1zh—上白垩统张家口组;J_3t—上侏罗统髫髻山组;J_2j—中侏罗统九龙山组;Є—寒武系;Pt_3^1—新元古界青白口群;Pt_2^2—中元古界蓟县群;Pt_2^1—中元古界长城群;Ar_3—新太古界。U—锆石 U-Pb 定年;A—$^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年。Bt—黑云母;Hb—角闪石;Kf—钾长石。[1] 据 Davis et al., 1996;[2] 据 Shi Yuruo et al., 2009;[3]:据刘翠等,2004;[4]: 据 Wang Tao et al., 2012

Q—Quaternary; K_1zh—Zhangjiakou Formation, Upper Cretaceous; J_3t—Tiaojiashan Formation, Upper Jurassic; J_2j— Jiulongshan Formation, Middle Jurassic; Є—Cambrian; Pt_3^1—Qingbaikou Group, Neoproterozoic; Pt_2^2—Jixian Group, Mesoproterozoic; Pt_2^1—Changcheng Group, Mesoproterozoic; Ar_3—Neoarchean. U—zircon U-Pb dating; A—$^{40}Ar/^{39}Ar$ dating. Bt—biotite; Hb—hornblende; Kf—K-feldspar. [1]: Davis et al., 1996;[2]: Shi Yuruo et al., 2009;[3]:Liu Cui et al., 2004&;[4]: Wang Tao et al., 2012

史。

1　地质背景

云蒙山地区位于华北克拉通北缘燕山褶断带的中段,出露岩石单元主要有太古宙变质基底、中—新元古代变沉积岩、少量寒武纪海相地层、中侏罗世陆相沉积、晚侏罗世—早白垩世陆相火山岩及第四纪沉积物(图 1)。太古宙变质基底主要出露于云蒙山岩基的北侧和密云水库的东侧,为各类高级变质的片麻岩、片岩。中—新元古代变沉积岩主要呈环状出露于云蒙山岩基及变质基底的北侧和西侧,岩性为碳酸盐岩和浅变质砂岩,在北部地层产状陡倾(倾角约 70°),在南部倾角低缓(倾角约 30°)。

区内的盆地主要分布在云蒙山岩基的东西两侧(图 1)。西北部四海盆地出露上侏罗统髫髻山组火山岩。东南部密云—怀柔盆地内出露中侏罗统九龙山组砂岩和砾岩、下白垩统张家口组火山岩及第四系沉积物。

云蒙山地区主要出露了晚侏罗世—早白垩世岩体,岩性主要为闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩(图 1)。闪长岩集中在东北部,包括变形的石城闪长岩(159~155 Ma;Davis et al., 1996;Shi Yuruo et al., 2009;Wang Tao et al., 2012)及冯家峪附近未变形闪长岩体。花岗闪长岩主要为西南部的长园岩体(151 Ma;Davis et al., 1996),广泛发育塑性变形。花岗岩主要出露于中部,包括变形的沙陀子岩体(151 Ma;Davis et al., 1996)、云蒙山岩基(145~141 Ma; Davis et al., 1996; Shi Yuruo et al., 2009; Wang Tao et al., 2012)及未变形的大东沟岩体(127 Ma;Davis et al., 1996)及冯家峪周边的花岗岩岩体(127 Ma;Wang Tao et al., 2012)。

云蒙山地区的构造运动主要表现为韧性构造四合堂剪切带、大水峪剪切带和脆性的河防口断层、崎峰茶—琉璃庙断层(Davis et al.,1996; Passchier et al.;2005; 陈印等, 2013, 2014; Zhu Guang et al., 2015)(图 1、2 和 3)。四合堂剪切带为一近 E—W 走向的逆冲型剪切带,带内可见地层的倒转,上盘向 SSW 运动(图 2)。该剪切带内岩体和基底变质岩一致地被强烈的面理化,出现糜棱岩化及透入性的矿物拉伸线理。由于后期云蒙山变质核杂岩隆升作用,四合堂剪切带目前呈弧形围绕岩体北缘展布(图 1, Zhu Guang et al.,2015 及其内部参考文献)。NNE 至 NE 走向的大水峪韧性剪切带作为云蒙山变质核杂岩的主拆离剪切带,位于云蒙山岩基的东南侧,向 SE 倾,上盘向 SE 运动(图 2 和 3c)。河防口正断层作为云蒙山变质核杂岩的主体拆离断裂带,沿大水峪剪切带东缘发育,倾向南东,倾角 20°~70°(图 3d)。该断层的南段沿云蒙山岩基及长园岩体东缘发育,控制了早白垩世张家口组火山岩充填的盆地。崎峰茶—琉璃庙断层发育在云蒙山岩基西侧变质基底内,呈 NE 走向,倾向 NW,倾角在 60°左右,并右行错断中元古界长城群,错距可达 3 km 左右(图 1)。

2　岩体及岩脉变形特征

云蒙山地区的变形岩体包括沙陀子岩体、石城岩体、长园岩体和云蒙山岩基;未变形岩体主要分布在云蒙山岩基的北部,有大东沟花岗质岩体及冯家峪周边的花岗质及闪长质岩体。变形岩脉主要出露于云蒙山岩基周边,尤其与石城岩体接触部位。

沙陀子岩体位于云蒙山岩基的东北部,夹于石城岩体与变质基底及长城系变质岩之间(图 1)。岩性主要为粗粒花岗岩,矿物颗粒明显大于周围岩体,发生强烈地塑性变形,并可见长石矿物拉伸线理

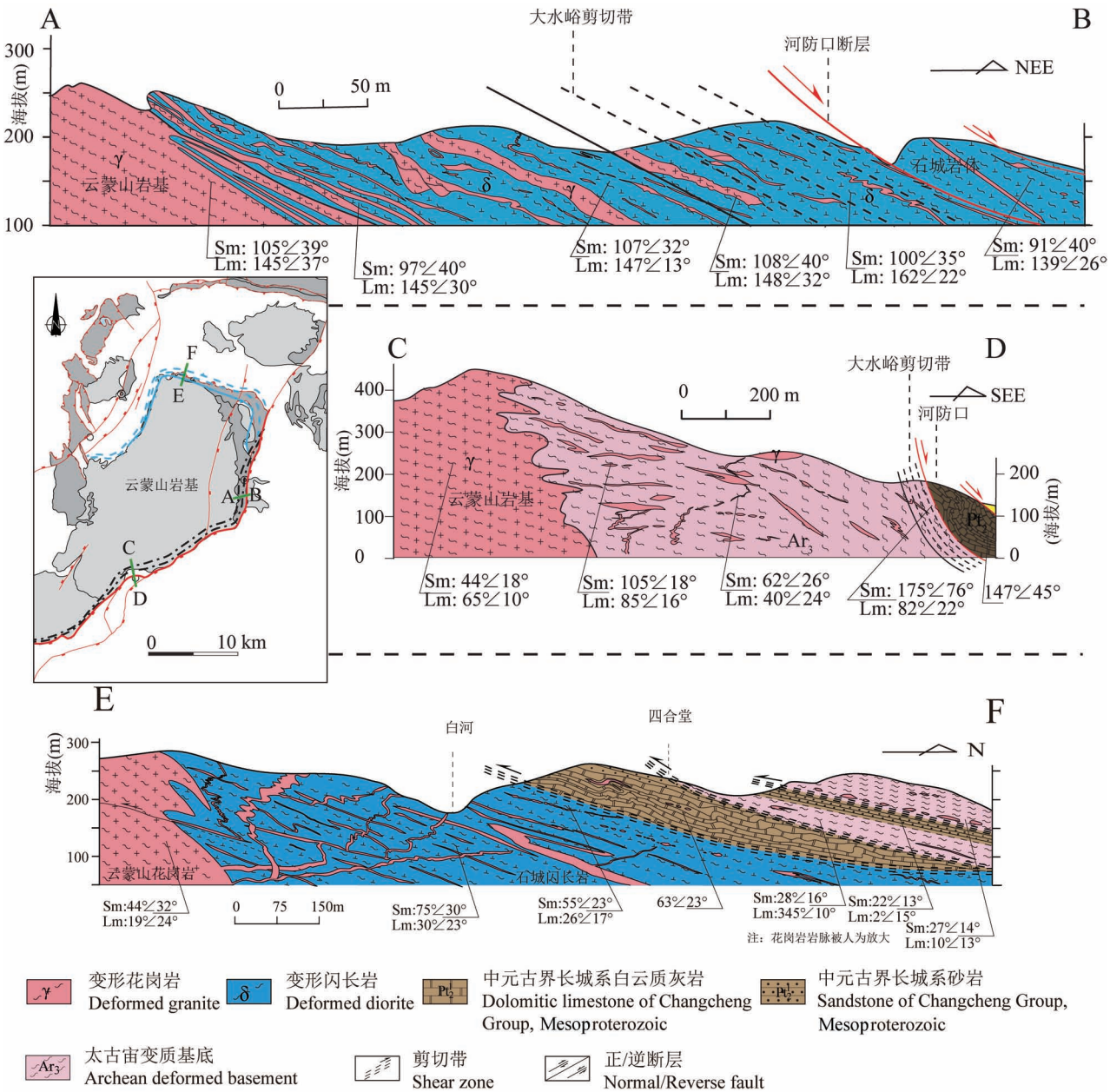


图 2 北京云蒙山变质核杂岩周边剖面

Fig. 2 Cross-sections around the Yunmengshan Metamorphic Core Complex

(图 4a)。石城岩体位于云蒙山岩基的东北部,可见强烈地面理化及长石和角闪石矿物拉伸线理。在与沙陀子岩体接触部位,石城闪长岩体内未发现沙陀子花岗质岩脉(图 4e)。但受后期云蒙山花岗质岩基影响,石城闪长岩体内发育大量的花岗质岩脉,并发生不同程度的变形(图 3f 和图 4)。长园花岗闪长质岩体位于云蒙山岩基的西南部,其四周发育不同程度的变形作用。在与云蒙山岩基接触地区,云蒙山花岗质岩脉侵入到长园岩体内,且未发生变形作用。长园岩体的东南部受大水峪拆离剪切带的影响,发生较强的变形,可见长石矿物拉伸线理。云蒙山岩基受四合堂剪切带及云蒙山变质核杂岩的影响,呈不同地区不同程度的变形。在云蒙山岩基的西部及北部主要表现为强烈的面理化及矿物拉伸线理,局部岩体内部可见露头尺度的剪切带,明显错断岩脉标志层(图 3a 和图 4)。在云蒙山岩基的东部主要表现为侵入于石城岩体的岩脉发生不同程度的变形作用(图 3 和图 4)。在云蒙山岩基的东南部,

可见明显的旋转残斑和矿物拉伸线理,并可见 S—C 组构等韧性构造特征(图 3c)。

岩脉主要出露于云蒙山岩基与石城岩体及斜长角闪质片麻岩接触部位,可见不同期次的侵入穿插关系,且受后期多次构造运动的影响表现为不同程度的变形。这些岩脉代表了构造运动不同时间段的岩浆活动,能够很好地反映岩浆活动与构造运动的关系,有利于岩浆活动及构造运动期次的厘定。通过野外观察,本次工作发现,该地区岩脉主要分为三期。第一期主要为灰白色花岗闪长质岩脉,受构造运动影响最为强烈,表现为褶皱轴面与面理平行或岩脉发生强烈地旋转,与面理呈小角度夹角或平行。该期次岩脉多发育 A 型褶皱,局部可见鞘褶皱(图 4f)。第二期岩脉多为肉红色及灰白色中细粒花岗岩脉,切割第一期岩脉。该期岩脉同样发生强烈的变形作用,但较之第一期岩脉,与面理的夹角稍微变大,可作为较好的旋向标志。第三期岩脉主要表现为花岗质伟晶岩脉,切割前两期岩脉,受构造运动影响最弱,发生弱变形或未变形。该期岩脉与面理的夹角最大,局部可见呈 90°夹角,代表了该地区韧性构造运动末期或后期侵位的岩浆活动。

因此,本次工作通过对不同变形程度的岩体及岩脉的年代学工作,能够进一步厘清该地区的岩浆活动期次及构造运动期次。

3　同位素年代学分析

为进一步限定云蒙山地区中生代岩浆—构造事件,本文深入分析和总结了有关岩体和岩脉的锆石 U-Pb 年代学工作,以及角闪石和黑云母$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学工作。

3.1　样品的选取

本次定年样品主要沿四合堂剪切带和大水峪剪切带采取,包括 9 个岩体和岩脉样品及 5 个单矿物样品。其中岩体和岩脉样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,单矿物样品进行角闪石和黑云母$^{40}Ar/^{39}Ar$定年。采样位置及定年结果可见图 4~8 和表 1 和表 2。

锆石测试工作在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产国家重点实验室完成。锆石原位 U-Pb 同位素定年采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪

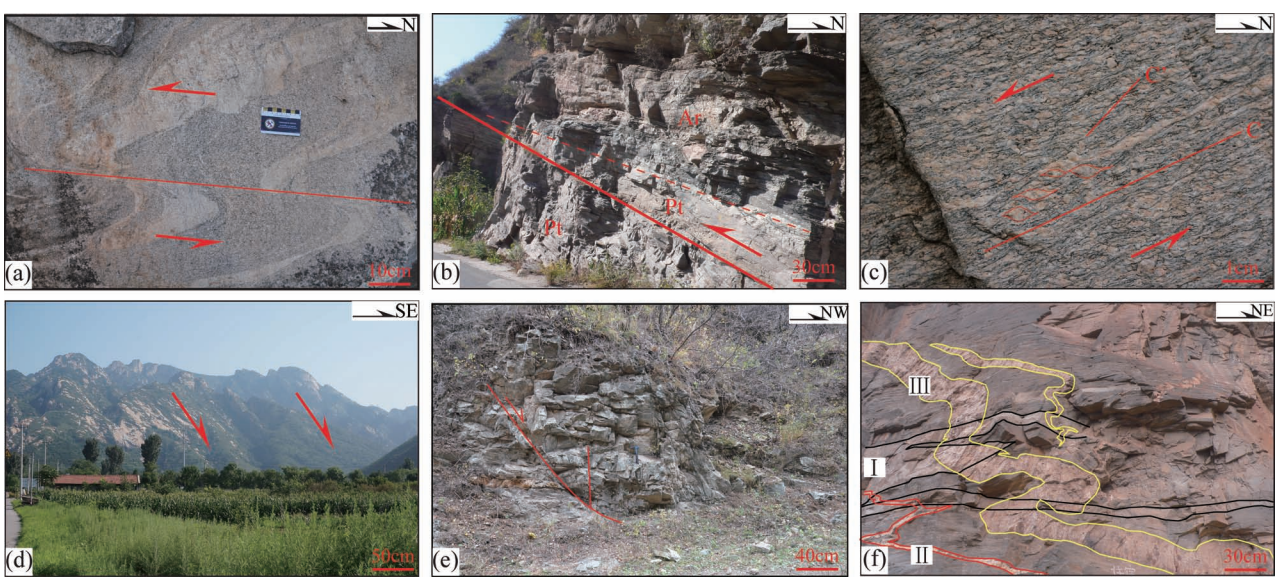


图 3 云蒙山地区野外照片

Fig. 3 Field photos of the Mount Yunmeng area

(a) 四合堂南云蒙山岩基内小型剪切带,指示上盘向 S 运动;(b) 四合堂地区逆冲推覆构造,上盘向 S 运动;(c) 白道峪地区云蒙山岩体变形特征,指示上盘向 SE 运动;(d) 云蒙山岩体东南部黑山寺附近正断层;(e) 崎峰茶地区正断层;(f) 云蒙山地区多期岩脉活动,Ⅰ—早期岩脉,Ⅱ—中期岩脉,Ⅲ—晚期岩脉

(a) Small shear zone developing in the Yunmengshan batholith at the south of Sihetang, and indicating the hanging wall moving to south; (b) the thrust nappe structure in the Sihetang area indicating the hanging wall moving to southe; (c) the deformation characteristic of the Yunmengshan batholith in the Baidaoyu area indicating the hanging wall moving to SE; (d) the normal fault developing at the Heishansi area locating at the southeast of the Yunmengshan batholith; (e) Qifengcha normal fault; (f) multi-stages dyke activities in the Mount Yunmeng area, Ⅰ—early stage, Ⅱ—medium stage, Ⅲ—late stage

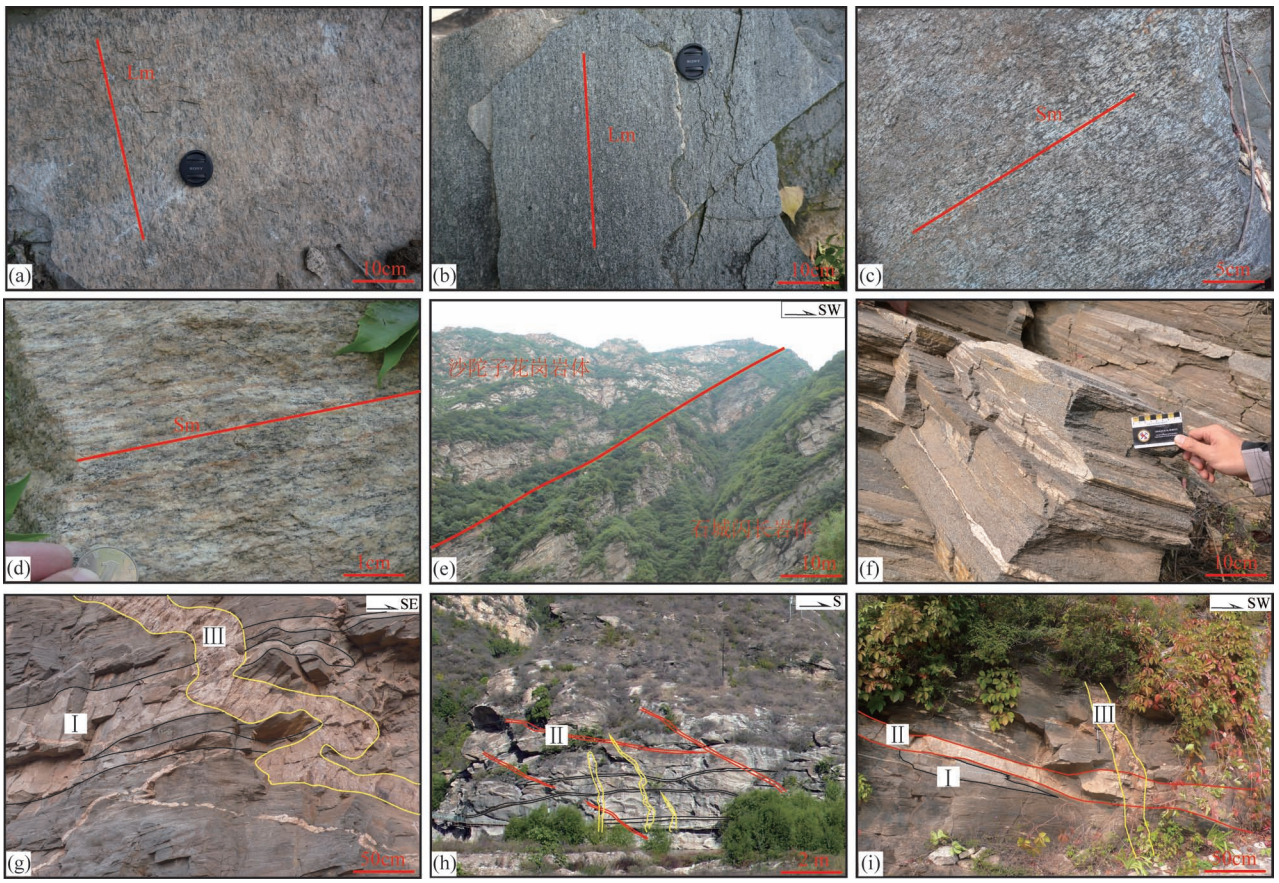


图 4 云蒙山地区岩体及岩脉变形特征：(a) 沙陀子岩体矿物拉伸线理；(b) 石城岩体矿物拉伸线理；(c) 长园岩体面理；(d) 云蒙山岩基北部面理；(e) 沙陀子岩体与石城岩体接触带；(f) A 型褶皱；(g)—(i) 不同期次变形岩脉

Fig. 4 Deformation characteristics of the plutons and veins in the Mount Yunmeng area: (a) Mineral lineation in Shatuozi pluton; (b) mineral lineation in Shicheng Pluton; (c) foliation in Changyuan Pluton; (d) foliation in the north part of Yunmeng batholith; (e) contact zone between Shatuozi pluton and Shicheng Pluton; (f) A-type fold; (g)—(i) different stages of deformed dykes

(LA-ICP-MS) 分析。具体分析流程及仪器参数见 Liu Yongsheng 等(2008)。锆石测定点的同位素比值、U-Pb 表面年龄和 U—Th—Pb 含量计算采用 ICPMSDataCal 6.2 程序计算(Liu Yongsheng et al., 2010),并采用 Andersen(2002) 的方法进行普通铅校正。单矿物 Ar-Ar 定年样品经人工提纯,颗粒均大于 100 μm。测试工作在中国地质科学院地质研究所$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学实验室完成。具体仪器参数和分析过程详见陈文等(2003, 2006)。锆石年龄和单矿物年龄的计算成图采用 Isoplot 3.7 软件。

3.2 锆石年代学分析

本文的锆石 U-Pb 定年样品主要采自于四合堂剪切带与大水峪剪切带周缘(图 3)。锆石 U-Pb 定年结果显示,样品常包含多个阶段的年龄(图 5、6 和 7)。这显示样品中包含了同期岩浆锆石、早期的继承锆石或从围岩捕获的锆石。

MY15 采自于云蒙山岩基北部四合堂大桥南浅色黑云母花岗岩脉。锆石呈长柱状,具有很好的岩浆环带,锆石 Th/U 值多数大于 0.5,为岩浆成因锆石。锆石 U-Pb 同位素年龄以 206.0±5.0 Ma 为主,含少量 153 Ma 左右的锆石年龄。锆石稀土蛛网图显示两期年龄对应的稀土元素特征没有明显的差异,呈轻稀土亏损、重稀土富集的特点,并具有明显的 Ce 高异常(图 8)。由于该地区未发现晚三叠世岩体出露,故本文推测 206.0±5.0 Ma 为捕获锆石年龄,而 153 Ma 对应了石城岩体的结晶年龄。

MY52-2 采自于云蒙山岩基东部云蒙峡变形花岗岩脉,侵位于石城闪长岩体内,呈布丁状发育。该锆石年龄分布范围为 160~110 Ma,但集中在 151.9±2.3 Ma、140±9.0 Ma 和 124.8±5.0 Ma。其中前两

表 1 北京云蒙山地区岩体和岩脉中锆石 U-Pb 年代学数据表

Table 1 U-Pb isotopic dating data of the zircons from the intrusives and dykes in Mt. Yunmeng area, Beijing

测点号	元素含量($\times10^{-6}$)			$\frac{Th}{U}$	同位素比值						同位素年龄(Ma)				谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$\frac{n(^{207}Pb)}{n(^{235}U)}$		$\frac{n(^{206}Pb)}{n(^{238}U)}$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
MY15 浅色黑云母花岗岩脉															
1	36.49	373.27	758.91	0.49	0.0574	0.0066	0.0574	0.0066	0.2586	0.0284	234	23	207	6	96
2	20.37	295.07	485.02	0.61	0.0580	0.0022	0.0580	0.0022	0.2585	0.0095	233	8	206	2	98
3	27.57	369.12	680.19	0.54	0.0521	0.0016	0.0521	0.0016	0.2354	0.0072	215	6	208	2	99
4	15.26	265.04	350.93	0.76	0.0634	0.0024	0.0634	0.0024	0.2776	0.0106	249	8	201	2	98
5	17.44	271.58	402.32	0.68	0.0504	0.0025	0.0504	0.0025	0.2282	0.0111	209	9	209	2	90
6	14.56	243.01	344.49	0.71	0.0506	0.0028	0.0506	0.0028	0.2196	0.0118	202	10	200	2	89
7	15.27	202.27	361.26	0.56	0.0497	0.0027	0.0497	0.0027	0.2176	0.0116	200	10	201	2	97
8	11.97	207.13	282.13	0.73	0.0707	0.0035	0.0707	0.0035	0.3003	0.0142	267	11	196	2	99
9	24.95	485.30	578.93	0.84	0.0529	0.0017	0.0529	0.0017	0.2368	0.0070	216	6	206	2	95
10	14.54	329.90	328.68	1.00	0.0626	0.0024	0.0626	0.0024	0.2854	0.0106	255	8	210	3	98
11	14.57	203.43	319.92	0.64	0.0497	0.0028	0.0497	0.0028	0.2441	0.0132	222	11	226	3	99
12	16.09	273.96	384.51	0.71	0.0519	0.0018	0.0519	0.0018	0.2360	0.0078	215	6	209	2	99
13	17.53	278.82	420.10	0.66	0.0540	0.0032	0.0540	0.0032	0.2386	0.0138	217	11	203	3	90
14	16.95	275.46	394.32	0.70	0.0505	0.0029	0.0505	0.0029	0.2312	0.0131	211	11	210	2	97
15	13.15	185.20	324.74	0.57	0.0519	0.0021	0.0519	0.0021	0.2357	0.0095	215	8	209	2	89
16	28.24	80.27	253.60	0.32	0.0495	0.0034	0.0495	0.0034	0.1627	0.0110	153	10	152	2	98
17	3.60	38.71	60.37	0.64	0.0471	0.0032	0.0471	0.0032	0.1565	0.0105	148	9	154	3	99
MY52-2 变形花岗岩脉															
1	6.59	80.27	253.60	0.32	0.0540	0.0030	0.1728	0.0096	0.0234	0.0004	162	8	149	2	91
2	9.14	346.10	333.05	1.04	0.0511	0.0024	0.1386	0.0064	0.0197	0.0002	132	6	126	2	95
3	2.57	45.96	55.09	0.83	0.0936	0.0223	0.3249	0.0766	0.0252	0.0008	286	59	160	5	92
4	1.99	38.71	60.37	0.64	0.0529	0.0060	0.1774	0.0197	0.0243	0.0006	166	17	155	4	98
5	1.98	47.93	56.45	0.85	0.0598	0.0077	0.1974	0.0248	0.0240	0.0006	183	21	153	4	99
6	4.82	141.60	145.75	0.97	0.0539	0.0035	0.1755	0.0106	0.0240	0.0003	164	9	153	2	93
7	20.51	880.25	669.16	1.32	0.0510	0.0016	0.1440	0.0043	0.0204	0.0002	137	4	130	1	95
8	2.02	52.12	60.56	0.86	0.0461	0.0048	0.1392	0.0139	0.0219	0.0006	132	12	140	4	95
9	2.48	57.16	71.47	0.80	0.0461	0.0067	0.1531	0.0216	0.0241	0.0008	145	19	154	5	97
10	21.93	72.99	132.86	0.55	0.1325	0.0086	2.2130	0.1255	0.1212	0.0038	1185	40	737	22	98
11	2.31	28.26	73.29	0.39	0.0652	0.0091	0.2193	0.0297	0.0244	0.0008	201	25	155	5	95
12	60.48	24.82	2794	0.01	0.0503	0.0012	0.0503	0.0012	0.1399	0.0031	133	3	129	1	98
13	63.70	70.25	2519.3	0.03	0.0559	0.0051	0.0559	0.0051	0.1320	0.0119	126	11	110	2	94
14	99.02	61.05	3354.9	0.02	0.0661	0.0063	0.0661	0.0063	0.1700	0.0161	159	14	119	2	97
15	109.13	64.05	4709.6	0.01	0.0551	0.0023	0.0551	0.0023	0.1470	0.0060	139	5	123	1	99
MY251-1 变形花岗岩岩脉															
1	2.63	52.31	75.06	0.70	0.0537	0.0070	0.0537	0.0070	0.1771	0.0229	166	20	152	3	93
2	1.39	29.60	37.62	0.79	0.0861	0.0104	0.0861	0.0104	0.3239	0.0551	285	42	173	5	95
3	3.59	65.77	96.99	0.68	0.0788	0.0119	0.0788	0.0119	0.2824	0.0422	253	33	165	4	91
4	4.14	116.08	119.50	0.97	0.0608	0.0052	0.0608	0.0052	0.2046	0.0162	189	14	161	3	98
5	5.69	168.58	155.15	1.09	0.0614	0.0099	0.0614	0.0099	0.1913	0.0305	178	26	144	4	96
6	4.08	57.39	97.07	0.59	0.0555	0.0126	0.0555	0.0126	0.1755	0.0395	164	34	146	4	95
7	3.25	57.32	101.15	0.57	0.0474	0.0047	0.0474	0.0047	0.1554	0.0150	147	13	151	3	98
8	3.31	67.91	106.31	0.64	0.0560	0.0042	0.0560	0.0042	0.1828	0.0130	170	11	156	3	99
9	3.77	98.02	109.55	0.89	0.0574	0.0061	0.0574	0.0061	0.1916	0.0198	178	17	154	3	97
10	46.04	342.02	1307.3	0.26	0.0528	0.0014	0.0528	0.0014	0.2326	0.0069	212	6	202	3	95
11	7.38	161.53	207.90	0.78	0.0484	0.0038	0.0484	0.0038	0.1796	0.0138	168	12	171	3	99
12	5.29	136.06	147.78	0.92	0.0495	0.0046	0.0495	0.0046	0.1619	0.0147	152	13	151	3	98

测点号	元素含量($\times10^{-6}$)			$\frac{Th}{U}$	同位素比值						同位素年龄(Ma)				谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$\frac{n(^{207}Pb)}{n(^{235}U)}$		$\frac{n(^{206}Pb)}{n(^{238}U)}$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
13	2.97	75.54	85.14	0.89	0.0468	0.0052	0.0468	0.0052	0.1537	0.0169	145	15	152	3	90
14	2.68	57.35	84.42	0.68	0.0598	0.0037	0.0598	0.0037	0.2033	0.0130	188	11	158	3	98
15	2.38	63.05	69.70	0.90	0.0611	0.0057	0.0611	0.0057	0.2019	0.0179	187	15	156	3	98
16	3.06	82.69	78.25	1.06	0.0673	0.0113	0.0673	0.0113	0.2265	0.0375	207	31	155	4	94
17	3.71	74.75	81.54	0.92	0.0646	0.0127	0.0646	0.0127	0.2102	0.0408	194	34	150	5	97
18	2.18	55.60	64.27	0.87	0.0628	0.0063	0.0628	0.0063	0.2106	0.0211	194	18	160	4	99
19	2.97	78.77	99.05	0.80	0.0607	0.0051	0.0607	0.0051	0.1894	0.0184	176	16	147	3	98
20	3.40	48.18	70.48	0.68	0.0461	0.0059	0.0461	0.0059	0.1619	0.0200	152	17	162	5	92
MY251-2 变形花岗伟晶岩脉															
1	234.06	1478.9	102.63	14.41	0.0616	0.0079	0.0616	0.0079	0.1972	0.0249	183	21	148	3	94
2	308.83	1867.7	86.16	21.68	0.0656	0.0090	0.0656	0.0090	0.2387	0.0322	217	26	168	4	96
3	559.82	4267.1	108.85	39.20	0.0675	0.0069	0.0675	0.0069	0.2223	0.0226	204	19	152	4	98
4	337.43	1054.9	112.45	9.38	0.0546	0.0072	0.0546	0.0072	0.1660	0.0214	156	19	141	4	92
5	241.65	1083.8	157.39	6.89	0.0461	0.0024	0.0461	0.0024	0.1603	0.0080	151	7	161	3	98
6	129.96	1001.1	54.24	18.46	0.0722	0.0072	0.0722	0.0072	0.2353	0.0221	215	18	159	5	97
7	420.85	2716.5	133.79	20.30	0.0550	0.0033	0.0550	0.0033	0.2154	0.0126	198	11	181	3	99
8	263.07	1163.3	105.19	11.06	0.0536	0.0066	0.0536	0.0066	0.1855	0.0225	173	19	160	3	94
9	336.17	1061.0	161.55	6.57	0.0569	0.0086	0.0569	0.0086	0.1741	0.0262	163	23	142	3	92
10	251.39	1414.3	159.88	8.85	0.0467	0.0036	0.0467	0.0036	0.1494	0.0111	141	10	148	3	97
11	932.60	1357.3	343.24	3.95	0.0876	0.0112	0.0876	0.0112	0.3307	0.0415	290	32	174	4	90
12	269.88	1852.5	309.17	5.99	0.0590	0.0047	0.0590	0.0047	0.2092	0.0162	193	14	164	3	97
13	132.79	883.96	60.41	14.63	0.0542	0.0047	0.0542	0.0047	0.1824	0.0168	170	14	156	4	99
14	165.83	779.61	83.80	9.30	0.0496	0.0077	0.0496	0.0077	0.1684	0.0257	158	22	157	4	96
15	158.94	1174.7	138.46	8.48	0.0496	0.0035	0.0496	0.0035	0.1731	0.0122	162	11	162	2	99
16	167.75	1238.6	93.31	13.27	0.0568	0.0041	0.0568	0.0041	0.1928	0.0137	179	12	161	3	99
17	91.25	758.57	74.73	10.15	0.0725	0.0067	0.0725	0.0067	0.2487	0.0238	225	19	158	5	96
18	290.29	2018.9	175.07	11.53	0.0536	0.0062	0.0536	0.0062	0.1771	0.0201	166	17	153	3	95
19	73.01	296.99	45.09	6.59	0.0545	0.0111	0.0545	0.0111	0.1812	0.0366	169	31	153	5	91
20	183.57	769.05	143.99	5.34	0.0513	0.0076	0.0513	0.0076	0.1808	0.0265	169	23	163	3	96
21	54.72	360.80	216.19	1.67	0.0526	0.0032	0.0526	0.0032	0.1772	0.0112	166	10	156	2	99
22	104.50	267.82	59.89	4.47	0.1206	0.0362	0.1206	0.0362	0.4275	0.1268	361	90	164	8	90
23	81.18	825.93	116.91	7.06	0.0625	0.0061	0.0625	0.0061	0.2014	0.0191	186	16	153	4	99
24	25.42	196.31	65.64	2.99	0.0573	0.0070	0.0573	0.0070	0.1999	0.0241	185	20	161	4	99
25	17.92	112.17	124.23	0.90	0.0500	0.0038	0.0500	0.0038	0.1659	0.0124	156	11	153	3	98
MY321 长园变形花岗闪长岩岩体															
1	NULL	NULL	NULL	0.96	0.0601	0.0051	0.0601	0.0051	0.2126	0.0178	196	15	163	3	95
2	10.08	247.38	287.72	0.78	0.0567	0.0038	0.0567	0.0038	0.1933	0.0125	179	11	158	2	96
3	10.10	142.79	181.28	0.76	0.0645	0.0166	0.0645	0.0166	0.2186	0.0560	201	47	157	4	90
4	NULL	NULL	NULL	1.14	0.0499	0.0038	0.0499	0.0038	0.1600	0.0118	151	10	148	2	99
5	20.05	359.75	669.80	0.51	0.0646	0.0020	0.0646	0.0020	0.2152	0.0069	198	6	153	2	98
6	10.67	345.11	274.82	1.20	0.0468	0.0045	0.0468	0.0045	0.1465	0.0139	139	12	145	2	95
7	6.18	188.69	181.77	1.00	0.0527	0.0032	0.0527	0.0032	0.1744	0.0101	163	9	154	2	99
8	10.82	410.70	291.96	1.37	0.0598	0.0024	0.0598	0.0024	0.2033	0.0090	188	8	156	2	99
9	2.71	66.95	85.20	0.77	0.0651	0.0065	0.0651	0.0065	0.2201	0.0214	202	18	156	4	98
10	8.08	196.87	211.65	0.90	0.0461	0.0026	0.0461	0.0026	0.1524	0.0082	144	7	153	2	97
11	10.87	197.57	224.55	0.85	0.0506	0.0057	0.0506	0.0057	0.1906	0.0214	177	18	174	3	92
12	8.12	237.00	230.18	1.01	0.0484	0.0038	0.0484	0.0038	0.1642	0.0127	154	11	157	2	98
13	7.41	203.52	216.46	0.91	0.0526	0.0042	0.0526	0.0042	0.1832	0.0143	171	12	161	2	99
14	NULL	NULL	NULL	1.12	0.0542	0.0050	0.0542	0.0050	0.1852	0.0166	173	14	158	3	99
15	7.62	209.55	223.60	0.91	0.0480	0.0033	0.0480	0.0033	0.1634	0.0111	154	10	157	2	99

测点号	元素含量($\times10^{-6}$)			$\frac{Th}{U}$	同位素比值						同位素年龄(Ma)				谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$\frac{n(^{207}Pb)}{n(^{235}U)}$		$\frac{n(^{206}Pb)}{n(^{238}U)}$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
16	8.35	200.17	230.87	0.83	0.0465	0.0034	0.0465	0.0034	0.1594	0.0114	150	10	158	2	98
17	NULL	NULL	NULL	0.79	0.0538	0.0035	0.0538	0.0035	0.1868	0.0119	174	10	162	2	99
18	NULL	NULL	NULL	0.80	0.0530	0.0027	0.0530	0.0027	0.1897	0.0095	176	8	165	2	99
19	34.44	1152.4	919.26	1.20	0.0510	0.0015	0.0510	0.0015	0.1863	0.0052	173	4	169	2	99
20	38.27	1113.5	998.63	1.06	0.0461	0.0024	0.0461	0.0024	0.1643	0.0083	154	7	165	2	97
21	9.38	157.87	218.64	0.66	0.0586	0.0077	0.0586	0.0077	0.2067	0.0269	191	23	163	3	93
22	NULL	NULL	NULL	0.90	0.0755	0.0042	0.0755	0.0042	0.2705	0.0145	243	12	168	2	97
23	NULL	NULL	NULL	0.64	0.0461	0.0065	0.0461	0.0065	0.1541	0.0217	146	19	155	3	93
24	NULL	NULL	NULL	1.02	0.0529	0.0040	0.0529	0.0040	0.1886	0.0140	175	12	165	2	98
MY482-1 弱变形粗粒花岗岩脉															
1	90.86	91.86	3519.1	0.03	0.0524	0.0011	0.0524	0.0011	0.1758	0.0035	164	3	155	1	99
2	188.92	187.26	6868.1	0.03	0.0534	0.0020	0.0534	0.0020	0.1775	0.0064	166	5	154	1	96
3	5.90	182.99	129.13	1.42	0.0621	0.0100	0.0621	0.0100	0.2209	0.0353	203	29	164	4	93
4	19.74	337.47	562.60	0.60	0.0518	0.0059	0.0518	0.0059	0.1682	0.0189	158	16	150	2	95
5	93.84	94.30	3469.1	0.03	0.0502	0.0017	0.0502	0.0017	0.1650	0.0054	155	5	152	2	97
6	99.40	153.67	3956.1	0.04	0.0488	0.0013	0.0488	0.0013	0.1538	0.0039	145	3	146	1	98
7	99.78	266.69	4279.9	0.06	0.1159	0.0023	0.1159	0.0023	0.2888	0.0058	258	5	115	1	93
8	157.99	239.21	5208.6	0.05	0.0512	0.0019	0.0512	0.0019	0.1785	0.0066	167	6	161	1	95
9	227.55	457.24	8158.9	0.06	0.0555	0.0042	0.0555	0.0042	0.1767	0.0133	165	11	147	1	97
10	117.90	405.76	4442.3	0.09	0.0613	0.0031	0.0613	0.0031	0.1623	0.0079	153	7	123	2	96
MY483 糜棱岩化花岗岩脉															
1	20.04	600.6	571.0	1.01	0.0543	0.0022	0.0543	0.0022	0.1926	0.0076	179	6	164	1	91
2	NULL	NULL	NULL	0.85	0.0531	0.0033	0.0531	0.0033	0.1927	0.0119	179	10	168	2	85
3	57.17	1594.8	1424.7	1.08	0.0546	0.0014	0.0546	0.0014	0.2161	0.0054	199	5	182	1	91
4	80.97	2754.8	1957.1	1.35	0.0589	0.0015	0.0589	0.0015	0.2244	0.0053	206	4	176	1	84
5	26.80	723.8	808.1	0.85	0.0547	0.0017	0.0547	0.0017	0.1898	0.0058	176	5	160	1	90
6	52.13	1597.3	1451.4	0.98	0.0526	0.0014	0.0526	0.0014	0.1992	0.0054	184	5	174	2	94
7	NULL	NULL	NULL	1.59	0.0517	0.0017	0.0517	0.0017	0.1878	0.0059	175	5	168	1	95
8	21.30	674.4	573.0	1.04	0.0515	0.0020	0.0515	0.0020	0.1854	0.0071	173	6	166	2	96
9	31.57	1030.9	829.4	1.19	0.0518	0.0018	0.0518	0.0018	0.1878	0.0062	175	5	167	1	95
10	98.91	4338.2	2295.8	1.79	0.0502	0.0011	0.0502	0.0011	0.1875	0.0038	175	3	172	1	98
11	NULL	NULL	NULL	0.96	0.0512	0.0015	0.0512	0.0015	0.1858	0.0053	173	4	167	1	96
12	10.30	241.8	318.3	0.74	0.0577	0.0030	0.0577	0.0030	0.2000	0.0099	185	8	161	2	86
13	107.47	4874.4	2416.9	1.96	0.0504	0.0011	0.0504	0.0011	0.1878	0.0042	175	4	171	1	97
14	NULL	NULL	NULL	0.93	0.0521	0.0018	0.0521	0.0018	0.1857	0.0066	173	6	164	2	94
15	98.50	4334.9	2177.0	1.92	0.0544	0.0012	0.0544	0.0012	0.2044	0.0042	189	4	173	1	91
16	NULL	NULL	NULL	0.79	0.0499	0.0019	0.0499	0.0019	0.1691	0.0063	159	5	157	2	99
17	NULL	NULL	NULL	1.16	0.0557	0.0022	0.0557	0.0022	0.1925	0.0074	179	6	160	2	88
18	103.19	4382.8	2480.6	1.69	0.0511	0.0012	0.0511	0.0012	0.1877	0.0043	175	4	169	1	96
19	75.96	2495.8	1955.9	1.22	0.0500	0.0012	0.0500	0.0012	0.1870	0.0044	174	4	172	2	98
20	NULL	NULL	NULL	1.10	0.0522	0.0016	0.0522	0.0016	0.1897	0.0056	176	5	168	2	95
21	104.30	597.4	5923.4	0.10	0.0535	0.0021	0.0535	0.0021	0.1066	0.0041	103	4	92.5	0.9	88
22	19.58	703.2	571.1	1.16	0.0507	0.0018	0.0507	0.0018	0.1693	0.0057	159	5	155	2	97
23	71.25	2853.8	1605.3	1.56	0.0526	0.0015	0.0526	0.0015	0.2037	0.0055	188	5	178	1	94
MY610-2 弱变形花岗伟晶岩脉															
1	57.1	169.8	2528.3	0.07	0.0544	0.0015	0.0544	0.0015	0.1538	0.0040	145	4	131	1	85
2	74.6	108.7	3030.3	0.04	0.0516	0.0013	0.0516	0.0013	0.1684	0.0037	158	3	151	2	95
3	67.0	99.6	3054.8	0.03	0.0539	0.0014	0.0539	0.0014	0.1495	0.0037	141	3	129	1	83
4	111.4	773.6	4425.3	0.17	0.0637	0.0017	0.0637	0.0017	0.1996	0.0048	185	4	145	1	85
5	251.5	222.0	10220	0.02	0.0499	0.0012	0.0499	0.0012	0.1633	0.0035	154	3	151	2	96

测点号	元素含量($\times10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)				谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$\frac{n(^{207}Pb)}{n(^{235}U)}$		$\frac{n(^{206}Pb)}{n(^{238}U)}$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
6	200.7	154.3	7274.9	0.02	0.0534	0.0011	0.0534	0.0011	0.1902	0.0042	177	4	164	1	92
7	69.9	118.2	3084.5	0.04	0.0513	0.0020	0.0513	0.0020	0.1328	0.0050	127	4	120	1	85
8	89.8	124.2	3895.7	0.03	0.0514	0.0011	0.0514	0.0011	0.1499	0.0029	142	3	135	1	97
9	82.7	96.4	2945.8	0.03	0.0519	0.0018	0.0519	0.0018	0.1702	0.0057	160	5	152	1	91
10	44.4	19.0	1697.6	0.01	0.0493	0.0018	0.0493	0.0018	0.1629	0.0058	153	5	153	1	94
11	76.9	140.4	2571.3	0.05	0.0543	0.0055	0.0543	0.0055	0.1816	0.0183	169	16	155	1	94
12	44.4	19.4	1707.6	0.01	0.0508	0.0014	0.0508	0.0014	0.1747	0.0044	163	4	159	1	96
13	154.5	175.5	7233.6	0.02	0.0512	0.0016	0.0512	0.0016	0.1379	0.0041	131	4	124.8	0.9	97
14	94.5	88.3	3701.4	0.02	0.0507	0.0012	0.0507	0.0012	0.1694	0.0039	159	3	154	1	90
15	67.9	31.7	2690.1	0.01	0.0508	0.0014	0.0508	0.0014	0.1644	0.0043	155	4	149	1	94
16	68.7	43.0	2863.4	0.02	0.0500	0.0015	0.0500	0.0015	0.1548	0.0044	146	4	143	1	99
17	98.5	277.6	4039.6	0.07	0.0574	0.0015	0.0574	0.0015	0.1780	0.0039	166	3	143	2	98
18	105.1	1181.4	4331.7	0.27	0.0624	0.0015	0.0624	0.0015	0.1929	0.0049	179	4	142	2	96
19	91.1	56.5	3525.2	0.02	0.0505	0.0012	0.0505	0.0012	0.1711	0.0037	160	3	157	1	91
MY618 弱变形花岗伟晶岩															
1	7.7	114.9	268.3	0.43	0.0544	0.0035	0.0544	0.0035	0.1703	0.0109	160	9	145	2	96
2	12.8	142.5	471.0	0.30	0.0614	0.0057	0.0614	0.0057	0.1866	0.0169	174	14	141	3	94
3	NULL	NULL	NULL	NULL	0.0540	0.0030	0.0540	0.0030	0.1759	0.0097	165	8	151	2	99
4	NULL	NULL	NULL	NULL	0.0781	0.0061	0.0781	0.0061	0.2722	0.0201	244	16	165	4	96
5	7.2	100.8	194.5	0.52	0.0485	0.0060	0.0485	0.0060	0.1752	0.0214	164	19	167	3	95
6	2.1	45.9	60.3	0.76	0.0808	0.0068	0.0808	0.0068	0.2933	0.0224	261	18	176	5	96
7	NULL	NULL	NULL	NULL	0.0852	0.0058	0.0852	0.0058	0.2798	0.0173	251	14	156	3	95
8	5.5	103.8	170.2	0.61	0.0566	0.0034	0.0566	0.0034	0.2001	0.0117	185	10	166	3	98
9	NULL	NULL	NULL	NULL	0.0624	0.0031	0.0624	0.0031	0.2107	0.0103	194	9	156	2	97
10	NULL	NULL	NULL	NULL	0.0622	0.0047	0.0622	0.0047	0.2044	0.0147	189	12	154	3	97
11	NULL	NULL	NULL	NULL	0.0511	0.0063	0.0511	0.0063	0.1797	0.0220	168	19	162	3	92
12	25.5	73.8	959.9	0.08	0.0517	0.0021	0.0517	0.0021	0.1648	0.0067	155	6	147	1	97
13	7.3	187.8	134.8	1.39	0.0615	0.0124	0.0615	0.0124	0.2183	0.0436	200	36	164	4	90
14	NULL	NULL	NULL	NULL	0.0721	0.0074	0.0721	0.0074	0.2731	0.0276	245	22	175	3	93
15	2.6	60.7	73.4	0.83	0.0647	0.0084	0.0647	0.0084	0.2216	0.0282	203	23	158	4	95
16	2.8	89.2	74.3	1.20	0.0773	0.0113	0.0773	0.0113	0.2473	0.0356	224	29	148	4	92
17	NULL	NULL	NULL	NULL	0.0564	0.0065	0.0564	0.0065	0.1903	0.0216	177	18	156	4	96
18	3.3	95.7	92.7	1.03	0.0574	0.0073	0.0574	0.0073	0.1937	0.0242	180	21	156	3	96
19	NULL	NULL	NULL	NULL	0.0625	0.0087	0.0625	0.0087	0.1984	0.0270	184	23	147	4	95
20	23.2	49.6	898.1	0.06	0.0531	0.0021	0.0531	0.0021	0.1774	0.0068	166	6	156	2	99
21	NULL	NULL	NULL	NULL	0.0813	0.0058	0.0813	0.0058	0.2626	0.0187	237	15	155	3	95
22	5.9	61.4	116.1	0.53	0.0461	0.0151	0.0461	0.0151	0.1440	0.0470	137	42	145	4	90
23	6.9	263.2	189.3	1.39	0.0531	0.0032	0.0531	0.0032	0.1728	0.0097	162	8	154	2	99
24	2.2	45.5	53.8	0.85	0.0822	0.0145	0.0822	0.0145	0.2728	0.0472	245	38	153	5	90

个阶段年龄对应的锆石呈短柱状或椭圆状,具有很好的岩浆环带,Th/U 值大于 0.5,为岩浆锆石。最后一组年龄对应的锆石呈短柱状,但没有岩浆环带,锆石内部呈海绵状,绝大部分锆石 Th/U 小于 0.1,为典型热液锆石。此外,锆石稀土蛛网图发现,岩浆锆石与热液锆石之间具有明显的轻稀土差别,表现为热液锆石更加富集轻稀土(图 8)。

MY251-1 采自于石城北郎房峪变形花岗岩岩脉,侵位于石城闪长岩体内,呈平行于面理面展布。该锆石 U-Pb 同位素年龄集中在 165~144 Ma,其中部分锆石加权平均年龄为 155.5±1.5 Ma,并发现了 202 Ma 的锆石年代学记录。此外,三颗锆石记录了 145.9±4.0 Ma 的岩浆结晶年龄。锆石呈圆柱状,具有很好的岩浆环带,Th/U 值大于 0.5,为岩浆锆石。锆石稀土蛛网图分布特征与 MY52-2 中岩浆锆石的稀土元素分布特征一致。

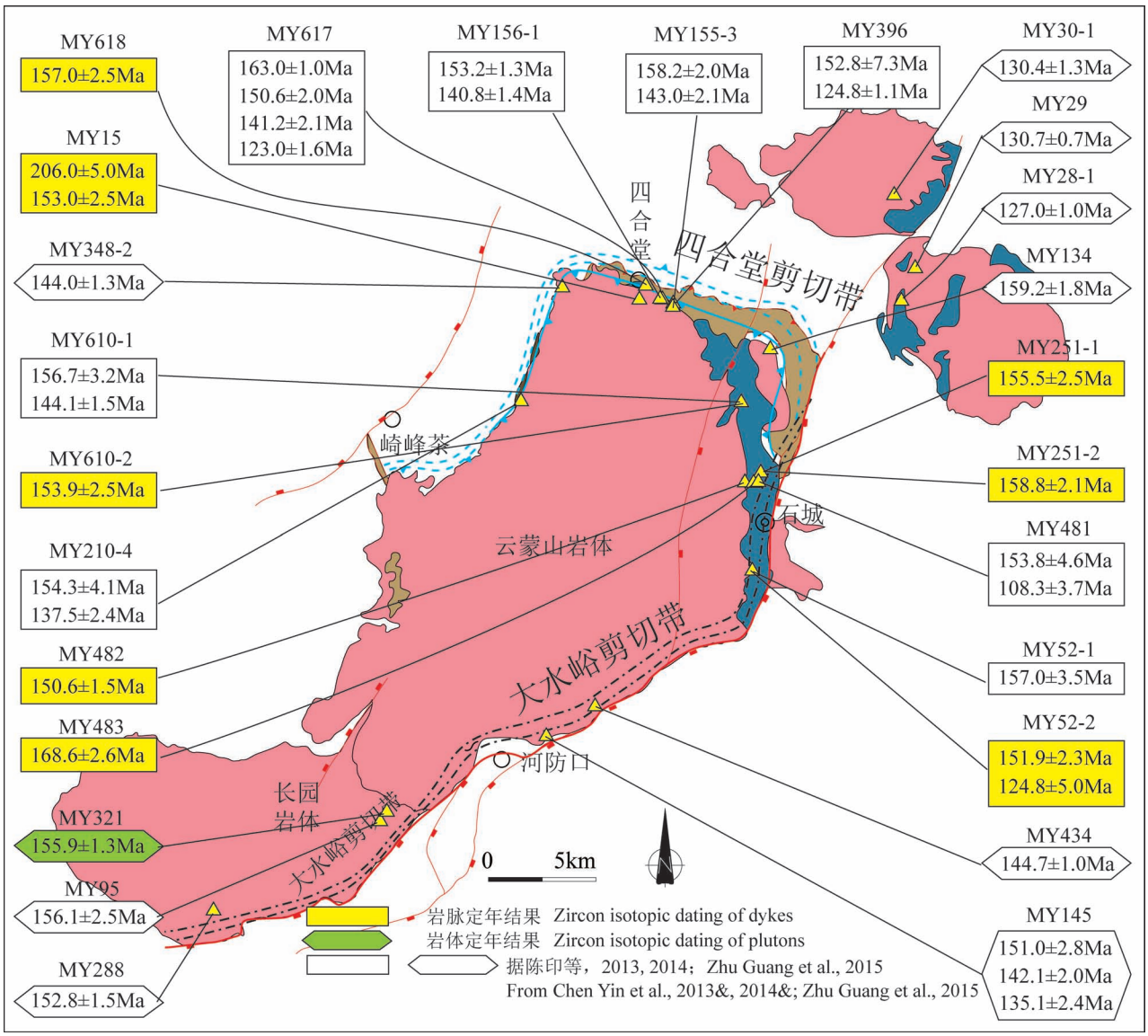


图 5 北京云蒙山地区岩体和岩脉锆石 U-Pb 定年结果

Fig. 5 U-Pb dating results of the zircons from plutons and dykes in Mount Yunmeng area, Beijing

MY251-2 采自于 MY251-1 相邻地区不同变形程度的花岗伟晶岩脉,呈布丁状展布。其锆石 U-Pb 同位素年龄分布范围为 181~141 Ma,其中加权平均年龄为 158.8±2.1 Ma。此外,四颗锆石记录了 145.2±5.8 Ma 的岩浆结晶年龄。该组锆石呈椭圆至圆柱状,具有较好的岩浆环带,Th/U 值相对其它锆石较大。锆石稀土元素除 La 和 Pr 元素有部分差异外,其它稀土元素具有一致的变化规律,轻、重稀土基本没有发生分馏,但蛛网图分布特征与其它样品差异较大(图 8)。这表明该组锆石的成因有别于其它锆石,或者受到了后期强烈改造。

MY321 采自于长园附近长园变形花岗闪长岩体。该锆石呈短柱状,具有很好的岩浆环带,Th/U 值大于 0.5,为典型的岩浆成因锆石,加权平均年龄为 159.9±2.3 Ma。锆石稀土元素表现为 Ce 的高异常,轻稀土元素弱亏损,重稀土元素弱富集。

MY482 采自于石城北郎房峪粗粒花岗岩脉,发生弱变形,并切割早期岩脉,与面理呈近垂直展布。该组锆石呈长柱状,岩浆环带不明显,多呈海绵状,Th/U 值变化范围较大 1.4~0.03,绝大多数小于 0.1,普遍遭受了后期热液的影响。同时稀土元素特征显示,热液锆石相对于岩浆锆石,轻稀土元素发生了强烈的分异作用,具有更高的轻稀土元素值,而重稀土元素基本一致。锆石 U-Pb 同位素年龄分布范

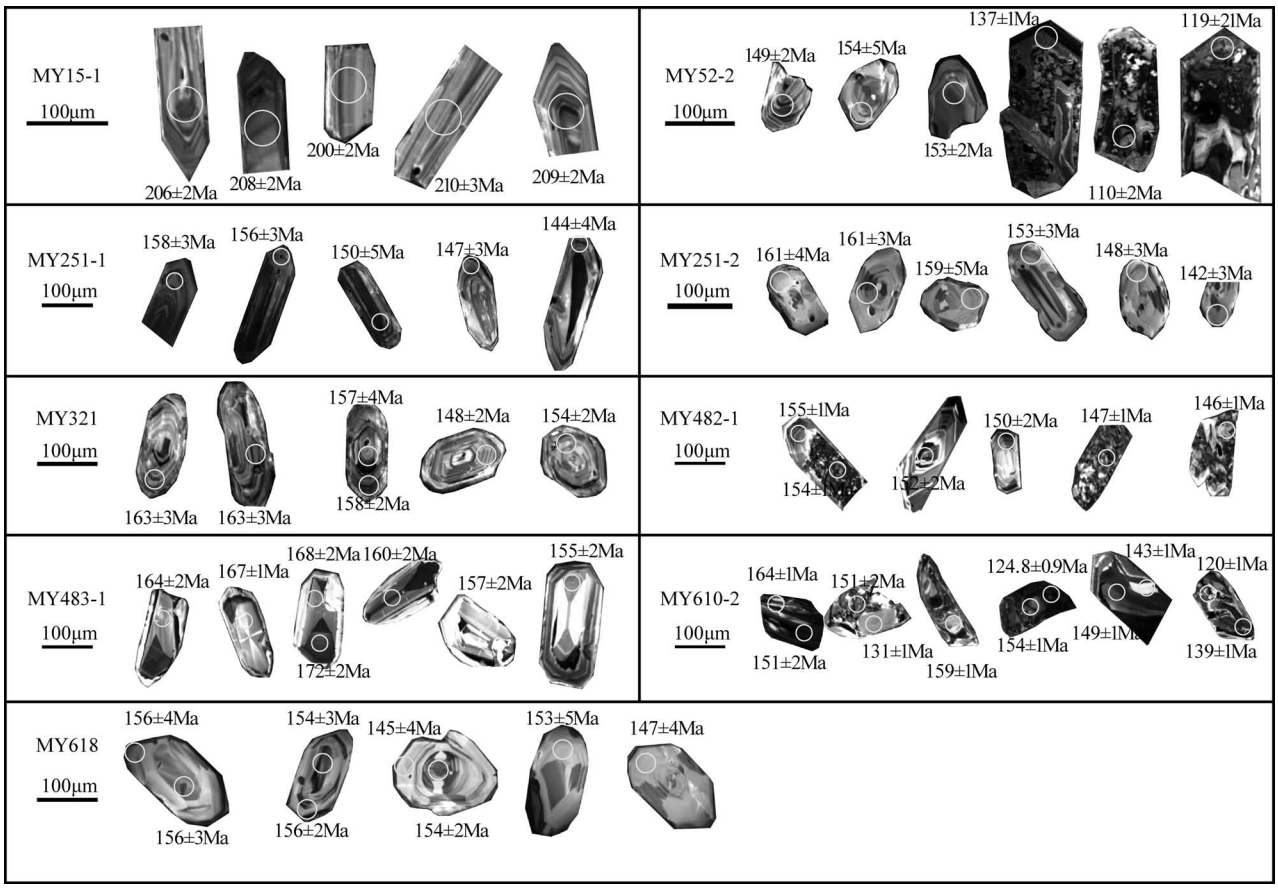


图 6 北京云蒙山地区岩体和岩脉锆石 CL 图像

Fig. 6 CL images of the zircons from plutons and dykes in Mount Yunmeng area, Beijing

围为 164~115 Ma,其中部分锆石加权平均年龄为 150.6±1.5 Ma。

MY483 采自于郎房峪地区糜棱岩化花岗岩脉,侵位于石城闪长岩体内,呈近平行于面理展布。该组锆石呈长柱状具有很好的岩浆环带,Th/U 值大于 0.7,为典型岩浆成因锆石。其锆石 U-Pb 同位素年龄分布范围为 178~92.5 Ma,其中部分锆石加权平均年龄为 168.6±2.6 Ma。各个锆石稀土元素含量之间没有大的差异,总体呈 Ce 高异常及轻稀土元素小于重稀土元素的特点。

MY610-2 采自于云蒙山岩基东北部捧河岩景区弱变形花岗伟晶岩脉,侵位于石城岩体内,并切割早期细粒花岗岩脉。该组锆石主要呈短柱状,部分具有岩浆环带,大部分受后期热液活动影响呈海绵状包裹残余岩浆环带,Th/U 值变化较大,绝大部分小于 0.1,具有热液锆石特征。该组锆石稀土元素蛛网图显示,各锆石之间轻、重稀土元素无巨大差异,没有明显的 Ce 异常,与 MY52-2 热液锆石稀土元素特征基本一致。锆石 U-Pb 同位素年龄分布范围为 164~120 Ma,部分锆石加权平均年龄为 153.9±2.5 Ma。此外,四颗锆石记录了 143.7±1.2 Ma 的岩浆结晶年龄;五颗锆石记录了 135~120 Ma 的热液锆石年龄。

MY618 采自于云蒙山岩基北部四合堂地区弱变形花岗伟晶岩,侵位于石城闪长岩体内,切割早期细粒花岗岩脉。该组锆石呈短柱状,具有很好的岩浆环带,大部分 Th/U 值大于 0.5,为岩浆成因锆石。锆石稀土元素轻稀土元素具有轻微差异外,总体分布特征与 MY52-2 岩浆锆石稀土元素特征基本一致。锆石 U-Pb 同位素年龄分布范围为 176~141 Ma,其中加权平均年龄为 157.0±2.5 Ma。此外,6 颗锆石记录了 146.2±1.6 Ma 的岩浆结晶年龄。

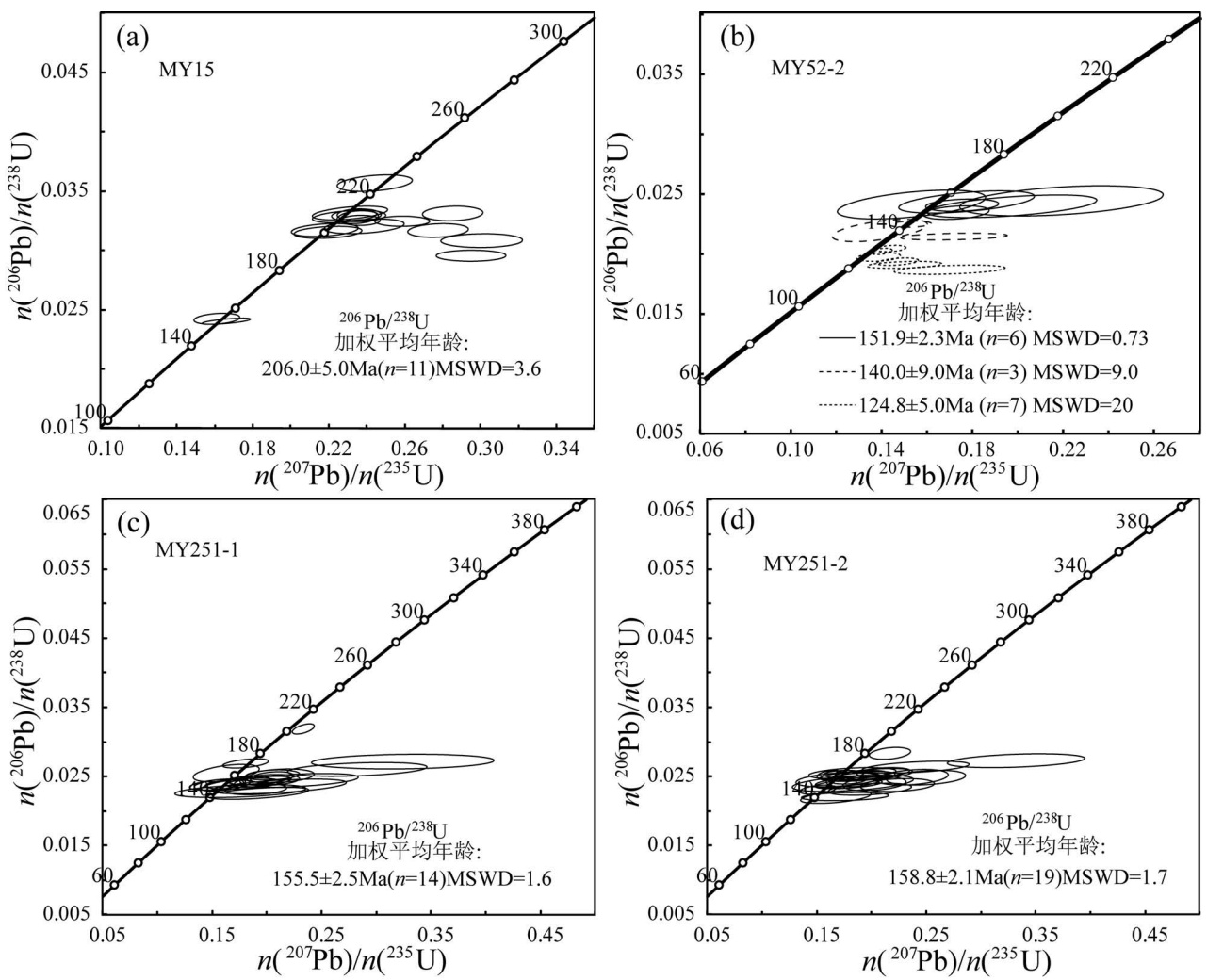
通过锆石年代学分析,本次工作发现,该地区最早的年代学记录为 206 Ma 的晚三叠世,最晚的时代为早白垩世晚期,基本代表了云蒙山地区主要的岩浆活动时代及构造运动时代。MY15 和 MY251-1 均

记录了 206 Ma 的晚三叠世年龄。由于该地区缺乏此时代岩浆活动,本文推测其代表了捕获锆石的年龄。考虑到岩脉侵位结晶过程中,可能会捕获大量围岩内的锆石,造成所测年龄代表了围岩的时代。本文认为 MY15 中 153 Ma 代表了石城岩体的结晶年龄。由于 MY52-2、MY251-1、MY251-2、MY482、MY483 及 MY610-2 发育于大水峪剪切带内,并侵位于石城岩体中(图 4),本文认为 151.9±2.3 Ma(MY52-2)、155.5±1.5 Ma(MY251-1)、158.8±2.1 Ma(MY251-2)、150.6±1.5 Ma(MY482)、168.6±2.6 Ma(MY483)、153.9±2.5 Ma(MY610-2)为捕获锆石的年龄,代表了围岩石城岩体结晶年龄;140±9.0 Ma(MY52-2)、145.9±4.0 Ma(MY251-1)、145.2±5.8 Ma(MY251-2)、143.7±1.2 Ma(MY610-2)代表了岩脉的结晶年龄;而 124.8±5.0 Ma(MY52-2)、135~120 Ma(MY610-2)为热液锆石的年龄,本文认为其代表了大水峪剪切带活动的时代。

3.3　单矿物$^{40}Ar/^{39}Ar$年代学分析

单矿物$^{40}Ar/^{39}Ar$定年样品主要围绕云蒙山岩基采取,且均为变形样品(图 9 和 10)。其中 MY19-5(黑云母)、MY41-6(黑云母)、MY163(黑云母)为加权平均年龄,MY255(角闪石)为坪年龄,MY255(黑云母)$^{40}Ar/^{39}Ar$测试结果较差,选择最小年龄进行地质解释。

MY19-5(黑云母)为四合堂地区逆冲型剪切带附近斜长角闪片麻岩样品,总气体年龄为 103.6 Ma,加权平均年龄 109.5±5.0 Ma(3~5 温阶,31%的^{39}Ar释放量),反等时线年龄为 121± 48 Ma。反等时线的 $n(^{40}Ar)/n(^{36}Ar)$ 初始比值为 173±180 Ma,小于现今大气氩标准值,可能受后期风化作用,Ar 的丢失造成年龄偏小。该样品坪年龄谱呈阶梯状,3~10 温阶加权平均年龄为 108.9 Ma,误差范围内与 3~5 温阶加权平均年龄基本一致,在误差范围内与总气体年龄一致,稍小于反等时线年龄,表明该



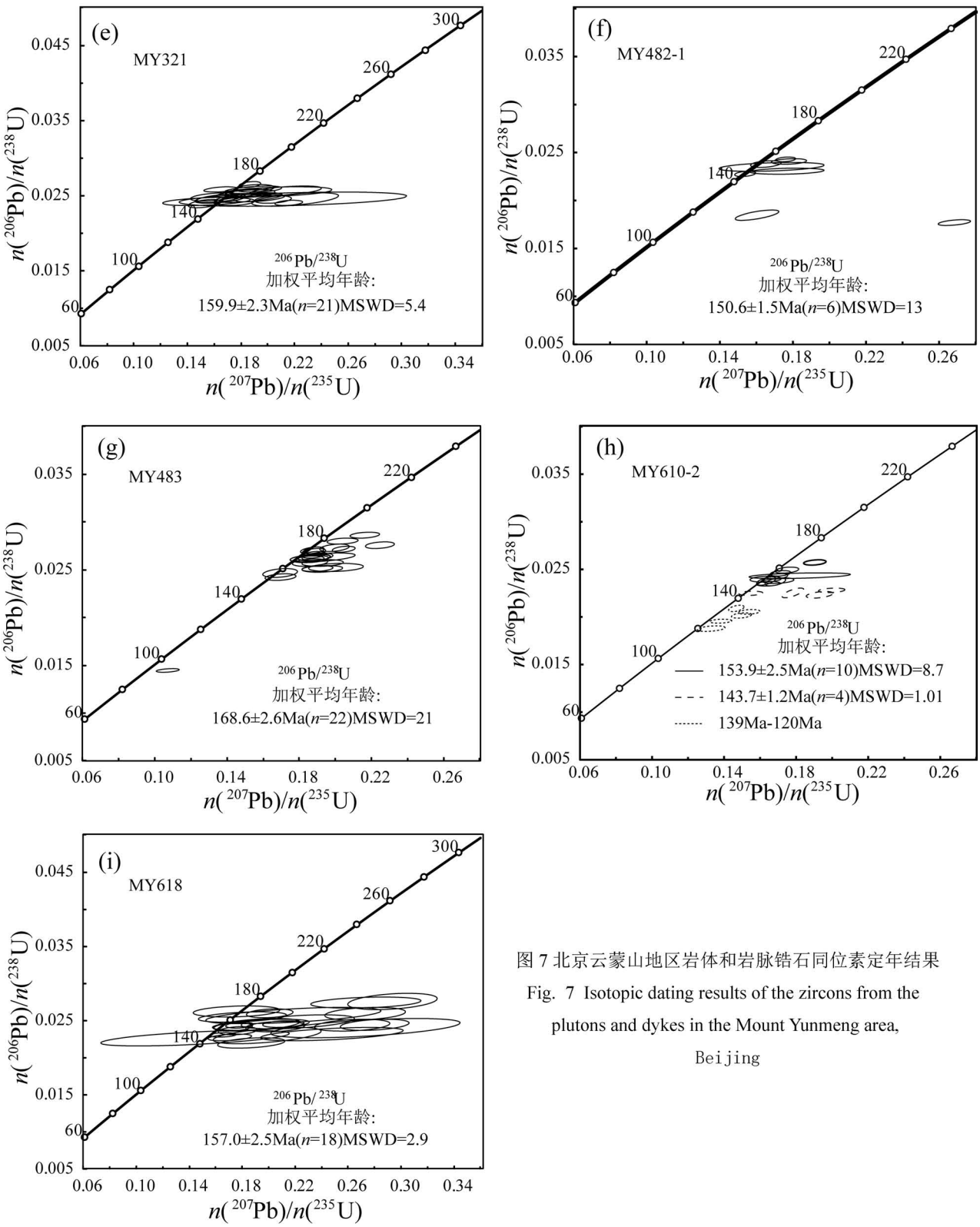


图 7 北京云蒙山地区岩体和岩脉锆石同位素定年结果

Fig. 7 Isotopic dating results of the zircons from the plutons and dykes in the Mount Yunmeng area, Beijing

地区后期经历的构造热事件扰动了黑云母$^{40}Ar/^{39}Ar$的封闭温度,造成黑云母坪年龄的变化。

MY41-6(黑云母)为梧桐壕地区斜长角闪片麻岩,总气体年龄为 117.4 Ma,加权平均年龄为 120.6 ±2.0 Ma(5~12 温阶,85% 的^{39}Ar释放量),反等时线年龄为 124.8± 4.9 Ma。反等时线的 $n(^{40}Ar)/$

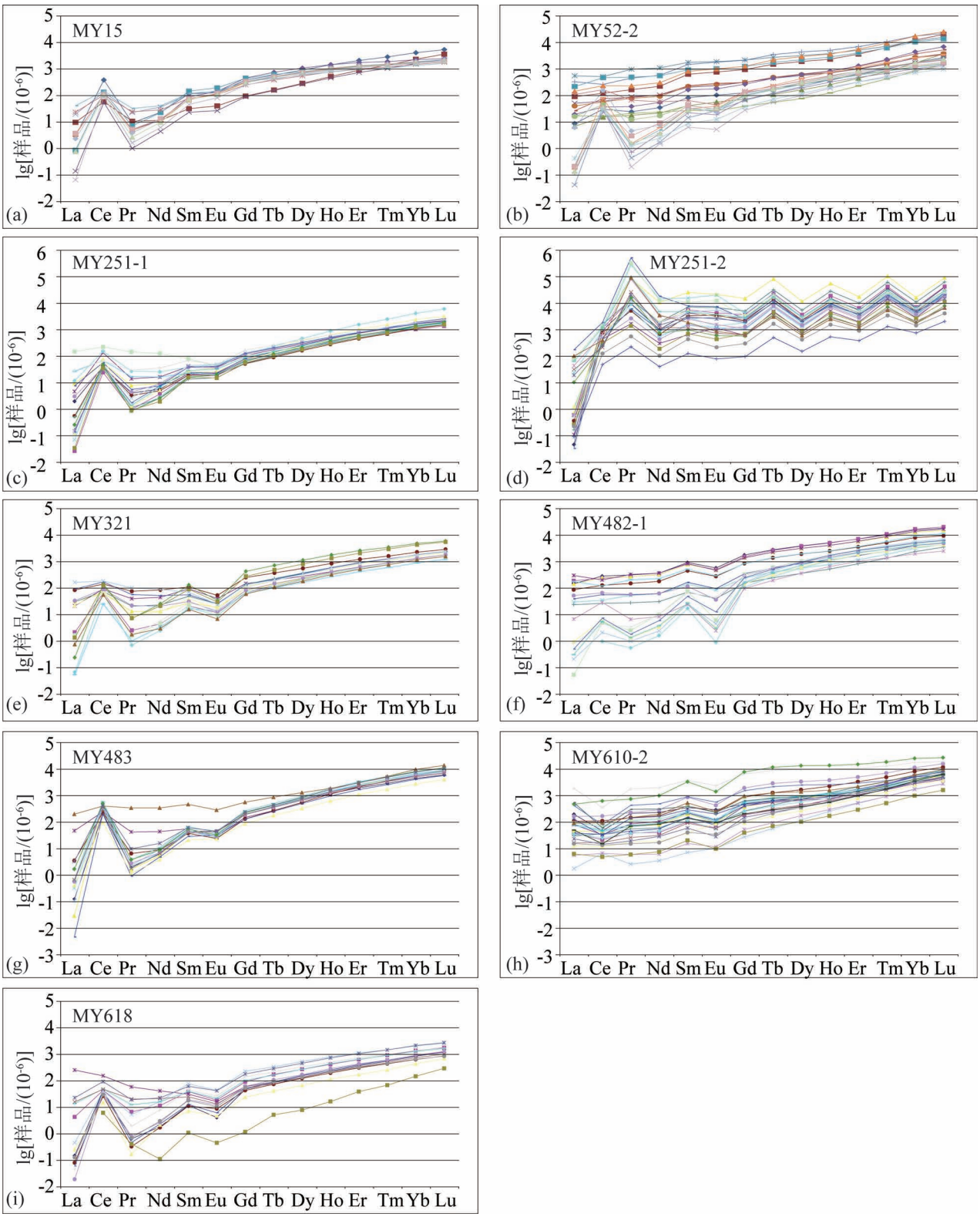


图 8 北京云蒙山地区岩体和岩脉锆石球粒陨石标准化稀土分配模式图

Fig. 8 Chondrite normalized REE patterns of zircons from the plutons and dykes in Mount Yunmeng area, Beijing

$n(^{36}Ar)$初始比值为 208±88 Ma,误差范围内基本与现今大气氩标准值一致。该样品加权平均年龄为 120.6±2.0 Ma 与附近 MY41-5(黑云母)的坪年龄 120.2 Ma 相一致(Zhu Guang et al., 2015)。

表 2 云蒙山岩基黑云母、角闪石等$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学数据

Table 2 Single mineral $^{40}Ar/^{39}Ar$ isotopic dating results of the biotite and hornblende from the pluton in Mount Yunmeng, Beijing

t(℃)	$\left[\frac{n(^{40}Ar)}{n(^{39}Ar)}\right]_m$	$\left[\frac{n(^{36}Ar)}{n(^{39}Ar)}\right]_m$	$\left[\frac{n(^{37}Ar)}{n(^{39}Ar)}\right]_m$	$\left[\frac{n(^{38}Ar)}{n(^{39}Ar)}\right]_m$	$\frac{n(^{40}Ar^*)}{n(^{39}Ar)}$	$n(^{39}Ar)$ ($\times10^{-14}$)	$n(^{39}Ar)$ (%)	年龄(Ma)	
								测值	±1σ
MY19-5 黑云母, W=29.36mg, J=0.006047, *WMPA*=109.5±5.0 Ma(3~5 温阶) Total age = 103.6 Ma									
700	53.5293	0.1632	0.1306	0.0525	5.3146	0.63	1.93	57.1	1.3
800	18.3017	0.0333	0.0344	0.0258	8.4481	6.33	21.5	89.88	0.89
840	12.926	0.0086	0.0144	0.0203	10.3679	4.66	35.9	109.7	1.1
880	12.6554	0.0072	0.0171	0.02	10.5347	2.74	44.37	111.4	1.1
930	13.1487	0.0102	0.0123	0.0209	10.1434	2.31	51.49	107.4	1.1
980	13.4281	0.0129	0.0259	0.0215	9.6275	2.32	58.67	102.1	1.1
1040	12.9717	0.0119	0.0433	0.0215	9.4521	4.62	72.94	100.3	1.1
1080	12.3527	0.0078	0.0154	0.02	10.0479	3.13	82.6	106.4	1.1
1140	11.9635	0.0038	0	0.019	10.8219	4.01	94.98	114.4	1.1
1200	11.9378	0.0022	0.0255	0.0187	11.2839	1.54	99.76	119.1	1.2
1400	15.4852	0.0149	0	0.0231	11.0802	0.08	100	117	6
MY41-6 黑云母, W=26.94mg, J=0.006535, *WMPA*=120.6±2.0 Ma(5~12 温阶) Total age = 117.4 Ma									
700	142.8669	0.4601	0.1106	0.1069	6.9031	0.29	0.83	79.6	2.7
750	32.0756	0.0828	0.026	0.0309	7.5936	1.5	5.09	87.37	0.95
800	15.3451	0.0201	0.0252	0.0181	9.4149	3.2	14.17	107.7	1.1
840	12.4828	0.0079	0.0115	0.0155	10.1381	3.56	24.25	115.7	1.1
880	12.2402	0.0058	0.0022	0.015	10.5223	2.28	30.71	120	1.2
920	12.3514	0.0062	0.0033	0.0149	10.5223	1.98	36.34	120	1.3
960	12.026	0.0055	0.023	0.0151	10.3986	1.98	41.96	118.6	1.3
1000	11.9621	0.0056	0.0173	0.0153	10.2952	3.1	50.74	117.5	1.2
1050	11.7135	0.004	0.0206	0.0148	10.5195	5.79	67.16	119.9	1.2
1100	11.6368	0.0032	0.0138	0.0146	10.6836	5.23	81.99	121.7	1.2
1150	11.6504	0.0028	0.004	0.0144	10.8208	4.65	95.19	123.3	1.2
1200	11.7467	0.0027	0.0219	0.0142	10.9586	1.48	99.37	124.8	1.4
1400	13.3178	0.0058	0	0.0127	11.5844	0.22	100	131.6	6
MY163 黑云母, W=29.36mg, J=0.005668, Tp=120.20±0.43 Ma(2~8 温阶) Total age =119.9 Ma									
700	28.4278	0.0784	0.6573	0.0348	5.295	0.29	0.91	53.3	2
800	15.8281	0.013	0	0.0211	11.9877	3.52	12.05	118.6	1.2
840	12.5932	0.0016	0.0198	0.0189	12.1257	6.47	32.5	119.9	1.2
880	12.3912	0.0009	0.0184	0.0187	12.128	6.23	52.21	119.9	1.2
920	12.4534	0.0012	0.0356	0.0185	12.088	3.37	62.87	119.6	1.2
980	12.7532	0.0021	0.0005	0.0188	12.1216	2.32	70.21	119.9	1.2
1040	13.1331	0.0029	0.0035	0.0192	12.2661	1.93	76.32	121.3	1.2
1100	12.6826	0.0015	0	0.0188	12.2414	3.39	87.03	121	1.2
1200	12.6895	0.0014	0	0.0186	12.2841	3.8	99.03	121.4	1.2
1300	17.1876	0.0034	0	0.0204	16.1773	0.31	100	158.3	2.6
MY255 角闪石, W=124.96mg, J=0.006448, *WMPA*=142.4±5.6(5~8 温阶) Total age =146.5 Ma									
700	394.9489	1.097	0	0.1474	70.7753	0	0.06	678	937
800	267.7433	0.721	0	0.1698	54.6819	0.12	1.5	545	23
900	76.2274	0.196	4.4817	0.0671	18.6993	0.08	2.5	205.4	7.5
1000	44.1828	0.096	0	0.0316	15.8117	0.04	3.03	175	14
1100	20.7558	0.0248	14.3146	0.0227	14.5976	0.32	6.97	162.3	2.3
1170	13.8631	0.0078	15.5476	0.0219	12.823	2.85	41.78	143.3	1.4
1200	14.0255	0.0095	14.2647	0.0216	12.3744	0.67	49.97	138.5	2.1
1300	13.5535	0.0066	15.1595	0.0209	12.8194	1.95	73.75	143.3	1.4
1400	17.6433	0.007	15.1805	0.022	16.8538	1.91	97.12	186.1	1.8
1430	35.9176	0.0131	11.9557	0.0243	33.2108	0.24	100	350	4.4

t(℃)	$\left[\frac{n(^{40}Ar)}{n(^{39}Ar)}\right]_m$	$\left[\frac{n(^{36}Ar)}{n(^{39}Ar)}\right]_m$	$\left[\frac{n(^{37}Ar)}{n(^{39}Ar)}\right]_m$	$\left[\frac{n(^{38}Ar)}{n(^{39}Ar)}\right]_m$	$\frac{n(^{40}Ar^*)}{n(^{39}Ar)}$	$n(^{39}Ar)$ ($\times10^{-14}$)	$n(^{39}Ar)$ (%)	年龄(Ma)	
								测值	±1σ
MY255 黑云母, W=30.09mg, J=0.006279, Total age =139.5 Ma									
740	746.3988	2.4467	0	0.0485	23.3934	3.25	15.5	247.2	8.3
780	93.1426	0.2772	0.2197	0.0684	11.2553	2.15	25.77	123.2	1.5
820	79.0857	0.2263	0.1005	0.0582	12.2107	2.14	36	133.3	1.4
860	55.3221	0.1468	0.1729	0.0432	11.9458	1.55	43.39	130.5	1.4
920	64.0577	0.1753	0.21	0.0486	12.263	1.21	49.15	133.8	1.6
1000	46.1312	0.1179	0.0965	0.0378	11.3035	2.29	60.05	123.7	1.5
1070	15.8952	0.0205	0.1764	0.0185	9.8347	3.28	75.71	108.1	1.1
1140	13.0704	0.0122	0.3021	0.0168	9.4878	3.14	90.71	104.4	1.2
1200	13.4493	0.0116	0	0.0158	10.0185	0.94	95.17	110.1	1.9
1300	14.1174	0.0117	0.0452	0.0161	10.6446	0.8	98.99	116.7	2.8
1400	24.3713	0.0157	1.0003	0.018	19.8273	0.21	100	211.7	6.1

MY163(黑云母)来自于四合堂地区韧性剪切带内部糜棱岩化斜长角闪岩,总气体年龄为 119.9 Ma,坪年龄为 120.20±0.43 Ma(2~9 温阶,97% 的 ^{39}Ar释放量),反等时线年龄为 120.36±0.73 Ma。反等时线的 $n(^{40}Ar)/n(^{36}Ar)$初始比值为 282±12 Ma,与现今大气氩标准值一致。该样品总气体年龄、坪年龄、反等时线年龄相一致,具有很好的地质意义。

MY255(角闪石)采自于云蒙山岩体与石城岩体接触部位韧性剪切带内。总气体年龄为 146.5 Ma,加权平均年龄 142.4±5.6 Ma(5~8 温阶,53% 的 ^{39}Ar 释放量),反等时线年龄为 144.1± 1.3 Ma。反等时线的 $n(^{40}Ar)/n(^{36}Ar)$初始比值为 273±110 Ma,误差范围内与现今大气氩标准值一致。

MY255(黑云母)没有很好的坪年龄和加权平均年龄,其中相对稳定温阶中,133.8~104.4 Ma,可能代表了大水峪剪切带活动的时代。

4　讨论

云蒙山地区在中生代经历了多期岩浆活动,并发育两期近垂向的韧性构造运动。

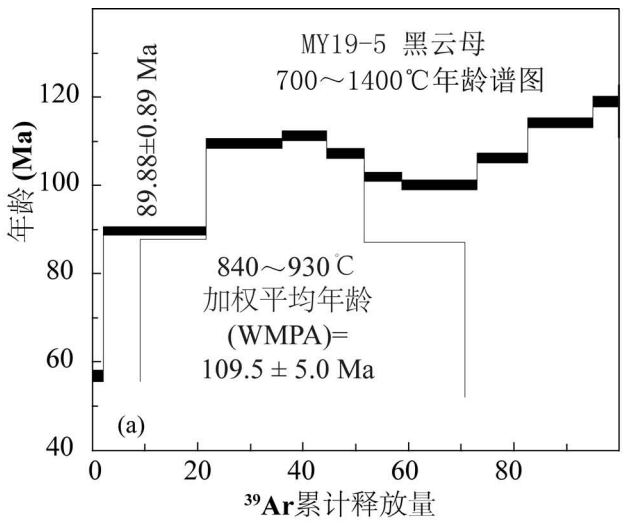
4.1　岩浆活动

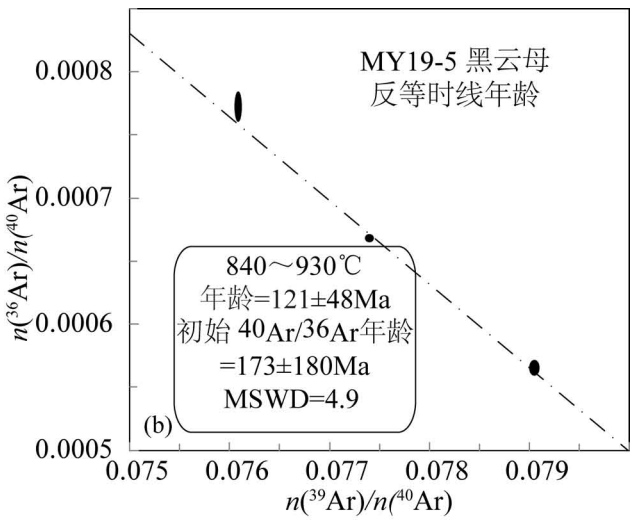
在晚三叠世(206 Ma),云蒙山地区可能经历了一次岩浆活动(图 11),但野外并未找到出露地表的岩体。这一岩浆锆石年代学记录与华北克拉通北缘该时期的岩浆活动具有很好的对应关系(图 12),共同指示了华北克拉通在印支运动后期的后造山伸展,并发育岩浆活动。此外,前人在喀喇沁地区(210 Ma,林少泽等,2013)、天津盘山地区(208~203 Ma,杨富全等,2007)及山东半岛地区(215~205 Ma,于学峰等,2012)均发现了早中生代岩浆活动,并认为 270~210 Ma 期间在华北克拉通北缘发育的岩浆活动,由北向南时代变新(Wang Yu et al.,2013)。该期次岩浆活动与华北克拉通与西伯利亚板块碰撞造山作用所引起的地壳加厚、后造山伸展及华北克拉通岩石圈拆沉作用有关(张拴宏等,2010;杨进辉等,2009)。因此,云蒙山地区 206 Ma 的锆石年代学记录代表了该地区中生代最早的岩浆活动记录,体现了华北克拉通与西伯利亚板块碰撞的远程效应。

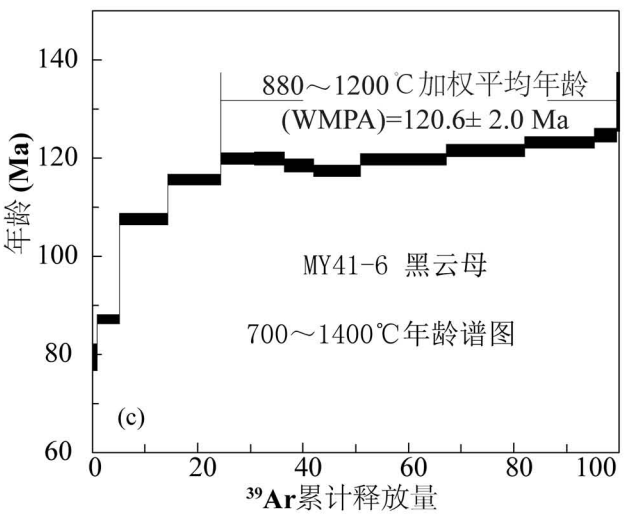
在晚侏罗世,云蒙山地区发育大量的侵入岩和火山岩(图 1、10 和 11)。结合已有研究成果(陈印等,2013, 2014;Zhu Guang et al.,2015;图 1),本次工作对云蒙山地区中生代侵入岩的结晶时代进行了新的分析和整理。侵入岩主要包括晚侏罗世的沙陀子花岗岩岩体(159~151 Ma)、石城闪长岩岩体(169~151 Ma)、长园花岗闪长岩岩体(156~151 Ma)(图 1 和图 4)。火山岩主要为分布于云蒙山岩基西侧四海盆地内的中—晚侏罗世髫髻山组火山岩(图 1,赵越等,2004;张岳桥等,2007)。此外,裴磊和刘俊来(2015)通过对云蒙山岩基北部大量岩脉的年代学研究,同样发现了大量晚侏罗世的岩浆锆石年龄,170~150 Ma。在晚侏罗世,由于受多向挤压汇聚作用的影响,华北克拉通开始失稳,在边缘开始发生克拉通破坏,并伴随大量的岩浆活动(董树文等,2000,2007)。对燕山褶断带内岩浆活动的研究,进一步证实了燕山地区在晚侏罗世处于伸展背景下,并伴随着华北克拉通岩石圈的减薄(吴福元等,2003;杨富全等,2003;Gao Shan et al.,2004;张必龙等,2011; Zhang Bilong et al., 2012; 许文良等,2013),且得到了华北克拉通北缘晚中生代盆地演

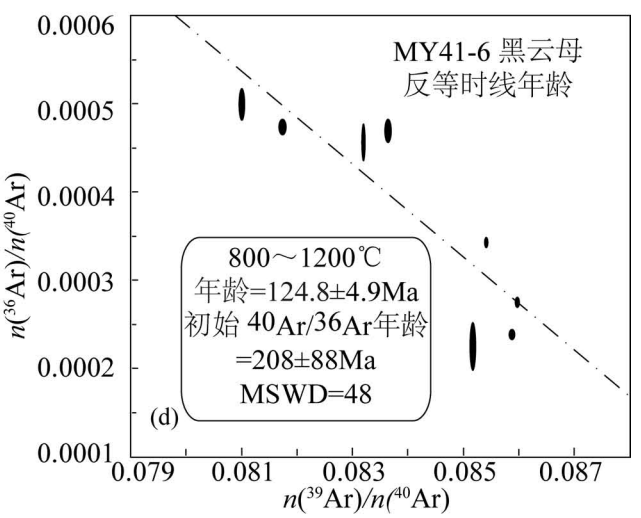
化的佐证(孟庆任等,2002;邵济安等,2003;武广等,2003)。因此,相对于三叠纪匮乏的岩浆活动,云蒙山地区在中—晚侏罗世开始出现强烈的岩浆活动,进入构造热活动活跃期。

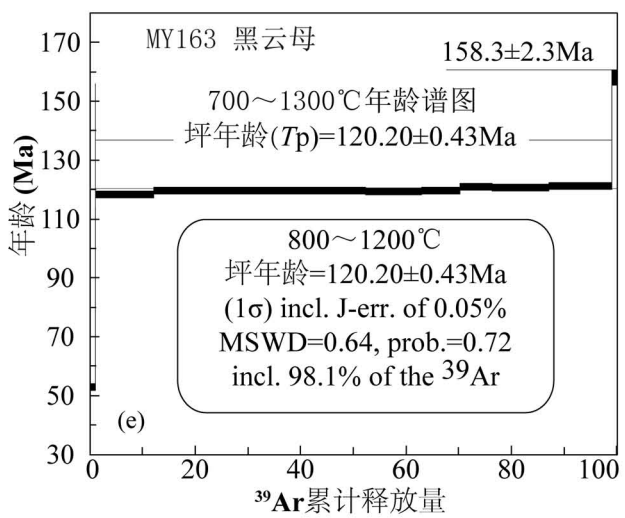
在早白垩世,云蒙山地区表现为强烈的岩浆活动和变质核杂岩的发育(图 12)。在云蒙山地区,出露的早白垩世岩体,包括云蒙山花岗岩岩基(146~140 Ma)、冯家峪—西白莲峪花岗岩岩体(130 Ma)、冯家峪—西白莲峪闪长岩岩体(127 Ma)(图 4 和 11),大东沟花岗岩体(127 Ma,Davis et al., 1996)。

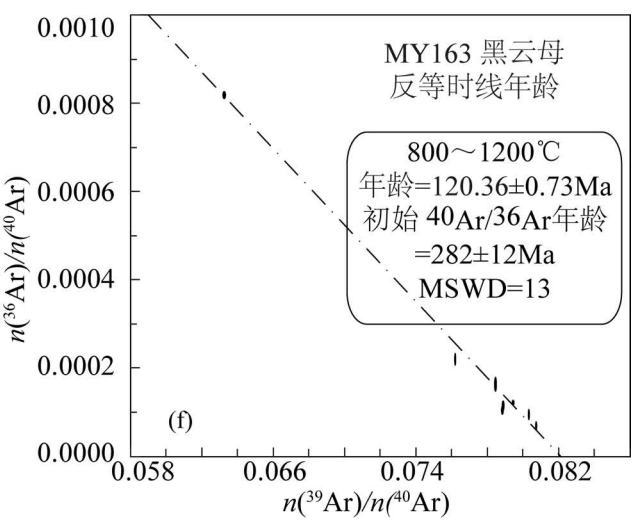


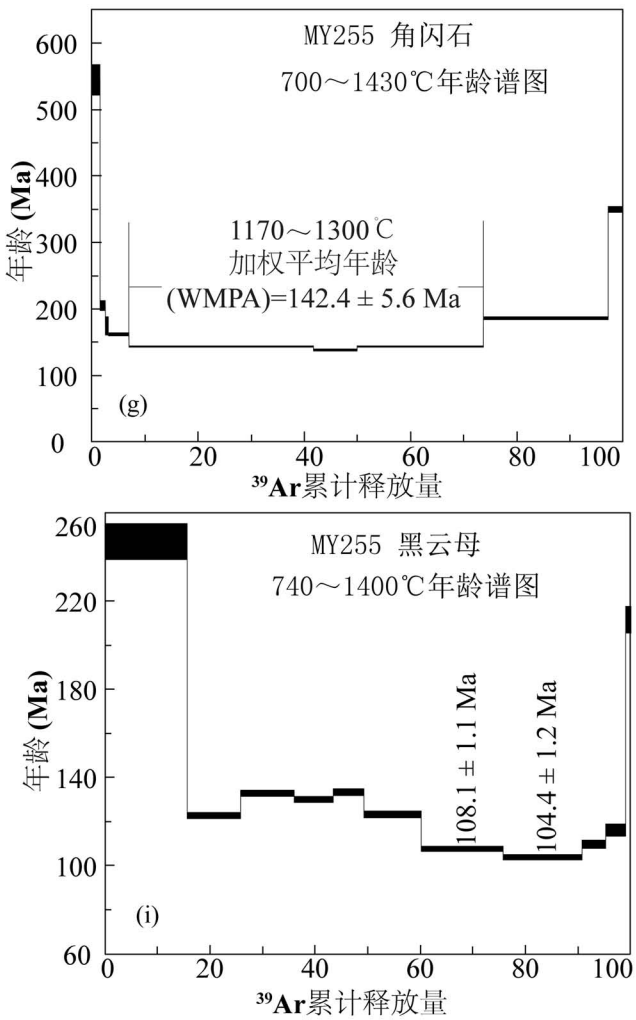












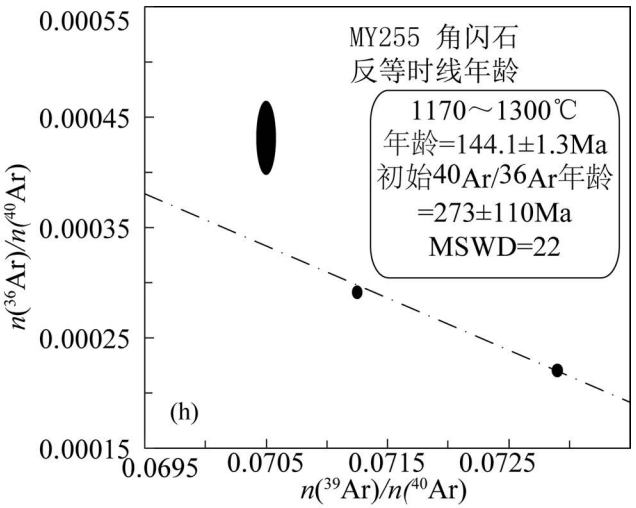


图 9　云蒙山岩基黑云母、角闪石等 ^{39}Ar/^{40}Ar同位素定年结果

Fig. 9　^{39}Ar/^{40}Ar isotopic dating results of the biotite and hornblende from the pluton in Mount Yunmeng, Beijing

此外,在冯家峪地区,沿河防口断层先后发育了花岗岩体和闪长岩体,本文认为,受断层切割深度的影响,导致不同深度源区的岩浆上涌侵位并出露地表。基于前人对华北克拉通破坏的研究,早白垩世作为华北克拉通破坏的峰期,区域上伴随着大量的岩浆活动和变质核杂岩的发育(Wang Tao et al.,2012;Zhu Rixiang et al., 2012b;林伟等,2013;Zhu et al.,2015)。同时,燕山褶断带内发育了大量早白垩世张家口组/义县组火山岩(邵济安等,2003;赵越等,2004;杨进辉等,2006),进一步指示华北克拉通北缘经历了强烈的岩浆热活动。因此,云蒙山地区早白垩世的岩浆活动为华北克拉通峰期破坏的产物。在此之后,该地区进入稳定伸展阶段,在云蒙山的东南部发育大规模沉积盆地,并缺少岩浆活动。

4.2　构造运动

云蒙山地区中生代构造运动主要表现为早侏罗世岩浆活动的间断、早白垩世早期四合堂逆冲型韧性剪切带及早白垩世云蒙山变质核杂岩的发育。

在早侏罗世(约 190 Ma),云蒙山地区明显缺乏岩浆活动(图 11 和 12),且区域上处于挤压抬升剥蚀状态。虽然云蒙山地区在该时期目前未发现直接的构造运动证据,但在区域上,燕山地区依然发育了构造挤压活动,尤其在云蒙山北部的承德地区。通过对燕山褶断带的研究,郑亚东(2000)认为在燕山褶断带内具有早—中侏罗世向南的逆冲作用。Davis 等(2001)指出,在中侏罗世(180 Ma)之前,冀北地区经历了一次向南的逆冲推覆和褶皱作用,在承德地区,主要表现为“无名逆冲推覆断层”。而此前,赵越(1990)认为该断层为代表“印支期”向南逆冲的平泉—古北口断层。此外,在晚三叠世—早侏罗世,下板城地区经历了强烈的缩短变形(Meng Qingren et al. 2014)。华北克拉通北缘在晚三叠世—早侏罗世(210~180 Ma)处于抬升剥蚀阶段,并进一步得到了马寅生等(2002)、邓晋福等(2004)和 Wang Yu 等(2013)的认可。这表明华北克拉通北缘在早侏罗世主要表现为挤压构造,而在云蒙山地

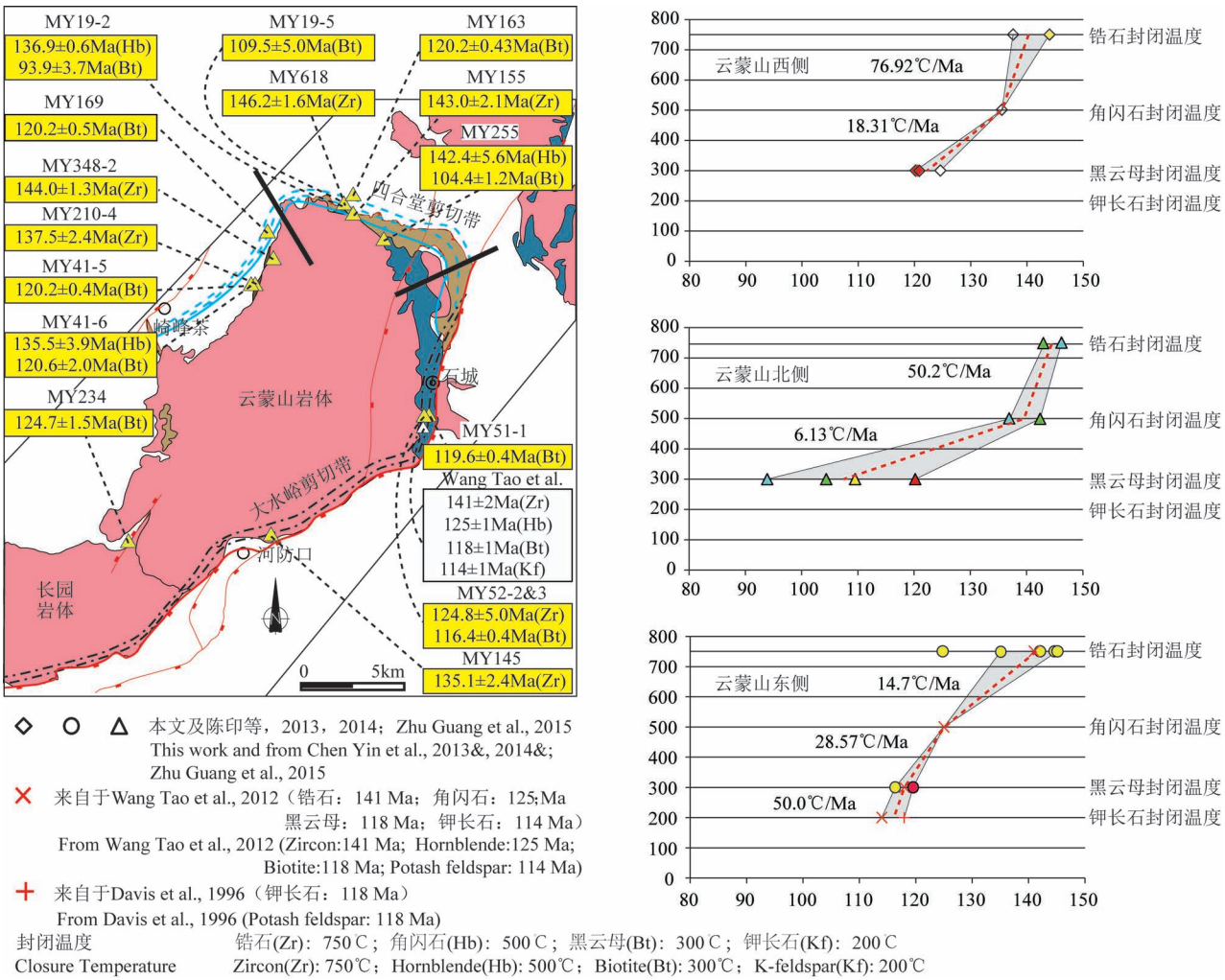


图 10 云蒙山岩基黑云母、角闪石等$^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年结果和冷却速率

Fig. 10 Biotite and hornblende $^{40}Ar/^{39}Ar$ isotopic dating results and the cooling rate of the Yunmengshan batholith

区主要表现为岩浆活动的缺乏。

在早白垩世早期，云蒙山地区发育了逆冲型四合堂剪切带（图 12）。根据四合堂剪切带内矿物重结晶特征，四合堂剪切带活动的温度为 500～650℃（陈印等，2013），与角闪石的$^{40}Ar/^{39}Ar$ 封闭温度一致（Hacker et al.，1995）。因此，本文认为此次四合堂剪切带内获得的角闪石$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄能够代表该剪切带活动的时间。其中，采自于云蒙山北部的 MY255（角闪石）记录了四合堂剪切带抬升至角闪石封闭温度的时间 142.4 Ma。此外，Zhu Guang 等（2015）指出云蒙山西部梧桐壕地区 MY41-6（角闪石）$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄的时代为 135.5 Ma。作者早期对四合堂剪切带内同构造岩脉的锆石年代学研究表明，四合堂剪切带活动的时间为 143～138 Ma（陈印等，2013）。因此，结合$^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年结果，本次工作重新厘定四合堂剪切带活动的时间为 143.0～135.5 Ma。通过野外构造特征及显微特征研究表明，四合堂剪切带为一上盘向 SSW 运动的逆冲型剪切带（Davis et al.，1996 和 2001；陈印等，2013），并在区域上与华北克拉通北缘该时期的构造运动特征相一致。例如，包头—呼和浩特地区在晚侏罗世及早白垩世均发生了近 S—N 向挤压的逆冲推覆构造（陈志勇等，2002）。此外，在华北克拉通北缘发生早白垩世 NW—SE 向拉伸之前，医巫闾山和喀喇沁地区均发生了 NE—SW 向运动的构造事件（Zhang Bilong et al.，2012；林少泽等，2014；李建波等，2017）。这些构造现象均指示华北克拉通北缘在早白垩世的构造运动方向主要为 NE—SW 向，深受北部鄂霍茨克洋关闭和东部古太平洋板块向华北克拉通斜向俯冲的影响。综上所述，本文认为逆冲型四

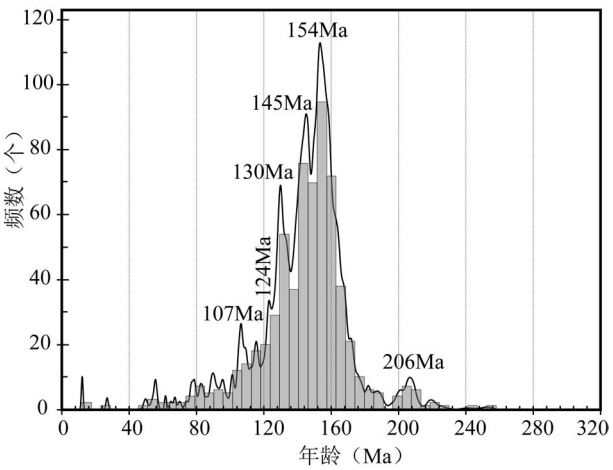


图 11 云蒙山地区中生代锆石 U-Pb 定年年龄谱图

Fig. 11 Mesozoic zircon U-Pb dating pattern in the Mount Yunmeng area

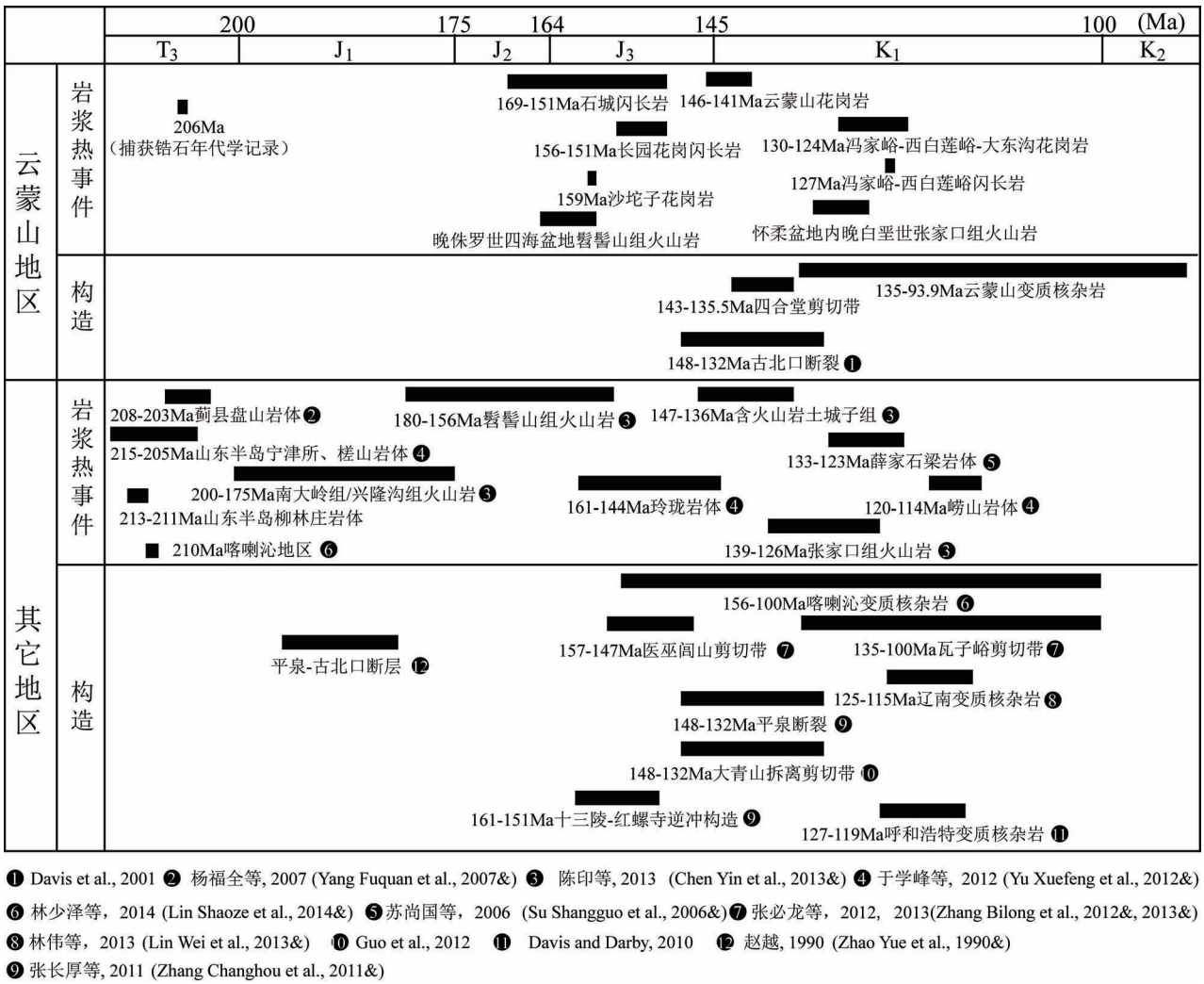
合堂剪切带发育于 143.0~135.5 Ma,造成了该地区地壳的加厚,为后期变质核杂岩的发育提供了前提条件,是鄂霍茨克洋关闭和古太平洋板块斜向俯冲共同作用的产物。

在早白垩世(约 130 Ma),受云蒙山变质核杂岩发育影响,该地区出现强烈的岩浆活动(图 11 和 12)和韧性伸展运动。大水峪剪切带作为该变质核杂岩的主拆离剪切带,上盘向 SE 运动(Zheng Yadong et al., 1988,陈印等,2014)。在变质核杂岩发育后期均衡隆升阶段,云蒙山岩基的东侧和西侧分别近对称发育脆性断层(河防口断层和崎峰茶—琉璃庙断层)(图 1)。本文通过对云蒙山周边岩脉锆石年代学的研究发现,部分锆石为热液锆石,记录了构造热活动的时间(图 4)。结合作者早期的研究成果及锆石年代学研究表明,本文认为大水峪剪切带活动的时间为 135~108 Ma(图 4)。此外,锆石分布频谱图指示,云蒙山地区在约 107 Ma 具有较高的峰值,均为热液锆石年龄(图 11,附表 1)。鉴于该地区未发现 107 Ma 岩浆活动,本文认为这些热液锆石记录了剪切带活动的时间。据剪切带内矿物重结晶特征分析表明,大水峪剪切带活动的温度为 300~520℃,低于四合堂剪切带活动的温度(陈印等,2014),下限与黑云母的的$^{40}Ar/^{39}Ar$ 封闭温度一致(Hacker et al.,1995)。而本次工作及作者前期工作表明,云蒙山岩体周边黑云母$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为 125~93.9 Ma(图 10),其中大水峪剪切带内黑云母$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄为 119.6~116.4 Ma。因此,通过对云蒙山岩体周围单矿物$^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年及热液锆石年代学研究表明,云蒙山变质核杂岩的活动时间为 135~93.9 Ma,而大水峪剪切带的活动时间为 135~108 Ma。此外,在该地区北部的冯家峪地区,发育该时期的花岗岩体(130 Ma)及闪长岩体(127 Ma)(图 4),可能代表了变质核杂岩发育期的核部岩体。花岗岩体的时代稍早于闪长岩体的原因,本文推测主要受变质核杂岩主拆离断层切割深度的影响。云蒙山变质核杂岩活动的时间,与华北克拉通内大量变质核杂岩发育的时间相一致,为华北克拉通大规模破坏及岩石圈减薄的结果(Zhu Guang et al., 2012a;Zhu Rixiang et al., 2012b;林伟等,2013;Zhu Guang et al., 2015)。

4.3 云蒙山岩基周边冷却史演化

根据所得岩浆锆石的 U-Pb 年龄及角闪石和黑云母$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄,并结合作者前期研究成果及前人的工作(Davis et al., 1996; Wang Tao et al., 2012),本次工作构建了云蒙山岩基周边的冷却曲线(图 10)。其中锆石年龄选择与单矿物样品相邻区域岩基或岩脉锆石 U-Pb 年龄。

由于受到四合堂剪切带和大水峪剪切带对云蒙山岩基的影响,云蒙山岩基周边的冷却速率在不同的阶段呈现不同的冷却速率。其中云蒙山岩基的北侧和西侧主要受四合堂剪切带的影响。由于四合堂剪切带活动时间为 143~135.5 Ma,且变形温度为 500~650 ℃,本文认为从锆石封闭温度到角闪石封闭温度反映了该阶段的冷却速率。云蒙山西侧、北侧和东侧在该阶段的冷却速率分别为 76.92℃/Ma、50.2℃/Ma 和 13.7℃/Ma。这显示西侧和北侧受四合堂剪切带活动影响较大,具有较高的冷却速率。而东侧主要受后期大水峪剪切带活动的影响,在该阶段冷却速率较小。此外,大水峪剪切带活动的时间为 135~108 Ma,且变形温度为 300~520℃。所以角闪石封闭温度至黑云母封闭温度区间的冷却速率基本反映了大水峪剪切带活动期间的冷却速率。兼之钾长石具有更小的封闭温度,能进一步反映云蒙山变质核杂岩活动晚期的冷却速率。本次工作显示在大水峪剪切带活动期间,云蒙山岩基西侧、北侧和东侧的冷却速率分布为 18.31℃/Ma、6.13℃/Ma 和 28.57℃/Ma,云蒙山变质核杂岩晚期的冷却速率为 50.0℃/Ma。受云蒙山变质核杂岩发育的影响,东侧拆离剪切带(大水峪剪切带)的发育导致东侧抬升最大,冷却速率最大。而西侧受均衡隆升的影响,相较于北侧具有更大的冷却速率,而变质核杂岩发



❶ Davis et al., 2001 ❷ 杨福全等, 2007 (Yang Fuquan et al., 2007&) ❸ 陈印等, 2013 (Chen Yin et al., 2013&) ❹ 于学峰等, 2012 (Yu Xuefeng et al., 2012&)
❻ 林少泽等, 2014 (Lin Shaoze et al., 2014&) ❺ 苏尚国等, 2006 (Su Shangguo et al., 2006&) ❼ 张必龙等, 2012, 2013(Zhang Bilong et al., 2012&, 2013&)
❽ 林伟等, 2013 (Lin Wei et al., 2013&) ❿ Guo et al., 2012 ⓫ Davis and Darby, 2010 ⓬ 赵越, 1990 (Zhao Yue et al., 1990&)
❾ 张长厚等, 2011 (Zhang Changhou et al., 2011&)

图 12 云蒙山地区及华北克拉通北缘中生代岩浆—构造事件

Fig. 12 Mesozoic magmatic and tectonic events in the Mount Yunmeng area and the northern margin of the North China Craton

育的晚期主要受脆性拆离断层(河防口正断层)影响,切割早期韧性构造,并具有很大的断距。因此,变质核杂岩发育晚期的冷却速率更大。

总之,云蒙山岩基侵位以后,北侧和西侧受四合堂剪切带的影响最先冷却至角闪石封闭温度,之后进入相对缓慢的冷却阶段。云蒙山岩基东侧早期受四合堂剪切带影响较小,自云蒙山岩基侵位后,经历了相对缓慢的冷却。但受后期受大水峪剪切带影响,在 125 Ma 之后,该地区进入快速冷却阶段。云蒙山岩基周边冷却史的演化进一步表明,该地区东南侧抬升幅度最大,西侧次之,北侧最小。这一结果与云蒙山变质核杂岩拆离剪切带南部以韧性构造出露,往北逐渐转变为脆性构造的野外变形特征相一致(陈印等,2014)。

5 结论

(1)本次工作通过岩体和岩脉锆石 U-Pb 定年,重新整理了云蒙山地区岩体的时代。沙陀子岩体侵位结晶时代为 159~151 Ma,石城岩体为 169~151 Ma,长园岩体为 156~151 Ma,云蒙山岩基为 146~141 Ma;冯家峪和西白莲峪花岗质岩体为 130~124 Ma;冯家峪闪长质岩体为 127 Ma;大东沟花岗质岩体为 127 Ma。

(2)云蒙山地区经历了三期重要的岩浆活动:晚三叠世、晚侏罗世和早白垩世。其中,206 Ma 为捕获岩浆锆石年龄,为晚三叠世华北克拉通与西伯利亚板块碰撞造山的后造山伸展产物。晚侏罗世岩浆活动在华北克拉通北缘广泛发育,为板块多向汇聚的产物。早白垩世岩浆活动为华北克拉通峰期破

坏的产物。

(3)云蒙山地区经历了三次重要的构造事件。早侏罗世,位于燕山褶断带中段的云蒙山地区处于隆起区,表现为区域性角度不整合,并以挤压运动为主,缺乏岩浆活动。在早白垩世早期(143~135.5 Ma),云蒙山岩基北缘发育逆冲型四合堂剪切带。在早白垩世(135~93.9 Ma),云蒙山地区发育以东南侧大水峪剪切带为主拆离剪切带的变质核杂岩。

(4)本文通过角闪石和黑云母$^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年,并结合锆石定年结果,得到了云蒙山岩基周边的冷却史。云蒙山岩基的北侧和西侧,早期受四合堂剪切带影响,具有较高的冷却速率,而晚期变质核杂岩发育阶段,受大水峪剪切带影响较小,处于缓慢隆升阶段,具有较小的冷却速率。云蒙山岩基的东侧,早期受四合堂剪切带影响较小,具有较小的冷却速率,以缓慢的均衡隆升为主,而晚期受大水峪剪切带强烈活动影响,具有较大的冷却速率,为快速隆升阶段。

感谢:感谢中国地质大学(武汉)地质过程与矿产国家重点实验室和中国地质科学院地质研究所$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学实验室在实验测试方面的帮助。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "**&**" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "**#**" is in Chinese without English abstract)

陈文,李曙光,张彦,刘新宇. 2003. 苏鲁超高压变质带东海青龙山高压正片麻岩中白云母的$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学研究. 地质论评, 49(5):537~543.

陈文, 张彦, 张岳桥, 金贵善,王清利. 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据. 岩石学报, 22(4): 867~872.

陈印, 朱光, 姜大志, 张必龙. 2013. 四合堂剪切带活动时代及其对燕山运动 B 幕时间的限定. 地质学报, 87(3): 295~310.

陈印, 朱光, 姜大志, 林少泽. 2014. 云蒙山变质核杂岩的变形规律与发育机制. 科学通报, 59: 1525~1541.

陈志勇, 李玉玺, 王新亮, 杨帅帅, 黄占起. 2002. 包头—呼和浩特北部地区逆冲推覆构造. 地质通报, 21(4~5): 251~258.

邓晋福, 苏尚国, 赵国春, 刘翠. 2004. 华北燕山造山带构造要素组合. 高校地质学报, 10(3): 315~323.

董树文,邓晋福. 2000. 论东亚大陆的构造翘变:燕山运动的全球意义. 地质论评,46(1):8~13.

董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡建民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报, 81(11): 1449~1461.

李建波,郭磊,鲁勇花,曾涛. 2017. 华北克拉通北缘医巫闾山韧性剪切拆离带的运动学涡度与韧性减薄量. 地质论评,63(6): 1429~143.

林少泽, 朱光, 严乐佳, 宋利宏, 刘备. 2013. 燕山构造带晚古生代挤压变形事件的构造与年代学证据. 科学通报, 58(34): 3597~3609.

林少泽, 朱光, 宋利宏, 赵田, 刘备. 2014. 燕山地区喀喇沁变质核杂岩的构造特征与发育机制. 科学通报, 59: 3174~3189.

林伟, 王军, 刘飞, 冀文斌, 王清晨. 2013. 华北克拉通及邻区晚中生代伸展构造及其动力学背景的讨论. 岩石学报, 29(5): 1791~1810.

刘翠, 邓晋福, 苏尚国, 肖庆辉, 罗照华, 王启航, 许立权. 2004. 北京云蒙山片麻状花岗岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 23(2): 141~143.

马寅生, 吴满路, 曾庆利. 2002. 燕山及临区中新生代挤压与伸展的转换和成矿作用. 地球学报, 23(2):115~122.

孟庆任, 胡健民, 袁选俊, 靳久强. 2002. 中蒙边界地区晚中生代伸展盆地的结构、演化和成因. 地质通报, 21(4~5):224~231.

裴磊,刘俊来. 2016. 京北云蒙山地区四合堂韧性逆冲型剪切带的变形特征及早期变形时限约束. 岩石学报, 32(9): 2723~2738.

苏尚国, 邓晋福, 赵国春, 赵兴国, 刘翠. 2006.北京燕山地区薛家石梁杂岩体特征、成因、源区性质及岩石圈减薄方式. 地学前缘, 13(2): 148~157.

邵济安, 张履桥, 储著银. 2003. 冀北早白垩世火山—沉积作用及构造背景. 地质通报, 22(6): 384~390.

吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘, 10(3):51~59.

武广, 王五力. 2003. 辽西及其毗邻地区中生代盆地的构造类型和特征. 地质与资源, 12(1): 1~8.

许继峰, 王人镜, 扬淑荣. 1994. 北京云蒙山花岗岩基的岩石变形及其成因. 地球科学, 19(6): 806~814.

许文良, 王枫, 裴福萍, 孟恩, 唐杰, 徐美君, 王伟. 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景:来自中生代火山岩组合时空变化的制约. 岩石学报, 29(2): 339~353.

杨富全,吴海,刘晓文,徐刚. 2003. 冀北承德甲山正长岩——燕山陆内造山带岩石圈减薄的早期记录. 地质论评,49(5):474~485.

杨富全, 赵越, 曾庆利, 吴海, 夏浩东. 2007. 天津蓟县盘山 I 型—A 型复合花岗岩体—区域构造环境转变的记录. 岩石学报, 23(3): 529~546.

杨进辉, 吴福元. 2009. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏. 中国科学(D 辑): 地球科学, 39(7): 910~921.

于学峰,李洪奎,单伟. 2012. 山东胶东矿集区燕山期构造热事件与金矿成矿耦合探讨. 地质学报, 86(12): 1946~1956.

张必龙,朱光,姜大志,陈印,胡召齐. 2011. 辽西医巫闾山变质核杂岩的形成过程与晚侏罗世伸展事件. 地质论评,57(6): 779~798.

张必龙, 朱光, 谢成龙, 柳小明, 陈印. 2012. 辽西医巫闾山晚侏罗世伸展事件的时限: 来自同构造岩脉的年代学证据. 高校地质学报, 18(4): 647~660.

张必龙, 朱光, 陈印, 谢成龙. 2013. 辽西医巫闾山变质核杂岩演化的$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学制约. 地球化学, 42(5): 481~498.

张长厚, 李程明, 邓洪菱, 刘阳, 刘磊, 魏波, 李寒滨, 刘孜. 2011. 燕山—太行山北段中生代收缩变形与华北克拉通破坏. 中国科学(地球科学), 41(5): 593~617.

张家声, Passchier C W, Konopasek J, 牛向龙, 黄雄南. 2007. 云蒙山变质核杂岩抬升过程中伸展拆离和岩浆底辟联合作用的证据. 地学前缘, 14(4): 26~39.

张建新, 曾令森, 邱小平. 1997.北京云蒙山地区花岗岩弯隆及伸展构造的探讨. 地质论评, 43(3): 232~240.

张拴宏, 赵越, 刘建民, 胡健民, 宋彪, 刘健, 吴海. 2010. 华北地块北缘晚古生代—早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景. 岩石矿物学杂志, 29(6): 824~842.

张岳桥,董树文, 赵越, 张田. 2007. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新

认识. 地质学报, 81(11): 1462~1480.

赵越. 1990. 燕山地区中生代造山运动及构造演化. 地质论评, 36(1): 1~12.

赵越, 徐刚, 张拴宏, 杨振宇, 张岳桥, 胡健民. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变. 地学前缘, 11(3): 319~328.

朱大岗, 崔盛芹, 吴珍汉, 马寅生, 冯向阳. 2000. 北京云蒙山地区挤压—伸展体系构造特征及其岩石组构的动力学分析. 地球学报, 21(4): 337~344.

Andersen T. 2002. Correlation of common lead in U-Pb analyses that do not report 204Pb. Chemical Geology, 192(1~2): 59~79.

Chen Wen, Li Shuguang, Zhang Yan, Liu Xinyu. 2003&. $^{40}Ar/^{39}Ar$ chronological study of the muscovite from Qinlongshan high-pressure orthogneiss, Donghai County, SU-Lu UHP metamorphic belt. Geological Review, 49(5): 537~543.

Chen Wen, Zhang Yan, Zhang Yueqiao, Jin Guishan, Wang Qingli. 2006&. Late Cenozoic episodic uplifting in southern part of the Tibetan plateau——evidence from Ar-Ar thermochonology. Acta Petrologica Sinica, 22(4): 867~872.

Chen Yin, Zhu Guang, Jiang Dazhi, Zhang Bilong. 2013&. Timing Determination of Phase B the Yanshanian Movement in the Eastern North China Craton: Evidence from Dating of a Ductile Shear Zone in Sihetang, Northeastern Beijing. Acta Geological Sinica, 87(3): 295~310.

Chen Yin, Zhu Guang, Jiang Dazhi, Lin Shaoze. 2014&. Deformation characteristics and formation mechanism of the Yunmengshan metamorphic core complex. China Science Bull., 59: 1525~1541.

Chen Zhiyong, Li Yuxi, Wang Xinliang, Yang Shuaishuai, Huang Zhanqi. 2002&. Trust nappe structure in the Baotou—northern Hohhot area, Inner Mongolia. 21(4~5): 251~258.

Davis G A and Darby B J. 2010. Early Cretaceous overprinting of the Mesozoic Daqing Shan fold-and-thrust belt by the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. Geoscience Frontiers, 1(1): 1~20.

Davis G A, Qian Xianlin, Zheng Yadong, Tong Hengmao, Yu Hao, Wang Cong, Gehrels G E, Shafiquallah M, Fryxell J E. 1996. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: a metamorphic core complex north of Beijing, China. In: Yin A and Harrison T M. eds. The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge University Press: 253~279.

Davis G A, Zheng Yadong. 1988. A possible cordilleran-type metamorphic core complex beneath the Great Wall near Hefangkou, Huairou Country, northern China. Geological Society of America Abstracts with Programs, 20: 324~334.

Davis G A, Zheng Yadong, Wang Cong, Darby B J, Zhang Changhou, Gehrels G E. 2001. Mesozoic tectonicevolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, northern China. Geological Society of America Memoir, 194: 171~197.

Deng Jinfu, Su Shangguo, Zhao Guochun, Liu Cui. 2004&. Structural elements association of Yanshan orogenic belt, North China. Geological Journal of China Universities, 10(3): 315~323.

Dong Shuwen, Deng Jinfu. 2000&. On tectonic seesawing of the East Asia continent——Global implication of the Yanshanian Movement. Geological Review, 46(1): 8~13.

Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, Yang Zhenyu, Ji Qiang, Wang Tao, Hu jianmin, Chen Xuanhua. 2007&. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan movement. Acta Geologica Sinica, 81(11): 1449~1461.

Gao Shan, Ridnick R L, Yuan Hongli, Liu Xiaoming, Liu Yongsheng, Xu Liangwen, Ling Wenli, Ayers J, Wang Xuanche, Wang Qianghai. 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton. Nature, 432: 892~897.

Guo Lei, Wang Tao, Zhang Jinjiang, Liu Jiang, Qi Guowei, Li jianbo. 2012. Evolution and time of formation of the Hohhot metamorphic core complex, North China: New structural and geochronologic evidence. International Geology Review, 54(11): 1309~1331.

Hacker B R, Wang Qincheng. 1995. $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of ultrahigh-pressure metamorphism in central China. Tectonics, 14(4): 994~1006.

Li Jianbo, Guo Lei, Lu Yonghua, Zeng Shou. 2017&. The kinematic vorticity and the ductile thinning of the Yiwulüshan ductile shear detachment zone in the North China Craton. Geological Review, 63(6): 1429~143.

Lin Shaoze, Zhu Guang, Yan Lejia, Song Lihong, Liu Bei. 2013&. Structural and chronological constraints on a Late Paleozoic shortening event in the Yanshan Tectonic Belt. China Science Bull., 58: 3922~3936.

Lin Shaoze, Zhu Guang, Song Lihong, Zhao Tian, Liu Bei. 2014&. Structural characteristics and formation mechanism of the Kalaqin metamorphic core complex in the Yanshan area, China. China Science Bull., 59: 3174~3189.

Lin Wei, Wang Jun, Liu Fei, Ji Wenbin, Wang Qingchen. 2013&. Late Mesozoic extension structures on the North China Craton and adjacent regions and its geodynamics. Acta Petrologica Sinica, 29(5): 1791~1810.

Liu Cui, Deng JInfu, Su Shangguo, Xiao QInghui, Luo Zhaohua, Wang Qihang, Xu Liquan. 2004&. Zircon SHRIMP dating of Yunmengshan gneissic granite and its geological significance. Acta Petrologica et Mineralogica, 23(2): 141~143.

Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Günther D, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of Major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. Chemmicl Geology, 257: 34~43.

Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Cchanghui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt—peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. Journal of Petrology, 51(1~2): 537~571.

Ma Yingsheng, Wu Manlu, Zeng Qingli. 2002&. The Mesozoic—Cenozoic compression and extension transformation process and ore-forming process in Yanshan and Adjacent Area. Acta Geoscientia Sinica, 23(2): 115~122.

Meng Qingren, Wei Honghong, Wu Guoli, Liang Duan. 2014. Early Mesozoic tectonic settings of the northern North China craton. Tectonophysics, 611(25): 155~166.

Meng Qingren, Hu Jianmin, Yuan Xuanjun, Jin Jiuqiang. 2002&. Structure evolution and origin of Late Mesozoic ectensional basins in the China—Mongolia border region. Geological Bulletin of China, 21(4~5): 224~231.

Passchier C W, Zhang Jiasheng, Konopasek J. 2005. Geometric aspects of sykinematic granite intrusion into a ductile shear zone——an example from the Yunmengshan core complex, northern China. Geological Society, London, Special Publications, 245: 65~80.

Pei Lei, Liu Junlai. 2016&. Structural deformation characteristics and geochronological constraints on the early deformation of Sihetang ductile thrust shear zone in Yunmengshan, northern Beijing. Acta

Petrologica Sinica, 32(9):2723~2738.

Shi Yuruo, Zhao Xitao, Ma Yinsheng, Hu Daogong, Liu Qisheng, Wu Zhenhan, Zhao Yuanyi, Liu Dunyi. 2009. Late Jurassic—Early Cretaceous plutonism in the northern part of the Precambrain Noerth China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating of diorites and granites from the Yunmengshan Geopark, Beijing. Acta Geologica Sinica, 83(2): 310~320.

Su Shangguo, Deng Jinfu, Zhao Guochun, Zhao Xingguo, Liu Cui. 2006&. Characteristics, origin and resource property of Xuejiashiliang complex, Beijing area and their relationship with the way of lithospheric thinning. Earth Science Frontiers, 13(2):148~157.

Shao Ji'an, Zhang Luqiao, Chu Zhuyin. 2003&. Early Cretaceous volcanism—sedimentation in northern Hebei and its tectonic setting: A discussion. Geological Bulletin of China, 22(6): 384~390.

Wang Tao, Guo Lei, Zheng Yadong, Donskaya Tatiana, Gladkochub Dmitry, Zeng Lingsen, Li Jianbo, Wang Yanbing, Mazukabzov Anatoliy. 2012. Timing and processes of late Mesozoic mid—lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes. Lithos, 154(1): 315~345.

Wang Yu, Zhou Liyun, Zhao Lijun. 2013. Cratonic reactivation and orogeny: An example from the northern margin of the North China Craton. Gondwana Research, 24(1~3): 1203~1222.

Wu Fuyuan, Ge Wenchun, Sun Deyou, Guo Chunli. 2003&. Discussion on the lithospheric thinning in eastern China. Earth Science Frontiers, 10(3):51~59.

Wu Guang, Wang Wuli. 2003&. Structural types and characteristics of Mesozoic basins in western Liaoning and its adjacent areas. Geology and Resources, 12(1): 1~8.

Xu Jifeng, Wang Renjing, Yang Shurong. 1994&. Rock deformation and genesis of Yunmengshan granitic batholith. Earth Science, 19(6): 806~814.

Xu Wenliang, Wang Feng, Pei Fuping, Meng En, Tang Jie, Xu Meijun, Wang Wei. 2013&. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China: Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations. Acta Petrologica Sinica, 29(2) : 339~353.

Yang Fuqian, Zhao Yue, Zeng Qingli, Wu Hai, Xia Haodong. 2007&. I- and A-type composite granites of the Panshan pluton in the Jixian, Tianjin: a record of regional tectonic transformation? Acta Petrologia Sinica, 23(3):529~546.

Yang Fuquan, Wu Hai, Liu Xiaowen, Xu Gang. 2003&. The Jiashan syenite in northern Hebei: an early record of lithosphic thinning in the Yanshan intracontinental orogenic belt. Geological Review, 49(5):474~485.

Yang Jinhui, Wu Fuyuan. 2009&. Triassic magmatism and its relation to decratonization in the eastern North China Craton. Science China (Ser. D)——Earth Sci., 39(7): 910~921.

Yu Xuefeng, Li Hongkui, Shan Wei. 2012&. Study on coupling between Yanshannian tectonic thermal events and gold mineralization jin Jiaodong ore concentrating area in Shandong Provence. Acta Geologica Sinica, 86(12): 1946~1956.

Zhang Bilong, Zhu Guang, Jiang Dazhi, Chen Yin, Hu Zhaoqi. 2011&. Evolution of the Yiwulüshan metermorphic core complex and Late Jurassic extensional event in the Western Liaoning Province. Geological Review, 57(6): 779~798.

Zhang Bilong, Zhu Guang, Xie Chenglong, Liu Xiaoming, Chen Yin. 2012&. Timing of Late Jurassic Extension in the Yiwulüshan Area, Western Liaoning: Geochronological Evidence from Syn-Kinematic Granitic Dikes. Geological Journal of China Universities, 18(4): 647~660.

Zhang Bilong, Zhu Guang, Jiang D Z, Li Changcheng, Chen Yin. 2012. Evolution of the Yiwulushan metamorphic core complex from distributed to localized deformation and its tectonic implications. Tectonics, 31(4): TC4018, doi:10.1029/2012TC003104.

Zhang Bilong, Zhu Guang, Chen Yin, Xie Chenglong. 2013&. Evolution of Yiwulüshan metamorphic core complex in western Liaoning constrained by $^{40}Ar/^{39}Ar$ thermochronology. Geochemica, 42(5): 481~498.

Zhang Changhou, Li Chengming, Deng Hongling, Liu Yang, Liu Lei, Wei Bo, Li Hanbin, Liu Mei. 2011&. Mesozoic contraction deformation in the Yanshan and northern Taihang mountains and its implications to the destruction of the North China Craton. Science China (Earth Sci.), 41(5): 593~617.

Zhang Jiasheng, Passchier C W, Konopasek J, Niu Xianglong, Huang Xiongnan. 2007&. Evidence for coalescing of extensional detachment and magma diapirism during uplift of the Yunmengshan metamorphic core complex. Earth Science Frontiers, 14(4):26~39.

Zhang Jianxin, Zeng Lingshen, Qiu Xiaoping. 1997&. Granite dome and ectensional tectonics in the Yunmeng mountand , Beijing. Geological Review, 43(3): 232~240.

Zhang Xuanhong, Zhao Yue, Liu Jianmin, Hu Jianmin, Song Biao, Liu Jian, Wu Hai. 2010&. Geochronology , geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic—Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A prel iminary review. Acya Petrologica et Mineralogica, 29(6): 824~842.

Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Zhao Yue, Zhang Tian. 2007&. Jurassic Tectonics of North China :a Synthetic View. Acta Geologica Sinica, 81(11): 1462~1480.

Zhao Yue. 1990&. The Mesozoic orogenies and tectonic evolution of the Yanshan area. Geological Review, 36(1): 1~12.

Zhao Yue, Xu Gang, Zhang Shuanhong, Yang Zhengyu, Zhang Yueqiao, Hu Jianmin. 2004&. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia. Earth Science Frontiers, 11 (3) :319~328.

Zheng Yadong, Wang Y, Liu R, Shao J. 1988. Sliding—thrusting tectonics caused by thermal uplift in the Yunmeng Mountains, Beijing, China. Journal of Structural Geology, 10(2): 135~144.

Zhu Dagang, Cui Shengqin, Wu Zhenhan, Ma Yinsheng, Feng Xiangyang. 2000&. Tectonic Features of the Compressional—Extensional System and Dynamic Analysis of Rock Fabric in Yunmengshan Area, Beijing. Acta Geoscientia Sinica, 21(4): 337~344.

Zhu Guang, Jiang Dazhi, Zhang Bilong, Chen Yin. 2012a. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics. Gondwana Research, 22(1): 86~103.

Zhu Guang,Chen Yin,Jiang Dazhi, Lin Shaoze. 2015. Rapid change from compression to extension in the North China Craton during the Early Cretaceous: Evidence from the Yunmengshan metamorphic core complex. Tectonophysics, 656(1): 91~110.

Zhu Rixiang, Yang Jinhui, Wu Fuyuan. 2012b. Timing of destruction of the North China Craton. Lithos, 149(4): 51~60.

Mesozoic Magmatic Activities and Tectonic Movements in Mount Yunmeng Area, Beijing

CHEN Yin[1)], ZHU Guang[2)], LIU Wengang[1)], CHEN Lulu[1)], AO Cong[1)]

1) *Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin*, 300170;

2) *Hefei University of Technology, Hefei*, 230009

Objectives: Mount Yunmeng Area, Beijing locates in the middle part of Yanshan Orogeny, the northern margin of the North China Craton (NCC). In this area, there are many Mesozoic magmatic activities, the E—W-trending thrust Sihetang shear zone, and NE-trending extensional Dashuiyu shear zone. Although, many isotopic dating works have been done for these plutons and movements, there are less works to organize these data to describe their period relationship systematically and discuss their indication to the evolution of the Yunmengshan Metamorphic Core Complex (YMCC) and NCC.

Methods: The zircon isotopic dating and single mineral (hornblende and biotite) $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating are analyzed in this work. The cooling rates around the Mount Yunmeng are calculated and discussed.

Results: Through the Zircon U-Pb isotopic dating, the ages of plutons are defined. The 206 Ma comes from the trapped magma zircon. Among the exposed rock masses, Shatuozi pluton is 159~151 Ma, Shicheng Pluton 169~151 Ma, Changyuan Pluton 156~151 Ma, Yunmengshan batholith 146~141 Ma, Fengjiayu—Xibailianyu granite pluton 130~124 Ma, Fengjiayu diorite pluton 127 Ma, Dadonggou granite pluton 127 Ma. Combined with the results of $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating, the cooling rates are calculated. During the development of Sihetang shear zone, the cooling rate of the western, northern and eastern part of the YMCC is 76.92℃/Ma, 50.2℃/Ma and 13.7℃/Ma separately. During the development of Dashuiyu shear zone, they are 18.31℃/Ma, 6.13℃/Ma and 28.57℃/Ma separately. At the late of the development of YMCC, it is 50.0℃/Ma.

Conclusions: The time of Mesozoic magmatic activities and tectonic movements in Yunmenshan area, and the cooling rate around the Yunmengshan batholith in different tectonic evolution stages are worked out. We figure out that there are three stages of magmatic activities: Late Triassic, Late Jurassic and Early Cretaceous. Besides, the Yunmengshan Area suffers three time significant tectonic events. In Early Jurassic, it behaves as the regional angular unconformity in the Yunmengshan area. There are less magmatic activities with the compress movements. In the earlier of Early Cretaceous (143~135.5 Ma), the Sihetang shear zone develops along the northern margin of the Yuanmengshan batholith. In the later of Early Cretaceous, (135~93.9 Ma), the Yunmengshan metamorphic core complex with the Dashuiyu shear zone as the detachment shear zone, develops along the southeastern margin. The northern and western margins of the Yuanmengshan batholith are affected by the Sihetang shear zone and have the higher cooling rate. At the early stage, the eastern margin is less affected by the Sihetang shear zone, with the smaller cooling rate, and mainly behaves the slow isostatic uplift. While at the late stage, with the high influence of the Dashuiyu shear zone, it is of the quick uplift. As a result, in Mesozoic, the Yunmengshan area has suffered many stages magmatic activities and tectonic movements, and it has the different cooling rates in different areas.

Keywords: Yunmengshan metamorphic core complex; North China Craton; zircon U-Pb dating; $^{40}Ar/^{39}Ar$; shear zone

Acknowledgements: the research is supported by "National Science Foundation of China (No. 41502195)" Project.

First author: CHEN Yin, male, born in 1984, research assistant, Tianjin Center, China Geological Survey, is mainly engaged in study of tectonics and mineral deposits; Email: chenyinchain@sina.com

Manuscript received on: 2017-08-29; Accepted on: 2018-06-11; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2018.04.004