

山西义兴寨岩体和车厂-北台岩体的变质程度及变质作用 K-Ar 定年

孟洁¹, 彭涛¹, 张继军², 吴春明¹

(1. 中国科学院大学 地球科学学院, 北京 100049; 2. 陕西省地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘要: 义兴寨岩体和车厂-北台岩体位于华北克拉通中部造山带中段, 均被变质辉绿岩墙穿切, 分别出露于山西省恒山南麓和五台山北麓。义兴寨岩体出露的岩石类型呈现渐变过渡的特征, 主要为花岗闪长片麻岩、石英闪长片麻岩和闪长片麻岩; 变质高峰期温压条件达到 710~760°C/0.65~0.75 GPa, 记录的降温降压条件为 560~690°C/0.46 GPa; 变质高峰期为高角闪岩相, 属于中压变质相系; 变质角闪石 K-Ar 定年表明义兴寨岩体变质时代为 1.84~1.82 Ga。车厂-北台岩体主要由二云母花岗片麻岩构成, 变质高峰期温压条件达到 550~690°C/0.92~1.14 GPa; 变质高峰期为中角闪岩相, 属于中压变质相系顶部; 变质黑云母 K-Ar 定年表明车厂-北台岩体变质时代为 1.80 Ga。这两个岩体变质时代与华北克拉通中部造山带普遍记录的 1.96~1.80 Ga 之间的变质事件一致, 说明它们同样卷入了华北中部造山带早元古代末期的造山过程。

关键词: 义兴寨岩体; 车厂-北台岩体; 温度-压力条件; K-Ar 定年; 华北中部造山带

中图分类号: P588.34⁺5; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)06-0991-14

Metamorphic pressure-temperature conditions and K-Ar geochronology of the Yixingzhai and Chechang-Beitai plutons, Shanxi Province

MENG Jie¹, PENG Tao¹, ZHANG Ji-jun² and WU Chun-ming¹

(1. College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an 710068, China)

Abstract: Exposed in the middle segment of the Palaeoproterozoic Trans-North China Orogen, the Yixingzhai pluton on the southern slope of the Hengshan Mountain and the Chechang-Beitai pluton on the northern slope of the Wutai Mountain experienced amphibolite facies metamorphism and were cut by metamorphosed diabase dykes. The Yixingzhai pluton consists of transitional granodioritic gneiss, quartz dioritic gneiss and dioritic gneiss. Its metamorphic peak *p-T* conditions are estimated to be of 710~760°C/0.65~0.75 GPa and the retro-grade metamorphism occurred at 560~690°C/~0.46 GPa. The metamorphic peak is ascribed to typical middle *p-T* facies series. K-Ar dating of metamorphic hornblende suggests that the metamorphic peak occurred at about 1.84~1.82 Ga. The Chechang-Beitai pluton consists of biotite-muscovite granitic gneiss and the metamorphic peak *p-T* conditions are estimated to be of 550~690°C/0.92~1.14 GPa, belonging to the top middle *p/T* facies series. K-Ar dating of metamorphic biotite implies that the metamorphic peak occurred at about 1.80 Ga. Geochronologic research indicates that these two plutons were involved in the late Palaeoproterozoic orogenic event of Trans-North China Orogen deciphered at about 1.96~1.80 Ga.

收稿日期: 2015-03-25; 修订日期: 2015-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41225007)

作者简介: 孟洁(1988-), 女, 硕士研究生, 变质地质学专业, E-mail: mengjie12@mails.ucas.ac.cn; 通讯作者: 吴春明(1967-), 男, 教授, 变质地质学与前寒武纪地质学专业, E-mail: wucm@ucas.ac.cn。

Key words: Yixingzhai pluton; Chechang-Beitai pluton; geothermobarometry; K-Ar dating; Trans-North China Orogen

华北克拉通基底的形成过程是前寒武纪研究的重大科学问题之一。一般认为,多个陆块经过俯冲、碰撞和拼合后,最终“焊接”成为一个统一稳定的华北克拉通基底。对于组成华北克拉通基底的古老地块的划分,存在多种方案(Zhao *et al.*, 2001a, 2003, 2005, 2007, 2012; 翟明国等, 2000; Zhai *et al.*, 2000, 2003, 2011; Kusky and Li, 2003; Kusky, 2011)。Zhao 等(1998, 2005)把华北克拉通基底划分为西部陆块、中部造山带和东部陆块。其中,位于华北中部造山带中段的恒山、五台山和阜平 3 个古老地块,岩石出露比较齐全,构造形迹丰富,系 3 个独立的块体(白瑾, 1986; Kusky and Li, 2003; Polat *et al.*, 2005),也是解剖前寒武纪期间华北中部造山带构造演化的理想地区,一些构造演化模式就是基于恒山-五台-阜平地区提出的。五台山地区具有代表岛弧环境的火山-沉积物(Zhao *et al.*, 1999; Kröner *et al.*, 2005; Wield *et al.*, 2005),在华北克拉通东、西陆块碰撞时发生变形和变质。Trap 等(2007)提出恒山、五台为两个同时代的推覆体,沿龙泉关逆冲断层带推覆于阜平块体之上。

最近 10 多年以来,不少学者对华北克拉通中部造山带开展了系统的同位素年代学研究,采用了全岩 Sm-Nd 法、锆石 U-Pb 法、独居石 U-Th-Pb 法、含钾矿物的 K-Ar 法和⁴⁰Ar/³⁹Ar 法等,以期确定中部造山带的造山时代。一部分学者根据年代学资料,认为华北克拉通基底形成于 2.55~2.45 Ga 期间(翟明国等, 2000; Kusky and Li, 2003; Liu *et al.*, 2004; Polat *et al.*, 2005);另一部分学者认为中部造山带的碰撞事件发生于 1.95~1.80 Ga(Zhao *et al.*, 1999, 2000, 2002, 2005; Guan *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2005; Wilde *et al.*, 2005; Kröner *et al.*, 2005, 2006; Liu *et al.*, 2006; Trap *et al.*, 2007; 王国栋等, 2013; Chen *et al.*, 2015; Lu *et al.*, 2015),与碰撞事件有关的变形作用发生在~1.85 Ga(Zhang *et al.*, 2009)。

恒山-五台山地区出露有各种各样的变质岩石,对变质演化研究具有重要意义。恒山地区 TTG 片麻岩中包裹有高压基性麻粒岩(王仁民等, 1991; Zhao *et al.*, 2001b),可能是退变榴辉岩。五台山地区广泛出露有记录变质作用能力较强的变质岩石,

例如含榴斜长角闪片麻岩、石榴直闪石岩、含榴黑云斜长片麻岩。这两个地区的变质岩石,普遍发育“白眼圈”状后成合晶矿物组合。无论是传统矿物温度计与压力计计算(Zhao *et al.*, 1999, 2001b),还是热力学视剖面图模拟(Qian *et al.*, 2013, 2015),都说明这两个地区的变质岩石记录了含有近等温降压退变质过程的顺时针型 *p-T* 轨迹,这两个地区的变质岩石形成于古元古代末期的俯冲-碰撞-构造抬升(折返)的造山环境。

为了更深入地研究华北中部造山带的构造演化过程,本文针对前人研究较少的恒山南麓的义兴寨岩体和五台山北麓的车厂-北台岩体,开展了变质作用和年代学研究,以期提供新的科学资料。这两个岩体是华北中部造山带中段的两个代表性灰色片麻岩体。本文采用矿物温度计和压力计,估算了这两个岩体的变质作用温度与压力条件,对变质成因的角闪石、黑云母进行了 K-Ar 定年,确定两个岩体经历的变质事件的地质时代,以深化对华北克拉通中部造山带构造演化的认识。

1 区域地质背景

华北克拉通基底由太古宙-古元古代的岩石组成,被划分为东部陆块、西部陆块以及其间的古元古代中部造山带等 3 大构造单元(图 1, Zhao *et al.*, 1998, 2005)。华北中部造山带变质杂岩的变质程度不均匀,部分达到高角闪岩相-麻粒岩相(例如阜平、恒山),部分仅达到绿片岩相-角闪岩相(例如五台山地区)。

恒山变质杂岩主要由 TTG 片麻岩和变质表壳岩组成。以近 E-W 向的朱家坊剪切带为界,大致可分为南、北两部分(图 1)。北部主要出露 TTG 片麻岩,并含有大量高压基性麻粒岩包体(王仁民等, 1991)和花岗岩类侵入体。南部主要由变质表壳岩和 TTG 片麻岩组成。TTG 片麻岩经历了高角闪岩相或更高级变质作用。变质表壳岩岩石组合包括斜长角闪片麻岩、云母片岩等。此外,在恒山南部还发育大量基性岩墙和花岗质岩墙。义兴寨岩体(图 1)出露于恒山南麓,整个岩体呈现灰色,具有明显的片麻理,岩体南部被滹沱河河谷的第四系沉积物覆盖。

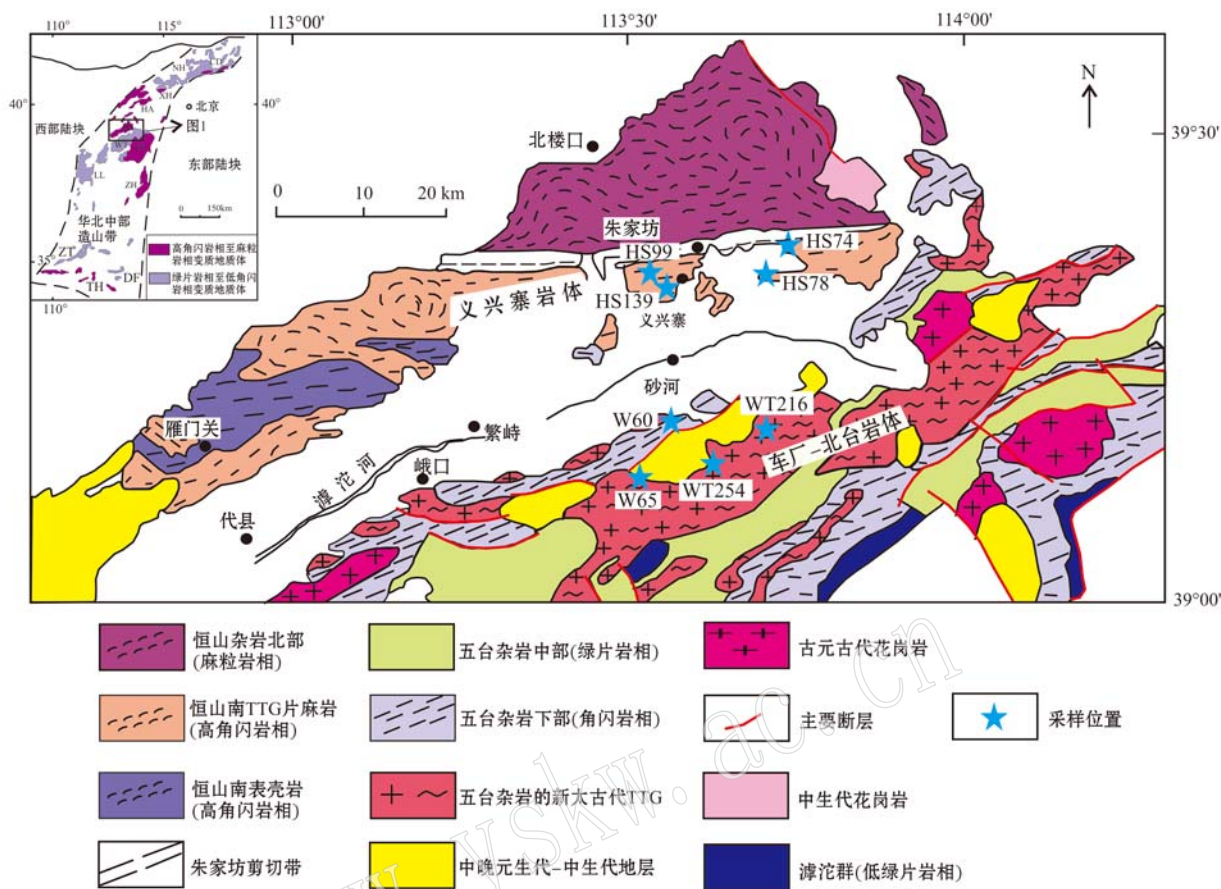


图1 恒山-五台地区地质图[改编自 Kröner 等(2006)、Li 等(2008, 2010)和 Qian 等(2013), 其中插图标出了恒山-五台地区在华北克拉通中的位置, 改编自 Zhao 等(2007)]

Fig. 1 Geological map of Hengshan Mountain-Wutai Mountain area (modified after Kröner *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2008, 2010; Qian *et al.*, 2013; The inserted small figure exhibits the location of the study area in the Tans-North China Orogen, after Zhao *et al.*, 2007)

CD—承德杂岩; DF—登封杂岩; FP—阜平杂岩; HA—怀安杂岩; HS—恒山杂岩; LL—吕梁杂岩; NH—冀北杂岩; TH—太华杂岩; WT—五台杂岩; XH—宣化杂岩; ZH—赞皇杂岩; ZT—中条杂岩

CD—Chengde complex; DF—Dengfeng complex; FP—Fuping complex; HA—Huai'an complex; HS—Hengshan complex; LL—Lüliang complex; NH—Northern Hebei complex; TH—Taihua complex; WT—Wutai complex; XH—Xuanhua complex; ZH—Zanhuang complex; ZT—Zhongtiao complex

义兴寨岩体中分布大量基性变质岩捕虏体, 并有基性辉绿岩墙侵入其中。锆石 U-Pb 测年表明, 义兴寨岩体成岩时代为 ~ 2.52 Ga (田永清等, 1992)。

五台杂岩为典型的花岗-绿岩带, 由五台群、滹沱群变质岩系及 TTG 片麻岩组成。五台群进一步划分为下亚群、中亚群、上亚群 (白瑾, 1986)。下亚群主要由基性-中性火山岩、沉积岩、条带状铁建造、少量灰岩和超基性岩块组成, 变质程度为角闪岩相。中亚群主要包括拉斑玄武岩和中酸性火山岩, 夹有少量沉积岩和超基性岩块, 变质程度为绿片岩相。上亚群与中亚群呈不整合接触, 主要由碎屑沉积岩组成, 并夹有少量基性-酸性火山岩, 变质程度为低

绿片岩相。车厂-北台岩体总体呈 NEE 向延伸, 出露于五台山的中北部, 在东部和东北部也有少量出露 (图 1), 主要岩石类型为 TTG 片麻岩, 发育明显的片麻理。锆石 SHRIMP U-Pb 及常规 U-Pb 定年表明, 车厂-北台岩体的成岩时代为 $2.55 \sim 2.51$ Ga (白瑾等, 1992; 王凯怡等, 1997)。

2 岩相学特征

2.1 义兴寨岩体

在义兴寨岩体中, 采集了 3 块代表性灰色片麻岩样品和 1 块变质辉绿岩墙样品。

样品 HS78 采集于恒山南麓红沟村西南,岩性为花岗闪长片麻岩,主要由斜长石(60%±)、角闪石(35%±)组成,次要矿物包括黑云母(3%±)以及极少量的绿帘石、榍石、石榴子石、锆石等(图 2a)。其中的斜长石发生钠黝帘石化,核心分解为细小的绿帘石、角闪石、榍石、石英,角闪石中包裹有细小的石英、黑云母、榍石、绿帘石等。

样品 HS99 采集于义兴寨镇西部的同路村南侧,

岩性为角闪黑云花岗片麻岩,主要矿物为斜长石(70%±)、石英(15%±)、黑云母(7%±)、角闪石(6%±)以及绿帘石(<1%)、榍石(<1%)、锆石(<1%)等(图 2b)。个别斜长石发生“钠黝帘石化”,核心分解为细小的绿帘石、黑云母、锆石、石英。角闪石包裹有细小的斜长石、绿帘石、锆石,并与黑云母呈交代关系。绿帘石、榍石、锆石或产于其它矿物颗粒之间,或被包裹于其它矿物内部。

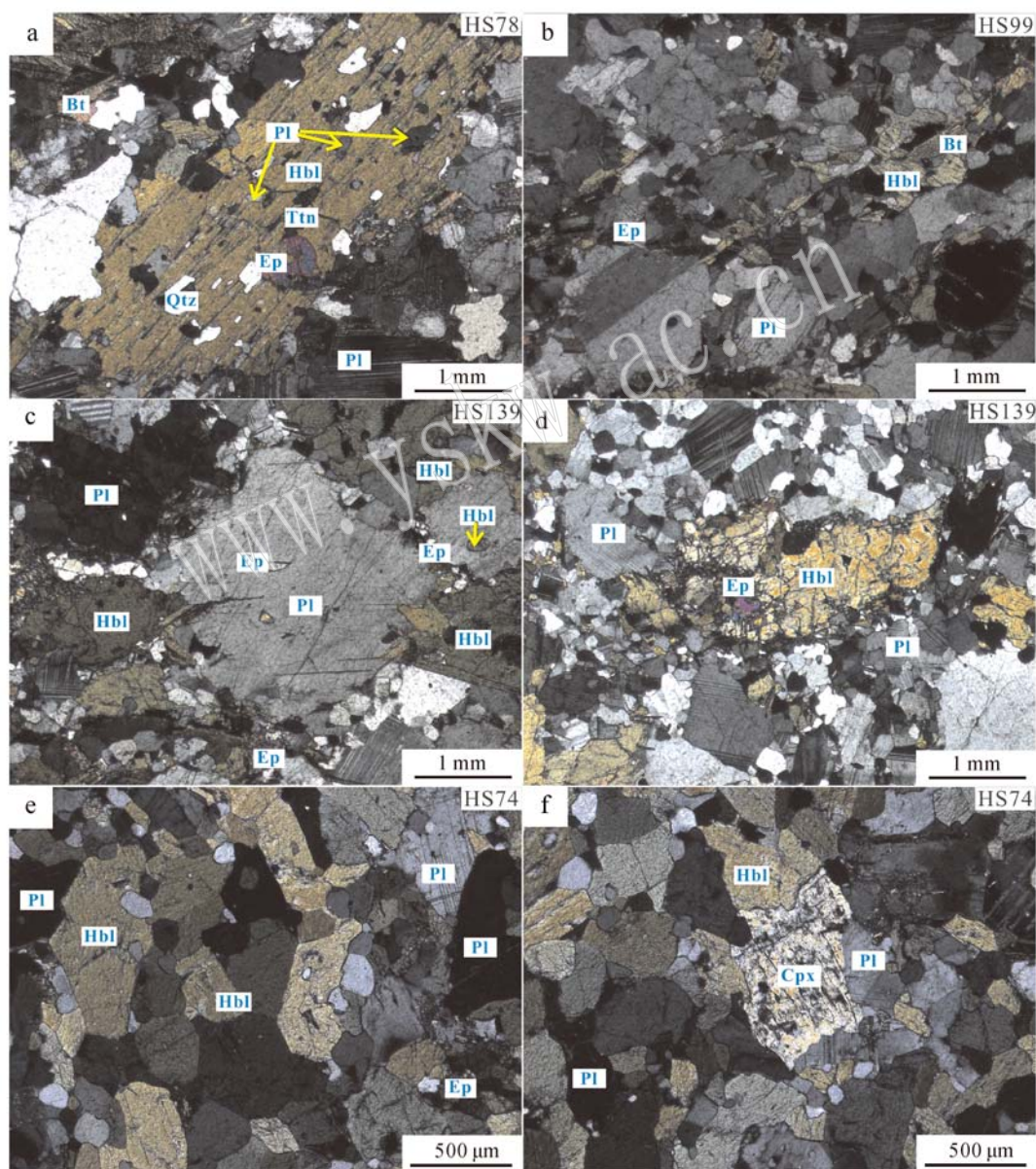


图 2 义兴寨岩体代表性样品的显微岩相照片

Fig. 2 Micropetrographs of representative samples in the Yixingzhai pluton

Hbl—角闪石; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Ep—绿帘石; Ttn—榍石; Cpx—单斜辉石; Qtz—石英

Hbl—hornblende; Pl—plagioclase; Bt—biotite; Ep—epidote; Ttn—titanite; Cpx—clinopyroxene; Qtz—quartz

样品 HS139 采集于孙家庄村西北, 岩性为石英闪长片麻岩, 主要矿物包括斜长石(75% ±)、石英(10% ±)、角闪石(8% ±)、绿帘石(1% ±)及少量榍石、磷灰石、黑云母。斜长石发生钠黝帘石化, 核心分解为细小的绿帘石、斜长石、石英、黑云母等(图 2c)。样品中可见角闪石转变为绿帘石的反应结构(图 2d)。

样品 HS74 采于义兴寨岩体中的变质辉绿岩墙, 位于羊圈村的东北路旁, 岩石主要由角闪石(60% ±)、斜长石(35% ±)、石英(5% ±)、榍石(<1%)、钾长石(<1%)、榍石(<1%)组成。原岩辉绿结构已彻底被改造。角闪石晶体构成三边平衡结构(图 2e), 偶见单斜辉石残晶(<<1%), 可能是单斜辉石被角闪石取代而残留下来的晶体(图 2f)。

2.2 车厂-北台岩体

在车厂-北台岩体中, 采集了 3 块代表性灰色片麻岩样品和 1 块变质辉绿岩墙样品。

样品 WT60 采集于寺子村以东, 岩性为二云斜长花岗片麻岩, 片麻状构造, 主要矿物为斜长石(64% ±)、石英(30% ±)、黑云母(4% ±)、白云母(1% ±)、绿帘石(<1%)、黝帘石(<1%)和磷灰石(<<1%)(图 3a)。黑云母、白云母、石英构成片麻理。斜长石发生钠黝帘石化, 核心分解为细小的绿帘石、白云母、黝帘石、黑云母、斜长石等(图 3a)。石英有弱的波状消光, 部分石英聚集成豆荚状。此外, 可见白云母穿插于黑云母中(图 3b)。

样品 WT216 采集于上庄村以南, 岩性为二云母花岗片麻岩, 片麻状构造, 主要由斜长石(66% ±)、石英(30% ±)、黑云母(3% ±)、绿帘石(<1%)、黝帘石(<<1%)、白云母(<<1%)、石榴子石(<<1%)组成(图 3c、3d)。斜长石发生“钠黝帘石化”, 核心分解为细小的白云母、绿帘石、黝帘石。石英之间呈平直状接触, 偶见波状消光。黑云母包裹有细小的石英、黑云母, 局部变为矽线石。黑云母、白云母、绿帘石、黝帘石呈“层状”分布。

样品 WT254 采集于茶坊村以南的坊城沟口附近, 岩性为含榴二云花岗片麻岩, 片麻状构造, 主要由斜长石(60% ±)、石英(30% ±)、黑云母(3% ±)、白云母(2% ±)、绿帘石(2% ±)、黝帘石(2% ±)、石榴子石(1% ±)等组成(图 3e)。斜长石发生钠黝帘石化, 核心分解为细小的绿帘石、黝帘石。石英定向拉长, 包裹有细小的黑云母、斜长石。绿帘石、黝帘石也都呈定向拉长。黑云母、白云母、绿帘石、黝帘

石呈“层状”分布。

样品 WT65 采集于车厂-北台岩体中的变质辉绿岩墙, 位于拖房沟口, 具有明显的变余辉长辉绿结构。岩石主要由角闪石(80% ±)、方柱石(18% ±)、斜长石(1% ±)、石榴子石(1% ±)组成(图 3f)。变余辉绿结构清楚可见。角闪石晶形很差, 发生细粒化。偶尔可见石榴子石产于斜长石、角闪石之间, 可能反映了石榴子石是由角闪石、斜长石反应形成的。方柱石系斜长石变成。

3 分析测试方法

3.1 电子探针测试

矿物成分分析测试是在中国科学院地质与地球物理研究所 CAMECA SX50 型电子探针分析仪上进行的, 加速电压 15 kV, 电流强度 20 nA, 电子束斑直径 3~7 μm, 计数时间 20 s。标准样品有天然矿物与人工合成矿物。对样品 HS74、HS78、HS99、HS139、WT60、WT65、WT216、WT254 中的主要矿物进行了成分分析, 包括斜长石、角闪石、黑云母、白云母、石榴子石及方柱石等代表性矿物。对于可能有成分变化的矿物, 矿物中心和边缘都做了分析。

3.2 K-Ar 定年

3 个定年样品新鲜, 变质矿物均未遭受风化, 选样时手工逐级破碎样品, 然后在体视显微镜下选取结晶程度好的黑云母和角闪石进行单矿物 K-Ar 年龄测定, 目测矿物纯度达到 99%。石英闪长片麻岩样品 HS139 中的角闪石和二云母花岗片麻岩样品 WT216 中的黑云母 K-Ar 测年, 在中国科学院地质与地球物理研究所进行, 变辉绿岩样品 HS74 中的角闪石 K-Ar 测年在北京大学进行, 采用同位素稀释法进行放射性同位素测试。实验采用的⁴⁰Ar 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10}/a$, $^{40}\text{Ar}/\text{K} = 1.167 \times 10^{-4}(\text{mol/mol})$ (Steriger and Jager, 1977)。

4 岩体变质作用温度与压力条件

根据变质岩石岩性及矿物温度计与压力计的适用条件, 分别选取斜长石-角闪石温度计(Holland and Blundy, 1994)、斜长石-角闪石-石英压力计(HPQ)压力计(Bhadra and Bhattacharya, 2007)、石榴子石-角闪石-斜长石-石英(GHPQ)压力计(Jonathon *et al.*, 2000)、黑云母-角闪石温度计(Wu

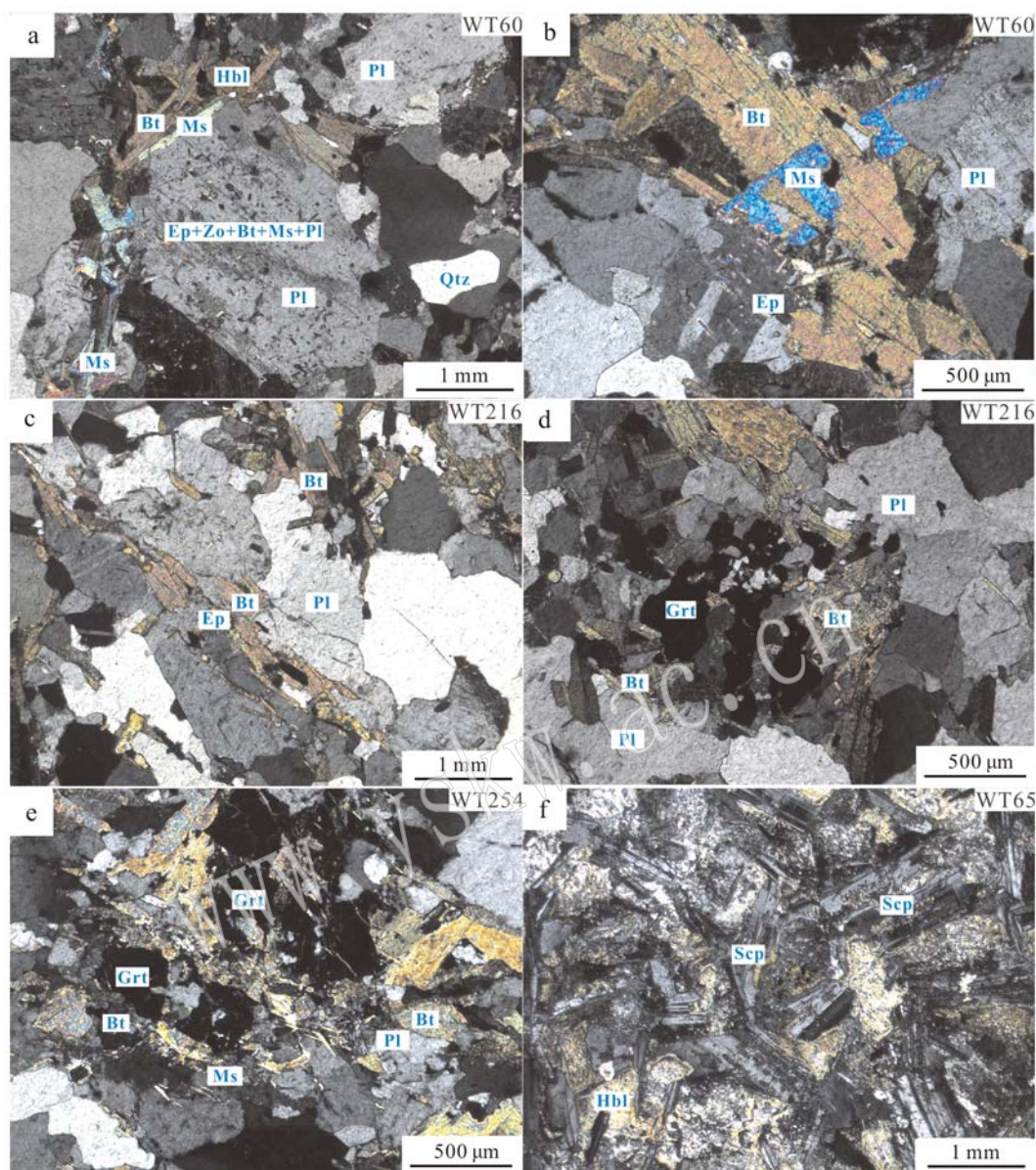


图 3 车厂-北台岩体代表性样品的显微岩相照片

Fig. 3 Micropetrographs of representative samples in the Chechang-Beitai pluton

Hbl—角闪石; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Ms—白云母; Ep—绿帘石; Zo—黧帘石; Grt—石榴子石; Qtz—石英; Sep—方柱石
Hbl—hornblende; Pl—plagioclase; Bt—biotite; Ms—muscovite; Ep—epidote; Zo—zoisite; Grt—garnet; Qtz—quartz; Sep—scapolite

et al., 2002)、二云母温度计(Hoisch, 1989)、石榴子石-黑云母温度计(Holdaway, 2000)、石榴子石-白云母-斜长石-石英(GMPQ)温度计-压力计(Wu and Zhao, 2006)、石榴子石-黑云母-斜长石-石英(GBPQ)压力计(Wu *et al.*, 2004)、石榴子石-黑云母-白云母-斜长石(GBMP)压力计(Wu, 2015)、角闪石 Al 压力计(Anderson and Smith, 1995),估算这两个岩体的变质作用温度与压力条件。其中,角闪石 Al 压力计是针对花岗岩类建立的,要求岩石中存

在共生的角闪石+斜长石+石英+黑云母+钾长石矿物组合(Hollister *et al.*, 1987),缺乏其中任何一种矿物时,所得结果仅有参考意义。

两个岩体中各类片麻岩均显示很好的定向性,原有岩浆矿物在变质作用中重新结晶为新生矿物,矿物之间呈现平衡接触关系。代表性矿物的电子探针分析数据见表 1 和表 2,其中矿物缩写符号参见沈其韩(2009)。电子探针测试还发现,无论是变质岩体还是侵入其中的辉绿岩墙,同种矿物成分基本均

表 1 义兴寨岩体中代表性变质矿物的化学成分
Table 1 Chemical compositions of the representative metamorphic minerals in the Yixingzhai pluton

$w_B/\%$

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	FeO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	Total	Si	Ti	Al	Cr	Mg	Ca	Mn	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Ni	Na	K	Total	
HS78																											
Pl(核)	57.87	0.00	25.91	0.03	0.01	7.58	0.00	0.15	0.00	7.20	0.14		98.89	2.62	0.00	1.38	0.00	0.00	0.37	0.00	0.00	0.01	0.00	0.63	0.01	5.02	
Hbl(核)	46.04	0.37	9.20	0.00	13.32	12.22	0.36	14.29	0.00	0.99	0.81	2.03	99.63	6.70	0.04	1.58	0.00	2.89	1.90	0.04	0.72	1.02	0.00	0.28	0.15	15.32	
Hbl(Pl中)	41.72	0.80	12.01	0.00	11.21	12.12	0.31	16.67	0.00	1.24	1.53	1.98	99.59	6.20	0.09	2.10	0.00	2.48	1.93	0.04	0.86	1.21	0.00	0.36	0.29	15.56	
Br(核)	35.86	1.88	15.63	0.04	16.01	0.04	0.22	15.30	0.00	0.06	7.19	3.92	96.15	5.49	0.22	2.82	0.00	3.65	0.01	0.03	0.29	1.66	0.00	0.02	1.40	15.59	
HS99																											
Pl(边)	60.21	0.00	25.19	0.02	0.00	6.94	0.03	0.16	0.00	7.81	0.19		100.55	2.67	0.00	1.32	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.01	0.00	0.67	0.01	5.01	
Pl(核)	59.01	0.00	25.31	0.00	0.02	6.97	0.02	0.14	0.00	7.79	0.23		99.49	2.65	0.00	1.34	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	0.01	0.00	0.68	0.01	5.03	
Hbl(边)	42.10	0.73	11.64	0.06	10.89	12.01	0.45	17.15	0.00	1.23	1.23	1.98	99.47	6.26	0.08	2.04	0.00	2.41	1.91	0.06	0.89	1.24	0.00	0.35	0.23	15.47	
Hbl(核)	41.39	0.79	12.31	0.00	10.67	11.68	0.42	17.23	0.00	1.23	1.51	1.97	99.20	6.18	0.09	2.16	0.00	2.37	1.87	0.05	0.91	1.24	0.00	0.36	0.29	15.52	
Br(边)	36.76	2.36	15.38	0.12	13.76	0.18	0.27	16.63	0.09	0.10	8.16	3.94	97.72	5.59	0.27	2.75	0.01	3.12	0.03	0.03	0.32	1.80	0.01	0.03	1.58	15.56	
HS74																											
Pl(核)	57.88	0.00	26.62	0.00	0.00	8.09	0.00	0.09	0.00	7.22	0.18		100.08	2.59	0.00	1.40	0.00	0.00	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	0.01	5.02	
Pl(Hbl中)	58.01	0.00	26.13	0.00	0.01	8.26	0.00	0.11	0.03	7.20	0.15		99.90	2.60	0.00	1.38	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	5.01	
Hbl(核)	42.01	0.99	11.09	0.02	9.82	11.81	0.31	18.59	0.00	1.10	1.35	1.96	99.05	6.33	0.11	1.97	0.00	2.20	1.90	0.04	0.78	1.56	0.00	0.32	0.26	15.47	
Cpx(核)	52.11	0.14	1.36	0.00	12.59	23.85	0.31	10.14	0.00	0.43	0.00		100.93	1.94	0.00	0.06	0.00	0.70	0.95	0.01	0.08	0.22	0.00	0.03	0.00	3.99	
HS99																											
Pl(Hbl中)	58.86	0.02	25.28	0.00	0.02	7.01	0.00	0.02	0.00	7.59	0.25		99.05	2.65	0.00	1.34	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.01	5.00	
Hbl(边)	40.57	0.73	11.29	0.01	8.37	11.44	0.41	21.50	0.06	1.50	1.63	1.93	99.44	6.19	0.08	2.03	0.00	1.90	1.87	0.05	0.91	1.83	0.01	0.44	0.32	15.63	
Hbl(核)	43.36	0.58	11.24	0.03	11.07	12.09	0.38	16.66	0.05	0.97	1.05	1.99	99.47	6.41	0.06	1.96	0.00	2.44	1.92	0.05	0.81	1.24	0.01	0.28	0.20	15.38	
Br(Hbl中)	36.81	2.40	15.77	0.05	13.52	0.09	0.27	15.83	0.00	0.33	9.00	3.95	98.02	5.59	0.27	2.82	0.01	3.06	0.01	0.03	0.30	1.71	0.00	0.10	1.74	15.64	
Br(核)	36.44	2.33	15.67	0.05	13.64	0.00	0.20	16.92	0.05	0.08	9.55	3.95	98.88	5.53	0.27	2.80	0.01	3.08	0.00	0.03	0.32	1.82	0.01	0.02	1.85	15.74	

表 2 车厂-北台岩体中代表性变质矿物的化学成分

$w_B/\%$

Table 2 Chemical compositions of the representative minerals in the Chechang-Beitai pluton

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	FeO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	Total	Si	Ti	Al	Cr	Mg	Ca	Mn	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Ni	Na	K	Total	
WT60																											
Pl(边)	61.51	0.00	24.27	0.01	0.02	5.63	0.07	0.09	0.00	8.71	0.11	100.42	2.72	0.00	1.27	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.01	5.02	
Bt(边)	35.61	2.54	17.27	0.01	8.33	0.16	0.19	22.15	0.00	0.06	8.42	3.88	98.62	5.51	0.30	3.15	0.00	1.92	0.03	0.03	0.00	2.86	0.00	0.02	1.66	15.48	
Ms(核)	45.54	0.86	32.72	0.00	1.11	0.00	0.00	3.36	0.00	0.43	10.64	4.41	99.07	6.19	0.09	5.24	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.38	0.00	0.11	1.84	14.07	
WT65																											
Pl(核)	58.69	0.00	26.26	0.00	0.01	6.89	0.13	0.62	0.00	7.03	0.68	100.31	2.62	0.00	1.38	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.02	0.00	0.61	0.04	5.00	
Hbl(核)	44.76	0.53	12.23	0.06	10.81	11.92	0.29	15.99	0.00	1.31	0.35	2.03	100.28	6.52	0.06	2.10	0.01	2.35	1.86	0.04	0.57	1.38	0.00	0.37	0.06	15.32	
Gr(核)	37.83	0.14	21.53	0.03	1.88	13.71	3.74	22.18	0.00	0.01	0.00	101.05	5.93	0.02	3.97	0.00	0.44	2.30	0.50	0.02	2.88	0.00	0.00	0.00	0.00	16.06	
WT216																											
Pl(边)	61.81	0.01	23.29	0.00	0.01	4.92	0.06	0.08	0.00	9.06	0.06	99.30	2.76	0.00	1.23	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	0.00	5.01	
Pl(核)	59.72	0.00	24.97	0.00	0.01	6.77	0.05	0.03	0.00	7.99	0.11	99.65	2.67	0.00	1.32	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	0.00	5.00	
Bt(核)	34.92	2.12	17.42	0.00	9.28	0.01	0.17	21.12	0.07	0.11	9.22	3.86	98.30	5.43	0.25	3.19	0.00	2.15	0.00	0.02	0.00	2.75	0.01	0.03	1.83	15.66	
Ms(Pl中)	45.03	0.07	33.43	0.00	1.05	0.02	0.00	2.91	0.06	0.50	10.63	4.38	98.08	6.17	0.01	5.40	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.33	0.01	0.13	1.86	14.13	
Ms(核)	46.73	0.51	32.39	0.00	1.32	0.00	0.04	3.55	0.00	0.45	10.60	4.26	99.85	6.28	0.05	5.13	0.00	0.26	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.12	1.82	14.06	
WT254																											
Pl(核)	63.54	0.00	22.26	0.00	0.00	3.36	0.00	0.00	0.00	9.85	0.10	99.11	2.83	0.00	1.17	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.01	5.02	
Bt(核)	35.17	2.22	17.29	0.03	7.23	0.00	0.16	24.13	0.00	0.11	9.54	3.86	99.74	5.47	0.26	3.17	0.00	1.68	0.00	0.02	0.00	3.14	0.00	0.03	1.89	15.66	
Ms(核)	46.37	0.59	30.74	0.00	1.56	0.00	0.00	3.95	0.00	0.34	10.74	4.38	98.67	6.35	0.06	4.96	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.45	0.00	0.09	1.87	14.10	
Gr(核)	37.10	0.14	21.17	0.00	0.97	9.08	5.36	27.12	0.00	0.01	0.03	100.98	5.92	0.02	3.98	0.00	0.23	1.55	0.72	0.01	3.61	0.00	0.00	0.01	16.05		

一,因此推测岩浆成因矿物在变质作用中受到彻底改造,系变质作用中形成的矿物。温度和压力计算结果见表 3。

4.1 义兴寨岩体

(1) 花岗闪长片麻岩样品 HS78

斜长石中包裹的角闪石与主晶角闪石的化学成分相比,贫 SiO_2 、 MgO ,富 FeO 、 Al_2O_3 , CaO 的含量无差别。采用角闪石 Al 压力计,利用斜长石中包裹的角闪石中 Al 含量计算得出压力值为 0.72 GPa,主晶角闪石中 Al 含量计算得出压力值为 0.46 GPa。根据斜长石中心的化学成分及其中包裹的角闪石化学成分,采用斜长石-角闪石温度计,计算得出变质温度为 759℃。根据主晶角闪石成分与黑云母成分,应用黑云母-角闪石温度计,得出变质温度为 588℃,

温度相比 759℃ 要低 171℃。

(2) 角闪黑云花岗片麻岩样品 HS99

斜长石中心和边缘的化学成分基本一致,角闪石中心相比边缘的化学成分,要贫 SiO_2 ,富 Al_2O_3 ,具有稍高的 FeO 和 K_2O 含量,稍低的 MgO 和 CaO 含量。应用角闪石 Al 压力计,得出主晶角闪石中心记录的压力值为 0.75 GPa,边缘记录的压力值为 0.69 GPa,明显要比中心记录的压力值低 0.06 GPa。根据角闪石中包裹的斜长石成分及角闪石中心成分,采用斜长石-角闪石温度计,得出变质温度为 760℃。根据角闪石边缘成分及主晶斜长石成分得出变质温度为 747℃,与中心温度基本一致。采用角闪石边缘成分及黑云母成分,应用黑云母-角闪石温度计,得出变质温度为 609℃,较 760℃ 低 151℃。

表 3 义兴寨岩体和车厂-北台岩体的变质温度-压力计算结果

Table 3 Metamorphic temperature and pressure conditions of Yixingzhai and Chechang-Beitai plutons

样品编号	p/GPa						$t/^\circ\text{C}$				
	Al ^T	GBMP	GMPQ	GBPQ	GHPQ	HPQ	Hbl-Pl	Bt-Hbl	Bt-Ms	Grt-Bt	Grt-Ms
HS74	0.65					0.72	757				
HS78	0.72						759	588			
	0.46										
HS99	0.75(Hbl 核)						760(Hbl 核)				
	0.69(Hbl 边)						747(Hbl 边)	609(Hbl 边)			
HS139	0.67(Hbl 核)						712	619(Hbl 核)			
	0.63(Hbl 边)							585(Hbl 边)			
WT60	0.70(假定)								740		
WT65	0.71				0.87		691				
WT216	0.70(假定)								729		
WT254		0.98	0.92	1.14					770	564	474

Al^T—角闪石 Al 含量压力计(Anderson and Smith, 1995); GBMP—石榴子石-黑云母-白云母-斜长石压力计(Wu, 2015); GBPQ—石榴子石-黑云母-斜长石-石英压力计(Wu *et al.*, 2004); GMPQ—石榴子石-白云母-斜长石-石英温度计-压力计组合(Wu and Zhao, 2006); GHPQ—石榴子石-角闪石-斜长石-石英压力计(Jonathon *et al.*, 2000); HPQ—角闪石-斜长石-石英压力计(Bhadra and Bhattacharya, 2007); Hbl-Pl—角闪石-斜长石温度计(Holland and Blundy, 1994); Bt-Hbl—黑云母-斜长石温度计(Wu *et al.*, 2002); Bt-Ms—二云母温度计(Hoisch, 1989); Grt-Bt—石榴子石-黑云母温度计(Holdaway, 2000); Grt-Ms—石榴子石-白云母温度计(Wu and Zhao, 2006)。

(3) 石英闪长片麻岩样品 HS139

角闪石中心比边缘的化学成分要富 SiO_2 、 MgO ,贫 FeO 、 CaO , Al_2O_3 的成分基本一致。采用角闪石 Al 压力计,根据角闪石中心的 Al 含量,计算得出压力值为 0.63 GPa,根据角闪石边缘的 Al 含量计算得出压力值为 0.67 GPa,两者相差无几。根据角闪石中心成分及角闪石中包裹的细粒斜长石成分,利用斜长石-角闪石温度计得出变质温度为 712℃。样品中角闪石中的黑云母相比主晶黑云母,矿物化学成分基本没有差别,仅相对具有更高的 FeO 。根据角

闪石中心成分及其中穿插的黑云母成分,应用角闪石-黑云母温度计,计算得出变质温度为 619℃。根据角闪石边缘成分及主晶黑云母成分,应用角闪石-黑云母温度计得出变质温度为 585℃,与 619℃ 在误差范围保持一致。可以看出,角闪石中心与被包裹的斜长石组合计算得出的温度,比角闪石与黑云母组合计算得出的温度高出约 100℃。

(4) 变质辉绿岩墙样品 HS74

角闪石中包裹的斜长石与主晶斜长石的成分基本一致,此样品具有单斜辉石残晶,其成分参照表 1。

应用角闪石 Al 压力计,使用角闪石中心的 Al 含量,得出压力值为 0.65 GPa。根据角闪石中心成分及角闪石中包裹的斜长石成分,应用斜长石-角闪石-石英(HPQ)温度计-压力计组合,得到变质温压条件为 757℃/0.72 GPa。

纵观 4 个样品的变质温度-压力计算值(表 3),可以看出:① 角闪石中心和斜长石中包裹的角闪石记录了较高的温度与压力值,即 710~760℃/0.65~0.75 GPa,可能系变质高峰温压条件,为高角闪岩相,属于典型中压变质相系;② 角闪石边缘和主晶角闪石组合记录了较低的温度与压力值,范围为 585~610℃/0.46~0.63 GPa,属于中角闪岩相、中压变质相系,说明这些样品都经历了明显的降温降压的过程;③ 角闪石-斜长石温度计的温度明显比黑云母-角闪石温度计的温度要高 100~170℃左右。

4.2 车厂-北台岩体

(1) 变质辉绿岩墙样品 WT65

根据角闪石 Al 含量压力计,得出压力为 0.71 GPa。根据斜长石成分和角闪石成分,应用斜长石-角闪石温度计计算得出的温度为 691℃。同时利用石榴子石、角闪石和斜长石成分,应用 GHPQ 压力计,配合斜长石-角闪石温度计得出的温度压力条件为 677℃/0.87 GPa,压力值比利用角闪石 Al 含量压力计所得的压力值高出 0.16 GPa。

(2) 二云斜长花岗片麻岩样品 WT60

没有合适的矿物对压力计计算压力值。根据临近样品 WT65 求得的压力数据,将其估计为 0.7 GPa。根据白云母成分和黑云母成分,根据二云母温

度计得出变质温度为 740℃。

(3) 二云母花岗片麻岩样品 WT216

斜长石中心及边缘成分有较大的差别,颗粒中心的 CaO、Al₂O₃ 含量更高, SiO₂ 和 Na₂O 含量要低,斜长石中心可能为更早期的矿物。斜长石中包裹的白云母与主晶白云母的成分没有明显差别。将变质压力估计为 0.7 GPa,根据白云母和黑云母成分,利用二云母温度计,得出主晶白云母与主晶黑云母组合的变质温度为 729℃。

(4) 含榴二云花岗片麻岩样品 WT254

根据主晶白云母成分与主晶黑云母成分,利用二云母温度计计算得出变质温度为 770℃。根据主晶黑云母、主晶白云母、主晶斜长石与主晶石榴子石中心成分,利用石榴子石-黑云母温度计和 GBPQ、GBMP 压力计,得到温度与压力条件分别为 556℃/1.14 GPa 和 564℃/0.98 GPa。采用 GMPQ 温度计-压力计组合,得到温度与压力条件为 474℃/0.92 GPa。这些数值在误差范围内基本一致,平均值为 530±40℃/1.01±0.09 GPa。

如果不考虑二云母温度计计算结果,车厂-北台岩体变质高峰期温压条件为中角闪岩相,属于中压变质相系顶部。

5 变质作用的 K-Ar 定年

利用传统的同位素稀释法对义兴寨岩体的 2 个样品(HS74、HS139)和车厂-北台岩体的 1 个样品(WT216)进行了 K-Ar 法测年,测试结果见表 4。

表 4 义兴寨和车厂-北台岩体样品的 K-Ar 定年结果

Table 4 K-Ar dating of samples from the Yixingzhai and Chengchang-Beitai plutons

样品	岩性	测年单矿物	质量/mg	K/%	(⁴⁰ Ar) _r /mole·g ⁻¹	(⁴⁰ Ar) _r /%	年龄/Ma
义兴寨岩体							
HS74	变辉绿岩	角闪石	25.1	1.172	6.363×10 ⁻⁹	97.5	1 815±1.0
HS139	石英闪长片麻岩	角闪石	21.25	1.52	8.448×10 ⁻⁹	99.83	1 842±35
车厂-北台岩体							
WT216	二云母花岗片麻岩	黑云母	21.25	1.52	8.448×10 ⁻⁹	99.83	1 796±0.7

义兴寨岩体中石英闪长片麻岩样品 HS139 的角闪石 K-Ar 年龄为 1 842±35 Ma,变质辉绿岩墙样品 HS74 的角闪石 K-Ar 测年的结果为 1 815.0±1.0 Ma。鉴于义兴寨岩体及其中岩墙都经过了较高的变质程度(>590℃),角闪石 K-Ar 同位素体系封闭温度为 500±20℃(Dodson and McClelland-Brown,

1985),因此在变质作用期间,角闪石 K-Ar 同位素体系还处于开放状态。等到温度下降到 500℃以下才开始启动计时,因此这些角闪石 K-Ar 年龄比峰期变质时代要晚,峰期变质年龄应老于 1.84 Ga。

车厂-北台岩体中二云母花岗片麻岩样品 WT216 的黑云母 K-Ar 测年结果为 1 796.0±0.7

Ma。该岩体的变质温度在 550℃ 以上, 高于黑云母 K-Ar 体系的封闭温度 350℃ (Spear, 1993), 此样品的黑云母 K-Ar 年龄仍然比峰期变质时代要晚, 峰期变质年龄应早于 1.80 Ga。

3 个样品的 K-Ar 法测年得出了基本一致的变质年龄(1.84~1.80 Ga), 表明它们记录了同一期变质事件, 真正的峰期变质时代应该老于 1.84 Ga。

6 讨论

6.1 变质作用温度与压力条件

同变质泥质岩、变质基性岩相比, 变质花岗岩类矿物种类过于单调, 因此其变质作用温压条件的估算一般不容易。此外, 就温度计、压力计的适用性而言:

(1) 二云母温度计(Hoisch, 1989)的准确度较低。一方面, 该温度计赖以建立的理论基础——黑云母与白云母之间契尔马克组分的交换受温度控制的规律, 也许并不存在。另一方面, 该温度计并不能有效地反映递增变质带、倒转变质带、热接触变质晕圈中不同地带温度的规律性变化, 不能准确反映客观地质事实。所以, 二云母温度计的计算结果尚值得推敲;

(2) 角闪石 Al 压力计是基于角闪石、黑云母、石英、斜长石、钾长石之间的纯转变反应建立的, 用于估算花岗岩类岩石中角闪石的结晶压力条件。如果花岗质岩浆在非饱水条件下高温结晶的话, 那么角闪石 Al 压力计给出的压力可能偏高(Anderson and Smith, 1995; 曾令森等, 2007)。当用于变质花岗岩时, 其数值意义还不是十分明朗;

(3) 角闪石-黑云母温度计用于恒山义兴寨岩体中中性、基性变质岩时, 总是比角闪石-斜长石温度计计算结果明显偏低。究其原因, 角闪石-斜长石温度计基于角闪石-斜长石-石英之间的纯转变反应建立, 抵御后期 Fe^{2+} - Mg^{2+} 离子再交换(扩散)的能力强; 角闪石-黑云母温度计基于两者之间的 Fe^{2+} - Mg^{2+} 离子交换, 容易受到后期离子扩散的制约。因此, 角闪石-黑云母温度计记录的是变质高峰期后某一个时段的退变质温度;

(4) 义兴寨岩体变质高峰温度条件显然超过了绿帘角闪岩相(Spear, 1993)的温度范围。但是, 该岩体是中性变质岩, 所以温度计算结果并不与基于基性变质岩构筑的相图相矛盾。

尽管温度计与压力计计算存在着一些误差, 仍然可以看出, 义兴寨岩体变质高峰期处于高角闪岩相、中压变质相系, 车厂-北台岩体变质高峰期处于中角闪岩相、中压变质相系顶部。如果情况的确是这样的话, 是否意味着这两个岩体变质期间位于不同的深度?

6.2 华北中部造山带的造山时限

10 余年以来, 学者们一直认为华北中部造山带的碰撞事件发生于约 1.85 Ga (Zhao *et al.*, 1998, 2012)。近年来, 随着高精度变质锆石 U-Pb 定年、富钾变质矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年、变质独居石 U-Th-Pb 化学法定年等数据的积累, 人们发现该造山带构造-热事件可能开始于约 1.97 Ga, 很可能一直延续到约 1.78 Ga, 详见 Lu 等(2015)、Chen 等(2015)的总结。如果情况真是这样的话, 那么需要重新认识该造山带的演化史。

7 结论

(1) 义兴寨岩体的变质高峰期变质温度-压力条件是 710~760℃/0.65~0.75 GPa, 记录的降温降压条件为 560~690℃/0.46 GPa。变质高峰期为高角闪岩相, 属于典型中压变质相系。车厂-北台岩体的变质高峰期温度-压力条件为 550~690℃/0.92~1.14 GPa。变质高峰期为中角闪岩相, 属于中压变质相系顶部。

(2) 义兴寨岩体、车厂-北台岩体中, 石英闪长片麻岩、变辉绿岩墙和二云母花岗片麻岩中的变质角闪石和黑云母的 K-Ar 测年结果分别为 1842 ± 35 Ma、 1815.0 ± 1.0 Ma、 1796.0 ± 0.7 Ma, 在误差范围内基本一致, 推测这两个岩体变质高峰期稍早于 1.84 Ga。

致谢 感谢任留东研究员和曾令森研究员提出的宝贵修改建议。

References

- Anderson L J and Smith R D. 1995. The effects of temperature and $f\text{O}_2$ on the Al-in-hornblende barometer[J]. *American Mineralogist*, 80: 549~559.
- Bai Jin. 1986. The Early Precambrian Geology of Wutaishan[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press (in Chinese).

- Bai Jin, Wang Ruizheng and Guo Jinjing. 1992. The Major Geological Events of Early Precambrian and Their Dating in Wutaishan Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~65(in Chinese).
- Bhadra S and Bhattacharya A. 2007. The barometer tremolite + tschermakite + 2 albite = 2 pargasite + 8 quartz: constraints from experimental data at unit silica activity, with application to garnet-free natural assemblages[J]. *American Mineralogist*, 92: 491~502.
- Chen Hongxu, Wang Juan, Wang Hao, *et al.* 2015. Metamorphism and geochronology of the Luoning metamorphic terrane, southern terminal of the Palaeoproterozoic Trans-North China Orogen, North China Craton[J]. *Precambrian Research* (in press. DOI: 10.1016/j.precamres.2015.04.013).
- Jonathon D, Holland T and Powell R. 2000. Hornblende-garnet-plagioclase thermobarometry: a natural assemblage calibration of the thermodynamics of hornblende[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140: 353~362.
- Dodson M H and McClelland-Brown E. 1985. Isotopic and palaeomagnetic evidence for rates of cooling, uplift and erosion[A]. Snelling N J. *The Chronology of Geological record*[C]. Geological Society, London, *Memoirs*, 10: 315~325.
- Guan Hong, Sun Min, Wilde S A, *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: implications for formation and assembly of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 113: 1~18.
- Guo Jinghui, Sun Min, Chen Fukun, *et al.* 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[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 629~642.
- Hoisch T D. 1989. A muscovite-biotite geothermometer[J]. *American Mineralogist*, 74: 565~572.
- Holdway M J. 2000. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer[J]. *American Mineralogist*, 85: 881~892.
- Holland T and Blundy J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116: 433~447.
- Hollister L S, Grissom G C, Peters E K, *et al.* 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons[J]. *American Mineralogist*, 72 (3~4): 231~239.
- Kröner A, Wilde S A, Li Jianghai, *et al.* 2005. Age and evolution of a late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 577~595.
- Kröner A, Wilde S A, Zhao Guochun, *et al.* 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[J]. *Precambrian Research*, 146: 45~67.
- Kusky T M. 2011. Geophysical and geological tests of tectonic models of the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 20: 26~35.
- Kusky T M and Li Jianghai. 2003. Palaeoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22: 383~397.
- Li Qiugen, Liu Shuwen, Wang Zongqi, *et al.* 2008. Contrasting provenance of Late Archean metasedimentary rocks from the Wutai Complex, North China Craton: detrital zircon U-Pb, whole-rock Sm-Nd isotopic, and geochemical data[J]. *International Journal of Earth Science*, 97: 443~458.
- Li Sanzhong, Zhao Guochun, Wilde S A, *et al.* 2010. Deformation history of the Hengshan-Wutai-Fuping Complexes: Implications for the evolution of the Trans-North China Orogen[J]. *Gondwana Research*, 18: 611~631.
- Liu Shuwen, Pan Yuanming, Xie Qianli, *et al.* 2004. Archean geodynamic in the Central Zone, North China Craton: constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutai complexes[J]. *Precambrian Research*, 130: 229~249.
- Liu Shuwen, Zhao Guochun, Wilde Simon A, *et al.* 2006. Th-U-Pb monazite geochronology of the Lüliang and Wutai Complexes: Constraints on the tectonothermal evolution of the Trans-North China Orogen[J]. *Precambrian Research*, 148: 205~224.
- Lu Junsheng, Wang Guodong, Wang Hao, *et al.* 2015. Zircon SIMS U-Pb geochronology of the Lushan terrane: dating metamorphism of the southwestern terminal of the Palaeoproterozoic Trans-North China Orogen[J]. *Geological Magazine*, 152 (2): 367~377.
- Polat A, Kusky T M, Li Jianghai, *et al.* 2005. Geochemistry of Neoproterozoic (ca. 2.55~2.50 Ga) volcanic and ophiolitic rocks in the Wutaishan greenstone belt, central orogenic belt, North China craton: Implications for geodynamic setting and continental growth [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 117 (11/12): 1387~1399.
- Qian Jiahui, Wei Chunjing, Clarke Geoffrey L, *et al.* 2015. Metamorphic evolution and zircon ages of garnet-orthoamphibole rocks in

- southern Hengshan, North China Craton: insights into the regional Paleoproterozoic *P-T-t* history[J]. *Precambrian Research*, 256: 223~240.
- Qian Jiahui, Wei Chunjing, Zhou Xiwen, *et al.*. 2013. Metamorphic *P-T* paths and new zircon U-Pb age data for garnet-mica schist from the Wutai Group, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 233: 282~296.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495~500 (in Chinese with English abstract).
- Spear F S. 1993. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-temperature-time Paths*[M]. Mineralogical Society of America, Washington, D. C.
- Steiger R H and Jager E. 1977. Subcommittee on geochronology: convention of the use of decay constants in geo- and cosmochemistry[J]. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 36: 359~362.
- Tian Yongqing, Liang Yingfang, Fan Sikun, *et al.*. 1992. Geochronology of the Hengshan Complex in special reference to Nd isotopic evolution[J]. *Geochimica*, 9: 255~264 (in Chinese with English abstract).
- Trap P, Faure M, Lin W, *et al.*. 2007. Late Paleoproterozoic (1900~1800 Ma) nappe stacking and polyphase deformation in the Hengshan-Wutai area: implications for the understanding of the Trans-North-China Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 156: 85~106.
- Wang Guodong, Lu Junsheng, Chen Hongxu, *et al.*. 2013. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of amphiboles of the Taihua Metamorphic Complex, Mt. Huashan, southern terminal of the Paleoproterozoic Trans-North China Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3099~3114 (in Chinese with English abstract).
- Wang Kaiyi, Hao Jie, Zhou Shaoping, *et al.*. 1997. Constraints on Wutai orogenic event from single zircon SIMS dating results[J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(12): 1295~1298 (in Chinese).
- Wang Renmin, Chen Zhenzhen and Chen Fei. 1991. Grey tonalitic gneiss and high-pressure granulite inclusions in Hengshan, Shanxi provinces and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31: 36~45 (in Chinese with English abstract).
- Wilde S A, Cawood P A, Wang Kaiyi, *et al.*. 2005. Granitoid evolution in the Late Archean Wutai Complex, North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 597~613.
- Wu Chunming. 2015. Revised empirical garnet-biotite-muscovite-plagioclase geobarometer in metapelites[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 33: 167~176.
- Wu Chunming, Pan Yusheng, Wang Kaiyi, *et al.*. 2002. A report on a biotite-calcic hornblende geothermometer[J]. *Acta Geologica Sinica*, 76(1): 126~131.
- Wu Chunming, Zhang Jian and Ren Liudong. 2004. Empirical garnet-biotite-plagioclase-quartz (GBPQ) geobarometry in medium- to high-grade metapelites[J]. *Journal of Petrology*, 45: 1907~1921.
- Wu Chunming and Zhao Guochun. 2006. Recalibration of the garnet-muscovite (GM) geothermometer and the garnet-muscovite-plagioclase-quartz (GMPQ) geobarometer for metapelitic assemblages[J]. *Journal of Petrology*, 47: 2357~2368.
- Zeng Lingsen, Chen Jing, Chen Zhenyu, *et al.*. 2007. Emplacement depth of the Shidao granitic complex and the rapid exhumation of the Sulu ultrahigh pressure rocks: New constraints on the mechanisms for rapid exhumation[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(12): 3171~3179 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo and Bian Aiguo. 2000. The amalgamation of the supercontinent of the North China Craton at the end of Neo-Archean and its breakup during late Paleoproterozoic and Meso-Proterozoic[J]. *Science in China (Series D)*, 30: 129~137 (in Chinese).
- Zhai Mingguo, Bian Aiguo and Zhao Taiping. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archean and its breakup during late Paleoproterozoic and Meso-Proterozoic[J]. *Science in China (Series D)*, 43: 219~232.
- Zhai Mingguo and Liu Wenjun. 2003. Paleoproterozoic tectonic history of the North China Craton: a review[J]. *Precambrian Research*, 122: 183~199.
- Zhai Mingguo and Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview[J]. *Gondwana Research*, 20: 6~25.
- Zhang Jian, Zhao Guochun, Li Sanzhong, *et al.*. 2009. Polyphase deformation of the Fuping Complex, Trans-North China Orogen: Structures, SHRIMP U-Pb zircon ages and tectonic implications[J]. *Journal of Structural Geology*, 31: 177~193.
- Zhao Guochun, Cawood Peter A, Li Sanzhong, *et al.*. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Precambrian Research*, 222~223: 55~76.
- Zhao Guochun, Cawood Peter A and Lu Liangzhao. 1999. Petrology and *P-T* history of the Wutai amphibolites: implications for tectonic evolution of the Wutai Complex, China[J]. *Precambrian Research*, 93: 181~199.

- Zhao Guochun, Cawood Peter A, Wilde Simon A, *et al.* 2001b. High-pressure granulites (retrograded eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: petrology and tectonic implications[J]. *Journal of Petrology*, 42: 1141~1170.
- Zhao Guochun, Kröner A, Wilde Simon A, *et al.* 2007. Lithotectonic elements and geological events in the Hengshan-Wutai-Fuping belt: a synthesis and implications for the evolution of the Trans-North China Orogen[J]. *Geological Magazine*, 144 (5): 753~775.
- Zhao Guochun, Sun Min and Wilde Simon A. 2003. Major tectonic units of the North China Craton and their Paleoproterozoic assembly[J]. *Science in China (Series D)*, 46 (1): 23~38.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde Simon A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136: 177~202.
- Zhao Guochun, Wilde Simon A, Cawood Peter A, *et al.* 1998. Thermal evolution of Archean basement rocks from the Eastern part of the North China Craton and its bearing on tectonic setting[J]. *International Geology Review*, 40 (8): 706~721.
- Zhao Guochun, Wilde Simon A, Cawood Peter A, *et al.* 2000. Petrology and *p-T* path of the Fuping mafic granulites: implications for tectonic evolution of the central zone of the North China Craton[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 375~391.
- Zhao Guochun, Wilde Simon A, Cawood Peter A, *et al.* 2001a. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 107: 45~73.
- Zhao Guochun, Wilde Simon A, Cawood Peter A, *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: implications for Late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton[J]. *American Journal of Science*, 302: 191~226.
- ### 附中文参考文献
- 白瑾. 1986. 五台山早前寒武纪地质[J]. 中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊, 16: 171~200.
- 白瑾, 王汝铮, 郭进京. 1992. 五台山早前寒武纪重大地质事件及其年代[M]. 北京: 地质出版社, 1~65.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495~500.
- 田永清, 梁英芳, 范嗣昆, 等. 1992. 恒山杂岩的年代学和钨同位素演化[J]. 地球化学, (3): 255~263.
- 王国栋, 卢俊生, 王浩, 等. 2013. 华山太华变质杂岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及角闪石 $^{30}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年[J]. 岩石学报, 29 (9): 3099~3114.
- 王凯怡, 郝杰, 周少平, 等. 1997. 单颗粒锆石离子探针质谱定年结果对五台造山事件的制约[J]. 科学通报, 42(12): 1295~1298.
- 王仁民, 陈珍珍, 陈飞. 1991. 恒山灰色片麻岩和高压麻粒岩包体及其地质意义[J]. 岩石学报, 31: 36~45.
- 曾令森, 陈晶, 陈振宇, 等. 2007. 山东石岛花岗岩复合岩体的侵位深度与苏鲁超高压变质岩的快速折返机制及动力学效应[J]. 岩石学报, 23(12): 3171~3179.
- 翟明国, 卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合[J]. 中国科学(D辑), 30: 129~137.