

·专题研究·

# 太行山阜平杂岩中麻棚-赤瓦屋岩体的时代、 侵位深度及构造意义

李林林<sup>1</sup> 韩宝福<sup>1</sup> 苗国均<sup>1</sup> 舒桂明<sup>1</sup> 陈家富<sup>1</sup> 杨进辉<sup>2</sup> 杨岳衡<sup>2</sup> 张艳斌<sup>2</sup>

(1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;  
2. 岩石圈演化国家重点实验室, 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 中生代岩浆活动在太行山北段形成了一系列花岗岩体, 其中的麻棚-赤瓦屋岩体侵位于穹窿状的阜平杂岩中, 具有贫硅、富碱、高铝的钙碱性 I 型花岗岩特征。岩体分带明显, 由边部向核部可以划分为石英闪长岩、花岗闪长岩、似斑状花岗岩 3 个相带, 它们的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为  $126.4 \pm 2.4$  Ma、 $125.4 \pm 2.0$  Ma 和  $126.2 \pm 2.0$  Ma, 在误差范围内一致, 指示岩体在早白垩世期间快速侵位、结晶。各相带样品的角闪石全铝平均值分别为 1.018、0.880 和 0.871, 对应的角闪石平均结晶压力分别为 0.183、0.118 和 0.114 GPa, 均值为 0.141 GPa, 对应的侵位深度约 5 km, 明显小于区域内元古界至侏罗系的地层厚度, 表明在岩体侵位之前, 阜平杂岩就已经具有穹窿状构造特征。结合相关资料, 估计太行山早白垩世以来的平均隆升速率为 0.07~0.08 km/Ma。

**关键词:** 麻棚-赤瓦屋岩体, 锆石 U-Pb 定年, 角闪石全铝压力计, 侵位深度, 隆升速率, 太行山

中图分类号: P588.12<sup>+</sup>1; P597<sup>+</sup>.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)03-0289-18

## Geochronology, emplacement depth and tectonic implications of the Mapeng-Chiwawu granitic pluton in Fuping Complex of the Taihang Mountains

LI Lin-lin<sup>1</sup>, HAN Bao-fu<sup>1</sup>, MIAO Guo-jun<sup>1</sup>, SHU Gui-ming<sup>1</sup>, CHEN Jia-fu<sup>1</sup>, YANG Jin-hui<sup>2</sup>,  
YANG Yue-heng<sup>2</sup> and ZHANG Yan-bin<sup>2</sup>

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** It is known that Mesozoic magmatism generated a series of granitic plutons in the northern segment of the Taihang Mountains. Among others, the Mapeng-Chiwawu pluton just crops out in the central part of the Neoproterozoic-Fuping Complex, showing I-type calc-alkaline affinity, with low SiO<sub>2</sub> and high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and alkali content. The pluton consists of quartz diorite, granodiorite and granite from edge to core, and these intrusions yielded LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of  $126.4 \pm 2.4$  Ma,  $125.4 \pm 2.0$  Ma and  $126.2 \pm 2.0$  Ma, indicating that the pluton was emplaced in a short time around 126 Ma (Early Cretaceous). The total amount of Al in hornblende is 1.018, 0.880 and 0.871 for quartz diorite, granodiorite and granite, and accordingly the crystallization pressure of hornblende is 0.183, 0.118 and 0.114 GPa, with an average of 0.141 GPa, indicating a depth of ca. 5 km. This is significantly smaller than the thickness of Proterozoic to Jurassic sequences

收稿日期: 2011-03-21; 修订日期: 2012-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90714006), 中国地质调查局项目(1212011120135)

作者简介: 李林林(1986-), 男, 博士研究生, 岩石、矿物、矿床学专业, E-mail: leein@sina.com; 通讯作者: 韩宝福(1960-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: bfhfan@pku.edu.cn.

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20120220.1036.001.html>

around the Fuping Complex, suggesting a dome-shaped structure for the Fuping Complex before the Early Cretaceous. Combined with other data, an average uplift rate of  $0.07 \sim 0.08$  km/Ma can be obtained for the Taihang Mountains since the Early Cretaceous.

**Key words:** Mapeng-Chiwawu granitic pluton; zircon U-Pb age; Al-in-hornblende barometer; emplacement depth; uplift rate; Taihang Mountains

中生代时期,中国东部构造岩浆活动强烈,使华北克拉通受到了强烈的改造,在太行山地区形成了一系列中酸性 I 型花岗质岩体,它们的侵位时代集

中在  $119 \sim 138$  Ma 之间(图 1;牛树银等,1995;罗照华等,1997;Davis *et al.*, 1998;路凤香,2000;陈斌等,2002,2005,2006;蔡剑辉等,2003,2005;

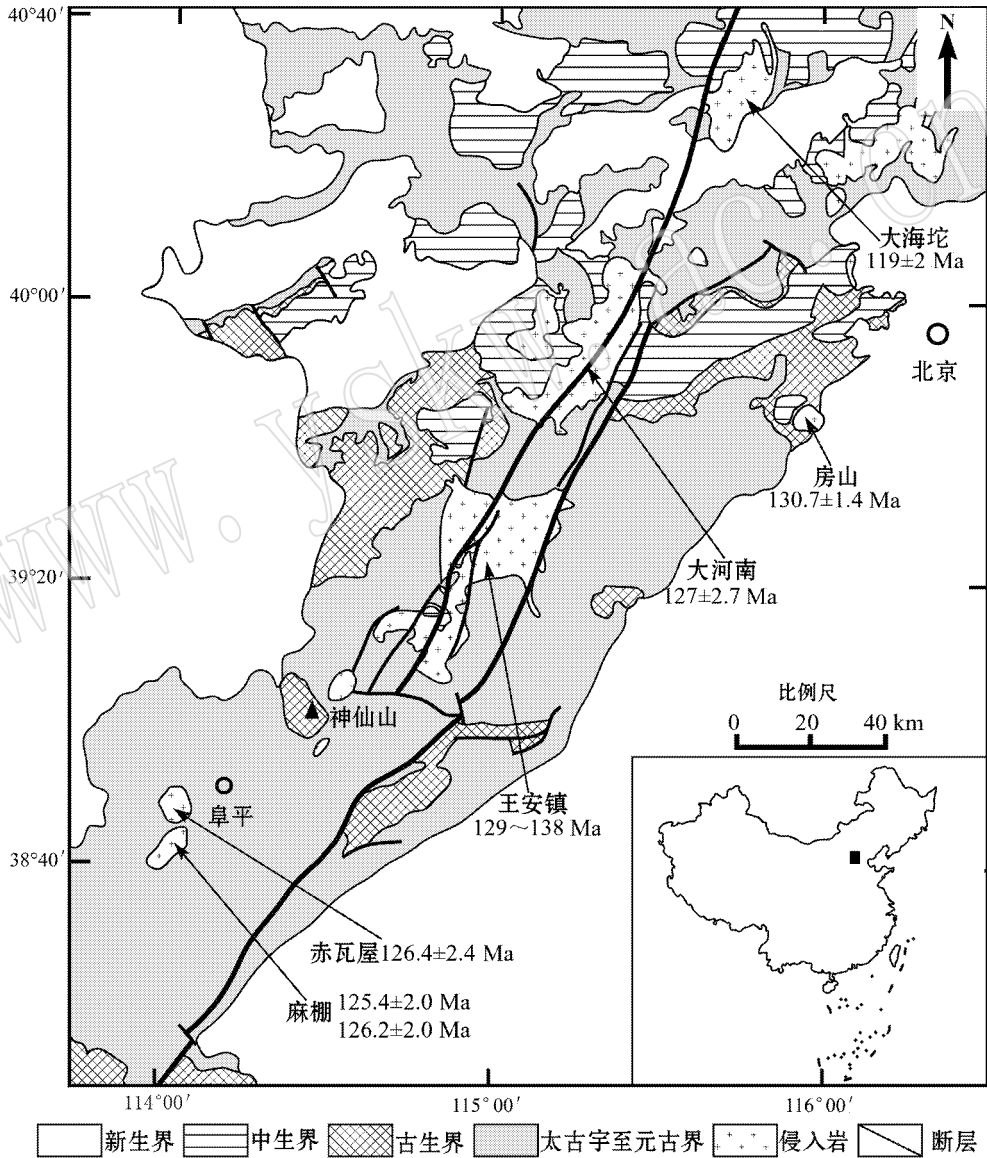


图 1 太行山北段中生代花岗质侵入体分布[据河北省地质矿产局(1989)简化]及锆石 U-Pb 年龄图  
(Davis *et al.*, 1998;蔡剑辉等,2005;陈斌等,2005;本文)

Fig. 1 The distribution of Mesozoic granitic plutons in the northern segment of Taihang Mountains (simplified after Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province, 1989) and their zircon U-Pb ages (after Davis *et al.*, 1998; Cai Jianhui *et al.*, 2005; Chen Bin *et al.*, 2005 and this study)

夏国礼等, 2005, 2006; 徐义刚, 2006)。前人已经对其中的两个相邻的麻棚-赤瓦屋岩体进行过岩石学、岩石化学、岩体成因类型和年代学等多方面的研究(王季亮等, 1994; 张亚雄等, 1994; 王启超等, 1995; 刘荣访, 2001; 夏国礼等, 2005, 2006; 王自力等, 2007; 惠朝庄等, 2008; 刘阳等, 2010a, 2010b), 其中夏国礼等(2005, 2006)报道的两个岩体的 Rb-Sr 等时线年龄基本一致, 分别为 135.1 Ma 和 135.2 Ma, 而刘阳等(2010a, 2010b)报道的两个岩体的锆石 U-Pb 年龄相差较大, 麻棚岩体边缘相的锆石 U-Pb 年龄为  $125.4 \pm 2.0$  Ma, 赤瓦屋岩体边缘相的锆石 U-Pb 年龄为  $134.0 \pm 5.3$  Ma 及  $139.8 \pm 3.1$  Ma。前人的定年结果显示这两个岩体是在早白垩世期间侵位的, 但它们是同时的还是不同期次岩浆活动的产物还有待于进一步确定。此外, 两个岩体侵位深度和侵位后隆升剥露历史也值得研究。因此, 本文在前人研究的基础上, 开展了岩体的岩石学、岩石化学和锆石 U-Pb 定年的工作, 分析了两个岩体的相互关系, 还应用角闪石全铝压力计估算了岩体的侵位深度, 结合区域地质资料粗略地估算了岩体侵位后

的区域隆升速率。

## 1 地质背景

麻棚-赤瓦屋岩体侵位于古老的阜平变质杂岩之中。阜平杂岩是华北克拉通太古宙变质结晶基底的一部分, 现今表现为 NNE 向展布的穹窿状构造, 阜平杂岩的围岩为元古宇至侏罗系及新生界的盖层(图 2a)。

前人(刘树文等, 2000, 2002; 孙敏等, 2001; 杨崇辉等, 2004; 李基宏等, 2005; Wilde *et al.*, 1997; Guan *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2002; Xia *et al.*, 2006)对阜平杂岩进行了大量的研究工作。刘树文(1996)将阜平杂岩分为 3 个单元: 以 TTG 片麻岩为主的阜平片麻岩、分布在阜平片麻岩东南和西部的角闪岩相变质的湾子表壳岩和位于两者之间的席状花岗质侵入体——南营片麻岩。Xia 等(2006)将阜平杂岩分为阜平 TTG 片麻岩、湾子表壳岩、龙泉关眼球状麻粒岩和南营花岗质片麻岩等 4 个单元。虽然阜平杂岩经历过角闪相至麻粒岩相变质作

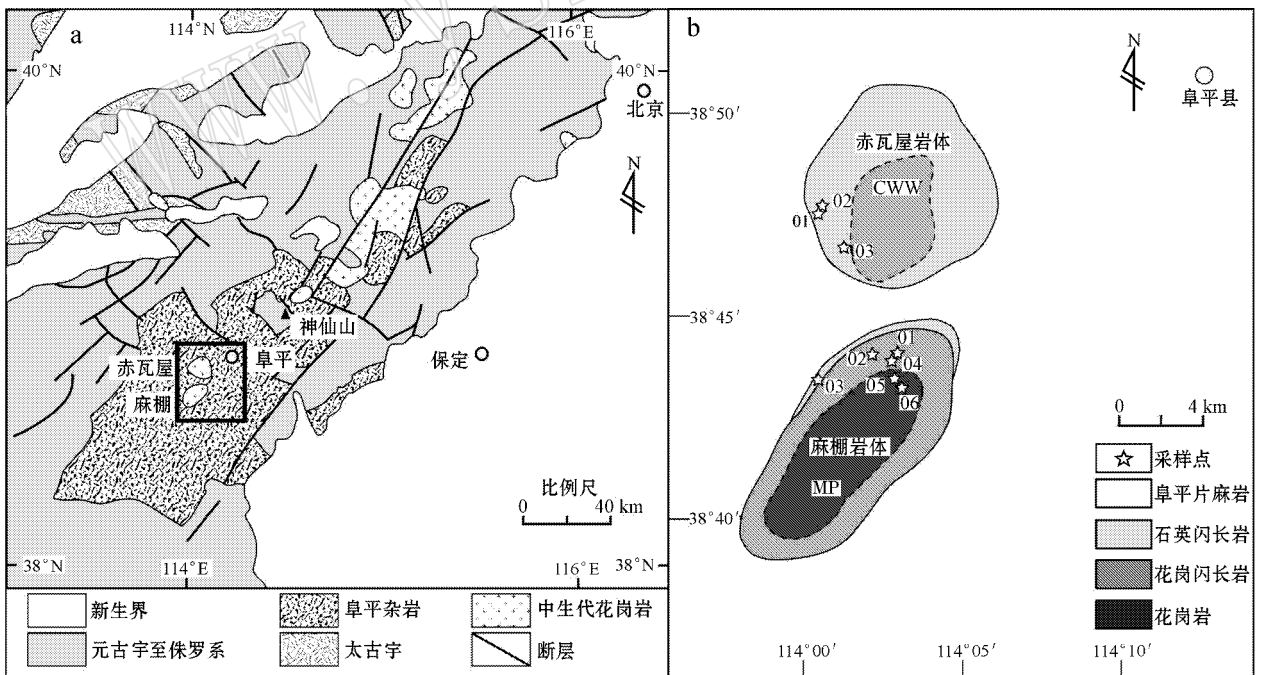


图 2 阜平隆起地质简图(a, 据乔秀夫等(2002)简化)和麻棚-赤瓦屋岩体地质简图(b)

Fig. 2 Simplified tectonic framework of Fuping Complex (a, simplified after Qiao Xiufu *et al.*, 2002) and Mapeng-Chiwawu pluton (b)

① 河北省地质局区域地质测量大队, 1966. 1:20 万阜平幅地质图.

用,各单元的形成时代不同,但是整体上在 1.8 Ga 以前就已经形成,至中生代,阜平杂岩中又被麻棚、赤瓦屋、台峪等花岗质岩体侵入(图 2a)。

## 2 岩体特征

麻棚-赤瓦屋岩体位于阜平县城西南(图 2a),由相邻的麻棚和赤瓦屋两个较小岩体组成,它们侵位于阜平杂岩核部的阜平 TTG 片麻岩之中(图 2b),出露总面积约 128 km<sup>2</sup>。岩体表现出明显的分带现象,由岩体中心向外,麻棚岩体可以划分为似斑状花岗岩、花岗闪长岩和石英闪长岩 3 个相带,赤瓦屋岩体可以划分为花岗闪长岩和石英闪长岩两个相带(图 2b)。不同相带之间,没有明显的界线,在岩性上呈渐变的过渡关系。两岩体均为块状构造,普遍含有暗色包体,并被细晶质和伟晶质脉体切割。

麻棚-赤瓦屋岩体的主要矿物组成为斜长石、钾长石、石英、角闪石、黑云母,副矿物主要为磷灰石、榍石、锆石、磁铁矿(图 3)。由边缘向中心,钾长石、斜长石和石英的含量逐渐增加,角闪石等暗色矿物的含量逐渐减少,角闪石颗粒内偶尔可见辉石残余。其中边缘相石英闪长岩中,石英含量约为 5%,长石以斜长石为主,钾长石含量较低,暗色矿物总量约为 15%,且角闪石明显多于黑云母;在过渡相花岗闪长岩中,石英含量约为 15%,长石中的钾长石含量明显增加,暗色矿物总量约为 5%;中心相与过渡相在岩相上差别不明显,钾长石的含量略有增加,暗色矿物的含量也相应降低,但差别不大。其中长石、黑云母多呈自形-半自形分布,石英的自形程度较差,呈它形充填在空隙中,中心相的粗粒似斑状花岗岩中,斑晶主要为钾长石(图 3e)。角闪石在岩体中具有两种产出形态,一类为半自形颗粒较大的角闪石,颗粒直径一般大于 0.5 mm,在显微镜下以淡绿色为主(图 3b)。这类角闪石在石英闪长岩中较多,在似斑状花岗岩和花岗闪长岩中较少。另一类为充填在长石、石英等颗粒之间的小颗粒它形角闪石,以淡蓝绿色为主(图 3f)。此类角闪石在似斑状花岗岩和花岗闪长岩中较多,而在石英闪长岩中较少。

对麻棚-赤瓦屋岩体 9 件样品进行岩石化学分析,结果(表 1)显示 SiO<sub>2</sub> 含量变化范围较大(57.43%~70.42%),Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较高(14.65%~16.49%),里特曼指数  $\sigma$  值在 2.83~3.76 之间,碱度指数 AR 在 2.0~3.34 之间。由边部向中心呈现

SiO<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>O 含量及 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值逐渐增大,FeO、MgO 含量及岩石分异指数 DI 和固结指数 SI 逐渐减小的特征,均表现为准铝质钙碱性 I 型花岗岩的特征(图 4)。

## 3 锆石 U-Pb 定年

本文对岩体不同相带中的样品(图 2b)进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年。先将岩石样品破碎至 100  $\mu$ m 左右,用电磁和重液方法分选,然后在双目镜下手工挑选具有代表性的锆石颗粒与 TEMORA-1 标准锆石一起粘在直径 25 mm 的环氧树脂上制成样品靶。锆石的阴极发光(CL)图像在北京大学电镜室完成,锆石 U-Pb 测试是在中国科学院地质与地球物理研究所 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)、Agilent7500a 型四级杆电感耦合等离子体质谱仪(Q-ICPMS)和 193 nm 激光取样系统上完成的(详细分析流程见谢烈文等,2008),锆石 U-Pb 年龄计算和谐和曲线绘制用 ISOPLOT 软件(Ludwig, 2000)完成。

所分析的锆石颗粒多为长柱状或短柱状,粒径集中在 100~200  $\mu$ m 之间,晶体透明、洁净,普遍发育有震荡生长环带,具有典型的岩浆锆石特征(图 5)。

对边缘相石英闪长岩样品 08CWW01 的 36 颗锆石的 36 个点进行了 U-Pb 同位素分析。其中两个点(09 和 11)的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄值分别为 179 ± 6 Ma 和 109 ± 8 Ma,明显偏离众数,点 01、18、19、22、27 和 30 的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄误差较大(表 2)。剩余 28 个点在 U-Pb 谐和曲线图(图 6a)上密集分布,<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 的加权平均年龄为 126.4 ± 2.4 Ma,MSWD 值为 0.69。

在过渡相花岗闪长岩样品 08MP04 的 34 颗锆石的 36 个点的分析中,点 7 和 8 选自同一颗锆石的两侧,点 19 和 20 选自同一颗锆石的边部与核部,4 个点得到的年龄值在误差范围内一致(表 2),说明样品锆石不存在继承的锆石核。点 33 的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄误差较大,点 09、22、25 和 36 的谐和性差,剩余的 31 个点在 U-Pb 谐和曲线图(图 6b)上密集分布,<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 的加权平均年龄为 125.4 ± 2.0 Ma,MSWD 值为 1.7。

在中心相似斑状花岗岩样品 08MP06 的 32 颗锆石的 32 个点的分析中,点 10 和 22 的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄误差大,剩余的 30 个点在 U-Pb 协和曲线图

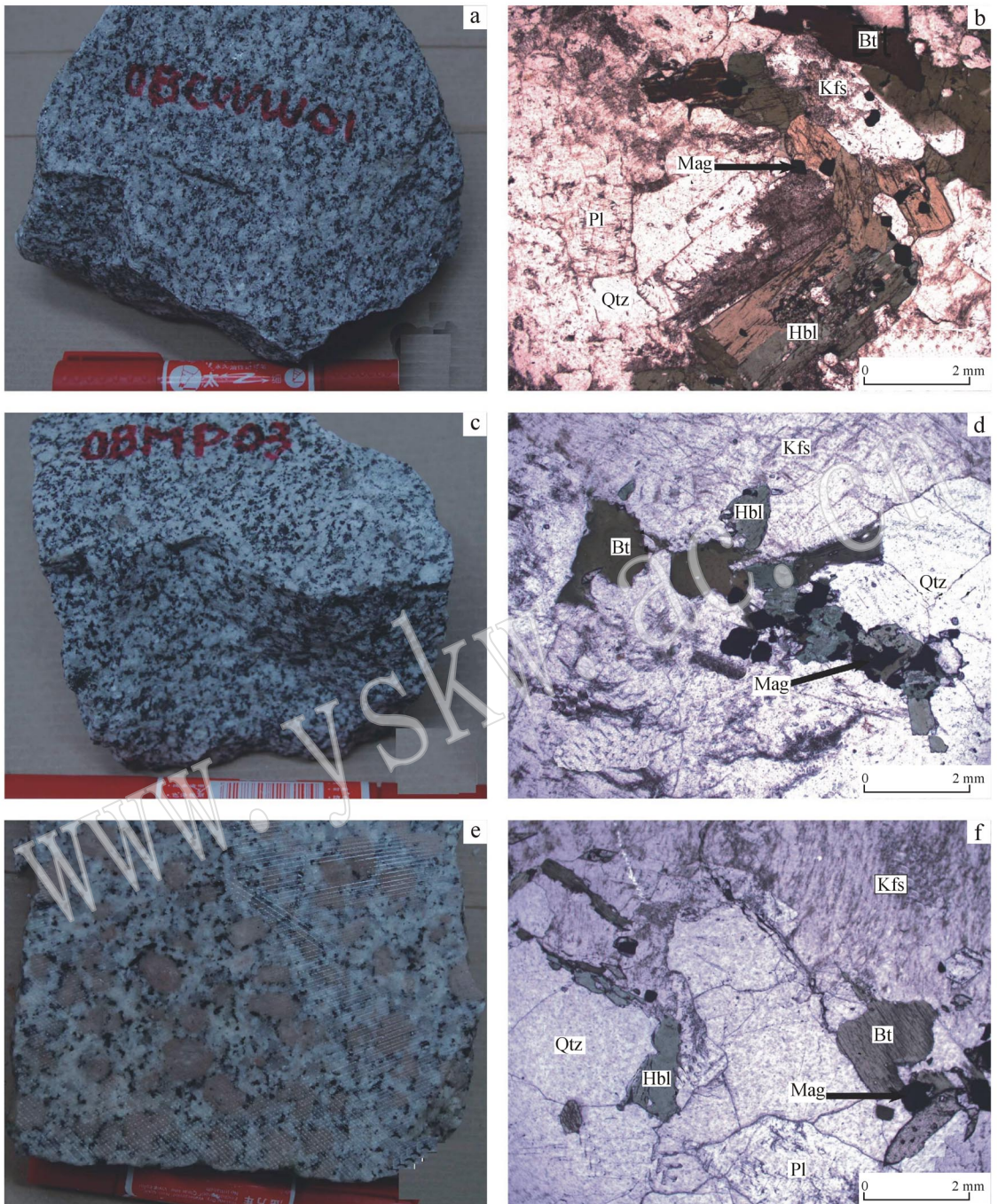


图 3 麻棚-赤瓦屋岩体手标本及显微结构图

Fig. 3 Hand specimen and photomicrographs of Mapeng-Chiwawu pluton

a—样品 08CWW01, 石英闪长岩; b—样品 08CWW03, 单偏光; c—样品 08MP03, 花岗闪长岩; d—样品 08MP02, 单偏光;  
 e—样品 08MP06, 似斑状花岗岩; f—样品 08MP06, 单偏光; Qtz—石英; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Hbl—角闪石;  
 Bt—黑云母; Mag—磁铁矿

a—sample 08CWW01, quartz diorite; b—sample 08CWW03, plainlight; c—sample 08MP03, granodiorite; d—sample 08MP02, plainlight;  
 e—sample 08MP06, porphyritic-like granite; f—sample 08MP06, plainlight;  
 Qtz—quartz; Kfs—feldspar; Pl—plagioclase; Hbl—amphibole; Bt—biotite; Mag—magnetite

表 1 麻棚-赤瓦屋岩体岩石化学成分和主要岩石化学参数

 $w_B/\%$ 

Table 1 Chemical data of Mapeng-Chiwawu pluton

样品号	麻棚及赤瓦屋岩体边缘相				麻棚岩体过渡相			麻棚岩体中心相	
	08CWW01	08CWW02	08CWW03	08MP03	08MP01	08MP02	08MP04	08MP05	08MP06
SiO <sub>2</sub>	59.31	7.43	58.68	60.88	69.76	65.02	69.07	69.24	70.42
TiO <sub>2</sub>	0.55	0.68	0.63	0.22	0.37	0.50	0.26	0.26	0.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.49	15.88	16.04	15.84	15.24	15.90	15.14	15.12	14.65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.42	2.89	2.61	2.32	0.76	1.54	0.90	0.89	0.87
FeO	3.26	3.90	3.52	3.13	1.02	2.09	1.22	1.20	1.18
MnO	0.07	0.08	0.08	0.08	0.03	0.06	0.03	0.04	0.04
MgO	3.77	4.98	4.47	4.01	0.91	2.57	1.06	1.09	0.89
CaO	4.64	5.24	4.96	4.57	1.92	2.96	2.07	2.06	2.05
Na <sub>2</sub> O	4.77	4.16	4.32	3.88	4.42	4.16	4.68	4.23	4.61
K <sub>2</sub> O	3.05	2.86	3.00	3.50	4.90	4.34	4.77	4.74	4.19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.30	0.36	0.34	0.26	0.10	0.17	0.12	0.12	0.14
LOI	0.67	0.74	0.66	0.43	0.36	0.36	0.30	0.64	0.36
Total	99.30	99.22	99.30	99.11	99.80	99.68	99.61	99.61	99.67
$\sigma$	3.76	3.42	3.41	3.04	3.25	3.28	3.42	3.07	2.83
AR	2.18	2.00	2.07	2.13	3.38	2.64	3.43	3.19	3.23
DI	64.33	57.44	60.71	63.75	87.01	75.38	86.48	85.21	86.63
SI	21.81	26.50	24.94	23.80	7.60	17.49	8.38	8.97	7.60
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.64	0.69	0.69	0.90	1.11	1.04	1.02	1.12	0.91

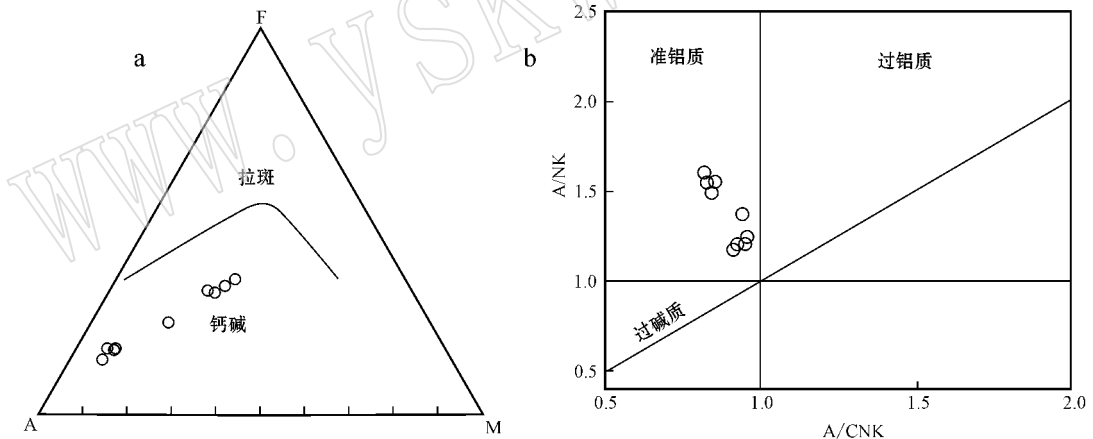


图 4 麻棚-赤瓦屋岩体 AFM(a)和 A/NK - A/CNK(b)图解

Fig. 4 AFM(a) and A/NK - A/CNK(b) diagrams for Mapeng-Chiwawu pluton

(图 6c)上密集分布,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的加权平均年龄为  $126.2 \pm 2.0$  Ma, MSWD 值为 0.93。

上述 3 个锆石 U-Pb 年龄在误差范围内相同, 表明麻棚和赤瓦屋两个岩体基本上是同时于早白垩世侵位的, 这与夏国礼等(2005, 2006)根据 Rb-Sr 等时线年龄得到的认识是一致的。麻棚岩体过渡相花岗闪长岩和中心相似斑状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄在误差范围内相同, 也与刘阳等(2010b)获得的麻棚岩体边缘相的锆石 U-Pb 年龄 ( $125.4 \pm 2.0$  Ma) 完全一致。但是, 赤瓦屋岩体边缘相石英闪长岩的锆石

U-Pb 年龄明显小于刘阳等(2010a)报道的结果。岩体不同相带具有一致的锆石 U-Pb 年龄反映了岩体经历了快速的侵位和冷却结晶过程。

野外观察和室内研究发现两个岩体不但产出位置非常接近, 二者之间没有被断裂分隔(图 2b), 对应相带的岩石学和岩石化学特征极为相似(表 1), 而且具有在误差范围内完全相同的侵位年龄(图 6)。这可能反映了在地表相距很近但相互独立的两个岩体在深部可能是相互连通的, 即它们是深部同一个大岩体在浅部的两个分支。

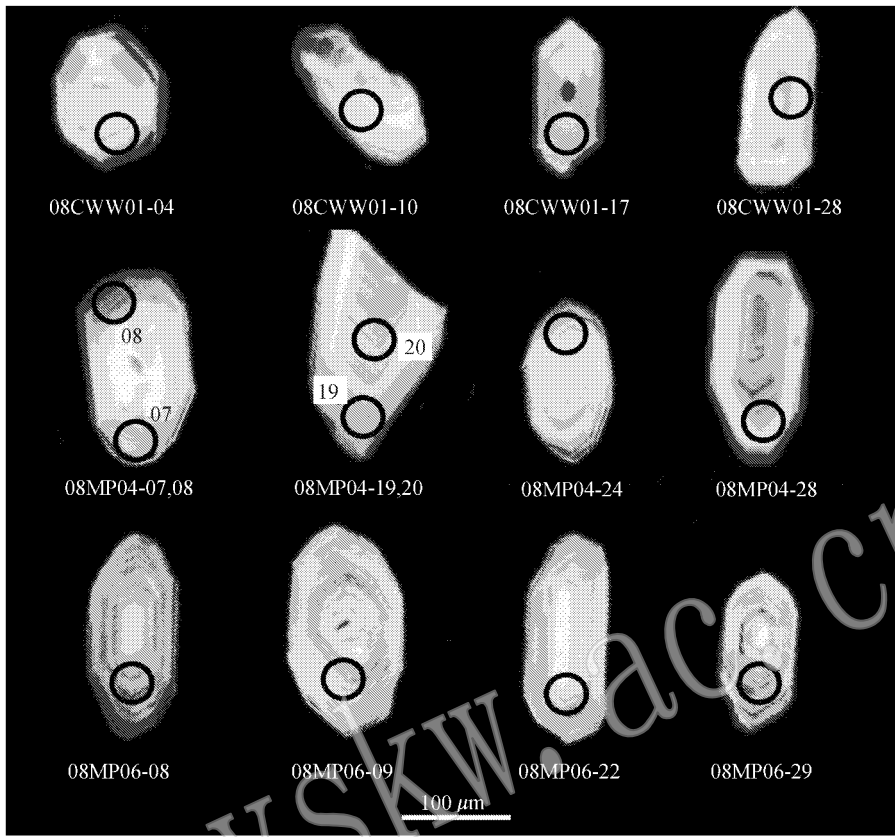


图5 锆石 CL 图像

Fig. 5 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircons from Mapeng-Chiwawu pluton

#### 4 岩体侵位深度估计

Hammarstrom 和 Zen(1986)的研究证明,在含有石英、斜长石、钾长石、黑云母、榍石、钛铁氧化物、熔体和挥发分的花岗岩中,角闪石的全铝含量随着结晶压力的增加而线性升高。后来的研究(Hollister *et al.*, 1987; Johnson and Rutherford, 1989; Schmidt, 1992)也证明了角闪石中全铝含量与压力呈正相关关系。虽然 Anderson 和 Smith(1995)提出角闪石中铝的含量还与温度等因素有一定的依赖关系,但 Aguilera(1997)和 Anderson 等(2008)对角闪石铝压力计的综合分析证明了 Schmidt(1992)计算方法的可行性。

3件样品(08CWW01、08MP01和08MP06)分别来自不同的相带,对每件样品随机选取两类角闪石中表面干净、新鲜的角闪石约20颗。电子探针成分分析结果(表3)显示,两类角闪石之间的化学成分并无明显差异。进一步计算得到的角闪石阳离子系数

(表4)显示,所有角闪石都具有  $Ca_B \geq 1.50$ 、 $(Na + K)_A \leq 0.50$  的特征,属于钙质角闪石组中的镁普通角闪石(图7)。

岩石矿物组合特征和角闪石成分分析结果表明,样品的角闪石符合 Schmidt(1992)角闪石压力计的使用条件。角闪石结晶压力的计算结果列于表4。

样品08CWW01的19颗角闪石的全铝含量介于0.766~1.176之间,平均值为1.018,对应结晶压力介于0.064~0.259 GPa之间,平均压力为0.183 GPa。其中14颗角闪石为粒径较大、自形程度较高的角闪石,其全铝含量介于0.766~1.176之间,对应结晶压力介于0.064~0.259 GPa,平均压力为0.181 GPa;另外5颗为粒径较小的它形角闪石,其全铝含量介于0.970~1.074之间,对应结晶压力为0.161~0.210 GPa,平均压力为0.191 GPa。

样品08MP01的17颗角闪石的全铝含量介于0.719~1.117之间,平均值为0.880,角闪石结晶压力介于0.041~0.231 GPa之间,平均值为0.118 GPa。其中3颗较大的角闪石全铝含量为0.758~

表 2 麻棚-赤瓦屋岩体锆石 LA-ICP-MS 定年结果  
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of Mapeng-Chiwawu pluton

分析点	$w_B/10^{-6}$			U/Th	同位素比值						年龄/Ma	
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$
08CWW01												
01	0.89	93.28	79.22	0.85	0.079 05	0.012 1	0.189 32	0.025 22	0.017 37	0.001 37	111	9
02	1.41	115.75	98.41	0.85	0.046 05	0.011 25	0.114 13	0.027 2	0.017 98	0.000 97	115	6
03	5.17	471.67	181.37	0.38	0.056 85	0.004 15	0.145 76	0.009 63	0.018 59	0.000 66	119	4
04	1.11	76.58	70.58	0.92	0.046 05	0.008 48	0.129 52	0.022 87	0.020 4	0.001 07	130	7
05	0.96	76.65	70.8	0.92	0.050 1	0.007 37	0.139 91	0.018 78	0.020 25	0.001 3	129	8
06	1.08	93.22	76.81	0.82	0.062 17	0.007 07	0.166 32	0.017 21	0.019 4	0.000 99	124	6
07	0.95	79.64	63.65	0.80	0.049 86	0.007 23	0.137 05	0.018 34	0.019 94	0.001 19	127	8
08	1.02	90.5	59.24	0.65	0.048 63	0.007 02	0.139 17	0.018 36	0.020 75	0.001 29	132	8
09	2.85	150.47	127.71	0.85	0.046 05	0.003 47	0.179 26	0.012 12	0.028 24	0.000 94	179	6
10	1.07	96.05	69.95	0.73	0.046 88	0.006 78	0.123 96	0.016 55	0.019 18	0.001 13	122	7
11	0.649	49.37	46.25	0.94	0.046 05	0.012 09	0.107 81	0.027 12	0.016 98	0.001 27	109	8
12	1.27	88.6	71.77	0.81	0.046 05	0.006 96	0.122 47	0.016 74	0.019 29	0.001 24	123	8
13	1.08	91.15	66.1	0.73	0.044 26	0.006 03	0.121 26	0.015 41	0.019 87	0.001 06	127	7
14	1.11	84.55	66.42	0.79	0.046 05	0.009 26	0.124 66	0.024 14	0.019 64	0.001 07	125	7
15	0.634	56.56	49.71	0.88	0.065 93	0.007 29	0.182 32	0.017 95	0.020 06	0.001 08	128	7
16	1.98	179.14	108.31	0.60	0.056 43	0.005 44	0.149 02	0.013 01	0.019 15	0.000 85	122	5
17	0.807	67.17	55.42	0.83	0.052 69	0.007 3	0.140 31	0.017 98	0.019 32	0.001 09	123	7
18	1.04	75.47	62.9	0.83	0.046 26	0.016 54	0.127 89	0.044 8	0.020 05	0.001 44	128	9
19	0.76	68.4	64.12	0.94	0.084 21	0.011 33	0.239 3	0.027 84	0.020 61	0.001 47	132	9
20	0.73	60.9	54.93	0.90	0.053 9	0.007 39	0.146 73	0.018 66	0.019 75	0.001 09	126	7
21	0.998	83.02	63.07	0.76	0.051 61	0.012 71	0.137 99	0.033 22	0.019 39	0.001 01	124	6
22	1.11	59.31	50.31	0.85	0.046 05	0.019 36	0.133 64	0.054 78	0.021 05	0.001 96	134	12
23	1.08	99.16	70.96	0.72	0.042 93	0.005 26	0.119 38	0.013 5	0.020 17	0.001 03	129	7
24	1.37	124.96	95.29	0.76	0.041 16	0.004 5	0.117 07	0.012 05	0.020 63	0.000 84	132	5
25	0.769	76.01	60.39	0.79	0.047 13	0.006 07	0.127 79	0.015 29	0.019 67	0.001 01	126	6
26	0.7	68.42	58.98	0.86	0.051 34	0.005 76	0.138 6	0.014 5	0.019 58	0.000 87	125	6
27	0.673	64.56	51.75	0.80	0.079 21	0.013 75	0.207 95	0.032 48	0.019 04	0.001 51	122	10
28	0.931	87.33	55.64	0.64	0.057 01	0.006 71	0.155 24	0.016 61	0.019 75	0.001 04	126	7
29	1.16	94.58	68.63	0.73	0.067 61	0.006 18	0.195 97	0.015 98	0.021 03	0.00095	134	6
30	1.04	83.8	57.96	0.69	0.063 56	0.011 11	0.158 92	0.025 08	0.018 14	0.001 42	116	9
31	1.03	85.34	71.31	0.84	0.049 43	0.006 97	0.140 39	0.018 06	0.020 61	0.001 27	132	8
32	1.05	82.85	56.86	0.69	0.046 17	0.012 54	0.133 22	0.035 59	0.020 93	0.001 02	134	6
33	1.65	163.94	97.16	0.59	0.065 22	0.009 29	0.172 64	0.022	0.019 2	0.001 29	123	8
34	0.798	70.82	48.02	0.68	0.057 99	0.006 09	0.171 06	0.016 4	0.021 4	0.001	136	6
35	1.16	95.95	72.6	0.76	0.050 8	0.005 45	0.138 73	0.013 66	0.019 81	0.000 92	126	6
36	0.97	75.9	62.19	0.82	0.056 74	0.007 23	0.163 28	0.019 11	0.020 88	0.001 13	133	7
08MP04												
01	1.1	111.59	128.62	1.15	0.051 21	0.004 45	0.139 85	0.011 16	0.019 81	0.000 77	126	5
02	0.851	74.13	111.63	1.51	0.052 39	0.005 49	0.141 42	0.013 51	0.019 58	0.000 92	125	6
03	1.2	104.34	147.74	1.42	0.048 51	0.008 49	0.119 69	0.020 24	0.017 89	0.000 8	114	5
04	1.72	150.84	227.39	1.51	0.053 47	0.003 74	0.149 58	0.009 53	0.020 29	0.000 69	129	4
05	0.991	88.76	104.18	1.17	0.062 64	0.004 15	0.171 49	0.010 2	0.019 86	0.000 68	127	4
06	0.482	43.55	63.61	1.46	0.049 43	0.005 12	0.139 26	0.013 41	0.020 44	0.000 87	130	5
07	1.84	192.49	229.28	1.19	0.049 71	0.004 44	0.127 01	0.010 38	0.018 53	0.000 75	118	5
08	2.39	165.67	252.8	1.53	0.056 57	0.009 19	0.150 21	0.023 66	0.019 26	0.000 77	123	5
09	0.8	68.05	93.37	1.37	0.069 26	0.007 48	0.182 54	0.017 55	0.019 12	0.001 01	122	6
10	2.01	200.42	263.54	1.31	0.054 54	0.002 83	0.142 41	0.006 72	0.018 94	0.000 52	121	3
11	2.04	186.6	265.08	1.42	0.053 47	0.003 97	0.143 16	0.009 66	0.019 42	0.000 69	124	4
12	1.04	97.91	121.47	1.24	0.050 13	0.006 29	0.135 05	0.015 47	0.019 54	0.001 07	125	7
13	1.11	84.22	125.51	1.49	0.052 1	0.005 17	0.158 34	0.014 35	0.022 05	0.000 99	141	6
14	0.873	83.35	88.65	1.06	0.049 23	0.004 61	0.135 09	0.011 87	0.019 91	0.000 74	127	5
15	0.98	94.68	92.48	0.98	0.048 18	0.005 7	0.141 18	0.015 31	0.021 26	0.001 09	136	7
16	1.12	102.37	154.27	1.51	0.059 36	0.005 99	0.161 95	0.014 71	0.019 79	0.000 95	126	6



续表 2  
Continued Table 2

分析点	$w_B/10^{-6}$			U/Th	同位素比值						年龄/Ma	
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$
17	2.34	213.38	811.6	3.80	0.048 37	0.001 37	0.135 78	0.003 56	0.020 37	0.000 4	130	3
18	1.56	158.48	202.37	1.28	0.048 49	0.002 95	0.130 62	0.007 32	0.019 54	0.000 57	125	4
19	1.24	99.98	163.33	1.63	0.046 05	0.006 42	0.120 94	0.015 97	0.019 05	0.000 85	122	5
20	0.429	38.28	114.41	2.99	0.051 02	0.004 29	0.137 97	0.010 58	0.019 62	0.000 77	125	5
21	0.825	70.86	101.42	1.43	0.050 91	0.003 97	0.146 16	0.010 45	0.020 83	0.000 75	133	5
22	1.41	145.4	249.14	1.71	0.064 37	0.003 65	0.153 74	0.007 79	0.017 33	0.000 53	111	3
23	1.87	202.63	267.73	1.32	0.049 21	0.002 55	0.128 79	0.006 13	0.018 99	0.000 51	121	3
24	2.18	205.84	249.53	1.21	0.047 92	0.002 68	0.132 34	0.006 85	0.020 04	0.000 55	128	3
25	0.522	47.31	63.73	1.35	0.073 4	0.007 37	0.214 13	0.018 87	0.021 18	0.001 11	135	7
26	1.16	105.58	159.39	1.51	0.049 8	0.003 99	0.137 27	0.010 08	0.020 01	0.000 74	128	5
27	0.762	67.39	140.35	2.08	0.048 68	0.004 21	0.129 47	0.010 31	0.019 31	0.000 74	123	5
28	1.09	85.21	188.07	2.21	0.047 92	0.003 21	0.126 83	0.007 79	0.019 21	0.000 62	123	4
29	1.75	169.07	266.64	1.58	0.049 73	0.004 68	0.126 96	0.010 92	0.018 54	0.000 79	118	5
30	1.82	143.64	203.05	1.41	0.050 09	0.005 08	0.152 26	0.014 11	0.022 07	0.001	141	6
31	1.86	156.14	240.93	1.54	0.052 07	0.002 97	0.150 22	0.007 8	0.020 95	0.000 62	134	4
32	1.2	115.5	103.05	0.89	0.049 13	0.005 98	0.135 31	0.015 15	0.02	0.001 04	128	7
33	0.68	62.16	65.27	1.05	0.061 86	0.010 6	0.170 1	0.026 07	0.019 97	0.001 61	127	10
34	2.15	219.79	279.1	1.27	0.051 88	0.002 5	0.132 42	0.005 82	0.018 54	0.000 48	118	3
35	1.72	162.78	176.57	1.08	0.057 04	0.003 64	0.153 43	0.008 83	0.019 54	0.000 64	125	4
36	1.56	128.62	187.47	1.46	0.050 16	0.006 15	0.121 4	0.013 56	0.017 58	0.000 96	112	6
08MP06												
01	2.53	242.54	337.36	1.39	0.050 6	0.005 11	0.146 37	0.013 46	0.021	0.000 98	134	6
02	2.52	196.35	315	1.60	0.051 84	0.005 16	0.143 3	0.012 97	0.020 07	0.000 93	128	6
03	2.61	216.3	306.87	1.42	0.050 67	0.004 72	0.145 94	0.012 46	0.020 9	0.000 89	133	6
04	2.18	234.17	356.47	1.52	0.057 77	0.004 62	0.152 1	0.010 95	0.019 11	0.000 77	122	5
05	1.55	166.37	286.84	1.72	0.048 36	0.004 49	0.128 37	0.010 9	0.019 26	0.000 83	123	5
06	1.23	120.25	217.96	1.81	0.048 62	0.005 24	0.131 19	0.012 96	0.019 58	0.000 93	125	6
07	2.42	255.96	362.88	1.42	0.048 95	0.004 27	0.130 15	0.010 38	0.019 29	0.000 79	123	5
08	1.8	176.66	280.8	1.59	0.049 76	0.004 31	0.132 78	0.010 49	0.019 36	0.000 79	124	5
09	2.23	216.92	391.08	1.80	0.052 55	0.004 89	0.138 12	0.011 69	0.019 06	0.000 84	122	5
10	0.53	42.18	103.67	2.46	0.049 28	0.009 73	0.143 57	0.025 89	0.021 13	0.001 79	135	11
11	2.11	184.16	361.35	1.96	0.050 54	0.005 8	0.128 93	0.013 51	0.018 5	0.000 95	118	6
12	2.34	231.52	319.23	1.38	0.045 63	0.004 76	0.128 01	0.012 38	0.020 34	0.000 9	130	6
13	2.35	171.34	319.71	1.87	0.050 06	0.005 49	0.149 43	0.014 97	0.021 64	0.001 07	138	7
14	2.15	172.29	272.19	1.58	0.047 19	0.003 89	0.129 2	0.009 78	0.019 86	0.000 76	127	5
15	3.13	302.36	406.12	1.34	0.049 07	0.004 39	0.128 61	0.010 56	0.019 01	0.000 78	121	5
16	1.22	115.11	354.8	3.08	0.048 28	0.003 76	0.131 35	0.009 38	0.019 73	0.000 73	126	5
17	14.56	1465.63	827.57	0.56	0.047 87	0.002 72	0.126 83	0.006 64	0.019 21	0.000 56	123	4
18	4.64	425.9	519.91	1.22	0.048 96	0.003 93	0.131 94	0.009 72	0.019 54	0.000 73	125	5
19	2.22	224.89	289.55	1.29	0.048 39	0.004 35	0.136 36	0.011 23	0.020 43	0.000 84	130	5
20	3.94	337.57	399.45	1.18	0.045 58	0.003 95	0.120 2	0.009 59	0.019 12	0.000 75	122	5
21	2.08	178.58	302.51	1.69	0.048 38	0.003 83	0.144 19	0.010 53	0.021 61	0.000 78	138	5
22	1.32	102.92	158.86	1.54	0.060 99	0.009 67	0.170 84	0.024 29	0.020 31	0.001 51	130	10
23	2.78	261.35	365.75	1.40	0.052 89	0.005 09	0.146 37	0.012 82	0.020 06	0.000 89	128	6
24	2.32	196.04	267.41	1.36	0.051 41	0.006 51	0.135 87	0.015 67	0.019 16	0.001 08	122	7
25	0.86	67.53	91.1	1.35	0.046 05	0.010 17	0.121 65	0.025 85	0.019 16	0.001 16	122	7
26	2.13	167.04	289.85	1.74	0.050 93	0.006 69	0.147 28	0.017 72	0.020 97	0.001 2	134	8
27	1.83	136.73	248	1.81	0.047 94	0.005 37	0.136 78	0.014 05	0.020 68	0.001 01	132	6
28	1.98	185.47	282.4	1.52	0.049 07	0.005 92	0.138 28	0.015 27	0.020 43	0.001 08	130	7
29	1.97	195.58	288.33	1.47	0.053 42	0.004 96	0.157 31	0.013 35	0.021 35	0.000 91	136	6
30	2.33	222.71	282.78	1.27	0.047 81	0.006 05	0.129 09	0.014 99	0.019 58	0.001 07	25	7
31	1.53	109.75	189.41	1.73	0.046 05	0.008 55	0.121 58	0.021 65	0.019 15	0.001 01	122	6
32	6.78	416.08	322.66	0.78	0.046 05	0.004 03	0.119 3	0.009 34	0.018 79	0.000 74	120	5

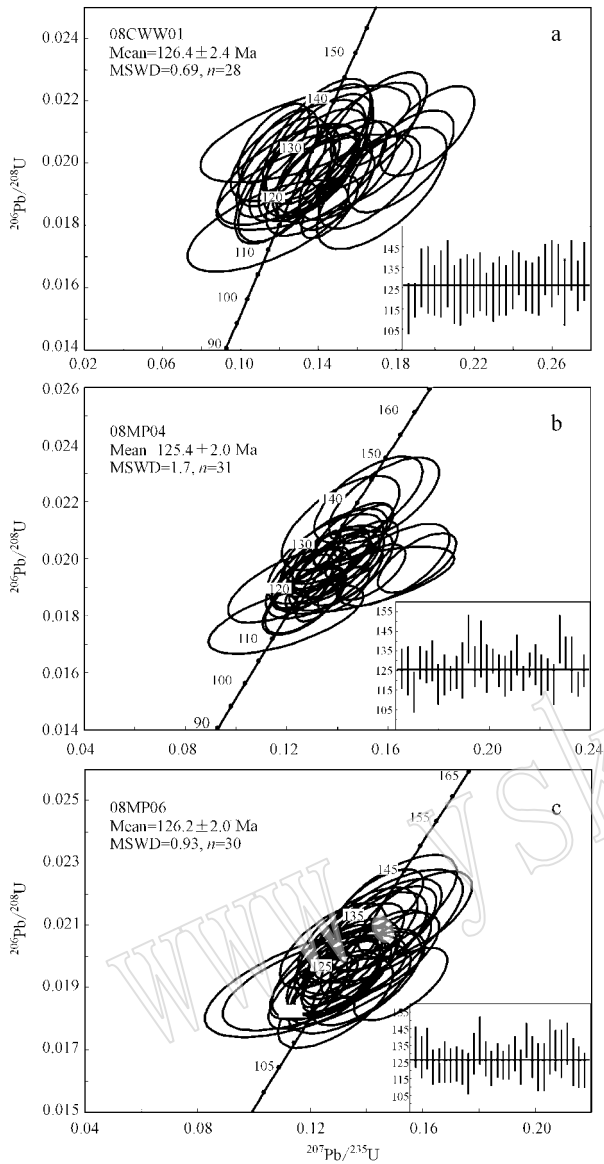


图 6 锆石谐和曲线图

Fig. 6 Concordia diagrams of U-Pb data for zircons

1.117 对应结晶压力为 0.041~0.231 GPa, 均值为 0.111 GPa; 另外 14 颗较小的角闪石全铝含量介于 0.723~1.117 之间, 对应结晶压力为 0.043~0.231 GPa, 均值为 0.119 GPa。

样品 08MP06 的 16 颗角闪石的全铝含量介于 0.747~1.074 之间, 平均值为 0.871, 角闪石结晶压力介于 0.055~0.210 GPa 之间, 平均值为 0.114 GPa。其中 6 颗较大的角闪石全铝含量介于 0.778~0.968 之间, 结晶压力为 0.069~0.160 GPa, 均值为 0.099 GPa; 其余 10 颗较小的角闪石全铝含量介于 0.747~1.074 之间, 结晶压力为 0.055~0.210

GPa, 均值为 0.123 GPa。

3 件样品所得到的角闪石结晶压力集中在 0.1~0.2 GPa 之间, 变化范围较小。其中每个样品内, 两类角闪石的结晶压力变化范围基本一致, 平均值相差很小, 反映了在同一个样品中两类角闪石的结晶环境基本一致。根据角闪石的形态, 可以初步判定颗粒较大、自形程度高的角闪石应为岩浆结晶较早时期生成的。在岩浆结晶早期, 大部分岩浆呈熔融状态, 角闪石生长空间较大, 因此生成的矿物晶形较为完整, 并与长石等矿物构成骨架颗粒。而颗粒较小、呈他形充填于骨架矿物之间的角闪石为岩浆结晶晚期生成的。此时, 早期结晶的矿物已经占据了大部分空间形成骨架, 角闪石只能在骨架之间空隙中结晶, 因而颗粒较小, 自形程度差。而两类角闪石相似的结晶压力反映了整个岩浆结晶过程中, 岩体周围的环境并没有发生大的变化, 说明了岩浆的侵位结晶过程在较短的时间内就完成了。这与锆石 U-Pb 年代学结果吻合。

样品 08MP04 和 08MP06 的角闪石结晶压力几乎相同, 而样品 08CWW01 的角闪石结晶压力略大。这种差异可能是受结晶温度影响所致。当结晶温度升高时, 会导致角闪石中铝含量的偏高, 计算得到的结晶压力偏高。08CWW01 样品是石英闪长岩, 较另两个样品更偏基性, 结晶温度也相对较高, 因此导致角闪石结晶压力的计算结果偏高, 而样品 08MP04 和 08MP06 分别为似斑状花岗岩和花岗闪长岩, 它们的结晶温度相对较低。由于岩体以似斑状花岗岩和花岗闪长岩为主, 这两个样品的计算结果可能更接近真实的角闪石结晶压力。

如果岩体的结晶压力与岩体侵位时上覆岩层的静压力大致相当, 在已知上地壳岩石的平均密度的情况下, 可以根据角闪石的结晶压力计算出岩体的结晶深度(龚松林, 2004)。假设上地壳平均密度为 2.65 g/cm<sup>3</sup>, 根据样品 08MP04 和 08MP06 的角闪石结晶压力平均值(0.114 和 0.118 GPa), 可得到岩体的侵位深度约为 4.4 km。这可以被认为是岩体的最小侵位深度。3 件样品的角闪石结晶压力的平均值为 0.141 GPa, 对应的岩体侵位深度约为 5.3 km, 这可以被视为岩体的最大侵位深度。这样的结果表明在麻棚-赤瓦屋岩体形成时, 上覆岩层的厚度约为 5 km, 即岩体的侵位深度中等。也许正是由于岩体侵位深度不大, 岩浆才能够较快冷却, 从而导致了不同岩相的岩石给出了在误差范围内一致的定年结果。

表 3 角闪石电子探针分析结果

 $w_B/\%$ 

Table 3 Chemical compositions of amphibole

样品	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	NiO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total
08CWW01												
1.1*	48.77	0.69	5.09	0.02	13.15	0.05	0.42	14.54	12.10	1.05	0.45	96.33
2.1*	47.37	1.24	6.30	0.01	12.97	0.03	0.35	14.56	11.63	1.32	0.63	96.41
3.2*	49.01	0.64	4.95	0.05	12.61	0.00	0.41	15.12	12.02	0.95	0.47	96.23
4.1*	47.98	1.07	6.09	0.02	13.26	0.01	0.47	14.03	11.84	1.19	0.59	96.55
5.1	47.82	1.03	6.14	0.02	13.77	0.00	0.33	13.87	11.90	1.22	0.57	96.67
6.1	47.65	1.06	6.21	0.00	13.92	0.00	0.37	14.02	11.84	1.25	0.62	96.94
7.1*	46.91	1.21	6.75	0.01	14.87	0.00	0.39	12.99	11.87	1.20	0.75	96.95
8.1*	48.15	1.22	5.70	0.00	13.68	0.00	0.44	14.03	11.67	1.39	0.55	96.83
9.1*	48.60	1.23	5.97	0.00	13.27	0.03	0.41	14.91	11.86	1.22	0.64	98.14
10.1*	47.87	1.15	6.02	0.00	13.79	0.05	0.47	13.78	11.77	1.14	0.65	96.69
11.1*	47.49	1.17	6.24	0.00	13.45	0.00	0.35	14.42	11.87	1.33	0.65	96.97
12.1	48.05	1.09	5.61	0.02	13.34	0.00	0.35	14.54	11.96	1.23	0.55	96.74
13.1*	48.44	0.82	5.92	0.00	13.57	0.06	0.38	13.98	12.15	1.04	0.59	96.95
14.1*	47.89	1.19	6.26	0.00	13.11	0.05	0.44	14.21	11.79	1.35	0.67	96.96
15.1*	47.70	1.19	6.17	0.00	13.80	0.02	0.49	13.92	11.99	1.19	0.65	97.12
16.1*	47.14	1.06	5.99	0.00	13.18	0.00	0.37	13.88	11.70	1.26	0.61	95.19
17.1	48.04	1.04	5.87	0.00	13.87	0.04	0.43	13.86	11.91	1.16	0.58	96.80
18.1*	49.80	0.78	4.42	0.07	12.89	0.00	0.41	14.49	12.16	0.85	0.40	96.27
19.1*	47.89	1.11	6.01	0.00	13.96	0.05	0.43	14.01	11.70	1.11	0.64	96.91
08MP01												
1.1*	50.28	0.41	4.20	0.00	12.38	0.03	0.64	15.42	11.69	1.22	0.44	96.71
2.1*	47.14	0.77	6.46	0.04	13.99	0.00	0.72	14.03	11.59	1.65	0.69	97.08
3.1*	49.88	0.43	4.41	0.00	12.84	0.00	0.79	14.98	11.83	1.33	0.43	96.92
4.1	47.88	0.90	5.67	0.02	13.16	0.00	0.64	14.40	11.90	1.51	0.58	96.66
6.1	49.58	0.58	5.05	0.02	13.31	0.00	0.78	14.46	11.79	1.43	0.55	97.55
7.1	49.83	0.54	4.64	0.00	13.06	0.03	0.80	15.08	11.62	1.26	0.46	97.32
9.1	50.11	0.43	4.22	0.00	11.98	0.00	0.77	15.68	11.88	1.05	0.44	96.56
10.1	49.14	0.58	5.40	0.01	13.42	0.04	0.75	14.60	12.00	1.43	0.61	97.98
11.1	46.95	0.80	6.41	0.00	13.87	0.00	0.71	13.83	11.61	1.63	0.70	96.51
12.1	49.53	0.51	4.56	0.01	12.64	0.00	0.74	15.08	11.50	1.61	0.53	96.71
14.1	48.96	0.56	5.48	0.09	13.72	0.00	0.76	14.26	11.77	1.39	0.55	97.54
15.1	48.93	0.64	4.89	0.00	12.84	0.00	0.81	14.90	11.67	1.29	0.52	96.49
16.1	50.02	0.41	4.54	0.06	12.67	0.01	0.72	15.00	11.86	1.16	0.45	96.9
17.1	49.82	0.52	4.60	0.05	12.78	0.00	0.73	15.01	11.72	1.43	0.50	97.16
18.1	47.49	0.75	6.23	0.04	13.92	0.00	0.65	13.72	11.56	1.53	0.66	96.55
19.1	49.31	0.53	4.82	0.04	12.81	0.00	0.79	14.99	11.72	1.27	0.51	96.79
20.1	48.76	0.59	5.27	0.00	13.18	0.00	0.77	14.7	11.89	1.25	0.55	96.96
08MP06												
1.1	50.28	0.49	4.37	0.01	12.56	0.05	0.84	15.11	11.72	1.16	0.52	97.11
2.1	48.94	0.61	4.96	0.12	12.97	0.03	0.85	14.10	11.81	1.24	0.55	96.18
3.1*	49.47	0.53	4.51	0.00	12.45	0.02	0.83	14.81	11.53	1.49	0.45	96.09
4.1*	49.36	0.53	4.89	0.08	13.09	0.00	0.79	14.23	11.57	1.43	0.44	96.41
6.1*	49.31	0.58	4.84	0.02	13.16	0.02	0.79	14.90	11.65	1.38	0.52	97.17
7.1*	49.67	0.48	4.53	0.00	13.37	0.07	0.74	14.73	11.65	1.42	0.44	97.10
8.1	49.32	0.46	4.67	0.04	12.97	0.02	0.91	14.30	11.71	1.13	0.43	95.96
9.1	47.83	0.94	5.93	0.02	14.15	0.12	0.55	13.32	11.65	1.52	0.58	96.61
10.1	47.84	0.87	5.97	0.04	13.91	0.03	0.69	13.43	11.78	1.80	0.62	96.98
11.1	48.37	0.61	5.35	0.00	13.35	0.00	0.65	13.93	11.82	1.58	0.57	96.23
12.1	49.22	0.51	4.44	0.02	12.78	0.00	0.88	14.36	11.75	1.29	0.51	95.76
13.1*	47.61	0.80	5.49	0.00	13.56	0.00	0.76	13.56	11.62	1.39	0.65	95.44
14.1	48.94	0.61	4.33	0.00	13.44	0.00	0.84	14.17	11.71	1.18	0.52	95.74
15.1	47.45	0.84	6.18	0.02	13.88	0.01	0.82	13.72	11.45	1.54	0.72	96.63
17.1*	49.25	0.57	4.85	0.01	13.34	0.00	0.87	14.37	11.79	1.42	0.52	96.99
18.1*	48.37	0.56	4.92	0.05	13.18	0.00	0.70	14.49	11.61	1.31	0.56	95.75

注：分析实验由北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室电子探针室完成，电子探针分析在 JXA-8100 电子探针仪上进行，加速电压为 15 kV，电流为  $1 \times 10^{-8}$  A，束斑直径为  $1 \mu\text{m}$ ，修正方法为 PRZ，标准样品为美国 SPI 公司 53 种矿物。表中带 \* 标记样品为大颗粒半自形角闪石，其他为小颗粒他形角闪石。

表 4 角闪石离子系数及压力计算结果

Table 4 Structural formula of amphibole and estimated crystallization pressure

样品	08cww01	1.1*	2.1*	3.2*	4.1*	5.1	6.1	7.1*	8.1*	9.1*	10.1	11.1*	12.1	13.1*	14.1*	15.1*	16.1*	17.1	18.1*	19.1*
Si	7.174	6.950	7.175	7.057	7.039	6.990	6.990	6.937	7.072	7.000	7.044	6.955	7.048	7.108	7.017	7.000	7.042	7.065	7.325	7.013
Al(IV)	0.826	1.050	0.825	0.943	0.961	1.010	1.010	1.063	0.928	1.000	0.956	1.045	0.952	0.892	0.983	1.000	0.958	0.935	0.675	0.987
T	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Al(IV)	0.057	0.039	0.029	0.112	0.104	0.064	0.064	0.113	0.058	0.013	0.088	0.032	0.018	0.132	0.098	0.067	0.097	0.082	0.092	0.050
Ti	0.076	0.137	0.070	0.118	0.114	0.117	0.117	0.135	0.135	0.133	0.127	0.129	0.120	0.091	0.131	0.131	0.119	0.115	0.086	0.122
Cr	0.002	0.001	0.006	0.002	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000
Fe(III)	0.416	0.587	0.521	0.410	0.418	0.520	0.433	0.429	0.602	0.454	0.531	0.479	0.353	0.412	0.441	0.441	0.397	0.430	0.253	0.586
Fe(II)	1.201	1.004	1.023	1.220	1.276	1.188	1.405	1.405	1.251	0.997	1.242	1.116	1.157	1.312	1.194	1.253	1.249	1.275	1.333	1.123
Ni	0.006	0.004	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.006	0.000	0.000	0.007	0.006	0.002	0.000	0.005	0.000	0.006
Mn	0.052	0.043	0.051	0.059	0.041	0.046	0.049	0.049	0.055	0.050	0.059	0.043	0.043	0.047	0.055	0.061	0.047	0.054	0.051	0.053
Mg	3.189	3.185	3.300	3.076	3.044	3.066	2.864	3.072	3.202	3.148	3.180	3.180	3.180	3.058	3.104	3.045	3.091	3.039	3.178	3.059
C	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Ca	1.907	1.828	1.885	1.866	1.877	1.861	1.880	1.880	1.836	1.830	1.856	1.862	1.879	1.910	1.851	1.885	1.872	1.876	1.916	1.836
Na	0.093	0.172	0.115	0.134	0.123	0.139	0.120	0.120	0.164	0.170	0.144	0.138	0.121	0.090	0.149	0.115	0.128	0.124	0.084	0.164
B	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Na	0.206	0.203	0.155	0.205	0.225	0.216	0.224	0.232	0.232	0.171	0.181	0.240	0.229	0.206	0.234	0.224	0.237	0.207	0.159	0.151
K	0.084	0.118	0.088	0.111	0.107	0.116	0.141	0.141	0.103	0.118	0.122	0.121	0.103	0.110	0.125	0.122	0.116	0.109	0.075	0.120
A	0.291	0.321	0.243	0.316	0.332	0.332	0.366	0.335	0.335	0.288	0.303	0.361	0.332	0.316	0.359	0.345	0.354	0.316	0.234	0.270
Total	15.29	15.32	15.24	15.32	15.33	15.33	15.37	15.37	15.34	15.29	15.30	15.36	15.33	15.32	15.36	15.35	15.35	15.32	15.23	15.27
$\Delta^{tet}$	0.882	1.089	0.854	1.056	1.065	1.074	1.176	1.176	0.987	1.013	1.044	1.077	0.970	1.024	1.081	1.067	1.055	1.017	0.766	1.037
$p/GPa$	0.119	0.218	0.106	0.201	0.206	0.210	0.259	0.169	0.181	0.196	0.212	0.161	0.186	0.214	0.207	0.201	0.201	0.183	0.064	0.193

续表 4-1  
Continued Table 4-1

样品	08MP01	1.1*	2.1*	3.1*	4.1	6.1	7.1	9.1	10.1	11.1	12.1	14.1	15.1	16.1	17.1	18.1	19.1	20.1
Si	7.308	6.918	7.275	7.052	7.215	7.213	7.282	7.129	6.942	7.237	7.129	7.162	7.282	7.248	7.010	7.191	7.122	
Al(IV)	0.692	1.082	0.725	0.948	0.785	0.787	0.718	0.871	1.058	0.763	0.871	0.838	0.718	0.752	0.990	0.809	0.878	
T	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	
Al(IV)	0.027	0.035	0.032	0.036	0.081	0.005	0.005	0.005	0.053	0.059	0.022	0.069	0.006	0.061	0.037	0.094	0.019	0.029
Ti	0.045	0.085	0.047	0.100	0.063	0.059	0.047	0.063	0.089	0.056	0.061	0.061	0.070	0.045	0.057	0.083	0.058	0.065
Cr	0.000	0.005	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.010	0.010	0.000	0.007	0.006	0.005	0.005	0.000
Fe(III)	0.510	0.630	0.446	0.416	0.392	0.622	0.542	0.445	0.544	0.473	0.503	0.567	0.451	0.446	0.507	0.554	0.542	
Fe(II)	0.995	1.087	1.120	1.205	1.227	0.959	0.914	1.184	1.171	1.072	1.167	1.004	1.092	1.109	1.211	1.008	1.068	
Ni	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	
Mn	0.079	0.089	0.098	0.080	0.096	0.098	0.095	0.092	0.089	0.092	0.094	0.100	0.089	0.090	0.081	0.098	0.095	
Mg	3.341	3.069	3.257	3.162	3.137	3.254	3.397	3.158	3.049	3.285	3.095	3.252	3.255	3.256	3.019	3.259	3.201	
C	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
Ca	1.820	1.822	1.848	1.878	1.838	1.802	1.850	1.865	1.839	1.800	1.836	1.830	1.850	1.827	1.828	1.831	1.861	
Na	0.180	0.178	0.152	0.122	0.162	0.198	0.150	0.135	0.161	0.200	0.164	0.170	0.150	0.173	0.172	0.169	0.139	
B	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	
Na	0.164	0.292	0.224	0.309	0.242	0.156	0.145	0.267	0.306	0.256	0.228	0.196	0.177	0.230	0.266	0.190	0.215	
K	0.082	0.129	0.080	0.109	0.102	0.085	0.082	0.113	0.132	0.099	0.102	0.097	0.084	0.093	0.124	0.095	0.102	
A	0.246	0.421	0.304	0.418	0.344	0.241	0.227	0.380	0.438	0.355	0.330	0.293	0.261	0.323	0.390	0.285	0.317	
Total	15.25	15.42	15.30	15.42	15.34	15.24	15.23	15.38	15.44	15.36	15.33	15.29	15.26	15.32	15.39	15.29	15.32	
$\Delta t^{tet}$	0.719	1.117	0.758	0.984	0.866	0.792	0.723	0.923	1.117	0.785	0.940	0.844	0.779	0.789	1.084	0.828	0.907	
$p/GPa$	0.041	0.231	0.060	0.167	0.111	0.076	0.043	0.138	0.231	0.073	0.147	0.101	0.070	0.074	0.215	0.093	0.131	

续表 4-2  
Continued Table 4-2

样品	08MFP06	1.1	2.1	3.1*	4.1*	6.1*	7.1*	8.1	9.1	10.1	11.1	12.1	13.1*	14.1	15.1	17.1*	18.1*
Si	7.296	7.234	7.276	7.258	7.173	7.240	7.273	7.082	7.082	7.177	7.297	7.124	7.265	7.265	6.998	7.217	7.158
Al(IV)	0.704	0.766	0.724	0.742	0.827	0.760	0.727	0.918	0.918	0.823	0.703	0.876	0.735	0.735	1.002	0.783	0.842
T	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Al(IV)	0.043	0.098	0.057	0.105	0.003	0.018	0.085	0.117	0.117	0.123	0.113	0.072	0.022	0.022	0.072	0.054	0.016
Ti	0.053	0.068	0.059	0.059	0.063	0.053	0.051	0.105	0.105	0.097	0.068	0.057	0.068	0.068	0.093	0.063	0.062
Cr	0.001	0.014	0.000	0.009	0.002	0.000	0.005	0.002	0.002	0.005	0.000	0.002	0.000	0.000	0.002	0.001	0.006
Fe(III)	0.486	0.319	0.407	0.376	0.579	0.516	0.431	0.346	0.346	0.227	0.254	0.315	0.414	0.414	0.547	0.400	0.532
Fe(II)	1.038	1.284	1.124	1.234	1.022	1.113	1.169	1.406	1.406	1.494	1.402	1.269	1.346	1.254	1.165	1.235	1.099
Ni	0.006	0.004	0.002	0.000	0.002	0.008	0.002	0.014	0.014	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Mn	0.103	0.106	0.103	0.098	0.097	0.091	0.114	0.069	0.069	0.087	0.082	0.110	0.106	0.106	0.102	0.108	0.088
Mg	3.269	3.107	3.247	3.119	3.231	3.201	3.144	2.940	2.940	2.964	3.081	3.174	3.025	3.136	3.017	3.139	3.197
C	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Ca	1.822	1.870	1.817	1.823	1.816	1.819	1.850	1.848	1.848	1.868	1.879	1.866	1.863	1.862	1.809	1.851	1.841
Na	0.178	0.130	0.183	0.177	0.184	0.181	0.150	0.152	0.152	0.132	0.121	0.134	0.137	0.138	0.191	0.149	0.159
B	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Na	0.148	0.226	0.242	0.230	0.205	0.220	0.173	0.284	0.284	0.385	0.333	0.237	0.266	0.202	0.250	0.254	0.217
K	0.096	0.104	0.084	0.083	0.096	0.082	0.081	0.110	0.110	0.117	0.108	0.096	0.124	0.098	0.135	0.097	0.106
Λ	0.245	0.329	0.326	0.313	0.301	0.302	0.254	0.394	0.394	0.502	0.441	0.333	0.390	0.300	0.385	0.351	0.322
Total	15.25	15.33	15.33	15.31	15.30	15.30	15.25	15.39	15.39	15.50	15.44	15.33	5.39	15.30	15.39	15.35	15.32
Al <sup>tot</sup>	0.747	0.864	0.782	0.847	0.830	0.778	0.812	1.035	1.035	1.041	0.936	0.776	0.968	0.757	1.074	0.838	0.858
p/GPa	0.055	0.110	0.071	0.102	0.094	0.069	0.085	0.192	0.192	0.195	0.144	0.068	0.160	0.060	0.210	0.098	0.107

$p(\pm 0.06 \text{ GPa}) = -3.01 + 4.76 \text{ Al}^{\text{tot}}$  (Schmidt, 1992); 表中带 \* 标记样品为大颗粒半自形角闪石, 其他为小颗粒他形角闪石。

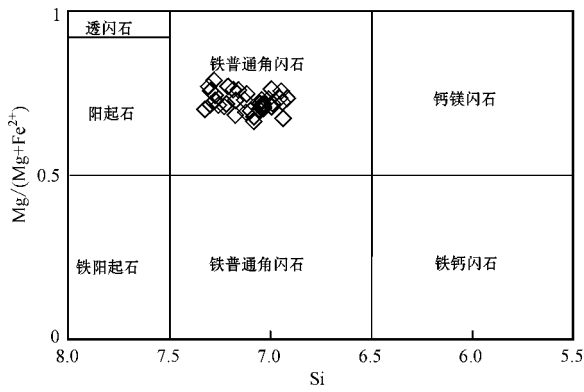


图 7 角闪石成分分类图(据 Leake *et al.*, 1997)

Fig. 7 Amphibole composition classification  
(after Leake *et al.*, 1997)

## 5 构造意义

区域地质资料显示,在阜平杂岩外围东南侧的灵山地区,元古宇至侏罗系的地层厚度在 6.5 km 左右(河北省、天津市区域地层表编写组,1979);在杂岩体西侧的五台地区,元古宇至古生界地层厚度在 7.2~11.8 km 之间(山西省地层表编写组,1979)。整体上,阜平杂岩外围元古宇至侏罗系的地层厚度明显大于麻棚-赤瓦屋岩体的侵位深度。由此推断,至少在麻棚-赤瓦屋岩体侵位时,阜平杂岩中央部位的最大埋藏深度约为 5 km,明显小于边部的埋藏深度。因此,在早白垩世时,阜平杂岩就已经具有穹隆状构造的特征。

在麻棚-赤瓦屋岩体侵位之后,太行山地区发生强烈的隆升和剥蚀作用,使得麻棚-赤瓦屋岩体最终出露于地表。徐杰等(2001)认为五台山北台夷平面的形成时期为 95~65 Ma,自 65 Ma 左右,以五台山为代表的太行山地区开始强烈隆升。庆建春等(2008)沿五台山北台剖面和阜平剖面进行磷灰石裂变径迹的研究,证明了自晚白垩世以来,太行山的隆升过程具有阶段性的特征,经历了 74~58 Ma、46~31 Ma 和 15 Ma 三期快速隆升事件。

麻棚-赤瓦屋岩体位于庆建春等(2008)所研究的阜平剖面南约 50 km 处。因此麻棚-赤瓦屋岩体的剥露过程很可能与区域隆升过程同步。可以认为,麻棚-赤瓦屋岩体在 125 Ma 左右形成后,一直处于距地表 5 km 左右的地壳深度上。直到 65 Ma 左右,伴随太行山的强烈隆升,麻棚-赤瓦屋岩体也开始抬升。由于目前的资料还不足以限定麻棚-赤瓦

屋岩体的剥露过程是否同样经历了 74~58 Ma、46~31 Ma 和 15 Ma 三期快速隆升事件,所以以 65 Ma 作为太行山隆升开始的时间,可以粗略地估算出麻棚-赤瓦屋岩体的平均隆升速率为 0.07~0.08 km/Ma。显然,这只是一个非常粗略的估算,至于岩体隆升过程是否具有阶段性的特点还需要做更深入的研究。

## 6 结论

麻棚-赤瓦屋岩体属于准铝质钙碱性 I 型花岗岩,具有较为明显分带现象,边缘相石英闪长岩、过渡相花岗闪长岩和中心相似斑状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为  $126.4 \pm 2.4$  Ma、 $125.4 \pm 2.0$  Ma 和  $126.2 \pm 2.0$  Ma,属于早白垩世。3 个年龄数据在误差范围内一致,说明麻棚-赤瓦屋岩体经历了快速侵位、快速冷却结晶的地质过程。

根据角闪石全铝压力计估算,麻棚-赤瓦屋岩体的侵位深度约为 5 km。结合区域地质资料,可以证明阜平杂岩在麻棚-赤瓦屋岩体于早白垩世侵位时就已经具有穹隆状构造特征。如果麻棚-赤瓦屋岩体侵位深度为 5 km 左右,而太行山是在 65 Ma 开始快速隆升,那么,估算的平均隆升速率则为 0.07~0.08 km/Ma。

致谢 衷心感谢 3 位评审人对本文提出的宝贵意见和建议。

## References

- Ague J J. 1997. Thermodynamic calculation of emplacement pressures for batholithic rocks, California: Implications for the aluminum-in-hornblende barometer [J]. *Geology*, 25(6): 563~566.
- Anderson J L and Smith D R. 1995. The effects of temperature and  $f_{O_2}$  on the Al-in-hornblende barometer [J]. *American Mineralogist*, 80: 549~559.
- Anderson J L, Barth A P, Wooden J L, *et al.* 2008. Thermometers and thermobarometers in Granitic Systems [J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 69: 121~142.
- Cai Jianhui, Yan Guohan, Chang Zhaoshan, *et al.* 2003. Petrological and geochemical characteristics of the Wanganzhen complex and discussion on its genesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 81~92 (in Chinese with English abstract).
- Cai Jianhui, Yan Guohan, Mu Baolei, *et al.* 2005. Zircon U-Pb age,

- Sr-Nd-Pb isotopic compositions and trace element of Fangshan complex in Beijing and their petrogenesis significance [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 776~788 ( in Chinese with English abstract ).
- Chen Bin, Liu Chaoqun and Tian Wei. 2006. Magma-mixing between mantle and crustal derived melts in the process of Mesozoic magmatism, Taihangshan: constraints from petrology and geochemistry [ J ]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 140~147 ( in Chinese with English abstract ).
- Chen Bin, Tian Wei, Zhai Mingguo, *et al.* 2005. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mesozoic magmatism in the Taihan Mountains and other places of the North China craton, with implications for petrogenesis and geodynamic setting [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 13~24 ( in Chinese with English abstract ).
- Chen Bin, Zhai Mingguo and Shao Ji'an. 2002. Petrogenesis and significance of the Mesozoic North Taihang Complex: Major and Trace Element evidence [ J ]. *Science in China ( Series D-Earth Sciences )*, 46(9): 941~953.
- Davis G A, Zheng Y D, Wang C, *et al.* 1998. Geometry and Geochronology of Yanshan Belt Tectonics [ A ]. Department of Geology, Peking University. Collected Works of International Symposium on Geological Science [ C ]. Beijing: Seismological Press, 275~292.
- Geology and Mineral Resources of Hebei Province. 1989. Regional Geology of Hebei Province, Beijing Municipality and Tianjin Municipality [ M ]. Beijing: Geological Publishing House ( in Chinese ).
- Gong Songlin. 2004. The ancient uplift rate study of Huangling pluton based on Al-in-hornblende barometer [ J ]. *Journal of East China Institute of Technology*, 27(1): 52~58 ( in Chinese ).
- Guan H, Sun M, 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(1~2): 1~18.
- Hammarstrom J M and Zen E-an. 1986. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer [ J ]. *American Mineralogist*, 71: 1297~1313.
- 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: 231~239.
- Johnson M C and Rutherford M J. 1989. Experimental calibration of the aluminium-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera ( California ) volcanic rocks [ J ]. *Geology*, 17: 837~841.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names [ J ]. *Canadian Mineralogist*, 35: 219~246.
- Ludwig K R. 2000. Isoplot/Ex 3.0: a geochronological toolkit for Microsoft Excel [ A ]. Berkeley Geochronology Center Special Publication [ C ], 1a: 1~54.
- Li Jihong, Yang Chonghui, Du Lilin, *et al.* 2005. SHRIMP U-Pb geochronology evidence for the formation time of the Wanzi group at Pingshan county, Hebei province [ J ]. *Geological Review*, 51(2): 201~207 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu Rongfang. 2001. The structural geochemical characteristics of Shihu gold mines in Hebei province [ J ]. *Beijing Geology*, 13(4): 13~19 ( in Chinese ).
- Liu Shuwen. 1996. Study on the fluid and rock balance system of the Taihangshan Fuping Gneissic complex [ J ]. *Science in China ( Series D—Earth Science )*, 27(3): 239~244 ( in Chinese ).
- Liu Shuwen, Li Jianghai, Pan Yuanming, *et al.* 2002. An Archean continental block in the Taihangshan and Hengshan regions: Constraints from geochronology and geochemistry [ J ]. *Progress in Natural Science*, 12(8): 826~833 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu Shuwen, Liang Haihua, Zhao Guochun, *et al.* 2000. Geochronology and geological events in the Precambrian complexes in Taihang mountains [ J ]. *Science in China ( Series D-Earth Science )*, 30(1): 18~24 ( in Chinese ).
- Liu Yang, Li Chengming, Mu Yiqing, *et al.* 2010a. Zircon SHRIMP U-Pb age of Chiwawu granite complex and its implication in the northern Taihang mountain [ J ]. *Geology and Exploration*, 46(3): 442~447 ( in Chinese ).
- Liu Yang, Li Chengming, Zheng Jie, *et al.* 2010b. The zircon SHRIMP U-Pb age of Mapeng granite complex in the northern Taihang Shan mountains and its implication [ J ]. *Geology and Exploration*, 46(4): 622~627 ( in Chinese ).
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Li Wuping, *et al.* 2000. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle in the eastern China: The "Mushroom Cloud" mode [ J ]. *Earth Science Frontiers*, 7(1): 97~107 ( in Chinese with English abstract ).
- Luo Zhaohua, Deng Jinfu, Zhao Guochun, *et al.* 1997. Characteristics of magmatic activities and orogenic process of Taihangshan intraplate orogen [ J ]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(3): 279~284 ( in Chinese with English abstract ).
- Niu Shuyin, Dong Guorun and Xu Chuanshi. 1995. The origin and source of magma in the Taihangshan tectono-magmatic belt [ J ]. *Geological Review*, 41(4): 301~310 ( in Chinese with English abstract ).
- Qing Jianchun, Ji Jianqing, Wang Jinduo, *et al.* 2008. Apatite fission track study of Cenozoic uplifting and exhumation of Wutai mountain, China [ J ]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(2): 384~392 ( in Chinese with English abstract ).
- Schmidt M W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of



- pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer[ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 304~310.
- Sun Min and Guan Hong. 2001. Zircon U-Pb ages of the Fuping Complex and their implications: some comments on the geochronological study of the Precambrian high-grade metamorphic terranes[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 145~156 (in Chinese with English abstract).
- Wilde S A, Cawood P A and Wang K Y. 1997. The relationship and timing of granitoid evolution with respect to felsic volcanism in the Wutai Complex, North China Craton[ J ]. *Precambrian Geology and Metamorphic Petrology*, 17: 75~88.
- Wang Jiliang, Li Bingze, Zhou Dexing, *et al.* 1994. *Geological Characteristics and Relationship between Rock Body and Metallization of Intermediate Acidity Rock Body, Hebei Province*[ M ]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Qichao, Ma Junliang and Zhang Jianzhong. 1995. Geochemical characteristics and genesis of Mapeng goldfield bordering Lingshou and Fuping, Hebei, China[ J ]. *Geochimica*, 24(1): 56~68 (in Chinese).
- Wang Zili, Chen Chao, Niu Shuyin, *et al.* 2007. Discussion on the genesis of Mapeng Granitic intrusion in the middle of Taihangshan mountain[ J ]. *Hebei Geology*, 4: 6~9 (in Chinese).
- Xia X P, Sun M, Zhao G C, *et al.* 2006. U-Pb age and Hf isotope study of detrital zircons from the Wanzi supracrustals: Constraints on the tectonic setting and evolution of the Fuping complex, trans-North China Orogen [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 844~863.
- Xi Chaozhuang, Dai Taigen, Liu Wei, *et al.* 2008. Petrogeochemical characteristics of the intrusive bodies of Mapeng granitoid[ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(2): 113~120 (in Chinese with English abstract).
- Xie Liewen, Zhang Yanbin, Zhang Huihuang, *et al.* 2008. In situ simultaneous determination of trace elements, U-Pb and Lu-Hf isotopes in zircon and baddeleyite[ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 53(10): 1565~1573.
- Xu Jie, Gao Zhanwu, Sun Jianbao, *et al.* 2001. A preliminary study of the coupling relationship between basin and mountain in extensional environments—A case study of the Bohai Bay Basin and Taihang Mountain[ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 165~174 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang. 2006. Formation of the Taihangshan gravity lineament by the diachronous lithospheric thinning of the North China Craton [ J ]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 14~22 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chonghui, Du Lilin, Wan Yusheng, *et al.* 2004. SHRIMP zircon U-Pb chronology of tonalitic gneiss in Banqiaogou area, Pingshan county, Hebei province[ J ]. *Geological Journal of China Universities*, 10(4): 514~522 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, *et al.* 2002. Review of global 2.1~2.8 Ga orogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent [ J ]. *Earth-Science Reviews*, 59: 125~162.
- Zhang Yaxiong and Hu Xiangzhao. 1994. Research on the characteristics of Mabeng granitic intrusion and its contribution to the gold ore metallogeny[ J ]. *Journal of Central-South Institute of Mining and Metallurgy*, 25(3): 275~281 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 蔡剑辉, 阎国翰, 常兆山, 等. 2003. 王安镇岩体岩石地球化学特征及成因探讨[ J ]. *岩石学报*, 19(1): 81~92.
- 蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 等. 2005. 北京房山岩体锆石 U-Pb 年龄和 Sr, Nd, Pb 同位素与微量元素特征及成因探讨[ J ]. *岩石学报*, 21(3): 776~788.
- 陈斌, 刘超群, 田伟. 2006. 太行山中生代岩浆作用过程中的壳幔岩浆混合作用: 岩石学和地球化学证据[ J ]. *地学前缘*, 13(2): 140~147.
- 陈斌, 田伟, 翟明国, 等. 2005. 太行山和华北其它地区中生代岩浆作用的锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其岩浆成因和地球动力学意义[ J ]. *岩石学报*, 21(1): 13~34.
- 陈斌, 翟明国, 邵济安. 2002. 太行山北段中生代岩基的成因和意义: 主要和微量元素地球化学证据[ J ]. *中国科学*, 32(11): 896~907.
- Davis G A, Zheng Y D, Wang C, *et al.* 1998. Geometry and geochronology of Yanshan belt tectonics[ A ]. *北京大学地质学系. 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集 C*. 北京: 地震出版社 275~292.
- 龚松林. 2004. 角闪石全铝压力计对黄陵岩体古隆升速率的研究[ J ]. *东华理工学院学报*, 27(1): 52~58.
- 河北省、天津市区域地层表编写组. 1979. 华北地区区域地层表——河北省、天津市分册[ M ]. 北京: 地质出版社.
- 河北省地质矿产局. 1989. 河北省北京市天津市区域地质志[ M ]. 北京: 地质出版社.
- 李基宏, 杨崇辉, 杜利林, 等. 2005. 河北平山湾子群的时代: SHRIMP 锆石年代学证据[ J ]. *地质论评*, 51(2): 201~207.
- 刘荣访. 2001. 河北省灵寿县石湖金矿的构造地球化学特征[ J ]. *北京地质*, 13(4): 13~19.
- 刘树文. 1996. 太行山阜平片麻杂岩的流体与岩石平衡体系研究[ J ]. *中国科学(D辑)*, 27(3): 239~244.
- 刘树文, 李江海, 潘元明, 等. 2002. 太行山-恒山太古代古老陆块: 年代学和地球化学制约[ J ]. *自然科学进展*, 12(8): 826~830.
- 刘树文, 梁海华, 赵国春, 等. 2000. 太行山早前寒武纪杂岩的同位素年代学和地质事件[ J ]. *中国科学(D辑)*, 30(1): 18~24.
- 刘阳, 李程明, 穆一青, 等. 2010a. 太行山北段赤瓦屋岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义[ J ]. *地质与勘探*, 46(3): 442~447.

- 刘阳,李程明,郑杰,等. 2010b. 太行山北段麻棚岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质与勘探, 46(4): 622~627.
- 路凤香,郑建平,李伍平,等. 2000. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式:“蘑菇云”模型[J]. 地学前缘, 7(1): 97~107.
- 罗照华,邓晋福,赵国春,等. 1997. 太行山造山带岩浆活动特征及其造山过程反演[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 22(3): 279~284.
- 牛树银,董国润,许传诗. 1995. 论太行山构造岩浆带的岩浆来源及其成因[J]. 地质论评, 41(4): 301~310.
- 乔秀夫,戴维生,王成述. 2002. 华北地区地质图[A]. 马丽芳主编. 中国地质图集[C]. 北京:地质出版社, 86~87.
- 庆建春,季建清,王金铎,等. 2008. 五台山新生代隆升剥露的磷灰石裂变径迹研究[J]. 地球物理学报, 51(2): 384~409.
- 山西省地层表编写组. 1979. 华北地区区域地层表——山西省分册[M]. 北京:地质出版社.
- 孙敏,关鸿. 2001. 阜平杂岩年龄及其地质意义:兼论前寒武高级变质地体的定年问题[J]. 岩石学报, 17(1): 145~156.
- 王季亮,李丙泽,周德星,等. 1994. 河北中酸性岩地质特征及其与成矿关系[M]. 北京:地质出版社.
- 王启超,马俊良,张建中. 1995. 河北省灵寿县阜平接壤地带麻棚金矿田的地球化学特征及矿床成因[J]. 地球化学, 24(1): 56~68.
- 王自力,陈超,牛树银,等. 2007. 太行山中段麻棚岩体的成因探讨[J]. 河北地质, 4: 6~9.
- 息朝庄,戴塔根,刘伟,等. 2008. 冀西麻棚花岗岩类侵入岩体岩石地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 27(2): 113~120.
- 夏国礼,李耀辉. 2005. 太行山北段燕山期侵入岩成因类型及构造环境分析[J]. 河北地质矿产信息, 1: 2~9.
- 夏国礼,张家奇,潘洪儒. 2006. 太行山北段燕山期花岗岩成因类型及其成矿作用[J]. 河北地质, 2: 5~12.
- 谢烈文,张艳斌,张辉煌,等. 2008. 锆石/斜锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定[J]. 科学通报, 53(2): 220~228.
- 徐杰,高战武,孙建宝,等. 2001. 区域伸展体制下盆-山耦合关系的探讨——以渤海湾盆地和太行山为例[J]. 地质学报, 75(2): 165~174.
- 徐义刚. 2006. 太行山重力梯度带的形成与华北岩石圈减薄的时空差异性有关[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 31(1): 14~22.
- 杨崇辉,杜利林,万渝生,等. 2004. 河北平山英云闪长质片麻岩锆石 SHRIMP 年代学[J]. 高校地质学报, 10(4): 514~522.
- 张亚雄,胡祥昭. 1994. 麻棚岩体特征及其与金矿成因关系研究[J]. 中南矿冶学院学报, 25(3): 275~281.