

# 赞皇变质穹隆黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代学研究及其对构造热事件的约束\*

王岳军 范蔚茗 郭锋 彭头平 李超文

WANG YueJun, FAN WeiMing, GUO Feng, PENG TouPing and LI ChaoWen

中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2001-10-21 收稿, 2002-03-14 改回.

Wang YJ, Fan WM, Guo F, Peng TP and Li CW. 2003. Biotite <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology of the deformational rocks from Zhanhuang metamorphic domain in south Taihang mountains and their tectonothermal overprinting. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1):131-140

**Abstract** Biotites separated from two Zhanhuang metamorphic rocks in south Taihang mountains respectively yield well-defined <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar plateau ages of 1792.61±2.26 Ma and 1826.83±0.76 Ma for about 70% released <sup>39</sup>Ar. These ages are interpreted to date the tectonothermal event of postmetamorphic cooling through appropriate argon closure temperatures (ca. 300°C). A significant tectonothermal extension event was overprinted at ca. 1800 Ma in North China Craton, resulting in the rapid uplifting of the metamorphic basement to middle-upper crust level with a cooling rate of >6°C/Ma, corresponding to a uplifting rate >200m/Ma. Three biotites separated from mylonites respectively from the Canyansi-Yingfangtai, Podi-Guandu and Yudi-Gangxi-Heishuihe NNE-trending ductile shear zones, give the <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar plateau ages of 1688.9±2.4 Ma, 1632.7±2.0 Ma and 1645.0±3.0 Ma for over 75% released <sup>39</sup>Ar. These ages are interpreted to date the cooling through <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar closure temperatures following synkinematic growth of biotite as a consequence of mylonitic overprinting. These ages are also close to the lower-limited age of Changcheng Group. Assuming that the geothermal gradient is 30°C/Ma, a slow average cooling rate of ca. 0.4°C/Ma and the corresponding uplifting rate of ca. 15m/Ma can be calculated since Mesoproterozoic era. Our observations appear to suggest that the Zhanhuang metamorphic complex has not been overprinted by younger thermal event over than 300°C since ca. 1800 Ma. It is also unlikely for the shear zones to reactivate after ca. 1633 Ma. This means that the Zhanhuang metamorphic complex might be a Paleoproterozoic metamorphic dome rather than a Mesozoic metamorphic core-complex, i. e., the total uplifting magnitude is no more than 10km since Mesozoic.

**Key words** Biotite <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating, Tectonothermal overprinting, Zhanhuang metamorphic dome, Extensional uplifting, South Taihang Mountains

**摘要** 太行山南段赞皇变质杂岩中黑云母给出了1827~1793 Ma的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar坪年龄,代表了变质基底在经历高温热扰动后冷却到300°C时的热事件年龄。结合华北克拉通变质岩的其他年代学资料,认为1800 Ma±华北克拉通内经历了一次广泛而强烈的构造热伸展事件,致使克拉通基底岩石快速抬升到中上地壳,其冷却速率>6°C/Ma,隆升速率>200m/Ma。赞皇变质杂岩内苍岩寺、岗西-榆底-黑水河东和坡底-郝庄韧性剪切带内糜棱岩中黑云母分别给出了1689 Ma、1633 Ma和1645 Ma的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar坪年龄,代表了剪切带变形的主变形时代,这一年龄也为约束长城系的底界年龄提供了新的信息。结合已有的热年代学资料,推断华北克拉通内部赞皇变质地区中元古代的冷却速率约0.4°C/Ma,隆升速率约15m/Ma。由此也表明,自中元古代以来华北克拉通内部未受到后期构造热事件的强烈扰动,赞皇变质杂岩并非中生代变质核杂岩,而是早元古代变质穹隆。

**关键词** 黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年龄;赞皇变质杂岩;糜棱岩;构造伸展;早元古代变质穹隆

**中图分类号** P597.3

\* 本项目得到国家自然科学基金项目(编号:49973021)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-102, KZCX1-107)的资助。

第一作者简介:王岳军,男,1969年生,副研究员,主要从事构造热年代学和岩石大地构造研究。

太行山地处华北陆块腹地,属大兴安岭-太行山-武陵山重力梯度带的中段,以太行山为界,现今华北陆块呈现东西分异的构造格局(马文璞等, 1989)。对太行山穹隆的成因一直以来存在不同的认识,如太古代片麻岩穹隆(马杏垣, 1989),晚太古代伸展变形带(唐先梅等, 1997)等等。近年来 Zhao 等(1999a, b, 2000, 2001)认为华北陆块由东西块体于 1870~1800 Ma 碰撞拼贴而成,太行山代表了中部碰撞拼贴带的东侧边界,然而钱祥麟等(1999)、李江海等(2001)则认为龙泉关剪切带及恒山南剪切带可能标志着西部再造和叠加变质高级区的东界,东南部的太行山-鲁西中低级区发育 TTG 绿岩带,再造作用较弱,1800 Ma 左右华北克拉通构造热变质事件的影响仅限于太行山以西。另外也有人认为太行山是在中生代强烈板内构造变形作用下形成的变质核杂岩(如阜平、赞皇变质核杂岩)(牛树银等, 1994a, b; 雷世和等, 1994)。通常,变质核杂岩内变质作用、核部岩浆杂岩与韧性剪切带的形成关系密切,韧性剪切带的形成时代代表了核杂岩形成的主体时代。但目前太行山基底变质岩广泛记录的是吕梁期热扰动年龄(如许荣华等, 1995; Zhao *et al.*, 1999a, b, 2000, 2001; 关鸿等, 1998; 刘树文等, 2000),而与中生代变质核杂岩无关。因此太行山变质杂岩究竟形成于何种构造背景,是否存在中生代变质核杂岩等问题需要更多热年代学资料的确证。考虑到太行山北端阜平变质杂岩与燕山造山带相连,其构造运动与构造-热事件格局可能受到中生代陆缘构造变形作用的复合、叠加与改造(Davis, 1998; Zheng *et al.*, 1996),而位于太行山南段的赞皇变质杂岩远离阴山-燕山造山带,也与秦岭造山带相距甚远,受中生代以来的构造-热叠加作用较弱,更有利于开展热年代学研究。因此本文选择赞皇变质杂岩内主要韧性剪切带及变质岩石开展黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 同位素定年,以厘定赞皇变质杂岩的主要热事件年龄和韧性剪切带的形成时代,进而为讨论区域隆升格局提供重要制约。

## 1 地质概况与定年样品描述

赞皇变质穹隆位于太行山南段,平面上呈北北东-南西西向展布的纺锤形(图 1),组成穹隆核部的是与阜平群下段相当的赞皇群,为一套由角闪岩-绿片岩相的黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、含石榴黑云斜长角闪片岩、黑云角闪片岩、石英片岩、黑云钾长片岩、大理岩、变粒岩及混合花岗岩等组成(牛树银等, 1994a; 河北地质矿产局, 1989),部分地段混合岩化强烈。其北西侧与绿片岩相的早元古代甘陶河群或未变形的长城系角度不整合接触,东侧与长城系或古生界呈角度不整合或断层接触(图 1)。穹隆内变形复杂(图 2a),广泛发育倒转褶皱、平卧褶皱和横弯褶皱等(牛树银等, 1994a)。

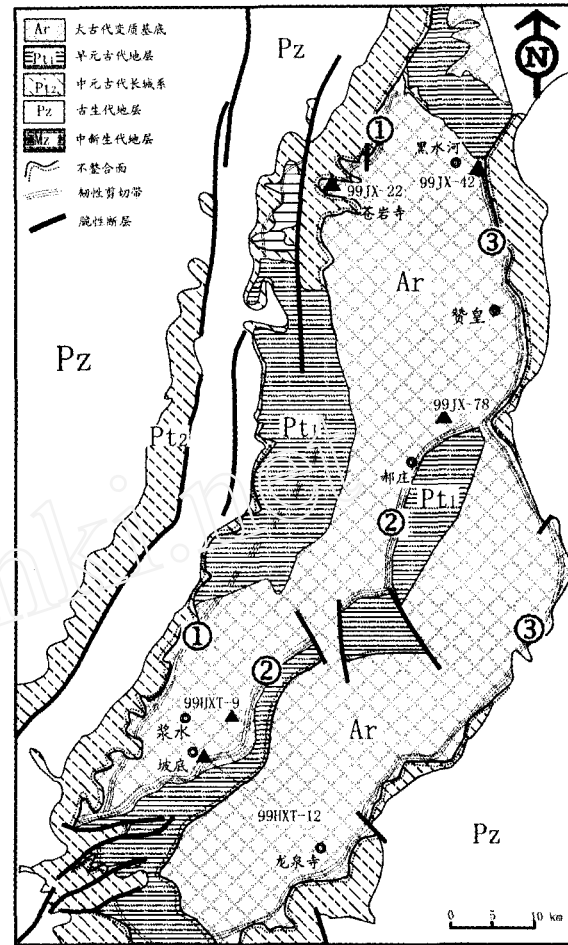


图 1 赞皇变质穹隆地质略图

(据牛树银等, 1994a, b); 其中①示苍岩寺韧性剪切带, ②示郝庄-坡底韧性剪切带, ③黑水河东韧性剪切带

Fig. 1 The geological sketch of Zanhuang massif (revised from Niu *et al.*, 1994a, b)

区内发育如图 1 所示的三条典型拆离韧性剪切带(牛树银等, 1994a, b)。西部营房台-招七-障石岩-苍岩山剪切带发育于长城系与基底构造层之间的接触带上(雷世和, 1991), 剪切带上盘为长城纪紫红色砂岩,下盘为赞皇群高级变质岩或早元古代甘陶河群南寺掌组底部的变砂岩和变安山岩,剪切带内发育倾向北西西,倾角和缓的糜棱面理,线理侧伏北西西,侧伏角 30~50°,野外剪切标志指示为北北西向伸展滑脱(图 2b)。东部韧性剪切带发育于赞皇榆底村-临城岗西-元氏黑水河东,糜棱面理倾向北东东,倾角 25~35°,根据肠状褶皱的产状和 S-C 组构判断,盖层向北东东向伸展滑脱(图 2c);中部剪切带分布于邢台坡底和临城郝庄-官都一带,带内构造透镜体压扁拉长,其剪切褶皱、残斑旋转系指示向北西西伸展剪切(图 2d)。三条剪切带内糜棱岩、初糜棱岩发育(牛树银等, 1994a, b; 雷世和, 1991),剪切标志较清晰,如劈理、S-C 组构、长英质脉体多被强烈揉

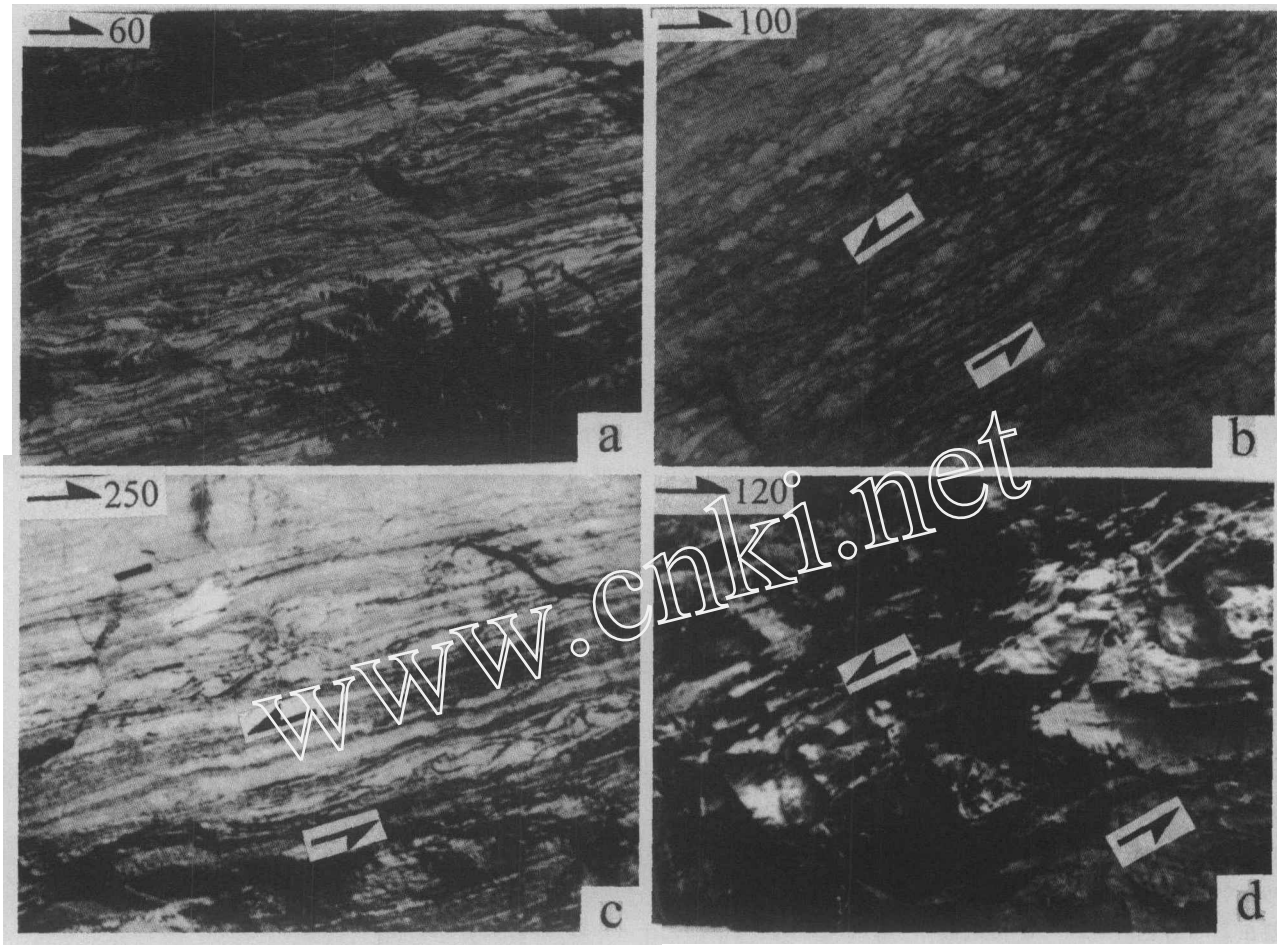


图2 野外照片 (a) 浆水赞皇群倒转褶皱; (b) 井陘苍岩寺剪切带旋转构造, 剪切标志指示北北西向伸展滑脱; (c) 元氏黑水河东剪切带南东东向伸展滑脱构造; (d) 临城郝庄东剪切带内透镜体, 示北西西向伸展

Fig. 2 Field photos from Zhanhuang massif. (a) overturned fold from Zhanhuang Group in Jiangshui; (b) a sense of top-to-NWW shear from Cangyansi; (c) a sense of top-to-SEE shear from Heishuihe ductile shear zone; (d) structural lens from Haozhuang, indicating a sense of top-to-NWW shear

皱成肠状构造或呈构造透镜状, 布丁构造呈 NEE 向断开, 反映当时近东西向的伸展作用。卷入剪切带的早元古代地层中气孔、杏仁或构造透镜体平行面理拉长,  $x/z$  在 3:1~5:1 之间, 其中以苍岩寺、招七及郝庄一带最为明显。显微构造方面, 普遍表现出石英动态重结晶和石英波状消光, 石英残斑定向拉长, 角闪石和黑云母矿物定向排列。黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年样品 99JX-22、99HXT-12 和 99JX-41 分别采自井陘苍岩寺、邢台城计坡底和元氏黑水河东(图 1), 三个样品均为黑云斜长质糜棱岩, 主要矿物组成为黑云母(10%~15%)、斜长石(30%~40%)、石英(35%~45%)、角闪石(5%~7%), 镜下可见旋转残斑系、S-C 组构、石英条带状构造和云母鱼等塑性变形构造, 分别代表赞皇地区西、中、东部三条主要韧性剪切带的样品, 其糜棱面理产状分别为  $240^\circ \angle 7^\circ$ 、 $270^\circ \angle 25^\circ$ 、 $70^\circ \angle 35^\circ$ 。变质基底样品 99JX-78、

99HXT-9 采自赞皇胡家庵、邢台浆水(图 1), 两者岩性为黑云斜长片麻岩, 具鳞片粒状变晶结构、片麻状或条带状构造, 主要矿物成分有黑云母(15%~20%)、斜长石(35%~45%±)、石英(30%~35%)、部分白云母、绿泥石, 副矿物主要有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿等, 矿物不规则定向排列, 黑云母有时相对集中呈条带状, 与粒状矿物平行分布。

## 2 分析方法

样品清洗晒干逐步破碎至 40~60 目, 在双目镜下挑选黑云母, 纯度在 99% 以上。单矿物样品(0.2g)用铝箔包裹, 锡箔屏蔽, 与参考标样一起置中国原子能科学研究院核反应堆照射, 瞬时中子通量为  $6.63 \times 10^{12} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ , 积分中子通量为  $1.05 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ , 照射时间 2627 min。用作中子通量监

测的标准样品为 ZBH-25 黑云母和 BSP-1 角闪石,其年龄分别为  $132.7 \pm 1.2 \text{ Ma}$  和  $2060 \pm 18.6 \text{ Ma}$ 。在超高真空析氦系统中对样品用半导体化高频感应电炉加热熔样。每个样品分 9~12 个阶段从  $420^\circ\text{C}$ ~ $1350^\circ\text{C}$  加热(每个加热阶段时间为 20 分钟),氦经 5 埃分子筛、Cu-CuO ( $550^\circ\text{C}$ )、海绵钛 ( $850^\circ\text{C}$ ) 和钛升华泵纯化后,进入中国科学院地质与地球物理研究所 RGA-10 气体质谱仪上(英国 VSS 公司)进行静态 Ar 同位素测定。实验室测定的大气 Ar 及 Ca、K 照射产生的  $^{36}\text{Ar}$ 、 $^{39}\text{Ar}$ 、 $^{40}\text{Ar}$  干扰,用实验室测定数据进行了校正,其校正因子分别为,  $(^{38}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 3.81 \times 10^{-5}$ ,  $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{a}} = 294.2$ ,  $(^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{a}} = 0.1869$ ,  $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 2.64 \times 10^{-4}$ ,  $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 6.87 \times 10^{-4}$ ,  $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{K})_{\text{K}} = 0.01$ 。  
 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} / \text{a}$ ,  $J = 0.008471$

### 3 分析结果与地质解释

5 个来自于赞皇变质杂岩内不同构造部位的黑云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  逐步加热测试分析结果列于表 1。坪年龄特征见图 3。

所分析的 5 个黑云母  $^{39}\text{Ar}$  在 70%~82% 的中高温释放区域皆给出了很好的坪年龄;而低温释放区域(18%~30%)出现较年轻的视年龄,表现低温热扰动的迹象。对这些样品的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  -  $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  等时线处理结果(表 1)表明,每个样品均能拟合成很好的等时线,99HXT-9、99HXT-12、99JX-78、99JX-41 样品的等时线年龄与坪年龄相差在 2Ma 以内,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  初始值介于 283.0~300.5,与大气值(295)相差不大,表明这些样品的坪年龄受过剩氦影响较小,无明显的氦丢失,其坪年龄值可信。而 99JX-22 黑云母  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  初始值 334.7,暗示可能存在一定的过剩氦或氦丢失的影响(如 Maluski *et al.*, 1990, 1993),但坪年龄稳定,应代表了黑云母的 Ar 同位素封闭年龄。

从表 1 中可知,赞皇变质杂岩西部苍岩寺-营房台剪切带内糜棱岩中黑云母(99JX-22)给出了  $1688.92 \pm 2.43 \text{ Ma}$  的坪年龄,中部坡底-郝庄剪切带内糜棱岩中黑云母(99HXT-12)给出了  $1632.66 \pm 1.99 \text{ Ma}$  的坪年龄,东部岗西-榆底-黑水河剪切带内初糜棱岩中黑云母(99JX-41)给出了  $1645.05 \pm 2.98 \text{ Ma}$  的坪年龄。样品中黑云母定向排列,表明剪切作用过程新生黑云母发生了  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  同位素体系的重新平衡,而石英、长石塑性变形说明变形温度在  $300^\circ\text{C}$ ~ $350^\circ\text{C}$  (王志洪等, 1997),因此这些糜棱岩中黑云母给出的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  坪年龄近似代表了三条剪切带的主变形年龄(Krol *et al.*, 1996; 王志洪等, 1997)。而片麻岩中黑云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  坪年龄  $1792.61 \pm 2.26 \text{ Ma}$  (99HXT-9)、 $1826.83 \pm 0.76 \text{ Ma}$  (99JX-78) 则反映了变质杂岩在经历高温变质作用后抬升冷却至黑云母封闭温度(约  $300^\circ\text{C}$ )时的冷却年龄,且

样品在其后的地质演化中未受到黑云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  封闭温度 ( $300^\circ\text{C}$ ) 以上的其他热事件扰动。

## 4 讨论

### 4.1 对华北克拉通 1800Ma± 构造热事件的指示

最近的年代学资料 (SHRIMP、单颗粒锆石 U-Pb、Sm-Nd 内部等时线、石榴石  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) 表明,华北陆块内部(如桑干孔兹岩系、阜平、恒山高级变质岩、五台花岗绿岩带)变质岩仅发育一期变质锆石,其年龄集中于  $1870 \sim 1810 \text{ Ma}$  (刘敦一等, 1984; 郭敬辉等, 1999; 胡世玲等, 1999; 耿元生等, 1997; 关鸿等, 1998; Zhao *et al.*, 1999b, 2001)。这一年传统上被认为是华北陆块克拉通化的时间(马杏垣, 1989),近年则被解释为一次强烈的大陆碰撞拼合事件(Zhao *et al.*, 1999, 2000, 2001; 郭敬辉等, 1996),或是与古地幔柱作用下的超大陆裂解事件有关(翟明国等, 2000, 2001)。赞皇片麻岩中黑云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  坪年龄  $1827 \sim 1793 \text{ Ma}$ , 记录了变质基底在经历高温热扰动后冷却到  $300 \pm 40^\circ\text{C}$  (Harrison, 1985) 时的热事件年龄,近似于晋冀蒙高压麻粒岩、五台山石榴斜长角闪岩中退变质角闪石  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄 ( $1782 \sim 1775 \text{ Ma}$ , 翟明国等, 2001) 和天津变质岩中黑云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  坪年龄 ( $1798 \text{ Ma}$ , 王松山等, 1995),表明 1800Ma 华北克拉通已经是一联合大陆或超大陆(陆松年等, 1991; 翟明国等, 2000)。此时华北克拉通内部经历了一次广泛而强烈的构造热伸展事件(李江海等, 2000)。而阜平片麻岩内花岗伟晶岩脉(为斜切片麻理的不规则脉体)中的锆石  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄  $1799 \pm 7 \text{ Ma}$ 、单颗粒锆石 SHRIMP 年龄  $1790 \pm 8 \text{ Ma}$  (王凯怡等, 1997) 以及侵入于赞皇变质基底的 NW 向未变形辉绿岩岩墙的 K/Ar 年龄  $1770 \sim 1750 \text{ Ma}$  (Qian *et al.*, 1987) 则代表了前寒武纪基底早元古代末期构造-热活化事件的终止时间。

近年为了回答如此大范围构造热伸展的动力学机制,结合华北克拉通地壳快速抬升冷却 ( $1850 \sim 1800 \text{ Ma}$ )、克拉通周边妙香山-承德-密云和中条山-熊耳裂谷型岩浆组合的发育 ( $1950 \sim 1750 \text{ Ma}$ ) (Gilder *et al.*, 1991; 翟明国等, 2000, 2001)、北祁连小洋盆的形成 ( $1840 \sim 1780 \text{ Ma}$ ) (Mao *et al.*, 1998)、克拉通内基性岩墙群 ( $1770 \sim 1750 \text{ Ma}$ ) (Qian *et al.*, 1987) 及非造山岩浆活动的广泛发育等地质事实,翟明国等 (1999, 2000, 2001) 认为 1800Ma± 华北克拉通的构造伸展事件与古地幔柱作用下的超大陆裂解作用有关,并可与全球同期 ( $1850 \sim 1700 \text{ Ma}$ ) 构造伸展事件 (Alkmin *et al.*, 1998; Teixeira *et al.*, 1999) 相类比。但 Zhao *et al.* (1999a, b, 2000, 2001) 认为  $1870 \sim 1810 \text{ Ma}$  是华北东西陆块碰撞拼合的时间,如此,1800Ma± 的构造-热伸展亦可理解为碰撞后伸展垮塌的记录。

表 1 黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar同位素逐步加热测试分析结果Table 1 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar isotopic analyses for incremental heating experiments on biotite concentrates out of deformational and metamorphic rocks in Zanhuang domain

加热阶段	加热温度 ℃	( <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	( <sup>36</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	( <sup>37</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	( <sup>38</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	<sup>39</sup> Ar <sub>k</sub> (×10 <sup>-12</sup> mol)	<sup>40</sup> Ar*/ <sup>39</sup> Ar <sub>k</sub> (±1σ)	<sup>39</sup> Ar <sub>k</sub> %	视年龄 (t±1σMa)
黑云母 (99JX-22), 采自井陘苍岩寺剪切带内糜棱岩, w=0.1120g									
1	420	286.44	0.0372	1.8833	0.0644	1.367	275.9±0.04	3.51	2174.34±54.28
2	550	119.17	0.0342	1.9788	0.0698	3.382	109.3±0.00	8.69	1182.99±12.69
3	650	137.38	0.0327	2.1462	0.0626	2.478	128.0±0.01	6.36	1325.62±14.79
4	750	159.24	0.0252	1.8052	0.0445	2.757	152.1±0.01	7.08	1493.73±17.93
5	850	189.77	0.0286	1.4872	0.0363	2.424	181.6±0.01	6.22	1680.54±23.76
6	940	186.71	0.0156	0.9838	0.0320	2.967	182.2±0.01	7.62	1684.68±23.25
7	1030	188.11	0.0139	2.1498	0.0671	6.625	184.4±0.01	17.0	1697.35±23.98
8	1100	184.67	0.0101	2.2005	0.0685	7.876	182.1±0.01	20.20	1683.59±23.32
9	1200	187.84	0.0114	2.2767	0.0655	5.049	184.9±0.01	12.90	1700.33±23.93
10	1300	192.43	0.0336	1.3072	0.0798	2.758	182.7±0.01	7.08	1687.65±24.84
11	1420	296.22	0.0943	2.6556	0.1377	1.227	269.1±0.04	3.15	2142.94±58.29
坪年龄 tp=1683.92±2.43Ma, 等时线年龄 tiso=1693.73±116.41Ma; <sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar 初始值=293.0									
黑云母 (99HXT-12), 采自邢台城计坡流剪切带内糜棱岩, w=0.1167g									
1	432	217.83	0.2736	0.6096	0.1199	1.101	137.4±0.002	3.32	1393.02±26.99
2	530	126.26	0.1777	0.8774	0.0585	1.147	74.04±0.00	3.45	878.39±10.32
3	650	139.08	0.1034	0.7904	0.0436	2.017	108.7±0.00	6.08	1177.90±13.50
4	750	158.06	0.0752	0.7005	0.0440	2.156	136.0±0.01	6.50	1382.78±16.91
5	850	175.37	0.0098	0.3838	0.0325	3.061	172.5±0.01	9.22	1625.05±20.97
6	930	178.94	0.0150	0.3810	0.0296	6.169	174.5±0.01	18.50	1637.68±21.59
7	1000	177.47	0.0118	0.4578	0.0371	2.933	174.0±0.01	8.84	1634.43±21.39
8	1080	179.71	0.0181	0.3672	0.0355	3.200	174.4±0.01	9.64	1636.78±21.74
9	1160	177.72	0.0131	0.4109	0.0323	5.311	173.9±0.01	16.00	1633.72±21.39
10	1240	185.48	0.0362	0.5254	0.0370	2.875	174.8±0.01	8.66	1639.61±22.69
11	1320	189.28	0.0595	0.6032	0.0392	1.947	171.8±0.01	5.87	1620.92±23.18
12	1430	320.37	0.1111	1.1395	0.0685	1.251	287.9±0.05	3.77	2228.56±67.68
坪年龄 tp=1632.66±1.99Ma, 等时线年龄 tiso=1628.36±57.76Ma; <sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar 初始值=334.7									
黑云母 (99JX-41), 采自元氏县黑水河东剪切带内糜棱岩, w=0.1347g									
1	420	119.23	0.1794	1.8297	0.0974	0.903	66.62±0.00	3.10	807.33±10.00
2	530	108.44	0.0519	1.6007	0.0727	1.784	93.35±0.00	6.13	1051.22±11.26
3	650	127.77	0.0277	1.0811	0.0611	2.503	119.7±0.00	8.60	1263.45±13.62
4	750	160.65	0.0327	1.1343	0.0666	2.121	151.1±0.01	7.28	1487.45±18.35
5	850	180.07	0.0150	1.0242	0.0556	3.083	175.8±0.01	10.50	1645.42±22.08
6	930	177.04	0.0073	0.9039	0.0565	2.828	175.0±0.01	9.71	1640.52±21.59
7	1000	178.57	0.0082	0.9623	0.0532	4.219	176.3±0.01	14.40	1648.38±21.84
8	1080	179.35	0.0090	0.9207	0.0483	3.593	176.8±0.01	12.30	1651.71±21.93
9	1180	181.25	0.0130	0.5743	0.0432	4.452	177.5±0.01	15.20	1655.69±22.20
10	1280	186.23	0.0458	0.9522	0.0623	2.527	172.9±0.01	8.68	1627.38±22.99
11	1420	291.48	0.1382	1.7943	0.1425	1.089	251.2±0.04	3.74	2057.46±55.52
坪年龄 tp=1645.05±2.98Ma, 等时线年龄 tiso=1646.65±75.21Ma; <sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar 初始值=298.0									

续表 1

Table 1 (Continued)

加热阶段	加热温度 ℃	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$^{39}\text{Ar}_k$ ( $\times 10^{-12}\text{mol}$ )	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k$ ( $\pm 1\sigma$ )	$^{39}\text{Ar}_k$ %	视年龄 ( $t \pm 1\sigma/\text{Ma}$ )
黑云母(99JX-78), 采自赞皇胡家庵村黑云母斜长片麻岩, w=0.1109g									
1	420	215.66	0.0710	1.1558	0.0951	0.962	194.9 $\pm$ 0.02	3.73	1759.26 $\pm$ 30.25
2	530	108.86	0.0582	0.7005	0.0537	1.831	91.80 $\pm$ 0.00	7.12	1037.87 $\pm$ 10.86
3	650	151.26	0.0527	2.0228	0.0730	2.282	136.0 $\pm$ 0.01	8.87	1383.10 $\pm$ 16.64
4	750	172.11	0.0259	1.6674	0.0750	2.410	164.7 $\pm$ 0.01	9.36	1760.23 $\pm$ 20.66
5	850	212.06	0.0172	1.0178	0.0655	2.689	207.1 $\pm$ 0.02	10.40	1828.38 $\pm$ 29.67
6	930	211.81	0.0196	1.0459	0.0531	2.944	206.2 $\pm$ 0.02	11.40	1822.97 $\pm$ 29.42
7	1000	209.66	0.0096	0.6060	0.0381	4.800	206.9 $\pm$ 0.02	18.60	1826.88 $\pm$ 28.87
8	1080	210.47	0.0133	0.9136	0.0552	5.434	205.7 $\pm$ 0.02	9.46	1825.78 $\pm$ 29.19
9	1180	213.69	0.0238	1.0981	0.0630	1.947	206.9 $\pm$ 0.02	7.56	1826.75 $\pm$ 29.97
10	1300	216.66	0.0312	0.5765	0.0411	2.226	207.5 $\pm$ 0.02	8.65	1830.47 $\pm$ 30.44
11	1450	264.99	0.0773	0.8564	0.0557	1.198	242.4 $\pm$ 0.03	4.65	2013.85 $\pm$ 45.30
坪年龄 $t_p=1826.83 \pm 0.76\text{Ma}$ , 等时线年龄 $t_{iso}=1826.08 \pm 27.11\text{Ma}$ , $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值=300.5									
黑云母(99HXT-9), 采自邢台营房台东凉水黑云母斜长片麻岩, w=0.1174g									
1	430	111.45	0.0610	4.0614	0.1389	3.030	94.04 $\pm$ 0.01	8.55	1057.03 $\pm$ 13.21
2	540	117.39	0.0279	0.6425	0.0472	3.733	109.2 $\pm$ 0.00	10.50	1181.88 $\pm$ 12.23
3	650	149.55	0.0353	0.8501	0.0592	2.620	139.2 $\pm$ 0.01	7.39	1405.72 $\pm$ 16.40
4	750	197.32	0.0491	0.7257	0.0428	2.597	182.9 $\pm$ 0.01	7.32	1688.88 $\pm$ 25.22
5	850	204.40	0.0157	0.5527	0.0417	2.945	199.8 $\pm$ 0.02	8.31	1787.27 $\pm$ 27.46
6	930	205.23	0.0174	0.7303	0.0569	3.988	200.2 $\pm$ 0.02	11.20	1789.34 $\pm$ 27.79
7	1000	205.75	0.0132	0.8501	0.0632	5.240	202.0 $\pm$ 0.02	14.70	1799.36 $\pm$ 28.07
8	1080	206.38	0.0212	0.9957	0.0723	3.268	200.3 $\pm$ 0.02	9.22	1789.79 $\pm$ 28.24
9	1160	207.39	0.0260	0.5783	0.0339	2.666	199.8 $\pm$ 0.02	7.52	1786.96 $\pm$ 28.00
10	1240	211.17	0.0372	0.6682	0.0404	2.179	200.3 $\pm$ 0.02	6.15	1789.90 $\pm$ 28.86
11	1320	220.64	0.0580	0.7151	0.0464	1.797	203.6 $\pm$ 0.02	5.07	1808.84 $\pm$ 31.15
12	1450	290.67	0.1016	0.8767	0.0576	1.367	260.9 $\pm$ 0.04	3.86	2104.36 $\pm$ 54.74
坪年龄 $t_p=1792.61 \pm 2.26\text{Ma}$ , 等时线年龄 $t_{iso}=1793.48 \pm 84.06\text{Ma}$ , $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值=283.0									

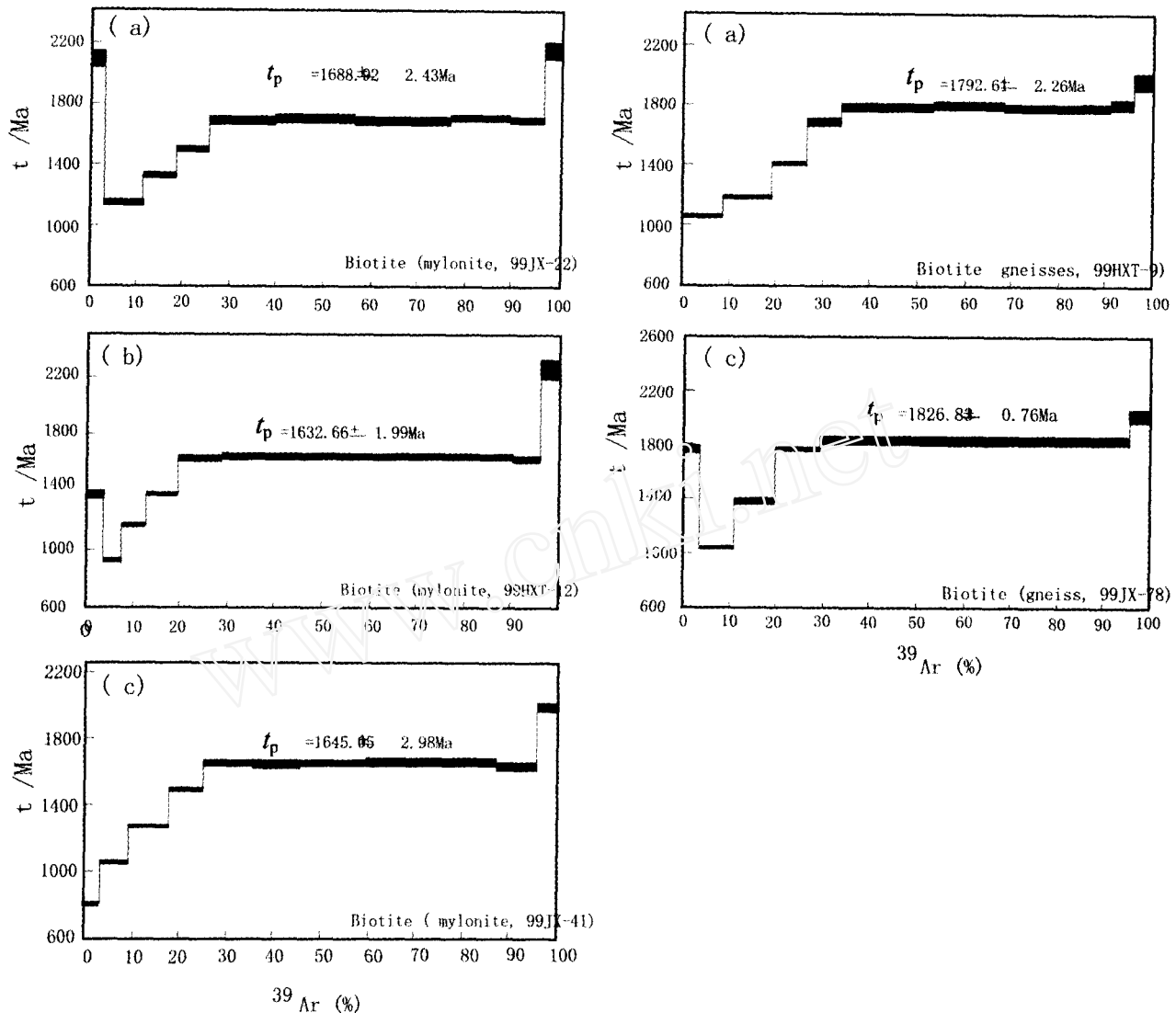
#### 4.2 1688~1632Ma 的伸展滑脱及其对长城系底界年龄的约束

赞皇变质杂岩内剪切带的定年结果表明区内剪切带形成于 1689~1633Ma, 其东西两侧伸展滑脱的时间略有差异。在变质杂岩的西缘, 沿苍岩寺-营房台一带向北西西滑脱伸展发生于 1689Ma, 而东缘沿岗西-黑水河东和坡底-郝庄剪切带于 1645~1633Ma 向东西两侧伸展滑脱。考虑到中生代岩浆岩仅出露于穹隆外侧的武安-涉县寒武-奥陶统中(牛树银等, 1994a; 河北省地质矿产局, 1989), 我们认为赞皇变质穹隆可能不是中生代变质核杂岩(牛树银等, 1994a, b; 雷世和, 1994), 而是早元古代片麻岩穹隆。岗西-黑水河

东剪切带和苍岩寺韧性剪切带发育于变质基底与长城系不整合面上, 卷入剪切带内的岩石包括赞皇群和甘陶河群(雷世和等, 1991), 这说明长城系的底界年龄不应老于 1689Ma。事实上熊耳群底界年龄 1750Ma(赵太平, 2001), 长城系常州沟组宇宙尘年龄 1670Ma(李增惠, 1992), 长城系大红峪组火山岩喷发于 1625~1683 Ma(陆松年, 1991)也说明该底界年龄可信。

#### 4.3 变质杂岩冷却隆升速率的约束

高压麻粒岩的研究表明华北陆块内麻粒岩相-角闪岩相岩石普遍经历了角闪岩相-绿帘角闪岩相退变质作用, 退变质温度 650℃~780℃(钱祥麟等, 1999; 翟明国等, 2000,

图3 黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年龄谱图Fig. 3 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar isotopic age spectra of biotite concentrates from deformational and metamorphic rocks

2001; 牛树银, 1994; 张家声, 1997; Zhang, 1994). 已有的资料表明华北陆块内部变质锆石年龄变化于 1870~1810Ma (锆石封闭温度约 700°C), 因此即使假设退变质隆升冷却始于 1870Ma, 而黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 同位素 (封闭温度约 300°C) 所记录的坪年龄为 1800Ma, 则在不到 70Ma 的时间尺度内华北克拉通基底快速抬升到中上地壳 (张家声, 1997; Zhang, 1994), 其冷却速率 (两种不同同位素体系的封闭温度差/两种不同同位素体系所测定的年龄差) > 6°C/Ma; 假设元古代该区地温梯度为 30°C/km (West *et al.*, 1993), 则对应的隆升速率 (冷却速率/地温梯度) > 200m/Ma。

黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 同位素年龄结果表明, 区内剪切带于 1689~1633Ma 发生剪切变形时, 变质杂岩并未记录到同期热事件信息, 剪切变形年龄明显低于同一同位素封闭体系下变质杂岩所记录到的热扰动年龄, 这表明剪切变形事件发生

时变质基底已整体抬升冷却至黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 同位素封闭温度以下, 即 < 300°C。邢台城计、卫鲁和尚庄黑云斜长片麻岩全岩和黑云母 K/Ar 年龄介于 1500~1545Ma (叶伯丹等, 1986), 分别采自变赞皇群片麻岩和糜棱岩的 3 个钾长石<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄介于 1409~1430Ma (封闭温度 160±25°C, 作者未刊资料), 表明中元古代以来, 该区未受到后期构造热事件的强烈扰动。假设地温梯度为 30°C/km (West *et al.*, 1993), 则可计算出中元古代该区整体冷却速率约 0.4°C/Ma, 对应的隆升速率约 15m/Ma; 且自 1689~1632Ma 以来该区的整体隆升幅度不会超过 10km, 当然, 如果其地温梯度小于 30°C/km, 则冷却速率、隆升速率和隆升幅度值将相应增高。此次同位素测年结果也表明中生代以来该区存在 > 10km 隆升幅度的观点 (牛树银等, 1994, 1995) 值得商榷。

## 5 结论

赞皇变质基底岩石及糜棱岩中黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代学清楚地记录了古-中元古代的两次重要构造热伸展事件,即:

(1) 赞皇变质基底在经历高温变质作用后于1827~1793Ma冷却至300℃,暗示华北克拉通在古元古代末期经历了一次广泛的构造热伸展事件。

(2) 赞皇变质杂岩于1689~1633Ma发生了另一次东西向的伸展滑脱事件,且西部北西向伸展滑脱的时间早于东部南东东向伸展滑脱时间约60Ma。该剪切带形成年龄的厘定也为长城系底界年龄的约束提供了新的信息。这些年龄的厘定暗示赞皇变质杂岩可能不是中生代变质核杂岩,而是早元古代末期的片麻岩变质穹隆。

## References

- Alkmin FF and Marshak S. 1998. Transamazonian orogeny in the South Sao Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil; evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilatero Ferrifero. *Precambrian Research*, 90, 29-58
- Davis GA. 1998. The enigmatic Yanshan fold-and-thrust belt of northern China; new views on its intraplate contractional styles. *Geology*, 26, 43-46
- Geng YS, Liu DY and Song B. 1997. Chronological framework of the early Precambrian important events of the Northwestern Hebei granulite terrain. *Acta Geologica Sinica*, 71(4), 316-327 (in Chinese with English abstract)
- Gilder SA, Keller GR, Luo M and Goodell PC. 1991. Eastern Asia and the western Pacific; Timing and spatial distribution of rifting in China. *Tectonophysics*, 197, 225-243
- Guan Hong, Sun Ming and Xu Ping. 1998. Geochronological study of zircons from high-grade gneisses of Fuping Complex using LP-ICPMS technique. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4), 460-470 (in Chinese with English abstract)
- Guo JH, Zhai MG and Li JH. 1996. Nature of the early Precambrian Sanggan structure zone in North China craton; evidences from rock associations. *Acta Petrologica Sinica*, 12(2), 193-207 (in Chinese with English abstract)
- Guo JH, Shi X, Bian AG, Xu RH, Zhai MG and Li YG. 1999. Pb isotopic composition of feldspar and U-Pb age of zircon from early Proterozoic granite in Sanggan area, North China craton; Metamorphism, crustal melting and tectono-thermal event. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2), 199-207 (in Chinese with English abstract)
- Harrison TM, Duncan I and McDougall L. 1985. Diffusion of <sup>40</sup>Ar in biotite; temperature, pressure and compositional effects. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 2261-2468
- HBGMR(Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources). 1989. Regional geology of Beijing, Tianjin and Hebei province. Beijing; Geological Publishing House, p741(in Chinese)
- Hu SL, Guo JH, Dai TM and Pu ZP. 1999. Continuous laser-probe <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age dating on garnet and plagioclase; constraint to metamorphism of high-pressure basic granulite from Sanggan area, North China craton. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4), 518-523 (in Chinese with English abstract)
- Krol MA and Zeitler PK. 1996. Episodic unroofing of the Kohistan Batholith, Pakistan implications from K-feldspar thermochronology. *J. Geophys. Res.*, 101 (B12): 28149-28164.
- Lei SH, Hu SJ. 1994. Models for Fuping-Zanhuang metamorphic core complex structure, Hebei, China. *Journal of Hebei College of Geology*, 17(1), 54-64 (in Chinese with English abstract)
- Lei SH. 1991. Structural features of the Fuqingshi shear zones, Jingying, Hebei. *Journal of Hebei College of Geology*, 14(3): 269-279 (in Chinese with English abstract)
- Li JH, Gou GT, Huang XN, Zhang Z Q and Qian X L. 2001. The constraint for the supercontinental cycles; evidence from Precambrian geology of North China Block. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2), 177-186 (in Chinese with English abstract)
- Li JH, Qian XL, Hou GT, Liu SW and Chen J. 2000. New interpretation of the "Luliang Movement". *Earth Science*, 24(1), 15-20 (in Chinese with English abstract)
- Li ZH. 1992. On-land age of cosmic dust from Changzhougou Formation, Jixian. *Geological Review*, 38(5), 449-456 (in Chinese with English abstract)
- Liu DY, Page RW, Compston W and Wu JS. 1984. U-Pb zircon geochronology of Precambrian metamorphic rocks in the Taihangshan-Wutaishan area, North China. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 8, 57-83 (in Chinese)
- Liu SW, Liang HH, Zhao GC, Hua YG and Jian AH. 2000. Isotopic geochronology of Precambrian Complex in Taihangshan and its geological event. *Science in China(Series D)*, 30(1), 18-24 (in Chinese)
- Lu SN and Li HM. 1991. U-Pb dating of single grain zircon of volcanic rocks from Dahongyu Formation in Changcheng Group, Jixian. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, (5), 111-114 (in Chinese with English abstract)
- Ma WP and He GQ. 1989. Late Mesozoic magmatism in Taihang Mountains and its tectonic implication. *Geological Review*, 29(1), 31-39 (in Chinese with English abstract)
- Ma XY. 1989. The geological observation in north and south of Xiangshui, Jiangsu- Madula, Neimeng geological profile. *Earth Sciences*, 14(1), 1-6 (in Chinese with English abstract)
- Maluski H, Matte P, Kienast JR and Rahmani A. 1990. Location of extraneous Argon in granulitic-facies minerals; a paired microprobe-laser <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar analysis. *Chem. Geol.*, 80, 193-217
- Maluski H, Rajlich P and Matte P. 1993. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of the Inner Carpathians Variscan basement and Alpine mylonitic



- overprinting. *Tectonophysics*, 223;313-337
- Mao JW, Zhang ZC and Yang JM. 1998. Single-zircon dating of Precambrian strata in the west sector of the Northern Qilian Mountains and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 43;1289-1294.
- Niu SY, Xu CS and Guo LJ. 1994. The characteristics of metamorphic core complex in Taihang Mountains and its genesis. *Journal of Hebei College of Geology*, 17(1);43-52(in Chinese with English abstract)
- Niu SY, Chen L, Xu CS. 1994. The crustal evolution and metallogenic regularity of the Taihangshan area. Beijing: Seismological Press, p203(in Chinese)
- Qian XL and Li JH. 1999. Identification of Neoproterozoic event in North China and its implication to the continental craton. *Science in China (series D)*, 29;1-8 (in Chinese)
- Qian XL, Chen YP. 1987. Late Precambrian mafic swarms of the North China craton. In: Halls HC *et al.* (eds.). *Mafic Dyke Swarms*. Geological Association of Canada, *Special Papers*, 34; 385-391
- Tang XM, Liu SW. 1997. An initial research on the extension deformation belt in the Archean metamorphic rocks in the North Taihang Mountains. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 33(4);447-55(in Chinese with English abstract)
- Teixeira W and Figueiredo MCH. 1999. An outline of early Proterozoic crustal evolution in the Sao Francisco craton, Brazil; a review. *Precambrian Research*, 53;1-22
- Wang KY and Hao J. 1997. SHRIMP dating of single grain zircon and its constraints on the Wutai orogenic event. *Chinese Sci. Bull.* 42(1);1295-1298(in Chinese)
- Wang SS, Sang HQ and Qiu J, Chen ME, Li MR. 1995. Metamorphic age of pre-Changcheng system in Beijing-Tianjing area and a discussion about the lower-limit age of Changcheng system. *Scientia Geologica Sinica*. 30(4);348-354(in Chinese with English abstract)
- Wang ZH and Lu HF. 1997. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar thermal chronology for Changle-Nan'ao ductile shear zone. *Science in China(Series D)*, 27(4);294-299(in Chinese)
- West DP, Lux DR and Hussey AM, 1993. Contrasting thermal histories across the Flying Point fault, southwestern Maine; evidence for Mesozoic displacement. *Geological Society of America Bulletin*. 105;1478-1490
- Xu RH, Zhu M, Chen FK and Guo JH. 1995. A geochronological study of the Longquanguan ductile shear zone. *Quaternary Sciences*, 4;332-342(in Chinese with English abstract)
- Ye BD, Shen YZ and Zhu JC. 1986. The embody of Chinese data of isotopic geological ages (series 4). Beijing: Geological Publishing House, 41-57(in Chinese)
- Zhai MG and Bian AG. 2000. Ultracontinental collision at the end of Neoproterozoic and its breakup between end of Paleoproterozoic and Mesoproterozoic in North China craton. *Science in China(series D)*, (Supp.);129-131(in Chinese)
- Zhai MG, Guo JH and Zhai TP. 2001. Study advances of Neoproterozoic-Paleoproterozoic tectonic evolution in the North China craton. *Progress in Precambrian Research*, 24(3);17-27 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG. 1999. The 1.8Ga thermal event in the North China cratons; a record of early upwelling mantle plumes. In: Lee BJ, Lee SK and Kim J (eds.). *Crustal evolution in Northeast Asian*. Taejeon: KIGMM, 2-3
- Zhang JS, Dirks GM and Passchier CW. 1994. Extension collapse and uplift in a polymetamorphic granulite terrain in the Archean and Paleoproterozoic of North China. *Precambrian Research*, 67;37-57
- Zhang JS. 1997. Extension and uplift of the Datong-Huai'an granulite terrain. *Geological Review*, 43(5); 503-514 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA, Lu LZ. 1999a. Tectonothermal history of the basement rocks in the western zone of the North China Craton and its tectonic implications. *Tectonophysics* 310, 223-240.
- Zhao GC, Cawood PA, Lu LZ, 1999b. Petrology and P-T history of the Wutai amphibolites; implications for tectonic evolution of the Wutai Complex, China. *Precambrian Res.*, 93, 181-199.
- Zhao GC, Gawood PA, Wilde SA, Sun M, Lu L. 2000. Metamorphism of basement rocks in the central zone of the North China Craton; implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103;55-88
- Zhao GC. 2001. Paleoproterozoic assembly of the North China Craton. *Geol. Mag.* 138(1), 89-91.
- Zhao TP, Zhou MF, Jin CW, Guan H and Li HM. 2001. The formational age of Xiong'er Group in southern North China Block. *Chinese Journal of Geology*, 36(3);326-334(in Chinese with English abstract)
- Zheng YZ. 1996. Great Jurassic thrust sheets in Beishan (North Mountains)-Gobi area of China and southern Mongolia. *J. Struct. Geol.*, 18;1111-1126

#### 附中文参考文献

- 耿元生, 刘敦一, 宋彪. 1997. 冀西北麻粒岩区早前寒武纪主要地质事件的年代格架. *地质学报*, 71(4);316-327
- 关鸿, 孙敏, 徐平. 1998. 阜平杂岩中几种不同类型片麻岩的锆石激光探针等离子质谱年代学研究. *岩石学报*, 14(4); 460-470
- 郭敬辉, 石昕, 卞爱国, 许荣华, 翟明国, 李永刚. 1999. 桑干地区早元古代花岗岩长石 Pb 同位素组成和锆石 U-Pb 年龄: 变质与地壳熔融作用及构造热事件演化. *岩石学报*, 15(2);199-207
- 郭敬辉, 翟明国, 李江海. 1996. 华北克拉通早前寒武纪桑干构造带的岩石组合特征及构造演化. *岩石学报*, 12(2);193-20
- 河北地质矿产局. 1989. 河北北京天津区域地质志. 北京:地质出版社, p741
- 胡世玲, 郭敬辉, 戴瞳漠, 蒲志平. 1999. 桑干地区高压麻粒岩中石榴石和长石的连续激光探针<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar等时年龄及其地质意义.

- 岩石学报, 15(4):518-523
- 雷世和, 胡胜军. 1994. 河北阜平、赞皇变质核杂岩构造及成因模式. 河北地质学院学报, 17(1):54-64
- 雷世和. 1991. 河北井径福庄寺剪切带构造特征. 河北地质学院学报, 14(3):269-279
- 李江海, 钱祥麟, 侯贵廷, 刘树文, 陈晶. 2000. "吕梁运动"新认识. 地球科学, 35(1):15-20
- 李江海, 侯廷贵, 黄雄南, 张志强, 钱祥麟. 2001. 华北克拉通对前寒武纪超大陆旋回的基本制约. 岩石学报, 17(2):177-186
- 李增惠. 1992. 河北藁县常州沟组宇宙尘落地年龄. 地质论评, 38(5):449-456
- 刘敦一. 1984. 太行山-五台山前寒武纪变质岩系同位素地质年代学研究. 中国地质科学院院报, 8:57-81
- 刘树文, 梁海华, 赵国春, 华永刚, 简安华. 2000. 太行山早前寒武纪杂岩的同位素年代学和地质事件. 中国科学(D辑), 30(1):18-24
- 陆松年, 李惠民. 1991. 藁县长城系大红峪组火山岩的单颗粒锆石 U-Pb 法准确定年. 中国地质科学院院报, (5):111-114
- 马文璞, 何国琦. 1989. 太行山晚中生代岩浆活动及其构造含义. 地质论评, 29(1):31-39
- 马杏垣. 1989. 江苏响水至内蒙霍林河地质断面南北段的地质观察. 地球科学, 14(1):1-6
- 牛树银, 陈路, 许传诗. 1994a. 太行山地壳演化及其成矿规律. 北京:地震出版社, 1-103
- 牛树银, 许传诗, 国连杰. 1994b. 太行山变质核杂岩特征及成因探讨. 河北地质学院学报, 17(1):43-52
- 钱祥麟, 李江海. 1999. 华北克拉通新太古代不整合事件的确定及其大陆克拉通构造演化意义. 中国科学(D辑), 29(1):1-8
- 唐先梅, 刘树文. 1997. 太行山北段晚太古代变质杂岩伸展变形带初步研究. 北京大学学报, 33(4):447-455
- 王凯怡, 郝杰. 1997. 单颗粒锆石等离子探针质谱定年结果对五台造山事件的制约. 科学通报, 42(1):1295-1298
- 王松山, 桑海青, 裘冀, 陈孟莪, 李明荣. 天津地区长城系下伏变质岩系变质年龄及长城系底界年龄的厘定. 地质科学, 1995, 30(4):348-354
- 王志洪, 卢华复. 1997. 长乐-南澳韧性剪切带<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 热年代学研究. 中国科学(D辑), 27(4):294-299
- 许荣华, 朱铭, 陈福坤, 郭敬辉. 1995. 龙泉关韧性剪切带的年代学研究. 第四纪研究, 4:332-342
- 叶伯丹, 申永治, 朱杰辰等. 全国同位素地质年龄数据汇编(第四集). 地质出版社, 1986, 41-57
- 翟明国, 卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解. 中国科学(D辑), 30(增刊):129-131
- 翟明国, 郭敬辉, 赵太平. 2001. 新太古代-古元古代华北陆块构造演化的研究进展. 前寒武纪研究进展, 24(3):18-27
- 张家声. 1997. 大同-怀安麻粒岩地体的伸展抬升. 地质论评, 43(5):503-514
- 赵太平, 周美夫, 金成伟, 关鸿, 李惠民. 2001. 华北陆块南缘熊耳群形成时代讨论. 地质科学, 36(3):326-334