

京北云蒙山地区四合堂韧性逆冲型剪切带的变形特征及早期变形时限约束^{*}

裴磊 刘俊来^{**}

PEI Lei and LIU JunLai^{**}

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2016-04-20 收稿, 2016-08-01 改回.

Pei L and Liu JL. 2016. Structural deformation characteristics and geochronological constraints on the early deformation of Sihetang ductile thrust shear zone in Yunmengshan, northern Beijing. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9):2723–2738

Abstract The Yunmengshan complex is a typical structural unit that records the complicated Late Mesozoic tectonic evolution of the North China Craton. The major structural elements of the complex mainly include the Sihetang anticlinal nappe, the Sihetang ductile shear zone, the Yunmengshan antiform, the Shuiyu ductile shear zone and the Hefangkou normal fault. The timing of thrust shearing along the Sihetang shear zone and its relationship with the Shuiyu shear zone has been debated for decades. Granitic dykes of various stages are widespread along the Sihetang shear zone. Based on studies of the shear deformation characteristics and the relationship between the granitic dikes and tectonic deformation in the Sihetang shear zone, we grouped these dikes into three categories: pre-shearing dikes, syn-shearing dikes and post-shearing dikes. Zircon U-Pb dating reveals that the granitic dykes have crystallization ages from ca. 170Ma to 150Ma. From the structural relationships of the dykes with wall rocks we would argue that the early evolution of the Sihetang ductile shear zone may date back to ca. 170Ma and lasted to 150Ma.

Key words Sihetang ductile shear zone; Tectonic deformation and magmatism; Zircon U-Pb isotopic ages; Yunmengshan metamorphic core complex

摘要 云蒙山杂岩是华北克拉通内记载了晚中生代构造演化的重要构造单元之一。云蒙山地区区域构造格架主要由四合堂背斜推覆体、四合堂逆冲型韧性剪切带、云蒙山背形、河防口正断层及水峪伸展型韧性剪切带等组成。对于四合堂逆冲型剪切带的活动时限及其与水峪剪切带之间的关系,是长期争论的课题之一。在四合堂韧性剪切带中广泛发育有剪切演化各个阶段就位的花岗质岩脉。本文研究云蒙山四合堂地区剪切变形特征及广泛发育的岩脉与构造变形之间关系,将岩脉厘定为构造期前(剪切前)岩脉、同构造期(同剪切)岩脉和构造期后(剪切后)岩脉等6期。不同类型的同构造岩脉锆石 U-Pb 定年获得了岩脉结晶年龄为 170~150Ma。从构造-岩浆关系分析角度考虑,本文认为四合堂剪切带韧性逆冲作用早期的活动始于约 170Ma,并持续到约 150Ma。

关键词 四合堂韧性剪切带;构造-岩浆关系;锆石 U-Pb 年龄;云蒙山变质核杂岩

中图法分类号 P542; P597.3

1 引言

云蒙山变质核杂岩是华北晚中生代时期发育的典型伸

展构造之一(Davis and Zheng, 1988),也是华北克拉通破坏过程的重要构造标志。长期以来,对于华北克拉通早白垩世伸展构造的发育背景与条件,一直存在广泛争议。一些学者基于诸如云蒙山变质核杂岩前伸展期发育的四合堂推覆构造

* 本文受国家自然科学基金项目(41430211)和高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110022130001)联合资助。

第一作者简介:裴磊,男,1989年生,博士生,构造地质学专业, E-mail: peilei.1989@163.com

** 通讯作者:刘俊来,男,1960年生,教授,主要从事区域构造、显微构造与岩石圈流变学研究, E-mail: jiliu@cugb.edu.cn

的存在,提出属于典型的科迪勒拉型变质核杂岩,是属于造山后伸展垮塌作用的结果(Davis and Zheng, 1988);部分研究者突出强调深部作用过程对于浅部构造活动的制约,提出浅表伸展构造的发育仅仅是岩石圈甚至地幔尺度地球动力学过程(如拆沉作用)的响应(Wu *et al.*, 2005b; Lin *et al.*, 2008)。近期研究揭示出非加厚地壳岩石圈伸展作用(Parallel Extension Tectonics)综合解释了同时发育的浅部和深部地质过程,这一点已经被数值模拟研究所证实(Wang *et al.*, 2015)。纵观所有争论,其关键之处在于基础地质构造关系有待进一步明确,早期逆冲推覆构造(即四合堂逆冲推覆构造)活动及其与晚期伸展构造(即水峪拆离断层带)之间的时间、空间演化和成因关系等是问题的关键。

在云蒙山地区,前人对于水峪低角度韧性剪切带和四合堂韧性剪切带的特点与关系的讨论一直是热点(冯孙齐等, 1983;上官志冠等, 1985;史兰斌和陈孝德, 1984;王玉芳, 1985;王玉芳等, 1989; Davis *et al.*, 1989, 1996a, b; Zheng *et al.*, 1988)。Zheng *et al.* (1988)通过对水峪低角度正断层的研究,在断层上盘发现了中型逆冲推覆构造,寒武纪岩层推覆于中侏罗统安山质火山岩系之上,并提出了云蒙山地区的热隆-滑覆-推覆的构造模式。Davis and Qian (1989)通过合作研究,确立了云蒙山北缘四合堂地区属于逆冲推覆构造,并且提出了科迪勒拉型变质核杂岩的不对称伸展模式。另外的一些研究者多倾向于对称的伸展模式(白志民, 1991;陈能松等, 1994;许继峰等, 1994;张建新等, 1997;王巧云等, 2006;张家声等, 2007)。进入 21 世纪以来,对于云蒙山地区的研究进入新的阶段。主要的研究趋势是通过构造地质学、岩石学、地球化学以及年代学研究相结合,深入研究云蒙山地区的热隆升历史、变形变质温压状态、韧性剪切带的岩石流变学特征、低角度断层的形成机制以及该地区缩短与伸展体制的关系及转化等问题(朱大岗等, 2000;吴珍汉等, 2000;汪洋和邓晋福, 2002;马寅生等, 2002;邓晋福等, 2004; Passchier *et al.*, 2005;王巧云等, 2006;曾令森等, 2006;张家声等, 2007; Davis and Zheng, 2002; Davis *et al.*, 2009; Davis and 郑亚东, 2002;李建波, 2010;夏浩然, 2011; Wang *et al.*, 2012)。最近,陈印等(2013, 2014)和 Zhu *et al.* (2015)对四合堂韧性剪切带内同构造岩脉进行了锆石 U-Pb 年代学研究,获得四合堂韧性剪切带的活动时间为 143 ~ 138Ma 和 140 ~ 137Ma,认为云蒙山变质核杂岩是拉张背景下以滚动枢纽模式演化的产物。然而,多数前人的研究仅限于单独的剪切带或变质核杂岩本身,对于 NE-SW 向韧性逆冲变形的四合堂韧性剪切带的变形特征与变形时限依然存在争议。

鉴于中下地壳韧性剪切带中经常缺少可以用于测年的矿物,因此对于剪切作用年代的限定一直是一个难点。由于近年来岩浆岩锆石精确测年技术的发展(如 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 等),剪切带中广泛发育的花岗质岩脉的存在为解决这一问题提供了契机。本文通过对云蒙山地区四合堂韧性剪切带的几何学、运动学和年代学的系统研究,尤其是侧重

对于其中广泛分布的花岗质岩脉进行分期研究,并开展了系统的锆石 U-Pb 同位素测年,以期准确地限定四合堂韧性剪切带的活动时限。

2 区域地质背景

云蒙山位于华北克拉通内,在构造上处于华北板块北缘、燕山造山带西段,为近东西向的燕山山脉与北东向的军都山脉交汇处。该地区出露的地层主要为太古宇、中上元古界、下古生界。云蒙山地区北部主要由太古宇英云闪长质片麻岩、黑云斜长片岩等组成,构成区域基底变质岩系。本区太古宇的主体英云闪长质片麻岩大多发生了强烈的变形与变质作用。黑云斜长片岩多发生强烈变形,主要分布在梨树沟-石城-黑龙潭-张家坟-四合堂地区。据金文山和管爱莲(1999a, b)研究,太古宇变质基底年龄在 2500 ~ 2650Ma。云蒙山地区的中上元古界主要呈环状分布在太古宇变质基底周围。长城系主要分布于云蒙山地区北缘和西北缘的四合堂地区和琉璃庙地区。在四合堂地区,由于变形强烈而出露不完整,在琉璃庙地区则出露较为完整。本区的长城系主要由常州沟组砾岩、砂岩和石英岩,串岭沟组页岩和白云岩,团山子组白云岩,大红峪组白云岩和石英砂岩以及高于庄组白云岩、页岩组成。蓟县系主要出露于云蒙山地区的西部和东南部,包括杨庄组厚层白云岩、雾迷山组含叠层石粉晶硅质白云岩、洪水庄组黑色碳质页岩和铁岭组泥晶白云岩和碎屑白云岩。青白口系包括下马岭组泥质粉砂岩和页岩、长龙山组砂质页岩和紫色薄层粉砂岩以及景儿峪组泥质灰岩。其中,长龙山组和景儿峪组主要在分布在云蒙山地区西部和东南部。云蒙山地区长城系、蓟县系和青白口系岩性基本上可以与蓟县标准剖面对比,但在厚度上明显减薄或有缺失。

云蒙山地区出露的下古生界主要为寒武系,分布在云蒙山东南部和西部。寒武系底部为府君山组豹皮灰岩,之上的馒头组、毛庄组主要为紫红色泥岩,中部的徐庄组、张夏组主要为鲕状灰岩,上寒武统以泥质条带灰岩夹竹叶状灰岩为主。在云蒙山地区,奥陶系缺失。中生界只有中侏罗统髫髻山组安山岩与安山质火山碎屑岩。

云蒙山地区出露的显生宙侵入岩主要为晚侏罗世-早白垩世侵入岩(图 1),主要包括云蒙山花岗闪长岩、密云闪长岩、沙坨子花岗岩、柏岔山花岗闪长岩以及云蒙山南西的长园闪长岩(白志民, 1991;姬广义等, 2004)。据 Davis *et al.* (1996a, b)研究,这些侵入岩的岩性主要为闪长岩和花岗闪长岩,虽然两种岩性的侵入岩就位时间间隔短,但是没有岩石化学或岩浆演化的继承关系。研究区的闪长岩体主要为石城地区的密云变闪长岩(159Ma)(Shi *et al.*, 2009)、柏岔山闪长岩(127Ma)(Davis *et al.*, 1996a)以及云蒙山南西缘的长园变闪长岩(151Ma)(Davis *et al.*, 1996a);花岗闪长岩主要有云蒙山北东缘的沙坨子花岗岩(151Ma)(Davis *et al.*, 1996a; Shi *et al.*, 2009)以及云蒙山主体的云蒙山花岗闪长

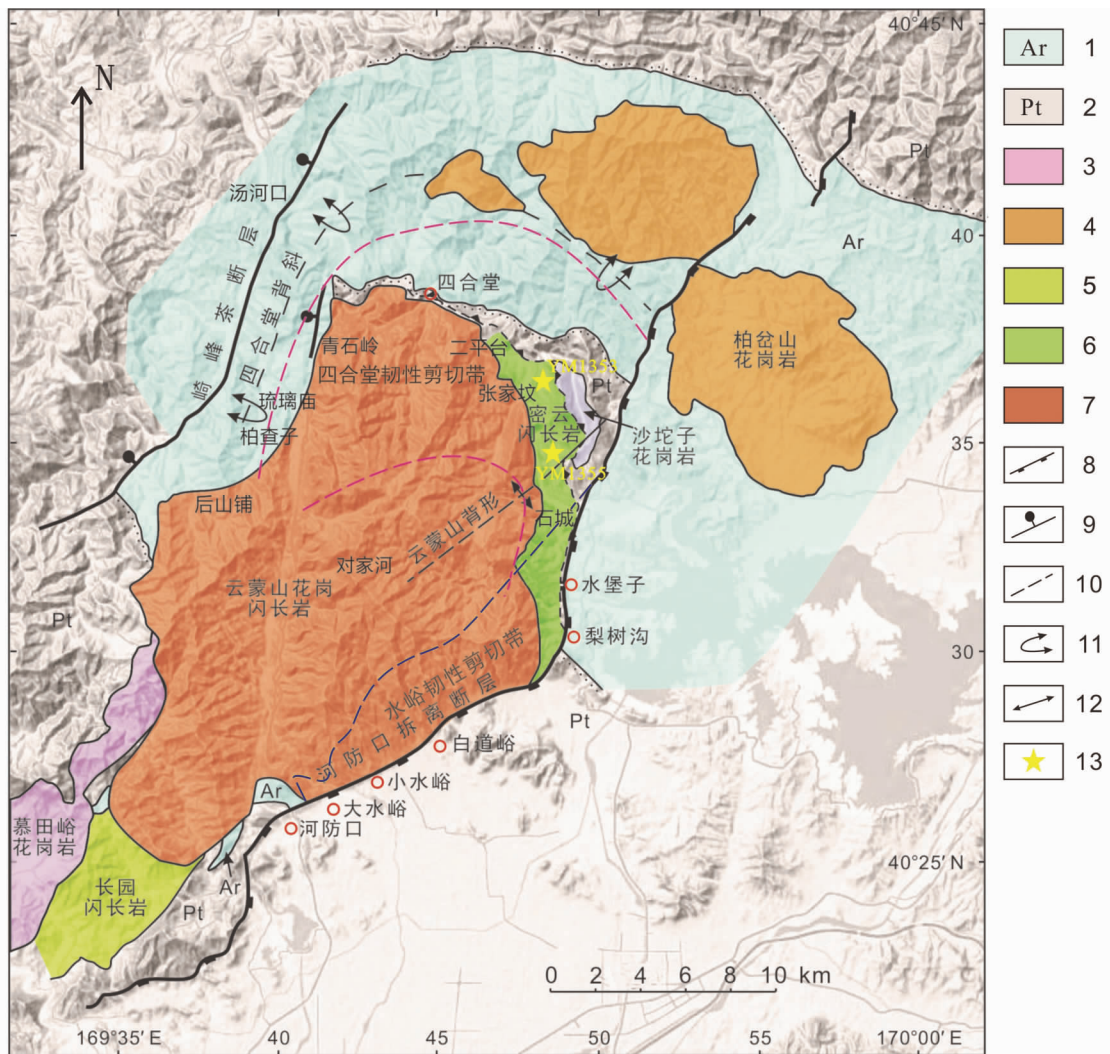


图1 云蒙山地区地质略图(据 Davis *et al.*, 1996a, b)

地质略图上部两条紫色虚线区域内为四合堂韧性剪切带,深蓝色虚线与河防口拆离断层内为水峪韧性剪切带;图中★处为锆石 U-Pb 同位素样品 YM1353、YM1355 采样点. 1-太古宇基底;2-中上元古界;3-慕田峪花岗岩;4-柏盆山花岗岩;5-长园闪长岩;6-密云闪长岩;7-云蒙山花岗岩闪长岩;8-河防口拆离断层;9-崎峰茶断层;10-韧性剪切带;11-四合堂背斜;12-云蒙山背形;13-采样位置

Fig. 1 Sketch geological map of the Yunmengshan area(modified after Davis *et al.*, 1996a, b)

岩(141 ~ 143Ma) (Davis *et al.*, 1996a; 刘翠等, 2004; Shi *et al.*, 2009)。

3 四合堂地区变形构造特征与构造-岩浆关系

3.1 四合堂韧性剪切带的几何学、运动学特点

在云蒙山花岗岩闪长岩体北部四合堂地区的太古界和中元古界中,发育数条低角度($20^{\circ} \sim 35^{\circ}$)的逆冲型韧性剪切带。每条韧性剪切带宽约100m左右,总体影响范围为3 ~ 10km(张家声等, 2007)。剪切带变形改造了太古界、中上元古界、密云闪长岩和云蒙山花岗岩闪长岩。

四合堂韧性剪切带主要沿云蒙山岩体北部周缘分布,总

体呈半圆形(朱大岗等, 2000; 陈印等, 2013)。其强应变带主要由糜棱岩、千糜岩和构造片岩组成。在四合堂韧性剪切带内部,云蒙山花岗岩闪长岩体和石城变闪长岩体均发育有糜棱面理以及透入性矿物拉伸线理。在靠近韧性剪切带的云蒙山花岗岩体内发育的矿物拉伸线理主要由拉长的石英颗粒和定向排列的长石组成(陈印等, 2013)。

四合堂韧性剪切带上盘的太古宙变质基底受到强烈剪切变形的影响,构造置换作用形成了与四合堂韧性剪切带几乎一致的面理和矿物拉伸线理,各类运动学指示标志表现为上盘向SW方向的运动(图2);在四合堂的东西方向,受四合堂韧性剪切带影响的区域宽度有10km以上。在靠近四合堂韧性剪切带的区域,太古宙变质基底内岩石发育的透入性面理与矿物拉伸线理的产状与韧性剪切带内的岩石面理与线

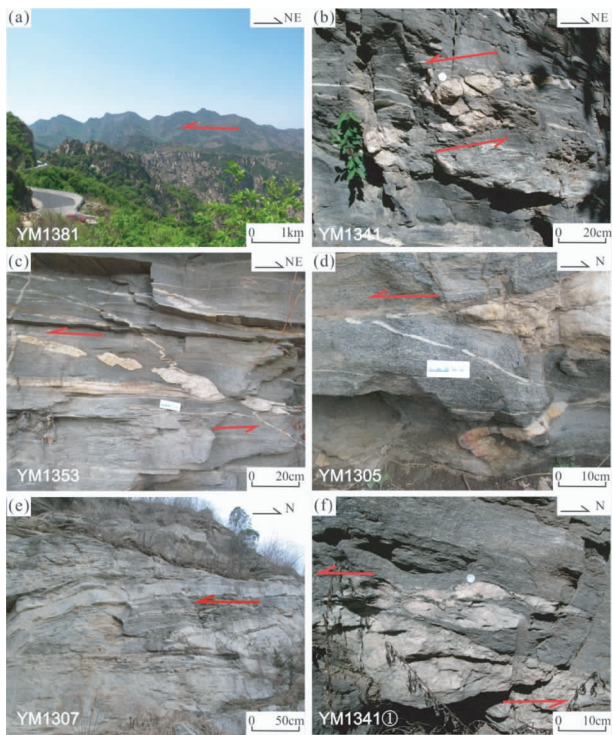


图2 四合堂韧性剪切带的变形现象

(a) 四合堂韧性剪切带东段二平台地区的“望京台”处地貌, 可见上盘向 SW 的运动; (b) 四合堂韧性剪切带附近的变形花岗质岩脉, 指示上盘向 SW 的运动; (c) 四合堂韧性剪切带附近的变形花岗质岩脉, 围岩为密云闪长岩, 岩脉发生了褶皱变形和石香肠化, 指示上盘向 SW 的运动; (d) 四合堂北部的剪切带内的变形花岗质岩脉, 指示上盘向 S 的运动; (e) 四合堂剪切带内花岗质岩脉变形形成的 A 型褶皱, 指示上盘由 N 向 S 的运动; (f) 四合堂韧性剪切带附近的变形花岗质岩脉, 围岩为密云闪长岩, 指示上盘向 S 的运动

Fig. 2 Deformation characteristics of the Sihetang shear zone

理一致, 说明该区域内岩石的构造置换较为彻底。在远离四合堂韧性剪切带的区域, 太古宙变质基底内的岩石面理倾向逐渐增大, 但是倾向均为 NE 与 NW 向, 以 NE 倾向为主。矿物拉伸线理倾向主要为 NE 向, 随着远离剪切带的距离加大, 构造置换愈不完全(陈印等, 2013)。

四合堂韧性剪切带西段主要位于变质基底的片麻岩内, 向南消失于元古界盖层之下。四合堂韧性剪切带北西缘的怀柔县柏查子以北, 云蒙山岩体受四合堂韧性剪切带的影响较强。野外出露的云蒙山花岗岩均发生塑性变形; 在怀柔县柏查子以南出露的云蒙山岩体塑性变形较弱或没有, 说明其基本上未卷入韧性剪切变形。

在四合堂剪切带西侧(柏查子-青石岭), 剪切带为 NNE 走向, 向 NW 倾斜。糜棱岩面理产状倾向介于 NW-NNW ($300^{\circ} \sim 320^{\circ}$), 倾角介于 $15^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。矿物拉伸线理倾向以 NNW ($340^{\circ} \sim 350^{\circ}$) 向为主, 倾伏角 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。

四合堂韧性剪切带的北段与东段沿中元古界长城系盖层顶面和底面延伸, 剪切带主体位于太古宙变质基底和早白垩世云蒙山花岗闪长岩岩体内。在四合堂剪切带北段(密云四合堂附近), 剪切带走向近 E-W 向, 北倾。糜棱岩面理倾向介于 $350^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之间, 倾角为 $10^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。矿物拉伸线理倾向为 $350^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 倾伏角为 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。在四合堂剪切带东侧(二平台-石城以北), 剪切带为 NE 走向, 向 NE 倾伏。糜棱岩面理倾向介于 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$, 倾角为 $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。矿物拉伸线理倾向为 NE-SW ($10^{\circ} \sim 25^{\circ}$), 倾伏角一般为 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。

在野外露头上有大量证据, 如岩脉的变形(包括石香肠)、矿物不对称旋转碎斑等, 均指示四合堂韧性剪切带的运动方向为上盘自 NE 向 SW 的低角度逆冲(图 2)。

3.2 四合堂地区构造-岩浆活动关系

花岗岩(脉)在中下地壳韧性剪切带中普遍发育, 云蒙山地区发育有大量的花岗岩脉体。识别岩体(脉)中的岩浆流动构造、亚岩浆流动构造和晶质塑性变形构造, 以鉴别剪切带中剪切前、剪切期(包括剪切前期和剪切后期)、剪切后花岗岩(脉)和理解剪切作用过程中构造变形与岩浆作用之间的关系, 阐明韧性剪切带各个阶段岩浆活动的性质, 是正确理解韧性剪切带演化规律及其大地构造属性和相应深部过程的重要依据。

云蒙山北部的四合堂地区主要发育了石城变闪长岩和云蒙山花岗闪长岩。前者主要矿物成分是角闪石、斜长石、石英和黑云母, 并且受到强烈的韧性剪切变形作用改造; 后者岩体内含有少量花岗岩和伟晶岩岩脉。由于存在岩脉的大量侵入, 石城变闪长岩与云蒙山花岗闪长岩之间很难找到截然的接触边界。根据野外观测, 云蒙山花岗闪长岩穿插进入了石城变闪长岩。在四合堂韧性剪切带内发育的所有岩脉, 都与晚侏罗世-早白垩世岩浆侵位事件密切相关, 为伴随着剪切带活动的岩浆侵入形成的同构造岩脉。

四合堂地区岩脉的主要类型为中-粗粒花岗岩岩脉、碱性花岗质岩脉和粗大的伟晶岩岩脉(张家声等, 2007)。脉体的厚度变化较大, 最薄的仅有 1mm 左右, 最宽的厚达数米, 并且与围岩界线明显。总体而言, 偏早期的岩脉主要是细粒或中等粒度的花岗质岩脉, 偏晚期的岩脉往往粒度粗大, 偏伟晶质。该地区出露的几乎所有岩脉都经历了不同程度的变形作用。通过对四合堂地区各个区域岩脉的研究, 可将四合堂地区的岩脉大致分为 6 类。其中, 构造前 1 期, 同构造 4 期, 构造后 1 期(表 1)。各类岩脉在整个地区均有发育, 而且在北部的四合堂韧性剪切带附近岩脉的发育较南部的水峪韧性剪切带的发育更为普遍, 期次更为明显。

构造期前(剪切前)岩脉 A: 主要特点是岩脉发育与围岩具有相同的面理, 面理叠加在围岩与岩脉之上, 有些岩脉与围岩的界线已不清晰。此类岩脉总体上出露很少, 脉体较细, 宽度 1~20mm, 成分不统一, 多为石英质, 也不易与同构造岩脉区分(图 3a)。

表1 云蒙山地区四合堂韧性剪切带中岩脉分期表

Table 1 Characteristics of granitic dikes from the Sihetang shear zone in the Yunmengshan area

期次	与围岩面理交角角度	褶皱化程度	布丁化程度	面理线理发育	脉体切穿关系
构造期前岩脉(A)	趋近于平行	不发育	不发育	面理叠加在围岩与岩脉之上,有些岩脉与围岩的界线已不清晰	被后期脉体切穿
同构造最早期岩脉(B1)	平行或近于平行,几乎顺层发育	部分地区形成紧闭褶皱,褶皱的轴面平行于围岩面理,褶皱枢纽与围岩线理平行	有发育	发育透入性的面理和线理	被 B2、B3、B4 切穿
同构造早-中期岩脉(B2)	小角度相交(多 $\leq 10^\circ$)	部分地区可见发育不对称褶皱	未见	发育面理和线理	切穿 B1
同构造中-后期岩脉(B3)	中等角度(约 $30^\circ \sim 45^\circ$)相交	微弱发育	局部地区可以观察到脉体的布丁化现象显著	发育较弱的面理和线理	切穿 B1、B2
同构造最晚期岩脉(B4)	高角度相交($50^\circ \sim 70^\circ$)	不发育	不发育	只有部分岩脉内有极微弱的面理发育	切穿 B1、B2、B3
构造期后岩脉	交角大,接近直立	不发育	不发育	不发育	切穿 B1、B2、B3、B4

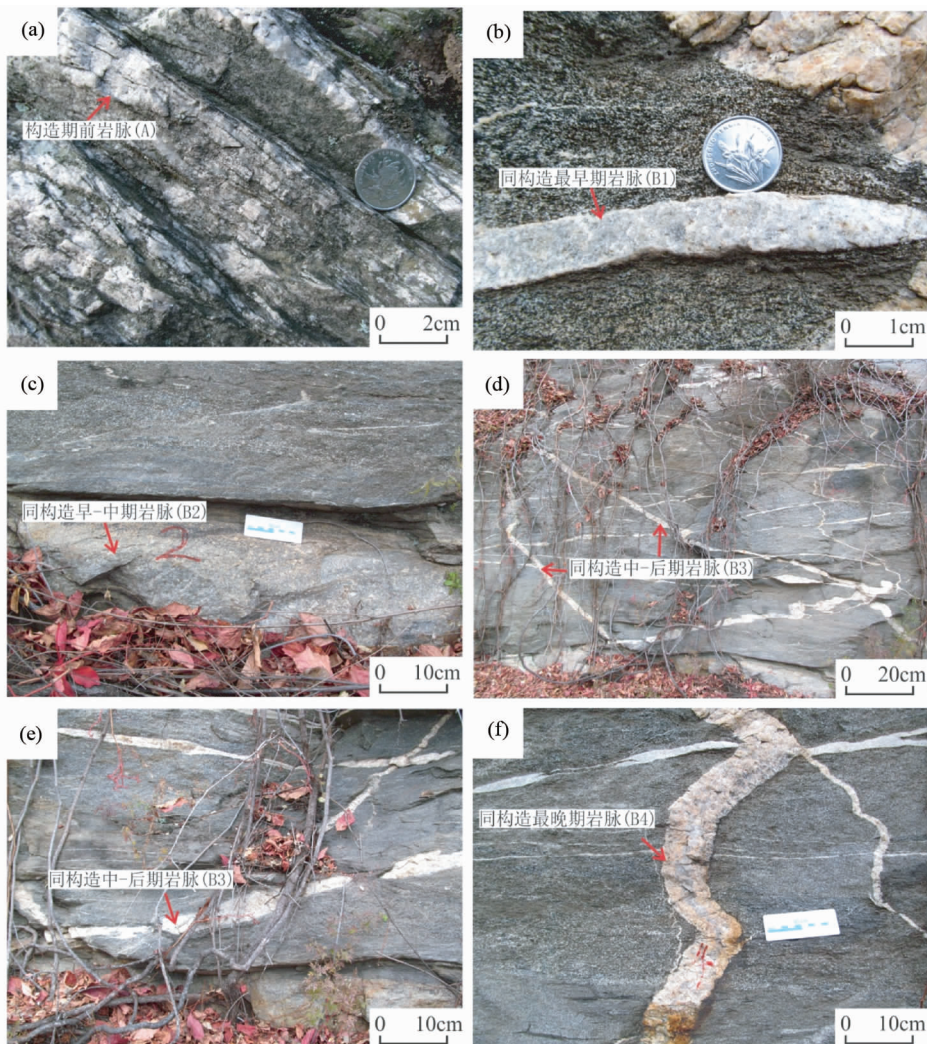


图3 四合堂剪切带内的花岗质岩脉

(a) 怀柔柏查子地区的构造期前岩脉,岩脉具有与围岩一致的产状;(b) 密云张家坟北野外露头上的同构造最早期岩脉(样品 YM1353-8),花岗质岩脉与围岩(石城变闪长岩)的面理近于平行;(c) 云蒙山北部张家坟北野外露头上的同构造早-中期岩脉,岩脉脉体粗大且出现大量分支脉,岩脉面理与围岩面理以小角度斜交;(d) 云蒙山北部张家坟北野外露头上的同构造中-后期岩脉,花岗质岩脉发育较弱的面理,多与围岩面理以中等角度相交(约 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$);(e) 同构造中-后期花岗质岩脉与围岩面理以中等角度相交,脉体的布丁化现象显著;(f) 云蒙山北部张家坟北野外露头上的同构造最晚期岩脉,花岗质岩脉与围岩面理以高角度($50^{\circ} \sim 70^{\circ}$)相交,且切过早期岩脉

Fig. 3 Granitic dikes within the Sihetang shear zone

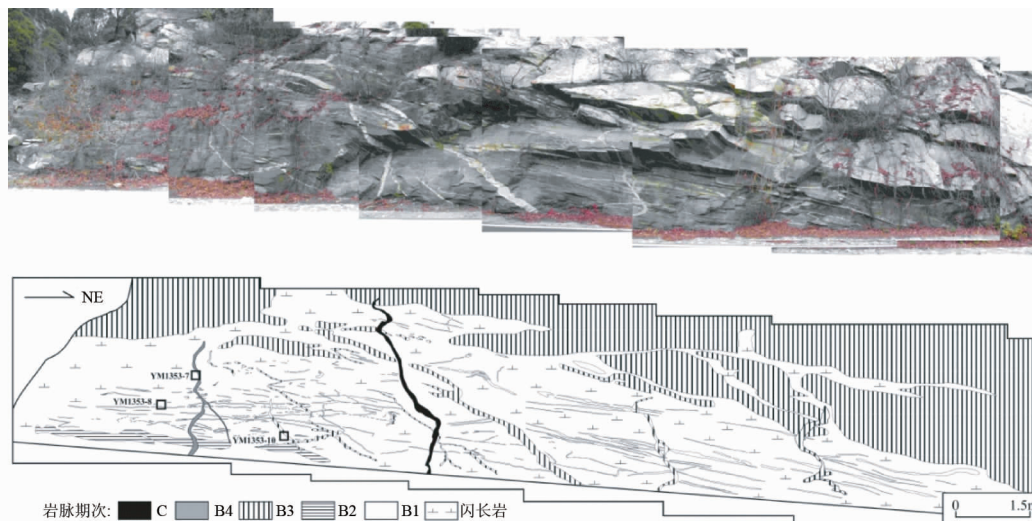


图4 石城以北的张家坟-二平台附近的野外露头照片与剖面素描图

露头上出露同构造的各期次岩脉, B1、B2、B3、B4 为同构造岩脉, C 为构造期后岩脉, 围岩为密云闪长岩, YM1353-7, YM1353-8, YM1353-10 为采样位置

Fig. 4 Outcrop photograph and sketch near the Zhangjiafen-Erpingtai in northern Shicheng

同构造(同剪切)岩脉 B: 即剪切过程中就位的岩脉, 为云蒙山地区出露的岩脉中最典型、最普遍发育的, 也是本次研究的重点。以下列举的同构造各个阶段岩脉主要选自石城以北的张家坟-二平台剖面, 并且各阶段岩脉可以在该地区其他野外露头上在成分、形态等方面一一对应(图4)。

同构造最早期岩脉 B1: 岩脉以细晶花岗质岩脉和碱性花岗质岩脉为主, 主要矿物组合为斜长石、石英与少量黑云母。几乎所有的矿物都定向排列, 石英呈明显的塑性拉长(图3b)。这类岩脉已经被剪切带所完全置换, 总体变形强烈, 岩脉内发育透入性面理和线理, 与围岩(石城变闪长岩)面理近于平行, 几乎顺面理发育, 厚度不大, 多为 1~5cm 厚, 沿面理延伸较远(>10m)。在部分地区可以形成布丁构造或紧闭褶皱, 褶皱的轴面平行于围岩面理, 褶皱枢纽与围岩线理平行。

同构造早-中期岩脉 B2: 主要为中粗粒浅色花岗质岩脉, 主要矿物组合为斜长石、石英与少量黑云母。几乎所有的矿物都定向排列, 石英呈明显的塑性拉长。脉体较 B1 厚度更大, 且出现大量分支脉, 岩脉面理与围岩面理以小角度斜交, 多不大于 10° 。在露头上一般宽 10~30cm, 长 10m 左右。这类岩脉普遍被剪切带部分置换, 部分地区可见发育不对称褶皱, 可以指示上盘向 SW 的逆冲运动。在露头上可以观察到

此期岩脉切穿早期的岩脉(图3c)。

同构造中-后期岩脉 B3: 该期岩脉发育较弱的面理, 多与围岩面理以中等角度相交(约 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$), 脉体内矿物颗粒较细, 石英颗粒直径约 0.5mm。主要矿物组合为斜长石、石英与少量黑云母。几乎所有的矿物都定向排列, 石英呈较弱的塑性拉长。局部地区可以观察到脉体的布丁化现象显著, 野外露头上可以观察到此期岩脉切穿前两期岩脉(图3d, e)。

同构造晚期岩脉 B4: 在露头上多呈现为与围岩面理以高角度($50^{\circ} \sim 70^{\circ}$)相交的伟晶岩脉或花岗质岩脉, 主要矿物组合为斜长石、石英与少量黑云母。该期岩脉受剪切带构造置换很弱, 只有部分岩脉内有极微弱的面理发育, 脉体内部弱变形或轻微变形, 石英变形很弱, 粒度粗大。在局部露头上可以观察到此期岩脉切穿前三期岩脉(图3f)。

4 四合堂地区构造-岩浆活动性的锆石 U-Pb 年代学约束

4.1 测试方法

为限定四合堂韧性剪切带的运动时间, 选取了云蒙山地区东北部出露于四合堂韧性剪切带下盘的张家坟-二平台一

表2 四合堂韧性剪切带中花岗质岩脉(YM1353-8)锆石 U-Pb 同位素分析数据

Table 2 Zircon U-Pb isotopic data of the granitic dike (YM1353-8) from Sihetang shear zone

测点号	U ($\times 10^{-6}$)	Th	Pb	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Ma)		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (Ma)		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)	
					Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Age	1 σ	Age	1 σ	Age	1 σ
1	808	1817	39	2.3	0.1006	0.0059	0.3977	0.0257	0.0288	0.0010	1636	109	340	19	183	6
2	269	124	8	0.46	0.0546	0.0081	0.1860	0.0256	0.0257	0.0013	394	339	173	22	164	8
3	135	62	4	0.46	0.0944	0.0159	0.3693	0.0587	0.0268	0.0025	1517	319	319	44	170	16
4	555	1109	23	2.0	0.0468	0.0058	0.1784	0.0220	0.0279	0.0010	39	270	167	19	178	6
5	493	908	19	1.9	0.0467	0.0038	0.1733	0.0135	0.0272	0.0006	35	181	162	12	173	4
6	650	1153	26	1.8	0.0535	0.0033	0.2024	0.0118	0.0277	0.0004	350	138	187	10	176	3
7	409	583	15	1.5	0.0816	0.0212	0.2495	0.0408	0.0253	0.0016	1237	530	226	33	161	10
8	0	0	0	error	0.0000	0.0000	29.3027	0.0000	0.0000	0.0000	error	error	3464	0	0	0
9	391	692	16	1.8	0.0845	0.0066	0.3187	0.0245	0.0272	0.0006	1306	153	281	19	173	4
10	1008	2217	44	2.2	0.0536	0.0048	0.2054	0.0186	0.0278	0.0007	354	171	190	16	177	4
11	501	888	19	1.8	0.0467	0.0066	0.1694	0.0212	0.0270	0.0011	32	307	159	18	171	7
12	267	341	163	1.3	0.1567	0.0046	9.8445	0.3833	0.4542	0.0114	2420	50	2420	36	2414	50
13	1000	2032	41	2.0	0.0512	0.0030	0.1919	0.0117	0.0271	0.0004	256	140	178	10	172	3
14	593	834	22	1.5	0.0766	0.0033	0.2853	0.0122	0.0271	0.0004	1122	81	255	10	172	3
15	484	832	18	1.8	0.0516	0.0027	0.1941	0.0102	0.0272	0.0004	333	119	180	9	173	3
16	80	89	4	1.2	0.0799	0.0171	0.4545	0.0754	0.0419	0.0031	1194	432	380	53	264	19
17	136	95	4	0.70	0.0559	0.0088	0.1952	0.0276	0.0266	0.0011	456	356	181	23	169	7
18	598	1172	21	2.0	0.0161	0.0026	0.0602	0.0094	0.0269	0.0004	error	error	59	9	171	3
19	1314	1394	43	1.1	0.0528	0.0018	0.1975	0.0066	0.0272	0.0004	320	80	183	6	173	2
20	556	790	20	1.5	0.0518	0.0038	0.1888	0.0123	0.0270	0.0007	276	168	176	10	172	5

线2个不同露头5件同构造岩脉样品(YM1353、YM1355)进行LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素年龄测定(图1)。

为了保证能够从样品中挑选出足量的岩浆锆石,在野外采集测年样品时,挑选的测年样品均为新鲜未风化的花岗质岩脉,且每件测年样品重量都在10kg以上,并且严格注意与围岩以及其它期次岩脉区分,以免影响实验结果。测年样品的粉碎与锆石单矿物分离在河北省廊坊市峰泽源岩矿检测技术有限公司完成。锆石挑选、制靶以及阴极发光(CL)照相在北京奥金顿科技有限公司完成。锆石U-Pb同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所LA-MC-ICP-MS实验室完成。

4.2 测试结果

四合堂地区的第一组3件年龄样品YM1353采集于四合堂韧性剪切带下盘的张家坟-二平台露头(图4)。同构造最早期岩脉B1样品YM1353-8的锆石具有岩浆环带结构,其Th/U比值为0.46~2.3,为典型的岩浆成因锆石;锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为173.4 \pm 2.1Ma(MSWD=0.43),代表其对应期次岩脉的岩浆结晶年龄(图3b、图5a-c、表2)。同构造中-后期岩脉B3样品YM1353-10的锆石具有岩浆环带结构,其Th/U比值为0.40~2.4,为岩浆成因锆石,锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为156.3 \pm 3.1Ma(MSWD=0.16),代表其对应期次岩脉的岩浆结晶年龄(图3d、e、5d-f、表3)。同构造最晚期岩脉B4样品YM1353-7的锆石具有岩浆环带结构,其Th/U比值为0.28~2.5,为典型的岩浆成因锆石;锆

石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为150.0 \pm 1.6Ma(MSWD=1.15),代表其对应期次岩脉的岩浆结晶年龄(图3f、5g-i、表4)。

样品YM1355包括测年样品YM1355-7与YM1355-10,均位于云蒙山地区北部的四合堂剪切带的东段下盘的另一露头剖面上(图6)。该剖面上的岩脉与张家坟-二平台露头YM1353上出露的岩脉在颜色、成分、变形程度与期次划分等方面均可对应。其中,样品YM1355-7所在岩脉为该期次最早的一期(B1)。岩脉为花岗质岩脉,呈白色,细晶结构,岩脉相对较细,宽约5~10cm,岩脉内部所发育的面理与围岩面理近于平行或以小角度截切,沿面理延伸较远(10m),在部分露头上可见该期次岩脉发生石香肠化或形成紧闭褶皱(图7a、b)。样品锆石呈长柱状,弱环带结构,其Th/U比值为0.10~2.0,主体大于0.4,为岩浆成因锆石特征;样品YM1355-10的岩脉为最晚期岩脉(B4),成分为粗粒花岗质。这一期岩脉发育很弱的面理,脉体较宽,多为10~25cm,多与围岩面理以高角度相交(图7g、h)。锆石Th/U比值为0.10~2.0,主体大于0.4,具岩浆成因锆石特征。

样品YM1355-7与YM1355-10的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为161.7 \pm 1.4Ma(MSWD=0.74)和151.1 \pm 3.0Ma(MSWD=0.53),分别对应该期次岩脉的岩浆结晶年龄(图7、表5、表6)。

上述采样点YM1353与YM1355均位于云蒙山地区北部的四合堂剪切带内部,所采集的样品均为同构造花岗质岩脉。采样点YM1353的3个锆石定年样品YM1353-8、YM1353-10

表3 四合堂韧性剪切带中花岗质岩脉(YM1353-10)锆石 U-Pb 同位素分析数据

Table 3 Zircon U-Pb isotopic data of the granitic dike(YM1353-10) from Sihetang shear zone

测点号	U ($\times 10^{-6}$)	Th	Pb	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Ma)		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (Ma)		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)	
					Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Age	1 σ	Age	1 σ	Age	1 σ
1	98	128	4	1.4	0.0517	0.0024	0.2456	0.0690	0.0258	0.0069	333	103	223	56	164	44
2	139	134	84	1.0	0.1614	0.0046	9.8791	0.3101	0.4424	0.0104	2472	48	2424	29	2362	46
3	112	116	7	1.1	0.0563	0.0050	0.3647	0.0326	0.0482	0.0012	465	198	316	24	303	7
4	82	46	49	0.60	0.1653	0.0038	10.7542	0.2648	0.4701	0.0052	2511	39	2502	23	2484	23
5	155	207	5	1.4	0.0523	0.0104	0.1689	0.0332	0.0242	0.0019	298	400	158	29	154	12
6	507	333	15	0.70	0.0512	0.0035	0.1734	0.0120	0.0247	0.0005	250	192	162	10	157	3
7	215	204	136	1.0	0.1648	0.0032	10.3160	0.2154	0.4536	0.0058	2506	33	2464	19	2411	26
8	708	1259	27	1.8	0.0509	0.0025	0.1711	0.0084	0.0246	0.0004	235	113	160	7	157	2
9	155	163	88	1.1	0.1630	0.0053	9.0864	0.3031	0.4043	0.0060	2487	56	2347	31	2189	28
10	140	157	72	1.2	0.1402	0.0043	7.1283	0.2057	0.3696	0.0058	2231	53	2128	26	2028	27
11	157	167	93	1.1	0.1644	0.0055	9.6785	0.3375	0.4274	0.0074	2502	61	2405	32	2294	33
12	179	196	114	1.1	0.1647	0.0035	10.2467	0.2246	0.4509	0.0046	2506	35	2457	20	2399	21
13	110	77	59	0.70	0.1643	0.0054	9.2794	0.3035	0.4100	0.0079	2502	56	2366	30	2215	36
14	136	139	76	1.1	0.1639	0.0042	9.1435	0.2309	0.4044	0.0046	2498	43	2352	23	2189	21
15	354	484	12	1.4	0.0542	0.0042	0.1802	0.0140	0.0241	0.0006	389	174	168	12	153	4
16	608	1418	24	2.4	0.0604	0.0066	0.1938	0.0227	0.0232	0.0009	620	239	180	19	148	6
17	847	1504	33	1.8	0.0503	0.0060	0.1700	0.0194	0.0246	0.0008	209	256	159	17	156	5
18	108	75	61	0.70	0.1649	0.0041	9.9260	0.2646	0.4353	0.0064	2506	41	2428	25	2330	29
19	96	34	35	0.40	0.1135	0.0029	4.8807	0.1275	0.3121	0.0044	1857	46	1799	22	1751	22

表4 四合堂韧性剪切带中花岗质岩脉(YM1353-7)锆石 U-Pb 同位素分析数据

Table 4 Zircon U-Pb isotopic data of the granitic dike (YM1353-7) from Sihetang shear zone

测点号	U ($\times 10^{-6}$)	Th	Pb	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Ma)		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (Ma)		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)	
					Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Age	1 σ	Age	1 σ	Age	1 σ
1	129	263	6	2.1	0.1498	0.0099	0.4905	0.0311	0.0244	0.0005	2344	114	405	21	155	3
2	342	194	7	0.60	0.0602	0.0052	0.1395	0.0120	0.0172	0.0005	613	187	133	11	110	3
3	933	256	23	0.28	0.0497	0.0037	0.1567	0.0104	0.0231	0.0003	189	154	148	9	147	2
4	519	268	164	0.60	0.1011	0.0012	3.7523	0.0523	0.2680	0.0026	1644	22	1583	11	1531	13
5	294	130	7	0.45	0.0528	0.0048	0.1638	0.0132	0.0228	0.0007	320	209	154	12	145	4
6	442	417	12	1.0	0.0556	0.0088	0.1726	0.0257	0.0228	0.0007	435	364	162	22	145	4
7	417	213	11	0.52	0.0851	0.0056	0.2683	0.0172	0.0232	0.0007	1317	129	241	14	148	5
8	187	257	6	1.4	0.0541	0.0063	0.1852	0.0230	0.0242	0.0009	376	260	172	20	154	6
9	694	347	18	0.50	0.0523	0.0104	0.1700	0.0309	0.0239	0.0009	298	400	159	27	153	5
10	450	1126	25	2.5	0.0717	0.0043	0.2680	0.0136	0.0400	0.0135	977	123	241	11	253	84
11	248	349	9	1.5	0.1023	0.0066	0.3406	0.0197	0.0250	0.0004	1666	119	298	15	159	3
12	1430	674	35	0.48	0.1172	0.0138	0.3129	0.0301	0.0204	0.0007	1915	217	276	23	130	5
13	2383	1017	63	0.43	0.0564	0.0016	0.1886	0.0056	0.0242	0.0004	478	32	175	5	154	2
14	1207	2115	43	1.8	0.0524	0.0021	0.1703	0.0065	0.0236	0.0003	302	94	160	6	150	2
15	488	553	16	1.1	0.0732	0.0061	0.2361	0.0191	0.0236	0.0005	1020	175	215	16	150	3
16	812	1143	28	1.5	0.0612	0.0047	0.2023	0.0150	0.0241	0.0005	656	164	187	13	154	3
17	938	331	25	0.36	0.0507	0.0018	0.1654	0.0060	0.0236	0.0003	228	83	155	5	150	2
18	578	159	19	0.28	0.0520	0.0055	0.2170	0.0189	0.0309	0.0015	283	251	199	16	196	9
19	952	1312	33	1.4	0.0548	0.0027	0.1773	0.0083	0.0236	0.0004	406	118	166	7	150	3
20	851	621	24	0.74	0.0627	0.0038	0.1956	0.0127	0.0224	0.0005	700	134	181	11	143	3

表 5 四合堂韧性剪切带中花岗质岩脉(YM1355-7)锆石 U-Pb 同位素分析数据

Table 5 Zircon U-Pb isotopic data of the granitic dike(YM1355-7) from Sihetang shear zone

测点号	U	Th	Pb	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb(Ma)		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U(Ma)		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U(Ma)	
	(×10 ⁻⁶)				Ratio	1σ	Ratio	1σ	Ratio	1σ	Age	1σ	Age	1σ	Age	1σ
1	66	25	2	0.38	0.0510	0.0066	0.1775	0.0234	0.0256	0.0012	239	283	166	20	163	8
2	294	330	10	1.1	0.0555	0.0038	0.1930	0.0106	0.0253	0.0006	432	158	179	9	161	4
3	508	857	19	1.7	0.0472	0.0016	0.1654	0.0053	0.0255	0.0003	61	81	155	5	162	2
4	612	1015	22	1.7	0.0505	0.0019	0.1732	0.0064	0.0249	0.0004	220	87	162	6	158	2
5	49	36	1	0.74	0.0556	0.0059	0.1836	0.0187	0.0241	0.0009	435	234	171	16	153	6
6	198	304	7	1.5	0.0501	0.0078	0.1730	0.0268	0.0249	0.0008	211	317	162	23	159	5
7	389	569	14	1.5	0.0482	0.0017	0.1697	0.0059	0.0256	0.0003	109	85	159	5	163	2
8	255	290	8	1.1	0.0427	0.0046	0.1476	0.0162	0.0249	0.0007	error		140	14	159	4
9	283	544	10	2.0	0.0592	0.0055	0.1923	0.0179	0.0236	0.0008	572	199	179	15	150	5
10	245	272	8	1.1	0.0596	0.0081	0.1995	0.0235	0.0245	0.0007	591	297	185	20	156	5
11	642	1075	23	1.7	0.0549	0.0028	0.1925	0.0108	0.0253	0.0005	409	108	179	9	161	3
12	387	602	14	1.6	0.0481	0.0019	0.1670	0.0063	0.0253	0.0003	106	93	157	6	161	2
13	175	155	6	0.89	0.0546	0.0062	0.1937	0.0199	0.0263	0.0007	394	256	180	17	167	4
14	110	69	3	0.4	0.0696	0.0085	0.2357	0.0293	0.0249	0.0009	917	254	215	24	158	6
15	289	342	10	1.2	0.0509	0.0031	0.1793	0.0121	0.0254	0.0006	239	136	167	10	162	4
16	251	23	6	0.10	0.0529	0.0025	0.1823	0.0084	0.0251	0.0004	324	107	170	7	160	2
17	256	310	9	1.2	0.0547	0.0028	0.1932	0.0091	0.0260	0.0004	467	119	179	8	166	3
18	96	92	3	0.97	0.0452	0.0094	0.1567	0.0294	0.0258	0.0012	error		148	26	164	7
19	264	330	9	1.3	0.0498	0.0025	0.1759	0.0093	0.0257	0.0004	187	119	165	8	164	2
20	163	141	6	0.87	0.0979	0.0060	0.3398	0.0196	0.0258	0.0004	1584	114	297	15	164	2

表 6 四合堂韧性剪切带中花岗质岩脉(YM1355-10)锆石 U-Pb 同位素分析数据

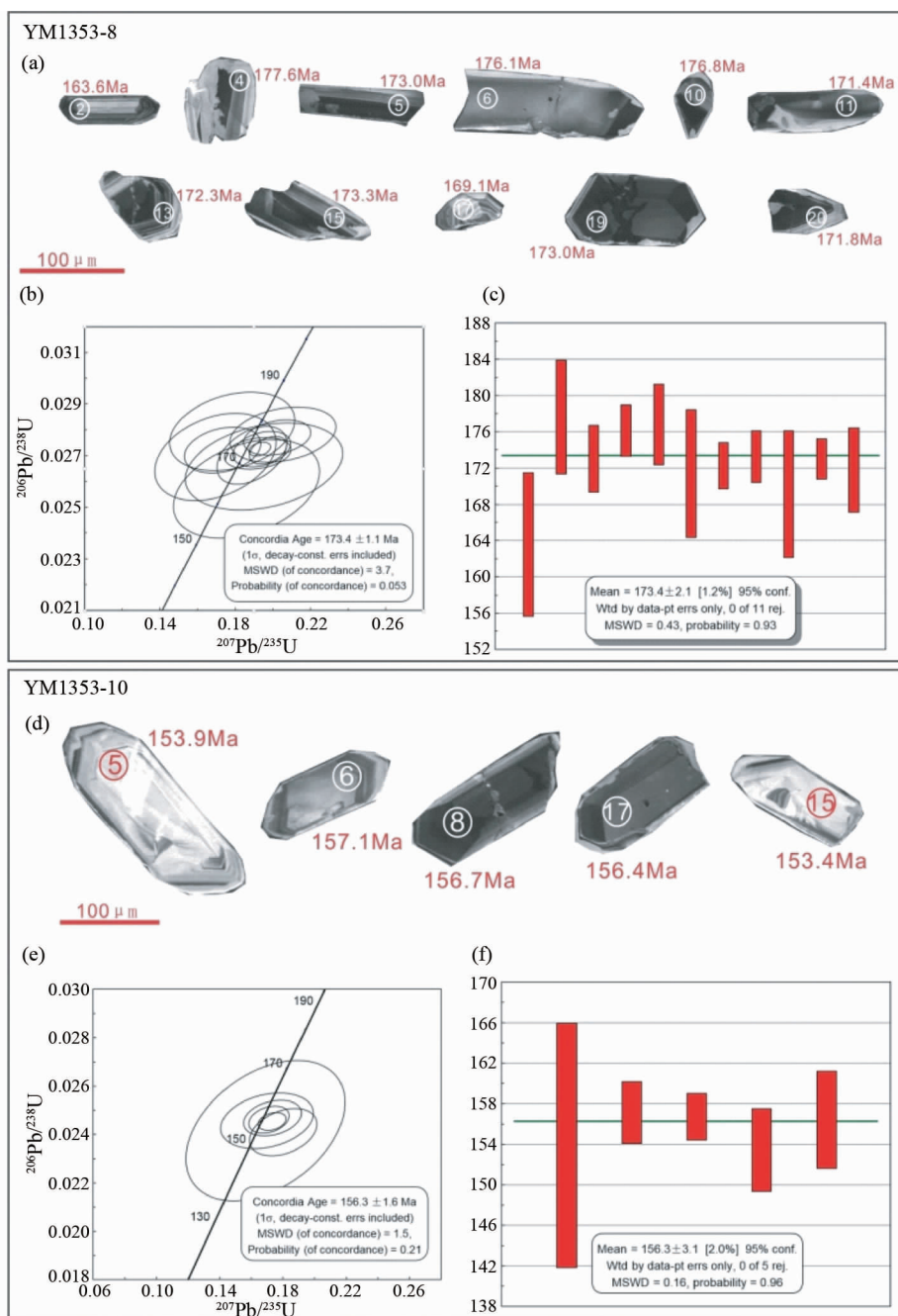
Table 6 Zircon U-Pb isotopic data of the granitic dike(YM1355-10) from Sihetang shear zone

测点号	U	Th	Pb	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb(Ma)		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U(Ma)		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U(Ma)	
	(×10 ⁻⁶)				Ratio	1σ	Ratio	1σ	Ratio	1σ	Age	1σ	Age	1σ	Age	1σ
1	76	7	2	0.10	0.0898	0.0117	0.2842	0.0408	0.0241	0.0017	1422	251	254	32	153	11
2	432	30	8	0.10	0.0486	0.0053	0.1202	0.0105	0.0189	0.0005	132	237	115	10	121	3
3	38	26	1	0.68	0.2015	0.0443	0.4981	0.0497	0.0239	0.0016	2839	366	410	34	152	10
4	0	1	2	1.6	1.2866	0.2412	160.8248	42.4761	1.2518	0.6879	error	error	5165	273	5233	2034
5	30	23	1	0.76	0.2016	0.0207	0.6573	0.0446	0.0244	0.0009	2839	168	513	27	156	6
6	43	27	1	0.62	0.1744	0.0221	0.5376	0.0768	0.0241	0.0015	2611	212	437	51	153	9
7	32	26	1	0.83	0.2082	0.0211	0.6524	0.0665	0.0231	0.0012	2892	165	510	41	147	7
8	38	24	1	0.64	0.1647	0.0229	0.5038	0.0519	0.0248	0.0011	2506	235	414	35	158	7
9	31	21	1	0.70	0.2477	0.0380	0.7199	0.0925	0.0249	0.0015	3170	246	551	55	159	9
10	24	17	1	0.71	0.6720	0.2710	1.2432	0.1815	0.0247	0.0024	4672	759	820	82	157	15
11	444	395	12	0.89	0.0439	0.0060	0.1366	0.0196	0.0224	0.0006	error		130	18	143	4
12	34	29	1	0.86	0.4034	0.0917	0.7039	0.0714	0.0244	0.0022	3922	349	541	43	155	14
13	39	29	1	0.74	0.1472	0.0199	0.5543	0.0983	0.0240	0.0023	2313	234	448	64	153	15
14	34	30	1	0.90	0.2087	0.0378	0.6969	0.1168	0.0231	0.0014	2895	298	537	70	147	9
15	32	23	1	0.75	0.1929	0.0259	0.6367	0.0726	0.0243	0.0014	2769	222	500	45	155	9
16	311	165	8	0.60	0.0538	0.0038	0.1716	0.0127	0.0237	0.0006	365	159	161	11	151	4
17	41	29	1	0.73	0.1694	0.0242	0.4513	0.0372	0.0237	0.0012	2552	241	378	26	151	8
18	36	29	1	0.82	0.1805	0.0195	0.4768	0.0412	0.0241	0.0014	2657	180	396	28	154	9
19	21	17	1	0.81	0.6588	0.3169	1.0845	0.2009	0.0238	0.0027	4644	972	746	98	151	17
20	134	263	5	2.0	0.1157	0.0073	0.3716	0.0230	0.0241	0.0005	1890	113	321	17	154	3

与 YM1353-7 的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 $173.4 \pm 2.1\text{Ma}$ (MSWD = 0.43), $156.3 \pm 3.1\text{Ma}$ (MSWD = 0.16) 和 $150.0 \pm 1.6\text{Ma}$ (MSWD = 1.15) (图 5); 采样点 YM1355 的 2 个锆石定年样品 YM1355-7、YM1355-10 的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 $161.7 \pm 1.4\text{Ma}$ (MSWD = 0.74) 和 $151.0 \pm 3.0\text{Ma}$ (MSWD = 0.53) (图 7)。这些年龄代表了四合堂韧性剪切带的同构造岩脉的岩浆结晶年龄。这 5 件同构造岩脉年龄同时也限定了四合堂韧性剪切带的活动时间大约在 $170 \sim 150\text{Ma}$ 。尽管本次研究掌握的四合堂韧性剪切带的最早活动时间资料尚不充足,但是基本可以确定四合堂早期逆冲型剪切活动时间持续到晚侏罗世 150Ma 左右。

5 四合堂逆冲型韧性剪切带构造-岩浆活动阶段性

在云蒙山北部四合堂地区中生代发生的主要构造变形事件为四合堂逆冲推覆体南北向的收缩变形,通过对四合堂韧性剪切带进行详细的几何学、运动学与年代学研究,建立起四合堂地区逆冲型韧性剪切作用早期构造演化的四期构造-岩浆演化序列。



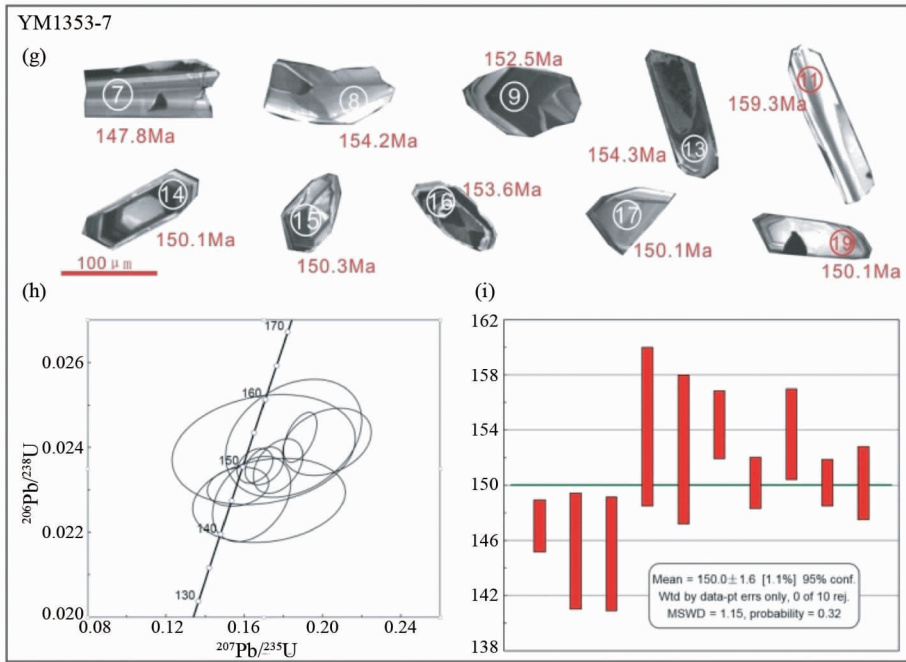


图5 云蒙山张家坟-二平台地区岩脉锆石 U-Pb 同位素年龄

(a) 样品 YM1353-8 的锆石阴极发光照片和年龄值; (b) 样品 YM1353-8 的锆石年龄谐和图; (c) 样品 YM1353-8 的锆石加权平均年龄; (d) 样品 YM1353-10 的锆石阴极发光照片和年龄值; (e) 样品 YM1353-10 的锆石年龄谐和图; (f) 样品 YM1353-10 的锆石加权平均年龄; (g) 样品 YM1353-7 的锆石阴极发光照片和年龄值; (h) 样品 YM1353-7 的锆石年龄谐和图; (i) 样品 YM1353-7 的锆石加权平均年龄

Fig. 5 CL images of zircons, dated spot and ages, concordia curves and weighted ages from the dated dikes in the Zhangjiafen-Erpingtai in Yunmengshan area

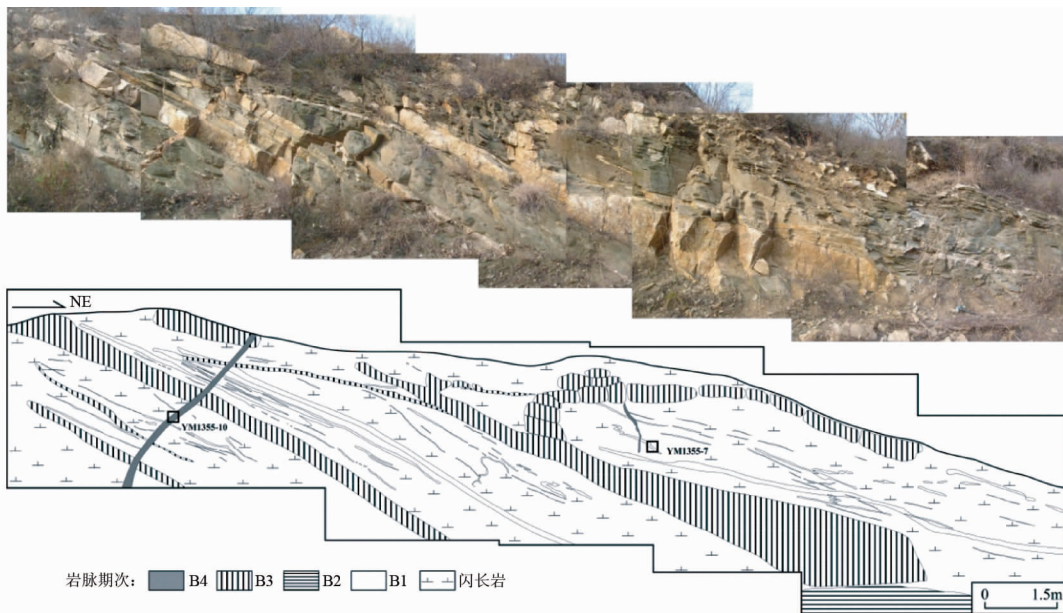


图6 云蒙山北部张家坟一带野外露头照片与剖面素描图

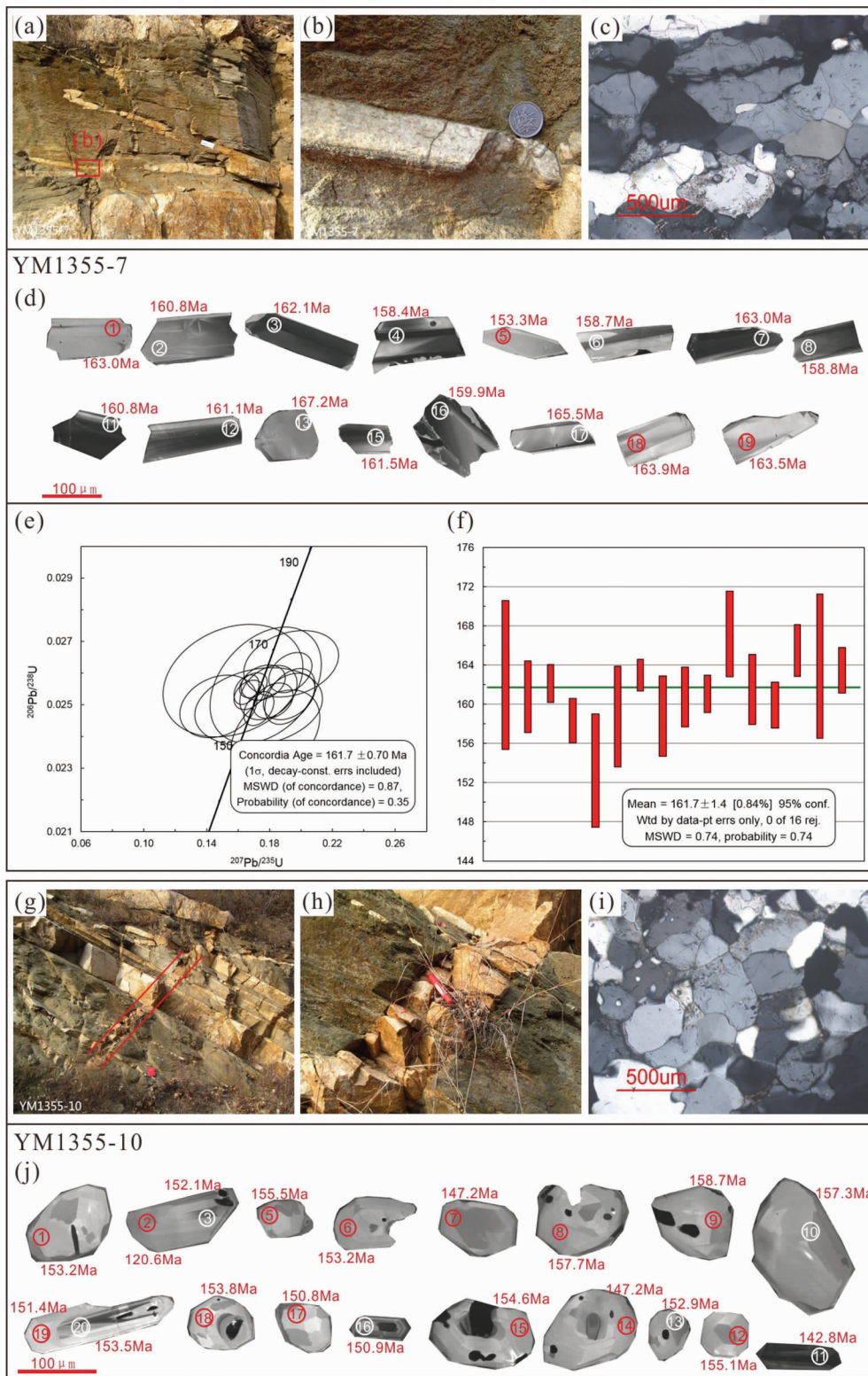
露头上出露同构造的各期次岩脉, B1、B2、B3、B4 为同构造岩脉, 围岩为密云闪长岩, YM1355-7, YM1355-10 为测年样品采样位置

Fig. 6 Outcrop photograph and sketch of the Zhangjiafen in northern Yunmengshan

四合堂地区出露的侵入岩主要为晚侏罗世-早白垩世侵入体,主要包括云蒙山花岗闪长岩、云蒙山东北的密云闪长岩、沙坨子花岗岩以及柏盆山花岗闪长岩。其中闪长岩主要为石城地区的密云变闪长岩(159Ma)(Shi *et al.*, 2009)、柏盆山闪长岩(127Ma)(Davis *et al.*, 1996a);花岗岩体主要有

云蒙山北东缘的沙坨子花岗岩(151Ma)(Davis *et al.*, 1996a;Shi *et al.*, 2009)以及云蒙山花岗闪长岩(141 ~ 143Ma)(Davis *et al.*, 1996a;刘翠等,2004;Shi *et al.*, 2009)。

大约在 170Ma(晚侏罗世),四合堂地区发生了大规模自 NE 向 SW 的韧性逆冲变形,形成了近东西向、影响区域宽度



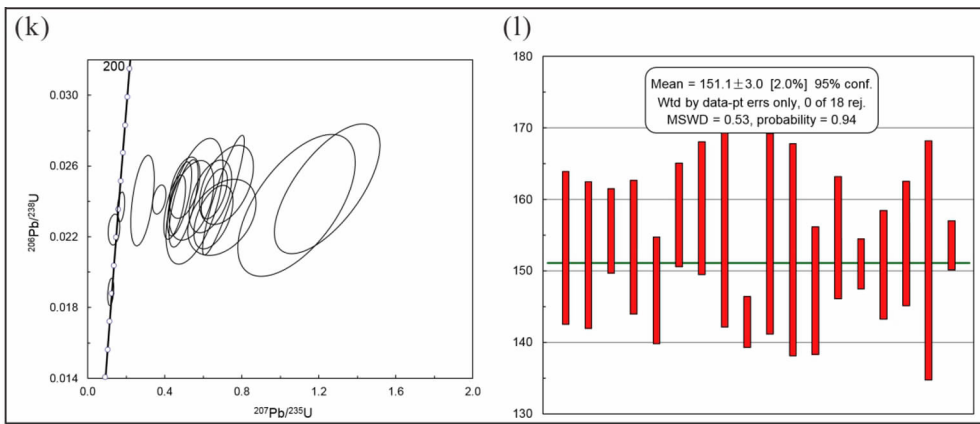


图7 云蒙山北部张家坟地区样品 YM1355-7 和 YM1355-10 的野外露头照片与锆石 U-Pb 同位素年龄

(a) 张家坟地区最早期岩脉发生石香肠化或形成紧闭褶皱;(b) 张家坟地区最早期岩脉的野外照片;(c) 张家坟地区最早期岩脉的显微镜下照片;(d) 样品 YM1355-7 的锆石阴极发光照片和年龄值;(e) 样品 YM1355-7 的锆石年龄谱和图;(f) 样品 YM1355-7 的锆石加权平均年龄图;(g) 粗粒花岗岩岩脉,脉体穿过早期的岩脉;(h) 最晚期岩脉的野外照片;(i) 最晚期岩脉的显微照片;(j) 样品 YM1355-10 的锆石阴极发光照片和年龄值;(k) 样品 YM1355-10 的锆石年龄谱和图;(l) 样品 YM1355-10 的锆石加权平均年龄图

Fig. 7 The Outcrop photographs, CL images of zircons, dated spot and ages, concordia curves and weighted ages of the samples YM1355-7 and YM1355-10 from Zhangjiafen in northern Yunnengshan

约 10km,并且总体呈现半圆形的四合堂逆冲型韧性剪切带,形成了研究区四期与韧性逆冲构造活动相关的岩脉。5 件同构造花岗岩岩脉锆石 U-Pb 定年限定了四合堂逆冲型韧性剪切带的活动时间大约在 170 ~ 150Ma。

在 170 ~ 160Ma,四合堂地区 NE 向 SW 的韧性逆冲变形继续进行,期间四合堂地区侵入了大量的同构造岩脉;在 160 ~ 150Ma,伴随着四合堂逆冲型韧性剪切带的发育,云蒙山地区的密云闪长岩(159Ma) (Shi *et al.*, 2009)、沙坨子花岗岩(151Ma) (Davis *et al.*, 1996a;Shi *et al.*, 2009) 开始发育,并且被四合堂逆冲型韧性剪切带改造。

在 150Ma 之后,云蒙山花岗岩闪长岩(141 ~ 143Ma) (Davis *et al.*, 1996a;刘翠等,2004;Shi *et al.*, 2009) 和柏岔山闪长岩(127Ma) (Davis *et al.*, 1996a) 开始发育,这些较晚期的岩体可能受到四合堂逆冲型韧性剪切带晚期阶段活动以及与水峪剪切带剪切变形作用的影响 (Davis 和郑亚东, 2002;陈印等, 2003; Zhu *et al.*, 2015)。这些卷入剪切带的岩体均经历了不同程度的韧性变形,在靠近四合堂剪切带的地区,岩石面理、长石残斑等运动学标志均与四合堂韧性剪切带的剪切方向一致。

由此可见,四合堂韧性早期逆冲变形作用时限为 170 ~ 150Ma, 随后,四合堂地区受云蒙山区域伸展构造体制影响,叠加了后期的拆离滑脱构造,并最终形成了该区的主体构造格架(夏浩然,2011;陈印等,2013,2014)。

6 区域构造意义

云蒙山北部四合堂地区中生代发生的主要构造变形事

件为四合堂逆冲推覆体南北向的收缩变形,该期变形在邻区亦有响应。区域上,阴山褶皱带中的呼和浩特地区以及燕山褶皱带中的逆冲断层均记录了晚侏罗世-早白垩世的 NNE-SSW 挤压事件 (Davis *et al.*, 2001; Guo *et al.*, 2012; Meng *et al.*, 2014)。阴山-燕山褶皱带中的上侏罗统与下白垩统的角度不整合亦为该期事件的沉积构造响应 (Davis *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2008)。本文研究结果显示,四合堂逆冲型韧性剪切带作用早期演化可以追溯到大约 170Ma,并持续到约 150Ma。该期韧性逆冲变形可能与西伯利亚板块和华北板块之间的蒙古-鄂霍茨克洋关闭后的陆陆碰撞造山相联系 (Zhu *et al.*, 2015)。

早白垩世,华北地区处在 NWW-SEE 向伸展构造背景下,形成了辽西巫闾山变质核杂岩(马寅生等,1999;Darby *et al.*, 2004;张必龙等,2011,2013;朱光等,2016)、辽南变质核杂岩(Liu *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2007;Lin *et al.*, 2008;刘俊来等,2008,2011)、云蒙山变质核杂岩等一系列变质核杂岩构造,它们是华北克拉通在岩石圈减薄的具体体现。

7 结论

(1) 在四合堂地区大规模的上盘自 NE 向 SW 向的韧性逆冲变形形成了近东西向并且总体呈半圆形的四合堂逆冲型韧性剪切带。卷入剪切带的岩体均经历了不同程度的韧性变形,在靠近四合堂剪切带的地区,岩石面理、长石残斑等运动学标志均与四合堂韧性剪切带的剪切方向一致。

(2) 四合堂韧性剪切带中岩脉厘定为构造期前(剪切前)岩脉、同构造期(同剪切)岩脉和构造期后(剪切后)岩脉

等三个主要期次,其中同构造岩脉可进一步分为同构造最早期岩脉,同构造早-中期岩脉,同构造中-晚期岩脉和同构造晚期岩脉。

(3) 四合堂韧性剪切带内不同变形阶段的同构造花岗质岩脉的锆石 U-Pb 加权平均年龄分别为 $173.4 \pm 2.1\text{Ma}$ 、 $156.3 \pm 1.6\text{Ma}$ 、 $150.9 \pm 1.6\text{Ma}$ 、 $161.7 \pm 1.4\text{Ma}$ 和 $151.0 \pm 3.0\text{Ma}$, 限定了四合堂韧性剪切带 NE-SW 向韧性逆冲时限为 $170 \sim 150\text{Ma}$ 。

致谢 野外工作得到了张若愚、夏增明、郑媛媛、王文龙、耿晓磊、高鑫磊、郭雯、赖琦婧、周明的大力支持与帮助,在此表示衷心感谢!

References

- Bai ZM. 1991. The characteristics and genesis re-recognized of Yunmeng mountain complex. *Beijing Geology*, (3): 1–11 (in Chinese)
- Chen NS, Wang RJ, Shan WL and Zhong ZQ. 1994. Isobaric cooling (IBC) *P-T-t* path for the western portion of archaean Miyun complex, Beijing: Constraints and its geodynamic genesis. *Scientia Geologica Sinica*, 29 (4): 355–365 (in Chinese with English abstract)
- Chen Y, Zhu G, Jiang DZ and Zhang BL. 2013. Timing determination of Phase B of the Yanshanian movement in the eastern North China Craton: Evidence from dating of a ductile shear zone in Sihetang, northeastern Beijing. *Acta Geologica Sinica*, 87(3): 295–310 (in Chinese with English abstract)
- Chen Y, Zhu G, Jiang DZ and Lin SZ. 2014. Deformation characteristics and formation mechanism of the Yunmengshan metamorphic core complex. *Chinese Science Bulletin*, 59(20): 2419–2438
- Darby BJ, Davis GA, Zhang XH, Wu FY, Wilde SA and Yang JH. 2004. The newly discovered Waziyu metamorphic core complex, Yiwulishan, western Liaoning Province, Northwest China. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 145–155
- Davis GA and Zheng YD. 1988. A possible cordilleran-type metamorphic core complex beneath the Great Wall near Hefangkou, Huairou County, northern China. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 20: A324–A334
- Davis GA, Qian XL, Zheng YD and Yu H. 1989. The Sihetang thrust plate, a major crystalline nappe in the Yunmeng Mountains, Beijing Province, northeastern China. *Geological Society of America Abstract with Programs*, 21: A–319
- Davis GA, Qian XL and Zheng YD. 1996a. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: A metamorphic core complex north of Beijing, China. In: Yin A and Harrison M (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. New York: Cambridge University Press, 253–280
- Davis GA, Qian XL, Zheng YD, Tong HM, Yu H, Wang C, Gehrels GE, Muhammad S and Joan FE. 1996b. The Huairou (Shuiyu) ductile shear zone, Yunmengshan Mts., Beijing. In: 30th International Geological Congress Field Trip Guide (Vol. 6). Beijing: Geological Publishing House, 25
- Davis GA, Zheng YD, Wang C, Darby BJ, Zhang CH and Gehrels G. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. In: Hendrix MS and Davis GA (eds.). *Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation*. Geological Society of America Memoirs, 194: 171–197
- Davis GA and Zheng YD. 2002. Metamorphic core complexes: Definition, types and tectonic setting. *Geological Bulletin of China*, 21(4–5): 185–192 (in Chinese with English abstract)
- Davis GA, Meng JF, Cao WR and Du WQ. 2009. Triassic and Jurassic tectonics in the eastern Yanshan belt, North China: insights from the controversial Dengzhangzi Formation and its neighboring units. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 69–86
- Deng JF, Su SG, Zhao GC and Liu C. 2004. Structural elements association of Yanshan orogenic belt, North China. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 315–323 (in Chinese with English abstract)
- Feng SQ, Pan GM and Wang YF. 1983. Microstructures and measure of structural differential stress of mylonite in Shuiyu fault zone, Huairou, Beijing. In: International symposium on Pre-Cambrian Crustal Evolution. 29–30 (in Chinese)
- Guo L, Wang T, Zhang JJ, Liu J, Qi GW and Li JB. 2012. Evolution and time of formation of the Hohhot metamorphic core complex, North China: New structural and geochronologic evidence. *International Geology Review*, 54 (11): 1309–1331
- Ji GY, Wang Y and Sun YH. 2004. Petrological characteristics and structural deformation of Yunmengshan magmatic complex, Beijing. *Beijing Geology*, 16(3): 1–11 (in Chinese with English abstract)
- Jin WS and Guan AL. 1999a. Division of the archaean stratum-rock units, and its characteristics in the Beijing area. *Progress in Precambrian Research*, 22(2): 1–10 (in Chinese with English abstract)
- Jin WS and Guan AL. 1999b. Isotopic age of the archaean rocks in Beijing area and their geological implications. *Progress in Precambrian Research*, 22(3): 1–13 (in Chinese with English abstract)
- Li JB. 2010. Strain, kinematic vorticity analysis and ductile thinning of the ductile detachment zone of metamorphic core complex in North China Craton. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 43–58 (in Chinese with English summary)
- Lin W, Faure M, Monié P, Schärer U and Panis U. 2008. Mesozoic extensional tectonics in Eastern Asia; The South Liaodong Peninsula metamorphic core complex (NE China). *The Journal of Geology*, 116(2): 134–154
- Liu C, Deng JF, Su SG, Xiao QH, Luo ZH, Wang QH and Xu LQ. 2004. Zircon SHRIMP dating of Yunmengshan gneissic granite and its geological significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(2): 141–146 (in Chinese with English abstract)
- Liu JL, Davis GA, Lin ZY and Wu FY. 2005. The Liaonan metamorphic core complex, southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of eastern Liaoning, Korea and contiguous areas. *Tectonophysics*, 407(1–2): 65–80
- Liu JL, Davis GA, Ji M, Guan HM and Bai XD. 2008. Crustal detachment and destruction of the North China craton: Constraints from Late Mesozoic extensional structures. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 72–81 (in Chinese with English abstract)
- Liu JL, Ji M, Shen L, Guan HM and Davis GA. 2011. Early Cretaceous extensional structures in the Liaodong Peninsula: Structural associations, geochronological constraints and regional tectonic implications. *Science China (Earth Sciences)*, 54(6): 823–842
- Ma YS, Cui SQ, Wu GG, Wu ZH, Zhu DG, Li X and Feng XY. 1999. The structural feature of metamorphic core complex in Yiwulishan Mountains, West Liaoning. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(4): 385–391 (in Chinese with English abstract)
- Ma YS, Cui SQ, Zeng QL and Wu ML. 2002. Yanshanian compression and extension in the Yanshan area. *Geological Bulletin of China*, 21(4–5): 218–223 (in Chinese with English abstract)
- Meng QP, He YK, Zhang W, Zheng RG, Xu C, Zhang ZY and Wu TR. 2014. Time constraints on the inversion of the tectonic regime in the northern margin of the North China Craton: Evidence from the Daqingshan granites. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 246–259
- Passchier CW, Zhang JS and Konopásek J. 2005. Geometric aspects of synkinematic granite intrusion into a ductile shear zone: An example from the Yunmengshan core complex, northern China. In: Bruhn D and Burlini L (eds.). *High-Strain Zones: Structure and Physical Properties*. Geological Society, London, Special Publication, 245: 65–80

- Shangguan ZG, Qiu CY, Wang YF and Zheng YD. 1987. Variation of oxygen isotopic composition of felsic mylonite in the Dashuiyu ductile shear zone, Huairou County, Beijing. *Chinese Science Bulletin*, 32(23): 1654–1658
- Shi LB and Chen XD. 1984. Microstructures of fault rocks in Beishicheng and Hefangkou fault zones, Beijing. *Seismology and Geology*, 6(3): 1–13 (in Chinese with English abstract)
- Shi YR, Zhao XT, Ma YS, Hu DG, Liu QS, Wu ZH, Zhao YY and Liu DY. 2009. Late Jurassic-Early Cretaceous plutonism in the northern part of the Precambrian North China craton: SHRIMP zircon U-Pb dating of diorites and granites from the Yunnengshan Geopark, Beijing. *Acta Geologica Sinica*, 83(2): 310–320
- Wang K, Burrov E, Gumiaux C, Chen Y, Lu G, Mezri L and Zhao L. 2015. Formation of metamorphic core complexes in non-over-thickened continental crust: A case study of Liaodong Peninsula (East Asia). *Lithos*, 238:86–100
- Wang QY, Yan DP, Su BX, Zhou M and Hu RZ. 2006. Tectono-thermal evolution of the detachment fault along the southeastern margin of the Yunneng Shan metamorphic core complex in the northern part of Beijing. *Geological Bulletin of China*, 25(4): 448–453 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Guo L, Zheng YD, Donskaya T, Gladkochub D, Zeng LS, Li JB, Wang YB and Mazukabzov A. 2012. Timing and processes of Late Mesozoic mid-lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes. *Lithos*, 154: 315–345
- Wang Y and Deng JF. 2002. Petrochemical characteristics and geodynamic significance of the Yanshanian strongly peraluminous intrusive rocks in the Hebei-Shanxi-Liaoning area. *Geological Bulletin of China*, 21(4–5): 270–276 (in Chinese with English abstract)
- Wang YF. 1985. A discussion of the component texture of quartz in mylonite, outcropped in Shuiyu fault zone, Huairou, Beijing. In: *Construction of Geological Sciences (5)*. Beijing: Geological Publishing House, 77–85 (in Chinese)
- Wang YF, Hu ZD and Zheng YD. 1989. The characteristics of clay mineral in fault gouge from Yunnengshan (Beijing) and its geological significance of K-Ar age. In: *Department of Geology, Peking University (ed.)*. *Lithosphere Earth Science*. Beijing: Peking University Press, 102–111 (in Chinese)
- Wu FY, Yang JH, Liu XM, Li TS, Xie LW and Yang YH. 2005a. Hf isotopes of the 3.8Ga zircons in eastern Hebei Province, China: Implications for early crustal evolution of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 50(21): 2473–2480
- Wu FY, Lin JQ, Wilde SA, Zhang XO and Yang JH. 2005b. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1–2): 103–119
- Wu ZH, Cui SQ, Wu GG, Zhu DG, Feng XY and Ma YS. 2000. Thermochronological analysis on the uplift process of the Yanshan Mountains. *Geological Review*, 46(1): 49–57 (in Chinese with English abstract)
- Xia HR. 2011. Evolution of an extensional detachment shear zone: Microfabric, kinematic and rheological study of the Shuiyu ductile shear zone, Yunneng Mountains, Beijing. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences, 1–36 (in Chinese with English summary)
- Xu JF, Wang RJ and Yang SR. 1994. Rock deformation and genesis of Yunnengshan granitic batholith. *Earth Science*, 19(6): 806–814 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Wu FY, Chung SL, Lo CH, Wilde SA and Davis GA. 2007. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton. *GSA Bulletin*, 119(11–12): 1405–1414
- Zeng LS, Zhang JX, Xu ZQ and Qiu XP. 2006. Geochemical characteristics of leucogranitic dikes and sheared granites in the Yunneng Mountains, northeastern Beijing. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(3): 203–209 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BL, Zhu G, Jiang DZ, Chen Y and Hu ZQ. 2011. Evolution of the Yiwulüshan metamorphic core complex and Late Jurassic extensional event in the western Liaoning Province. *Geological Review*, 57(6): 779–798 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BL, Zhu G, Chen Y, Pu XF, Ju LX and Wang HQ. 2012. Deformation characteristics and genesis of the Waziyu metamorphic core complex in western Liaoning of China. *Science China (Earth Sciences)*, 55(11): 1764–1781
- Zhang JS, Passchier CW, Konopasek J, Niu XL and Huang XN. 2007. Evidence for coalescing of extensional detachment and magma diapirism during uplift of the Yunnengshan metamorphic core complex. *Earth Science Frontiers*, 14(4): 26–39 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Zeng LS and Qiu XP. 1997. Granite dome and extensional tectonics in the Yunneng Mountains, Beijing. *Geological Review*, 43(3): 232–240 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Dong SW, Zhao Y and Zhang T. 2008. Jurassic tectonics of North China: A synthetic view. *Acta Geologica Sinica*, 82(2): 310–326
- Zheng YD, Wang Y, Liu R and Shao J. 1988. Sliding-thrusting tectonics caused by thermal uplift in the Yunneng Mountains, Beijing, China. *Journal of Structural Geology*, 10(2): 135–144
- Zhu DG, Cui SQ, Wu ZH, Ma YS and Feng XY. 2000. Tectonic features of the compressional-extensional system and dynamic analysis of rock fabric in Yunnengshan area, Beijing. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(4): 337–344 (in Chinese with English abstract)
- Zhu G, Chen Y, Jiang DZ and Lin SZ. 2015. Rapid change from compression to extension in the North China Craton during the Early Cretaceous: Evidence from the Yunnengshan metamorphic core complex. *Tectonophysics*, 656: 91–110
- Zhu G, Wang W, Gu CC, Zhang S and Liu C. 2016. Late Mesozoic evolution history of the Tan-Lu Fault Zone and its indication to destruction processes of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 32(4): 935–949 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 白志民. 1991. 云蒙山杂岩体的特征及成因再认识. *北京地质*, (3): 1–11
- 陈能松, 王人镜, 单文琅, 钟增球. 1994. 密云杂岩西段等压冷却 P - T 轨迹确定及地球动力学成因. *地质科学*, 29(4): 355–365
- 陈印, 朱光, 姜大志, 张必龙. 2013. 四合堂剪切带活动时代及其对燕山运动 B 幕时间的限定. *地质学报*, 87(3): 295–310
- 陈印, 朱光, 姜大志, 林少泽. 2014. 云蒙山变质核杂岩的变形规律与发育机制. *科学通报*, 59(16): 1525–1541
- Davis GA, 郑亚东. 2002. 变质核杂岩的定义、类型及构造背景. *地质通报*, 21(4–5): 185–192
- 邓晋福, 苏尚国, 赵国春, 刘翠. 2004. 华北燕山造山带结构要素组合. *高校地质学报*, 10(3): 315–323
- 冯孙齐, 潘桂明, 王玉芳. 1983. 北京怀柔水峪断裂带糜棱岩的显微构造及差异应力的估算. 见: 国际前寒武纪地壳演化讨论会论文摘要汇编. 29–30
- 姬广义, 汪洋, 孙永华. 2004. 北京云蒙山岩杂岩体的岩石学和构造变形特征. *北京地质*, 16(3): 1–11
- 金文山, 管爱莲. 1999a. 北京地区太古宙岩石、地层单元划分及其特征. *前寒武纪研究进展*, 22(2): 1–10
- 金文山, 管爱莲. 1999b. 北京地区太古宙岩石同位素年龄及其意义. *前寒武纪研究进展*, 22(3): 1–13
- 李建波. 2010. 华北克拉通北缘变质核杂岩韧性拆离带的应变、运动

- 学焐度分析与韧性减薄量. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 43-58
- 刘翠, 邓晋福, 苏尚国, 肖庆辉, 罗照华, 王启航, 许立权. 2004. 北京云蒙山片麻状花岗岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 23(2): 141-146
- 刘俊来, Davis GA, 纪沫, 关会梅, 白相东. 2008. 地壳的拆离作用与华北克拉通破坏: 晚中生代伸展构造约束. 地学前缘, 15(3): 72-81
- 刘俊来, 纪沫, 申亮, 关会梅, Davis GA. 2011. 辽东半岛早白垩世伸展构造组合、形成时代及区域构造内涵. 中国科学(地球科学), 41(5): 618-637
- 马寅生, 崔盛芹, 吴淦国, 吴珍汉, 朱大岗, 李晓, 冯向阳. 1999. 医巫闾山变质核杂岩构造特征. 地球学报, 20(4): 385-391
- 马寅生, 崔盛芹, 曾庆利, 吴满路. 2002. 燕山地区燕山期的挤压与伸展作用. 地质通报, 21(4-5): 218-223
- 上官志冠, 邱纯一, 王玉芳, 郑亚东. 1985. 北京怀柔水峪韧性剪切带长英质糜棱岩氧同位素组成的变异及其地质意义. 科学通报, 30(17): 1329-1332
- 史兰斌, 陈孝德. 1984. 北京北石城断裂带与河防口断层带断层岩石显微构造研究. 地震地质, 6(3): 1-13
- 王巧云, 颜丹平, 苏本勋, 周密, 胡瑞忠. 2006. 京北云蒙山变质核杂岩南东侧剥离断层带的构造热演化. 地质通报, 25(4): 448-453
- 汪洋, 邓晋福. 2002. 冀晋辽地区燕山期强过铝质侵入岩岩石化学特征及其动力学意义. 地质通报, 21(4-5): 270-276
- 王玉芳. 1985. 关于怀柔水峪韧性断裂带中糜棱岩石英组构特征的探讨. 见: 构造地质论丛(5). 北京: 地质出版社, 77-85
- 王玉芳, 胡振铎, 郑亚东. 1989. 北京云蒙山区断层泥中粘土矿物特征及钾氩年龄的地质意义. 见: 北京大学地质学系编. 岩石圈地质科学. 北京: 北京大学出版社, 102-111
- 吴珍汉, 崔盛芹, 吴淦国, 朱大岗, 冯向阳, 马寅生. 2000. 燕山山脉隆升过程的热年代学分析. 地质论评, 46(1): 49-57
- 夏浩然. 2011. 伸展拆离型韧性剪切带的演化: 北京云蒙山水峪剪切带的显微构造、运动学与流变学研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1-36
- 许继峰, 王人镜, 杨淑荣. 1994. 北京云蒙山花岗岩基的岩石变形及其成因. 地球科学, 19(6): 806-814
- 曾令森, 张建新, 许志琴, 邱小平. 2006. 北京云蒙山浅色花岗岩脉及韧性剪切变形的地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 25(3): 203-209
- 张必龙, 朱光, 姜大志, 陈印, 胡召奇. 2011. 辽西医巫闾山变质核杂岩的形成过程与晚侏罗世伸展事件. 地质论评, 57(6): 779-798
- 张必龙, 朱光, 陈印, 朴学峰, 鞠林雪, 王浩乾. 2013. 辽西瓦子峪变质核杂岩的变形规律与成因. 中国科学(地球科学), 43(8): 1249-1267
- 张家声, Passchier CW, Konopasek J, 牛向龙, 黄雄南. 2007. 云蒙山变质核杂岩抬升过程中伸展拆离和岩浆底辟联合作用的证据. 地学前缘, 14(4): 26-39
- 张建新, 曾令森, 邱小平. 1997. 北京云蒙山地区花岗岩穹隆及伸展构造的探讨. 地质论评, 43(3): 232-240
- 朱大岗, 崔盛芹, 吴珍汉, 马寅生, 冯向阳. 2000. 北京云蒙山地区挤压-伸展体系构造特征及其岩石组构的动力学分析. 地球学报, 21(4): 337-344
- 朱光, 王薇, 顾承申, 张帅, 刘程. 2016. 郯庐断裂带晚中生代演化历史及其对华北克拉通破坏过程的指示. 岩石学报, 32(4): 935-949