

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.269>



# 北京西山白垩纪—古近纪多期次构造叠加作用：以周口店黄院奥陶系变形为例

刘先益<sup>1,2</sup>, 梁晓<sup>1\*</sup>, 干微<sup>1</sup>, 王根厚<sup>1</sup>, 徐德兵<sup>1</sup>, 魏玉帅<sup>1</sup>, 张宏远<sup>1</sup>, 李加斌<sup>1</sup>, 黄祖根<sup>1</sup>

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 伦敦大学学院地球科学系, 伦敦 WC1E 6BT

**摘要:** 北京西山中生代多期次变形强烈, 是探讨华北板块构造演化的重要窗口. 构造解析及 EBSD 组构分析表明, 黄院奥陶系发育 4 个期次变形, 第 2 期 NE-SW 向挤压变形为主体构造样式. 第 1 期为顶面指向 SEE 的简单剪切, 透入性面理  $S_1$  已基本置换层理  $S_0$ , 伴生  $110^\circ\sim 120^\circ$  缓倾拉伸线理; 自北向南, 第 2 期变形可划分为纵弯褶皱亚带和逆冲剪切亚带, 褶皱倒伏趋势和剪切条带显示上盘向 SW 逆冲; 第 3 期为沿面理  $S_2$  发生的 NNW 向正断层式滑脱, 第 4 期为近 N-S 向陡倾正断层系. 依据卷入变形的闪长岩脉最年轻锆石 U-Pb 年龄峰值 ( $\sim 116$  Ma), 结合区域地质资料, 认为: (1) 黄院奥陶系第 1 期 SEE 向剪切时代为早白垩世晚期; (2) 第 2 期晚白垩世 NE-SW 向挤压变形形成于燕山运动晚期, 可能与蒙古—鄂霍茨克洋关闭之后的陆陆汇聚相关.

**关键词:** 北京西山; 多期变形; 构造; 奥陶系; 白垩纪; 构造地质学.

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2021)04-1467-14

收稿日期: 2020-06-19

## Multiple-Stage Structural Superimposition of Cretaceous-Paleogene Deformation in West Hill of Beijing: An Example from the Ordovician Carbonate Rocks in Huangyuan, Zhoukoudian

Liu Xianyi<sup>1,2</sup>, Liang Xiao<sup>1\*</sup>, Gan Wei<sup>1</sup>, Wang Genhou<sup>1</sup>, Xu Debing<sup>1</sup>, Wei Yushuai<sup>1</sup>, Zhang Hongyuan<sup>1</sup>,  
Li Jiabin<sup>1</sup>, Huang Zugen<sup>1</sup>

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Department of Earth Science, University College London, London WC1E 6BT, The United Kingdom

**Abstract:** The West Hill of Beijing experienced multiple stages of deformation since Mesozoic, and is considered as an important window to decipher the tectonic evolution of the North China block. Structural analyses and the EBSD data show that the Ordovician carbonate rocks in Huangyuan of Zhoukoudian is characterized by four stages of deformation, among which the  $D_2$  NE-SW-striking compressional structures shaped the main structural style. The  $D_1$  is represented by top-to-the-SEE ( $110^\circ\sim 120^\circ$ ) shearing bands and the penetrative stretching lineation  $L_1$ , and the pervasive foliation  $S_1$  has replaced the sedimentary bedding  $S_0$ . From north to south, the  $D_2$  deformation can be subdivided into two subzones including buckle fold and ductile shear zone, showing a consistent kinematics of top-to-the-SE thrusting as indicated by the fold vergence and shearing bands, respectively. The

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金资助(No.2652018284);教育部双一流学科建设项目(No. 649209111028).

**作者简介:** 刘先益(1996—),男,本科生,地质与地球物理复合专业. ORCID: 0000-0002-3851-116X. E-mail: liuxianyi1996@gmail.com

\* **通讯作者:** 梁晓, E-mail: liangxcugb@163.com

**引用格式:** 刘先益, 梁晓, 干微, 等, 2021. 北京西山白垩纪—古近纪多期次构造叠加作用: 以周口店黄院奥陶系变形为例. 地球科学, 46(4): 1467-1480.

$D_3$  is featured by the NWW-directed normal slipping superimposed on the foliation  $S_2$ , and the  $D_4$  displays nearly N-S-trending high-angle normal faults. According to the youngest zircon U-Pb age peak ( $\sim 116$  Ma) of a diorite intrusion, it infers that the  $D_1$  happened in the late Early Cretaceous, and the  $D_2$  occurred in the Late Cretaceous, i.e., the Late Yanshanian stage, probably as a response to the continental-continental collision after the closure of the Mongol-Okhotsk Ocean.

**Key words:** West Hill of Beijing; multiple-stage deformation; structure; Ordovician; Cretaceous; structural geology.

## 0 引言

北京西山位于燕山板内造山带、太行山构造带与华北平原的衔接部位(图1),中生代以来多期次板内变形十分活跃,是解析华北板块构造演化的重要窗口(张长厚等,2006;Wang *et al.*, 2011;续海金等,2020)。周口店地区位于北京西山的南段(图1),是我国地质事业的发祥地(北京市地质矿产局,1988,周口店幅 1:50 000 区域地质及矿产地质调查报告;赵温霞,2003)。燕山期—新生代多个构造期次、多种构造体制和变形样式相互叠加,形成了复杂的变形格局(Wong, 1927, 1929;宋鸿林,1987, 1996;单文琅等,1991;Yan *et al.*, 2006, 2011;Wang *et al.*, 2011;舒坦等,2019;续海金等,2020)。燕山运动塑造了北京西山NE向区域构造样式(张长厚等,2006;Wang *et al.*, 2011),周口店地区表现

为 170~150 Ma NWW 向挤压变形(张长厚等,2006;Wang *et al.*, 2011)与 133~128 Ma 房山岩体的NW向侵位变形,如北岭新月形叠加向斜、车厂韧性剪切带等(Yan *et al.*, 2006, 2011;He *et al.*, 2009)。早白垩世(136~135 Ma)之后,华北板块构造体制发生重大转折,克拉通遭受大规模破坏(刘俊来等,2006;朱日祥等,2012;林伟等,2013),普遍发育变质核杂岩、断陷盆地等近EW向伸展构造(翟明国等,2003;万天丰,2004;刘俊来等,2006;董树文等,2007),房山岩体西侧发育时代为 130~110 Ma 的 $\sim 110^\circ$ SEE 拉伸线理(Wang *et al.*, 2011)。白垩纪末以后(70 Ma 至今),北京西山发育脆性伸展构造,周口店见NS向辛开口同沉积正断层(Yan *et al.*, 2006;Wang *et al.*, 2011)。另外,部分学者认为北京西山板内变形始于印支运动(宋鸿林,1987, 1996;单文琅等,1991),体现为晚三叠世的近水平韧性剪

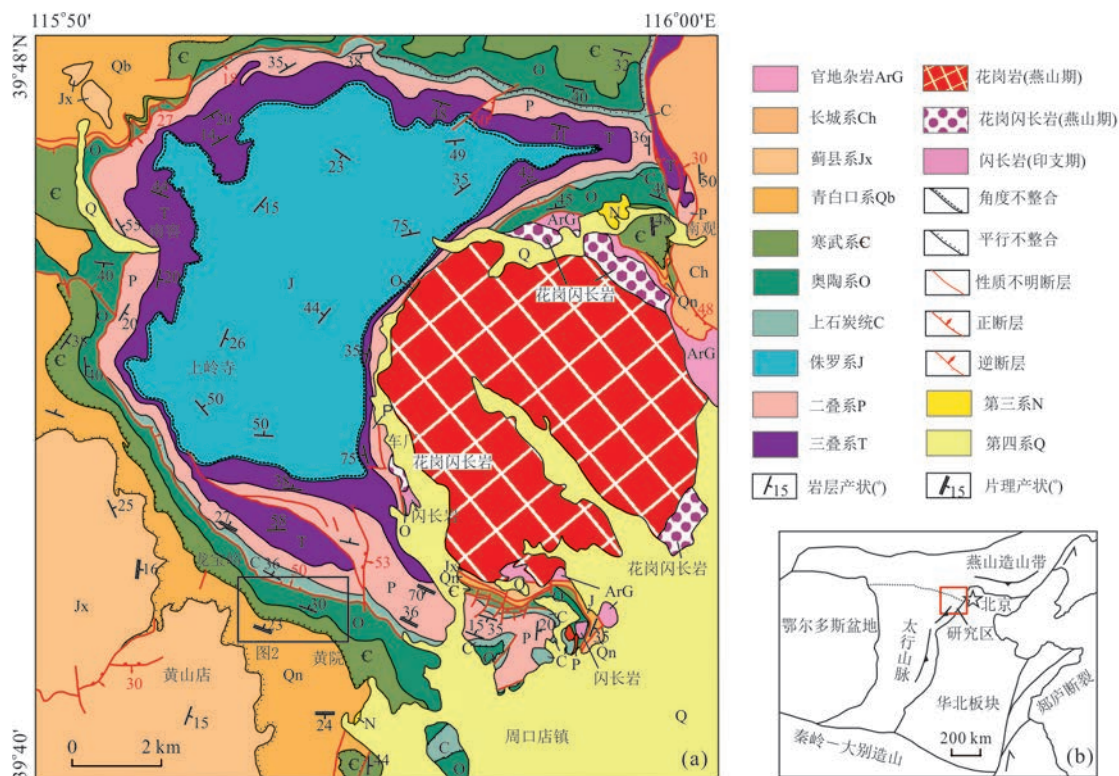


图1 周口店地区地质—构造简图(a)及大地构造背景(b)

Fig.1 Regional geology of Zhokoudian area (a) and its location in North China craton (NCC)(b)

切带——“褶皱层”与三叠纪末近 NS 向挤压形成的 EW 纵弯褶皱、逆冲断层(Yan *et al.*, 2006, 2011). “褶皱层”由中元古界一下三叠统组成,垂向上表现为 3 层模式的伸展拆离构造(宋鸿林, 1996; Yan

*et al.*, 2006).

综上,北京西山及周口店地区中生代构造变形历史复杂,变形期次的划分仍然存在一定争议(Shan *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2011; 舒坦等,

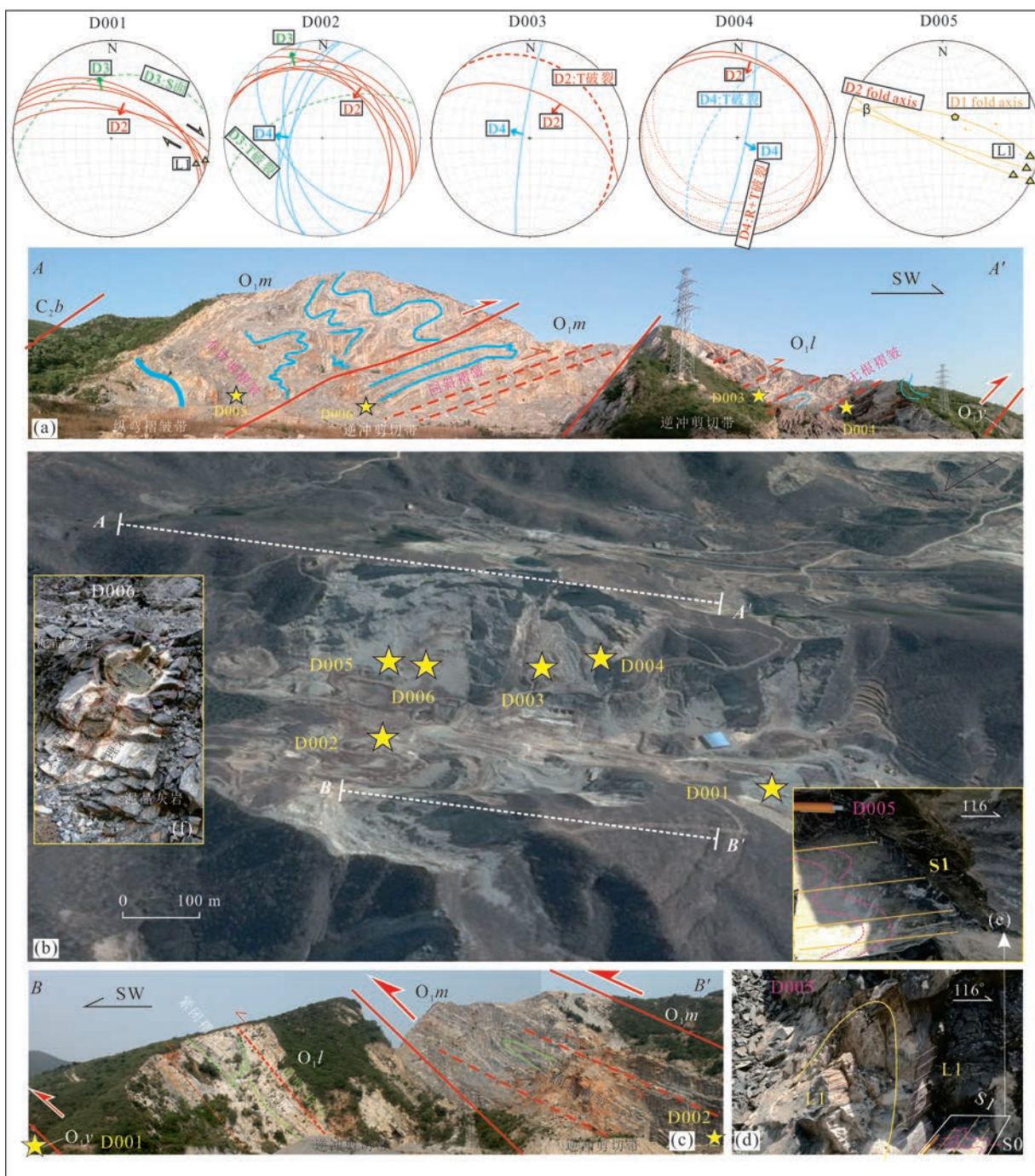


图 2 黄院金子沟地区宏观构造样式及各地质点构造要素吴氏网投影

Fig.2 Macro structural style and polar stereographic projection net for each geological element in Jinzigou, Zhoukoudian  
 a. 金子沟东侧自然剖面 AA'; b. Google 地图显示的观察点和自然剖面位置, GPS 点位详见附表 1; c. 金子沟西侧自然剖面 BB'; d~e. D005 观察点马家沟组灰岩 D<sub>2</sub> 期近 EW 向纵弯褶皱及岩层面上所显示的矿物拉伸线理 L<sub>1</sub>, 近水平断面显示有 D<sub>1</sub> 期倾型流变褶皱, 白色岩层为大理岩化灰岩, 表面存在连续分布的片状绢云母; f. D006 观察点马家沟组泥晶灰岩中的闪长岩脉石香肠, 岩脉边界存在热接触变质, 灰岩发生大理岩化

2019;续海金等,2020),部分构造变形的时代主要依据构造层的划分而厘定(宋鸿林,1987,1996;Yan *et al.*, 2006),缺乏同位素年代学的精确制约(Shan *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2011).另外,已有构造解析集中在燕山期变形(中侏罗世—早白垩世),即NE向或EW向挤压逆冲构造和后期伸展构造与岩浆事件(Yan *et al.*, 2006, 2011;张长厚等,2006;He *et al.*, 2009;Wang *et al.*, 2011;舒坦等,2019;续海金等,2020).再者,最新研究表明华北板块燕山运动可持续到晚白垩世(董树文等,2007),然而北京西山晚白垩世变形鲜有报道,并且缺乏精细运动学、年代学约束.

周口店黄院村金子沟出露连续的寒武纪—奥陶纪地层,保存着白垩纪—新生代多期次构造变形记录(图2).本文力图通过露头和显微尺度的构造解析,精细解剖不同期次变形的样式、运动学与叠加关系,并结合闪长岩脉锆石U-Pb定年,尝试建立黄院奥陶系变形期次,着重对晚白垩世极性向南的逆冲剪切带展开调查,为北京西山晚燕山期变形期次划分提供新佐证.

## 1 区域地质背景

华北板块夹持于北侧的中亚造山带和南侧的秦岭—大别造山带之间,东侧为NNE向左行滑动的郯庐断裂带所切割,北部被NEE向的燕山—阴山板内造山带所截切,中部分布着NNE向的太行山构造隆起带(图1b).周口店地区位于燕山、太行山两个构造带的接合部位(图1b),出露有较完整的华北型结晶基底和沉积盖层(北京市地质矿产局,1988,周口店幅1:50 000区域地质及矿产地质调查报告;赵温霞,2003).早白垩世(136~128 Ma)房山花岗岩株南北两侧分布有变质基底—新太古界官地杂岩(图1),斜长片麻岩~2 500 Ma的锆石U-Pb年龄代表了克拉通基底形成时代(Yan *et al.*, 2006).中元古代—晚古生代沉积地层以低角度拆离断层和变质基底相接触(Yan *et al.*, 2006),地层时代相对连续,显示这一时期为华北地台较稳定的盖层沉积时期.中上元古界为一套滨海相沉积,包括长城系(石英砂岩为主的碎屑岩)、蓟县系(白云岩夹细碎屑岩)和上元古界青白口系(细碎屑岩、灰岩).青白口系与上下地层之间均为平行不整合面,分别代表芹峪运动、蓟县(晋宁)运动.下古生界(寒武系,奥陶系地层)主要表现为浅海相的碳酸盐岩夹少量细碎屑

岩,与上覆石炭系—二叠系之间为加里东期升降形成的区域性平行不整合面,后者由潮坪—泻湖相的泥岩、碳酸盐岩逐渐过渡为河流—湖沼相的碎屑岩夹煤层.上覆的三叠系主要为一套含砾岩的陆相红层,侏罗系为陆相的火山岩、碎屑岩(北京市地质矿产局,1991).北京西山中生代主要经历了印支期、燕山期的变形(Yan *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2011),地层时代不连续,并且多以角度不整合相接触.

周口店地区主体构造样式为北岭复式向斜,由早期近EW向线状向斜被后期近圆形房山岩株NW斜向侵位改造为新月形.其核部地层为中侏罗统九龙山组,北翼构造行迹呈近EW向,南翼构造行迹由NW向逐渐转为EW向(图1).黄院位于北岭向斜的南翼,地层呈NW-SE向展布,主要出露上元古界青白口系绿片岩相碎屑岩和大理岩、寒武系—下奥陶统弱变质碳酸盐岩(图1).

## 2 奥陶系构造变形

金子沟奥陶系具有多期次变形叠加的特征,但其宏观构造样式主要表现为一期SEE向展布的纵弯褶皱和顶面向SW逆冲的韧性剪切带(图2a,图2c),岩石形成了一组透入性的剪切面理 $S_2$ ,置换了前期SEE向韧性剪切变形(图3a,图3b,图4a,图5a,图5b,图6a),后两期脆—韧性伸展正断层叠加切割逆冲剪切变形(图3c,图3d,图3e,图5d,图6d,图6e).不同露头的观察均表明:奥陶系3个组(马家沟组( $O_1m$ )、亮甲山组( $O_1l$ )、冶里组( $O_1y$ ))的分界面具有主逆冲滑动面的特征,组内岩层因递进的简单剪切,发育较为连续的紧闭、同斜褶皱和石香肠,并具有“层内”或“片内”构造形态(图2a,图5a).自然剖面上,3个组的逆冲剪切带产状基本一致,以中等角度倾向NE或NEE,并表现向SW的逆冲滑动(图3a,图3b,图5a,图5b,图6a).其中,马家沟组从北向南,近圆柱状斜歪褶皱逐渐向SW倒伏,连续过渡为南侧的韧性剪切带(图2a).

### 2.1 马家沟组( $O_1m$ )变形

马家沟组变形大致可划分为南北两个亚带,即北侧的纵弯褶皱亚带和南侧的逆冲剪切带(图2a).北亚带主要表现两期变形的叠加,但以第2期连续的SEE向纵弯褶皱为主体样式(图2a).自然剖面中碳酸盐岩层形成了多个序次的弯滑褶皱,转折端多呈中常—开阔,少量紧闭褶皱,总体形态多变,平行—顶厚型都有分布,局部发育不协调褶皱.位态

呈斜歪状,枢纽 NWW 向缓倾(例如图 2 D005),并且靠近南亚带,褶皱顶部逐渐向 SW 倒伏,轴面最终与剪切带近平行,反映上盘向 SW 的逆冲滑动.更小尺度的水平截面上,褶皱层理  $S_0$  已经被一组透入性变形面理  $S_1$  所置换,闪长岩和大理岩围岩形成了连续状的紧闭一同斜小褶皱,其位态随褶皱层产状而异,近直立岩层中呈倾竖型,褶皱轴面近 NWW-SEE 向展布(图 2d,图 2e),枢纽向 NE 陡倾.另外,面理  $S_1$  表面发育一组透入的近水平拉伸线理  $L_1$  (倾伏角  $\leq 20^\circ$ ),倾伏向集中在  $100^\circ \sim 120^\circ$  之间,大致平行于第 2 期纵弯褶皱的枢纽(图 2d).面理  $S_1$  伴生的片内褶皱轴面与线理  $L_1$  平行,枢纽与  $L_1$  近垂直,为典型 B 型褶皱,指示 SEE 向的简单剪切(图 2d,图 2e).

南亚带为 NE 走向的逆冲剪切带,宏观上较早期 SEE 向纵弯褶皱卷入其中,递进剪切变形后轴面与剪切带一致,并被明显拉长为同斜状(图 2a,图 2c).米级露头中见碳酸盐岩发育一组剪切面理  $S_2$ ,大致平行于层理  $S_0$ ,横向上因岩层能干性差异,透入性不均匀(图 3a,图 3b).部分露头中,面理  $S_2$  的近 EW 向截面(YZ 应变面)仍残留有第 1 期的 EW 向剪切条带,如黑色方解石脉体褶皱显示上盘 E 向的剪

切滑动(图 3e).剪切带内包夹的闪长岩脉发生脆—韧性变形后呈断续分布的石香肠,延伸方向大致与面理  $S_2$  一致,但相邻香肠体的排列明显受次级破裂或滑动带的控制,主要发育  $R$ 、 $P$  破裂,偶见  $R'$ 、 $D$  破裂(图 3a).依据次级破裂系统的组合以及运动学特征可以判断出剪切带上盘向 SW 发生逆冲滑动.后两期变形( $D_3$  和  $D_4$ )均表现为伸展构造,岩石变形行为并且由脆—韧性转变为韧—脆性.第 3 期为沿剪切面  $S_2$  向 NW 的滑动(图 3c,图 3d),第 4 期形成了一组向西陡倾的正断层系,横向切穿了剪切带,闪长岩脉被切断为矩形断块状(图 3f).

## 2.2 亮甲山组( $O_1l$ )变形

亮甲山组以倾向 NE 的韧性剪切带为变形样式,产状与地层界限近一致,陡于北侧马家沟组南亚带(图 2a,图 2c).灰黑色泥晶灰岩以塑形流变为变形特征,剪切面理  $S_2$  十分透入,白色方解石脉作为能干层强烈石香肠化,次级破裂  $R$  或  $C'$  十分发育,错断脉体为细长的菱形块体,并在递进的剪切中发育细长拖尾(图 4b).白云岩层能干性较强,以脆—韧性变形为特征,宏观上形成了连续的剪切褶皱,均呈紧闭一同斜状的斜歪水平褶皱,夹持于剪切带及其面理  $S_2$  之间(图 2c,图 5a),部分递进变形

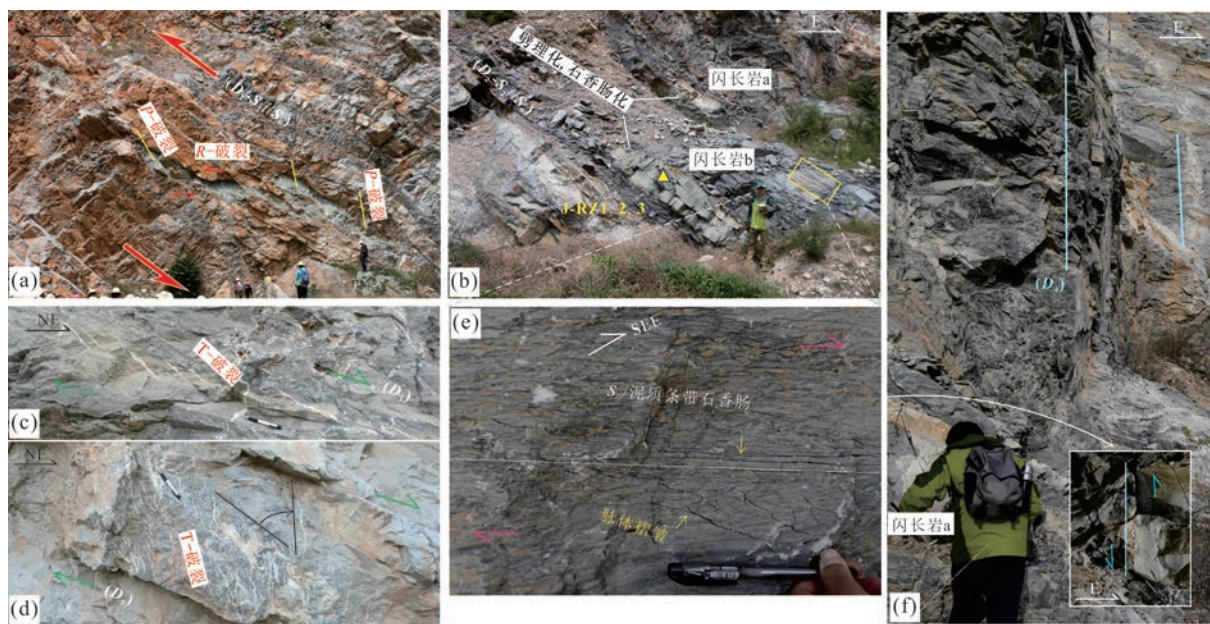


图 3 下奥陶统马家沟组各期次构造变形特征

Fig.3 Structural characteristics of each deformation phase in Majiagou Formation (Lower Ordovician)

a. 显示  $D_2$  期指向 SW 的逆冲运动特征,闪长岩脉石香肠化,并发育有  $P$ 、 $R$  等次级破裂;b. 显示灰岩中较为透入的逆冲剪切面理  $S_2$ ,其中的闪长岩脉石香肠为锆石定年样品;c~d. 为  $D_3$  期沿剪切面理  $S_2$  发生的 NNW 向的正断层式滑动;e. 为图 2b 中岩层近 EW 向横截面,黑色脉体褶皱及碎斑系显示  $D_1$  期上盘向 E 的剪切滑动;f. 为向西陡倾的高角度正断层,切割(B)中闪长岩香肠体为矩形块体,沿断层面形成小型牵引褶皱

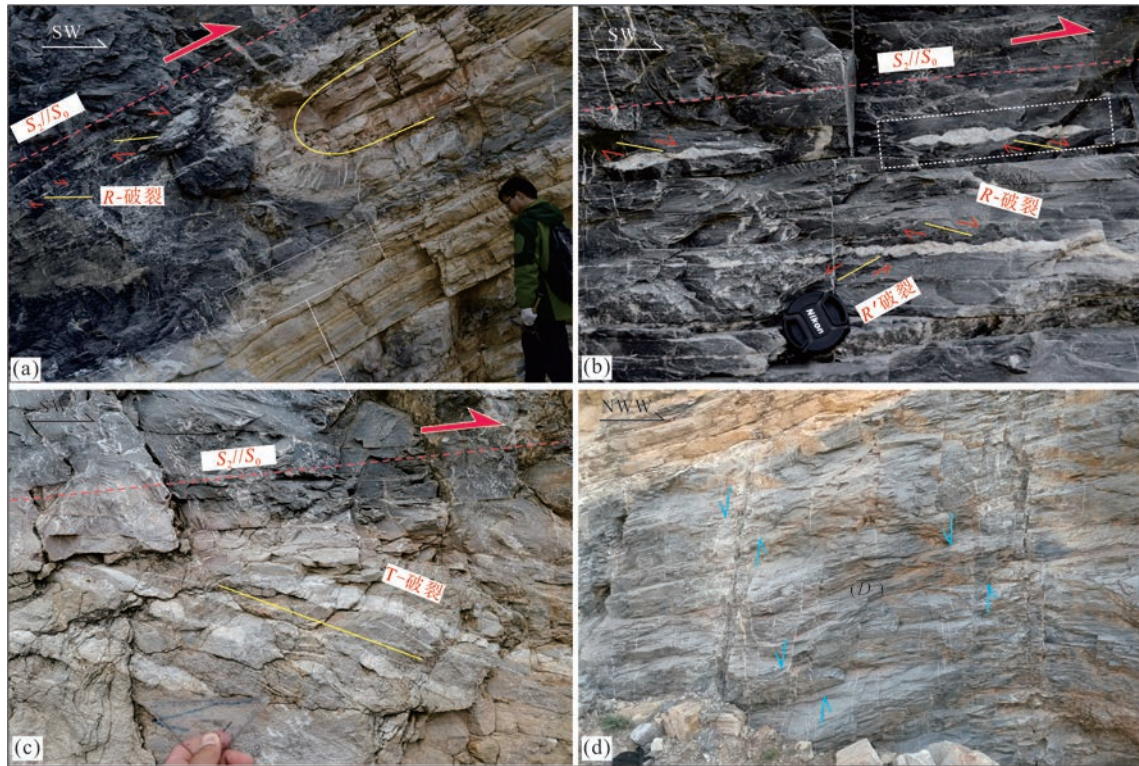


图 4 下奥陶统亮甲山组各期次变形特征

Fig.4 Structural characteristics of each deformation phase in Liangjiashan Formation (Lower Ordovician)

a. 泥晶灰岩形成的  $D_2$  期逆冲剪切面理  $S_2$ , 白色方解石脉石香肠化, 次级破裂  $R$  显示上盘向南西的逆冲, 面理中夹有白云质灰岩形成同斜褶皱, 下部的白云质灰岩层出现一组雁列式张裂  $T$  (图 4c); b. 面理  $S_2$  伴生的方解石香肠体, 发育两组里德尔剪裂; d. 为一组  $NW$  倾向的高角度正断层, 伴生有雁列式的张裂脉

为“无根”钩状(图 2a). 露头中见白云岩经常发育一组雁列式的张裂脉和少量  $R$  破裂, 雁列带明显在灰岩与白云岩分界面附近发生尖灭(图 4a). 通过对剪切面  $S_2$ 、 $R$  和  $T$  破裂的统计和吴氏网投影(图 2 D003, D004), 发现剪切带以逆冲滑动为主导, 平移位移量十分微弱. 另外, 金子沟西侧自然剖面中, 同斜褶皱与石香肠的不协调叠置关系反映剪切带具有压扁与逆冲剪切的复合特征(图 2c).

亮甲山组后期叠加有两期的脆-脆性拉伸变形, 前期变形继承在剪切带面理  $S_2$  之上, 沿面理发生了  $N$  向正断层式滑动, 可见一组密集的线状擦痕和正阶步(图 4c). 后一期脆性变形表现为  $NW$  或  $SEE$  向陡倾的正断层或剪节理, 常次生一组雁列式的张裂脉, 吴氏网投影显示沿倾向拉张作用(图 4d).

### 2.3 冶里组 ( $O_2y$ ) 变形

冶里组变形与亮甲山组相似,  $NE$  向逆冲剪切面理  $S_2$  十分透入, 白云质能干层强烈石香肠化,  $S$  型不对称褶皱和不对称眼球的叠瓦状构造显示上盘向  $SSW$  发生逆冲(图 5a). 第 1 期构造被改造较为彻底, 面理  $S_1$  已被区域性面理  $S_2$  替换, 但片内微劈石

域仍保留早期近  $EW$  向剪切条带(图 5b), 并且  $S_2$  表面保留有一组透入性的  $SEE$  向 ( $100^\circ \sim 110^\circ$ ) 缓倾拉伸线理  $L_1$  (图 5d, 图 5e). 另外, 部分露头可见 2 期面理置换形成的褶皱理构造(图 5f), 面理  $S_1$  与层理  $S_0$  呈近平行状, 发育紧闭状小褶皱. 在面理  $S_2$  的  $YZ$  应变面上, 白云岩和方解石出现不对称石香肠化, 大部分指示上盘  $E$  向剪切滑动(图 5b), 但部分岩石剪切指向发生了反转(图 7a), 可能反映第 2 期褶皱理对面理  $S_1$  的叠加效果(图 6a). 冶里组后期叠加有一期  $NNW$  向滑动的脆性剪切变形, 其运动学特征与马家沟组、亮甲山组沿面理  $S_2$  的正断层式滑动一致, 但变形层次明显加深, 泥晶灰岩普遍塑形流变, 并发育良好的  $S-C$  组构(图 5a, 图 5c),  $S$  面表现有类似  $P$  破裂的逆冲滑动, 改造面理  $S_2$  为挠曲状, 岩层表面可见一组间隔状的皱纹线理(图 5c, 图 5d).

### 2.4 构造期次的厘定

露头和显微尺度构造解析表明, 金子沟奥陶系主要发育 4 个期次的变形, 从早到晚具有从脆性向脆性递变的特点(表 1, 图 6). 第 1 期 ( $D_1$ ) 为近  $EW$  向的脆性剪切变形, 冶里组和马家沟组均发育有  $EW$

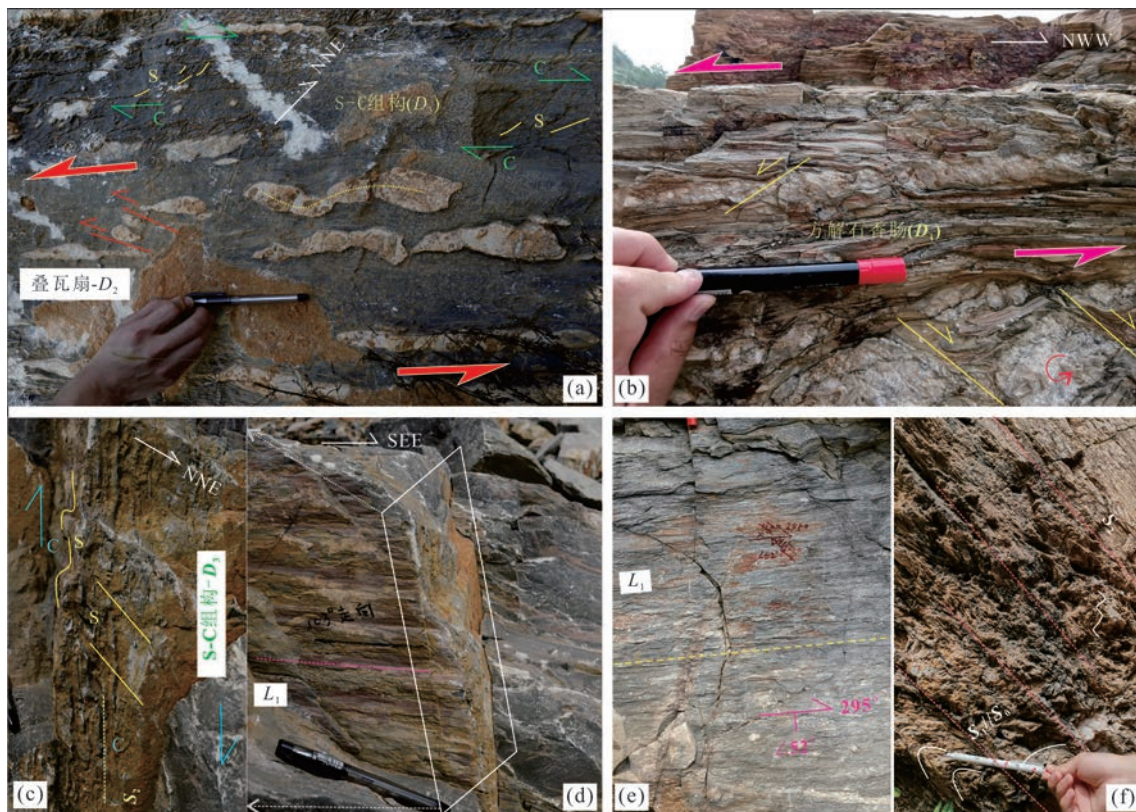


图 5 下奥陶统冶里组多期次变形特征

Fig.5 Structural characteristics of each deformation phase in Yeli Formation (Lower Ordovician)

图 a 显示两期次变形的叠加,下部硅质条带石香肠化,小型叠瓦构造指示  $D_2$  期上盘 SW 向的逆冲剪切,上部泥晶灰岩形成的 S-C 结构显示  $D_3$  期沿面理  $S_2$  向 NNW 滑脱;图 b 为面理  $S_2$  的近 EW 向截面,方解石不对称香肠显示  $D_1$  期上盘 SEE 向的剪切;图 c 为图 d 的垂向截面,显示  $D_3$  期沿面理  $S_2$  朝 NNW 向滑脱形成 S-C 结构, S 构造面发生微弱滑动,改造面理  $S_2$  为“Z”形弯曲(图 5d). 图 d~e 为面理  $S_2$  显示的 SEE 向透入性拉伸线理;图 f 为面理  $S_2$  对  $S_1$  置换形成的褶理. 图 b, 图 d 和图 f 显示的露头位于金子沟东侧

表 1 周口店金子沟奥陶系变形期次划分

Table 1 Summary of deformation phases in Jinzigou, Zhoukoudian

期次	变形样式	运动学/应力场	构造相	时间
$D_1$	近 EW 剪切条带,面理 $S_1$ , $100^\circ\sim 120^\circ$ SE 向拉伸线理	上盘向 SEE 滑动	韧性变形—流变	130~110 Ma
$D_2$	近 EW 向纵弯褶皱、逆冲型韧性剪切带,面理 $S_2$	NNE-SSW 向挤压,指向 SW 的逆冲	韧性变形为主	晚白垩世
$D_3$	沿面理 $S_2$ 的 NNW 向伸展滑动	上盘 NNW 向正断式滑动	脆—韧性	晚白垩世
$D_4$	近 NS 向陡倾的正断层系	近 EW 向伸展	脆性变形为主	白垩纪末—新生代(70~60 Ma)

向剪切条带、~110°倾伏的透入性拉伸线理(图 2d, 图 7c). 马家沟组北亚带水平断面上显示白云岩能干层形成枢纽向 NE 倾伏的 B 型褶皱(图 2d, 图 2e), 南亚带和冶里组面理  $S_2$  的 EW 向截面上,白云岩薄层、方解石脉体递进变形为 Z 形不对称褶皱和不对称石香肠,指示上盘向东滑动的剪切指向(图 3e, 图 7b, 图 8a). 第 2 期变形( $D_2$ )为近 NS 向水平挤压,金子沟自北向南发育 SEE 向纵弯褶皱和逆冲剪切带(图 2a, 图 2c),基本置换第 1 期变形( $D_1$ )及面理  $S_1$ (图 3a, 图 3b, 图 5a, 图 5b, 图 5c, 图 7a). 马家沟组北

亚带纵弯褶皱以  $S_1$  为变形面,顶部渐倒向南亚带发生倒伏(图 2a). 马家沟组南亚带、亮甲山组和冶里组发育指向 SW 的逆冲剪切带(图 2a, 图 2c, 图 3a, 图 3b, 图 5a, 图 5b, 图 5c, 图 7a),泥晶灰岩塑形流变发育透入性剪切面理  $S_2$ ,白云岩能干层同斜褶皱递进变形后呈无根钩状、不连续石香肠(图 3a, 图 3b, 图 5a, 图 5b, 图 7a). 由于面理  $S_1$  和  $S_2$  劈理域未见新生变质矿物,主要为泥质薄膜所覆盖(图 7),推断变形条件在亚绿片岩相以下.

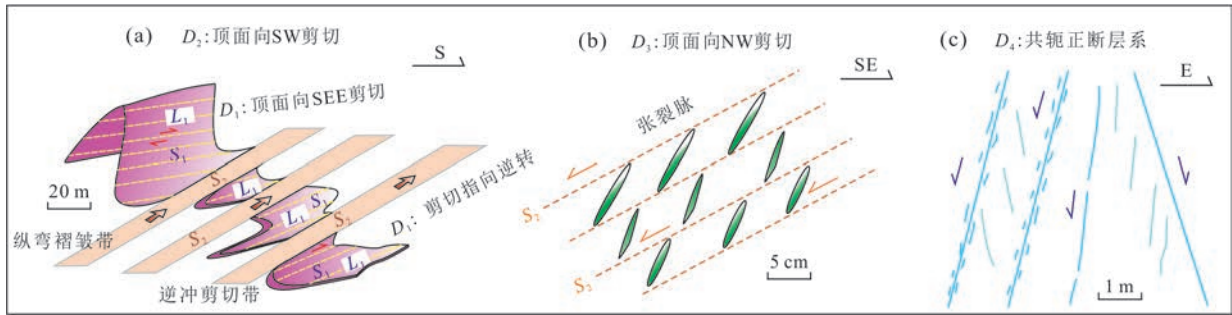


图6 黄院子金子沟奥陶系多阶段变形的卡通图解

Fig.6 Cartoons to explain Ordovician multi-phase deformation in Jinzigou, Zhoukoudian area

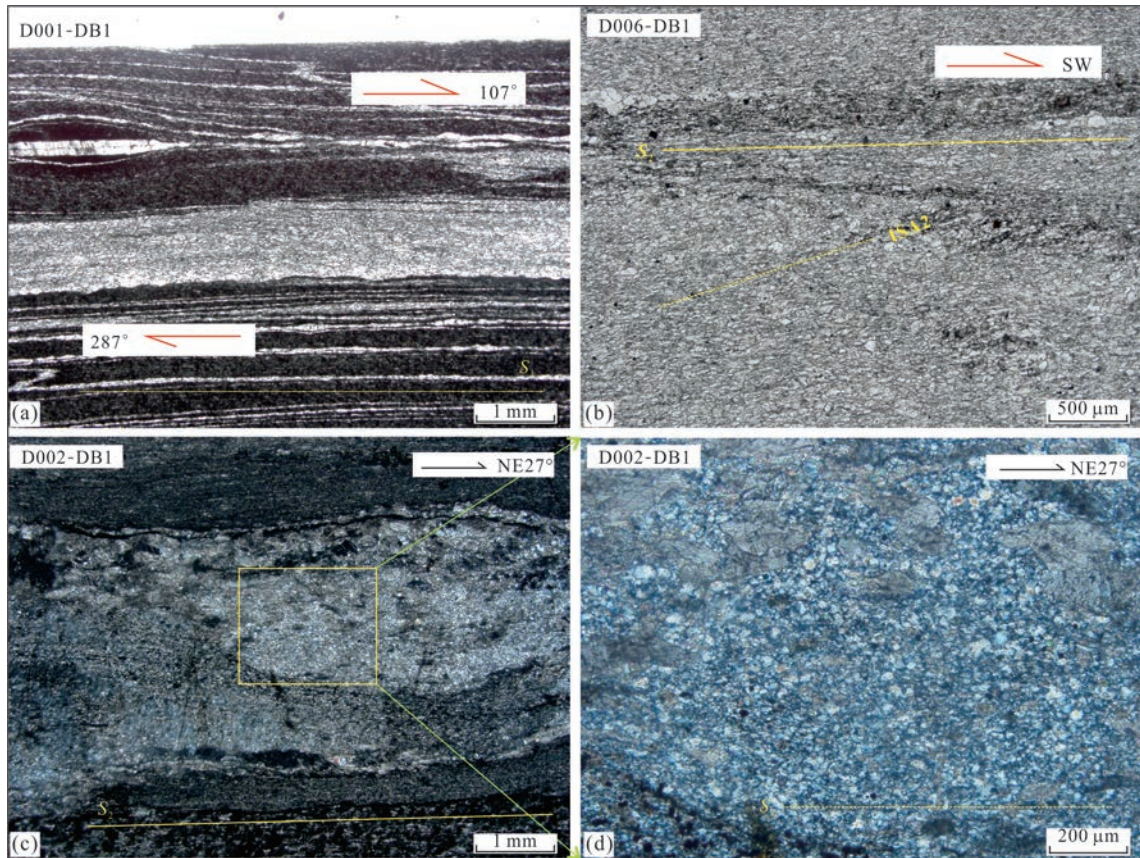


图7 奥陶系灰岩的显微变形特征

Fig.7 Microscopic deformational features of Ordovician limestones

a. D001 观察点冶里组灰岩定向薄片,白色方解石条带发生不对称香肠化,显示上盘向 W 的剪切(构造指向发生了逆转,见图 6);b. D006 点马家沟组灰岩定向薄片,面理  $S_2$  与动态重结晶方解石颗粒瞬时拉伸应变轴 (ISA2) 的关系显示上盘向 SW 的逆冲.c,d.D002 观察点马家沟组灰岩定向薄片,石英脉条带出现了普遍的亚颗粒化

第 3 期 ( $D_3$ )、第 4 期 ( $D_4$ ) 分别表现为脆—韧性、脆性伸展变形,它们在金子沟奥陶系分布较广. 第 3 期 ( $D_3$ ) 向 NNW 的正向剪切滑动继承在面理  $S_2$  之上,片内的 S-C 组构、雁列式张裂脉叠加第 2 期逆冲变形(图 3c,图 3d,图 6a,图 6c). 第 4 期 ( $D_4$ ) NWW 或 SEE 向陡倾的正断层以破劈理的形式叠加在前 3 期变形之上(图 3f,图 5d),尽管单条断层

的规模和位移量有限,但总体上类似于阶梯状正断层的组合形式,可能反映区域尺度一次脆—韧性伸展变形事件.

### 3 显微变形及 EBSD 组构

野外采集了马家沟组南亚带、冶里组发生强烈剪切的灰岩定向标本,显微镜镜下观察它们普遍为



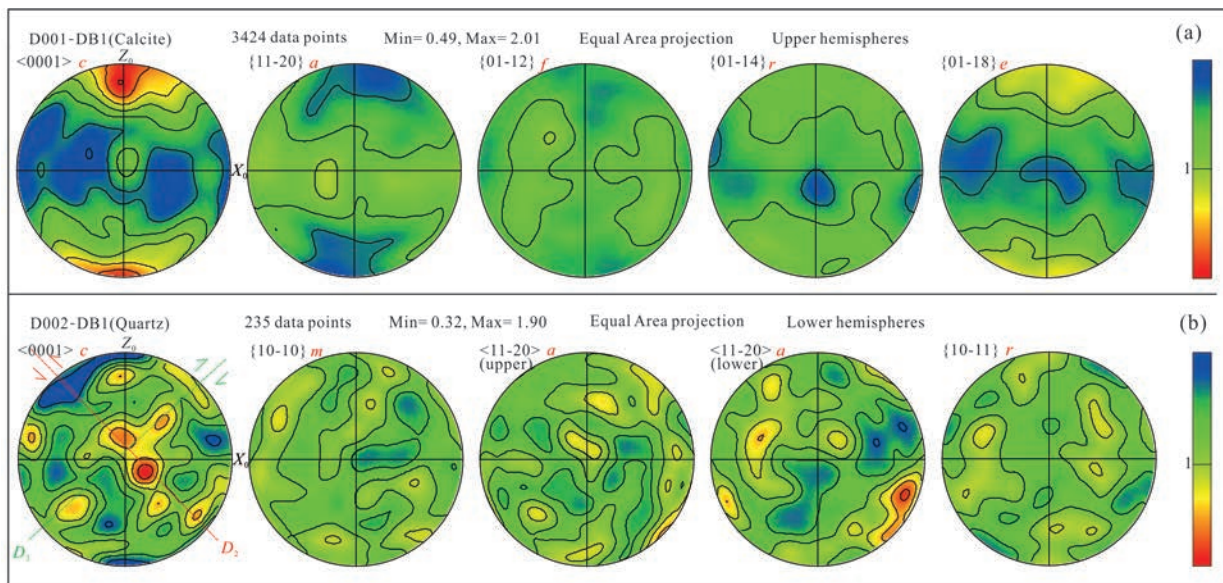


图 8 金子沟奥陶系灰岩定向薄片 EBSD 结构分析显示的结晶学优选(CPO)

Fig.8 The analytical results of crystallographic preferred orientation (CPO) for calcite and quartz in oriented thin-sections of Jinzigou limestone

a.D001 冶里组方解石的 EBSD 极图;b.D002 马家沟组石英的 EBSD 极图

糜棱岩—超糜棱岩,方解石、石英动态重结晶而高度细粒化(图 7)。冶里组标本(D001-DB1)近 EW 向定向薄片中,灰岩、泥质成分均呈细长的剪切条带,横向上呈韵律状重复,灰岩条带 C'破裂指示上盘向 SEE 向的剪切滑动,内部方解石普遍动态重结晶,压扁拉长后与剪切条带平行(图 7a)。马家沟组南亚带标本(D002-DB1)北东向切片也发育类似的剪切条带,泥质、方解石/石英质分异为域状成分条带,石英条带完全亚颗粒化(图 7c,图 7d)。另一马家沟组标本(D006-DB1)北东向切片中方解石彻底细粒化,亚颗粒旋转重结晶新晶粒呈眼球状或板条状,其所代表的瞬时拉伸方向(ISA)与剪切条带 S<sub>2</sub>小角度相交,指示上盘向 SW 的逆冲滑动(图 7b)。

D001 薄片的方解石 EBSD 晶格优选具有明显的斜方对称性(相对于剪切面 XY)(图 8a)。C 轴 <0001> 呈 2 个较宽阔的点极密,垂直于剪切面理 XY 和拉伸线理 X, a 轴呈宽阔的大圆环带,平行于 XY 面, f 面(e 双晶)法线分布均匀,大致呈 2 个对称的单环带,分布于 YZ 面两侧, f 面(e 双晶)法线具有与 C 轴类似的点极密,但密度明显降低。r 面法线呈 2 个宽阔的小圆环带,分布在 Z 轴附近。这些特征表明岩石显微尺度的滑移系很可能为 c<a> 及 e<a>, 并指示低温共轴变形(Wenk *et al.*, 1987; Cao *et al.*, 2013)。然而,鉴于薄片所显示的简单剪切变形(图 5,图 8a),推测晶格优选代表的 D<sub>1</sub>期 SEE 向剪切可

能受到了 D<sub>2</sub>期 SW 向逆冲剪切的明显改造。D002 薄片石英 EBSD 结构反映多期次变形的叠加(图 8b), c 轴极密图主要为平行 YZ 面的单环带和 Z 轴点极密或小圆环带的复合,很可能指示中低温菱面<a>滑移系后期被低温底面<a>滑移系所叠加。两期晶格优选(CPO)都具有单斜对称的特征,单环带可能显示早期(D<sub>2</sub>)上盘向 SW 的逆冲滑动,小圆环带可能反映 D<sub>3</sub>期上盘向 NE 的正断层式滑动。

### 4 闪长岩脉锆石 U-Pb 定年

在马家沟组南亚带闪长岩香肠体中采集了 3 块新鲜无裂隙的样品 J-RZ1、J-RZ2、J-RZ3(图 3a,图 3b),切除风化表皮后粉碎至 80 目后,经淘洗、电磁选等常规方法,每个样品都分选出大于 200 粒的锆石,在显微镜下挑选裂纹较少、透明度好、干净的锆石制成环氧树脂样品靶,对每个靶样加入国内标准锆石 Qinghu 为监控标样。打磨、抛光靶样后暴露锆石中心环带,再对其拍摄透射光、反射光和阴极发光(CL)图像。3 个样品锆石的形态、结构都较为相似,绝大部分呈长柱状或针状,内部发育规则的窄条状岩浆振荡环带(图 9),属于典型浅层次脉岩成因,与野外地质特征一致。锆石 U-Th-Pb 同位素分析是在中国地质大学(北京)苏犁教授监管的 LA-MC-ICP-MS 实验室进行,使用美国 New Wave 公

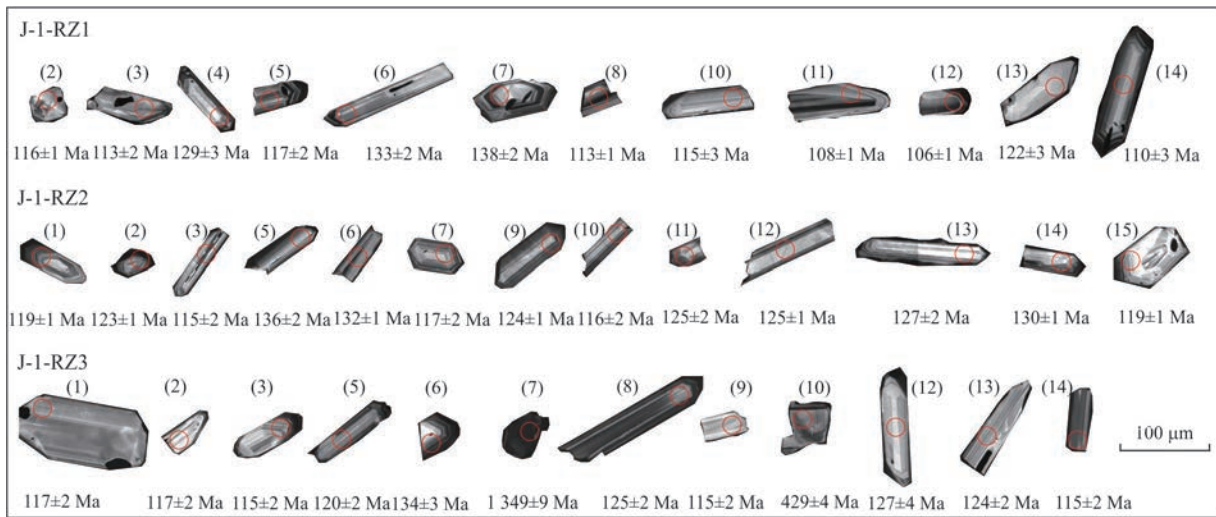


图9 马家沟组南亚热带闪长岩石香肠的锆石阴极发光图像(样品野外特征见图3b)

Fig.9 Cathodoluminescence (CL) of zircon in deformed diorite from southern subzone of Majiagou Formation (see outcrop photo of samples in Fig.3b)

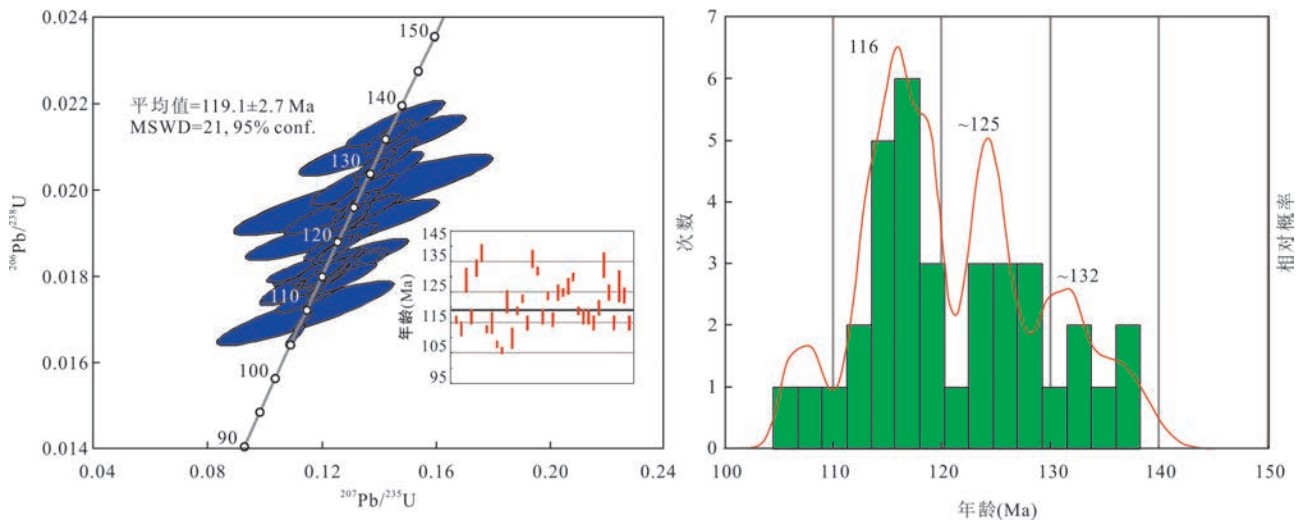


图10 闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图和  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄统计直方图

Fig.10 Zircon U-Pb concordia and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age diagram

司生产的 UP 193 SS 型激光器, 激光波长为 193 nm, He 载气流速为 0.89 L/min, 激光束斑直径 36  $\mu\text{m}$ , 激光频率为 10 Hz, 预剥蚀时间为 5 s, 剥蚀时间为 45 s. 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 为美国 Agilent 公司生产的 7500a 型, Ar 辅助气流速为 1.13 L/min, RF 功率为 1 350 W. 试验前反复对比 3 类锆石图像, 挑选裂隙、包裹体少的锆石进行测试, 尽量将激光束选择在环带棱角处 (图 9). 使用标准锆石 91500 作为外标进行 U-Pb 同位素比值校正,  $^{204}\text{Pb}$  校正方法同 Andersen (2002). 实验数据处理借助 Glitter 4.4.1 软件完成, 使用 Ludwig 研发的 Iso-plot4.0 程序绘制 U-Pb 年龄谐和图和平均值计算.

绝大部分锆石的表面年龄 ( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ) 为  $\sim 120$  Ma, 代表岩脉结晶成因, 2 个继承或捕获锆石表面年龄分别为  $1\ 349\pm 9$  Ma ( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ )、 $429\pm 4$  Ma ( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ) (附表 2). 剔除不谐和度  $> 10\%$  的锆石年龄, 发现岩脉成因锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄分布在 106~138 Ma 的区间内 (附表 1), U-Pb 谐和图显示锆石未发生明显的 Pb 丢失, 但年龄较为分散, 所取得的谐和年龄  $119.1\pm 2.7$  Ma 具有很大误差 (MSWD=21) (图 10). 然而,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄直方图及概率曲线显示 3 个明显的峰值, 依次为  $\sim 132$  Ma、 $\sim 125$  Ma 和  $\sim 116$  Ma, 其中最晚峰值具有高概率性 (图 10). 鉴于金子沟与早白垩世 (136~

128 Ma)房山岩体(蔡学林等, 2005; Yan *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011)的毗邻关系(图2),以及南窖闪长岩体获得的  $128.5 \pm 1.5$  Ma (Davis *et al.*, 1998, 2001)、 $136 \pm 1$  Ma (王瑜和李锦轶, 2007)锆石年龄, 推测 $\sim 116$  Ma很可能代表了金子沟闪长岩脉的形成年龄, $\sim 132$  Ma、 $\sim 125$  Ma可能反映继承或捕获锆石成因。

## 5 讨论

### 5.1 变形时代

周口店地区中生代变形主要包括5个期次(Yan *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2011),其中燕山期变形可划分为2个阶段:(1)晚侏罗世—早白垩世NW向逆冲(张长厚等, 2006; Wang *et al.*, 2011)或近NS向挤压(舒坦等, 2019; 续海金等 2020);(2)早白垩世房山岩株NW向侵位(He *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2011)和SEE向伸展(王瑜和李锦轶, 2007; Wang *et al.*, 2011; 续海金等 2020)。黄院位于新月形北岭叠加向斜的南翼,已有区域构造解析表明黄院奥陶系可能记录了燕山期2个阶段的构造变形:早期NS向挤压形成的近EW向褶皱与晚期房山岩体的NW向侵位叠加(舒坦等, 2019; 续海金等, 2020)。露头及显微尺度的观测显示黄院奥陶系的透入性变形主要始于燕山期第2阶段,其中第2期( $D_2$ )NW-SE向展布的纵弯褶皱和逆冲剪切带、第3期( $D_3$ )沿面理 $S_2$ 向N或NNW的滑脱在已有周口店地质文献中鲜有报道。

周口店地区广泛出露与黄院奥陶系第1期( $D_1$ )剪切类似的伸展构造,例如房山岩体SW部、NW部、N部均保留稳定的SEE指向的剪切和拉伸线理(王瑜和李锦轶, 2007; Wang *et al.*, 2011),但其形成时代仍存在较大争议(Shan *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2011)。早期认为SEE向剪切是印支期( $T_{2-3}$ )华北板块近水平伸展减薄形成的“褶叠层”(单文琅等, 1991; 宋鸿林, 1996; Yan *et al.*, 2006),后期研究依据南窖闪长岩锆石U-Pb定年和14件同剪切白云母Ar/Ar测年结果,推断SEE向剪切时代为130~110 Ma,略晚于房山岩体侵位(133~128 Ma)(王瑜和李锦轶, 2007; Wang *et al.*, 2011),与华北板块燕山运动的主伸展期(135~90 Ma)时间一致(董树文等, 2007, 2019),很可能是白垩纪华北克拉通伸展减薄的响应。黄院奥陶系纵弯褶皱亚带中(图2a, 图3a, 图3b),闪长岩脉及大理岩围岩发生褶皱的面理

$S_1$ 上分布定向排列的绢云母/白云母,并且可见一组SEE向透入性拉伸线理(图2d)。据此判断,黄院闪长岩面理 $S_1$ 及同生白云母SEE向拉伸线理时代应不早于闪长岩侵入( $\sim 116$  Ma)。黄院奥陶系第1期( $D_1$ )变形与房山岩体周围130~110 Ma的透入性SEE向伸展构造特征一致(Wang *et al.*, 2011),也反映其时代可能为早白垩世的中晚期。

第2期( $D_2$ )NE-SW向挤压变形是黄院奥陶系的宏观构造样式,逆冲剪切带面理 $S_2$ 已基本置换前期( $D_1$ )指向 $\sim 110^\circ$ SE的韧性剪切,马家沟组( $O_{1m}$ )NW-SE向纵弯褶皱亚带以剪切面理 $S_1$ ( $S_1//S_0$ )为变形面。奥陶系中广泛侵入的闪长岩脉烘烤围岩发生热接触变质,碳酸盐岩大理岩化,泥质薄层变质为绢云母/白云母条带(图2f)。露头中闪长岩已卷入 $D_2$ 剪切变形,在纵弯褶皱亚带中发生明显弯曲(图2d),逆冲剪切带中呈巨型石香肠包夹在面理 $S_2$ 之间(图3a, 图3b)。因此, $D_2$ 变形时间应晚于闪长岩脉年龄( $\sim 116$  Ma),也晚于房山岩体的NW向侵位(136~128 Ma)。另外,奥陶系 $D_2$ 纵弯褶皱和逆冲剪切带与周口店地区广泛分布的早白垩世EW向褶皱(147~136 Ma)存在构造行迹和变形样式的明显差异(舒坦等, 2019; 续海金等, 2020)。区域上,华北板块和中国东部在晚白垩世发生了一次近NS向挤压变形(89~80 Ma),早期的伸展断陷盆地发生不同程度的构造反转(董树文等, 2007, 2019)。黄院奥陶系 $D_2$ 期挤压变形特征、应力场与晚白垩世区域构造类似,因此时代很可能为晚白垩世。

第3期( $D_3$ )浅层次脆—韧性条件下,面理 $S_2$ 向N或NNW的正断层式滑动应发生在第2期( $D_2$ )之后。黄院奥陶系第4期脆性( $D_4$ )的正断层叠加在前3期变形之上,因此时代应晚于 $\sim 116$  Ma,断层运动学分析显示 $D_4$ 最大拉伸应力方向为NW-SEE向(图2中D002, D003, D004)。周口店最新一期变形为白垩纪末—新生代近EW向伸展(Yan *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2011),例如房山岩体以东SEE向陡倾的辛开口—石家庄正断层,断层带绢云母Ar/Ar年龄指示的活动时限为70~60 Ma(Wang *et al.*, 2011),它控制了晚白垩世—新生代断陷盆地河流相沉积(Yan *et al.*, 2006)。综合上述区域构造背景,推测 $D_3$ 时代为晚白垩世, $D_4$ 变形时代很可能为白垩纪末—新生代。

## 5.2 晚白垩世挤压变形的构造背景

Wong (1927, 1929)发现并定义了“燕山运动”,认为A、B两幕分别对应于北美西部的侏罗纪和拉拉米运动.经过20世纪的调查,不同学者对板内造山作用的构造机制、活动时限及动力学背景进行了探讨.万天丰(2004)重新厘定出燕山期(205~135 Ma)、四川期(135~52 Ma)两个构造阶段,但多数学者认为燕山运动以髻髻山组下伏角度不整合为标志,大致起始于175~160 Ma(赵越等, 2004a, 2004b;董树文等, 2007, 2019),结束于~80 Ma(董树文等, 2007).燕山运动呈幕式演化,早白垩世华北板块从NW向挤压转变为SE向伸展减薄体制(翟明国等, 2003),广泛出现变质核杂岩构造群(刘俊来等, 2006;林伟等, 2013).董树文等(2007, 2019)划分燕山运动为3个变形阶段:(1)强挤压—陆内造山期(165~136 Ma)、(2)主伸展—岩石圈减薄期(135~90 Ma)、(3)弱挤压变形期(89~80 Ma).赵越等(2004a, 2004b)认为中国东部的燕山运动以NE向环太平洋构造带为特征,指示古亚洲洋和古特提斯构造域汇聚体制向古太平洋构造域汇聚体制的转变.

北京西山燕山期NE向构造呈先挤压后伸展的两阶段演化特征(张长厚等, 2006;王瑜和李锦铁, 2007; He *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011; Yan *et al.*, 2011),但晚白垩世燕山晚期挤压变形鲜有报道.黄院奥陶系新发现的 $D_2$ 期NW-SEE向纵弯褶皱、逆冲型剪切带共同指示北京西山存在晚白垩世NE-SW向挤压变形,剪切带运动学指向显示收缩应变自NE向SW传导. $D_2$ 变形特征与华北板块北部晚白垩世NW向的褶皱、逆冲断层(万天丰, 2004)或NW-SE向挤压变形(董树文等, 2007; Liu *et al.*, 2017)相似,可能代表一次区域尺度近NS向挤压事件.

传统观点认为,华北板块燕山期变形和早白垩世构造体制转变受控于环太平洋活动大陆边缘增生造山作用,北京西山早期(170~130 Ma)NW向挤压变形与晚期(130~110 Ma)指向SEE的伸展滑脱与太平洋板块NW向幕式俯冲相关(万天丰, 2004; 赵越等, 2004a, 2004b;董树文等, 2007; Wang *et al.*, 2011).董树文等(2007)晚白垩世NW-SE向挤压变形是对早白垩世伸展垮塌的调整,区域动力主要受控于古太平洋向亚洲大陆俯冲板块的边界应力场.然而,黄院奥陶系 $D_2$ 期纵弯褶皱和逆冲剪

切带指示最大主应力轨迹( $\sigma_1$ )为NE-SW向,明显与太平洋板块NW向俯冲背景不协调.另外,华北北缘、中亚造山带燕山期变形,即近EW向褶冲带、盆地内部角度不整合被认为与蒙古—鄂霍茨克洋的向南俯冲和早白垩世的快速关闭相关(Yang *et al.*, 2015;Zhu *et al.*, 2015).尽管周口店晚白垩世 $D_2$ 和 $D_3$ 构造变形时间晚于早白垩世蒙古—鄂霍茨克洋的关闭,但洋壳闭合后陆陆碰撞期可能存在西伯利亚板块和华北板块的挤压汇聚,导致晚白垩世华北板块内部出现NE-SW向挤压变形.

## 6 结论

(1)北京西山黄院奥陶系发育4个期次的韧脆性变形,以第2期NE-SW向收缩变形为主体构造样式.第1期为顶面指向SEE的简单剪切,伴生 $110^\circ\sim 120^\circ$ SEE向缓倾拉伸线理,第3期为沿面理 $S_2$ 发生的NNW向正断式滑脱,第4期为近NS向陡倾正断层系.

(2)奥陶系第2期变形可划分为纵弯褶皱带和逆冲剪切带,褶皱轴面倒伏趋势和不对称剪切条带显示上盘向SW逆冲的运动学指向.

(3)第2期变形时代为晚白垩世(晚于~116 Ma),参与了北京西山近EW向构造格局的形成,可能代表蒙古—鄂霍茨克洋关闭之后的陆陆碰撞期构造事件.

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>).

## References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192(1/2): 59–79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)
- Beijing Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991. Regional Geology of Beijing Municipality. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Cai, X.L., Zhu, J.S., Cao, J.M., et al., 2005. Three-Dimensional Structural and Dynamic Types of the Continental Margin Lithosphere in Southeast China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 25(3): 25–34 (in Chinese with English abstract).
- Cao, S.Y., Neubauer, F., Bernroider, M., et al., 2013. The Lateral Boundary of a Metamorphic Core Complex: The Moutsounas Shear Zone on Naxos, Cyclades, Greece. *Journal of Structural Geology*, 54: 103–128. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.05.011>

- doi.org/10.1016/j.jsg.2013.07.002
- Davis, G. A., Wang, C., Zheng, Y. D., et al., 1998. The Enigmatic Yinshan Fold-and-Thrust Belt of Northern China: New Views on Its Intraplate Contractional Styles. *Geology*, 26(1): 43–46. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1998\)026<0043:teyfat>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026<0043:teyfat>2.3.co;2)
- Davis, G. A., Zheng, Y. D., Wang, C., et al., 2001. Mesozoic Tectonic Evolution of the Yanshan Fold and Thrust Belt, with Emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, Northern China. *Memoirs-Geological Society of America*, 194: 171–194.
- Dong, S. W., Zhang, Y. Q., Li, H. L., et al., 2019. The Yanshan Orogeny and Late Mesozoic Multi-Plate Convergence in East Asia—Commemorating 90th Years of the “Yanshan Orogeny”. *Science China Earth Sciences*, 49(6):913–938(in Chinese).
- Dong, S. W., Zhang, Y. Q., Long, C. X., et al., 2007. Jurassic Tectonic Revolution in China and New Interpretation of the Yanshan Movement. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1449–1461(in Chinese with English abstract).
- He, B., Xu, Y. G., Paterson, S., 2009. Magmatic Diapirism of the Fangshan Pluton, Southwest of Beijing, China. *Journal of Structural Geology*, 31(6): 615–626. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.04.007>
- Lin, W., Wang, J., Liu, F., et al., 2013. Late Mesozoic Extension Structures on the North China Craton and Adjacent Regions and Its Geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1791–1810(in Chinese with English abstract).
- Liu, J. L., Guan, H. M., Ji, M., et al., 2006. The Late Mesozoic Metamorphic Core Complex and Its Constrains to the Mechanism of Lithospheric Thinning in North China. *Progress in Nature Science*, 16(1):21–26 (in Chinese).
- Liu, S. F., Gurnis, M., Ma, P. F., et al., 2017. Reconstruction of Northeast Asian Deformation Integrated with Western Pacific Plate Subduction since 200 Ma. *Earth-Science Reviews*, 175: 114–142. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.012>
- Shan, W. L., Song, H. L., Fu, Z. R., et al., 1991. Principals, Methods and Practices of Structural Analysis. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Shan, Y. H., Gong, F. X., Lin, G., et al., 2006. Discussion on Mesozoic Extensional Structures of the Fangshan Tectonic Dome and Their Subsequent Reworking during Collisional Accretion of the North China Block. *Journal of the Geological Society*, 163(6): 1051–1055. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-026>
- Shu, T., Xu, H. J., Zhang, J. F., et al., 2019. Deformation Characteristics and Time of Taipingshan Folds in Fangshan Area, Beijing: Implications for Early Cretaceous Compressional Tectonics of North China Craton. *Earth Science*, 44(5): 1734–1748(in Chinese with English abstract).
- Song, H. L., 1987. The Primary Study of the Structural Sequences in South Part of the West Hills of Beijing. *Earth Science*, 12(1):15–20(in Chinese with English abstract).
- Song, H. L., 1996. Characteristics of Fangshan Metamorphic Core Complex, Beijing and a Discussion about Its Origin. *Geoscience*, 10(2): 149–158(in Chinese with English abstract).
- Wan, T. F., 2004. Rotation of the Jurassic Crust and Transformation of the Lithosphere of Eastern China. *Geological Bulletin of China*, 23(9):966–972(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Li, J. Y., 2007. Thermochronological Constraints on the Formation of ESE110°–120° Stretching Lineations at Nanjiao Area, West Hills of Beijing. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 617–624(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Zhou, L., Li, J., 2011. Intracontinental Superimposed Tectonics: A Case Study in the Western Hills of Beijing, Eastern China. *Geological Society of America Bulletin*, 123(5/6): 1033–1055. <https://doi.org/10.1130/b30257.1>
- Wenk, H. R., Takeshita, T., Bechler, E., et al., 1987. Pure Shear and Simple Shear Calcite Textures. Comparison of Experimental, Theoretical and Natural Data. *Journal of Structural Geology*, 9(5/6): 731–745. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(87\)90156-8](https://doi.org/10.1016/0191-8141(87)90156-8)
- Wong, W. H., 1929. The Mesozoic Orogenic Movement in Eastern China. *Bulletin of the Geological Society of China*, 8(1): 33–44. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.1929.mp8001004.x>
- Wong, W. H., 1927. Crustal Movements and Igneous Activities in Eastern China since Mesozoic Time.1. *Bulletin of the Geological Society of China*, 6(1): 9–37. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.1927.mp6001002.x>
- Xu, H. J., Wang, G. Q., Shu, T., et al., 2020. The Characteristics and Formation Mechanisms of Tectonic Assemblages in Nanguan, Beijing. *Earth Science* (online) (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.147>
- Yan, D. P., Zhou, M. F., Song, H. L., et al., 2006. Mesozoic Extensional Structures of the Fangshan Tectonic Dome and Their Subsequent Reworking during Collisional Accretion of the North China Block. *Journal of the Geological Society*, 163(1): 127–142. <https://doi.org/10.1144/>

- 0016-764904-154
- Yan, D.P., Zhou, M.F., Zhao, D.G., et al., 2011. Origin, Ascent and Oblique Emplacement of Magmas in a Thickened Crust: An Example from the Cretaceous Fangshan Adakitic Pluton, Beijing. *Lithos*, 123(1-4): 102-120. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.11.015>
- Yang, Y. T., Guo, Z. X., Song, C. C., et al., 2015. A Short-Lived but Significant Mongol-Okhotsk Collisional Orogeny in Latest Jurassic-Earliest Cretaceous. *Gondwana Research*, 28(3): 1096-1116. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.09.010>
- Zhai, M.G., Zhu, R.X., Liu, J.M., et al., 2003. The Key Time Intervals of the Mesozoic Tectonic Transformation in Eastern North China. *Science in China (Ser.D)*, 33(10): 913-920(in Chinese).
- Zhang, C.H., Zhang, Y., Li, H.L., et al., 2006. Late Mesozoic Thrust Tectonics Framework in the Western Part of Yanshan Orogenic Belt and Western Hills of Beijing: Characteristics and Significance. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 165-183(in Chinese with English abstract).
- Zhao, W.X., 2003. The Field-work Methodologies and High Technology Applied in Field Geological Practice Teaching at Zhoukoudian. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhao, Y., Xu, G., Zhang, S. H., et al., 2004a. Yanshanian Movement and Conversion of Tectonic Regimes in East Asia. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 319-328(in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Zhang, S.H., Xu, G., et al., 2004b. Major Tectonic Event in the Yanshanian Intraplate Deformation Belt in the Jurassic. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 854-863(in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Chen, Y., Jiang, D., et al., 2015. Rapid Change from Compression to Extension in the North China Craton during the Early Cretaceous: Evidence from the Yunmengshan Metamorphic Core Complex. *Tectonophysics*, 656: 91-110. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.06.009>
- Zhu, R. X., Xu, Y. G., Zhu, G., et al., 2012. Destruction of North China Craton. *Scientia Sinica Terrae*, 42(8): 1135-1159(in Chinese with English abstract).
- 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等, 2005. 中国东南大陆边缘带岩石圈三维结构—动力学型式. 海洋地质与第四纪地质, 25(3): 25-34.
- 董树文, 张岳桥, 李海龙, 等, 2019. “燕山运动”与东亚大陆晚中生代多板块汇聚构造: 纪念“燕山运动”90周年. 中国科学(地球科学), 49(6): 913-938.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等, 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报, 81(11): 1449-1461.
- 林伟, 王军, 刘飞, 等, 2013. 华北克拉通及邻区晚中生代伸展构造及其动力学背景的讨论. 岩石学报, 29(5): 1791-1810.
- 刘俊来, 关会梅, 纪沫, 等, 2006. 华北晚中生代变质核杂岩构造及其对岩石圈减薄机制的约束. 自然科学进展, 16(1): 21-26.
- 单文琅, 宋鸿林, 傅昭仁, 等, 1991. 构造变形分析的理论、方法和实践. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 舒坦, 续海金, 章军锋, 等, 2019. 北京房山地区太平山褶皱的变形特征和形成时代: 华北克拉通早白垩世挤压构造的意义. 地球科学, 44(5): 1734-1748.
- 宋鸿林, 1987. 北京西山南部构造序列初探. 地球科学, 12(1): 15-20.
- 宋鸿林, 1996. 北京房山变质核杂岩的基本特征及其成因探讨. 现代地质, 10(2): 149-158.
- 万天丰, 2004. 侏罗纪地壳转动与中国东部岩石圈转型. 地质通报, 23(9): 966-972.
- 王瑜, 李锦轶, 2007. 北京西山南窖地区南东东 110°~120°拉伸线理形成时间的年代学制约. 岩石学报, 23(3): 617-624.
- 续海金, 王国庆, 舒坦, 等, 2020. 北京南观地区构造组合特征及成因机制. 地球科学. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.147>
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等, 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学(D辑: 地球科学), 33(10): 913-920.
- 张长厚, 张勇, 李海龙, 等, 2006. 燕山西段及北京西山晚中生代逆冲构造格局及其地质意义. 地学前缘, 13(2): 165-183.
- 赵温霞, 2003. 周口店地质及野外地质工作方法与高新技术应用. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 赵越, 徐刚, 张拴宏, 等, 2004a. 燕山运动与东亚构造体制的转变. 地学前缘, 11(3): 319-328.
- 赵越, 张拴宏, 徐刚, 等, 2004b. 燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件. 地质通报, 23(9): 854-863.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等, 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学(地球科学), 42(8): 1135-1159.

#### 附中文参考文献

北京市地质矿产局, 1991. 北京市区域地质志. 北京: 地质出版社.