中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 8 期: 1249 ~ 1267
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

辽西瓦子峪变质核杂岩的变形规律与成因

张必龙*, 朱光, 陈印, 朴学峰, 鞠林雪, 王浩乾

合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009
* E-mail: zhbl-88@163.com

收稿日期: 2012-07-25; 接受日期: 2012-12-09; 网络版发表日期: 2013-07-22
国家自然科学基金(批准号: 40828001, 41072162)资助

摘要 位于燕山构造带东端的瓦子峪变质核杂岩, 其 NNE 走向的拆离韧性剪切带出现在太古代变质基底与阜新-义县断陷盆地之间, 总体呈低角度倾向北西, 发育波瓦状褶皱. 露头构造、显微构造及石英 C 组构皆指示剪切带上盘向 WNW 方向(约 285°)剪切变形. 变形温度估计结果(550~250℃)表明其起源于中地壳环境, 并揭示经历过从深部向浅部的递进变形过程. 剪切带北段抬升幅度相对较小, 出露低温糜棱岩; 中、南段抬升幅度较大, 出露较深层次糜棱岩. 黑云母与白云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄、岩脉与岩体的锆石 U-Pb 定年及上叠盆地的年代学资料综合表明, 该核杂岩的活动时间为 135~100 Ma, 期间伴随早白垩世石山岩体的同构造侵位. 核杂岩西缘后期剥露到地壳浅部时, 在晚白垩世又被孙家湾-稍户营子中、高角度脆性正断层切割, 最终出露到近地表. 该核杂岩形成于早白垩世华北克拉通峰期破坏之中, 在区域 WNW-ESE 向拉伸背景下, 以滚动枢纽模式演化, 下盘并未出现大规模的塑性流动, 不支持下地壳重力垮塌机制.

关键词
瓦子峪变质核杂岩
拆离剪切带
$^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年
滚动枢纽模式
克拉通破坏

华北克拉通东部自晚中生代以来发生过大规模的破坏与岩石圈减薄已经成为共识, 其岩石圈厚度从早古生代的约 200 km 减薄为现今的 80~60 km 左右[1~7]. 但关于岩石圈减薄的时间、机制、动力学背景等仍存在不同的认识[8~13]. 地壳作为岩石圈减薄的浅部响应载体, 主要以出现变质核杂岩、伸展盆地、大规模岩浆活动等为特征. 其中变质核杂岩记录了地壳伸展的变形过程, 因而成为研究岩石圈伸展与减薄浅部过程的理想对象.

华北克拉通北缘已发现了一系列变质核杂岩, 主要包括中蒙边界亚干[14~17]、呼和浩特[18,19]、云蒙山[20~22]、楼子店[23,24]、瓦子峪(医巫闾山)[25,26]和辽南[27~31]等变质核杂岩. 它们的形成时间主要集中在 135~110 Ma, 代表了岩石圈减薄的峰期, 并一致指示了 WNW-ESE 向拉伸[32,33]. 在这些核杂岩中, 瓦子峪变质核杂岩的研究程度较低, 存在着不同的认识. 马寅生等[25]认为它是一个对称型变质核杂岩, 其拆离剪切带围绕晚侏罗世医巫闾山岩基分布, 并推测与该岩体同期形成, 故将其命名为医巫闾山变质核杂岩. 孟宪刚等[34]和朱大岗等[35,36]持有相似的观点, 并指出其拆离滑脱带具有导矿、控矿作用. 张晓辉等[37]则认为区内存在北侧 E-W 向和西侧 NNE 向两条剪切带, 代表晚三叠世斜向推覆和早白垩世伸展走滑事件. 不过张宏等[38]分析认为西侧其实存在两条近

中文引用格式: 张必龙, 朱光, 陈印, 等. 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, 2013, 43: 1249–1267
英文引用格式: Zhang B L, Zhu G, Chen Y, et al. Deformation characteristics and genesis of the Waziyu metamorphic core complex in western Liaoning of China. Science China: Earth Sciences, 2012, 55: 1764–1781, doi: 10.1007/s11430-012-4495-z

NNE 向韧性剪切带, 代表晚侏罗走滑与早白垩世伸展事件. 而 Darby 等[26]则对该区早白垩世伸展事件进行了重新厘定, 指出位于西侧的孙家湾-稍户营子断裂才是核杂岩的拆离断层, 具有上盘向WNW运动指向, 其下盘糜棱岩黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄分别为(127±3)和(116±2) Ma[37], 并重新命名为瓦子峪变质核杂岩. 但前人对该核杂岩拆离剪切带的研究比较局限且不够详细[26], 对整条剪切带的空间展布、变形规律、形成环境等缺乏系统的调查, 特别是关于该核杂岩的形成过程与隆升模式仍没有明确的认识. 本文通过系统调查瓦子峪变质核杂岩拆离剪切带的几何学与运动学, 结合新的年代学证据及上、下盘变形特征, 探讨该核杂岩的演化过程与形成机制, 为了解华北克拉通岩石圈减薄中的详细地壳变形过程提供重要的信息.

1 核杂岩上盘概况

瓦子峪变质核杂岩具有典型的三层结构, 即上盘、拆离剪切带及下盘. 上盘主要由中元古代长城系盖层及阜新-义县上叠盆地构成(图 1, 2). 其中长城系呈零星分布于拆离剪切带之上, 总体呈NE走向, 多倾向 NW. 区内长城系主体为白云质灰岩和石英砂岩, 其底部出现板岩、千枚岩、浅变质砂岩等低级变质岩(图 3, 4), 并经历过明显的塑性变形与变质, 部分学者称之为中间韧性流变层[25,39]. 上盘盖层底部变形面理产状与下伏糜棱面理协调一致, 发育WNW-ESE向矿物拉伸线理, 显示遭受拆离剪切带韧性变形改造. 北侧盖层中侵入若干早白垩世小岩体, 如排山楼东部的大石头沟黑云母花岗岩体, 其锆石 SHRIMP 年龄为(124±1) Ma[40].

核杂岩上盘的阜新−义县断陷盆地位于拆离剪切带西侧, 呈 NNE-SSW 向延伸. 盆地地表出露的中生代地层由老到新分别为下白垩统义县组火山岩(K_1y)、九佛堂组(K_1j)、沙海组(K_1s)和阜新组(K_1f)碎屑岩及上白垩统孙家湾组(K_2s)红层和大兴庄组(K_2d)火山岩[41,42]. 在义县盆地内仍有少量长城系出露, 与义县组呈角度不整合接触. 义县组火山岩下段主要为暗色玄武岩, 含沉积夹层; 中段以浅灰色玄武安山岩和粗面安山岩为主, 基本缺乏沉积夹层; 上段包括暗红色安山岩、流纹岩和角砾岩, 含多套沉积夹层. 该组火山岩形成于 130~119 Ma 间[43~46]. 阜新组主体为一套杂色砂、砾岩, 夹煤层, 顶部出现薄层碱性玄武岩, 其 K-Ar 年龄为 100 Ma, 地化分析显示起源于亏损的软流圈地幔[47]. 与阜新组呈平行不整合接触的孙家湾组以紫红色砂、砾岩为主, 靠近基底处砾岩中含有大量的糜棱岩砾石, 分选差. 大兴庄组火山岩仅出露于锦州北部大兴庄附近, 岩性为中酸性火山熔岩、火山碎屑岩等, 角度不整合于下伏地层. 盆地内发育多条 NNE 向正断层, 包括控制孙家湾组沉积的孙家湾-稍户营子断裂(图 1). 该断层北段为阜新盆地的盆缘断层, 南段则延伸进入义县盆地内. 该断层倾向 WNW, 倾角为 30°~60°.

2 核杂岩下盘特征

瓦子峪变质核杂岩下盘包括太古代高级变质基底及侵位其中的晚侏罗-早白垩世岩体, 周缘局部残留长城系盖层(图 1, 2). 其中基底变质杂岩主要包括两套岩性单元. 上部以云母片岩为主,夹黑云石英片岩、黑云斜长变粒岩、黑云斜长片麻岩等, 变质程度达角闪岩相, 主体为一套副变质岩. 它们主要分布在核杂岩西侧, 东侧北镇附近也有部分出露. 下部主要由黑云斜长片麻岩、花岗质片麻岩、黑云角闪片麻岩等角闪岩相变质岩组成, 并含有暗色铁镁质包体, 主体为正变质岩, 无混合岩出露. 侵位于这些杂岩中的岩体主要有两个时代, 包括晚侏罗世的医巫闾山岩基、尖砬子岩体、观音洞岩体以及早白垩世的石山岩体等. 其中医巫闾山岩基规模最大, 为一个复式岩体, 主要由花岗闪长岩、二长花岗岩、白云母花岗岩组成. 在该岩基的西侧出露尖砬子和观音洞二长花岗岩体. 前人报道了医巫闾山岩基的锆石 LA-ICP-MS 年龄为(153±2)和(163±3) Ma[48], SHRIMP 年龄为(153±5), (159±4)和(163±4) Ma[49,50], 尖砬子和观音洞岩体的锆石 LA-ICP-MS 年龄为(169±10)和(154±4) Ma[48]. 这些年龄数据表明这几个岩体基本是同期侵位的. 南侧石山岩体岩性主要为花岗闪长岩和二长花岗岩, 其锆石 LA-ICP-MS 年龄为(123±3) Ma[48]. 下盘内残留的长城系中发育多条 NNE 与 WNW 走向的脆性正断层.

核杂岩下盘基底内广泛存在早期变形组构, 围绕着医巫闾山岩基周缘发育一条长环形韧性剪切带(称为医巫闾山剪切带, 见图 1 和 2), 它切割变质基底和所经过的医巫闾山岩基与尖砬子岩体, 呈现为与

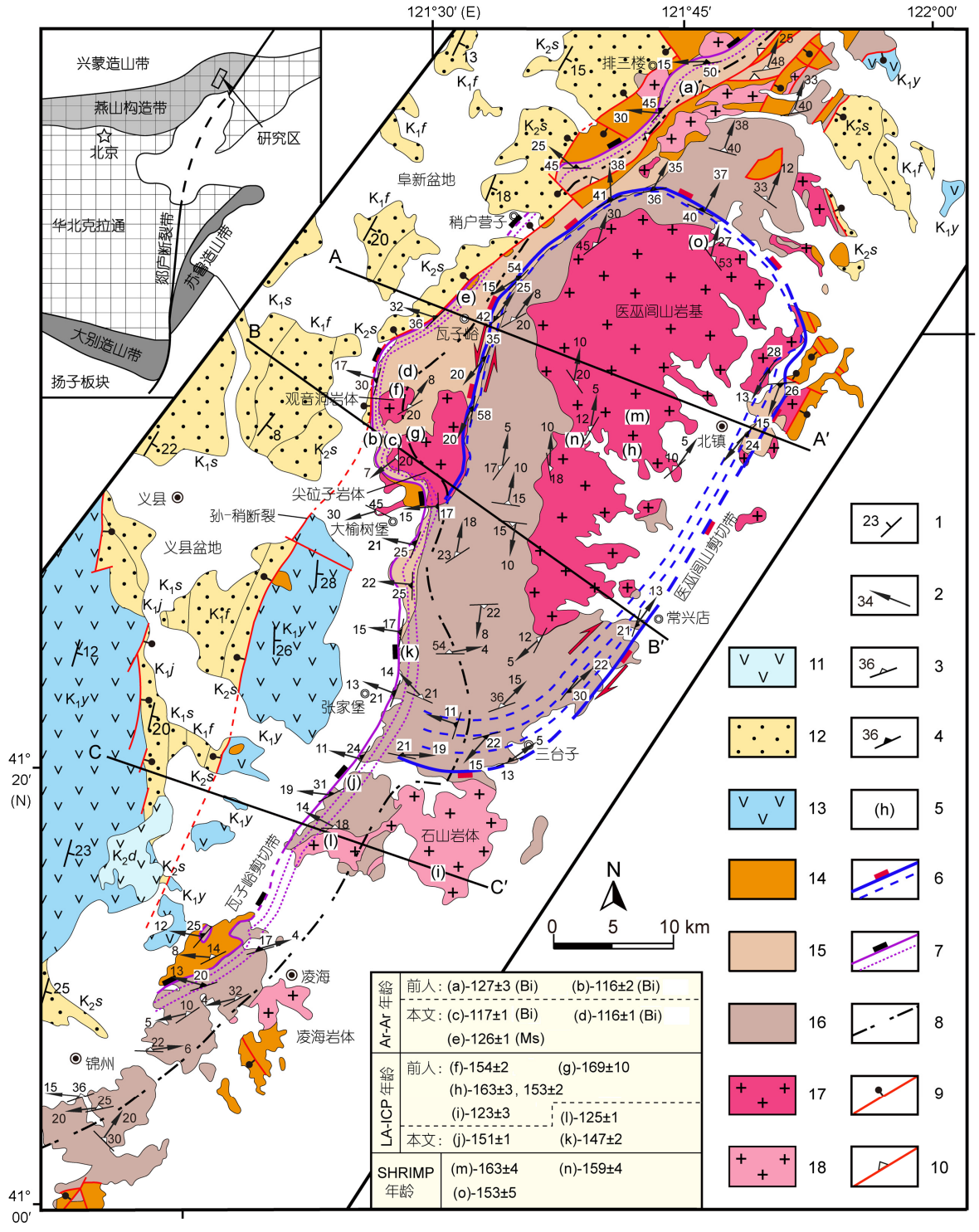

图 1　瓦子峪变质核杂岩构造简图

1. 地层产状; 2. 矿物拉伸线理; 3. 变质岩面理产状; 4. 糜棱岩面理产状; 5. 同位素定年采样点[37,48~50]; 6. 早期医巫闾山剪切带; 7. 晚期瓦子峪拆离剪切带; 8. 两期韧性变形界线; 9. 脆性正断层; 10. 逆断层; 11. 晚白垩世大兴庄组火山岩(K_2d); 12. 白垩纪碎屑岩, 包括九佛堂组(K_1j)、沙海组(K_1s)、阜新组(K_1f)、孙家湾组(K_2s); 13. 早白垩世义县组火山岩; 14. 中元古代长城系盖层; 15. 太古代杂岩(片岩为主); 16. 太古代杂岩(片麻岩为主); 17. 晚侏罗世岩体; 18. 早白垩世岩体. 孙-稍断裂代表孙家湾-稍户营子断层. 据文献[26]修改. 图中年龄单位为 Ma

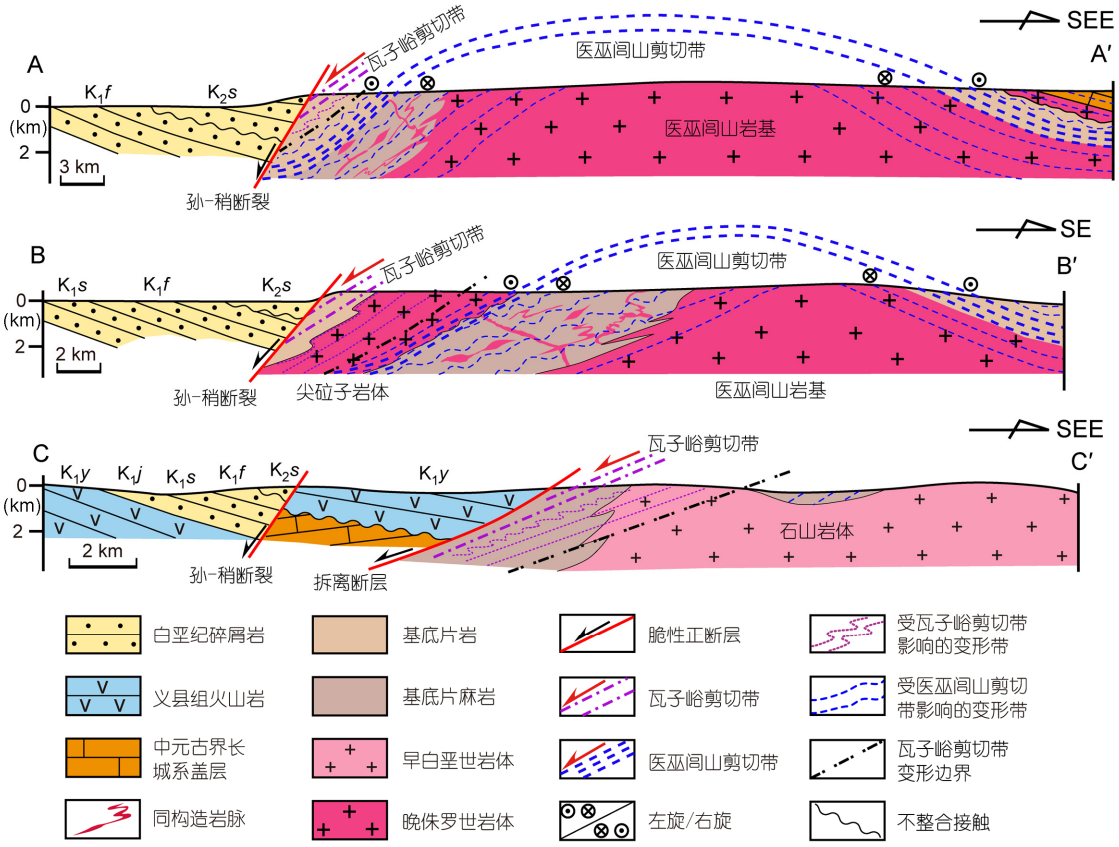

图 2　瓦子峪变质核杂岩区域剖面图

剖面位置见图 1

晚侏罗世岩体同侵位变形的特征. 该剪切带东段和南段面理产状主要向东或南缓倾, 北段和西段主要向北或西陡倾. 剪切带产状虽然变化较大, 但它具有一致的上盘向 SSW 运动, 现今这种形态乃是后期隆升造成, 以致东段和西段分别具有右行和左行走滑假象(图 2, 4), 这种现象也被部分学者解释为走滑事件的存在[37,38]. 剪切带之外的变质基底内也普遍发育 NNE-SSW 向矿物拉伸线理及较平缓的变形面理, 并具有相同的上盘向 SSW 的运动指向, 显然是与医巫闾山剪切带同期的变形组构. 由于区内盖层与基底中没有出现 WNW-ESE 走向的挤压褶皱与逆冲断层, 笔者倾向于认为这可能是一期晚侏罗世伸展构造, 与一些学者认识一致[51,52], 同时也得到核部医巫闾山岩基的地球化学证据支持[50]. 在医巫闾山剪切带及其变形下盘中侵入有大量不同变形样式的同构造岩脉, 通过对其锆石 U-Pb 年代学测定限定该期变形时代为 157~147 Ma[53]. 此外, 前人在下盘杂岩中获得一批 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄数据为 (153±3)~(132±2) Ma[26,54], 其中晚侏罗世的年龄应与该阶段隆升有关. 核杂岩后期隆升过程中, 医巫闾山剪切带西侧受到了后期瓦子峪拆离剪切带的叠加, 导致其西南段被截切, 呈不完整环形带展布. 当接近瓦子峪拆离剪切带时, 核杂岩内矿物拉伸线理转变为与该剪切带一致的 WNW-ESE 向[26], 为上盘向 WNW 运动的变形. 而远离瓦子峪剪切带又恢复为 NNE-SSW 向矿物拉伸线理. 依据这种组构变化, 大致可划分出两期变形的界线(图 1, 2). 不过由于后期变形时剪应变的局部集中也导致在早期组构发育的地区局部会出现晚期变形组构. 图 1 显示, 受瓦子峪拆离剪切带叠加影响的下盘变形区域很窄(1~5 km 宽), 仅分布在基底杂岩的西侧, 其他地区总体仍保留早期组构信息. 所以, 瓦子峪变质核杂岩下盘中没有出现同期大规模塑性流动变形与混合岩化现象.

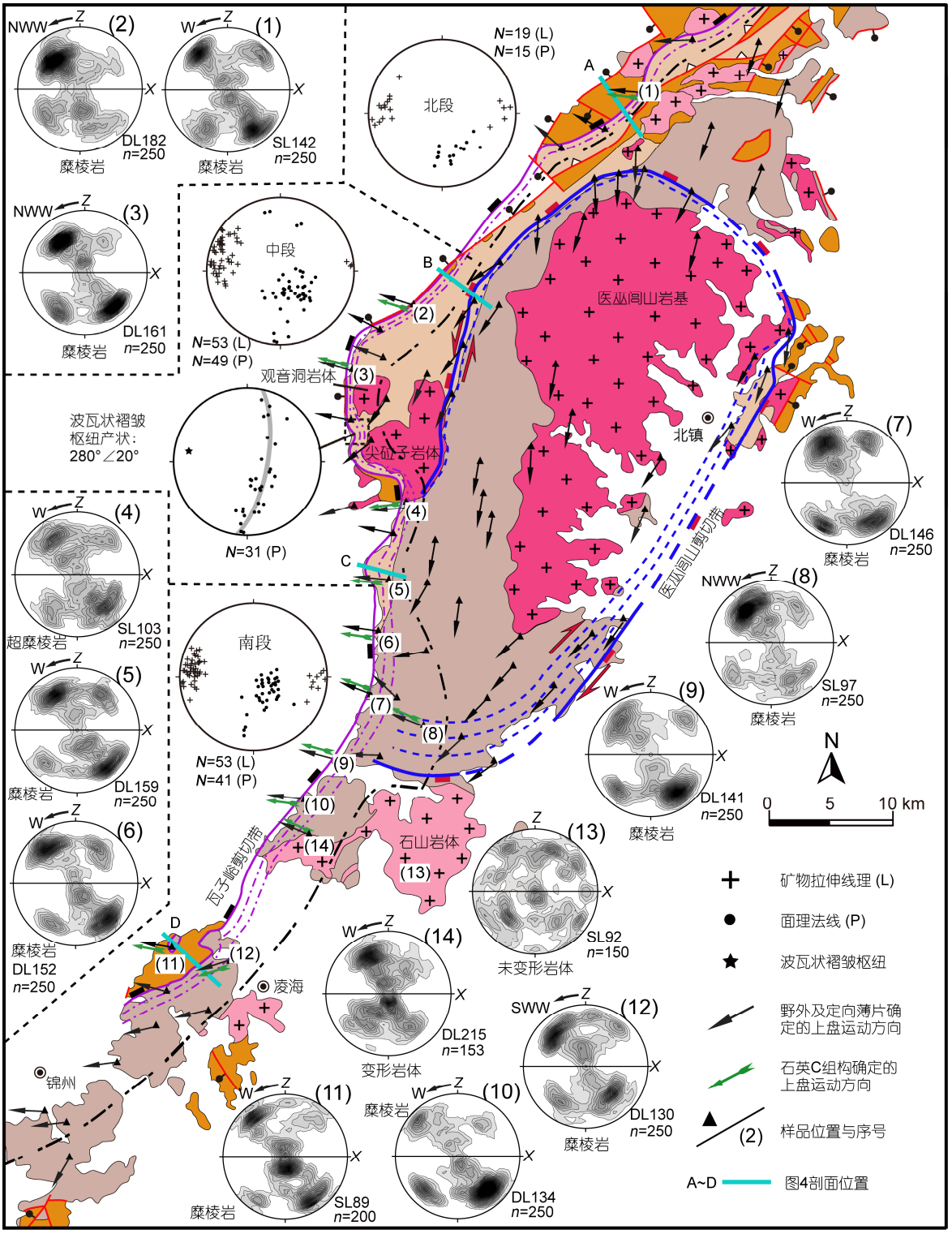

图 3　瓦子峪变质核杂岩拆离剪切带的变形组构与石英 C 组构赤平投影

N 为线理和面理的测量数, *n* 为测试石英颗粒数

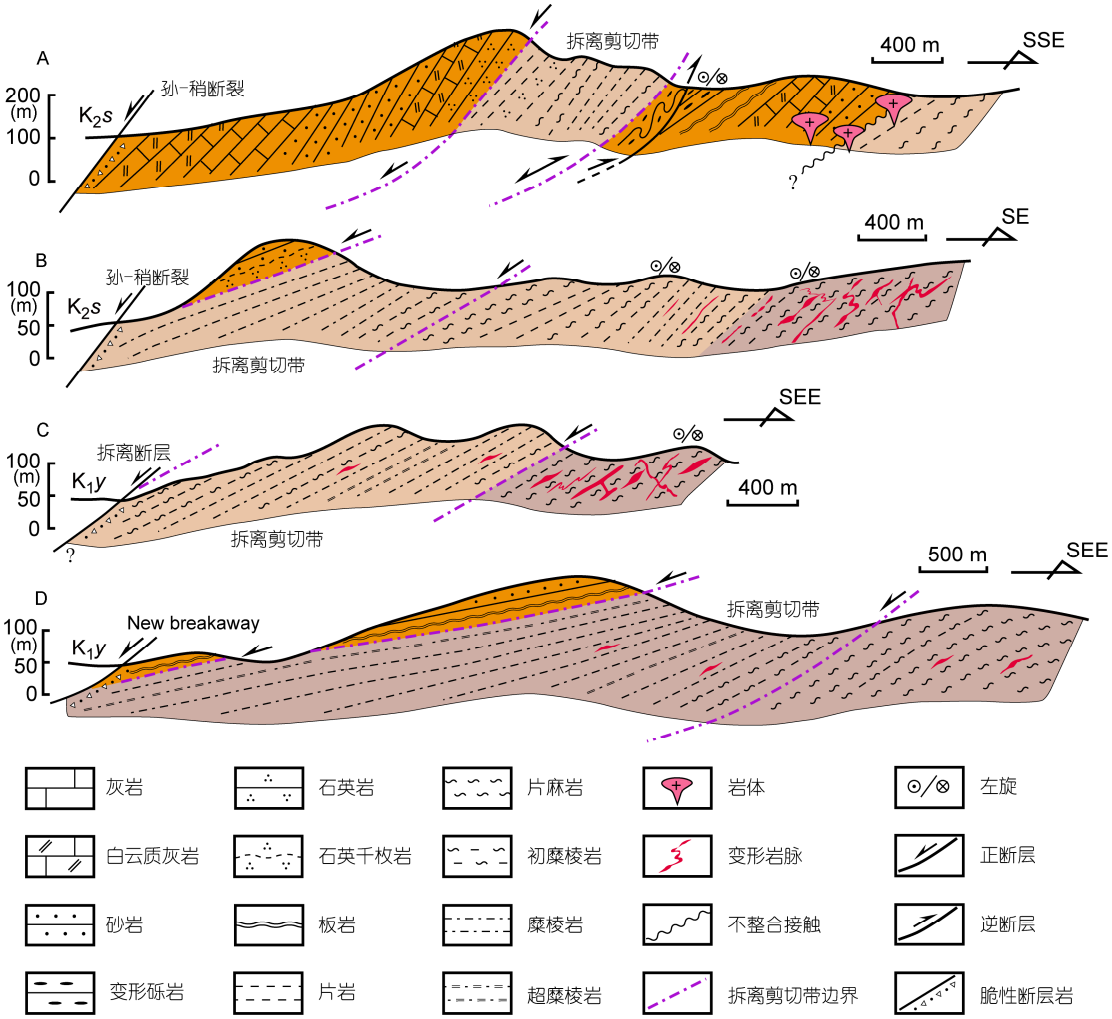

图 4　瓦子峪变质核杂岩拆离剪切带剖面图

剖面 A~D 位置见图 3

3　拆离剪切带的空间展布与变形特征

瓦子峪韧性剪切带分布在基底杂岩西缘排三楼-瓦子峪-张家堡-锦州一带, 呈 NNE 向展布(图 1). 自南向北分别叠加在太古代片麻岩与片岩之上, 以出现初糜棱岩、糜棱岩、超糜棱岩为主要标志, 出露宽度约 1~3 km (图 4). 受其影响, 早白垩世石山岩体西缘与晚侏罗世尖砬子和观音洞岩体西缘都遭受强烈韧性变形, 在剪切带内已达糜棱岩程度. 该剪切带西侧或与长城系韧性接触, 或被上叠盆地中的义县组与孙家湾组覆盖(图 5(a)). 其中与义县组的接触界线已被第四系覆盖, 无法识别出拆离断层与脆性断层岩系列.

对瓦子峪剪切带的变形组构分段分析显示(图 3, 4), 南段糜棱面理产状较缓, 约 20°倾角, 主要向 WNW 倾. 其中矿物拉伸线理集中向 280°左右缓倾. 中段由于受褶皱影响, 剪切带呈现背形与向形, 虽总体向 WNW 倾, 但产状变化较大, 从向北倾至向南西倾皆有出现, 倾角变化也较大, 多在 20°~40°之间. 剪切带的这种宏观形态变化可能是由同期波瓦状褶皱造成的[26], 其规模大小不一, 属宽缓倾伏型褶皱. 据此笔者对位于尖砬子岩体西北侧连续露头的剪切带褶皱进行了面理系统测量(图 5(b)), 野外估测其半波长达 1~2 km, 31 个面理法线的π图解显示该宏观褶皱的枢纽产状大致为 280°∠20°(图 3). 而中段的矿物拉伸线理倾伏向主要在 275°~295°之间, 倾伏角约

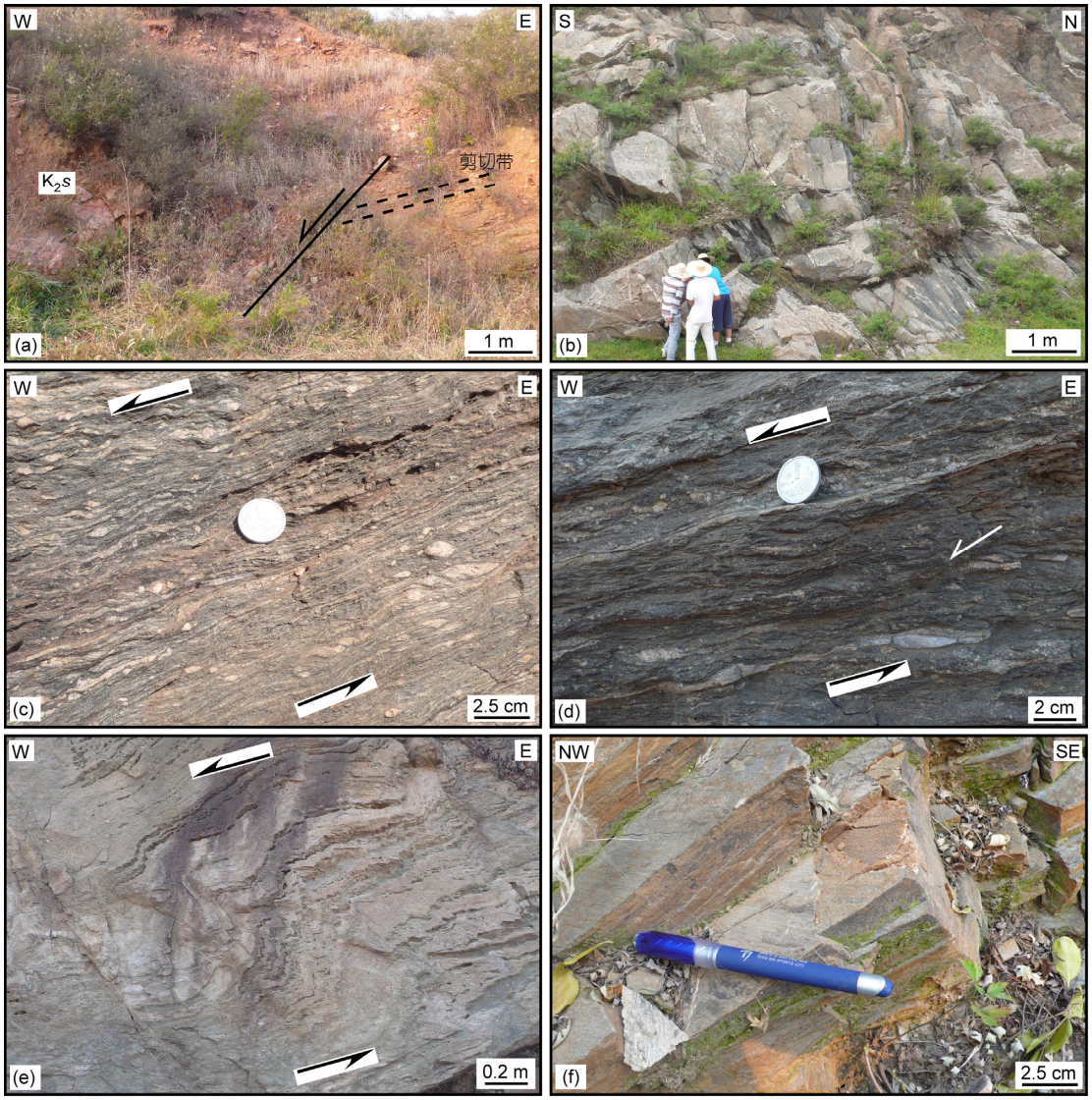

图 5　瓦子峪变质核杂岩的野外照片

(a) 尖砬子岩体西北侧, 向西缓倾的瓦子峪拆离剪切带被孙家湾-稍户营子正断层切割; (b) 尖砬子岩体西北侧, 波瓦状褶皱导致糜棱岩面理向北陡倾; (c) 张家堡北, 绿泥石化糜棱岩, S-C 组构与不对称残斑拖尾指示上盘向西剪切; (d) 瓦子峪西南侧, 绿泥石化糜棱岩, 不对称布丁指示上盘向西剪切; (e) 大榆树堡南, 瓦子峪拆离剪切带底部不对称剪切褶皱指示上盘向西运动; (f) 稍户营子东, 盖层变质砂岩中向 NNE 倾伏的矿物拉伸线理, 平行蓝笔方向

10°~30°. 褶皱枢纽与线理产状相吻合, 证实了波瓦状褶皱的存在. 褶皱使剪切带走向发生弯曲变化, 因而呈现背形与向形共存的形态. 剪切带北段糜棱面理向 N 至 NW 陡倾, 倾角变化在 40°~65°间, 但线理仍主要向西缓倾. 前人研究表明, 北侧杂岩内存在多条产状较陡的 NE 向早期逆断层(倾角为 40°~70°)[51], 北段剪切带可能正好利用了这些薄弱带再次活动, 导致产状较陡(图 4), 这也可解释剪切带之下出露长城系的缘故. 因此, 整条剪切带从南向北, 产状虽呈由缓变陡的趋势, 但总体仍以向北西缓倾为主, 矿物拉伸线理主要向 285°方向倾伏.

瓦子峪拆离剪切带中广泛发育的 S-C 组构(图 5(c))、残斑拖尾(图 5(c))、不对称(岩脉)布丁(图 5(d))、C′ 构造等皆指示上盘向 WNW 运动. 局部还发育了剪切带变形过程中伴生的剪切褶皱, 其枢纽与矿物拉伸线理垂直, 也指示上盘向 WNW 运动(图 5(e)).

糜棱岩定向薄片内的矿物残斑拖尾(图 6(a))、S-C 组构(图 6(b), (c))、云母鱼(图 6(b), (f))等同样指示了上盘向 WNW 剪切变形. 为了进一步确定该剪切带的运动方向, 工作中还对部分糜棱岩与超糜棱岩进行了石英 C 轴组构测定. 其图案显示以“I”型环带为主[55], 所呈现的点极密方位也一致指示上盘向 WNW 运动(图 3).

瓦子峪拆离剪切带中段被晚期控制孙家湾组沉积的中-高角度孙家湾-稍户营子脆性正断层切割(图 1, 5(a)), 并且在稍户营子镇附近被其截切, 而非 Darby 等[26]所认为的剪切带沿该断层走向延伸. 因为该处断层东侧(铁河嘴子村)强变形的变质砂岩、板岩及下部糜棱岩化白云母片岩中并没有出现瓦子峪剪切带的变形组构, 而是发育稳定的 NNE-SWW 向矿物拉伸线理(图 5(f)), 显然为早期的变形产物. 这表明孙家湾-稍户营子断层东侧并不是拆离剪切带的

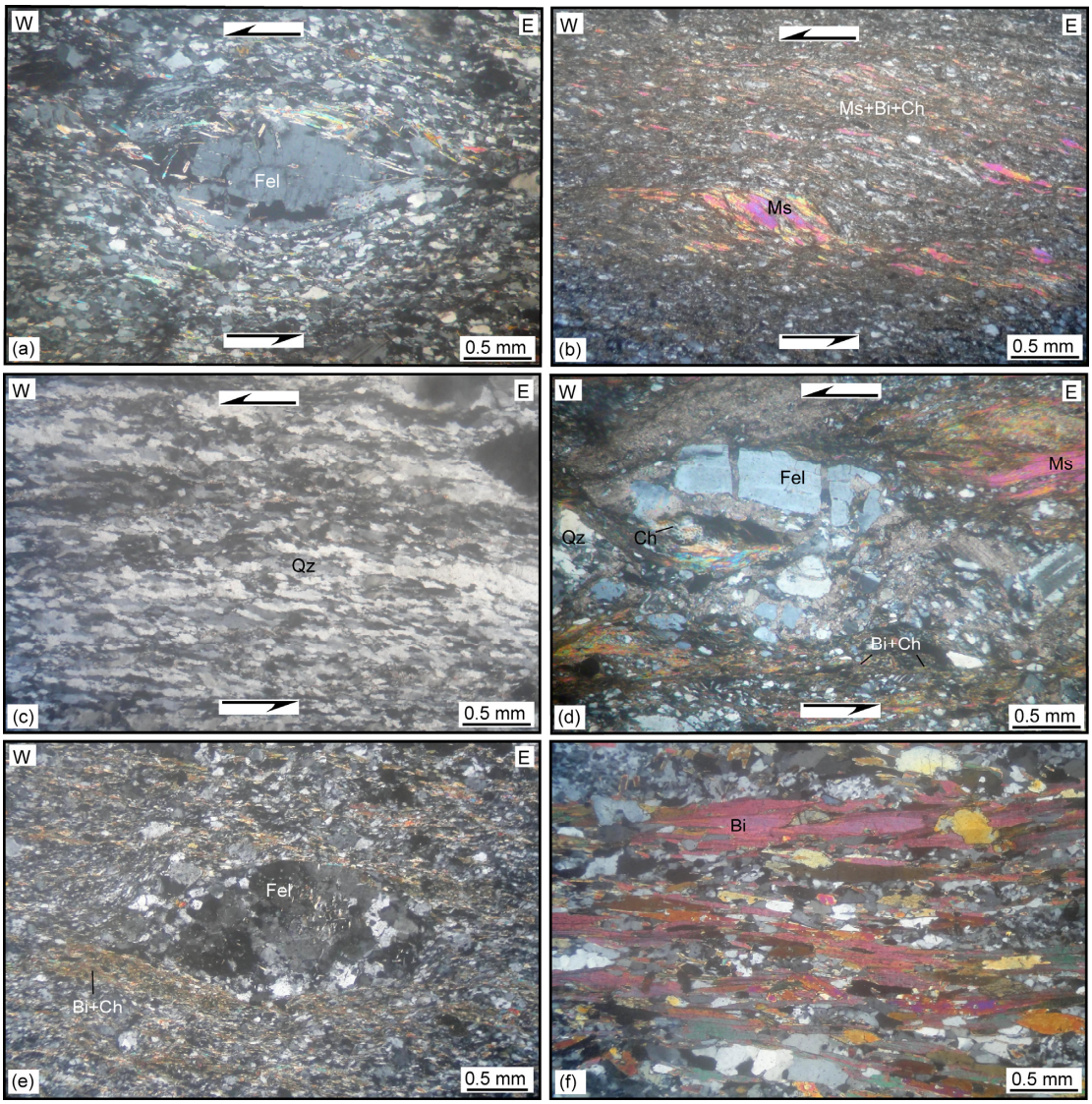

图 6　瓦子峪变质核杂岩的显微照片

(a) 超糜棱岩(SL103), 长石塑性拉长与 BLG 重结晶, 不对称拖尾指示上盘向西运动; (b) 糜棱岩(SL89-3), 云母鱼指示上盘向西运动; (c) 糜棱岩(DL161), 石英呈 SR 与 GBM 重结晶, S-C 组构指示上盘向西运动; (d) 糜棱岩(SL142), 长石显微破裂, 基质中遍布绿泥石; (e) 糜棱岩(DL159-2), 长石 BLG 重结晶, 基质中遍布绿泥石; (f) 瓦子峪剪切带下盘的黑云母片岩(YW41). 正交偏光

延伸部位, 剪切带在稍户营子镇南侧附近已被其切过, 并为孙家湾组覆盖, 恰好可以与北段剪切带衔接, 因而没有改造东侧岩石的早期组构信息. 所以, 孙家湾-稍户营子断层乃后期晚白垩世叠加在拆离剪切带上的脆性正断层, 控制了上白垩统孙家湾组沉积, 而不是核杂岩的拆离断层.

4 拆离剪切带的变形温度估计

瓦子峪拆离剪切带的变形温度分析可以恢复其形成与演化过程的环境. 糜棱岩中石英与长石的动态重结晶型式与变形温度具有较好的对应关系, 可以用于变形温度的估计(误差约 50℃)[55~59]. 显微观测显示, 瓦子峪剪切带糜棱岩类中石英广泛发生动态重结晶, 北段大多以亚颗粒旋转型(SR)重结晶为主, 长石则多数出现显微破裂与亚颗粒化(图 6(d)), 两者皆指示变形温度约(450±50)℃(表 1). 剪切带中段与南段糜棱岩中石英多数以颗粒边界迁移型(GBM)重结晶为主, 部分呈现与亚颗粒旋转型(SR)共存; 同时长石也出现广泛的动态重结晶, 主要表现为嵌入型(BLG)重结晶, 多数还保留有残斑特征(图 6(a), (e)), 两者皆指示了 500~550℃的变形温度(表 1). 整条剪

表 1 瓦子峪剪切带糜棱岩显微镜下鉴定结果

样品号	岩石类型	矿物组合 a)	石英重结晶型式	长石重结晶型式	估计早期变形温度(℃)
北段					
SL142	糜棱岩	残斑(35%): Qz+Fel+Ms 基质(65%): Qz+Ms+Bi+Cal+Ch	BLG+SR	碎裂	380~420
LN35-1	糜棱岩	残斑(40%): Qz+Fel+Ms 基质(60%): Qz+Ms+Bi+Ch	SR	扭折+亚颗粒	400~450
LN36	糜棱岩	残斑(40%): Qz+Fel+Ms 基质(60%): Qz+Fel+Ms+Bi	SR+GBM	BLG	450~500
YW29	初糜棱岩	残斑(75%): Qz+Fel 基质(25%): Qz+Cal+Ms+Bi+Ch	SR	裂纹+亚颗粒	400~450
LN54	糜棱岩	残斑(35%): Qz+Fel+Ms 基质(65%): Qz+Ms+Bi	SR	裂纹+亚颗粒	400~450
中段					
SL103	超糜棱岩	残斑(10%): Fel 基质(90%): Qz+Fel+Ms+Bi+Ep	GBM	BLG	500~550
DL112	糜棱岩	残斑(20%): Qz+Fel+Hb 基质(80%): Qz+Fel+Bi+Ep	GBM	BLG	500~550
DL159-2	糜棱岩	残斑(30%): Qz+Fel+Hb 基质(70%): Qz+Fel+Bi+Ms+Ep+Ch	GBM	BLG	500~550
DL161	糜棱岩	残斑(20%): Qz 基质(80%): Qz+Bi	SR+GBM	—	450~500
DL167	超糜棱岩	残斑(5%): Fel 基质(95%): Qz+Fel+Ms+Bi+Ch	GBM	BLG	500~550
DL182-2	糜棱岩	残斑(35%): Qz+Fel 基质(65%): Qz+Fel+Ms+Ep+Ch	SR+GBM	BLG	450~500
南段					
SL89-2	糜棱岩	残斑(25%): Qz+Fel 基质(75%): Qz+Fel+Bi+Cal+Ep+Ch	SR+GBM	BLG	450~500
DL130	糜棱岩	残斑(20%): Qz+Fel 基质(80%): Qz+Fel+Bi+Ms+Ep	SR+GBM	BLG	450~500
DL134	糜棱岩	残斑(30%): Qz+Fel 基质(70%): Qz+Fel+Ms	GBM	BLG	500~550
DL141	糜棱岩	残斑(40%): Qz+Fel 基质(60%): Qz+Fel+Ms	SR+GBM	BLG	450~500
DL146	糜棱岩	残斑(45%): Qz+Fel+Bi+Hb 基质(55%): Qz+Fel+Bi+Ms+Ep+Ch	GBM	BLG	500~550
DL152	糜棱岩	残斑(30%): Qz+Fel+Hb 基质(70%): Qz+Fel+Bi+Ms+Ep+Ch	GBM	BLG	500~550

a) Qz, 石英; Fel, 长石; Bi, 黑云母; Ms, 白云母; Hb, 角闪石; Ep, 绿帘石; Ch, 绿泥石; Cal, 方解石; BLG, 嵌入式重结晶; SR, 亚颗粒旋转重结晶; GBM, 颗粒边界迁移重结晶

切带内, 含铁镁质矿物糜棱岩多出现绿泥石化现象(图 6(b), (d), (e)), 绿泥石沿 C 与 C′ 面理定向排列, 表明瓦子峪剪切带在变形后期向浅部剥露过程中普遍发生了同构造退变质作用, 估计变形后期温度可低至 300~200℃. 因此, 大致估计瓦子峪剪切带北段的变形温度范围为 450~250℃, 指示绿片岩相环境; 中、南段变形温度范围为 550~250℃, 指示低角闪岩-低绿片岩相环境. 这也揭示了该剪切带活动经历过从深部向浅部运移的过程. 同时还显示北段抬升幅度相对较小, 出露浅层次低温糜棱岩, 下盘残留长城系盖层; 中、南段抬升幅度大(尤其中段), 暴露较深层次糜棱岩.

5 瓦子峪变质核杂岩的形成时代

为了确定瓦子峪核杂岩的活动时间, 笔者应用单矿物 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年、岩脉与岩体的锆石 U-Pb 定年及阜新-义县盆地的年代学资料共同进行约束.

5.1 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学研究

用于 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 测试的共三个样, 两个采自剪切带中段的糜棱岩(LN13-2 和 DL112-3), 一个采自其变形影响的下盘变质岩(位置见图 1). LN13-2 样品为含白云母糜棱岩, 矿物残斑为石英+长石+白云母, 基质为石英+长石+白云母+绿帘石. DL112-3 样品为含黑云母糜棱岩, 矿物残斑为石英+长石+黑云母, 基质为石英+长石+黑云母+绿帘石. YW41 样品为剪切带下盘附近的黑云母片岩, 发育 WNW 向矿物拉伸线理, 云母 S-C 组构与不对称布丁均指示上盘向 WNW 剪切变形. 其矿物组成为石英+黑云母+长石+角闪石+绿帘石, 石英与长石部分出现动态重结晶, 指示发生过糜棱岩化(图 6(f)).

三个样中所分选的白云母或黑云母单矿物, 粒级均大于 100 μm(糜棱岩样中包括残斑与基质矿物), 并进行了手工提纯. 测试工作是在中国地质科学院地质研究所 ^{40}Ar-^{39}Ar 年代学实验室完成的, 具体仪器参数和分析过程详见陈文等[60]. 坪年龄计算与等时线处理采用 Isoplot 3.23 程序. 具体 Ar 同位素分析数据见表 2, ^{40}Ar-^{39}Ar 年龄谱与反等时线见图 7.

LN13-2 白云母的 4~10 加热阶段数据组成的坪年龄为(125.7±0.8) Ma(^{39}Ar 释放量为 85%), 这 7 个成坪温阶构筑的反等时线年龄为(123.8±2.3) Ma, 坪年龄、反等时线年龄与总气体年龄((126.2±1.2) Ma)三者在误差范围内相互一致. DL112-3 黑云母的 8~11 高温加热阶段视年龄的加权平均年龄为(117.0±0.9) Ma(^{39}Ar 释放量为 42%), 构筑的反等时线年龄为(120.1±3.7) Ma, 总气体年龄为(115.2±1.2) Ma, 三者在误差范围内相互一致. YW41 黑云母给出较理想的年龄谱特征, 其坪年龄为(116.2±0.7) Ma(2~10 温阶, ^{39}Ar 释放量为 85%), 相应的反等时线年龄为(116.3±1.4) Ma, 总气体年龄为(116.5±1.1) Ma, 三者在误差范围内一致.

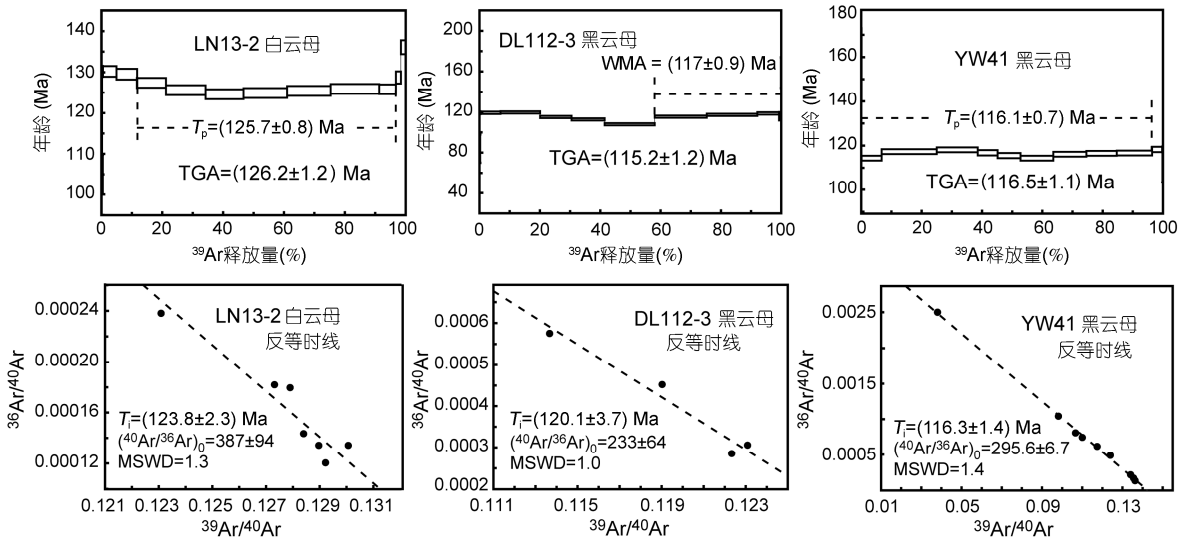

图 7 瓦子峪剪切带糜棱岩与下盘片岩中的白云母与黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄谱及反等时线

WMA 为加权平均年龄, TGA 为总气体年龄, T_p 为坪年龄, T_i 为反等时线年龄

表 2　瓦子峪剪切带糜棱岩与下盘片岩中白云母与黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 分析结果

T (℃)	$(^{40}Ar/^{39}Ar)_m$	$(^{36}Ar/^{39}Ar)_m$	$(^{37}Ar/^{39}Ar)_m$	$(^{38}Ar/^{39}Ar)_m$	$^{40}Ar^*/^{39}Ar$	^{39}Ar (10^{-14}, mol)	^{39}Ar (%)	年龄±1σ (Ma)
LN13-2 (白云母, 121°31′42″E , 41°41′51″N), W=30.70 mg, J=0.009685, T_p=(125.7±0.8) Ma (4~10 温阶)								
700	22.0336	0.0536	0.0304	0.0238	6.1827	0.31	0.45	104.9±4.9
800	11.8579	0.0140	0.0118	0.0155	7.7262	3.06	4.53	130.2±1.3
850	9.0298	0.0045	0.0091	0.0132	7.6814	4.57	6.75	129.5±1.3
900	8.1291	0.0019	0.0045	0.0127	7.5538	6.42	9.48	127.4±1.2
940	7.7588	0.0010	0.0041	0.0125	7.4474	8.80	13.01	125.6±1.2
980	7.6939	0.0010	0.0046	0.0125	7.3857	8.45	12.48	124.6±1.2
1020	7.8242	0.0014	0.0050	0.0126	7.4046	9.70	14.33	124.9±1.2
1060	7.8591	0.0014	0.0060	0.0127	7.4310	9.71	14.35	125.4±1.2
1100	7.7436	0.0009	0.0044	0.0125	7.4635	10.79	15.95	125.9±1.2
1140	7.7934	0.0011	0.0097	0.0124	7.4565	3.70	5.46	125.8±1.2
1240	8.1612	0.0018	0.0638	0.0132	7.6384	1.12	1.66	128.7±1.5
1400	8.7996	0.0024	0.2109	0.0132	8.0902	1.05	1.55	136.1±1.7
DL112-3 (黑云母, 121°26′46″E, 41°35′38″N), W=24.39 mg, J=0.009477, T=(117.0±0.9) Ma (8~11 温阶)								
600	439.8002	1.4141	0.0000	0.2036	20.9306	0.01	0.01	314±188
700	256.9406	0.8518	0.1053	0.1768	5.2323	0.10	0.21	84±14
800	43.1049	0.1204	0.0133	0.0361	7.5244	3.38	6.73	119.2±1.2
850	11.4161	0.0131	0.0087	0.0153	7.5479	6.58	13.12	119.6±1.2
900	13.2431	0.0202	0.0166	0.0169	7.2633	5.23	10.44	115.2±1.1
950	11.0973	0.0135	0.0180	0.0156	7.1077	5.50	10.96	112.8±1.1
1000	9.5215	0.0092	0.0209	0.0146	6.7853	8.31	16.57	107.9±1.1
1050	8.4080	0.0038	0.0085	0.0134	7.2751	8.69	17.31	115.4±1.1
1100	8.1312	0.0025	0.0047	0.0131	7.3921	8.38	16.70	117.2±1.1
1150	8.1793	0.0023	0.0048	0.0131	7.4898	3.63	7.23	118.7±1.2
1200	8.8028	0.0051	0.0215	0.0142	7.3039	0.30	0.60	115.8±4.2
1300	11.9158	0.0059	0.0000	0.0117	10.1671	0.05	0.10	159±15
1400	38.1023	0.0779	0.2714	0.0563	15.1014	0.01	0.02	232±81
YW41 (黑云母, 121°28′43″E , 41°38′25″N), W=30.07 mg, J=0.009477, T_p=(116.2±0.7) Ma (2~10 温阶)								
700	259.4418	0.8455	0.0000	0.1790	9.5994	0.07	0.11	157±16
800	26.3133	0.0657	0.0083	0.0257	6.9049	4.41	6.65	114.3±1.1
850	9.0861	0.0067	0.0032	0.0141	7.0880	12.10	18.24	117.3±1.1
890	9.3719	0.0075	0.0024	0.0142	7.1375	9.00	13.57	118.1±1.1
930	10.1921	0.0106	0.0072	0.0149	7.0572	4.40	6.63	116.8±1.2
980	8.5097	0.0052	0.0013	0.0138	6.9794	5.02	7.57	115.5±1.2
1020	8.0581	0.0039	0.0057	0.0135	6.9031	7.22	10.88	114.3±1.1
1060	7.4588	0.0015	0.0017	0.0131	7.0133	7.25	10.93	116.1±1.1
1100	7.3830	0.0012	0.0000	0.0130	7.0367	6.69	10.09	116.5±1.1
1160	7.3547	0.0010	0.0031	0.0130	7.0515	7.77	11.72	116.7±1.1
1260	7.4369	0.0009	0.0087	0.0128	7.1544	2.27	3.42	118.3±1.2
1400	8.7487	0.0069	0.0274	0.0139	6.7080	0.13	0.19	111.2±7.9

白云母与黑云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 同位素体系的封闭温度分别为(350±50)和(300±50)℃[61,62]. 瓦子峪剪切带中段峰期变形温度高达 550℃, 超过了云母类矿物的封闭温度. 因而, LN13-2 白云母 125.7 Ma 的坪年龄与 DL112-3 黑云母 117.0 Ma 的坪年龄记录了剪切带变形的冷却年龄. 张晓晖等[37]从瓦子峪剪切带北段与中段糜棱岩中分别获得了黑云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为(127±3)和(116±2) Ma, 两者相差 11 Ma. 前者年龄较大与剪切带北段出露较浅相吻合(变形温度较低), 它代表了剪切带浅层次部位活动的时间. 后者采样位置与 DL112-3 相邻, 两者年龄在误差范围内相一致, 同样代表了剪切带的冷却年龄. 下盘片岩中 YW41 黑云母 116.2 Ma 的坪年龄则记录了下盘抬升到 300 ℃等温面的冷却年龄. 由于剪切带经历从深部向浅部的递进变形, 其变形温度范围大, 上述 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄只是记录了剪切带剥露至 350 或

300℃等温面时的时间, 表明核杂岩在127~116 Ma间处于活动, 但并不能确定活动开始与结束的具体时间.

5.2 岩脉与岩体的锆石 U-Pb 定年

瓦子峪剪切带中一些部位(如张家堡附近)含有许多变形花岗岩脉. 这些岩脉主要呈现为被剪切带完全置换的样式, 而很少出现部分置换的同类脉体, 说明它们为剪切带活动之前侵位的岩脉, 而非同变形侵位岩脉. 此外, 南侧的石山岩体西缘由于受瓦子峪剪切带叠加变形作用, 也出现强烈糜棱岩化现象(图 8(c)). 工作中采集了两个完全置换岩脉和强变形石山岩体进行了锆石 U-Pb 定年, 以此来限定剪切带具体活动时间(位置见图 1). LN8-2 样品为二长花岗岩脉, 发生了糜棱岩化, 组成矿物包括斜长石、钾长石、石英、白云母及少量绿帘石. DL136 样同样为二长花岗岩脉(图 8(a), 强烈糜棱岩化, 组成矿物包括钾长石、斜长石、石英和白云母, 石英与长石皆发生了动态重结晶(图 8(b)). DL215 样品为花岗闪长岩, 组成矿物包括斜长石、石英、钾长石和黑云母, 偶见角闪石.

通过浮选、电磁选等方法分选出三个样的锆石, 然后再挑选晶型完整的锆石颗粒制成环氧树脂样品耙, 经抛光处理后, 进行阴极发光图像照相, 据此选择合适的锆石进行分析. 测试工作是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产国家重点实验室完成的. 锆石原位 U-Pb 同位素定年采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)分析, 具体分析流程及仪器参数见 Yuan 等[63]. 锆石 U-Pb 年代学数据处理采用 ICPMSDataCal 6.2 软件计算[64], 并且采用 Andersen[65] 的方法进行普通铅校正. 锆石年龄的计算及谐和图的编制采用 Isoplot 3.23 完成, 样品的锆石 CL 图像与 U-Pb 同位素年代学结果见图 9 和表 3.

LN8-2 中锆石长短轴比大于 2, 具清晰的岩浆振荡环带, 部分见核. 其 Th/U 比值为 0.28~1.91, 为典型岩浆成因. 其中 9 颗岩浆锆石的分析点位于 U-Pb 谐和线上或其附近, $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为(147.2±1.5) Ma, 代表岩脉的结晶年龄. DL136 中锆石以长柱状为主, 岩浆环带发育, Th/U 比值为 0.12~1.59, 显示岩浆成因. 其中 8 颗岩浆锆石的 9 个分析点给出 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为(151.4±1.4) Ma, 代表岩脉的结晶年龄. DL215 中锆石呈长柱状, 晶型较好, 发育岩浆环带, Th/U 比值为 0.71~1.44, 为典型岩浆成因. 其中 16 颗岩浆锆石的分析点总体位于 U-Pb 谐和线上, 给出 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为(125.2±1.0) Ma, 代表岩体的侵位年龄.

早期变形岩脉定年结果表明剪切带的开始活动时间至少在(147.2±1.5) Ma 之后. 尖砬子岩体西部叠加了瓦子峪剪切带, 变形已达糜棱岩程度. 远离该剪切带, 岩体则呈现早期 NNE-SSW 向线理的变形组构, 表明剪切带变形在其侵位(154 Ma)之后. 早白垩世石山岩体西缘同样受到瓦子峪剪切带变形影响, 靠近剪切带处的岩体变形强烈(图 2), 石英明显拉长且定向排列, 由其定义的矿物线理向 WNW 倾伏(图 8(c)~(f)). 镜下也显示矿物定向排列, 石英出现动态重结晶, 颗粒边界不规则, 明显细粒化与塑性拉长, 且 C 轴组构分析结果也是如此, 其点集密图案指示上盘向 WNW 运动(图 3), 为固态变形的结果. 但远离剪切带时, 变形快速减弱(图 8(g)), 主体位于东侧的石山岩体并没有发生塑性变形(图 8(h)), 其石英 C 轴组构分析显示图案呈散点分布(图 3), 证实未发生过晶内塑性变形. 这种特征表明石山岩体乃核杂岩伸展活动同期侵位的, 其西侧变形部位年龄为(125±1) Ma, 东侧未变形岩体年龄为(123±3) Ma[48], 两者在误差范围内一致, 也与剪切带活动时间相吻合. 北部未变形的早白垩世大石头沟岩体(124 Ma)同样也应是同构造侵位岩体.

5.3 上叠断陷盆地的制约

瓦子峪拆离剪切带中的变形岩脉与糜棱岩单矿物定年可以将其活动开始时间限制在 147~127 Ma 之间, 结束时间限制在 116 Ma 之后, 但仍无法确定具体的开始与结束时间. 阜新-义县盆地作为核杂岩同伸展活动的上叠盆地, 其沉积的连续地层包括义县组、九佛堂组、沙海组和阜新组, 它们的形成时代与核杂岩的活动时间相对应, 即可以用义县组的下限年龄与阜新组的上限年龄来限定核杂岩的活动时间. 前人报道义县盆地内的义县组火山岩 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 与 U-Pb 年代学数据介于 130~119 Ma 之间[43~46]. 由于义县组最底部还发育一套以杂砂岩、复成分砾石为主的沉积岩(即马神庙层与老公沟层)[66], 所以义县盆地开始发育时间应略早于 130 Ma. 结合旁侧跟义县盆地相连的金-羊盆地内与义县组不整合接触的下伏土城子组时代为 147~136 Ma[67~69], 可以限定义县组的开

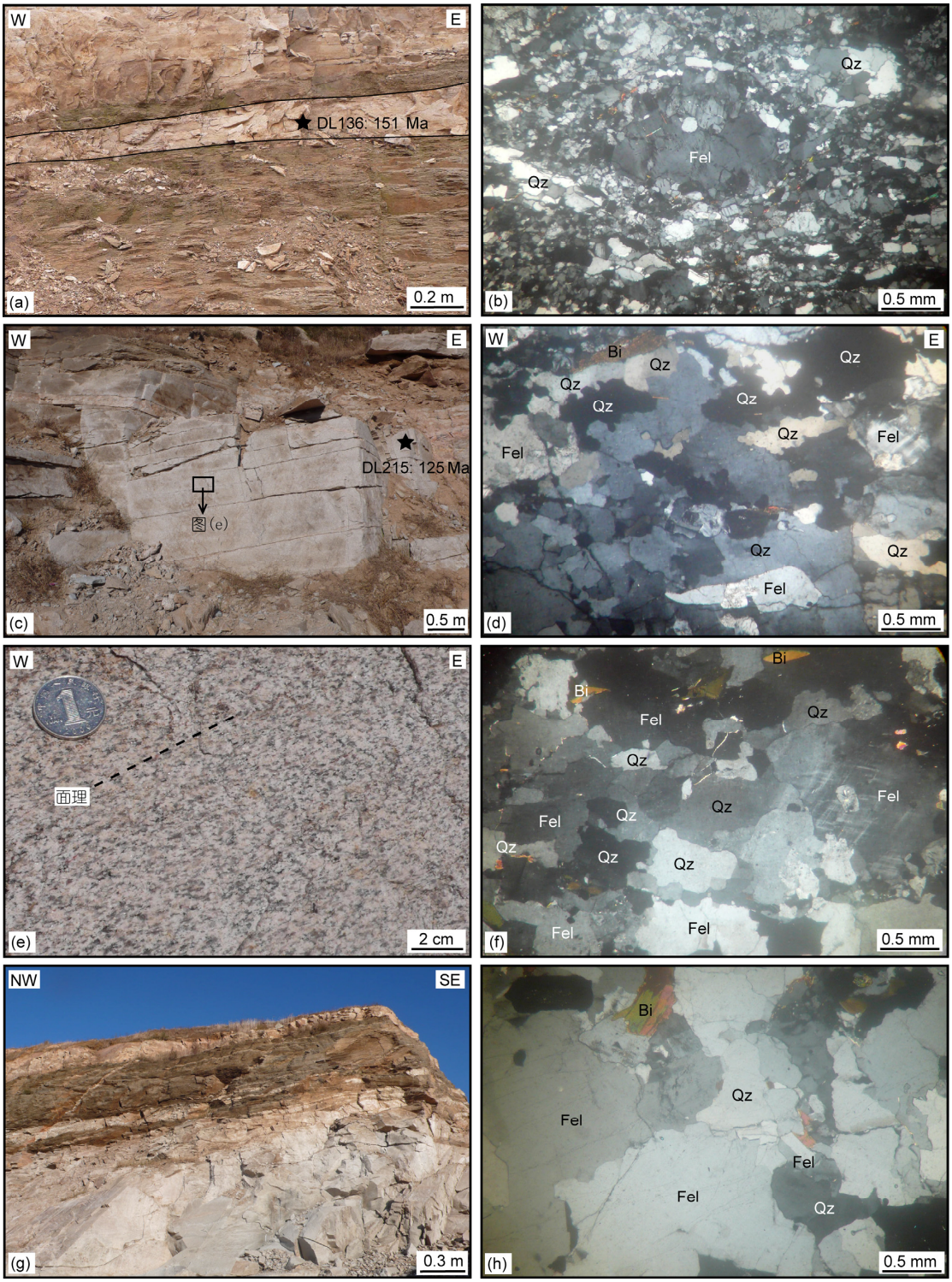

图 8　变形岩脉与石山岩体的野外与显微照片

(a) 张家堡南, 向西缓倾的瓦子峪剪切带中完全置换的二长花岗岩脉(DL136); (b) 长英质糜棱岩 DL136, 基质为动态重结晶的细粒石英与长石; (c) 西侧变形的石山岩体(DL215), 面理向北西缓倾; (d) 糜棱岩化花岗闪长岩(DL215), 矿物定向排列, 石英多晶条带内颗粒出现细粒化与动态重结晶;. (e) 石英塑性拉长且定向排列, 构成向 WNW 倾伏的矿物线理; (f) 微弱变形石山岩体, 矿物弱定向排列; (g) 弱变形石山岩体与围岩糜棱岩化片麻岩, 两者面理协调; (h) 未变形的石山岩体, 矿物无定向排列

表 3　变形岩脉与石山岩体锆石 U-Pb 年龄测试结果

分析点号	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	同位素比值						年龄(Ma)			
				$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
样品 LN8-2 (121°27′59″E, 41°25′51″N)													
1.1	236	309	1.31	0.0600	0.0028	0.1834	0.0088	0.0222	0.0003	171	8	142	2
2.1	91	91	0.99	0.0501	0.0030	0.1532	0.0091	0.0227	0.0004	145	8	145	2
3.1	129	167	1.30	0.0634	0.0041	0.1961	0.0125	0.0228	0.0004	182	11	146	2
4.1	153	233	1.52	0.0497	0.0027	0.1564	0.0081	0.0232	0.0003	148	7	148	2
5.1	55	54	0.98	0.0683	0.0047	0.2116	0.0133	0.0232	0.0005	195	11	148	3
6.1	338	357	1.06	0.0495	0.0017	0.1591	0.0052	0.0233	0.0002	150	5	149	1
7.1	353	261	0.74	0.0527	0.0020	0.1679	0.0066	0.0230	0.0003	158	6	146	2
8.1	494	137	0.28	0.0486	0.0020	0.1546	0.0060	0.0230	0.0002	146	5	147	1
9.1	167	320	1.91	0.0525	0.0032	0.1654	0.0096	0.0234	0.0003	155	8	149	2
样品 DL136 (121°24′39″E, 41°19′48″N)													
1.1	190	233	1.22	0.0513	0.0028	0.1679	0.0094	0.0236	0.0003	158	8	151	2
2.1	238	241	1.01	0.0529	0.0042	0.1746	0.0151	0.0241	0.0005	163	13	153	3
3.1	695	544	0.78	0.0510	0.0017	0.1661	0.0052	0.0237	0.0002	156	5	151	1
4.1	485	119	0.24	0.0495	0.0017	0.1639	0.0056	0.0240	0.0003	154	5	153	2
5.1	44	53	1.22	0.0696	0.0086	0.2106	0.0219	0.0241	0.0007	194	18	153	5
6.1	66	105	1.59	0.0468	0.0065	0.1508	0.0205	0.0234	0.0006	143	18	149	4
6.2	246	136	0.55	0.0493	0.0025	0.1634	0.0087	0.0240	0.0004	154	8	153	3
7.1	159	18	0.12	0.0461	0.0057	0.1491	0.0181	0.0235	0.0005	141	16	150	3
8.1	45	45	1.00	0.0709	0.0088	0.2222	0.0227	0.0237	0.0007	204	19	151	4
样品 DL215 (121°23′47″E, 41°17′14″N)													
1.1	1548	2231	1.44	0.0637	0.0019	0.1701	0.0051	0.0192	0.0002	160	4	123	1
2.1	1147	880	0.77	0.0519	0.0039	0.1372	0.0102	0.0192	0.0003	131	9	122	2
3.1	1114	1068	0.96	0.0480	0.0017	0.1333	0.0047	0.0201	0.0002	127	4	128	1
4.1	990	1063	1.07	0.0476	0.0015	0.1287	0.0040	0.0196	0.0002	123	4	125	1
5.1	1056	1237	1.17	0.0461	0.0019	0.1237	0.0050	0.0195	0.0002	118	5	124	1
6.1	974	691	0.71	0.0511	0.0019	0.1397	0.0050	0.0198	0.0002	133	4	127	1
7.1	605	678	1.12	0.0490	0.0022	0.1306	0.0059	0.0194	0.0003	125	5	124	2
8.1	526	727	1.38	0.0488	0.0022	0.1311	0.0058	0.0196	0.0002	125	5	125	1
9.1	1250	1329	1.06	0.0487	0.0027	0.1345	0.0074	0.0200	0.0002	128	7	128	1
10.1	1499	1698	1.13	0.0502	0.0031	0.1352	0.0082	0.0195	0.0002	129	7	125	1
11.1	601	859	1.43	0.0507	0.0024	0.1381	0.0064	0.0199	0.0002	131	6	127	1
12.1	661	771	1.17	0.0521	0.0023	0.1424	0.0065	0.0199	0.0002	135	6	127	1
13.1	891	1149	1.29	0.0461	0.0027	0.1211	0.0070	0.0190	0.0002	116	6	122	1
14.1	844	885	1.05	0.0502	0.0019	0.1343	0.0049	0.0194	0.0002	128	4	124	1
15.1	924	1208	1.31	0.0507	0.0021	0.1355	0.0058	0.0192	0.0002	129	5	123	1
16.1	1302	1642	1.26	0.0509	0.0017	0.1394	0.0047	0.0198	0.0002	133	4	126	1

始时间介于 136~130 Ma. 而阜新组顶部碱性玄武岩的 K-Ar 年龄表明其上限年龄为 100 Ma[47]. 因此, 作为控制阜新-义县盆地发育的瓦子峪剪切带的启动时间应介于 136~130 Ma 间, 推测在 135 Ma 左右, 且在 100 Ma 时已停止活动. 这也与阜新–义县盆地地层的沉积速率相吻合, 马寅生等[70]研究发现义县组到阜新组的沉积速度主要呈现由快到慢的变化过程, 对应断陷活动的强弱变化, 至阜新末期断陷活动基本停止, 同样表明瓦子峪剪切带伸展此时已结束.

综上分析, 瓦子峪变质核杂岩的活动时间基本可以限制在 135~100 Ma, 期间伴随早白垩世石山等多个岩体的同构造侵位与阜新-义县上叠盆地的形成.

6　瓦子峪变质核杂岩的演化模式

本次研究表明, 大约自 135 Ma 开始, 由于 WNW-ESE 向拉伸, 医巫闾山现今变质杂岩出露区西

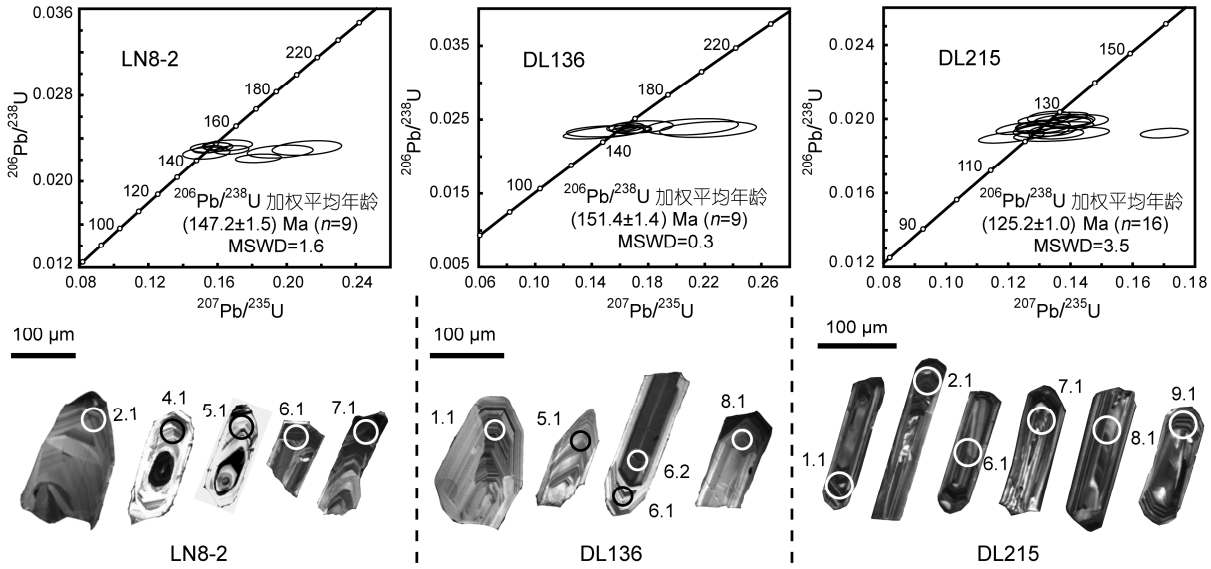

图 9　变形岩脉与石山岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图与阴极发光照片

侧发育了低角度西倾的瓦子峪拆离剪切带, 浅部表现为脆性变形, 深部呈现为韧性变形[71], 同时浅部伴生阜新-义县断陷盆地, 控制了下白垩统沉积(图 10(a)). 此时医巫闾山剪切带(至少其西段)仍位于韧性域中, 局部则被瓦子峪剪切带所切割. 瓦子峪拆离剪切带中段估计的变形温度最大约 550 ℃, 指示其至少起源于中地壳环境(>15 km). 而阜新−义县盆地内下白垩统的总厚度不超过 6 km[72], 表明仅仅通过伸展断层的活动无法将深部的剪切带与下盘杂岩抬升至近地表, 还必须有均衡作用贡献的隆升. 核杂岩发育过程中伴随有下地壳部分熔融与岩浆侵位, 浮力的增加必然造成均衡隆升(图 10(b)). 同构造侵位的岩体在靠近剪切带处被置换改造, 而远离剪切带则未受影响. 正是在持续的拉伸与热隆作用下, 上盘向西拆离运动, 盆地扩展, 下盘基底杂岩快速抬升, 出现盆岭构造格局. 拆离韧性剪切带在向浅部运移过程中糜棱岩发生了绿泥石化退变质. 至更浅部还会叠加脆性变形, 出现绿泥石化角砾岩、微角砾岩等脆性断层岩系列, 演变成拆离断层带. 同时, 上盘拆离与下盘隆升导致剪切带枢纽向西滚动, 并衍生出多条新的分离断层(breakaway fault zone, 图 10(b), (c))[71,73,74]. 这些断层根部与主拆离断层相连, 可以演化成新的拆离断层(如图 4). 当拆离断层浅部不断被剥蚀掉时, 剪切带的出露位置逐渐向西迁移. 现今剪切带中段糜棱岩与下盘片岩的黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 坪年龄, 指示其在 116 Ma 时才剥露至 300 ℃等温面(图 10(c)). 而上叠盆地中早白垩世地层的连续性表明瓦子峪变质核杂岩本身一直演化至 100 Ma 才结束(图 10(d)). 此时核杂岩的情形则与北美核杂岩的现今格局基本相似, 即拆离断层带中的断层岩系列保存完好, 盆地内地层时代与核杂岩形成时间相一致. 但不同的是, 瓦子峪变质核杂岩形成后于晚白垩世时可能再一次叠加了拉伸, 发育了中-高角度的孙家湾-稍户营子脆性正断层(图 10(e)). 它不仅切过下白垩统与长城系, 也切割了拆离剪切带, 控制了孙家湾组砾岩沉积. 这另一阶段的脆性伸展与抬升, 最终造就瓦子峪变质核杂岩现今复杂的格局. 因此, 笔者认为孙家湾-稍户营子断裂不能代表瓦子峪变质核杂岩的拆离断层, 原因包括该断层与拆离韧性剪切带的形成时间不一致, 两者的产状与走向不协调, 而且它还截切了韧性剪切带. 上述分析揭示, 瓦子峪变质核杂岩的演化过程与 Wernicke 和 Axen[73]提出的均衡回弹模式相似, 即滚动枢纽模式(rolling-hinge)[75,76]. 其均衡隆升的动力来自上盘拆离、剥蚀与下盘热隆的共同作用.

世界上许多造山带内发育的核杂岩, 如北大别核杂岩[77,78]、北美 Shuswap 核杂岩[79,80]、爱琴海 Naxos 和 Ios 核杂岩[81,82]等, 都发现存在同期大规模中下地壳塑性流动与混合岩化, 显示发生过下地壳重力垮塌作用[83~85]. 目前, 许多学者对华北克拉通北缘燕

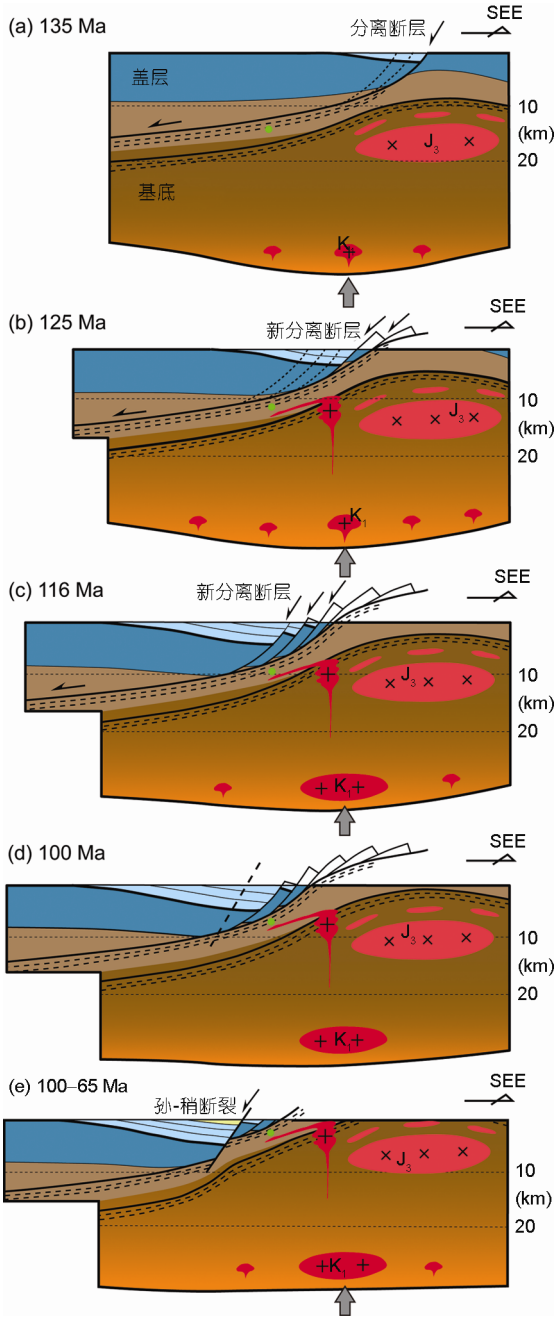

图 10　瓦子峪变质核杂岩演化模式图

辽构造带上发育的多个变质核杂岩成因机制也都较简单认为与加厚地壳的重力垮塌直接相关[17,18,26,28], 却缺乏垮塌过程的证据. 而包括瓦子峪变质核杂岩在内的板内核杂岩, 下盘岩石都没有大规模同期塑性流动变形与同构造混合岩化现象[15,16,18,23,26,27], 明显区别于造山带内核杂岩特征. 笔者认为加厚下地壳的重力垮塌并不是这些板内核杂岩的通用演化模式. 尽管燕辽构造带前期经历过燕山运动的收缩变形[86~88], 但与发生过显著地壳加厚的造山带相比, 其板内的地壳加厚有限, 积累的重力势能明显不够, 不足以驱动下地壳流动. 瓦子峪变质核杂岩是在区域拉伸与均衡隆升作用下, 以滚动枢纽模式演化. 该过程没有伴生核杂岩下盘的大规模塑性流动, 因此不支持下地壳重力垮塌模式. 推测华北克拉通北缘的其他板内核杂岩也具有相类似的演化过程.

7　结论

通过对瓦子峪变质核杂岩拆离剪切带进行详细的几何学、运动学和变形环境分析, 并结合上、下盘变形特征, 依据相关定年结果和上叠盆地的年代学资料, 得到以下几点认识.

(1) 该核杂岩仅发育单侧低角度拆离剪切带, 总体倾向北西, 波瓦状褶皱发育, 剪切带上盘向 WNW 方向(约 285°)伸展运动. 剪切带变形温度估计(550~250℃)表明其起源于中地壳环境, 经历过从深部向浅部剥露过程. 剪切带北段抬升幅度较小, 变形温度较低, 出露浅层次糜棱岩; 中、南段抬升幅度大, 尤其中段最大, 峰期变形温度较高, 出露深层次糜棱岩.

(2) 瓦子峪变质核杂岩的开始活动时间大约在 135 Ma, 变形结束时间为 100 Ma, 期间伴随包括石山等多个岩体的同构造侵位与下盘杂岩的隆升, 并控制了上叠盆地火山碎屑沉积. 该核杂岩于晚白垩世时又一次叠加拉伸, 造成拆离剪切带被后期孙家湾-稍户营子脆性正断层切割.

(3) 瓦子峪变质核杂岩形成于区域 WNW-ESE 向拉伸背景中, 在均衡隆升的共同作用下, 核杂岩以滚动枢纽模式演化, 下盘中没有出现明显的塑性流动, 不支持下地壳重力垮塌机制.

致谢　野外调查中得到加拿大西安大略大学地球科学系姜大志老师的指导, 锆石测试得到中国地质大学(武汉)地质过程与矿产国家重点实验室胡兆初、郑曙老师和陈露等的大力支持和帮助, 评审专家提出的宝贵修改意见, 在此一并表示衷心感谢.

参考文献

1 Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al, eds. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Amer Geophys Union Geodyn Ser 27, 1998. 107–126

2 Menzies M A, Xu Y G. Geodynamics of the North China Craton. In: Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al, eds. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Amer Geophys Union Geodyn Ser 27, 1998. 155–165

3 Fan W M, Zhang H F, Baker J, et al. On and off the north China craton: Where is the Archaean keel? J Petrol, 2000, 41: 933–950

4 Rudnick R L, Gao S, Ling W L, et al. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China Craton. Lithos, 2004, 77: 609–637

5 Menzies M A, Xu Y G, Zhang H F, et al. Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. Lithos, 2007, 96: 1–21

6 Xu Y G. Diachronous lithospheric thing of the North China Craton and formation of the Daxin'anling-Taihangshan gravity lineament. Lithos, 2007, 76: 281–298

7 Chen L, Tao W, Zhao L, et al. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in northeastern North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 2008, 267: 56–68

8 Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath eastern China: Evidence, timing and mechanism. Phys Chem Earth, 2001, 26: 747–757

9 Gao S, Ridnick R L,Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China Craton. Nature, 2004, 432: 892–897

10 Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. Earth Planet Sci Lett, 2005, 233: 103–119

11 姜耀辉, 蒋少涌, 赵葵东, 等. 辽东半岛煌斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对中国东部岩石圈减薄开始时间的制约. 科学通报, 2005, 50: 2161–2168

12 吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 2008, 24: 1145–1174

13 高山, 章军峰, 许文良, 等. 拆沉作用与华北克拉通破坏. 科学通报, 2009, 54: 1962–1963

14 Zheng Y D, Zhang Q. The Yagan metamorphic core complex and extensional detachment fault in Inner Mongolia. Acta Geol Sin, 1994, 7: 125–135

15 Webb L E, Graham S A, Johnson C L, et al. Occurrence, age, and implications of the Yagan-Onch Hayrhan metamorphic core complex, southern Mongolia. Geology, 1999, 27: 143–146

16 王涛, 郑亚东, 李天斌, 等. 中蒙边界区亚干变质核杂岩的组成与结构. 地质科学, 2002, 37: 79–85

17 郑亚东, 王涛. 中蒙边界区中生代推覆构造与伸展垮塌作用的运动学和动力学分析. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35: 291–303

18 Davis G A, Darby B J, Zheng Y D, et al. Geometric and temporal evolution of an extensional detachment fault, Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. Geology, 2002, 30: 1003–1006

19 王新社, 郑亚东, 张进江, 等. 呼和浩特变质核杂岩伸展运动学特征及剪切作用类型. 地质通报, 2002, 21: 238–245

20 Davis G A, Qian X, Zheng Y D, et al. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: A metamorphic core complex north of Beijing, China. In: Yin A, Harrison M, eds. Tectonic Evolution of Asia. New York: Cambridge University Press, 1996. 253–280

21 Passchier C W, Zhang J S, Konopasek J. Geometric aspects of synkinematic granite intrusion into a ductile shear zone—An example from the Yunmengshan core complex, northern China. J Geol Soc London, 2005, 245: 65–80

22 张家声, Passchier C W, Konopasek J, 等. 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, 2007, 14: 27–39

23 Wang X S, Zheng Y D, Jia W. Extension of the Louzidian Metamorphic Core Complex and Develoment of Supradetachment Basins in Southern Chifeng, Inner Mongolia, China. Acta Geol Sin, 2004, 78: 237–245

24 王新社, 郑亚东. 楼子店变质核杂岩韧性变形作用的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学约束. 地质论评, 2005, 51: 574–582

25 马寅生, 崔盛芹, 吴淦国, 等.医巫闾山变质核杂岩构造特征. 地球学报, 1999, 20: 385–391

26 Darby B J, Davis G A, Zhang X H, et al. The newly discovered Waziyu metamorphic core complex, Yiwulüshan, western Liaoning Province, Northwest China. Earth Sci Front, 2004, 11: 145–155

27 Liu J L, Davis G A, Lin Z Y, et al. The Liaonan metamorphic core complex ,southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of eastern Liaoning, Korea and congtiguous areas. Tectonophysics, 2005, 407: 65–80

28 Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from $^{40}Ar/^{39}Ar$ thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton. Geol Soc Am Bull, 2007, 119: 1405–1414

29 Lin W, Faure M, Monié P, et al. Mesozoic extensional tectonics in Eastern Asia: the south Liaodong peninsula metamorphic core complex (NE China). J Geol, 2008, 116: 134–154
30 林伟, 王清晨, 王军, 等. 辽东半岛晚中生代伸展构造——华北克拉通破坏的地壳响应. 中国科学: 地球科学, 2011, 41: 638–653
31 刘俊来, 纪沫, 申亮, 等. 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, 2011, 41: 618–637
32 Lin W, Wang Q. Late Mesozoic extensional tectonics in the North China block: A crustal response to subcontinental mantle removal? Bull Soc Géol France, 2006, 177: 287–297
33 刘俊来, 关会梅, 纪沫, 等. 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, 2006, 16: 21–26
34 孟宪刚, 冯向阳, 邵兆刚, 等. 辽西医巫闾山变质核杂岩构造系统及其对金矿的控制. 地质通报. 2002, 21: 841–847
35 朱大岗, 孟宪刚, 马寅生, 等. 辽西医巫闾山变质核杂岩构造特征及其对金矿床的控制作用. 大地构造与成矿学, 2002, 26: 156–161
36 朱大岗, 孟宪刚, 冯向阳, 等. 辽西医巫闾山变质核杂岩构造特征及其岩石组构的动力学分析. 地球学报, 2003, 24: 225–230
37 张晓晖, 李铁胜, 蒲志平. 辽西医巫闾山两条韧性剪切带的 ^{40}Ar-^{39}Ar 年龄: 中生代构造热事件的年代学约束. 科学通报, 2002, 47: 697–701
38 张宏, 王五力, 李之彤, 等. 辽西医巫闾山地区中生代两期韧性变形的研究. 世界地质, 2004, 23: 213–220
39 梁雨华, 王献忠, 于文祥, 等. 辽西医巫闾山变质核杂岩中间流变层变形特征. 吉林大学学报(地球科学), 2009, 39: 711–716
40 罗镇宽, 苗来成, 关康, 等. 辽宁阜新排山楼金矿区岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其意义. 地球化学, 2001, 30: 483–490
41 邴志波, 刘文海, 黄志安, 等. 辽西上白垩统大兴庄组地层层序及时代. 地质通报, 2003, 22: 351–355
42 Jiang B Y, Sha J S. Late Mesozoic stratigraphy in western Liaoning, China: A review. J Asian Earth Sci, 2006, 28: 205–217
43 Smith P E, Evensen N M, York D, et al. Dates and rates in ancient lakes: $^{40}Ar/^{39}Ar$ evidence for an Early Cretaceous age for the Jehol Group, Northeast China. Can J Earth Sci, 1995, 32: 1426–1431
44 王松山, 胡华光, 李佩贤. 辽西义县组的地质时代. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20: 289–291
45 张宏, 柳小明, 陈文, 等. 辽西北票–义县地区义县组顶部层位的年龄及其意义. 中国地质, 2005, 32: 596–603
46 He H Y, Pan Y X, Tauxe L, et al. Toward age determination of the M0r (Barremian-Aptian boundary) of the Early Cretaceous. Phys Earth Planet Int, 2008, 169: 41–48
47 张宏福, 郑建平. 华北中生代玄武岩的地球化学特征与岩石成因: 以辽宁阜新为例. 科学通报, 2003, 48: 603–609
48 吴福元, 杨进辉, 张艳斌, 等. 辽西东南部中生代花岗岩时代. 岩石学报, 2006, 22: 315–325
49 杜建军, 马寅生, 赵越, 等. 辽西医巫闾山花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义. 中国地质, 2007, 34: 26–33
50 Zhang X H, Mao Q, Zhang H F, et al. A Jurassic peraluminous leucogranite from Yiwulüshan, western Liaoning, North China Craton: Age, origin and tectonic significance. Geol Mag, 2008, 145: 305–320
51 吕晶, 刘文海. 辽西卡拉房子地区印支期构造特征. 辽宁地质, 1994, 3: 255–262
52 李刚, 刘正宏, 徐仲元, 等. 医巫闾山岩体同伸展侵位的证据及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40: 971–978
53 张必龙, 朱光, 姜大志, 等. 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, 2011, 57: 779–798
54 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等. 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, 2003, 33: 913–920
55 Passchier C W, Trouw R A J. Microtectonics. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 40–43
56 Lafrance B, John Barbara E, Frost B R. Ultra high-temperature and subsolidus shear zones: Examples from the Poe Mountain anorthosite, Wyoming. J Struct Geol, 1998, 20: 945–955
57 Altenberger U. Ductile deformation of K-feldspar in dry eclogites facies shear zones in the Bergen Arcs, Norway. Tectonophysics, 2000, 320: 107–121
58 Rosenberg C L. Deformation and recrystallization of plagioclase along a temperature Gradient: An example from the Bergell tonalite. J Struct Geol, 2003, 25: 389–408
59 Mancktelow N S, Pennacchioni G. The influence of grain boundary fluids on the microstructure of quartz-feldspar mylonites. J Struct Geol, 2004, 26: 47–69
60 陈文, 张彦, 张岳桥, 等. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据. 岩石学报, 2006, 22: 867–872
61 Hacker B R, Wang Q. Ar/Ar geochronology of ultrahigh-pressure metamorphism in central China. Tectonics, 1995, 14: 994–1006
62 Dunlap W J. Neocrystallization of cooling? $^{40}Ar/^{39}Ar$ ages of white mica of low-grade mylonites. Chem Geol, 1997, 143: 181–203
63 Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. Geostand Geoanal Res, 2004, 28: 353–370
64 Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. J Petrol, 2010, 51: 537–571
65 Andersen T. Correlation of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb. Chem Geol, 2002, 192: 59–79

66 梁俊红, 巩恩普, 董旭明, 等.辽西义县盆地义县组底部沉积相与沉积环境分析. 沉积学报, 2007, 25: 545–553
67 Swisher C C, 汪筱林, 周忠和, 等. 义县组同位素年代新证据及土城子组 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄测定. 科学通报, 2001, 46: 2009–2012
68 张宏, 韦忠良, 柳小明, 等. 冀北–辽西地区土城子的 LA-ICP-MS 测年. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 960–970
69 Chang S C, Zhang H C, Renne R R, et al. High-precision $^{40}Ar/^{39}Ar$ age for the Jehol Biota. Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol, 2009, 280: 94–104
70 马寅生, 崔盛芹, 吴淦国, 等. 辽西医巫闾山的隆升历史. 地球学报, 2000, 21: 245–253
71 Lister G S, Davis G A. The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, USA. J Struct Geol, 1989, 11: 65–94
72 马寅生. 燕山东段——下辽河盆地中新生代盆岭构造及应力场演化. 北京: 地质出版社, 2004. 63–65
73 Wernicke B, Axen G J. On the role of isostasy in the evolution of normal fault system. Geology, 1988, 16: 848–851
74 Arca M S, Kapp P, Johnson R A. Cenozoic crustal extension in southeastern Arizona and implications for models of core-complex development. Tectonophysics, 2010, 488: 174–190
75 Livaccari R F, Geissman J W, Reynolds S J. Large-magnitude extensional deformation in the South Mountains metamorphic core complex, Arizona: Evaluation with paleomagnetism. Geol Soc Am Bull, 1995, 107: 877–894
76 Piper J D A, Dagley P, Carpenter A H. Detachment and rotation of a metamorphic core complex during extensional deformation: Palaomagnetic study of the Catalina-Rincon core complex, Basin and Range Province, Arizona. Tectonophysics, 2010, 488: 191–209
77 Wang Y S, Xiang B W, Zhu G, et al. Structural and geochronological evidence for Early Cretaceous orogen-parallel extension of the ductile lithosphere in the northern Dabie orogenic belt, East China. J Struct Geol, 2011, 33: 362–380
78 冀文斌, 林伟, 石永红, 等. 大别山早白垩世变质核杂岩的结构与演化. 地质科学, 2011, 46: 161–180
79 Vanderhaeghe O. Pervasive melt migration from migmatites to leucogranite in the Shupswap metamorphic core complex, Canada: Control of regional deformation. Tectonophysics, 1999, 312: 35–55
80 Norlander B H, Whitney D L, Teyssier C, et al. Partial melting and decompression of the Thor-Odin dome, Shuswap metamorphic core complex, Canadian Cordillera. Lithos, 2002, 61: 103–125
81 Lister G S, Banga G, Feenstra A. Metamorphic core complexes of Cordilleran type in the Cyclades, Aegean Sea, Greece. Geology, 1984, 12: 221–225
82 Keay S, Lister G, Buick I. The timing of partial melting, Barrovian metamorphism and granite intrusion in the Naxos metamorphic core complex, Cyclades, Aegean Sea, Greece. Tectonophysics, 2001, 342: 275–312
83 Vanderhaeghe O, Teyssier C. Partial melting and flow of orogens. Tectonophysics, 2001, 342: 451–472
84 Liu M. Cenozoic extension and magmatism in the North American Cordillera: The role of gravitational collapse. Tectonophysics, 2001, 342: 407–433
85 Rey P, Vanderhaeghe O, Teyssier C. Gravitational collapse of the continental crust: definition, regimes and modes. Tectonophysics, 2001, 342: 435–449
86 张长厚, 王根厚, 王果胜, 等. 辽西地区燕山板内造山带东段中生代逆冲推覆构造. 地质学报, 2002, 76: 64–76
87 赵越, 张拴宏, 徐刚, 等. 燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件. 地质通报, 2004, 23: 854–863
88 和政军, 牛宝贵, 张新元. 辽西朝阳地区晚侏罗世逆冲断裂及同构造沉积盆地系统. 地质论评, 2007, 53: 152–165