



论 文

胶东东部鹊山变质核杂岩结构、演化及区域构造意义

夏增明^{①②}, 刘俊来^{①*}, 倪金龙^③, 张婷婷^①, 施性明^②, 吴云^④^① 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;^② 首钢地质勘查院地质研究所, 北京 100144;^③ 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590;^④ 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083

* 通讯作者, E-mail: jliu@cugb.edu.cn

收稿日期: 2015-07-22; 接受日期: 2015-11-23; 网络版发表日期: 2016-02-22

国家自然科学基金项目(批准号: 41430211, 90814006, 91214301)和教育部高等学校博士学科点专项科研项目(编号: 20110022130001)资助

摘要 自晚中生代以来, 华北克拉通岩石圈在伸展机制下经历了剧烈的减薄, 位于胶东东部华北克拉通南东缘的鹊山变质核杂岩是该时期地壳伸展的一个重要实例. 鹊山变质核杂岩具有典型科迪勒拉变质核杂岩构造的三层结构: 上盘由早白垩世上叠盆地及其古元古代基底组成, 下盘为太古代深变质杂岩与中生代侵入体, 上下盘之间被一条主拆离断层所分隔. 一系列 NNE 走向的后期脆性断裂, 使得变质核杂岩被肢解和改造. 岩石学、几何学、运动学、宏观和显微构造以及石英 c 轴组构分析表明鹊山变质核杂岩经历了递进剥露过程, 即在 WNW-ESE 区域伸展作用下, 发育于中-下地壳, 之后经过中-上地壳, 最后到达地壳表层次. 通过构造和年代学证据分析, 限定鹊山变质核杂岩的剥露时代为 135~113Ma. 综合分析辽东半岛和胶东半岛这一时期发育的不同型式的伸展构造, 厘定了胶-辽早白垩世伸展省, 同时确定了该区域伸展作用开始于约 135Ma, 结束于 105Ma, 并将其划分为两个阶段. 第一阶段伸展表现为中-下地壳强烈的流动, 第二阶段为中-上地壳的伸展作用. 结合区域构造背景, 胶-辽早白垩世伸展省可以作为一个在东亚地区伸展作用下壳-幔拆离作用及其响应的典型案例.

关键词 胶东半岛, 鹊山变质核杂岩, 拆离断层带, 胶辽早白垩世伸展省, 华北克拉通

1 引言

晚中生代以来华北克拉通岩石圈在伸展机制下发生了巨大减薄(约100km)已经被证实(Menzies等,

1993; Xu, 2001; Wu等, 2005; 刘俊来等, 2008b; 朱日祥等, 2011), 其中最直接的证据表现为广泛分布的断陷盆地、拆离断层、变质核杂岩, 以及大规模的岩浆活动和成矿作用(Ren等, 2002; 申亮等, 2011; 刘俊来

中文引用格式: 夏增明, 刘俊来, 倪金龙, 张婷婷, 施性明, 吴云. 2016. 胶东东部鹊山变质核杂岩结构、演化及区域构造意义. 中国科学: 地球科学, 46: 356-373, doi: 10.1360/N072014-00590
英文引用格式: Xia Z M, Liu J L, Ni J L, Zhang T T, Shi X M, Wu Y. 2016. Structure, evolution and regional tectonic implications of the Queshan metamorphic core complex in eastern Jiaodong Peninsula of China. Science China Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-015-5259-3

等, 2006, 2011; Liu等, 2013; 毛景文等, 2003). 一些具有争议的模型被提出来解释这次岩石圈减薄事件, 如拆沉作用(Wu等, 2002)、古太平洋板块俯冲造成的弧后伸展(Zheng等, 2010)、碰撞造山后的垮塌(Meng,

2003)、地幔柱(Zheng等, 2010)以及机械热化学的改变(Xu等, 2001)等.

地壳伸展作用下形成的变质核杂岩(Lister和Davis, 1989; Davis和Coney, 1979)遍布华北克拉通的

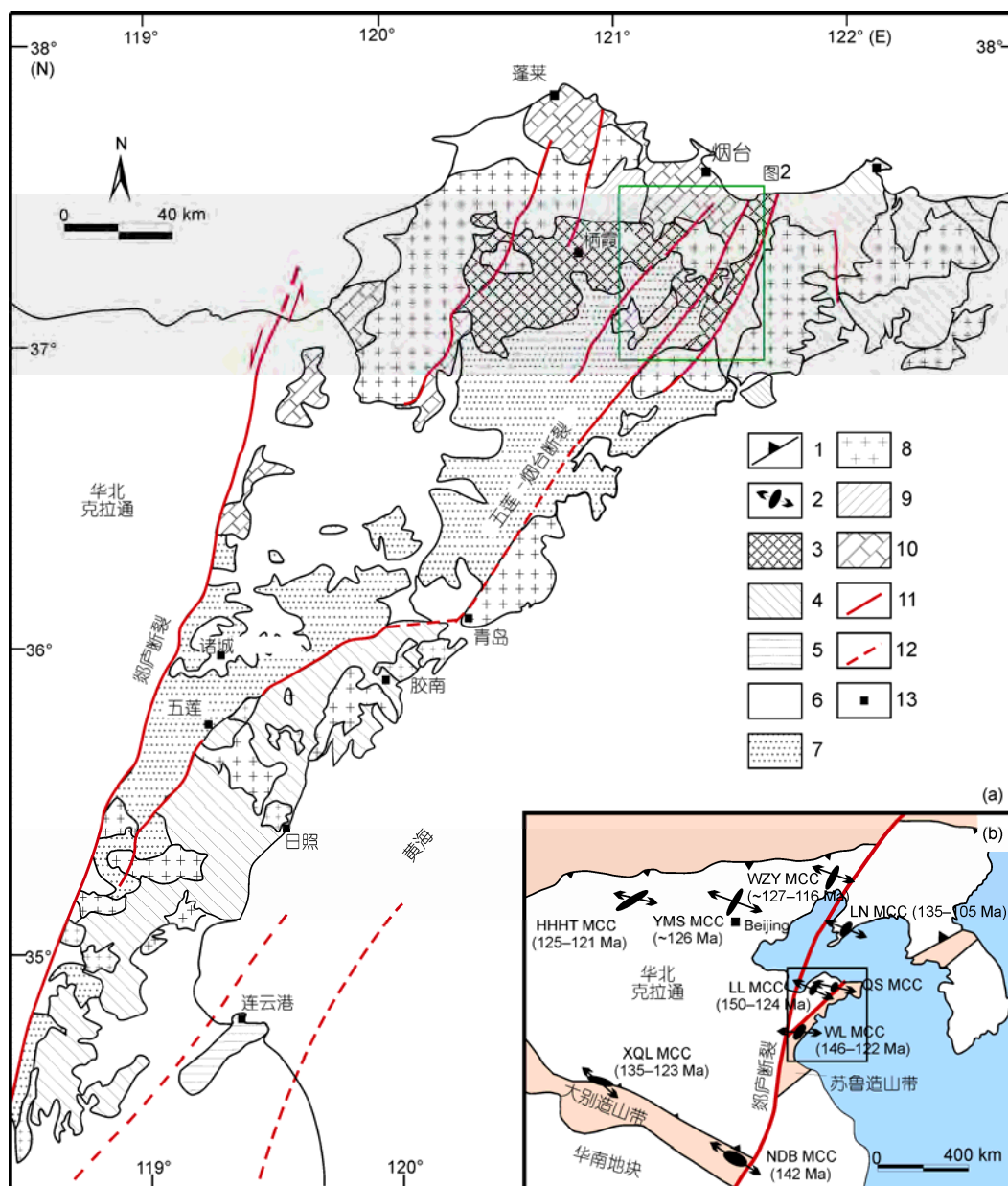


图 1 胶东半岛地质简图及华北克拉通主要变质核杂岩分布图

据林伟等(2006)、Ni 等(2013)、Zhang 等(2012). 1. 缝合带; 2. 变质核杂岩伸展方向; 3. 太古代基底, 包含胶东群镁铁质和长英质片麻岩; 4. 苏鲁超高压变质单元(片麻岩和石英岩, 含榴辉岩镁铁质岩石); 5. 高压单元(片麻岩); 6. 新生代沉积; 7. 侏罗系和白垩系; 8. 中生代花岗岩; 9. 中-古元古代蓬莱群(砂板岩); 10. 古元古代粉子山群和荆山群(大理岩和角闪岩); 11. 断裂; 12. 推测断裂; 13. 城镇. HHHT MCC: 呼和浩特变质核杂岩; YMS MCC: 云蒙山变质核杂岩; WZY MCC: 瓦子峪变质核杂岩; LN MCC: 辽南变质核杂岩; XQL MCC: 小秦岭变质核杂岩; NDB MCC: 北大别变质核杂岩; WL MCC: 五莲变质核杂岩; LL MCC: 玲珑变质核杂岩; QS MCC: 鹊山变质核杂岩

各个地区(图1b), 如克拉通北缘的呼和浩特变质核杂岩(Davis和郑亚东, 2002)、燕山地区云蒙山变质核杂岩(Davis等, 1996)、辽西瓦子峪变质核杂岩(Darby等, 2004; 马寅生等, 1999)、辽东半岛地区的辽南变质核杂岩(Liu等, 2005; 纪沫等, 2009)、华北克拉通南缘的小秦岭变质核杂岩(张进江等, 1998)和北大别变质核杂岩(Wang等, 2011). 这些变质核杂岩在WNW-ESE伸展应力作用下, 具有一致的运动学特性, 发育时间在145~60Ma, 峰期为(125±5)Ma(刘俊来等, 2006, 2008b).

位于华北克拉通东南缘的胶东半岛在晚古生代时期同样经历了强烈的岩石圈减薄(Faure等, 2001), 并形成了多个变质核杂岩(图1b), 如玲珑变质核杂岩(Charles等, 2011), 五莲变质核杂岩(Ni等, 2013), 以及本文中的鹊山变质核杂岩. 鹊山变质核杂岩是胶东半岛地区最早被发现的变质核杂岩. 前人对于鹊山变质核杂岩的研究主要集中于基本组成及拆离断层带对蓬家金矿成矿作用的构造控制(孙丰月等, 1995; 杨金中和沈远超, 2000; Li等, 2006). 本文通过对鹊山变质核杂岩的结构组成和测年数据的系统分析, 来解释鹊山变质核杂岩的形成机制和构造演化, 并综合胶辽地区伸展构造型式, 深入探讨整个华北克拉通破坏和伸展减薄的属性.

2 区域地质背景

胶东半岛(山东省东部)主要由胶北变质地块、苏鲁超高压变质带和中生代胶莱盆地组成(程裕洪, 1994; 李俊建等, 2010), 西侧为著名的NNE-SSW向的郯庐走滑断裂带(朱光等, 2001)(图1a).

胶北地块主要由广泛出露的变质基底和中生代花岗岩组成(Wu等, 2004; Tang等, 2007; 宋明春和王沛成, 2003; 郭敬辉等, 2005). 苏鲁超高压变质带岩石类型以新元古代的花岗质片麻岩和中生代的花岗岩为主, 其余为各种类型的榴辉岩、退变榴辉岩、斜长角闪岩及超镁铁岩包体及一些规模相对较大的古-中元古代的变沉积岩透镜体(Xu等, 2006; Zheng等, 2003, 2005). 大多数地质学家认为胶北地块属于华北板块, 苏鲁超高压变质带属于华北板块与扬子板块的结合带, 二者以五莲-烟台断裂为边界(Zhai等, 2002; 徐贵忠等, 2001; 宋明春等, 2009). 胶莱盆地是一个晚中生

代伸展盆地, 充填有碎屑岩、火山岩等(张岳桥等, 2008; Zhang Y Q等, 2003; 山东省地质矿产局, 1991).

3 鹊山变质核杂岩

鹊山变质核杂岩发育于桃村断裂和海阳断裂之间的胶北地块内(图2a), 具有典型科迪勒拉变质核杂岩构造的三层结构: 上盘由早白垩世上叠盆地及其古元古代基底组成, 下盘为太古代深变质杂岩与中生代侵入体, 上下盘之间被一条主拆离断层所分隔. 一系列NNE走向的后期脆性断裂, 使得变质核杂岩被肢解和改造. 消除朱吴断裂的左旋平移的影响, 鹊山变质核杂岩表现为穹状隆起.

3.1 上盘

上盘以白垩纪半地堑状上叠盆地和一些古元古代荆山群地层组成的基底为特征. 上叠盆地底部主要充填有晚白垩世莱阳群地层, 上部为少量的晚白垩世青山群和早白垩世王氏群地层.

莱阳群是一套河湖相碎屑沉积, 其中玄武岩夹层中的角闪石和锆石测年显示其沉积年龄为135~125 Ma(Zhang等, 2008). 在盆地东北缘靠近拆了断层的位置, 莱阳群以冲-洪积扇相砾岩沉积为显著特征, 向西逐渐过渡为浅湖相沉积之后, 上部形成一套以细砂岩、粉砂岩夹薄层砾岩为主的浅湖泊相至河流相沉积(图3a和b). 所有地层的倾角从15°~40°不等, 倾向集中于E-SE向与拆离断层面的倾向相反(图3c). 沉积环境与地层产状变化特征表明盆地莱阳群沉积物源位于研究区东北部. 另外, 在靠近拆了断层的位置, 沉积有大量糜棱岩砾石(图3d). 这些证据充分说明在莱阳群沉积时期, 此时盆地是一个受拆离断层活动控制的半地堑状伸展断陷盆地(Ritts等, 2001).

青山群和王氏群分别由火山岩和紫红色粉砂岩组成. 荆山群作为盆地的基底由于被盆地沉积物不整合覆盖而出露有限(图3e).

3.2 鹊山拆离断层带

3.2.1 鹊山拆离断层带结构分析

鹊山变质核杂岩拆离断层带北部被NNE走向断裂所截断, 南部被白垩纪海阳岩体侵入. 在崖子镇附近, 鹊山拆离断层带被朱吴断裂左行走滑错开成两

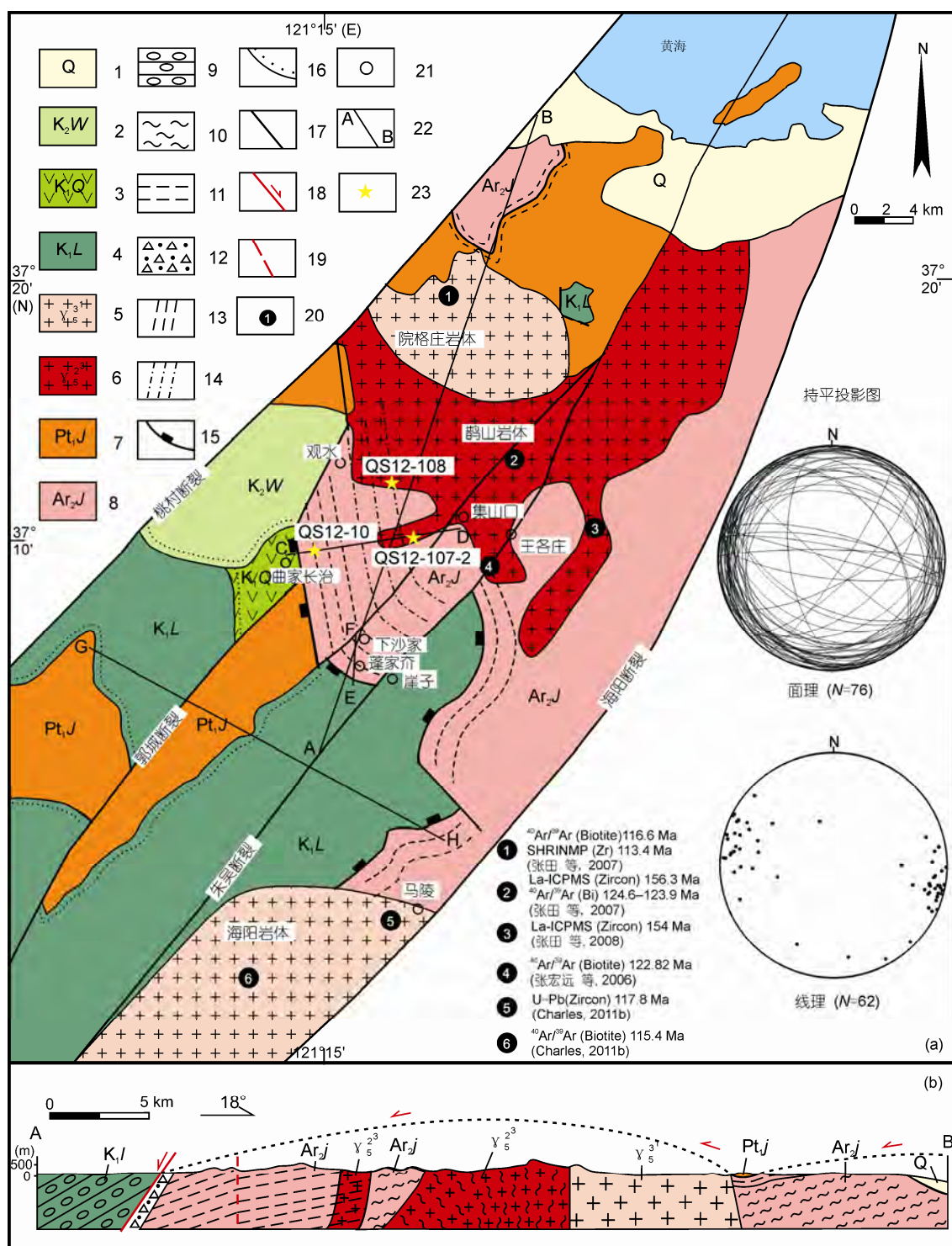


图 2 鹊山变质核杂岩地质简图

(a) 鹊山变质核杂岩构造简图; (b) 鹊山变质核杂岩剖面图(剖面 AB)。1. 第四系; 2. 晚白垩世王世群; 3. 早白垩世青山群; 4. 早白垩世莱阳群; 5. 早白垩世花岗岩; 6. 晚侏罗世花岗岩; 7. 古元古代荆山群; 8. 新太古代胶东群; 9. 砾岩; 10. 片麻岩; 11. 糜棱岩; 12. 断层角砾岩; 13. 强韧性剪切带; 14. 弱韧性剪切带; 15. 拆离断层; 16. 角度不整合; 17. 断裂构造; 18. 正断层; 19. 推覆断层; 20. 前人测年采样点; 21. 村镇; 22. 剖面线; 23. 本文测年采样点

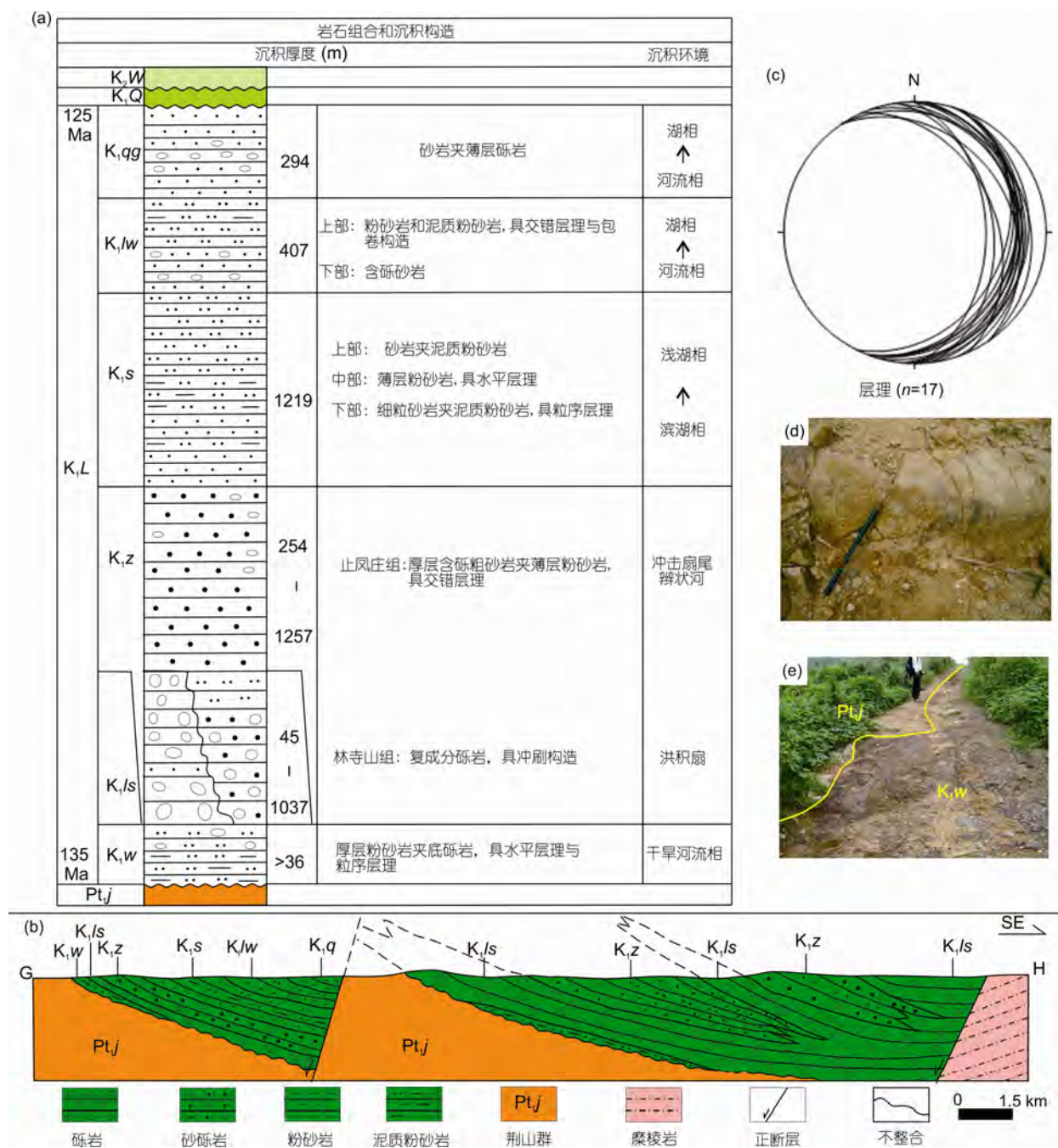


图 3 鹊山变质核杂岩上盘结构组成

(a) 莱阳群地层柱状图; (b) 莱阳群剖面示意图(图 2a 中剖面 GH); (c) 莱阳群地层产状(下半球赤平投影); (d) 莱阳群底部糜棱岩砾石; (e) 瓦屋介组不整合覆盖在荆山群之上。K₁L: 莱阳群, K₁Q: 青山群, K₂W: 王氏群, K₁w: 瓦屋介组, K₁ls: 林寺山组, K₁z: 止凤庄组, K₁s: 水南组, K₁lw: 龙旺庄组, K₁qg: 曲格庄组

段(图2a)。如果将这两段拆离断层带沿朱吴断裂复原, 完整的拆离断层带的面状构造走向由南向北呈现出 NW-SW-NW-SW波瓦状构造。波瓦状构造在许多成

熟的变质核杂岩中被证实(Davis和郑亚东, 2002; 纪沫等, 2008)。尽管拆离断层带中糜棱叶理走向多变, 但是由拉长石英, 定向长石和角闪石组成矿物拉伸

线理却有稳定的 $\text{NWW}285^{\circ}\text{--SEE}105^{\circ}$ 延伸方向. 叶理和拉伸线理倾角多集中在 $5^{\circ}\text{--}25^{\circ}$ (图2a).

北段拆离断层带出露宽度约8 km, 而南段拆离断层带由于受后期断层活动和剥蚀差异影响, 只保留有3km宽度(图2a). 在拆离断层之下发育有完整的构造岩序列, 随着靠近拆离断层面依次出现片麻岩→糜棱片麻岩→糜棱岩→角砾状糜棱岩→绿泥石化微角砾岩→断层泥. 这些是下盘岩石沿着拆离断层逐渐剥露过程中, 穿越不同构造层位的产物(Lister 和Davis, 1989).

糜棱状片麻岩位于拆离断层带的最底部, 是一

种高温剪切条件下形成的糜棱岩. 糜棱片麻岩由钾长石、斜长石残斑和定向排列的角闪石和黑云母等矿物构成, 拔丝状石英几乎不发育(图4f). 作为拆离断层带主体的糜棱岩可以分为两组: 初糜棱岩和糜棱岩. 岩石中糜棱叶理和矿物拉伸线理发育强烈, 并且组构特征明显, 例如长石 σ 组构, 石英拔丝以及细小的云母颗粒(图4e). 同时, 随着靠近拆离断层糜棱岩中基质含量的增多, 岩石类型由初糜棱岩过渡到糜棱岩. 位于糜棱岩和微角砾岩之间角砾糜棱岩, 虽然保留了部分糜棱岩组构特征, 但是其中长石可见有明显的脆性破裂以及杂乱的分布特征(图4d). 微角砾

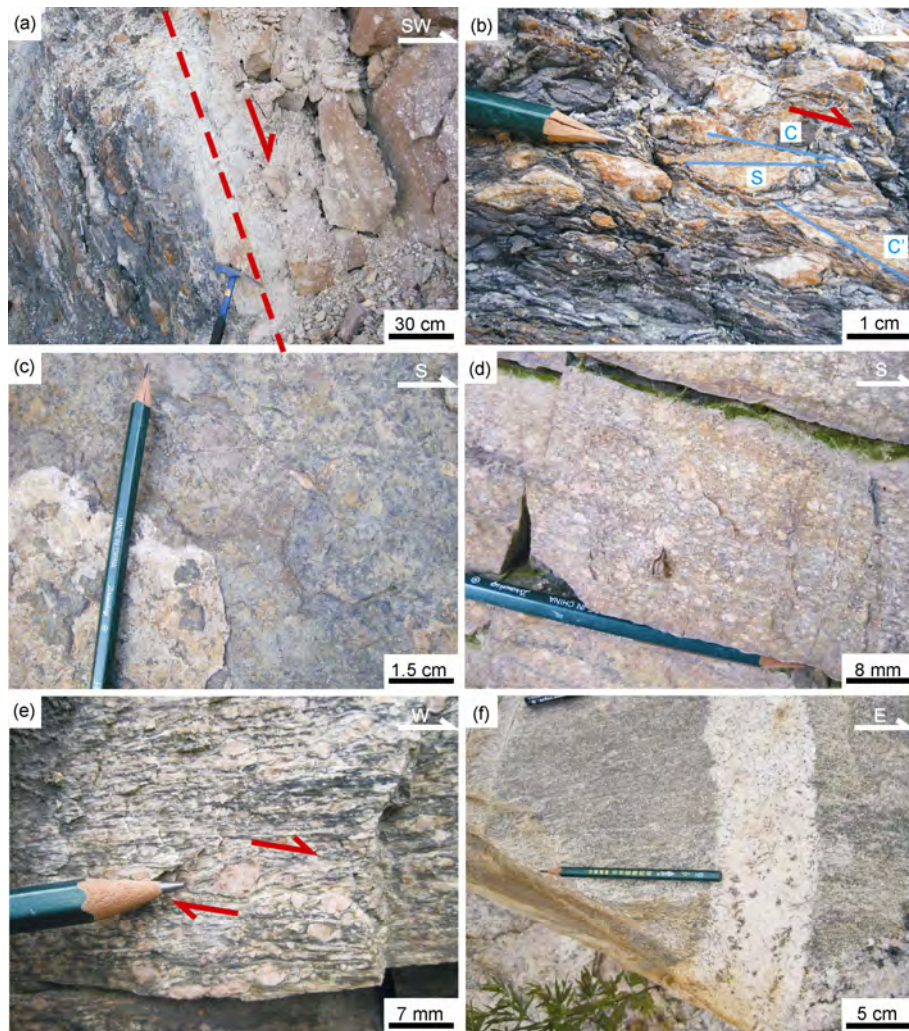


图4 鹊山拆离断层带构造岩出露特征

(a) 拆离断层面将断层泥与上盘土红色砾岩隔开; (b) 断层泥带中发育的 S-C 组构以及 C' 构造; (c) 灰绿色绿泥石化微角砾岩; (d) 角砾糜棱岩中长石可见脆性破, 分布杂乱; (e) 长英质糜棱岩中长石 σ 型旋转碎斑系; (f) 糜棱片麻岩

岩主要由固结的断层角砾组成, 因强烈绿泥石化而呈灰绿色(图4c). 位于拆离断层带的最顶部断层泥, 主要由碳化的泥质和硅化的长英质小透镜体(最大的宽约1cm, 长约3cm)组成(图4b). 作为地表构造层的脆性变形产物(Sibson, 1977), 它与白垩纪盆地底部砾岩被拆离断层所隔开(图4a).

3.2.2 鹊山拆里断层带构造岩显微构造分析

岩石变形条件, 例如温度, 可以根据矿物(特指石英和长石)的显微构造特征来确定(胡玲等, 2009; Passchier和Trouw, 2005; 纪沫等, 2008). 沿着垂直鹊山拆离断层带走向的剖面(图2a中剖面CD和EF)采集不同类型的岩石进行切片, 并在显微镜下分析(分析结果见表1). 抛光的薄片通过平行线理并垂直岩石样品面理方向的切割获得.

形成于中-下地壳的高温(500~700℃)变形显微构造包括高温颗粒边界迁移动态重结晶作用(GBM)形成的石英新颗粒(图5a), 静态重结晶作用形成的石英三结点构造(图5b), 核幔构造(图5c)和应力蠕英结构(图5f). 中-上地壳下形成的中温(300~500℃)变形显微构造包括由亚颗粒旋转动态重结晶(SGR)石英多晶条带(图5d), 膨凸动态重结晶作用(BLG)形成的长石新晶粒和旋转碎斑系(图5e). 近地表面形成的低温(<300℃)变形显微构造包括长石书斜构造(图5g)和碎裂结构(图5h). 同时, 随着靠近拆离断层应变的逐渐增强, 基质含量也逐渐增多(从10~75%)(表1).

变形显微构造观察表明鹊山拆离断层带初始发育于高温角闪岩相的中-下地壳层次. 之后, 逐渐被剪切剥露, 经过中温绿片岩相的中-上层次退变质作用的叠加, 最后到达近地表面层次的低温脆性域.

3.2.3 鹊山拆里断层带组构分析

石英的结晶学优选(Lattice Preferred Orientation, LPO)常用来解释岩石变形温压环境和矿物变形机制等(夏浩然和刘俊来, 2011). LPO数据采集在Hitachi S-3400 N-II扫描电子显微镜(连接有Nordlys EBSD Model NL-II探头)上采用交互模式完成. 所有EBSD分析测定是在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成. 详细的测试过程见刘俊来等(2008a).

12个代表性的样品采集于垂直拆离断层带的剖面CD和EF(采样位置见图6). 显微照片和数据结果在图7中给出, 岩石类型及特征在表1中列出. 两个剖面上样品的石英c轴组构均显示出规律的变化. 根据他们的不同表现形式, 我们对其分别描述.

剖面CD样品的石英c轴组构显示了较为复杂的变化, 即随着靠近拆离断层, 石英c轴组构从X轴极密到Y轴极密, 再到交叉环带, 最后变化为单环带. 该结果与Stipp等(2002)建立的在非共轴变形环境下, 随着温度的降低所形成的石英c轴组构演化序列相一致.

样品QS11-6的石英c轴组构在X轴附近的极密显示了高温柱面<c>滑移(600~700℃), 样品QS11-135中, Y轴附近极密对应中高温的柱面<a>滑移(550~600℃). 样品QS11-5和QS11-4中由小圆环带和Y轴极密组成的I型交叉环带的出现, 表明中低温的变形条件, 并且温度跟小圆环带的开角大小具有相关性, 而这种极密类型是由柱面<a>滑移, 菱面<a>滑移和底面<a>滑移共同作用形成的(Law, 1990; Passchier和Trouw, 2005). 根据QS11-5和QS11-4样品石英c轴组构图中小圆环带的开角(分别为58°和50°), 我们推断它们的变形温度分别为(520±50)℃和(440±50)℃. 样品QS11-136-1和QS11-136-2中, 由Y轴极密和Z轴极密组成的单环带对应柱面<a>滑移和底面<a>滑移, 它指示了低温变形环境(350~400℃). 样品QS11-136-2石英c轴组构虽然保留完好, 但是考虑到后期有低温碎裂结构的叠加, 因此它的变形温度应该低于300℃. 值得注意的是, 采自于距拆离断层最远处的未遭受剪切改造的片麻岩样品QS11-133, 它的石英c轴组构图由复杂多种类型的组构叠加组成, 表明原岩在剪切改造之前经历了多期变形变质作用.

剖面EF上样品石英c轴组构的演化序列相对简单. 随着靠近拆离断层面, 石英c轴组构从中高温的柱面<a>滑移形成的Y轴极密(QS11-123), 然后经过中低温柱面<a>和菱面<a>滑移共同形成拉长的Y轴极密(QS11-124, QS11-55和QS11-56-1), 最后变为低温底面<a>滑移形成的Z轴极密(QS11-58).

这两组石英c轴组构演化序列是由于鹊山拆离断层带在递进剪切过程中变形叠加而形成, 这一结果与前面的显微观察相一致.

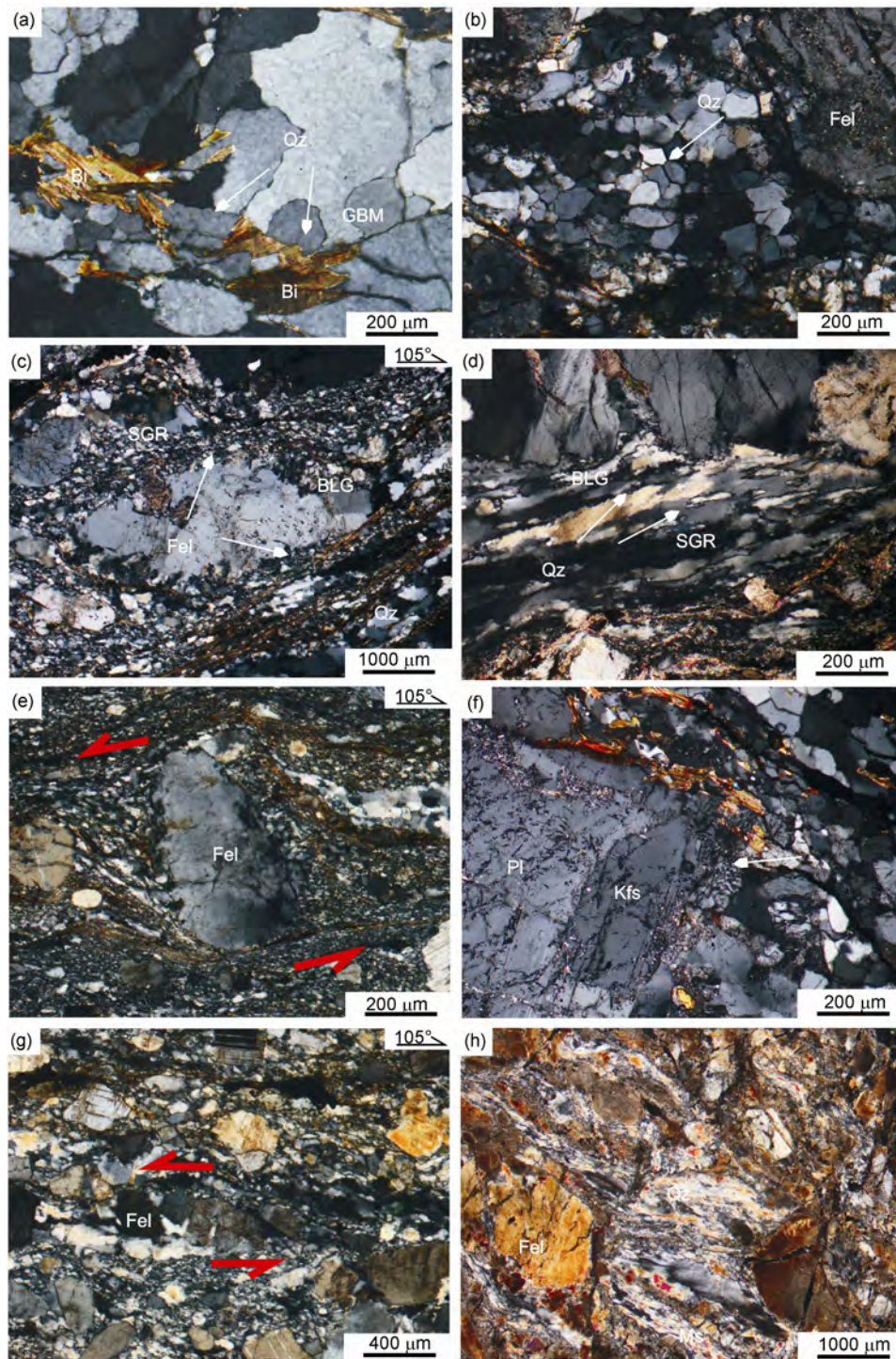


图 5 鹊山变质核杂岩拆离断层带显微构造特征

(a) 石英 GBM 作用形成的窗户和牵制构造; (b) 石英经静态恢复重结晶作用形成的三结点; (c) 核幔构造, 核部由长石残斑组成, 边部由亚颗粒和重结晶新颗粒组成; (d) 亚颗粒旋转动态重结晶作用和膨凸重结晶作用形成新晶粒构成石英多晶条带; (e) σ 型残斑系, 核部为能干性强的长石残斑, 拖尾有塑性变形的石英动态重结晶细小晶粒组成; (f) 钾长石边部发育的应力蠕英结构; (g) 长石沿着剪切裂隙错开呈阶梯状排列, 形成书斜式构造; (h) 长石残斑和石英丝带被裂隙所切割. Qz, 石英; Pl, 斜长石; Kfs, 钾长石; Ms, 白云母; Bi, 黑云母; GBM, 颗粒边界迁移动态重结晶; SGR, 亚颗粒旋转动态重结晶; BLG, 膨凸重结晶

表 1 拆离断层带构造岩矿物组合和显微构造特征^{a)}

样品	岩石类型	矿物组合	石英主要变形特征	长石主要变形特征	变形温度 (℃)
剖面CD					
QS11-133	片麻岩	Fel(70%)+Qz(25%)+ Bi(5%)	条带状、边界不规则、波状 消光、定向较强	半自形-他形粒柱状残斑	多期
QS11-6	糜棱片麻岩	P(>90%): Fel+Qz+Bi M(<10%): Fel+Qz	矩形多晶条带、局部见三结 点、GBM	不连续条带、SGR	600~700
QS12-16-1	初糜棱岩	P(90%): Fel+Qz+Bi M(10%): Fel+Qz	矩形多晶条带、局部见三结 点、GBM	残斑、SGR、蠕英结构	500~600
QS11-135	初糜棱岩	P(85%): Fel+Qz+Bi M(15%): Fel+Qz	单晶矩形条带、可见三结点	残斑、BLG+SGR、蠕英结构	500~600
QS12-13-1	初糜棱岩	P(75%): Fel+Qz+Bi+Ms M(25%): Fel+Qz	多晶集合体、GBM+SGR	残斑、BLG+SGR、 少量机械双晶	500~600
QS12-12-1	初糜棱岩	P(70%): Fel+Qz M(30%): Fel+Qz+Bi+Ms	扁豆状多晶集合体、SGR	残斑、BLG、机械双晶	400~500
QS11-5	初糜棱岩	P(70%): Fel+Qz M(30%): Fel+Qz+Bi+Ms	扁豆状多晶集合体、SGR	σ 型残斑、BLG	400~500
QS11-4	糜棱岩	P(50%): Fel+Qz M(50%): Fel+Qz+Bi+Ms	亚颗粒多晶集合体、SGR	残斑、核幔构造、BLG、机械 双晶、扭折、破裂	300~500
QS12-11-1	糜棱岩	P(35%): Fel+Qz M(65%): Fel+Qz+Bi+Ms	亚颗粒多晶集合体、 SGR+BLG	残斑、核幔构造、BLG、 裂隙被石英充填	300~400
QS11-136-1	糜棱岩	P(25%): Fel+Qz M(75%): Fel+Qz+Bi+Ms	不对称亚颗粒多晶条带、 SGR+BLG	残斑、核幔构造、BLG、大部 分细粒化	300~500
QS11-136-2	碎裂岩化糜棱岩	P(>90%): Fel+Qz M(<10%): Fel+Qz+Ms	丝带状石英集合体被后期 碎裂破坏	残斑被后期碎裂破坏	<300
剖面EF					
QS11-123	初糜棱岩	P(>90%): Fel+Qz M(<10%): Fel+Qz+Bi+Ms	拔丝条带状、局部见矩形条 带GBM、三结点	残斑、BLG+SGR、局部见钠长 石出溶花纹	500~600
QS11-124	初糜棱岩	P(75%): Fel+Qz M(25%): Fel+Qz+Bi+Ms	拔丝状多晶透镜体、可见斜 向叶理、SGR	残斑、BLG、核幔构造、 机械双晶和膝折	400~500
QS11-55	糜棱岩	P(35%): Fel+Qz M(65%): Fel+Qz+Bi+Ms	透镜状多晶集合体、斜向叶 理、SGR+BLG	残斑、BLG、充填石英、 波状消光、机械双晶、张裂隙	300~500
QS11-56-1	角砾状糜棱岩	P(50%): Fel+Qz M(50%): Fel+Qz+Bi+Ms	亚颗粒多晶集合体、 SGR+BLG	残斑、BLG、破裂	300~500
QS11-58	碎裂岩化糜棱岩	P(>90%): Fel+Qz M(<10%): Fel+Qz	拔丝状集合体被后期碎裂 破坏	残斑被后期碎裂破坏	<300
QS12-133-1	绿泥石化微角砾岩	Fel+Qz+Chl	固结的断层角砾组成, 绿泥石化而呈灰绿色		<300

a) P, 残斑; M, 基质; Qz, 石英; Fel, 长石; Bi, 黑云母; Ms, 白云母; Chl, 绿泥石; BLG, 膨凸重结晶; SGR, 亚颗粒旋转重结晶; GBM, 颗粒边界迁移重结晶

3.2.4 拆离断层活动的运动学特征

鹊山拆离断层带中糜棱面理和线理产状获得的赤平投影图表明了WNW-ESE的运动方向(图2b)。另外, 顶部向WNW的正剪切活动也被露头 and 显微剪切标志所指示, 例如 σ 型组构(图4e)、断层泥带中S-C组构和伸展褶劈理(C')(图4b)、不对称压力影(图5e)和长石书斜构造(图5g)。同样, 这一运动学特征与WNW-SES向的区域伸展方向也是一致的。

3.3 下盘

鹊山变质核杂岩下盘由胶东群深变质杂岩和中

生代侵入体组成。胶东群在研究区东部分布广泛, 北部有少量出露(图2a)。胶东群以TTG片麻岩为主, 夹基性麻粒岩和斜长角闪岩等透镜体, 该岩群变质作用以高角闪岩相为主, 局部出现麻粒岩相, 原岩锆石U-Pb年龄为2.9~2.6Ga(Tang等, 2007; Zhai, 2000; 山东省地质矿产局, 1991)。

鹊山岩体和院格庄岩体是侵入到鹊山变质核杂岩下盘的中生代花岗质岩体。鹊山岩体在研究区中部大面积出露(图2a), 主要由弱片麻状黑云母花岗岩和中粒二长花岗岩组成, 局部遭受糜棱岩化作用改造。二长花岗岩中LA-ICPMS锆石U-Pb年龄为156~

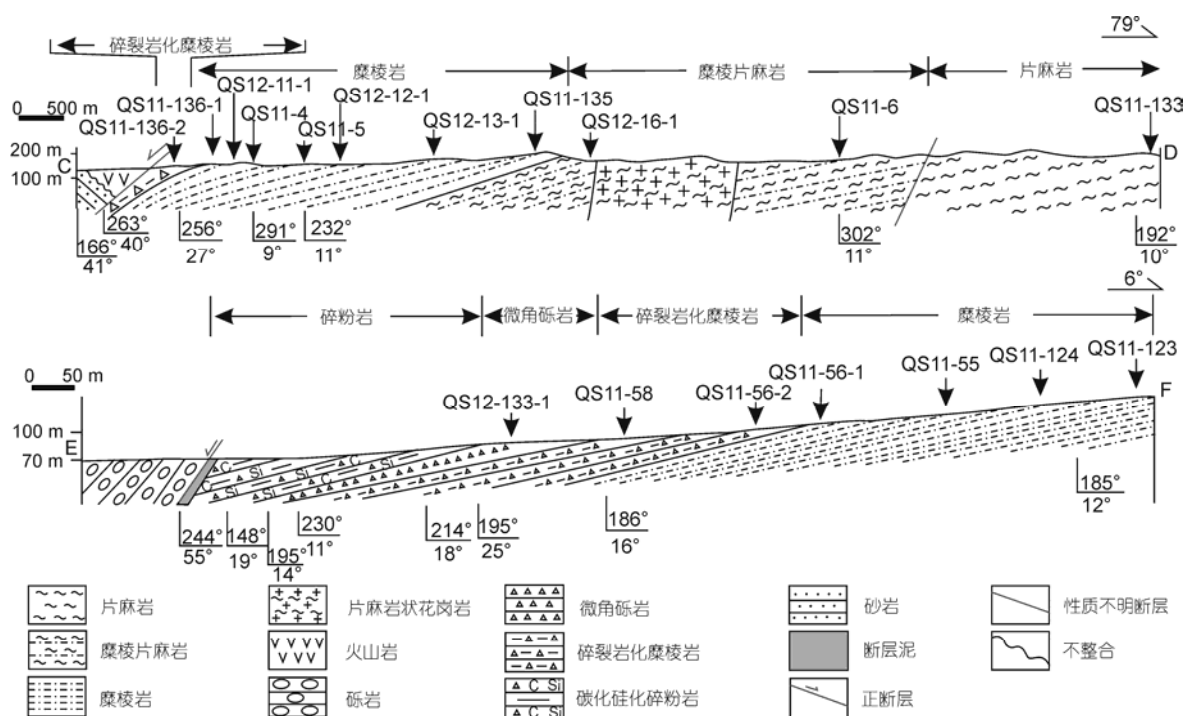


图6 鹊山拆离断层带剖面图

154Ma(Li等, 2006; 张田和张岳桥, 2008). 院格庄岩体位于研究区院格庄镇地区(图2a), 岩性以似斑状粗粒二长花岗岩为特征. 前人的年代学研究资料显示院格庄岩体SHRIMP锆石U-Pb年龄为113Ma, 黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为116Ma(张田和张岳桥, 2007), 二者相近的年龄表明院格庄岩体侵位之后经历了快速冷凝过程.

4 鹊山变质核杂岩形成的年代学

基于前人测年资料, 我们运用LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测年方法对采集于下盘拆离断层带内变形岩石和鹊山侵入岩体中的3个样品(QS12-107-2, QS12-108和QS12-10)进行了测试分析, 以此来约束鹊山变质核杂岩的演化.

4.1 分析方法

用来分析锆石结构特征和确定LA-ICPMS锆石U-Pb测年点位的锆石的阴极发光图(CL)像采集是在北京大学造山带和地壳演化教育部重点实验室(OBCE)电子探针X射线显微分析仪(JEOL JXA-81)上

完成. 锆石原位微区测试在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICPMS)仪器上完成, 具体流程参见文献(Li等, 2009). 锆石91500(1064Ma)作为外部标样, NIST610进行元素分馏校正. LA-ICPMS分析误差为 1σ , 加权平均年龄具有95%的置信度. $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 协和图和加权平均年龄在ISOPLOT3.7处理完成(Compston等, 1992), 分析数据和测试结果见表2和图8.

4.2 样品测年结果

样品QS12-107-2为弱片麻状黑云母花岗岩, 取自鹊山岩体分枝岩墙, 局部被糜棱岩条带叠加(图8a). 样品QS12-108糜棱岩化花岗岩, 取自鹊山岩体边部, 受糜棱岩化作用较弱, 石英呈小透镜状, 长石具自形晶(图8b). 两个样品的锆石呈自形-半自形柱状, 轴比 $2:1\sim 4:1$, CL图像中可见锆石边部具有振荡环带, Th/U比值较高(>0.8). 这些特征表明锆石为岩浆锆石(图8a和b). 样品QS12-107-2锆石的12个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相互协和, 加权平均年龄为 $(162.5\pm 3.0)\text{Ma}$ (95%置信度, $\text{MSWD}=0.67$)(图8a). 样品QS12-108锆石的13个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 相互协和, 加权平均年龄为 $(155.9\pm$

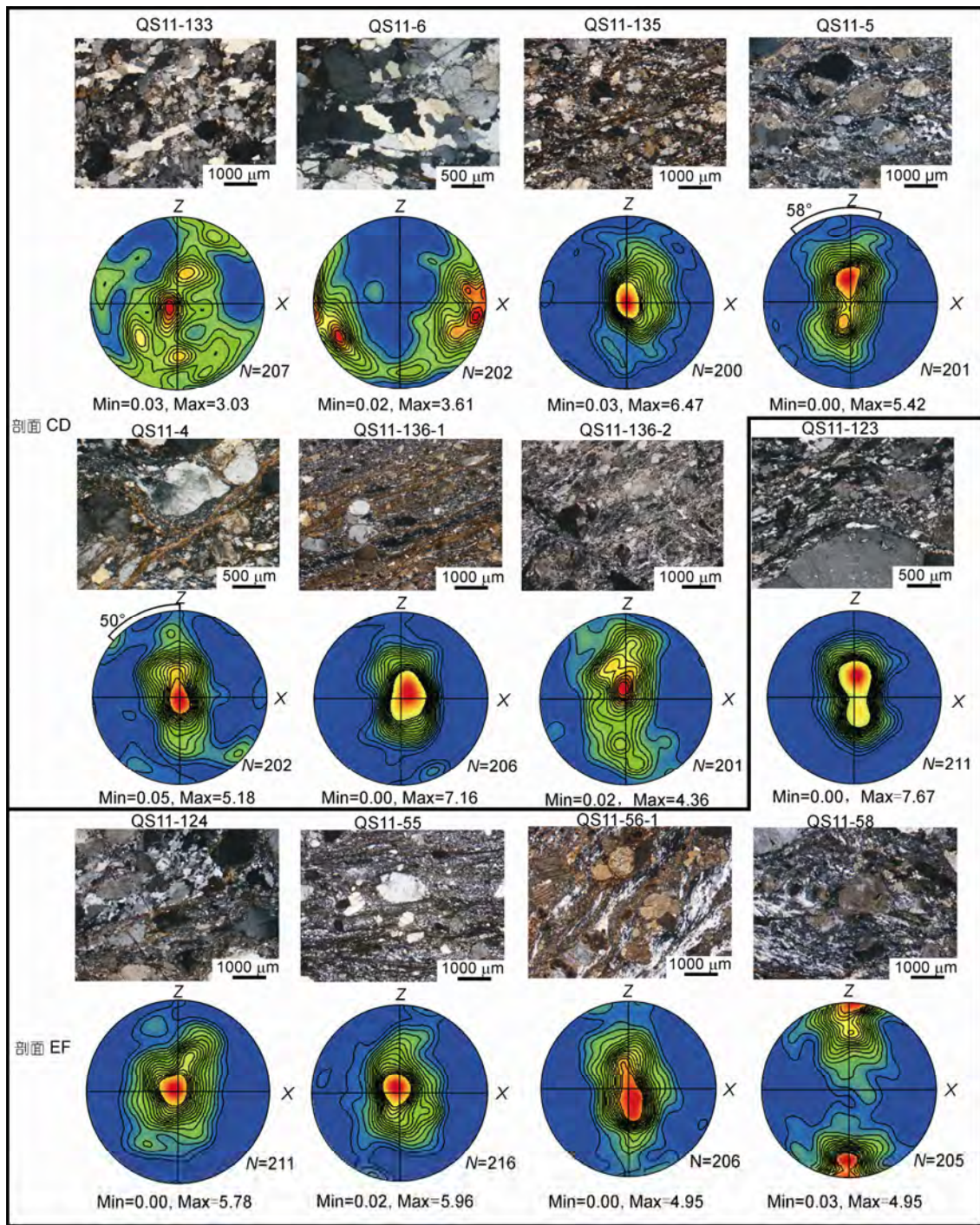


图 7 鹊山拆离断层带中构造岩显微照片及石英 *c* 轴组构图(下半球赤平投影)

采样位置见图 6

2.2)Ma(95%置信度, MSWD=0.55)(图8b).

样品QS12-10花岗质糜棱岩, 取自糜棱岩带. 尽管糜棱岩化作用变形强烈, 但是局部可见到残留的

未变形花岗质岩石(图8c). 锆石呈不规则状, 半自形-他形, CL图像下无分带或弱分带, Th/U比值为0.01~1.2. 这些特征表明锆石后期遭受了变质热液和

流体的改造. 27个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄可以分为3组: $(217.5\pm 5.4)\text{Ma}$ ($N=6$, 95%置信度, $\text{MSWD}=0.16$), $(184.4\pm 4.9)\text{Ma}$ ($N=11$, 95%置信度, $\text{MSWD}=1.6$)和 $(157.3\pm 4.0)\text{Ma}$ ($N=10$, 95%置信度, $\text{MSWD}=1.3$)(图8c).

$(162.5\pm 3.0)\text{Ma}$ (样品QS12-107-2)和 $(155.9\pm 2.2)\text{Ma}$ (样品QS12-108)地质测年结果代表了鹊山岩体的

侵位年龄(张田和张岳桥, 2007, 2008). 同时, 它也表明该地区的岩浆活动开始于中侏罗世末(162Ma)持续到 155Ma , 与胶东半岛地区伸展作用之前的构造热事件相一致(邱连贵等, 2008; 郭敬辉等, 2005; 张华峰等, 2006; 李三忠等, 2004). 样品QS12-10的三组年龄证实了花岗质糜棱岩中的锆石形成于 $217\sim 157\text{Ma}$.

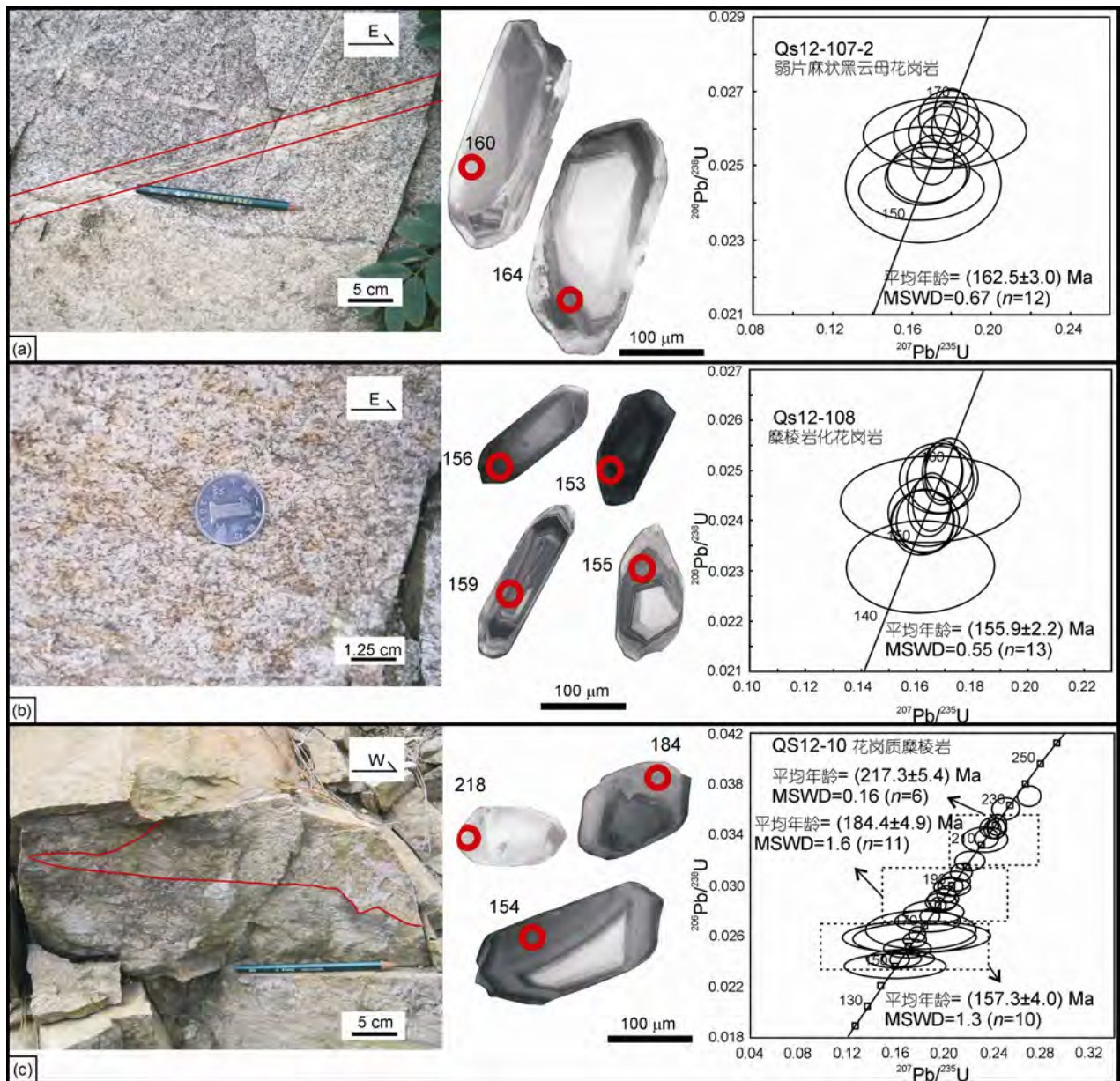


图 8 测年样品的野外出露特征、部分测年锆石 CL 图像(含分析点位置和年龄结果)、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谱和曲线图解 (a) 样品 QS12-107-2 弱片麻状黑云母花岗岩, 被应变局部化形成的强应变窄带叠加改造(红线位置); (b) 样品 QS12-108 糜棱岩化花岗岩受糜棱岩化作用改造, 石英呈细小透镜体状; (c) 样品 QS12-10 花岗质糜棱岩, 变形强烈, 局部可见残留的花岗质岩块(红线位置)

表 2 鹊山变质杂岩年龄样品 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素数据

样品点	元素含量(ppm)				同位素比值						年龄(Ma)	
	总Pb	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
QS12-107-2 弱片麻状黑云母花岗岩												
QS12-107-2-7	2	93	30	3.06	0.0491	0.1651	0.1651	0.0210	0.0250	0.0005	155	4
QS12-107-2-9	2	92	21	4.38	0.0491	0.1660	0.1660	0.0258	0.0241	0.0004	156	7
QS12-107-2-10	2	80	36	2.21	0.0493	0.1686	0.1686	0.0136	0.0236	0.0006	158	3
QS12-107-2-13	4	168	30	5.54	0.0493	0.1708	0.1708	0.0073	0.0261	0.0004	160	3
QS12-107-2-15	6	229	80	2.86	0.0493	0.1748	0.1748	0.0071	0.0360	0.0006	164	3
QS12-107-2-16	3	114	26	4.39	0.0494	0.1764	0.1764	0.0116	0.0303	0.0005	165	3
QS12-107-2-19	9	313	91	3.43	0.0494	0.1803	0.1803	0.0056	0.0264	0.0010	168	3
QS12-107-2-20	2	65	25	2.63	0.0496	0.1768	0.1768	0.0273	0.0344	0.0005	165	4
QS12-107-2-22	2	80	24	3.31	0.0495	0.1763	0.1763	0.0165	0.0370	0.0005	164	4
QS12-107-2-28	15	582	44	13.14	0.0493	0.1772	0.1772	0.0046	0.0336	0.0006	166	3
QS12-107-2-29	2	88	37	2.35	0.0491	0.1674	0.1674	0.0135	0.0348	0.0005	157	3
QS12-107-2-34	4	134	63	2.14	0.0493	0.1789	0.1789	0.0099	0.0344	0.0005	167	3
QS12-108 糜棱岩化花岗岩												
QS12-108-1	3	79	87	0.90	0.0490	0.0064	0.1651	0.0214	0.0319	0.0005	156	4
QS12-108-5	5	82	193	0.43	0.0492	0.0023	0.1685	0.0080	0.0272	0.0006	158	3
QS12-108-10	14	158	522	0.30	0.0492	0.0013	0.1653	0.0046	0.0293	0.0005	155	2
QS12-108-12	4	51	169	0.30	0.0507	0.0056	0.1615	0.0175	0.0284	0.0004	147	4
QS12-108-15	12	88	479	0.18	0.0494	0.0021	0.1632	0.0069	0.3726	0.0055	153	3
QS12-108-16	10	205	341	0.60	0.0492	0.0025	0.1629	0.0082	0.0279	0.0006	153	3
QS12-108-17	4	112	141	0.80	0.0492	0.0028	0.1642	0.0094	0.0298	0.0005	154	3
QS12-108-19	16	280	551	0.51	0.0493	0.0013	0.1694	0.0047	0.0310	0.0005	159	3
QS12-108-21	17	177	647	0.27	0.0497	0.0016	0.1715	0.0055	0.0289	0.0005	159	2
QS12-108-23	13	193	501	0.39	0.0492	0.0015	0.1645	0.0051	0.0242	0.0005	155	2
QS12-108-27	7	134	270	0.50	0.0491	0.0023	0.1621	0.0075	0.0337	0.0005	153	3
QS12-108-30	9	142	318	0.45	0.0491	0.0028	0.1682	0.0093	0.0298	0.0005	158	3
QS12-108-32	24	539	813	0.66	0.0492	0.0012	0.1695	0.0044	0.0259	0.0008	159	2
QS12-10 花岗质糜棱岩												
Q12-10-3	18	29	656	0.04	0.0495	0.0014	0.1878	0.0055	0.1153	0.0018	175	3
Q12-10-4	3	81	89	0.90	0.0491	0.0038	0.1694	0.0129	0.0244	0.0006	159	3
Q12-10-5	11	48	459	0.10	0.0490	0.0016	0.1630	0.0053	0.0245	0.0010	154	2
Q12-10-6	2	76	63	1.20	0.0489	0.0086	0.1591	0.0277	0.0248	0.0005	150	4
Q12-10-7	19	313	647	0.48	0.0495	0.0018	0.1753	0.0063	0.1198	0.0018	164	3
Q12-10-8	8	32	282	0.11	0.0498	0.0021	0.1972	0.0085	0.1263	0.0028	182	3
Q12-10-9	23	272	812	0.34	0.0493	0.0012	0.1775	0.0045	0.0252	0.0004	166	3
Q12-10-11	6	42	182	0.23	0.0500	0.0020	0.2092	0.0082	0.0259	0.0005	193	3
Q12-10-12	2	43	54	0.79	0.0494	0.0085	0.1802	0.0303	0.0264	0.0004	168	6
Q12-10-13	34	138	945	0.15	0.0512	0.0010	0.2429	0.0053	0.0259	0.0006	218	3
Q12-10-15	4	16	108	0.15	0.0504	0.0027	0.2333	0.0124	0.0261	0.0004	213	4
Q12-10-17	73	18	2131	0.01	0.0505	0.0008	0.2394	0.0045	0.0263	0.0005	218	3

续表2

样品点	元素含量(ppm)				同位素比值						年龄(Ma)	
	总Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
Q12-10-18	10	5	324	0.02	0.0502	0.0018	0.2205	0.0081	0.0244	0.0006	202	3
Q12-10-21	3	36	93	0.39	0.0497	0.0048	0.1861	0.0180	0.0248	0.0005	173	4
Q12-10-22	37	165	1239	0.13	0.0499	0.0012	0.2015	0.0051	0.0244	0.0004	186	3
Q12-10-23	40	180	1351	0.13	0.0497	0.0010	0.1945	0.0043	0.0231	0.0006	180	3
Q12-10-25	3	74	70	1.05	0.0498	0.0043	0.1911	0.0164	0.0240	0.0004	177	4
Q12-10-26	14	160	427	0.38	0.0498	0.0016	0.2048	0.0067	0.0242	0.0005	189	3
Q12-10-27	17	200	508	0.39	0.0499	0.0014	0.2135	0.0060	0.0249	0.0004	197	3
Q12-10-31	15	14	512	0.03	0.0499	0.0021	0.1987	0.0084	0.0251	0.0004	184	3
Q12-10-34	4	117	117	1.01	0.0492	0.0032	0.1643	0.0107	0.0243	0.0004	154	3
Q12-10-35	18	17	519	0.03	0.0504	0.0014	0.2396	0.0069	0.3184	0.0048	219	3
Q12-10-36	18	10	521	0.02	0.0505	0.0013	0.2346	0.0063	0.0240	0.0004	214	3
Q12-10-37	8	41	265	0.16	0.0501	0.0024	0.2061	0.0098	0.0248	0.0005	189	3
Q12-10-38	1	26	47	0.55	0.0494	0.0113	0.1766	0.0402	0.0250	0.0004	165	5
Q12-10-39	1	17	31	0.55	0.0492	0.0095	0.1750	0.0334	0.3683	0.0056	164	5
Q12-10-40	3	75	122	0.61	0.0492	0.0056	0.1639	0.0185	0.3210	0.0048	154	3

因此,可推断糜棱岩最终变形晚于最年轻的锆石 U-Pb年龄157Ma,这与我们前面的解释相吻合。

5 讨论

5.1 鹊山变质核杂岩的演化

变质核杂岩的剥露通常伴随着岩体的侵入和拆离断层带的韧性变形。根据岩体与拆离断带之间的构造时间关系,可以建立变质核杂岩的年代学格架,如辽东半岛地区的辽南变质核杂岩(Liu等, 2005; 纪沫等, 2009)。但是,在缺乏详细的拆离断层带与侵入岩体之间的构造时间关系时,或者用来约束变质核杂岩时代的构造前岩体与同构造岩体之间年龄间隔相差太大时(>20Ma),我们需要结合变质核杂岩上叠盆地的年龄和韧性剪切带中糜棱岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄来精确限定变质核杂岩的剥露时代(朱志澄, 1994)。

如前面所述,上叠盆地在莱阳群沉积时期(135~125Ma)是一个受拆离断层活动控制的半地堑状伸展盆地。同时,前人对拆离断层带中糜棱岩黑云母测得的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为125~122Ma(张宏远等, 2006; Li等, 2006)。这些证据表明鹊山变质核杂岩的快速抬升和剥露发生在135~122Ma。另外,由于院各庄岩体侵入

到拆离断层下盘,而且未被剪切改造,我们推断拆离断层活动的终止是在约113Ma。

基于上述构造和年龄数据分析,我们建立鹊山变质核杂岩演化模式如下:

(1) 162~155Ma, 鹊山地区在162Ma开始岩浆活动,鹊山岩体在155Ma完成侵位,与胶东半岛地区该时期的构造热事件一致(图9a)。

(2) 155Ma之后,鹊山地区受NWW-SEE向伸展机制作用,韧性剪切带开始在中-下地壳深度发育。在135~113Ma期间,随着递进剥露,韧性剪切带经过中-上地壳最后到达近地表层次,同时伴随着上叠盆地的发育。后剥露时期的院格庄岩体(113Ma)的侵入就位造成鹊山变质核杂岩呈穹状隆起(图9b)。

(3) 113Ma之后,拆离断层停止活动,鹊山地区总体以脆性变形为主,浅部层次发育一系列NNE向断裂切割和破坏了早期的鹊山变质核杂岩(图9c)。

5.2 区域构造意义

刘俊来等(2009)根据岩石圈壳-幔耦合关系(Jackson, 2002),提出华北克拉通东部在晚中生代时期壳-幔具有解耦性。中-上地壳、下地壳和上地幔通过不同型式(变质核杂岩,拆离断层系统和半地堑盆

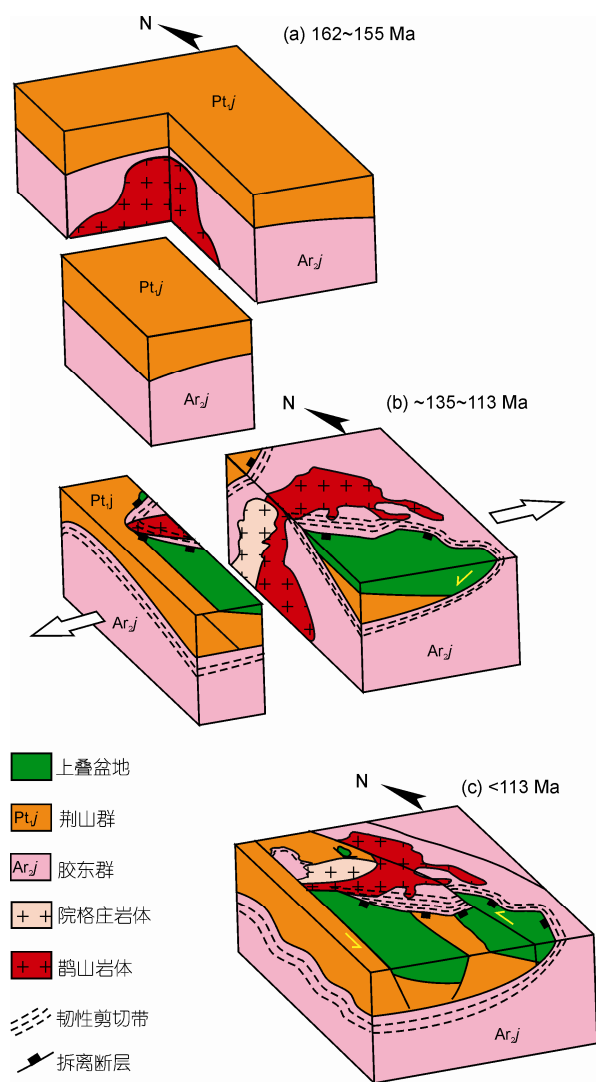


图9 鹊山变质核杂岩构造演化图解

地)而表现出分层拆离特点。

在整个华北克拉通东部的区域尺度上,与胶东半岛相似的辽东半岛是另一个在晚中生代时期经历岩石圈强烈减薄典型地区。一系列不同型式的伸展构造在这些地区广泛发育,例如胶东半岛地区的五莲变质核杂岩、鹊山变质核杂岩、郭家岭拆离断层系、俚岛拆离断层系和胶莱盆地(Ni等, 2013; Charlse等, 2011a; 蔡志慧等, 2009; 张岳桥等, 2008),以及辽东半岛地区的辽南变质核杂岩、万福变质核杂岩、大营子拆离断层和分散的断陷盆地(远通堡、丹东和本溪)(Liu等, 2005; 关会梅等, 2008; 申亮等, 2011; 刘俊来等, 2011)。这些构造指示了大规模的地壳伸展作用,

并共同组成胶-辽早白垩世伸展省。

通过本次研究获得的U-Pb数据并结合前人研究测年资料,我们提出胶-辽早白垩世伸展省的伸展作用开始于约135Ma,结束于105Ma,并划分为两个阶段。年龄界限在胶东半岛和辽东半岛地区为分别为125和120Ma(图10)。第一阶段伸展表现为中-下地壳强烈的流动性,对应胶东半岛地区的五莲变质核杂岩和鹊山变质核杂岩的发育,辽东半岛地区辽南变质核杂岩和大营子拆离断层的发育。在伸展作用机制下,胶辽早白垩世伸展省此时中-下地壳的拆离流动方向为下盘向SEE运动。侏罗纪时期大量岩体侵入造成的岩石圈软化和热状态改变为此次拆离流动创造了良好条件(McKenzie和Jackson, 2002; Williams和Jiang, 2005)。第二阶段为中-上地壳的伸展作用,对应胶东半岛地区的郭家岭拆离断层,俚岛拆离断层的发育和胶莱盆地中的火山喷发作用,以及辽东半岛地区的万福变质核杂岩和分散的断陷盆地的发育。此时,鹊山变质核杂岩和辽南变质核杂岩进入快速剥露阶段(Yang等, 2007),中-上地壳,上部地幔表现为强烈的拆离。

结合区域构造背景,胶-辽早白垩世伸展省可以作一个在华北克拉通东部乃至整个东亚地区伸展作用下壳-幔拆离作用及其响应的典型案例。

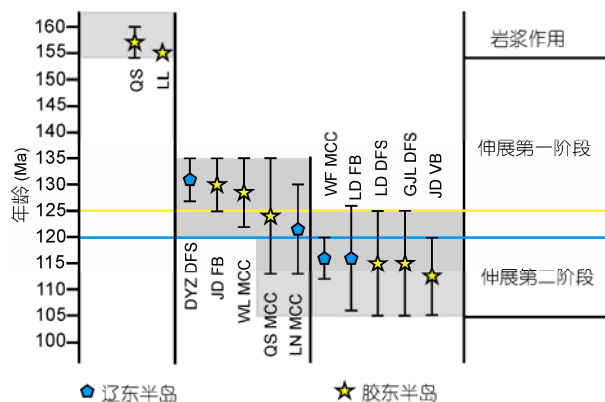


图10 胶辽地区早白垩世伸展作用阶段划分

QS: 鹊山岩体, LL: 玲珑岩体, DYZ DFS: 大营子拆离断层系, JD FB: 胶东断陷盆地, WL MCC: 五莲变质核杂岩, QS MCC: 鹊山变质核杂岩, LN MCC: 辽南变质核杂岩, WF MCC: 万福变质核杂岩, LD FB: 辽东断陷盆地, LD DFS: 俚岛拆离断层系, GJL DFS: 郭家岭拆离断层系, JD VB: 胶东火山盆地。年龄数据来源 Liu 等(2005), 关会梅等(2008), 申亮等(2011), 刘俊来等(2011), 张岳桥等(2008), Charlse 等(2011a), 蔡志慧等(2009), 郭敬辉等(2005)

6 结论

(1) 鹊山变质核杂岩具有典型科迪勒拉变质核杂岩构造的三层结构: 上盘由早白垩世上叠盆地及其古元古代基底组成, 下盘为太古代深变质杂岩与中生代侵入体, 上下盘之间被一条主拆离断层所分隔. 一系列NNE走向的后期脆性断裂, 使得变质核杂岩被肢解和改造.

(2) 岩石学、几何学、运动学、宏观和显微构造以及石英c轴组构分析表明鹊山变质核杂岩经历了递进剥露过程, 即在WNW-ESE区域伸展作用下, 发育于中-下地壳, 之后经过中-上地壳, 最后到达地壳表层.

(3) 通过构造和年代学证据分析, 我们限定鹊山变质核杂岩的剥露时代为135~113Ma.

(4) 综合分析辽东半岛和胶东半岛这一时期发育的不同型式的伸展构造, 我们厘定了胶辽早白垩世伸展省并且确定该区域伸展作用开始于约135Ma, 结束于105Ma, 并且将其划分为两个阶段. 第一阶段伸展表现为中-下地壳强烈的流动, 第二阶段为中-上地壳的伸展作用.

致谢 本文所涉及的野外工作、测年分析和EBSD实验分别得到了张若愚、董彦龙、孔亚亮和窦国兴的帮助, 申亮博士和评审人提出宝贵的修改意见, 在此表示诚挚的感谢.

参考文献

- Davis G A, 郑亚东. 2002. 变质核杂岩的定义, 类型及构造背景. 地质通报, 21: 185-192
- 蔡志慧, 许志琴, 唐哲民, 梁凤华, 陈方远. 2009. 北苏鲁荣成地区超高压变质带的形成与折返动力学. 岩石学报, 25: 1627-1638
- 程裕淇. 1994. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社. 517
- 关会梅, 刘俊来, 纪沫, 赵胜金, 胡玲, Davis G A. 2008. 辽宁南部万福变质核杂岩的发现及其区域构造意义. 地学前缘, 15: 199-208
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, Siebel W, 翟明国. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石U-Pb年代学. 岩石学报, 21: 1281-1301
- 胡玲, 刘俊来, 纪沫, 曹淑云, 张宏远, 赵中岩. 2009. 变形显微构造识别手册. 北京: 地质出版社. 96
- 纪沫, 胡玲, 刘俊来, 曹淑云. 2008. 主要造岩矿物动态重结晶作用及其变质条件. 地学前缘, 12: 226-233
- 纪沫, 刘俊来, 胡玲, 关会梅, Davis G A, 张维. 2009. 辽南变质核杂岩饮马湾山和赵房岩体锆石SHRIMP U-Pb年龄及其地质意义. 岩石学报, 25: 173-181
- 李俊建, 罗镇宽, 燕长海, 谢汝斌, 李德胜, 李洪奎, 骆辉, 刘晓阳, 刘晓雪, 李生. 2010. 华北陆块的构造格局及其演化. 地质找矿论丛, 25: 89-100
- 李三忠, 刘建忠, 赵国春, 吴福元, 韩宗珠, 杨中柱. 2004. 华北克拉通东部地块中生代变形的关键时限及其对构造的制约——以胶辽地区为例. 岩石学报, 20: 633-646
- 林伟, 王清晨, 石永红. 2006. 大别-苏鲁碰撞造山带构造几何学、运动学和岩石变形分析. 岩石学报, 21: 1195-1214
- 刘俊来, Davis G A, 纪沫, 关会梅, 白相东. 2008b. 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: 72-81
- 刘俊来, 曹淑云, 邹运鑫, 宋志杰. 2008a. 岩石电子背散射(EBSD)组构分析及应用. 地质通报, 27: 1638-1645
- 刘俊来, 关会梅, 纪沫, 胡玲. 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: 21-26
- 刘俊来, 纪沫, 申亮, 关会梅, Davis G A. 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: 618-637
- 刘俊来, 纪沫, 夏浩然, 刘正宏, 周永胜, 于心起, 张宏远, 程素华. 2009. 华北克拉通晚中生代壳-幔拆离作用: 岩石流变学约束. 岩石学报, 25: 1819-1829
- 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: 385-391
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示. 中国科学 D辑: 地球科学, 33: 289-299
- 邱连贵, 任凤楼, 曹忠祥, 张岳桥. 2008. 胶东地区晚中生代岩浆活动及对大地构造的制约. 大地构造与成矿学, 32: 117-123
- 山东省地质矿产局. 1991. 山东省区域地质志. 北京: 地质出版社. 526
- 申亮, 刘俊来, 胡玲, 纪沫, 关会梅, Davis G A. 2011. 辽东半岛大营子拆离断层系及其区域构造意义. 中国科学: 地球科学, 41: 437-451
- 宋明春, 王沛成. 2003. 山东省第四地质矿产勘察院: 山东省区域地质. 济南: 山东省地图出版社. 970
- 宋明春, 徐军祥, 王沛成. 2009. 山东省大地构造格局和地质构造演化. 北京: 地质出版社. 124
- 孙丰月, 石准立, 冯本智. 1995. 胶东金矿地质及幔源CHO流体分异成岩成矿. 长春: 吉林人民出版社. 170
- 夏浩然, 刘俊来. 2011. 石英结晶学优选与应用. 地质通报, 30: 58-70
- 徐贵忠, 周瑞, 闫臻, 余宏全, 王艺芬, 杨茂森, 李兵. 2001. 论胶东地区中生代岩石圈减薄的证据及其动力学机制. 大地构造与成矿学, 25: 368-380
- 杨金中, 沈远超. 2000. 胶东东部鹊山变质核杂岩与金矿成矿. 地

- 质地球化学, 28: 15–19
- 张宏远, 侯泉林, 曹代勇. 2006. 胶东东部中生代走滑逆冲构造带的构造年代学制约. 中国科学 D辑: 地球科学, 36: 593–600
- 张华锋, 李胜荣, 翟明国, 郭敬辉. 2006. 胶东半岛早白垩世地壳隆升剥蚀及其动力学意义. 岩石学报, 22: 285–295
- 张进江, 郑亚东, 刘树文. 1998. 小秦岭变质核杂岩的构造特征, 形成机制及构造演化. 北京: 海洋出版社. 136
- 张田, 张岳桥. 2007. 胶东半岛中生代侵入岩浆活动序列及其构造制约. 高校地质学报, 13: 323–336
- 张田, 张岳桥. 2008. 胶北隆起晚中生代构造–岩浆演化历史. 地质学报, 82: 1210–1228
- 张岳桥, 李金良, 张田, 董树文, 袁嘉音. 2008. 胶莱盆地及其邻区白垩纪–古新世沉积构造演化历史及其区域动力学意义. 地质学报, 82: 1230–1257
- 朱光, 宋传中, 王道轩, 刘国生, 徐嘉炜. 2001. 郯庐断裂带走滑时代的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究及其构造意义. 31: 250–256
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间, 范围与机制. 中国科学: 地球科学, 41: 583–592
- 朱志澄. 1994. 变质核杂岩和伸展构造研究述评. 地质科技情报, 13: 1–9
- Charles N, Chen Y, Augier R, Gumiaux C, Lin W, Faure M, Monie P, Choulet F, Wu F Y, Zhu R X, Wang Q C. 2011a. Palaeomagnetic constraints from granodioritic plutons (Jiaodong Peninsula): New insights on Late Mesozoic continental extension in Eastern Asia. *Phys Earth Planet Inter*, 187: 276–291
- Charles N, Gumiaux C, Augier R, Chen Y, Zhu R X, Lin W. 2011b. Metamorphic core complexes vs. synkinematic plutons in continental extension setting: Insights from key structures (Shandong Province, eastern China). *J Asian Earth Sci*, 40: 261–278
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, Zhang Z C, Ma G G. 1992. Zircon U–Pb ages for the Early Cambrian time-scale. *J Geol Soc*, 149: 148–171
- Darby B J, Davis G A, Zhang X H, Wu F Y, Wilde S, Yang J H. 2004. The newly discovered Waziyu metamorphic core complex, Yiwulü Shan, western Liaoning Province, Northwest China. *Earth Sci Front*, 11: 145–155
- Davis G A, Darby B J, Zheng Y D, Spell T L. 2002. Geometric and temporal evolution of an extensional detachment fault, Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. *Geology*, 30: 1003–1006
- Davis G A, Qian X L, Zheng Y D, Yu H, Wu F Y, Simon W, Yang J H. 1996. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: A metamorphic core complex north of Beijing, China. *World and Regional Geology*. In: Yin A, Harrison M, eds. *Tectonic Evolution of Asia*. New York: Cambridge University Press. 253–280
- Davis G H, Coney P J. 1979. Geologic development of the Cordilleran metamorphic core complexes. *Geology*, 7: 120–124
- Faure M, Lin W, Breton N L. 2001. Where is the North China–South China block boundary in eastern China? *Geology*, 29: 119–122
- Jackson J. 2002. Strength of the continental lithosphere: Time to abandon the jelly sandwich? *GSA Today*, 12: 4–9
- Law R D. 1990. Crystallographic fabrics: A selective review of their applications to research in structural geology. *J Geol Soc London*, 54: 335–352
- Li J W, Vasconcelos P, Zhou M F, Ma C Q. 2006. Geochronology of the Pengjiakuang and Rushan gold deposits, eastern Jiaodong gold province, northeastern China: Implications for regional mineralization and geodynamic setting. *Econ Geol* 101: 1023–1038
- Li X H, Liu Y, Li Q L, Guo C H, Chamberlain K R. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. *Geochem Geophys Geosyst*, 10: 1–21
- Lister G S, Davis G A. 1989. The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region. *J Struct Geol*, 11: 65–94
- Liu J L, Davis G A, Lin Z Y, Guan H M, Zhang Z C, Zhao Z D. 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: 65–80
- Liu J L, Shen L, Ji M, Zhang Z C, Zhao Z D. 2013. The Liaonan/Wanfu paired metamorphic core complexes in the Liaodong Peninsula: Progressive exhumation and constraints on destruction of the North China craton. *Tectonics*, 32: 1121–1141
- McKenzie D, Jackson J. 2002. Conditions for flow in the continental crust. *Tectonics*, 21: 1–1055
- Meng Q R. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China–Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369: 155–174
- Menzies M A, Fan W, Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 76: 71–81
- Ni J L, Liu J L, Tang X L, Yang H B, Xia Z M, Guo Q J. 2013. The Wulian metamorphic core complex: A newly discovered metamorphic core complex along the Sulu orogenic belt, eastern China. *J Earth Sci*, 24: 297–313
- Passchier C W, Trouw R A. 2005. *Microtectonics*. Berlin: Springer-Verlag. 366
- Ren J Y, Tamaki K, Li S T, Zhang J X. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344: 175–205
- Ritts B D, Darby B J, Cope T. 2001. Early Jurassic extensional basin formation in the Daqing Shan segment of the Yinshan belt, northern North China Block, Inner Mongolia. *Tectonophysics*, 339: 239–258
- Sibson R. 1977. Fault rocks and fault mechanisms. *J Geol Soc*, 133: 191–213

- Stipp M, Stünitz H, Heilbronner R, Schmid S. 2002. The eastern Tonale fault zone: A natural laboratory for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700°C. *J Struct Geol*, 24: 1861–1884
- Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, Gong B, Liu X M. 2007. Geochronology and geochemistry of metamorphic rocks in the Jiaobei terrane: Constraints on its tectonic affinity in the Sulu orogen. *Precambrian Res*, 152: 48–82
- Wang Y S, Xiang B W, Zhu G, Jiang D Z. 2011. 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*, 33: 362–380
- Williams P F, Jiang D. 2005. An investigation of lower crustal deformation: Evidence for channel flow and its implications for tectonics and structural studies. *J Struct Geol*, 27: 1486–1504
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O, Yang J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 103–119
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Wilde S J. 2002. A-type granites in Northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chem Geol*, 187: 143–173
- Wu Y B, Zheng Y F, Zhou J B. 2004. Neoproterozoic granitoid in Northwest Sulu and its bearing on the North China-South China Blocks boundary in East China. *Geophys Res Lett*, 31: 157–175
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath eastern China: Evidence, timing and mechanism. *Phys Chem Earth*, 26: 747–757
- Xu Z Q, Zeng L S, Liu F L, Yang J S, Zhang Z M. 2006. Polyphase subduction and exhumation of the Sulu high-pressure-ultrahigh-pressure metamorphic terrane. In: *Continental Subduction*. *Geol Soc Am Bull*, 403: 93–113
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Lo C H, Wilde S A, Davis G A. 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. *Geol Soc Am Bull*, 119: 1405–1414
- Zhai M G. 2002. Where is the North China-South China block boundary in eastern China? *Geology*, 30: 667
- Zhang B L, Zhu G, Jiang D, Li C C, Chen Y. 2012. Evolution of the Yiwulushan metamorphic core complex from distributed to localized deformation and its tectonic implications. *Tectonics*, 31: 1–22
- Zhang Y Q, Dong S W, Shi W. 2003. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu fault zone in Shandong Province, eastern China. *Tectonophysics*, 363: 243–258
- Zhang Y Q, Li J L, Zhang T, Dong S W, Yuan J Y. 2008. Cretaceous to paleocene tectono-sedimentary evolution of the Jiaolai basin and the contiguous areas of the Shandong Peninsula (North China) and its Geodynamic Implications. *Acta Geol Sin*, 82: 1229–1257
- Zheng J P, Tang H Y, Zhao J H. 2010. Age, trace elements and Hf-isotope composition of zircon in eclogites from the Sulu UHP belt, east-central China: Neoproterozoic intrusion and subsequent paleozoic and early mesozoic metamorphism. *J Earth Sci*, 21: 598–622
- Zheng Y F, Fu B, Gong B, Li L. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth-Sci Rev*, 62: 105–161
- Zheng Y F, Zhou J B, Wu Y B, Xie Z. 2005. Low-grade metamorphic rocks in the Dabie-sulu Orogenic Belt: A Passive-margin accretionary wedge deformed during continent subduction. *Int Geol Rev*, 47: 851–871