中国科学: 地球科学 2011 年 第 41 卷 第 4 期: 437 ~ 451
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

辽东半岛大营子拆离断层系及其区域构造意义

申亮[①], 刘俊来[①*], 胡玲[①], 纪沫[①], 关会梅[②], Gregory A DAVIS[③]

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 防灾科技学院, 燕郊 065201;
③ Department of Earth Sciences, University of South California, Los Angeles, CA90089-0740, USA
* 联系人, E-mail: jliu@cugb.edu.cn

收稿日期: 2010-05-25; 接受日期: 2010-11-11
国家自然科学基金(批准号: 90814006)与教育部"111"计划(编号: B07011)资助

摘要 华北克拉通晚中生代发生了大规模岩石圈减薄并伴随着地壳层次区域性伸展作用的发生. 在此伸展背景下, 华北克拉通区发育有一系列的伸展构造, 大营子拆离断层系即为一个典型实例、大营子拆离断层系位于华北克拉通东部(辽东半岛东南部), 主要由上盘火山-沉积盆地, 大营子-黄花甸拆离断层带以及下盘古元古代变质岩系和侵入岩体三部分组成. 依据拆离断层带中构造岩组合、构造岩变形显微构造和石英 EBSD 组构分析揭示出下盘岩石主要经历了从高绿片岩相到低绿片岩相的变形变质过程. 基于火山-沉积盆地中火山岩的 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果, 推断伸展构造开始活动于(135 ± 1.2) Ma 之前, 结束于 (127 ± 1) Ma. 通过与辽南变质核杂岩及辽东半岛其他伸展构造的对比, 以及这些伸展构造的分布及影响深度, 可充分说明辽东半岛岩石圈破坏和减薄的不均一性, 从而显示出其破坏程度的差异, 并藉此探讨了华北克拉通破坏和伸展减薄的不均匀性.

关键词
辽东半岛
拆离断层系
白垩纪伸展作用
岩石圈减薄
华北克拉通

晚中生代以来发生的大规模岩石圈减薄是华北克拉通破坏的重要表现形式[1~8]. 伴随着华北克拉通破坏和岩石圈减薄, 华北克拉通内部分散出现了包括辽南变质核杂岩[9~12]、万福变质核杂岩[13]、医巫闾山变质核杂岩[14~16]、小秦岭变质核杂岩[17]、云蒙山变质核杂岩[18,19]、亚干变质核杂岩[20]和呼和浩特变质核杂岩[21]在内的一系列伸展构造. 这些变质核杂岩拉伸线理的统计方向以 SE130°~NW310°为主, 说明这些伸展构造形成于统一的应力场中; 形成和剥露时间 140~90 Ma, 但主体形成和剥露时间介于 130~110 Ma[11,22,23].

辽东半岛是华北克拉通晚中生代岩石圈破坏与减薄最为强烈和典型的地区之一, 在约 40000 km^2 范围内不仅发育了辽南和万福变质核杂岩, 还发育一系列的拆离断层构造和断陷盆地. 伸展构造的发育伴随着广泛的侵入岩和火山岩的发育. 前人年代学研究表明, 该区侵入岩可划分为三期: 三叠纪(231~210 Ma)、侏罗纪(180~153 Ma)和白垩纪(135~110 Ma)[23~25]. 大营子拆离断层系发育于辽东半岛东南部, 该断层在 1∶25 万丹东-东港地质图上曾被厘定为一条左行的走滑断层(据辽宁省地质矿产调查院, 2003; 未发表). 本文作者观察与分析的结果表明其为一条低角度正断层, 上盘发育了两个典型的陆相火山-沉积盆地. 在前人研究的基础上[23,26,27], 结

英文引用格式: Shen L, Liu J L, Hu L, et al. The Dayingzi detachment fault system in Liaodong Peninsula and its regional tectonic significance. Sci China Earth Sci, 2011, doi: 10.1007/s11430-011-4202-5

合系统的区域构造分析、断层构造与构造岩显微构造、组构分析, 结合开展盆地火山岩的年代学分析, 厘定了拆离断层系的构造组合型式、阐明其运动学方式与发育的时间, 并结合区域伸展构造变化初步阐述了大营子拆离断层形成与演化的模型. 这项研究有助于我们进一步了解其与辽东半岛其他伸展构造之间的关系, 并藉此探讨华北克拉通破坏和伸展减薄的属性.

1 地质概况

辽东半岛地区自太古宙形成克拉通古陆核之后, 经历了古元古代胶辽活动带的改造[28,29], 区域性高角闪岩相-低绿片岩相变质作用条件下的变形作用使之构成了华北克拉通统一的结晶基底. 与华北克拉通其他地区一样, 该地区从中元古代-早二叠世属于陆内稳定发展阶段, 除中奥陶世有大规模的金伯利岩就位外(462 Ma, 瓦房店[30]), 几乎没有发生显著的构造-岩浆活动[31,32]. 然而, 自印支期开始, 辽东半岛开始出现强烈的构造-岩浆活动. 早期受扬子板块与华北板块碰撞与拼合作用的影响, 部分地区形成了大规模的区域收缩变形构造组合(如大连地区 EW 走向的褶皱构造[33~35])与岩浆岩组合(辽东半岛主要为中基性岩浆岩, 如正长岩、闪长岩及辉绿岩[23]). 晚中生代开始, Izanagi 板块向欧亚大陆的俯冲, 整个华北岩石圈处于强烈破坏和减薄阶段, 并使得辽东半岛形成了一系列主体伸展方向为 NW-SE 向的伸展构造. 在此背景下, 也发育了包括辽南和万福变质核杂岩对与大营子拆离断层系在内的辽东半岛伸展-拆离构造系. 大营子拆离断层系(Dayingzi Detachment Fault System, DFS)主要由三部分组成: 上盘白垩纪火山-沉积盆地、中部的大营子-黄花甸拆离断层带(detachment fault zone)及下盘的古元古代变质岩系和侵入岩体.

2 大营子拆离断层系

2.1 上盘火山-沉积盆地

大营子拆离断层系的上盘由一套古元古代变质岩系和白垩纪火山-沉积盆地构成(图 1). 现今可见的白垩纪火山-沉积岩主要分布于大营子和黄花甸地区. 依据野外地质研究, 发现白垩纪火山-沉积岩由桂云花组(K_1g)和大峪组(K_2d)两套地层组成.

桂云花组(K_1g)地层在大营子地区出露的平面形态近椭圆形, 主体南北向延伸, 长轴南北向约 18 km, 短轴东西向约 10 km(图 1); 在黄花甸地区出露的平面形态呈曲颈瓶状, 主体近北西-南东向延伸. 该组地层厚度可达 1.5 km 左右, 主要为一套溢流相-爆发相-火山沉积间歇碎屑岩相的中酸性火山岩, 如安山质火山角砾岩、安山岩、凝灰岩及流纹岩等(黄花甸地区除却中性火山岩, 还可见酸性的流纹岩(图 2(a)); 大营子地区则以中性火山岩为主(图 2(b)), 以及火山喷发间隙平静期沉积的砂砾岩. 上述地层均倾向东, 与拆离断层面的倾向相反(图 2), 进而充分说明这套地层沉积后发生了显著的掀斜.

2.2 大营子-黄花甸拆离断层带

大营子-黄花甸拆离断层带是辽东地区重要的拆离断层构造之一, 对于进一步了解辽东半岛地区的构造展布、演化历史及伸展减薄的机制提供一定的帮助. 该断层带主要展布于大营子、黄花甸一线, 走向自南向北由 NNE 向逐渐转向 NNW(图 1). 纵贯南北延伸约 70 km, 切过了古元古代变质岩系, 并控制了早白垩世火山岩系的发育.

大峪组(K_2d)地层角度不整合于桂云花组(K_1g)地层之上, 产状相对比较平缓(图 2(a)), 出露面积很小, 只见于黄花甸镇西侧. 该组未见顶, 处于研究区中生代地层最上部层位, 主要为一套紫色铁质胶结长石岩屑砂岩、砂砾岩和厚层砾岩等沉积岩系(图 2(a)), 沉积环境为河湖相.

2.2.1 大营子-黄花甸拆离断层及断层构造岩

拆离断层(detachment fault)是指结晶变质基底杂岩与上覆盖层之间的大型低角度正断层或伸展型断层[17,36~38]. 大营子-黄花甸拆离断层走向自南向北由 NNE 向逐渐转向 NNW, 断层总体倾向 NWW 方向, 倾角从几度到三十度(图 3(a)). 在平面上, 大营子-黄花甸主拆离断层、拆离断层带内构造岩普遍具有“W”形特点. 大营子镇南北两侧面状构造的产状分别为 283°∠22°和 225°∠20°, 构成一个向形, 枢纽产状: 250°∠18°; 黄花甸镇南北两侧面状构造的产状分别为 294°∠17°和 258°∠23°, 构成一个向形, 枢纽产状 303°∠15°. 黄花甸向形和大营子向形之间为一个背形, 其枢纽产状 268°∠15°(图 1). 这种局部产状的变

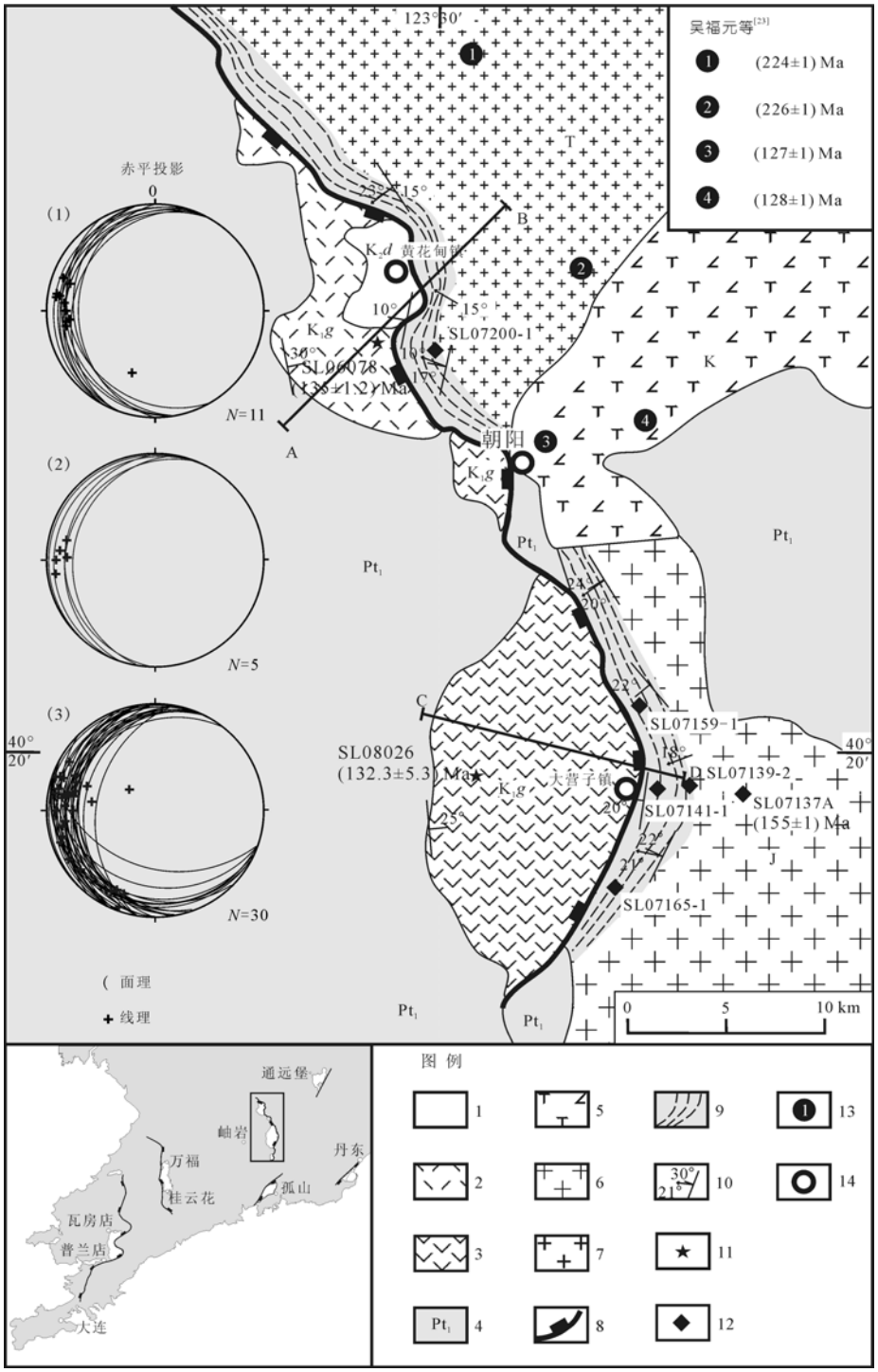


图 1　大营子拆离断层系地质简图

赤平投影图(1)和(3)分别为黄花甸段和大营子段糜棱岩面理(大圆弧)和线理(十字)构造统计(下半球等面积投影); (2)为大营子-黄花甸主拆离断层面及擦痕构造统计; AB 和 CD 为穿过该拆离断层系的两条剖面(图 2); 角图为辽东半岛伸展构造分布图. 1, 上白垩统大峪组沉积岩; 2, 下白垩统桂云花组中酸性火山岩(黄花甸镇); 3, 下白垩统桂云花组中性火山岩(大营子镇); 4, 古元古界变质岩系; 5, 白垩纪二长岩; 6, 侏罗纪花岗岩; 7, 三叠纪花岗岩; 8, 主拆离断层; 9, 拆离断层带; 10, 面理和线理; 11, 本文测年采样点; 12, 石英 EBSD 组构采样点; 13, 前人测年采样点; 14, 城镇. 据丹东-东港 1∶25 万地质图修编

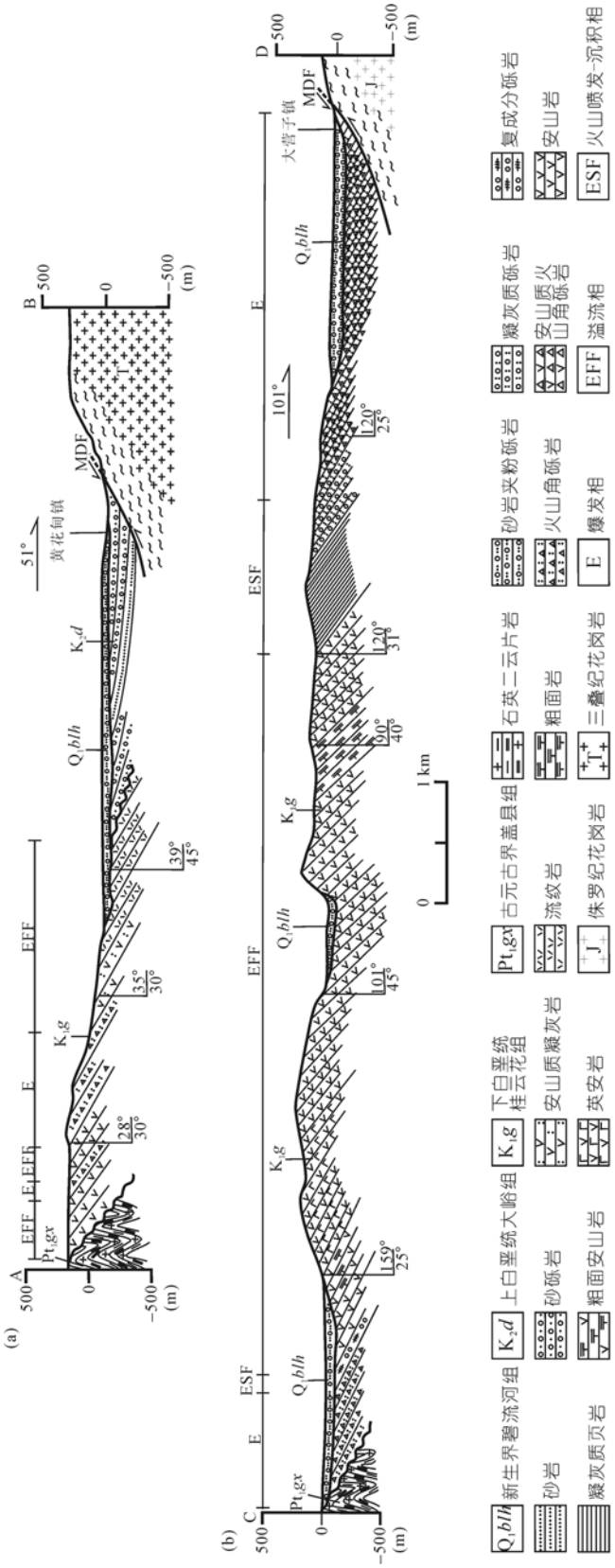


图 2　黄花甸(a)和大营子盆地(b)地质剖面图

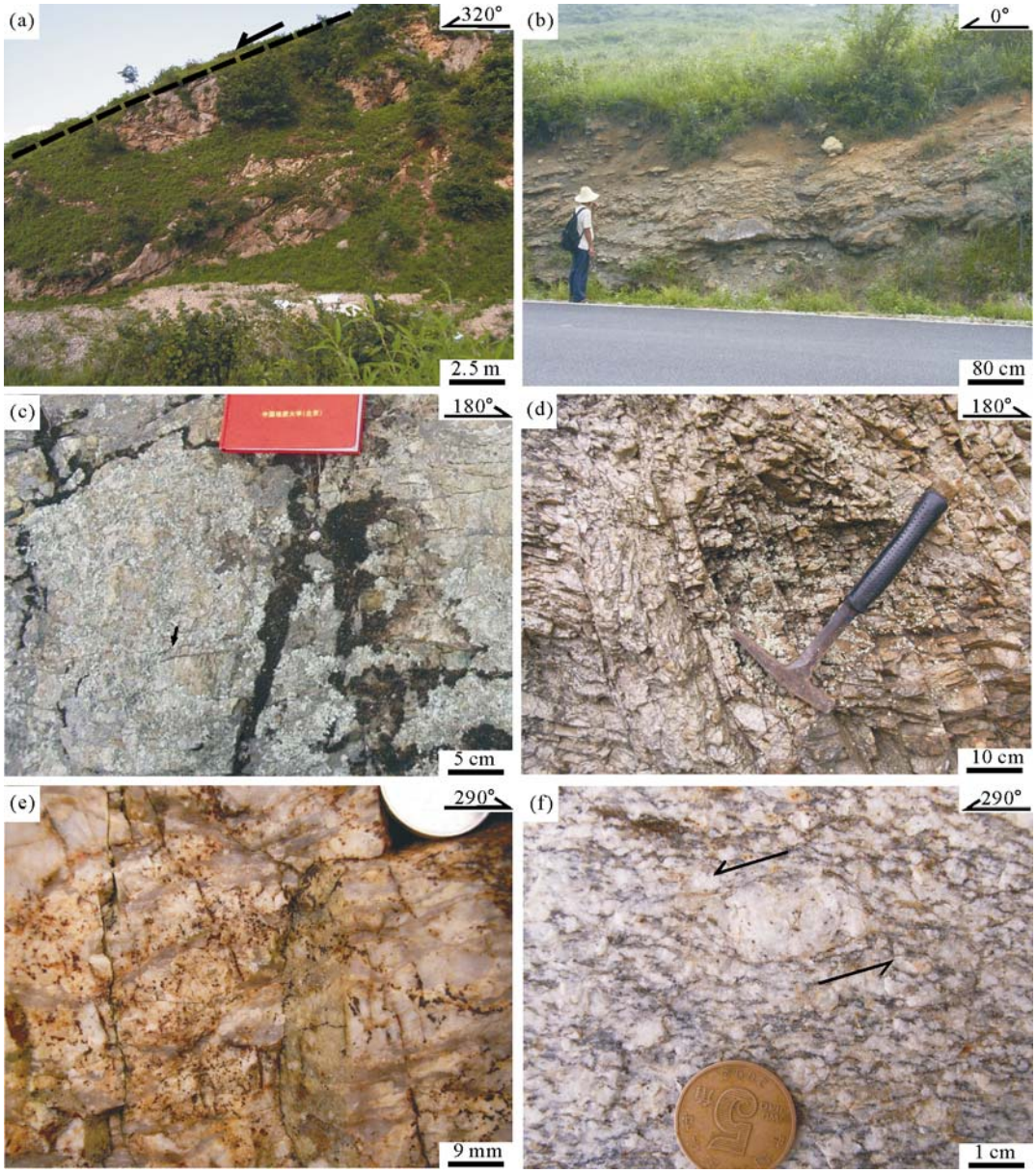


图 3　大营子-黄花甸拆离断层带宏观特征

(a) 拆离断层断层面倾向西(黄花甸镇), 倾角 22°; (b) 拆离断层面附近的断层泥带(黄花甸镇), 呈灰黄色, 局部灰黑色, 其中夹有硅质透镜体; (c) 微角砾岩, 长英质, 角砾极其细小(≤1 mm), 青灰色、致密, 断层面上发育阶步, 指示下盘向上运动(大营子镇); (d) 发生明显破碎的长英质碎裂糜棱岩(大营子镇); (e) 长英质糜棱岩(大营子镇), 可见长石呈残斑状, 石英呈拔丝状环绕长石; (f) 片麻状的黑云二长花岗岩(大营子镇), 发育有长石残斑, 拖尾指示剪切方向为西

化可能是拆离断层带在抬升中期或后期发生弯曲所造成的.

在垂向上, 大营子-黄花甸拆离断层带出露宽度 1~1.5 km, 在大营子镇东侧垂直于拆离断层走向方向上发育的构造岩依次为: 断层泥、微角砾岩、碎裂糜棱岩、糜棱岩和片麻状的黑云二长花岗岩, 是拆离断层下盘抽拉出地表过程中不同演化层次的产物, 也是确定其为拆离断层构造的重要标志[38].

其中, 断层泥位于断层面附近, 是主拆离断层强烈滑移、摩擦、破碎, 并伴随着流体活动使得破碎矿物分解所形成的, 主要为灰黑色含碳的泥灰质物及硅质物, 局部可含有少量断层角砾岩. 断层泥中清晰

可见一些硅质的构造透镜体(最大可达宽 40 cm, 长 90 cm)(图 3(b)). 微角砾岩出露范围很小(可见厚度 10 cm~1 m), 主要为青灰色的长英质, 角砾细小(≤1 mm)(图 3(c)). 碎裂糜棱岩位于微角砾岩和糜棱岩之间. 岩石一般呈灰白色, 主要为花岗质, 组成矿物为石英和长石, 含少量黑云母, 具碎裂结构或碎斑结构. 碎块位移较大, 常常呈残留碎屑状, 被细小基质物质所包围. 尽管碎裂岩破碎明显, 但在碎块中仍保留有糜棱面理和线理(图 3(d)). 在拆离断层中强变形的部位可以见到的韧性变形构造岩, 即糜棱岩, 以花岗质眼球状糜棱岩常见, 且发育连续的面理和线理, 厚度约 1 km. 糜棱组构发育明显, 如石英呈拔丝状和长石"σ"、"δ"残斑(图 3(e)). 在大营子镇东侧约 1 km 处, 远离主拆离断层糜棱岩逐渐转变为片麻状黑云二长花岗岩, 主要由钾长石、斜长石和石英组成, 其中黑云母的定向排列构成片麻理, 并可见明显的长石呈残斑, 但拔丝状石英几乎不发育(图 3(f)).

2.2.2 大营子-黄花甸拆离断层带构造岩的显微构造

拆离断层递进变形作用在构造岩中保留了各种不同特点的显微构造特征, 其中既包括了地壳浅部层次低温变形的产物, 也广泛发育了中部地壳层次中高温变形构造的特征(表 1).

前者主要包括石英的单晶丝带(图 4(a))及膨凸动态重结晶形成的新晶(图 4(b)), 长石发育"混合型"书斜式构造(图 4(c)). 后者主要包括石英多晶条带(图 4(d), (e))、长石"δ"旋转残斑(图 4(e))、蠕英结构(图 4(f))、应力条纹(图 4(g))以及长石膨凸动态重结晶形成的新晶(图 4(h)).

上述代表地壳中、浅部层次中高温和低温变形的组构特征表明拆离断层经历了从高绿片岩相到低绿片岩相的变形-变质过程[39], 也揭示出主拆离断层下盘岩石经历了从深部到浅部递进剥露和逐渐抽拉出地表的过程.

2.2.3 花岗质糜棱岩中石英 EBSD 组构分析

所选样品沿垂直面理和平行线理的方向切制光薄片, 并在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室对样品进行抛光(使用 BUEHLER MASTERMET 硅胶和 BUEHLER 磨抛机), 随后晶格优选方位(Lattice Preferred Orientation, LPO)数据的获取在 Hitachi S-3400N-II 扫描电镜(连接有 Nordlys EBSD Model NL-II 探头)上采用交互模式来完成, 工作条件为: 15 kV 加速电压, 23 mm 工作距离. 具体实验流程参见文献[40]. 将测得的数据放入一个文件夹并在 HKL CHANNEL5 软件上统计其 LPO. 一般采用下半球投影, 且面理平行于 *XY* 面, 线理平行于 *X* 轴方向.

选取的样品主要为拆离断层带中花岗质的糜棱岩(SL07159-1, SL07141-1, SL07165-1, SL07139-2 和 SL07200-1)及片麻状黑云二长花岗岩(SL07137A). 其中, SL07159-1, SL07141-1 和 SL07165-1 三个样品为碎裂糜棱岩, 主要分布于大营子段南、北、中三个位置. SL07139-2(采自大营子段)和 SL07200-1(采自黄花甸段)为强烈发育残斑的糜棱岩, 位于碎裂糜棱岩之下. SL07137A 为大营子镇东侧糜棱岩之下的片麻状黑云二长花岗岩(见图 1, 图 5 构造岩剖面示意图). 花岗质糜棱岩中石英普遍发生动态重结晶作用, 形成一系列组成糜棱面理的亚颗粒, 长石则构成残斑. 因此, 为了更好的揭示拆离断层的构造岩演化及下盘的运动方向, 本文主要选取这些构成面理的定向性较强的石英颗粒(图 5 显微照片)进行 EBSD 组构分析. 根据实验结果(图 5), 石英组构<c>轴极密区均位于 *Y* 轴附近, 主要为中温柱面滑移形成的组构[39,41~43], 滑移系为$\{10\bar{1}0\}$<a>, 对应的形成温度为 400~500℃, 属于高绿片岩相. 从这些不对称、顺时针旋转的极密图中可看出下盘岩石向 SEE 运动. 片麻状黑云二长花岗岩, 其石英<c>轴极密比较分散, 规律性不明显(图 5, SL07137A), 这可能与该岩中石英的弱定向排列有关. 但是从极密图中仍可看出下盘向 SEE 运动.

表 1 大营子-黄花甸拆离断层带构造岩的显微构造特征

变形温度(℃)	变质相	变形现象	变形机制	构造层次
300~400	低绿片岩相	石英: 单晶丝带、波状消光、膨凸动态重结晶形成的新颗粒 长石: 显微破裂和书斜式构造	位错滑移、膨凸动态重结晶作用 破裂、微破裂作用	上部地壳
400~500	高绿片岩相	石英: 多晶石英条带及亚颗粒旋转动态重结晶形成的新颗粒 长石: 钾长石蠕英结构、钠长石应力条纹、斜长石的残斑、扭折、变形纹、波状消光, 膨凸动态重结晶形成的新颗粒等	亚颗粒旋转重结晶作用 位错滑移、膨凸动态重结晶作用	中部地壳

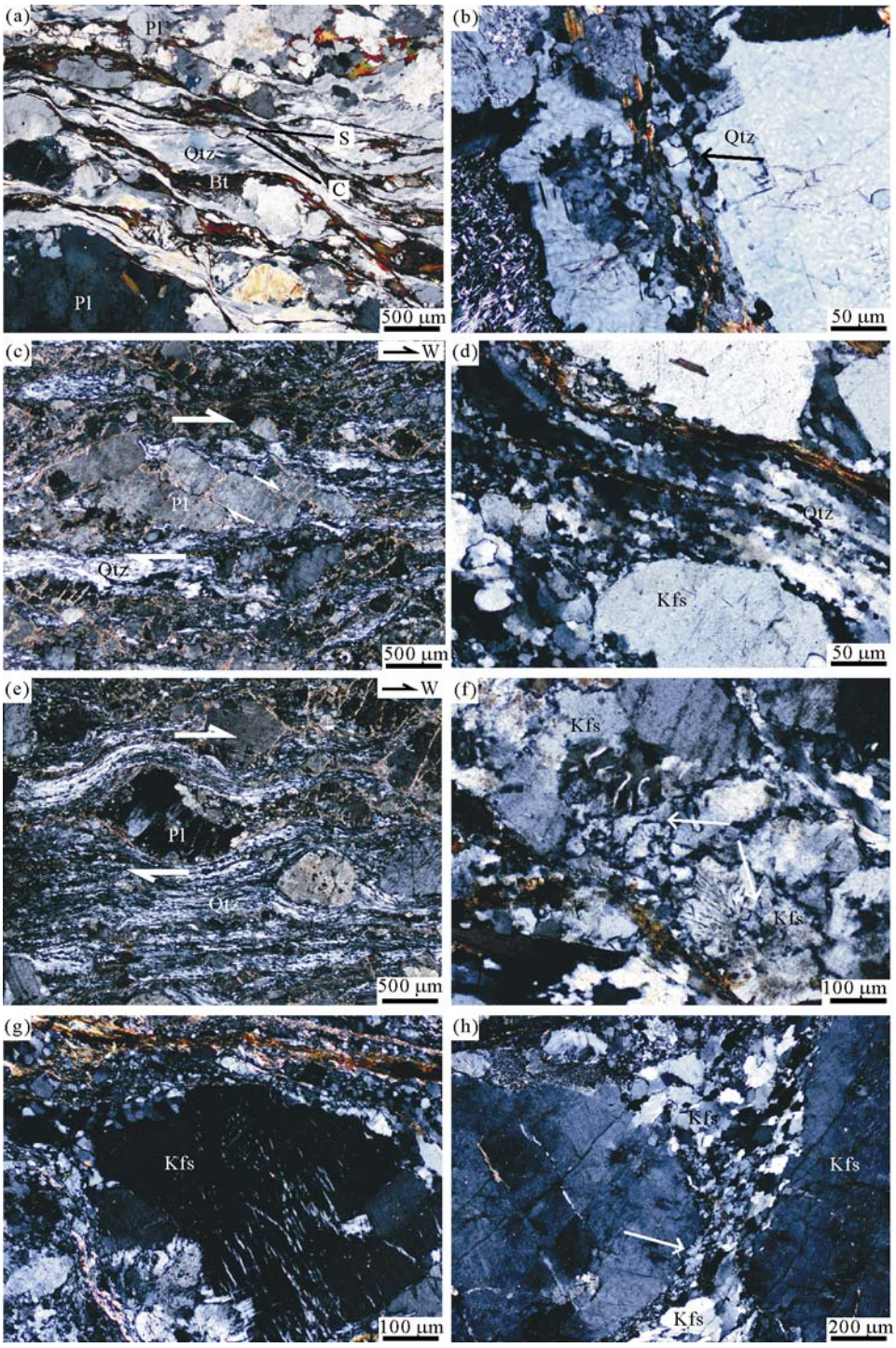


图 4　大营子-黄花甸拆离断层带构造岩的显微构造特征

(a) 石英的单晶丝带及 S-C 组构; (b) 石英膨凸动态重结晶形成的新晶; (c) 长石的书斜式构造; (d) 石英亚颗粒旋转动态重结晶形成的新晶所构成多晶条带; (e) 石英多晶条带及长石“δ”旋转残斑; (f) 钾长石的蠕英结构; (g) 钠长石的应力条纹; (h) 长石膨凸动态重结晶形成的新晶. Qtz, 石英; Pl, 斜长石; Bt, 黑云母; Kfs, 钾长石

2.2.4 拆离断层的运动学特征

宏、微观构造与组构特征是拆离断层运动学方向的重要判据. 在大营子-黄花甸拆离断层的主拆离断层面上经常可见到清晰的指示下盘上升的阶步构造(图 3(c)). 同时, 大营子-黄花甸拆离断层中部构造层次的糜棱岩发育非常明显的面状和线状构造, 对其进行赤平投影, 结果表明该拆离断层系的运动方向为近东西向(图 1 赤平投影(1), (3)). 再者对主拆离断层面及其面上的擦痕产状的构造统计, 得出与糜棱岩面理、线理产状一致的结果(图 1 赤平投影(2)). 另外, 拆离断层中的构造岩发育有指示剪切运动方向的不对称组构, 如 S-C 组构(图 4(a))、长石的"混合型"书斜式构造[39](图 4(c))、"σ"残斑(图 3(f))和"δ"残斑(图 4(e)). 这些不对称组构均指示下盘向 SEE 运动. 这就充分说明该拆离断层系运动学方向与构造伸展方向具有一致性.

2.3 下盘古元古代变质岩系与侵入岩体

大营子拆离断层下盘出露有古元古代变质岩系及侵入于其中的三叠纪、侏罗纪和白垩纪花岗质侵入岩体. 三叠纪岩体主要分布于黄花甸镇东部地区, 为闪长岩和花岗岩(图 1), 且该岩体边部遭受了后期脆-韧性变形(图 6(a)). 前人测得黄花甸附近的双牙山似斑状花岗岩和老尖顶子闪长岩的锆石 U-Pb 年龄分别为(224±1)和(220±1) Ma(图 1)[23]. 侏罗纪天桥山岩体出露范围很广, 分布于大营子镇的东部及南部地区(图 1), 岩性为片麻状黑云母二花岗岩, 接近拆离断层带的岩体边部为糜棱状构造(图 6(b)), 明显遭受了后期的脆-韧性变形作用的改造. 远离断层的黑云二长花岗岩在 1∶25 万丹东-东港地质图上归并为古元古代的红铜沟单元, 该岩体的锆石 U-Pb SHRIMP 测年结果为(155±1) Ma, 即该岩体为侏罗纪(未发表). 白垩纪岩体的出露范围则比较小, 主要分布于朝阳乡东部(图 1), 岩性为二长岩和石英二长岩. 二者的锆石 U-Pb 年龄分别为(127±1)和(128±1) Ma(图 1)[23]. 根据野外观察分析发现, 该岩体并未发生构造变形(图 6(c), (d)), 因此认为是构造期后侵入岩体. 岩体的结晶年龄可以用来约束伸展拆离作用的活动时限.

古元古代变质岩系在上、下盘均有出露, 且面积广泛(图 1). 比较上、下盘古元古代变质岩系, 认为它们可能只是剥蚀残留的结果, 且拆离断层对古元古代变质岩系的影响很小. 这套变质岩系属于辽河群, 为一套层状中浅变质岩系, 其构成了辽东地区结晶基底的主体. 出露岩层主要为里尔峪组(Pt_1lr, 二长浅粒岩、变粒岩、黑云变粒岩及阳起透闪变粒岩等), 高家峪组(Pt_1g, 白云石大理岩夹黑云微斜片麻岩及斜长浅粒岩), 大石桥组(Pt_1d, 方解大理岩、黑云斜长变粒岩)和盖县组(Pt_1gx, 二云片岩).

3 大营子拆离断层系上盘火山岩年代学

为了解大营子拆离断层系的演化历史和拆离作用过程, 本文在前人测年资料的基础上, 运用锆石 U-Pb SHRIMP 和 LA-ICPMS 年代学方法分别对黄花甸桂云花组流纹岩(SL06078)和大营子桂云花组安山岩(SL06078)进行了测年分析.

3.1 分析方法

将采集的新鲜的流纹岩和安山岩样品(约 2~3 kg)进行粉碎、淘洗及磁选后, 在双目镜下挑选晶型完好、无裂纹、具有代表性的锆石颗粒进行制靶和抛光.

SHRIMP U-Pb 测年的锆石, 其阴极发光 CL 图像在中国地质科学院 JOEL JXA-8900RL 上进行采集. SHRIMP U-Pb 分析则在北京离子探针中心 SHRIMP Ⅱ上完成, 并采用 TEM(约 417 Ma, $^{206}Pb/^{238}U$=0.06683)标样进行校正, 详细的分析流程和原理参考文献[44, 45]. 流纹岩的年龄数据(在 ISOPLOT 软件上进行计算[44])采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄, 分析误差为 2σ, 具有 92%的置信度.

安山岩锆石的 CL 图像采集和 LA-ICPMS U-Pb 测年分析在中国科学院地质与地球物理研究所进行, 具体流程参见文献[46]. 测年数据利用 GLITTER4.0 软件对锆石的同位素以及元素含量进行计算, 参考锆石 91500(年龄 1064 Ma)和 NIST SRM 610 进行元素分馏校正, 具体方法见文献[47~49]. 安山岩年龄数据采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄(在 ISOPLOT 3.7 上进行计算), 分析误差为 1σ, 加权平均年龄具有 95%的置信度.

3.2 样品岩石学和年代学特征

流纹岩(SL06078), 野外露头上表面风化严重, 呈主要斑状结构(图 7(a)), 岩石斑晶成分为更长石、条纹长石、石英和黑云母; 基质为钾长石、斜长石、

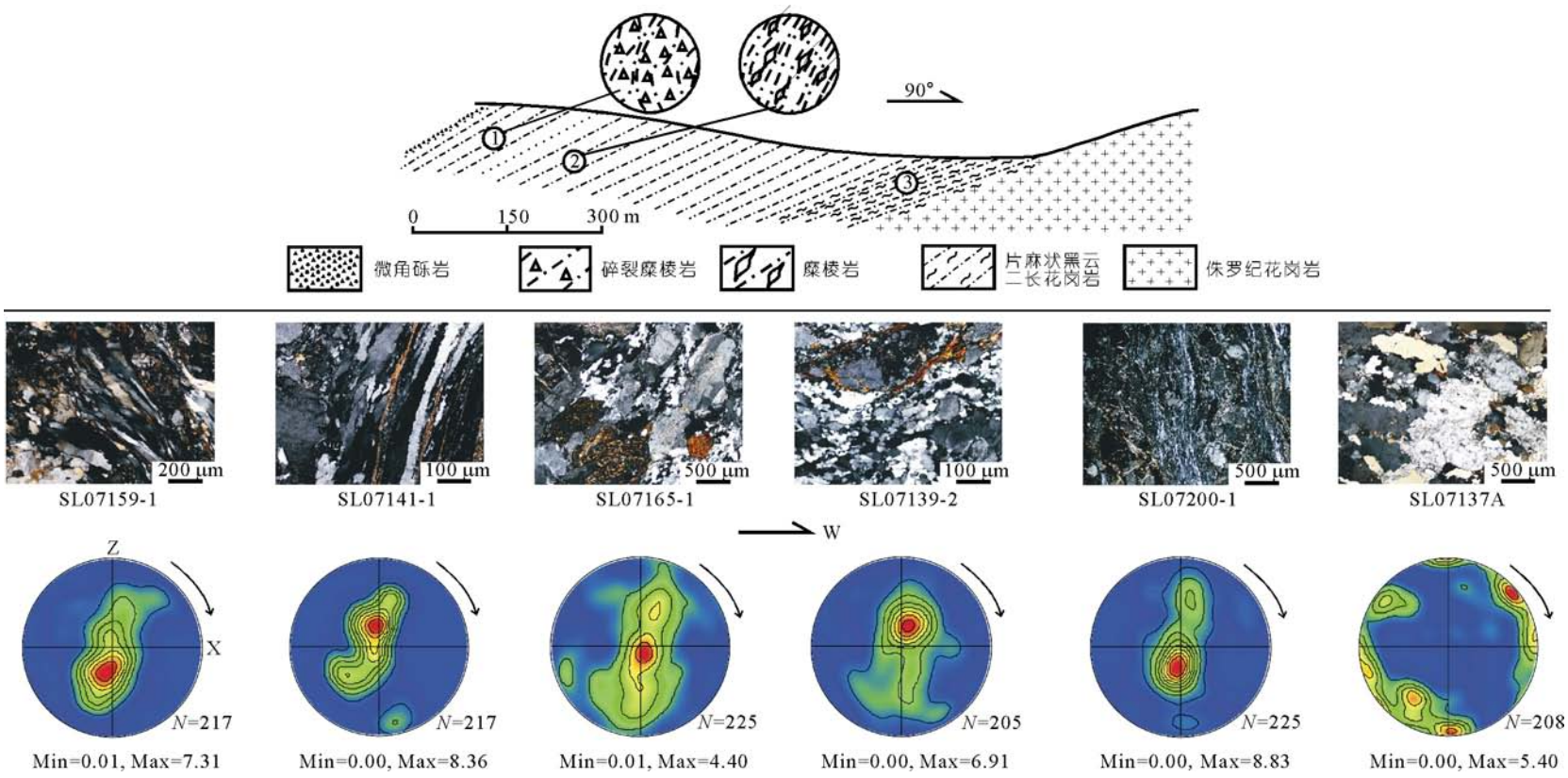


图 5　大营子-黄花甸拆离断层示意性剖面、构造岩显微照片及石英<c>轴组构图

下半球等面积投影

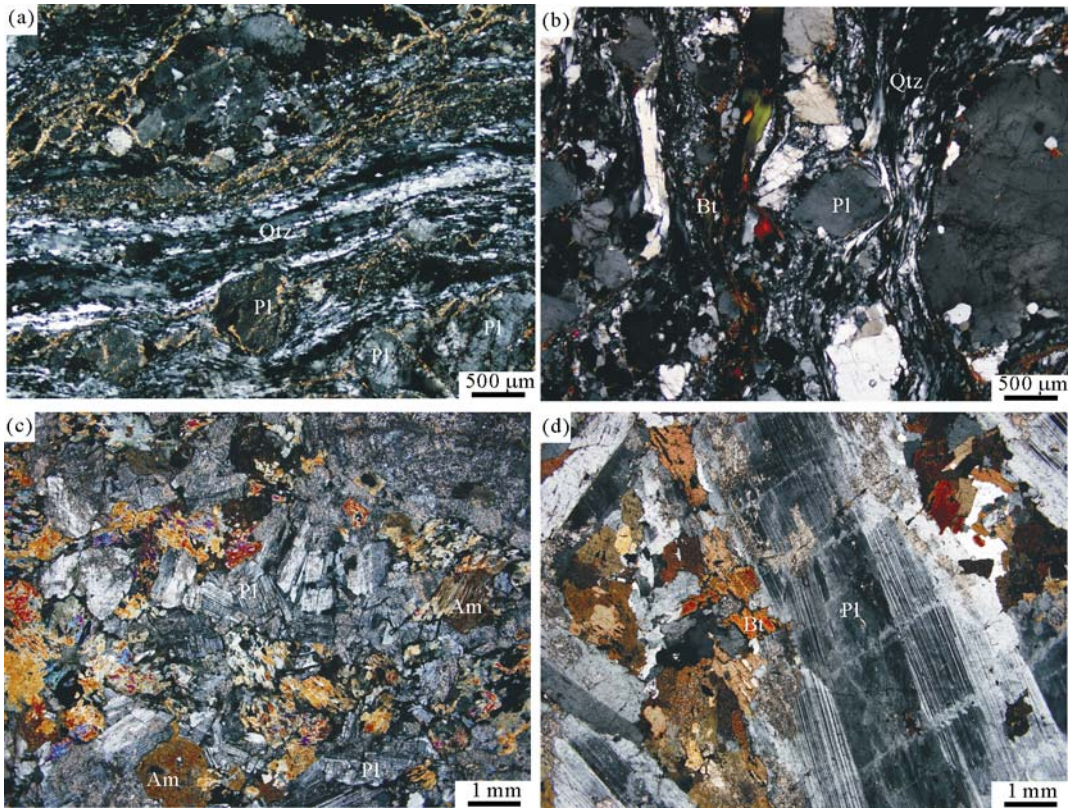


图 6　下盘侵入岩体显微照片

(a) 三叠纪花岗质糜棱岩; (b) 侏罗纪花岗质糜棱岩; (c) 白垩纪二长岩; (d) 白垩纪石英二长岩. Qtz, 石英; Pl, 斜长石; Bt, 黑云母; Am, 角闪石

石英, 或隐晶长英质(图 7(b)). 锆石颗粒形态相似, 粒度均匀. 在阴极发光图像中, 这些颗粒均具有典型的岩浆结晶振荡环带(图 7(c)). 此外, 12 颗锆石的 Th/U 比值大于为 0.4~0.81>0.2, 所以认为它们是岩浆锆石(表 2). 其中, 9 个测点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄平均为(135±1.2) Ma(92%置信度, MSWD=1.3, 误差 2σ)(表 2, 图 8(a)), 另外三个因为普通铅含量偏低而具有偏差较大的年龄值.

安山岩(SL08026), 斑状结构, 斑晶成分主要为中长石、拉长石, 呈自形, 基质为斜长石、安山质玻璃等(图 7(d), (e)). 锆石颗粒大部分为长柱状, 少数为短柱状. 长宽比一般为 1~2, 个别大于 2. CL 图像显示大部分锆石具有振荡环带, 说明为岩浆成因锆石(图 7(f)), 且分析锆石的 Th/U 值都集中在 0.38~0.79 之间(表 3), 显示了岩浆锆石的特征. 进行普通铅校正后剔除铅丢失严重的点, 最终选择了 13 颗锆石的 13 个剥蚀点参与年龄计算. 13 个测点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄平均为(132.3±5.3) Ma(95%置信度, MSWD=11.7, 误差 1σ)(表 3, 图 8(b)).

4　大营子-黄花甸地区拆离作用过程与区域构造意义

4.1　大营子-黄花甸地区拆离作用过程

对于拆离断层的形成和演化, 可以利用区内发育的岩浆活动性来限定其形成时间. 白垩纪岩体((127±1) Ma)未发生变形, 而侏罗纪岩体((155±1) Ma)遭受了强烈的剪切变形改造, 根据二者的年龄可限定该拆离断层系活动时间的区间. 现今我们获得盆地中桂云花组流纹岩的年龄((135±1.2) Ma)及安山岩年龄((132.3±5.3) Ma), 据此考虑该伸展构造的演化历史为:

(1) (135±1.2) Ma 之前, 该区开始发生区域伸展活动, 切过中部地壳的拆离断层诱发岩浆上涌而发生中酸性的火山喷发事件, 从而形成一系列的中酸性的火山岩(图 9(a)).

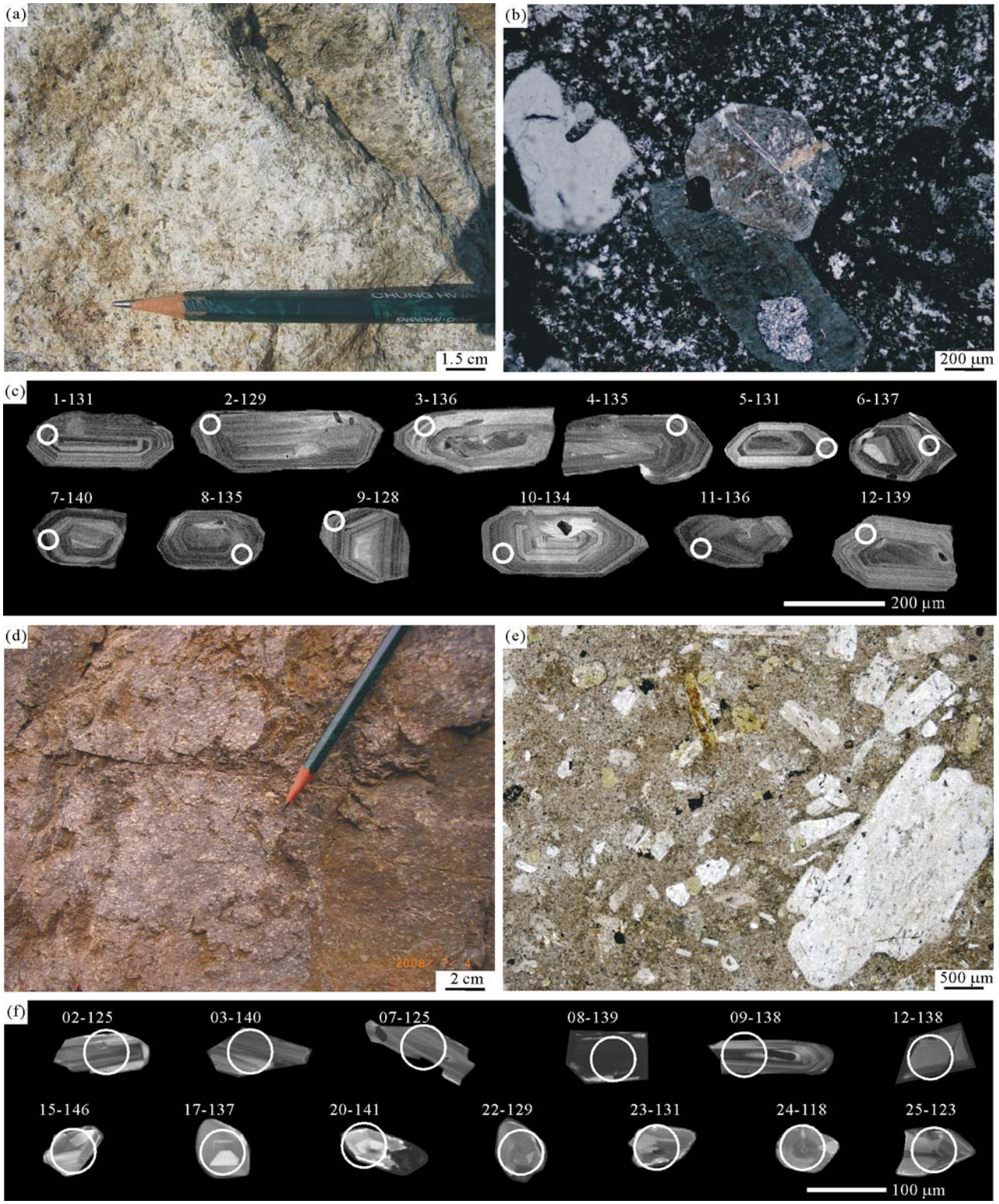


图 7　流纹岩(SL06078)及安山岩(SL08026)的岩石学特征、锆石的 CL 图像及年龄

(a), (b) 流纹岩; (c) 流纹岩的锆石 CL 图像; (d), (e) 安山岩; (f) 安山岩的锆石 CL 图像. 1-131 中的 1 表示测点 1, 131 表示该点年龄, 单位为 Ma

表 2　黄花甸流纹岩(SL06078)测年数据 [a)]

样品编号	$^{206}Pb_c$(%)	U(μg g^{-1})	Th(μg g^{-1})	Th^{232}/U^{238}	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	2σ	$^{206}Pb^*/^{238}U$	2σ	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄(Ma)	
SL06078-1	5.03	347	231	0.69	0.0924	3.7	0.0203	1.2	130.8	1.9
SL06078-2	1.37	318	221	0.72	0.0729	5.9	0.0201	1.4	129.0	2.0
SL06078-3	5.92	256	159	0.64	0.0646	6.3	0.0222	1.4	135.5	3.4
SL06078-4	2.00	690	374	0.56	0.0729	3.5	0.0208	0.9	135.1	3.4
SL06078-5	5.39	217	133	0.63	0.0811	7.6	0.0211	1.6	131.5	3.8
SL06078-6	3.06	369	228	0.64	0.0874	9.0	0.0213	1.2	136.8	2.4
SL06078-7	1.87	808	550	0.70	0.0891	2.5	0.0215	0.9	140.1	1.5
SL06078-8	4.67	751	434	0.60	0.1109	2.9	0.0205	1.5	134.8	2.6
SL06078-9	0.44	1042	763	0.76	0.0534	2.9	0.0203	0.8	128.4	1.1
SL06078-10	1.70	509	243	0.49	0.0572	3.9	0.0212	1.0	134.3	1.4
SL06078-11	1.12	840	661	0.81	0.0563	5.7	0.0213	0.8	135.8	1.2
SL06078-12	0.43	226	129	0.59	0.0693	7.4	0.0213	1.4	138.9	2.1

a) $^{206}Pb_c$(%)为普通铅百分含量; Pb^*为放射性成因铅

表 3　大营子安山岩(SL08026)测年数据

样品编号	$^{206}Pb_c$(μg g^{-1})	U(μg g^{-1})	Th(μg g^{-1})	$^{232}Th/^{238}U$	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	1σ	$^{206}Pb^*/^{238}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄(Ma)	
SL0826-02	28.33	380.96	145.82	0.38276984	0.05611	0.0077	0.01959	0.00086	125	5
SL0826-03	31.81	388.15	224.11	0.57737988	0.04988	0.0031	0.02197	0.00076	140	5
SL0826-07	29.65	407.03	169.33	0.41601356	0.04816	0.00361	0.01953	0.00074	125	5
SL0826-08	109.75	1351.75	1068.78	0.79066395	0.05021	0.00175	0.02177	0.00059	139	4
SL0826-09	20.25	250.14	121.59	0.48608779	0.05732	0.00584	0.0217	0.0011	138	7
SL0826-12	19.92	245.9	109.56	0.44554697	0.04851	0.00561	0.02171	0.0011	138	7
SL0826-15	18.79	220.59	121.69	0.55165692	0.06947	0.00517	0.02283	0.00097	146	6
SL0826-17	15.84	191.67	116.42	0.60739813	0.08119	0.00862	0.02148	0.00083	137	5
SL0826-20	21.29	258.53	162.01	0.62665841	0.06769	0.00429	0.02208	0.00084	141	5
SL0826-22	15.24	202.03	94.25	0.46651487	0.06181	0.00529	0.02022	0.0009	129	6
SL0826-23	15.77	201.1	104.19	0.51810045	0.04948	0.00857	0.0205	0.00103	131	7
SL0826-24	13.48	192.46	95.99	0.49875299	0.05989	0.00882	0.01848	0.00082	118	5
SL0826-25	35.11	488.43	342.01	0.70022316	0.04619	0.00249	0.01927	0.0006	123	4

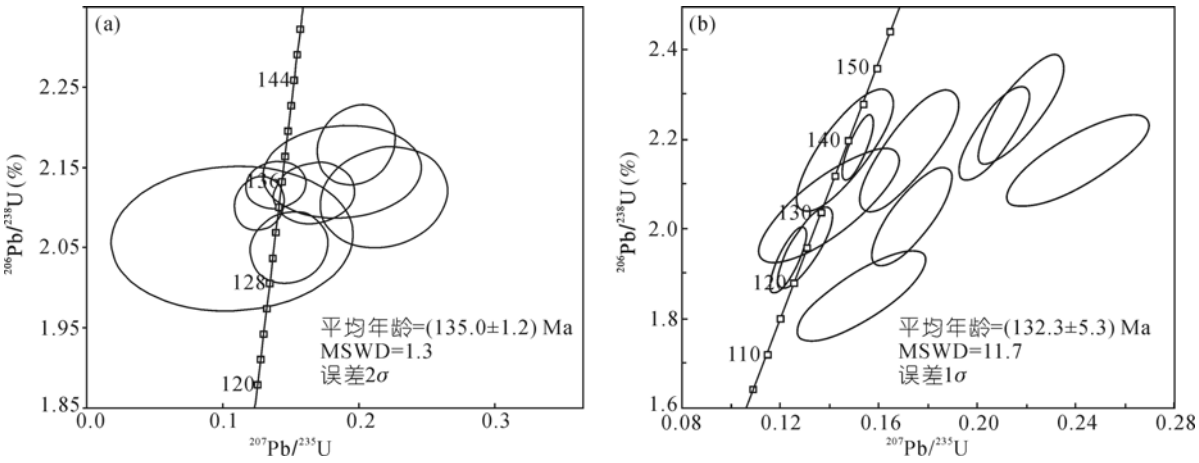


图 8　流纹岩 SL06078(a)及安山岩 SL08026(b)的测年谐和图

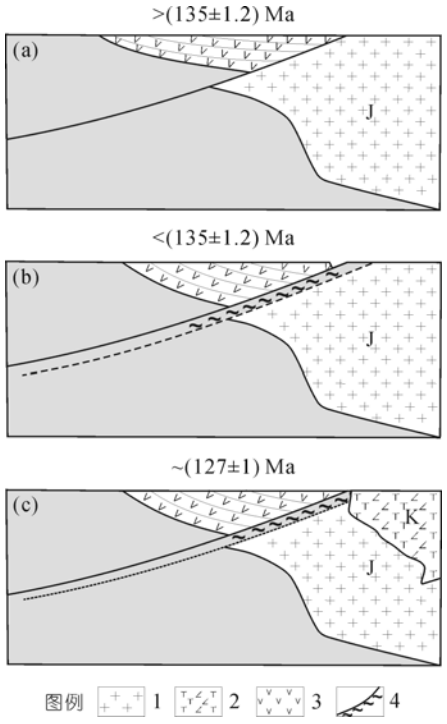


图 9 大营子拆离断层系构造演化模式简图

1, 侏罗纪花岗岩; 2, 白垩纪二长岩; 3, 早白垩世桂云花组火山岩; 4, 主拆离断层及拆离断层带

(2) (135±1.2) Ma 之后, 大规模的拆离断层活动使得断层切过中、上部地壳, 又改造早期三叠纪和侏罗纪岩体, 使得岩体边部遭受脆韧性剪切. 同时, 当拆离断层伸展拆离至地表时, 又使得白垩纪火山-沉积岩发生掀斜(图 9(b)).

(3) (127±1) Ma, 拆离断层的活动行将结束并伴随朝阳乡白垩纪岩体的侵入(图 9(c)).

晚白垩世大峪组(K_2d)地层开始发生沉积, 形成一系列产状平缓的、角度不整合于桂云花组(K_1g)之上的沉积岩层. 现今可见的该组地层, 可能为后期区域性抬升和剥蚀残留所致.

4.2 区域构造意义

大营子拆离断层系作为辽东半岛一个重要的伸展构造, 与辽南变质核杂岩相比, 存在结构组成、构造岩类型、切割深度和岩石变形变质作用及剥露时间方面的差异(表 4).

(1) 结构组成. 相比大营子 DFS, 辽南 MCC 主要由三层结构(上盘弱变形沉积岩层、下盘的深成变质岩和中部的拆离断层带), 五部分(上盘弱变形沉积岩层、上盘的上叠伸展盆地、中部的拆离断层带、下盘的深成变质岩和同构造花岗质侵入岩体)构成[10].

(2) 拆离断层带中构造岩类型. 大营子-黄花甸拆离断层带主要由断层泥、微角砾岩、花岗质碎裂糜棱岩、糜棱岩和片麻状黑云二长花岗岩组成;辽南变质核杂岩金州拆离断层带则包括断层泥、假玄武玻璃、微角砾岩、绿泥石化角砾岩、角闪斜长质或斜长角闪质糜棱岩及片麻岩.

(3) 切割深度及岩石变形、变质作用. 如前所述, 大营子-黄花甸拆离断层带中的岩石经历了从高绿片岩相到低绿片岩相的变形变质过程, 这也预示着拆离断层带下盘岩石经历了从地壳中、浅部层次逐渐剥露和抽拉出地表的过程. 而辽南 MCC 下盘岩石经历了从角闪岩相到绿片岩相的变形变质过程, 亦即金州拆离断层带影响到中、下地壳[10].

(4) 剥露时间. 尽管大营子 DFS 和辽南 MCC 发育于同一伸展构造背景之下, 但是它们剥露的起始和结束时间却不一致. 前者剥露的时间为(135±1.2)~(127±1) Ma, 后者则为 130~113 Ma[12,50].

从图 1 可以看出, 辽东半岛地区发育的伸展构造(如达子营和丹东拆离断层系和本溪、通远堡盆地断陷盆地)影响深度自南而北逐渐变浅, 即南部的辽南-万福变质核杂岩影响至中、下地壳, 中部的拆离断层系则影响至中部地壳, 而北部的断陷盆地的控盆断层未发育拆离断层带, 说明其应为更浅部层次的伸展构造. 充分说明辽东半岛岩石圈破坏和减薄的不均一性.

从整个华北地区、甚至整个东亚地区考虑, 同样发育有分带性明显的伸展构造(诸如变质核杂岩、拆离断层系和断陷盆地). 在贝加尔-蒙古北部地区以发育变质核杂岩为主; 蒙古东部、内蒙古及松辽一线则以发育大型的断陷盆地为特点; 华北克拉通地区, 变质核杂岩较其他二者发育. 同时, 拆离断层可反映这些伸展构造的形成过程及时间. 结合前人资料, 这些伸展构造的形成时间 140~90 Ma, 但是主体形成和剥露时间则在 130~113 Ma[11,22,23,25]. 另外, 从这些伸展构造的分布及特点来看, 地壳减薄的不均一性与东亚地区岩石圈的减薄有关, 同时也表明地壳的拆离和减薄是岩石圈减薄在地壳的浅部构造表现[51].

5 结论

根据以上研究, 本文得出以下几点结论:

表 4　大营子拆离断层系及辽南变质核杂岩的对比

	大营子拆离断层系	辽南变质核杂岩
结构组成	上盘火山-沉积盆地, 中部大营子-黄花甸拆离断层带, 下盘古元古代变质岩系和侵入岩体	上盘弱变形沉积岩层、上叠伸展盆地, 中部拆离断层带、下盘太古宙深成变质岩和同构造花岗质侵入岩体
构造岩类型	断层泥、微角砾岩、花岗质碎裂糜棱岩、糜棱岩和片麻状黑云二长花岗岩	断层泥、假玄武玻璃、微角砾岩、绿泥石化角砾状糜棱岩、角闪斜长质或斜长角闪质糜棱岩及片麻岩
变质作用	高绿片岩相-低绿片岩相	角闪岩相-绿片岩相
切割深度	中、上部地壳	中、下部地壳
剥露时间	(135±1.2)~(127±1) Ma	130~113 Ma

(1) 大营子拆离断层系主要由大营子-黄花甸拆离断层、下盘古元古代变质岩系和侵入岩体以及上盘火山-沉积盆地组成.

(2) 结合大营子拆离断层系中构造岩的显微构造和石英的EBSD组构分析, 认为大营子拆离断层系影响到了中部地壳.

(3) 对于火山-沉积盆地中火山岩的测定及下盘构造活动不同阶段就位的侵入岩体的年龄揭示出大营子拆离断层系初始形成于早白垩世(135±1.2) Ma之前, 结束于(127±1) Ma.

(4) 对比大营子拆离断层系与辽南变质核杂岩, 综合分析辽东半岛、华北克拉通, 甚至是整个东亚地区伸展构造的分布及特点, 揭示出地壳减薄的不均一性与东亚地区岩石圈的减薄有关.

致谢　本文所涉及的野外工作、测年分析和 EBSD 实验分别得到了张同凯、吴随禄、翟云峰、杨国良、夏浩然和郭强的帮助, 两位评审人提出宝贵的修改意见, 在此给予诚挚的感谢.

参考文献

1 Menzies M A, Fan W M, Zhang M. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of ＞120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean Craton, China. In: Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, et al, eds. Magmatic Processes and Plate Tectonic. Geol Soc Spec Pub, 1993, 76: 71–81

2 Xu Y G. Thermal-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism. Phys Chem Earth, 2001, 26: 747–757

3 Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. A-type granite in North China: Age and geochemical constrains on their petrogenesis. Chem Geol, 2002, 187: 143–173

4 Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. Contrib Mineral Petrol, 2002, 144: 241–253

5 Deng J F, Mo X X, Zhao H L, et al. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: 'Continental roots-plume tectonics'. Earth Sci Rev, 2004, 65: 223–275

6 Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 2002, 198: 307–322

7 徐义刚. 岩石圈的热-机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄. 矿物岩石地球化学通报, 1999, 18: 1–5

8 徐义刚. 华北岩石圈减薄的时空不均一特征. 高校地质学报, 2004, 10: 324–331

9 杨中柱, 孟庆成, 江江, 等. 辽南变质核杂岩构造. 辽宁地质, 1998, 4: 243–250

10 Liu J L, Davis G A, Lin Z Y, et al. The Liaonan metamorphic core complex, Southeastern Liaoning Province, North China: A likely contribution to Cretaceous rotation of Eastern Liaoning, Korea and contiguous areas. Tectonophysics, 2005, 407: 65–80

11 刘俊来, Davis G A, 纪沫, 等. 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, 2008, 15: 72–81

12 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

13 关会梅, 刘俊来, 纪沫, 等. 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, 2008, 15: 199–208

14 Darby B J, Davis G A, Zhang X H, et al. The newly discovered Waziyu metamorphic core complex, Yiwulü Shan, western Liaoning Province, Northwest China. Earth Sci Front, 2004, 11: 143–155

15 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: 387–391

16 张晓晖, 李铁胜, 蒲志平. 辽西医巫闾山两条韧性剪切带 ^{40}Ar-^{39}Ar 年龄: 中生代构造热事件的年代学约束. 科学通报, 2000, 47: 697–701
17 张进江, 郑亚东, 刘树文. 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, 1998. 1–136
18 王巧云, 颜丹平, 苏本勋, 等. 京北云蒙山变质核杂岩南东侧剥离断层带的构造热演化. 地质通报, 2006, 25: 448–453
19 张家声, Passchier C W, Konopase K 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: 26–39
20 郑亚东, 张青. 内蒙古亚干变质核杂岩内递进伸展作用. 伸展构造研究, 北京: 地质出版社, 1994. 4–11
21 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
22 Liu J L, Guan H M, Ji M, et al. Late Mesozoic metamorphic core complexes: New constraints on lithosphere thinning in North China. Prog Nat Sci, 2006, 16: 633–638
23 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架. 高校地质学报, 2005, 11: 305–317
24 Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. Petrogenesis of Early Cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, East China and their relationship to lithospheric thinning. Chem Geol, 2005, 222: 200–231
25 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
26 项才, 陈跃月, 曹洪亮, 等. 辽宁岫岩县偏岭地区晚大石桥期沉积环境及构造古地理. 地质与资源, 2008, 17: 166–169
27 彭向东, 李世超. 辽东南地区晚中生代地层序列与盆地演化规律. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38: 1–7
28 白瑾. 早前寒武纪古地热状态的构造环境意义. 地学前缘, 1999, 6: 323–330
29 白瑾. 华北原地台古元古代热力活动遗迹及其构造边界意义. 岩石学报, 2000, 16: 39–48
30 池际尚, 路凤香. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京: 科学出版社, 1996. 21
31 万天丰. 中国大地构造学纲要. 北京: 地质出版社, 2004. 1–387
32 乔秀夫, 张安棣. 华北块体、胶辽朝块体与郯庐断裂. 中国地质, 2002, 29: 337–345
33 王宗秀, 杨天南, 唐哲民. 大连地区南北向剪切滑褶变形. 岩石矿物学杂志, 2001, 20: 208–216
34 杨天南, 彭阳, 王宗秀, 等. 旅顺-大连地区沉积盖层的近南北向挤压变形——苏鲁大陆深俯冲的上盘板内变形效应. 地质通报, 2002, 21: 308–314
35 邢志波, 王宗秀. 华北地台东缘的印支运动烙印——来自大连地区的构造形变信息. 地球学报, 2004, 25: 555–560
36 Ramsay J G, Huber M I. The Techniques of Modern Structural Geology, Vol. 2, Folds and Fractures. London: Academic Press, 1987. 1–516
37 Davis G A, 郑亚东. 变质核杂岩的定义、类型及构造背景. 地质通报, 2002, 21: 185–192
38 Lister G S, Davis G H. The origin of metamorphic core complexes and detachment fault formed during Teriary continental extension in the Northern Colorado River region, U.S.A. J Struct Geol, 1989, 11: 65–94
39 Passchier C W, Trouw R A J. Microtectonics. Berlin: Springer-verlag, 2005. 56–57
40 刘俊来, 曹淑云, 邹运鑫, 等. 岩石电子背散射衍射(EBSD)组构分析及应用. 地质通报, 2008, 27: 1638–1645
41 Schmid S E, Cacey M. Complete fabric analysis of some commonly observed quartz c-axis patterns. In: Hobbs B E, Heard H C, eds. Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies-the Paterson Volume. Am Geophys Union Monograph, 1986, 36: 246–261
42 嵇少丞. 部分熔融的构造地质意义(1)变形机制转变的实验研究. 地质科学, 1988, 4: 347–356
43 Kurtz W, Fritz H, Tenczer V, et al. Tectonometamorphic evolution of the Koralm Complex(Eastern Alps): Constrains from microstructures and textures of the 'Palttengneis' shear zone. J Struct Geol, 2002, 24: 1957–1970
44 Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, et al. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. J Geol Soc, 1992, 149: 171–148
45 Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben M A, Shanks W C III, Ridley W I, eds. Applications of Microanalytical Techniques the Understanding Mineralizing Processes. Rev Econ Geol, 1998, 7: 1–35
46 Xie Y X, Wenk H R, Matthies S. Plagioclase preferred orientation by TOF neutron diffraction and SEM-EBSD. Tectonophysics, 2003, 370: 269–286
47 Wedenbeck M, Alle P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analysis. Geostandard Newslett, 1995, 19: 1–23
48 Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to *in situ* U-Pb zircon geochronology. Chem Geol, 2004, 211: 47–69
49 Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb. Chem Geol, 2002, 192: 59–79
50 纪沫, 刘俊来, 胡玲, 等. 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. 地质学报, 2009, 25: 173–181
51 刘俊来, 纪沫, 夏浩然, 等. 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, 2009, 25: 1819–1829