论文

内蒙古赤峰楼子店低角韧性剪切拆离带的应变与运动学涡度分析

李建波^{①②}, 王涛^{①*}, 欧阳志侠^①

① 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

② 东华理工大学地球科学与测绘工程学院, 抚州 344000

* 联系人, E-mail: taowang@cags.net.cn

收稿日期: 2009-11-16; 接受日期: 2010-04-30

国家自然科学基金重点项目(批准号: 90714006)和国家自然科学基金(批准号: 40672146)资助

摘要 赤峰南部楼子店拆离断层带为一北东-南西向、南东倾的低角正断层系, 下盘由韧性剪切带、韧-脆性剪切带和脆性断裂带组成。韧性剪切带自下而上依次发育糜棱岩化岩石、糜棱岩和初糜棱岩。长石应变标志体的 R/ϕ 法有限应变测量显示, 在韧性剪切带内核部糜棱岩的应变强度最大($E_s=0.65\sim0.96$), 下部接近花岗岩体的糜棱岩化岩石与上部的初糜棱岩次之(E_s 分别为 $0.59\sim0.62$ 和 $0.47\sim0.70$)。对数付林图解与霍塞克图解显示初糜棱岩的应变类型为接近于平面应变的拉长应变, 糜棱岩应变类型为平面压扁应变。用极莫尔圆和刚性颗粒网法测得的运动学涡度值分别为初糜棱岩 $0.81\sim0.90$, 平均 0.85 ; 糜棱岩 $0.53\sim0.80$, 平均 0.66 ; C' 法获得伸展褶皱理形成时的运动学涡度值为 $0.63\sim0.37$, 平均 0.5 。由最大有效力矩准则确定的主压应力轴 σ_1 与剪切方向的夹角经历了 $61^\circ, 69^\circ$ 到 75° 的递进增大过程, 最后趋于与剪切方向垂直。应变与运动学涡度测量结果表明, 韧性剪切带高应变部位对应于低的运动学涡度值。运动学涡度测量显示, 韧性剪切拆离带是形成于早期以简单剪切为主、后期以纯剪切为主的总体一般剪切变形。这表明, 韧性剪切拆离带形成机制是平面压扁应变与一般剪切作用联合作用的结果。结合已有年代学资料与区域构造背景分析判断, 楼子店低角韧性剪切拆离带是地壳伸展与岩浆底侵联合作用的产物。早期单剪-晚期纯剪的剪切模式在变质核杂岩形成中可能具有普遍意义。

关键词

楼子店
低角韧性剪切拆离带
糜棱岩
应变强度
运动学涡度
主压应力

拆离断层带中的糜棱岩或糜棱状岩石多为地壳中、深层次韧性变形产物, 其组构演化与剪切应变强度和类型密不可分^[1-4]。深入研究糜棱岩形成过程中的应变强度和剪切类型是分析拆离断层带形成机制的有效途径和方法^[5-9]。剪切类型可分为纯剪切与简

单剪切两种端元。自然界中出现的剪切类型往往是两者的组合——一般剪切作用。因此, 如何定量描述一般剪切中纯剪切与简单剪切所占组分是确定剪切类型和分析剪切变形机制的关键。运动学涡度概念^[10-12]的引入为上述问题的解决提供了一条有效途径。迄

引用格式: Li J B, Wang T, Ouyang Z X. Strain and kinematic vorticity analysis of the Louzidian low-angle ductile shear detachment zone in Chifeng, Inner Mongolia, China. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-4041-9

今,运动学涡度已较广泛应用于剪切带共轴组分与非共轴组分定量确定及变形机制^[13~15],大型剪切带内变形岩石流变学特征及变形历史^[16~18],造山带构造演化^[18],变质核杂岩与伸展构造的形成机制^[5,6]等方面.

楼子店低角韧性剪切拆离带最先由王玉芳等^[19]所识别,以后的研究进一步将该拆离断层带由下而上划分为糜棱岩带、绿泥石化带、微角砾岩带和脆性断层^[19~24].已有的年代学资料^[24~26]显示拆离断层带内糜棱岩形成时间为(133±3), (126±3)和 126~128 Ma;绿泥石化带形成时间为 121 Ma,且在 112~114 Ma 经历了由北东剪切到倾向下滑的运动学转换^[23].这些研究表明,拆离断层带经历了不同阶段的剪切变形.王新社等^[7]以长石和石英为标志体对该拆离带的有限应变和运动学涡度进行了初步测量和估算,认为该拆离带总体上是以简单剪切为主的一般剪切带,应变型式为近似平面应变.这些研究为深入探讨糜棱岩的剪切作用类型提供了一些依据.然而,拆离断层带内的区域应变型式和应变强度与运动学涡度的垂向与侧向变化及其形成机制等尚待进一步系统研究.本文在前人研究^[7]基础上,以有限应变测量为手段,进一步对糜棱岩带运动学涡度进行系统的测定,旨在揭示楼子店低角韧性剪切拆离带的应变与运动学涡度的垂向和侧向变化,以便确立区域应变型式、运动学路径和动力学背景.

1 构造背景

研究区位于华北板块北缘,北侧发育康保-赤峰-开原断裂带,以其为界北部属兴蒙造山带.该断裂形成于早元古代^[26],晚古生代随着古亚洲洋的逐渐消亡,断裂带主体呈由北向南的大规模逆冲,中生代断裂以走向滑动为主并控制着断裂两侧构造格局的变化^[26~29].研究区早古生代以前经历了陆块形成及克拉通化^[30].早古生代末期由于北边西拉木伦河增生带的形成而不断隆升,缺失了晚古生代沉积^[31].晚古生代末或中生代早期,随着古亚洲洋的消失,华北板块和西伯利亚板块对接,区内岩浆活动强烈^[32,33].晚三叠世的印支运动造成内蒙地轴的挤压隆升^[34],自此开始,赤峰南部地壳深部一直处于过热状态,发生了多次岩浆侵入和火山喷发^[20,35].中侏罗世末期一次南北向的强烈挤压,使中蒙边界和华北克拉通的

北缘地区出现了大规模的逆冲推覆构造^[36,37].晚侏罗世-早白垩世,岩石圈伸展减薄^[38],进入伸展构造的演化阶段.

研究区在构造形态上以由深层变质岩和中生代岩浆杂岩体构成一北东向隆起为特征,两侧发育盆地,分别是平庄盆地和小牛盆地.盆地地层的岩石类型主要为侏罗系-白垩系火山-沉积岩,它们与变质-岩浆杂岩体之间为一低角拆离断层带.上述特征与科迪勒拉型变质核杂岩相似^[19~25],故也称楼子店变质核杂岩或似变质核杂岩^[21].

2 楼子店变质核杂岩及拆离带概况

2.1 楼子店变质核杂岩

楼子店变质核杂岩基本组成可分为三个部分:下盘变质核与侵入岩、拆离带和上盘未变质岩系.

2.1.1 变质核与侵入体

下盘变质核由前寒武系结晶变质岩系和岩浆侵入体组成.结晶变质岩系占变质核的 40%左右,包括新太古代变质表壳岩和早元古代二云石英片岩、条带状大理岩和正片麻岩,新太古代表壳岩主要呈捕掳体分布于上述早元古代岩石中.岩浆侵入体约占变质核的 60%左右,形成时代为早元古代、晚古生代和中生代.早元古代侵入体主要为中酸性的花岗闪长岩和二长花岗岩,岩体普遍糜棱岩化.晚古生代侵入体主要为中酸性二长花岗岩.中生代侵入体占主导,其中三叠纪侵入体的岩石类型为角闪闪长岩-角闪石英闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩,除岩体边部具韧性变形外,内部定向组构不发育;早侏罗世侵入体的岩石类型为石英二长闪长岩-二长花岗岩,岩体内部定向组构不发育;早白垩世为二长花岗岩-花岗闪长岩.

2.1.2 楼子店低角韧性剪切拆离带

拆离带主要发育在核部岩体边部的太古代、早元古代和中生代的片麻岩与花岗质岩石中.由深到浅,拆离带依次为韧性变形的糜棱岩带(韧性剪切带)、韧-脆性剪切带和脆性断裂带.其中,韧性剪切带中的岩石类型由下部糜棱岩化花岗岩逐渐向上变为糜棱岩.糜棱岩具有显著的面理和拉伸线理,面理产状为 110°~145°/23°~40°,平均产状 135°/26°;拉伸线理产状为 25°~70°/5°~38°(图 1).糜棱岩中常见的运动

图 1 赤峰南部地质构造简图(据文献[7]修改)

学标志指示上盘向北东剪切. 韧-脆性剪切带一般平行于糜棱岩面理, 主要由绿泥石化糜棱岩组成, 带内发育微小裂隙, 表明韧性和脆性变形具有继承性, 是连续伸展作用的产物. 韧-脆性剪切带的顶部是脆性断裂带, 由角砾岩、微角砾岩、碎裂岩、面理化角砾岩、假熔岩、网格状脆性正断层、断层泥和脆性拆离断层面组成. 脆性拆离断层面上发育有倾向擦痕以及方解石和绿帘石晶体纤维, 显示上盘向南东的倾向滑动, 拆离断层面产状为 $107^{\circ}\sim 140^{\circ}/31^{\circ}\sim 44^{\circ}$, 平均产状 $119^{\circ}/41^{\circ}$, 断层面上擦痕平均产状为 $135^{\circ}/38^{\circ}$. 韧-脆性剪切带内绿泥石化糜棱岩内发育有沿走向滑动和倾向下滑两组线理, 记录了韧性向脆性转换过程中由北东的韧性剪切到倾向下滑的脆性运动的特征, 表明拆离带内糜棱岩带与脆性拆离断层面虽然产状一致, 但在其演化过程中发生了由走向剪切到倾向下滑的运动学转换^[7].

2.1.3 上盘未变质岩系

上盘由未变质-低级变质岩系组成, 主要为侏罗系-白垩系沉积岩、火山岩和少量下白垩统花岗岩. 侏罗纪地层主要为土城子组的黄灰色砂砾岩夹凝灰质砂岩和火山凝灰岩; 白垩纪地层主要为孙家湾组的灰绿-黄绿色砂岩夹黑色页岩, 局部有中酸性二长花岗岩体侵入.

2.2 糜棱岩构造要素及其发育顺序

韧性剪切带内主要的岩石类型为花岗质初糜棱岩和糜棱岩, 局部发育超糜棱岩. 这些糜棱岩普遍发育 S 和 C 面理并组成 S-C 组构, 面理由石英和长石碎斑定向排列构成, 线理由拉长的长石、石英和白云母颗粒的优选定向构成. 与初糜棱岩相比, 糜棱岩发育更强的拉伸线理和面理, 表现为长石和石英呈条带状且粒度进一步减小. 超糜棱岩则呈细小致密的条纹, 局部切割初糜棱岩与糜棱岩的面理和线理, 显示随着剪切应变增强发生初糜棱岩、糜棱岩和超糜棱岩的演变^[4]. 此外, 糜棱岩中还发育一组间隔的、近平行的小型剪切条带, 即伸展褶劈理或 C' . 该剪切条带以小角度切割和错断透入性糜棱面理并使之发生弯曲且剪切指向与糜棱状岩石的剪切指向一致; 进一步观察发现, 伸展褶劈理或 C' 带内残存的早期面理发生了转动, 而带外面理则保持其初始方位. 这些说明伸展褶劈理或 C' 是在同一递进变形过

程中的较晚的增量应变期间形成的. 据此, 研究区糜棱岩的构造要素发育顺序为: 1) 初糜棱岩和糜棱岩的 S-C 面理(S-C 组构)和线理; 2) 同向伸展褶劈理或 C' .

3 样品概况与有限应变测量

3.1 样品概况

该低角韧性剪切拆离北东段发育并出露较好, 其发育在新太古代-早元古代变质结晶基底中. 笔者选择该段杨家窝铺西(图 2(a))、二道营子(图 2(b))、上店西(图 2(c))和小五家南(图 2(d)) 4 条路线进行系统观测, 其中杨家窝铺西剖面中拆离断层带各组成要素均有出露. 观测表明, 各条剖面上糜棱岩带产状与厚度稳定: 其中杨家窝铺西厚度为 800 m, 二道营子为 1200 m, 上店西为 1000 m, 小五家南为 600 m. 样品采集依据以下原则进行: 一是对于不同原岩的糜棱岩分别采集其代表性样品, 注意避开局部的强变形带, 以使所测应变能更好地代表区域应变; 二是样品的采集尽量在宽度大、产状稳定的露头上进行.

采集的样品主要为糜棱岩化岩石、初糜棱岩和糜棱岩(图 3). 糜棱岩化岩石主要发育弱的面理和线理, 矿物颗粒如长石和石英等变形不甚强烈, 基本保留原岩的结构与构造(图 3(b)). 初糜棱岩中常见明显的眼球状构造, 眼球状碎斑多为原岩中的粗晶长石, 部分为石英集合体. 眼球大小不一, 以椭圆状者居多, 长轴与 C 面理大致平行. 长石碎斑以脆性变形为主, 两端构成不对称拖尾, 细粒黑云母集合体平行面理分布或在碎斑压力影中, 石英具波状消光. 糜棱岩主要表现为岩石粒度的减小和定向性明显, 眼球构造呈长条状(图 3(c)), 面理构造更为发育, 基质含量明显增多, 占岩石体积的 50%以上. 石英发生边界迁移和动态重结晶, 出现港湾状边界和核幔构造, 石英条带内发育斜交面理; 拔丝状石英和细小鳞片状云母类矿物平行排列构成糜棱面理.

3.2 有限应变测量

对样品根据组构拉伸线理和面理切制三个主应变面并制作光面(平行拉伸线理和垂直糜棱面理作为 XZ 面; 垂直糜棱面理与拉伸线理作为 YZ 面, 平行糜棱面理为 XY 面)并在该平面上进行应变测量(图 4). 应变测量过程中, 选择合适的应变标志体极为关键,

图2 横切楼子店低角韧性剪切拆离带剖面图

(a) 剖面I; (b) 剖面II; (c) 剖面III; (d) 剖面IV

一般而言, 变形长石和石英都可作为应变标志体. 本文选用长石为应变标志体主要基于如下考虑: 1) 本

区糜棱状岩石中长石含量高; 2) 长石颗粒粗大, 在露头 and 手标本光面尺度上易观察测量(图 3 和 4); 3)

图 3 糜棱岩中的不对称长石碎斑、S-C 结构和伸展褶劈理或 C'

(a) 花岗质糜棱岩野外露头(样品编号: CF 06-001); (b) 花岗质糜棱岩 XZ 面(样品编号: CF 06-032, 发育 S-C-C', $R_{xz}=2.4$, 应变强度 $Es=0.67$); (c) 糜棱岩 XZ 面(样品编号: CF 06-003, 发育 S-C-C', $R_{xz}=3.1$, $Es=0.90$)

图 4 楼子店低角韧性剪切拆离带糜棱岩的宏观构造特征和应变测量

样品 CF 06-014 有限应变测量结果: $R_{xz}=2.8$, $R_{yz}=1.8$, $R_{xy}=1.6$; 付林参数 $K=0.75$, 罗德参数 $\nu=0.14$, $Es=0.73$

在露头 and 手标本上对粗大的长石进行测量, 应变测量尺度大, 测量结果相对更可靠^[16]。虽然石英也是常用的应变测量标志体, 但在本区一些强变形的岩石中, 石英强烈变形呈拔丝状, 颗粒边界和形态难以确定, 只能在薄片下测定, 尺度相对较小。尽管长石所记录的应变可能小于岩石的实际应变, 然而, 作为统一的应变标志体, 所获得的应变基本参数可用以对比韧性剪切拆离带内不同岩石的应变类型、应变强度和运动学涡度, 并确定这些基本运动学参数空间分

布与变化。

应变测量可以通过 R/ϕ 法^[39]和 Fry 法进行, 本文选择 R/ϕ 法进行应变测量。每一定向样品每一应变面(XY, XZ 和 YZ 面)上分别测量的长石标志体数目为 40~60 个^[40]。测量数据用双曲线网^[41]进行处理, 得出三维有限应变数值 R_{xz} , R_{yz} 和 R_{xy} 。表 1 列出了三维有限应变数值(X, Y 和 Z), $K=\ln(X/Y)/\ln(Y/Z)$, 自然应变 $\gamma=X/Y+Y/Z-1$, $\nu=(2\varepsilon_2-\varepsilon_1-\varepsilon_3)/(\varepsilon_1-\varepsilon_3)$ 和 $Es=\{[(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2+(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2+(\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2]/3\}^{1/2}$ 。

根据表 1 所测的数据做应变剖面图(图 5), 图中横坐标为剖面长度。从图 5 可以得出, 距楼子店变质核杂岩核部岩体近的部位显示弱的糜棱岩化岩石的应变强度较小; 在拆离带内应变强度由糜棱岩向初糜棱岩逐渐变小。总体上, 应变强度表现为糜棱岩最大, 初糜棱岩次之, 糜棱岩化岩石最小; 表明拆离断层带内应变显著集中于糜棱岩带内。

所有计算结果投在对数付林图解上(图 6(a)), 可以看出应变对称性与构造岩类型相关。初糜棱岩投在视收缩应变区的拉长应变区域, 显示应变类型主要为似拉长应变; 糜棱岩投在压扁应变区域, 显示应变类型主要为平面压扁型。图 6(b)为应变的 ν 与 Es 的霍塞克图解。其中, 糜棱岩 ν 介于 0.14~0.88, 初糜棱岩 ν 介于 -0.228~-0.535; 糜棱岩 Es 介于

表 1 楼子店低角韧性剪切拆离带内糜棱岩长石三维有限应变测量和参数

样品编号	测量切面	R_{xz}	R_{yz}	X	Y	Z	K	ν	γ	Es
CF 06-001	光面	3.6	2.8	1.67	1.30	0.46	0.24	0.61	3.08	0.96
CF 06-002	光面	2.3	2.1	1.36	1.24	0.59	0.12	0.78	2.20	0.65
CF 06-003	光面	3.1	2.9	1.49	1.39	0.48	0.15	0.88	3.07	0.90
CF 06-006	光面	2.8	2.0	1.58	1.13	0.56	0.49	0.35	2.40	0.74
CF 06-008	光面	2.9	2.7	1.46	1.36	0.50	0.07	0.87	2.77	0.84
CF 06-012	光面	2.2	1.95	1.35	1.20	0.62	0.18	0.69	2.08	0.59
CF 06-014	光面	2.8	1.8	1.63	1.05	0.58	0.75	0.14	2.36	0.73
CF 06-021	光面	3.6	2.6	1.71	1.23	0.47	0.34	0.49	2.98	0.94
CF 06-022	光面	2.6	2.2	1.45	1.23	0.56	0.21	0.65	2.38	0.72
CF 06-032	光面	2.4	2.1	1.40	1.22	0.58	0.18	0.69	2.24	0.67
CF 06-037	光面	2.7	2.2	1.49	1.21	0.55	0.26	0.59	2.43	0.74
CF 06-041	光面	2.3	1.9	1.41	1.16	0.61	0.30	0.54	2.11	0.62
C005 ^[7]	光面	1.89	1.16	1.46	0.90	0.77	3.3	-0.535	1.79	0.47
C006 ^[7]	光面	2.16	1.26	1.55	0.91	0.72	2.30	-0.393	1.97	0.56
C044 ^[7]	光面	2.58	1.26	1.76	0.86	0.68	3.04	-0.504	2.30	0.70
H28-1 ^[7]	光面	2.15	1.25	1.51	0.94	0.70	1.59	-0.228	1.94	0.55

图 5 楼子店低角韧性剪切拆离带应变强度剖面(a)和运动学涡度剖面(b)

图中 I, II, III 和 IV 的位置如图 1. W_k 为运动学涡度

0.65~0.96, 初糜棱岩 Es 介于 0.47~0.70. 上述测量结果表明, 随着初糜棱岩向糜棱岩转变应变强度增

加, 应变类型也由似拉长应变转换为平面压扁应变.

4 运动学涡度

糜棱岩变形过程中经历的剪切作用的度量由运动学涡度 $W_k=\cos\alpha$ 给出^[13], 其中 α 为变形介质中两特征向量(非旋转方向)或流脊间夹角. 纯剪切为共轴变形, 主变形面(XZ 面)内有两个非旋转方向分别与剪切带边界平行, 其间的夹角为 90° , 运动学涡度为 0; 简单剪切为非共轴变形, 主变形面内仅有一非旋转方向与剪切带边界平行, 即两非旋转方向间的夹角为 0° , 运动学涡度为 1; 一般剪切为上述两种剪切方式的组合, 主变形面内两非旋转方向的夹角介于 $0^\circ\sim90^\circ$ 之间, 相应的运动学涡度为 0~1 之间.

在总体均匀变形、无体积变化和平面变形条件下, 只要涡度与应变速率之比恒定, 运动学涡度也可根据主应力方向求得, 即 $W_k=\sin(2\xi)$. 其中 ξ 为最大主应力轴 σ_1 与剪切带法线的夹角^[42~44]. 依据 C' 与最大主应力轴 σ_1 的夹角为 55° ^[45~50], 如果已知 C' 与 C 面理之间的夹角则可以求出 σ_1 的取向, 并以此获得 ξ 值, 按 $W_k=\sin(2\xi)$ 式计算运动学涡度.

4.1 面理和线理形成时的运动学涡度和应力状态

在前述有限应变测量基础上, 为了减小因测量误差带来的精度问题, 对同一块样品通过以下 2 种方

图 6 楼子店韧性拆离带糜棱岩长石有限应变测量付林图解(a)和霍塞克图解(b)

法估算糜棱面理和线理形成时的运动学涡度值。

(1) 极莫尔圆法. 用 XZ 面上有限应变椭圆轴比及其最长轴与剪切带边界夹角, 通过极莫尔圆法^[13,51~54]获得两特征向量(非旋转方向)的夹角(α), 取其余弦即可得到运动学涡度. 例如 CF 06-001 和 CF 06-012 两样品 XZ 面上有限应变椭圆轴比 R_s 分别为 3.6 和 2.2, 其最长轴与剪切带边界的夹角 β 为 13.1° 和 10.3° , 依据 R_s 和 β 构建的极莫尔圆分别为图 7(a)和(b), 所获运动学涡度值 CF 06-001 为 0.80, CF 06-012 为 0.51.

(2) 刚性颗粒网. 该方法无需判断刚性体的旋转方式, 只需客观纪录刚性体的长轴取向和二长比, 避免了人为主观判断可能带来的失误. 刚性颗粒在剪切带中的取向取决于剪切带的运动学涡度和颗粒的形态因子 B (定义为 $B = [(R-1)/R] \cdot [(R+1)/R]^{-1}$ ^[15]), 其中 R 为样品 XZ 面上刚性体的二长比. 当刚性体长轴取向从随机分布突变至优选分布的形态因子便是临界形态因子 (B^*), 其数值等于运动学涡度. 因此, 以形态因子 B 为纵轴、刚性体长轴与糜棱面理之间的夹角为横

轴构建刚性颗粒网(图 8), 每一定向样品的 XZ 面上所测刚性体的个数为 60~80 个时就可以很好地确定相应的涡度值. 结果显示 CF 06-001 和 CF 06-003 涡度值分别为 0.80(图 8(a))和 0.78(图 8(b)).

上述两种方法获得的数据存在较好的一致性, 说明所获得的运动学涡度值可以合理表征样品变形过程中单剪和纯剪组分所占比率的相对大小. 刚性颗粒网记录的是理想状态下刚性体的运动学涡度值, 其前提是假定刚性体在变形过程中无变形或有很小的变形; 对于应变标志体分布差异较大的样品, 运用刚细颗粒网可以很好地降低运动学涡度估算时的误差^[15]. 由于样品中应变标志体分布方位和轴比的差异, 每一应变标志体只反映其本身记录的运动学涡度, 这给定量研究带来诸多不便. 基于 R_s/ϕ 法的极莫尔圆法合理地解决了这一问题, 因此, 极莫尔圆记录的是样品中所有应变标志体在变形过程中的平均运动学涡度.

表 2 为用上述方法估算的糜棱岩 S-C 面理和线理形成时的涡度值. 可以看出, 初糜棱岩的运动学涡度值在 0.81~0.90, 平均 0.85; 主压应力 σ_1 与剪切带边界法线的夹角介于 $27^\circ \sim 32^\circ$, 平均为 29° , 对应的与剪切方向的夹角介于 $58^\circ \sim 63^\circ$, 平均为 61° . 对于糜棱岩和糜棱岩化花岗闪长岩, 极莫尔圆所得的运动学涡度介于 0.51~0.80, 平均为 0.66; 刚性颗粒网测得的运动学涡度介于 0.55~0.80, 平均为 0.69; 主压应力 σ_1 与剪切带边界法线的夹角介于 $15.5^\circ \sim 26.5^\circ$, 平均夹角为 21° , 对应的与剪切方向的夹角介于 $63.5^\circ \sim 74^\circ$, 平均为 69° . $W_k=0.75$ 或 0.71 ^[13] 是纯剪切和简单剪切各占一

图 7 样品 CF 06-001(a)和 CF 06-012(b)极莫尔圆图解

图 8 样品 CF 06-001(a)和 CF 06-003(b)刚性颗粒网求解运动学涡度图解(据文献[15])

表 2 楼子店低角韧性剪切拆离带内糜棱岩类岩石的运动学涡度值

样品编号	岩性	刚性颗粒网	极莫尔圆		
			W_k	$\alpha(^{\circ})$	$\xi(^{\circ})$
CF 06-001	糜棱岩	0.80	0.80	37	26.5
CF 06-002	糜棱岩	0.60	0.56	56	17
CF 06-003	糜棱岩	0.78	0.72	44	23
CF 06-006	糜棱岩	0.75	0.69	46	22
CF 06-008	糜棱岩	0.77	0.73	43	23.5
CF 06-012	糜棱岩化花岗闪长岩	0.58	0.51	59	15.5
CF 06-014	糜棱岩	0.55	0.53	58	16
CF 06-021	糜棱岩	0.68	0.58	54	18
CF 06-022	糜棱岩	0.70	0.68	47	21.5
CF 06-032	糜棱岩	0.68	0.60	53	18.5
CF 06-037	糜棱岩	0.72	0.79	37	26.5
CF 06-041	糜棱岩化花岗岩	0.69	0.76	40	25
C005 ^[7]	初糜棱岩		0.90	26	32
C006 ^[7]	初糜棱岩		0.82	35	27.5
C044 ^[7]	初糜棱岩		0.86	31	29.5
H28-1 ^[7]	初糜棱岩		0.81	36	27

半时的涡度值, 小于该值时以纯剪切为主, 大于该值时以简单剪切为主. 表 2 的实测运动学涡度值表明, 糜棱岩 S, C 面理和线理形成初始阶段以简单剪

切为主, 后来转化为以纯剪切为主的一般剪切作用, 对应的主压应力 σ_1 与剪切方向的夹角由 61° 变化为 69° .

4.2 伸展褶皱理或C'形成时的运动学涡度和应力状态

伸展褶皱理受最大有效力矩控制, 褶皱理与最大压应力方向间的夹角约为 55° ^[45-50], 因此, 郑亚东等^[46-50]提出依据 C' 测量运动学涡度的新方法——C' 法. 笔者在楼子店低角韧性剪切拆离带糜棱岩内实测了四组伸展褶皱理的产状, 所在糜棱岩的面理产状近水平. 据 C' 法获得的运动学涡度值和最大压应力 σ_1 取向可知, 伸展褶皱理发育时运动学涡度介于 0.63~0.37 之间, 平均为 0.5; 对应的最大压应力 σ_1 与剪切方向的夹角介于 71° ~ 79° , 平均为 75° . 测量计算结果(表 3)进一步表明糜棱岩带形成后期经历了以纯剪切为主的一般剪切作用.

表 3 依据 C' 求得的运动学涡度值^{a)}

测量点	C $\wedge$ C'($^\circ$)	ξ ($^\circ$)	α ($^\circ$)	W_k
1	19	16	58	0.53
2	16	19	51	0.63
3	21	14	62	0.47
4	24	11	68	0.37

a) C $\wedge$ C' 为 C 与 C' 之间的夹角

上述糜棱岩面理和线理形成时的运动学涡度值为 0.55~0.85, 平均为 0.66. C' 测得的运动学涡度介于 0.37~0.63, 平均 0.5. 虽然测点不多, 但总体小于糜棱岩面理和线理形成时的运动学涡度, 表明在韧性剪切拆离带演化过程中运动学涡度随着初糜棱岩和糜棱岩的 S-C 面理和线理(图 5), 以及伸展褶皱理或 C' 面理的形成而逐渐减小, 纯剪切组分相应增加, 相对应主压应力轴 σ_1 与剪切方向的夹角也经历了 69° ~ 75° 的变化并逐渐接近与剪切方向垂直. 表明不同的构造要素形成时具有不同的运动学涡度值.

5 讨论

5.1 应变型式和运动学涡度

图 9 为楼子店低角韧性剪切拆离带北段的运动学涡度和应变强度的等值线图. 从图 9(a)可以看出, 楼子店韧性剪切拆离带可划分为三个应变单元: 以糜棱岩化岩石($E_s=0.59$ ~ 0.62)为代表的弱应变域, 以初糜棱岩($0.7<E_s<0.8$)为代表的中等强度应变域和以

糜棱岩($E_s>0.8$)为代表的强应变域, 这显示应变强度分带与剪切带结构相关. 楼子店低角韧性剪切拆离带三维应变主轴 $X>Y>Z$ 且 $X\approx Y>Z$, 表明应变类型为近于拉长应变和平面压扁应变的一般应变. 拆离带内不同构造岩应变强度分带与应变类型的差异是应变调节的结果, 在一般应变中应变调节是普遍存在的. Simpson 和 De Paor^[13]研究发现, 一般剪切应变带的形成必须满足如下条件: 1) 围岩发生变形; 2) 沿弯曲的、非平行的边界截面积发生改变(即体积发生改变); 3) 高应变带与围岩之间由断裂和间隙分隔. 楼子店韧性剪切拆离带高应变的下盘与未变质变形上盘之间由脆性断层以及角砾岩带分隔是应变调节的表现.

比较图 9(a)和(b)可以得出, 高应变强度对应低的运动学涡度, 这可能与垂向共轴拉伸、高应变强度和地壳物质挤出有关^[18], 也可能由韧性正断和地壳减压剥露所致^[16]. 在研究区, 这种负相关关系是拆离带形成后期核部岩体隆升和带内高应变强度的直接反映. 反之, 相对于简单剪切, 由于纯剪切的共轴性, 使其更易于应变的积累^[14]从而显示其应变强度大于简单剪切时的应变强度. 前述运动学涡度测量结果显示所有 $W_k<1$, 这表明剪切带在沿 Z 轴方向(垂直于剪切带边界)发生过显著的缩短, 即楼子店韧性剪切拆离带在形成过程中经历了较强的垂向缩短. 研究区 130 Ma 左右发生的大量岩浆侵入^[20]可能是这种垂向缩短的动力来源之一(详见下文). 因此, 拆离带内糜棱岩运动学涡度分带与应变强度分带的负相关关系是伸展背景下岩浆侵入所引起应变增强和纯剪组分增加的结果. 基于现有年代学资料、应变参数、运动学涡度和上述分析, 笔者提出了一个楼子店低角韧性剪切拆离带可能的演化模式(图 10).

在华北克拉通北缘, 伴随中侏罗世蒙古-额霍次克海闭合进入陆内造山阶段, 西伯利亚板块的持续南向运动导致了自北向南的地壳缩短增厚(160~140 Ma)^[55]. 这一事件使岩石圈或下地壳拆沉进而诱发了华北克拉通伸展减薄和破坏, 推测可能制约紧随其后的以变质核杂岩为代表的伸展构造的发生.

有关韧性剪切拆离带演化的理论模型都是下盘物质在地壳伸展过程中被抬升到地表^[1,56], 且拆离带是中-下地壳韧-脆性转换带之下近水平韧性剪切带递进变形演化的产物^[56]. 在韧性剪切拆离带演化的

图9 楼子店低角韧性剪切拆离带应变强度图(a)和运动学涡度等值线图(b)

初始阶段, 由于地壳切向剪切作用, 理论上主压应力轴 σ_1 与剪切方向的夹角为接近 45° , 运动学涡度接近于1. 楼子店低角韧性剪切拆离带内初糜棱岩记录的平均运动学涡度为0.85, σ_1 与剪切带剪切方向的夹角为 61° , 付林参数1.59~3.3, 与简单剪切相近(图10(a)); 应变强度则介于0.47~0.7, 相对较弱. 需要指出, 纯剪切代表地壳颈缩或岩体隆升, 简单剪切代表切向剪切作用, 一般剪切则代表两者共同作用^[57]. 因此, 该拆离带演化早期即初糜棱岩形成阶段(126~133 Ma)^[24,25]是以切向简单剪切作用为主的地壳伸展拆离. 与上述过程几乎同时, 加厚地壳引发的下地壳拆沉导致的上地壳伸展以及中酸性花岗质岩浆底侵(130 Ma)的均衡效应, 使早期近水平的韧性剪切带拱形上隆(图10(b)). 在此过程中糜棱岩的应变强度增大且变形过程中纯剪组分增加导致运动学涡度减小, 糜棱岩表现为面状和线状组构强烈发育. 糜

棱岩所记录的平均运动学涡度为0.66, σ_1 与剪切带剪切方向夹角为 69° , 付林参数0.07~0.49, 应变强度介于0.65~0.96且大于初糜棱岩. 当糜棱岩组构表现为S//C时, 伸展褶皱理或C'出现. 这是本阶段最具代表性的事件(图10(c)), 反映较强的地壳伸展和岩浆底侵. 野外实际观察发现, 伸展褶皱理与糜棱面理以小角度相交且切割糜棱面理, 显示其是糜棱岩演化到较晚期的产物, 伸展褶皱理的进一步扩展为拆离带形成提供了条件; 在此阶段, 伸展褶皱理记录的平均运动学涡度为0.5, σ_1 与剪切带剪切方向夹角为 75° , 接近于与剪切方向垂直. 付林参数为0~0.07显示强烈压扁作用, 应变强度也继续加大.

最后, 糜棱岩抬升至地表, 脆性构造强烈发育且叠加在先成糜棱岩上, 伸展褶皱理或C'扩展为新生的脆性拆离断层面^[45-50](图10(d)). 至此, 楼子店韧性剪切拆离带完成了其主要演化历史. 需要强调, 在中

图 10 楼子店韧性剪切拆离带演化简图

酸性花岗质岩浆底侵过程中带来的流体的加入、应变集中与软化等也是促成拆离带形成必不可少的因素。同时,与拆离断层面接触的糜棱岩则经历退化变质作用,在更浅的一些层次上则发生角砾化,在 121 Ma 左右形成拆离断层带内的绿泥石化角砾岩^[23]。

本文与国内外诸多研究成果相一致。比较典型的有中蒙边界区中生代亚干大型拆离断层系^[5]和希腊西奈山 Chelmos 剪切带^[17,18],共同特征是早期单剪为主,伴随伸展引发岩浆底侵逐步转化到晚期纯剪为主的构造体制,且两者共同作用促成了这些剪切带的形成。

5.2 区域构造演化意义

主压应力轴 σ_1 与剪切方向的夹角由缓变陡制约着楼子店低角韧性剪切拆离带中糜棱岩的应变强度和运动学涡度变化。包括研究区在内的中国东部地区晚中生代以来发生了大规模的地壳伸展和岩石圈减薄^[58-61],特别是中-晚侏罗世板块汇聚、多向挤压变形和陆内造山导致中国东部地壳岩石圈增厚,晚造山期的重力垮塌和造山期后地壳应力松弛诱发了以华北为中心的岩石圈减薄和克拉通破坏,大规模的软流圈地幔上涌发生的底板垫托作用引发了巨量的岩浆侵入^[62-64]。同时,

由板块汇聚和多向挤压后的应力松弛导致的伸展背景下的岩浆底辟使区域应力场垂向的分量逐渐增加,最终导致了楼子店低角韧性剪切拆离带内糜棱岩的运动学涡度、应变强度和应变型式递进变化。

近期研究表明,华北克拉通中生代以来发生了明显的由挤压到伸展的构造体制转折。总体上,构造体制转折始于 150~140 Ma,终于 110~100 Ma,高峰期是 120~110 Ma^[60-64];但研究区所在的华北北缘转折峰期为 130~110 Ma^[64]。同位素年代学资料表明,楼子店低角韧性剪切拆离带正好形成于这一构造体制转折时期,与之相应的运动学涡度数据($0 < W_k < 1$)很好记录了这一构造体制转折时的应变型式——地壳伸展和岩浆底辟引起的一般剪切作用。

中国东部存在着与楼子店低角韧性剪切拆离带在形成时代和构造样式上相似的医巫闾山、辽南、云蒙山以及呼和浩特等低角韧性拆离带。对上述各个拆离带系统的应变和运动学涡度研究工作已经开始。初步研究显示,其结果与本文结论类似^[65]。因此,应变和运动学涡度研究不仅可以探讨韧性剪切拆离带的形成机制,而且还可为华北克拉通中生代构造体制转折和岩石圈减薄的动力学背景研究提供一种有

效可行的构造解析方法。

6 结论

(1) 楼子店低角韧性剪切拆离带内糜棱岩化岩石($E_s=0.59\sim0.62$)、初糜棱岩($E_s=0.47\sim0.7$)和糜棱岩($E_s=0.65\sim0.96$)应变强度依次增大,表明伴随地壳伸展,应变集中在韧性剪切拆离带的糜棱岩内;随着应变强度增加罗德参数也逐渐加大,相应的应变型式从拉长应变转变为平面压扁应变。

(2) 由极莫尔圆和刚性颗粒网法获得的初糜棱岩与糜棱岩 S-C 面理和线理发育时的平均运动学涡度为 0.85 和 0.66;后期伸展褶劈理或 C' 发育时的平均运动学涡度为 0.5。结果显示,随初糜棱岩和糜棱

岩的 S-C 面理与线理和伸展褶劈理或 C' 的发育,纯剪切共轴组分逐渐增加,运动学涡度值逐渐减小,主压应力轴 σ_1 与剪切方向的夹角也由 61° , 69° 到 75° ,逐渐趋于与剪切方向垂直。

(3) 楼子店低角韧性剪切拆离带的形成经历了早期简单剪切为主和后期纯剪切为主的总体一般剪切作用。结合年代学资料和区域构造背景分析,楼子店变质核杂岩形成于地壳伸展环境,并在地壳伸展引起的岩浆底侵联合作用下最终形成。

(4) 本研究进一步表明,早期单剪-晚期纯剪的剪切模式在变质核杂岩形成中可能具有普遍意义,这为探讨华北克拉通中生代以来构造体制转折和岩石圈减薄的动力学机制提供了一种有效可行的构造解析方法。

致谢 中国地质科学院童英博士和北京大学郭磊博士以及两位匿名评审人对本文给予了许多有益的建议和帮助,在此表示真挚的感谢。

参考文献

- 1 Wernicke B. Low-angle normal fault in the Basin and Range province: Nappe tectonics in an extending orogen. *Nature*, 1981, 291: 645—648
- 2 Lister G S. Discussion: Crossed girdle c -axes fabrics in quartzites plastically deformed by plane strain and progressive simple shear. *Tectonophysics*, 1977, 39: 51—54
- 3 Brodie K. Variations in mineral chemistry across a shear zone. *J Struct Geol*, 1980, 2: 265—272
- 4 Sibson R H. Fault rocks and fault mechanisms. *J Struct Geol*, 1977, 133: 191—213
- 5 郑亚东, 王涛. 中蒙边界面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
- 6 郑亚东. 亚干变质核杂岩的运动学涡度与剪切作用类型. *地质科学*, 1999, 34: 273—280
- 7 王新社, 郑亚东, 王涛. 内蒙赤峰南部楼子店韧性剪切带应变与剪切作用类型. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 160—166
- 8 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—243
- 9 王新社, 张尚坤, 张富中, 等. 鲁西青邑韧性剪切带运动学涡度及剪切作用类型. *地球学报*, 2005, 26: 423—428
- 10 McKenzie D P. Some remarks on the development of sediment basins. *Earth Planet Sci Lett*, 1978, 40: 25—32
- 11 Means W D, Hobbs B E, Lister G S, et al. Vorticity and non-coaxiality in progressive deformation. *J Struct Geol*, 1980, 2: 371—378
- 12 Bobyarchick A R. The eigenvalues of steady state flow in Mohr space. *Tectonophysics*, 1986, 122: 35—51
- 13 Simpson C, De Paor D G. Strain and kinematic analysis in general shear zones. *J Struct Geol*, 1993, 15: 1—20
- 14 Forte A M, Bailey C M. Testing the utility of the porphyroblast hyperbolic distribution method of kinematic vorticity analysis. *J Struct Geol*, 2007, 29: 983—1001
- 15 Jessup M J, Law R D, Frassi C. The Rigid Grain Net (RGN): An alternative method for estimating mean kinematic vorticity number. *J Struct Geol*, 2007, 29: 411—421
- 16 Klepeis K A, Daczko N R, Clarke G L. Kinematic vorticity and tectonic significance of superposed mylonites in a major lower crustal shear zone, northern Fiordland, New Zealand. *J Struct Geol*, 1999, 21: 385—405
- 17 Xypolias P, Doutsos T. Kinematics vorticity and strain rate patterns associated with ductile extrusion in the Chelmos shear zone (External Hellenides), Greece. *Tectonophysics*, 2001, 338: 69—77
- 18 Xypolias P, Doutsos T. Kinematics of rock flow in a crustal-scale shear zone: Implication for the orogenic evolution of southwestern Hellenides. *Geol Mag*, 2000, 137: 81—96
- 19 王玉芳, 崔元元, 孙承志. 内蒙赤峰南部楼子店-大城子拆离断层及其构造演变. 见: 钱祥麟, 编. 伸展构造专辑. 北京: 地质出版社,

1994. 99—108
- 20 邵济安, 张履桥, 贾文, 等. 内蒙古喀喇沁变质核杂岩及其隆升机制探讨. 岩石学报, 2001, 17: 283—290
 - 21 Han B F, Zheng Y D, Gang J W, et al. The Louzidian normal fault near Chifeng, Inner Mongolia: Master fault of a quasi-metamorphic core complex. *Int Geol Rev*, 2001, 43: 254—264
 - 22 Wang X S, Zheng Y D, Jia W. Extensional stages of Louzidian metamorphic core complex and development of the supradetachment basin south of Chifeng, Inner Mongolia, China. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 2004, 78: 237—245
 - 23 王新社, 郑亚东, 刘玉琳, 等. 内蒙赤峰南部楼子店拆离断层系绿泥石化带的形成时代. 自然科学进展, 2006, 16: 902—906
 - 24 王新社, 郑亚东. 楼子店变质核杂岩韧性变形作用的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学约束. 地质论评, 2005, 51: 574—581
 - 25 张晓晖, 李铁胜, 蒲志平, 等. 内蒙古赤峰楼子店-大城子韧性剪切带的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其构造意义. 科学通报, 2002, 47: 951—956
 - 26 邓兆伦, 曹书静, 崔新省. 运用遥感和地学信息探讨华北地台北缘边界断裂. 国土资源遥感, 1995, 24: 15—22
 - 27 任继舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 中国及邻区大地构造图(1:500 万). 北京: 地质出版社, 1999. 1—25
 - 28 邵济安. 中朝板块边缘中段地壳演化. 北京: 北京大学出版社, 1991. 1—138
 - 29 王瑜. 中国东部内蒙古-燕山造山带晚古生代晚期-中生代的造山作用过程. 北京: 地质出版社, 1996. 1—143
 - 30 周新华, 张国辉, 杨进辉, 等. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义. 地球化学, 2001, 30: 10—23
 - 31 张炯飞, 祝洪臣. 关于蓟县型中-上元古界沉积环境及内蒙地轴的性质. 吉林地质, 2000, 19: 11—16
 - 32 牛树银, 孙爱群, 张建珍, 等. 华北地台北缘中段构造演化及成矿控矿作用. 河北地质学院学报, 1996, 19: 236—246
 - 33 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 等. 燕辽-阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr-Nd-Pb 同位素特征及意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2000, 30: 383—387
 - 34 王桂梁, 刘桂建, 邹海, 等. 华北地台北缘中生代盆-山耦合转移及其动力学分析. 煤田地质与勘探, 1999, 27: 14—17
 - 35 邵济安, 韩庆军, 张履桥, 等. 内蒙古东部早中生代堆积杂岩捕虏体的发现. 科学通报, 1999, 44: 478—485
 - 36 郑亚东, Davis G A, 王琮, 等. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题. 地质学报, 2000, 74: 290—301
 - 37 Davis G A, Zheng Y D, Wang C, et al. Mesozoic tectonic evolution of Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. *Geol Soc Am Mem*, 2001, 194: 171—197
 - 38 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造-大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 1996. 1—110
 - 39 Dunnet D. A technique of finite strain analysis using elliptical particles. *Tectonophysics*, 1969, 7: 117—136
 - 40 Wang T, Wang X X, Li W P, et al. Evaluation of multiple emplacement mechanisms: The Huichizi granite pluton, Qinling orogenic belt, central China. *J Struct Geol*, 2000, 22: 505—518
 - 41 De Paor D M. R_f/ϕ strain analysis using an orientation net. *J Struct Geol*, 1988, 10: 323—333
 - 42 Weijermars R. Taylor-mill analogues for patterns of flow and deformation in rocks. *J Struct Geol*, 1998, 20: 77—92
 - 43 Weijermars R. The role of stress in ductile deformation. *J Struct Geol*, 1991, 13: 1061—1078
 - 44 Weijermars R. Progressive deformation of single layers under constantly oriented boundary stresses. *J Struct Geol*, 1993, 15: 911—922
 - 45 Zheng Y D, Wang T, Ma M B, et al. Maximum effective moment criterion and the origin of low-angle normal faults. *J Struct Geol*, 2004, 24: 271—285
 - 46 郑亚东, 王涛, 王新社. 世纪构造地质学与力学的新理论——最大有效力矩准则. 自然科学进展, 2005, 15: 142—148
 - 47 郑亚东, 王涛, 王新社. 最大有效力矩准则及相关地质构造. 地学前缘, 2007, 14: 49—60
 - 48 郑亚东, 王涛, 王新社. 最大有效力矩准则的理论与实践. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43: 145—156
 - 49 郑亚东, 王涛, 王新社. 神秘的 109.4° ——共轭变形带的夹角. 地质科学, 2007, 42: 1—9
 - 50 Zheng Y D, Wang T, Zhang J J. Comment on “Structural analysis of mylonitic rocks” in the Cougar Creek Complex, Oregon-Idaho using the porphyroclast hyperbolic distribution method, and potential use of SC' -type extensional shear bands as quantitative vorticity indicators. *J Struct Geol*, 2009, 31: 541—543
 - 51 张进江, 郑亚东. 运动学涡度、极莫尔圆及其在一般剪切带定量分析中的应用. 地质力学学报, 1995, 1: 56—64
 - 52 张进江, 郑亚东. 运动学涡度和极莫尔圆的基本原理与应用. 地质科技情报, 1997, 16: 33—39
 - 53 Zhang J J, Zheng Y D. Polar Mohr constructions of strain analysis in general shear zone. *J Struct Geol*, 1997, 19: 745—748
 - 54 郑亚东, 王涛, 张进江. 运动学涡度的理论与实践. 地学前缘, 2008, 15: 209—220
 - 55 高山, 章军锋, 许文良, 等. 拆沉作用与华北克拉通破坏. 科学通报, 2009, 54: 1962—1973
 - 56 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
 - 57 Zhang J J, Zheng Y D, Liu S W. Application of general shear theory to the study of formation mechanism of the metamorphic core complex: A case study of Xiaoqinling in central China. *Acta Geol Sin*, 2000, 74: 19—28

- 58 吴福元, 葛文春, 孙德育, 等. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘, 2003, 10: 51—60
- 59 Meng Q R. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? Tectonophysics, 2003, 369: 155—174
- 60 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
- 61 王涛, 郑亚东, 张进江, 等. 华北克拉通中生代伸展构造研究的几个问题及其在岩石圈减薄研究中的意义. 地质通报, 2007, 26: 1154—1166
- 62 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报, 2007, 81: 1449—1461
- 63 董树文, 张岳桥, 陈宣华, 等. 晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征. 地球科学, 2008, 29: 306—317
- 64 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 等. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨. 地学前缘, 2004, 11: 285—296
- 65 郑亚东, 曾令森, 李建波, 等. 辽南中生代造山作用与晚造山伸展垮塌作用. 地质科学, 2009, 44: 811—824