

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*

郑亚东** 王 涛

(①北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871; ②中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要 中蒙边界的亚干地区经历古生代造山作用之后, 中生代经历两次重大的构造事件: 造山期(晚三叠-早侏罗世)为地壳的缩短导致总体向南的特大型推覆构造; 晚造山期(晚侏罗-早白垩世)近南北的地壳伸展, 形成变质核杂岩. 经构造的运动学和动力学分析查明, 造山期形成的推覆构造上盘总体运动方向约 180° , 运动学涡度约为 -0.10 , 属缩短-增厚型剪切作用, 最大主压应力轴方向近水平. 晚造山期伸展作用形成拆离断层, 上盘总体运动方向约 165° ; 早期运动学涡度平均为 0.74 , 属简单剪切为主减薄型剪切作用, 最大主压应力轴倾角 66° ; 晚期伸展作用的运动学涡度为平均 0.55 , 属纯剪切为主减薄型剪切作用, 最大主压应力轴方向近直立. 表明推覆构造导致地壳的增厚, 原处于地壳上层的岩石下沉进入韧性转化带以下的下地壳, 增温的下盘岩石和其下部分重熔的物质因其体积的增大和比重的减小而上浮, 而上盘岩石则因构造增厚负荷加大. 在上方负荷和下部热隆的联合作用下, 夹持其间的韧性剪切带中的垂向纯剪切组分增大. 当垂向纯剪切组分超过简单剪切组分时, 韧性剪切带转化为伸展-减薄型剪切带. 这一递进转化过程体现了推覆构造和伸展构造时空关系和其间运动学和动力学内在的本质联系: 推覆构造引起地壳增厚的过程中孕育了伸展的因素, 伸展组分的递增最终导致晚造山的伸展垮塌.

关键词 中生代 推覆构造 晚造山垮塌 运动学涡度 应力状态

1 前言

上世纪 80 年代初在北美科迪勒拉区确立了以变质核杂岩为主体的伸展构造模式^[1~4]. 由于早期存在逆冲推覆构造, 一些研究者假定其成因归结于造山

带造山期地壳的增厚^[5~8], 即造山期地壳增厚、深部物质增温和部分重熔, 深部高温低密度物质失稳向浅部运移, 浅部低温高密度物质在重力作用下发生垮塌的结果. 这种解释已广泛为人们接受并称之为

2003-12-03 收稿, 2004-08-16 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40272084, 40472101)和高校博士学科点专项科研基金(批准号: 2000000128)资助项目

** E-mail: ydzheng@pku.edu.cn

晚造山期伸展垮塌作用^[9-31]。然而,为何造山期逆冲方向与晚造山期伸展方向一致,两者指向常相同,如北美科迪勒拉区^[5],或与之相反,如喜马拉雅区^[7,32]和大青山区^[33],或偶尔两者兼而有之^[34-36]。这种密切的运动学和动力学关系至今还缺乏深入研究。本文试图通过中蒙边界区特大型逆冲推覆构造和亚干变质核杂岩相关的切向剪切作用和应力状态分析探讨其间可能存在的运动学和动力学关系。

2 剪切带的运动学和动力学研究

2.1 运动学涡度

尽管地质文献中剪切带的三维运动学分析日益增多^[37,38],但因涉及瞬时长度比、流脊和有限应变等诸多复杂条件的限制^[39],研究者一般还限于二维运动学分析,并且常采用纯剪切和简单剪切模式。然而,纯剪切和简单剪切是剪切作用的两个特殊端元,所需的边界条件,自然界一般难以满足。正如Reston^[40]所指出的,地壳中的剪切带的属性既非纯剪切,亦非简单剪切。天然剪切带很可能是介于两者之间的一般剪切作用的产物。为了定量说明剪切带中纯剪切和简单剪切两端元组分的相对大小,定量表征剪切带的性质,McKenzie^[41]和Means等人^[42]首次将运动学涡度的概念引入地质文献,说明变形介质中空间中某一点,某一瞬间旋转量与长度比之比。Bobyarchick^[43]简单定义运动学涡度(W_k)为变形介质中两特征方向(非旋转方向)或流脊间夹角的余弦:

$$W_k = \cos \alpha. \quad (1)$$

纯剪切为共轴变形,主变形面(XZ面或ac面)内有两个非旋转方向分别平行与垂直剪切带边界,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,可视为两非旋转方向间的夹角为 0° ,运动学涡度为1。一般剪切为上述两者的组合,主变形面内两非旋转方向间的夹角介于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间,运动学涡度为0~1之间。运动学涡度值有正负之别,正值代表剪切带厚度减薄,负值代表剪切带增厚。剪切带中两非旋转方向间的夹角 α 可根据带内有限应变轴比及有限应变最大应变主轴与剪切带边界的夹角,或根据原平行和垂直剪切带

或任意两方向的长度比,或根据平行剪切方向的长度比和最大有限应变主轴与剪切带边界的夹角,通过极摩尔圆法^[44-46]或张量分析获得^[39,47,48]。

2.2 运动学涡度与主应力轴方向

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,运动学涡度可根据主应力方向求出^[48-50]:

$$\xi = 45^\circ - (\alpha/2).$$

或

$$\alpha = 90 - 2\xi,$$

因此运动学涡度与主压应力轴方向存在以下关系:

$$W_k = \sin 2\xi, \quad (2)$$

式中 ξ 为主压应力轴 σ_1 与剪切带边界法线间的交角。当 $\xi = 45^\circ$ 时, $\alpha = 0$,代表简单剪切,剪切带厚度不变;当 $\xi = 0$, $\alpha = 90^\circ$,代表垂直剪切带的挤压或缩短的纯剪切,形成减薄型剪切带;当 $\xi = 90^\circ$, $\alpha = -90^\circ$,代表平行剪切带的挤压或缩短,形成增厚型剪切带。当 $0 < \xi < 45^\circ$ 时,形成减薄型一般剪切带;当 $45^\circ < \xi < 90^\circ$ 时形成增厚型一般剪切带。因此,如果已知主压应力和剪切带的方向,可以确定剪切带的运动学涡度和剪切带的类型。

2.3 主应力轴方向的确定

脆性变形域可通过共轭断裂锐角夹角的等分线或断层取向和位移方向获得主压应力轴方向^[51,52]。韧性变形域中,当涡度与应变速率之比恒定时,可根据(2)式获得主应力方向^[48-50]。韧性剪切带中石英条带中发育斜向面理,文献[53,54]中称为II型S/C组构代表晚期增量应变的XY面,最新增量应变的主缩短方向可代表主压应力方向。因此相应的最小增量应变主轴或主压应力轴与之垂直。减薄型韧性剪切带中发育的伸展褶劈理,根据最大有效力矩准则^[55],主压应力轴与褶劈理间的夹角为 55° ,因此可根据伸展褶劈理产状确定主应力的方向。

3 中蒙边界区的中生代推覆构造与伸展构造

中蒙边界区,东经 $102^\circ \sim 107^\circ$ 、北纬 $42^\circ \sim 43^\circ$ 面积约9万平方公里的东西狭长带内,散布着规模不等、

数以百计的飞来峰, 构成世界上最大的天然“飞来峰公园”(图 1)。飞来峰以中新元古界含叠层石白云灰岩为主体, 包括少量震旦系冰碛岩和早寒武的黑色硅质板岩, 推覆在以古生界低绿片岩相变质沉积岩为主(图 2(a))和未变质的上三叠陆相红色磨拉石上(图 2(c))。沿逆冲断面一般见有几十厘米的断层泥或断层角砾岩, 常被晚白垩系地层覆盖(图 1)。经郑亚东等^[56,57]研究证明, 这些飞来峰构成南蒙晚古生代造山带内一侏罗纪巨型推覆构造。推覆体内见有大量的叠瓦逆冲断层, 其中一些如图 2(b)示。近观可见一同构造方解石脉沿断层充填, 并形成一指示向南逆冲的断层扩展褶皱(图 2(b)插图)。飞来峰脆性断裂发育, 未见更老的变质结晶基底, 故为一特大型薄皮构造, 地壳增厚主要发生在上地壳脆性变形域内。

在推覆体分布范围内, 发育一大型伸展构造-亚干-翁奇海尔罕变质核杂岩^[56,58,59]。该杂岩在东经 104° 附近跨越中蒙边界。平面呈不规则长圆形, 总体轴向北东 65° 。延伸约 70 余公里。穹隆状缓倾的主拆离断层分割下盘糜棱状片麻岩和变余糜棱白云质大理岩与上盘古生界变质沉积岩。燧石状主拆离断层为厚约一米的燧石状微角砾岩, 顶面为主拆离面。主拆离断层下一般见有 50~100 m 糜棱状片麻岩的绿泥石化带, 其中断裂及相伴热液活动发育。拆离断层之

上为未黏结的断层泥或断层角砾岩, 厚数厘米至几米不等, 最厚近 10 m。变质结晶核包括糜棱状片麻岩、角闪岩相片麻岩、石英云母片岩和大理岩, 出露厚近 2 km。上盘浅变质和未变质岩与下盘深层次岩石沿低角度断层在同一水平面上的并置表明地壳经历了大规模的伸展。野外查明拆离断层切断上述推覆构造(图 2(d)), 表明该伸展构造晚于大规模的缩短事件。

显而易见, 中蒙边界的亚干地区经历古生代造山作用之后, 中生代经历两次重大的构造事件: 造山期为地壳的缩短导致总体向南的特大型推覆构造; 晚造山期近南北的地壳伸展, 形成变质核杂岩。这两次构造事件远离同期的汇聚板块边界(图 1 插图), 堪称板内造山作用的典型事例。地壳的大规模缩短和伸展发生在同一地区, 时代上一先一后, 伸展事件尾随缩短事件, 运动方向大体一致, 其间存在何种运动学和动力学关系?

4 推覆构造的运动学与应力状态

迄今查明最北的飞来峰位于蒙古境内的诺木公区(105°E ; 43°N)(图 1), 最南端的飞来峰为中国境内的杭乌拉飞来峰(104.4°E ; 41.2°N), 其间距离约为 180 km。断层面广泛出露, 平均高差小于 40 m, 表明

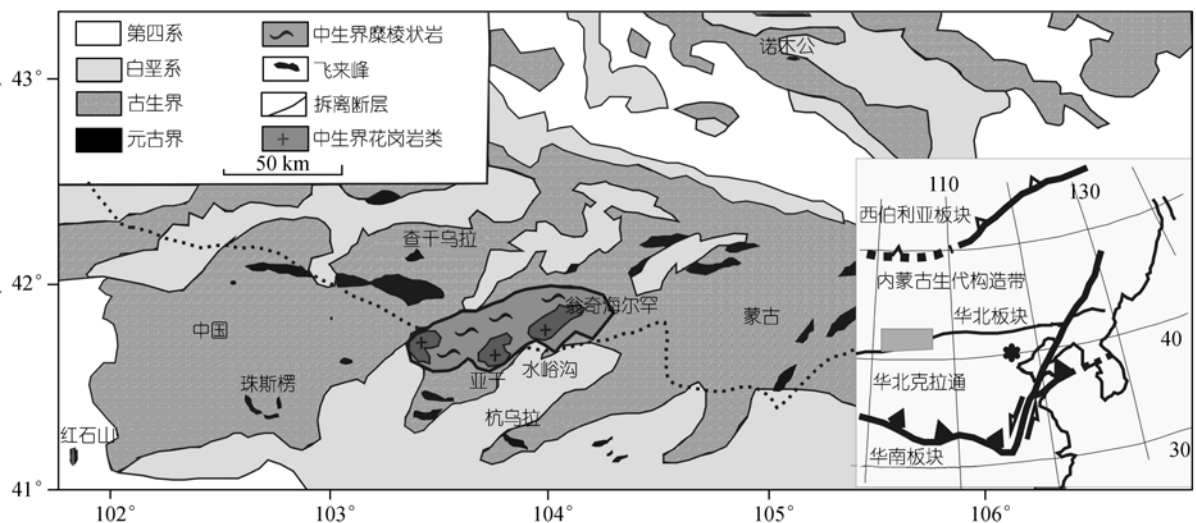


图 1 中蒙边界区简化地质图
插图示构造背景

断层面总体十分平缓. 北部飞来峰由中新元古界白云灰岩夹少量石英砂岩组成. 南部飞来峰则卷入震旦系冰碛岩和早寒武的黑色硅质板岩, 主断层总体向南向上切断地层剖面. 上盘发育的向南逆冲断层和主断面的擦痕产状判断, 总体推覆方向为 180° ^[57]. 南北部飞来峰所切割的中新元古界厚度约为 10 km, 断层面总体倾角约为 3° . 亚干-翁奇·海尔罕变质核杂岩出露该区推覆构造下盘的最老岩层. 变质核主要由糜棱片麻岩和变余糜棱白云大理岩组成. 侵入其中的糜棱状花岗片麻岩的锆石铀铅年龄为 916 ± 16 Ma, 属新元古代. 推测围岩时代为中元古代, 与上述推覆体的白云灰岩夹石英岩年代相当^[60]. 证明中蒙边界大型逆冲推覆构造导致上地壳水平缩短和中新元古和古生界地层的重复和地壳的垂向增厚. 根据断层岩为断层泥和断层角砾岩和上盘岩石脆性断裂发育判断逆冲断层形成于上地壳脆性变形域内, 地壳垂向的构造增厚在 10 km 以上. 上盘白云灰岩中的叠瓦逆冲断层^[56,57]以及共轭雁行状方解石脉(图 3(a))均指示最大和中间主压应力轴近水平, 最小主应力轴近直立. 主压应力方向与近水平产出的主逆冲断面法线间的交角 ξ 甚大, 趋近 90° (~ 87°). 根据(2)式, 相应的运动学涡度为 -0.10 . 表明相关的剪切作用属纯剪切组分为主的缩短-增厚型.

5 亚干-翁奇·海尔罕变质核杂岩的运动学与应力状态分析

5.1 构造要素、形成顺序与时代

如前所述, 变质核杂岩主体构造为一北东向穹隆状大型低角正断层(拆离断层)分割下盘糜棱状片麻岩和变余糜棱白云质大理岩与上盘古生界变质沉积岩. 拆离断层由厚约一米的燧石状微角砾岩组成, 顶面为主拆离面. 拆离面上擦痕发育, 常出现摩擦镜面. 北西翼倾向北西, 表现为上盘向南南东运动的视逆冲断层; 而正常的南东翼断层面和擦痕总体倾伏方向为 $165^\circ \angle 25^\circ$. 其中钉头状擦痕指示上盘相对向南南东的正断运动. 下盘糜棱状片麻岩, 以长英质为主, 因暗色矿物含量的不同构成色度深浅不同的层状体或成分条带. 糜棱状岩石最显著的组构是一组平行成分条带的透入性糜棱面理和包含其中的一组拉伸

线理. 变形集中部分形成分米级厚的糜棱岩和局部厘米级厚的超糜棱岩. 平行糜棱岩成分条带有时穿切条带常见基本未变形的厘米至分米级细晶岩和伟晶岩脉侵入. 这些层状岩体成分与侵入糜棱状花岗岩类相似, 与围岩界限分明, 其间成整合至不整合关系. 糜棱状岩石的成分条带常呈 a-型褶皱产出, 偶尔发育成鞘褶皱. 这些在糜棱面内构成紧闭的不对称平卧褶皱或无根褶皱, 除鼻部外, 其枢纽产状与糜棱线理一致(图 3(b)). 糜棱面理总体呈平缓的穹隆状产出, 与变质核杂岩的总体形态一致. 在变质核杂岩的正常东南翼, 糜棱面理和线理平缓, 总体倾向南南东与拆离断层一致, 但倾角较缓^[55]. 糜棱面理和线理主要由对称和不对称眼球状长石和石英条带组成. 不对称眼球体常构成 σ 碎斑, 偶尔见有 δ 碎斑. 碎斑体的中部和尾部取向分别定义糜棱状岩石的 S-和 C-面并构成 S/C 组构(图 3(c)). 不对称眼球、S/C 组构和其它运动学标志几乎无一例外地指示上盘相对下盘向南南东向的正断式剪切. 石英条带围绕眼球状长石呈舒缓波状, 其中发育斜向面理. Lister 等人^[53]称之为 II 型 S/C 组构. 含云母的糜棱状片麻岩中见有“云母鱼”, 构成另一类 II 型 S/C 组构. 两类 II 型 S/C 组构所指示的剪切指向与 S/C 组构的指向相同^[61].

糜棱状岩石中还广泛发育一组间隔性近平行的小型剪切条带(图 3(c)). 这些剪切条带以小角度切割和错断上述透入性糜棱面理并使之发生 S 或反 S 形弯曲, 其剪切指向与糜棱状岩石的剪切指向一致, 表明它们是在同一递进变形过程中的较晚的增量应变期间形成的. 对于糜棱状岩石中这些小型剪切条带, 文献中赋予以下不同的术语: 剪切条带劈理^[62-64], C' 面^[65,66], 伸展褶劈理^[64,67,68], 正向膝褶带^[52], 正向滑劈理^[69], 镶边剪切条带^[70]. 糜棱状岩石中偶而出现与之共轭的小型剪切条带, 其剪切指向与之相反(图 3(d)), 面对缩短方向的共轭角平均为 110° , 即钝角面对最大主压应力方向. 因其无可争议的平行糜棱岩面理伸展成因, 本文采用 Platt^[67]提出的伸展褶劈理, 同向一组称为同向伸展褶劈理或 C', 反向一组称为反向伸展褶劈理. 由于同向伸展褶劈理或 C' 切割糜棱面理, 其中的线理与糜棱线理一致, 所指示的剪切指向相同, 故与糜棱面理同属同一递进变形, 为该递进变形

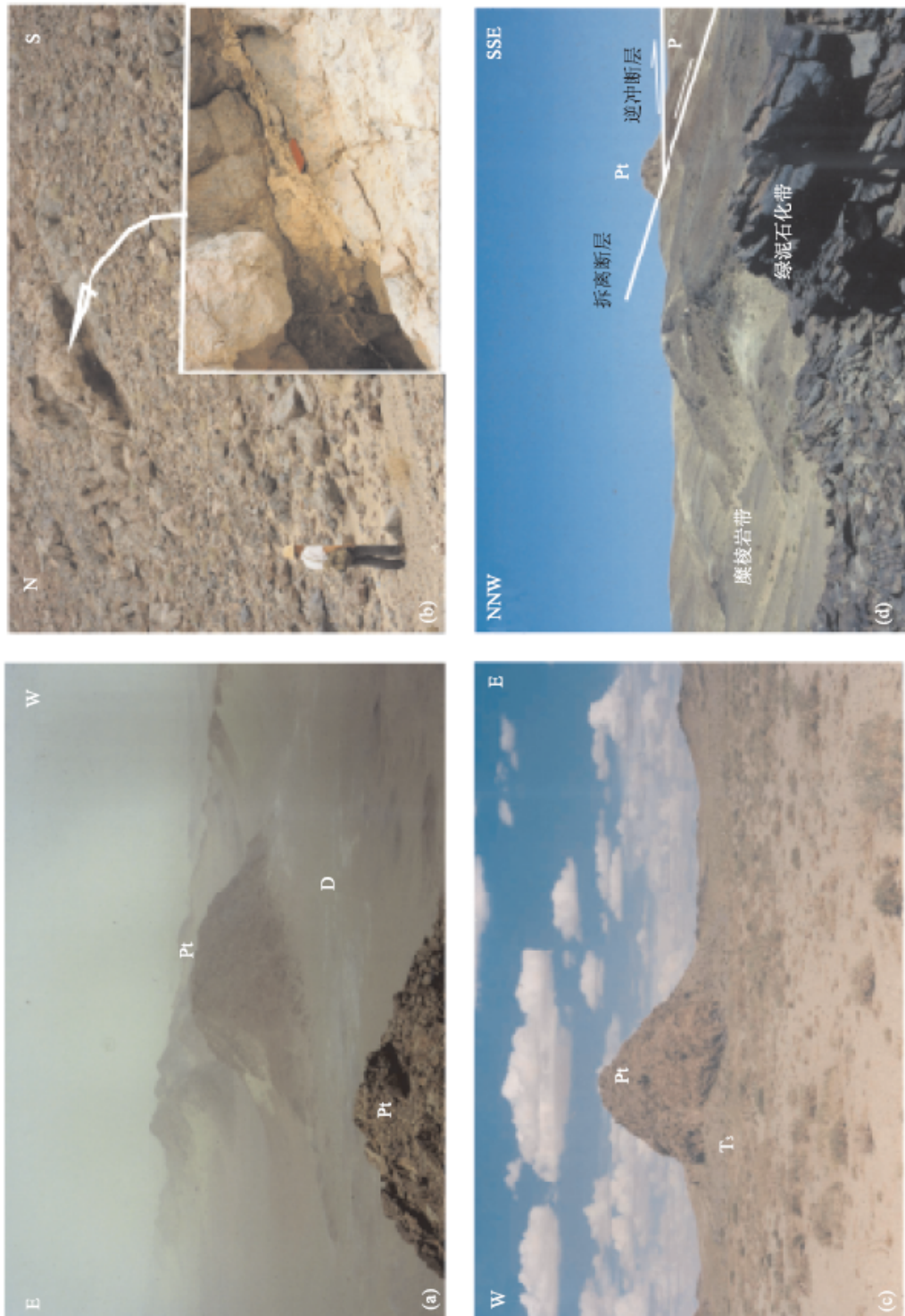


图 2

(a) 红石山飞来峰(元古界白云灰岩)中的构造窗(泥盆系变沉积岩). 断层面大面积出露, 平整如地毯; (b) 红石山飞来峰中的叠瓦逆冲断层. 插图: 沿断层充填的同构造方解石脉形成一断层扩展褶皱指示向南逆冲; (c) 中蒙边界线上(乌拉特后旗)一飞来峰(元古界白云灰岩)推覆在上三叠统陆相红色磨拉石上: Pt-中元古界白云岩, T₃-上三叠统砖红色砾岩; (d) 亚干变质核杂岩南翼拆离断层切割中蒙边界推覆构造

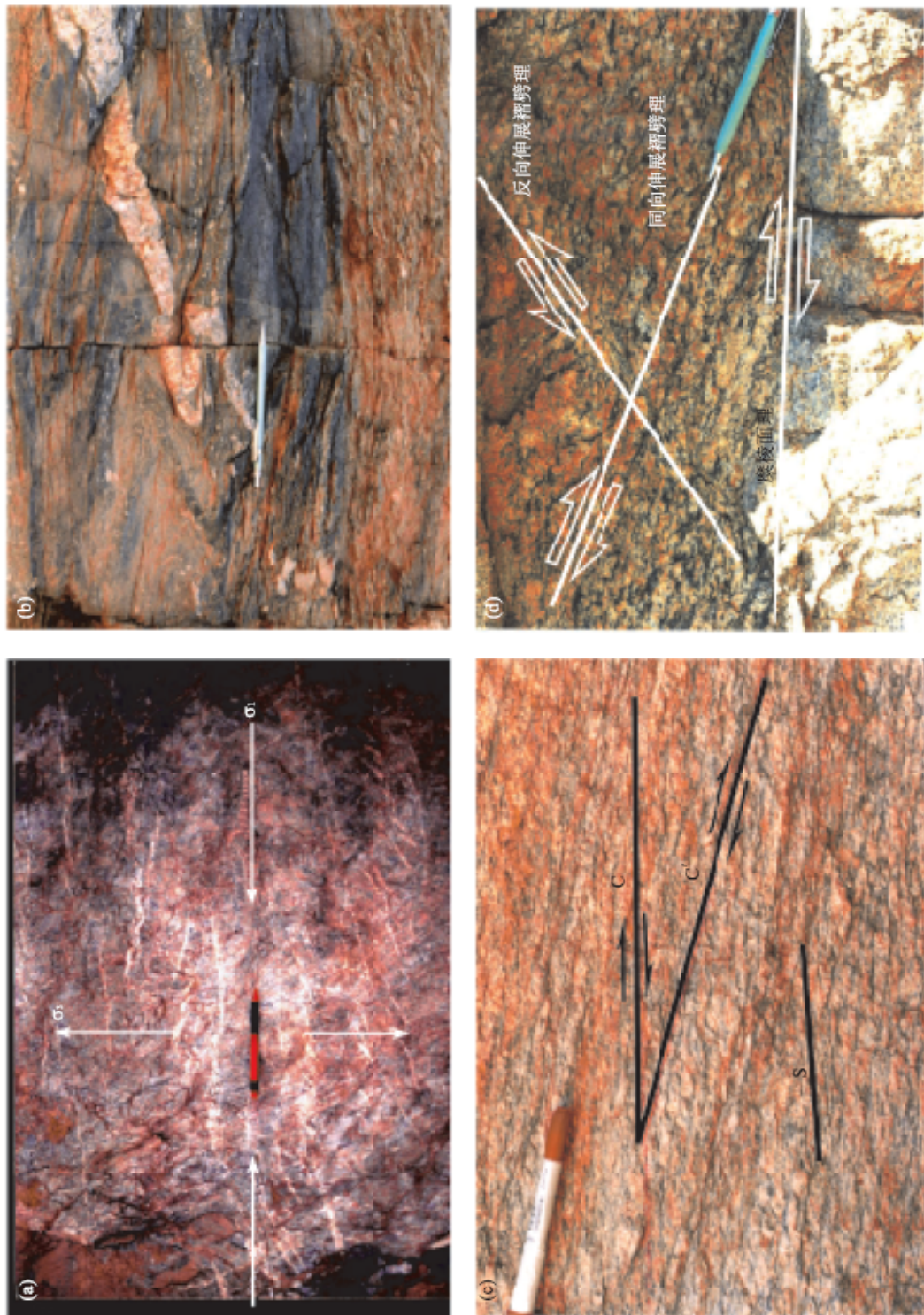


图 3

(a) 中蒙边界推覆构造上盘元古界白云灰岩中的共轭方解石脉(露头面直立, 右侧指南, 层面近水平); (b) 亚干变质核杂岩中糜棱面理和长英脉的 a-型不对称卧褶皱(露头面直立, 右侧朝南南东); (c) 亚干变质核杂岩糜棱状岩中的 S/C 组构与同向伸展褶劈理(露头面直立, 右侧指南南东); (d) 亚干变质核杂岩糜棱状岩中的共轭伸展褶劈理(露头面直立, 右侧指南南东)

晚期的产物。值得注意的是同向伸展褶皱理统计上与糜棱岩中露头规模的低角正断层和主拆离断层的产状一致,运动方式相同。郑亚东等人^[57]论证伸展褶皱理可通过应变集中和软化,扩展形成低角正断层,亚干-翁奇·海尔罕变质核杂岩中的同向伸展褶皱理产状和运动方式与该杂岩的主拆离断层和下盘低角正断层一致,为这一理论提供了有力的证据。

总之,根据剪切指向的一致性和相互切割关系,亚干-翁奇·海尔罕变质核杂岩中的主要构造要素为同一递进变形的产物,其形成顺序依次为:(1)糜棱面理和线理及其相关的S/C组构;(2)II型S/C组构(包括石英条带中的斜向面理和“云母鱼”);(3)伸展褶皱理;(4)糜棱状岩石中的低角正断层和主拆离断层。总体顺糜棱片理就位而面内褶皱发育的糜棱状富钾花岗岩获得锆石铀铅年龄为 228 ± 7 Ma^[71],代表糜棱状岩石形成的早期年龄,可能与推覆事件有关。伸展晚期就位的花岗岩体同位素锆石铀铅年龄为 135 ± 1.7 Ma^[72,73],其氩氩年龄(127 ± 1 Ma)^[72]与同伸展期糜棱岩黑云母氩氩年龄为 $126\pm 1\sim 129\pm 1$ Ma^[59]相近,并与附近同裂谷火山岩的定年($156\sim 125$ Ma)一致^[74],表明伸展隆升冷却的时代为早白垩世。最近获得伸展晚期弱糜棱花岗岩的锆石铀铅年龄为 145 ± 5 Ma,表明伸展作用很可能起始晚侏罗世。侵入绿泥石化带沿脆性断裂就位的伟晶岩脉的钾氩年龄为 93.8 ± 7 Ma^[56],可代表变质核杂岩演化的终结。

5.2 糜棱面理和线理形成期的运动学和应力状态

根据剪切带方向的和原与剪切带边界近垂直变形长英质脉的长度比,通过极摩尔圆法和张量分析法,获得的运动学涡度为0.87,所预测有限应变长轴

与剪切带边界的夹角为 13° 。糜棱状岩石中实测的S/C面夹角(β)为 $9^\circ\sim 16^\circ$ (平均夹角 12°),两者几乎完全一致^[61,75]。根据长英质糜棱岩光片,以长石为应变标志体,运用Fry法^[76]测定的6个变形椭球体主轴比及X轴与剪切带的夹角所编制的极摩尔圆获得运动学涡度变化于 $0.64\sim 0.81$ (表1)。其平均值0.74略小于上述根据变形岩脉获得的运动学涡度值,尽管数据量不甚充分,仍表明相关的剪切作用为以简单剪切为主的伸展-减薄型一般剪切,相关的主压应力与剪切带法线间的平均夹角约为 24° 。

应当指出的是,缩短-增厚型和伸展-减薄型剪切带的基本鉴别标志在于前者面内褶皱发育,后者伸展褶皱发育。亚干-翁奇·海尔罕变质核杂岩中,由糜棱面理和成分条带构成的面内紧闭平卧褶皱和的a型褶皱(包括鞘褶皱)的发育表明上述伸展-减薄之前,剪切带一度经历过缩短和增厚,很可能与上述推覆事件有关。糜棱岩面内褶皱形成香肠构造是先缩短后伸展的有力证据。剪切带从早期缩短-增厚到晚期的伸展-减薄过程中,势必经历过一简单剪切作用阶段,而这一阶段的构造记录是同向缩短褶皱理的形成^[55]。

5.3 II型S/C组构形成期的运动学和应力状态

II型S/C组构只代表变形历史的最后部分,S面代表糜棱面理形成晚期增量应变的XY面,相应的主压应力轴与之垂直^[53,54]。根据条带状石英斜向面理和“云母鱼”产状获得的运动学涡度分别为0.85和0.77^[61]。对应主压应力与剪切带法线间的夹角约为 $29\sim 25^\circ$ 。这些数值与上述糜棱岩面理和线理形成期的运动学涡度相近,表明糜棱岩形成期涡度与应变

表1 极摩尔圆法求得的 β , α , W_k 和 σ_1 取向

编号	数据量	R_s	$\beta/(^\circ)$	$\alpha/(^\circ)$	W_k	$\xi/(^\circ)$
N 7	77	3.20	11	46	0.695	22
I 9	20	2.29	18	50	0.643	20
I 15	38	2.40	15	41	0.755	24.5
I 18	33	2.00	19	36	0.809	27
I 13	48	2.40	17	36	0.809	27
I 4	37	1.60	18	43	0.731	23.5
平均值	42	2.32	16	42	0.740	24

速率之比基本稳定。

5.4 伸展褶皱理形成期的运动学和应力状态

郑亚东等人^[55]论证伸展褶皱理受最大有效力矩准则控制,褶皱理与最大主压应力方向间的夹角约为 55°。因此可根据褶皱理的产状确定褶皱理形成时的古应力方向和运动学涡度。运用同向伸展褶皱理或C'确定运动学涡度的方法称为C'法。郑亚东^[61]根据亚干-翁奇·海尔罕变质核杂岩中 19 处露头点测得同向伸展褶皱理与剪切带的夹角为 13°~25°, 平均夹角 19°。根据(2)式获得运动学涡度为 0.53。表 2 为均

匀的分布于整个变质核杂岩南东翼(水泉沟剖面)^[55]32 个数据点的测量,同向伸展褶皱理与剪切带间是平均夹角为 19°,主压应力轴与剪切带边界法线方向间的平均夹角为 16°,主变形面内两特征方向间的平均夹角为 57°,对应的运动学涡度值为 0.55,进一步表明相关的剪切作用以为减薄型纯剪切为主的一般剪切。

表 2 表明 C'法求得的特征向量夹角 α 和运动学涡度 W_k 的变化范围不大, α 在 52°~63°之间, W_k 在 0.45~0.63 之间,说明 C'形成期构造环境相对稳定。其平均值(0.55)小于上述糜棱岩主期的涡度值,相应

表 2 C'法获得的主压应力取向、 α 及 W_k 值

测量点	$C \wedge C' / (^\circ)$	$\xi / (^\circ)$	$\alpha / (^\circ)$	W_k
N 7	18	17	55	0.574
I 9	19	16	57	0.545
I 15	19	16	57	0.545
I 18	22	13	63	0.453
I 13	20	15	59	0.515
S ₁ 30	20	15	59	0.515
S ₁ 35	22	13	63	0.453
S ₁ 36	18	17	55	0.574
S ₁ 37	16	19	51	0.629
S ₂ 1	20	15	59	0.515
S ₂ 11	16	19	51	0.629
S ₂ 12	17	18	53	0.602
S ₂ 18	21	14	61	0.485
S ₂ 19	21	14	61	0.485
S ₂ 21	16	19	51	0.629
S ₂ 22	16	19	51	0.629
S ₂ 25	16	19	51	0.629
S ₂ 26	20	15	59	0.515
S ₂ 28	22	13	63	0.453
I 4	20	15	59	0.515
I 3	20	15	59	0.515
I 20	21	14	61	0.484
S ₁ 31	20	15	59	0.515
S ₁ 32	19	16	57	0.545
S ₁ 33	19	16	57	0.545
S ₁ 34	19	16	57	0.545
S ₂ 16	20	15	59	0.515
S ₂ 17	20	15	59	0.515
S ₂ 20	20	15	59	0.515
S ₂ 27	16	19	51	0.629
S ₂ 29	20	15	59	0.515
S ₁ 38	20	15	59	0.515
平均值	19	16	57	0.545

表3 中蒙边界区中生代板内造山带主要构造事件的运动学和应力状态

构造事件	时代	上盘运动方向/°	剪切作用类型	W_k	$\xi/(^\circ)$	α_1 倾角/ $(^\circ)$
推覆构造	$T_3\text{-}J_1$	~180	缩短-增厚型	~-0.10	~87	~3
伸展早期	$J_3\text{-}K_1$ 145~135 Ma	~165	简单剪切为主的伸展-减薄型	0.74	24	66
伸展晚期	K_1 127 Ma	~165	纯剪切为主的伸展-减薄型	0.55	16	74

的主压应力方向与剪切带边界法线的夹角 16° 小于糜棱岩主期的夹角, 表明纯剪切组分的增大。

根据上述糜棱岩形成不同阶段的运动学和应力状态分析, 糜棱岩形成的全过程经历的剪切作用为减薄型一般剪切。如果以 $\xi = 22.5^\circ$ 为界(相当于 $W_k = 0.71$), 大于该值的减薄型一般剪切以简单剪切为主, 小于该值以纯剪切为主, 则可清楚地看出, 亚干-翁奇·海尔罕变质核杂岩糜棱岩形成过程中主期以简单剪切为主, 伸展褶劈理形成期以纯剪切为主。中蒙边界区中生代板内造山带主要构造事件的运动学和应力状态特征可综合如表3所示。

6 讨论

中蒙边界推覆构造涉及地壳上层约 10 km 的脆性域, 其下平缓向北倾斜的断层面向南向上切断地层剖面, 表明近南北向挤压力导致地壳南北向水平缩短和垂向的构造增厚, 形成该区中生代造山带。其下的韧性剪切带中因上覆负荷而经历近简单剪切作用, 所记录平均运动学涡度为 0.74, 对应的主压应力方向与剪切带法线的夹角为 24° 。随着递进增厚的上盘, 地壳负荷导致原处于地壳上层的下盘中新元古界岩石下沉进入温度和压力较高的韧脆性转化带以下的下地壳。其下更深层的岩石则处于温度和压力更高的环境中。当温度升至 750°C 以上, 长英质岩石则发生部分重熔。增温的下盘岩石和其下部分重熔的物质因其体积的增大和比重的减小而上浮, 在上部糜棱状岩顺面理或穿切面理就位, 形成网格状同构造长英质脉。随着逆冲过程的进行, 在上方负荷和下部热隆的联合作用下, 夹持其间的韧性剪切带中的垂向纯剪切组分势必递进增大。当垂向纯剪切组分超过简单剪切组分时, 韧性剪切带转化伸展-减薄型剪切带, 所记录的运动学涡度平均为 0.74, 构造体制发生了质的变化, 从缩短转化为伸展。随着垂向纯剪切组分的增加, 运动学涡度降至 0.55, 对应的主压

应力方向与剪切带法线的夹角为 16° , 相应的最大有效力矩方向为 $71^\circ(16^\circ+55^\circ)$, 有利于同向伸展褶劈理的形成。同向伸展褶劈理的应变集中与软化最终导致低角正断层的形成。这一递进转化过程体现了推覆构造和伸展构造时空关系和其间运动学和动力学内在的本质联系: 推覆构造形成过程中一开始就孕育了伸展的因素, 伸展组分的递增最终导致晚造山的伸展垮塌。值得注意的是, 亚干-翁奇·海尔罕变质核杂岩中根据共轭伸展褶劈理(图3(d))获得的主压应力方向与剪切带法线的夹角为 10° , 对应的运动学涡度值为 0.34。表明伸展晚期, 主压应力轴取向已趋于直立, 近水平的糜棱面理相关的各向异性对同向和反向伸展褶劈理的影响趋近^[7], 反向伸展褶劈理得以形成。与之平行的露头规模的反向低角韧性正断层的发育, 表明反向伸展褶劈理也可通过应变集中与软化有可能扩展为大规模的拆离断层。造山期推覆构造与晚造山伸展垮塌的运动学和动力学演化过程可概括如图4所示。

7 结论

(1) 中生代早期($T_3\text{-}J_1$)形成的中蒙边界特大型推覆构造是限于地壳上层脆性域内的薄皮构造。上盘沿向北缓倾的主断面向南推覆, 导致岩层侧向缩短和垂向增厚。推覆体内所记录的主压应力轴南北向近水平产出。

(2) 亚干-翁奇·海尔罕变质核杂岩形成于晚侏罗-早白垩世, 主要构造要素为一倾向南南东的伸展拆离断层。下伏糜棱状岩石中不同阶段形成的运动学标志所指示的剪切指向与拆离断层一致, 表明这些构造同属一递进变形。早期构造与简单剪切为主伸展-减薄型剪切有关, 平均运动学涡度为 0.74, 所指示的最大主压应力轴倾角 66° ; 而晚期形成的构造与纯剪切为主减薄型剪切相关, 平均运动学涡度为 0.55, 所指示的最大主压应力轴倾角 74° , 而共轭伸展褶劈理

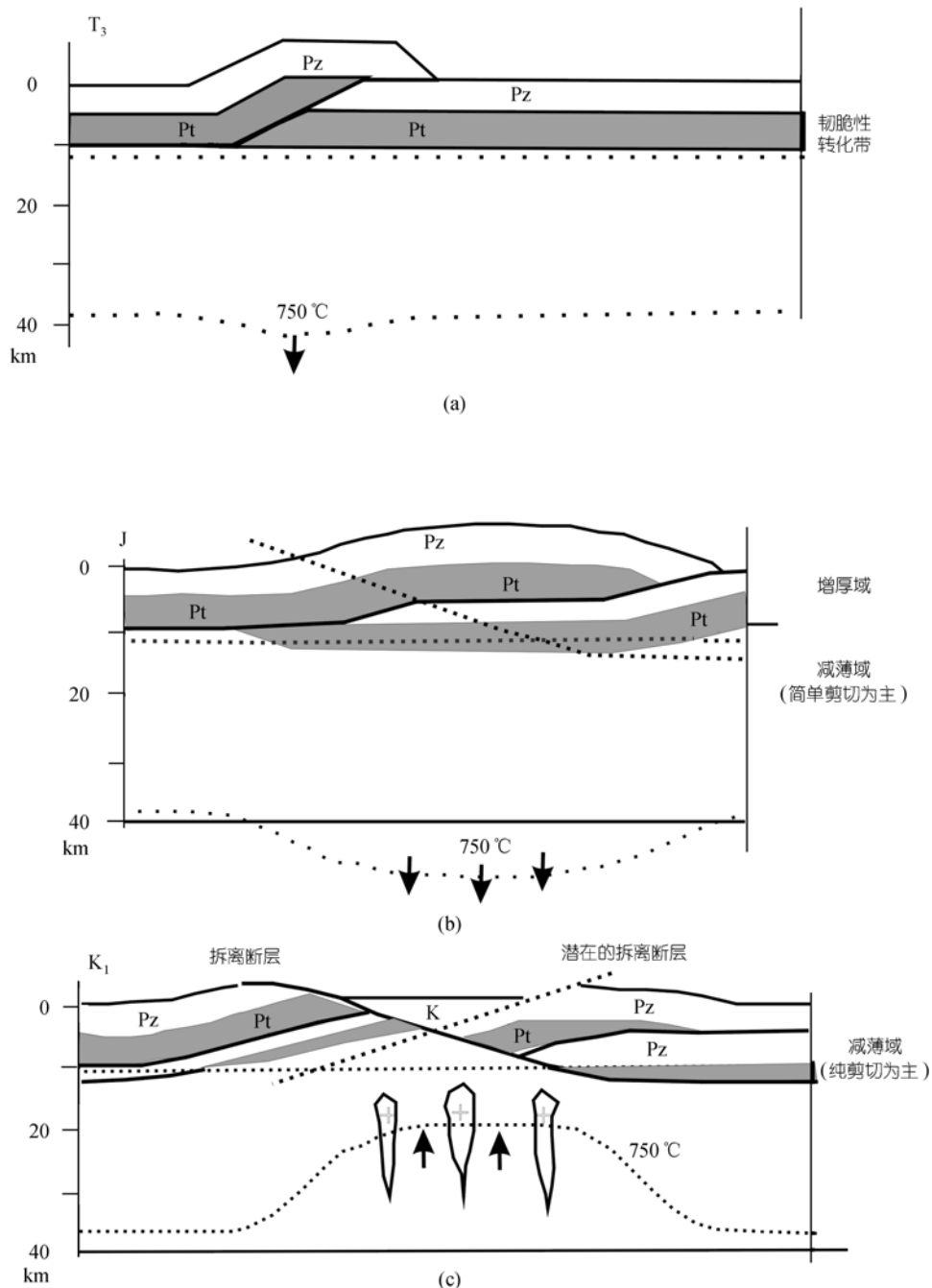


图 4 中蒙边界区中生代造山期推覆构造与晚造山伸展垮塌的构造演化

表明最大主应力轴倾角为 80° 。证明伸展过程中运动学涡度的递减和最大主应力轴倾角的递增。

(3) 最大主压应力轴从造山期的近水平转化为晚造山期近直立的伸展构造可解释为逆冲推覆构造

导致岩层增厚、地面成山和下伏岩石下沉增温以至部分重熔，在浅部山体重力和深部热隆的联合作用下的晚造山伸展垮塌。

致谢 作者衷心感谢三位匿名评审者对论文初稿提

出的宝贵建设性意见。

参 考 文 献

- 1 Davis G H, Coney P J. Geologic development of the Cordilleran metamorphic core complexes. *Geology*, 1979, 7: 120~124
- 2 Coney P J. Cordilleran metamorphic core complexes: An overview. *Mem Geol Soc Am*, 1980, 122: 35~51
- 3 Wernicke B. Low-angle normal faults in the Basin and Range province-Nappe tectonics in an extending orogen. *Nature*, 1981, 291: 645~648[DOI]
- 4 Davis G H. Shear-zone model for the origin of metamorphic core complexes. *Geology*, 1983, 11: 342~347[DOI]
- 5 Coney P J, Harms T A. Cordilleran metamorphic core complexes: Cenozoic extensional relics of Mesozoic compression. *Geology*, 1984, 12: 550~554[DOI]
- 6 Sonder L J, England P C, Wernicke B P. A physical model for Cenozoic extension of western North America. In: Coward M P, Dewey J F, Hancock P L, eds. *Continental Extensional Tectonics*. Geol Soc Lon Sp Pub 1987, 28: 187~201
- 7 Dewey J F. Extensional collapse of orogens. *Tectonics*, 1988, 7: 1123~1139
- 8 Platt J P, Vissers R L M. Extensional collapse of thickened continental lithosphere: A working hypothesis for the Alboran Sea and Gibraltar Arc. *Geology*, 1989, 17: 540~543[DOI]
- 9 Echter H, Malavieille J. Extensional tectonics, basement uplift and Stephano-Permian collapse basin in a late Variscan metamorphic core complex (Montagne Noire, Southern Massif Central), In: Matte P, ed. *Terranes in the Variscan Belt of Europe and Circum- Atlantic Paleozoic Orogens*. *Tectonophysics*, 1990, 177: 125~138[DOI]
- 10 Malavieille J. Late orogenic extension in mountain belts: Insights from the Basin and Range and the late Paleozoic Variscan belt. *Tectonics*, 1993, 12(5): 1115~1130
- 11 Foster D A. Limits on the tectonic significance of rapid cooling events in extensional settings-insights from the Bitterroot metamorphic core complex, Idaho-Montana—comment. *Geology*, 1995, 23(11): 1051~1052[DOI]
- 12 Vissers R L M, Platt J P, Vanderwal D. Late orogenic extension of the Betic Cordillera and the Alboran domain—A lithospheric view. *Tectonics*, 1995, 14: 786~803[DOI]
- 13 张家声. 造山后伸展构造研究的最新进展. *地学前缘*, 1995, 2(2): 67~83
- 14 O'Sullivan P B, Foster D A, Kohn B P, et al. Multiple postorogenic denudation events: An example from the eastern Lachlan fold belt, Australia. *Geology*, 1996, 24(6): 563~566[DOI]
- 15 Faure M, Sun Y, Shu L P, Monie P, et al. Extensional Tectonics within a subduction type orogen, the case of the Wugonshan dome (Southeastern China). *Tectonophysics*, 1996, 263: 77~106[DOI]
- 16 Henk A. Gravitational orogenic collapse vs plate boundary stresses: A numerical modeling approach to the Permo-Carboniferous evolution of Central Europe. *Geologische Rundschau*, 1997, 86: 39~55[DOI]
- 17 Vanderhaeghe O, Teyssier C. Formation of the Shuswap metamorphic core complex during late-orogenic collapse of the Canadian Cordillera: Role of ductile thinning and partial melting of the mid- to lower crust. *Geodinamica Acta*, 1997, 10: 41~58
- 18 Fossen H, Dallmeyer R D. Ar-40/ Ar-39 muscovite dates from the nappe region of southwestern Norway: Dating extensional deformation in the Scandinavian Caledonides. *Tectonophysics*, 1998, 285: 119~133[DOI]
- 19 Vanderhaeghe O, Teyssier C, Wysoczanski R. Structural and geochronological constraints on the role of partial melting during the formation of the Shuswap metamorphic core complex at the latitude of the Thor-Odin dome, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1999, 36: 917~943[DOI]
- 20 Sonder L J, Jones C H. Western United States extension: How the West was widened. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1999, 27: 417[DOI]
- 21 Levin V, Park J, Brandon M T, et al. Thinning of the upper mantle during late Paleozoic Appalachian orogenesis. *Geology*, 2000, 28: 239~242[DOI]
- 22 Cabry R, Hammor D, Delor C. Metamorphic evolution, partial melting and Miocene exhumation of lower crust in the Edough metamorphic core complex, west Mediterranean orogen, eastern Algeria. *Tectonophysics*, 2001, 342(3-4): 239~273[DOI]
- 23 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(3-4): 275~312[DOI]
- 24 Strachan R A, Martin M W. Evidence for contemporaneous yet contrasting styles of granite magmatism during extensional collapse of the northeast Greenland Caledonides. *Tectonics*, 2001, 20: 458~473[DOI]
- 25 Teyssier C, Vanderhaeghe O. Special issue-Partial melting of crust and flow of orogens-Preface. *Tectonophysics*, 2001, 342(3-4): V~VI[DOI]
- 26 Vanderhaeghe O, Teyssier C. Partial melting and flow of orogens. *Tectonophysics*, 2001, 342(3-4): 451~472[DOI]
- 27 Norlander B H, Whitney D L, Teyssier C, et al. Partial melting and decompression of Thor-Odin dome, Shuswap metamorphic core complex. *Canadian Cordillera. Lithos*, 2002, 61(3-4): 103~125[DOI]
- 28 Poller U, Uher P, Broska I, et al. First Permian-Early Triassic zircon ages for tin-bearing granites from the Gemeric unit (western Carpathians, Slovakia): connection to post-collisional extension of the Variscan orogen and S-type granite magmatism. *Terra Nova*, 2002, 14(1): 41~48[DOI]
- 29 Robyr M, Vannay J C, Epard J L, et al. Thrusting, extension, and doming during the polyphase tectonometamorphic evolution of High Himalayan Crystalline zone, NW India. *J Asian Earth Sci*, 2002, 21(3): 221~239[DOI]
- 30 Teyssier C, Whitney D L. Gneiss domes and orogeny. *Geology*, 2002, 30(12): 1139~1142[DOI]

- 31 Platt J P, Whitehouse M J, Kelley S P, et al. Simultaneous extensional exhumation across the Alboran Basin: Implications for the causes of late orogenic extension. *Geology*, 2003, 31: 251~254[DOI]
- 32 Burchfiel B C, Chen Z, Hodges K V, et al. The south Tibetan detachment system, Himalayan orogen: Extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt. *Geol Soc America Spec Paper*, 1992, 269: 41
- 33 Davis G A, Darby B J, Zheng Y, et al. Geometric and temporal evolution of an extensional detachment fault, Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. *Geology*, 2002, 30: 1003~1006[DOI]
- 34 Parrish R R, Carr S D, Parkinson D L. Eocene extensional tectonics and geochronology of the southern Omineca belt, British Columbia and Washington. *Tectonics*, 1988, 7: 181~212
- 35 Hetzel R, Passchier C W, Ring U, et al. Bivergent extension in orogenic belts—the Menderes Massif (southwestern Turkey). *Geology*, 1995, 23: 455~458[DOI]
- 36 Vandenberg L C, Lister G S. Structural analysis of basement tectonites from the Aegean metamorphic core complex of Ios, Cyclades, Greece. *Journal of Structural Geology*, 1996, 18: 1437~1454[DOI]
- 37 Fossen H, Tikoff B. The deformation matrix for simultaneous pure shear, simple shear, and volume change, and its application to transpression/transension tectonics. *Journal of Structural Geology*, 1993, 15: 413~422[DOI]
- 38 Tikoff B, Fossen H. Three-dimensional reference deformation and strain facies. *Journal of Structural Geology*, 1999, 21: 1497~1512[DOI]
- 39 Tikoff B, Fossen H. The limitations of three-dimensional kinematic vorticity analysis. *Journal of Structural Geology*, 1995, 17(12): 1771~1784[DOI]
- 40 Reston T J. The lower crust and the extension of the continental lithosphere: Kinematic analysis of BIRPS deep seismic data. *Tectonics*, 1990, 9: 1235~1248
- 41 McKenzie D P. Some remarks on the development of sediment basins. *Earth Planet Sci Lett*, 1978, 40: 25~32
- 42 Means W D, Hobbs B E, Lister G S, et al. Vorticity and non-coaxiality in progressive deformation. *Journal of Structural Geology*, 1980, 2: 371~378[DOI]
- 43 Bobyarchick A R. The eigenvalues of steady state flow in Mohr space. *Tectonophysics*, 1986, 122: 35~51[DOI]
- 44 Passchier C W, Urai J L. Vorticity and strain analysis using Mohr diagrams. *Journal of Structural Geology*, 1988, 10: 755~763[DOI]
- 45 Simpson C, De Paor D G. Strain and kinematic analysis in general shear zones. *Journal of Structural Geology*, 1993, 15: 1~20[DOI]
- 46 Zhang J, Zheng Y. Polar Mohr constructions for strain analysis in general shear zones. *Journal of Structural Geology*, 1997, 19: 745~748[DOI]
- 47 Tikoff B, Fossen H. Simultaneous pure and simple shear: The unified deformation matrix. *Tectonophysics*, 1993, 9: 47~76
- 48 Weijermars R. Taylor-mill analogues for patterns of flow and deformation in rocks. *Journal of Structural Geology*, 1998, 20: 77~92[DOI]
- 49 Weijermars R. The role of stress in ductile deformation. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13: 1061~1078[DOI]
- 50 Weijermars R. Progressive deformation of single layers under constantly oriented boundary stresses. *Journal of Structural Geology*, 1993, 15: 911~922[DOI]
- 51 Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89: 5835~5848
- 52 Price N J, Cosgrove J W. *Analysis of Geological Structures*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 502
- 53 Lister G S, Snoke A W. S-C mylonites. *Journal of Structural Geology*, 1984, 6: 617~638[DOI]
- 54 Passchier C W, Trouw R A. *Microtectonics*. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 1996. 289
- 55 Zheng Y, Wang T, Ma M, et al. Maximum effective moment criterion and the origin of low-angle normal faults. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26: 271~285[DOI]
- 56 郑亚东, 王士政, 王玉芳. 中蒙边界区新发现的特大型推覆构造及伸展变质核杂岩. *中国科学, B 辑*, 1990, (12): 1299~1305
- 57 Zheng Y, Zhang Q, Wang Y, et al. Great Jurassic thrust sheets in Beishan (North Mountains)-Gobi areas of China and southern Mongolia. *Journal of Structural Geology*, 1996, 18(9): 1111~1126[DOI]
- 58 Zheng Y, Zhang Q. The Yagan metamorphic core complex and extensional detachment fault in Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 7: 125~135
- 59 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(2): 143~146[DOI]
- 60 王涛, 郑亚东, Gehrels G E, 等. 南蒙微大陆存在的年代学证据: 亚干-翁奇·海尔罕核杂岩花岗岩质麻岩的锆石 U-Pb 年龄. *科学通报*, 46(17): 1220~1224
- 61 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(3): 273~280
- 62 White S H. Large strain deformation: Report on a Tectonic Studies Group discussion meeting held at Imperial College, London on 14 November 1979. *Journal of Structural Geology*, 1979, 1: 333~339
- 63 White S H, Burrows S E, Carreras J, et al. On mylonites in ductile shear zones. *Journal Structural Geology*, 1980, 2: 175~187[DOI]
- 64 Passchier C W. Geometric constrains on the development of shear bands in rocks. *Geologie en Mijnbouw*, 1991, 70: 203~211
- 65 Berthe D, Choukroune P, Jegouzo P. Orthogneiss, mylonite, and noncoaxial deformation of granite: The example of the South Armorican shear zone. *Journal of Structural Geology*, 1979, 2: 31~42
- 66 Blenkinsop T G, Treloar P J. Geometry, classification and kinematics of S-C and S-C' fabrics in the Mushandike area, Zimbabwe. *Journal of Structural Geology*, 1995, 17: 397~408[DOI]

- 67 Platt J P. Extensional crenulation cleavage. *Journal Structural Geology*, 1979, 1: 95
- 68 Platt J P, Vissers R L M. Extensional structures in anisotropic rocks. *Journal Structural Geology*, 1980, 2: 397~410[DOI]
- 69 Dennis A J, Secor D T. A model for the development of crenulations in shear zones with applications from the southern Appalachian Piedmont. *Journal of Structural Geology*, 1987, 9: 809~817[DOI]
- 70 Passchier C W. Flanking structures. *Journal of Structural Geology*, 2001, 23: 951~962[DOI]
- 71 Wang T, Zheng Y, Li T, et al. Structures of mylonitic granitoid plutons of the Yagan metamorphic core complex in the Sino-Mongolian boundary area-constraint for the kinematics and chronology of the MCC. *Prog Nat Sci*, 2001, 11: 766~771
- 72 Wang T, Zheng Y, Li T, et al. Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolian border in China and their implications for crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23: 715~729[DOI]
- 73 Wang T, Zheng Y, Li T, et al. Forceful emplacement of granitic plutons in an extensional tectonic setting: syn-kinematic plutons in the Yagan-Onch Hayrhan metamorphic core complex. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76: 81~88
- 74 Graham S A, Hendrix M S, Badarch G, et al. Sedimentary record of transition from contractile to extensional tectonics, Mesozoic, southern Mongolia. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 1996, 28: 68
- 75 郑亚东, 王玉芳. 内蒙亚干变质核杂岩剪切作用类型的初步分析. *地学前缘*, 1995, 2(1-2): 245~246
- 76 Nanna S S, Fry N. A comparison of methods of strain determination in rocks from southwest Dyfed (Pembrokeshire) and adjacent areas. *Journal of Structural Geology*, 1979, 1: 155~163
- 77 Shea W T Jr, Kronenberg A K. Strength and anisotropy of foliated rocks with varied mica contents. *Journal of Structural Geology*, 1993, 15: 1097~1121[DOI]