

中蒙边界早白垩世不对称花岗岩穹隆的伸展时限、
剪切作用类型和区域构造意义

杜 灿^{1,2}, 郭 磊¹, 王 涛¹, 李建波³, 童 英¹, NARANTSETSEG Tserendash⁴,
ENKH-ORSHIKH Orsoo⁴, 张 磊¹

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013; 4. 蒙古科学院 地质研究所, 蒙古 乌兰巴托 15160)

摘 要: 东北亚大陆于晚中生代时期发生了大规模地壳伸展, 发育变质核杂岩和不对称花岗岩穹隆, 其伸展剪切机制一直是构造研究的重要内容之一。中蒙边界东南段沿北东向展布了罕乌拉、纳兰和宝德尔等3个不对称花岗岩伸展穹隆, 主体均为晚中生代花岗岩侵入体, 岩体西北缘发育韧性剪切(糜棱岩)带, 并被后期高角度正断层所围限, 整体为穹隆状。根据罕乌拉穹隆韧性剪切带内强变形中粗粒钾长花岗岩(133±1 Ma)和弱变形细粒花岗岩(128±2 Ma)的构造关系及其锆石 U-Pb 年龄, 推测该穹隆内岩体可能为同伸展岩体, 韧性伸展时间在 133 Ma 之后并持续至 128 Ma 或更晚, 与同区其他穹隆发育时限相同。笔者用 R_f/ϕ 方法测量了3个穹隆剪切带内糜棱岩中长石的有限应变轴率, 利用 Hsu 图解获得其应变类型为平面压扁应变($k=0.5$)。用长石板莫尔圆法、刚性颗粒网法和 C 轴石英组构法估算了韧性剪切的长期变形过程, 得到糜棱岩的平均运动学涡度值为 0.68~0.74, 表明这些穹隆的韧性剪切作用主要是纯剪切和简单剪切分量几乎相等的一般剪切作用。石英斜向条带法测得的韧性变形后期的运动学涡度值为 0.87~0.99, 平均值为 0.93, 表明韧性变形由一般剪切为主转变为简单剪切为主。然而, 由 C' 法(伸展褶皱理法)获得的运动学涡度值为 0.53~0.74, 平均为 0.68, 表明递进变形中的晚期增量应变主要是纯剪切, 可能指示了后期同伸展岩浆持续上涌导致穹隆整体抬升和剥露。估算结果表明, 这些穹隆的韧性剪切拆离带由一般剪切作用形成, 前期单剪组分逐渐增加, 后期因岩浆上涌和整体剥露抬升, 简单剪切分量降低, 以纯剪切作用为主。对比同时期早白垩世东北亚地区其他伸展穹隆和变质核杂岩, 认为此种剪切模式可能具普遍意义。

关键词: 花岗岩穹隆; 糜棱岩; 应变测量; 运动学涡度; 中蒙边界

中图分类号: P588.12⁺1; P542 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2022)01-0018-19

Timing of extention, type of shearing and regional tectonic implications of
the Early Cretaceous asymmetric granitic domes in China-Mongolia
border area

DU Can^{1,2}, GUO Lei¹, WANG Tao¹, LI Jian-bo³, TONG Ying¹, NARANTSETSEG Tserendash⁴,
ENKH-ORSHIKH Orsoo⁴ and ZHANG Lei¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. School of Geosciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 4. Institute of Geology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar 15160, Mongolia)

收稿日期: 2021-04-12; 接受日期: 2021-12-02; 编辑: 郝艳丽
基金项目: 国家自然科学基金项目(41972225); 国家重点研发计划(2017YFC0601305); 中国地质调查局项目(DD20190001, DD20190004)
作者简介: 杜 灿(1996-), 女, 硕士研究生, 构造地质学专业, E-mail: d15611611933@126.com; 通讯作者: 郭 磊(1981-), 男, 博士, 副研究员, 构造地质学专业, E-mail: guolei_cn@sina.com。
网络首发时间: 2021-12-14; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20211210.1841.002.html>

Abstract: Large-scale crustal extension happened in Northeast Asia continent during the Late Mesozoic, represented by metamorphic core complex and asymmetric granite domes. The extensional shearing mechanism has always been one of the important issues in tectonic research. Three asymmetric extensional granitic domes, including Hanwula, Nalan and Baoder, are spread along the southeast section of the China-Mongolia boundary in the NE direction. The main body of these domes are the Late Mesozoic granitic intrusions. Ductile shear (mylonitic) zones are developed in the northwest margin of these domes, which are confined by the later high-angle normal faults. According to the structural relationships between the strongly deformed medium coarse-grain K-feldspar granite (133 ± 1 Ma) and the weakly deformed fine-grain granite (128 ± 2 Ma) in the ductile shear zone of the Hanwula dome and their zircon U-Pb ages, it is inferred that these granites may be syn-extensional intrusions, and the timing of ductile extension is after 133 Ma and lasts to 128 Ma or later, which is the same as the development time of other domes in the NE Asia. We use R_f/ϕ method to measure the finite strain axial rates of feldspar in mylonites from the three ductile shears, Hsu diagram shows that the strain type is plane-flattening strain type (average $k=0.5$). Polar Mohr circle method, the rigid particle network method and the C -axis quartz fabric method are used to estimate the long-term deformation processes of ductile shearing. The methods gave average kinematic vorticity values of $0.68 \sim 0.74$ of mylonites, which indicated that the ductile shearing of these domes was dominated by general shear with nearly equal pure shear and simple shear components. Kinematic vorticity values of the later stage of ductile deformation obtained by the quartz diagonal strip method are $0.87 \sim 0.99$ with an average value of 0.93 , which indicated that the ductile deformation converted from general-shear-dominated to simple-shear-dominated. However, kinematic vorticity values obtained by the C' (stretch fold cleavage) method are $0.53 \sim 0.74$ with an average of 0.68 , which indicated that the latest incremental strain in progressive deformation process is mainly pure shear. The results show that the ductile shear detachment zones of these domes are mainly formed by general shear. In the early stage, the simple shear component gradually increased. In the later stage, the simple shear component decreased due to the processes of magma upwelling and overall exhumation. The shear deformation is dominated by pure shear. Compared with other extensional domes and metamorphic core complexes in NE Asia at the same period, this kind of shearing pattern may be general significance.

Key words: granitic dome; mylonite; strain measurement; kinematic vorticity; China-Mongolia border

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41972225); Project of National Key Research and Development (2017YFC0601305); Project of China Geological Survey (DD20190001, DD20190004)

晚中生代是东北亚地质演化和地壳变形的关键时期。这一时期东北亚最突出的特征是大规模的地壳伸展 (Wang *et al.*, 2011, 2012), 表现为广泛发育变质核杂岩、变质/岩浆穹隆、伸展盆地、正断层等 (Ritts *et al.*, 2001; Graham *et al.*, 2001; Ren *et al.*, 2002; Meng *et al.*, 2003; Johnson, 2004; Lin and Wang, 2006; Daoudene *et al.*, 2009; Charles *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013; Lin and Wei, 2020) 以及大规模的花岗质岩浆岩 (多为 A 型花岗岩; Wu *et al.*, 2005a, 2005b, 2011a, 2011b; Wang *et al.*, 2015)。此外, 在伸展省的中部地区 (二连浩特附近、蒙古中部和南部) 发现了另一种伸展构造——不对称花岗岩伸展穹隆 (Castro and Fernández, 1998 及其所引文献)。不对称伸展花岗

岩穹隆, 以前称为岩浆核杂岩 (Liu *et al.*, 1997) 或同减薄岩体 (Daoudene *et al.*, 2012), 是指在岩浆形成、上升、定位和最终形成穹隆的过程中, 区域伸展拆离形成的穹状隆起。不对称伸展花岗岩穹隆由主体的花岗岩体和沿深成杂岩体边缘的滑脱断裂带组成, 主拆离断层仅在一侧发育, 其他两侧微弱变形或不变形。此外, 花岗质岩体为同构造岩体, 其变形程度由未变形的核部向边缘逐渐增大 (Daoudene *et al.*, 2012; 郭磊等, 2015)。对不对称伸展花岗岩穹隆的研究可以获得用于区域构造动力学分析的中、下地壳的流变信息 (Chen *et al.*, 1990; 许志琴等, 2006; Zhang *et al.*, 2020), 然而, 目前其地质背景和剪切机制尚未得到很好的研究。

近年来, 中蒙边界东南段陆续新发现了一系列呈

带状展布的不对称花岗岩穹隆，以往的研究多关注于其构造样式和岩浆来源(程银行等, 2014; 郭磊等, 2015)。本文从限定部分穹隆的韧性变形时限入手, 进行了有限应变测量和运动学涡度估算, 进而讨论这些穹隆韧性剪切带的变形机制和演变。这将有助于更好地理解中上地壳的流变信息及与上述花岗岩穹隆相关的韧性剪切带所反映的穹隆变形过程。

1 构造背景

研究区位于内蒙古东乌旗、苏尼特左旗北部中蒙边界一带, 构造位置属蒙古-鄂霍茨克构造带和阴山-燕山构造带夹着的蒙古高原地区, 是东北亚巨量区域伸展的核心区域(图1)。该区晚古生代经

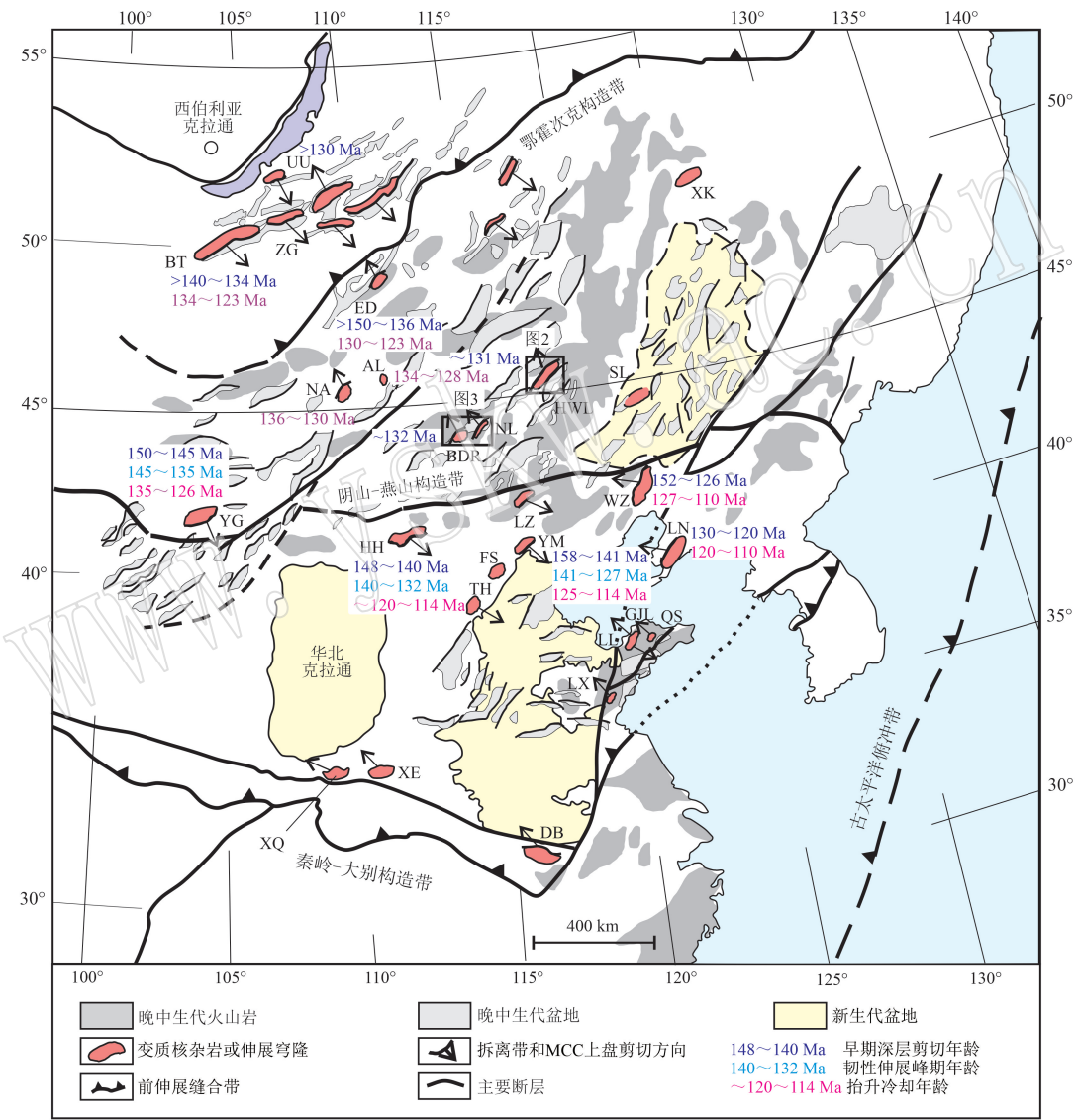


图 1 研究区构造背景及伸展穹隆构造图(修改自 Wang *et al.*, 2012; Lin and Wei, 2020)

Fig. 1 Tectonic map and structural map of extension domes in study area (modified from Wang *et al.*, 2012; Lin and Wei, 2020)

UU—Ulan-Ude; BT—Buteel; ZG—Zagan; ED—Ereendavaa; NA—Nartyn; AL—Altanshiree; BDR—宝德尔; HWL—罕乌拉; NL—纳兰; YG—亚干; HH—呼和浩特; LZ—楼子店; YM—云蒙山; FS—房山; TH—太行山; WZ—瓦子峪; SL—松辽; XK—新开岭; LN—辽南; LL—玲珑; LX—鲁西; XQ—小秦岭; XE—熊耳山; DB—大别山

UU—Ulan-Ude; BT—Buteel; ZG—Zagan; ED—Ereendavaa; NA—Nartyn; AL—Altanshiree; BDR—Baoder; HWL—Hanwula; NL—Narlan; YG—Yagan; HH—Hohhot; LZ—Louzidian; YM—Yunmengshan; FS—Fangshan; TH—Taihangshan; WZ—Waziyu; SL—Songliao; XK—Xinkailing; LN—Liaonan; LL—Linglong; LX—Luxi; XQ—Xiaoqinling; XE—Xiongershan; DB—Dabieshan

历了古亚洲洋的闭合以及华北板块与西伯利亚板块的最终拼贴等过程(Xiao *et al.*, 2003, 2018; Jian *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2013), 晚侏罗世—早白垩世, 陆内岩石圈大规模伸展并伴随有强烈的火山喷发及盆岭构造运动(Meng *et al.*, 2003; 李锦轶等, 2004; Wang *et al.*, 2011, 2012), 伸展构造形迹均为北东向。区内花岗质侵入岩十分发育, 形成时代多为晚古生代和晚中生代(Wang *et al.*, 2015)。研究区由北东至南西依次发育罕乌拉穹隆、纳兰穹隆及宝德尔穹隆(图 1), 其主体为早白垩世黑云母二长花岗岩及钾长花岗岩, 北东向延伸均超过 100 km, 岩体北西侧多为中新生代拗陷盆地。

2 穹隆构造组成及样品概况

罕乌拉穹隆、纳兰及宝德尔穹隆位于中蒙边境东乌旗及苏尼特左旗北部地区, 整体呈北东 30°~50°方向带状展布。野外调查表明花岗质岩浆于晚

中生代多期次侵入形成穹隆主体(程银行等, 2014; 童英等, 2017)。这些穹隆核部深成杂岩体由早白垩世黑云母二长花岗岩、含黑云母二长花岗岩、钾长石花岗岩和早期侵入的中晚侏罗世黑云母二长花岗岩和正长岩组成(图 2、图 3)。拆离断层带发育于岩体西北侧, 其他侧发育后期高角度正断层。穹隆上盘多位于蒙古境内, 为晚中生代盆地以及晚古生代岩浆-沉积杂岩。其中, 拆离断层带由糜棱岩带(图 4a)以及叠加其上的脆性断层组成, 主要发育于穹隆西北部, 剪切带走向与岩体形态密切相关, 出露长度约 30~100 km 不等。拆离断层带具典型岩石组合, 由剪切带底部至顶部依次发育花岗质糜棱岩、绿泥石化角砾岩、微角砾岩(图 4b)、断层泥等。其中绿泥石化角砾岩、微角砾岩中可见糜棱岩碎块, 剪切带后期被高角度正断层所切割, 指示花岗质岩体抬升剥露过程中先期韧性后期脆性的递进变形过程(郭磊等, 2015)。

剪切带大多延伸 30~100 km, 其产状与岩体形态

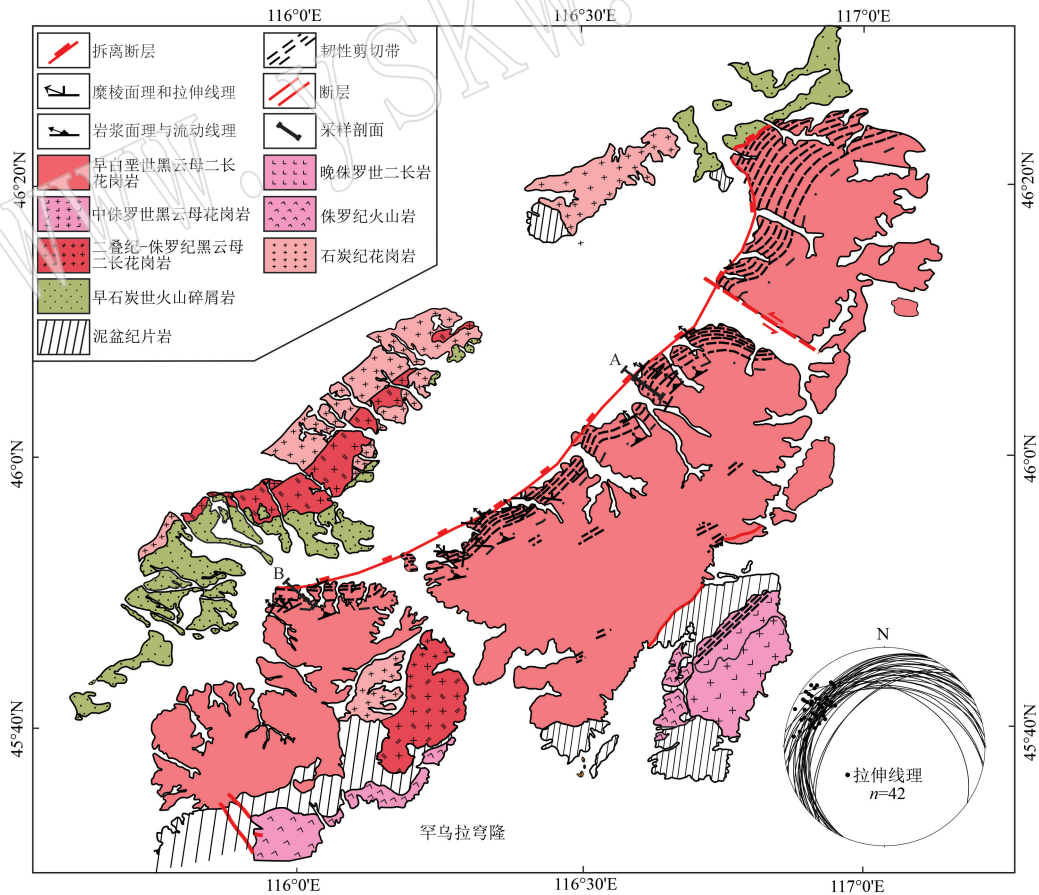


图 2 罕乌拉穹隆构造组成

Fig. 2 Structural composition of Hanwula extensional dome

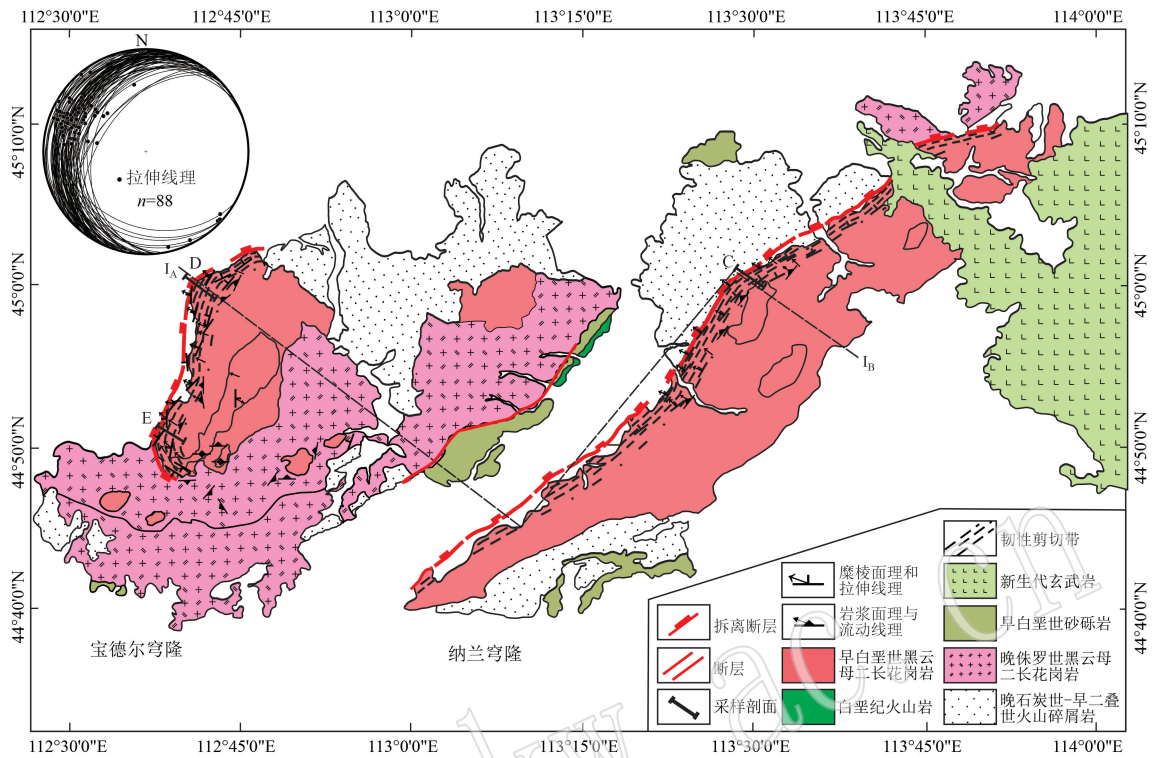


图 3 宝德尔和纳兰穹隆构造组成

Fig. 3 Structural compositions of Baoder and Narlan extensional domes

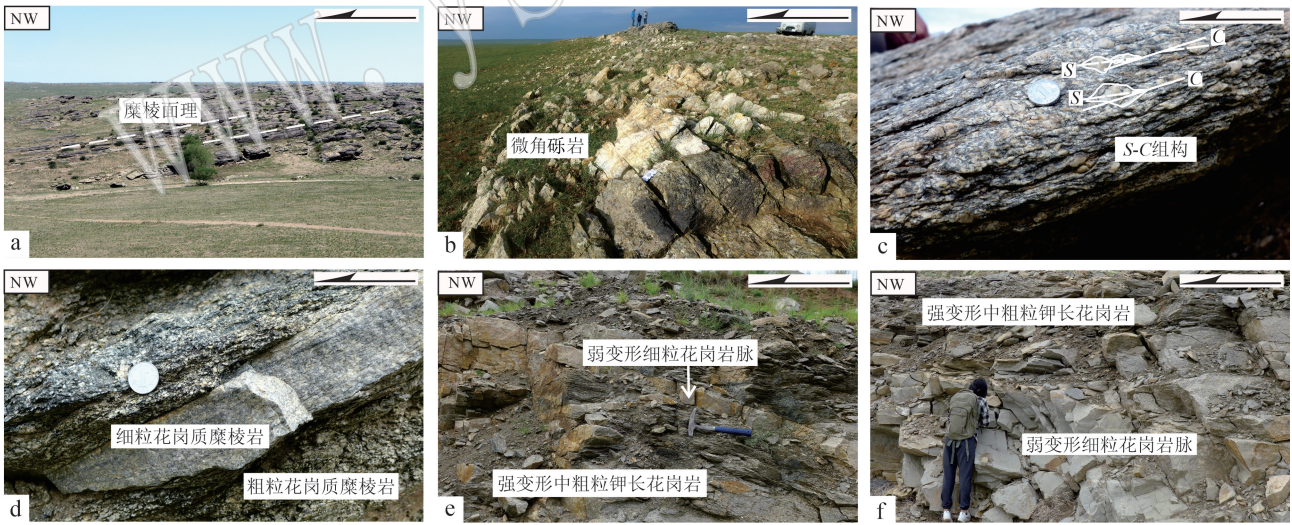


图 4 拆离断层带野外特征

Fig. 4 Field photographs of detachment fault zones

密切相关。沿着岩体西北边缘岩石面理发育，随剪切带走向发生变化。糜棱面理向沉积盆地侧缓倾，约 $290^{\circ} \sim 346^{\circ} \angle 10^{\circ} \sim 47^{\circ}$ ，平均产状为 $320^{\circ} \angle 25^{\circ}$ 。由韧性剪切带的南缘到北缘，糜棱面理的产状总体上具有越来越缓的趋势。此外，韧性剪切带发育透入性北西-南东向的拉伸线理，拉伸线理产状 $285^{\circ} \sim$

$321^{\circ} \angle 7^{\circ} \sim 38^{\circ}$ ，平均产状 $305^{\circ} \angle 21^{\circ}$ (图 2、图 3)。弱变形的含黑云母二长花岗岩发育近水平节理，长石定向排列形成流动线理，其走向与剪切带内拉伸线理平行，核部岩体西北缘与韧性剪切带之间连续过渡。糜棱岩化的黑云母二长花岗岩岩体发育 S-C 组构 (图 4c)，指示上盘向北西的伸展剪切。

3 构造年代学

为了确定穹隆韧性剪切带的变形时限,考察了穹隆剪切带中不同变形程度的花岗质糜棱岩及其交切关系。其中,在罕乌拉穹隆剪切带内发现了一处较好的露头,变形较强的中粗粒黑云母钾长花岗岩(发育明显的糜棱面理和拉伸线理)被弱变形(发育微弱面理和线理)的细粒花岗岩小角度斜切(图4d、4e),早期变形形成的糜棱面理被细粒花岗岩脉所切割,但岩脉本身发育与围岩一致的糜棱面理,指示该岩脉可能为同构造侵位。细粒花岗岩脉为邻近一小型细粒花岗岩株的一部分(图4f),该岩株也发生了变形,发育微弱面理与拉伸线理,与剪切带总体一致(图2)。分别对强变形糜棱岩化中粗粒黑云母钾长花岗岩(N180717-9, N46°03′54″, E116°36′44″)和弱变形细粒花岗岩(N180717-11, N46°03′54″, E116°36′44″)这两种不同变形程度的花岗岩进行了采样,采用LA-ICP-MS进行了锆石U-Pb年代学测试,以期限定罕乌拉穹隆韧性变形的时限。

3.1 测年方法

锆石U-Pb同位素定年和微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用LA-ICP-MS同时分析完成,详细的仪器参数和分析流程见Zong等(2017)。GeolasPro激光剥蚀系统由COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和MicroLas光学系统组成,ICP-MS型号为Agilent 7700e。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入ICP之前通过一个T型接头混合,激光剥蚀系统配置有信号平滑装置(Hu *et al.*, 2015)。本次分析的激光束斑和频率分别为32 μm 和5 Hz。U-Pb同位素定年和微量元素含量处理中采用锆石标准91500和玻璃标准物质NIST610作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。每个时间分辨分析数据包括大约20~30 s空白信号和50 s样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及U-Pb同位素比值和年龄计算)采用软件ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008)完成。锆石样品的U-Pb年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算采用Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)完成。

3.2 测年结果

锆石U-Pb年代学测试数据和结果分别见表1

和图5。强变形中粗粒钾长花岗岩样品(N18717-9)与弱变形细粒花岗岩(N18717-11)中锆石均为无色透明,大小100~300 μm 不等,长宽比3:1~1:1,绝大部分发育振荡环带(图5)。Th/U值变化范围为0.23~1.88,这种比值特征暗示锆石的岩浆来源。其中,强变形花岗岩样品(N18717-9)所测16个锆石颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄投点均落在谐和线及其附近区域(图5a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于136~129 Ma之间,加权平均值为 133 ± 1 Ma(MSWD=3.2),时代为早白垩世,代表了中粗粒钾长花岗岩的侵位年龄。弱变形细粒花岗岩(N18717-11)所测19个锆石颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄投点均落在谐和线及其附近区域(图5b),可以分为两组:第1组有6个测点,年龄介于329~222 Ma之间,为捕获锆石的年龄;第2组有13个测点,构成最年轻且集中的主锆石群, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 128 ± 2 Ma(MSWD=3.3),时代也为早白垩世,略晚于中粗粒钾长花岗岩,代表了细粒花岗岩的侵位年龄。

4 显微构造、有限应变测量及运动学涡度

4.1 显微构造

糜棱岩中长英质矿物强烈变形,其中长石多呈透镜状、眼球状、带状,“ σ ”和“ δ ”旋转残斑均有发育,具定向性,多与糜棱面理(C面理)呈锐角相交,形成S-C组构。石英变形更为强烈且颗粒形态多变,呈不规则颗粒、拔丝状、带状等,具波状消光,矿物拉伸线理平行于或近似平行于剪切带C面理。由剪切带底部至顶部,长石不对称构造逐渐明显。剪切带底部矿物动态重结晶型式组合为长石部分亚颗粒旋转重结晶(SR)、石英颗粒边界迁移重结晶(GBM)和亚颗粒旋转重结晶(SR),至顶部转化为长石膨凸式动态重结晶(BLG)、石英亚颗粒旋转重结晶(SR)及部分颗粒边界迁移重结晶(GBM)方式。剪切带内发育大量韧性变形组构,如S-C组构(图6a)、斜向石英条带(图6c)及核幔构造(图6b)等,剪切带中上部可见长石脆性破裂(图6f)、伸展褶劈理(图6d)、“云母鱼”(图6e)等脆性变形组构,其中伸展褶劈理小角度切割糜棱面理。

4.2 有限应变测量

为了确定该区域的应变类型和剪切类型,并讨论这些穹隆韧性剪切带的变形机制和演化,本文进

表 1 罕乌拉花岗岩穹隆韧性剪切带内强变形与弱变形花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of strongly deformed and weakly deformed granites from ductile shear zone of Hanwula granitic dome

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	²³² Th	²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ
N180717-9-01	1 115.8	1 567.1	0.71	0.131 6	0.005 3	0.020 7	0.000 2	1	126	5	20
N180717-9-02	91.3	404.9	0.23	0.143 4	0.007 2	0.020 6	0.000 3	2	136	6	233
N180717-9-03	1 956.2	1 765.8	1.11	0.148 0	0.007 2	0.021 4	0.000 2	1	140	6	209
N180717-9-04	1 182.0	1 165.9	1.01	0.147 9	0.004 6	0.021 1	0.000 2	1	140	4	232
N180717-9-05	2 053.0	1 605.4	1.28	0.140 5	0.005 0	0.021 3	0.000 2	1	134	4	100
N180717-9-06	1 081.1	1 437.0	0.75	0.136 8	0.012 0	0.021 2	0.000 2	1	130	11	76
N180717-9-07	163.5	284.4	0.57	0.135 3	0.007 9	0.020 2	0.000 3	2	129	7	195
N180717-9-08	1 883.3	1 663.1	1.13	0.143 0	0.004 8	0.020 6	0.000 2	1	136	4	220
N180717-9-09	2 655.3	2 035.5	1.30	0.154 2	0.005 6	0.020 9	0.000 2	1	146	5	346
N180717-9-10	261.1	768.3	0.34	0.137 3	0.004 7	0.020 5	0.000 2	1	131	4	117
N180717-9-11	626.0	1 462.3	0.43	0.133 0	0.005 6	0.020 4	0.000 2	1	127	5	58
N180717-9-12	1 582.5	1 603.0	0.99	0.149 6	0.016 1	0.020 7	0.000 2	1	142	14	165
N180717-9-13	515.1	1 343.6	0.38	0.153 5	0.004 7	0.021 1	0.000 2	1	145	4	306
N180717-9-14	328.6	720.3	0.46	0.154 7	0.005 1	0.021 2	0.000 3	2	146	5	332
N180717-9-15	229.1	837.6	0.27	0.141 6	0.005 3	0.020 2	0.000 2	1	135	5	256
N180717-9-16	163.8	557.8	0.29	0.148 2	0.005 9	0.020 8	0.000 2	1	140	5	283
N180717-11-01	3 178.6	1 794.3	1.77	0.142 4	0.004 7	0.019 8	0.000 2	1	135	4	272
N180717-11-02	2 376.4	1 521.5	1.56	0.131 3	0.006 1	0.019 6	0.000 2	1	125	5	109
N180717-11-03	1 935.3	1 410.0	1.37	0.140 1	0.005 2	0.020 5	0.000 2	1	133	5	161
N180717-11-04	2 731.9	1 976.8	1.38	0.144 9	0.005 6	0.019 7	0.000 2	2	137	5	343
N180717-11-05	2 205.2	1 491.9	1.48	0.143 4	0.005 2	0.020 2	0.000 2	1	136	5	256
N180717-11-06	1 775.6	1 267.4	1.40	0.133 5	0.004 9	0.020 8	0.000 2	1	127	4	13
N180717-11-07	3 090.3	1 645.8	1.88	0.144 4	0.004 3	0.019 9	0.000 2	1	137	4	283
N180717-11-08	557.5	654.1	0.85	0.128 9	0.005 5	0.019 8	0.000 2	1	123	5	54
N180717-11-09	127.2	221.2	0.58	0.053 3	0.002 6	0.046 4	0.000 6	3	299	10	343
N180717-11-10	44.0	47.5	0.93	0.361 8	0.028 0	0.047 1	0.001 0	6	314	21	532
N180717-11-11	115.9	164.5	0.70	0.133 7	0.009 6	0.019 8	0.000 4	2	127	9	187
N180717-11-12	26.7	44.7	0.60	0.399 4	0.025 8	0.050 4	0.001 3	8	341	19	613
N180717-11-13	82.2	96.6	0.85	0.132 2	0.011 6	0.020 2	0.000 4	3	126	10	189
N180717-11-14	283.2	897.2	0.32	0.248 2	0.006 7	0.035 1	0.000 3	2	225	5	239
N180717-11-15	57.7	59.2	0.97	0.322 3	0.024 6	0.044 6	0.001 1	7	284	19	467
N180717-11-16	890.9	765.9	1.16	0.148 5	0.005 2	0.020 6	0.000 2	1	141	5	283
N180717-11-17	89.6	122.9	0.73	0.144 7	0.011 0	0.019 6	0.000 4	2	137	10	369
N180717-11-18	20.5	59.7	0.34	0.128 7	0.015 5	0.020 4	0.000 5	3	123	14	143
N180717-11-19	635.6	751.5	0.85	0.378 0	0.009 4	0.052 4	0.000 4	3	326	7	283

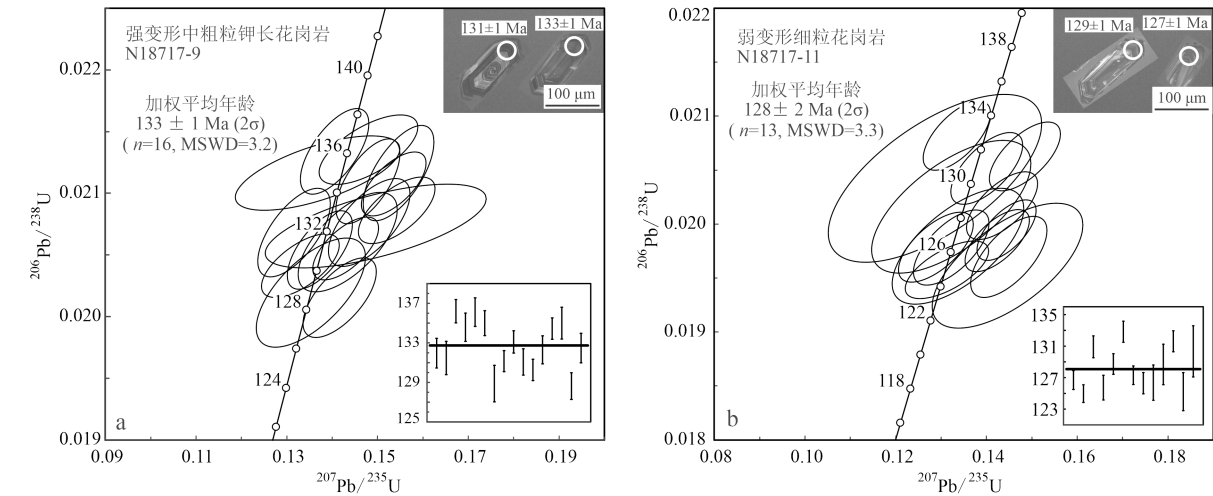


图 5 罕乌拉穹隆韧性剪切带内强变形及弱变形花岗岩锆石 U-Pb 谐和图及典型锆石 CL 图像

Fig. 5 Typical zircon CL images and LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams of the strongly and weakly deformed granites in the ductile shear zone of Hanwula dome

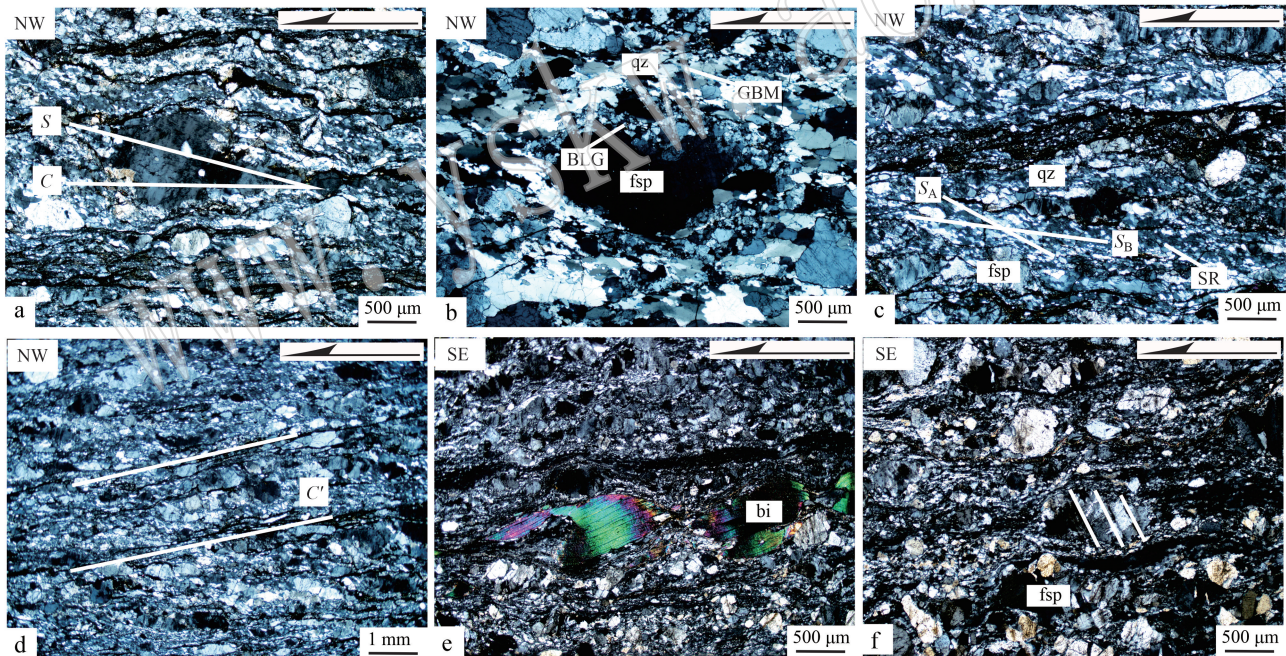


图 6 穹隆韧性拆离带花岗质糜棱岩显微构造图

Fig. 6 Microstructures of granitic mylonites of the ductile shear zone of domes

qz—石英；fsp—长石；bi—黑云母；S—S 面理；C—糜棱面理；S_A—石英主面理；S_B—石英斜交面理；C'—伸展褶劈理；BLG—膨凸式重结晶；SR—亚颗粒旋转重结晶；GBM—颗粒边界迁移重结晶

qz—quartz；fsp—feldspar；bi—biotite；S—S-foliation；C—mylonitic foliation；S_A—quartz primary foliation；S_B—quartz diagonal foliation；C'—extensional fold cleavage；BLG—bulging recrystallization；SR—subgrain rotating recrystallization；GBM—grain boundary migration recrystallization

行了有限应变测量和运动学涡度估计。在罕乌拉、纳兰及宝德尔伸展穹隆中，由韧性剪切带底部至顶部进行采样，共采集 5 个剖面 25 块定向样品用于测量(剖面位置见图 2 和图 3)，其中包括罕乌拉韧性剪切带剖面 A、剖面 B，即 N180717 (N46°03′36″~N46°09′11″，E116°36′15″~E116°44′34″) 和 M16527 (N45°49′3.6″~N45°49′20.4″，E115°57′30.5″~E115°58′36.7″) 剖面，纳兰韧性剪切带剖面 C，即

M16604(N45°0′13.7″~N45°0′31″, E113°29′40.7″~E113°29′53.5″)剖面,宝德尔韧性剪切带剖面 D、剖面 E,即 M16607(N44°58′56.5″~N44°59′15.3″, E112°42′20.4″~E112°42′45.5″)和 H7(N44°49′28.5″~N44°50′15.8″, E112°40′16.4″~E112°41′7.1″)两个剖面。以上样品均为花岗质糜棱岩。

将样品切面做抛光处理,平行拉伸线理和垂直糜棱面理作为 XZ 面,垂直拉伸线理和糜棱面理作为 YZ 面(图 7)。基于样品中石英多因强变形而颗

粒细小、形态不定使测量不易,且无法消除石英颗粒边界滑动对应变的影响,在光面上选取应变标志体进行了应变测量。长石颗粒较粗大且含量高,近似可看作椭圆形,且粒度分布基本均匀,在中低级韧性变形中鲜少有颗粒边界滑动的现象,因此本文选用长石作为应变标志体。在选取样品时,尽量选择变形岩体内部,变形均一的岩体中的长石作为研究对象,其近于随机分布,而非泊松分布(黄建军, 1994; 李德伦等, 2001; 梁琛岳等, 2011)。

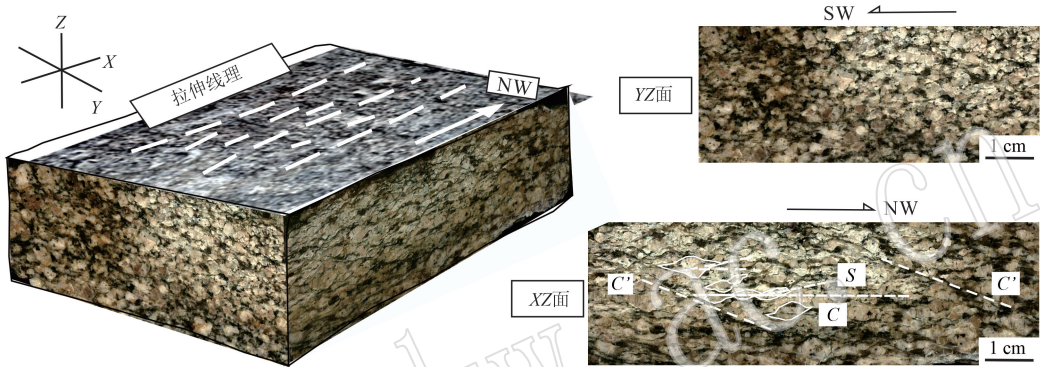


图 7 穹隆韧性剪切带内花岗质糜棱岩切面图
Fig. 7 Schematic diagram of granitic mylonites slice of the ductile shear zone of dome

测量岩石有限应变的方法较多,常用的主要有长短轴法、 $R_v\phi$ 法、Fry 法等(郑亚东等, 1985; 王云斌等, 2004)。其中长短轴法需利用原始球形或近球形标志体测量应变; Fry 法要求标志体中心在变形前各向同性分布,使各标志体中心间的距离都相等;而 $R_v\phi$ 法要求原标志体方位随机分布,对其形状、粒度和是否均匀分布并无严格要求。因此,本文选用的 $R_v\phi$ 法对长石进行有限应变测量更为理想。

对糜棱岩样品的 XZ 及 YZ 面进行了长石标志体的长短轴及长轴取向测量,每一定向样品所测量的长石标志体数目平均为 50 个。测量数据经 Ellip-stat 软件处理,可得每一样品的有限应变椭圆轴比 R_{s-xz} 、 R_{s-yz} 。根据所得数据求取弗林指数 K 值为 0.36~0.59,平均值为 0.5,指示糜棱岩的应变类型是平面压扁应变。劳德指数的 v 值为 0.49~1,平均值为 0.83。XZ 平面上轴向应变率的 R_s 值为 1.91~3.35,平均值为 2.33,应变强度的 E_s 值为 0.53~0.95,平均值为 0.66。将上述数据投到 Hsu 图解中,可见在不同剖面中随着糜棱岩 R_{s-xz} 值的增大,应变强度从剪切带底部向顶部逐渐增强(图 8)。

4.3 运动学涡度

运动学涡度 W_k 原指一个参考点瞬时旋转相对

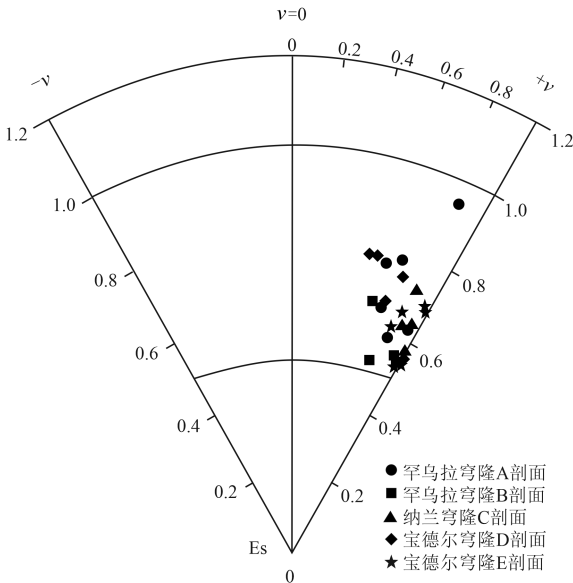


图 8 糜棱岩有限应变测量 Hsu 图解(据 Hsu, 1966)
Fig. 8 Hsu diagram of finite strain measurement for mylonite (Hsu, 1966)

瞬时拉伸的比率(Means *et al.*, 1980),自 20 世纪 70 年代末被引入地质学领域,应用于应变非共轴程度的确定,可度量韧性变形带中纯剪切和简单剪切组分的相对大小,其简单的定义为 $W_k = \cos\alpha$ (α 指双曲流两特征方向夹角)(Bobyarchick, 1986),其中纯

剪切为共轴变形, XZ 面内两流脊间夹角呈 90° , 即 $W_k = 0$; 简单剪切为非共轴变形, 主变形面内两流脊间夹角为 0 , 即 $W_k = 1$ 。由纯剪切和简单剪切形成的一般剪切 (Zhang and Zheng, 1997), 两非旋转方向间夹角介于 $0 \sim 90^\circ$ 之间, 则 W_k 介于 0 和 1 之间, 且以 $\alpha = 45^\circ$ 、 $W_k = 0.71$ 为纯剪切和简单剪切的分界 (Forte and Bailey, 2007)。

涡度为瞬时概念, 指变形历史中的某一阶段的剪切状态, 除稳定递进变形外, 在剪切过程中并不是恒定值 (郑亚东等, 2008)。涡度也可用瞬时缩短轴 (ISA_3) 或最大主应力轴 (σ_1) 方向、有限应变、临界形态因子等形式来定义, 表征不同状态下的运动学涡度 (Passchier, 1988; Wallis, 1992, 1995; Simpson and De Paor, 1993)。目前涡度计算多数假定为平面应变, Y 方向为稳态单向流动或无变形 (Weijermars, 1991, 1998)。本文采用多种运动学涡度计算方法对罕乌拉岩浆穹隆、纳兰穹隆及宝德尔穹隆中韧性剪切带演化予以约束。

4.3.1 长石极莫尔圆法

糜棱岩样品中, 长石不对称结构发育, 其中的

碎斑系多为 σ 型, 适于用应变椭圆的长短轴比和最大拉伸方向与剪切带夹角编制极摩尔圆, 从而获得两特征向量的夹角, 通过 $W_k = \cos \alpha$ 求得韧性剪切带运动学涡度 (Simpson and De Paor, 1993; 张进江等, 1997; 郑亚东等, 2008)。长石的长短轴比 R_s 、应变椭圆长轴与剪切边界夹角 β 由 R_t/ϕ 法获得 (图 9a)。由样品 N180717-21.1 和 H7-16 所绘制的极莫尔圆 (图 9) 在 XZ 面上有限应变椭圆轴比 R_s 及 β 分别为 2.82 、 15° 和 2.28 、 13° , 由此所得的 α 角分别是 41° 和 48° , 即样品 N180717-21.1 的运动学涡度值为 0.75 , 样品 H7-16 的运动学涡度值为 0.67 (表 2)。

运用此方法可知, 罕乌拉穹隆中由长石标志体所得的运动学涡度 $W_m = 0.64 \sim 0.89$, 平均值为 0.76 ; 纳兰穹隆中 $W_m = 0.59 \sim 0.80$, 平均值为 0.69 ; 宝德尔穹隆中 $W_m = 0.62 \sim 0.84$, 平均值为 0.73 (表 2)。通过长石极摩尔圆法获得的是糜棱面理和拉伸线理形成时的运动学涡度值, 代表岩石变形过程中的总体应变, 具有最长时效性。

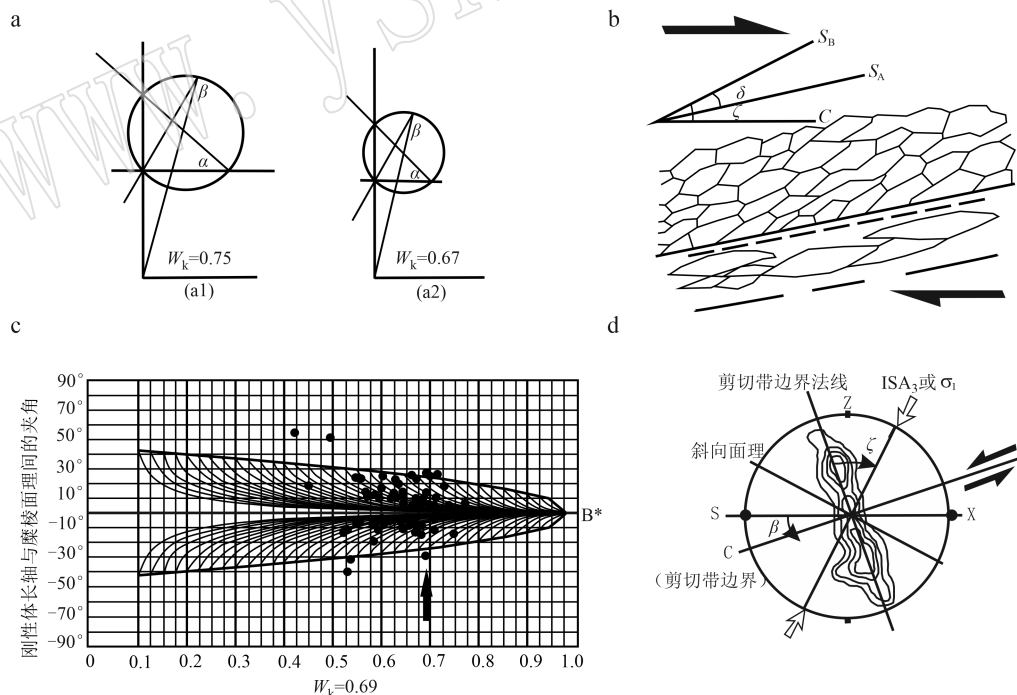


图 9 运动学涡度计算方法示意图

Fig. 9 Schematic diagrams of kinematic vorticity calculation methods

a—极莫尔圆法示意图 (a1. N180717-21.1 样品; a2. H7-16 样品); b—石英斜交面理 S_B 、主面理 S_A 与剪切带边界关系图 (据 Xypolias, 2009); c—刚性颗粒网求解运动学涡度图解 (N180717-19.1 样品); d—石英光轴组构与 S-C 组构间的关系 (据 Xypolias and Koukouvelas, 2001)

a—schematic diagram of polar Mohr's circle method (a1. sample N180717-21.1; a2. sample H7-16); b—diagram of oblique foliation S_B , main foliation S_A and boundary of shear zone (according to Xypolias, 2009); c—diagram of kinematic vorticity solved by rigid particle network (sample N180717-19.1); d—relationship between quartz optical axis fabric and S-C fabric (according to Xypolias and Koukouvelas, 2001)

表 2 糜棱岩应变测量及运动学涡度值统计表
Table 2 Strain measurements and kinematic vorticities of mylonites

样品号	R_{s-xz}	R_{s-yz}	k	E_s	长石极莫尔 圆法 $W_m(\beta)$	石英 C 轴组 构法 $W_m(\beta)$	刚性颗粒法 W_m	石英斜向条带 法 $W_k(\delta+\beta)$	C' 法 $W_n(\varepsilon)$
N180717-16. 1	3. 35	3. 07	0. 36	0. 95	0. 71(11)	0. 81(15)	0. 83	0. 87(30)	0. 74(11)
N180717-17. 2	2. 17	2. 14	0. 47	0. 63	0. 75(18)		0. 67	0. 99(42)	0. 69(13)
N180717-19. 1	2. 13	1. 98	0. 54	0. 59	0. 74(16)	0. 71(16)	0. 69	0. 90(32)	0. 67(14)
N180717-19. 2	2. 20	2. 02	0. 54	0. 61	0. 64(17)	0. 59(14)	0. 66	0. 94(35)	0. 64(15)
N180717-20. 2	2. 39	2. 07	0. 56	0. 66	0. 78(20)		0. 70	0. 93(34)	0. 72(12)
N180717-21. 1	2. 82	2. 41	0. 49	0. 79	0. 75(15)	0. 66(13)	0. 78	0. 94(35)	0. 74(11)
M16527-7	2. 5	2. 08	0. 58	0. 68	0. 89(20)	0. 80(18)	0. 78	0. 98(39)	0. 72(12)
M16527-1. 2	2. 03	1. 98	0. 51	0. 57	0. 74(24)	0. 63(15)	0. 61	0. 96(37)	0. 69(13)
M16527-5	1. 92	1. 94	0. 51	0. 54	0. 83(27)		0. 66		
M16527-6	1. 99	1. 83	0. 59	0. 53	0. 79(23)		0. 65	0. 95(36)	0. 59(17)
M16604-11. 2	2. 22	2. 16	0. 47	0. 64	0. 75(26)		0. 75	0. 99(32)	0. 64(15)
M16604-12. 2	2. 49	2. 32	0. 46	0. 72	0. 80(19)		0. 77	0. 91(33)	0. 69(13)
M16604-12. 1	2. 22	2. 09	0. 50	0. 63	0. 59(16)		0. 67	0. 93(34)	0. 72(12)
M16604-10. 2	1. 99	2. 05	0. 47	0. 57	0. 62(23)		0. 60	0. 91(33)	0. 53(19)
M16607-20. 2	2. 90	2. 21	0. 59	0. 78	0. 62(10)	0. 61(11)	0. 79	0. 95(36)	0. 72(12)
M16607-19. 2	2. 85	2. 26	0. 56	0. 78	0. 69(12)		0. 79		0. 69(13)
M16607-17	2. 62	2. 32	0. 48	0. 74	0. 72(14)		0. 76	0. 88(31)	0. 67(14)
M16607-16	2. 46	2. 11	0. 55	0. 68	0. 71(14)	0. 63(13)	0. 72	0. 90(32)	0. 62(16)
M16607-15	1. 93	2. 09	0. 44	0. 57	0. 67(16)	0. 67(16)	0. 67	0. 90(32)	0. 67(14)
H7-18	2. 35	2. 3	0. 44	0. 69	0. 74(15)	0. 61(13)	0. 71		
H7-17	2. 33	2. 15	0. 50	0. 66	0. 77(18)		0. 70	0. 95(36)	0. 74(11)
H7-16	2. 28	2. 29	0. 43	0. 68	0. 67(13)	0. 74(17)	0. 72	0. 96(37)	0. 74(11)
H7-15	2. 22	2. 06	0. 53	0. 62	0. 82(13)		0. 72		0. 62(16)
H7-14	1. 96	2. 05	0. 47	0. 57	0. 83(23)	0. 75(20)	0. 69	0. 97(38)	0. 69(13)
H7-13	1. 91	2. 02	0. 47	0. 55	0. 84(23)		0. 59	0. 96(37)	

4.3.2 石英 C 轴组构法

石英是自然界中最主要的造岩矿物之一，具多种滑移系。在不同的温度下不同的滑移系起着主导作用，而不同的滑移系在剪切作用下会产生不同的石英晶格优选方位，导致不同的石英光轴定向排列 (Passchier and Trouw, 2005; 许志琴等, 2009; 夏浩然等, 2011; Law, 2014)。石英组构实验研究表明，石英 C 轴组构大环带法线与主面理 S_A 夹角 β 等于特征流动方向 A_1 与应变主轴 X 间的夹角 (Wallis, 1992; Vernooij *et al.*, 2006)。因此，将石英 C 轴组构与有限应变结合可计算涡度值 (图 9d)。这一过程通常假定瞬时剪应变相对瞬时伸长度的大小保持恒定，因此可以实测有限应变代替瞬时应变，使 β 结合有限应变轴比 R_s 来求得剪切过程中较长期的平均运动学涡度 (Passchier, 1988; 郑亚东等, 2008)，公式为 $Y = \tan^{-1} \{ \sin 2\beta [(R_{xz} + 1) / (R_{xz} - 1) - \cos 2\beta]^{-1} \}$ ， $W_m = \sin Y (R_{s-xz} + 1) / (R_{s-zx} - 1)$ 。

EBSD 组构分析是通过分析晶体背散射衍射图像来确定晶轴方向，进而确定晶体颗粒排列的取向性，由于测试颗粒多，更能客观地反映样品中矿物颗粒排列的优势方位 (许志琴等, 2009)。本文糜棱岩样品石英 C 轴测量在北京大学 EBSD 实验室完成。实验过程中，每个样品手动打点数大于 300 个，经数据处理后所得的等密度图如图 10 所示，并结合样品野外及显微构造特征绘制各组构轮廓图，据此获得 S_A 和 A_1 夹角 β ，再与有限应变轴比 R_{s-xz} 联合求取运动学涡度值，其中纳兰穹隆因所测 C 轴取向较分散无结果 (图 10e、10d)；罕乌拉穹隆运动学涡度值为 0.59~0.81，平均值为 0.70；宝德尔穹隆的涡度值为 0.61~0.75，平均值为 0.67 (表 2)。因一些糜棱岩样品的石英 C 轴取向分散而不能绘制出石英 C 轴轮廓图，且所求夹角 β 可能因存在的几度误差而导致运动学涡度值有较大变化，故平均运动学涡度值 W_m 多采用极莫尔圆法所测值。

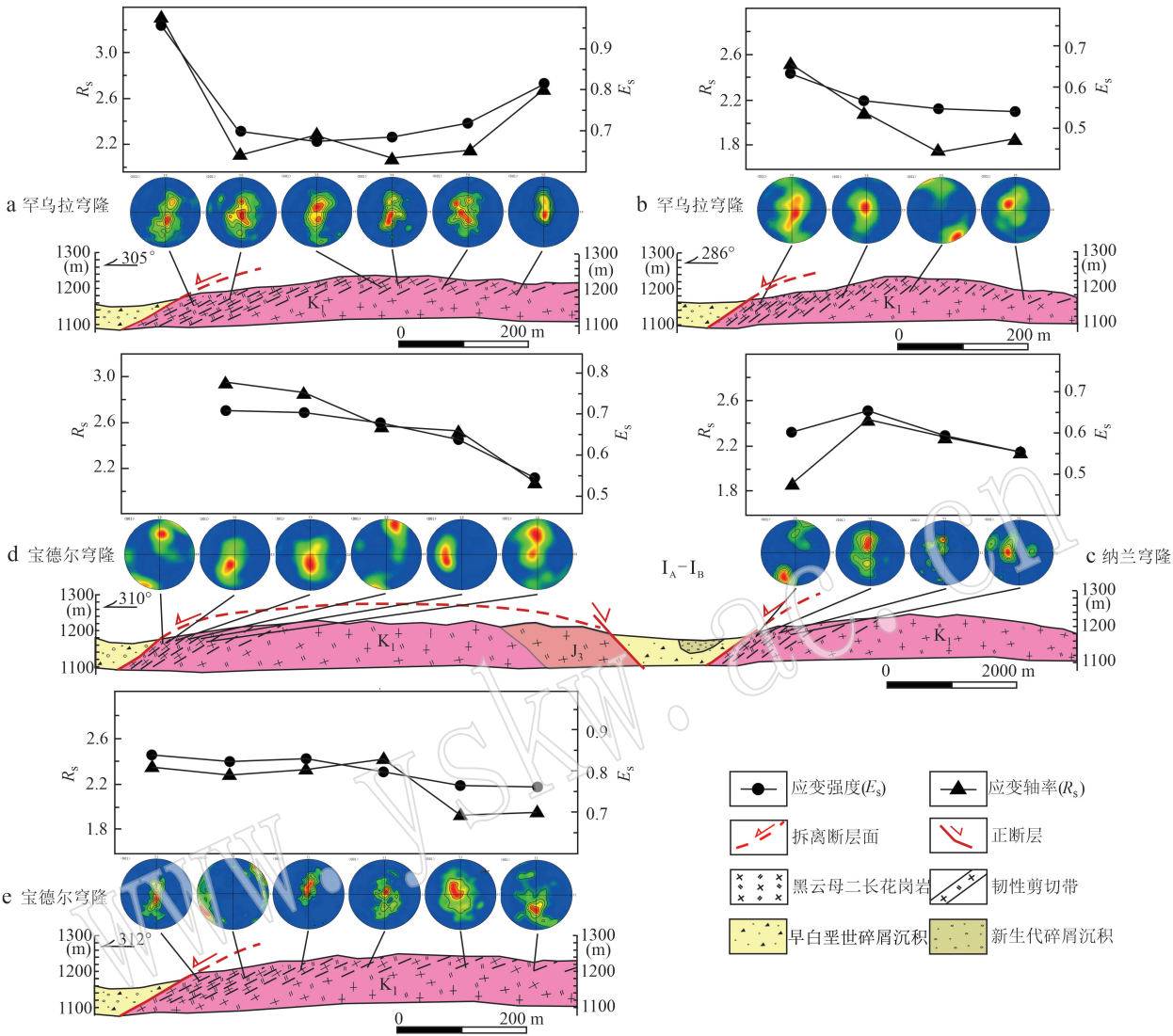


图 10 伸展穹隆韧性剪切带剖面及糜棱岩石英 C 轴组构等密度图

Fig. 10 Sections of ductile shear zones of extensional domes and isodensity diagrams of quartz C-axis fabric of mylonites

4.3.3 刚性颗粒网法

在韧性剪切带中，存在一临界形态因子，小于临界形态因子的刚性体因顺向不断旋转而使其长轴取向随机分散。反之，大于临界形态因子的刚性体顺向逆向旋转，其取向限定在一定范围内 (Passchier, 1987; Simpson and De Paor, 1993)。前人可根据这一特点进行多种方式投图获取运动学涡度。其中刚性颗粒网投图采用直角坐标系，以形态因子 B 为横轴，以刚性体长轴取向为纵轴，剪切指向参照顺向倾斜的锐角为正，逆向倾斜为负。当刚性体长轴取向由随机分布突变为优选分布形态因子即为临界形态因子 B^* ，其值可直接代表运动学涡度 (图 9c, Jessup *et al.*, 2007)。

此种方法无需判断刚性体的旋转方式，只需客观记录刚性体的长轴取向及二长比，可避免一些人为判断的失误。文中每一定向样品的 XZ 面上测得的刚性体个数大于 50 个，将数据投影于刚性颗粒网中可得出运动学涡度，如 N18717-19.1 样品，运动学涡度值为 0.69。应用此方法可得罕乌拉穹隆运动学涡度值为 0.61~0.83，平均值为 0.71；纳兰穹隆的涡度值为 0.60~0.77，平均值为 0.70；宝德尔穹隆的涡度值为 0.59~0.79，平均值为 0.69 (表 2)。

4.3.4 石英斜向条带法

石英斜交面理 S_B 和主面理 S_A 夹角 δ 等于 ISA_1 (瞬时拉伸轴) 和应变主轴 X 轴之间的夹角，高应变带中的糜棱面理与剪切带边界近于平行，则糜棱面

理与石英斜向面理的夹角为 ξ , 根据 $W_k = \sin 2\xi$ 可获得相关运动学涡度 (图 9b, Simpson and De Paor, 1993)。于每块样品的 XZ 面, 选取约 20 处石英斜向条带获取其与糜棱面理的夹角计算调和平均值, 部分样品石英条带不发育无测量数据。此法所测得的运动学涡度值均较大, 罕乌拉穹隆的涡度值介于 0.87~0.99 之间, 平均值为 0.94; 纳兰穹隆的涡度值为 0.91~0.93, 平均值为 0.91; 宝德尔穹隆的涡度值介于 0.88~0.97 之间, 平均值为 0.93 (表 2)。石英长轴方向所测得的 W_k 记录了石英韧性变形最后阶段的运动学涡度 (Simpson and De Paor, 1993; Xypolias, 2009)。

4.3.5 C' 法

糜棱岩中多发育剪切条带 C' (伸展褶劈理)。 C' 法基于最大有效力矩准则得出同向伸展褶劈理与最大主应力方向理论夹角为 $54^\circ 44'$ (郑亚东等, 2005, 2007)。根据式 $W_n = \sin(70 - 2\varepsilon)$ (ε 为伸展褶劈理与剪切带边界的夹角) 所得的运动学涡度一般代表较晚期的剪切作用类型 (王新社等, 2002)。选取发育伸展褶劈理的 XZ 面, 每张薄片测量约 20 组数据求取其调和平均值。据 C' 法获得罕乌拉穹隆的涡度值介于 0.59~0.74 之间, 平均值为 0.69; 纳兰穹隆为 0.53~0.72, 平均值 0.65; 宝德尔穹隆的涡度值介于 0.62~0.74 之间, 平均值 0.68 (表 2)。

5 讨论

5.1 剪切变形时限

结合罕乌拉穹隆韧性剪切带内强变形中粗粒钾长花岗岩 (133 ± 1 Ma) 和弱变形细粒花岗岩 (128 ± 2 Ma) 的构造关系及其锆石 U-Pb 年龄, 笔者认为该穹隆内韧性伸展时限为 133 Ma 之后并持续至 128 Ma 或更晚, 细粒花岗岩可能为同伸展岩体。近期的岩浆岩专题填图和构造研究则发现宝德尔穹隆发育 2 个岩套 5 个单元的岩浆作用, 早期中侏罗世岩体由 2 个单元组成 ($159 \sim 161$ Ma), 而晚期的早白垩世石林岩套由 3 个单元组成 ($138 \sim 125$ Ma), 该期岩浆具有明显的先后关系和脉动式侵位特点, 与剪切带的伸展变形具有密切的关系, 为同伸展岩浆作用 (郭磊等, 2015; 童英等, 2017)。Daoudene 等 (2012) 对邻近 Nartyn 和 Atanshiree 同减薄岩体的构造解析、锆石 U-Pb 年代学和单矿物 Ar-Ar 热年代学分析也表明, 这两个类似的花岗岩穹隆构造韧性剪切时限也

为 134~128 Ma, 花岗岩为同伸展侵位。

因此, 可以认为包括罕乌拉、宝德尔和纳兰穹隆在内的这些伸展构造均发育于 134~128 Ma 左右, 穹隆内的早白垩世花岗岩为同伸展侵位。

5.2 应变型式及剪切类型

本文以长石为应变标志体, 采用 R_f/ϕ 法测定的罕乌拉、纳兰及宝德尔穹隆韧性剪切带的应变指数、应变强度均具相同特征。弗林指数 K 值为 0.36~0.59, 平均值为 0.5, 表明糜棱岩的应变类型为平面压扁型 (Simpson and De Paor, 1993; Wallis, 1995; Xypolias, 2009)。 XZ 面应变轴率 R_s 值为 1.91~3.35, 平均值为 2.33, 应变强度 E_s 值为 0.53~0.95, 平均值为 0.66, 且由剪切带底部至顶部, 糜棱岩应变轴率及应变强度逐渐增大。

剪切带一般经历几个阶段的演化, 如韧性变形、韧脆变形和脆性变形。与之对应, 不同的岩石组构记录了不同变形期的运动学涡度。具体而言, 基于有限应变测量的极莫尔圆法和石英光轴组构法估算了糜棱岩长期韧性变形的平均运动涡度 (Simpson and De Paor, 1993; Zhang and Zheng, 1997; 郑亚东等, 2008)。石英斜向面理、“云母鱼”等 II 型 S-C 组构法可以估算糜棱岩韧性变形晚期涡度 (Simpson and De Paor, 1993; Wallis, 1995; Xypolias, 2009)。最大有效力矩法 (郑亚东等, 2008) 或 C' 法可以估算拆离末期糜棱岩韧脆性变形的运动学涡度。共轭脆性断层估算的是剪切带脆性变形期的“涡度”。因此, 对不同显微构造进行运动学涡度的估算有利于详细刻画剪切带的运动学演化过程。

以石英长石为应变标志体, 由长石极莫尔圆法、石英 C 轴组构法及刚性颗粒法、石英斜向面理法所测得的伸展时期不同阶段的运动学涡度也具相似特征 (图 11), 即长石极莫尔圆法求得的运动学涡度值为 0.59~0.89, 平均值为 0.74; 石英 C 轴组构法求得的运动学涡度值为 0.59~0.81, 平均值为 0.68, 人为估算 β 值可能会使结果存在偏差; 刚性颗粒网法获得的运动学涡度值为 0.59~0.83, 平均值为 0.71, 与极莫尔圆法所得结果相近。以长石极莫尔圆法和刚性颗粒网法所得的运动学涡度为参照数值, 即平均运动学涡度值介于 0.68~0.74 之间, 可指示长期韧性变形过程中的运动学涡度, 代表剪切带在韧性变形过程中受到近于纯剪切和简单剪切各占一半的一般剪切作用; 石英斜向面理法所求得的韧性变形较晚期运动学涡度值为 0.87~0.99, 平

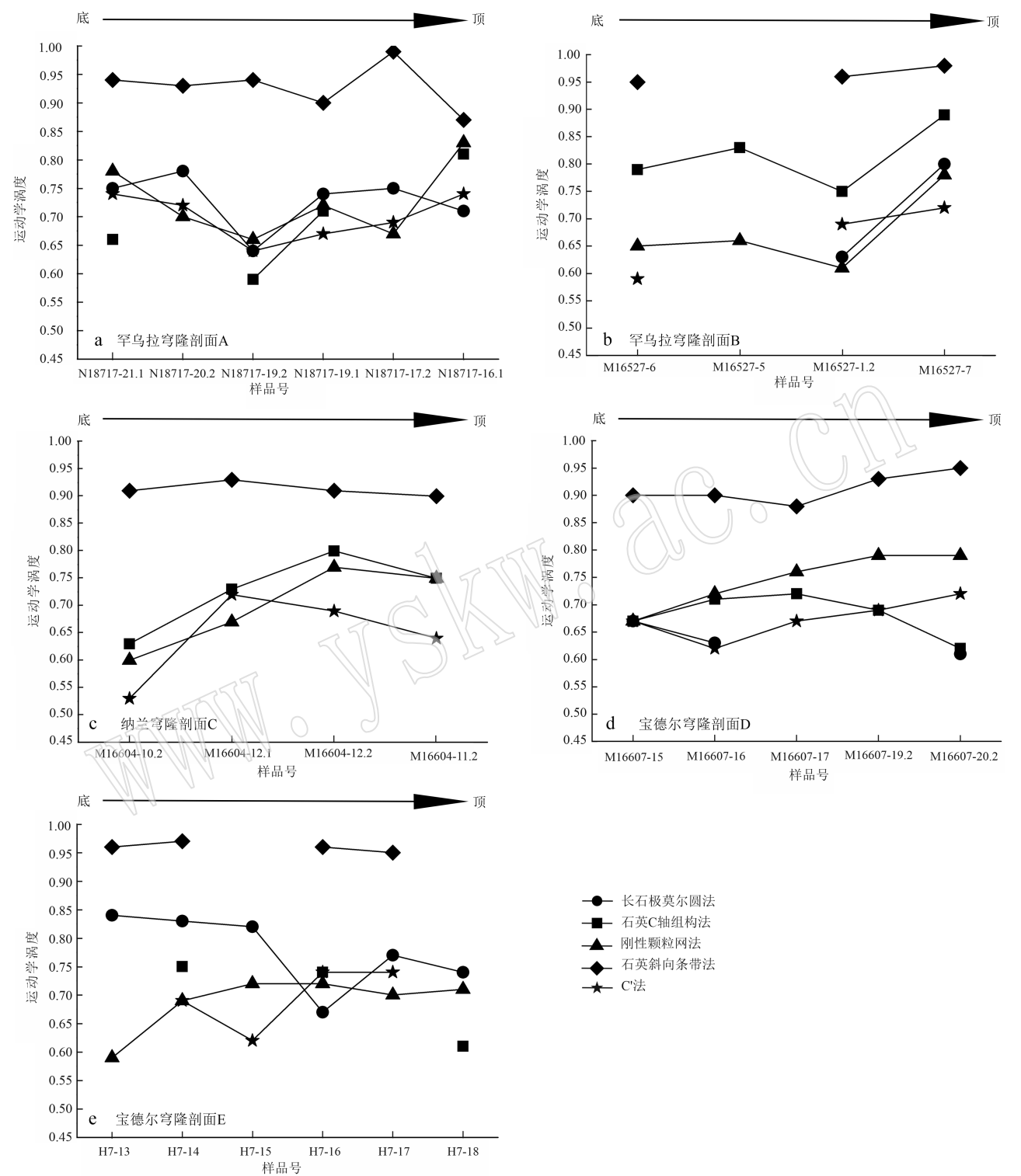


图 11 糜棱岩运动学涡度值对比图

Fig. 11 Comparison diagrams of kinematic vorticities of mylonites

均值为 0.93，指示石英韧性变形最后应变增量的剪切类型以简单剪切为主；*C'* 法获得的末期运动学涡度为 0.53~0.74，平均值为 0.68，指示在这一递进变形过程中抬升至韧性转化域的增量应变以纯剪切为主。这些结果表明伸展拆离带为一般剪切变形，前期韧性剪切带中的简单剪切分量逐渐增加，

随着抬升至脆性域,后期纯剪切分量增加。

5.3 发育过程及区域演化意义

东北亚地区晚中生代发育巨量伸展构造,被认为与蒙古鄂霍次克构造带的造山后垮塌和古太平洋的弧后扩张相关(李锦轶等, 2009; Wang *et al.*, 2011; 许文良等, 2013)。据前人研究,代表东北亚地区地壳典型伸展构造的变质核杂岩具有北西-南东向极性伸展,深层次的韧性伸展剪切可能在约150~145 Ma开始,于145~130 Ma达到顶峰,130~120 Ma期间冷却隆升(Wang *et al.*, 2012; Daoudene *et al.*, 2017 及其所引文献)。研究区罕乌拉、纳兰及宝德尔等3个不对称花岗岩穹隆也具有统一向北西的极性伸展,变形时限则集中于134~128 Ma,表明这些穹隆可能为同时期相同区域应力场下的产物,于东北亚大规模地壳伸展变形高峰期产出。

本文及前人研究结果显示这3个穹隆与岩浆底侵作用密切相关(Daoudene *et al.*, 2012; 程银行等, 2014; 郭磊等, 2015; 童英等, 2017)。穹隆形成前期,区域内发育中晚侏罗世A型岩浆作用(约160 Ma或之前,薛富红等, 2015),表明此时地壳深层次已发生减薄,岩浆上升层状侵入中下地壳,使其流变性增强,形成相对软弱带(图12a)。随后代表地壳深层次伸展的变质核杂岩启动(Wang *et al.*, 2011 及其所引文献),导致下地壳进一步熔融形成大规模花岗质岩浆作用(145~130 Ma)(Wang *et al.*, 2015),同伸展岩浆作用侵入至中地壳并发生与变质核杂岩类似的近水平伸展剪切,即穹隆形成早期。运动学涡度估算结果指示早期韧性剪切为纯剪切和简单剪切近于各占一半的一般剪切作用,形成与岩浆流动线理近平行的拉伸线理及糜棱面理,单剪组分持续增大(图12b)。随着地壳伸展减薄的递进和同伸展岩浆作用持续上涌侵位(130~120 Ma),穹隆进一步伸展抬升进入韧脆性转化域,发育伸展褶皱理,伸展褶皱理逐渐扩展为大型拆离面,岩体上涌逐渐占据了主导地位,使得先期剪切带沿拆离面逐渐抬升,脆性域叠加脆性断层带并剥露至地表(图12c)。由C'法估算的运动学涡度记录了以纯剪切为主的该变形过程。在穹隆形成的连续过程中,于地表可见多期次岩浆形成的不变形核部、弱变形岩体边部(流动线理与糜棱岩中拉伸线理近平行)、强变形韧性剪切带(花岗质糜棱岩)及叠加于韧性剪切带之上的脆性变形(含糜棱岩团块的绿泥石化角砾岩、微角砾岩、断层泥、后期切割韧性剪

切带的高角度正断层等),反映花岗质岩体就位、抬升和剥露过程中先期韧性后期脆性的递进变形过程。该模式与前人探讨的变质核杂岩的形成类似,均反映东北亚地区地壳减薄的过程,为解析晚中生代构造体制的转换提供了一种有效的方法。

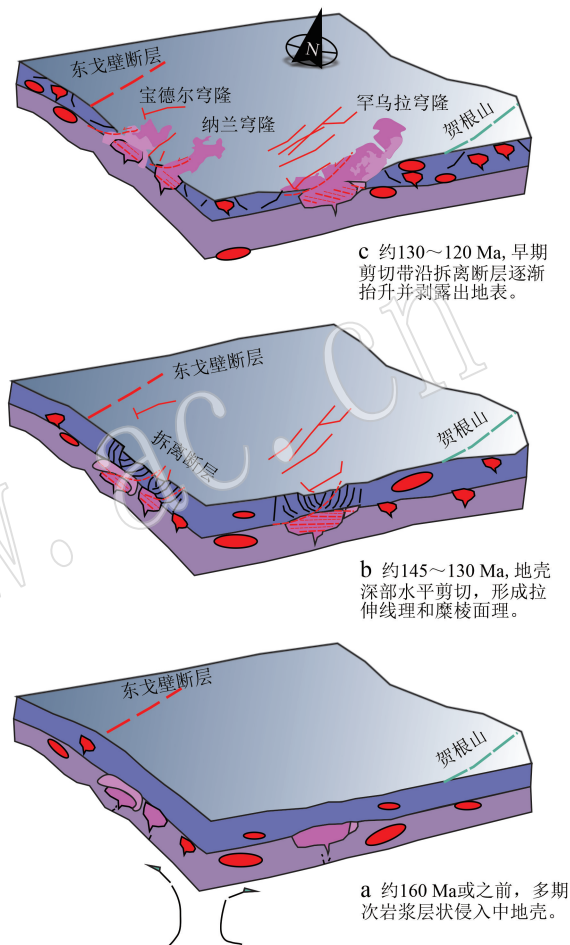


图12 伸展穹隆发育模式图

Fig. 12 Structural evolution model of extensional domes

6 结论

(1) 中蒙边界地区发育3个不对称花岗岩穹隆(罕乌拉穹隆、纳兰穹隆及宝德尔穹隆),其特点是主拆离断层仅在一侧发育,其他两侧变形微弱或不变形,被后期高角度正断层所围限,整体呈穹隆状,变形程度从未变形的核部到边缘逐渐增加。据罕乌拉穹隆韧性剪切带内强变形中粗粒钾长花岗岩(133 ± 1 Ma)和弱变形细粒花岗岩(128 ± 2 Ma)的构造关系及其锆石 U-Pb 年龄,限定该穹隆内岩体可能为同伸展岩体,韧性伸展时限为133 Ma之后并持续至128 Ma或更晚,与同区其他穹隆发育时限相同。

(2) 3个穹隆韧性剪切带内糜棱岩的应变型式均为平面压扁应变($k=0.5$), 应变强度为中强度应变(E_s 值为 $0.53\sim 0.95$, 平均 0.66), 且应变强度从剪切带底部向顶部(向岩体边缘)增加。

(3) 3个穹隆韧性剪切带岩石塑性变形平均涡度(长石极莫尔圆法为 0.74 , 石英 C 轴组构法为 0.68 , 刚性颗粒网法为 0.71)说明它们均为一般剪切。石英斜向条带法求得的石英韧性变形最后的运动学涡度值为 0.93 , C' 法获得的此递进变形最晚期阶段运动学涡度值为 0.68 , 表明早期高温阶段韧性剪切带中简单剪切分量增加(石英斜向面理法), 晚期抬升和低温阶段纯剪切分量增大(C' 法), 韧性剪切带经历的一般剪切指示在伸展背景下, 其由地壳伸展与岩浆底侵的共同作用形成, 是东北亚地区晚中生代巨量伸展峰期的产物。

References

- Bobyarchick A. 1986. The eigenvalues of steady state flow in Mohr space [J]. *Tectonophysics*, 122: 35~51.
- Castro A and Fernández C. 1998. Granite intrusion by externally induced growth and deformation of the magma reservoir, the example of the Plasenzuela pluton, Spain [J]. *Journal of Structural Geology*, 20(9~10): 1 219~1 228.
- Charles N, Gumiaux C, Augier R, *et al.* 2010. Metamorphic Core Complexes vs. synkinematic plutons in continental extension setting: Insights from key structures (Shandong Province, eastern China) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(1): 261~278.
- Chen Z, Liu Y, Hodges K V, *et al.* 1990. Structural evolution of the Kangmar dome a metamorphic core complex in southern Xizang (Tibet) [J]. *Science*, 250: 1 552~1 556.
- Cheng Yinhang, Teng Xuejian, Li Yanfeng, *et al.* 2014. Chronology constraint and tectonic evolution of Hanwula Early Cretaceous ductile shear belt in Dong Ujimqin, Inner Mongolia [J]. *Earth Science*, 39(4): 375~386 (in Chinese with English abstract).
- Daoudene Y, Gapais D, Ledru P, *et al.* 2009. The Ereendavaa Range (north-eastern Mongolia): An additional argument for Mesozoic extension throughout eastern Asia [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1 381~1 393.
- Daoudene Y, Gapais D, Ruffet G, *et al.* 2012. Syn-thinning pluton emplacement during Mesozoic extension in eastern Mongolia [J]. *Tectonics*, 31(TC3001): 1~23.
- Daoudene Y, Gapais D, Cogne J P, *et al.* 2017. Late Jurassic-Early Cretaceous continental extension in northeast Asia—Relationships to plate kinematics [J]. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 188(1~2): 10.
- Forte A M and Bailey C M. 2007. Testing the utility of the Porphyroclast hyperbolic distribution method of kinematic vorticity analysis [J]. *Journal of Structural Geology*, 29: 983~1 001.
- Guo Lei, Li Jianbo, Tong Ying, *et al.* 2015. The identification of Early Cretaceous Baoder extensional granitic dome in Sonid Left Banner, Inner Mongolia, and its tectonic implications [J]. *Geological Bulletin of China*, 34(12): 2 195~2 202 (in Chinese with English abstract).
- Graham S A, Hendrix M S, Johnson C L, *et al.* 2001. Sedimentary record and tectonic implications of Mesozoic rifting in southern Mongolia [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12): 1 560~1 579.
- Hsu T C. 1966. The characteristics of coaxial and non-coaxial strain path [J]. *Journal of Strain Analysis*, 1: 216~222.
- Hu Zhaozhu, Zhang Wen, Liu Yongsheng, *et al.* 2015. “Wave” signal smoothing and mercury removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS analysis: Application to lead isotope analysis [J]. *Analytical Chemistry*, 87: 1 152~1 157.
- Huang Jianjun. 1994. On some viewpoints on studies of mylonite and their applications [J]. *Geology of Chemical minerals*, 16(2): 117~122 (in Chinese with English abstract).
- Jessup M J, Law R D and Frassi C. 2007. The Rigid Net (RGN): An alternative method for estimating mean kinematic vorticity number (W_m) [J]. *Journal of Structural Geology*, 29: 411~421.
- Jian P, Liu D Y, Alfred Kröner, *et al.* 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia [J]. *Lithos*, 118(1): 169~190.
- Johnson C L. 2004. Mesozoic-Cenozoic evolution of the East Gobi basin: Integration of outcrop and subsurface data [J]. *Basin Research*, 16(1): 79~100.
- Law R D. 2014. Deformation thermometry based on quartz c-axis fabrics and recrystallization microstructures: A review [J]. *Journal of Structural Geology*, 66: 129~161.
- Li Delun and Wang Enlin. 2001. *Structural Geology* [M]. Changchun: Jilin University Press (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Mo Shenguo, He Zhenjun, *et al.* 2004. The timing of crustal sinistral strike-slip movement in the northern Great Khing'an ranges and its constraint on reconstruction of the crustal tectonic evolution of

- NE China and adjacent areas since the Mesozoic[J]. *Earth Science Frontiers*, (3): 157~168(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Yang Tiannan, Li Yaping, *et al.* 2009. Geological features of the Karamaili faulting belt, eastern Junggar region, Xinjiang, China and its constraints on the reconstruction of Late Paleozoic ocean-continental framework of the Central Asian region[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1 817~1 826(in Chinese with English abstract).
- Liang Chenyue, Liu Yongjiang, Li Wei, *et al.* 2011. Characteristics of extensional structure of Keluo complex in Nenjiang area, Heilongjiang, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(2/3): 291~299(in Chinese with English abstract).
- Lin W and Wang Q C. 2006. Late Mesozoic extensional tectonics in the North China block: A crustal response to subcontinental mantle removal[J]? *Bulletin de la Société Géologique de France*, 177(6): 287~297.
- Lin W and Wei W. 2020. Late Mesozoic extensional tectonics in the North China Craton and its adjacent regions: A review and synthesis[J]. *International Geology Review*, 62(7~8): 811~839.
- Liu J L, Liang S, Mo J, *et al.* 2013. The Liaonan/Wanfu paired metamorphic core complexes in the Liaodong Peninsula: Progressive exhumation and constraints on destruction of the North China craton[J]. *Tectonics*, 32(5): 1 121~1 141.
- Liu J L, Liu Y J, Chen H, *et al.* 1997. The inner zone of the Liaoji Paleorift: Its early structural styles and structural evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15(1): 19~31.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34~43.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot/Ex. Version 3.00: A geochronological toolkit for microsoft excel[J]. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 4: 1~70.
- Means W D, Hobbs B E and Williams P F. 1980. Vorticity and non-coaxiality in progressive deformations[J]. *Journal of Structural Geology*, 2(3): 371~378.
- Meng Q R, Hu J M, Jin J Q, *et al.* 2003. Tectonics of the late Mesozoic wide extensional basin system in the China-Mongolia border region[J]. *Basin Research*, 15: 397~415.
- Passchier C W. 1987. Stable positions of rigid objects in non-coaxial flow (a study in vorticity analysis[J]. *Journal of Structural Geology*, 9: 671~690.
- Passchier C W. 1988. Analysis of deformation paths in shear zones[J]. *Geologische Rundschau*, 77: 309~318.
- Passchier C W and Trouw R A. 2005. *Microtectonics*[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2: 101~110.
- Ren J, Tamaki K, Li S, *et al.* 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. *Tectonophysics*, 344(3): 175~205.
- Ritts B D, Darby B J and Cope T. 2001. Early Jurassic extensional basin formation in the Daqing Shan segment of the Yinshan belt, northern North China, Inner Mongolia[J]. *Tectonophysics*, 339(3): 239~258.
- Simpson C and De Paor D G. 1993. Strain and kinematic analysis in general shear zones[J]. *Structural Geology*, 15: 1~20.
- Tong Ying, Guo Lei, Wang Tao, *et al.* 2017. Pedigree mapping of cogenetic granitoids: A case study of Baoder Stone Forest granitic pluton in Erlian, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(11): 1 963~1 970(in Chinese with English abstract).
- Vernooij M G C, Kunze K and den Brok B. 2006. 'Brittle' shear zones in experimentally deformed quartz single crystals[J]. *Journal of Structural Geology*, 28: 1 292~1 306.
- Wallis S R. 1992. Vorticity analysis in a metachert from the Sanbagawa Belt, SW Japan[J]. *Journal of Structural Geology*, 14: 271~280.
- Wallis S R. 1995. Vorticity analysis and recognition of ductile deformation in the Sanbagawa Belt, SW Japan[J]. *Journal of Structural Geology*, 17: 1 077~1 093.
- Wang T, Guo L, Zhang L, *et al.* 2015. Timing and evolution of Jurassic-Cretaceous granitoid magmatisms in the Mongol-Okhotsk belt and adjacent areas, NE Asia: Implications for transition from contractional crustal thickening to extensional thinning and geodynamic settings[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97(Part B, 1): 365~392.
- Wang T, Guo L, Zheng Y D, *et al.* 2012. Timing and processes of late Mesozoic mid-lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes[J]. *Lithos*, 154: 315~345.
- Wang T, Zheng Y D, Zhang J J, *et al.* 2011. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes[J/OL]. *Tectonics*, 30(6). doi:10.1029/2011tc002896
- Wang Xinshe, Zheng Yadong, Zhang Jinjiang, *et al.* 2002. Extensional kinematics and shear type of the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(4/5): 238~245(in Chinese with English abstract).
- Wang Yunbin, Liang Minghong, Huo Qinzhi, *et al.* 2004. The study of

- the limit deformation measurement with deformation feldspar in granite areas[J]. *Northwestern Geology*, 37(1): 19~24 (in Chinese with English abstract).
- Weijermars R. 1991. The role of stress in ductile deformation[J]. *Journal of Structural Geology*, 13: 1 061~1 078.
- Weijermars R. 1998. Taylor-mill analogues for patterns of flow and deformation in rocks[J]. *Journal of Structural Geology*, 20: 77~92.
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, *et al.* 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in Eastern China[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 233(1): 103~119.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, *et al.* 2011a. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Asian Earth Sci.*, 41(1): 1~30.
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, *et al.* 2005b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China[J]. *Chemical Geology*, 221(1): 127~156.
- Wu F Y, Zhang L C, Wan B, *et al.* 2011b. Geochronological and geochemical constraints on Aolunhua porphyry Mo-Cu deposit, northeast China, and its tectonic significance[J]. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 78~91.
- Xia Haoran and Liu Junlai. 2011. The crystallographic preferred orientation of quartz and its applications[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(1): 58~70 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Han C M, *et al.* 2018. Late Paleozoic to early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 94~128.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, *et al.* 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J/OL]. *Tectonics*, 22(6). DOI: 10.1029/2002TC001484
- Xu B, Charvet J, Chen Y, *et al.* 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): Framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 342~1 364.
- Xu Wenliang, Wang Feng, Pei Fuping, *et al.* 2013. Mesozoic tectonic regime and regional ore-forming background in NE China: Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 339~353 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Wang Qin, Liang Fenghua, *et al.* 2009. Electron backscatter diffraction (EBSD) technique and its application to study of continental dynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(70): 1 721~1 736 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Qi Xuexiang, *et al.* 2006. India-Asia collision: A further discussion of N-S- and E-W-trending detachments and the orogenic mechanism of the modern Himalayas[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(1/2): 1~14 (in Chinese with English abstract).
- Xue Fuhong, Zhang Xiaohui, Deng Jiangxia, *et al.* 2015. Late Jurassic A-type granite from the Dalai region of central Inner Mongolia: Geochemistry, petrogenesis and tectonic implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1 774~1 788 (in Chinese with English abstract).
- Xypolias P. 2009. Some new aspects of kinematic vorticity analysis in naturally deformed quartzites[J]. *Journal of Structural Geology*, 31(1): 3~10.
- Xypolias P and Koukouvelas I K. 2001. kinematic vorticity and strain patterns associated with ductile extrusion in the Chelmos shear zone (External Hellenides, Greece)[J]. *Tectonophysics*, 338: 59~77.
- Zhang B, Cai F L, Chen S Y, *et al.* 2020. Sinistral strike-slip shearing along the Jiali shear zone around the Eastern Himalaya syntaxis region: Evidences for oligocene eastward limited translation of Tibet[J]. *Journal of Structural Geology*, 139: 104~136.
- Zhang J J and Zheng Y D. 1997. Polar Mohr constructions for strain analysis in general shear zones[J]. *Journal of Structural Geology*, 19: 745~748.
- Zhang Jinjiang and Zheng Yadong. 1997. Basic principle and application of kinematic vorticity and polar Mohr circle[J]. *Geological Science and Technology Information*, 16(3): 33~39 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yadong and Chang Zhizhong. 1985. Finite Strain Measurement and Ductile Shear Zone[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yadong, Wang Tao and Wang Xinshe. 2005. The theory of structural geology and mechanics in the new century: Maximum effective moment criterion[J]. *Progress in Natural Science*, 15: 142~148 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yadong, Wang Tao and Wang Xinshe. 2007. Theory and practice of maximum effective moment criterion[J]. *Journal of Peking University (Natural Science Edition)*, 43: 145~156 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yadong, Wang Tao and Zhang Jinjiang. 2008. Theory and practice of kinematic vorticity[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 209~220 (in Chinese with English abstract).
- Zong Keqin, Klemd R, Yuan Yu, *et al.* 2017. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 ma) high-grade met-

amorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern central Asian Orogenic Belt (CAOB) [J]. Precambrian Research, 290: 32~48.

附中文参考文献

程银行, 滕学建, 李艳锋, 等. 2014. 东乌旗罕乌拉韧性剪切带的构造属性及其年代约束[J]. 地球科学, 39(4): 375~386.

郭磊, 李建波, 童英, 等. 2015. 内蒙古苏尼特左旗早白垩世宝德尔花岗岩伸展穹隆的确定及其地质意义[J]. 地质通报, 34(12): 2 195~2 202.

黄建军. 1994. 糜棱岩研究的若干理论与应用初评[J]. 化工地质, 16(2): 117~122.

梁琛岳, 刘永江, 李伟, 等. 2011. 黑龙江嫩江地区科洛杂岩伸展构造特征[J]. 地质通报, 30(2/3): 291~299.

李德伦, 王恩林. 2001. 构造地质学[M]. 长春: 吉林大学出版社.

李锦轶, 莫申国, 和政军, 等. 2004. 大兴安岭北段地壳左行走滑运动的年代及其对中国东北及邻区中生代以来地壳构造演化重建的制约[J]. 地学前缘, (03): 157~168.

李锦轶, 杨天南, 李亚萍, 等. 2009. 东准噶尔卡拉麦里断裂带的地质特征及其对中亚地区晚古生代洋陆格局重建的约束[J]. 地质通报, 28(12): 1 817~1 826.

童英, 郭磊, 王涛, 等. 2017. 同源花岗岩谱系填图——内蒙古二连宝德尔石林花岗岩填图试点[J]. 地质通报, 36(11): 1 963~1 970.

王新社, 郑亚东, 张进江, 等. 2002. 呼和浩特变质核杂岩伸展运动

学特征及剪切作用类型[J]. 地质通报, 21(4/5): 238~245.

王云斌, 梁明宏, 霍勤知, 等. 2004. 利用变形花岗岩体中的长石矿物进行有限应变测量初探[J]. 西北地质, 37(1): 19~24.

夏浩然, 刘俊来. 2011. 石英结晶学优选与应用[J]. 地质通报, 30(1): 58~70.

许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. 岩石学报, 29(2): 339~353.

许志琴, 杨经绥, 戚学祥, 等. 2006. 印度/亚洲碰撞——南北向和东西向拆离构造与现代喜马拉雅造山机制再讨论[J]. 地质通报, 25(1/2): 1~14.

许志琴, 王勤, 梁风华, 等. 2009. 电子背散射衍射(EBSD)技术在大陆动力学研究中的应用[J]. 岩石学报, 25(7): 1 721~1 736.

薛富红, 张晓晖, 邓江夏, 等. 2015. 内蒙古中部达拉地区晚侏罗世A型花岗岩: 地球化学特征、岩石成因与地质意义[J]. 岩石学报, 31(6): 1 774~1 788.

张进江, 郑亚东. 1997. 运动学涡度和极摩尔圆的基本原理与应用[J]. 地质科技情报, 16(3): 33~39.

郑亚东, 常志忠. 1985. 岩石有限应变测量及韧性剪切带[M]. 北京: 地质出版社.

郑亚东, 王涛, 王新社. 2005. 新世纪构造地质学与力学的理论——最大有效力矩准则[J]. 自然科学进展, 15: 142~148.

郑亚东, 王涛, 王新社. 2007. 最大有效力矩准则的理论与实践[J]. 北京大学学报(自然科学版), 43: 145~156.

郑亚东, 王涛, 张进江. 2008. 运动学涡度的理论与实践[J]. 地学前缘, 15(3): 209~220.