

再论韧性剪切带运动学涡度分析

李泽宇^{1, 2)}, 刘俊来^{1, 2)}

- 1) 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京, 100083;
2) 中国地质大学(北京)深时数字地球前沿科学中心, 北京, 100083



内容提要:运动学涡度分析是确定韧性剪切带中纯剪切与简单剪切组分相对占比的重要方法,近十余年来的深入研究取得了重要进展。笔者等回顾了5种创新性方法的应用情景、不同类型剪切带的运动学涡度时空变化特征以及应变量与运动学涡度的相关性,取得了如下认识:这些创新性方法在特定场景下的运动学涡度分析中具有关键价值:将椭圆亚晶粒法、 R_{xz}/δ 法与斜向叶理相关传统方法联用可更精细地约束韧性变形晚期运动学涡度变化;3D应变椭圆法和磁面理法在缺乏实际标志体时可作为传统方法的替代;CVA分析法是确定VNS,判断剪切型式与识别多期变形的有效手段。通过分析运动学涡度时空变化可获得不同类型剪切带的变形路径与变形分解特征:伸展拆离型剪切带多表现先加速后减速变形型式,靠近拆离断层面运动学涡度增大或减小;逆冲型剪切带多表现减速变形型式,靠近逆冲断层面运动学涡度增大;走滑型剪切带先加速后减速与减速变形型式均较常见,多表现为中心运动学涡度较两侧增大或者从一侧向另一侧运动学涡度逐渐增大。另一方面,应变量和运动学涡度的相关性显著受剪切带类型及伴随地质过程影响:伸展拆离剪切带中若应变主要由岩浆底辟与垂向隆升作用贡献两者多为负相关,若应变主要由拆离断层活动贡献则两者多为正相关;逆冲型剪切带中两者多为正相关;走滑型剪切带中两者多为正相关,若应变主要由挤压作用贡献则两者多为负相关。未来研究需在方法选择的全面性、区域尺度运动学涡度分析、沿走向运动学涡度变化解析以及物理和数值模拟手段的应用等方面加强工作。

关键词:运动学涡度;韧性剪切带;变形路径;变形分解;应变

韧性剪切带出露大量塑性变形构造岩,是研究中下地壳流变学与造山带演化过程的绝佳窗口。长期以来其基本研究内容涵盖了几何学、运动学、变形环境、构造年代学以及有限应变等诸多方面,但都难以确定剪切运动中简单剪切与纯剪切组分的相对占比,运动学涡度(Wk)分析为此提供了良好的解决途径。

运动学涡度的概念最早由Truesdell(1953)在流体力学研究中提出,McKenzie(1979)和Means等(1980)将其引入了构造地质学领域。自20世纪80年代后期以来,伴随糜棱岩研究的兴盛国外构造地质学者开始深入探索天然剪切带运动学涡度分析的理论、方法与应用;Bobyarchick(1986)通过研究剪切流中的特征方向提出了运动学涡度的简化计算公式;Passchier(1987)、Simpson和De Poar(1993)、Wallis(1992, 1995)、Holcombe和Little(2001)以及

Jessup等(2007)等学者为传统分析方法的成型奠定了基础;Xypolias(2009)、Mamtani(2013)、Michels等(2015)、Das等(2016)等学者在此基础上提出了各种创新性分析方法;Grasemann等(1999)、Ring等(2001)、Xypolias和Koukouvelas(2001)、Bailey等(2007)、Law(2010)、Behary和Shahbazi(2019)、Ghosh等(2020)、McFadden等(2024)等学者在科迪勒拉、阿巴拉契亚、喜马拉雅、阿尔卑斯、扎格罗斯等不同造山带开展了大量运动学涡度分析的实践并深入洞察剪切带演化规律;Xypolias(2010)、Fossen和Cavalcante(2017)以及Ghosh和Bhattacharyya(2022)等学者对运动学涡度分析的发展与应用进行了详尽的回顾,为学界提供了难得的参考。20世纪末以来,我国学者也对运动学涡度方法的引入、改良与发展开展了大量工作,北京大学以及中国科学院地质研究所的前辈们在初期起到了可贵的领

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:42430309、42172246)的成果。

收稿日期:2025-11-19;改回日期:2026-01-28;网络首发:2026-02-15;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2026.02.001

作者简介:李泽宇,男,2002年生,在读硕士生,构造地质学专业;Email: Lzy180306@163.com。通讯作者:刘俊来,男,1960年生,教授,从事构造地质学教学与研究工作;Email: jliu@cugb.edu.cn。

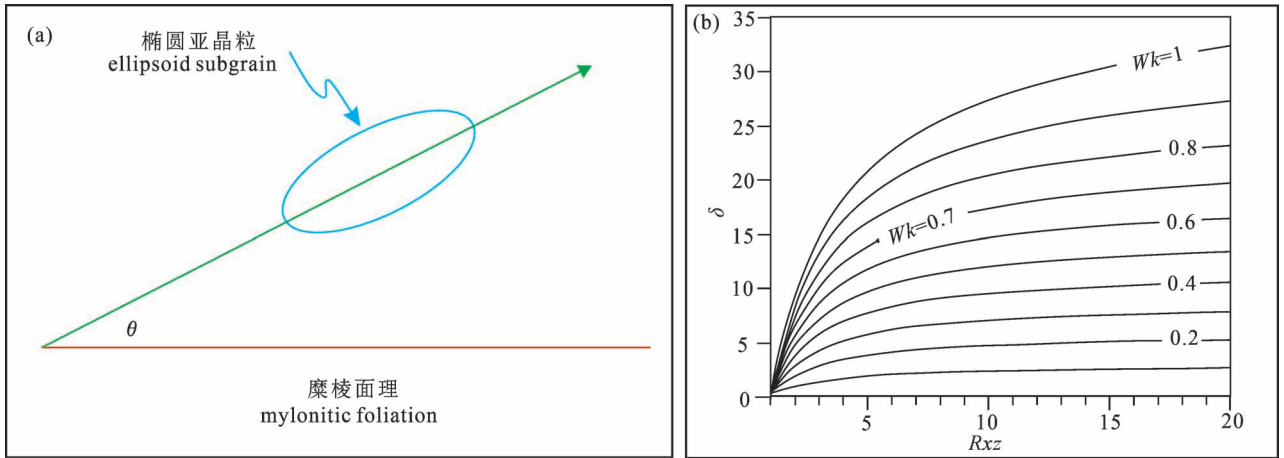


图1 椭圆亚晶粒法与 R_{xz}/δ 法示意图:(a)据 Ghosh et al., 2020 修改;(b)据 Xypolias, 2009 修改

Fig. 1 Schematic diagram of ellipsoid subgrain method and R_{xz}/δ method:(a) modified after Ghosh et al., 2020;
(b) modified after Xypolias, 2009

航作用:张进江和郑亚东(1997)、Zheng Yadong 等(2004)、郑亚东等(2007)以及刘江等(2012)等学者为极摩尔圆法的引入改良以及最大有效力矩准则和 C' 法的提出作了突出的贡献;刘江(2019)以及侯泉林等(2021)对 C' 的形成机制及旋转性进行了深入的总结与分析,深化了 C' 法的理论根基;自郑亚东(1999)对中蒙边界的亚干变质核杂岩首次开展运动学涡度分析以来,Zhang Jinjiang 等(2000)、王新社等(2002, 2005)、王勇生等(2006)、Li Jianbo 等(2010)、李小兵等(2015)、孟元库等(2016)、李海龙等(2017)、武亚威等(2022)以及 Li Wenyuan 等(2024)等学者使用该方法极大促进了我国不同区域天然韧性剪切带的量化构造解析;运动学涡度方法引入国内的早期阶段国内学者对其概念以及常用计算方法进行过系统总结,也初步考虑了运动学涡度时间变化和应变—运动学涡度关联问题(张桂林等,2002;王勇生和朱光,2004;郑亚东等,2008;李建波等,2012;李阳,2013)。

近十余年创新性方法的涌现以及国外学者普遍更为深入的研究为我们再认识剪切带运动学涡度分析提供了广阔的视角。笔者等简要介绍了椭圆亚晶粒法、 R_{xz}/δ 法、3D 应变椭圆球法、磁面理法和 CVA 分析法 5 种创新性方法在运动学涡度分析中的应用,并重点探讨了不同类型剪切带内的运动学涡度时空变化以及应变与运动学涡度的相关性,进而阐述了对未来研究的建议与展望。

1 创新性方法简介

采取合适的分析方法是通过运动学涡度研究剪

切带的基础。鉴于前人已对 20 世纪 80 年代末至本世纪初的各种传统方法进行过详尽讨论(郑亚东等,2008;Xypolias, 2010),笔者等重点介绍 5 种近十余年的创新性方法,它们在一些特定场景中具有重要意义。

1.1 椭圆亚晶粒法与 R_{xz}/δ 法

这两种方法都是对富石英构造岩运动学涡度分析的重要补充方法(图 1)。

在糜棱岩中,构成斜向叶理的石英颗粒如果继续遭受递进剪切变形作用其中会形成椭圆形亚晶粒,这些亚晶粒发生不同程度的拉伸,其长轴方向代表了比斜向叶理更晚一些的增量应变方向。椭圆亚晶粒法最早由 Das 等(2016)据此提出,之后主要在 Ghosh 等(2020)以及 Ghosh 和 Bhattacharyya(2022)的研究中得到应用。

该方法的操作流程是优先选择轴比大于 1.5 的亚晶粒,至少测量 50 个并统计其长轴与 C 面理的平均夹角 θ (图 1a),代入公式(1):

$$Wk = \sin 2\theta \quad (1)$$

计算运动学涡度值。

R_{xz}/δ 法由 Xypolias(2009)基于石英斜向叶理与主叶理的夹角 δ 和剪切流的非共轴度及有限应变共同相关这一概念(Herwegh and Handy, 1998)提出,是以 R_{xz}/β 法为基础演化而来的新型方法。

从 R_{xz}/β 法以及应力摩尔圆出发可以得到公式(2):

$$\delta = \frac{1}{2} \arcsin \left(Wk \frac{R_{xz} - 1}{R_{xz} + 1} \right) \quad (2)$$

据此可绘制图 1b 所示的列线图,让该方法更为直观。

Xypolias (2009) 通过在希腊 External Hellenides 地区的实践证实该方法可以记录比 δ/β 法更晚的运动学涡度,并提出石英相关运动学涡度分析应该尽可能使用多种方法:将石英条带斜交面理法、 δ/β 法与本节简介的椭圆亚晶粒法与 R_{xz}/δ 法联合使用对于韧性变形晚期运动学涡度变化路径的约束效果将远优于仅使用前两种传统方法。

1.2 3D 应变椭球法与磁面理法

目前绝大多数研究中对运动学涡度的分析都要通过变形脉、旋转碎斑、II 型 S-C 组构以及 C' 等各种宏观标志体完成。然而,一些剪切带中这些标志体较为少见,此时本节介绍的两种方法可以发挥关键的替代作用。

3D 应变椭球法的理论依据即磁化率椭球或应变椭球的最小主轴方位代表了最大主应力方向,之后结合 C 面理(剪切带边界)的法线方向获取最大主应力与剪切带边界法线所夹的 λ 角,代入公式(3):

$$Wk = \sin 2\lambda \quad (3)$$

可求解 Wk 。李阳等(2017)、Feng Yipeng 等(2020)、胡军(2022)、范天一等(2023)以及李康(2024)对不同地区剪切带的研究中都使用了这种分析方法。目前 mathematics 软件中已有为此开发的运行脚本,将样品的 XZ 、 YZ 与 XY 切面轴比和长轴取向导入后可以自动生成 3D 应变椭球并给出运动学涡度值,具体可参考 Mookerjee 和 Nickleach (2011)以及 Mookerjee 等(2016)的介绍。

磁面理法由 Mamtani (2013) 在对印度西北部 Singhbhum 剪切带的研究中提出,其操作方法是通过对磁组构分析获得磁面理平均产状并求出磁面理与剪切带 C 面理之间的夹角 ε ,代入公式(4)求解运动学涡度:

$$Wk = \sin 2\varepsilon \quad (4)$$

该方法的理论基础是磁面理追踪瞬时伸长轴发育而 C 面理代表剪切带边界,因此根据几何关系 ε 角与 3D 应变椭球法的 λ 角是相等的,这也揭示出两种方法具有高度的内在联系。Liu Hongsheng 等(2023)使用此方法对 Calacalí-Pujilí-Pallatanga 剪切带的运动学涡度变化进行了深入的研究并据此建立了法拉隆与纳兹卡板块间俯冲方向的变化模型,这是国内学者将创新性方法化为己用的生动实例。

“跳出微观标志体束缚”的思维还有助于运动

学涡度分析走向区域尺度,前人研究中已有很好的典范:聂冠军等(2019)利用断裂错移量估算得到了右江地区应变张量,其特征值和特征向量为区域应变椭球的主应变及其方向,结合区域边界断裂走向获得右江地区的宏观运动学涡度值为 0.96。对于这种区域性分析,结合航测资料以及地震剖面、GPS 速度场等地球物理资料或许可使结果更加可靠,未来工作中可进行尝试。

1.3 CVA 分析法

运动学涡度分析的前提是找到与涡度轴垂直的平面(VNS)。通常情况下我们认为平行线理、垂直面理的 XZ 面满足该要求,这建立在默认简单剪切主导的二维变形基础上(图 2)。然而,很多剪切带内涡度轴方位和应变椭球相关要素(线理与面理)没有必然关联(Fossen and Tikoff, 1993; Robin and Cruden, 1994; Goodwin and Williams, 1996; Tikoff and Greene, 1997; 张波等, 2006; Iacopini et al., 2008; Toy et al., 2013), 斜向汇聚引起的压扭(Transpression)是导致这种变化的主要原因。在纯剪切主导的单斜压扭以及各种复杂的三斜压扭中,与涡度轴垂直的不是 XZ 面而是 YZ 面或介于二者之间的某一斜面。除此以外,地块斜向离散运动引起的张扭(Transtension)也可导致这种变化,但在自然界中较压扭少见(Díaz-Azpiroz et al., 2019)。

结晶学涡度轴(CVA)分析为确定 VNS 提供了客观而可靠的途径。Bestmann 和 Prior(2003)以及 Reddy 和 Buchan(2005)等学者建立了该方法的雏形,Michels 等(2015)在此基础上正式提出了该方法,国外学者的研究中已得到广泛应用(Giorgis et al., 2017; Piette-Lauziere et al., 2020; Mirinda et al., 2023)。塑性变形颗粒中结晶学轴常常沿着下半球等面积投影的小圆分散展布,最能准确描述这种分散样式的弧的极点方位即代表了晶内涡度轴方位,大量统计单晶涡度轴方位可计算整体涡度轴方位并以此确定 VNS。目前,Michels 已将该过程的开源代码在其 GitHub 主页上公开并配有相应实例,可访问网址(<https://github.com/zmichels/CVA>)查看(Sen et al., 2025)。

CVA 分析确定天然变形岩石 VNS 最为经典的研究即 Michels 等(2015)在提出此方法时的实践:他们对 Moine 逆冲带, Gem Lake 剪切带和 Western Idaho 剪切带的样品实施了该方法,结果显示前两者中 VNS 为 XZ 面,但在纯剪切主导的压扭带——Western Idaho 剪切带中却为 YZ 面(图 3)。

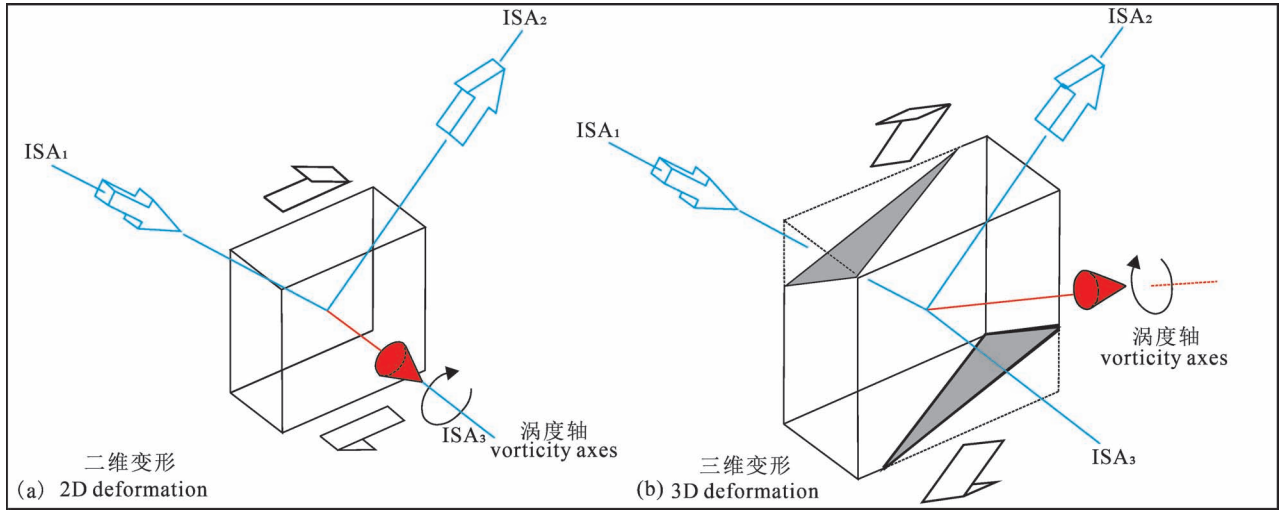


图2 二维和三维变形示意图(据 Xypolias, 2010 修改)

Fig. 2 Schematic diagram about monoclinic and triclinic deformation(modified after Xypolias, 2010)

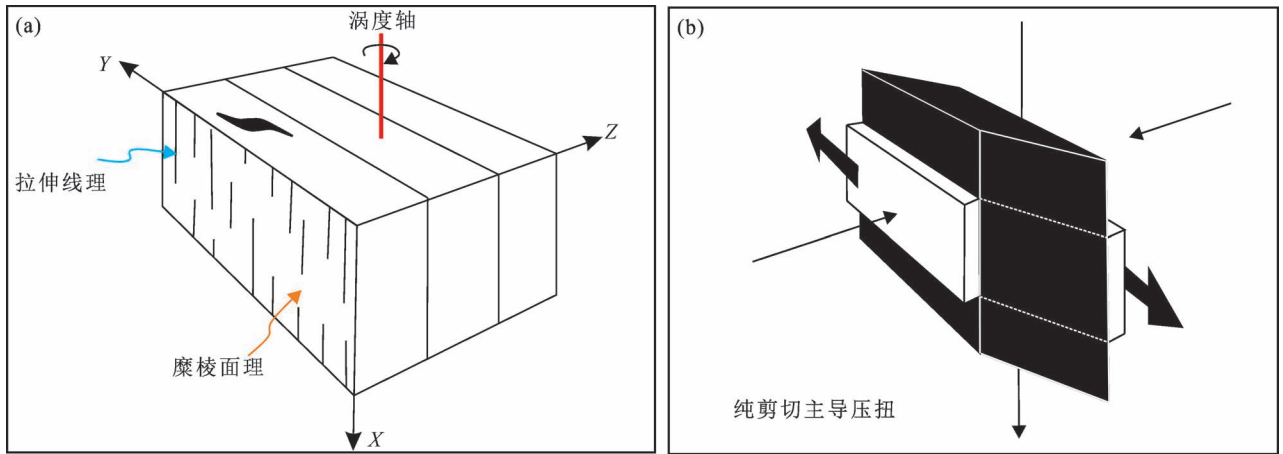


图3 Western Idaho 剪切带内涡度轴方位及其成因(据 Michels et al. , 2015 修改)

Fig. 3 The orientation of vorticity axes in Western Idaho shear zone and its formation(modified after Michels et al. , 2015)

CVA 分析对于判断剪切形式具有很好的指导作用。Sen 等(2025)在喜马拉雅地区首次开展系统性 CVA 分析,在 MCT 和 STDS 带附近识别出简单剪切主导的 CVA 样式而高喜马拉雅板片核部展现纯剪切主导三斜流动的 CVA 样式,据此推断板片核部可能经历了复杂的多期变形事件——这为前人在此地区的工作提供重要佐证的同时也揭示出对传统通道流模型进行改进的必要性。

除此以外,CVA 分析还可在复矿物岩石中识别多期叠加变形。Miranda 等(2023)通过对新西兰 Large 岩体进行 CVA 分析识别出了石英和斜长石具有张扭的 CVA 样式而黑云母和榴石却具有纯剪切主导压扭的 CVA 样式,结合年代学分析厘定出早期

张扭与晚期压扭两期变形。值得关注的是 Piette-Lauzière 等(2020)提出在具有多期变形的样品进行整体性 CVA 分析要十分谨慎,因为这种分析模式假设了样品中各个矿物颗粒的变形是均匀一致的,这在天然剪切带中难以实现。Sen 等(2025)对此采用了对比分析动态重结晶颗粒、残斑颗粒 CVA 样式和整体 CVA 样式的方法,这是一种严谨有效的分析途径。

综上所述,CVA 分析在寻找 VNS、确定剪切型式以及识别多期变形方面具有十分重要的应用价值,但对于其局限性也要足够重视:残斑颗粒与动态重结晶颗粒往往具有不同的应变记忆与变形机制——残斑以及整体性 CVA 分析侧重于全阶段变形,而动态重结晶颗粒 CVA 分析则更侧重变质峰期

后剥露过程 (Sen et al., 2025)。如能系统对比残斑/整体性 CVA 样式与重结晶颗粒 CVA 样式将对约束剪切带变形路径十分有益,而仅研究某一种则可能陷入管中窥豹的误区;其次,单一颗粒的变形也常是不均匀的,核幔结构十分常见。Piette-Lauzière 等 (2020) 对加拿大 EHSZ 剪切带的研究发现在残斑颗粒核部以及幔部获得的 CVA 样式十分接近,这说明核部的应变记忆可能比人们普遍认为的更短,受早期晶格变形位错影响不大,笔者等认为这值得在更多不同构造背景的剪切带中进行对比与验证;此外,对于具有复杂变形历史的地区如发现不同样品或矿物间 CVA 样式的显著差异需要结合宏微观构造解析、其他运动学涡度分析方法以及构造年代学工作等仔细梳理其反映的变形期次及其动力学特点。

2 运动学涡度时空变化及意义

运动学涡度数据的深入解读对于认识剪切带构造演化具有极为重要的意义。

Xypolias (2010) 建议运动学涡度分析要注重不同尺度以及不同背景的剪切带以建立更为全面与可靠的认识。笔者等也遵循这一原则,基于不同类型剪切带展开讨论。

2.1 运动学涡度的时间变化

早期研究中常将剪切带的变形视为稳态流动过程 (Means et al., 1981; Bobyarchick, 1986)。然而,天然剪切带中完全的稳态流动几乎不可能存在 (Fossen and Cavalcante, 2017), 非稳态流动必然带来运动学涡度随时间的变化,这称为剪切带的变形路径。Simpson 和 De Paor (1997) 将剪切过程中随时间推移运动学涡度逐渐减小者称为减速变形,反之则称为加速变形。

2.1.1 伸展拆离型剪切带的变形路径

运动学涡度分析方法的选择很大程度上影响着对变形路径的判断 (图 4): 选择

“韧性变形阶段平均涡度计算方法+C’法”的学者普遍得到“早期至晚期纯剪切组分增大”的减速变形型式 (Li Jianbo et al., 2010; 李刚等, 2017; 赵腾格等, 2021; 冯翼鹏, 2022); 选择“韧性变形阶段平均涡度计算方法+韧性变形晚期增量应变涡度计算方法+C’法”的学者常得到“韧性变形阶段简单剪切组分逐渐增大,脆韧性变形阶段纯剪切组分增大”的先加速后减速变形型式 (郑亚东和王涛, 2005; 刘江等, 2011; 杜灿等, 2022; 季雷, 2022), 笔者等使用该方法组合在大水峪剪切带也获得了这一型式; 而选择“韧性变形阶段平均涡度计算方法+韧性变形阶段晚期增量应变涡度计算方法”方法组合的学者则多得到“简单剪切组分逐渐增大”的加速变形型式 (Langille et al., 2010; 夏浩然, 2010; Li Xiaofan et al., 2024)。

综合对比发现,第二种方法组合较好的刻画了韧性变形阶段以及从韧性变形阶段转为脆韧性变形阶段时运动学涡度的变化,其获得的先加速后减速

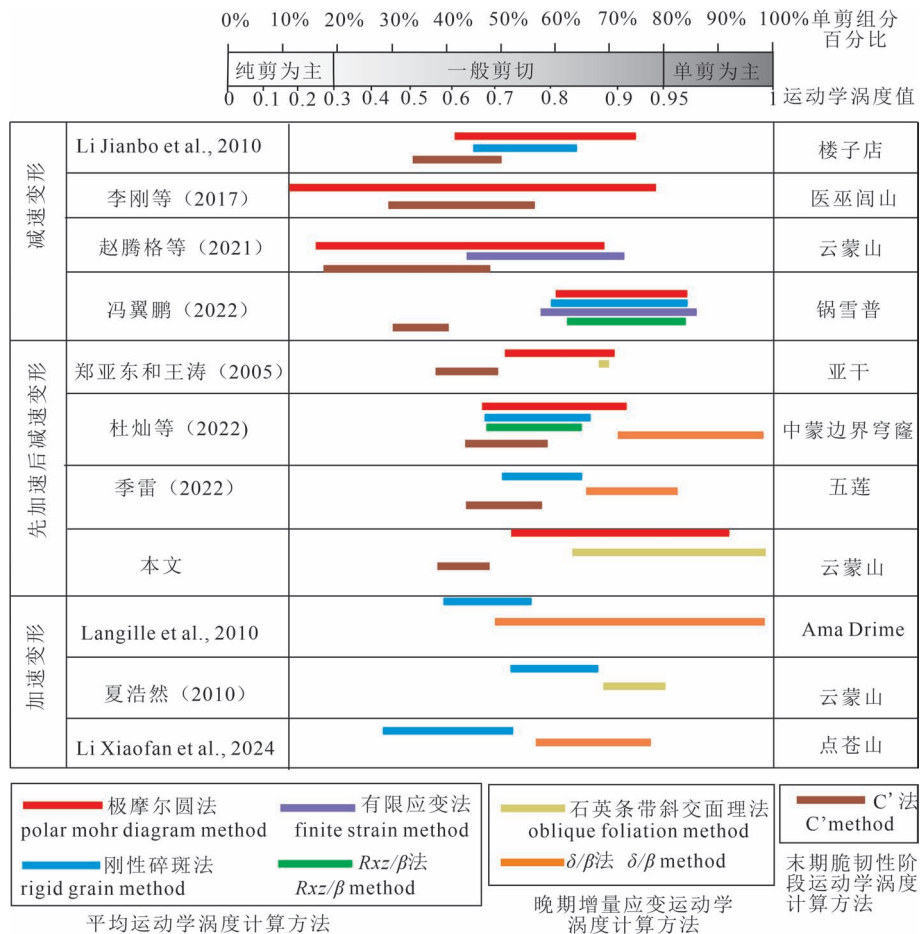


图 4 伸展拆离剪切带不同运动学涡度估算方法组合与所得变形路径对比图
Fig. 4 Diagram of different kinematic vorticity calculate methods and deformation path in detachment shear zone

变形型式可以相对全面地代表伸展拆离型剪切带的变形路径。第一种方法组合应变记忆跨度过大,只能粗略对比韧性/脆韧性变形阶段之间的涡度变化而无法准确刻画韧性变形阶段内的详细变形路径。杨谦等(2019)对中国东部伸展构造的综述中认为它们普遍表现减速变形的根本原因正是他们分析的研究实例几乎都使用了这一不够完整的方法组合;第三种方法组合虽然较好的约束了韧性变形阶段的涡度变化,但却无法分析剪切末期转为脆韧性变形时的涡度变化。

那么,伸展拆离型剪切带中这一变形路径如何形成?首先,韧性变形阶段的加速变形可以用 Bailey 和 Easter(2003)的卸荷模型进行解释:伴随伸展拆离作用下盘岩系逐渐抬升,其上覆岩层压力逐渐减小,简单剪切组分增加。此时虽然也存在垂向隆升以及岩浆活动带来的纯剪切组分,但尚不足以抵消卸荷作用的影响。而剪切末期 C' 发育的脆韧性变形阶段的减速变形则与持续岩浆上涌以及核部强烈垂向隆升作用有关(图 5),其纯剪切贡献已经非卸荷作用所能补偿;另一方面,C' 常会演化成不连续面,沿其出现的位移分解作用也可形成一定的纯剪切贡献(Tikoff and Teyssier, 1994)。

2.1.2 逆冲型剪切带的变形路径

大量研究表明逆冲型剪切带主要呈现减速变形型式。例如:Grasemann 等(1999)在喜马拉雅 MCT 逆冲带使用 R_{xz}/β 法、C' 法和张裂隙法分别获得了 0.9 左右、0.6~0.8 和 0.55~0.7 的涡度值,指示剪

切后期运动学涡度显著减小;Xypolias 等(2010)在希腊 Ochi 以及 Evia 逆冲带发现 R_{xz}/β 法获得的平均运动学涡度多数大于 δ/β 法的晚期瞬时运动学涡度(图 6a, b); Ghosh 等(2020)在喜马拉雅地区 PT 和 MCT 逆冲带使用石英条带斜交面理法获得的运动学涡度普遍大于更晚的椭圆亚晶粒法(图 6c, d)。这表明此类剪切带的发育与深部物质的韧性挤出紧密相伴,俯冲碰撞进程中挤出作用增强以及地壳的不断加厚导致纯剪切组分持续增加。具有逆冲双重构造的逆冲剪切带大多具有更大的纯剪切组分且减速变形更为显著,因为这可进一步促进深部物质挤出并形成流动障碍(Ghosh and Bhattacharyya, 2022)。

2.1.3 走滑型剪切带的变形路径

走滑型剪切带的韧性变形阶段加速变形和减速变形均较常见。加速变形方面,吴文斌(2016)以及 Wu Wenbin 等(2017)在哀牢山—红河剪切带内用刚性碎斑法获得的平均运动学涡度显著小于 δ/β 法的晚期瞬时运动学涡度(图 7a); Graziani 等(2020)在撒丁岛东北部的 PAL 剪切带内使用刚性碎斑法获得的平均运动学涡度值明显小于 δ/β 法的晚期瞬时运动学涡度;樊文魁(2023)在高黎贡剪切带中使用刚性碎斑法获得的平均运动学涡度小于记录晚期瞬时运动学涡度的 C'-c 法;Li Wenyuan 等(2024)在崇山剪切带使用刚性碎斑法与 δ/β 法亦得到这一模式(图 7b)。减速变形方面,王新社等(2005)在青邑剪切带通过糜棱岩化岩石到超糜棱岩之间的运

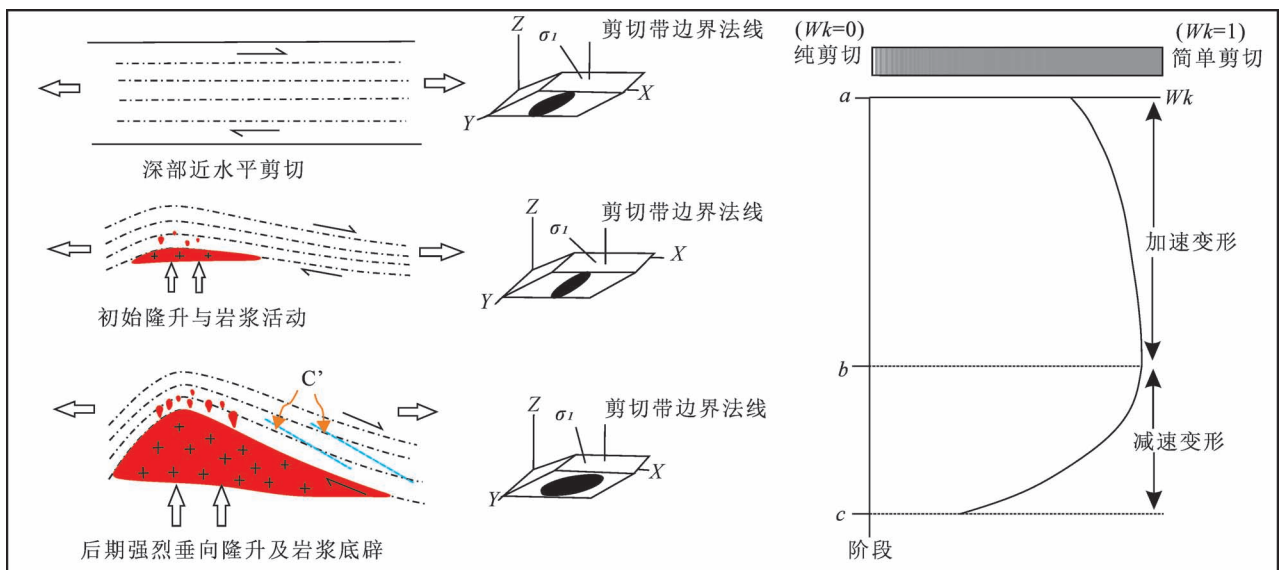


图 5 伸展拆离型剪切带变形路径模式图(据 Li Jianbo et al., 2010 修改)

Fig. 5 Model diagram of the deformation path in detachment shear zone(modified after Li Jianbo et al., 2010)

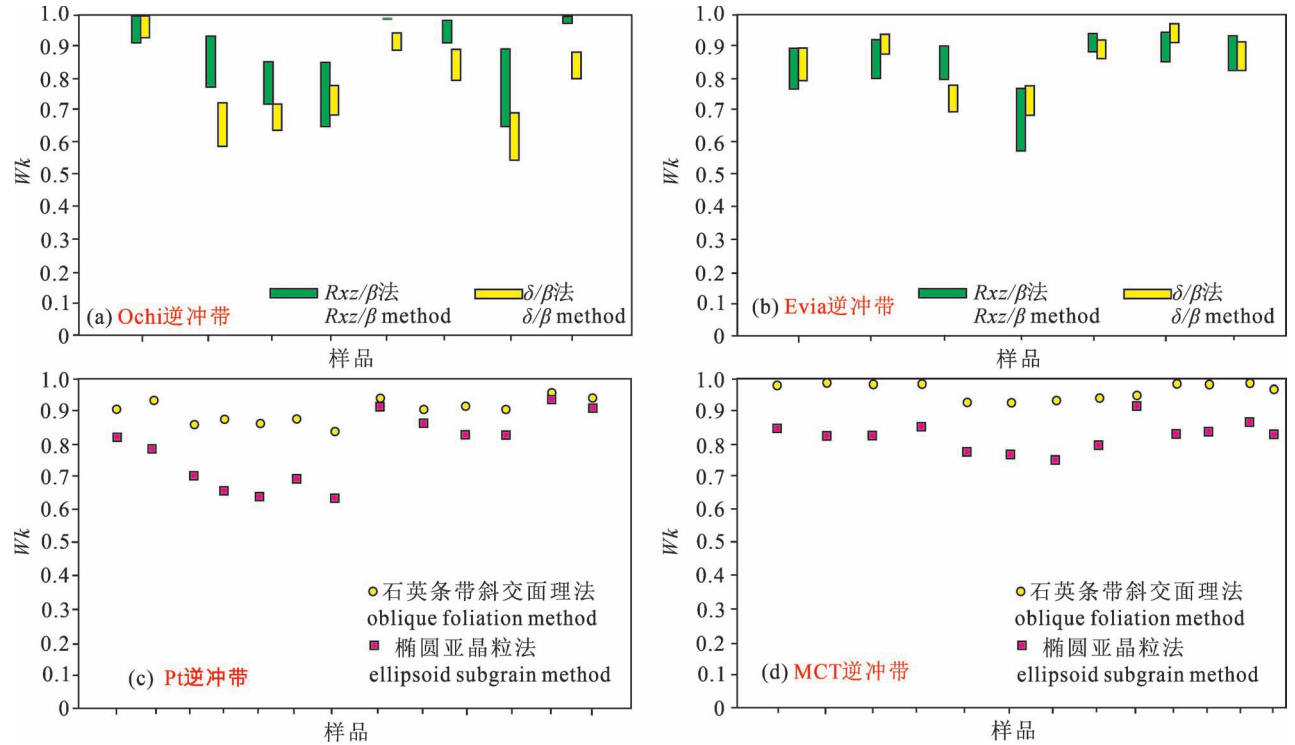


图6 逆冲剪切带减速变形实例:(a)和(b)据 Xypolias et al., 2010 数据整理;(c)和(d)据 Ghosh et al., 2020 数据整理;
(a)和(b)中的 δ/β 法代表相对较晚涡度,(c)和(d)中椭圆亚晶粒法代表相对较晚涡度

Fig. 6 Example of the decelerate deformation path in thrust zone:(a) and (b) is organized with data from Xypolias et al. (2010); (c) and (d) is organized with data from Ghosh et al. (2020); The δ/β method in (a) and (b) represents relatively late-stage vorticity, while the ellipsoid subgrain method in (c) and (d) represents relatively late-stage vorticity

动力学涡度变化判断晚期运动学涡度明显减小;王勇生等(2006)在郯庐断裂南段使用 R_{xz}/β 法获得的平均运动学涡度普遍大于石英条带斜交面理法获得的晚期瞬时运动学涡度;刘川炜(2017)在皖南五城—屯溪剪切带用 R_{xz}/β 法获得的平均运动学涡度大于 R_{xz}/δ 法以及 δ/β 法的晚期瞬时运动学涡度(图7c);张咪咪和赵德军(2021)在碧口地块东南缘剪切带用 R_{xz}/β 法获得的平均运动学涡度大于 δ/β 法的晚期瞬时运动学涡度(图7d)。

这种差异揭示了走滑型剪切带的不同演化机制:一些成员在演化过程中经历了汇聚角逐渐减小的斜俯冲(Kongsukho and Kanjanapayont, 2025),这使变形的非共轴性逐渐增加。例如:藏东南地区诸多走滑型剪切带在印度板块与欧亚板块碰撞早期水平压应力近东西向分布,这使剪切带内纯剪切组分较大。而后地块的旋转挤出过程中压应力向近南北向转化(Huchon et al., 1994),简单剪切组分不断积累,因此展现加速变形;而另一些成员则受控于汇聚角较大的斜俯冲,较大的挤压组分使之具备与逆冲型剪切带相似的构造行为,起到加厚地壳、使微陆块

克拉通化的作用(王新社等,2005)。伴随剪切带演化挤出作用的加强贡献了大量纯剪切组分,这导致了它们的减速变形。

进入脆韧性变形阶段,走滑型剪切带主要表现为减速变形,例如:哈图沟—清水泉—沟里剪切带、哀牢山剪切带以及连云山剪切带使用C'法计算的运动学涡度值均显著小于以韧性变形构造为标志的计算方法(李小兵等,2015;吴文斌,2016;叶挺威,2019),这可能源于剪切带隆升剥露以及沿C'位移分解效应造成的纯剪切贡献(Tikoff and Teyssier, 1994)。

2.1.4 多期及递进变形在变形路径分析中的应用

除了使用不同阶段的计算方法,使用一种方法追踪多期及递进变形过程也可以有效约束变形路径。例如:Klepeis等(1999)在新西兰的Anita剪切带识别出平缓面理线理定义的早期构造和亚垂直面理线理定义的晚期构造,使用旋转碎斑拖尾法分别进行涡度分析并得到了减速变形型式;Montemagni等(2020)对MCT逆冲带内两条次级剪切带通过构造年代学研究确定了其活动时序并分别开展刚性碎

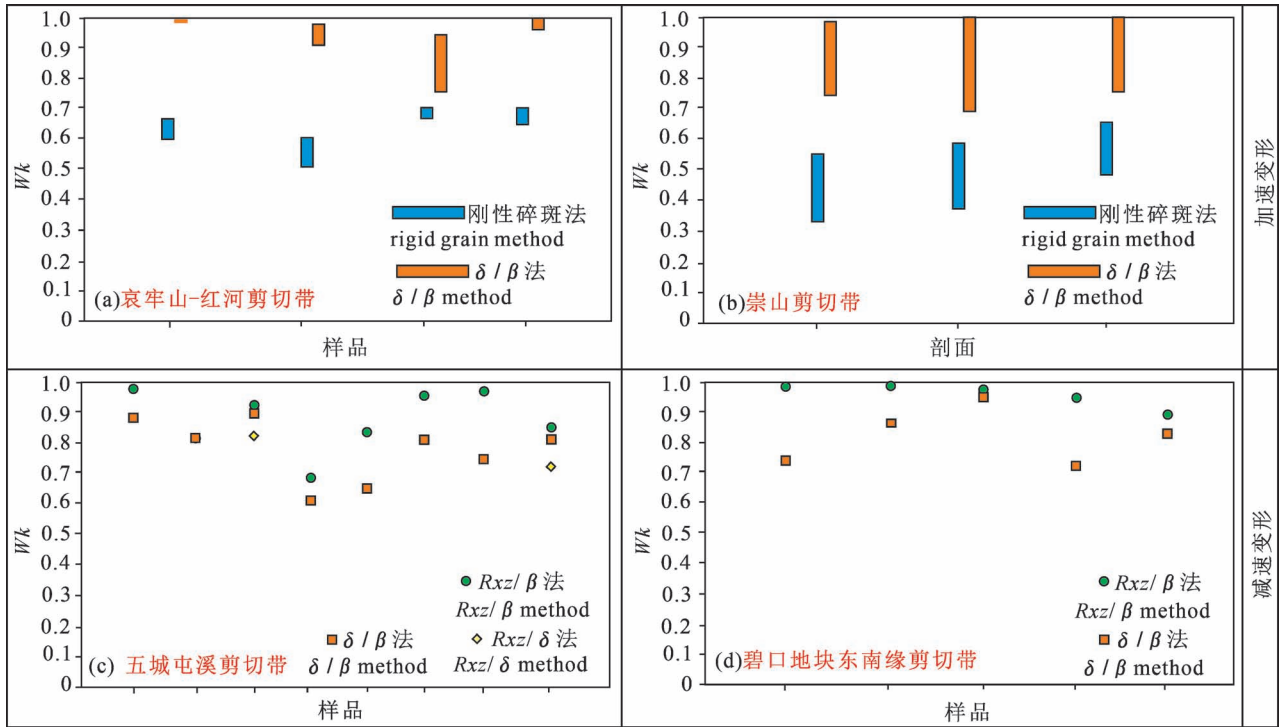


图7 走滑型剪切带韧性变形阶段加速及减速变形路径实例:(a)据 Wu Wenbin 等(2017)数据整理;(b)据 Li Wenyuan 等(2024)数据整理;(c)据刘川炜(2017)数据整理;(d)据张咪咪和赵德军(2021)数据整理;(a)、(b)和(d)中 δ/β 法代表相对较晚涡度,(c)中 R_{xz}/δ 法代表相对较晚涡度

Fig. 7 Example of the accelerate and decelerate deformation path in strike-slip shear zone:(a) is organized with data from Wu Wenbin (2017); (b) is organized with data from Li Wenyuan et al. (2024); (c) is organized with data from Liu Chuanwei (2017&); (d) is organized with data from Zhang Mimi and Zhao Dejun (2021&); The δ/β method in (a), (b) and (d) represents the relatively late-stage vorticity, while the R_{xz}/δ method in (c) represents the relatively late-stage vorticity

斑法涡度分析得到了减速变形型式;特别是很多学者利用糜棱岩化岩石、初糜棱岩、糜棱岩以及超糜棱岩之间的运动学涡度差异来分析变形路径;王新社等(2005)根据青邑剪切带内糜棱岩化岩石—初糜棱岩—糜棱岩—超糜棱岩涡度逐渐降低得到了减速变形型式;李建波等(2012)根据楼子店拆离带中糜棱岩化岩石—初糜棱岩—糜棱岩运动学涡度逐渐减小得到了减速变形型式;夏增明(2013)根据鹊山变质核杂岩拆离带中糜棱岩化片麻岩—初糜棱岩—糜棱岩运动学涡度逐渐增大得到了加速变形型式。笔者等认为使用这一方法应避免主观臆断:Fossen 和 Cavalcante(2017)给出了剪切带的四种演化模式:早期变形均匀展布,随着剪切带加厚变形向两侧集中而中心逐渐停止活动的 Type I;早期变形均匀展布,随后快速集中在中心部位而两侧逐渐停止活动的 Type II;整个剪切过程中各处变形均匀的 Type III;中心部位经历了全部变形,伴随剪切带加厚两侧仅记录晚期增量变形的 Type IV。在这些类型中 Type I 和 Type II 的强变形岩石会记录更多晚期变

形,而 Type IV 中强变形岩石则记录更多早期变形。以王新社等(2005)对青邑剪切带的研究为例,该剪切带发生强烈减薄,结合张尚坤等(2003)指出超糜棱岩带在其中心部位呈狭带状分布可以判断它极大可能属于 Type II,超糜棱岩的确记录了晚期运动学涡度。值得注意的是 Type IV 也可以表现为剪切带中心变形更强,但相较 Type II 强变形带局限性更差且剪切带发生加厚(图 8),若不加分析地认为超糜棱岩一定形成于糜棱岩、初糜棱岩之后则可能对 Type IV 产生误判。因此,通过剪切带减薄或加厚、强变形带局限程度以及与之—弱变形岩石面理交切关系等判断不同变形程度岩石的时序是正确使用该方法的前提。

此外,不同矿物体系也可记载递进变形不同阶段的运动学涡度。刘江等(2011)对大青山拆离断层的研究中使用石英极摩尔圆法测得的涡度值全部在 0.95~1,而长石极摩尔圆法则存在 0.22~0.31 的较低值,并指出这是由于两种矿物记录的变形阶段不一致。这本质上反映了对温压条件的不同响应

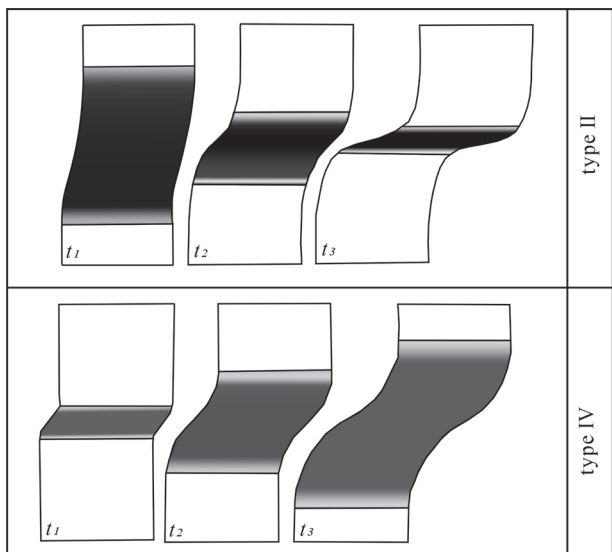


图8 Type II 与 Type IV 剪切带的对比
(据 Fossen and Cavalcante, 2017 修改)

Fig. 8 Comparison of Type II and Type IV shear zone
(modified after Fossen and Cavalcante, 2017)

导致的应变记忆差异:长石发生塑性变形的温度至少达 450~600℃,在 600~700℃ 的高温下才容易形成真正的亚颗粒以及形态学和结晶学优选(巴合达尔·阿勒塔别克等,2019),而石英发生塑性变形的温度则低至 300℃ 左右的低绿片岩相(纪沫等,2008),因此长石较早停止了塑性变形,石英则在剪切晚期中低温环境中还能不断记录增量应变导致的涡度变化。使用其他运动学涡度估算方法同样需要考虑到这一问题,例如:方解石能够发生塑性变形的温度(约 250℃)比石英还低(纪沫等,2008),那么使用斜向叶理法估算运动学涡度时方解石是否可能记录到比石英还晚一些的变形阶段?这值得我们深入思考。

2.1.5 运动学涡度方法选择策略

合理选择运动学涡度方法组合对于获得可靠的变形路径至关重要,其核心在于综合考量样品特点以及不同方法的应变记忆差异。具体可参考笔者等给出的方法选择策略图(图9)。

2.2 运动学涡度的空间变化

剪切带的运动学涡度除时间变化外,在不同空间位置亦有差异。这是变形分解现象的一种表现,即地质体结构不均一性导致的应变不均一性(Bell, 1985)。郑亚东等(2008)对此有形象的比喻:大型剪切带如一条河流,主河道与两侧以及上游与下游之间必然具有流速差异。因此,空间变化也是运动

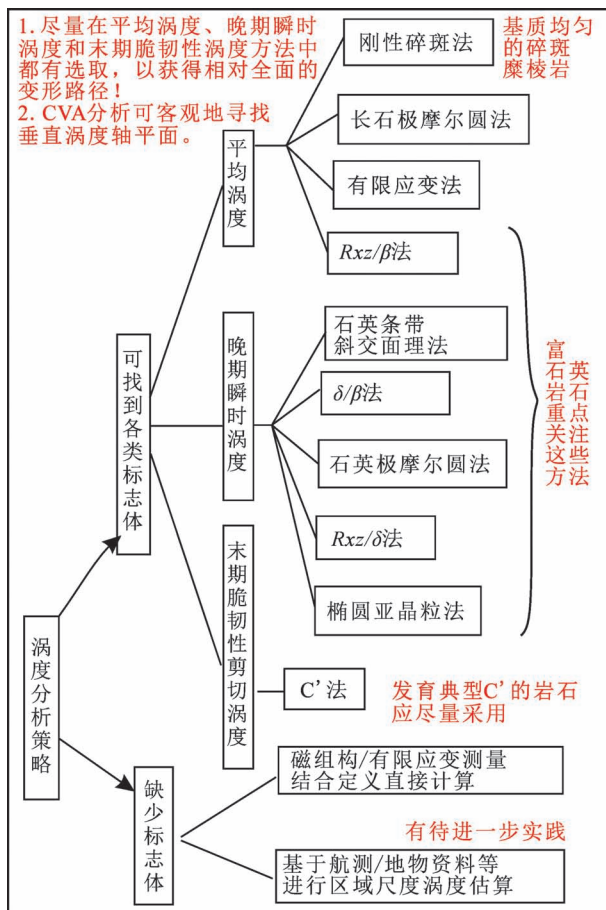


图9 运动学涡度分析方法选择策略图

Fig. 9 Selection strategy diagram of choosing kinematic vorticity analysis methods

学涡度分析的必要环节。

2.2.1 伸展拆离型剪切带的运动学涡度空间变化

伸展拆离型剪切带的运动学涡度空间变化具有显著的二分性。

第一种变化形式为自核部向拆离断层面靠近运动学涡度增大,例如:小秦岭变质核杂岩拆离带(Zhang Jinjiang et al., 2000)、五莲拆离断层带(Ni Jinlong et al., 2019; 季雷, 2022)、吉塘变质核杂岩拆离带(Feng Yipeng et al., 2024)以及康马穹窿拆离带(Wagner et al., 2010)等。

第二种变化形式为自核部向拆离断层面靠近运动学涡度减小,例如:华北北缘楼子店及云蒙山变质核杂岩拆离带(Li Jianbo et al., 2010; Wang Tao et al., 2011)、西阿尔卑斯 Simplon 拆离带(Montemagni and Zanchetta, 2022)以及中蒙边界苏尼特左旗变质核杂岩拆离带(Li Jianbo et al., 2024)等。

2.2.2 逆冲型剪切带的运动学涡度空间变化

逆冲剪切带常表现为靠近冲断面运动学涡度增

大,喜马拉雅地区 MCT 以及 PT 逆冲剪切带 (Bhattacharya and Weber, 2004; Ghosh et al., 2020; Ahanger and Jeelani, 2022)、希腊 External Hellenides 地区诸多逆冲剪切带 (Xypolias and Doutsos, 2000; Xypolias and Koukouvelas, 2001; Xypolias and Kokkalas, 2006)、伊朗 Darizhan 逆冲剪切带 (Derikvand, 2021) 和 Samen 逆冲剪切带 (Derikvand and Almasi, 2022) 以及苏格兰 Moine 逆冲剪切带 (Law, 2010; Thigpen et al., 2010) 等都大致符合此规律,即冲断面附近区域非共轴变形组分更大并形成剪切中心(图 10)。

2.2.3 走滑型剪切带的运动学涡度空间变化

走滑型剪切带的运动学涡度空间变化相比之下更为复杂。Alonso-Henar 等 (2025) 对走滑型剪切带的模拟研究中考虑到了 i 型 (increase, 运动学涡度随时间推移逐渐增大) 与 d 型 (decrease, 运动学涡度随时间推移逐渐减小) 两种流动模式并结合 Fossen 和 Cavalcante (2017) 的 4 种剪切带演化模型 (2.1.4 节已介绍) 得到了 8 种运动学涡度分布模

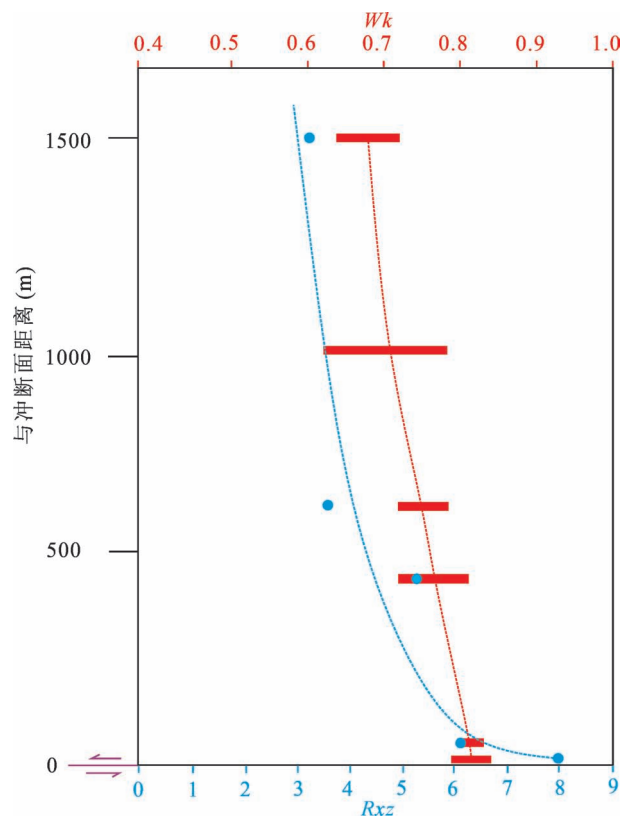


图 10 MCT 逆冲带内 R_{xz} 与 W_k 空间变化示意图 (据 Ahmad and Jeelani, 2022 修改)

Fig. 10 Schematic diagram about the spatial variation of R_{xz} and W_k in MCT zone (modified after Ahmad and Jeelani, 2022)

型。它们很好地解释了 Dewey 等 (1998) 提到的走滑型剪切带内不同的变形分解型式,为笔者等的研究提供了难得的参考。

前人研究中此类剪切带的运动学涡度空间变化普遍表现为“核-幔”或单向变化模式(图 11)。“核-幔”模式中核部(剪切带中心附近的强变形岩石)普遍具有较高的运动学涡度,幔部(剪切带两侧区域的弱变形岩石)普遍具有较低的运动学涡度,例如:澜沧江剪切带(张波等,2008)、元宝山剪切带(郭阿龙,2017)、桐柏杂岩北界剪切带(李海龙等,2017)以及摩天岭剪切带(任志丽等,2025)等;单向变化模式中剪切中心出现在紧邻一侧边界处,向另一侧运动学涡度逐步减小,例如:喀喇沁七家剪切带(陈颖,2014)、金沙江中段剪切带(赵磊,2014)、秦岭沙沟街剪切带(李阳等,2017)以及 Cap de Creus 剪切带 (Alonso-Henar et al., 2025) 等。二者皆可能属于 Type II (i) 或者 Type IV (d) (Alonso-Henar et al., 2025)——天然剪切带中高应变带恰好出现在空间中心只是一种理想情形。Alonso-Henar 等 (2025) 特别强调了用 Type II (i) 解释可能更符合构造演化规律,因为剥露冷却过程更易引起剪切带缩窄与应变局部化。

然而,少数剪切带强变形区运动学涡度较弱变形区更低(王新社等,2005;李小兵等,2015;刘川炜,2017)。结合 2.1.4 节讨论,该空间变化模式可能主要对应 Type II (d)。

走滑型剪切带还容易形成一定的空间集群性,即由多条走向相似的次级剪切带组成“复式变形带”(张尚坤等,2003);常玉巧(2013)在戈枕剪切带的基础上重新厘定了由 NW 带、中间带和 SE 带 3 条次级剪切带构成的琼西剪切带;张尚坤等(2003)厘定的尚河剪切带中包含郑家峪、青邑、石泉庄等多条次级剪切带;李伟(2020)亦在内蒙古四子王旗识别出空间联系紧密的多条元古宙走滑剪切带。此时仅研究某条次级剪切带尚不够全面,最好可以对比不同次级剪切带之间的运动学涡度变化——例如:常玉巧(2013)通过对琼西剪切带 3 条次级剪切带的对比得到了 SE 带的简单剪切组分较 NW 和中间带明显偏高,并综合宏微观构造解析以及年代学研究将这种差异与太平洋板块与东南亚大陆间的俯冲增生作用建立了关联,可见这种对比分析对于深入洞悉区域构造演化历史十分有益。

2.2.4 易被忽视的要点——沿剪切带走向的运动学涡度变化

郑亚东等 (2008) 在形容大型剪切带变形分解

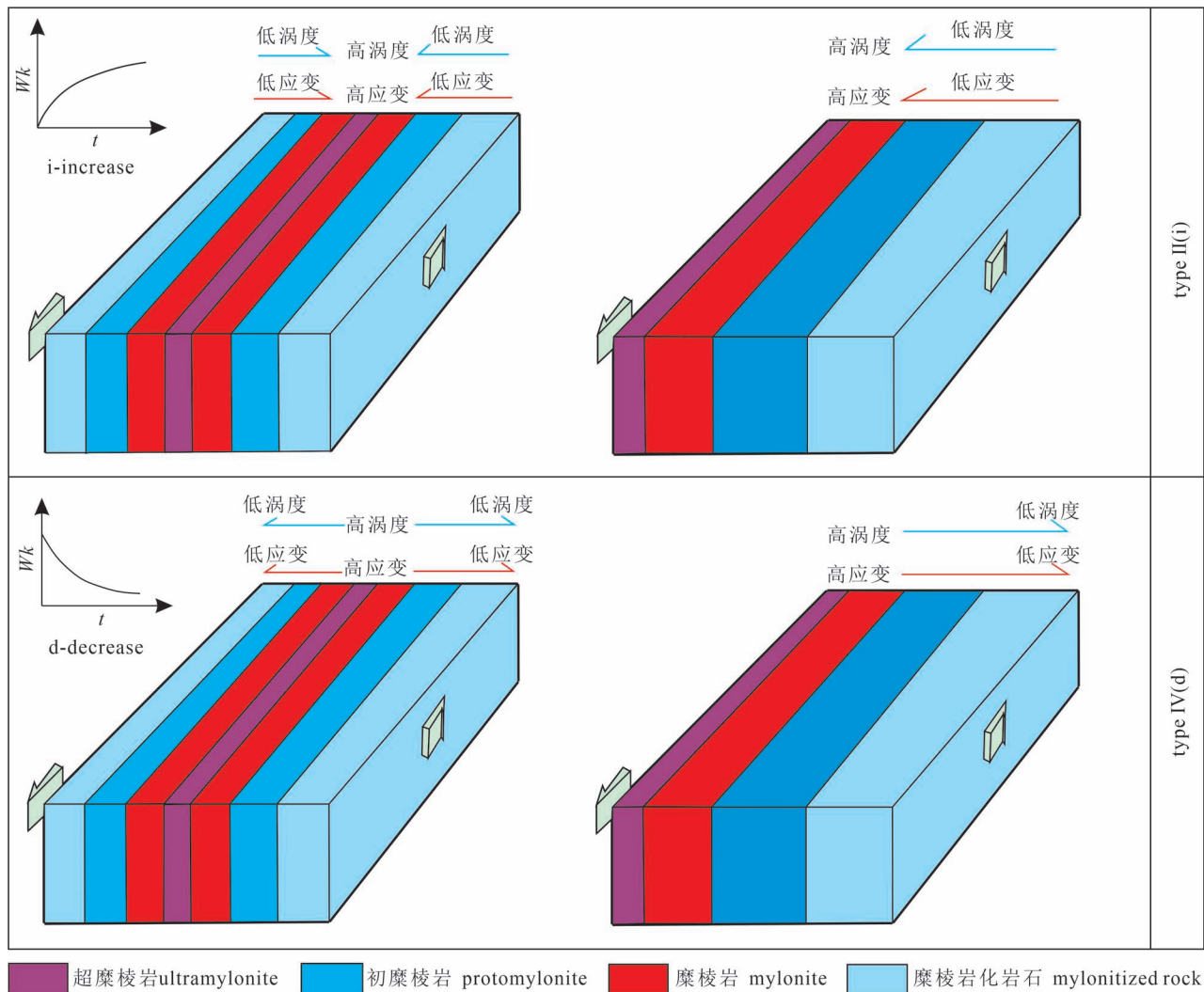


图 11 走滑剪切带常见运动学涡度空间分布对应剪切带类型图解

Fig. 11 Diagram of Spatial Distribution of Kinematic Vorticity Corresponding to Shear Zone Types in Strike-Slip Shear Zones

时用河流的上下游进行比喻,所揭示的正是走向变化研究的重要性。然而,前人普遍重视横跨剪切带的运动学涡度变化及其地质意义,但沿走向变化的分析明显缺乏——例如:李阳等(2017)对秦岭沙沟街剪切带的研究中仅分析了运动学涡度沿倾向自北向南变化的原因,对于走向上“两高夹一低”的成因却未予以解读。

相比于横跨剪切带运动学涡度变化的规律性沿走向的变化更为随机,但这往往更能反映每一条剪切带独特的演化背景,前人对此有限的分析实例形成了十分有价值的见解:向必伟等(2009)发现晓天一磨子潭剪切带沿走向各段皆为运动学涡度 0.9 以上的近简单剪切变形,进而推断剪切带中段走向的剧变并非韧性变形时即发生的;赵腾格等(2021)通过大水峪剪切带南西段具有运动学涡度自北向南

增大的趋势认为这里受到了早期近南北向逆冲推覆的影响;Li Wenyuan 等(2024)通过对比崇山构造带利沙底、老姆登以及苗尾三条剖面的运动学涡度变化指出构造带北部较大的纯剪切组分可能由于更靠近东喜马拉雅构造结从而更接近碰撞前缘。

显然,沿走向运动学涡度变化是长期易被忽视的要点,今后应加强这方面的工作。

3 应变量与运动学涡度的相关性

运动学涡度的空间变化很大程度上反映了应变量(由应变强度(E_s)或 XZ 面轴比(R_{xz})等代表)与运动学涡度的相关性,这是解析剪切带发育机制和变形过程的关键切入点。笔者等认为这与剪切带类型以及伴随的地质过程密切相关。

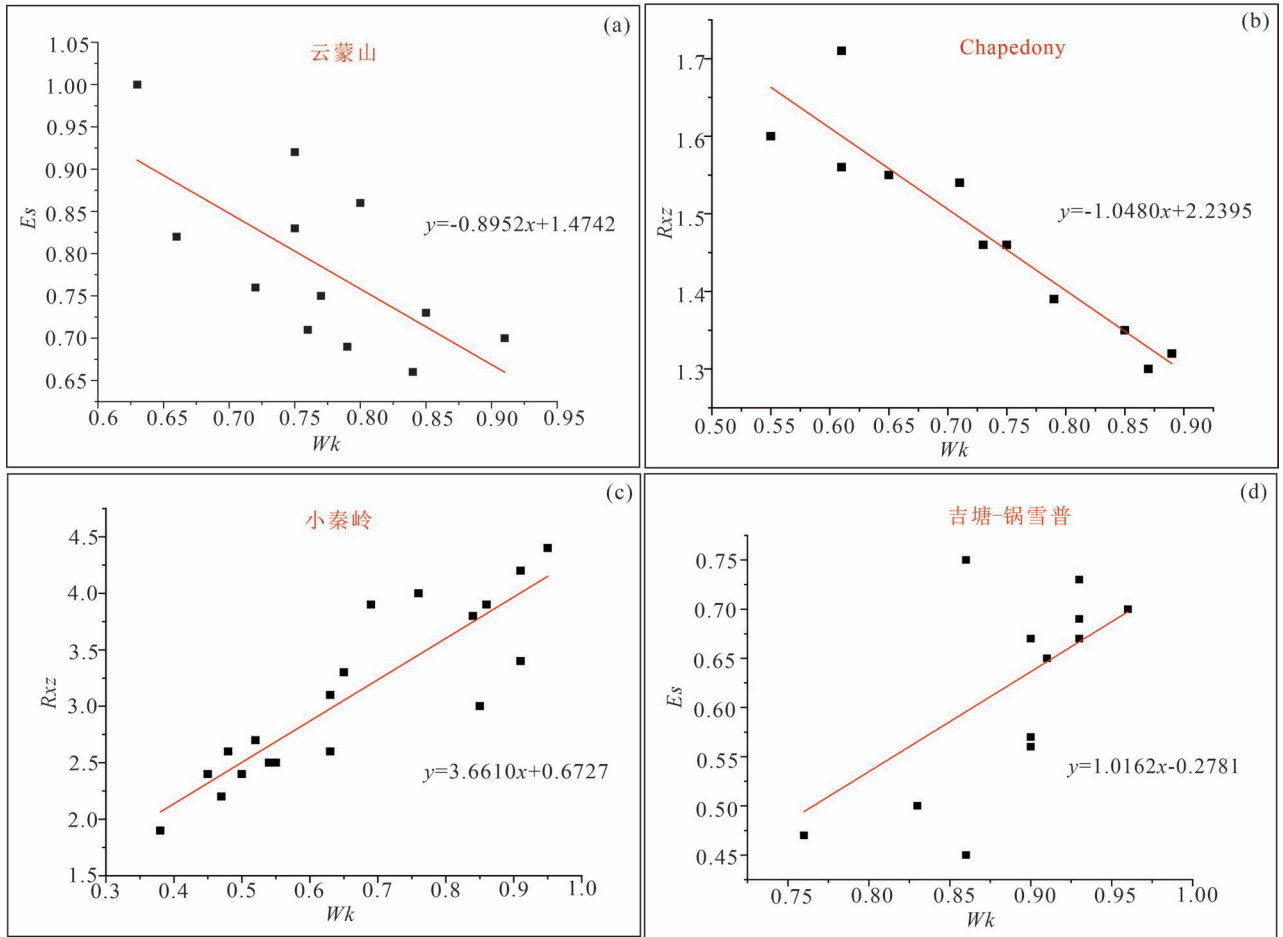


图 12 伸展拆离型剪切带应变量与运动学涡度关系散点图: (a)据 Wang Tao et al., 2011 和 Li Jianbo et al., 2013 数据整理; (b)据 Faghih et al., 2020 数据整理;(c)据 Zhang Jinjiang et al., 2000 数据整理;(d)据 Feng Yipeng et al. 2024 数据整理
Fig. 12 Scatter plot of the correlation between strain and kinematic vorticity in detachment shear zone: (a) modified from Wang Tao et al., 2011 and Li Jianbo et al., 2013; (b) modified from Faghih et al., 2020; (c) modified from Zhang Jinjiang et al., 2000; (d) modified from Feng Yipeng et al., 2024

3. 1 伸展拆离型剪切带应变量与运动学涡度相关性

伸展拆离型剪切带中两者呈现正、负两种相关性;华北楼子店变质核杂岩及云蒙山变质核杂岩拆离带(Li Jianbo et al., 2010; Wang Tao et al., 2011; Li Jianbo et al., 2013)、伊朗中部 Chapedony 变质核杂岩拆离带(Faghih et al., 2020)、西阿尔卑斯 Simplon 拆离带(Montemagni and Zanchetta, 2022)以及中蒙边界苏尼特左旗变质核杂岩拆离带(Li Jianbo et al., 2024)等呈现负相关。图 12a、b 以云蒙山以及 Chapedony 地区前人数据为例具体展现了这一特征,两者的 E_s — W_k 或 R_{xz} — W_k 线性回归拟合线斜率为 -0.8952 和 -1.0480 ,呈典型负相关。在此背景下,应变量的增加主要由伴随地壳伸展逐渐增强的垂向隆升以及同构造岩浆活动所造成,它们对

共轴变形组分贡献较大(图 13),而共轴变形中物质线和瞬时伸长轴平行因此对于应变的积累具有高效性(Tikoff and Teyssier, 1994; Tikoff and Fossen, 1995)。

而小秦岭变质核杂岩拆离带(Zhang Jinjiang et al., 2000)、康马穹窿拆离带(Wagner et al., 2010)、吉塘变质杂岩锅雪普拆离带(Feng Yipeng et al., 2024)以及五莲变质核杂岩拆离带(Ni Jinlong 等, 2019; 季雷, 2022)等呈现正相关。图 12c、d 以小秦岭和锅雪普地区前人数据为例具体展现了这一特征,两者的 E_s — W_k 或 R_{xz} — W_k 线性回归拟合线的斜率为 3.6610 和 1.0162 ,呈典型正相关。此时应变变量可能更多来自拆离断层带活动,在下盘抽拉抬升的过程中应变以及非共轴变形组分逐渐向拆离断层面附近集中(图 14)(季雷, 2022)。前人研究也

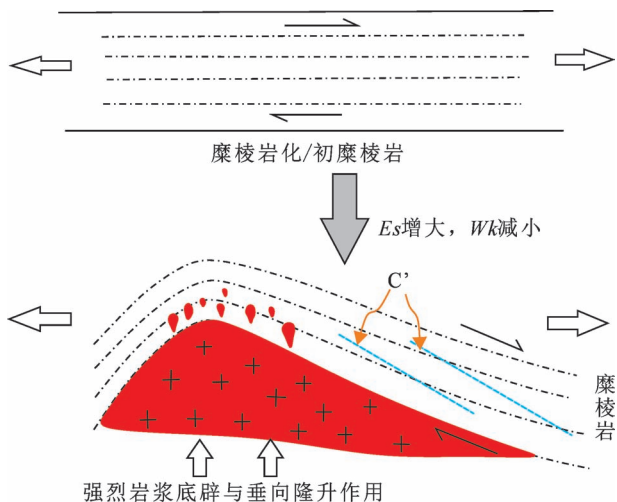


图 13 伸展拆离型剪切带 E_s — W_k 负相关成因模式图
(据 Li Jianbo 等, 2010 修改)

Fig. 13 E_s — W_k negative correlation formation modal diagram in detachment shear zone(modified after Li Jianbo et al., 2010)

指出小秦岭岩浆活动主要在拆离断层形成之前 (Zhang Jinjiang and Zheng Yadong, 1999), 五莲岩浆活动集中在变质核杂岩形成之后 (季雷, 2022), 这对应了刘俊来等 (2020) 提出的无岩浆活动型伸展, 进一步表明岩浆底辟主导的垂向作用不是这些拆离带内应变的主要来源。

3.2 逆冲型剪切带应变变量与运动学涡度相关性

逆冲型剪切带中两者主要呈正相关, 靠近冲断面应变变量逐渐增大的同时运动学涡度也同步增大。希腊 Parnon 和 Taygetos 逆冲带 (Xypolias and Kokkalas, 2006), 苏格兰 Moine 逆冲带 (Law, 2010), 伊朗 Darizhan 逆冲带 (Derikvand, 2021)、Samen 逆冲

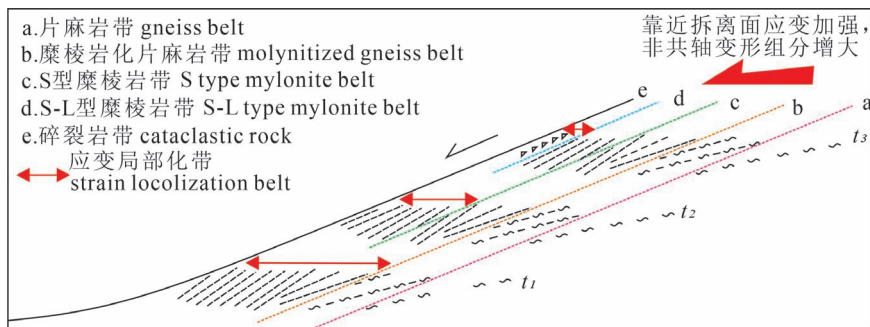


图 14 伸展拆离型剪切带 E_s — W_k 正相关成因模式图

——以五莲变质核杂岩为例 (据季雷, 2022 修改)

Fig. 14 E_s — W_k positive correlation formation modal diagram——take Wulian metamorphic core complex for example(modified after Ji Lei, 2022&)

带 (Derikvand and Almasi, 2022)、Alvand 逆冲带 (Imanpournamin and Sarkarinejad, 2022) 以及喜马拉雅地区 MCT 和 PT 逆冲带 (例如: Bhattacharya and Weber, 2004; Ghosh et al., 2020; Ahanger and Jeelani, 2022) 等多个实例均符合这一特征。图 15 中以 MCT、Samen、Alvand 以及 Tagetos 逆冲带前人数据为例具体展现了这一关系, 其 R_{xz} — W_k 线性回归拟合线斜率分别为 6.4707、1.6945、1.5365 以及 5.6792, 呈典型正相关。这一规律表明靠近冲断面的区域应变显著增加造成应变软化使简单剪切组分大量积累 (Ahanger and Jeelani, 2022)。

3.3 走滑型剪切带应变变量与运动学涡度相关性

走滑型剪切带内两者大多呈现正相关, 少数呈现负相关。正相关实例包括桂北地区元宝山 (郭阿龙, 2017) 和摩天岭剪切带 (任志丽等, 2025), 大别地区桐柏杂岩北界剪切带 (李海龙等, 2017) 和晓天—磨子潭剪切带 (向必伟等, 2009), 滇西地区澜沧江剪切带 (张波等, 2008)、高黎贡剪切带 (樊文魁, 2023) 和金沙江中段剪切带 (赵磊, 2014) 以及撒丁岛 PAL 剪切带 (Graziani et al., 2020) 等。图 16a、b 以桐柏杂岩北界剪切带和晓天磨子潭剪切带前人数据为例具体展现了这一关系, 其 R_{xz} — W_k 线性回归拟合线斜率分别为 2.0335 和 209.5106, 为典型正相关。这些剪切带主要对应 Type II (i) 以及少数 Type IV (d), 其应变可能更多由转换作用所贡献, 且简单剪切组分普遍较大; 负相关实例包括青邑剪切带 (王新社等, 2005)、郟庐断裂南段剪切带 (王勇生等, 2006)、哈图沟—清水泉—沟里剪切带 (李小兵等, 2015) 以及五城—屯溪剪切带 (刘川炜, 2017) 等。图 16c、d 以青邑剪切带及郟庐断裂南段剪切带前人数据为例具体展现了这一关系, 其 R_{xz} — W_k 线性回归拟合线的斜率分别为 -14.5929 和 -27.2654, 为典型负相关。它们普遍属于 Type II (d), 即应变变量与运动学涡度的负相关与减速变形常相伴出现, 这表明此时应变可能更多由挤压作用所贡献, 且纯剪切组分普遍较大。

靠近拆离面应变加强, 非共轴变形组分增大

4 结语

(1) 创新性运动学涡度分析方法在特定场景下具有关键作用; 椭圆亚晶粒法和 R_{xz}/δ 法与

斜向叶理相关传统方法联用可以更精准地约束富石英构造岩韧性变形晚期运动学涡度变化;3D应变椭球法与磁面理法是缺乏实际标志体时重要的替代方法;CVA分析法是确定VNS、判断剪切属性与识别多期变形的重要手段。

(2)一般情况下,3种剪切带在运动学涡度时空变化以及应变—运动学涡度关系方面存在一定区别:①伸展拆离型剪切带的变形路径多为“先加速,后减速”变形型式;逆冲型剪切带多为减速变形型式;走滑型剪切带“先加速,后减速”变形型式与减速变形型式均较常见;通过多期及递进变形分析变形路径时一定要注意其时序问题。②伸展拆离型剪切带向拆离断层面靠近运动学涡度增大或减小;逆冲剪切带大多靠近冲断面运动学涡度增大;走滑型剪切带主要表现为中心较两侧运动学涡度增大或者

由一侧向另一侧运动学涡度逐渐增大的单向变化,对于复式走滑剪切带应注重对比不同次级剪切带之间的运动学涡度变化。③伸展拆离剪切带中若应变主要由岩浆底辟与垂向隆升作用贡献则应变多与运动学涡度呈现负相关,若应变主要由拆离断层活动贡献则应变多与运动学涡度呈现正相关;逆冲剪切带中应变多与运动学涡度呈现正相关;走滑型剪切带中应变多与运动学涡度正相关,少数负相关者应变主要由挤压作用所贡献。

后续研究可注重以下4方面:注意不同矿物体系的应变记忆差异并采取多阶段方法提高分析全面性;尝试结合航测或地物资料开展区域尺度运动学涡度分析;加强沿剪切带走向运动学涡度变化的分析;通过物理及数值模拟进一步探究不同类型剪切带应变—运动学涡度相关性的控制因素。

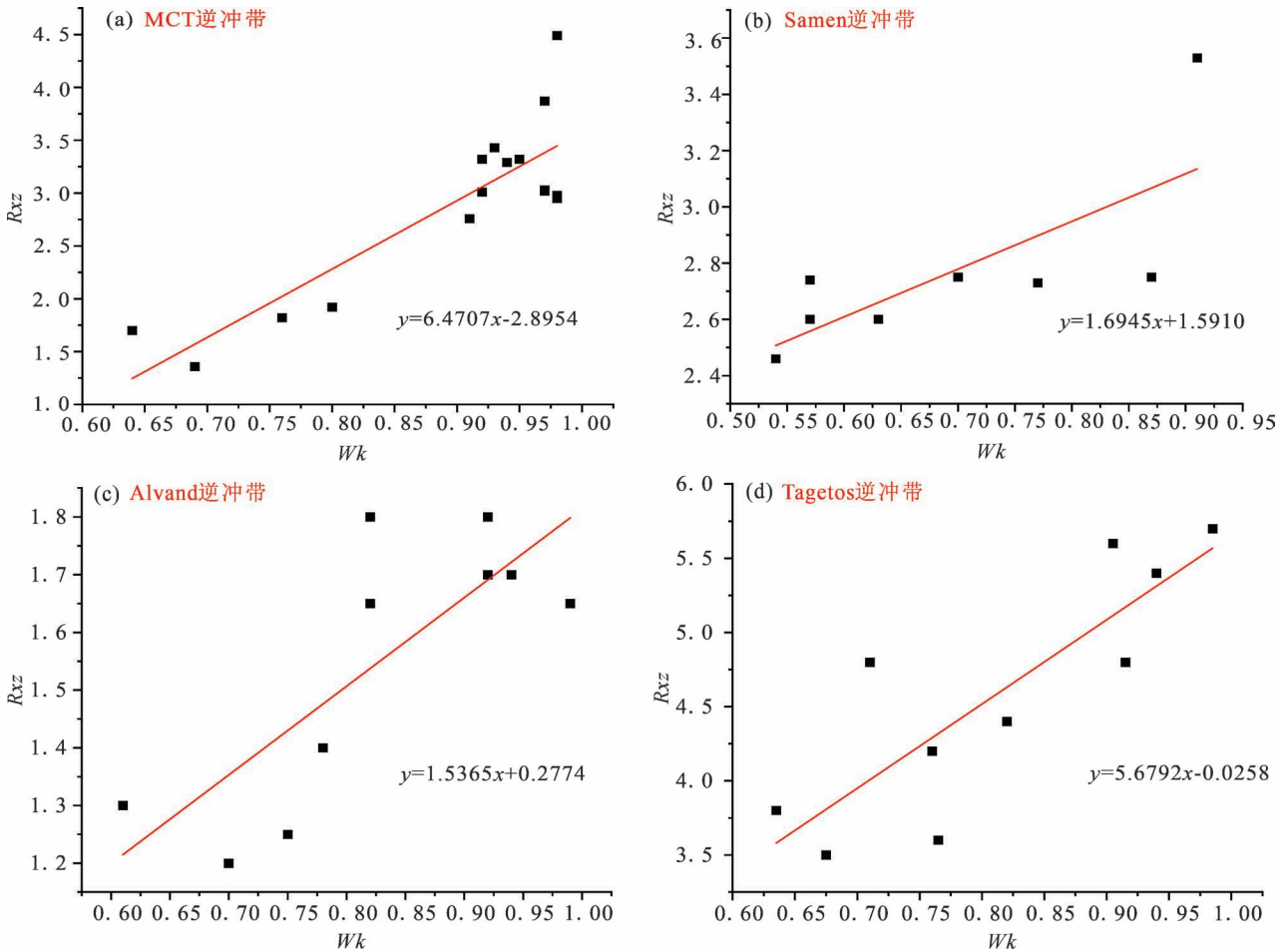


图 15 逆冲型剪切带应变量与运动学涡度关系散点图:(a)据 Ghosh 等(2020)数据整理;(b)据 Derikvand 和 Almasi (2022)数据整理;(c)据 Imanpournamin 和 Sarkarinejad 等(2022)数据整理;(d)据 Xypolias 和 Kokkalas(2006)数据整理
Fig. 15 Scatter plot of the correlation between strain and kinematic vorticity in thrust shear zone:(a) is modified from Ghosh et al., 2020;(b) is modified from Derikvand and Almasi, 2022;(c) is modified from Imanpournamin and Sarkarinejad, 2022;(d) is modified from Xypolias and Kokkalas, 2006

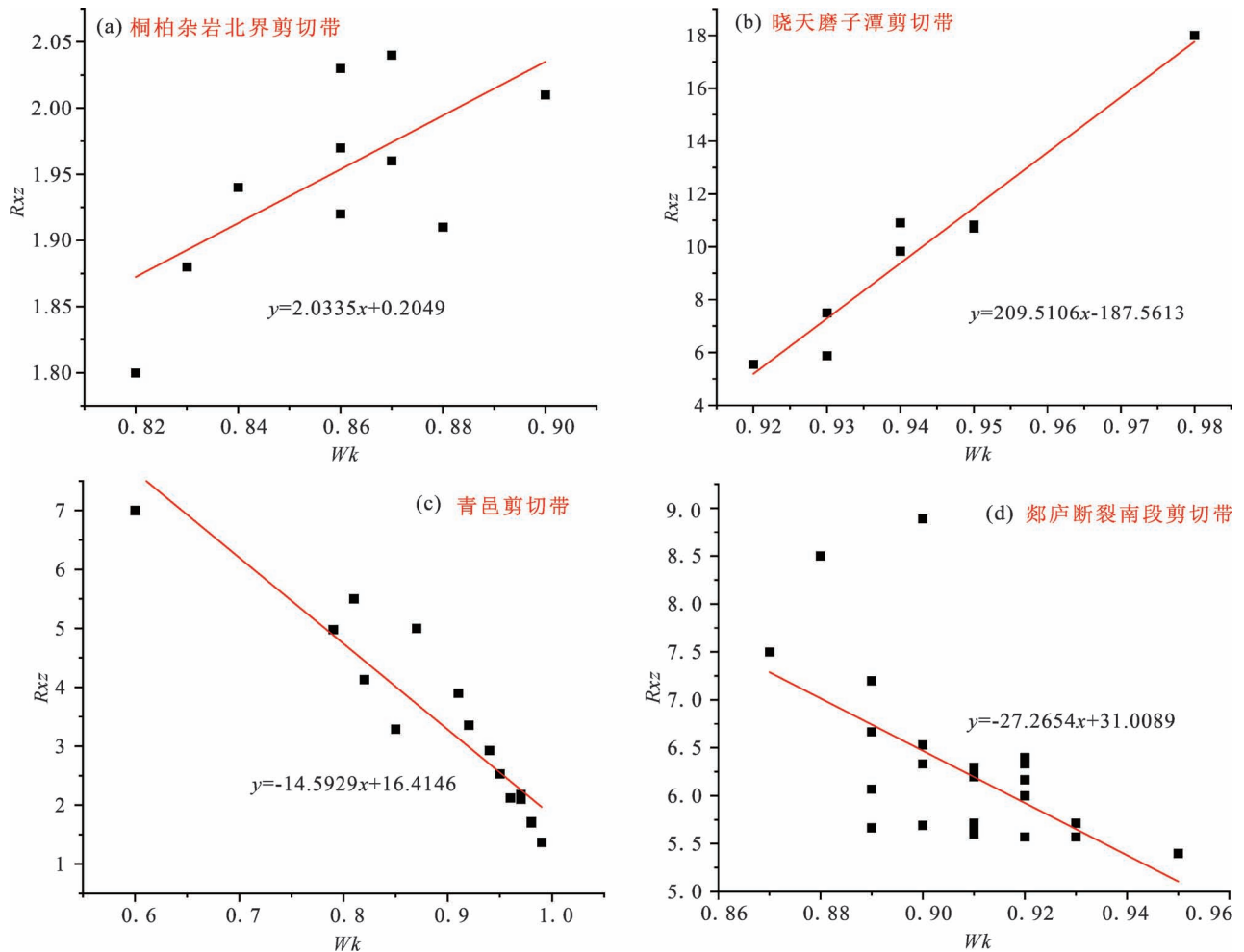


图 16 走滑型剪切带应变与运动学涡度关系散点图: (a)据李海龙等(2017)数据整理;(b)据向必伟等(2009)数据整理;(c)据王新社等(2005)以及 Zhang Hao 等(2022)数据整理;(d)据王勇生等(2006)数据整理

Fig. 16 Scatter plot about the correlation between strain and kinematic vorticity in strike-slip shear zone: (a) is modified from Li Hailong et al. (2017&); (b) is modified from Xiang Biwei et al. (2009&); (c) is modified from Zhao Hao et al. (2022); Fig (d) is modified from Wang Yongsheng et al. (2006&)

运动学涡度分析在国际上大规模应用已近 40 年,在我国也走过了近 30 年的历程。汲取前辈的经验并敏锐洞察值得进一步探索的窗口,正是我们不断前行所需要的。谨以此文向近 40 年间为该领域发展做出贡献的中外学者致敬!

致谢:感谢张波副教授和另一位匿名审稿人对本文提出的宝贵建议,以及樊文魁和江成宇对本文创作的热切鼓励!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

巴合达尔·巴勒塔别克, 赵中宝, 王根厚, 孙丽静, 赵鹏彬. 2019. 长石显微变形机制研究进展. 地质学报, 93(10): 2678~2697.
 常玉巧. 2013. 琼西韧性剪切带厘定、涡度分析及其区域构造意义. 导

师: 刘俊来. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1~64.
 陈颖. 2014. 内蒙古赤峰喀喇沁旗南部韧性剪切带变形特征及其区域构造意义. 导师: 赵国春. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1~51.

杜灿, 郭磊, 王涛, 李建波, 童英, NARANTSETSEG Tserendash, ENKH-ORSHIKH Orsoo, 张磊. 2022. 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. 岩石矿物学杂志, 41(1): 18~36.

樊文魁. 2023. 藏东南新生代中下地壳分层流动: 高黎贡杂岩构造解析. 导师: 刘俊来. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文: 1~160.

范天一, 秦亚, 冯佐海, 郑桂青, 白玉明, 胡乔帆, 吴杰. 2023. 桂北地区龙胜韧性剪切带的应变特征及构造意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 50(5): 613~628.

冯翼鹏. 2022. 藏东吉塘变质核杂岩新生代韧性变形及大地构造意义. 导师: 王根厚. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文: 1~164.

郭阿龙. 2017. 桂北元宝山韧性剪切带构造特征及流变参数估算. 导师: 冯佐海. 桂林: 桂林理工大学硕士学位论文: 1~55.

- 侯泉林, 刘宏伟, 郭谦谦. 2021. 伸展褶皱理(C面理)在递进变形过程中的行为及其对剪切带面理(S面理)的影响. 岩石学报, 37(12): 3645~3655.
- 胡军. 2022. 江南造山带东段新元古代—早古生代韧性变形及构造意义. 导师: 余心起. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文; 1~168.
- 纪沫, 胡玲, 刘俊来, 曹淑云. 2008. 主要造岩矿物动态重结晶作用及其变质条件. 地学前缘, 15(3): 226~233.
- 季雷. 2022. 克拉通岩石圈减薄过程中的壳/幔耦合关系. 导师: 刘俊来. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文; 1~167.
- 李刚, 刘正宏, 李永飞, 刘俊来, 徐仲元, 李世超. 2013. 辽西医巫闾山区韧性剪切带的应变与运动学涡度. 地质通报, 32(2~3): 408~423.
- 李海龙, 宋传中, 李加好, 任升莲, 张妍, 王微, 杨帆. 2017. 桐柏杂岩北界剪切带的变质变形分析及归属讨论. 地质论评, 63(2): 347~362.
- 李建波, 王涛, 郭磊, 童英, 欧阳志侠, 曾涛, 史兴俊, 张建军. 2012. 韧性剪切带的剪切作用类型和韧性减薄量. 地质通报, 31(1): 26~37.
- 李康, 焦骞骞, 许德如, 张胜印, 常华诚, 戴家润. 2024. 广东河台金矿田糜棱岩磁组对剪切带变形与成矿的约束. 地质学报, 98(6): 1757~1775.
- 李伟. 2020. 内蒙古四子王旗元古宙韧性剪切带. 导师: 周志广. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文; 1~63.
- 李小兵, 裴先治, 陈有炘, 刘成军, 李佐臣, 李瑞保, 陈国超, 魏博. 2015. 东昆仑造山带东段哈图沟—清水泉—沟里韧性剪切带塑性变形及动力学条件研究. 大地构造与成矿学, 39(2): 208~230.
- 李阳, 梁文天, 靳春胜, 董云鹏, 袁洪林, 张国伟. 2017. 秦岭沙沟街韧性剪切带的岩石磁学、磁组构和运动学涡度分析. 岩石学报, 33(6): 1919~1933.
- 李阳. 2013. 剪切带运动学涡度研究进展. 地下水, 35(4): 250~252.
- 刘川炜. 2017. 皖南五城—屯溪韧性剪切带显微构造特征与运动学分析. 导师: 余心起. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文; 1~51.
- 刘江, 张进江, 郭磊, 戚国伟. 2011. 大青山伸展拆离断层运动学涡度研究及构造指示意义. 大地构造与成矿学, 35(1): 1~11.
- 刘江, 张进江, 张波. 2012. 极摩尔圆法计算二维平均运动学涡度. 地质科学, 47(1): 13~21.
- 刘江. 2019. 伸展褶皱理地质现象、成因机制及其地质意义. 地质科技情报, 38(2): 1~13.
- 刘俊来, 倪金龙, 陈小宇, Craddock J P, 郑媛媛, 孙彦琪, 季雷. 2020. 岩石圈伸展的壳/幔拆离模型(Parallel Extension Tectonics): 华北克拉通东部早白垩世岩石圈减薄与破坏机理. 岩石学报, 36(8): 2331~2343.
- 孟元库, 许志琴, 马士委, 刘晓佳. 2016. 运动学涡度在藏南冈底斯岩浆带中段谢通门—一曲水韧性剪切带中的应用. 地质学报, 90(11): 3023~3038.
- 聂冠军, 杨仕升, 张沛全, 李冰溯. 2019. 右江地区新生代走滑断裂活动特征及其构造意义. 大地构造与成矿学, 43(6): 1094~1105.
- 任志丽, 秦亚, 冯佐海, 吴杰, 刘诗云, 胡乔帆, 白玉明, 周鹏程. 2025. 桂北地区摩天岭韧性剪切带的应变特征及其构造意义. 矿产综合利用, 46(1): 46~60.
- 王新社, 郑亚东, 张进江, Davis G A, Darby B J. 2002. 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, 21(4~5): 238~245.
- 王新社, 张尚坤, 张富中, 杨崇辉. 2005. 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, 26(5): 423~428.
- 王勇生, 朱光, 宋传中, 刘国生. 2006. 郯庐断裂带南段晚期韧性剪切带涡度分析及其构造意义. 地质论评, 52(5): 591~600.
- 王勇生, 朱光. 2004. 运动学涡度及其测量方法. 合肥工业大学学报(自然科学版), 27(11): 1480~1484.
- 吴文斌. 2016. 袁牢山构造带中北段古特提斯裂谷演化与新生代构造变形. 导师: 刘俊来. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文; 1~115.
- 武亚威, 张建新, 路增龙, 周桂生, 毛小红, 滕霞, 郭祺. 2022. 柴达木盆地北缘东段察汗河右行转换挤压剪切带的变形样式及构造意义. 地质学报, 96(6): 1937~1956.
- 夏浩然. 2011. 伸展拆离型韧性剪切带的演化: 北京云蒙山水峪剪切带的显微构造、运动学与流变学研究. 导师: 刘俊来. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文; 1~36.
- 夏增明. 2013. 胶东东部鹊山变质核杂岩结构、演化及区域构造意义. 导师: 刘俊来. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文; 1~86.
- 向必伟, 朱光, 姜大志, 王勇生. 2009. 晓天一磨子潭韧性剪切带变形模拟及其对北大别穹隆构造演化的指示. 地质论评, 55(2): 159~172.
- 杨谦, 施旸, 侯贵廷. 2019. 中国东部及邻区晚中生代伸展拆离构造——综述与新认识. 地球学报, 40(4): 511~544.
- 叶挺威. 2019. 华南晚中生代的构造演化: 来自湘东北连云山地区构造变形事件的证据. 导师: . 北京: 中国科学院大学硕士学位论文; 1~90.
- 张波, 张进江, 郭磊, 戚国伟. 2006. 三维韧性剪切变形构造组构样式探讨. 北京大学学报(自然科学版), 42(6): 708~716.
- 张桂林, 梁金城, 冯佐海. 2002. 一般剪切带中运动学涡度的确定和构造意义. 桂林工学院学报, 22(2): 99~103.
- 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. 地质科技情报, (3): 33~39.
- 张咪咪, 赵德军. 2021. 碧口地块东南缘韧性剪切带构造特征浅析. 矿物岩石, 41(4): 80~93.
- 张尚坤, 王新社, 辛国金, 张增奇, 王从祥, 杨崇辉. 2003. 鲁西尚河韧性剪切带变形特征研究. 山东地质, 19(2): 30~35.
- 赵磊. 2014. 义敦岛弧西侧金沙江中段韧性剪切带应变特征研究. 导师: 颜丹平. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文; 1~42.
- 赵腾格, 侯泉林, 石梦岩, 丁林. 2021. 北京云蒙山变质核杂岩大水峪韧性剪切带的应变特征及构造意义. 岩石学报, 37(8): 2483~2501.
- 郑亚东, 王涛, 王新社. 2007. 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), 43(2): 145~156.
- 郑亚东, 王涛, 张进江. 2008. 运动学涡度的理论与实践. 地学前缘, 15(3): 209~220.
- 郑亚东, 王涛. 2005. 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. 中国科学(D辑: 地球科学), 35(4): 291~303.
- 郑亚东. 1999. 亚干变质核杂岩的运动学涡度与剪切作用类型. 地质科学, 34(3): 273~280.
- Ahanger M A, Jeelani G. 2022. Deformation kinematics of main central thrust zone (MCTZ) in the western Himalayas. Journal of Earth Science, 33(2): 452~461.
- Alonso-Henar J, Fernández C, Díaz-Azpiroz M, Druguet E. 2025. Unsteady transpression: How progressive variations in kinematic vorticity influence finite strain in shear zone evolution. Journal of Structural Geology, 198: 105462.
- Bailey C M, Eyster E L. 2003. General shear deformation in the Pinaléño Mountains metamorphic core complex, Arizona. Journal of Structural Geology, 25(11): 1883~1892.
- Bailey C M, Polvi L E, Forte A M. 2007. Pure shear dominated high-strain zones in basement terranes. In: 4-D Framework of Continental

- Crust. Geological Society of America: 93~108.
- Baletabieke Bahedaer, Zhao Zhongbao, Wang Genhou, Sun Lijing, Zhao Pengbin. 2019. Research advances of microstructural deformation mechanism of feldspar. *Acta Geologica Sinica*, 93(10): 2678~2697.
- Behyari M, Shahbazi M. 2019. Strain and vorticity analysis in the Zagros suture zone (W Iran): Implications for Neo-Tethys post-collision events. *Journal of Structural Geology*, 126: 198~209.
- Bell T H. 1985. Deformation partitioning and porphyroblast rotation in meta-morphic rocks: A radical reinterpretation. *Journal of Metamorphic Geology*, 3(2): 109~118.
- Bestmann M, Prior D J. 2003. Intragranular dynamic recrystallization in naturally deformed calcite marble: Diffusion accommodated grain boundary sliding as a result of subgrain rotation recrystallization. *Journal of Structural Geology*, 25: 1597~1613.
- Bhattacharya A R, Weber K. 2004. Fabric development during shear deformation in the Main Central Thrust Zone, NW-Himalaya, India. *Tectonophysics*, 387(1~4): 23~46.
- Bobyarchick A R. 1986. The eigenvalues of steady flow in Mohr space. *Tectonophysics*, 122(1~2): 35~51.
- Chang Yuqiao. 2013. Determination of Qiongxi ductile shear zone, vorticity analysis and its regional tectonic significance. Dissertation Supervisor: Liu Junlai. Beijing: China University of Geosciences Master Thesis: 1~64.
- Chen Ying. 2014. Deformation characteristics of ductile shear zone in the south of Harqin Banner, Chifeng, Inner Mongolia and its regional tectonic significance. Dissertation Supervisor: Zhao Guochun. Beijing: China University of Geosciences Master Thesis: 1~51.
- Das J P, Bhattacharyya K, Mookerjee M, Ghosh P. 2016. Kinematic analyses of orogen-parallel L-tectonites from Pelling-Munsiari thrust of Sikkim Himalayan fold thrust belt: Insights from multiple, incremental strain markers. *Journal of structural geology*, 90: 61~75.
- Derikvand S, Almasi A. 2022. Kinematic vorticity, finite strain, and deformation thermometry analyses of the exhumed mylonites in the Samen ductile shear zone (Sanandaj-Sirjan Metamorphic Belt, Iran). *Journal of Structural Geology*, 154: 104500.
- Derikvand S. 2021. Quantitative kinematic analyses of the Darizhun shear zone within the hinterland of the Zagros orogenic belt, Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 110(2): 609~626.
- Dewey J F, Holdsworth R E, Strachan R A. 1998. Transpression and transtension zones. Geological Society, London, Special Publications, 135(1): 1~14.
- Díaz-Azpiroz M, Fernández C, Czeck D M. 2019. Are we studying deformed rocks in the right sections? Best practices in the kinematic analysis of 3D deformation zones. *Journal of Structural Geology*, 125: 218~225.
- Du Can, Guo Lei, Wang Tao, Li Jianbo, Tong Ying, Tserendash N, Orsoo E O, Zhang Lei. 2022. Timing of extension, type of shearing and regional tectonic implications of the Early Cretaceous asymmetric granitic domes in China-Mongolia border area. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(1): 18~36.
- Faghhi A, Soleimani M, Partabian A. 2020. Exhumation style of the chapedony core complex (central Iran): Insights from kinematic vorticity analysis. *Geotectonics*, 54(5): 705~712.
- Fan Tianyi, Qin Ya, Feng Zuohai, Zheng Guiqing, Bai Yuming, Hu Qiaofan, Wu Jie. 2023. The strain characteristics and tectonic significance of the Longsheng ductile shear zone in Northern Guangxi, China. *Journal of Chengdu University of Technology* (Science & Technology Edition), 50(5): 613~628.
- Fan Wenkui. 2023. Stratified flow of Cenozoic middle and lower crust in southeastern Tibet: Structural analysis of Gaoligong complex. Dissertation Supervisor: Liu Junlai. Beijing: China University of Geosciences Doctoral Dissertation: 1~160.
- Feng Yipeng, Wang Genhou, Meng Yuanku, Li Dian, Xu Xuming, Lu Yang, Li Jie, Liu Han. 2020. Kinematics, strain patterns, rheology, and geochronology of Woka ductile shear zone: Product of uplift of Gangdese batholith and Great Counter Thrust activity. *Geological Journal*, 55(11): 7251~7271.
- Feng Yipeng, Wang Genhou, Wang Shulai, Li Dian, Wang Huan, Lu Yang, Liu Han, Zhang Peilie. 2024. Structural, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological and rheological feature analysis of the guoxuepu shear zone: Indications for the jitang metamorphic complex in the northern Lancangjiang zone. *Acta Geologica Sinica* (English Edition), 98(1): 32~49.
- Feng Yipeng. 2022. Cenozoic ductile deformation of Jitang metamorphic core complex in eastern Tibet and its tectonic significance. Dissertation Supervisor: Wang Genhou. Beijing: China University of Geosciences Doctoral Dissertation: 1~164.
- Fossen H, Cavalcante G C G. 2017. Shear zones - A review. *Earth-Science Reviews*, 171: 434~455.
- Fossen H, Tikoff B. 1993. The deformation matrix for simultaneous simple shearing, pure shearing and volume change, and its application to transpression-transension tectonics. *Journal of Structural Geology*, 15(3~5): 413~422.
- Ghosh P, Bhattacharyya K, Parui C. 2020. Tracking progressive deformation of an orogenic wedge through two successive internal thrusts: Insights from structure, deformation profile, strain, and vorticity of the Main Central thrust (MCT) and the Pelling-Munsiari thrust (PT), Sikkim Himalayan fold thrust belt. *Journal of Structural Geology*, 140: 104120.
- Ghosh P, Bhattacharyya K. 2022. Investigating inter-relationships among kinematic vorticity, strain, and minimum translations from shear zones associated with internal thrusts of major fold-thrust belts. *Earth-Science Reviews*, 231: 104093.
- Giorgis S, Michels Z, Dair L, Braudy N, Tikoff B. 2017. Kinematic and vorticity analyses of the western Idaho shear zone, USA. *Lithosphere*, 9(2): 223~234.
- Goodwin L B, Williams P F. 1996. Deformation path partitioning within a transpressive shear zone, Marble Cove, Newfoundland. *Journal of Structural Geology*, 18(8): 975~990.
- Grasemann B, Fritz H, Vannay J C. 1999. Quantitative kinematic flow analysis from the Main Central Thrust Zone (NW-Himalaya, India): Implications for a decelerating strain path and the extrusion of orogenic wedges. *Journal of Structural Geology*, 21(7): 837~853.
- Graziani R, Montomoli C, Iaccarino S, Menegon L, Nania L, Carosi R. 2020. Structural setting of a transpressive shear zone: Insights from geological mapping, quartz petrofabric and kinematic vorticity analysis in NE Sardinia (Italy). *Geological Magazine*, 157(11): 1898~1916.
- Guo Along. 2017. Tectonic characteristics and rheological parameter estimation of Yuanbaoshan ductile shear zone. Dissertation Supervisor: Feng Zuohai. Guilin: Guilin University of Technology Master Thesis: 1~55.
- Herwegh M, Handy M R. 1998. The origin of shape preferred orientations in mylonite: Inferences from *in-situ* experiments on polycrystalline norcamphor. *Journal of Structural Geology*, 20(6): 681~694.

- Holcombe R J, Little T A. 2001. A sensitive vorticity gauge using rotated porphyroblasts, and its application to rocks adjacent to the Alpine Fault, New Zealand. *Journal of Structural Geology*, 23(6~7): 979~989.
- Hou Quanlin, Liu Hongwei, Guo Qianqian. 2021. Behavior of extensional crenulation cleavage (C' foliation) during progressive deformation and its effect on shear zone foliation (S foliation). *Acta Petrologica Sinica*, 37(12): 3645~3655.
- Huchon P, Le Pichon X, Rangin C. 1994. Indochina Peninsula and the collision of India and Eurasia. *Geology*, 22(1): 27~30.
- Hu Jun. 2022. Neoproterozoic-Early Paleozoic ductile deformation in the eastern part of Jiangnan orogenic belt and its tectonic significance. Dissertation Supervisor: Yu Xinqi. Beijing: China University of Geosciences Doctoral Dissertation: 1~168.
- Iacopini D, Carosi R, Montomoli C, Passchier C W. 2008. Strain analysis and vorticity of flow in the Northern Sardinian Variscan Belt; Recognition of a partitioned oblique deformation event. *Tectonophysics*, 446(1~4): 77~96.
- Imanpournamin A, Sarkarinejad K. 2022. Structural significance of the Alvand mantled granite-gneiss dome exhumation within the Zagros hinterland fold-and-thrust belt, Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 111(1): 195~214.
- Jessup M J, Law R D, Frassi C. 2007. The rigid grain net (RGN): An alternative method for estimating mean kinematic vorticity number (W_m). *Journal of Structural Geology*, 29: 411~421.
- Ji Lei. 2022. Lithospheric thinning of the North China Craton. Dissertation Supervisor: Prof. Liu Junlai. Beijing: China University of Geosciences Doctoral Dissertation: 1~167.
- Ji Mo, Hu Ling, Liu Junlai, Cao Shuyun. 2008. Dynamic recrystallization and metamorphic conditions of main rock-forming minerals. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 226~233.
- Klepeis K A, Daczko N R, Clarke G L. 1999. Kinematic vorticity and tectonic significance of superposed mylonites in a major lower crustal shear zone, northern Fiordland, New Zealand. *Journal of Structural Geology*, 21(10): 1385~1405.
- Kongsukho S, Kanjanapayont P. 2025. Kinematic flow and temperature variation within the Three Pagodas shear Zone, western Thailand. *Journal of Asian Earth Sciences*, 289: 106572.
- Langille J M, Jessup M J, Cottle J M, Newell D, Seward G. 2010. Kinematic evolution of the Ama Drime detachment; Insights into orogen-parallel extension and exhumation of the Ama Drime Massif, Tibet - Nepal. *Journal of Structural Geology*, 32(7): 900~919.
- Law R D. 2010. Moine Thrust zone mylonites at the Stack of Glencoul; II - results of vorticity analyses and their tectonic significance. Geological Society, London, Special Publications, 335(1): 579~602.
- Li Gang, Liu Zhenghong, Li Yongfei, Liu Junlai, Xu Zhongyuan, Li Shichao. 2013. Strain and kinematic vorticity analysis of the ductile shear zone in Yiwulüshan area, western Liaoning Province. *Geological Bulletin of China*, 32(2~3): 408~423.
- Li Hailong, Song Chuanzhong, Li Jiahao, Ren Shenglian, Zhang Yan, Wang Wei, Yang Fan. 2017. Metamorphism and deformation analysis of the shear zone in the northern boundary of the Tongbai complex and discussion on its ascription. *Geological Review*, 63(2): 347~362.
- Li Jianbo, Song Zhijie, Lei Hengeong, Zeng Tao. 2024. The early Mesozoic NE - SW extensional model and exhumation processes at the southeastern margin of the Central Asian Orogenic Belt; Insights from the strain and kinematic vorticity analysis of the sonid Zuoqi ductile detachment zone. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 98(5): 1141~1153.
- Li Jianbo, Wang Tao, Guo Lei, Tong Ying, Ouyang Zhixia, Zeng Tao, Shi Xingjun, Zhang Jianjun. 2012. The shear types and the ductile thinning of the ductile shear zone. *Geological Bulletin of China*, 31(1): 26~37.
- Li Jianbo, Wang Tao, Guo Lei, Tong Ying, Ouyang Zhixia, Zeng Tao. 2013. Strain, kinematic vorticity and ductile thinning along the detachment zone of the Yunmeng Shan metamorphic core complex, Beijing, China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 87(4): 989~1004.
- Li Jianbo, Wang Tao, Ouyang Zhixia. 2010. Strain and kinematic vorticity analysis of the Louzidian low-angle ductile shear detachment zone in Chifeng, Inner Mongolia, China. *Science China Earth Sciences*, 53(11): 1611~1624.
- Li Kang, Jiao Qianqian, Xu Deru, Zhang Shengyin, Chang Huacheng, Dai Jiarun. 2024. Characteristics of mylonite magnetic fabrics and constraint on the relationship between the shear zone deformation and mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 98(6): 1757~1775.
- Li Wei. 2020. Proterozoic ductile shear zones in Siziwang banner, Inner Mongolia. Dissertation Supervisor: Zhou Zhiguang. Beijing: China University of Geosciences Master Thesis: 1~63.
- Li Wenyuan, Cao Shuyun, Dong Yanlong, Zhan Lefan, Tao Lirong, Carosi R, Montomoli C. 2024. Kinematics, rheology, and cooling of the continental-scale Chongshan strike-slip shear zone on the southeast of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 881: 230352.
- Li Xiaobing, Pei Xianzhi, Chen Youxin, Liu Chengjun, Li Zuochen, Li Ruibao, Chen Guochao, Wei Bo. 2015. Study on the plastic deformation and dynamic condition of hatugou - qingshuiquan - Gouli ductile shear zone in the eastern section of east Kunlun. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(2): 208~230.
- Li Xiaofan, Zheng Han, Li Huan, Whattam S A, Pi Wei, Zeng Linlin. 2024. Finite strain, kinematic vorticity, rheological behavior and thermochronology of the Diancang Shan complex: Insights into channel flow of the southeastern Tibetan Plateau. *Journal of Structural Geology*, 181: 105105.
- Li Yang, Liang Wentian, Jin Chunsheng, Dong Yunpeng, Yuan Honglin, Zhang Guowei. 2017. Rock-magnetism, magnetic fabric and kinematic vorticity analysis of the Shagoujie shear zone, Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 33(6): 1919~1933.
- Li Yang. 2013. Advances of kinematic vorticity research in shear zones. *Ground Water*, 35(4): 250~252.
- Liu Chuanwei. 2017. The analysis of microstructure and kinematics in the Wucheng-Tunxi ductile shear zone of south Anhui Province. Dissertation Supervisor: Yu Xinqi. Beijing: China University of Geosciences Master Thesis: 1~51.
- Liu Hongsheng, Liu Liangming, Zhang Dexian, Huang Fangfang, Zhang Xin. 2023. Unilateral magma emplacement of the telimbela batholith in the central Ecuadorian arc; Implications for kinematics of oblique subduction of the Farallon-nazca plate. *Tectonics*, 42(2): e2021TC007114.
- Liu Jiang, Zhang Jinjiang, Guo Lei, Qi Guowei. 2011. Kinematic vorticity of the Daqingshan detachment fault and its structural implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(1): 1~11.
- Liu Jiang, Zhang Jinjiang, Zhang Bo. 2012. 2-D mean vorticity numbers calculated from construction of polar Mohr diagram. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 47(1): 13~21.
- Liu Jiang. 2019. Occurrences, formational mechanisms and significances of extensional crenulation cleavage. *Geological Science and Technology Information*, 38(2): 1~13.

- Liu Junlai, Ni Jinlong, Chen Xiaoyu, Craddock J P, Zheng Yuanyuan, Sun Yanqi, Ji Lei. 2020&. Parallel Extension Tectonics; Mechanism of Early Cretaceous thinning and destruction of the lithosphere of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 36(8): 2331~2343.
- Mamtani M A, Pal T, Greiling R O. 2013. Kinematic analysis using AMS data from a deformed granitoid. *Journal of Structural Geology*, 50: 119~132.
- McFadden R R, Taylor J M, Whitney D L, Teyssier C, Seaton N C A, Schroeder H, Senjem A, Johnson I. 2024. Deformation conditions and kinematic vorticity within the footwall shear zone of the Wildhorse detachment system, Pioneer metamorphic core complex, Idaho. *Journal of Structural Geology*, 178: 105031.
- McKenzie D. 1979. Finite deformation during fluid flow. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 58(3): 689~715.
- Means W D, Hobbs B E, Lister G S, Williams P F. 1980. Vorticity and non-coaxiality in progressive deformations. *Journal of Structural Geology*, 2(3): 371~378.
- Means W D. 1981. The concept of steady-state foliation. *Tectonophysics*, 78(1~4): 179~199.
- Meng Yuanku, Xu Zhiqin, Ma Shiwei, Liu Xiaojia. 2016&. Application of the kinematic vorticity in the xaitongmoin-quxu ductile shear zone in the middle gangdese magmatic belt, southern Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 90(11): 3023~3038.
- Michels Z D, Kruckenberg S C, Davis J R, Tikoff B. 2015. Determining vorticity axes from grain-scale dispersion of crystallographic orientations. *Geology*, 43(9): 803~806.
- Miranda E A, Brown V, Schwartz J J, Klepeis K A. 2023. Making sense of shear zone fabrics that record multiple episodes of deformation; Electron backscatter diffraction - derived and crystallographic vorticity axis - enhanced petrochronology. *Geology*, 51(6): 591~596.
- Montemagni C, Carosi R, Fusi N, Iaccarino S, Montomoli C, Villa I M, Zanchetta S. 2020. Three-dimensional vorticity and time-constrained evolution of the Main Central Thrust zone, Garhwal Himalaya (NW India). *Terra Nova*, 32(3): 215~224.
- Montemagni C, Zanchetta S. 2022. Constraining kinematic and temporal evolution of a normal-sense shear zone; Insights into the Simplon Shear Zone (Western Alps). *Journal of Structural Geology*, 156: 104557.
- Mookerjee M, Canada A, Fortescue F Q. 2016. Quantifying thinning and extrusion associated with an oblique subduction zone; An example from the Rosy Finch Shear Zone. *Tectonophysics*, 693: 290~303.
- Mookerjee M, Nickleach S. 2011. Three-dimensional strain analysis using Mathematica. *Journal of Structural Geology*, 33(10): 1467~1476.
- Ni Jinlong, Liu Junlai, Sun Yujie, Shi Xiaoxiao, Li Shen. 2019. The characteristics of the structure, strain and kinematic vorticity of the Wulian detachment fault zone, Shandong Peninsula, China. *Science China Earth Sciences*, 62(9): 1399~1415.
- Nie Guanjun, Yang Shisheng, Zhang Peiquan, Li Bingsu. 2019&. Characteristics and tectonic significance of Cenozoic strike-slip faults in Youjiang Region. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(6): 1094~1105.
- Passchier C W. 1987. Stable positions of rigid objects in non-coaxial flow—a study in vorticity analysis. *Journal of Structural Geology*, 9(5~6): 679~690.
- Piette-Lauzière N, Larson K P, Kellett D A, Graziani R. 2020. Intracrystalline vorticity record of flow kinematics during shear zone reactivation. *Journal of Structural Geology*, 140: 104134.
- Reddy S M, Buchan C. 2005. Constraining kinematic rotation axes in high-strain zones: A potential microstructural method? *Geological Society, London, Special Publications*, 243(1): 1~10.
- Ren Zhili, Qin Ya, Feng Zuohai, Wu Jie, Liu Shiyun, Hu Qiaofan, Bai Yuming, Zhou Pengcheng. 2025&. Strain characteristics of Motianling ductile shear zone in northern Guangxi and its tectonic significances. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 46(1): 46~60.
- Ring U, Brandon M T, Ramthun A. 2001. Solution-mass-transfer deformation adjacent to the Glarus Thrust, with implications for the tectonic evolution of the Alpine wedge in eastern Switzerland. *Journal of Structural Geology*, 23(10): 1491~1505.
- Robin P F, Cruden A R. 1994. Strain and vorticity patterns in ideally ductile transpression zones. *Journal of Structural Geology*, 16(4): 447~466.
- Sen A, Roy S, Kim D, Sen K. 2025. Quartz microstructures and crystallographic preferred orientation analysis across the Himalayan metamorphic core reveal exhumation through changing taper angle and strain partitioning along discrete fault zones. *Journal of Structural Geology*, 197: 105446.
- Simpson C, De Paor D G. 1993. Strain and kinematic analysis in general shear zones. *Journal of Structural Geology*, 15(1): 1~20.
- Simpson C, De Paor D G. 1997. Practical analysis of general shear zones using the porphyroclast hyperbolic distribution method: An Example from the Scandinavian Caledonides. In: *Evolution of Geological Structures in Micro- to Macro-scales*. Dordrecht: Springer Netherlands; 169~184.
- Thigpen J R, Law R D, Lloyd G E, Brown S J. 2010. Deformation temperatures, vorticity of flow, and strain in the Moine thrust zone and Moine nappe; Reassessing the tectonic evolution of the Scandian foreland - hinterland transition zone. *Journal of Structural Geology*, 32(7): 920~940.
- Tikoff B, Fossen H. 1995. The limitations of three-dimensional kinematic vorticity analysis. *Journal of Structural Geology*, 17(12): 1771~1784.
- Tikoff B, Greene D. 1997. Stretching lineations in transpressional shear zones; An example from the Sierra Nevada Batholith, California. *Journal of Structural Geology*, 19(1): 29~39.
- Tikoff B, Teyssier C. 1994. Strain modeling of displacement-field partitioning in transpressional orogens. *Journal of Structural Geology*, 16(11): 1575~1588.
- Toy V G, Norris R J, Prior D J, Walrond M, Cooper A F. 2013. How do lineations reflect the strain history of transpressive shear zones? The example of the active Alpine Fault zone, New Zealand. *Journal of Structural Geology*, 50: 187~198.
- Truesdell C. 1953. Two measures of vorticity. *Indiana University Mathematics Journal*, 2(2): 173~217.
- Wagner T, Lee J, Hacker B R, Seward G. 2010. Kinematics and vorticity in Kangmar Dome, southern Tibet; Testing midcrustal channel flow models for the Himalaya. *Tectonics*, 29(6): 1~26.
- Wang Xinshe, Zheng Yadong, Zhang Jinjiang, Davis G A, Darby B J. 2002&. Extensional kinematics and shear type of the Hohhot metamorphic core complex. *Geological bulletin of China*, 21(4~5): 238~245.
- Wallis S R. 1992. Vorticity analysis in a metachert from the sanbagawa belt, SW Japan. *Journal of Structural Geology*, 14(3): 271~280.
- Wallis S. 1995. Vorticity analysis and recognition of ductile extension in the Sanbagawa belt, SW Japan. *Journal of Structural Geology*, 17(8): 1077~1093.

- Wang Tao, Zheng Yadong, Zhang Jinjiang, Zeng Lingsen, Donskaya T, Guo Lei, Li Jianbo. 2011. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes. *Tectonics*, 30(6): 2011TC002896.
- Wang Xinshe, Zhang Shangkun, Zhang Fuzhong, Yang Chonghui. 2005&. Kinematic vorticities and shear types of the Qingyi ductile shear zone in western Shandong. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(5): 423~428.
- Wang Yongsheng, Zhu Guang, Song Chuanzhong, Liu Guosheng. 2006&. Vorticity analysis of the late ductile shear zone in the southern segment of the Tancheng—Lujiang fault zone and its tectonic significances. *Geological Review*, 52(5): 591~600.
- Wang Yongsheng, Zhu Guang. 2004&. The kinematic vorticity number and its measurement. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 27(11): 1480~1484.
- Wu Wenbin, Liu Junlai, Zhang Lisheng, Qi Yinchuan, Ling Chengyang. 2017. Characterizing a middle to upper crustal shear zone: Microstructures, quartz c-axis fabrics, deformation temperatures and flow vorticity analysis of the northern Ailao Shan-Red River shear zone, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 139: 95~114.
- Wu Wenbin. 2016&. Paleoe-Tethyan rift tectonics and Cenozoic structural deformation in the middle-northern segment of the Ailaoshan tectonic belt. Dissertation Supervisor: Liu Junlai. Beijing: China University of Geosciences Master Thesis: 1~115.
- Wu Yawei, Zhang Jianxin, Lu Zenglong, Zhou Guisheng, Mao Xiaohong, Teng Xia, Guo Qi. 2022&. Structural style and tectonic implication of the Chahanhe dextral transpressional shear zone in the eastern North Qaidam basin. *Acta Geologica Sinica*, 96(6): 1937~1956.
- Xia Haoran. 2011&. Evolution of an extensional detachment shear zone: Microfabric, kinematic and rheological study of the Shuiyu ductile shear zone, Yunmeng mountains, Beijing. Dissertation Supervisor: Liu Junlai. Beijing: China University of Geosciences Master Thesis: 1~36.
- Xia Zengming. 2013&. The structure, evolution and regional tectonic implications of Queshan metamorphic core complex in eastern Jiaodong peninsula. Dissertation Supervisor: Liu Junlai. Beijing: China University of Geosciences Master Thesis: 1~86.
- Xiang Biwei, Zhu Guang, Jiang Dazhi, Wang Yongsheng. 2009&. Deformation modeling of the Xiaotian—Mozitan ductile shear zone and its implications to the north Dabie dome evolution. *Geological Review*, 55(2): 159~172.
- Xypolias P, Doutsos T. 2000. Kinematics of rock flow in a crustal-scale shear zone: Implication for the orogenic evolution of the southwestern Hellenides. *Geological Magazine*, 137(1): 81~96.
- Xypolias P, Kokkalas S. 2006. Heterogeneous ductile deformation along a mid-crustal extruding shear zone: An example from the External Hellenides (Greece). *Geological Society, London, Special Publications*, 268(1): 497~516.
- Xypolias P, Koukouvelas I K. 2001. Kinematic vorticity and strain rate patterns associated with ductile extrusion in the Chelmos Shear Zone (External Hellenides, Greece). *Tectonophysics*, 338(1): 59~77.
- Xypolias P, Spanos D, Chatzaras V, Kokkalas S, Koukouvelas I. 2010. Vorticity of flow in ductile thrust zones: Examples from the Attico-Cycladic Massif (Internal Hellenides, Greece). *Geological Society, London, Special Publications*, 335(1): 687~714.
- Xypolias P. 2009. Some new aspects of kinematic vorticity analysis in naturally deformed quartzites. *Journal of Structural Geology*, 31(1): 3~10.
- Xypolias P. 2010. Vorticity analysis in shear zones: A review of methods and applications. *Journal of Structural Geology*, 32(12): 2072~2092.
- Yang Qian, Shi Wei, Hou Guiting. 2019&. Late Mesozoic extensional detachment structures in Eastern China and adjacent areas: Overview and new insight. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(4): 511~544.
- Ye Tingwei. 2019&. Tectonic evolution of South China in the Late Mesozoic: Evidence from structural deformation in the Lianyungshan area of northeastern Hunan Province, South China. Dissertation Supervisor: Prof. Xu Deru. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences Master Thesis: 1~90.
- Zhang Bo, Zhang Jinjiang, Guo Lei, Qi Guowei. 2006&. Fabric patterns in three-dimensional deformations of ductile shear. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 42(6): 708~716.
- Zhang Bo, Zhang Jinjiang, Zhong Dalai, Guo Lei. 2008&. Strain and kinematic vorticity evidence of strain decomposition in the sinistral strike-slip compression zone of the Lancang River in western Yunnan. *Science in China (Series D)*, (10): 1268~1283.
- Zhang Guilin, Liang Jincheng, Feng Zuohai. 2002&. The measurement of kinematic vorticity number and its structural significance in general shear zone. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 22(2): 99~103.
- Zhang Hao, Hou Guiting, Zhang Bo, Tian Wei. 2022. Kinematics, temperature and geochronology of the Qingyi ductile shear zone: Tectonic implications for late Neoproterozoic microblock amalgamation in the Western Shandong Province, North China Craton. *Journal of Structural Geology*, 161: 104645.
- Zhang Jinjiang, Zheng Yadong, Liu Shuwen. 2000. Application of general shear theory to the study of formation mechanism of the metamorphic core complex: A case study of Xiaoqingling in Central China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 74(1): 19~28.
- Zhang Jinjiang, Zheng Yadong. 1997&. Basic principles and applications of kinematic vorticity and polar Mohr diagram. *Geological Science and Technology Information*, (3): 33~39.
- Zhang Jinjiang, Zheng Yadong. 1999. Multistage extension and age dating of the Xiaoqingling metamorphic core complex, Central China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 73(2): 139~147.
- Zhang Mimi, Zhao Dejun. 2021&. Analysis of tectonic characteristics of the ductile shear zone in the southeastern part of the Bikou terrane. *Mineralogy and Petrology*, 41(4): 80~93.
- Zhang Shangkun, Wang Xinshe, Xin Guojin, Zhang Zengqi, Wang Congxiang, Yang Chonghui. 2003&. Deformation characteristics study of Shanghe ductile shear belt in west of Shandong Province. *Geology of Shandong*, 19(2): 30~35.
- Zhao Lei. 2014&. Study on the deformation features of the mid-Jinshajiang suture zone, in the western segment of Yidun island arc. Dissertation Supervisor: Yan Danping. Beijing: China University of Geosciences Master Thesis: 1~42.
- Zhao Tengege, Hou Quanlin, Shi Mengyan, Ding Lin. 2021&. Strain characteristics and tectonic significance of Dashuiyu ductile shear zone in Yunmengshan metamorphic core complex, Beijing. *Acta Petrologica Sinica*, 37(8): 2483~2501.
- Zheng Yadong, Wang Tao, Ma Mingbo, Davis G A. 2004. Maximum effective moment criterion and the origin of low-angle normal faults. *Journal of Structural Geology*, 26(2): 271~285.
- Zheng Yadong, Wang Tao, Wang Xinshe. 2007&. Theory and practice of the maximum effective moment criterion (MEMC). *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 43(2): 145~

156.

Zheng Yadong, Wang Tao, Zhang Jinjiang. 2008&. Theory and practice of kinematic vorticity (Wk). *Earth Science Frontiers*, 15(3): 209~220.

Zheng Yadong, Wang Tao. 2005&. Kinematics and dynamics of the Mesozoic nappe structure and extensional collapse in the China-

Mongolia border areas. *Science in China (Series D)*, 35(4): 291~303.

Zheng Yadong. 1999&. Kinematic vorticity number and shear type related to the Yagan metamorphic core complex on Sino Mongolian border. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 34(3): 273~280.

Further discussion of kinematic vorticity analysis in ductile shear zone

LI Zeyu^{1, 2)}, LIU Junlai^{1, 2)}

1) *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083;*

2) *Frontiers Science Center for Deep-time Digital Earth, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083*

Abstract: Kinematic vorticity analysis is a crucial method for determining the relative proportions of pure shear and simple shear components in ductile shear zones, significant advances have been achieved in in-depth research over past decade. This paper reviews five innovative approaches for kinematic vorticity analysis, spatio-temporal variations in kinematic vorticity and the correlation between strain and kinematic vorticity in different shear zone types. The following insights are obtained: These innovative methods are of great importance in some special circumstance: Combining ellipsoid subgrain analysis and Rxz/δ methods with traditional oblique foliation techniques allows finer constraints on late-stage kinematic vorticity changes; 3D strain ellipsoid methods and magnetic foliation method serve as important alternatives when actual markers are absent; CVA analysis helps identify the VNS, determine shear type and recognize polyphase deformation. We can acquire the deformation path and deformation partitioning characteristic in different kinds of shear zones by analysing the spatio-temporal variations in kinematic vorticity: detachment shear zones typically exhibit an accelerate-decelerate deformation path, with increasing or decreasing vorticity toward the detachment plane; Thrust shear zones generally show a decelerate deformation path, with vorticity increasing toward the thrust plane; Strike-slip shear zones may display either accelerate-decelerate or decelerate patterns, often with higher vorticity at the center or gradual lateral variations. Besides, the types of shear zones and accompanying geological processes can influence the correlation between strain and kinematic vorticity: In detachment shear zones, if the strain is contributed by magma diapir and vertical exhuming, the correlation between strain and kinematic vorticity is predominantly negative; If the strain is contributed by activation of the detachment fault, the correlation between strain and kinematic vorticity is predominantly positive. In thrust zones, the correlation is commonly positive. In strike-slip shear zones, the correlation is generally positive, but it becomes negative if the strain is predominantly contributed by compressive component. Future research should strengthen efforts in the comprehensiveness of method selection, regional-scale kinematic vorticity analysis, interpretation of kinematic vorticity variations along the strike, and the application of physical and numerical simulation methods.

Keywords: kinematic vorticity; ductile shear zone; deformation path; deformation-partitioning; strain

Acknowledgements: This research was supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42430309, 42172246)

First author: LI Zeyu, male, born in 2002, postgraduate; Email: Lzy180306@163.com

Corresponding author: LIU Junlai, male, born in 1960, professor, is mainly engaged in teaching and researching of structural geology; Email: jliu@cugb.edu.cn

Manuscript received on: 2025-11-19; Accepted on: 2026-01-28; Published online on: 2026-02-15

Doi: 10.16509/j.georeview.2026.02.001

Edited by: LIU Zhiqiang