

应用显微构造确定构造运动学涡度的定量分析方法及研究现状

丁 超

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年6月11日; 录用日期: 2026年7月21日; 发布日期: 2026年7月30日

摘 要

韧性剪切带记录了大陆岩石圈变形与构造转换的丰富信息, 而构造运动学涡度(W_k)的定量分析是定量约束其内部应变分解与运动学特征的重要手段。本文系统梳理了构造运动学涡度的基本理论及其在地质研究多个领域中的应用现状。文章重点评述了基于显微构造确定运动学涡度的经典定量分析方法, 包括反演有限应变状态的极摩尔圆法、基于电子背散射衍射(EBSD)技术的石英C轴组构法、指示早期变形特征的旋转残斑法, 以及记录增量伸展方向的张裂脉中纤维法。针对单一方法存在的固有适用缺陷与系统误差, 本文强调了多方法联合分析在开展交叉约束和提高解释可靠性方面的必要性。当前该领域仍面临显微构造标志体可靠性甄别以及不同方法间结果差异等科学挑战。未来, 数值模拟辅助的涡度计校准、EBSD与晶体学涡度轴(CVA)分析的融合, 以及多方法、多尺度与P-T-t演化的协同研究, 有望推动该领域由运动学描述向多参数约束的构造动力学解释拓展。

关键词

运动学涡度, 韧性剪切带, 显微构造, 定量分析, 电子背散射衍射

Quantitative Analysis Methods for Determining Tectonic Kinematic Vorticity Using Microstructures and Their Research Status

Chao Ding

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

文章引用: 丁超. 应用显微构造确定构造运动学涡度的定量分析方法及研究现状[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(7): 1149-1156. DOI: 10.12677/ag.2026.167102

Abstract

Ductile shear zones preserve important information on continental lithospheric deformation and tectonic evolution, and quantitative analysis of the kinematic vorticity number (W_k) provides an important means of constraining strain partitioning and kinematic characteristics within these zones. This paper systematically reviews the fundamental theory of kinematic vorticity and its applications in various fields of geological research. Particular emphasis is placed on classical quantitative methods for determining kinematic vorticity from microstructural criteria, including the polar Mohr circle method for reconstructing finite strain, the quartz c-axis fabric method based on electron backscatter diffraction (EBSD), the rotated porphyroclast method for characterizing early-stage deformation, and the fibrous-vein method for recording incremental stretching directions. Given the inherent limitations in applicability and systematic uncertainties associated with individual methods, this review emphasizes the necessity of integrating multiple methods to provide cross-validation and improve the reliability of geological interpretations. Major challenges remain, including the assessment of the reliability and representativeness of microstructural markers and the interpretation of discrepancies among results obtained using different methods. Future developments involving numerical simulation-assisted calibration of vorticity gauges, integration of EBSD with crystallographic vorticity axis (CVA) analysis, and coordinated multi-method and multi-scale investigations coupled with pressure-temperature-time (P-T-t) evolution are expected to advance the field from descriptive kinematic analysis toward tectonodynamic interpretations constrained by multiple parameters.

Keywords

Kinematic Vorticity, Ductile Shear Zone, Microstructure, Quantitative Analysis, Electron Backscatter Diffraction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

韧性剪切带是大陆岩石圈变形、物质迁移和构造转换的重要部位，其内部发育的面理、线理、S-C 组构、旋转残斑、云母鱼、石英动态重结晶组构和石英 C 轴组构等显微构造，记录岩石在中深地壳条件下的递进变形过程。传统显微构造研究主要用于判断剪切指向和变形温压条件，而随着定量构造地质学的发展，研究者逐渐认识到仅依靠定性运动学标志难以准确揭示剪切带中简单剪切与纯剪切的相对贡献。运动学涡度(W_k)分析为这一问题的定量化解提供了有效途径[1]。

在天然剪切带研究中，显微构造为运动学涡度的估算提供了关键载体。运动学涡度的概念是由 Means 等学者于 20 世纪 80 年代将其从流体力学领域引入到了构造地质学领域，自此国外的构造地质学者开始在运动学涡度分析的理论、方法与应用开始逐渐深入，为后续定量分析奠定了基础。自运动学涡度的概念引入后，此后国内学者结合我国区域构造特点开始不断对运动学涡度的应用、改良和发展投入了大量针对性的研究，使得对微观研究向量化的阶段发展[1]-[4]。

2. 运动学涡度的基本概念与地质应用

2.1. 基本概念

构造运动学涡度的定量分析是韧性剪切带应变分解与运动学机制研究的核心工具。其核心应用在于通过计算介于 0 至 1 之间的 W_k 值， W_k 的定义为：

$$W_k = \cos v \tag{1}$$

式(1)中 v 为主变形面内包含剪切方向的两个特征向量(e)之间的夹角(如图 1) [5] [6]。

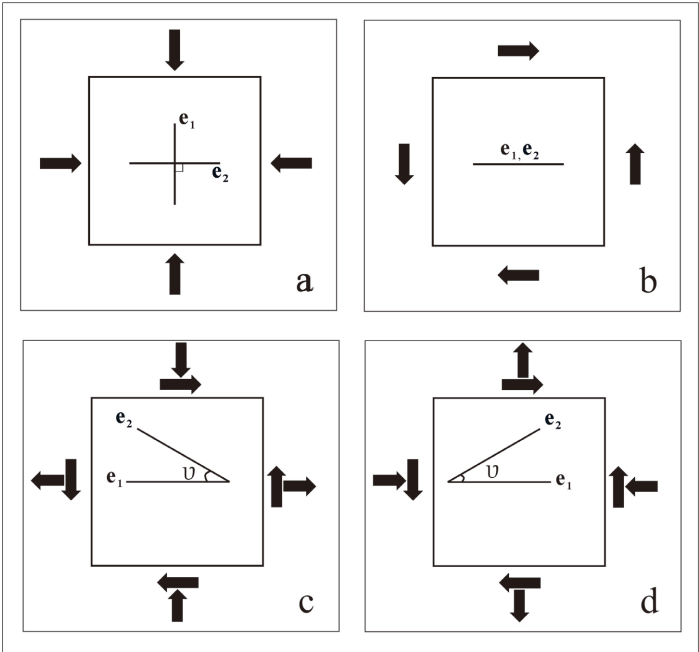


Figure 1. The relationship between the eigenvector (e) and the deformation state. (adapted from [6])
图 1. 特征向量e与变形状态之间的关系(改编自[6])

定量确定天然剪切带中简单剪切与纯剪切的相对比例，从而精确判定剪切带的性质并解析其递进变形过程(表 1)。定量分析方法主要包括基于有限应变测量的极摩尔圆法、石英 C 轴组构法以及旋转残斑法等。李泽宇、刘俊来等学者简要论述了椭圆亚晶粒法等多种创新性方法并综合分析了运动学涡度分析在特定场景下所具有的关键作用[1] [5] [6] [7] [8]。

Table 1. Relationship between kinematic vorticity number (W_k) and the eigenvector angle v (adapted from [6] [9])
表 1. 运动学涡度 W_k 与特征向量夹角 v 的对应关系(改编自[6] [9])

变形类型	v 角	W_k 值
纯剪切(共轴变形)	$v = 90^\circ$	$W_k = 0$
简单剪切(非共轴变形)	$v = 0^\circ$	$W_k = 1$
一般剪切(混合变形)	$0^\circ < v < 90^\circ$	$0 < W_k < 1$

2.2. 地质应用

韧性剪切带在地壳中广泛分布，构造运动学涡度的应用已贯穿地质研究多个领域。在区域构造演化

研究中,通过涡度分布规律可反演板块俯冲、造山带隆升等重大地质事件的演化过程;在矿产资源勘探中,高涡度区域常为矿液运移与富集的有利部位,可为韧性剪切带型金矿、铜矿等矿产勘探提供潜在靶区;在工程地质评价中,通过分析工程区岩石涡度特征,可预判岩体变形潜力与稳定性,为工程灾害防控提供地质支撑。电子背散射衍射(EBSD)、透射电子显微镜(TEM)等先进观测技术的应用,进一步提升了构造运动学涡度测量的精准度与效率。国内研究人员在运动学涡度的应用方面也不断深入[4][10]。

3. 确定构造运动学涡度的定量分析方法

3.1. 极摩尔圆法

极摩尔圆法是目前量化程度最高、应用广泛的方法。该方法是通过反演岩石有限应变状态来定量估算运动学涡度的重要显微构造解析手段。在非共轴递进变形中,岩石的有限应变比及主应变轴方位会随变形强度发生规律性变化,极摩尔圆法能够直观地建立有限应变与运动学参数之间的几何联系。在稳态变形假设下,该方法利用流动分离面间的夹角 α 作为核心参数,通过关系式 $W_k = \cos \alpha$ 直接求解涡度值[4][7][11]-[13]。

在面对复杂构造变形时,合理解释不同显微定量方法获得的结果差异是反演动力学过程的关键。学者在对滇西澜沧江左旋走滑挤压带的研究中为了避免极摩尔圆法“均质变形和体积不变”理想假设带来的系统偏差联合选择了极摩尔圆法、 R_s - θ 等方法等进行独立约束。结果显示,不同方法所得数据虽有细微差异(极摩尔圆法反映的累积平均涡度与碎斑法记录的某一阶段涡度略有不同),但获得的 W_k 值相互印证,整体表现为单斜对称的一般剪切特征。这种多方法交叉验证的结果排除了单一误差,并为该区域的构造演化提供了决定性的量化制约:中等偏高的 W_k 值完美证实了该断裂带发生了典型的应变分解。它定量揭示了板块斜向汇聚的构造应力被有效地分解为平行于边界的走滑分量(简单剪切)和垂直于边界的挤压分量(纯剪切),从而将极摩尔圆法提取的微观几何学参数,直接转化为论证区域大型走滑挤压带大地构造模型的关键核心证据[7][14]。

3.2. 石英 C 轴组构法

石英 C 轴组构法是定量估算运动学涡度的重要手段,其核心原理是利用塑性变形中石英晶体产生的 C 轴优选方位反演纯剪切与简单剪切的相对比例。在单剪或一般剪切作用下,石英 C 轴组构的中心环带(或特定极密区)法线与有限应变椭球体的主压扁面(XY 面)之间存在一个夹角 β ,该夹角受控于有限应变轴率(R_s)和非共轴程度。在数据处理环节,研究者首先需在平行于拉伸线理且垂直于剪切面理的 XZ 定向薄片上,利用电子背散射衍射(EBSD)技术获取大样本石英晶粒的结晶学取向,精准测量中心环带法线与宏观面理之间的夹角 β 。同时,结合惯量椭圆法或 Fry 法在同切面上计算出有限应变比 R_s ,将两项核心参数代入特定理论关系式即可求解出最终的运动学涡度值[7][12][13]。

随着电子背散射衍射(EBSD)技术的普及,高精度、大数据的石英 C 轴组构获取变得更加便捷。在实际研究中选择该方法,主要是由于石英在递进变形中极易发生动态重结晶,其晶格组构能灵敏地适应新的应力场并实时重置,因而是提取晚期变形阶段运动学特征的理想载体。学者对医巫闾山变质核杂岩南段韧性变形的研究中联合使用了 EBSD 石英 C 轴组构法与极摩尔圆法进行精细量化。数据结果的差异揭示了深刻的地质学意义:多方法联合数据表明,早期高温变形阶段 W_k 值偏高,以简单剪切为主导;而代表晚期低温变形的测算显示 W_k 值显著降低,指示纯剪切分量大幅激增。这种随时间演化的结果差异并非系统误差,而是真实记录了剪切带应变分解与变形机制转换的过程。最终,这一基于石英 C 轴等微观组构精确量化的 W_k 值演变,成功将局部的非共轴变形与宏观动力学背景相连接,为华北克拉通岩石圈强烈伸展与垂向减薄提供了关键性的微观运动学制约[7][12][13]。

3.3. 旋转残斑法

旋转残斑法(或刚性残斑法)是定量估算韧性剪切带运动学涡度以区分纯剪切与简单剪切相对贡献的重要手段。其基本原理在于,韧性变形过程中包裹于流动基质(如石英、云母)内的相对刚性矿物(如长石、石榴子石等残斑),在非共轴剪切作用下会发生与周围基质应变率不同的旋转,导致残斑长轴与剪切方向之间的夹角发生规律性改变。在实际应用中,首先需在平行于拉伸线理且垂直于剪切面理的 XZ 定向薄片上识别刚性残斑,测量并统计大量残斑长轴与剪切方向(或参考面理)之间的平均夹角。同时,借助惯量椭圆法等手段在同视域下求取有限应变比(R_s)。将获取的平均夹角与有限应变比代入基于刚性椭球体在黏性基质中旋转理论的力学模型中,即可求解出 W_k 的值。由于刚性矿物的旋转特征较难被后期微弱变形彻底改造,该方法获得的涡度值往往代表了剪切带演化的早期变形阶段。学者在胶东玲珑双向变质核杂岩的研究中,由刚性残斑法获得的涡度值(0.57~0.74)明显低于同一样品利用石英 C 轴组构法揭示的晚期变形涡度值(0.79~0.93),这一对比有效指示了该剪切带在演化过程中纯剪切组分逐渐降低、简单剪切主导作用日益增强的递进变形趋势[7][15]。

3.4. 张裂脉中纤维法

张裂脉中纤维法,又称石英条带斜交面理法,是估算剪切带运动学涡度的一种重要微观构造学方法。其原理基于剪切带内发育的张裂脉(或构造缝合线)中纤维状矿物(如石英)的生长方向记录了变形过程中的增量伸展方向。在一般剪切变形(纯剪切与简单剪切的复合)过程中,张裂脉的张开方向与剪切带的边界(或面理)并非完全垂直,而是存在一个夹角。纤维矿物的生长方向记录了脉体张开轨迹与剪切带边界之间的几何关系。通过测量这个夹角,并结合适当的运动学模型,可以计算出运动学涡度值,从而定量评估剪切变形中纯剪切与简单剪切组分的相对贡献。当涡度值为 0 时代表纯剪切,为 1 时代表理想简单剪切,中间值则代表两者混合。该方法在具体研究中得到了实际应用。在大兴安岭北段科洛-嘎拉山伸展变形带的研究中,学者便采用了包括石英条带斜交面理法在内的多种方法来估算运动学涡度。在呼和浩特热隆伸展构造的研究中,也明确提到了使用石英条带斜交面理法进行运动学涡度分析,并获得了具体的涡度值数据。这些实例表明,该方法是一种有效且被广泛使用的定量分析剪切变形非共轴程度的工具[7][14]-[17]。

3.5. 多方法联合定量分析法

单一显微构造定量方法均存在固有适用缺陷与系统误差,为提升涡度测算精度,目前广泛采用多方法联合分析模式。在运动学涡度定量分析领域,多方法联合应用已成为常规技术路径。以滇西澜沧江左旋走滑挤压带研究为例,学者们综合运用 R_s - θ 法、碎斑双曲线分布法和极摩尔圆法三种传统方法进行运动学涡度值的联合估算,所得结果相互印证并揭示了该剪切带具有单斜对称应变特征,总体为典型的走滑挤压应变带且伴随应变分解。这种方法论的核心在于通过不同几何指标的独立计算,获得多个独立的涡度估计值后取平均值或进行对比验证,从而提高定量结果的可靠性和可信度。类似的联合应用也见于秦岭伏牛山构造带研究,其中运动学涡度分析与有限应变测量作为构造解析的常规手段被并行使用,两者共同支撑了对区域变形机制的运动学解释。在更广泛的韧性剪切带研究实践中,多方法联合不仅限于涡度分析本身,还扩展到将运动学标志物观察、S-C 组构统计、矿物定向排列及显微构造综合识别等技术路径整合到统一的分析框架中(表 2),以实现从宏观到微观尺度的跨尺度变形重建[12][14][18]-[20]。

除上述案例外,学者在藏南冈底斯岩杂带的研究也采用了多方法联合分析,通过极摩尔圆法和石英 C 轴组构法计算得到 W_k 值介于 0.73~0.96,平均值约 0.83~0.88,证实其为以简单剪切为主、伴有部分纯剪切的一般剪切带,深化了对区域构造演化的理解[10]。

Table 2. Comparative analysis of primary methods for determining kinematic vorticity (W_k) from microstructural criteria
表 2. 基于显微构造确定构造运动学涡度(W_k)的主要方法对比

方法名称	基本原理	所需地质标志	适用温压与岩性	主要误差来源	反映的变形阶段
极摩尔圆法	反演有限应变状态与流动分离面夹角	变形砾石、鲕粒、长石斑晶等应变标志体	中地壳；适用含明显刚性/半刚性标志体的糜棱岩	初期有限应变测量的误差；天然体积膨胀或缩小的干扰	累积(有限)变形
石英 C 轴组构法	C 轴中心环带法线与主压扁面(XY 面)的夹角	发生塑性变形且动态重结晶的石英多晶集合体	中低地壳；富石英的硅铝质长英岩	晚期退变质或静态重结晶对组构的改造	晚期递进变形
旋转残斑法	刚性矿物在黏性基质中的旋转速率与非共轴程度相关	具长宽比差异的刚性残斑(如长石、石榴子石)	中深地壳；具“核-幔”结构的糜棱岩或片麻岩	残斑形状非理想椭球体；基质流变性不均一	早期变形阶段
张裂脉中纤维法	纤维状矿物生长方向记录增量伸展方向	剪切带内发育的同构造张裂脉及伴生纤维矿物	浅-中地壳(脆韧性转换带)；各类变质岩	脉体旋转、多次开启或压溶作用导致的几何方位偏转	增量(瞬间)变形

4. 存在的问题与发展趋势

4.1. 存在的问题

运动学涡度研究在目前来说取得了显著的进展，但在实际应用中仍面临若干关键问题。显微构造标志体的可靠性和代表性问题值得关注。天然岩石中显微构造的形成受温度、压力、应变速率、流体活动等多重因素的综合控制，同一剪切带内不同部位的变形条件可能存在显著差异。研究者必须结合详细的岩相学观察和温压条件估算，谨慎甄别标志体的变形机制与变形阶段，避免简单套用。

不同方法间的结果差异问题是最为突出的挑战之一，不同方法反映不同时空尺度和不同变形阶段的信息，往往导致同一样品采用不同方法获得的值存在差异。如何判断这种差异是真实的地质过程记录还是方法本身的系统偏差，是目前具有挑战性的科学问题之一。当前的研究实践采取多方法对比及交叉验证策略来延缓这一问题，建立统一的标准样品校准体系或开展方法学间的系统对比实验，是未来需要深入研究的课题。

4.2. 发展趋势

4.2.1. 数值模拟在涡度计校准与误差评估中的应用

传统基于显微构造的运动学涡度分析方法大多建立在“均质变形”、“体积不变”或“刚性椭球体在牛顿流体中旋转”等理想物理假设之上，这导致不同方法在应用于复杂天然岩石时不可避免地存在系统误差。近年来，数值模拟技术(如 ELLE 多尺度微观结构模拟平台、VPSC 黏塑性自洽模型)的引入，为涡度计的精细校准提供了革命性的手段。未来该领域的重要发展趋势是采用“正演模拟 + 反演验证”的研究范式，即研究者可以在计算机中设定精确的简单剪切与纯剪切比例(预设一个绝对准确的 W_k 值)，模拟特定温压和应变速率下的晶粒动态重结晶、颗粒旋转及组构发育全过程。随后，将传统测算方法应用于模拟生成的数字化显微组构中，通过对比测算值与预设真值，即可定量评估不同方法的测量偏差，从而建立针对不同岩性与流变状态的标准校准体系。

4.2.2. EBSD 与晶体学涡度轴(CVA)分析的深度融合

电子背散射衍射(EBSD)技术获取的大数据为显微构造量化提供了基础，而晶体学涡度轴分析则是从这些数据中深度挖掘变形涡度信息的前沿利器。两者的内在联系在于 EBSD 提供了晶粒内亚微米级的

结晶学取向海量数据,而CVA分析则利用旋转统计学原理,直接通过计算这些晶内取向的弥散度来求取变形涡度轴的空间方位。相较于传统方法,CVA的核心优势在于它独立于宏观面理和线理信息,克服了传统测量必须预设有限应变主轴与宏观构造严格对应的理论局限性。在最新的前沿应用中,CVA已成为解析多期复杂变形叠加的关键工具。Miranda等学者在复杂剪切带的研究中,将CVA分析与岩石年代学深度融合。面对经历了多期变形事件的复杂糜棱岩,他们利用CVA成功提取出不同矿物相(甚至同一矿物的不同重结晶世代)所对应的独立涡度轴方位,从而将相互叠加的显微组构与特定的多期变形事件进行了精准的剥离与关联。这一实例表明,CVA技术正引领涡度分析向更精细的微观三维空间拓展[8] [21] [22]。

4.2.3. 运动学涡度与 P-T-t 演化轨迹的深度耦合

在深层次的构造动力学解析中,国际显微构造学研究正向着将微观运动学涡度演化与变质岩石的压力-温度-时间(P-T-t)演化轨迹深度耦合的方向发展。运动学涡度记录了变形的非共轴程度,而P-T-t轨迹则精确标定了变形发生时的深部物理化学环境、地壳热状态及绝对时间序列。将二者结合,能够实现构造山带构造过程从“三维空间几何学”向“四维时空流变学”的全面解析[23] [24]。

在实际的区域构造研究中,建立高精度的P-T-t演化轨迹是实现这种耦合的前提。学者在对粤西高州泥质麻粒岩的最新研究中通过精细的岩相学观察与矿物化学分析,识别出岩石经历了包含压力峰期(约0.95 GPa/800°C)、温度峰期(0.57~0.69 GPa/815°C~865°C)和晚期退变质冷却阶段的顺时针型P-T演化轨迹。在年代学方面,他们利用锆石U-Pb定年获得 441 ± 1.4 Ma的谐和年龄,并结合Ti温度计(693°C~759°C)成功将该年龄精准对应至岩石的退变质冷却阶段。这一高精度的P-T-t轨迹表明,华南早古生代变质作用整体上为中压相系条件,缺乏高压蓝片岩或榴辉岩,从而为华南陆块内部发育早古生代陆内造山带(应力来源于大陆边缘的远程传导)提供了决定性的热动力学证据。面对这种高度成熟的P-T-t解析框架,未来的构造地质学前沿在于将运动学涡度无缝嵌入其中[23]。

4.2.4. 多方法协同与多尺度分析

鉴于单种运动学涡度分析方法均存在各自的局限性和不确定性,在同一剪切带乃至同一样品中综合运用多种方法进行交叉约束和相互验证,已成为国际学界的共识和实践主流。多方法、多尺度的综合分析正从单纯的运动学涡度计算向更深层次的构造动力学解析拓展。在微观层面,刚性残斑法记录早期变形信息,石英C轴组构法反映晚期变形特征,极摩尔圆法给出应变积累的平均结果,三种方法在时间维度上的互补性被用于构建剪切带变形的演化序列。在宏观方面,将运动学涡度与应变强度、有限应变量型以及韧性减薄量、差应力、变形温度、应变速率等流变学参数进行综合分析,有可能实现从单纯运动学描述向动力学过程模拟的根本突破。

5. 结论

(1) 基于显微构造的运动学涡度定量分析已形成以极摩尔圆法、石英C轴组构法、旋转残斑法及张裂脉中纤维法为主体的方法体系。各方法的适用条件及反映的变形阶段各不相同,多方法联合分析不仅是提升测算精度的技术路径,更是完整重建剪切带递进变形序列的必要手段。

(2) 当前研究面临显微构造标志体可靠性甄别、不同方法结果差异以及二维平面应变假设局限等科学挑战。其中,不同方法间系统性偏差的识别与校正是最具挑战性的难题,而引入多尺度数值模拟技术开展“正演-反演”验证是解决这一误差评估问题的关键途径。

(3) EBSD与晶体学涡度轴(CVA)分析的深度融合、运动学涡度与变质岩P-T-t演化轨迹的深度耦合、以及多方法协同与多尺度分析的集成应用,是推动该领域发展的三个主要方向。

(4) 运动学涡度研究正从单一几何参数的静态测量迈向与流变学参数、热力学相平衡结合的动态分析阶段。这一跨越使涡度分析能够有效破解应变分解等复杂地质现象, 实现了从微观运动学描述向“四维时空流变学”及深部构造动力学解析的根本转变, 为深入理解大陆岩石圈变形机制提供了强大的定量工具。

参考文献

- [1] 李泽宇, 刘俊来. 再论韧性剪切带运动学涡度分析[J/OL]. 地质论评, 1-21. <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2026.02.001>, 2026-05-27.
- [2] Means, W.D., Hobbs, B.E., Lister, G.S. and Williams, P.F. (1980) Vorticity and Non-Coaxiality in Progressive Deformations. *Journal of Structural Geology*, **2**, 371-378. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(80\)90024-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(80)90024-3)
- [3] McKenzie, D. (1979) Finite Deformation during Fluid Flow. *Geophysical Journal International*, **58**, 689-715. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1979.tb04803.x>
- [4] 郑亚东. 亚干变质核杂岩的运动学涡度与剪切作用类型[J]. 地质科学, 1999(3): 273-280.
- [5] 张进江, 郑亚东. 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, 1997(3): 34-40.
- [6] 张进江, 郑亚东. 运动学涡度、极摩尔圆及其在一般剪切带定量分析中的应用[J]. 地质力学学报, 1995(3): 55-64.
- [7] 王勇生, 朱光. 运动学涡度及其测量方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2004(11): 1480-1484.
- [8] 何国建, 金巍, 胡为正, 等. 运动学涡度及其在湘东雁林寺韧性剪切带中的应用[J]. 地质调查与研究, 2014, 37(2): 136-143.
- [9] 张桂林, 梁金城, 冯佐海. 一般剪切带中运动学涡度的确定和构造意义[J]. 桂林工学院学报, 2002(2): 99-103.
- [10] 孟元库, 许志琴, 马士委, 等. 运动学涡度在藏南冈底斯岩浆带中段谢通门-曲水韧性剪切带中的应用[J]. 地质学报, 2016, 90(11): 3023-3038.
- [11] 李金玺, 孙东, 刘树根, 等. 米仓山构造带的应变与涡度分析[J]. 矿物岩石, 2012, 32(1): 48-54.
- [12] 常瑞虹, 李伟民, 刘永江, 等. 辽吉裂谷带北缘连山关韧性剪切带的构造属性和运动学分析[J]. 地球科学, 2017, 42(12): 2193-2207.
- [13] 梁琛岳, 刘永江, 李伟民, 等. 医巫闾山变质核杂岩南段韧性变形与流变特征[J]. 岩石学报, 2016, 32(9): 2656-2676.
- [14] 张波, 张进江, 钟大赉, 等. 滇西澜沧江左旋走滑挤压带应变分解的应变和运动学涡度证据[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2008(10): 1268-1283.
- [15] 吴晓冬, 朱光. 胶东地区玲珑双向变质核杂岩的均衡隆升: 运动学涡度的指示[J]. 地质学报, 2024, 98(1): 31-49.
- [16] 刘江, 张进江, 张波. 极摩尔圆法计算二维平均运动学涡度[J]. 地质科学, 2012, 47(1): 13-21.
- [17] 梁琛岳, 刘永江, 李伟, 等. 大兴安岭北段伸展隆升样式: 来自科洛-嘎拉山韧性变形带的证据[J]. 岩石学报, 2018, 34(10): 2873-2900.
- [18] 张宇, 董树文, 施炜. 呼和浩特热隆伸展构造: 华北“变质核杂岩”再认识[J]. 科学通报, 2024, 69(7): 939-949.
- [19] 任升莲. 秦岭伏牛山构造带的变质-变形分析[D]: [博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [20] 殷秀兰. 大山口剪切带大理岩糜棱岩的变形机制分析[J]. 地质力学学报, 1996(4): 63-69.
- [21] Zuza, A.V., Cao, W.R., Levy, D.A., DesOrmeau, J.W., Odum, M.L. and Siciliano, A.A. (2024) Kinematic Vorticity of Shear Zones That Accommodate Vertical Crustal Advection: Implications for Metamorphic Core Complexes and Pluton Emplacement. *Earth and Planetary Science Letters*, **646**, Article 118964. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.118964>
- [22] Miranda, E.A., Brown, V., Schwartz, J.J. and 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**, 591-596. <https://doi.org/10.1130/g50982.1>
- [23] 钱加慧, 梁勇智, 尹常青, 等. 粤西高州泥质麻粒岩变质 P-T-t 演化及其对华南早古生代构造背景的指示[J]. 科学通报, 2024, 69(18): 2602-2617.
- [24] Lardeaux, J.M. (2024) Metamorphism and Linked Deformation in Understanding Tectonic Processes at Varied Scales. *Comptes Rendus Géoscience*, **356**, 525-550. <https://doi.org/10.5802/crgeos.204>