

断层泥显微结构与矿物成分研究进展

——以龙门山断裂带为例

黄晓可

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年3月12日; 录用日期: 2026年4月15日; 发布日期: 2026年4月27日

摘要

断层泥是活动断裂带内最具代表性的软弱断层岩, 其形成与构造剪切、颗粒破碎、流体-岩石相互作用及低温蚀变等过程密切相关, 能够连续记录断层长期活动的力学环境、变形方式与演化历史。显微结构是断层泥在剪切过程中形成的直观痕迹, 可用于判别断层是地震式快速滑动, 还是稳定蠕滑; 矿物组成尤其是黏土矿物组合, 则对变形温度、流体性质、蚀变强度具有敏感响应。二者结合, 已成为判断断裂活动性、分析强震机理、评价工程地质稳定性的重要依据。龙门山断裂带位于青藏高原东缘, 是典型的大陆内部逆冲推覆构造带, 历史上发生过多次强震, 断裂带内部断层泥发育完整、露头连续, 为开展微观结构与矿物成分研究提供了良好条件。文章在总结国内外相关研究的基础上, 系统梳理了断层泥的野外采集、显微观测与矿物分析的主要方法, 详细阐述了断层泥显微结构类型、矿物组成特征及其地质意义, 重点讨论了显微结构与矿物组合联合用于判别滑动方式、活动期次、变形环境和工程稳定性的思路, 并以龙门山断裂带为例, 总结了该区域在断层泥研究方面的主要成果。最后指出当前研究存在的不足, 并对未来发展方向进行展望。

关键词

断层泥, 显微结构, 矿物成分, 活动断裂, 龙门山断裂带

Research Progress on Microstructure and Mineral Composition of Fault Gouge

—A Case Study of the Longmenshan Fault Zone

Xiaoke Huang

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

Received: March 12, 2026; accepted: April 15, 2026; published: April 27, 2026

文章引用: 黄晓可. 断层泥显微结构与矿物成分研究进展[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(4): 524-537.
DOI: 10.12677/ag.2026.164047

Abstract

Fault gouge is one of the most representative weak fault rocks in active fault zones. Its formation is closely related to tectonic shearing, grain fragmentation, fluid-rock interaction and low-temperature alteration, which can continuously record the mechanical environment, deformation pattern and evolution history of long-term fault activity. The microstructure is an intuitive trace formed during the shearing process of fault gouge, which can be used to distinguish whether the fault slips rapidly in earthquakes or creeps steadily. The mineral composition, especially clay mineral assemblage, is sensitive to deformation temperature, fluid properties and alteration intensity. The combination of microstructure and mineral composition has become an important basis for judging fault activity, analyzing strong earthquake mechanisms and evaluating engineering geological stability. Located on the eastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau, the Longmenshan Fault Zone is a typical intracontinental thrust belt. Many large earthquakes have occurred in history, and the fault gouge inside the fault zone is well developed and continuously exposed, providing favorable conditions for the study of microstructure and mineral composition. Based on the summary of relevant research, this paper systematically sorts out the main methods of field collection, microscopic observation and mineral analysis of fault gouge, expounds the types of microstructure, mineral composition characteristics and their geological significance, and focuses on the idea of combining microstructure and mineral assemblage to identify slip patterns, activity stages, deformation environment and engineering stability. Taking the Longmenshan Fault Zone as an example, this paper summarizes the main research results of fault gouge in this area. Finally, the deficiencies of current research are pointed out, and the future development direction is prospected.

Keywords

Fault Gouge, Microstructure, Mineral Composition, Active Fault, Longmenshan Fault Zone

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

在活动断裂带的浅部至中深部地壳范围内，断层岩石普遍经历强烈剪切与细化，最终形成以极细颗粒为主的软弱物质，即断层泥。由于它直接形成于断层面附近，对应力状态、滑动速率、温度、流体等条件变化高度敏感，因此被视为记录断层活动历史的“天然档案”[1]-[3]。

断层泥的研究价值主要体现在两个方面：一是显微结构，它保留了颗粒在剪切过程中的排列、破碎、旋转与变形特征，能够直观反映断层的滑动方式和变形机制；二是矿物成分，尤其是黏土矿物，其类型、含量和结晶度可以有效约束断层所处的物理化学环境[4]-[7]。将微观结构与矿物特征结合，可以更准确地判断一条断裂是否活动、以何种方式活动、活动强度如何，从而为地震危险性分析提供关键依据[8]。

龙门山断裂带因2008年汶川地震、2013年芦山地震受到全球关注(图1)。该断裂带由多条分支断裂组成，内部结构复杂，断层泥发育厚度大、序列完整，是研究逆冲断裂微观变形机制的理想区域[9]。近十几年来，围绕龙门山断裂带开展的大量野外调查与室内实验，极大推动了断层泥微观研究的进展[4][5][10]-[14]。本文在综合前人成果的基础上，对断层泥显微结构与矿物成分的研究内容、方法与应用进行系统梳理，以期青藏高原东缘及其他地区活动断裂研究提供参考。

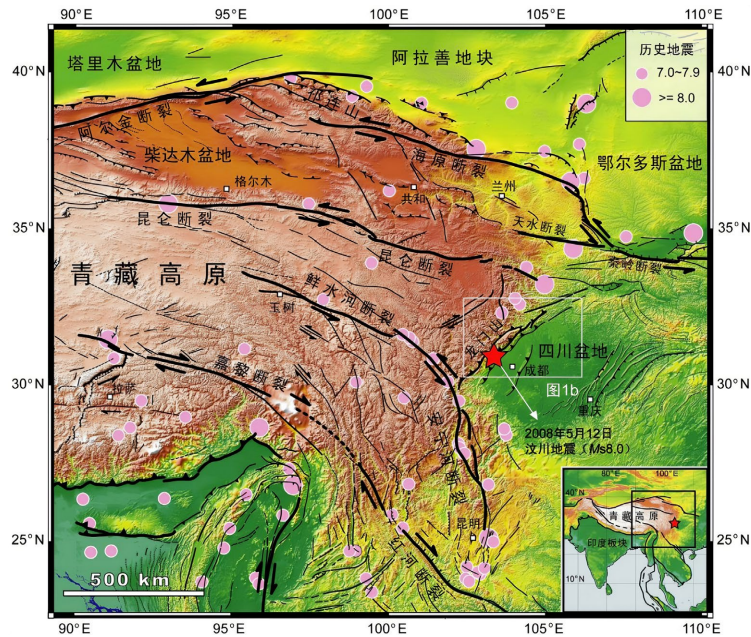


Figure 1. Location of the Longmenshan fault zone
图 1. 龙门山断裂位置

2. 断层泥的主要研究方法

断层泥研究以野外剖面观测为基础，结合室内显微观测、矿物测试与力学实验，形成一套较为完整的研究体系。

2.1. 野外调查与定向采样

野外工作的核心是识别断裂带内部结构，划分碎裂岩、断层泥、主滑移带等不同岩性单元(图 2、图 3)，并在关键部位采集定向样品[15]。为了保证显微结构不被破坏，通常采用石膏包埋、冷冻固样等方法，避免颗粒扰动与结构松弛。采样一般遵循从围岩到断裂中心的系统剖面控制，以便对比不同位置的变形强度。



Figure 2. Schematic profile of the Longmenshan fault zone
图 2. 龙门山断裂剖面示意图

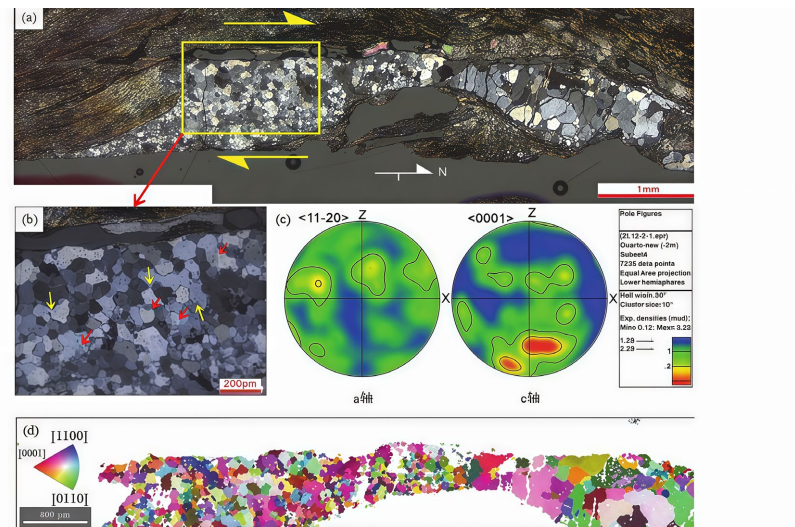


Figure 3. Partial view of fault gouge
图 3. 断层泥局部图

2.2. 显微结构观测

偏光显微镜用于观察矿物形态、组构发育、碎斑分布与剪切面理，是判断剪切方向和变形强度最基本的手段。扫描电镜可以在更高分辨率下观察颗粒表面特征、微裂隙、溶蚀结构和黏土矿物形态，尤其适合分析石英颗粒的撞击、磨圆与破裂特征。对于晶体变形与取向特征，可采用电子背散射衍射技术，实现对晶格优选方位、动态重结晶等微观机制的定量分析。

2.2.1. 基于 EBSD 的显微应变定量分析



注：(a) 断层 F2 露头区石英脉平行剪切面呈透镜状，断层剪切面顶部出现大量垂直于断层面分布的脉体；(b) 岩断层剪切面获取的定向石英脉的薄片切面；(c) F1 断层面与脉体关系以及应力状态特征；(d) 剪切断层破裂面附近石英的颗粒显著的亚颗粒旋转动态重结晶作用，其中(e)为进行 EBSD 组构分析的选区；(e) 选区石英 EBSD 组构分析面扫结果(2.5 阶)；(f) 选区(e)的石英 $\langle 11\sim 20 \rangle$ ($\langle a \rangle$ 轴)与 $\langle 0001 \rangle$ ($\langle c \rangle$ 轴)极密点的空间分布图，其中 $\langle c \rangle$ 轴极密点的分布存在一定的开角，测量开角为 71.2° ；(g) 粗颗粒的石英显示显著的拉长和波状消光的特征，其颗粒长轴方向与断层面剪切方向一致；(h) 选区(g)面扫和反极图结果；(i) 选区(g)长颗粒石英 $\langle 11\sim 20 \rangle$ ($\langle a \rangle$ 轴)与 $\langle 0001 \rangle$ ($\langle c \rangle$ 轴)极密点的空间分布图。

Figure 4. Microscopic fabrics and EBSD features of shear quartz veins within fault zone [20]
图 4. 断层带剪切变形石英脉显微组构与 EBSD 组构特征[20]

电子背散射衍射(EBSD)是当前实现断层泥显微应变定量表征的核心技术,可在微米至纳米尺度对矿物晶格变形、颗粒取向、动态重结晶及剪切应变进行精准测量,突破了传统显微观测只能定性描述的局限[16][17]。EBSD通过获取晶粒取向分布函数(ODF)、晶格优选方位(CPO)、亚晶界角度、位错密度与局部取向差(KAM、GOS)等参数,实现剪切应变强度、应变分布与变形机制的定量计算。在实际应用中,可将断层泥划分为强应变带、中等应变带与弱应变域,定量给出主应变方向、剪切应变大小,并用EBSD晶相图、IPF彩色取向图、局部取向差KAM图直观展示,清晰呈现主滑移带高应变集中、围岩应变微弱的分带特征。针对石英、长石等框架矿物,EBSD可识别脆性破裂与塑性变形的空间分布,区分地震快速粘滑导致的晶格破碎与蠕滑条件下的渐进塑性变形,为滑动方式判别提供定量依据[18][19](图4)。

2.3. 矿物成分分析

X射线衍射是目前定性分析与定量分析黏土矿物最常用的方法,可以有效识别伊利石、蒙脱石、高岭石、绿泥石等主要类型,并通过伊利石结晶度估算温度条件。电子探针与能谱分析可用于观察矿物交代关系、确定化学成分,判断流体活动与蚀变强度。

2.3.1. 基于地球化学分析的温压估算

温压估算以黏土矿物地球化学、流体包裹体、元素地球化学为基础,实现断层泥形成环境的定量约束,是恢复变形深度、温度与流体压力的关键方法。最常用的是黏土矿物温度计,以伊利石结晶度(IC)、伊利石-绿泥石成分温度计为代表,利用伊利石结晶度与形成温度的负相关关系,建立半定量温度模型。主流的研究方法见表1。

Table 1. Geothermobarometry methods based on geochemical analysis

表 1. 基于地球化学分析的温压估算方法

方法	温度范围	压力范围	优势	局限
黏土矿物(I/S、伊利石、绿泥石)	50~350℃	低-中压	灵敏度高、样品易获取、成本低	受时间、流体、重结晶影响
矿物相平衡	300~700℃	中-高压	结果稳定、适用于韧性剪切带	需特定矿物组合、样品少
岩石磁学/熔融	250~1700℃	全范围	直接记录同震摩擦热	易受后期热液改造
同位素($\delta^{18}\text{O}$ - δD)	50~350℃	全范围	约束流体来源与平衡温度	需纯矿物、分析复杂
流体包裹体	100~350℃	低-中压	直接测流体温压	包裹体易改造、数量少

2.4. 力学实验与数值模拟

通过剪切摩擦实验可以测定断层泥在不同湿度、温度、压力和滑动速率下的强度与摩擦特性,判断其更倾向于发生粘滑失稳还是稳定蠕滑[6][21][22]。

岩石力学摩擦实验是建立断层泥摩擦本构关系、判定滑动稳定性的直接手段,通过控制法向应力、滑动速率、湿度与温度,获取应力-应变曲线、摩擦系数-位移曲线、粘滑周期与弱化强度等关键参数,构建可用于数值模拟的摩擦本构方程。实验常用设备包括低速剪切仪、高速摩擦仪与高温高压流变仪,输出两类核心图表:一是应力-应变曲线,可确定峰值强度、残余强度、屈服点与硬化/软化特征,判断断层泥在加载过程中是强化还是弱化;二是摩擦系数-位移关系图,用于区分稳定滑动、粘滑失稳与滑动弱化行为。经典速率相关摩擦本构关系为:

$$\mu = \mu_0 + a \ln \left(\frac{V}{V_0} \right) + b \ln \left(\frac{\theta V_0}{D_c} \right)$$

其中 a 、 b 为速率依赖参数， $a-b$ 的正负直接决定断层是稳定蠕滑($a-b > 0$)还是易发生地震粘滑($a-b < 0$)， D_c 为特征弱化位移。

大量实验表明，黏土含量升高会使 $a-b$ 由负变正，摩擦系数显著降低，从高摩擦粘滑转为低摩擦稳定蠕滑。在龙门山断裂带实测中，主滑移带断层泥摩擦系数约 0.4~0.6， $a-b$ 值在低速条件下接近零，表现为速率无关或弱速率强化，与野外观察到的分段粘滑 - 蠕滑共存特征一致。

数值模拟则用于将微观观测结果与宏观断裂活动规律联系起来，分析应力分布、能量释放与滑移行为。

3. 断层泥显微结构类型及特征

在断层泥显微构造特征与发震构造关系上，过去一般认为局部化脆性变形的显微构造特征是在黏滞滑动或快速加载条件下形成的，与发震构造关系密切；而散布的韧性变形显微构造特征是断裂稳定滑动或缓慢加载的产物，亦即断层无震蠕滑的产物[3] [22]-[24]。岩石摩擦实验表明，断层同震动态滑动是一个非常复杂的过程[13] [25]，断层的地震滑动事件有可能使断层泥产生 2 种变形现象的共存[26]-[29]。

断层泥的显微结构是剪切历史的直接体现，按照形成机制可分为以下几类。

3.1. 定向组构与面理构造

在持续、稳定的剪切作用下，黏土矿物与片状矿物会沿着剪切方向定向排列，形成明显的面理。S-C 组构是最典型的结构之一，由剪切面理和剪切条带共同构成，可用于判断剪切方向与相对运动方式。这类结构通常出现在蠕滑为主、变形相对均匀的部位，代表缓慢、稳定的滑动过程[3] [22] (图 5)。

3.2. 碎裂结构

当断层发生快速滑动甚至地震级事件时，颗粒会在短时间内受到强烈冲击与挤压，形成棱角分明、大小混杂、破碎程度高的碎裂结构。这类结构常伴随大量微裂隙和多期剪切带，反映出突发性、高能级的变形过程[37]。局部脆性变形特征，如 Y、R 剪切以及棱角状、次棱角状碎斑随机分布，呈楔形的碎斑密集分布，不连续的断裂裂隙、书斜构造，S-C 组构以及其他变形，是由断层活动时的粘滑现象引起的。

3.3. 流动与塑性变形结构

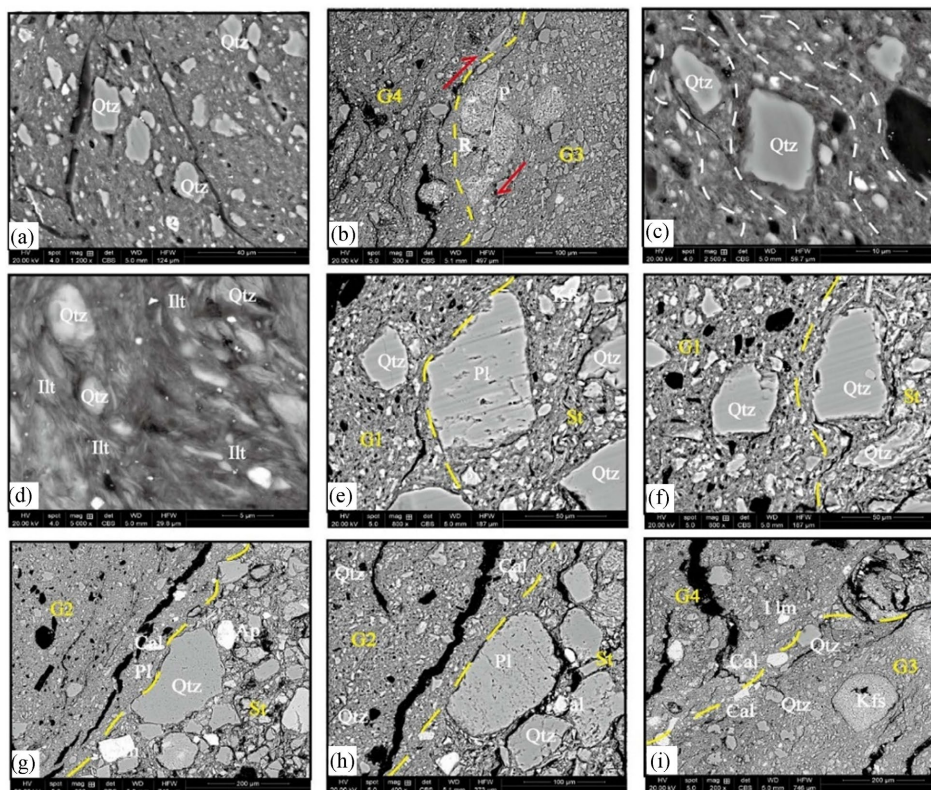
在流体较发育、温度较高或细粒化程度很高的条件下，断层泥会表现出一定的塑性特征，出现纹层、透镜体、微褶皱等流动构造。这类结构说明物质在剪切过程中发生了黏性流动或压力溶解作用，变形以韧性为主。

3.4. 石英颗粒表面特征

石英化学性质稳定，不易蚀变，其表面形貌可以长期保存[31]。稳定滑动条件下，颗粒多表现为磨圆、溶蚀；地震滑动则会留下撞击坑、贝壳状断口、阶梯状断裂等痕迹[32]。同一颗粒上出现多期特征叠加，通常指示断层经历了多次活动[33]。

3.5. 分带性特征

在完整的断裂剖面上，显微结构具有明显分带：远离断层面以原岩破碎为主，定向性弱；靠近主滑移带颗粒明显细化，定向组构发育；主滑移带内结构最均匀、黏土含量最高、剪切痕迹最清晰。



注：(a) - 石英和长石颗粒边缘溶蚀，弱定向排列；(b) - 黄色断层泥和黑色断层泥界线，矿物碎块沿着 R 和 P 剪切方向发生分异旋滚；(c) - 载剪面围绕大颗粒发生弯曲；(d) - 板条状黏土矿物定向排列；(e-h) - 砂岩和断层泥的界线，石英、长石矿物颗粒的边界锯齿状且平直；(i) - 黄色断层泥和黑色断层泥界线且石英矿物颗粒被截切；不同带的矿物颗粒以石英和长石为主，大小差异较大，泥行载剪明显；Qtz - 石英；Pl - 斜长石；Kfs - 钾长石；Cal - 方解石；Illm - 钛铁矿；Ap - 磷灰石；Illt - 伊利石；St - 砂岩；G1~G6 - 显及司黄色断层泥断层泥[16]。

Figure 5. Characteristics of fault gouge under scanning electron microscope (SEM) from the trench sample of the Guanxian-Anxian fault zone [16]

图 5. 灌县 - 安县断裂带地表探槽断层泥扫描电镜下特征[16]

4. 断层泥矿物组成及演化特征

结合先前的断层泥矿物研究表明，富含伊利石的断层泥是地震期间粘滑的产物，而蒙脱石含量较高的断层泥则是断层蠕动的产物[34] [35]。许多断层泥黏土矿物如高岭石、伊利石等在高围压下，强度升高，能承受很大的应力差，易产生粘滑作用[32]。

断层泥的矿物组成由原岩成分、剪切强度、流体活动和蚀变程度共同决定，通常可分为碎屑矿物、黏土矿物和次生蚀变矿物三类。

4.1. 碎屑矿物

碎屑矿物主要来自围岩破碎，以石英、长石、云母、方解石等为主。石英含量高、稳定性好，是构成断层泥骨架的主要矿物；长石易发生黏土化，其保存程度可反映蚀变强弱；云母等片状矿物容易定向排列，对组构形成有重要贡献；方解石多来自碳酸盐岩地层，常以碎斑或细脉形式出现，可用于判断多期活动。

碎屑矿物的粒度、分选和相对含量直接影响断层泥的力学性质。碎屑含量高、颗粒粗时，整体强度

偏高，更容易发生不稳定滑动；黏土含量高、细粒化充分时，岩体更软弱，更易发生稳定蠕滑。

4.2. 黏土矿物

黏土矿物是断层泥中最具指示意义的组分，主要由长石、云母等铝硅酸盐矿物在低温、富流体环境下蚀变形成[36]。

伊利石分布最广，稳定性强，其结晶度可用于粗略判断温度条件；蒙脱石膨胀性强，遇水强度大幅降低，主要形成于近地表、富水、偏酸性环境；高岭石是强烈风化的产物，多见于浅表部位；绿泥石则形成于温度稍高、富铁镁的环境，常与深部或热液作用有关。

不同黏土矿物的组合，可以用来判断断层形成的深度、流体性质、蚀变强度以及长期活动历史。

4.3. 次生蚀变矿物

次生矿物由流体沉淀与交代作用形成，常见方解石、绿帘石、沸石、褐铁矿、黄铁矿等。方解石脉体穿插代表多期流体活动；褐铁矿指示氧化环境；黄铁矿则反映还原条件。这些矿物为判断断层流体系统与构造演化提供了重要依据。

4.4. 矿物分带与演化规律

从围岩向断裂中心过渡，矿物组合呈现规律性变化：原岩带蚀变微弱；过渡带开始出现黏土矿物；主滑移带蚀变最强烈，黏土矿物高度富集。在多次活动的断裂中，早期形成的黏土矿物会被后期碎裂作用改造，再叠加新一期的蚀变矿物，形成复杂的多世代矿物组合，这是识别多期地震事件的重要标志。

5. 显微结构与矿物组合的构造指示意义

将显微结构与矿物成分结合，可以更全面、更可靠地揭示断层活动特征。

5.1. 判别滑动方式：地震粘滑与稳定蠕滑

以地震粘滑为主的段带，通常发育强烈碎裂结构，颗粒破碎明显，微裂隙密集，石英表面多见撞击与断口；矿物上以碎屑为主，黏土化相对较弱，细粒化程度有限。力学上表现为摩擦强度高，易发生突发性失稳。

以稳定蠕滑为主的段带，多发育强定向组构和流动构造，颗粒均匀细化；矿物上黏土含量高，伊利石、绿泥石等蚀变矿物发育，原岩结构被强烈改造。力学上表现为摩擦强度低，以缓慢、持续滑动为主。

5.2. 识别活动期次与相对强度

多期活动最直接的证据包括：早期面理被晚期剪切带错断、不同时代矿物相互叠加、同一石英颗粒同时保留古老溶蚀面与新鲜断口。伊利石结晶度、颗粒溶蚀程度、组构完整性等指标，可用于半定量判断活动强度与相对时间顺序，为重建古地震序列提供微观依据。

5.3. 反演变形环境

利用黏土矿物组合可以判断温度与深度：浅层以高岭石、蒙脱石为主；中部以伊利石为主；较深部出现绿泥石和韧性变形。次生矿物与结构特征则可以反映流体强弱、氧化还原条件，进而恢复断层所处的物理化学环境。

5.4. 评价工程地质稳定性

断层泥是隧道、边坡、大坝等工程的关键软弱带(图 6)。蒙脱石含量高的层位遇水易膨胀、软化,易引发大变形与失稳;伊利石和绿泥石为主的层位流变明显,易产生长期沉降[37];主滑移带强度极低,是最危险的潜在滑动面。通过微观分析可以提前识别风险段,为工程设计提供依据。



Figure 6. Bailu middle school across the Longmenshan fault
图 6. 龙门山断裂经过白鹿中学

6. 龙门山断裂带断层泥研究进展

龙门山断裂带作为青藏高原东缘典型的逆冲型活动断裂系统,先后触发 2008 年汶川 Ms8.0 级地震与 2013 年芦山 Ms7.0 级地震,其内部发育连续且保存完好的断层泥序列,成为揭示逆冲断裂微观变形机制、滑动行为差异与强震机理的天然试验场。近年来,针对汶川地震发震的北川-映秀断裂(BYF) [5]与芦山地震相关的大川-双石断裂(DSF) [38]开展的精细微观研究,构建了“强地表破裂型”与“微地表破裂型”两类断裂的断层泥判别范式,实现了从野外取样、室内定量测试到构造解释的完整技术流程。

6.1. 典型实例 1: 北川-映秀断裂沙坝探槽剖面(强地表破裂型)

6.1.1. 野外背景与取样过程

北川-映秀断裂是汶川地震的主控断裂,沙坝探槽位于该断裂北段,为地表垂直位移最大的剖面之一,可见清晰的同震地表破裂带。探槽垂直断裂走向布设,揭露断层上盘为石炭系砂岩、灰岩,下盘为寒武系炭质泥岩,两者之间发育一层厚度稳定、界线清晰的青灰色同震断层泥,厚度约 10 mm。

采用定向盒取样 + 石膏包埋固样方法,沿垂直断层面方向系统采集断层泥样品及上、下盘围岩样品,保证显微结构不被扰动,重点获取主滑移带中心高应变段样品,用于显微观测与矿物测试。

6.1.2. 室内定量分析全过程

在立体显微镜与偏光显微镜下,断层泥中心发育两条平行 Y 型剪切面,限定宽约 2~3 mm 的强变形带,内部发育典型 Y-剪切、R1-剪切、P-叶理、书斜式构造与碎屑不对称拖尾,构成典型 S-C 组构,指示逆冲同震快速滑动特征。围岩内部则发育密集菱形微裂隙与剪切破碎带,变形强烈且延伸范围广。

全岩与黏土矿物 X 射线衍射结果显示，断层泥中总黏土含量高达 72.8%，显著高于围岩；黏土组合以伊利石与伊利石/蒙脱石混层为主，伊利石含量显著升高，伊/蒙混层含量降低，高岭石极低，绿泥石占比稳定。伊利石结晶度指标指示断层泥形成温度为 180~220℃，对应埋深 7~10 km。

6.1.3. 构造解释

沙坝剖面断层泥的强定向组构、窄强变形带、高黏土含量与高伊利石比例，共同指示该剖面为汶川地震同震快速粘滑活动产物，同震滑动高度集中于毫米级主滑移带内；摩擦增温促使伊/蒙混层向伊利石转化，记录了同震摩擦热与流体活动的协同作用。

6.2. 典型实例 2：大川 - 双石断裂大川钻孔剖面(微地表破裂型)

6.2.1. 野外背景与取样过程

大川 - 双石断裂位于龙门山断裂带南段，为芦山地震相关的地表微破裂型断裂，无明显同震地表破裂，仅发育小位移错动与隐伏滑动面。研究依托 DC4、DC5、DC6 等钻孔揭露深部断层泥，主滑移带断层泥呈灰白色、质地松软，单层厚度仅 1~5 mm，呈透镜状、薄层状产出。

采用钻孔定向岩芯取样，沿破碎带等间距采集断层泥样品，重点采集主滑动面附近薄层软弱带，用于 SEM 微观形貌与 XRD 矿物分析。

6.2.2. 室内定量分析全过程

光学显微镜下，围岩几乎无微裂纹发育，变形完全局限于薄层断层泥内部；断层泥仅发育不连续微裂隙与不典型 S-C 组构，无明显强剪切面与拉长碎斑。SEM 下可见矿物颗粒以次棱角状为主，再加工碎屑与卷入结构极少，颗粒定向性弱，以分散式弱变形为特征。

断层泥总黏土含量 < 50%，显著低于北川 - 映秀断裂；黏土组合中高岭石含量明显高于绿泥石，伊利石/蒙脱石混层含量 < 30%，以低温浅表蚀变矿物组合为特征，指示弱剪切、低摩擦、弱流体环境。

结合显微与矿物特征，该断裂以弱粘滑与蠕滑交替为特征，同震变形能量低、位移小，属于典型微地表破裂型活动断裂。

6.2.3. 构造解释

大川 - 双石断裂薄层断层泥、弱变形组构、低黏土含量、高岭石富集的特征，代表了低速率、小位移、弱活动的断裂行为，与强震破裂型断裂形成鲜明对照，可作为识别隐伏微破裂断裂的微观指标。

6.3. 龙门山断裂带断层泥核心认识

结构分段方面，北川 - 映秀断裂等中段 - 北段主断裂以强剪切、高细化、典型 S-C 组构、密集裂隙为特征，代表快速粘滑；大川 - 双石断裂等南段分支断裂以弱定向、不连续裂隙、薄层分布为特征，代表蠕滑与弱粘滑。

矿物差异方面，主滑移带普遍以伊利石为主、局部绿泥石富集，指示中深部较强流体 - 岩石相互作用；强震段黏土总量更高、伊/蒙混层转化更彻底；微破裂段高岭石发育、蚀变强度更低。

Table 2. Comparison of microanalytic results of fault gouge between Dachuan-Shuangshi Fault (DSF) and Beichuan-Yingxiu Fault (BYF) [39]

表 2. 大川 - 双石断裂(DSF)与北川 - 映秀断裂(BYF)断层泥微观分析结果对比[39]

对比项目	大川 - 双石断裂(DSF)	北川 - 映秀断裂(BYF)
单一断层事件的断层泥厚度	0.5~1.0 毫米*或 1~5 毫米*	>10 毫米*, a, b, c

续表

断层泥周围围岩特征	几乎无结构变形痕迹*或少量不连续的非笔直微裂纹*	许多(微)裂纹、钻石状裂纹或剪切面*, a, b; 局部有严重破碎的角砾岩和广泛分布的裂隙*, c
碎屑或矿物颗粒特征	定向排列特征*或少量微米级斑晶特征*	明显的颗粒定向排列, 许多碎屑或矿物颗粒呈定向分布*, b, d
韧性变形特征	似 S-C 组构和小褶皱*	明显的 S-C 组构、显著的 P-叶理、拉长的碎屑颗粒和不对称的拖曳结构*ab
总粘土含量	44%或 36%	~50%或更高*f 及 72.8%*b
矿物粘土组成: 相对含量	I (39~50) > I/S (27~28) > Kln (16~21) > Chl (6~13)*	I/S (~50%) > I > Chl (~30%) > Kh (几乎 0%), 或 I > I/S (40%) > Chl (>7%) > Kln (1%)
伊利石/蒙脱石混层比例	15%*	>50% ^d 或 35%*

注: I: 伊利石; I/S: 伊利石/蒙脱石混层; Kln: 高岭石; Chl: 绿泥石。符号“*”表示断层泥样品取自钻孔, “#”表示断层泥出露于地表。a: Li 等人(2013b) [39]; b: Yuan 等人(2013) [5]; c: Han 等人(2010) [40]; d: Si 等人(2014) [41]; e: Chen 等人(2016) [42]; f: Wang 等人(2014) [43]; g: Duan 等人(2016) [44]。

滑动行为方面, 龙门山断裂带呈现北段强震粘滑、中南段蠕滑 - 弱粘滑的分段特征, 与地表破裂分布、强震活动规律高度一致(表 2)。

6.4. 不同构造类型断裂带的差异

与全球典型走滑断裂、正断层对比, 龙门山逆冲断裂带断层泥呈现显著的构造背景差异性。

6.4.1. 与走滑断裂差异

走滑断裂断层泥以强 S-C 组构、均匀细粒化、对称剪切带为特征, 黏土矿物以伊利石 + 蒙脱石为主, 形成温度偏低, 以稳定蠕滑与粘滑 - 蠕滑转换为特征; 龙门山逆冲断裂则以不对称分带、压缩型构造、绿泥石更发育为标志, 粘滑特征更显著。

6.4.2. 与正断层差异

正断层断层泥以强碎裂、张性裂隙发育为特征, 浅表高岭石、蒙脱石等低温风化矿物占绝对优势, 形成温度 < 150°C, 变形以脆性张剪为主; 龙门山逆冲断裂以压剪性结构、中温蚀变矿物组合、变形高度局部化为显著差异。

总体而言, 逆冲断裂断层泥以中温蚀变、压剪结构、强局部化为标志; 走滑断裂以强定向组构、对称剪切为特征; 正断层以低温风化、张性破裂为特点, 微观特征可有效判别断裂构造属性与活动方式。

7. 目前存在的主要问题

当前断层泥显微结构与矿物成分研究虽已取得大量成果, 但在多学科交叉、定量表征、跨尺度衔接等方面仍存在具体瓶颈。一是多期活动精准定年困难, 微观结构与绝对年代数据结合不紧密, 自生伊利石 Ar-Ar 定年误差较大, 碎屑锆石、自生黏土、磷灰石等不同组分的定年体系不匹配, 难以建立精准的多期活动时间框架; 二是多参数耦合机制不明确, 显微结构、矿物组成、力学行为、流体活动之间的四维耦合关系缺乏统一定量模型, 单一参数解释存在明显多解性; 三是三维定量表征技术不成熟, 传统观测以二维平面为主, 无法反映微观结构与矿物分布的空间非均质性, 三维定量表征与可视化技术有待突破; 四是跨尺度衔接机制不清晰, 纳米 - 微米尺度的微观参数与千米尺度的宏观断裂活动之间, 缺乏定量关联模型, 难以实现微观机制向宏观行为的有效推演; 五是工程化转化不足, 微观参数与工程稳定性评价指标之间的定量转换模型不完善, 现场快速测试与应用技术不成熟, 限制了基础研究成果向工程防

灾的实际转化。

8. 研究展望

未来断层泥研究将朝着精准化、量化、多学科融合与工程化应用的方向发展, 针对当前研究瓶颈, 提出具体可操作的研究路径。一是构建多体系微区定年技术体系, 联合碎屑锆石 U-Pb 定年、自生伊利石 Ar-Ar 定年、磷灰石裂变径迹定年等方法, 对断层泥中不同矿物组分进行精准定年, 建立多期次断裂活动的绝对时间框架, 将定年误差控制在 ± 5 Ma 内; 二是建立四维耦合定量模型, 整合 EBSD 应变定量、XRD 矿物定量、力学本构关系、流体地球化学参数, 构建“显微结构-矿物组成-力学行为-流体活动”统一的定量模型, 消除判别多解性; 三是突破三维微观定量表征技术, 采用 CT 扫描、三维重构与人工智能图像识别相结合的方法, 定量获取断层泥三维孔隙、裂隙、矿物分布特征, 实现微观结构的全维度精准表征; 四是完善跨尺度定量衔接模型, 基于微观参数构建离散元数值模型, 向上耦合宏观断裂活动规律, 实现微观变形机制向宏观滑动行为的定量预测; 五是推动工程化转化应用, 建立微观参数与工程稳定性指标的定量转换公式, 研发现场快速测试装置, 将微观研究成果直接服务于隧道、边坡、大坝等重大工程的防灾减灾设计; 六是建立全球构造对比体系, 整合逆冲、走滑、正断层等不同构造背景下的断层泥数据, 构建全球统一的断裂活动性微观判别标准, 推动基础研究成果向地震预测与灾害防治实际应用转化。

参考文献

- [1] 张秉良, 林传勇, 史兰斌. 香山-天景山断裂断层泥显微构造特征及其地质意义[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2002(3): 184-190.
- [2] Bos, B., Peach, C.J. and Spiers, C.J. (2000) Frictional-Viscous Flow of Simulated Fault Gouge Caused by the Combined Effects of Phyllosilicates and Pressure Solution. *Tectonophysics*, **327**, 173-194. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00168-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00168-2)
- [3] Reinen, L.A. (2000) Seismic and Aseismic Slip Indicators in Serpentine Gouge. *Geology*, **28**, 135-138. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)028<0135:saasii>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)028<0135:saasii>2.3.co;2)
- [4] 付碧宏, 王萍, 孔屏, 等. 四川汶川 5·12 大地震同震滑动断层泥的发现及构造意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(10): 2237-2243.
- [5] 袁仁茂, 张秉良, 徐锡伟, 等. 汶川地震北川-映秀断裂北段断层泥显微构造和黏土矿物特征及其意义[J]. 地震地质, 2013, 35(4): 685-700.
- [6] 张秉良, 方仲景, 向宏发, 等. 断层泥显微结构特征与断层滑动习性的研究[J]. 华南地震, 1996(4): 68-72.
- [7] 张秉良, 林传勇, 方仲景, 等. 活断层中断层泥的显微构造特征及其意义[J]. 科学通报, 1993(14): 1306-1308.
- [8] 张秉良, 周永胜. 含有粘土矿物断层泥地震与非地震标志[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2000(4): 67-71.
- [9] 李海兵, 许志琴, 马胜利, 等. 汶川地震和九寨沟地震断层作用及动力学过程研究进展——纪念汶川地震十周年[J]. 地球物理学报, 2018, 61(5): 1653-1665.
- [10] 王萍, 付碧宏, 张斌, 等. 汶川 8.0 级地震地表破裂带与岩性关系[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 131-139.
- [11] 党嘉祥, 周永胜, 韩亮, 等. 虹口八角庙-深溪沟炭质泥岩同震断层泥的 X 射线衍射分析结果[J]. 地震地质, 2012, 34(1): 17-27.
- [12] 韩亮, 周永胜, 陈建业, 等. 汶川地震基岩同震断层泥结构特征[J]. 第四纪研究, 2010, 30(4): 745-758.
- [13] 何昌荣, Verberne, B.A., Spiers, C.J. 龙门山断裂带沉积岩和天然断层泥的摩擦滑动性质与启示[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 113-131.
- [14] 袁仁茂, 张秉良, 徐锡伟, 等. 汶川地震剪切滑动面微-纳米级颗粒的特征、形成机制及地震意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(8): 1821-1832.
- [15] Tanaka, H., Fujimoto, K., Ohtani, T. and Ito, H. (2001) Structural and Chemical Characterization of Shear Zones in the Freshly Activated Nojima Fault, Awaji Island, Southwest Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **106**, 8789-8810. <https://doi.org/10.1029/2000jb900444>

- [16] 张青, 李馨. 电子背散射衍射技术(EBSD)在组构分析中的应用和相关问题[J]. 岩石学报, 2021, 37(4): 1000-1014.
- [17] 刘俊来, 曹淑云, 邹运鑫, 等. 岩石电子背散射衍射(EBSD)组构分析及应用[J]. 地质通报, 2008(10): 1638-1645.
- [18] 许志琴, 王勤, 梁风华, 等. 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, 2009, 25(7): 1721-1736.
- [19] 夏浩然, 刘俊来. 石英结晶学优选与应用[J]. 地质通报, 2011, 30(1): 58-70.
- [20] 曹晓文, 孙志明, 黄宝琛, 等. 藏南泽当地区大反向逆冲断层变形研究——以磁组构与 EBSD 组构分析为例[J]. 岩石学报, 2021, 37(10): 3167-3184.
- [21] 李晓慧. 龙门山断裂带金河磷矿剖面断层泥的低速至高速摩擦性质研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2018.
- [22] Moore, D.E., Summers, R. and Byerlee, J.D. (1989) Sliding Behavior and Deformation Textures of Heated Illite Gouge. *Journal of Structural Geology*, **11**, 329-342. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90072-2](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90072-2)
- [23] 姚大全. 基岩区断裂活动习性研究方法初探: 以殷家汇-葛公镇断裂研究为例[J]. 地震学刊, 2001, 21(2): 15-18.
- [24] 姚大全. 鲜水河断裂带活动期次和滑移特性微观标志的识别[J]. 灾害学, 2004, 19(1): 7-10.
- [25] 马胜利, 姚路, 嶋本利彦, 等. 岩石高速摩擦实验的进展[J]. 地震地质, 2014, 36(3): 814-824.
- [26] 韩竹军, 张秉良, 曾新福, 等. 江西中北部基岩区断层泥显微构造特征及意义[J]. 地震地质, 2018, 40(4): 903-919.
- [27] Yao, L., Shimamoto, T., Ma, S., Han, R. and Mizoguchi, K. (2013) Rapid Postseismic Strength Recovery of Pingxi Fault Gouge from the Longmenshan Fault System: Experiments and Implications for the Mechanisms of High-Velocity Weakening of Faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**, 4547-4563. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50308>
- [28] Chester, F.M. and Logan, J.M. (1986) Implications for Mechanical Properties of Brittle Faults from Observations of the Punchbowl Fault Zone, California. *pure and applied geophysics*, **124**, 79-106. <https://doi.org/10.1007/bf00875720>
- [29] Rutter, E.H., Maddock, R.H., Hall, S.H. and White, S.H. (1986) Comparative Microstructures of Natural and Experimentally Produced Clay-Bearing Fault Gouges. *Pure and Applied Geophysics*, **124**, 3-30. <https://doi.org/10.1007/bf00875717>
- [30] Blenkinsop, T. (2002) Deformation Microstructures and Mechanisms in Minerals and Rocks. Kluwer Academic Publishers, 7-23.
- [31] 丁盛昌, 邱世藩, 朱照宇, 等. 华南沿海广从断裂带北段断层泥中石英微形貌与第四纪活动性特征[J]. 大地构造与成矿学, 2023, 47(2): 327-336.
- [32] 申俊峰, 申旭辉, 曹忠全. 断层泥石英形貌与断层活动性研究[J]. 矿物岩石, 2007, 27(1): 90-96.
- [33] 黄静宜, 刘智荣, 刘晓燕. 沂沭断裂带北段断层泥中石英颗粒微形貌特征分析[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(5): 197-207.
- [34] Chen, W.D., Tanaka, H., Huang, H., Lu, C., Lee, C. and Wang, C. (2007) Fluid Infiltration Associated with Seismic Faulting: Examining Chemical and Mineralogical Compositions of Fault Rocks from the Active Chelungpu Fault. *Tectonophysics*, **443**, 243-254. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.01.025>
- [35] Isaacs, A.J., Evans, J.P., Song, S. and Kolesar, P.T. (2007) *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **18**, 183-221. [https://doi.org/10.3319/tao.2007.18.2.183\(tcdp\)](https://doi.org/10.3319/tao.2007.18.2.183(tcdp))
- [36] 谢礼煊, 刘贺娟, 班胜男, 等. 不同组分断层泥的剪切特性试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(9): 2545-2554.
- [37] 齐群, 兰恒星, 李守定. 断层泥微观结构与力学性质关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S1): 2689-2698.
- [38] Li, Y.B., Chen, L.C., Ran, Y.K. and Chang, Y. (2022) Microscopic Characteristics of Fault Gouge in Minor-Surface-Rupture Faults: A Case Study in the Longmenshan Fault Zone, Eastern Tibetan. *Frontiers in Earth Science*, **10**, Article ID: 840667. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.840667>
- [39] Li, H., Wang, H., Xu, Z., Si, J., Pei, J., Li, T., et al. (2013) Characteristics of the Fault-Related Rocks, Fault Zones and the Principal Slip Zone in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1). *Tectonophysics*, **584**, 23-42. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.021>
- [40] Han, L., Zhou, Y., Chen, J., Ma, S., Yang, X., He, C., et al. (2010) Structural Characters of Co-Seismic Fault Gouge in Bed Rocks during the Wenchuan Earthquake. *Quaternary Science*, **30**, 745-758. (In Chinese)
- [41] Si, J., Li, H., Kuo, L., Pei, J., Song, S. and Wang, H. (2014) Clay Mineral Anomalies in the Yingxiu-Beichuan Fault Zone from the WFSD-1 Drilling Core and Its Implication for the Faulting Mechanism during the 2008 Wenchuan Earthquake (Mw 7.9). *Tectonophysics*, **619**, 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.09.022>
- [42] Chen, J., Yang, X., Ma, S., Yang, T. and Niemeijer, A. (2016) Hydraulic Properties of Samples Retrieved from the

Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1) and the Surface Rupture Zone: Implications for Coseismic Slip Weakening and Fault Healing. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **17**, 2717-2744. <https://doi.org/10.1002/2016gc006376>

- [43] Wang, H., Li, H., Si, J., Sun, Z. and Huang, Y. (2014) Internal Structure of the Wenchuan Earthquake Fault Zone, Revealed by Surface Outcrop and WFSD-1 Drilling Core Investigation. *Tectonophysics*, **619**, 101-114. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.029>
- [44] Duan, Q., Yang, X., Ma, S., Chen, J. and Chen, J. (2016) Fluid-Rock Interactions in Seismic Faults: Implications from the Structures and Mineralogical and Geochemical Compositions of Drilling Cores from the Rupture of the 2008 Wenchuan Earthquake, China. *Tectonophysics*, **666**, 260-280. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.11.008>