

白格滑坡构造混杂岩的空间结构和强度特性 对滑动带形成和远程运动的影响

彭星亮¹, 汪发武^{1,2*}, 陈也¹, 赵子昕¹

1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092
2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092

摘要: 2018 年 10 月和 11 月在金沙江构造混杂岩带中段相继发生两次大型高位远程滑坡, 并引发滑坡-堰塞湖灾害链, 滑坡源区位于西藏自治区昌都市江达县白格村。针对白格滑坡的远程运动特性, 通过室内微观特性测试分析滑坡处构造混杂岩的岩性特征, 运用环境噪声频散测量探明物源区构造混杂岩的空间结构, 结合不排水环剪试验剖析滑动带物质的剪切行为。研究发现, 1) 滑坡物源区的构造混杂岩主要由绿泥石化变质粉砂岩和伊利石化变质板岩组成, 均含有较高比例粘土矿物成分, 遇水易发生风化作用导致强度降低; 2) 坡体内构造混杂岩块体的分布结构显著影响滑动带的形成和形状, 滑动带沿着块体和基质之间的薄弱区域扩展, 在岩体内呈现“绕块体发育”模式; 3) 饱和滑动带试样在长距离不排水剪切过程中产生高孔隙水压力, 导致强度显著弱化, 其峰值抗剪强度和残余强度降低为干燥状态下的 67% 和 60%。结果表明, 构造混杂岩的强度劣化特性和块体分布结构对滑动带的形成有显著影响, 其剪切强度特性对滑坡的远程运移具有控制作用。本研究可为白格滑坡坡体后续可能的变形破坏分析提供依据, 还可进一步为构造混杂岩地区边坡稳定性评价和同类型滑坡灾害防治提供参考。

关键词: 白格滑坡; 构造混杂岩; 频散测量; 空间结构; 不排水剪切强度

中图分类号: P694 **收稿日期:** 2025-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.42230715); 中央高校基本科研业务费专项资金资助
Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42230715) and the Fundamental Research Funds of China for the Central Universities

第一作者简介: 彭星亮 (1993-), 男, 博士生, 主要从事应用地球物理, 地质灾害方面的研究工作。
ORCID: 0000-0002-1132-5703. E-mail: jackliang@tongji.edu.cn

***通讯作者简介:** 汪发武 (1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质, 地质灾害方面的研究工作。ORCID: 0000-0002-5912-7095. E-mail: wangfw@tongji.edu.cn

Research on the effects of spatial structure and strength characteristics of tectonic mélanges in Baige landslide on the formation of sliding zone and long runout movement

PENG Xingliang¹, WANG Fawu^{*1,2}, CHEN Ye¹, ZHAO Zixin¹

1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China

**Corresponding author: wangfw@tongji.edu.cn*

Abstract: In October and November 2018, two large-scale high-altitude long-runout landslides successively occurred in the central section of the Jinsha River tectonic mélange belt, triggering a cascades disaster chain of landslide-dammed lake. The source areas of these landslides were located at Baige Village, Jiangda County, Changdu City, Tibet Autonomous Region. This study focuses on the long runout movement characteristics of the Baige landslide. We investigated the topographic features of the landslide area through unmanned aerial vehicle (UAV) surveying. Laboratory microscopic characterization was used to analyze the lithological properties of the mélange rock. The ambient noise dispersion measurements were used to explore the spatial structure of the mélange rock mass in the source area, combined with the high-speed undrained ring shear test to analyze the dynamics of the sliding zone material. This study reveals that: 1) The mélange rocks of the source area are primarily composed of chloritized metamorphic siltstone and illitized metamorphic slate. These rocks contain a high proportion of clay minerals, which are prone to weathering when exposed to water, leading to a reduction in strength. 2) The spatial distribution of blocks within the mélange rock mass significantly affects the formation and shape of sliding zones. Sliding zones tend to form along zones of weakness in both the blocks and the matrix, exhibiting a failure mode characterized by block-bypassing mechanisms. 3) The saturated sliding zone sample generates high pore-water pressure during undrained rapid shear process, resulting in significant strength degradation. Its peak shear strength and residual strength are 67% and 60% of that under dry conditions, respectively. The results demonstrate that the combination of the spatial structure and strength deterioration characteristics of mélanges is a key factor causing the frequency of high-

altitude long runout landslides in this region. The shear strength characteristics of mélanges controlled the long-runout movement of the landslide. This research provides a foundation for the subsequent potential deformation and failure of the Baige landslide slope. It also offers valuable insights for slope stability analysis and landslide disaster prevention in tectonic mélange areas.

Keywords: Baige landslide; tectonic mélange; dispersion measurement; spatial structure; undrained shear strength.

1 引言

构造混杂岩（tectonic mélange）是指在陆-陆碰撞、弧-陆碰撞等板块俯冲消减构造环境中，经强烈的剪切构造变形作用形成的具有“块体（block）-基质（matrix）”结构的混杂岩体（Festa et al., 2012；闫臻等，2018）。构造混杂岩区域的形成过程受到多种作用影响，包括构造剪切、沉积和变质作用等（Kimura et al., 2012；Festa et al., 2019）。这些地质作用造成混杂岩内部组成成分多样，不规则层理和断裂构造发育。混杂岩具有多尺度的内部结构，内部岩块的形态和排列方式混乱。这些特性使得构造混杂岩在空间结构上表现出高度异质性，而这种异质性及不同岩性的组合又将对构造混杂岩体的力学性质产生重要影响（Ogata et al., 2021；赵子昕等，2023）。

青藏高原受欧亚板块与印度板块的俯冲-碰撞影响，形成了众多复杂的断裂带和缝合带，如金沙江断裂带、巴塘断裂带、雅鲁藏布江缝合带、班公错—怒江缝合带等（彭建兵等，2020）。这些缝合带、断裂带又衍生 7 条混杂岩带，包括雅鲁藏布江混杂岩带、嘉黎-易贡构造混杂岩带、怒江构造混杂岩带、澜沧江混杂岩带、金沙江构造混杂岩带、甘孜-理塘混杂岩带及炉霍-道孚混杂岩带（潘桂棠等，2020；张永双等，2024）。构造混杂岩带内主要由混杂岩基质和各种规模不一、岩性各异的岩块构成（唐渊等，2022）。部分基质中包含的基性-超基性岩石经风化作用易形成强度较低的蚀变岩，从而为构造混杂岩滑坡的滑动带形成提供有利的条件，促进滑坡的发生（郭长宝等，2024；张永双等，2024）。譬如，在怒江构造混杂岩带上的红色泥质岩基质，在高海拔地区干湿交替和冻融循环作用下，常表现出极差的强度特征，极易形成局部软弱滑动带（张永双等，2023）。

白格滑坡位于金沙江流域四川省甘孜藏族自治州白玉县与西藏自治区昌都市江达县交界处，其所处的江达县波罗乡为典型的构造混杂岩分布区域。该区域岩性以元古界片麻岩（雄松群）为主（图 1）（王国生等，1992），在接近滑坡后壁处分布有风化程度较高的蛇纹

岩(华力西期)(李金秋等, 2023)。从构造混杂岩地质特征角度分析, 该区域主要由蚀变程度不一、性质软弱及结构破碎的片麻岩基质, 夹杂蚀变程度高的蛇纹岩块构成(陈菲等, 2020)。滑坡整体受断层控制, 后壁位于金沙江断裂的错动带上(Tian et al., 2020)。

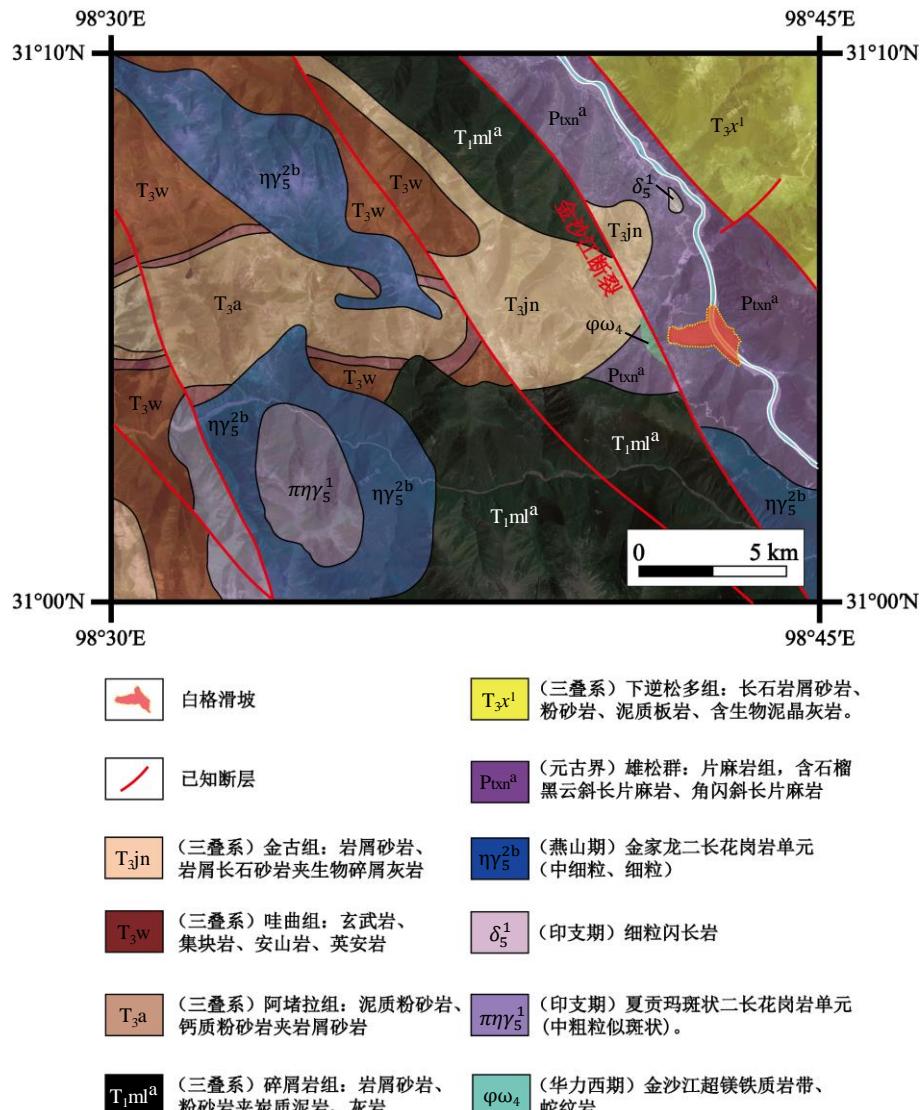


图 1 白格滑坡区域地质图 (修改自 1: 200,000 白玉县地质图幅 (基于王国生等 (1992)); 底图为吉林一号卫星地图)

Fig. 1 Geological map of the Baige landslide area (modified from the 1: 200,000 Baiyu county geological map by Wang et al., 1992; Base map is from the Jilin-1 satellite image)

根据现场三维地形图(图 2a 和 b)和滑坡纵剖面图(图 2c), 白格滑坡位于金沙江的“V”型河谷段, 崩滑体原始坡度在35°~45°(Fan et al., 2020)。根据滑坡现场无人机航测结果, 调查时滑坡物源区的海拔约为3725 m, 坡角处海拔为2875 m。滑坡后壁紧邻坡顶, 其最高点至坡脚处金沙江高差约850 m。滑坡的主滑方向为81°, 水平运动距离1956 m, 初步估算两次滑坡的总方量约为3.6×10⁷ m³(Zhang et al., 2020)。滑坡运动的视摩擦角测算约为23.5°, 远小于蛇纹岩与片麻岩的内摩擦角(通常为30°~40°), 考虑对岸的阻挡作用, 该

滑坡可分类为高位远程滑坡（汪发武等，2022）。

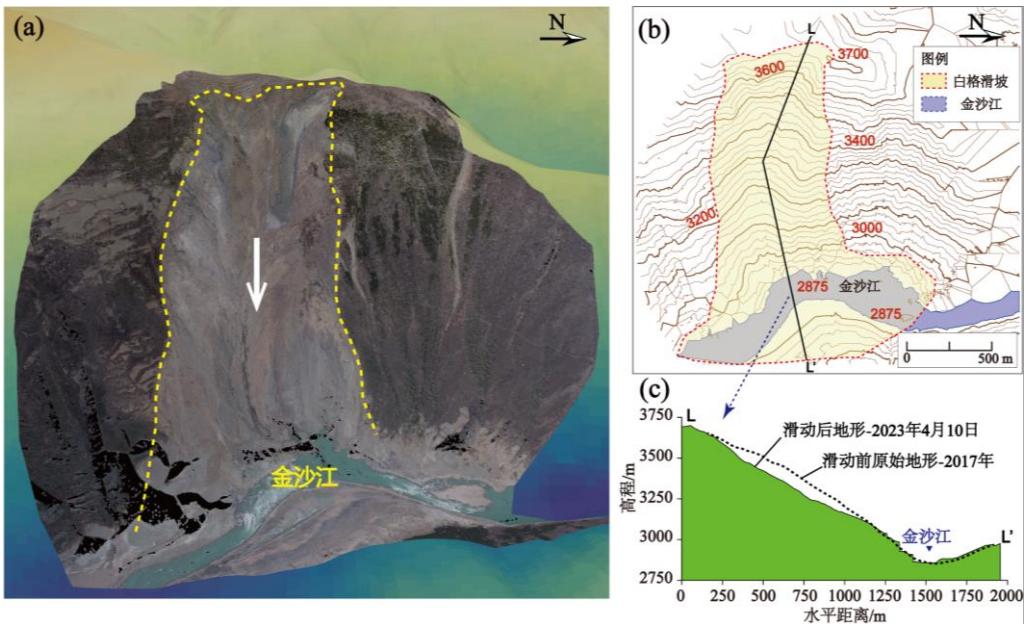


图 2 白格滑坡地形图（由 2023 年 4 月 10 日滑坡现场无人机航测数据生成）

Fig. 2 Topographic map of the Baige landslide

- (a) 滑坡三维点云地形图；(b) 滑坡地形等高线图；(c) 滑坡纵剖面 L-L'（滑前地形源自谷歌地球）
 (a) Three-dimensional point cloud map; (b) Contour map; (c) Longitudinal profile L-L'

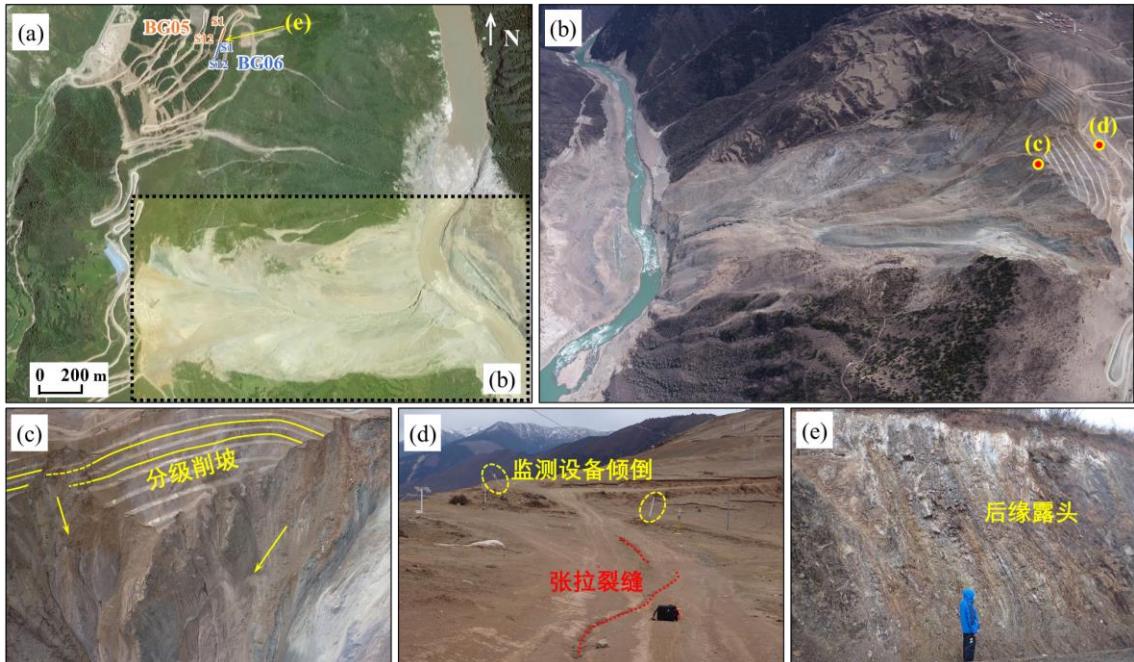


图 3 白格滑坡现场调查情况

Fig. 3 On-site investigation of the Baige landslide

- (a) 白格滑坡物源区环境噪声频散测量 BG05 与 BG06 测线位置（修改自吉林一号卫星影像）；(b) 白格滑坡全貌；(c) 滑坡后壁渐进式破坏 (b-c 均由无人机拍摄)；(d) 滑坡后缘平台发生变形破坏后形成的张拉裂缝及倾倒的监测设备；(e) 滑坡后缘测试现场露头
 (a) BG05 and BG06 ambient noise dispersion survey lines in the Baige landslide source area; (b) Overview of the Baige landslide; (c) Progressive failure of the main scarp (captured by UAV); (d) Tensile cracks and tilted

- (a) BG05 and BG06 ambient noise dispersion survey lines in the Baige landslide source area; (b) Overview of the Baige landslide; (c) Progressive failure of the main scarp (captured by UAV); (d) Tensile cracks and tilted

monitoring equipment resulting from deformation and failure along the landslide crown; (e) Outcrop in the landslide source area

滑坡物源区起滑势能高、地质结构复杂且构造混杂岩基质破碎松散，导致坡体在 2018 年间发生了两次大规模的高位滑坡事件，造成金沙江两次被堵，形成滑坡-堰塞湖灾害链（冯文凯等，2019；陈菲等，2020；闫怡秋等，2021）。第二次形成的堰塞湖虽经人工干预提前泄洪，但溃坝的洪水仍然造成下游云南省超 74 亿元的经济损失（朱德明等，2021）。通过现场调查发现，经过两次大体量的滑坡事件后，虽然坡体上松散物质已大量减少，但滑坡后缘平台上仍存在渐进式变形破坏迹象（图 3b），如多条大型拉张裂缝，以及倾倒的监测设备（图 3c）。滑坡后缘仍存在持续变形破坏的风险。

因此，本研究基于对白格滑坡孕灾环境特征的现场调查，结合现场无人机测绘、环境噪声频散测量、构造混杂岩样品的微观测试及滑动带物质的环剪试验，从地质地形特征、构造混杂岩体力学性质分布结构，到构造混杂岩的岩性特征和强度性质，由宏观到微观角度，试图厘清构造混杂岩空间结构及其强度特性对白格滑坡频发性和远程运动行为的影响，为今后类似地区的滑坡防治提供科学依据。

2 滑坡物源区岩性特征分析

白格滑坡物源区浅表发育大量强风化构造混杂岩，其结构高度破碎，手捻即呈粘土质粉末状，力学强度显著降低。为分析滑坡体构造混杂岩的物理力学特性，本研究在滑坡物源区削坡露头处采集了具有代表性的不同性质岩石样品，并在室内开展微观鉴定分析。通过对岩石样品的偏光显微镜分析，其主要岩性为绿泥石化变质粉砂岩（图 4a、4d）、高岭石化变质粉砂岩（图 4b）及伊利石化变质板岩（图 4c）。测试结果表明：绿泥石化变质粉砂岩与高岭石化变质粉砂岩（方解石化）主要由砂级碎屑和由粘土质组分转化形成的变质矿物（绿泥石、绢云母）组成。此两种粉砂岩和伊利石化变质板岩样品内均有轻微碎裂，裂隙宽度不一，裂隙内有方解石、石英及不透明矿物充填交代。砂级碎屑为长石、石英，大小一般 0.01~0.03 mm，长石主要为斜长石；绿泥石呈片状结构，片直径一般 0.001~0.02 mm。伊利石化变质板岩（含细砂粉砂），其粘土质变矿物为绢云母，绢云母片直径一般为 0.001~0.02 mm，集合体呈条纹状定向分布，被褐铁矿等不透明矿物交代。

为分析岩石样品中的粘土矿物成分，我们对采集的样品进行 X 射线衍射分析测试。各岩样的自然状态样品、乙二醇处理样品及 450°C 高温处理样品的 XRD 衍射图谱如图 5 所示，其中 θ 为入射角， 2θ 表示入射角和衍射角的和，是入射 X 射线束与衍射波之间的夹角。

在 X-射线衍射实验中，样品和探测器的相对位置变化使入射和出射光束的夹角（即 2θ ）发生变化，从而产生不同晶面间距的衍射峰，通过晶面间距则可确定其晶体结构和晶面排列方式。而样品制备过程中利用饱和乙二醇处理有助于层间吸附性矿物的识别，吸附性强的矿物会引起特征峰的偏移或拓宽； 450°C 高温处理则是为去除矿物中的水分，使非膨胀矿物保持稳定而膨胀性矿物的层间结构则会坍塌，能够有效识别出粘土特性矿物（曲永新等，2002；方敬锐等，2021）。本研究采用《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》(SY/T 5163-2018)进行测试，其中自然样品及 450°C 高温处理样品的扫描角度(2θ)范围为 $3.5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ，饱和乙二醇处理样品的扫描范围扩展至 $3.5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。测试结果显示各岩样中的粘土矿物成分如图 5 所示，谱图中绿泥石(C)、高岭石(K) 及伊利石(It) 矿物的衍射峰均清晰可辨。X-射线衍射的测试结果表明（表 1），白格滑坡物源区采集的岩样中含有较高比例的粘土矿物成分，主要以伊利石、绿泥石为主，少部分岩样中含有高岭石成分。白格滑坡位于金沙江构造混杂岩带，坡体内构造裂隙发育，由岩体结构面入渗的雨水易与构造混杂岩发生风化作用，进而对此类富含粘土矿物岩石的物理力学性质产生显著影响。

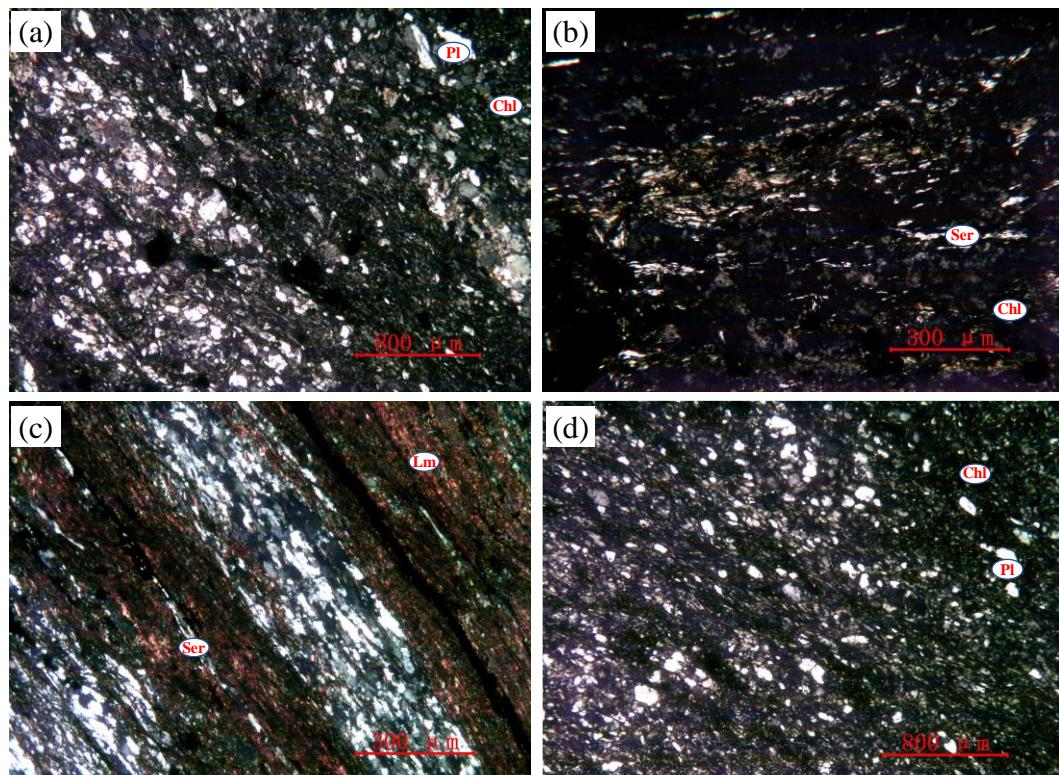


图 4 滑坡物源区露头岩石样品偏光显微镜照片

Fig. 4 Photographs of rock samples from the source area of the landslide under optical microscope

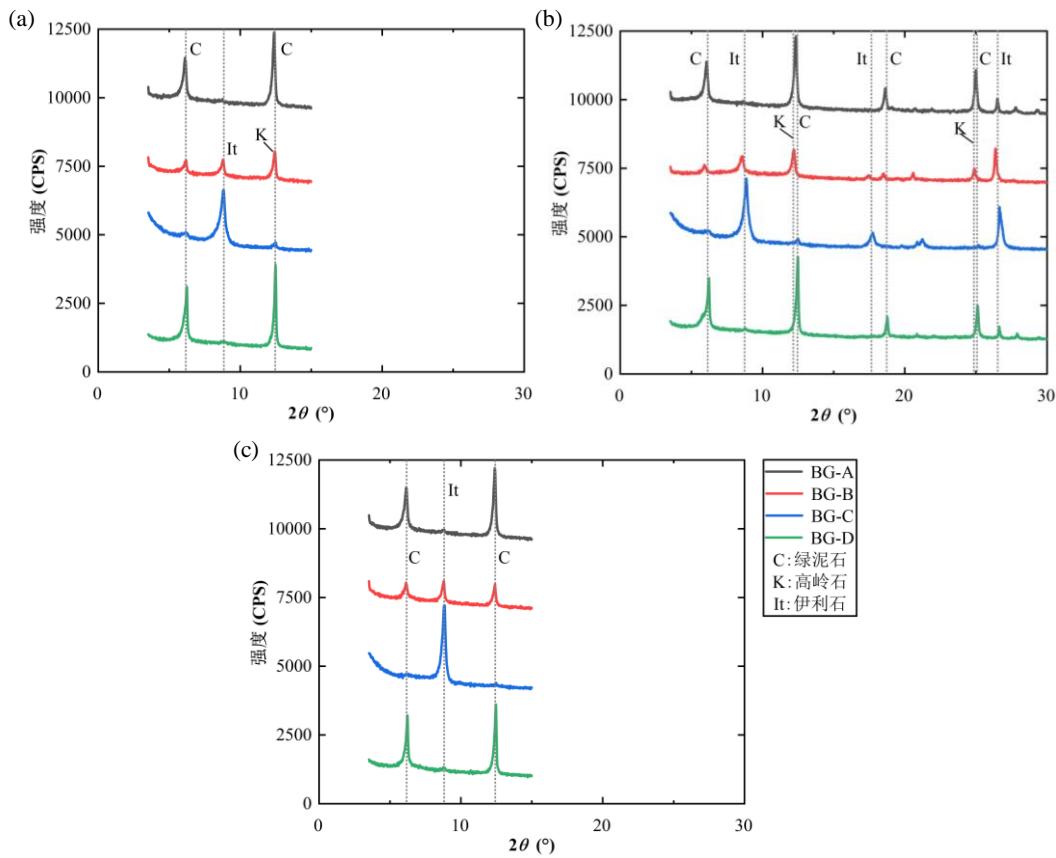
Pl: 斜长石；Chl: 绿泥石；Ser: 绢云母；Lm: 褐铁矿

(a) 绿泥石化变质粉砂岩 BG-A；(b) 高岭石化变质粉砂岩（方解石化）BG-B；(c) 伊利石化变质板岩（含细砂粉砂）BG-C；(d) 绿泥石化变质粉砂岩 BG-D

(a) Chloritized metamorphic siltstone BG-A; (b) Kaolinized metamorphic siltstone (calcified) BG-B; (c) Illitized metamorphic slate (containing fine sand and silt) BG-C; (d) Chloritized metamorphic siltstone

表 1 白格滑坡物源区岩样 X 射线衍射粘土矿物定量分析结果**Table 1** X-ray diffraction quantitative analysis results of clay mineral components in rock samples from the source area of the Baige landslide

样品编号	粘土质组分形成的变质矿物占比	粘土矿物主要矿物及相对质量百分比 (%)		
		伊利石 (It)	高岭石 (Kao)	绿泥石 (C)
BG-A	25%	5	/	95
BG-B	20-30%	41	50	9
BG-C	25-30%	95	/	5
BG-D	20-25%	5	/	95

**图 5** 白格滑坡物源区岩样 X 射线衍射粘土矿物测试图谱**Fig. 5** X-ray diffraction patterns of clay mineral components in rock samples from the source area of the Baige landslide

(a) 未经处理的自然样品; (b) 饱和乙二醇处理样品; (c) 450°C高温处理后样品

(a) Untreated natural sample; (b) Sample treated with ethylene glycol saturation; (c) Sample after high-temperature treatment under 450°C

3 基于环境噪声频散测量的滑坡源区结构特征研究

白格滑坡发生后，许多学者对滑坡变形破坏特征及断层结构展开研究，运用遥感影像解译、大地电磁法及高密度电法等方法对坡体的内外部结构进行分析（林松等，2019；曹鹏等，2021）。为进一步获取构造混杂岩体内部空间结构信息，本研究采用环境噪声频散测量方法开展相关测试。由于测试现场震源条件基本满足各向同性波场假设，故本研究对观测阵列几何形状和地震台站间距进行优化设计，运用线性阵列以提高阵列探测效率、增加探测深度并扩展适用范围。其探测原理在于，当远场震源或地下构造混杂岩介质对近场地震波的多次散射形成弥散波场时，部分噪声信号依次通过多个观测台站。该部分随机噪声信号在观测台站记录中将表现出弱相关性，且其强度随时间的变化不受震源条件影响，仅由地下构造混杂岩体的性质决定（Weaver, 2005）。本文采用以空间自相关理论为基础的短周期环境噪声频散提取方法，运用空间自相关函数计算阵列中各台站之间的波形相关性，提取在构造混杂岩体中传播的面波信息（Wang et al., 2018；Asten 和 Hayashi, 2018）。通过分析空间中不同台站阵列提取的面波响应信息，并根据面波相速度随介质性质和频率变化的频散特性，构建滑坡地下构造混杂岩介质的二维横波速度结构模型，理论上可有效估算坡体内部构造混杂岩体力学性质的空间分布特征（Zhang et al., 2019）。

测试地点位于白格滑坡后缘东北方向，距离滑坡左侧壁约 850 m 的物源区处（图 3a），该区域具有地形起伏大（不利于二维阵列布设）和岩体性质高度不均匀的特点。现场测量使用的是自然频率为 2 Hz 的三分量拾震器，采样频率设置为 500 Hz。本研究共在测试现场布设两条观测剖面，分别编号为 BG05 和 BG06 测线。每条测线运用 12 个地震台站（S1-S12 号台站）按照线性阵列进行测量，台站间距离分别设置为 6 m 和 8 m。在进行波形相关性分析时，运用相邻每四个台站阵列的环境噪声记录，可反演至测线 48 m（BG05）和 64 m（BG06）范围地下岩体性质的分布情况。两测线的观测时间分别设置为 25 和 30 分钟，当频散曲线形态趋于稳定时终止采集。测试地点旁有削坡露头，有助于验证探测结果。由测试现场削坡揭露可见，该区域浅部分布有厚度超过 8 m 的破碎岩体（图 3e）。

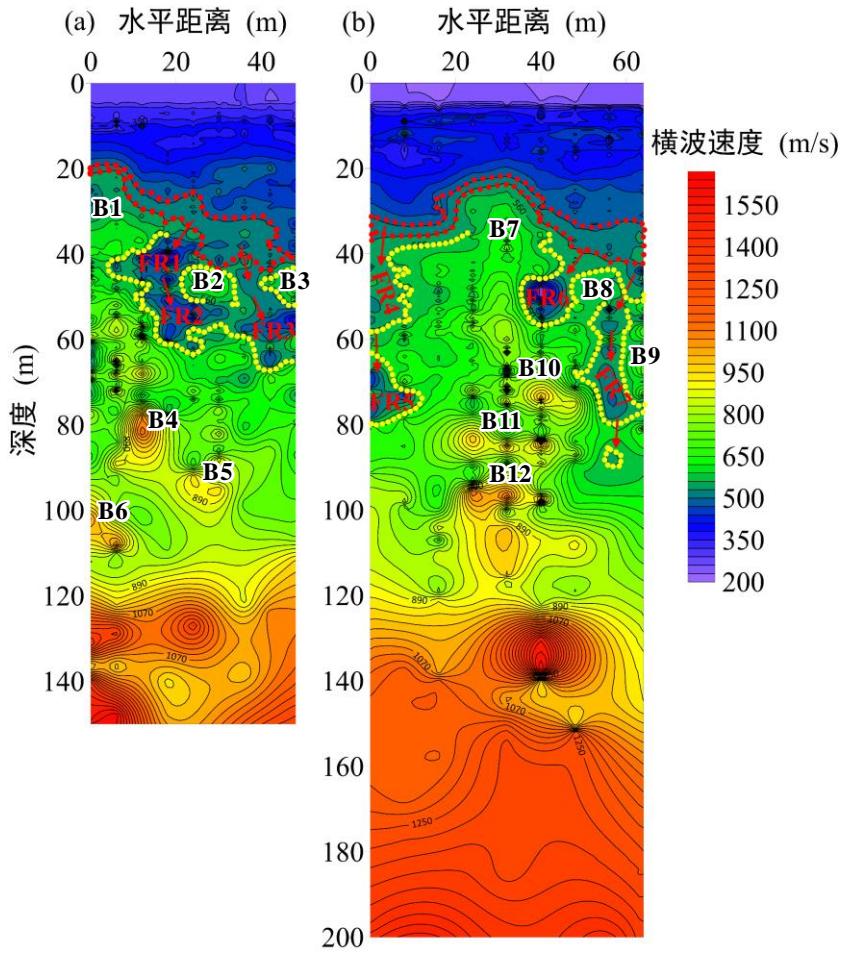


图 6 白格滑坡物源区环境噪声频散测量结果

Fig. 6 Results of ambient noise dispersion measurements in the source area of the Baige landslide

(a) 测线 BG05; (b) 测线 BG06

(a) Survey line BG05; (b) Survey line BG06

图 6 展示了测线 BG05 与 BG06 环境噪声频散测量的反演解译结果。测试结果表明：两测线分别获取到滑坡物源区 150 m 与 200 m 深度范围地下构造混杂岩体的横波速度结构，且两测线二维横波速度剖面均显示在 20~120 m 深度范围，地下岩体的性质呈现出高度横向不连续性，存在高低强度区域混杂的现象，详细分析如下。根据白格滑坡研究区域的相关文献资料 (Tian et al., 2020; 曹鹏等, 2021) 及反演提取的频散曲线拐点特征推断，(1) 横波速度值分布在 220~560 m/s 的岩体可被定义为极软或破碎岩体，高海拔气候及干湿循环作用可能加速该部分岩体的强度劣化过程 (张永双等, 2024)；该部分岩体主要分布于浅部约 30 m 深度范围内，是白格滑坡松散物质的主要来源。(2) 在 20~40 m 深度范围内，存在与浅部破碎岩体及下部完整性受损岩体的分界区域，可以推断该部分区域的贯通破坏是形成滑动带的必要条件，图 6 中红色虚线区域即是滑动带潜在的形成区域，本研究探测到的滑动带潜在深度位置与现有文献资料基本吻合 (陈菲等, 2020; 曹鹏等, 2021)。(3) 在 30~80

m 深度范围内，可剖析出坡体内构造混杂岩体强度劣化发展的规律。①在此深度段内，两测线均存在多个横波速度低速异常区域（黄色虚线区域），如 BG05 测线标记的 FR1~FR3 三个区域和 BG06 测线标记的 FR4~FR7 四个区域（图 6）。这 7 个区域的横波速度值均在 220~560 m/s 变化，相较于等深度段的相邻岩体破碎程度显著更高。该部分岩体强度的劣化发展可能是由浅部破碎岩体中降雨或裂隙水的渗透所致（即埋深在 30~80 m 范围的岩体与浅部破碎岩体裂隙中渗透的水接触，发生风化作用，导致岩体强度劣化）。图 6 中红色箭头指引的方向为降雨或裂隙水向下渗透的可能路径，也是滑坡物源区构造混杂岩体强度劣化逐步向深部发展的路径。②该深度段的高强度区域横波速度值在 560~890 m/s 范围变化，可被定义为完整性受损的岩体。图 6a 和 b 两剖面中 30~80 m 深度范围标注为 B1、B2、B3、B7、B8 和 B9 的区域推测为构造透镜体（即构造混杂岩块体）分布区域。重点分析此深度段二维横波速度剖面可发现，破碎的构造混杂岩体区域环绕于块体发育。具体而言，如图 6 中 BG05 测线的破碎岩体区域 FR1、FR2 与 FR3 环绕于块体区域 B2 分布；BG06 测线中破碎岩体区域 FR6 与 FR7 环绕于块体区域 B8 分布。且构造混杂岩块体的分布结构显著影响滑动带的空间形状特征，如在 B1~B3（图 6a）及 B7~B9（图 6b）块体上方滑动带的形成区域形状出现弯曲。（4）当横波速度值大于 890 m/s 则可表明岩体结构完整性良好。此外，在两测线二维横波速度剖面的 70~120 m 深度范围内，同样存在 6 个横波速度值在 890~1060 m/s 的高横波速度区域（图 6 中 B4~B6 及 B10~B12 区域），规模大小在几米到二十几米不等，呈现出深部构造透镜体的特征。

通过环境噪声频散测量的反演解译结果发现，白格滑坡物源区构造混杂岩体的力学性质在空间结构上具有高度异质性，其特征为低强度基质与高强度块体混杂分布。降雨的入渗加之构造混杂岩体中构造裂隙发育的共同影响，使岩体中的破碎区域持续向四周块体与基质的薄弱区域扩展，呈现“绕块体发育”的模式（Montoya-Araque 和 Suarez-Burgoa, 2019）。同时，构造混杂岩体中块体的分布也造成破碎区域的弯曲，改变了滑动带形成区域的几何形状。

4 基于不排水环剪试验的风化构造混杂岩剪切特性研究

以上的现场探测和微观特性分析表明滑坡物源区物质均有着一定含量的粘土矿物，会导致构造混杂岩强度性质在水的作用下发生变化；而由于构造作用，岩体内部裂隙发育，为降雨提供了快速渗流通道。根据地区降雨数据显示，2018 年 8 月至第一次大规模滑坡发生前，白格滑坡区域的累计降雨量超 200 mm，约占全年平均降雨量的三分之一（王立朝等，

2019; Tian et al., 2020; 李金秋等, 2023), 降雨入渗造成的坡体物质强度降低和孔隙水压力升高可能是白格滑坡发生远程的重要诱发因素。为分析滑动带物质在含水条件下力学特性的变化特征, 本研究通过 ICL-2 型 (Sassa et al., 2014) 不排水动态环剪仪开展了饱和不排水环剪试验, 研究白格滑坡滑动带物质在长距离剪切过程中的力学行为。该设备核心部分为一个环形剪切盒, 具有在固定剪切面上进行长距离剪切的优势, 能够模拟高压(1 MPa)不排水条件下的滑坡运动, 还原滑坡滑动带饱和土在实际工况条件下的力学行为 (Chen et al., 2024)。

试验使用的滑动带物质采自滑坡后壁 (图 7a), 为粘土化变质粉砂岩和粘土化变质板岩的混合物, 主要由砾石和粘土状细粒土组成。为避免试验结果的尺寸效应 (剪切盒最大宽度为 21 mm), 试验所用土样粒径应小于设备尺寸的 1/10, 使用 2 mm 的分筛器初步对滑动带物质进行筛分。筛分后的滑动带物质试验材料如图 7b 所示。盛装试样的剪切盒尺寸为外径 142 mm, 内径 100 mm, 最大高度 50 mm (下部 15 mm, 上部固结前 35 mm)。采用干燥和饱和不排水条件下两组环剪试验进行分析, 剪切速率均控制为 2 mm/s。干燥状态下的环剪试验可以获取滑动带物质在干燥条件下的抗剪强度, 而饱和不排水剪切试验, 可了解滑动带物质在饱和状态下长距离剪切过程中力学强度的变化特征。

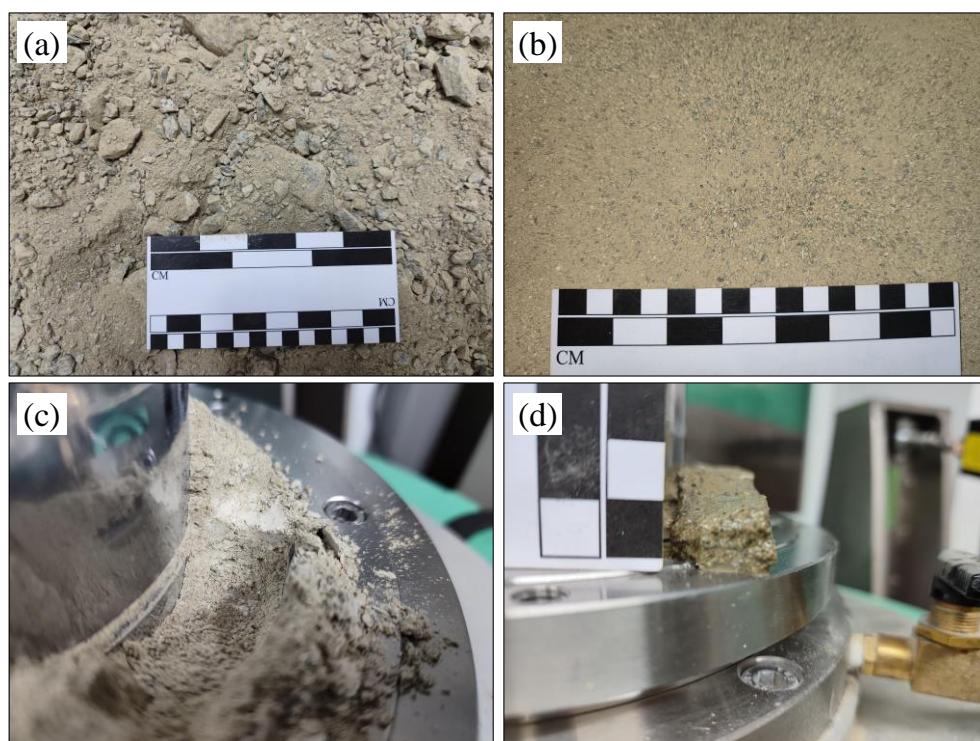


图 7 ICL-2 不排水环剪试验情况

Fig. 7 Conditions of ICL-2 undrained ring shear test

(a) 滑动带试验样品 (砾石土); (b) 筛分后试样; (c) 干燥条件下环剪后;

(a) Sample from the main scarp of the Baige landslide (gravel soil); (b) Sample after sieving (< 2 mm);

Photographs of the tested sample after ring shear test (c) under dry and (d) saturated conditions

图 8 展示了对干燥状态下的试样进行环剪试验的结果。剪切阻力随剪切位移的变化如图 8a 所示，其峰值强度为 469 kPa。当剪切位移超过峰值强度点后，抗剪强度略有下降，并逐步趋于稳定至 450 kPa，达到临界（残余）状态。图 8b 中应力路径随着剪应力的增大逐步达到峰值，后下降至临界强度。在剪切进入临界状态后，改变试样所受的正应力水平，观察抗剪强度随之产生的变化，可以得到试样的临界强度包络线，由此获得滑动带物质在临界状态下的动摩擦角为 36.7°。

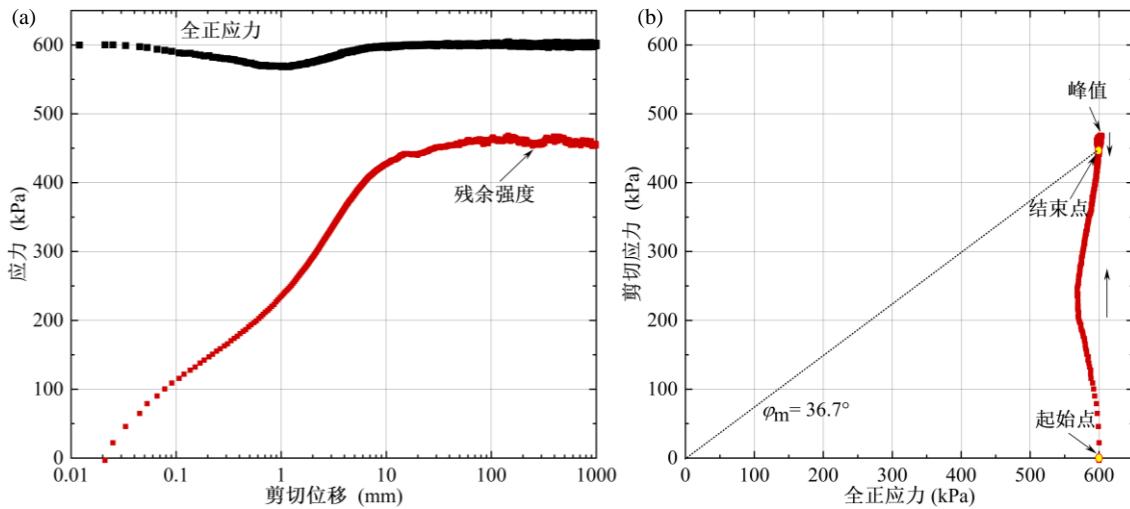


图 8 干燥试样在排水条件下进行速度控制下环剪测试的结果（剪切速率为 2 mm/s）

Fig. 8 Results of speed-controlled ring shear test on dry samples (shear rate = 2 mm/sec)

(a) 剪切阻力随剪切位移的变化 (正应力控制在 600 kPa); (b) 应力路径与破坏线

(a) Variation of shear resistance with shear displacement (normal stress was controlled at 600 kPa); (b) Stress path and failure line

图 9 是饱和滑动带试样在不排水条件下的环剪试验结果。试样通过抽真空法与二氧化碳置换法相结合的方式进行饱和后 ($B_D=0.95$)，在 600 kPa 的正应力条件下进行固结，随后对固结试样采用 2 mm/s 的剪切速度进行不排水剪切。图 9a 是剪切阻力与孔隙水压力随剪切位移的变化，在与干燥状态下相同的 600 kPa 法向应力条件下，滑动带饱和试样的峰值强度为 316 kPa 左右，为干燥状态下的 67%，弱化了 33%。当剪切阻力超过峰值强度后，孔隙水压力也趋于稳定，为 138 kPa，残余强度稳定在 270 kPa，为干燥状态下的 60%，弱化了 40%。根据应力路径可计算得到饱和条件下试样的视摩擦角为 24.2°。滑坡发生后实际的视摩擦角为 23.5°，与饱和不排水条件下环剪试验最终的视摩擦角 24.2° 接近。饱和滑动带物质所表现出的动摩擦角与实际白格滑坡堆积的视摩擦角吻合较好。白格滑坡坡前金沙江的存在，使得滑坡体沿着其表面向前运动时产生快速不排水加载，也对滑坡运动起到促滑

的作用（汪发武等，2019）。

图 7c 和 7d 分别为干燥条件试验与饱和条件试验剪切过后的剪切带物质照片。在进行长距离剪切之后，可以明显看出试样的颗粒发生破碎，呈现为更细的白色粉末状物质。饱和试样的不排水环剪试验结果表明，随着剪切距离的上升，试样内部产生了一定的超孔隙水压力，最终稳定在约 138 kPa 左右，为正应力的 23%。此外还可以观察到，试样内部的孔隙水压力稳定后，剪切阻力仍进一步表现出缓慢的降低，且有效应力路径并未与破坏线相交（图 9b），这可能是由于岩样物质成分中所含的粘土矿物成分的低渗透性导致的孔隙水压力测试结果滞后。

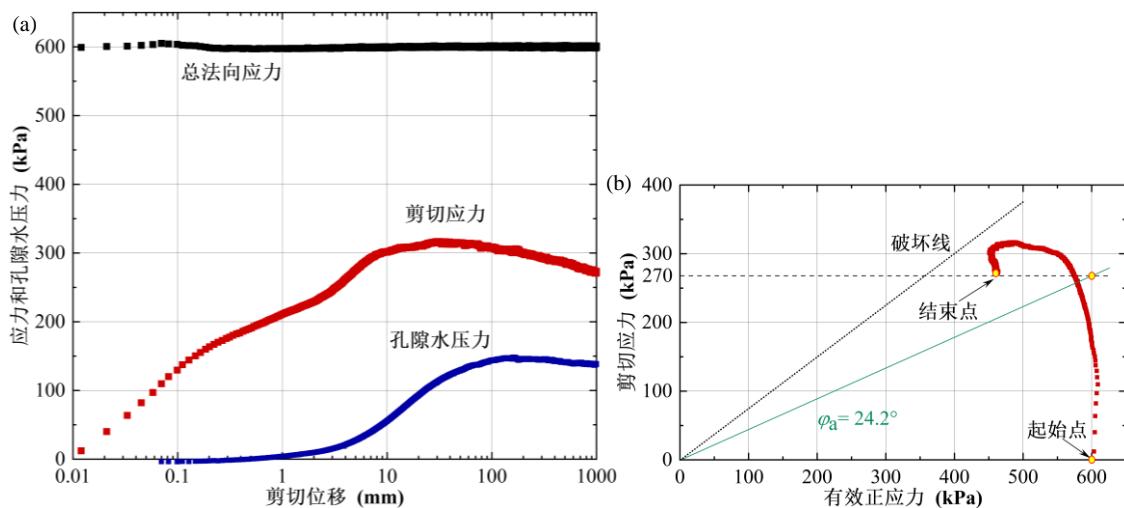


图 9 饱和不排水条件下滑动带物质速度控制下环形剪切试验结果（剪切速率为 2 mm/s, $B_D=0.95$ ）
Fig. 9 Results of speed-controlled ring shear test on sliding zone materials under saturated undrained conditions (shear rate = 2 mm/sec, $B_D=0.95$)

(a) 剪切阻力与孔隙水压力随剪切位移的变化；(b) 应力路径与破坏线

(a) Variation of shear resistance and pore water pressure with shear displacement; (b) Effective stress path and failure line

形成白格滑坡滑动带物质的构造混杂岩在干燥条件下仍可保持较高的力学强度，但是遇水后强度将发生劣化，内部结构也将崩解破坏。在本研究中滑动带试样的饱和不排水环剪试验中，剪切后的试样颗粒明显发生破碎现象，这表明风化构造混杂岩颗粒具有较高的破碎性。剪切破碎过程使得滑动带表现出剪缩效应，这在不排水条件下引起滑动带内部产生一定的超孔隙水压力（Wang, 1999；袁浩等，2024），导致滑动带残余抗剪强度与峰值抗剪强度下降幅度分别达到 40% 和 33%。然而，尽管混杂岩试样在饱和不排水条件下呈现出明显的抗剪强度降低（郭长宝等，2022），但其并未像砂土产生极高的超孔隙水压力，无法达到完全液化乃至抗剪强度完全丧失的状态，剪切结束后仍然保持一定的残余强度（张永双等，2022）。该现象与非构造混杂岩均质性粘土的脆性破坏形成对比，反映了单次降雨作

用即使引起构造混杂岩质边坡体的失稳破坏，也很难造成灾难性的高速运动滑坡。而白格滑坡的远程运动的控制机制应归因于在高海拔气候和累积降雨干湿循环作用下，岩体内部破碎区域强度持续降低至临界阈值时发生贯通破坏的滑动带演化过程。

5 主要结论

本研究基于白格滑坡物源区岩性特征测试、岩体力学性质结构探测及滑动带物质强度特性的环剪试验结果，发现白格滑坡的远程运动特性是构造混杂岩的特殊岩性、空间结构和强度特性组合的结果，并且对滑动带的形成有显著影响。

(1) 构造混杂岩的强度劣化特性是白格区域滑坡形成的重要因素。通过对白格滑坡物源区岩石进行微观特性分析发现，坡体内的构造混杂岩均含有一定比例的粘土矿物成分，粘土矿物主要以伊利石、绿泥石为主，部分含有高岭石矿物。故其易与水发生风化作用（软化崩解等）导致强度降低，物理力学性质受水的作用影响显著。白格滑坡处于金沙江构造混杂岩带，其岩体内部构造裂隙发育，为降雨入渗提供了优势渗透通道；在高海拔气候与季节性降雨共同影响下，致使裂隙岩体经受频繁的干湿交替作用，加速了构造混杂岩体强度劣化过程。且风化构造混杂岩因其内部富含低渗透性粘土矿物成分，在特定的水文地质条件下更易达到饱和状态。根据不排水环剪试验结果，饱和状态下风化构造混杂岩的抗剪强度与残余强度将进一步降低。

(2) 构造混杂岩中块体的分布结构对滑动带的形成具有显著影响。根据滑坡物源区环境噪声频散测量结果，构造混杂岩体内部呈现出低强度与高强度区域混杂分布的特征。其中低强度区域为构造混杂岩基质，高强度区域为较坚固的块体，块体的分布结构造成破碎区域弯曲，显著影响滑动带的形成和形状。具体表现为，构造混杂岩体中的低强度区域在高海拔气候与周期性干湿交替作用下持续发生强度劣化，在降雨、地震及人类工程活动的共同影响下，区域内部结构破坏，裂隙扩展贯通，形成滑动带。高强度块体因具致密结构且节理裂隙不发育，表现出较低的强度劣化倾向。故滑动带将持续沿着块体和基质之间的薄弱区域扩展，呈现“绕块体发育”模式，块体的分布结构控制着滑动带的几何形状。

(3) 强风化构造混杂岩基质的剪切强度特性显著影响滑坡的远程运动。滑动带物质是由强风化构造混杂岩基质破碎形成的砾石土混合物，岩性主要为绿泥石化变质粉砂岩、高岭石化变质粉砂岩和伊利石化变质板岩。根据滑动带试样的不排水环剪试验结果，其在饱和状态和法向应力 600 kPa 条件下，孔隙水压力达到 138 kPa 为正应力的 23%，其抗剪强度和残余强度分别降低了 33% 和 40%。由此可见，滑动带物质在高速剪切运动过程中产生的

高孔隙水压力导致其强度降低的效应，显著影响滑坡的远程运动行为；加之高陡的地形条件给滑体带来的巨大重力势能，以及滑体进入金沙江与江水混合后，使得滑动带物质处于高饱和度状态，进一步促进滑坡的远程运移。

致谢

在成文过程中，感谢同济大学土木工程学院地下建筑与工程系叶真华老师在地质理论方面的学术讨论和建议。另，感谢北京锆年领航科技有限公司在微观测试分析中提供的技术支持。

References

- Asten, M. W., Hayashi, K., 2018. Application of the spatial auto-correlation method for shear-wave velocity studies using ambient noise. *Surveys in Geophysics*, 39(4): 633-659. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9474-2>
- Cao, P., Li, Y. S., Li, Z. L., Ba, R. J., Zhang, S. T., 2021. Geological structure characteristics and genetic mechanism of Baige landslide slope in Changdu, Tibet. *Earth Science*, 46(9): 3397-3409 (in Chinese with English abstract).
- Chen, F., Wang, S., Gao, Y. J., Zhao, S. Y., Li, Z. L., Ba, R. J., Yang, Z. K., Deng, J. H., 2020. Evolution of the cracking zones at the site of the Baige landslides and their future development. *Advanced Engineering Sciences*, 52(5):71–78 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y., Wang, F. W., Feng, Y. Q., Peng, X. L., Zhu, G. L., 2024. Localised fluidisation in a giant loess landslide. *Engineering Geology*, 2024:107854. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107854>
- Fan, X. M., Yang, F., Siva Subramanian, S., Xu, Q., Feng, Z. T., Mavrouli, O., Peng, M., Ouyang, C. J., Jansen, J. D., Huang, R. Q., 2020. Prediction of a multi-hazard chain by an integrated numerical simulation approach: the Baige landslide, Jinsha River, China. *Landslides*, 17: 147-164. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01313-5>
- Fang, J. R., Song, J., Li, X., 2021. Quantitative analysis of clay minerals' influence on bound water characteristics and mechanical properties of soft soils. *Journal of Engineering Geology*, 29(5): 1303-1311 (in Chinese with English abstract).
- Feng, W. K., Zhang, G. Q., Bai, H. L., Zhou, Y. L., Xu, Q., Zheng, G., 2019. A preliminary analysis of the formation mechanism and development tendency of the huge Baiglandslide in Jinsha River on October 11, 2018. *Journal of Engineering Geology*, 27(2):415-425 (in Chinese with English abstract).
- Guo C. B., Yan Y. Q., Zhang Y. S., Wu R. A., Yang Z. H., Li X., Ren S. S., Zhang Y. Y., Wu Z. K., Liu J. X., 2022. Research Progress and Prospect of Failure Mechanism of Large Deep-Seated Creeping Landslides in Tibetan Plateau, China. *Earth Science*, 47(10): 3677-3700 (in Chinese with English abstract).
- Guo C. B., Wu R. A., Zhong N., Yang Z. H., Yuan H., Li C. H., Qiu Z. D., Cao S. C., 2024. Large Landslides along Active Tectonic Zones of Eastern Tibetan Plateau: Background and Mechanism of Landslide Formation. *Earth Science*, 49(12): 4635-4658 (in Chinese with English abstract).

- Festa, A., Dilek, Y., Pini, G. A., Codegone, G., Ogata, K., 2012. Mechanisms and processes of stratal disruption and mixing in the development of mélanges and broken formations: Redefining and classifying mélanges. *Tectonophysics*, 568: 7-24. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.05.021>
- Festa, A., Pini, G. A., Ogata, K., Dilek, Y., 2019. Diagnostic features and field-criteria in recognition of tectonic, sedimentary and diapiric mélanges in orogenic belts and exhumed subduction-accretion complexes. *Gondwana Research*, 74: 7-30. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.01.003>
- Kimura, G., Yamaguchi, A., Hojo, M., Kitamura, Y., Kameda, J., Ujiie, K., Hamada, Y., Hamahashi, M., Hina, S., 2012. Tectonic mélange as fault rock of subduction plate boundary. *Tectonophysics*, 568: 25-38. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.08.025>
- Li, J. Q., Zhang, Y. S., Ren, S. S., Bi, J. B., 2024. Catastrophic mechanical behavior of clay-altered rock in the baige landslide upstream of the jinsha river. *Advanced Engineering Sciences*, 56(3):72 - 82 (in Chinese with English abstract).
- Lin, S., Wang, W., Deng, X. H., Zha, Y. H., Zhou, H. W., Cheng, M., 2019. Geophysical observation of typical landslides in Three Gorges reservoir area and its significance: A case study of Sifangbei landslide in Wanzhou District. *Earth Science*, 44(9): 3135-3146 (in Chinese with English abstract).
- Montoya-Araque, E. A., Suarez-Burgoa, L. O., 2019. Automatic generation of tortuous failure surfaces in block-in-matrix materials for 2D slope stability assessments. *Computers and Geotechnics*, 112: 17-22. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.04.002>
- National Energy Administration, 2018. Analysis method for clay mineral sand ordinary non-clay minerals in sedimentary rocks by the X-ray diffraction: SY/T 5163-2018. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Ogata, K., Festa, A., Pini, G. A., Pogacnik, Z., 2021. Mélanges in flysch-type formations: Reviewing geological constraints for a better understanding of complex formations with block-in-matrix fabric. *Engineering Geology*, 293: 106289. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106289>
- Pan, G. T., Ren, F., Yin, F. G., Wang, L. Q., Wang, B. D., Wang, D. B., An, X. Y., Tang, Y., Liu, H., Wang, Q. Y., Pang, W. H., Xu, B., 2020. Key Zones of Oceanic Plate Geology and Sichuan-Tibet Railway Project. *Earth Science*, 45(7): 2293-2304 (in Chinese with English abstract).
- Peng, J. B., Cui, P., Zhuang, J. Q., 2020. Challenges to engineering geology of Sichuan—Tibet railway. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(12): 2377-2389 (in Chinese with English abstract).
- Sassa, K., Dang, K., He, B., Takara, K., Inoue, K., Nagai, O., 2014. A new high-stress undrained ring-shear apparatus and its application to the 1792 Unzen–Mayuyama megaslide in Japan. *Landslides*, 2014, 11: 827-842. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0501-1>
- Tang, Y., Qin, Y. D., Gong, X. D., Liu, H., Wang, D. B., Wang, B. D., 2022. Determination of material composition of Jinshajiang tectonic mélange belt in Gonjo-Baiyu area, eastern Tibet. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42(2): 260-278 (in Chinese with English abstract).
- Tian, S. F., Chen, N. S., Wu, H., Yang, C. Y., Zhong, Z., Rahman, M., 2020. New insights into the occurrence of the Baige landslide along the Jinsha River in Tibet. *Landslides*, 17(5): 1207-1216. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01351-4>
- Wang F. W., 1999. An experimental study on grain crushing and excess pore pressure generation during shearing of sandy soils: a key factor for rapid landslide motion [D]. Japan: Kyoto University.

- Wang, F. W., Chen, Y., Liu, W. C., Gao, J., 2022. Characteristics and challenges to dynamics of long-runout landslides with high-altitude in southeast Tibet. *Journal of Engineering Geology*, 30(6): 1831-1841 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F. W., Okeke, A. C. U., Kogure, T., Sakai, T., Hayashi, H., 2018. Assessing the internal structure of landslide dams subject to possible piping erosion by means of microtremor chain array and self-potential surveys. *Engineering Geology*, 234: 11-26. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.12.023>
- Wang, F. W., 2019. Liquefactions caused by structure collapse and grain crushing of soils in rapid and long runout landslides triggered by earthquakes. *Journal of Engineering Geology*, 27(1): 98-107 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. S., et al. 1992. Report on the H-47-9 Xiongsong district H-47-15 1200,000 regional geological survey of the Baiyu County Formation: mineral part [DS]. National Geological Information Centre (in Chinese).
- Wang, L. Z., Wen, M. S., Feng, Z., Sun, W. F., Wei, Y. J., Li, J. F., Wang, W. P., 2019. Researches on the Baige landslide at Jinshajiang River, Tibet, China. *The Chinese Journal of Geological Hazards and Control*, 30(1): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- Weaver, R. L., 2005. Information from seismic noise. *Science*, 307(5715): 1568-1569.
- Yan, Z., Wang, Z. Q., Fu, C. L., Niu, M. L., Ji, W. H., Li, R. S., Qi, S. S., Mao, X. C., 2018. Characteristics and thematic geological mapping of mélange. *Geological Bulletin of China*, 37(2-3): 167-191(in Chinese with English abstract).
- Yan, Y. Q., Guo, C. B., Zhang, Y. S., Zhang, X. J., Zheng, Y. Z., Li, X., Yang, Z. H., Wu, R. A., 2021. Study of the deformation characteristics of the Xiongba ancient landslide based on SBAS-InSAR method, Tibet, China. *Acta Geologica Sinica*, 95(11):3556-3570 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H., Guo C. B., Wu R. A., Yan M. Q., Zhong N., 2024. Shear strength characteristics of sliding zone soils and mechanisms of Luanshibao long runout landslide in Litang County, Sichuan Province, China. *Earth Science*, 49(12): 4659-4672 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. L., Yin, Y. P., Hu, X. W., Wang, W. P., Zhu, S. N., Zhang, N., Cao, S. H., 2020. Initiation mechanism of the Baige landslide on the upper reaches of the Jinsha River, China. *Landslides*, 17: 2865-2877. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01495-3>
- Zhang, Y. S., Du, G. L., Guo, C. B., Li, X. Q., Ren, S. S., Wu, R. A., 2021. Research on typical geomechanical model of high- position landslides on the Sichuan- Tibet traffic corridor. *Acta Geologica Sinica*, 95(3):605-617 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y. S., Li J. Q., Ren S. S., Wu R. A., Bi J. B., 2022. Development characteristics of clayey altered rocks in the Sichuan-Tibet traffic corridor and their promotion to large-scale landslides. *Earth Science*, 47(6): 1945-1956 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. S., Ren, S. S., Li, J. Q., Liao, G. Z., 2023. Prone Sliding Geo-Structure and High-Position Initiating Mechanism of Duolasi Landslide in Nu River Tectonic Mélange Belt. *Earth Science*, 48(12): 4668-4679 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. S., Wang, D. B., Li, X., Wu, R. A., Tang, Y., Ren, S. S., Li, J. Q., Luo, L., 2024. Research on hazard prone geological genes and major engineering geological problems in tectonic meange belts of Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 98(3):992-1005 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., He, S. M., Liu, W., Liang, H., Yan, S. X., Deng, Y., Bai, X. Q., Chen, Z., 2019. Source characteristics and dynamics of the October 2018 Baige landslide revealed by broadband seismograms. *Landslides*, 16: 777-785. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01145-3>

Zhao, Z. X., Wang, F. W., Zhu, G. L., Peng, X. L., 2023. A review of forming mechanisms and inhomogeneous mechanical properties of mélange. *Journal of Engineering Geology*, 31(3): 796-814 (in Chinese with English abstract).

Zhu, D. M., Li, P. Y., Hu, X. H., Wu, X. M., 2021. Stability analysis and prevention countermeasures for residual bodies of Baige landslide in Jinsha River. *Geoscience*, 35(01): 56-63 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

曹鹏,黎应书,李宗亮,巴仁基,张世涛,2021.西藏昌都白格滑坡斜坡地质结构特征及成因机制. *地球科学*, 46(9):3397-3409.

陈菲,王塞,高云建,赵思远,李宗亮,巴仁基,杨仲康,邓建辉,2020.白格滑坡裂缝区演变过程及其发展趋势分析. *工程科学与技术*, 52(5):8.

方敬锐,宋晶,李学,2021.黏土矿物对软土结合水特征及力学性质影响的定量分析. *工程地质学报*, 29(5):1303-1311.

冯文凯,张国强,白慧林,周玉龙,许强,郑光,2019.金沙江“10·11”白格特大型滑坡形成机制及发展趋势初步分析. *工程地质学报*, 27(2):415-425.

国家能源局,2018.沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法: SY/T5163-2018. 北京:石油工业出版社.

郭长宝,闫怡秋,张永双,吴瑞安,杨志华,李雪,任三绍,张怡颖,吴中康,刘吉鑫,2022.青藏高原大型深层蠕滑型滑坡变形机制研究进展与展望. *地球科学*, 47(10):3677-3700.

郭长宝,吴瑞安,钟宁,杨志华,袁浩,李彩虹,邱振东,曹世超,2024.青藏高原东部活动构造带大型滑坡成灾背景与灾变机制. *地球科学*, 49(12):4635-4658.

李金秋,张永双,任三绍,毕俊肇,2024.金沙江上游白格滑坡黏土化蚀变岩的灾变力学行为研究. *工程科学与技术*, 56(3):72-82.

林松,王薇,邓小虎,查雁鸿,周红伟,程邈,2019.三峡库区典型滑坡地球物理实测及其意义:以万州区四方碑滑坡为例. *地球科学*, 44(9):3135-3146.

潘桂棠,任飞,尹福光,王立全,王保弟,王冬兵,安显银,唐渊,刘函,王启宇,庞维华,徐波,2020.洋板块地质与川藏铁路工程地质关键区带. *地球科学*, 45(7):2293-2304.

彭建兵,崔鹏,庄建琦,2020.川藏铁路对工程地质提出的挑战. *岩石力学与工程学报*, 39(12):2377-2389.

唐渊,秦雅东,巩小栋,刘函,王冬兵,王保弟,2022.藏东贡觉—白玉地区金沙江构造混杂岩带物质组成的厘定. *沉积与特提斯地质*, 42(2):19.

汪发武,2019.地震诱发的高速远程滑坡过程中土结构破坏和土粒子破碎引起的两种不同的液化机理. *工程地质学报*, 27(1):98-107.

汪发武,陈也,刘伟超,高杰,2022.藏东南高位远程滑坡动力学特征及研究难点. *工程地质学报*, 30(6):1831-1841.

王国生,等,1992.白玉县幅H-47-9雄松区幅H-47-15 1/20万区域地质调查报告:矿产部分 [DS]. 全国地质资料馆.

王立朝,温铭生,冯振,孙炜锋,魏云杰,李俊峰,王文沛,2019.中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究. *中国地质灾害与防治学报*, 30(1): 1-9.

闫臻,王宗起,付长垒,牛漫兰,计文化,李荣社,祁生胜,毛晓长,2018.混杂岩基本特征与专题地质填图. *地质通报*, 37(2-3): 167-191.

闫怡秋,郭长宝,张永双,张绪教,郑岳泽,李雪,杨志华,吴瑞安,2021.基于SBAS-InSAR技术的西藏雄巴古滑坡变形特征. *地质学报*, 95(11):3556-3570.

袁浩,郭长宝,吴瑞安,闫鸣岐,钟宁,2024.四川理塘乱石包滑坡滑带土环剪强度特性与高

- 位远程滑动机制. 地球科学, 49(12):4659-4672.
- 张永双, 杜国梁, 郭长宝, 李向全, 任三绍, 吴瑞安, 2021. 川藏交通廊道典型高位滑坡地质力学模式. 地质学报, 95(3):605-617.
- 张永双, 李金秋, 任三绍, 吴瑞安, 毕俊擘, 2022. 川藏交通廊道黏土化蚀变岩发育特征及其对大型滑坡的促滑作用. 地球科学, 47(6):1945-1956.
- 张永双, 任三绍, 李金秋, 廖国忠, 2023. 怒江构造混杂岩带多拉寺滑坡的易滑地质结构及高位启滑运动机制. 地球科学, 48(12): 4668-4679.
- 张永双, 王冬兵, 李雪, 吴瑞安, 唐渊, 任三绍, 李金秋, 罗亮, 2024. 青藏高原构造混杂岩带的孕灾地质基因与重大工程地质问题研究. 地质学报, 98(3):992-1005.
- 赵子昕, 汪发武, 朱国龙, 彭星亮, 2023. 混杂岩形成机制及非均质力学特性研究进展. 工程地质学报, 31(3):796-814.
- 朱德明, 李鹏岳, 胡孝洪, 吴新明, 2021. 金沙江白格滑坡残留体稳定性分析与防治对策. 现代地质, 35(1):8.