



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：基于微动探测的四川德达古滑坡空间结构特征与形成机理研究

作者：邱振东，郭长宝，杨志华，吴瑞安，闫怡秋，张怡颖，靳峰，陈文凯

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023183

投稿时间：2023-11-13

录用时间：2023-12-04

预出版时间：2024-05-15

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

基于微动探测的四川德达古滑坡空间结构特征与形成机理研究¹

邱振东^{1,2}, 郭长宝^{1,3,4*}, 杨志华^{1,3,4}, 吴瑞安^{1,3,4}, 闫怡秋¹, 张怡颖¹, 靳峰¹, 陈文凯¹

QIU Zhendong^{1,2}, GUO Changbao^{1,3,4*}, YANG Zhihua^{1,3,4}, WU Ruian^{1,3,4}, YAN Yiqiu¹, ZHANG Yiyang¹, JIN Feng¹, CHEN Wenkai¹

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉, 430074;

3. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081;

4. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;*

3. *Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*

4. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China*

Research on the spatial structure characteristics and formation mechanism of the Deda ancient landslide based on Microtremor Survey Method in Sichuan province, China

Abstract: The topography and geological structure of the eastern Tibetan Plateau are extremely complex. The high development density and intricate spatial structures of large ancient landslides in alpine canyon areas, such as those in the Jinsha River Basin. The hazards resulting from the creep deformation and resurgence of these ancient landslides are particularly severe. The Deda ancient landslide, situated in Deda Township, Batang County, Sichuan Province, is a significant ancient landslide influenced by the Chalong-ranbu fault activity. The spatial structural characteristics of this ancient landslide are complex, with localized resurgence deformation observed at the landslide front. This study employs various methods, including remote sensing interpretation, on-site investigations, Microtremor Survey Method (MSM), and engineering geological drilling, to further elucidate the spatial structural characteristics of the Deda ancient landslide. The research reveals that the Deda ancient landslide can be divided into three parts in plan view: Deda I landslide (I), Deda II landslide (II), and the rear wall of the Deda ancient landslide (III). Through MSM combined with drilling verification, the study proposes a scheme for classifying the shear wave velocities of shallow and deep sliding zones, with a relative error in sliding zone depth identification generally ranging from 2.6% to 4.8%. The research uncovers that Deda I landslide features two sliding zones, with a burial depth of 18.7-20.1 m for the shallow sliding zone (S1) and 36.2-49.9 m for the deep sliding zone (S2). And the volume of Deda I landslide is approximately $8.7-12.0 \times 10^6 \text{ m}^3$. Deda II landslide has one sliding zone, with a burial depth ranging from 25.2 to 38.6 m and a landslide volume of approximately $6.3-9.6 \times 10^6 \text{ m}^3$. A comprehensive analysis suggests that the formation of the Deda ancient landslide is the result of various factors, including fault structures, rainfall infiltration, and river erosion. The complex landslide structure and its genesis are identified as the primary controlling factors for the landslide being in a state of creep deformation. The research methods and insights presented in this study can serve as a reference for the spatial identification and risk prevention of large ancient landslides in the eastern Tibetan Plateau.

¹ **基金项目:** 国家自然科学基金项目 (No. 41877279, 41731287), 中国地质调查局项目 (DD20190319, DD20221816)。

第一作者简介: 邱振东 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害调查评价工作。E-mail: qiuzhendong@cug.edu.cn

通讯作者简介: 郭长宝 (1980-), 男, 博士, 研究员, 主要从事工程地质与地质灾害方面的研究。E-mail: guochangbao@163.com

Keywords: Tibetan Plateau; Ancient landslide; Microtremor Survey Method (MSM); Sliding zone; Spatial structure

摘要: 青藏高原东部地形地貌和地质构造极为复杂, 位于该区金沙江流域等高山峡谷区的大型古滑坡具有发育密度大、空间结构复杂等特点, 由古滑坡蠕滑变形及复活引起的灾害危害性强。德达古滑坡是位于四川省巴塘县德达乡的一个大型古滑坡, 受查龙-然布断裂活动等影响, 该古滑坡空间结构特征复杂, 滑坡前缘呈现局部复活变形。文章采用遥感解译、现场调查、微动探测和工程地质钻探等工作手段, 进一步查明了德达古滑坡的空间结构特征。研究表明, 德达古滑坡在平面上分为德达 I 号滑坡体 (I)、德达 II 号滑坡体 (II) 和德达古滑坡后壁 (III) 等 3 个部分。通过微动探测结合钻探验证, 文章提出了浅层滑带和深层滑带的微动横波速度划分方案, 其对滑带深度识别相对误差一般为 2.6-4.8%, 研究揭示德达 I 号滑坡发育 2 层滑带, 浅层滑带 S1 埋深为 18.7-20.1m, 深层滑带 S2 埋深为 36.2-49.9 m, 滑体体积约 $8.7-12.0 \times 10^6 \text{ m}^3$; 德达 II 号滑坡体发育 1 层滑带, 滑带埋深为 25.2-38.6m, 滑体体积约 $6.3-9.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。综合分析认为, 德达古滑坡是在断裂活动、降雨入渗、河流侵蚀等多种因素作用下形成的, 复杂的滑体结构及其成因是滑坡体处于蠕滑变形的主要控制因素。文章研究方法和认识可以为青藏高原东部域大型古滑坡空间结构判识和风险防控提供参考。

关键词: 青藏高原; 古滑坡; 微动探测; 滑带; 空间结构

0 引言

古滑坡是指全新世以前发生滑动、经过长期复杂演化过程的滑坡 (Cruden and Varnes, 1996), 该类滑坡沿着老滑动面重新滑动, 同时还会孕育出新的次级滑坡, 呈现出多期次、多分区、多级滑带的变形特点 (Li et al., 2008; Zhang et al., 2015; 张永双等, 2016)。在地形地貌陡度最大、构造活动最为强烈的青藏高原地区 (Dewey et al., 1988; 彭建兵等, 2004; Xu et al., 2009), 大型古滑坡广泛发育, 如乱石包滑坡 (Guo et al., 2016)、甲居滑坡 (Yan et al., 2023) 等。近年来也发生了包括江顶崖古滑坡、沙丁麦古滑坡等在内的大型古滑坡复活变形 (Guo et al., 2023; 邱振东等, 2023), 造成了极为严重的影响和危害, 因此关于青藏高原东缘大型深层古滑坡空间结构发育特征是地质灾害调查研究的热点和难点。

目前对于青藏高原东缘高山峡谷区大型古滑坡的调查主要采用遥感解译、现场调查、无人机航测、地球物理勘探等方法 (闫怡秋等, 2022; 赵超英等, 2022; Xu et al., 2023; Yang et al., 2023), 近年来国内外学者多采用地球物理勘探技术开展滑坡滑体厚度、滑带深度、断裂展布等滑坡空间结构特征研究 (郭桥桥等, 2017; Gao, et al., 2018; Xu et al., 2021; Yang et al., 2021), 同时结合工程地质钻探进行验证, 精准判识滑坡的空间发育特征 (Naudet et al., 2008; Su et al., 2017; Ma et al., 2019)。其中, 微动探测是面波勘探的一种物探手段, 在对滑坡滑动面的识别、地下孤石的圈定、以及对滑坡裂缝延伸情况探测精度较高 (Xu et al., 2021; Su et al., 2017), 也能精确划分风化岩层界面及厚度、隐伏断层的展布特征等 (徐佩芬等, 2013; 杜亚楠等, 2018)。但是关于滑坡滑带结构的横波速度反演判识研究较少, 其对于大型古滑坡结构特征分析与滑坡稳定性研究极为重要。

位于四川省巴塘县德达乡的德达古滑坡发育于查龙-然布断裂带内, 已有调查认为其受构造活动、降雨以及河流侵蚀影响, 滑坡复活变形明显 (张怡颖等, 2021), 在该区域内具有典型性, 但关于其空间结构特征目前仍不清晰, 而该滑坡的发育特征与稳定性对建设于该滑坡前缘的公路、村庄等安全影响较大。因此, 文章通过采用遥感解译、现场调查、微动探测和工程地质钻探等调查研究方法, 对德达古滑坡空间结构特征和形成机理进行了分析研究, 并提出基于微动探测的滑带判识方法。研究结果对德达古滑坡稳定性及发展趋势研究提供参考意义, 研究方法对青藏高原高山峡谷区大型古滑坡形成机理与稳定性研究具有重要指导意义。

1 地质背景

巴塘县属于青藏高原亚湿润气候区, 气候干燥, 垂直变化显著。区内海拔在 2240-6060 m, 地形随金沙江

走向由北西向东南倾斜，并呈东北高西南地；地貌属“川西高山、高原区”中的金沙江东岸极高山亚区（白永健等，2014）。多年平均降雨量为 436 mm，降雨多集中在每年的 6-9 月，占多年年平均降雨量 90%。区内水系发育，主要河流有金沙江及其支流莫曲、巴曲、定曲，其中研究区沿巴曲发育德达滑坡、扎马滑坡、结协勒巴滑坡。

研究区位于青藏高原东缘弧形构造带的转折部位，属于三江构造区，横跨金沙江结合带和德格-中甸陆块两个二级构造单元，横断山脉纵贯全区，区内地质构造复杂，主要呈现出强烈的、差异性的上升运动和水平挤压特征（Wu et al., 2023）。查龙-然布断裂的分支断裂从德达古滑坡后缘通过。根据《中国地震动参数区划图》（GB 18306-2015），滑坡所在区域地震烈度为Ⅷ度区，历史上发生过 3 次 $M_s \geq 6.0$ 级地震，350 余次 $M_s < 6.0$ 级地震（周荣军，2005）。德达古滑坡区出露地层岩性主要为三叠系中下统茨岗群（ T_{1-2}^b ）砂质板岩和三叠系上统曲嘎寺组（ T_3q^1 ）灰岩（图 1）。

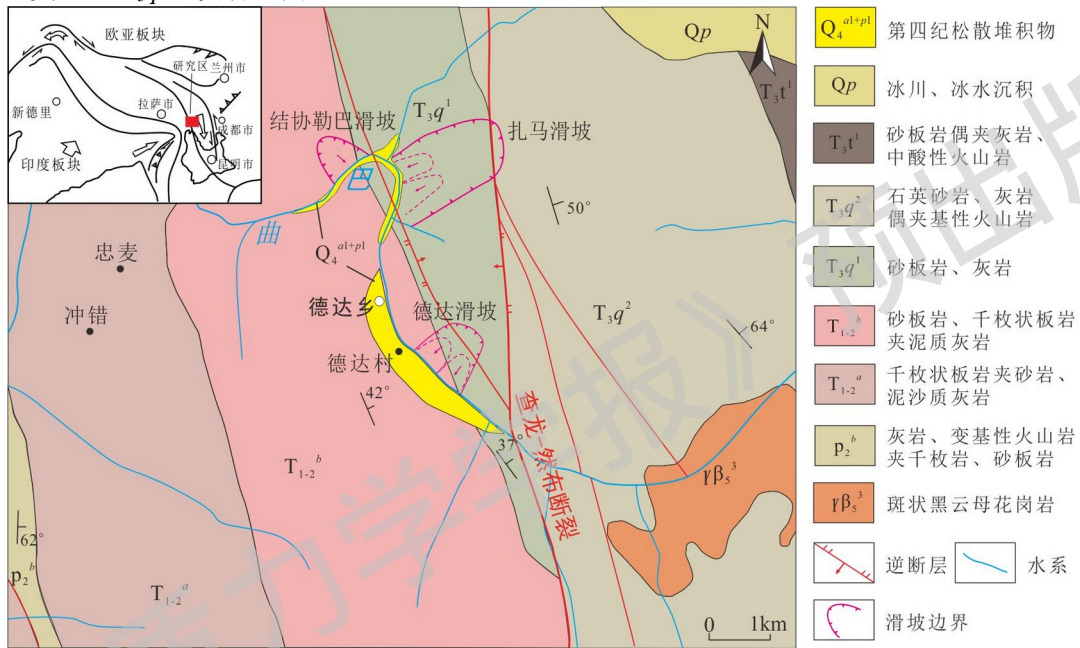


图 1 四川省巴塘县德达古滑坡构造位置与地层岩性分布图

Fig.1 Structure location and stratigraphic lithology distribution map of Deda ancient landslide in Batang County, Sichuan Province

2 德达古滑坡平面发育特征

德达古滑坡平面形态呈簸箕状，滑坡地形呈陡-缓-陡折线形，滑坡顶部高程为 4265m，巴曲河面高程为 3657m，滑坡前后缘相对高差 608 m，两侧以基岩为界，前缘以巴曲为界，后缘以山脊为界，滑坡纵长约为 1200 m，横宽 1100 m，平面面积约 $1.32 \times 10^6 m^2$ ，坡度平均为 $20^\circ \sim 45^\circ$ ，坡向为 $230^\circ \sim 240^\circ$ 。根据德达古滑坡的平面分布特征，可将其划分为德达 I 号滑坡体（I）、德达 II 号滑坡体（II）和德达古滑坡后壁（III）三部分（图 2a）。

2.1 德达 I 号滑坡体（I）

德达 I 号滑坡体发育在滑坡体的东南侧，呈簸箕状，滑体高程分布范围为 3657~4000 m，滑体纵长约 480 m，横宽约 500 m，平面面积约 $24 \times 10^4 m^2$ ，滑坡体左边界为基岩陡坎，右边界为冲沟，后缘为断裂陡坎，陡坎高约 200 m，前缘以巴曲为界，主滑方向为 230° 。I 号滑坡体前缘发育两个复活变形区，且存在多级滑动现象，受巴曲冲刷侵蚀作用，目前还在发生滑动变形（图 2d）。

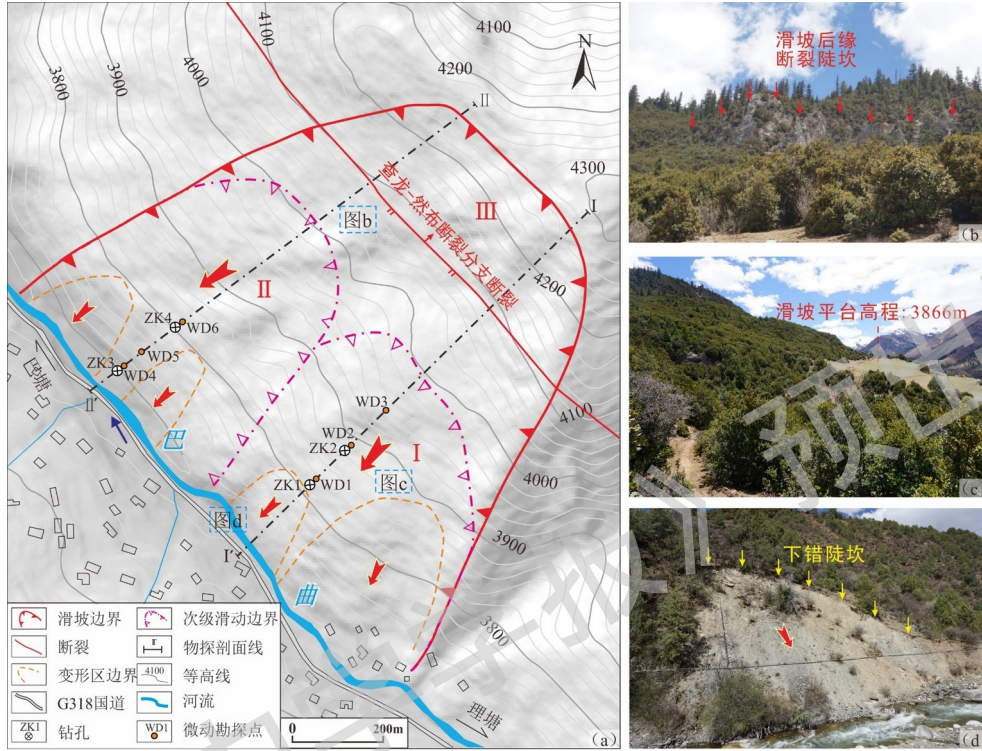
2.2 德达 II 号滑坡体（II）

德达 II 号滑坡体发育在滑坡体的北西侧，圈椅状明显，滑体高程分布范围为 3660~4010 m，纵长约 570 m，横宽约 440 m，平面面积约 $25 \times 10^4 m^2$ ，滑坡体右边界为基岩陡坎，左边界为冲沟，后缘以断裂陡坎为界，

陡坎高约 150 m，前缘以巴曲为界，主滑方向为 240°。II 号滑坡体前缘发育两个复活变形区，在变形区中存在多处小的滑塌现象，部分滑塌区域推挤河道。

2.3 德达古滑坡后壁（III）

滑坡后缘高程范围为 4000~4265 m，后缘可见明显的断裂陡坎，坎高 150-200 m，可见基岩出露（图 2b），岩性为灰岩。根据区域地质资料和现场调查，查龙-然布断裂分支断裂从滑坡后壁穿过，断裂陡坎前部为滑坡堆积体平台（图 2c）。



a—德达古滑坡工程地质平面图；b—德达古滑坡后壁区（III）断裂陡坎（镜向 NE）；c—德达古滑坡滑坡平台（镜向 NE）；d—德达古滑坡前缘复活变形（镜向 NW）

图 2 德达古滑坡平面发育特征与不同位置典型照片

Fig. 2 Planar development characteristic and typical photos of different locations of Deda ancient landslide

(a) Engineering geological plan of the Deda ancient landslide; (b) Deda ancient landslide back wall (III) fault scarp (NE); (c) Deda ancient landslide platform (NE); (d) Deda ancient landslide front reactivation deformation (NW)

3 德达古滑坡结构特征

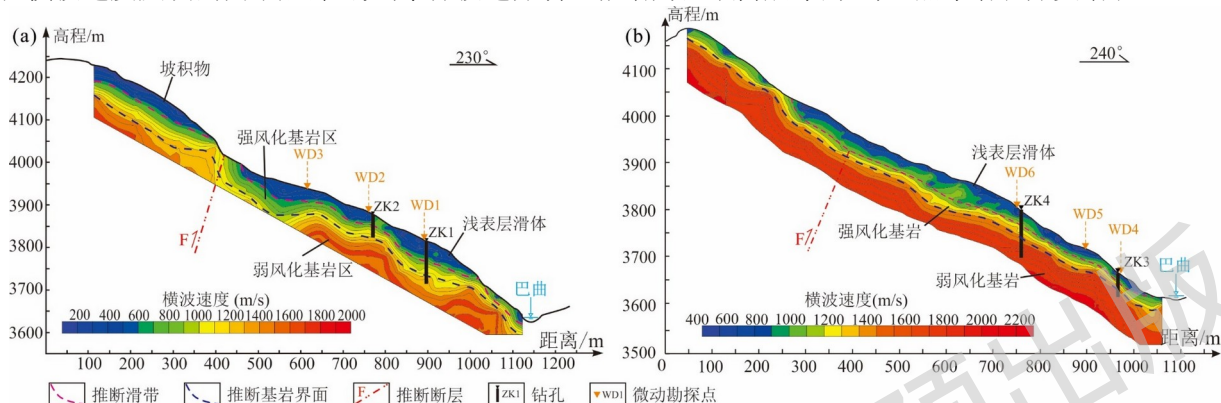
为研究德达古滑坡结构特征，综合现场调查，在德达古滑坡上布置了两条微动物探测线 I-I'、II-II'（图 2a），每条测线上布置了 15 个微动物探测点。为更好分析滑坡组成结构特征对应的横波速度结构特征，在每条测线各选取 3 个微动物探测点进行详细分析，共 6 个（WD1-WD6）。其中 WD1、WD2、WD3 在剖面 I-I' 上，WD4、WD5、WD6 在剖面 II-II' 上（图 2a），综合分析德达古滑坡组成结构在微动物探测上的响应特征，同时采用工程地质钻探验证微动物探测在滑坡组成结构研究中的应用成效。

3.1 德达古滑坡微动物探测反演结果分析

微动物探测技术（Microtremor Survey Method，简称为 MSM）是由美国地球物理学家 Aki（1957）和 Capon（1969）提出一种地球物理探测方法，是依赖于面波中 Rayleigh 波的频散特性，即当 Rayleigh 波遇到不均匀介质时，其相速度会随频率的变化而变化（Molnar et al., 2022）。其基本原理是将野外采集的微动物信号通过空间自相关法得到频谱能量，再从频谱能量中提取出 Rayleigh 波的频散曲线，通过采用最小二乘法反演得到横波波速，再由横波波速来解释地下地质空间分布特征。

由微动物探测结果可知（图 3），德达古滑坡结构可划分为 3 层：浅表层滑体、中-强风化基岩层、弱-未风

化基岩层。I号滑坡体所显示的浅表层滑体主要分布在坡体中部（图3a），横波速度呈低速状态，浅表层滑体厚度不均，最大厚度约55m，滑坡后缘横波速度低速区域主要为坡积物。II号滑坡体所显示的浅表层滑体主要分布在坡体中前部（图3b），横波速度低速状态明显，滑体中部厚度较为均一，厚度变化范围为40-50m。德达I号滑坡与II号滑坡在浅表层滑体、中-强风化基岩层与弱-未风化基岩层各分层界面上，以波速差异特征为界，分层明显，推测滑带位置在浅表层滑体与中-强风化基岩层界面处。滑坡深部基岩表现为横波速度高值状态。在横波速度反演剖面中后部可见高-低波速分明，推断为区域内展布的查龙-然布断裂分支断裂。



a—德达古滑坡 I -I'剖面微动探测反演结果；b—德达古滑坡 II -II'剖面微动探测反演结果

图3 德达古滑坡微动探测反演结果剖面图

Fig.3 Inversion results of MSM in the section of the Deda ancient landslide

(a) Inversion results of MSM in the I-I' section of the Deda ancient landslide; (b) Inversion results of MSM in the II-II' section of the Deda ancient landslide

3.2 德达古滑坡横波速度结构特征分析

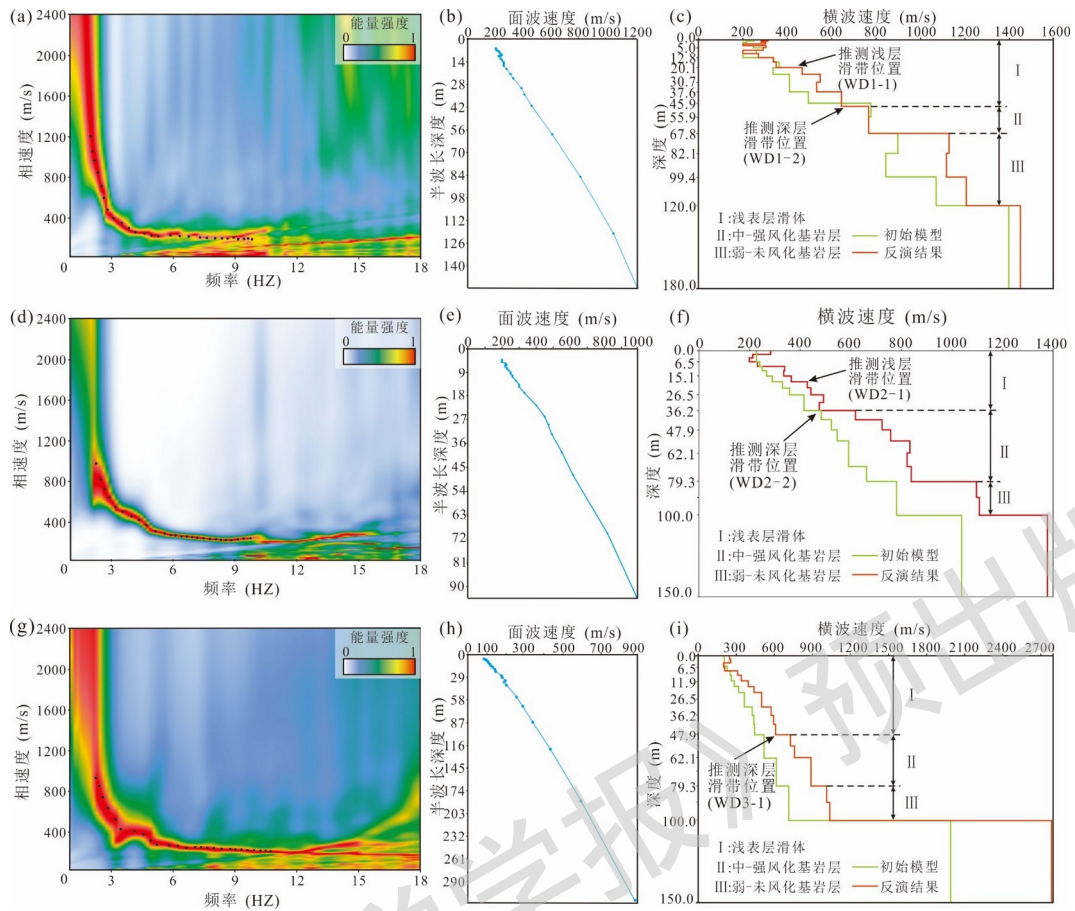
3.2.1 德达I号滑坡体

对I号滑坡体中的微动勘探点WD1、WD2、WD3进行分析，根据最小二乘法的横波速度结果，把滑坡结构分为浅表层滑体、中-强风化基岩层和弱-未风化基岩层等3个高层。各微动勘探所揭示的结果如下（图4，表1）：

(1) WD1在频谱能量获取的有效频散曲线面波波速范围为200-1200m/s（图4a, b），通过横波速度结构反演（图4c）揭露的浅表层滑体横波波速为200.0-644.2 m/s，主要是松散的碎块石，厚度为47.3 m；中-强风化基岩层横波速度在644.2-766 m/s之间，地下埋深为47.3-67.8m，厚度为20.1m；弱-未风化基岩层横波速度在766-1206.1 m/s之间，岩体完整性较好，结构紧密，地下埋深为67.8-120.0 m，厚度为52.2m。其中，在地下埋深20.1m（WD1-1）和47.3m（WD1-2）处横波速度结构差别较大，波速变化值分别为116.5 m/s和121.7 m/s，且在波速变化之后有一定深度是相对稳定的，推测这两处为潜在滑带位置，浅层滑带横波波速为349.5m/s，深层滑带横波波速为644.2m/s。

(2) WD2在频谱能量获取的有效频散曲线面波波速范围为200-1000m/s（图4d, e），通过横波速度结构反演（图4c）揭露的浅表层滑体厚度为36.2m，横波速度值在198.7-492.2 m/s；地下埋深在36.2-79.3m之间的主要是中-强风化基岩层，其横波速度在492.2-840.8m/s之间，厚度为43.1m；弱-未风化基岩层横波速度在840.8-1110.4 m/s之间，地下埋深为79.3-100m，厚度为20.7m。其中，在地下埋深18.7m（WD2-1）和36.2m（WD2-2）处横波速度结构差别较大，波速变化值分别为63.2 m/s、127.9 m/s，且在波速变化之后有一定深度是相对稳定的，推测这两处为潜在滑带位置，浅层滑带横波波速为365.1 m/s，深层滑带横波波速为475.2 m/s。

(3) WD3在频谱能量获取的有效频散曲线面波波速范围为100-900m/s（图4g, h），通过横波速度结构反演（图4c）揭露的浅表层滑体厚度为47.9m，横波速度值在200.0-618.0m/s；中-强风化基岩层地下埋深为47.9-79.3m，厚度为31.4m，横波速度在618.0-888.7m/s之间；弱-未风化基岩层横波速度在888.7-1006.5 m/s之间，地下埋深为79.3-100m，厚度为20.7m。在深度为47.9m（WD3-1）处横波速度发生突变，波速变化值为116.8 m/s，推测该深度为潜在滑带埋深，滑带横波波速为618.0 m/s。



a—WD1 频散能量谱；b—WD1 频散曲线；c—WD1 横波速度结构反演；d—WD2 频散能量谱；e—WD2 频散曲线；f—WD2 横波速度结构反演；g—WD3 频散能量谱；h—WD3 频散曲线；i—WD3 横波速度结构反演

图4 德达I号滑坡体微动勘探点地球物理响应特征图

Fig.4 Geophysical response characteristics of MSM points on Deda I landslide

(a) WD1 dispersion energy spectrum; (b) WD1 dispersion curve; (c) Inversion of WD1 shear wave velocity structure; (d) WD2 dispersion energy spectrum; (e) WD2 dispersion curve; (f) Inversion of WD2 shear wave velocity structure; (g) WD3 dispersion energy spectrum; (h) WD3 dispersion curve; (i) Inversion of WD3 shear wave velocity structure

综上所述，根据微动岩层反演结果，认为德达I号滑坡体发育两条滑带，微动勘探点揭露浅层滑带在18.7-20.1m，横波速度变化区间为349.5-365.1 m/s，深层滑带深度在36.2-47.9 m，横波速度变化区间为475.2-644.2m/s；且由WD1、WD2、WD3三个勘探点可知，浅层滑带主要分布在坡体中前部，WD3位置未探测出浅层滑带位置，很可能在该处只发育1层滑带。

3.2.2 德达II号滑坡体

对II号滑坡体中的微动勘探点WD4、WD5、WD6进行分析，根据最小二乘法的横波速度结果，把滑坡结构分为浅表层滑体、中-强风化基岩层和弱-未风化基岩层等3个大层。各微动勘探点所揭示的结果如下（图5，表1）：

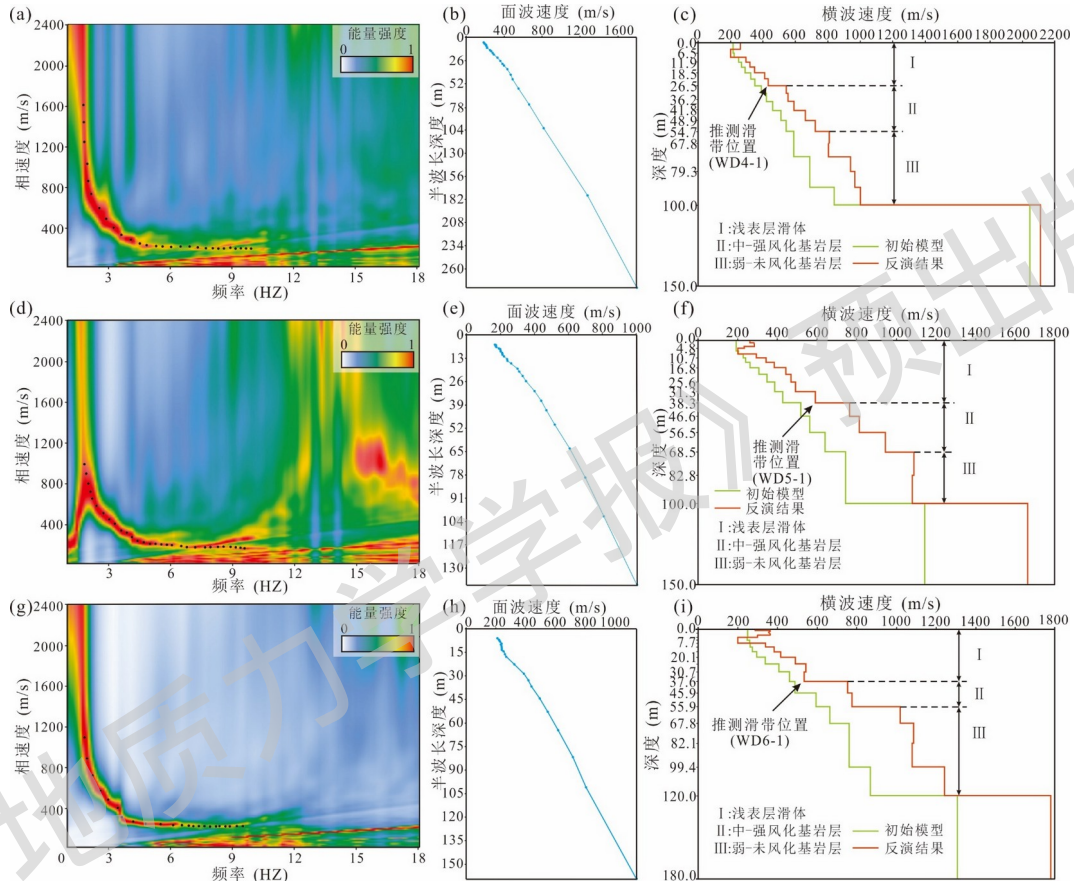
(1) WD4在频谱能量获取的有效频散曲线面波波速范围为200-1600m/s（图5a, b），通过横波速度结构反演（图4c）揭露的浅表层滑体横波波速为200.0-432.4 m/s，厚度为26.4 m；中-强风化基岩层横波速度在432.4-718.5 m/s之间，地下埋深为26.4-54.7m，厚度为28.2m；弱-未风化基岩层横波速度在718.5-1000.0 m/s之间，地下埋深为54.7-100.0 m，厚度为45.3m。其中，在地下埋深26.4m（WD4-1）处横波速度结构差别较大，波速变化值为110.9 m/s，推测为潜在滑带位置，滑带横波波速为432.4m/s。

(2) WD5在频谱能量获取的有效频散曲线面波波速范围为180-1000m/s（图5d, e），通过横波速度结构反演（图4c）揭露的浅表层滑体厚度为38.3 m，横波速度值在200.0-590.8 m/s；地下埋深在38.3-68.5m之间的主要是中-强风化基岩层，其横波速度在590.8-939.0m/s之间，厚度为30.2m；弱-未风化基岩层横波速度在939.0-1056.1 m/s之间，地下埋深为68.5-100m，厚度为31.5m。其中，在地下埋深38.3m（WD5-1）处横波波速

度结构差别较大，波速变化值为 172.9m/s，推测为潜在滑带位置，滑带横波波速为 590.8 m/s。

(3) WD6 在频谱能量获取的有效频散曲线面波波速范围为 200-1200m/s (图 5g, h)，通过横波速度结构反演 (图 4c) 揭露的浅表层滑体厚度为 37.6m，横波速度值在 200.0-543.1m/s；中-强风化基岩层地下埋深为 37.6-55.9m，厚度为 18.3m，横波速度在 543.1-776.7 m/s 之间；弱-未风化基岩层横波速度在 776.7-1240.8 m/s 之间，地下埋深为 55.9-120.0m，厚度为 64.1m。在深度为 37.6m (WD6-1) 处横波速度发生突变，波速变化值为 218.6 m/s，推测该深度为潜在滑带埋深，滑带横波波速为 543.1 m/s。

综上所述，德达 II 号滑坡体发育一条滑带，微动勘探点揭露滑带深度在 26.4-38.3 m，横波速度变化区间为 432.4-590.8m/s。



a—WD4 频散能量谱；b—WD4 频散曲线；c—WD4 横波速度结构反演；d—WD5 频散能量谱；e—WD5 频散曲线；f—WD5 横波速度结构反演；g—WD6 频散能量谱；h—WD6 频散曲线；i—WD6 横波速度结构反演

图 5 德达 II 号滑坡体微动勘探点地球物理响应特征图

Fig.5 Geophysical response characteristics of MSM points on Deda II landslide

(a) WD4 dispersion energy spectrum; (b) WD4 dispersion curve; (c) Inversion of WD4 shear wave velocity structure; (d) WD5 dispersion energy spectrum; (e) WD5 dispersion curve; (f) Inversion of WD5 shear wave velocity structure; (g) WD6 dispersion energy spectrum; (h) WD6 dispersion curve; (i) Inversion of WD6 shear wave velocity structure

表 1 德达古滑坡微动探测响应与横波速度一览表

Table 1 List of MSM response characteristics of Deda ancient landslide

微动勘探点	浅表层滑体 (m/s)	中-强风化基岩 (灰岩、砂质板岩, m/s)	弱-未风化基岩 (灰岩、砂质板岩, m/s)	滑带横波速度值 (m/s)			
				滑带编号	浅层滑带	滑带编号	深层滑带
WD1	200.0-644.2	644.2-766.0	766.0-1206.1	WD1-1	349.5	WD1-2	644.2
WD2	198.7-492.2	492.2-840.8	840.8-1110.4	WD2-1	365.1	WD2-2	475.2
WD3	200.0-618.0	618.0-888.7	888.7-1006.5	/	/	WD3-1	618.0
WD4	200.0-432.4	432.4-718.5	718.5-1000.0	/	/	WD4-1	432.4
WD5	200.0-590.8	590.8-939.0	939.0-1056.1	/	/	WD5-1	590.8
WD6	200.0-543.1	543.1-776.7	776.7-1240.8	/	/	WD6-1	543.1

3.3 德达古滑坡工程钻探结果

根据微动探测解释的结果，在德达 I 号滑坡体和德达 II 号滑坡体布置了 4 个钻孔 (ZK1-ZK4) (图 3a)，用于验证物探结果的准确性，以及揭露实际地层信息。ZK1、ZK4 钻孔深度为 100m，ZK2、ZK3 钻孔深度为

50m。

3.3.1 德达 I 号滑坡体

根据 ZK1 钻探编录结果，I 号滑坡实际揭露 1 层滑带（图 6），滑带深度为 49.7m，滑体主要由黄褐色含角砾粘土和碎石土组成。含角砾粘土厚度为 3.2m，角砾含量约 25%，粒径一般为 2-15 mm，夹有少量碎石；碎石土厚度为 46.5 m，碎石含量约 50%，粒径一般为 3-10 cm，块石含量约 12%，粒径最大可达 50 cm，岩性主要为强风化灰岩。滑带土为黄褐色角砾土，埋深为 49.7-49.9 m，厚度为 0.2 m。滑坡基岩主要为中-强风化板岩，在深度为 70.9-72.5m 发育一层深灰色软弱夹层（图 6d）。微动探测在 ZK1 位置揭露了 2 层滑带，浅层滑带深度为 20.1 m，深层滑带为 47.3 m；钻孔 ZK1 未揭露出浅层滑带土的原因可能是浅层滑动面未完全贯通，但在物探结果上有较为明显的差异。

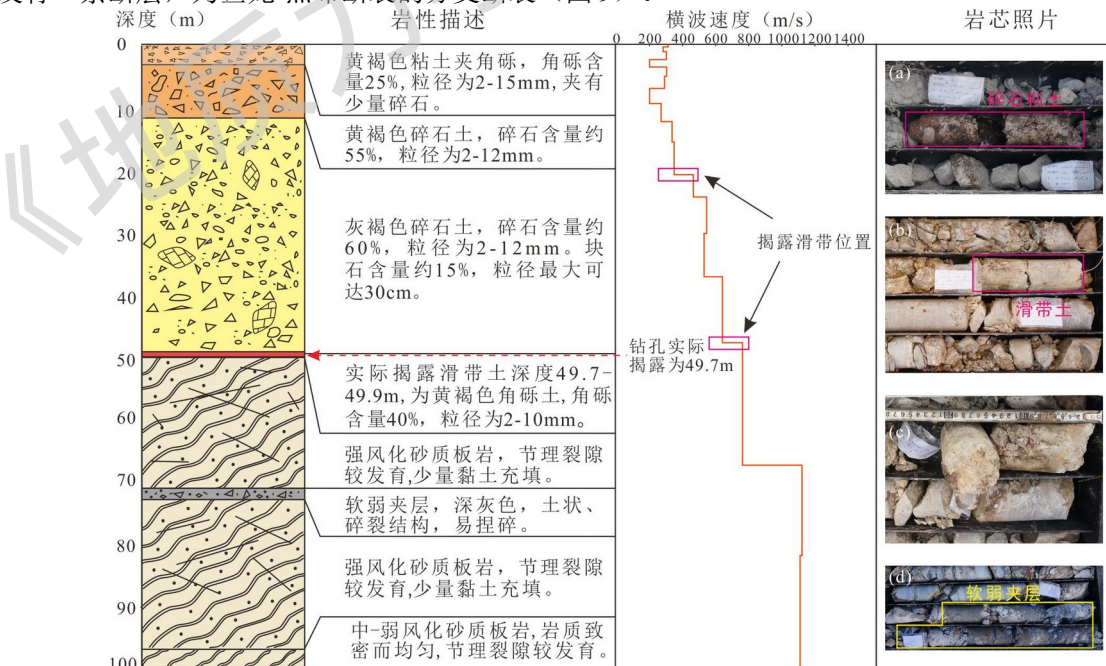
ZK2 揭露滑带深度为 49.1m，滑体主要由碎块石土组成，碎块石含量较大，约占 60%。微动探测在 ZK2 位置揭露了两层滑带，浅层滑带深度为 18.7 m，深层滑带为 36.2 m；钻孔 ZK2 实际揭露浅层滑带深度为 19.5-20.0 m，深层滑带为 49.1-49.8m。

因此，德达 I 号滑坡发育两层滑带，浅层滑带深度为 18.7-20.1m（S1），深层滑带深度为 36.2-49.9m（S2），滑坡基岩岩性为灰岩、砂质板岩，在滑坡后缘发育一条断层，为查龙-然布断裂的分支断裂（图 7）。

3.3.2 德达 II 号滑坡体

根据 ZK4 钻孔编录结果，II 号滑坡实际揭露 1 层滑带（图 8），厚度为 38.6m，滑体主要由黄褐色含角砾粘土和碎石土组成。含角砾粘土厚度为 1.1m，角砾含量约 30%，粒径一般为 3-12mm；碎石土厚度为 37.5 m，碎石含量约 55%，粒径一般为 3-15 cm，块石含量约 15%，粒径最大可达 30 cm。滑带土为黄褐色角砾土，埋深为 38.6-39.3m，厚度为 0.7 m。微动探测在 ZK4 位置探测的滑带深度为 37.6 m，钻孔 ZK4 实际揭露的滑带深度为 38.6 m。ZK3 揭露滑体厚度为 25.2m，主要由碎块石土组成，碎块石含量较大，约占 60%。微动探测在 ZK3 位置探测的滑带深度为 26.4 m，钻孔 ZK3 实际揭露的滑带深度为 25.2 m。

因此，德达 II 号滑坡体发育 1 层滑带，滑带埋深为 25.2-38.6m，滑坡基岩岩性为灰岩、砂质板岩，在滑坡后缘发育一条断层，为查龙-然布断裂的分支断裂（图 9）。



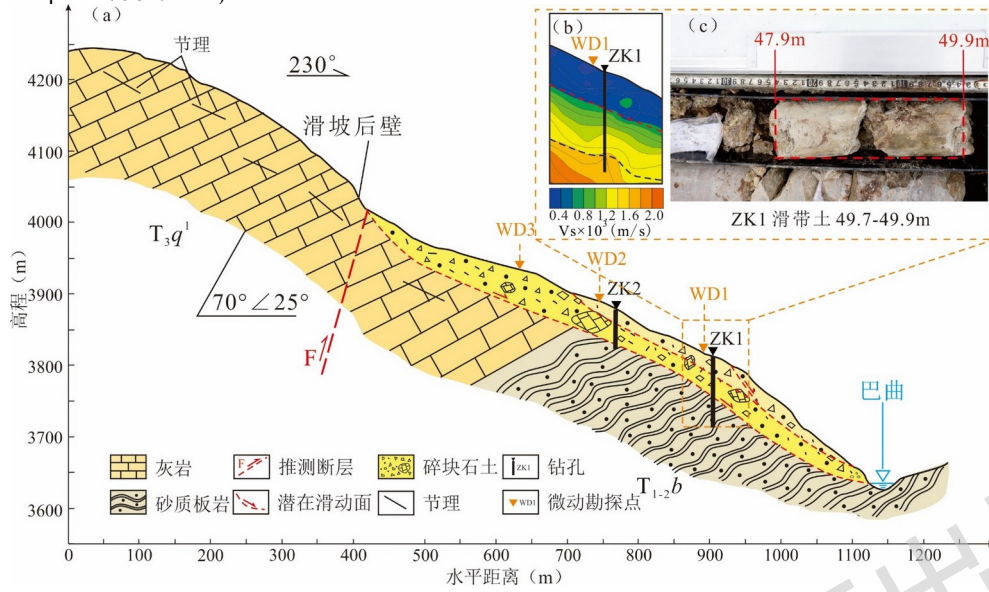
a—碎石粘土（钻孔深度 20.1-20.3m）；b—滑带土（钻孔深度 49.7-49.9m）；c—滑带土断面；d—软弱夹层钻孔深度为（钻孔深度 70.9-72.4m）

图 6 德达古滑坡 ZK1 钻孔柱状图

Fig.6 Column diagram of ZK1 borehole in Deda ancient landslide

(a) Gravelly clay (borehole depth is 20.1-20.3m); (b) Sliding zone (borehole depth is 49.7-49.9m); (c) Sliding zone cross-section; (d) Soft

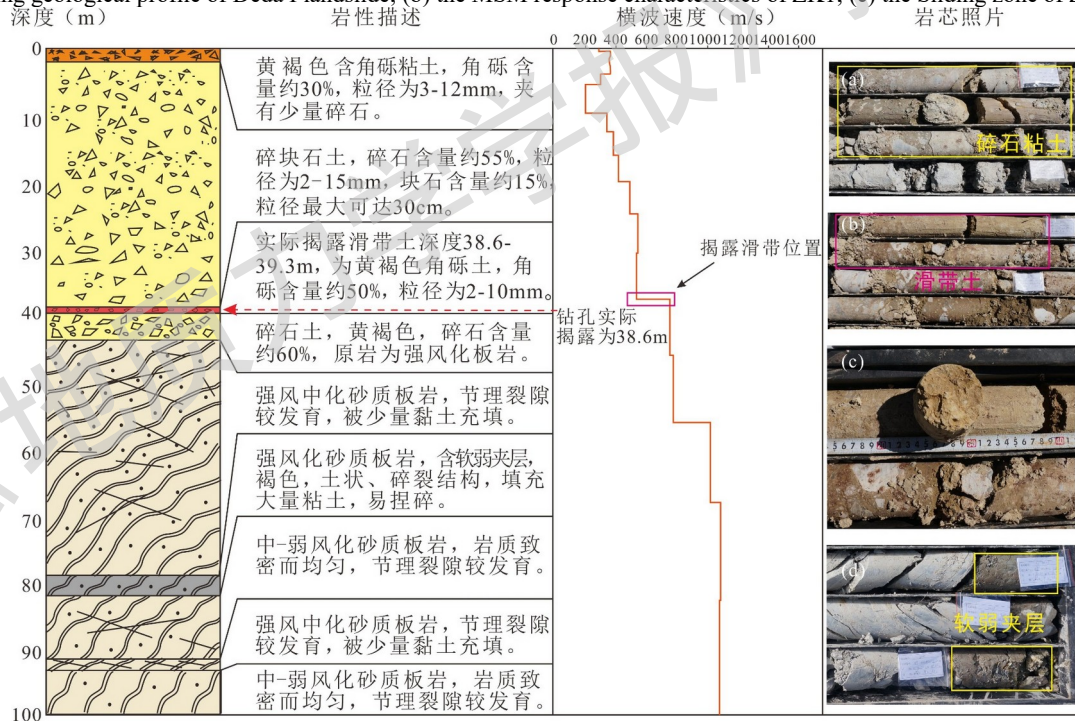
interlayer (borehole depth is 70.9-72.4m)



a—德达 I 号滑坡工程地质剖面图；b—ZK1 微动探测响应特征；c—ZK1 揭露滑带土
图 7 德达 I 号滑坡结构特征图

Fig.7 Structure characteristics of Deda I landslide

(a) Engineering geological profile of Deda I landslide; (b) the MSM response characteristics of ZK1; (c) the Sliding zone of ZK1

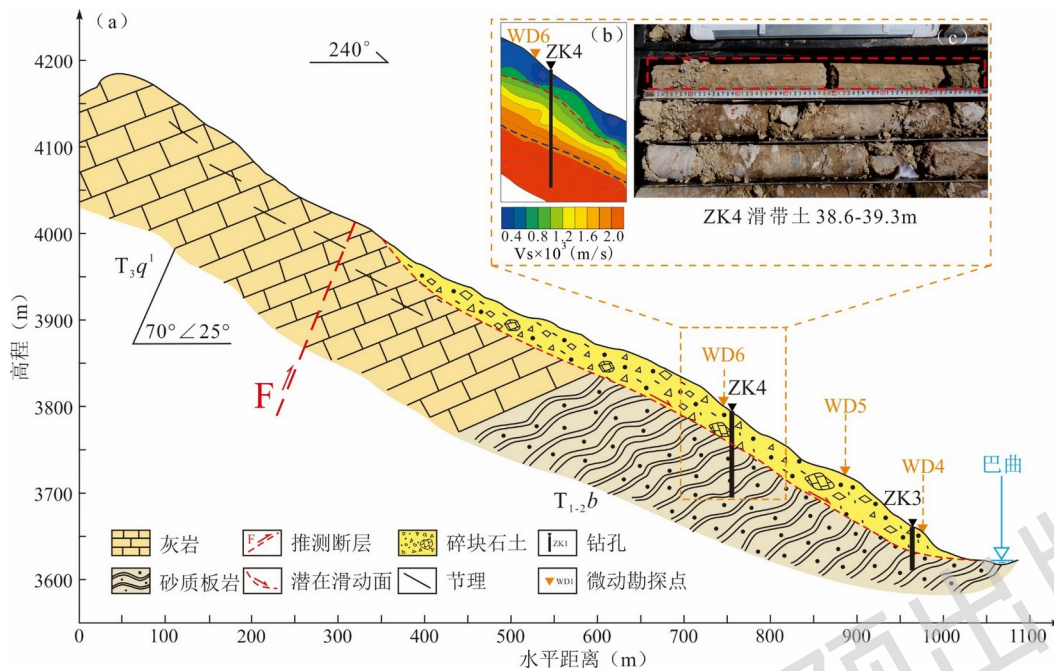


a—碎石粘土（钻孔深度 24.8-26.6m）；b—滑带土（钻孔深度 38.6-39.3m）；c—滑带土断面；d—软弱夹层（钻孔深度 78.9 和 81.3m）

图 8 德达古滑坡 ZK4 钻孔柱状图

Fig.8 Column diagram of ZK4 borehole in Deda ancient landslide

(a) Gravelly clay (borehole depth is 24.8-26.6m); (b) Sliding zone (borehole depth is 38.6-39.3m); (c) Sliding zone cross-section; (d) Soft interlayer (borehole depth is 78.9 and 81.3m)



a—德达 II 号滑坡工程地质剖面图；b—ZK4 微动探测响应特征；c—ZK4 揭露滑带土
图 9 德达 II 号滑坡结构特征图

Fig.9 Structure characteristics of Deda II landslide

(a) Engineering geological profile of Deda II landslide; (b) the MSM response characteristics of ZK4; (c) the Sliding zone of ZK4

3.4 德达古滑坡滑带判识误差分析

基于微动探测技术在滑带上的判识方法可通过对地层中横波速度差异区进行识别，德达古滑坡滑带土所处位置横波速度为 349.5-644.2 m/s，处于低横波速度状态，而到基岩中则可达 1000-2200 m/s 的高横波速度状态，且在波速变化之后在一定深度内是相对稳定的，则可推断该分层界面为滑带位置。通过对德达滑坡 WD1、WD2、WD4、WD6 微动勘探点的数据分析，WD1、WD2 的浅层滑带埋深分别为 20.1m、18.7m，深层滑带埋深分别为 47.3m、36.2m，WD4、WD6 只揭露了 1 层滑带，滑带埋深分别为 26.4m、37.6m。钻孔 ZK1、ZK2、ZK3、ZK4 揭露的滑带深度分别为 49.7m、19.5m、25.2m、38.6m，相对于实际钻孔揭露的误差分别为 4.8%、4.1%、4.7%、2.6%（表 2）。

微动探测精度的研究得到了国内外学者的重视，徐佩芬等（2013）采用微动探测对地下地层结构进行分层，通过钻探揭露，探测深度误差最大为 12%；Xu et al.（2021）采用微动探测对广州地铁线路进行勘探，解译出基岩界面和强风化层界面，与实际钻孔揭露的深度相比，最大相对误差为 5.46%；张若晗等（2020）基于微动 H/V 谱比法解译的土石分界面深度与钻孔揭露深度平均误差为 4.33%。事实说明微动探测精度高，误差率较低，适用于大型深度滑坡滑带的空间结构判识。微动探测在德达古滑坡揭露的滑带深度相对于钻孔实际揭露深度的相对误差最大为 4.8%，该探测结果是相对可靠且精准的。

因此，综合实际物探、钻探及现场调查结果，进一步完善了德达古滑坡的工程地质剖面，德达 I 号滑坡发育 2 层滑带，浅层滑带埋深为 18.7-20.1m（S1），深层滑带埋深为 36.2-49.9 m（S2），平面面积约为 $24 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，滑体体积为 $8.7\text{-}12.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ ；德达 II 号滑坡发育 1 层滑带，滑带埋深为 25.2-38.6m，平面面积约为 $25 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，滑体体积为 $6.3\text{-}9.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

表 2 德达古滑坡微动勘探点与钻探结果对比

Table 2 Comparison of MSM Points and Drilling Results of the Deda Ancient Landslide

名称	位置	滑带深度/m	相对误差/%
德达 I 号 滑坡体	WD1	47.3	4.8
	ZK1	49.7	
	WD2	18.7	4.1
	ZK2	19.5	
达 II 号滑 坡体	WD3	26.4	4.7
	ZK3	25.2	
	WD4	37.6	2.6
	ZK4	38.6	

4 德达古滑坡形成机理与影响因素分析

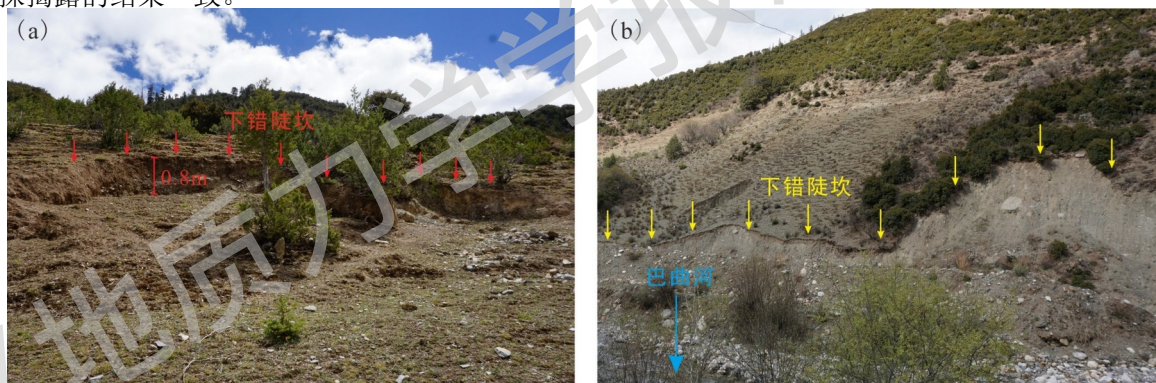
大型古滑坡的形成机理一直是地质灾害调查研究的重点和难点，诱发大型古滑坡形成的因素主要有：地震、降雨、人类工程活动、河流侵蚀、断裂活动以及长期重力作用等（黄润秋，2007；张永双等，2016；郭长宝等，2022）。基于野外调查、物探、钻探以及工程地质分析，认为德达古滑坡的形成与诱发因素主要为断裂活动、降雨入渗以及河流侵蚀等作用。

4.1 断裂活动对德达古滑坡形成的影响

地质构造作用控制着滑坡的形成和发展，断裂活动直接或间接影响着大型滑坡的形成和演化（李晓等，2008；Zhang, et al., 2015；铁永波等，2022）。德达古滑坡位于查龙-然布断裂内，该断裂为一条右旋压扭性正断层，呈NNW向延伸（张清林，2021），结合现场调查和微动探测确定了查龙-然布断裂分支断裂从滑坡后部穿过（图2a，b），该区岩体结构较为破碎。滑坡区域地震烈度为Ⅷ度区，历史上发生过3次 $M_s \geq 6.0$ 级地震，350余次 $M_s < 6.0$ 级地震（周荣军，2005），频繁的地震对斜坡岩体结构造成了损伤。同时，再加上斜坡体自身重力作用、斜坡顶部冻融作用以及前期的降雨作用，促进了斜坡的变形，导致岩土体沿节理发育方向逐渐形成贯通的结构面（图11a）。

4.2 降雨入渗对德达古滑坡形成的影响

降雨是诱发滑坡变形破坏的主要因素之一，其变形破坏机制主要表现为对滑坡岩土体的加载以及改变岩土体结构和力学强度等，从而降低滑坡体的稳定性（谢守益等，1999；姚贺冬等，2015）。德达滑坡区域降雨主要分布在6-9月的雨季，6-9月降雨量之和平均为391mm，占全年的90%，强降雨会增加坡体重度、弱化滑带力学强度，促进滑坡的发生。且现场调查发现长期降雨作用和自重作用下，坡体浅表层发生滑动，形成下错陡坎（图10a），说明浅表覆盖层在雨水入渗作用下，沿浅表层滑面发生滑动变形，故滑坡堆积体存在两层滑带，这与物探揭露的结果一致。



a—德达古滑坡浅表层滑动（镜向NE）；b—巴曲河侧蚀造成失稳变形（镜向NW）；

图10 降雨及河流侵蚀对德达古滑坡的影响

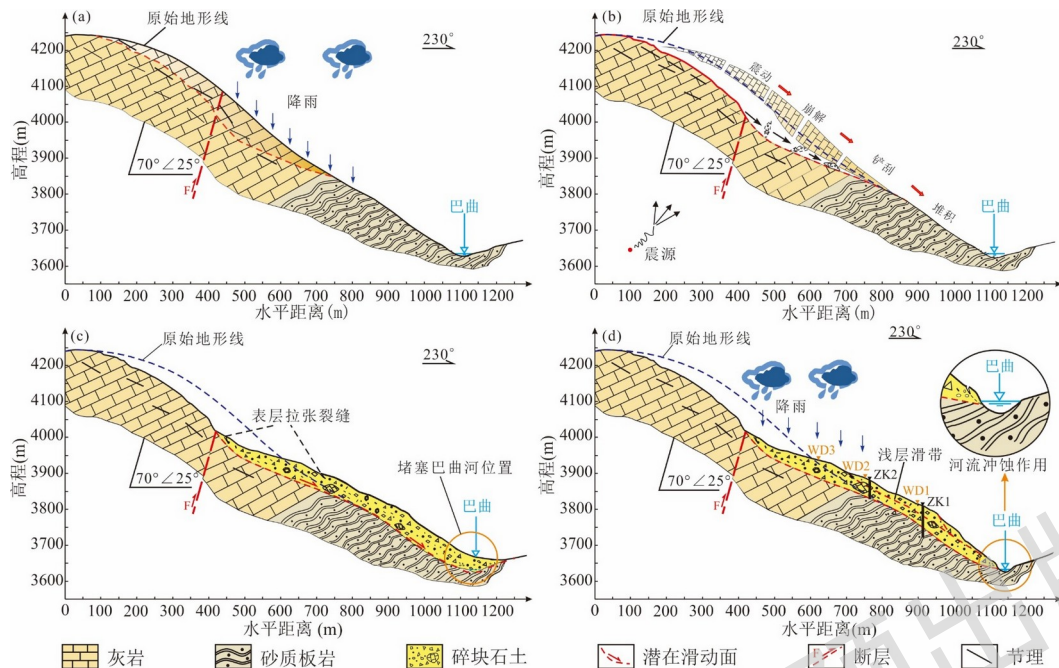
Fig.10 Influence of rainfall and river erosion on Deda ancient landslide

(a) Shallow surface slide of the Deda ancient landslide (NE); (b) Baqu River erosion caused instability deformation (NW)

4.3 河流侵蚀对德达古滑坡形成的影响

根据四川省巴塘县地质灾害调查与区划报告，巴曲河平均流量为 $52.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ，枯、洪水位差1-3m，50年一遇洪峰流量 $395 \text{ m}^3/\text{s}$ ，流速 2.9 m/s 。河流携带和侵蚀能力较强，尤其是在降雨季节，巴曲流量较大，对德达古滑坡坡脚处具有强烈的冲刷、侵蚀能力。由于滑坡体堆积堵塞了巴曲河，在河流上游形成堰塞湖，在长时间堰塞作用下，巴曲河流发生改道，沿河流左侧偏移近50m，在巴曲不断下切和冲蚀作用下，堰塞坝被冲开。且在长期的河流侵蚀作用下，坡脚处被侧蚀形成连续的且陡倾的临空面，造成坡体前缘不断发生失稳变形（图10b），从而由前部滑动牵引后部发生大型滑动。

综上所述，德达古滑坡可能是在某一次由断裂活动引起的强震作用下，原始斜坡结构较为破碎的表层岩土体沿着节理裂隙面发生崩解-滑动，滑落的岩体和坡积物在运动过程中铲刮坡体中部的原始地形，推挤前部岩土体，并在斜坡前部堆积，堵塞前缘巴曲河（图11b，c），在巴曲长期不断冲蚀下发生溃坝，巴曲河道发生改变。在滑坡稳定之后，受重力作用、降雨入渗、河流侵蚀等多种因素的影响，滑坡发生浅层滑动，形成浅层滑带，滑坡前缘发生复活变形等现象（图11d）。



a—滑坡后缘节理面发育贯通阶段；b—震动-崩解-铲刮-堆积阶段；c—崩滑体堆积-堵江-溃坝阶段；d—降雨入渗-河流冲刷-蠕滑变形阶段

图 11 德达古滑坡形成机制模式图

Fig.11 Schematic diagram of Deda ancient landslide formation mechanism

(a) The development of the joints surface at the rear edge of the landslide; (b) Shaking-disintegrating-scraping-accumulation stage; (c) The rockslide accumulation -river blocking-dam breach stage; (d) Rainfall infiltration-river erosion-creep deformation stage

5 主要结论

文章以德达古滑坡为研究对象，采用现场调查、地球物理勘探、工程地质钻探的手段对德达古滑坡开展滑坡结构特征研究，得到以下结论和认识：

(1) 德达滑坡为一大型古滑坡，呈簸箕状，滑坡纵长约为 1200 m，横宽 1100 m，滑坡在平面上分为德达 I 号滑坡体 (I)、德达 II 号滑坡体 (II) 和德达古滑坡后壁 (III) 三部分；基于微动勘探点结果分析认为，德达 I 号滑坡体发育两条滑带，所揭露浅层滑带深度在 18.7-20.1m，横波速度为 349.5-365.1 m/s，深层滑带深度在 36.2-47.9 m，横波速度为 475.2-644.2m/s；德达 II 号滑坡体发育一条滑带，微动勘探点揭露滑带深度在 26.4-38.3 m，横波速度为 432.4-590.8m/s。

(2) 综合物探结果、钻探揭露以及现场调查分析，德达 I 号滑坡浅层滑带埋深为 18.7-20.1m (S1)，深层滑带埋深为 36.2-49.9 m (S1)，平面面积约为 $24 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，滑体体积为 $8.7-12.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ ；德达 II 号滑坡发育 1 层滑带，滑带埋深为 25.2-38.6m，平面面积约为 $25 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，滑体体积为 $6.3-9.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

(3) 通过微动探测揭露，并结合钻探验证，文章提出了一种基于微动探测技术的浅层滑带和深层滑带划分方法，其对滑带深度识别相对误差一般为 2.6-4.8%，探测误差在 5% 以内，探测结果是相对可靠且精准的。

(4) 综合分析认为德达古滑坡是在断裂活动、降雨入渗、河流侵蚀等多种因素作用下形成的，原始斜坡结构较为破碎的岩层岩土体在强震作用下沿着节理节理裂隙面发生崩解-滑动-堆积-堵江-溃决灾害链事件，滑坡堆积稳定之后，在重力作用、降雨入渗、河流侵蚀等长期作用下，滑坡发生浅层滑动、前缘复活变形等现象，目前滑坡仍处于蠕滑变形阶段。

致谢： 本项工作的野外地球物理勘探和数据处理得到了成都蓝天信息工程有限公司张国华高级工程师的指导和帮助；野外工程钻探施工得到了四川省地质调查院魏昌利、廖伟高级工程师的指导和帮助；中国地质科学院地质力学研究所金继军硕士研究生、宋德光硕士研究生在本次野外调查工作中提供了相关帮助与支持；中国地质

大学（武汉）凌雨薇硕士研究生、袁新霞硕士研究生参加了部分图件绘制工作，在此一并表示感谢。

References

- AKI K, 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35: 415-456.
- BAI Y J, LI M H, WANG D H, et al., 2014. Characteristics and disastrous rule research of geohazards in batang county, the middle reaches of Jinsha river[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 25(2): 103-109. (in Chinese with English abstract)
- CAGNIARD L, 1953. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting[J]. *Geophysics*, 18(3): 605-635.
- CAPON J, 1969. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis[J]. *Proceedings of the IEEE*, 57(8): 1408-1418.
- CRUDEN D M, VARNES D J, 1996. Landslide types and processes, special report, transportation research board. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 247:36-75.
- DEWEY J F, SHACKLETON R M, Chang C F, et al., 1988. The Tectonic Evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 327(1594): 379-413.
- DU Y N, XU P F, LING S Q, 2018. Microtremor survey of soil-rock mixture landslides: An example of Baidian township, Hengyang City. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(4): 1596-1604. (in Chinese with English abstract)
- DI Q Y, XUE G Q, ZENG Q D, et al., 2020. Magnetotelluric exploration of deep-seated gold deposits in the Qingchengzi orefield, Eastern Liaoning (China), using a SEP system[J]. *Ore Geology Reviews*, 122: 103501.
- GUO C B, ZHANG Y S, MONTGOMERY D R, et al., 2016. How unusual is the long-runout of the earthquake-triggered giant Luanshibao landslide, Tibetan Plateau, China?[J]. *Geomorphology*, 259: 145-154.
- GUO C B, YAN Y Q, ZHANG Y S, et al., 2021. Study on the creep-sliding mechanism of the giant Xiongba ancient landslide based on the SBAS-InSAR method, Tibetan Plateau, China[J]. *Remote Sensing*, 13(17): 3365.
- GUO C B, ZHANG Y S, YUAN H, et al., 2023. Study of an ancient landslide reactivation mechanism based on centrifuge model testing: An example of the Jiangdingya ancient landslide reactivation in 2018, Gansu Province, China[J]. *Landslides*, 20(1): 127-141.
- GUO C B, YAN Y Q, ZHANG Y S, et al., 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 Q Q, GUO C B, SHEN W, et al., 2017. Geophysical exploration and sliding surface discriminant analysis of large-giant ancient landslides in Minjiang river valley, Western Sichuan[J]. *Journal of Geomechanics*, 23(05): 788-797. (in Chinese with English abstract)
- GAO W W, GAO W, HU R L, et al., 2018. Microtremor survey and stability analysis of a soil-rock mixture landslide: A case study in Baidian town, China[J]. *Landslides*, 15: 1951-1961.
- HUANG R Q, 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(03): 433-454. (in Chinese with English abstract)
- LI X, LI S D, CHEN J, et al., 2008. Coupling effect mechanism of endogenic and exogenic geological processes of geological hazards evolution[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(9):1792-1792. (in Chinese with English abstract)
- LI X, LIAO Q, WANG S, et al., 2008. On evaluating the stability of the Baiyian ancient landslide in the three gorges reservoir area, Yangtze River: a geological history analysis[J]. *Environmental geology*, 55(8): 1699-1711.
- MA N, WANG G W, KAMAI T, et al., 2019. Amplification of seismic response of a large deep-seated landslide in Tokushima, Japan[J]. *Engineering Geology*, 249: 218-234.
- MOLNAR S, SIROHEY A, ASSAF J, et al., 2022. A review of the microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (MHVSR) method[J]. *Journal of Seismology*, 26(4): 653-685.
- NAUDET V, LAZZAR I M, PERRONE A, et al., 2008. Integrated geophysical and geomorphological approach to investigate the snowmelt-triggered landslide of Bosco Piccolo village (Basilicata, southern Italy)[J]. *Engineering Geology*, 98(3-4): 156-167.
- PENG J B, MA R Y, LU Q Z, et al., 2004. Geological hazards effects of uplift of Qinghai-tibet plateau. *Advances in Earth Science*, 19(03): 457-466. (in Chinese with English abstract)

English abstract)

- QIU Z D, GUO C B, WU R A, et al., 2023. Development characteristics and stability evaluation of Shadingmai large-scale ancient landslide in the upper reaches of Jinsha River, Tibetan Plateau [J/OL]. *Geoscience*, 1-14. (in Chinese with English abstract)
- SU L J, XU X Q, GENG X Y, et al., 2017. An integrated geophysical approach for investigating hydro-geological characteristics of a debris landslide in the Wenchuan earthquake area[J]. *Engineering Geology*, 219: 52-63.
- TIE Y B, ZHANG X Z, GONG L F, et al., 2022. Research on the pattern of typical geohazard chains in the southwest mountainous region, China[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(6): 1071-1080. (in Chinese with English abstract)
- TIKHONOV A N, 1950. Determination of the electrical characteristics of the deep strata of the earth's crust[M]. Scientific Information Centre.
- WU R A, GUO C B, NI J W, 2023. Ancient landslide river damming event in the Batang fault zone, Tibetan Plateau[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(1): 25.
- XIE S Y, XU S Y, 1999. Research on the mechanism of rainfall-induced landslides[J]. *J. Wuhan Univ. of Hydr. & Elec. Eng.*, 32(01): 22-24. (in Chinese with English abstract)
- XU J R, ZHAO Z X, 2009. Extensional seismogenic stress and tectonic movement on the central region of the Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Geophysics*, 2009: 1-8.
- Xu X Q, Su L J, Zhang G D, et al, 2017. Analysis on shear wave velocity structure of a gravel landslide based on dual-source surface wave method[J]. *Landslides*, 14: 1127-1137.
- XU Q, ZHAO B, DAI K, et al., 2023. Remote sensing for landslide investigations: A progress report from China[J]. *Engineering Geology*, 321: 107156.
- XU P F, LING S Q, LONG G, et al., 2021. ESPAC-based 2D mini-array microtremor method and its application in urban rail transit construction planning[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 115: 104070.
- XU P F, LI S H, DU J G, et al., 2013. Microtremor survey method: A new geophysical method for dividing strata and detecting the buried fault structures[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1841-1845. (in Chinese with English abstract)
- YANG D D, QIU H J, ZHU Y, et al., 2021. Landslide characteristics and evolution: What we can learn from three adjacent landslides[J]. *Remote Sensing*, 13(22): 4579.
- YAN Y Q, GUO C B, ZHONG N, et al., 2022. Deformation characteristics of Jiayu ancient landslide based on InSAR monitoring method, Sichuan, China. *Earth Science*, 47(12): 4681-4697. (in Chinese with English abstract)
- YAN Y Q, GUO C B, Li C H, et al., 2023. The Creep-Sliding Deformation Mechanism of the Jiayu Ancient Landslide in the Upstream of Dadu River, Tibetan Plateau, China. *Remote Sensing*, 15, 592.
- YAO H D, SHI C, XU W Y, et al., 2015. Landslide reactivation of Zhenggang deposit talus at Gushui Hydropower Station[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 43(1):28-33. (in Chinese with English abstract)
- YANG X H, JIANG Y W, ZHU J C, et al., 2023. Deformation characteristics and failure mechanism of the Moli landslide in Guoye Town, Zhouqu County[J]. *Landslides*, 20(4): 789-800.
- ZHANG R H, XU P F, LING S Q, et al, 2020. Detection of the soil-rock interface based on microtremor H/V spectral ratio method: a case study of the Jinan urban area. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(01): 339-350.
- ZHANG Q L, 2016. Study on deformation of faults in Batang region in Western Sichuan[D]. Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y S, GUO C B, LAN H X, et al., 2015. Reactivation mechanism of ancient giant landslides in the tectonically active zone: a case study in Southwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 74: 1719-1729.
- ZHANG Y S, GUO C B, YAO X, et al., 2016. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan plateau[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(3): 277-286. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Y, GUO C B, YANG Z H, et al., 2021. Development characteristics and reactivation trend of Zhama ancient landslide in Batang, Sichuan[J]. *Geological Bulletin Of China*, 40(12): 2002-2014. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO C Y, LIU X J, GAO Y, et al., 2022. Early identification of high-elevation geohazards in the lower Yarlung Zangbo River based on the SAR/InSAR technology[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(6): 981-994. (in Chinese with English abstract)

ZHOU R J, CHEN G X, LI Y, et al., 2005. Research on active faults in Litang-Batang region, western Sichuan Province, and the seismogenic structures of the 1989

Batang M6.7 earthquake swarm[J]. *Seismology and Geology*, 27(1):31-43. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 白永健, 李明辉, 王东辉, 等, 2014. 金沙江中游巴塘县地质灾害发育特征及成灾规律分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 25(02): 103-109.
- 杜亚楠, 徐佩芬, 凌盪群. 2018. 土石混合滑坡体微动探测: 以衡阳拜殿乡滑坡体为例. *地球物理学报*, 61(4): 1596-1604.
- 郭长宝, 闫怡秋, 张永双, 等, 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[J]. *地球科学*, 47(10): 3677-3700.
- 郭桥桥, 郭长宝, 申维, 等, 2017. 川西岷江河谷典型大型—巨型古滑坡特征物探解译分析[J]. *地质力学学报*, 23(05): 788-797.
- 黄润秋, 2007. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 26(03): 433-454.
- 李晓, 李守定, 陈剑, 等, 2008. 地质灾害形成的内外动力耦合作用机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 27(09): 1792-1806.
- 彭建兵, 马润勇, 卢全中, 等, 2004. 青藏高原隆升的地质灾害效应. *地球科学进展*, 19(03): 457-466.
- 邱振东, 郭长宝, 吴瑞安, 等, 2023. 金沙江上游沙丁麦大型古滑坡发育特征与稳定性评价[J/OL]. *现代地质*: 1-14.
- 铁永波, 张宪政, 龚凌枫, 等, 2022. 西南山区典型地质灾害链成灾模式研究[J]. *地质力学学报*, 28(06): 1071-1080.
- 徐佩芬, 李世豪, 杜建国, 等, 2013. 微动探测: 地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法[J]. *岩石学报*, 29(05): 1841-1845.
- 谢守益, 徐卫亚, 1999. 降雨诱发滑坡机制研究[J]. *武汉水利电力大学学报*, 32(01): 22-24.
- 姚贺冬, 石崇, 徐卫亚, 等, 2015. 古水水电站争岗堆积体滑坡复活条件分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 43(1): 28-33.
- 闫怡秋, 郭长宝, 钟宁, 等, 2022. 基于 InSAR 形变监测的四川甲居古滑坡变形特征[J]. *地球科学*, 47(12):4681-4697.
- 赵超英, 刘晓杰, 高杨, 等, 2022. 基于 SAR/In SAR 技术的雅鲁藏布江下游高位地质灾害早期识别[J]. *地质力学学报*, 28(06): 981-994.
- 张若晗, 徐佩芬, 凌盪群, 等, 2020. 基于微动 H/V 谱比法的土石分界面探测研究——以济南中心城区为例[J]. *地球物理学报*, 63(01): 339-350.
- 张清林, 2016. 川西巴塘地区断裂构造变形研究[D]. 成都理工大学.
- 周荣军, 陈国星, 李勇, 等, 2005. 四川西部理塘—巴塘地区的活动断裂与 1989 年巴塘 6.7 级震群发震构造研究[J]. *地震地质*, 27(1): 31-43.