引用格式：冉丽娜，张永双，任三绍，等，2025. 金沙江上游蚀变蛇绿岩型滑坡形成机制与稳定性分析：以堆绒通滑坡为例[J]. 地质力学学报，31（2）：267−277. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024084

Citation: RAN L N，ZHANG Y S，REN S S，et al.，2025. Formation mechanism and stability analysis of a landslide in altered ophiolite in the upper reaches of Jinsha River: A case study of the Duirongtong landslide[J]. Journal of Geomechanics，31（2）：267−277. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024084

金沙江上游蚀变蛇绿岩型滑坡形成机制与稳定性分析——以堆绒通滑坡为例

冉丽娜[1]，张永双[2]，任三绍[2]，李金秋[1,2]

RAN Lina[1]，ZHANG Yongshuang[2]，REN Sanshao[2]，LI Jinqiu[1,2]

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所，河北 石家庄 050061；
2. 中国地质大学（北京）工程技术学院，北京 100083
1. *Institution of Hydrogeology and Environmental Geology*, *Chinese Academy of Geosciences*, *Shijiazhuang* 050061, *Hebei*, *China*;
2. *School of Engineering and Technology*, *China University of Geosciences*, *Beijing* 100083, *China*

Formation mechanism and stability analysis of a landslide in altered ophiolite in the upper reaches of Jinsha River: A case study of the Duirongtong landslide

Abstract: ［**Objective**］The tectonic suture zone of the Qinghai-Tibet Plateau has a complex rock mass structure and special lithology combination and is thus prone for large landslides. However, many factors influence the formation and evolution of landslides in altered ophiolite. Their formation mechanism is not clear at present, which restricts an effective identification and disaster risk prevention.［**Methods**］Taking the Duirongtong (DRT) landslide in the Jinsha River tectonic suture zone as an example, field investigations, UAV mapping, geochronological analysis, ring-shear testing, and numerical simulation were performed to analyze the formation mechanisms of the landslide and evaluate the stability of the landslide deposits.［**Results**］The results show that: (1) The DRT landslide is a giant landslide formed in the late Pleistocene. The slope is mainly composed of basic-ultrabasic rocks, and several clay-altered ophiolitic bands are developed, forming a sliding-prone geo-structure. (2) The clay-altered ophiolite has low shear strength under natural conditions, and its shear strength drops sharply when exposed to water. The natural values of c and φ are 67.0 kPa and 20.3°, and the water-saturated values of cohesion(c) and angle of internal friction(φ) are 39.8 kPa and 13.83°. The DRT landslide is currently stable as a whole, but the leading edge of the landslide may experience movement under heavy rainfall. Based on numerical simulation, some preventive recommendations are proposed.［**Conclusion**］The study suggests that the formation and evolution of the DRT landslide are controlled by the combination of geological structure and clay-altered rock.［**Significance**］These findings have important implications for the slope stability analysis and disaster prevention in the tectonic suture zone of the Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: tectonic suture zone; landslip; ophiolites; clay-altered rock; sliding-prone geo-structure; stability analysis

摘　要：青藏高原构造缝合带具有复杂的岩体结构和特殊的岩性组合，是特大滑坡易发带，但蚀变蛇绿岩型滑坡形成演化涉及的影响因素较多，目前对其孕生机制尚不明晰，制约了灾害隐患有效判识和风险防范。以金沙江构造缝合带堆绒通滑坡为例，基于现场调查、无人机测绘、年代学测试和环剪试验等方法，剖析了蚀变蛇绿岩型滑坡的发育特征和形成机制，并对滑坡堆积体的稳定性进行了模拟分析。结果

基金项目：国家自然科学基金项目（42472350，41941017）；中国地质调查局地质调查项目（DD20221816）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42472350 and 41941017), and the China Geological Survey Project (Grant No. DD20221816).

第一作者：冉丽娜（2000—），在读硕士，主要从事工程地质与地质灾害研究。Email：1801358314@qq.com

通信作者：张永双（1968—），博士，教授，博士生导师，主要从事工程地质与地质灾害教学和研究工作。Email：zhys100@cugb.edu.cn

收稿日期：2024−08−06；**修回日期：**2025−02−07；**录用日期：**2025−02−10；**网络出版日期：**2025−02−13；**责任编辑：**吴芳

表明：堆绒通滑坡是形成于晚更新世的巨型滑坡，所在斜坡岩性以基性−超基性岩为主，内部发育多条黏土化蚀变蛇绿岩条带，构成易滑地质结构；黏土化蚀变蛇绿岩在天然状态下具有较低的抗剪强度，遇水强度急剧下降，天然状态下的黏聚力（c）、内摩擦角（φ）值分别为67.0 kPa和20.3°，饱和状态下的c、φ值分别为39.8 kPa和13.8°，软化效应显著；堆绒通滑坡堆积体目前整体稳定，但在强降雨条件下滑坡体前缘可能出现局部失稳，基于滑坡稳定性数值模拟结果提出了灾害风险防范对策。综合分析认为，岩体结构与黏土化蚀变岩联合控制了堆绒通滑坡的形成演化。相关认识对青藏高原构造缝合带斜坡稳定性分析和防灾减灾具有较好的启示意义。

关键词：构造缝合带；滑坡；蛇绿岩；黏土化蚀变岩；易滑地质结构；稳定性分析
中图分类号：P642.22 **文献标识码**：A **文章编号**：1006−6616(2025)02−0267−11
DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024084

0 引言

青藏高原东缘的大型河流如金沙江、澜沧江、怒江等，大都是沿板块构造缝合带发育，复杂的地质构造演化史和后期地貌改造过程，导致这些深切河谷成为巨型滑坡密集发育区。金沙江上游河谷两岸大型−巨型滑坡频繁发生，形成滑坡−堵江−堰塞湖−溃决灾害链，具有发生规模大、破坏性严重等特点。据统计，金沙江上游白玉至得荣段发育大型滑坡上百处，造成了若干重大灾害事件，如2018年10月11日和11月3日，西藏自治区江达县白格滑坡先后2次堵江，造成10万余人受灾，直接经济损失超过100亿元(许强等，2018；邓建辉等，2019)；1969年9月26日，云南省德钦县支斯山滑坡堵江，造成金沙江阻断达14 h(陈剑平和李会中，2016)。张永双等(2024)研究表明，构造缝合带的滑坡类型主要有构造控制型、泥质软岩控制型和蚀变蛇绿岩控制型，其中蚀变蛇绿岩型滑坡是构造缝合带最具特色且危害最大的类型，具有典型的地质构造与特殊岩性联合控制特征。

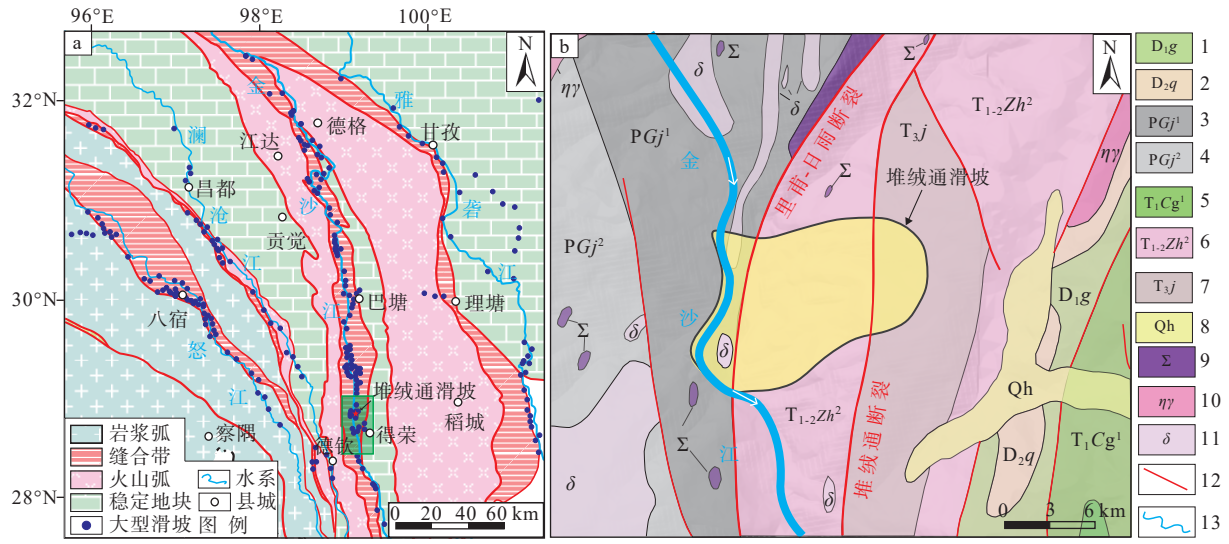
构造缝合带形成演化过程中，不仅形成了活动断裂及密集的节理、面理、劈理等结构面，严重弱化了岩体的强度和完整性(陈剑平和李会中，2016；童鹏等，2023)，而且具有物质组成复杂、工程地质特性差异大等岩性特征(潘桂棠等，2020；唐渊等，2022)。在热液作用下构造缝合带中的蛇绿岩极易发生黏土化蚀变(张永双等，2020；Yousufi et al.，2023)，产生大量亲水性黏土矿物(蒙脱石、伊利石等)，控制着滑坡形成演化(Heap et al.，2021；Ren et al.，2023)。蚀变蛇绿岩型滑坡在三江构造带普遍发育，如金沙江白格滑坡(Ren et al.，2023)、达嘎顶滑坡、怒江多拉寺滑坡(张永双等，2023)、果拉山滑坡(Li et al.，2023)等，这些滑坡的滑带土均由高黏土含量、低抗剪强度的蚀变蛇绿岩构成。然而当前对蚀变蛇绿岩的灾变力学行为及其对滑坡的促滑机制尚不清晰(张永双等，2023；李金秋等，2024)，严重制约了构造缝合带特大滑坡灾害隐患早期识别与风险防范。

以金沙江上游堆绒通滑坡为例，采用野外精细调查、无人机航测、年代学测试、矿物分析和岩土力学试验，阐明了滑坡的发育特征和形成时代，剖析了蚀变蛇绿岩的力学行为及其对滑坡的促滑作用，并通过FlAC^{3D}软件，开展了现今滑坡堆积体的稳定性分析，研究结果对青藏高原构造缝合带蛇绿岩型滑坡早期识别及复活滑动风险评估具有较好的启示意义。

1 地质背景

堆绒通滑坡位于四川省得荣县徐龙乡金沙江左岸(99°09′49.18″E、28°42′31.69″N)，距得荣县城约15 km。滑坡区属典型的深切河谷地貌，地形起伏大，相对高差在2000 m以上。构造上位于金沙江缝合带内(图1)，发育有金沙江断裂和巴塘断裂等活动断裂，晚更新世以来构造活动强烈，历史地震频繁(伍先国和蔡长星，1992)。滑坡区属青藏高原亚湿润气候区，干湿季节交替明显，年均降雨量354.2～633.7 mm，降雨多集中于5月至9月，占年均降雨量的90%，其他月份降雨较少。

滑坡区地层主要由三叠系上统甲丕拉组(T_3j)、三叠系中下统中心绒群($T_{1\text{-}2}Zh^2$)、二叠系戛金雪山群(PGj)组成(图1)，河谷斜坡出露大量玄武岩、辉绿岩、绿片岩、蛇纹岩等基性−超基性岩，其中夹有黏土化蚀变蛇绿岩条带。滑坡前缘发育3级河流阶地，皆为基座阶地。T_1阶地拔河高程约为5 m，T_2阶地拔河高程约为18 m，T_3阶地拔河高程约



a—三江构造缝合带大型滑坡分布图；b—堆绒通滑坡及周边地质略图

1—泥盆系下统格绒组灰岩夹砂岩、火山岩；2—泥盆系中统穷错组灰岩夹板岩；3—二叠系戛金雪山群石英片岩；4—二叠系戛金雪山群蚀变玄武岩；5—三叠系下统茨岗群板岩；6—三叠系中—下统中心绒群中-基性火山岩(绿片岩)；7—三叠系上统甲丕拉组砾岩、砂岩；8—早更新统红色黏土层、泥砾层；9—超基性岩；10—二长花岗岩；11—石英闪长岩；12—断层；13—河流

图 1　堆绒通滑坡孕灾地质背景图

Fig. 1　Geological background map of disaster-prone areas around the Duirongtong landslide

(a) Distribution map of large-scale landslides in the tectonic suture zone; (b) Geological sketch of the Duirongtong landslide and its surrounding

1—Lower Devonian Gerong Formation limestone with sandstone and volcanic rocks; 2—Middle Devonian Qiongcuo Formation limestone cleats; 3—Permian Gajinxueshan Group quartz schist; 4—Altered basalt of the Permian Gajinxueshan Group; 5—Lower Triassic Cigang Group slate; 6—Intermediate volcanic rocks (greenschist) in the Lower and Middle Triassic Zhongxinrong Group; 7—Conglomerate and sandstone of the Upper Triassic Jiapila Formation; 8—Early Pleistocene red clay layer, mud gravel layer; 9—Ultramafic rock; 10—Monzonitic granite; 11—Quartz diorite; 12—Fault; 13—River

130 m 左右。T_1、T_2 阶地基座为二叠系戛金雪山群蚀变玄武岩，T_3 阶地基座为滑坡堆积体，说明堆绒通滑坡形成于 T_3 阶地之前。

2　堆绒通滑坡发育特征

根据野外调查和无人机测绘结果，堆绒通滑坡后缘高程 3720 m、前缘高程 2130 m，最大高差达 1590 m。滑坡长约 3000 m、后缘宽约 1800 m、前缘宽约 2700 m，面积约 6.5 km^2，堆积体厚 100～200m，体积约 3×10^8 m^3，为一巨型堵江滑坡。金沙江断裂的分支断裂——里甫-日雨断裂和堆绒通断裂，分别从滑坡后部和前缘穿过(常昊等，2021)，二者均为逆断层，产状分别为 260°∠68°、275°∠70°。

2.1　滑坡分区

根据滑坡表面形态和近期变形特征，可以将堆绒通滑坡划分为 3 个区(图 2，图 3)：

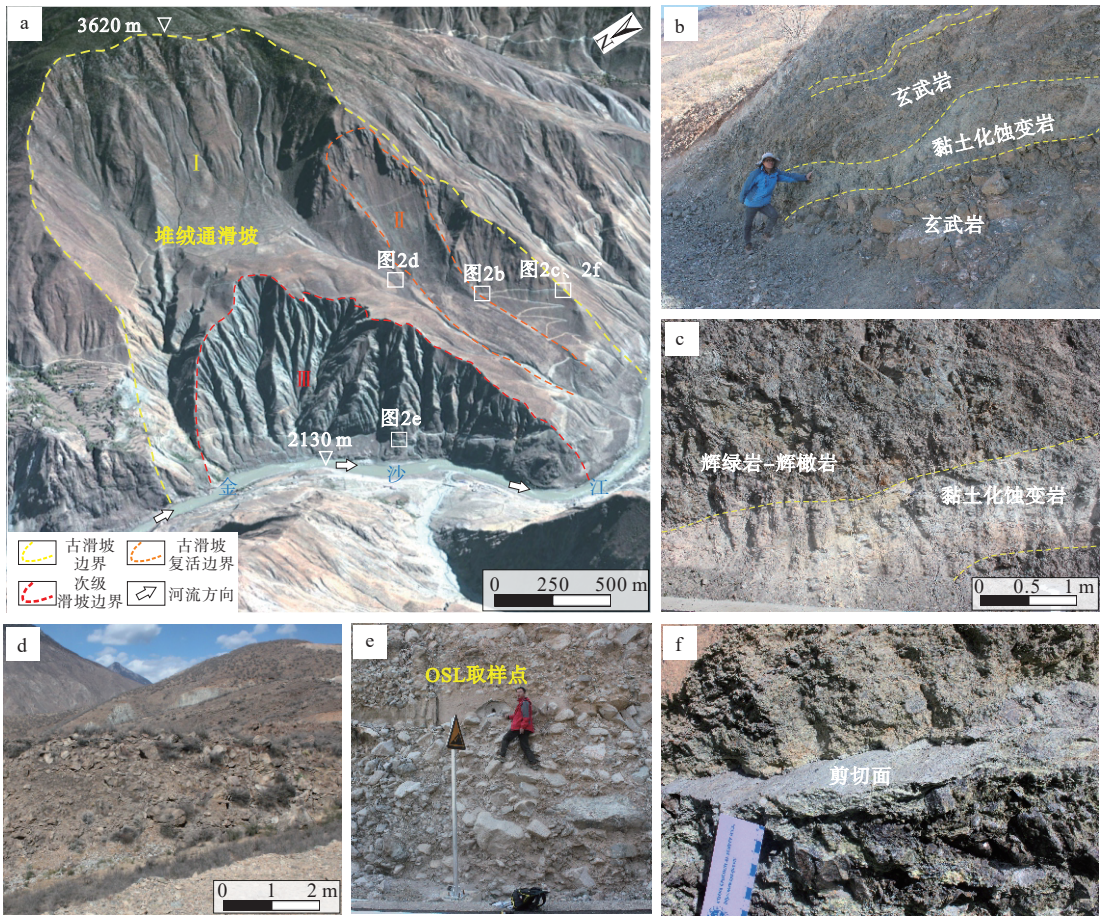
(1) Ⅰ区为滑坡初始形成范围。滑坡后缘圈椅状地貌明显，后壁陡峭，坡度 35°～40°；中部为滑坡平台，纵向长 500 m，横向宽 900 m，坡度小于 5°，为原堆绒通村居住地。滑坡体由散乱的块石组成，块石直径一般 10～50 cm，最大可达 5 m，块石岩性主要为辉绿岩、玄武岩、绿片岩等基性岩。

(2) Ⅱ区位于滑坡左侧，为滑坡形成后再次滑动形成的次级滑坡。该次级滑坡呈长条状，后缘高程 3200 m，前缘高程约 2300 m，最大高差达 900 m，滑坡长约 2000 m，宽约 350 m，面积约 70×10^4 m^2，体积约 1500×10^4 m^3。滑坡表面块石巨大，直径一般为 2～5 m，最大可达 10 m。

(3) Ⅲ区位于滑坡前缘右侧，为古滑坡堆积体复活变形区。该区后缘位于古滑坡平台处，高程 2650 m，坡脚高程 2130 m。滑坡平面形态呈扇形，纵向最长约 1000 m，前缘沿金沙江宽 1600 m，面积约 110×10^4 m^2，体积约 3000×10^4 m^3。滑坡表面冲沟遍布，沿江公路位于 T_3 河流阶地之上。

2.2　滑坡剖面特征

滑坡剖面(图 4)上较好地显示了滑床的主要岩性构成，顶部为三叠系上统甲丕拉组砾岩、砂岩



a—滑坡全景(底图来自 google earth); b—滑坡中部黏土化蚀变岩条带; c—滑坡左侧公路旁出露的黏土化蚀变岩条带; d—滑坡中部堆积块石特征(镜向北西); e—滑坡前缘发育的冲洪积阶地及光释光(OSL)测年取样位置; f—滑坡左侧蛇绿岩中发育的黏土化蚀变岩滑带

图 2 堆绒通滑坡发育特征

Fig. 2 Development characteristics of the Duirongtong landslide

(a) Landslide panorama (negative from google earth); (b) Strip of clay-altered rock in the middle of the landslide; (c) Strip of clay-altered rock on the road to the left of the landslide; (d) Characteristics of rock accumulation in the middle of landslide; (e) Alluvial terrace developed at the landslide front and sampling location of OSL dating; (f) Clay-altered rock slip zone developed in the ophiolite to the right side of the landslide

(T_3j), 产状 150°∠48°～54°; 中部为三叠系中下统中心绒群基性-超基性火山岩($T_{1\text{-}2}Zh^2$), 蚀变现象发育, 玄武岩、辉绿岩与蛇纹蚀变软岩、蚀变黏土呈堆积互叠结构特征(图 2b、2c); 前缘为二叠纪戛金雪山群石英片岩(PGj^1)。受构造挤压作用影响, 出露的基岩呈层状-碎裂结构, 岩层挤压揉皱现象及片理化显著, 节理裂隙发育。沿滑床基性岩的节理裂隙, 黏土化蚀变现象明显。沿堆绒通滑坡Ⅰ区与Ⅲ区的分界线、Ⅲ区与 T_3 阶地的分界线, 将滑坡体表面分成 3 级平台(图 4)。在 T_3 阶地中大致可识别出砾石层、砂层、滑坡堆积、堰塞湖相黏土层等沉积物。

2.3 滑坡稳定性现状

滑坡目前处于整体稳定状态, 局部存在复活变形现象。受地质构造、降雨以及人类工程活动影响, 在次级滑坡(Ⅲ区)表面发育多条拉张裂缝, 裂缝长度不等, 说明滑坡现今仍在变形。坡体变形剧烈的地方集中在在滑坡Ⅰ区与Ⅲ区衔接处(图 3), 野外调查发现滑坡前缘发育多条坡表侵蚀沟, 由于长期受河流下切与坡脚卸荷作用, 前缘堆积体稳定性较差, 在强降雨作用下存在复活滑动的可能性。

3 滑坡形成机制分析

3.1 滑坡形成时代

根据滑坡堆积体与 T_3 阶地的关系, 可以大致判断滑坡的形成时代。野外在 T_3 阶地中下部的砂层中采集了测年样品(图 2e), 采样时用内径为 3 cm, 长 15 cm 的不锈钢管钻取, 取出圆柱状岩芯后两端

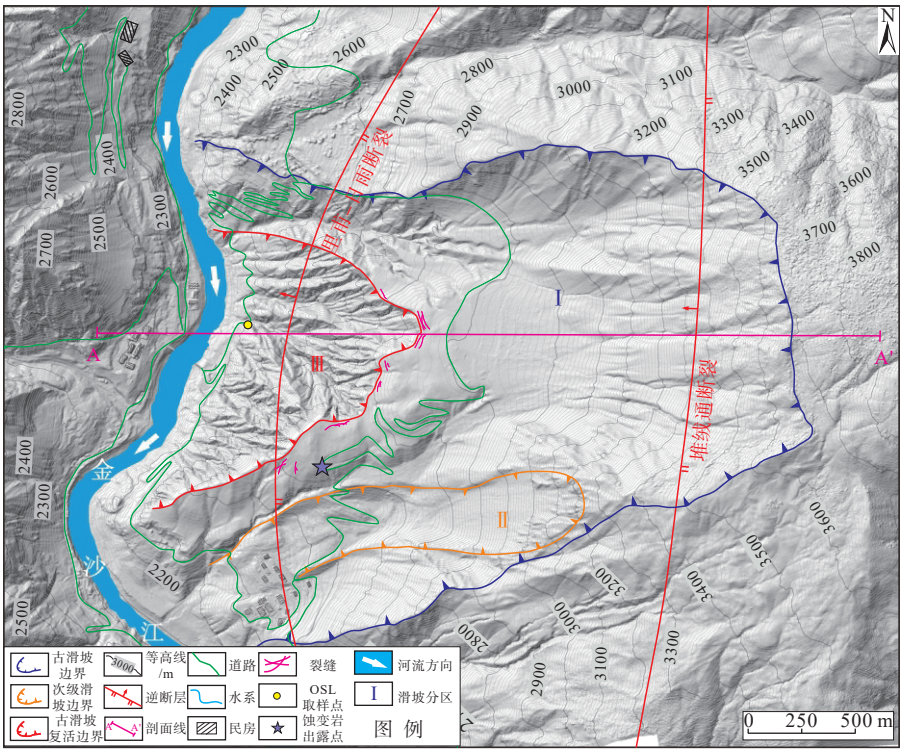
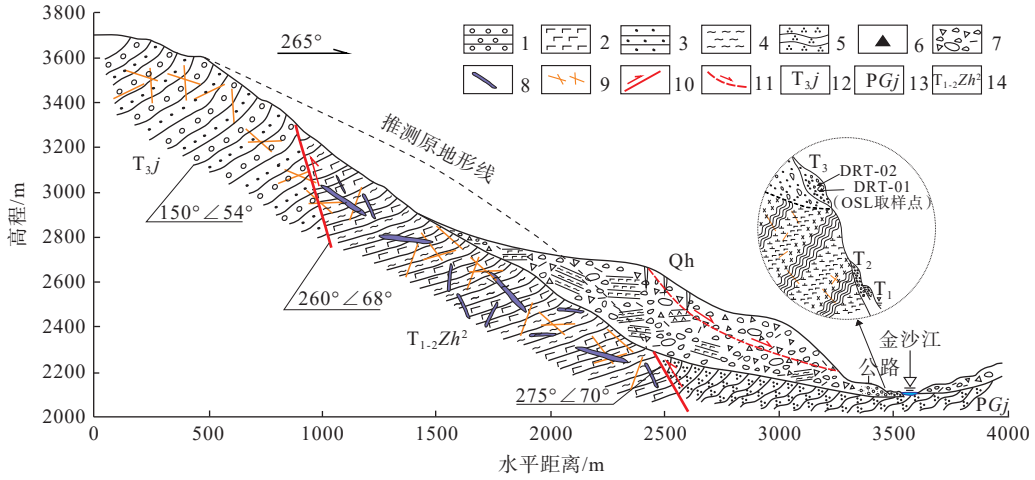


图 3　堆绒通滑坡平面分区图

Fig. 3　Plane zonation of the Duirongtong landslide



1—砾岩；2—玄武岩；3—砂岩；4—绿片岩；5—石英片岩；6—堆绒通滑坡光释光测年取样点；7—第四纪残坡积物；8—蚀变蛇绿岩条带；9—节理裂隙；10—断层；11—潜在滑动面；12—三叠系中下统中心绒群；13—二叠系戛金雪山群；14—三叠系上统甲丕拉组

图 4　堆绒通滑坡 A-A′剖面图

Fig. 4　A-A′ prof ile of the Duirongtong landslide

1—Conglomerate; 2—Basalt; 3—Sandstone; 4—Greenschist; 5—Quartz schist; 6—OSL dating sampling point of the DRT landslide; 7—Quaternary residual slope deposits; 8—Altered ophiolite bands; 9—Joint fissure; 10—Fault; 11—Potential slip surface; 12—Lower–Middle Triassic Zhongxinrong Group; 13—Permian Gajinxueshan Group; 14—Upper Triassic Jiapila Formation

用黑色塑料袋包裹。经中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室测定，光释光测年结果分别为距今 73.7±4.2 ka 和 102.4±4.6 ka(表 1)，表明堆绒通滑坡可能形成于距今 100 ka 左右的晚更新世早期，这与 Bao et al.(2023)对金沙江上游洒茂顶滑坡形成时代的研究结果一致。

3.2　滑坡形成内部因素

在金沙江上游发育的若干大型–巨型滑坡的形

表 1 光释光样品年龄测定结果

Table 1 Results of OSL age determination

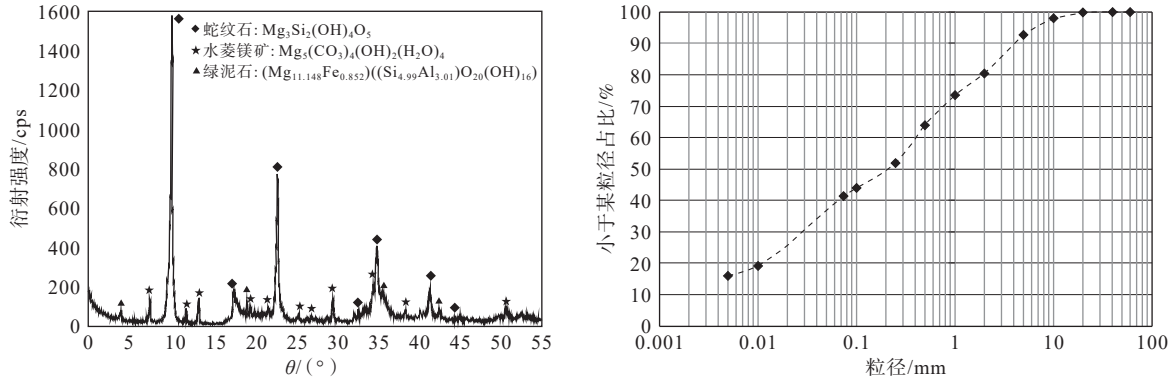
样品号	埋深/m	U/×10⁻⁶	Th/×10⁻⁶	K/%	等效剂量De(Gy)	年剂量Gy/ka	含水量/%	年龄/ka
DRT-01	0.5	1.58	6.69	2.40	254.04±8.03	3.45±0.16	7±5	73.7±4.2
DRT-02	0.5	1.05	9.95	1.55	281.41±1.31	2.75±0.12	7±5	102.4±4.6

成大多与古地震有关(Chen et al., 2018; 白永健等, 2019; 邓建辉等, 2022); 也有学者认为这些滑坡的形成与极端气候变化(冰川作用或强降雨)密不可分(高杨等, 2017; Zhang et al., 2022)。此次调查认为, 在金沙江活动构造带上的滑坡无论是内动力作用形成的地震滑坡还是受极端气候变化影响的降雨型滑坡都离不开斜坡的地质结构。特别是在金沙江构造缝合带发育着典型的蛇绿岩带, 它们在热液作用下易形成蚀变软岩或蚀变黏土夹层, 与缝合带斜坡内基性–超基性岩堆积互叠构成的易滑地质结构是导致大型–巨型滑坡形成的重要因素。

3.2.1 蚀变蛇绿岩的物性指标

蚀变岩结构松散、易风化、崩解性强, 岩石强度比原岩显著降低, 是工程性质极差的不良地质体(Del Rodrigo and Hürlimann, 2009; Darmawan et al., 2022)。野外调查发现, 在堆绒通滑坡体前缘及滑床基性–超基性岩的节理裂隙中发育明显的蚀变现象, 其中在堆绒通滑坡前缘(Ⅱ区)处有黏土化蛇绿蚀变岩滑带出露(图 2c、2f), 为浅绿色含砾黏土, 可见明显擦痕及镜面, 含角砾、碎石, 岩性为蛇纹岩、玄武岩。

滑带土富含黏土矿物, 手捏即碎, 主要由蛇纹石、水菱镁矿和绿泥石等亲水性矿物组成(图 5a)。利用 QT-2002 型激光粒度分析仪以及土壤标准试样筛对滑带土进行粒径分析得到粒径分布曲线(图 5b)。为保证实验数据的准确性, 在野外对采集的土样称重后进行分组, 每组 3 个样品, 试验结果为各指标数据平均值, 分别应用烘干法与环刀法测得平均天然含水率为 15.0%, 湿密度为 2.1 g·cm^{-3}, 干密度为 1.8 g·cm^{-3}, 利用液塑限联合测定仪测得样品塑限为 19.9, 液限为 62.4, 塑性指数大于 10, 属高液塑限黏土, 与野外特征相符。其基本物理性质指标见表 2。



(a) 蚀变岩滑带土黏粒XRD定量测试结果 (b) 蚀变岩滑带土粒径分布曲线

图 5 蚀变岩滑带土 X-衍射鉴定与粒径分布曲线

Fig. 5 X-ray diffraction identification and fractional curve of altered rock slip zone soil

(a) XRD quantitative test results of clay particles in altered rock slip zone soil; (b) Fractional curve of altered rock slip zone soil

表 2 黏土化蚀变岩物质组成与滑带土粒度分析

Table 2 Material composition of clay-altered rock and particle size analysis of slip zone soil

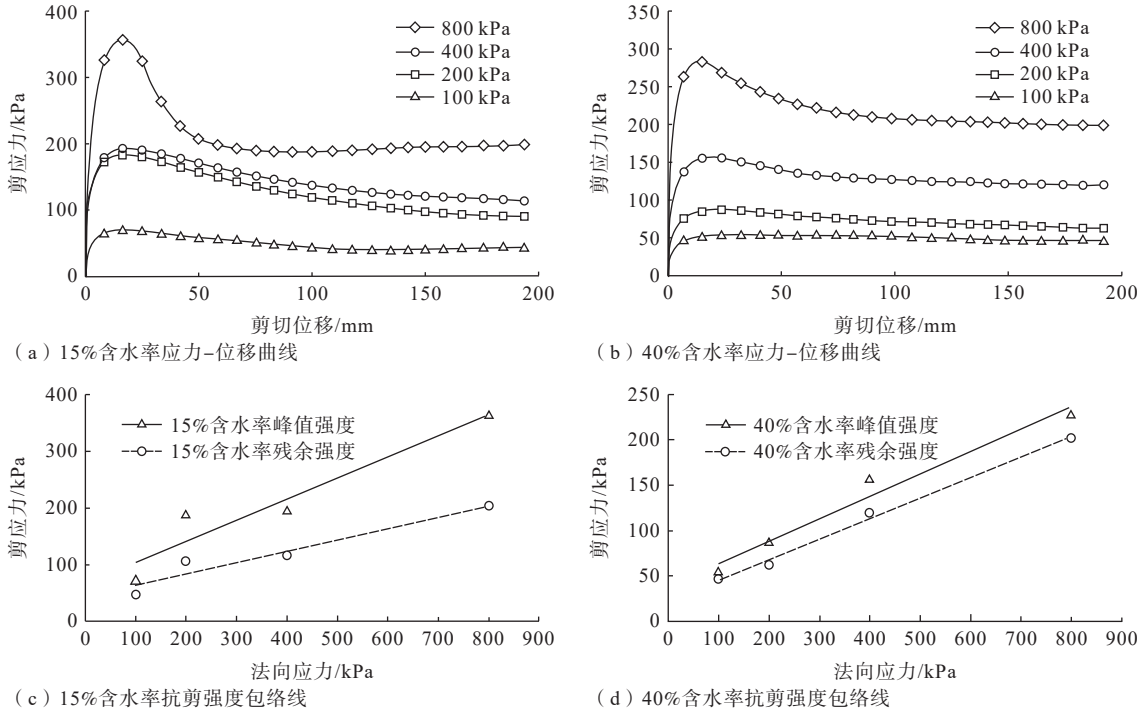
天然含水率%	湿密度/(g·cm^{-3})	干密度/(g·cm^{-3})	塑限(W_P)/%	液限(W_L)/%	塑性指数(I_P)	颗粒级配/%		矿物含量检测结果/%		
						粒径大小/mm	%			
15.0	2.1	1.8	19.9	62.4	42.5	<0.005 mm	16.0	蛇纹石	水菱镁矿	绿泥石
						0.005～0.075 mm	25.3			
						0.075～2 mm	39.0	88	10	2
						>2 mm	19.7			

3.2.2　蚀变蛇绿岩的力学特性

试样采用华北水利水电大学土动力学实验室 ARS-3 型环剪仪，试验样品均取自蚀变蛇绿岩滑带土（图 2f）。试验按照《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019），分别开展了天然（含水率约 15%）和饱和（含水率约 40%）工况下的环剪试验。试样规格为内径 50 mm，外径 100 mm，高 25 mm 的圆柱环形样，试验样品剔除大于 2 mm 的颗粒，每次剪切试验前固结 12 h 至法向沉降稳定，试验剪切速率 0.2 mm/min，单样剪切位移 200 mm。

（1）应力–应变特征分析

如图 6a、6b 所示，相同含水率，法向应力越大，达到峰值所需剪切位移也越大，随含水率升高，不同法向应力下的剪切峰值减小；剪应力可以在较小的位移下迅速达到峰值，随后下降至残余强度，每组剪切试样均表现出较明显的应变软化特征。



（a）15%含水率应力–位移曲线　（b）40%含水率应力–位移曲线

（c）15%含水率抗剪强度包络线　（d）40%含水率抗剪强度包络线

图 6　黏土化蚀变岩应力–位移关系曲线及强度包络线

Fig. 6　Shear stress-displacement relationship curve and strength envelope of clay-altered rock

(a) 15% moisture content stress-displacement curve; (b) 40% moisture content stress-displacement curve; (c) 15% moisture content shear strength envelope; (d) 40% moisture content shear strength envelope

（2）含水率对抗剪强度的影响

滑带土峰值强度与残余强度均随含水率增高而降低，且峰值强度下降值比残余强度大（图 6c、6d）。如在法向应力为 800 kPa 条件下，天然含水率与饱和含水率下峰值强度分别为 364.16 kPa、228.30 kPa，强度降幅约为 37.31%，残余强度分别为 203.31 kPa、201.65 kPa，强度降幅仅为 0.82 %。

含水率增加对黏聚力和内摩擦角的影响程度不同。含水率由 15 % 增至饱和过程中，峰值和残余黏聚力分别由 67.03 kPa、39.78 kPa 降至 43.24 kPa、22.80 kPa，下降幅度达到 35.79%、42.68%，内摩擦角分别由 20.29°、12.73°降至 13.79°、11.32°，下降幅度为 32.04%、11.07%。说明黏聚力受含水率影响较大，这是由于水对土颗粒表面起到一定的润滑作用，使得土颗粒定向排列更为明显，颗粒之间的联结性减弱，导致黏聚力下降更为显著。

3.3　黏土化蚀变岩对滑坡的促滑作用

黏土化蚀变岩对堆绒通滑坡的促滑作用主要体现在强度弱化与结构劣化两方面。

强度弱化：黏土化蚀变岩富含亲水性黏土矿物，小于 0.005 mm 粒径占比可达 16%，属高液塑限黏土，易吸水且水敏性强。当黏土化蚀变岩的含水率由天然状态增至饱和状态时，抗剪强度急剧降低，对黏聚力影响尤为明显，降幅可达 42.68%。吸水后黏土矿物间物理联结强度减弱是黏土化蚀变岩强度弱化的主要原因。

结构劣化：构造缝合带破碎的岩体结构和软弱的黏土化蚀变岩联合控制着滑坡的演化过程。黏土化蚀变岩沿岩体节理裂隙发育，干湿交替作用下易泥化、崩解，促进斜坡内裂隙面的贯通，导致岩体结构劣化（张永双等，2022；李金秋等，2024），斜坡稳定性相应降低，近平行斜坡方向的一组蚀变岩条带构成斜坡的软弱夹层，控制着滑坡的孕育（张永双等，2020），在强降雨、地震等内外影响因素作用下，岩体结构不断劣化，剪切带逐渐贯通，滑坡彻底失稳（Pola et al., 2012; Schaefer et al., 2023）。

4 滑坡堆积体稳定性分析

调查表明，堆绒通滑坡堆积体前缘上部主要由碎石土与大块石组成，结构松散，透水性好，下部为蚀变软岩、蚀变黏土，透水性弱，是致密性良好的隔水层，易构成滑坡复活变形的滑带。尽管断裂活动是堆绒通古滑坡形成的触发因素，但对松散堆积层滑坡体的复活影响较小（王伟等，2006；邵帅等，2021；刘科，2023），且金沙江断裂为晚更新世活动断裂（常昊等，2021），目前活动性相对较弱，因此滑坡堆积体稳定性模拟中不考虑地震工况。

为分析强降雨条件下堆绒通滑坡堆积体的稳定性，根据堆绒通滑坡空间形态，并考虑边界效应，建立数值模型如下：高 1700 m，长 3600 m，宽 10 m。顶面和坡面均采用自由边界约束，四周和底部均采用固定边界约束，模拟计算过程中采用莫尔−库仑准则。据滑坡剖面特征，模型分为滑床、堆积体，并在堆积体内部设置宽约 2 m 的黏土化蚀变岩条带。分别在堆积体中设置 3 个监测点来分析不同工况下滑坡前缘的变形情况（图 7）。结合环剪试验测试结果及工程类比（刘铮等，2020；任三绍等，2021），确定岩土体参数如表 3 所示。

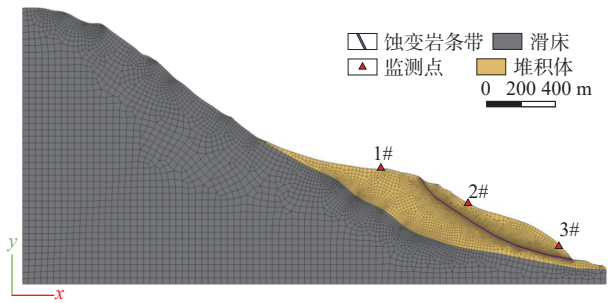


图 7 堆绒通滑坡地质概化模型

Fig. 7 Generalized geological model of the Duirongtong landslide

表 3 岩土体物理力学参数取值表

Table 3 Values of physical and mechanical parameters of rock and soil mass

岩性	杨氏模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)		天然密度/(g·cm^{-3})
			天然	饱和	天然	饱和	
滑坡堆积体	800	0.21	60.00	45.00	35.00	28.00	2.20
滑床	2810	0.20	460.00	400.00	40.00	30.00	2.50
蚀变岩条带	310	0.24	67.03	43.24	20.29	13.79	1.85

4.1 天然工况下滑坡稳定性

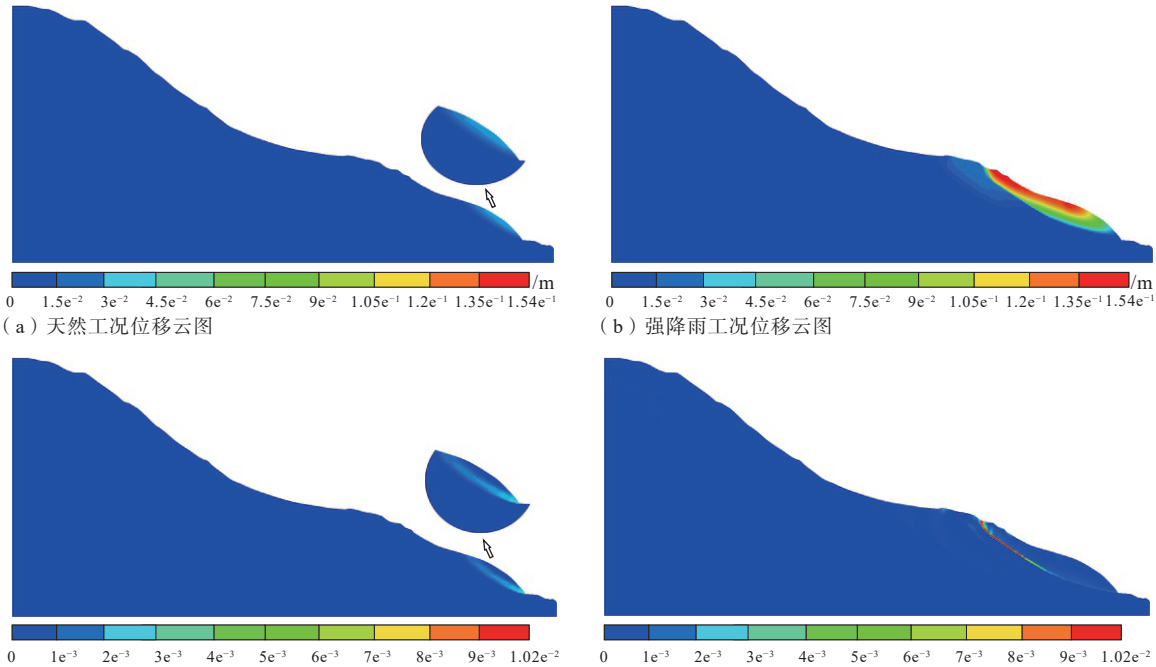
在天然工况下，变形区主要集中在坡脚（图 8a），最大形变量约为 0.03 m，3#监测点形变量大于 1#、2#监测点（图 9a），剪应变增量云图（图 8c）也表明最大变形部位集中于坡脚。基于强度折减法得到天然工况下稳定性系数 *FOS*=1.29，表明在天然工况下的堆绒通滑坡整体变形较小，稳定性良好。

4.2 强降雨工况下滑坡稳定性

由位移云图（图 8b）可见，强降雨工况下最大变形部位集中在 2#监测点处，蚀变岩条带上覆堆积体监测点（2#、3#）变形大，监测点 1#变形相对较小（图 9b），滑坡最大形变量约为 0.15 m，约为天然工况下的 5 倍。剪应变增量云图（图 8b）显示自坡脚处向上剪应变增量值逐渐增大，总体可见一条相对集中的剪切带。该工况下稳定性系数为 *FOS*=1.03。表明在强降雨工况下堆积体前缘变形较大，极有可能形成贯通的滑带并复活滑动。

5 讨论

研究缝合带深切河谷区高陡斜坡稳定性或形成机制时，学者们重点考虑了活动断裂、降雨、人类工程活动等因素（Chen et al., 2018；常昊等，2021；邓建辉等，2022），忽略了缝合带中的特殊软岩——蚀变蛇绿岩的作用。试验表明，蚀变蛇绿岩富含黏土矿物，具有较低的抗剪强度，特别是遇水后强度



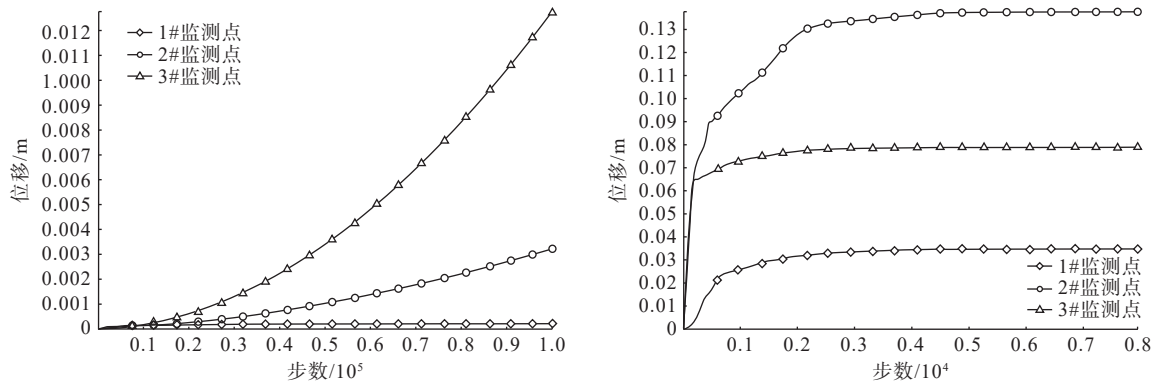
（a）天然工况位移云图　（b）强降雨工况位移云图

（c）天然工况剪应变增量云图　（d）强降雨工况剪应增量变云图

图 8　不同工况下位移云图与应变增量云图

Fig. 8　Displacement cloud images and shear strain increment cloud images for different working conditions

(a) Displacement cloud image for natural condition; (b) Displacement cloud image for heavy rainfall condition; (c) Shear strain increment cloud image for natural condition; (d) Shear strain increment cloud image for heavy rainfall condition



（a）天然工况下监测点位移曲线　（b）强降雨工况下监测点位移曲线

图 9　不同工况下监测点位移曲线

Fig. 9　Displacement curves of monitoring points for different working conditions

(a) Displacement curve of monitoring points under natural condition; (b) Displacement curve of monitoring point under heavy rainfall condition

急剧下降(李金秋等, 2024)，当斜坡中发育蚀变蛇绿岩时，往往构成易滑地质结构，对滑坡的形成演化具有重要的促进作用(张永双等, 2022)。因此，在开展构造缝合带区域滑坡易发性评价时，可基于地质背景分析、高光谱遥感、野外调查等手段对蚀变信息进行提取(白杨林等, 2023)，厘清蚀变蛇绿岩的分布范围，并将蚀变蛇绿岩作为重要的指标因子考虑，在进行单体滑坡稳定性评价时，建议将蚀变蛇绿岩条带作为重要影响因素考虑。

此次野外调查发现金沙江上游基性-超基性岩广泛出露(玄武岩、辉绿岩、蛇纹岩、绿片岩等)，且该区域发育有大量古滑坡堆积体(陈剑平和李会中, 2016)，无论这些滑坡由何种因素触发，在堆积体中必然存在蚀变蛇绿岩条带或蚀变黏土夹层，它们具有很强的水敏性，在降雨、库水位等作用下易发生复活。因此，在区内开展工程建设，尤其是水电开发时，应特别关注古滑坡堆积体中的蚀变蛇绿岩带，及时做好防水措施，避免水岩作用加剧古滑

坡复活变形。

6 结论

基于现场调查、无人机航测、试验测试和数值模拟方法，剖析了蚀变蛇绿岩型滑坡的发育特征和形成机制，分析了天然与强降雨工况下蚀变蛇绿岩条带对滑坡堆积体稳定性的影响。得到以下主要结论和认识：

（1）堆绒通滑坡是形成于晚更新世早期的巨型滑坡，滑坡岩性以金沙江蛇绿岩套的基性−超基性岩为主，沿节理裂隙内部充填大量黏土化蚀变蛇绿岩条带，两者堆积互叠构成堆绒通滑坡的重要易滑地质结构。

（2）蚀变蛇绿岩是物理力学性质较差的特殊岩土体，富含大量亲水性黏土矿物，遇水抗剪强度急剧降低，应变软化效应明显，劣化岩体结构，促进裂隙面贯通，对堆绒通滑坡起着重要促滑作用。

（3）模拟结果表明，堆绒通滑坡体在天然工况下稳定性良好，但在强降雨条件下，稳定性显著降低，滑坡前缘堆积体变形明显，堆积体内部形成剪应变集中带，极有可能发生复活滑动，应采取相应的防范措施。

References

BAI Y J, NI H Y, GE H, 2019. Advances in research on the geohazard effect of active faults on the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 25(6): 1116-1128. (in Chinese with English abstract)

BAI Y L, LV F J, SU H B, et al., 2023. Review of hyperspectral remote sensing altered mineral information extraction[J]. Remote Sensing Information, 38(1): 1-10. (in Chinese with English abstract)

BAO Y D, CHEN J P, SU L J, et al., 2023. A novel numerical approach for rock slide blocking river based on the CEFDEM model: a case study from the Samaoding paleolandslide blocking river event[J]. Engineering Geology, 312: 106949.

CHANG H, CHANG Z F, Liu C W, 2021. The relationship between activity of Jinsha River fault zone and large-scale landslides: a case study of the section between Narong and Rongxue along the Jinsha River[J]. Seismology and Geology, 43(6): 1435-1458. (in Chinese with English abstract)

CHEN J, ZHOU W, CUI Z J, et al., 2018. Formation process of a large paleo-landslide-dammed lake at Xuelongnang in the upper Jinsha river, SE Tibetan Plateau: constraints from OSL and ^{14}C dating[J]. Landslides, 15(12): 2399-2412.

CHEN J P, LI H Z, 2016. Genetic mechanism and disasters features of complicated structural rock mass along the rapidly uplift section at the upstream of Jinsha River[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 46(4): 1153-1167. (in Chinese with English abstract)

DARMAWAN H, TROLL V R, WALTER T R, et al., 2022. Hidden mechanical weaknesses within lava domes provided by buried high-porosity hydrothermal alteration zones[J]. Scientific Reports, 12(1): 3202.

DEL RODRIGO P, HÜRLIMANN M, 2009. The decrease in the shear strength of volcanic materials with argillic hydrothermal alteration, insights from the summit region of Teide stratovolcano, Tenerife[J]. Engineering Geology, 104(1-2): 135-143.

DENG J H, GAO Y J, YU Z Q, et al., 2019. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China[J]. Advanced Engineering Sciences, 51(1): 9-16. (in Chinese with English abstract)

DENG J H, LI H, DAI F C, et al., 2022. A gigantic paleo-dammed lake in the upper reaches of Jinsha River and its relevant issues[J]. Advanced Engineering Sciences, 54(6): 75-84. (in Chinese with English abstract)

GAO Y, LI B, FENG Z, et al., 2017. Global climate change and geological disaster response analysis[J]. Journal of Geomechanics, 23(1): 65-77. (in Chinese with English abstract)

HEAP M J, BAUMANN T S, ROSAS-CARBAJAL M, et al., 2021. Alteration-induced volcano instability at La Soufrière de Guadeloupe (eastern Caribbean)[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(8): e2021JB022514.

LI J Q, ZHANG Y S, LI X, et al., 2023. Identification of clayey altered ophiolite in the Nujiang tectonic belt and new understanding of its impacts on engineering stability[J]. China Geology, 6(4): 754-758.

LI J Q, ZHANG Y S, REN S S, et al., 2024. Catastrophic mechanical behavior of clay-altered rock in the Baige landslide upstream of the Jinsha River[J]. Advanced Engineering Sciences, 56(3): 72-82. (in Chinese with English abstract)

LIU K, ZHOU X P, SHI Y, et al, 2023. Basic characteristics and mechanisms of the giant Shaweitaizi paleo-landslide dammed the Jinsha River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 54(8): 167-177.

LIU Z, LI B, HE K, et al., 2020. An analysis of dynamic response characteristics of the Yigong landslide in Tibet under strong earthquake[J]. Journal of Geomechanics, 26(4): 471-480. (in Chinese with English abstract)

PAN G T, REN F, YIN F G, et al., 2020. Key zones of Oceanic Plate geology and Sichuan-Tibet railway project[J]. Earth Science, 45(7): 2293-2304. (in Chinese with English abstract)

POLA A, CROSTA G, FUSI N, et al., 2012. Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks[J]. Tectonophysics, 566-557: 67-86.

REN S S, ZHANG Y S, XU N X, et al. , 2021. Mobilized strength of sliding zone soils with gravels in reactivated landslides[J]. Rock and Soil Mechanics, 42(3): 863-873, 881. (in Chinese with English abstract)

REN S S, ZHANG Y S, LI J Q, et al., 2023. A new type of sliding zone soil and its severe effect on the formation of giant landslides in the Jinsha River tectonic suture zone, China[J]. Natural Hazards, 117(2): 1847-1868.

SCHAEFER L N, KERESZTURI G, KENNEDY B M, et al., 2023. Characterizing lithological, weathering, and hydrothermal alteration influences on volcanic rock properties via spectroscopy and laboratory testing: a case

study of Mount Ruapehu volcano, New Zealand[J]. Bulletin of Volcanology, 85(8): 43.

SHAO S, SHAO S J, LI N, et al., 2021. Dynamic centrifugal model tests on seismic subsidence of loess slopes under earthquake action[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 43(2): 245-253. (in Chinese with English abstract)

TANG Y, QIN Y D, GONG X D, et al., 2022. Determination of material composition of Jinshajiang tectonic mélange belt in Gonjo-Baiyu area, eastern Tibet[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(2): 260-278. (in Chinese with English abstract)

TONG Peng, WU Shangqian, XIE Meng, et al, 2023. Remote Sensing Interpretation and Risk Assessment of Landslide Hazards in Newly Built High-speed Railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 49(6): 56-63.

WANG W, WANG Z L, LI Z Q, et al., 2006. Study of effect of rock softness-hardness on evolution of 1-D stress waves[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 33(1): 11-15. (in Chinese with English abstract)

WU X G, CAI C X, 1992. The neotectonic activity along the central segment of Jinshajiang fault zone and the epicentral determination of Batang M6.5 earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 15(4): 401-410. (in Chinese with English abstract)

XU Q, ZHENG G, LI W L, et al., 2018. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige village on Octorber 11 and November 3, 2018[J]. Journal of Engineering Geology, 26(6): 1534-1551. (in Chinese with English abstract)

YOUSUFI A, AHMADI H, BEKBOTAYEVA A, et al., 2023. Integration of remote sensing and field data in ophiolite investigations: a case study of Logar ophiolite complex, SE Afghanistan[J]. Minerals, 13(12): 234.

ZHANG W, WANG J, CHEN J P, et al., 2022. Mass-wasting-inferred dramatic variability of 130, 000-year Indian summer monsoon intensity from deposits in the Southeast Tibetan Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 49(6): e2021GL097301.

ZHANG Y S, BA R J, REN S S, et al., 2020. An analysis of geo-mechanism of the Baige landslide in Jinsha River, Tibet[J]. Geology in China, 47(6): 1637-1645. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y S, LI J Q, REN S S, et al., 2022. Development characteristics of clayey altered rocks in the Sichuan-Tibet Traffic corridor and their promotion to large-scale landslides[J]. Earth Science, 47(6): 1945-1956. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y S, REN S S, LI J Q, et al., 2023. Prone sliding geo-structure and high-position initiating mechanism of Duolasi landslide in Nu River tectonic mélange belt[J]. Earth Science, 48(12): 4668-4679. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y S, WANG D B, LI X, et al., 2024. Research on hazard prone geological genes and major engineering geological problems in tectonic mélange belts of Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 98(3): 992-1005. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

白杨林，吕凤军，苏鸿博，等，2023. 高光谱遥感蚀变矿物信息提取研究综述[J]. 遥感信息，38(1)：1-10.

白永健，倪化勇，葛华，2019. 青藏高原东南缘活动断裂地质灾害效应研究现状[J]. 地质力学学报，25(6)：1116-1128.

常昊，常祖峰，刘昌伟，2021. 金沙江断裂带活动与大型滑坡群的关系研究：以金沙江拿荣—绒学段为例[J]. 地震地质，43(6)：1435-1458.

陈剑平，李会中，2016. 金沙江上游快速隆升河段复杂结构岩体灾变特征与机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，46(4)：1153-1167.

邓建辉，高云建，余志球，等，2019. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析[J]. 工程科学与技术，51(1)：9-16.

邓建辉，李化，戴福初，等，2022. 金沙江上游超大古堰塞湖及其相关问题[J]. 工程科学与技术，54(6)：75-84.

高杨，李滨，冯振，等，2017. 全球气候变化与地质灾害响应分析[J]. 地质力学学报，23(1)：65-77.

李金秋，张永双，任三绍，等，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[J]. 工程科学与技术，56(3)：72-82.

刘科，周小棚，施炎，等，2023. 金沙江杀威台子巨型堵江古滑坡基本特征与成因机理研究[J]. 水利水电技术(中英文)，54(8)：167-177.

刘铮，李滨，贺凯，等，2020. 地震作用下西藏易贡滑坡动力响应特征分析[J]. 地质力学学报，26(4)：471-480.

潘桂棠，任飞，尹福光，等，2020. 洋板块地质与川藏铁路工程地质关键区带[J]. 地球科学，45(7)：2293-2304.

任三绍，张永双，徐能雄，等，2021. 含砾滑带土复活启动强度研究[J]. 岩土力学，42(3)：863-873，881.

邵帅，邵生俊，李宁，等，2021. 地震作用下黄土边坡震陷破坏的动力离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报，43(2)：245-253.

唐渊，秦雅东，巩小栋，等，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[J]. 沉积与特提斯地质，42(2)：260-278.

童鹏，伍尚前，谢猛，等，2023. 新建高速铁路滑坡隐患遥感解译及风险评估[J]. 铁道勘察，49(6)：56-63.

王伟，王志亮，李振强，2006. 岩体软硬度对一维应力波演化影响研究[J]. 水文地质工程地质，33(1)：11-15.

伍先国，蔡长星，1992. 金沙江断裂带新活动和巴塘6.5级地震震中的确定[J]. 地震研究，15(4)：401-410.

许强，郑光，李为乐，等，2018. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报，26(6)：1534-1551.

张永双，巴仁基，任三绍，等，2020. 中国西藏金沙江白格滑坡的地质成因分析[J]. 中国地质，47(6)：1637-1645.

张永双，李金秋，任三绍，等，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[J]. 地球科学，47(6)：1945-1956.

张永双，任三绍，李金秋，等，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[J]. 地球科学，48(12)：4668-4679.

张永双，王冬兵，李雪，等，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[J]. 地质学报，98(3)：992-1005.