

西藏澜沧江流域察雅县城滑坡群成因及现状稳定性

田尤^{1,2}, 陈龙^{1,2}, 黄海^{1,2}, 高波^{1,2}, 张佳佳^{1,2}

TIAN You^{1,2}, CHEN Long^{1,2}, HUANG Hai^{1,2}, GAO Bo^{1,2}, ZHANG Jiajia^{1,2}

1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734;

2. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 四川 成都 611734

1. Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological sciences, Chengdu 611734, Sichuan, China;

2. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, China Geological Survey, Chengdu 611734, Sichuan, China

摘要:地球内外动力耦合叠加人类工程活动下的大型滑坡灾害是青藏高原工程建设面临的工程地质问题之一。针对在澜沧江流域察雅县城南侧斜坡新发现的9处大型—特大型滑坡,采取野外调查、试验测试和数值计算,分析了滑坡的特征、成因和现状稳定性。结果表明:①察雅县城滑坡具有规模大、切割深、地形阻止系数大等特征,滑坡堆积体现状具有多期蠕滑变形,表现为牵引式滑移的变形破坏特点,再次活动主要与降雨、河流侵蚀、人类工程活动等因素有关;②综合滑坡的发育特征、运动特征、物质结构与组成、断层与历史地震4个方面,初步判断察雅县城滑坡的诱发因素为内动力地质作用,为历史地震滑坡;③古妥尔滑坡堆积体在天然状态下处于基本稳定—稳定状态,在强降雨状态下滑坡前缘局部或整体处于欠稳定状态,较易—易发生滑动。新发现的大型—特大型滑坡拓宽了青藏高原“三江”地区地震滑坡的分布范围,对研究昌都及周边地区的地震历史、断裂活动性、地貌形成演化等方面提供了重要的佐证资料,滑坡堆积体现状稳定性分析结果可为县城的扩建及地质灾害风险管控提供一些参考。

关键词:西藏察雅县;大型—特大型滑坡;地震滑坡;滑坡稳定性

中图分类号:P642.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)12-2034-09

Tian Y, Chen L, Huang H, Gao B, Zhang J J. Origin and stability of landslides in Chaya County, Lancang River Basin, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2034–2042

Abstract: Large-scale landslide disasters under the coupling of internal and external dynamics of the earth and human engineering activities are one of the engineering geological problems faced by major engineering constructions on the Qinghai-Tibet Plateau. Based on the field investigation, experimental test and numerical calculation of the newly discovered 9 large-extra large landslides on the southern slope of Chaya County in the Lancang River Region, the characteristics, causes and current stability of the landslides were analyzed. The results show that the Chaya landslide has the characteristics of large scale, deep cutting, and large topographic blocking coefficient; the landslide accumulation is represented by multi-stage creep deformation characterized by traction slip; and the deformation is mainly related to factors such as rainfall, river erosion and human engineering activities. The integration of the development characteristics, movement features, material structure and composition, faults and historical earthquakes of the landslides indicates that the inducing factor of the landslide in Chaya County is internal dynamic earthquake action, and it is a historical earthquake landslide. The Guttor landslide accumulation body is basically stable or stable in its natural state, and the front edge of the landslide is in a partially or overall under-stable state under heavy rainfall conditions, which is relatively easy to slip. The newly discovered large-extra-large ancient landslide provides important supporting information for the study of the earthquake history, fault activity and geomorphological evolution

收稿日期: 2021-06-15; 修订日期: 2021-11-23

资助项目: 中国地质调查局项目《藏东昌都地区城镇灾害地质调查》(编号: DD20190644)、第二次青藏高原综合科学考察研究(编号: 2019QZKK0903)

作者简介: 田尤(1991-), 男, 硕士, 工程师, 从事地质灾害调查与评价研究。E-mail: tyou@mail.cgs.gov.cn

of Changdu and surrounding areas. The evaluation results of current stability of landslide accumulations can provide some scientific basis for the expansion of the county and the risk management as well as control of geological disasters.

Key words: Chaya County, Tibet; large-extra large landslide; seismic landslide; landslide stability

地球内动力与大型滑坡的关系一直是国内外研究的热点^[1-2]。众多学者从不同尺度进行了研究,区域上发现先存地质构造对滑坡的形成和发展有重要影响^[3-4],不同程度地控制着滑坡的发育程度和分布规律^[5-7],绝大多数巨型—大型滑坡紧邻断裂上盘发育^[8]。区段上发现,河谷岸坡附近的断裂对谷坡应力的传递有明显的阻隔和分异作用^[9]。对于单体滑坡,地球内动力都直接或间接影响滑坡的形成和演化^[10-11]。

一般而言,极端滑坡事件绝大部分与地震断裂活动有关^[12],地震滑坡具有发生范围广、密度大、成群成带性等空间分布特征^[13-15]。滑坡堆积体主要由无分选、无磨圆的大小碎石堆积而成^[16],滑床一般不具连续完整的滑面,无明显剪出口,呈现“尖点突起”或“边缘突起”^[17],总斜率和地形阻止系数均较大^[18]。

近年,笔者在西藏昌都地区开展地质灾害调查研究时,发现澜沧江流域察雅县城南侧斜坡发育大量大型—特大型滑坡。这些滑坡特点相近,在澜沧江流域昌都段是非常特殊的滑坡。察雅县城作为藏东南“三江地区”的重要城镇之一,随着国家乡村振兴战略的实施,县城扩张将是未来城镇发展的必然趋势。人类工程活动下的大型滑坡复活是青藏高原工程建设面临的重要工程地质问题之一。本文针对澜沧江流域察雅县城南侧斜坡新发现的9处大型—特大型滑坡,采取野外调查、试验测试和数值计算方法,分析滑坡的特征、成因和现状稳定性,为研究昌都及周边地区的地震历史、断裂活动性、地貌形成演化等提供了重要的基础资料,对察雅县城扩张有重要的防灾减灾参考价值。

1 地质背景

察雅县城位于西藏自治区昌都市东南约50 km处,地势整体北高南低,澜沧江一级支流麦曲从县城自东向西通过,主要地貌类型为构造—侵蚀高山地貌。

根据潘桂棠等^[19]对中国大地构造单元的划分

方案,其大地构造位置隶属于西藏—三江造山系三江弧盆系昌都—兰坪双向弧后前陆盆地。西藏昌都盆地夹于金沙江结合带和澜沧江结合带之间(图1)。澜沧江断裂带分支断层从县城通过(NW—SE方向),县城南东侧见断层面,产状 $223^{\circ}\sim 250^{\circ}\angle 61^{\circ}\sim 73^{\circ}$,断层性质为逆冲断层。断层上盘为上三叠统夺盖拉组(T_3d),下盘为下侏罗统汪布组(J_1w)(图1)。该断层破碎带宽200~500 m,由多条次级断层组成。根据已有研究成果^[23-24],澜沧江断裂带北段为右旋逆冲活动断裂。

研究区出露的地层由老至新依次为上三叠统夺盖拉组石英砂岩与页岩、下侏罗统汪布组石英细砂岩与泥页岩、中侏罗统东大桥组(J_2d)泥质粉砂岩与石英细砂岩。地层整体走向NE—SW向,倾角多变,一般为 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。第四系分布在河谷区,主要为松散的冲积、洪积(Q_h^{al})砾石层。滑坡滑动区发育在下侏罗统汪布组与上三叠统夺盖拉组中。

昌都及周边地区处于昌都地震区^[21],历史上曾发生多次地震(图1-a)。1950年以来发生震级 $M_s\geq 5.0$ 的地震5次,距今记录较完整且破坏程度较大的地震为1979年的 $M_s 6.0$ 级地震。秦四清等^[21]预测,区内断裂有发生 $M_s\geq 6.2$ 级地震的发震潜力,有强震发生的可能性。

研究区属于高原温带半干旱季风型气候,受纬度海拔高度和地理位置的影响,气温垂直变化明显,气温偏低,日温差较大。多年平均降雨量为488 mm,降雨集中在3—10月^[25]。

2 察雅县城滑坡特征

2.1 滑坡群特征

2.1.1 基本特征

察雅县城滑坡群位于西藏自治区昌都市察雅县城南侧,麦曲左岸斜坡之上,由9个大型—特大型滑坡组成。根据野外调查,该滑坡群呈条带状分布于县城南侧,各滑坡平面形态表现为喇叭形、长舌形、不规则形等(图1-b)。各滑坡基本特征见表1。

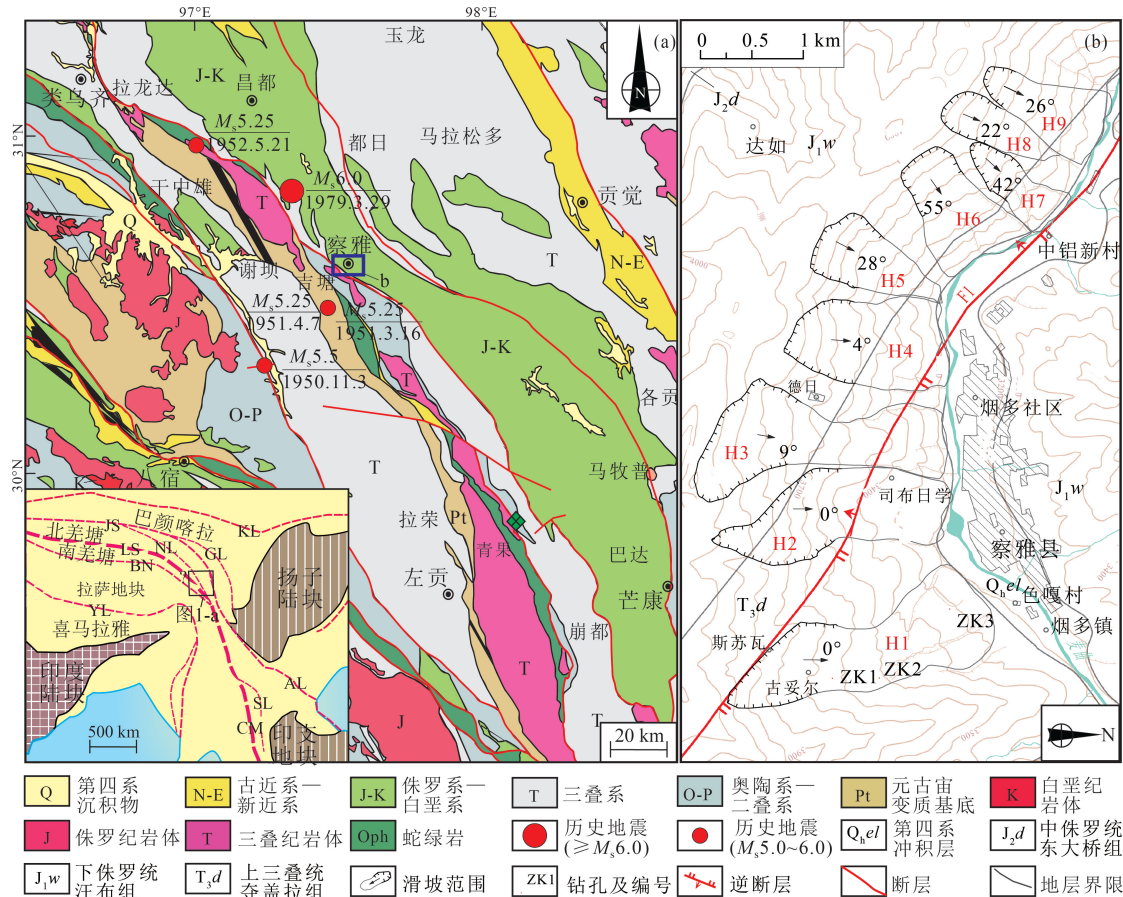


图1 西藏昌都地区地质地震简图(a,据参考文献[20]修改)及研究区滑坡分布图(b)
(历史地震数据据参考文献[21-22])

Fig. 1 Geological and history earthquake distribution of Changdu (a) and landslide distribution of the study area (b)
KL—阿尼玛卿—昆仑结合带;GL—甘孜—理塘结合带;JS—金沙江结合带;AL—哀牢山结合带;NL—北澜沧江结合带;SL—南澜沧江结合带;LS—龙木错—双湖结合带;CM—昌宁—孟连结合带;BN—班公湖—怒江结合带;YL—印度河—雅鲁藏布江结合带

表1 察雅县城滑坡群各滑坡基本特征

Table 1 Basic characteristics of the landslides in Chaya County

编号	滑坡名称	滑动方向	最大滑移距离/m	前后缘最大高差/m	质心高度/m	长×宽/m	长宽比	堆积体平均厚度/m	体积/m ³	平均坡度	后缘距分水岭距离/m	地形阻止系数
H1	古妥尔滑坡	0°	2200	880	490	2200×500	3.7	30	2300×10 ⁴	9°	280	0.22
H2	司布日学滑坡	0°	2300	960	310	1200×650	1.8	35	2200×10 ⁴	8°	310	0.23
H3	德日东滑坡	9°	2400	1040	550	2100×500	4.2	40	3360×10 ⁴	25°	250	0.30
H4	德日西滑坡	4°	1600	820	430	1070×850	1.3	35	2400×10 ⁴	31°	610	0.39
H5	察雅县中学南侧滑坡	28°	1340	760	370	1000×500	2.0	35	1130×10 ⁴	30°	150	0.42
H6	中铝新村南东侧滑坡	55°	1170	680	380	630×690	0.9	20	600×10 ⁴	28°	370	0.42
H7	中铝新村南西侧1#滑坡	42°	1070	560	320	900×325	2.8	40	880×10 ⁴	29°	630	0.36
H8	中铝新村南西侧2#滑坡	22°	1200	660	390	850×375	2.3	30	620×10 ⁴	23°	120	0.39
H9	中铝新村南西侧3#滑坡	26°	1300	720	330	1100×510	2.2	40	1900×10 ⁴	29°	250	0.42

察雅县城滑坡群各滑坡体积均在 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上,多数超过 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡体表面坡度为 $8^\circ \sim 31^\circ$,长数百米至数千米不等,长宽比为 $0.9 \sim 3.7$ 。滑坡滑移距离 $1.0 \sim 2.6 \text{ km}$,后缘与前缘高差 $560 \sim 1040 \text{ m}$ 。各滑坡圈椅状地貌特征较清楚,后壁高陡(图2),滑坡后缘顶部均接近于斜坡分水岭。侧壁遭后期侵蚀作用明显,常以冲沟为界,各滑坡滑动方向为 N—NE 向。

总体看,察雅县城滑坡群内各滑坡具有规模巨大、高位发育、切割深、滑动距离远、地形阻止系数较大等共同基本特征。

2.1.2 滑坡体变形破坏特点

目前,滑坡群中的古妥尔滑坡、司布日学滑坡、中铝新村南东侧滑坡、中铝新村南西侧 3#滑坡体变形明显。尽管每个变形体各有特点,但仍然具有部分共同特征。

(1) 各滑坡变形主要集中在滑体中下部

从已有的几个变形体分布的空间位置看,各滑坡变形体主要发生在滑坡体的中下部,而滑坡体上部几乎未发现明显的变形滑动迹象。强烈变形区主要分布在滑坡体前缘麦曲河谷岸坡,以及滑体中下部堆积体中深切深沟的岸坡(图3)。

(2) 滑坡体后期变形表现为牵引式滑移,具有蠕滑变形的特点

各滑坡体变形的范围虽然不尽相同,但各滑坡体上发育的变形体一般均表现为前缘先变形滑动,而后逐渐往后部发展,表现为牵引式滑移特征。中铝新村南西侧 3#滑坡强变形体平面上表现为舌型,显示其蠕滑变形的特点(图4)。

(3) 普遍具有多期次的变形历史

察雅县城滑坡群现今变形表现为古滑坡新活动,且普遍具有多期次的活动历史。如古妥尔滑坡(H1)滑坡体上现今至少经历过2期局部滑移,司布日学滑坡(H2)、中铝新村南西侧 3#滑坡(H9)在河流侧蚀作用下前缘发生多次坍塌和滑移变形(图3)。

2.2 古妥尔滑坡特征

2.2.1 基本特征

滑坡平面形态呈不规则形,具较明显的圈椅状地貌(图5)。滑源区位于斜坡 $3700 \sim 4050 \text{ m}$ 高程之间,堆积区前缘堆积至高程 3170 m 处,相对高差

约 880 m 。滑移距离约 2.2 km ,堆积区坡度 $10^\circ \sim 18^\circ$,主滑方向 0° ,滑动后堆积体方向发生偏转。滑坡堆积体长 2200 m ,平均宽约 500 m ,平均厚度约 30 m ,方量约 $2300 \times 10^4 \text{ m}^3$,属特大型滑坡。滑坡后缘陡坎坡度约 75° ,高约 90 m ,延伸长约 1000 m ,侧壁遭侵蚀改造,现今不完整。

2.2.2 滑坡体结构组成

根据野外调查和钻探揭示(图6),滑坡堆积体主要由第四系残坡积碎块石土、下侏罗统汪布组(J_1w)紫红色泥质粉砂岩、粉砂岩、泥岩团块组成,局部夹上三叠统夺盖拉组灰绿色泥质粉砂岩团块,具混杂堆积特征,结构较松散。滑床为下侏罗统汪布组泥质粉砂岩、泥岩,滑坡体东侧见基岩产状 $54^\circ \sim 85^\circ \angle 35^\circ \sim 45^\circ$,斜坡结构为斜顺向坡和横向坡。滑坡主滑面(带)剖面形态呈近直线型-阶梯型(图7)。

2.2.3 滑坡体变形特征

依据野外调查和无人机测绘,滑坡体现今主要可分为2个变形区。

(1) 变形区 I

受后期流水作用影响,在滑坡体内形成4条主要的冲沟,沟深数米至数十米不等,两侧沟岸高陡。变形区 I 主要沿中部靠东侧沟谷两岸发生,变形方式表现为沟岸坍塌变形,主要发育4处规模较大的坍塌变形区,其分布见图8。

(2) 变形区 II

该变形区位于滑坡体前缘,为强烈变形区,表现为牵引式滑移特征。变形区边界清晰,左侧以冲沟为边界,右侧以变形陡坎为界,陡坎高约 40 m 。变形区滑动后形成明显后壁,高 $20 \sim 40 \text{ m}$,延伸约 340 m 。两侧边界和后缘陡坎基本贯通连续,形成圈椅状地形。变形区 II 可分为3个次级变形区,其分布见图8。

从古妥尔滑坡体变形特征看,变形破坏方式以牵引式为主。变形区 I 主要受控于沟谷内流水的侵蚀作用;变形区 II 主要是由于前缘临空,在水的作用下岩土体饱和和导致的变形。总体上,古妥尔滑坡体的后期变形破坏主要与水的作用密切相关。一方面,水体的入渗使地下水位线增高,浮托力增大,且重度增大,下滑力增大;另一方面,降雨入渗使得岩土体饱和,强度降低,阻滑力降低。



图2 察雅县城滑坡群滑坡后壁特征

Fig. 2 Landslide cliff characteristics of landslides in Chaya county

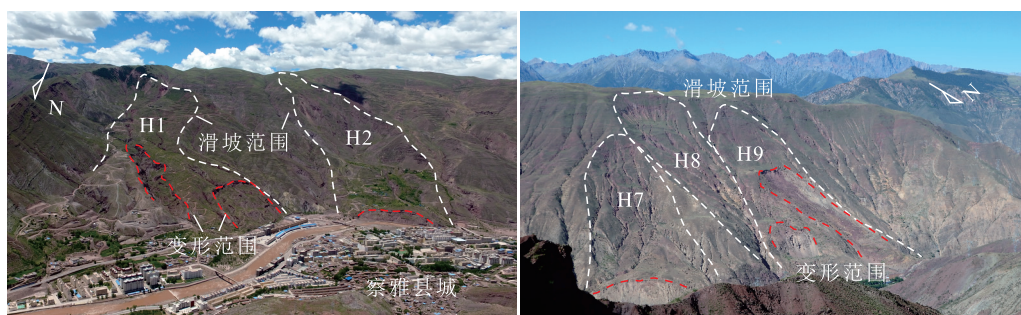


图3 察雅县城滑坡全貌及前缘变形

Fig. 3 Panorama and deformation of the landslides in Chaya County

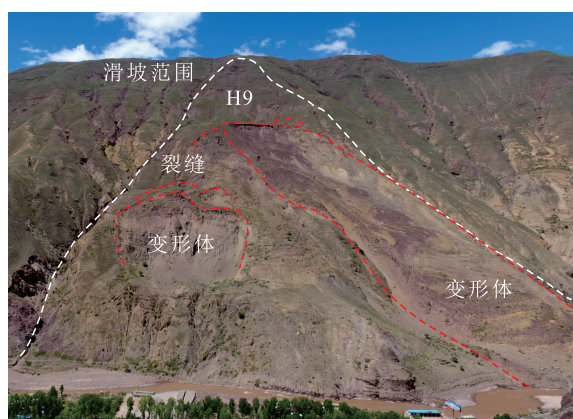


图4 中铝新村南西侧3#滑坡滑坡体蠕滑变形

Fig. 4 Creep deformation of the No.3 landslide on the southwest side of Zhongluxincun



图5 古妥尔滑坡全貌

Fig. 5 Overall view of Gutuoer landslide

a、b—滑坡后壁;c—滑坡体内冲沟;d—潜出水露

3 察雅县城滑坡成因

基于滑坡的基本特征和所处的地质背景,分析察雅县城滑坡群的成因。

(1) 发育特征方面

从察雅县城南侧滑坡总体特征看,各滑坡具有

典型的成群分布、密度大、滑动方向相对集中的特征(图1-b)。这与前人研究得出的地震滑坡具有空间上集中发育、扎堆群发^[13-15]、密度大^[14],主滑方向相对统一^[15],形态主要为喇叭形、长舌形、不规则形^[15]等空间分布特征类似。

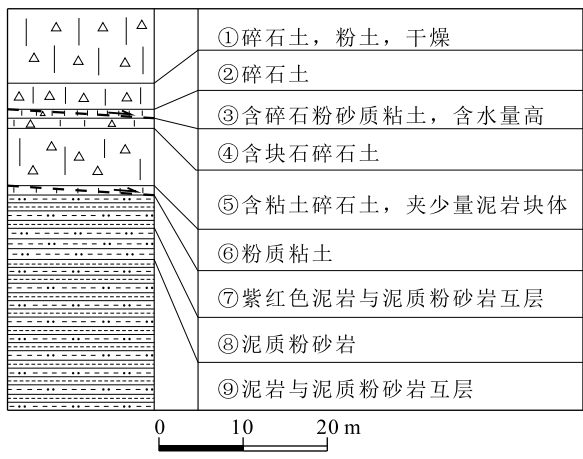


图 6 古妥尔滑坡体中部钻孔(ZK1)柱状图

Fig. 6 Column of bore hole ZK1 in Gutuoer middle landslide

察雅县城各滑坡规模巨大,普遍具有滑面埋深大、滑动位置高、滑移距离远等特征(表 1)。这与地震滑坡多具有高位滑坡^[26]、滑速快、滑距远^[27]等发育特征相近。各滑坡发育处斜坡坡度为 8°~31°(表 1),发育部位几乎不受地形地貌条件的限制。这些发育特征表明,滑坡的诱发因素为内动力作用的可能性较大。

(2) 滑坡的运动特征方面

滑坡的运动特征、运动距离不仅受滑坡规模及总能量的控制,还与滑坡的动力诱发机制、地形阻止等因素有关^[18]。对于不同规模等级的地震与非地震滑坡,地形阻止系数特征差异较大^[18]。根据樊晓—^[18]给定的公式计算察雅县城各滑坡的地形阻

止系数(表 1),结果(图 9)显示,察雅滑坡群各滑坡地形阻止系数介于 0.22~0.42 之间,平均值为 0.35。其中 10⁶级的滑坡有 3 个,地形阻止系数介于 0.36~0.42 之间,平均值为 0.39;10⁷级的滑坡有 6 个,地形阻止系数介于 0.22~0.42 之间,平均值为 0.33。这些滑坡的地形阻止系数特征与已有地震滑坡地形阻止系数特征相近,与非地震滑坡特征差异较大,佐证了滑坡的诱发因素为地震诱发的可能性较大。

(3) 物质结构与组成方面

野外调查结果表明,察雅滑坡滑体物质组成主要为碎石土和泥质岩团块,含少量粉土和粉质粘土,为混杂的滑坡堆积体。这与已有研究地震滑坡堆积体主要为无分选、无磨圆的大小碎石堆积而成^[16]的特征相近。

另外,滑坡群各滑床为下侏罗统汪布组和上三叠统夺盖拉组,通过野外实测滑坡滑源区地层产状,运用 ArcGIS 绘制斜坡结构图(图 10),显示滑坡滑源区斜坡结构主要为逆向坡、横向坡和斜逆向坡。据此推断,发育于以逆向—横向斜坡结构为主的斜坡,单靠外动力作用很难形成规模如此巨大的滑坡,表明为内动力作用诱发的可能性极大。

(4) 滑坡区断层和历史地震方面

昌都及周边地区历史上有多次强震爆发历史,如 1979 年发生在昌都附近(北纬 30.9°、东经 97.4°)的 M_s 6.0 级地震、1951 年发生在察雅附近(北纬 30.5°、东经 97.5°)的 M_s 5.25 级地震等(图 1-a)。据研究,昌都及周边地区亦属于强震区^[22, 25]。同时,察雅县城滑坡分布在断层破碎带和影响带内,滑坡的分

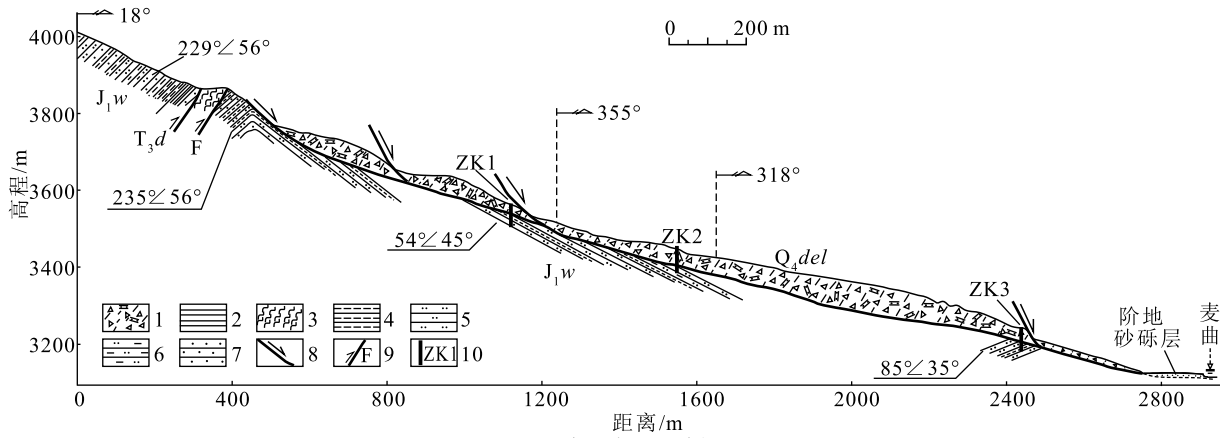


图 7 古妥尔滑坡剖面

Fig. 7 Profile of Gutuoer landslide

1—含粘土碎石土;2—页岩;3—断层破碎带;4—泥岩;5—粉砂岩;6—泥质粉砂岩;7—砂岩;8—滑面;9—逆冲断层;10—钻孔及编号;
Q₄del—第四系滑坡堆积;J₁w—下侏罗统汪布组;T₃d—上三叠统夺盖拉组

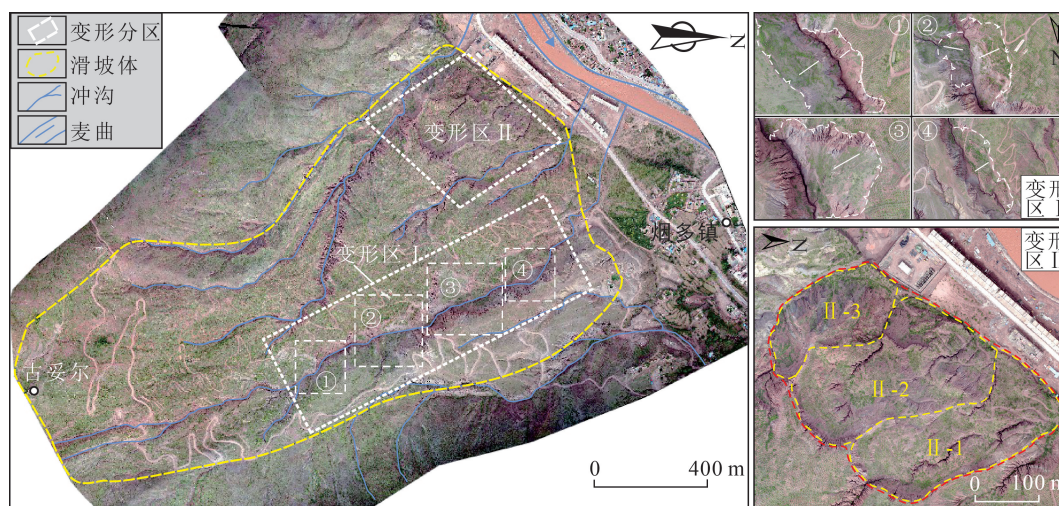


图8 古妥尔滑坡变形分区

Fig. 8 Deformation zoning of Gutuoer landslide

布与断层密切相关。从断层和历史地震分布看,察雅县城周边斜坡具有地震诱发形成滑坡的条件。

综合以上 4 个方面初步判断,察雅滑坡的诱发因素为内动力地质作用,为历史地震滑坡。但由于地震诱发滑坡的复杂性,加之工作程度较低、工作材料较少等因素,现状条件对确定地震诱发如此规模的滑坡形成机制存在一定困难,对探讨和确定古滑坡与地震的关系也存在诸多难题。新发现的大型—特大型地震滑坡为研究昌都及周边地区的地震历史、断裂活动性、地貌形成演化等提供了重要的基础资料。

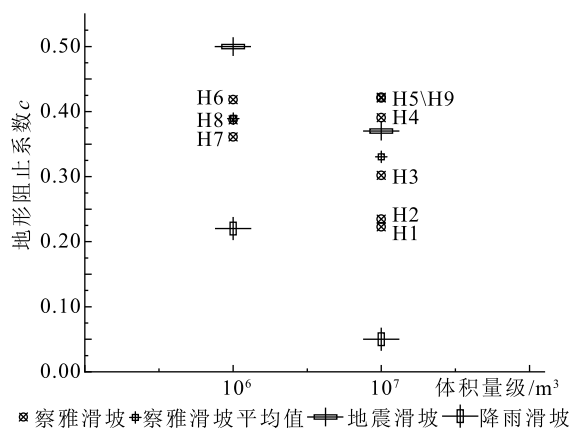
图9 地震与非地震滑坡体积与地形阻止系数关系^[18]及与察雅滑坡的对比

Fig. 9 The volume and topographic blocking coefficient relation between seismic and non-seismic landslides, and the comparison with Chaya landslides

4 典型滑坡体稳定性

4.1 滑坡体变形影响因素

察雅滑坡初步判断为历史地震滑坡,现状变形主要表现为滑坡体的再次活动。通过对察雅县城滑坡体现状变形特点观测,其变形破坏主要与降雨、河流侵蚀、人类工程活动等因素有关。具体体现在以下 3 个方面。

(1) 降雨对滑坡体的变形起决定性作用

降雨对滑坡体稳定性的影响与滑体物质的亲水性、透水性等因素有关。察雅县城各滑坡滑体物质较松散破碎,块石和已解体基岩形成的架空结构具有较好的渗透性,使水较容易抵达潜在滑动面(带)附近,软化、泥化滑带土,降低滑坡体稳定性。

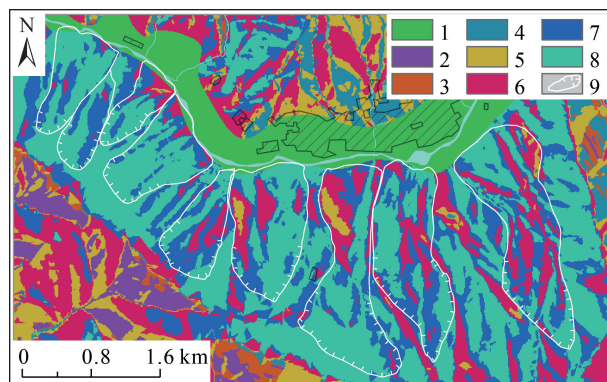


图10 察雅县城滑坡区斜坡结构特征

Fig. 10 Slope structure of landslides area in Chaya County
1—河谷;2—顺向飘倾坡;3—顺向层面坡;4—顺向伏倾坡;
5—斜顺向坡;6—横向坡;7—斜逆向坡;8—逆向坡;9—滑坡范围

(2) 麦曲顺流向方向的拖拽力是滑坡产生二次变形的主要原因

麦曲河道水流的长期冲刷,在坡脚产生流向方向的拖拽力,将滑坡堆积体的前缘坡脚掏空。上覆滑坡体由于失去底部支撑,在重力作用下不断坍塌,同时引发滑坡体不断变形。

(3) 人类工程不合理切坡是滑坡体变形的重要原因

察雅县城的扩建对古妥尔滑坡体前缘进行了切坡,使坡脚形成高陡的临空面。坡面变陡后改变了滑坡体原有的稳定状态,在前缘切坡处形成最大剪应力增高带,在坡缘区附近则形成张力带,该区域通常成为最容易产生变形和破坏的部位。

4.2 稳定性分析

基于上述滑坡体变形的控制因素,运用刚体极限平衡法,选取不同降雨工况对察雅县城典型滑坡堆积体(古妥尔滑坡体)开展现状稳定性分析。

4.2.1 计算模型

根据 1:2 000 地形测绘和古妥尔滑坡工程地质剖面,滑坡体简化计算模型见图 11。考虑降雨入渗对滑坡体的稳定性影响,评价的滑体稳定性包括:①根据野外调查和测绘结果,宏观上已经发生明显下挫滑移的次级滑体的稳定性(L4、L5);②滑坡体整体的稳定性(L1);③通过试算得到的滑坡前部和中部较危险的滑动面(L2、L3)。

4.2.2 计算工况

古妥尔滑坡体失稳的主要控制因素为降雨。因此,其稳定性主要考虑降雨的影响。结合察雅县以往的降雨资料,确定降雨类型为连阴雨,时间为 24 h。本次选用以下 4 种组合工况条件进行极限平衡计算。工况 1:天然状态;工况 2:天然状态+10 年一遇降雨工况;工况 3:天然状态+50 年一遇降雨工况;工况 4:天然状态+100 年一遇降雨工况。

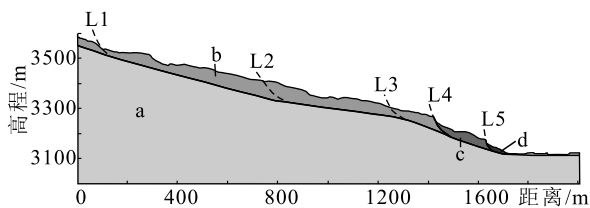


图 11 计算模型图

Fig. 11 Calculation model of landslide stability

a—基岩;b—滑体;c—前部已变形滑体;d—最前部已变形滑体

4.2.3 计算参数

根据王腾等^[23]的昌都市及昌都站 1980—2015 年降雨数值,确定察雅县城年最大日降雨量均值 $\bar{H}_{24}$ 为 28.4 mm,变差系数 C_v 为 0.16。选用皮尔逊Ⅲ型分布函数对研究区进行频率分析,通过其离均系数 K_p ,计算不同降雨频率(P)下的年最大日降雨量 H_{24P} ,计算公式见(1),计算结果见表 2。

$$H_{24P} = K_p \times \bar{H}_{24} \quad (1)$$

由于室内实验的局限性,本次计算的物理力学参数由室内测试、工程地质类比和反分析法综合取得,各岩土体物理力学参数取值如表 3 所示。

4.2.4 计算结果分析与评价

根据极限平衡原则,运用 GeoStudio 软件的 SLOPE/W 和 SEEP/W 模块,选用 Morgenstern-Price 法对古妥尔滑坡体稳定性进行分析,其中天然水位线根据钻孔资料赋予,10 年、50 年和 100 年一遇降雨频率的降雨曲线为 24 小时等量连阴雨,计算结果见表 4。

选用文献[28]中采用的徐邦栋等提出的滑坡稳定性系数分级表,将古妥尔滑坡体稳定性系数(F_s)划分为 4 个等级:①稳定状态, $F_s > 1.2$;②基本稳定状态, $1.1 < F_s < 1.2$;③欠稳定状态, $1.0 < F_s < 1.1$;④不稳定状态, $F_s < 1.0$ 。

表 2 研究区不同降雨频率下的年最大日降雨量估算结果

Table 2 Calculated results of maximum daily rainfall in a year at different frequencies

$P/\%$	K_p	H_{24P}/mm
1	1.436	55.14
2	1.374	52.76
10	1.212	46.54

表 3 模型物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of the model

材料	天然容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	C/kPa	$\varphi/^\circ$
后部滑坡体	26.2	9.8	25.6
中前部滑坡体	25.8	10.3	25.2
前部滑坡体	25.5	10.5	24.6
基岩层(泥质粉砂岩)	24	16.2	8.5

表 4 古妥尔滑坡堆积体稳定性计算结果

Table 4 Calculation results of stability for Gutour landslide

滑坡体编号	L1	L2	L3	L4	L5
工况一 天然状态	1.939	1.722	1.109	1.18	1.101
工况二 10 年一遇降雨	1.933	1.592	1.113	1.147	1.077
工况三 50 年一遇降雨	1.915	1.575	1.104	1.066	1.032
工况四 100 年一遇降雨	1.903	1.487	1.099	1.059	1.006

由表 4 可知,古妥尔滑坡体 L1 滑体、L2 滑体的稳定性系数均较高,4 种工况下稳定性系数均大于 1.2,处于稳定状态;L3 滑体在天然状态、10 年一遇、50 年一遇降雨工况下稳定性系数介于 1.1~1.2 之间,处于基本稳定状态,在 100 年一遇降雨工况下处于欠稳定状态,易发生滑动;L4 滑体在天然状态、10 年一遇降雨工况下处于基本稳定状态,在 50 年一遇、100 年一遇降雨工况下处于欠稳定状态,较易发生滑动;L5 滑体在天然状态下处于基本稳定状态,在 10 年一遇、50 年一遇和 100 年一遇降雨工况下均处于欠稳定状态,易发生滑动。

总体看,古妥尔滑坡堆积体的稳定性在天然状态下均处于基本稳定或稳定状态。滑坡堆积体前缘受临空条件和水的作用共同影响,强降雨工况下整体或局部处于欠稳定状态,较易一易发生滑动。

5 结 论

(1)在西藏澜沧江流域察雅县城南侧斜坡新发现 9 处大型—特大型滑坡,综合滑坡的发育特征、运动特征、物质结构与组成,以及滑坡区断层与历史地震 4 个方面,初步判断这些滑坡的诱发因素为内动力地质作用,为历史地震滑坡。

(2)总结了察雅地震滑坡具有规模巨大、高位发育、切割深、滑移距离远、地形阻止系数大等特征。滑坡体现状变形表现为古滑坡新活动,主要集中在滑体中下部,表现为多期次的牵引式滑移,具有蠕滑变形的特点。复活主要与降雨、河流侵蚀、人类工程活动等因素有关,其中降雨和河流侵蚀是主要的诱发因素,人类工程活动是重要的诱发因素之一。

(3)以古妥尔滑坡体为典型案例,滑坡体在天然状态下处于基本稳定—稳定状态,在强降雨状态下滑坡前缘局部或整体处于欠稳定状态,较易一易发生滑动。亟待开展滑坡风险评价,为县城扩张及地质灾害风险管理提供科学依据。

致谢:中国地质调查局应用地质研究中心熊德清高级工程师、西华大学刘建康副教授、中国地质科学院探矿工艺研究所李洪梁工程师在研究工作中给予了帮助,西南石油大学李旭德硕士生、西南交通大学肖克锋硕士生协助完成了野外调查工作,审稿专家在文章修改过程中提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

参考文献

[1] 王思敬.地球内外动力耦合作用与重大地质灾害的成因初探[J].

- 工程地质学报,2002,10(2): 115-117.
- [2] Scheidegger A E. Tectonic Predesign of Mass Movements, with Examples from the Chinese Himalaya[J]. Geomorphology, 1998, 26(1/2/3): 37-46.
- [3] Martel S J. Mechanics of Landslide Initiation as a Shear Fracture Phenomenon[J]. Marine Geology, 2004, 203(3/4): 319-339.
- [4] 居恢扬.断裂构造对滑坡的控制意义[C]//滑坡文集:第三集.北京:中国铁道出版社,1982: 47-55.
- [5] 吴玮江,王念秦.甘肃滑坡灾害[M].兰州:兰州大学出版社,2006: 82-87.
- [6] Scheidegger A E,艾南山.武都地区的滑坡和泥石流[J].水土保持学报,1987,1(2): 19-27.
- [7] 张永双,苏生瑞,吴树仁,等.强震区断裂活动与大型滑坡关系研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增刊 2): 3503-3513.
- [8] 许强,黄润秋.5·12 汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探[J].工程地质学报,2008,16(6): 721-729.
- [9] 黄润秋,李为乐.5·12 汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(12): 2585-2592.
- [10] 杨为民,黄晓,张春山,等.白龙江流域坪定—化马断裂带滑坡特征及其形成演化[J].吉林大学学报:地球科学版,2014,44(2): 574-583.
- [11] 李晓,李守定,陈剑,等.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,2008,27(9): 1792-1806.
- [12] 吴树仁,王涛,石玲,等.2008 汶川大地震极震端滑坡事件初步研究[J].工程地质学报,2010,18(2): 145-159.
- [13] 邹谨敏,邵顺妹.海原地震滑坡及其分布特征探讨[J].内陆地震,1996,(1): 1-6.
- [14] 乔彦肖,马中社,吕凤军.汶川地震地质灾害发育特点及成因机制分析[J].中国地质,2009,36(3): 736-741.
- [15] 邓龙胜,范文.宁夏海原 8.5 级地震诱发黄土滑坡的变形破坏特征及发育机理[J].灾害学,2013,28(3): 30-37.
- [16] 蒋瑶,吴中海,李家存,等.2010 年玉树 7.1 级地震诱发滑坡特征及其地震地质意义[J].地质学报,2014,88(6): 1157-1176.
- [17] 殷跃平.汶川八级地震滑坡特征分析[J].工程地质学报,2009,17(1): 29-38.
- [18] 樊晓一.地震与非地震诱发滑坡的运动特征对比研究[J].岩土力学,2010,31(S2): 31-37.
- [19] 潘桂棠,李兴振,王立全,等.青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J].地质通报,2002,21(11): 701-707.
- [20] 安显银,王启宇,李勇,等.西藏昌都市察雅地区侏罗纪恐龙化石新发现[J].地质通报,2021,40(1): 189-193.
- [21] 秦四清,李国梁,薛雷,等.中国西南地区某些地震区未来震情研判[J].地球物理学进展,2013,28(5): 2407-2432.
- [22] 秦四清,薛雷,黄鑫,等.西藏地区未来强震预测[J].地球物理学进展,2010,25(6): 1879-1886.
- [23] 钟康惠,刘肇昌,舒良树,等.澜沧江断裂带的新生代走滑运动学特点[J].地质论评,2004,(1): 1-8.
- [24] 郭长宝,吴瑞安,蒋良文,等.川藏铁路雅安—林芝段典型地质灾害与工程地质问题[J].现代地质,2021,35(1): 1-17.
- [25] 王腾,孙晓光,李白萍.成都市近 36a 暴雨气候特征分析[J].暴雨灾害,2017,36(1): 75-80.
- [26] 张树轩,杨为民,程小杰,等.甘肃天水红旗山黄土滑坡群成因及稳定性分析[J].中国地质,2017,44(5): 924-937.
- [27] 陈永明,石玉成.中国西北黄土地区地震滑坡基本特征[J].地震研究,2006,29(3): 276-280.
- [28] 孟庆华,孙伟峰,张春山,等.陕西宝鸡地区胡家山滑坡风险性评价[J].地质通报,2011,30(7): 1155-1165.