

doi: 10.12029/gc20200603

张永双, 巴仁基, 任三绍, 李宗亮. 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.

Zhang Yongshuang, Ba Renji, Ren Sanshao, Li Zongliang. 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).

中国西藏金沙江白格滑坡的地质成因分析

张永双^{1,2}, 巴仁基³, 任三绍^{1,2}, 李宗亮³

(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. 中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演化重点实验室, 河北 石家庄 050061; 3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要: 2018 年 10 月 11 日发生金沙江白格滑坡是中国西藏继 2000 年易贡滑坡以来社会影响最大的滑坡事件。许多学者对该滑坡的形成条件、稳定性和监测预警等进行了研究报道, 但对滑坡的地质成因研究比较薄弱。本文在区域地质分析、现场调查测绘和综合研究的基础上, 重点从断裂作用控制斜坡岩体结构、水与蚀变软岩夹层作用促进结构面弱化、卸荷作用控制滑坡规模和失稳方式等方面, 提出了金沙江构造缝合带混杂岩体岸坡在持续重力作用下的失稳机理, 对金沙江沿岸滑坡隐患早期识别和风险控制具有一定指导意义。

关键词: 滑坡; 缝合带混杂岩; 卸荷作用; 蚀变作用; 早期识别; 破坏模式; 地质灾害调查工程; 金沙江; 西藏
中图分类号: P642.22 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)06-1637-09

An analysis of geo-mechanism of the Baige landslide in Jinsha River, Tibet

ZHANG Yongshuang^{1,2}, BA Renji³, REN Sanshao^{1,2}, LI Zongliang³

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, 050061, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-Environmental Evolution, China Geological Survey, Shijiazhuang, 050061, Hebei, China; 3. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: On October 11, 2018, Baige landslide occurred in the upper reaches of the Jinsha River, and this was the most influential landslide event in Tibet since the Yigong landslide in 2000. The formation conditions, stability, monitoring and early warning of the landslide have been studied and reported by many experts, but the geo-mechanism of landslide has seldom been studied. On the basis of regional geological analysis, field survey, mapping and comprehensive research, the authors put forward the failure mechanism of the bank slope of the mélangé in the Jinsha River structural suture zone under the sustained gravity, which mainly considers such factors as the structure of slope rock mass controlled by fracture, the weakening of the structural plane by the action of water and weak altered interlayer, and the scale and failure mode of the landslide controlled by unloading. The results have certain guiding significance for early recognition of potential landslide and risk prevention and control along the Jinsha River.

Key words: Landslide; suture zone mélangé; unloading process; alteration; early recognition; failure modes; geo-hazard survey engineering; Jinsha River; Tibet

收稿日期: 2019-09-01; 改回日期: 2020-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41941017、41731287)和中国地质调查局项目(20190505)联合资助。

作者简介: 张永双, 男, 1968 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事工程地质与地质灾害研究; E-mail: zhys100@qq.com。

About the first author: ZHANG Yongshuang, male, born in 1968, doctor, professor, engages in research on engineering geology and geo-hazard; E-mail: zhys100@qq.com.

Fund support: Supported jointly by the National Natural Science Foundation of China (No. 41941017, No. 41731287) and China Geological Survey Project (No. 20190505).

1 引 言

2018年10月11日凌晨4时,在中国西藏与四川交界的金沙江右岸江达县波罗乡白格村发生特大型滑坡,形成堵江-堰塞湖;11月3日17时,滑坡后缘发生二次滑动,叠加于前一期堰塞坝之上。后经人工干预,坝体上下游水位贯通,堰塞湖险情解除。白格滑坡-堰塞湖导致江达县波罗乡、白玉县金沙乡等先后被淹;泄洪后出现较大洪峰,四川、云南等下游部分沿江地区被淹,多座桥梁被冲毁(王立朝等,2019),造成巨大的经济损失和广泛的社会影响(许强,2018)。

白格滑坡发生后,不同学者从滑坡的形成条件、稳定性和监测预警等方面进行了研究。许强等(2018)、冯文凯等(2019)结合地面调查和历史遥感影像解译、InSAR和无人机航拍等技术手段,研究了滑坡区的坡体结构、滑坡-堰塞堵江的基本特征,提出了应急处置过程中的滑坡监测预警方法。王立朝等(2019)基于地面调查、现场监测和数值模拟方法,分析了滑坡形成过程、滑坡残存块体的稳定性及未来变化趋势。邓建辉等(2019)基于现场调查,分析了白格滑坡基本特征和形成过程。此外,还有一些研究者采用不同类型SAR数据和不同处理技术,分析研究了白格滑坡发生前后的时序变形特征及其早期识别标志(Fan et al., 2019; Ouyang et al., 2019; Yang et al., 2019)。但是,由于滑坡处于复杂的金沙江缝合带混杂岩带,很多学者仅从浅表层滑坡特征和宏观表象分析预测,在阐述地质背景时所依据的资料也比较老,总体上对滑坡形成的本质缺乏深入的认识。因此,有必要对该滑坡形成的地质背景、岩体结构及其弱化特点、卸荷带控制的滑坡启动模式等进行深入剖析,以期对青藏高原东部深切河谷型滑坡隐患的早期识别和风险防控有所启示。

2 地质背景

滑坡区位于青藏高原东部芒康山与沙鲁里山

间的金沙江河谷地带,属构造侵蚀高山峡谷地貌,滑坡区河谷地貌呈宽缓的“V”型,左岸较陡、右岸略缓,河流侵蚀强烈(图1)。滑坡所在的右岸斜坡总体坡向 80° ,坡顶高程约3720 m,河谷高程约2880 m,相对高程达840 m。原始地形前陡(约 65°)、后缓($35\sim 55^\circ$),前缘近河谷段为近直立陡坎,后缘为台阶状地形,坡顶为宽缓平台。

在大地构造位置上,滑坡区位于特提斯洋俯冲消减碰撞形成的金沙江俯冲增生杂岩带(王保弟等,2018)。该杂岩带是不同地质构造单元的结合部,是典型的构造缝合带和造山作用形成的特殊不良地质体集中发育区(图2),具有变质基性-超基性岩(绿泥石片岩、蛇纹岩)、变质碎屑岩(绢云石英片岩、二云石英片岩、千枚岩、板岩)、大理岩混杂组合的岩性特征,具有同斜-倒转-冲断-叠瓦变形的复杂构造样式,构造面常呈S型或反S型,不同规模不同岩性块体均以剪切面为边界,岩石构造变形强烈(潘桂棠等,2019)。金沙江增生杂岩带(含蛇绿混杂岩带)也是活动构造带、热液作用活跃带,比欧洲阿尔卑斯山、北美柯迪勒拉山脉和阿巴拉契亚山、俄罗斯的乌拉尔山还要复杂多变。

上述地质背景造就了金沙江两岸斜坡具有以下显著特征:基性岩与大理岩组合的混杂岩带特征,节理化与片理化交织的碎裂结构特征,活跃的热液作用形成的蚀变软岩夹层特征,这些特征为滑坡形成奠定了极为不利的基础条件,是认识巨型滑坡形成机理的关键。

3 白格滑坡基本特征

3.1 斜坡结构特征

斜坡的地质结构及构造演化是控制滑坡形成的基础,因此对沿金沙江两岸进行了地形地貌和地质观测,特别是对滑坡周边的斜坡结构特征进行了较详细的调查,并结合钻孔资料进行了综合分析。

在滑坡后缘的斜坡顶部平台,发育金沙江断裂形成的断层槽谷,槽谷西侧边界的断坎比较明显,

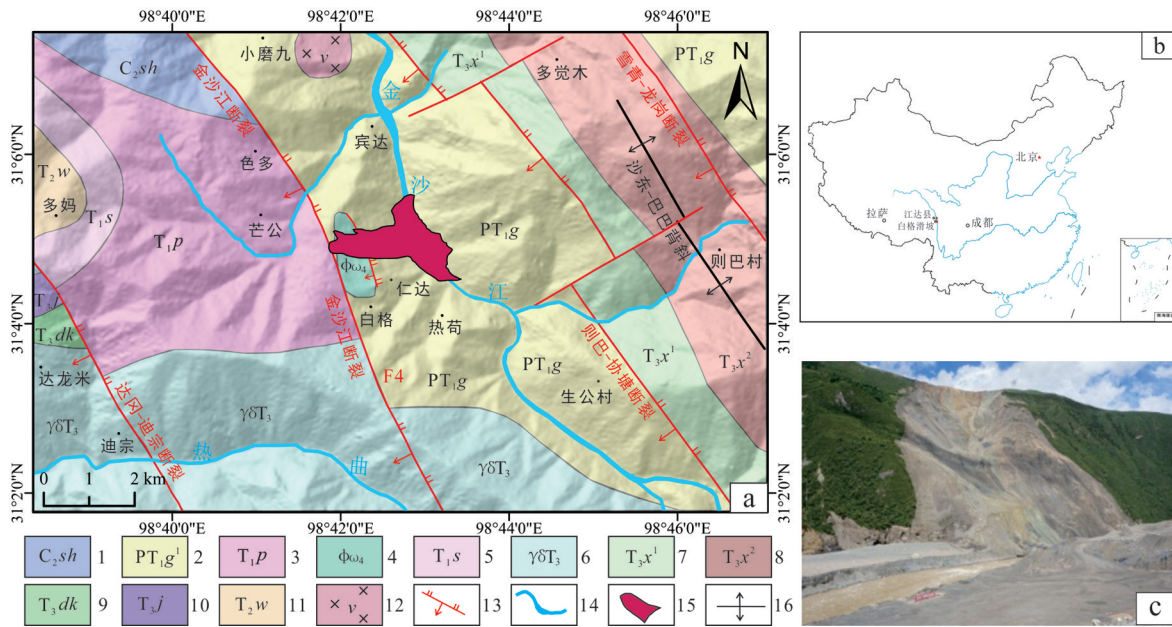


图1 滑坡区地质背景图

1—上石炭统生帕群:岩屑砂岩、砂质板岩、灰岩、粉砂岩等;2—二叠—三叠系岗托岩组:绢云石英片岩、二云片岩、绿泥片岩、千枚岩、砂岩、板岩等;3—下三叠统普水桥组:紫红色砾岩、砂岩、中基性火山岩;4—华力西期金沙江超镁铁质岩带、蛇纹岩;5—下三叠统色容寺组:泥质灰岩、结晶灰岩、砂板岩夹中基性火山岩;6—三叠系花岗岩闪长岩;7—上三叠统下逆松多组下段:长石岩屑砂岩、粉砂岩与泥质板岩互层,偶夹灰岩;8—上三叠统下逆松多组上段:细晶灰岩、白云岩夹生物碎屑灰岩;9—上三叠统洞卡组:安山岩、板岩、砂岩、灰岩;10—上三叠统甲丕拉组:砾岩、含砾砂岩、砂岩、泥岩;11—三叠系中统瓦拉寺组:板岩、粉砂岩、泥质灰岩;12—三叠系辉长岩岩块;13—断裂;14—水系;15—白格滑坡;16—背斜

Fig.1 Geological background of landslide area

1—Upper Carboniferous Shengpa Formation: lithic sandstone, sandy slate, limestone and siltstone; 2—Permian–Triassic Gangtuo Formation: sericite quartz schist, dolomite schist, chlorite schist, phyllite, sandstone, slate; 3—Lower Triassic Pushuiqiao Formation: purple conglomerate, sandstone, intermediate–basic volcanic rocks; 4—Jinsha River ultramafic belt and serpentine; 5—Lower Triassic Serongsi Formation: argillaceous limestone, crystalline limestone and sandstone intercalated with intermediate basic volcanic rocks; 6—Triassic granodiorite; 7—Lower Songduo Formation of Upper Triassic: feldspar lithic sandstone, siltstone and argillaceous slate interbedded with limestone; 8—Upper member of Upper Triassic Nisongduo Formation: fine–grained limestone and dolomite intercalated with bioclastic limestone; 9—Dongka Formation of Upper Triassic: andesite, slate, sandstone and limestone; 10—Jiapira Formation of Upper Triassic: conglomerate, conglomerate–bearing sandstone, sandstone and mudstone; 11—Walasi Formation of Middle Triassic: slate, siltstone, argillaceous limestone; 12—Triassic gabbro block; 13—Faults; 14—Water system; 15—Baige landslide; 16—Anticline

断续延伸超过1.0 km,高差达1.0~1.5 m,错断了全新世坡积层(图3)。这条断裂是金沙江断裂带的重要分支断裂之一,对斜坡稳定性具有明显影响。

斜坡地层组合总体上可分为3段:下段为二叠—三叠系岗托岩组(PT_{1g})灰绿色绿泥石片岩、变质玄武岩夹大理岩;中段为二叠—三叠系岗托岩组(PT_{1g})灰—灰黑色千枚岩、板岩夹大理岩,局部含糜棱岩化花岗岩;上段为华力西期深黑—浅绿色蛇纹石化辉石橄榄岩、蛇纹岩,上述3段之间为断层接触。滑源区位于斜坡中、上段,滑床产状为240°∠25~50°,为反向坡(图3)。受长期构造演化和断裂活动影响,斜坡岩体呈碎裂—层状结构,岩层皆遭受强烈挤压揉皱、片理化明显,在岩体中发育若干节理裂隙及蚀变岩带。蚀变软岩夹层成为软弱带,黏

土化现象明显,手捏即碎。

3.2 滑坡特征

白格滑坡后缘紧邻坡顶,高程约3718 m,与坡脚高差达834 m。前人对滑坡特征进行了较详细的描述(冯文凯等,2019;王立朝等,2019),现择其要点简述如下:滑坡平面形态呈长条状,主滑体呈楔形体,剖面形态呈陡缓相间的阶状。滑坡纵向长约1600 m,最大宽度约700 m,平均宽度约550 m,主滑方向82°~102°(图3,图4)。该滑坡于2018年10月11日高位下滑后,形成金沙江涌浪并冲击左岸,随即向右岸回弹散落堆积,形成堰塞坝。11月3日,滑坡后缘发生二次滑动,滑坡体叠加于前一期堰塞坝之上。

以无人机影像获取的高精度DEM为基础,采用3DAnalyst计算得到:白格滑坡第一次下滑体积

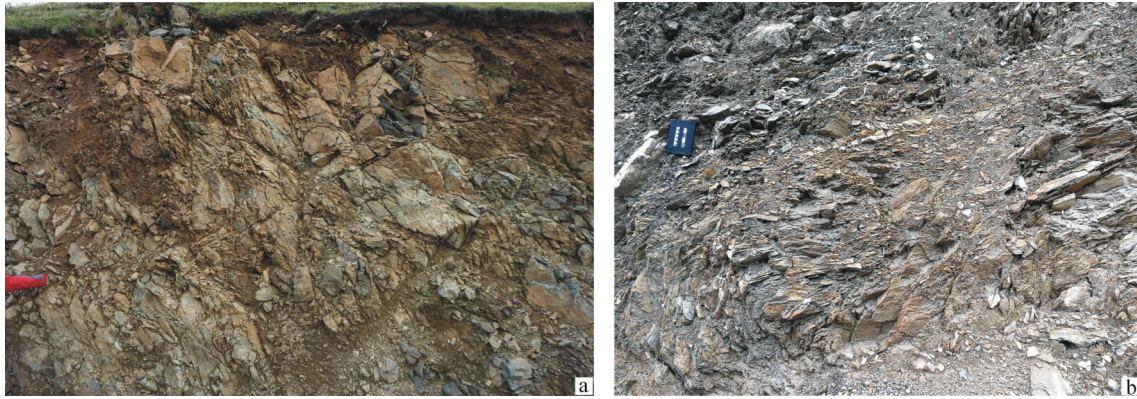


图2 金沙江岸坡地层岩性及变形特征
a—斜坡顶部出露的蛇纹石化辉石橄榄岩(SE); b—斜坡中部强烈揉皱的千枚岩和板岩(W)

Fig. 2 Lithology and deformation characteristics of the bank slope of Jinsha River

a—Serpentinized pyroxene peridotite on the top of the slope (SE); b—Strongly ruffled phyllite and slate in the middle of the slope (W)

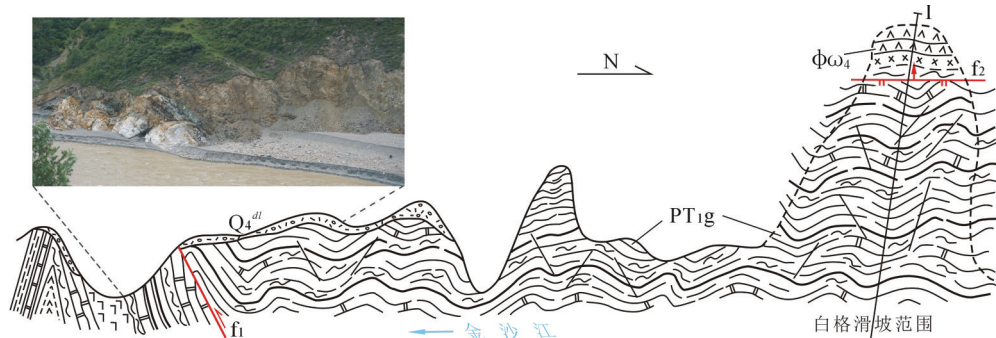
约 $3500 \times 10^4 \text{ m}^3$, 堰塞坝体积约 $2400 \times 10^4 \text{ m}^3$; 第二次滑动体积 $160 \times 10^4 \text{ m}^3$, 铲刮坡体及第一次滑坡堆积物共约 $660 \times 10^4 \text{ m}^3$; 最终堰塞坝总体积约 $3020 \times 10^4 \text{ m}^3$, 后缘残存体积约 $395 \times 10^4 \text{ m}^3$, 属特大型滑坡。

白格滑坡堆积体主要由粉土、砂土、碎块石土组成, 碎块石粒径以 50 cm~5 m 为主, 含量 30%~40%, 多呈棱角状。滑坡发生之后的坡形呈阶状, 前

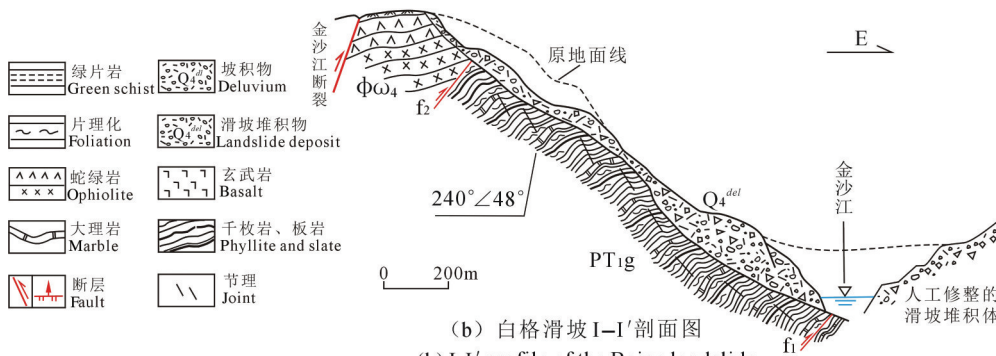
缘地形坡度 $35^\circ \sim 65^\circ$, 中后部地形坡度 $35^\circ \sim 55^\circ$, 后壁局部达 75° (图4)。

3.3 滑坡堆积体与滑源区基岩的对应关系

分析滑坡堆积体与滑源区基岩的对应关系, 有助于理解滑坡的启动—堆积过程。根据现场观察 (图4), 滑坡堰塞坝在疏通河道开挖过程中, 在左岸形成了非常清晰的滑坡堆积物剖面, 右岸滑源区的



(a) 金沙江右岸地层组合剖面图
(a) Stratigraphic profile at the right bank of the Jinsha River



(b) 白格滑坡 I-I' 剖面图
(b) I-I' profile of the Baige landslide

图3 斜坡地层组合特征

Fig.3 Characteristics of stratigraphic assemblages on slopes

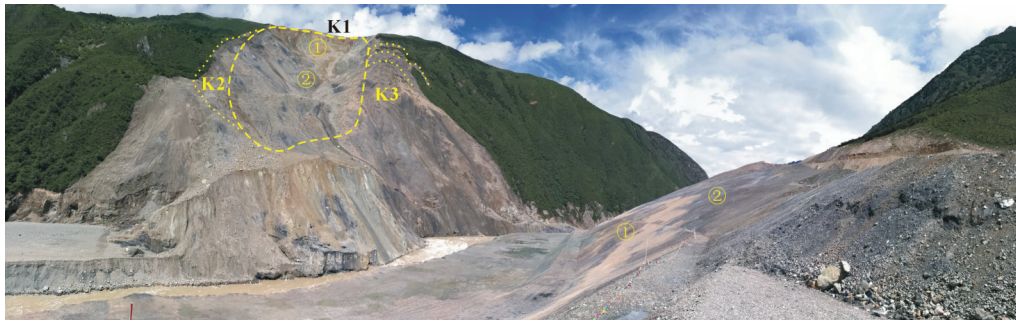


图4 白格滑坡总体特征及滑源区与滑坡堆积体的对应关系(镜向290°)

Fig.4 General characteristics of Baige landslide and the corresponding relationship between the sliding source area and the landslide accumulation area (Lens direction 290°)

阶状地形、地层岩性与左岸碎块石堆积特征均具有很好的对应关系。即:①右岸滑坡第一个台阶之上以灰黑、灰绿色基性—超基性的蛇绿岩化玄武岩、蛇纹岩化辉石橄榄岩为主,与左岸堰塞坝底部碎块石的岩性和颜色都很对应;②右岸滑坡第二个台阶之上以褐色、灰色千枚岩、板岩夹石灰岩为主,与左岸堰塞坝中下部碎块石的岩性和颜色对应。这两个层位的对应关系说明,白格滑坡是从斜坡上方首先启动,然后带动或铲刮中下部岩体滑动,这将佐证下文要讨论的深切河谷区卸荷带与滑坡的关系。

4 白格滑坡形成机理探讨

白格滑坡地处青藏高原东部寒温带半湿润气候区,多年平均降水量650 mm(最大可达1067.7 mm),具有活跃的地质构造背景和深切河谷地貌,因此,不少研究者在分析滑坡成因时,自然会想到高山峡谷地貌、断裂构造带、岩体结构破碎、地震、冻融、降雨、坡脚侵蚀等因素(葛华等,2013;刘筱怡等,2019)。无疑,这些因素都与滑坡形成有关。笔者认为,构造缝合带内部的断裂作用、蚀变软岩夹层及其与水的作用、高陡斜坡的卸荷作用是3个关键因素,特别是后两个因素常被滑坡研究者忽视。

4.1 构造缝合带混杂岩及断裂作用控制斜坡岩体结构

前已述及,白格滑坡处于金沙江构造缝合带。缝合带的特征之一是混杂岩带,地层岩性极其复杂,且经历长期构造演化(潘桂棠等,2019;董玉飞等,2019),常呈层状碎裂结构。其二,缝合带内部发育了多条断裂带,特别是位于右岸斜坡顶部的活动断裂是金沙江断裂带5条区域性分支断裂之一,全新世活动性明显。受断裂长期活动影响,岩体的

完整性和质量下降,抗侵蚀能力减弱,稳定性降低,是引发大规模滑坡的控制因素(张永双等,2016)。

据现场调查,在右岸斜坡的中上部和底部还发育两条次级断裂,直接切割斜坡体,导致斜坡节理发育、岩体更加破碎。其中千枚岩、板岩产状 $240^{\circ}\angle 25\sim 50^{\circ}$,发育的两组优势结构面产状为 $60\sim 80^{\circ}\angle 75\sim 85^{\circ}$ 、 $100\sim 115^{\circ}\angle 80^{\circ}$,密集的节理构成倾向坡外的潜在楔形体,为滑坡的形成奠定了基础。

4.2 蚀变软岩夹层及其与水的作用促进结构面弱化

构造缝合带的另一特点是热液作用比较活跃,为蚀变软岩的形成提供了有利条件。在以往1:20万区域地质报告中,涉及蚀变作用的研究成果均没有黏土化蚀变作用的相关描述。区域蚀变带常与区域深断裂的构造岩浆活动有关(翟裕生,1999),岩石类型、活动断裂和流体作用是产生区域蚀变带的前提,具有一定规模且稳定的热源是促使岩石蚀变的动力条件。从工程地质和地质工程的角度,蒙脱石化的危害最严重,常常成为工程地质研究中最受关注的对象。大量研究表明,不同岩石形成蒙脱石所需要的条件是不同的,但蒙脱石的形成必须有足够的 Mg^{2+} 参与。 Mg^{2+} 的来源一般有3种途径:①富含Mg的火成岩,如辉绿岩、辉长岩、玄武岩等基性岩;②富Mg的围岩,如白云岩、白云质灰岩、白云质大理岩;③存在富含 Mg^{2+} 的地下热水作用。这些蚀变岩既是强度极低的软岩,又是典型的膨胀岩。

笔者曾在金沙江下游开展过基性岩的蚀变特征研究(表1),在德钦县奔子栏至大理一带,玄武岩遭受热液蚀变后,在宏观上表现为相对较完整的玄武岩夹蒙脱石化蚀变岩组合,蚀变的岩体常呈土状或泥状夹层,在干湿交替和松弛条件下极易发生膨胀变形,加上节理发育、破碎程度高、岩体性质裂化

加剧,自稳能力很差。

野外实地调查表明,金沙江白格一带的蚀变软岩类型主要为基性—超基性岩在热液作用下的蚀变,特别是在基性—超基性岩与大理岩等富Mg岩体接触带,更容易发生蚀变作用,形成黏土化(蒙脱石化)岩土体,在宏观上表现为节理化的蛇纹石化玄武岩、绿泥石片岩中夹黏土化的条带或透镜体(图5)。现场调查发现,白格滑坡中部有明显的地下水出露,在水的作用下,蚀变软岩的工程性质会发生软化,而且在干湿交替作用下,因膨胀和收缩变形交替出现而进一步蜕化。当岩体中节理发育时,蚀变软岩往往沿节理面向两侧扩展,形成沿裂隙发育的软弱泥化层,结构面进一步弱化,成为滑坡的重要内因。可见,蚀变软岩夹层及其与水的作用是导致白格滑坡发生的不可忽视的因素。

4.3 卸荷作用控制滑坡规模和失稳方式

沟谷高陡斜坡岩体卸荷带是内外动力耦合作用的结果(殷跃平等,2017),主要表现为与坡面平行或小角度相交的张开裂隙,且裂隙中常充填有黏土夹碎石。李日运等(2014)统计了金沙江某水电站岸坡卸荷带裂隙发育情况,强卸荷带裂隙密集发育,裂隙线密度4~9条/m,张开度 ≥ 2 mm;弱卸荷带裂隙数量减少,裂隙线密度1~4条/m,张开度0.1~2 mm。

边坡岩体卸荷作用主要受岩性、构造、地形地貌等因素影响(许向宁等,2005)。据金沙江岗拖水电站坝址区8个平硐揭示(中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,2013^①),斜坡地层岩性主要为变质砂岩、板岩类,在3100 m高程边坡岩体强卸荷带水平深度15~25 m,弱卸荷水平深度40~60 m;而3200 m高程强卸荷带水平深度40~60 m,弱卸荷、弱风化水平深度80~100 m,可见同一类岩体卸荷带发育特征随高程的差异特性明显。蓝康文(2018)统

计分析了大渡河、金沙江、澜沧江、怒江峡谷边坡的卸荷带发育深度,认为金沙江峡谷边坡强卸荷带发育深度小于80 m,弱卸荷带发育深度小于150 m。上述结论与吴龙科(2015)研究金沙江巴塘水电站坝址区边坡卸荷带(表2)、宋章等(2016)研究金沙江虎跳峡一带岸坡卸荷带(图6)、刘恋嘉(2017)研究金沙江叶巴滩水电站河谷两岸卸荷带(图7)的结果是一致的。

李日运等(2014)认为,岩体卸荷的影响范围还与应力降低区和应力增高区具有对应关系,对岩体影响最为显著的是应力降低区。强卸荷带与弱卸荷带均落在应力降低区,其中强卸荷带一般对应拉裂区与压致拉裂区,岩体松弛量相对较大,卸荷裂隙张开度相对较宽;弱卸荷带一般对应剪切型破裂区,岩体松弛量相对较小,卸荷裂隙张开度相对较小。根据白格滑坡所在的金沙江右岸斜坡钻孔岩心观测,滑体所在层位的卸荷裂隙较宽,其中充填有方解石脉、碎屑物等,有的宽大卸荷裂隙带内充填物厚度可达1.5 m(图8)。

根据多期DEM差分计算,第一次滑坡发生后,后缘地表向后退缩了约90 m;第二次滑坡发生后,后缘陡壁后退了约60 m,这与金沙江峡谷边坡强卸荷带和弱卸荷带发育深度具有较好的对应性。根据上述认识,笔者认为,该滑坡之所以在第一次滑动后出现第二次较大规模滑动,与卸荷带的发育特征有很大关系,即第一次强卸荷带和部分弱卸荷带下滑后,残留的弱卸荷带物质在第二次发生下滑。

4.4 白格滑坡形成过程

关于白格滑坡的形成过程,有古滑坡复活和新生滑坡之说(邓建辉,2019)。从上述影响滑坡形成演化的3个关键因素来看,定为新生滑坡更为合适。尽管在本次滑动前,前缘坡脚已有部分崩滑体

表1 金沙江中下游奔子栏至大理段蚀变岩的工程特性测试结果(据张永双等,2007)

Table1 Test results of engineering properties of altered rocks in Jinsha River tectonic belt from Benzilan to Dali (after Zhang Yongshuang et al., 2007)

编号	取样地点	颜色	干岩块的 浸水性状	岩块干燥 饱和吸水率/%	岩粉干燥 饱和吸水率/%	蚀变 系数	比表面积 /m ² ·g ⁻¹	有效蒙 脱石含量/%	膨胀势 判别
E40	德钦奔子兰	灰色	碎屑泥状	14.58			70.76	8.01	微
E192-1	大理禾洛山	褐黄色	泥状	86.90	103.72	0.84	493.73	72.24	强
E192-2	大理禾洛山	深褐色	碎屑状	15.08	34.99	0.43	209.18	15.53	微
E194	大理大磨坪	棕色	泥状	81.85	88.85	0.92	447.30	60.11	强
E201-1	大理康廊村	灰棕色	泥状	74.63	95.61	0.78	449.61	59.23	强
E201-2	大理康廊村	黄绿色	变软	19.84	50.92	0.39	256.16	26.08	微



图5 蚀变岩宏观特征

a—蚀变岩在钻孔中的表现特征;b—斜坡表面的蚀变岩特征(W)

Fig.5 Macroscopic characteristics of altered rocks

a—Characteristics of altered rocks in boreholes; b—Characteristics of altered rocks on slope surface (W)

存在,但上部滑源区是以强卸荷带为主体,前缘剪出口位于斜坡中下部,具有明显的新生性。每次滑坡失稳便是卸荷带再次向斜坡深部和后方扩展的开始,这也是卸荷带控制滑坡的特点。

从滑坡形成机制看,白格滑坡属于区域断裂构造带复杂碎裂岩体在卸荷和持续重力作用下变形破坏的产物,蕴含着水与蚀变软岩的相互作用,具有典型的内外动力耦合作用致滑机制。其形成过程为:金沙江右岸上部强卸荷带在降雨作用下首先启动,飞至左岸坡脚(灰绿色岩石碎块与滑源区岩性和颜色一致),随后弱卸荷带部分岩体发生崩滑,加大了堵江和滑坡

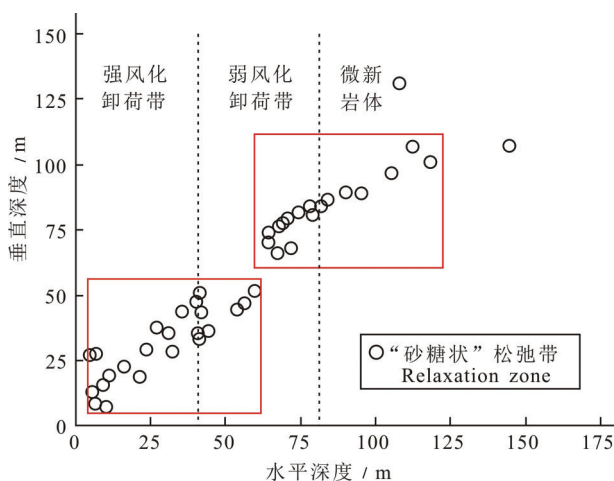


图6 叶巴滩水电站河谷右岸卸荷带发育特征 (据刘恋嘉,2017)

Fig.6 Development characteristics of unloading zone on the right bank of Yebatan Power Station(after Liu Lianjia, 2017)

表2 巴塘水电站坝址区边坡卸荷带水平深度 (据吴龙科,2015)
Table 2 Horizontal depth of slope unloading zone in the dam area of Batang Power Station (after Wu Longke, 2015)

洞号	高程/m	洞深/m	强卸荷带/m	弱卸荷带/m
PD318	2545	150	0~20	20~150
PD308	2514	89.5	0~42	42~78.3
PD304	2510	150	13~78	78~85
PD302	2527	78.3	0~84	84~114

堆积体范围,同时对本岸下方凸出部位进行铲刮,导致中下部滑坡堆积体在坡脚汇集。

目前,白格滑坡残留的3处变形区(K1、K2、K3)中,顶部变形区K1已被人工改造成阶梯状,上游侧变形区K2处于牵引式蠕滑状态,下游侧变形区K3以潜在崩滑形式向临空方向出现裂缝(图4)。中国地质调查局相关单位采用空-天-地一体化技术方法对上述变形区和整个滑坡外围的稳定性和发展趋势进行实时监测,已持续近1年时间。相关监测进展将另文讨论,本文不作赘述。

5 结论

本文在前人工作的基础上,结合现场调查分析,重点从地质角度剖析了金沙江白格滑坡的成因,获得以下主要认识:

(1)白格滑坡是发育于金沙江构造缝合带的深

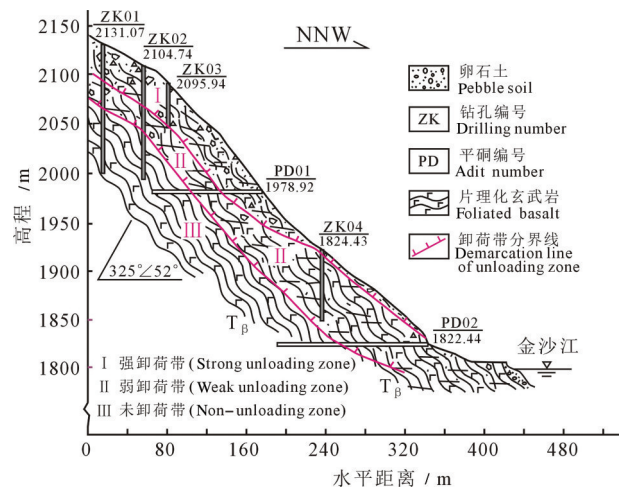


图7 金沙江岸坡工程勘察揭示的卸荷带 (据宋章等,2016修改)

Fig.7 Unloading zone revealed by engineering survey in Jinsha River slope(modified from Song Zhang et al., 2016, replenished)

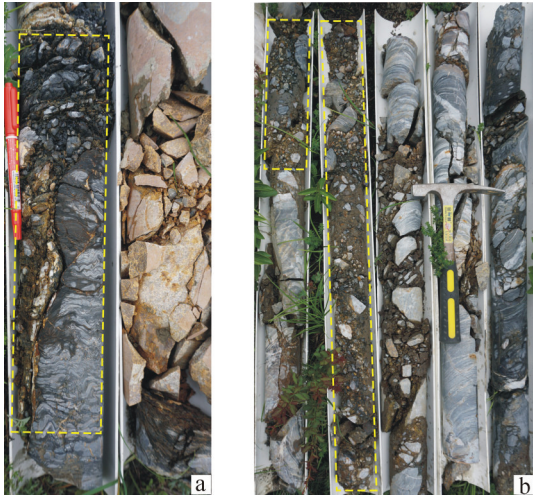


图8 钻孔中的卸荷带及充填物
Fig.8 Unloading zone and filling in borehole

切河谷滑坡,是反映现今构造地貌演化的代表性滑坡事件,对于揭示青藏高原内外动力耦合作用及其致灾机理具有典型意义。

(2)白格滑坡在形成机制上属于构造缝合带混杂岩体在卸荷和重力持续作用下的变形破坏,除了地形地貌和降雨等因素外,构造缝合带的复杂岩体结构、水与蚀变软岩夹层相互作用和长期卸荷作用是关键性因素,在以往滑坡形成机制分析时有所忽视。

(3)青藏高原东部滑坡灾害多发频发、类型复杂多样,对于滑坡形成机制和成灾模式的认识很大程度上取决于对基础地质问题的研究程度,必须充分把握成灾地质背景和关键性因素,才能提升地质灾害预警水平。

致谢:成文过程中,得到自然资源部地质灾害技术指导中心殷跃平研究员、中国地质调查局成都地质调查中心潘桂棠研究员的指导;野外观测的岩心为四川915地质队施工的钻孔岩心;中国地质科学院地质力学研究所刘筱怡博士协助处理了部分图片,一并深表谢意!

注释

①中国水电顾问集团成都勘测设计研究院.金沙江上游岗托水电站预可行性研究报告[R]. 2013.

References

Deng Jianhui, Gao Yunjian, Yu Zhiqiu, Xie Heping. 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):13–20(in Chinese with English abstract).

Dong Yufei, Yang Jingsui, Lian Dongyang, Xiong Fahui, Zhao Hui, Chen Xiaojian, Li Guanlong, Wang Tianze. 2019. Genesis and tectonic setting of the Dongqiao peridotites in the central segment of the Bangong Co–Nujiang Suture Zone[J]. *Geology in China*, 46(1): 87–114(in Chinese with English abstract).

Fan Xuanmei, Xu Qiang, Andres Alonso–Rodriguez, Srikrishnan Siva Subramanian, Li Weile, Zheng Guang, Dong Xiujun, Huang Runqiu. 2019. Successive landsliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet, China: Prime investigation, early warning, and emergency response[J]. *Landslides*, 16(5): 1003–1020.

Feng Wenkai, Zhang Guoqiang, Bai Huilin, Zhou Yulong, Xu Qiang, Zheng Guang. 2019. A preliminary analysis of the formation mechanism and development tendency of the huge baige landslide in jinsha river on October 11, 2018[J]. *Journal of Engineering Geology*, 27(2):200–210(in Chinese with English abstract).

Ge Hua, Chen Qiguo, Wang Dewei. 2013. The assessment and mapping of seismic landslide hazards: A case study of Yingxiu area, Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 40(2):644–652(in Chinese with English abstract).

Lan Kangwen. 2018. Study on Failure Modes and Stability of Unloading Zone of Slopes in Alpine–Gorge Region along Sichuan–Tibet Railway[D]. Southwest Jiaotong University, Master's thesis(in Chinese with English abstract).

Li Riyun, Liu Tianke. 2014. Research of bank slope stress field and quantitative indicators of unloading zones classification[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 35(2):76–80(in Chinese with English abstract).

Liu Lianjia. 2017. Altered Mineral Petrologic Characteristics and Genetic Analysis of Saccharoidal Compresso–Crushed zone in Dam Site of Yebatan Hydropower Station[D]. Chengdu University of Technology, Master's thesis. (in Chinese with English abstract).

Liu Xiaoyi, Zhang Yongshuang, Guo Changbao, Wu Ruian, Ren Sanshao, Shen Yaqi. 2019. Development characteristics and evolution process of the Xialazong ancient rockslide along the Xianshuihe River in Western Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(7): 1767–1777(in Chinese with English abstract).

Ouyang Chaojun, An Huicong, Zhou Shu, Wang Zhongwen, Su Pengcheng, Wang Dongpo, Cheng Duoxiang, She Jinxing. 2019. Insights from the failure and dynamic characteristics of two sequential landslides at Baige village along the Jinsha River, China[J]. *Landslides*, 16(7): 1397–1414.

Pan Guitang, Xiao Qinghui, Zhang Kexin, Yin Fuguang, Ren Fei, Peng Zhimin, Wang Jiaxuan. 2019. Recognition of the oceanic subduction–accretion zones from the orogenic belt in continents and its important scientific significance[J]. *Earth Science*, 44(5): 1544–1561(in Chinese with English abstract).

- Song Zhang, Zhang Guangze, Jiang Liangwen, Cheng Qiangong. 2016. Analyzed the characteristic of deep unloading fracture zone of high and steep slope of the Sichuan-Tibet Railway[C]//Zhu Ying (eds.). Proceedings of The Sichuan-Tibet Railway Construction: Challenges and Countermeasures Symposium in 2016. Beijing: China Communications Press(in Chinese with English abstract).
- Wang Baodi, Wang Liquan, Wang Dongbing, Yin Fuguang, He Juan, Peng Zhimin, Yan Guochuan. 2018. Tectonic evolution of the Changning-Menglian proto-paleo Tethys ocean in the Sanjiang area, Southwestern China[J]. Earth Science, 43(8):5-28(in Chinese with English abstract).
- Wang Lichao, Wen Mingsheng, Feng Zhen, Sun Weifeng, Wei Yunjie, Li Junfeng, Wang Wenpei. 2019. Researches on the Baige landslide at Jinshajiang River, Tibet, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 30(1): 5-13(in Chinese with English abstract).
- Wu Longke. 2015. Research on the Unloading Characteristics of Rockmass and Its Impact on the Project on Left Dam Abutment Slope Area of Batang Power Station[D]. Chengdu University of Technology, Master's thesis (in Chinese with English abstract).
- Xu Qiang, Zheng Guang, Li Weile, He Chaoyang, Dong Xiujun, Guo Chen, Feng Wenkai. 2018. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige village on October 11 and November 3, 2018[J]. Journal of Engineering Geology, 26(6):129-146(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiangning, Li Shengwei. 2005. Risk evaluation and precautionary measures for bank slope instability in the hydroelectric project area on the mainstream of the Jinsha River[J]. Geology in China, 32(1): 155-161(in Chinese with English abstract).
- Yang Wentao, Wang Yunqi, Sun Shao, Wang Yujie, Ma Chao. 2019. Using Sentinel-2 time series to detect slope movement before the Jinsha River landslide[J]. Landslides, 16(7): 1313-1324.
- Yin Yueping, Wang Wenpei, Zhang Nan, Yan Jingkai, Wei Yunjie, Yang Longwei. 2017. Long runout geological disaster initiated by the ridge-top rockslide in a strong earthquake area: A case study of the Xinmo landslide in Maoxian County, Sichuan Province[J]. Geology in China, 44(5): 827-841(in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng. 1999. Regional Metallogeny[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhang Yongshuang, Guo Changbao, Yao Xin, Yang Zhihua, Wu Ruian, Du Guoliang. 2016. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Earth Science, 37(3):277-286(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Qu Yongxin, Liu Jingru, Guo Changbao. 2007. Engineering geological research on altered rocks in the area of NW Yunnan along Yunnan-Tibet Railway line[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 29(4):531-536(in Chinese with English abstract).
- 邓建辉, 高云建, 余志球, 谢和平. 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):13-20.
- 董玉飞, 杨经绥, 连东洋, 熊发辉, 赵慧, 陈晓坚, 李观龙, 王天泽. 2019. 西藏班公湖-怒江缝合带中段东巧地幔橄榄岩岩石成因及构造环境分析[J]. 中国地质, 46(1): 87-114.
- 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[J]. 工程地质学报, 27(2):200-210.
- 葛华, 陈启国, 王德伟. 2013. 地震滑坡危险性评价及编图——以映秀震中区为例[J]. 中国地质, 40(2):644-652.
- 蓝康文. 2018. 川藏铁路高山峡谷边坡卸荷带变形破坏模式及稳定性研究[D]. 西南交通大学, 硕士学位论文.
- 李日运, 刘田珂. 2014. 岸坡应力场及卸荷带划分量化指标研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 35(2):76-80.
- 刘恋嘉. 2017. 叶巴滩水电站坝址区“砂糖状”挤压破碎带蚀变矿物岩石学特征及成因分析[D]. 成都理工大学, 硕士学位论文.
- 刘筱怡, 张永双, 郭长宝, 吴瑞安, 任三绍, 沈亚麒. 2019. 川西鲜水河呷拉宗古滑坡发育特征与形成演化过程[J]. 地质学报, 93(7): 1767-1777.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 张克信, 尹福光, 任飞, 彭智敏, 王嘉轩. 2019. 大陆中洋壳俯冲增生杂岩带特征与识别的重大科学意义[J]. 地球科学, 44(5): 1544-1561.
- 宋章, 张广泽, 蒋良文, 程谦恭. 2016. 川藏铁路高陡边坡深厚卸荷带特征分析[C]//朱颖(主编):川藏铁路建设的挑战与对策2016学术交流会论文集. 北京:人民交通出版社.
- 王保弟, 王立全, 王冬兵, 尹福光, 贺娟, 彭智敏, 闫国川. 2018. 三江昌宁-孟连带原-古特提斯构造演化[J]. 地球科学, 43(8): 5-28.
- 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[J]. 中国地质灾害与防治学报, 30(1): 5-13.
- 吴龙科. 2015. 金沙江巴塘水电站坝址区左岸边坡岩体卸荷特征及其对工程的影响研究[D]. 成都理工大学, 硕士学位论文.
- 许强, 郑光, 李为乐, 何朝阳, 董秀军, 郭晨, 冯文凯. 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):129-146.
- 许向宁, 李胜伟. 金沙江干流水电工程区岸坡失稳危险性预测及防治对策[J]. 中国地质, 2005, 32(1): 155-161.
- 殷跃平, 王文沛, 张楠, 闫金凯, 魏云杰, 杨龙伟. 2017. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究——以四川茂县新磨滑坡为例[J]. 中国地质, 44(5): 827-841.
- 翟裕生. 1999. 区域成矿学[M]. 北京:地质出版社.
- 张永双, 郭长宝, 姚鑫, 杨志华, 吴瑞安, 杜国梁. 2016. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. 地球学报, 37(3):277-286.
- 张永双, 曲永新, 刘景儒, 郭长宝. 2007. 滇藏铁路滇西北段蒙脱石化蚀变岩的工程地质研究[J]. 岩土工程学报, 29(4):531-536.

附中文参考文献