

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.06.07

美姑河流域地质构造对大型滑坡孕育的控制作用

孙东^{1,2} 殷志强³ 李大猛^{1,2} 岳建军² 邵海³ 曹楠^{1,2}

(1. 四川省地质矿产勘查开发局成都水文地质工程地质中心, 四川 成都 610081; 2. 四川省华地建设工程有限责任公司, 四川 成都 610081; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 地质构造及其活动特征与滑坡灾害的关系是工程地质研究中的热点问题。文章在川西南大凉山美姑河流域地质构造资料分析和大型古滑坡精细化调查的基础上,以流域内的典型古滑坡为研究对象,结合该地区地质构造的几何学、变形学、运动学和活动性特征,深入剖析了沉积构造、断裂构造、褶皱构造和节理构造等不同的地质构造类型对大型古滑坡的孕育的控制作用,认为地质构造对大型滑坡的控制主要表现在:(1) 断层破碎带、节理密集带等不连续结构面控制了滑坡发育的边界;(2) 断层破碎带、褶皱弯滑作用的滑动层面、沉积结构软弱夹层等孕育滑带的形成;(3) 节理构造形成的裂隙构成地下水储集和运移的通道,促进滑坡的孕育和大型滑坡的发生;(4) 活动断裂制约着滑坡地貌发展演化,诱发断裂活动的地震导致了大型滑坡失稳。建议在美姑河流域的滑坡灾害防治方面应加强不同尺度,尤其是中小尺度活动构造与滑坡发育演化研究。

关键词: 活动构造; 大型滑坡; 孕育控制; 美姑河流域; 防灾减灾

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)06-0049-10

Development of the large-scale landslides controlled by geological structures in Meigu River Basin

SUN Dong^{1,2}, YIN Zhiqiang³, LI Dameng^{1,2}, YUE Jianjun², SHAO Hai³, CAO Nan^{1,2}

(1. Chengdu Center of Hydrogeology and Engineering Geology Sichuan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Sichuan Huadi Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610081, China; 3. China Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: The relationship between geological structures with their action process and landslide hazards is a hot issue in engineering geological research area. Based on the analysis of geological tectonic data and the detailed investigation of large-scale ancient landslides in the Daliangshan mountain area of southwestern Sichuan, some typical ancient landslides in the basin were selected researched as the research objects. meanwhile. Combining the geometry, deformation, kinematics and active periods of the geological structures in the area, then the characteristics of different tectonics of sedimentary structures, fault structures, fold structures and joint structures to the formation mechanism and controlling of large-scale ancient landslides were analyzed in-depth. It is believed that the controlling action of geological active structures on large landslides is mainly about: (1) The boundary of landslide development controlled by fault fracture zone and jointed dense belt. (2) The formation of landslide sliding zone controlled by sliding layer, and weak interlayer of fault and fold fracture zones. (3) Some large-scale landslides occurred on the fissure formed by the joint structure

收稿日期: 2019-04-05; 修订日期: 2019-05-24

基金项目: 国家重点研究发展计划项目(2017YFC1501005); 国家自然科学基金重点项目(41731287); 国家地质调查项目(12120115045201); 中国地质调查局科研专项基金(1212011220126); 四川省科技计划基金(2012SZ0191)

第一作者: 孙东(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水工环地质调查评价工作。E-mail: sundong2003@126.com

通讯作者: 殷志强(1980-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事滑坡演化研究工作。E-mail: yinzq@cigem.cn

constitutes a channel for groundwater storage and migration could promote the large-scale landslides development. (4) The development of large-scale landslide landform evolution restricted by the active fault, and the earthquakes induced by fault activity lead to the instability of large landslides. Therefore, it is suggested that different scales should be strengthened in the prevention and controlling to landslide disasters in the Meigu River Basin, especially study on small and medium-scale active structures and landslide evolution, which can provide technical support for landslides early identification and disaster prevention in the basin.

Keywords: active structures; large-scale landslide; controlling; Meigu River Basin; disaster prevention and mitigation

0 引言

20 世纪以来,在人类工程活动及气候变化等因素影响下,大型滑坡频发,对经济建设和人民财产造成巨大的损失,吸引了众多学者的关注和研究^[1-2]。但对于滑坡灾害的研究多从工程地质的角度出发,研究其变形、失稳、破坏过程,部分研究者从滑坡体所处的构造背景探讨了构造与滑坡的关系^[3-17],研究多集中在滑坡与断层之间的“距离效应”^[4-10]、“上下盘效应”^[4,6,10-11]、“锁固段效应”^[10]、“背坡面效应”^[6,10],断层的几何学特征对滑坡的控制^[6,11],地震与滑坡的关系^[4,6-8,10]等,少数研究者深入探讨了各类活动构造与滑坡的关系^[12-17]。然而,实际的工作过程中发现,区域尺度的地质构造控制了滑坡的空间分布和密度,而各种类型的中小尺度的地质构造在滑坡孕育过程中起到了重要的作用。因此研究各种中小尺度的地质构造对滑坡的孕育机理和控制过程,可为滑坡灾害早期识别和风险防范提供关键的技术支撑。

1 美姑河流域活动构造与大型滑坡分布

1.1 美姑河流域活动构造格局

美姑河流域整体上位于青藏高原东缘云贵高原与川西南山地过渡带,构造上位于安宁河断裂带、龙门山断裂带、马边—盐津断裂和宁南—莲峰断裂带所挟持的凉山断块中部。区内构造以南北向褶皱和褶断构造为主,区域性的 SN 逆冲断裂带往往由数条雁列式断层组成,活动时间多在晚更新世以前^[18];受喜马拉雅造山运动的多期次不同方向应力场的影响下,在此基础上叠加了 NE 和 NW 走向的褶皱与断裂构造^[19]。上述三个方向的构造基本构成了区内的总体构造框架^[20]。

1.2 美姑河流域大型滑坡分布特征

美姑河流域共调查发现滑坡 161 处^[20],其中大型滑坡 17 处,特大型滑坡 5 处,巨型滑坡 4 处(图 1),其

余为中小型滑坡。

流域内的 4 处巨型古滑坡均表现为圈椅状地形,包括美姑县城古滑坡、亲木地古滑坡、柳洪古滑坡、拉马古滑坡,均为古滑坡,现今基本稳定;特大型滑坡 5 处,主要分布在美姑河中下游的河谷区左岸,部分前缘受河道侵蚀掏空形成崩塌(危岩带),以下游峡谷区最为典型,经常发生因崩塌堵塞交通;中型滑坡主要集中分布在上游的龙门乡至佐戈依达乡和中游的牛牛坝乡至俄洛依甘乡的河流左岸。

流域内大型、特大型和巨型滑坡堆积体长宽主要集中在 2 km 以内,其中以亲木地滑坡长度最长,超过 10 km;堆积体厚度以浅层滑坡为主,深层滑坡主要为基岩滑坡,如坪头电站滑坡深度为 125 m;堆积体前后缘高程差上游段主要集中在 500 m 以下,下游段滑坡堆积体高程差分布在 500 ~ 2 500 m,这与上下游段的地形密切相关,上游段主要 U 型谷,下游段主要为 V 型谷;地形坡度主要集中在 15° ~ 25°,最大地形坡度为乐约村滑坡,平均地形坡度为 35°^[20]。

2 典型古滑坡与构造识别

2.1 基伟村古滑坡

该古滑坡堆积体位于美姑县基伟村,河流左岸;堆积体长约 320 m,宽约 690 m,厚约 15 m,体积为 $3.31 \times 10^6 \text{ m}^3$,前后缘高差约 115 m,地形坡度 25°,地貌上呈圈椅状(图 2)。

基伟村古滑坡构造受三河断裂和支耳木背斜的控制明显,在滑坡体后缘位置为支耳木背斜核部位置(图 2、图 3),该背斜核部地层为二叠系上统峨眉山玄武岩(P_3em),属于坚硬类岩石,在褶皱作用过程中易发生与褶皱变形相伴生的节理破裂构造,岩石较破碎,结构松散,构成了滑坡体的主要滑动物质。在滑坡体前缘的井叶特西河沿河方向发育有三河断裂(图 2、图 3),该断裂的发育切割了较为完整的岩石,导致井叶特西河沿断裂的侵蚀能力强于断层影响带之外,因此

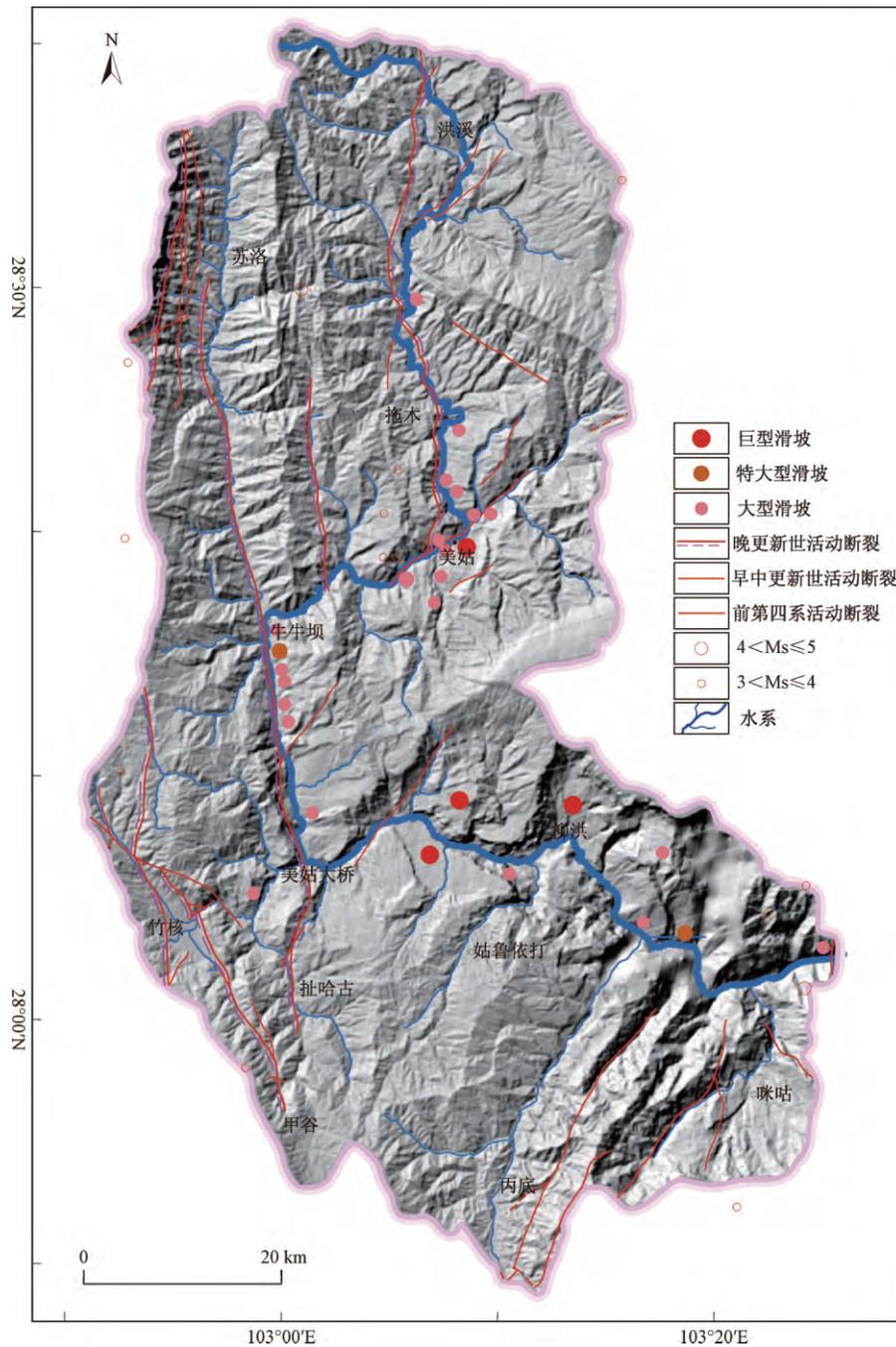


图 1 美姑河上游大型滑坡分布图

Fig. 1 Distribution map of large-large landslides in the upper reaches of Meigu River Basin

井叶特西河沿断层破碎带强烈切割, 形成深切地貌, 为大型滑坡孕育了前缘临空的有利地貌(图 3)。

2.2 美姑县城古滑坡

美姑县城滑坡是一个巨型古滑坡, 位于美姑河和井叶特西河交汇处的河流左岸, 滑坡体横跨整个美姑县城, 其宽度达 3 650 m, 长度达 3 000 m, 厚约 30 m (图 4)。

美姑县城古滑坡后缘分布有支耳木背斜构造, 滑坡体中部有一次级断层, 前缘有三河断裂出露(图 4)。支耳木背斜位于其滑坡体后缘的山脊一带, 核部地层主要为二叠系上统峨眉山玄武岩(P_3em)和下三叠统飞仙关—嘉陵江组(T_{1f-j})和中三叠统雷口坡组(T_2l), 其中嘉陵江组顶部存在一套泥页岩, 除此之外的中三叠统主要为白云岩, 下三叠统(T_{1f-j})主要为砂

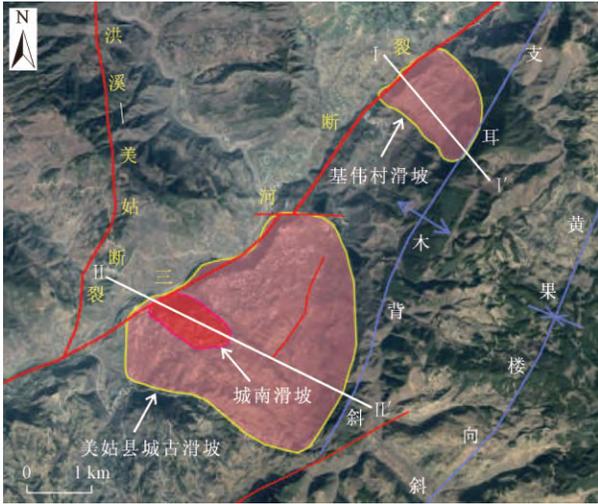


图 2 井叶特西河支流大型滑坡与构造分布图

Fig. 2 Distribution of large landslides and structures in the tributary of the Jingyetexi River

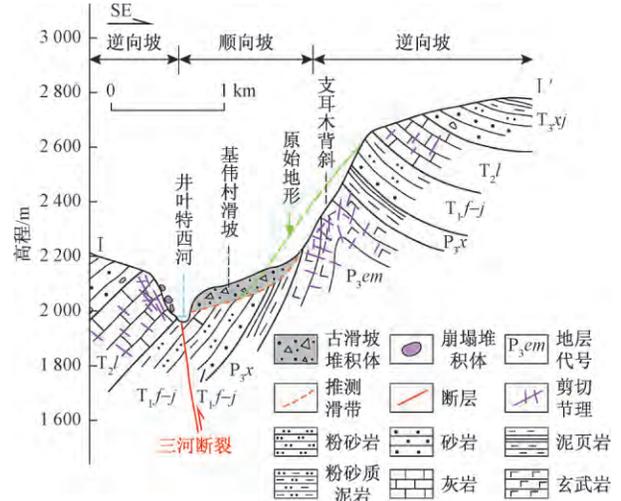


图 3 基伟村古滑坡纵剖面图

Fig. 3 The longitudinal profile of ancient-landslide in Jiwei Village

岩、粉砂岩,由此可见其岩石的能干性较强,属于较硬岩类,在褶皱作用过程中,背斜核部容易产生与褶皱相关的节理,其中的纵向节理结构面形成了滑坡体后缘的边界(图4);在坚硬层之间的软若夹层内部及其相互接触界面容易发生弯滑作用,导致原始沉积的层面力学性质降低,后期滑坡孕育过程中,沿着这种软弱夹层或软弱层与坚硬岩层的接触面孕育滑动面(图4)。

该滑坡体前缘为三河断裂经过之处(图4),该断裂属于规模较大的一条区域性断裂,断裂倾向SE,平面上基本与美姑河及其支流井叶特西河位置重叠,表明了:一方面断裂作用导致岩石破裂、碎裂成为侵蚀的优势区,河流沿断裂的下蚀作用在滑坡前缘加剧了地形坡度变陡;另一方面该断裂属于逆冲断裂性质,滑坡体位于断层的上盘,古滑坡及今仍在活动的城南滑坡

前缘与该断裂分布位置具有高度的吻合性,前人的研究识别了滑坡体的滑带为软弱夹层^[21],但前缘滑带与软弱层不对应,因此认为前缘存在将上覆的雷口坡组(T_2l)白云岩剪断的可能^[21],但没有很好地解释上述现象。针对城南滑坡的勘查亦表明在滑坡体前缘一带,出露地表的仍为雷口坡组(T_2l)白云岩,未见软弱夹层,作者认为这可能与该滑坡在前缘利用了断裂的断面或者次级断层破裂面,作为滑坡前缘上翘的剪出口(图4)。

其次,该滑坡的滑体上有多级陡缓地貌存在,可能该古滑坡经历了多期活动,调查表明在滑坡体中部位置亦存在NE走向的断层,认为滑坡体的前部活动是利用了其中部的断层作为后缘边界,前部活动之后,后部再次活动的牵引式滑坡(图4)。

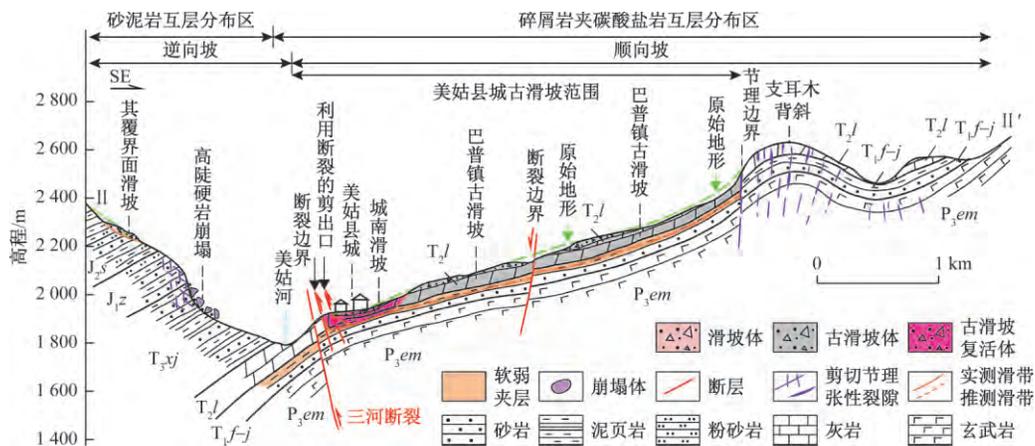


图 4 美姑县城古滑坡纵剖面图

Fig. 4 The longitudinal profile of ancient-landslide in Meigu County

2.3 拉马古滑坡

拉马古滑坡位于美姑河下游右岸的拉马乡,为一典型的超大型缓倾角顺层岩质滑坡^[22]。该古滑坡经过长期的地质演变,滑坡残余形态在平面上呈一近似三角形(图5)左侧边界完整直立,滑动后部分坚硬滑坡体残留形成孤石。滑坡体长约6 km,宽约2.5 km,分布面积约20 km²,滑坡中部发育有一条大冲沟,冲沟切割滑坡堆积体,可见最大切割深度约25 m,估算残余堆积体平均厚度约15 m,现今残余体积达到 3.0×10^8 m³。滑坡体前缘较陡,中部平缓,后缘陡立,坡度一般在12°;滑坡中部局部可见一些小的凸起,相对高差一般在2~4 m。滑坡体中部冲沟切穿堆积体,可见底部上三叠统峨眉山玄武岩(P_3em)基岩出露。古滑坡体前缘复活,发育了变电站滑坡(图5)。

拉马古滑坡滑体地层为下三叠统飞仙关组、嘉陵

江组(T_2f-j)和中三叠统雷口坡组(T_2l),三叠系下统岩性主要为一套中厚层砂岩为主的地层,中统为一套中厚层白云岩为主的地层,这些坚硬岩石在构造作用中发育了与岩石层面垂直的平面共轭“X”型剪节理,节理平直、延伸较远,贯通性极好,多切割数个单层。这些贯通性极好的节理面构成了滑坡孕育的先存结构面,逐渐孕育了滑坡的后缘拉张裂缝及两侧的滑坡边界。根据调查表明,滑坡滑带为上三叠统宣威组(P_3x),滑床为上三叠统峨眉山玄武岩(P_3em)^[22]。宣威组(P_3x)岩性主要为一套泥岩,属于软弱岩(图6),该地层在褶皱作用过程中成为了弯滑作用的优势层位,在该层内发生了剪切变形作用,降低了岩石的工程地质性能,后期由于美姑河强烈的下蚀作用,前缘临空之后,该层孕育为滑坡的滑带,而下伏且倾向美姑河的上三叠统坚硬峨眉山玄武岩(P_3em)成为滑床。

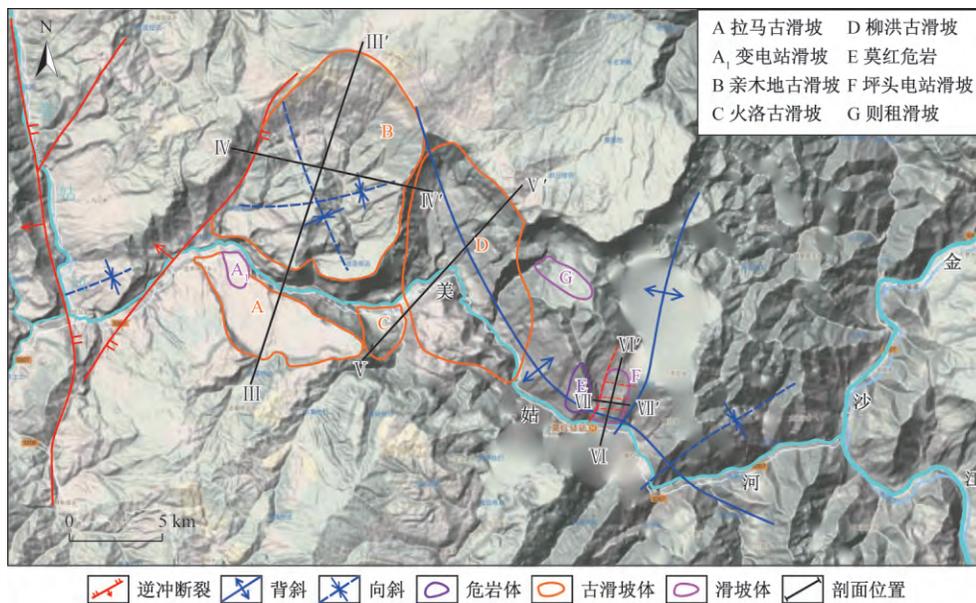


图5 美姑河下游大型滑坡与活动构造分布图

Fig. 5 Distribution of large-scale landslides and structures in the lower reaches of the Meigu River

2.4 亲木地古滑坡

亲木地古滑坡位于美姑河下游左岸尔其乡至瓦古乡一带,为一超大型缓倾角顺层岩质滑坡,形态呈“圈椅状”,滑坡体长度超过10 km,宽度达到9 km,最大厚度推测超过500 m,估算体积达到 1.87×10^{10} m³。是美姑河流域内规模最大的古滑坡(图5)。

该地区的构造研究表明,区域内发育多期叠加褶皱^[19],根据地质调查表明亲木地古滑坡区域为两期叠加褶皱(图5),褶皱构成了地层层面为“瓢”状,且倾向美姑河;同时在滑坡体的北西侧发育一条走向NE,

倾向NW的逆冲断裂(图5)。叠加向斜的核部为中生界三叠系至侏罗系地层,岩性以砂岩、粉砂岩和白云岩为主,古生界上三叠统峨眉山玄武岩(P_3em)及其之下地层亦卷入了该褶皱(图6)。

亲木地古滑坡为一大型基岩滑坡,滑体的地层为中生界三叠系至侏罗系地层,滑带为上三叠统宣威组(P_3x)软弱泥页岩,滑床为上三叠统坚硬的峨眉山玄武岩(P_3em)(图6)。其位置大致与前述的拉马古滑坡遥河相望(图5),对比二者的发育背景,其滑带和滑床一致,仅亲木地古滑坡的滑体地层更多更厚(图6)。

由此可见,亲木地巨型古滑坡受到了褶皱构造、断裂构造和沉积构造的控制。叠加褶皱构造整体将地层弯曲成斜倾的“瓢”状,坚硬的峨眉山玄武岩“瓢”孕育成典型的圈椅状滑床(P_3em);滑坡体西侧的断层破坏了岩石的连续性,构成了滑坡的西侧滑动边界(图5、图7);宣威组(P_3x)特殊的沉积构造——软弱泥页岩夹层,在褶皱作用过程中孕育发展成滑带(图6、

图7)。上述3种构造共同孕育了该巨型古滑坡体的初始地质背景条件,在前缘被美姑河侵蚀产生临空条件后,推测在地震及强降雨的激发条件下,该古滑坡体中生界地层曾利用了宣威组作为滑带、峨眉山玄武岩为滑床,出现过小规模滑动。后缘的多沟同源、阶地状地貌,南西侧滑床的大光壁均证明其滑动过(图5)。

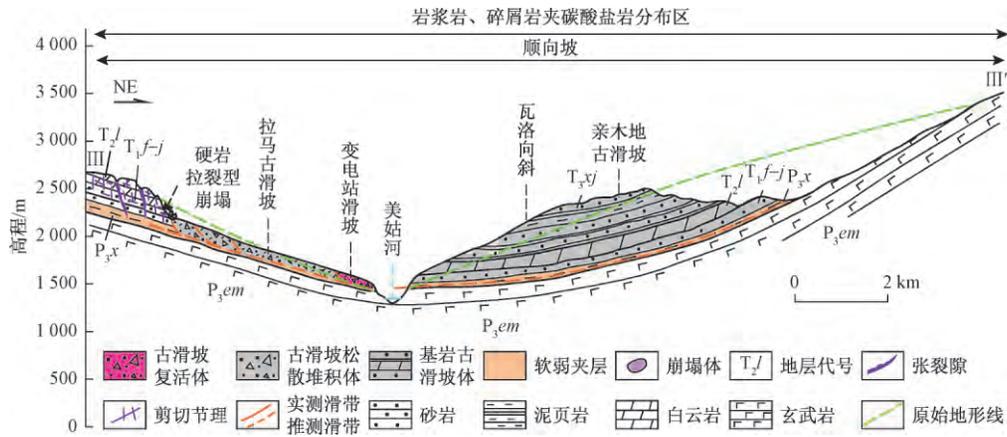


图6 美姑河下游拉马古滑坡、亲木地古滑坡纵剖面图

Fig.6 The longitudinal profile of Lama and Qinqmudi ancient-landslide in the lower reaches of the Meigu River

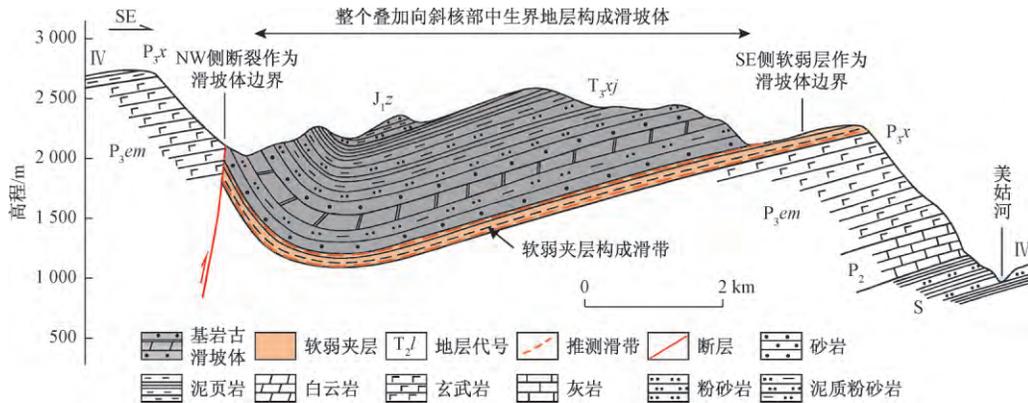


图7 亲木地古滑坡横剖面

Fig.7 The cross profile of Qinqmudi ancient-landslide

2.5 火洛古滑坡

火洛古滑坡位于美姑河下游右岸哈甘乡火洛洼喜村(图5),面积约 $1.8 \times 10^6 m^2$,滑坡长 2.5 km,宽约 2 km;滑坡堆积体平均厚度约 150 m,总体积约 $2.7 \times 10^8 m^3$,估计原始体积约 $6 \times 10^8 m^3$,最大滑移距离为 2 km,滑坡形成于晚更新世中晚期以前^[23]。

滑坡区出露的地层主要由二叠系中下统(P_{1-2})灰岩和上统峨眉山玄武岩(P_3em)、志留系(S)粉砂岩、页岩组成的基岩及第四系各种成因的松散堆积物(图8)。斜坡中上部二叠系地层属于较坚硬—坚硬岩石,

斜坡下部的志留系龙马溪组为软弱岩石,尤其是在志留系(S)与中下二叠统(P_{1-2})接触界面附近有一套炭质页岩(图8),强度极低。

据许声夫(2016)研究成果^[23],该滑坡的滑坡体物源为中下二叠统(P_{1-2})灰岩和上三叠统峨眉山玄武岩(P_3em)。其主要滑面为志留系(S)顶部与中下二叠统(P_{1-2})交界的一套炭质页岩。该斜坡体的变形破坏是由于内、外动力作用相互交织、耦合造成。在早期的区域性构造作用(内动力地质作用)下,坚硬的二叠系灰岩和玄武岩形成了一些垂直层面的构造节理,切贯通

性较好(图 9a);随着美姑河的下切,在该河谷段形成了深切“V”型河谷,导致河流右岸坡度变陡,使得二叠系灰岩和玄武岩地层反倾并暴露在河谷右岸陡坡之上(图 9a)。随着美姑河河流下切的加强,斜坡变陡,在自身重力作用下发生蠕变,出现卸荷裂隙,原有构造节理面进一步扩展延伸(图 9b);在地表风化、地下水(外动力地质)作用下,斜坡顶部的裂隙进一步加大,前缘产生临空条件,在顶部出现拉裂现象(图 9c);斜坡中部的构造节理面也处于持续扩展变形中,重力造成的卸荷裂隙进一步发育,将原始不连续的构造节理结构

面连通起来,在斜坡中上部形成贯通的大裂缝,在斜坡下部出现新的卸荷裂隙,在斜坡顶部由于表生风化作用和地表水、地下水作用下将破碎岩体带至拉张裂隙中充填(图 9d);随着重力作用的进行,下部二叠系灰岩中的原有不连续构造节理结构面和卸荷结构面继续扩展,演变成岩体从斜坡顶部玄武岩至斜坡下部灰岩的贯通性大裂隙。最终在强震作用下,斜坡被分割的坡体就整体失稳,脱离母体,产生倾倒变形,或者是沿志留系顶部的炭质页岩层整体滑动,形成滑坡灾害(图 9e)。

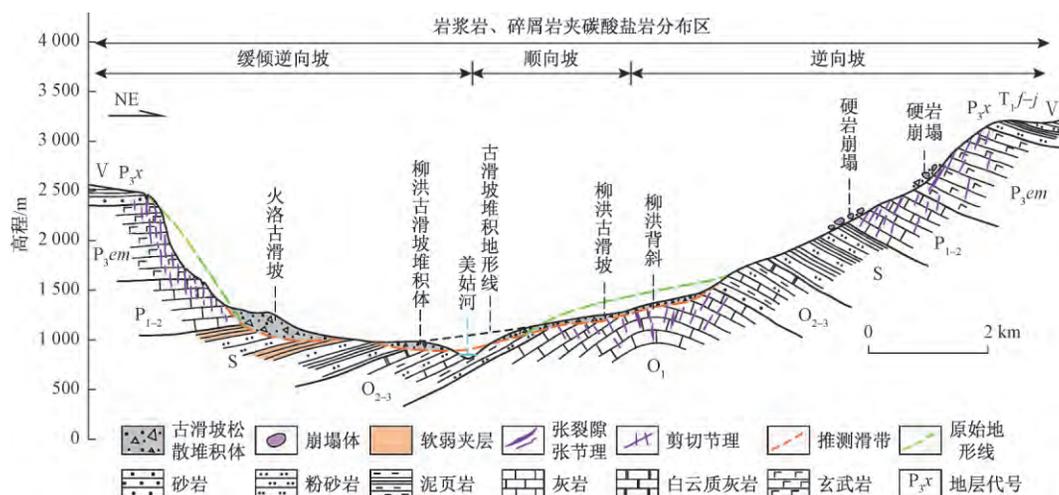


图 8 美姑河下游火洛古滑坡、柳洪古滑坡纵剖面图

Fig. 8 The longitudinal profile of Huoluo and Liuhong old ancient-landslide in the lower reaches of the Meigu River

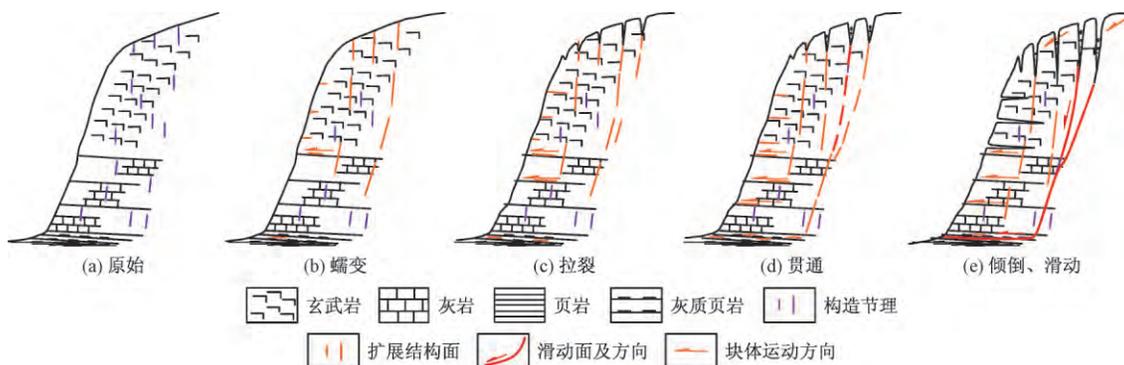


图 9 火洛反倾岩质斜坡的变形破坏机理及过程(据 [23] 修改)

Fig. 9 The mechanism and process of deformation and failure in the Huoluo anti-dip rock slope(According to [23] modification)

由此可见,该古滑坡的孕育和发展过程中,先存垂直层面的节理构造和沉积构造中的软弱层,起到了至关重要的作用。

2.6 柳洪古滑坡

柳洪古滑坡位于美姑河下游左岸的柳洪乡一带(图 6),其滑坡整体长 10.9 km,宽 5.5 km;滑坡堆积

体平均厚度约 40 m,总体积约 $2.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,估算原始体积超过约 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

其滑坡产生的位置基本与柳洪背斜位置重叠,柳洪背斜核部地层主要为下奥陶统(O_1)中厚层灰岩(图 8),属于较坚硬—坚硬岩体,在褶皱的过程中由于岩石的能干性较强,同期伴生了较多的纵向张节理和横

向、斜向剪节理,使得岩石较为破碎。受美姑河下蚀的影响,在柳洪背斜西翼形成高陡斜坡,前缘临空条件产生,由于沿背斜转折端先存构造节理面密集发育,不连续的节理面逐渐贯通,先存构造节理面和岩石的层面组合形成滑面,上覆破碎的岩体在强震激发条件下发生滑动,形成柳洪古滑坡。该古滑坡规模较大,形成的滑坡体可能阻塞了美姑河,现今的美姑河属于堰塞湖在滑坡体中前部溃坝后继续下蚀的结果,因此在美姑河右岸河谷区亦堆积了大量的滑坡堆积体(图8)。

由此可见,背斜构造与坚硬岩类耦合产生的构造节理是孕育该滑坡的关键因素。

2.7 坪头电站古滑坡

该滑坡位于美姑河下游左岸尔古沟—万波沟段凹形岸坡前缘(图6),平均宽约600 m,纵向长度约1.5 km,滑面最大埋深达282 m,体积约 $8.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ 左右,属特大型超深层滑坡,滑坡发生在距今约1.3万年的冰末期^[24]。

滑坡体内部发现了数条断裂及层间挤压错动带,基本横穿滑坡体,靠近前部的一条断层具有逆冲性质(图10)。虽在该断层向上的区域未通过平硐或钻探手段直接揭露到断裂带,但氦气测量显示在滑坡体中后部存在数个高异常带,推测在滑坡体后部及后缘存在与前部逆冲断裂近于平行展布的断层^[24](图10)。据资料显示^[24],在滑坡右侧尔古沟内,沿沟下游存在一条推测的断层,从构造上看此处位于莫红背斜的西翼。存在着褶断型断裂的可能性,根据尔古沟上游遥感资料,存在一条与尔古沟斜交的线性冲沟,综合推测沿西侧存在一条近南北走向的逆冲断裂(图11)。

由此可见,坪头电站滑坡其西侧边界为一断层控

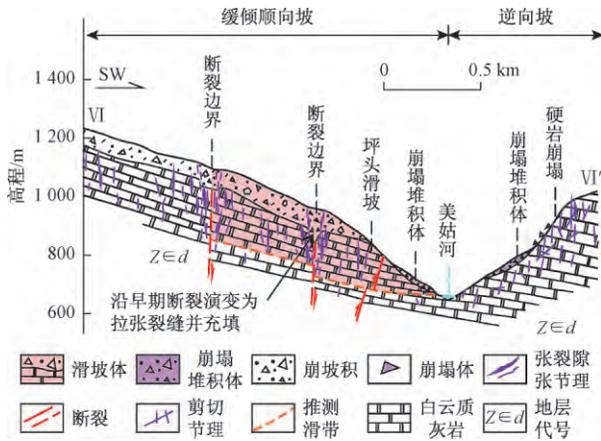


图10 坪头电站古滑坡纵剖面图(据^[24]修改)

Fig. 10 The longitudinal profile of Pingtou hydropower station ancient landslide (according to ^[24] modification)

制,东侧受万古沟控制(图11),后缘推测与断裂相关(图10),为典型的断裂构造控制滑坡,属于断裂—顺层斜坡—深切河谷类型。坪头滑坡与其上游的莫红危岩有着相似的斜坡结构,但其最终的变形破坏机制则差别较大,莫红危岩表现为小块的崩塌,而坪头滑坡则表现为规模巨大的整块滑动,认为其与控制变形的边界条件有关,莫红危岩主要控制构造为不连续或贯通性一般的褶皱相关节理结构面,而坪头滑坡则表现为连续性、贯通性好的断层。

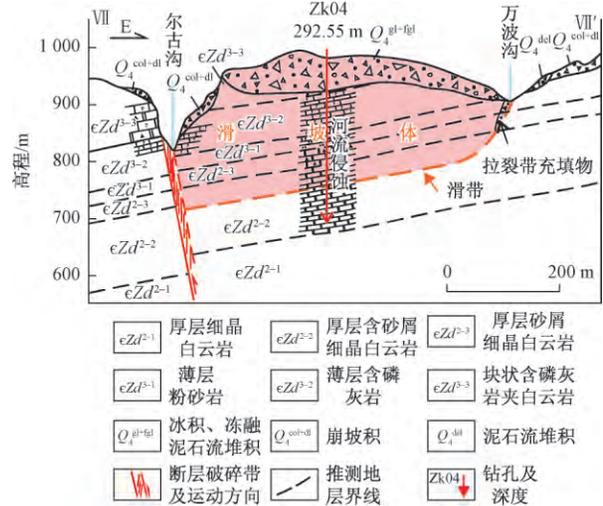


图11 坪头电站古滑坡横剖面图(据^[24]修改)

Fig. 11 The cross profile of Pingtou hydropower station ancient landslide (According to ^[24] modification)

3 讨论

3.1 沉积构造对滑坡的孕育和控制

美姑河流域的大型滑坡研究表明沉积构造对滑坡的控制主要表现为层面及软弱带孕育为滑带,其次亦可构成滑坡边界。其具体方式体现在:(1)沉积环境的改变形成的层理,构成了最早的结构面,是构造变形中的薄弱带,易发生剪切变形,多孕育为滑坡的滑动面;(2)沉积相的变化可以构成软弱夹层,该层在构造变形过程中易产生塑性变形及剪切变形,是孕育大型滑坡滑带的“关键带”;(3)沉积相变形成的岩性差异控制了构造变形的的方式,硬岩易发生破裂,软岩易发生塑性及剪切变形,差异变形是促进大型滑坡孕育的重要因素;(4)软弱夹层不仅可以构成滑带,在与其他构造耦合出现时,亦可构成滑坡边界,如前述的亲木地古滑坡。

3.2 断裂构造对滑坡的孕育和控制

断裂构造产生的变形学差异破坏了岩石的连续

性,降低了岩石的工程地质性能;断裂的破裂变形和运动学特征均可以控制地貌的发展演化,为滑坡孕育了优势的地形地貌条件。

因此,断裂对滑坡的孕育和控制体现在:(1)构成滑坡体的边界条件,包括后缘和侧向边界,甚至是前缘剪出口,如美姑县城古滑坡、亲木地古滑坡、坪头电站滑坡等;(2)断裂作用的破裂变形和位移可以孕育和控制并提供优势的滑坡地貌,如基伟村古滑坡、美姑县城古滑坡;(3)断裂作用导致的岩石破裂可以构成滑坡体的松散物源;(4)断裂活动产生地震可以为滑坡提供激发条件。

3.3 褶皱构造对滑坡的孕育和控制

褶皱作用是岩石的一种重要变形过程,根据上述分析,其对滑坡的控制主要体现在:(1)褶皱作用过程中的弯滑作用导致了岩层沿层面方向的力学性质降低,从而将该层面孕育为滑面(图12);(2)褶皱作用过程中会伴生有岩石的破裂变形,并形成节理,破坏了岩石的连续性,降低了其工程地质性能(图12),可构成滑坡物源,如基伟村古滑坡、柳洪古滑坡;(3)褶皱作用导致地层倾斜,与地形耦合构成各类斜坡,并形成一些不稳定的斜坡结构;(4)褶皱与坚硬岩层的耦合可形成滑坡滑床的形态,并控制整个滑坡体,如亲木地古滑坡。

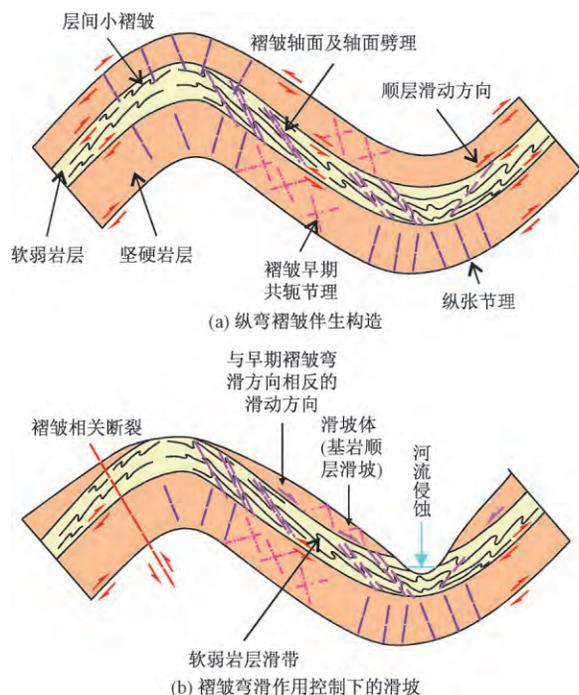


图12 软硬相间地层纵弯褶皱弯滑作用示意图

Fig. 12 Schematic diagram of folding and bending by buckle fold in soft alternating with hard layer

3.4 节理构造对滑坡的孕育和控制

节理是构造变形中的产物,其变形最终导致了岩石的破裂,并形成了先存结构面。其对滑坡的控制体现在:(1)节理变形破坏了岩石的连续性,导致岩体呈现为碎块状,构成滑坡体的物源,如基伟村古滑坡、柳洪古滑坡;(2)节理产生的结构面在地形耦合的情况下,可孕育并发展成为滑坡体边界,如火洛古滑坡;(3)节理形成的裂隙是地下水运移的主要通道和储集空间,在降雨过程中,是地表水入渗的主要位置,其储集的地下水容易软化岩层,减小摩擦力,也容易产生浮托力,最终诱发滑坡滑动。

4 结论

通过对美姑河流域活动构造与大型古滑坡分布的研究,主要取得了以下认识:

(1) 沉积构造对大型滑坡孕育的控制主要体现在层面常孕育演变为滑面及软弱层发展演变为滑带。

(2) 断层对大型滑坡的控制主要体现在破坏岩石的连续性、降低岩石的工程地质性能,构成滑坡边界;断层的岩石变形学及断层的活动位移可进一步加速滑坡地貌演化;诱发断裂活动的地震导致了大型滑坡失稳。

(3) 褶皱过程中的弯滑、湾流作用,进一步促进了层面及软弱夹层的工程地质性能下降,甚至孕育为大型滑坡的滑带。

(4) 节理构造破坏了岩石的完整性,同时是地下水径流、储集主要途径和空间,为滑坡的发生提供了先决条件。

致谢: 本文在写作过程中得到了四川省华地建设工程有限责任公司赵松江教授级高工的指导,在此感谢。

参考文献:

- [1] ZHOU J W, XU W Y, YANG X G, et al. The 28 October 1996 landslide and analysis of the stability of the current Huashiban slope at the Liangjiaren Hydropower Station, Southwest China [J]. Engineering Geology, 2010, 114(1-2): 45-56.
- [2] 黄润秋. 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, 2007, 26(3): 433-454. HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanism in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454.
- [3] 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.
WANG Sijing. Coupling of earths endogenic and exogenic geological disasters [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10(2): 115-117.
- [4] 陈晓利, 李传友, 王明明 等. 断裂带两侧地震诱发滑坡空间分布差异性的主要影响因素研究——以北川地区的地震滑坡分布为例[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(3): 737-746.
CHEN Xiaoli, LI Chuanyou, WANG Mingming, et al. The main factors causing the seismic landslide distribution difference on two sides of the faults: A case study of landslide distribution in Beichuan area [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(3): 737-746.
- [5] 郭长宝, 杜宇本, 张永双 等. 川西鲜水河断裂带地质灾害发育特征与典型滑坡形成机理[J]. *地质通报*, 2015, 34(1): 121-134.
GUO Changbao, DU Yuben, ZHANG Yongshuang, et al. Geohazard effects of the Xianshuihe fault and characteristics of typical landslides in western Sichuan [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(1): 121-134.
- [6] 陈晓利, 惠红军, 赵永红. 断裂性质与滑坡分布的关系——以汶川地震中的大型滑坡为例[J]. *地震地质*, 2014, 36(2): 358-367.
CHEN Xiaoli, HUI Hongjun, ZHAO Yonghong. Study on the fault mechanics influences on the landslide distribution: a case study from the Wenchuan earthquake [J]. *Seismology and Geology*, 2014, 36(2): 358-367.
- [7] YIN, Z Q, ZHAO W J, QIN X G. Distribution characteristics of geohazards induced by the Lushan Earthquake and their comparisons with the Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Earth Science*, 2014, 25(5): 912-923.
- [8] 许冲, 徐锡伟, 吴熙彦 等. 2008 年汶川地震滑坡详细编目及其空间分布规律分析[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(1): 25-44.
XU Chong, XU Xiwen, WU Xiyan, et al. Detailed catalog of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake and statistical analyses of their spatial distribution [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(1): 25-44.
- [9] 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.
ZHANG Yongshuang, SU Shengrui, WU Shuren, et al. Research on relationship between fault movement and large-scale landslide in intensive earthquake region [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2011, 30(S2): 3503-3513.
- [10] 许强, 李为乐. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(6): 818-826.
XU Qiang, LI Weile. Distribution of large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(6): 818-826.
- [11] 付碧宏, 时丕龙, 王萍 等. 2008 年汶川地震断层北川段的几何学与运动学特征及地震地质灾害效应[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(2): 485-495.
FU Bihong, SHI Peilong, WANG Ping, et al. Geometry and kinematics of catalog of Wenchuan earthquake surface ruptures around the Qushan town of Beichuan Country, Sichuan: Implications for mitigation of seismic and geologic disaster [J]. *Chinese Journal of Geophysics* 2009, 52(2): 485-495.
- [12] LI Y, ZHOU R, ZHAO G, et al. Tectonic uplift and landslides triggered by the Wenchuan earthquake and constraints on orogenic growth: A case study from Hongchun Gully, Longmen Mountains, Sichuan, China [J]. *Quaternary International*, 2014, 349: 142-152.
- [13] 张莹, 苏生瑞, 李鹏. 断裂控制的滑坡机理研究——以柳家坡滑坡为例[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(6): 1127-1137.
ZHANG Ying, SU Shengrui, LI Peng. Numerical simulation on mechanism of fault: controlled Liujiapo landslide [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(6): 1127-1137.
- [14] HUANG C, T B BYRNE, W B OUMMET, et al. Tectonic foliations and the distribution of landslides in the southern Central Range, Taiwan [J]. *Tectonophysics*, 2016, (692): 203-212.
- [15] F DHAHRI, R BENASSI, A MHAMDI, et al. Structural and geomorphological controls of the present-day landslide in the Moulares phosphate mines (western-central Tunisia) [J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2015, 75(4): 1-10.
- [16] F BUCCI, M SANTANGELO, M CARDINALI, et al. Landslide distribution and size in response to Quaternary fault activity: the Peloritani Range, NE Sicily, Italy [J]. *Earth Surf. Process. Landforms*, 2016, 41, 711-720.
- [17] M CARLINI, A CHELLI, P VESCOVI, et al. Tectonic control on the development and distribution of large landslides in the Northern Apennines (Italy) [J]. *Geomorphology*, 2016, 253: 425-437.

(下转第 67 页)

- 管道应力分析[J]. 天然气工业, 2017, 37(2): 84-91.
CHEN Liqiong, SONG Liqiang. FEM-based stress analysis of gas pipelines in landslide areas [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(2): 84-91.
- [59] 李杭杭. 基于 DEM-FEM 耦合的滑坡作用下管道力学响应分析[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
LI Hanghang. Mechanical response analysis of pipeline subjected to landslide based on DEM-FEM coupling [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [60] CHALLAMEL N, DE BUHAN P. Mixed modelling applied to soil-pipe interaction [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(3): 205-216.
- [61] 张满银, 王生新, 孙志忠, 等. 基于云理论的油气管道滑坡危险性综合评价[J]. 工程科学学报, 2018, 40(4): 427-437.
ZHANG Manyin, WANG Shengxin, SUN Zhizhong, et al. Comprehensive evaluation of landslide risks of oil and gas pipelines based on cloud theory [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(4): 427-437.
- [62] 洗国栋, 吴森, 潘国耀, 等. 油气管道滑坡灾害危险性评价指标体系[J]. 油气储运, 2018, 37(8): 865-872.
XIAN Guodong, WU Sen, PAN Guoyao, et al. Hazard assessment index system of landslide disasters along oil and gas pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(8): 865-872.
- [63] ALVARADO-FRANCOJ P, CASTRO D, ESTRADA N, et al. Quantitative-mechanistic model for assessing landslide probability and pipeline failure probability due to landslides [J]. Engineering Geology, 2017, 222: 212-224.

(上接第 58 页)

- [18] 孙东, 王道永, 吴德超, 等. 美姑河断裂活动性研究及对水电工程影响评价[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(4): 13-17.
SUN Dong, WANG Daoyong, WU Dechao, et al. Research on activity of Meigu River fracture zone and effect evaluation on hydropower project [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(4): 13-17.
- [19] 孙东, 王道永. 四川省美姑地区叠加褶皱构造特征[J]. 四川地震, 2008(1): 43-47.
SUN Dong, WANG Daoyong. Structure characteristics of the superposition fold of Meigu Region, Sichuan Province [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2008(1): 43-47.
- [20] 殷志强, 孙东, 张瑛, 等. 美姑河流域滑坡时空展布及成生机制研究[J]. 第四纪研究, 2018, 38(6): 1358-1368.
YIN Zhiqiang, SUN Dong, ZHANG Ying et al. Study on spatial temporal distribution characteristics and forming mechanism of landslides in the Meigu River basin [J]. Quaternary Sciences, 2018, 38(6): 1358-1368.
- [21] 朱永莉. 四川美姑县城南滑坡稳定性及防治方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
ZHU Yongli. The study on the stability and remedial measures of Meigu south landslide [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [22] 王金鹏. 美姑县拉马阿觉滑坡成因机制及运动学特征分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
WANG Jinpeng. Research on formation mechanism and motion characteristics of Lamajue Landslide in Meigu County [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [23] 许声夫. 美姑河火洛古地震滑坡的动力学特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
XU Shengfu. Research on dynamical characteristics of historical seismic landslide on Huoluo village near Meigu River [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [24] 胡正涛. 美姑河坪头水电站尔古沟-万波沟古滑坡稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
HU Zhengtao. Study on the stability of the ancient landslide of Ergu groove-Wanbo groove of Meigu Pingtou hydropower station [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.