

四川高位滑坡发育特征及典型地质力学模式

蒋涛¹, 崔圣华^{1*}, 许向宁^{1,2}, 蒙明辉^{1,3}

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 四川省地质矿产勘查开发局四〇五地质队, 成都 611830;

3. 四川省华地建设工程有限公司, 成都 610081)

摘要: 四川省地处华南板块和藏滇板块的结合区域, 受地形地貌、地质构造、气候条件等因素的综合影响, 该地区成为地质灾害易发区和高发区。其中高位滑坡由于剪出口位置高、临空条件良好、潜在势能巨大, 这类滑坡往往会发生高速远距离运动, 具有极强的冲击破坏能力, 并引发滑坡-碎屑流-堰塞湖灾害链。因此, 本文通过文献查阅、野外地质调查和归纳分析等方法, 分析了四川高位滑坡发育分布特征及梯子槽滑坡、新磨村滑坡、照壁山滑坡的形成机理, 得出了以下结论: (1) 区内滑坡灾害密集分布带与龙门山断裂、鲜水河断裂和安宁河断裂所构成的“Y”字形区域应力场分界线相吻合; (2) 高位滑坡的发育受到地形地貌条件的显著影响和控制, 大高差的斜坡为滑坡提供了良好的临空条件和势能条件, 且 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 坡度有利于斜坡堆积, 为滑坡形成提供物质条件; (3) 软硬相间岩中的软岩硬度小、力学强度相对较差、易风化, 属于易滑地层, 与硬岩形成差异风化, 在下伏软岩软化作用下, 上部更硬岩易发生滑动形成滑坡; (4) 分析了梯子槽滑坡、新磨村滑坡、照壁山滑坡高位大型滑坡成因模式: 倾倒-折断型、拉裂-顺层滑移型、蠕滑-拉裂型。通过以上认识, 可以对四川区域的高位滑坡风险防治提供借鉴。

关键词: 高位滑坡; 发育分布规律; 形成机制; “Y”字形断裂; 四川省

中图分类号: P642.22; P56; X4 **文献标识码:** A

DEVELOPMENT CHARACTERISTICS AND TYPICAL GEOMECHANICAL MODELS OF HIGH-POSITION LANDSLIDES IN SICHUAN

JIANG Tao¹, CUI Sheng-hua^{1*}, XU Xiang-ning^{1,2}, MENG Ming-hui^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. 405 Geological Brigade of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Chengdu 611830, China;

3. Sichuan Hua Di Building Engineering Co., Ltd., Chengdu 610081, China)

Abstract: According to literature review, field geological investigation, and inductive analysis, this article analyzes the distribution characteristics of high-level landslides in Sichuan Province and the formation mechanisms of Ladder Gully landslide, Xinmo Village landslide, and Zhaobi Mountain landslide. The following conclusions are drawn: (1) The densely distributed landslide disaster zone in the region coincides with the boundary of the regional stress field formed by Longmen Mountain Fault, Xianshui River Fault, and Anning River Fault, which forms a “Y” shape; (2) The development of high-level landslides is

significantly influenced and controlled by the topography and geomorphological conditions. Steep slopes with large elevation differences provide good conditions for landslides, and slopes with a gradient of $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ are conducive to slope accumulation, providing material conditions for landslide formation; (3) The alternating layers of soft and hard rocks have lower hardness, relatively weaker mechanical strength, and are prone to weathering, belonging to easily slid strata. Under the softening effect of the underlying soft rocks, the upper harder rocks are more prone to sliding and forming landslides; (4) The formation mechanisms of large-scale high-level landslides such as Ladder Gully landslide, Xinmo Village landslide, and Zhaobi Mountain landslide are analyzed, including the tipping-fracture type, the pull-apart-bedding sliding type, and the creep-pull-apart type. Based on the above understanding, this study can provide references for the risk prevention and control of high-level landslides in Sichuan Province.

Key words: high-position landslides; development distribution law; formation mechanism; “Y” shaped fault; Sichuan

滑坡是世界普遍存在的地质灾害事件,因其频率高、致灾范围广和破坏性强,且具有隐蔽性和突发性等特点^[1, 2],滑坡研究已经成为工程地质领域的焦点。“高位”主要是指滑坡剪出口与前缘的高差 h 较大,一般在 100 m 以上^[1, 3]。由于剪切带位置高、临空条件良好、潜在势能巨大,这类滑坡往往会发生高速远距离运动,具有极强的冲击破坏能力,并引发滑坡-碎屑流-堰塞湖灾害链^[4-6],所以一旦发生失稳破坏,经济和社会的影响都是巨大的。我国西南地区位于构造活动带上,尤其是四川省处于华南板块和藏滇板块的结合区域。受地形地貌、地质构造、气候条件等因素的综合影响,该地区成为地质灾害易发区和高发区^[7-9]。

本文聚焦华南板块和藏滇板块的结合区域,以四川省为研究区,重点分析四川省内高位滑坡空间分布特征、主要影响因素及典型高位大型滑坡的形成机制。前人针对典型高位滑坡案例,从变形特征、动力学特征和监测方法等方面进行了研究。杨沛璋等^[10]研究了茂县梯子槽大型倾倒变形体变形演化特征;蒙明辉等^[11]认为倾倒一旦失稳将堵塞岷江造成灾害链,对下游造成极大威胁。物理模拟和数值模拟手段是研究高位滑坡动力学特征的重要手段。以新磨村滑坡为例,通过数值模拟和物理模拟^[12-16],研究认为,滑坡的动力学过程是中部滑体受到上部滑体的推挤作用下,向临空面方向高速弹射,下部被带动向外运动。徐杨青等^[17]通过数值模拟分析了菲律宾 Guinsaugon 高位滑坡灾害运动学特征。通过遥感(RS)、无人机(UAV)、地面合成孔径雷达(InSAR)等技术手段,既可以实现高位滑坡的早期识别^[18, 19],又可以初步揭示滑坡的动力学过程。此

外,还可以对滑坡周边欠稳定岩土体特征和危险性进行分析评价^[20-22]。但是,目前还没有四川省高位滑坡分布规律系统性的研究。另外,高位大型滑坡的成因模式也一直是地质灾害领域长期关注的重要问题。张永双等^[23]将川藏交通廊道典型高位滑坡总结归纳为 6 类地质力学模式;张佳佳等^[24]以此分类为基础将澜沧江昌都段滑坡主要分为断裂控制的滑坡、砂泥岩软弱地层区滑坡、堆积层滑坡 3 类,这说明不同类型高位滑坡发育具有地域性。

本文以研究区内四川典型的高位滑坡为研究对象,利用遥感、实地勘察和理论数据统计分析等手段,通过对研究区内典型的高位滑坡进行统计分析,系统分析和研究区内高位滑坡分布发育规律。结合典型的地质-力学模式,研究区的地质环境条件以及现有的滑坡研究成果,对区域内 3 个典型高位滑坡形成机理进行了分析,为川内高位滑坡的识别和重大工程的防灾减灾提供参考和支撑。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

研究区位处于青藏高原东侧,在我国地形第一、第二两级阶梯的过渡带(图 1)。地形地貌类型多样,整个省份被横跨其境的川西高山所分割,西部是青藏高原的一部分,地势高度逐渐升高,形成了许多高山峰峦和峡谷地貌。该区域内平均海拔为 2 000~6 000 m,最高海拔达 7 556 m,最低海拔为 540 m,低纬度高海拔特征明显。其东部地形逐渐由高山向低山、丘陵过渡,直到平原地区。区域内的气候鲜明,季节性明显,年温度从东往西迅速降低,年降水量受

到地形和季风环流的影响, 自四川盆地四周向中部减少, 盆中丘区最少雨区不足 900 mm, 盆东及盆西边缘山地普遍在 1 200 mm 以上, 整体上从东南往西北逐渐减少。

在构造上地处中国大陆板块的东缘, 是青藏高

原、华南地区和川滇地区 3 个地质构造单元的交汇区域。受到了太平洋板块、欧亚板块和印度洋板块等 3 大板块的夹持下, 四川省的地质构造背景比较复杂, 存在着多个地质构造带和活动断裂带(图 1), 容易受到地震、滑坡等自然灾害的影响^[25]。

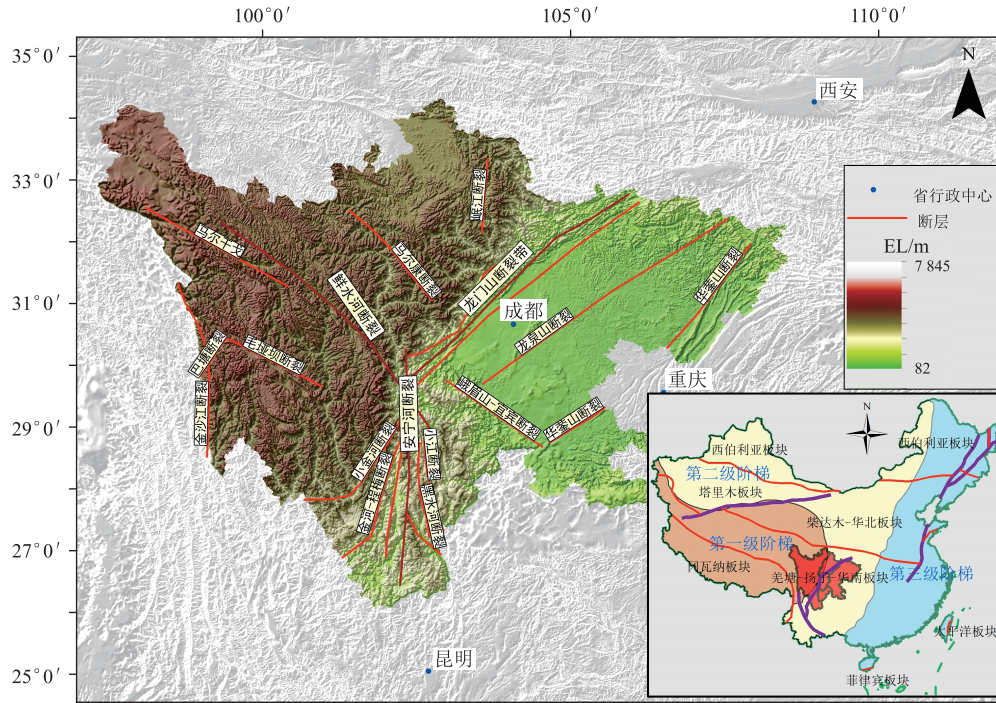


图 1 四川省构造纲要图

1.2 数据来源

1.2.1 滑坡数据

本项研究的滑坡数据来源包括以下 2 个方面: (1) 国际期刊数据库 Web of Science(WOS) 核心合集数据库、国内期刊数中国知网、万方数据知识服务平台数据库及维普网等多源数据; (2) 典型的高位滑坡详细的地质现场调查, 包括典型地质现象进行拍照、描述、测量。

1.2.2 遥感数据

遥感数据主要是土地利用数据、地形地貌 (DEM) 数据、岩性空间分布数据。中国多时期土地利用遥感监测数据来源于资源环境科学数据注册与出版系统; 岩性空间分布数据来源于中国地质调查局; DEM 空间分布数据来源于美国 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 数据。

2 高位滑坡发育基本特征

2.1 滑坡编目

为了全面获取四川高位特大滑坡的分布特征及

形成机理, 本文通过查阅文献^[26-30], 对四川的高位滑坡进行统计分析(表 1)。

2.2 滑坡空间分布特征

由于高位滑坡发育必须具有一定的地形高差, 通过调查收集的高位滑坡灾害(表 1) 可以看出, 研究区的高位滑坡基本都发育在龙门山区(如茂县、汶川、小金等地)、川西高原区(如丹巴、康定等地)和攀西地区(如冕宁、宁南等地)。龙门山区位于四川盆地西北边缘, 东北-南西走向, 绵延超 200 km, 海拔高程变化大, 由盆地边缘 2 000 m 向西逐渐升高到 3 000 m 以上; 川西高原区为青藏高原东南缘和横断山脉的一部分, 川西高原的峡谷区沟壑纵横, 落差极大, 地表生态脆弱; 而攀西地区地处横断山系东缘, 具有山高谷深、盆地交错分布的特点(图 2)。境内山脉纵横, 地形起伏, 北部金沙江-安宁河谷地区地处横断山脉东缘, 呈狭长形状, 海拔高程在 992~4 750 m 之间。上述 3 块区域, 地形总体上为深切构造侵蚀中-高山地形, 地形陡峻, 受构造和岩性控制, 形成了各种峡谷和悬崖峭壁, 同时地形临空条件发育, 为高位滑坡发育提供了良好的地质条件。

表 1 四川高位滑坡统计数据

序号	滑坡名称	规模/ 10^4m^3	规模等级	坡度/ $^\circ$	坡向/ $^\circ$	高差/m	滑坡类型	坡面形态
1	茂县梯子槽滑坡	1 388.2	特大型	31	78	640	岩质滑坡	直线型
2	茂县新磨村滑坡	1 800	特大型	30	200	1 550	岩质滑坡	直线型
3	茂县渭门乡德胜村茅草坪滑坡	1 160	特大型	33	158	350	土质滑坡	直线型
4	康定市金汤镇汤坝料场滑坡	1 101.6	特大型	41	256	152	土质滑坡	凹型坡
5	小金县沃日镇黄家山村黄家山滑坡	1 800	特大型	27	15	187	土质滑坡	凹型坡
6	茂县三龙乡卓吾寨村大寨子滑坡	120	大型	27	176	125	土质滑坡	折线型
7	茂县太平乡太平滑坡	112.5	大型	35	28	175	土质滑坡	凸形坡
8	小金县沃日镇甘沟村牛通湿地滑坡	580	大型	43	10	256	土质滑坡	折线型
9	小金县崇德乡崇德村上红寨子滑坡	140	大型	32	248	195	土质滑坡	凹型坡
10	小金县宅垄乡四龙村黄草坡滑坡	223.2	大型	35	40	176	土质滑坡	凹型坡
11	宁南县白水河滑坡	176	大型	28	52	395	土质滑坡	直线型
12	冕宁县照壁山滑坡	270.4	大型	30	313	210	岩质滑坡	凹型坡
13	汶川县阿尔寨滑坡	105	大型	55	103	120	岩质滑坡	凹型坡
14	茂县凤仪镇南庄村花园组滑坡	30	中型	42	29	73	土质滑坡	凹型坡
15	茂县三龙乡白布村蔡泽勇屋后滑坡	43.5	中型	33	132	110	土质滑坡	直线型
16	茂县回龙乡白布村曹清高屋后滑坡	90	中型	28	120	150	土质滑坡	凹型坡
17	茂县回龙乡白布村撮箕组滑坡	65	中型	38	116	150	土质滑坡	折线型
18	茂县白溪乡何家坝村二木瓜子组滑坡	38	中型	32	6	200	土质滑坡	凸形坡
19	茂县洼底乡三寨村吴双全屋后滑坡	35	中型	45	126	325	土质滑坡	凹型坡
20	茂县谷曲乡二不寨村陈富兵屋后滑坡	53	中型	31	79	300	土质滑坡	折线型
21	茂县三龙乡富布寨村水沟子组滑坡	20	中型	37	88	300	土质滑坡	凹型坡
22	茂县三龙乡纳呼村合心坝组后山滑坡	80	中型	30	144	275	土质滑坡	折线型
23	茂县太平乡胡尔滑坡	30	中型	29	352	84	土质滑坡	直线型
24	茂县三龙乡富布寨滑坡	40	中型	31	47	400	土质滑坡	折线型
25	丹巴县色足阿尔克巴滑坡	12	中型	28	87	150	土质滑坡	凸形坡
26	丹巴县阿莎西滑坡	28	中型	32	84	225	土质滑坡	凹型坡
27	丹巴县格宗村乱石组滑坡	18	中型	30	68	230	土质滑坡	折线型
28	丹巴县关永场滑坡	20.2	中型	25	228	290	土质滑坡	凹型坡
29	丹巴县中槽滑坡	80	中型	31	46	365	土质滑坡	折线型
30	丹巴县乱石组滑坡	18	中型	22	68	230	土质滑坡	凹型坡
31	小金县美兴镇春厂村春厂坝滑坡	74	中型	40	5	173	土质滑坡	折线型
32	小金县新格乡元营村松包滑坡	81	中型	31	6	142	土质滑坡	直线型
33	小金县新格乡马鞍村马鞍桥滑坡	67.2	中型	42	162	276	土质滑坡	凹型坡
34	小金县结斯乡廖家院子村毛麻子坟滑坡	13.4	中型	29	250	300	土质滑坡	凸形坡
35	小金县崇德乡海坪村梅子坪滑坡	72	中型	31	280	234	土质滑坡	折线型
36	小金县抚边乡庄房村肖家坡滑坡	60	中型	41	20	108	土质滑坡	凸形坡
37	小金县抚边乡胥家山村伐木场滑坡	22	中型	45	205	119	土质滑坡	凹型坡
38	小金县老营乡老营村张家包包滑坡	24	中型	36	355	93	土质滑坡	折线型
39	小金县木坡乡登春村达尔康山滑坡	28.8	中型	25	190	263	土质滑坡	凸形坡
40	小金县木坡乡康乐村康乐定居点滑坡	27	中型	23	189	242	土质滑坡	凹型坡
41	小金县窝底乡春卡村赵家山滑坡	15	中型	27	135	214	土质滑坡	折线型
42	小金县汗牛乡阿斯隆村啥土滑坡	54	中型	29	250	220	土质滑坡	凹型坡
43	茂县石大关乡桃花村 1 组桃花寨滑坡	9	小型	35	46	140	土质滑坡	凹型坡
44	茂县回龙乡小牛儿滑坡	5	小型	25	231	200	土质滑坡	凹型坡
45	丹巴县各林滑坡	7	小型	32	328	120	土质滑坡	凹型坡
46	丹巴县格利亚滑坡	7.4	小型	30	230	156	土质滑坡	凹型坡
47	丹巴县周家巴巴滑坡	7.2	小型	35	320	120	土质滑坡	折线型
48	丹巴县梭坡乡共布村滑坡	2.7	小型	33	300	112	土质滑坡	折线型
49	小金县美兴镇营盘村喇嘛寺下滑坡	3.2	小型	25	59	183	土质滑坡	凹型坡
50	小金县达维镇筒槽村江家院子滑坡	2.4	小型	33	229	261	土质滑坡	折线型
51	小金县日尔乡四大安村嘎拉木滑坡	4	小型	30	355	201	土质滑坡	凹型坡
52	小金县宅垄乡波罗村黄柠坪滑坡	4.8	小型	39	168	182	土质滑坡	折线型
53	小金县宅垄乡马尔村四组战奔滑坡	5	小型	42	357	124	土质滑坡	凹型坡
54	小金县木坡乡康乐村四零五滑坡	2.4	小型	38	179	254	土质滑坡	折线型
55	小金县潘安乡潘安村大寨子滑坡	9.8	小型	30	65	158	土质滑坡	凹型坡

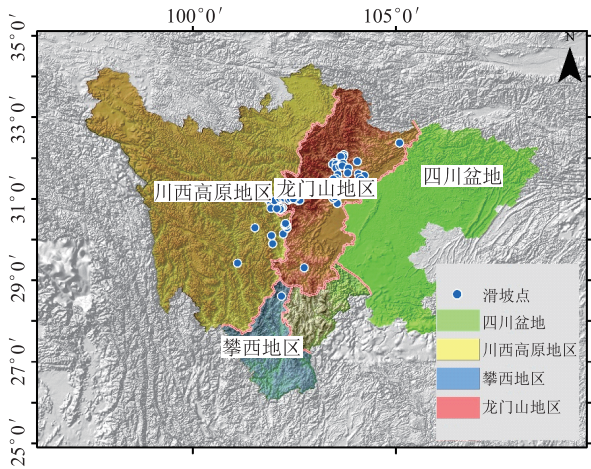


图 2 区内高位滑坡的区位分布特征

3 滑坡影响因素分析

3.1 斜坡物质组成

根据滑坡物质组成的不同, 滑坡一般分为土质滑坡、岩质滑坡和岩土混合滑坡 3 类。本文根据斜坡物质的松散程度、斜坡的破坏模式认为岩土混合滑坡和土质滑坡都属于堆积物滑坡, 且具有相似的地质力学模式, 因此将二者统称为土质滑坡。

土质滑坡主要由黏土、砂土、粉土等土质组成, 这类滑坡通常发生在陡坡或者较陡的山坡上, 一般滑坡速度较慢, 但可能会造成较大的破坏。岩质滑坡主要由岩石和碎石等岩性物质组成, 这类滑坡发生在山体岩石结构比较复杂的地区, 滑坡速度较快, 对周围环境造成的影响也较大。混合滑坡则是由土质和岩质组成的混合物, 具有土质滑坡和岩质滑坡的特点, 通常发生在土石混合层或者土层和岩层交错的地质体中, 滑坡速度和对周围环境的影响都相对较小, 但也需要引起重视。调查分析发现研究区主要以土质滑坡为主, 占滑坡总数的 92.7%; 岩质滑坡仅占 7.3%(图 3)。这可能是由于高位岩质滑坡易转化为崩塌, 这导致高位岩质滑坡的数量较少。

3.2 地形地貌特征

高位滑坡的发育受到地形地貌条件的显著影响和控制。地形地貌与滑坡灾害之间存在着密切关系。一方面, 地形地貌为滑坡提供了破坏的空间; 另一方面, 坡度、坡高和坡形是灾害产生的动力来源。在地形起伏不大、低坡度山坡上, 斜坡往往是比较稳定的。在高陡山区, 良好的临空面条件, 让斜坡上部处于不稳定状态, 且高坡度使斜坡具有更大的势能, 更容易发生高位滑坡, 需要加强对高陡山坡的关注以减少灾害风险。

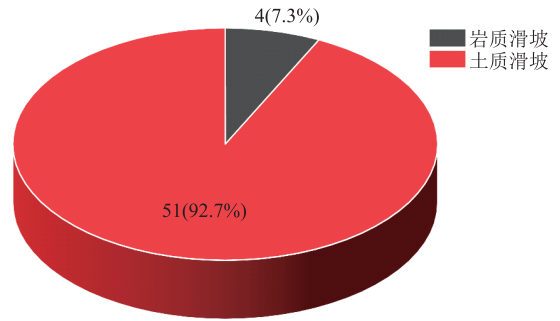


图 3 滑坡与物质组成的关系图

3.2.1 坡面形态

斜坡的地形地貌、地质构造、岩性等因素都会对坡面形态产生影响。在地形地貌方面, 山脉和高原地形相对于丘陵和平原地形, 更容易形成陡峭的坡面, 同时由于降雨集中等因素, 也更容易发生地质灾害。在坡面形态中, 坡度和坡向是最基本的特征, 对于斜坡的稳定性具有决定性的影响。坡面形状、地形起伏、地形凹凸等特征则会影响土体的分布和排水情况, 进而影响滑坡的发生。在本研究中, 收集了高位滑坡的坡面形态, 包括直线型、折线型、凹型和凸型(图 4)。通过对 55 个高位滑坡的坡面形态进行统计分析, 发现发育在凹型坡的高位滑坡最多, 占 45%; 其次为折线型坡, 占 31%; 直线型占 13%, 凸型坡最少, 仅占 11%。

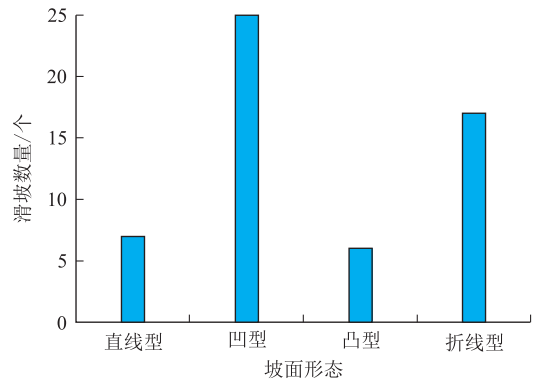


图 4 高位滑坡坡形统计图

分析总结后, 发现高位滑坡的坡面形态主要是凹形坡, 推测是因为高位滑坡主要发育于高陡山区, 滑坡坡度较陡, 有利于滑体在重力作用下缓慢滑动; 同时凹形坡在形成之后起到了汇集地下水的作用, 这增加了岩土体的容重并降低了强度, 从而开始了滑坡启动。折线型坡的形成则可能是由于斜坡体的异质性造成的, 是斜坡变形多级发育的表现。

3.2.2 地形坡度

地形坡度是一个重要的参数, 可以反映斜坡的

自然状态。当斜坡的天然休止角小于地形坡度时，斜坡容易发生滑移。这是因为地形坡度越大，斜坡岩土体受到的重力作用就越大，从而容易失去平衡，产生滑移。此外，坡度也影响着斜坡上的水文条件，对斜坡稳定性也有影响。当斜坡上的水分过多时，岩土体的强度会降低，从而增加滑坡的风险。因此，在进行滑坡危险性评估时，坡度是一个重要的考虑因素。根据调查情况，区内高位滑坡优势坡度为 $25^{\circ}\sim 45^{\circ}$ (图5)。

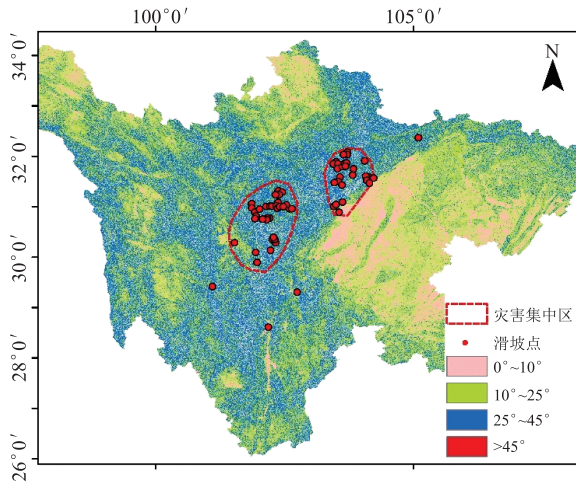
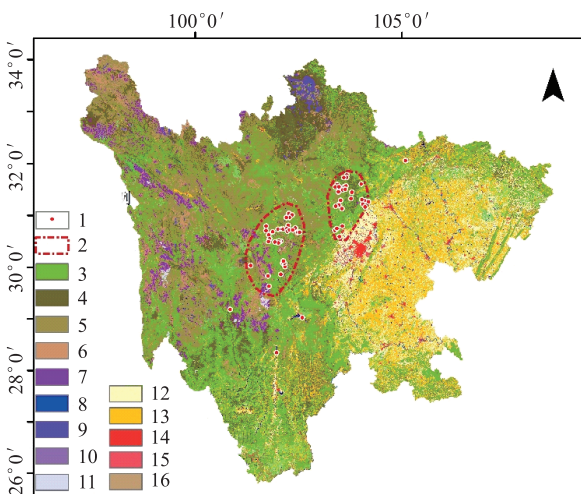


图5 高位滑坡主要分布区域与坡度的关系图

$25^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 坡度段是受到人类活动影响较强的地区,包括当地居住区和林农业开垦耕植区(图6)。在人为活动影响下,比如开垦、种植以及灌溉等导致坡体的应力处于不断变化过程,从而为滑坡变形提供了有利条件。



- 1. 滑坡点;2. 灾害集中区;3. 有林地;4. 高覆盖度草地;5. 中覆盖度草地;6. 低覆盖度草地;7. 裸岩石质地;8. 湖泊;9. 沼泽地;
- 10. 沙地;11. 永久性冰川雪地;12. 水田;13. 旱地;14. 城镇用地;
- 15. 农村居民点;16. 其他。

图6 高位滑坡主要分布区域与土地利用类型的关系图

3.2.3 相对高差

相对高差对滑坡的稳定性起着重要影响。将研究区内高位滑坡相对高差离散化为 $<100\text{ m}$ 、 $100\sim 200\text{ m}$ 、 $200\sim 300\text{ m}$ 、 $>300\text{ m}$ 的4个区间进行统计分析(图7、表2)。

相对高差 $<100\text{ m}$ 的滑坡个数最少,仅占5%;相对高差 $100\sim 200\text{ m}$ 之间的滑坡最多,占44%;相对高差 $200\sim 300\text{ m}$ 之间的个数占33%,而相对高差 $>300\text{ m}$ 的滑坡个数占18%。相对高差越大,滑坡的稳定性越差。这是因为相对高差增大会导致滑坡上下部分土体的重力作用不同,下部土体承受的重力更大,抗滑力降低,导致滑坡易发生。此外,相对高差还会影响滑坡的水文条件,当相对高差较大时,水流容易从高处流向低处,增加滑坡发生的可能性。

表2 高位滑坡与相对高差的关系

相对高差/m	滑坡个数	滑坡个数百分比/%
<100	3	5.5
$100\sim 200$	24	43.6
$200\sim 300$	18	32.7
>300	10	18.2

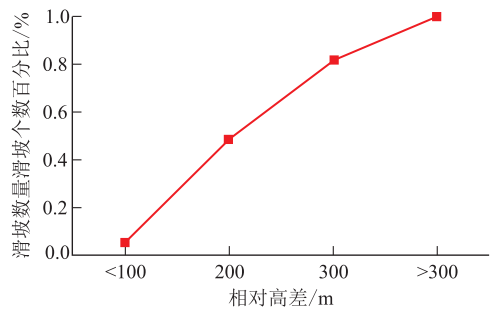


图7 高位滑坡与相对高差的关系图

3.2.4 坡向

坡向也是影响斜坡发生滑坡的一个重要因素,其影响主要体现在两个方面。首先,不同坡向的斜坡受到光照强度等条件不同,从而影响该区域的水源涵养量、植被覆盖率,导致滑坡易发程度不同。其次,对于同震滑坡,地震波的传播方向以及斜坡与震源的相对位置等因素也会影响滑坡在某个坡向的斜坡上更易发生^[31]。

对于四川高位滑坡而言,坡向统计结果表明N、NE、E、SW方向的滑坡数量略高于其他坡向区间(图8)。虽然四川省位于南北地震带的中段位置,优势方向是NWW-SEE向^[32, 33],但发现高位滑坡的坡向并没有和区域主应力场方向对应起来,可能是本次收集的数据还存在局限性。因此,在今后的

研究中需要进一步完善数据采集和分析方法, 以便更准确地评估坡向对斜坡滑坡发生的影响。

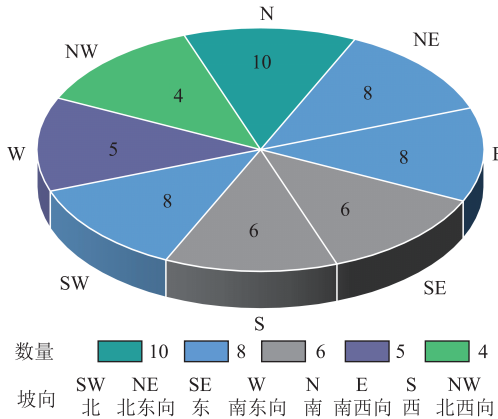


图 8 高位滑坡优势坡向统计图

3.3 主要断裂构造

研究区的高位滑坡基本都发育在川西高原地区、龙门山区和攀西地区的峡谷中, 并发现区内滑坡灾害密集分布带与龙门山断裂、鲜水河断裂和安宁河断裂所构成的“Y”字形区域应力场分界线相吻合(图 9)。这些地区的控制性断裂带、新构造运动以及岩体破碎等因素都会对斜坡稳定性产生影响^[34], 从而为高位滑坡的发生提供了有利条件。在这些地区, 岩体易于破碎、裂缝密集, 地表形成了大量的断层、褶皱等构造形态, 这些都会增加岩土体的不稳定性, 进而引发高位滑坡。

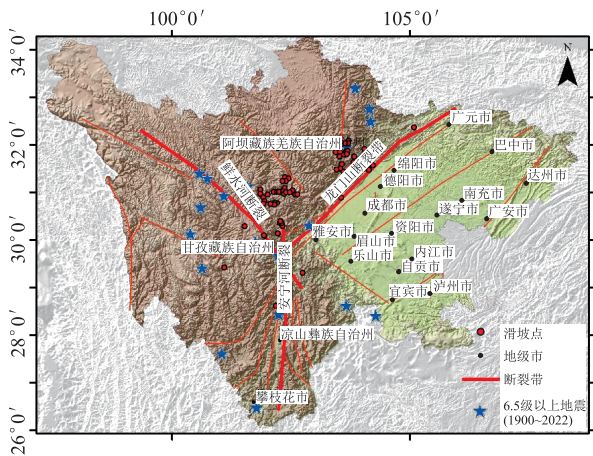


图 9 区内高位滑坡与地质构造的关系图

深大构造是一个重要的控制因素, 它不仅控制着岩浆活动和区域地层分布, 还控制着地貌类型。近期强烈的构造运动进一步加剧了这种控制作用。在山区总体抬升的趋势下, 龙门山山系山体高大, 而差异性上升运动则导致了冲沟深切以及树枝型水系的形成, 从而为高位滑坡的发生提供了条件。

另外, 各种构造软弱结构面对于滑动面的形成也起着至关重要的作用。首先, 软弱结构面的存在使得岩土体中的应力分布不均匀, 导致了局部应力集中, 从而形成滑坡的发生条件。其次, 软弱结构面上沉积物或岩体发生滑移的可能性更大, 因为这些部位强度低, 易受外力作用而发生破坏。此外, 软弱结构面还可以作为滑坡的滑面或滑裂面, 进一步促进滑坡的发生和发展。而且结构面的存在, 岩土体的完整性受到破坏, 有利于地下水的流动, 导致岩体风化严重, 导致岩体强度降低, 这些都为高位滑坡的形成提供了有利条件。

并且通过研究发现, 地质构造对于控制高位滑坡的规模有直接影响, 离断裂带越近, 滑坡发育的规模越大, 如新磨村滑坡、梯子槽滑坡、牛颈沟滑坡等均处于龙门山断裂带内且新磨村滑坡还位于叠溪地震震中位置。

3.4 工程地质岩组

地层岩性与滑坡的关系非常密切。不同地层的岩石具有不同的力学性质和工程性质, 因此不同地层的滑坡类型和滑坡特征也会有所不同。例如, 在强烈构造作用下形成的节理、裂隙等岩石结构对滑坡的发生和发展具有控制作用。另外, 岩石的可溶性也是影响滑坡的重要因素, 容易溶解的石灰岩和石膏等岩层, 一旦遇到水流或地下水, 容易形成溶洞或地下沉陷, 从而引发滑坡。

据《工程岩体分级标准》, 根据《工程岩体分级标准》的分类方法, 可以将研究区内的地层岩性分为以下几类(表 3):

表 3 工程地质岩组分级

岩体分级	地层岩性
坚硬岩	花岗岩、辉绿岩、玄武岩等
较坚硬岩	砂岩、灰岩、页岩等
软硬相间岩	软岩和坚硬岩、较坚硬岩
软岩	泥岩、粉砂岩、砂质黏土等

坚硬岩: 此类岩体的抗压强度、抗拉强度和抗剪强度都很高, 具有较好的稳定性。

较坚硬岩: 此类岩体的抗压强度和抗拉强度相对较高, 但抗剪强度较低, 容易出现滑坡等地质灾害。

软岩: 此类岩体的抗压强度、抗拉强度和抗剪强度都较低, 容易发生滑坡、崩塌等地质灾害。

由于岩体的复杂性将坚硬岩或较坚硬岩和软岩混杂在一起的情况分为软硬相间岩。

通过资料收集及现场调查发现, 区内高位滑坡主要发育在软硬相间岩地层(图 10)。软硬相间岩

中的软岩硬度小、力学强度相对较差、易风化,属于易滑地层,与硬岩形成差异风化,且上部硬岩重量大,在下伏软岩软化作用下,易发生滑动形成滑坡^[35]。

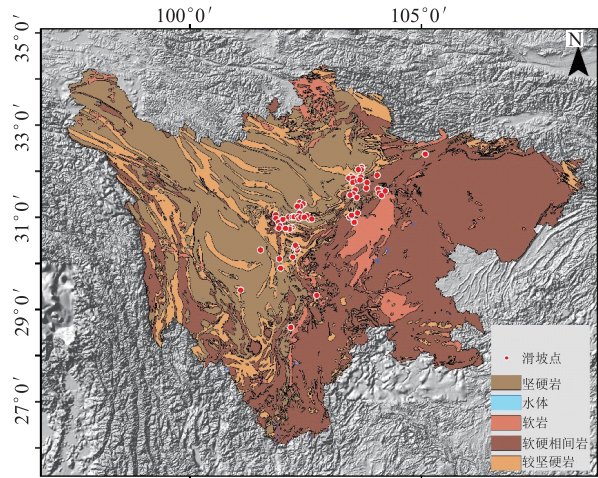


图 10 高位滑坡与地层岩性的关系图

4 典型高位大型滑坡分析

结合对滑坡成因的认识以及前述研究区滑坡主要影响因素的分析,认为区内土质边坡主要以蠕滑

拉裂破坏为主,岩质边坡由于其斜坡结构的不同可初步分为倾倒折断滑移型和拉裂顺层滑移型。因此,将区内高位滑坡的破坏模式分为蠕滑拉裂破坏、倾倒折断滑移型、拉裂顺层滑移型。通过对梯子槽滑坡、新磨村滑坡以及照壁山滑坡典型案例的解析,以此来更好地理解高位滑坡的不同地质力学模式。

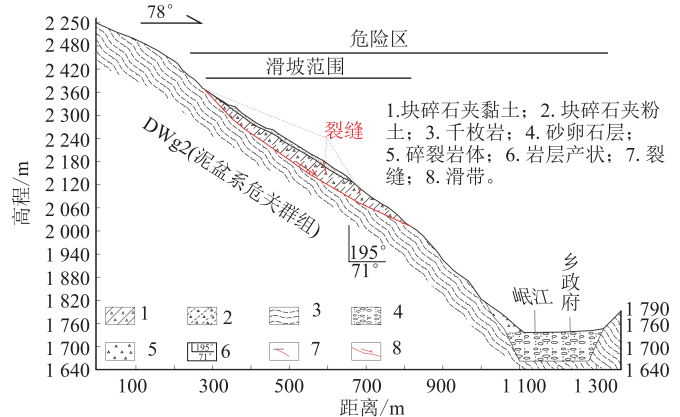
4.1 梯子槽滑坡——倾倒折断滑移型

梯子槽滑坡位于四川省茂县岷江的高山河谷地区,滑床为泥盆系危关群上组(Dwg²)以炭质千枚岩为主夹石英脉的地层,表层为成分、结构和性质不均匀的残坡积或崩坡积土。滑坡区呈不规则的四边形,平均纵向长度 540 m,平均宽度约 560 m,平面面积 30.78×10⁴ m²,平均厚度(含滑带)45.1 m,总方量为 1 388.2×10⁴ m³,如图 11 所示。

梯子槽滑坡属于典型的倾倒折断滑移型,斜坡岩体随着岷江河谷下切产生卸荷回弹作用下,反倾陡立岩层向临空方向产生倾倒变形并逐步向坡体深部发展,最终产生倾倒折断,折断面逐步贯通破坏产生滑移。滑坡的变形破坏可以分为 4 个阶段:(a)卸荷回弹阶段;(b)倾倒-拉张阶段;(c)倾倒-弯曲变形阶段;(d)滑移-折断破坏阶段,如图 12 所示。



(a) 滑坡全貌



(b) 滑坡地质剖面

图 11 梯子槽滑坡发育特征

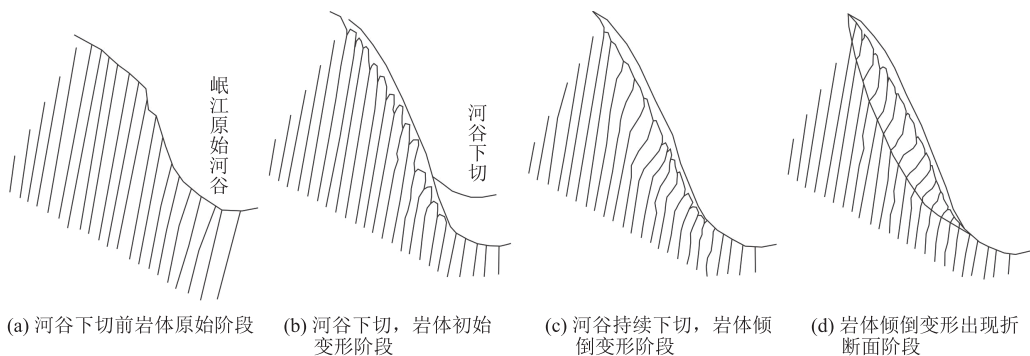
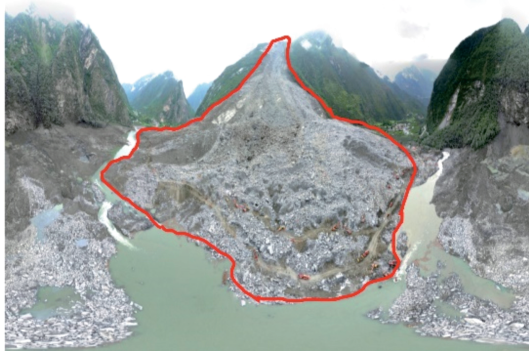


图 12 梯子槽滑坡变形破坏模式图

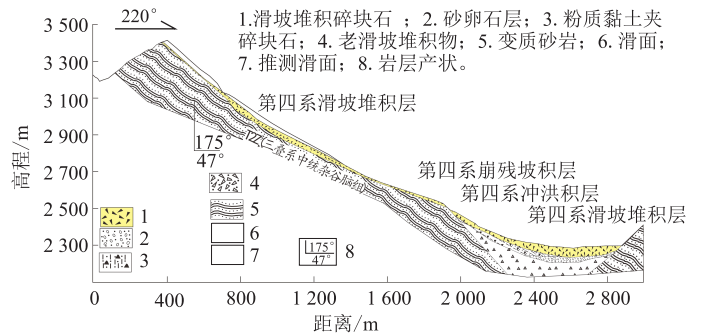
4.2 新磨村滑坡——拉裂顺层滑移型

茂县新磨村滑坡发育在岷江一级支流松坪沟左岸斜坡上, 滑坡平面形态呈冬瓜状, 滑坡剖面形态呈凹形。滑坡发育于三叠系中统杂谷脑组(T₂z)灰色薄-中厚层变质石英砂岩中, 岩层产状 182°∠54°, 上覆第四系崩坡积碎石土。新磨村滑坡的平面形态为冬瓜状, 即滑坡的形状类似于冬瓜的形状。而滑坡

的剖面形态为凹形, 即滑坡的横截面呈现凹形。坡后缘顶部的高程约为 3 450 m, 坡脚最低高程为 2 250 m, 高差约为 1 200 m。此外, 滑坡的平面最大滑动距离为 2.3 km。滑坡斜坡总体坡度约 40°, 其中上部坡度较陡, 约 55°~70°, 中下部坡度相对较缓, 坡度 30°~35°(图 13)。



(a) 滑坡全貌



(b) 滑坡地质剖面

图 13 新磨村滑坡发育特征

茂县新磨村滑坡为典型的拉裂-顺层滑移型滑坡, 斜坡岩体在自重应力等作用下, 首先坡体中上部岩土体沿着顺层泥岩软弱面发生拉裂破坏, 导致失去了大部分黏聚力。紧接着, 岩体沿着拉裂面顺层高速滑动, 形成典型的拉裂-顺层滑移型滑坡(图 14)。

滑体中部, 滑坡前缘滑移堆积区则较薄(图 15)。

照壁山滑坡、小金春厂坝滑坡为典型的蠕滑-拉裂型滑坡。斜坡岩土体受到自身重力作用, 缓慢地向临空面方向变形, 随着变形的进行, 岩土体向下滑动导致其后缘产生拉应力并在坡面上产生拉裂, 通常会形成面向坡下的台阶。剪切变形进一步发展, 斜坡中部应力集中区裂缝增大, 下部出现鼓胀。变形进入累进性破坏阶段, 变形体后缘下沉, 潜在剪切面逐渐发展直到被剪断贯通, 滑坡整体滑动(图 16)。

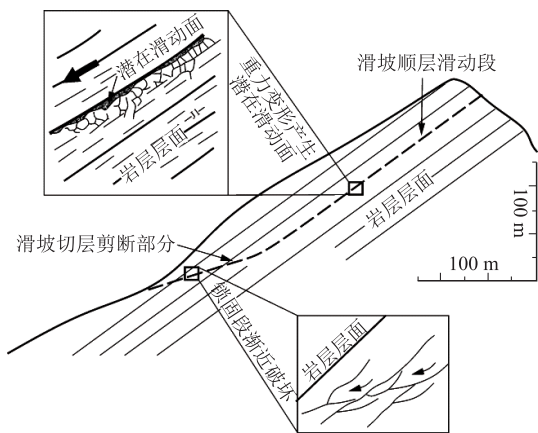


图 14 新磨村滑坡形成机制示意图

4.3 照壁山滑坡——蠕滑拉裂型

照壁山滑坡位于四川省凉山彝族自治州冕宁县北部, 滑坡平面形态为圈椅状, 根据确定的滑坡周界, 滑坡区纵向长度 300~570 m, 前缘横向宽度约 160~380 m。照壁山滑坡滑体厚度一般 10~40 m, 在边界区最薄一般 5~7 m, 滑体最厚达 43.8 m, 平均厚度约 20 m。以滑坡后部滑体厚度最大, 其次为

5 讨论

在全国范围内, 除山东省外, 其他地区都曾发生过严重的滑坡灾害。西部地区的四川、重庆、云南、贵州、西藏以及湖南西部、湖北西部和甘肃地区则是滑坡灾害最为严重的地区^[36]。西藏区域高位地质灾害主要以高位崩塌为主^[2], 云贵高原及其周边环境属于岩溶山区, 具有上硬下软的地层结构以及上陡下缓的地形特征, 滑体岩性以硬岩为主, 滑体易从高陡斜坡上部剪出, 形成凌空加速坠落的滑体, 撞击周围岩土体, 所以高位远程滑坡碎屑流灾害发育最多^[37]。四川省高位地质灾害类型多为土质滑坡, 滑坡规模多为中大型滑坡(图 17), 具有更强的破坏性。而且滑坡的发育多位于软硬相间的岩性区域内, 这和周边区域滑坡分布特征具有一定的差异性。

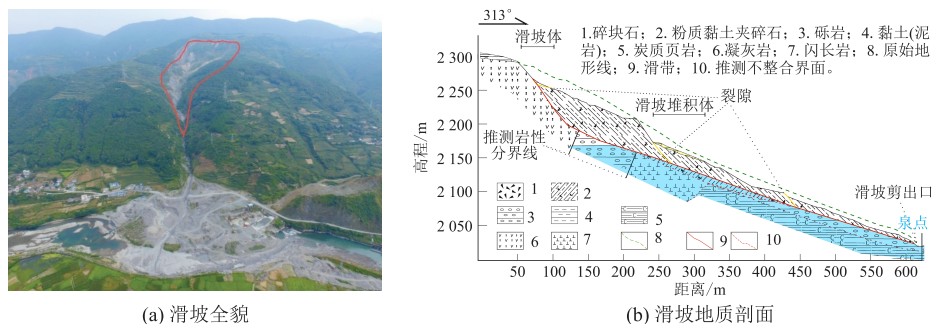


图 15 照壁山滑坡发育特征

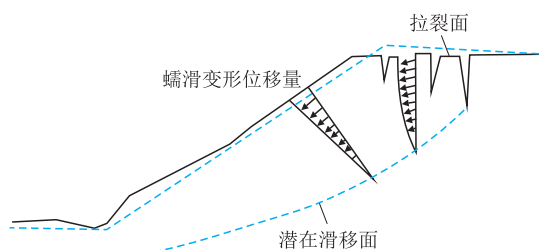


图 16 蠕滑-拉裂示意图

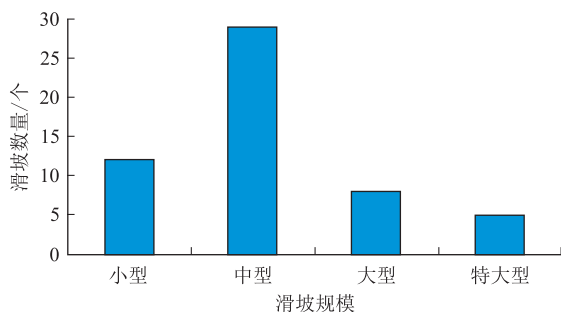


图 17 高位滑坡规模统计图

滑坡发育及变形破坏除了受基础地质、地形地貌等因素控制外,降雨等地下水活动对其起到促进作用^[38]。同时,调查收集的滑坡多发育在高海拔地区,昼夜温差大,冰冻作用强烈。中国大型滑坡的影响主要诱发因素和触发因素中,地下水在滑坡发育变形演化过程中起着十分重要的作用,包括物理、化学和力学作用^[39]。水的作用不仅会增大岩土自身重量,而且会浸润软化边坡岩土、滑带或层间夹层,使边坡岩土、滑带或层间夹层抗剪强度指标降低,最终促进和诱发滑坡现象^[40]。

由于构造运动的影响,岩石中常常发育着丰富的节理系统。在雨水的渗入下,岩石体积会因水的凝结而增大,形成一定的张力,从而迫使节理裂隙扩展,进一步促进节理发育。反复的冰融作用导致岩石体裂隙的不断扩大和累积,加速了岩土体强度的降低和破碎的程度,从而为滑坡等地质灾害的形成

提供了物质基础^[41]。此外,循环冻融作用也会对滑坡的变形破坏造成影响,冻结期会导致滑坡内部地下水富集,增加滑坡静水压力同时软化斜坡岩土体,对于岩质坡还会由于冻胀力破坏岩体结构,滑坡强度因此大幅下降;而在融水期,滑坡动水压力增加,并且由于地下水排泄,会产生强烈的机械冲刷作用^[42-44]。

6 结论

(1) 区内滑坡灾害密集分布带与龙门山断裂、鲜水河断裂和安宁河断裂所构成的“Y”字形区域应力场分界线相吻合。

(2) 高位特大型滑坡主要发育在坡度 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 的斜坡中,且其相对高差集中在 $100 \sim 200 \text{ m}$ 之间,这表明高位滑坡的发育与地形地貌条件密切相关,大高差使斜坡具有更大的势能,更容易发生高位滑坡,坡度 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 易形成堆积区,为滑坡提供物质条件。

(3) 岩石强度对高位滑坡具有明显的控制作用。软硬相间岩中的软岩硬度小、力学强度相对较差、易风化,属于易滑地层,与硬岩形成差异风化,且上部硬岩重量大,在下伏软岩软化作用下,易发生滑动形成滑坡。

(4) 根据滑坡区所处的地质环境条件、坡体结构以及岩性组合特征,分析了梯子槽滑坡、新磨村滑坡、照壁山滑坡高位大型滑坡成因模式:倾倒-折断型、拉裂-顺层滑移型、蠕滑-拉裂型。

参考文献

- [1] 杨龙伟,徐杨青,高敬轩,等. 高位滑坡成灾地质环境研究进展[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(S1): 1-8.
- [2] 张田田,殷跃平,李滨,等. 西藏波密茶隆隆巴曲高位地质灾害类型及发育特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 9-16.

- [3] 杨龙伟. 高位滑坡远程动力成灾机理及减灾措施研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [4] 曾庆利, 魏荣强, 薛鑫宇, 等. 茂县新磨特大滑坡-碎屑流的发育特征与运移机理[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 193-206.
- [5] 高杨, 李滨, 高浩源, 等. 高位远程滑坡冲击铲刮效应研究进展及问题[J]. 地质力学学报, 2020, 26(4): 510-519.
- [6] Shen T, Wang Y S, Zhao X, et al. Features and Formation Mechanism of the Jiaopenba Landslide, Southwestern Sichuan Province, China [J]. FRONTIERS IN EARTH SCIENCE, 2022, 10: 919268.
- [7] 苏林雪. 汶川地震前后四川省主要地质灾害时空发育规律研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2021.
- [8] 戴岚欣, 许强, 范宣梅, 等. 2017年8月8日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1151-1164.
- [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] 杨沛璋, 崔圣华, 裴向军, 等. 基于 SBAS-InSAR 和光学遥感影像的大型倾倒变形体变形演化研究[J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 1-13.
- [11] 蒙明辉, 崔圣华, 张文, 等. 岷江河谷深层倾倒形成演化特征及堵江灾害链效应[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27): 11829-11841.
- [12] 赵志明, 潘岳, 陈理. 四川茂县新磨村滑坡高速启动机理研究[J]. 工程地质学报, 2020, 31(1): 145-153.
- [13] 郭朋瑜, 闫兴田, 吉锋, 等. 四川茂县新磨村滑坡启动机制物理模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 154-164.
- [14] 谢艳芳, 李新坡, 赵曙熙, 等. 基于物质点法的新磨村滑坡动力特性分析[J]. 山地学报, 2018, 36(4): 589-597.
- [15] 刘春, 范宣梅, 朱晨光, 等. 三维大规模滑坡离散元建模与模拟研究——以茂县新磨村滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2019, 27(6): 1362-1370.
- [16] Su L J, Hu K H, Zhang W F, et al. Characteristics and triggering mechanism of Xinmo landslide on 24 June 2017 in Sichuan, China [J]. JOURNAL OF MOUNTAIN SCIENCE, 2017, 14(9): 1689-1700.
- [17] 徐杨青, 乔龙腾, 杨龙伟, 等. 高位滑坡动力学特征分析[J]. 煤炭工程, 2022, 54(11): 164-169.
- [18] 白泽朝, 吕森, 曹琨, 等. 结合星载地基 InSAR 分析的四川新磨村滑坡早期识别与灾后监测[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(5): 1637-1643.
- [19] 朱赛楠, 殷跃平, 王猛, 等. 金沙江结合带高位远程滑坡失稳机理及减灾对策研究——以金沙江色拉滑坡为例[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 688-697.
- [20] 许强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2612-2628.
- [21] 唐青松, 田述军, 张静, 等. 基于时序 InSAR 技术的新磨村滑坡发生前后变形研究[J]. 华北地震科学, 2019, 37(4): 1-6.
- [22] 李为乐, 许强, 陆会燕, 等. 大型岩质滑坡形变历史回溯及其启示[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1043-1053.
- [23] 张永双, 杜国梁, 郭长宝, 等. 川藏交通廊道典型高位滑坡地质力学模式[J]. 地质学报, 2021, 95(3): 605-617.
- [24] 张佳佳, 田尤, 陈龙, 等. 澜沧江昌都段滑坡发育特征及形成机制[J]. 地质通报, 2021, 40(12): 2024-2033.
- [25] 罗改, 王全伟, 秦宇龙, 等. 四川省大地构造单元划分及其基本特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2021, 41(4): 633-647.
- [26] 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.
- [27] 张永双, 石菊松, 孙萍, 等. 汶川地震内外动力耦合及灾害实例[J]. 地质力学学报, 2009, 15(2): 131-141.
- [28] 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.
- [29] 唐然, 邓韧, 安世泽. 北川县白什乡老街后山滑坡监测及失稳机制分析[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 760-768.
- [30] 王得双, 梁收运, 赵红亮. 高位滑坡特征与防治[J]. 地质灾害与环境保护, 2018, 29(3): 5-11.
- [31] 许冲, 田颖颖, 马思远, 等. 1920年海原 8.5级地震高烈度区滑坡编录与分布规律[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1188-1195.
- [32] 崔子健. 区域构造应力场的反演与地震带划分的研究[D]. 中国地震局地球物理研究所, 2018.
- [33] 杨树新, 姚瑞, 崔效锋, 等. 中国大陆与各活动地块、南北地震带实测应力特征分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4207-4217.
- [34] 崔圣华, 杨晴雯, 芮雪莲, 等. 裂隙岩体循环冻融变形特征及影响因素分析[J]. 地质科技通报, 2021, 40(6): 205-215.
- [35] 雷津, 崔圣华, 裴向军, 等. 基于射线理论的垂直 P 波入射过程滑坡滑带应力放大特征及成因分析[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 149-161.
- [36] 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, (3): 433-454.
- [37] 高杨, 贺凯, 李壮, 等. 西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 14-23.
- [38] 杨校辉, 强远文, 王宏睿, 等. 甘肃舟曲滑坡成因机制与发育分布规律[J/OL]. 现代地质, 1-9[2024-05-21].
- [39] 杨虎锋, 贺江坤, 邢本聪, 等. 青藏高原东缘乱石包滑坡塘发育特征及成因机制[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1573-1582.
- [40] 崔圣华. 强震过程软弱层带地震动响应及大型滑坡启动机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [41] 陈文涛, 杨志全, 朱颖彦, 等. 阿塔巴德滑坡形成条件与诱发机制分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(11): 148-155.
- [42] 叶伟林, 康丽娟, 安亚鹏, 等. 甘肃永靖焦家村上庄“2·28”滑坡特点及成因分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(3): 369-375.
- [43] Zhuang M G, Gao W W, Zhao T J, et al. Mechanistic Investigation of Typical Loess Landslide Disasters in Ili Basin, Xinjiang, China [J]. SUSTAINABILITY, 2021, 13(2): 635.
- [44] 朱赛楠, 殷跃平, 王文沛, 等. 新疆伊犁河谷黄土滑坡冻融失稳机理研究[J]. 地球学报, 2019, 40(2): 339-349.

作者简介: 蒋涛(1998—), 男, 四川资中人, 在读博士生, 主要从事滑坡规律方面研究. E-mail: jiang_tao@stu.cdut.edu.cn

通讯作者: 崔圣华(1989—), 男, 四川达州人, 副教授, 主要从事地震滑坡机理方面研究. E-mail: cuihenghua18@cdut.edu.cn