

郭家成, 巨能攀, 解明礼, 等. 大渡河干流流域滑坡发育时空特征与影响因素研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 276-294. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.021

GUO Jiacheng, JU Nengpan, XIE Mingli, et al. Spatiotemporal development patterns and disaster-inducing factors of landslides in the main stream of Dadu River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 276-294. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.021

大渡河干流流域滑坡发育时空特征与影响因素研究

郭家成¹, 巨能攀², 解明礼^{2,3,4}, 刘贺¹, 林清桦², 陈川¹, 冉星星¹

(1. 国能大渡河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610093; 2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站, 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 4. 四川大学 山区河流保护与治理全国重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:【目的】大渡河流域位于我国青藏高原与四川盆地之间的过渡区域, 区内高山耸立, 河谷深切, 地表起伏巨大, 复杂地质条件下极易发育一系列地质灾害问题。【方法】以大渡河流域为研究区, 基于多源数据融合分析方法, 整合地质调查、遥感解译、时空统计分析及典型案例反演, 系统构建了大渡河流域滑坡的空间分布、时间分布特征及其与地形、地质构造、岩土体类型、斜坡结构、水文条件和人类活动等多要素协同作用分析框架, 研究大渡河干流流域滑坡时空演化规律并解释其多尺度耦合致灾机制。构建了多因素综合控制的滑坡发育模型, 明确了研究区域地质构造与人类活动的协同作用机制。【结果】主要获得以下认识: (1)97%的滑坡发育于距断层5 km范围内, 并且集中分布于海拔500~3 500 m、坡度10°~50°的强卸荷带; (2)94.18%的滑坡事件发生在5—9月雨季, 与降雨量呈显著正相关; (3)水电枢纽区5 km范围内滑坡密度达0.113处/km², 是其他区域的3倍。【结论】结果表明: 滑坡空间分布上呈现显著构造控灾特征, 时序特征揭示降雨是滑坡发生的主要触发因素, 且工程扰动诱发滑坡效应突出。

关键词: 工程地质; 滑坡; 时空特征; 影响因素; 大渡河流域; 时空分布; 遥感解译; 地质构造

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.021

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0276-19



Spatiotemporal development patterns and disaster-inducing factors of landslides in the main stream of Dadu River

GUO Jiacheng¹, JU Nengpan², XIE Mingli^{2,3,4}, LIU He¹, LIN Qinghua², CHEN Chuan¹, RAN Xingxing¹

(1. Guoneng Dadu River Hydropower Co., Ltd., Chengdu 610093, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Badong National Observation

收稿日期: 2025-06-24; 修回日期: 2025-09-27; 录用日期: 2025-12-03; 网络出版日期: 2025-12-20

基金项目: 大渡河公司复杂水动力条件下滑坡监测数据可靠性评估及演变机理研究项目(KB-KY-2023-003); 四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室开放课题资助项目(SKHL2422); 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室开放基金资助项目(SKLG2024K030); 湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站开放基金项目支持(BNORSG-202406); 国家自然科学基金项目(42407230)

作者简介: 郭家成(1993—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事大坝安全监测、水库大坝安全管理工作。E-mail: 1060471855@qq.com

通信作者: 巨能攀(1973—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事地质工程和岩土工程教学研究。E-mail: jnp@cdut.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

and Research Station of Geohazards, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 4. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] The Dadu River Basin, a transition between the Qinghai-Xizang Plateau and Sichuan Basin, features towering mountains, deep valleys, and dramatic relief. Complex geology renders it highly prone to geological hazards. [Methods] Via multi-source data fusion, this work integrates geological surveys, remote sensing, spatiotemporal statistics, and case inversion to establish a framework. It explores landslide spatial-temporal distribution and synergies with topography, geology, rock-soil, slope structure, hydrology, and human activities, clarifying evolution patterns and multi-scale coupled disaster mechanisms in the main basin. A multi-factor landslide model is built, and geological-human activity synergies identified. [Results] Key findings: (1) 97% of landslides occur within 5 km of faults, concentrated in strong unloading zones (500~3 500 m elevation, 10°~50° slope); (2) 94.18% of landslides happen in May-September rainy season, correlating significantly with rainfall; (3) Landslide density within 5 km of hydropower hubs hits 0.113/km², triple that of other areas. [Conclusion] Result show landslide spatial distribution is strongly structure-controlled; rainfall is the main trigger, with prominent engineering disturbance effects.

Keywords: engineering geology; landslide; spatiotemporal characteristics; influencing factors; Dadu River Basin; spatiotemporal distribution; remote sensing interpretation; geological structure

0 引言

大渡河干流流域地处青藏高原向四川盆地的过渡带,地形高差大、地质构造复杂,是滑坡灾害频发的典型区域^[1-3]。近年来,随着流域内水电开发、交通建设等人类活动的加剧,滑坡灾害对生态环境和基础设施的威胁日益显著^[4-5]。目前,国内外学者对滑坡的成因机制已开展大量研究。李明辉等^[6]通过GPS监测,对比滑坡前缘、后缘等不同地形发现,大渡河流域的高山峡谷地貌与强烈的河流下切作用是滑坡发育的重要地形诱因,揭示了地形差异对变形速率的直接控制。吴亚子等^[7]通过地质结构分析与量化评价对松坪滑坡进行研究,明确了其破坏模式为“蠕滑拉裂”,其破坏变形与坡体内层状碎裂岩体结构密切相关,表明地质构造是滑坡失稳的内在控制因素;同时亚喀则滑坡的复活机制研究强调了地表水入参与暴雨的触发作用,而松坪滑坡在暴雨条件下因孔隙水压力升高,滑带土抗剪强度降低,稳定性系数降至临界阈值。两案例研究均表明,水文条件通过改变岩土体力学性质和水压力分布,成为滑坡动态失稳的关键外因。周洪福等^[8]量化了工程扰动(坡脚开挖)与降雨的协同作用,揭示了工程活动与滑坡时空分布的关联性,深化了人类活动(如梯级水电开发)的定量化评估。杨芳等^[9]利用SBAS-InSAR技术结合升降轨Sentinel-1A数据获取金沙江流域阿海库区的地表形变信息进行时空演化特征分析,表明降雨是加速滑坡位移变形的重要因素之一。包馨等^[10]进一步解算得到了金沙江各滑坡点的滑移方向计量值,并结合降水数

据总结归纳了滑坡的季节性演化特征与长期发展趋势。邱恒志^[11]以地貌演化为切入点,对大渡河中上游流域的滑坡空间分布特征进行了研究,表明过剩地形的存在可以指示未来易发生滑坡的地方。解明礼^[12]应用滑坡多源监测技术开展库岸滑坡时空演化规律分析,融合地质、环境量、形变等多源数据分析不同类型滑坡时序变形响应特征,建立滑坡动态风险排序模型。YANG等^[13]应用Sentinel-2时间序列提取不同年份的滑坡进行计数并显示在一个彩色合成图像中,绘制山体滑坡前的斜坡移动图。

大渡河流域地理环境恶劣,地质灾害调查和监测难度大,地质灾害综合防治能力较薄弱,同时区间降雨量充沛、地质构造复杂、断层分布密集,极易发育降雨型和地震型滑坡灾害,具有突发性、群体性等特点^[14-20]。基于上述大渡河干流流域滑坡灾害研究现状,了解到大渡河流域由于其独特的地理位置以及地质环境决定了其区域内滑坡灾害频发,当前,针对大渡河干流流域滑坡成因机制研究聚焦于地形地貌、地质构造、水文条件及人类活动等多要素耦合作用^[21-24],但相比于其他区域性滑坡时空分布研究(如白龙江流域、金沙江流域等)^[25-30],针对大渡河流域的系统性分析仍存在不足,尤其是地质构造与人类活动的耦合效应、滑坡时空分布的定量化特征等方面亟待深入探讨^[31-32]。

因此,本文基于大渡河流域地质环境条件,综合运用遥感影像解译、野外调查与统计分析,系统研究了流域内2 377处滑坡的分布规律及其控制因素。研究范围涵盖丹巴至乐山的干流及主要支流区域,重点探讨了地形坡度、地质构造、岩土体类型、水文条件

和人类工程活动对滑坡发育的影响。本文揭示了滑坡的时空分异规律, 并量化了关键驱动因子的贡献度。研究结果不仅丰富了对高山峡谷区滑坡生成机制的理论认识, 也为区域灾害风险管控和工程规划提供了重要参考。

1 流域地质环境条件

1.1 区域地质背景

如图 1 所示, 大渡河干流以四川省丹巴县为起点, 在乐山境内与青衣江汇流后流入长江, 流经四川省阿坝州、甘孜州、雅安市等 12 个区县(市)。河段划分以泸定以上为上游, 泸定至铜街子为中游, 铜街子以下为下游。流域整体呈条状, 南北向长 340 km, 东西向宽 290 km, 沿 SSE 方向展布, 总面积约 $4.88 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

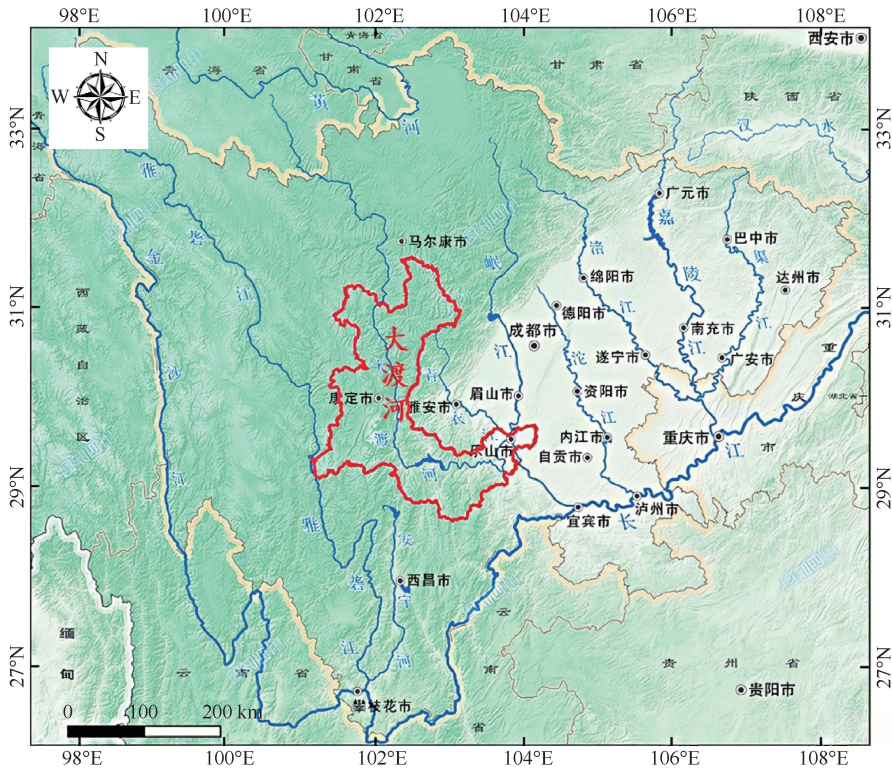
大渡河流域南北狭长, 地形复杂且垂直高差显著, 气候时空变异性突出: 上游丹巴县至石棉县属高原亚温带气候, 寒冷干燥, 年均温不到 6°C , 年降水量约 700 mm, 暴雨稀少(单日最大降水量 30~70 mm), 月降水峰值见于 6 月; 中下游汉源县至市中区属中亚热带湿润气候, 年均温 $13 \sim 18^\circ\text{C}$, 年降水量约 1 000 mm; 中游西部及南部高山区域年降水量达 1 400~1 600 mm; 中下游全域具备暴雨发生条

件, 单日最大降水量大于 100 mm。

大渡河系岷江一级支流, 年均径流量 $488 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其流域水系具显著空间分异性: 上游(大金川、小金川、革什扎河等干支流)集水面积为 $17\,440 \text{ km}^2$, 占全流域 76.2%; 中游(磨西河、南桲河、流沙河等)区间面积为 $17\,440 \text{ km}^2$, 占比 22.5%; 下游(以龙池河等小支流为主)区间面积为 $1\,017 \text{ km}^2$, 占比 1.3%。干流总体呈南北向展布, 于石棉折转向东, 构成“L”形流路。流域内支流水系发育, 双江口以下流域面积大于 $1\,000 \text{ km}^2$ 的一级支流达 28 条, 呈典型羽状水系格局; 各支流水量差异显著, 径流深空间分异呈现自上游至下游沿程递增趋势。径流补给以降水为主, 地下水与冰雪融水次之。主汛期为 6—9 月, 年最大流量多见于 6、7 月。

大渡河流域地处青藏高原—四川盆地地貌过渡带, 地势呈 NW-SE 向阶梯状递降。地貌类型多元, 涵盖平原($0.24 \times 10^4 \text{ km}^2$, 4.95%)、丘陵($0.06 \times 10^4 \text{ km}^2$, 1.26%)、山地($4.55 \times 10^4 \text{ km}^2$, 93.09%)及冰川($0.03 \times 10^4 \text{ km}^2$, 0.71%)。地形非均质性显著, 高程极值 408~7 556 m, 相对高差达 7 095 m。大渡河流域内发育形成三级夷平面, 并伴随 4~6 级河流阶地。

大渡河流域地跨羌塘—三江地层大区(金川地层



修改自“四川省十大水系图”, 审图号为图川审【2019】232号, 底图无修改

图 1 研究区位置

Fig. 1 Location map of the study area

小区和雅江地层小区)和扬子地层大区(龙门山、成都、康定—西昌和峨边—曲靖地层小区),地层出露齐全,从前震旦系到第四系均有不同程度的发育。

大渡河流域地处北西向鲜水河断裂带、北东向与南北向安宁河断裂带的构造复合部位,区域岩体呈碎裂化特征,节理密集发育。在中游泸定一带交汇构成著名的“Y”字形构造;上游的丹巴和小金受到东北部金汤弧形构造、西南部的雅江弧形构造影响;下游局部受到小的东西向构造带的影响。

大渡河流域地下水类型主要是基岩裂隙水,河谷盆地及河漫滩阶地发育松散堆积物孔隙潜水。大渡河干流水文地质条件呈流域分异特征,上中下游水文地质响应存在机制性差异,主要与气象水文、岩性、构造作用相关。

1.2 滑坡分布特征

截至2021年12月,大渡河流域内发育滑坡2377处,自然资源系统在册1687处,销号点450处;交通部门126处,水利部门87处,旅游景区27处。其中小型1573处,占总灾害数的66.18%;中型692处,占总灾害数的29.11%;大型105处,占总灾害数的4.42%;巨型7处,占总灾害数的0.29%(见图2)。

降雨是引发地质灾害的主要因素,受区域内降雨年内分配不均影响,地质灾害的年内发生节律呈现非均一性。依据四川省1990—2020年灾情统计序列,区域约94.18%的滑坡灾害集中于5—9月,该时段构成滑坡高发期;其中降雨峰值对应的8月,滑坡月发生频率达全年最高(34.30%),7月次之(25.63%),整体呈现单峰型时序分布特征。

2 滑坡生成规律分析

2.1 地形控制规律

从地貌形态来看,虽然大渡河流域以高山、极高山为主要地貌单元,但滑坡主要发育于河谷区,高山、极高山区则相对较少。滑坡主要沿河(沟)谷呈枝(羽)状展布,大渡河流域地质灾害的分布规律主要受斜坡坡度和斜坡高度两个方面影响。

2.1.1 斜坡坡度

地形坡度作为滑坡孕育的基础条件,其梯度特征对灾害类型分异具有重要控制作用。斜坡坡度与坡体稳定性呈负相关:地形陡峭程度越大,临空面失稳趋势与内部应力集中效应越显著,导致岩土体发生形变破坏的可能性同步提升。当坡面倾角超过60°的临界值时,通常引发崩塌型破坏;随着地形梯度逐渐降

低,斜坡破坏形式向滑动型转变;当坡角减小至缓坡范畴时,滑坡发生频率呈现明显递减规律。对大渡河干流流域滑坡发育规模与对应斜坡坡度统计显示,10°~50°斜坡为滑坡集中发育区间(发育2172处,占全区滑坡总数的91.33%),以30°~40°斜坡最多,698处;滑坡数量随坡度升高呈先增后减特征,40°为数量变化拐点,40°内数量随坡度上升而增加,40°后则反向递减。这一规律印证了地形地貌的控灾机制:低坡度区相对高差小、坡积物势能弱,滑坡变形活动受限;中坡度区势能积累达临界值,滑坡易发性增强;高坡度区(>50°)则因坡体稳定性主控因素转变(由滑坡向崩塌过渡),滑坡发育规模回落,易产生崩塌(见图3)。

2.1.2 斜坡高度

滑坡坡高分为相对坡高和绝对高程。相对高差特指灾变地质体后缘剪出口与前缘堆积区之间的地形高差量值,作为滑坡体几何形态参数的宏观表征参数,同时表征了滑体势能载体的度量指标。绝对高程系指基于国家高程基准面标定的地形面海拔值,该参数与区域地形地貌单元垂向分带性存在显著相关性。在此,分别分析海拔高程与相对坡高对滑坡形成的影响。

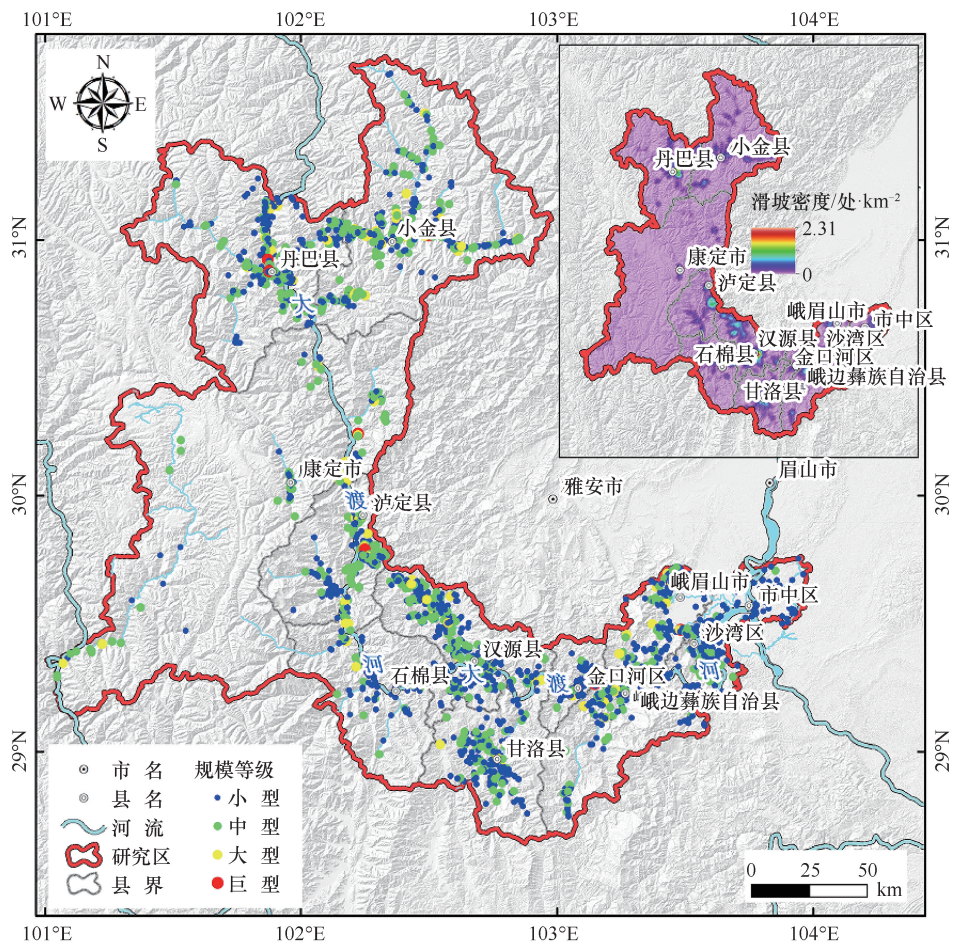
通过对大渡河流域内滑坡海拔高程的统计分析,滑坡主要集中在海拔500~3500m之间,占全区96.55%。其中,以海拔1000~1500m分布灾害点最多,共有554个,占总数的23.31%;其次为海拔1500~2000m,有354处,占总数的17.92%。以海拔1000~1500m为分区界线,随着海拔高程分级逐级升高或降低,滑坡数据逐级减少,其中,海拔在3500m以上的灾害点仅有26处,占灾害点总数的1.09%;海拔在500m以下的灾害点仅56处,占灾害点总数的2.36%(见图4)。

2.2 地质构造控制规律

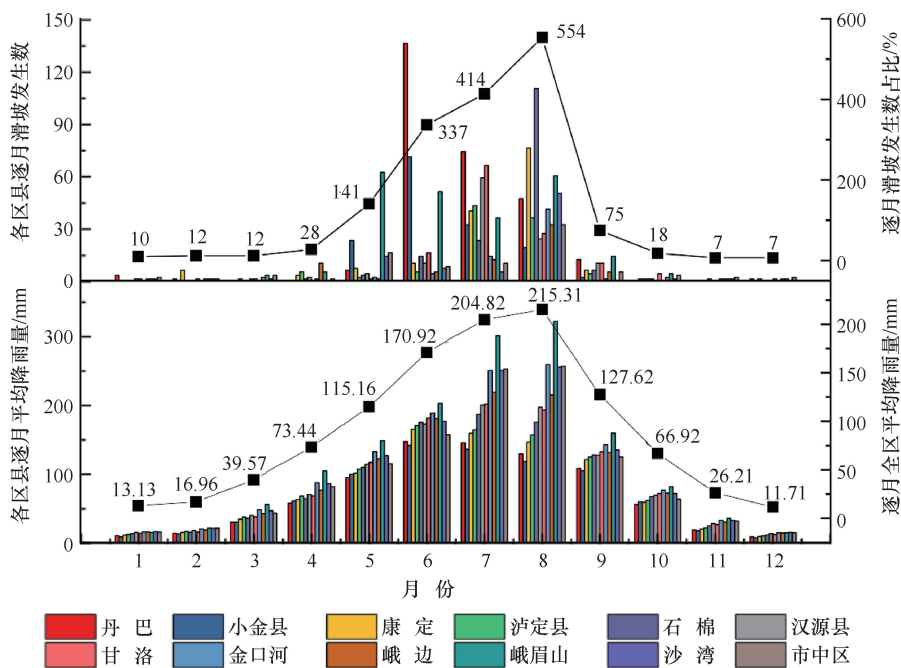
大渡河流域滑坡发育受地质构造显著控制,构造-滑坡空间耦合分析表明:距断层≤5km范围内发育滑坡1877处,占流域滑坡总数的78.9%。滑坡分布密度与构造活动强度呈显著正相关(见图5)。

(1)地质构造对岩质滑坡具有直接的控制作用。典型实例为泸定县摩岗岭滑坡:其主滑面受印支期—燕山期构造结构面控制;河谷下切过程中形成缓倾临空剪切带,现代构造应力场导致谷底压应力集中;地震触发作用下发生大规模滑移,形成灾害链式反应(古构造面+表生改造+应力集中+地震触发)。

(2)区内的滑坡主要沿构造走向分布。如峨边平



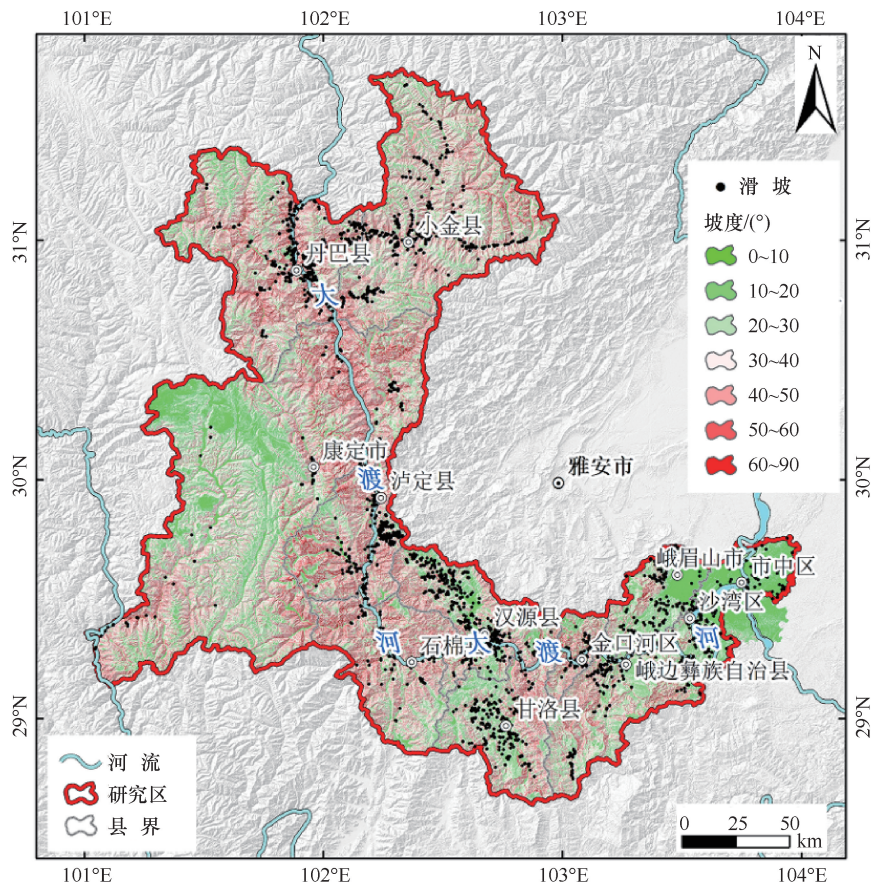
(a) 大渡河流域滑坡隐患点分布



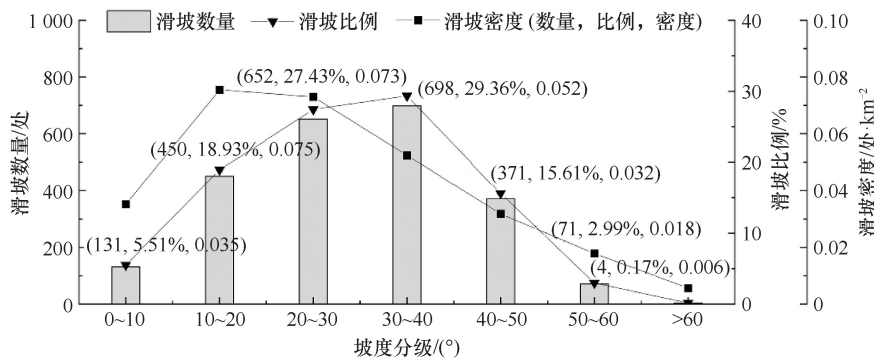
(b) 大渡河流域滑坡灾情时间分布

图2 大渡河流域滑坡灾情时空分布

Fig. 2 Spatio-temporal distribution map of landslide disasters in the Dadu River Basin



(a) 滑坡坡度分布



(b) 滑坡坡度分级统计

图3 滑坡坡度控制规律

Fig. 3 Graph of control law for landslide slope gradient

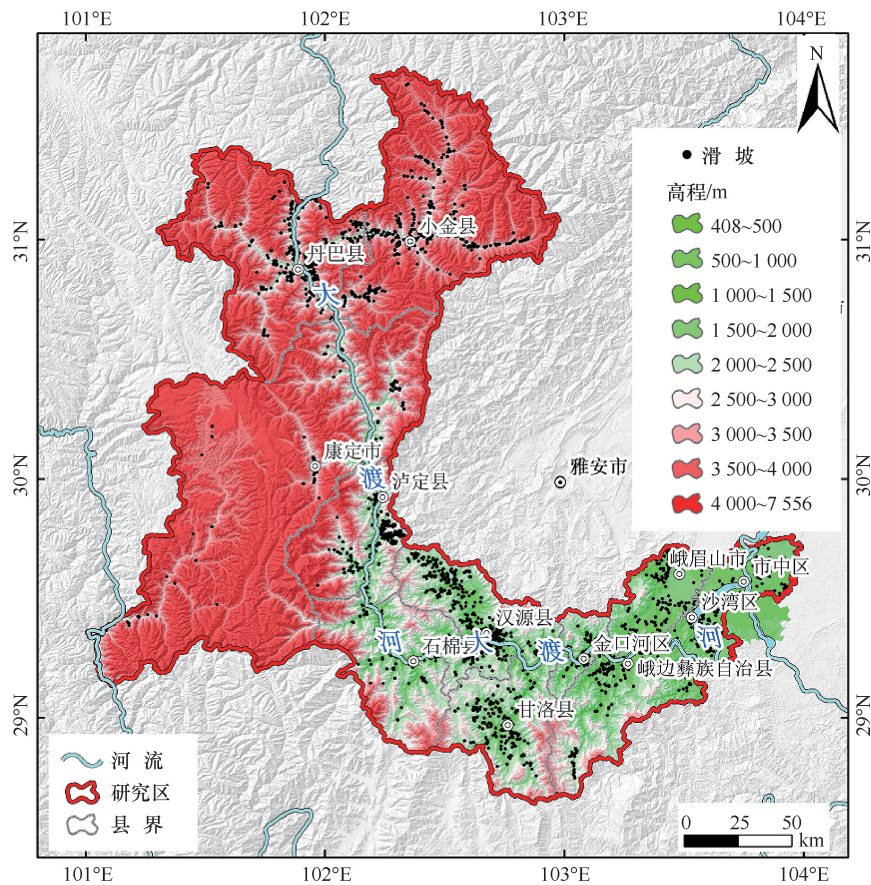
等断层, 沿 NE 向穿经平等场镇并伴生大量褶曲构造, 致使地层风化破碎程度加剧, 受此构造效应影响, 构造线沿线发育多处滑坡与不稳定斜坡体, 整体稳定性较低。

(3) 褶皱构造成为控制流域内滑坡灾害的主要因素。如汉源县域内发育的宜东向斜、汉源—桂贤复式向斜及磨坊沟背斜组成的褶皱构造组合控制域, 经斜坡灾害数据库统计结果显示, 其构造影响范围内发育的滑坡灾害占比达 86.78%, 揭示出该区褶皱变形过

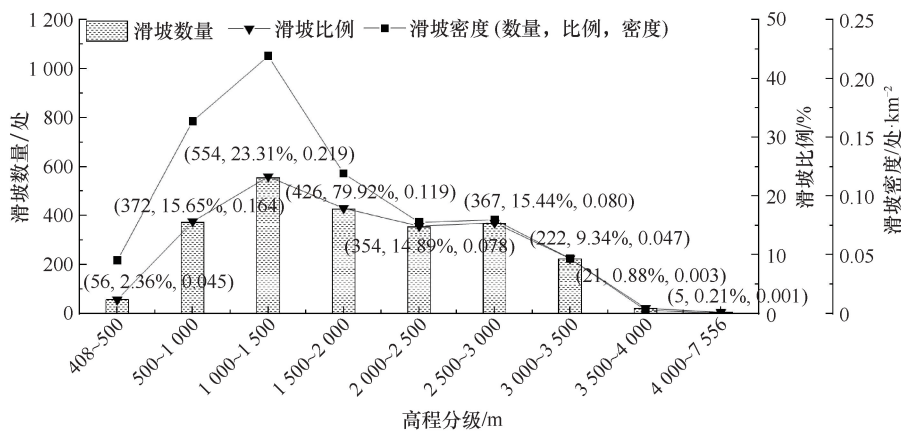
程中产生的层间剪切带及应力释放裂隙网络对斜坡失稳的控制作用非常明显。

2.3 岩土体类型控制规律

岩土体是地质灾害的承灾载体, 滑坡从孕育到成灾的全过程均通过岩土体变形响应表现。其物理-水理性质差异直接调控灾害发育特征。大渡河干流流域内岩类因矿物组分分异, 风化响应具相异性, 致滑坡孕灾机制与发育强度存在区段差异。其中, 泥岩-页岩-砂岩互层坚硬-半坚硬岩组(IV)、



(a) 滑坡高程分布



(b) 滑坡高程分级统计

图4 滑坡高程控制规律

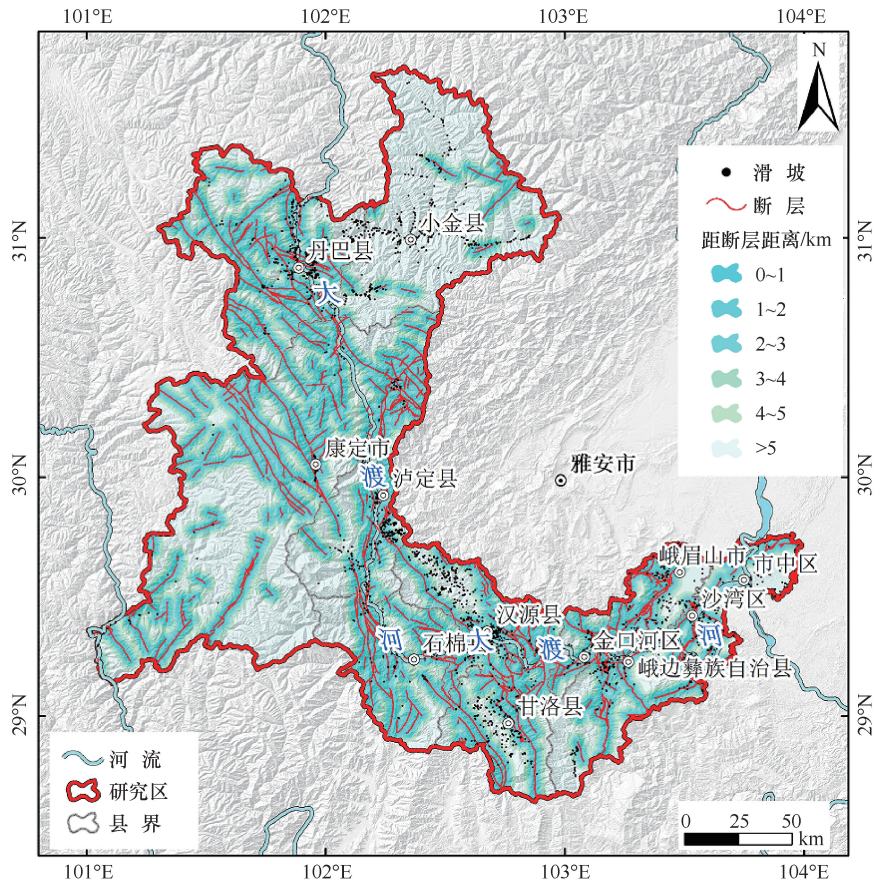
Fig. 4 Graph of control law for landslide elevation

碳酸盐岩建造坚硬岩组(VI)及板岩-片岩-变质砂岩-砂岩-碳酸盐岩互层坚硬-半坚硬岩组(V),在流域内分布面积较大,滑坡数量较多,分别发育648处、328处和822处,但发育密度小于前两类。主要原因是:泥岩-页岩-砂岩互层岩类(IV)虽有软弱夹层,但较砾岩-砂岩-页岩-泥岩为主的半胶结地层半坚硬岩类(III)少且强度更高,故发育密度小于III类;碳酸盐岩建造坚硬岩类(VI)和板岩-片

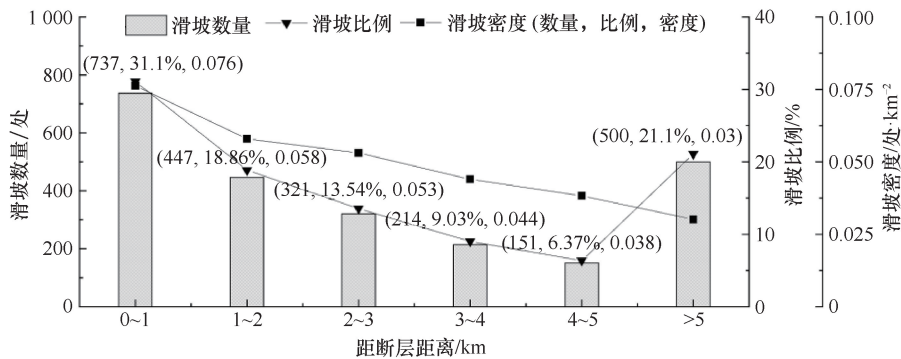
岩-变质砂岩-砂岩-碳酸盐岩互层坚硬-半坚硬岩类(V)无软弱夹层,岩体强度较大,除构造特别强烈地区外,一般不易发生滑坡。岩浆岩建造坚硬岩类(VII)强度最高,不易风化,岩体完整性较好,除石棉境内粗粒花岗岩风化导致滑坡外,其余地区很少发育,故其发育密度小(见图6)。

2.4 斜坡结构控制规律

不同的斜坡结构类型、斜坡倾角与岩层倾角的大



(a) 距断层距离分布



(b) 不同断层距离滑坡统计

图5 滑坡距断层距离规律

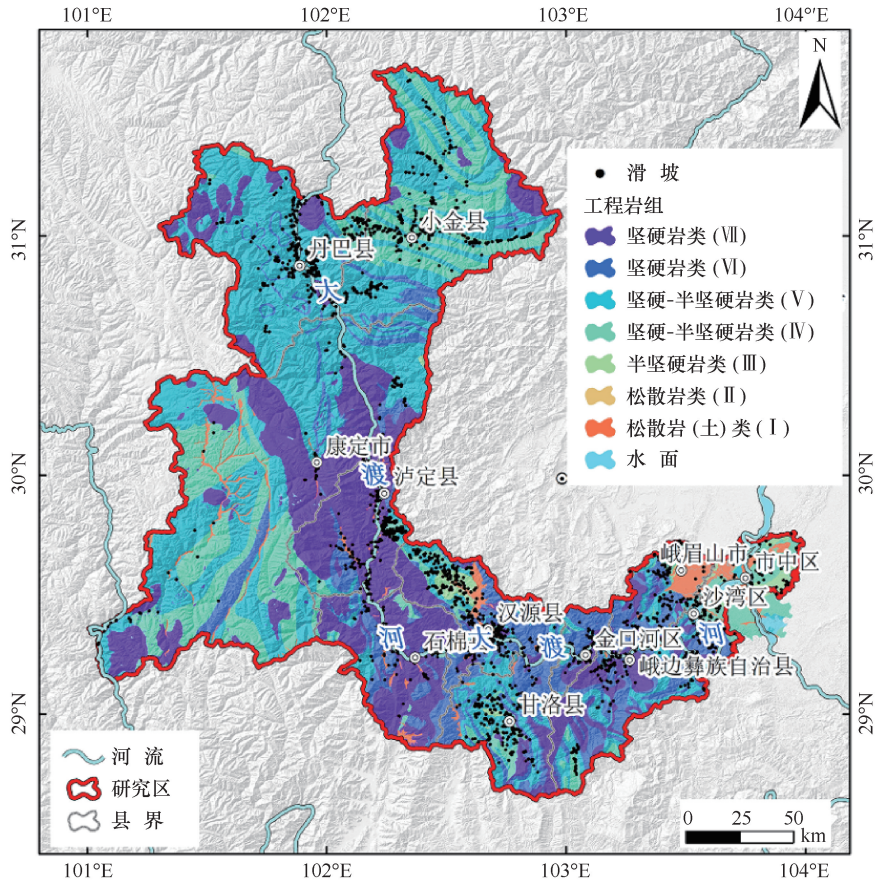
Fig. 5 Graph of law for landslide distance to faults

小不同, 导致斜坡的变形破坏模式、破坏规模等存在差异, 进而影响斜坡稳定性。根据 20 万地质图提取产状等信息, 由岩层面倾向与斜坡坡向之间的关系, 提取研究区的斜坡结构类型, 区内可划分为 6 类斜坡: 顺向斜坡 (7.91%)、逆向斜坡 (17.68%)、斜向斜坡 (24.35%)、横向斜坡 (27.78%)、块状斜坡 (19.22%) 与土质斜坡 (3.06%)。从滑坡发育的个数来看, 横向斜坡最多, 为 740 处; 斜向斜坡和逆向斜坡, 分别发育 625 和 458 处; 然后是顺向斜坡和块状

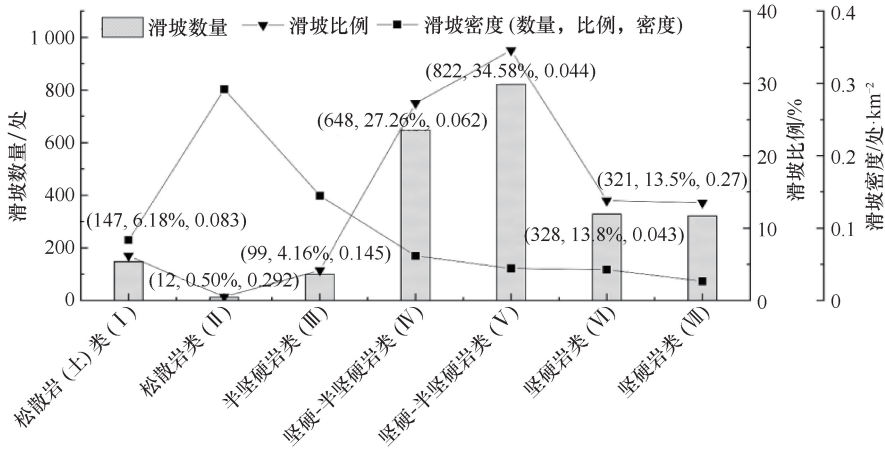
斜坡, 分别发育 234 和 171 处; 土质斜坡发育最少, 发育 147 处 (见图 7)。

2.5 水文条件控制规律

水文地质环境是滑坡孕灾的关键诱因之一。地表水冲蚀并渗入滑润滑弱化岩层面、降低界面摩擦与黏聚性, 驱动滑坡变形启动。研究区缓倾坡体中, 泥岩、黏土或粉质黏土弱透水层受顺层地下水长期浸润 (如出露成泉) 发生软化泥化; 叠加地表水入渗的水力耦合, 易触发坡体失稳。基岩山区



(a) 工程岩组分布



(b) 不同工程岩组滑坡统计

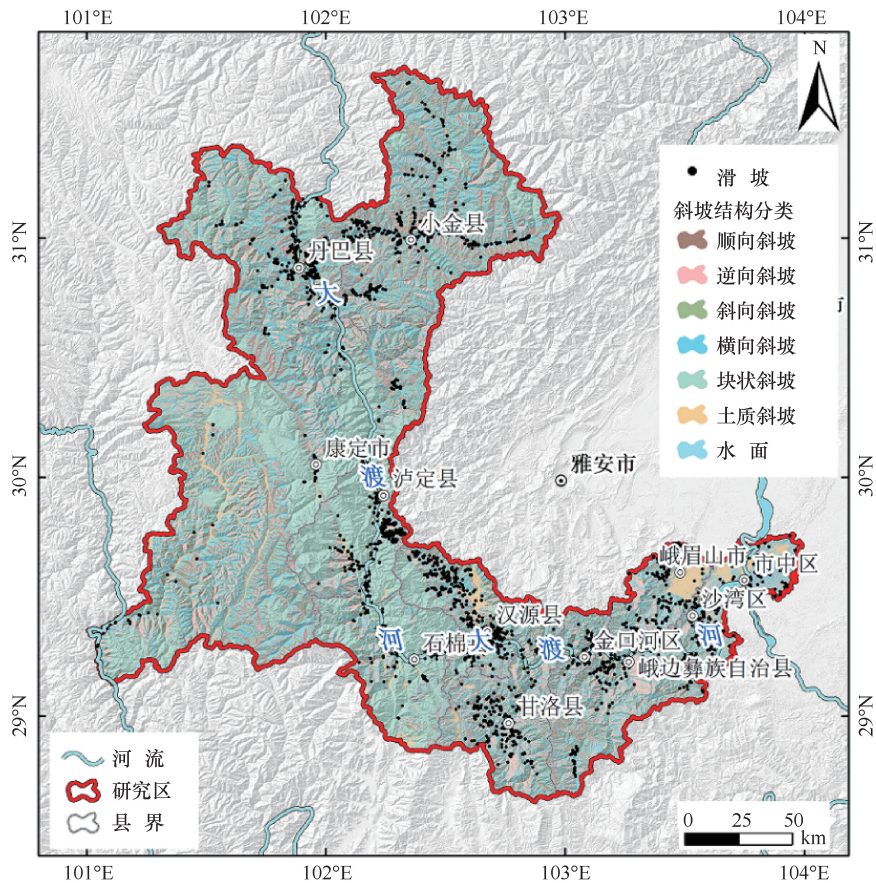
图 6 滑坡的工程岩组规律

Fig. 6 Graph of law for engineering rock groups of landslides

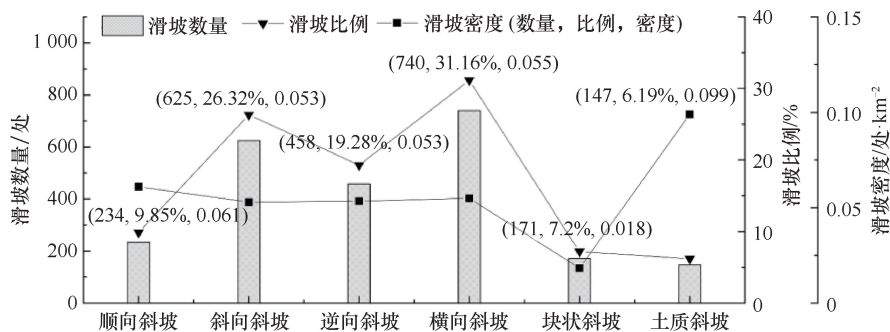
以裂隙-破碎带型地下水为主, 其裂隙静水压力持续劣化岩体完整性, 诱发岩质边坡滑塌。区域水文地质勘查揭示, 气象水文、地形地貌、地层岩性、地质构造等控渗要素协同约束地下水赋存-运移体系(分布模式、补给路径、排泄机制、动态响应), 其中地质构造对地下水富集带的控制作用最为显著。

2.5.1 河流

区域内地质环境条件复杂, 构造发育, 岩体破碎, 且流域内为主要人类工程活动区, 分布有重要城镇、村庄、重要交通干线、大型水利水电工程等重要基础设施, 人类工程活动强烈, 破坏区内地质环境条件, 诱发滑坡发育。为分析区内河网水系对地质灾害的控制强度, 主要对大渡河干流与支流进行统计分



(a) 工程岩组分布



(b) 不同工程岩组滑坡统计

图7 斜坡结构规律

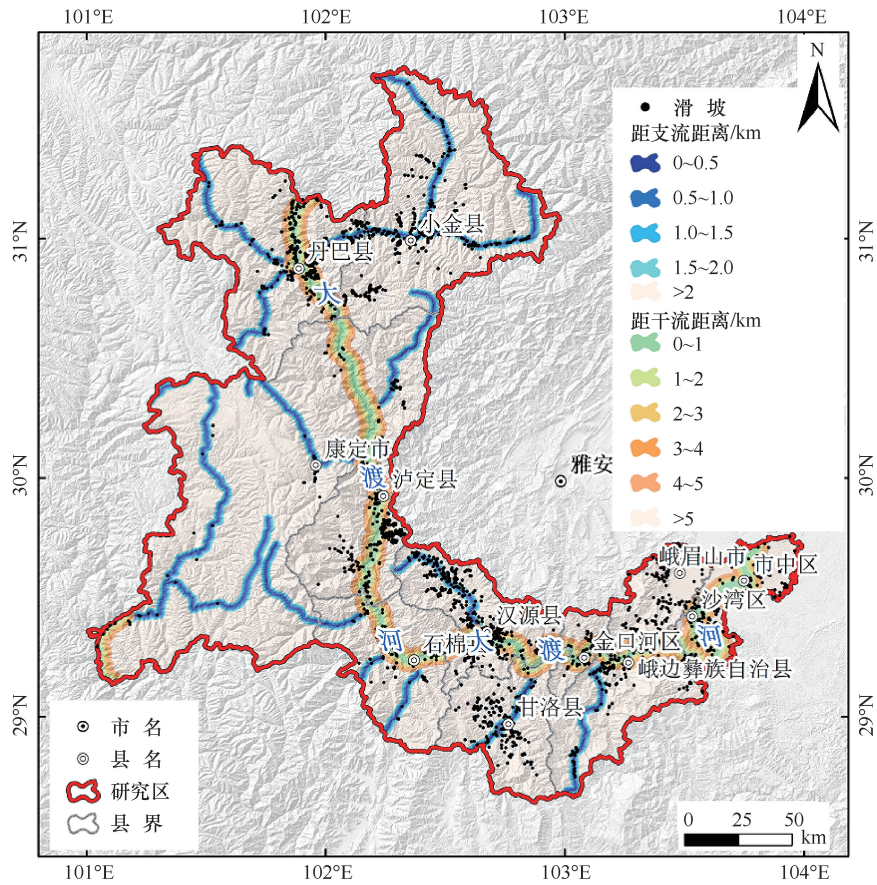
Fig. 7 Graph of law for slope structure

析。大渡河干流以 1 km 为间隔依次创建 5 组多环缓冲区, 支流以 0.5 km 为间隔依次创建 4 组多环缓冲区。统计结果表明, 区内滑坡随距离河流距离增大, 滑坡数量及密度逐级降低, 在大渡河干流两岸分布滑坡数量最多, 在距离大渡河干流 5 km 范围内, 发育滑坡 967 处, 占滑坡总数的 39.32%; 距离大渡河支流 2 km 范围内, 发育滑坡 504 处, 占滑坡总数的 21.31%。综上, 区内河流对滑坡形成起到一定的控制性作用(见图 8)。

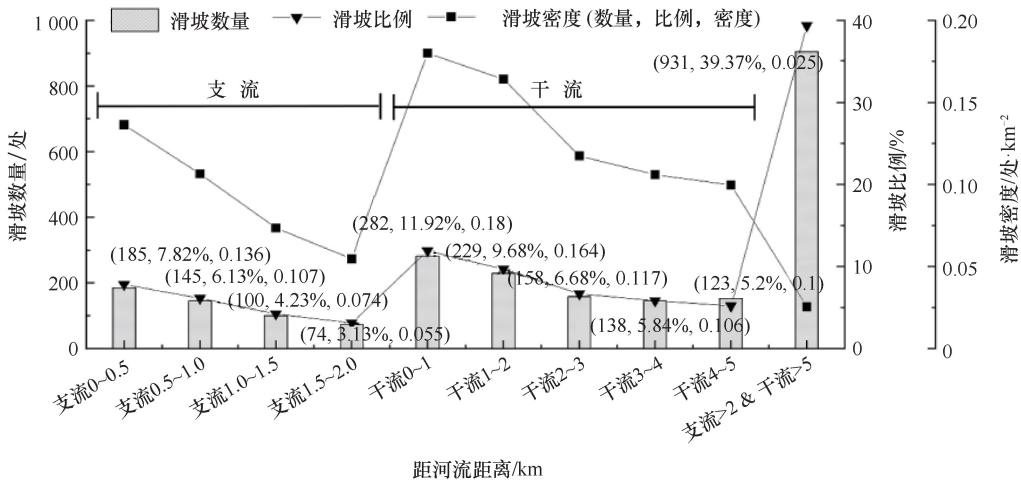
2.5.2 降雨

降雨诱发斜坡失稳的灾变机制主要体现在三个方

面, 一是增加斜坡体自重, 促使重力势能累积突破临界阈值; 二是浸润斜坡的软弱结构面, 致使岩土体物理力学参数发生强度折减; 三是地表径流产生的剪切应力作用于坡体临空面, 通过冲蚀-搬运的链式过程破坏坡体几何形态完整性。前文研究表明, 降雨对于区内滑坡形成起到控制性作用, 区域几乎所有的滑坡发生多集中在每年 5—9 月, 占全年滑坡灾情数据的 94.18%。根据 2001—2020 年降水量月度数据, 统计了 20 年间 5—9 月累计降雨量平均值, 统计结果表明, 上游区域(丹巴至康定), 滑坡密度分布随降雨



(a) 滑坡距河流距离分布



(b) 不同河流距离滑坡统计

图 8 滑坡距河流距离规律

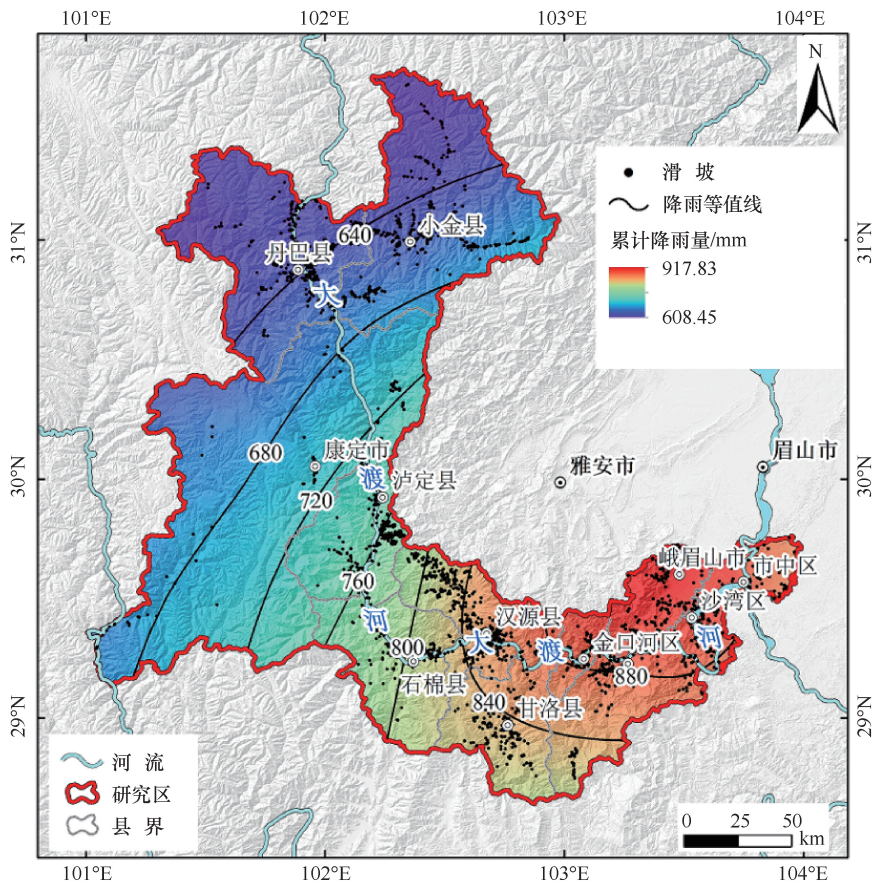
Fig. 8 Graph of law for landslide distance to rivers

量降低而逐步增大, 该区域为高原温带季风区, 昼夜温差大, 物理风化强烈, 形成较多冰碛物, 为崩滑流提供了良好的物质条件。降水时空分布显著不均, 降雨集中, 多暴雨, 是诱发滑坡灾害的重要因素。大渡河中下游属亚热带季风区, 强对流天气过程引发的极端降水事件汇聚大量地表水, 降雨诱发滑坡作用较上游更加强烈, 滑坡密度分布随降雨量增高而逐步增大

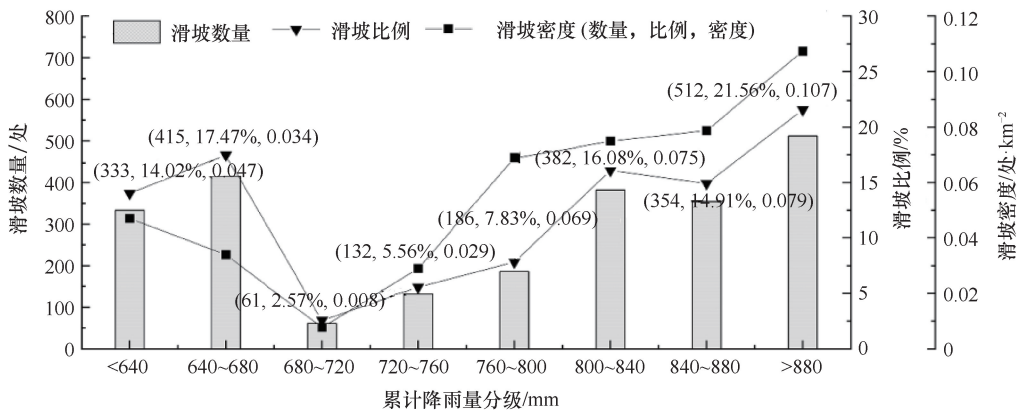
(见图 9)。

2.6 人类工程活动控制规律

滑坡与不稳定斜坡的孕育机制可从内外因双维度解析: “内因”源于岩土体本征物理力学性质的非均质性, 受物理风化、胀缩变形、累积损伤致抗剪强度衰减及孔隙水压力攀升等多因子耦合作用, 构成坡体失稳的先验性劣化基础; “外因”主要为人类工程活



(a) 多年5月至9月累计降雨量分布



(b) 不同累计降雨量滑坡统计

图9 滑坡累计降雨量规律

Fig. 9 Graph of law for landslide cumulative rainfall

动, 开挖切坡形成高陡临空面后, 坡体应力场重构并于坡脚区发育剪应力集中带, 土体抗滑阈值降低。

2.6.1 土地利用

土地利用类型是人类或自然对地表岩土体改造的一种表现, 同时也反映了不同的地表水和地下水作用。收集研究区2000年与2020年两期地表覆盖分类成果, 两期地表覆盖类型显示研究区内以林地和草地为主。

对比分析不同覆盖物类型改变对于滑坡发育的影响, 其中覆盖物差异性分析将耕地、林地、草地、灌木地与湿地统称为植被覆盖区。分布在地表覆盖物变化区域的滑坡仅有73处, 分布在人造地表→植被覆盖区滑坡6处, 密度为0.236处/km²; 植被覆盖区→人造地表区滑坡50处, 密度为0.318处/km²; 植被覆盖区→水体区滑坡50处, 密度为0.087处/km², 该区域主要为2000年之后修建水电站库区水位变动带。

表 1 各类地表覆盖物及变化面积统计

Table 1 Land cover classification and change area statistics

土地覆盖类型		面积/km ²		变化面积/km ²	
		2000年	2020年		
植被覆盖区	耕地	3 799.80	3 673.75	232.76	-126.05
	林地	28 794.98	27 693.56		-1 101.42
	草地	13 807.28	15 263.35		1 456.07
	灌木地	852.49	890.95		38.46
	湿地	48.63	14.33		-34.30
水体		182.56	390.59	208.03	
人造地表		129.29	304.00	174.72	
冰川和积雪		1 201.16	585.77	-615.39	

典型案例为汉源中海村滑坡——中海村位于汉源县人类活动密集区, 2010年后因村镇建设将原有林地(植被覆盖区)改造为建筑用地(人造地表), 一方面, 建筑开挖扰动下部昔格达地层(半成岩, 遇水易软化的自然脆弱层); 另一方面, 地表硬化导致降雨集中入渗坡体内部, 形成孔隙水压力, 最终诱发覆盖层沿昔格达地层表面滑移, 滑坡面积达 0.8 km², 影响周边 50 余户居民。

2.6.2 公路建设

如图 10 所示, 在道路工程建设过程中, 边坡开挖对自然斜坡稳定性产生重大影响, 在外部因素作用下, 极易诱发灾害。因此, 将距道路的距离作为表征人类工程活动状况的指标具有合理性。统计结果表明, 区内滑坡随距离道路距离增大, 滑坡数量及密度逐级降低, 在距离主干公路 1 km 范围内, 发育滑坡 656 处, 占滑坡总数的 27.6%。综上, 区内公路对滑坡形成起到一定控制作用。

以丹巴甲居滑坡为典型案例——该滑坡位于丹巴县主干公路旁 1 km 内, 滑体为第四系冰水堆积层(自然条件下结构松散、透水性强), 公路开挖切坡后, 坡脚支撑力丧失, 坡体应力重构, 叠加雨季降雨入渗(自然触发), 导致滑坡从缓慢变形转为失稳滑动, 最终形成长约 1.2 km 的滑动体, 直接威胁公路通行安全。

2.6.3 水电开发

大渡河位于长江上游区段, 纵贯南北方向, 区内溪沟纵横分布。其流域面积逾两千平方千米, 蕴含极为丰富的水能资源。目前, 在区内河流沿线大规模兴建了一系列梯级水电站, 在实现水能开发利用的同时, 造成地下水位抬升、土层软化的现象。当水库区蓄水之后, 水位升高, 再加上库岸边坡的重塑, 从而促使滑坡产生。遥感技术在宏观监测水域变化方面具有得天独厚的优势, 利用 1984 年至 2020 年期间获取的 Landsat 5、Landsat 7 和 Landsat 8 数据, 在 GEE 平台绘制大渡河流域连续 30 年水域分布及其动态变化,

提取每年最大水面覆盖面积, 1984 年水面面积为 108.98 km², 2020 年水面面积为 305.51 km², 37 年间水面面积增加 196.53 km²。根据统计, 库区影响区发育滑坡 739 处, 占全区 31.09%, 密度 0.113 处/km²。影响区之外发育滑坡 1 638 处, 占全区 68.91%, 密度为 0.038 处/km²(见图 11)。

以泸定新华滑坡为典型例子, 该滑坡位于大渡河中游泸定水电站库区影响范围内, 滑体为上三叠系白果湾组含煤线砂页岩(自然条件下已因构造作用呈碎裂状), 水库蓄水后水位反复升降, 一方面软化岩层面、降低界面摩阻力(自然因素叠加), 另一方面加剧河谷冲刷致前缘临空(人工扰动), 最终诱发滑坡发生倾倒-滑移拉裂破坏, 印证“自然地质脆弱性+人工水位变动”的复合致灾逻辑。

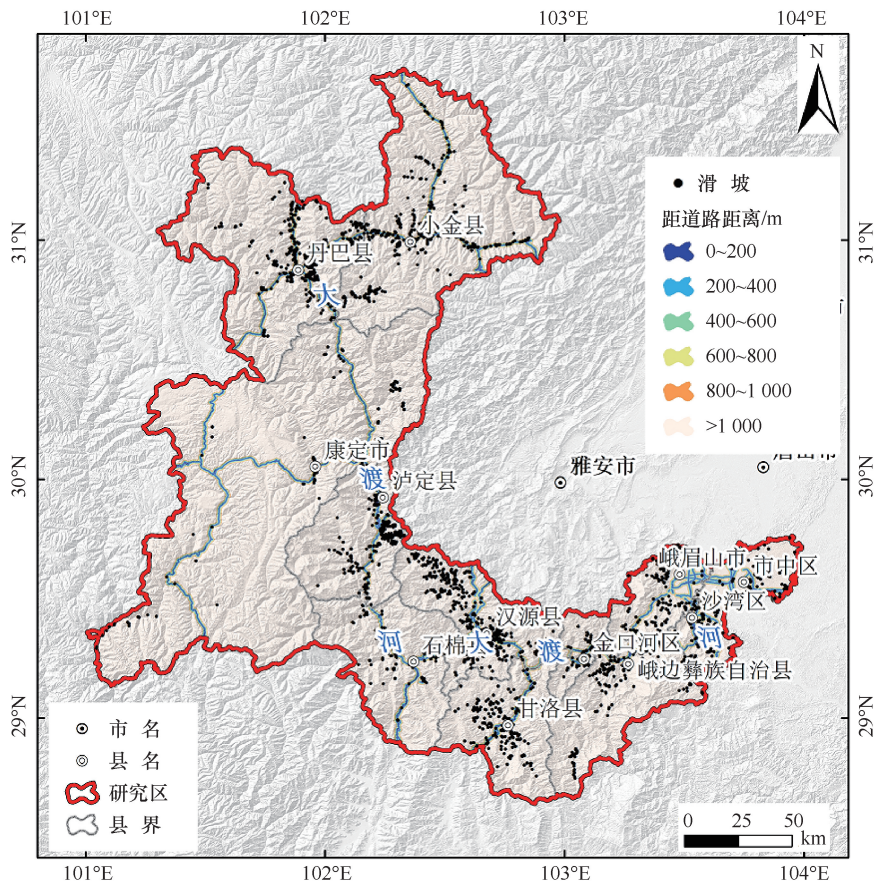
3 大渡河流域滑坡特征分析

3.1 大渡河上游堆积层滑坡

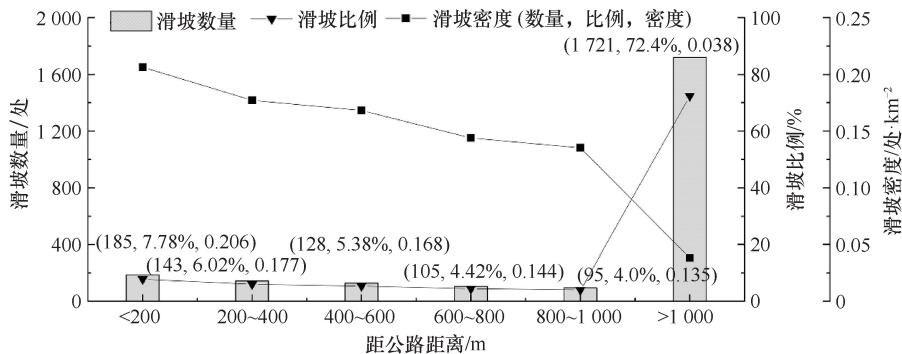
主要分布在丹巴县、小金县, 特别是丹巴县境内松散堆积层沿大渡河及支沟两岸分布广泛, 最厚处接近 100 m, 在长期的内外动力作用下持续变形并形成滑坡隐患(见图 12)。

滑体主要由第四系地层构成, 涵盖滑坡堆积层、崩坡积层以及冰水堆积层。其中, 滑坡堆积层源于大渡河流域河流强烈切割, 在河谷相对平缓区域发育众多古(老)滑坡。此类滑坡堆积层普遍结构松散, 块碎石土结构松散, 多见架空现象, 透水性好; 崩坡积层, 主要是由于大渡河上游新构造运动十分强烈, 岩体节理、裂隙发育, 温差大, 易于岩体风化, 形成大量崩坡积物。结构松散, 多见架空现象, 主要分布于滑坡体的后缘和两侧, 具有很好的透水性; 冰水堆积层, 特别是上更新统冰水堆积层(Q₃^{gl})在大渡河中上游较发育, 多为灰黄色、灰色块石土, 局部含大块石, 结构较密实, 有一定程度胶结, 其厚度最大可达 50 m 以上, 在滑坡两侧及后缘经常形成坡度大于 60 度的陡坡, 其稳定程度通常较高, 如丹巴县建设街滑坡、甲居滑坡。

松散堆积层滑坡的最大特点就是初始变形或等速变形阶段时间长, 变形最终结果可能产生如下三种情况: 一是经过长时间的蠕变变形(类似于固结作用)后, 又形成新的阶段性的稳定体, 如丹巴县干桥沟滑坡; 二是持续蠕变变形下去, 局部形成小的鼓胀和拉裂, 但整体不会突然破坏, 如丹巴县红军桥滑坡、梭坡滑坡等; 三是变形累积到一定阶段后形成应力集中或在外力作用, 如河流切割、修路、建房切坡等, 破



(a) 滑坡距道路距离分布



(b) 不同道路距离滑坡统计

图 10 滑坡距道路距离规律

Fig. 10 Graph of law for landslide distance to roads

坏坡体本身平衡形成滑坡, 如丹巴县甲居滑坡和建设街滑坡。

3.2 大渡河中游昔格达地层、炭质页岩夹板岩滑坡

3.2.1 昔格达地层滑坡

昔格达组地层分布区滑坡的滑体通常位于通上段, 主要为粉土、黏土夹砂土, 黄色、黄绿色黏土、粉砂质黏土与灰色泥质粉砂, 粉砂呈薄层状互层, 半成岩, 厚度达 50 m 以上, 其本身透水性较差, 但在新构造或风化作用下往往形成倾斜层面渗水通道, 对

坡体起到增加自重和软化作用(见图 13)。

昔格达地层由于多具有遇水易软化的特征, 因此其物理力学特性较差, 多以中小型滑坡为主, 但十分发育, 变形破坏形式也多样化, 主要表现为覆盖层滑坡和昔格达组的上段与下伏层滑坡 2 种类型: 覆盖层滑坡滑体主要为残坡积物, 由于昔格达组地层的上段即粉砂质半成岩泥岩, 具有相对隔水作用, 地表水入渗后会形成一定的水压力, 而且遇水易软化, 内摩擦角、凝聚力急剧降低, 从而引起覆盖层沿昔格达层表

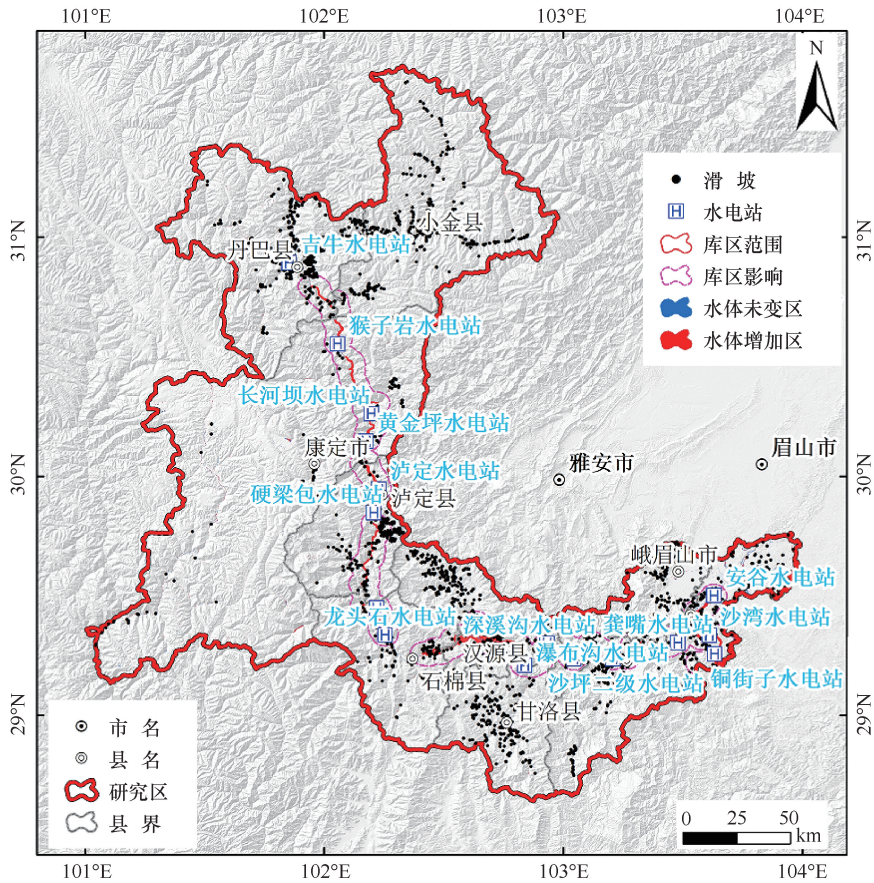


图 11 水电站库区影响范围滑坡分布

Fig. 11 Landslide distribution in the affected zone of hydropower station reservoirs

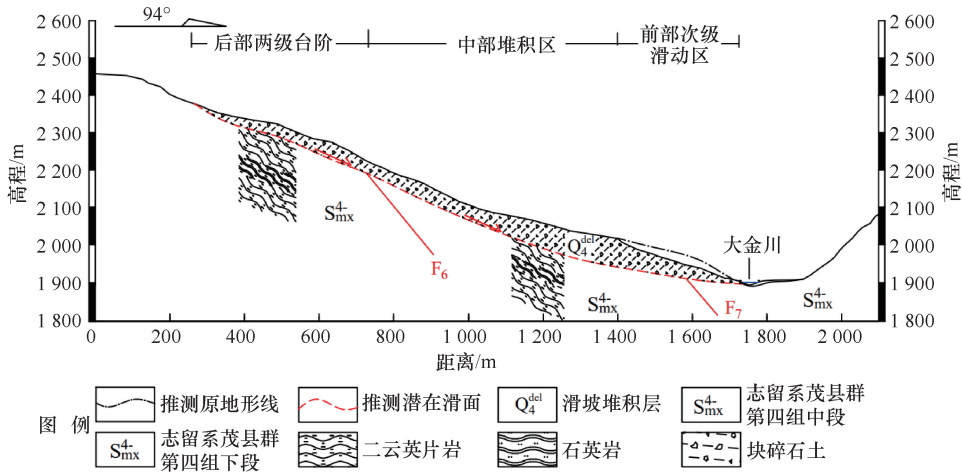


图 12 丹巴县甲居滑坡剖面

Fig. 12 Landslide profile of the Jiaju Landslide, Danba County

面发生滑移；昔格达组的上段与下伏层滑坡主要表现为：昔格达组的上段与下段(粉砂质半成岩泥岩与半胶结碎石土)，以及上段与下部基岩(粉砂质半成岩泥岩与下伏基岩)。由于物理力学性质和透水性的较大变化，在不同渗透及细粒土运移作用下通常可以形

成软化膜，在一定程度上起到润滑作用，从而形成滑动面。

3.2.2 炭质页岩夹板岩滑坡

如图 14 所示，滑体涉及的地质主要是上三叠系白果湾组(T₃bg)。白果湾组具深灰色薄-极薄层砂岩

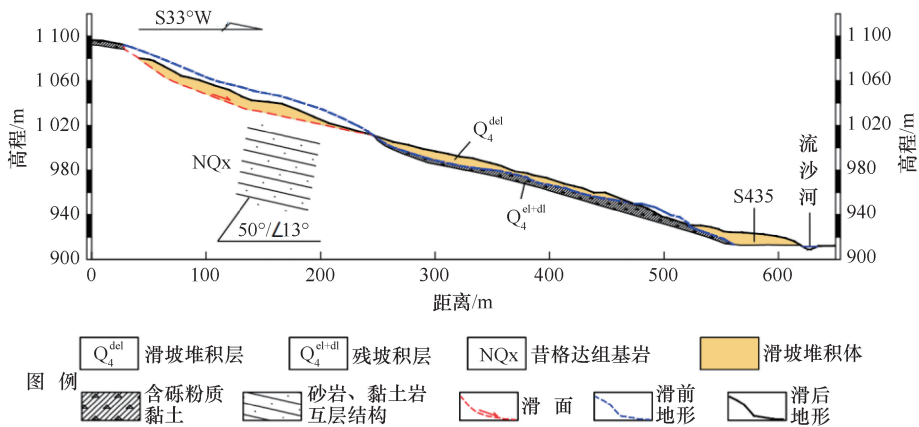


图 13 汉源县中海村滑坡剖面

Fig. 13 Zhonghai Village landslide profile, Hanyuan County

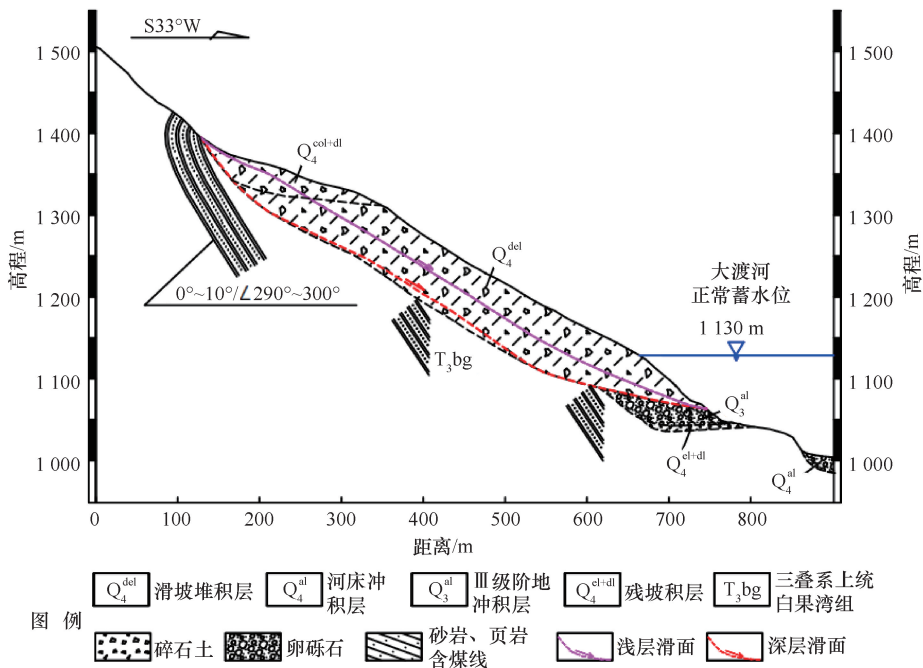


图 14 泸定县新华滑坡剖面

Fig. 14 Profile of the Xinhua Landslide, Luding County

与页岩特征, 其中含煤线及植物化石, 岩体结构多呈互层状-中厚层状, 系晚三叠世湖滨-沼泽环境下形成的海陆交互相含煤建造。

区域地表径流集中、降水下渗滞缓的水力耦合效应, 残坡积土体易饱水失稳。空间分布上, 岩组沿大渡河断裂带呈近南北向条带状展布, 受断裂东、西支断层侧向围限; 地层走向以近南北向为主, 河谷为纵向谷, 陡倾层面裂隙发育、岩体完整性差, 风化剥落作用强烈, 驱动库岸局部发生倾倒型变形及滑坡灾变(典型灾点如新华滑坡、黄草坪变形体)。

在该类滑坡中, 砂页岩层面走向往往与斜坡坡面走向近乎垂直, 构成切向坡, 这对斜坡稳定性较为有

利。然而, 此类斜坡通常呈陡倾状态, 大渡河对坡脚持续冲刷, 致使斜坡前缘临空, 岩体向坡外发生倾倒。在下滑分力作用下, 极易出现滑移拉裂破坏。坡体在重力作用下产生滑移, 促使中倾坡外节理不断发展并贯通, 最终顺此节理滑落。

3.3 大渡河下游红层滑坡

在大渡河下游的石棉至峨眉段发育有两类主要的滑坡易发地层, 分别为侏罗系和三叠系的紫红色砂岩泥岩地层, 此类岩层具有层状构造和易风化特征, 为大渡河流域滑坡地质灾害易发地层之一, 滑坡以顺向坡为主(见图 15)。

滑体物质组成以残坡积和滑坡堆积的含碎石粉质

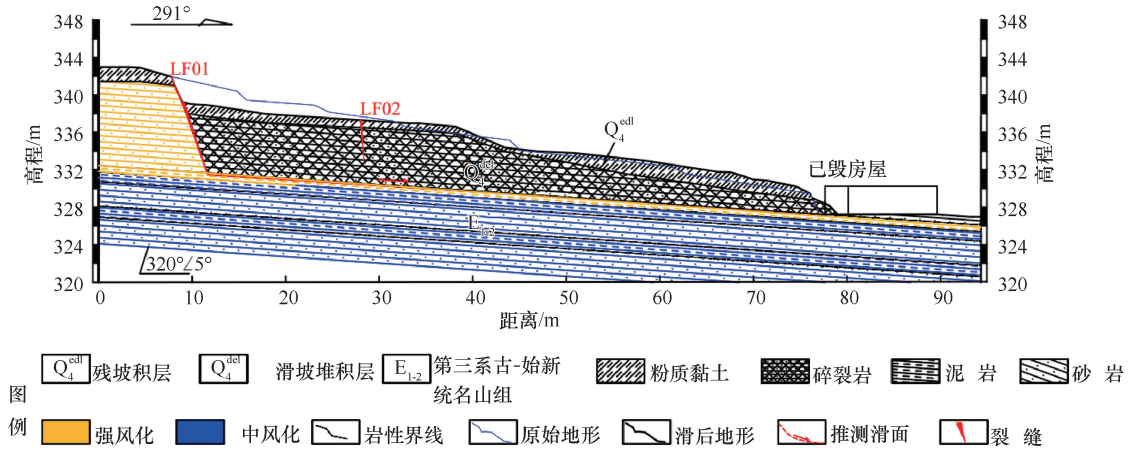


图 15 乐山市连山滑坡剖面

Fig. 15 Profile of the Lianshan Landslide, Leshan City

黏土和碎块石土为主。粉质黏土多分布于地表, 厚度不均, 在滑体内部呈不连续展布, 局部地段较厚; 碎块石土, 主要为崩坡积物或滑坡体堆积形成, 其石质成分大部分为砂岩, 泥岩, 松散, 稍湿, 其余为粉质黏土所充填。总体上看, 滑体土结构不均匀, 土石比在空间上变化较大。

该类滑坡滑移结构面具单一性特征, 滑移界面为松散盖层与下伏基岩接触带, 且以基岩滑面为主, 滑动面产状多与坡面近一致。滑坡下伏基岩类型与主结构面(岩层面、节理、裂隙)对稳定性具显著控稳效应。在层状岩体里, 主结构面与基岩面的倾向以及倾角的耦合关系主导着稳定性的差异: 当二者倾向一致且结构面倾角稍小于基岩面倾角时, 稳定性处于最为不利的状况; 若倾向一致但结构面倾角大于基岩面倾角, 不利程度次之; 而当主结构面与基岩面倾向斜交时, 稳定性呈现出较不利的特征; 块状岩体以及其他层状岩体对于稳定性的控制作用相对较为薄弱。

4 结论

本文围绕大渡河干流流域滑坡灾害这一核心研究对象, 通过多源数据融合、野外调查验证与定量化分析, 系统揭示了流域滑坡发育的时空规律及多要素耦合致灾机制, 弥补了此前该区域研究中“地质构造—人类活动耦合效应不明”时空分布定量化不足”等短板, 主要研究结论如下。

(1)明确流域滑坡对地形参数的“临界响应阈值”——91.33%的滑坡集中于 $10^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 坡度区间、96.55%分布于500~3 500 m高程范围, 且86.07%发育于200~800 m相对高差内。验证了大渡河流域滑坡具有显著的空间分异特征, 集中于中游河谷地带,

受地形坡度($10^{\circ} \sim 50^{\circ}$)、断层距离(<5 km)及岩土体类型(泥岩、页岩互层)的联合控制。

(2)基于1990—2020年灾情数据, 量化滑坡集中的雨季, 年内分布与暴雨季节(5—9月)高度吻合, 且中下游地区因短时强降雨诱发滑坡的强度更大, 揭示降雨触发与人类活动的协同致灾机制。量化人类工程活动的致灾强度, 明确核心影响源, 通过水电库区、公路沿线、土地利用变化的对比分析, 清晰界定“水库蓄水—道路开挖—地表改造”三大人类活动致灾源的影响强度, 明确灾害高发规律与人为影响强度。

(3)系统梳理上中下游典型滑坡特征, 厘清不同区段滑坡发育差异与失稳逻辑。上游以第四系松散堆积物为主, 初始变形阶段长, 最终呈现“形成新稳定体(如丹巴干桥沟滑坡)、持续局部变形(如丹巴红军桥滑坡)、外力触发失稳(如丹巴甲居滑坡)”三类差异化演化结局; 中游滑坡以“遇水软化”和“河谷冲刷致前缘临空”为主要诱因, 易发生倾倒、滑移拉裂破坏; 下游滑坡层状岩体的稳定性核心受控于“主结构面与基岩面的倾向—倾角耦合关系”, 其中“倾向一致且结构面倾角稍小”为最不利工况。

参考文献(References):

- [1] BIAN M F, QIU H Z, CHEN X L. The distribution characteristics of large landslides along the Daduhe River in the eastern Tibetan Plateau and their effects on landscape evolution[J]. Remote Sensing, 2025, 17(7): 1133.
- [2] KUSUMA R J, MEILANO I, SADISUN I A, et al. Spatial analysis of causative factors for landslide susceptibility on Java Island[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1276(1): 012012.

- [3] GAO A S, QI C Z, SHAN R L, et al. Identification and early warning method of key disaster-causing factors of AE signals for red sandstone by principal component analysis method[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2023, 14(10): 102205.
- [4] YANG Z G, CAO J X, WU Y C, et al. Study of 3-D velocity structure characteristics in Dadu river Houziyan reservoir area at different impoundment stages[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2024, 12: 1324268.
- [5] HUANG H B, JU S J, DUAN W, et al. Landslide Monitoring along the Dadu River in Sichuan Based on Sentinel-1 Multi-Temporal InSAR [J]. *Sensors*, 2023, 23(7): 3383.
- [6] 李明辉, 李浩然, 王东辉. 大渡河上游亚喀则滑坡复活变形机理及发展趋势分析[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(1): 305-309.
LI M H, LI H R, WANG D H. The revival mechanism and development tendency of yakaze landslide in the upper reaches of Dadu River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(1): 305-309.
- [7] 吴亚子, 傅荣华, 王健, 等. 大渡河松坪滑坡形成机制及稳定性分析[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(2): 62-65.
WU Y Z, FU R H, WANG J, et al. Analysis on formation mechanism and stability for the landslide in songping beside Daduhe River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(2): 62-65.
- [8] 周洪福, 方甜, 夏晨皓, 等. 工程扰动诱发川西杜米滑坡复活变形特征及机理分析[J]. *现代地质*, 2023, 37(4): 1044-1053.
ZHOU H F, FANG T, XIA C H, et al. Reactivation characteristics and mechanism of engineering disturbed dumi landslide in western Sichuan Province, China [J]. *Geoscience*, 2023, 37(4): 1044-1053.
- [9] 杨芳, 丁仁军, 李勇发. 基于 SBAS-InSAR 技术的金沙江流域典型滑坡时空演化特征分析[J]. *测绘通报*, 2024(11): 102-107.
YANG F, DING R J, LI Y F. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of typical landslides in the Jinsha River Basin based on SBAS-InSAR technology [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2024(11): 102-107.
- [10] 包馨, 张瑞, 刘安梦云, 等. 联合升降轨时序 InSAR 的金沙江滑坡群隐患识别 [J]. *北京理工大学学报*, 2023, 43(11): 1135-1145.
BAO X, ZHANG R, LIU A, et al. Identification of Jinsha River landslide hazards by time-series InSAR with combined ascending and descending orbit data [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2023, 43(11): 1135-1145.
- [11] 邱恒志. 大渡河流域滑坡分布特征及其与地貌演化相互影响作用研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2024.
QIU H Z. The Distribution Characteristics of Landslides and Their Interaction with Geomorphic Evolution on the Dadu River Basin[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2024.
- [12] 解明礼. 多源数据融合的岸岸滑坡演化机制与风险排序研究: 以大渡河流域为例 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(12): 2106.
XIE M L. Evolution mechanism of bank landslide and risk ranking based on multi-source data fusion: Take Dadu River Basin as an example [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(12): 2106.
- [13] ZHANG L L, ZHANG J Q, MING Z Y, et al. Effects of changing spatial scale on debris-flow hazard assessment: A case study in the Dadu River basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 954: 176482.
- [14] YANG W T, WANG Y Q, SUN S, et al. Using Sentinel-2 time series to detect slope movement before the Jinsha River landslide [J]. *Landslides*, 2019, 16(7): 1313-1324.
- [15] 周礼, 范宣梅, 许强, 等. 金沙江白格滑坡运动过程特征数值模拟与危险性预测研究 [J]. *工程地质学报*, 2019, 27(6): 1395-1404.
ZHOU L, FAN X M, XU Q, et al. Numerical simulation and hazard prediction on movement process characteristics of baige landslide in Jinsha river [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(6): 1395-1404.
- [16] HUANG H B, JU S J, DUAN W, et al. Landslide monitoring along the Dadu River in Sichuan based on sentinel-1 multi-temporal InSAR [J]. *Sensors*, 2023, 23(7): 3383.
- [17] DENG Z C, WANG Y K. Application of key technologies in detailed geological hazard risk investigation and analysis of hazard development mechanisms in western Sichuan Region: A case study of Heishui County [J]. *Journal of Research in Science and Engineering*, 2025, 7(7): 8-11.
- [18] CHENG D Q, IQBAL J, GAO C L. Spatiotemporal activity characteristic analysis and hazard assessment of rainfall-induced landslide for the Eurasian continent by considering mountain-hazards developing environment differences [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2025, 84(5): 237.
- [19] 陈靖, 文广超, 谢洪波, 等. 白格滑坡区遥感光谱时空特征对滑坡发育的指示作用 [J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(6): 239-247.
CHEN J, WEN G C, XIE H B, et al. Spatial and temporal characteristics of remote sensing spectrum for indicating landslide development in Baige landslide area [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(6): 239-247.
- [20] WU L Z, DENG H, HUANG R Q, et al. Evolution of lakes created by landslide dams and the role of dam erosion: A case study of the Jiajun landslide on the Dadu River, China [J]. *Quaternary International*, 2019, 503: 41-50.
- [21] 何佳阳. 多源数据融合的金阳县城区滑坡群风险分析 [D]. 成都: 成都理工大学, 2023.
HE J Y. Multi-Source Data Fusion for Risk Analysis of Landslide Clusters in the Urban Area of Jinyang County [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2023.
- [22] 何鑫, 罗贺文, 孟照蔚, 等. 金沙江下游滑坡分布特征及控制因素研究 [J]. *人民长江*, 2025, 56(08): 139-146.
HE X, LUO H W, MENG Z W, et al. Study on distribution characteristics and controlling factors of landslides in lower Jinsha River area [J]. *Yangtze River*, 2025, 56(08): 139-146.
- [23] 李佳春. 震后滑坡时空分布特征与易发评价时效性研究: 以银厂沟为例 [D]. 成都: 四川大学, 2022.

- LI J C. Spatial-Temporal Distribution Characteristics of Post-Earth Quake Landslide and Susceptibility Timeliness Research [D]. Chengdu: Sichuan University, 2022.
- [24] 刘永, 赵海松, 邵江, 等. 库区强发育特大型滑坡特征及公路防治对策[J/OL]. 地质灾害与环境保护, 2025: 1-8.
LIU Y, ZHAO H S, SHAO J, et al. Characteristics of strongly developed super-large landslides in reservoir areas and highway prevention countermeasures [J/OL]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2025: 1-8.
- [25] 李朝辉, 张柯宏. 藏东南某滑坡成因分析及稳定性评价[J]. 铁道勘察, 2025, 51(1): 13-19.
LI C H, ZHANG K H. Cause analysis and stability evaluation of a landslide in southeastern Tibet [J]. Railway Investigation and Surveying, 2025, 51(1): 13-19.
- [26] 王高峰, 毕远宏, 李浩, 等. 白龙江流域特大滑坡灾害链发育分布特征及形成机制[J]. 地球科学, 2025, 50(10): 3885-3904.
WANG G F, BI Y H, LI H, et al. Developmental and Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Large-Scale Landslide Disaster Chains in Bailong River Basin [J]. Earth Science, 2025, 50(10): 3885-3904.
- [27] 王思敬, 陈卫昌, 傅焕然. 固体材料应力-应变曲线趋势规律的普适性[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 577-581.
WANG S J, CHEN W C, FU H R. Universal regularity of stress-strain curves on solid materials [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 577-581.
- [28] 魏正发, 曹小岩, 张俊才, 等. 青海省滑坡崩塌泥石流灾害时空分布特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(6): 134-142.
WEI Z F, CAO X Y, ZHANG J C, et al. Temporal and spatial characteristics of landslide, rockfall and debris flow disasters in Qinghai Province during the period [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 134-142.
- [29] 吴碧娟, 卜鹏, 何旭, 等. 祁东县滑坡地质灾害发育特征与孕灾因子分析[J]. 矿产勘查, 2025, 16(5): 1162-1169.
WU B J, BU P, HE X, et al. Development characteristics and disaster-pregnant factors analysis of landslide geological hazards in Qidong County [J]. Mineral Exploration, 2025, 16(5): 1162-1169.
- [30] 薛雷. 2016. 岩石单轴压缩破裂过程应力和应变阈值研究及其启示意义 [R]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所.
XUE L. 2016. A study on the stress and strain thresholds of rock samples based on uniaxial compression tests and its implications [R]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences.
- [31] LIU Y C, MENG Y C, LIU G D, et al. Effects of high dams and large reservoirs with cascade development on stable water isotopes [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2025, 137: 103807.
- [32] BAI Y J, TIE Y B, WANG J Z, et al. Formation mechanism and evolution of the Jiayu landslide in the Dadu River, China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(4): 151.

(责任编辑 王海锋)