

川西南喜德县地质灾害发育特征及其沉积-构造孕灾规律研究

熊小辉, 白永健, 铁永波, 高延超, 葛 华, 徐 伟, 龚凌枫, 王家柱, 田 凯, 何孟龙, 朱志华

Development and distribution characteristics of geohazards based on sedimentary-structural evolution in Xide County, southwest Sichuan

XIONG Xiaohui, BAI Yongjian, TIE Yongbo, GAO Yanchao, GE Hua, XU Wei, GONG Lingfeng, WANG Jiazhu, TIAN Kai, HE Menglong, and ZHU Zhihua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309050>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四川省泸定县Ms6.8级地震地质灾害发育规律与减灾对策

Characteristics of geological hazards and it's mitigations of the Ms6.8 earthquake in Luding County, Sichuan Province

铁永波, 张宪政, 卢佳燕, 梁京涛, 王东辉, 马志刚, 李宗亮, 鲁拓, 石胜伟, 刘民生, 巴仁基, 何龙江, 张新克, 甘伟, 陈凯, 高延超, 白永健, 龚凌枫, 曾孝文, 徐伟 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 1-12

基于时空维度耦合的地质灾害发育程度评价研究

A study of the evaluation of geo-hazards development degree based on time-space coupling

曲雪妍, 李媛, 房浩, 杨旭东, 谢振桦, 尹春荣, 张艳玲, 佟彬 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 137-145

川藏铁路廊道关键水工环地质问题: 现状与发展方向

Key problems on hydro-engineering-environmental geology along the Sichuan-Tibet Railway corridor: Current status and development direction

张永双, 郭长宝, 李向全, 毕俊攀, 马剑飞, 刘峰 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 1-12

白龙江流域中上游第四纪沉积物的发育特征及其灾害效应

Development characteristics and disaster effect of the Quaternary sediments in the middle and upper reaches of the Bailongjiang River Basin

陈宗良, 叶振南, 王志宏, 王高峰, 高幼龙, 田运涛 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 29-29

川藏铁路卡子拉山滑坡发育特征与防灾减灾对策

Characteristics of Kazila mountain landslide and its mitigation measures on the Sichuan-Tibet Railway

铁永波, 徐伟, 梁京涛, 蒙明辉, 李富, 赵聪 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 129-136

薄层灰岩浅部岩溶发育特征及分布模型

Development characteristics and distribution model of shallow karst in thin-bed limestones

张宽, 唐朝晖, 柴波, 孙巧, 张洁飞 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 167-174



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309050

熊小辉, 白永健, 铁永波, 等. 川西南喜德县地质灾害发育特征及其沉积-构造孕灾规律研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 197-210.

XIONG Xiaohui, BAI Yongjian, TIE Yongbo, et al. Development and distribution characteristics of geohazards based on sedimentary-structural evolution in Xide County, southwest Sichuan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 197-210.

川西南喜德县地质灾害发育特征及其沉积-构造孕灾规律研究

熊小辉^{1,2,3,4}, 白永健^{1,2,3}, 铁永波^{1,2,3}, 高延超^{1,2,3}, 葛 华^{1,2,3}, 徐 伟^{1,2,3}, 龚凌枫^{1,2,3}, 王家柱^{1,2,3},
田 凯^{1,2,3}, 何孟龙⁵, 朱志华⁵

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610081; 2. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心, 四川 成都 611734; 3. 自然资源部成都地质灾害野外科学观测研究站, 四川 成都 610000; 4. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610081; 5. 中国冶金地质总局浙江地质勘查院, 浙江 衢州 324000)

摘要: 四川省喜德县地处扬子陆块西缘与青藏高原东缘造山带过渡区, 区内地质演化复杂、差异显著, 地质灾害分布广泛、类型多样。前人对内动力致灾机理已开展大量研究, 然而县域尺度下关键基础地质孕灾因子差异演化与地质灾害孕育的耦合关系仍需进一步研究。基于现场调查、基础地质资料与历史地质灾害数据, 从区域地质历史演化角度, 通过不同分区的基础地质孕灾条件与不同类型地质灾害发育趋势的对比分析, 深刻剖析孕灾地质条件与灾害发育趋势的深层次耦合关系。结果表明: 区域地层、构造改造以及地质演化是制约研究区不同类型地质灾害发育的主控因子, 区内地质灾害类型以滑坡(240处)、泥石流(81处)为主, 崩塌(7处)发育较少, 全县可划分为变质基底区、被动陆缘沉积区、前陆盆地沉积区、陆内凹陷盆地等4个孕灾模式区; 软弱红层主控下宽缓褶皱构造是滑坡地质灾害的主要孕灾环境, 断裂褶皱等强烈构造改造是泥石流发育的关键, 坚硬碳酸盐岩、岩浆岩等地层叠加漫长的构造演化是崩塌发育的重要条件; 松软的白果湾组炭质泥页岩分布与强烈断裂改造叠加是制约红莫镇一带滑坡-泥石流链式灾害的关键基础地质条件。该研究将进一步指导区域地质灾害早期识别, 为防灾减灾提供重要参考。

关键词: 地质灾害; 地质演化; 发育特征; 孕灾规律; 喜德县

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)03-0197-14

Development and distribution characteristics of geohazards based on sedimentary-structural evolution in Xide County, southwest Sichuan

XIONG Xiaohui^{1,2,3,4}, BAI Yongjian^{1,2,3}, TIE Yongbo^{1,2,3}, GAO Yanchao^{1,2,3}, GE Hua^{1,2,3}, XU Wei^{1,2,3},
GONG Lingfeng^{1,2,3}, WANG Jiazhu^{1,2,3}, TIAN Kai^{1,2,3}, HE Menglong⁵, ZHU Zhihua⁵

(1. Chengdu Center of China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 611734, China; 3. Observation and Research Station of

收稿日期: 2023-09-22; 修订日期: 2024-02-07

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 云南省重点研发计划项目(202403AA080001); 中国地质调查局地质调查项目(DD20230435)

第一作者: 熊小辉(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事基础地质与地质灾害调查研究工作。E-mail: xiongxiaohui1987@163.com

Chengdu Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 610000, China;
4. *Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources,*
Chengdu, Sichuan 610081, China; 5. *Zhejiang Geological Exploration Institute of China*
Metallurgical Geology Administration, Quzhou, Zhejiang 324000, China)

Abstract: Xide County, located in Sichuan Province, lies at transitional zone between the western margin of the Yangtze Block and the eastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau. The geological evolution in the area is complex and diverse, with a wide distribution and various types of geohazards. While previous research has extensively studied the mechanisms of endogenic disaster causation by predecessors, further investigation is needed into how key foundational geological factors contribute to disaster formation and their interrelationship at the county level. Based on field investigations, foundational geological data, and historical records of geohazards, this study conducted a comparative analysis of the geological conditions for disaster formation in different zones and the developmental trends of various types of geohazards, from the perspective of regional geological evolution. The deep coupling relationship between the two is deeply analyzed. The results show that distribution of regional stratigraphy, differences in structural transformation, and geological evolution history are key factors controlling the development of different types of geohazards in the study area. The main types of geohazards in the area are landslides (240 occurrences) and debris flows (81 occurrences), with less development of collapses (7 occurrences). The county can be divided into four disaster gestation model zones: the metamorphic basement area, the passive continental margin sedimentary area, the foreland basin sedimentary area, and the intracontinental depression basin area. The wide and gentle fold structures in red beds are the disaster-prone environment for landslide. Strong structural transformations are the primary factor driving the development of debris flows. Collapses occur primarily in areas where hard carbonate rocks and magmatic rocks overlay, combined with a long history of structural evolution. The distribution of the Baiguowan Formation carbonaceous mudstone and intense fault transformations are the key geological conditions that constrain the chain disasters of landslides and debris flows around Hongmo Town. This study provides further insight into the early identification of regional geohazards and offers important guidance for disaster prevention and reduction.

Keywords: geohazards; geological evolution; development characteristics; geohazards gestation characteristics; Xide County

四川西南地区地处青藏高原东缘造山带与扬子稳定陆块过渡区,强烈的内外动力地质作用塑造了独特的区域地质灾害发育分布特征,尤其是内动力地质作用,控制着地质灾害孕育的物质基础,同时也深刻地决定着其灾变趋势^[1-3]。开展内动力主要致灾因子分析及区域基础地质孕灾规律研究,对地质灾害早期识别和防灾减灾具有重要意义。

前人针对内动力致灾机理已开展大量研究^[4-6]。构造控灾效应方面,孙东等^[7]认为不同地质构造类型对大型滑坡的孕育有明显的控制作用;李洪梁等^[8]系统分析了构造结构面对藏东昌都地区石灰石矿山采场崩塌的控制机理,区域活动断裂对地形地貌演化及地质灾害发育分布影响显著^[9-10]。受区域地层与岩石组合控制,工程地质岩组制约着地质灾害的敏感性^[11-15],

如典型中生代陆相湖盆炎热干旱气候下的红层碎屑地层多发育缓倾顺层滑坡^[16-17],西南地区碳酸盐岩分布区广泛发育岩溶塌陷^[18]。然而在县域、中比例尺下,各主要基础地质孕灾因子相互作用与演化叠加过程复杂,差异演化的基础地质孕灾条件对区域地质灾害发育分布规律制约方面有待深入研究^[19-20]。

基于区域地质演化,从动态角度对喜德县岩石地层、地质构造等主要基础地质孕灾因子开展深入分析,系统收集调查区不同比例尺区域地质调查成果、2023年地质灾害风险调查数据及历史地质灾害统计数据,通过现场调查、横向分区差异与纵向海陆变迁的对比研究,深入探讨喜德县区域地质演化与地质灾害发育之间的耦合关系,以期针对性地开展地质灾害早期识别,为区域防灾减灾提供参考。

1 研究区概况

1.1 区域地质环境条件

喜德县位于扬子陆块西南缘、川西南上升山地区, 紧邻青藏高原东缘羌塘—三江造山系之松潘甘孜造山带, 西侧以安宁河断裂为界与康滇古陆区相邻^[21-23], 处于川滇南北向构造带北段, 受安宁河断裂带及东部县域外普雄河断裂带的影响, 地质历史上长期以东西

向挤压为主^[18]。喜德县城以西地区南北向断裂与褶皱发育, 构造形迹表现为紧密的背斜、向斜及断裂形态, 县城以东地区断裂稀少, 褶皱平缓, 主要发育宽缓开阔的米市向斜、且拖背斜、罗木大山背斜等, 属构造活动相对稳定区域。新生代以来主应力近东西向, 境内主要地质构造线方向近南北向, 自西向东, 构造变形减弱趋势显著(图 1、图 2)。

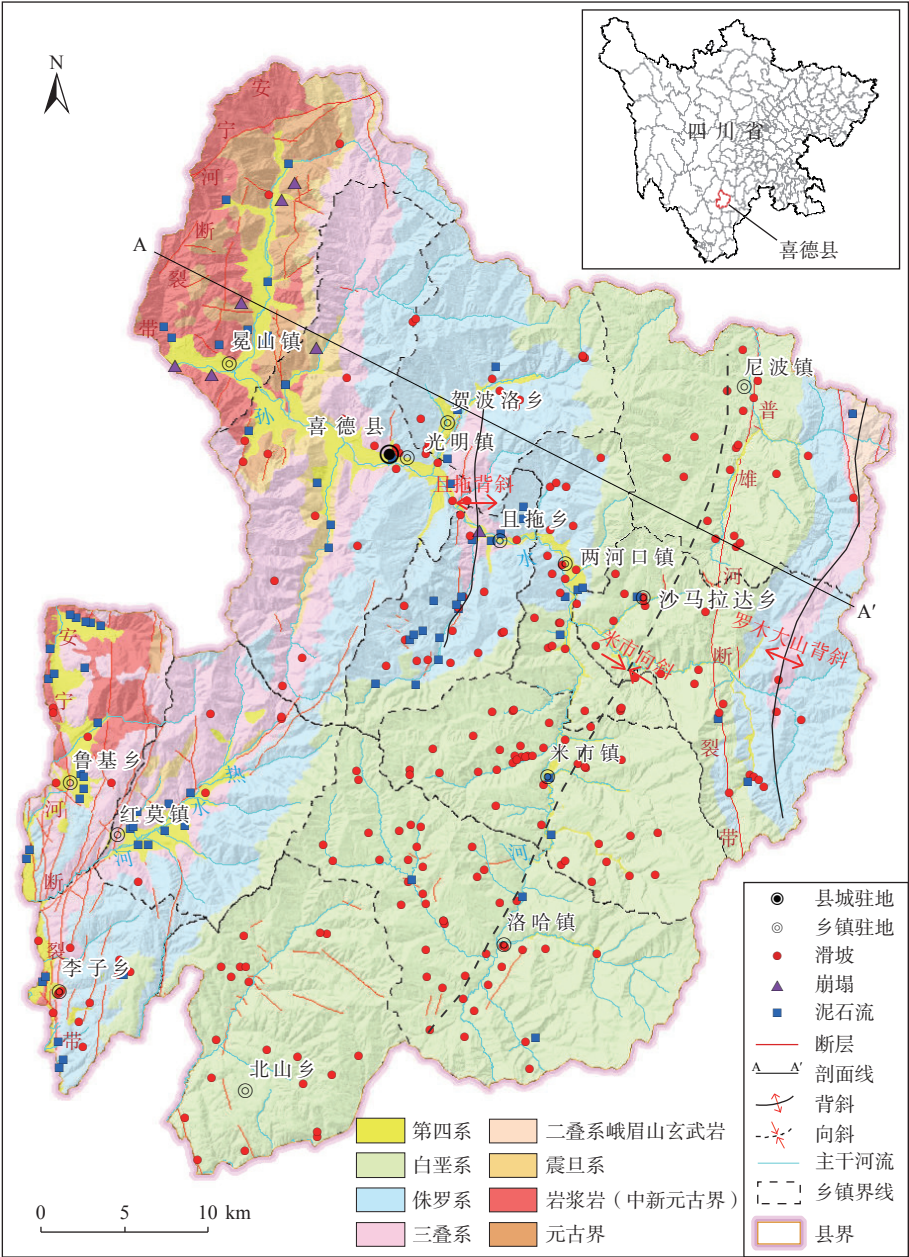


图 1 喜德县区域地质及地质灾害分布图

Fig. 1 Distribution of geohazards and regional geology in Xide County

注: 区域地质资料源自 1:5 万区调报告成果; 地质灾害数据源收集自喜德县自然资源局及现场调查。

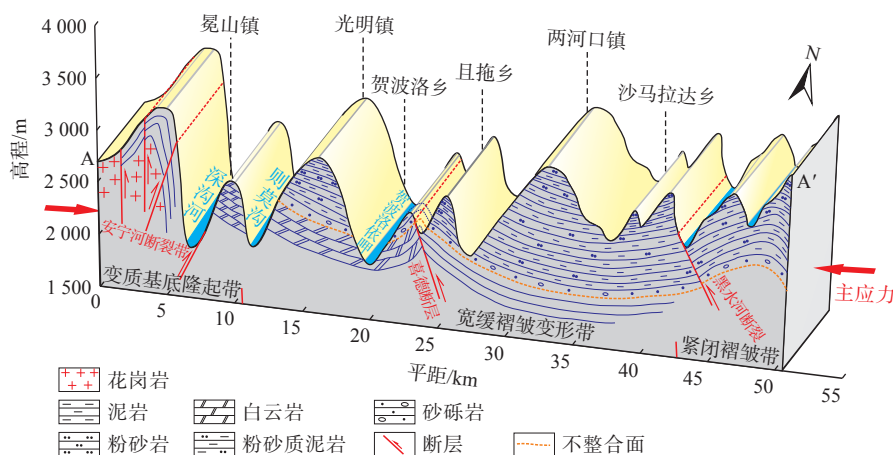


图2 喜德县近东西向主剖面岩性-构造变形特征

Fig. 2 Characteristics of east-west lithology and structural deformation in Xide County

喜德县境内出露地层以元古界和中新生界为主(图1)^[23],区内最老地层分布于县域西北部冕山镇一带,主要为中新元古界变质岩及岩浆岩,变质变形均较强烈。晚三叠世是区内重要的海陆转换过渡期,沉积了一套深灰色炭质泥页岩,与下覆震旦系灯影组至二叠系峨眉山玄武岩等不同时代地层呈角度不整合接触,是区内重要的易滑孕灾地层。中生代陆相红色碎屑沉积分布于米市镇—洛哈镇一带的米市向斜内,弱固结、产状平缓。境内孙水河、热水河流域河谷地带多发育第四系冲洪积地层。

1.2 地质灾害分布

喜德县历史共发育地质灾害328处,其中滑坡240处、泥石流81处、崩塌7处,以中小型为主,地质灾害类型呈现出明显的区域分布差异(图1)。滑坡是喜德县最主要的地质灾害,占比高达73.2%,各乡镇均有分布,洛哈镇—米市镇—尼波镇一带分布较为集中,尤其是米市向斜两翼的侏罗系、白垩系红层区。泥石流地质灾害主要分布于县域西部冕山镇、鲁基乡、红莫镇、李子乡和且拖乡,红莫镇热水河流域和冕山镇强变质变形岩体分布区较集中,其余乡镇零星分布,与县域内断裂构造、岩体破碎分布区较一致。崩塌灾害较少,主要分布于冕山镇和光明镇西部,多发育于中新元古代岩浆岩及碳酸盐岩地层。

2 地质演化与地质灾害发育特征

喜德县古地理位置位于西昌盆地西部,根据区域构造变形特征,盆地自西向东主要分为:西缘变质基底隆起带、宽缓褶皱变形带、冲断紧闭褶皱带、东缘冲断构造带^[23],盆缘构造变形明显较盆地内部强烈

(图2)。自中、新元古代至新生代以来,喜德县所处的西昌盆地经历了复杂的沉积构造演化^[24-26],孕育了多套具有区域特色的易崩易滑岩石组合(表1),形成区域独特的地质灾害发育特征。

2.1 区域地质演化

西昌盆地喜德地区大体经历了3大地质演化阶段:褶皱基底形成阶段、被动边缘海盆发展阶段、陆内盆地演化阶段^[25,27],可细分为6个小阶段(表1)。

(1)前震旦纪变质基底形成阶段(AnZ):形成于晋宁运动(850 Ma)之后,发育系列强变质变形岩体、中酸性侵入体等,岩体由于变质程度高,且受到安宁河断裂带切割,呈断块状产出,岩石结构破碎,局部发育崩塌危岩体,强风化及构造破碎岩体为区域泥石流提供了重要物源。

(2)被动大陆边缘稳定克拉通发展阶段(Z-S):下部以观音崖组底部角度不整合界面为标志,上部以二叠系底部不整合界面为标志,区内主要为陆缘滨海-浅海相碳酸盐岩建造和陆源碎屑建造^[28],其中灯影组白云岩节理裂隙极为发育,由于强烈风化改造下不同类型结构面切割作用,成为重要的易崩地层,河谷两岸高陡斜坡是重要的崩塌发育区。

(3)隆升剥蚀阶段(D-T₂):区域总体抬升剥蚀,缺少沉积记录,仅在中晚二叠纪局部发育短期海侵及峨眉山玄武岩,构造上表现为西高东低。

(4)前陆盆地发展阶段(T₃-J₁):受塔里木板块和华北板块聚合、西南金沙江小洋盆消亡以及古西太平洋向东俯冲影响^[29],晚三叠世晚期,西昌盆地的应力背景由拉张为主转入以挤压为主,区内强烈下陷进入前陆盆地演化阶段,沉积了一套河湖-沼泽相含煤陆相碎

表 1 喜德县沉积构造演化与地质灾害发育特征

Table 1 Sedimentary-structural evolution and geohazards development of Xide County

界	系	统	组	柱状图	岩石组合	沉积构造演化	地质灾害发育特征
新生界	第四系				冲洪积砂砾石、碎块石、亚黏土等	盆地萎缩改造阶段 (E-Q)	分布于孙水河及热水河河谷区, 砂砾石胶结较弱, 易发育河岸崩塌
中生界	白垩系	上统	雷打树组		紫红色泥岩夹紫色粉砂岩	陆内凹陷盆地发展阶段 (J ₂ -K ₂)	主要分布于米市向斜两翼, 岩体结构松软, 平缓褶皱改造下易发育顺层岩质滑坡及大量浅层土质滑坡, 如洛哈镇采疏组堵江滑坡、金尔果特大型滑坡及阿坡洛滑坡等
		下统	小坝组		下段砖红色块状中-细粒长石石英砂岩、泥岩、粉砂岩, 中段紫红色、红色钙质泥岩、粉砂岩夹泥灰岩, 上段砖红色, 紫红色钙质泥岩, 粉砂岩夹细粒长石石英砂岩		
			飞天山组		灰紫色块状中细粒的钙质砂岩为主, 夹粉砂岩、泥岩, 底部为砾岩		
	侏罗系	上统	官沟组		暗紫红色的钙质泥岩、粉砂岩、泥灰岩互层夹页岩, 细砂岩夹多层泥灰岩		主要分布于且拖背斜、罗木大山背斜两翼, 岩体结构松软, 褶皱改造, 发育泥石流及浅层滑坡, 如且拖乡则巴村2组则巴古泥石流
			牛滚凼组		以鲜红色泥岩、粉砂岩为主, 夹中厚层的砂岩, 顶部夹泥灰岩		
		中统	新村组		紫红色钙质泥岩, 粉砂岩夹杂砂岩	前陆盆地发展阶段 (T ₃ -J ₁)	主要分布于红莫镇、鲁基乡至光明镇西, 呈南北带状, 炭质泥岩岩体松软, 多发育浅层滑坡及滑坡-泥石流链式灾害, 如红莫镇老洼沟泥石流
		下统	益门组		紫红色的泥岩、粉砂岩, 砂质页岩夹砂岩		
	三叠系	上统	白果湾组		底部为灰色块状砾岩、中粒砂岩; 下部为炭质页岩, 粉砂岩夹煤层, 中上部为中厚层的砂岩和粉砂岩、泥、页岩互层状		
							
古生界	二叠系	上统	峨眉山玄武岩		斑状玄武岩, 夹深灰色、灰绿色致密块状玄武岩、杏仁状玄武岩、斑状杏仁状玄武岩等	隆升剥蚀阶段 (D-T ₂)	仅出露于县城东北角, 易发育河岸崩塌
新元古界	震旦系	上统	灯影组		灰白色厚层块状灰岩、白云质灰岩, 白云岩夹燧石条带, 泥灰岩	被动大陆边缘稳定克拉通发展阶段 (Z-S)	主要分布于冕山镇及光明镇西部, 岩体节理裂隙发育, 易诱发崩塌灾害, 如光明镇干拖村2组崩塌
			观音崖组		灰白色钙质砂岩、石英砂岩、泥灰岩、紫红色钙质页岩		
	南华系	上统	列古六组		紫红色中厚层凝灰质细砂岩	变质基底形成阶段 (AnZ)	主要分布于冕山镇、鲁基乡, 岩体破碎, 多发育泥石流及崩塌危岩体, 如冕山镇新桥村三组矿山沟泥石流、冕山镇洛发村三组白岩子崩塌
		中统	开建桥组		紫红色凝灰质粗砂岩、砂砾岩以及凝灰质页岩		
	青白口系		苏雄组		绿灰色、肉红色变质流纹质熔结含角砾凝灰岩夹少量流纹质晶屑凝灰岩、流纹岩、英安岩		
中元古界	蓟县系、长城系				中深变质岩, 如千枚岩、石英岩、石英片岩、变质砂岩、大理岩等		

屑岩系(白果湾组), 广泛出露于喜德县西南部红莫镇一带, 呈南北向展布, 是区内重要的易滑孕灾地层, 受沉积相展布控制^[30], 在红莫镇周缘炭质泥页岩厚度大, 广泛发育沟岸垮塌及滑坡-泥石流链式灾害。

(5)陆内凹陷盆地发展阶段(J₂-K₂): 经历了早侏罗世末抬升后, 喜德地区在中侏罗世继续沉降并开启了陆内盆地发展阶段, 以米市凹陷为沉积中心发育一套松软的湖相红色碎屑岩系, 岩性以紫红色砂岩、粉砂岩及泥岩为主, 地层缓倾, 发育大量浅层滑坡及中大

型缓倾岩质滑坡。

(6)盆地萎缩改造阶段(E-Q): 新生代以来, 受燕山运动、喜山运动等多期构造运动影响, 盆地逐渐抬升剥蚀, 受到一定的改造并最终形成现今沉积构造格局。

2.2 地质灾害发育特征

区域地质演化对地质灾害的孕育起着至关重要的作用, 不同演化阶段孕育了不同的岩石组合, 构造改造方式及强度的差异叠加, 塑造出喜德县独特的基础孕灾地质条件与地质灾害发育特征。

一方面,不同期次沉积-构造演化过程中,影响地质灾害发育的关键地质因素各异。尤其是新构造活动对前期形成的地层不同程度的改造,如变质基底和被动大陆边缘稳定克拉通岩石分布区的地形地貌和岩体结构,地形高差大,最高海拔大于4 500 m,最低海拔小于1 500 m,岭谷高差多在2 000 m以上,坡度主要介于 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$,部分坡度大于 70° ,广泛发育花岗岩型块状结构斜坡及碳酸盐岩顺向坡,岩体节理裂隙发育;前陆盆地沉积区松软的含煤碎屑岩系及其沉积相展布是关键,红莫镇一带白果湾组炭质泥页岩厚度最大,其分布与地质灾害高度契合;陆内凹陷盆地沉积区弱固结红层及顺向型斜坡结构是关键,软硬相间的岩性组合中滑坡最为发育,坡度多介于 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$,岸坡风化层厚度大,易诱发沿基覆界面滑动的小型浅层滑坡。

另一方面,各异的控灾关键地质因素形成了不同的地质灾害类型及其分布。滑坡多孕育在前陆盆地、陆内凹陷盆地发展阶段的松软地层岩组(表1),尤其是米市陆内凹陷红层分布区,绝大部分为小型浅层土质滑坡,滑面多为基覆界面,少数为顺层缓倾岩质滑坡,滑带主要为泥质软弱夹层,包括小型滑坡203处、中型滑坡34处、大型滑坡2处、特大型滑坡1处。泥石流主要发育于变质基底和前陆盆地区的软弱地层或构造改造下岩体结构破碎区,如白果湾组炭质泥页岩分布区、中新元古代地层区及背斜核部构造破碎带等,丰富的松散物源储备是泥石流发育的必需条件,包括小型泥石流68处,中型泥石流12处,大型泥石流1处。崩塌多发育于变质基底及被动大陆边缘稳定克拉通分布的易崩地层区,崩塌危岩体岩性主要包括节理裂隙较发育的岩浆岩及碳酸盐岩,第四系松散砂砾石型河岸崩塌有少量发育,受高陡地形条件制约明显,包括小型崩塌4处、中型崩塌3处。

综上,变质基底形成阶段、被动大陆边缘稳定克拉通发展阶段、前陆盆地发展阶段以及陆内凹陷盆地发展阶段等4个阶段是喜德县最重要的孕灾地质环境条件形成阶段,根本上决定了区域地质灾害发育和分布特征。

3 地质灾害发育的沉积构造制约

根据区域地质演化及地质灾害发育分布特征,喜德县主要划分为4个孕灾模式分区(图3):变质基底区、被动陆缘沉积区、前陆盆地沉积区、陆内凹陷盆地。陆内凹陷盆地又分为宽缓向斜亚区和背斜

核部亚区。

各个分区由于区域地层、构造改造以及演化历史等关键地质要素差异,孕育出了不同的地质灾害优势灾种(表2)。变质基底区分布着全县71.43%的崩塌和27.16%的泥石流;被动陆缘沉积区地质灾害总体分布较平均,崩塌占全县14.29%;前陆盆地沉积区泥石流占比最高,达28.40%,其次为滑坡,占全县10.83%;陆内凹陷盆地区的向斜亚区滑坡最发育,占全县比例达61.25%;背斜亚区泥石流占比高达28.40%,其次为滑坡,占比24.17%。

3.1 变质基底区地质灾害发育特征

变质基底区主要分布于喜德县西部冕山镇、鲁基乡北部,区内山高谷深,地形切割强烈,地势起伏度大,地质灾害类型主要为泥石流和崩塌。发育前震旦系中深变质岩及元古代花岗岩,岩体坚硬,结构大多呈层状-碎裂结构。构造上主体位于小相岭背斜核部,背斜轴向近南北,核部地层陡立,受近E-W向主应力作用及安宁河断裂带影响,核部主体发育N-S走向高角度冲断层,断面一般倾向东,倾角 $65^{\circ} \sim 80^{\circ}$,后期受NE-SW、NW-SE向主应力改造,形成NW、NE向斜切断层(如甘沟断层),主要断裂为岩浆活动提供了重要通道,在区内形成了多期岩浆岩侵入。

复杂多样的岩石组合、强烈的褶皱变形、多期次的断裂切割、大量的岩浆岩侵入以及长期的风化改造,造就了喜德县变质基底区岩体的异常破碎。统计表明,变质基底区发育5处崩塌,其中3处基岩岩性为岩浆岩,如流纹岩或花岗岩,具碎裂结构;另外2处分别为大理岩及河岸冲洪积砂卵砾石。构造改造下岩体结构的弱化为冕山镇一带高陡地形起伏带崩塌灾害的发育提供了重要条件,如白岩子花岗岩型崩塌(图3b、图4a)以及曹王坪碳酸盐型崩塌。丰富的松散碎屑物源与构造侵蚀中高山地貌进一步促进了区内泥石流的发生,如冕山镇矿山沟泥石流(图3a、图4b)。

3.2 被动大陆边缘稳定克拉通沉积区地质灾害发育特征

被动大陆边缘稳定克拉通沉积区主要出露于冕山镇东部、光明镇西部,呈南北向条带状产出,沿线地形高陡,垂直落差大,主要发育崩塌。区内地层岩性较简单,包括下部观音崖组滨海相碎屑岩-碳酸盐岩及上部灯影组浅海相碳酸盐岩,主要岩性为灰白色厚层白云岩、灰岩,岩石致密坚硬。构造上总体位于小相岭背斜东翼,岩层倾角较缓(多介于 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$),局部受北东向、北西向断层切割。

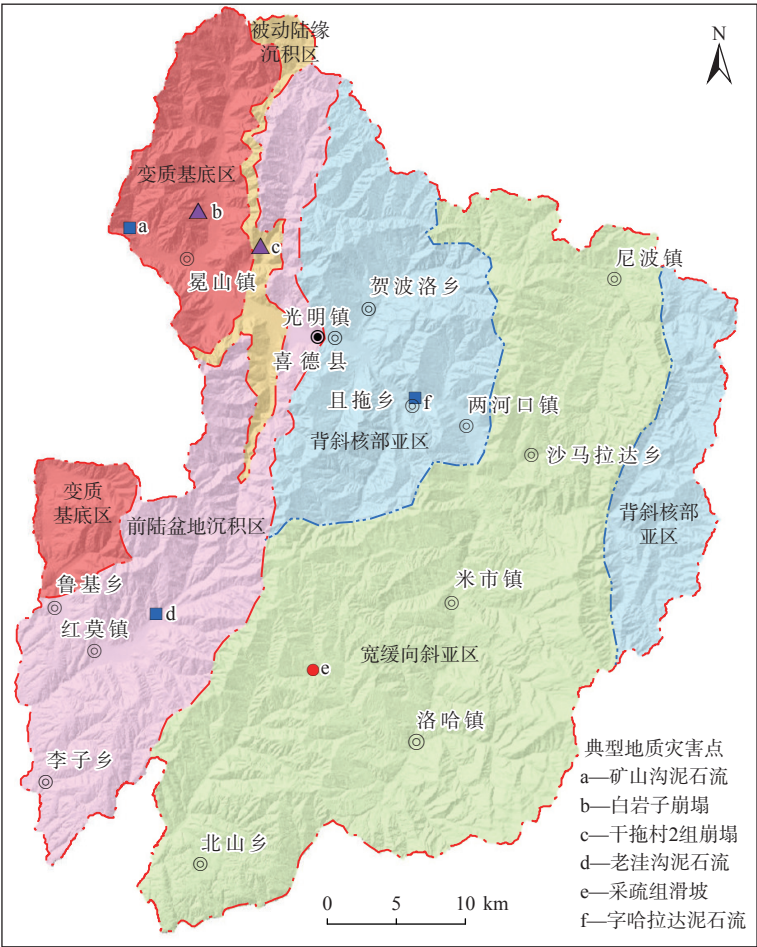


图 3 喜德县地质灾害孕灾分区图

Fig. 3 Zoning map of geohazards-pregnant mode in Xide Count

表 2 喜德县各孕灾分区地质灾害统计表

Table 2 Statistical table of geohazards in each disaster-pregnant mode area of Xide County

地质灾害类型	变质基底区		被动陆缘沉积区		前陆盆地沉积区		陆内凹陷盆地地区				数量 合计/个	占比 合计/%
							向斜区		背斜区			
	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%		
滑坡	7	2.92	2	0.83	26	10.83	147	61.25	58	24.17	240	100
崩塌	5	71.43	1	14.29	0	0.00	0	0.00	1	14.29	7	100
泥石流	22	27.16	3	3.70	23	28.40	10	12.35	23	28.40	81	100
合计	34		6		49		157		82		328	

该区主要孕灾地层为灯影组厚层白云岩、灰岩, 岩石节理裂隙较发育, 包括缓倾的岩层面、垂直层面的至少两组节理面以及垂直或斜交层面的不规则裂隙面, 此外, 在岩层断面多见小型断层及断层破碎带, X 型剪切错断等, 多组结构面将厚层白云岩切割成相互连接较弱的块状, 最终在斜坡凌空面一侧发生卸荷, 同时, 斜坡面强烈的风化溶蚀作用将岩块改造为浑圆状, 极易发生滚落, 威胁坡脚住户, 如干拖村 2 组崩塌(图 3c、图 5)。

3.3 前陆盆地沉积区地质灾害发育特征

前陆盆地沉积区位于红莫镇、鲁基乡至光明镇西部, 呈南北带状展布, 在且拖背斜核部、罗木大山背斜核部也有少量分布。区内广泛发育的晚三叠世白果湾组是重要的孕灾地层, 主要灾害类型为滑坡、泥石流及滑坡-泥石流链式灾害。晚三叠世印支运动导致盆地西侧松潘—甘孜地块抬升, 大地构造格局总体为西高东低, 西侧是盆地的重要物源区, 控制着西昌盆地白果湾组沉积相及其空间展布。白果湾组作为一

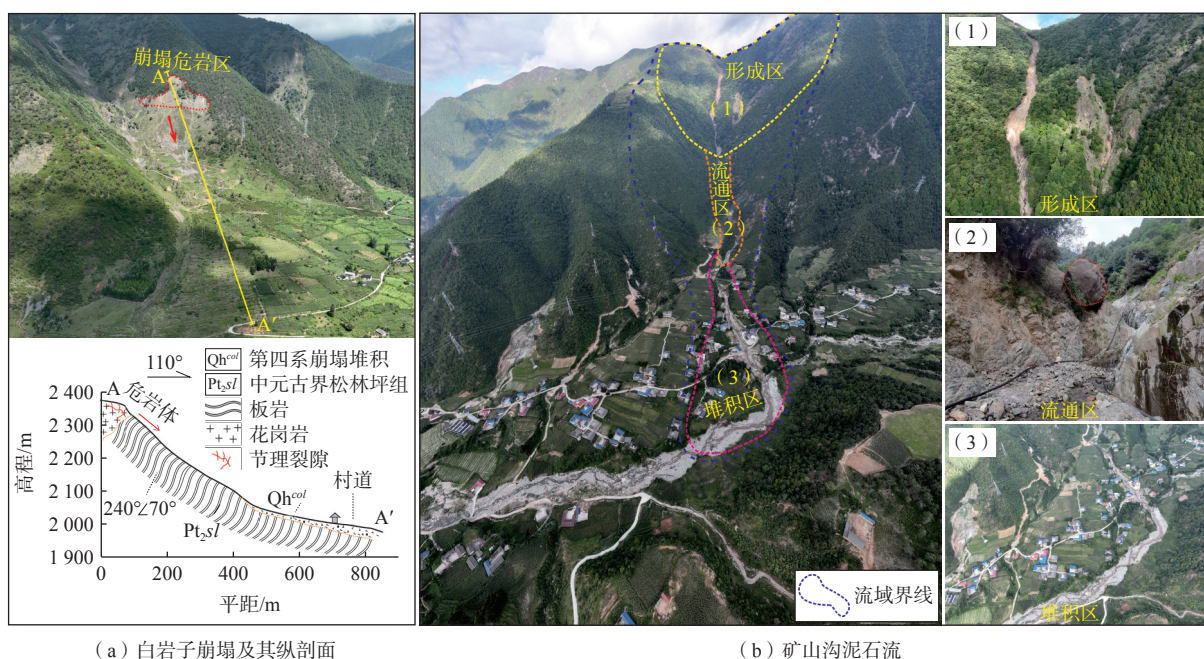


图4 变质基底区典型地质灾害发育特征

Fig. 4 Development characteristics of typical geohazards in the metamorphic basement area

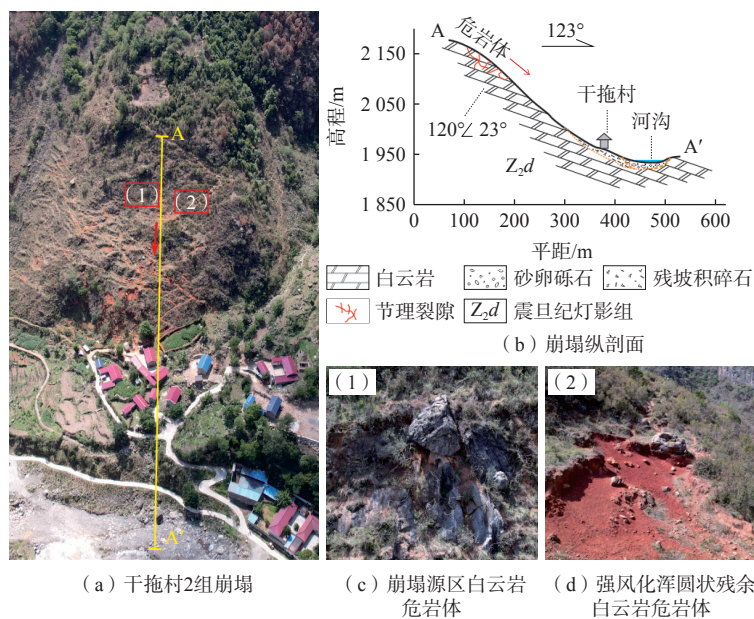


图5 被动大陆边缘稳定克拉通沉积区典型地质灾害发育特征

Fig. 5 Development characteristics of typical geohazards in the passive continental margin area

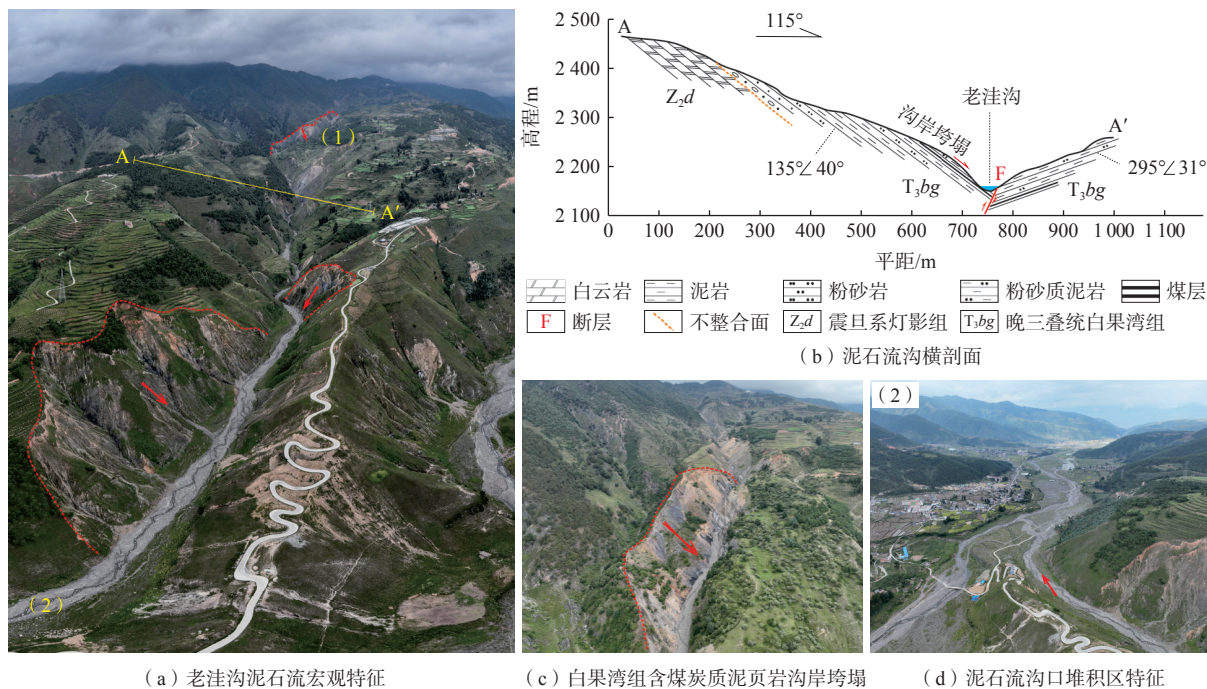
套巨厚陆相碎屑岩系,整体以湖泊、河流及河流三角洲相沉积为主,山前局部发育扇三角洲沉积,其沉积中心位于西昌市一带^[31-33]。

白果湾组以发育深灰色、灰黑色炭质页岩及局部含煤层为主要特征,结构松软,极易发生沟岸垮塌,为泥石流提供大量松散物源。深灰色炭质页岩区域上受沉积相展布控制,由盆地边缘至盆地沉积中心,总体深灰色细粒沉积逐渐增厚,炭质含量逐渐增多,如

盆地边缘的喜德县冕山镇小山村一带发育扇三角洲平原,沉积了巨厚的砂砾岩,往南靠近沉积中心,炭质页岩逐渐增厚^[24]。红莫镇一带白果湾组炭质泥页岩广布且厚度大,同时叠加发育大量N—S向、NE—SW向及NW—SE向断裂,造就了区域地质灾害及沟谷链式地质灾害集中发育区,热水河流域发育有支沟19条,支沟泥石流非常活跃,沟内崩塌、滑坡等松散物源丰富,每年均有大小不一的泥石流发生,属典型高频泥

石流沟, 如老洼沟泥石流、分叉沟泥石流等。老洼沟沿主沟道发育 Y 字形断裂(图 3d、图 6), 为对冲的逆断层, 断层高陡(倾角 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$), 沟口红莫断裂沿热水河主河道呈 NE—SW 向穿过, 沟道两侧白果湾组下部以砂砾岩为主, 中部发育大套灰黑色炭质页岩、粉砂岩、泥岩夹煤线, 上部以灰色粉砂岩、泥岩夹砂岩

为主, 炭质页岩、煤线及松软泥岩是重要的滑脱层, 构成上硬下软的不稳定岩石组合, 错综的断层系统进一步破坏了岩体的稳定性, 发育大量沟岸垮塌变形, 大量松散滑坡堆积体进一步为沟谷泥石流提供了物源, 最终发育为滑坡-泥石流链式灾害, 是前陆盆地沉积区典型地质灾害发育模式。



(a) 老洼沟泥石流宏观特征

(c) 白果湾组含煤炭质泥页岩沟岸垮塌

(d) 泥石流沟口堆积区特征

图 6 前陆盆地沉积区典型地质灾害发育特征

Fig. 6 Development characteristics of typical geohazards in the foreland basin area

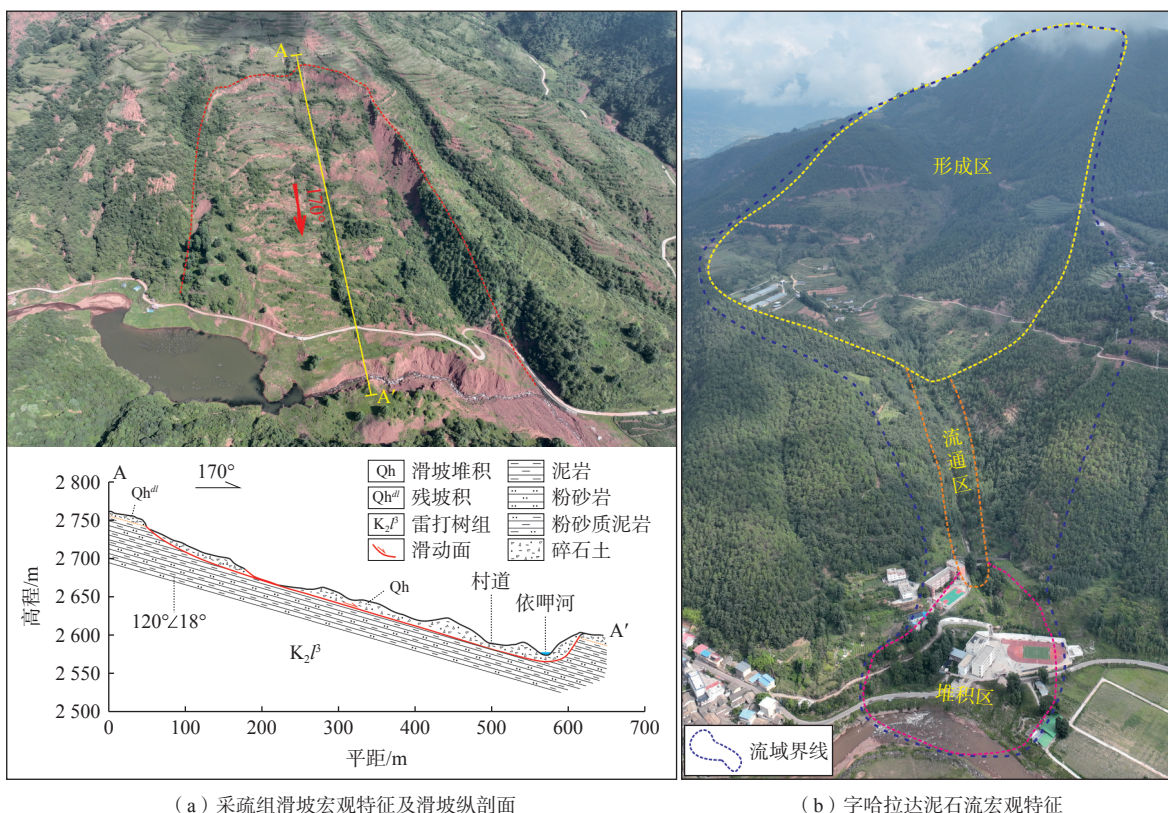
3.4 陆内凹陷盆地区地质灾害发育特征

陆内凹陷盆地区作为西昌盆地演化末期典型的内陆湖盆红层沉积, 沉积中心已由白果湾组沉积期的西昌地区转移至喜德县米市镇—洛哈镇一带, 出露范围主要包括米市向斜及两侧且拖背斜和罗木大山背斜, 呈南北向展布, 其中米市向斜亚区主要发育滑坡地质灾害, 而且拖背斜及罗木大山背斜亚区泥石流和滑坡均较发育。区内地层岩性较单一, 主要为紫红色、砖红色碎屑岩, 如泥岩、粉砂岩及砂砾岩等, 发育隔挡式褶皱, 向斜宽缓开阔, 变形较弱, 背斜具有箱状褶皱特征, 断裂构造不发育, 仅在且拖背斜和罗木大山背斜核部发育轴向断层。

作为川西南最大的红层集中片区, 区内发育典型红层缓倾滑坡, 在雨季滑坡地质灾害多发, 其中不乏大型、特大型顺层岩质滑坡, 易诱发链式地质灾害。2012 年 8 月喜德县孙水河流域普降暴雨, 诱发大量红层滑坡及次生链式灾害, 如采疏组堵江滑坡(图 3e、

图 7a)、金尔果特大型滑坡、阿坡洛滑坡等, 危害巨大^[17, 34-35]。受东西向主应力挤压, 米市向斜轴向近南北向, 中部沿向斜轴部发育孙水河、尼波河。受河流侵蚀, 向斜东西两翼地层倾向与坡向基本一致, 斜坡结构总体为顺向坡。在修路、建房切坡等人类工程活动影响下, 河流不断侵蚀河岸。强降雨诱发等多因素叠加作用下, 向斜两侧岩层往往沿着软弱结构面(泥质夹层、基覆界面等)向凌空面发生卸荷滑动变形, 甚至形成堵江灾害链, 如采疏组滑坡。制约米市向斜地质灾害发育的最重要基础孕灾地质条件是斜坡结构和软硬相间的岩土体组成。

随着孙水河主河道对褶皱的侵蚀改造由南北向转为东西向以及褶皱样式的改变, 地质灾害的发育类型随之调整, 在孙水河转向的两河口镇以及背斜发育的且拖乡, 斜向坡及逆向坡为沟谷型泥石流提供了更多的松散物源, 泥石流灾害呈现增多的趋势。尤其在背斜核部地区, 白果湾组软岩岩组发育, 构造应力集



(a) 采疏组滑坡宏观特征及滑坡纵剖面

(b) 字哈拉达泥石流宏观特征

图7 陆内凹陷盆地地区典型地质灾害发育特征

Fig. 7 Development characteristics of typical geohazards in the intracontinental depression basin area

中,普遍发育沿背斜轴向的断裂构造,岩石节理裂隙丰富,结构破碎,遭受强烈侵蚀,往往形成背斜谷地,为泥石流的发生创造了地形条件,如字哈拉达泥石流(图3f、图7b)。

4 讨论

作为喜德县地质灾害发育分布的关键基础地质孕灾因素,区域地层、构造改造、演化历史等方面的差异及各因子相互配置关系是塑造不同分区优势地质灾害类型差异的深层次条件。分别提取工程地质岩组、距断层距离和基岩地层时代等3个代表性基础地质孕灾因子,开展喜德县孕灾规律研究(图8),根据对比各个次级孕灾因子分区不同灾种的数量、占比及其变化趋势,分析不同因子对地质灾害发育的控制强弱。结果表明,滑坡发育更多受到软硬适中的工程地质岩组控制,如较硬-较软岩组和较软岩组。

不同时代基岩地层中滑坡的发育趋势也呈现出明显的规律,总体上中新元古代至白垩系底层,滑坡数量和占比逐渐升高,白垩系地层是滑坡孕育最多的地层。距断层越近,泥石流的发育呈现明显的数量和占比的增长趋势。崩塌的发育在坚硬岩组和较硬岩

组中有绝对优势。与滑坡相反,较古老的基岩地层中崩塌地质灾害数量和占比较高。距断层距离因子表现出对崩塌控制不明显,可能其更多受到次级构造控制,如岩体结构等。

喜德县关键孕灾地质因子差异及对地质灾害的制约作用形成了不同孕灾分区典型孕灾模式(图9)。构造改造的强弱、区域地层的坚硬程度、演化历史的长短等变量是不同分区制约地质灾害发育的关键基础地质因素。

区域地层主控、较短的演化历史、构造改造叠加是喜德县滑坡发育的主要制约因素。滑坡地质灾害分布特征显示,陆内凹陷盆地的红层、前陆盆地白果湾组是滑坡的主要赋存层位,区域地层及岩土体类型表现出明显的控制作用,尤其是在陆内凹陷盆地的侏罗~白垩系红层区,滑坡分布更为集中(占比86%),米市向斜白垩系滑坡占比甚至达到94%,较短的演化历史使区内岩土体胶结较弱,结构松散,构造改造虽然可以进一步弱化岩体结构,但不是发生滑动变形的主要控制因素。

构造改造主控、较长的演化历史、区域地层条件是喜德县泥石流发育的主要制约因素。泥石流地质

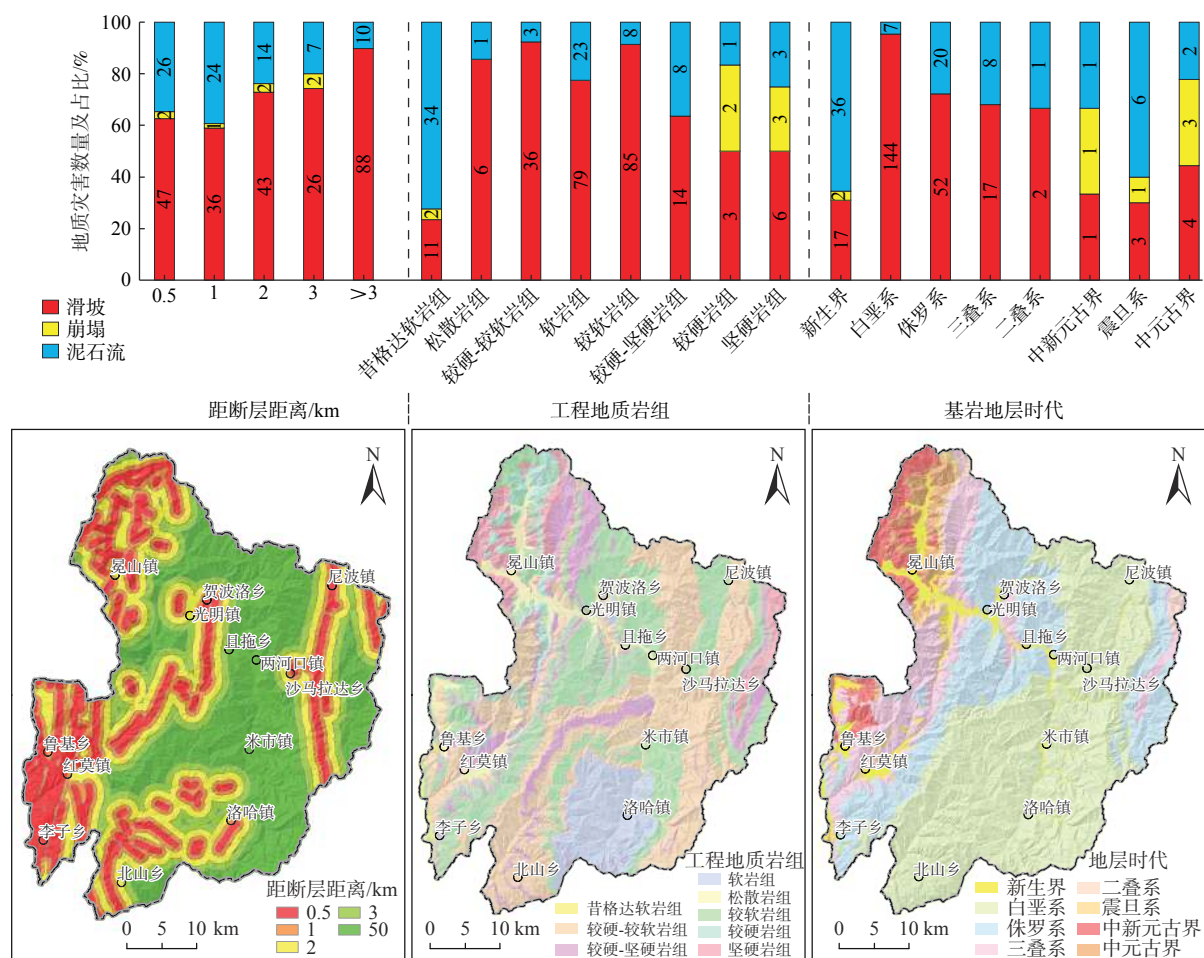


图 8 喜德县基础地质孕灾因子及地质灾害分布柱状图

Fig. 8 Basic geological factors and their distribution of geohazards in Xide County

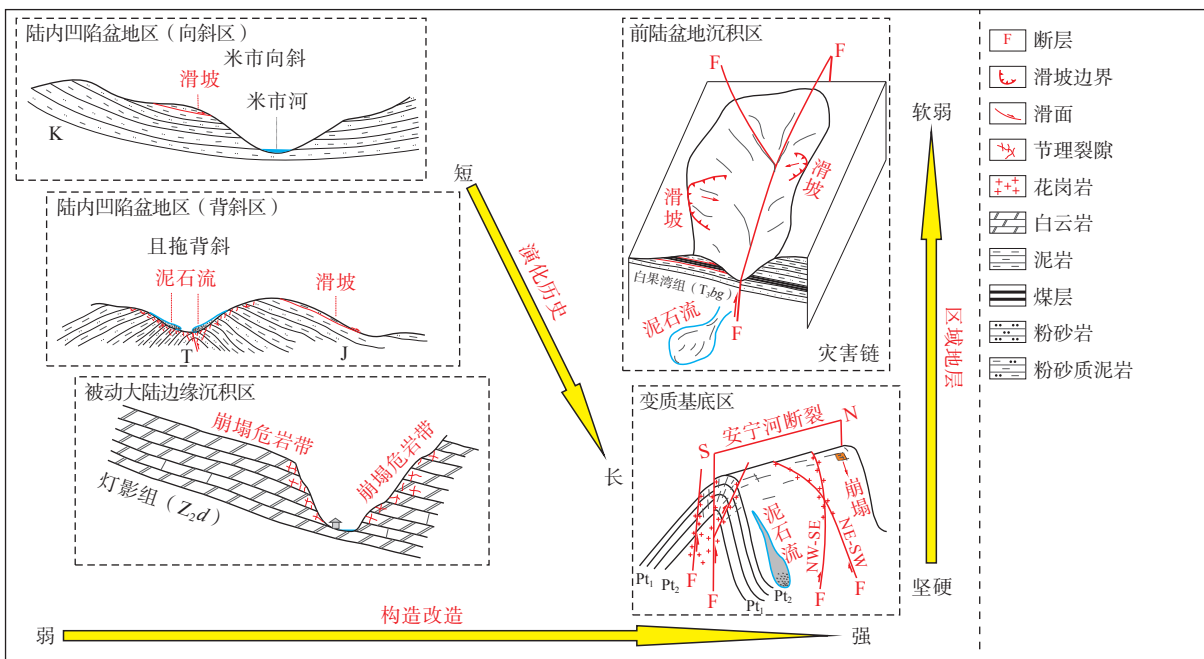


图 9 区域地层、构造改造及演化历史与地质灾害发育综合模式图

Fig. 9 Comprehensive pattern of regional stratigraphy, tectonic transformation, evolution history, and geohazards development

灾害分布特征显示,变质基底区、前陆盆地断裂改造区、陆内凹陷盆地背斜核部应力集中区等是泥石流地质灾害的优势发育区,泥石流数量占喜德县全县的 80%。松散物源储量是泥石流发生的基础条件,其中构造对岩土体的改造起着至关重要的作用,漫长的地质历史演化提供了充足的改造时间,相对前两者,区域地层条件的重要性次之。

区域地层主控、较长的演化历史、构造改造叠加是喜德县崩塌发育的主要制约因素。相对于滑坡和泥石流,喜德县崩塌地质灾害发育数量最少,但最为集中。变质基底区花岗岩体、被动大陆边缘沉积区碳酸盐岩等是崩塌发育的主要层位(占比 86%),区域地层或岩土体类型及原生结构面发育特征是制约崩塌地质灾害的最重要条件,漫长的演化历史、构造改造叠加进一步弱化了这些节理裂隙面。

软弱的区域地层条件、强烈的构造改造作用以及适中的地质演化历史等有利条件的综合叠加是喜德县滑坡-泥石流链式灾害发育的深层制约因素。前陆盆地沉积区作为滑坡、泥石流共同的主要分布区,发育滑坡-泥石流链式灾害是其典型特征,尤其是在红莫镇所属的热水河流域,含煤层及炭质泥页岩发育的白果湾组软弱岩组,紧邻安宁河断裂带,叠加了大量南北向、北东-南西向及北西-南东向断裂,以及印支-燕山-喜山期地质演化历史,共同造就了如老洼沟、分叉沟等滑坡-泥石流灾害链的发生。

5 结论

(1)喜德县基础地质孕灾主控因素包括区域地层、构造改造及地质演化,全县可划分为变质基底区、被动陆缘沉积区、前陆盆地沉积区和陆内凹陷盆地等 4 个地质灾害孕灾模式区。

(2)软弱红层主控下宽缓褶皱构造是喜德县滑坡地质灾害的主要孕育环境;断裂褶皱等强烈构造改造是区内泥石流发育的关键;坚硬碳酸盐岩、岩浆岩等地层叠加漫长的构造演化是崩塌发育的重要条件。

(3)松软的白果湾组炭质泥页岩分布与强烈断裂改造叠加是制约喜德县红莫镇一带滑坡-泥石流链式灾害发育分布的关键基础地质条件。

参考文献 (References):

- [1] 王思敬. 地球内外动力耦合作用与重大地质灾害的成因初探 [J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 115 - 117. [WANG Sijing. Coupling of earth's endogenic and

exogenic geological processes and origins on serious geological disasters[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(2): 115 - 117. (in Chinese with English abstract)]

- [2] 彭建兵, 马润勇, 邵铁全. 构造地质与工程地质的基本关系 [J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 535 - 549. [PENG Jianbing, MA Runyong, SHAO Tiequan. Basic relation between structural geology and engineering geology[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4): 535 - 549. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 彭建兵. 中国活动构造与环境灾害研究中的若干重大问题 [J]. 工程地质学报, 2006, 14(1): 5 - 12. [PENG Jianbing. Some important problems to be addressed in research of active tectonics and environmental disasters in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(1): 5 - 12. (in Chinese with English abstract)]
- [4] CARLINI M, CHELLI A, VESCOVI P, et al. Tectonic control on the development and distribution of large landslides in the Northern Apennines (Italy) [J]. *Geomorphology*, 2016, 253: 425 - 437.
- [5] HUANG C, BYRNE T B, OUMET W B, et al. Tectonic foliations and the distribution of landslides in the southern Central Range, Taiwan [J]. *Tectonophysics*, 2016, 692: 203 - 212.
- [6] KOUKIS G, PYRGIOTIS L, KOUKI A. Landslide phenomena in Greece: Types of movement related to the lithology and structure of the geological formations [M]//Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2. Cham: Springer International Publishing, 2015: 1023-1027.
- [7] 孙东, 殷志强, 李大猛, 等. 美姑河流域地质构造对大型滑坡孕育的控制作用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 49 - 58. [SUN Dong, YIN Zhiqiang, LI Dameng, et al. Development of the large-scale landslides controlled by geological structures in Meigu River Basin[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 49 - 58. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李洪梁, 高波, 张佳佳, 等. 内外动力地质作用耦合的崩塌形成机理研究: 以藏东昌都地区上三叠统石灰石矿山采场崩塌为例 [J]. 地质力学学报, 2022, 28(6): 995 - 1011. [LI Hongliang, GAO Bo, ZHANG Jiajia, et al. Mechanism of rockfall coupled with endogenic and exogenic geological processes: A case study in the Upper Triassic limestone mines in the Qamdo area, eastern Tibet[J]. Journal of Geomechanics, 2022,

- 28(6): 995 – 1011. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 谢吉尊, 冯文凯, 杨少帅, 等. 则木河断裂带活动特征和地质灾害对地貌演化的影响——以鹅掌河流域为例 [J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 772 – 783. [XIE Jizun, FENG Wenkai, YANG Shaoshuai, et al. Active characteristics and geohazard of zemuhe fault and their influence on morphological evolution in ezhang river[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 772 – 783. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张恩铭, 程谦恭, 林棋文, 等. 岩体结构对岩质滑坡运动过程和堆积特征的影响研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 125 – 135. [ZHANG Enming, CHENG Qiangong, LIN Qiwen, et al. A Study of the influence of rock mass structure on the propagation processes and deposit characteristics of rockslides[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 125 – 135. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 侯李杰, 张玉芳, 刘洪瑜, 等. 西南地区红层滑坡致灾成因及致灾模式研究 [J]. 铁道建筑, 2021, 61(2): 71 – 74. [HOU Lijie, ZHANG Yufang, LIU Hongyu, et al. Study on the cause and mode of red bed landslide hazard in southwest of China[J]. Railway Engineering, 2021, 61(2): 71 – 74. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 白永健, 铁永波, 孟铭杰, 等. 川西地区地质灾害发育特征与时空分布规律 [J]. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(4): 666 – 674. [BAI Yongjian, TIE Yongbo, MENG Mingjie, et al. Characteristics and temporal-spatial distribution of geohazards in western Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022, 42(4): 666 – 674. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 熊小辉, 汪长林, 白永健, 等. 基于不同耦合模型的县域滑坡易发性评价对比分析——以四川普格县为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 114 – 124. [XIONG Xiaohui, WANG Changlin, BAI Yongjian, et al. Comparison of landslide susceptibility assessment based on multiple hybrid models at county level: A case study for Puge County, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 114 – 124. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 马煜, 李彩侠. 构造作用对地质灾害分布的影响分析——以四川省马边县地质灾害为例 [J]. 地质与勘探, 2023, 59(1): 145 – 153. [MA Yu, LI Caixia. Influence of tectonic activities on the distribution of geological hazards: A case study of Mabian County, Sichuan Province[J]. Geology and Exploration, 2023, 59(1): 145 – 153. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李守定, 李晓, 吴疆, 等. 大型基岩顺层滑坡滑带形成演化过程与模式 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2473 – 2480. [LI Shouding, LI Xiao, WU Jiang, et al. Evolution process and pattern of sliding zone in large consequent bedding rock landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2473 – 2480. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王德伟, 林启飞, 倪化勇, 等. 孙水河流域阿坡洛滑坡成灾机理分析 [J]. 四川地质学报, 2016, 36(1): 114 – 117. [WANG Dewei, LIN Qifei, NI Huayong, et al. Genetic mechanism of the apoluo landslide in the Sunshui River Basin[J]. Acta Geologica Sichuan, 2016, 36(1): 114 – 117. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李滨, 殷跃平, 高杨, 等. 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 5 – 13. [LI Bin, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Critical issues in rock avalanches in the Karst mountain areas of Southwest China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 5 – 13. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 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. [XU Xiangning, LI Shengwei. Risk evaluation and precautionary measures for bank slope instability in the hydroelectric project area on the mainstream of the Jinsha River[J]. Chinese Geology, 2005, 32(1): 155 – 161. (in Chinese with English abstract)]
- [20] PENG Wenfei, WANG C L, CHEN S T, et al. A seismic landslide hazard analysis with topographic effect, a case study in the 99 Peaks region, Central Taiwan[J]. *Environmental Geology*, 2009, 57(3): 537 – 549.
- [21] 王运生, 李云岗. 西昌盆地的形成与演化 [J]. 成都理工学院学报, 1996, 23(1): 85 – 90. [WANG Yunsheng, LI Yungang. Formation and evolution of the Xichang basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology

- (Science & Technology Edition), 1996, 23(1): 85 – 90. (in Chinese)]
- [22] 刘丽华, 徐强, 范明祥. 西昌盆地构造特征和含油气条件分析 [J]. 天然气工业, 2003, 23(5): 34 – 38. [LIU Lihua, XU Qiang, FAN Mingxiang. Structural features and oil-gas bearing conditions in Xichang basin [J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(5): 34 – 38. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 许智雄. 西昌盆地喜德地区构造特征及油气远景探讨 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020. [XU Zhixiong. Discussion on structural characteristics and oil and gas prospect in Xide area of Xichang basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 彭灿明. 西昌盆地褶皱构造变形特征研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020. [PENG Canming. Study on deformation characteristics of fold structure in Xichang basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 覃建雄, 夏竹, 张长俊, 等. 西昌复合盆地层序充填序列与沉积动力演化初探 [J]. 古地理论, 2001, 3(4): 45 – 55. [QIN Jianxiong, XIA Zhu, ZHANG Changjun, et al. Sequence filling succession and sedimentary dynamic evolution of the Xichang compound basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(4): 45 – 55. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 赵杰, 周欣, 王燕, 等. 西昌盆地构造演化及特征研究 [J]. 物探化探计算技术, 2020, 42(5): 651 – 659. [ZHAO Jie, ZHOU Xin, WANG Yan, et al. The study on tectonic evolution and characteristics of Xichang basin [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 42(5): 651 – 659. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 伏明珠, 覃建雄. 四川西昌盆地沉积演化史研究 [J]. 四川地质学报, 2011, 31(1): 1 – 5. [FU Mingzhu, QIN Jianxiong. Study of sedimentary evolution of the Xichang Basin [J]. Acta Geologica Sichuan, 2011, 31(1): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 邵红君, 丁一, 孙玮, 等. 西昌盆地震旦系灯影组沉积相与储层特征 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(4): 424 – 434. [SHAO Hongjun, DING Yi, SUN Wei, et al. Sedimentary facies and reservoir characteristics of the Sinian Dengying Formation in Xichang Basin, Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2021, 48(4): 424 – 434. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 许效松, 刘宝珺, 赵玉光, 等. 上扬子西缘二叠纪—三叠纪层序地层与盆山转换耦合 [M]. 北京: 地质出版社, 1997. [XU Xiaosong, LIU Baojun, ZHAO Yuguang, et al. Sequence stratigraphy and basin—mountain transformation in the western margin of Upper Yangtze Landmass during the Permian to Triassic [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. (in Chinese)]
- [30] 杨威, 魏国齐, 金惠, 等. 西昌盆地上三叠统白果湾组沉积相与油气勘探前景 [J]. 天然气工业, 2020, 40(3): 13 – 22. [YANG Wei, WEI Guoqi, JIN Hui, et al. Sedimentary facies and oil and gas exploration prospect of the Upper Triassic Baiguowan Formation in the Xichang Basin [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(3): 13 – 22. (in Chinese with English abstract)]
- [31] HE Dengfa, LI Desheng, WU Xiaozhi, et al. Basic types and structural characteristics of uplifts: An overview of sedimentary basins in China [J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 2009, 83(2): 321 – 346.
- [32] DENG Bin, LIU Shugen, JANSAN L, et al. Sedimentary record of Late Triassic transpressional tectonics of the Longmenshan thrust belt, SW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 48: 43 – 55.
- [33] DENG Jun, WANG Qingfei, LI Gongjian, et al. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China [J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(2): 419 – 437.
- [34] 白永健, 倪化勇, 王运生, 等. 喜德采书组“8·31”滑坡工程地质特征及运动过程 [J]. 山地学报, 2014, 32(3): 327 – 335. [BAI Yongjian, NI Huayong, WANG Yunsheng, et al. Engineering geological characteristics and motor process of Caishu landslide in Xide of Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2014, 32(3): 327 – 335. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 李坤. 喜德县采书组滑坡形成演化机制研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020. [LI Kun. Study on formation and evolution mechanism of Caishu formation landslide in Xide County [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农