

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.003 CSTR:32310.14.stbcbx.2026.01.003

顾煜, 马超, 吕立群. 2005—2021年大河坝流域极端气候及其对滑坡的影响[J]. 水土保持学报, 2026, 40(1):78-88.

GU Yu, MA Chao, LÜ Liqun. Extreme climate events and their impacts on landslides in the Daheba Watershed from 2005 to 2021[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):78-88.

2005—2021年大河坝流域极端气候及其对滑坡的影响

顾煜, 马超, 吕立群

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 为探究青藏高原东北缘大河坝流域2005—2021年极端气候特征及其对滑坡发育的影响机制。[方法] 基于1960—2021年兴海气象站数据, 采用RClimDex模型计算22个极端气候指数, 分析气温与降水变化趋势; 利用多源遥感影像和无人机DSM数据, 解译2005—2021年28条泥石流沟的新增型(I型)与扩大型(II型)滑坡时空分布, 结合皮尔逊相关性分析, 揭示气候因子对滑坡的驱动机制。[结果] 1) 1960—2021年气候暖湿化显著, 极端高温事件频率与强度增加, 极端低温事件减少; 降水模式转向高频短历时强降雨。2) 滑坡活动加剧, 2005—2021年滑坡数量从218处增至1125处(年平均增长10.5%), 面积从 6.25×10^4 增至 44.69×10^4 m²(年平均增长12.3%), 其中I型滑坡占比56%(平均厚度0.65 m), II型滑坡占比44%(平均厚度1.35 m)。2016年后滑坡加速发育, 2018年工程扰动导致道路沿线滑坡密度激增。3) 新增型滑坡(56%)与极端降水(Rx5day, $r=0.68$)相关, 扩大型滑坡(44%)受冷夜频率(TN10p, $r=0.64$)和干旱日数(CDD, $r=-0.67$)驱动。4) 黄土-卵石夹砂结构调控滑坡类型, 浅层滑坡(0.65 m厚)由黄土低渗透性(1.81 m/d)导致, 深层滑坡(1.35 m厚)与卵石层高渗透性(3.02 m/d)相关。[结论] 极端气候通过直接(降雨)和间接(冻融)作用驱动滑坡, 黄土-卵石夹砂结构和人类工程活动进一步加剧灾害风险。研究结果可为青藏高原东北缘泥石流物源预测提供借鉴。

关键词: 泥石流物源; 极端气候; 坡面物源; 滑坡; 气候变化

中图分类号: P642.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)01-0078-11

Extreme Climate Events and Their Impacts on Landslides in the Daheba Watershed from 2005 to 2021

GU Yu, MA Chao, LÜ Liqun

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] To investigate the characteristics of extreme climate over the past 2005-2021 years in the Daheba river basin on the northeastern margin of the Tibetan Plateau and the mechanisms through which it influences landslide development. [Methods] Based on meteorological data from the Xinghai Station from 1960 to 2021, 22 extreme climate indices were calculated using the RClimDex model to analyze the variation trends of temperature and precipitation. Multi-source remote sensing images and unmanned aerial vehicle (UAV)-derived digital surface model (DSM) data were used to interpret the spatiotemporal distribution of newly formed (Type I) and expanded (Type II) landslides in 28 debris flow gullies from 2005 to 2021. Pearson correlation analysis revealed the driving mechanisms of climate factors on landslide development. [Results] 1) From 1960 to 2021, the climate showed significant trends of warming and wetting, with increases in the frequency and intensity of extreme high-temperature events and decreases in extreme low-temperature events. Precipitation patterns shifted toward high-frequency, short-duration heavy rainfall. 2) Landslide activity intensified. From 2005 to 2021, the number of landslides increased from 218 to 1125 (average annual growth rate of 10.5%), and the landslide area

收稿日期: 2025-03-21 修回日期: 2025-06-13 录用日期: 2025-06-30 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-08-11

资助项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0902); 国家科技重大专项(2019QZKK0902)

第一作者: 顾煜(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事山地灾害预测预报研究。E-mail: 2968136989@qq.com

通信作者: 马超(1986—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事山地灾害成灾动力研究。E-mail: sanguoxumei@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

expanded from 6.25×10^4 to 44.69×10^4 m² (average annual growth rate of 12.3%). Among them, Type I landslides accounted for 56% (average thickness of 0.65 m), and Type II landslides accounted for 44% (average thickness of 1.35 m). Landslide development accelerated after 2016, with engineering disturbances in 2018 caused a sharp increase in landslide density along roads. 3) Newly formed landslides (56%) were correlated with extreme precipitation (Rx5day, $r=0.68$), while expanded landslides (44%) were driven by cold night frequency (TN10p, $r=0.64$) and dry day count (CDD, $r=-0.67$). 4) The loess-cobble-sand structure regulated landslide types. Shallow landslides (0.65 m thick) were caused by the low permeability of loess (1.81 m/d), while the deep landslides (1.35 m thick) were associated with the high permeability of cobble layers (3.02 m/d). [Conclusion] Extreme climate events drive landslides through direct (rainfall) and indirect (freeze-thaw) effects, and the loess-cobble-sand structure and human engineering activities further aggravate disaster risks. The results can provide a reference for predicting debris flow material sources on the northeastern margin of the Tibetan Plateau.

Keywords: debris flow material source; extreme climate; slope material source; landslide; climate change

Received: 2025-03-21

Revised: 2025-06-13

Accepted: 2025-06-30

Online(www.cnki.net): 2025-08-11

全球气候变暖及极端气候事件显著增加泥石流灾害频率和强度,严重威胁山区生态环境和人类生命财产安全^[1-2]。我国青藏高原东北缘地处东部季风区、西北干旱与青藏高寒区的交会区域,为典型的高原大陆性气候。已有研究^[3-5]表明,该区域当前气候呈暖湿化趋势,山洪泥石流事件也逐渐呈群发性、高强度等特征。尤其是黄河一级支流大河坝河流域中、下游支沟因沟道下切和溯源侵蚀严重,支沟沟头不断往两侧沉积台地迁移,由此产生的崩塌、滑坡等松散物质增加,泥石流活动非常频繁^[6-8]。

干旱区因年降雨少、降雨集中,泥石流产生多由于短历时降雨诱发的集中水流侵蚀沟床物质形成,相对集中降雨而言,前期降雨对泥石流的贡献相对较低^[9-10]。近年来,国际上一些干旱区泥石流降雨因子研究^[11-13]表明,前期降雨起着非常重要的作用,前期有效降水在泥石流形成中的作用是使土壤水分增多,强度降低,从而降低坡面物源的稳定性^[14]。集中性强降水事件在前期降雨的基础上,不仅增加失稳物源的数量,还扩大其规模和影响范围^[15]。特别是在降水量达到阈值时,泥石流的增长变得尤为明显^[16-19]。此外,冬春季节气温升高导致冰雪融水缓慢入渗也改变坡面的水文条件和土壤结构,大大增加泥石流的潜在物源量^[20-22]。大河坝河流域虽属于干旱区气候,但冬春季节因积雪消融带来的雪水缓慢入渗有可能增加坡面物源,甚至在原有浅层滑坡体基础上,导致滑坡周壁土体进一步坍塌,从而增加泥石流物源。或许是当前区域气候变暖及暖湿化背景下,该区域泥石流活跃的原因之一。

鉴于此,以青藏高原东北缘大河坝流域下游 28 条泥石流沟作为研究对象,利用 Google Earth、

Spot5、Planet(鸽群卫星)及 GF-1 遥感图像解译 2005—2021 年新增型和面积扩大型滑坡的动态变化,结合兴海县国家气象站数据,分析极端气候与新增型和面积扩大型滑坡的相关性,以期对当前该区域泥石流活动频率增加与气候的关系提供证据,为青藏高原东北缘未来气候变化背景下泥石流活动趋势预测提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区属青海省海南藏族自治州,位于青藏高原东部黄河源区的同德盆地。大河坝河作为黄河左岸一级支流,由水塔拉河、青根河和黄清河 3 条河流汇聚而成,整体呈“丰”字形分布(图 1)。由于黄河以 4 mm/(10 a) 的速率持续下切,基准面降低,加剧上游支流的溯源侵蚀和下切作用^[4,18]。

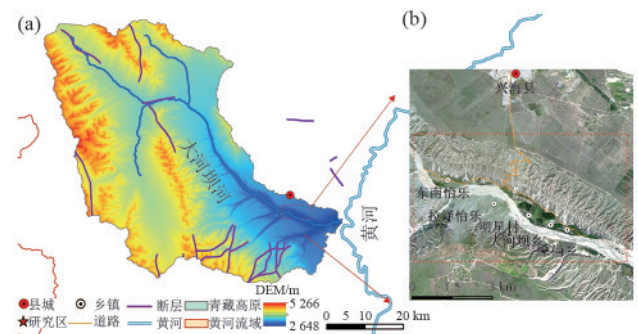


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

研究区发育大量逆冲断层、走滑断裂及褶皱构造^[23]。该区域上部覆盖厚层第四纪风成黄土,下部则是由上新世至中更新世的河湖相沉积层构成,厚度达 200 m,主要由卵砾石组成,并夹杂着大量砂粒,形成独特的卵石夹砂结构^[4]。1960—2020 年,区域年

平均气温为1.48℃,最热月为7月(12.5℃),最冷月为1月(-11.4℃),年平均降水量为361mm,降水主要集中在5—9月,7月为降水高峰期,年平均蒸发量高达1680mm。季节性冻土分布全区,自1971—2020年,最大冻结深度为64.27~204.76cm,平均最大冻结深度为132.28cm^[24]。区内地震动峰值为0.10g,据1965—2021年地震记录显示,区域及周边共发生15次地震,震级为2.4~4.1级,震源深度为5~10km。

1.2 数据来源

1.2.1 气象数据 气象数据来源于国家基准基本气象站的青海省兴海气象站。本研究收集1960—2021年的逐日气温和降水数据,数据包含日平均温度、日最高气温、日最低气温和日降水数据。为确保数据质量,对气象数据进行严格的质量控制和潜在异常值处理,以确保后续分析的准确性。

1.2.2 影像数据 降雨诱发的滑坡通常规模较小,与当地地形密切相关。为准确识别和提取滑坡信息,本研究主要采用多源高分辨率遥感影像数据和数字表面模型(DSM)开展研究(表1)。具体而言,共使用11期遥感影像,涵盖4期Google Earth影像、2期GF-1影像、4期Planet影像和1期Spot5影像。其中,Google Earth影像、GF-1影像、Spot5影像和Planet影像的分辨率分别为1.5、1.0、2.5、3.0m。该影像提供多时相、高分辨率的历史卫星数据,为提取滑坡信息提供有力支持。研究所用的数字表面模型(DSM)数据由无人机(UAV)于2023年5月2日获取,分辨率为1.0m。DSM数据用于分析滑坡的空间分布特征和提取相关信息。

表1 遥感影像数据集

Table 1 Remote sensing image dataset

类型	数据源	分辨率/m	时间(年-月-日)
影像	Google earth	1.5	2005-09-16
影像	Spot5	2.5	2007-08-07
影像	Google earth	1.5	2009-10-26
影像	Google earth	1.5	2013-02-15
影像	Planet	3.0	2015-12-20
影像	Google earth	1.5	2016-07-27
影像	Planet	3.0	2017-11-16
影像	Planet	3.0	2018-12-19
影像	GF-1	1.0	2019-11-10
影像	Planet	3.0	2020-12-23
影像	GF-1	1.0	2021-06-18
DSM	UAV	1.0	2023-05-02

1.3 研究方法

1.3.1 极端气候指数 由于研究区内人为活动较少,缺乏滑坡具体发生时间的详细记录,因此,本研究主要依托现有影像数据研究坡面物源的变化趋势,并结合逐日气象数据,探讨坡面物源与极端气候的关系。本研究以气候变化监测和指数专家组(ETCCDMI)推荐的27种气候变化指数为基础,结合研究区的具体特点,重点选取能够反映气候变化特征的高温、低温和降水相关指数,最终确定12个气温指数和10个极端降水指数作为分析指标(表2)。极端气候指数采用RClimDex1.1模型计算。由于20世纪60年代的数据较为稀缺,本研究时间设定为1960—2021年,探讨大河坝流域极端气候变化的特征与规律。

1.3.2 滑坡解译 本研究选取2005—2021年的历史卫星影像(表2)。依据影像数据,将近20年的滑坡变化划分为10个阶段,分别为(2005,2007]年、(2007,2009]年、(2009,2013]年、(2013,2015]年、(2015,2016]年、(2016,2017]年、(2017,2018]年、(2018,2019]年、(2019,2020]年和(2020,2021]年,通过计算每个阶段内滑坡变化量,研究分析坡面物源的变化趋势。影像数据经过几何校正、辐射定标和大气校正等预处理后,通过目视解译方法识别滑坡。滑坡在影像中与周围地物的色调存在显著差异,通常呈白色或灰色(图2)。通过对影像特征的比较分析,准确解译滑坡边界。

为提高滑坡疤痕边界的提取精度,研究借助无人机(UAV)获取研究区的数字表面模型(DSM),结合遥感影像分析滑坡几何特征及分布特点。根据滑坡变化情况,将滑坡划分为新增型(I)、扩大型(II)、稳定型(III)3类,分别为新发生的滑坡,此前未曾出现过滑坡现象、基于原有滑坡的基础,滑坡进一步发育扩大、滑坡发生后进入稳定状态,滑坡保持不变。在本研究中,主要探讨新增型和扩大型滑坡的变化情况。

2 结果与分析

2.1 气候变化特征

2.1.1 极端气温指数的变化趋势 自1960年以来,研究区的极端气温指数变化显著。极端高温事件强度和频率显著增强,而极端低温事件则逐渐减弱(表2)。具体而言,高温极值(TX_x, TN_x)与低温极值(TX_n, TN_n)分别以0.3、0.21℃/(10a)及0.36、0.11℃/(10a)的速率变化。2000—2021年,年最大日最高气温(TX_x)和年最小日最高气温(TX_n)平均值较1961—1999年分别升高1.40、1.43℃,表明极端高温事件强度显著增强,极端低温事件的强度则有所减弱。

表 2 极端气候变化指数趋势
Table 2 Trends of extreme climate indices

类型	气候指数	1961—2021 年趋势/ (10 a)	1960—1999 年平均值/ [%·(10 a) ⁻¹]	2000—2021 年平均值/ [%·(10 a) ⁻¹]
极端 气温指数	年最大日最高气温(TXx)	0.30*	25.26	26.66
	年最小日最高气温(TXn)	0.36*	-8.79	-7.36
	年最大日最低气温(TNx)	0.21*	11.83	12.57
	年最小日最低气温(TNn)	0.11	-27.35	-27.61
	霜冻天数(FD)	-2.68*	234.20	226.77
	结冰天数(ID)	-3.91*	52.60	38.59
	冷夜日数(TN10p)	-2.09*	11.53	7.73
	冷昼日数(TX10p)	-1.18*	11.66	7.24
	暖夜日数(TN90p)	1.45*	8.43	13.09
	暖昼日数(TX90p)	0.91*	8.78	12.40
极端 降水指数	寒冷时间持续指数(CSDI)	-1.11*	3.46	0.32
	连续暖日数(WSDI)	1.20*	1.18	6.68
	最大 1 d 降水量(Rx1day)	1.11*	23.42	28.40
	最大 5 d 降水量(Rx5day)	1.72	45.08	52.70
	强降水总量(R95p)	7.27*	59.62	87.72
	极端强降水总量(R99p)	6.08*	11.54	35.98
	日降水强度(SDII)	0.14*	5.28	5.78
	年降水总量(PRCPTOT)	16.26*	341.80	395.22
	大雨日数(R10mm)	0.66*	8.80	11.09
	极端大雨日数(R20mm)	0.15	1.31	1.91
持续干燥指数(CDD)	-3.73	108.20	100.64	
持续湿润指数(CWD)	-0.20	6.67	6.32	

注:*表示 $p < 0.05$ 。

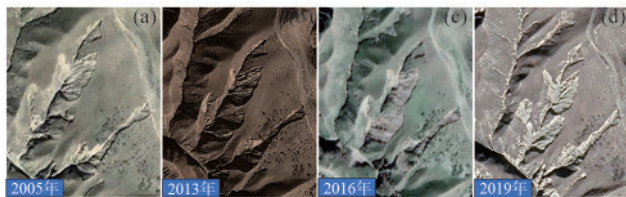


图 2 滑坡遥感影像

Fig. 2 Remote sensing images of landslides

在频率方面,暖昼(TX90p)和暖夜(TN90p)日数分别以 0.91、1.45 d/(10 a) 速率增加,而冷昼(TX10p)、冷夜(TN10p)、霜冻(FD)和结冰(ID)天数则分别以 1.18、2.09、2.68、3.91 d/(10 a) 速率减少,表明高温事件频率显著增加,而低温事件频率则大幅减少。持续性指标显示,极端高温事件持续性增强,而低温事件持续性则趋于破碎化。连续暖日日数(WSDI)以 1.20 d/(10 a) 的速率增加,而寒冷时间持续指数(CSDI)则以 1.11 d/(10 a) 的速率降低。

总体来看,自 1960 年以来,研究区气温显著上升,气候逐渐变暖。高温事件的强度和频率呈加速增强

趋势,而低温事件则持续弱化。与 2000 年以前相比,2000 年之后气候变得更加温暖,高温事件更为频繁,而低温事件则显著减少,进一步加剧气候变暖趋势。

2.1.2 极端降水指数的变化趋势 研究区降水量指数呈明显波动上升趋势,降水量和降水强度均有所增加。由表 2 可知,自 1961 年以来,研究区的降水特征发生显著变化。最大 1 日降水量(Rx1day)和最大 5 日降水量(Rx5day)分别以 1.11、1.72 mm/(10 a) 的速率增加,表明极端降水事件的强度显著增强。强降水总量(R95p)和极端强降水总量(R99p)的增幅尤为显著,分别达到 7.27、6.08 mm/(10 a),其中强降水总量(R95p)的增幅最为突出,表明强降水量显著增加。日降水强度(SDII)和年降水总量(PRCPTOT)也呈显著增加趋势,年降水总量的增幅为 16.26 mm/(10 a),说明研究区整体降水量增加及暴雨强度加剧。

降水日指数呈增加趋势,降雨变得更加频繁且持续时间较短。尽管大雨日数(R10mm)和极端大雨日数(R20mm)均呈上升趋势,但 R20mm 增加趋势并

不显著,表明大雨日数增多,而极端降水事件的增加相对较少。1961—2021年,持续干燥日数(CDD)以3.73 d/(10 a)的速率减少,而持续湿润日数(CWD)也以0.20 d/(10 a)的速率减少,表明研究区连续无降水天数和降水天数均有所减少。总体而言,研究区的降雨变得更加频繁且持续时间更短。

与1961—1999年相比,2000—2021年降水量和极端降水事件的频率和强度均显著增加,尤其是强降水事件,R95p和R99p增幅较大,分别达到1961—1999年的1.47、3.12倍。R10mm和R20mm增幅也表明强降水场次有所增加。总体而言,研究区的气候特征呈现出从干燥逐渐向湿润过渡趋势,降雨模式从低频长历时转变为高频短历时强降雨。

2.2 滑坡时空变化特征

2.2.1 时间变化特征 2005—2021年,研究区滑坡活动呈显著增长趋势(表3)。滑坡数量从218处增加至1 125处,累计增幅达到416%,年平均增长率为10.5%;滑坡总面积从 $6.25 \times 10^4 \text{ m}^2$ 增加至 $44.69 \times 10^4 \text{ m}^2$,累计增幅为615%,年平均增长率为12.3%。单体滑坡的平均规模从 286 m^2 增加至 397 m^2 ,增幅为39.2%。特别是自2016年后,滑坡规模增速加快,

2020—2021年面积增量达到 $5.26 \times 10^4 \text{ m}^2$,占总增量的28.5%。

2类滑坡的发育规模差异显著(图3)。2005—2021年,新增型滑坡(I型)累计面积达到 $21.52 \times 10^4 \text{ m}^2$,占总增量的56%,平均厚度0.65 m,滑坡面积为 $42 \sim 1\ 208 \text{ m}^2$,平均滑坡面积 237.27 m^2 ,以浅层滑坡为主;扩大型滑坡(II型)面积为 $16.92 \times 10^4 \text{ m}^2$,占比44%,滑坡平均厚度为1.35 m,滑坡面积为 $42 \sim 5\ 065 \text{ m}^2$,平均滑坡面积为 344.55 m^2 。新增型滑坡面积占比为扩大型的1.27倍,表明研究区滑坡发育主要以新增型为主,说明研究区地质灾害正处于活跃阶段。通过计算各时段滑坡面积平均变化速率($\Delta A/t$),2005—2021年呈降低-骤升-回落趋势。2015年后显著提升,在(2018年,2019年]达到峰值($7.23 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{a}$),较基准期(2005年,2007年)增幅达305%。不同时段2类滑坡面积占比存在显著差异。在(2015年,2017年]和(2019年,2020年],扩大型滑坡面积增长量大于新增型滑坡,其余时段新增型滑坡增长占主导。其中,在(2018年,2019年],新增型滑坡面积变化量达到最大值($5.12 \times 10^4 \text{ m}^2$),而扩大型滑坡在(2015年,2016年]增长最大,为 $3.51 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

表3 2005—2021年研究区滑坡变化

Table 3 Landslide changes in study area from 2005 to 2021

滑坡变化	2005年	2007年	2009年	2013年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
滑坡数量/个	218	300	401	505	548	701	763	824	908	1 049	1 125
滑坡面积/(10^4 m^2)	6.25	9.82	12.62	16.77	19.29	23.63	26.12	30.21	37.45	39.42	44.69

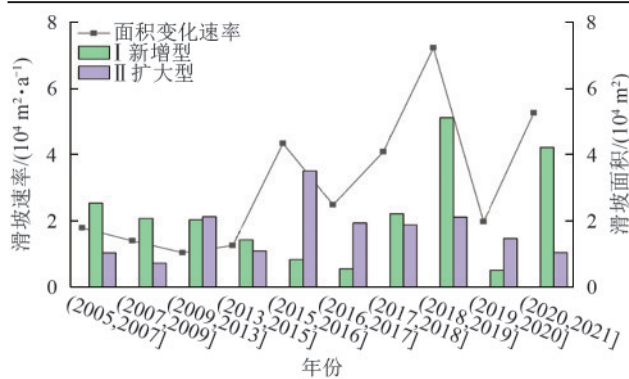


图3 各时段滑坡面积

Fig. 3 Variations in landslide areas across different periods

2.2.2 空间分布特征 本研究依托高精度地形数据与滑坡编录资料,系统分析不同坡度带内滑坡面积的分布规律(图4a、图4b)。滑坡主要分布在 $35^\circ \sim 45^\circ$,其中,新生型滑坡集中分布在 $35^\circ \sim 40^\circ$ 坡度区间,而扩大型滑坡则主要分布在 $40^\circ \sim 45^\circ$ 区间,表明陡坡带更有利于已有滑坡的持续扩大。通过分析不同类型滑坡的坡向分布(图4c、图4d)发现,滑坡主要发生在南面,而北面发生较少,表明坡向影响滑坡的发育。新增型和扩大型滑坡主要分布在西

南向,其中扩大型滑坡的面积占比大于新增型,而在东南向,新增型滑坡面积反超扩大型,说明东南向更易发生新增型滑坡,西南向则更有利于扩大型滑坡发生。

图5为2005—2021年滑坡密度(LDP)的变化情况。在早期(2005—2017年),研究区以低密度区($0 \sim 50$ 个/ km^2)为主,2009年以后,局部陡坡带开始出现中低密度($50 \sim 100$ 个/ km^2),整体以稳定为主导的灾害格局。2018年成为灾害突变的关键节点,滑坡密度增强,中高密度($100 \sim 200$ 个/ km^2)范围迅速扩大,同时高密度区(>300 个/ km^2)开始零星出现,并随着时间推移逐渐扩大。2021年,研究区内高密度(>300 个/ km^2)占比增大,形成以道路为核心呈放射状分布的高强度灾变态势。高密度区(>300 个/ km^2)集中分布于人类活动密集的道路沿线及工程扰动区域(如2018年水土保持工程区),而低密度区(<50 个/ km^2)则多分布于植被覆盖良好的平缓地带。说明人类活动影响坡体的稳定性,诱发滑坡大规模的发生。

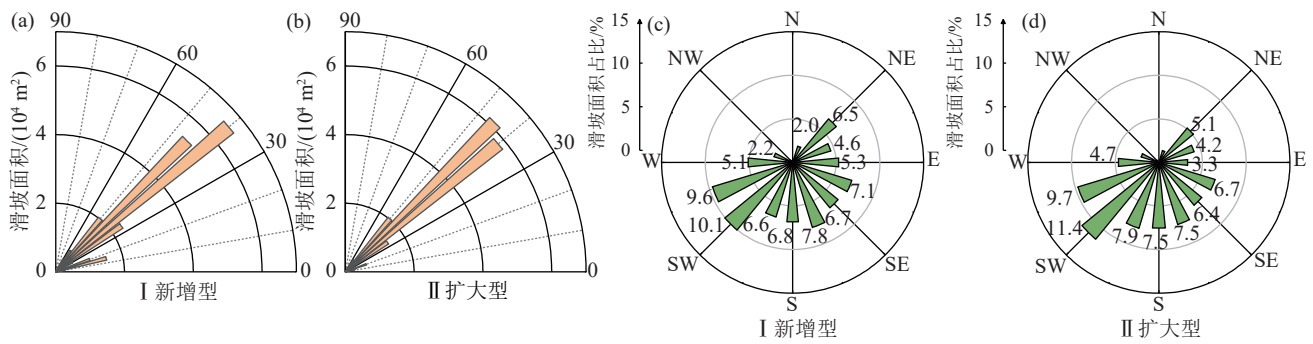


图 4 2005—2019 年滑坡坡度分布特征

Fig. 4 Slope distribution characteristics of landslides from 2005 to 2019

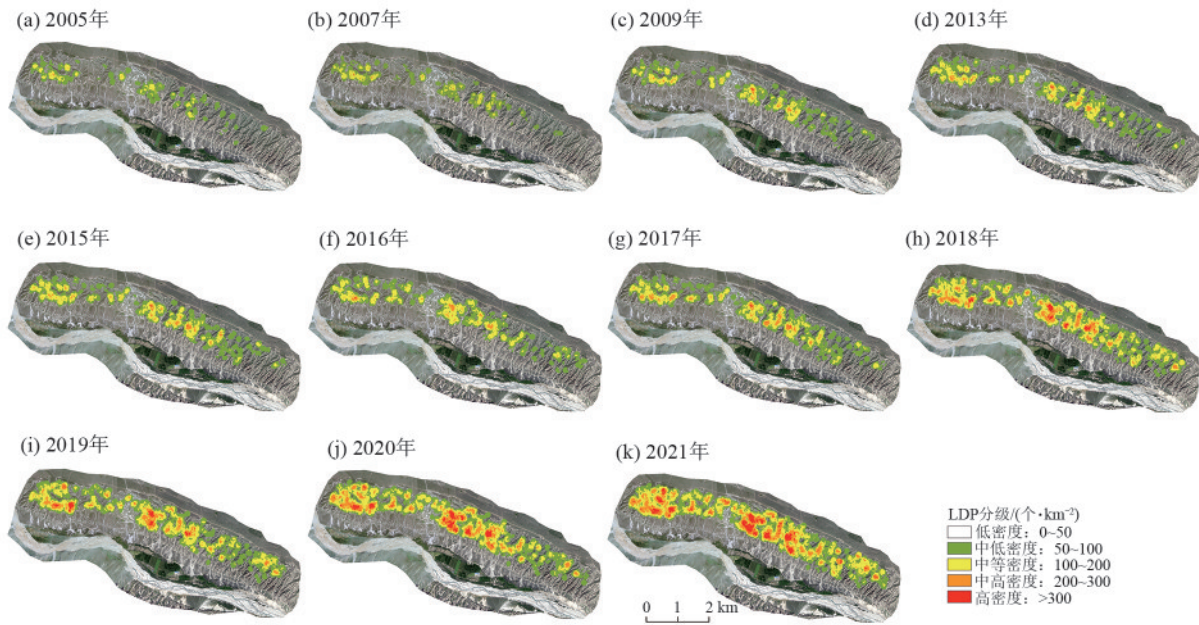


图 5 2005—2021 年滑坡密度分布 (LDP)

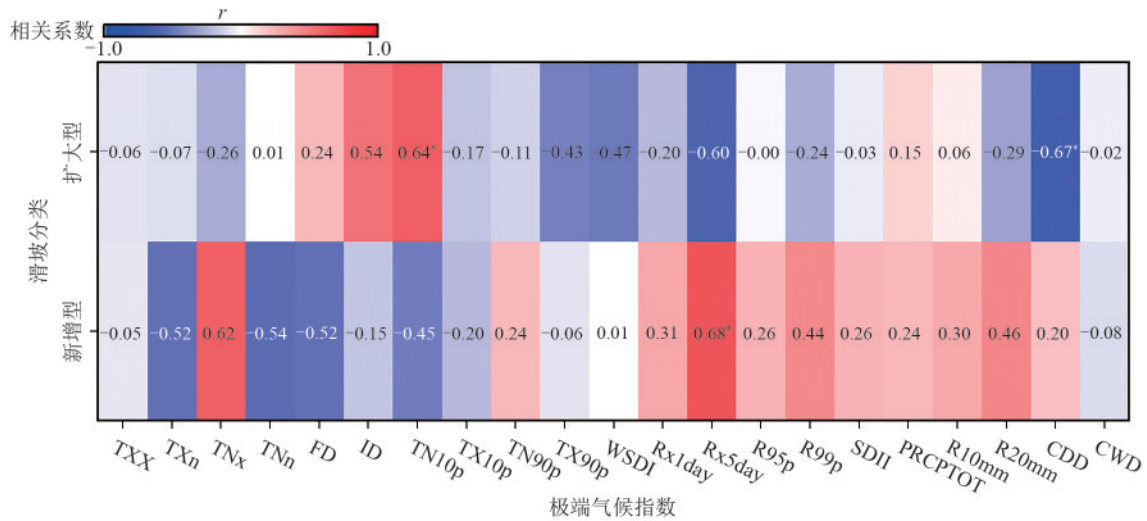
Fig. 5 Landslide density probability (LDP) distribution from 2005 to 2021

2.3 气候变化对滑坡的影响

基于皮尔逊相关性分析(图 6)表明,滑坡与极端温度指数在年尺度上总体相关性较弱。12 个极端气温指数中,仅扩大型滑坡与冷夜日数(TN10p)通过显著性检验($p < 0.05$)。具体表现为扩大型滑坡与冷事件指数(ID、FD、TN10p)呈正相关,相关系数分别为 0.24、0.54、0.64,表明极端冷事件增加对扩大型滑坡发生具有促进作用;与暖事件指数(TX90p、TN90p、WSDI)呈负相关,相关系数分别为 -0.44、-0.11、-0.47;与其他极端极值指数(TXx、TXn、TNx、TNn)相关性较弱($|r| < 0.26$)且均为负相关,均未通过显著性检验($p > 0.05$),说明极值指数对扩大型滑坡影响较小,其发生更依赖于事件指数和持续时间。新增型滑坡方面,除年最大日最高气温(TXx)外,其余极值指数(TXn、TNx、TNn)与滑坡相关性较强($|r| \geq 0.52$),相关系数分别

为 -0.52、0.62、-0.54,表明极值指数对该类型滑坡具有抑制作用;冷事件指数(FD、ID、TX10p、TN10p)与滑坡呈负相关,其中与霜冻日数(FD)相关性最强($r = -0.52$);与暖事件指数(TX90p、TN90p、WSDI)相关性较弱,相关系数分别为 -0.06、0.24、0.01。

滑坡与极端降水指数的相关性分析表明,极端降水指数与滑坡的相关性普遍高于年降水量,其中年降水量与新增型、扩大型滑坡的相关系数分别为 0.24、0.15;新增型滑坡中,Rx5day 与滑坡相关性最强($r = 0.68, p < 0.05$),而扩大型滑坡与 CDD($r = -0.67$)和 Rx5day($r = -0.60$)呈显著负相关,仅 CDD 通过显著性检验。滑坡与单日降水量 Rx1day 和连续湿日(CWD)相关性相对较低,可能是因为单日降水量难以达到诱发滑坡临界值,需累积至临界阈值才可能诱发滑坡。



注:*表示 $p < 0.05$ 。下同。

图 6 极端气候指数与滑坡的相关性

Fig. 6 Correlation between extreme climate indices and landslides

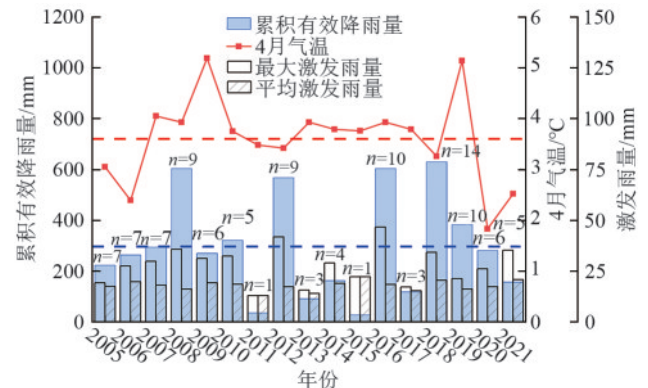
滑坡与有效降雨紧密相关。降雨使土体饱和、增重且抗剪强度降低,长时间连续降雨或短时间强降雨更易诱发滑坡。春季升温时,冰雪融水渗入土体,降低抗剪强度,即使降雨量较小,也可能引发滑坡。研究区 1—3 月日平均气温均低于 0°C , 4 月后升温,气温为 3.3°C , 因此,选 4 月日平均气温表征温度对滑坡的影响。滑坡与累积有效降雨量相关,滑坡与前期 15 d 有效降水相关性最高^[19]。本文将前期有效降雨时段定义为前 15 d, 根据先前经验公式有效降雨系数 a 取值为 0.8 ^[25]。研究区上层为 2 m 厚薄层黄土, 下层为巨厚卵石夹砂, 且滑坡平均厚度 $< 2\text{ m}$, 在黄土高原研究^[19]发现, 当累积降雨量超过 71 mm 时易引发滑坡, 因此, 本文将该值作为触发滑坡的累积降雨阈值。强降雨也触发滑坡, 实地监测数据显示, 当日降水量超 12.6 mm 时超渗产流, 发生泥石流, 选取单日降水量超 12.6 mm 或累积有效降雨量超 71 mm 的降雨事件作为触发滑坡的降雨事件。累积有效降雨计算公式为:

$$R = R_0 + R_1 + R_2 + R_3 + \sum_{i=4}^{15} a^{i-3} R_i$$

式中: a 为有效降雨系数; R 为累积有效雨量, mm; R_0 为滑坡当日降水总量; R_1, R_2, \dots, R_i 依次表示滑坡发生前 1、2、3、 \dots 、 i 天的逐日降水雨量, mm。

由图 7 可知, 2005—2021 年降雨对滑坡的诱发作用显著。各阶段特征显示, 前期有效降雨时段的累积降雨量增加, 虽使土体饱和, 但若当日激发雨量不足, 滑坡面积增加量较小。单一阶段内降雨事件天数的增多不一定促使滑坡面积扩大, 只有当累积有效降雨量或当日降水量较大时, 滑坡面积才显著增加。(2015, 2016] 阶段以扩大型滑坡为主, 前期有

效降雨使土体饱和, 叠加强降雨(对应自日降雨记录以来的最大值 46.6 mm), 最终导致土体失稳, 导致大规模滑坡发生; (2017 年, 2018 年] 时段累积有效降雨和当日激发雨量的增加, 滑坡面积增加; (2018 年, 2019 年] 新增型滑坡达到最大值, 除降雨因素外, 2018 年大范围水土保持工程的开挖修建, 降低坡体稳定性, 促使该时段新增型滑坡增长量最大。与之相对, 部分阶段滑坡面积变化较小。(2005 年, 2007 年]、(2007 年, 2009 年] 阶段, 累积有效降水量虽有增加, 但因当日激发雨量较小, 滑坡面积增加较少; (2009 年, 2013 年] 阶段, 有效累积降雨量虽然增加, 但部分年份激发雨量不足, 导致滑坡面积变化不大; (2013 年, 2015 年], 降雨场次和激发雨量均较小, 滑坡变化面积最小; (2016 年, 2017 年] 由于降雨天数和激发降雨均处于较低水平, 滑坡面积增加量也最少。



注: n 为单日降水量超 12.6 mm 或累积有效降雨量超 71 mm 降雨事件的天数。

图 7 2005—2021 年温度和降雨变化

Fig.7 Changes in temperatures and precipitations from 2005 to 2021

从温度与滑坡变化情况(图7)来看,温度与滑坡的变化无明显规律,但其对滑坡的影响不容忽视。全区分布季节性冻土,昼夜温差较大。温度可通过影响土体理化性质进而对滑坡产生作用。低温环境下,土体水分冻结产生冻胀力,改变土体结构;升温时冰雪融化,增加土体水分,削弱土体强度,降低抗剪能力,进而增加滑坡风险。温度异常还影响植被生长,破坏根系对土壤的固定作用,降低土体稳定性。从时间分布上看,冬季低温期滑坡发生较少,春季升温阶段滑坡风险上升,夏秋季节多雨高温,滑坡频发,秋季降温且降雨减少时,滑坡风险也随之减少。

总体而言,降雨是滑坡诱发关键因素,其通过影响土体水分和抗剪强度直接作用于滑坡。温度则通过影响土体和植被等方式间接作用于滑坡。在降雨与温度的共同影响下,不同阶段滑坡程度呈显著差异。

为研究不同黄土与卵石夹砂层的渗透能力,对土壤进行渗透试验。结果显示,不同层间土壤水分

入渗速率存在差异,其中黄土层渗透系数($K=1.81\text{ m/d}$)显著低于卵石夹砂层($K=3.02\text{ m/d}$,为黄土层的1.67倍)。

坡向对滑坡发育特征的空间响应差异显著(图8)。新增型滑坡中,仅西北坡、西南坡和南坡与极端气候指数存在显著相关性($p<0.05$),而其他坡向无明显相关性。其中,西北坡向与7个极端气候指数显著相关,以RX5day($r=0.80, p<0.01$)、TXn($r=-0.80, p<0.01$)相关性最强;西南坡向与3个指数显著相关(RX5day=0.68、TNx=0.65和FD=-0.67);南坡仅与TN10p($r=-0.66, p<0.05$)显著相关。西北和西南坡向同时受RX5day影响,相关系数分别为0.80、0.68。扩大型滑坡中,仅东南坡向与极端气候指数无显著相关性($p\geq 0.05$),其余坡向均存在关联,其中以西北坡向与TX10p($r=-0.79, p<0.01$)相关性最强。南、东和东北坡向与CDD呈显著负相关($r=-0.65\sim 0.75, p<0.05$),表明该区域扩大型滑坡受干旱日数减少的驱动更为显著。

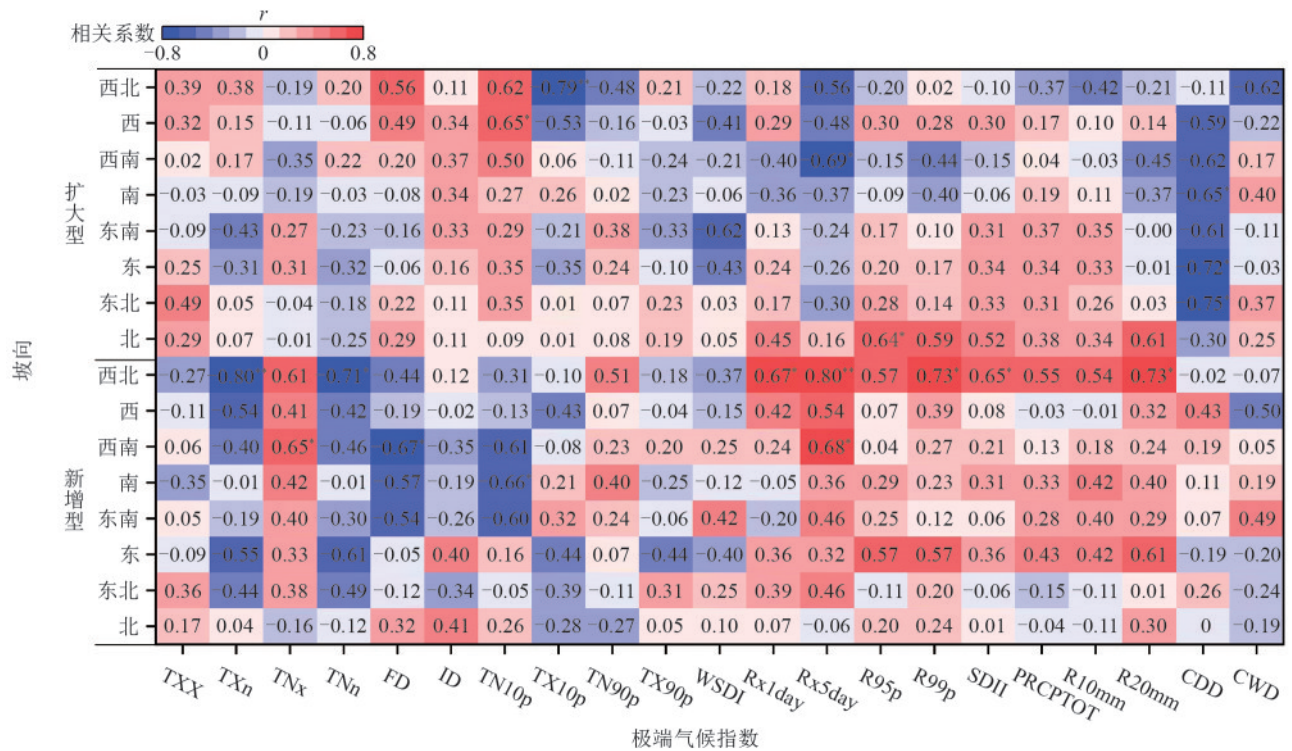


图8 极端气候指数与坡向的相关性

Fig. 8 Correlation between extreme climate indices and slope aspects

3 讨论

3.1 滑坡对极端气候变化的响应机制

滑坡发生往往是多种因素共同作用的结果。除极端气候因素外,地震活动和人类活动也可能对滑坡产生一定影响。通过分析研究区周边1965—2021年地震记录发现,震级多在2.4~4.1级,震源深度5~10 km,且距离研究区较远,2017年3.7级地震位

于研究区边缘,整体地震活动较弱,对滑坡影响可忽略不计。实地考察显示,研究区内无采矿活动,县乡道路对滑坡影响较小,仅2018年水土保持工程道路扩宽扰动边坡,使道路两旁滑坡增多(图5)。

青藏高原东北缘在暖湿化背景下,极端气候要素对滑坡灾害的复合驱动机制。极端温度主要间

接影响滑坡的发生。暖昼日数(TX90p)和连续暖日指数(WSDI)的显著增加[分别为0.91、1.20 d/(10 a)]加速地表蒸散,导致深层土壤水分亏缺,使得土体收缩形成裂隙,为后续降水入渗创造优势通道。冬春季节气温升高[年平均升温0.3 °C/(10 a)]导致积雪消融期提前并延长持续时间,融雪水入渗增加土体水分,降低抗剪强度,提升滑坡风险。此外,冷夜频率(TN10p)减少[2.09 d/(10 a)],增加冻融循环次数,削弱季节性冻土的“固土效应”,使土体黏聚力降低^[26]。新增型滑坡平均厚度为0.65 m,对温度变化较为敏感;而扩大型滑坡较厚(平均厚度1.35 m),其发育需要经历更长时间的累积过程,可能是导致新增型滑坡与极值指数呈较强相关性,扩大型滑坡与极端气候事件指数及持续性指数呈更高相关性的原因。极端降水则通过“双水源”补给模式直接触发滑坡。短时强降雨[Rx5day增加1.72 mm/(10 a)]与融水叠加,受黄土层低渗透性($K=1.81$ m/d)限制,导致浅层饱和,触发新增型滑坡(I型)。“高频短历时”降雨模式区别于青藏高原东南部湿润区的长历时降雨(如岷江流域)^[27],展现干旱区特有的水文响应机制。研究区年蒸发量高达1 680 mm,导致单日降水量(Rx1day)难以达到滑坡降雨阈值,因此,5日最大降水量(Rx5day)与滑坡的相关性($r=0.677$)显著高于单日降水指标($r=0.321$)。虽与黄土高原规律一致^[28],但因两地土壤结构差异(研究区为薄层黄土-卵石夹砂层),滑坡降雨阈值可能存在不同。

3.2 滑坡时空演变的气候-地质耦合机制

本研究发现,黄土-卵石夹砂二元结构对滑坡类型具有调控作用。新增型滑坡(I型)受极端降雨驱动(Rx5day, $r=0.677$),黄土层低渗透性限制水分下渗,导致浅层饱和失稳。监测数据^[17]显示,2.0~4.0 m深度黄土层水分对降雨响应较弱,而5.0 m以下土体水分基本不受降雨影响。研究区内主要以强降雨为主,结合黄土平均厚度与新增型滑坡平均厚度,因而区域内以新增型浅层滑坡为主。扩大型滑坡(II型)受冷夜频率(TN10p, $r=0.640$)与干旱日数(CDD, $r=-0.665$)协同驱动。冻融循环减少[CSDI减少1.11 d/(10 a)],促使黄土-卵石界面产生裂隙,干旱期(CDD ≥ 100 d)裂隙扩大形成优势渗流路径,后续降雨沿裂隙快速下渗导致深层孔隙水压力激增,最终引发大规模滑移。40°~45°陡坡带因重力驱动下的渗流加速,扩大型滑坡占比达58%。该机制

与西南地区碎屑岩滑坡^[29]和黄土高原滑坡^[17]的机制存在显著差异。

坡向则通过影响太阳辐射与水分分布,进一步放大气候-地质耦合效应。西北坡向因年平均太阳辐射弱,土体水分多,新增型滑坡与极端降雨(Rx5day, $r=0.80$)的相关性显著增强;而东北-东南坡向由于年平均太阳辐射强,土体干燥裂隙发育,扩大型滑坡受干旱日数(CDD, $r=-0.75$)的主导控制作用更为突出。该坡向分异说明太阳辐射驱动的土体干湿循环通过改变黄土-卵石界面的水文地质条件,间接影响滑坡的发生模式与空间分布特征。

4 结论

1) 气候暖湿化趋势显著,极端气候事件加剧。自1960年以来呈显著升温趋势,极端高温事件频率和强度增加[暖昼日数增速0.91 d/(10 a),连续暖日日数增速1.20 d/(10 a)],而极端低温事件减少[冷夜日数降速2.09 d/(10 a)]。同时,降水模式由低频长历时向高频短历时强降雨转变,5 d最大降水量(Rx5day)增速达1.72 mm/(10 a),强降水总量(R95p)增幅达7.27 mm/(10 a),极端降水与融雪水的协同作用显著提升泥石流物源量。

2) 2005—2021年,滑坡数量与面积分别以10.5%、12.3%的年平均速率增长,2016年后呈加速趋势。新增型滑坡(I型)以浅层失稳为主(平均厚度0.65 m),主要受极端降雨(Rx5day相关性 $r=0.68$)驱动;扩大型滑坡(II型)则与冷夜频率(TN10p, $r=0.64$)及干旱日数减少(CDD, $r=-0.67$)显著相关。坡向分异特征表明,西北坡向因低辐射高湿度更易受降雨触发,而东南坡向受干旱日数减少影响显著。

3) 降雨是滑坡诱发关键因素,通过影响土体水分和抗剪强度直接作用于滑坡。温度则通过影响土体物理化学性质和植被等方式间接作用于滑坡。前期有效降雨时段的累积降雨量增加虽使土体饱和,但若当日激发雨量不足,滑坡面积增加量较小,只有当累积有效降雨量或当日降水量较大时,滑坡面积才显著增加。

4) 黄土-卵石夹砂二元结构导致水文响应差异,薄层黄土(渗透系数1.81 m/d)限制水分下渗,促使浅层饱和型滑坡(I型)占比达56%;卵石夹砂层高渗透性(3.02 m/d)则加速深层渗流,结合冻融裂隙扩展,导致扩大型滑坡(II型)集中于40°~45°陡坡带,平均厚度达1.35 m。2018年水土保持工程扰动使道路沿线滑坡密度激增,高密度区(>300 个/km²)呈放

射状分布,表明工程活动通过破坏坡体稳定性显著加剧灾害风险。

参考文献:

- [1] WANG F W, ZHANG B, YAN K M, et al. Rainfall-induced Guilong landslide-mudflow in a terraced field of southwestern China on 22 June 2022 [J]. *Landslides*, 2024, 21(11):2711-2724.
- [2] 贾洋,崔鹏.西藏冰湖溃决灾害事件极端气候特征[J].气候变化研究进展,2020,16(4):395-404.
JIA Y, CUI P. The extreme climate background for glacial lakes outburst flood events in Tibet [J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(4):395-404.
- [3] 秦小光,殷志强,汪美华,等.青藏高原东北缘共和-贵德盆地全新世气候变化[J].地质学报,2017,91(1):266-286.
QIN X G, YIN Z Q, WANG M H, et al. Loess records of the Holocene climate change of Gonghe and Guide basins in the northeastern boundary of the Tibet Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(1):266-286.
- [4] LYU L Q, XU M Z, WANG Z Y, et al. A field investigation on debris flows in the incised Tongde sedimentary basin on the northeastern edge of the Tibetan Plateau [J]. *Catena*, 2022, 208: e105727.
- [5] 史培军,杨文涛.山区孕灾环境下地震和极端天气气候对地质灾害的影响[J].气候变化研究进展,2020,16(4):405-414.
SHI P J, YANG W T. Compound effects of earthquakes and extreme weathers on geo-hazards in mountains [J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(4):405-414.
- [6] 吕立群,周冠宇,马超,等.古沉积盆地地下切引发的泥石流侵蚀和波状流动耦合过程[J].地球科学,2023,48(9):3389-3401.
LÜ L Q, ZHOU G Y, MA C, et al. Coupling process of debris flow erosion and wavy flow caused by incision on paleosedimentary basin [J]. *Earth Science*, 2023, 48(9):3389-3401.
- [7] 黄锋,吕立群,马超,等.古沉积盆地泥石流发育与河流下切之间的响应关系[J/OL].地球科学,1-19 [2025-12-05]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20231226.1122.031>.
HUANG F, LYU L Q, MA C, et al. The response of debris flow development along incised river in ancient sedimentary basin [J/OL]. *Earth Science*, 1-19 [2025-12-05]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20231226.1122.031>.
- [8] JIANG Z N, WANG J, ZHOU L Q, et al. Formation-evolutionary mechanism of large debris flow in semi-arid region, the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Landslides*, 2024, 21(7):1515-1530.
- [9] 王敏,王严琪,孙树峻,等.四川省康定市泥石流灾害与降水预报阈值确定[J].高原山地气象研究,2021,41(4):125-130.
WANG M, WANG Y Q, SUN S J, et al. Debris flow disasters and precipitation forecast threshold determination in Kangding City [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2021, 41(4):125-130.
- [10] 倪化勇,宋志,徐伟.沟床侵蚀主导型泥石流形成机理与成灾特征:以石棉县2013-07-04群发泥石流为例[J].自然灾害学报,2015,24(2):97-106.
NI H Y, SONG Z, XU W. Formation mechanism and disaster characteristics of debris flows originated predominately from gully erosion: Taking the 2013-07-04 clustered debris flows in Shimian County as an example [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(2):97-106.
- [11] SIMAN-TOV S, MARRA F. Antecedent rainfall as a critical factor for the triggering of debris flows in arid regions [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2023, 23(3):1079-1093.
- [12] LI J R, RAJ ADHIKARI B, DING X L, et al. Frequent dry-wet cycles promote debris flow occurrence: Insights from 40 years of data in subtropical monsoon region of Sichuan, China [J]. *Catena*, 2024, 238: e107888.
- [13] ZHANG S J, LEI X H, YANG H J, et al. Investigation of the functional relationship between antecedent rainfall and the probability of debris flow occurrence in Jiangjia gully, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2024, 28(11):2343-2355.
- [14] WEI Z L, FAN X M, YANG J, et al. Evaluating the thresholds for predicting post-earthquake debris flows: Comparison of meteorological, hydro-meteorological and critical discharge approaches [J]. *Engineering Geology*, 2024, 343: e107773.
- [15] 庄建琦,崔鹏,葛永刚,等.降雨特征与泥石流总量的关系分析[J].北京林业大学学报,2009,31(4):77-83.
ZHUANG J Q, CUI P, GE Y G, et al. Relationship between rainfall characteristics and total amount of debris flow [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(4):77-83.
- [16] 陈文鸿,余斌,叶鹏,等.福建区域浅层滑坡诱发沟谷型泥石流灾害预测[J].自然灾害学报,2024,33(5):12-22.
CHEN W H, YU B, YE P, et al. Regional prediction of gully-type debris flow caused by shallow landslides in

- Fujian [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2024, 33(5): 12-22.
- [17] 唐亚明. 陕北黄土滑坡风险评价及监测预警技术方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- TANG Y M. Methods on risk assessment and monitor and early-warning for the loess landslide in north of Shaanxi[D]. China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [18] 梁馨月, 徐梦珍, 吕立群, 等. 基于地貌特征的青藏高原边缘泥石流流沟分类[J]. *地理学报*, 2020, 75(7): 1373-1385.
- LIANG X Y, XU M Z, LYU L Q, et al. Geomorphological characteristics of debris flow gullies on the edge of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(7): 1373-1385.
- [19] 卢盛栋, 李强, 李芬, 等. 大气降水诱发黄土高原滑坡灾害阈值及灾损研究[J]. *灾害学*, 2023, 38(3): 53-59.
- LU S D, LI Q, LI F, et al. Study on threshold and damage of landslide disaster induced by atmospheric precipitation in Loess Plateau [J]. *Journal of Catastrophology*, 2023, 38(3): 53-59.
- [20] 戴福初, 邓建辉. 青藏高原东南三江流域滑坡灾害发育特征[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(5): 3-15.
- DAI F C, DENG J H. Development characteristics of landslide hazards in three-rivers basin of southeast Tibetan Plateau [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(5): 3-15.
- [21] LIN Q G, STEGER S, PITTORE M, et al. Evaluation of potential changes in landslide susceptibility and landslide occurrence frequency in China under climate change [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 850: e158049.
- [22] XU X M, CUI P, ZHANG X Q. Critical environmental factors affecting mountain geohazards in a warming climate in southwest China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2024, 15(4): 695-707.
- [23] 袁道阳, 张培震, 刘百箴, 等. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. *地质学报*, 2004, 78(2): 270-278.
- YUAN D Y, ZHANG P Z, LIU B C, et al. Geometrical imagery and tectonic transformation of late quaternary active tectonics in northeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(2): 270-278.
- [24] WANG S, SHENG Y, RAN Y H, et al. Predict seasonal maximum freezing depth changes using machine learning in China over the last 50 years [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(15): e3834.
- [25] 林巍, 李远耀, 徐勇, 等. 湖南慈利县滑坡灾害的临界降雨量阈值研究[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(2): 48-54.
- LIN W, LI Y Y, XU Y, et al. Rainfall thresholds of rainfall-triggered landslides in Cili County, Hunan Province [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2020, 37(2): 48-54.
- [26] 邱恩喜, 潘宏宇, 何巧玲, 等. 冻融条件下冰碛土力学特性试验及模型研究[J]. *工程地质学报*, 2024, 32(3): 772-784.
- QIU E X, PAN H Y, HE Q L, et al. Tests on the mechanical properties of moraine soils under freeze-thaw conditions and the modified Duncan-Zhang model [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(3): 772-784.
- [27] 杜华明, 贺胜英. 岷江流域降水特征与旱涝灾害趋势分析[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 153-157.
- DU H M, HE S Y. The analysis on characteristics of precipitation and trends in drought and flood disasters in Minjiang River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(1): 153-157.
- [28] GUAN X D, SUN W, KONG X N, et al. Response of fatal landslides to precipitation over the Chinese Loess Plateau under global warming [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: e1146724.
- [29] 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.
- GAO Y, HE K, LI Z, et al. An analysis of disaster types and dynamics of landslides in the southwest karst mountain areas [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2020, 47(4): 14-23.