

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.026

汪珍亮, 陈曼玉, 赵建林, 等. 基于 InSAR 的黄土高原延河流域滑坡降雨阈值模型构建[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 142-151.

WANG Zhenliang, CHEN Manyu, ZHAO Jianlin, et al. Model construction of InSAR-based rainfall thresholds for landslide hazards in Yanhe Basin, Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 142-151.

基于 InSAR 的黄土高原延河流域滑坡降雨阈值模型构建

汪珍亮, 陈曼玉, 赵建林, 袁可, 杨节, 张晨

(长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054)

摘要: [目的] 经验性降雨阈值存在地域局限性, 在黄土高原开展滑坡灾害降雨阈值模型研究具有重要意义。[方法] 以黄土高原延河流域为研究区, 综合 Sentinel-1A、DEM、GPM 降雨等多源数据, 首先基于时序 InSAR 对延河流域进行滑坡识别; 然后计算降雨因子与滑坡形变量间的相关性, 确定前期降雨天数和前期有效降雨衰减系数; 最后计算前期有效降雨量(E)、降雨强度(I)和降雨历时(D), 并结合幂函数建立 E - D 、 I - D 和 E - I 降雨阈值模型。[结果] (1) 共识别出 2017—2021 年 107 个滑坡, 包括滑坡的具体位置和加速变形时间; (2) 随着前期降雨天数的增加, 累积降雨量与滑坡形变量的相关性呈先升后降的趋势; 当前期有效降雨衰减系数 $K=1$ 时, 9 天有效累积降雨量(滑坡发生当日及前 8 日降雨量)与滑坡形变量的相关性最强; (3) E - D 、 I - D 和 E - I 降雨阈值模型对应的表达式分别为 $E=12.19D^{0.661}$, $I=10.66D^{-0.255}$ 和 $E=3.84I^{1.141}$ 。[结论] E - D 、 I - D 和 E - I 降雨阈值模型将为黄土高原延河流域滑坡灾害的气象预警提供科学依据和借鉴。

关键词: 延河流域; 滑坡; InSAR; Stacking; 降雨阈值

中图分类号: P237 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242-(2024)06-0142-10

Model Construction of InSAR-based Rainfall Thresholds for Landslide Hazards in Yanhe Basin, Chinese Loess Plateau

WANG Zhenliang, CHEN Manyu, ZHAO Jianlin, YUAN Ke, YANG Jie, ZHANG Chen

(College of Geological Engineering and Surveying and Mapping, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: [Objective] Empirical rainfall thresholds have geographical limitations, it is of great significance to carry out a rainfall threshold modeling study for landslide hazard on the Chinese Loess Plateau. [Methods] Taking the Yanhe River Basin on the Loess Plateau as the research area, the landslide identification of the Yanhe River Basin based on InSAR was carried out by integrating Sentinel-1A, DEM, GPM rainfall and other multi-source data. Then the correlations between rainfall factors and landslide shape variables were calculated to determine the rainfall days and effective rainfall attenuation coefficient in the early period. Finally, the effective rainfall (E), rainfall intensity (I) and rainfall duration (D) were calculated, and the E - D , I - D and E - I rainfall threshold models were established by combining the power function. [Results] (1) A total of 107 landslides from 2017 to 2021 were identified, including the specific location and accelerated deformation time of landslides. (2) With the increase of rainfall days in the early period, the correlations between cumulative rainfall and landslide shape variables showed a trend of first increasing and then decreasing. When the attenuation coefficient of effective rainfall in the current period (K) was equal to 1, the correlation between the effective cumulative rainfall in nine days (the rainfall on the day of landslide occurrence and the rainfall in the previous eight days) and the landslide shape variable was the strongest. (3) The expressions corresponding to the E - D , I - D and E - I rainfall threshold models are $E=12.19D^{0.661}$, $I=10.66D^{-0.255}$ and $E=3.84I^{1.141}$, respectively. [Conclusion] The rainfall threshold model can provide a scientific basis and reference for meteorological early warning of landslide hazards in the Yanhe Basin of the Chinese Loess Plateau.

收稿日期: 2024-07-02

修回日期: 2024-08-13

录用日期: 2024-08-19

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-09

资助项目: 陕西林业科技创新重点专项 (SXLK2023-02-15); 国家自然科学基金项目 (41907048); 中央高校基本科研费专项 (300102260206)

第一作者: 汪珍亮 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事 InSAR 滑坡识别与风险评估研究。E-mail: 2021226057@chd.edu.cn

通信作者: 赵建林 (1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与区域生态评价研究。E-mail: jianlin.zhao@chd.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

Keywords: Yanhe River Basin; landslides; InSAR; Stacking; rainfall thresholds

Received: 2024-07-02

Revised: 2024-08-13

Accepted: 2024-08-19

Online(www.cnki.net): 2024-12-09

滑坡是我国山地丘陵区主要的地质灾害类型之一,具有突发性强、分布广泛的特点^[1]。滑坡每年发生频率较高,危害程度位居地质灾害第 2 位,仅次于地震。有效预测滑坡的发生是降低其危害的重要途径之一,方法包括滑坡的实时动态监测和滑坡风险预测^[2]。由于大尺度范围滑坡实时监测的费用昂贵,因此基于滑坡诱发因子的区域滑坡风险预测是大尺度范围滑坡预警的主要手段。滑坡灾害的诱发因子较多,包括地质条件、气候、人类活动等,其中降雨是诱发滑坡发生的主要因素之一,相关统计资料^[3-5]显示,由降雨直接或间接诱发的滑坡占据全世界滑坡的 90% 左右。基于降雨事件与滑坡灾害间的关联性,通过区域降雨特征开展大范围滑坡灾害的预测预报,是有效预防降雨型滑坡灾害的重要手段^[6-7]。

降雨型滑坡预测主要基于降雨与滑坡之间的关系开展,当前主要的研究方法有 2 种:基于物理模型法^[8-9]和统计分析法^[10]。由于物理模型法需要输入详细的水文地质参数且计算量大,一般只适用于单个边坡的滑坡预测,区域降雨型滑坡预测多采用后者^[11-12]。国外研究者较早地关注到降雨型滑坡经验性降雨阈值问题,CAMPBELL^[13]首次通过建立滑坡事件与累积降雨量之间的关系来建立降雨阈值模型;随后 CANIE^[14]利用峰值降雨强度和历时建立降雨强度-降雨历时($I-D$)阈值模型;CROZIER^[15]考虑到随着降雨时间的前移,前期降雨对滑坡的影响逐渐减弱,对此提出用于计算滑坡事件的前期有效降雨模型。国内研究者^[16-17]对该研究起步较晚,但开展了大量区域滑坡降雨阈值的研究。前人^[17]通过经验性统计方法建立了不同区域的多种滑坡降雨阈值模型,具体可分为 4 类:降雨强度-历时($I-D$)曲线、累积降雨量-历时($E-D$)曲线、累积降雨量-降雨强度($E-I$)曲线和基于降雨诱发滑坡的总降雨量阈值。

虽然前人针对滑坡降雨阈值模型开展了大量工作,在模型构建方面还存在不足。一方面,滑坡降雨阈值模型依赖于历史滑坡信息(包括滑坡发生的时间和位置),大多数研究通过收集资料、新闻报道和实地勘察等途径获取历史滑坡信息,该方法需耗费大量的人力、物力和财力,效率极低;另一方面,对于前期有效降雨模型的参数,大多数研究者在分析中直接采用前人的经验取值,缺乏具体地区具体分析,导致降雨型滑坡预测不准确。因此,如何高效和准确地获取滑坡发生的时间和位置是制约区域滑坡降雨阈值模型

构建的关键技术。当前,时序 InSAR 技术凭借全天时、全天候、高分辨率以及穿透性强等优点,在滑坡的早期识别、监测和预警方面得到广泛应用^[18]。基于时序 InSAR 技术可准确地动态监测大尺度区域滑坡发生的时间和位置,极大地降低滑坡监测成本,因此,结合时序 InSAR 技术监测区域滑坡发生事件可为区域降雨型滑坡预测提供重要的技术支撑。

黄土高原地区滑坡频发,其中降雨诱发的滑坡数量较多。当前在黄土高原地区开展的降雨与滑坡风险关系研究大部分是基于物理模型法对单个滑坡进行预测,缺乏对区域性滑坡降雨阈值开展研究^[19-20];另一方面,黄土高原地区雨量计分布密度低且滑坡数据难以获取,滑坡和降雨数据的缺失导致无法建立有效的降雨阈值模型,限制了黄土高原地区滑坡风险预测^[21]。因此,在数据稀缺的黄土高原地区开展区域性滑坡降雨阈值研究具有重要意义。

综上,本文采用 Sentinel-1A 影像、DEM 和 GPM 降雨数据,首先采用时序 InSAR 技术,获取 2017—2021 年研究区内滑坡的信息,包括滑坡发生的具体位置和时间;然后计算降雨因子与滑坡形变量间的相关性,确定前期降雨天数和前期有效降雨衰减系数;最后计算前期有效降雨量 E 、降雨强度 I 和降雨历时 D ,并结合幂函数建立 $E-D$ 、 $I-D$ 和 $E-I$ 降雨阈值模型。研究结果将为黄土高原延河流域滑坡灾害的气象预警提供科学依据和借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

延河流域(108°39′30″—110°28′46″E, 36°20′39″—37°19′18″N)位于我国西北内陆半湿润向半干旱过渡地区,属于我国黄土丘陵沟壑区第二副区,流域面积 7 725 km²(图 1)。延河是黄河一级支流,全长 286.9 km。延河流域地势西北高东南低,多年平均气温为 9.2 °C,降水量为 500 mm,土壤类型主要为黄绵土,流域水土流失严重,河流含沙量大,多年平均输沙量为 7.16×10⁷ t,其黄土结构疏松,厚度约为几十米至上百米,最厚处达 150 m 左右。延河流域地形错综复杂,地势起伏较大,河流和沟壑分布密集,岩石和土壤受到强烈的侵蚀作用,长期受到季节性热浪和降雨的影响,导致该区域滑坡、崩塌、不稳定斜坡等重力地质灾害频发。

1.2 数据来源

本文主要采用的数据包括哨兵一号(Sentinel-1A)影像、DEM 和降雨数据。其中 Sentinel-1A 数据基于

时序 InSAR 计算延河流域的地表形变速率和地表形变时间序列;DEM 数据用于模拟地形相位和生成坡度等地形因子;降雨数据用于分析降雨与滑坡形变的关系来计算降雨阈值模型。

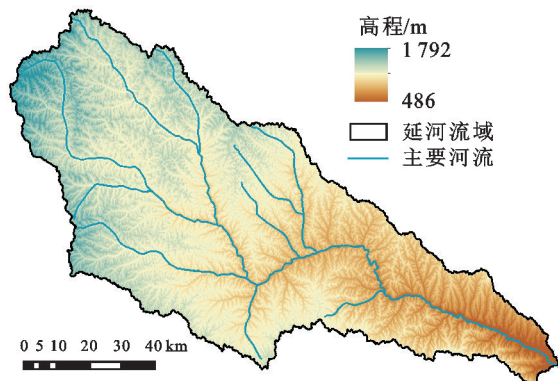


图 1 黄土高原延河流域地理位置

Fig.1 Geographical location of the Yanhe River Basin on the Chinese Loess Plateau

(1)SAR 数据。Sentinel-1 是由欧洲空间局(European Space Agency, ESA)发射运营的两颗对地观测卫星组成,工作波段为 C 波段,波长约为 5.6 cm,每颗卫星重访周期为 12 天,渐进式扫描地形观测(terrain observation by progressive scans, TOPS)模式下单景覆盖范围达到 250 km×170 km,可提供全天时、全天候的高分辨率雷达卫星数据^[22]。由于覆盖本研究区最早的一景 Sentinel-1A 影像时间为 2017 年 3 月 12 日,因此,本研究选用时间覆盖范围为 2017 年 3 月 12 日至 2021 年 12 月 4 日的 Sentinel-1A 升轨影像数据,共 115 景。由于原始 Sentinel-1A 影像覆盖范围较大,为提高数据处理效率,裁剪出与研究区相关的区域进行处理。其中在 InSAR 数据处理中,为减小基线误差,本文还使用 Sentinel-1A 影像对应的 POD 精密轨道卫星星历(Precise Orbit Ephemerides, POD)数据,数据详细参数见网址 https://slqc.asf.alaska.edu/aux_poeorb/。

(2)DEM 数据。本文采用美国航空航天局(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合发布的 30 m 分辨率 SRTM DEM 数据,数据下载网址为 <https://earthexplorer.usgs.gov/>。

(3)降雨数据。本文采用延河流域 2017—2021 年的 GPM 降雨数据。全球卫星降水计划(GPM)是由 NASA 和 JAXA 合作开展的国际卫星任务,利用多传感器多卫星多算法结合卫星网络和雨量计反演更高精度的降水数据,时间分辨率为 1 天。

2 研究方法

2.1 InSAR 堆叠技术的滑坡识别

干涉图堆叠技术(Stacking)最初由 SANDWELL

等^[23]于 1998 年提出,其基本思想是:假设地表形变为线性形变,而大气延迟在时间域上为随机信号,当对 N 幅干涉图进行相位平均时,线性的地表形变信号增强 N 倍,而随机分布的大气延迟只增加 \sqrt{N} 倍,从而提高形变信号的信噪比^[24]。其数学模型为:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i^2} \quad (1)$$

式中: V 为年均形变速率(mm/a); Δt_i 为第 i 幅干涉图的时间基线; N 为参与加权平均计算的干涉图数量; φ_i 为第 i 个干涉图的解缠相位图。

基于 InSAR 的滑坡识别主要分为地理编码、形变速率计算和滑坡识别 3 部分,总体流程见图 2。

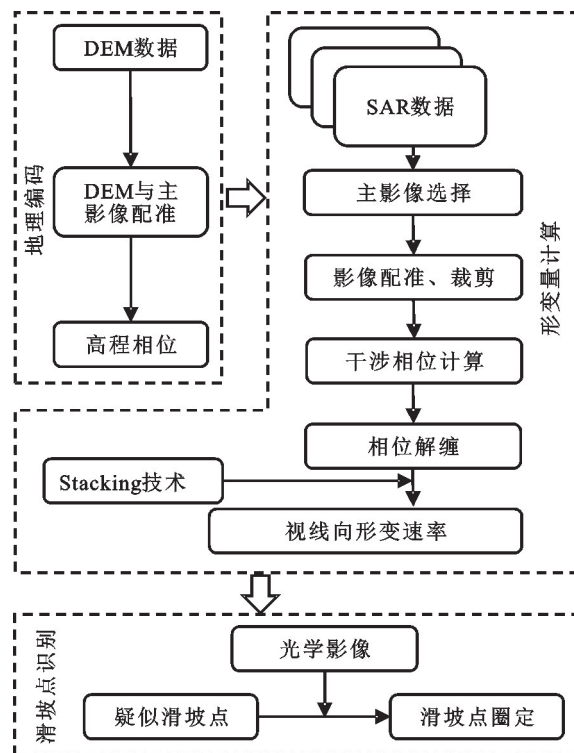


图 2 基于 Stacking 的滑坡识别流程

Fig.2 Flowchart of landslide identification based on Stacking 具体流程为:

(1)选取主影像,将外部 DEM 与主影像配准,获取高程相位。

(2)首先将主影像与副影像配准,为了抑制噪声影响,提高干涉图的相干性,在距离向和方位向采用 10×2 的多视比;其次设置空间基线 75 m、时间基线 85 天组成干涉对,基于流程(1)获取的高程相位,对所有干涉对进行差分干涉、滤波、相位解缠及大气改正处理;最后对 447 个干涉对进行筛选,筛选出相干性较好、解缠误差较少的 305 个高质量解缠图进行 Stacking 解算,获取沿雷达视线(LOS)向的形变速率。

(3)首先结合研究区地形和地质灾害的活动特

性,选择人工建筑物作为稳定区,并计算标准差和最大形变速率,最终选定形变速率阈值为 10 mm/a、斜坡坡度阈值为 5°进行滑坡的初步识别;其次将初步识别结果导入谷歌地球中,与多时相光学遥感影像进行叠加,分析疑似滑坡对应的地形地貌特征进行滑坡最终识别,包括滑坡位置、范围等。

2.2 滑坡加速变形时间的确定

在重力作用下,滑坡体通常具有 3 阶段演化特征:初始变形阶段、等速变形阶段和加速变形阶段。当滑坡变形发展到一定阶段后,变形速率呈现出不断加速增长的趋势,直至坡体整体失稳(滑坡)之前,变形曲线近于陡立,这一阶段被称为加速变形阶段。为了确定滑坡加速变形的时间,对 SAR 数据采用小基线集(small baseline subset, SBAS)InSAR^[25] 技术进行处理。其基本原理为:使用时空基线较短的影像对任意组成小基线集,并使用最小二乘法求解集合内地表形变,最后使用奇异值分解法将多个独立的小集合联合求解,以获取地表形变时间序列。

地表形变时间序列中,时间节点对应每一景影像获取时间,由于相邻 2 景影像的获取时间间隔存在差异,因此本文计算了相邻 2 景影像间滑坡点的单位时间内形变量。其单位形变量最大值可设定为滑坡加速变形时刻,该值对应影像的开始时间即为滑坡加速变形时间,具体见图 3。

比较曲线 AB、BC 和 CD,BC 单位时间形变量最大,故点 B 对应的时间即为滑坡加速变形时间。由于数据局限性,本文将滑坡加速变形时间近似估计为滑坡发生时间用于后续构建滑坡降雨阈值模型。

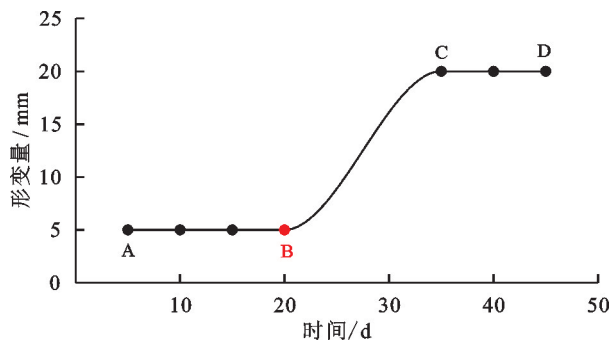


图 3 确定滑坡加速变形时间的方法

Fig. 3 Method for determining the acceleration deformation time of landslides

2.3 有效降雨量模型

降雨对诱发滑坡的影响存在一定的滞后性,随着降雨时间的前移,前期降雨的影响逐渐减弱。本文采用 CROZIER^[15] 有效降雨量模型分析滑坡与前置降雨量的关系,其计算公式为:

$$P_a = R_0 + KR_1 + K^2R_2 + K^3R_3 + \dots + K^nR_n \quad (2)$$

式中: P_a 为有效降雨量(mm); K 为降雨衰减系数; R_0 为滑坡发生当日降雨量(mm); R_1 为滑坡发生前 1 日降雨量(mm),依次类推, n 为滑坡发生前的天数。

本模型中有 2 个关键因子,即前期有效降雨天数(n)和有效降雨衰减系数(K)^[26]。本文引入累积降雨量的概念,累积降雨量指滑坡发生当日及前一段时间内的降雨总量,其中将滑坡发生当日的降雨量记为 R_0 ,滑坡发生当日及前 n 天内的降雨总量记为 R_{0n} 。采用皮尔逊相关系数(r)计算累积降雨量与滑坡形变量间的相关性,确定前期有效降雨天数 n ^[27-28]。其中,相关系数最大的累积降雨量对应的前期降雨天数设定为前期有效降雨天数(n)。皮尔逊相关系数(r)计算公式为:

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (3)$$

式中: n 为数据的个数; x 和 y 为第 i 个数据对应的数值。

对于前期有效降雨衰减系数 K ,本文分别设置不同的前期有效降雨衰减系数 K 值(从 1~0.5 依次减小),根据前期有效降雨天数(n),计算出 n 天有效累积降雨量,然后分别计算不同衰减系数下,滑坡形变量与 n 天有效累积降雨量的相关系数(r),最终确定合理的前期有效降雨衰减系数。

2.4 经验性降雨关系阈值模型

本文主要通过前期有效降雨量(E)、降雨强度(I)和降雨历时(D),建立现阶段主流的 3 种经验性降雨关系阈值模型 $E-D$ 、 $I-D$ 和 $E-I$,具体公式见表 1。其中,前期有效降雨量(E)根据公式(2)确定;降雨历时(D)基于李长江等^[29]模型,即将降雨事件定义为从日降雨量 ≥ 2 mm 作为降雨事件的开始时间,直到连续 2 天日降雨量 < 2 mm 结束的时间段确定为降雨历时(D)(图 4);降雨强度(I),短历时取峰值为降雨强度,长历时取平均值为降雨强度。

表 1 经验性降雨关系阈值及表达式

Table 1 Empirical rainfall relationship thresholds and their expressions

降雨关系阈值	表达式
前期有效降雨量-降雨历时($E-D$)	$E = C + \alpha \times D^\beta$
前期有效降雨量-降雨强度($E-I$)	$E = C + \alpha \times I^\beta$
降雨强度-降雨历时($I-D$)	$I = C + \alpha \times D^\beta$

注: I 为诱发滑坡降雨事件的降雨强度(mm/d),短历时取峰值降雨强度,长历时取平均值; D 为诱发滑坡的降雨事件历时(d); E 为前期有效降雨量(mm); α 、 β 均为统计参数; $C \geq 0$ 。

3 结果与分析

3.1 滑坡识别结果

基于 Stacking 方法的延河流域 2017—2021 年

形变速率反演结果见图 5。结果表明,研究区总体形变速率分布不均,总体形变速率为 $-55\sim 44\text{ mm/a}$ 。总体年均形变速率直方图(图 6)呈正态分布,且分布较集中,平均值为 -3.7 mm/a ,标准差为 6.7 mm/a ,数据离散程度较小,表明计算结果可靠。

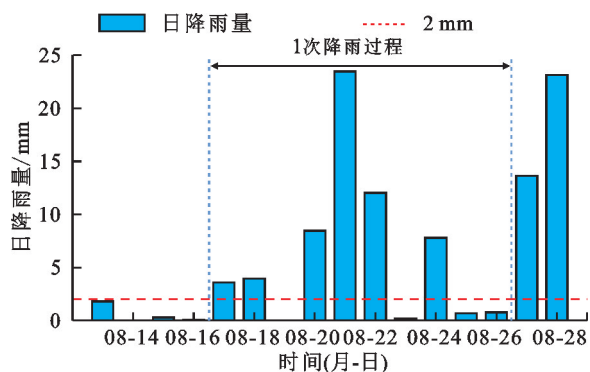


图 4 降雨事件划分

Fig.4 Schematic diagram of rainfall event division

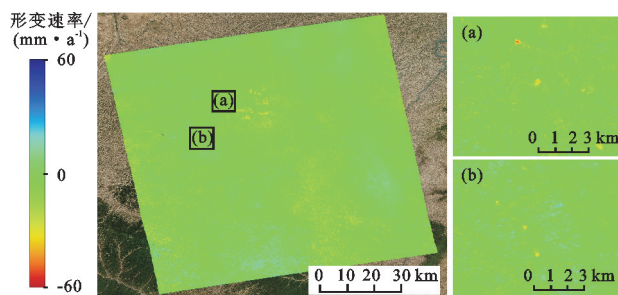


图 5 2017—2021 年延河流域年均形变速率

Fig.5 Annual average deformation rate of the Yanhe River Basin from 2017 to 2021

本文共识别出研究区滑坡 107 处,其空间分布见图 7。结果表明,总体上滑坡主要集中于研究区水系附近,在延河流域下游分布的滑坡点较多,且上游分布较疏散,下游较集中。部分典型滑坡 a~h 的光学影像见图 7。

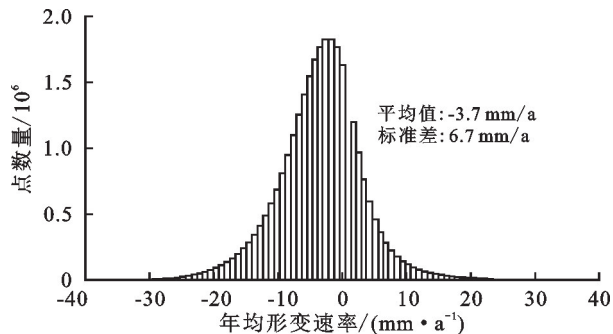


图 6 年均形变速率直方图

Fig.6 Histogram of the annual average deformation rate

3.2 滑坡形变特征

为确定滑坡加速变形时间,以滑坡点 a 为例,计算滑坡点 a 的形变时间序列(本文将累积形变量取绝对值进行分析)。由图 8 可知,在 2017 年 3 月 12 日至 2021 年 12 月 4 日的时间内,滑坡 a 的累积形变量

达到 154 mm,总体处于蠕滑阶段,但存在一定的加速点,明显的加速点为图中的 A、B、C 和 D,对应的时间为 2018 年 4 月 12 日、2018 年 7 月 29 日、2020 年 7 月 18 日和 2021 年 8 月 6 日,共 4 个加速阶段,其中第 4 个阶段加速程度最大,即在 2021 年 8 月 6 日至 2021 年 8 月 30 日间,滑坡形变量达到 36 mm,日均形变量为 1.5 mm,因此确定滑坡 a 的加速变形时间为 2021 年 8 月 6 日。由于数据局限性,本文将滑坡加速变形时间近似估计为滑坡发生时间。

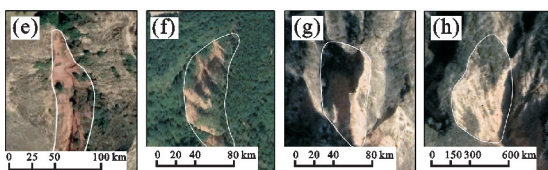
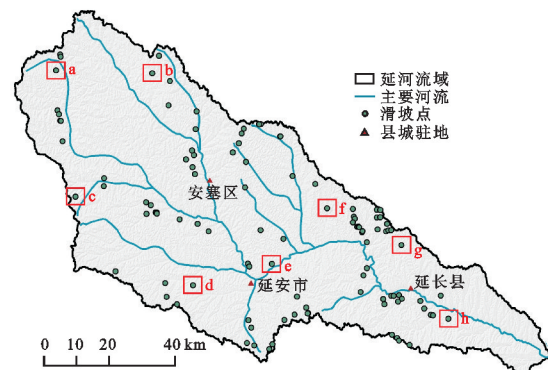
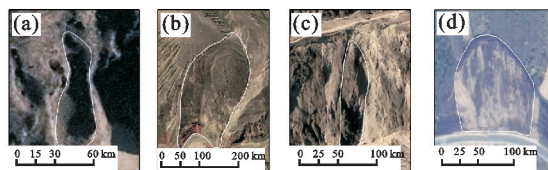


图 7 延河流域滑坡点 InSAR 识别结果分布

Fig.7 Distribution of InSAR identification results for landslide points in the Yanhe River Basin

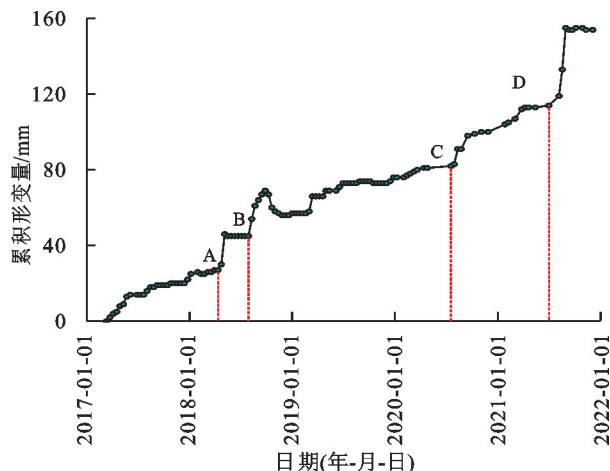


图 8 滑坡 a 形变时间序列

Fig.8 Time series of deformation of landslide a

按此方法,最终确定研究区 107 个滑坡的发生时间。结果表明,某一区域同一天发生的滑坡个数达到多个,如在 2020 年 4 月 25 日的降雨条件下,滑坡发

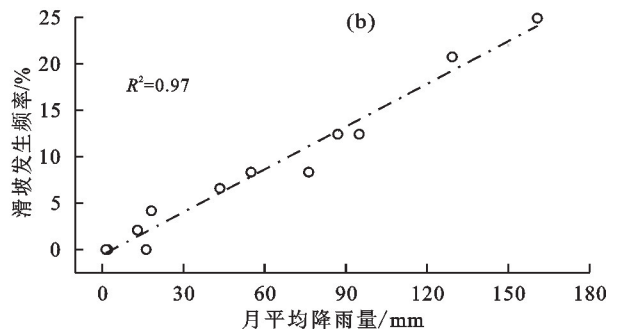
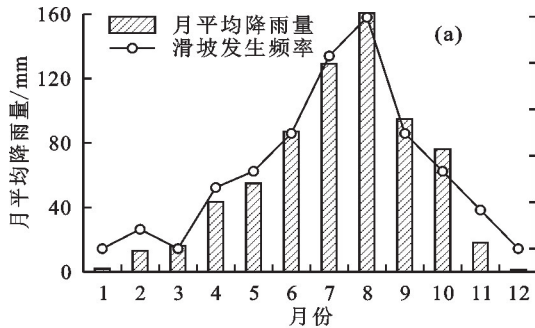
生的个数为 15 个。由于在相同的降雨条件下诱发的滑坡只计为 1 个滑坡事件参与计算,因此,最终统计分析得出 48 个不重复的滑坡事件。

3.3 滑坡与降雨的关系

3.3.1 月平均降雨量与滑坡发生频率的关系 由图 9 可知,滑坡发生频率与降雨量的大小密切相关,即月平均降雨量越大,滑坡发生的可能性也越高,但仍存在一定的不确定性。延河流域全年降雨主要集中在 6—9 月,月平均降雨量超过 85 mm,6—9 月的滑坡发生频率高达 70%。滑坡灾害与降雨呈正相关, R^2 高达

0.97。因此,降雨是滑坡发生的重要诱因。

3.3.2 滑坡累积形变量与累积降雨量的关系 为研究滑坡累积形变量与累积降雨量之间的关系,计算滑坡 a 和 b 累积形变量与累积降雨量之间的关系(本文将累积形变量取绝对值进行分析)。由图 10 可知,滑坡 a 和 b 累积形变量与累积降雨量呈正相关, R^2 分别为 0.95 和 0.89,说明累积降雨是引发滑坡发生形变的重要诱因;且在某一段时间内,随着降雨量的增加,滑坡累积形变量不变,说明累积降雨诱发滑坡形变存在一定的滞后性。



注:图 a 为月平均降雨量与滑坡发生频率分布;图 b 为月平均降雨量与滑坡发生频率相关性。

图 9 月平均降雨量与滑坡发生频率的关系

Fig.9 The relationship between the average monthly rainfall and the frequency of landslides

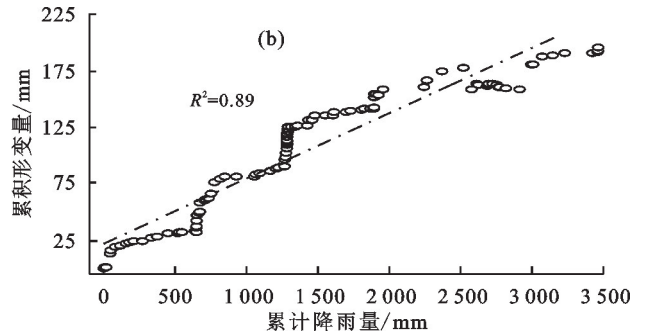
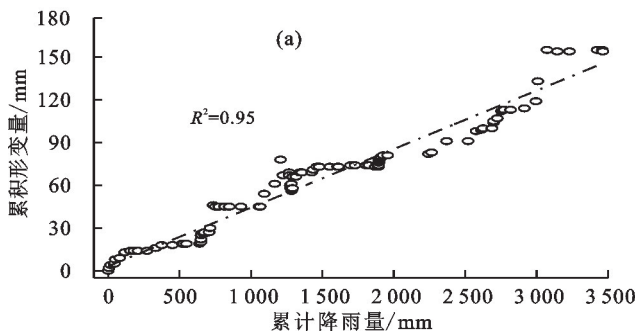


图 10 滑坡 a 和 b 累积形变量与累积降雨量的关系

Fig.10 The relationship between cumulative deformation and cumulative rainfall of landslides a and b

3.3.3 当日降雨量与前期累积降雨量的关系 本文分析滑坡发生当日降雨量与前 10 日累积降雨量之间的关系。由图 11 可知,将 48 个滑坡事件划分为 3 个区域,A 区域滑坡主要由前期降雨诱发;B 区域滑坡主要由当日降雨诱发;C 区域滑坡则是由前期降雨和当日降雨共同诱发。前期累积降雨量为 0.16 ~ 125.57 mm,且 94% 的滑坡当日降雨量 < 20 mm。虽然少数滑坡由当日强降雨造成,但大多数滑坡发生在当日降雨量较小且降雨后的几天内。因此,前期有效降雨量在延河流域降雨型滑坡中占据主导地位。

积 9 天($n=8$)时达到最大值 0.68。因此,选用累积 9 天降雨量(即滑坡发生当日及前 8 天内的降雨总量)来建立有效降雨量模型更合理,即 n 取值为 8。

3.4 前期降雨天数和有效降雨衰减系数的确定

3.4.1 前期有效降雨天数 n 的确定 将 n 取值为 0, 1, 2, ..., 10, 计算不同 n 取值下的累积降雨量与滑坡形变量间的相关性。由图 12 可知,滑坡形变量与累积降雨量的相关性总体表现出先升后降的趋势,在累

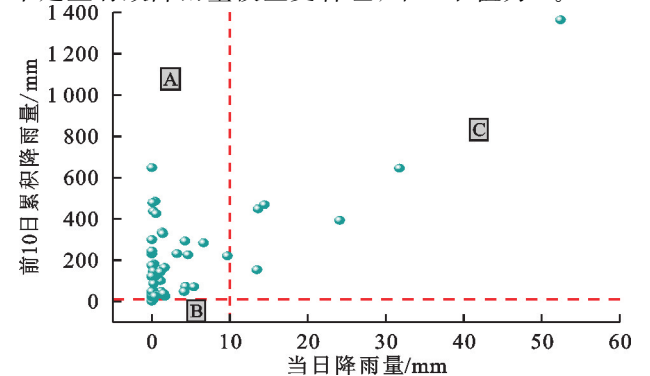
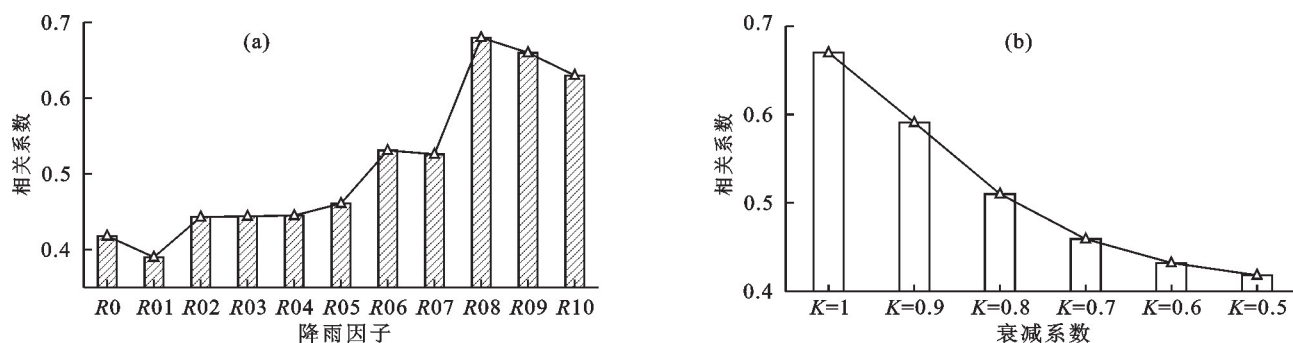


图 11 滑坡发生当日降雨量与前 10 日累积降雨量的关系
Fig.11 The relationship between rainfall on the day of landslide occurrence and cumulative rainfall in the previous 10 days



注:图 a 为不同 n 取值下累积降雨量与滑坡形变量的相关性;图 b 为不同衰减系数下累积 9 天降雨量与滑坡形变量的相关性。

图 12 累积降雨量与滑坡形变量的相关性

Fig.12 Correlation between cumulative rainfall and landslide deformation

3.4.2 有效降雨衰减系数 K 的确定 本文分别设定不同的前期有效降雨衰减系数(0.5~1.0),依据前期有效降雨天数 n ,得出 9 天有效累积降雨量,并进一步计算在不同衰减系数情况下 9 天有效累积降雨量与滑坡形变量相关系数 r ,确定前期有效降雨衰减系数 K 。

由图 12 可知,当前期有效降雨衰减系数 $K=1$ 时,累积 9 天降雨量与滑坡形变量的相关性最高,达到 0.67。因此,本研究前期有效降雨衰减系数 K 设置为 1 更合理,即 K 取值为 1。

3.5 经验性降雨阈值模型结果

滑坡前期有效降雨量(E)和降雨历时(D)的关系见图 13a,其临界阈值模型表达式为: $E=12.19D^{0.661}$ 。结

果表明,诱发滑坡所需要的前期有效降雨量随降雨历时的增大而增大,2 个降雨因子呈正相关,有 38% 的滑坡落在临界阈值曲线上方。

滑坡的降雨强度(I)和降雨历时(D)的关系见图 13b,其临界阈值模型表达式为: $I=10.66D^{-0.255}$ 。结果表明,诱发滑坡所需要的降雨强度随降雨历时的增大而减小,2 个降雨因子呈负相关,有 38% 的滑坡落在临界阈值曲线上方。

滑坡的前期有效降雨量(E)和降雨强度(I)的关系见图 13c,其临界阈值模型表达式为: $E=3.84I^{1.141}$ 。结果表明,诱发滑坡所需要的前期有效降雨量随降雨强度的增大而增大,2 个降雨因子呈正相关,有 40% 的滑坡落在临界阈值曲线上方。

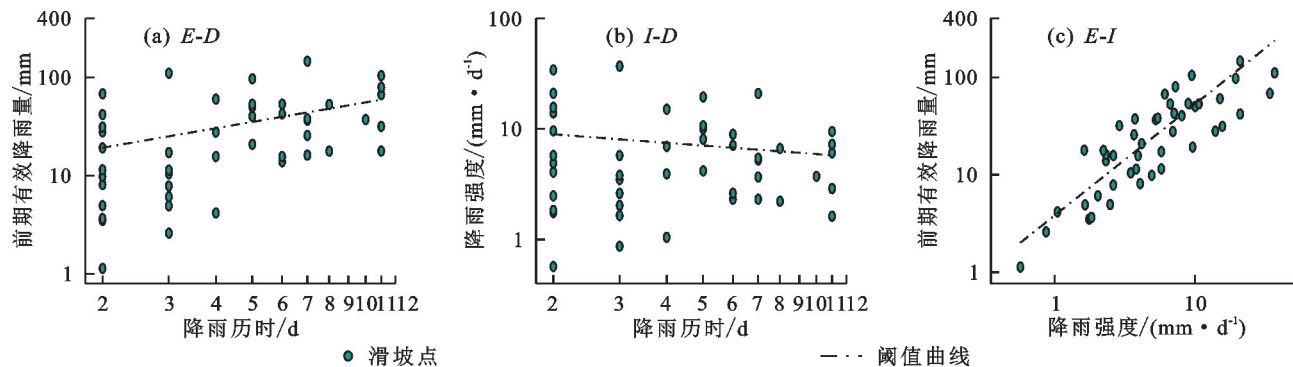


图 13 滑坡降雨阈值临界曲线

Fig.13 Critical curve of landslide rainfall threshold

4 讨论

本文采用时序 InSAR 技术识别黄土高原延河流域 2017—2021 年的滑坡事件,在此基础上首次建立延河流域滑坡降雨阈值模型。由于该区域缺乏相关的研究,为了验证降雨阈值模型的准确性,本文通过新闻报道、调查报告和野外调查等途径搜集到研究区内 12 个历史滑坡的发生时间和位置信息对建立的模型进行验证。将上述历史滑坡点分别与 $E-D$ 、 $I-D$ 和 $E-I$ 模型叠加分析,结果表明,25% 的滑坡落在 $E-D$ 降雨阈值临界曲线上方(图 14a),33% 的滑坡落在

$I-D$ 降雨阈值临界曲线上方(图 14b),42% 的滑坡落在 $E-I$ 降雨阈值临界曲线上方(图 14c),验证结果与 $E-D$ 、 $I-D$ 和 $E-I$ 模型结果均基本保持一致,证明该滑坡降雨阈值模型可靠性较高。因此,本文建立的基于时序 InSAR 技术的滑坡阈值模型技术框架具有一定的可靠性,可用于其他区域相关模型的建立。

通过上文的分析,建立了延河流域 3 种经验性降雨阈值模型,但也存在不足。一方面,本文基于 InSAR 识别出 2017—2021 年的 107 个滑坡,由于同一时间发生的滑坡只算 1 次滑坡事件,最终仅计算出 48 个滑坡

事件,且研究区仅有 1 个气象站点,站点分布不均匀且数量少,不能准确反映整个研究区的降雨情况。因此,缺乏足够的滑坡和降雨数据,导致目前对降雨阈值的研究与国外相比还有较大差距,最终结果的精度分布不均匀,所给阈值可能不能完全反映出整个研究区降雨阈值特征。建议加强这方面的数据采集工作,例如,通过扩大时间跨度来识别出更多的滑坡数据或使用不同的降雨数据等;另一方面,降雨

事件的定义范围各不相同。本文在李长江等^[29]研究基础上,将降雨事件定义为从日降雨量 ≥ 2 mm 作为降雨事件的开始时间,直到连续 2 天日降雨量 < 2 mm 结束,从而确定 1 次降雨型滑坡事件的历时;黄发明等^[30]以降雨开始之后到连续 2 天无雨(干旱期)或 4 天无雨(湿润期)结束来确定 1 次降雨型滑坡事件的历时。因此,降雨事件的定义不同也导致不同的降雨阈值。

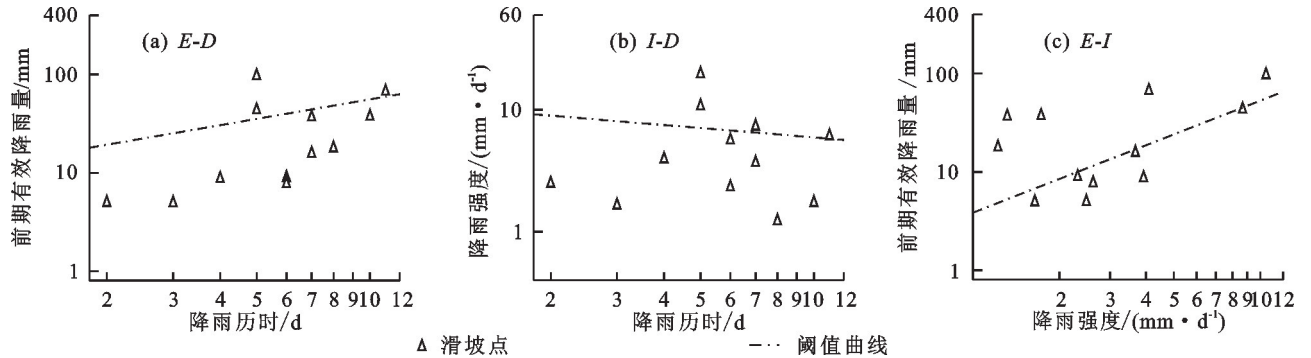


图 14 滑坡降雨阈值模型验证

Fig.14 Verification of the landslide rainfall threshold model

5 结论

(1)基于时序 InSAR 技术,对 115 景 Sentinel-1A 影像进行数据处理,获取 2017—2021 年覆盖研究区 LOS 向的形变速率。选定形变速率阈值为 10 mm/a、斜坡坡度阈值为 5°进行滑坡的初步识别,并与多时相光学遥感影像进行叠加,分析疑似滑坡对应的地形地貌特征进行滑坡最终识别。采用 SBAS 方法计算滑坡时间序列形变,确定滑坡的加速变形时间。

(2)计算滑坡形变量与累积降雨量的相关性,结果表明,随着前期降雨天数的增加,累积降雨量与滑坡形变量的相关性呈先升后降的趋势;当前期有效降雨衰减系数 $K=1$ 时,9 天有效累积降雨量(即滑坡发生当日及前 8 日降雨量)与滑坡形变量的相关性最强。

(3)计算延河流域滑坡点的前期有效降雨量(E)、降雨强度(I)和降雨历时(D),并结合幂函数建立 $E-D$ 、 $I-D$ 和 $E-I$ 降雨阈值模型,对应的阈值模型表达式分别为 $E=12.19D^{0.661}$ 、 $I=10.66D^{-0.255}$ 和 $E=3.84I^{1.141}$ 。

参考文献:

[1] HU X, WANG T, PIERSON T C, et al. Detecting seasonal landslide movement within the Cascade landslide complex (Washington) using time-series SAR imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 187: 49-61.
 [2] 刘传正, 陈春利. 中国地质灾害防治成效与问题对策 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 375-383.
 LIU C Z, CHEN C L. Achievements and countermeasures in risk reduction of geological disasters in China [J].

Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 375-383.
 [3] 张勤, 赵超英, 陈雪蓉. 多源遥感地质灾害早期识别技术进展与发展趋势 [J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 885-896.
 ZHANG Q, ZHAO C Y, CHEN X R. Technical progress and development trend of geological hazards early identification with multi-source remote sensing [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 885-896.
 [4] HUANG F M, ZHANG J, ZHOU C B, et al. A deep learning algorithm using a fully connected sparse autoencoder neural network for landslide susceptibility prediction [J]. Landslides, 2020, 17(1): 217-229.
 [5] 李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 967-979.
 LI Z H, SONG C, YU C, et al. Application of satellite radar remote sensing to landslide detection and monitoring: Challenges and solutions [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 967-979.
 [6] KIM S W, CHUN K W, KIM M, et al. Effect of antecedent rainfall conditions and their variations on shallow landslide-triggering rainfall thresholds in South Korea [J]. Landslides, 2021, 18(2): 569-582.
 [7] 郭子正, 殷坤龙, 刘庆丽, 等. 基于位移比模型的三峡库区云阳县域内蠕变型滑坡降雨预警 [J]. 地球科学, 2020, 45(2): 672-684.
 GUO Z Z, YIN K L, LIU Q L, et al. Rainfall warning of creeping landslide in Yunyang County of Three Gorges Reservoir Region based on displacement ratio model

- [J]. *Earth Science*, 2020, 45(2): 672-684.
- [8] 陈悦丽, 赵琳娜, 王英, 等. 降雨型地质灾害预报方法研究进展[J]. *应用气象学报*, 2019, 30(2): 142-153.
CHEN Y L, ZHAO L N, WANG Y, et al. Review on forecast methods of rainfall-induced geo-hazards [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2019, 30(2): 142-153.
- [9] 刘朝. 滑坡物理模型试验的危险降雨过程研究[D]. 湖北宜昌: 三峡大学, 2019.
LIU C. Study on dangerous rainfall process in landslide physical model test [D]. Yichang, Hubei; China Three Gorges University, 2019.
- [10] 陶妍, 角媛梅, 丁银平, 等. 降雨诱发型滑坡的降雨阈值及机理研究进展与展望[J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(4): 71-78.
TAO Y, JIAO Y M, DING Y P, et al. Research progress and prospect on rainfall threshold and mechanism of rainfall-induced landslides [J]. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2023, 43(4): 71-78.
- [11] SALCIARINI D, FANELLI G, TAMAGNINI C. A probabilistic model for rainfall-induced shallow landslide prediction at the regional scale [J]. *Landslides*, 2017, 14(5): 1731-1746.
- [12] 刘谢攀, 殷坤龙, 肖常贵, 等. 基于 I-D-R 阈值模型的滑坡气象预警[J]. *地球科学*, 2024, 49(3): 1039-1051.
LIU X P, YIN K L, XIAO C G, et al. Meteorological early warning of landslide based on I-D-R threshold model [J]. *Earth Science*, 2024, 49(3): 1039-1051.
- [13] CAMPBELL R H. Debris flows originating from soil slips during rainstorms in Southern California [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1974, 7(4): 339-349.
- [14] CAINE N. The rainfall intensity - duration control of shallow landslides and debris flows [J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 1980, 62(1/2): 23-27.
- [15] CROZIER M J. *Landslides: Causes, Consequences, and Environment* [M]. London: Croom Helm, 1986.
- [16] 周剑, 汤明高, 许强, 等. 重庆市滑坡降雨阈值预警模型 [J]. *山地学报*, 2022, 40(6): 847-858.
ZHOU J, TANG M G, XU Q, et al. Early warning model of rainfall-induced landslide in Chongqing of China based on rainfall threshold [J]. *Mountain Research*, 2022, 40(6): 847-858.
- [17] 赵彬如, 陈恩泽, 戴强, 等. 基于水文-气象阈值的区域降雨型滑坡预测研究[J]. *测绘学报*, 2022, 51(10): 2216-2225.
ZHAO B R, CHEN E Z, DAI Q, et al. Study on prediction of regional rainfall-induced landslides based on hydro-meteorological threshold [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10): 2216-2225.
- [18] 杜青松. 基于 InSAR 的青藏工程走廊多年冻土区地表面形变监测及稳定性评价研究[J]. *测绘学报*, 2024, 53(7): e1463.
DU Q S. InSAR-based study for surface deformation monitoring and stability evaluation in permafrost areas of Qinghai-Tibet Engineering Corridor in the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(7): e1463.
- [19] 孟振江, 曹一迪, 康尘云, 等. 降雨促发黄土滑坡的启动机制模拟[J]. *地球科学与环境学报*, 2023, 45(3): 474-484.
MENG Z J, CAO Y D, KANG C Y, et al. Simulation of the initiation mechanism of loess landslide promoted by rainfall [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2023, 45(3): 474-484.
- [20] 马思远. 地震降雨多场景下触发滑坡分布规律和危险性概率评估研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2022.
MA S Y. Study on distribution law and risk probability evaluation of triggered landslide under multi-scenarios of earthquake and rainfall [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2022.
- [21] 李昊宇, 许强, 李品良, 等. 降雨数据稀缺山区地质灾害的降雨阈值研究: 以茂县为例 [J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240075>.
LI H Y, XU Q, LI P L, et al. Study on rainfall thresholds for geological disasters in rainfall data-scarce mountainous: A case study of Mao County [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240075>.
- [22] ZHANG L L, DAI K R, DENG J, et al. Identifying potential landslides by stacking-InSAR in Southwestern China and its performance comparison with SBAS-InSAR [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18): e3662.
- [23] SANDWELL D T, SICHOUX L. Topographic phase recovery from stacked ERS interferometry and a low-resolution digital elevation model [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105(B12): 28211-28222.
- [24] 刘传金. 时序 InSAR 技术用于构造形变的监测研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
LIU C J. Study on monitoring tectonic deformation by time-series InSAR technology [D]. Xi'an; Changan University, 2017.
- [25] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [26] 盛逸凡, 李远耀, 徐勇, 等. 基于有效降雨强度和逻辑回归的降雨型滑坡预测模型[J]. *水文地质工程地质*, 2019,

- 46(1):156-162.
- SHENG Y F, LI Y Y, XU Y, et al. Prediction of rainfall-type landslides based on effective rainfall intensity and logistic regression[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, 46(1):156-162.
- [27] 高华喜,殷坤龙.降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. *岩土力学*, 2007, 28(5):1055-1060.
- GAO H X, YIN K L. Discuss on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5):1055-1060.
- [28] SEGONI S, PICIULLO L, GARIANO S L. A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence[J]. *Landslides*, 2018, 15(8):1483-1501.
- [29] 李长江,麻土华,李炜,等.滑坡频度-降雨量的分形关系[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2010, 21(1):87-93.
- LI C J, MA T H, LI W, et al. Fractal relation of landslide frequency and rainfall[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2010, 21(1):87-93.
- [30] 黄发明,陈佳武,范宣梅,等.降雨型滑坡时间概率的逻辑回归拟合及连续概率滑坡危险性建模[J]. *地球科学*, 2022, 47(12):4609-4628.
- HUANG F M, CHEN J W, FAN X M, et al. Logistic regression fitting of rainfall-induced landslide occurrence probability and continuous landslide hazard prediction modelling[J]. *Earth Science*, 2022, 47(12):4609-4628.
- (上接第 141 页)
- [29] 董茹月,彭琴,贺云龙,等.冻融期温带草地土壤呼吸和土壤异养呼吸的日变化特征及对水氮添加的响应[J]. *土壤通报*, 2021, 52(5):1129-1139.
- DONG R Y, PENG Q, HE Y L, et al. Diurnal variation characteristics of soil respiration and heterotrophic respiration in freeze-thaw period of temperate grassland and its response to water and nitrogen addition[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(5):1129-1139.
- [30] LEE M S, NAKANE K, NAKATSUBO T, et al. Effects of rainfall events on soil CO₂ flux in a cool temperate deciduous broad-leaved forest[J]. *Ecological Research*, 2002, 17(3):401-409.
- [31] 朱文煜,李艳红,李发东,等.艾比湖湿地季节性冻融土壤温室气体排放规律研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(4):549-556.
- ZHU W Y, LI Y H, LI F D, et al. Greenhouse gas emission from seasonal frozen-thawed soil in Ebinur Lake wetland[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, 56(4):549-556.
- [32] 张琳焱.半干旱区草地土壤呼吸特征及其影响因子的观测研究[D].兰州:兰州大学, 2022.
- ZHANG L H. Observation and study on grassland soil respiration characteristics and its influencing factors in semi-arid area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [33] LUO Y, WAN S, HUI D, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413(6856):622-625.
- [34] KIRSCHBAUM M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6):753-760.