

引用格式: 赵淑芬, 曾润强, 张宗林, 王鸿, 孟兴民. 黄河上游潜在滑坡早期识别及影响因素[J]. 山地学报, 2022, 40(2): 249-264.

ZHAO Shufen, ZENG Runqiang, ZHANG Zonglin, WANG Hong, MENG Xingmin. Early identification and influencing factors of potential landslides in the upper reaches of the Yellow River, China [J]. Mountain Research, 2022, 40(2): 249-264.

黄河上游潜在滑坡早期识别及影响因素

赵淑芬^{1,2}, 曾润强^{1,2*}, 张宗林^{1,2}, 王 鸿^{1,2}, 孟兴民^{1,2}

(1. 兰州大学 地质科学与矿产资源学院, 兰州 730000; 2. 甘肃省环境地质与灾害防治技术创新中心, 兰州 730000)

摘 要: 黄河上游特殊的地质地貌环境与区域气候, 孕育了大型、特大型和巨型滑坡群, 频发的地质灾害影响着黄河上游的经济发展和生态保护。InSAR 技术可用于地质灾害早期识别、预防地质灾害发生和降低灾害损失, 然而针对黄河上游区域的潜在滑坡早期识别及影响因素却鲜有开展。本研究基于 2017 年 2 月至 2020 年 12 月的 SAR 影像, 运用 SBAS-InSAR 技术获取黄河上游(龙羊峡至刘家峡段)南北 20 km 范围内的地表形变速率, 结合光学遥感影像和野外调查确定潜在滑坡。研究发现:(1) 确定出的 355 处潜在滑坡, 在空间分布上具有集群性, 其中 85 处位于老滑坡上。同时, 区内潜在滑坡主要集中于海拔 1600~2200 m 的河谷阶地和低山丘陵, 分布在坡度 10°~30°, 坡向 45°~180°, 高差 50~200 m 的较软弱地层上, 受 NWW-NW 向构造影响强烈。(2) 对形变速率和面积较大且直接威胁村庄和道路的席箕滩滑坡和锁子滑坡变形特征的野外调查和原因的分析表明, 这两个滑坡均为老滑坡局部复活, 目前分别处于稳定蠕滑和波动蠕滑阶段。本研究结果具有较高的准确性和可靠性, 可为该段潜在滑坡隐患排查和致灾空间分析提供数据参考, 具有重要的科学意义与应用价值。

关键词: 黄河上游; SBAS-InSAR 技术; 早期识别; 席箕滩滑坡; 锁子滑坡; 变形阶段

中图分类号: P642.22

文献标志码: C

黄河上游位于青藏高原东北缘一、二阶梯过渡地带, 区内新构造运动强烈, 内外部营力作用显著, 地形落差大, 岩性复杂, 广泛发育大型、特大型和巨型滑坡^[1-2], 具有群发、集中、机理复杂的特点^[3]。历史上, 黄河上游重大滑坡事件造成了惨重后果, 受到了学者的高度关注^[4-5]。例如, 黑方台滑坡群是近十年来西北黄土地区最为频繁和损失最为严重的滑坡灾害^[6]; 1983 年洒勒山高速滑坡^[7]造成 237 人被掩埋; 戈隆布巨型滑坡^[8]导致黄河堵塞, 堰塞湖溃决引起官亭盆地大洪水。

人类工程活动加剧黄河上游地质灾害活动。黄河上游龙羊峡至刘家峡段已建成 12 座大型水电站, 2 座在建, 重大工程的建设和运营使得区内地质环境条件发生变化。李家峡 I、II 号滑坡在水库蓄水前均为蠕变状态, 蓄水后 1 个月, 地表出现不同规模的裂缝, 滑坡前缘位移超过 1 m^[9]; 果卜岸坡在拉西瓦水库蓄水后 1 年内位移达到 7.5 m^[10]; 龙羊峡水库蓄水后发生了多处坍塌和小滑坡^[11], 这些滑坡严重威胁着水利工程的安全运行, 需要实时、长期和高精度的位移监测。

收稿日期(Received date): 2021-10-13; 改回日期(Accepted date): 2022-03-29

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划项目(2018YFC1504704); 甘肃省技术创新中心建设项目(18JR2JA006); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2021-sp01)。[National Key R&D Program of China (2018YFC1504704); The Construction Project of Gansu Technological Innovation Center (18JR2JA006); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(lzujbky-2021-sp01)]

作者简介(Biography): 赵淑芬(1996-), 女, 甘肃庆阳人, 博士研究生, 主要研究方向: 环境遥感与地质灾害监测。[ZHAO Shufen (1996-), female, born in Qingyang, Gansu province, Ph. D. candidate, research on environmental remote sensing, early identification of geological disasters] E-mail: zhaoshf21@lzu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 曾润强(1987-), 男, 湖南邵阳人, 讲师, 主要研究方向: 环境遥感与地质灾害监测。[ZENG Runqiang (1987-), male, born in Shaoyang, Hunan province, Ph. D., lecturer, research on environmental remote sensing and geological disaster monitoring] E-mail: zengrq@lzu.edu.cn

地表形变监测是地质灾害早期识别的技术手段之一^[12]。传统的形变监测手段,如精密水准测量、全球定位系统(GPS)和地球物理勘探等适用于小范围监测,对大范围的形变监测适用性较差^[13]。新兴的合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术具有远距离、非接触、多维宏观视角的特点^[14],具有全天候、穿透性强、精度高、覆盖范围大和连续获取地表信息的优势^[15],可为地质灾害隐患早期识别提供有力数据支撑^[16-17]。差分雷达干涉测量技术(Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, D-InSAR)是利用覆盖同一区域不同时间的两景 SAR 影像进行干涉处理^[18],从而获取地表变形信息,但容易受到时空失相干和大气延迟的影响^[19]。针对上述问题,永久散射体(Persistent Scatterers, PS)和小基线集(Small Baselines Subset, SBAS)两种时序 InSAR 技术先后问世。PS-InSAR 技术^[20]依赖于研究区内永久散射体密度,不能很好地反映城镇化率低、建筑少的山区的地表形变信息。理论上,SBAS-InSAR^[21]技术可以减小时空基线过长而导致的失相干问题,增加了时间采样频率,减缓了大气效应和地形的影响。该技术提取的在短时间内能够保持高相干性的分布式散射体(Distributed Scatterers)目标,提高了自然场景(草地、裸土岩石等)的监测密度,从而获得较为密集的形变数据,增强了变形结果的精度^[16,22]。另外,在对地观测过程中,其不但能获取地表微小的空间形变,也能获取长时间的时序形变信息,大量研究证实了 SBAS-InSAR 技术在地表形变监测中的可靠性和适用性^[23-25]。

黄河上游滑坡早期识别的研究工作仍然需要精细化、量化。大多数学者集中于该区域老滑坡的发育特征^[26-28]、年龄^[29-30]、演化过程^[28,31]、稳定性分析^[32]、风险评价^[33-34]和成因分析^[35-36]等研究,但是区内潜在滑坡分布特征和数量尚不明确。黄河上游(龙羊峡至刘家峡段)地形陡峭,城镇大多分布在黄河两岸,建筑密度小,为了获取较多的形变点,本研究基于 SBAS-InSAR 技术,运用 58 景 Sentinel-1A 数据获取区内地表形变速率场,结合光学遥感影像圈定形变区并进行野外验证;基于数理统计方法分析潜在滑坡的孕灾环境,如坡度、坡向、曲率、高差、地层和构造活动等。本研究对黄河上游潜在滑坡的预防和综合治理具有一定的参考价值。

1 研究区概况

黄河上游(龙羊峡至刘家峡段)位于青藏高原东北部^[37],属于典型的河谷地区,地势西高东低,海拔为 1577~4580 m,发育有多级阶地和剥蚀、侵蚀山地,边坡高差达 300~600 m。区内岩性复杂,地层从元古界至全新世均有分布^[35],其中,分布于黄河干流的贵德盆地、群科-尖扎盆地和龙羊峡水库的古近系-新近系泥岩、砂岩,下更新统湖相半成岩的粘土岩和上更新统黄土^[35]是地质灾害发生的主要地层。该段构造断裂发育、数量多、规模大、活动性强,以断裂和隆升为主的新构造运动破坏了岩体结构,并形成软弱结构面^[37]。尽管区内气候干旱,年均降水量约 300 mm,但全年约 80% 的降雨主要集中于 6—9 月;植被覆盖率低,土地荒漠化严重,生态环境脆弱。据不完全统计,该段两岸已发育有滑坡 578 处(图 1)。

2 数据与方法

本文选用 2017 年 2 月至 2020 年 12 月的 58 景 Sentinel-1A 数据(128 轨道,单视复数(SLC)文件类型,VV 极化方式,干涉宽幅成像模式的升轨数据,入射角 39.24°,方位角 350.10°)和精密轨道数据来自于欧空局(<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>)。30 m 分辨率的 STRM 数据来自于美国宇航局,1:50 万地层岩性和构造数据来自于中国地质调查局(<https://www.cgs.gov.cn/>),坡度、坡向、高差和曲率数据通过 DEM 分析得到。

2.1 SBAS-InSAR 技术

雷达影像在长时间间隔和大空间基线条件下更容易造成失相干现象^[21],本文设置 100 d 的时间基线和 200 d 的空间基线生成 117 个干涉对进行干涉处理(图 2);运用最小费用流方法进行相位解缠^[38],相干性和解缠阈值均设置为 0.35,低于此阈值的区域不参与相位解缠计算;运用 30 m 的 DEM 数据去除地形相位,采用 Goldstein 滤波方法减小噪声^[39],提高干涉图质量;检查生成的干涉图,去除相干性低、干涉效果和解缠质量差的相对,利用剩余干涉对进行地表形变反演;选择地面控制点去除残余轨道相位;利用线性模型将干涉

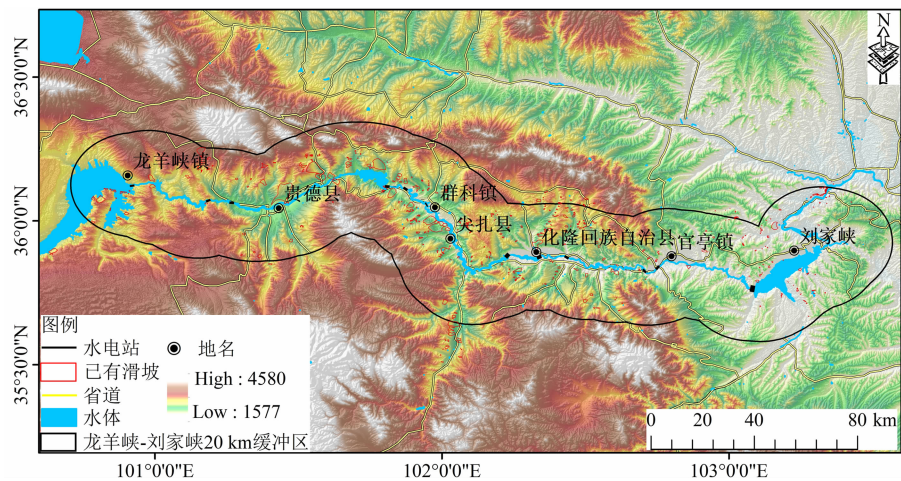


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

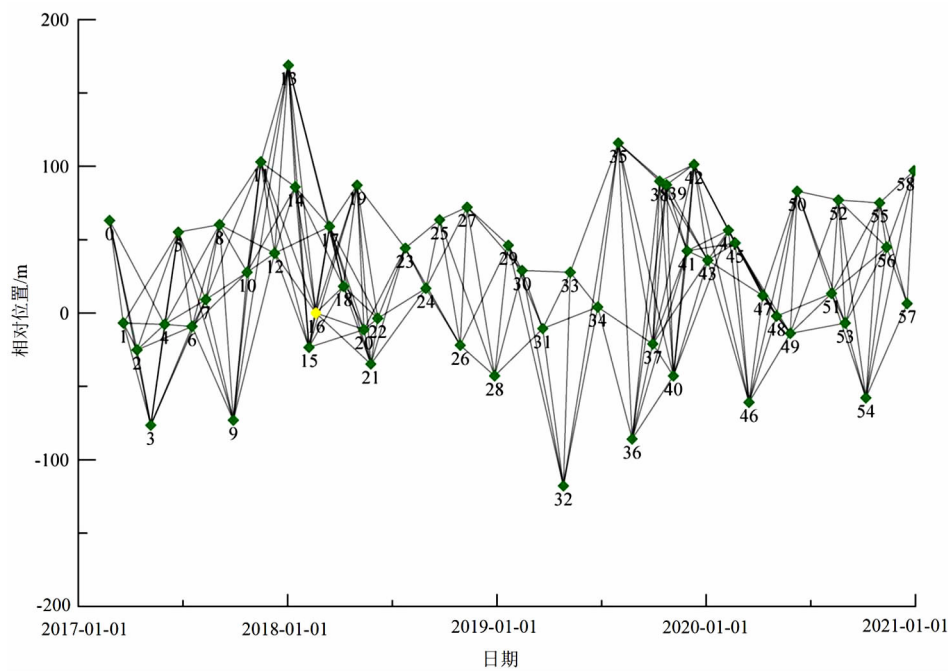


图 2 SAR 影像时空基线连接图

Fig.2 Spatio-temporal baseline connection diagram of SAR image

处理得到的相位信息转化为形变信息,初次得到研究区形变速率;最后通过 1000 m 低通域的空间滤波和 365 d 高空域的时间滤波去除大气相位,用奇异值分解和最小二乘法方法反演时序形变信息;最终将得到的形变结果通过地理编码转换到地理坐标系。以上处理过程均在 SARscape 中进行,流程图如图 3 所示。

2.2 野外调研和数理统计分析

基于 InSAR 技术得到研究区形变速率图,结合

光学影像纹理特征,选取典型潜在滑坡进行野外验证,确定潜在滑坡边界。在调查研究区地形地貌、构造活动、地层岩性及人类工程活动的基础上,重点调查区内滑塌、落石、裂缝和落水洞的发育及分布,地下水出露情况(泉水及可溶盐)和植被形态等变形迹象。

此外,将潜在滑坡与坡度、坡向、地层、曲率和高差数据叠加,利用数理统计方法,分析潜在滑坡发育的影响因子。

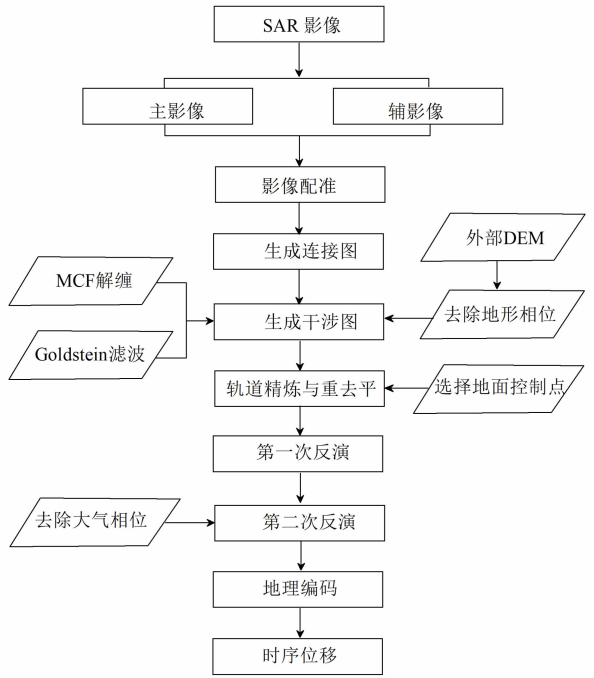


图 3 SBAS-InSAR 技术流程图

Fig. 3 SBAS-InSAR technology flow chart

3 结果及分析

3.1 InSAR 形变结果分析

本研究西起龙羊峡水库,东止刘家峡水库,在此段以黄河为中心向南北构建 20 km 缓冲区,面积约 11 673.83 km²。运用 SBAS-InSAR 技术共获取了 9701 881 个变形点,平均密度为 831.08/km²,年平均形变速率为 -109 ~ 104 mm/a (图 4)。根据形变点标准差和平均值设置 -10 ~ 10 mm/a 为相对稳定区域,从图 4 可以得到,黄河北岸的贵德县、群科镇、化

隆回族自治县和永靖县黑方台出现了大片连续变形区,其中最大变形位置分布于群科镇,最大变形密度分布于化隆回族自治县和永靖县黑方台。

3.2 潜在滑坡分布特征

根据获取的地表形变速率,初步圈定潜在滑坡边界,结合光学遥感影像纹理特征和野外调查迹象确定潜在滑坡边界。研究区共识别出 355 处潜在滑坡(图 5),有 85 处位于老滑坡上。其在地理位置上主要分布于黄河以北,黄河以南分布较少;行政区划上主要分布在贵南县、贵德县、化隆回族自治县、尖扎县和永靖县。

3.2.1 潜在滑坡的地形地貌特征

地形地貌对滑坡的发育具有至关重要的作用,其与滑坡的发生概率密切相关。

地形坡度的改变会使得坡体内部原始应力状态发生改变^[40-41]。本文按 10° 间隔对研究区坡度重分类(图 6a),约 74.37% 的潜在滑坡的坡度分布在 10° ~ 30°,其中,181 个潜在滑坡的坡度分布在 10° ~ 20°,约占潜在滑坡总数的 51%;83 个潜在滑坡的坡度分布在 20° ~ 30°,坡度在 30° ~ 50° 的潜在滑坡数量仅占 11.27%,而大于 50° 的坡度不存在潜在滑坡,主要是由于坡度较陡不易积累物源。

不同坡向植被的发育、光照和降雨等因素具有差异性^[42],其影响着岩土体物理力学特征,进而影响斜坡稳定性^[43]。区内东北至南向的阳坡上(45° ~ 180°)发育潜在滑坡 228 处,约占潜在滑坡总数的 64.23%,西南向至西北向阴坡上潜在滑坡分部少(图 6b)。经分析,可能有以下两个原因:一方面,龙羊峡至刘家峡段植被指数为 0.2 ~ 0.25,植被

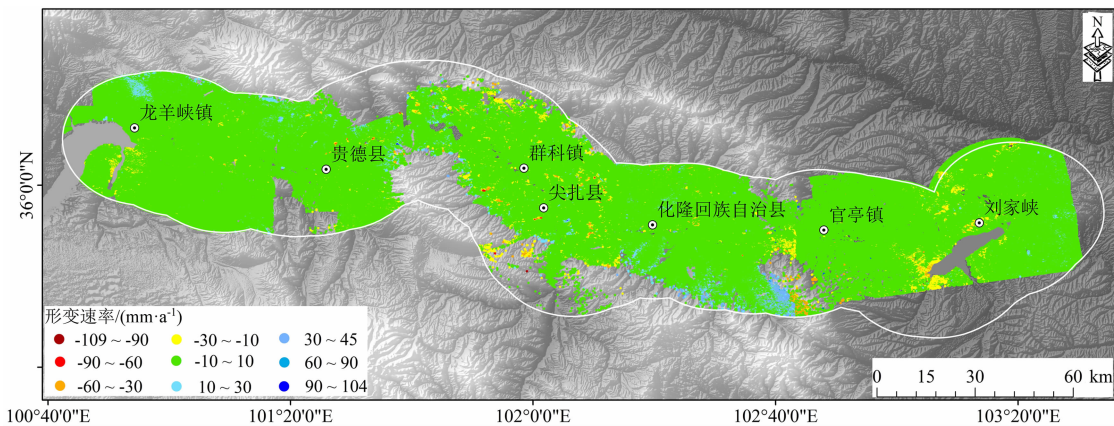


图 4 龙羊峡至刘家峡形变速率图

Fig. 4 Deformation velocity diagram from Longyangxia to Liujiaxia

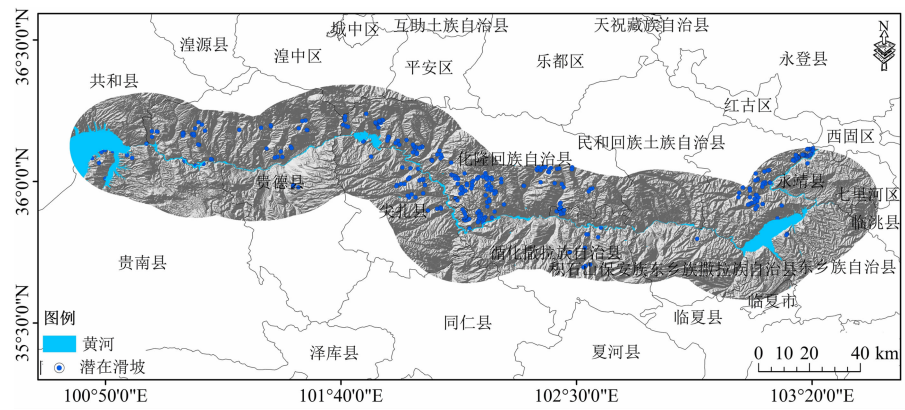


图 5 龙羊峡至刘家峡段潜在滑坡分布图

Fig. 5 Distribution of potential landslides from Longyangxia to Liujiaxia

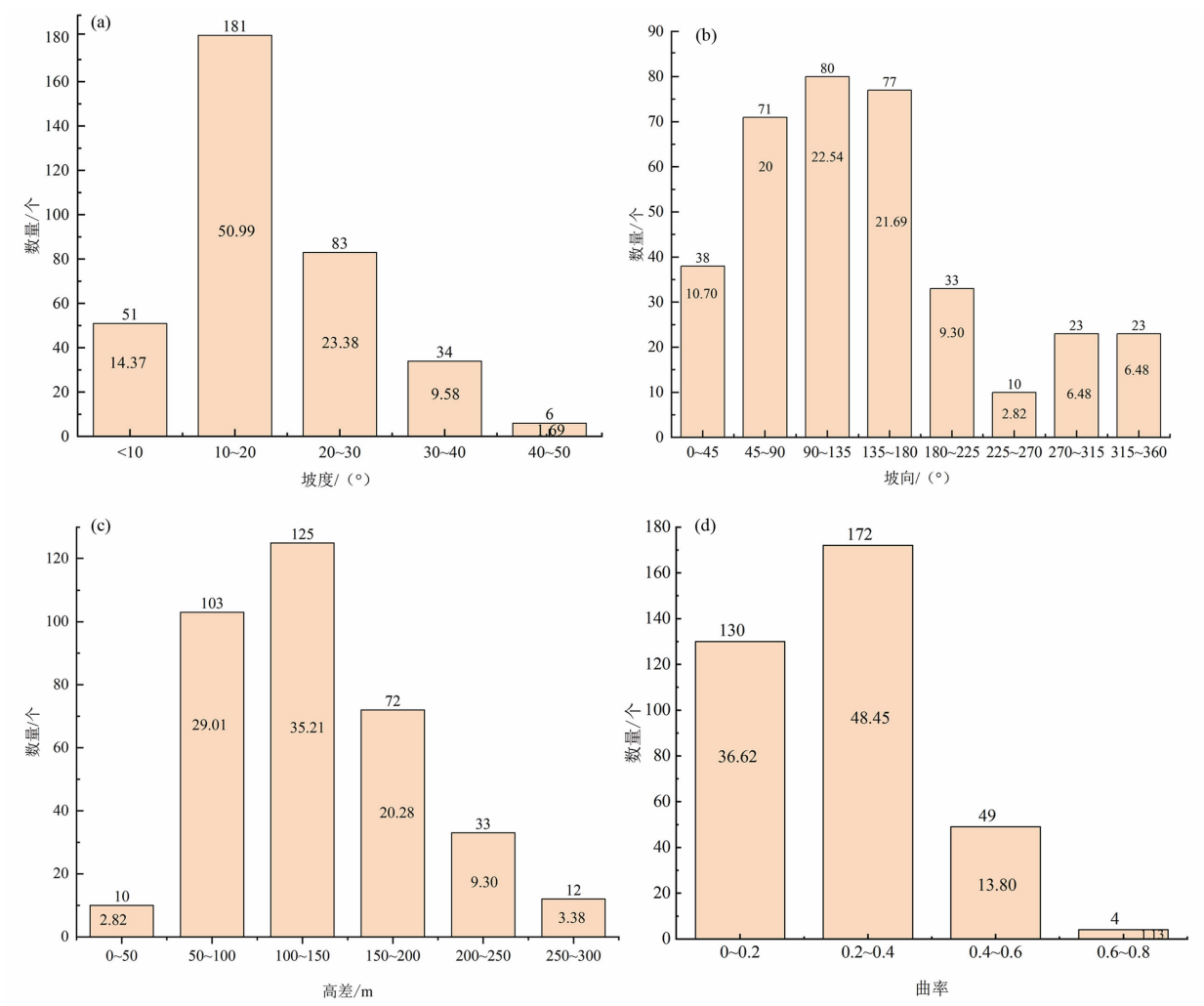


图 6 龙羊峡至刘家峡段潜在滑坡发育条件:(a)坡度;(b)坡向;(c)高差;(d)曲率

Fig. 6 Development conditions of potential landslides from Longyangxia to Liujiaxia section:

(a) Slope; (b) Aspect; (c) Height difference; (d) Curvature

覆盖率低^[44],地表裸露,阳坡比阴坡日照时间长,太阳辐射强,岩土体温度高,同时阳坡、迎风坡比阴坡、

背风坡降水更多,更容易受到降雨侵蚀的影响,在水热条件作用下,岩土体风化作用强烈,再加上区内早

晚温差大,受热胀冷缩作用岩土体容易崩解,导致坡体物质破碎,降低了斜坡稳定性;另一方面,人类活动也一直作为一个高强度的扰动因子影响着斜坡的稳定性,研究区阳坡相较于阴坡土地利用规模更大和开发强度更强。综上所述,阳坡的潜在滑坡在自然因素和人为因素的综合作用下更为发育。

滑坡高差决定滑坡的势能,影响滑坡发育情况和运动特征^[45]。区内大部分潜在滑坡分布于海拔 1600 ~ 3000 m,高差 50 ~ 200 m 的河谷阶地和低山丘陵地貌中,约占潜在滑坡总数的 84.51%,其中 100 ~ 150 m 附近潜在滑坡数量最多,约占潜在滑坡总数的 35.21%;高差为 100 ~ 150 m,海拔为 1600 ~ 2200 m 的潜在滑坡主要分布在刘家峡至黑方台段,高差为 100 ~ 150 m,海拔大于 2200 m 的潜在滑坡主要分布在尖扎县和贵德县(图 6c)。

曲率反映坡体在内外动力作用下的发展变形过程和形态特征^[46]。曲率值为 $(-1, 1)$,曲率越大反应地形遭受侵蚀越强,曲率小于 0 为凹形坡,等于 0 为直线形坡,大于 0 为凸形坡。从图 6d 和图 7 中可

以看出,研究区内 355 处潜在滑坡的曲率均大于 0,表明研究区内不存在凹形坡,96.62% 潜在滑坡发育于凸形坡上。近期研究结果表明凸形坡因遭受的地形隆升和河流侵蚀作用大于斜坡体表面的风化剥蚀作用,坡体内部应力集中现象显著,不利于斜坡稳定^[41],这极有可能会增大研究区潜在滑坡发生的可能性。

3.2.2 潜在滑坡的地层岩性和构造活动特征

本研究将区内地层划分为坚硬、较坚硬、较软弱和软弱 4 类岩性^[33]。

从图 8 中可以看出,较软弱地层主要分布于龙羊峡水库、刘家峡水库南北两岸及贵德县、尖扎县、化隆回族自治县的大部分地区。空间分布上,潜在滑坡在较软弱岩性中发育最多(图 8),占总数的 61.97%;较坚硬岩性占总数的 24.79%;软弱岩性和坚硬岩性中潜在滑坡约占 13.24%。区内较软弱岩性为第三系泥岩、砂岩、泥质砂岩岩组,具有泥、砂岩互层结构,泥岩顶部和砂岩底部存在软弱结构面,加之该套地层可溶盐含量高,遇水易崩解,导致其抗

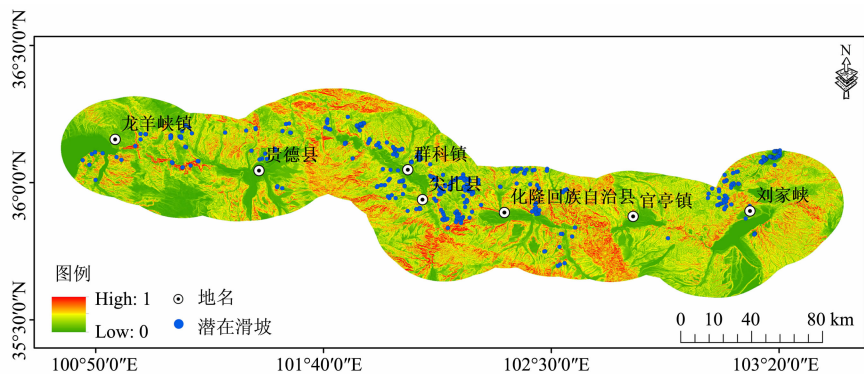


图 7 龙羊峡至刘家峡段水系和曲率图

Fig. 7 Water system and curvature map from Longyangxia to Liujiaxia

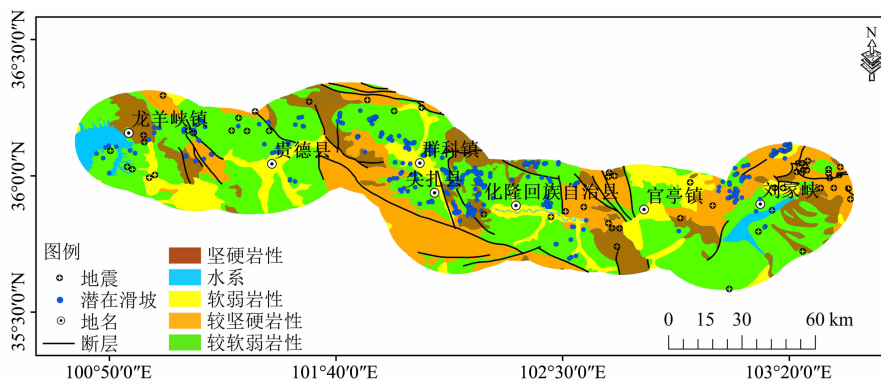


图 8 龙羊峡至刘家峡段潜在滑坡地层、构造和地震分布图

Fig. 8 The distribution of stratum, fault, earthquake and potential landslides from Longyangxia to Liujiaxia

剪强度降低,属于区内易滑地层^[31],因此潜在滑坡较为发育。较坚硬岩性主要为中生代砂岩、砂砾岩、砾岩岩组,由于受到区内构造活动的影响,岩土体结构不稳定,在地震、降水等触发因素下容易发生滑坡。

同时,区内构造错综复杂,断层走向主要为 NWW-NW 向、NNW 向、SN 向和 NE 向。大多数潜在滑坡空间分布和断层走向较为一致,这与构造带对滑坡的发育具有控制作用密切相关。在断层穿过地区,岩土体裂隙发育,通常成为降雨入渗的优势通道,也为滑坡的发育提供了优势拉裂面,如尖扎东断裂、德恒隆断裂、宗务隆山-青海湖断裂穿过的尖扎县和化隆回族自治县是潜在滑坡分布密集的地区。

3.3 典型滑坡分析

本文运用 InSAR 技术获取的潜在滑坡具有广域

特征,缺乏 GNSS 点对 InSAR 结果精度的定量验证,因此通过实地调查间接验证本研究结果的准确性。

位于贵德县的席箕滩滑坡和尖扎县的锁子滑坡是此次潜在滑坡识别结果中形变量和面积较大且具有极大威胁的 2 处隐患点,因此,结合 InSAR 结果和实地调查验证,分析了 2 个潜在滑坡的变形特征。

3.3.1 席箕滩滑坡

席箕滩滑坡位于青海省贵德县黄河北岸,农春河东侧,是一处长约 7200 m,宽约 3600 m 的新近系泥岩古滑坡,滑坡上部为全新统残坡积地层,中部为上更新统贵德组砂岩、泥岩和泥灰岩,遇水易软化,下部为三叠纪地层^[36]。2017 年 2 月至 2020 年 12 月,席箕滩滑坡的年形变速率为 $-86 \sim 45$ mm,绝大部分区域目前相对稳定,但也存在活动区(图 9),自

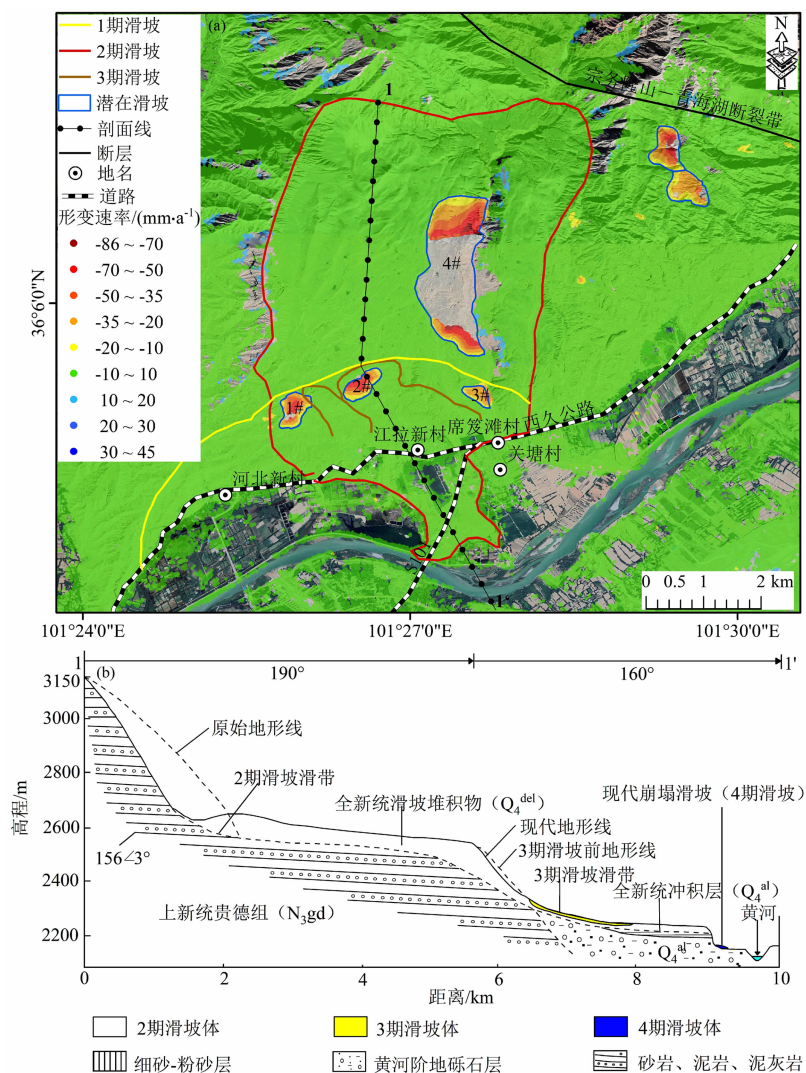


图 9 席箕滩滑坡形变速率和剖面图:(a)形变速率图;(b)地层剖面图^[27]

Fig. 9 Deformation velocity and profile diagram of Xijitan landslide: (a) Deformation velocity; (b) Stratigraphic profile

西向东依次标记为 1#、2#、3#和 4#潜在滑坡,总面积约 2.21 km²(表 1)。

表 1 席笈滩潜在滑坡基本参数

Tab. 1 Basic parameters of Xijitan potential landslide

编号	长度/m	宽度/m	面积/ km ²	后缘 高程/m	前缘 高程/m	高差/m
1#	600	400	0.19	2551	2394	157
2#	370	620	0.18	2513	2414	99
3#	377	240	0.09	2384	2275	109
4#	700	2500	1.75	2570	2370	200

1#潜在滑坡位于席笈滩二期滑坡上,形变由中间向四周减小,中部年平均形变速率为 55.22 mm,累积形变 230 mm(图 10a、图 11a)。基于野外调查结果,1#潜在滑坡中部地形凹陷且破碎,陡坎发育,存在大规模不稳定土体,已发生多处滑塌;同时发育多级平行于顶缘的裂缝,最大宽度达 1 m;残坡积地层在泉水的浸泡下强度降低,局部已经发生明显变形;坡底存在大量粒径为厘米级的落石(图 10b)。两侧为陡峭的老滑坡侧壁,局部发育串珠状落水洞,裂缝不发育。因此,1#潜在滑坡的发展模式可能是中部老滑坡体先滑动从而牵引后缘和两侧斜坡发生滑动。

2#潜在滑坡分布于席笈滩三期滑坡体上,形变速率由中部向两侧逐渐减小,如图 10c 所示,b1、b2、b3 和 b4 年形变速率分别为 55.23 mm、43.32 mm、26.78 mm 和 14.31 mm(图 10c),同时活动区后缘的形变速率大于前缘。野外调查发现,2#潜在滑坡地形呈阶梯状,坡体后缘发育窄小裂缝;坡体中部存在多处崩塌和次级滑坡,地形破碎,物质疏松,发育多级拉张裂缝且延展范围广,同时落水洞和马刀树广泛分布,泉水出露(图 10d);滑坡体下部坡度相对平缓,沿道路两侧存在崩塌现象,未见大裂缝。因此,2#潜在滑坡属于中部推移两侧牵引的滑动模式。

4#潜在滑坡发育于席笈滩二期滑坡堆积体上,面积 1.75 km²。InSAR 结果表明,坡体中部发生失相关现象无形变点,四周形变点密度高,南部和北部的形变速率具有从中间向外依次递减的变化特征(图 10e)。野外调查发现,该潜在滑坡中部发育多条纵横交错的冲沟,存在多级下错台阶,大面积滑塌

导致坡体破碎,滑坡前缘发育宽而连续的多级拉张裂缝,并且具有向后延伸的趋势(图 10f),远离滑坡前缘存在直径为厘米级的落水洞;在其北部和南部,很少出现局部滑动,串珠状落水洞和裂缝交替出现为主要变形特征,其中北部形变区有一处典型区域,发育 2 级串珠状落水洞和 3 级裂缝,向着谷缘方向,落水洞直径逐渐变大、塌陷并贯通成裂缝(图 10e)。通过对变形数据的分析和野外地形地貌、变形特征的考察,4#活动区属于牵引式滑坡。

从图 11b 和图 11c 时序变形监测结果发现,2#潜在滑坡活动区和 4#潜在滑坡活动区北部在 2018 年 7 月 25 日之前的年最平均最大形变为 47.94 mm 和 57.95 mm,在此之后年平均最大形变速率为 58.68 mm 和 76.42 mm,但是日位移速率保持相对稳定。图 11a 和图 11d 表明 1#潜在滑坡和 4#潜在滑坡南部累积位移基本呈线增加,速率平稳,暂未出现明显的加速期。

从整体上看,三个潜在滑坡在 2017 年 5 月 31 日之前经历了初始变形,之后过渡为匀速变形。目前,三个潜在滑坡处于稳定蠕滑阶段。

3.3.2 锁子滑坡

锁子滑坡位于青海省尖扎县,是一处基岩古滑坡(图 12b)。在 InSAR 监测时期内,该滑坡局部地区发生变形,面积约 2.92 km²,年平均形变速率为 -49 ~ 69 mm,最大形变出现在锁子滑坡西侧(图 12a),东侧形变普遍位于 40 mm 以下,以 10 ~ 20 mm 居多。年形变速率不同的位置对应的裂缝宽度和长度不同,年形变速率 10 ~ 30 mm,裂缝数量少,狭窄且不连续(图 12c);年形变速率 30 ~ 50 mm,部分相邻落水洞贯通,裂缝宽度和深度均增大(图 12d);年形变速率 50 ~ 69 mm,串珠状落水洞已经完全贯通发育为裂缝,同时裂缝一侧的地形发生沉降(图 12e)。综上所述,实际地形中裂缝的展布状况在一定程度上与滑坡的变形程度具有较好的对应关系。

锁子 1#潜在滑坡东西两侧为两条深切冲沟,后缘高程 2854 m,前缘高程 2360 m,高差 494 m,长 1.84 km,宽 490 m,面积约 0.84 km²,平均坡度 17°,坡向朝东南(150°),岩性为中早三叠世隆务河群变砂岩、板岩夹灰岩组,分布有尖扎东断裂和德恒隆断裂构造,为大型和巨型滑坡的发育提供了优势条件。通过实地调查与光学影像相结合的方

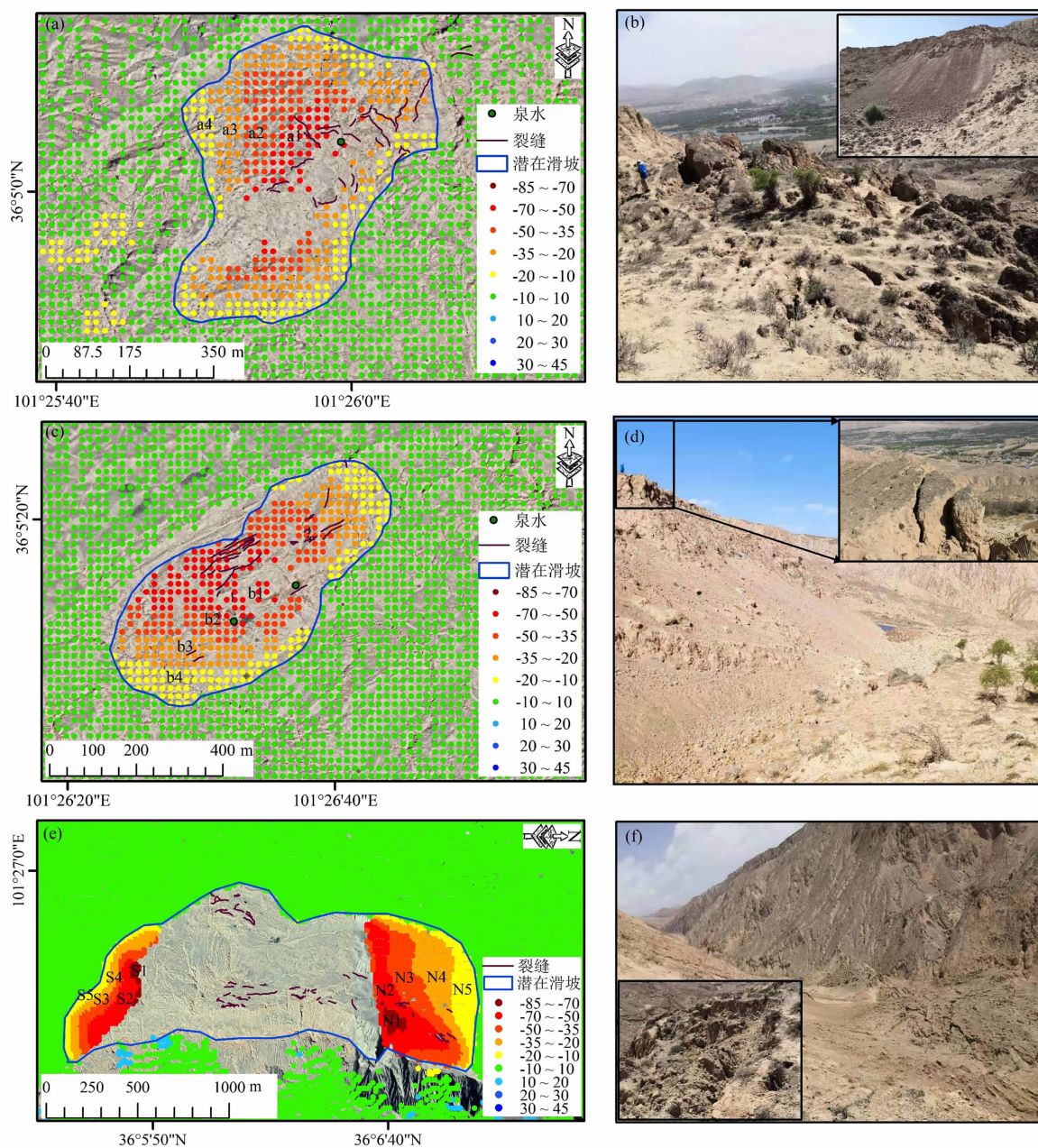


图 10 席笈滩潜在滑坡形变速率和野外验证图：

(a) 1#潜在滑坡形变速率；(b) 1#潜在滑坡野外验证；(c) 2#潜在滑坡形变速率；(d) 2#潜在滑坡野外验证；
(e) 4#潜在滑坡形变速率；(f) 4#潜在滑坡野外验证

Fig. 10 The deformation velocity and field verification of Xijitan potential landslides:

(a) The deformation velocity of 1# potential landslide ; (b) The field verification of 1# potential landslide ;
(c) The deformation velocity of 2# potential landslide ; (d) The field verification of 2# potential landslide ;
(e) The deformation velocity of 4# potential landslide ; (f) The field verification of 4# potential landslide

法,按照地形差异将该潜在滑坡划分为上部(S1),中部(S2)和下部(S3)(图 13a),S2 处形变速率明显大于 S1 和 S3,累积形变约 250 mm,S1 和 S3 累积形变分别为 120 mm 和 150 mm(图 13c)。基于野外调查显示,S1 处地形陡峭,板岩出露,物理风

化导致岩体破碎,局部地区岩石剥落,并且有小裂缝发育;S2 处地形相对平坦,局部出现坍塌并伴生出密集的拉张裂缝,大面积土体已经处于临空状态,并且向前倾倒(图 13b);S3 前缘凸起,表面发育有串珠状落水洞和剪胀鼓丘(图 13d)。坡体不

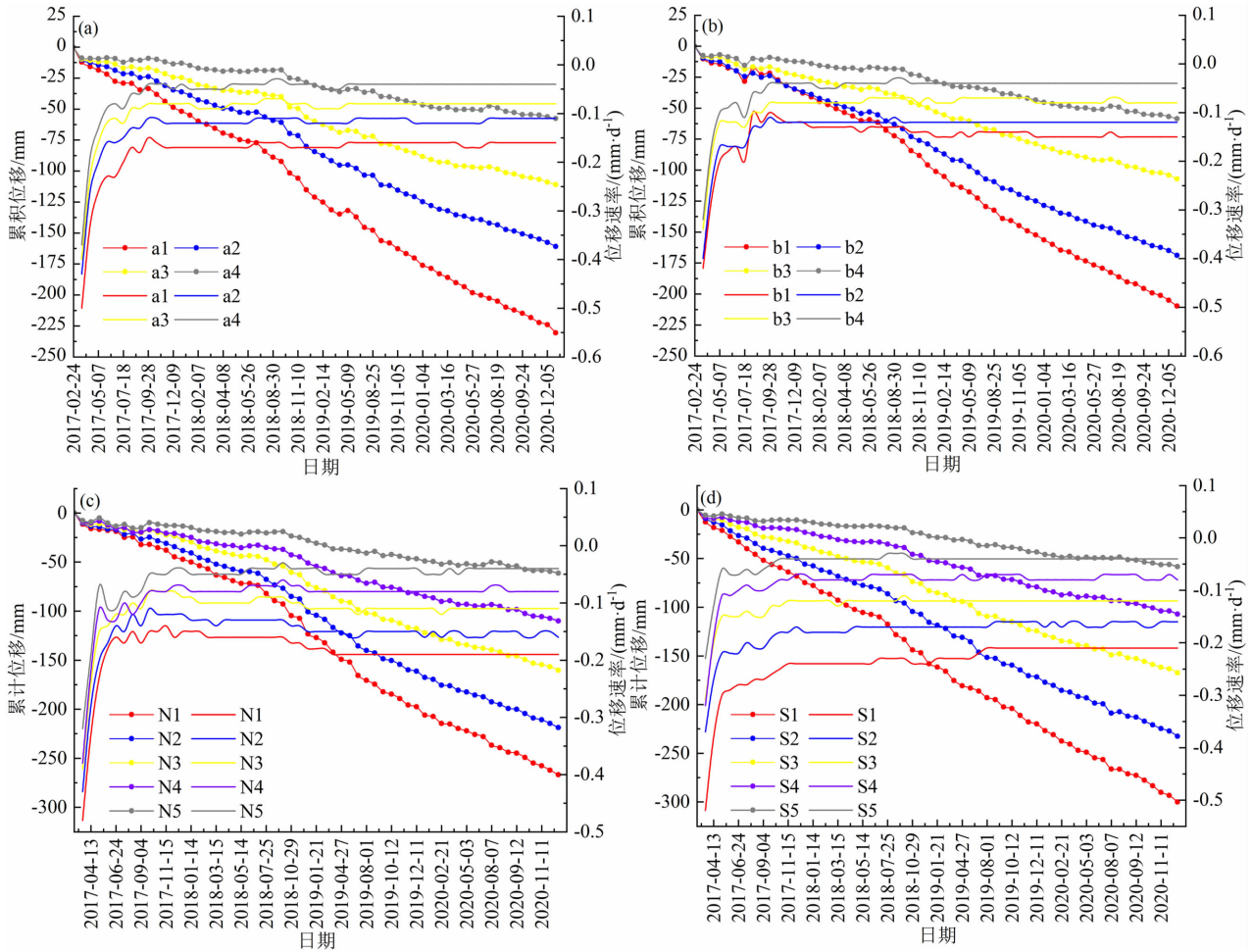


图 11 席笈滩潜在滑坡时序形变速率:

(a) 1#潜在滑坡时序形变; (b) 2#潜在滑坡时序形变; (c) 4#潜在滑坡北部时序形变; (d) 4#潜在滑坡南部时序形变

Fig. 11 Time series deformation velocity of Xijitan potential landslide: (a) Time series deformation of 1# potential landslide;

(b) Time series deformation of 2# potential landslide; (c) Time series deformation in the northern part of the 4# potential landslide;

(d) Time series deformation in the southern part of the 4# potential landslide

同部位发育的裂缝没有完全贯通,因此,发生整体滑动的可能性不大。

另外,时序位移监测结果表明,该潜在滑坡位移处于升-降循环变化,未出现持续加速变形,目前处于波动蠕滑状态。不同部位每年8月左右均会发生明显位移,原因可能是8月是降雨集中期,坡体植被发育差,雨水通过坡体表面的裂隙快速进入岩土体内部,在一定深度土体内聚力降低,导致岩土体抗剪强度降低,坡体稳定性下降^[47]。

综上所述,该滑坡可能在地形、断裂构造控制作用下,受降雨影响,中部较大的变形向下推移挤压使得活动区前缘凸起,并在后缘形成拉裂区,严重威胁坡脚科沙塘村人民的生命安全和G0611国道车辆的安全通行。

4 讨论

本研究通过历史滑坡的解译与调查、潜在滑坡的识别,构建了黄河上游(龙羊峡至刘家峡段)滑坡数据库,弥补了该区域内潜在滑坡数据缺失的不足。此外,从坡度、坡向、高差、曲率、地层岩性和构造方面总结了潜在滑坡发育的基本规律与特征。上述研究成果对区域滑坡的防治提供了可靠的数据支撑。

对比分析潜在滑坡与历史滑坡的发育特征对于了解区域滑坡演化特征与规律具有积极作用。历史滑坡发育特征结果表明,其多分布于 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 和 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$,小于 20° 的滑坡数量少^[48],而本研究识别的74.37%的潜在滑坡分布于 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。23.94%

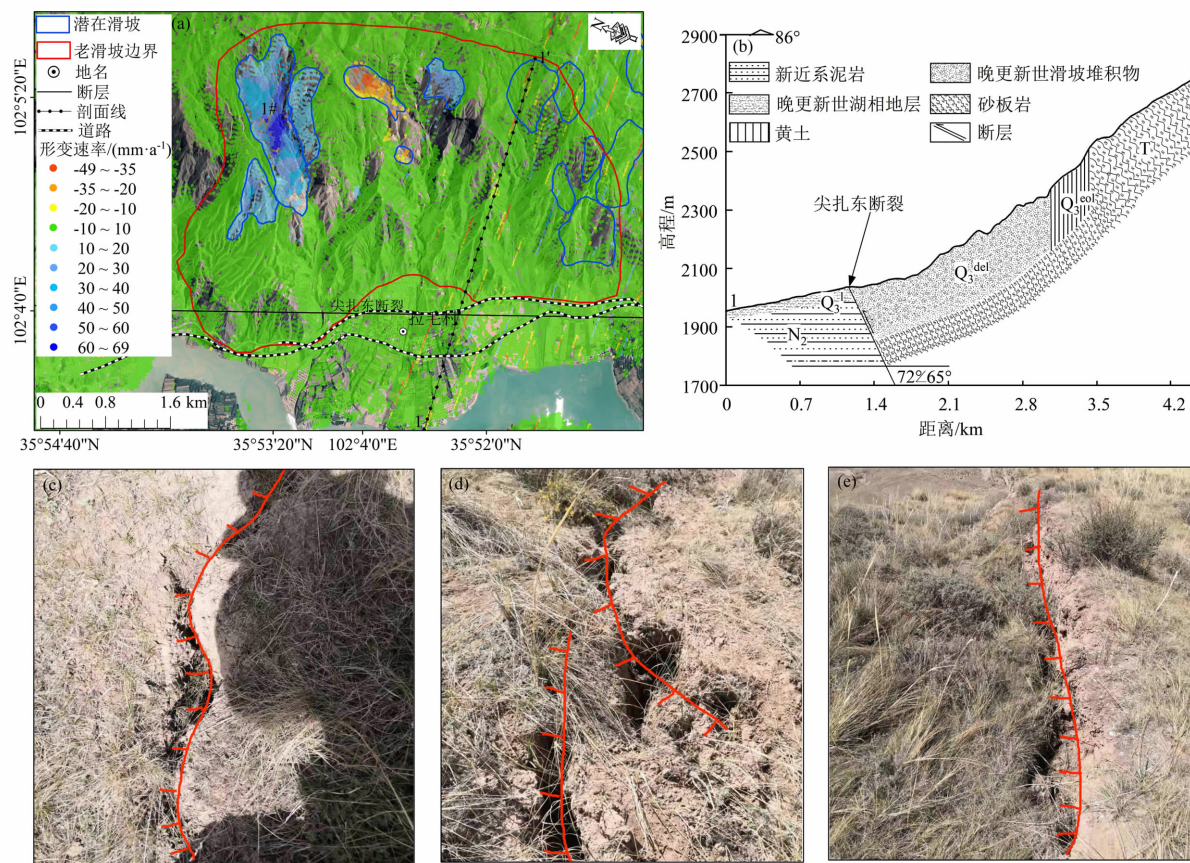


图 12 锁子滑坡形变速率图、野外验证图和剖面图:(a)形变速率;

(b)地层剖面图;(c)形变速率为 10 ~ 30 mm 裂缝;(d)形变速率为 30 ~ 50 mm 裂缝;(e)形变速率为 50 ~ 69 mm 裂缝

Fig. 12 Deformation velocity, field verification, and profile diagram of Suozi landslide: (a) Deformation velocity;

(b) Stratigraphic profile; (c) Cracks with a deformation velocity of 10 ~ 30 mm;

(d) Cracks with a deformation velocity of 30 ~ 50 mm; (e) Cracks with a deformation velocity of 50 ~ 69 mm

的潜在滑坡分布于老滑坡之上,滑坡的发生可以改变原有地形特征,因此潜在滑坡坡度可能低于老滑坡的滑坡。

在黄河上游(龙羊峡至刘家峡段)识别的潜在滑坡中,如李坎公路滑坡群分布于工程建设区,果卜滑坡位于拉西瓦水库右岸,这些类型的滑坡威胁着基础设施和水利工程安全。此外,自然(地震、降雨、冰雪融化等)和人类活动(斜坡开挖、建筑施工、引水灌溉)的多重影响对促进潜在滑坡的发生具有积极作用^[49]。本次研究中由于数据缺乏,仅局限于潜在滑坡地貌发育特征分析,未开展降雨、工程活动和库水位影响下不同类型滑坡的驱动机制的研究工作。

5 结论与展望

本文基于 58 景 Sentinel-1A 数据,运用 SBAS-

InSAR 技术并结合野外调查和数理统计分析的方法,开展黄河上游(龙羊峡至刘家峡段)滑坡早期识别研究并分析潜在滑坡的发育特征和影响因素,主要得到以下认识和结论:

(1) 本文获取的黄河上游(龙羊峡至刘家峡段)南北 20 km 范围内的年平均速率为 $-109 \sim -104$ mm,结合光学遥感影像和实地调查,识别出 355 处潜在滑坡主要分布在贵南县、贵德县、化隆回族自治县、尖扎县和永靖县黑方台,其中 85 处发育于老滑坡之上。

(2) 355 处潜在滑坡主要分布于海拔为 1600 ~ 2200 m 的河谷阶地和低山丘陵中,分布在坡度 $10^\circ \sim 30^\circ$,坡向 $45^\circ \sim 180^\circ$,高差 50 ~ 200 m 的较软弱地层上,主要受 NWW - NW 向构造控制。此外,黄河北岸潜在滑坡数量约为南岸的 5 倍。受构造活动的影响,北岸化隆回族自治县分布最为密集约为

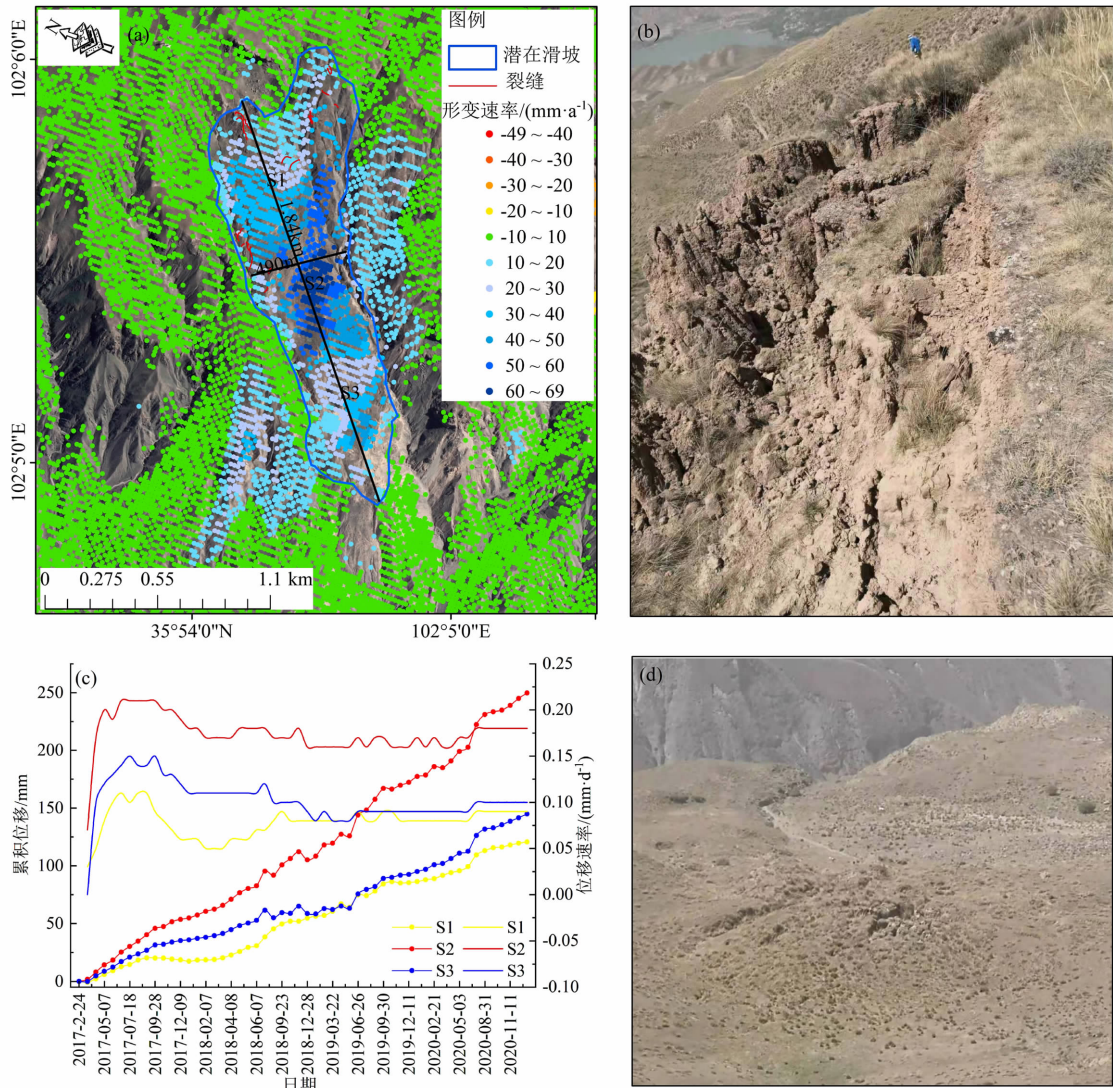


图 13 锁子 1#潜在滑坡时序形变和验证结果：

(a) 形变速率图；(b) 中部野外验证图；(c) 时序形变；(d) 下部野外验证

Fig. 13 Time series deformation and verification results of Suozi 1# potential landslide; (a) Deformation velocity;

(b) The field verification of central part; (d) Time series deformation; (e) The field verification of lower part

60%，南岸尖扎县最为密集约为 49%。

(3)形变速率和面积较大且直接威胁村庄和道路的席笈滩滑坡和锁子滑坡均为老滑坡局部复活，目前分别处于稳定蠕滑和波动蠕滑阶段。席笈滩 1#和 2#潜在滑坡为中部推移两侧牵引的滑动模式，席笈滩 4#潜在滑坡为牵引式滑坡；锁子潜在滑坡为推移式滑坡。

(4)野外的验证结果表明黄河上游（龙羊峡至刘家峡段）的时序形变监测结果准确性、可靠性和有效性较高，可为该段潜在滑坡排查，重大工程设施布局 and 区内防灾减灾工作提供一定的数据支撑。

斜坡大变形数据往往因失相干难以获取，然而更完整以及精细化的变形数据有助于区域潜在滑坡的早期识别以及滑坡的预测研究，在区域的防灾减灾工作中具有指导价值。因此，在后续的研究中尝试利用方位向像素偏移量或者多孔径雷达干涉技术获取研究区内大形变，并采用升降轨数据降低单一轨道数据在潜在滑坡识别过程中的漏判概率。此外，现有监测时间范围内形变数据的结果表明席笈滩 1#、2#、4#潜在滑坡和锁子潜在滑坡未完整出现随时间演化的加速变形阶段，不能满足基于三阶段变形规律^[50-52]建立滑坡时间预测的条件。因此，后

续仍需要利用持续更新的 SAR 数据开展潜在滑坡发生时间的预测工作。

参考文献 (References)

- [1] 黄润秋. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. 第四纪研究, 2003, **23**(6): 640 – 647. [HAUNG Runqiu. Mechanism of large scale landslides in western China [J]. Quaternary Sciences, 2003, **23**(6): 640 – 647] DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2004.03.016
- [2] 郭小花, 卢玉东, 李小林, 等. 黄河上游德恒隆—锁子滑坡堵塞黄河事件[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, **45**(6): 1789 – 1797. [GUO Xiaohua, LU Yudong, LI Xiaolin, et al. Event of block up of Yellow River by Dehenglong – Suozi landslides [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, **45**(6): 1789 – 1797] DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.201506202
- [3] 殷志强, 秦小光, 赵无忌, 等. 黄河上游滑坡泥石流时空演化及触发机制[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 7 – 12. [YIN Zhiqiang, QIN Xiaoguang, ZHAO Wuji, et al. Temporal and spatial evolution and triggering mechanism of landslide and debris flow in the upper Yellow River [M]. Beijing: Science Press, 2016: 7 – 12]
- [4] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(3): 433 – 454. [HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(3): 433 – 454] DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2004.03.016
- [5] 殷志强, 魏刚, 秦小光, 等. 青藏高原东北缘黄河上游滑坡与堰塞湖研究进展[J]. 地学前缘, 2021, **28**(2): 46 – 57. [YIN Zhiqiang, WEI Gang, QIN Xiaoguang, et al. Research progress of landslides and dammed lakes in the upper reaches of the Yellow River, northeastern Tibetan Plateau [J]. Earth Science Frontiers, 2021, **28**(2): 46 – 57] DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.9.4
- [6] 周琪, 许强, 周书, 等. 基于数值模拟的突发型黄土滑坡运动过程研究——以黑方台陈家 8# 滑坡为例[J]. 山地学报, 2019, **37**(4): 528 – 537. [ZHOU Qi, XU Qiang, ZHOU Shu, et al. Movement process of abrupt loess flowslide based on numerical simulation—a case study of Chenjia 8# on the Heifangtai terrace [J]. Mountain Research, 2019, **37**(4): 528 – 537] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000445
- [7] 詹铮, 李曰国, 黎克武. 酒勒山滑坡分析[J]. 山地研究, 1986, **4**(2): 145 – 152. [ZHAN Zheng, LI Yueguo, LI Kewu. Analysis on Salieshan landslide [J]. Mountain Research, 1986, **4**(2): 145 – 152] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.1986.02.006
- [8] DONG Guanghui, ZHANG Fanyu, MA Minmin, et al. Ancient landslide-dam events in the Jishi Gorge, upper Yellow River valley, China [J]. Quaternary Research, 2014, **81**(3): 445 – 451] DOI: 10.1016/j.yqres.2013.09.003
- [9] 白俊光, 吕生弟, 韩建设. 李家峡水电站坝前水库滑坡蓄水前后稳定性预测[J]. 岩土力学, 2008, **29**(7): 1723 – 1731. [BAI Jinguang, LYU Shengdi, HAN Jianshe. Stability prediction of reservoir landslide of Liji Xia Hydropower station before and after reservoir impounding [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(7): 1723 – 1731] DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2008.07.001
- [10] ZHANG Dexuan, WANG Gonghui, YANG Tinjun, et al. Satellite remote sensing-based detection of the deformation of a reservoir bank slope in Laxiwa Hydropower Station, China [J]. Landslides, 2013, **10**(2): 231 – 238. DOI: 10.1007/s10346-012-0378-9
- [11] 罗银飞, 许伟林, 田浩, 等. 黄河龙羊峡库区地质环境条件与滑坡灾害发育特征[J]. 工程地质学报, 2011, **19**: 75 – 79. [LUO Yinfei, XU Weilin, TIAN Hao, et al. Yellow River Longyang Xia storehouse district geology environmental condition and landslide disaster growth characteristic [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**: 75 – 79]
- [12] 安炳琪, 罗海滨, 丁海勇, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的西宁地表形变监测[J]. 遥感技术与应用, 2021, **36**(4): 838 – 846. [AN Bingqi, LUO Haibin, DING Haiyong, et al. Monitoring of surface deformation in Xining based on SBAS-InSAR [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, **36**(4): 838 – 846] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.4.0838
- [13] 廖明生, 董杰, 李梦华, 等. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测[J]. 遥感学报, 2021, **25**(1): 332 – 341. [LIAO Mingsheng, DONG Jie, LI Menghua, et al. Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, **25**(1): 332 – 341] DOI: 10.11834/jrs.20210162
- [14] 李晓恩, 周亮, 苏奋振, 等. InSAR 技术在滑坡灾害中的应用研究进展[J]. 遥感学报, 2021, **25**(2): 614 – 629. [LI Xiaoen, ZHOU Liang, SU Fenzhen, et al. Application of InSAR technology in landslide hazard: Progress and prospects [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, **25**(2): 614 – 629] DOI: 10.11834/jrs.20209297
- [15] 范一大, 吴玮, 王薇, 等. 中国灾害遥感研究进展[J]. 遥感学报, 2016, **20**(5): 1170 – 1184. [FAN Yida, WU Wei, WANG Wei, et al. Research progress of disaster remote sensing in China [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2016, **20**(5): 1170 – 1184] DOI: 10.11834/jrs.20166171
- [16] 张路, 廖明生, 董杰, 等. 基于时间序列 InSAR 分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, **43**(12): 2039 – 2049. [ZHANG Lu, LIAO Mingsheng, DONG Jie, et al. Early detection of landslide hazards in mountainous areas of west China using time series SAR interferometry: A case study of Danba, Sichuan [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, **43**(12): 2039 – 2049] DOI: 10.13203/j.whugis.20180181
- [17] 郭华东, 张露. 雷达遥感六十年: 四个阶段的发展[J]. 遥感学报, 2019, **23**(6): 1023 – 1035. [GUO Huadong, ZHANG Lu. 60 years of radar remote sensing: Four-stage development [J].

- National Remote Sensing Bulletin, 2019, **23**(6):1023 – 1035] DOI: 10.11834/jrs.20199398
- [18] 徐郡,胡晋山,康建荣,等. 基于 SBAS-InSAR 的矿区村庄地面沉降监测与分析[J]. 金属矿山,2019(10):74 – 80. [XU Jun, HU Jinshan, KANG Jianrong, et al. Monitoring and analysis of village surface subsidence in mining area based on SBAS-InSAR [J]. Metal Mine, 2019(10):74 – 80] DOI: 10.19614/j.cnki.jksk.201910012
- [19] ZEBKER H A, ROSEN P A, HENSLEY S. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, **102**(B4):7547 – 7563. DOI: 10.1029/96JB03804
- [20] SQUARZONI G, BAYER B, FRANCESCHINI S, et al. Pre_and post-failure dynamics of landslides in the northern Apennines revealed by space-borne synthetic aperture radar interferometry (InSAR) [J]. Geomorphology, 2020, **369**:107353. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107353
- [21] BERARDUNO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferogram [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, **40**(11):2375 – 2383. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792
- [22] SHI Xuguo, YANG Chao, ZHANG Lu, et al. Mapping and characterizing displacements of active loess slopes along the upstream Yellow River with multi-temporal InSAR datasets [J]. Science of the Total Environment, 2019, **674**:200 – 210. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.140
- [23] LIU Peng, LI Zhenhong, HOEY T, et al. Using advanced InSAR time series techniques to monitor landslide movements in Badong of the Three Gorges region, China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, **21**:253 – 264. DOI: 10.1016/j.jag.2011.10.010
- [24] 苏晓军,张毅,贾俊,等. 基于 InSAR 技术的秦岭南部略阳县潜在滑坡灾害识别研究[J]. 山地学报,2021, **39**(1):59 – 70. [SU Xiaojun, ZHANG Yi, JIA Jun, et al. InSAR—based monitoring and identification of potential landslides in Lueyang county, the southern Qinling Mountains, China [J]. Mountain Research, 2021, **39**(1):59 – 70] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000576
- [25] ZHANG Zonglin, ZENG Runqiang, MENG Xingmin, et al. Effect of soluble salt loss via spring water on irrigation-induced landslide deformation [J]. Water, 2020, **12**(10):2889. DOI: 10.3390/w12102889
- [26] 殷志强,秦小光,赵无忌,等. 基于多元遥感影像数据的黄河上游滑坡发育特征研究[J]. 工程地质学报,2013, **21**(5):779 – 787. [YIN Zhiqiang, QIN Xiaoguang, ZHAO Wuji, et al. Characteristics of landslides in upper reaches of Yellow River with multiple date of remote sensing [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, **21**(5):779 – 787] DOI: 10.3969/j.issn.1004 – 9665.2013.05.01
- [27] 史立群,魏刚,殷志强,等. 青海尖扎盆地寺门村滑坡发育特征及成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2020, **31**(5):15 – 21. [SHI Liqun, WEI Gang, YIN Zhiqiang, et al. Characteristics and formation of Simencun landslide in Jianzha Basin of Qinghai province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, **31**(5):15 – 21] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003 – 8035.2020.05.03
- [28] 赵无忌,殷志强,马吉福,等. 黄河上游贵德盆地席茆滩巨型滑坡发育特征及地貌演化[J]. 地质论评,2016, **62**(3):709 – 721. [ZHAO Wuji, YIN Zhiqiang, MA Jifu, et al. Multi-stage development characteristics and geomorphic evolution process of Xijitan super large landslide in the Guide Basin, upper reaches of Yellow River [J]. Geological Review, 2016, **62**(3):709 – 721] DOI: 10.16509/j.georeview.2016.03.013
- [29] 赵瑞欣,周保,李滨. 黄河上游龙羊峡至积石峡段巨型滑坡 OSL 测年[J]. 地质通报,2013, **32**(12):1943 – 1951. [ZHAO Ruixin, ZHOU Bao, LI Bin. The application of optical stimulate luminescence dating to the study of clustered landslides activity [J]. Geological Bulletin of China, 2013, **32**(12):1943 – 1951] DOI: 10.3969/j.issn.1671 – 2552.2013.12.008
- [30] 张志刚,白世彪,王建,等. 全新世早期黄河上游积石峡大型滑坡堵江事件研究[J]. 干旱区资源与环境,2013, **27**(7):102 – 106. [ZHANG Zhigang, BAI Shibiao, WANG Jian, et al. The event of Jishixia of river block by sever landslide occurred at in the upper reaches of the Yellow River during the early Holocene [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, **27**(7):102 – 106] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2013.07.030
- [31] 魏刚,殷志强,马吉福,等. 黄河上游阿什贡滑坡群发育期次及演化过程分析[J]. 水文地质工程地质,2016, **43**(6):133 – 140 + 153. [WEI Gang, YIN Zhiqiang, MA Jifu, et al. An analysis of forming stages and evolution process of the Ashigong landslide cluster in the upper reaches of the Yellow River [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, **43**(6):133 – 140 + 153] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000 – 3665.2016.06.21
- [32] 李坤熠. 黄河峡谷龙羊峡—拉西瓦段右岸坡稳定性研究[D]. 西安:西安工业大学,2018:1 – 82. [LI Shenyi. The research of stability of the right bank slope of the Longyangxia—Laxiwa section of the Yellow River gorge [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018:1 – 82]
- [33] 周保,胡贵寿,彭建兵,等. 基于 GIS 的黄河上游拉干峡—寺沟峡段滑坡危险性评价[J]. 南水北调与水利科技,2010, **8**(1):36 – 38 + 48. [ZHOU Bao, HU Guishou, PENG Jianbing, et al. Landslide hazard assessment from La'gan Gorge to Sigou Gorge in the upper reaches of Yellow River based on GIS [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2010, **8**(1):36 – 38 + 48] DOI: 10.3969/j.issn.1672 – 1683.2010.01.009
- [34] 魏刚. 黄河上游龙羊峡至寺沟峡段巨型滑坡分布特征及风险

- 评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013: 12-13
- [WEI Gang. Study on the distribution characteristics and risk assessment of super large scale landslides from Longyang Gorge to Sigou Gorge in the upper reaches of Yellow River [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013: 12-13]
- [35] 周保, 彭建兵, 殷跃平, 等. 黄河上游拉干峡—寺沟峡段特大型滑坡及其成因研究[J]. 地质论评, 2014, **60**(1): 138-144. [ZHOU Bao, PENG Jianbing, YIN Yueping, et al. Research on large-scale landslides between Lagan Gorge and Sigou Gorge in the upper reaches of Yellow River [J]. Geological Review, 2014, **60**(1): 138-144] DOI: 10.16509/j.georeview.2014.01.018
- [36] 李小林, 郭小花, 李万花. 黄河上游龙羊峡—刘家峡河段巨型滑坡形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(4): 516-529. [LI Xiaolin, GUO Xiaohua, LI Wanhua. Mechanism of giant landslides from Longyangxia Valley to Liujiaxia Valley along upper Yellow River [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(4): 516-529] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2011.04.013
- [37] 殷志强, 程国明, 胡贵寿, 等. 晚更新世以来黄河上游巨型滑坡特征及形成机理初步研究[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(1): 41-51. [YIN Zhiqiang, CHENG Guoming, HU Guishou, et al. Preliminary study on characteristic and mechanism of super-large landslide in upper Yellow River since Late - Pleistocene [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(1): 41-51] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2010.01.006
- [38] 李媛茜, 张毅, 苏晓军, 等. 白龙江流域潜在滑坡 InSAR 识别与发育特征研究[J]. 遥感学报, 2021, **25**(2): 677-690. [LI Yuanxi, ZHANG Yi, SU Xiaojun, et al. Early identification and characteristics of potential landslides in the Bailong River Basin using InSAR technique [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, **25**(2): 677-690] DOI: 10.11834/jrs.20210094
- [39] 麻源源, 陈云波, 左小清, 等. Sentinel-1A 数据及短基线集的昆明地面沉降分析[J]. 测绘科学, 2019, **44**(11): 59-66+95. [MA Yuanyuan, CHEN Yunbo, ZUO Xiaoqing, et al. Analysis of land subsidence in Kunming based on Sentinel-1A data and SBAS technology [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, **44**(11): 59-66+95] DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2019.11.009
- [40] LEE S, MIN K. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea [J]. Environmental Geology, 2001, **40**(9): 1095-1113. DOI: 10.1007/s002540100310
- [41] 孙晓慧. 快速隆升金沙江上游典型河段滑坡敏感性与风险性区划研究: 以徐龙—奔子栏河段为例[D]. 吉林: 吉林大学, 2020: 90-93. [SUN Xiaohui. Study on landslide susceptibility and risk mapping along the rapidly uplifting section of the upper Jinsha River: A case of Xulong to Benzilan reach [D]. Jilin: Jilin University, 2020: 90-93] DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2020.001120
- [42] 兰剑, 陈晓利. 2008 年 MS 8.0 汶川地震诱发滑坡灾害在映秀地区的演化特征[J]. 地震地质, 2020, **42**(1): 125-146. [LAN Jian, CHEN Xiaoli. Evolution characteristics of landslides triggered by 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake in Yingxiu area [J]. Seismology and Geology, 2020, **42**(1): 125-146] DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2020.01.009
- [43] 兰恒星, 伍法权, 周成虎, 等. 基于 GIS 的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(10): 1500-1506. [LAN Hengxing, WU Faquan, ZHOU Chenghu, et al. Analysis on susceptibility of GIS based landslide triggering factors in Yunnan Xiaojiang watershed [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(10): 1500-1506] DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2002.10.014
- [44] 叶培龙, 张强, 王莺, 等. 1980—2018 年黄河上游气候变化特征及其对生态植被和径流量的影响[J]. 大气科学学报, 2020, **43**(6): 967-969. [YE Peilong, ZHANG Qiang, WANG Ying, et al. Climate change in the upper Yellow River Basin and its impact on ecological vegetation and runoff from 1980 to 2018 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, **43**(6): 967-969] DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200924001
- [45] 吴博, 赵法锁, 段钊, 等. 基于熵权的属性识别模型在陕西土质滑坡危险度评价中的应用[J]. 灾害学, 2018, **33**(1): 140-145. [WU Bo, ZHAO Fasuo, DUAN Zhao, et al. Application of attribute recognition model based on coefficient of entropy to hazard degree evaluation of soil landslide in Shaanxi [J]. Journal of Catastrophology, 2018, **33**(1): 140-145] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.01.025
- [46] 张烜途. 岷江上游流域滑坡灾害发育特征及易发性评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2020: 41-42. [ZHANG Xuantu. Landslides characteristics and landslides susceptibility assessment in the upperstream catchment of Minjiang River [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020: 41-42] DOI: 10.27414/d.cnki.gxjtu.2020.001675
- [47] VAN ASCH T W J, BUMA J, VAN BEEK L P H. A view on some hydrological triggering systems in landslides [J]. Geomorphology, 1999, **30**(1): 25-32. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00042-2
- [48] 何玉花, 张东水, 李燕婷, 等. 基于 Google Earth 影像的黄河上游干流地区滑坡特征分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, **40**(7): 91-94. [HE Yuhua, ZHANG Dongshui, LI Yanting, et al. Analysis of landslide characteristics in main stream area of the upper reaches of the Yellow River based on Google Earth image [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2017, **40**(7): 91-94] DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2017.07.029
- [49] MA Peifeng, CUI Yifei, WANG Weixi, et al. Coupling InSAR and numerical modeling for characterizing landslide movements under complex loads in urbanized hillslopes [J]. Landslides, 2021, **18**: 1611-1623. DOI: 10.1007/s10346-020-01604-2
- [50] 许强, 黄润秋, 李秀珍. 滑坡时间预测预报研究进展[J]. 地球科学进展, 2004, **19**(3): 478-483. [XU Qiang, HUANG Runqiu, LI Xiuzhen. Research progress in time forecast and

- prediction of landslides [J]. *Advances in Earth Sciences*, 2004, **19**(3): 478 – 483] DOI: 10.3321/j.issn:1001 – 8166.2004.03.021
- [51] 陈贺, 汤华, 葛修润, 等. 基于深部位移的蠕滑型滑坡预警指标及预警预报研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, **38**(S1): 3015 – 3024. [CHEN He, TANG Hua, GE Xiurun, et al. Research on early warning of creep landslide by early-warning indicators based on deep displacements [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, **38**(S1): 3015 – 3024] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1336
- [52] 任开瑀, 姚鑫, 赵小铭, 等. 基于时序 InSAR、GPS、影像偏移测量 3 种监测数据的滑坡失稳破坏预测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, **39**(S2): 3421 – 3431. [REN Kaiyu, YAO Xin, ZHAO Xiaoming, et al. Study of landslide failure prediction based on TS-InSAR, GPS and image offset monitoring [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, **39**(S2): 3421 – 3431] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.1095

Early Identification and Influencing Factors of Potential Landslides in the Upper Reaches of the Yellow River, China

ZHAO Shufen^{1,2}, ZENG Runqiang^{1,2*}, ZHANG Zonglin^{1,2}, WANG Hong^{1,2}, MENG Xingmin^{1,2}

(1. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Technology & Innovation Centre for Environment Geology and Geohazards Prevention, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The special geological, geomorphological environment and regional climate, jointly contribute to the formation of large to giant landslide groups in the upper reaches of the Yellow River, which influence the region's economic development and ecological protection. InSAR technology can be used for early identification and prevention of geological hazards, helping to reduce the potential casualties and economic losses, but has not yet been applied in the upper reaches of the Yellow River. This study used SBAS-InSAR technology, optical remote sensing images and field surveys to define potential landslides along a 40 km section of the upper reaches of the Yellow River (Longyangxia to Liujiaxia). Specifically, we used SAR images from February 2017 to December 2020 to obtain surface deformation velocity. Results are as follows: (1) The 355 identified potential landslides were clustered in space, and include 85 sites located on old landslides. The potential landslides were mainly concentrated on river valley terraces and on low mountains and hills at an altitude of 1600 m to 2200 m. They were distributed on relatively weak stratum with slope of 10 ° to 30 °, aspect of 45 ° to 180 °, and height difference of 50 m to 200 m. The landslides were strongly affected by NWW-NW faults. (2) The deformation characteristics of the Xijitan Landslide and Suozi Landslide, which have undergone large deformation across a wide area and directly threaten villages and roads, show that both have developed from the local reactivation of old landslides. They were now in the stable creep and fluctuation creep stages, respectively. Our accurate and precise results, provide key data for potential landslide hazard investigation and assessment in this section, and are additionally of great scientific significance and application value.

Key words: upper reach of the Yellow River; SBAS-InSAR technology; early-identification; Xijitan landslide; Suozi Landslide; deformation stage