引用格式：李磊，顾畛逵，樊辉，等，2025. 金沙江下游白鹤滩蓄水触发库岸灾变的地貌标志研究[J]. 地质力学学报，31（4）：720−739. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025003

Citation: LI L，GU Z K，FAN H，et al.，2025. Geomorphic signatures of reservoir–slope hazards triggered by the Baihetan Reservoir impoundment, lower Jinsha River, China[J]. Journal of Geomechanics，31（4）：720−739. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025003

金沙江下游白鹤滩蓄水触发库岸灾变的地貌标志研究

李 磊[1,2,3,4]，顾畛逵[3,4]，樊 辉[1,2]，姚闯闯[3,4]，姚 鑫[3,4]，李仁江[5]，蒋 树[5]，戴福初[6]

LI Lei[1,2,3,4]，GU Zhenkui[3,4]，FAN Hui[1,2]，YAO Chuangchuang[3,4]，YAO Xin[3,4]，LI Renjiang[5]，JIANG Shu[5]，DAI Fuchu[6]

1. 云南大学国际河流与生态安全研究院，云南 昆明 650091；
2. 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室，云南 昆明 650091；
3. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
4. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室，北京 100081；
5. 中国长江三峡集团有限公司，四川 成都 610095；
6. 北京工业大学建筑工程学院，北京 100124

1. *Institute of International Rivers and Eco-Security*, *Yunnan University*, *Kunming* 650091, *Yunnan*, *China*;
2. *Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-Security*, *Kunming* 650091, *Yunnan*, *China*;
3. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
4. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081, *China*;
5. *China Three Gorges Corporation*, *Chengdu* 610095, *Sichuan*, *China*;
6. *Faculty of Architecture*, *Civil and Transportation Engineering*, *Beijing University of Technology*, *Beijing* 100124, *China*

Geomorphic signatures of reservoir–slope hazards triggered by the Baihetan Reservoir impoundment, lower Jinsha River, China

Abstract: ［**Objective**］Slope instability triggered by reservoir water-level fluctuations represents a prevalent geohazard in mountainous regions and canyons undergoing large-scale hydropower development. Since the 21st century, accelerated hydropower development has necessitated enhanced methodologies for identifying such specific-type geohazard potentials. In recent years, InSAR observations have largely addressed the challenge of identifying large-scale, multi-target deformation; however, due to limitations in real-time monitoring capabilities, this technique cannot detect latent hazards that have not yet manifested as deformations. Therefore, there is an urgent need to establish geomorphic signatures of reservoir-induced slope failures to improve hazard identification specificity. The large-scale impoundment of the Baihetan Reservoir since 2021 has triggered a series of slope instabilities, providing an exceptional opportunity to define the geomorphic signatures. ［**Methods**］We integrated InSAR observations, geomorphic parameters, and optical imagery. Specifically, we utilize 228 ascending and 234 descending Sentinel-1A datasets (2020–2023) processed with DS-InSAR to

基金项目：中国长江三峡集团有限公司科研项目（YMJ(BHT)/(21)036）；国家自然科学基金项目（42107218）；云南大学研究生科研创新基金项目（KC-242410443）；中国地质调查局地质调查项目（DD20230433）

This research is financially supported by the Project of Three Gorges Corporation (Grant No. YMJ(BHT)/(21)036), the National Natural Science Foundation of China (Grant No.42107218), the Scientific Research and Innovation Fund for Postgraduates of Yunnan University (Grant No. KC-242410443), and the Geological Survey Project of the Chinese Geological Survey (Grant No. DD20230433).

第一作者：李磊（2001—），男，在读硕士，主要从事灾害地质与地理过程研究。Email: lilei@stu.ynu.edu.cn

通信作者：顾畛逵（1987—），男，博士，副研究员，主要从事灾害地表过程及其环境效应研究。Email: guzhenkui15@mails.ucas.ac.cn

收稿日期：2025−01−14；**修回日期**：2025−06−11；**录用日期**：2025−06−12；**网络出版日期**：2025−06−18；**责任编辑**：吴芳

identify deformed slopes triggered by reservoir water-level fluctuations. [**Results**] The results demonstrate the explanatory power of geomorphic parameters such as toe height, slope, aspect, and roughness in relation to disaster triggers. Furthermore, the analysis reveals correlations between lithological variations, slope structures, precipitation, and reservoir water-level fluctuations. [**Conclusion**] The strength of lithology, slope structure, and geomorphometric parameters in the Baihetan Reservoir area, along with their corresponding numerical ranges, form composite geomorphic signatures that can be used to identify hazards associated with reservoir water-level-induced slope instability early on. Additionally, we discovered that, beyond the effects of water-level fluctuations , precipitation events also play a significant role in triggering slope instability in the reservoir area, highlighting the importance of this factor as a driving force. [**Significance**] These insights significantly advance risk mitigation strategies for hydropower projects, facilitating optimal site selection and operation of hydropower stations, while providing a reference framework for assessing other slope instability mechanisms.
Keywords: Baihetan; reservoir; landslide; InSAR; geomorphic signatures; geodetector; geohazard

摘　要：蓄水位变化触发的坡体失稳是高山峡谷区大规模水电开发情景下普遍存在的灾害形式。21 世纪以来，由于水电开发加剧，对这种特定类型灾害隐患的识别提出了更高要求。近些年，InSAR 观测在很大程度上解决了在大尺度空间开展多目标变形体识别的难题，但由于观测的即时性，无法识别尚未发生变形的隐伏灾患，迫切需要归纳蓄水触发岸坡灾变的地貌标志，以利灾患判别。自 2021 年白鹤滩库区大规模蓄水以来，连续触发一系列库岸坡体失稳，为总结蓄水灾变地貌标志提供了良好时机。文章通过将 InSAR 观测、一系列地貌参数及光学影像进行有机结合，即利用 2020—2023 年期间升轨 228 景、降轨 234 景的 Sentinel-1A 数据，借助 DS-InSAR 技术对蓄水触发变形坡体进行识别，对其拔河高度、坡度、坡向和起伏度等一系列地貌参数的灾变触发解释力进行了排序，又结合岩层结构、岩性差异、降水与蓄水位变化记录进行了相关性分析，得出了白鹤滩库区蓄水位触发失稳坡体的岩性强弱、岸坡结构和地貌参数及其数值区间，形成的组合形式可作为地貌标志用于实现对该类型灾害隐患的早期识别。在进一步的分析过程中发现，除了蓄水作用之外，降水事件也是库岸坡体失稳不可忽视的驱动因素。该认识对于水电开发背景下的防灾减灾工作具有积极意义，有利于水电站选址与运营，并为其他类型坡体失稳评估提供参考。
关键词：白鹤滩；水库；滑坡；InSAR；地貌标志；地理探测器；地质灾害
中图分类号：P694; P237　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)04−0720−20
DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025003

0　引言

坡体失稳是山地灾害的重要类型，在中国西部地区极为发育。造成坡体失稳的原因一方面是由于该区域处于侵蚀发育壮年期，构造活跃、气候空间变化剧烈，内外营力的对抗作用导致河谷持续深切，滑坡随着地貌变迁而持续孕育；另一方面，则是由于人类活动对地质环境的扰动，包括城市扩张、公路建设、铁路建设、农业灌溉以及水利开发等（高秉海等，2023；王江波等，2023；曾帅等，2023；周洪福等，2023；李白露，2024；李亚军等，2024；余文秀等，2024；赵鹏等，2024）。因此，滑坡的孕育与灾变也表现出多成因特点。西南地区是中国重要的水资源储备和水电开发基地，在恶劣地质环境下正持续产生坡体失稳灾变，以金沙江下游最为典型。目前该区域已开发出“乌东德−白鹤滩−溪洛渡−向家坝”四级超大型梯级水库，库岸里程长约 760 km（Liu et al., 2021；唐凤娇等，2022），成为当今世界最大的清洁能源走廊，且金沙江中上游干流仍将持续建设大型水电站，计划数量高达 25 座（唐凤娇等，2022）。由此产生的蓄水位周期变化会对水文地质条件产生巨大影响，可能会催生出更多新生的坡体失稳并导致一些已经稳定的古滑坡复活，破坏生态基础并产生社会安全隐患。例如，1961 年发生在湖南省资水柘溪水库蓄水初期的塘岩光滑坡，引起的浪涌泄向下游造成 40 人死亡（金德镰和王耕夫，1988）；1963 年在意大利瓦依昂水库蓄水期间发生的巨型滑坡造成约 2000 余人死亡，并冲毁下游城镇（Müller-Salzburg, 1987）；2003 年三峡水库蓄水初期催生的千将坪滑坡造成 24 人死亡，1100 多座房屋

被毁(廖秋林等, 2005)。如果能在蓄水前及时识别出这些隐患,将为水电开发早期的移民搬迁、开发过程中的边坡治理以及运营过程中的灾变预警等一系列安全管理问题的解决争取到宝贵的时间,是促进经济–自然生态系统协调发展的有效助力因素。

对于灾害隐患的识别,早期采用人力排查的方式,通过对地裂缝、墙体开裂等直观变形迹象加以确认,然而受限于主观误差及时效性,难以满足大范围灾患识别需求。光学遥感识别虽然能适应大空间尺度探测且具有直观性,但易受云雾干扰而导致信息不完整(陆会燕等, 2019)。近些年因星载SAR(Synthetic Aperture Radar)数据、GNSS(Global Navigation Satellite System)监测以及高分辨率光学影像的应用,InSAR观测技术(Ferretti et al., 2001, 2011; Berardino et al., 2002)、像元偏移追踪技术(Michel et al., 1999)等方法得以快速普及。通过对多种遥感技术的结合实现了大范围、长周期、直观性、高精度与全天时观测特点的多维互补,大幅提高了灾患识别准确性。然而,在高起伏山区受叠掩、目视经验等因素的制约,光学遥感辅助下的InSAR观测依然难以克服地形起伏引起的几何畸变和植被覆盖导致的低相干(Bürgi and Lohman, 2021)。鉴于灾害隐患在发育和灾变过程中均以形态变化的形式出现(Liu et al., 2021; Steger et al., 2021; 顿佳伟等, 2023; Tang et al., 2024),即与地貌特征具有物理机制上的根本相关性,故研究通过引入拔河高度、坡度、坡向、地形起伏度、地表粗糙度、平面曲率、剖面曲率、高程变异系数、面积–高程积分值、地形湿度指数、表面指数、输沙能力指数等一系列量化参数,将InSAR观测、光学影像与地貌特征进行有机结合,通过分析典型蓄水触发岸坡灾变体的地貌参数,归纳其标志性地貌特征,借以通过更为简单的方式识别具备蓄水诱发变形可能性的坡体,即利用具有针对性的地貌标志,实现对尚未发生变形而在未来蓄水条件下可能发生变形的隐藏灾害体的判定。借助这种标志有望实现对潜在隐患的超前判断,将对未来的水库建设与运营提供有效参考和指导。

1 研究区和数据

1.1 研究区概况

位于金沙江下游的白鹤滩水电站是中国第二大水电站,地处四川省和云南省的交界。白鹤滩库区内地层岩性多为灰岩和玄武岩,其中玄武岩较脆、易破裂(Dai et al., 2023);地质构造特征主要是褶皱和断层(Yao et al., 2022)。所在川滇地区的地质构造形成一个“Y”形带,主要由北部松潘–甘孜地块、东部四川盆地地块、西部川滇菱形地块组成。白鹤滩水库位于川滇菱形地块东部边界,多条左旋走滑和逆冲断裂发育(Fu et al., 2021; Zhou et al., 2022)。穿越库区的断层包括小江断层和大凉山断层等(Li et al., 2022),其中小江断裂是库区内最为活跃的典型断裂(Liu et al., 2023)。库区谷深约1500～3000 m,是典型的V型河谷地貌(Li et al., 2022)。库区内平均气温21.7 °C,平均年降水量715.9 mm,全年降水日数约为100天(Liu et al., 2024)。水库自2021年开始蓄水,库区水位由660 m上升至825 m。水电站运行期间最低水位765 m,最高水位825 m,最大升降水位差大约60 m(冯文凯等, 2021; 佘雅文等, 2021)。研究区位于白鹤滩库区库水面左右两岸5 km范围内,具体地理位置及范围如图1所示。

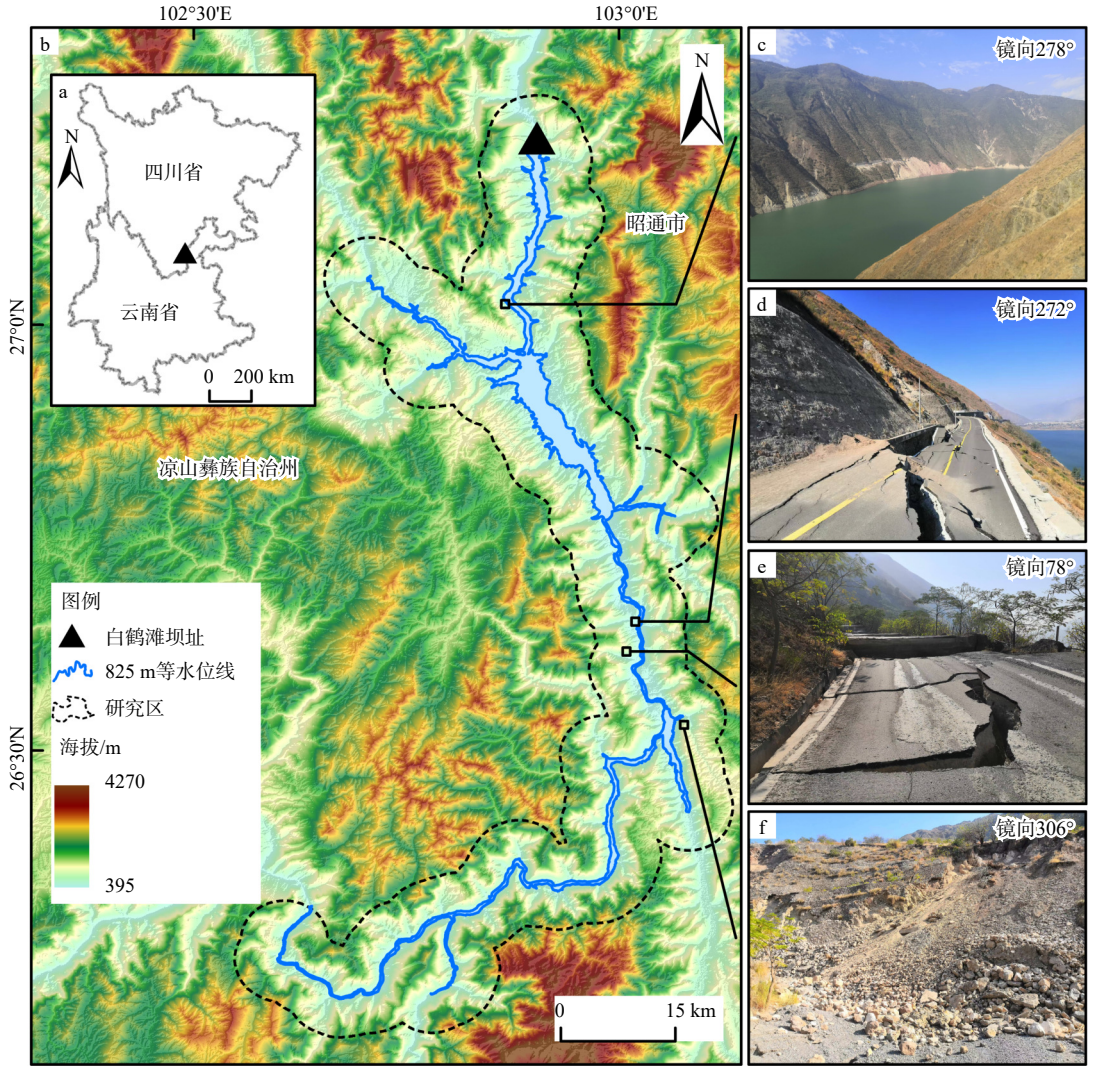
1.2 数据来源

研究过程基于C波段成像的Sentinel-1A干涉宽幅单视复数(Single Look Complex, SLC)SAR数据(https://browser.dataspace.copernicus.eu/),包括升轨数据228景,降轨数据234景,几何分辨率为5 m × 20 m。时间范围为2020年1月至2023年12月,最小时间间隔为12d,极化方式为VV,成像方式为IW(表1)。为提高影像的轨道精度,引入POD(Precise Orbit Ephemerides)精密定轨星历数据(https://browser.dataspace.copernicus.eu/),并结合GACOS(Generic Atmospheric Correction Online Service)数据(http://ceg-research.ncl.ac.uk/v2/gacos/)以弱化大气影响。SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)DEM数据(30 m分辨率)用于去平地效应、地形相位和地理编码。降水数据来源于国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)中国逐日降水数据集(1961—2022年),数据为NETCDF格式,时间分辨率为1d,水平空间分辨率为0.1° × 0.1°。

2 研究方案

2.1 技术框架

实施路线如图2所示,主要内容包括:①研究区地表形变速率获取,即借助ENVI SARscape平台,采用DS-InSAR技术分别对升、降轨条件下白鹤滩库区蓄水前(2020年)和蓄水后(2021—2023年)逐



基于国家地理信息公共服务平台 GS(2024)0650 号标准地图制作，底图边界无修改

a—白鹤滩水电站地理位置；b—研究区范围及海拔；c—不稳定区域 1 实景照片；d—不稳定区域 2 实景照片；e—不稳定区域 3 实景照片；f—不稳定区域 4 实景照片

图 1　研究区概况图

Fig. 1　Overview map of the study area

(a) Location of the Baihetan Hydropower Station; (b) Extent and elevation of the study area; (c) Photo of unstable area 1; (d) Photo of unstable area 2; (e) Photo of unstable area 3; (f) Photo of unstable area 4

Fig. 1a is produced based on the standard map (No. GS(2024)0650) from the National Geographic Information Public Service Platform, without modification of the base map boundaries.

年的地表形变速率进行观测，在此过程中需要完成数据导入、连接图生成、干涉影像生成、变形相位反演以及地理编码等处理步骤（陈志谋等，2017）；②基于 DEM 数据，采用 r.slopeunits 方法划分斜坡单元（Alvioli et al., 2016），计算系列地貌参数，并以斜坡单元为基础进行分区统计；③根据识别的所有变形坡体（分为涉水坡体和非涉水坡体）及其地貌参数，分析蓄水、非蓄水触发坡体在地貌参数中的分异，并结合岩性、岸坡结构等特征确定蓄水位触发岸坡灾变的地貌标志。选取若干典型蓄水触发的变形坡体，分析其形变过程与降水量、蓄水位变化之间的相关性，以明确地貌特征的指示程度。将蓄水之前（2020 年）以及蓄水之后（2021—2023 年）识别的非涉水坡体定义为非蓄水触发坡体；蓄水之后（2021—2023 年）识别的涉水坡体定义为蓄水触发坡体。

2.2　关键技术

2.2.1　斜坡单元划分

由于坡体失稳是发生在有限空间范围内的斜

表 1 SAR 影像及具体参数

Table 1 Basic parameters of SAR datasets

属性	参数
卫星	Sentinel-1A
波段	C
波长/cm	5.6
成像模式	IW
极化方式	VV
入射角/(°)	43.34(升轨) 39.06(降轨)
方位角/(°)	12.54(升轨) 167.46(降轨)
轨道号	升轨(26) 降轨(62)
距离向及方位向分辨率/m×m	5 × 20
最短时间基线/d	12
影像数量/景	228(升轨) 234(降轨)
时间范围	2020-01-09−2023-12-31(升轨) 2020-01-11−2023-12-21(降轨)
多视参数(方位向:距离向)	2:8

坡面，斜坡单元划分的合理性和精确度会对描述失稳坡体性质产生重要影响。研究表明，斜坡单元是滑坡等地质灾害隐患的基本单元，尤其对于深层滑坡，边界与斜坡单元则极为接近(Lin et al., 2021)。研究过程中的斜坡单元划分基于 r.slopeunits 实现(Alvioli et al., 2016)，即通过计算汇流累积量并借助阈值变化将每个子流域划分为左、右 2 个“半流域”(half basin, HB)，剔除包含沟谷的 HB，并计算每个 HB 的坡向圆方差(1−|*R*|/N_v)，其中|*R*|为 HB 内所有栅格坡向矢量和的模，N_v 为 HB 内的栅格数目。当 HB 的坡向圆方差大于给定阈值(*c*)时，认为其坡向均质，可将该 HB 作为最终的斜坡单元；否则通过减小集水面积阈值重新提取河网，对 HB 进行再次细分。当 HB 的面积超过指定的斜坡单元最大面积，即便满足坡向均质条件，仍进行细分；当 HB 的面积小于指定的最小面积时，无论其是否满足坡向均质条件，均不再进行细分处理。划分过程依托 GRASS GIS 平台，斜坡单元的大小、方向由最小流域面积(*a*)和斜坡单元内坡向的最小圆方差(*c*)2 个参数共同决定。初始流量累计面积(*t*)和迭代系数(*r*)等参数仅用于数值计算的收敛控制，不具有直接的地貌学意义(吴先谭等, 2022)。在进行滑坡稳定性分析时会考虑评价单元的均一性，如单元内坡向、坡度均一性(王凯等, 2020)，故选取坡向标准差和坡向全局莫兰指数(Global Moran's Index, *GMI*)来评价斜坡单元的坡向均质性和单元间的异质性(张建廷等, 2015)。当坡向标准差和 *GMI* 较小时，坡向变化幅度小，斜坡单元的均一性较好(吴先谭等, 2022)。通过设置多组参数，按照最大限度保证斜坡单元内坡向均质的要求，最终确定将 $a = 0.45$ km^2、$c = 0.6$、$t = 0.5$ km^2 和 $r = 10$ 作为斜坡单元划分参数。

2.2.2 地貌参数计算

选取拔河高度、坡向、坡度、地形起伏度、平面曲率、剖面曲率、地表粗糙度、高程变异系数、面积−高程积分值、地表指数、地形湿度指数和输沙能力指数共计 12 项地貌参数(Andreani and Gloaguen, 2016; 王淞等, 2022; 安雪莲等, 2024)。其中，拔河高

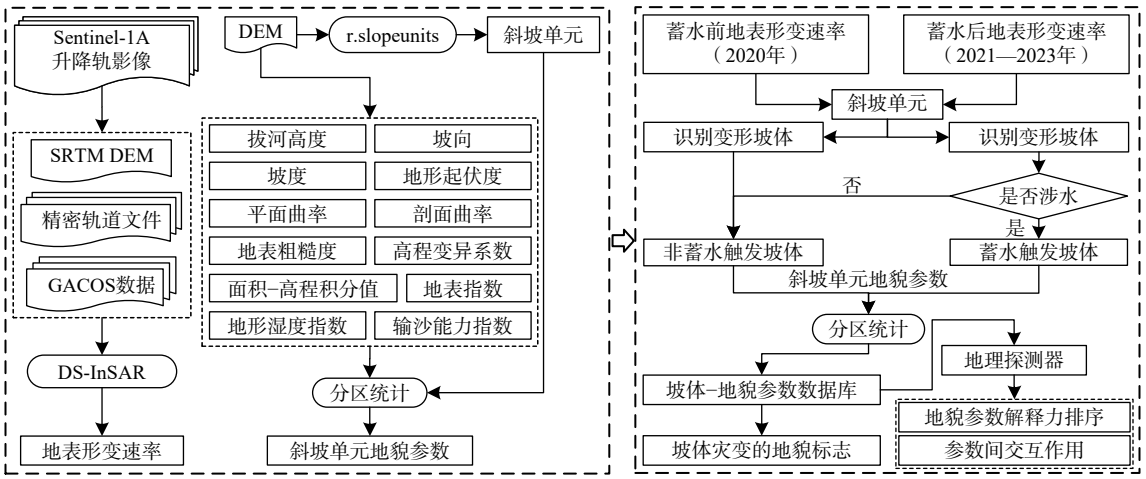


图 2 研究技术路线图

Fig. 2 Research technical workflow

度虽然不直接影响坡体失稳，但失稳坡体可能集中在一定高程范围内；坡向会影响太阳辐射和水汽分布，使得降雨、风化和侵蚀呈现坡向差异，例如在忽略构造作用时，迎风坡和阳坡的坡体失稳概率较高（吴彩燕和乔建平，2005）；地形起伏度描述宏观的地形变化情况（顾文亚等，2020），使用 3×3 像元大小的窗口计算地形起伏度。坡度影响岩土的应力分布，在一定数值区间内对失稳坡体具有显著控制作用（Dai and Lee, 2002）；曲率反映地表凹凸程度，凹陷地形汇集地表径流从而提高孔隙水压力，易引发浅层坡体失稳（Ayalew et al., 2004）。平面曲率和剖面曲率是曲率在水平和垂直 2 个方向上的分量；地表粗糙度表征地表纹理光滑度，坡体失稳区域粗糙度往往较高，不同类型失稳坡体的粗糙度也不尽相同（McKean and Roering, 2004）；高程变异系数是区域内高程标准差与平均值的比值，反映区域内地貌特征的差异性（欧阳晓，2011）；面积−高程积分值描述侵蚀发育阶段，高值对应侵蚀发育的早期，低值表示侵蚀末期，失稳坡体多集中在壮年期（Gu et al., 2021）；地表指数（Surface Index, *SI*）结合了面积−高程积分值、高程和地表粗糙度，可区分局部地形起伏较小区域和地形较为崎岖区域。其正值表示局部地势较低，而负值则表示地貌崎岖不平。公式为（Andreani and Gloaguen, 2016）：

$$SI = (N_{\mathrm{HI}} N_{\mathrm{h}}) - N_{\mathrm{SR}} \tag{1}$$

式中，N_{HI}、N_{h} 和 N_{SR} 分别为归一化的面积−高程积分值、高程值和地表粗糙度值。地形湿度指数（Topographic Wetness Index, *TWI*）基于单位汇水面积和坡度计算，反映降雨过程中土壤饱和度的分布状况，对于坡体稳定性存在潜在影响，公式为（Borga et al., 2002）：

$$TWI = \ln\left(\frac{A_{\mathrm{s}}}{\tan\beta}\right) \tag{2}$$

式中，A_{s} 为单位面积的汇流累积量，m²；β 为局地坡度，%。输沙能力指数（Sediment Transport Index, *STI*）可以定量描述地表水的输沙能力和侵蚀能力，其值越大，水流的输沙能力和侵蚀能力越强，更容易致使边坡失稳，公式为（Moore and Wilson, 1992）：

$$STI = \left(\frac{A_{\mathrm{s}}}{22.13}\right)^{0.6} \times \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^{1.3} \tag{3}$$

式中，A_{s} 为单位面积的汇流累积量，m²；β 为局地坡度，%。

2.2.3　地理探测器分析

地理探测器模型用来探寻空间分异并揭示驱动因子（王劲峰和徐成东，2017）。早期地理探测器模型受离散方法与分级数的限制，Song et al.（2020）在此基础上开发出具有最优参数的地理探测器（OPGD）模型，组合连续型变量不同的离散化分级方法和分级数，根据变量最高解释度对应的离散化参数组合作为最优参数，以实现更准确地空间分析。原理如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{\mathrm{h}-1}^{\mathrm{L}} N_{\mathrm{h}}\sigma_{\mathrm{h}}^2}{N\sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \tag{4}$$

$$SSW = \sum_{\mathrm{h}-1}^{\mathrm{L}} N_{\mathrm{h}}\sigma_{\mathrm{h}}^2, SST = N\sigma^2 \tag{5}$$

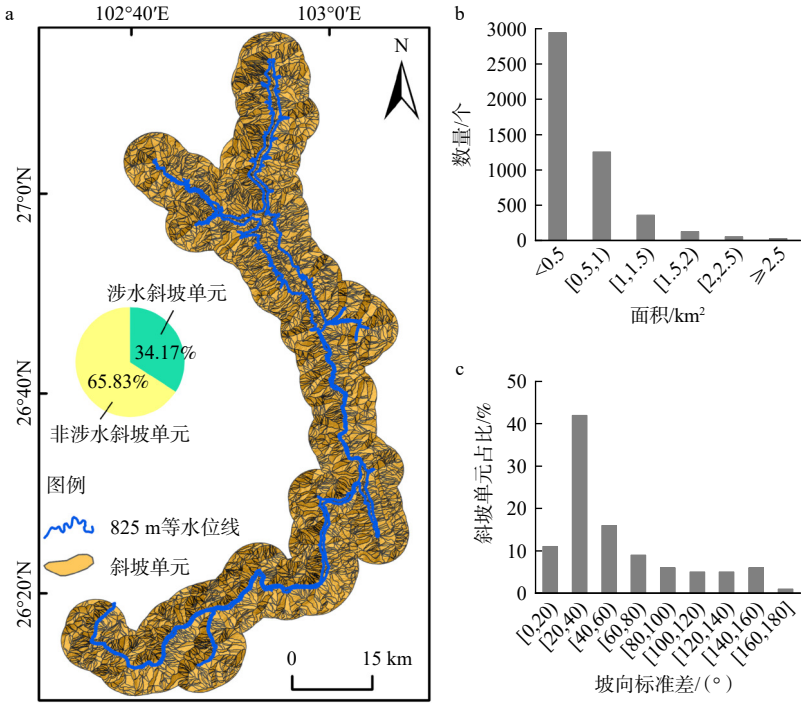
式中，q 代表因子的解释力，值域为（0, 1），越趋近于 1 解释力越高；h 代表解释变量或解释变量的分层；N_{h} 和 N 为层 h 和全区的单元数，σ_{h}^2 和 σ^2 分别代表层 h 和全区因变量值的方差，*SSW* 和 *SST* 分别为层内方差之和与全区总方差。

3　结果与分析

3.1　斜坡单元与地貌参数

基于 GeoDa 软件计算的 *GMI* = 0.41 条件下的斜坡单元与后期 InSAR 观测到的变形坡体规模相适应，划分效果良好。划分得到 4765 个斜坡单元，在水位线边界 5 km 范围内，涉水斜坡单元的比例达到 34.17%，非涉水斜坡单元占比达 65.83%（图 3a）。斜坡单元面积主要分布在小于 1 km² 区间，大部分集中在 0.5 km² 附近，极少数斜坡单元的面积大于 2.5 km²（图 3b）。斜坡单元中坡向标准差分布在 0° ～180°之间，在 0°～60°较小范围的斜坡单元占比达到 69%（图 3c）。以斜坡单元为提取单元获取的各参数平均值分布情况见图 4，其中涉水坡体各地貌参数的分布情况为：拔河高度集中于 100～500 m；坡度集中于 20°～30°；地形起伏度值集中于 30～50 m；粗糙度为 1.1～1.2；平面曲率和剖面曲率值介于 0～0.05；高程变异系数值集中在 0.01～0.015；面积−高程积分值集中在 0.48～0.5；地表指数值则介于 0～0.1；地形湿度指数值介于 6～7；输沙能力指数值为 1.5～4.5；

坡向多为东、西、西南向。对于非涉水坡体，拔河高度一般为600～1200 m，坡度值为20°～30°，地形起伏度值为35～50 m，粗糙度为1.1～1.2，平面曲率和剖面曲率值介于−0.02～0.02，高程变异系数值集中于0.005～0.01，面积−高程积分值集中在0.49～0.51，地表指数值则介于0.1～0.2；地形湿度指数值为5.5～6，输沙能力指数值为1.5～4，坡向与涉水坡体坡向的空间分布格局无明显差异。



涉水坡体为与825m水位线存在相交情况的斜坡单元

a—斜坡单元；b—斜坡单元面积−数列特征；c—坡向标准差特征

图3 斜坡单元划分结果及特征

Fig. 3 Slope unit delineation and characteristics

(a) Slope units; (b) Area–sequence characteristics of slope units; (c) Aspect standard deviation characteristics

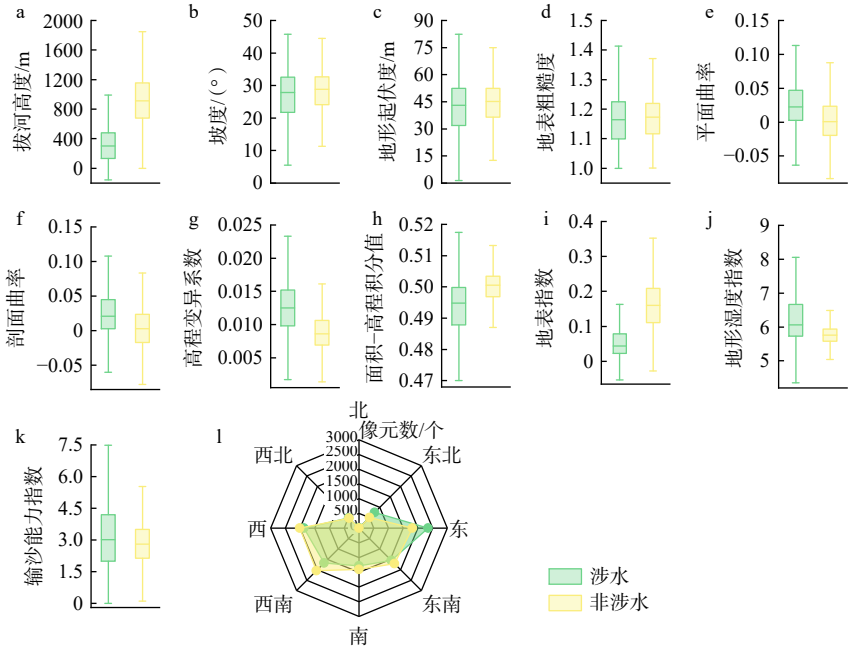
Water-influenced slopes refer to those intersecting with the 825 m water level contour.

3.2 蓄水前、后斜坡变形体空间分布

基于DS-InSAR技术获取的年均地表形变速率(图5)，由于Sentinel-1A数据在高植被覆盖区易受到散射和植被生长季节性变化的影响导致干涉图失相干，使得获取的形变速率会出现局部空洞。蓄水之后识别出的变形坡体主要呈现出形变加剧(图6a)、形变稳定(图6b—6d)和形变消退(图6e)3种状态。水库蓄水前(2020年)在研究区共解译出变形坡体89处，其中升轨条件下识别40处，降轨条件下识别52处，升降轨共同体现出的有3处。水库蓄水后(2021—2023年)解译出变形坡体144处，其中升轨条件下识别77处，降轨条件下识别74处，升降轨共同体现出的有7处。在升轨识别的77处中，呈现形变加剧状态的变形坡体有53处，15处坡体呈现形变稳定状态，9处坡体的形变呈现消退状态；在降轨识别出的74处中，呈现出形变加剧状态的变形坡体有43处，25处坡体呈现形变稳定状态，6处坡体的形变呈现消退状态。对比蓄水前后变形坡体的空间分布发现，蓄水前识别的变形坡体在库区上游、下游段的分布较为集中，中游分布较少且较为零散，蓄水后新增的变形坡体主要分布在研究区的中上游段(图7)。

3.3 蓄水与非蓄水触发隐患地貌参数特征

蓄水触发的变形坡体拔河高度主要分布范围为200～500 m，与蓄水位抬高量表现出一定的一致性；而在较高拔河高度、大起伏区以及距离库区较远区域，变形坡体发育明显较少。蓄水触发的变形坡体主要分布在东、西和西北向，坡度20°～40°区间变形坡体数量较多，特征最为明显。此外，在地形起伏为32～64 m、地表粗糙度为1.24～1.48，高程



a—拔河高度数值分布；b—坡度数值分布；c—地形起伏度数值分布；d—地表粗糙度数值分布；e—平面曲率数值分布；f—剖面曲率数值分布；g—高程变异系数数值分布；h—面积−高程积分值数值分布；i—地表指数数值分布；j—地形湿度指数数值分布；k—输沙能力指数数值分布；l—坡向数值分布

图 4　地貌参数数值分布情况

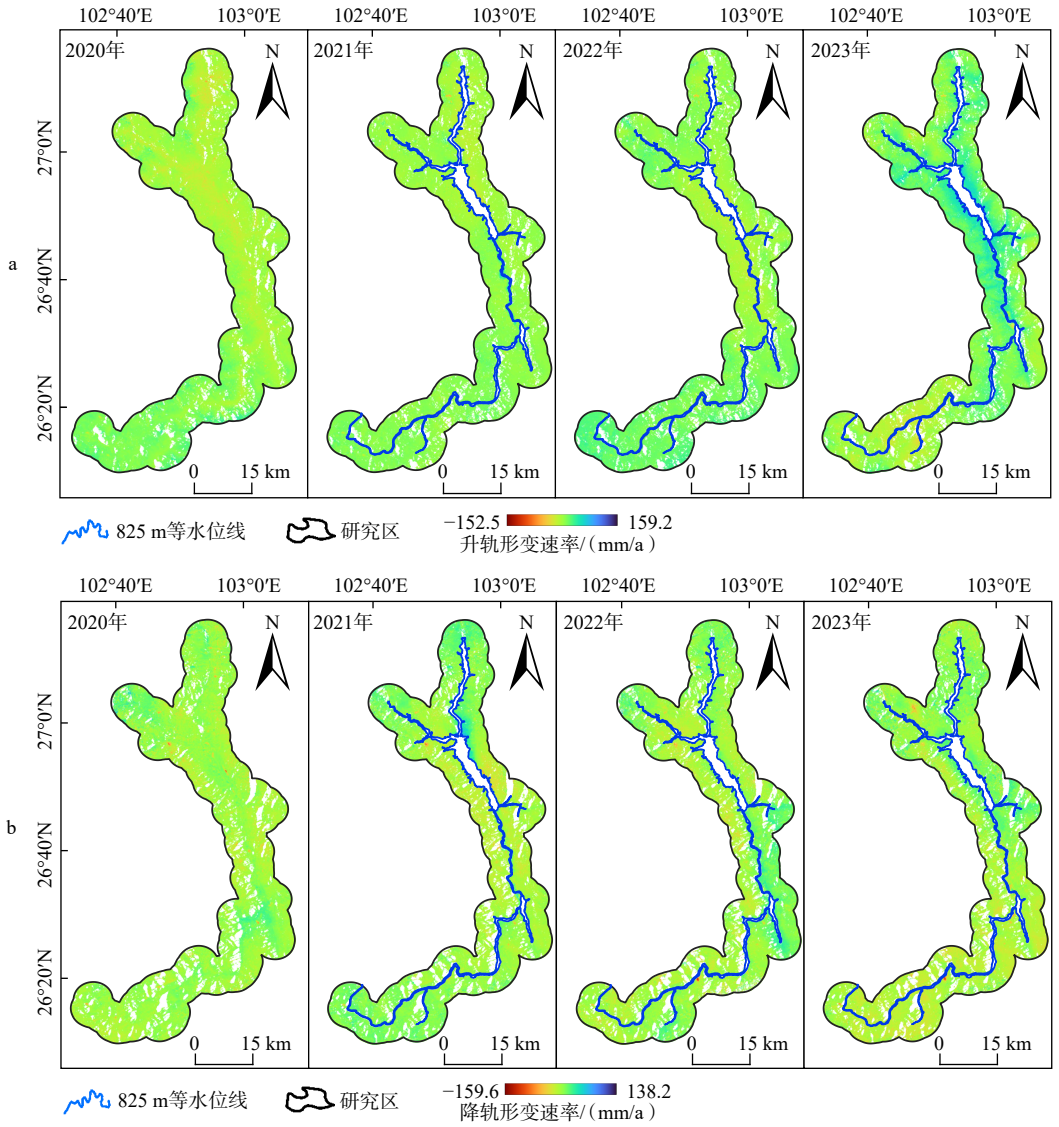
Fig. 4　Numerical distribution of geomorphic parameters

(a) Numerical distribution of toe height; (b) Numerical distribution of slope gradient; (c) Numerical distribution of terrain relief; (d) Numerical distribution of surface roughness; (e) Numerical distribution of plan curvature; (f) Numerical distribution of profile curvature; (g) Numerical distribution of elevation coefficient of variation; (h) Numerical distribution of area–elevation integral value; (i) Numerical distribution of surface index; (j) Numerical distribution of topographic wetness index; (k) Numerical distribution of sediment transport capacity index; (l) Numerical distribution of aspect

变异系数为 0.01～0.02、地表指数为−0.11～0.07 时，也容易触发坡体变形；非蓄水触发的变形坡体拔河高度主要分布范围为 500～800 m，其次为 200～500 m 和 800～1100 m。在地形起伏为 32～64 m、地表粗糙度为 1～1.24、高程变异系数为 0.01～0.02、地表指数为 0.07～0.25 的范围内也有不少分布。对于平面曲率、剖面曲率、面积−高程积分值和输沙能力指数，蓄水触发型坡体和非蓄水触发型坡体的分布集中，分布在平面曲率为−1～2、剖面曲率为−2～1、面积−高程积分值为 0.42～0.58 以及输沙能力指数为 0～286 的范围内（图 8）。

3.4　地形特征驱动的解释力与联合判别

应用地理探测器模型因子探测分析变形坡体发育相关的地貌参数的解释力大小（图 9），并得出各地貌参数的显著性检验 P 值（表 2）。P 值越小，认为对比事物间存在差异。P<0.05，证明结果显示的差别由偶然因素所致的可能性不足 5%，亦或在同样条件下重复同样的研究，得出相反结论的可能性不足 5%。P≤0.05 称为显著，P>0.05 称为不显著。涉水坡体各地貌参数的解释力由大到小排序为：坡向>输沙能力指数>拔河高度>坡度>地表粗糙度>地形起伏度>地形湿度指数>剖面曲率>平面曲率>面积−高程积分值>地表指数>高程变异系数（图 9a），且各地貌参数的 P 值均小于 0.05，通过显著性检验（表 2）。其中，坡向的解释力最高，因子解释力（q 值）达到 0.294。输沙能力指数、拔河高度和坡度的解释力也相对较高，达到 0.1 以上。这说明坡向对涉水坡体失稳起着控制作用，一方面，由于水库的空间走向接近于南北向，蓄水位变化对东西朝向的坡体具有特定的扰动作用；另一方面，这类坡体均为阳坡属于有利于风化壳发育和不稳定堆积体形成的坡向。输沙能力指数、拔河高度和坡度的驱动作用也较强，其余地貌参数的驱动作用相对较弱。对非涉水坡体而言，地貌参数的解释力大小顺



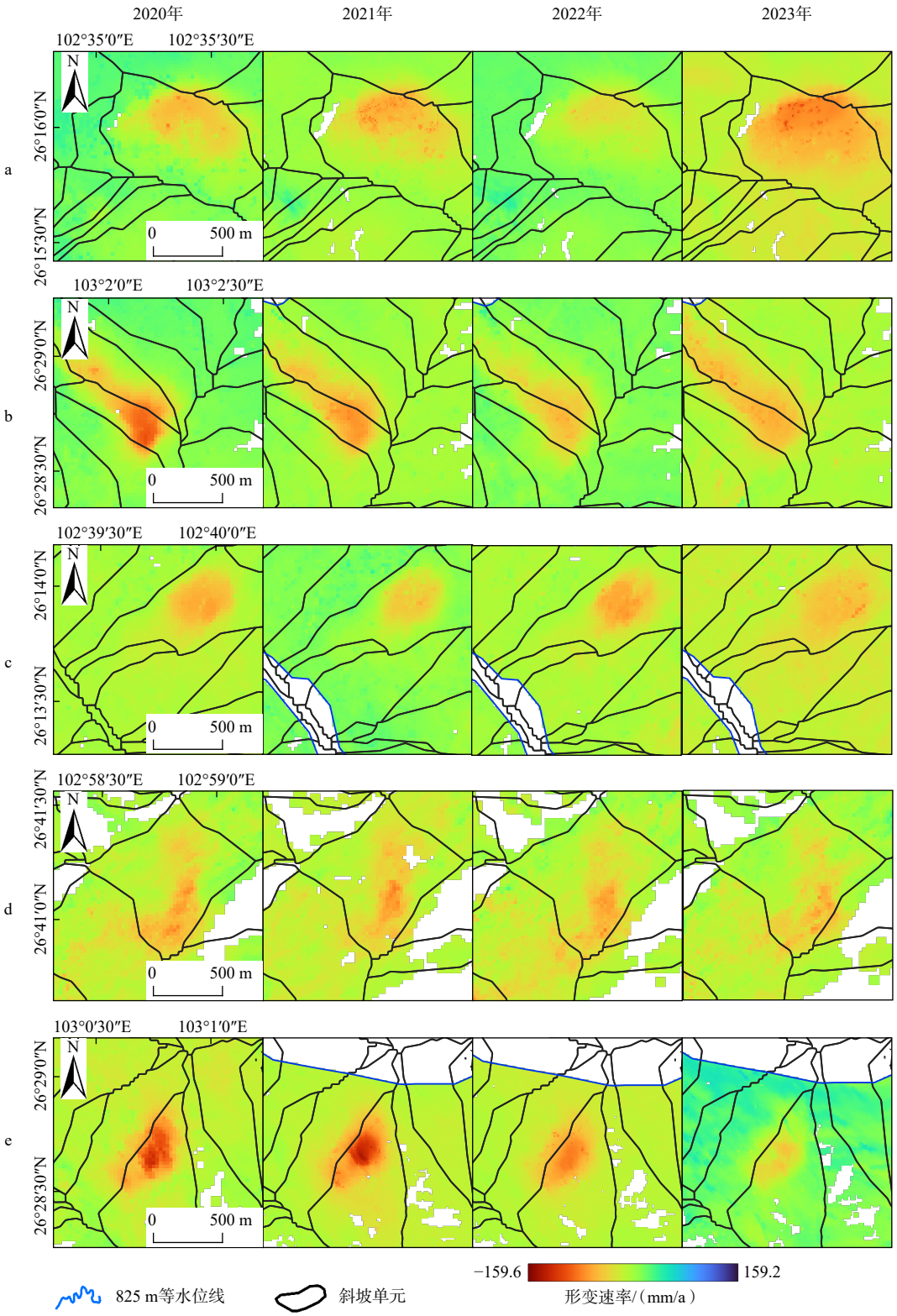
a—基于升轨数据；b—基于降轨数据

图 5 DS-InSAR 监测地表形变速率

Fig. 5 Surface deformation rates monitored by DS-InSAR

(a) Based on ascending orbit datasets; (b) Based on descending orbit datasets

序为：地表粗糙度>地形起伏度>地表指数>坡度>输沙能力指数>拔河高度>坡向>地形湿度指数>剖面曲率>平面曲率>高程变异系数>面积−高程积分值(图 9b)，除面积−高程积分值外，其余各地貌参数的 P 值均小于 0.05，通过显著性检验(表 2)。其中，地表粗糙度、地形起伏度、地表指数和坡度的解释力相对较高，均达到 0.1 以上。地表粗糙度的解释力最高，q 值达到 0.115，其余地貌参数的解释力相对较低。这表明地表粗糙度、地形起伏度、地表指数和坡度是非涉水坡体发育的重要驱动因素，其中地表粗糙度起着较为突出的作用，其余参数驱动作用相对较弱。除此之外，考虑到单个地貌参数对坡体失稳的判别不够显著，但多个地貌参数交互之后，可能使其解释力显著增强，地貌参数间的交互作用也需要注意(图 10)。其中对于涉水坡体，坡向与输沙能力指数、地形湿度指数、面积−高程积分值、高程变异系数、地表粗糙度、地形起伏度以及坡度的交互作用显著，其中与输沙能力指数的交互作用最强，q 值为 0.43(图 10a)，二者可协同解释 43% 的涉水坡体失稳现象。对于非涉水坡体，坡度和拔河高度、坡向，地表指数和坡度、地形起伏度、地表粗糙度存在显著交互作用，其中坡度和坡向的交互作用

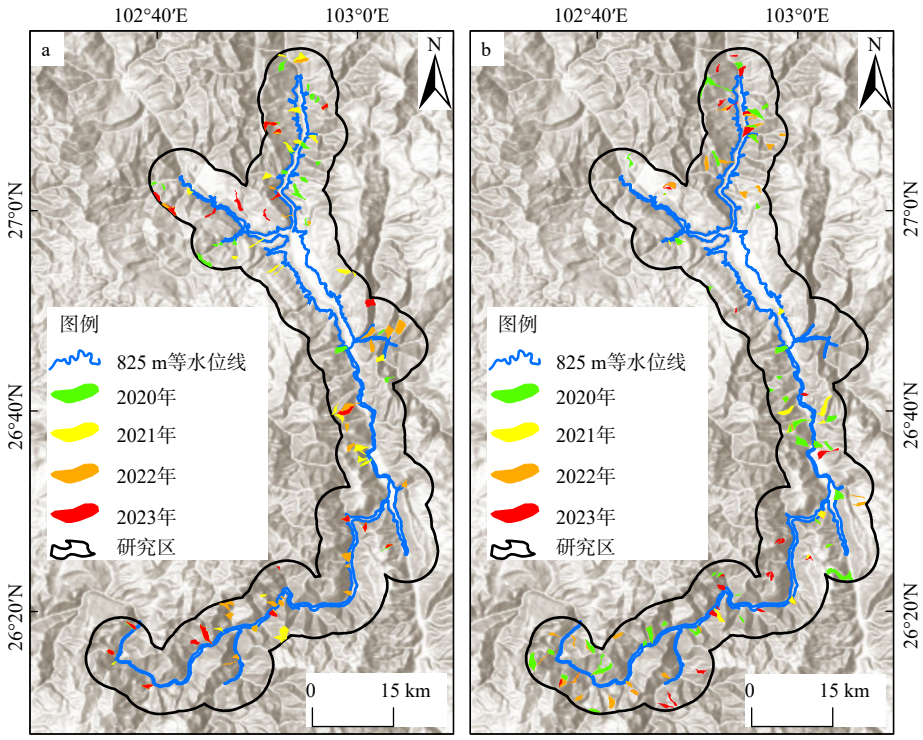


a—典型变形坡体 1 形变特征；b—典型变形坡体 2 形变特征；c—典型变形坡体 3 形变特征；d—典型变形坡体 4 形变特征；e—典型变形坡体 5 形变特征

图 6　典型变形坡体的 InSAR 观测特征

Fig. 6　InSAR-monitored characteristics of typical deformed slopes

(a) Deformation characteristics of deformed slope 1; (b) Deformation characteristics of deformed slope 2; (c) Deformation characteristics of deformed slope 3; (d) Deformation characteristics of deformed slope 4; (e) Deformation characteristics of deformed slope 5



a—基于升轨数据识别的变形坡体所在斜坡单元；b—基于降轨数据识别的变形坡体所在斜坡单元

图 7 变形坡体空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of deformed slopes

(a) Slope units with deformed slopes identified from ascending orbit datasets; (b) Slope units with deformed slopes identified from descending orbit datasets

最强，q 值为 0.30(图 10b)，二者可协同解释 30% 的非涉水坡体失稳现象。

4 讨论

4.1 降水与蓄水位变化的岸坡失稳影响

天然地表条件下，失稳坡体的发育和分布受到地貌、岩性、地层构造以及降水等因素综合影响(姚鑫等，2020；吴昊等，2021；吕蓓茹等，2022；隆然和刘兴东，2023；苏晓军等，2024)。大型水库区岸坡失稳的特殊性在于，除受到上述因素作用外，库区蓄水对其影响也较大，且作用更加直接有效(史先琳等，2023)，其对坡体失稳的影响主要通过浸泡库岸岩土体，蓄水位的急剧升降产生的动水压力作用来实现(袁中友和唐晓春，2003；贺可强和郭璐，2017)。由于其变化的活跃性和幅度特征，往往能在短时间内触发坡体灾变。与此同时，降水事件也可能通过水体下渗、润滑等作用对这种灾变过程产生影响(Tang et al., 2025)。为确定灾变过程对降水和蓄水变化的响应特点，即在发生降水事件、蓄水位上升以及下降时坡体的形变趋势如何，选取不同岩性、岸坡结构的涉水坡体和非涉水坡体各 5 处作为检测案例。其中 W1—W5 为 5 处涉水坡体，经纬度坐标依次为：(26.35°N, 102.99°E)(26.50°N, 103.04°E)(26.83°N, 102.98°E)(26.95°N, 102.79°E)(27.14°N, 102.92°E)，位于较软岩组和较硬岩组，岸坡结构为反向坡和斜向坡，分布在西北向，输沙能力指数 0～286，拔河高度 200～500 m 和坡度为 30～40°区间内；NW1—NW5 为 5 处非涉水坡体，经纬度坐标依次为：(26.87°N, 102.85°E)(26.68°N, 103.05°E)(26.39°N, 103.07°E)(26.31°N, 102.78°E)(26.25°N, 102.63°E)，位于较软岩组、较硬岩组和极硬侵入岩类，分布在坡度 30°～40°、拔河高度 500～800 m、南向和地形湿度指数为 2.5～6.3 区间内。通过计算坡体的时序形变速率分别与降水、蓄水位之间的斯皮尔曼相关系数，分析坡体形变速率与降水、蓄水位变化的相关性来确定其响应规律。进一步的研究显示，涉水坡体的形变与降水量变化间呈现一定的规律性(图 11a)，非涉水坡体形变整体上呈现出加剧的状态(图 11b)。涉水坡体形变与降水量间呈现较为明显的负相关关系

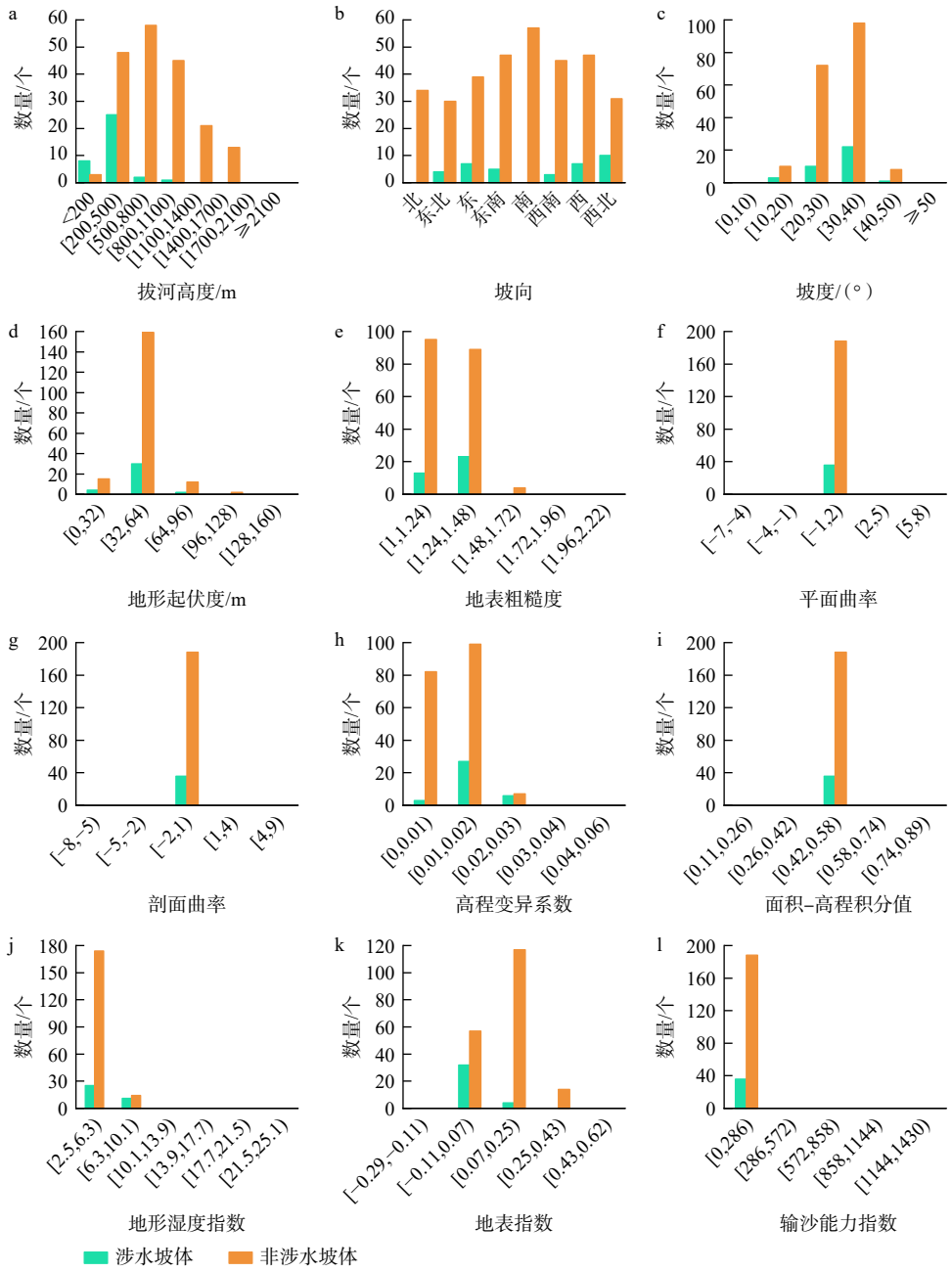


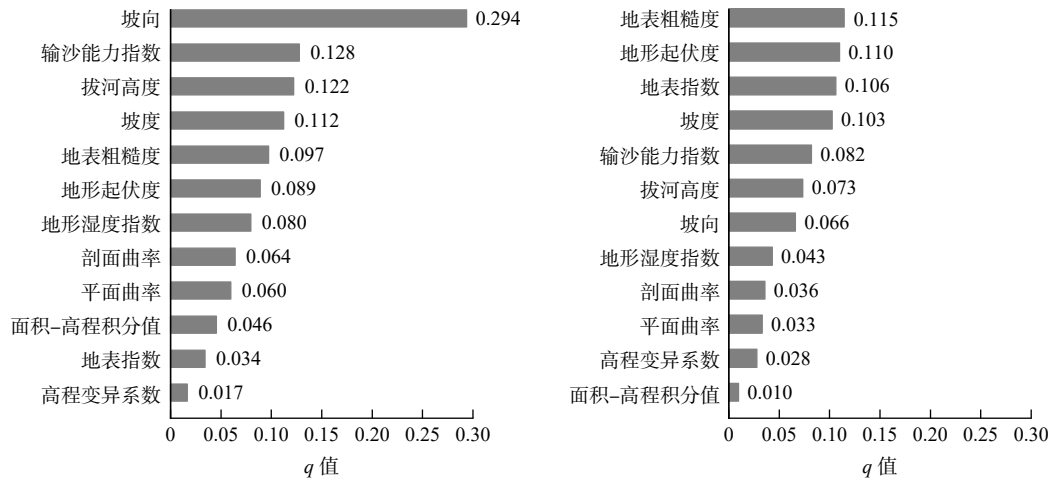
图 8　蓄水与非蓄水触发型变形坡体地貌参数特征

Fig. 8　Characteristics of geomorphic parameters for slopes with impoundment-triggered and non-impoundment-triggered deformation

(图 11c)，非涉水坡体形变与降水量在蓄水之前呈正相关关系；在蓄水之后，4 处示例坡体(NW1—NW4)形变与降水量之间的正相关关系变成负相关关系，且相关性值的绝对值增大(图 11d)，表明降水对于坡体形变具有促进作用。经测，2021 年、2023 年的蓄水位整体呈现上升趋势，而 2022 年的蓄水位整体呈下降趋势(图 12a、12b)，与此同时，通过坡体形变速率与蓄水位变化间的相关系数，发现无论涉水坡体，还是非涉水坡体，其形变速率与蓄水位变化间存在明显的正负交替现象(图 12c、12d)，这可能与蓄水位的涨落变化有关(Zhu et al., 2024)。由此可知蓄水位上升与坡体形变存在负相关关系，蓄水位下降与坡体形变间存在正相关关系。进一步比较坡体在水位升降时的形变速率变化，发现水位上升期间坡体的形变加快较为明显(图 12a、12b)，且无论涉水坡体还是非涉水坡体，在水位大幅度变化背景下，受到蓄水位变化的影响都比降水更显著(图 11，图 12)。

4.2　岩性与岸坡结构对库岸失稳潜在作用

岩性强弱通常反映岩土体受内外力作用时抗



（a）涉水坡体地貌参数解释力排序　（b）非涉水坡体地貌参数解释力排序

图 9　地貌参数因子解释力（q 值）排序

Fig. 9　Ranking of the explanatory power (q value) of geomorphic parameters for slopes

(a) Ranking of the explanatory power of geomorphic parameters for water-influenced slopes; (b) Ranking of explanatory power of geomorphic parameters for non-water-influenced slopes

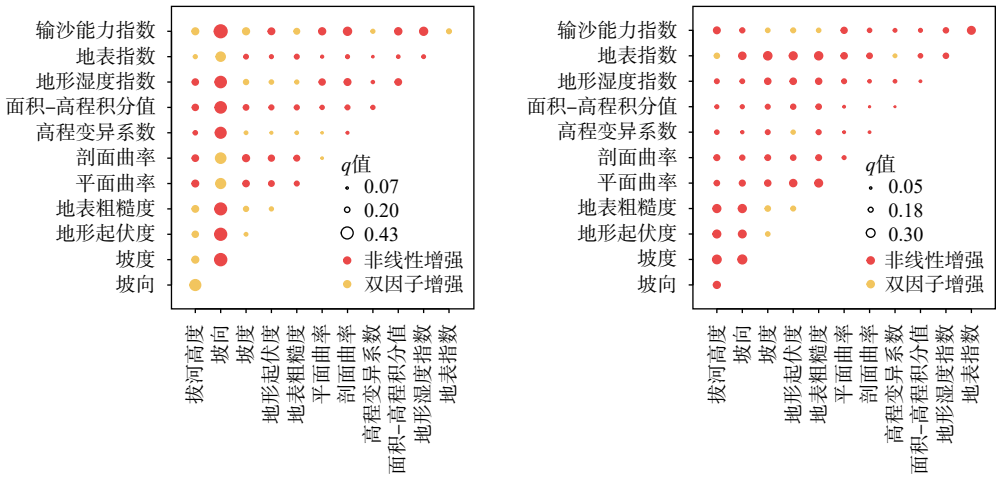
表 2　因子探测结果显著性检验

Table 2　Significance tests for factor detection results

编号	涉水坡体		非涉水坡体	
	地貌参数	P值	地貌参数	P值
1	坡向	5.80×10^{-11}	坡度	5.10×10^{-11}
2	输沙能力指数	2.13×10^{-9}	拔河高度	1.02×10^{-10}
3	坡度	1.11×10^{-8}	坡向	3.08×10^{-10}
4	地表粗糙度	9.21×10^{-8}	输沙能力指数	3.78×10^{-10}
5	地形起伏度	3.91×10^{-7}	地表指数	4.71×10^{-10}
6	拔河高度	1.22×10^{-5}	地形起伏度	5.31×10^{-10}
7	地形湿度指数	1.71×10^{-5}	地表粗糙度	6.84×10^{-10}
8	剖面曲率	1.09×10^{-4}	平面曲率	6.35×10^{-5}
9	平面曲率	5.51×10^{-4}	剖面曲率	5.98×10^{-3}
10	面积–高程积分值	1.70×10^{-3}	高程变异系数	6.66×10^{-3}
11	地表指数	8.84×10^{-3}	地形湿度指数	8.49×10^{-3}
12	高程变异系数	3.97×10^{-2}	面积–高程积分值	9.05×10^{-1}

注：编号为按显著性检验P值从小到大排序

风化、侵蚀的能力。研究区的岩性类型多样，按照强度可划分为松散岩组（第四纪松散沉积物，黏结成块的碎石、砾石）、软弱岩组（泥岩、软弱页岩、石膏、页岩、冰碛物等）、较软岩组（凝灰岩、千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩、泥质砂岩、粉砂岩、碎屑岩、南方的碳酸盐岩（岩溶发育）等）、较硬岩组（熔结凝灰岩、大理岩、板岩、白云岩、石灰岩、钙质胶结的砂岩、北部和西部的碳酸盐岩（岩溶不发育）等）、坚硬侵入岩类（零散的花岗岩、正长岩、闪长岩、辉绿岩、安山岩）和极硬侵入岩类（各类相对较纯、单一类型的坚硬岩石，如石英岩、玄武岩、大面积连续分布的花岗岩、正长岩、闪长岩）等类型（姚鑫等，2020；姚闯闯等，2022）。对变形坡体所分布的岩性进行统计分析（图 13a），可知涉水坡体和非涉水坡体均主要分布在较软岩组和较硬岩组 2 种地层岩性，在较软岩组中分布的涉水坡体达到 55%，非涉水坡体高达 74%；在较硬岩组中分布的涉水坡体达 42%，非涉水坡体达 19%。其余涉水坡体分布在松散岩组中，非涉水坡体则在松散岩组、软弱岩组、坚硬侵入岩类和极硬侵入岩类均有少量分布。除此之外，岸坡结构控制着变形坡体发育的基本条件，不同岸坡结构会影响变形坡体的类型、数量以及规模大小（巨能攀等，2010）。经过调查与实测后发现，研究区岩层结构复杂，主要有正交坡、顺向坡、反向坡、斜向坡和横向坡等类型。对涉水坡体、非涉水坡体所处的岩层结构分别进行统计，结果显示（图 13b），涉水坡体与非涉水坡体主要分布在反向坡中，其中涉水坡体达其总体的 57%，非涉水坡体达其总体的 51%。此外，涉水坡体在正交坡和顺向坡中分布较多，而非涉水坡体则除了正交坡和顺向坡外，在横向坡中也有分布，达到 14%。在斜向坡类型中，涉水坡体和非涉水坡体分布较少，在横向坡中也有少量涉水坡体分布。据此可知，在较软岩组、较硬岩组中，岸坡结构为反向坡、正交坡和顺向坡时，更容易在蓄水条件下触发岸坡失稳。

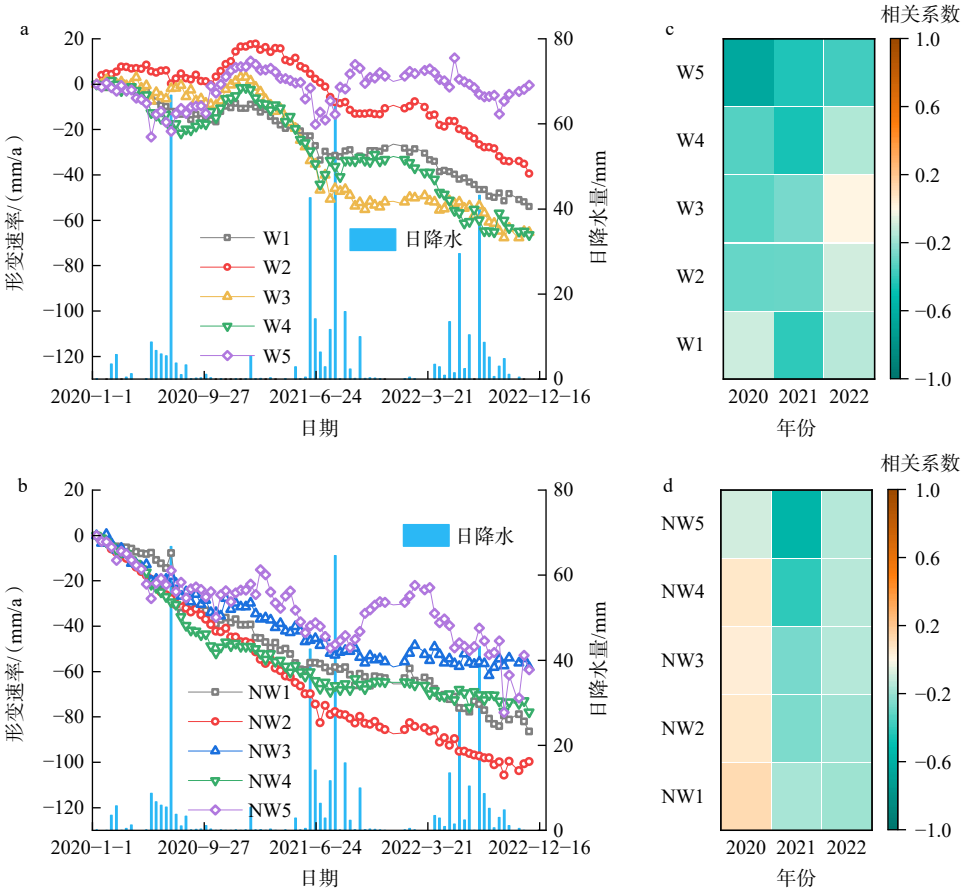


a 涉水坡体地貌参数间交互作用　　b 非涉水坡体地貌参数间交互作用

图 10　地貌参数交互作用探测结果

Fig. 10　Interaction detection results of geomorphic parameters for slopes

(a) Interaction of geomorphic parameters for water-influenced slopes; (b) Interaction of geomorphic parameters for non-water-influenced slopes

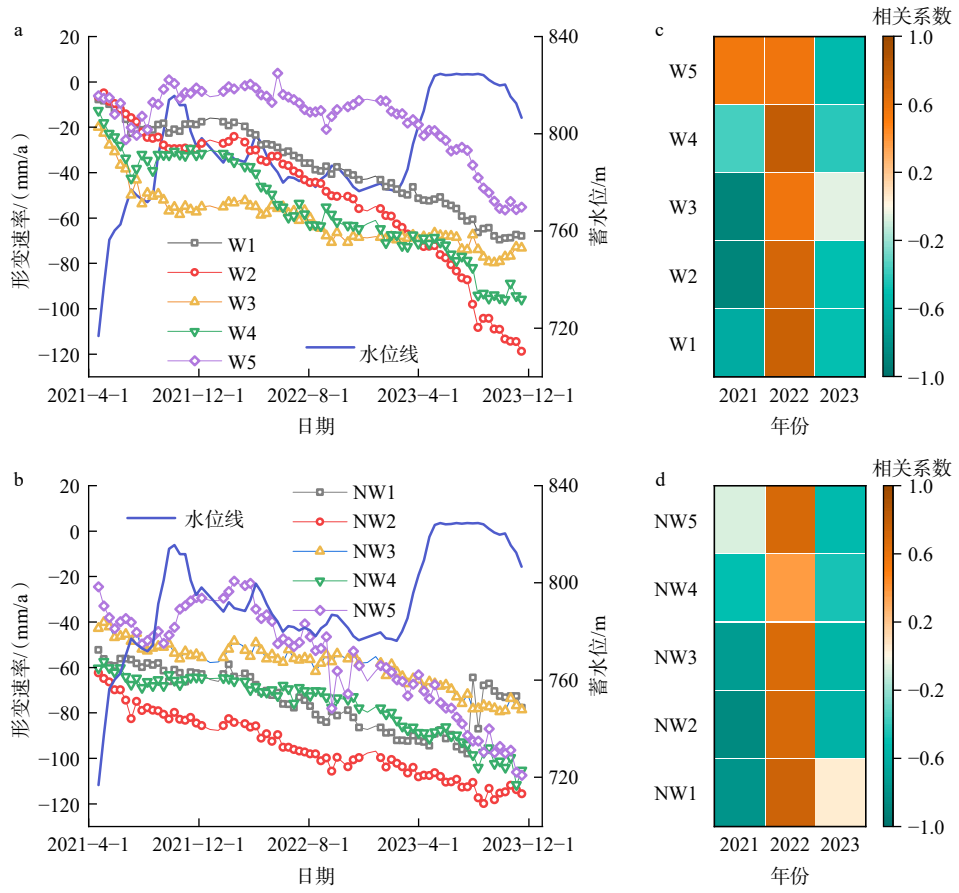


a—涉水坡体形变；b—非涉水坡体形变；c—涉水坡体形变与降水相关性；d—非涉水坡体形变与降水相关性

图 11　坡体形变速率及与降水量相关性

Fig. 11　Slope deformation rate and its correlation with precipitation

(a) Deformation rate of water-influenced slopes; (b) Deformation rateof non-water-influenced slopes; (c) Correlation of water-influenced slopes and precipitation; (d) Correlation of non-water-influenced slopes and precipitation



a—涉水坡体形变；b—非涉水坡体形变；c—涉水坡体形变与蓄水位相关性；d—非涉水坡体形变与蓄水位相关性

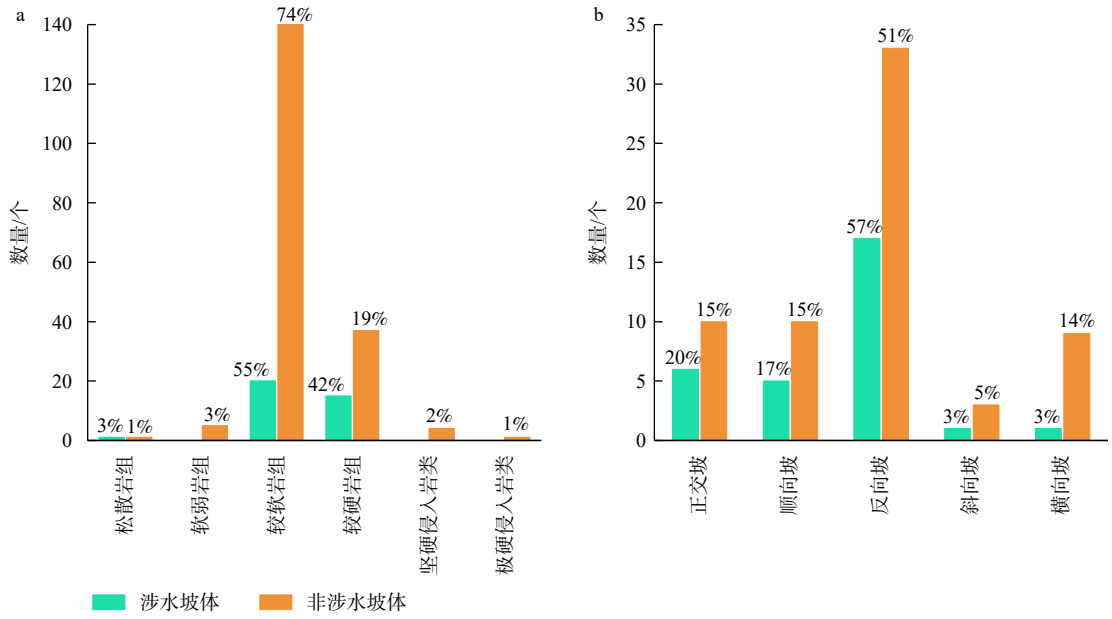
图 12 坡体形变速率及与蓄水位相关性

Fig. 12 Slope deformation rate and its correlation with reservoir level

(a) Deformation rate of water-influenced slopes; (b) Deformation rate of non-water-influenced slopes; (c) Correlation of water-influenced slopes and reservoir level; (d) Correlation of non-water-influenced slopes and reservoir level

4.3 白鹤滩库岸失稳坡体的地貌标志归纳

由于研究聚焦金沙江白鹤滩库区，通过对大规模蓄水前后库岸及其附近的涉水、非涉水坡体的多元地貌参量特征进行统计和对比，探寻能用于蓄水位触发影响下灾变易发坡体早期识别的地貌标志。根据对蓄水前后、涉水与非涉水坡体地貌参数特征的对比，在未考虑岩性、岸坡结构以及降水影响的情况下，涉水坡体地貌参数对其影响的重要性遵循“坡向>输沙能力指数>拔河高度>坡度>地表粗糙度>地形起伏度>地形湿度指数>剖面曲率>平面曲率>面积−高程积分值>地表指数>高程变异系数”的规律。相关性分析结果表明坡度和地形起伏度、地表粗糙度之间存在强相关性，高程变异系数与坡度、地形起伏度、地表粗糙度间存在较强的相关性，地表指数和拔河高度间存在较强的相关性，其他各地貌参数间不存在较强相关性(图 14a)，可以共同解释失稳坡体发育相关的驱动机制。因此，其重要性序列可以简化为“坡向>输沙能力指数>拔河高度>坡度>地形湿度指数>剖面曲率>平面曲率>面积−高程积分值”。对于非涉水坡体而言，除与上述涉水坡体的地貌参数相关性规律相似外，输沙能力指数与坡度、地形起伏度、地表粗糙度存在有较强的相关性(图 14b)，因此重要性序列可简化为“坡度>拔河高度>坡向>地形湿度指数>剖面曲率>平面曲率>面积−高程积分值”的规律。结合上一部分变形坡体在不同岩性、岸坡结构中的分布情况，可知涉水坡体主要分布在岩性为较软岩组和较硬岩组的地层中，分布的岸坡结构依次为反向坡、正交坡和顺向坡。为探究岩性和岸坡结构的潜在影响，选取分布在较软岩组和较硬岩组，岸坡结构为反向坡、正交坡和顺向坡的涉水坡体，基于地理探测器模型探究同类岩性、岸坡结构条件下的各地貌参数对岸



岸坡结构划分依据(覃怡等, 2015)为岩层倾向与坡向间的夹角，即顺向坡(0°～20°)、斜向坡(20°～70°)、横向坡(70°～100°)、正交坡(接近90°)和反向坡(＞100°)

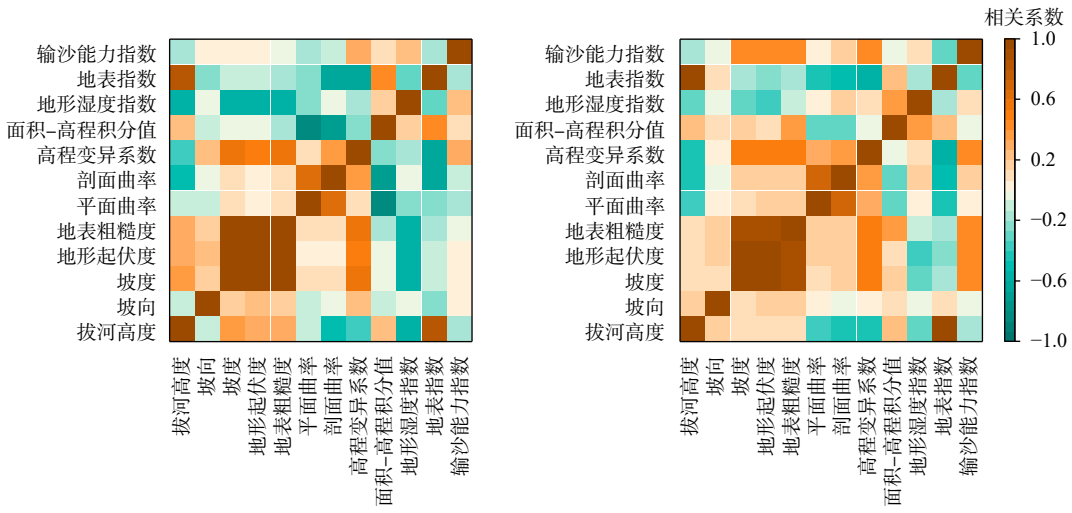
a—在不同岩组；b—在不同岸坡结构

图 13　变形坡体的数量分布

Fig. 13　Distribution of deformed slope counts

(a) In different rock formations; (b) In different slope structures

The classification of bank–slope structures is based on the angle betweenthe dip direction of the rock layers and the slope direction, i.e., cis-bank slope (0°–20°), diagonal bank–slope (20°–70°), transverse bank–slope (70°–100°), orthogonal bank–slope (close to 90°), and reverse bank–slope (＞100°) (Qin et al., 2015)



(a) 涉水坡体地貌参数间相关性　　(b) 非涉水坡体地貌参数间相关性

图 14　地貌参数间的相关性

Fig. 14　Correlation of geomorphic parameters for slopes

(a) Correlation of geomorphic parameters for water-influenced slopes; (b) Correlation of geomorphic parameters for non-water-influenced slopes

坡失稳的解释力大小。结合前面统计的坡体地貌参数特征，整理得到在不同岩性、岸坡结构条件下，蓄水触发岸坡灾变的地貌标志(表 3)。在不同岩性、岸坡结构的地层中，坡向西北向是识别白鹤滩蓄水触发岸坡灾变的 1 个较为突出的标志，其余地貌参数如拔河高度、平面曲率、剖面曲率、面积–高

程积分值、地形湿度指数均可作为识别蓄水触发岸坡灾变的地貌参数标志。根据上述地貌特征组合，可用于对库区蓄水后可能发生不稳定变化的地质体进行早期判断。尽管此次研究得出的地貌特征组合弥补了 InSAR 观测的即时性在超前识别方面的不足，然而其只能用于隐患坡体的辅助识别，给出定性的辨别，不能给出定量的易发性评估值，致使结果存在一定的局限性。后续可考虑引入更丰富的环境因子，在隐患坡体易发性的定量评估方面开展进一步的研究。

表 3 白鹤滩库区蓄水触发岸坡灾变的地貌识别标志

Table 3 Geomorphic signatures of bank–slope disasters triggered by reservoir in the Baihetan Reservoir area

岩性	岸坡结构	地貌参数
较软岩组	反向坡	坡向(西北)、剖面曲率(−2, 1)、拔河高度(200 m, 500 m)
较软岩组	正交坡	坡向(西北)、地形湿度指数(2.5, 6.3)、平面曲率(−1, 2)
较软岩组	顺向坡	坡向(西北)、平面曲率(−1, 2)、坡度(30°, 40°)
较硬岩组	反向坡	坡向(西北)、拔河高度(200 m, 500 m)、面积−高程积分值(0.42, 0.58)

注：较软岩组包括：凝灰岩、千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩、泥质砂岩、粉砂岩、碎屑岩、南方的碳酸盐岩(岩溶发育)等；较硬岩组包括：熔结凝灰岩、大理岩、板岩、白云岩、石灰岩、钙质胶结的砂岩、北部和西部的碳酸盐岩(岩溶不发育)等；标志应用要求：采用30m分辨率DEM时地貌参数提取须基于3×3像元大小的窗口

5 结论

文章针对 InSAR 与光学遥感在库岸失稳坡体识别中的功能性和局限性，通过引入一系列地貌特征量与 InSAR 观测和光学影像进行结合，在识别白鹤滩库区 2020—2023 年蓄水前、后库岸变形坡体基础上，归纳了白鹤滩库区蓄水触发岸坡灾变的地貌标志，可用于灾患识别，主要结论如下：

(1)在库区水域 5 km 范围内，蓄水前有变形坡体 89 处，蓄水后升为 144 处，变形坡体呈现出形变加剧、形变稳定、形变消退 3 种主要的发育状态。蓄水触发变形坡体主要分布在东、西和西北向，20°～40°坡度范围内，变形坡体数量较多，特征最为明显。

(2)在特定坡向、输沙能力指数、拔河高度和坡度等地貌参数条件下，坡体易受蓄水扰动而触发灾变。

(3)在较软岩组、反向坡条件下，坡向(西北)、剖面曲率(−2, 1)、拔河高度(200 m, 500 m)可作为识别蓄水触发岸坡灾变的地貌标志；在较软岩组、正交坡条件下，坡向(西北)、地形湿度指数(2.5, 6.3)、平面曲率(−1, 2)可作为识别蓄水触发岸坡灾变的地貌标志；在较软岩组、顺向坡条件下，坡向(西北)、平面曲率(−1, 2)、坡度(30°, 40°)可作为识别蓄水触发岸坡灾变的地貌标志；在较硬岩组、反向坡条件下，坡向(西北)、拔河高度(200 m, 500 m)、面积−高程积分值(0.42, 0.58)可作为识别蓄水触发岸坡灾变的地貌参数标志。

(4)在水位大幅度变化背景下，坡体形变受到蓄水位变化的影响都比降水更为显著，同时降水因素的活跃性在驱动岸坡灾变过程中也不容忽视。

致谢：本文水位数据由中国长江三峡集团有限公司移民工作办公室提供，并协助野外工作开展，特此感谢。

References

ALVIOLI M, MARCHESINI I, REICHENBACH P, et al., 2016. Automatic delineation of geomorphological slope units with r. slopeunits v1.0 and their optimization for landslide susceptibility modeling[J]. Geoscientific Model Development, 9(11): 3975-3991.

AN X L, MI C L, SUN D L, et al., 2024. Comparison of landslide susceptibility in three gorges reservoir area based on different evaluation units: take Yunyang county in Chongqing as an example[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 54(5): 1629-1644. (in Chinese with English abstract)

ANDREANI L, GLOAGUEN R, 2016. Geomorphic analysis of transient landscapes in the Sierra Madre de Chiapas and Maya mountains (northern central America): implications for the north American-Caribbean-Cocos plate boundary[J]. Earth Surface Dynamics, 4(1): 71-102.

AYALEW L, YAMAGISHI H, UGAWA N, 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan[J]. Landslides, 1(1): 73-81.

BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11): 2375-2383.

BORGA M, DALLA FONTANA G, CAZORZI F, 2002. Analysis of topo-

graphic and climatic control on Rainfall-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness Index[J]. Journal of Hydrology, 268(1-4): 56-71.

BÜRGI P M, LOHMAN R B, 2021. Impact of forest disturbance on InSAR surface displacement time series[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 59(1): 128-138.

CHEN Z M, HU B, CHEN J Z, et al. , 2017. Monitoring the surface deformation caused by oil exploration based on InSAR[J]. Bulletin of Surveying and Mapping(11): 42-46. (in Chinese with English abstract)

DAI F C, LEE C F, 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong[J]. Geomorphology, 42(3-4): 213-228.

DAI K R, CHEN C, SHI X L, et al., 2023. Dynamic landslides susceptibility evaluation in Baihetan Dam area during extensive impoundment by integrating geological model and InSAR Observations[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 116: 103157.

DUN J W, FENG W K, YI X Y, et al., 2023. Early InSAR identification of active landslide before impoundment in Baihetan reservoir area: a case study of Hulukou town Xiangbiling section[J]. Journal of Engineering Geology, 31(2): 479-492. (in Chinese with English abstract)

FENG W K, YI X Y, BAI H L, et al., 2021. Prediction and analysis of influence of the first impoundment of Baihetan reservoir on the bank slope stability of Shuanghe river section[J]. Science Technology and Engineering, 21(1): 346-352. (in Chinese with English abstract)

FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F, 2001. Permanent scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1): 8-20.

FERRETTI A, FUMAGALLI A, NOVALI F, et al., 2011. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(9): 3460-3470.

FU G Y, SHE Y W, ZHANG G Q, et al., 2021. Lithospheric equilibrium, environmental changes, and potential induced-earthquake risk around the newly impounded Baihetan reservoir, China[J]. Remote Sensing, 13(19): 3895.

GAO B H, HE Y, ZHANG L F, et al., 2023. Dynamic evaluation of landslide susceptibility by CNN considering InSAR deformation: a case study of Liujiaxia reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 42(2): 450-465. (in Chinese with English abstract)

GU W Y, MENG X R, ZHU X C, et al., 2020. Geomorphological classification research based on BEMD decomposition[J]. Journal of Geo-information Science, 22(3): 464-473. (in Chinese with English abstract)

GU Z K, YAO X, YAO C C, et al., 2021. Mapping of geomorphic dynamic parameters for analysis of landslide hazards: a case of Yangbi river basin on the upper Lancang-Mekong of China[J]. Journal of Mountain Science, 18(9): 2402-2411.

HE K Q, GUO L, 2017. Research on the prediction parameter and evaluation method of displacement coupled with water dynamics of the reservoir landslides[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 48(5): 516-525. (in Chinese with English abstract)

JIN D L, WANG G F, 1988. Tangyanguang landslide in the Zhexi reservoir area[M]//Ground Rock Engineering Professional Committee of the Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, Engineering Geology Professional Committee of the Geological Society of China. Beijing: Science Press: 301-307. (in Chinese)

JU N P, HOU W L, ZHAO J J, et al., 2010. Geohazards of Jushui River in the Wenchuan earthquak area[J]. Mountain Research, 28(6): 732-740. (in Chinese with English abstract)

LI B L, 2024. Slope deformation monitoring of railroad bridge in mountainous area adjacent to a landslide[J]. Railway Investigation and Surveying, 50(3): 28-33. (in Chinese with English abstract)

LI L, XU C, YAO X L, et al., 2022. Large-scale landslides around the reservoir area of Baihetan hydropower station in Southwest China: analysis of the spatial distribution[J]. Natural Hazards Research, 2(3): 218-229.

LI Y J, YUE D X, CHEN G, et al., 2024. A preliminary analysis of the process and cause of the Jintian-Caotan landslide-mudflow hazard chain induced by the Jishishan earthquake[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 60(1): 1-5. (in Chinese with English abstract)

LIAO Q L, LI X, LI S D, et al., 2005. Occurrence, geology and geomorphy characteristics and origin of Qianjiangping landslide in Three Gorges reservoir area and study on ancient landslide criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(17): 3146-3153. (in Chinese with English abstract)

LIN M L, WANG J F, CHEN Y C, et al. , 2021. Potential analysis of deep-seated landslides caused by Typhoon Morakot using slope unit[M]//GUZZETTI F, ARBANAS S M, REICHENBACH P, et al. Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk. Cham: Springer: 173-183.

LIU H F, LUO Y H, FENG W K, et al., 2023. Site response of ancient landslides to initial impoundment of Baihetan Reservoir (China) based on ambient noise Investigation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 164: 107590.

LIU X J, ZHAO C Y, ZHANG Q, et al., 2021. Integration of Sentinel-1 and ALOS/PALSAR-2 SAR datasets for mapping active landslides along the Jinsha River corridor, China[J]. Engineering Geology, 284: 106033.

LIU Y, YAO X, GU Z K, et al., 2024. Research on automatic recognition of active landslides using InSAR deformation under digital morphology: a case study of the Baihetan reservoir, China[J]. Remote Sensing of Environment, 304: 114029.

LONG R, LIU X D, 2023. Study on stability evaluation and treatment scheme of highway landslide based on disaster mechanism analysis[J]. Railway Investigation and Surveying, 49(2): 33-37. (in Chinese with English abstract)

LU H Y, LI W L, XU Q, et al., 2019. Early detection of landslides in the upstream and downstream areas of the Baige landslide, the Jinsha river based on optical remote sensing and InSAR technologies[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 44(9): 1342-1354. (in Chinese with English abstract)

LÜ B R, PENG L, LI Q M, 2022. Landslide susceptibility evaluation considering sample sensitivity[J]. Bulletin of Surveying and Mapping(11): 20-25. (in Chinese with English abstract)

MCKEAN J, ROERING J, 2004. Objective landslide detection and surface morphology mapping using High-resolution airborne laser Altimetry[J]. Geomorphology, 57(3-4): 331-351.

MICHEL R, AVOUAC J P, TABOURY J, 1999. Measuring ground displacements from SAR amplitude images: application to the Landers earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 26(7): 875-878.

MOORE I D, WILSON J P, 1992. Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 47(5): 423-428.

MÜLLER-SALZBURG L, 1987. The Vajont catastrophe: a personal review[J]. Engineering Geology, 24(1-4): 423-444.

OUYANG X, 2011. Study on regional terrain factors of soil erosion[D]. Xi'an: Northwest University. (in Chinese with English abstract)

QIN Y, XIANG N, JIANG W X, 2015. Statistical analysis for landsliding characteristic parameters in Xiangjiaba reservoir area[J]. Technology of Highway and Transport(3): 5-8. (in Chinese with English abstract)

SHE Y W, FU G Y, ZHAO Q, et al., 2021. Simulating changes of gravity and coulomb stress caused by the impoundment of the Baihetan hydropower station[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(6): 1925-1936. (in Chinese with English abstract)

SHI X L, JU A H, DAI K R, et al., 2023. Deformation evolution and reactivation mechanism of landslide revealed based on multi-source remote sensing during impoundment period for Wulipo landslide in Baihetan reservoir area[J]. Transactions of Beijing institute of Technology, 43(11): 1164-1175. (in Chinese with English abstract)

SONG Y Z, WANG J F, GE Y, et al., 2020. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data[J]. GIScience & Remote Sensing, 57(5): 593-610.

STEGER S, MAIR V, KOFLER C, et al., 2021. Correlation does not imply geomorphic causation in data-driven landslide susceptibility modelling–benefits of exploring landslide data collection effects[J]. Science of the Total Environment, 776: 145935.

SU X J, ZHANG Y, MENG X M, et al., 2024. Potential landslides identification and development characteristics analysis in Hunza valley, along China-Pakistan Economic Corridor based on SBAS-InSAR[J]. National Remote Sensing Bulletin, 28(4): 885-899. (in Chinese with English abstract)

TANG F J, QI S W, GUO S F, et al., 2022. Spatio-temporal distribution pattern and susceptibility of reservoir-induced landslides in Xiluodu Hydropower Station[J]. Journal of Engineering Geology, 30(3): 609-620. (in Chinese)

TANG F J, QI S W, GUO S F, et al., 2025. The influence of reservoirs on landslide erosion[J]. Remote Sensing, 17(4): 569.

TANG X G, WANG L J, WANG H Y, et al., 2024. Predicted climate change will increase landslide risk in Hanjiang River basin, China[J]. Journal of Earth Science, 35(4): 1334-1354.

WANG J B, LIU W, ZHAO M H, et al., 2023. Characteristics and interaction of spatial expansion and natural disasters in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Science Technology and Engineering, 23(25): 11027-11040. (in Chinese with English abstract)

WANG J F, XU C D, 2017. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 72(1): 116-134. (in Chinese with English abstract)

WANG K, ZHANG S J, WEI F Q, 2020. Slope unit extraction methods: advances and prospects[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 37(6): 85-93. (in Chinese with English abstract)

WANG S, HUANG W L, XIANG W, et al., 2022. Landslide roughness chronology method: Taking Xieliupo and Suo'ertou landslides in Zhouqu area of Gansu, China as examples[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 44(6): 1037-1047. (in Chinese with English abstract)

WU C Y, QIAO J P, 2005. The contributing rate research of slope aspect to landslide growth from Yunyang to Wushan in Three Gorges reservoir region[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 37(4): 25-29. (in Chinese with English abstract)

WU H, PEI X J, CUI S H, et al., 2021. Study of topographic and geological controls on landslide development and distribution within mountainous regions influenced by strong earthquakes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 40(5): 972-986. (in Chinese with English abstract)

WU X T, DENG H, ZHANG W J, et al., 2022. Evaluation of landslide susceptibility based on automatic slope unit division[J]. Mountain Research, 40(4): 542-556. (in Chinese with English abstract)

YAO C C, YAO X, GU Z K, et al., 2022. Analysis on the development law of active geological hazards in the Loess Plateau based on InSAR identification[J]. Journal of Geomechanics, 28(2): 257-267. (in Chinese with English abstract)

YAO J M, LAN H X, LI L P, et al., 2022. Characteristics of a rapid landsliding area along Jinsha River revealed by multi-temporal remote sensing and its risks to Sichuan-Tibet Railway[J]. Landslides, 19(3): 703-718.

YAO X, DENG J H, LIU X H, et al., 2020. Primary recognition of active landslides and development rule analysis for pan Three-river-parallel territory of Tibet Plateau[J]. Advanced Engineering Sciences, 52(5): 16-37. (in Chinese with English abstract)

YU W X, LI X Z, ZHENG L J, et al., 2024. Application of the SBAS technique in potential landslide area identification along the KKH of China-Pakistan economic corridor[J]. Journal of Engineering Geology, 32(5): 1597-1606. (in Chinese with English abstract)

YUAN Z Y, TANG X C, 2003. The influence of sluice and water level fluctuation on landslides and rockfalls of the Three Gorges project and principles of prevention[J]. Tropical Geography, 23(1): 30-34. (in Chinese with English abstract)

ZENG S, MA Z G, ZHAO C, et al., 2023. Multi-source remote sensing recognition of reactivation characteristics of an ancient landslide group at Taipingqiao in the Dadu River Catchment, Eastern Tibetan Plateau[J]. Geoscience, 37(4): 994-1003. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J T, ZHANG L M, XU T, 2015. Heterogeneity measure based segmentation performance evaluation for remote sensing image[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 32(5): 479-482, 488. (in Chinese with English abstract)

ZHAO P, WEN G, HE Z C, et al, 2024. Shallow landslide susceptibility assessment in Jinsha River Basin based on machine learning models[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 55(10): 53-70. (in Chinese with English abstract)

ZHOU H F, FANG T, XIA C H, et al., 2023. Reactivation characteristics and mechanism of engineering disturbed Dumi landslide in western Sichuan Province, China[J]. Geoscience, 37(4): 1044-1053. (in Chinese with English abstract)

ZHOU L Q, ZHAO C P, ZHANG M, et al., 2022. Machine-learning-based earthquake locations reveal the seismogenesis of the 2020 M_w 5.0 Qiaojia, Yunnan earthquake[J]. Geophysical Journal International, 228(3): 1637-1647.

ZHU Y R, QIU H J, LIU Z J, et al., 2024. Rainfall and water level fluctu-

ations dominated the landslide deformation at Baihetan Reservoir, China[J]. Journal of Hydrology, 642: 131871.

附中文参考文献

安雪莲，密长林，孙德亮，等，2024. 基于不同评价单元的三峡库区滑坡易发性对比：以重庆市云阳县为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，54(5)：1629-1644.

陈志谋，胡波，陈金座，等，2017. 利用 InSAR 技术监测石油开采引起的地表形变[J]. 测绘通报(11)：42-46.

顿佳伟，冯文凯，易小宇，等，2023. 白鹤滩库区蓄水前活动性滑坡 InSAR 早期识别研究：以葫芦口镇至象鼻岭段为例[J]. 工程地质学报，31(2)：479-492.

冯文凯，易小宇，白慧林，等，2021. 白鹤滩水库初次蓄水对双河段岸坡稳定性的影响预测分析[J]. 科学技术与工程，21(1)：346-352.

高秉海，何毅，张立峰，等，2023. 顾及 InSAR 形变的 CNN 滑坡易发性动态评估：以刘家峡水库区域为例[J]. 岩石力学与工程学报，42(2)：450-465.

顾文亚，孟祥瑞，朱晓晨，等，2020. 基于 BEMD 分解的地貌分类研究[J]. 地球信息科学学报，22(3)：464-473.

贺可强，郭璐，2017. 水库滑坡位移与水动力耦合预测参数及其评价方法研究[J]. 水利学报，48(5)：516-525.

金德镰，王耕夫，1988. 柘溪水库塘岩光滑坡[M]//中国岩石力学与工程学会地面岩石工程专业委员会，中国地质学会工程地质专业委员会. 中国典型滑坡. 北京：科学出版社.

巨能攀，侯伟龙，赵建军，等，2010. 安县睢水河流域地质灾害发育、分布及影响因素[J]. 山地学报，28(6)：732-740.

李白露，2024. 某邻近滑坡山区铁路大桥边坡变形监测[J]. 铁道勘察，50(3)：28-33.

李亚军，岳东霞，陈冠，等，2024. 积石山地震诱发金田-草滩村滑坡-泥流灾害链过程与成因[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，60(1)：1-5.

廖秋林，李晓，李守定，等，2005. 三峡库区千将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究[J]. 岩石力学与工程学报，24(17)：3146-3153.

隆然，刘兴东，2023. 基于致灾机理分析的公路滑坡稳定性评价及治理方案研究[J]. 铁道勘察，49(2)：33-37.

陆会燕，李为乐，许强，等，2019. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，44(9)：1342-1354.

吕蓓茹，彭玲，李樵民，2022. 顾及样本敏感性的滑坡易发性评价[J]. 测绘通报(11)：20-25.

欧阳晓，2011. 区域土壤侵蚀地形指标研究[D]. 西安：西北大学.

覃怡，向楠，江为学，2015. 向家坝库区滑坡特征参数统计分析[J]. 公路交通技术(3)：5-8.

余雅文，付广裕，赵倩，等，2021. 白鹤滩水电站蓄水引起重力与库仑应力变化的模拟研究[J]. 地球物理学报，64(6)：1925-1936.

史先琳，居安华，戴可人，等，2023. 多源遥感揭示白鹤滩库区五里坡滑坡蓄水期形变演化与复活机制[J]. 北京理工大学学报，43(11)：1164-1175.

苏晓军，张毅，孟兴民，等，2024. 中巴经济走廊洪扎段潜在滑坡 SBAS-InSAR 早期识别及发育特征分析[J]. 遥感学报，28(4)：885-899.

唐凤娇，祁生文，郭松峰，等，2022. 金沙江溪洛渡库区水库诱发滑坡时空分布规律及易发性研究[J]. 工程地质学报，30(3)：609-620.

王江波，刘威，赵梦涵，等，2023. 粤港澳大湾区城乡建设空间扩张与自然灾害相互影响[J]. 科学技术与工程，23(25)：11027-11040.

王劲峰，徐成东，2017. 地理探测器：原理与展望[J]. 地理学报，72(1)：116-134.

王凯，张少杰，韦方强，2020. 斜坡单元提取方法研究进展和展望[J]. 长江科学院院报，37(6)：85-93.

王淞，黄伟亮，项闻，等，2022. 滑坡粗糙度年代学方法：以甘肃舟曲地区泄流坡和锁儿头滑坡为例[J]. 地球科学与环境学报，44(6)：1037-1047.

吴彩燕，乔建平，2005. 三峡库区云阳-巫山段坡向因素对滑坡发育的贡献率研究[J]. 四川大学学报(工程科学版)，37(4)：25-29.

吴昊，裴向军，崔圣华，等，2021. 强震山区滑坡发育分布的地形地质控制作用研究[J]. 岩石力学与工程学报，40(5)：972-986.

吴先谭，邓辉，张文江，等，2022. 基于斜坡单元自动划分的滑坡易发性评价[J]. 山地学报，40(4)：542-556.

姚闯闯，姚鑫，顾畛逵，等，2022. 基于 InSAR 识别的黄土高原活动性地质灾害发育规律分析[J]. 地质力学学报，28(2)：257-267.

姚鑫，邓建辉，刘星洪，等，2020. 青藏高原泛三江并流区活动性滑坡 InSAR 初步识别与发育规律分析[J]. 工程科学与技术，52(5)：16-37.

余文秀，李秀珍，郑玲静，等，2024. 基于 SBAS-InSAR 技术的中巴公路 KKH 沿线潜在滑坡区识别研究[J]. 工程地质学报，32(5)：1597-1606.

袁中友，唐晓春，2003. 蓄水和水位变动对三峡库区崩塌滑坡的影响及对策[J]. 热带地理，23(1)：30-34.

曾帅，马志刚，赵聪，等，2023. 青藏高原东部大渡河流域太平桥乡古滑坡群复活特征多源遥感识别[J]. 现代地质，37(4)：994-1003.

张建廷，张立民，徐涛，2015. 遥感图像的异质性测度分割效果评价[J]. 测绘科学技术学报，32(5)：479-482，488.

赵鹏，文刚，何展昌，等，2024. 基于机器学习的金沙江流域浅层滑坡易发性评价[J]. 水利水电技术(中英文)，55(10)：53-70.

周洪福，方甜，夏晨皓，等，2023. 工程扰动诱发川西杜米滑坡复活变形特征及机理分析[J]. 现代地质，37(4)：1044-1053.