

融合斜坡形变特征的复杂山区区域滑坡评价研究现状与展望

杨志华^{1,3,5}, 吴瑞安^{1,3}, 郭长宝^{1,3}, 伍宇明⁵, 邵慰慰^{1,2}, 郁鹏飞^{1,4}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质大学, 湖北 武汉, 430074; 3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081; 4. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 5. 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘要:【研究目的】复杂山区斜坡形变普遍存在, 促进了滑坡发育发生, 增加了滑坡危险性, 是区域滑坡评价研究需要考虑的重要因素。【研究方法】梳理文献资料, 总结了融合斜坡形变特征的区域滑坡评价研究现状。【研究结果】该领域的相关理论模型和技术方法尚不成熟, 还处于探索研究阶段。区域斜坡形变获取的时间分辨率有待于进一步提高, 加强捕捉长时序斜坡形变过程的关键特征, 深入分析区域斜坡形变的时空分布规律。初步构建了融合斜坡形变特征的区域滑坡评价体系, 包含流程步骤、技术方法和因子指标。技术方法主要有: 基于专家经验的定性判断、基于专家经验和校正矩阵的加权图层叠加、斜坡形变作为区域滑坡评价的因子指标、斜坡形变作为区域滑坡评价的滑坡样本。斜坡形变因子可以进一步划分为斜坡形变类型、强度、分布位置和时间变化等次一级因子。【结论】需要结合机器学习、人工智能等新技术, 提出或优化融合斜坡形变特征的区域滑坡量化评价新模型, 提高区域滑坡评价精度。研究成果期望推动融合斜坡形变特征的区域滑坡评价研究, 支撑服务复杂山区滑坡灾害早期防控。

关键词: 复杂山区; 斜坡形变; 区域滑坡评价; 综述; 地质调查工程

创新点: 梳理总结了融合斜坡形变特征的区域滑坡评价研究现状, 提出了下一步研究发展思路。

中图分类号: 文献标志码: 文章编号:

Research status and prospect of regional landslide assessment integrating slope deformation characteristics in the complex mountainous area

YANG Zhihua^{1,3,5}, WU Ruian^{1,3}, GUO Changbao^{1,3}, Wu Yuming⁵, SHAO Weiwei^{1,2}, YU Pengfei^{1,4}

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 3. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China*; 4. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*; 5. *State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Beijing 100101*)

Abstract: [Objective] The slope deformation is common in the mountainous areas, which significantly promotes landslide development and increases landslide risk. So, it is the important factor for the regional landslide assessment. [Methods] By reviewing literatures, the research status of regional landslide assessment integrating slope deformation characteristics were summarized. [Results] The relevant theoretical models and technical methods are not mature and are still in the stage of preliminary research. The temporal resolution of regional slope deformation should be further improved, and key characteristics of the long time series slope deformation should be captured, and the spatio-temporal distribution of regional slope deformation should be deeply analyzed. A preliminary regional landslide assessment system integrating slope deformation was constructed, including process steps, technical methods and factor indicators. The main technical methods include the qualitative judgment based on expert experience, weighted layer overlay based on expert experience and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42277180)、资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金和中国地质调查局项目(DD20221816)。

作者简介: 杨志华(1982-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事遥感地质和地质灾害风险评估研究工作。E-mail: yangzh99@163.com

通讯作者: 吴瑞安(1991-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事地质灾害形成机理研究工作。E-mail: wuruian1991@126.com

correction matrix, slope deformation as a factor index of regional landslide assessment, slope deformation as a landslide sample of regional landslide assessment. The slope deformation factor can be further divided into slope deformation type, intensity, distribution position and time change. **[Conclusions]** It is necessary to combine new technologies such as machine learning and artificial intelligence to propose or optimize the new quantitative regional landslide assessment models that integrate the slope deformation characteristics to improve regional landslide assessment accuracy. It is expected to promote the study on regional landslide assessment integrating slope deformation, and support the early landslide prevention in the complex mountainous areas.

Key Words: complex mountainous area; slope deformation; regional landslide assessment; review; geological survey engineering

Highlights: The research status and prospect of regional landslide assessment integrating slope deformation characteristics were summarized, and the further research and development idea is put forward.

About the first author: YANG Zhihua, male, born in 1982, doctor, associate researcher, engages in research on geo-hazard assessment; E-mail: yangzh99@163.com.

About the corresponding author: WU Ruian, male, born in 1991, doctor, associate researcher, engages in research on geo-hazard mechanism; E-mail: 648266126@qq.com

Fund support: Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42277180) and a grant from State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System and the project of China Geological Survey (No. DD20221816)

1 引言

我国是世界上滑坡灾害最严重的国家之一，尤其是地形地貌、地质构造极为复杂的青藏高原及其周边地区（彭建兵等，2004），给国家重大工程、区域发展和公共安全造成巨大危害，严重制约了区域经济可持续发展，区域滑坡评价已经成为滑坡灾害早期防控的重要课题。

复杂山区地质构造和地形地貌复杂，在长期内外动力持续作用下，斜坡岩土体普遍存在局部应力累积、卸荷裂隙、蠕滑形变等现象（图 1），这是斜坡岩土体结构裂化和强度弱化的外在表现，也是斜坡潜在失稳破坏的前奏。我国发育多个地震带，西部山区历史上多次发生 6.0 级以上地震，地震滑坡风险高（王涛等，2021；杨志华等，2022；Yang et al., 2023），例如 2008 年汶川 Ms8.0 级地震（殷跃平，2008；Xu et al., 2013），2010 年芦山 Ms7.0 级地震（Zhang et al., 2013），2022 年泸定 Ms6.8 级地震（韩炳权等，2023）。这些频发的历史地震加剧了岩土体结构裂化和强度弱化（图 1a），这对具有先存损伤的斜坡稳定性是致命的。我国西部复杂山区斜坡形变普遍存在。例如，金沙江沿岸存在大量斜坡形变（图 1c, d）（陈剑平等，2016），鲜水河断裂带斜坡体存在长期蠕滑形变（图 1b, e）。大量滑坡发生之前存在长期斜坡形变历程。例如，2017 年四川茂县新磨村滑坡后壁岩土体存在长期持续形变（Su et al., 2017；何思明等，2017），2018 年甘肃舟曲江顶崖滑坡体几十年内均有持续形变（郭长宝等，2019），2018 年金沙江白格滑坡经历了 50 年以上的长期形变过程（许强等，2018）。

斜坡形变降低了岩土体物理力学强度，减弱了斜坡稳定性，是滑坡发育的重要促进因素（秦四清等，2010），在同等内外动力触发条件下，存在持续形变的斜坡更容易失稳滑动。因此，斜坡形变是区域滑坡评价研究中需要考虑的重要因素，已经引起区域滑坡评价研究学者的广泛重视（Novellino et al., 2021；Dai et al., 2023）。本文在总结区域斜坡形变获取方法、发育特征、时空分布规律的基础上，梳理了融合斜坡形变特征的区域滑坡评价技术方法，提出了需要解决的关键科学问题和下一步

研究发展思路，初步构建了融合斜坡形变特征的区域滑坡评价体系，期望推进区域滑坡评价研究，支撑服务复杂山区滑坡灾害早期防控。

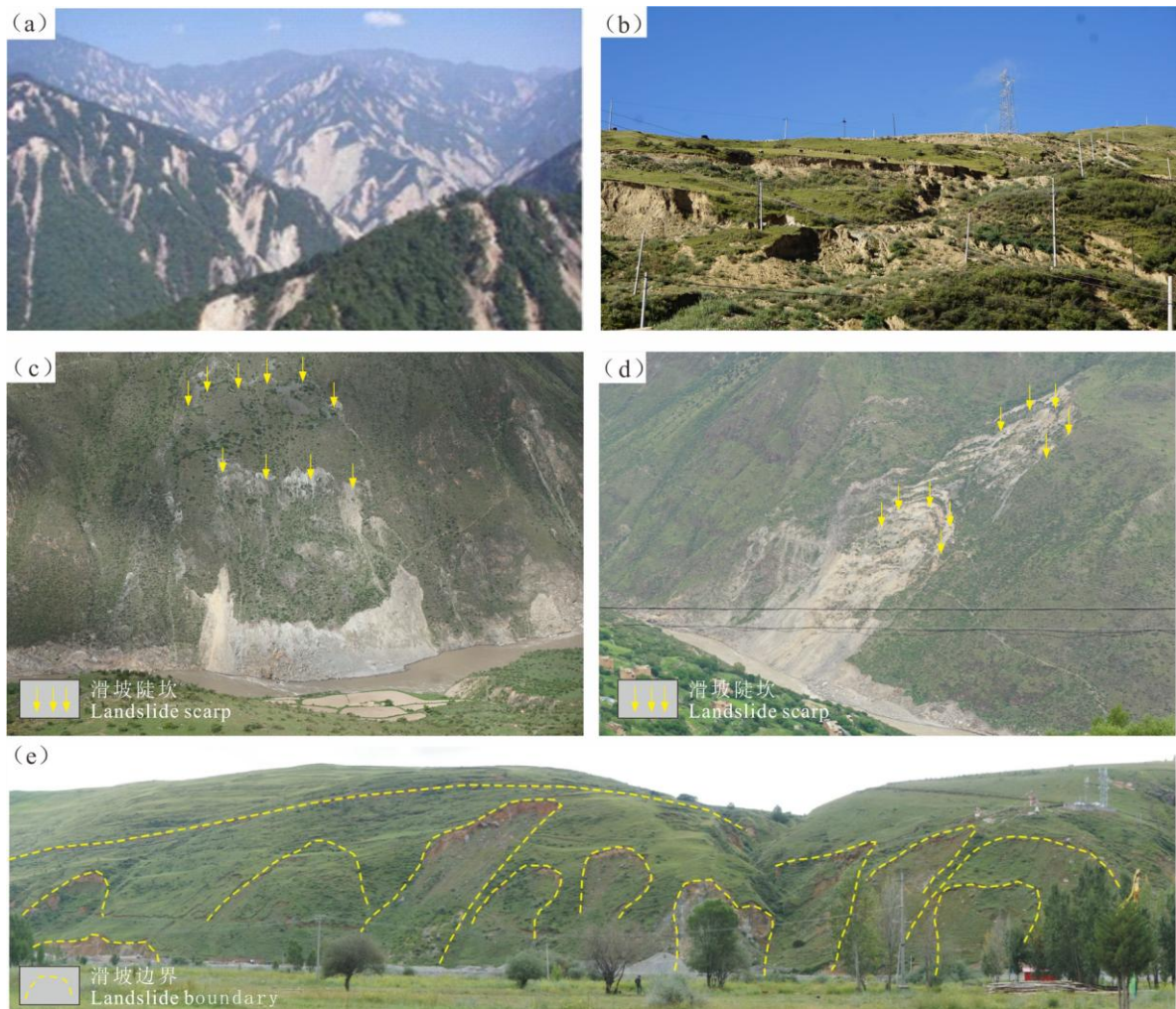


图 1 我国西部复杂山区典型斜坡形变特征

a-2008 年汶川地震山体表层滑塌和斜坡形变；b-鲜水河右岸斜坡形变；c-金沙江敏都乡斜坡形变；d-金沙江沙东乡斜坡形变；e-鲜水河支流左岸斜坡形变。

Fig. 1 Typical slope deformation characteristics in the complex mountainous areas of western China

a-The mountain surface slide and slope deformation during the 2008 Wenchuan earthquake; b-Slope deformation on the right bank of the Xianshui River; c-Slope deformation of Mindu Township, Jinsha River; d-Slope deformation of Shadong Township, Jinsha River; e-Slope landform of the left bank of Xianshui River tributary.

2 区域斜坡形变获取和特征

2.1 区域斜坡形变获取

目前，在区域斜坡形变获取方面，除了传统的地面调查、GPS 测量、位移计和光学遥感识别等方法，以星载 InSAR、地基 SAR、LiDAR 和无人机等先进技术方法为主的非接触式斜坡形变监测发展非常迅速。斜坡形变的获取方法各有特点，需要联合使用，才能发挥各自优势。地面调查能够获取详细的斜坡形变信息以及现场测量数据，但效率慢，覆盖面积小，适应于典型斜坡形变野外调查验证。无人机等航空设备能够获取局部区域的斜坡形变信息，方便灵活，速度快，精度较高，适用于小区域、流域性的斜坡形变信息获取。卫星等航天设备适用于大区域的斜坡形变信息获取，但精

度相对较低，在人力无法到达地区的斜坡形变监测方面具有独特优势。

最近快速发展的 InSAR 技术在区域斜坡形变获取中得到了广泛应用（王桂杰等，2011），在我国西部活动断裂带和复杂山区斜坡形变监测研究中发挥了重要作用。例如：采用 InSAR 技术对鲜水河断裂带的斜坡形变进行了识别研究，从空间上揭示了斜坡形变的活动断裂效应（图 2a）（Yao et al., 2017; 刘筱怡等, 2017）。在金沙江上游区域，开展了斜坡形变定量探测和分析评价（陆会燕等, 2019）。近年来，采用 InSAR 技术获取了大量地震斜坡形变成果，例如 2008 年汶川 Ms8.0 级地震斜坡形变场（图 2b）（屈春燕等, 2010; Gorum et al., 2011），2010 年玉树 Ms7.1 级地震斜坡形变场（姚鑫等, 2010），2001 年昆仑山口西 Ms8.1 级地震斜坡形变场（单新建等, 2004），1999 年土耳其 Duzce 地震斜坡形变场（Burgmann et al., 2002）。区域斜坡形变速率差异很大，且强烈内外动力触发的快速斜坡形变往往难以及时捕捉，这是滑坡发生的重要指示因子，因此区域斜坡形变获取的时间分辨率有待于进一步提高，准确反映斜坡形变的时序历程特征。

2.2 区域斜坡形变特征

斜坡形变是构造活动（地震）、重力、水力和人类活动等内外动力耦合作用造成斜坡损伤的宏观外在表现形式之一。区域斜坡形变特征研究主要有两个方面：

(1) 区域斜坡形变发育发生的时空规律和主控因素，主要是在获取区域斜坡形变的基础上，统计分析区域斜坡形变的时间变化和空间分布规律，统计分析区域斜坡形变与地质环境因素之间的关系，挖掘控制斜坡形变发育发生的主要地质环境因素。例如：采用多源遥感技术分析了岷江上游峡谷区地表形变的时空分布规律及其与地质环境因素的内在联系，研究表明岷江上游峡谷区地表形变具有明显的坡向分异规律，快速形变区多分布于阳坡（肖洪敏等, 2021）。鲜水河断裂带斜坡形变监测结果表明，斜坡形变主要沿断裂呈 NW 向展布，受到显著的活动断裂控制作用（刘筱怡等, 2017; 张文婷等, 2020）。地震斜坡形变场与地质环境因素、地震参数的相关性分析表明（Fujiwara et al., 2019; Liu et al., 2020; Bayik, 2021; Isik et al., 2021），地震斜坡形变场常常沿发震断层展布，受发震断层和地形地貌的控制作用显著。

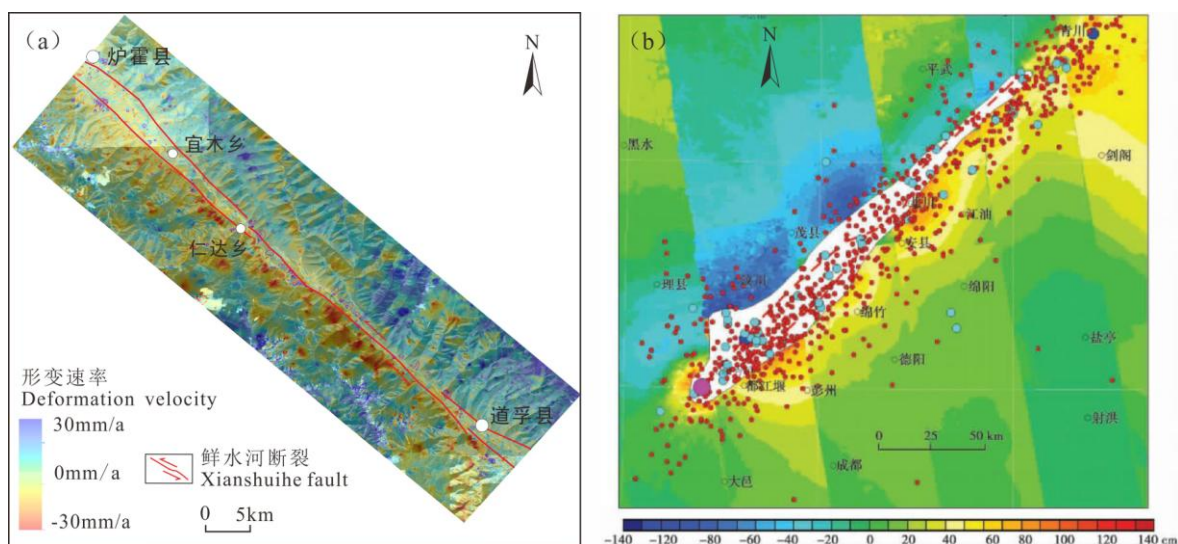


图2 典型活动断裂带和地震斜坡形变场

a-鲜水河断裂带斜坡形变场（刘筱怡等，2017），b-2008年汶川地震斜坡形变场（屈春燕等，2010）。

Fig.2 Typical slope deformation field in the active fault zone and seismic zone

a-Slope deformation field of the Xianshuihe fault zone (Liu et al., 2017), b-Slope deformation field of the 2008 Wenchuan earthquake (Qu et al., 2010).

(2) 基于区域斜坡形变特征的活性滑坡识别, 主要是在深入认识区域斜坡形变与滑坡发育发生之间的相关关系, 判识活性滑坡或潜在滑坡。例如: 基于区域斜坡形变特征, 开展了我国金沙江、白龙江、怒江、澜沧江等区域滑坡隐患识别 (姚鑫等, 2020; Liu et al., 2021; Dai et al., 2021), 以及基于多源遥感技术的秘鲁科迪勒拉斯、尼泊尔特里舒利河、意大利中部伦巴第亚等区域的缓慢移动山体滑坡判识 (Strozzi et al., 2018; Bekaert et al., 2020; Crippa et al., 2021)。地震斜坡形变是地震滑坡分布的重要控制因素, 也是地震滑坡危险性评价的重要因子。2008 年汶川 Ms8.0 级地震诱发滑坡密度空间分布与同震斜坡形变量之间存在正相关关系, 地震诱发滑坡密度随着同震斜坡形变量的增加而增加, 地震斜坡形变量大于 0.6m 的区域为地震滑坡高发区 (Gorum Tolga et al., 2011), 2017 年九寨沟 Ms7.0 级地震斜坡形变与滑坡密度的空间分布存在相似重叠 (朱崇浩等, 2020)。复杂山区地质环境背景的区域差异性决定了斜坡形变特征具有显著的空间异质性, 目前基于区域斜坡形变特征的活性滑坡识别多是定性判识, 斜坡形变在滑坡发育发生过程中的机理机制尚不清晰, 尤其是区域尺度的内在规律需要进一步深入研究。

3. 融合斜坡形变的区域滑坡评价

斜坡形变既是缓慢-蠕滑型滑坡、非显性滑坡的重要识别标志, 也是开展滑坡易发性和危险性评价的重要指标。斜坡形变作为单体滑坡评价因子的研究已经非常广泛, 主要是在斜坡形变特征分析的基础上, 结合野外地质调查、统计分析、数值模拟等方法, 开展定性-半定量的斜坡稳定性和滑坡危险性评价。例如: 采用时序遥感技术开展了三峡库区树坪滑坡和木鱼包滑坡、舟曲锁儿头滑坡和牙豁口滑坡等典型蠕滑型滑坡体的时空形变监测, 分析了滑坡体的形变机理和潜在危险性 (周超等, 2018; Zhang et al., 2022)。获取金沙江白格滑坡 (Fan et al., 2019; Li et al., 2020)、茂县新磨村滑坡 (Intrieri et al., 2018) 等大型滑坡发生前的斜坡形变信息, 追溯斜坡形变历史, 发现斜坡存在较长时期的缓慢形变, 斜坡体长期处于不稳定状态。获取印度喜马拉雅山脉大型滑坡 (Roy et al., 2022)、拉西瓦水电站 Guobu 滑坡 (Shi et al., 2021) 三维地表位移信息, 判识坡体显著形变区段, 分析滑坡危险性。但是, 斜坡形变在区域滑坡评价中的应用相对欠缺, 还不成熟, 依据斜坡形变因子在区域滑坡评价中的使用方式, 目前的研究进展主要包括以下几个方面。

3.1 专家经验判断

在深入分析区域斜坡形变特征和时空分布规律的基础上, 结合野外地质调查和区域滑坡灾害发育特征, 根据专家知识经验, 进行区域斜坡稳定性和滑坡易发性、危险性区划。例如: 采用遥感技术开展了白龙江中游斜坡形变信息监测, 定性评价了不稳定斜坡活动强度, 划分了 218 个运动非常慢斜坡, 113 个运动极慢斜坡和 14 个稳定斜坡 (张毅, 2018)。在西班牙阿尔科斯周边蠕滑型滑坡运动特征监测的基础上, 分析了滑坡危险性及其对城市的潜在影响 (Béjar-Pizarro et al., 2017)。结合多变量统计分析和 InSAR 地表形变结果来定义和划分蠕滑型滑坡风险, 并成功应用于意大利南部坎帕尼亚地区 (Calvello Michele et al., 2017)。基于专家知识经验的滑坡评价判断属于定性评价方法, 虽然缺乏定量化数据支撑, 但是适用于区域滑坡的宏观初步认识和紧急情景下的快速决策。

3.2 加权图层叠加

结合初始滑坡评价结果和斜坡形变监测结果的图层叠加方法。首先, 获取区域斜坡形变场, 分析区域斜坡形变特征, 划分区域斜坡形变等级; 然后, 采用随机森林、逻辑回归、信息量等模型方法完成初始滑坡评价, 划分初始滑坡评价等级; 最后, 加权叠加初始滑坡评价图层和区域斜坡形变

图层，在斜坡形变等级高的区域相应的提高滑坡评价等级，从而提高区域滑坡评价精度，优化区域滑坡评价结果。

图层的权重取值方式主要有 2 种：（1）根据野外地质调查和专家经验，分别为初始滑坡评价图层和区域斜坡形变图层赋权重值（权重总和为 1），该方法成功应用于茂县岷江流域的区域滑坡易发性评价研究（杨光，2020）。（2）基于初始滑坡评价等级和区域斜坡形变等级建立校正矩阵模型（图 3），根据斜坡形变等级相应的增加滑坡评价等级，校正矩阵模型原理简单、方便易用，成功应用于三峡库区（周超，2018）、乌东德地区（黄佳璇，2017）、意大利墨西拿地区（图 4a）（Ciampalini et al., 2016）、西南喀斯特地区（图 4b）（Shen et al., 2019）、意大利中部阿尔诺河流域（Lu et al., 2014）、葡萄牙里斯本北部 Grande 盆地（Oliveira et al., 2015）和湖北省西部（Zhang et al., 2023）等区域滑坡易发性、危险性评价研究，并取得了较好效果。初始滑坡评价可以采用量化的统计分析模型，然而初始滑坡评价等级和区域斜坡形变等级划分，以及相应的权重赋值需要借助专家知识经验。总体上，该类方法属于定性-半定量评价模型，具有原理简单、操作方便等优点。

		校正：斜坡形变等级				
		D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
初始 滑坡 评价 等级	H ₁	0	+?	+?	+?	+?
	H ₂	0	0	+?	+?	+?
	H ₃	0	0	0	+?	+?
	H ₄	0	0	0	0	+?
	H ₅	0	0	0	0	0

图 3 融合斜坡形变的区域滑坡评价校正矩阵模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of correction matrix model of regional landslide assessment integrating slope deformation

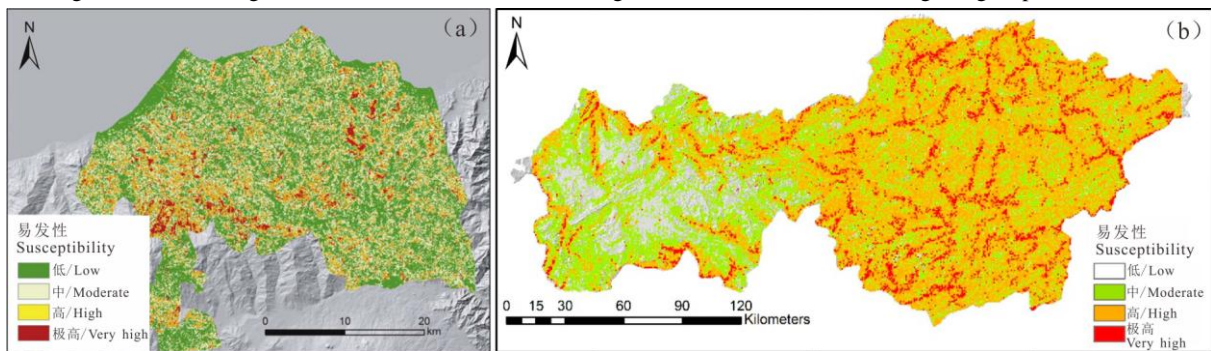


图 4 融合斜坡形变的区域滑坡评价实例（Ciampalini et al., 2016；Shen et al., 2019）

Fig. 4 Example of regional landslide assessment integrating slope deformation (Ciampalini et al., 2016；Shen et al., 2019)

3.3 斜坡形变作为区域滑坡评价的因子指标

在获取分析区域斜坡形变特征的基础上，把斜坡形变作为滑坡评价的因子指标，与地形地貌、地质构造、气象水文、地层岩性、植被覆盖、降雨、地震动等共同组成新的因子指标体系，采用随机森林、逻辑回归、信息量等模型方法开展区域滑坡评价。根据斜坡形变特征，斜坡形变因子可以进一步划分为斜坡形变类型、强度、分布位置（高度、坡度）和时间变化等次一级因子。例如：建立融合斜坡形变的 14 个滑坡致灾因子组成的指标体系，采用人工神经网络，完成意大利亚平宁山脉南部滑坡风险评价（Novellino et al., 2021）。引入斜坡形变，构建区域滑坡评价的指标体系，完成甘肃刘家峡水库区域滑坡易发性评价（高秉海等，2023）和四川黑水毛尔盖库区滑坡易发性评价（周

玉龙, 2020)。引入地震斜坡形变场, 构建地震滑坡评价的因子指标体系, 完成了 2017 年四川九寨沟地震滑坡易发性评价 (王燕燕, 2019)、2004 年日本新潟中越地震滑坡易发性评价 (黄赠, 2017) 和 2022 年四川泸定地震诱发滑坡危险性评价 (Zou et al., 2023)。因子指标本身及其等级 (例如不同的坡度、降雨量) 权重来自统计分析模型, 而因子等级划分需要借助经验模型。总体上, 该类方法属于半定量-定量评价模型, 需要特别注意区域斜坡形变与滑坡发育强度之间的内在规律。

3.4 斜坡形变作为区域滑坡评价的滑坡样本

在获取分析区域斜坡形变特征的基础上, 判识滑坡隐患点, 或把斜坡形变作为滑坡隐患点, 结合已有但不完整的滑坡数据, 组成新的滑坡数据样本, 采用随机森林、逻辑回归、信息量等模型方法开展区域滑坡评价。例如: 以多源遥感技术提取的斜坡形变点作为滑坡隐患点, 采用层次分析、证据权和逻辑回归等模型方法, 完成白龙江舟曲-武都段 (Xie et al., 2017) (图 5)、岷江流域等区域滑坡易发性、危险性评价。通过四川九寨沟区域地表形变信息, 识别潜在滑坡隐患点, 采用改进的层次分析-信息量模型完成九寨沟区域滑坡危险性评价 (卢星宇, 2021)。遥感获取川西鲜水河活动断裂带康定-炉霍段斜坡形变, 建立考虑静态和动态因子的滑坡危险性评价指标体系, 采用改进信息量模型完成滑坡危险性评价 (王天河, 2019)。该类方法属于半定量-定量评价模型, 尤其是在滑坡数据相对缺乏的地区, 可以采用斜坡形变点替代部分缓慢-蠕滑型滑坡。但是, 斜坡形变不代表一定发生滑坡, 而只是滑坡发生的促进因素和前兆信息, 在根据斜坡形变判识滑坡隐患点的过程中, 需要特别注意选取那些最大可能发育滑坡的斜坡形变区域。

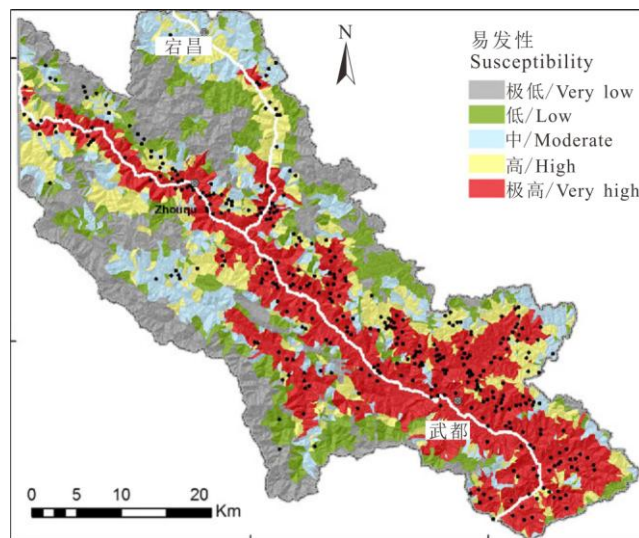


图 5 融合斜坡形变的白龙江舟曲-武都段滑坡易发性 (Xie et al., 2017)

Fig. 5 Landslide susceptibility of the Zhouqu-Wudu section of Bailong river integrating slope deformation (Xie et al., 2017)

4. 融合斜坡形变的区域滑坡评价体系

聚焦斜坡形变在区域滑坡评价中的重要作用, 结合目前研究现状、存在的问题和未来发展趋势, 主要从区域滑坡评价的流程步骤、采用的技术方法和成灾因子指标等 3 个方面, 初步构建了融合斜坡形变特征的区域滑坡评价体系 (图 6), 以流程步骤为贯穿主线, 技术方法和因子指标融入其中。

(1) 流程步骤主要有 5 个: 区域地质环境资料收集、区域斜坡形变获取 (地面调查、地面位移监测、星空位移监测等)、区域斜坡形变特征和主控因素分析 (空间统计分析、相关分析等)、融合斜坡形变特征的区域滑坡易发性评价、叠加内外动力触发因素的区域滑坡危险性评价。(2) 技术方法主要有 4 类: 基于专家经验的定性判断、基于专家经验和校正矩阵的加权图层叠加、斜坡形变作为区

域滑坡评价的因子指标、斜坡形变作为区域滑坡评价的滑坡样本。(3) 因子指标类型: 融入斜坡形变因子, 结合地形地貌、地质构造、气象水文、地层岩性、植被覆盖、降雨和地震动等传统因子, 构建新的因子指标体系。斜坡形变因子可以进一步划分为斜坡形变类型、强度、分布位置(高度、坡度)和时间变化等次一级因子。例如, 在层析分析模型中, 斜坡形变的次一级因子可组成因子指标层之下的次一级因子指标层, 构建双层因子指标层, 斜坡形变次一级因子的权重总和等于斜坡形变权重。梳理总结的 4 类技术方法已经在部分区域得到应用, 例如前文的大量研究实例, 并取得了满意的效果。

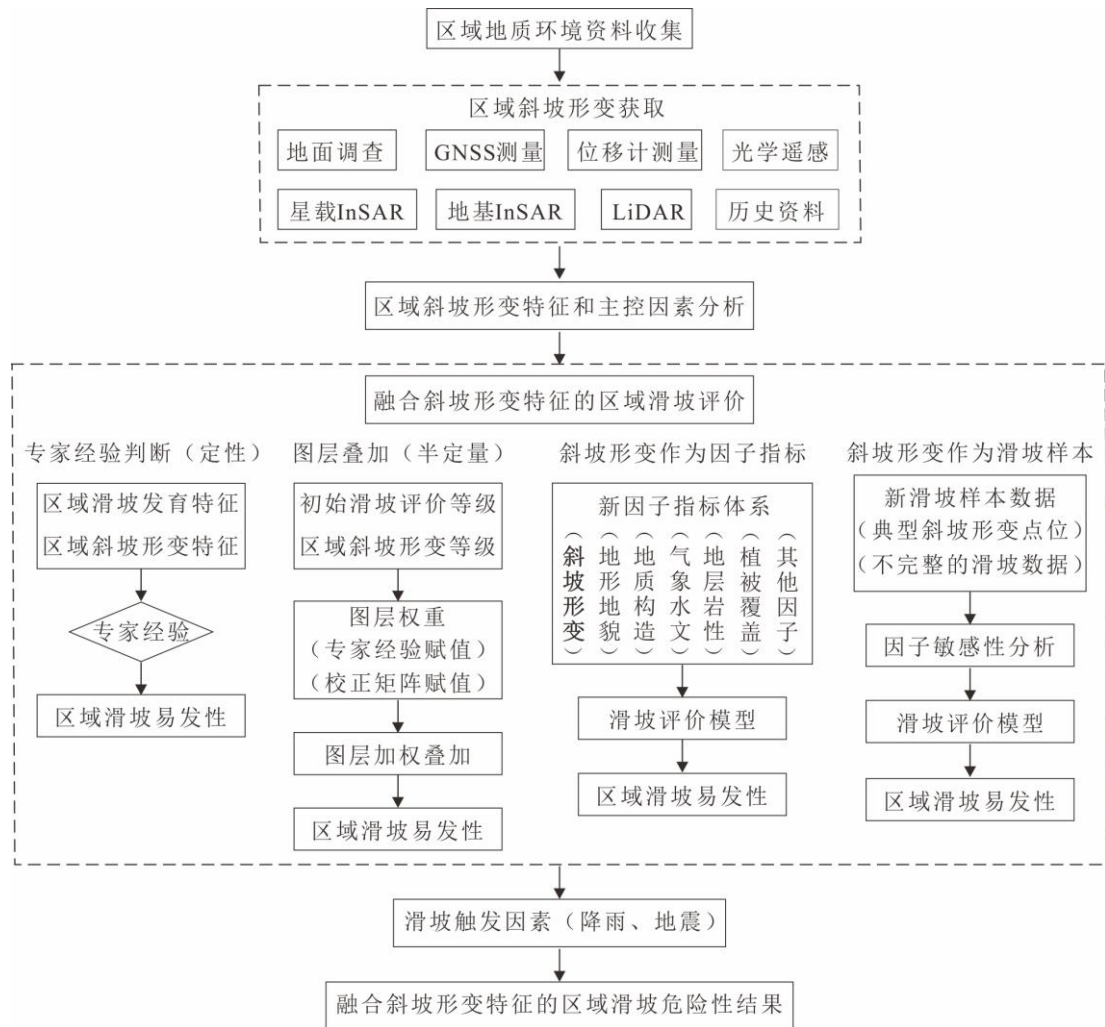


图 6 初步的融合斜坡形变特征的区域滑坡评价体系

Fig. 6 Preliminary regional landslide assessment system integrating slope deformation characteristics

5 讨论与展望

5.1 讨论

复杂山区内外动力耦合作用导致的斜坡形变普遍存在, 降低了岩土体物理力学强度, 进而降低了斜坡自稳性, 在同等动力触发条件下, 存在持续形变的斜坡更容易失稳滑动。因此, 斜坡形变是区域滑坡评价需要考虑的重要因素。目前, 区域滑坡评价研究多是面向静态因子指标的易发性评价、以及叠加地震、降雨等触发因子指标的危险性评价, 虽然融合斜坡形变特征的区域滑坡评价已经取得了一些成果, 但相关理论模型和技术方法尚不成熟, 还处于探索研究阶段。

多源多时相遥感技术已经广泛应用于斜坡形变研究，尤其适用于大面积的广域斜坡形变探测，与地面调查、无人机、现场监测等技术方法共同组成了区域斜坡形变的多层次、多尺度观测体系。但是，区域斜坡形变速率差异很大，尤其是快速的斜坡形变往往难以及时捕捉，而这恰恰是滑坡发育的前兆信息和滑坡评价的重要指标。因此，遥感探测的时间分辨率有待于进一步提高，以便能够捕捉短时间的斜坡形变，准确反映斜坡形变的时序历程特征。

复杂山区地形地貌、地质构造和内外动力作用的差异性，决定了区域斜坡形变特征具有显著的空间异质性。区域斜坡形变是多种复杂地质环境因素长期综合影响的结果，需要深入分析区域斜坡形变的时空分布规律，剖析区域斜坡形变与地质环境背景因素的内在关系，深入挖掘区域斜坡形变的主控因素。斜坡形变在滑坡发育发生过程中的机理机制尚不清晰，尤其是区域尺度的内在联系规律需要进一步深入研究，对于滑坡评价中的斜坡形变因子权重取值具有重要参考价值，这是进一步开展区域滑坡评价的重要支撑。

目前，已经发展了 4 种类型的融合斜坡形变的区域滑坡评价技术方法，且取得了一些研究成果，但主要是基于专家经验、统计分析的定性、半定量结果，缺乏全流程量化评价模型，且多是围绕区域降雨滑坡评价，区域地震滑坡评价较少考虑斜坡形变因子，需结合活动断裂带地震高发区斜坡形变特征，建立融合斜坡形变的地震滑坡危险性评价新模型新方法，提高潜在地震滑坡危险性预测评价精度。

5.2 展望

基于已有研究成果，初步构建了融合斜坡形变特征的区域滑坡评价体系，但仍然只是一个框架概念，内部的相关理论、技术方法和操作流程有待于进一步优化、充实、完善。未来发展趋势是：

(1) 充分吸收应用最新的空天地观测技术，获取更高时空分辨率的区域斜坡形变，这是开展后续研究的关键基础数据，(2) 深入剖析区域斜坡形变的时空分布规律，挖掘区域尺度上的斜坡形变与滑坡发育的内在机制，量化描述其内在联系，建立基于大数据统计规律的函数公式，(3) 深入研究斜坡形变在区域滑坡评价中的位置角色（作为影响滑坡发育的因子指标，或者作为缺失滑坡数据区域的滑坡样本）和权重取值（斜坡形变本身的权重，以及斜坡形变类型、强度、分布位置和时间变化等次一级因子的权重），研发融合斜坡形变特征的区域滑坡评价的量化新模型新方法。

6 结论

复杂山区斜坡形变普遍存在，降低了斜坡稳定性，是区域滑坡评价需要考虑的重要因素，需加强捕捉长时序斜坡形变过程的关键特征，深入分析区域斜坡形变的时空分布规律，揭示斜坡形变对于区域滑坡发育发生的促进机制，为开展融合斜坡形变特征的区域滑坡评价提供理论支撑。

初步构建了融合斜坡形变特征的区域滑坡评价体系，包含 5 个流程步骤、4 类技术方法和因子指标类型。技术方法主要有：基于专家经验的定性判断、基于专家经验和校正矩阵的加权图层叠加、斜坡形变作为区域滑坡评价的因子指标、斜坡形变作为区域滑坡评价的滑坡样本。斜坡形变因子可以进一步划分为斜坡形变类型、强度、分布位置和时间变化等次一级因子。

融合斜坡形变特征的区域滑坡评价研究尚处于探索研究阶段，需要结合机器学习、人工智能等新技术，提出或优化区域滑坡评价的新模型新方法，加强量化评价研究。研究成果期望推动融合斜坡形变特征的区域滑坡评价研究，为区域滑坡灾害防控提供科学支撑。

References

Bayik Caglar. 2021. Deformation analysis of 2020 Mw 5.7 Karliova, Turkey, earthquake using DInSAR method with

- different incidence angle SAR data[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(4): 273.
- Béjar-Pizarro Marta, Notti Davide, Mateos Rosa M, Ezquerro Pablo, Centolanza Giuseppe, Herrera Gerardo, Bru Guadalupe, Sanabria Margarita, Solari Lorenzo, Duro Javier, Fernández José 2017. Mapping vulnerable urban areas affected by slow-moving landslides using sentinel-1 InSAR[J]. *Remote Sensing*, 9(9), 876.
- Bekaert David P S, Handwerger Alexander L, Agram Piyush, Kirschbaum Dalia B. 2020. InSAR-based detection method for mapping and monitoring slow-moving landslides in remote regions with steep and mountainous terrain: an application to Nepal[J]. *Remote Sensing of Environment*, 249(1), 111983.
- Burgmann Roland, Ayhan M Emin, Fielding Eric J, Wright Tim J, McClusky Simon, Aktug Bahadir, Demir Coskun, Lenk Onur, Turkezer Ali. 2002. Deformation during the 12 November 1999 Duzce, Turkey, Earthquake, from GPS and InSAR Data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1): 161–171.
- Calvello Michele, Peduto Dario, Arena Livia. 2017. Combined use of statistical and DInSAR data analyses to define the state of activity of slow-moving landslides[J]. *Landslides*, 14(2): 473-489.
- Chen Jianping, Li Huizhong. 2016. Genetic mechanism and disasters features of complicated structural rock mass along the rapidly uplift section at the upstream of Jinsha river[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(4): 1153-1167 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Qiangong, Zhang Zhuoyuan, Huang Runqiu. 2007. Study on Dynamics of Rock Avalanches State of the Art Report[J]. *Journal of Mountain Science*, 25(1): 72-84 (in Chinese with English abstract).
- Ciampalini Andrea, Raspini Federico, Lagomarsino Daniela, Catani Filippo, Casagli Nicola. 2016. Landslide susceptibility map refinement using PSInSAR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 184: 302-315.
- Crippa Chiara, Valbuzzi Elena, Frattini Paolo, Crosta Giovanni B, Spreafico Margherita C, Agliardi Federico. 2021. Semi-automated regional classification of the style of activity of slow rock-slope deformations using PS InSAR and SqueeSAR velocity data[J]. *Landslides*, 18(7): 2445-2463.
- Dai Cong, Li Weile, Wang Dong, Lu Huiyan, Xu Qiang, Jian Ji. 2021. Active Landslide Detection Based on Sentinel-1 Data and InSAR Technology in Zhouqu County, Gansu Province, Northwest China[J]. *Journal of Earth Science*, 32(5): 1092-1103.
- Dong Jie, Zhang Lu, Tang Minggao, Liao Mingsheng, Xu Qiang, Gong Jianya, Ao Meng. 2018. Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiayu landslide in Danba, China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 205: 180-198.
- Fan Xuanmei, Xu Qiang, Alonso-Rodriguez Aadres, Siva Subramanian Srikrishnan, Li Weile, Zheng Guang, Dong Xiujun, Huang Runqiu. 2019. Successive landsliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet, China: prime investigation, early warning, and emergency response[J]. *Landslides*, 16(5): 1003–1020.
- Fujiwara Satoshi, Nakano Takayuki, Morishita Yu, Kobayashi Tomokazu, Yurai Hiroshi, Une Hiroshi, Hayashi Kyonosuke. 2019. Detection and interpretation of local surface deformation from the 2018 Hokkaido Eastern Ibari Earthquake using ALOS-2 SAR data[J]. *Earth, Planets and Space*, 71(1): 1-17.
- Gao Binghai, He Yi, Zhang Lifeng, Yao Sheng, Yang Wang, Chen Yi, He Xu, Zhao Zhan'ao, Chen Hesheng. 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).
- Gorum Tolga, Fan Xuanmei, van Westen Cees J, Huang Runqiu, Xu Qiang, Tang Chuan, Wang Gonghui. 2011. Distribution pattern of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake[J]. *geomorphology*, 133(3-4): 152-167.
- Guo Changbao, Ren Sanshao, Li Xue, Zhang Yongshuang, Yang Zhihua, Wu Ruian, Jin Jijun. 2019. Development characteristics and reactivation mechanism of the Jiangdingya ancient landslide in the Nanyu town, Zhouqu county, Gansu province[J]. *Geoscience*, 33(1): 206-217 (in Chinese with English abstract).
- Guo Changbao, Yan Yiqiu, Zhang Yongshuang, Zhang Xujiao, Zheng Yueze, Li Xue, Yang Zhihua, Wu Ruian. 2021. Study on the creep-sliding mechanism of the giant Xiongba ancient landslide based on the SBAS-InSAR method, Tibetan plateau, China[J]. *Remote Sensing*, 13(17): 3365.
- Han Bingquan, Liu Zhenjiang, Chen Bo, Li Zhenhong, Yu Chen, Zhang Yong, Peng Jianbing. 2023. Coseismic Deformation and Slip Distribution of the 2022 Luding Mw6.6 Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 48(1):36-46 (in Chinese with English abstract).
- He Siming, Bai Xiuqiang, Ouyang Chaojun, Wang Dongpo. 2017. On the survey of giant landslide at Xinmo village of Diexi town, Maoxian country, Sichuan province, China[J]. *Mountain Research*, 35(4): 598-603 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jiakuan. 2017. Slow-moving landslide dynamic monitoring and regional stability analysis based on PSInSAR[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing (in Chinese with English abstract).
- Huang Zeng. 2017. Multiscale susceptibility zonation of landslides triggered by buried fault earthquake[D]. Zhejiang: Zhejiang University (in Chinese with English abstract).
- Intrieri Emanuele, Raspini Federico, Fumagalli Alfio, Lu Ping, Conte Sara Del, Farina Paolo, Allievi Jacopo, Ferretti Alessandro, Casagli Nicola. 2018. The Maoxian landslide as seen from space detecting precursors of failure with

- Sentinel-1 data[J]. *Landslides*, 15(1): 123-133.
- Isik Veysel, Saber Reza, Caglayan Ayse. 2021. November 08, 2019 Turkmanchay earthquake (Mw 5. 9) in NW Iran an assessment of the earthquake using DInSAR time-series and field evidence[J]. *Natural Hazards*, 105(3): 3013-3037.
- Li Menghua, Zhang Lu, Ding Chao, Li Weile, Luo Heng, Liao Mingsheng, Xu Qiang. 2020. Retrieval of historical surface displacements of the Baige landslide from time-series SAR observations for retrospective analysis of the collapse event[J]. *Remote Sensing of Environment*, 240: 1-11.
- Dai Cong, Li Weile, Lu Huiyan, Zhang Shuai. 2023. Landslide hazard assessment method considering the deformation factor A case study of Zhouqu, Gansu Province, Northwest China[J]. *Remote Sensing*, 15: 596.
- Liu Xianwen, Chen Qiang, Zhao Jingjing, Xu Qian, Luo Rong, Zhang Yijun, Yang Yinghui, Liu Guoxiang. 2020. The spatial response pattern of coseismic landslides induced by the 2008 Wenchuan earthquake to the surface deformation and Coulomb stress change revealed from InSAR observations[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 87: 102030.
- Liu Xiaojie, Zhao Chaoying, Zhang Qin, Lu Zhong, Li Zhenhong, Yang Chengsheng, Zhu Wu, Liu-Zeng Jing, Chen Liquan, Liu Chuanjin. 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 Xiaoyi, Yang Zhihua, Guo Changbao, Shen Wei, Su Fangrui. 2017. Study of Slow-moving Landslide Characteristics Based on the SBAS-InSAR in the Xianshuihe Fault Zone[J]. *Geoscience*, 31(5): 965-977 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huiyan, Li Weile, Xu Qiang, Dong Xiujun, Dai Cong, Wang Dong. 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).
- Lu Ping, Catani Filippo, Tofani Veronica, Casagli Nicola. 2014. Quantitative hazard and risk assessment for slow-moving landslides from Persistent Scatterer Interferometry[J]. *Landslides*, 11(4): 685-696.
- Lu Xingyu. 2021. Risk Assessment of Geological Hazards in Jiuzhaigou, China Based on InSAR Technique[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China (in Chinese with English abstract).
- Novellino A, Cesarano M, Cappelletti P, Martire D Di, Napoli M Di, Ramondini M, Sowter A, Calcaterra D. 2021. Slow-moving landslide risk assessment combining Machine Learning and InSAR techniques[J]. *Catena*, 203: 105317.
- Oliveira S C, Zêzer E J L, Catalão J, Nico G. 2015. The contribution of PSInSAR interferometry to landslide hazard in weak rock-dominated areas[J]. *Landslides*, 12(4): 703-719.
- Peng Jianbing, Ma Runyong, Lu Quanzhong, Li Xian, Shao Tiejun. 2004. Geological hazards effects of uplift of Qinghai-Tibet plateau[J]. *Advance in Earth Sciences*, 19(3): 457-466 (in Chinese with English abstract).
- Qin Siqing, Wang Yuanyuan, Ma Ping. 2010. Exponential laws of critical displacement evolution for landslides and avalanches[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(5): 873-880 (in Chinese with English abstract).
- Qu Chunyan, Shan Xinjian, Song Xiaogang, Zhang Guifang, Zhang Guohong, Guo Limin, Liu Yunhua, Han Yufei. 2010. Spatial analysis of coseismic displacement field of the Wenchuan MS 8.0 earthquake derived using D-INSAR[J]. *Seismology and Geology*, 32(2): 175-190 (in Chinese with English abstract).
- Roy Priyom, Martha Tapas R, Khanna Kirti, Jain Nirmala, Kumar K Vinod. 2022. Time and path prediction of landslides using InSAR and flow model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 271: 112899.
- Shan Xinjian, Liu Jiahang, Ma Chao. 2004. Preliminary analysis on characteristics of coseismic deformation associated with Ms=8.1 western Kunlunshan pass earthquake in 2001[J]. *Acta seismologica sinica*, 26(5): 474-480 (in Chinese with English abstract).
- Shen Chaoyong, Feng Zhongke, Xie Chou, Fang Haoran, Zhao Binbin, Ou Wenhao, Zhu Yu, Wang Kai, Li Hongwei, Bai Honglin, Mannan Abdul, Chen Panpan. 2019. Refinement of landslide susceptibility map using persistent scatterer interferometry in areas of intense mining activities in the karst region of Southwest China[J]. *Remote Sensing*, 11(23): 2821.
- Shi Xuguo, Hu Xie, Sitar Nicholas, Kayen Robert, Qi Shengwen, Jiang Houjun, Wang Xudong, Zhang Lu. 2021. Hydrological control shift from river level to rainfall in the reactivated Guobu slope besides the Laxiwa hydropower station in China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 265: 112664.
- Strozzi Tazio, Klimeš Jan, Frey Holger, Caduff Rafael, Huggel Christian, Wegmüller Urs, Rapred Alejo Cochachin. 2018. Satellite SAR interferometry for the improved assessment of the state of activity of landslides: A case study from the Cordilleras of Peru[J]. *Remote Sensing of Environment*, 217: 111-125.
- Su Lijun, Hu Kaiheng, Zhang Weifeng, Wang Jiao, Lei Yu, Zhang Chonglei, Cui Peng, Alessandro Pasuto, Zheng Quanhong. 2017. Characteristics and triggering mechanism of Xinmo landslide on 24 June 2017 in Sichuan, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 14(9): 1689-1700.
- Wang Guijie, Xie Mowen, Qiu Cheng, Wu Weilun, Huang Jiehui. 2011. Experiment research of D-InSAR technique on identifying landslide moving in a wide area[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 33(2): 131-141 (in Chinese with English abstract).

- Wang Tao, Liu Jiamei, Li Zetong, Xin Peng, Shi Jusong, Wu Shuren. 2021. Seismic landslide hazard assessment of China and its impact on national territory spatial planning[J]. *Geology in China*, 48(1):21-39 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tianhe. 2019. Risk Assessment of Geological Hazards and Route Optimization Analysis of Kangding-Luhuo Proposed Expressway Based on Multi-source Remote Sensing[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanyan. 2019. Landslide recognition and susceptibility assessment after earthquake supported by InSAR[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University (in Chinese with English abstract).
- Xiao Hongmin, Zhang Wenjiang, Tian Yunfeng, Jiang Huiru, Zhu Qiang. 2021. Controls underlying the aspect pattern of SBAS-InSAR retrieved surface subsidence in the upper Minjiang basin[J]. *Remote Sensing Technology and Application* (in Chinese with English abstract).
- Xie Zhengtuan, Chen Guan, Meng Xingmin, Zhang Yi, Qiao Liang, Tan Long. 2017. A comparative study of landslide susceptibility mapping using weight of evidence, logistic regression and support vector machine and evaluated by SBAS-InSAR monitoring: Zhouqu to Wudu segment in Bailong River Basin, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 76(8): 1-19.
- Xu Chong, Xu Xiwei, Yao Xin, Dai Fuchu. 2013. Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis[J]. *Landslides*, 11(3): 441-461.
- Xu Qiang, Zheng Guang, Li Weile, He Chaoyang, Dong Xiujun, Guo Chen, Feng Wenkai. 2018. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018[J]. *Journal of Engineering Geology*, 26(6): 1534-1551 (in Chinese with English abstract).
- Yang Guang. 2020. Optimized regional landslide susceptibility evaluation in Maoxian based on SBAS-InSAR technique[D]. Jilin: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhihua, Wu Ruian, Guo Changbao, Zhang Yongshuang, Lan Hengxing, Ren Sanshao, Yan Yiqiu. 2022. Geo- hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan[J]. *Geology in China*, 49(2): 355-368 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhi-hua, Guo Chang-bao, Wu Rui-an, Shao Wei-wei, Yu Peng-fei, Li Cai-hong. 2023. Potential seismic landslide hazard and engineering effect in the Ya'an-Linzi section of the Sichuan-Tibet transportation corridor, China[J]. *China Geology*, 6, 228-240.**
- Yao Xin, Zhang Yongshuang, Yang Nong, Xiong Tanyu. 2010. D-INSAR observation of earth surface deformation in the Ms 7.1 Yushu earthquake[J]. *Journal of Geomechanics*, 16 (2): 129-136 (in Chinese with English abstract).
- Yao Xin, Li Lingjing, Zhang Yongshuang, Zhou Zhenkai, Liu Xinghong. 2017. Types and characteristics of slow-moving slope geo-hazards recognized by TS-InSAR along Xianshuihe active fault in the eastern Tibet Plateau[J]. *Natural Hazards*, 88(3): 1727-1740.
- Yao Xin, Deng Jianhui, Liu Xinghong, Zhou Zhenkai, Yao Jiaming, Dai Fuchu, Ren Kaiyu, Li Lingjing. 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).
- Yin Yueping. 2008. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan[J]. *Journal of engineering geology*, 16(4): 433-444 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guo, Wang Shun Yao, Chen Zhenwei, Liu Yutao, Xu Zixing, Zhao Ruishan. 2023. Landslide susceptibility evaluation integrating weight of evidence model and InSAR results, west of Hubei Province, China[J]. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 26: 95-106.
- Zhang Wenting, Ji Lingyun, Liu Chuanjin, Xu Jing. 2020. Interseismic deformation monitoring of Xianshuhe fault zone based on sentinel-1 data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 40(4): 357-361 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yi. 2018. Detecting ground deformation and investigating landslides using InSAR technique—taking middle reach of Bailong river basin as an example[D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yi, Meng Xingmin, Novellino Alessandro, Dijkstra Tom, Chen Guan, Jordan Colm, Li Yuanxi, Su Xiaojun. 2022. Characterization of pre-failure deformation and evolution of a large earthflow using InSAR monitoring and optical image interpretation[J]. *Landslides*, 19: 35-50.
- Zhang Yongshuang, Dong Shuwen, Hou Chuntang, Guo Changbao, Yao Xin, Li Bin, Du Jianjun, Zhang Jiagui. 2013. Geohazards induced by the Lushan Ms7.0 earthquake in Sichuan Province, Southwest China: typical examples, types and distributional characteristics[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 87(3): 646–657.
- Zhou Chao. 2018. Landslide identification and prediction with the application of time series InSAR[D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yulong. 2020. Evaluation of landslide susceptibility in Maoergai reservoir area with time series InSAR deformation[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Zhu Chonghao, Zhang Jianjing, Ma Donghua, Liu Yang, Xiang Bo. 2020. Comprehensive analysis on risk of landslides in post-earthquake area based on DInSAR-BP neural networks[J]. *Journal of Engineering Geology*, 28(3): 530-540 (in Chinese with English abstract).

Zou Lichuan, Wang Chao, Zhang Hong, Wang Dong, Tang Yixian, Dai Huayan, Zhang Bo, Wu Fan, Xu Lu. 2023. Landslide-prone area retrieval and earthquake-inducing hazard probability assessment based on InSAR analysis[J]. Landslides, published online.

附中文参考文献

- 陈剑平, 李会中. 2016. 金沙江上游快速隆升河段复杂结构岩体灾变特征与机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 46(4): 1153-1167.
- 高秉海, 何毅, 张立峰, 姚圣, 杨旺, 陈毅, 何旭, 赵占鹭, 陈鹤升. 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.
- 郭长宝, 任三绍, 李雪, 张永双, 杨志华, 吴瑞安, 金继军. 2019. 甘肃舟曲南峪江顶崖古滑坡发育特征与复活机理[J]. 现代地质, 33(1): 206-217.
- 韩炳权, 刘振江, 陈博, 李振洪, 余琛, 张勇, 彭建兵. 2023. 2022 年泸定 Mw6.6 地震 InSAR 同震形变与滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 48(1): 36-46.
- 何思明, 白秀强, 欧阳朝军, 王东坡. 2017. 四川省茂县叠溪镇新磨村特大滑坡应急科学调查[J]. 山地学报, 35(4): 598-603.
- 黄佳璇. 2017. 基于 PSInSAR 蠕动型滑坡动态监测及区域稳定性分析[D]. 北京: 北京科技大学.
- 黄赠. 2017. 隐伏断层地震诱发滑坡易发性多尺度评价[D]. 浙江: 浙江大学.
- 刘筱怡, 杨志华, 郭长宝, 申维, 宿方睿. 2017. 基于 SBAS-InSAR 的鲜水河断裂带蠕滑型滑坡特征研究[J]. 现代地质, 31(5): 965-977.
- 陆会燕, 李为乐, 许强, 董秀军, 代聪, 王栋. 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.
- 卢星宇. 2021. 基于 InSAR 技术的九寨沟地质灾害危险性评价研究[D]. 成都: 电子科技大学.
- 彭建兵, 马润勇, 卢全中, 李喜安, 邵铁全. 2004. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. 地球科学进展, 19(3): 457-466.
- 秦四清, 王媛媛, 马平. 2010. 崩滑灾害临界位移演化的指数律[J]. 岩石力学与工程学报, 29(5): 873-880.
- 屈春燕, 单新建, 宋小刚, 张桂芳, 张国宏, 郭利民, 刘云华, 韩宇飞. 2010. D-InSAR 技术应用于汶川地震地表位移场的空间分析[J]. 地震地质, 32(2): 175-190.
- 单新建, 柳榭航, 马超. 2004. 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震同震形变场特征的初步分析[J]. 地震学报, 26(5): 474-480.
- 王桂杰, 谢谟文, 邱骋, 吴维伦, 黄洁慧. 2011. 差分干涉合成孔径雷达技术在广域滑坡动态辨识上的实验研究[J]. 北京科技大学学报, 33(2): 131-141.
- 王涛, 刘甲美, 栗泽桐, 辛鹏, 石菊松, 吴树仁. 2021. 中国地震滑坡危险性评估及其对国土空间规划的影响研究[J]. 中国地质, 48(1): 21-39.
- 王天河. 2019. 基于多源遥感的康定—炉霍拟建高速公路地质灾害危险性评价及线路优化分析[D]. 成都: 成都理工大学.
- 王燕燕. 2019. InSAR 支持下的震后滑坡识别与易发性评价[D]. 焦作: 河南理工大学.
- 肖洪敏, 张文江, 田云锋, 蒋蕙如, 朱强. 2021. 基于 SBAS-InSAR 方法的岷江上游峡谷区地表沉降的坡向分异规律研究[J]. 遥感技术与应用.
- 许强, 郑光, 李为乐, 何朝阳, 董秀军, 郭晨, 冯文凯. 2018. 2018 年 10 月和 11 月金沙江白格两次滑坡—堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 26(6): 1534-1551.
- 杨光. 2020. 基于 SBAS-InSAR 技术优化的茂县区域滑坡敏感性评价[D]. 吉林: 吉林大学.
- 杨志华, 吴瑞安, 郭长宝, 张永双, 兰恒星, 任三绍, 闫怡秋. 2022. 川西巴塘断裂带地质灾害效应与典型滑坡发育特征[J]. 中国地质, 49(2): 355-368.
- 姚鑫, 张永双, 杨农, 熊探宇. 2010. 玉树地震地表变形 InSAR 观测及初步分析[J]. 地质力学学报, 16(2): 129-136.
- 姚鑫, 邓建辉, 刘星洪, 周振凯, 姚佳明, 戴福初, 任开瑀, 李凌婧. 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.
- 殷跃平. 2008. 汶川八级地震地质灾害研究. 工程地质学报[J], 16(4): 433-444.
- 张文婷, 季灵运, 刘传金, 徐晶. 2020. 基于 Sentinel-1 数据的鲜水河断裂带震间形变监测[J]. 大地测量与地球动力学, 40(4): 357-361.
- 张毅. 2018. 基于 InSAR 技术的地表变形监测与滑坡早期识别研究—以白龙江流域中游为例[D]. 兰州: 兰州大学.
- 周超. 2018. 集成时间序列 InSAR 技术的滑坡早期识别与预测研究[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 周玉龙. 2020. 融入时序 InSAR 形变的毛尔盖库区滑坡易发性评价研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 朱崇浩, 张建经, 马东华, 刘阳, 向波. 2020. 基于 DInSAR-BP 神经网络的震后区域滑坡危险性综合评价研究[J]. 工程地质学报, 28(3): 530-540.