



# 利用遥感技术进行滑坡探测、监测和预测

尼古拉·卡萨利,埃马努埃莱·因特里耶里  , 维罗妮卡·托法尼、乔瓦尼·吉利和费德里科·拉斯皮尼

抽象的

山体滑坡是一种普遍现象,当它们发生在定居点和基础设施附近时,可能会造成灾难性的后果。检测、监测和预测是管理山体滑坡风险的基础,通常依赖于遥感技术 (RST),包括从太空观测地球、激光扫描和地面干涉测量。在本技术综述中,我们描述了 RST 在滑坡分析和管理中的使用。卫星 RST 用于探测和测量滑坡位移,提供各种时空尺度的概要视图。地基传感器 (包括地基干涉雷达、多普勒雷达和激光雷达) 监测区域较小,但精度高、采集频率高、配置灵活,因此越来越多地应用于滑坡的实时监测和预警。每个 RST 都有优点和局限性,具体取决于应用 (检测、监测或预测)、关注区域的大小、滑坡类型、变形模式和滑坡造成的风险。因此,各种技术的集成通常是最好的。更有效的山体滑坡风险管理需要更多地利用大数据、更有策略地利用监测资源以及与山体滑坡易发地区的居民更好地沟通。

部分

介绍

星载技术

地面技术

应用领域

总结和未来展望

技术审查

介绍

山体滑坡在倾斜环境中普遍存在,可能是由气候<sup>2</sup>或人类<sup>3</sup>活动引起的(方框1)。当土构造<sup>1</sup>, 壤和岩石的危险移动直接或间接影响脆弱的人类住区和基础设施时,有时会造成大范围的破坏,就会发生山体滑坡灾害。仅 2004 年至 2016 年间,全球估计就有 55,997 人在 4,862 起不同的山体滑坡事件中丧生(不包括地震造成的滑坡事件),其中亚洲是受影响最严重的大陆<sup>4</sup>。

全球变化(例如降雨频率或强度增加以及永久冻土退化)可能会加剧山体滑坡风险。因此,国际组织和机构提倡减少山体滑坡风险的政策,包括了解风险和加强备灾以进行有效应对。例如, 2020 年山体滑坡京都承诺旨在提供工具、信息、平台、技术专长和激励措施,以促进在全球范围内减少山体滑坡风险。

为了实现这些目标,检测不稳定斜坡的存在、监测速度并预测不稳定斜坡的稳定性条件以及这些特征随时间的演变至关重要。然而,滑坡的复杂性和广泛性需要精确的测量,通常具有能够针对一个或多个斜坡的空间覆盖范围,并且采集频率足够高以捕获滑坡的重大变化(取决于滑坡的类型;框1)。

现场监测技术通常不适合广域监测,因为每个传感器仅提供有关其周围环境的信息,并且可能要求操作员进入危险或难以进入的区域。因此,遥感技术(RST)已成为滑坡调查中不可或缺的工具<sup>6</sup>

,因为它们提供了不同尺度的地表的系统性、概要性和成本效益的视图。RST 的使用使人们能够更好地了解破坏性过程背后的不同地质和地貌现象之间的复杂相互作用<sup>7,8</sup>。

从广义上讲,RST 包括不需要人类与目标接触的工具,可以是星载或地面的,这两种工具都用于滑坡科学。例如,卫星RST被广泛用于滑坡监测,自2000年代以来,由于技术的不断进步,例如算法的开发以大幅提高监测数据的质量<sup>9</sup>以及卫星的发射,其使用量自2000年代以来不断增长。更高的采集频率和空间分辨率<sup>10,11</sup>。地面激光扫描广泛用于边坡失稳检测、测绘和监测<sup>12-14</sup>。某些技术可以从任一平台应用。例如,自 20 世纪 90 年代以来,基于卫星的传感器开始使用干涉测量法,它可以以亚毫米精度测量目标的移动程度。自 2000 年代以来,干涉测量法也被用于地面设备,从而实现更定制的应用。自 RST 出现以来,快速绘制大范围滑坡地图<sup>15</sup>、收集提供机械和运动学见解的信息<sup>16,17</sup>以及收集大数据以发布早期预警<sup>18</sup>的能力已大大提高。

在本技术综述中,讨论了 RST在滑坡检测、监测和时间预测方面的潜力和应用。我们主要关注多光谱和干涉卫星、地基干涉测量、激光扫描和多普勒雷达,这些技术在2000 年代初期开发的 RST 中得到越来越多的使用。描述了RST 在滑坡科学中的功能和发展,随后概述了它们在检测、监测和预报方面的应用、优点和局限性。最后,

我们提出了未来的研究和开发方向,以最好地改善其在滑坡风险管理中的使用。

星载技术

自 1972 年发射 Landsat-1 以来,RST 被认为是滑坡研究的一个有前途的工具<sup>6,19</sup>,因为它们提供了地表不同参数的系统性、大范围的信息,使得能够研究不同条件下的活跃破坏过程。空间和时间尺度<sup>7,8</sup>。目前,通过使用在不同波长和频率下运行的传感器(提供不同的空间、时间和光谱分辨率),可以对各种几何形状、类型和运动学的滑坡进行研究<sup>20</sup>。现代滑坡分析还受益于电磁频谱多光谱<sup>21,22</sup>和微波<sup>10,23</sup>域内的图像收集。例如,超高分辨率(VHR)多光谱和合成孔径雷达(SAR)卫星采集已被用来编制滑坡数据库<sup>24</sup>,并测量和量化滑坡发生引起的地面变形<sup>25</sup>。本节介绍星载多光谱和雷达传感器的特性以及基本原理。

多光谱卫星传感器

在可见光、近红外和短波红外光谱中获取的卫星图像主要用于制作滑坡清单地图,通常具有区域范围的分析<sup>26</sup>。在大多数情况下,多光谱图像用于绘制指示滑坡发生的地形特征,例如地表地貌、地质结构、土地利用实践、植被分布<sup>24</sup>以及这些因素的时间变化<sup>27</sup>。

多光谱卫星平台(例如 Landsat、ASTER、SPOT 和 Sentinel-2)拥有能够探测和测量地球表面反射或发射电磁辐射的无源仪器有效载荷<sup>28</sup>(图 1a)。他们沿着太阳同步轨道垂直于轨道观察地球,以确保地球表面的阳光角度始终保持不变。选择采集时间是为了最大限度地减少阴影的潜在影响并保证适当的照明水平,通常是在早晨(对于 Sentinel-2,降交点的当地平均太阳时为 10:30)。对于大多数任务(Landsat、SPOT 和 WorldView-3),一天中的采集时间非常接近;之所以如此与众不同,是因为档案与现有的和历史的任务具有可比性,因此可以整合起来。例如,当尝试重建山体滑坡过去的活动时,此功能非常重要,因为它最大限度地减少了对不同阴影角度和光照条件进行校正的需要。

选择用于滑坡研究的卫星数据有几个考虑因素。例如,卫星之间的重访时间差异很大,从每天(WorldView 和 Pléiades星座)到几天(QuickBird-2 和 GeoEye-1)到几周(Landsat 系列为 16 天,SPOT 为 26 天)-5)。采用中分辨率多光谱卫星虚拟星座可显著提高时间观测频率<sup>29</sup>。Landsat-8 和 Landsat-9(8 天的重复周期)以及 Sentinel-2a 和 Sentinel-2b(5 天的重复周期)共同提供了 2.3 天的全球中值平均重访间隔<sup>30</sup>。

传感器之间的测绘带宽度(或足迹)也有所不同,范围从 VHR 卫星的几公里(WorldView-3 和 WorldView-4 约为 13 公里)到 SPOT-5 的 120 公里,Landsat-7 的 185 公里Sentinel-2 为 290 公里。地面采样距离因情况而异

技术审查

在特定的光谱带上,一般从可见光、近红外到短波红外增加。VHR 的推出卫星系统通常覆盖可见光波段并包括全色域 (混合蓝色、绿色和红色波段的信息),导致采集地面采样距离为 0.25 m 至 1 m 的图像。对于 VHR 卫星 (例如,GeoEye-1 和 GeoEye-2、QuickBird-2、Cartosat、WorldView-3、Pléiades-1 和 Pléiades-2

和 IKONOS),最低点的全色成像能力大约是多光谱波段的四倍精细<sup>31</sup>。有许多全色锐化算法<sup>32</sup>可用于将低空间分辨率多光谱图像与较高空间分辨率全色波段合并以生成单个高分辨率彩色图像。然而,不同空间和光谱分辨率的数据融合可能会影响可用于滑坡检测和绘图的图像特征,例如线性特征、纹理、对比度和颜色<sup>33</sup>。

盒子1

滑坡分类

滑坡是一个包罗万象的术语,指的是在重力影响下形成斜坡的材料向下和向外运动<sup>157</sup>,它普遍作用于天然、工程和开挖的斜坡<sup>158</sup>。山体滑坡可能发生在不稳定边缘的斜坡上,可能由自然过程 (降雨、融雪、溪流侵蚀、火山活动和地震震动)、人为干扰 (农业、建筑、采矿、水库水位削减或变化)或这些因素的任意组合。

强烈、短期的暴雨事件 (数小时至数天)和持续时间较长的降水 (数周至数月)都可能引发山体滑坡,从而导致较长时间尺度的季节性波动<sup>159</sup>。第一个事件通常会引发浅层滑坡,而第二个事件通常与更深和更大的斜坡运动 (5-20 米深度)相关。深层滑坡和浅层滑坡在体积、范围、水文触发因素<sup>160</sup>、发生情况<sup>161</sup>和造成的风险方面存在本质差异。

最广泛使用的分类之一是基于类型运动 (坠落、倾倒、滑动、扩散、流动和复杂)和所涉及材料的类型 (岩石、碎片和泥土)<sup>162</sup>,以及完成该方案的速度尺度 (后来更新<sup>86</sup>) (见表)。更新的分类提出了一个包含 32 种滑坡类型的矩阵<sup>163</sup>。然而,分类方案并不完美,因为运动和材料的类型在空间和时间上各不相同,并且存在几乎连续的类型分级。

| 描述 典型速度 可能相关的破坏 |           |  |
|-----------------|-----------|--|
| 极快              | 5米秒-1     | 重大灾难;建筑物被毁;由于逃逸的可能性不大,因此因果关系发生率较高            |
| 非常快             | 3 m 分钟-1  | 一些人丧生,速度太快,无法让所有人逃脱                          |
| 迅速的             | 1.8 m·h-1 | 可以进行逃生疏散;建筑物和财产被毁                            |
| 缓和              | 每月 13 m   | 一些临时的、不敏感的结构可以临时维护                           |
| 慢的              | 每年 1.6 m  | 可在移动过程中进行补救施工;如果加速阶段总运动不大,则可以通过频繁工作来维护不敏感的结构 |
| 非常慢             | 每年 16 毫米  | 一些永久性结构未受损<br>通过运动                           |
| 极慢              | 每年 <16 毫米 | 无需仪器即可察觉;<br>采取预防措施即可施工                      |

当前不同卫星平台的可用性增加了在重大滑坡事件后或在高变形期间及时获取无云多光谱图像的可能性,此时必须快速监测滑坡活动并预测其可能的破坏。尽管如此,天气条件 (尤其是云层和积雪)和日光仍然会妨碍获取合适的图像,具体取决于气候带和季节。一般来说,山区以及气候潮湿和雨季的地区可能是最不利获得最佳图像的地区和时间。不幸的是,这些通常是更容易发生山体滑坡的时间和地点,这是该技术的主要限制。

SAR 卫星传感器  
与被动遥感不同,SAR 仪器等主动传感器<sup>34</sup>提供自己的照明能源。因此,他们能够使用微波域的频段随时获得测量结果,无论一天中的时间或季节如何。这一功能对于连续的滑坡监测和预测至关重要。

SAR 图像由对应于地面区域的像素组成,该地面区域以幅度和相位值为特征。虽然幅度取决于被照明物体的反射率,但单个 SAR 图像的相位值部分取决于传感器与目标的距离 当地面上的一点移动时,传感器与该点之间的距离发生变化,并且由传感器也会受到相应的影响。此功能是干涉测量应用中的关键要素,干涉测量应用是一个广泛的术语,指的是利用至少两个 SAR 图像的 SAR 信号<sup>36</sup>。SAR 图像的空间分辨率取决于所使用的传感器及其采集模式。时间分辨率取决于卫星的重访时间,范围从几周 (Radarsat 星座)到几天 (Sentinel-1 星座)。

利用在同一目标区域获取的两个连续雷达图像之间的相位变化的合适方法是差分干涉SAR (DInSAR)。经过地形补偿后,DInSAR能够测量数十个物体的表面运动。

厘米至 1 厘米或更小 (取决于波长),在数十或数百平方公里的区域内具有适当的分辨率<sup>37</sup>。  
大气相位失真<sup>38</sup>以及几何和时间去相关<sup>39</sup>降低 (甚至损害) DInSAR 结果的质量和可靠性。为了克服这些限制,可以通过基于长堆栈共配准 SAR 图像分析的多时相干涉 SAR (MTInSAR) 方法来增强基于干涉 SAR (InSAR) 的信息<sup>9,40-43</sup>。MTInSAR 旨在识别与单个像素或一组少数像素相对应的测量点 (MP) 网格,在整个观测期间表现出稳定的雷达特征 (图 1b)。MP通常对应于人造物体、岩石露头和裸露土壤,其特点是高反射率和稳定性 (每年移动不高于几十厘米)。对于每个 MP,可以估计沿卫星视线 (LOS) 的位移时间序列和一组质量参数。LOS 变形率可以通过以下方式估计



技术审查

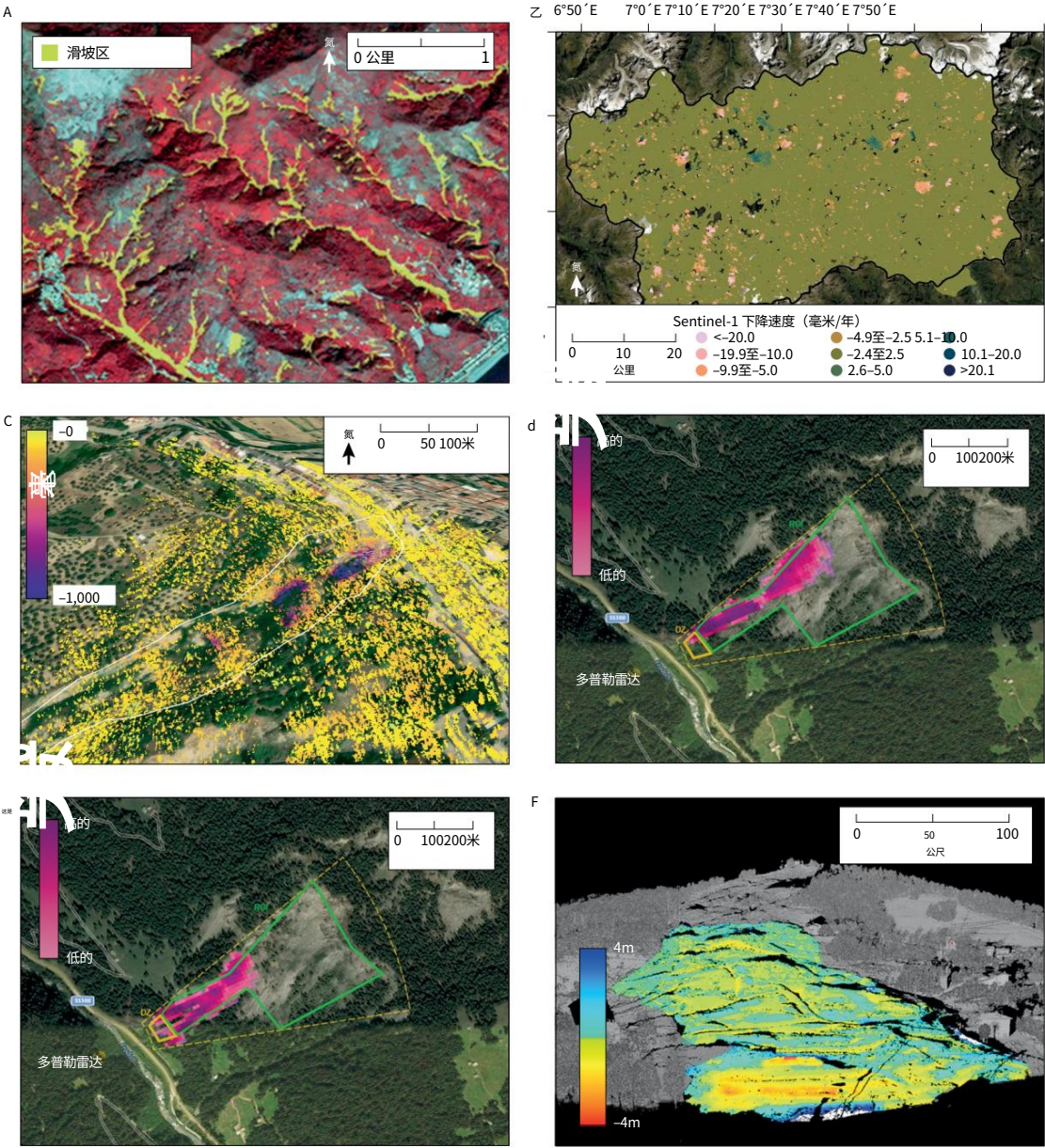


图1|山体滑坡遥感产品。a,对意大利 Giampilieri 地区进行多光谱超高分辨率分析的 QuickBird 图像,该地区在暴风雨后发生了 600 多起山体滑坡。图像以假颜色表示,其中红色区域是近红外光谱中具有高反射率的区域(即植被区域),青色区域是裸露土壤或城市,黄色区域是事件发生前的区域和事件后的差异,表明发生了山体滑坡(来自参考文献 11)。b,意大利瓦莱达奥斯塔地区的变形图,利用沿卫星上升轨道获取的多时相干涉合成孔径雷达 Sentinel-1 数据绘制而成。c,意大利波马里科山体滑坡的位移图,来自地面干涉仪并投影在多光谱图像上。黄色像素在 30 个月内保持稳定;紫色显示

由于山体滑坡而向传感器移动。d,2020 年 9 月 12 日,多普勒雷达应用于威胁意大利鲁伊农街道的岩石雪崩的结果。黄色虚线区域是多普勒雷达视场。颜色条使用任意比例表示检测到的落石的局部强度,该比例代表滑坡的动量。表示为 ROI(感兴趣区域)的完整绿线包括潜在移动的区域。如果崩塌材料进入称为 DZ(危险区域)的区域(由黄实线界定),则会发出警告。e,与d相同,但时间为 2020 年 10 月 1 日。f,对马拉诺山体滑坡(意大利的土流)的两次激光雷达扫描的比较,两次扫描相隔 5 天。冷色代表地球前进,暖色代表地球后退。A 部分

转载自 ref.11, CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)。

理论上每年的精度低于 0.1 毫米,至少对于在很长一段时间内非常稳定的 MP 来说是这样,而每次 SAR 采集对应的单次测量的精度范围为

1 至 3 毫米(参考文献 44)。在测量极其缓慢的滑坡(方框 1)的运动时,高精度非常重要,否则只有在几个月的累积位移后才能检测到。

技术审查

在时间去相关45 或相干性损失 46 的情况下,振幅信息分析是 InSAR 映射表面变形的有效替代方案。基于幅度的方法利用两个图像 (例如滑坡前和滑坡破坏后)的散斑图案的相关性。如果变形引入几何畸变而基本上不影响SAR图像反射率,则通过跟踪多时相SAR数据中的幅度特征,可以记录超过InSAR可观测值的运动速率 (从几十厘米到几十米)。尽管精度较低 (约为图像像素的 1/50 至 1/20) 47,散斑跟踪提供了位移矢量的所有三个几何分量 (x、y和z),并沿升序和降序获取图像轨道。

对雷达传感器收集的相位和振幅进行分析是滑坡调查的有力工具,特别是在大面积滑坡调查中,可以检索有关不同位移状况 (从小变形率到高变形率)的信息。星载应用的一个普遍缺点是它们不可定制。采集频率等采集参数是固定的,通常需要几天的时间,而阴影 (尤其影响陡坡、狭窄的山谷和某些方向)会减少反射信号的地表数量。例如,对于星载InSAR,南北向的斜坡是不利的,因为假设沿此类斜坡的运动将大致垂直于 LOS,因此无法检测到。因此,可能无法通过卫星平台对特定位置进行最佳研究,并且可能需要使用地面传感器采取更具针对性的方法。

地面技术

虽然卫星可以扫描广阔的区域并发现不稳定区域,但地面遥感技术可以监测单个斜坡的不稳定性,以进行短期到长期的滑坡管理。通过利用雷达、激光和多光谱信号,地面技术可以实现多功能、准确和精确,并具有高空间和时间分辨率。例如,地基 InSAR (GBInSAR) 可能需要不到 1 分钟 (某些设备最多需要 10-20 秒)。这种 (至少)十倍的改进意味着可以监测中速和快速之间边界的山体滑坡 (方框 1)。本节介绍滑坡监测中的地面干涉测量、多普勒雷达和激光雷达。

地基干涉测量

地面干涉测量技术于 20 世纪 90 年代中期诞生,因为人们发现在卫星平台上开发的技术可用于测量斜坡变形 48 和水坝等人造结构49。地面设备被开发为同时使用合成雷达 (例如 GBInSAR)和实孔径雷达。在后一种情况下,碟形天线用于在小 (几平方米)区域内进行采集,然后旋转并指向相邻的分辨率区域,直到扫描整个感兴趣的场景;因此,采集时间是监测区域范围的函数。

GBInSAR的采集时间与合成孔径的长度有关,合成孔径通常是通过沿线性轨道 (一般为2~3 m长)来回移动天线来获得的。这两个系统都能够进行近乎实时的斜坡尺度监测,具有早期预警的潜力,因为它们产生几乎空间连续的位移数据 (位移图) (图1c),变形率范围从每年几毫米到每天几米。同样,它们都可以实现亚毫米精度和1-10 m 量级的空间分辨率。他们还可以在不到 2 分钟的时间内完成采集 (至少考虑到 30-45° 水平视野),完全远程操作

并确保在几乎全天候条件下24小时运行 (尽管强风、降雨以及高气温和湿度梯度会产生噪音)。这些功能是提供山体滑坡警报的关键。

各种应用的蓬勃发展以及此类系统的不断发展表明,地基干涉测量是滑坡监测和预测的前沿方法。早在2000 年代初就已成功尝试使用,包括对威胁公共安全的山体滑坡 16,50、露天矿不稳定边坡51,52、火山建筑物侧面 53、崩塌后剩余边坡风险 54进行监测和预警,以及评估稳定工程的成效17。

多普勒雷达

某些类型的快速山体滑坡,例如落石和泥石流,通常缺乏明显的前兆。因此,风险缓解策略通常侧重于主动或被动防御结构工程,并可以使用工具来检测正在进行的倒塌;其中一种工具是利用多普勒效应原理的复杂雷达系统。这些设备可以实现有效的实时监控,以便在事件发生期间发出警报。由于地球的移动质量通常位于比暴露于风险的元素更高的斜坡上,因此这种实时监控可以提供数十秒的提前时间,这足以自动关闭交通灯并关闭街道或触发警报器以清理该区域并允许人们到达安全位置。

将快速大规模移动检测和道路封闭与中程多普勒雷达技术相结合的首次成功尝试是在雪崩上进行的55。此后,开发了一种长距离、广角、基于雷达的雪崩检测系统,该系统已集成到全面运行的警报系统中,可以检测雪崩并在无需人工干预的情况下关闭受威胁的道路56。

自 2010 年代末以来,多普勒雷达技术已成功应用于泥石流57,58以及落石监测和预警系统 59-61。

工作原理62在于通过调频连续波雷达传感器在微波域发射电磁信号。周围场景反射的信号由多个接收天线拾取并进行分析,以确定沿观察到的斜坡是否出现快速移动的物体。如果物体尺寸和速度足够大,就会引起并检测到信号频率的偏差或多普勒效应。

由于能够提供快速事件的二维地图,包括测量其速度、持续时间和轨迹,多普勒雷达成为检测和跟踪快速山体滑坡 (快于 1 m s<sup>-1</sup>)并发出警报的有效工具。

检测警告可以根据适当的空间标准进行定制,并且需要使用特定的算法进行过滤,以区分真实事件和虚假警报 (例如由于大气扰动或树顶振荡引起的事件)。因此,该系统能够实时测量滑坡速度并精确定位其传播轨迹 (图1d,e)。可以检测到距离传感器约 1-2 公里处大于几立方米、移动速度超过每秒几米的物体的存在。

还可以跟踪多个同时发生的事件,只要它们彼此相距至少 10 m。警报通知 (短信和电子邮件)由与雷达传感器相关的控制单元发送;该系统还可以连接到安全装置,例如交通灯、警报器或自动关闭杆。对于位于岩壁或碎屑斜坡底部的道路受到广泛且反复的不稳定现象影响的情况,该解决方案尤其方便。



技术审查

激光雷达

激光雷达技术用于监测不稳定的斜坡,因为它们提供了所观察表面的详细数字模型,可以在其上投影其他空间信息(例如干涉位移图)、有关事件体积的信息,以及是否在不同时间进行多次扫描进行比较,可以检测和监测位移场(图1f)。它们通过使用窄激光束根据预定义的扫描模式扫描特定物体来实现3D滑坡分析。激光扫描的直接输出是点云,其位置以相对于设备中心的极坐标表示。因此,对于特定的角分辨率,所得点密度是激光射击距离的函数。可以分析点云以生成滑坡的3D模型。用于地面测量和监测的仪器主要基于飞行时间测量来计算距离,最大范围从几百米到几千米<sup>13</sup>。

激光雷达系统可以在地面固定位置使用(地面激光雷达),也可以安装在移动平台上,例如飞机(空中激光雷达)、无人机、汽车和船只(移动激光雷达)。由于距离是指以仪器为中心的固定参考系统,因此地面激光雷达不需要定位校正系统。此功能减少了精细化时间,并且不需要全球导航卫星系统来记录坐标。大多数商用激光雷达传感器记录反射脉冲的一到四个回波,这使得能够区分来自放置在不同范围(植被和地面)的同一发射脉冲的物体的不同返回脉冲。此外,全波形激光雷达系统能够将完整的回波波形数字化<sup>63</sup>,从而获得每次发射几乎无限数量的回波和高多目标分辨率,从而增加冠层、子冠层结构、地面植被和地面形态。

航空激光雷达的空间分辨率是高度和飞行速度的函数,范围从高度约250 m的几厘米到飞行高度高于1000 m的几分米。

数据精度取决于用于运动补偿的设备的精度。因此,当需要覆盖大面积,或者所研究的斜坡太远而无法从地面位置观察时,航空激光雷达特别适合。为了获得最佳的全景视角,地面激光雷达可提供更高的精度和分辨率,尤其是在陡峭和悬垂的斜坡上。

应用领域

星载和地面的RST都是滑坡灾害仪器管理所需的三个主要步骤(检测、监测和预测)的关键。上一节中描述的RST在此根据这些应用程序的镜头进行评估。没有一种技术在所有领域都优于其他技术,并且性能取决于技术参数,例如空间分辨率、研究区域的扩展、操作距离、采集频率、精度和可检测速度,这些参数随每个传感器的不同而变化(图2)。最合适的仪器(或多个仪器)的选择还取决于与滑坡类型相关的应用类型,因为任何滑坡类型通常都与可能的体积、速度和其他特征(例如触发类型)的特征范围相关。、地质力学特性和地形,这使得某些工具比其他工具更合适(表1)。

检测

滑坡检测包括数据和信息的收集  
滑坡的存在、分布和强度以及受变形过程影响的要素的识别。多光谱图像主要用于检测已经发生的山体滑坡,这些山体滑坡在地面上很明显,但仍需要进行识别、制图和分类,例如,为损害评估和重建等紧急情况活动提供支持。

多光谱图像的使用受益于计算能力的提高、分析和可视化软件的改进以及处理云平台的蓬勃发展。HR和VHR传感器可用性的提高在克服许多现有传感器的低空间分辨率方面也发挥了重要作用<sup>64</sup>。事实证明,应用于VHR全色和HR多光谱卫星图像的分类模型对于检测和绘制大面积快速降雨引起的山体滑坡非常有价值<sup>65</sup>。滑坡测绘的自动方法可分为两大类:是否执行逐像素分析来检测事件前和事件后图像之间的颜色或亮度变化(基于像素的方法),或者是否该分析的基本单元是在一组定义有意义的形状的像素上进行的(基于对象的方法)。

当不对缓慢移动的滑坡(尚未塌陷的区域)进行检测时,通常通过使用InSAR技术测量地面位移来进行。例如,自20世纪90年代以来,卫星DInSAR已被广泛使用<sup>66,67</sup>来测量与质量运动相关的空间范围和表面变形的幅度<sup>68-71</sup>。基于卫星的InSAR可用于探测和绘制偏远地区、山区和/或一般情况下部署地面工具在后勤上不可行且现场活动具有挑战性的地方的滑坡。这一方面对于在事先不知道滑坡位置的情况下绘制滑坡地图非常重要<sup>72</sup>,特别是对于有永久冻土<sup>73</sup>或季节性冻土<sup>74</sup>的地区,这些地区对包括滑坡在内的地质灾害的敏感性预计会随着快速变暖而增加<sup>75,76</sup>。事实上,自2000年代初期<sup>23</sup>以来,InSAR已被用于研究滑坡,并成为在不同尺度(从国家<sup>77</sup>到区域<sup>78</sup>、盆地<sup>79</sup>、单坡<sup>80</sup>和建筑物<sup>81</sup>)以及滑坡响应和民用的不同阶段使用的综合工具。保护实践<sup>82</sup>。在滑坡体上制作大量MP的能力可以检测和绘制主动变形的斜坡<sup>83</sup>、滑坡机制的表征<sup>84</sup>、滑坡区域内具有不同速度和行为的扇区的分区<sup>85</sup>以及大边坡不稳定的建模<sup>69</sup>。

特别是,MTInSAR在分析不同阶段的滑坡相关事件方面非常有效<sup>26</sup>,尽管它仅限于“连贯”滑坡,这种滑坡内部变形很小,并且运动极其缓慢和非常缓慢<sup>86</sup>(方框1)。在自然、农村和山区,MTInSAR结果受到微波信号强度和稳定性降低的影响,特别是植被的快速和混乱运动。在这些设置中,与短波长(例如C波段)相比,利用长波长(例如L波段)可以生成更可靠的位移图<sup>87</sup>并检索更高的MPs空间密度<sup>88</sup>,因为它的穿透树冠表面的能力。然而,在高山环境中处理和解释SAR数据可能具有挑战性,<sup>89</sup>其特点是地形梯度高和持续积雪。基于SAR幅度和像素偏移技术<sup>90,91</sup>是绘制植被区域中快速滑坡引起的变形的有效方法,而快速变化会损害InSAR方法<sup>92</sup>。

技术审查

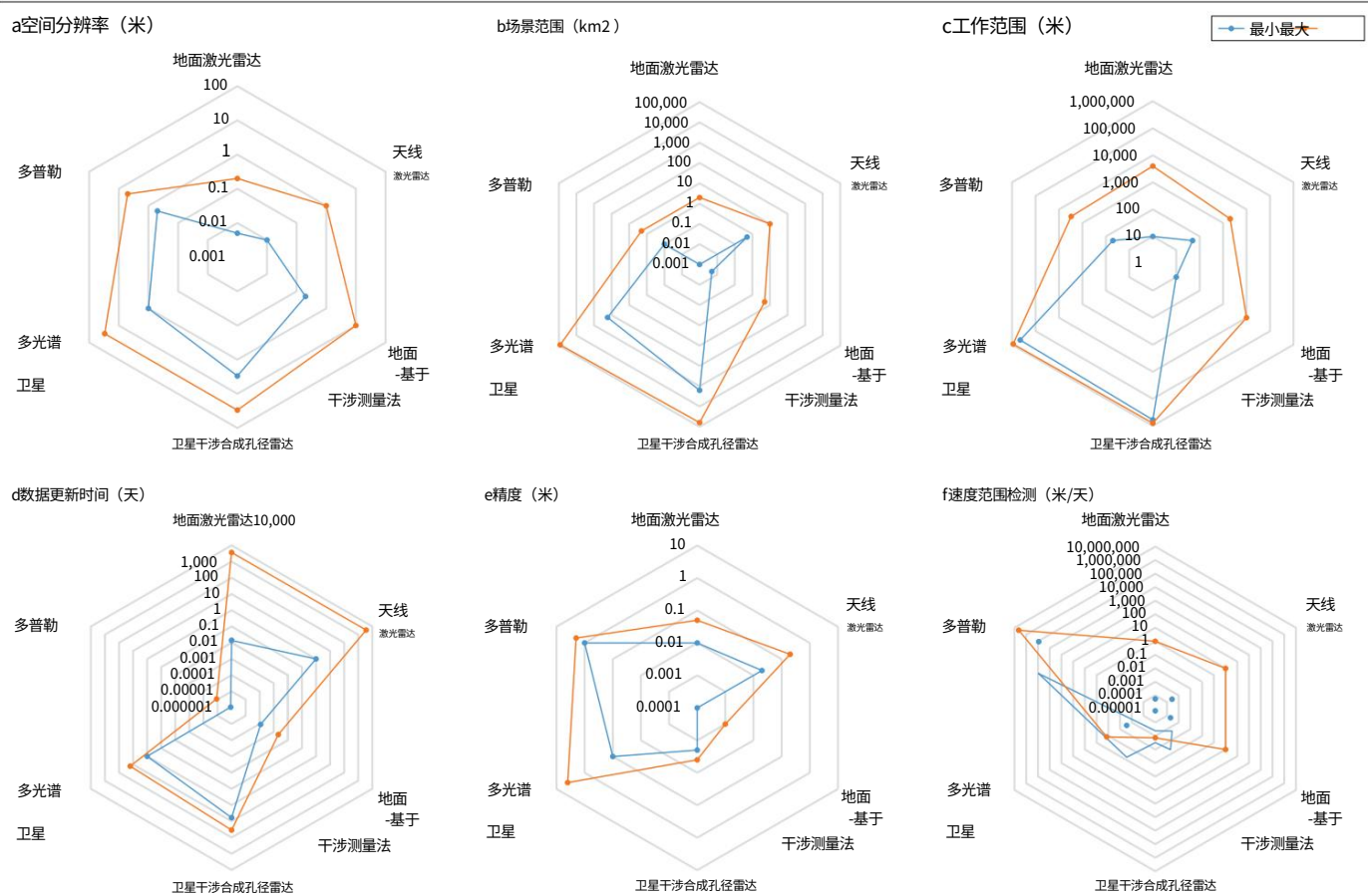


图2|不同遥感技术之间的技术比较。  
每种描述的技术都有一定的可操作性。a、空间分辨率。b、可测量区域的范围。c、距目标的距离。d、频率  
的收购。e、准确度。f、目标的速度。每种技术都有自己的优点和缺点,这意味着没有一种技术适合每种应用和滑坡类型。InSAR,干涉合成孔径雷达。

由于空间覆盖范围广且成本效益高,卫星应用(基于雷达和多光谱)适合扫描大范围区域和发现局部变形,特别是在现场活动可能具有挑战性或不可行的危险区域。理论上,现有的卫星 SAR 和多光谱传感器适用于在波长、地面分辨率和时间重复性方面的各种设置中进行滑坡检测和测绘。鼓励采用不同的光谱间隔(可见光、红外、C 波段、X 波段和 L 波段),而不是依赖单个传感器,因为它可以减轻任何一种特定传感器的固有限制。此外,不同技术的协同使用可以扩展观测能力,从而能够检测和绘制不同的变形状态;虽然缓慢移动的滑坡可以使用 DInSAR 和 MTInSAR 方法进行分析,但快速滑坡只能通过干涉图(即仅比较两次采集数据)才能成功检测到。

在位移非常快的情况下(最大可检测速度范围从几厘米到几百厘米,具体取决于传感器的波长和重访时间),仅使用基于多光谱变化检测和幅度跟踪。

地面技术在滑坡探测方面也越来越多有帮助。在局部范围内,高精度和灵活性使得

地面技术对于检索有关单个(或一组)滑坡变形速率和变形程度的基本信息非常有用。例如,地基干涉测量可通过执行 2D 采集来覆盖最初认为感兴趣的区域之外的区域,并可能检测斜坡的进一步不稳定部分,从而用于快速测绘。

激光雷达广泛应用于滑坡表征和检测<sup>93</sup>。例如,激光雷达提供的高分辨率数字高程模型的目视检查通常可以极大地提高滑坡测绘能力<sup>94,95</sup>,因为可以识别有趣的特征,例如裂缝、地层、碎片沉积物、悬垂岩石等。关于 3D 重建。地面激光雷达获取的高分辨率点云可以对岩体进行完整的地质力学表征,特别是在苛刻的环境中<sup>96-98</sup>。

最后,比较不同时间采集的两个点云可以估计滑坡体积并识别落石源区域<sup>99,100</sup>。

监控  
识别后,测量滑坡的关键参数至关重要,尤其是其表面随时间的位移。

多光谱图像适用于监测滑坡运动<sup>101</sup>,

技术审查

词汇表

|  |                                    |
|--|------------------------------------|
| 干涉测量法  | 雷达                                 |
| 一种通过测量同一目标在两个不同时间反向散射的两个电磁波之间的相移来计算目标位移的技术。        | 发射微波域特定频段内信号（对应于不同波长)的传感器。         |
|  | 重访时间                               |
|  | 两次之间的时间间隔                          |
| 多光谱  | 对一个区域的连续观察。                        |
| 电磁频谱的范围从0.4μm到约12.5μm。                             |                                    |
|  | 合成孔径雷达                             |
|  | 移动雷达干涉仪天线来获取数据的技术                  |
| 多光谱波段  |                                    |
| 整个电磁频谱的特定波长范围,大致对应于多光谱传感器捕获的蓝色、绿色和红色可见光直至近波和短波红外线。 | 其空间分辨率等于具有与整个轨迹长度一样大的天线的传感器的空间分辨率。 |

尽管与云层覆盖有关的明显限制,直到 20 世纪 90 年代末,空间分辨率不足6。随着 VHR 卫星图像 (IKONOS 和 QuickBird)的出现以及 Sentinel-2 任务 102 的发射,多光谱成像监测的有效性得到了提高,该任务提供了定期和频繁的全球图像采集。

覆盖范围。  
图像相关性可用于量化滑坡演化103,104。  
该方法使用移动窗口来计算历时图像对中纹理相似性之间的相关性,并且是导出子像素位移的最流行和最有效的方法,例如,使用航空照片和 QuickBird 卫星图像105、Pléiades 卫星106或 Landsat-针对不同类型的滑坡进行了 8 次收购107。使用 Sentinel-2图像108或 SPOT1 和 SPOT5–Pléiades 档案109也获得了斜坡位移时间序列。除了滑坡运动学之外,连续的后退和前进阶段也可以利用短重访时间卫星成功重建110。

有一些方法可以检测和监测缓慢移动的山体滑坡（范围从每天几毫米到每天几厘米111），但大多数图像相关方法仅适用于监测每年以米到十米速度移动的山体滑坡。这些方法的精度往往在像素大小的八分之一到二分之一之间,具体取决于传感器106,其中 Pléiades 提供最低的不确定性112。大型连续图像数据集的可用性减少了不确定性,因为完整的数据冗余有助于创建更稳健的位移时间序列109。此外,对于给定的参考图像,使用在一年中的相似时间采集的图像进一步减少了与采集条件和背景噪声相关的位移不确定性108。具有相似光谱和空间特性的不同卫星源（Landsat-7、Landsat-8 和 Sentinel-2）可以组合起来创建密集的时间序列113。

对于卫星 SAR,位移时间序列是所有多时相干涉处理中最先进的产品,并提供观测周期内每次采集的每个 MP 变形的时间模式。当得到其他人的支持时

仪器仪表和现场调查、时间序列的视觉114、半自动115和自动分析116可以支持滑坡运动学117的表征和监测、扇区分区118、震后119和降雨引起的120速度变化的识别、季节变化121和监测补救工程绩效122。此外,Sentinel-1、TerraSAR-X 或 COSMO-SkyMed 等卫星的重访时间不到一周,使得区域尺度的滑坡监测具有系统性和规律性123。

虽然卫星干涉测量显然很有用,但干涉滑坡监测需要在雷达传感器成像的区域存在合适的目标,例如建筑物和人造物体,这可以为干涉测量应用提供良好的相位稳定性;相反,在非城市地区,裸土、农作物和植被区的反应可能不足,甚至根本不存在。

主动和被动角反射器 125 形式的人工目标 124可用于作物和裸露土壤区域 126的变形监测研究126 以及 InSAR 测量的精度评估 127。

尽管干涉式滑坡监测对于较慢的滑坡速率非常有效,但地面雷达干涉测量法具有接近实时的采集频率,因此能够测量每天高达几米的移动速率128。因此,该技术适用于监测可能发生灾难性破坏之前阶段的大多数滑坡,例如土流17、土体滑坡16、大型岩石滑坡129和不稳定的火山侧面130。非常或极快的运动（方框 1），例如落石,速度太快,无法用雷达干涉测量法进行测量,但可以通过多普勒雷达成功监测,多普勒雷达也可以与早期预警系统相结合,例如关闭危险的街道（图3）。

与基于雷达的监测一样,多时相激光雷达测量可用于监测不同类型的滑坡过程。自动地面激光扫描仪的引入提高了数据采集频率。然而,需要自动数据处理,特别是对于预警应用131,限制了其当前的监测应用。

总体而言,卫星方法适合对区域尺度的地面变形现象进行系统跟踪。来自安装在原位的传感器的准确、高频数据使我们能够了解变形过程的具体细节,并最终识别导致滑坡破坏的先兆迹象。

表 1 |该技术适用于最常见类型的山体滑坡

| 技术       | 检测              | 监控                           | 预测 (故障时间)     |
|----------|-----------------|------------------------------|---------------|
| MTInSAR  | ES,RS,EF,LS,SLa | ES,RS,EF,LS,SLa ESa          | RSa           |
| 多光谱卫星传感器 | ES,RS,EF,LS,SLa | DF ES,RS,EF,LS,SLa ES,RS,EFa |               |
| 地基干涉测量   | ES,RS,LS        | ES,RS,EF,LSa                 | SLa ES,RS,EFa |
| 多普勒雷达射频  |                 | 射频,DF,SL                     | —             |
| 激光雷达     | ES,RS,EF,LS,RF  | ES,RS,EF,LS                  | —             |

对于每种滑坡类型,假设典型速度如下:土体滑坡（ES;从每年 <1.6 m 到 1.8 m h<sup>-1</sup>）、岩石滑坡（RS;从每年 <1.6 m 到 >1.8 m h<sup>-1</sup>）、落石（RF;>1.8 m h<sup>-1</sup>）、土流（EF;从每年 1.6 m 到 1.8 m h<sup>-1</sup>）、泥石流（DF;>1.8 m h<sup>-1</sup>）、横向扩散（LS;从每年 <1.6 m 到 1.8 m h<sup>-1</sup>）和浅层滑坡（SL;从每年 <1.6 m 到 >1.8 m h<sup>-1</sup>）。MTInSAR,多时相干涉合成孔径雷达。 a适用范围有限。



技术审查

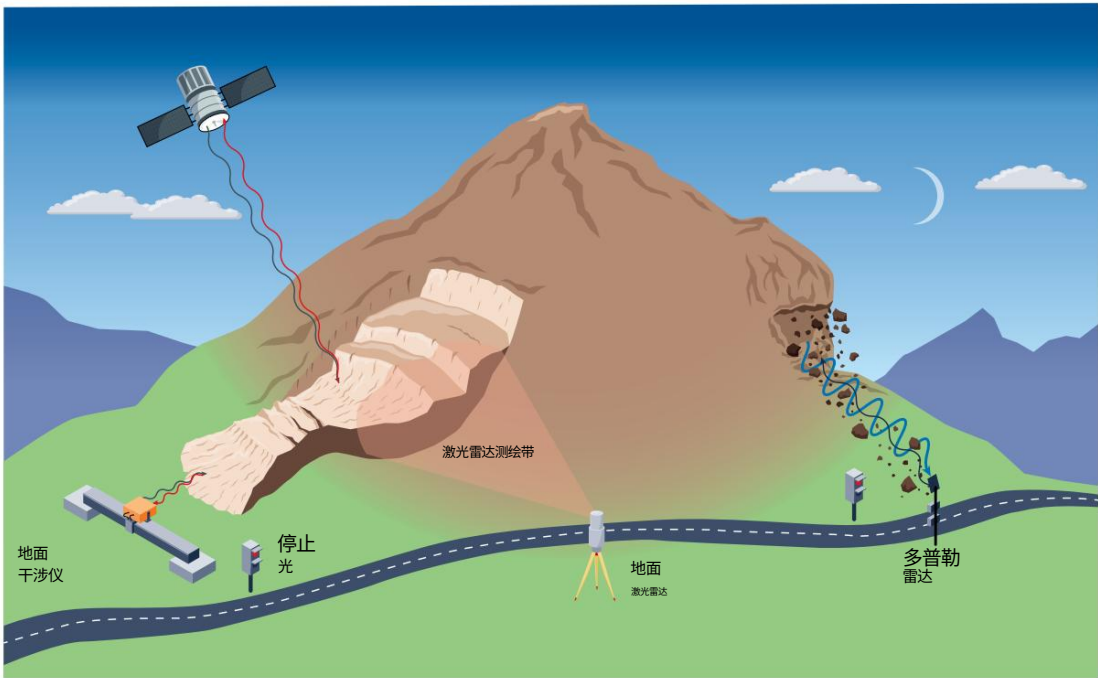


图3利用遥感技术进行现场监测。激光雷达、卫星和地面干涉测量可用于监测较慢的滑坡（山的左侧），多普勒雷达用于快速或极快的移动

例如落石（山的右侧）。地基干涉仪和多普勒雷达旁边的交通灯表明使用近实时测量来提供早期预警。

预言

滑坡监测的最终目标是预测（或预测）：能够及时、准确和有效地估计与滑坡未来失败相关的一个（或多个）参数<sup>132</sup>。破坏通常意味着滑坡的灾难性演变，导致速度和跳动的急剧增加<sup>132</sup>，通常与所涉及材料的全部或部分崩解以及宏观裂缝的形成有关。对及时性、准确性和效率的精确要求因情况而异，因为它们取决于预测的规模（大区域需要更长的准备时间）、风险因素的类型（人员、关键基础设施和文化遗产）、例如，所需对策的类型（城镇疏散、封闭街道和清理露天矿区）以及人们对预测做出反应的准备程度。

滑坡破坏时间（ToF）的预测依赖于地面位移数据（或导数速度和加速度）、降雨量，或者不太常见的变量，例如与渐进压裂相关的声波或地震发射<sup>133</sup>。在这三种方法中，地面位移数据在坡度范围内使用最广泛<sup>134-137</sup>，因为位移代表了稳定性条件的直接测量。然而，在区域尺度上进行预报时，首选降雨，因为通常无法获得分散的和近实时的位移测量。基于其他参数的预测（所有这些参数都只能在坡度尺度上测量）不太常见，因为它更难以与可能的崩塌联系起来。

基于位移的 ToF 预测背后的一般假设是，最终破裂之前通常会出现称为三次蠕变的幂律加速度，可以对其进行建模以推断塌陷时间。为此，几乎所有的 ToF 预测

方法仅依赖于第三级蠕变阶段获取的位移数据<sup>138-140</sup>（方框2）。

预测的进展通常取决于滑坡的规模和材料的类型。

数百万立方米规模的滑坡可以在崩塌前数十天显示出第三级蠕变的早期迹象<sup>141,142</sup>，从而可以在崩塌前 1 周或更长时间进行实际可行的预测。

尽管 GBInSAR 等快速测量仪器现在能够提供几个小时的提前时间，即使对于几万立方米的小型滑坡<sup>144</sup>，坚硬而脆的岩石往往会突然崩塌<sup>143</sup>，从而限制了预警时间。破坏机制似乎也会影响滑坡的可预测性。通过地下裂缝的扩展而形成滑动表面的质量往往对三次蠕变模型反应良好<sup>145</sup>。然而，由于外界因素（如人类活动）和复杂地质条件的干扰，无法确定失效机理与失效预测之间的精确关系。

仪器监测与预测的能力取决于它是否能够以与滑坡演变相适应的频率进行新的采集（以及必要的阐述）。高采集率有助于跟踪滑坡运动学演化的每一步，特别是其加速度，以模拟接下来可能发生的情况，特别是当可能发生阵发性崩塌时（严格意义上的 ToF 预测）。然而，即使没有能够提供可能发生塌陷的日期或一小时的适当预测模型，即将到来的塌陷也会因位移速度的大幅增加（有时十倍或更高）而变得明显，因此高采集频率对于根据一些明显的动员或经验阈值发出警告。

# 技术审查

然而,基于模型(甚至是经验模型)的预测方法通常需要一些与所有滑坡速度不兼容的数据阐述。例如,多普勒雷达擅长对落石和泥石流进行预警,因为当这些非常或极其快速的山体滑坡已经开始沿着斜坡灾难性地移动时,它会发出信号。相比之下,地基干涉测量更适合ToF预测;考虑到处理和解释数据所需的时间,在发出警报之前可能会延迟数十分钟。尽管如此,对于那些在第三级蠕变过程中经历缓慢或中等速度的滑坡(例如岩石滑坡、岩崩、深层土体滑坡或特别大的落石;方框2),这个提前时间仍然可以被认为是非常好的早期预警性能。此外,当这些滑坡的移动速度在崩塌前不久增加时,在前面的加速阶段就可以进行 ToF 预测(图4)。

地面技术在滑坡预测中应用最广泛,但 Sentinel-1 双卫星146的发射

增强了 InSAR 在滑坡分析中的应用,并为滑坡预测提供了新的可能性。特别是,这些卫星提供了相对较短的重访时间(欧洲和其他一些地区的重复周期为 6 天,全球为 12 天)、区域尺度测绘能力(因为测绘带长达 250 公里)和系统性和定期采购计划。对中国发生的一次大型灾难性山体滑坡的事后分析表明,在滑坡发生前几周,山体滑坡发生了明显的加速,这可以实现准确的 ToF 预测并避免许多人员伤亡142,147。

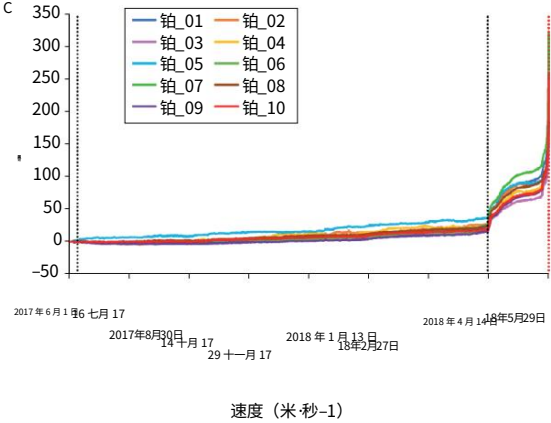
以短重访时间在大范围内系统地获取的卫星多光谱数据也可用于大型滑坡预测和预警,至少对于某些类型的滑坡现象是有用的。例如,使用Sentinel-2 卫星 5 天的重访时间观察了法国阿尔卑斯山滑坡的 9 个月位移时间序列,捕获了导致故障的突然重新激活109。同样,利用大型 Sentinel-2 档案和像素偏离轨道方法来得出喜马拉雅山脉南部山体滑坡之前可能的前兆148。

## 盒子2

# 成功的滑坡监测和预报

加利瓦焦保护区(意大利基亚文纳附近)是一处文化遗产,受到悬挂在 500 米高的亚垂直花岗岩墙上的不稳定岩体的威胁。2016 年安装了地基干涉合成孔径雷达 (GBInSAR),该雷达检测到 5,000 立方米的岩体正在经历持续变形,威胁着保护区和附近的道路164。保护区的交通和进入受到一系列警报阈值的监管,并根据测量的速度发布限制令。2019 年 5 月 29 日,岩体崩塌,如 2018 年 5 月 29 日记录山体滑坡失败的录像中的一帧所示(见图),并在岩体上留下了 15 米宽的疤痕164。事故发生的时间是提前几个小时准确预测的,因此尽管道路和建筑物都遭到损坏,但该地区的及时疏散避免了人员伤亡。

基于位移速度阈值的预警系统挪威 Veslemannen 也实施了该标准,其中包含颜色编码的危险级别(绿色、黄色、橙色和红色,红色表示疏散)。监测包括 GBInSAR、引伸计网络和延时摄像机,观测较大的 Mannen 不稳定岩石边坡的 54,000 立方米活动部分152。山体滑坡多年来逐渐加速,从2014年到2019年引发了多达16次疏散,其中包括实际斜坡崩塌之前的最后一次疏散。最后一次警告伴随着足够高的位移速度,达到了 GBInSAR 能力的极限,最终,在崩溃前 1 小时,GBInSAR 数据完全失去了相关性。与当地居民和当局持续、透明的沟通对于公众对预警系统的信任至关重要,该系统有效地防止了任何人员损失。



该图改编自ref.164, CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)。

## 技术审查

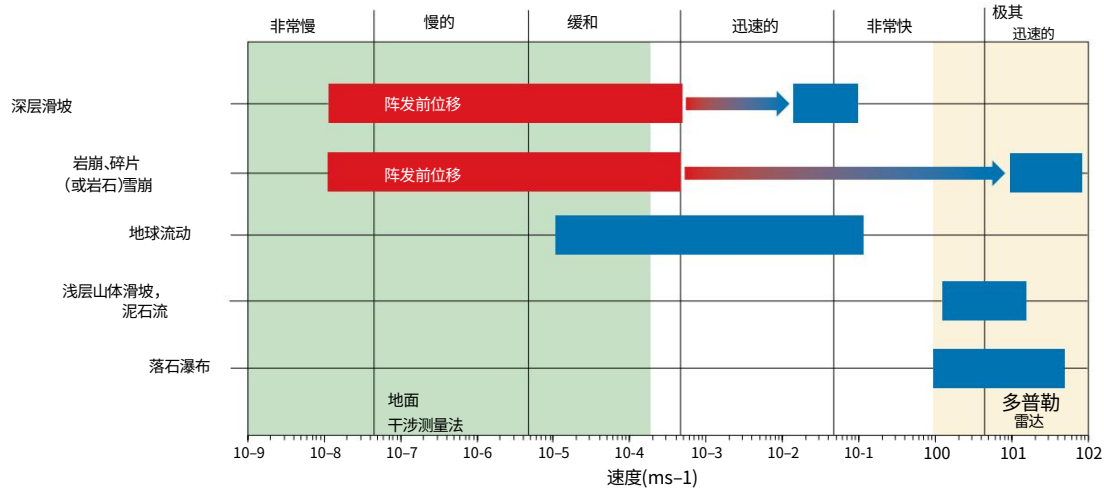


图4地基干涉测量和多普勒雷达在常见类型滑坡中的作用范围。绿色和黄色区域分别显示地基干涉测量和多普勒雷达可以运行的速度范围。某些类型的山体滑坡,例如岩石滑坡和深层土体滑坡,可能会经历突然的指数加速度 (由

箭头从红色转变为蓝色)就在故障发生前几天或几小时,从而表现出超出地面干涉测量能力的移动速率;然而,在阵发前阶段 (红色)测量的趋势足以推断出故障时间的预测。

## 总结和未来展望

遥感对于山体滑坡的探测、监测和预测至关重要。新的和改进的技术现在收集了多种尺度上不同类型的斜坡不稳定性的一系列信息。

总的来说,由于新的算法以及具有更高采集频率和空间分辨率的传感器,我们现在能够监测直到 2010 年代末才超出仪器能力的快速滑坡,并更好地检测和绘制偏远地区和植被覆盖地区的坡度不稳定性轮廓。地区。

当前滑坡监测与预测的瓶颈不仅在于滑坡数据的收集能力,还在于滑坡数据的充分利用。例如,卫星不断获取和存档图像,这些图像可以检测、监测,并在某些情况下预测威胁人类的山体滑坡,但通常仅在灾难性事件发生后才进行分析<sup>142</sup>。

地面干涉测量法生成由数千个像素组成的位移图;然而,常见的做法是仅任意选择几个控制点,而不是使用雷达提供的完整空间覆盖<sup>149</sup>。解决这些数据未充分利用的部分解决方案可能是在科学界内采取更加开放的共享政策,并在行业、当地管理人员和研究人员之间进行更密切的交流。一般来说,数据流通得越多,它们被使用的可能性就越大。

除了更好地利用现有数据外,还必须扩大滑坡监测的地理范围。在人口和/或山体滑坡敏感性预计将增加的发展中地区以及在采取预防政策来减轻山体滑坡影响的能力可能较差的低收入国家,需要进行更多的研究和监测。哥白尼陆地监测服务<sup>150</sup>的欧洲地面运动服务于2022年年中首次发布基线,是最大的广域MTInSAR形变监测系统,是大范围监测的一个例子。基于全分辨率处理的 Sentinel-1 SAR 数据,欧洲地面运动服务提供有关自然和人为地面运动现象的免费无缝信息。

欧洲,滑坡测绘和监测的基础,包括调查较少的地区。在不久的将来,这些地面位移数据将增加对能够发现容易发生故障区域的算法的需求。

不同技术的整合应该成为未来 5-10 年滑坡科学的重点。NISAR 任务计划于 2023 年 1 月发射,将成为第一颗双频全极化 SAR 卫星,在 L 和 S (3.2 GHz,~9.3 cm波长)微波频段151 运行。整合多个波段的数据将有助于更深入地了解山体滑坡的动态,特别是在植被覆盖的地区<sup>72</sup>。地面干涉仪生成的位移图存在几何变形,如果不将其投影到地理参考地图或环境的 3D 重建上,就很难解释它们。

如今,这些投影程序是标准的后处理 (图 1e),但需要时间和精力。因此,下一代地基干涉仪应包括集成激光扫描仪,以直接生成显示逐点位移场景的 3D 图像;多次激光扫描的比较还可以校正噪声干涉测量,并在不受视距限制的情况下涵盖更大的位移率。同样,多普勒和地面干涉测量应集成在一个能够覆盖大范围 (大约 10 个数量级)滑坡速度的单一工具中 (图 4)。

然而,在滑坡监测和管理中,在一个地区安装仪器的成本与其实际使用之间的适当匹配也很重要。例如,当建立一个昂贵的综合监测网络来处理最近出现重新激活迹象的大型山体滑坡时,由于维护时间长,高成本可能会缩短该系统保持工作的时间。成本。使用成本较低的仪器对一个或多个滑坡进行长期监测活动最终可能会增加监测任何由此产生的崩塌的可能性。



技术审查

为了提高这些系统的效率,我们建议将基于三次蠕变的预测方法纳入预警系统。目前它们还不是,主要是由于噪声以及难以区分正常加速阶段和灾难性倒塌之前的最终加速(如方框2(参考文献152)中所示)。然而,故障之前的时刻最终与其他(季节性)重新激活有着明显的区别,因为导致故障的事件通常会达到更高的速度和加速度值153。对于决策者来说,将这些差异正式化,以增加在紧急情况下区分假警报和真警报所需的信心和进步,这是决策者急需迈出的一步。

最后,滑坡管理涉及技术和社会方面,因此风险沟通和认知显然很重要。良好的沟通策略154,155与技术先进的监测和预警系统在实践中并不总是相匹配的,因此,如果警报没有传达给民众,即使是使用先进的快速响应技术做出的最准确的预测也不会有效。

提高风险意识是一种经济有效的降低风险的方法,可以减少不安全行为造成的危险,并提高山体滑坡警报的可理解性和有效性156。

在线发布:2023 年 1 月 10 日

参考

1. Bennett, GL, Miller, SR, Roering, JJ & Schmidt, DA 山体滑坡:门槛斜坡以及门多西诺三重交汇处后遗迹地形的生存.地质学 44, 363–366 (2016)。

2. Moreiras, SM ENSO 气候效应与滑坡发生有关 阿根廷门多萨省安第斯山脉中部,山体滑坡2, 53–59 (2005)。

3. 佩特利, DN 等人。尼泊尔山体滑坡发生的趋势.纳特.危险43, 23–44 (2007)。

4. Froude, MJ 和 Petley, DN 2004 年至 2016 年全球发生的致命山体滑坡。 纳特.危害地球系统.科学。 18, 2161–2181 (2018)。

5. Patton, AI, Rathburn, SL & Capps, DM 山体滑坡对气候变化的反应 永久冻土地区.地貌学340, 116–128 (2019)。

6. Mantovani, F.,Soeters, R. 和 Van Westen, CJ 用于欧洲滑坡研究和危险区划的遥感技术.地貌学15, 213–225 (1996)。

7. Metternicht, G.,Hurni, L. 和 Gogu, R.山体滑坡遥感:对山区环境灾害评估地理空间系统的潜在贡献分析。 遥感环境。 98, 284–303 (2005)。

8. Delacourt, C. 等人。分析滑坡运动学的遥感技术: 回顾.公牛.苏克.杰奥尔.神父。 178, 89–100 (2007)。

9. Crosetto, M.,Monserat, O.,Cuevas-González, M.,Devanthery, N. 和 Crippa, B. 持久散射体干涉测量:综述。 ISPRS J.摄影图.遥感115, 78–89 (2016)。

10. 蒙迪尼,AC 等人。使用合成孔径雷达进行滑坡破坏检测和绘图:过去、现在和未来.地球科学.修订版216, 103574 (2021)。

11. 卡萨利, N.等人。用于滑坡测绘、监测和预警的星载、无人机和地面遥感技术.地球环境.灾难4,9 (2017)。

12. Lillesand, T.,Kiefer, RW 和 Chipman, J.遥感和图像解释 (约翰·威利父子公司,2014 年)。

13.Jaboyedof,M.等人。激光雷达在山体滑坡调查中的应用:综述.纳特.危险61, 5–28 (2012)。

14. Salvini, R.,Francioni, M.,Ricucci, S.,Boncini, F. 和 Callegari, L.摄影测量和激光扫描,用于分析意大利阿尔卑斯山多莫索拉-伊塞尔铁路沿线的边坡稳定性和落石跳动.地貌学185, 110–122 (2013)。

15. Rosi, A. 等人。使用 PS-InSAR 更新了托斯卡纳(意大利)的新滑坡清单:地貌特征和滑坡分布.山体滑坡15, 5–19 (2018)。

16.Lombardi,L.等人。卡拉塔比亚诺山体滑坡(意大利南部):初步 GB-InSAR 监控数据和远程 3D 绘图.山体滑坡14, 685–696 (2017)。

17. Ferrigno, F.,Gigli, G.,Fanti, R.,Intrieri, E. 和 Casagli, N. GB-InSAR 监测和滑坡应急管理观测方法.蒙特古托土流(AV,意大利).纳特.危害地球系统.科学。 17, 845–860 (2017)。

18. Intrieri,E.等人。滑坡预警系统中的大数据管理:经验 来自地面干涉雷达应用.纳特.危害地球系统.科学。 17, 1713–1723 (2017)。

19. MacDonald, HC & Grubbs,RS NASA 林登·约翰逊航天中心 NASA 地球资源调查研讨会卷。 1-B (美国宇航局,1975)。

20. 赵成和卢志. 滑坡遥感:综述.遥感10, 279 (2018)。

21. Martha, TR,Kerle, N.,Van Westen, CJ,Jetten, V. 和 Kumar, KV 用于创建历史滑坡清单的多时相全色图像的面向对象分析。 ISPRS J.摄影图.遥感67, 105–119 (2011)。

22.Höbling,D.等人。比较基于不同传感器的光学卫星图像的手动和半自动滑坡测绘.地球科学7, 37 (2017)。

23.索拉里, L.等人。意大利滑坡探测卫星干涉测量综述.偏僻的 感觉。 12, 1351 (2020)。

24.Guzzetti,F.等人。山体滑坡库存图:解决老问题的新工具.地球科学.牧师。 112, 42–66 (2012)。

25. Scaioni, M.,Longoni, L.,Melillo, V. 和 Papini, M. 滑坡遥感 调查:最近成就和观点的概述.遥感6, 9600–9652 (2014)。

26. Tofani, V.,Segoni, S.,Agostini, A.,Catani, F. 和 Casagli, N. 技术说明:利用遥感进行欧洲滑坡研究.纳特.危害 地球系统.科学。 13, 299–309 (2013)。

27. Savvaidis, PD 现有滑坡监测系统和技术.在《从行星到 地球与文化242–258 (学术界,2003 年)。

28. Ose, K.,Corpetti, T. 和 Demagistri, L.陆地表面光学遥感57–124 (爱思唯尔,2016)。

29. Li, J. 和 Roy, DP 对 Sentinel-2A,Sentinel-2B 和 Landsat-8 数据重访间隔的全球分析以及对地面监测的影响。 偏僻的。 Sens.9, 902 (2017)。

30. Li, J. & Chen, B. Landsat-8-9 和 Sentinel-2A-2B 数据的全球重访间隔分析 用于地面监测.传感器20, 6631 (2020)。

31. Jacobsen, K.用于地形测绘的甚高分辨率光学卫星的特性 (isprs,2011 年); <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-4-W19/137/2011/>。

32. Li, S., Kang, X., Fang, L., Hu, J. & Yin, H. 像素级图像融合:对现有技术的调查.信息.融合33, 100–112 (2017)。

33.Santurri,L.等人。用于滑坡识别的极高分辨率卫星数据融合技术的评估。 ISPRS TC VII 研讨会 – 奥地利维也纳 100 周年 (Wagner, W. 和 Székely, B. 编辑)5–7 (ISPRS,2010)。

34. Curlander,JC 和 McDonough,RN合成孔径雷达卷。 11 (威利,1991)。

35. Wasowski, J. 和 Bovenga, F.利用卫星多时相干涉测量研究山体滑坡和不稳定斜坡:当前问题和未来前景.工程师.地质学家。 174, 103–138 (2014)。

36. Bamler, R. 和 Hartl, P. 合成孔径雷达干涉测量.反问题。 14, R1 (1998)。

37. Gabriel, AK,Goldstein, RM 和 Zebker, HA 绘制小海拔变化图 大面积:差分雷达干涉测量。 J.地球物理学.资源.固体地球94, 9183–9191 (1989)。

38. Massonnet, D. & Feigl, KL. 卫星雷达中地球物理现象的辨别 干涉图.地球物理学.资源.莱特。 22, 1537–1540 (1995)。

39. Zebker, HA 和 Villasenor, J.,干涉雷达回波中的去相关。 IEEE 传输。 地理学.遥感30, 950–959 (1992)。

40. Ferretti, A.,Prati, C. 和 Rocca, F. SAR 干涉测量中的永久散射体。 IEEE 传输。 地理学.遥感39, 8–20 (2001)。

41. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. & Sansosti, E. 一种新的曲面算法 基于小基线差分 SAR 干涉图的变形监测。 IEEE 传输.地理学.遥感40, 2375–2383 (2002)。

42. Conforti, M.,Pascale, S.,Pepe, M.,Sdao, F. 和 Sole, A. 剥蚀过程和 卡马斯特拉河流域(巴西利卡塔-意大利南部)的地貌图。 J. 地图, 444–455 (2013)。

43. Zhou, X., Chang, N.-B. & Li, S. SAR 干涉测量在地球和环境科学研究中的应用.传感器9,1876–1912 (2009)。

44. Colesanti, C.,Ferretti, A.,Locatelli, R.,Novali, F. 和 Savio, G. 2003 年 IEEE 国际地球科学和遥感研讨会论文集1193–1195 (IEEE,2003 年)。

45. Michel, RM,Avouac, JP 和 Taboury, J.根据 SAR 振幅图像测量地面位移:在兰德斯地震中的应用.地球物理学.资源.莱特。 26, 875–878 (1999)。

46. Strozzi, T.,Luckman, A.,Murray, T.,Wegmuller, U. 和 Werner, CL 冰川运动 使用 SAR 偏移跟踪程序进行估计。 IEEE 传输.地理学.遥感40, 2384–2391 (2002)。

47. De Zan, F.圆形高斯信号的非相干散斑跟踪的精度。 IEEE 地球科学.遥感快报。 11, 264–267 (2014)。

48. Reeves, B.,Noon, DA,Stickley, GF 和 Longstaf, D. 用于监测矿壁的边坡稳定性雷达.在过程中.地下和地表传感 技术及应用 III 卷 (Nguyen, C. 编)57–67 (SPIE,2001 年)。

49. Tarchi, D.等人。用于结构变化检测的 SAR 干涉测量:大坝的演示测试.在IEEE 1999国际地球科学与遥感研讨会上 1522–1524 (IEEE,1999)。

50. Atzeni,C. 等人。用于滑坡监测和控制的地面雷达干涉测量。 在过程中。 ISSMGE 滑坡和自然/文化遗产产特拉布宗现场研讨会(土耳其) 195–209 (ISSMGE,2001 年)。

51. Dick, GJ,Eberhardt, E.,Cabrejo-Liévano, AG,Stead, D. 和 Rose, ND 利用地面边坡稳定性开发露天矿边坡故障预警时间分析方法雷达监测数据.能.地质技术。 J. 52, 515–529 (2015)。

52. Carlà, T.,Farina, P.,Intrieri, E.,Ketizmen, H. 和 Casagli, N. 整合地面雷达和卫星 InSAR 数据以分析露天矿意外边坡破坏.工程师.地质学家。 235, 39–52 (2018)。

53. Di Traglia,F.等人。地面 InSAR 揭示了斯特龙博利火山的管道加压脉冲.特拉诺瓦25, 192–198 (2013)。

54.Del Ventisette,C.等人。在紧急情况下使用地面雷达干涉测量:3 高速公路(意大利卡拉布里亚地区)受到山体滑坡威胁的案例.纳特.危害地球系统.科学。 11, 2483–2495 (2011)。

技术审查

55. Gubler, H. 在瑞士拥有五年雪崩、泥石流和落石警报系统经验。在过程中。国际雪科学研讨会1-9 (ISSW,2000 年) 。

56. Meier, L.,Jacquemart, M.,Blattmann, B. 和 Arnold, B.,瑞士采尔马特的道路安全远程广角雷达实时雪崩检测。在过程中。国际雪科学研讨会304–308 (ISSW,2016) 。

57. 崔平,郭X,严Y,李Y,葛Y.活动碎片的实时观测汶川地震灾区的流域。地貌学321, 153–166 (2018)。

58. Miko , M. 和 Huebl, J. 监测和预警技术实践指南泥石流:TXT-工具 2.386-1.2.滑坡动力。ISDR-ICL 滑坡相互作用。教.工具 1, 567–585 (2018)。

59. Meier, L.,Jacquemart, M.,Wahlen, S. 和 Blattmann, B. 使用多普勒雷达进行实时落石检测。在过程中。第六届落石防护跨学科研讨会1-4 (CIMNE,2017 年) 。

60. Michelini,A.等人。一种基于雷达的新型系统,用于检测和跟踪落石露天矿。在过程中。2020 年露天采矿和土木工程边坡稳定性国际研讨会1183–1192 (澳大利亚地质学中心,2020 年) 。

61. Wahlen,S.等人。意大利鲁伊农山体滑坡的实时落石检测系统,采用多普勒雷达技术自动封闭和重新开放道路。2021 年 EGU 大会<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-14818> (2021) 。

62. Viviani, F.,Michelini, A. 和 Mayer, L. RockSpot:用于落石/雪崩检测和跟踪的干涉多普勒雷达。2020年IEEE雷达会议(RadarConf20) 1–5 (IEEE,2020) 。

63. Mallet,CM 和 Bretar,FDR 全波形地形激光雷达:最先进的。ISPRS J. 摄影图。遥感64, 1–16 (2009)。

64. Brunsten, D. 群众运动:研究前沿及其他:地貌学方法。地貌学7, 85–128 (1993)。

65. 蒙迪尼,A.等人。使用光学卫星图像对降雨引起的浅层滑坡进行半自动识别和绘图。遥感环境。115, 1743–1757 (2011)。

66. Achache, J.,Fruneau, B. 和 Delacourt, C. SAR 干涉测量的适用性山体滑坡监测。ERS 应用383, 165 (1996)。

67. Fruneau, BND, Achache, J. 和 Delacourt, C. 使用 SAR 干涉测量法对 Saint-Etienne-de-Tinée 山体滑坡进行观测和建模。构造物理学265, 181–190 (1996)。

68. Kimura, H. 和 Yamaguchi, Y. 使用卫星雷达干涉测量法检测滑坡区域。摄影图。工程师。遥感66, 337–344 (2000)。

69. Berardino,P. 等人。使用微分 SAR 干涉测量法监测和模拟拉泰亚 (意大利巴斯科卡塔) 的大边坡失稳。工程师。地质学家。68, 31–51 (2003)。

70. Rott, H.,Scheuchl, B.,Siegel, A. 和 Grasmann, B.,通过 SAR 干涉测量法监测非常缓慢的斜坡运动:奥地利奥茨塔阿尔卑斯山水库上方大量废物的案例研究。地球物理学。资源。莱特。26, 1629–1632 (1999)。

71. Schlögel, R.,Dubre, C.,Malet, J.-P. & Masson, F. 利用 ALOS/PALSAR 图像进行滑坡变形监测:一种 D-InSAR 地貌解释方法。地貌学231, 314–330 (2015)。

72. Bekaert, DPS,Handwerger, AL,Agram, P. 和 Kirschbaum, DB 基于 InSAR 的检测方法,用于绘制和监测陡峭山区偏远地区缓慢移动的滑坡:在尼泊尔的应用。遥感环境。249, 111983 (2020)。

73. Singhroy, V.,Aasset, P.-J.,Couture, R. 和 Poncos, V. InSAR 山体滑坡监测加拿大的永久冻土地形。2007年IEEE 国际地球科学和遥感研讨会2451–2454 (IEEE,2007) 。

74. Hao,J.等人。InSAR与青藏高原小型滑坡调查绝对变形模型。遥感11, 2126 (2019)。

75. Yao,T.等人。最近第三极的快速变暖伴随着冰冻圈融化和水循环加剧以及季风与环境之间的相互作用:采用观测、建模和分析的多学科方法。公牛。是。梅泰罗尔。苏克。100, 423–444 (2019)。

76. Cui, P. & Jia, Y. 青藏高原山地灾害:研究现状与展望。国家科学。修订版2,397–399 (2015) 。

77. Di Martire, D. 等人。意大利全国范围的滑坡测绘和风险管理系统:第二个非常规环境遥感计划。国际。J.应用程序。地球观测。地理信息。63, 143–157 (2017)。

78. Meisina,C. 等人。区域尺度 PSInSAR 数据的地质解释。传感器8, 7469–7492 (2008)。

79. 张,Y.等人。合成孔径雷达干涉技术检测白龙河流域地质灾害山体滑坡13, 1273–1284 (2016)。

80. Lauknes,T.等人。使用小基线法和持续散射体干涉 SAR 时间序列方法绘制挪威北部的详细岩石滑坡测绘。遥感环境。114,2097-2109 (2010) 。

81. Ciampalini,A.等人。使用多传感器 PSInSAR™ 技术分析滑坡地区的建筑物变形。国际。J.应用程序。地球观测。地理信息。33, 166–180 (2014)。

82. 拉斯皮尼,F.等人。卫星 SAR 位移测量在滑坡风险管理实践中的贡献。纳特。危险86, 327–351 (2017)。

83. Cigna, F.,Bianchini, S. 和 Casagli, N. 如何评估滑坡活动和强度持久散射体干涉测量 (PSI) 基于 PSI 的矩阵方法。山体滑坡10, 267–283 (2013)。

84. Tofani, V.,Raspini, F.,Catani, F. 和 Casagli, N. 用于滑坡表征和监测的持久散射体干涉测量 (PSI) 技术:遥感5, 1045–1065 (2013)。

85. Berti, M.,Corsini, A.,Franceschini, S. 和 Iannacone, J. 持久散射体干涉测量时间序列的自动分类。纳特。危害地球系统。科学。13,1945-1958 (2013) 。

86. Cruden, DM & Varnes, DJ, 《山体滑坡:调查和缓解特别报告》247 (特纳 AK 和舒斯特,RL 编辑) 3 (美国国家科学院交通研究委员会,1996 年) 。

87. 斯特罗齐,T.等人。L波段滑坡位移调查与监测卫星 SAR 干涉测量。山体滑坡2, 193–201 (2005)。

88. Dong,J.等人。使用时间序列 SAR 绘制滑坡表面位移图结合持久性和分布式散射体的干涉测量:以中国丹巴甲层滑坡为例遥感环境。205, 180–198 (2018)。

89. Cignetti,M.等人。利用 ESA G-pod 服务进行地面研究高山地区的变形过程:意大利北部瓦莱达奥斯塔地区的案例研究。遥感8, 852 (2016)。

90. 曼科尼,A.等人。简短交流:滑坡事件的快速绘图:2013 年 12 月 3 日,意大利蒙泰斯卡廖索山体滑坡。纳特。危害地球系统。科学。14, 1835–1841 (2014)。

91. 拉斯皮尼,F.等人。利用卫星 SAR 图像的幅度和相位进行滑坡测绘:蒙特斯卡利奥索 (意大利南部) 的案例。遥感7, 14576–14596 (2015)。

92. Singleton, A.,Li, Z.,Hoey, T. 和 Muller, JP 将像素偏移技术评估为 D-InSAR 的替代方案,用于监测植被地形中的间歇性山体滑坡运动。遥感环境。147, 133–144 (2014)。

93. Jaboyedof,M.和Derron,M.-H.,在地球表面过程的发展卷。23 (爱思唯尔,2020) 。

94. Ardizzone, F.,Cardinali, M.,Galli, M.,Guzzetti, F. 和 Reichenbach, P. 识别和使用机载激光雷达收集的海拔数据绘制最近降雨引起的山体滑坡的地图。纳特。危害地球系统。科学。7,637-650 (2007) 。

95. Chigira, M.,Tsou, C.-Y.,Matsushi, Y.,Hiraishi, N. 和 Matsuzawa, M. 地形前体以及台风塔拉斯引起的深层灾难性山体滑坡的地质结构。地貌学201, 479–493 (2013)。

96. Sturzenegger, M. 和 Stead, D. 使用地面遥感技术量化高山岩石斜坡和大型滑坡的不连续性方向和持久性。纳特。危害地球系统。科学。9, 267–287 (2009)。

97. Gigli, G. & Casagli, N. 从高处半自动提取岩体结构数据分辨率激光雷达点云。国际。J.摇滚机械师。分钟。科学。48, 187–198 (2011)。

98. Battulwar,R.,Zare-Naghadhi,M.,Emami,E. 和 Sattarvand,J. 最先进的评论使用三维表面模型自动提取岩体不连续特征。J.摇滚机械师。地质技术。工程师。13, 920–936 (2021)。

99. Giordan,D.等人。大型土流的形态和运动学演化:意大利南部蒙塔古托山体滑坡。地貌学187, 61–79 (2013)。

100. Frodella,W.等人。协同使用卫星和地面遥感方法来监测圣利奥岩石悬崖 (意大利北部)。地貌学264, 80–94 (2016)。

101. Hervás,J.等人。利用光学遥感图像监测山体滑坡:意大利泰西纳山体滑坡的案例历史。地貌学54, 63–75 (2003)。

102. Drusch,M.等人。Sentinel-2 太空局用于 GMES 运行的光学高分辨率任务服务。遥感环境。120, 25–36 (2021)。

103. S. Leprince, S. Barbot, F. Ayoub 和 J.-P. 自动、精准卫星图像的校正、配准和亚像素相关,在地面变形测量中的应用。IEEE 传输。地理学。遥感45, 1529–1558 (2007)。

104. Leprince, SB,Berthier, E.,Ayoub, FO,Delacourt, C. 和 Avouac, JP 监测地球表面动力学与光学图像。Eos 运输。是。地球物理学。联盟89,1-2 (2008)。

105. Delacourt, C.,Allemand, P.,Casson, B. 和 Vadon, H. “La Clapière”的速度场通过航空图像和 QuickBird 卫星图像的相关性来测量滑坡。地球物理学。资源。莱特。31, 2004GL020193 (2004)。

106. Lacroix, P.,Berthier, E. 和 Maquerhua,ET 从群宿星团图像中检测到,秘鲁科尔卡山谷中地震驱动的缓慢移动的山体滑坡加速。遥感。大约。165, 148–158 (2015)。

107. Xiong,Z.等人。从多个雷达和光学卫星图像中检索到的白格滑坡破坏前后的时空变形模式。工程师。地质学家。279, 105880 (2020)。

108. Yang, W.,选择最佳图像对来测量斜坡变形。传感器20, 4721 (2020) 。

109. Bontemps, N.,Lacroix, P. 和 Doin, M.-P. 变形场时间序列反演光学图像,以及在秘鲁缓慢移动的山体滑坡的长期运动学中的应用。遥感环境。210, 144–158 (2018)。

110. Lacroix, P.,Araujo, G.,Hollingsworth, J. 和 Taipei, E. 慢速运动的自热带运动从 Landsat-8 时间序列推断的移动滑坡。J.地球物理学。资源。地球冲浪。124, 1201–1216 (2019)。

111. Stumpf,A.,Malet, J.-P. & Delacourt, C. 卫星图像时间序列的相关性缓慢移动的山体滑坡的检测和监测。遥感环境。189, 40–55 (2017)。

112. Stumpf, A.,Malet, JP,Allemand, P. 和 Ulrich, P.,利用 Pléiades 卫星图像进行地表重建和滑坡位移测量。ISPRS J.摄影图。遥感95, 1–12 (2014)。

113. Stumpf, A.,Michéa, D. 和 Malet, J.-P. 改进了 Sentinel-2 和 Landsat-8 的联合注册用于地球表面运动测量的图像。遥感10, 160 (2018)。

技术审查

114. Cigna, F.,Del Ventisette, C.,Liguori, V. and Casagli, N. InSAR 时间序列的高级雷达解释,用于地质过程的绘图和表征。  
纳特.危害地球系统.科学。 11, 865–881 (2011)。

115. Cigna, F.,Tapete, D. 和 Casagli, N.从卫星持久性散射体时间序列中半自动提取偏差指数 (DI) 沉积火山作用和构造诱发运动的测试.非线性过程.地球物理学。 19, 643–655 (2012)。

116. Hussain, E.,Novellino, A.,Jordan, C. 和 Bateson, L. 离线-在线变更检测  
Sentinel-1 InSAR 时间序列.遥感13, 1656 (2021)。

117.马特奥斯,RM 等人.结合使用 PSInSAR 和无人机摄影测量技术来分析影响城市地区 (西班牙东南部)的沿海滑坡的  
运动学.山体滑坡<https://doi.org/10.1007/s10346-016-0723-5> (2017) 。

118. Necsoiu, M.,McGinnis, RN 和 Hooper, DM 基于地貌分析和多时相卫星 InSAR 技术对 Salmon Falls  
Creek Canyon 滑坡复合体的新见解.山体滑坡11, 1141–1153 (2014)。

119. 张,Y 等人.利用方法研究中国舟曲地区缓慢移动的滑坡  
InSAR 时间序列.山体滑坡15, 1299–1315 (2018)。

120.拉斯皮尼,F 等人.持续散射体连续流动用于山体滑坡检测  
和绘图.托斯卡纳地区 (意大利)的情况.山体滑坡16, 2033–2044 (2019)。

121.Journault,J 等人.使用卫星 InSAR 测量加拿大不列颠哥伦比亚省阿什克罗夫特以南汤普森河谷山体滑坡的位  
移.山体滑坡15, 621–636 (2018)。

122. Confuorto,P 等人.通过地面和卫星技术监测受山体滑坡影响的地区的补救工程绩效.链178, 77–89 (2019)。

123.拉斯皮尼,F 等人.使用以下方法连续.半自动监测地面变形  
Sentinel-1 卫星.科学.报告8, 7253 (2018)。

124. Garthwaite,MC 关于用于变形监测的雷达角反射器的设计  
多频InSAR.遥感9, 648 (2017)。

125.克罗塞托,M 等人.使用 SAR 干涉测量法以及主动和被动反射器进行变形监测.国际.拱.摄影图.遥感争端.信  
息.科学。 43, 287–292 (2020)。

126. Bovenga, F.,Pasquariello, G.,Pellicani, R.,Refice, A. 和 Spilotro, G. 使用角反射器和卫星 SAR 干涉测量法进  
行滑坡监测以减轻风险.Carlantino 的大型滑坡 (意大利) 。链151, 49–62 (2017)。

127.费雷蒂,A 等人. InSAR 时间序列的亚毫米精度:实验验证。  
IEEE 传输.地理学.遥感45, 1142–1153 (2007)。

128.Bardi,F 等人.通过以下方式监测地球流的快速重新激活  
GB-InSAR:2013 年 4 月的 Capriglio 山体滑坡 (意大利亚平宁山脉北部) 。遥感。  
9, 165 (2017)。

129. Barla, G.,Antonolini, F.,Barla, M.,Mensi, E. 和 Piovano, G. 博勒加德的监测  
使用先进和传统技术的山体滑坡 (意大利奥斯塔山谷) 。工程师.地质学家。 116, 218–235 (2010)。

130. Di Traglia,F 等人.斯特龙博利火山地面 InSAR 监测系统记录的十年火山变形回顾:缓解火山侧翼动态和剧烈火山  
活动的工具.地球科学.修订版139, 317–335 (2014)。

131.克罗默,RA 等人.具有近乎实时变化的自动地面激光扫描  
Séchilienne 山体滑坡的检测监测.地球冲浪.动态。 5,293–310 (2017) 。

132. Catani, F. 和 Segoni, S., 《地貌学论文》第二版,531–545 (爱思唯尔,2021 年) 。

133. Intrieri, E.,Carlà, T. 和 Gigli, G. 预测斜坡尺度滑坡失效时间:文献综述.地球科学.修订版193, 333–349 (2019)。

134. Hungr, O. 和 Kent, A. 加拿大不列颠哥伦比亚省煤矿废矿堆倒塌事故。  
滑坡新闻, 26–28 (1995)。

135. Hutchinson, J. 山体滑坡风险 了解.预见.预防.地质学家.环境技术  
9, 3–24 (2001)。

136. Gigli, G.,Fanti, R.,Canuti, P. 和 Casagli, N. 先进监控和  
用于岩石滑坡完整风险情景分析的数值模拟技术:贝尼山 (意大利佛罗伦萨)的案例.工程师.地质学家。 120,  
48–59 (2011)。

137. Intrieri, E. 和 Gigli, G. 滑坡预报和影响可预测性的因素。  
纳特.危害地球系统.科学。 16, 2501–2510 (2016)。

138. Saito, M.三次蠕变导致的边坡破坏的预测时间.在过程中.第七届国际  
土壤力学和基础工程会议.墨西哥城,卷。 2 677–683 (墨西哥机械学会,1969 年) 。

139. Fukuzono, T. 使用表面位移速度的倒数来预测降雨引起的斜坡破坏时间的方法.山体滑坡22, 8–13 (1985)。

140. Voight, B. 火山喷发预测方法.自然332, 125–130 (1988)。

141. Kilburn, CR 和 Petley, DN 预测巨大的灾难性斜坡崩塌:意大利北部 Vajont 的经验教训.地貌学54, 21–32 (2003)。

142. Intrieri, E 等人.从太空看茂县山体滑坡:探测崩塌前兆  
与 Sentinel-1 数据.山体滑坡15, 123–133 (2018)。

143.Rose, ND 和 Hungr, O.使用预测露天矿潜在岩石边坡破坏  
反速度法.国际。 J.摇滚机械师.分钟.科学。 44, 308–320 (2007)。

144. T. Carlà,P. Farina,E. Intrieri,K. Botsialas 和 N. Casagli. 硬岩体中脆性边坡破坏的警告:露天矿的例子。  
工程师.地质。 228, 71–81 (2017)。

145. Petley, DN,Bulmer, MH 和 Murphy, W. 旋转和移动的运动模式  
平移山体滑坡.地质学30, 719–722 (2002)。

146.托雷斯,R 等人. GMES Sentinel-1 任务.遥感.大约。 120, 9–24 (2012)。

147.Dong,J 等人.使用 Sentinel-1 和 ALOS-2 PALSAR-2 数据集测量最近中国茂县新磨山体滑坡的前兆运动.山体  
滑坡15, 135–144 (2018)。

148. Qi, W.,Yang, W.,He, X. 和 Xu, C. 利用遥感数据探测喜马拉雅山脉南部的 Chamoli 滑坡前兆.山体滑坡18, 3449–  
3456 (2021)。

149. Dick, G.J.Eberhardt, E.,Cabrejo-Liévano, AG,Stead, D. 和 Rose, ND 利用地面边坡稳定性开发露天矿边  
坡故障预警时间分析方法雷达监测数据.能.地质技术。 J. 52, 515–529 (2015)。

150.克罗塞托,M 等人.广域 DinSAR 的演变:从区域和国家服务到欧洲地面运动服务.遥感12, 2043 (2020)。

151.罗森,P 等人. NASA-ISRO SAR (NISAR) 任务双频雷达仪器  
初步设计。 IEEE国际地球科学与遥感研讨会  
(IGARSS) 3832–3835 (IEEE,2017) 。

152.克里斯滕森,L 等人. Weslemannen 的运动.故障和气候控制  
挪威西部的岩石滑坡.山体滑坡18, 1963–1980 (2021)。

153. Xu, Q., Yuan, Y., Zeng, Y. & Hack, R. 一些新的蠕变边坡破坏预警标准。  
科学.中国科技.科学。 54, 210–220 (2011)。

154. Alcántara-Ayala, I. 和 Oliver-Smith, A.识别灾害风险中的新问题  
减少.移民.气候变化和可持续发展101-124 (Springer,2017 年) 。

155. Alcántara-Ayala, I. 和 Moreno, AR 山体滑坡风险感知和沟通  
发展中国家山区灾害风险管理:墨西哥的先见之明。 J.山科学。 13,2079–2093 (2016) 。

156. Intrieri, E.,Gigli, G.,Casagli, N. 和 Nadim, F. 简短沟通“早期滑坡”  
警告系统:工具箱和一般概念”。纳特.危害地球系统.科学。 13, 85–90 (2013)。

157. Varnes,DJ 山体滑坡类型和过程.山体滑坡工程师.练习。 24, 20–47 (1958)。

158. Zaruba, Q. 和 Mencil, V.山体滑坡及其控制 (Elsevier,1969) 。

159. Aleotti, P.降雨引起的浅层破坏的预警系统.工程师.地质学家。 73,247–265 \_  
(2004) 。

160. Van Asch, TWJ,Buma, J. 和 Van Beek, LPH 对某些水文触发的看法  
滑坡系统.地貌学30, 25–32 (1999)。

161. Zêzere, JL, Trigo, RM 和 Trigo, IF 里斯本地区降雨引起的浅层和深层滑坡 (葡萄牙) :评估与北大西洋清动  
的关系.纳特.危害地球系统.科学。 5, 331–344 (2005)。

162. Varnes,DJ 斜坡运动类型和过程.规格报告176, 11–33 (1978)。

163. Hungr, O.,Leroueil, S. 和 Picarelli, L. 滑坡类型的 Varnes 分类,  
更新.山体滑坡11, 167–194 (2014)。

164.Carlà,T 等人.通过地面雷达干涉测量法对阿尔卑斯山主要交通走廊沿线的落石预报和风险管理.山体滑坡16,  
1425–1435 (2019)。

作者贡献

NC 协调和修改了工作并提供了资金。 EI 参与了本文的撰写、修改了论文、协调了修改并准备了一些图表。

GG 参与了写作、修改了论文并准备了一些图表。 VT 为本文的撰写做出了贡献并进行了修改。 FR 参与了写作和其中一张图表,并修改了论文.所有作者都对文章的定义和结构做出了贡献。

利益争夺

作者声明没有竞争利益。

附加信息

信件应寄给 Emanuele Intrieri。

同行评审信息《自然评论地球与环境》感谢 Michel Jaboyedof 和其他匿名审稿人对这项工作的同行评审所做的贡献。

重印和许可信息可在[www.nature.com/reprints](http://www.nature.com/reprints) 上获取。

出版商说明施普林格 自然对于已出版地图和机构隶属关系中的管辖权主张保持中立。

Springer Nature 或其许可方 (例如协会或其他合作伙伴)根据与作者或其他权利持有者签订的出版协议拥有本文的  
专有权;作者对本文已接受手稿版本的自行存档仅受此类出版协议条款和适用法律的约束。

© 施普林格自然有限公司 2023

自然评论地球与环境 |第 4 卷| 2023 年 1 月 | 51–64

64