

遥感技术在滑坡地质灾害中的应用综述

黄会阳

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年3月7日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月14日

摘要

在全球气候变暖和降雨量不断增加的背景下, 滑坡的严重威胁人民群众的生命安全。随着遥感技术的发展, 其在滑坡方面的使用不断成熟。将遥感技术应用到滑坡前后的变形监测与防治, 可快速准确了解灾害发生区域的具体情况, 为防灾减灾救灾工作提供技术支持。文章综合概述了不同遥感技术应用在滑坡灾害中的原理与方法, 探讨了SAR技术、光学遥感技术、激光雷达技术在滑坡灾害应用中的实例, 对三类技术的基本原理、研究现状进行阐述, 总结各类技术方法的优缺点, 并综合运用多类遥感技术, 为预防滑坡灾害提供有益借鉴。

关键词

滑坡, SAR技术, 光学遥感技术, 激光雷达技术, 多源遥感数据

Overview of the Application of Remote Sensing Technology in Landslide Geological Hazards

Huiyang Huang

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Mar. 7th, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

Against the backdrop of global climate change and increasing rainfall, landslides pose a serious threat to the safety of people's lives. With the development of remote sensing technology, its use in landslides continues to mature. Applying remote sensing technology to deformation monitoring and prevention before and after landslides can quickly and accurately understand the specific situation of the disaster area, providing technical support for disaster prevention, reduction, and relief

work. The article provides a comprehensive overview of the principles and methods of different remote sensing technologies applied in landslide disasters, explores examples of SAR technology, optical remote sensing technology, and LiDAR technology in landslide disaster applications, elaborates on the basic principles and research status of the three types of technologies, summarizes the advantages and disadvantages of each technology method, and comprehensively applies multiple types of remote sensing technologies to provide useful references for landslide disaster prevention.

Keywords

Landslide, SAR Technology, Optical Remote Sensing Technology, LiDAR Technology, Multi-Source Remote Sensing Data

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

滑坡指的是在自然地质作用和人类活动等因素的影响下，斜坡上的岩土体在重力作用下沿一定的软弱面整体或局部保持岩土体结构完整而向下滑动的过程和现象[1]。滑坡是中国地质灾害中的主要灾种，滑坡灾害给中国人民的生命财产带来了严重的危害，极大地影响了社会的进步与发展。

遥感技术是通过各种途径搭载探测仪器，不与探测目标接触，通过探测目标与特定谱段电磁波的相互作用特性，从远处把目标的电磁波特性记录下来，通过分析揭示出目标物体的特征性质及其变化的综合性探测技术[2]。遥感发展至今，大致可分为3类，一类是SAR技术，包括InSAR、极化SAR等多种不同类型的SAR技术，一类是光学遥感技术，包括光学卫星遥感和航空遥感等，最后便是激光雷达遥感技术。

Table 1. Advantages and disadvantages of different remote sensing technologies

表 1. 不同遥感技术原理及优缺点

遥感技术	原理	适用条件	精度	局限性	滑坡类型	监测阶段
SAR (合成孔径雷达)	通过主动微波探测地表形变	全天候工作、对地表湿度敏感	形变精度 0.1~1 cm	失相干问题、数据处理复杂	缓慢蠕变滑坡	长期形变监测、预警
光学遥感	利用载荷获取反射光谱	晴朗天气、无云层遮挡	空间分辨率高 (0.3~30 m)	受光照及大气干扰	浅层滑坡、地表监测	初期识别、灾后评估
LiDAR	激光脉冲测量地表三维结构	需机载/无人机平台、适合复杂地形	垂直精度 0.1~0.5 m	成本高、覆盖范围小	陡坡滑坡、植被覆盖区	高精度地形建模、灾后重建
热红外遥感	探测地表温度异常	昼夜均可	温度分辨率 0.1~1 K	易受大气干扰	深层滑坡	早期预警
无人机遥感	搭载光学传感器获取高分辨率数据	小范围、紧急监测	厘米级分辨率	续航时间短、数据处理量大	突发性滑坡	应急响应、局部详细调查

遥感具有宏观性、高效性、多层次、多尺度的特点，利用遥感技术可以根据多时相数据分析滑坡孕育机制，可以定性或定量地恢复和追踪滑坡发生前后的过程，可以提前预测滑坡发生的区域[3]。相较于传统的滑坡灾害观测手段，遥感数据有以下优点，覆盖范围大，其能观测到的面积非常广。观测时间长、完整性高，可以对滑坡进行时序监测。时效性高，获取速度快、获取成本低。信息量大，能够包括不同波

长的波段，对于运用波段信息识别滑坡具有重要的意义。不同遥感技术因其原理和应用途径不同，每种技术都有着其特有的优势和局限性，不同类型的遥感技术的优缺点见表 1。

本文在前人研究的基础上总结监测滑坡地质灾害的不同遥感技术，并结合相应实例介绍遥感技术在滑坡地质灾害中的应用现状，论述其优势，并对未来滑坡地质灾害遥感的发展趋势进行展望。

2. SAR 在滑坡地质灾害中的应用

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动式微波遥感，其显著特点是主动发射电磁波，具有不依赖太阳光照及气候条件的全天时、全天候对地观测能力，并对云雾、小雨、植被及干燥地物有一定的穿透性，可在阴雨天气和夜间持续地监测[2]。其数据处理流程图见图 1。

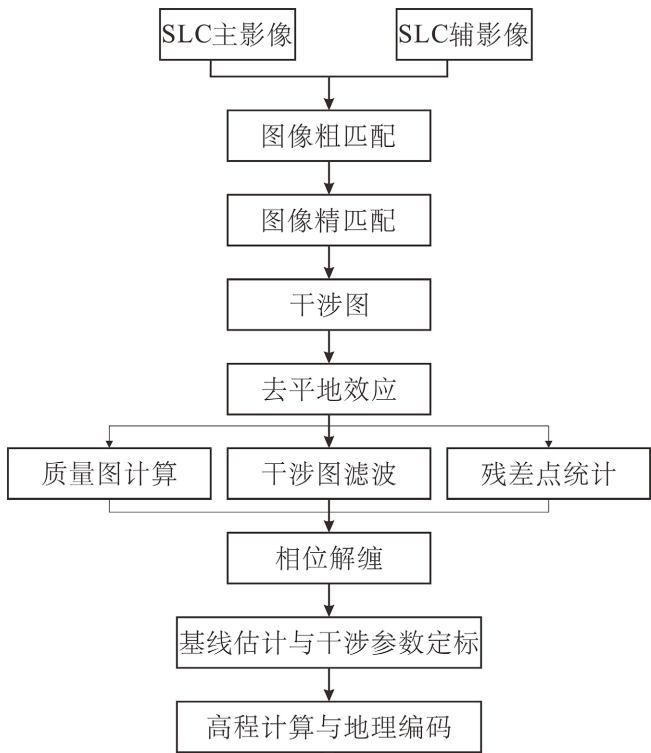


Figure 1. SAR processing flowchart
图 1. SAR 数据处理流程图

2.1. InSAR 技术

合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)通过干涉测量和雷达成像获取地表各物体高程信息。其基本原理是利用雷达向目标区发射微波，通过目标反射回波，得到区域成像的 SAR 复图像对，对其共轭相乘得出干涉图，依据其相位值得到两次成像中微波的路程差，计算出目标地区的地形、地貌以及表面的微小变化。

雷玲等(2012)提出运用永久散射体(PS-InSAR, Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar)技术，以一幅主图像为基准，与其他 SAR 图像分别进行差分干涉处理，并限定幅度和相位双重阈值选择 PS 点，分析其相位在时域空域的频谱特性，通过滤波处理提取形变部分，成功定位了伯克利山的滑坡区域，得到地形的形变速率[4]。敖萌等(2017)借鉴 InSAR 小基线集算法和 CR-InSAR 周期图算法，采用非线性 CR-InSAR 算法，对甲居滑坡进行了非线性 CR-InSAR 试验，通过与 GPS 监测形变结果一致性

的比较,表明该算法比原 CR-InSAR 算法获取的滑坡形变结果更为合理[5]。张路等(2018)以大渡河上游丹巴县为例,使用相干散射时序 InSAR 方法,从历史存档的 ALOS PALSAR 和 ENVISAT ASAR 数据集中成功识别出了 17 处持续变形中的不稳定坡体,通过与外部观测数据比对和实地调查核实验证了其探测结果的有效性[6]。邢明泽等(2024)利用小基线集时序 InSAR (SBAS-InSAR)技术对云南省宣威东北部地表进行形变监测,获取 2021 年 1 月至 2023 年 6 月的形变结果,分析选取的典型滑坡的形变特征,采集 GNSS 监测数据与 InSAR 形变监测进行对比验证,分析 InSAR 形变对降雨的响应,表明 SBAS-InSAR 技术能有效监测西南山区的典型滑坡[7]。张蕙等(2024)以伊宁县为研究对象使用 ALOS-2 数据和 Sentinel-A 数据,采用 InSAR 技术获取研究区信息,识别潜在滑坡 418 处,对典型地质灾害区域滑坡识别结果进行了野外验证,分析两种时序 InSAR 技术的优缺点,构建了伊宁县滑坡 InSAR 早期识别方法[8]。杨佳艺等(2025)采用时序 InSAR 技术对云南兰坪县车邑坪滑坡进行形变监测研究,获取了该滑坡多维度的形变特征。结果表明,车邑坪滑坡前缘和中部形变速率较大。同时,车邑坪滑坡先是从前缘开始发生变形,随时间推移向滑坡体的中部和后缘发展,具有滑移式滑坡变形的特征[9]。刘晓杰等(2025)提出了基于 InSAR 技术的地震区活动滑坡自动化识别与动态形变监测框架。采用升轨与降轨 Sentinel-1 影像,反演获得 InSAR 相位梯度速率、年平均形变速率及时间序列,建立了深度学习滑坡自动化识别方法[10]。

国际上 Maurya 等(2025)提出了一种使用 MT-InSAR 衍生的位移时间序列和 ML 算法识别最脆弱区(MVZ)的方法。使用 SAR 数据集在 Balia Nala 和 Kotropi 和 Joshimath 进行验证。B 表明随机森林(RF)模型的性能优于支持向量机(SVM)模型,准确率达到 93.12%,使用 RF 模型,根据各自区域内的分类加速 MP 有效识别印度三个研究地点的最脆弱区域(MVZ) [11]。

InSAR 技术具有高空间分辨率和时间分辨率,在滑坡的变形监测方面具有其它常规遥感技术无可比拟的优势。但该技术也有一些问题亟待解决,例如 SAR 影像对的失相干问题,虽然众多学者已经提出了一些解决方案,但该问题尚未形成公认成熟有效的方法。仍需要时间去不断完善和解决。

2.2. 极化 SAR

极化 SAR 测量是每一像元的全散射矩阵,可合成包括线性极化、圆极化及椭圆极化在内的多种极化散射信息。因此与常规的 SAR 相比,在雷达目标探测、识别、纹理特征的提取、目标方向、物质对称性和组分方面研究具有很大的改善[12]。

王兴玲等(2014)从多极化机载 SAR 数据的特征选择和信息提取等角度,评估不同极化模式组合对滑坡信息提取精度的影响;并基于 Bayes 决策理论,提出了多极化 SAR 图像分类的特征选择方法,提取精度均在 90%以上[13]。李强等(2019)以九寨沟地震震区为实验区,采用全极化 SAR 卫星影像数据,深入分析滑坡体和其他地物类型散射特征,融合极化特征、纹理特征和地形特征等多维特征信息,结合高分二号影像获取的训练样本,构建基于 BP 神经网络的全极化 SAR 数据滑坡自动识别模型,实现滑坡体的自动快速识别[14]。胡灿程等(2023)利用全极化 SAR 影像的强度信息和散射信息,提出了一种基于极化似然比检验(polarimetric likelihood ratio test, PoLLRT)原理的极化 SAR 滑坡形变估算方法。该方法不仅考虑了同种极化方式间的互相关信息,而且考虑了不同极化方式间的互相关信息,从而提高了 POT 在采用极化 SAR 影像进行形变估算的精度和稳健性[15]。胡军等(2023)采用干涉和极化 SAR 分析三峡库区奉节县和巫山县滑坡分布。使用双极化强度图合成的纹理图和伪彩色图进行随机森林(RF)分类,然后使用相干和斜率图运行 K-Means 算法(KMA)表现出 94%的分类准确率,尤其是在崎岖不平的区域。结合土地利用变化,采用 GIS 空间分析对滑坡空间分布进行分析,发现滑坡发生率与变化后类型呈显著相关,相关系数为 0.7 [16]。

国际上 Ohki 等(2020)评估了多频合成孔径雷达(SARs)在森林覆盖的山区检测滑坡区域的极化灵敏度。

在日本奈良的户川村测试场测试了 L 波段机载和 X 波段星载 SAR, 即 L 波段的机载极化干涉 SAR (Pi-SAR-L2)、Terra SAR X 和 Cosmo Skymed。发现三个参数: HH 和 VV 的相干性、极化熵和 HH/HV 的功率比对于检测从森林到滑坡的土地覆盖变化非常有效, 尤其是对于 L 波段 SAR。结果表明, X 波段 SAR 对滑坡区域不太敏感[17]。

2.3. 多源 SAR

近年来, 随着卫星遥感技术的不断发展, 以 InSAR 和极化 SAR 等等 SAR 技术为一体的系统融合了多种手段的优点, 为监测滑坡提供了精确的方法。多源 SAR 数据的应用, 可以补充单一数据源在覆盖范围、时间间隔和分辨率上的不足, 加强监测的连续性、可靠性和准确性。

于海明等(2024)综合运用 SBAS-InSAR 和 D-InSAR 技术, 及 C 波段的 Sentinel-1A 数据和 L 波段 ALOS-2 数据, 验证监测结果的可靠性, SBAS-InSAR 技术可以监测滑坡形变演化特征, D-InSAR 技术可以监测滑坡形变体特征, 二者结合进行监测可以更全面地反映滑坡时空演化态势, 受研究区低矮植被和冬季积雪的影响, 通过 C 波段 Sentinel-1A 影像获取的滑坡体监测点较少, 使用 L 波段 ALOS-2 数据则可以很好的解决影像失相干的问题[18]。左小清等(2024)基于多源 SAR 数据和多种 InSAR 技术, 构建了一套适用于云南省复杂山地高效、可靠的地表形变监测与滑坡灾害隐患识别方法, 凸显了多源 SAR 数据在提高形变监测精度和扩大覆盖范围上的显著优势[19]。

因为 SAR 影像有噪声、重叠等情况, 而且其存在也可能存在一定的阴影区域, 所以不同类型影像的融合能够有效提升滑坡的辨识度[20]。但是, 使用 SAR 和其他影像融合来加强滑坡分类的研究还有很好的上升空间, 限制其发展的主要困难是合成孔径雷达与其他影像的成像机理略有差距, 这让 SAR 影像与其他影像的配准极其不易[21]。因此, 在 SAR 影像和其他影像和数据的融合策略及方法上都需要有更深入的研究。

3. 光学遥感在滑坡地质灾害中的应用

3.1. 光学卫星遥感

光学遥感通过光学手段实现对遥远信息的感知[22]。将光学遥感设备搭载在卫星平台上, 通过远距离、大角度、全视野来实现信息的观测。其包括两个的组成部分: 一部分是光学载荷, 如可见光、红外线、微波等遥感仪器; 另一部分是卫星平台, 能携带载荷并保障载荷安全、可靠地运行。

陆会燕等(2019)基于 ALOS PALSAR-1 和 Sentinel-1A 雷达卫星数据, 利用短基线差分干涉测量技术进行滑坡地表形变定量探测, 探测出 7 处较显著形变的滑坡隐患[23]。涂宽等(2021)对隆德县展开滑坡隐患早期识别与探测研究, 根据高分辨率光学遥感影像能有效反映滑坡隐患形态发育特征, 获取了滑坡隐患的位置、范围、威胁对象等单体形态特征和承灾体特征。结合 DEM 影像, 能有效排除由地形、大气及人类工程活动等多种因素造成的 InSAR 伪形变对滑坡隐患识别造成的影响[24]。Jianming 等(2023)联合使用时间序列干涉合成孔径雷达(InSAR)和光学像素偏移跟踪(POT)来评估重新激活的滑坡在破坏后阶段的变形特征和时空演变的潜力。使用两个 Sentinel-1 数据集进行时间序列 InSAR 处理, 检索沿视线方向的表面变形, 显示最大变形速率高达 190 mm/年。使用 Planet Scope 卫星获取的 11 张光学图像在 POT 处理中也检测到了较大的水平位移, 增加了约 24 m [25]。谭晴等(2025)基于白格滑坡提出一种自适应偏移估计方法, 即通过干扰因素的掩膜找出互相关窗口中的干扰因素像素, 并在计算时排除这些像素, 从而提高了偏移估计的准确性和可靠性[26]。

国际上 Peters 等(2024)提出 ML-LaDeCORsat (使用结合光学和雷达卫星图像的基于机器学习的同震滑坡检测)方法, 该方法将免费提供的 Sentinel-1、Palsar-2 和 Sentinel-2 图像数据集成到 Google Earth Engine

(GEE)中。该方法包括稳健且可重复的训练和验证策略,并允许在五个分类器(CART、随机森林、GTB、SVM 和 Naive Bayes)之间进行选择。使用来自四个不同地震案例研究的滑坡,证明了该方法在同震滑坡识别和定位方面优于现有解决方案,提供了 87%~92%的基于 GTB 的检测准确率[27]。

光学遥感因其特殊的观测位置,搭载在卫星平台上,能够从空间的视角实现对地观测,有得天独厚的特点,主要表现为:观测范围广;获取信息速度快、周期短;获取信息量大。同时,光学卫星遥感不受地域、环境的限制,甚至特定的谱段可以不受天气的限制,但其难以识别地表光谱特征变化不明显的滑坡。常见的光学遥感分类见图 2。

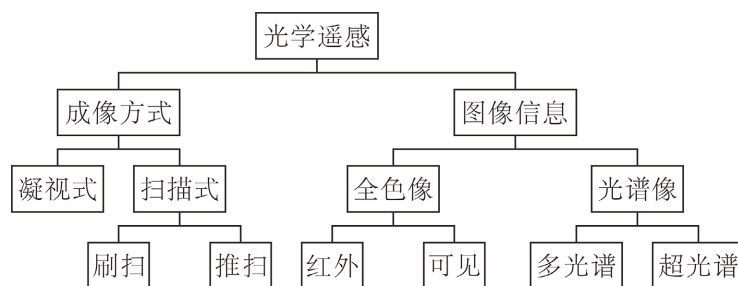


Figure 2. Optical remote sensing classification map
图 2. 光学遥感分类图

3.2. 航空摄影遥感

航空遥感是用无人机等航空平台搭载传感器的一种非接触式遥感技术,近年来被广泛应用于大面积地形测绘和局域滑坡地质灾害详查。

曾帅等(2023)采用无人机航空遥感和 InSAR 监测相结合的多源遥感技术手段,对各洛寨村滑坡的复活变形特征以及复活机理进行研究分析。结果表明利用无人机航空遥感数据能够有效识别古滑坡表部不同规模的拉张裂缝、剪切裂缝、陡坎、次级滑坡等变形特征,依据变形特征发育时间、规模以及所分布区域,能够判断古滑坡是否处于局部或整体复活状态[28]。

国际上 Lucieer 等(2014)利用无人机拍摄了 Tasmania 东南部的影像,从多视角无人机摄影中获得塔斯马尼亚东南部滑坡的三维模型,通过与地面控制点进行检验,其水平精度为 7 cm,垂直精度为 6 cm [29]。Hölbling 等(2016)提出了一种通过分析不同日期航空摄影来识别山体滑坡易发“热点”及其时空变化的方法,以新西兰北岛东南部帕希阿图阿镇附近为例,使用基于对象的图像分析(OBIA)从半自动检测到的滑坡分布中识别滑坡热点,并与手动绘制的滑坡热点对比,OBIA 结果的准确率在 46%到 61%之间 [30]。

因具有高时空分辨率、大比例尺、大范围、快速成图等优势,航空遥感逐渐成为现代空间数据获取中不可替代的一种技术手段,被广泛应用于诸多领域,成为卫星遥感、传统地面摄影的有效补充[31]。

4. 激光雷达在滑坡地质灾害中的应用

激光雷达(LiDAR light detection and ranging)技术是现代对地观测的最新技术之一,通过位置、距离、角度等观测数据直接获取三维坐标,其具有高时空分辨率、动态探测范围大、能够穿越部分遮挡、直接获取真实地表信息等特点,是快速获取高精度地形信息的全新手段[32][33]。其数据获取及数据处理流程见图 3。

沈永林等(2011)以海地地震诱发的滑坡体为研究对象,以高分辨率航空影像和机载 LiDAR 数据为数据源,利用 eCognition、ArcGIS 等为数据处理软件,采用面向对象分析方法,通过多尺度影像分割、特征选择及参数阈值设置、分类规则构建等关键步骤,实现了基于多源数据的地物分类及滑坡识别[34]。李

彩虹等(2021)通过采用机载 LiDAR 扫描获取德达古滑坡的地形数据, 利用克里金插值法对滑坡边界点和钻孔数据进行插值, 以此重构滑动面, 获得滑动面高程, 通过填挖方对滑坡体积进行计算, 得到德达古滑坡体积为 $1259 \times 104 \text{ m}^3$, 与野外测量法相比, 体积计算精度提升了 20.8% [35]。贺鹏等(2022)以四川东南部地区缓倾地层滑坡及其拉裂槽识别为主要应用目标, 通过对研究区机载 LiDAR 数据的获取和处理, 得到 HRDEM 数据及其派生的多种可视化产品, 利用缓倾地层滑坡综合遥感识别方法, 实现基于机载 LiDAR 数据的滑坡隐患识别标志构建、边界准确判识、拉裂槽位置识别及信息提取[36]。邓博等(2024)通过实验证实 LiDAR 技术能够提高海洋性季风气候下的植被茂密城市的地质灾害隐患识别与精细化风险评价准确率。基于 LiDAR 数据的地质灾害识别与制图为地质灾害危险性评价提供了全面的灾害数据库, 能够将原有样本数据库数量提升 330%, 覆盖范围也更加全面[37]。

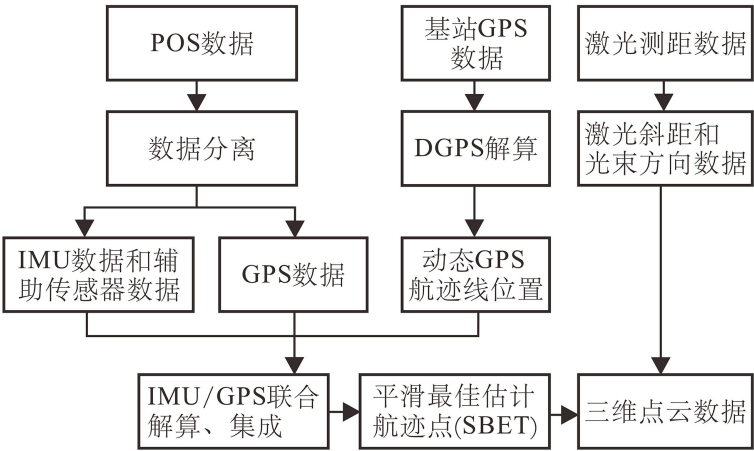


Figure 3. LiDAR data processing flowchart
图 3. 激光雷达数据处理流程图

激光雷达的优势是快速、直接并精确地探测到真实的地表及地面的高程信息, 是一种直接获取地面模型的手段。激光雷达技术虽可以对滑坡做到精细化识别, 但难以进行大区域滑坡的普查等。

5. 多源遥感技术在滑坡地质灾害中的应用

与单源遥感影像数据相比, 多源遥感影像数据所提供的信息具有冗余性、互补性和合作性。多源遥感影像数据的冗余性表示他们对环境或目标的表示、描述或解译结果相同; 互补性是指信息来自不同的自由度且相互独立; 合作信息是不同传感器在观测和处理信息时对其它信息有依赖关系[38]。多源遥感数据融合通过整合不同传感器或平台的遥感数据(如光学、雷达、LiDAR 等), 提升对地表信息的全面感知能力, 其主要融合方法见表 2。

Table 2. Multi-source remote sensing data fusion methods
表 2. 多源遥感数据融合方法

融合层级	方法	特点	适用场景
像素级融合	加权平均法、IHS 变换、主成分分析(PCA)	直接操作原始像素, 保留细节, 但易受传感器差异影响	提高影像空间分辨率如 (Landsat 与 MODIS 融合)
特征级融合	边缘提取、纹理分析、神经网络特征融合	减少数据冗余, 增强目标识别能力, 依赖特征选择算法	滑坡边界提取、地质构造识别
决策级融合	贝叶斯网络、模糊逻辑、投票机制	综合多源分析结果, 鲁棒性强, 需先验知识支撑	灾害风险评估、多模型联合预警

基于像素的融合方法：直接将不同遥感数据源的像素值进行融合处理。其优点为简单直观，能保留原始图像的大部分信息。缺点为容易受到噪声的影响，且在融合过程中可能会丢失一些图像的细节和特征。彭志忠等(2023)将光学遥感、合成孔径雷达(InSAR)、机载 LiDAR 等技术融合应用于滑坡调查，对研究区典型滑坡进行分类，引入 Maxent 模型进行滑坡易发性评价研究[39]。

基于特征的融合方法：先提取不同遥感图像的特征，如边缘、纹理、形状等，然后将这些特征进行融合。这种方法可以更好地保留图像的关键特征信息。优点为能突出图像的重要特征，提高目标的识别率。缺点是特征提取过程较为复杂，需要根据不同的应用场景选择合适的特征提取算法。王家宝等(2023)基于干涉合成孔径雷达(InSAR)、无人机(UAV)和地基干涉合成孔径雷达(GB-InSAR)3 种技术，以云南省红石岩滑坡为例，提出了一种新的边坡稳定性分析方法。将小基线子集干涉 SAR(SBAS-InSAR)技术与研究区域整体分析相结合，识别出大变形的感兴趣区域(ROIs)和起始目标点，并利用雷达变形数据(RDD)和数字表面模型(DSM)数据的融合结果拟合 ROIs 的变形面场。结果表明，该方法能够准确识别变形区域，尤其是在变形趋势快速变化的情况下[40]。王猛等(2023)基于高精度无人机航空影像和机载 LiDAR 数据，采用三维立体+时间的四维分析方法，通过高位滑坡历史变形特征和滑动过程动态分析，预测了荣山镇岩窝村滑坡未来的 3 种滑动模式[41]。

基于决策的融合方法：各个遥感数据源先独立进行处理和分析，得到各自的决策结果，然后将这些决策结果进行融合。优点是可以充分利用各个数据源的优势，提高决策的准确性和可靠性。缺点是对各个数据源的处理结果要求较高，且融合规则的制定需要考虑多种因素。卫石印等(2024)基于 HJ-2A CCD4 光学遥感影像和 ASTER GDEM 地形数据进行处理形成多源异构数据，利用决策树方法提取 2022 年和 2023 年同时期滑坡易发生区域，并通过面积变化和空间叠加分析对提取结果进行了时间和空间变化分析，结果表明能够较好地识别滑坡易发生区域，总体精度为 90%，Kappa 系数为 0.802 [42]。张利军等(2024)基于 InSAR 形变速率数据、多光谱影像和 DEM 数据对湖南常澧地区滑坡进行识别提取，圈定了 16 处滑坡隐患高风险区，识别出数处植被覆盖区滑坡隐患和 4 处裸露区与人工切坡相关的高隐蔽性滑坡隐患[43]。

多种遥感手段的综合利用将明显提高滑坡隐患的识别效率和准确性，这也就意味着多源遥感数据融合作为未来地质灾害早期遥感调查的发展方向具有巨大潜力。

6. 未来遥感技术在滑坡监测的发展趋势

未来遥感技术在滑坡监测与预警中的发展方向大致可以分为以下几个方面。

多源数据融合与协同分析：综合利用遥感数据，实现优势互补，提高滑坡监测的准确性和可靠性。例如，光学遥感可提供高分辨率的地表图像，SAR 能捕捉地表微小形变，LiDAR 则擅长获取高精度的地形数据。

空-天-地协同观测体系：建立由卫星、飞机、无人机和地面监测设备组成的协同观测网络，实现对滑坡的全方位、多层次监测。比如，卫星进行大面积的宏观监测，飞机和无人机在重点区域进行详查，地面设备进行实时验证和补充观测。

实时监测与快速响应：借助先进的传感器技术和数据传输技术，实现对滑坡的实时监测，一旦发现异常情况，能够迅速发出预警并采取相应的应对措施，提高防灾减灾的效率。

人工智能与大数据分析：利用人工智能算法，如深度学习、机器学习等，对遥感数据分析处理，自动识别滑坡的特征、位置和发展趋势，减少人工解译的工作量和误差。同时，通过大数据分析挖掘数据背后的规律，为滑坡预测和防治提供科学依据。

高精度形变监测技术：发展更高精度的形变监测技术，如差分干涉合成孔径雷达(D-InSAR)、永久散射体干涉测量(PS-InSAR)等，提前发现潜在的滑坡隐患。

跨学科合作：加强遥感技术与地质学、水文学、气象学、计算机科学等多学科的交叉合作，深入研究滑坡的形成机制和演化规律，提高对滑坡灾害的综合认识和防控能力。

7. 结论

本文介绍了 SAR 技术、光学遥感技术、激光雷达技术及将三者融合的多源遥感技术在滑坡地质灾害调查和监测中的应用实例，并对其进行了梳理和概括，阐述其在滑坡地质灾害调查与监测中的优势和存在的不足及发展动向。结果表明遥感技术基本适合各种类型的滑坡地质灾害的调查监测研究，能提高滑坡探测、监测和预测的准确性，还能为滑坡防治提供科学依据和技术支持。

伴随着遥感技术的进步与发展，不同类型的遥感传感器也随着搭载平台的迭代而不断升级，遥感方面的理论与科学依据也日益成熟，对于滑坡发生前和发生后的监测与防护也不断完善，多手段融合的遥感技术将会是未来滑坡防治不可或缺的途径。

参考文献

- [1] 潘懋, 李铁峰. 灾害地质学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [2] 邵芸, 张茗, 谢酬. 地质灾害遥感综合监测现状与展望[J]. 地质与资源, 2022, 31(3): 381-394.
- [3] 杨佳旺, 钱建平, 龙思远, 等. 遥感技术在中国地质灾害中的应用[J]. 防灾减灾学报, 2022, 38(4): 17-25.
- [4] 雷玲, 周荫清, 李景文, 等. PS-InSAR 技术在伯克利山滑坡监测中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(9): 1224-1226.
- [5] 敖萌, 张勤, 赵超英, 等. 改进的 CR-InSAR 技术用于四川甲居滑坡形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(3): 377-383.
- [6] 张路, 廖明生, 董杰, 等. 基于时间序列 InSAR 分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2039-2049.
- [7] 邢明泽, 左小清, 张荐铭, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的西南山区滑坡稳定性监测[J]. 测绘通报, 2024(2): 63-68.
- [8] 张蕙, 张娅娣, 师芸. 基于 InSAR 技术的伊宁县滑坡早期识别[J]. 中国矿业, 2024, 33(10): 131-142.
- [9] 杨佳艺, 杨成生, 魏云杰, 等. 基于时间序列 InSAR 技术的云南车邑坪滑坡活动监测及影响因素分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2025, 45(1): 13-21.
- [10] 刘晓杰, 赵超英, 李滨, 等. 基于 InSAR 技术的甘肃积石山震区活动滑坡识别与动态形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(2): 297-312.
- [11] Maurya, V.K., Meghanadh, D., Dwivedi, R., Martha, T.R. and Roy, P. (2025) A Novel Approach for Most Vulnerable Zone Identification Using MT-InSAR and Machine Learning: A Case Study from Lesser Himalayan Region. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1007/s12524-024-02103-w>
- [12] 郭华东, 李新武, 王长林, 等. 极化干涉雷达遥感机制及作用[J]. 遥感学报, 2002, 6(6): 401-405.
- [13] 王兴玲, 胡德勇, 唐宏, 等. 基于 Bayes 决策的机载全极化 SAR 图像滑坡信息提取[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(2): 121-127.
- [14] 李强, 张景发. 高分三号卫星全极化 SAR 影像九寨沟地震滑坡普查[J]. 遥感学报, 2019, 23(5): 883-891.
- [15] 胡灿程, 汪长城, 沈鹏. 一种引入极化似然比检验的极化 SAR 滑坡形变监测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 1943-1950.
- [16] Hu, J., Yu, Y., Gui, R., Zheng, W. and Guo, A. (2023) Spatial Distribution Analysis of Landslide Deformations and Land-Use Changes in the Three Gorges Reservoir Area by Using Interferometric and Polarimetric Sar. *Remote Sensing*, 15, Article 2302. <https://doi.org/10.3390/rs15092302>
- [17] Ohki, M., Abe, T., Tadono, T. and Shimada, M. (2020) Landslide Detection in Mountainous Forest Areas Using Polarimetry and Interferometric Coherence. *Earth, Planets and Space*, 72, Article No. 67. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01191-5>
- [18] 于海明, 张熠斌, 方向辉, 等. 综合 InSAR 技术和多源 SAR 数据在滑坡变形监测中的应用——以吉林治新村滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 155-162.
- [19] 左小清, 张荐铭, 李勇发, 等. 典型山区 InSAR 地表形变监测与滑坡灾害识别[J]. 昆明理工大学学报(自然科学

- 版), 2024, 49(4): 89-104.
- [20] Schmitt, M. and Zhu, X.X. (2016) Data Fusion and Remote Sensing: An Ever-Growing Relationship. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, **4**, 6-23. <https://doi.org/10.1109/mgrs.2016.2561021>
 - [21] Bai, Y., Sun, G., Li, Y., Ma, P., Li, G. and Zhang, Y. (2021) Comprehensively Analyzing Optical and Polarimetric SAR Features for Land-Use/Land-Cover Classification and Urban Vegetation Extraction in Highly-Dense Urban Area. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **103**, Article ID: 102496. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102496>
 - [22] 刘敏时, 刘英, 赵峰. 智能光学遥感微纳卫星系统设计方法[M]. 北京: 人民邮电出版社: 2021: 165.
 - [23] 陆会燕, 李为乐, 许强, 等. 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), 2019, 44(9): 1342-1354.
 - [24] 涂宽, 王文龙, 谌华, 等. 联合升降轨 InSAR 与高分辨率光学遥感的滑坡隐患早期识别——以宁夏隆德为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(6): 72-81.
 - [25] Kuang, J., Ng, A.H., Ge, L., Metternicht, G.I. and Clark, S.R. (2023) Joint Use of Optical and Radar Remote Sensing Data for Characterizing the 2020 Aniangzhai Landslide Post-Failure Displacement. *Remote Sensing*, **15**, Article 369. <https://doi.org/10.3390/rs15020369>
 - [26] 谭晴, 吴希文, 王华, 等. 基于光学遥感自适应偏移追踪技术的滑坡监测[J]. 广东工业大学学报, 2025, 42(1): 107-113.
 - [27] Peters, S., Liu, J., Keppel, G., Wendleder, A. and Xu, P. (2024) Detecting Coseismic Landslides in GEE Using Machine Learning Algorithms on Combined Optical and Radar Imagery. *Remote Sensing*, **16**, Article 1722. <https://doi.org/10.3390/rs16101722>
 - [28] 曾帅, 马志刚, 赵聪, 等. 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, 2023, 37(4): 994-1003.
 - [29] Lucieer, A., Jong, S.M.d. and Turner, D. (2013) Mapping Landslide Displacements Using Structure from Motion (SfM) and Image Correlation of Multi-Temporal UAV Photography. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, **38**, 97-116. <https://doi.org/10.1177/0309133313515293>
 - [30] Hölbling, D., Betts, H., Spiekermann, R. and Phillips, C. (2016) Identifying Spatio-Temporal Landslide Hotspots on North Island, New Zealand, by Analyzing Historical and Recent Aerial Photography. *Geosciences*, **6**, Article 48. <https://doi.org/10.3390/geosciences6040048>
 - [31] 许强, 郭晨, 董秀军. 地质灾害航空遥感技术应用现状及展望[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 2020-2033.
 - [32] Glenn, N.F., Streutker, D.R., Chadwick, D.J., Thackray, G.D. and Dorsch, S.J. (2006) Analysis of Lidar-Derived Topographic Information for Characterizing and Differentiating Landslide Morphology and Activity. *Geomorphology*, **73**, 131-148. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.006>
 - [33] Schulz, W.H. (2007) Landslide Susceptibility Revealed by LIDAR Imagery and Historical Records, Seattle, Washington. *Engineering Geology*, **89**, 67-87. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.019>
 - [34] 沈永林, 李晓静, 吴立新. 基于航空影像和 LiDAR 数据的海地地震滑坡识别研究[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(1): 16-20, 115.
 - [35] 李彩虹, 郭长宝, 张广泽, 等. 基于激光雷达(LiDAR)的地形与钻探滑面重构滑坡体积计算方法——以四川省巴塘县德达古滑坡为例[J]. 地质通报, 2021, 40(12): 2015-2023.
 - [36] 贺鹏, 颜瑜严, 文艳, 等. 机载 LiDAR 技术在缓倾地层滑坡及其拉裂槽识别中的应用[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 307-316.
 - [37] 邓博, 张会, 柏君, 等. 利用机载 LiDAR 的深圳市斜坡类地质灾害危险性评价[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(8): 1377-1391.
 - [38] 贾永红, 李德仁, 孙家柄. 多源遥感影像数据融合[J]. 遥感技术与应用, 2000, 15(1): 41-44.
 - [39] 彭志忠, 袁飞云, 肖锋, 等. 多源遥感数据融合调查的复杂山区滑坡易发性评价方法研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2023, 34(1): 1-7.
 - [40] Wang, J., Lei, T., Liu, W., Chen, Y., Yue, J. and Liu, B. (2022) Prediction Analysis of Landslide Displacement Trajectory Based on the Gradient Descent Method with Multisource Remote Sensing Observations. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **14**, 143-175. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2158375>
 - [41] 王猛, 何德伟, 贾志宏, 等. 基于多源遥感数据的高位滑坡特征分析——以广元市利州区柴山镇岩窝村滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(6): 57-68.
 - [42] 卫石印, 李忠涵, 张启慧, 等. 基于多源遥感数据的滑坡易发区域识别——以山东省沂源县为例[J]. 山东国土资

源, 2024, 40(10): 60-65.

- [43] 张利军, 贺思睿, 张建东, 等. 多源遥感技术支持下的滑坡地灾隐患识别——以常澧地区为例[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(2): 173-187.