

# 三峡库区滑坡 灾害识别与工程实践

SANXIA KUQU HUAPU ZAIHAI SHIBIE YU GONGCHENG SHIJIAN

贾建红 毛成文 贺金明 编著

定价：18.00元



中国地质大学出版社  
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

# 三峡库区滑坡灾害识别与工程实践

SANXIA KUQU HUAPU ZAIHAI SHIBIE YU GONGCHENG SHIJIAN

贾建红 毛成文 贺金明 编著



中国地质大学出版社  
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

三峡库区滑坡灾害识别与工程实践/贾建红,毛成文,贺金明著.—武汉:中国地质大学出版社,2017.10

ISBN 978-7-5625-4086-1

I. ①三…

II. ①贾…②毛…③贺…

III. ①三峡水利工程-滑坡-预防

IV. ①P642.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 219493 号

三峡库区滑坡灾害识别与工程实践

贾建红 毛成文 贺金明 编著

责任编辑:彭钰会 周旭 策划编辑:易帆 张健

责任校对:徐蕾蕾

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路388号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://cugp.cug.edu.cn>

开本:787毫米×1092毫米 1/16

字数:263千字 印张:10.25

版次:2017年10月第1版

印次:2017年10月第1次印刷

印刷:武汉华东印务有限公司

ISBN 978-7-5625-4086-1

定价:58.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

---

# 前 言

---

滑坡指的是斜坡上的土体或岩体,受河流冲刷、地下水活动、雨水浸泡、地震及人工切坡等因素影响,在重力作用下,沿着一定的软弱面或者软弱带,整体或分散向下滑动的自然现象。滑坡地质灾害具有群发性、多发性、突发性的特点。按危险程度排序,滑坡已经成为仅次于地震的第二大地质灾害,严重威胁着人民群众的生命财产安全。

三峡库区地处我国地势的第二阶梯东缘,两岸地形复杂,高差悬殊,山高坡陡,河谷深切,库区沿岸地质地貌条件复杂,处于亚热带气候区,雨量充沛,且多暴雨,故滑坡、崩塌及泥石流时有发生。三峡库区地质环境极其脆弱,是我国地质灾害的多发地区。据不完全统计,各种类型、大小地质灾害点达 2 万余处。三峡库区滑坡地质灾害发生后,滑坡体入江后极易形成堰塞湖,堵塞河道;同时滑坡体滑入长江后形成的涌浪会对长江航运以及沿岸居民或建筑物造成更严重的危害,例如 2007 年 5 月 10 日,湖北省巴东县清太坪镇发生大面积滑坡,致使清江支流被截断,清江线交通完全中断,大小船舶停航,造成直接经济损失达 4600 余万元。2003 年 7 月 13 日凌晨,长江支流青干河左岸发生了千将坪大型滑坡,滑坡规模约 2400 万  $\text{m}^3$ ,滑坡体上 80 余栋民房以及 4 家工业厂房化为废墟,滑坡前缘形成堰塞湖,经济损失高达 8000 多万元,造成重大的社会不良影响。在这一背景条件下,为保证库区人民生命财产安全,更加有效预测预警三峡库区滑坡地质灾害的发生,总结提出合理的三峡库区滑坡灾害识别方法具有重要的工程实际应用价值。

在实际工程开展过程中,正确进行滑坡识别并非易事,常出现滑坡识别错误的案例发生。三峡库区地质灾害防治排查过程中就出现过大量误判工程案例,有将崩(残)坡积误判成滑坡的,有将冲洪坡积当滑坡的,更有将滑坡当成稳定基岩岩体的。正确识别滑坡灾害一直是地质灾害勘查及防治工作中的重点内容。

本书在综合调研的基础上介绍了目前滑坡常用识别方法研究及应用现状,针对三峡库区的滑坡地质灾害,以白衣庵滑坡、陈家沟滑坡、鹤峰乡滑坡、桂花井滑坡、向家淌滑坡、新铺滑坡为例,分析了三峡库区滑坡形成条件及成因机制,归纳总结了库区滑坡变形特征及发育模式,提出了三峡库区滑坡灾害识别方法,制定了预防和治理滑坡的对策和措施。

本书可为水电工程建设中库区滑坡识别、稳定性预测及防治措施提供一定的借鉴与启示。可供从事地质灾害研究和水电工程建设科研、勘查、设计、施工单位的技术人员学习参考,也可供相关专业高年级本科生和研究生阅读使用。

由于作者水平有限,加之写作时间仓促,书中难免存在不妥或错误之处,恳请读者批评指正。

作 者

2017年8月

---

# 目 录

---

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 第一章 滑坡识别方法及研究现状 ..... | (1)  |
| 第一节 滑坡识别的重要性 .....    | (1)  |
| 第二节 滑坡识别的方法 .....     | (2)  |
| 一、滑坡的野外鉴别 .....       | (2)  |
| 二、InSAR 技术 .....      | (3)  |
| 三、PS - InSAR 技术 ..... | (3)  |
| 四、StaMPS MTI 技术 ..... | (4)  |
| 五、面向对象的影像分析方法 .....   | (4)  |
| 六、基于像元的影像分析方法 .....   | (4)  |
| 七、LiDAR 技术 .....      | (5)  |
| 第三节 滑坡识别的研究现状 .....   | (5)  |
| 一、基于像元的滑坡识别研究现状 ..... | (5)  |
| 二、面向对象分析的研究现状 .....   | (6)  |
| 三、InSAR 技术的研究现状 ..... | (6)  |
| 四、LiDAR 技术研究现状 .....  | (7)  |
| 第四节 滑坡识别方法的应用现状 ..... | (7)  |
| 一、现代滑坡识别方法 .....      | (7)  |
| 二、古老滑坡识别方法 .....      | (8)  |
| 第五节 三峡库区滑坡研究意义 .....  | (8)  |
| 第二章 白衣庵滑坡 .....       | (10) |
| 第一节 工程概况 .....        | (10) |
| 一、环境地质条件 .....        | (11) |
| 二、滑坡基本特征 .....        | (18) |

|                          |             |
|--------------------------|-------------|
| 第二节 滑坡形成机制 .....         | (26)        |
| 一、白衣庵古滑坡地质历史背景 .....     | (26)        |
| 二、滑坡形成条件 .....           | (27)        |
| 三、滑坡形成过程与机制分析 .....      | (29)        |
| 第三节 滑坡稳定性评价 .....        | (30)        |
| 一、滑坡的稳定性计算 .....         | (30)        |
| 二、三峡水库回水岸坡稳定性评价 .....    | (38)        |
| 三、计算结果及岸坡稳定性评价 .....     | (40)        |
| 四、滑坡危害性评价与发展趋势预测 .....   | (41)        |
| <b>第三章 陈家沟滑坡 .....</b>   | <b>(42)</b> |
| 第一节 工程概况 .....           | (42)        |
| 一、环境地质条件 .....           | (43)        |
| 二、滑坡基本特征 .....           | (50)        |
| 第二节 滑坡影响因素及成因分析 .....    | (54)        |
| 一、滑坡影响因素 .....           | (54)        |
| 二、滑坡成因分析 .....           | (55)        |
| 第三节 滑坡稳定性分析与评价 .....     | (56)        |
| 一、滑坡稳定性计算 .....          | (56)        |
| 二、滑坡体稳定性评价 .....         | (60)        |
| <b>第四章 鹤峰乡场镇滑坡 .....</b> | <b>(63)</b> |
| 第一节 工程概况 .....           | (63)        |
| 一、自然条件及区域地质条件 .....      | (64)        |
| 二、滑坡基本特征 .....           | (67)        |
| 第二节 滑坡影响因素及形成机制 .....    | (72)        |
| 一、滑坡影响因素 .....           | (72)        |
| 二、滑坡形成机制 .....           | (73)        |
| 第三节 滑坡稳定性评价 .....        | (74)        |
| 一、滑坡稳定性分析 .....          | (74)        |
| 二、稳定性计算 .....            | (74)        |
| 第四节 滑坡环境影响 .....         | (79)        |
| 一、库岸再造预测 .....           | (79)        |

|                     |            |
|---------------------|------------|
| 二、滑坡环境影响综合评价        | 80         |
| 第五节 滑坡防治工程方案建议及效益评估 | 80         |
| 一、滑坡防治工程方案建议        | 80         |
| 二、滑坡防治工程方案效益评估      | 82         |
| <b>第五章 桂花井滑坡</b>    | <b>84</b>  |
| 第一节 工程概况            | 84         |
| 一、自然条件及基本地质条件       | 85         |
| 二、滑坡基本特征            | 91         |
| 第二节 滑坡变形现状、影响因素及其机制 | 94         |
| 一、滑坡变形现状            | 94         |
| 二、滑坡形成条件与机制分析       | 97         |
| 三、滑坡变形影响因素分析        | 98         |
| 第三节 滑坡稳定性分析与评价      | 100        |
| 一、滑坡稳定性计算           | 100        |
| 二、计算参数的选定           | 101        |
| 三、计算结果              | 103        |
| 四、滑坡稳定性综合评价         | 104        |
| 第四节 滑坡防治方案初步建议      | 104        |
| 一、防治工程方案建议          | 104        |
| 二、防治原则与目的           | 105        |
| 三、防治措施建议            | 106        |
| 四、滑体(带)土物理力学参数建议    | 106        |
| 五、滑床岩土体物理力学参数建议     | 107        |
| <b>第六章 向家淌滑坡</b>    | <b>108</b> |
| 第一节 工程概况            | 108        |
| 一、自然条件及地质环境条件       | 108        |
| 二、滑坡基本特征            | 112        |
| 第二节 滑坡影响因素及形成机制分析   | 117        |
| 一、滑坡影响因素            | 117        |
| 二、形成机制分析            | 119        |
| 第三节 滑坡稳定性评价及推力计算    | 120        |



|                       |              |
|-----------------------|--------------|
| 一、稳定性计算方法及公式 .....    | (120)        |
| 二、计算模型与计算方案选取 .....   | (121)        |
| 三、滑坡稳定性计算结果 .....     | (122)        |
| 第四节 地质灾害体防治方案建议 ..... | (124)        |
| 一、防治工程设计参数建议 .....    | (124)        |
| 二、防治工程方案建议 .....      | (124)        |
| 三、环境影响综合评价 .....      | (126)        |
| 四、地质灾害防治效益评估 .....    | (126)        |
| <b>第七章 新铺滑坡 .....</b> | <b>(128)</b> |
| 第一节 工程概况 .....        | (128)        |
| 一、自然条件及地质环境条件 .....   | (128)        |
| 二、新铺滑坡特征 .....        | (134)        |
| 第二节 滑坡影响因素及形成机制 ..... | (139)        |
| 一、滑坡影响因素 .....        | (139)        |
| 二、形成机制分析 .....        | (140)        |
| 第三节 滑坡稳定性评价 .....     | (141)        |
| 一、稳定性宏观地质分析 .....     | (141)        |
| 二、稳定性计算 .....         | (141)        |
| 三、稳定性计算结果 .....       | (144)        |
| 第四节 滑坡防治方案建议 .....    | (148)        |
| 一、防治原则 .....          | (148)        |
| 二、主要设计依据 .....        | (148)        |
| 三、防治工程设计参数 .....      | (148)        |
| 四、防治工程方案 .....        | (149)        |
| 五、防治工程投资估算 .....      | (149)        |
| 第五节 环境影响综合评价 .....    | (151)        |
| 一、主要地质环境问题 .....      | (151)        |
| 二、工程施工对环境的影响 .....    | (151)        |
| <b>参考文献 .....</b>     | <b>(153)</b> |

# 第一章 滑坡识别方法及研究现状

## 第一节 滑坡识别的重要性

由于经济的发展,人类对自然资源无节制地开采和对生态环境的肆意破坏,导致我们赖以生存的地球环境持续恶化,加之现阶段全球范围的地震断裂带进入较活跃时期,各种自然灾害(尤其是滑坡灾害)频繁发生。

滑坡是指斜坡上的土体或岩体,受河流冲刷、地下水活动、雨水浸泡、地震及人工切坡等因素影响,在重力作用下,沿着一定的软弱面或软弱带,整体或分散向下滑动的自然现象。滑坡地质灾害具有群发性、多发性、突发性的特点。按危险程度排序,滑坡已经成为仅次于地震的第二大地质灾害,严重威胁着人民群众的生命财产安全。

在美国,滑坡每年会带来约 10~20 亿美元的经济损失和 25~50 人死亡;意大利在 1279—1999 年期间的 840 次滑坡中的死亡人数超过 1 万人;中国是一个滑坡多发国家,1949—2011 年期间,由滑坡体引起的死亡人数保守估计超过 25 000 人,平均每年超过 400 人,年均经济损失约为 5000 万美元。从中国地质环境监测院每年发布的《全国地质灾害通报》的内容来看,2013 年全国发生地质灾害共计 15 403 起,其中滑坡 9 849 起、崩塌 3 313 起、泥石流 1 541 起、地面塌陷 371 起、地裂缝 301 起、地面沉降 28 起,分别占地质灾害总数的 63.9%、21.5%、10.0%、2.4%、2.0%、0.2%,共造成 481 人死亡、188 人失踪、264 人受伤,直接经济损失 102 亿元,为近几年之最。

鉴于滑坡灾害的严峻形势及其带来的巨大损失,有效地调查、监测滑坡分布与活动状况,进行滑坡预测与评估,为滑坡灾害防治提供科学依据,尽可能地减少灾害损失,是受灾地区的迫切需求,也是科学研究工作者肩负的使命。

滑坡可由强降雨和过度挖掘开采而引发,还可能作为地震的次生灾害而带来巨大的破坏,例如 2008 年汶川地震引发该区域地质灾害 2 000 多起,在地震后的地质灾害调查与排查基础上,2010 年 8 月又进行了再次排查,新增地质灾害 631 处,其中滑坡灾害 260 处。据报道仅在 2013 年 7 月该区域因暴雨引发的滑坡、泥石流灾害就超过 700 起,造成 10 多万人受灾。因此,提高滑坡识别的研究水平,不但可以防灾减灾,还能为救灾及灾后重建提供充足的灾害信息数据保障,减少滑坡灾害造成的生命和财产损失。滑坡识别对地质灾害预测预警以及防灾减灾具有重要的理论和实际意义。

## 第二节 滑坡识别的方法

为了避免滑坡大面积发生造成难以估量的损失,需要采取有效手段对潜在的或正在发生的滑坡体进行监测,制定相应的滑坡预报。一般来说,滑坡预报包括3个要素,即滑坡发生的时间、空间和规模,由此可以采取必要的防治措施,避免或减少滑坡灾害可能造成的损失。在滑坡预报3个要素中,空间要素是最重要的,即根据滑坡的形态及其特征,确定滑坡可能发生的位置,即滑坡的识别。传统的滑坡识别以野外调查为主,这种方法工作量大、成本高,且很多滑坡处于偏远地区,人员很难到达,尤其是在滑坡的临发阶段,人员到场可能存在危险。

近几十年来,遥感等新技术在系统科学理论、空间科学、计算机技术及数理模型方法等理论的有利支持下迅速发展。童立强等(2013)指出,基于光学影像的滑坡识别是利用光学影像目视解译或数字图像处理方法,将滑坡从所处的环境背景中分离出来,其原理是滑坡与其背景地质体之间存在色调、形状、阴影、纹理及图像的差异。目前卫星遥感技术可提供覆盖上百平方千米的影像数据而不需要人员进入现场,对大面积山体滑坡监测具有无可比拟的优势。随着遥感技术的发展,滑坡遥感研究也经历了从目视解译到数字图像处理、模式识别的重大转变。

### 一、滑坡的野外鉴别

滑坡的发育过程是受其内在地质条件和各种外界因素所控制的,滑动发生后会在地表留下各种滑坡构造形迹,因此可以根据地层岩性、地质构造、水文地质特征、地形地貌等对滑坡进行识别。

滑坡具有一定的地形地貌特征,例如在斜坡上常形成上陡中缓下陡的折线状地形,在山坡上部造成环谷地貌,所谓环谷即圈椅状或马蹄状地形。滑坡区周围地形较陡,中间有一个较平缓的核心台阶。

在进行滑坡野外调查时也可利用钻孔测井法查明易滑坡地层在研究区内的分布组合规律。在我国易滑坡地层的主要类型有:砂页岩和泥岩互层;煤系地层;灰岩、泥灰岩、页岩互层;板岩、千枚岩、云母片岩等变质岩系;各种黏土、黄土和类黄土地层;风化残积层以及各种成因的堆积层等。

地质构造条件控制了滑坡滑动面的空间位置和滑坡范围,滑坡构造与一般地质构造的主要区别如下:

(1)不同的滑坡构造出现的相互位置较固定。例如滑坡地堑出现在坡面较高的部位,而滑坡地层褶皱和滑坡舌逆掩现象则出现在坡脚附近。一般地质构造现象本身不受山坡部位高低的限制。

(2)滑坡构造成分的展布范围一般较小,而一般地质构造的展布范围往往较大。

(3)各种滑坡构造张裂缝中,往往充填有松散土石和岩屑角砾,这类充填物除多孔隙外无任何动力变质烘烤现象。而一般地质构造形成的破碎带中,充填物少有直观的孔隙,多具有动力变质现象以及糜棱化和角砾化现象。

(4)滑坡擦痕方向与主滑方向一致,仅存在于黏性软塑带中或基岩表层,痕槽深浅及方向随不同部位稍有变化。而断层擦痕与坡向或滑坡方向无关,且常深入基岩呈平行的多层状。痕槽深浅及方向较有规律性。

(5)滑坡地层褶皱的次级张性断裂都是开口的,折断处参差不齐,褶皱轴部的硬岩层保持不变的厚度。而一般地层褶皱的岩层往往有减薄或构造尖灭现象,折断处是圆顺的。

(6)滑坡床产状有起伏波折,其总体有下凹的趋势。而一般断层的产状较稳定。

滑坡滑动面处水文地质条件可能发生异常,因此可以通过水文地质条件来判断滑动面。通过采用物理测井,如地下水测井(盐液法)方法,来了解钻孔内地下水位的变化(即地下水流入钻孔或孔内水流往孔外的状况),从而推断可能成为滑动面的不连续面及作用于其上的孔隙压力。

## 二、InSAR 技术

合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)是指利用同一地区不同期次合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)数据中的相位信息进行干涉测量的技术,利用传感器的系统参数、姿态参数和轨道之间的几何关系等精确测量地表某一点的三维空间位置及其微小变化。

时间序列 SAR 影像分析的基本原理是选取长时间序列内相位和振幅都保持稳定的离散点,通过对 SAR 影像集的相位信息进行分析以获取长时间序列内地表的形变信息。由于时序 InSAR 技术研究的是在数年甚至更长时间内保持稳定的相干目标点(CT),这些 CT 点在受时空基线的影响较小,较好地克服了传统 D-InSAR 的时空去相干、大气相位延迟的影响,可以获取高精度的地表形变信息。实践证明,时序 InSAR 技术获取地表缓慢形变信息是有效的,其应用领域包括地表沉降、火山活动形变、断裂带监测等。

## 三、PS-InSAR 技术

PS-InSAR 技术是“永久散射体合成孔径雷达干涉测量”的多重嵌套缩写,即 Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar。其中 PS(永久散射体)是指对雷达波的后向散射较强,并且在时序上较稳定的各种地物目标,如建筑物与构筑物的顶角、桥梁、栏杆、裸露的岩石等目标。该技术是在传统 D-InSAR 技术的基础上发展起来的,是从长时间序列 SAR 影像中选取散射特性保持稳定的离散点作为 PS 点(如人工建筑、裸露岩石等),进行缓慢地表形变反演,但在山区稳定散射体较少,易造成形变信息的遗漏。

#### 四、StaMPS MTI 技术

StaMPS MTI(Multi - Temporal InSAR)技术是经典 StaMPS 技术的拓展,除了永久散射体(PS)外,还包括小基线(SBAS),及结合两者优点的多时相干涉(MTI)技术。与 PS-InSAR 技术相比,StaMPS MTI 更适合地形条件复杂的高山峡谷区,该方法基于空间相关性进行相位分析,且不需要建立先验形变模型,在保证形变监测精度的同时提高 CT 点密度,在断层、火山、滑坡等失相干严重的非城镇区也能取得较好的形变监测效果。通过对 SAR 影像进行 MTI 分析,一方面可以获取已知滑坡体的形变速率,进行滑坡活动状态和强度评价;另一方面通过对离散 CT 点进行分析,能快速识别潜在的滑坡区域,制定相应规则进行滑坡识别。该技术实施主要包括主影像选取、配准、干涉相位计算、差分干涉图生成、相干点选取、形变相位分离 6 个主要步骤。

#### 五、面向对象的影像分析方法

面向对象的影像分析是由英文 Object Based Image Analysis 直译过来的,它被该领域研究专家简称为 OBIA。此方法与基于像元方法的本质区别在于:影像分类的最小单元是影像分割生成的像元组合对象,而不再是单个的像元;影像分割对象是通过影像分割方法生成的,在影像分割过程中整合了像元的光谱信息与空间信息等,分割对象具有形状与光谱的同质性。

面向对象遥感影像分类的基本原理为:以遥感影像数据中像元包含的光谱、形状、纹理、邻域等信息属性特征为依据,通过分裂合并把具有相同或相近属性特征的像元分割成为一个影像多边形对象,然后结合地物分布属性特征以及影像中地物的展现形式来对影像分割对象属性特征进行选定,通过对选取的对象属性特征计算比较来开展以影像分割对象多边形为单元的分类。

面向对象遥感影像分类的流程为:首先,对经过遥感影像结合研究区域内地物类型及分布情况来确定影像的波段权重、异质性因子和分割尺度等分割标准,按照设定的分割标准进行影像的分割,得到相对同质的、同时满足目标信息提取或者进一步分类要求的影像分割对象;其次,从目标信息提取或者遥感影像分类的要求出发,对影像分割对象的属性特征进行选择,通过选取的属性特征建立分类体系,相关影像分割对象的属性特征如光谱、纹理、形状、邻域、阴影和空间分布等;最后,选取合适的分类算法,以计算的影像分割对象的属性特征为依据,实施影像对象的分类。

#### 六、基于像元的影像分析方法

此类方法是在对遥感影像中滑坡灾害进行识别的过程中,对遥感影像的分析以单个像元为基本单位开展的,主要是通过像元的光谱信息进行识别。基于像元的滑坡灾害识别方法,简言之,是依据遥感影像中滑坡灾害与其他地物的光谱特征差异,采用基于像元

的遥感影像分类方法,对滑坡灾害进行识别。基于像元的遥感影像分类方法,依据人在分类过程中的参与程度可分为非监督分类、监督分类和二者结合的混合分类。

(1)非监督分类(Unsupervised),也叫做点群分类或聚类分析。它通过对遥感影像搜索并定义相似光谱集合而实现。该方法是在多光谱特征空间中分割遥感影像数据并提取地面覆盖信息的一种有效方法。非监督分类是在多光谱特征空间中通过数字操作搜索像元光谱属性的自然群组的过程,这种聚类过程生成一幅由许多个光谱类组成的分类图。分析人员根据后验知识(根据事实获取)将光谱类划分或转换为感兴趣的专题信息类(如草地、建筑用地、农业用地等)。

(2)监督分类(Supervised),可形象地称为训练分类法。它是首先通过选择类别易于确定的像元作为分类样本,然后用分类样本来对其他未知类别像元进行类别确定;对训练区的分类样本像元确定好类别后,再识别其余未知类别的像元。在这种分类过程中,首先对每种地物类别在影像上选取一定数量满足要求的分类样本,然后计算分类样本的属性特征信息,最后通过分析待分类像元与所选取训练样本的属性特征,按照规则将像元分到与其最接近的样本类别,以此完成整幅图像的分类。常用的分类算法包括最小距离法、平行算法、最大似然法和 ECHO 算法等。

此外,混合分类即为综合采用非监督分类方法及监督分类方法对影像进行分析,在点群分类方法对影像预处理的基础上采用训练分类方法进行影像分析。

## 七、LiDAR 技术

激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR)技术分为机载和地面两大类,是一种主动式的现代对地观测技术。它通过激光测距和差分 GPS 等技术,直接得到带地表二维坐标的点云数据,具有常规测量方法和摄影测量技术无法取代的优势。时间、空间分辨率很高,探测范围广,具有一定的植被穿透能力,可以快速获取高精度的真实地表信息。

LiDAR 能够穿透一定的植被覆盖而获取纯地表信息,并且其数据采集方式相对于航片来说能够最大程度地减小地形切割带来的阴影影响;从 LiDAR 原始数据中能够生成垂直精度在 10cm 左右、横向精度为 1m 的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),其数据处理过程相对于星载干涉雷达而言也更为简单。因此,具备了提升(潜在)滑坡体识别精度的条件。

## 第三节 滑坡识别的研究现状

### 一、基于像元的滑坡识别研究现状

吴忠芳等(2008)将 RS 与 GIS 相结合对重庆武隆县山体滑坡进行识别,将历史滑坡分布图与滑坡影响因子进行叠加,建立滑坡与不同影响因子的回归方程,实现对滑坡的自

动识别。童立强等(2013)在遥感解译和地面调查的基础上,分析总结了巫山大清坎滑坡、武隆滑坡等典型滑坡的影像特征,提出了多尺度滑坡遥感解译标志。叶润青等(2007)以 Landsat-7 影像为例,对比了非监督分类、监督分类方法在归州老城滑坡中的分类效果,认为图像分类方法可去除与滑坡体无关的干扰信息,有利于对单体滑坡进行快速识别。Mondini 等(2011)在对比三种多元滑坡提取模型后,提出了一种新的基于几何变形技术(PCA 和 ICA)的综合分类模型(CM),在意大利南部西西里海岸降雨型滑坡识别的研究中,ROC 曲线统计量(AOC)高达 0.860。

## 二、面向对象分析的研究现状

面向对象分析(Object-Oriented Analysis, OOA)的滑坡识别方法可将滑坡的光谱、空间、形态特征与专家知识相结合,分析自然表面的多尺度特征,提高滑坡识别的精度。Barlow 等(2003)采用 OOA 方法对英国哥伦比亚海岸滑坡进行半自动化识别,首先根据光谱反射率进行多尺度分割,剔除植被覆盖区和坡度较缓的地区,并根据对象的光谱、形态和纹理特征制定滑坡提取规则,在滑坡识别中取得 75% 的总体精度。Martha 等(2010)采用 OOA 方法对喜马拉雅地区的曼代基罗河流域进行滑坡识别和分类,在没有进行任何后处理的情况下识别出 76.4% 的滑坡,分类精度达 69.1%。Holbling 等(2014)以 2.5m 分辨率的 SPOT-5 全色融合影像及 20m 分辨率的 DEM 为数据源进行滑坡识别研究,根据影像的光谱、空间、形态学特征实现多尺度分割,在较大的尺度下将滑坡识别出来,在此基础上以一个较小尺度对滑坡类型进行细分,在意大利东北部奥斯塔山谷地区 70km<sup>2</sup> 的范围内共识别出 3.77km<sup>2</sup> 的滑坡影响区。李松等(2010)利用福卫 2 号多光谱影像作为数据源,对比汶川震前、震后影像的差异,利用变化检测方法对图像纹理进行分析,识别出北川县境内的滑坡。陈莹(2011)通过多源遥感影像数据,对比灾前和灾后影像的不同,利用变化检测的方法对重庆武隆大型滑坡进行识别研究,并对影像变化检测中的分割阈值进行探讨。

## 三、InSAR 技术的研究现状

范青松等(2006)属于较早采用 InSAR 技术进行滑坡监测的国内学者之一,他们分析了 D-InSAR 技术在滑坡监测方面的优缺点,并指出 InSAR 与 GPS 技术相结合可提高滑坡监测的精度。程滔等(2008)以 ASAR 影像为数据源,对陕西子长地区两个单滑坡进行形变监测,结果显示,InSAR 技术提取的滑坡位移量与野外地质调查的结果相一致。廖明生等(2012)在三峡库区秭归县滑坡灾害调查中,对比了中分辨率 ASAR 影像和高分辨率 TerraSAR 影像的结果,证明了在外源 DEM 相同的情况下,低重返周期、高空间分辨率的 TerraSAR-X 影像干涉条纹更明显,能够发现更细微的滑坡形变。段建华等(2010)利用 ERS-1/2 二轨法对湖北郧阳县山滑坡体进行监测,测定结果与通过地学测量方法获取的结果相吻合。

Hilley 等(2004)是较早采用时序 InSAR 技术进行滑坡研究的学者,采用 PS 技术对美国旧金山东部滑坡进行了监测,并采用非线性相关分析方法对滑坡位移速率与降雨量进行分析,证明了滑坡速率在强降雨季节会有一定程度的增加。Wasowski 等(2014)介绍了永久散射体干涉技术(PSI)在甘肃舟曲滑坡运动监测中的应用,以 3m 分辨率的 COSMO/SkyMed(CSK)影像为数据源,采用 SPINUAPSI 技术,获得离散点形变结果,与野外测量结果较为一致。廖明生等(2012)以 2003—2009 年间 57 景 30m 分辨率的 ASAR 数据和 2008—2009 年间 22 景 3m 分辨率的 TerraSAR-X 影像为数据源,对三峡库区滑坡进行监测。结果表明,高分辨率的 TerraSAR-X 影像由于具有较短的波长及较高的时空分辨率,在地形复杂、大气状况多变的三峡库区可获取较高密度的 PS 点,用于滑坡的监测预警可获得更好的效果。雷玲等(2012)以 1992—2010 年间的 28 景 ERS 数据、35 景 Radarsat-2 数据、18 景 TerraSAR-X 数据为基础,采用 PS-InSAR 技术,获取了伯克利山滑坡的形变速率。

#### 四、LiDAR 技术研究现状

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。李显巨(2012)通过机载 LiDAR 形成了一套科学、有效的复杂地质背景区数据处理与分析方法,并选取三峡地区秭归段为研究区,以机载 LiDAR 数据为主要数据源,结合其他多源地学数据,开展了滑坡识别研究,为复杂地质背景区滑坡地质灾害识别和预测预警提供了新的技术支撑。

### 第四节 滑坡识别方法的应用现状

#### 一、现代滑坡识别方法

现代滑坡的主要特点是滑坡的各部分要素发育齐全,它往往可以具有各种滑坡要素。在野外鉴别现代滑坡,也就是识别各种滑坡要素的存在。当滑坡要素齐全或基本具备时,就可以判定滑坡的存在。在宏观上远眺,可以观察现代滑坡的边界。而在滑坡体上的相应位置,可以直接观察到不同的滑坡要素。

这些滑动形迹在滑坡体内的组合是有规律的,常可根据所有滑动形迹在空间的展布规律来确定现代滑坡的范围。现代滑坡的擦痕是新鲜的,在野外较易于识别。根据擦痕的方向和所处的部位,常可判断滑坡各部分的滑移方向和受力状态。

现代滑坡作为一种特殊的地形地貌,滑移体在滑动过程中会产生各种裂缝、台阶、褶皱、镜面擦痕等滑动形迹,因此也可利用钻孔测井法进行判别。实际工程应用中常结合钻



孔测井法的勘探结果,进行岩芯对比分析,从而辨认及判定滑坡的潜在滑动面。

上面已经提到,滑坡滑动面处水文地质条件可能发生异常,因此可以通过水文地质条件来判断滑动面。通过采用物理测井,如地下水测井(盐液法)方法,来了解钻孔内地下水位的变化,从而推断可能成为滑动面的不连续面及作用于其上的孔隙压力。

### 二、古老滑坡识别方法

古老滑坡往往受后期剥蚀夷平风化作用的改造,使滑坡要素短缺或变得模糊不清。古老滑坡的野外鉴别,应首先在宏观上远眺其与周围山坡的异常之处,然后进一步研究对比山坡地貌的发育过程,从而推断古老滑坡的存在。古老滑坡的野外鉴别特征如下。

(1)河流阶地的变位:滑坡使阶地的原始产状和特征遭到破坏,使阶地平台不再连续,使阶地前缘与河床的距离缩短,使阶地高程降低,与区域上相应阶地的高程产生差异性变位。

(2)坡面地形的菱形转折:正常坡面在纵断面上多呈浑圆状的凸形坡或凹形坡,而高陡滑坡壁的存在,将使斜坡纵断面上出现明显的菱形转折。

(3)河流凹岸中的局部凸出:河道水流对凹岸的强烈冲刷,常造成滑坡。滑坡体的前缘伸入河道,占据部分河床,形成河流凹岸中的局部凸出。在后期冲刷作用改造后仍残留有巨大的孤石于岸边,这是古老滑坡存在的一种标志。平面上山坡堆积物在阶地面上的明显凸出也是古老滑坡存在的标志。

(4)环谷状洼地:在正常的斜坡上出现低于周围原坡面的环谷状或簸箕状洼地地形。洼地内部起伏不平,甚至出现向坡内反倾的台地。洼地内部冲沟发育,方向紊乱。这些冲沟往往沿古老滑坡的裂缝发育。洼地两侧发育的冲沟往往呈双沟同源现象。

(5)基岩陡坡区域内的局部缓坡:在由基岩组成的陡坡地段,由于滑坡使地形坡度减缓,构成由松散碎石夹土组成的局部滑坡。

## 第五节 三峡库区滑坡研究意义

三峡库区长江干流河谷受地质构造、岩性等因素的控制,形成各种不同类型的河流地貌景观,以奉节白帝城为界,东西两段截然不同。东段河谷长 160km,绝大部分是以碳酸盐岩为主组成的中低山峡谷,两岸峭壁对峙,形成举世闻名的三峡;西段长约 440km,主要是低山丘陵宽谷地形,奉节至涪陵江面开阔,一般宽 400~1 000m,坡高 150~300m,河谷两岸阶地比较发育。涪陵至重庆间,长江干流横切多个平行岭谷,呈现出宽谷夹短小山谷的地貌形态。

受环境条件的影响,三峡库区滑坡具有数量多、密度高、规模大、危害严重等显著特点。据有关部门调查统计,三峡库区滑坡共 1 150 处,主要分布在万州至巫山地段。其中万州区 175 处,占总数的 15%;云阳 309 处,占总数的 27%;奉节 120 处,占总数的 10%;