

DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017.03.024

基于数字滑坡技术的三峡新滩滑坡研究*

王治华^① 贾伟洁^{①②}

(①中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

(②中国国土资源航空物探遥感中心 北京 100083)

摘要 以6.12新滩滑坡前后的航摄图像及数字地形为信息源,采用数字滑坡技术,以更广阔的时空视野,更准确的地理配准及更直观清晰的表达方式,从切层滑坡类型之一的角度,再次宏观分析6.12新滩滑坡活动特征,指出该滑坡是分段分区活动的,各区段的规模、活动方式、方向各不相同,且分区段多级驱动;基岩裂隙对滑坡有一定的控制作用,姜家坡—新滩斜坡滑坡活动将持续间断地发生,难以完全停止。基于数字滑坡技术早期识别该类滑坡的关键工作方法除了详细调查滑坡所处地质环境外,主要是监测斜坡活动,主要监测内容有:①主要滑坡物质来源的崩塌活动及其下堆积的变化,确定滑前崩塌堆积的预警(最大)面积;②监测各段各区块活动,特别是驱动区块的活动;③监测堆积坡上显示的基岩裂隙变化。由于斜坡的地质与地形条件,建议进行长期连续性的监测。

关键词 数字滑坡技术 6.12新滩滑坡 切层滑坡 姜家坡—新滩斜坡 分级分块活动

中图分类号:P642.22 **文献标识码**:A

STUDY ON XINTAN LANDSLIDE IN THREE GORGE BASED ON DIGITAL LANDSLIDE TECHNIQUE

WANG Zhihua^① JIA Weijie^{①②}

(①Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, China Academy of Sciences, Beijing 100101)

(②China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center, Beijing 100083)

Abstract This paper uses the aerial images before and after the 6.12 Xintan Landslide and digital terrain as the information source. It adopts digital landslide technique, and takes a broader view of space-time. It aims to have more accurate geographical registration and more intuitive and clear expression. From the angle of one of the typical layer landslide types, it analyzes the characteristics of the 6.12 Xintan Landslide activities again in macro view. It suggests that the landslide is a piecewise partition activity. In the meantime, the size of each section, the activity way and the direction of each part are different. The landslide is driven by partition period of multistage movement. It is found that bedrock fissure control the landslide activities to a certain extent. Landslide activity of Jiangjiapo-Xintan slope can happen continuously and is difficult to stop completely. In addition to detailed investigation of geological environment of Xintan Landslide, the key method of digital landslide technique for identify initial failure of this type of layer landslide is to monitor the Jiangjiapo-Xintan slope. The main monitoring contents should include the follow three work. (1) The collapse activities of the main landslide material source areas, the change of the

* 收稿日期: 2016-07-21; 收到修改稿日期: 2017-10-20.

基金项目: 创新研究群体—地理时空数据分析, 资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金(08R8B040YA)资助.

第一作者简介: 王治华(1942-), 女, 教授, 主要研究方向为滑坡遥感解译, 地质灾害研究. Email: 577027159@qq.com

collapse debris accumulation below, and acquiring the warning (maximum) area size of the accumulate debris before slip. (2) The activities of each section on each stage, especially the activities of driving section. (3) The change of bedrock fissure shown on the debris accumulation slope. Because the geological and topography environment of Jiangjiapo-Xintan slope, long-term and successive monitoring is strongly recommended.

Key words Digital landslide technique, 6.12 Xintan Landslide, Insequent layer landslide, Jiangjiapo-Xintan slope, Piecewise partition activity

0 引言

1985年6月12日新滩滑坡(以下简称为6.12新滩滑坡)发生后次日,笔者带领小组即赶到现场,在湖北省岩崩调查处同行的陪同下考察了滑坡全场及附近。经分析研究,形成了论文“秭归新滩大滑坡”发表在1986年的“自然科学年鉴”(王治华,1987)。

自1974年起西陵峡岩崩调查工作处(湖北省岩崩滑坡研究所前身)对广家崖—姜家坡—新滩斜坡进行每月一次,每次7~15天的密集监测状态(王治华,1987)。正是由于十余年的严密监测,以及对调查及监测数据的科学分析才在新滩滑坡发生前11个小时及时、准确地预报了新滩大滑坡的发生,使经济财产损失减到最小,滑坡区1371人得以安全转移,无一人伤亡,成为我国滑坡预测预报、抢险救灾工作的一个范例(王尚庆等,2008)。

自从新滩滑坡发生后,国内科技工作者进行了大量考察研究。先后主要有中国科学院地质所、山地灾害与环境研究所、原地矿部水文所等单位及水利部长江流域规划办公室参加考察,国外也先后有加拿大、美国、捷克、法国、日本、以色列、伊拉克、联合国及中国香港、中国台湾地区的地质专家去滑坡现场考察(王治华,1987)。

关于新滩滑坡国内已有近百篇论文发表,对滑坡的灾害灾情、活动历史、活动特征、成因等,以及监测预警情况进行了研究,如王尚庆等(2008)根据数年累积的监测数据蠕变曲线特征分析,将新滩滑坡发育过程分为初始蠕变→匀速蠕变→加速蠕变→急剧变形至最终破坏4个阶段。王承辉(1990)根据新滩滑坡的主要地质地貌特征,分析其变形方式、机理和成生联系,认为新滩滑坡变形的主要影响因素为西缘和北缘陡壁岩崩物对滑体上段的加荷、地下水导致的静水和动水压力、新构造运动和地应力的影响等。夏元友等(1996)在现场地质调查与综合分析基础上,进行竖井勘探和力学试验,从而对新滩

滑坡进行稳定性评价与滑动机理探讨,认为新滩滑坡为一沿基岩面黏土层滑动的整体式堆积层滑坡,水对滑移层黏土的软化作用是新滩滑坡1985年滑动的主要触发因素。殷坤龙等(2002)基于非连续变形分析基本原理,分析了新滩滑坡的工程地质特征和发展变化特征,并用非连续变形分析方法对该滑坡运动的全过程进行了数值模拟,模拟结果显示:中部的姜家坡先发生滑动,继而对上部的古滑体产生牵引作用,对下部古滑体产生推挤作用,导致新老崩积堆积区、毛家院和柳林地区的失稳,造成整体滑动。

以往国内工作虽见个别的力学分析及数字模拟文献(张明等,2010;高杨等,2016),但主要以地面考察、测绘监测辅以勘探工程,相对而言使用现代信息新技术进行研究的较少。在国外学者的滑坡研究中,意大利、荷兰、日本等国学者较为深入且使用了多种新技术。意大利帕多瓦大学Teza et al.(2008)设计的滑坡预警系统,该系统包含一个接收站和一个转换站,采用智能控制开关,融合了先进的网络和计算机技术,利用地音听器采集滑坡数据,通过数据采集程序监控滑坡,用网络照相机获取滑坡影像,保证了不同气候下的可信度,具有低成本,简单化,遥控性以及获取降水、流动高度、碎屑流等基础数据的优势。意大利Salciarini et al.(2006)通过多时相分析识别和有针对性的现场调查,通过航片提取碎屑流滑坡体,分析滑坡的演化倾向,以识别东翁布里亚河谷碎屑流滑坡诱发因子。荷兰Van Westen et al.(2000)以GIS技术作为滑坡诱发因素分析的基本工具,界定出3个比例尺的滑坡灾害制图:直接勘查数据制图、定量敏感度制图和大比例尺制图。在正确理解和模拟触发机制的前提下,以水文和斜坡稳定性等模型,使用影像等资料,综合多元数据统计、二元经验统计、概率论等方法,模拟预测滑坡并制图。通过GIS内外部环境的对比研究指出,发挥专家知识经验和GIS的双重优势能取得更佳效果。

经多年实践与探索,笔者于1999年提出“数字滑坡”概念。该概念使传统地质滑坡拓展为以数字

形式表达的,具有三维空间、多维时间信息的,由多元要素组成的“数字滑坡”,这就使根据遥感的光谱、时间、空间信息特征来认识滑坡地学特征及变化成为可能(王治华, 2012, 2016)。多年来,数字滑坡技术成功应用于我国大型水电站建设(王治华, 1995),山区交通线建设(王治华, 2003),区域开发环境治理、抗震减灾(王治华等, 2009)等滑坡灾害调查及千将坪(王治华等, 2005)、易贡(吕杰堂等, 2002)、天台乡(Wang, 2005)、岩门村(王治华等, 2009)等大规模个体滑坡调查研究。

本研究旨在前面工作的基础上,探索采用数字滑坡技术以更广阔的时空视野,更准确的地理配准及更直观清晰的表达方式,从切层滑坡的类型之一的角度,再次宏观分析 6.12 新滩滑坡发生的必然性,滑坡活动特征及规律。

1 6.12 新滩滑坡灾害

1985年6月12日凌晨3点52分至3点56分,在长江三峡之一的西陵峡上段兵书宝剑峡出口处的北岸,下距三峡大坝坝址 26km 的湖北省秭归县所属的广家崖—姜家坡—新滩斜坡,发生体积约 $3 \times 10^7 \text{m}^3$ 的大滑坡(以下简称为 6.12 新滩滑坡)。高速下滑的土石摧毁了位于岸边的新滩古镇(图 1)。毁坏镇上 481 户居民的房屋、市政设施及 780 多亩良田。

约 $2 \times 10^6 \text{m}^3$ 土石滑入长江,激起最高达 54m 的涌浪。汹涌的巨浪冲上对岸,将建在 92m 高程处的湖北省西陵峡岩崩调查工作处的两层楼浆砌块石仓库、发电房卷入江中。涌浪波及上、下游 42km 长的江段,击毁击沉 240 匹马力以下的机动船 13 艘,木船 64 条,夜宿船内的船民死 10 人,伤 8 人,失踪 2 人。

宽约 250m 的滑坡舌部向江中伸出 93m,使兵书宝剑峡出口处的过水断面缩小了 1/3,客货轮断航 56h。滑坡土石冲到南岸,该段航道普遍垫高,成为急流险滩。

6.12 新滩滑坡所造成的损失是巨大的,但由于原湖北省岩崩调查处及长江流域规划办公室等部门在滑坡区的勘察工作及长期观测工作的基础上进行了准确、及时的报警,当地政府撤离措施果断有力,使滑坡区各类人员 1371 人安全转移,无一人伤亡,成为我国滑坡预测预报、抢险救灾工作的一个范例(王尚庆等, 2008)。

2 6.12 新滩滑坡区域地质环境

2.1 构造与地层

新滩滑坡所在区域构造部位为华南板块的扬子陆块北缘的黄陵背斜西翼,西接秭归向斜。自燕山运动以来,三峡地区已全面隆起成为陆地,地壳大面积间歇性抬升,幅度达 1700~2000m。期间经鄂西期、山原期两次地壳相对稳定,至三峡期,地壳又强烈隆起,长江迅速下切,造成相对高差 1000 余米山高谷深的峡谷形态及 1~10 级河流阶地。广家崖—新滩镇斜坡就是此时形成的高陡边坡。该边坡位于北西向的仙女山断裂和北北东向的九湾溪断裂之间(图 1)。本区地震活动较微弱,附近于 1972 年 3 月



图 1 新滩滑坡位置及地质环境示意图

Fig. 1 Location and geological environment sketch map of Xintan landslide

13 日发生过 3.6 级地震。

本区主要地层由老至新(分布由东至西)有:奥陶系(O),灰岩;志留系(S),粉砂岩、钙质页岩、黏土页岩互层;泥盆系(D),厚层石英砂岩,下部紫红色页岩;石炭系(C),厚层粗粒结晶灰岩及白云质灰岩;二叠系(P),中厚层坚硬、次坚硬燧石灰岩硅质结核灰岩与泥灰岩互层,底部夹薄层泥岩、炭质页岩夹煤层。

研究区长江段 NWW-SEE 走向。受黄陵背斜产状控制,以上地层呈单斜倾向江上游且偏北岸,形成切层坡。岩层走向 $NE10^{\circ} \sim 30^{\circ}$,倾向北西,倾角 $25^{\circ} \sim 38^{\circ}$ 。岩层裂隙发育,按产状可分为 4 组(图 2):

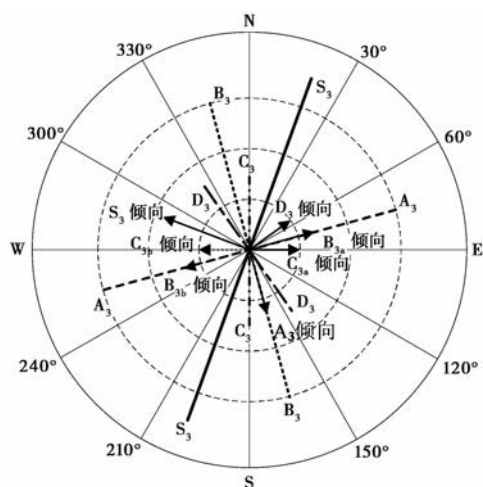


图 2 黄崖—新滩斜坡各软弱结构面的产状
Fig. 2 The occurrence of weak structural planes of Huangya-Xintan slope

A_3 走向 $65^{\circ} \sim 85^{\circ}$,倾向南东,倾角 $75^{\circ} \sim 80^{\circ}$;

B_3 走向 $340^{\circ} \sim 350^{\circ}$,倾向北东和南西,倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$;

C_3 走向南北,倾向东或西,倾角 $60^{\circ} \sim 85^{\circ}$;

D_3 走向 $320^{\circ} \sim 330^{\circ}$,倾向北东,倾角 $52^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 。

其中以 A、B 互为垂直的两组最为发育,往往成为长大裂隙,与层面一起将斜坡切成破裂块体。除以上陡倾裂隙外,在志留系页岩中还发现一些缓倾裂隙。

区内第四系地层有两套。河流冲积层:壤土夹钙质结核、半磨圆的砂砾石夹块碎石及钙质胶结砾石层(江北砾石层)可见厚度约为 $2 \sim 3m$,分布在斜坡前缘东侧及中侧残留不全的一~三级阶地上。

2.2 地形地貌

地形地貌特征受所处构造类型、部位和构造活动、地层岩性和产状及侵蚀方式等因素控制。本区地壳长期抬升,经受外力侵蚀与剥蚀作用。研究区的地貌可概括为两山夹一坡:西侧,由黄陵背斜西翼的泥盆系石英砂岩、石炭系和二叠系灰岩组成高 $1332 \sim 300m$,平均坡度约 60° 的黄崖山体(包括广家崖、黄崖和鲤鱼山),岩性坚硬,以溶蚀及崩塌作用为主,北西—南西弧形走向。黄崖山体岩脚在二叠系底部煤系及泥盆系顶部泥页岩夹层处形成狭带状缓坡。黄崖山体以东,本区中部,从约 $1000m$ 到 $60m$ (江边),由志留系粉砂岩、钙质页岩、黏土页岩互层构成,简称志留系缓坡。其抗风化能力弱,软硬不一,形成相对低缓,陡缓相间,临空长江的斜坡。可分为东西两部分:紧邻黄崖山体的志留系缓坡西部,由于接受了广家崖不断崩落的岩块土石,成为堆积坡。堆积坡的范围以黄崖山体崩塌物所达到的位置及后期活动到达的部位为边界。志留系缓坡东部为总体走向与黄崖山体相似的弧形斜坡,由表层风化的砂页岩基岩坡构成,笔架山坡下为 4 条基岩垄脊与沟谷相间,上部北西—南东走向,中下部近南北走向的规则基岩斜坡。

东侧, 992.50 (笔架山) $\sim 300m$ 高程为奥陶系灰岩构成的近南北走向,平均坡度约 30° 的较规则的顺层坡(图 3)。

2.3 气象水文

本区位于鄂西山地暴雨中心,多年平均降雨量约 $1100mm$,雨量集中在 $6 \sim 8$ 月,多暴雨。1935 年 7 月 3 日至 7 月 7 日 5d 总降雨量 $1281.8mm$,1975 年 8 月 9 日 12h 降雨量 $545mm$ 。

本区地下水主要为堆积物中的孔隙水,受大气降水及灰岩溶洞裂隙水补给。据钻孔资料表明,地下水只在砂页岩构成的坳槽内蓄积,以页岩或黏土为隔水层。斜坡中上部,地下水在粗大岩块孔隙中运行,有良好的径流排泄条件,一般无地下水蓄存;斜坡下部,地下水在坡脚、三游沟、新滩、柳林一带集中成泉群涌出,排泄入江。

3 方法技术

在滑后地面考察的基础上,采用数字滑坡技术获取 6.12 新滩滑坡前后的地面特征信息,进行时空

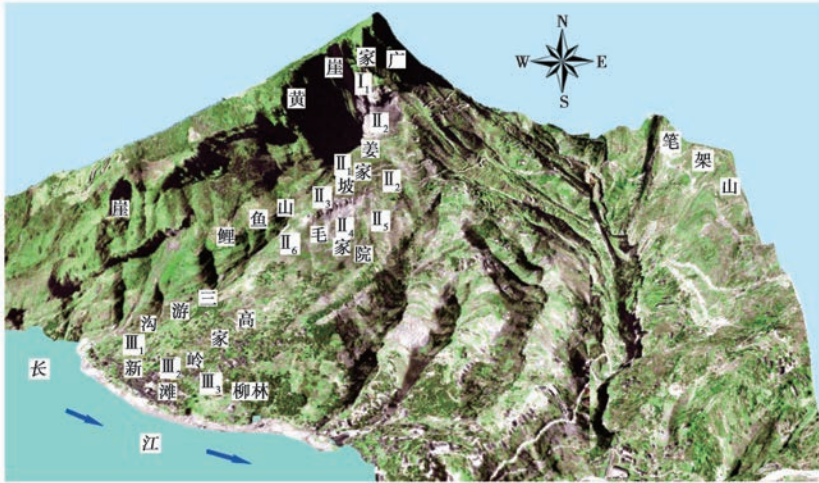


图3 黄崖-新滩-笔架山“两山夹一坡”地形示意图(6.12新滩滑坡前)

Fig. 3 The saddle between the two peaks" topographical sketch map of Huangya-Xintan-Bijiashan area (before 6.12 Xintan Landslide)

分析,了解该类切层滑坡活动特征,获取预警因素。

3.1 信息源

3.1.1 图像

以1984年12月滑前半年的航摄图像为滑前信息源。以1985年6月26航摄图像为滑后信息源,另外参考Google earth上2003年到2016年的滑后卫星影像。

3.1.2 地理控制

以1958年测绘制作的1:50000新滩幅纸质地形图为滑前地理控制信息源。

以地理空间数据云网站(www.gscloud.cn)的ASTER GDEM数字高程数据产品为滑后地理控制数据源。ASTER GDEM是日本经济产业省-METI和美国航天局-NASA于2009年6月30日共同发布的数据,其空间分辨率达到了1弧秒×1弧秒-约30m×30m。

3.2 图像处理

3.2.1 数字高程构建

3.2.1.1 滑前数字高程构建

步骤:①滑前地形图数字化,在新滩幅纸质地形图上划定包括6.12滑坡及其附近区域的研究区,以300dpi扫描该图成栅格形式的电子文档,确定坐标系及投影参数:北京1954坐标系,6度分带的高斯克吕格投影,19度带;②滑前地形几何校正,在ArcGIS软件平台,根据扫描地形图的坐标系和投影参数,利用GeoReferencing工具,先在整幅地形图四

周选择4个点,进行整幅粗校正,然后对滑坡及周边区域进行加密控制,均匀选择50个控制点。利用方里网交点进行配准,实现细致的地形校正,使用二次多项式进行投影变换,获得几何校正及地理配准的滑前数字地形;③滑前数字地形矢量化,在ArcMap软件平台对研究区地形图等高点进行矢量化,得到20m间隔滑前等高线矢量文件;④构建滑前数字高程模型,以矢量化的等高线文件,构建研究区域数字高程不规则三角网模型(TIN),然后利用ArcGIS 3D分析中TIN转RASTER功能构建滑前DEM(数字高程模型)。

3.2.1.2 滑后数字高程构建

获取滑后地形是难度大且花费昂贵的工作。如能通过网络获取,则事半功倍,但往往精度难以满足要求,须采取一些处理方法以部分弥补该缺陷。

本研究采用的滑后地形数据为ASTER GDEM,GeoTIFF格式,WGS-84坐标系,在全球范围内的平均垂直精度为20m,水平精度为30m,置信度为95%。该数据的山区垂直精度低于平原地区,且由于没有进行内陆水域掩蔽,导致绝大多数的内陆湖泊河流高程数据不稳定。所以对于未受滑坡影响地区,直接采用滑前1:5万地形高程数据。

步骤:①网上下载及坐标转换,下载一景研究区ASTER GDEM数据-ASTGTM2_N30E110,将坐标系系统转换为北京1954系坐标系,高斯克吕格投影,19度带投影参数。②裁剪,依照滑前研究区DEM范围裁剪滑后ASTER GDEM数据,使滑坡前后DEM位置范围相同。③校正,研究区滑前地形图

得到的 DEM 的高程范围是 60m 到 1240m; 同范围滑后 ASTER GDEM 的高程范围是 80m 到 1218m。参考滑后航摄影像和 Google earth 上 2003~2008 年卫星影像数据, 在 ArcGIS 中运用栅格计算器对 ASTER GDEM 中的高程值进行修正。由于研究区内的最大高程位于未受滑坡影响区域, 所以参照滑前的地形图高度, 将研究区滑后 GDEM 的最高值修改为 1240m。最终得到的滑后 DEM 数据高度范围为 60m 到 1240m。并在 ArcGIS 软件中提取滑后 20m 高程间隔等高线。

3.2.2 航摄图像处理

3.2.2.1 滑前影像

在 ENVI 软件平台, 以校正好的地形图为准图像, 对 1984 年滑前航摄影像进行几何校正, 使两者精确匹配, 得到校正后的滑前影像, 最大校正误差为 3 个像元。

3.2.2.2 滑后影像

在 ENVI 软件平台, 利用 1985 年 6 月 26 日航摄影像自带飞行参数(航空摄影机型号、数字、焦距、视场角、最大光圈、最大畸变差、框标数据、镜头介象力-线数/mm 等)及滑后 DEM, 投影方式同上, 均匀选择控制点对其进行正射校正获取校正后的滑后影像, 由于缺乏地面控制点数据, 最大校正误差为 5 个像元。

3.2.3 其他数字产品制作

对滑坡分析有用的地势、坡度、坡向等是 DEM 的衍生产品。在 ArcGIS 软件中, 利用滑前和滑后 DEM 数据, 生成滑前、滑后的地势图、坡度图和坡向

图等(图 4)。

3.3 建立解译基础

解译基础, 即用于识别滑坡, 能定位、定量获取滑坡及其发育环境信息的, 由多层图像、图形构成的组合。它将滑坡调查区所有的遥感与非遥感信息源整合成一个数字的、精确几何校正的, 相关信息在同一地理坐标控制下配准的数据集合。以此为基础可实现定位、定量的精细滑坡遥感解译及时空分析。解译基础由遥感、数字摄影测量、地理信息系统技术整合形成, 是“数字滑坡技术”最基础的部分。

3.3.1 滑前解译基础

滑前解译基础由在同一地理坐标控制下严格配准的滑前航摄图像、地形等高线, 坡度图和坡向图构成。

3.3.2 滑后解译基础

滑后解译基础由在同一地理坐标控制下严格配准的滑后航摄图像、地形等高线, 坡度图和坡向图构成。

为了尽可能地利用原有的分辨率, 解译所用滑坡前后的图像的地面分辨率统一采样为 0.42m。

4 6.12 新滩滑坡遥感解译

4.1 6.12 滑坡前的广家崖—姜家坡—新滩斜坡

根据滑前解译基础, 在 photoshop 和 ArcGIS 软件平台进行解译。

如图 3 所示, 西邻黄崖山体的广家崖—姜家

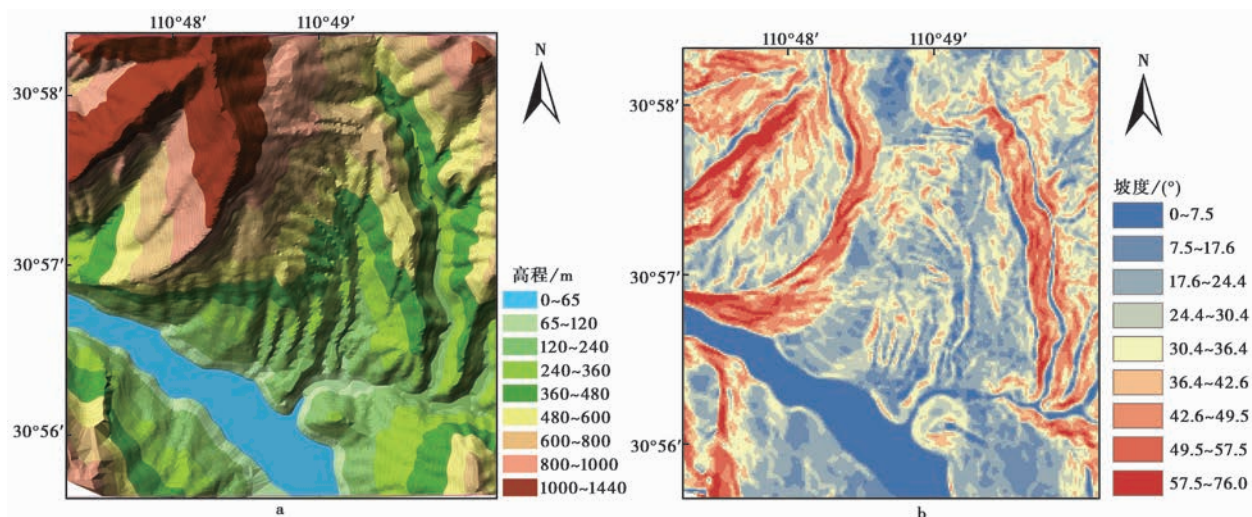


图 4 黄崖—新滩—笔架山两山夹一坡地形地势及坡度图

Fig. 4 Physiographic diagram (a) and slope gradient map (b) of “the saddle between the two peaks” topography of Huangya-Xintan-Bijiashan area

坡—新滩斜坡在滑前图像上表现为分段(级)分区(块)的堆积坡,大致分为3段11块。①上段—I,可分为广家崖陡崖 I_1 及其下的堆积锥 I_2 两部分。 I_1 ,为崩塌形成的不规则基岩陡崖,可见中部三面悬空,仅一面贴在陡壁上的危悬岩体; I_2 ,图像上表现为不同色彩亮度及不同颗粒大小,以岩块为主的堆积,反映该段不同规模,不同时间崩塌的堆积,并有不同部位不同阶段发生的后续垮塌活动。I段总面积约 0.12km^2 。②中段—II,图像解译结合现场验证,该段为老滑坡和古滑坡(以下统称老滑坡)堆积,可分为 $II_1\sim II_6$ 6个次级老滑坡块体。每个次级滑坡又都有各自的后缘陡坡、滑坡平台、前缘陡坎和滑动方向,总面积 0.28km^2 。③下段—III,江岸以上,II段以下为老滑坡及残坡积区,分为西— III_1 ,中— III_2 和东— III_3 等3部分。总投影面积约 0.29km^2 。

综上所述,在6.12新滩滑坡前,广家崖—姜家坡—新滩斜坡上部为崩塌堆积,中下部主要为滑坡堆积。

4.2 6.12 新滩滑坡特征解译

图5为6.12新滩滑坡高清图像,根据滑坡前、后解译基础,在photoshop和ArcGIS软件平台中对比解译,并进行时空分析。得到6.12新滩滑坡主要特征如下:①6.12滑坡是分段分区(块)活动的,②6.12新滩滑坡至少有3级驱动及2级剪出口,③基岩A、B裂隙对滑坡有一定控制作用,④滑坡活动

将持续间断地发生。

4.2.1 6.12 滑坡分段分区活动

遥感解译滑坡前后各段各区块的部位、高程、面积及滑坡前后变化(图3,图5;表1)。

(1) I段, I_1 区以崩塌活动为主,6.12滑坡后,残留基岩后壁,三面悬空的危悬岩体仍然存在; I_2 区原岩锥堆积已大部向南偏西崩滑,堆积物减少。

(2) II段,姜家坡至新滩以上以滑坡活动为主。

II_1 区,由滑坡前后平台基本形状未变及植被残留判译,原位于 $670\sim 580\text{m}$ 高程的姜家坡平台,现已滑至 $620\sim 500\text{m}$,整体滑移距离约 $50\sim 80\text{m}$,为姜—新堆积斜坡最大规模的深层滑移。自约 500m 高程起部分堆积冲入西侧三游沟,加入泥石流活动;另一部分则向南偏东冲泻。

II_2 区,滑坡前后基本未变,不在滑坡范围,其西界为6.12滑坡边界。受影响局部有碎屑堆积。

II_3 区,6.12滑坡时,大部分堆积物冲入三游沟加入泥石流活动。

II_4 区,滑前为老滑坡堆积,有滑塌后壁。6.12滑坡时前缘向南西滑了约 132m 。

II_5 区,6.12滑坡的边缘,仅有浅层滑动或扰动。

II_6 区,6.12滑坡时部分冲入三游沟加入泥石流,部分滑向江岸。

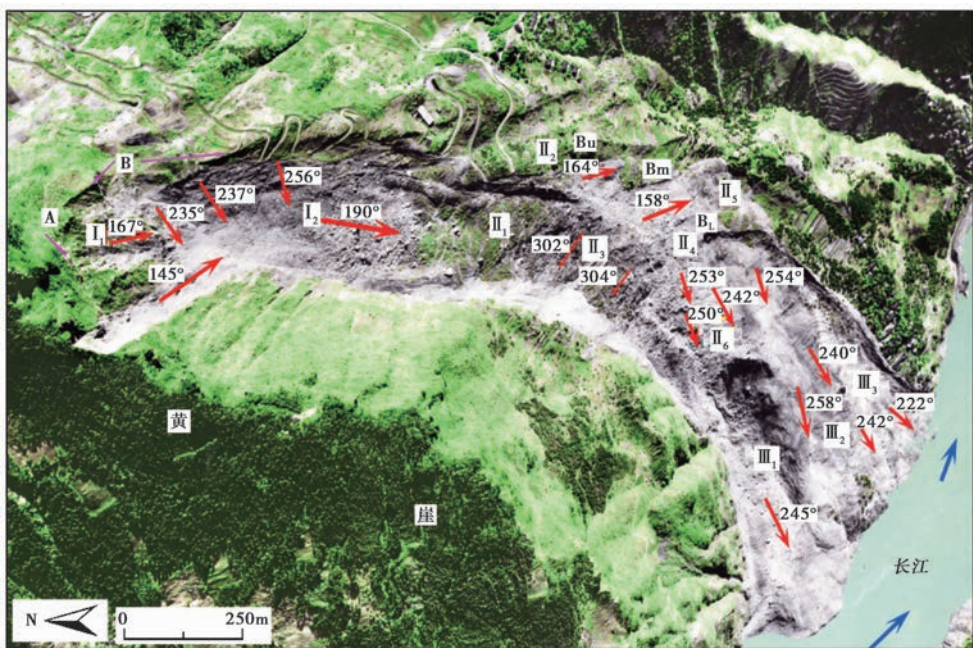


图5 滑后影像及各区段运动方向

Fig. 5 After landslide image and each segment movement direction

表 1 6.12 新滩滑坡前后解译表

Table 1 The interpretation table before and after Xintan landslide

地理位置及面积	滑坡前(1984年12月)		6.12 滑坡后		滑坡前后变化
	高程/m	平均坡度	高程/m	平均坡度	
广家崖危岩 I ₁ 43232.7m ²	1120~820	44.0°	1120~820	44.5°	高程范围基本未变。滑后沿 A、B 裂隙发生崩塌后的岩壁明显
广家崖下堆积岩锥, I ₂ 73039.1m ²	820~670	24.0°	840~630	21.9°	滑坡后岩锥上界抬高 20m, 下界下移 40m, 崩塌堆积范围扩大, 但堆积物明显减少
姜家坡与新滩之间斜坡 II ₁ , II ₁ 61817.4m ²	670~580	15.0°	620~500	10.0°~15.0°	II ₁ 整体下移 50~80m 高程, 平均坡度约 12.5° 计, 滑移距离约 230~370m。自约 500m 高程起分成两部分, 一部分向西偏南进入三游沟, 一部分向南偏东冲去
II ₂ 15765.3m ²	630~340	21.0°	630~340	21.0°	II ₂ 滑坡前后未动, 划出 6.12 滑坡范围, 西侧边界为滑坡边界, 局部表层有碎屑堆积
II ₃ 44954.8m ²	580~500~420	27.6°	580~470	23.9°	II ₃ 大部分土石向西偏北入三游沟
II ₄ 102931.1m ²	500~480 为滑塌后壁, 480~280 为滑坡堆积	后壁: 30.8°, 堆积: 21.7°	后壁: 500~450m 堆积: 450~220	后壁: 28.1° 堆积: 22.7°	滑后, 后壁呈弧形, 后缘位置大致未变, 滑体向南西运动, 堆积较滑前下降约 50m, 此处坡度以 22.2° 计, 滑前堆积滑动距离约 132m
II ₅ 29740.4m ²	620~340 长条形堆积	25.1°	620~340	24.5°	620~520m 表层有碎屑覆盖, 520m 以下至 340m 止, 有向南偏东的浅层滑动, 属滑坡东南缘扰动区
II ₆ 85866.8m ²	420~260	22.3°	340~220	27.1°	西部 280m 高程以上少量向西偏北滑向三游沟, 大部向西南冲滑
三游沟 III ₁ 112496.1m ²	260~60 三游沟	20.4°	260~60	18.9°	在约 260~300m 高程处, 滑体好像突然脱落, 部分向西冲去, 进入三游沟, 前端形成扇形堆积, 中部向南偏西推动前部滑前堆积
高家岭及新滩镇 III ₂ 143130.3m ²	260~60 农田、乡镇, 有一基岩岭脊	21.6°	120~220m 高程位置有基岩垄脊	10°~21.4°	中部有基岩垄脊出露滑后堆积的表面起伏, 前缘有残余植被、房屋和出露
东部高梗地 III ₃ 37273.5m ²	260~60 农田、乡镇	21.6°	260~60	10°~21.6°	滑坡东南边界, 有突起梗, 薄土石碎屑堆积覆盖, 有零星植被残留

6.12 滑坡堆积面积 691345.3 ≈ 0.69km² (减去非滑坡区的 II₂ ~ 15765.3m² 及广家崖崩塌壁面积 43232.7m²)

(3) III 段, II 段以下至江边, 原新滩镇及坡上。

III₁ 区, 泥石流活动, 形成伸入长江近 90 余米的泥石流扇形堆积。

III₂ 区, 原高家岭及新滩镇, 滑坡有受阻现象, 起伏大, 有基岩垄脊突出及残余植被、房屋出露。

III₃ 区, 滑坡活动东南缘, 东侧受阻成一突起梗, 薄土石覆盖, 有零星植被出露。

4.2.2 分区段多级驱动

看似整体活动的 6.12 新滩滑坡, 时空分析发现各区段块体活动是受多级驱动的。① I₂ 驱动 II₁, I₂ 接受了来自 I₁ 段各处的崩塌堆积, 当堆积坡度超过重力侵蚀的临界坡度(胡世雄等, 1999) 或下伏黏粒富集形成局部滑面时, I₂ 堆积发生向 190° 方位的大规模滑移(图 5), 加载和冲击 II₁ 区块, 激发 II₁ 区块活动, 导致其坡内的老滑动面贯通和恢复,

发生整体滑动。② II₁ 驱动 II₃、II₄, 整体高速深层滑动的 II₁ 约在 500~520m 高程附近剪出, 该处滑体形态和滑动方向改变, 滑体分为两部分, 一部分推动 II₃ 向西偏北高速滑入三溪沟; 另一部分向南偏东冲滑, 并推动其下的 II₄ 区块, 使其下降了约 50m, 前缘向南偏西滑了 132m。③ II₄ 驱动 II₆ 和 III, II₆ 和 III 区块是被动的, 在约 300m 高程, II₄ 区块部分剪出, 进入三游沟, 形成向长江冲击最远的扇形堆积 III₁; 部分推动其下的 II₆ 区块及高家岭、新滩向江岸滑移, 形成 III₂、III₃ 堆积。

综上所述, 本研究认为 6.12 滑坡在 670m、500m、300m 高程附近, 有 3 处较大规模的剪出口, 自这 3 处驱动下部堆积活动。

4.2.3 基岩裂隙对滑坡的控制作用

(1)控制发生崩塌部位(图5北部),在I段,北面、西面的广家崖和东面的志留系(580~780m高程范围)都发生了部分斜坡沿着A($75^\circ \sim 255^\circ/165^\circ \angle 78^\circ$)和B($165^\circ \sim 345^\circ/255^\circ$ 和 $75^\circ \angle 70^\circ$)裂隙走向破裂,并分别向各自倾向方向崩塌。

(2)控制部分滑块的方向和边界,如图5中部,II段至少3处显现与B走向相似的裂隙,分别称其为Bu、Bm和B_L。Bu和Bm成为6.12滑坡堆积的部分东侧边界。过Bu、Bm后,部分II₁向北西滑入三游沟,部分II₁快速向南偏东滑动。B_L则成为滑坡由南偏东转向西偏南运动的分界。

4.2.4 姜家坡—新滩斜坡滑坡活动将持续间断地发生,难以完全停止

由于黄崖山体斜坡结构、产状及受力特征,加之处于鄂西山地暴雨中心,所以其沿B、A陡倾裂隙被拉裂,沿层面破坏,向东向南崩塌的活动不会停止,直至黄崖山体夷平。由于姜家坡—新滩斜坡不断接受岩块、土石的加载和冲击作用,一段时间后,加载和冲击作用到一定程度,姜家坡—新滩斜坡便会发生滑坡活动。历史记载,公元100年~1542年新滩江段共发生过滑坡10次,其中间隔最长为649年(公元377年至公元1026年),最短间隔仅3年(公元1026年至公元1029年)(王治华,1987;王尚庆,2008)。在本区域地壳抬升,黄崖山体形成过程中,崩塌滑坡活动难以停止。

5 新滩滑坡的预警

由泥盆、石炭和二叠系组成的质坚性刚的黄崖切层高陡斜坡本身不易发生向长江临空面的大规模崩塌。由质软性柔的志留系组成的陡缓相间的姜家坡—新滩低缓切层斜坡,向斜坡内倾角达 32° ,也不易发生向长江临空面的滑坡。但是它俩相邻,黄崖山体长期间断地向姜家坡—新滩斜坡提供以块石为主的土石堆积和冲击力;姜家坡—新滩斜坡接收了最厚达110m(王尚庆,2008),多达数千万立方的堆积,又位于鄂西山地暴雨中心,地表及地下水活动促进黏粒在地下富集形成滑动面,所以姜家坡—新滩成为能被外力触发发生大规模灾害性滑坡的切层堆积坡。基于遥感技术早期识别,即预警该类滑坡的主要工作方法是:

(1)详细调查滑坡所处地质环境。包括区域构

造类型,所处构造部位,构造活动,斜坡结构、软弱结构面产状,与相邻斜坡的关系等。

(2)监测主要物质来源的崩塌活动及其下堆积的变化如图3、5所示,确定滑前崩塌堆积的预警(最大)面积,当崩塌堆积超过此面积时,即预警。由于滑坡前后的地形精度过低,本研究未能得出准确的预警面积。

(3)监测各段各区块活动,特别是驱动区块的活动。由3段11个区块组成的6.12新滩堆积层滑坡,运动方式复杂,多级驱动。监测驱动区块的活动尤为重要。

(4)监测堆积坡上显示的基岩裂隙变化。6.12新滩滑坡是堆积层滑坡,但是基岩的主要裂隙不但控制了基岩的崩塌活动,还影响了部分区块滑坡的范围和运动方向,所以监测坡体裂隙变化至关重要。

(5)长期监测。新滩滑坡的历史活动记载及本研究证明,姜家坡—新滩斜坡所处地质环境,必将会长期间断地发生崩塌滑坡,不会停止,务必长期监测。

参 考 文 献

- Gao Y, Li B, Wang G Z. 2016. Motion feature and numerical simulation analysis of Jiweishan Landslide with rapid and long run-out[J]. Journal of Engineering Geology, **24**(3): 425~434.
- Hu S X, Jin C X. 1999. Theoretical analysis and experimental study on the critical slope of erosion[J]. Acta Geographica Sinica, **54**(4): 347~356.
- Huang R Q, Xu Q, et al. 2008. Catastrophic landslides in China[M]. Beijing: Science Press: 243~260.
- Lü J T, Wang Z H, Zhou C H. 2002. A Tentative discussion on the monitoring of the Yigong landslide-blocced lake with satellite remote sensing technique[J]. Acta Geoscientia Sinica, **23**(4): 363~368.
- Salciarini D, Conversini P, Godt J W. 2006. Characteristics of debris flow events in eastern Umbria, central Italy[C]// Proceeding of IAEG 2006. London, UK: IAEG.
- Teza G, Pesci A, Genevois R, et al. 2008. Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanning and strain field computation[J]. Geomorphology, **97**: 424~437.
- Van Westen C J, Soeters R, Sijmons K. 2000. Digital geomorphological landslide hazard mapping of the Alpage area, Italy[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, **2**(1): 51~60.
- Wang C H. 1990. Approach to deformation and mechanism of Xintan Landslide[J]. Crustal Deformation and Earthquake, **10**(4): 25~33.
- Wang Z H, Xu Q D, Xu B. 2009a. High resolution remote sensing survey and mechanism analysis for Yanmen village landslide[J]. Chinese

- Journal of Rock Mechanics and Engineering, **28**(9): 1810~1818.
- Wang Z H, Xu Q D, Xu B, et al. 2009b. Airborne Remote Sensing Emergency Investigation in the "5·12" Wenchuan Strong Earthquake[J]. Science in China (Series E), **39**(7): 1304~1311.
- Wang Z H, Yang R H. 2005. The activity characteristics and movement style of Qianjiangping landslide in the three gorges reservoir region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, **16**(3): 5~11.
- Wang Z H. 1987. Catastrophic Xintan landslide on Zigui[M]// Natural Science Yearbook for 1986. Shanghai: Shanghai Translation Publishing House: 1. 68~1. 81.
- Wang Z H. 1995. The application of remote sensing technique to the hydro-electric construction of earlier stage in China[J]. Remote Sensing for Land & Resources, **7**(3): 1~8.
- Wang Z H. 2003. Landslides along the Qinghai-tibet railway and highway[J]. Geoscience, **17**(4): 355~362.
- Wang Z H. 2005. Applying "Digital Landslide Technique" to Survey Large Scale Tian-Tai-Xiang Landslide in Sichuan Province China [J]. IEEE Internal Geoscience and Remote Sensing Symposium, **3**: 1818~1821.
- Wang Z H. 2012. Remote sensing for landslide[M]. Beijing: Science Press.
- Wang Z H. 2016. Digital landslide technology and its typical application[J]. Geological Survey of China, **3**(3): 47~54.
- Xia Y Y, Zhu R G. 1996. Study on sliding mechanism and stability evaluation for Xintan landslide in Three Gorges of the Chanjiang River[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, **7**(3): 49~54.
- Yin K L, Jiang Q H, Wang Y. 2002. Numerical simulation on the movement process of Xintan landslide by DDA method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, **21**(7): 959~962.
- Zhang M, Yin Y P, Wu S R, et al. 2010. Development status and prospects of studies on kinematics of long runout rock avalanches[J]. Journal of Engineering Geology, **18**(6): 805~817.
- 高杨, 李滨, 王国章. 2016. 鸡尾山高速远程滑坡运动特征及数值模拟分析[J]. 工程地质学报, **24**(3): 425~434.
- 胡世雄, 靳长兴. 1999. 坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究[J]. 地理学报, **54**(4): 347~356.
- 黄润秋, 许强, 等. 2008. 中国典型灾害性滑坡[M]. 北京: 科学出版社: 243~260.
- 吕杰堂, 王治华, 周成虎. 2002. 西藏易贡滑坡堰塞湖的卫星遥感监测方法初探[J]. 地球学报, **23**(4): 363~368.
- 王承辉. 1990. 新滩滑坡变形方式与机理探讨[J]. 地壳形变与地震, **10**(4): 25~33.
- 王治华, 徐起德, 徐斌. 2009a. 岩门村滑坡高分辨率遥感调查与机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, **28**(9): 1810~1818.
- 王治华, 徐起德, 徐斌, 等. 2009b. 5·12 汶川地震航空遥感应急调查[J]. 中国科学 E 辑, **39**(7): 1304~1311.
- 王治华, 杨日红. 2005. 三峡水库区千将坪滑坡活动性质及运动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, **16**(3): 5~11.
- 王治华. 1987. 秭归新滩大滑坡[M]// 自然科学年鉴 1986. 上海: 上海翻译出版公司: 1. 68~1. 81.
- 王治华. 1995. 遥感技术在我国水电建设前期工作中的应用[J]. 国土资源遥感, **7**(3): 1~8.
- 王治华. 2003. 青藏公路及铁路沿线的滑坡研究[J]. 现代地质, **17**(4): 355~362.
- 王治华. 2012. 滑坡遥感[M]. 北京: 科学出版社.
- 王治华. 2016. 数字滑坡技术及其典型应用[J]. 中国地质调查, **3**(3): 47~54.
- 夏元友, 朱瑞赓. 1996. 新滩滑坡滑动机理及稳定性评价研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, **7**(3): 49~54.
- 殷坤龙, 姜清辉, 汪洋. 2002. 新滩滑坡运动全过程的非连续变形分析与仿真模拟[J]. 岩石力学与工程学报, **21**(7): 959~962.
- 张明, 殷跃平, 吴树仁, 等. 2010. 高速远程滑坡-碎屑流运动机理研究发展现状与展望[J]. 工程地质学报, **18**(6): 805~817.