

数字滑坡技术及其在天台乡滑坡调查中的应用

王治华

(中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要:“数字滑坡”技术, 是在我国前期滑坡遥感工作基础上, 在现代先进信息技术支持下发展起来的滑坡遥感新技术。利用“数字滑坡技术”和滑坡前后的高分辨率卫星数据对 2004 年 9 月 5 日发生在中国四川省的天台乡滑坡, 进行了详细调查。获取了滑坡边界、规模、各部分的滑动方向和滑动距离、运动方式、加载和减载部位及方量等数据。基于滑坡地质学原理进行的分析认为义和村斜坡虽具有发生滑坡的岩性、构造及临空面基本条件, 但在 2004 年 9 月 5 日滑坡前其总体上为一稳定斜坡, 这次滑坡性质为义和村斜坡上的首次大规模滑动, 滑坡的滑动方式为牵引式, 规模约为 2300 万方, 一年前修筑公路是滑坡潜在的诱发因素; 滑坡发生前连续强降雨是直接触发因素。

关键词:“数字滑坡”技术; 卫星数据; 天台乡滑坡; 滑坡规模; 运动方式

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)04-0516-05

作者简介:王治华(1942-), 女, 教授级高工, 博士生导师, 长期从事环境灾害遥感调查及“数字滑坡”技术研究。

Digital landslide technology and its application in investigation of Tiantai Town landslide

WANG Zhi-hua

(China Aerial Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract:“Digital Landslide” Technique(DLT) is a new developing technique for landslide remote sensing, based on the earlier work in the early stage and supported by modern information technique. At 14:00 2004-09-05, a large scale landslide occurred in Tiantai Town, Sichuan Province, China. By using DLT and satellite data of IKONOS (received before landslide occurring) and QUICK BIRD (received after landslide occurring) the landslide had been investigated in detail. Data of the boundary, size, direction and distance of the displacement of sliding blocks, position and volume of loading and unloading, and so on were obtained. Then, based on the principle of landslide-geoscience the spatial analysis was made. It was considered that although there were basic conditions of lithology, tectonic, and facing space to develop a landslide for Tiantai Town slope, which still had been a stable slope before 2004-09-05 landslide, the 2004-09-05 landslide was the first large scale movement and the slide was regressive; with a volume about 23 million m^3 . It was deduced that high way constructed on November 2003 was the potential inducing factor and the continuous heavy rain was the direct triggering factor for occurrence of 2004-09-05 landslide.

Key words:“Digital Landslide” technique; landslide remote sensing; Tiantai Town; landslide size; moving manner

0 前言

我国的大规模区域滑坡(包括崩塌、泥石流、碎屑流等斜坡重力失稳现象)遥感调查起步于 20 世纪 80 年代初, 经过 20 年的实践, 我们逐步摸索出一套新的技术方法, 并于 1999 年在第一届国际“数字地球学术讨论会”做了介绍^[1]。该方法称为“数字滑坡”技术。“数字滑坡技术”是在我国前期滑坡遥感工作和先进信息技术基础上发展起来的滑坡遥感新技术, 进入 21 世纪, 使用该新技术, 已完成了新一轮二滩电站库区、青藏、川藏、滇藏等进藏公路、铁路沿线的地质灾害遥感调查, 三峡库区的遥感调查正在进行中。

2004 年 9 月 5 日, 四川天台乡发生特大山体滑坡, 宣汉县、四川省及中央电视台等传媒报导:“宣汉县天台乡因连降暴雨发生特大山体滑坡, 约 6500 多万立方米山石整体下滑, 阻断前河, 形成回水 20 余公里, 最高库容近亿立方米的天然水库, 上游五宝镇及天台乡一万多名群众被水围困”。国家民政局、国土资源部及四川省领导及多个专家组赶赴天台乡滑坡现场查看险情。该滑坡规模巨大、灾害损失严重, 由于当地政府的疏散工作得力, 无人员伤亡。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40171067)

收稿日期: 2005-03-07

以滑坡前后的高分辨率卫星数据作为遥感信息源,采用数字滑坡技术对天台乡滑坡进行了遥感调查。

1 “数字滑坡”与“数字滑坡”技术

“数字滑坡”就是信息化滑坡,由与滑坡相关的多元多维信息组成,这些信息必须是数字形式的,有自己的准确位置和属性。多元就是与滑坡有关的形态、边界、规模、岩土物质、构造、水文……等因素;多维就是三维空间和一维时间。

“数字滑坡”技术,就是以遥感和空间定位方法为主,结合其它调查手段获取数字形式的与地理坐标配准的滑坡基本信息(滑坡各要素,地形、光谱、土地覆盖、地质结构、物理力学特征……)^[2];利用 GIS 技术存贮和管理这些数字信息;在此基础上,根据滑坡地质学原理进行空间分析,研制各类滑坡模型,服务于滑坡调查研究、评价和防治等。

“数字滑坡”技术使滑坡遥感前期的获取、分析、存贮和显示滑坡信息的方式发生根本变化,使调查者能更准确地定性、定量地认识滑坡,科学有效地存贮和管理调查结果,方便、快捷地传输及交流滑坡信息,从而改善滑坡灾害调查及滑坡理论研究工作。

“数字滑坡”技术的实现主要依赖于 4 类信息科学技术的支持:①遥感技术,当今的遥感技术可以为滑坡遥感提供多种类型的、特别是高分辨率的遥感信息源。商用卫星快鸟数据图像已达到星下 0.61 m 分辨率;②数字摄影测量及图像处理技术,20 世纪末,传统的以解析模拟方法处理航摄照片的技术进步为数字摄影测量技术。该技术使航摄照片成为数字形式并准确定位,新的数字图像处理技术软件层出不穷,功能更加强大;③GIS 技术,该技术使几何级数增加的,无论是矢量还是格网形式的数字滑坡信息有可能科学合理地存储和被管理,较方便地进行定性解译及量算,并实现多种成果表达方式;④计算机技术,高速发展的计算机技术使计算机容量、计算能力、运算速度迅速提高,使对数字滑坡技术中迅速膨胀的海量数据进行复杂的运算成为可能。其它如灵镜(虚拟现实)技术、网络技术等在滑坡过程研究、滑坡遥感监测、滑坡信息传输等过程中使用。

以下以天台乡滑坡遥感调查为例,说明数字滑坡技术的应用。

2 天台乡滑坡遥感调查

2.1 天台乡滑坡环境概况

天台乡滑坡位于四川省东北部,达州市宣汉县天台乡义和村,如图 1,滑坡范围地理坐标为 E108° 03'00″~108° 04'30″, N31° 25'30″~31°26'30″。

天台乡滑坡的区域构造部位在扬子地台西北缘,所属次级构造部位为五宝镇背斜南东翼。滑坡所在义和村斜坡为由第四系及侏罗纪遂宁组砂、泥岩组成的顺层坡。节理发育,断裂不发育。滑坡所在地区降雨丰富,年均降雨量为 1175.17 mm,大部分降雨集中在夏秋季 5~9 月。据宣汉县气象局降雨资料:2004 年 9 月 3 日~9 月 5 日的降雨量达 395.5 mm。前河是嘉陵江支流渠江的支流,从斜坡前面流过,坡体上分布三条前河的支流及一些更细的小沟谷。

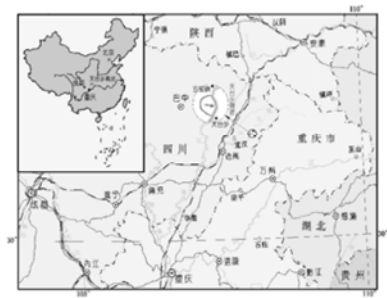


图 1 天台乡滑坡地理交通位置示意图
Fig. 1 Location of Tiantai Town landslide

2.2 方法技术

主要介绍“数字滑坡”技术在获取天台乡滑坡基本信息、进行空间分析及研究滑坡性质方面的应用。

(1) 数据源

本项调查采用了三种类型:TM、IKONOS、QUICK BIRD;二个时相:滑坡前(2004 年 1 月 21 日)、滑坡后(2004 年 1 月 21 日)的卫星数据。

本调查采用了二类空间定位数据源:①调查区 20 世纪 80 年代测绘的 1:10000 万地形图;②实测 GPS 控制点。

(2) 制作基础图像

在数字滑坡技术中用于滑坡及其发育环境解译的是处理合格的正射影像,通常,该正射影像与数字地理底图配合使用,合并称为基础图像。

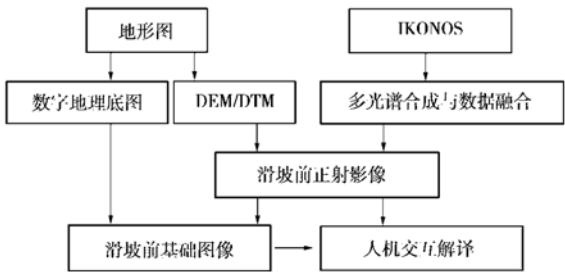


图 2 滑坡前基础图像制作流程
Fig. 2 Flow diagram for preparation of basic image before landslide

a) 滑坡前基础图像

制作滑坡前基础图像的工作如图 2 所示,分 3 步

完成: ①将调查区 1:10000 地形图矢量化, 制作数字地理底图及 DEM/DTM; ②将滑坡前的 IKONOS 数据合成 4 m 分辨率的多光谱图像, 再与 Pan 图像融合形成 1 m 分辨率的多光谱图像; ③用 DEM/DTM 校正 1 m 分辨率的多光谱融合图像, 使之与调查区 1:10000 地形图配准, 形成调查区滑坡前的正射影像(以下简称滑前图像), 如图 3 所示。



图 3 滑坡前天台乡义和村斜坡 IKONOS 卫星正射图像

Fig. 3 IKONOS image of Tiantai Town slope before landslide

b) 滑坡后基础图像

滑坡后基础图像制作的关键在于生成滑坡后的 DEM, 并无现成的方法可以借鉴, 经过多次试验, 探索了一套制作滑后 DEM 的方法, 即, 由实测 GPS 产生滑坡后原始 DEM, 该 DEM 与滑坡周围未变形的滑前 DEM 相拼合生成滑坡后 DEM。DEM 生成后, 再根据与图 2 相似步骤生成滑坡后的 QUICK BIRD 正射影像, 如图 4 (滑后图像) 所示。



图 4 天台乡滑坡 QUICK BIRD 卫星正射图像

Fig. 4 QUICK BIRD image for Tiantai Town landslide

(3) 遥感解译

滑坡前后的基础图像完成后, 以人机交互方式进行解译, 获取数字形式的与地理坐标配准的滑坡基本信息^[2]如滑坡边界、形态、规模、地质环境……等。该部分解译以定性识别及定量划界、量测为主。

(4) 求取滑坡特征点

“求取滑坡特征点”是本项遥感调查提出的一种新方法, 即根据相似地貌特征, 分别在滑坡前后的基础图像上寻找同名点, 即同一地物点, 置于滑后图像上, 称其为滑坡特征点。显然, 滑坡前后特征点连线方向则为该点的滑动方向, 连线长度则为位移大小。所以, 特征点法成为能求取滑坡位移特征参数的一种新方法。

法, 其它方法技术是不易获取这些滑坡参数的。

天台乡滑坡特征点群包括了 604 个特征点。这些点基本均匀分布在滑体各处。量测和时空分析工作在 ERDAS、ArcGIS、MapGIS 和 Surfer 软件平台上进行。

(5) 误差分析

本项遥感调查过程中, 可能有以下 4 个主要产生误差的方面: ①现场 GPS 测量; ②图像几何校正; ③图像解译; ④求取特征点误差。取上述 4 类误差的中值或均方差相加, 本项遥感调查的综合误差即为 13.75 m (滑前) 或 12.66 m (滑后), 这是 4 类中误差相加的结果。大多数情况下, 各类误差可能部分迭加, 部分相抵, 此时的综合误差应小于该值。

2.3 遥感解译结果

2.3.1 滑坡前的义和村斜坡

(1) 坡向和坡度

图 3 显示, 滑坡前的义和村斜坡倾向差异明显, 坡向由北至南斜坡的倾向约在 $80^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 范围。前河河谷为该斜坡的宽阔临空谷。由 DEM 计算的坡度图表明滑坡前义和村斜坡的大部分坡度在 $0^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 范围。平均坡度约为 13.5° 。

(2) 斜坡物质与结构

义和村斜坡地表大部分由农田覆盖, 由第四纪堆积及零星出露的风化泥岩及粉砂岩组成。堆积层下伏为中等风化泥岩、泥质粉砂岩夹石英砂岩。实测基岩层面产状: $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\angle 4^{\circ}\sim 7^{\circ}$, 有 3 组十分发育的陡倾节理, 其产状: $40^{\circ}\angle 75^{\circ}$ 、 $360^{\circ}\angle 73^{\circ}$ 、 $263^{\circ}\angle 81^{\circ}$ 和一组缓倾节理: $70^{\circ}\angle 4^{\circ}$ 。所以, 义和村斜坡为一由堆积物及强—中风化泥岩、泥质粉砂岩夹石英砂岩组成的顺层缓倾单斜坡。研究区地表水及地下水十分丰富, 在滑坡范围共分布有长度为 88~1217.9 m 的沟谷 32 条, 这 32 条沟谷将调查区斜坡切割成数十个小块体。斜坡上并有 19 个面积为 $105\sim 1669\text{ m}^2$ 的池塘和数处泉眼分布。

綜上解译, 分析认为义和村斜坡虽具有发生滑坡的物质、构造及临空面基本条件, 且富水, 但由于平缓斜坡上的第四系及风化泥岩、沙泥岩被较密集的沟谷切割, 被出露的基岩分隔, 所以在 2004 年 09 月 05 日滑坡前其总体上为一稳定斜坡。据访问当地村民, 以前从未听说过滑坡活动, 也证实了这一分析。

2.3.2 天台乡滑坡特征

(1) 滑坡表面特征

滑前义和村斜坡上的绿色农田、植被, 在滑坡后大部变为粉红及棕色土石组成的波状起伏的滑坡堆积, 如图 3, 4 所示。滑坡总体呈平行四边形。滑坡前后的坡向无明显变化。滑坡后的 DEM 计算滑坡地表平均坡度为 $10.89^{\circ}\sim 11^{\circ}$ 。滑体上可见多级约 30 余处陡

崖构成的后壁、侧壁。

(2) 确定滑坡边界

由滑坡特征点群的位移特征及滑坡前后图像地物变化对比,逐段确定滑坡边界和影响带范围。将开始有明显位移的特征点,或具陡崖特征的位置定为滑坡边界。将无明显位移,地貌上可见拉裂、房屋倒塌破坏、水塘异常等部位归为滑坡影响区,分别划出其界限,如图5。

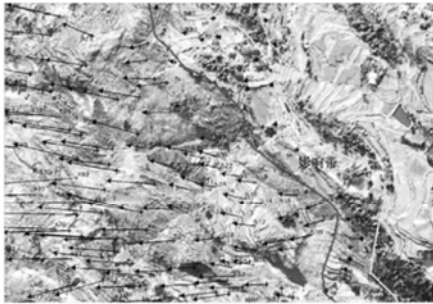


图5 天台乡滑坡局部特征点及确定边界和影响带示意图

Fig. 5 Sketch map of partial characteristic points and determination of boundary and influenced zone

(3) 滑坡的运动特征

了解滑坡各部分的滑动距离和滑动方向,从而较合理、准确地分析滑坡运动特征,是滑坡科学工作者多年来梦寐以求的事情。采用数字滑坡技术及高分辨率遥感信息源,在天台乡滑坡遥感调查中实现了这一愿望。

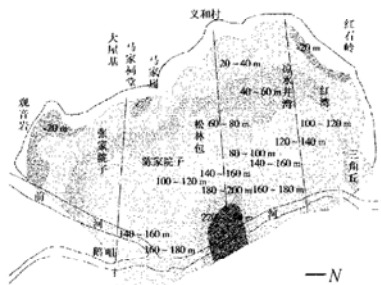


图6 天台乡滑坡各部分的滑动距离

Fig. 6 Distribution of sliding distance of Tiantai Town landslide

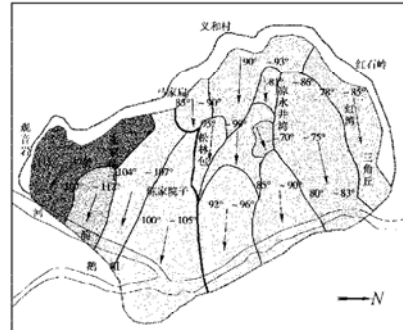
a) 滑动距离

由特征点群制作的天台乡滑坡各部分滑动距离图,图6清楚地显示了滑体各部分的滑动距离是不一样的,其变化很大,但呈一定规律:①滑体中前部滑距最大,达220~240 m,向两侧(南北)和向后部(西),滑距逐步减小,在滑坡边缘的滑距为20~40 m,局部<20 m;②不同滑动距离的变化大致呈3个不规则的同心弧分布,依此特征并参考滑动方向,可将滑坡分为南、中、北3部分。

b) 滑动方向

由特征点群制作的天台乡滑坡各部分滑动方向图,见图7显示了滑体各部分的滑动方向是不一样的,总体上由北至南滑动方向由东偏北(约80°)逐渐转

为东偏南(约115°)。在大致滑坡中部存在一条界线,将天台乡滑坡分为南北两个部分,南部滑体以东偏南(100°~120°)为主;北部滑体的滑动方向以东及东偏北(80°~约95°)为主。滑动方向特征与滑坡前的斜坡坡向大致相似。



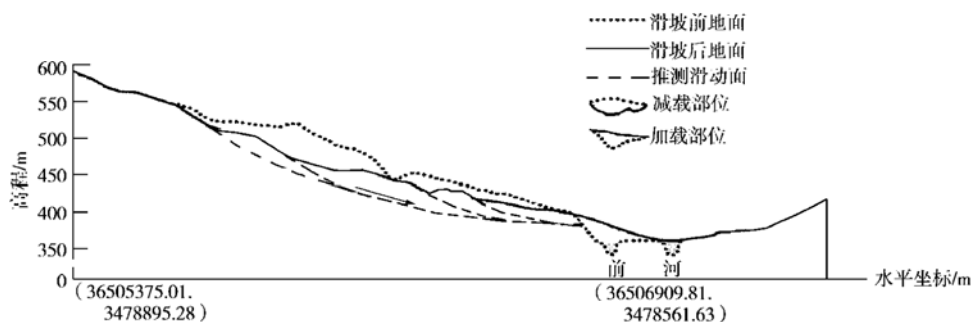


图9 天台乡滑坡中部剖面示意图

Fig. 9 Profile in the middle of Tiantai Town landslide

$m^2 \approx 1.12 \text{ km}^2$, 滑坡活动影响带范围约为 $128400 \text{ m}^2 \approx 0.13 \text{ km}^2$, 滑坡区与影响区合计投影面积共约 1.25 km^2 。滑坡周长 4550 m。以滑体平均坡度 11° 计算滑体斜坡面积为 $S = S_{\text{投}} / \cos 11^\circ = 1141867.37 \approx 1.14 \text{ km}^2$, 估算滑体的平均厚度约为 20 m, 见图 9。由滑坡范围投影面积和平均厚度估算天台乡滑坡体积为 $22837347.48 \text{ m}^3 \approx 2300 \text{ 万 m}^3$ 。

f) 滑坡各部分的减载和加载

滑坡活动后, 原斜坡地面的大部分由于滑动, 其地面高程较滑坡前降低, 这些部位称为减载部位。滑坡中后部减载较多, 最多降低达 50.43 m。滑坡边界部位高程较滑前降低 5~10 m。由图 8 及 DEM 求得滑体上减载部分的面积为 896445.9 m^2 , 约占总滑坡面积的 80%, 减载方量 = $10924104.5992 \text{ m}^3$ 。

在原前河河床、河岸及原坡体上的沟谷及一些低洼处, 由于增加了滑坡堆积(荷载), 其地面高程较滑坡前增高, 这些部位称为滑体上的加载部位。前河河床局部抬升幅度最大, 最大升高达 28.57 m。滑体上的沟谷及低凹处地势抬升幅度在 0~10 m 范围。如图 8 所示。同样求得滑体加载部位的投影面积共约 224794.9 m^2 , 加载方量 = 1115951.4431 m^3 。了解滑坡的加减载状况对滑坡研究及滑坡防治工程设计有重要意义。图 8 为天台乡滑坡上的减载与加载分布状况, 图中 8 表明滑坡前后地势基本一致的部位, 绿色和蓝色等高线表明滑体上减载部位, 黄、红色等高线表明滑坡加载部位。

3 结语与讨论

(1) 滑坡形成条件及触发因素

滑坡前的义和村斜坡具备产生顺层滑坡的物质、斜坡结构和临空面 3 项基本环境条件, 且斜坡含水丰富, 有丰富且集中的降水, 但由于滑前的义和村斜坡倾向各异 ($80^\circ \sim 120^\circ$), 缓倾斜坡上厚度不一的堆积被 32 条沟谷切割及出露的丘状泥岩、砂泥岩突起分隔成数十个小块体, 分散了斜坡的下滑力, 在 2004 年 9 月 5 日滑坡前其总体上为一稳定斜坡。

去年开挖新公路相当于在几乎处于极限平衡的岸坡上拉开一个长口子, 大大减小了抗滑力, 局部坡体的下滑力超过抗滑力后便发生滑坡, 所以 2003 年开挖新公路是天台乡滑坡的潜在诱发因素。2004 年 9 月 3~5 日的连续强降雨使坡体风化岩土含水超饱和, 大大增加了坡体上覆重量并减小抗滑强度是直接触发滑坡的因素。今后应使滑体上排水顺畅, 非常谨慎地对待开挖、削坡、加载等扰动斜坡的活动, 以避免其再次活动。

(2) 推进滑坡遥感工作

先进的“数字滑坡技术”和高分辨率遥感数据使滑坡遥感调查达到了前所未有的调查精度。高精度遥感调查结果促进了对滑坡的更深入的认识。天台乡滑坡遥感调查初步成果出来以后, 恰逢四川华地公司天台乡滑坡地质勘查工作的成果也刚出来, 双方互报了调查结果。遥感调查的边界位置范围、规模估算等滑坡几何形态方面结论基本一致。勘查工作可以更加详细、形态特征等方面结论基本一致。勘查工作可以更加详细、深入地了解滑坡地下状况, 水文特征等。遥感调查凭借获取滑坡前后的空间信息, 采用数字滑坡技术可较详细地了解滑坡的地表特征细节、滑动方向、滑动距离、坡度变化、加、减载情况等。且遥感调查的经费远远低于勘查工作, 故建议大型滑坡在动用勘查工作以前先进行大比例尺遥感调查, 看需要再布置勘查工作, 两者结合, 互相补充使用既可节约经费, 又可提高滑坡调查水平。

参考文献:

- [1] WANG Zhi-hua. Preliminary study for digital landslide, towards digital earth[C]// Proceedings of the International Symposium on Digital Earth. Beijing: Science Press, 1999, 718 - 722.
- [2] 王治华. RS+GCPs 获取滑坡基本信息[J]. 中国地质灾害及防治学报, 2004, 15(1):94 - 101. (WANG Zhi-hua. Capture basic information of landslide by RS+GIS[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(1):94 - 101.)