

引用格式: 王治华. 数字滑坡技术及其典型应用[J]. 中国地质调查, 2016, 3(3): 47–54.

数字滑坡技术及其典型应用

王治华

(中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 为了改变传统滑坡遥感技术方法效率低、调查精度难以提高的状况, 经多年实践与探索, 笔者于 1999 年提出了“数字滑坡”概念。该概念使传统的“地学滑坡”拓展为能以数字形式表达的, 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”。数字滑坡技术系统由滑坡解译基础技术、遥感识辨滑坡技术、滑坡数据库及滑坡模型 4 部分构成。多年来, 数字滑坡技术已成功应用于我国大型水电站建设、山区交通线建设、区域开发环境治理以及抗震减灾等领域, 也用于大规模个体滑坡调查研究, 并取得了显著的经济和社会效益, 有效服务于国家防灾减灾战略。该文主要以西藏帕里河及川东天台乡 2 个典型滑坡调查为例, 阐述数字滑坡技术的创新应用。

关键词: 数字滑坡; 数字滑坡技术; 帕里河滑坡; 天台乡滑坡

中图分类号: TP79; P642

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2016)03–0047–08

0 引言

滑坡是世界上最严重的自然灾害之一, 每年在全球造成数十亿美元的经济损失和成千上万的人员伤亡。长期以来, 国内外滑坡工作者对滑坡调查预警方法作过大量探索和努力, 但成效并不显著^[1]。世界各山地国家都迫切需要能有效调查滑坡的技术, 以减轻和防治滑坡灾害。

面对这一世界难题, 笔者带领研究团队自 1980 年起, 踏遍了北自青海省的德令哈、南至香港的大屿山、西达中印边界的帕里河、东抵三峡工程坝址的我国滑坡灾害严重地区, 历经 30 多年的潜心研究和技术攻关, 在来自国土资源部、中国科学院、原水电部、国家自然科学基金、863 计划等 20 余个项目的支持下, 在中国地质调查局的直接领导及支持下, 开拓性地将现代空间信息技术用于滑坡调查, 创建了数字滑坡理论方法与技术体系, 实现了滑坡调查研究从定性到精确信息化定量, 填补了数字滑坡理论方法与技术研究的国内外空白。迄今, 该技术系统已经历了多项国家重大防灾减灾和重大工程安全运营任务的科学检验, 日趋完善。本文以西

藏帕里河滑坡及川东天台乡滑坡调查为例, 介绍数字滑坡技术的应用成果。

1 数字滑坡与数字滑坡技术

“数字滑坡”^[2], 即以数字形式表达的, 具有三维空间、“多维”时间信息的, 由与滑坡相关的地形、岩土物质、斜坡结构和区域地质环境等多元要素构成的滑坡。“数字滑坡技术”就是实现“数字滑坡”概念的技术, 即将滑坡地质特征及变化(变形、位移等)以数字的形式与遥感信息特征联系起来, 采用遥感和 GIS 方法进行滑坡调查研究的技术, 由滑坡解译基础技术、遥感识辨滑坡技术、滑坡数据库及滑坡模型 4 大部分构成。

多年来, 数字滑坡技术已成功服务于国务院、国土资源部、水利部等国家部委, 中国科学院及地方相关研究所, 高等院校以及中国电建集团等勘测设计企业, 为我国大型水电站建设、山区交通线建设、山地区域开发环境治理以及中印边界等人类难以到达的高山深谷地区滑坡灾害事件调查提供了准确的滑坡、泥石流及地质环境资料; 在汶川、芦山、舟曲等地震滑坡灾害应急调查和恢复重建中得

收稿日期: 2016–01–27; 修订日期: 2016–03–27。

作者简介: 王治华(1942—), 女, 教授级高级工程师, 博士生导师, 长期从事遥感地质灾害调查及“数字滑坡”技术研究。

Email: 577027159@qq.com。

到了推广应用,取得了显著的经济和社会效益,有效服务于国家防灾减灾战略。实践证明,数字滑坡技术有力地推动了我国滑坡灾害调查技术进步^[3]。

2 帕里河滑坡应急调查

2.1 帕里河滑坡的地理环境

帕里河发源于印控克什米尔山区,流经我国西藏自治区西端扎达县后,下游进入印度境内^[4]。我国境内帕里河长约 152.08 km,其中界河段 12.2 km,境内流域面积约 2 730 km²。调查区位于喜马拉雅山脉西段,山高谷深,最高山峰海拔 6 790 m,最大高差达 3 790 m;属高原亚寒带干旱季风气候区,年降水量 50~100 mm,年平均气温<0℃。

调查区内人烟稀少,只在下游有楚鲁松杰村及数个村民点;无公路,须经扎达翻越 5 767 m 的波博山口才能到达调查区(图 1)。

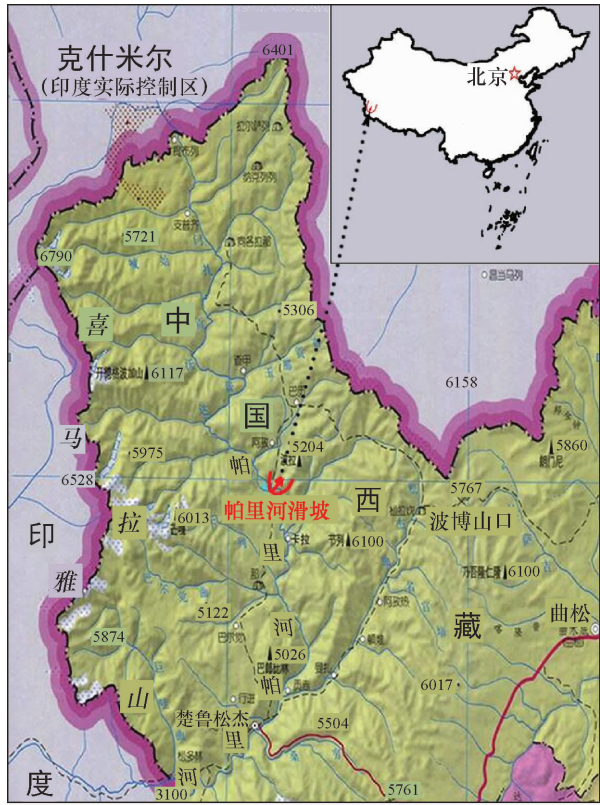


图 1 帕里河调查区自然环境示意图^[4]
Fig.1 Sketch map for physiographical environment of Pali River survey area^[4]

2.2 帕里河滑坡灾害事件

2004 和 2005 年夏,帕里河发生滑坡坝溃决灾

害,《西藏自治区札达县帕里河堰塞湖溃决灾害应急调查报告》称:“……2004 年 6 月 22 日,西藏自治区札达县曲松乡楚鲁松杰村上游帕里河发生山体崩塌,造成河流堵塞形成堰塞湖;2005 年 6 月 8 日,堰塞湖左岸山体再次发生崩塌,堵塞原坝溢流口,湖面水位上升;6 月 26 日 10 时,堰塞湖坝体发生溃决,下泄洪水量达 3 420 余万 m³,给楚鲁松杰村带来了巨大的损失且灾害波及印度境内帕里河流域。”

对于这次发生在中印边界附近的滑坡坝溃决灾害,印方反映强烈,曾几次为帕里河堰塞湖事件照会中国外交部。

中国对帕里河灾害高度重视,西藏自治区先后派出多个工作组克服难以想象的交通困难,赴滑坡地点进行现场调查。国家遥感中心及时组织水利部遥感中心、中国科学院遥感应应用研究所、国家卫星气象中心等单位利用多种卫星遥感影像对该地区的堰塞湖水面变化情况进行监测。但以上努力未能查明滑坡情况。2005 年 7 月中国地质调查局根据国土资源部的部署,委托中国国土资源航空物探遥感中心(以下称航遥中心)开展此项工作。航遥中心组织了以笔者为项目负责的“西藏帕里河滑坡卫星遥感调查项目组”,立即投入调查。这是一项涉及边境外交事务的灾害与地质环境遥感调查任务,中印双方都急等着具体结果,时间紧,要求高,对数字滑坡技术是一次考验。

2.3 帕里河滑坡调查采用的具体方法技术

2.3.1 信息源

在这样的山高谷峡、极度寒旱、人迹罕至、从未做过地面调查工作的地区,遥感资料是唯一可能获取的反映地表实况的信息源。为满足不同详细程度、不同时间滑坡调查变化的需求,本调查收集了地面分辨率分别为 0.6 m、1 m、2.5 m、5 m、10 m 和 250 m,自滑坡前 2003 年 10 月至滑坡后 2007 年 9 月获取的 21 个时相的卫星数据(图 2)。

- 在几何精纠正和地理配准中使用的数据包括:
- ①国家地理信息中心提供的境内部分地区的 1:5 万地形数据;
 - ②根据美国早年测绘的地形图放大的境外部分地形数据;
 - ③日本卫星 ASTER 立体像对;
 - ④1 m 分辨率的美国 OrbView 卫星影像数据。

同时,以成都地质矿产研究所 2004 年取得的 1:25 万青藏高原区域地质调查成果为本调查的地质环境信息源。

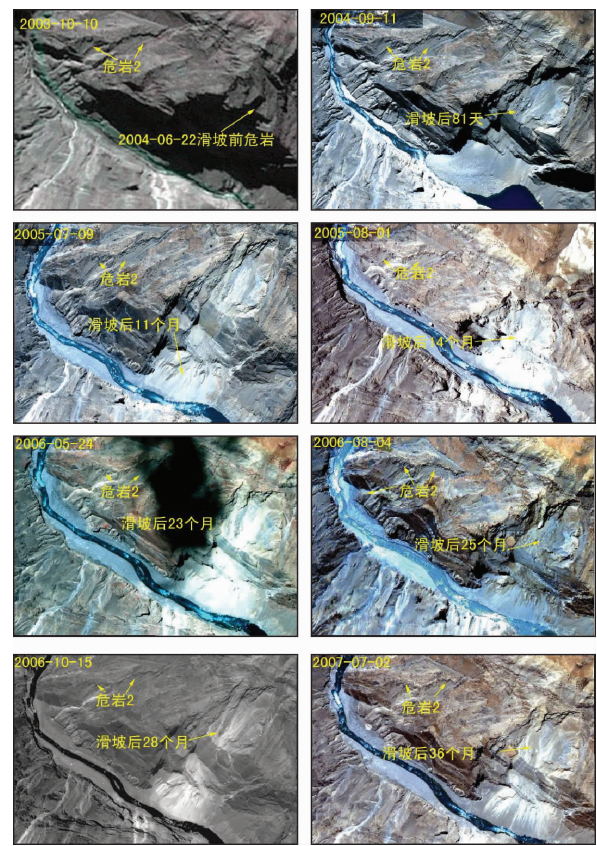


图2 用于监测帕里河滑坡的8个时相卫星影像
Fig.2 Eight multi-temporal satellite images for monitoring Pali River Landslides from 2003 to 2007

2.3.2 “解译基础”建立

“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,是数字滑坡技术的最基础部分。它是用于识别滑坡,能定位、定量获取滑坡及其发育环境信息,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、经过几何精纠正的、相关信息在同一地理坐标控制下配准的数据集合。

在获取上述信息源后,经数字化、图像融合、几何纠正与地理配准等图像处理步骤,形成重点调查区1:1万和全调查区1:5万2种不同精度的解译基础。以此为基础,可实现精细的滑坡遥感解译及时空分析。

2.3.3 遥感解译和时空分析

遥感解译就是在滑坡地学理论指导下,通过人机交互方式将解译基础中各图像的色彩、色调、形态、阴影等信息特征还原成滑坡地学特征的过程,包括识别滑坡和获取其岩性、构造、类型、形态、规模等特征信息。滑坡时空分析则是在图像解译的基础上,利用解译基础提供的空间和时间信息,借助于GIS技术分析计算,进一步了解滑坡空间分布及随时间变化的特征。

2.3.4 模型建立

基于数字滑坡技术,根据不同的服务目的,建立应用模型。滑坡模型的各项参数主要由数字滑坡技术获取。对于帕里河滑坡调查,建立了滑坡灾害预测预警模型(图3)。

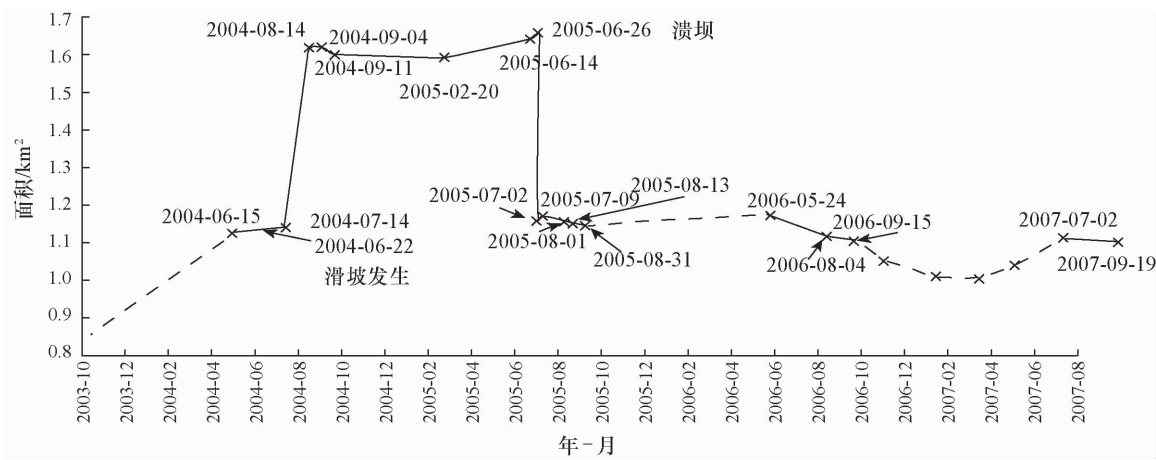


图3 帕里湖滑坡灾害预测预警模型
(帕里湖湖面变化卫星监测曲线)

Fig.3 Early warning model of landslide hazard prediction in Pali Lake
(Change of Pali Lake area from satellite monitoring)

2.4 帕里河滑坡调查主要成果

(1)准确、快速获得滑坡信息。获取了滑坡位置、形态、活动性质和规模信息,分析了滑坡形成条件,并明确指出该滑坡近期不会有大的活动。

(2)查明了滑坡堰塞湖的性质,计算了可能下泄的洪水量。堰塞湖的特征与下游灾害直接相关,本调查通过遥感解译与时空分析对该湖进行了较深入的研究,确定帕里湖为一逐渐萎缩的高原山地湖盆(图4),有多级阶地发育。量测了各级阶地高程和湖盆面积,估算了阶地形成年代(表1)。

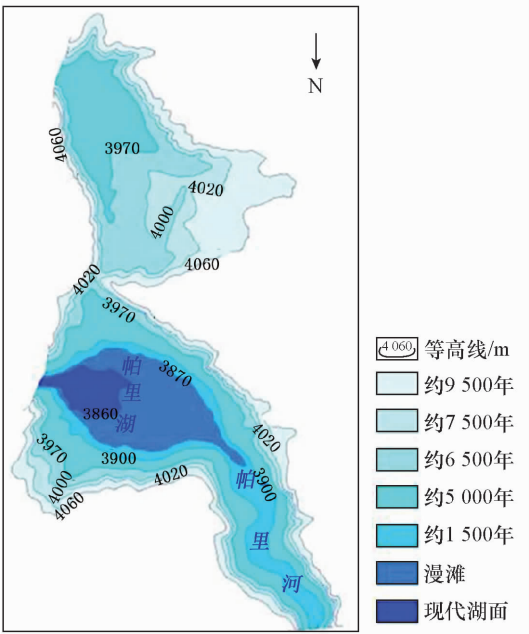


图4 帕里湖萎缩的历史变迁

Fig.4 Evolution of Pali Lake shrink

表1 帕里湖阶地与所处年代分析简表
Tab.1 Abridged table for Pali Lake terrace and geological time

阶地级别	平均高程/m	面积/km ²	距今(约)时间/a
漫滩	3 870	1. 29	现代
I	3 900	2. 13	1 500
II	3 970	4. 48	5 000
III	4 000	6. 22	6 500
IV	4 020	7. 28	7 500
V	4 060	9. 10	9 500

注:以海拔3 870 m为基底,以抬升平均速率2 mm/a 计算阶地年代。

根据精确配准的2003—2007年不同时相卫星影像(图5),求得各水位的湖水量(表2)。计算出水位从3 907 m(卫星监测最高)降至3 870 m(卫星

监测滑坡后最低)时,泄出水量约3 738 万 m³(即下泄洪水量),此数据与下游实测洪水量相近。

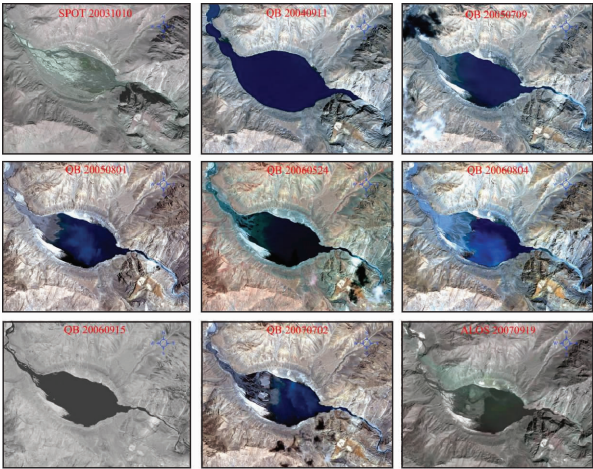


图5 2003—2007年帕里湖湖面变化
高分辨率卫星监测示意

Fig.5 Sketch map for high resolution satellite monitoring of Pali Lake surface changes from 2003 to 2007

表2 帕里湖各水位面积及蓄积量
Tab.2 Surface area and water capacity of Pali Lake in different time

帕里湖水位/m	湖面积/km ²	蓄积量/m ³
3 907. 0	1. 75	61 443 163
3 900. 0	1. 62	49 742 540
3 883. 5	1. 49	24 015 357
3 875. 0	1. 16	12 362 268
3 870. 0	0. 86	7 358 240

(3)进行了滑坡灾害预测预警。帕里河滑坡灾害主要表现为帕里湖溃坝造成的下游洪水灾害,故灾害预测预警须认识堰塞湖形成至溃坝的特征。图3曲线反映了帕里湖从2004-06-22滑坡发生前一滑坡坝堵河形成堰塞湖—溃坝成灾—恢复稳定的卫星监测湖面全过程。由于水陆交界是遥感最易识别的边界,故以湖面积为卫星监测对象。

分析图3曲线,可确定帕里湖的正常水位及预警水位时的湖面积,并确定到达和维持各水位面积的时间:即帕里湖旱季的正常湖面面积约为0. 86 km²,汛期正常湖面面积为1. 1~1. 2 km²,滑坡坝溃决前湖面积为1. 75 km²。

卫星监测表明,滑坡发生后22 d湖水才从正常湖面开始上涨,又过53 d湖面积到达1. 6 km²以上,在此高水位湖面积维持了10个月零10 d才缓

慢上涨至 1.75 km²最高水位,然后溃决。所以确定湖水面积 1.6 km²为预警湖水水位。

综上所述,本项目于 2005 年 7 月下旬启动,由于应用了数字滑坡技术,同年 9 月便提交了调查成果,指出造成 2004 和 2005 年堵河事件的滑坡位置、活动性质、滑坡及滑坡堆积坝的方量、堰塞湖的性质及水面定量变化等情况,阐明帕里河堰塞湖溃决造成的灾害主要在我国境内,对下游河谷的灾害难以控制,下游村民防灾应以避让为主。本调查还提出了帕里湖灾害预测预警模型及具体指标。以上成果形成了国土资源部上报国务院的专题报告,为帕里河流域防灾减灾及解决国际争端提供了重要的基础资料与技术依据^[4]。

3 天台乡滑坡调查

3.1 天台乡滑坡灾害

2004 年 9 月 5 日,四川省东北部的达州市宣汉县天台乡发生特大山体滑坡(图 6),滑坡阻断前河,形成回水 20 余 km,最高库容近亿 m³的天然水库,上游五宝镇及天台乡 10 000 多名群众被水围困。

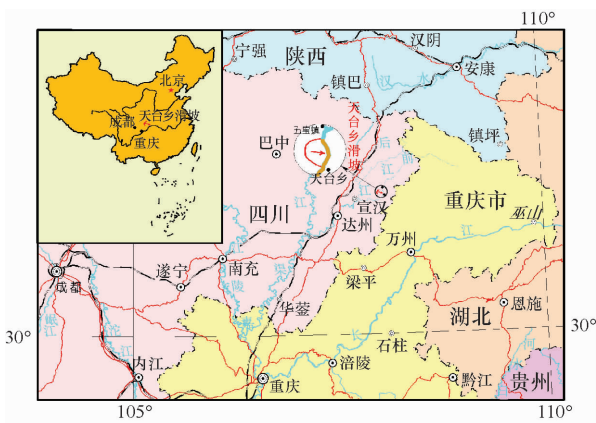


图 6 天台乡滑坡地理交通位置示意图
Fig.6 Sketch map of geographic and traffic position of Tiantai Landslide

3.2 主要方法技术——“同地物点群”法

2004 年 9 月下旬,笔者负责的灾害调查小组,投入天台乡滑坡遥感调查工作。除了采用上述基本的数字滑坡方法技术外,根据天台乡滑坡具有滑动速度较低、滑后扰动不激烈等特点,创造性地提出了“同地物点群”新方法,分别在滑坡前、后解译基础平台上,人机交互求得 604 个滑坡前后的同一地物点,形成“同地物点群”(图 7)。

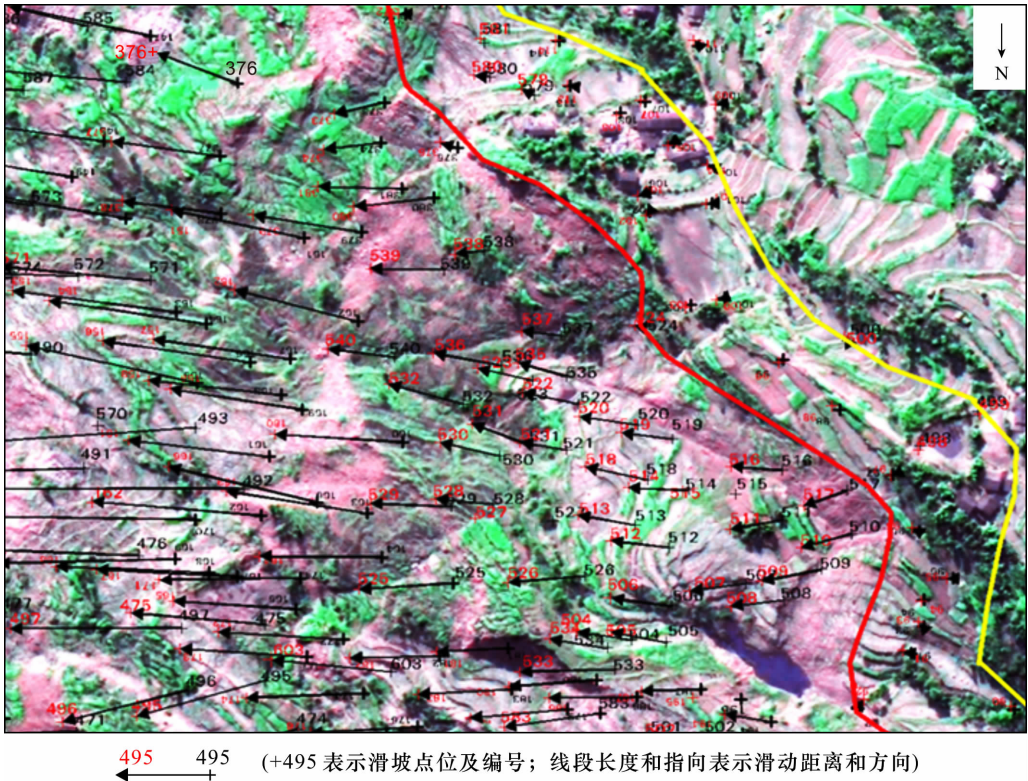


图 7 天台乡滑坡前后同地物点群示意图
Fig.7 Ground feature of same point groups before and after Tiantai Landslide

作为数字滑坡技术衍生的一个新方法,“同地物点群”可定量反映滑坡各部分地表位移的方向及大小,由此可确定天台乡滑坡的边界、影响范围、滑动方向、滑动距离以及滑动速度等。再结合滑坡前、后数字高程,获得滑前地表和滑后地表的高程,从而全方位了解滑坡的空间变化。由“同地物点群”分析表明,天台乡滑坡为牵引式滑坡。采用数

字滑坡技术计算得出滑坡体积为 2 300 万 m³,堵塞河床的最高滑坡堆积为 28.57 m;地方单位同时进行的地质勘查工作估算的滑坡方量为 2 500 万 m³,地质测量获得的滑坡堆积最高为 30 m,验证了利用数字滑坡进行的滑坡规模与最高滑坡堆积计算误差小于 10%^[5]。天台乡滑坡各部位地表滑动方向和滑动距离的计算结果如图 8 所示。

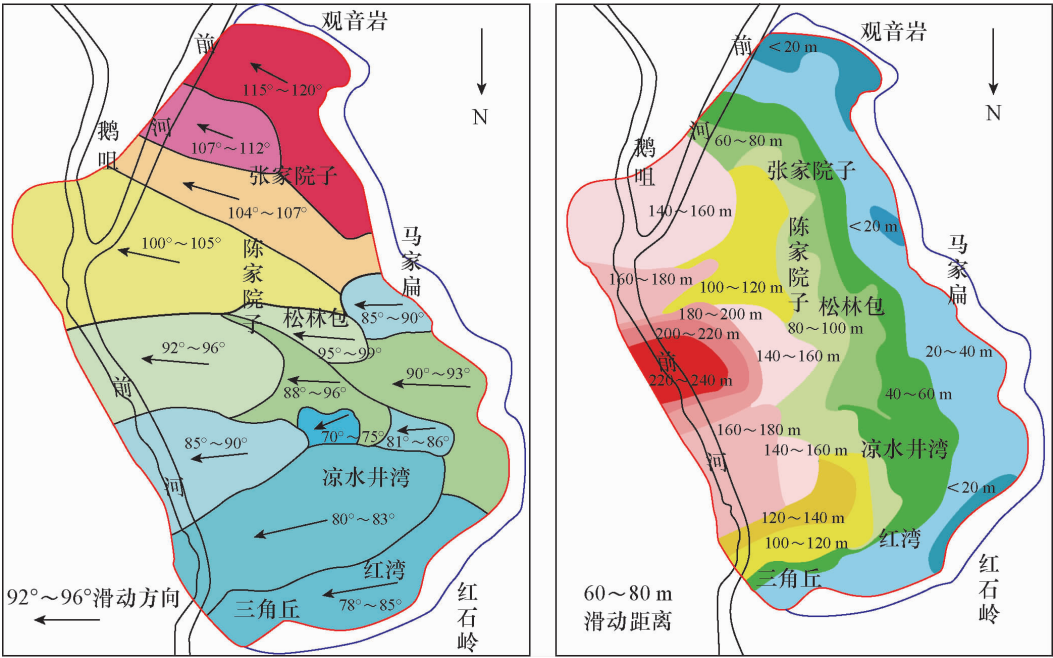


图 8 天台乡滑坡各部分地表滑动方向(左)和滑动距离(右)计算结果示意图
Fig. 8 Interpreting result of the earth surface slide direction (left) and distance (right) of each part of Tiantai Landslide

4 其他应用

(1)水电建设。我国的滑坡遥感监测工作是在为二滩水电站可行性研究服务时起步的,多年来,数字滑坡技术应用于我国二滩、三峡、溪落渡、白鹤滩、乌东德、官地等特大型水电站的可行性论证、设计、施工和运行各阶段,提供了滑坡灾害类型、分布、规模和危险性评价等基础资料。中国电建集团成都勘测设计研究院评审认为,数字滑坡技术对大规模滑坡的识别、位置和边界的确定以及方量估算等的精度可达 90% 以上,提交的灾害类型、分布、规模等成果准确,灾害对水电工程影响的基本结论可信,成果可应用于其他新建水电站^[6]。

(2)山区交通线建设。最典型的实例是数字滑坡技术应用于“青、甘、川、滇进藏交通线区域灾害与地质环境调查”。在短短的 2 a 内,提交的调查成果从宏观上展示了位于中国西南部约 180 万 km² 范围的青藏、甘藏、川藏、滇藏交通线的地质环境,提供了各条进藏交通线途经地区的地质构造单元、岩类、地貌、水系特征、活动断裂带和地震活动带等。

青藏交通线 50 km 宽条带范围的 1:25 万比例尺遥感调查结果,为青藏铁路、公路的建设和运行,为该地区的环境监测与保护,提供了以冻土现象为主的沙化、崩塌、滑坡和泥石流等 7 类大型地质灾害及 4 类融区的分布、规模及其发育环境的资料。对调查结果(各类灾害分布及发育环境)进行空间

分析,了解规律,建立模型,进行调查区“灾害与地质环境区划”,共划分为3个Ⅰ级区、6个Ⅱ级区、7个Ⅲ级区和14个Ⅳ级区。通过各级区号查询可详细了解各区的灾害与地质环境特征,为设计防灾减灾措施提供依据^[7]。

(3)抢险救灾。数字滑坡技术还曾有效服务于汶川等地震抢险救灾及灾后重建。汶川地震后,及时获取遥感数据,迅速进行了全区滑坡解译,在第一时间向国土资源部、国务院提交了滑坡分布、类型、规模、道路和建筑设施损毁情况等资料,并指出最重灾区在北川而不在汶川,为打通生命通道、应急救援、地质灾害隐患点排查及灾后重建提供了依据^[8]。

应用“数字滑坡技术”对2008年“5·12”汶川地震震源区牛眠沟进行了调查。在获取灾区遥感及相关数据后8h内,输出约50 km²范围内的滑坡和泥石流灾害信息产品;经实地验证,识别各类滑坡准确率90%以上。利用“暴雨滑坡泥石流预测模型”预测2010-08-13和2010-08-14牛眠沟暴雨引发滑坡泥石流精度达80%以上^[9]。

(4)区域开发。数字滑坡技术曾用于安宁河谷东西河泥石流防治规划^[10]以及香港大屿山开发的滑坡、泥石流调查。对境内帕里河流域的调查成果则揭示了我国境内帕里河流域灾害与地质环境的历史与现状,预测了重点地质灾害的发展趋势及可能的危害,填补了该地区地质灾害与地质环境调查评价的空白,对青藏高原喜马拉雅山西段地质灾害发育规律的认识有重要意义;及时将地质灾害调查成果资料上报国务院决策使用,发挥了遥感技术快速、高效进行灾害与环境应急调查评价的优势。

5 结论

在我国山区大规模建设中诞生并逐步发展起来的数字滑坡技术无疑是推动我国灾害调查技术进步的关键技术之一。该技术已在多个领域得到了有效应用,但它毕竟还是一门尚不成熟的新兴技术;而滑坡是一种几乎与所有地质因素相关、也越来越与人类活动相关的非常复杂的地质体,能否准

确地认识滑坡并获取其特征参数,从而能对其进行科学合理的分析评价,在很大程度上取决于使用数字滑坡技术者对滑坡基本地质理论的掌握程度和对遥感基本原理及基本技术的了解程度,这些都需要我们,特别是年轻的滑坡工作者不断努力学习、探索和创新,在应用中不断发展和完善数字滑坡技术。

参考文献:

- [1] 唐亚明,张茂省,薛强,等.滑坡监测预警国内外研究现状及评述[J].地质论评,2012,58(3):533-541.
- [2] Wang Z H. Preliminary study for digital landslide[C]//Towards digital Earth - Proceedings of the International symposium on Digital Earth. Beijing: Science Press, 1999: 715-717.
- [3] 王治华. 滑坡遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [4] 王治华. 滑坡遥感调查、监测与预警——以西藏帕里河滑坡为例[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
- [5] 王治华. 数字滑坡技术及其在天台乡滑坡调查中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 516-520.
- [6] 王治华. 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, 1995, 7(3): 1-8.
- [7] 王治华, 吕杰堂, 刘琼, 等. 青、甘、川、滇进藏公路、铁路沿线地区地质环境遥感调查[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [8] 王治华, 周英杰, 徐斌, 等. “5·12”汶川大地震震中区映秀镇地震灾情及次生地质灾害遥感初步调查[J]. 国土资源遥感, 2008, 20(2): 1-4.
- [9] 王治华, 郭兆成, 杜明亮, 等. 基于数字滑坡技术的暴雨滑坡、泥石流预警、监测模型研究[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 303-309.
- [10] 王治华. 西昌东西河流域环境灾害及防治[C]//王思敬, 黄鼎承. 攀西地区环境工程地质. 北京: 海洋出版社, 1990: 300-333.
- [11] 朱平一, 李沛, 孔纪名. 雅砻江二滩水电站库区泥石流[J]. 山地研究, 1995, 13(4): 273-278.
- [12] Lan H X, Wu F Q, Zhou C H, et al. Spatial hazard analysis and prediction on rainfall-induced landslide using GIS[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(7): 703-708.
- [13] 石菊松, 吴树仁, 石玲. 遥感在滑坡灾害研究中的应用进展[J]. 地质论评, 2008, 54(4): 505-514.
- [14] 钟颐, 余德清. 遥感在地质灾害调查中的应用及前景探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 134-136.
- [15] 童立强, 郭兆成. 典型滑坡遥感影像特征研究[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 86-92.
- [16] 王治华. 面向新世纪的滑坡、泥石流遥感技术[J]. 地球信息科学, 1999, 1(2): 71-74.

Digital landslide technology and its typical application

WANG Zhihua

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

Abstract: In order to change the condition of the traditional Landslide Remote Sensing, with low efficiency and survey precision, also having difficulty being improved, the author put forward the concept of “Digital Landslide” in 1999 after years of practices and exploration. This new concept makes the traditional geological landslide develop into a new “Digital Landslide”, which can be expressed in digital form and has a three-dimensional space, multidimensional time information and multiple elements. Digital Landslide technology system compose of four parts: the interpretation basic technology, the remote sensing identification technology, landslide database and model. In recent years, digital landslide technique has successfully been applied to the construction of large hydroelectric power station, mountain transportation line, regional development, environmental governance, earthquake resistance and disaster reduction. Besides, it has also been used in large-scale individual landslide investigation and research. Significant economic and social benefits have been achieved and effectively serves have been provided to the national disaster prevention and mitigation strategies. Tibet Pali River landslide and Tiantaixiang landslide in the east part of Sichuan province were used in this paper as examples to explain the innovative application of Digital Landslide Technology.

Key words: digital landslide; application of digital landslide technology; Pali River landslide; Tiantaixiang landslide

(责任编辑: 刁淑娟)