

数字滑坡技术及其应用

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,就是以遥感(RS)和全球定位系统(GPS)方法为主,结合其它勘探、试验、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;利用GIS技术存贮和管理这些数字信息;在此基础上,根据滑坡地学原理进行空间分析,研制各类模型,服务于滑坡调查、监测、研究、滑坡灾害评价、危险预测、灾情评估、滑坡防治等。本文还通过金龙山三维数字模型、卫星监测易贡滑坡、三峡库区重点城镇滑坡、干将坪滑坡遥感调查说明数字滑坡技术的实际应用。

[关键词] 数字滑坡技术 三维数字模型 易贡滑坡监测, 三峡滑坡 干将坪滑坡

1 前言

20世纪80年代初,从为二滩水电工程前期论证服务为主的‘西南高山峡谷水能开发遥感试验项目’起,我国开始了应用遥感技术进行区域性滑坡、崩塌、泥石流调查(以下统称滑坡)。至20世纪末,在雅砻江中上游、红河上游、三峡库区、黄河中游、金沙江下游以及宝成、成渝……等多条铁路、公路沿线等地区进行了以中小比例尺调查为主的区域滑坡遥感调查。该阶段主要使用黑白或彩色红外航片及79米和30米空间分辨率的美国陆地卫星图像。调查方法以借助于立体镜进行目视解译航片像对为主,配合一些地面验证。解译结果通过目视转绘到相应比例尺的地形图上。该方法使我们能居高临下观测地物,使部分野外工作转移到室内,在一定程度上提高了工作效率,减轻了野外工作强度,特别在危险及气候恶劣地区,有很大优越性。但由于地面分辨率较低、图像畸变,加上目视解译及转绘均带来较大误差,影响调查结果的精度,从而影响了方法的使用。大量纸质资料的处理、存贮、更新、交流也很不方便。这些不足促使我们一直在思考解决问题的途径。经过长期的遥感滑坡调查研究实践,认为设法获取与地理坐标配准的数字遥感解译结果是改善传统滑坡遥感调查方法的关键,但这必须借助于其它技术。

信息科学技术是20世纪发展最快的科学技术之一,其中的遥感技术在认识地球环境及探索宇宙强大需求的推动下更是飞速发展。美国1975年发射的第一颗陆地卫星图像的空间分辨率只有79米,5个波段。进入21世纪,遥感卫星数据已极大丰富,各类卫星数据的空间分辨率已成系列,可以根据实际需要购买,当前空间分辨率最高的商用卫星快鸟数据图像已达到0.61米。光谱特征也更加丰富,不但有我们常用的多波段,更有数百个波段的高光谱。上世纪末,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。这些遥感技术的进步,加上计算机容量及计算能力的迅速提高,各类功能强大软件的出现等使改善遥感调查滑坡的方法成为可能。

于是,在廿多年滑坡遥感调查及滑坡研究实践的基础上,在迅速发展的信息技术的影响下,受“数字地球”概念的启发,作者于1999年初提出“数字滑坡”概念^[1]，“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。我们先以二滩电站库区金龙山及西藏易贡滑坡为主要研究区,在滑

坡灾害及其环境监测、定量计算及建立三维滑坡技术研究方面取得一定的进展，又在进藏交通线地质环境遥感调查及三峡库区重点城镇滑坡遥感调查中获得实际应用。

2 什么是数字滑坡技术

数字滑坡技术，就是以遥感（RS）和全球定位系统（GPS）方法为主，结合其它勘探、试验、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、形变、地质构成、物理力学特征...）；利用 GIS 技术存贮和管理这些数字信息；在此基础上，根据滑坡地学原理进行空间分析，研制各类滑坡模型，服务于滑坡调查、监测、研究、滑坡灾害评价、危险预测、灾情评估、减灾和防治等。数字滑坡技术将使现有的获取、处理、存贮和显示滑坡信息的方式发生根本性变化，使我们能更准确地定性、定量地认识滑坡，方便、快捷地传输及交流滑坡信息，从而改善滑坡灾害调查、监测、防治、预测及滑坡理论研究工作。

数字滑坡技术大致可分为三大部分：滑坡基本信息获取、信息存贮和管理及专题服务技术。以下分别叙述。

3 RS+GCPs 获取滑坡基本信息

3.1 基础遥感图像

遥感图像是获取滑坡地表形态特征及其发育环境地表信息的最基本和最重要的信息来源。目前用于滑坡调查的遥感数据可分为全色（panchromatic）、多光谱(Multi-spectral)和雷达(SAR)三类。据传感器又分为航摄和卫星两大类。目前使用的卫星资料均直接为数字形式，但大部分航摄结果还是纪录在胶片上，须经高精度扫描后成为数字形式。

为了使遥感图像能消除畸变，获取的滑坡信息能准确地与地理坐标配准，需要有地面控制信息资料 - GCPs 和 DEM 对图像进行几何校正和地理坐标配准。GCPs（地面控制点群），实际工作中建设为工作区的地理坐标控制点网。获取 GCPs 信息的方法主要有采用国家级控制点、地形图采集、GPS 现场实测等。在建控制点网基础上用地形图、航片立体像对、卫星图像像对或雷达数据可产生 DEM。

经过合格几何校正和地理坐标配准的正射影像，才能作为获取数字滑坡基本信息的信息源或基础。本文不涉及数字图像处理的专门技术。

3.2 滑坡基本信息

滑坡基本信息就是滑坡要素及滑坡发育环境要素。

一个发育完全的滑坡，一般具有下列要素：滑坡体、滑坡周界、滑坡壁、滑坡台阶、滑坡舌、滑坡轴、滑坡鼓丘、拉张裂缝、剪切裂缝、扇形裂缝、鼓张裂缝、破裂缘、后缘洼地、滑动面、滑动带、滑坡床等。就滑坡解译而言，滑坡体和滑坡后壁两项为必要的最基本要素。其余的视工作比例尺及遥感图像的空间分辨率而定。

产生滑坡的基本地质环境要素有 3 项：能产生滑动面及滑坡堆积的物质（地层、岩体、堆积），使部分斜坡与山体分离的软弱结构面或带，使与山体分离的部分斜坡可能向前运动的临空面。

所以滑坡环境遥感调查主要包括地层、岩体或堆积体的岩类、岩性、风化程度、堆积特征等，断裂、节理裂隙、层面、第四系中的分界面等，斜坡的坡度、坡向、形态、高程等调查。

滑坡遥感调查还需收集及调查其它勘查、试验资料以及包括人类活动状况在内的触发因素资料^[2]。

3.3 解译方法

以合格的正射影像为基础，采用人机交互方式进行解译。在解译过程中，需随时进行图像处理，以最佳图像进行解译。人机交互解译获取的就是数字滑坡信息。

3.4 图像可识别滑坡的规模

遥感是从远距离了解滑坡，各类遥感图像的最小可识别滑坡及地质环境的规模，除了与图像的质量及地面分辨率有关以外，还与滑坡本身的类型、典型性以及周围其它地物在图像上的反差比有关。

就识别任一单要素而言，该要素在图像上应至少覆盖 10×10 个像元，由此，最小可识别的滑坡至少覆盖 $10 \times 10 \times 2$ 个像元。不同地区不同类型滑坡的识别情况是不同的。根据实践，至少覆盖 1000 个像元图像的滑坡体才有可能分析其各要素的特征，并进行定量分析，覆盖 2000 像元以上的滑坡才可能识别其要素的细部特征^[2]。同样尺寸的图像，分辨率高的像元就多，能解译更多的内容。但是，并不是图像分辨率越高越好，某些大规模的滑坡如易贡滑坡等用高分辨的图像难以识别其整体，由于数据量大，使用也不方便。所以滑坡遥感调查的工作比例尺不同，滑坡规模不同所需图像的分辨率也不同。

4 数字滑坡信息的存贮和管理

数字滑坡信息的存贮和管理是 GIS 技术特别是数据库技术问题。本文不涉及专门的技术问题，只讨论我们对建设滑坡数据库的思路及技术概念。

在获取数字滑坡信息后建立滑坡数据库至少需有以下步骤：

(1) 进行数据库的‘需求’分析，应根据不同的目的及‘需求’来设计数据库，对一个项目或地区而言，主要‘需求’是项目调查区或地区滑坡资料的查询、更新、表达、分析；

(2) 根据‘需求’检查、分析滑坡数据库所需要的数据，如有不足应设法补充、修改、整理；

(3) 确定所采用数据库软硬件设备；我们目前采用较多的是软件为 Arc/Info, ArcSDE, 由于图像的数据量大，需采用较大内存（1G），和较大硬盘（80G）的计算机；

(4) 将所获取滑坡数字信息分类并根据软件的要求进行格式转换。如影像数据有各种影像格式，需要转换为带有地理坐标的影像格式（Geotiff.等），如果需要用 ArcSDE 软件管理的话，还需要进行格式转换。如历史统计数据，可分为两大类：有空间准确位置的统计数据 and 没有空间准确位置的统计数据，需要分别进行处理。前一种可以依据空间位置用 ArcSDE 的点状图层存储；而后面一种则可以空间展布到所需区域范围进行数据的转换和组织（如以县、乡、村为单位，或以流域为单位等）。遥感解译的定量数据如是人机交互解译的图像数据，需要转换为矢量数据并按照滑坡的基本要素（滑坡体、滑坡壁等）进行数据的组织。

(5) 数据编码；

(6) 为了使用方便，对遥感解译的滑坡空间数据（经地理坐标配准的数据）必须合理组织，即各要素分别存贮在各自的图层中，采用 GeoDatabase 的方式进行数据存储；

(7) 分不同的数据类型进行滑坡综合数据库的具体装载设计。

5 数字滑坡的专题服务技术

数字滑坡的专题服务技术是指在获取数字滑坡信息及建立数据库的基础上，实现为各种应用目的服务的的技术。本文以某库区金龙山滑坡、西藏易贡滑坡和三峡库区重点城镇滑坡的数字滑坡工作实例介绍专题服务技术 - 建立三维滑坡、滑坡调查与监测、空间分析等的应用。

5.1 金龙山三维数字模型的应用

经过航摄资料数字化、获取大地坐标控制点（GCPs）、生成数字地形模型（DTM）、航片正射校正、正射图像镶嵌、收集勘探、钻探资料、生成三维模型等主要技术步骤建立了金龙山三维滑坡模型^[3]。滑坡三维数字模型，在工程上有广泛的用途，是改善观察条件、提高定性、定量解译精度的新科技手段。具体用途如下。

5.1.1 滑坡立体演示

金龙山立体影像是金龙山三维数字模型的表现形式之一，它可从多个方位立体表现该斜坡的地貌形态(图1)。其栅格图可显示滑坡各部分的空间位置及相互关系，并对所有的层面对象进行等值线显示，图2为滑床的 P_{ly}/P_{ll} 岩层面以及滑坡滑动面的等值线显示。该模型使我们可从不同的角度观察金龙山滑坡，供研究及布置勘探、监测工程，介绍情况等各种用途使用。

5.1.2 获取滑坡地形线或等高线

DTM 的等值线可形成地形线特别是等高线形式供各种用途使用。不同采样间距的 DTM，其地形线的精度不同，采样点越密，地形线的精度越高。

5.1.3 求解滑坡空间信息

利用立体模型可求解滑坡体上各点的空间位置坐标、地形坡度、计算不同点之间的空间距离等信息。

5.1.4 切取滑坡地形剖面

利用数字地形模型的各种形式（图像、格网、等值线等）可以在其任意位置，切取任意方向(包括直线和折线)的地形剖面，如图3。加入地形剖面及勘探、钻探等资料后，便形成地形地质剖面。

5) 计算滑坡面积和方量

三维模型的体积计算主要用于获得块体的体积或施工所需的挖、填方的方量。其计算思路是：

根据三维模型获得要进行体积计算块体的地面高程（三维模型的顶面）信息；由给定的设计底面或通过一定的钻孔控制，根据滑坡地学原理，用计算方法产

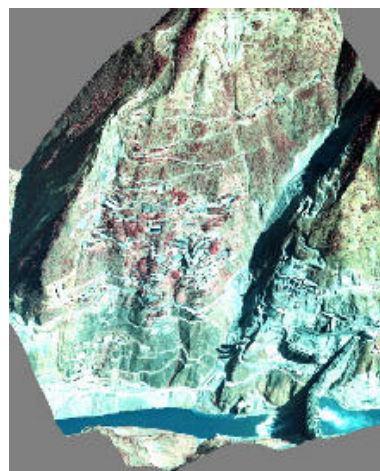


图1，金龙山立体影像

Fig.1.Stereo image of Jinlong mountain

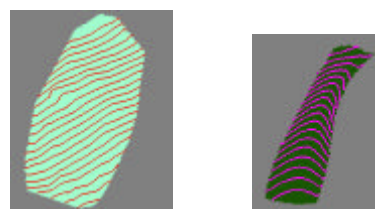


图2，地层层面（左）和滑动面（右）的等值线图

Fig.2, Contour for stratigraphic Layer (left) And slide face (right)

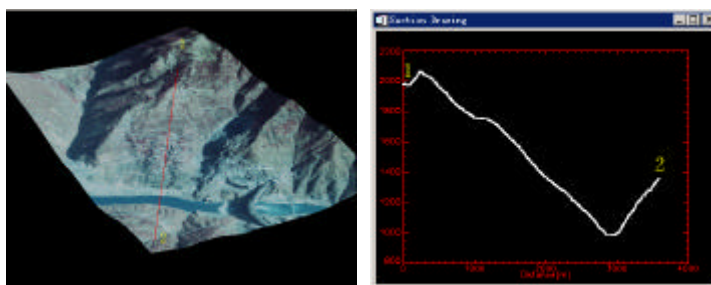


图3，从金龙山滑坡立体模型切取剖面

Fig.3, Main profile from stereo image of Jinlong mountain

生的底面模型来获得要进行体积计算的块体的底面高程信息； 在圈定的滑坡（或其它块体）范围内，利用离散的方法将计算块体划分为若干微小单元，由该微元的面积和顶、底高程得到其体积，所有微元体积的积分便是三维模型（块体）的体积^[4]。划分的单元越小，所获得的体积精度越高。

以金龙山 II 区滑坡体积计算为例，将滑体边界投影到水平面上，并在水平面上按 4m（可任意设定，愈小愈精确）单元对其进行离散化，这样每个单元的面积为 16m²，位于边界的单元根据四舍五入的原则取舍。如前述，根据三维模型，我们可以得到每一点的地面高程，所以可获得金龙山 II 区滑坡地面（顶面）模型，从而获得滑坡地表面积。

根据研究区的钻孔资料及地学分析我们用多项式拟合一个曲面，即金龙山 II 区滑坡底面模型，顶底面结合便组成滑坡体的外围面。对所有位于边界范围内的各个微元进行体积计算，再对所有微元体积积分，便获得金龙山 II 区滑坡地面面积及体积结果。

水平面上投影面积为：135935.42m²

滑坡地面面积为：151193.66m²

滑坡体积为：3824701.50m³。

表 1 易贡滑坡监测所用卫星数据

Tab. Satellite data for Yigong Landslide Monitoring

卫星数据 类型	数据特征	分辨率	接收时间
TM5	Multi-spectral	30m	11/15/1998
TM5	Multi-spectral	30m	12/17/1998
CBERS-1	Multi-spectral	20m	4/13/2000
SPOT4	Multi-spectral	20m	5/4/2000
CBERS-1	Multi-spectral	20m	5/9/2000
IKONOS	Multi-spectral	4m	5/9/2000
ETM	Multi-spectral	15mand30m	5/20/2000
SPOT2	Multi-spectral	20m	6/16/2000
IKONOS	Multi-spectral	4m	9/20/2000
IKONOS	Multi-spectral	4m	10/20/2000
ETM	Multi-spectral	15mand30m	12/30/2000

5.2 卫星监测易贡滑坡

2000 年 4 月 9 日，西藏易贡地区发生的滑坡是近年来地球上发生的最大规模的滑坡活动。由于滑坡地处青藏高原东南部的高山峡谷中，交通十分不便，我们当即决定采用卫星遥感技术监测该滑坡的活动及周围环境^[5]。先后共使用了滑坡前后及易贡湖溃坝后的 5 种不同类型的 11 个时相的卫星数据，见表 1。经过建立 DEM、数字图像处理形成高精度图像，以人机交互的解译方式对易贡滑坡后的滑体状态、易贡湖的变化及易贡滑坡造成的灾害情况进行了监测。

5.2.1 4 月 9 日滑坡前的地质环境

卫星解译如下：扎木弄沟长约 8.7km，流域面积 28.8km²，沟的平均比降 382‰，上陡下缓，最陡处为沟头以下约 2000m 处，比降达 641‰。沟上部呈冰川角峰状，5520m 以下至约 4500m 的陡峭斜坡上有大量破裂面及深大的楔口，此处将不断发生以崩塌为主的斜坡破坏。沟头北侧与 4 个粒雪盆地相接，相距 600m 处有一条宽 500~650m 的冰川通过，沟

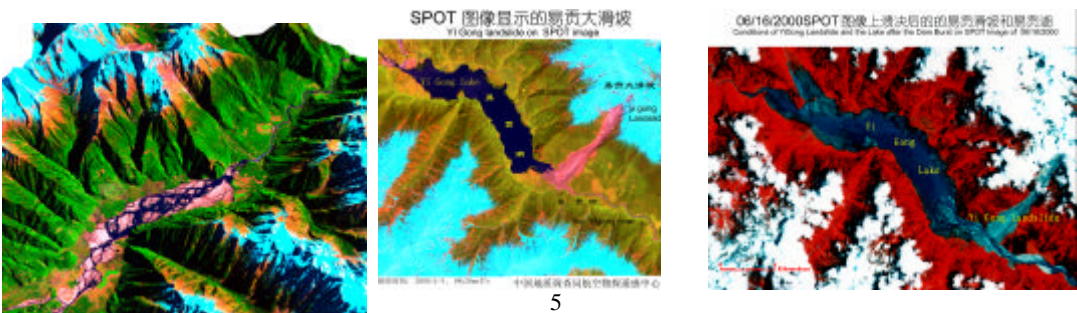


图 4，2000-4-9 易贡滑坡前（a-左）滑坡后（b-中）和溃坝后（c-右）的易贡峡谷

头分水岭两侧均受到严重侵蚀。其地质环境特征表明扎木弄沟是一条可能发生崩塌、滑坡、碎屑流、泥石流综合灾害的沟谷，如图 4(a)。

5.2.2 滑坡监测、性质判断及危险性预测

4 月 13 日至 6 月 16 日的卫星监测表明：4 月 9 日大规模活动后的易贡滑坡堆积整体基本稳定，前缘及后端局部有变化。

分析认为易贡滑坡是喜马拉雅造山运动地貌演变过程中的一次大规模重力侵蚀活动，活动性质为高速滑坡碎屑流，推测由雪崩触发。

滑坡堵断易贡河后使水流呈网状的易贡盆地成为一个高原湖泊，图 4(b)。监测表明湖水增加迅速，结合滑坡坝前缘变化及周围地质环境分析，预测滑坡坝随时有溃决的危险，会给下游造成严重灾难，并将结果通过中国地质调查局的 internet 发往西藏前线抢险救灾指挥部。6 月 10 日，滑坡坝溃决，与卫星遥感监测所预测的结果相符。图 4(c)。

5.2.3 易贡湖监测及溃坝洪水估算

卫星监测显示自 4 月 9 日至 6 月 10 日，易贡湖水面由滑坡前的 10.728km² 增加到溃坝时的 52.855 km²，水位上升约 60m。溃坝后 6 天水位下降至 20.335 km²，见表 2。

由湖面及水位变化估算，滑坡坝溃决后 6 天内下泄的洪水总量约为 23 亿立方。这些洪水加上冲开约 2.5 公里宽的滑坡坝时所挟带的泥沙，成为总计约 24 亿立方的特大规模挟沙洪水。

5.2.4 灾情估算

遥感监测了易贡滑坡在下游 120 km² 范围内造成的灾害：其前缘阻塞了易贡河，并淹埋了原堆积扇上约 4km² 的农田和村庄。

易贡湖水迅速上涨，淹没了海拔 2280m 高程以下大约 32.4km² 范围内的所有农田、村庄和道路。疯狂下泄的特大规模挟沙水流，冲毁了所经之处的道路、农田及村庄；冲毁了通麦大桥；毁坏了下游两岸大量林木植被；在下游 120km 的主河道两岸触发了 35 处斜坡表层滑塌、浅层滑坡及坡面泥石流，最大的一处坡面泥石流达 0.8km²，使下游河道加宽 2~10 倍以上；影响范围超过下游 120km，见表 3。

5.2.5 易贡滑坡坝溃决后的监测

滑坡坝溃决后，我们又用 2000 年 6 月 16 日~12 月 30 日的 4 个时相的卫星数据（见表 2 最后四行）对易贡滑坡坝溃决后的滑坡堆积、易贡湖及下游环境进行了监测，结果如下：

（1）滑坡堆积：如图 5，2000 年 10 月 20 日 IKONOS 图像显示的易贡滑坡堆积。

表 2 易贡滑坡前后卫星监测易贡湖水变化情况

编号	监测时间	易贡湖水面积 (km ²)	水面高程 (m)	增加的水量 (10 ⁸ m ³)
1	1998-12-17	10.728	2210	0.000
2	2000-04-13	18.909	2214	0.854
3	2000-05-04	33.659	2225	5.143
4	2000-05-09	36.32	2228	7.062
5	2000-05-12	37.979	2229	7.707
6	2000-05-20	43.121	2234	12.345
7	2000-06-10*	52.855	2270	22.590
8	2000-06-16	20.335	2216	1.178
9	2000-12-30	9.280	2209	-0.267

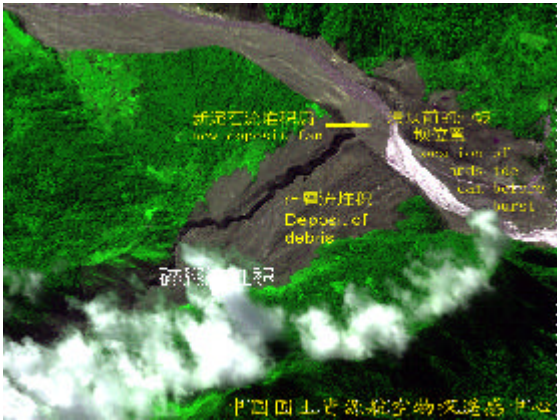


图 5 溃坝后的易贡滑坡堆积分解图像

坝体溃决后滑坡堆积开始逐渐解体。溃决的易贡河水冲开了滑坡坝，在坝体前部形成了一个宽为 70~180m 的河道将滑坡堆积分解为面积分别为 2.728 和 1.790km²，的两块。位于扎木弄沟下游的北东块，又有一条顺坡向的泥石流沟发育，该沟长约 1.38km，宽约 40~100m，将北东块滑坡堆积切分为东南和西北两块，沟口有新的泥石流堆积扇发育。位于西北的仍为最大的一块堆积体，但在其表面已发育一些顺坡向的较小和较浅的冲沟，堆积体有被进一步分解的可能。据 2000 年 12 月 30 日 ETM 数据三维图像与 6 月 16 日三维图相比易贡河河床位置明显向南摆动，最大摆动距离为 70m，但仍然未到达滑坡前的易贡河道位置。滑坡堆积面积与体积分别较半年前减少了 0.107 km² 和 0.015 亿 m³。该结果说明易贡河床虽有摆动，但已处于较稳定的自然侵蚀状态。

(2) 易贡湖，溃坝后，由于湖上下游的落差大，易贡湖水很快下泻，湖面迅速恢复到与滑坡前相似的湖水面积。

(3) 滑坡坝下游，溃坝洪水成灾范围超过下游 300 公里。

表 3 易贡滑坡下游 120 公里以内触发的斜坡表层活动统计

编号	面积 (km ²)	编号	面积 (km ²)	编号	面积 (km ²)
1	0.3372	13	0.3212	25	0.0880
2	0.0296	14	0.0336	26	0.0400
3	0.0452	15	0.3196	27	0.0152
4	0.0500	16	0.1028	28	0.0720
5	0.0224	17	0.4460	29	0.8800
6	0.0836	18	0.2476	30	0.1556
7	0.0568	19	0.0684	31	0.0212
8	0.2660	20	0.0308	32	0.0144
9	0.3884	21	0.0140	33	0.3580
10	0.2188	22	0.3160	34	0.1016
11	0.0628	23	0.1420	35	0.1192
12	0.0164	24	0.0356	合计	5.5200

5.3 三峡库区重点城镇滑坡遥感

“三峡库区重点城镇滑坡遥感”是正在执行中的地质大调查项目。目标任务是利用高精度遥感资料，在三峡库区首段至中段的新秭归县、巴东、巫山、奉节、云阳、万州 6 个重点城镇及香溪河、归州河下游沿岸，开展 1:1 万比例尺地质灾害遥感调查，查明调查区滑坡等地质灾害的分布特征，研究其发育规律，提出防治措施建议。本项目工作采用数字滑坡技术方法进行，这里介绍一些大家关心的进展。

5.3.1 以最新的数字图像为基础

(1) 正射航摄图像

2003 年中国地质调查局向中国国土资源航空物探遥感中心（航遥中心）下达了“长江上游 1:5 万比例尺彩色红外航空摄影”基础调查项目。航遥中心克服了三峡库区雾气重，能见度差，气流大等不利于航摄工作的种种困难，于 2003 年 3 月底完成了航摄任务，获取了三峡库区第一期蓄水前的三峡库区彩红外航摄资料。该航摄资料真实地记录了三峡水库蓄水前该段长江最低水位时三峡库区的水面、库岸及两岸山区的环境现状，从而成为三峡

工程、三峡水库区域及长江流域唯一的一份完整记录整个三峡库区蓄水前原貌的珍贵历史记录。该资料经高精度扫描（14 μ）及前述数字处理形成 1:1 万彩色正射影像（1m 分辨率），以此作为本项目工作区的基础图像。

(2) Quick Bird 卫星图像

由于三峡库区的航摄难度很大，航摄前，对是否能及时获取航摄资料没有把握，事先订购了 Quick Bird 卫星图像数据，由于天气原因只买到一部分数据，也制成 1m 分辨率图像辅助使用。

5.3.2 反映现状的工作区地理底图

基础地理控制也称为基础空间控制，是确定调查区地物空间位置的最基本的重要资料。长办 20 世纪 80 年代测的 1:1 万地形图，由于三峡电站施工及移民迁建、新城镇建设等大规模工程活动极大地改变了相当部分地表状况，原有地形图已不能完全准确地反映地形地物现状。所以，基础地理控制是目前三峡库区非常急需的，也是本项目工作必不可少的基础资料。

采用数字摄影测量与传统的解析测图方法相结合的技术，基于最新航摄资料和测绘控制点，我们完成了包括国家等级的基础控制点数据和加密点的控制点网以及反映三峡库区第一期蓄水前地物地形的 DEM，并由此制作了 1:1 万，含 5m 等高距地形线的最新工作区数字地理底图。

5.3.3 滑坡分布图

基于 1:1 万正射影像和 DEM，分别在 Photoshop、ArcGIS、CorelDraw 等软件平台上以人机交互的方式进行了以滑坡为主的地质灾害解译。解译内容包括识别地质灾害类型、确定边界、主滑方向、前后缘高程、估算面积、坡度、坡向等，并将解译结果直接置于地理底图上，完成工作区滑坡分布图。此外，结合地质资料及其它环境资料，解译滑坡表面覆盖、地层岩性、构造等。该分布图上的滑坡有准确的空间位置。只需在计算机屏幕上点击它，便可以显示它的位置、规模、发育环境等其它特征。

5.4 千将坪滑坡遥感调查

“7.13”千将坪滑坡发生后，我们当即采用数字滑坡技术解译航摄图像(2003 年 3 月底 135m 高程临蓄水前航摄)和现场验证相结合的方法获取了千将坪新老滑坡的一些特征资料，并对其规模、滑程及滑坡前后的地质环境作了初步的分析^[6]。2003 年 11 月及 2004 年 4 月我们又两次来到千将坪，对滑坡进行进一步地面调查及 GPS 测量，并利用实测 GPS 数据重新对航片进行几何校正，进一步解译古滑坡特征要素。通过蓄水前航片及“7.13”滑坡后的调查资料对比我们对“7.13”千将坪滑坡的活动性质及特征有了较前更进一步的认识。

5.4.1 “7.13”千将坪滑坡的活动性质

“7.13”千将坪滑坡是千将坪古滑坡的大规模复活，因为：

航片显示“7.13”滑坡前的千将坪斜坡具有古滑坡地貌形态，滑坡的边界清晰可辨，滑坡后壁、侧壁组成一个簸箕形的圈壁，其下为相对平缓的滑坡堆积，新滑坡东侧边界发育在古滑坡东部位置，地面调查表明，边界东面为厚层泥土夹碎石的滑坡堆积，未见基岩分布，在“7.13”滑坡后壁的后面，还存在着古滑坡后壁，具有发生滑坡的地质环境条件。

5.4.2 新、古千将坪滑坡特征的定性分析及定量估算

(1) 古滑坡

千将坪古滑坡的运动方式为一深层推移式基岩滑坡。并推测：滑动面沿千佛崖组泥岩的层面和缓倾裂隙发育；西侧边界为一组陡倾裂隙面；北侧后壁以砂岩层面为主，东侧边界上部为一组陡倾裂隙面，下部为原单斜坡上的沟谷，滑坡剪出口应在河床附近，接近 100m 高程。

估算滑体投影面积约 0.46km^2 ，体积接近 2800 万 m^3 ，主滑方向约 155° 。

2) “7.13” 新滑坡

“7.13” 滑坡的运动方式为高速厚层推移式滑坡，是古滑坡的大规模（大部分滑体）复活。

新滑坡的实际滑距应大于 200m。

根据后壁、侧壁、滑体表面形态及主滑方向的剖面图推测，滑坡厚度约在 30 - 100m 范围，平均厚度约为 60m，新老滑坡滑体的厚度相似。

滑体的表面投影面积约为 0.40km^2 ，新滑体的规模约为 2400 万 m^3 。

5. 结语

在现代遥感技术、计算机技术支持下实现的数字滑坡技术将使已进行了 20 多年的传统滑坡遥感调查方法在获取、处理、存贮和显示滑坡信息的方式发生根本性变化，使我们能更准确的定性、定量地认识滑坡，方便、快捷地传输及交流滑坡信息，从而改善滑坡灾害调查、监测、防治、预测及滑坡理论研究工作。

参 考 文 献

- [1] Wang Zhihua, Preliminary Study for Digital Landslide, Towards Digital Earth –Proceedings of the International Symposium on Digital Earth, Science Press 1999.1.p718-722
- [2] 王治华, RS + GCPs 获取滑坡基本信息, 中国地质灾害及防治学报, 2004.3, 第 15 卷第 1 期, 94-101
- [3] 王治华 吕杰堂 数字滑坡研究新进展, 2002 年环境遥感学术年会论文集, 中国环境遥感学会, 205-214
- [4] 李志林, 朱庆, 数字高程模型, 武汉测绘科技大学出版社, 2000
- [5] 王治华, 吕杰堂, 从卫星图像上认识西藏易贡滑坡, 遥感学报, Vol.5, No.4, 2001.(6): 312~16
- [6] 王治华等, 秭归沙镇溪镇千将坪滑坡航空遥感调查[J]. 国土资源遥感, 2003 年第 3 期, 5-10