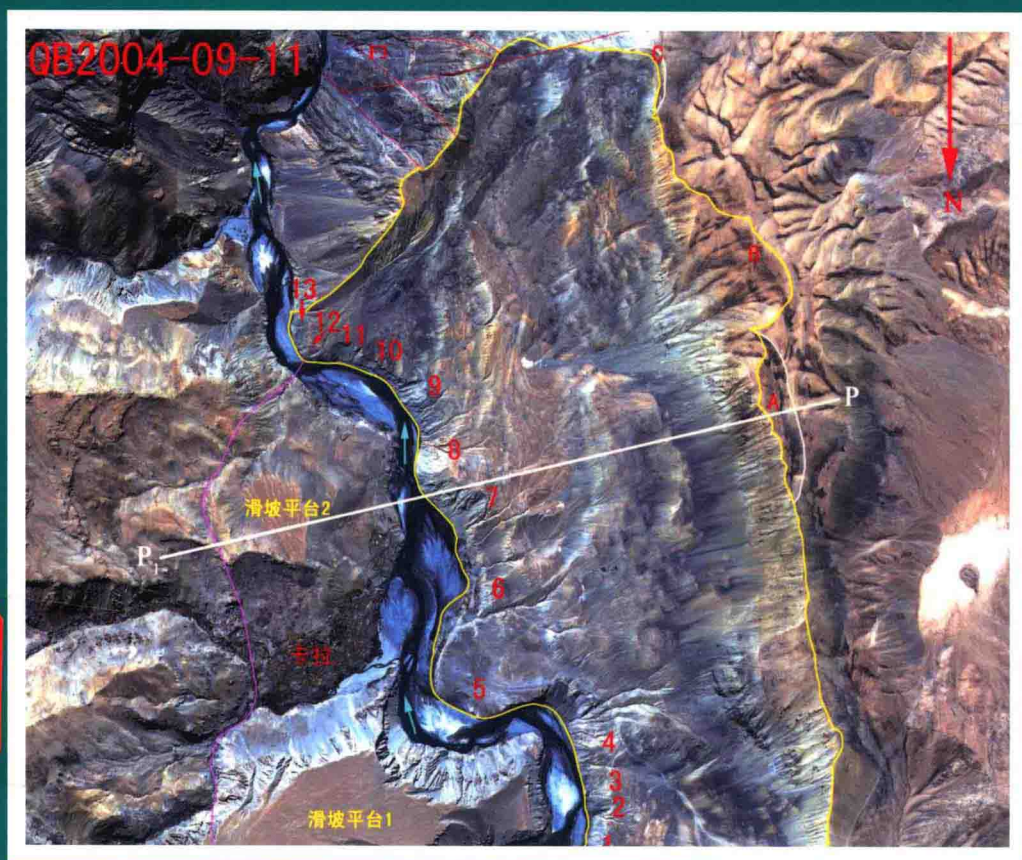


HUAPO YAOGAN  
DIAOCHA JIANCE YU YUJING  
— YI XIZANG PALIHE HUAPO WEILI

# 滑坡遥感 调查、监测与预警

——以西藏帕里河滑坡为例

王治华 著



地质出版社

# 滑坡遥感调查、监测与预警 ——以西藏帕里河滑坡为例

王治华 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

## 内 容 摘 要

本书主要以西藏帕里河滑坡遥感调查与监测为例,介绍了数字滑坡技术在滑坡调查、监测与预警中的应用。

遥感调查与监测结果揭示了喜马拉雅山西段这一人迹罕至的高海拔、高辐射、干旱、寒冷的高山峡谷荒漠地区的地质灾害与地质环境的现状及变迁。

本书可供遥感应用、地质工程、防灾减灾工程等领域的工程技术人员、科研和教学人员、研究生参考使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

滑坡遥感调查、监测与预警:以西藏帕里河滑坡为例 / 王治华著. —北京:地质出版社,2015.4

ISBN 978 - 7 - 116 - 09226 - 6

I. ①滑… II. ①王… III. ①遥感技术—应用—滑坡—监测预报—西藏 IV. ①P642.22 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 072232 号

---

责任编辑:龚法忠 吴宁魁

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京市海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 66554642 (邮购部); (010) 66554627

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554686

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787 mm × 1092 mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

印 张:5

字 数:120 千字

印 数:1—800 册

版 次:2015 年 4 月北京第 1 版

印 次:2015 年 4 月北京第 1 次印刷

定 价:30.00 元

书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 09226 - 6

---

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

# 前 言

广义滑坡，泛指崩塌、滑坡、泥石流和碎屑流等一切斜坡坡面及沟谷的重力侵蚀现象。

近年来，由于全球气候变暖，异常天气现象，地震活动等触发因素增多；也由于社会经济发展，基础工程建设活动逐渐向山区深入，滑坡灾害的数量、分布、规模，活动频率和强度都大大增加，灾害损失严重。滑坡防灾减灾事业迫切需要空间信息技术提供更加准确的滑坡灾害与环境资料，特别是在地质环境复杂，灾害严重的山区进行有效、快速的遥感调查。

面对该项需求，在多年滑坡遥感实践的基础上，1999年，王治华提出了“数字滑坡”概念与实现数字滑坡的技术，此后，项目组又经过20余年的不懈探索与实践，目前已经形成了由理论、方法技术和应用模型组成的“滑坡遥感”系统。“数字滑坡技术”已成功应用于我国二滩、三峡、溪落渡、白鹤滩、乌东德、官地等大型水电站建设；川、滇、青、甘进藏交通线等山区交通线建设；长江上游攀枝花—泸州段、西昌东西河流域、香港大屿山等区域开发环境治理中的滑坡、泥石流、地质环境遥感调查和我国近年发生的主要大型个体滑坡遥感调查与监测。

本书以西藏帕里河滑坡遥感调查与监测为例，介绍该项技术在特殊山地环境的滑坡灾害及地质环境调查、监测中的应用。

选择境内帕里河流域作为典型应用实例，主要基于四个因素。

其一，帕里河流域位于特殊地质环境。

境内帕里河流域所在的青藏高原喜马拉雅山西段是一个地质环境复杂，挽近构造活动强烈，海拔高，地形切割剧烈，具多种地层岩类，极端寒旱气候与立体气候交叉，极少人类活动干扰的高原干寒荒漠半荒漠山地自然生态区域。由于该区被高原雪山阻隔，以往的调查及科学研究并未进入，长久以来该区域的大部分环境资料是空白的。遥感技术可在此发挥不可替代的独特作用。

运用数字滑坡技术可以基本查明本区的灾害与地质环境的现状与变化，调查结果显示这里地质灾害发育，类型众多，活动性强，由此，填补了境内帕里河流域灾害与环境资料的空白。同时，该区域斜坡重力侵蚀与环境现状与变迁研究结果，将丰富青藏高原西端这一无人活动干扰特殊环境地区地质环境演化理论。

其二，位于特殊的边境地区。

帕里河发育在印控克什米尔山区，流经我国西藏自治区西端的扎达县西北部后，跨越中印边境，下游进入印度，是一条国际河流。我国位于流域的中上游，境内流域的灾害与环境变化可能影响下游邻国。

其三，近期的帕里河滑坡灾害，波及下游印度，引起印方强烈关注。

2004年和2005年夏，帕里河发生滑坡坝溃决灾害，国土资源部收到了《西藏自治区



札达县帕里河堰塞湖溃决灾害应急调查报告》(以下简称为“报告”),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2420余万 $m^3$ ,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的安全。”

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,其中关于帕里河滑坡堰塞湖的要求非常具体:“……恳请中方能进一步提供从滑坡堆积体上下游拍摄的更为准确的照片。这些照片将有助于印度专家对堰塞湖情况作出更准确的评估……希望中方能在现已泄流的堆积体左侧采取泄流通道疏导措施(加宽、加深通道过水断面)。这些措施将有助于堰塞湖水量的下泄,从而降低堆积体溃塌发生的风险……”(据报告,2004)。

中国对帕里河灾害高度重视,西藏自治区有关部门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及抢险救灾,为实施救灾应急方案提供依据。灾情发生后,国家遥感中心及时组织水利部遥感中心、中国科学院遥感应用研究所、国家卫星气象中心等单位利用加拿大雷达卫星 RadarSat-1、美国气象卫星 MODIS、中巴资源卫星 CBERS-2 等中低分辨率卫星遥感影像对该地区的堰塞湖水面变化情况进行监测。

自2004年8月起,中印两国就如何解决帕里河洪灾隐患进行多次协商,并在北京就水资源合作问题举行了中印副部长级会谈。双方就帕里河堰塞湖问题及跨界河流报汛事宜进行了积极和富有成效的会谈。中国总理温家宝与印度总理发表的中印《联合声明》中,明确提到了帕里河的问题。该声明第9条称:“为回应印方关切,中方同意,一旦各方面条件允许,将采取措施,对帕里河的天然坝体进行有控制的泄洪。”

从印方的照会可知,印方迫切想了解滑坡堆积坝的详细且准确的情况。中国外交部同样希望有翔实的滑坡资料数据,作为妥善处理该边界灾害事件及进行外交谈判的事实依据。但是境内帕里河流域为交通困难的高山峡谷荒漠地区,一般的地面调查无法进入滑坡区调查灾害具体情况。分辨率较低的卫星也难以查明滑坡情况。2005年7月国务院总理温家宝、副总理曾培炎指示采用卫星遥感技术调查西藏帕里河堰塞湖水面变化及滑坡情况。

为执行这一指示,中国地质调查局根据国土资源部地质环境司的有关讲话,部署中国国土资源航空物探遥感中心开展此项工作,航遥中心组织了以王治华为项目负责的“西藏帕里河滑坡卫星遥感调查项目组”,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,中印双方都等着明确、具体的结果,时间紧,要求高,对数字滑坡技术是一种考验。

其四,该地区的滑坡遥感调查方法技术有所创新及发展。

主要表现在以下几方面:

(1) 调查区可能已成为迄今国内使用卫星类型最多,遥感监测时相最多的灾害区。

该项目采用了自0.6 m~250 m不同空间分辨率的7种类型20余个时相的卫星图像,监测了滑坡发生前后的帕里湖;采用了2003~2007年九个时相,以QUICKBIRD为主的高分辨率卫星图像监测了2004-06-22滑坡及其下游的危岩;采用了中高分辨率卫星图像进行了境内流域的灾害与地质环境1:5万遥感调查。

(2) 建立了可靠的解译基础。

与有关单位合作攻克了在高差大于 3000 m 的高山峡谷区采用卫星立体像对建立 1:1 万 DEM 的难关, 制作了符合国家测绘标准的重点调查区的 1:1 万 DEM, 从而使各时相的图像在一个统一的、精确的地理坐标上进行几何校正及配准, 为获得准确的调查和监测结果提供了可靠的解译基础。

(3) 根据获取的灾害与环境各要素资料, 通过时空分析, 建立了多种应用模型。

通过认真细致的人机交互遥感解译, 定性、定位、定量地获取了调查区的灾害与地质环境各要素基本资料; 并通过灾害与环境多因子在多维时空域的分析, 基于地学理论建立了①帕里河流域境内高原湖泊衰退模型, 揭示了帕里湖的历史、现状及演变。②建立了帕里河滑坡灾害预警模型, 提出了预警指标, 对可能的危害作出预警。

鉴于以上四个因素, 本书以帕里河滑坡遥感调查与监测为例, 说明数字滑坡技术在该类地区灾害及地质环境调查研究中的应用有重要意义。

由于本书是一个特殊地区的数字滑坡技术应用实例, 为了便于读者翻阅使用, 尽可能详细地介绍了工作方法, 解译过程及分析结果, 重要内容在不同章节有重复。

本书是集体劳动的结晶, 项目组成员分工如下: 徐起德、杜明亮、杜云艳、徐斌分别进行建立调查区 DEM、图像处理、计算及制图工作; 王治华负责, 郭兆成、李松、杨日红参加灾害与地质环境解译、时空分析; 王治华、李松、章铭陶、隋山川等进行野外调查验证; 王治华撰写本书全文。项目组成员抱着对国家负责, 不辜负总理期望的强烈责任感及通过数字滑坡技术了解该地区地质灾害与环境的探索精神投入了项目工作, 无论是室内还是野外工作, 都付出了艰辛和创造性的劳动。在项目组的努力下, 2005 年 7 月下旬项目启动, 同年 9 月便提交了遥感调查的阶段成果, 指出了造成 2004、2005 年堵河事件的滑坡位置、活动性质, 估算了滑坡及滑坡堆积坝的方量, 明确了堰塞湖的性质, 获取了滑坡堰塞湖水面变化的定量数据, 说明帕里河堰塞湖溃决造成的灾害主要在我国境内, 湖以下河谷的灾害是难以控制的, 下游村民防灾应以避让为主, 并预测今后在 2004-06-22 滑坡下游, 危岩活动造成堵河的可能性是存在的。以上阶段成果形成了国土资源部向国务院呈送的专题报告。

本书共分为五章, 第一章“数字滑坡”及帕里河地区遥感调查的技术方法, 第二章帕里河流域地质环境遥感, 第三章帕里河灾害遥感调查、监测与预警, 第四章帕里河滑坡与地质环境分析, 第五章结论与建议。

期望本书能帮助灾害与环境科学工作者、技术人员及相关专业学生了解数字滑坡技术方法, 同时了解我国青藏高原喜马拉雅山西段这一特殊地区的灾害与地质环境。

限于笔者水平, 错漏与不足之处, 恳请同行专家及读者给予批评指正。

王治华  
2015 年 3 月 20 日

# 目 录

## 前 言

第一章 “数字滑坡”及帕里河地区遥感调查的技术方法 .....	(1)
第一节 “数字滑坡”概述 .....	(1)
一、滑坡遥感历史回顾 .....	(1)
二、“数字滑坡”定义 .....	(2)
三、“数字滑坡”技术 .....	(2)
第二节 帕里河地区遥感调查技术方法 .....	(3)
一、工作流程 .....	(3)
二、信息源 .....	(4)
三、DEM及数字地理底图制作 .....	(5)
第二章 境内帕里河流域地质环境遥感调查 .....	(10)
第一节 自然地理概况 .....	(10)
第二节 地质环境遥感调查结果 .....	(11)
一、地形地貌 .....	(11)
二、地质构造与地层、岩体 .....	(12)
三、地震 .....	(19)
四、水体和植被 .....	(22)
第三节 1:1万重点调查区地质环境遥感调查结果 .....	(24)
第三章 帕里河灾害遥感调查与监测 .....	(26)
第一节 帕里湖卫星监测与预警 .....	(26)
一、帕里湖卫星遥感解析 .....	(26)
二、帕里湖卫星监测 .....	(28)
三、帕里湖预警 .....	(29)
四、堰塞湖溃坝下泄洪水量估算 .....	(30)
五、帕里湖灾害特点及预警 .....	(31)
第二节 2004-06-22滑坡卫星调查与监测 .....	(33)
一、滑坡位置及所处斜坡地质结构 .....	(33)
二、滑前危岩 .....	(33)
三、滑坡形态及活动特征 .....	(34)
四、滑坡规模初步估算 .....	(34)



五、RS + GIS 计算滑坡规模 .....	(34)
六、卫星监测结果 .....	(36)
七、滑坡形成条件及未来滑坡活动预警 .....	(37)
第三节 帕里湖以下峡谷段的危岩 .....	(37)
一、危岩 2 .....	(37)
二、危岩 3 .....	(38)
三、危岩 4 .....	(38)
四、危岩 5 .....	(38)
五、危岩 6 .....	(40)
六、危岩 7 .....	(41)
七、危岩 8 .....	(41)
八、危岩 9 .....	(41)
九、危岩 10 .....	(42)
第四节 帕里湖以下宽谷段的卡拉滑坡 .....	(43)
一、滑坡位置、形态、规模遥感解译 .....	(43)
二、滑坡活动性监测 .....	(45)
三、滑坡形成条件及活动过程分析 .....	(46)
第五节 1:5 万调查区域的大型地质灾害 .....	(47)
一、崩塌 .....	(48)
二、滑坡 .....	(49)
三、碎屑流 .....	(55)
四、冻融碎屑流 .....	(56)
五、泥石流 .....	(59)
六、溜沙坡 .....	(60)
七、冰碛物 .....	(61)
<b>第四章 境内帕里河流域滑坡与地质环境分析 .....</b>	<b>(65)</b>
一、以滑坡为主的斜坡重力侵蚀概述 .....	(65)
二、发育特大规模滑坡的基本环境条件 .....	(66)
三、滑坡与易滑地层 .....	(66)
四、滑坡与地质构造 .....	(67)
五、滑坡与地形 .....	(67)
六、滑坡与水及冻融作用 .....	(67)
七、滑坡与植被 .....	(68)
<b>第五章 结论与建议 .....</b>	<b>(69)</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>(71)</b>



# 第一章 “数字滑坡”及帕里河地区 遥感调查的技术方法

## 第一节 “数字滑坡”概述

“数字滑坡”是怎么产生的？什么是“数字滑坡”？什么是“数字滑坡技术”？

### 一、滑坡遥感历史回顾

我国的滑坡遥感是在为山区大型工程服务中产生并逐渐发展的。1980年启动，由谷德振先生和陈述彭先生任项目负责的“西南高山峡谷地区水能开发遥感应用试验暨二滩水电站可行性研究”是我国首次在高山峡谷地区进行的大规模遥感应用试验。“二滩电站库岸稳定性遥感研究”是该项目设立的课题之一，采用遥感技术调查库区两岸滑坡、泥石流，评价它们对二滩电站建设与运行的影响是课题的主要内容。自此以后，我国先后在红水河龙滩电站、长江三峡电站、黄河龙羊峡电站、金沙江下游的溪洛渡、白鹤滩、乌东德电站库区等区域，开展了大规模的区域性滑坡、泥石流遥感调查，为这些大型水电工程的可行性研究提供滑坡、泥石流灾害及环境基础资料。

20世纪80年代中期起，在宝成、宝天、成昆铁路等沿线进行了大规模航摄，调查滑坡、泥石流分布及危害。经过十年，完成了川藏、滇藏（部分路段）、南昆、内昆铁路等20余条新铁路线的滑坡、泥石流遥感调查。

90年代起，在公路选线、公路沿线防灾工程中，也使用了滑坡、泥石流遥感调查技术，如川藏公路、新疆乌奎公路、东北沈丹公路等。

在20世纪的最后十年，我国进行的区域滑坡、泥石流遥感调查面积覆盖超过10万平方千米。该阶段称为我国滑坡遥感的前期或前期滑坡遥感。

在滑坡遥感前期，我国主要进行中等比例尺（1:5万—1:20万）的滑坡宏观调查。主要的调查内容为：识别滑坡、制作区域滑坡分布图、认识滑坡发育环境、评价滑坡对大型工程施工及运行安全的影响等（王治华，1999）。其方法技术可概括为：主要使用黑白或彩红外航片，辅以79m和30m空间分辨率的美国陆地卫星图像（了解区域地质环境）；借助于立体镜目视解译航片像对或直接目视卫星图像，配合一定的地面验证，了解滑坡及其发育环境；解译结果通过目视地貌特征转绘到相应比例尺的地形图上，制作滑坡分布图。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，显示了明显的优越性，所以遥感技术逐步成为我国区域滑坡及其发育环境宏观调查不可缺少的先进技术，为山区大型工程建设的环境灾害调查及防灾减灾工作作出了重要贡献。

随着滑坡遥感工作的推进，前期滑坡遥感技术方法的不足之处也日渐显露，这些不足

之处主要表现为：①遥感信息源的局限性，当时的航摄图像为中心投影，其非线性畸变难以消除，MSS、TM 卫星图像的地面分辨率低，难以识别滑坡；②工作效率低，立体镜目视解译、手工转绘及成图工作效率低；③难以提高成果精度，目视解译及手工转绘均有较大误差；④成果表达为单一的纸介质，资料的处理、存贮、更新、交流很不方便。这些不足之处使前期滑坡遥感只能作为区域宏观调查手段，难以提供高精度的滑坡调查成果。

在长期滑坡遥感调查研究实践基础上，经不断探索，笔者认为如果能使遥感调查结果的每一个地物单元有确定的地理（空间）坐标及反映滑坡特征的属性是改善滑坡遥感调查方法的关键，这便是“数字滑坡”思想的雏形。

在这一思想指导下，在不断实践中，逐步摸索出一套新的技术方法，王治华于 1999 年在第一届国际“数字地球学术讨论会”上予以介绍。该方法称为“数字滑坡”技术，它是在我国前期滑坡遥感基础上，借助于先进信息技术创立发展起来的滑坡遥感新技术。迄今，数字滑坡技术的应用已超过十年，实践证明，数字滑坡技术是中国滑坡遥感进步的关键技术。

## 二、“数字滑坡”定义

在多年滑坡遥感调查实践的基础上，受 Albert Arnold Gore Jr.（1993）提出的“数字地球”概念的启发，借助于迅速发展的空间信息技术，笔者于 1999 年初提出“数字滑坡”概念：“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，多元就是与滑坡有关的微地貌、岩土物质、斜坡结构、区域地质环境等因素；多维就是三维空间和一或多维时间（多时相）；这些信息是数字形式的，有自己的确定空间位置和属性。

## 三、“数字滑坡”技术

“数字滑坡”技术，就是实现“信息化滑坡”的技术。具体方法为：在滑坡地学理论指导下，以遥感和空间定位（GCPs 或 GPS）方法为主，结合其他调查手段识别滑坡，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）：位置、形态、土地覆盖、变形和位移、地质构成等；利用 GIS 技术存贮和管理这些数字信息；在此基础上，对滑坡及其发育环境信息进行空间分析，服务于滑坡调查、监测、研究、灾害评价、危险预测、灾情评估、减灾和防治措施等。

“数字滑坡”技术使滑坡遥感前期的获取、处理、存贮和显示滑坡信息的方式发生根本变化，使我们能更准确地定性、定位、定量地认识滑坡，科学有效地存贮和管理遥感调查结果，方便、快捷地传输及交流滑坡信息，从而为改善滑坡灾害调查、监测、防治、预测及滑坡理论研究工作提供更加准确、丰富的滑坡信息。

“数字滑坡”技术的实现主要依赖于四类信息科学技术的支持：①遥感技术；②数字摄影测量及图像处理技术；③GIS 技术；④计算机技术。其他如灵镜（虚拟现实）技术、网络技术，也在滑坡过程研究、滑坡遥感监测、滑坡信息存贮和传输等过程中使用。

“数字滑坡”技术大致可分为七个部分：信息源、建立解译基础、滑坡遥感解译、时空分析、现场验证、制图和滑坡数据库。

## 第二节 帕里河地区遥感调查技术方法

### 一、工作流程

工作流程即根据目标任务及调查区情况，采用数字滑坡技术完成项目工作任务的步骤。

本项目工作的最初阶段是执行紧急救灾任务，接受任务后立即收集资料、订购数据、进行图像处理及解译，在一个多月的时间内拿出了有关2004年6月堵河滑坡的性质、估算规模及堰塞湖变化等初步成果资料，上报中国地质调查局及国土资源部，尔后才正式立项的。所以在立项前已做了一定的前期工作。

立项及项目设计后，收集（购买卫星数据）是一项需抓紧进行的工作。首先要了解各种空间分辨率、各类型卫星数据的特征，确定重大地质灾害监测的时段，再根据目标任务及经费预算确定订购的卫星数据及必须的地理控制信息源。

获得遥感及地理控制信息源后，即制作解译基础，这是一项较繁重的工作。

获取合格的解译基础后，基于滑坡地学原理，以人机交互获取滑坡及其发育环境的基本信息，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，从而定性、定位、定量地认识调查区地质灾害的类型、分布、规模、活动状况及与地质环境的关系。工作流程如图1-1所示。



图 1-1 帕里河滑坡卫星遥感调查工作流程



## 二、信息源

### (一) 遥感信息源

由于需进行不同比例尺、不同范围的遥感调查及帕里湖和其他重大地质灾害遥感监测，故采用多种类型多时相遥感图像。表 1-1 为本项目所采用的遥感数据源及其特征。

表 1-1 项目工作使用的遥感数据特征

卫星类型	波段特征	图像处理	覆盖范围	接收时间	用途
Landsat 7 ETM	可见光至红外的 8 个波段	经多光谱合成及融合处理，形成 15 m 分辨率的多光谱图像	78°14′ - 79°00′E, 32°50′ - 31°59′N, 共计 6878 km <sup>2</sup>	2000 - 06 - 02	1 : 5 万调查区及国境线附近的地质环境解译
ASTER	可见光 3 个波段，红外和短波 11 个波段及全色立体像对	经多光谱合成及融合处理，形成 15 m 分辨率的多光谱图像	78°18′02″ - 79°02′43″E, 31°50′53″ - 32°45′45″N; 约 7070 km <sup>2</sup>	2003 - 10 - 01	提取 DEM, 形成具有较 1 : 5 万地形图更准确的 15 m 分辨率的多光谱图像
CBERS - 2	CDD	彩色图像	帕里河附近地区	2004 - 6 - 15、7 - 14、9 - 4、12 - 21; 2005 - 6 - 14、8 - 31; 2006 - 7 - 10	监测帕里湖水面变化
SPOT - 5	可见光至红外的 5 个波段	经多光谱合成及融合处理，形成 2.5 m、5 m 和 10 m 分辨率的多光谱图像	SPOT - 2.5 m; 78°40′0″ - 78°46′15″E, 32°17′0″ - 32°22′15″N; 约 100 km <sup>2</sup> ; 10 m 分辨率约 5000 km <sup>2</sup>	2003 - 08 - 23 ~ 2003 - 10 - 10 的 5 景图像	了解滑坡灾害前重点区灾害与地质环境细节
QUICKBIRD	全色及多光谱共 4 个波段	经多光谱合成及融合处理，形成 0.6 m 分辨率的多光谱图像	78°46′37″ - 78°27′32″E, 32°17′12″ - 32°20′17″N; 约 100 km <sup>2</sup>	2004 - 09 - 11 2005 - 07 - 09 2005 - 08 - 01 2006 - 05 - 24 2006 - 08 - 04 2007 - 07 - 02 共 6 个时相	重点区灾害与环境调查与监测
OrbView	全色及多光谱共 5 个波段	制作 DEM 及高精度正射影像	约 190 km <sup>2</sup>	2006 - 10	重点区灾害与环境调查与监测，制作 DEM
ALOS	多光谱	经多光谱合成及融合处理，形成 10 m 及 2.5 m 分辨率的多光谱图像	约 4900 km <sup>2</sup>	2007 - 06 - 19 2007 - 09 - 19	1 : 5 万调查区及国境线附近的地质环境监测

## （二）地理控制信息源

### 1. 1:5 万调查区

本项目的 1:5 万调查区采用了三种地理控制信息源：①数字化的 1:5 万地形图，帕里河调查区范围涉及 17 幅 1:5 万标准图幅，图幅号分别是：I44E020002-004、I44E021002-004、I44E022002-004、I44E023002-004、I44E024002-004 及 H44E001003-004，这些图的境外部分是根据美国早年的 1:25 万地形图放大的，有较大误差；②由国家地理信息中心提供的境内部分地区的 1:5 万 DEM；③日本卫星 ASTER 立体像对。

### 2. 1:1 万调查区

1:1 万 DEM 信息源为美国 OrbView 卫星立体像对。

## 三、DEM 及数字地理底图制作

### （一）1:5 万调查区的 DEM

调查区的 DEM 是由 17 幅 1:5 万图幅的分幅 DEM 数据拼接而成的。将该 17 幅地形图进行扫描，在 ENVI 图像处理软件中进行校正、配准和拼接，形成整幅 1:5 万调查区地形图，而后进行地形线矢量化，再结合日本卫星 ASTER 立体像对生成的 15 m 栅格的 DEM 及国家地理信息中心提供的境内部分地区的 DEM 共三部分数据，在 MAPGIS 软件平台生成 1:5 万调查区的 DEM。

### （二）1:5 万调查区的数字地理底图

首先，在矢量化地形等高线时，也将河流、道路、山峰、高程点、居民地等要素矢量化；将已完成的 1:5 万调查区 DEM 转换成 Surfer 格式的网格数据，再根据需要在 MAPGIS 中绘制出高程间隔为 100 m、50 m 或 20 m 的高程等值线图；最终编辑形成调查区数字地理底图。本图的投影方式为高斯投影，中央经线为东经 81°，采用以克拉索夫斯基球为基准的北京 54 坐标系。

### （三）1:1 万调查区的 DEM

#### 1. 技术难点

高精度 DEM 是 1:1 万灾害与地质环境定量遥感调查与监测工作的基础，在山岭起伏地区制作高精度 DEM 是当今国内外的技术难点。其主要技术难点有两方面：一是当今只有很少的建立高精度立体模型的卫星数据；二是缺少在高差起伏较大地区生成高精度 DEM 的技术方法。

#### 2. 技术难点攻关及作业过程

##### （1）寻求高分辨率卫星立体像对

本项目要求建立 1~5 m 栅格 DEM，目前广泛使用的 SPOT-5 卫星的 2.5 m 立体像对不能满足精度要求。经过调研，除了 SAR 以外，目前只有美国 OrbView 卫星立体像对可能制作这样高精度的 DEM。经过一年多的努力，直到 2006 年 11 月份才获得该卫星数据。OrbView-3 卫星是世界上最早提供高分辨率影像的商业卫星之一。卫星轨道高度

470km，回访周期 < 3 天，全色波段的波谱范围为 450 - 900 nm，空间分辨率 1 m。本项目采用了 12 幅共 6 个像对的 1 m 分辨率的 OrbView 卫星影像数据建立立体模型，生成 DEM。

(2) 软件平台

开始试采用 VirtuoZo 作业，但普通的 VirtuoZo 全数字测图系统软件不支持 OrbView 卫星影像，经向 VirtuoZo 供应商要求提供技术援助后，获得了为西部测图新开发的可以支持 OrbView 卫星影像的 VirtuoZoSeri 软件的有限使用权。

该项工作还使用了 ERDAS、ENVI 和 PHOTOSHOP 等辅助。

(3) 三种作业流程方案及对比

高精度 DEM 是在调查区 1 : 5 万工作 DEM 和数字地理底图完成后进行的。由于制作大起伏山区的高精度 DEM 是一项探索性工作，所以我们设计了三套方案的工作流程：  
 ①从 1 : 5 万地形图上选择平面控制点及从 1 : 5 万 DEM 上确定的高程来校正用 RSAT 模块定向 OrbView 卫星立体像对形成的 DEM；  
 ②通过自由网平差来校正用 RSAT 模块定向 OrbView 卫星立体像对建立的 DEM，而后再用地形图上的控制点校正；  
 ③无控制点，根据卫星轨道参数，通过自由网平差用 RSAT 模块定向 OrbView 卫星立体像对建立 DEM，如图 1-2 所示。

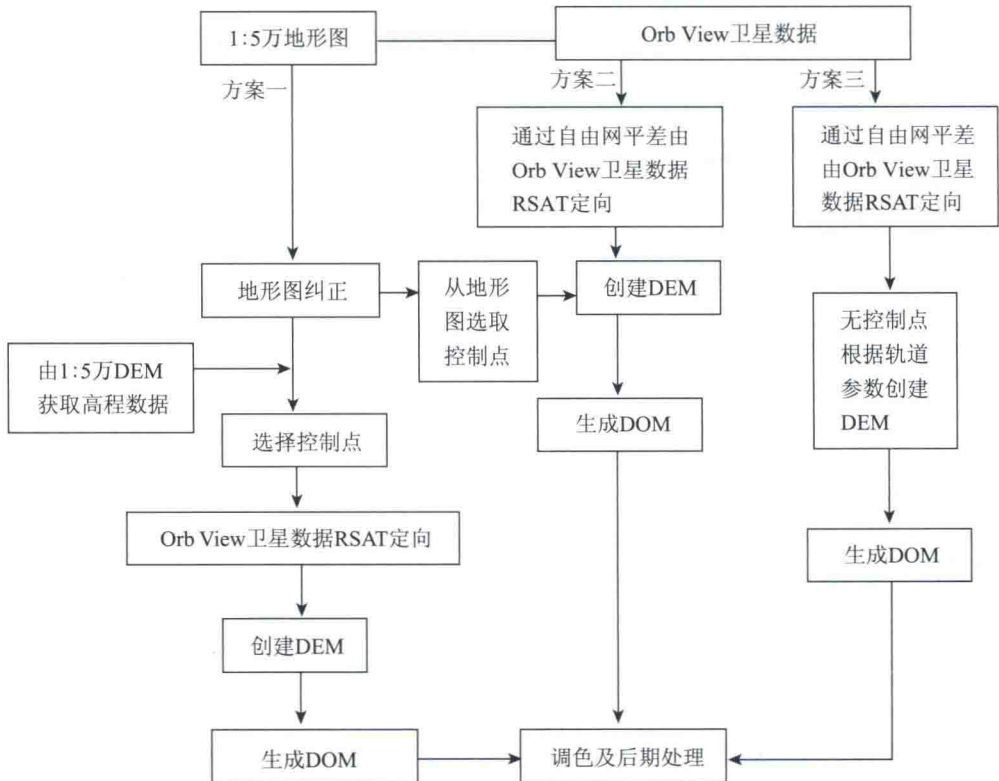


图 1-2 建立 1 : 1 万 DEM 工作流程的三种方案



在执行“方案一”的作业过程中，定向中误差非常大，最大定向中误差达 17.852 m。究其原因是控制点本身误差太大，所以在参与定向时也不能控制住。分析影响控制点精度的主要因素有以下几点：①栅格地形图误差，控制点是在纠正后的 1:5 万栅格地图上读取的，1:5 万栅格图的一个像素尺度为约 4 m，现要制作 1 m 栅格的 DEM，所以其精度相对较低；尽管已经对 1:5 万地图采取逐格网纠正，也会有较大误差；作为地理控制的地图资料与影像资料的时间间隔超过 20 年，在该强风化地区，地形地貌会有一定变化，不容易选择同名点。②地形变化误差，调查区属于高山峡谷地形，难以找到比较固定的参考地形，基本上都是通过河流来选择控制点，由于水面季节性变动及强烈冲刷等原因，20 年来河流的边线或形状发生了较大变化。③两种坐标系统转换误差及 DEM 误差，虽然每幅都有自己的转换参数，但仍存在不同椭球系统之间的转换差，从国家地理信息中心提供的 DEM 读取控制点高程，该 DEM 格网间隔为 25 m，相对 1:1 万工作，误差太大。

后执行方案二，先用立体像对，通过数字摄影测量的自由网平差方法，制作一套正射影像 (DOM)，利用影像本身的经纬度，通过坐标转换和移位，使地形图和生成的 DOM 的位置相关，并参照该地区的 ASTER 影像图寻找栅格图和影像的同名点，读取所选控制点的 54 平面坐标。再将控制点的 54 坐标转换为 80 坐标，把 80 坐标的控制点与已制作完成的 1:5 万 80 坐标的 DEM 进行套合，读取控制点的高程数据。这样虽然确定了控制点，但由于上述地形图与影像资料时间差太大和特殊地形，获取的成果精度仍不合格。对控制点分析结果表明，控制点参与定向后，残差比没有控制点参与的要大得多，引入控制点作业会加大作业区的内部误差。

因此，最终采用方案 3 - 主要使用卫星的轨道参数来控制。

#### (4) 提高 DEM 精度的方法

本项目采取以下解决办法：①在纠正地形图时采取逐点（每个格网点都参与）二次多项式纠正法，尽量减少纠正误差；②该高山峡谷地区在地形图和影像图上选取控制点，难度均很大，后来以该地区的 ASTER 彩色影像辅助参照选点，并在控制点套合 DEM 读取控制点高程信息时，尽量将所有控制点对应的 DEM 处放到最大，以减少人为选择平面控制点误差；③创建完立体模型后在显示立体工具栏下可以看见生成的立体影像，但由于地形高差太大，在测图模块下不能显示立体；此外，创建的立体模型不能编辑 DEM，但可以自动匹配 DEM，也可以生成正射影像。对这些问题，均与协作方联合攻关，最后所有软、硬件问题都一一得到解决。

#### (5) 图像处理

ETM、SPOT、ASTER、CBERS-2 各类卫星数据的图像处理，包括多光谱合成、数据融合、镶嵌、几何校正与图像配准工作，主要在 ENVI、PCI 和 PHOTOSHOP 平台上进行。

在获取高精度 DEM 以前，地面分辨率  $\leq 1$  m 的高分辨率图像的校正是基于 1:5 万 DEM 的，所以其绝对精度只有 1:5 万。1:1 万高精度正射影像及各时相影像之间的精确配准是滑坡及地质环境定量解译与监测的基础与保证。在建立合格的 1:1 万 DEM 后，将已获取的 2004 - 2007 年度 QUICKBIRD、ALOS 共 8 个时相的多光谱数据重新进行 3、4、2 波段合成及与全色波段融合，并全部与 OrbView DOM (1 个时相) 进行图像对图像校正、配准，并统一重采样成 1 m 分辨率的图像，至此完成调查区 1:1 万 9 个时相的多光谱正射图像制作。

### (6) 人机交互解译及验证

人机交互遥感解译,就是基于滑坡地学原理,在处理合格的解译基础上,采用人机交互方法进行解译,获取滑坡及地质环境基本信息。解译主要在 MAPGIS、ENVI 和 PHOTOSHOP 平台上进行。

1:5 万灾害与地质环境解译以 5 m 分辨率的 SPOT-5 多光谱正射影像为基础,同时参照 ASTER、ETM 及 ALOS 影像。本区的地质工作程度较低,区内唯一详细的资料是 1:25 万扎达幅和斯诺乌山幅区域地质图。但据访问,由于地形复杂及气候恶劣等原因,填图工作未能到达帕里河流域。本项目遥感解译,首先参照该图及文字说明,结合影像特征建立解译标志,然后据解译标志逐片解译。初步解译完成后曾去西藏现场验证,虽已是 6 月,但由扎达通往帕里河调查区需翻越的多座 5000 m 高程以上的垭口,积雪覆盖太厚,虽雇了当地民工及马匹,还是未能到达帕里河流域。由于喜马拉雅山脉东西两端气候虽有较大差别,但地形是基本对称相似的,所以我们便辗转到了东端的南迦巴瓦峰山脉,考察了那里的冰川与泥石流地形与环境。此外又通过访问当地曾去过帕里河的水利及地质环境监测站人员了解实地情况,收集了帕里河的野外照片,并通过附近卫星影像对比解译来验证调查区的灾害与地质环境情况。野外验证返回后,再次对全区灾害与地质环境进一步解译分析。

### (7) GIS 和空间分析

将以上解译获取的基本信息在 GIS 系统中进行空间分析及计算,包括重点调查区的灾害类型、性质及环境分析,灾害体位置、形态及规模估算;1:5 万调查区重力侵蚀类型与位置确定、规模计算、危险性评价及与环境关系分析。该项工作主要在 MAPGIS、ARCVIEW 和 ENVI 平台上进行。

### (8) 成果精度

1) 1:1 万遥感调查。本项目调查区总体地形困难程度应属最高的三级高山地,但对于局部滑坡而言也有相对较平缓的地形,对多时相滑坡监测,要求有更严格的几何校正及各时相图像的配准,所以要求中误差达到 1 m 以内。需要说明的是,这只是重点区范围内的相对精度,如表 1-2 所示。

表 1-2 本项目重点区内部 1:1 万 DEM 精度

立体模型编号	参加定向点数	定向单位权中误差/m
920	24	0.741
1007	22	0.489
525	48	0.339
608	31	0.603
919	28	0.331
2010	73	0.300

另需说明的是,项目工作的前一阶段,由于未能获得建立用于 1:1 万调查的高精度 DEM 的数据源,所以只能先建立 1:5 万 DEM,相应的重点工作区虽然购买了 0.6 m 分辨率的卫星数据,但校正及配准精度还是 1:5 万的,解译基础(正射影像、DEM 和数字地

形图)也只能是1:5万精度的。直至2006年12月才重新建立了重点区的高精度DEM及解译基础。

2) 1:5万遥感调查。本项目采用的1:5万DEM由前述三部分组成,境内部分满足国家测绘标准,境外部分精度难以统计。

1:5万灾害与地质环境解译以5m分辨率的SPOT-5多光谱正射影像为基础,同时参照ASTER、ETM及ALOS影像。就地面分辨率而言,足以满足1:5万调查的要求。

在图像处理过程中,主要用满足国家测绘标准的境内DEM作校正及与地理坐标配准,调查区的SPOT图像各景季节不同,PAN数据与多光谱时相也不同,加之在高山峡谷地区,故校正及融合难度都很大。经多种方法比较,最终采用了有限元计算处理,最终融合数据校正误差不超过10个像元。ASTER、ETM及ALOS则与已融合校正的SPOT图像采用图像对图像校正,误差控制在2个像元内。