



张文君 陈廷方 王卫红 廖胜利 黄良 覃文柱 / 编著

滑坡灾害遥感特征监测与 预测预警分析研究

Huapozaihai Yaogan Tezheng Jiance Yu
Yuceyujing Fenxi Yanjiu



科学出版社

滑坡灾害遥感特征监测与 预测预警分析研究

张文君 陈廷方 王卫红 编著
廖胜利 黄良 覃文柱

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一本关于遥感技术、计算机技术和空间信息技术在地质灾害监测与预报上应用的专著。全书共分8章,论述地质滑坡灾害形成的机理和表象特征以及采用高分辨率的遥感影像面向对象解译滑坡信息的方法,构建滑坡灾害特征时空数据库的基础框架,运用“3S”空间信息技术以及基于统计学理论的支持向量机方法对滑坡灾害的预测预报进行分析,同时,对滑坡滑动位移GPS实时监测预警技术进行研究。

本书内容丰富,语言精练,重点突出,可作为地质、环境、交通、安全、采矿、测绘、遥感、地理信息等相关专业的研究生教材,也可作为相关领域的科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

滑坡灾害遥感特征监测与预测预警分析研究 / 张文君, 陈廷方编著. —北京: 科学出版社, 2014.6
ISBN 978-7-03-040858-7

I. ①滑… II. ①张… ②陈… III. ①遥感技术-应用-滑坡-监测预报-研究 ②遥感技术-应用-滑坡-灾害防治-研究 IV. ①P642.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 119633 号

责任编辑: 张 展 李 娟 / 封面设计: 墨创文化
责任校对: 孟 锐 / 责任印制: 余少力



科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年6月第一版 开本: 787×1092 1/16

2014年6月第一次印刷 印张: 7 3/4

字数: 180千字

定价: 48.00元

前言

本书在系统而全面地总结滑坡灾害形成机理的基础上,利用高分辨率遥感影像特征监测滑坡体(以某一示范区为例),并获得其运动变化规律,同时就滑坡灾害各种自然及环境因素建立其特征时空数据库框架,并在此基础之上利用相关回归分析及模式识别的非线性方法对滑坡灾害的发生和发展进行预测等。

研究中针对示范区地质滑坡灾害形成的机理和表象特征,采用高分辨率的遥感影像解译滑坡信息,并通过相关数据分析提取滑坡灾害影响因子,达到利用遥感技术特征监测和预测预报滑坡灾害的目的。数据分析及处理过程主要包括:首先对滑坡研究区域的遥感影像进行几何校正、空间配准、多波段影像数字合成、镶嵌、数据变换等解译预处理,其次利用1:50 000地形图以及其他相关的地质资料等,提取滑坡区域初步的表层地质区分图、土地利用区分图、倾斜区分图、土壤区分图、地形区分图等,再通过对滑坡区域遥感影像进行比值运算处理获得其植被指标图,在此基础之上,运用多变量解析的重回归分析处理算法进一步获取其风化度区分图、表层地质区分图、土地利用区分图、饱和度区分图、倾斜区分图、土壤区分图、地形区分图等,最后反演出与滑坡因子有关的各个主题分类图,并准确地就滑坡灾害发生的原因、时间、场所和规模进行了预测预报,达到了判断、分析滑坡成因及表征的目的。

另外,在提高遥感特征监测和数据处理及管理自动化程度的同时,构建滑坡灾害特征时空数据库基础框架。同时,以滑坡形成机制为基础,运用“3S”空间信息技术以及基于统计学理论的支持向量机方法对滑坡灾害的预测预报分析进行讨论。

同时,本书在前期滑坡灾害特征监测和预测预报工作基础上,主要针对滑坡滑动位移GPS实时监测预警技术进行研究。

1. 自动化高精度和远距离传输的GPS监测预警技术与设备

采用多个GPS监测站、1个GPS基准站以及后台数据处理服务器进行监测预警。后台数据处理服务器设置在监测中心,它负责管理和控制各个监测站和基准站,完成监测站、基准站数据的收发、各种参数设置,如对各观测点观测时段的设置、各监测站时钟的校准以及GPS接收机参数的调整等;对GPS观测数据进行差分解算,以得到各监测站与基准站基线长度和高程差;结果显示等。各个监测站安装于滑坡体上,除GPS接收机外,其内部还包含GPS数据采集模块、GPRS传输模块、太阳能电源模块和GPRS天线等。

选择具有典型地质背景的区域进行滑坡地质灾害发育规律、形成条件、发展演化趋势等方面的监测预警研究;开展滑坡监测指标包括地质宏观形迹GPS高精度位移监测、地面位移监测的系统研究,建立自动化高精度远距离监测数据采集与处理系统;结合滑坡地质灾害自身特点,设计滑坡各类监测数据整合方案,构建滑坡灾害区划数据模型和

区域典型滑坡地质灾害数据模型。

2. 滑坡的深部位移监测预警技术

通过钻探分析和滑坡勘查，确定滑坡监测的位置，埋设相应的监测传感器，经过调校后确定监测流程：数据获取→数据传输→数据分析；根据模型实验和机理分析得到可能的滑动阈值（根据文献查阅获取类似滑坡的滑动阈值），如果滑体处于蠕滑变形阶段，则继续监测，如果进入加速变形阶段，则加密监测频率，随时准备发出临滑通知，准备撤出威胁对象，当监测数据表明进入滑动破坏阶段时，直接向坡下居民发出撤离警报（地震扰动土滑坡速度一般较慢，很难出现高速滑坡，完全有撤离时间）。

本书研究滑坡滑动过程的位移特征，确定滑坡滑移过程的位移和变形规律，确定滑动位移的阈值，并采用表层位移和深部位移联合监测的技术进行监测预警。通过实验研究坡体深部位移数量与滑坡滑动时间的耦合关系，基于这一耦合关系研究基于深部位移阈值为基础的滑坡监测预警设备，并在具体的滑坡体上示范应用，形成综合、全面、可靠的滑坡监测预警技术。

本书集科学性、系统性、基础性、前沿性、实用性为一体，涉及滑坡灾害遥感特征监测与预测预警分析和滑坡实时 GPS 监测技术等内容，具有广泛的适用性和参考推广价值。本书编写和出版过程中，得到了西南科技大学、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所（国家十二五科技支撑计划子课题——滑坡滑动位移实时监测预警技术“2011BAK12B02-2”）、西南交通大学和日本广岛工业大学的大力支持和帮助。同时要感谢西南科技大学的陈廷方教授、王卫红教授以及四川省交通运输厅交通勘察设计研究院测绘队廖胜利队长和四川省核工业地质调查院黄良总工程师、覃文柱副院长的辛勤付出。全书由西南科技大学张文君教授统稿。

由于作者水平有限，书中不足之处恳请批评指正。

张文君

2014 年 1 月 15 日

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究的依据和意义	1
1.2 国内外滑坡特征监测预报研究和发展趋势	2
1.2.1 国内外滑坡特征监测预报研究	2
1.2.2 国内外滑坡研究发展趋势	4
1.3 研究思路和组织	6
1.3.1 研究可行性分析	6
1.3.2 研究目标、内容	7
1.3.3 研究拟解决的关键问题和创新点	10
1.3.4 研究技术路线及组织	11
第2章 滑坡灾害遥感特征监测技术流程的建立	12
2.1 滑坡灾害形成机理与监测特点	12
2.2 滑坡影响因素分析	12
2.2.1 滑坡影响因素	12
2.2.2 滑坡因子分析	13
2.2.3 滑坡预报参数的确定	14
2.3 基于预报预警的滑坡灾害分类	15
2.4 滑坡遥感地质分析	16
2.5 滑坡灾害遥感特征监测技术流程	16
2.6 本章小结	18
第3章 滑坡灾害遥感特征监测方法与数据处理	19
3.1 概述	19
3.2 滑坡遥感影像特征分析	19
3.3 研究区域地域特征	20
3.3.1 地形概况	21
3.3.2 地质概况	23
3.3.3 土地利用	24
3.4 遥感影像数据处理	24
3.4.1 滑坡灾害遥感监测数据来源	24
3.4.2 滑坡遥感影像几何校正	25
3.4.3 滑坡遥感影像表现	27
3.4.4 滑坡遥感影像增强及演算处理	29
3.4.5 面向滑坡灾害对象遥感影像分类	31

3.4.6 多变量解析方法	34
3.5 滑坡遥感影像数据解析结果	38
3.5.1 本研究解析地域灾害状况	38
3.5.2 滑坡遥感影像合成特点	40
3.5.3 比值运算处理下的植生指标计算	41
3.5.4 回归处理	43
3.6 滑坡土石方量预测	55
3.7 本章小结	68
第4章 滑坡灾害特征时空数据库设计	70
4.1 滑坡数据组织	70
4.1.1 滑坡数据对象描述	70
4.1.2 滑坡数据组成	70
4.1.3 滑坡数据标准化设计	71
4.2 滑坡特征时空数据库设计	73
4.2.1 特征数据库特点	73
4.2.2 特征数据库结构设计	73
4.2.3 特征数据库模型	74
4.2.4 数据库建库流程分析	75
4.3 滑坡灾害数据质量控制	76
4.4 本章小结	77
第5章 遥感滑坡灾害预测预报分析	78
5.1 遥感滑坡灾害预测预报概念设计	78
5.2 基于 GIS 空间尺度的滑坡空间分析	78
5.2.1 地形分析	79
5.2.2 叠加分析	80
5.2.3 缓冲区分析	81
5.3 滑坡灾害危险性评价分析	83
5.3.1 滑坡危险度因子选定	84
5.3.2 滑坡危险度判定方法	85
5.4 基于 SVM 算法的滑坡灾害特征预测模型与实现方法	86
5.4.1 SVM 基本理论	86
5.4.2 研究区滑坡预测样本点的获取	91
5.4.3 基于 SVM 算法的滑坡灾害特征预测方法实现	92
5.5 本章小结	93
第6章 滑坡滑动位移 GPS 实时监测预警技术	95
6.1 概述	95
6.2 滑坡实时监测技术的发展	96
6.3 滑坡实时监测的意义	97
6.4 滑坡 GPS 实时监测技术	97

6.4.1	研究目标	98
6.4.2	主要内容	98
6.4.3	拟解决的主要技术难点和问题	98
6.4.4	技术路线和实施方案	98
第7章	滑坡 GPS 实时监测系统设计	100
7.1	滑坡监测系统方案设计	100
7.1.1	GPS 数据采集系统	100
7.1.2	监控中心数据处理系统	101
7.2	监控系统软件及数据分析处理	103
7.2.1	系统监控软件	103
7.2.2	数据处理中心软件	106
7.2.3	变形解算软件	106
第8章	结语	107
8.1	总结	107
8.2	展望	109
参考文献		110

第1章 绪 论

1.1 研究的依据和意义

“自然灾害”是人类依赖的自然界中所发生的异常现象，自然灾害对人类社会所造成的危害往往是触目惊心的。它们之中既有地震、火山爆发、滑坡、泥石流、海啸、台风、洪水等突发性灾害，也有地面沉降、土地沙漠化、干旱、海岸线变化等在较长时间中才能逐渐显现的渐变性灾害，还有臭氧层变化、水体污染、水土流失、酸雨等人类活动导致的环境灾害。这些自然灾害和环境破坏之间有着复杂的相互联系。认识这些灾害的发生、发展以及尽可能减小它们所造成的危害，已是国际社会的一个共同主题^[1]。

由于自然变异和人为作用所导致的地质灾害如崩塌、滑坡、泥石流等，每年都会给人类社会造成重大危害。其中，滑坡灾害是全球分布范围广、影响大、破坏严重的地质灾害之一^[2]。滑坡灾害产生的原因多种多样，其中包括地面因素(包括地形、地质、水文等)、气象因素和人为活动因素三大类。其中值得注意的是，科学技术以前所未有的速度和规模飞速发展，这不仅增强了人类改造自然的能力，给人类社会带来空前的繁荣，也为人类社会今后的进一步发展准备了必要的物质和技术条件。对此，人们产生了盲目乐观情绪，好像自己已经成为大自然的主人，可以长期掠夺资源而不会受到大自然的惩罚。然而，这种掠夺式生产已经造成了生态环境和生活环境的破坏，主要表现如滑坡灾害就是由于人为不断地破坏山体及盲目地开采开挖，常常导致滑坡体出现明显的开裂、下错等蠕动变形，当雨水和沟水渗入滑坡体内时，就给滑坡体增加了水压力，并对滑坡面碳质岩进行了软化作用，加剧了山坡的变形，最终酿成了滑坡灾害。人类对资源的过度开发以及对植被覆盖的破坏，加剧了滑坡灾害发生的频率，增加了滑坡灾害的破坏性及损失程度。因此，有计划地利用并保护自然资源，对滑坡灾害进行研究，在一定程度上减少滑坡灾害的影响是众多学者关注的问题之一^[3]。

滑坡灾害可以总结为滑坡内外因素相互作用产生变形及蠕动，进而导致滑坡运动形成地质灾害，并最终在地球表面以某种形式达到新的平稳状态，整个运动过程形成一个复杂的非线性结构。滑坡运动具有时空不确定性，并且运动过程出现巨大的能量转化，给人类的生活、生产等领域带来不便，甚至导致重大的经济损失。因此，对这一非线性系统进行研究，对内外因存在及相互作用的规律进行科学的描述，结合灾害过程外在表现(如变形、蠕动、滑坡运动)特征的定性与定量监测，反演灾害体的时空状态分布，了解其运动规律，可达到提高灾害监测效率以及预报预警时空精度的目的。同时，新的科学技术发展也为相应的研究提出了新的研究内容和研究方法，作为空间信息技术之一的遥感技术，已经在滑坡自然灾害特征监测及预报预测方面发挥着非常重要的作用^[4]。

遥感(remote sensing, RS)是一种远距离的利用地面目标反射或辐射电磁波的固有特

性、非接触的目标探测技术和方法。通过对目标进行探测,获取目标的信息,然后对所获取的信息进行加工处理,从而实现对目标进行定位、定性或定量的描述。RS 技术的显著特点是:①具有宏观性和直观性;②获取资料的速度快、周期短,而且能反映特征变化;③使用的电磁波各波段之间性质差异大、用途广;④获得的信息量巨大;⑤其应用受地面条件限制少,可用于自然条件恶劣、地面工作困难的地区;⑥经济效益好,成本低、收益高。RS 技术已经在自然灾害的调查、监测和预警中体现出明显的优势^[5]。

遥感滑坡技术就是以 RS、地理信息系统(geographic information system, GIS)和全球定位系统(global positioning system, GPS)等空间信息技术为主,结合其他勘探、试验及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,如地形、光谱、土地覆盖、形变、地质构成、物理力学特征等),并利用 GIS 技术存储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、滑坡灾害评价、危险预测、灾情评估、减灾和防治等^[6,7]。

自然灾害的监测和评估,是遥感和空间信息非常重要的应用领域。我国是一个自然灾害非常频繁的国家,每年由于干旱、洪水、山崩滑坡、泥石流、雪灾等造成的经济和人民生命财产的损失都要以千亿元人民币来计算,我国从青藏高原向云贵高原以及从云贵高原向长江中下游平原过渡的两个大陆坡度带范围内,仅 20 世纪 80 年代以来所发生的一次性伤亡人数在数十人以上或直接经济损失在数千万元以上的灾难性崩滑事件就达十余起,仅这些灾害所造成的人民生命损失已超过千人,直接经济损失上亿元,善后处理及整治费用则高达近十亿元,而由于灾害给社会带来的影响所产生的间接损失则更是无法估量,这是非常严峻的事实。采用 RS 技术特征监测灾害,并在此基础上,进一步开展对自然灾害的预测、预报和预警,已成为遥感地理空间信息技术的重要任务^[8]。

1.2 国内外滑坡特征监测预报研究和发展趋势

1.2.1 国内外滑坡特征监测预报研究

滑坡是地质灾害中较为严重的一种,属于斜坡变形范畴,是指大块岩(土)体由于地震、大暴雨、地下水或人为因素等影响造成岩体下伏物质不稳定,在重力作用下,沿着贯通剪切破坏面整块地向下滑动的现象^[9]。滑坡普遍分布在山区,时常给人们造成重大灾难,仅美国、日本两国每年因滑坡致使经济损失即达 15 亿美元,为了查明滑坡区地质环境、滑坡灾害发生发展因素、形成条件、分布规律及发展趋势,以便有效地预测预防滑坡,国外通常采用陆地卫星、航空摄影与彩色红外摄影及热红外扫描来调查滑坡,利用不同时相的航天航空遥感图像监测其特征变化^[10,11]。

从 1980 年开始的 20 年内,我国完成的区域滑坡、泥石流遥感调查面积大约覆盖了 10 万平方公里的国土。我国山区大型工程项目的建设,带动了滑坡、泥石流遥感调查技术的发展。从 20 世纪 80 年代初开始,我国先后在雅砻江二滩电站、红水河龙滩电站、长江三峡电站、黄河龙羊峡电站、金沙江下游溪落渡、白鹤滩及乌东德电站库区开展了大规模的区域性滑坡、泥石流遥感调查,目的是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;从80年代中期起,又分别在宝成铁路、宝天铁路、成昆铁路等沿线进行了大规模的航空摄影,为调查滑坡、泥石流分布及其危害提供了信息源。近10年时间,先后完成了川藏铁路、滇藏铁路、南昆铁路及内昆铁路等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(如川藏公路、新疆乌奎公路、东北沈丹公路等)沿线防灾工程中也使用了滑坡、泥石流遥感调查技术。这些调查主要为中等比例尺(1:50 000~1:200 000)的滑坡、泥石流宏观调查。主要的调查成果为:识别滑坡、泥石流;制作区域滑坡、泥石流分布图;判别滑坡、泥石流的微地貌类型及活动性;评价滑坡、泥石流对大型工程施工及运行的影响等^[12,13]。经过多年实践,我国的科技工作者已经探索出了一套较为合理的滑坡、泥石流遥感调查方法,那就是采用以遥感影像为主要信息源,以人工与计算机交互解译为主,并将重点区遥感解译结果与现场验证相结合,同时结合其他非遥感资料综合分析,多方调查验证的方法。

遥感滑坡特征监测及预测与GIS技术密切相关。国外发达国家对于地质灾害灾情风险评估特别是GIS在地质灾害研究中的应用做了很多工作。1987年加利福尼亚门洛帕克地调局的Carth M. Wentworth和Stephen D. Ellen等利用GIS对区域工程地质作了进一步的分析。1989年,美国的Michael A. Finney和Nancy R. Bain用GIS技术分析滑坡灾害。Douglas C. Peter等利用GIS对工程数据进行评价。20世纪90年代以来,印度的Roorkee大学地球科学系的R. P. Gupta和B. C. Joshi在1990年用GIS方法进行喜马拉雅山麓Ramganga Catchment地区的滑坡灾害危险性分带研究。该研究利用多源数据,如航片、远程位移监测系统(movement monitoring system, MMS)数据、假彩色合成图像和各种野外数据,分析了地质、构造、地形、土地利用及滑坡分布等相关因素,并将其储存在GIS系统中,利用GIS的存储、更新、网格化、空间叠加功能,在图上绘出了滑坡灾害危险性分区图。1991年美国弗吉尼亚州地调局的Russell H. Campbell等用GIS对滑坡灾害进行了空间预报。美国密苏里州的R. B. Jacobson等用GIS分析滑坡位置。意大利A. Carrara等学者将GIS技术与统计模型结合应用于滑坡灾害的评价。新西兰学者R. Soeters等则将GIS与RS技术结合应用于山地灾害分析与环境评价。1992年,加拿大的A. G. Fabbri等学者利用GIS进行了滑坡灾害分区的多因素综合分析。1994年,美国科罗拉多州立大学M. M. Navarro和E. E. Wohl在哥伦比亚的麦德林地区利用GIS开展地质灾害风险评估。其重点考虑了基岩和地表地质条件、构造地质条件、气候、地形、地貌单元、水文条件等因素。他们利用GIS软件的空间信息存储、缓冲分析、数字高程模型(digital elevation model, DEM)及叠加分析等功能,对滑坡、洪水和河岸侵蚀等灾害进行了分析,并进行了脆弱性评价。1996年M. M. Nawarro等又将GIS技术与决策支持系统(decision support system, DSS)结合,利用GIS及工程数学模型建立了自然灾害及风险评估的决策支持系统,进行了灾害敏感性分析、脆弱性分析及风险评估。1997年C. J. Van Westen等分析了GIS在不同尺度地质滑坡危险性评价中的应用,将GIS与统计模型结合划分滑坡灾害区域。1998年R. Nagarajan等分析了热带地区地形与气候因子与滑坡敏感性之间的关系,并且利用该方法对印度贡根地区的滑坡敏感性进行了分析。2000年Saro lee和Kyungduck Min等用GIS的空间数据管理功能和空间分析能力结合遥感数据分析了韩国Yongin地区滑坡敏感性^[14~16]。

近年来,利用遥感技术的滑坡特征监测取得了较大的进步,更多的监测成果被应用

于实际生产,主要体现在以下两方面^[17]:

(1)遥感数据的多源化、多波段和高分辨率化。20世纪70年代以来,随着一系列大型国际遥感计划的实施,获取的卫星遥感数据已从可见光发展到红外线、微波;从单波段发展到多波段、多角度;从空间维扩展到时空维。并且已初步建立了高、中、低轨道结合,大、小、微型协同,粗、细、精分辨率互补的全天候、多层次的全球对地观测体系,能极大地满足不同应用需求以及不同精度的滑坡遥感特征监测^[18]。

(2)遥感数据处理技术方法的改进优化。针对基于统计方法结合人工解译存在的解译周期长、重复性差、对解译人员依赖性强等不足,对遥感解译和植被指数分析的新方法进行了探讨,主要是非线性方法的引入,包括支持向量机(support vector machine, SVM)、分形模型、人工神经网络、小波分析等,使滑坡体能更真实地再现其地理位置和坡度、坡向及地质环境等因素的影响,在一定程度上增强了滑坡灾害预测预报及预警的能力。

1.2.2 国内外滑坡研究发展趋势

由于滑坡的覆盖范围相对较小,而且主要依靠灾害体在遥感图像上反映的形态特征来识别,因此需要遥感资料有较高的空间分辨率,并在可见光和近红外波段有较高的光谱分辨率。目前,地质灾害的遥感调查通常采用航天遥感与航空遥感相结合的方法。航天遥感资料主要用于地质灾害的区域性宏观快速解译,了解地质灾害与区域地质背景等因素的关系,分析灾害分布的空间特征,探讨灾害发生的总体趋势。航空遥感资料则用于分析具体灾害的形态、规模和运动方式等微观特征,有时还要进行灾害体某些要素(比如坡度、坡向、影响面积及堆积体积等)的量算。因此,根据任务要求,合理选择遥感资料和工作方法是实现调查目标的重要环节^[19]。

目前,滑坡预报已经从静态预报发展到动态预报,从半定量预报发展到以定性描述为基础的定量预报,从线性预报发展到非线性动力学预报。滑坡预报研究近几十年来,虽然取得了较大的进展,但至今尚有许多关键问题没有解决,滑坡时间预报理论和方法还不成熟。目前用于滑坡预报的方法主要是基于滑坡形变的斋藤法和改进斋藤法,即以土体蠕变理论为基础,以应变速率为基本参数,在一定程度上反映了滑坡变形的本质,所以在滑坡预报方面取得了一定的效果。目前国内外主要预报方法还包括滑坡前兆现象法(地质分析和经验法)、位移-时间曲线变化趋势判断法(依赖于正确的地质分析和经验判断)、统计数学模型法(回归模型、灰色理论模型、泊松旋回模型、生物生长模型、梯度正弦模型、灾变模型等)、黄金分割法、模型实验(事例推算)、非线性预报法(非线性动力学模型、非线性混沌模型、协同-分岔模型、分形模型、人工神经网络模型等)、单因子预报法(降雨量参数预报法、声发射参数预报法)、多参数预报法等。从滑坡灾害滑前预报方法的有效性看,只有斋藤法、滑坡前兆法和位移-时间曲线变化趋势判断法对滑坡预测有过成功的例子,而其他方法均为事后验证,还有待进一步的探索^[20]。

另外,自20世纪80年代末起,随着联合国“国际减轻自然灾害十年”计划的启动,包括滑坡在内的自然灾害引起了国际社会的空前重视,许多国际和区域性自然灾害合作研究计划相继实施,极大地推动了全球范围内包括降雨滑坡在内的自然灾害预测预报

研究^[4]。

1995年,在“减灾十年”行动中,联合国会员大会要求“国际减灾十年计划”秘书处分析全球及各国对包括滑坡在内的各类自然灾害的早期预警能力,提出开展相关的国际合作研究的建议与计划,进而促进、提高全球对自然灾害的预测预报能力和研究水平。为此,“国际减灾十年计划”秘书处成立了包括地质灾害在内的6个专家工作组。1997年专家工作组提交了“国家及局部地区灾害早期预警能力评述报告”,报告提出了建立国家和局部地区不同层次上有效的早期预警系统的指导原则。专家组报告指出,有效的、不同层次的早期预警系统必须建立在科学的、不同层次的灾害危险性评价基础上,其中包括灾害敏感性、危险性和易损性分区评价等。只有这样,灾害早期预警才有实际意义,才能真正为不同层次的决策者制定减灾对策,提供科学依据。对于滑坡灾害,专家报告指出,由于滑坡类型多样、发育条件复杂、诱发因素变化多端,所以准确地滑坡预测预报非常困难。以目前的研究水平而言,从长、中、短三个时段进行滑坡预测预报可能较为现实。各种类型的滑坡灾害图,如滑坡分布图、易发性分区图、危险性分区图、风险性分区图等可预测灾害的长期发展趋势。对于区域性的降雨滑坡,在深入、详细的前期研究和大量的资料积累基础上,建立滑坡、降雨统计关系,根据天气演变模式和降雨强度、降雨持续时间变化,可进行该类滑坡的中期和短期预报。专家组报告提醒:①由于滑坡发育、分布和气象条件都具有很大的局部性特点,降雨滑坡预报判据应因地制宜;②深入的滑坡形成机理和活动过程研究,不仅有助于建立更加准确的滑坡、降雨统计关系,而且是建立滑坡、降雨理论关系模型的基础^[4]。

1998年,“国际减灾十年计划”秘书处在德国波茨坦专门召开以“减轻自然灾害的早期预警系统”为主题的联合国大会,会后的波茨坦宣言强调“早期预警应该是各国和全球21世纪减灾战略中的关键措施之一。”1999年,联合国大会决定在“国际减灾十年计划”结束后,继续实施“国际减灾战略”,成立“国际减灾战略秘书处”。该秘书处随后成立了“跨国际组织的特别工作小组”。2000年,特别工作小组在瑞士日内瓦召开第一次工作会议,决定将推动灾害早期预警为工作时间表上的首要任务,并将致力于协调全球的早期预警实践,促进和推广将早期预警作为减灾的主要对策之一^[4]。

1988年意大利多洛米蒂山区域性降雨滑坡发生后,欧盟“环境与气候计划”中“气候与自然灾害”组资助了以该地为示范区的降雨滑坡预测预报研究项目。在该项目取得了重要成果后,欧盟在1999~2002年的第五个框架计划(能源、环境和可持续发展)中,启动了“滑坡早期预警综合系统”和“服务于当地终端用户的山区汇水盆地地区泥石流流评价”项目。目前在2002~2006年的第六个框架计划(全球变化与生态系统)中,继续资助一系列与“环境风险和灾害”有关的降雨滑坡灾害预测预报研究项目^[4]。

综观滑坡灾害遥感特征监测和预测预报,在技术手段上经历了从实地航片调查到利用多源、多分辨率、高分辨率卫星影像以及雷达影像与野外核查相结合的过程;滑坡影像信息提取经历了早期人工目视判读、手工编绘及滑坡体体积量算的过程;滑坡灾害预测预报经历了从数理统计线性预测到非线性预测阶段以及同时结合GIS时空数据库空间分析技术的更高层次阶段。同时,充分利用航天遥感、差分干涉雷达和GPS及其集成技术进行地质滑坡灾害监测,是未来遥感对地观测技术体系在灾害监测应用中的必然趋势。

1.3 研究思路和组织

1.3.1 研究可行性分析

地质灾害(包括滑坡灾害)遥感调查正由示范性实验阶段步入全面推广的实用性阶段。鉴于地质灾害的日益严重和对突发性地质灾害抢险救灾工作的时效性要求,应用 RS 技术开展地质灾害调查是极其必要的,是当代高新技术发展的必然趋势。RS 技术特点及其他相关高新技术的高速发展,已使地质灾害遥感调查成为可能。RS 技术可以贯穿于地质灾害调查、监测、预警、评估的全过程。应用 RS 技术开展地质灾害调查具有广阔的前景。

近 20 年来,随着航空航天对地观测技术、计算机技术和电磁波信息传输技术等深入研究,RS 技术得到了迅猛的发展,在实用化方向上迈出了重要的一步,并被广泛应用于各种国土资源调查与环境评价及灾害监测中。

RS 技术应用于地质灾害调查,可追溯到 20 世纪 70 年代末期。在国外,开展得较好的有日本、美国、欧盟等。日本利用遥感图像编制了全国 1:50 000 地质灾害分布图;欧盟各国在大量滑坡、泥石流遥感调查基础上,对 RS 技术方法进行了系统总结,指出了识别不同规模、不同亮度或对比度的滑坡和泥石流所需的遥感图像的空间分辨率,RS 技术结合地面调查的分类方法,可以用 GPS 测量及雷达数据,监测滑坡活动可能达到的程度^[21]。

另外,暴雨是诱发地质灾害的催化剂。暴雨的冲刷、淋漓和渗透,一方面降低了岩土体的抗剪强度,特别是降低了地质体结构面的抗滑强度,使其发展成为滑动面和崩塌界面;另一方面增加了岩土体的自重,并增大了地下水的动压力和静压力,进一步降低了山区斜坡的稳定性,进而诱发滑坡。由此可以看出,地质滑坡灾害多发生于山区暴雨天气,常具有突发性和山区不易实地调查的特点。因此,这种在暴雨恶劣天气下突发的地质滑坡灾害,若用传统的调查方法,不仅调查难以做到实时性,也难以保证真实性和准确性。然而,RS 技术具有宏观性强、时效性好、信息量丰富等特点,不仅能有效地监测预报天气状况进行滑坡灾害预警,研究查明不同地质地貌背景下地质滑坡灾害隐患区段,同时对突发性滑坡灾害也能进行实时或准实时的灾情调查、特征监测和损失评估。所以,RS 技术在地质滑坡灾害调查中必将发挥重要的作用^[4]。

目前,对地观测的遥感器已涉及从紫外线、可见光、红外线、微波到超长波的各个波段,其中,可见光-红外波段间的波谱分辨率已达纳米级。同时,成像光谱仪技术已获得了重大突破,如美国在 20 世纪 90 年代发展研制的地球观测系统(Earth Observing System, EOS),为直接监测和区分地物提供了可能性。在空间分辨率上,利用了长达 20 年之久的美国专题绘图仪(Thematic Mapper, TM)图像(30 m)和法国 SPOT 卫星图像(10 m)已被近年来发射的米级甚至分米级卫星图像所取代,美国 IKONOS、Landsat-7 卫星,俄罗斯的 SPIN-2 卫星,加拿大的 Radar SAR 卫星,印度的 IERS 卫星等空间分辨率均达米级,我国 1999 年成功发射的 CBERS-1 地球资源卫星的空间分辨率也达 19.5 m。

特别是,目前国内外竞相研究的小卫星群发射,将成为地质灾害调查中的主要信息源之一。总之,卫星遥感中不同轨道高度的陆地卫星、气象卫星、海洋卫星、雷达卫星等遥感平台的多层次性,像元大小从0.61 m(QuickBird)到4000 m(气象卫星)的多空间分辨率,从紫外线、可见光、红外线到微波的多光谱分辨率,以及从光谱校正、几何校正、影像增强、特征信息提取、自然识别分类、自动成图、数据压缩及数据库、地理信息系统、网络技术(互联网)的连接等遥感应用模型的广泛性,为地质滑坡灾害遥感调查提供了丰富的信息源和信息获取途径。

地质滑坡灾害的发生是缓慢蠕动的地质体从量变到质变的过程。一般情况下,地质滑坡灾害体的蠕动速率是很小而且稳定的,突然增大即预示着灾害即将到来。利用不同时相遥感影像对滑坡进行特征监测,可以从静态到特征监测滑坡体的变化运动规律。在此基础上,可有效地利用各种预报预测方法进行地质滑坡灾害的预测、预报和预警。

1.3.2 研究目标、内容

传统的滑坡研究仅限于定性或半定量化,实际上由于滑坡系统不断与外界发生物质和能量交换,具有非平衡性、非线性、多尺度性、突变性、自组织性、自相似性、有序性、随机性的属性,是一个复杂的系统。正是由于系统演化的复杂性和非确定性使得滑坡的预测预报一直是一个难题。传统的方法已经无法满足滑坡的预报要求,本研究就是在总结滑坡灾害形成机理的基础上,利用高分辨率遥感影像特征监测滑坡体的变化运动规律,同时就滑坡灾害各种自然及环境因素建立其特征时空数据库,并在此基础上利用相关回归分析及模式识别的非线性方法对滑坡灾害的发生发展进行预测等。研究的主要内容有以下几个方面。

1. 高分辨率滑坡遥感影像的选择和资料整理

实时获取多时相、高分辨率、高光谱的滑坡卫星遥感数据。同时,利用GPS空间信息定位技术或数字地图进行滑坡工作区的定位测量,获取准确的滑坡定位信息,定位精度须达到厘米级或更高。最后通过其他方法获取滑坡区域地质、水文、土壤、植被、岩土物理力学特性及人类活动等相关资料。

2. 高分辨率滑坡遥感影像解译

高分辨率滑坡遥感影像解译是获得准确滑坡信息的基础和前提,即要对滑坡影像经过几何校正、空间配准、多波段影像数字合成、镶嵌、数据变换等方法产生一幅能较清晰反映滑坡现象的遥感图像;同时在滑坡遥感图像分类中采用一种新型的影像分类方法——面向滑坡灾害对象分类法,以提高分类的精度。

另外在滑坡遥感影像解译过程中,除要考虑图像几何形态特征外,还要重点考虑其光谱特征。以往的遥感解译是根据滑坡发生后形成的特殊微地貌在图像上的形态特征来识别的,而在本书遥感影像解译研究中除应用几何形态特征外,还将应用光谱特征,即了解不同物质成分、结构构造、不同含水量、不同土地覆盖状况、不同发育时期的滑坡及其发育环境的光谱特征。滑坡灾害遥感解译的最终目的是^[22]:

(1)定性识别滑坡:依据滑坡发生的最基本的地质、地貌环境和触发条件,从灾害体特殊的总体形态、色调特征识别着手,定性地确定滑坡的存在。

(2)微地貌结构解译:滑坡灾害体有一系列微地貌特征,例如滑坡灾害的滑坡体、滑坡壁、滑坡洼地、滑坡阶地、滑坡鼓丘以及伴随滑坡产生的各种裂隙等。进行微地貌解译的目的是为进一步确定灾害的类型、规模、范围、性质、活动特点提供依据,由于微地貌的尺寸大多较小,所以解译采用的遥感影像空间分辨率较高。

(3)灾害体要素量算:滑坡灾害遥感调查时常常需要对某些灾害体要素,如滑坡距离、体积等进行量测,以了解灾害的规模、灾情和活动特点。

(4)灾害特点分析与形成机理探讨:由于所处地貌、地质环境的不同,滑坡灾害的特点常常因地而异。这就需要在对灾害体作细致的定性、定量遥感解译的基础上,对该地区相关的地学资料,包括灾害发生的历史资料作系统的分析研究,结合必要的实地调查,在地质理论的指导下,了解灾害的具体特点和环境条件,进而探讨灾害孕育、发展和触发的机理,进行灾害趋势的预测预警。

(5)灾情调查和损失评估:遥感方法是滑坡等地质灾害发生后灾情调查和损失评估最快速而有效的方法。选择好灾害发生前后的具有足够空间分辨率的遥感图像是进行灾情评估的基础。参与对比的不同时相图像的时间间隔越短越好。在轨运行的卫星越来越多,空间分辨率不断提高,为灾情的遥感评估提供了条件。

3. 滑坡灾害相关数据分析

遥感影像可以直接解释灾害的影响范围以及破坏的特征信息。利用空间分辨率达1~5 m 高分辨率卫星影像数据或航空摄影数据,如 SPOT-5, QuickBird, IKONOS 等可以直接提取滑坡灾害位置、范围,分析滑坡的类型;也可通过高分辨率 DEM 获取滑坡灾害的相关信息。通过不同时相的影像还可采集滑坡灾害历史数据,建立相应的历史数据库,进而为灾害影响评价提供基础数据,为决策提供参考。同时, GIS 技术的发展也将为灾后监测信息的管理、分析等提供有力的工具。

本书针对试验区地质滑坡灾害形成的机理和表象特征,拟采用高分辨率的遥感影像解译滑坡信息,并通过相关数据分析提取滑坡灾害的影响因子,达到利用遥感技术特征监测和预测预报滑坡灾害的目的。数据分析及处理过程主要包括:利用 1:50 000 地形图和其他相关的地质资料等,提取滑坡区域表层地质区分图、土地利用区分图、倾斜区分图、土壤区分图、地形区分图等,再通过对滑坡区域遥感影像进行比值运算处理获得其正规化差分植生指标(normalized difference vegetation index, NDVI)图,在此基础上,运用多变量解析的重回归处理算法进一步获取其风化度区分图、表层地质区分图、土地利用区分图、饱和度区分图、倾斜区分图、土壤区分图、地形区分图等,最后反演出与滑坡因子有关的各个主题分类图,并充分考虑降雨、风化度等因素对滑坡实验区进行的时间、场所和规模的预测,从而达到判断、分析滑坡成因及表征的目的。

4. 滑坡特征时空数据库的构建

将 RS、GIS、GPS(即“3S”)技术引入滑坡灾害灾情评价,主要是考虑到它们的空间数据采集、管理能力及其强大的空间数据分析能力。同时由于 GIS 独特的空间分析功能

和超强的数据分析能力使得其在滑坡灾害灾情评估过程中发挥着越来越重要的作用。滑坡灾害的不稳定性由一系列复杂的相互关联的背景参数(如岩性及岩石的结构状况、侵蚀状况及与上覆层的接触关系、上覆土壤的物理特性、斜坡的倾斜度和外部形态、水文学条件、植被覆盖状况、土地利用和土地使用习惯和人类活动条件)相互作用而组成,因而现有的滑坡灾害条件有可能外推到未来滑坡的空间位置。而这要依赖于对上述所有与滑坡空间分布相关的背景变量的联合分析。GIS是采集、存储、管理、分析和描述整个或部分地球表面及与空间和地理分布有关数据的空间信息系统,它是研究空间问题的一种强有力的工具。GIS把空间数据和属性数据结合起来,通过计算机进行采集、存储和处理,可以综合空间数据和属性数据进行多种空间分析。滑坡灾害特征监测信息系统是指以GIS技术为支撑,在计算机软硬件支持下,把各种滑坡信息按空间分布或地理坐标,以一定的格式输入、编辑、存储、查询、统计和分析的应用系统。系统一般由图像库、图形库和滑坡信息数据库组成。图像库存储重点监测区的滑坡遥感影像,可提供地质、地貌、土壤、水文、土地利用和植被等信息,并能进行图像文件管理和基本图像处理。图形库用于录入、存取野外工作所获得的各种专题图、等值线图及其地貌DEM图形,并能进行图形数字化、编辑、拼接、显示、叠加、输出等功能。滑坡信息数据库则存储有关滑坡特征参数以及不同时期当地的降雨情况、洪水、滑坡过程等数据,具有录入、检索、汇总、计算、统计以及生成和输出报表的功能^[23,24]。

从数据信息的使用情况来看,滑坡灾害特征监测信息系统数据库包含的数据信息复杂多样,既包括滑坡体的基础地质数据信息,还包括各种监测数据和各种图形信息。概括起来主要有:①描述滑坡现状的资料;②滑坡活动历史或发展历史过程资料;③滑坡预报所需要的基础地质资料;④影响滑坡的因素即背景地质资料;⑤各种监测数据;⑥历史滑坡相关资料;⑦其他背景资料(如人类工程活动等)。如何有效地组织和管理这些滑坡信息数据是目前建立滑坡灾害特征监测信息系统的关键^[25]。

5. 滑坡灾害预测预报模型的建立

滑坡灾害预测预报模型的建立是滑坡灾害研究的最终目的。滑坡灾害的形成主要分为内因和外因,建模方法主要有三个方面:第一,内外因特征的时空分布建模,主要是针对与滑坡相关的内外部特征因素进行建模(如地形、地貌特征、地质构造、滑面摩擦角等);第二,内外因素作用机理建模,主要是针对内外因素相互作用进行特征建模(如随降雨变化摩擦角变化的建模等);第三,灾害系统运动的外在表现建模,包括变形时空建模、滑体运动速度建模。滑坡灾害模拟及预警的综合模型指结合以上三者研究的成果建立物理确定性模型,进行滑坡稳定性建模以及滑坡空间风险评估建模等,它们都直接或间接地为灾害控制以及预警提供了理论保证^[26]。

长久以来,人们一直非常重视对滑坡的建模、预报研究,并从不同角度采用不同方法致力于具体的滑坡灾害预测预报研究工作。但是,目前对滑坡、崩塌形成机理的研究还不够充分,滑坡模拟相关数理手段落后,尤其是滑坡发生前后数据资料的缺乏是造成滑坡短期模拟、预测精度不高的重要原因。正因为如此,采用先进的“3S”空间信息技术进行滑坡灾害的特征监测,并在此基础上利用GIS的空间分析功能完成滑坡灾害的预测工作是一种行之有效的分析方法;另外,借助于数理统计的线性回归、最优回归算