

浙江省重大科技攻关项目研究成果

浙江省 突发性地质灾害 预警预报

殷坤龙 张桂荣 龚日祥 杜惠良 等著



中国地质大学出版社

P694
3

浙江省重大科技攻关项目研究成果

浙江省突发性地质灾害预警预报

殷坤龙 张桂荣 龚日祥 杜惠良 等著

中国地质大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

浙江省突发性地质灾害预警预报/殷坤龙,张桂荣,龚日祥,杜惠良等著. —武汉:中国地质大学出版社,2005.8

ISBN 7-5625-2046-1

I. 浙…

II. ①殷…②张…③龚…④杜…

III. 地质灾害-预警预报-浙江省

IV. P642

浙江省突发性地质灾害预警预报

殷坤龙 张桂荣 等著
龚日祥 杜惠良

责任编辑:徐润英

技术编辑:阮一飞

责任校对:胡义珍

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路388号)

邮编:430074

电话:(027)87482760

传真:87481537

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

http://www.cugp.cn

开本:787毫米×1092毫米 1/16

字数:170千字 印张:6.5 彩版:20

版次:2005年8月第1版

印次:2005年8月第1次印刷

印刷:湖北地矿印业有限公司印刷

印数:1—1000册

ISBN 7-5625-2046-1/P·645

定价:32.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

浙江省是我国经济发达的省份之一,但在经济发展的过程中,地质灾害也频繁发生,因滑坡、泥石流等突发性地质灾害造成的损失日趋严重。为此,2002年浙江省科学技术厅和浙江省国土资源厅设立了“浙江省突发性地质灾害预警预报系统研究及应用示范”重大科技攻关项目。本书是该项目研究成果的总结。

浙江省地质灾害以滑坡、崩塌、泥石流为主,其中降雨是主要的诱发因素之一。本书通过对浙江省地质灾害与降雨量、降雨历时、降雨强度等关系,以及地下水渗流过程对地质灾害稳定性的影响分析,结合区域地质灾害空间预测成果,建立了适合于浙江省的突发性地质灾害的预警预报模型,在此基础上成功开发了基于WEBGIS的区域地质—气象信息耦合的地质灾害实时预警预报系统,实现了地质灾害的有效预报。通过对浙江省地质灾害资料进行收集和整理,开发了基于WEBGIS的浙江省地质灾害信息管理系统,实现了地质灾害信息、灾害管理的综合性、实时远程管理。

在2004年的梅雨季节和8月份第14号“云娜”台风期间,该系统成功开展了浙江省范围和永嘉、庆元、淳安、磐安4个研究区的地质灾害预警预报的试运行,取得了良好的减灾防灾效果。2004年8月10日至11日,在第14号台风登陆之前,运用这一系统先后两次发布了提示性地质灾害预报。8月12日,台风登陆后,该系统每隔4小时就更新发布预警预报实时信息,为防灾减灾部门提供了及时、可靠的信息。

本书详细介绍了基于实时气象信息的地质灾害预警预报研究思路,以及该预警预报系统在浙江省地质灾害预测预报中的工作流程。全书共分为7章。第一章对国内外在地质灾害预警预报研究领域的相关研究进行了比较全面系统的归纳。第二章对浙江省的地质环境进行了综述,并简要介绍了淳安、磐安、庆元、永嘉4个典型县的地质环境及地质灾害发育情况。第三章是关于地质灾害空间预测、时间预报及单体稳定性评价方面的问题。以永嘉县和磐安县为例介绍了信息量模型和逻辑回归模型在空间预测中的应用,并运用破坏概率模型对庆元县张村滑坡稳定性进行了评价。第四章开展了浙江省滑坡灾害与降雨量、降雨历时、降雨强度等关系的研究,并研究了地下水渗流过程对滑坡体稳定性的影响,为区域地质灾害的预警预报提供了充分的理论依据。第五章介绍了开发的浙江省第一个全省范围内的突发性地质灾害信息管理系统,该系统为预警预报提供了数字化的工作平台。第六章介绍了在全国率先研制的基于MAPGIS-IMS软件平台的时间与空间为一体的实时滑坡(泥石流)灾害预警预报系统。第七章是浙江省地质灾害预警预报系统试运行的两个实例。

参加该项目研究的单位是中国地质大学(武汉)、浙江省地质调查院、浙江省气象台、浙江省地质环境监测总站,项目负责人是殷坤龙。本书各章节编写人员分工是:第一章,殷坤龙;第二章,龚日祥、张桂荣、殷坤龙、斯小君;第三章,殷坤龙、张桂荣、吴益平、陈丽霞、周春梅;第四章,谢剑明、殷坤龙、刘礼领;第五章,张桂荣、殷坤龙;第六章,张桂荣、杜惠良、殷坤龙;第七章,殷坤龙、张桂荣、桂树强、陈丽霞。全书最后由殷坤龙、张桂荣统稿。

项目研究过程中,浙江省地质灾害信息库的建设所采用的基础调查资料均来自于浙江省国土资源厅主持的浙江省县市地质灾害大调查资料,其中永嘉、磐安、庆元、淳安4个县地质灾害区域空间预测所依据的地质灾害点基础资料分别来自于浙江省地矿研究所、浙江省第三地质大队、浙江省第七地质大队和浙江省地质调查院完成的县市地质灾害大调查资料,在此对这些单位表示诚挚的谢意。感谢项目主管部门浙江省科学技术厅和浙江省国土资源厅在研究过程中及时提供的信息与帮助。

著 者

2005年6月

目 录

第一章 地质灾害预警预报研究现状	(1)
第一节 地质灾害及预测预报研究的意义	(1)
第二节 地质灾害空间预测研究	(1)
第三节 降雨与滑坡发生关系的研究	(3)
一、降雨与滑坡的统计分析研究	(3)
二、降雨与滑坡的数值模拟研究	(4)
第四节 GIS 在地质灾害预测预报中的应用	(6)
一、传统 GIS 在地质灾害预测预报中的应用	(6)
二、WEBGIS 的特点及其在地质灾害预测预报中的应用	(7)
第五节 地质灾害预警预报研究	(8)
第二章 浙江省及典型县地质灾害特点	(12)
第一节 浙江省地质环境综述	(12)
一、自然地理与经济	(12)
二、地形地貌	(13)
三、地层岩性	(13)
四、地质构造	(15)
第二节 浙江省地质灾害概况	(16)
一、地质灾害的基本类型	(16)
二、地质灾害发生的地质环境规律	(17)
三、地质灾害发生的时间规律	(17)
第三节 典型县地质环境与地质灾害综述	(18)
一、淳安县地质环境及地质灾害特征	(18)
二、磐安县地质环境及地质灾害特征	(19)
三、庆元县地质环境及地质灾害特征	(21)
四、永嘉县地质环境及地质灾害特征	(22)
第三章 地质灾害预警预报模型研究	(23)
第一节 地质灾害空间预测模型研究	(23)
一、信息模型	(23)
二、二态变量的多元回归预测模型	(25)
三、人工神经网络模型	(26)
第二节 地质灾害时间预报模型研究	(28)
第三节 单体地质灾害稳定性计算模型	(29)
第四节 地质灾害空间预测及稳定性评价研究实例	(30)
一、永嘉县地质灾害危险性评价	(30)
二、磐安县地质灾害空间预测	(35)

三、单体地质灾害稳定性研究——以庆元县张村乡滑坡为例·····	(37)
第四章 降雨对浙江省滑坡灾害作用规律研究 ·····	(42)
第一节 浙江省降雨与滑坡的统计分析研究·····	(42)
一、滑坡与降雨量和降雨强度的相关分析·····	(42)
二、有效降雨量模型的确定·····	(43)
三、临界降雨量的确定·····	(44)
四、降雨量危险性等级及预警预报等级划分·····	(46)
第二节 降雨入渗对滑坡作用的机理研究·····	(47)
一、非饱和渗流基本理论·····	(47)
二、渗流对滑坡稳定性的影响·····	(51)
三、降雨入渗对滑坡作用规律的影响实例分析·····	(56)
第五章 基于 WEBGIS 的浙江省地质灾害信息管理系统 ·····	(63)
第一节 基于 WEBGIS 的地质灾害信息库的数据准备·····	(63)
一、数据整理·····	(64)
二、数据编码工作·····	(64)
三、数据组织工作·····	(64)
第二节 空间数据库的设计及其相关技术·····	(64)
一、空间数据库的设计·····	(64)
二、用 ASP 对 Web 数据库进行操作·····	(65)
三、Web 数据库的操作·····	(67)
四、子系统开发环境·····	(67)
第三节 系统功能演示·····	(68)
一、信息查询、检索功能·····	(68)
二、统计分析功能·····	(69)
三、信息的远程实时更新功能·····	(69)
四、空间信息可视化功能·····	(69)
五、空间信息共享功能·····	(70)
第六章 基于 WEBGIS 和实时降雨信息的浙江省地质灾害预警预报系统 ·····	(71)
第一节 基于 WEBGIS 的地质灾害时空耦合预警预报系统研究·····	(71)
一、地质灾害预警预报的地质-气象耦合模型研究·····	(71)
二、降雨信息的实时传递·····	(73)
三、地质灾害预报模型与 WEBGIS 集成系统·····	(74)
四、地质灾害实时预报信息的 WEB 发布系统·····	(74)
五、浙江省地质灾害预警预报系统功能演示·····	(75)
第二节 服务于地质灾害预警预报的降雨预报研究·····	(76)
一、中尺度数值预报 MM5 的针对性研究·····	(76)
二、利用卫星短时降水的估算研究·····	(76)
三、利用雷达短时雨量的估算研究·····	(77)
四、降雨预报在地质灾害预警预报中的应用实例·····	(78)

第七章 浙江省地质灾害预警预报系统试运行实例 (80)

第一节 “云娜”台风期间系统运行结果与分析 (80)

一、地质灾害预警预报系统及时启动..... (80)

二、地质灾害实地调查..... (83)

三、模型与系统的可靠性验证..... (84)

第二节 梅雨季节系统运行结果与分析 (85)

一、庆元县的预警预报情况..... (85)

二、庆元县 5~6 月份实际发生地质灾害核查情况 (86)

三、模型与系统的可靠性验证..... (86)

第三节 单体地质灾害监测工作 (88)

一、监测工作基本概况..... (88)

二、监测方法与手段..... (88)

三、庆元县张村滑坡监测结果与分析..... (88)

主要参考文献 (92)

第一章 地质灾害预警预报研究现状

第一节 地质灾害及预测预报研究的意义

以滑坡、崩塌和泥石流为主的斜坡地质灾害属于一种自然地质现象,但其造成的后果却是一种社会和经济现象,具有灾害性,它不仅给人类生命安全带来威胁,而且对财产、环境、资源等具有破坏性。无论是从单个地质灾害所造成的危害,还是从区域性的宏观角度观察,其造成的损失已大得令人震惊。

浙江经济发达,人口众多。由于地理位置独特,地形复杂,地貌类型多样,差异明显,是我国滑坡、泥石流等突发性地质灾害频发的地区之一。特别是近年来,随着经济建设等人类活动的增强,这类地质灾害日趋增多,损失日益增大,已成为浙江省的四大灾害之一。截止 2002 年 3 月,浙江省共发生有记载的突发性地质灾害点 2 918 处,造成的损失十分严重。目前全省还有 2 300 余处滑坡灾害隐患点处于不稳定状态,许多村庄和乡镇正在受到滑坡危险体的威胁。

如何对这类分布面广、规模小、多点突发的滑坡(泥石流)灾害进行预警、预报,积极减轻灾害所造成的损失,维护人民生命财产安全,保障经济建设顺利进行,已成为当前社会和政府关注的一个焦点并迫切希望开展研究和加以解决的一个重大课题。关于群发性地质灾害的预警预报研究,在国际地球科学界也是属于极具挑战性的前沿领域之一。

随着网络化和信息化技术的发展,传统的地质灾害时空预测预报的范畴和功能正在悄然发生变化和延伸。建立一个基于网络技术的地质灾害预警预报系统,实现地质灾害时间与空间预测预报的统一,对地质灾害的减灾与防灾具有十分重要的意义。其核心是在研究地质灾害时空预测预报模型的基础上,开发基于 Internet 的地质灾害实时预报系统,实现与网络连接的地质灾害实时预警预报与减灾防灾体系。

开展地质灾害预测预报研究也是当今国际地质灾害研究和环境地质研究领域的前沿课题,是合理解决人类活动与地表自然地质体平衡关系的关键问题之一,具有重要的理论意义和实际意义。

第二节 地质灾害空间预测研究

过去 30 多年来,地质灾害研究的特点已由单个灾害点的现象描述、分类、治理发展到现在以定性和定量描述为基础的定量预测预报和综合治理研究,但作为灾害来研究则是近十多年的事。从当前的地质灾害研究理论和技术水平来看,如果地质灾害得到了深入的地质勘查,地质灾害的发展过程能够得到实时监测,预测预报地质灾害可能发生的位置和时间还是可能的。问题是预测预报所要求的技术和经济代价是一般地质灾害点难以承受的。因而,地质灾害预报成功的事例也就成了凤毛麟角,无数地质灾害和预测预报失败的事例足以证明,开展地质灾害预测预报仍是一件非常困难的事。人们从经验中得到更深刻的认识,减少地质灾害的重要措施必须从区域地质灾害分布规律研究开始,必须与国土开发规划结合在一起考虑,从宏观上

进行预测控制,在微观上进行整治补救,而宏观研究所带来的实际效益通常是显著的。

地质灾害空间危险性预测在国外早就得到研究与报道。Sheko A. (1977)认为区域性滑坡灾害预测应被理解为空间位置、时间以及运动方式的一种科学性预测,这种预测基于滑坡的分布规律以及滑坡的发展状况。Ilievil(1977)提出了编制 1:1 500 000 全欧洲斜坡地质灾害工程地质图及灾害预测区划图的必要性和基本原理。建议编图从以下几个方面来进行:①标出各种滑坡灾害作用的位置、类型、成因和影响因素;②滑坡灾害作用所处的地质背景,从而确定滑坡灾害的分布规律。在此基础上对不同地区进行定量的危险性区划。Kyunttsel V. V. 等(1978)对地质灾害时间和空间预测的 4 个阶段进行了划分,即:①原始数据的分析。了解地质灾害的位置、活动周期、影响因素、区域地质条件、类型、触发因素和这些因素与条件对地质灾害的影响;②分析结果的概括与系统化。在第一阶段工作结果的基础上,编制区域地质灾害工程地质分区图,评价地质灾害运动的规律性;③详细阐述预测因素。为了预测研究区内的地质灾害,对地质灾害的激发因素(降雨的变化、河谷的侵蚀等)进行预测,绘制地质灾害运动速率图和活动性图;④概括与总结。依据以上步骤编制地质灾害预测图,地质灾害预测包括两个方面:时间(预测灾害可能活动的时期)和空间(预测灾害活动的范围)。Hansen A. (1984)从地貌学的观点,提出了针对区域性的滑坡灾害区划分析的有关方法。认为灾害区划应考虑三个方面的因素:①确定灾害的类型。灾害程度不仅取决于滑坡自身的特点,而且取决于灾害危险区的社会状况;②分清自然滑坡灾害与人工诱发的滑坡灾害;③从评价的区域大小和地理位置、财政方面的许可性、能够投入的时间和人力、交通运输及设备能够进入研究区的可能性等综合方面,选择滑坡灾害的评价方法。Hansen 实际上已经提出了不仅要预测研究滑坡灾害的自然属性,而且要研究滑坡的后果(损失、伤亡等),即风险研究。Einstein(1988)对滑坡灾害的危险性及风险评价进行了系统分析,提出了事件先验概率和后验概率的统计评价方法,从滑坡灾害图的角度提出了五个层次的滑坡灾害评价过程:滑坡灾害影响因素图、滑坡灾害现象分布图、危险性图、风险图、滑坡灾害管理图。Martin Cross(1998)采用矩阵评价方法,按滑坡敏感性指标的大小进行了滑坡灾害危险性区划制图研究,滑坡敏感性指数 LSI 越高,滑坡越容易产生。A. Ragozin(2000)研究了当前地质灾害及风险评价中的危险性、易损性和风险三个基本概念,提出考虑危险性预测目标有效期限在内的单个地质灾害危险性指标,可用其主要控制因素的概率乘积来表示。而对于区域研究,地质灾害的危险性则可通过特定地区的面积、灾害发生面积、灾害数量和时间之间的关系表达式来建立定量模型,并根据灾害体的厚度、速度、体积等与建筑物基础埋深之间的关系为例研究了易损性指标的确定方法,提出了相应的途径和易损性指标评价表。对于风险指标的确定则采用联合国教科文组织在 1984 年提出的定义为基础,针对不同的受灾对象(财产、人口、环境等)修订出相应的具体表达式。

20 世纪 80 年代开始,国内也开展了大量地质灾害空间危险性预测的研究。杨顺安、殷坤龙等(1987)基于对滑坡、崩塌灾害影响因素的统计分析,通过建立各影响因素的分级与分类,以及与滑坡灾害之间发生频率的关系曲线,然后进行综合分析评价,提出了滑坡灾害危险性评价的系统模型法。晏同珍(1994,2000)系统地研究了滑坡灾害空间预测的理论问题,提出了滑坡灾害空间预测的理论基础在于滑坡发生的工程地质条件的类比,通过在我国西北、西南以及长江三峡地区的滑坡灾害综合研究,认为滑坡灾害的空间分布具有丛集性规律,并采用数学模型定量地研究了我国易滑岩组的特征,提出了易滑地层的概念。殷坤龙、晏同珍等(1989、1996、2001)就滑坡灾害和斜坡不稳定性空间预测与区划进行了深入系统的研究,先后提出了信息分析模型、多因素回归分析模型、聚类分析模型、判别分析模型等,通过在秦巴山区、三峡

库区区域滑坡灾害预测的实例研究,探索了信息分析模型的理论基础,认为特定地区的滑坡影响因素不是简单地与单个因素有关,而更重要的是与多因素组合有关,从而提出了信息熵分析模型。张梁、张业成(1998)、柳源(2000)等提出了基于历史地质灾害发生特点的危险性指标评价方法,对地质灾害采用其空间分布密度、活动频率或发生规模等指标,运用层次分析法建立危险性评价模型。

第三节 降雨与滑坡发生关系的研究

滑坡失稳是山区常见的自然灾害,降雨型滑坡的频繁发生,既造成了大量的人员伤亡与财产损失,同时对经济建设和社会稳定也产生非常不良的影响。滑坡的发生与降雨关系密切是早为人知的事实,但人们对这种关系的认识和理解仍很不充分,深入研究降雨引起滑坡失稳的规律,并在此基础上建立定量的分析模型对于滑坡灾害的预警预报有重要的指导意义。同时,对滑坡与降雨的关系进行研究,既有利于加深对降雨型滑坡发育规律及防治措施的认识,又能充分利用其规律来指导灾害区资源、能源开发的规划和交通、城乡的建设,最终达到防灾与减灾的目的。

大量的统计资料表明,大多数的滑坡是发生在降雨期间或降雨之后,一个地区的滑坡发育程度有随降雨量增多而增强的规律。在浙江省庆元县境内,1998年6月13~22日的连续特大暴雨期间,累计降雨量达792.7mm,引发了100多处地质灾害。1999年9月4日受台风降雨影响,浙江省永嘉县日降雨量达285.9mm,引发了该县境内大小83处滑坡。又如浙江省磐安县境内,1997年8月18日台风,连降暴雨220mm,局部达294mm,造成山洪暴发,引发11处山体滑坡。钟立勋(1999)在《中国重大地质灾害实例分析》一文中所列举的27例中国重大地质灾害中有15例是由于暴雨引起的。《中国典型滑坡》一书中列举的90多个滑坡实例,有95%以上的滑坡都与降雨或地下水渗流有密切关系,其中有相当一部分滑坡发生在雨季。

对于滑坡而言,按组成滑体的物质成分可以分为土质滑坡和岩质滑坡。降雨对于土质滑坡的影响主要是降雨入渗改变了滑体内的渗流场,从而增大了土体的静水压力和动水压力,另一方面土体的抗剪强度降低。由于土体是多孔介质,存在毛细作用,非饱和区土体的含水量并不为零,非饱和土体的抗剪强度与其饱和度密切相关,含水量的变化对非饱和土体的影响十分敏感。雨水入渗的过程中,滑体的饱和区和非饱和区在不断发生变化,且非饱和区内土体的含水量也在变化,因此,土体的抗剪强度发生了变化。对于不同的降雨量、降雨强度、降雨历时,在考虑降雨对滑坡的影响时,应对饱和-非饱和渗流场进行模拟研究,从而确定滑坡体内渗流场的动态变化过程,在此基础上研究土体的抗剪强度变化,最终确定滑坡体的稳定性变化情况,即滑坡随降雨的雨量、降雨强度、降雨历时不同时的稳定性实时变化情况。这对于滑坡灾害预警预报具有重要的理论意义和实际应用价值。

降雨对于岩质滑坡的影响主要有两个方面,其一是降雨入渗降低了岩体的强度,特别是岩体中的软弱夹层或软弱结构面;其二是降雨入渗形成的渗流场在岩体中形成水压力,特别是裂隙岩体形成的静动水压力。

一、降雨与滑坡的统计分析研究

在运用统计分析方面,一些学者做过这方面研究,他们从不同的角度或方面对降雨与滑坡灾害进行研究,取得了不少成果。①曲焰(1987)通过长期观测,发现滑坡蠕变滑动与降雨量

具有明显的关系,并经过回归分析建立了蠕变位移(y)与月降雨量(x)的指数函数关系: $y = ae^{bx}$ (a, b 为系数)。②李明华以四川北部 1981 年暴雨滑坡为例,分析了该地区滑坡发生的地质地貌和降雨条件,得出了不同地质地貌条件下触发滑坡的降雨量不同,同时通过统计该区域不同地貌区触发滑坡的累积降雨量和日降雨量的结果,得出了不同地貌区触发不同数量滑坡时的降雨参数。③谢守益(1995)根据对长江三峡库区典型滑坡的分析,得到几个典型滑坡降雨诱发的阈值,并利用阈值分析了典型滑坡降雨诱发的概率。

对于滑坡发生的降雨临界值的讨论,一些学者强调前期降雨的重要性,建议以一次降雨过程总量作为发生大量滑坡的依据;香港地区滑坡研究资料则提出以小时降雨量作为发生灾害性滑坡的临界值。山田刚二等(1977)通过滑坡灾害的位移和地下水压力的监测,认为滑坡位移速率以及地下水压力不仅与当天的降雨量有关,而且还与以前的降雨量有关,所以用有效雨量来表示雨量。

Guidicini G. (1977)对巴西 9 个地区滑坡记录和降雨资料的分析,建立了降雨与滑坡之间的统计关系,发现这些地区的一次降雨量超过 250~300mm 时,降雨与滑坡之间存在很好的对应关系。据此对每个地区绘制了危险图,划分了滑坡产生的 4 个危险等级,以绘制的降雨量与滑坡危险性等级图为依据进行滑坡灾害的预测预报。

在浙江省开展的地质灾害预警预报研究中,殷坤龙等(2003, 2005)对浙江省降雨型滑坡进行了研究,将浙江省分为台风区和非台风区两个区域,分别确定了适合区域地质灾害预测预报的有效降雨量临界值和当日雨强临界值,并结合浙江省地质灾害发生的地质条件,建立了区域地质—气象信息耦合的地质灾害预测预报模型。

值得一提的是,1985 年,美国地质调查局和美国国家气象服务中心联合建立了一套滑坡实时预报系统(Wieczorek, 1990)。该系统于 1986 年 2 月 12~21 日在旧金山海湾地区的一次特大暴雨灾害中被用于滑坡预报,并得到检验。该系统考虑了临界降雨强度和持续时间,并且考虑了地质条件、降雨的空间分布以及地形条件。

综观上述研究成果,均从降雨历时、降雨量、降雨强度及降雨型式等方面进行分析,得出的成果的应用范围也存在一定的局限性,一般只能适用于本区域或相类似的地区。

二、降雨与滑坡的数值模拟研究

目前的一些研究(赵阳升, 1994; 王恩志、孙役、邓旭东, 2000)表明降雨的入渗一方面使滑坡体的抗剪强度降低(张家发、李思慎、叶自桐, 1998);另一方面雨水入渗导致瞬态动静水压力,对于地下水位较低、非饱和区深厚的滑坡体则形成饱和和非饱和渗流场。非饱和区的水份运动影响着降雨入渗的补给过程和坡体内的水压力分布,在地下水位以上非饱和区的孔隙水压力增大,形成瞬态附加孔隙水压力。其压力分布与介质结构、介质原有含水量分布、降雨过程、强度和历时有关。当降雨过程长、强度大,在非饱和区形成瞬态饱和区,对滑坡稳定产生不利。

张家发等(1994, 1997)通过三峡工程永久船闸高边坡降雨入渗的试验研究对高边坡饱和和非饱和渗流场做出初步分析。首先他们通过室内试验进行了材料非饱和参数研究。他们采用不胡溶驱替法(周创兵、叶自桐、韩冰, 1998)通过流量和水压力观测得到介质的基质吸力-饱和度关系,然后用 Van Genuchten(Van Genuchten M Th., 1980)模型和 Brooks-Corey(Brooks RH. Corey AT., 1964)模型对数据进行拟合,得到介质非饱和和水力传导率的表达式;采用压力板出流法则测得土样的吸湿和排水过程的水份特征曲线。在试验的基础上,假定岩体渗透各向同性,并为了迭代的收敛,将饱和渗透系数放大(约 100 倍),以固定降雨入渗系数(0.165)

乘以多年平均降雨率($3.636 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$)作为降雨入渗边界条件,用有限元数值模拟分析了类似多年平均降雨强度条件下边坡中的稳定渗流状态及强降雨过程中的非稳定入渗补给过程及地下水运动和水压力分布的变化趋势。

陈守义(1997)针对我国南方及中西部地区广泛分布的膨胀土、残积土等粘土在雨季常发生浅层滑坡的问题,运用非饱和土壤水份运动的研究方法,采用交替隐式差分格式求解给定入渗和蒸发边界的边坡土体瞬时含水量分布,为分析土坡稳定性提供依据,并建立了天气变化对土坡稳定性影响的预测模型。

针对香港地区一种典型非饱和土斜坡和香港地区的降雨特点,吴宏伟(1999)等在总结前人研究的基础上,用有限元法模拟降雨入渗引起的土坡瞬态渗流场,分析降雨强度、降雨历时、雨型及土体渗透特性、坡面防渗及阻水层埋藏条件等因素对瞬态渗流场的影响,并用极限平衡法研究斜坡安全系数对上述影响因素的敏感性。但在研究斜坡时假定基岩面平行于自然坡面,还假定坡面左右两端边界的地下水位面保持不变,所采用的降雨强度是 24h 的降雨强度,而实际的降雨过程并非如此;所采用的雨型也是一种理想化的降雨型式。

Shimada 等(1995)用 Galerkin 有限元法模拟二维非饱和渗流,采用刚体弹簧模型进行斜坡稳定性数值分析。考虑的影响因素包括降雨强度和土的类型。他的计算结果表明:较高的降雨强度可以显著降低模型斜坡的安全因数;渗透性函数对模型斜坡安全因数的降低只有较小影响;在土的水份保持曲线靠近饱和一端,基质吸力的较小改变可引起模型斜坡安全因数的大幅度降低。

Alonso 等(1995)进行了土坡二维非饱和渗流和极限平衡法的联合分析,渗流分析中采用了考虑空气压力变化的耦合型控制方程。考虑的影响因素包括土的类型、降雨历时、降雨强度、水份保持曲线的形状和土的渗透性。主要研究结论为:安全因数变化所需的时间与土的渗透系数成反比,且当饱和渗透系数 $K_w < 10^{-7} \text{ m/s}$ 时,在降雨的当时看不出安全因数明显下降;对于水份保持曲线形状比较光滑(亦即级配较好)的土,安全因数下降所需延迟时间较为显著;高降雨强度和低渗透性的参数组合可导致降雨后安全因数的降低。可以看出,Alonso 的结论都是与降雨引起延迟型的土坡失稳有关。

Sun 等(1995)认为,空气压力对非饱和土的渗流有明显的影响,发展了应力和两相流的耦合理论,并应用于分析降雨引起土坡的浅层破坏。推导了将多相流与多孔介质固结相耦合的控制方程组,并用一个将吸力、饱和度和孔隙比联系在一起的状态方程作为附加方程。Galerkin 有限元法用于离散控制方程,有限差分公式用于离散时域。总水头、空气压力及饱和度视为独立变量。该理论被用于分析 Yash-naga 斜坡。分析结果表明,由于空气压力的影响,使朝向斜坡深部的渗流变慢,而斜坡浅部将迅速饱和。雨水入渗造成斜坡浅部从坡顶到坡脚方向的渗流,并很易在坡脚产生破坏。如果分析中不考虑空气压力的作用,则雨水会不断地渗到坡体的深处,使斜坡底部一直呈饱和状态,此情形下的渗透力使斜坡的稳定性增大。Sun 等认为不考虑空气压力的分析结果不符合实际情况。

Fredlund 等(1987)反复强调负孔隙水压力对土坡稳定性的影响,并重新研究了边坡稳定分析中的安全因数计算公式,以便把正的和负的孔隙水压力都包括进去。他通过香港陡坡的算例进行了暴雨情形下的瞬态渗流分析和边坡稳定分析。分析中采用模拟降雨前稳态渗流条件下的孔隙水压力分布作为暴雨期间瞬态分析的初始条件。渗流分析中假定孔隙空气压力不变,用 Galerkin 有限元法模拟稳态和瞬态渗流场,通过渗流分析可以得出暴雨开始后不同时刻的孔隙水压力分布,从而分析土坡在不同时刻的稳定性。分析结果表明:由于临界滑动面比

较浅,负孔隙水压力在抗剪强度发挥中起主要作用,所以暴雨期间安全因数下降很显著,并有可能导致斜坡的破坏。

第四节 GIS 在地质灾害预测预报中的应用

由于 GIS 技术的空间分析与制图功能和可视化的特点, GIS 技术在地质灾害预测预报研究方面的应用正得到快速发展。从 20 世纪 80 年代至今, GIS 的应用已从数据管理、多源数据数字化输入和绘图输出发展到数字高程(DEM)或数字地形(DTM)的使用、GIS 结合灾害评价模型的扩展分析、GIS 与决策支持系统(DSS)集成技术的应用, GIS 已逐步发展成熟并深入应用。我国应用 GIS 技术开展地质灾害预测起步较晚,研究程度偏低。虽然目前尚未见到较成熟实用的地质灾害预测预报与评价的 GIS 系统,但是在这方面的研究投入和进展却是惊人的,有大量的科研院校和从事地质灾害防治的部门已加大了 GIS 技术的应用研究。

一、传统 GIS 在地质灾害预测预报中的应用

在地质灾害研究领域,国外在 GIS 技术的应用已经比较成熟的地方主要体现在以下几个方面:

(1)建立基于 GIS 的地质灾害信息管理系统。如 Keane - James - M(1992)、Bahar - Irwan(1998)、Bliss - Norman - B(1998)等将 GIS 运用到灾害历史数据的管理及预测成果成图表达中。

(2)GIS 技术与各种评价模型相结合运用到地质灾害危险性预测中。如 Matula(1987)、Lekkas - E(1995)、Randall(1998)、Dhakal - Amod - Sagar(1999)等利用 GIS 的空间分析功能与预测模型的结合完成灾害预测因素的空间叠加,进行危险性预测,得出相应的预测分区图和灾害敏感图。

(3)进行基于 GIS 的地质灾害分析预测与管理。如 Ellene(1994)、Leroi(1996)、Bunza(1996)、Castaneda - Oscar - E(1998)、Atkinson(1998)、Michael(2000)、Aleotti(2000)等从影响地质灾害风险的因素出发,利用 GIS 的空间分析功能进行因素叠加,实现风险评估,并结合 GIS 的信息管理功能,对灾害信息进行管理,最终进行管理决策,达到防灾减灾的目的。目前,国外在地质灾害预测领域已基本实现了 RS 与 GIS 的紧密结合,少数研究成果达到了 3S 技术整体结合。

在国内也开展了一些 GIS 在地质灾害预测预报中的应用研究。

(1)成都理工学院(1998)和全国地质环境监测总站及国土资源部长江三峡地质灾害防治指挥部合作进行了“地质灾害信息系统及防治决策支持系统”开发试验工作,以建立一个全国地质灾害调查与综合评价系统。

(2)殷坤龙、晏同珍等(1989、1996、2001)就滑坡灾害和斜坡不稳定性空间预测与区划进行了深入系统的研究,先后提出了信息分析模型、多因素回归分析模型、聚类分析模型、判别分析模型等,并提出了信息熵分析模型。这些模型经过近 20 年的研究与发展,目前已经完全实现了基于 GIS 技术的滑坡灾害危险性预测与区划。

(3)殷坤龙、张梁等(2002)在全国地质灾害风险区划研究项目中,基于 GIS 平台,采用信息量模型和专家评分模型,以 1:6 000 000 的比例尺成功实现了全国崩塌滑坡和泥石流灾害危险性、易损性和风险的区划。

(4)三峡库区(2003)在监测预警工程中,在建立了专业队伍与群测群防相结合的综合监测系统和基于网络的信息系统的基础上,建成了基于地理信息(GIS - based)的地质灾害预警系统,为各级政府部门提供了有效的预警信息,使对库区地质灾害的防治由被动转为主动,最大限度地减少了库区地质灾害造成的损失。

今后, GIS 技术在地质灾害研究领域中的应用将主要集中于以下几个方面:

- (1)GIS、GPS、RS 集成技术的进一步发展与应用;
- (2)在运用 GIS 技术获取地质信息时,各种地质调查方法的相互结合及补充;
- (3)实现真正的三维甚至四维信息的存贮、管理与再现;
- (4)地质模型与 GIS 技术的耦合。

应该指出的是, GIS 在地质灾害研究领域中的应用并不意味着完全取代基础资料的收集、必要的野外调查及室内分析试验;相反地,只有在全面深入地认识地质灾害的发生机理和条件的前提下所进行的 GIS 技术分析才是可靠的。

二、WEBGIS 的特点及其在地质灾害预测预报中的应用

GIS 作为一种多源信息的集成工具,已成为地质灾害预测预报研究的重要技术之一。近年来,许多部门都建立了自己的 GIS 系统,并取得了一定的效果。但是,这些 GIS 系统均是封闭、独立的单机系统,是由不同部门,按不同的应用策略、使用不同的传统 GIS 工具软件建造的。因此,不仅不能实现信息的共享、造成极大的数据存贮冗余和软硬件资源浪费,而且系统的利用率低、成本高、更新维护困难。随着信息技术以及互联网的飞速发展及广泛应用,这些传统的 GIS 系统面临着严峻的挑战。这种封闭独立的体系结构要求运行系统的计算机必须包含所需的所有数据、应用程序及软硬件配置。当系统升级或数据变更时,必须对所有系统进行升级和更新。这在互联网发展如此迅猛、应用如此普及的今天,实在是不可取的。因此,开发基于互联网的、具有空间信息共享及协同工作能力的网络 GIS,已成为地质工作者亟待解决的问题。这对于扩大地学信息的来源,降低地学数据获取成本,提高数据的利用率和时效性,以及促进地质灾害研究中相关信息应用的深度和广度都具有重要意义。

WEBGIS 是建立在 Internet 上具有浏览器/服务器体系结构(B/S)的网络 GIS,是利用万维网技术对传统 GIS 的改造和发展,它改变了传统 GIS 的运行模式,使用户可以借助方便、廉价的 Internet 网,通过 Browser 这一统一的图形用户界面,访问位于不同地区不同类型的空间信息资源。WEBGIS 的最终目标是实现 GIS 与 WEB 的有机结合,也就是将 GIS 融入 WEB。从 WEB 的任意一个节点上,用户使用浏览器(如 IE、Netscape 等)就可以浏览 WEBGIS 站点中的空间数据、制作专题地图,进行地理信息的空间查询、空间分析,甚至预测和决策,从而给 WEB 的信息发布赋予了 GIS 这一直观工具,使人们通过 WEB 浏览查询信息更加方便,也使 GIS 的功能通过 WEB 得到普及和扩展,真正成为大众使用的技术和工具。

WEBGIS 与一般基于因特网的信息系统相比,最大特点是在空间框架下实现图形、图像数据与属性数据的动态连接,提供网上可视化查询和空间分析功能。与传统 GIS 相比,它使原来基于单机或局域网的 GIS 扩展到整个因特网,使得地质灾害的基本信息和预警信息有可能在全球范围内共享。经过合理地组织,WEBGIS 可以实现数据和模型操作的透明,为地质灾害的预测预报研究提供一个功能强大而又方便有效的途径。

目前 WEBGIS 在地质灾害方面的应用主要体现在基于 WEBGIS 开发地质灾害数据管理系统(Sturdivant - Nicholas - S, McAdoo - Brian - G. 1999;李雪梅,2002;陈植华、关学峰、胡

成,2003;朱良峰等,2003、2004),实现地质环境和地质灾害空间信息的集中管理、远程浏览查询、信息共享等功能。但将之应用到地质灾害预测预报研究中的相关文献还是鲜有报道。殷坤龙、张桂荣等(2003、2005)在浙江省重大科技攻关项目“浙江省突发性地质灾害实时预警预报系统与应用示范”研究过程中,在传统 GIS 技术的基础上,构建了基于 WEBGIS 的浙江省突发性地质灾害信息管理系统,实现了浙江省地质灾害信息的开放和共享;并运用二次开发技术实现了地质灾害空间预测模型与气象信息的耦合,在国内率先研制了基于 WEBGIS 的地质灾害预测预报系统。该系统建立了实时气象信息与地质灾害空间信息的时空耦合模型,可以实现地质灾害预警预报信息的实时 WEB 发布。

第五节 地质灾害预警预报研究

国内外地质灾害(滑坡、崩塌、泥石流等)预警预报研究经历了 3 个阶段。

(1)20 世纪 40 年代中期至 20 世纪 80 年代,日本学者斋藤迪孝(1963)提出一个预报滑坡的经验公式“斋藤法”。Hoek(1969)提出基于滑坡监测时间-位移曲线的外延法。这段时期内我国在这方面的相关报道很少,只是有个别研究者做过探索性工作。

(2)20 世纪 80 年代至 20 世纪 90 年代,这一阶段内出现了敏感性制图、信息论、灰色系统理论等预报方法。代表性学者有 Kawakami H., Saito Y. (1984), 晏同珍(1984), Einstein H. H. (1988), 张倬元、黄润秋(1988), 崔政权(1989), Romana M. (1989), Fukuzono、Voight (1989), 王思敬、王效宁(1989)等。

(3)20 世纪 90 年代至今,在原来的基础上,出现了信息论、灰色系统、模糊数学、专家系统、灾变理论、分形理论、控制论、神经网络、3S 技术等预报方法。

1984 年,印度尼西亚公共工程部在日惹市(Yogyakarta)的防砂技术中心(SABO TECHNICAL CENTRE)为了收集水文资料和监测泥石流的发生(刘孝盈,1995),安装了雷达雨量计和雷达遥测装置系统,在 Merapi 山上进行降雨观测,认为泥石流的发生与短期暴雨和长期降雨相关。将 1h 短期暴雨的降雨量称做有效降雨量,长期降雨称为工作性降雨量。由对降雨期间泥石流发生的分析和印度尼西亚实际观测结果得到 1h 降雨与工作性降雨之间的临界线,从而得到各地区的预警和躲避降雨的临界线,这种信息通过无线电通知印度尼西亚自然灾害防治执行协调局,再由协调局以省长的名义向下逐级传达,直至传达到村以及居民点的代表。

1985 年,美国地质调查局和美国国家气象服务中心联合建立了一套滑坡实时预报系统(Wieczorek,1990),该系统是基于 1982 年 2 月 3~5 日在该地区发生的一次特大暴雨所引起的滑坡灾害数据。根据这次灾害建立了滑坡与降雨强度和持续时间的临界关系曲线,该曲线作为后来滑坡实时预报的经验曲线。该系统于 1986 年 2 月 12~21 日在旧金山海湾地区的另一次特大暴雨灾害中被用于滑坡预报,并得到检验。美国地质调查局和美国国家气象中心在整个旧金山海湾地区共设立了 45 个自动降雨记录点,当降雨每增加 1mm 时,降雨观测点就通过自动方式将数据传送到美国地质调查局的接收中心和计算机系统。同时,为了监测降雨期间地下水压力的变化,他们还设置了若干个孔隙水压力计以观测斜坡中地下水压力的变化。当降雨量和降雨强度将要超过临界值时,提前进行滑坡灾害的预报,以减少滑坡灾害的损失和可能的人员伤亡。

1999 年,云南省国土资源厅在云南省滑坡、泥石流等地质灾害频发地区和重点危险区域开展了县域地质灾害调查与区划工作,提出防治措施,建立了群测群防体系。在查清地质灾害

隐患点数量、规模、形成机制、发展趋势的同时,全省各地国土资源管理部门与民政、气象、水利等部门,共同构建起了省、地、县、乡、村五级地质灾害群测群防体系,对辖区内的地质灾害隐患点明确到责任人,进行监测、预警。

1999年,香港地区利用自动雨量计组成监测网络,将资料定时传给管理部门,如果预测24h内降雨量达到175mm或1h市区内降雨量超过75mm,则认为达到滑坡预报阈值,即由政府发出通报。香港地区平均每年发出3次泥石流和滑坡预警预报。

2001年,台湾研发完成了泥石流防灾应变系统,借助因特网发布。整个系统包括实时雨量数据与泥石流警戒基准值自动分析、泥石流观测示范站现场信息、泥石流潜势流调查资料和疏散路线规划等。利用地理信息系统(GIS)及因特网技术使外界能够随时得知最新泥石流警戒消息与各项信息,结合自动传真与简讯系统进行多元化公开,增加各级防灾单位的应变时间。

2003年,三峡库区建立了专业队伍与群测群防相结合的监测体系,建成了库区监测预警系统。该监测预警工程分为三个子系统,分别为以基于综合监测获取现场信息为核心的地质灾害监测系统,以基于网络数据分析和管理的地质灾害信息系统和以基于地理信息系统减灾防灾决策支持为核心的预警系统。三个子系统之间采用计算机网络技术相互联系,形成了一套以现代监测分析评价技术为核心的地质灾害监测、分析、评价、预测和预警系统。

2003年,山东省国土资源厅与省气象局联合开展了“山东省地质灾害气象等级预报”工作,于2003年6月投入正式运行,并分别于当年7月9日、16日和17日发布三级以上地质灾害气象等级预报3次,均在山东卫视18时30分的新闻联播节目中播出。

2001~2005年期间,中国地质环境监测院开展了国土资源大调查地质灾害预警工程计划设立的《典型地区突发性地质灾害时空预警示范(试验区)建设》项目。该项目选择了四川省雅安市雨城区作为西南地区地质灾害预警试验区,采用20台SL1遥测雨量计(翻斗式)构成试验区降雨观测网,得到2002年4月1日至2003年3月31日的雨量观测值,结合1979年、1991~2001年间的历史降雨资料,得到试验区年降雨分布规律、暴雨的时间分布规律等结论。同时,该项目根据高频电磁波时域反射(TDR)原理,研制了岩土含水量监测仪,记录了试验区李坝乡桥沟镇桑树坡在降雨期间不同深度土层含水量变化情况。通过地质灾害因子统计研究,选择了响应因子,基于区域地质灾害评价预警的递进分析理论与方法(AMFP),以MAPGIS为辅助工具,确定了试验区“发育度”与“潜势度”区划。通过2003年8月25~26日的典型降雨事件,反演模拟了试验区内确定时间段的地质灾害发生的“危险度”分布情况,共划分出5级危险区,结果精度达到50%。

2003~2004年期间,殷坤龙、张桂荣等(2005)在“浙江省突发性地质灾害实时预警预报及应用示范”重大科技攻关项目中,率先在国内开展了基于WEBGIS的地质灾害实时预警预报研究。通过对浙江省地质灾害与降雨量、降雨历时、降雨强度等关系的研究,结合地质灾害的特点和空间预测成果,建立了适合于浙江省的突发性地质灾害预警预报等级的科学划分依据,开展了地质灾害预警预报模型的理论研究。研究成果经在示范县的实际验证,表明了模型较好的实用性和可靠性。该项目建立了第一个全省范围内的突发性地质灾害信息管理系统和时间与空间为一体的实时滑坡(泥石流)灾害预警预报系统,实现了基于WEBGIS平台的浙江省地质灾害点分布和灾情信息的图、数一体化管理。能够通过互联网与气象等有关部门相连接,根据实时的降雨预报和雨量资料,对浙江省范围内地质灾害发生的空间位置和时间作出预警预报,实时发布滑坡(泥石流)灾害发生的空间范围、强度、为政府部门提供了地质灾害减灾