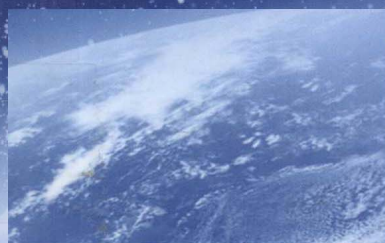


滑坡灾害风险分析

殷坤龙 张桂荣 陈丽霞 高华喜 汪 洋 著



科学出版社
www.sciencep.com

滑坡灾害风险分析

殷坤龙 张桂荣 陈丽霞 高华喜 汪 洋 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对滑坡灾害,分五章对其风险分析与决策管理进行理论与实践研究,所论述的科学问题具有较强的学术前沿性。本书针对区域滑坡灾害,在空间预测、时空耦合模型建立以及承灾体易损性等理论分析的基础上,进行国家级、县级和乡镇级滑坡灾害风险分析实践;针对单体滑坡及其次生涌浪灾害,在失稳概率与可靠度分析、单体滑坡灾害时间预测预报、涌浪危险性分析以及承灾体调查与易损性理论分析的基础上,进行单体滑坡灾害风险分析实践;采用 WebGIS 技术进行了区域滑坡灾害风险预警预报系统开发与风险管理研究,对水库库岸滑坡及其次生涌浪灾害进行风险预警决策与管理实践的探讨性研究。

本书可作为地质工程、岩土工程、环境工程、减灾防灾工程、安全管理等专业研究生、本科生的教材或参考书,也可供从事地质灾害风险分析和管理的科研或减灾防灾部门各界人士参考。

图书在版编目(CIP)数据

滑坡灾害风险分析/殷坤龙等著. —北京:科学出版社,2010
ISBN 978-7-03-028901-8

I. ①滑… II. ①殷… III. ①滑坡-地质灾害-风险分析 IV. ①P642.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 173692 号

责任编辑:杨 红 孙燕冬 / 责任校对:刘小梅
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京天时彩色印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010 年 9 月第一次印刷 印张:19

印数:1—2 000

字数:450 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

灾害风险分析与评估是制定突发性重大灾害应急预案的最重要的基础性研究工作。我国 2003 年的 SARS 病毒传播、2008 年的南方冰雪灾害等大范围的突发性灾害事件,暴露了我国减灾防灾应急预案系统的脆弱性,表明相应的研究成果尚且十分匮乏。人们对公共安全、自然灾害风险预测和应急预案的需求越来越迫切。在 2008 年全国人民代表大会和中国人民政治协商会议调查的当前老百姓最关注的十大话题中,应急预案就是其中之一。可见,灾害风险分析、评估与管理研究不仅是一个前沿性的科学课题,更是一个制定减灾防灾应急预案所迫切需要解决的重要实际问题。本书针对滑坡这一地质灾害现象,从理论与实践的角度,阐述滑坡灾害风险分析的基本理论与技术方法。

本书在建立滑坡灾害风险评价与管理的基本理论体系的基础上,依次详细讨论滑坡灾害危险性和承灾体易损性的理论分析方法,并进行不同比例尺的滑坡灾害和三峡库区滑坡次生涌浪灾害风险分析实践,力争形成一个比较完整的体系。本书瞄准领域前沿,所论述的科学问题是目前国内外滑坡灾害研究领域的热点与难点问题。

本书具有较强的针对性,其他同类图书多对自然灾害或地质灾害进行研究,而本书针对滑坡灾害展开研究,所涉及的内容包括区域滑坡灾害时空预测、单体滑坡灾害危险性和时间预测、承灾体易损性分析以及滑坡次生涌浪灾害的风险分析等的理论与实践研究,充分体现灾害链的研究思想。

本书由殷坤龙负责编写,各章节编写人员分工是:第 1 章,殷坤龙、陈丽霞、张桂荣;第 2 章,殷坤龙、陈丽霞;第 3 章,殷坤龙、张桂荣、高华喜;第 4 章,殷坤龙、陈丽霞、汪洋;第 5 章,殷坤龙、张桂荣、陈丽霞。全书由殷坤龙、陈丽霞统稿。

本书是著者及其课题组研究人员过去二十多年来关于滑坡灾害风险问题的研究成果,分别得到了国家自然科学基金、教育部博士点基金、中国地质大调查项目、三峡库区地质灾害防治工程项目、浙江省重大科技攻关项目等的资助。

由于滑坡灾害风险研究中的各个细节问题仍然是国际国内的科学难点,加之著者水平有限,书中不足之处在所难免,衷心希望读者批评指正。

著 者

2010 年 6 月 30 日

目 录

前言

第 1 章 滑坡灾害风险分析研究现状	1
1.1 滑坡灾害风险分析研究的意义	1
1.2 滑坡灾害风险评价与管理研究现状概述	2
1.2.1 区域滑坡灾害空间预测理论与区划制图研究	5
1.2.2 滑坡灾害破坏概率研究	10
1.2.3 滑坡涌浪灾害危险性研究	12
1.2.4 滑坡灾害承灾体易损性研究	13
1.3 滑坡灾害风险管理研究现状	16
1.3.1 国内外滑坡灾害风险管理概述	16
1.3.2 我国的滑坡灾害风险管理	17
第 2 章 滑坡灾害风险评价与管理的基本概念	19
2.1 滑坡灾害风险评价与管理的基本术语	19
2.2 滑坡灾害风险评价与管理的基本体系	21
2.2.1 滑坡灾害风险识别	23
2.2.2 滑坡灾害风险估算	25
2.2.3 滑坡灾害风险评价	25
2.2.4 滑坡灾害风险决策、控制与管理	26
第 3 章 区域滑坡灾害风险分析	27
3.1 区域滑坡灾害空间预测	27
3.1.1 基本原理	27
3.1.2 预测方法与模型	30
3.2 区域滑坡灾害时间预测	44
3.2.1 基于滑坡规模的滑坡灾害时间预测	44
3.2.2 基于降雨的滑坡灾害时间预警	45
3.3 区域滑坡灾害承灾体易损性分析	47
3.3.1 灾害破坏效应分析	48
3.3.2 易损性构成分析及承灾体分类	51
3.3.3 承灾体经济价值评估	53
3.3.4 区域滑坡灾害人口与经济易损性评价	55
3.4 不同尺度的区域滑坡灾害风险实例分析	58
3.4.1 全国滑坡灾害风险区划	58
3.4.2 浙江省永嘉县滑坡灾害风险分析	79

3.4.3 三峡库区巴东县新城区滑坡灾害风险分析	114
第4章 单体滑坡灾害风险分析	149
4.1 单体滑坡灾害失稳概率及可靠度研究	149
4.1.1 滑坡失稳概率的成因分析	149
4.1.2 滑坡稳定性破坏概率及可靠性分析原理与模型	150
4.1.3 多因素条件下滑坡失稳概率的计算	156
4.2 单体滑坡灾害时间预测预报	161
4.2.1 滑坡灾害长期时间预测	161
4.2.2 基于位移信息的费尔哈斯特灰色模型临滑时间预报	163
4.3 滑坡涌浪危险性分析	165
4.3.1 滑速及入水体积的确定	165
4.3.2 滑坡引起的初始涌浪高度计算	167
4.3.3 滑坡涌浪的传播过程及爬高估算	168
4.4 滑坡及其涌浪影响范围内承灾体调查与易损性分析	170
4.4.1 承灾体调查及经济价值评估	170
4.4.2 建筑物易损性的定量确定	172
4.4.3 人口易损性的定量确定	182
4.4.4 涌浪影响范围内承灾体易损性分析	185
4.5 实例分析——赵树岭滑坡及其涌浪灾害风险分析	189
4.5.1 滑坡概况	189
4.5.2 滑坡概率分析	192
4.5.3 滑坡滑速及涌浪危险性指标分析	206
4.5.4 滑坡变形阶段变形量数值模拟	215
4.5.5 滑坡变形阶段滑体上建筑物易损性分析	217
4.5.6 滑坡失稳时滑体上人口易损性分析	223
4.5.7 10年重现期赵树岭滑坡灾害风险预测	223
第5章 滑坡灾害风险决策与风险管理	240
5.1 滑坡灾害风险标准	240
5.1.1 风险可接受水平	240
5.1.2 生命风险标准	241
5.1.3 全国滑坡灾害生命风险标准的探讨	243
5.2 滑坡灾害预警预报与风险应急响应	244
5.2.1 基于WebGIS的浙江省区域性滑坡灾害预警预报	247
5.2.2 浙江省永嘉县滑坡灾害预警与风险管理	273
5.2.3 三峡水库库岸单体滑坡及其涌浪灾害风险预警与应急处置	278
主要参考文献	287

第1章 滑坡灾害风险分析研究现状

1.1 滑坡灾害风险分析研究的意义

滑坡作用过程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问题,具有灾害性,不仅给人类生命安全带来威胁,而且对财产、环境、资源等造成破坏。因此,滑坡灾害是滑坡这一地质现象与人类社会经济活动共同作用的结果。

世界各国每年因滑坡灾害造成的经济损失近百亿美元,致数千人伤亡,如美国在20世纪70年代,滑坡造成的损失每年达10亿美元,防灾减灾费用更是惊人。我国滑坡灾害发生密度大、频率高、分布范围广泛,全国地质灾害大调查结果表明,我国受潜在地质灾害困扰的县级城镇达400多个,有1万多个村庄受到滑坡、崩塌、泥石流等灾害的威胁。2008年5月12日,我国发生的汶川地震诱发了近15000处滑坡、崩塌、泥石流灾害,导致了约2000人死亡(Yin et al., 2009),滑坡灾害带给人类巨大的危害性可见一斑。

不仅如此,水库库岸滑坡带给人类的次生灾害产生的灾害链效应也不容忽视。我国三峡库区存在大量的库岸滑坡,且发育较集中、灾害性较强,库区鸡扒子滑坡、新滩滑坡、千将坪滑坡等一次又一次地成为国内外滑坡领域学者研究的典型案例,其产生的次生涌浪灾害与滑坡灾害共同形成一条持续的灾害链,给人类带来更大的损失。例如,在三峡水库蓄水和强降雨的共同作用下,2003年7月13日三峡库区秭归县境内发生的千将坪滑坡,导致滑坡体上的建筑物严重倒塌,由于地质灾害群测群防预警机制发挥了重要作用,滑坡体上近千人得到紧急撤离,避免了重大人员伤亡灾害的发生。但是,滑坡高速入水后在对岸激起的最大涌浪高度超过30m,并在水库逾10km长的河道范围形成涌浪,造成水库岸边的人员伤亡与财产损失。有时,水库区滑坡所造成的次生涌浪灾害带来的损失与危害远远超过原生滑坡灾害,如1963年10月9日发生在意大利的瓦依昂水库滑坡,产生的涌浪以150m的高度越过坝顶,造成下游近3000人死于洪水。可见,对于水库库岸滑坡灾害,不仅要研究滑坡体上的灾害,还应从灾害链的角度出发,综合研究滑坡及其次生灾害的灾害效应与风险预测问题。

没有预警机制和风险控制的灾害预防工作是达不到减灾防灾目的的。面对滑坡灾害链及其潜在风险效应,传统的地质成因机制、工程治理技术等方面的研究难以满足综合减灾防灾的实际需求,应从灾害风险预测及风险控制角度来开展滑坡灾害研究,这也是滑坡研究从地质学、工程治理、监测预报向灾害风险评估、预测与管理的一种综合延伸,是减灾防灾的另一个重要手段。

在过去的二三十年间,我国滑坡研究的理论水平得到显著提高,治理工程的措施与方法不断改善,国家和地方投入的灾害防治工程经费增长迅速。但是,我国滑坡灾害所造成的人员伤亡和经济损失却没有因此而得到明显减少。近年来,滑坡灾害风险一直处在高位状态,每年因滑坡(包括崩塌、泥石流)造成的人员伤亡数量接近千人、直接经济损失在

100 亿元左右。虽然这与当前我国经济高速发展、人类工程活动加剧密不可分,但也与我们在滑坡灾害风险研究方面还处于刚刚起步阶段非常有关,深入系统的滑坡灾害风险研究亟待加强。

1.2 滑坡灾害风险评价与管理研究现状概述

滑坡灾害风险管理研究已成为当今国际滑坡研究领域的最前沿课题之一,虽然该领域的研究历史还非常短,但已取得明显的进展,目前正在成为新的研究热点。

国际上研究滑坡灾害风险比较早的学者包括 Carrara 等(1982)、Brabb^① 等,当时的研究还多属于滑坡灾害敏感性制图分区与土地利用或与规划相结合的土地利用适宜性分区,对滑坡风险的研究尚处于对基本研究术语、基本研究方法的探索阶段(Varnes, 1984^②; Einstein, 1988)。

围绕国际减灾十年计划行动(1990~2000 年),针对滑坡灾害的风险研究迅速发展,各类学术会议在国际国内相继召开。1996 年,第一次国际性的滑坡灾害风险评估会议在挪威的特隆赫姆召开,会议主要内容包括滑坡风险研究中基本术语的规范化、风险可接受水平标准的讨论、财产和生命易损性预测方法等。1997 年,滑坡风险评估国际会议在美国夏威夷召开,出版了会议论文集 *Landslide Risk Assessment*, 此次会议的主要议题是为斜坡与滑坡风险定量评估提出一个总体框架与思路,主要内容包括:滑坡发生概率的定量与半定量评估、滑坡风险制图中存在的问题及发展趋势、滑坡风险管理研究及在实际工作中存在的问题等。1998 年,“第一届中日风险评估和管理学术研讨会”在我国北京召开,讨论的主题包括各类自然灾害风险研究,关于灾害的风险问题开始受到国内灾害领域学者们的关注。

此后,国际学者对滑坡灾害风险定量评价或预测的研究在世界各国以各种形式展开。例如,2002 年不稳定边坡计划与管理国际会议(the International Conferences on Slope Instability: Planning and Management)在英国的文特诺召开;2003 年高速滑坡运动——基于风险转移的滑坡灾害预测与防治会议在意大利那不勒斯召开;2005 年,国际滑坡风险管理会议在加拿大温哥华召开,出版了会议论文集 *Landslide Risk Management*。2006 年 1 月,国际滑坡协会在日本东京召开了圆桌会议,其主题为“在联合国国际减灾战略框架(以滑坡为主)下,加强地球系统风险分析和可持续灾害管理研究和交流”,并形成了“2006 年东京行动计划”(2006 Tokyo Action Plan)。该计划内容包括:国际滑坡计划(International Programme of Landslide, IPL)框架的建立;促进国际滑坡计划的全球协作领域的技术发展(灾害监测与预警,灾害区划图的制作、易损性与风险的评估),防灾能力的建立(制度的建立、灾害知识宣传),灾害防御、风险转移及恢复等。2007 年 1 月, IPL 全球促进委员会在日本东京又召开了滑坡风险分析与灾害管理会议,会议提出了滑坡风险

① Brabb E E. 1984. Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping // Proc., Fourth International Symposium on Landslides, Canadian Geotechnical Society, Toronto, 1: 307-323.

② Varnes D J. 1984. Landslide hazard zonation: a review of principal and practice // Commission of Landslide of IAEG, UNESCO, Natural Hazades, 3: 63.

教育和滑坡风险重要性的认识,并力图从学校教育环节入手,从降低人口易损性的角度降低滑坡灾害的人口风险,达到防灾减灾的目的。

与此对应的,关于滑坡灾害风险的实例性研究及论文、书籍在国内外逐渐丰富起来。开展滑坡灾害风险实例性研究的文章有 Einstein(1988)、Conroy 等(1992)、Fell(1994)、Cruden 和 Fell^①、Hardingham 等(1998)、Finlay 等(1999)、Guzzetti(2000)、Hearn 和 Griffiths(2001)、Cardinali 等(2002)、Dai 和 Lee(2002)、Sassa 等(2004)、Bonnard 和 Corominas(2005)、唐越和方鸿琪(1992)、谢贤平和李怀宇(1994)、张业成和张梁(1996)、彭荣亮(1996)、黄崇福(1999)、向喜琼和黄润秋(2000)、刘希林等(2001)、汪敏和刘东燕(2001)、殷坤龙和朱良峰(2001)等。专门的著作有:*Landslide Hazard and Risk* (Glade et al., 2004),对滑坡灾害与风险中的学术观点、概念模型、风险评价、风险管理方法和风险的处理措施及解决方法等内容进行了比较系统的阐述;2005 年, *Landslides* (Bonnard and Corominas, 2005)专门针对滑坡灾害风险刊登了 11 篇国际学者相关学术论文,主要包括来自新西兰、美国、加拿大以及欧洲国家的一些学者,其共同点就是对滑坡灾害风险定量评价的方法予以讨论并解决其中存在的细节问题。

可见,为了能将滑坡风险研究应用到实际工作中,真正达到减灾防灾的目的,学者们已经从对滑坡灾害风险的基本概念、基本方法的标准化讨论,发展到了定量预测研究探索和实践的程度。至此,滑坡灾害风险研究的重要性已经得到了全世界滑坡研究领域的广泛认同。总体看来,国外滑坡灾害多发且经济较发达的国家对于滑坡灾害风险研究的起步相对较早,所讨论的问题也深入一些,如美国、加拿大、澳大利亚、意大利、法国、日本等。

美国是一个滑坡多发国家,开展滑坡风险研究在世界上属于最早的国家之一,代表性的研究有 Brabb^②、Varnes^③、Conroy 等(1992)等,这些研究从早期的以滑坡危险性和风险区划、敏感性制图发展到易损性研究、风险估算以及地理信息系统(geographic information system, GIS)技术的应用。1997 年,美国地质调查局制订了一个 5 年滑坡计划,期望在其后 5 年内对全美主要的中心城市、交通中心和公共用地进行滑坡灾害调查与分析,通过 GIS 技术开展滑坡灾害危险性评估,更新并数字化全国滑坡灾害分布图,完成重灾地区区域滑坡灾害风险评价工作^④。Evans^⑤对加拿大 1840~1996 年的历史滑坡灾害进行了分析和总结,得到了加拿大全国因滑坡灾害人口年均死亡率、 $F-N$ 曲线(N 为因灾害造成的死亡人数; F 为相应死亡人数时的累计发生频率)、人口风险可接受水平标准,并将其应用于加拿大滑坡风险管理工作中。

① Cruden D M, Fell R. 1997. Landslide risk assessment. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment. Honolulu, Balkema, Rotterdam.

② Brabb E E. 1984. Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping // Proc, Fourth International Symposium on Landslides, Toronto, 1: 307-323.

③ Varnes D J. 1984. Landslide hazard zonation: a review of principal and practice // Commission of Landslide of IAEG, UNESCO, Natural Hazards, 3: 63.

④ Cruden D M, Fell R. 1997. Landslide risk assessment. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment. Honolulu, Balkema, Rotterdam.

⑤ Evans N C. 1997. Natural terrain landslide study: Preliminary assessment of the influence of rainfall on natural terrain landslide initiation. Geotechnical Engineering Office, Hong Kong, Discussion Note DN, 1: 97.

2000年,澳大利亚国家灾害基金资助计划支持的“滑坡风险管理和边坡管理和维护”项目,针对滑坡灾害发生的可能性、滑坡危险性区划、斜坡风险管理与治理开展系统研究,并提出了有关标准(Leventhal and Withycombe, 2009)。

1998年5月发生在意大利的一次强暴雨引发的地质灾害导致了160多人的死亡事件,促使意大利政府于当年6月制定了专门针对滑坡灾害的制度,要求在全国范围内进行滑坡灾害调查并进行灾害风险制图,并于2002年完成,风险的确定以统计分析方法为主,根据多指标的综合评分,采用矩阵的方式,并定为5级(Sorriso-Valvo, 2005)。

1995年,法国提出风险预防规划(PPR计划),由国家层面投入巨资对城市和农村分别进行1:10 000和1:25 000的滑坡风险图的编制,编制的滑坡风险图主要为定性的不同等级的区划图^①。

瑞士联邦政府于1997年发布了在土地规划中考虑滑坡灾害风险的政策,并出版了滑坡灾害指南和洪水灾害指南,规定地方土地规划中必须考虑滑坡灾害问题并针对不同灾害风险水平(高、中、低和极低)采取相应的预防措施(Lateltin et al., 2005)。

我国香港地区对滑坡风险预测的研究在世界上处于比较领先的位置,香港地区对于滑坡灾害风险研究已经发展到大比例尺(1:2000或更大)单体设施的风险评价,并建立起切坡分级系统,用于特定承灾体风险管理和决策(Hungr et al., 2005)。

我国内地对灾害风险研究的起步较晚,针对滑坡灾害风险的专门会议还没有召开过,但是有关自然灾害风险评估的学术会议已召开多次。例如,1991年召开了全国灾害经济损失评估学术讨论会,1997年召开了全国滑坡灾害经济学术研讨会等,以及近几年连续由中国地质调查局组织主办的涉及滑坡风险内容的地质灾害培训班。目前国内学术界关于地质灾害的风险研究工作多为基本概念、基本原理、基本方法的分析和讨论,以及特定地区的风险预测实例研究。学术界对灾害风险的度量可以归纳为以下两种:一种是定性表达观点(黄崇福, 1999; 向喜琼和黄润秋, 2000; 高庆华等, 1999),即“风险指数”观点;另一种是定量表达观点(张业成和张梁, 1996; 彭荣亮, 1996; 张梁和张建军, 2000; 殷坤龙, 2004; 张桂荣等, 2007; 陈丽霞等, 2008a),即“期望损失”观点。区域性滑坡灾害风险区划在国内研究偏多,单体滑坡灾害易损性和风险实例研究非常少见。区域性风险区划研究大多采用评分法、统计方法进行风险等级区划(罗元华, 2000; 程凌鹏等, 2001; 汪敏和刘东燕, 2001; 殷坤龙和朱良峰, 2001)。随着研究的不断深入,更多的细节问题便不断出现,为了能得到准确度高、实用性强的风险研究结果,学者们开始了细节问题的探索和研究。

综合对国内外滑坡灾害风险的理论研究与实践工作的分析,滑坡灾害风险研究经历了从基本概念的确立到技术方法的实现,滑坡灾害风险预测与评价的理论基本趋于统一,研究深度得到加强,研究的方法手段越来越丰富,表明在该领域已经取得了明显的进展。然而,为了加快风险分析成果在防灾减灾领域的有效应用,风险研究的各个环节中的很多关键的细节问题亟待解决,主要包括:①风险的动态性;②次生灾害风险预测研究;③考虑滑坡灾害强度的承灾体易损性的定量确定;④适合特定国家或地区的滑坡灾害风险可接

^① Leroi E. 1996. Landslide hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and developments. Landslides, Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides, 1996.

受水平标准的研究;⑤滑坡灾害风险管理与应急预案体系的建立等,这是滑坡灾害风险研究需要着力探索的方向。

1.2.1 区域滑坡灾害空间预测理论与区划制图研究

国内外大量的研究成果表明,滑坡灾害危险性可通过滑坡灾害危险性制图(hazard mapping)来实现。对于大区域的灾害评估,危险性分区的原则是“类似原则”,即类似的地质、自然环境具有类似的滑坡灾害问题。遵循类似原则开展滑坡灾害危险性区划,首先要充分全面调查、搜集过去已发生的滑坡灾害信息与资料,编制滑坡灾害分布图。滑坡灾害危险性的等级可以用定性也可以用定量方式来描述,如高、中、低等定性术语,也可以用信息量值(Yin and Yan,1998^①;殷坤龙和晏同珍,1996)、敏感性指标^②或影响因素的权重系数指标(张梁等,1998)等来表示。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5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。

危险性区划制图是滑坡灾害区划研究中的一个重要方面,包括直接制图(direct mapping)和间接制图(indirect mapping)两种途径。灾害危险性分区制图归纳起来有两种方法:一是以灾害分布图和各因素图的叠加,定量、半定量确定灾害敏感性(susceptibility)指标,然后对各敏感性指标进行相加处理,高敏感性指标区代表危险区,一般用红色标注,低敏感性指标区代表非危险区域,可用绿色标注。二是以灾害影响因素与灾害关系的理论分析,采用打分或评级的方法赋予各因素以权重系数,再对各权重系数进行相关数学运算,从而得到滑坡灾害危险性区划的定量依据。无论何种途径编制的滑坡灾害危险性区划图,都是一种综合图件,而且具有一定时段内的静态特点,因此需要不断更新,尤其是有新的滑坡灾害发生时,更应及时修订。

根据灾害类型和区划目的不同,滑坡灾害危险性区划还可进一步微区划,可分为单一灾害-单一用途、单一灾害-多用途、多灾害-多用途的区划图。根据比例尺的不同,滑坡灾害区划图可划分成4个等级,这一划分类似于国际工程地质与环境协会(International Association for Engineering Geology and the Environment, IAEG)的工程地质图比例尺的划分:概图(1:100 000或更小)、中比例尺图(1:25 000~1:50 000)、大比例尺图(1:10 000~1:5000)、详图(1:2000~1:5000)。

1. 制图方法

1) 直接制图

滑坡灾害直接制图就是标出滑坡灾害的位置,目的是反映已有滑坡的分布状况,编制滑坡分布图,可通过航片解译和地面测绘来完成。例如,早在1962年,捷克斯洛伐克就已完成

① Yin K L, Yan T Z. 1998. Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks.

② Brabb E E. 1984. Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping // Proc., Fourth International Symposium on Landslides, Canadian Geotechnical Society, Toronto, 1:307-323.

了一项较系统的滑坡灾害调查工作,根据调查记录的 12 000 多个滑坡资料编制了 1:1 000 000 比例尺的滑坡概图(Nemcok and Rybar, 1968^①; Rybar, 1973),图上标明了滑坡位置,自然滑坡和采矿诱发的滑坡分别以不同的颜色标出。美国在 1976 年编制的 1:7 500 000 的全美滑坡概图(Radbruch-Hall et al., 1976),则是依据 15% 和 1.5% 的已有滑坡分布面积的覆盖百分率为界线,将滑坡分布图划分为高、中、低 3 个等级。李娜和刘新民(1991)编制了我国第一张 1:6 000 000 的中国滑坡灾害分布图。地区性的、流域性的滑坡灾害调查图则因调查区面积的大小或调查目的的不同,所采用的比例尺和表示的内容会有所不同。

2) 间接制图

滑坡灾害间接制图是在滑坡灾害分布图的基础上,基于对滑坡灾害发生原因的充分分析,着眼于滑坡灾害系统的控制因素分析研究,从而建立一个模拟滑坡灾害系统的模型,在此基础上编制滑坡灾害图件。

最简单的滑坡灾害间接制图方法,是采用类似于构造地质学中制作等密度图的方法,按照滑坡灾害分布密度,采用等间距滑动的方法,计数一定面积圆内的滑坡灾害点的数目,并标示在圆心处。依据圆心处数目值的大小,圈划等值线。这种滑坡灾害等值线图可以反映滑坡发育的程度和趋势。

国际上最普遍的一种滑坡灾害区划模型是在 20 世纪 70 年代发展起来的敏感性制图法,即根据滑坡灾害分布图与控制因素分布图的叠加,来确定各因素对滑坡灾害作用敏感性指标。最具有影响的成果是 Brabb 等(1972)、Drennon 和 Schleining(1975)在美国加利福尼亚州圣马特奥市根据滑坡灾害分布图、坡度图和地层单元图制作的滑坡灾害敏感性区划图,首先将相同比例尺的地层单元图和滑坡分布图(1:62 500)划分成 0.01mi^2 (0.0259km^2) 的方格单元,然后计算 35 种地层岩性单元的滑坡覆盖率,再根据各地层单元内滑坡覆盖率的大小,以一定的分组界线将它们分成 6 个等级组,并排列起来。从等级 I (为 0~1%) 到等级 VI (为 54%~70%),敏感性也随之表示为从低到高。地形坡度图被分成 6 个范围区间:0~5%、5%~15%、15%~30%、30%~50%、50%~70%、>70%。而后把坡度图叠加在地层-滑坡组合图之上,确定每个地层单元中滑坡频率最高的坡度区间,并按最高敏感性等级进行标记。滑坡灾害危险性区划图则根据敏感性指标值的大小来确定,高敏感性指标的单元对应于高危险性,用红色标注,低敏感性指标的单元对应于低危险性,用绿色标注。Nilsen 和 Brabb(1977)进一步把滑坡灾害敏感性图扩展到了整个圣弗朗西斯科海湾地区,因素图和滑坡灾害分布图的比例尺均为 1:125 000。他们对方法进行了更改,同时增添了区划的参数,如岩层倾向、植被、裂缝宽度和斜坡方向,并利用电子计算机技术使其数字化。

另外一类广泛应用的滑坡灾害制图方法则是采用多变量的统计分析方法进行滑坡灾害预测制图,如多元回归分析、判别分析等。见诸报道的早期研究工作是 Jones 等^②在美

① Nemcok A, Rybar J. 1968. Landslide investigations in Czechoslovakia//Proceedings of the 1st Session of the International Association of Engineering Geology, Prague: 183-198.

② Jones F O, Embury D R, Peterson W L. 1961. Landslides along the Columbia River Valley, northeastern Washington. United States Geological Survey. Professional Paper: 98.

国富兰克林·罗斯福湖周围的更新世阶地堆积物中开展的滑坡灾害危险性区划。他们根据调查的 300 多个滑坡灾害点进行分类统计,并对定性与定量影响因素(如物质成分、地下水条件、阶地高度、排水状况、原始坡度、浸没程度等)的信息数据建立滑坡灾害数据卡。通过对滑坡灾害的分类,做进一步的方差、协方差和多元回归计算,确定预测系统中的主要控制参数,并建立判别预测方程。根据判别方程所计算得到的指标值大小对不同的滑坡地段和斜坡进行危险性等级划分。该湖周围的岸坡被划分成稳定坡、相对稳定坡、易滑坡 3 种危险性等级。

20 世纪 80 年代国内开展了滑坡灾害空间危险性预测模型的研究。Yang 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。Yin 和 Yan^①根据滑坡灾害影响因素的特点,提出了采用二态变量的多元回归统计预测模型,并在我国多滑坡灾害的秦巴山区开展了滑坡灾害的空间统计预测。二态变量的多元回归统计预测模型是对通常进行定性描述的地质、构造、工程地质岩组等非连续型变量用 1、0 两种状态予以描述,然后根据相关系数分析法对变量之间的独立性进行筛选,以确定独立性强的预测变量进行建模。在陕西省旬阳地区的应用实例,以自然河谷和山坡地形的控制边界划分不规则单元,然后对每个单元取值。所采用的模型参数共 6 类 32 种状态,包括工程地质岩组、地形、断裂构造、地层产状、单元与当地侵蚀基准面的高差、岩层面与斜坡面之间的夹角。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,通过对我国西北、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。张梁等(1998),殷坤龙和柳源(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了危险性评价模型。

2. 预测因子的选取与指标体系的建立

滑坡灾害预测因子选取的合理性是准确预测的关键。不同预测尺度范围、不同预测目的,预测指标的选取原则是不同的。在开展滑坡危险性区划时,要根据研究区滑坡成灾机理,考虑研究区尺度,合理建立预测因素指标体系。

近年来,国外一些学者开始定量研究单个环境因子与区域滑坡的关系。例如,Lumb(1975)分析了不同类型坡积物和下伏岩性与滑坡的相关性;Ruxton(1980)统计了风化层与滑坡的关系,得出风化对滑坡发生的重要性;Fourie(1996)研究了降雨渗透与浅层崩塌的关系;Collison 和 Anderson(1996)对热带地区的植被与斜坡稳定性关系进行了研究,得出随着植被根系的生长,植被透水性将增加,且土壤强度随之降低;Mark 和 Ellen(1995)利用 GIS 数据库中的 1500 个滑坡研究了浅层滑坡与地形的关系,结果显示陡峭地形与滑坡具有很好

^① Yin K L, Yan T Z. 1988. Statistical Prediction models for slope instability of metamorphosed rocks//Bonnard C. Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland, Balkema, Rotterdam: 1269-1272.

的统计相关性;Brabb^①以坡度为权重,分析了2000多个滑坡与12个因子相互关系,最后确立了地质、土壤和坡度是影响滑坡稳定性的主要原因。这些成果为定量分析区域滑坡与地质环境因子的关系以及建立区域滑坡预测模型提供了良好的研究基础。

在滑坡灾害危险性区划研究中,美国滑坡专家主要考虑与滑坡相关的地形因素和岩性因素以及滑坡分布现状,将滑坡危险性划分为5个等级进行评价;瑞士国家水文局1995年以政府行为规定,对全国的坡地进行危险性评价,其中对滑坡危险度提出特殊评价标准,采用的评价指标主要为坡度和滑动速度,评价等级分为高、中、低3级(Kienholz, 1995);日本对地震区的滑坡危险性评价采用了地震震级、坡度、降雨量3项指标划分地震区的滑坡危险度(Takashi, 1995)。Hansen(1984)从地貌学的观点,提出了针对区域性滑坡灾害区划分析的有关方法,认为灾害区划应考虑3个方面:①确定灾害程度,灾害程度不仅取决于滑坡自身特点,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(财产损失、人员伤亡等),即风险研究。

在确定滑坡灾害空间预测因子方面,国内一些学者也开展了相关研究。殷坤龙(1994)对重庆市崩塌、滑坡两类灾害的形成机制及相互关系进行了研究,通过对不同类型的滑坡分析其形成机理和诱发因素,在此基础上确定了进行滑坡灾害空间预测的因子。该篇文献在对滑坡机理和诱发因素进行综合分析的基础上选择和筛选预测因子,这样可以做到有的放矢,选出对滑坡发生贡献大的指标,并排除某些指标对预测结果的干扰。谢全敏和朱瑞赓(1997)认为岩体边坡稳定性受多种因素影响,对于不同的边坡,各因素的影响程度不一,认为主控因子的选定是空间预测最关键环节,提出了基于优势分析的主因子筛选方法,并提出用灰色聚类方法进行岩体边坡稳定性空间预测。单新建等(2004)利用人工神经网络及GIS技术,在香港大屿山岛中部研究区,将多元空间信息分析与非线性理论相结合,建立了基于环境因子的区域滑坡非线性预测模型,据此得到研究区下伏岩性是决定滑坡稳定性的重要内因的结论;并认为,坡度是决定因素,降雨量是触发因素,植被、侵蚀、地形、坡向是辅助因素,最后采用反向传播(back propagation, BP)人工神经网络对区域天然滑坡进行了危险性分区。乔建平和赵宇(2001)认为在滑坡危险度区划分析过程中,应将相关性很强的因素进行系统归类:①滑坡的主控因素类(包括地形、地层岩性、地质构造、切割密度等),②滑坡的诱导因素类(包括降雨强度、人类工程活动、地震强度、河流侵蚀强度等),③滑坡的危害因素类(包括滑坡分布密度、发生时代、规模、受灾程度等);并给出了危险度评价中主控因素、诱导因素和危害因素之间的关系。

3. GIS技术在滑坡灾害危险性区划中的应用

由于GIS技术的空间分析与制图功能和可视化的特点,GIS技术在滑坡灾害预测预

^① Brabb E E. 1984. Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping//Proc., Fourth International Symposium on Landslides, Canadian Geotechnical Society, Toronto, 1:307-323.

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, 到数字高程模型(digital elevation model, DEM)或数字地形模型(digital terrain model, 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(decision support system, DSS)的集成技术的应用, GIS已逐步发展成熟并深入应用。我国应用GIS技术开展滑坡灾害预测起步较晚, 研究程度偏低。虽然目前尚未见到较成熟实用的滑坡灾害预测预报与评价GIS系统, 但是在这方面的研究投入和进展却是惊人得快, 大量的科研院校和从事滑坡及其他地质灾害防治的部门已加大了GIS技术的应用研究。

在滑坡灾害研究领域, 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的滑坡灾害信息管理系统。如Keane^①, Dikau等(1996), Corbeanu(1998), Dai和Lee(2002)将GIS运用到灾害历史数据的管理及预测成果图的表达中。陈植华等(2003), 徐振宇等(2002), 殷坤龙等(2004), 殷坤龙和张桂荣(2005)基于Web-GIS开发的地质灾害数据管理系统, 实现了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。

(2) GIS技术与各种评价模型相结合运用到滑坡灾害危险性预测中。如Matula^②, Gao(1993), Lekkas等(1995), Jibson等(2000), Larsen和Torres-Sanchez(1998), Dhakal等(1999), Lin和Tung(2004), Zhou等(2003), 沈芳(2000), 单新建等(2002), 李彦荣(2003), 殷坤龙(1992), 吴益平和唐辉明(2001), 朱良峰等(2002)、张桂荣等(2005)利用GIS的空间分析功能与滑坡灾害空间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, 得到了相应的预测分区图和灾害敏感图。

(3) 基于GIS的滑坡灾害分析预测与管理。如Carrara等(1991), Merio和Wohl(1994), Leroi(1996), Atkinson和Massai(1998), Schuster^③, Castaneda(1998), 李焯芬和袁勇(1997), 殷坤龙等(2004)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。

成都理工大学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, 试图建立一个全国地质灾害调查与综合评价系统。殷坤龙、张梁等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1:6000000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。三峡库区在监测预警工程中, 在

① Keane, 1992. Development and analysis of highway slope landslide databases//41st Annual Meeting of the Southeastern Section of the Geological Society of America.

② Matula M. 1987. Engineering geological mapping and zoning in mountainous areas//Proc of Int Sym Engr Geo Enc mout areas.

③ Schuster R L. 1999. Concepts of risk-based decision making with emphasis on geotechnical engineering and slope hazards. Geotechnical Risk Management. Hong Kong Institute of Engineering; 2-20.

④ 张梁, 殷坤龙. 2007. 全国地质灾害风险区划(内部报告).

建立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(殷坤龙, 2004)。

(4) 基于 WebGIS 的地质灾害预测预报系统研究。殷坤龙和张桂荣(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滑坡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发布。

(5) GIS 技术与遥感(remote sensing, RS)、全球定位系统(global position system, GPS)技术相结合,应用于滑坡灾害监测预报。目前在滑坡预测领域已基本实现了 RS 与 GIS 的紧密结合,个别项目达到了“3S”技术整体结合,如 Soeters 和 Van Westen(1996), Corbeanu(1998), 何满潮和崔政权(1999)探讨了“3S”技术结合在滑坡识别、分析、预测评价中的应用。

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:①GIS、GPS、RS 集成技术的进一步发展和应用;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储、管理与再现;④地质模型与 GIS 技术的耦合。

1.2.2 滑坡灾害破坏概率研究

在滑坡灾害风险评价中,利用可靠性理论可求得滑坡的稳定性程度、破坏概率,为定量风险评价提供依据。

从 20 世纪 70 年代起,破坏概率及可靠性理论模型得到了迅速发展,这种模型是将与稳定性系数 F_s 有关的参数视为服从一定概率分布的随机变量,并各自有其概率密度分布函数, F_s 是这一系列随机变量的函数,滑坡的失稳概率被视作 F_s 小于 1 的概率。祝玉学(1993)对边坡工程的可靠性分析作出了系统的研究。滑坡的形成经历过长期的地质作用、人类工程活动以及环境因素的共同作用,使得其水文地质、工程地质、环境因素条件复杂且多变。目前,在进行滑坡失稳概率分析研究的过程中,需要解决的问题主要涉及两个方面:一个是在计算过程中对滑坡失稳的影响因素随机性的考虑;另一个是可靠性计算方法的选取。

在滑坡失稳概率的影响因素的随机性方面,主要考虑的是岩土体强度参数的随机分布规律。大量的土工实验结果证明,即便是同一成因的岩土体,其物理力学性质参数也不是唯一确定的,而往往服从某种概率分布形式。由于岩土体强度参数资料的可获取性大,一定区域的岩土体强度参数随机分布规律已有大量的研究成果。例如,滑带土抗剪强度参数通常服从正态分布或对数正态分布规律(Nadim and Einstein, 2005)。

大量学者在此基础上,结合传统的极限平衡方法和破坏概率分析方法,进行了滑坡失

稳概率的实例性研究(徐卫亚和张志滕,1995;李强等,2001;Leroi,1997^①;杨磊,2005)。然而,滑坡失稳除其内在的地质因素外,还存在各种诱因的可能。对于降雨型、库水诱发型或地震诱发型滑坡,滑坡失稳概率研究还需要考虑降雨、库水位、地震等诱因的随机变化规律。由于滑坡所处环境条件的差异性及气象、水文和地震资料获取的困难性,考虑这些诱因的随机规律而进行滑坡失稳概率分析的成果相对较少,但也有学者进行过尝试。例如,Wang等(2008)采用 Monte Carlo 法,对日本的新潟地震诱发的滑坡进行了预测评估。

在可靠性计算方法方面,使用最多的是 Monte Carlo 法和一次二阶矩法(Nadim et al.,2005)。李猛(2004)基于毕肖普(Bishop)稳定性计算方法和 Monte Carlo 法对边坡分别处于降雨和地震条件下的失稳概率和可靠度进行了计算。阙金声等(2006)利用 Monte Carlo 法和传统的极限平衡理论对某岩质边坡进行可靠度分析。林立相和徐汉斌(1999)通过边坡破坏概率与安全系数的比较分析,提出基于概率方法的边坡可靠性分析的必要性,从边坡可靠度指标的几何定义出发,对一次二阶矩的验算点法进行了改进。聂士诚(2002)、李世文(2006)基于 Bishop 法和一次二阶矩法中的验算点法,在考虑土性参数(内聚力、内摩擦角和重度)的变异条件下,对土质边坡进行了可靠度分析。汪汉生和赵丰功(2003)采用传递系数法和一次二阶矩法中的验算点法建立功能函数计算边坡的可靠指标和失效概率。张世雄和任高峰(2004)将有限元数值模拟与一次二阶矩的中心点法相结合,对矿区深凹边坡进行了可靠指标和破坏概率计算。王亚军(2004)基于 Monte Carlo 法和一次二阶矩法分别对边坡滑动、渗透破坏两种失效模式进行了模糊随机可靠度计算。李东升和刘东燕(2005)主要介绍一次二阶矩法中功能函数对各随机变量求偏导的方法。王永刚等(2006)分别选取瑞典条分法、Bishop 法和简布(Janbu)法,以内聚力、内摩擦角和容重为随机变量,运用一次一阶矩法建立边坡可靠性分析的极限状态功能函数,对公路边坡进行了可靠性分析。郑荣跃和梧松(2006)基于斯宾塞(Spencer)法,运用一次二阶矩法,在考虑计算模型的不确定性和计算参数的不确定条件下,对某滑坡进行了可靠性分析。

此外,计算可靠度的方法还包括二次二阶矩法、二次四阶矩法、响应面法、统计矩法和随机有限元法、神经网络模拟等。在实际使用过程中,可以将多种方法相结合,如 Giasi 等(2003)将一次二阶矩法和模糊(fuzzy)理论相结合,并对这两种方法单独使用和结合使用的效果进行了对比分析,认为方法结合使用后能更有效地评估边坡失稳概率的不确定性。邱骋等(2005)基于 GIS 的三维分析方法,随机生成多个假想滑动面,计算其对应的安全系数,并将安全系数小于 1 的计算次数与总的计算次数的比值作为滑坡发生的概率,得到了边坡单元的公路沿线滑坡危险度概率分布。谭晓慧(2001)讨论了由多个滑动面组成的边坡发生破坏时概率的确定方法,认为只要边坡沿着其中一个滑面发生破坏,边坡即失稳。基于该思想和一次二阶矩的验算点法,谭晓慧采用了串联系统时效概率的上下界

^① Leroi E. 1997. Landslide risk mapping: problems, limitations and development//Cruden D M, Fell R. Landslide Risk Assessment. Proc Inter Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, 19-21 February 1997. Balkema, Rotterdam; 239-250.