

滑坡灾害预测预报

LANDSLIDE HAZARD
PREDICTION AND EVALUATION

殷坤龙 著



 中国地质大学出版社

中国地质大学出版基金资助

滑坡灾害预测预报

殷坤龙 著

中国地质大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

滑坡灾害预测预报/殷坤龙著. —武汉:中国地质大学出版社, 2004. 1

ISBN 7-5625-1826-2

I. 滑…

II. 殷…

III. 滑坡灾害—预测

IV. P642

滑坡灾害预测预报

殷坤龙 著

责任编辑:徐润英 赵来时

责任校对:张咏梅

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: cbo@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:220 千字 印张:7.875 图版:26

版次 2004 年 1 月第 1 版

印次:2004 年 1 月第 1 次印刷

印刷:武汉市科普教育印刷厂

印数:1—1050 册

ISBN 7-5625-1826-2 / P·610

定价:45.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

滑坡是一种地质作用,是地貌演化的一种方式,滑坡作用的结果可能造成经济损失、人员伤亡、环境破坏等。因此,滑坡也是一种灾害。滑坡问题既具有自然属性,又具有社会、经济和环境等属性。由于经济的高速增长、城市化进程的加快,滑坡及其灾害问题日益突出。越来越多的滑坡灾害与人类工程活动有关,主要原因是在滑坡灾害高易发区所进行的切坡、加载、地下采矿、灌溉、水库工程建设等各种人类工程活动使得自然斜坡的地质、地形和水文地质等环境在短时间内发生了重大变化,加速了处于平衡状态或准平衡状态的斜坡体向不稳定性方向发展,从而导致滑坡的产生并造成经济损失和人员伤亡等灾害。

过去 30 多年来,滑坡研究的特点已由单个滑坡的现象描述、分类、治理发展到现在以定性和定量描述为基础的预测预报和综合治理研究,但作为灾害来研究则是近 10 多年的事。滑坡预测预报成功的事例虽然经常见于报道,但与无数的滑坡灾害事件相比却是凤毛麟角,众多的滑坡灾害和预测预报失败的事例就足以证明开展滑坡灾害预测预报仍是一件非常困难的事。无论是从理论上还是从减少滑坡灾害的实际需要角度出发,预测预报必须得到强化。

本书以滑坡及其灾害的预测预报为主题,力图做到主题明确、思路清楚。全书共分 6 章。第一章对国内外在滑坡灾害预测预报研究领域的研究进行了比较全面系统的归纳,是笔者在过去近 20 年内对国内外滑坡灾害预测预报研究领域文献学习与消化的小结,目的是帮助读者方便地了解国内外在这方面研究的历史与过程。第二章对滑坡灾害研究领域的有关术语和定义进行了总结,对滑坡灾害的时空预测预报进行了分类。第三章是关于滑坡灾害空间危险性预测、风险预测、区划制图等问题,重点讨论了滑坡灾害空间预测的有关模型。第四章是滑坡灾害的时间预测预报研究,包括长期时间预测预报和临滑预警预报,并根据最新的 Web-GIS 技术,根据实时气象数据建立滑坡灾害实时预警预报系统,这是传统滑坡灾害预报预警方式的一个发展。第五章是滑坡灾害时空预测预报的 GIS 技术开发系统。第六章是基于 GIS 技术的全国滑坡灾害危险性和风险区划预测研究成果。

本书是笔者结合过去 20 年来主持或参与的有关滑坡问题的研究成果而撰写的。由于滑坡灾害预测预报研究是一项非常有难度的科学研究课题,加之笔者水平所限,书中之不足在所难免,衷心希望读者批评指正。

笔者要感谢已故导师晏同珍教授,是他把我引入到滑坡研究的领域。同时,还要感谢与笔者在过去一起从事滑坡研究的同事、老师和研究生,他们是:吴益平博士、杨顺安教授、余宏明教授、伍法权研究员、Christophe Bonnard 博士(瑞士)、安关峰博士、张永荣、朱良峰、张桂荣等,从他们那里笔者得到了有益的启发,对他们所给予的帮助或合作表示衷心的感谢。

殷坤龙
2003 年 4 月

Preface

As one kind of geological process of slope and a manner of geomorphological evolution, landslide can cause economic losses, casualties, deterioration to environments and other consequences. So, beyond the characteristics of geological nature, landslide is a kind of natural disaster which characterized by its social, economic and environmental compacts. With the quick development of economy and fast urbanization, landslide problem is becoming more and more related to human activities, such as cutting slope, loading, underground mining, irrigation, and reservoir project, and so on. These human constructions changed the slope geology, topography and hydrogeology in a very short period, which accelerated the tendency of the slope from stable state to unstable state. As consequences, landslide brings the hazardous results to the economy and safety of lives.

In the past 30 years, the studies on landslide have been gradually developed from phenomenon descriptions, classification, control to the studies of qualitative and quantitative predictions and comprehensive control. However, it is a newly topic to study the landslide as a hazard. Even there were some successive reports of landslide disaster prediction, it is still extremely rare to compare with the large amount of landslide events, which demonstrates the difficulties to predict landslides. Therefore, the researches of prediction should be strengthened to meet the need of landslide hazard reduction.

This book is focused on the landslide hazard evaluation and time prediction to formulate clear outline and topic in its 6 chapters. Based on the author's readings in the past two decades of the worldwide documents on landslide hazard studies, a brief review on the landslide hazard evaluation and time prediction is summarized in the first chapter, which could give convenience to readers to follow the history and development in this area. The chapter 2 makes common terms and definitions, which are frequently used in landslide hazard and risk assessment. A classification of landslide prediction is also formulated in this chapter. Landslide spatial prediction, including hazard evaluation, risk assessment, and mapping, and their models are presented in the chapter 3. The chapter 4 discusses the time prediction, including long-term prediction and real-time warning. On the basis of Web-GIS software platform, a real-time warning system is presented in this chapter coupled with real-time precipitation forecasting, which presents a development of traditional warning system. A landslide hazard predictive system that is based on GIS software is introduced in chapter 5. The chapter 6 concludes the procedures and results of landslide hazard and risk prediction in conterminous land of China.

This book is completed under the author's studies on landslide issues supported by all engaged or directed projects by the author in the past 20 years. There might be some defects, and improvements should be made in future due to the sense of difficulties to predict landslides and limit from author's understandings. All suggestions from the readers are welcome.

Thanks to author's supervisor, Professor Yan Tongzhen who was passed away 4 years ago. He led the author into the concentration on landslide disciplinary. Thanks are also due to my colleagues and my graduates who worked together with me on landslide problems, they are Dr. Wu Yiping, Prof. Yang Shun'an, Prof. Yu Hongming, Prof. Wu Faquan, Dr. Christophe Bonnard (Switzerland), Dr. An Guanfeng, Mr. Zhang Yongrong, Mr. Zhu Liangfeng, and Miss Zhang Guirong.

Yin Kunlong
2003.4

目 录

第一章 滑坡灾害预测预报研究现状与发展趋势	(1)
第一节 滑坡灾害及预测预报研究的意义	(1)
第二节 滑坡灾害预测预报研究现状概述	(3)
一、滑坡灾害空间预测理论研究	(3)
二、滑坡灾害危险性区划制图	(6)
三、滑坡灾害时间预测预报研究	(8)
四、滑坡灾害危险性区划与土地使用立法	(9)
五、滑坡灾害危险性区划与 GIS 技术应用	(11)
第三节 滑坡灾害预测预报研究的发展趋势	(12)
第二章 滑坡灾害预测预报分类	(15)
第一节 基本术语与定义	(15)
第二节 基本论点	(16)
一、基本论点	(16)
二、预测目的及意义	(18)
第三节 预测预报分类	(19)
一、滑坡灾害空间预测	(19)
二、滑坡灾害时间预测预报	(20)
三、滑坡灾害工程地质预测预报的主要内容	(22)
第三章 滑坡灾害空间预测	(24)
第一节 滑坡灾害空间预测的基本原理	(24)
第二节 信息模型	(26)
一、信息模型的基本原理	(26)
二、实例分析——重庆市中区滑坡灾害空间预测	(29)
第三节 多元统计模型	(35)
一、二态变量的多元回归预测模型	(35)
二、聚类分析模型	(36)
三、实例分析——陕西省旬阳县城近区滑坡灾害空间预测	(38)
第四节 专家评分模型	(49)
第五节 破坏概率模型	(52)
一、破坏概率模型的基本原理	(52)
二、滑坡破坏概率与信息量的关系	(53)
三、典型滑坡破坏概率计算与分析	(55)
第四章 滑坡灾害时间预测预报	(59)
第一节 滑坡灾害长期时间预测	(59)
一、灰色灾变模型原理	(59)
二、灰色灾变预测模型	(60)

三、陕西省旬阳地区滑坡灾害活动性长期预测	(61)
第二节 滑坡灾害临滑时间预报	(65)
一、基于位移信息的 Verhulst 灰色模型	(65)
二、基于滑动面摩擦热信息进行时间预测预报的可行性研究	(68)
三、基于降雨过程的滑坡动态位移预测预报	(74)
第三节 滑坡灾害实时预测预报与信息发布	(77)
一、滑坡灾害实时预测预报的有效降雨量模型	(77)
二、Web-GIS 的滑坡灾害实时预报模型的集成系统与信息发布	(79)
第五章 滑坡灾害预测预报的 GIS 系统	(82)
第一节 GIS 的特征及其在滑坡灾害预测预报领域的应用	(82)
第二节 滑坡灾害预测预报系统的 GIS 技术开发	(83)
一、应用型 GIS 系统的开发模式选择	(83)
二、基于 MapGIS 软件平台的二次开发模式	(83)
三、系统开发思路	(85)
第三节 系统的构成与主要模块	(87)
一、系统的物理构成	(87)
二、系统的主要模块	(87)
第四节 GIS 与滑坡灾害危险性和风险预测区划制图	(89)
一、单一因素滑坡灾害危险性预测区划制图	(90)
二、多因素滑坡灾害危险性预测区划制图	(90)
三、以行政单元为基础的滑坡灾害危险性预测区划制图	(91)
第五节 基于 Web-GIS 的滑坡灾害实时预报系统	(93)
一、滑坡灾害预报模型系统	(93)
二、滑坡灾害预报模型与 Web-GIS 集成系统	(93)
三、滑坡灾害实时预报信息的 Web 发布系统	(93)
第六章 全国滑坡灾害风险预测区划	(96)
第一节 全国滑坡灾害危险性预测指标的确定	(96)
一、滑坡灾害危险性预测指标体系的结构层次	(96)
二、全国滑坡灾害危险性预测指标的确定	(97)
第二节 基础图件的数字化	(98)
第三节 滑坡灾害危险性区划	(100)
一、基于信息量模型的图层叠加与信息量值计算分析	(100)
二、基于专家评分模型的危险性区划指标权重计算与分析	(102)
三、滑坡灾害危险性区划图	(106)
第四节 滑坡灾害人口伤亡易损性区划	(109)
第五节 滑坡灾害人口伤亡风险区划	(110)
参考文献	(115)

CONTENTS

CHAPTER 1 A REVIEW OF TIME PREDICTION AND RISK EVALUATION OF LANDSLIDE HAZARD AND PROSPECTIVE OF FURTHER STUDIES	(1)
1.1 Landslide hazard and significance of time prediction and risk evaluation	(1)
1.2 Review of time prediction and risk evaluation of landslides	(3)
1.2.1 Theoretical studies on landslide hazard evaluation	(3)
1.2.2 Mapping and zonation of landslide hazards and risks	(6)
1.2.3 Temporary prediction and warning of landslides	(8)
1.2.4 Hazard zonation and legislation for land-use in landslide prone area	(9)
1.2.5 Hazard zonation and application of GIS	(11)
1.3 Prospective of further development on the studies of landslide prediction and risk evaluation	(12)
CHAPTER 2 CLASSIFICATION OF TIME PREDICTION AND RISK EVALUATION OF LANDSLIDE	(15)
2.1 Terms and their definitions	(15)
2.2 Principles	(16)
2.2.1 Principles	(16)
2.2.2 Aims and significance of prediction	(18)
2.3 Classifications	(19)
2.3.1 Spatial prediction of landslide hazard	(19)
2.3.2 Temporary prediction of landslide	(20)
2.3.3 Engineering geological aspects for landslide hazard prediction	(22)
CHAPTER 3 HAZARD AND RISK EVALUATIONS OF LANDSLIDE	(24)
3.1 Principles	(24)
3.2 Information model	(26)
3.2.1 Principles of information model	(26)
3.2.2 Case analysis-landslide hazard evaluation in Chongqing City	(29)
3.3 Multiple-variable statistical models	(35)
3.3.1 Two-state variables regression model	(35)
3.3.2 Cluster analysis model	(36)
3.3.3 Case study—landslide hazard evaluation in Xunyang district, Shanxi Province	(38)
3.4 Expert analysis model	(49)
3.5 Failure probability model	(52)
3.5.1 Principles of failure probability model	(52)
3.5.2 Relations between failure probability and information	(53)
3.5.3 Calculation of failure probability for a landslide case	(55)
CHAPTER 4 TIME PREDICTION OF LANDSLIDES	(59)
4.1 Long-term time prediction	(59)
4.1.1 Principles of grey system model	(59)
4.1.2 Grey system model	(60)

4.1.3	Long-term prediction of landslide reactivation in Xunyang district	(61)
4.2	Short-term time prediction	(65)
4.2.1	Verhulst grey model in terms of ground displacement	(65)
4.2.2	Feasibility analysis of temporary prediction based on frictional heating alongsliding surface	(68)
4.2.3	Prediction of landslide movement in relation to precipitation	(74)
4.3	Real-time warning and information releasing	(77)
4.3.1	Integration of landslide prediction models with Web-GIS	(77)
4.3.2	Real-time warning and information releasing	(79)
CHAPTER 5	APPLICATIONS OF GIS IN LANDSLIDE PREDICTION	(82)
5.1	Characteristics of GIS and its applications in landslide prediction	(83)
5.2	Exploration of GIS system used in landslide prediction	(83)
5.2.1	Exploration modes for applied GIS	(83)
5.2.2	Re-exploration modes based on MapGIS software	(83)
5.2.3	Outline on system design	(85)
5.3	Structure and main components of the system	(87)
5.3.1	Physical components	(87)
5.3.2	Main modules of the system	(87)
5.4	Hazard and risk zonation of landslide with GIS	(89)
5.4.1	Mapping and zonation of landslide hazards and risks in terms of single factor	(90)
5.4.2	Mapping and zonation of landslide hazards and risks in terms of multiple factors	(90)
5.4.3	Mapping and zonation of landslide hazards and risks considering admini- strativeboundaries	(91)
5.5	Real-time warning system based on Web-GIS	(93)
5.5.1	Real-time warning system for landslide hazard	(93)
5.5.2	Integration of real-time warning models with Web-GIS	(93)
5.3.3	Information releasing of real-time warning from Web Site	(93)
CHAPTER 6	OVERVIEW EVALUATIONS OF LANDSLIDE HAZARDS AND RISKS IN CHINA	(96)
6.1	Selections of variables for hazard evaluation	(96)
6.1.1	Structures of factors for landslide hazard evaluation	(96)
6.1.2	Determination of factors used for landslide hazard evaluation in China	(97)
6.2	Digitisation of basic maps	(98)
6.3	Zonation of landslide hazard	(100)
6.3.1	Superposition of maps and calculation of information on information model	(100)
6.3.2	Weight calculation for hazard evaluation on expert analysis model	(102)
6.3.3	Landslide hazard zonation in China	(106)
6.4	Zonation of life casualty vulnerability	(109)
6.5	Risk prediction and zonation of life casualties from landslides	(110)
REFERENCES		(115)

滑坡灾害预测预报研究现状与发展趋势

第一节 滑坡灾害及预测预报研究的意义

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。从地质灾害的角度看,滑坡给人类带来的损失可能仅次于地震,但是滑坡所发生的频率和范围又远远超过地震。无论是从单个滑坡所造成的危害,还是从区域性的宏观角度观察,其灾害性已大得令人震惊。1982年长江岸边重庆市云阳县鸡扒子滑坡的整治费用高达近1亿元人民币;1970年秘鲁 Huascarán 山区因地震而触发的一起山崩,造成18 000人死亡的惨局;1963年的意大利 Vajont 水库滑坡致使当时世界上最高的双曲拱坝失效,涌浪夺去了坝下游2 600多人的生命;1981年我国四川盆地因暴雨而诱发大小不等的滑坡有6万多处,直接的经济损失超过3亿元人民币。这些严重的滑坡灾害的原因有自然的,也有人类自身所酿造的。世界上滑坡灾害严重的国家,如美国、日本、意大利、印度、中国等,每年因滑坡而造成的损失均在10亿美元以上(Schuster R. L., 1978, 1985; Ohhira N., 1982; Arnould, 1982; Mathur, 1982; 孙广忠, 1990)。世界上滑坡灾害主要集中在环太平洋周边的多山国家、欧洲阿尔卑斯山和亚洲的喜马拉雅山等地区的多山国家,中国、日本、美国、加拿大、秘鲁、智利、法国、意大利、瑞士和印度等国是世界上滑坡现象最丰富、灾害也最严重的国家。全世界在1960至1990年期间共有300万人死于包括滑坡灾害在内的各种自然灾害,其中约有四分之三发生在发展中国家,发达国家仅占0.75%,其余发生在中等发达国家中(Bell F. G., 1999)。据联合国救灾署1991年公布的资料,全世界受自然灾害影响的人口还在以每年6%的数量增加;在发达国家,灾害所造成的财产损失和恢复所需费用往往较高,而发展中国家由自然灾害所导致的人员伤亡则十分严重,其主要原因之一是无规划的土地占用和灾害高易发区的土地使用。

我国是世界上滑坡灾害最严重的国家之一,在过去的20多年内,我国相继发生了一系列重大的滑坡灾害事件,如:重庆市云阳县鸡扒子滑坡,湖北省盐池河磷矿岩崩,甘肃省洒勒山、湖北省新滩镇和重庆市溪口镇等滑坡,这些滑坡灾害事件均造成了重大的人员伤亡或经济损失并造成重大的环境影响。同时,由于气象等外部因素的影响,大区域的滑坡灾害群发事件也时有发生,如:1998年,全国共发生滑坡、崩塌和泥石流达18万处,较大规模的有447处,造成1 157人死亡,1万多人受伤,50多万间房屋被毁坏,经济损失270亿元人民币;2000年的6月至7月期间,陕西南部秦巴山区的安康地区连续受到5次特大暴雨的袭击,诱发了规模不等的滑坡、崩塌、泥石流等灾害超过4 000处,造成213人死亡,并使多处桥梁、路基被毁,5条国、省干线公路和49条县乡级公路中断,襄渝铁路中断行车达7天之久。最近十多年来,我国滑坡灾害的总体特点是:滑坡灾害理论研究和防治水平逐步在提高,但灾害却越来越严重,受潜在滑坡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。

在过去几十年的经济活动和重大工程建设过程中,由于忽视滑坡灾害预测研究而有很多的教训得以借鉴,如:宝成铁路因滑坡灾害,在铁路接轨后对滑坡整治长达一年多才恢复通车;1980年成昆线铁西车站因滑坡中断行车达40天;陇海铁路宝鸡一天水段由于处于我国滑坡灾害的高发区,铁路线在建成后的30年间,因滑坡灾害中断行车195天,经济损失达2.49亿元人民币(刘光代,1991)。四川省的渡口市是受滑坡灾害严重影响的城市之一,95%的滑坡灾害是因人为活动而诱发的(王思敬,1987)。就我国滑坡灾害发生的区域性和多发性特点以及国民经济总体水平不高的状况而言,我国不可能有足够的经济力量和技术力量对有潜在危险的滑坡灾害点进行全面的工程治理。因此,作为我国滑坡灾害综合防治的另外一条有效途径,就是开展滑坡灾害预测预报和风险区划,开展预防性研究,进一步圈定滑坡灾害危险性区域和灾害高风险区域,为国土规划、减灾防灾、灾害管理与决策提供可靠依据;对危害性严重的滑坡灾害点加强监测预报,避免重大滑坡灾害事件的发生。

国内外在滑坡灾害的治理工程方面已经取得了丰富的科学成果和经验,在保证重大工程建设、人口安全、环境保护等方面发挥了重要作用,相应的减灾效益可通过滑坡灾害的勘察、研究和治理工程的实际投入与所产生的经济效益、社会效益比得到直接评价。然而,滑坡灾害尤其是区域滑坡群体灾害的预防性研究,其预测成果的效益评价远没有得到治理工程所能引起的社会关注,就如同现代医学上的流行疾病的免疫预防措施的巨大效益无法得到全社会的准确评估一样,人们更多地看到了某成功手术挽救了一重危病人生命的价值,却很少注意到或关心该疾病的发病率早已通过免疫预防得到全面控制的事实。可以说,如果没有今天的免疫预防措施,人类的健康状况就无法得到保证。相比之下,滑坡灾害预测预报研究的重要性远没有达到医学上免疫研究的重要性为全社会共识的高度,是一个需要大力探索的研究领域,其潜在的科学意义和经济效益、社会效益十分重大。因此,从减灾防灾的角度,滑坡灾害的研究重点还需要探索一条从区域滑坡灾害空间预测、中长期时间预测到滑坡灾害易发区风险评价研究的系统理论与方法,从而为更有效地减少滑坡灾害的损失发挥作用。从减少宏观滑坡灾害的目的出发,区域滑坡灾害空间预测与危险性区划研究要优先于单体灾害防治研究,斜坡土地使用前要进行滑坡灾害风险评价,滑坡灾害高易发区应建立中长期和短期时间预测预报系统。

人类活动与滑坡灾害之间变得日见相关。面对这样的形势,传统的以单个滑坡机理研究和整治为目的的方法和手段在减轻滑坡灾害方面已经显得力不从心,所以,区域性的、超前性的预测研究迫在眉睫。失败的经验告诉我们,减少滑坡灾害最行之有效的方法是在土地利用的规划阶段就考虑到滑坡灾害这一问题。世界上几乎任何一个多山的国家都经历了在山区城市发展和重大工程建设过程中的人工堆土、开挖等,结果造成了一系列的滑坡灾害,而又不肯不再采取必要的防治措施。然而,这种补救性的处理措施面临的问题又是十分复杂的。滑坡区的移民工作就是一件十分困难的事情,其原因在于要在本已紧张的土地中重新开辟一片安全地带安置移民是有困难的,再加上人们的生活习惯方式和传统观念,更使问题复杂化,涉及到技术、经济、社会乃至法律方面的一系列问题。

人类虽不能完全消除滑坡灾害,但可以采取积极的、有效性的方法来减轻这种灾害。1985年长江岸边的新滩滑坡,因受到长期监测而得到准确的预报,其效益/费用之比为44:1(孙广忠,1990)。美国加利福尼亚州矿山及地质办公室对加州1970—2000年的滑坡灾害损失作了估计,如果采取地质调查、合适的工程措施,以及有效的土地利用控制手段,其灾害损失将减少90%以上,而相应的效益/费用之比大于9:1(Schuster R. L.; Krizek R. L., 1978)。采取积极性的滑坡灾害空间预测分区,为土地规划的宏观决策提供科学依据,进行滑坡灾害的中长期和

短期时间预测预报,为提前做好预防措施奠定基础。

开展滑坡灾害预测预报研究是当今国际滑坡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 滑坡灾害预测预报研究现状概述

过去 30 多年来,滑坡研究的特点已由单个滑坡的现象描述、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 10 多年的事。从当前的滑坡研究理论和技术水平来看,如果滑坡得到了深入的地质勘查、滑坡发展过程能够得到实时监测,预测预报滑坡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滑坡灾害点所难以承受的。因而,滑坡灾害预报成功的事例也就成了凤毛麟角,无数的滑坡灾害和预测预报失败的事例足以证明开展滑坡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,减少滑坡灾害的重要措施必须从区域滑坡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。

美国、欧洲阿尔卑斯山区的国家自 20 世纪的 60 年代末、70 年代初就开始了区域滑坡灾害危险性区划研究,如:20 世纪 60 年代末,美国西部加利福尼亚州的滑坡敏感性预测区划(Susceptibility mapping)及滑坡高危险区土地使用的立法研究;20 世纪 70 年代法国提出的滑坡灾害危险性分区系统(ZERMOS);等等。进入 20 世纪 80 年代,世界大部分国家和地区都开始了区域滑坡灾害危险性分区及预测问题的研究,如意大利、瑞士、美国、法国、前苏联、西班牙、新西兰、印度等。从 20 世纪 90 年代起,围绕国际减灾十年计划行动,北美及欧洲许多国家在原滑坡灾害危险性分区研究的基础上开展了滑坡灾害危险性土地使用立法的风险评价研究,把原来单纯的滑坡灾害危险性研究拓展到了综合减灾效益方面的系统研究。

一、滑坡灾害空间预测理论研究

滑坡灾害空间危险性预测分区在国外早就得到研究与报导(Nilsen, 1977; Sheko, 1977; Carrara, 1983; Brabb, 1984; Brand, 1988; Cross, 1998 等)。滑坡灾害危险性分区归纳起来有两种方法:一是以滑坡灾害分布图和各因素图的叠加,定量、半量化确定滑坡灾害敏感性指标,然后对各敏感性指标进行叠加计算与分析,高敏感性指标区代表滑坡灾害易发区,一般用红色标注,低敏感性指标区代表滑坡灾害不易发生的区域,用绿色标注。另一种方法是以滑坡灾害影响因素与滑坡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。

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。预测因素可分为 4 类:①基本因素,它限定了滑坡运动的条件,如降雨;②派生因素,它直接影响滑坡的活动,但归因于基本因素,如河岸下切、岩土体的含水量和强度;③缓变因素,如现代构造运动,海平面上升;④稳定因素,如地质构造、地貌条件。根据区域性预测的年限和应用的方法不同,预测可分为:①地质历史分析预测;②重大气候变更分析预测;③长期预测;④短期预测。确定滑坡的危险季节和滑坡的最活跃阶段应归类于时间预测范围。滑坡危险季节是指一年中滑坡可能发生的

时期,而滑坡最活跃阶段是指滑坡危险季节中具有更大概率($>0.5\sim0.6$)的滑坡阶段。通过分析地质历史和重大的气候变化,可以弄清滑坡发展的趋势。长期预测分超长期和长期预测。由于大气圈、水圈、地球表面乃至地壳内部之间存在着一些重要的日地关系,滑坡运动和其他作用的长期预测就可能涉及到太阳循环周期,滑坡的超长期预测则应在长期太阳活动周期内进行(80~90年),长期预测则可在11年的太阳活动周期中进行。长期预测应着眼于区内地质历史背景和重大气候变化。超长期和长期预测可根据概率统计方法来进行,如调和函数分析和相关回归分析等。由于观测滑坡产生的时间序列一般是不连续的,因而一些简单方法常常较严格的数学方法更具效果。根据11年的太阳活动周期进行的滑坡时间序列分析是一种最简单的并具相关性原理的调和函数分析,这种方法的要点是绘制每一周期中各部分的(周期的四分之一区间、最大值、最小值曲线的上升部分和下降部分)平均年滑坡数量曲线图。对比滑坡异常的积分曲线和太阳活动以及控制滑坡运动的因素之间相关关系,通过相关回归分析预测可以确定滑坡活动和滑坡因素之间的关系,建立滑坡与各因素的单相关系数、非线性相关系数和复相关系数。滑坡短期预测是在滑坡产生之前预测滑坡危险季节,然后把它们限定在一个月、十天或几天之内。为了进行滑坡危险季节的初步预测,可以运用概率统计方法(如周期分析、相关回归分析等)。基于滑坡运动速率和触发因素的监测是短期预测的基础,不同尺度的时间预测对国民经济都具有重要意义,长期预测能保证提前采取必要措施来排除滑坡可能带来的后果,而短期预测则可应急于直接受滑坡威胁的情况,以便采取急救措施。

Ilievil(1977)提出了编制1:1 500 000全欧洲滑坡灾害工程地质图及灾害预测区划图的必要性和基本原理。由于地域辽阔、地质构造和各种滑坡灾害作用复杂、影响因素多等原因,建议编图从以下两个主要方面来进行: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(大地构造、地层、地貌和岩石的岩性及工程地质特性),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,定量区划可根据不同的情况构造一些定量指标:①当评价线性地段时,如长的山区斜坡和海岸斜坡,采用滑坡段长度与总长度的比值(l/L)和滑坡数量与总长度的比值(n/L)。前一指标表示线性段的哪些部分受到了影响,后一指标反映滑坡集中程度这样一个概念,两者可以相互补充;②若评价面状区域时,指标的确定是类似的,用面积替代长度,采用(f/F)和(n/F)两个指标。 f 表示受滑坡作用影响的面积, n 是滑坡现象的数目, F 是总面积。

Kyunttsel V. V.等(1978)对滑坡灾害时间和空间预测的四个阶段进行了划分,即:①原始数据的分析。了解滑坡灾害的位置、活动周期、影响因素、区域地质条件、类型、触发因素,以及这些因素和条件对滑坡灾害的影响;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,编制区域滑坡工程地质分区图,评价滑坡灾害运动的规律性;③详细阐述预测因素。为了预测研究区内的滑坡灾害,对滑坡的激发因素(降雨的变化、河谷的侵蚀等)进行预测,绘制滑坡灾害运动速率图和活动性图;④概括与总结。依据以上步骤编制滑坡灾害预测图,滑坡灾害预测包括两个方面:时间(预测滑坡可能活动的时期)和空间(预测滑坡活动的范围)。

Hansen A. (1984)较详细地回顾了滑坡灾害分析的进展和研究成果,并从地貌学的观点,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四个方面的因素: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根据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因素,选择滑坡灾害的评价方法。评价方法包括历史分析方法、地理分析法和实验计算法。在具体的灾

害评价时,往往不是采用单一的方法,而是采用两种、甚至三种方法。通常情况下,灾害评价具有主观成分,其中部分来自于观测者的经验。因此,数据搜集和分析评价方法的不同对评价结果的可靠程度有很大影响。在灾害评价时,不仅要考虑灾害本身的特点,还要评价与灾害作用有关的受灾区的范围和特点,如:灾害运动过程中,灾害体表面上的建筑会受到破坏;灾害体前方建筑物可直接受到滑坡灾害运动的冲击;处于滑坡两侧的建筑物会由于侵蚀和滑坡灾害运动而导致建筑物基础下沉、倒塌等。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 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。第一层次的图主要反映滑坡灾害影响因素的自然状态,这些图件为滑坡灾害危险性和风险评价提供最基本的分析信息。滑坡灾害现象分布图包括评价区域内已发生的各类滑坡灾害的空间分布特征和具有明显潜在特征的滑坡灾害位置,但不具有预测性质。危险性图则是一种基于分析信息的预测性图件,预测可以是定量的也可以是定性的,但主体要反映滑坡灾害发生的概率大小。风险图是基于危险性图和土地使用现状的综合分析,预测各土地单元内因滑坡灾害而可能导致的损失大小。灾害管理图的目的是为决策服务的,包括滑坡灾害的技术管理和法规管理两个主要方面。

Jefferies 等(1996)提出了用 Bayesian 方法进行滑坡灾害风险概率评估,Bayesian 方法与一般的统计方法不同。一般的统计方法是根据调查资料来统计滑坡灾害的发生频率,而 Bayesian 方法则根据相关条件对滑坡灾害的可能性作出定量判断。

Ragozin A. (2000)从理论上研究了当前滑坡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滑坡灾害危险性指标,可用其主要控制因素的概率乘积来表示。而对于区域研究,滑坡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。并以滑坡体的厚度、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。

殷坤龙、晏同珍(1987,1988)采用信息量模型和多元统计模型在我国陕南秦巴山区的变质岩地区开展了滑坡灾害空间预测,将需要预测研究的区域划分成样本区和待预测区,样本区与待预测区的单元划分采用地形控制的自然多边形单元。在样本区以滑坡调查资料和地质、地形等资料为依据,建立滑坡分布与各主要影响因素关系的预测模型,把所建立的预测模型运用到待预测区。将待预测区的滑坡灾害空间预测结果与现场滑坡调查的结果相对比,以检验预测方程的可靠度,并进一步建立了区域滑坡空间预测结果的检验方程。

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坡岩组的特征,提出了易滑坡地层的概念。

张梁、张业成(1998)、柳源(2000)等提出了基于历史滑坡灾害发生特点的危险性指标评价方法,对滑坡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。对于受灾对象的易损性评价,大体分为人口、建筑物、交通、农林、土地与地下

水资源等类型,按轻微、中等、严重三级易损性指标进行评估分析,采用图表矩阵法对各类受灾对象在不同滑坡灾害作用强度下的受灾对象损失率作了定量评估分析,并在三峡库区的重点滑坡区域开展了实例分析研究。

刘希林等(1995)在泥石流灾害的危险性预测评价过程中,通过对一系列泥石流灾害事件的统计分析,提出了泥石流灾害危险性评价的因子分析方法。以泥石流作用的主要影响因素的定量与半定量分析,建立各影响因子的重要性权重指标,最终以总权重指标值大小来评判泥石流危险性的大小。该评价体系把区域研究的危险性区划与具体泥石流沟的堆积范围预测结合在一起分析,做到了泥石流灾害危险性评价的点、面结合。

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,以及与滑坡灾害发生频率之间的关系曲线,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。在陕西南部地区 1:500 000 滑坡灾害调查分布图的基础上,采用系统模型法建立了滑坡灾害与地形坡度、岩组类型、地形高差、地质结构面与斜坡方向之间夹角等主要影响因素之间的频率关系曲线,并制作了小比例尺(1:500 000)的陕西省南部地区滑坡灾害危险性预测区划图。

陕西省滑坡工作办公室(1995)采用因子叠加法和因子综合计分法对陕西省滑坡灾害进行了危险性区划,并完成了比例尺为 1:750 000 的滑坡灾害危险性预测区划图。因子的选择包括主控自然因子(地形、易滑坡岩组、地质构造)、从控因子(降雨、植被、地震、人类活动)和社会发展因子(人口密度、近期工程建设状况)。按各因子与滑坡灾害发生的密切程度,把各因子进一步分成若干等级。根据主控因子等级的叠加组合数值,结合从控因子的等级,参考滑坡灾害分布密度,半定量地进行全陕西省滑坡灾害危险性分级分区。

二、滑坡灾害危险性区划制图

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(殷坤龙、晏同珍,1988,1996)、敏感性指标(Brabb,1984)或影响因素的权重系数指标(张梁、张业成,1998)等来表示。

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易发区,一般用红色标注,低敏感性指标区代表非易发区域,可用绿色标注。另一种方法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,这类图件都是一种综合图件,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协会(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 到 1:50 000)、大比例尺图(1:10 000 到 1:5 000)、详图(1:2 000 到 1:5 000)。

(一)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,可通过航片解释和地面测绘来完成。如:早在 1962 年捷克斯洛伐克就已完成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; Rybar, 1973),图上标明了滑坡位置,自然滑坡(红色)和采矿诱发的滑坡(紫色),分别以不同的颜色标出。美国在 1976 年编制的 1:7 500 000 比例尺的全美滑坡概图(Radbruch-Hall 等, 1976),则是以 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、低三个等级。中国科学院成都山地灾害与环境研究所 1991 年编制出版了我国第一张 1:6 000 000 比例尺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。

(二)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,并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。

国际上一种最普遍的滑坡灾害区划模型则是在 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,从而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 等(1975)在美国加州 San Mateo 县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,相同比例尺的地层单元图和滑坡分布图(1:62 500)被划分成 0.01 平方英里(0.0259 km²)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%。然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大的坡度区间,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 等人(1979)进一步把滑坡灾害敏感性图扩展到了整个旧金山海湾地区,因素图和滑坡灾害分布图的比例尺为 1:125 000。通过对方法所进行的更改,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。Keeper(1979)根据地形条件、地质条件和不同类型的地震滑坡,制作了加州 La Honda 地区地震滑坡灾害危险性区划图。

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。见诸报导的早期研究工作是 Jones 等人(1961)在美国富兰克林·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 多个滑坡灾害点的分类统计,对定性与定量影响因素(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,作进一步的方差、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的、相对稳定的、易滑坡的三种危险性等级。

殷坤龙等(1988)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。

三、滑坡灾害时间预测预报研究

国内外在滑坡灾害时间预测预报方面的研究大体分为两种类型:一类是以滑坡位移监测数据为基础,结合室内模型实验而开展的模型预报研究,最早的研究由日本学者 Saito(1965)在 20 世纪 60 年代提出,后由 Fukuzono、Voight(1989)等研究得到了进一步深化;另一类是基于大气降雨的观测,研究降雨量、降雨强度和降雨过程与滑坡灾害的空间分布、时间上的对应关系,建立滑坡灾害时空分布与降雨过程的统计关系,确定宏观上的统计关系,以达到预警预报的目的。这两种研究途径各有侧重,前者强调的是滑坡灾害位移的机理研究,后者则强调了滑坡灾害受外界触发因素影响的统计和相关分析研究。

Saito(1965)基于滑坡的室内模拟研究发现,滑坡灾害一般经过三个阶段:第一、第二和第三蠕变阶段。通过对第三阶段的加速位移监测,用作图方法可以开展滑坡灾害的临滑预报,并在日本多起滑坡灾害实例研究中得到成功。Fukuzono、Voight(1988、1989)等进一步对滑坡灾害的蠕变规律和机理开展了深入研究,认为在滑坡的第三蠕变阶段,滑坡的位移量与位移速度成指数关系,并进一步推导出不同情况下的位移速度倒数与距离滑坡发生时间的关系。通过大量事例研究发现,大多数的情况是位移速度倒数与距离滑坡发生时间呈线性关系,从而建立了滑坡时间预报模型。

Guidicini G. (1977)通过对巴西 9 个地区滑坡记录和降雨资料的分析,建立了降雨与滑坡事件之间的统计关系。这些地区具有明显的雨季(夏季)和旱季(冬季)之分,降雨大多集中在每年的一、二、三月份,旱季多出现于六、七、八月份。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。据此关系,对每个地区绘制了危险图,图中划分了滑坡产生的 4 个危险等级。一定的降雨量以及先前的降雨历史过程,可以对应于图中不同的危险等级区,采用绘制的降雨量与滑坡危险性等级图为依据进行滑坡灾害发生时间的预测预报。

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,并通过对山阴干线小田一田仪间 403、400km 附近的滑坡研究发现,可结合日有效雨量、滑坡位移速率、地下水压力随时间而变化的曲线来开展滑坡灾害的预警预报工作。