

滑坡灾变智能预测 理论及其应用

张永兴 文海家 欧 敏 著



科学出版社

www.sciencep.com

滑坡灾变智能预测 理论及其应用

张永兴 文海家 欧 敏 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在国家“十五”重点攻关课题“库区地质灾害监测、预警及辅助决策支持系统关键技术与示范”部分重要研究成果的基础上编著而成的。

本书主要采用计算智能理论及其耦合方法,结合地理信息系统(GIS)技术,研究建立了基于GIS的滑坡灾变预测智能集成系统,并针对“十五”课题示范点做了实例分析,从理论到实际应用两方面对滑坡灾变的计算智能预测方法进行了较为系统的论述。

本书是对滑坡灾变预测领域的前沿研究成果的总结,可供岩土工程、地质工程等专业的研究人员参考,也可作为土木工程、水利工程、矿业工程、石油工程、交通运输工程、地球科学等专业研究生的教学参考书,对高等院校相关专业的教师,科研院所和工程部门的科技人员也具有较高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

滑坡灾变智能预测理论及应用 / 张永兴等著. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-015087-2

I. 滑… II. 张… III. 滑坡-智能控制:预测控制 IV. P642.22

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第015267号

责任编辑:杨家福 / 责任校对:刘彦妮

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2005年6月第一次印刷 印张:13 3/4

印数:1—2 500 字数:263 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA06)

前 言

在人类生存的地球上,山区高地面积占陆地总面积的 $1/4$,而居住人口占世界人口的 $1/10$ 。与山地地貌紧密相关的滑坡灾害,其危害和影响程度仅次于地震,但因其出现的频度和广度远远大于地震事件,故而成为人类社会及生活环境中广泛遭遇、受害最重的自然灾害之一。

我国是一个山区面积占国土陆地面积 69% 的多山国家,山区人口占全国总人口的 56% ;我国西部,山区面积更是占陆地面积的 86% 以上,故也是我国山地灾害发生数量最多、损失程度最大的地区之一。

以三峡库区为代表的我国广大西部地区,自然地质环境十分恶劣;随着三峡工程的兴建及其运行、城镇迁址移民安置、“西部大开发”战略的实施等,这些人类工程活动空前加剧,必然使库区的不良自然地质环境更为恶化。三峡工程已于 2003 年 6 月蓄水至 135m,并将于 2009 年竣工。三峡水库正常蓄水(175m 水位)时库岸总长约 5 927.2km,据统计,在长 5 014km 的岸线上,欠稳至不稳定库岸共计有 140 段,达 343km;前缘高程低于正常蓄水位的崩、滑体 1 190 处,总体积占总库容的 10% 左右,严重威胁着三峡水库的正常运行和库区城乡安全。可见,三峡库区滑坡灾害防治量大面广、投资巨大,要在水库正常蓄水前对其全面治理根本不可能。可以断言,以三峡库区为代表的我国西部地区,未来较长一段时间内滑坡灾害将一直是该区面临的各种自然灾害危害之首。

滑坡的预测预报是科学界公认的尖端课题之一,不仅因为其内存因素的复杂性、多样性,而且还有其形成条件、诱发因素的随机性与非稳定性。近二三十年来,我国科学工作者在三峡地区岸坡变形破坏及稳定性研究等方面做了大量的工作。但已有的研究成果还难以实现对滑坡灾害的滑动时间、活动强度、危害程度(灾情)等方面进行全面、快速、准确的预报,故防灾决策部门对滑坡预报有进一步的更高要求。所以,国家科技“十五”攻关计划重点项目“三峡库区生态环境安全及生态经济系统重建关键技术研究及示范”(2001BA604A)列入“库区地质灾害监测、预警及辅助决策支持系统关键技术研究及示范”(2001BA604A02)课题,为管理决策部门能及时对滑坡灾害可能发生的时间、强度、灾情等方面进行科学决策提供可操作的技术支持系统。

本书是在前述“十五”重点攻关课题“库区地质灾害监测、预警及辅助决策支持系统关键技术研究及示范”所取得的部分重要研究成果的基础上,结合作者多年的

相关探索及其他项目研究成果编著而成的。

本书采用了智能科学理论的前沿——计算智能理论及其耦合方法,结合先进的地理信息系统(GIS)技术,研究建立了基于GIS的滑坡灾变预测智能集成系统,并针对“十五”课题示范点做了实例分析,从理论到实践应用两个方面对滑坡灾变的计算智能预测方法进行了较为系统的论述。

全书共十章,分为三大部分:第一章对目前已有的常规滑坡预测预报研究方法进行了归纳分析;第二章到第六章研究了计算智能理论及其耦合方法用于滑坡灾变预测实践的建模思路、方法与实现步骤,提出了基于计算智能理论的滑坡灾变新判据——综合信息模糊预报判据,提出了GIS技术与计算智能理论耦合应用于滑坡灾变研究的新思路,研究了滑坡灾变GIS综合信息模型与滑坡灾变计算智能预测系统之间的数据交换及数据接口技术,并采用混合编程技术开发了GIS支持下计算智能集成滑坡灾变预测系统;第七章到第九章对GIS支持下的计算智能集成滑坡灾变预测系统应用于工程实践及相关结果分析等做了详尽的介绍。最后一章对全书研究成果做了总结,并探讨了该领域的进一步研究方向。

本书着眼于当今相关最新理论与先进技术,以国家“十五”重点攻关研究课题为依托,对严重影响人类社会经济环境发展的滑坡灾变预测问题进行了方法研究、软件开发与检验性应用,是一本较为全面系统地论述滑坡灾变智能预测的专著。作者希望本书能为从事相关研究的科技人员提供有价值的参考;同时,因为本研究还处于初期阶段以及科技成果的日新月异,书中可能存在欠妥或遗漏之处,恳请读者指正。

在成书过程中,得到了重庆大学土木工程学院永兴学术团队(<http://www.yxcivil.com>)的大力支持,硕士生陈云、博士生徐洪参与了部分文字的编辑及图件的清绘工作,在此对他们付出的辛劳表示衷心的感谢。在研究成果的长期积累过程中也得到了重庆大学土木工程学院许多同仁的支持与帮助,还得到了重庆大学基础及应用基础研究基金项目“滑坡计算智能预报系统研究”及“重庆市高等学校优秀中青年骨干教师资助计划”的支持,在此一并致谢。

目 录

前 言

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 滑坡灾变预测研究现状述评	2
1.2.1 滑坡灾害及其危害	2
1.2.2 滑坡预报国内外研究动态	3
1.2.3 现有滑坡预报模型述评	5
1.3 存在的问题和发展趋势	12
1.3.1 滑坡灾变预测研究存在的主要问题	12
1.3.2 滑坡灾变预报研究发展趋势分析	12
1.4 本书研究思路及主要进展	13
1.4.1 本书的研究思路	13
1.4.2 本书完成的主要工作	14

理 论 篇

第二章 智能科学理论基础	17
2.1 智能与计算智能概述	17
2.2 人工神经网络(ANN)	18
2.2.1 ANN的发展概述	18
2.2.2 简单人工神经元模型	20
2.2.3 人工神经网络的构成	22
2.2.4 人工神经元激活值的计算	22
2.2.5 人工神经网络的训练类型和方法	23
2.2.6 BP网络的学习公式	23
2.2.7 BP网络的训练方法和步骤	26
2.2.8 训练中的几个问题	27
2.2.9 BP算法的改进	28
2.3 模糊逻辑(FL)	29
2.3.1 经典集合及其特征函数表示	30

2.3.2	模糊集合及其隶属度函数	30
2.3.3	模糊集合相关的定理	32
2.3.4	模糊集合的基本运算	33
2.3.5	模糊关系及表示	34
2.3.6	模糊关系的合成	36
2.3.7	基于模糊规则库的模糊推理	37
2.3.8	工程控制常用模糊推理方法	42
2.4	遗传算法(GA)概述	43
2.4.1	遗传算法的基本原理和特点	45
2.4.2	遗传算法的进化过程和基本操作	48
2.4.3	遗传算法运行参数的选择	57
2.5	其他计算智能分支简介	60
2.5.1	模拟退火算法	60
2.5.2	人工蚁群优化算法	63
2.6	本章小结	66
第三章	计算智能预测原理及耦合方法研究	67
3.1	基于三个基本功能的计算智能预测原理	67
3.1.1	传统人工智能与计算智能的学习模型	67
3.1.2	现代搜索技术与计算智能	68
3.1.3	推理与 Fuzzy 推理	69
3.2	神经网络、模糊逻辑及其耦合方法研究	70
3.2.1	神经网络与模糊逻辑的比较	70
3.2.2	神经网络与模糊逻辑耦合形式	72
3.2.3	ANN-FL 耦合方法用于滑坡预测的可行性	76
3.3	遗传算法与神经网络耦合方法简介	77
3.4	本章小结	78
第四章	滑坡灾变预测计算智能系统设计及灾变判据研究	79
4.1	滑坡灾变预测的神经网络系统设计	79
4.1.1	神经网络应用系统的结构	79
4.1.2	神经元与激励函数	81
4.1.3	评价因子与评价矩阵	82
4.1.4	网络结构及参数设置	83
4.1.5	滑坡灾变的神经网络系统实现步骤	84
4.2	滑坡灾变预测的模糊推理系统研究	85
4.2.1	滑坡灾变黑箱问题	85

4.2.2	模糊逻辑与模糊推理	85
4.2.3	模糊推理的 Mamdani 法	86
4.2.4	隶属度函数与模糊推理规则	87
4.2.5	滑坡灾变预测的 FIS 系统设计	89
4.3	滑坡灾变预测的 ANFIS 系统研究	90
4.3.1	建模思路	91
4.3.2	模型学习与推理的特点	92
4.3.3	Sugeno-Type 模糊推理方法	92
4.3.4	Subtractive 模糊聚类	93
4.3.5	滑坡预报的 ANFIS 系统设计	94
4.4	基于计算智能方法的滑坡灾变判据研究	94
4.4.1	滑坡灾变判据的确定原则及建立灾变判据的新思路	94
4.4.2	已有滑坡灾变判据归纳分析	95
4.4.3	综合信息模糊灾变判据及其特点	96
4.4.4	综合信息模糊灾变判据的具体表达	97
4.5	本章小结	98
第五章	滑坡灾变 GIS 综合信息模型研究	99
5.1	地理信息系统概述	99
5.1.1	GIS 的特征与基本功能	100
5.1.2	GIS 的构成	102
5.1.3	GIS 空间数据模型	103
5.2	ArcView GIS 简介	112
5.2.1	ARCVIEW 数据类型	113
5.2.2	ARCVIEW 模块简介	113
5.2.3	ARCVIEW 三维分析	115
5.3	滑坡灾变综合信息 GIS 模型	117
5.3.1	综合信息 GIS 滑坡模型的优点与技术难点	117
5.3.2	滑坡灾变综合信息的构成	118
5.3.3	滑坡灾变综合信息的数据来源	119
5.3.4	滑坡灾变综合信息 GIS 模型的构建	121
5.4	滑坡综合信息 GIS 模型的工程解析	122
5.4.1	基于 GIS 自身功能的工程解析方法	122
5.4.2	基于数据接口的外部程序解析方法	123
5.5	滑坡 3D-GIS 仿真模型	124
5.5.1	3D-GIS 与二维 GIS 的区别	124

5.5.2	3D-GIS 软件系统现状	125
5.5.3	3D-GIS 建模方法	125
5.5.4	3D-GIS 建模关键技术探讨	126
5.6	本章小结	128
第六章	GIS 支持下滑坡灾变预测智能集成系统开发	129
6.1	GIS 支持下滑坡灾变预测智能集成系统设计	129
6.1.1	总体设计思路	129
6.1.2	系统设计的主要内容	130
6.1.3	系统程序化总框图及关键技术	132
6.2	数据交换及接口设计	134
6.2.1	数据格式与数据存储文件	134
6.2.2	数据交换原理与接口设计思路	134
6.2.3	从 GIS 数据库提取滑坡灾变信息	135
6.2.4	滑坡灾变分析结果的 GIS 解析	136
6.3	GIS 滑坡灾变智能分析系统的程序实现	137
6.3.1	滑坡稳定性极限平衡分析	138
6.3.2	滑坡稳定性 FLAC 程序分析	139
6.3.3	滑坡灾变的计算智能预测	140
6.3.4	灾变分析结果的 GIS 解析	140
6.4	本章小结	142

应 用 篇

第七章	研究区概况及成灾分析	145
7.1	研究区滑坡灾害概况	145
7.1.1	研究区交通位置	145
7.1.2	自然地理	146
7.1.3	地质环境	148
7.2	吴家湾-实验小学滑坡基本特征	150
7.2.1	滑坡周界	152
7.2.2	滑体物质结构特征	153
7.2.3	滑带土	153
7.2.4	滑床特征	155
7.2.5	滑坡变形破坏迹象及特征	155
7.3	滑坡形成条件及耦合成灾因素	159
7.4	本章小结	160

第八章 滑坡稳定性综合分析	161
8.1 滑坡力学参数研究	161
8.1.1 室内土工试验数据分析统计	161
8.1.2 野外天然快剪试验峰值	162
8.1.3 工程地质类比法	163
8.1.4 反算法	163
8.1.5 滑带上 c 、 φ 计算值的综合确定	164
8.2 基于力学的稳态分析	164
8.2.1 GB50021-2001 推荐公式滑坡推力计算	165
8.2.2 FLAC 程序分析	173
8.2.3 有限元法数值模拟分析	176
8.3 本章小结	181
第九章 滑坡灾变智能预测	182
9.1 GIS 滑坡灾变综合信息系统建模	182
9.1.1 区域地质灾害基本数据库	182
9.1.2 研究滑坡的 GIS 信息模型	184
9.2 基于 GIS 的滑坡灾变预测耦合分析	188
9.3 滑坡灾变分析结果的 GIS 解析	197
9.3.1 滑坡分析结果数据更新	197
9.3.2 滑坡灾变分析结果 GIS 表达	198
9.4 本章小结	200
第十章 结论与展望	201
10.1 主要结论	201
10.2 进一步研究的展望	203
参考文献	204

第一章 绪 论

1.1 引 言

在人类生存的地球上,山区高地面积占陆地总面积的 $1/4$,而居住人口占世界人口的 $1/10$ 。山区建设与发展是全人类的共同课题,已经引起国际社会的广泛关注。山地灾害的防、减灾是联合国“国际减灾十年”(1987年12月11日联合国大会169号决议,确定20世纪最后的10年定名为国际减轻自然灾害十年,英文名为 International Decade for Natural Disaster Reduction,简称为 IDNDR)的内容之一;1992年里约热内卢“世界环境与发展大会”确定脆弱生态区——山区和荒漠化地区为优先发展领域;2000年4月联合国进一步确定2002年为“世界山区年”(International Year of Mountains 2002)。与山地地貌紧密相关的滑坡灾害,在全世界范围内其危害和影响程度仅次于地震,而在大部分山区因其出现的频度和广度远远大于地震事件,故而成为人类社会及生活环境中广泛遭遇、受害最重的自然灾害之一。

我国更是一个山区面积占国土陆地面积 69% 的多山国家,全国有 1 500 多个山区县,山区人口占全国总人口的 56%。我国山区主要集中分布在中西部地区。据不完全统计,西部 12 个省、自治区、直辖市中,山区面积占西部陆地总面积的 86% 以上,故西部为我国山地灾害发生数量最多、损失程度最大的地区之一。加上我国“西部大开发”战略的实施、三峡工程的兴建等人类工程活动,可以断言,以三峡库区为代表的我国西部地区,在未来较长一段时间内,以滑坡为代表的山地灾害将一直是该地区面临的各种自然灾害危害之首。

三峡工程兴建的重大历史意义已不必赘述。但如此巨大的工程建设及其运行、城镇迁址移民安置等,必然使库区的不良自然地质环境更为恶化。三峡工程已于 2003 年 6 月蓄水至 135m,将于 2009 年竣工。随着不断更新的统计,库区崩塌、滑坡、泥石流灾害的数量及规模,均在扩展。在三峡水库正常蓄水时干、支流库岸总长约 5 927.2km 范围内,“八五”期间的勘查表明,崩塌、滑坡体共有 1 153 处,总体积约为 $37.1 \times 10^8 \text{m}^3$,水库两岸崩塌、滑坡 428 处(其中干流 344 处),总体积 $27.9 \times 10^8 \text{m}^3$ (其中干流 $14 \times 10^8 \text{m}^3$);大于 $1 \times 10^8 \text{m}^3$ 的特巨型滑坡有 4 个,体积在 $1 \times 10^7 \text{m}^3$ 至 $1 \times 10^8 \text{m}^3$ 的有 50 个。其中分布在干流较不稳定的崩塌、滑坡有 13 个;有活动迹象的有 8 个;此外,三峡库区两岸发育泥石流沟谷有 280 余条,活动且有危害的为 33 条。以移民部门 2000 年复查的数据,前缘在海拔 175m 以下的崩滑体有 1 302 处, $100 \times 10^4 \text{m}^3$ 以下的中小型崩滑体约占总数的 63%。而于 2002 年 1 月 25

日由国务院批复的《三峡库区地质灾害防治总体规划》中明确的库区两岸崩、滑体为 2 490 余处,大小泥石流流沟为 90 余条^[1]。可见,三峡库区滑坡灾害防治量大面广、投资巨大,要在水库正常蓄水前对其全面治理根本不可能。所以,应确立“以防为主、治理为辅”及“全面预报、重点防治”的近期滑坡防治工作方针。

滑坡的预测预报是科学界公认的尖端课题之一,不仅因为其内存因素的复杂性、多样性,而且其形成条件、诱发因素的随机性与非稳定性。近二三十年来,我国科学工作者在三峡地区岸坡变形破坏及稳定性研究等方面做了大量的工作,包括以长江水利委员会综合勘察局、中国水文工程地质勘察院、中科院等为代表的科研院所对库区滑坡泥石流预测预报方面开展了大量的研究工作。但已有的研究成果还难以实现对滑坡灾害的滑动时间、活动强度、危害程度(灾情)等方面进行全面、快速、准确的预报,因而防灾决策部门对滑坡预报提出了进一步的更高要求。所以,国家科技“十五”攻关计划重点项目“三峡库区生态环境安全及生态经济系统重建关键技术与示范”列入了“地质灾害监测、预警及辅助决策支持系统关键技术与示范”课题,为管理决策部门能及时对滑坡灾害可能发生的时间、强度、灾情等方面进行科学决策提供可操作的技术支持系统。

本书研究课题始于 1999 年。20 世纪末,作者所在团队就开始进行有关滑坡灾害预报科研资料收集整理、课题申报立项等方面的工作。2001 年“十五”攻关专项课题“地质灾害监测、预警及辅助决策支持系统关键技术与示范”正式立项,我团队除负责总课题的项目建议、项目申报、中期检查、结题验收等各阶段资料整理汇总外,还独立承担了课题之专题二“滑坡成灾机理、地质灾害预测模型研究”(2001BA604A02-2)的研究工作。本书主要是在该课题支持下开展相关研究工作的基础上完成的。

1.2 滑坡灾变预测研究现状述评

1.2.1 滑坡灾害及其危害

滑坡作为最严重的自然灾害之一,人类受其危害也由来已久^[1~21]。

国内,有史为证,近 2000 年来,长江三峡地区因崩滑引致堵江断航事件达 7 处 9 次,其中 1026 年和 1542 年秭归新滩两次堵江,曾分别中断长江航运 25 年和 8 年之久;岷江于公元前 10 年和公元 1437 年、1449 年、1773 年曾多次为滑坡所堵断,其后 1933 年四川迭溪地震,造成岷江两岸山体崩滑形成三座高达 100 余米的堆石坝,将岷江完全堵塞,1 个月后堆石坝溃决,高达 40 多米的水头顺江而下,席卷了两岸的村庄。最近 30 年来,我国发生了很多危害影响相当严重的大型崩滑事件,如 1972 年 6 月 18 日香港两起重大滑坡事故(死 138 人,伤 80 人),1976 年 6 月 8 日雅砻江唐古栋滑坡($6\,800\times 10^4\text{m}^3$),同年 7 月 16 日巫山长江南岸鲤鱼沱滑坡

($180 \times 10^4 \text{ m}^3$), 1980 年 7 月 3 日成昆铁路铁西车站滑坡($220 \times 10^4 \text{ m}^3$), 1982 年 7 月 18 日云阳长江北岸鸡扒子滑坡($1\,916 \times 10^4 \text{ m}^3$), 1983 年 3 月 7 日甘肃东乡洒勒山南麓滑坡($4\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$), 1985 年 6 月 12 日秭归新滩滑坡($3\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$), 1988 年 1 月 10 日巫溪下堡乡中阳村滑坡($1\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$), 1989 年 1 月 7 日澜沧江中游某在建大型水电站左岸滑坡($10.6 \times 10^4 \text{ m}^3$), 同年 7 月 10 日华蓥山溪口滑坡($1\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$), 1994 年 4 月 30 日重庆武隆白马鸡冠岭滑坡($325 \times 10^4 \text{ m}^3$), 1996 年 6 月 10 日巴东迁建县城原新址二道沟滑坡($4.6 \times 10^4 \text{ m}^3$)及同年 10 月 29 日三道沟滑坡($16 \times 10^4 \text{ m}^3$), 1998 年 8 月 14 日重庆巴南麻柳嘴滑坡(约 4 km^2 山体), 2001 年 5 月 1 日重庆武隆县城江西北西段滑坡($1.6 \times 10^4 \text{ m}^3$), 同年 7 月 11 日重庆綦江赶水瓦池村滑坡($2\,900 \times 10^4 \text{ m}^3$); 而中小型者, 更是不可数计。伴随这些滑坡灾害的是城镇毁灭, 交通运输中断, 人们无家可归甚至丧生, 年均经济损失数以十亿计。

在国外, 滑坡危害一样严重而广泛^[22~30]。1939 年加拿大 Montagneuse 河谷发生 $7\,600 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的历史最大滑坡, 堵塞河流形成 1.5 km 长的水库, 至 1952 年被湖相沉积填满, 1988 年才溃决; 1952 年冬天美国洛杉矶滑坡造成 750 万美元的损失; 1963 年意大利 Vajont 双曲拱坝库区发生体积约 $(2.7 \sim 3) \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大滑坡, 造成的涌浪夺去坝下游 2 400 余人的生命; 同年秘鲁 Huascaran 山区因地震而触发的山体崩滑, 使 18 000 人丧生; 1977 年瑞典塔维滑坡, 造成 150 多间房屋破坏或重创, 9 人丧生, 直接经济损失约一亿五千万瑞典克朗; 1999 年 10 月墨西哥因大雨普遍引发滑坡, 致使丧生或失踪近 600 人, 20 多万人无家可归。事实上, 诸多国家和地区, 如日本的新潟县及其临县、俄罗斯的高加索及黑海沿岸、英国的南威尔士、肯尼亚中部、美国加州与新泽西及得克萨斯、法国南阿尔卑斯、意大利中部等, 均为滑坡多发地区或曾报道过大型滑坡灾害。

1.2.2 滑坡预报国内外研究动态

虽然人类与滑坡灾害的斗争由来已久, 但起先多是消极被动的, 或有研究也是零星片断的。直至 20 世纪第二次世界大战以后, 人们才真正广泛开始对滑坡进行专门的、系统的研究^[1,3,15,31~55]。最初主要是在对可能失稳边坡进行长期观测的基础上, 开展滑坡加固方法与措施的研究。而滑坡之所以往往给人类造成严重的损失, 究其原因是人们难以事先准确知道其发生的地点、时间、强度和影响, 也就预先难以防范, 所以对于滑坡灾害, 重在预测。

在滑坡灾害预测预报的专门研究中, 日本学者斋藤迪孝可能算是先驱代表之一, 他于 20 世纪 40 年代中期就开始就滑坡预报开始实验研究, 并于 1968 年提出一个预报滑坡的经验公式及图解, 即著名的“斋藤法”; 前苏联 Е. П. Емельянова 曾从八个方面讨论滑坡预报的内容(1959); Hoek(1969)据智利 Chuquicamata 矿滑坡监测时间-位移曲线提出了外延法; F. O. Jones (1961)、P. C. Stevenson (1977)、

T. H. Nilsen ,et al. (1979)、T. Endo (1970)、E. Fussganger (1976)、G. Guidicini (1976)等先后对滑坡预报的经验法或统计学方法进行研究。这一时期我国滑坡预报研究相关的报道甚少,仅有卢蠡栖(1976,1977)、李天池(1979)等个别研究者做过一些探索性的工作。这些为 20 世纪 60~70 年代的经验-统计学方法,均处于预报阶段。

自 20 世纪 80 年代始,预测滑坡学逐渐成为滑坡学和预测科学交叉的分支科学,这一阶段不但经验式和统计学方法有了进一步的发展,还出现了敏感性制图、信息论等预报方法,数理科学的一些新理论,如灰色系统理论等开始被应用于滑坡预报研究。其代表如: M. Haruyama, 1984; H. Kawakami, Y. Saito, 1984; E. E Brabb, 1984; 福 囿 (1985); Yan Tongzheng, et al. , 1987; Yu Suolong, 1987; H. H. Einstein, 1988; J. Hartcen, L. Viberg, 1988; A. Wangner, et al. , 1988; M. Romana, 1989; G. F. Wiecaorek, et al. , 1990。我国在滑坡预报方面研究的真正兴起也是在这一时期,如卢蠡栖(1984)、周宏业等(1986)、晏同珍(1987,1988)、薛果夫(1988)、陈明东(1987,1988)、张倬元和黄润秋(1988)、崔政权(1989)、王思敬和王效宁(1989)等做了一些开拓性研究。

对 20 世纪 90 年代以后滑坡预报研究的特点,作者以为主要可以归纳为三个方面:① 多种预报方法的综合研究与应用;② 广泛的现代数理科学新理论应用于滑坡预报理论研究;③ 滑坡预报的技术手段得到前所未有的发展。我国在这一时期滑坡预报研究方面如火如荼,涌现了很多创新性的研究成果:苏爱军(1990)、张利民(1991)、李天斌等(1996)、门玉明等(1997)、何薪基(1998)、郝小员等(1999)、陈永波(2000)等研究了数据统计的解析与数值方法处理建立的预报模型;秦四清、张倬元(1993)、胡广韬(1994)、周萃英(1995,1999)、易顺民(1996)、龙辉(2001)等研究过滑坡预报的动力学与非线性动力学方法;廖小平(1994)、徐峻龄(1996,1998)、马崇武(1999)等以力学功能原理方法进行滑坡预报研究;最近 10 年来,从 20 世纪 90 年代初秦四清(1993)、吴文德等(1994)开始将现代数理新理论全面引入应用于滑坡预报研究,如灰色、模糊、专家系统、突变、灾变、分形分维、混沌、协同、分岔、自组织、控制论、信息论、系统论、耗散结构、神经网络等理论方法,如崔中兴(1995)、蔡德所(1995,1998)、谢漠文等(1996)、晏小明(1996)、汤连生(1996)、殷坤龙、晏同珍(1996)、熊传治(1998)、周萃英(1996,1999)、何述东(1997)、易顺民(1994,1996,1998)、李天斌等(1999)、黄志全、郑乾墙、刘端伶(1999)、蒋刚等、蒋良文、吴承祯(2000)、钟铁(2001)均做过相关的应用及其改进方法。从 90 年代中后期开始,计算机仿真、遥测技术与 3S 技术相继应用于滑坡的监测预报,如桂立铭等(1997)、王秋明等(1998)、杨克俭等(1999)、王旭春(1999)、何满朝等(1999)、崔政权等(1999)、唐川等、耿大玉(2001)、单新建、谢漠文、兰恒星等(2002)均有过相关的文献报道。目前,我国在滑坡预报研究领域正在步入世界领先行列。当然,这一时期国外相似的研究也很多,如 Hergarten, et al. (1998), R. Nagra jan, et al. (1998), 佚名

(USA, 2000), Aldo Clerici, et al. (2000), H. Tien Wu et al. (2000), Mandy Lineback Gritzner et al. (2001)等也报道了 3S 技术在滑坡预报方面的应用文献。

1.2.3 现有滑坡预报模型述评

人类社会遭受滑坡或地震一类的自然灾害时,人们最为关心的主要有三个问题:灾害发生在哪里?什么时候发生灾害?灾害发生带来的影响或破坏程度如何?因此,滑坡预报的主要任务或对象,主要应包括对滑坡灾害发生的地点(空间)、时间、强度(滑坡活动强度及破坏程度)等进行预测预报。要达到这一目标,滑坡预报研究的主要内容或要解决的关键问题应该是建立起与滑坡实体相适应的预测预报模型,而其核心又是预报方法与预报判据。

事实上,从滑坡预报问题的提出开始,人们就一直试图寻找或建立一种与滑坡体相适应、预报准确、可操作性强的滑坡预报模型;经过近半个世纪的探索,国内外许多相关专家、学者从不同的角度提出了各种各样的预报模型^[1,9,15,32,56~63]。近年研究较为活跃的滑坡预报模型主要类型及对应的预报方法与判据可归纳为表 1.1 所列。

表 1.1 目前滑坡预报模型的主要类型

预报对象	预报模型	预报方法	预报判据
空间预报	线性回归模型	统计预测法	
	聚类分析模型	灰色聚类法	聚类向量择大
	人工神经网络模型	ANN 法	期望输出
	GIS 多因子定量分析模型	逐步筛选综合系数法	最佳预测因子
时间预报	斋藤模型	经验公式	应变速率
	福圆模型	实验拟合公式	滑坡速度
	Hayashi 模型	拟合公式	滑坡速度
	位移加速度回归模型	监测曲线回归方程外推法	位移加速度
	匀加速条件时间预报模型	统计方法	位移
	灰色 Verhulst 模型	灰色统计方法	
	滑体变形功率模型	功能原理	位移峰值
	分形时间预测模型	分形理论	位移分维值
	非线性动力学模型	反演理论	动力学判据
	Pearl 预报模型	统计方法	位移
强度预报	运动机理滑速或滑距模型	运动机理与运动学结合	
	滑坡敏感度图	制图法	
	地震滑坡危险度图		危险度分区
	GIS 滑坡灾害灾情评估系统	图形信息一体化	

在表 1.1 所列预报模型中,以斋藤迪孝法为代表的一类方法是用严格的推理方法,特别是在数学、物理方法方面进行精确分析,得出明确的预测判断,故称之为确定性预报模型,即是可以明确的函数来表达其数学关系的一种预报方法。这类方法一般为加速度蠕变经验方程,精度较低,适用于滑坡的中短期预报和临滑预报。

灰色预报、生长曲线预报、线性回归等类方法与确定性预报模型相反,是一类非确定性预报模型,这类模型是不能用明确的函数来表达其数学关系的,它们是建立在因果分析和统计分析基础上的,多属趋势预报或跟踪预报,适用于各类滑坡的中、短期预报;一般说来,当滑坡发展至加速变形阶段时,可以较准确地预报滑坡时间。

由于每一个滑坡的具体条件均不一样,各种预报方法的适用性也不尽相同,因此,应根据每个滑坡的具体条件选择合适的预测方法,并尽可能采用多种方法进行综合预报,这对提高滑坡预报的精度和成功率大有裨益。

1. 空间预报模型

线性回归模型:此模型是较早提出的一种空间预报模型,其基本原理是基于基准变量 y_i 的线性数学模型

$$y_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} d_i(j, k) b_{jk} + \epsilon_i \quad (1.1)$$

式中: $d_i(j, k)$ 表示第 i 样本中 j 项目的 k 类目; b_{jk} 为依赖于 j 项目 k 类目的常数; ϵ_i 为第 i 次抽样中的误差。

利用最小二乘法推导出原模型的正规方程

$$X'X\hat{b} = X'Y \quad (1.2)$$

而后利用已抽样数据建立和求解正规方程,并对结果进行显著性检验。

聚类分析模型:此模型是基于对事物间的相似性和亲疏关系的研究,来对研究的对象进行分类组合,滑坡预报中常用 Q 型聚类法。每个网格单元视为样本,单元中的滑坡条件视为变量,各网格单元中的边坡稳定性取决于样本单元所有变量的组合特征,具相似组合的单元可分类归并到同一组中,最后据样本 滑坡在各网格单元中的分布情况,把分类的网格单元划分成为相同的危险等级,来预测滑坡危险性区划。

人工神经网络模型:此模型一般应用 BP 模型,利用 BP 模型很强的学习与自适应能力,在滑坡的物理数学模型未知的情况下通过网络自学习达到其输出与期望输出在一定误差范围内完全相符的结果。利用人工神经网络(ANN)方法并借助计算机分析综合,在研究区内的滑坡空间特征同滑坡工程地质因素间建立起人工智能推理网络系统,就可以预测滑坡可能出现的位置及可能发生的规模。

多因子定量分析模型：此模型将多元空间信息统计分析方法与非线性统计预测方法相结合，在充分考虑滑坡与各环境因子之间的统计相关性和位置相关性的基础上，研究滑坡与环境因子之间的定量关系及表示方法，利用逐步筛选综合系数法求解最佳预测因子集，并通过构建的已知滑坡样本集与预测样本集，对滑坡的区域危险性进行预测，由于可借助地理信息系统(GIS)平台，其分析与表达非常方便明确。

从长远着眼，人工神经网络模型和多因子定量分析模型由于其方法具有先进性、操作方便与表达明确等优点，是较有发展前途的滑坡空间预报模型类型。

2. 时间预报模型

时间预报根据滑坡不稳定性时间可分为趋势预报和临滑预报两大类；趋势预报又可再分为长期预报、中期预报和短期预报。长期预报是指斜坡尚处于初始变形阶段而进行的未来整体破坏的时间预报，预报的时间尺度一般为数十年甚至上百年；中期预报是指斜坡处于稳定变形阶段(线性阶段)而进行的未来整体破坏的时间预报，预报的时间尺度一般为数年至数十年；短期预报是指斜坡处于加速变形初期阶段(非线性阶段)而进行的未来整体破坏的时间预报，预报的时间尺度一般为数月；临滑预报是指斜坡处于加速变形末期后(非线性阶段)而进行的整体破坏的时间预报，预报的时间尺度为数天。

斋藤模型：此模型是一种短临预报模型。日本学者斋藤迪孝根据大量的室内外试验研究，于1968年提出均质坡的滑坡时间与蠕变速率之间有经验关系

$$\lg t_r = 2.33 - 0.516 \times \lg \epsilon \pm 0.59 \quad (1.3)$$

式中： ± 0.59 为包括95%测定值的范围； t_r 为滑坡发生时间(min)； $\epsilon = \Delta l / l \Delta t$ ($\times 10^{-4} \text{min}$)为等速蠕变速率， l 、 Δl 与 Δt 分别为观测点间距离、相对位移与观测时间。

当坡体进入加速蠕变阶段，可在位移-时间曲线上取三点，利用如下公式预报破坏时间：

$$t_r = \frac{(t_2 - t_1)^2 / 2}{(t_2 - t_1) - (t_3 - t_1) / 2} + t_1 \quad (1.4)$$

选取三点时，要使 $t_1 - t_2$ 和 $t_2 - t_3$ 间的位移量相等。

可见，斋藤模型是以监测曲线和蠕变理论为依据的一种确定性模型，当滑坡处于加速蠕变阶段时可得到比较精确的临滑时间预报值。

福囿模型：此模型是日本学者福囿在1985年经多次大比例尺模型试验的基础上提出的滑坡速度-时间关系

$$\frac{1}{v} = A(\alpha - 1)^{\frac{1}{\alpha-1}}(t_f - t)^{\frac{1}{\alpha-1}} \quad (1.5)$$

式中： A 、 α 为常数； v 为滑坡速度； t 为初始时间； t_f 为破坏时间。利用上式，可结合