

典型地质环境问题 区域灾变智能预测研究

——以湖北省恩施地区为例

曾斌 项伟 著

DIANXING
DIZHI HUANJING WENTI
QUYU ZAIBIAN ZHINENG YUCE YANJIU



中国地质大学出版社有限责任公司

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

典型地质环境问题区域 灾变智能预测研究

DIANXING DIZHI HUANJING WENTI QUYU
ZAIBIAN ZHINENG YUCE YANJIU

——以湖北省恩施地区为例

曾斌 项伟 著



中国地质大学出版社有限责任公司

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

图书在版编目(CIP)数据

典型地质环境问题区域灾变智能预测研究——以湖北省恩施地区为例/曾斌,项伟著.
—武汉:中国地质大学出版社有限责任公司,2013.2

ISBN 978-7-5625-3055-8

I. ①典…

II. ①曾…②项…

III. ①地理信息系统-应用-滑坡-监测预报-研究-恩施土家族苗族自治州

IV. ①P642.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 020986 号

典型地质环境问题区域灾变智能预测研究 ——以湖北省恩施地区为例

曾斌 项伟 著

责任编辑:胡珞兰

责任校对:戴莹

出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路 388 号) 邮政编码:430074

电 话:(027)67883511 传 真:67883580 E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店 <http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:200 千字 印张:7.75

版次:2013 年 2 月第 1 版

印次:2013 年 2 月第 1 次印刷

印刷:武汉市教文印刷厂

印数:1—500 册

ISBN 978-7-5625-3055-8

定价:20.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

滑坡是我国山区最为典型也是最为常见的突发性地质环境问题之一,其所造成的危害正随着经济建设的不断发展而日趋严重。当今我国基础设施建设(如水利工程,公路、铁路工程,移民安置工程等)正如火如荼地进行,将为社会带来巨大的经济效益,如果不注重地质环境的保护以及建设中对各类灾害的主动防护,则必将带来地质环境的进一步恶化以及不必要的人员伤亡和经济损失。

发生在我国西南部山区的各类多发性地质环境问题,又以滑坡的危险性及其所造成的破坏性为最大。然而由于滑坡灾害本身的复杂性,在很多情况下对于滑坡的准确时间预报是十分困难的,甚至是不可能的;同时对于大规模的滑坡治理而言,从某种意义上讲也并不现实。因此对于滑坡灾害预测防治研究的趋势将是对特定区域、特定条件下的不稳定斜坡体演变成滑坡的可能性,以及这些不稳定斜坡体在空间分布规律上的预测研究。从而为相关部门制定建设用地规划方案提供参考依据,以减少不必要的生命财产损失。

然而,目前许多斜坡灾变空间预测模型实际上是属于“后验型”的,即通过模型的计算预测得出研究区内既有滑坡灾害的分布情况。但通常情况下,对于已经发生过的滑坡体,一方面斜坡内蓄积的应力通过坡体的滑动变形得以释放,另一方面滑动后的坡体其整体势能也得到了一定程度的降低,因此真正新近发生过的滑坡体将会处在一个暂时的稳定间歇期内。而真正存在危险性并对生命、财产构成威胁的是如今尚未滑动但具备滑动的一切客观条件,甚至已经出现了变形迹象,在将来外界营力的持续作用下极有可能发展演变成滑坡的潜在不稳定天然斜坡体。因此,如何有针对性地为这一类潜在不稳定斜坡体选取合理的评价指标体系以及计算预测模型,从而能够更好地为预测其空间分布规律服务,而不是简单地预测既有滑坡体的分布情况,这是本书研究的主要思路及亮点之一。

结合中国地质调查局项目“鄂西恩施地区滑坡形成机制与危险性评价”,选择鄂西恩施地区部分志留系地层作为研究区域,通过综合系统的工程地质、环境地质调查与监测,查明鄂西恩施地区志留系地层滑坡形成的区域地学背景和关键影响因素。在该地层上既有典型滑坡的形成破坏机理进行深入探讨的基础上,确定志留系地层上斜坡变形破坏的评价因子指标体系;进而应用 GIS 技术,并结合人工神经网络智能化预测模型,建立起区域潜在不稳定斜坡的空间预测模型,力求探索出一条适合鄂西山区志留系地层特点的、应用 GIS 技术进行斜坡灾变智能化空间预测的技术路线和方法体系。

全书共分 7 章:第 1 章对目前区域斜坡灾变的空间预测预报方法进行了归纳及分析;第 2 章、第 3 章总结了研究区斜坡变形破坏的特征,得出了志留系地层上斜坡演变成滑坡的过程机理,以及决定斜坡稳定性的主要影响因素及其作用方式,并在此基础上建立了有针对性的区域斜坡灾变空间预测评价指标体系;第 4 章针对鄂西地质环境的复杂性以及地质灾

害发生的非线性,引入了非线性理论的神经网络智能化方法,为区域潜在不稳定斜坡的空间预测 GIS 系统提供了新的空间分析方法,并对研究所需要构建的斜坡灾变空间预测神经网络模型进行了设计;第 5 章、第 6 章利用 GIS 技术,结合所设计的神经网络预测模块,建立了完整的基于 GIS 的斜坡灾变智能化空间预测技术路线和方法体系,并在恩施地区屯堡乡一带志留系地层范围内进行了预测应用;第 7 章对全书的研究工作作了梳理总结,并讨论了该领域今后的研究发展方向。

在本书编写过程中,中国地质大学(武汉)项伟教授对本书科学问题的选取及研究方向的把握给予了极其宝贵的建议,中国地质大学(武汉)唐辉明教授学术团队对书中部分基础数据的收集整理提供了大力帮助,中国地质大学(武汉)陈植华教授、余宏明教授,德国 Erlangen - Nuremberg 大学 Joachim Rohn 教授、Dominik Ehret 博士等在本书的编写过程中均给予了宝贵的意见,同时在本书的编写过程中也参考了部分专家学者的著作,在此一并表示衷心的感谢!

鉴于笔者水平有限,书中可能存有欠妥或遗漏之处,恳请读者指正。

笔 者

2012 年 10 月

目 录

1 绪论	(1)
§ 1.1 引言	(1)
1.1.1 滑坡灾害造成的损失日益严重	(1)
1.1.2 GIS 为区域滑坡研究提供了良好的技术平台	(2)
1.1.3 GIS 与神经网络结合为区域滑坡研究提供了有效的解决方案	(2)
1.1.4 研究意义	(3)
§ 1.2 国内外研究现状评述	(3)
1.2.1 GIS 在区域滑坡灾害预测预报中的应用	(3)
1.2.2 区域滑坡灾害空间预测研究	(5)
1.2.3 人工智能的应用研究	(6)
1.2.4 人工智能与 GIS 相结合应用于灾害空间预测的研究	(8)
1.2.5 滑坡灾害空间预测评价指标	(9)
§ 1.3 目前存在的问题.....	(10)
§ 1.4 发展趋势.....	(11)
§ 1.5 本书研究内容及思路.....	(12)
1.5.1 研究内容.....	(12)
1.5.2 研究方法及技术路线.....	(12)
2 恩施地区志留系地层典型滑坡及其破坏机理分析	(14)
§ 2.1 概述.....	(14)
2.1.1 地质灾害类型.....	(15)
2.1.2 滑坡灾害的类型及分布.....	(16)
§ 2.2 瞿家湾滑坡群.....	(16)
2.2.1 地质环境条件.....	(18)
2.2.2 物质结构特征.....	(18)
2.2.3 滑坡稳定性计算.....	(19)
2.2.4 滑坡应力、应变数值模拟分析	(21)
2.2.5 滑坡形成机理.....	(25)
§ 2.3 保扎滑坡.....	(25)
2.3.1 形态特征.....	(26)
2.3.2 物质结构特征.....	(27)
2.3.3 影响因素.....	(27)
2.3.4 滑坡形成机理.....	(28)
§ 2.4 志留系地层滑坡机理分析.....	(29)

2.4.1	志留系地层上滑坡发育特征.....	(30)
2.4.2	岩土体性质对滑坡的控制.....	(32)
2.4.3	地形地貌对滑坡的控制.....	(34)
2.4.4	坡体结构对滑坡的作用.....	(35)
2.4.5	降雨对滑坡的作用.....	(35)
2.4.6	构造对滑坡的控制.....	(36)
2.4.7	人类活动对滑坡的影响.....	(37)
2.4.8	志留系地层滑坡规律总结.....	(37)
3	斜坡灾变空间预测评价指标体系.....	(39)
§ 3.1	指标选取的原则.....	(39)
§ 3.2	指标的筛选.....	(40)
3.2.1	指标筛选的原则.....	(40)
3.2.2	指标的筛选.....	(41)
§ 3.3	预测指标的量化.....	(47)
§ 3.4	预测指标的权重.....	(49)
4	神经网络技术理论及应用模型构建.....	(51)
§ 4.1	人工神经网络理论概述.....	(51)
4.1.1	神经网络的基本性质.....	(52)
4.1.2	神经元模型.....	(52)
4.1.3	神经网络的互联模式.....	(53)
4.1.4	神经网络的工作方式.....	(54)
§ 4.2	神经网络的学习与计算.....	(54)
4.2.1	神经网络的学习.....	(54)
4.2.2	神经网络的计算.....	(55)
§ 4.3	BP神经网络.....	(55)
4.3.1	BP网络的模型与结构.....	(56)
4.3.2	BP网络的学习公式.....	(57)
4.3.3	BP网络的训练方法和步骤.....	(59)
4.3.4	BP网络的优缺点及改进方法.....	(60)
§ 4.4	斜坡灾变空间预测 BP神经网络模型的构建.....	(62)
4.4.1	网络模型的选取.....	(63)
4.4.2	BP网络模型的结构.....	(63)
4.4.3	样本数据及数据的预处理.....	(64)
4.4.4	网络设计及训练函数比较研究.....	(67)
4.4.5	网络隐含层神经元数探讨.....	(74)
5	区域斜坡灾变空间预测模型的设计及实现.....	(76)
§ 5.1	斜坡灾变空间预测的工作特点.....	(76)
§ 5.2	空间预测系统的技术支撑平台.....	(77)

5.2.1	GIS 地理信息系统软件.....	(77)
5.2.2	MATLAB 编程软件.....	(78)
§ 5.3	空间预测系统的结构设计及实现.....	(78)
5.3.1	空间数据库的建立.....	(78)
5.3.2	数据的空间分析处理.....	(79)
5.3.3	斜坡灾变空间预测.....	(84)
6	恩施地区屯堡乡一带志留系地层斜坡灾变空间预测	
	应用实例.....	(86)
§ 6.1	研究区地理地质背景.....	(86)
6.1.1	地理位置.....	(86)
6.1.2	地质环境概况.....	(87)
6.1.3	现有灾害发育情况.....	(91)
§ 6.2	研究区斜坡灾变空间预测的实现.....	(91)
6.2.1	研究区预测单元的划分.....	(91)
6.2.2	影响因子图层的生成.....	(91)
6.2.3	神经网络模型的预测分析.....	(95)
6.2.4	预测成果可视化及评述.....	(97)
§ 6.3	预测系统准确性的遥感评价.....	(98)
6.3.1	遥感源信息及解译方法.....	(99)
6.3.2	遥感解译结果.....	(99)
6.3.3	预测准确度评定.....	(100)
7	结论及展望.....	(107)
§ 7.1	结论.....	(107)
§ 7.2	研究的创新点.....	(109)
§ 7.3	研究展望.....	(109)
	参考文献.....	(110)

1 绪论

§ 1.1 引言

地质环境是人类生存、繁衍,从事各种活动的场所和资源的提供者。人类在利用、改造地质环境的过程中,会遇到许多不良的甚至危害人身安全的各种地质现象和地质过程。人们把这些现象、过程与不利的后果联系在一起,形成目前有关地质环境问题或地质灾害的概念^[1]。

徐恒力等^[2]指出:由地质作用引发的,不利于人的生存、发展的现象和过程,通称地质环境问题。从地质过程的动力学形式来考察,地质环境问题则可以分为突发的和渐进发生的两类:前者与地质环境系统以突变的形式失稳有关,如地震、崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、坑道突水、瓦斯突出与爆炸、岩爆等;后者是地质环境系统渐变的外在表现形式,如水土流失、荒漠化、盐渍化、地面沉降、海水入侵,等等。

本书所研究的滑坡地质灾害即是地质环境系统突变所导致的,并且在我国西南山区十分多发,所以又称突发性的典型地质环境问题。

1.1.1 滑坡灾害造成的损失日益严重

中国是亚洲乃至世界上滑坡灾害最为严重的地区之一,特别是20世纪80年代以来,随着我国经济建设的恢复与高速发展及自然因素的影响,滑坡灾害呈逐年加重的趋势。目前,全国范围内除山东省没有发现严重的滑坡灾害外,其余各地均有发生。其中又以西部地区(西南、西北)的云南、贵州、四川、重庆、西藏以及湖北西部、湖南西部、陕西、宁夏及甘肃等省区最为严重。据初步统计,全国至少有400多个市、县、区、镇,10 000多个村庄受到滑坡灾害严重侵害,有证可查的滑坡灾害点约为 4.1×10^5 多处,总面积达 $1.74 \times 10^6 \text{ km}^2$,占国土总面积的18.10%(截至2000年数据)。1995年以来,滑坡造成的年均死亡人数已连续多年超过1 000人,严重的滑坡灾害不仅给当地居民的生命财产造成极大损失,还摧毁相当数量的工厂和矿山,并严重影响铁路、公路、水运及水电站等基础设施的安全运营。

如本书所研究的湖北省鄂西恩施地区,由于其地处鄂西南褶皱山地,属云贵高原的东沿部分,是滑坡地质灾害的频发地区。据资料显示,仅恩施市19个乡镇即发育有规模不等的灾害点338处,其中滑坡292处、崩塌33处、地面塌陷11处、泥石流2处。地质灾害共造成118人死亡,直接经济损失2 352.9万元。其中1980年发生的屯堡杨家山滑坡规模达 $6.3 \times 10^7 \text{ m}^3$,破坏耕地950亩(1亩=666.6 m^2),毁房94户,造成850人无家可归。1960年7月发生的龙马保扎滑坡,规模 $1.75 \times 10^8 \text{ m}^3$,破坏耕地1 300亩,毁房470间,造成11个村组当年粮食绝收,滑坡景象惨不忍睹。1997年是恩施市内地质灾害最严重的一年,全市共发生大小地质灾害100多处,灾害涉及22个乡镇街道办事处,206个村,1 564村组,30 297

户,64 386人受到地质灾害威胁,这一次的地质灾害共造成 5 924 间房屋倒塌,7 565 人无家可归,良田被毁70 500亩,砸死牲猪 634 头,折断电力和通讯电杆 734 根,公路垮塌1 882处,18 条乡村公路交通中断,造成 19 人死亡,391 人受伤。

然而,国家和政府却很难支付所有重大工程或规划项目中滑坡等地质灾害防治所需的巨额支出,换句话说,滑坡等地质灾害的频繁发生,已经超出人们采取各种防治措施进行治理的能力。同时,滑坡影响因子本身的随机性和不确定性以及滑坡发生物理过程的非线性,都决定了滑坡发生在时间和空间上准确预报的困难,尤其是区域性滑坡。因此目前滑坡研究的趋势是发展区域地质灾害的危险性预测或预警系统,力求在滑坡发生之前就能够对地质灾害高危险性的地区采取避让或者进行工程治理,从而减少不必要的生命和财产损失(U. S. Geological Survey, 1982; Kockelman, 1986; Schuster and Fleming, 1986; Schuster, 1995; Carrara, 1995, 1999)。

1.1.2 GIS 为区域滑坡研究提供了良好的技术平台

地质灾害空间预测是一个复杂的多源信息综合分析的过程,其数据量大,数据结构复杂,既有空间数据(如空间位置),又有属性数据(非图形数据),因此,需要有功能强大的空间数据库管理功能才能满足要求。此外,地质灾害信息的多源性、模糊性、非确定性和随机性,都使得信息处理和空间综合分析的模型十分复杂。传统方法与手段,不仅因简化而缺失大量的信息,导致成果可靠程度的降低,而且其成果表达亦缺乏直观性和可操作性。因此,地理信息系统(Geographic Information System,简称 GIS)作为当前高科技发展的产物,集空间数据与属性数据的处理、管理、查询、分析、输入输出及遥感图像处理分析等功能为一体,既可以有效地管理影响滑坡发生的各种准静态因素(如岩性、结构、地形等),又可以有效地管理各种外部动力因素(如降雨、地震、人类活动、侵蚀等);同时 GIS 与 GPS、RS 的集成使用也大大拓宽了 GIS 的应用领域;滑坡研究理论与方法的逐步完善也为 GIS 的应用提供了技术和理论积累。经过 30 多年的发展,GIS 显然已成为使用其他研究手段难以解决的区域滑坡灾害危险性空间预测等问题的有力工具。

1.1.3 GIS 与神经网络结合为区域滑坡研究提供了有效的解决方案

虽然 GIS 技术已经发展了近 30 年,但其在滑坡预测与评价研究中的应用明显滞后于 GIS 技术本身的发展。其主要原因是缺乏必要的可集成到 GIS 系统中的滑坡分析模型,单纯依靠 GIS 技术建立一个地区的地质资料库,不能进行进一步的分析评价,只能称作是空间数据库,并不能达到地质灾害空间预测的目的。与此同时,孤立的人工神经网络方法由于数据获取的困难和偏差,在实际应用中也会大受局限。如何将二者结合起来,快速有效地得出实用的评价预测结果,便成为研究的核心问题。大体而言,可以通过以下几个步骤来完成。

1) 利用 GIS 有效地处理基础数据

利用 GIS 本身的空间分析功能,进行适当的用户扩展,便可以较为方便地处理业已输入的基础资料,得出分析评价模型所要求的数据。一方面,需要将定性属性按照一定的原则进行定量化;另一方面,需要将原始数据中点状或线状特征信息转化为面状信息。

2) GIS 剖分用于评价的图元区域

评价的基本图元区域大小和剖分方法往往对评价预测结果有较大影响。一般划分有两

种途径:一种是等分为规则的矩形图元,制图时将评价结果通过趋势面分析等方法处理,形成评价区划图;另一种方法是依照斜坡的自然分界线(如沟脊)和某些因素(如岩性、构造)分布的差异,将评价区人为地分成若干小区域。

3)应用人工神经网络方法扩充分析评价功能

由于 GIS 具有可二次开发性,用户可以结合所需解决问题的实际情况,选定合理的数学模型进行二次开发,扩充 GIS 本身的功能,实现本领域传统分析方法与 GIS 的整合,建立起专业信息系统甚至是决策支持系统。

可以将图元区域的各项因素指标值写入中间数据库,供人工神经网络等用户分析模型直接调用,充分利用面向对象编程语言的优势,调用方法可采用预先绑定方式,真正实现 GIS 数据与评价分析模型的无缝连接。这样便可省却用户为神经网络模型手工准备数据之苦。

4)将分析结果返还到 GIS 处理成图,形成最终成果

GIS 具有强大的图形显示和输出功能,将评价预测模型所得的结果写入相应图元的属性数据,然后便可以将分析预测结果通过 GIS 直接成图,在 GIS 编辑模块中调配好颜色,加上图例和注记,形成最终成果。

1.1.4 研究意义

当今我国实施西部大开发战略,开发的重点是基础设施建设(如水利工程,公路、铁路工程,移民安置工程等)及生态环境保护;2008年,面对世界金融危机,国家决定投资4万亿元重整国内经济,其中大部分的资金投入到了基础建设中。人类的工程建设必将为社会带来巨大的经济利益,如果不注重客观自然条件的制约因素,也必将导致环境的恶化、灾害的发生。而地质环境问题的空间分布预测则是保护地质环境的一项重要举措,它要求人们采用多种先进手段获取大量可靠信息并在短时期内快速、动态合理地评价预测区域地质环境与地质灾害,进行危险性区划,准确定位,对地质环境适宜性分析,避开不适合人类工程活动的地段,避免可能发生的地质灾害。在当今高新技术的兴起及信息产业的逐步形成,使得地质环境与灾害调查的手段(如先进精密仪器、物理探测、遥感、GPS)大大改善,所获得的信息是多源的、海量的,如何科学处理与充分利用这些信息,从而快速地评价地质环境和预测地质环境问题是现阶段的首要任务,也是我国提高地质环境评价、灾害监测预测、资源利用水平的重要途径。

国外将 GIS 技术应用于地质灾害的快速预测和地质环境的综合评价,以及将智能化预测模型与 GIS 的结合应用都已十分普遍。而我国在这些方面,特别是将 GIS 与智能化预测模型的结合研究应用尚不广泛。因此,加强典型地质环境问题空间预测领域 GIS 技术的推广与应用,以及采取智能化的预测模型,对于我国地质灾害的防治与地质环境的保护都具有重要的理论和实际意义。

§ 1.2 国内外研究现状评述

1.2.1 GIS 在区域滑坡灾害预测预报中的应用

近几年来,地理信息系统(GIS)在滑坡灾害研究中的应用引起了广泛的关注。GIS 强

大的空间分析和空间数据库功能决定了 GIS 非常适合于解决滑坡研究领域中的许多问题,如历史滑坡编录、滑坡的时空序列分析、滑坡发生与静态及动态环境因素(如暴雨、地震)等之间的空间相关分析、滑坡灾害风险评价等。这些问题与滑坡及影响滑坡发生的动、静态环境因素的空间位置有直接的联系,利用 GIS 技术可以对这些问题进行定位、定量分析。

鉴于 GIS 技术在数值化制图、空间分析以及可视化方面的独有特点,其也越来越广泛地被运用到滑坡灾害的预测预报研究中。从 20 世纪 80 年代初的地质数据管理、输入数据的数字化以及成果图的数字化输出,到数字高程模型和数字地形模型等的应用、基于 GIS 二次开发后的灾害评价模型等,GIS 技术已逐步地发展成熟并被广泛地应用到相关的科研领域中。

国内外 GIS 技术在滑坡灾害研究领域中的应用较成熟的地方主要体现在以下几个方面^[2]:

(1) 建立基于 GIS 的滑坡灾害信息管理系统。如 Keane^[3]、Dikau^[4]、Corbeanu^[5]、Bliss^[6]、Dai & Lee^[7]、戴福初^[8]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。陈植华等^[9]、徐振宇等^[10]、殷坤龙等^[11]基于 WebGIS 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^[12]、Gao^[13]、Lekkas^[14]、Randall^[15]、Larsen & Sanchez^[16]、Sagar^[17]、Lin & Tung^[18]、Zhou et al.^[19]、单新建等^[20]、李彦荣^[21]、殷坤龙^[23,24]、吴益平^[25]、朱良峰^[26]、张桂荣^[27]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) GIS 技术与 RS、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^[28]、Corbeanu^[29]、何满潮等^[30]探讨了 3S 技术结合在滑坡识别、分析、预测评价中的应用。

其中,在国外的研究中,比较具有代表性的是印度 Roorkee 大学地球科学系的 Gupta 和 Joshi(1990)用 GIS 方法对喜马拉雅山系的 Ramganga Catchment 地区进行的滑坡灾害危险性分带研究。该研究基于多源数据集,如航空相片、MSS 磁带数据、MSS 图像、假彩色合成图像及各种野外数据,包括地质、构造、地形、土地利用及滑坡分布。以上数据需要进行数字、图像等处理,然后解译绘制出专题平面图,包括地质图(岩性与构造)、滑坡分布图、土地利用图等。这些图件经数字化,把有关数据都存储在 GIS 系统中,找出与滑坡灾害评价相关的因素,如滑坡活动与岩性的关系,滑坡活动与土地利用的关系,不同斜坡类型的滑坡分布情况,滑坡分布与主要断裂带的距离关系。经过统计及经验分析,引入一个滑坡危险系数(LNRF)。LNRF 值越大,表示该地滑坡灾害发生的危险性越高,并且对 LNRF 的 3 个危险级别分别赋予 0、1、2 三个权重。考虑到滑坡的发生是多个因素综合作用的结果,故调用 GIS 的叠加分类模型(Overlay),将各因素的权重叠加,得到综合图件,图上反映的是每个地区的权重总和。根据给定标准,即可在这张图上勾绘出滑坡灾害危险性分区图^[30]。

今后,GIS 技术在区域地质灾害研究领域中的应用将主要集中在以下几个方面:①以 GIS、RS、GPS 为基础的 3S 技术的进一步发展与应用;②GIS 技术与其他各种地质调查方法的相互结合及补充,以提高地质信息提取的质量;③实现多维信息的采集、存储与管理;④基于 GIS 在数据管理上的优势,开发各种可集成于 GIS 系统的数学分析模型,如神经网络模

型、统计模型等,从而使区域地质灾害的研究方法得到更进一步的提高。

1.2.2 区域滑坡灾害空间预测研究

开展区域滑坡灾害预测预报研究的一项重要措施就是从其分布规律研究开始。而根据时空关系,区域滑坡灾害的预测预报又可分为空间预测和时间预测两大类。空间预测是通过分析滑坡产生的条件,确定出对滑坡作用最有效的因素组合,根据这些因素组合来预测区域上目前产生滑坡的可能性,圈定出可能产生滑坡的影响范围。

事实上,空间预测是时间预测预报的先决条件,在明确预测对象后,方可有目的地开展滑坡灾害的时间预测预报。因此一般而言,滑坡灾害空间和时间预测具有先后次序关系,但从减灾的角度考虑,两者又具有相对的独立性,即可以在时间预测之外进行空间预测。空间预测能够为人类活动选择稳定性较好的地段,以保障生命和财产尽可能免遭滑坡的袭击^[2]。

滑坡灾害空间预测在国外很早就得到了研究与报道(Nilsen, 1977; Sheko, 1977; Carrara, 1983; Brabb, 1984; Brand, 1988; Cross, 1988; 等)。美国、欧洲阿尔比斯山区的国家自 20 世纪 60 年代末、70 年代初就开始了区域滑坡灾害空间分布研究,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空间分布及预测问题的研究:如 60 年代末,美国西部多滑坡的加利福尼亚州的滑坡敏感性预测区划及滑坡高危险区土地使用的立法研究;70 年代法国提出的滑坡灾害危险性分区系统(ZERMOS);80 年代以后,各国普遍开始了区域滑坡稳定性分区预测问题的研究,随着对滑坡研究的不断深入,各国对采用“多因素综合预测法”进行滑坡危险性分区的研究基本达成了共识,同时在方法论上不断与非线性学科相结合,提出了合理的数学模型;从 20 世纪 90 年代开始,围绕国际减灾十年计划行动,北美及欧洲许多国家开展了滑坡灾害危险性与土地使用立法的风险评价研究;1991 年,意大利的 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;1992 年,加拿大的 Chung 和 Fabbri 等学者利用 GIS 进行了滑坡灾害分区的多因素综合分析,利用地质图、地貌图、地形坡度图和土地利用图的指标数据和本地区 1960 年以前的滑坡灾害数据,采用多元回归分析法得出了对本地区历史滑坡的发生贡献最大的影响因子,然后进一步得出了本区的滑坡灾害空间预测图。

我国对灾害的研究历史久远,但早期的灾害研究主要局限于对灾害事件和破坏损失情况的统计描述。真正开展滑坡灾害空间分布预测始于 20 世纪 70 年代末、80 年代初,在此期间由于我国相继发生了四川鸡扒子、湖北盐池河磷矿、湖北新滩镇等重大滑坡事件,三峡水库和二滩水电工程也相继开展了库区滑坡调查和库岸滑坡的预测工作,从而推动了我国滑坡灾害空间预测的研究工作。杨顺安、殷坤龙等^[31,32]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^[33,34]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;晏同珍、殷坤龙等^[35~39]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,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;张梁等^[40]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;张桂荣等^[2]运用半定量的袭扰系数和滑坡易发程度指标以及定量的信息量模型对浙江省永嘉县滑坡灾害危险性进行了评价,并通过区划图的比较,分析了滑坡的形成和各影响因素的关系;丛威青等^[41]通过对地质灾害危险性评价常用模型进行分析,综合各种模型,建立了完整的定性—定量—非线性关联复合评价模型,并应用该模型对三峡库区和辽宁省鞍山市进行了滑坡灾害空间区划,取得了较好的效果^[2]。

总的来说,滑坡灾害空间预测经历了从定性—半定量预测到定量预测方向的发展。目前滑坡的空间预测使用较多的方法主要有稳定系数预测法、信息模型预测法、统计模型预测法、专家系统预测法、神经网络预测法、非线性模型预测法和因子叠加分析预测法等。

1.2.3 人工智能的应用研究

滑坡预报的智能化方法研究还处于起步阶段,发展空间及潜力很大。近年来,工程学科中的智能化浪潮一浪高过一浪,其中,又以遗传算法、模糊逻辑和神经网络为代表的计算智能科学理论在工程学科的应用中独树一帜,目前正在逐步引入到滑坡预报的研究中,其在滑坡预报方面的应用也将会对该研究领域作出创新性贡献。在本书中则选取了人工神经网络(ANN)作为智能化的研究工具。

人工神经网络(Artificial Neural Network,简称 ANN)是 20 世纪 40 年代提出、80 年代复兴的一门交叉学科。该项技术以生物大脑的结构和功能为基础,以网络结点模仿大脑的神经细胞、网络连接权模仿大脑的激励电平、简单的数学方法完成复杂的智能分析,能有效地处理问题的非线性、模糊性和不确定性关系。人工神经网络技术以其大规模并行处理、分布式存储、自适应性、容错性等优点吸引了众多领域科学家的广泛关注,被广泛地应用于生物、电子、计算机、数学和物理等众多领域。

迄今为止,人类提出了几十种甚至上百种不同类别的人工神经网络模型,这些人工神经网络模型在不同的条件下使用,显示其独特的性能。在土木工程中应用较多的几类人工神经网络模型是:单层感知器模型、BP 网络模型、径向基函数模型、样条函数模型、Elman 模型、Hopfield 模型、自组织映射模型、自适应双向联想记忆模型、随机神经网络模型、模糊神经网络模型等^[42]。根据葛宏伟等^[43]的总结,人工神经网络如今在国内外岩土工程中的应用主要涉及以下 8 个方面。

1) 神经网络在参数识别及应力分析中的应用

常春等^[44]建立了将离散元计算与神经网络预测相结合的模式,提出了斜坡应力分析的新方法。首先应用离散元计算不同开采深度下的斜坡岩体应力,然后将计算结果形成样本集,应用神经网络学习并进行推理,再预测其他开采深度下的斜坡岩体应力。对已开挖的斜坡岩体应力的验证结果表明,该分析模型方便合理,并能进一步推广用于预测未开挖的斜坡岩体应力。

2) 神经网络在岩体变形预测中的应用

徐卫亚等^[45]提出并建立了三峡工程永久船闸高边坡变形预测的人工神经网络,并应用

BP 网络模型对其进行了分析。通过人工神经网络模型以及构筑的三峡永久船闸高边坡变形预测知识库,得到了永久船闸高边坡典型断面边坡岩体变形预测曲线。

3) 神经网络在岩体稳定性研究中的应用

卢才金等^[46]对神经网络理论中的 BP 网络算法进行综合改进,并将其运用于岩质斜坡稳定性评判,建立了评判模型。结果表明,改进的 BP 网络性能良好,所建立的模型预测精度高,有一定的实用价值。

4) 神经网络应用于确定岩体材料的本构模型

阎平凡等^[47]利用 RBF(Radial Basis Function)网络,基于具体条件下的岩石力学实验数据,对相应的岩石的本构关系进行逼近。实例表明,所建立的模型不仅对具体应力-应变关系能够很好地逼近和预测,而且逼近速度快、稳定性好。

5) 神经网络在岩石力学数值计算中的应用

神经网络-数值计算方法是神经网络理论应用到数值计算中,它的基本思想是用神经网络材料本构模型代替现有的数学材料模型并应用到数值计算中。杨忠等^[48]在数值计算中涉及到用神经网络代替显式刚度。

6) 神经网络预测岩石的整体信息

岩石力学信息存在分形自相似性,无论在空间尺寸上,还是在时间的分布上,有关研究都表明自相似性的客观存在性。所以,人们可以构造一种从局部信息预测整体信息的网络推广预测算法,以实现由容易获得的观测信息预测出岩体的整体信息。比如可以通过开挖巷道位移等信息,建立神经网络模型,再利用信息分形、尺度效应,通过岩体力学信息的分形神经网络重构,获得反映岩体力学的总体信息的大网络^[49]。

7) 神经网络在岩石工程反分析中的应用

在参数反分析中,人工神经网络作为人工智能的一个分支,能将所有控制因素作为一个整体来考虑,而不仅局限于定量因素,因此如果能够获得足够的样本,神经网络就能较好地处理诸如工程岩体抗剪强度参数问题。

8) 神经网络在地质灾害危险性区划中的应用

将 GIS 技术与人工神经网络有机结合起来进行地质灾害危险性区划,不仅利于有效地利用基础资料,方便神经网络模型的应用,更为重要的是,这种结合极大地丰富了 GIS 应用于地质灾害防治的内涵,实现了其作为单纯的空间数据管理工具到成为地质灾害防治决策支持系统核心的质的飞跃。徐佩华^[42]在地质分析的基础上对锦屏 I 级水电站枢纽区高边坡稳定性进行分区研究,在本书中构建了 15-31-7 结构的 BP 人工神经网络及 15-7 结构的概率神经网络,并用该网络对锦屏 I 级水电站枢纽区高边坡稳定性进行了预测,将其结果与工程地质分析法、极限平衡法、数值模拟法计算的结果进行比较,认为人工神经网络法计算的结果是可靠的。

当然人工神经网络在应用中也存在着一些问题:一是网络本身存在的限制与不足,例如需要较长的训练时间、不能完全训练、收敛的局部最小值等问题;二是在应用中存在的问题,例如如何取得最具代表性的学习样本、如何把握学习样本的数量以防止网络的“过拟合”现象、如何最优化网络的结构、如何确定隐含层的神经元数目,等等。

为解决以上提到的这些问题,国内外的学者们提出了各种改进的学习算法,如具有二次收敛的 Newton 法、共振梯度法、加入动量项的 BP 算法、类似“模拟退火”的具有二阶动量项

的 BP 算法、二阶 BP 算法、自适应变步长学习算法、拟 Newton 法,具有并行计算特点的 Marquardt - Levenberg 最小二乘法,还有近年热门的蚂蚁算法、遗传算法,等等^[42]。

1.2.4 人工智能与 GIS 相结合应用于灾害空间预测的研究

国外将人工智能结合 GIS 应用于地质灾害空间预测的案例较多,已形成了一套成熟的方法体系;人工智能在我国也正逐步成为地质灾害空间预测研究中的热门预测模型之一,但在实际的计算过程中还有许多问题有待于进一步的改进。

国外比较典型的研究包括 Fernández - Steeger 等^[50]基于 MTL(Multi Task Learning)原理建立了 17 - 11 - 2 框架结构的神经网络,并将之运用于阿尔卑斯山东部 Zlambach 地区,预测了该区域既有的滑坡地带和非滑坡地带,根据实地调查显示准确度达到了 89%; Lee 等^[51]利用遥感影像资料并结合野外地质调查确定了韩国 Janghung 地区的滑坡灾害资料库,之后选择了 13 个斜坡稳定性的影响因素,并利用神经网络的回馈分析确定了每个因素的权重,在神经网络的构建过程中还先后试用了 5 种不同的结构框架,最终将研究区的地质灾害危险性分为了 10 个等级,根据既有的滑坡点分布来看,预测的准确度较高; Kanungo 等^[52]选择了土地利用类型、岩性、斜坡坡脚、斜坡坡向、人类工程活动以及水系分布作为斜坡稳定性的影响因素,并利用专家打分法确定了各个因素的权重,之后基于模糊数学理论构建模糊神经网络对研究区的滑坡分布进行了研究; Ercanoglu^[53]在土耳其西黑海地区进行滑坡的空间分布研究,选择了坡度、坡向、坡形、高程、集水区域、土地覆盖类型 6 个影响因素,以现有的滑坡作为神经网络的学习样本,通过不断学习、反馈并调整网络参数,使网络的预测能力逐渐趋于稳定,最终的预测结果显示与实际的滑坡分布拟合度达到了 82.5%; Pavel 等^[54]认为利用人工地质灾害填图在很大程度上依赖于填图者的经验和技巧,不同的填图者共同完成一个地区的填图工作将会造成精度上的人为因素差别,在本书中笔者建立了 Learning Vector Quantization 型的神经网络模型,并采用高程、坡度、坡向、坡形作为影响因素对加拿大 Seymour 地区的既有滑坡灾害进行了预测,结果表明由神经网络预测的灾害部位与实际灾害分布拟合度达到了 91%; Lee 等^[55]对菲律宾 Baguio 城周边由于 1990 年地震造成的滑坡灾害分布进行了研究,基于对当地的滑坡机理研究,总结出了坡度、坡向、地形、水系距离等影响因素,同时构建 8 - 16 - 2 框架结构的反向传播 BP 神经网络,并利用该网络的反馈分析功能为各个因子设定权重,最后得出了与实际情况拟合度达 93.2% 的滑坡危险度的分区图; Gomeza 等^[56]将神经网络模型应用于预测委内瑞拉境内 Jabonosa 流域地区的浅层堆积体滑坡,选择了坡度、坡长、坡向、高程、汇水区面积、土地利用类型、断裂、构造、岩土类型 9 项作为影响因素,并利用 Matlab 提供的神经网络工具箱构建了 9 - 28 - 1 结构的网络模型,对流域内的滑坡进行了危险度分区预测,结果显示 90% 的既有滑坡都落在了预测的高危险性区域之中; Ermini 等^[57]对位于意大利北部亚平宁山区 Reno 河支流 Riomaggiore 流域的滑坡灾害空间分布进行了研究,选取了岩性、土地利用类型、坡度、地面形态、汇水区面积作为影响因素,并分别构建了 MLP(Multi Layered Perceptron)模型和 PNN(Probabilistic Neural Network)神经网络模型对灾害的分布分别进行预测,结果显示 PNN 的预测效果要明显地好于 MLP,但前提是神经网络的学习样本必须和预测地区的基本条件高度类似,从而才可以达到理想的预测精度。

从以上国外的典型研究中可以看出,国外将神经网络与 GIS 结合应用于区域滑坡灾害

的分布预测或者是滑坡灾害的危险度分区已经具备了相当的研究基础和比较完善的理论体系,预测的准确度基本上都达到了 90%。在对区域内主要滑坡灾害类型进行调查分析的基础上,一般会选取与研究区内斜坡稳定性最为相关的一些因素作为神经网络的输入层因子,例如岩性、坡度、坡高、坡向、土地利用类型等共性比较大的因子,也有如汇水面积、坡形等针对不同滑坡类型的因子,而最终神经网络的输出层因子基本上为既有滑坡点的分布或者是研究区内灾害危险性的级别划分。在神经网络的构建上,输入输出层可依照评价因子拟定,隐含层参数的确定由于至今尚无权威的理论指导,因此在制定的过程中均尝试着各自的方法体系,而指标体系的权重确定大多都利用了神经网络所具备的反馈功能予以确认。GIS 在整个研究过程中则成了建立海量数据库及属性库的得力工具;影响因子的矢量化及图层式管理、各专题图层的空间叠加分析、预测结果的图形化显示等,都是基于 GIS 强大的空间数据管理和处理功能而完成的。而在整个预测过程中如何确定最为相关的影响因子、如何构建合理的神经网络结构则成为了研究的重点以及难点。

1.2.5 滑坡灾害空间预测评价指标

滑坡灾害预测因子的选取在某种程度上可以说是预测成功与否的关键。不同层次、不同预测目的,预测指标的选取原则是不同的。

在开展滑坡灾害空间预测时,各国根据具体情况采用的评价指标不尽相同^[21];美国滑坡专家进行空间预测时主要采用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^[58];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、低三级^[59];日本对地震区的滑坡空间分布评价则采用了地震震级、坡度、降雨量 3 项指标来划分地震区的滑坡危险度^[60]。

近年来,国外的一些学者还开始定量研究单个环境因子与区域滑坡的关系^[31]:如 Lumb^[61]分析了不同类型坡积物和下伏岩性与自然滑坡的相关性;Ruxton^[62]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^[63]研究了降雨渗透与引起的浅层崩塌的关系;Collison^[64]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;Evans^[65]对高程和降雨量的关系进行了研究,得出降雨量与高程有一定的关系;Mark^[66]利用 GIS 数据库中的 1 500 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的统计相关性;Brabb^[67]以坡度为权重,计算了 2 000 多个滑坡与 12 个因子的百分比,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环境因子的关系以及区域滑坡预测模型的建立提供了良好的研究基础。

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方面的研究^[2]:殷坤龙^[68]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。谢全敏等^[69]认为岩体斜坡稳定性受多种因素影响,不同的斜坡,各影响因素的影响程度不一。为评价多种因素对斜坡稳定性的影响,提出了岩体斜坡稳定性灰色聚类空间预测方法。文中认为主