

河南省小秦岭矿区 地质灾害研究

HENANSHENG
XIAOQINLING KUANGQU
DIZHI ZAIHAI YANJIU

王现国 葛 雁 吴东民 等著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

河南省小秦岭矿区地质灾害研究

王现国 葛 雁 吴东民 强山峰
翟小洁 张平辉 周奇蒙 陈 峰 著



中国地质大学出版社

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

河南省小秦岭矿区地质灾害研究/王现国,葛雁,吴东民,强山峰,翟小洁,张平辉,周奇蒙,陈峰著. —武汉:中国地质大学出版社,2010.11

ISBN 978-7-5625-2503-5

I. ①河…

II. ①王…②葛…③吴…④强…⑤翟…⑥张…⑦周…⑧陈…

III. ①矿区-地质灾害-防治-研究-河南省

IV. ①P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 183271 号

河南省小秦岭矿区地质灾害研究

王现国 葛 雁 吴东民 强山峰 著
翟小洁 张平辉 周奇蒙 陈 峰

责任编辑:徐润英

组织稿件:李菊凤

责任校对:戴 莹

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.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:220 千字 印张:8.5

版次:2010 年 11 月第 1 版

印次:2010 年 11 月第 1 次印刷

印刷:武汉中科兴业印务有限公司

印数:1—500 册

ISBN 978-7-5625-2503-5

定价:28.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

地质灾害是地质环境质量低劣的表现,它的频频发生不仅反映了自然地质环境的脆弱性,而且也反映了人类工程活动与地质环境之间矛盾的激化。

地质灾害广泛分布于世界各地。随着人类活动规模与强度的不断增大,正在越来越深刻地干预地球表层演化的自然过程,导致地质灾害发生的频率越来越高,影响的范围也越来越大。地质灾害在历史上曾给人类带来无尽的伤痛,留下了许多不堪回首的记忆。它不仅使建筑物受到破坏,而且会破坏生态环境,造成巨大的经济损失和人员伤亡。

地质灾害的发生与我国所处的地理位置有很大的关系。我国位于大陆与海洋结合部,东濒世界最大的太平洋,西倚全球最高的青藏高原,南北跨越 50 个纬度,天气系统复杂多变。我国地处世界最强大的环太平洋构造带与特提斯构造带交汇部位,地质构造复杂,新构造活动强烈,地理生态环境多变。加之又是人口众多、社会经济和科学技术比较落后的农业大国,承灾能力较低。这些因素叠加在一起,使我国成为世界上自然灾害种类最多、活动最频繁、危害最严重的国家之一,也是世界上地质灾害危害最严重的国家之一。我国不仅灾害种类多、发生频率高、分布范围广,且有日益加重的趋势,直接影响到国家经济的发展和人民生活的各个方面。据统计,我国每年因崩塌、滑坡、泥石流、地面沉降、矿山地质灾害和土地荒漠化等灾害所造成的直接经济损失高达 840 亿元人民币,由于地质环境的恶化而引发或加重的其他自然灾害所造成的间接损失更是无法估算。

正是由于地质灾害给人类带来了巨大的损失,促使国家开始重视对地质灾害的研究与防灾减灾,无数科学家开始投身于地质灾害风险研究之中。

2003 年 11 月,国务院颁布了《地质灾害防治条例》,从 2004 年 3 月 1 日起正式实施,明确要求地质灾害的防治工作应当纳入国民经济和社会发展规划。由联合国举办的世界减灾大会于 2005 年 1 月 17~22 日在日本兵库县神户市举行,本次大会就过去 10 年世界减灾进展进行了全面的总结,并对未来 10 年世界减灾战略框架进行了部署。当前地质灾害发生的原因是多方面的,要通过多方面、多种手段才能最大限度地减轻地质灾害。现在世界各国都在尽自己最大的力量来减少地质灾害给人类带来的损失,而且也采用了很多新的方法,也取得了很多成果。但是,毕竟地质灾害是一门新兴的学科,各方面的发展还不是很完善,这就需要广大的科学工作者继续积极投身于防灾减灾工作之中。

就我国地质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,我国还没有足够的经济力量和技术力量对有潜在威胁的地质灾害点进行全面的工程治理。因此,作为地质灾害综合防治的另外一条有效途径,就是开展地质灾害区划及预防性研究,进一步圈定地质灾害危险区域和灾害高风险区域,为国土规划、减灾防灾提供可靠依据。信息量计算方法是一种统计分析方法,其在地质灾害调查区划中的应用是通过对已知的变形或破坏区域的现实情况和提供的信息,把反映各种影响区域稳定性因素的实测值转化为反映区域稳定性的信息量值,并在此基础上进行分析评价。

开展地质灾害区划研究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,是合乎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应用价值。

该课题的研究是在新一轮国土资源大调查地质灾害预警项目的基础上进行的。全国计划安排 700 个县市地质灾害调查与区划,研究区地质灾害调查与区划为河南省第一批安排进行的地质灾害预警项目。该项目为 2000 年度国土资源部部控项目。研究区位于河南省西部边陲,地处豫、陕、晋三省交界处,隶属于三门峡市,总面积 3 007.3km²,调查了 433 个行政村、2 169 个自然村。调查点共有 256 个,其中滑坡 97 处,崩塌 29 处,泥石流沟 22 条,地面塌陷 14 处,黄河塌岸 16 处,斜坡 68 处,地裂缝 10 条。作者根据地质灾害调查成果,得出急需对该区域进行地质灾害区划的结论,并通过定性与定量相结合的方法对研究区的地质灾害类型进行了分析以及用专家经验模型、模糊综合评判法及信息量模型进行了危险性区划,提出了防治建议。目的在于更好地指导研究区的地质灾害预警系统,为当地防灾减灾工作服务。

作 者

2010 年 6 月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 地质灾害的研究意义	(1)
第二节 地质灾害危险性区划研究现状	(2)
第三节 研究目标、技术路线和工作方法	(15)
第二章 自然地理与地质环境	(18)
第一节 自然地理	(18)
第二节 地层岩性	(22)
第三节 地质构造与区域稳定性	(25)
第四节 工程水文地质特征	(28)
第五节 人类工程活动	(31)
第三章 地质灾害发育特征及稳定性分析	(33)
第一节 地质灾害分布特征	(33)
第二节 地质灾害发育规律	(37)
第三节 地质灾害稳定性评价	(38)
第四节 地质灾害的影响因素	(41)
第四章 典型地质灾害分析	(46)
第一节 基岩滑坡(以大湖滑坡为例)	(46)
第二节 土质滑坡(以庙头滑坡为例)	(49)
第三节 矿山泥石流形成分析(以枣乡峪河四范沟泥石流为例)	(51)
第四节 西峪泥石流	(61)
第五节 五龙村土质斜坡	(61)
第五章 地质灾害经济损失评估	(63)
第一节 经济损失评估的原则与方法	(63)
第二节 经济损失评估及危害程度划分	(64)

第六章 地质灾害危险性区划	(74)
第一节 概 述	(74)
第二节 定性分析	(74)
第三节 专家经验模型	(80)
第四节 模糊综合评判	(82)
第五节 信息量模型	(98)
第六节 区划结果分析	(102)
第七章 地质灾害防治建议	(104)
第一节 地质灾害防治目标	(104)
第二节 地质灾害防治要求	(104)
第三节 防治分区的划分与评价	(105)
第四节 地质灾害重点防范区段的圈定	(108)
第五节 重要地质灾害隐患点的勘查监测与防治	(108)
第六节 群专结合的群测群防系统建设与运行方案	(116)
第七节 地质灾害防治管理建议	(116)
第八章 结论与建议	(117)
第一节 结论	(117)
第二节 建议	(118)
参考文献	(119)
图版	(123)

第一章 绪 论

第一节 地质灾害的研究意义

一、地质灾害的威胁

地质灾害作为一种自然现象,从地球诞生时起就一刻也没有间断、停止过,只是随着人类文明的发展,它给人类生存发展带来的灾害越来越不可忽视,人类才将其看成是一种不可不防、不可不治的灾害。一般认为,地质灾害是指由于自然的、人为的或综合的地质作用,使地质环境产生突发的或渐进的破坏,并对人类生命财产造成危害的地质作用或事件。在我国,地质灾害已经成为危害一些地区经济和社会发展的的重要因素,甚至严重影响了中国经济社会的可持续发展。地质灾害的发生,具有区域空间上的规律性和时间上的突发性特点。主要地质灾害包括滑坡、崩塌、泥石流、地面沉降、地面塌陷、岩土膨胀、砂土液化、土地冻融、沙漠化、沼泽化、土壤盐碱化以及地震、火山等。

地质灾害在历史上曾给人类带来无尽的伤痛,留下了许多不堪回首的记忆,如:1970年,秘鲁瓦斯卡兰山一起滑坡灾害造成18 000人伤亡;1963年,意大利瓦依昂水库因滑坡的涌浪而诱发的坝下游洪水造成了2 600人丧生并导致当时世界上最高的双曲拱坝报废;1980年6月湖北远安盐池河磷矿在拓掘巷道过程中引起岩体变形,使上部厚层灰岩中的顺坡节理被拉开,造成约100万 m^3 的岩体迅速崩落,摧毁了矿务局和坑口全部建筑物,致使281人死亡。1981年,我国四川盆地因暴雨而诱发大小不等的山地地质灾害共6万多处。

地质灾害造成的损失是巨大的,它不仅使建筑物受到破坏,而且会破坏生态环境,造成巨大的经济损失和人员伤亡。我国处于一个特殊的地质构造部位,是受地质灾害影响最严重的国家之一,灾种类型多、发生频率高、分布地域广、灾害损失大。据国土资源部2003年统计,近10年来我国因崩塌、滑坡和泥石流等自然地质灾害造成近万人死亡,有70多座城市和460多个县受到直接威胁,年经济损失达300多亿元。我国铁路全线分布着大中型滑坡约1 000余处。铁路全线有泥石流沟1 386条,受危害铁路3 000多千米,每年的维修和整建工程费达7 000多万元。全国有近千座水电站及数百座水库受到崩塌、滑坡和泥石流灾害的严重威胁,仅云南省已毁坏水电站达260座、水库50座。矿山采掘造成的采空塌陷所损毁的土地面积已超过3 000万亩。全国共有16个省(区、市)的46个城市(地段)或县城出现沉降问题,其中天津、上海、西安、太原、北京、大同等地比较严重,总沉降面积达到48 700 km^2 ,有的地方地面沉降速率最大可达188 mm/a 。地裂缝出现在17个省(区、市),总长超过346 km ,其中仅西安市因地裂缝危害经济损失就达数亿元。据中国地质环境公报,2006年全国共发生各类地质灾害102 804起,造成人员伤亡1 227人,其中死亡663人,失踪111人,受伤453人,造成直接经济损失43.2亿元。

二、地质灾害的研究意义

地质灾害发生的原因是多方面的,要通过多方面、多种手段才能最大限度地减轻地质灾害。现在世界各国都在尽自己最大的力量来减少地质灾害给人类带来的损失,而且也采用了很多新的方法,在这期间也取得了很多成果。但是毕竟地质灾害是一门新兴学科,各方面的发展还不是很完善,这就需要广大科学工作者积极投身于防灾减灾之中。

2003年11月,国务院颁布了《地质灾害防治条例》,从2004年3月1日起正式实施,明确要求地质灾害的防治工作应当纳入国民经济和社会发展规划。由联合国举办的世界减灾大会于2005年1月17~22日在日本兵库县神户市举行,本次大会就过去10年世界减灾进展进行了全面的总结,并对未来10年世界减灾战略框架进行了部署。

就我国地质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,我国还没有足够的经济力量和技术力量对有潜在威胁的地质灾害点进行全面的工程治理。因此,作为地质灾害综合防治的另外一条有效途径,就是开展地质灾害区划,开展预防性研究,进一步圈定地质灾害危险区域和灾害高风险区域,为国土规划、减灾防灾提供可靠依据。为揭示地质环境各要素在区域上的分布规律,按一定原则和一定等级系统,选取一定的评价指标体系,对区域进行由上而下或自下而上的逐级划分称为地质灾害区划。也即是说,地质灾害区划是在充分考虑影响地质灾害发育的诸多因素后对灾害进行逐级划分。信息量计算方法是一种统计分析方法,其在地质灾害调查区划中的应用是通过已知变形或破坏区域的现实情况和提供的信息,把反映各种影响区域稳定性因素的实测值转化为反映区域稳定性的信息量值,并在此基础上进行分析评价。

开展地质灾害区划研究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,是合乎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应用价值。

该课题的研究是在新一轮国土资源大调查地质灾害预警项目的基础上进行的。全国计划安排700个县市地质灾害调查与区划,研究区地质灾害调查与区划为河南省第一批安排进行的地质灾害预警项目。该项目为2000年度国土资源部部控项目。研究区位于河南省西部边陲,地处豫、陕、晋三省交界处,隶属于三门峡市,总面积3007.3km²,调查了433个行政村、2169个自然村。调查点256个,其中滑坡97处、崩塌29处、泥石流沟22条、地面塌陷14处、黄河塌岸16处、斜坡68处、地裂缝10条。笔者在项目工作中,根据地质灾害调查成果,认为急需对该区域进行地质灾害区划,目的在于更好地指导该地区的地质灾害预警系统,为当地防灾减灾工作服务。

第二节 地质灾害危险性区划研究现状

一、地质灾害危险性区划理论

美国、西欧国家自20世纪60年代末、70年代初就开始了以滑坡灾害为主体的地质灾害危险性区划研究。60年代末期,美国专家在多滑坡的加利福尼亚州,利用“滑坡敏感性预测方法”对该行政区的斜坡进行了危险性分区;70年代初期,法国专家提出了用ZERMOS法进行

滑坡危险性分区研究,该理论认为滑坡的空间分布不是单因素所能控制的,需要两个或两个以上的因素控制其发育,并利用两种主控因素建立了滑坡分区的数学模型,对法国局部山区进行了滑坡危险性分区研究。进入 80 年代,世界大部分国家和地区都开始了区域地质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、澳大利亚、西班牙、新西兰、印度等。日本为了减少因地震诱发的滑坡所造成的生命财产损失,采用地震、坡度以及降雨等因素对滑坡进行空间预测。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,但在方法论上不断与非线性理论相结合,提出了合理的数学模型。从 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地地质灾害危险性分区研究的基础上开展了地质灾害危险性与土地使用立法的风险评价研究,把原来单纯的地质灾害危险性研究拓展到了综合减灾效益方面的系统研究。由于 GIS 技术的空间分析、制图功能和可视化特点,GIS 技术在地质灾害区划研究方面正得到快速发展,以 GIS 软件为技术平台的地质灾害危险性、易损性和风险评价的系统研究则逐步成为本领域研究的发展方向,并有可能在不远的将来与网络技术相结合。21 世纪初期,澳大利亚专家利用 GIS 技术对滑坡风险评价作了一些尝试,虽然在实践中的应用效果不是太好,但其无疑成为未来滑坡研究的重要领域。

地质灾害危险性分区在国内外早就得到深入研究与报道(Nilsen,1977;Sheko,1977;Car-rara,1983;Brabb,1984;Brand,1988;Cross,1988;P. Aleotti,2000;Martin Cross, 1988;晏同珍、殷坤龙,1989;殷坤龙、雷明堂,2002)。地质灾害危险性分区归纳起来有两种方法:一种方法是以地质灾害分布图和各因素图的叠加、定量、半定量化确定地质灾害敏感性指标,然后对各敏感性指标进行叠加处理,高敏感性指标区代表地质灾害易发区,一般用红色标注,低敏感性指标区代表地质灾害不易发生区域,用绿色标注。另一种方法是以地质灾害影响因素与地质灾害关系的理论分析,采用打分或评级的方法赋予每个因素以权重系数,再对各权重系数进行相关数学运算,从而得到地质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预测,这种预测基于滑坡的分布规律以及滑坡的发展状况。有关预测的因素可分为四类:①基本因素,它限定了滑坡运动的条件,如降雨、人类工程活动;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衡定因素,如地质构造、地貌条件。地质灾害影响因素的选取根据比例尺的大小和区域的具体情况有所差异,但总体都要考虑三个方面的条件:成本问题、获取指标的可能性及因素间的相关关系(Martin Cross,1998)。

近几年来,伴随着我国地质灾害大调查在全国的实施,更加丰富了地质灾害形成的机理及区划理论。朱照宇等运用“灾害密度”和“灾害强度”两种指标,将广东沿海陆地划分为 9 个地质灾害一级区及其所属的 32 个二级分区,其中包括 10 个重灾区、10 个中灾区和 12 个弱灾区。张春山、张业成、马寅生选取崩滑流的发育密度、地形地貌、地质条件、气候条件、植被条件等地质灾害的基础条件及地质灾害激发条件作为危险性要素,并将各要素的概论数据进行归一化处理,使危险性指数的计算结果介于 $[0,1]$ 之间,运用灰色关联分析方法确定各因素的权重值。在此基础上,利用危险性指数建立崩滑流危险程度的数学模型,将黄河上游地区崩塌、滑坡、泥石流地质灾害划分为高危险单元 5 个,较高危险单元 7 个,中等危险单元 11 个,较低危险单元 47 个,低危险单元 46 个。张业成针对我国崩塌、滑坡、泥石流、岩溶塌陷灾害,建立

了地质灾害危险性评价模型和危险性评价分析模型,并研绘了地质灾害强度分布图和区划图。谢晓娟依据地质环境条件及诱发因素对地质灾害易发区区划的影响,在袭扰系数法的基础上,对地质环境条件及诱发因素定量化参与地质灾害易发区分区,进行了初步探讨,得出了地质环境条件及诱发因素,作为袭扰系数 R 值的一个因子,参与了地质灾害易发区评价。褚洪斌等采用层次分析法,通过对河北省太行山地区地质灾害主要影响因素的分析,以滑坡、泥石流、崩塌、水土流失等为计算样本,计算出各地质灾害影响因素对计算样本的影响权重,并通过计算机进行网络剖分、因素叠加,计算出单位面积的单灾种评价指数和综合评价指数,用以表征整个地区地质灾害的危险性。我国在地理信息系统(geographic information system,简称 GIS)的工作起步较晚,直到 20 世纪 90 年代中后期,随着高等院校与科研院所将 GIS 技术全面引入滑坡区域评价,使得 GIS 技术在地质灾害区划研究方面得到快速发展,并且运用数学方法(如统计分析法、模糊评判法、层次分析法、主成分分析法、神经网络法和因子叠加法等),以 GIS 软件为技术平台进行的地质灾害的危险性、易损性和风险评价系统研究,正逐步成为本领域研究的发展方向之一。朱良峰、刘行架、殷坤龙、张桂荣、阮沈勇、石菊松等在基于 MapGIS 软件平台基础上,采用基于信息论发展起来的信息量模型,确定致灾因子敏感系数,最后将致灾因子分区图叠加,对滑坡灾害危险性和风险性评估与分区,实现了滑坡灾害区划和 GIS 技术功能优势的结合。王铁、王慧玲运用 GIS 的空间叠置分析技术(spatialoverlay analysis),通过与专家评判和层次分析法相结合,以地质灾害危险性评价为基础,在单类地质灾害危险性区划的层次上,实现地质灾害危险性的综合区划,构建了地质灾害危险性综合评价与区划体系。除此之外,还有很多专家和研究人員利用卫星遥感技术、GIS 技术等新技术和新方法对地质灾害易发区进行了评价。GIS 应用于地质灾害区划研究,主要是先依照传统理论与方法进行评价指标体系的确定,然后采用模糊统计法、对比排序法、层次分析法或黄金分割法等数学方法,给评价指标加以量化并赋以权值。同时,利用 GIS 中的 GRID 模块对参评因子进行栅格化,形成可用于叠加分析的专题图层(如坡度图、降雨量图等),根据各因子在地质灾害发生发育中所起作用的大小,构造初始 GIS 评价模型,然后利用 GIS 的数据处理和空间叠加分析功能,将各评价因子的专题图层进行综合空间叠加分析,形成新的、综合的评价图,以及新图层中的每个评价单元的综合评价权值,最后依据层次分析法、模糊数学综合评判法等,建立适当的数学模型,实现地质灾害区划的易发性、危险性和经济损失等方面的评价及相应的分区。

在地质灾害易发性和危险性评价过程中,数学模型为定量评价创造了条件和手段。但同时我们也必须清醒地认识到,地质灾害系统的开放性、非线性和复杂性特点,它的发生、发展和演化趋势与岩石圈、生物圈、水圈、大气圈、人类圈甚至宇宙圈密不可分,在对所构成的地质灾害系统进行研究时,无论采用多么完美的数学方法和数学模型,无论形式上是否严格,各种方法无一例外都带有较大的人为性,从而导致评价结果与实际情况不能很好地吻合。造成这种现象的原因是,在地质灾害研究中缺乏综合与协调,缺乏建立在事物间具有广泛联系性规律基础上的整体思考和对解决实际问题能力的追求。而地质灾害系统是一个具有众多因素且规模巨大、多层次结构、多子系统、多重时间标度、多种控制参量和多样的作用过程,这就决定其是一个动态发展的、非线性的、开放的灾害系统,同时也是具有不确定性和社会经济性等特征的复杂系统。因此,要重视对区域地质条件的评价与分析,重视对灾害发生机理及其区域性规律的认识,重视评价指标体系建立的科学性和合理性,才能从本质上对地质灾害的形成机制和发展趋势作出更为深刻的认识和判断。同时,我们也应该意识到,地质灾害系统的复杂性、数据

的多样性和海量性等特点,单纯依靠传统手段和数学方法进行地质灾害区划研究,已经不能满足处理海量数据和生产实践的要求,应充分利用计算机技术和现代信息技术,特别是借助 GIS 技术,分析地质灾害与孕灾环境和致灾因子之间的相互作用强度,不断完善和改进易发性和危险性评价方法。应用 GIS 技术不仅可以对各种灾害及其相关信息进行管理,而且可以从不同空间和时间的尺度上分析灾害的发生与地质环境之间的关系,评价各种灾害的发生概率和可能的灾害后果。它还可以使用各种空间分析的方法,对多种不同的信息进行综合分析,寻找空间对象间的相互关系,分析和处理一定区域内分布的现象和过程。

国内外大量研究成果表明,地质灾害危险性区划可通过地质灾害危险性制图(Hazard Mapping)来实现。对于大区域的风险评估,危险性分区图的原则是“类似原则”,即类似的地质、自然环境具有类似的地质灾害问题。遵循类似原则开展地质灾害危险性区划,首先要充分、全面地调查已发生的地质灾害信息与资料,编制地质灾害分布图。地质灾害危险性的等级可以用定性也可以用定量的方式来描述,如高、中、低等定性术语,也可以用信息量值(殷坤龙, 1988, 1996; 阮沈勇、黄润秋, 2001)、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; 柳源, 2000)等来表示。

二、地质灾害危险性区划数学模型

纵观发展历程,地质灾害危险性区划经历了从定性一半定量一定量,从确定性一非确定性一概率论的过程。可以把地质灾害危险性区划方法分为四大类:定性分析法、定量分析法(又可称为数学模型法)、模型实验方法和监测分析方法。

数学模型法的预测思路是:在进行定性分析的基础上,建立预测对象的地质模型,通过合理的假设或简化,将复杂的研究对象抽象成可以求解的数学模型,进而选取合理的参数,进行预测计算,获取最后的预测结果。预测模型的建立、预测方法的选取是地质灾害危险性区划的核心过程,如图 1-1 所示。

目前预测数学模型可以分为两大类:非确定性方法和确定性方法。非确定性方法主要有模糊数学分析法、灰色理论分析法、灰色模糊综合法以及概率分析法等;确定性方法包括解析法和数值分析法。随着概率论、数理统计以及信息理论、模糊数学理论用于地质灾害预测,已形成了多种预测模型。目前常用的非确定性方法主要有以下几种。

(1)经验模型预测法(也称专家打分法)。该类模型建立在专家丰富的经验基础之上,通过专家打分等途径获得专家经验知识,运用人工智能技术建立地质灾害预测的专家系统。它把某一位或多位地质灾害预测专家的知识、工程经验、理论分析、数值分析、物理模拟、现场监测等行之有效的知识和方法有机地组织起来,建立一个地质灾害预测知识库,然后利用智能化的推理机(一个控制整个系统的计算机程序)来模拟并再现人(专家)脑的思维(推理与决策)过程,吸收其合理的知识结构,寻求优化的技术路径,同时,它又能建立计算机模型,结合相关学科不同专家的知识进行推理和决策,对所研究的对象进行预测。目前,基于符号推理与定量计算结合的问题求解方法的专家系统是经验模型预测方法的发展方向。

(2)数理统计模型。该类方法是通过对现有地质灾害及其类似不稳定现象所在地质环境条件和作用因素之间的统计规律研究,建立相关的预测模型,从而预测区域地质灾害的危险性。该类模型方法很多,如回归模型、判别分析、聚类分析方法等。适用于区域地质灾害空间预测研究,对一定地区土地利用、国土开发、城市规划具有宏观指导作用。

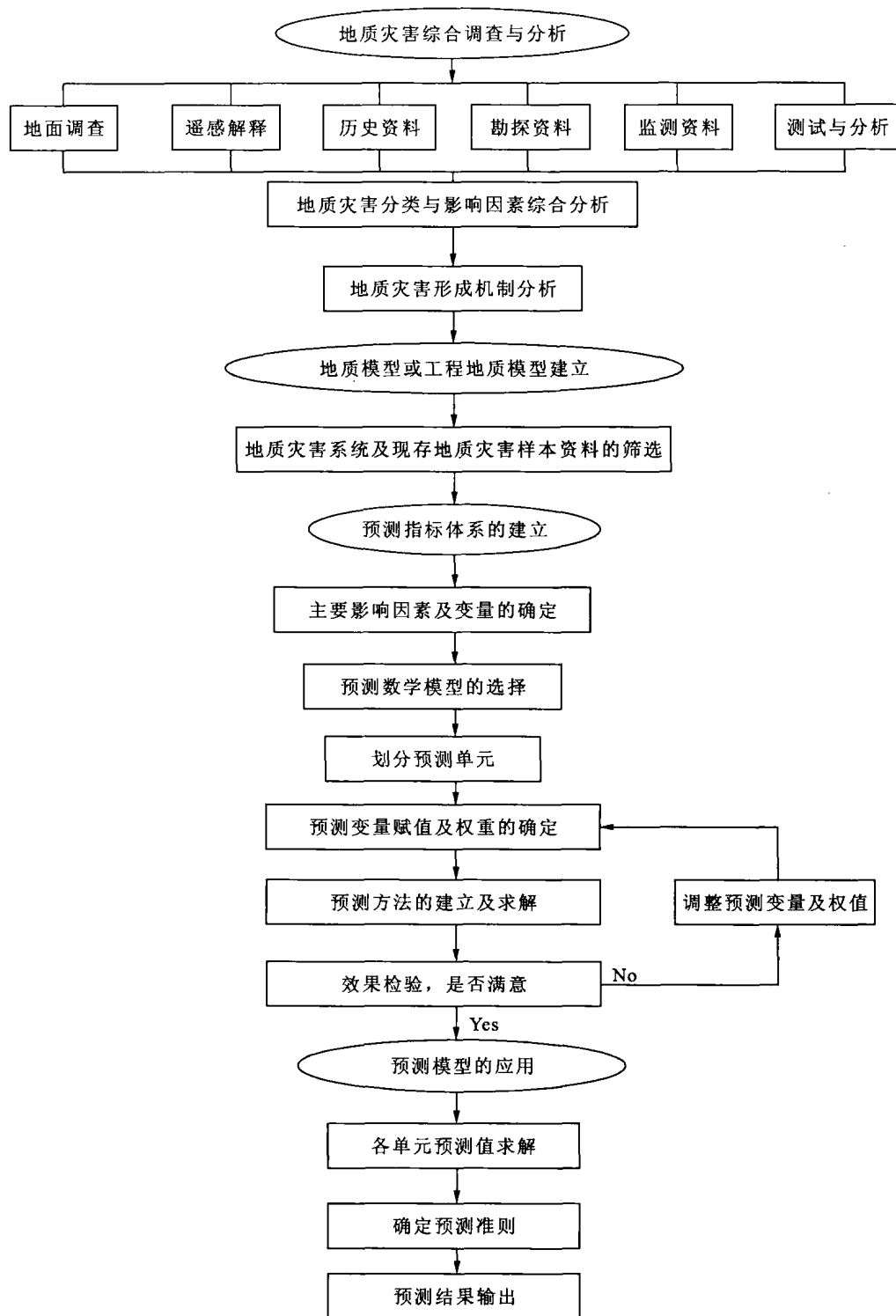


图 1-1 地质灾害危险性区划的主要流程(据张桂荣等,2006)

(3)信息模型预测法。该类模型的理论基础是信息论,用地质灾害发生过程中熵的多少来表征地质灾害事件产生的可能性,因素组合对某地质灾害事件的确定所带来的不肯定性程度的平均减少量等于该地质灾害系统熵值的变化。地质灾害预报准确与否与预测过程中获取信息的数量和质量有关。地质灾害发生的概率是用信息量来衡量的,信息量越大,表明产生地质灾害的可能性越大。该类模型预测法同统计模型一样,适用于大小比例尺区域预测。

(4)模糊判别模型。此类模型是以模糊数学理论为基础。由于地质灾害系统的复杂性,用绝对的“非此即彼”不能准确地描述地质灾害系统的客观现实,存在着“亦此亦彼”的模糊现象,不能用1真或0假二值逻辑来刻画,而需用区间 $[0,1]$ 的多值逻辑来表达。而模糊数学理论正是适用于地质灾害系统的不确定性,是用隶属函数来描述那些边界不清的过渡性问题及受多因素影响的复杂系统的非确定性问题。目前常用的方法有模糊综合评判法、模糊可靠度分析方法及其与层次性原理相结合而派生的模糊层次综合评判法。

(5)灰色模型预测法。此类模型是以灰色系统理论为基础的,是研究“小样本、贫信息不确定性”问题。在地质灾害预测中,可利用灰色关联分析评价斜坡稳定性各影响因素的影响程度,对样本量和样本的规律性无特殊要求。同样可通过灰色聚类中的灰类白化权函数聚类,在考虑多种影响因素的基础上对各研究单元危险性状态进行判定,进而完成空间预测中的危险性分区。灰色系统以灰色模型为核心的各种预测模型还为分析地质灾害预测中的各种时序数据提供了有效途径,成为目前地质灾害实时跟踪预报的常用方法之一。

(6)模式识别模型预测法。该类模型是建立在人工智能技术基础之上的,用计算机代替人类或帮助人类感知模式,是对人类感知外界功能的模拟。随着生物医学对人类大脑的初步认识,模拟人构造大脑计算机实验即人工神经网络开始出现并进入灾害预报领域,适用于有可借鉴样本区的地质灾害区域预测。

(7)非线性模型预测法。由于系统具有复杂性特点,很难用简单的线形方程表达,一批非线性预测模型迅速发展起来。如分形理论就是通过研究地质灾害系统的自相似来对地质灾害的运动规律进行研究。易顺民应用分形理论研究了区域性滑坡灾害活动的自相似性特点,发现在地质灾害活动的高潮期到来之前有明显的降维。吴中如、黄国明等依据分形理论提出了滑坡变形失稳判据以及滑坡蠕滑的相空间模型,是地质灾害时间预报的一种全新思路。自组织理论探索地质灾害复杂系统如何从无序进化到有序的自组织过程;突变理论主要从定量的角度描述非线性系统在临界失稳时的突变行为,为地质灾害时间预报提供一种新途径;分形理论则从几何的角度探讨系统内各个层次间的自相似性,应用在地质灾害过程描述及过程预报中,化复杂为简单,化定性为定量;混沌动力学探讨非线性地质灾害系统在其演化过程中的不可逆性和演化行为对初值的敏感性。

三、滑坡灾害空间预测研究现状

过去30年里,国内外多个学者开展了滑坡灾害空间危险性预测方面的研究。研究内容主要体现在两个方面。一方面是以滑坡灾害分布图和各因素图的叠加,定量、半定量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,分别用高敏感性指标和低敏感性指标代表灾害易发区和灾害不易发区。另一方面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。

在开展滑坡危险性区划时,各国根据具体情况采用的评价指标不尽相同。美国滑坡专家进行危险性区划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五个等级进行评价。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、低三级。日本对地震区的滑坡危险性评价采用了地震震级、坡度、降雨量三项指标划分地震区的滑坡危险度。

Sheko 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。Hansen 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的自身特点,而且取决于灾害危险区划的社会状况;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 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。Ragozin 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。

20 世纪 80 年代开始在国内也相继开展了大量滑坡灾害空间危险性预测模型的研究。杨顺安、殷坤龙等基于对滑坡、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、殷坤龙、柳源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。乔建平认为在滑坡危险性区划时应将相关性很强的因素进行系统归类,他将之分为三类: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、人为破坏、地震强度、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),并给出了危险性评价中主控因素、诱导因素和危害因素之间的关系。

滑坡灾害预测因子的选取在某种程度上来说是预测成功的关键。不同预测层次、不同预测目的,预测指标的选取原则是不同的。近年来,国外一些学者开始定量地研究一些单个环境因子与区域滑坡的关系。如 Lumb 分析了不同类型坡积物及下伏岩性与自然滑坡的相关性;

Ruxton 统计了风化层与滑坡的关系,得出风化对滑坡影响的重要性;Fourie 研究了降雨渗透与引起的浅层崩塌的关系;Collison 对热带地区的植被与斜坡稳定性关系进行了研究,得出植被根系的生长将使植被透水性增加,降低土壤强度;Evans 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 利用 GIS 数据库中的 1 500 个滑坡研究了浅层滑坡频度与地形的关系,结果显示陡峭地形与滑坡具有很好的统计相关性;Brabb 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因素。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。殷坤龙对重庆市崩塌、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可以做到有的放矢,选出对滑坡的发生贡献大的指标,以排除某些指标对预测结果的干扰。谢全敏、朱瑞赓认为岩体边坡稳定性受多种因素影响,不同的边坡,各影响因素的影响程度不一。为评价多种因素对边坡稳定性的影响,提出了岩体边坡稳定性灰色聚类空间预测方法。文中认为主因子的选择和确定是空间预测最关键的一环,提出了基于优势分析的主因子筛选方法。单新建、叶洪、李焯芬等利用人工神经网络(AI)及地理信息系统(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,据此最终确定研究区下伏岩性是决定滑坡稳定性的重要内在因素,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。据此采用 BP 人工神经网络对区域天然滑坡进行了危险性分区。

四、降雨与滑坡关系研究

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。钟立勋在《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。

目前,一般认为降雨诱发滑坡的机理是:在降雨时期,雨水下渗在渗透障(在多数情况下是覆盖物的基底)之上的一个饱和带内积累,导致斜坡组成物内的孔隙水压力增大。孔隙水压力增大将引起有效荷载应力增大,使斜坡组成物的剪切强度减小,从而导致滑坡发生。

国内外一些学者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。

在国外,山田刚二等通过对山阴干线小田—田仪间 403km、400km 附近的滑坡研究,结合日有效雨量、滑坡位移速率、地下水压力随时间变化曲线开展滑坡灾害预警预报工作。Guidicini 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。这些地区的一次降雨量超过 250~300mm 时,降雨与滑坡之间存在一定的对应关系。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四个危险等级。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。Rahardjo 通过对 1995 年 2 月因持续的降雨

在新加坡南洋理工大学校园发生的 20 多个浅层滑坡进行研究,并采用数值模拟技术模拟了由于不同的降雨量模式而导致孔隙水压力的变化,得出前期雨量对边坡失稳起着重要作用的结论。

在国内,曲焰通过长期观测,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。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。谢守益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,认为降雨诱发的滑坡是降雨三个基本变量(降雨量、降雨强度、降雨时间)综合作用的结果,并利用阈值分析了典型滑坡降雨诱发的概率。

殷坤龙、张桂荣、谢剑明等在浙江省开展的地质灾害预警预报研究中,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滑坡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。

国内外在滑坡与临界雨强关系的研究方面也取得了不少的成果。Brand, Au 等在详细分析了 1963—1983 年的滑坡数目与 1~30 天的累积降雨关系之后,认为香港地区的日均滑坡数量和滑坡伤亡人数与前期降雨量之间基本无关系可循,结论是香港地区的绝大多数滑坡是由短时高强度的降雨引发的。70mm/h 的降雨强度被看作是可能发生滑坡的临界雨强,若降雨量超过 100mm/d,滑坡失稳数量显著增加。Malone 等指出预警系统制定的临界降雨强度不适于大型深层滑坡(深度大于 5m),这类滑坡明显与前期降雨量有关。Pun 等人重新评定了以 Brand 结果为依据而建立的滑坡预警系统的有效性,得出结论:①75mm/h 临界降雨量不宜作为有居民的山坡地区的临界降雨量;②滑坡发生概率与 15 天前期降雨量有关,相关程度随滑坡规模而变。Murry 和 Olsen 建议 70mm/h 的降雨强度可以作为巴布亚新几内亚滑坡发生的有效标准,在 24h 降雨量超过 125mm 时滑坡大量发生;在日本累积雨量超过 150~200mm,或降雨强度超过 20~30mm/h 时,大量滑坡将发生滑动;美国 SarzBertlto 和 Alameda 在过程降水量累积超过 180~250mm 时为滑坡发生的临界值;加拿大滑坡发生的临界累积雨量值超过 250mm;巴西滑坡的暴雨强度临界值为 250~300mm。

在国内,对三峡库区滑坡研究结果认为当雨强大于 6mm/h,日降雨量大于 30mm,一次降水过程累计雨量大于 100mm,即可能使浅层堆积体出现初滑迹象。柳源通过对中国几个重要暴雨滑坡集中区的临界暴雨强度进行研究,得出四川盆地红层分布区临界暴雨强度可确定为 200mm/d,陕南则大致为 70mm/d,鄂西为 100mm/d,且前期降雨对滑坡滑动是否有明显影响,取决于滑体的岩土性质、滑坡形成机制等多种因素,不可一概而论。文宝萍等通过对陕南地区典型滑坡的数值模拟得出临界暴雨强度为 75mm/d。但需要指出的是,这一地区的暴雨滑坡与前期雨量有较为明显的关系,这一点与四川盆地的暴雨滑坡是不一样的。

综观上述研究成果,均从降雨历时、降雨量、降雨强度及降雨形式等方面进行分析,得出的成果具有特定的应用范围,一般适用于本区域或相类似的地区。另外对于不同物质组成的滑坡体,降雨过程对其影响也不同,这是因为不同的地质地貌条件有不同的渗透性和不同的排泄能力,因此不能一概而论。如在香港地区,大部分的滑体物质组成为非黏性土,渗透性很好,故滑坡和短时高强度的降雨相关性非常大,在 Brand, Au 的研究中得到了验证。在新加坡,滑体