

中国地质环境监测院

# 中国地质灾害区域预警 方法与应用

ZHONGGUO DIZHI ZAIHAI QUYUYUJING FANGFA YU YINGYONG

刘传正 刘艳辉 温铭生 唐 灿 薛群威 著



地 质 出 版 社

# 中国地质灾害区域预警 方法与应用

刘传正 刘艳辉 温铭生 著  
唐 灿 薛群威

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

本书概述了国内外地质灾害区域预警预报理论研究和应用服务发展动态,阐述了我国地质环境和地质灾害分布特点,提出了地质灾害区域预警划分为隐式统计预警、显式统计预警和动力预警原理。简单总结了采用临界降雨判据方法(隐式统计)建立的中国第一代国家级地质灾害预警系统及2003~2007年期间的应用经验。通过系统建立包括30个图层的全国地质环境信息系统、因子分析确定权重、多元统计和神经网络模型对比,对中国大陆分区建立了显式统计预警模型,研发了第二代国家级地质灾害预警系统,经过2008年汛期地质灾害区域预警预报服务检验证明效果良好。概括提出了地质灾害区域预警预报的工作程序及其基本要求。

本书可供从事地质灾害防治和防灾减灾公共管理、科学技术研究、应用服务和教学培训人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

中国地质灾害区域预警方法与应用/刘传正等著.

—北京:地质出版社,2009.12

ISBN 978-7-116-06435-5

I. ①中… II. ①刘… III. ①地质灾害—预警系统—研究—中国 IV. ①P694

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第240131号

---

责任编辑:蔡卫东

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324571(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

印 张:16.5

字 数:450千字

印 数:1—1000册

版 次:2009年12月北京第1版·第1次印刷

审 图 号:GS(2010)726号

定 价:80.00元

书 号:ISBN 978-7-116-06435-5

---

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)



## 第一作者简介



刘传正,男,1961年生,1983、1986年先后在长春地质学院(现吉林大学)获得工程地质专业学士、硕士学位,1992年在中国地质科学院获得理学博士学位,1997年1月晋升教授级高级工程师,现任中国地质环境监测院(国土资源部地质灾害应急中心)副总工程师,二级研究员。研究方向为灾害地质、工程地质与环境地质。以第一作者在国内公开发表论文100余篇,出版专著5部,合著6部。5部专著是:《环境工程地质学导论》,1995,地质出版社;《地质灾害勘查指南》,2000,地质出版社(2008年第3次印刷);《长江三峡库区地质灾害成因与评价研究》,2007,地质出版社;《重大地质灾害防治理论与实践》,2009,科学出版社;《中国地质灾害区域预警方法与应用》,2009,地质出版社。

主要学术成就有:初步建立了重大工程选址的区域地壳稳定性评价“安全岛”多级逼近与优选理论(1992)和环境工程地质学理论体系(1995);提出了长江三峡链子崖危岩体三维开裂变形破坏机制及防治工程目标函数,并设计了地下采空区防治工程和“七千方”锚固工程,跟踪开展了防治工程效果研究(1993~2006);从防灾减灾的角度创建了区域地质灾害“发育度”、“潜势度”、“危险度”和“危害度”等“四度”递进分析理论方法,并在三峡库区和四川雅安等地进行了应用(2003);从合理利用地质环境的角度初步提出了工程建设地质环境质量评价、功能区划、容量评价和地质灾害防治风险管理的学术思想(2005)。综合吸收美国旧金山和中国香港经验,创建了中国第一个地质灾害监测预警试验区——四川雅安地质灾害监测预警试验区(2001,2004);提出了地质灾害隐式统计(临界降雨量)、显式统计和动力模式区域预警原理,隐式统计和显式统计方法是2003年以来基于气象因素的全国地质灾害区域预警预报和多个省(自治区、直辖市)开展类似工作的理论依据(2003,2007);针对长江三峡复杂斜坡建立了“复合堆积体”概念,认为古川江与古峡江东西贯通形成统一的长江是一个重大地质事件,是三峡库段大型复杂斜坡形成的根本动因的科学认识(2000,2005);提出并系统研究了长江三峡“巴东复杂斜坡系统”及其“重力成因论”(2006);根据多年工作经验,提出了重大地质灾害防治方案论证设计、应急响应和群测群防的一系列技术工作原则(1995,2000,2006)。

主要学术兼职有,国家减灾委员会专家委员会专家、全国减灾救灾标准化技术委员会委员、国土资源部地质灾害应急防治专家、中国科学技术协会决策咨询专家、中国科协滑坡防治专家组成员、中国气象局灾害评估咨询专家、中国岩石力学与工程学会地面岩石工程专业委员会副主任、中国水土保持学会泥石流滑坡专业委员会副主任、中国地质学会地质灾害研究分会秘书长、《水文地质工程地质》副主编、《岩土力学》、《工程地质学报》、《中国地质灾害与防治学报》和《岩土工程界》等杂志编审委员会委员等。曾被中共中央国家机关工委、原地质矿产部、国土资源部、中国地质调查局等授予多项荣誉称号,多次获得部、省级科技成果奖,2007年获全国地质灾害防治科技进步特别贡献奖。

### 通讯地址:

100081,北京市海淀区大慧寺路20号,中国地质环境监测院(国土资源部地质灾害应急中心)  
Tel:010-62175999, Fax: 010-62173426, E-mail: liucz@mail.cigem.gov.cn

# 前 言

2003年春天,在全国应对“非典”疫情的紧张形势下,国土资源部地质环境司和中国气象局预测减灾司组织技术人员也在紧张磋商突发性地质灾害的预测预警与应急响应问题。作为一项重要举措,2003年4月7日签订了《国土资源部和中国气象局关于联合开展地质灾害气象预报预警工作协议》。《协议》确定,从2003年开始,每年汛期(5月1日~9月30日)联合开展国家级地质灾害气象预警预报工作,并在中国中央电视台(CCTV-1)和中国地质环境信息网站(<http://www.cigem.gov.cn>)上同时向全社会发布地质灾害预警信息。

在抗击“非典”疫情,直接交流会商不便的非常状态下,我们研发了第一代国家级地质灾害预警系统,满足了《协议》规定的从2003年6月1日开始通过中国中央电视台(CCTV-1)向全社会发布地质灾害预警信息的要求。

似乎是弹指之间,我们的事业已走过了6年的征程。这是适应我国经济社会防灾减灾需要的6年,也是摸索前进的6年。无疑地,6年来的国家级地质灾害预警预报工作对减轻地质灾害造成的人员伤亡和财产损失起到了积极的作用,带动了各级地方人民政府的防灾减灾工作,提高了公众社会对地质灾害的防范意识和群测群防的针对性,得到了各级政府的充分肯定和社会公众的广泛关注。同时,我们也清醒地认识到,地质灾害预警预报理论方法尚很不成熟,地质环境基础信息和业务运行能力建设更是处于初创阶段,加之我国地域广大,地质环境复杂多样,国家级地质灾害预警预报服务水平与我国经济社会防灾减灾的需求之间仍存在巨大的差距。

因此,总结6年来国家级地质灾害预警系统运行的成功经验及其局限性,适应新形势研发并应用第二代国家级地质灾害预警系统就成为我们义不容辞的责任。

## 一、第一代国家级地质灾害预警系统(CGWS1.0)

### 1. 第一代国家级地质灾害预警系统(CGWS1.0)的主要成就

1)在地质灾害预警方法研究方面,2003年创建了临界降雨量判据图( $\alpha \sim \beta$ 线)方法,与国内外同类研究对比,该方法在预警临界阈值表达和预警产品等级划分上具有独创性,是2003~2007年国家级和17个省级地质灾害气象预警工作单位开展业务的理论依据。

2)根据中国地貌格局、地质环境特征及其与降雨引发的崩塌、滑坡、泥石流地质灾害的关系,将中国陆域划分为7个预警大区、28个预警区,2004年以后细分为74个预警区,并根据崩塌、滑坡、泥石流地质灾害样本与降雨量统计关系确定了各个预警区的临界雨量判据,作为预警等级发布的依据。

3)开发了基于地理信息系统平台(MapGIS)的预警软件,实现了数据自动分析和预警等级自动生成,提高了工作效率。

4)在硬件建设方面,从一张桌子、一部台式电脑起步,发展到功能基本齐全的地质灾害预警会商中心(会商用桌椅、投影仪、高分辨率大屏幕显示器、摄像镜头、远程会商软件、图形工作站、照明系统、高智能的音频系统和摄像系统以及电子白板、自动化操控系统等),初步具备了与国家气象部门及省级预警预报业务单位开展可视化会商的条件。

5)在数据传输方面,从电子邮件到FTP方式,又到2M数据专线传输,解决了数据传输不稳定、安全有隐患的问题,可以满足有关各方便捷地上传、下载数据的需要。

6)在预警产品发布形式方面,从比较单一的图片解说,到配发崩塌、滑坡、泥石流形象动画,增强了视觉冲击效果。

7)在预警产品发布途径方面,从中国中央电视台(CCTV-1)、中国地质环境信息网站(<http://www.cigem.gov.cn>)扩展到手机短信和中央人民广播电台等多种形式播发,明显扩大了受众面。

8)在减灾应用方面,会同重点地区省级预报单位多次到典型群发地质灾害事件现场开展野外调查,指导如何应用地质灾害预警信息开展群测群防,也为检验、改进预警预报服务工作提供了重要依据。

9)在制度建设方面,编制了“地质灾害气象预警预报技术要求(试行稿)”。

## 2. 第一代国家级地质灾害预警系统(CGWS1.0)的局限性

临界降雨量判据图( $\alpha \sim \beta$ 线)方法(或称隐式统计预警方法)抓住了气象因素诱发地质灾害的关键方面,但预警精度必然受到所预警地区面积大小、突发性地质事件样本数量、地质环境复杂程度和地质环境稳定性及区域社会经济活动状况的限制,单一的临界雨量指标难于反映地质环境变化及地质灾害成因,且更新判据与提高准确性也比较受限制。

经过2003~2007年的工作实践,结合国内外相关研究的调研分析,我们逐渐认识到第一代预警系统的局限性。

1)临界降雨量判据图( $\alpha \sim \beta$ 线)方法是以降雨量作为判据的,地质环境条件是隐含的,预警产品不能直接显示预警预报区域的地质环境与人类工程经济活动状况。

2)某一个具体预警预报区的临界降雨量判据图( $\alpha \sim \beta$ 线)制作是依据地质环境条件对同样的降雨量和降雨过程具有相对一致的反映,也即假定一个预警预报区的地质基础条件应相对均一,如不能在地层、岩性和地质构造等方面(决定了地表残坡积物类型、性质及对人类活动扰动的敏感性)存在显著差异。一个典型实例是,中国香港自20世纪80年代末以来把本行政区(约1000km<sup>2</sup>)作为一个预警预报区,仅仅使用临界降雨量(24h雨量大于175mm,1h雨量大于70mm)作为预警判据,是因为该地区主要分布较为单一的火成岩残坡积物。中国陆域(约960×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>)划分为74个预警区仍不能使复杂地质单元相对独立,继续细分下去不但个人的知识力所不及,而且合理确定每个区的临界降雨判据也变得不大可能。

3)由于各省(自治区、直辖市)的研究程度、技术力量和区域地质环境条件等的巨大差异,采用临界降雨量判据图( $\alpha \sim \beta$ 线)不便于建立全国会商的统一平台,难于推行统一的技术语言,“地质灾害气象预警预报技术要求(试行稿)”也不能全面实施,尽管已有17个省级地质灾害预警预报业务单位采用了临界降雨量判据图( $\alpha \sim \beta$ 线)方法,但只是理论方法上与国家级一致,而在预警区域划分上则各行其是。

4)临界降雨量判据图( $\alpha \sim \beta$ 线)方法是采用从高到低的原则进行分区的,采用统计结果确定预警判据来判断相应区域的危险等级,而不是源于严密的计算。限于全国范围资料

的海量和人脑记忆知识的能力,无限细化分区是不可能的,如要求国家级信息系统满足 1:100 万精度,省级满足 1:25 万~1:50 万精度,市(县)级满足 1:5 万~1:10 万精度,则仅仅是国家级预警区划就远不是 5 年来使用的 74 个区,而是成千上万个预警区。显然,此种情况下逐区确定  $\alpha \sim \beta$  线判据不仅工作量巨大,而且也无法满足每个区需要的有效统计样本数。

因此,必须基于 GIS 技术整合海量数据,采用从低到高的区划原则,结合数据精度选用合理单元,筛选适用的数学模型进行集成计算,最后采用图斑合并方法形成预警产品。

## 二、第二代国家级地质灾害预警系统(CGWS2.0)研发与应用

2006 年底,在国土资源部地质环境司和中国地质调查局的支持下,国家国土资源大调查计划中设立了“全国地质灾害气象预报预警技术方法研究”项目。实施这项研究也是具体贯彻落实《地质灾害防治条例》、《“十一五”全国地质灾害防治规划》、《国家突发地质灾害应急预案》和国务院、国土资源部及中国地质调查局有关领导多次批示的一项重要举措。

经过 2007 年的紧张工作,我们调研了国内外地质灾害区域预警预报现状,总结了 2003 年以来我国地质灾害区域预警预报工作经验,研发完成了基于显式统计方法的第二代国家级地质灾害预警系统,初步满足了 2008 年国家级地质灾害预警预报升级换代应用服务的要求。

2008 年汛期(2008 年 5 月 1 日~9 月 30 日)应用检验第二代国家级地质灾害预警系统(CGWS2.0),在中国中央电视台(CCTV-1)共发布预警信息 94 次。另外,结合“5.12”汶川地震区和东南沿海台风影响区的实际需要,10 月、11 月采取了即时发布的灵活服务。

### 1. 基本认识与研发目标

2003 年以来的实践证明,地质灾害问题是复杂的,预警预报工作难度是较大的,但预警工作取得显著成效是肯定的,尤其是在提高社会减灾意识,推动政府减灾管理工作方面。由于我国尚处于基础工程大规模建设的高峰时期,农业社会向工业化、信息化社会的转型也在初级阶段,因此,在今后相当长一段时期内,坚持并不断改进预警预报工作是十分必要的。

总结分析国内外研究进展,特别是中国香港(Brand et al., 1984)、美国(Keefer et al., 1987)、日本(Fukuzono, 1985)、巴西(Neiva, 1998)、委内瑞拉(Wieczorek et al., 2001)和中国大陆(刘传正等, 2003, 2004)等国家或地区的预警服务经验,我们发现,仅仅基于临界降雨量的预警方法(第一代国家级地质灾害预警系统)是有局限的,主要是无法显示和分析预警目标区的地质环境要素和危害对象。为了提高预警系统对区域地质环境和社会经济状况的反映能力,研发并推广基于地质环境要素组合与激发因素相耦合的预警系统(第二代国家级地质灾害预警系统)是必要的,也是满足不同尺度或不同层面减灾服务的客观需求。

第二代国家级地质灾害预警系统(CGWS2.0)研发目标是:

- 1) 探索新的预警预报方法;
- 2) 解决地质环境要素隐含问题;
- 3) 提高预警预报空间尺度或走向服务精细化;
- 4) 建立国家级统一语言的预报与会商平台。

### 2. 第二代国家级地质灾害预警系统(CGWS2.0)主要特色

1) 在学术思想上立足于地质灾害区域“发育度”、“潜势度”、“危险度”和“危害度”评价,计算出全国的地质灾害区域“潜势度”作为预警背景值,叠加降雨量实况和预报值参与



二次计算得出地质灾害区域预警结果,按预警等级指数( $T$ )进行单元图斑合并,再经等值化后形成具体的预警预报区即预警产品,初步实现临界过程降雨量判据(第一代系统的思想)与地质环境空间分析相耦合,故也可称地质环境要素组合模式预报方法。

2)在空间尺度上,基于1:100万精度地质信息数据,采用 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 作为计算单元,可认为全国划分为约10万个预警区,只要气象预报精度能够与之匹配,即可认为理论上可预报的最小区域是 $100\text{km}^2$ ,而第一代系统采用的地质信息精度是1:600万。

3)在技术实现上,可以查询相应预警预报区域的地质、地理、人文和人类活动背景,及时修正预警产品,通知或会商地方预警业务单位,谓之显式预警。

4)在产品生成上,预警结果源于统计数学模型运算而非临界雨量判断,预警等级的确定更加科学。

5)在升级能力上,只要提供新的数据源,如新的地质调查、土地利用、遥感监测和工程活动等数据信息,就可以进行多元数据同化,计算更新全国或某区域的地质灾害“潜势度”背景值,CGWS2.0即可升为CGWS2.1、CGWS2.2或更高版本,并逐步“傻瓜化”,以便逐级向下推广。自然,随着计算能力的提高,全国范围的地质灾害“潜势度”计算时间需要数日,二次计算生成预警产品需要数分钟的状态会很快改变,目前的计算时间可以完全满足预警服务值班的需要。

### 三、主要研究人员及其贡献

在本项目的研究过程中,项目组多位技术骨干作出了贡献。

1)刘传正负责整个研究工作,提出学术思路、技术路线和工作分工,并指导各部分工作。具体负责研发了第一代和第二代国家级地质灾害预警系统的技术框架和实现方法;指导了2003年以来的预警服务工作;提出了地质灾害区域预警原理,将地质灾害区域预警划分为隐式统计预警、显式统计预警、动力预警三大类;建立了地质灾害显式统计预警系统设计思路和工作程序;确定了地质灾害气象预警信息图层;完成了全国范围内地质环境大区划分工作;拟定了本项目的技术路线和工作进程安排;指导各个部分的研发与应用工作。

2)刘艳辉完成了国外地质灾害气象预警现状调研;完成了地质灾害气象预警信息图层(约30个)的收集、整理与编制的主要工作;将地质灾害显式统计预警方法在东南地区测试完成,验证了该方法的适用性和可行性;分区完成了全国地质灾害潜势度、预警指数计算工作;在项目负责人工作思路指导下,完成了显式统计预警的模型方法在全国范围内具体实现的工作;参加完成了全国地质灾害气象预报预警软件系统需求与测试;自2004年以来参与汛期预警服务工作,并对汛期诱发地质灾害与降雨关系进行了分析。

3)温铭生参与了第一代国家级地质灾害预警系统的研发工作,特别是负责软件研制应用工作,完成了国内地质灾害气象预警研究现状调研;参加部分图层资料的收集整理工作;自2003年以来参与汛期预警服务工作,并对典型降雨过程的地质灾害预警、预报成效进行了分析;开展了地质灾害预警效率评价工作。

4)唐灿参与了第一代系统的研发工作,负责或参加了2003年以来地质灾害气象预警预报日常工作,参加了部分图层资料的收集整理工作。

5)薛群威完成了第二代国家级地质灾害预警系统的软件需求分析、软件设计、软件编制和软件调试工作,指导了浙江省地质灾害显式统计预警系统研发。



6) 连建发基于 1:100 万地质图完成了全国大部分地层岩性图层编制工作;参加部分图层资料的收集整理工作;自 2004 年以来参与汛期预警服务工作,并对地质灾害预警效率评价方法进行了探索。

7) 李铁锋参与了第一代国家级地质灾害预警系统软件的改进工作,参加或负责了 2004 年以来地质灾害气象预警预报日常服务工作。

8) 徐晶作为国家气象中心业务团队的代表参与了 2003~2007 年的预警服务工作,负责分析了台风影响区地质灾害的分布规律。

刘传正提出整个书稿框架,并统编定稿。本书各部分的撰写人是:前言 刘传正;第 1 章 刘艳辉,温铭生,李媛;第 2 章 刘传正,徐晶,刘艳辉;第 3 章 刘传正,温铭生,唐灿,刘艳辉,连建发,李铁锋;第 4 章 刘传正;第 5 章 刘艳辉,薛群威,刘传正,唐灿,温铭生,连建发;第 6 章 刘传正,唐灿,李铁锋,刘艳辉,温铭生,连建发;第 7 章 刘传正。

#### 四、致 谢

第二代国家级地质灾害预警系统(CGWS2.0)的完成与应用,极大地得益于多个单位和专家学者的无私帮助,在此特别说明并热诚致谢!

国土资源部和中国气象局的有关领导寿嘉华、姜建军、钟自然、熊自立、柳源、李继江、李黄、阮水根、毕宝贵、王邦中等对于全国地质灾害气象预警预报事业的开创与运行起了重要作用。

丁孝忠教授提供了中国 1:100 万地质图空间数据库;张进德教授的项目组提供了全国矿山环境地质调查数据 11 万处;李媛教授和陈辉教授提供了全国 700 个县(市)地质灾害调查数据;孟晖教授提供了 1:600 万土壤侵蚀图,协助完成 1:100 万土地利用图的图层处理工作。

国家气象中心作为合作伙伴,6 年来克服了工作量大幅增加的困难,每天坚持提供实况降雨数据和次日预报雨量,他们的探索精神和工作经验多次给予我们宝贵的启发。尤其是徐晶、张淑月、薛建军、赵琳娜、李宇梅等给予了长期持续的支持与合作。

另外,我们还要感谢国家科学数据共享工程、地球系统科学共享网和地震科学共享网等共享的相关数据资料,感谢中国科学院地理科学与资源研究所提供了 1:400 万地貌图、1:100 万地理底图、1:100 万土地利用图等方面的数据资料。

再次表示特别致谢!

刘传正

2009 年 5 月 1 日

# 目 次

## 前 言

|  |         |
|--|---------|
| <b>第 1 章 地质灾害区域预警研究现状</b> .....        | ( 1 )   |
| 1.1 国内地质灾害区域预警研究现状 .....               | ( 1 )   |
| 1.2 国外地质灾害区域预警研究状况 .....               | ( 11 )  |
| 1.3 中国香港滑坡泥石流预警服务 .....                | ( 24 )  |
| 1.4 美国和日本等国地质灾害预警服务 .....              | ( 29 )  |
| <b>第 2 章 中国地质环境与地质灾害</b> .....         | ( 33 )  |
| 2.1 区域地质环境 .....                       | ( 33 )  |
| 2.2 人类工程活动 .....                       | ( 37 )  |
| 2.3 地质灾害状况 .....                       | ( 38 )  |
| 2.4 台风暴雨影响区的地质灾害 .....                 | ( 44 )  |
| <b>第 3 章 第一代国家级地质灾害预警系统</b> .....      | ( 51 )  |
| 3.1 地质灾害预警系统研发 .....                   | ( 51 )  |
| 3.2 2003 年预警工作实践 .....                 | ( 68 )  |
| 3.3 2004 年预警工作实践 .....                 | ( 69 )  |
| 3.4 2005 年预警工作实践 .....                 | ( 74 )  |
| 3.5 2006 年预警工作实践 .....                 | ( 89 )  |
| 3.6 2007 年预警工作实践 .....                 | ( 103 ) |
| 3.7 预警效率评价方法初步探讨 .....                 | ( 113 ) |
| <b>第 4 章 地质灾害区域预警原理与显式预警系统设计</b> ..... | ( 126 ) |
| 4.1 基本认识 .....                         | ( 126 ) |
| 4.2 地质灾害区域预警原理 .....                   | ( 129 ) |
| 4.3 地质灾害显式预警系统设计 .....                 | ( 133 ) |
| <b>第 5 章 第二代国家级地质灾害预警系统</b> .....      | ( 148 ) |
| 5.1 工作思路 .....                         | ( 148 ) |
| 5.2 地质灾害信息系统 .....                     | ( 148 ) |
| 5.3 中国地质灾害预警区划 .....                   | ( 156 ) |
| 5.4 中南山地丘陵区显式统计预警试运算 .....             | ( 157 ) |
| 5.5 显式统计预警模型方法 .....                   | ( 166 ) |
| 5.6 中国地质灾害分区预警模型 .....                 | ( 171 ) |
| 5.7 预警预报软件与运行检验 .....                  | ( 178 ) |

|               |  |              |
|---------------|--|--------------|
| 5.8           | 2008 年国家地质灾害气象预警服务 .....   | (185)        |
| <b>第 6 章</b>  | <b>地质灾害预警服务工作程序 .....</b>  | <b>(209)</b> |
| 6.1           | 概 述 .....  | (209)        |
| 6.2           | 汛前准备工作 .....   | (210)        |
| 6.3           | 汛期预警服务 .....   | (211)        |
| 6.4           | 信息反馈 .....   | (213)        |
| 6.5           | 野外核查 .....   | (214)        |
| 6.6           | 技术报告 .....   | (214)        |
| 6.7           | 信息系统 .....   | (215)        |
| 6.8           | 工作管理 .....   | (216)        |
| <b>第 7 章</b>  | <b>认识与设想 .....</b>   | <b>(217)</b> |
| 7.1           | 基本认识 .....   | (217)        |
| 7.2           | 基本结论 .....   | (218)        |
| 7.3           | 问题与设想 .....  | (218)        |
| 参考文献          | .....  | (220)        |
| 附表            | 中国地质灾害区域预警临界降雨量判据 .....  | (227)        |
| 附录 (Appendix) | <b>EARLY WARNING METHODS AND ITS APPLICATION FOR<br/>GEO-HAZARDS BASED ON THE WEATHER CONDITION IN<br/>CHINA .....</b> | <b>(241)</b> |

# 第 1 章 地质灾害区域预警研究现状

## 1.1 国内地质灾害区域预警研究现状

我国大陆地质灾害气象预警预报工作起步较晚,但进展很快,许多方面已接近国际先进水平。

### 1.1.1 地质灾害与地质环境的关系

地质灾害与地质环境的关系主要体现在地质灾害与坡度、坡向、岩性、构造等因子之间的紧密关系,分析同一因子不同区段(类型)对地质灾害发生的敏感性,从而确定出影响滑坡发生的地质环境条件组合。

◆ 何易平、马泽忠、谢洪等(2004)以敏感性系数( $SC$ , Sensitivity Coefficient)来定量描述不同土地利用方式对山地灾害的敏感性,以云南省昆明市东川区为例,讨论分析了不同土地类型对滑坡、崩塌和泥石流的敏感性,得出了极易引发地质灾害的土地类型。

敏感性计算模型为

$$SC_i = \ln \left( \frac{DensClas_i}{DensMap} \right) \quad (1.1)$$

式中: $SC_i$  为第  $i$  类土地利用类型的敏感性; $DensClas_i$  为某类灾害在  $i$  类土地利用类型中分布的面积比率或出现的频率; $DensMap$  为所有该类灾害总的面积比率或频率。

$SC_i$  值为正表示敏感程度,值越大,敏感性越高,该土地类型分布区域为灾害易发区; $SC_i$  值为负表示不敏感程度,值越小,越不敏感,灾害发生率越低。 $SC_i$  为零表示敏感性与区域整体水平相似,称为现势区,不能定性为灾害易发区。

◆ 兰恒星、伍法权、周成虎(2002)等应用确定性系数( $CF$ )模型分析了云南省小江流域滑坡对岩性、结构、断裂、坡度、坡向、高程、岩土工程参数等因子的敏感性。敏感性分析可以提高研究的准确度。

模型中  $PP_a$  为事件(滑坡)在数据类  $a$  中发生的条件概率,在实际滑坡应用时可以表示为代表数据类  $a$  的单元中存在的滑坡面积与单元面积的比值; $PP_s$  代表事件在整个研究区  $A$  中发生的先验概率,可以表示为整个研究区的滑坡面积与研究区面积的比值。

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} & \text{如果 } PP_a > PP_s \\ \frac{PP_s - PP_a}{PP_s(1 - PP_a)} & \text{如果 } PP_a < PP_s \end{cases} \quad (1.2)$$



敏感性分析也可以用统计方法、类比方法及定性分析,如白云峰、周德培(2003)以定性描述的方式分析了渝怀铁路沿线滑坡发育特征及其与环境的关系,得出滑坡的发育与地质构造、地层岩性、地形地貌、水文地质及气象条件等自然地质环境及人类活动等人为环境密切相关。

### 1.1.2 预警预报模型研究

预警预报模型研究主要基于滑坡灾害监测数据,结合室内模型实验而开展起来的。

◆ 殷坤龙、汪洋、唐仲华(2002)从动态分析和数值模拟两方面讨论了滑坡过程中的地下水作用机理和地下水动力场的时空分布问题,建立了二维极限平衡状态下的临界水位高度模型和描述滑坡剖面二维不稳定流动问题的动力学模型。以重庆土台镇滑坡和长江三峡库区鸡扒子滑坡为实例进行分析验证。

◆ 李先华、林珏、陈晓清等(2001)研究了降水、滑坡含水量与滑体容重、滑带土内聚力之间的定量关系来解决滑坡启动机制机理及其预测、预报,监测土体含水量,降雨入渗坡体,含水量增加,容重增加,内聚力随含水量的增加逐渐减少,当滑带土含水率增加到某临界阈值时,则滑带土内聚力趋于0。

◆ 胡明鉴、张平仓、汪稔(2001)以蒋家沟流域作为试验地点,实验前对坡体进行了整修,最终形成上宽3.7m,下宽7.4m,长达7m,坡度为42°的孤立块体。试验采取人工浇水办法,架设4个侧喷头喷水,分时段降雨,累计降雨时间92min,累计雨量94.87mm,平均雨强1mm/min。试验结果表明,坡体首先是坡度较大的一面溜滑,溜滑和崩塌的规模先由小变大,再由大逐渐变小,因为在降雨开始时,斜坡土体含水量小,土粒间黏结力较小,松散的颗粒在雨水的作用下很快流失;随着降雨的进行,土体含水量变大,土体间黏结力增大,于是溜滑和崩塌的规模减小,后期很快完成了由溜滑、崩塌、高含沙水流向泥石流转化,形成泥石流。主要得出,斜坡自身固有的特性(如岩性、坡度、结构构造等)是决定斜坡稳定性的因素,降雨前期雨量、临界雨量和滑坡发生后雨量的不同作用,降雨激发滑坡是一个复杂的综合过程,滑坡滞后于降雨。

◆ 兰恒星、周成虎、王苓涓等(2003)提出斜坡网格单元划分法,其划分方法是把数字高程模型(DEM)的地形脊线和谷线与水系相交的聚水区称为子流域单元,子流域单元被水系网格分割为斜坡单元,将斜坡单元进行网格剖分的方法称为斜坡网格单元划分法,这种剖分方法比一般剖分方法更具有聚类性。他们基于极限平衡的滑坡稳定性计算模型(滑坡推力),当滑坡处于极限平衡状态时,推出饱和因子:

$$w = r \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi} \right) / \left( 1 + \frac{\tan\theta}{\tan\varphi} \right) \quad (1.3)$$

同时,基于DEM的水文分布模型推得

$$w = \frac{q}{T} \frac{a}{\sin\theta} \quad (1.4)$$

由以上两个等式可得

$$a = r \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi} \right) \frac{T}{q} \sin\theta / \left( 1 + \frac{\tan\theta}{\tan\varphi} \right) \quad (1.5)$$

此模型有效拟合了极限平衡和水文模型,是单体和区域的有效结合,但是模型计算需要较高精度的 DEM,对小流域地区有较好的参考价值,实际研究时需考虑忽略水力传导性在滑坡体的深度方向上的变化等。

基于监测数据的地质灾害预警工作,很多学者做了研究,主要研究方法是监测土体的含水量变化、降雨量、水体的渗透压力以及变形位移等内容。这类研究主要强调的是滑坡灾害位移的机理研究,对地下水对滑坡的作用机理进行分析,通过监测数据进行降雨-渗流-斜坡变形的耦合规律研究,从而找出适合监测坡体的预警预报方法。这类研究可以逐步趋向精确预报,即在某一时刻预测滑坡体的稳定性,这类分析主要针对单点滑坡预报比较适用,未来的某个时间,我国的地质灾害预报会达到这一目标,但是由于这种研究需要投入大量经费,在区域上推广很难实现。

### 1.1.3 预警预报统计学模型

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在空间分布、时间上的对应关系,建立滑坡灾害的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。强调的是滑坡灾害受外界触发因素影响的统计学研究。

◆ 谢守益、张学年、许兵(1995)对三峡库区鸡扒子滑坡、黄腊石滑坡、新滩滑坡的激发降雨量进行了统计学研究,认为滑坡发生(复活)是在一年中最大日降雨、最大一次连续降雨、最长一次连续降雨、最强一次连续降雨或最大两次组合降雨过程。

◆ 邢建民(1999)对堆积层滑坡与降雨关系作了简要分析,主要分析了发生时的降雨量大小及降雨对滑坡的作用机制,如激发作用、增压作用等。

◆ 柳源(1998)分析了四川、陕南等地区的临界暴雨强度,主要是从几次暴雨引发滑坡的雨量进行分析得出结论。同时分析了滑坡的临界暴雨强度与一个地区的滑坡土体结构、滑坡类型、规模、植被及当地常年降水量大小等因素有关。

◆ 林孝松、黄玲娟、郭跃(2001,2002)从暴雨频次、降雨的周期变化、降雨历时、降雨量以及雨型等方面研究了滑坡发生与降雨的耦合关系,得出滑坡发生与暴雨频次具有很好的一致性,滑坡发生与降雨之间有一定的滞后性,滑坡发生与不同雨型间存在明显的差异性,滑坡的规模和类型与降雨量的大小有明显的正相关性。

◆ 钟荫乾(1998)认为降雨是滑坡活动最重要的诱发因素,分析了降雨型滑坡的时空分布规律、滑坡变形发展过程与降雨特征值的关系,初步总结了以往滑坡预报的经验教训。以三峡库区滑坡发生的实例,分析了滑坡发生时前期降雨特征及滑坡的地质条件,提出了滑坡的预报需要加强监测工作。主要从单体滑坡预报进行了分析研究。

◆ 张玲、黄敬峰、王深法(2003)提出了年均降雨量的推算,给出推算模型  $R = R(\lambda, \Psi, \alpha, \beta, h, g)$ 。 $\lambda, \Psi$  表示经纬度; $\alpha, \beta$  表示坡度、坡向; $h, g$  代表高程和地形。但由于资料难以获取,仅选取平均高程建立方程: $R = 1654.157 + 0.431h$ 。对每月的暴雨日数、平均降雨量和滑坡日数进行分析,对滑坡与降雨因子[月降雨量、一日最大降雨量、大于 0.1(和 25, 50, 100, 150)mm 的降雨日数、最长连续降雨天数、最长连续降雨量、最大连续降雨量]进行了回归分析,得出滑坡与大于 50mm 和大于 100mm 降雨天数成显著正相关。对滑坡的降雨触发条件进行了分析,主要分析方法是对现有暴雨滑坡、久雨滑坡及暴雨、久雨共同作用的滑坡,

研究其发生与降雨关系后得出日降雨量大于 50mm 或前 10d 累计达到 100mm 时可以发生滑坡。

◆ 郑明新、王全才(1997)对宝成铁路沿线滑坡与降雨关系进行分析,结果表明滑坡发育与降水量及日降水强度的组合关系密切相关。据此他们采用降水不均匀系数  $Rd$ :即采用各地区日平均最大降水强度与年平均降水量之比值来探讨与滑坡发育的关系,得出宝成铁路沿线滑坡与  $Rd$  的映射关系,结果表明从北而南,滑坡发育对降水的敏感程度不断增强,根据  $Rd$  的映射关系并结合各区段多年平均降水量可得出各段滑坡大量激发的临界降雨值。

◆ 姚学祥、徐晶、薛建军(2005)对由降雨引起的滑坡、泥石流等地质灾害进行了统计分型,把降雨引发的地质灾害大概分为当日大降雨型、持续降雨型和前期降雨型 3 种类型。首先在预警区进行分区,然后在各分区范围内选取当日降雨量、前一日降雨量、降雨持续天数、累计雨量、前 14d 有效雨量等 5 个因子,选取概率为 10%、25%、50%、75% 和 95% 定义为 1~5 级预报的临界概率,与这些概率对应的因子取值作为地质灾害发生该概率时的临界降雨量值。

◆ 朱平一、程尊兰、汪阳春(2000)对泥石流的影响因子:面积方量因子、岩石类型因子、区域构造因子、流域构造因子、补给形式因子、补给距离因子、区域气候因子、流域面积因子、沟床比降因子、平均坡度因子、流域形态因子、植被覆盖因子进行综合值的分析计算,因子从 1~10 进行取值,给定权重,按  $K = \sum K_i$  计算综合值。根据综合值  $K$  反算泥石流的激发雨量。

◆ 张珍、李世海、马力(2005)对重庆地区 577 个滑坡与降雨的关系进行了分析,主要分析了滑坡与当日降雨量、发生前的每日降雨量、暴雨、距离滑坡发生的最近一次降雨的时间、连续降雨天数、发生前 10d 内有降雨的天数的关系,认为滑坡主要集中在雨季;滑坡的活动强度与雨量的大小成正比;滑坡与滑坡发生前 4d 的降雨有着密切的关系;如果连续 3d 有降雨,而且在这 3d 的前后 5d 内又有 1,2 次的降雨,那么发生滑坡的可能性相对来说会很大;一两次的暴雨就可以诱发一次滑坡,暴雨当天发生滑坡的可能性更大。连续的 2 次暴雨结束的当天发生滑坡的可能性很大,其次是中间间隔 7d 的 2 次暴雨,在第 2 次暴雨结束的当天也非常有可能发生滑坡。

以上研究者对引发地质灾害的降雨情况进行了详细分析,考虑到降雨因子主要有当日降雨量、最大日雨量、最大连续降雨量、月降雨量、大雨(暴雨、大暴雨)降雨日数、最长连续降雨天数、最长连续降雨量、日平均最大降水强度、年平均降水量、一年中最大日降雨、最强一次连续降雨、最大两次组合降雨过程等,在其分析的过程中多采用了简单的统计分析方法,目前考虑这些因子可以满足区域地质灾害预报精度,但是研究者对地质灾害与地质环境和降雨特征的联合考虑较少。

#### 1.1.4 基于前期有效降雨量的精确统计研究

◆ 王仁乔、周月华、王丽等(2005)根据区域地质环境条件进行分区,将湖北省分成 3 个区,统计样本 120 个,在 3 个区中分别为 9,80,31 个,根据 120 个灾害点的降雨情况,按  $\min(R_0) = R(\text{当日}) + R(\text{前 1d}) + R(\text{前 2d}) + R_0$  的公式进行计算,其中,  $R_0$  指每次个例的临

界雨量,取所有个例中临界雨量最小值作为区域临界雨量  $R$  (当日)代表当日降雨量; $R$  (前 1d)代表前 1d 降雨量; $R$  (前 2d)代表前 2d 降雨量; $R_e$ 表示滑坡发生前第 3d 至第 18d 有效雨量。其经验公式:

$$R_e = \sum_{k=3}^{18} \partial^{k-2} R_k \quad (1.6)$$

式中  $\partial = 0.8$ 。3 个区均计算出了最小临界降雨量。选取发生滑坡 30%、50%、70% 的概率作为可能性较大、可能性大、可能性很大临界值,计算得出每个区的临界值。

◆ 张桂荣、殷坤龙、刘礼领(2005)仍然引用有效降雨量的计算模型:

$$R_e = \sum_{k=1}^n \partial^k R_k + R_0 \quad (1.7)$$

式中, $R_0$  为当日雨量; $k = 1, 2, \dots, n$ 。将浙江省分成高易发区、中易发区、低易发区和不易发区 4 个等级,在非台风区,在当日降雨量为 50mm 和 130mm,有效降雨量为 150mm 和 225mm 时,高易发区和中易发区滑坡点密度都有明显的增加,曲线斜率明显增大,据此确定降雨预报值。

◆ 谢剑明、刘礼领、殷坤龙(2003)首先分析了滑坡与降雨量和降雨强度的相关性,分台风区和非台风区进行统计,得出台风区滑坡与 4d 降雨关系大,与 50mm 暴雨关系大,非台风区滑坡与 5d 降雨关系大,与 100mm 大暴雨相关性大。有效降雨模型为

$$R_e = \sum_{k=1}^n \partial^k R_k + R_0 \quad (1.8)$$

式中, $R_0$  为当日雨量; $k = 1, 2, \dots, n$ 。根据滑坡发生时的降雨量和有效降雨量进行统计分析,得出临界雨量。他们作出有效雨量和小型滑坡关系的曲线图,根据曲线的斜坡变化认为,当有效雨量达到 150mm 时,滑坡发生多,250mm 时突然增多,因此此雨量可作为临界降雨量阈值。

◆ 王雁林(2005)通过统计分析滑坡与降雨时间、降雨量的相关性,以及滑坡滞后时间与降雨强度的相关性分析,得出陕南地区滑坡灾害受 10d 降雨影响,通过对比分析滑坡点和当日降雨、日综合降雨量(有效降雨量,模型递减系数为 0.7)的关系曲线,取斜率明显变化的地方作为临界点,得出日雨量 50mm,综合雨量 75mm 即为滑坡的启动雨量。

以上研究方法均引用了有效降雨量模型,认为前期降雨对滑坡产生的影响是随时间的推移逐渐减少的,降雨时间离滑坡发生时间越长,由于蒸发、排水等作用,坡体的含水量会逐渐减少到正常水平,此时前期降雨对滑坡已经没有影响,一般均引用前人的研究成果,认为衰减系数为 0.7 ~ 0.8,没有对研究区的实际情况进行试验研究以找出各区不同的衰减系数。计算出有效雨量后以滑坡和有效雨量的曲线图为依据,根据斜率的变化确定临界雨量值,实际研究时还可以采用其他分析方法加以对比分析。

### 1.1.5 基于多元回归分析的地质灾害预报

◆ 李雪平、唐辉明、陈实(2005)选用 Logistic 回归模型,在 MapGIS 的支持下,选取坡度、高程、坡向、岩性坡形、距最近构造线距离为因子,划分为 10m × 10m 的网格,计算各网格单因子的回归系数,再建立综合回归方程得到概率  $P$ ,将原始数据进行回归,根据二维判别理论可



得到判据:  $Y_0 = 0.163$ 。若格网单元概率  $P > Y_0$ , 则发生滑坡, 进行预报, 否则不预报。

◆ 魏永明、谢又予(1997)将影响泥石流发生的因子分别分成5级, 坡度( $0 \sim 2^\circ, 2 \sim 8^\circ, 8 \sim 15^\circ, 15 \sim 25^\circ, 25 \sim 90^\circ$ )、植被、坡积物厚度、面积、切割度、破裂度、降雨强度、实际一次降雨量、多年平均降雨量、径流状况、土地利用状况、人口状况、设施状况等。引用多元回归分析预报模型  $Y = a_0 + a_1 \times 1 + a_2 \times 2 + \dots + a_8 \times 8$ ,  $a_i$  为待定参数,  $x_i$  为各因子等级, 将已有数据代入, 回归出系数, 根据回归出的公式, 将各因子代入计算, 得到预报等级。

◆ 李媛(2005, 2006)、杨旭东(2006)选取雅安市雨城区作为研究区, 以85个滑坡点作为研究对象, 采用滑坡发生与滑坡发生前数日降雨量的逻辑回归分析, 计算出滑坡发生与各日降雨量的相关系数, 分析滑坡发生与降雨过程的关系, 得出滑坡发生与前期4d降雨量有关。利用1d和3d雨量作为坐标轴, 做灾害点散点图, 得出1d和3d雨量的临界值表达式  $R_1 = -0.62 \times R_3 + 84.4$ 。如果降雨在曲线以外的区域, 则可能发生滑坡。在预报时首先判断降雨是否达到临界值, 若达到, 根据 Logistic 回归模型计算回归系数, 回归系数按5级(概率)进行划分, 3级以上进行预报。

◆ 李铁锋、丛威青(2006)采用 Logistic 回归模型与前期有效降雨量结合, 形成一套对降雨诱发型滑坡进行定量预测预报的方法, 即概率预报方法。并以长江三峡地区为例进行了检验, 给出了0.1, 0.5和0.9三个概率预报。

多元统计回归分析模型可以找出影响地质灾害发生的因子及其关系, 分析因子之间的相关关系, 根据相关性系数的分析结果对未来的灾害发生概率进行预报, 预报过程中及预报结果没有人为参与, 可以排除人为干扰, 但是模型对原始分析数据的敏感性较大, 原始数据的增加或者减少对分析结果的影响较大, 研究分析时应尽量选取较为准确的原始数据。

## 1.1.6 滑坡中长期预报方法探讨

许多学者研究分析了滑坡发生的过程及其影响其发生的因素, 对中长期预报理论和方法进行了探讨。

◆ 徐嘉谟(1998)提出一个滑坡的发生要具备下述3个条件: ①坡体中具有(至少)一个独立单元, 或在边坡体变形、破坏过程中先要形成这样的单元; ②具有能够保证上述单元可以取得足够滑程的位移允许条件; ③不仅在滑坡启动即时, 而且在沿某一足够滑程滑动过程中都必须满足滑动力大于抗滑力的条件。

◆ 李天斌、陈明东(1999)以斜坡变形破坏的阶段性的依据, 将滑坡预报分为4类:

- 1) 长期预报、中期预报、短期预报、临滑预报;
- 2) 预报参数监测点的选取必须以斜坡的变形破坏机制分析为依据;
- 3) 斜坡变形历时曲线大都具有突变现象, 对各类突变现象提出了处理方法;
- 4) 斜坡变形阶段判别方法除了地质分析外, 可采用累计位移数据切线角的线性拟合方程的斜率值进行定量判别。

◆ 罗先启、李海岭、葛修润(2000)根据引发黄腊石滑坡的典型降雨过程给出了设计降雨过程和入渗曲线。并对降雨条件下滑坡的非饱和非稳定渗流进行了分析。以黄腊石滑坡群石榴树包滑坡为例进行了研究。