

泥石流堆积数值模拟及泥石流 灾害风险评估方法

罗元华 陈崇希 著

地质出版社



泥石流堆积数值模拟及泥石流 灾害风险评估方法

罗元华 陈崇希 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

泥石流堆积数值模拟及灾害风险评估是当今科学研究的前沿领域。本书根据质量守恒和动量守恒原理,结合泥石流堆积特征,建立泥石流堆积的数学模型,利用现代数值计算技术,研究提出了符合实际运动特征的泥石流堆积数值模拟方法;建立了以泥石流危险性评价为基础、以易损性评价为核心、以灾害损失和防灾减灾效益评价为结果的泥石流灾害风险评估体系。

本书可供从事泥石流研究和地质灾害风险评估与防治工作的专业技术人员、管理者、大专院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

泥石流堆积数值模拟及泥石流灾害风险评估方法/罗元华,陈崇希著. -北京:地质出版社, 2000. 3

ISBN 7-116-03007-7

I. 泥… II. ①罗…②陈… III. ①泥石流-堆积-数值模拟-分析②泥石流-灾害-评估
IV. P642. 23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 56202 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:刘亚军 肖 扬 王章俊

责任校对:李 玫

*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:5.625 字数:125000

2000 年 3 月北京第 1 版·2000 年 3 月北京第一次印刷

印数:1 500 册 定价:16.00 元

ISBN 7-116-03007-7

X·14

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

序 言

近年来,我国气候正从干旱转向多雨。地壳表层活动的不断增强,特别是山区经济开发活动的进一步升级,以及不合理的工程活动、滥伐森林、破坏草场、过度垦荒等人为因素,使得泥石流的危害进一步加大,已成为贯彻“保护生态环境”基本国策和实施可持续发展战略的重要影响因素。因此,大力加强对泥石流及其灾害的研究是十分必要的。

我国对泥石流的研究始于新中国成立初期,至今全国已有 30 多个科研、勘测设计院所和高等院校及 100 多个基层单位开展了泥石流的研究和防治工作,在泥石流理论研究、区域综合考察、勘察、定位观测试验、室内模拟实验、预测预报及工程和生物措施防治等方面做了大量的工作,取得了丰硕的成果。综合来看,我国对泥石流的研究和其他主要自然灾害一样,大体经历了三个阶段:在 80 年代之前,研究的基点是“调研”,即主要是在实际调查研究的基础之上,总结规律,提出认识和防治对策;进入 90 年代,开始重视“评估”,对灾害的评价由定性向定量方向发展,包括灾后总结评估、灾时跟踪评估和灾前预评估及灾害防治效益评估,居多的是灾后总结评估;近年来,人们进一步认识到,研究灾害的根本目的是防灾减灾,最重要的是要预测人类将面对的未来灾害风险,因此,时至今日对“风险”的研究成为灾害科学研究的前沿性热门课题。

本书从研究泥石流成灾的最重要区域——泥石流堆积区的致灾条件入手,将泥石流堆积运动理论应用于云南东川市尼拉姑沟的实际,通过模拟尼拉姑沟泥石流堆积可能发生的概率、强度和活动范围,进而对可能出现的泥石流灾害进行危险性评价、易损性评价和灾害损失预评估,并对该地区泥石流灾害防治工程的防灾效益进行了评价。这一研究路线不仅适应了社会需要,而且居于灾害科学研究的前沿,有超前的实用价值。作者运用数值模拟技术进行仿真模拟,与实验研究和实证研究结合,提出的泥石流灾害风险评估系列分析方法,可操作性强,具有新的创见和推广使用价值,是我国在泥石流灾害领域进行具体灾害点(单条泥石流沟)风险评估工作的首创性成果。

泥石流灾害的形成是一个复杂的过程,其中对成灾来讲,至关重要的是泥石流堆积的速度、厚度和范围。作者在本项研究中,将泥石流在冲出沟口后的堆积运动在数学上近似描述为二维扩散流动,通过分析总结前人的相关研究成果,根据质量守恒和动量守恒原理,推导出泥石流的连续性方程和运动方程,用泥石流运动过程中的底坡高程随时间的变化量来描述泥石流的堆积作用,用运动修正系数来表征泥石流的特殊运动特性,选用的参数考虑了泥石流的性质、密度、补给量、流速、高程、坡度、重力、动水压力、沟床的剪切阻力等,并且对不同密度、不同坡度和不同补给量的计算机数值模拟结果与实验结果进行了对比分析,其拟合率达到 90% 以上;通过与实际泥石流堆积结果对比,也显示出特征一致的结果。本书的泥石流堆积数值模拟成果使泥石流堆积运动的理论更加严密,结论更符合实际,在精度、可信度

和适用性方面有新的提高,参评因子考虑之全面居同行研究的前列。

本书的另一个突出的特点是将泥石流的研究从自然属性的研究推进到与社会属性和经济属性相结合的研究阶段。作者以云南东川市尼拉姑沟为实例,在采用数值模拟确定泥石流堆积区最大流速和最大堆积厚度分布的基础上,针对不同类型受灾体的易损性,分别计算出各类受灾体的破坏损失率,通过对受灾体价值分类调查核算和运用 GIS、遥感等技术综合分析,分别预测评价了 2%、1% 和 0.5% 泥石流灾害频率下的灾害破坏损失。将理论通过实例加以验证和示范,使整个研究系统全面,有理有据,逻辑严密,符合实际。

本书的出版,丰富了泥石流的堆积运动理论,为泥石流灾害风险评估提供了一套具有很强实用性和推广价值的新技术方法,同时也将推进自然灾害风险评估科学的发展。

高庆华

1999 年 9 月

Methodological Research on Numerical Simulation and Disaster Risk Assessment of Debris Flow Deposition Fan

Luo Yuanhua Chen Chongxi

Abstract

This monograph focuses its research on the advanced areas of numerical simulation and disaster risk assessment of debris flow deposition fan. On the bases of its research achievements, a systematic methodology has been established for the assessment of disaster risk of debris flow deposition fan.

With respect to numerical simulation of debris flow deposition fan, the previous studies has been reviewed in this book. Set up the mathematics model with describing the process of two-dimensional debris flow, authors develop the continuity equation by the law of conservation of mass and establish the momentum equations by the law of conservation of momentum. The authors make good use of the advanced computer technologies, establish the finite difference equation of numerical simulation by the differential operator fission method, and write programs for computers which contact friendly with the other programs. The parameters are directly input on the keyboard. The numerical simulation process is correct and stable. The whole programs can be used commonly and be expanded easily. Comparing with the results of the laboratory experiment and the data observed in the field, the results of numerical simulation are identical. The deposition process by numerical simulation is in keeping with the law of debris flow movement.

With respect to the disaster risk assessment of debris flow deposition fan, the authors promote their main ideas by summarizing and analyzing the relevant techniques and methods for its assessment. On the bases of a research on the preconditions of debris flow deposition fan and the allocation of the disaster areas, the authors lay their foundation on the assessment of the degree of danger, regards the assessment of injured degree as the main part of his research and the assessment of disaster loss and efficiency in preventing and reducing the disaster as its research findings. Finally, some proposals for the decision maker are put forward. According to

the findings of numerical simulation and with the example of Nilagu river in Dongchuan city of Yunnan Province, the author promotes the concept of danger and injured degree and its calculating methods in assessing the degree of disaster, which can be used directly in assessing and estimating the losses on the debris flow deposition fan when a certain degree of debris flow disaster is coming.

目 录

序言

1. 绪论	(1)
1.1 泥石流灾害风险评估基本现状	(1)
1.2 泥石流堆积数值模拟进展概述	(3)
1.3 本研究的基本思路	(3)
2. 泥石流堆积数学模型的建立	(5)
2.1 泥石流的连续方程	(5)
2.1.1 一维模型连续方程的推导	(5)
2.1.2 二维模型连续方程的推导	(6)
2.1.3 泥石流的二维连续方程	(6)
2.2 泥石流动量守恒方程	(7)
2.2.1 一维模型的动量守恒方程	(7)
2.2.2 二维模型的动量守恒方程	(8)
2.3 二维泥石流堆积的控制方程	(9)
3. 泥石流堆积数学模型的数值解法	(11)
3.1 方程差分格式的建立	(11)
3.2 数值模拟的开发环境及流程	(14)
3.2.1 开发环境	(14)
3.2.2 程序流程	(16)
4. 泥石流堆积数值模拟结果分析	(17)
4.1 数值模型的确定	(17)
4.2 泥石流堆积数值模拟的验证	(18)
4.2.1 实验结果验证	(18)
4.2.2 数值模拟的实际资料验证	(21)
4.3 泥石流堆积的影响因素分析	(22)
4.3.1 坡度的影响	(23)
4.3.2 运动修正系数的影响	(24)
4.3.3 泥石流流体密度的影响	(25)
4.3.4 不同速度模型的影响	(26)
4.3.5 泥石流补给量大小的影响	(26)
4.4 泥石流堆积的动态模拟	(30)
4.4.1 理想模型的堆积过程	(30)
4.4.2 尼拉姑沟泥石流的堆积过程	(30)
5. 泥石流灾害风险评估方法体系	(31)

5.1	泥石流灾害风险评估的意义和主要任务	(31)
5.2	泥石流灾害的成灾特点及风险评估要素	(32)
5.2.1	泥石流成灾特点	(32)
5.2.2	泥石流灾害风险评估要素	(34)
5.3	泥石流灾害风险评估工作步骤	(34)
6.	泥石流灾害危险性评价	(36)
6.1	泥石流灾害危险性评价方法	(36)
6.1.1	发生概率的确定方法	(36)
6.1.2	泥石流危害范围及强度的确定方法	(37)
6.1.3	危险度值的确定	(38)
6.2	云南东川市尼拉姑沟泥石流灾害危险性评价	(39)
6.2.1	尼拉姑沟泥石流灾害概况	(39)
6.2.2	尼拉姑沟泥石流灾害危险性评价	(45)
7.	泥石流灾害易损性评价	(46)
7.1	泥石流灾害受灾体类型	(46)
7.2	泥石流灾害受灾体价值核算	(48)
7.2.1	财富性资产价值核算基本方法	(48)
7.2.2	资源性资产价值的核算	(48)
7.3	受灾体受损程度的确定	(49)
7.4	尼拉姑沟泥石流灾害易损性评价	(50)
7.4.1	受灾体价值评价	(50)
7.4.2	受灾体受损程度的确定	(53)
8.	泥石流灾害破坏损失及防治工程效益评价	(55)
8.1	泥石流灾害破坏损失评价方法	(55)
8.2	尼拉姑沟泥石流堆积区灾害经济损失评价	(56)
8.3	防治工程效益评价方法	(59)
8.4	尼拉姑沟泥石流灾害防治工程效益评价	(61)
8.4.1	尼拉姑沟泥石流灾害防治主要工程措施	(61)
8.4.2	尼拉姑沟泥石流灾害防治效益评价及有关对策建议	(61)
9.	结论	(63)
附 录	东川市深沟泥石流堆积动态模拟及工程有效性评价实例	(65)
后 记	(80)
主要参考文献	(81)

1 绪 论

泥石流是发生在山区的常见自然灾害,每年在世界各地都有大量的泥石流灾害事件发生。我国是世界上泥石流灾害最为严重的国家之一,近几十年来,平均每年造成的直接经济损失达 10 多亿元,死亡近千人^[1~3],并且,随着人类社会经济活动的不断增强,人们对自然资源的过度索取和对环境的持续破坏,使泥石流等自然灾害更趋严重。因此,必须加强泥石流灾害的研究、评估、预测预报和减灾管理,组织实施经济有效的防治工程,从而尽可能地防范灾害的发生和尽量减轻灾害损失。而且,减灾防灾工作随着人类文明进步、社会和科学发展而越来越受到人们的普遍关注和重视^[4]。

泥石流灾害同其他自然灾害一样,主要表现为自然现象,它的发生发展往往是不以人的意志为转移的。长期以来,人们从被动的抗争、经验性的抵御,到逐步运用科学理论和先进技术方法,尽可能合理地组织实施防灾减灾工作,已经积累了丰富的经验。但由于泥石流运动的客观复杂性和突发性,真正做到科学有效的防治还需要人们孜孜不倦的努力和探索,以及不断地实践、深化和提高^[5]。

为了科学合理地组织实施泥石流灾害减灾防灾工程,首要任务是对灾害发生的可能性、危险性、危害范围和程度以及破坏损失等要有一个基本的认识和评价,即灾害风险评估。只有在掌握可能造成的危害范围和灾害损失的基础上,才能做到有针对性地、合理地、经济有效地实施减灾措施。进行泥石流灾害风险评估的重要基础工作是客观科学地认识泥石流灾害的成灾过程^[6]。因此,本书重点研究泥石流堆积的数值模拟方法,探讨用该方法定量分析预测泥石流灾害的发生过程及结果,并以此为基础,研究提出泥石流灾害风险评估工作方法,结合实例应用于实际。

1.1 泥石流灾害风险评估基本现状

自然灾害风险评估是当今世界在减灾领域的热门研究领域。国际上以美国 W. J. Petak 和 A. A. Atkission 所著的《自然灾害风险评价与减灾政策》(1982)一书为代表^[7],该书系统地阐述了自然灾害风险评估的基本理论和方法,把灾害风险评估内容概括为风险辨识、风险估算和风险评价三个相互联系的组成部分。风险辨识着重于描述可能的问题对系统的负作用或影响;风险估算则着眼于定量地描述处于风险中的人口分布,阐明事件的成因、发生的概率、相应于不同强度时的后果,并将这些强度或事件的概率统计作为风险的定量结果;风险评价主要是为决策者提出建议,据此可以权衡风险的大小。

1994 年 10 月在北京召开的“'94 亚太地区沿海城市减灾国际学术讨论会”,开设了“沿海城市的灾害危险性评价”专题。1996 年 6 月在德国召开的“第八届国际防灾大会”,设

有专题“灾害危险性和不确定性评价”。1996年10月,我国在上海召开了“首次全国灾害风险评估研讨会”。我国学者马宗晋、李闵锋在1990年召开的“全国减轻自然灾害研讨会”上,首次提出了自然灾害评估、灾度等概念和评价方法^[8,9]。

在泥石流灾害研究领域,国内外学者已经做了大量的工作,无论是理论研究和野外实地调查分析评价,还是室内实验模拟以及灾害防治工程评价等都有大量的成果。国际上以日本高桥堡编著的《泥石流》(1991)一书为代表,该书系统地总结论述了泥石流的基本特征、运动机理、发生发展及堆积过程^[10]。中国科学院成都山地和环境研究所、清华大学、云南地理所等单位的有关学者做了大量的研究工作,出版了不少专著,具有较高的理论水平和丰富的现场观测研究经验^[11-12]。我国铁道、水利、交通、城建、地矿等部门的有关科研、设计和生产单位,为泥石流灾害的有效防治做了大量卓有成效的工作^[13]。纵观国内外在泥石流灾害研究领域的工作,主要是从自然科学的角度研究泥石流灾害的形成及运动特征和分布规律。近年来,有少数学者开始从灾害经济的角度做工作,他们主要侧重在泥石流危险性评价、成灾和运动特征及区域性危险区划等方面^[14],全面系统的泥石流灾害风险评估研究成果尚不多见。

国际上,日本学者足立胜治等在1977年首先开展了泥石流发生危险度的判定研究,他主要从地貌条件、泥石流形态和降雨三方面分析来判定泥石流发生率^[15];1979年,池谷浩等率先从统计学的角度,提出根据流域面积推算出泥石流冲出量,进而推算泥石流堆积长度和宽度,从而预测泥石流的危险范围^[16];1980年日本高桥堡和水山高久等开展了泥石流堆积过程和堆积范围的模型试验,开始从水力学的角度探讨这一问题^[17-19],并于1987年运用连续流基础方程首次建立了泥石流危险范围预测的数学模型^[20];1991年,石川芳治、水山高久、井户清尾采用水工模型试验和数值模拟研究了在冲积扇上泥石流的泛滥和堆积范围^[21]。

奥地利、瑞士等欧洲国家对泥石流灾害危险性评价,较早提出了采用类似于交通信号中红、黄、绿三色的特定含义,划分泥石流危险区、潜在危险区和无危险区^[22,23];加拿大O. Hungr等认为泥石流危险范围的确定应以理论做基础,而目前还没有合适的理论,因此强调凭经验,通过实地勘测来确定泥石流灾害的危险范围^[24]。

我国学者谭炳炎于1986年提出了泥石流沟严重程度的数量化综合评判方法^[25]。刘希林、唐川等在泥石流危险性分析评价方面已经做了大量的工作。1988年,刘希林首次提出了泥石流危险度的判定方法^[26];1993年,唐川、刘希林等应用泥石流二维非恒定流理论建立了危险度评价的数学模型,并初步应用于实际^[27]。我国台湾学者谢成伦、詹钱登等也做了与唐川等相类似的研究,在1996年,建立数学模型,并将数值解与实验室的模拟结果对比,取得了较好的效果^[28]。

以上泥石流灾害分析评价研究成果,大部分是从致灾条件的统计分析出发或是根据实验室模拟结果,进行预测评价,其成果虽然便于实际应用,但往往依赖于专家经验,缺乏理论依据;另一部分是从建立泥石流运动数学模型出发,运用计算机等现代技术手段,进行模拟评价,其成果具有较坚实的理论依据,无疑具有广阔的应用前景,但因泥石流运动堆积过程复杂,目前尚没有成熟的计算公式和模型,仍处于不断的探索之中。

1.2 泥石流堆积数值模拟进展概述

泥石流灾害从形成、发生发展到结束的过程，在空间分布上可划分为形成区、流通区和堆积区^[29]。在形成区，主要是研究泥石流的物质来源及启动过程，数学模型无疑是三维非恒定流，由于其复杂性，至今尚无人涉足这一领域；流通区往往是泥石流的快速运移通道，一般可用一维数学模型来描述，目前在这一领域的研究成果较多，日本、美国、中国都有一些学者做过工作；堆积区往往是泥石流成灾的主要地带，这一区域泥石流主要表现为水平方向的扩散流动，数学上可用平面二维流来近似模拟^[30]。这方面的研究以日本的学者研究较多，高桥堡等率先提出以质量和动量守恒原理为基础，建立二维非恒定流方程，采用有限差分法求解，并用于模拟水工实验的结果；石川芳治等通过水工模型实验用数值模拟研究了泥石流的堆积泛滥范围。国内学者主要以唐川、刘希林等做的工作较多，台湾学者谢成伦、詹钱登等也做了较为深入的研究，他们都是以高桥堡的数学模型为基础，从质量守恒原理和动量守恒方程推导出来的，所不同的是阻力项的确定和运动形式的简化各有不同，计算机数值模拟方法各有特色。1997年底，清华大学绍颂东在他的博士论文《流团模型在洪水与泥石流大尺度流动计算中的应用》中，运用流团模型原理和两相流理论，将数学模型简化后得出近似描述粘性泥石流堆积过程的单流体模型方程，经与实验结果对比验证后应用于实际，效果较好。

高桥堡在《Debris Flow》(1991)一书中，提出的泥石流堆积区二维数学模型的理论推导是根据质量和动量守恒原理，假定泥石流为不可压缩的连续流体，泥石流的运动具有宾汉流体的阻力特性，即运用流体连续性原理和运动方程建立数学模型。这些模型（包括唐川、谢成伦等的模型）中，一是反映泥石流侵蚀和堆积过程的参数值，有些学者未予考虑；二是对反映泥石流非纯液体性质（一相流）运动特性的参数值有不同的看法；三是关于运动方程的阻力项，一般认为，泥石流在运动过程中，当运动至某一临界坡度，动剪切力小于流体与沟床床面间的摩擦阻力时，泥石流就会停积，其停积过程除与沟床边界条件有关外，还与泥石流运动和流变类型、流体结构等密切相关。在泥石流阻力特性研究方面，有不少学者开展了研究工作，但多是经验或半经验公式，从理论上推导还处于不断探索之中。

由于描述泥石流堆积运动过程的数学模型是一组非线性双曲线方程，目前尚无解析解，只有通过计算机数值模拟，求出问题的近似解，这些研究尚处于探索阶段。目前的研究成果都未讨论或模拟泥石流堆积的动态过程，尤其是实际发生泥石流的堆积动态过程；对初始条件和边界条件的确定缺乏实际应用的论证；对泥石流运动阻力项的确定尚没有成熟的理论公式可供应用。

1.3 本研究的基本思路

本研究根据当前国内外在泥石流灾害风险评估和堆积区数值模拟领域的研究现状及存

在的主要问题，从质量守恒和动量守恒原理出发，经数学推导，研究建立了泥石流堆积过程数学模型，运用数值方法的有限差分原理，求解数学模型，运用计算机技术，结合 GIS 技术，模拟泥石流堆积的动态过程。以此结果为基础，以云南东川市区尼拉姑沟为实例，研究提出了泥石流灾害风险评估方法。即分析评价泥石流灾害的危险范围和程度，确定危险度；统计调查危险区的资产价值和住留人口，选取适当的分析方法，确定易损度；分析评估在不同条件（灾害频率）下可能造成的灾害损失，确定破坏损失强度；对比减灾防灾工程措施及其造价，进行效益分析后，提出有关决策建议。工作程序详见框图（图 1.1）。

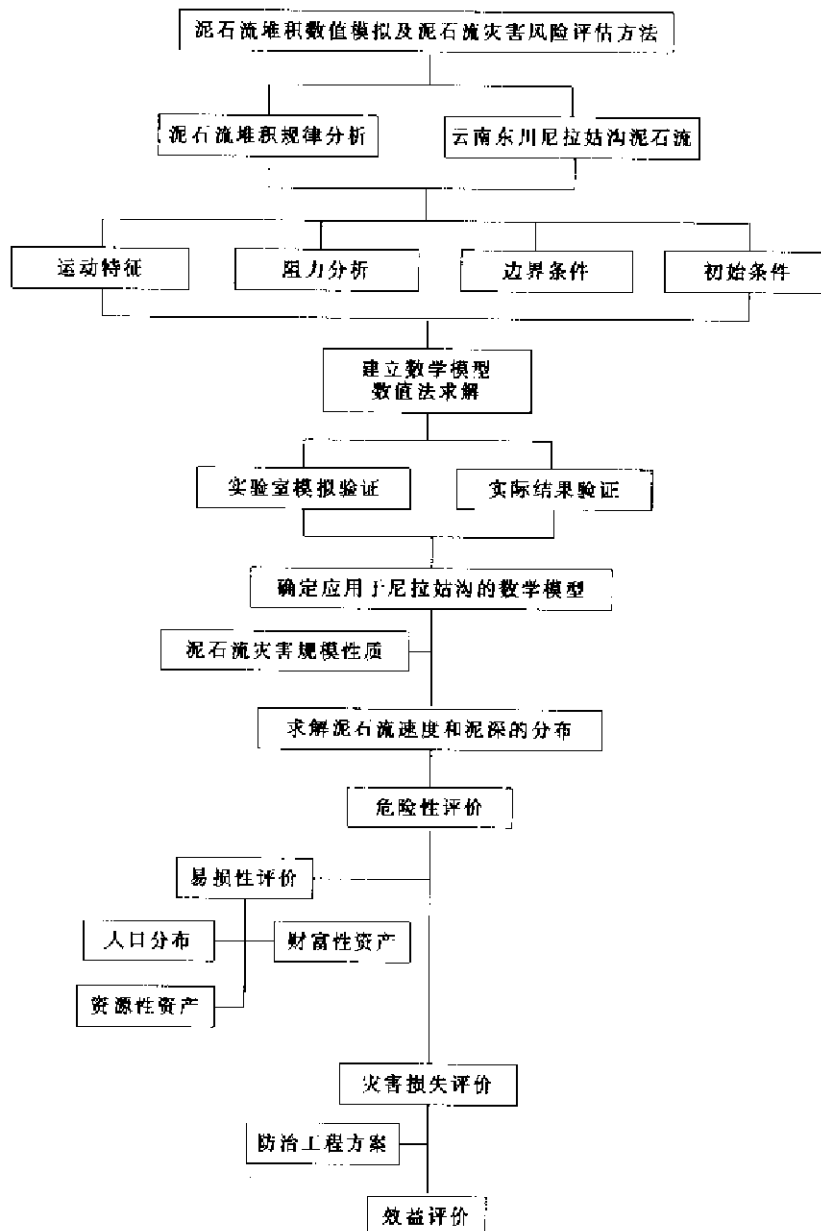


图 1.1 泥石流堆积数值模拟及泥石流灾害风险评估方法研究程序框图

2 泥石流堆积数学模型的建立

泥石流是一种产生于沟谷和坡地的饱含泥沙、岩石块体或巨砾和水的固液两相重力流体。它不同于通常的牛顿流体，泥石流呈现出非牛顿流体特性，因此需要以合理的流变模型来进行研究，建立起能客观描述泥石流的数学模型需以粘性流体动力学为基础，并结合泥石流的流变特性进行分析。至今尚不能以某种单一的流变模式来描述各类泥石流的流变特性^[31]，本书以粘性泥石流为研究对象。

粘性流体的基本方程包括：连续性方程、运动方程和能量方程。这三组方程由相应的质量守恒、动量守恒和能量守恒三定理导出。对于粘性不可压缩流体，通常只需使用连续方程和运动方程即可建立数学模型，进行数值模拟^[32~35]。

2.1 泥石流的连续方程

2.1.1 一维模型连续方程的推导

根据质量守恒定律，即流体在流动过程中质量保持不变，并假设泥石流流体与固体间无相对速度，则控制体内质量的增加量应等于单位时间的流入量减去流出量。如图 2.1 所示。

$$\text{流入量: } \left(u - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left(h - \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right);$$

$$\text{流出量: } \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left(h + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right);$$

$$\text{单元体内体积增量: } \frac{\partial h}{\partial t} \Delta x$$

式中： u ——断面平均流速；

h ——流体的厚度。

由质量守恒有：

$$\left(u - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left(h - \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left(h + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) = \frac{\partial h}{\partial t} \Delta x$$

即：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uh) = 0$$

(2-1)

(2-1) 式即为—维流体的连续方程。或写成：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} = 0$$

$q_x = uh$ ，为 x 方向单位宽度流量。

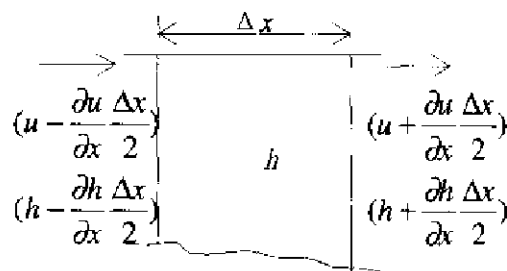


图 2.1 一维流体模型

2.1.2 二维模型连续方程的推导

对二维模型而言，应同样遵循质量守恒定律，且必须同时考虑 x 方向和 y 方向的质量守恒，在图 2.1 中，取垂直于纸面方向的宽度为 Δy ，设 y 方向流速为 v ，即成为二维泥石流问题的控制体，同理有：

$$\text{流入量} \quad \left(u - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \Delta y\right) \left(h - \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \Delta y\right) + \left(v - \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \Delta x\right) \left(h - \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \Delta x\right)$$

$$\text{流出量} \quad \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \Delta y\right) \left(h + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \Delta y\right) + \left(v + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \Delta x\right) \left(h + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \Delta x\right)$$

$$\text{单元体内体积增量} \quad \frac{\partial h}{\partial t} \Delta x \Delta y$$

由质量守恒定律有：

$$\begin{aligned} & \left(u - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \Delta y\right) \left(h - \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \Delta y\right) + \left(v - \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \Delta x\right) \left(h - \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \Delta x\right) \\ & - \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \Delta y\right) \left(h + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \Delta y\right) - \left(v + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \Delta x\right) \left(h + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \Delta x\right) = \frac{\partial h}{\partial t} \Delta x \Delta y \end{aligned}$$

将上式化简为：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0$$

即：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} + \frac{\partial (vh)}{\partial y} = 0 \quad (2-2)$$

(2-2) 式即为二维流体的连续方程。或写成：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

$q_x = uh$ ，为 x 方向单位宽度流量；

$q_y = vh$ ，为 y 方向单位宽度流量。

2.1.3 泥石流的二维连续方程

泥石流是固液混合的两相流，而不同于通常的纯液体。纯液体的流动过程一般认为可忽略堆积和侵蚀影响，而对于泥石流，流动过程中的堆积和侵蚀是客观存在的。因此从质量守恒的角度讲，不能忽略堆积（侵蚀）影响^[10]，则 (2-2) 式可表示为：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = i \quad (2-3)$$

其中： i 表示泥石流的堆积和侵蚀影响，当忽略堆积和侵蚀影响时， $i=0$ ，即为 (2-2) 式； i 是一个与固体的颗粒的直径、流体的速度、流过的坡度等有关的函数，日本高桥堡给出了不同条件下的取值公式，但较为复杂；据谢成伦、詹钱登等的研究^[28]，给出表达式为： $i = -\frac{\partial z_b}{\partial t}$ ， z_b 为河床的标高，在侵蚀或堆积作用下随时间变化，侵蚀时 i 大于 0，堆积时 i 小于 0。本研究重点考虑泥石流的堆积过程（有堆积作用）。

2.2 泥石流动量守恒方程

2.2.1 一维模型的动量守恒方程

动量方程亦称为运动方程，是由动量守恒原理推导出的。即单元体的净动量增量加上单元体的诸力之和应等于单元体动量的变化率。可表示为单元段流体的表面力加上体积力等于该单元流体的动量通量与单元段内动量的变化率。

表面力表示为 F_x ，体积力表示为 $\iiint_{\zeta,w} \rho g dz$ ，单元河段动量通量 $\oint_{\zeta,\zeta'} \rho u^2 dA$ ，单元河段动量变化率为 $\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\zeta,w} \rho u dz$ ，即：

$$\iiint_{\zeta,w} \rho g dz + F_x = \oint_{\zeta,\zeta'} \rho u^2 dA + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\zeta,w} \rho u dz \quad (2-4)$$

设 A 为单元流体的截面积， $A=Bh$ ($B=1$) 为单位宽度渠道，采用曼宁阻力公式：

$$F_{\bullet} = -\gamma A S_f dx = -\rho g h S_f dx$$

其中： ρ 为流体密度， S_f 为摩阻坡度， h 为流体厚度。

参考^[37~39]，可知合力的表达式为：

$$F_{\bullet} = -\gamma \cdot A \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) \cdot dx \quad (2-5)$$

其中： $z=h+z_0$ ， z_0 为倾斜河床高度。

由 (2-4) 和 (2-5) 式有：

$$-\gamma \cdot A \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) \cdot dx = \frac{\partial \rho Q}{\partial t} dx + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2 A) dx \quad (2-6)$$

因为 $\gamma=\rho g$ ，消去 dx ，则 (2-6) 式可写成：

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (u^2 A)}{\partial x} + g A \frac{\partial z}{\partial x} + g A S_f = 0$$

$$\text{或：} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + g A \frac{\partial (z_0+h)}{\partial x} + g A S_f = 0$$

又因为： $A=Bh$ ($B=1$) 为单位宽度渠道，令 $\frac{\partial z_0}{\partial x} = -S_0$ 则：

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + g A \frac{\partial h}{\partial x} = g A (S_0 - S_f) \quad (2-7)$$

事实上： $\frac{\partial z_0}{\partial x} = -S_0$ ， $S_0=\tan\theta$ ， θ 为渠床坡角，即 $gh \frac{\partial z_0}{\partial x} = -gh\tan\theta$ ，这是重力沿河床倾斜方向的分量，故运动方程可表示为：

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/h)}{\partial x} + gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh\tan\theta + gh S_f = 0 \quad (2-8)$$

詹钱登^[34]将一维运动方程表示为：

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{h} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh\tan\theta + \frac{\tau_b}{\rho_m} = 0 \quad (2-9)$$

比较 (2-9) 式和 (2-8) 式，当视渠道为矩形单位宽度的渠道时 $A=hB$ ($B=1$)，各分项是相对应的：

$$gA \frac{\partial h}{\partial t} \longleftrightarrow gh \frac{\partial h}{\partial t}; gAS_0 \longleftrightarrow gh \tan \theta, (S_0 = \tan \theta); gAS_1 \longleftrightarrow \frac{\tau_b}{\rho_m}$$

只是(2-9)式增加了运动修正系数 β ,并以 $\frac{\tau_b}{\rho_m}$ 作为阻力项,其中 τ_b 为底床剪应力, ρ_m 为混合体平均密度。

关于运动修正系数,学者们的观点不尽一致。詹钱登^[40~42]、谢成伦等^[28]认为:从理论上考虑运动修正系数,即考虑在垂流速分布方向上泥石流运动形态变化是合理的,并提出根据泥石流中颗粒运动的不同方式,取 $\beta=1.0\sim 1.25$ 。日本高桥堡(Tamatsu Takahashi)在其专著《Debris Flow》中也已采用并指出应考虑运动修正系数,他用符号 η 表示。但也有学者,如日本的江头进治^[43,44]等在研究中不考虑运动修正系数 β 影响。

2.2.2 二维模型的动量守恒方程

如图2.2所示的二维泥石流, x 和 y 方向的渠床坡角分别为 θ_x 和 θ_y ,在厚度为 h 的泥石流中,取 x 和 y 方向分别为 Δx , Δy 的泥石流有限单元体进行分析, x 和 y 方向的平均流速分别为 u , v 。根据动量守恒原理,即单元体净动量增量加上作用于单元体上的诸力之和应等于单元体的动量变化率。对于二维泥石流应分别考虑 x 和 y 方向的动量变化,据图2.2,对 x 方向而言,单元体进入与流出的动量为:

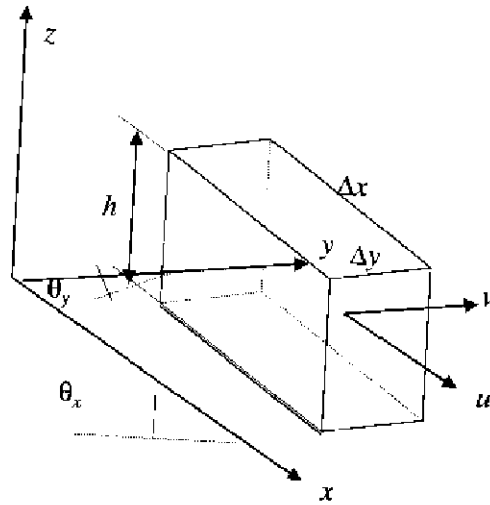


图 2.2 二维模型

$$\text{流入量: } \rho_m \left[u(uh) - \frac{\partial}{\partial x}(u^2h) \cdot \frac{\Delta x}{2} \right] \cdot \Delta y + \rho_m \left[u(vh) - \frac{\partial}{\partial y}(uvh) \cdot \frac{\Delta y}{2} \right] \cdot \Delta x$$

$$\text{流出量: } \rho_m \left[u(uh) + \frac{\partial}{\partial x}(u^2h) \cdot \frac{\Delta x}{2} \right] \cdot \Delta y + \rho_m \left[u(vh) + \frac{\partial}{\partial y}(uvh) \cdot \frac{\Delta y}{2} \right] \cdot \Delta x$$

式中: ρ_m ——泥石流密度。

$$x \text{ 方向上单元体动量变化率为: } \frac{\partial (\rho_m uh)}{\partial t} \Delta x \Delta y$$

对作用于泥石流的诸力研究,学者们的观点不尽一致。尤其是阻力项的确定各有差异。其中以高桥堡、曼宁、詹钱登和钱宁等学者的研究较为典型。参考上述学者的研究方法,对

图 2.2 所示的二维泥石流模型，应考虑其重力、动水压力和底床剪切阻力的影响。事实上，对图 2.2 的二维泥石流模型，重力分量是泥石流运动的动力而非阻力，设泥石流 x 方向的底床剪切应力为 τ_{bx} ，则作用于单元体上诸力之和可表示为：

$$F_{\Sigma} = \rho_m g h \Delta x \Delta y \sin \theta_x - \rho_m g h \Delta x \Delta y \frac{\partial h}{\partial x} \cos \theta_x - \tau_{bx} \Delta x \Delta y$$

将上述各项代入动量守恒定律的表达式，即有：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_m u h)}{\partial t} \Delta x \Delta y + \rho_m \left[u(uh) + \frac{\partial}{\partial x}(u^2 h) \cdot \frac{\Delta x}{2} \right] \cdot \Delta y + \rho_m \left[u(vh) + \frac{\partial}{\partial y}(uvh) \cdot \frac{\Delta y}{2} \right] \cdot \Delta x \\ & - \rho_m \left[u(uh) - \frac{\partial}{\partial x}(u^2 h) \cdot \frac{\Delta x}{2} \right] \cdot \Delta y - \rho_m \left[u(vh) - \frac{\partial}{\partial y}(uvh) \cdot \frac{\Delta y}{2} \right] \cdot \Delta x \\ & = \rho_m g h \Delta x \Delta y \sin \theta_x - \rho_m g h \Delta x \Delta y \frac{\partial h}{\partial x} \cos \theta_x - \tau_{bx} \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (2-10)$$

将上式化简，两边同除以 $\rho_m \Delta x \Delta y$ ，则有：

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2 h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = gh \sin \theta_x - gh \frac{\partial h}{\partial x} \cos \theta_x - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (2-11)$$

(2-11) 式即为二维泥石流 x 方向上动量守恒方程。

又因为： $q_x = uh$ ， $q_y = vh$ ，则 (2-11) 式可写成：

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \frac{\partial v q_x}{\partial y} = gh \sin \theta_x - gh \frac{\partial h}{\partial x} \cos \theta_x - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (2-12)$$

对 y 方向而言，推导方法与上述方法完全相同，设泥石流 y 方向的底床剪切应力为 τ_{by} ，同理可得：

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \frac{\partial v q_y}{\partial y} = gh \sin \theta_y - gh \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta_y - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (2-13)$$

(2-12)、(2-13) 式即为二维泥石流运动方程，如前所述，当考虑 β 运动修正系数影响时，则 (2-12)、(2-13) 式可表示为：

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \beta \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \beta \frac{\partial v q_x}{\partial y} = gh \sin \theta_x - gh \frac{\partial h}{\partial x} \cos \theta_x - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (2-14)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \beta \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \beta \frac{\partial v q_y}{\partial y} = gh \sin \theta_y - gh \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta_y - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (2-15)$$

比较唐川、谢成伦等人的研究，他们未考虑泥石流堆积时重力作用的影响。

2.3 二维泥石流堆积的控制方程

如前所述，考虑到实际泥石流的侵蚀、堆积影响，其二维连续方程如式 (2-3)，运动方程如式 (2-14)、(2-15)，即总的控制方程为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = i$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \beta \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \beta \frac{\partial v q_x}{\partial y} = gh \sin \theta_x - gh \frac{\partial h}{\partial x} \cos \theta_x - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m}$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \beta \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \beta \frac{\partial v q_x}{\partial y} = g h \sin \theta_x - g h \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta_y - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m}$$

式中： $q_x = uh$ ，—— x 方向单位宽度流量；

$q_y = vh$ ，—— y 方向单位宽度流量；

$i = -\frac{\partial z_b}{\partial x}$ ， z_b ——河床的标高，在侵蚀或堆积作用下随时间变化；

ρ_m ——泥石流混合体的平均密度， $\rho_m = c(\rho_s - \rho_f) + \rho_f$ ，其中： ρ_s 为颗粒密度， ρ_f 为流体密度， c 为体积浓度；

β ——运动修正系数；

θ_x 和 θ_y —— x 和 y 方向的渠床坡角；

τ_{bx} 、 τ_{by} ——泥石流 x 、 y 方向的底床剪切应力。

关于 τ_{bx} 、 τ_{by} 的选取，对 Bagnold 模式（适宜于描述水石性泥石流，亦称膨胀型流体）及 Bingham 模式（适宜于描述粘性泥石流）， τ_{bx} 、 τ_{by} 的表达式各异^[36]。高桥堡研究提出：

$$\tau_{bx} = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} (\rho_s - \rho_f) g h c \cdot \cos \theta_b \cdot \tan \alpha + \rho_f f_b u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2-16)$$

$$\tau_{by} = \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} (\rho_s - \rho_f) g h c \cdot \cos \theta_b \cdot \tan \alpha + \rho_f f_b v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2-17)$$

其中： θ_b 为堆积表面最大倾角， $\tan \alpha$ 为 Bagnold 常数， f_b 为滑动泥石块体与流体的摩擦系数。

詹钱登等^[36, 42, 28]采用了不同于其他学者之处在于将动量的传播分为对流过程和波动过程分别研究，他提出：

$$\tau_{bx} = \rho_m f u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2-18)$$

$$\tau_{by} = \rho_m f v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2-19)$$

其中： f 为摩擦系数，即

$$f = \frac{25}{4} \frac{a_i \rho_m \lambda^3 \sin \varphi}{cc(\rho_m - 1) + 1} \left(\frac{dd}{h} \right) \quad (2-20)$$

式中： cc ——泥石流中泥石体积比；

dd ——泥石流中主要颗粒直径；

a_i ——微调系数，其值范围为 0.042~0.24；

φ ——动摩擦角，其值范围为 17°~37°。

本研究采用 (2-18)、(2-19) 式计算 τ_{bx} 、 τ_{by} 值。

3 泥石流堆积数学模型的数值解法

描述泥石流的数学方程是一组拟线性的双曲线方程组,目前还没有确切的解析解,但通过现有的已经成熟的数值解法可以求得方程组的近似解。数值解法有许多种,包括有限元法、有限差分法、边界元法等,它们在地下水动力学研究等多方面得到广泛的应用^[45]。比较而言,有限元法需要建立庞大的刚度矩阵,对于动态变化体的求解,其单元体参量的计算即复杂又不易控制;边界元法由于要首先建立方程的基本解,然后才能求解,而找到比较好的基本解也是相当的复杂。相对上面的方法,有限差分形式上简单,而且特别适合与时间有关控制方程的迭代计算,因此,本研究采用该数值解法。

3.1 方程差分格式的建立

根据第二章的推导和讨论,本研究建立的泥石流堆积控制方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = i \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \beta \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \beta \frac{\partial v q_x}{\partial y} = gh \sin \theta_x - gh \frac{\partial h}{\partial x} \cos \theta_x - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \beta \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \beta \frac{\partial v q_y}{\partial y} = gh \sin \theta_y - gh \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta_y - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (3-3)$$

其中: $q_x = uh$, $q_y = vh$

$$i = -\frac{\partial z}{\partial t}$$

$$\tau_{bx} = \rho_m f u \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\tau_{by} = \rho_m f v \sqrt{u^2 + v^2}$$

为建立方程的简洁有效的求解方法,首先对方程组进行转化,将(3-1)分别与(3-2)、(3-3)合成为以下形式:

$$\begin{aligned} & h \frac{\partial u}{\partial t} + (\beta - 1)u^2 \frac{\partial h}{\partial x} + (\beta - 1)uv \frac{\partial h}{\partial y} + (2\beta - 1)uh \frac{\partial u}{\partial x} \\ & + \beta vh \frac{\partial u}{\partial y} + (\beta - 1)hu \frac{\partial v}{\partial y} + ui - gh \sin \theta_x - gh \frac{\partial h}{\partial x} \cos \theta_x - fu \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (3-4)$$

$$\begin{aligned} & h \frac{\partial v}{\partial t} + (\beta - 1)v^2 \frac{\partial h}{\partial y} + (\beta - 1)uv \frac{\partial h}{\partial x} + (2\beta - 1)vh \frac{\partial v}{\partial y} \\ & + \beta uh \frac{\partial v}{\partial x} + (\beta - 1)hv \frac{\partial u}{\partial x} + vi - gh \sin \theta_y - gh \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta_y - fv \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (3-5)$$

虽然经过了化简,但是直接求解由方程(3-4)、(3-5)组成的方程组仍然相当困难,为进一步建立简洁有效的方程差分格式,本文采用算子分裂的方法^[16],这种方法是由原苏联学者 Yanenko 等人在 20 世纪 50 年代末至 60 年代初首先提出的,以后又经过进一步的研究,在理论上已经较为完善,并且广泛应用于流体力学中有关求解多维问题的数值模拟方法中。

算子分裂法的基本原理是通过引进中间变量将原来的二维或三维问题降低到一维,或较低的维数。根据实际的物理问题可以对其偏微分控制方程进行方向分裂、时间分裂和根据物理现象进行分裂。为便于分析,考虑如下的简单微分方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial T} = L_1 Q + L_2 Q \quad (3-6)$$

其中: L_1, L_2 为沿着不同的空间方向的微分算子, Q 是微分方程中的未知函数,如按隐式格式求解,则(3-6)的相应的差分方程为:

$$\frac{Q^{n+1} - Q^n}{\Delta T} = A_1 Q^{n+1} + A_2 Q^{n+1} \quad (3-7)$$

其中: A_1, A_2 为差分算子,并且 $A_1 \approx L_1, A_2 \approx L_2$;若采用算子分裂法,则方程(3-6)可分裂为一对方程:

$$\frac{1}{m} \frac{\partial Q}{\partial T} = L_1 Q \quad (3-8)$$

$$\left(1 - \frac{1}{m}\right) \frac{\partial Q}{\partial T} = L_2 Q \quad (3-9)$$

其中: m 为大于 1 的正整数,显然(3-8),(3-9)两式之和正是(3-6)。同样建立上面两式的隐式差分格式:

$$\frac{Q^{n+\frac{1}{m}} - Q^n}{\Delta T} = A_1 Q^{n+\frac{1}{m}} \quad (3-10)$$

$$\frac{Q^{n+1} - Q^{n+\frac{1}{m}}}{\Delta T} = A_2 Q^{n+1} \quad (3-11)$$

应用算子分裂给求解高维问题带来很多方便。首先从形式上大大简化了控制方程,算子分裂算法可以把原来一个十分复杂的、可能包含多个变量的方程化为仅包含一个或较少个自变量的多个方程,而这些方程可分别求解。更为重要的是,如果直接求解高维的控制方程或方程组,若采用显式差分格式虽然可以避免求解大型的方程组,但是不能保证解法的收敛性,而且解的精度也受到较大的限制;若采用隐式求解,则必须面对求解大型稀疏矩阵的困难,即使是 PC 机的性能大大提高的今天这这也是一个棘手的问题。而采用算子分裂法把高维问题降为一维的问题,应用已经成熟的一维问题的求解方法,问题便迎刃而解。

下面对泥石流的控制方程(3-1),(3-4),(3-5)采用方向分裂法进行剖开,质量连续性方程的算子分裂格式为:

$$\frac{\tilde{h} - h^n}{\Delta T} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{i}{2} \quad (3-12)$$

$$\frac{h^{n+1} - \bar{h}}{\Delta T} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{i}{2} \quad (3-13)$$

运动方程的算子分裂格式为：

$$\begin{aligned} h \frac{\bar{u} - u^n}{\Delta T} + (\beta - 1)u^2 \frac{\partial h}{\partial x} + (2\beta - 1)uh \frac{\partial u}{\partial x} + ui &= gh \sin \theta_x \\ &- gh \frac{\partial h}{\partial x} \cos \theta_x - fu \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (3-14)$$

$$h \frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta T} + (\beta - 1)uv \frac{\partial h}{\partial y} + \beta v h \frac{\partial u}{\partial y} + (\beta - 1)hu \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3-15)$$

$$\begin{aligned} h \frac{\bar{v} - v^n}{\Delta T} + (\beta - 1)v^2 \frac{\partial h}{\partial y} + (2\beta - 1)vh \frac{\partial v}{\partial y} + vi &= gh \sin \theta_y \\ &- gh \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta_y - fv \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (3-16)$$

$$h \frac{v^{n+1} - \bar{v}}{\Delta T} + (\beta - 1)uv \frac{\partial h}{\partial x} + \beta uh \frac{\partial v}{\partial x} + (\beta - 1)vh \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3-17)$$

应用算子分裂已将原二维问题转化为简单的一维问题，下面建立此问题的差分求解格式，即在前半步只计算 x 方向得到一中间结果，在后半步只计算 y 方向得到下一时间的最后结果。网格化处理如图 3.1 所示：

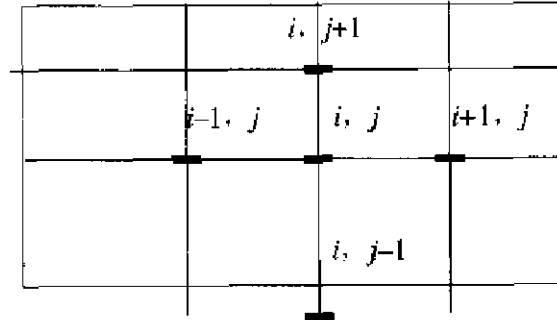


图 3.1 二维泥石流网格分布图

在上述两次计算中，均采用两层平均隐式进行差分^[47]，具体的差分方程如下：

质量连续性方程的差分格式为：

$$\begin{aligned} \bar{h}_{i,j} - h_{i,j}^n + u_{i,j}^n \frac{\lambda_x}{4} (\bar{h}_{i+1,j} - \bar{h}_{i-1,j} - h_{i+1,j}^n - h_{i-1,j}^n) \\ + \bar{h}_{i,j} \frac{\lambda_x}{2} (u_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n) = \frac{i \Delta t}{2} \end{aligned} \quad (3-18)$$

$$\begin{aligned} h_{i,j}^{n+1} - \bar{h}_{i,j} + \bar{v}_{i,j} \frac{\lambda_y}{4} (h_{i,j+1}^{n+1} - h_{i,j-1}^{n+1} + \bar{h}_{i,j+1} - \bar{h}_{i,j-1}) \\ + h_{i,j}^{n+1} \frac{\lambda_y}{2} (\bar{v}_{i,j+1} - \bar{v}_{i,j-1}) = \frac{i \Delta t}{2} \end{aligned} \quad (3-19)$$

运动方程的差分格式为：

$$\begin{aligned}
& h_{i,j}^n(\tilde{u}_{i,j} - u_{i,j}^n) + (\beta - 1) \frac{\tilde{u}_{i,j} u_{i,j}^n \lambda_x}{2} (h_{i-1,j}^n - h_{i+1,j}^n) \\
& + (2\beta - 1) \frac{u_{i,j}^n h_{i,j}^n \lambda_x}{4} (\tilde{u}_{i+1,j} - \tilde{u}_{i-1,j} + u_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n) \\
& + \frac{\tilde{u}_{i,j} i \Delta t}{2} = gh \sin \theta_x - \frac{gh_{i,j}^n \lambda_x}{2} (h_{i-1,j}^n - h_{i+1,j}^n) \cos \theta_x \\
& - f \tilde{u}_{i,j} \sqrt{u_{i,j}^{n^2} + v_{i,j}^{n^2}}
\end{aligned} \tag{3-20}$$

$$\begin{aligned}
& \tilde{h}_{i,j} (u_{i,j}^{n+1} - \tilde{u}_{i,j}) + (\beta - 1) u_{i,j}^{n+1} \frac{\tilde{v}_{i,j} \lambda_y}{2} (\tilde{h}_{i,j+1} - \tilde{h}_{i,j-1}) \\
& + \beta \frac{\tilde{v}_{i,j} \tilde{h}_{i,j} \lambda_y}{4} (u_{i,j+1}^{n+1} - u_{i,j-1}^{n+1} + \tilde{u}_{i,j+1} - \tilde{u}_{i,j-1}) \\
& + (\beta - 1) \frac{u_{i,j}^{n+1} \tilde{h}_{i,j} \lambda_y}{2} (\tilde{v}_{i,j+1} - \tilde{v}_{i,j-1}) + \frac{u_{i,j}^{n+1} i \Delta t}{2} = 0
\end{aligned} \tag{3-21}$$

$$\begin{aligned}
& h_{i,j}^n(\tilde{v}_{i,j} - v_{i,j}^n) + (\beta - 1) \frac{\tilde{v}_{i,j} v_{i,j}^n \lambda_y}{2} (h_{i,j+1}^n - h_{i,j-1}^n) \\
& + (2\beta - 1) \frac{v_{i,j}^n h_{i,j}^n \lambda_y}{4} (\tilde{v}_{i,j+1} - \tilde{v}_{i,j-1} + v_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n) \\
& + \frac{\tilde{v}_{i,j} j \Delta t}{2} = gh_{i,j}^n \sin \theta_y - \frac{gh_{i,j}^n \lambda_y}{2} (h_{i,j-1}^n - h_{i,j+1}^n) \cos \theta_y \\
& - f \tilde{v}_{i,j} \sqrt{u_{i,j}^{n^2} + v_{i,j}^{n^2}}
\end{aligned} \tag{3-22}$$

$$\begin{aligned}
& \tilde{h}_{i,j} (v_{i,j}^{n+1} - \tilde{v}_{i,j}) + (\beta - 1) v_{i,j}^{n+1} \frac{\tilde{u}_{i,j} \lambda_x}{2} (\tilde{h}_{i+1,j} - \tilde{h}_{i-1,j}) \\
& + \beta \frac{\tilde{u}_{i,j} \tilde{h}_{i,j} \lambda_x}{4} (v_{i+1,j}^{n+1} - v_{i-1,j}^{n+1} + \tilde{v}_{i+1,j} - \tilde{v}_{i-1,j}) \\
& + (\beta - 1) \frac{v_{i,j}^{n+1} \tilde{h}_{i,j} \lambda_x}{2} (\tilde{u}_{i+1,j} - \tilde{u}_{i-1,j}) + \frac{v_{i,j}^{n+1} j \Delta t}{2} = 0
\end{aligned} \tag{3-23}$$

上述 (3-18) ~ (3-23) 式便是泥石流控制方程组的应用算子分裂法的剖分格式, 其中 $\lambda_x = \frac{\Delta t}{\Delta x}$, $\lambda_y = \frac{\Delta t}{\Delta y}$, 分别为 x 方向和 y 方向的网格比。这些方程都是基于三对角的方程求解方案: 首先已知 n 时刻的所有值, 求得方程 (3-18), (3-20), (3-22) 的解, 得到所有的中间结果 \tilde{h} , \tilde{u} , \tilde{v} , 再利用这些值计算方程 (3-19), (3-21), (3-23), 得到 $n+1$ 时刻的最终结果^[48,49]。

3.2 数值模拟的开发环境及流程

3.2.1 开发环境

20 世纪 80 年代, C 语言成为最主要、最通用的程序设计语言, 使用 C 语言可以高效地写出可移植到各类计算机上的代码, 从而使软件编制得更快。C++ 是在 C 语言基础上、为简化程序而开发的, 因此, 该语言本身要比其前身 C 语言更复杂。C++ 之所以能流行, 是因为

它采用一种新的程序设计方法，即面向对象的程序设计方法，简称 OOP 设计方法^[51,52]。

面向对象的程序设计方法把重点放在对象之间的关系，而不是实现的细节上。关系是对象之间联系的纽带，通常是通过族谱形成的，新的对象类型就是通过族谱由其他对象类型生成。把一个对象的实现细节掩藏起来，可以使用户把注意力集中在对象与系统其他部分之间的联系上，而不是对象行为的实现过程上。

本研究采用 TURBO C++ 在 DOS 环境和 VISUAL C++ 5.0 在 WINDOWS 环境下的正演模拟程序。

本次正演模拟程序开发出三个正演模型类库，这三个类库及它们之间的关系如右图：

数据类是基类，它主要包括基本参数定义和速度模型函数；数据处理类是数据类的子类，它继承

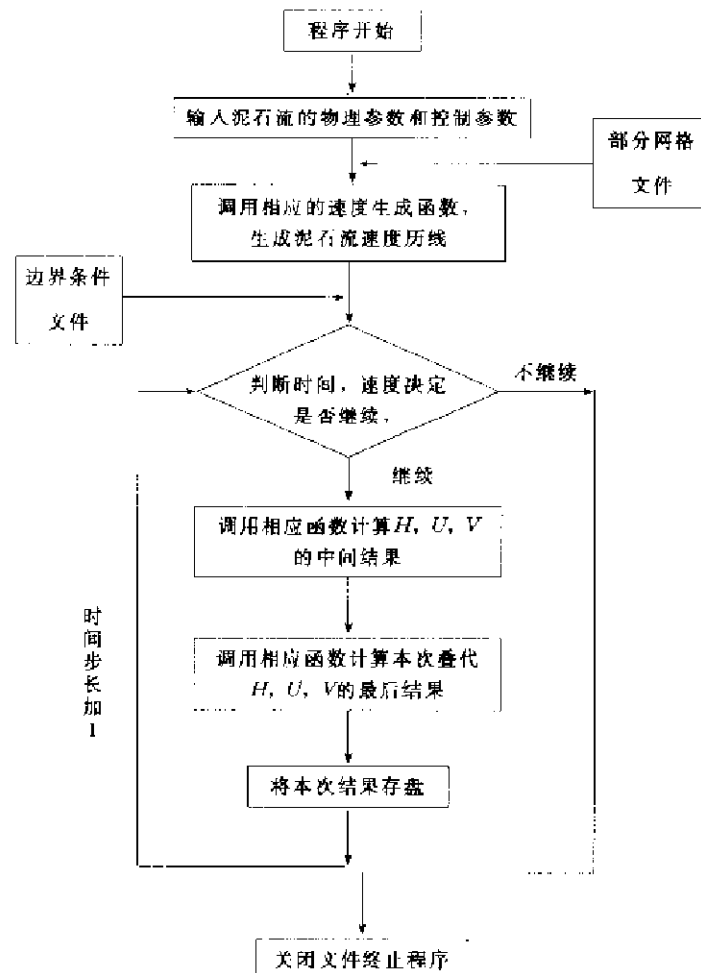
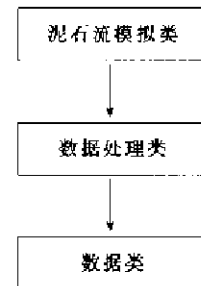


图 3.2 模拟程序流程图

了数据类中非私有型属性的所有性质，并且定义了网格剖分的迭代算法函数；泥石流模拟类从数据处理类中派生出来，它定义模拟泥石流本身属性变量和泥石流模拟函数。

程序运行要求 586 以上主机、内存 16M 以上并配有 WINDOWS 95 系统。

3.2.2 程序流程

泥石流正演模拟软件的设计遵循实用的原则，考虑到程序的通用性、可扩展性和易维护性，在实际设计时，作如下约定：

数据采用 ASCII 文件存贮，易于对数据进行检测。

常量参数设置采用人机对话形式，如 β 值等。

综合项设置都留有二次开发接口，当泥石流数学模型某一综合项发生变化时，可以重新作为一个子函数，把原来项覆盖，对新项再次进行差分格式的剖分。如泥石流数学模型中，当阻力项发生变化时，可以随时对新的阻力项进行差分格式的剖分。

给新增设的项留有二次开发接口。

采用开放式编程方式，给开发人员带来较大的难度，但给使用者以及作进一步研究工作带来极大的方便。

在 DOS 环境下编制的模拟程序的计算流程见图 3.2。

4 泥石流堆积数值模拟结果分析

数值模拟的突出优势在于可非常方便地模拟不同状态和条件下泥石流的堆积特征。但是,数值模拟结果是否真实地反映泥石流的运动和堆积特征及是否符合实际,需要与实际运动观测资料相比较。实际上,一次泥石流堆积的发生过程往往较为复杂,很难观测和记录到其实际运动过程。正因为如此,我国学者刘希林、唐川专门设计和观测记录了不同密度的泥石流体、不同堆积坡度和不同泥石流补给量条件下的泥石流实验堆积过程。这些宝贵的研究资料为验证数值模拟的正确性提供了可靠的对比依据。

4.1 数值模型的确定

刘希林、唐川等于1991年9月在云南东川市蒋家沟泥石流观测研究站现场进行了专门的泥石流堆积模型实验,实验材料为泥石流堆积沟床新鲜残留泥样。实验装置由3部分组成:①泥石流补给箱,为一内边长为46.2 cm的立方体,底部开有直径为5 cm的供给孔,由闸板开关控制泥石流的补给;②泥石流流通槽,为一内宽15.8 cm、内高18 cm、有效流动长度150 cm的矩形槽;③泥石流堆积板,为一宽120 cm、长200 cm的平板,坡度可任意调节,堆积板与流通槽以斜口方式平整相接。他们共进行了5项实验,包括:一次泥石流补给量大小与堆积范围的关系、泥石流堆积区坡度与堆积范围的关系、泥石流密度与堆积范围的关系等^[14]。

为了验证数值模拟的正确性,本研究选取与刘希林、唐川实验模型相同的条件进行数值模拟。即:

1. 模拟范围和堆积区坡度

取泥石流堆积区为一宽120 cm、长200 cm的长方形;堆积区坡度可任意确定,选堆积区坡度为0°、2°、5°、7°和10°分别进行数值模拟。

2. 初始条件

堆积厚度 $h=0$;泥石流堆积区的实际相对高程为模拟模型的高程。

3. 边界条件

堆积区采用开放自由的边界条件;堆积区的入口取Y轴线中点,人为给定入口处的泥石流流速,为了使边界流速接近实际,根据有关专家对泥石流发生过程实测资料的分析结果^[33],取用概率中的F分布和卡方分布密度函数,建立相应F分布速度模型和卡方分布速度模型进行模拟。这两种概率模型的函数表达式为:

$$\text{F 分布:} \quad f(x) = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma(\frac{n}{2})} x^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}} \quad (x \geq 0) \quad (4-1)$$

$$\text{卡方分布: } f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{m+n}{2}\right) m^{\frac{m}{2}} n^{\frac{n}{2}}}{\Gamma\left(\frac{m}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \frac{x^{\frac{m+n}{2}-1}}{(m \times x + n)^{\frac{m+n}{2}}} \quad (x \geq 0) \quad (4-2)$$

除上述两种速度模型外，为了比较分析，还按恒定速度模型进行了数值模拟。这三种速度模型的速度分布特征见图 4.1 所示。

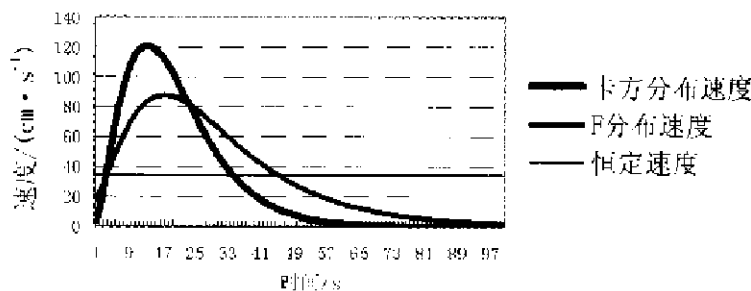


图 4.1 速度模型示意图

4. 泥石流介质

(1) 密度：与刘希林等的实验模型相对应，取密度为（单位： g/cm^3 ）2.20, 2.07, 1.92, 1.79, 1.76, 1.62 的泥石流分别进行模拟。

(2) 泥石流间的摩擦阻力：这里主要是指摩擦阻力系数的确定，根据式 (2-20)，输入流体的密度、流体中的泥石颗粒直径、泥石体积比和颗粒密度等参数计算确定。

(3) 阻力项中的动态摩擦角和微调系数。主要根据泥石流的密度、颗粒直径和泥石体积比等参数相应确定其值的大小。

5. 时间步长的确定

本研究采用的剖分格式是平均隐式，从理论上讲，这种格式是恒稳的，但对于拟线性的方程组来说，也不是不需要任何的限制。在实际模拟时取：

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{u + v}, \Delta t \leq \frac{\Delta y}{v + u}$$

其中： u 、 v 分别为可能的最大值。

6. 运动修正系数 β 的选取

考虑到不同类型的泥石流其运动修正系数的不同（ β 值一般在 1~1.25 范围）^[40]，在本次模型模拟计算中， β 值选取如下 6 组：1.0、1.05、1.1、1.15、1.2 和 1.25，分别进行模拟。

4.2 泥石流堆积数值模拟的验证

4.2.1 实验结果验证

根据以上模拟条件，运用数值方法可得出泥石流堆积的数值模拟结果，为了说明本研

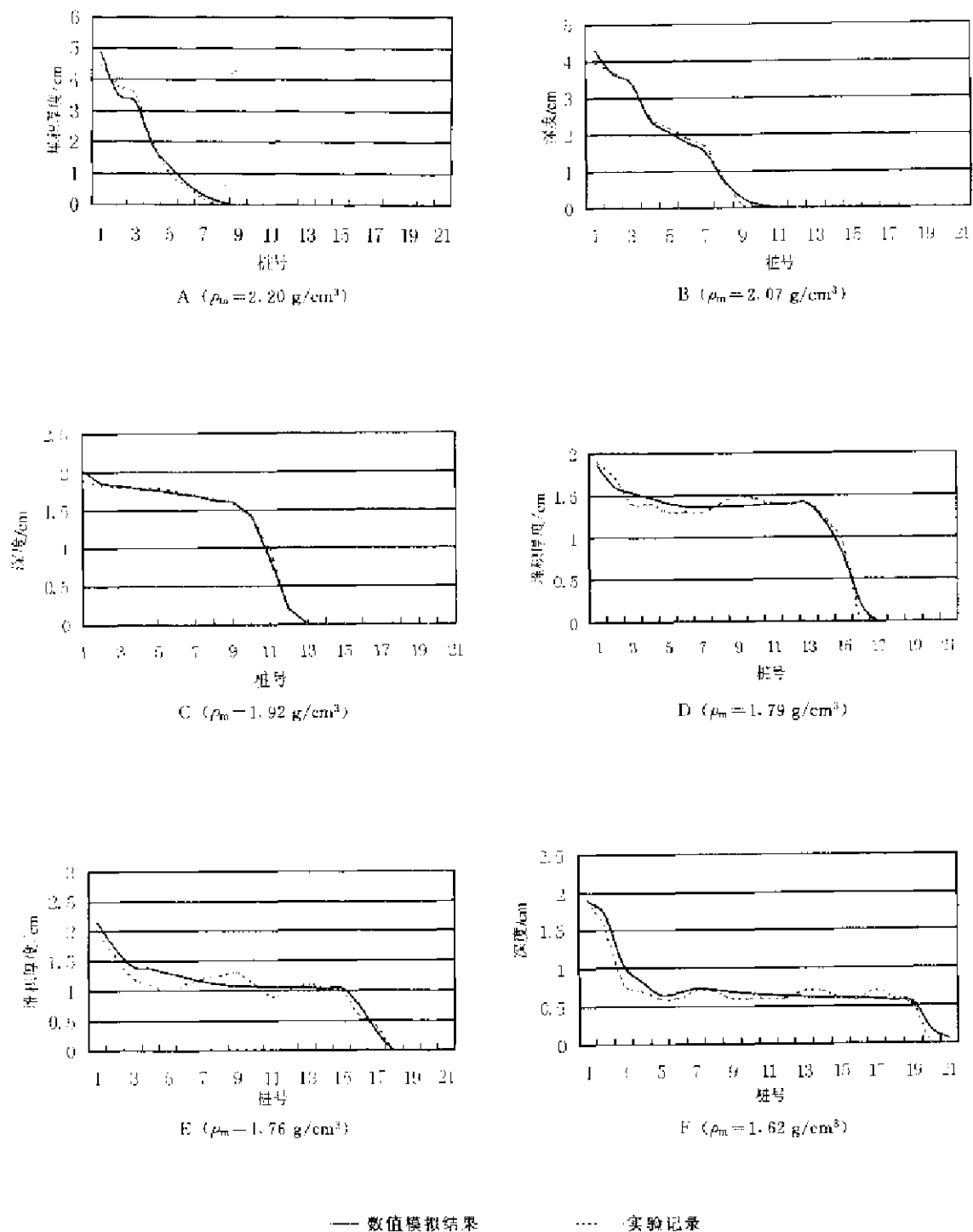


图 4.2 不同密度泥石流堆积的数值模拟结果与实验记录对比图

究结果的可靠性和模拟精度，本文采用与刘希林等的泥石流堆积模型实验的相应结果进行对比来验证。使用如下定义的拟合率来说明两者对比结果的一致程度：

$$\eta_i = \frac{|x_i - x'_i|}{|x'_i|} \quad ; \quad \eta = \frac{\sum \eta_i}{n}$$

式中： x ——模拟结果；

x' ——实验结果；

η_i ——第*i*回次的拟合率；

i——模拟或实验回次；

n——模拟或实验回次总数；

η ——平均拟合率。

1. 模拟不同密度泥石流堆积的结果对比

取泥石流补给量为 7700 cm³，堆积区坡度为 5°，选用 6 种不同密度泥石流，分别进行数值模拟，其结果与实验结果对比详见图 4.2，拟合程度见表 4.1。

表 4.1 不同密度泥石流数值模拟与实验结果的拟合率

密度/g·cm ⁻³	2.20	2.07	1.92	1.79	1.76	1.62
拟合率/%	92.3	93.1	93.8	84.5	90.4	89.7

从计算机数值模拟结果与模型实验结果对比来看，对于不同密度的泥石流，无论从泥石流堆积趋势，还是从泥石流堆积厚度，都表现出与实验模型很好的一致性，平均拟合率达 90.6%。

2. 不同坡度结果对比

取泥石流补给量为 6318 cm³，密度为 2.03 g/cm³，对堆积区 5 种不同坡度分别进行数值模拟，其结果（堆积长度*l*，最大宽度*b*，以及它们之间的比值*l/b*）与实验结果的对比和拟合率详见表 4.2，平均拟合率为 88.5%。

表 4.2 不同坡度泥石流数值模拟与实验结果对比及拟合率

堆积区坡度		0°	2°	5°	7°	10°
实验记录	最大堆积长度 <i>l</i> /cm	50	70	80	106	124
	最大堆积宽度 <i>b</i> /cm	92	79	70	69	65
	<i>l/b</i> 值	0.54	0.89	1.21	1.77	1.91
数值模拟结果	最大堆积长度 <i>l</i> /cm	58	65	84	103	117
	最大堆积宽度 <i>b</i> /cm	67	63	70	60	60
	<i>l/b</i> 值	0.86	1.03	1.20	1.71	1.91
拟合率/%		62.4	86.5	99.2	96.5	98.1
平均拟合率/%		88.5				

从表中可以看出,随堆积区角度增加,拟合率也随之增大。当角度大于 2° 时,拟合率都在95%以上。可见数值模拟与实验模拟的结果基本一致。

3. 不同补给量的模拟结果对比

取泥石流密度为 2.12 g/cm^3 ,堆积区坡度为 5° ,对6种不同补给量的泥石流堆积分别进行数值模拟,其堆积面积结果与实验结果对比见图4.3,拟合率见表4.3,平均拟合率达95%两者基本一致。

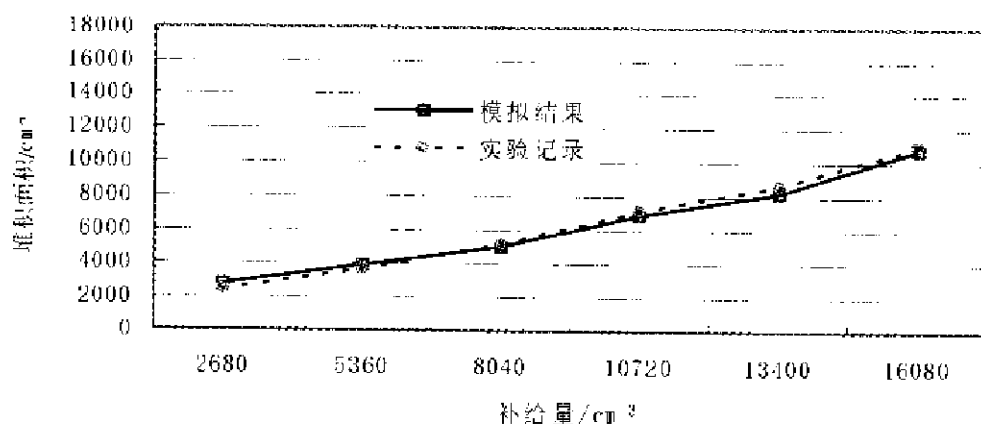


图 4.3 不同补给量泥石流堆积数值模拟和实验模拟结果对比图

表 4.3 不同补给量泥石流数值模拟和实验模拟结果拟合率表

补给量/cm³	2680	5360	8040	10720	13400	16080
数学模型堆积面积/cm²	2760	3840	4980	6900	8220	10800
实验模型堆积面积/cm²	2421	3645	5150	7160	8670	11045
拟合率/%	88.8	94.9	96.6	96.2	94.5	97.7

从以上影响泥石流堆积形态的三种主要参数的对比结果来看,都呈现出很好的一致性,说明本研究的数值模拟不论从数学模型的确定还是从剖分算法上都是可靠的,数值模拟的结果是正确的,符合泥石流堆积运动规律。

4.2.2 数值模拟的实际资料验证

为了进一步验证数值模拟结果的正确性和实际可用性,本研究根据实际资料运用数值方法模拟云南怒江州芭蕉河曾经发生的一次泥石流堆积过程,将模拟结果与实际观测资料进行对比分析。

云南怒江州芭蕉河曾于1989年10月20日爆发了一次大规模的灾害性泥石流,造成严重的经济损失。据调查分析^[54],该泥石流出口最大流速为 4.08 m/s ,最大堆积厚度 3.8 m ,堆积区坡度 $6^{\circ}\sim 8^{\circ}$,沿主坡角方向堆积长度约 700 m ,侧向最大宽度约 800 m ,泥石流密度约 2.05 g/cm^3 。

数值模拟的堆积厚度平面分布形态见图4.4,与实际堆积形态基本一致;沿主坡角方向

堆积的模拟结果与实际调查资料对比见图 4.5，两者基本吻合。由此可见，本研究的泥石流堆积数值模拟方法和结果符合实际，是科学可信的，具有实用价值。

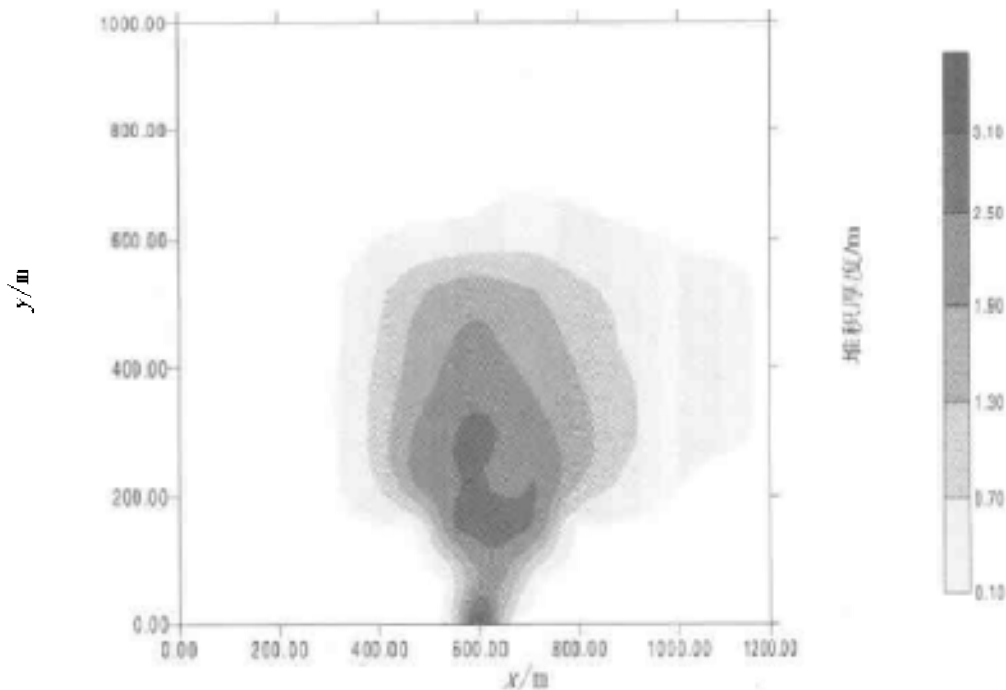


图 4.4 芭蕉河泥石流最大堆积厚度分布图

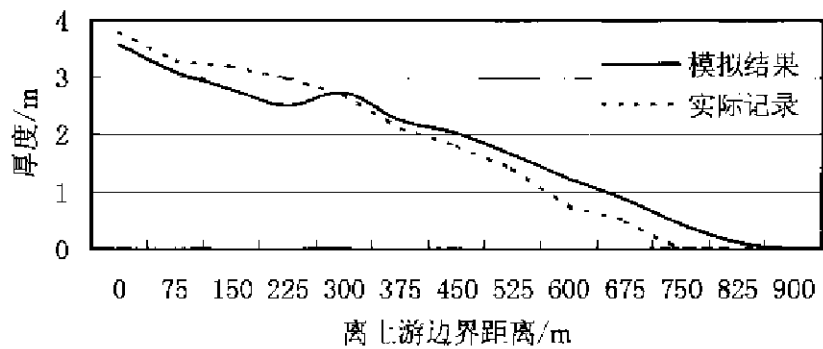


图 4.5 堆积厚度的实测值和模拟结果对比图

4.3 泥石流堆积的影响因素分析

根据本研究的数值模拟方法，可以很方便地分析各种因素对泥石流堆积范围、形态、厚度等的影响。下面分别对坡度、运动修正系数、密度、速度、补给量等因素的影响做初步的讨论。

4.3.1 坡度的影响

为了分析泥石流堆积区坡度对堆积范围和堆积厚度的影响，取泥石流补给量为 6318 cm^3 ，密度为 2.03 g/cm^3 ，把坡度值分为 5 组分别进行模拟计算。图 4.6 和表 4.4 分别为不同坡度的中轴堆积厚度变化示意图及其值大小。图 4.7 为不同坡度泥石流堆积面积示意图，表 4.5 为不同坡度时的堆积面积表。

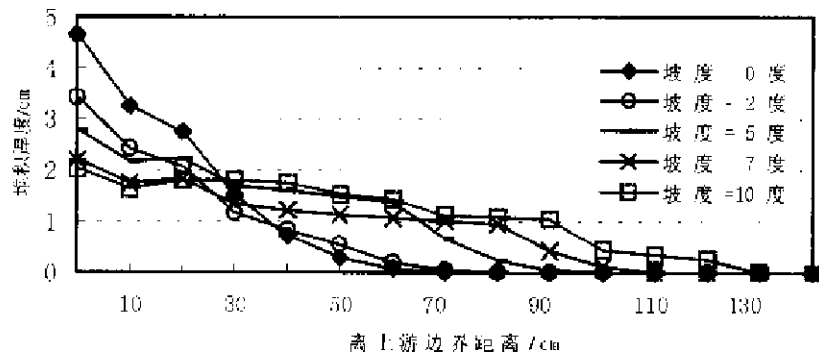


图 4.6 不同坡度的中轴堆积厚度变化图

表 4.4 堆积厚度随坡度的变化表 (单位: cm)

离上游边界距离	坡度为 0°	坡度为 2°	坡度为 5°	坡度为 7°	坡度为 10°
10	4.650	3.423	2.778	2.197	2.019
20	3.242	2.418	2.160	1.743	1.645
30	2.742	2.072	2.222	1.826	1.802
40	1.536	1.169	1.698	1.340	1.800
50	0.721	0.833	1.608	1.220	1.745
60	0.294	0.552	1.492	1.130	1.534
70	0.081	0.196	1.386	1.072	1.435
80	0	0.050	0.666	1.017	1.111
90	0	0	0.231	0.956	1.085
100	0	0	0.050	0.419	1.045
110	0	0	0	0.118	0.445
120	0	0	0	0	0.354
130	0	0	0	0	0.254
140	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0

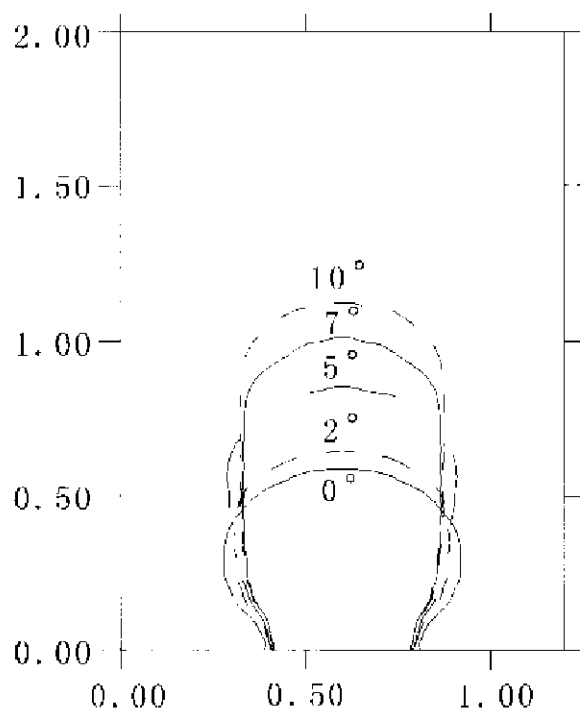


图 4.7 不同坡度的堆积形态变化示意图

标尺单位: m

表 4.5 堆积面积随坡度的变化表

坡度	0°	2°	5°	7°	10°
面积/cm ²	4140	4500	5760	6600	7880

模型模拟结果表明,泥石流堆积形态受坡度的影响较大。坡度越小,泥石流堆积范围越小,沿着冲积方向延伸,堆积厚度急剧减小,表现为泥石流在近源点处大量堆积,对近源点处地段的破坏作用较大;相反,坡度增大,泥石流堆积面积也随之增大,随着冲积方向延伸,堆积厚度表现为略有起伏,总的趋势是逐渐减小,堆积长度不断增加,表现为泥石流堆积区较大,破坏面较广。当坡度增大到一定数值后,泥石流的堆积长度虽然增加,但其宽度却反而有所减小。

4.3.2 运动修正系数的影响

由于不同类型的泥石流内部相互作用能量大小不同,在泥石流堆积过程中,垂直向也存在流速分布,通过 β (运动修正系数)来调整泥石流体内部动量变化,这从理论上而言更为合理。 β 值的取值范围前面已做描述,为了分析 β 值变化对泥石流堆积形态的影响,取泥石流补给量为 6318 cm^3 ,密度为 2.03 g/cm^3 ,对 β 值为1.0、1.05、1.1、1.15、1.2和1.25分别进行模拟计算,模拟结果见表4.6。

表 4.6 堆积厚度随 β 的变化 (单位: cm)

离上游边界 距离	$\beta=1.0$	$\beta=1.05$	$\beta=1.1$	$\beta=1.15$	$\beta=1.2$	$\beta=1.25$
10	1.703	1.704	1.704	1.704	1.704	1.705
20	1.532	1.532	1.532	1.533	1.533	1.534
30	0.948	0.948	0.949	0.949	0.950	0.950
40	0.867	0.867	0.868	0.869	0.869	0.870
50	0.775	0.775	0.776	0.777	0.777	0.778
60	0.709	0.710	0.711	0.711	0.712	0.713
70	0.662	0.663	0.664	0.664	0.665	0.666
80	0.627	0.628	0.629	0.629	0.630	0.631
90	0.603	0.603	0.604	0.605	0.605	0.606
100	0.584	0.584	0.585	0.586	0.586	0.587
110	0.562	0.562	0.563	0.563	0.564	0.565
120	0.537	0.538	0.538	0.539	0.539	0.540
130	0.512	0.512	0.513	0.513	0.514	0.514
140	0.497	0.498	0.498	0.498	0.499	0.499
150	0.489	0.489	0.489	0.490	0.490	0.491
160	0.509	0.509	0.510	0.510	0.511	0.511
170	0.535	0.535	0.535	0.536	0.536	0.537
180	0.234	0.234	0.234	0.234	0.235	0.235
190	0.054	0.054	0.0541	0.054	0.054	0.054
200	0	0	0	0	0	0

模拟计算结果表明,不论从堆积范围,还是从堆积厚度方面来看, β 值变化对泥石流堆积区的影响很小。

4.3.3 泥石流流体密度的影响

为说明泥石流流体密度对其堆积区的影响,固定泥石流堆积区坡度为 5° ,泥石流补给量为 7700 cm^3 ,不同密度的泥石流堆积平面形态模拟结果见表 4.7 和图 4.8。

表 4.7 泥石流流体密度对堆积形态的影响

模拟回次	1	2	3	4	5	6
泥石流流体密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.62	1.76	1.79	1.92	2.07	2.20
最大堆积长度/cm	194.1	162.9	143.3	113.4	80.8	63.8
最大堆积宽度/cm	53.3	54.8	56.1	58.4	63.0	58.8
最大堆积厚度/cm	1.91	2.14	1.85	2.03	4.31	4.86
堆积面积/ cm^2	9700	8220	6360	5760	4500	2280

由图 4.8 和表 4.7 可见:当密度在 2.07 g/cm^3 以上时,泥石流流体堆积区的平面展布表现为类圆形、椭圆形的形状,密度越大,堆积外形越圆;当密度在 1.79 g/cm^3 以下时,泥石流流体堆积区的平面展布表现为长条带状。总而言之,密度越大,堆积长度越短,横向越

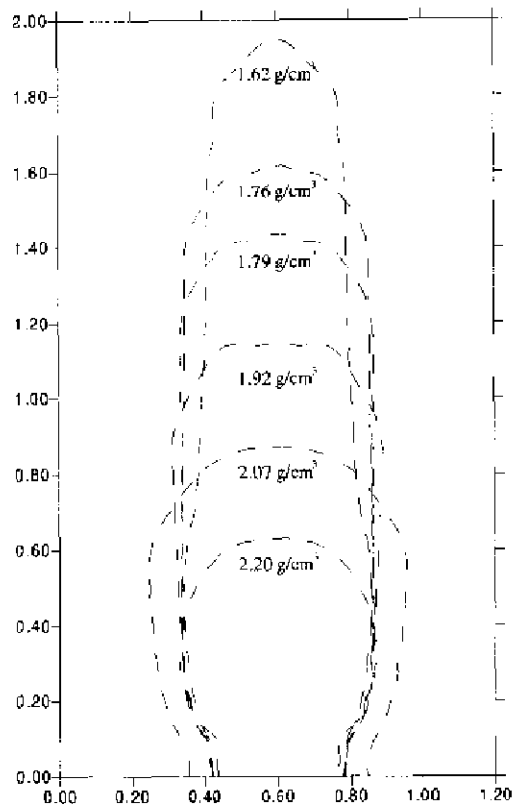


图 4.8 不同密度泥石流堆积形态示意图
标尺单位: m

宽，堆积外形越“胖”；相反，密度越小，堆积外形越“瘦”。

4.3.4 不同速度模型的影响

在一次泥石流补给量为 7700 cm^3 、 $\rho_m = 1.62 \text{ g/cm}^3$ 、坡度 $= 5^\circ$ 相同的条件下，本研究考察了不同速度模型对堆积形态的影响，对卡方速度模型、F 分布速度模型和恒定速度模型分别进行数值模拟的结果（图 4.9）表明，这三种速度模型，以恒定速度模型的堆积厚度最大，F 分布速度模型次之，卡方速度模型最小，但总的差别不大。

4.3.5 泥石流补给量大小的影响

为了研究不同泥石流补给量（规模）形成的堆积范围大小和形态变化，取泥石流密度为 2.12 g/cm^3 ，堆积区坡度为 5° ，模拟当泥石流补给量分别为 2680 cm^3 、 5360 cm^3 、 8040 cm^3 、 10720 cm^3 、 13400 cm^3 、 16080 cm^3 时泥石流堆积区的平面展布特征，见图 4.10。从图中可以看出：补给量越大，泥石流的堆积长度越长，堆积面积越大，而堆积宽度总的变化不大，即平面形态表现为由椭圆形逐渐变为长条形。

根据以上分析，泥石流堆积形态变化主要受堆积区坡度、泥石流密度和补给量大小的影响，而与速度大小的影响不大，运动修正系数在数值模拟中的作用很小，其原因值得进一步研究。

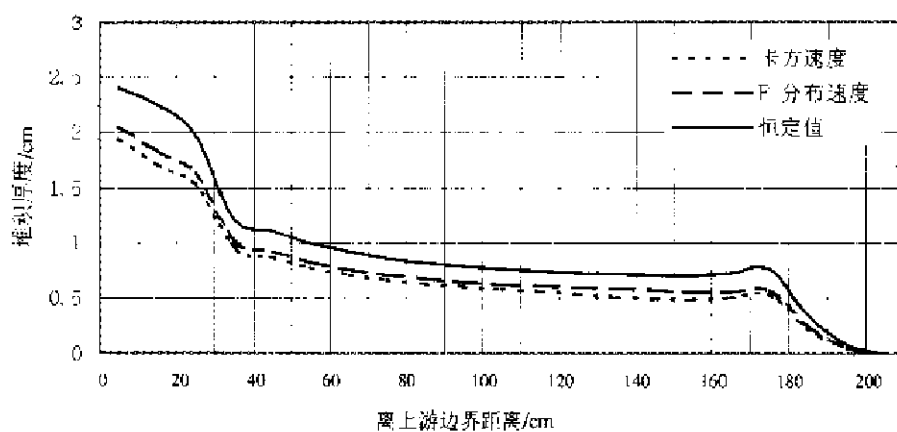


图 4.9 速度模型对堆积厚度的影响

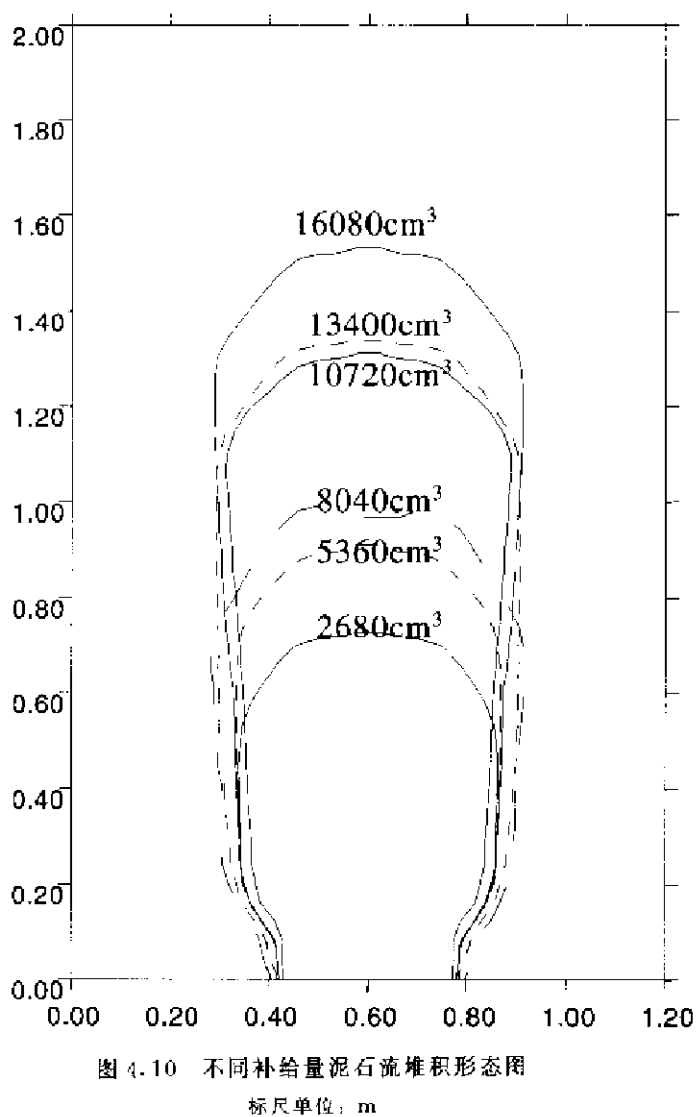


图 4.10 不同补给量泥石流堆积形态图
标尺单位: m

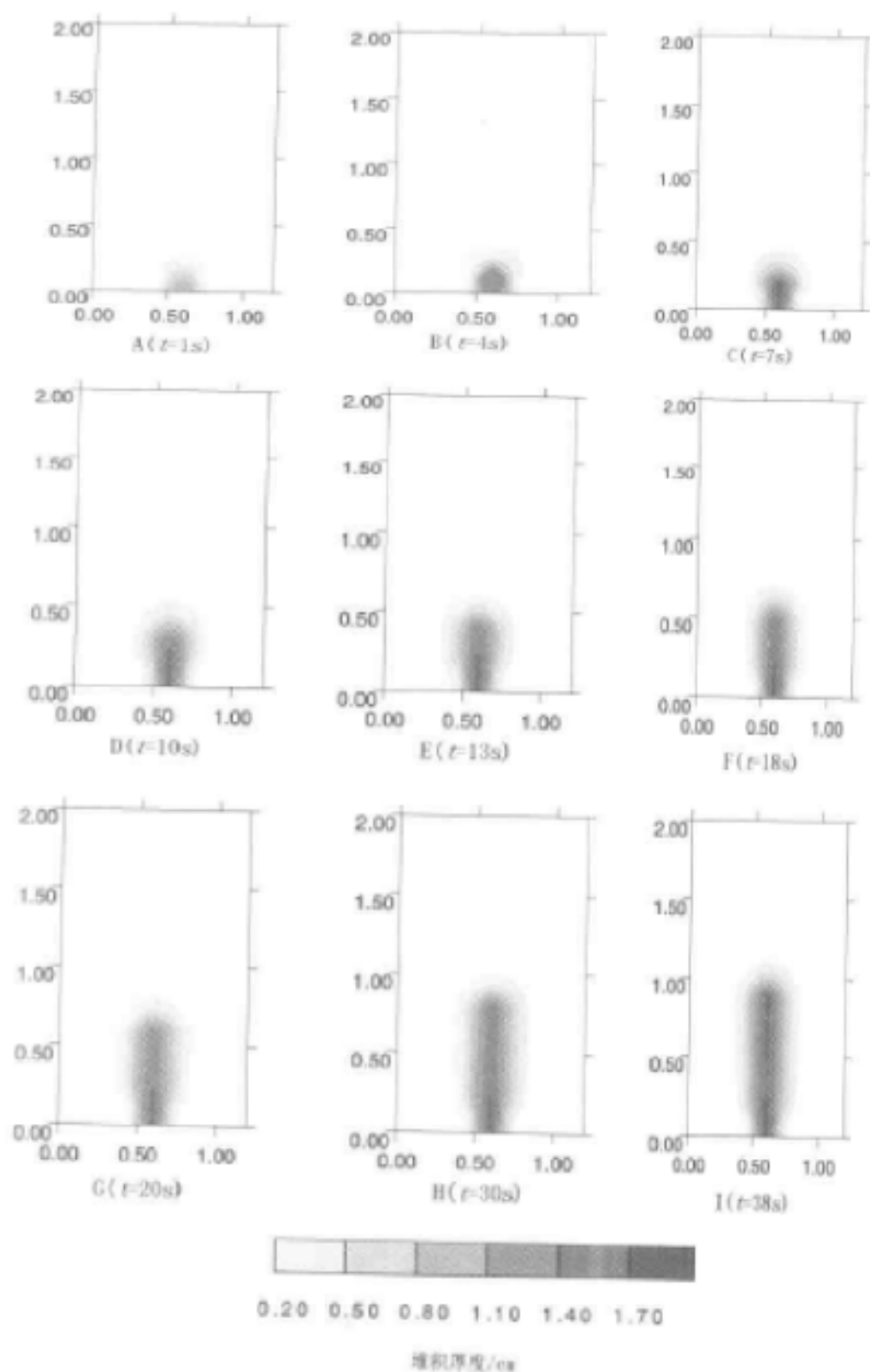


图 4.11 理想模型的泥石流堆积动态过程
标尺单位: m

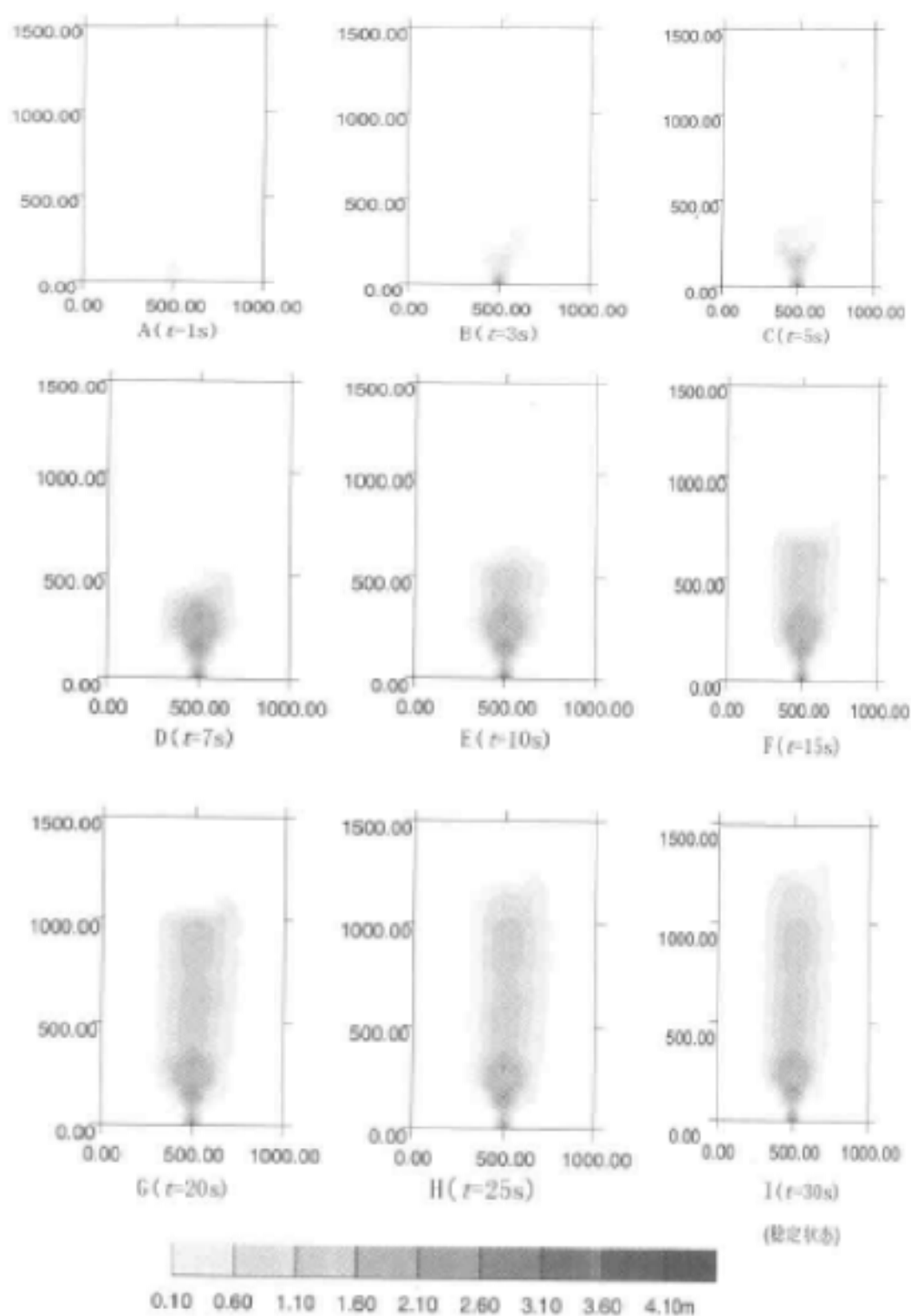


图 4.12 尼拉姑沟 2% 频率的泥石流爆发堆积过程平面示意图
标尺单位: m

4.4 泥石流堆积的动态模拟

4.4.1 理想模型的堆积过程

为了分析某一次泥石流爆发期间，在不同时间段时泥石流的堆积形态范围以及发展过程，本研究取密度为 2.2 g/cm^3 ，堆积区为坡度是 5° 的平板的理想模型，模拟其堆积动态过程，模拟结果见图 4.11。图中 A、B、C、D、E、F、G、H、I 分别表示泥石流从堆积开始到最后稳定的不同时间段的堆积平面形态分布。

通过对泥石流堆积过程的动态描述，可直观地了解到泥石流灾害的发展变化过程。从图 4.11 中各时间段泥石流堆积形态分析可见，泥石流在堆积初期，同时沿主坡度角方向和两边侧向延伸，平面展布呈对称的似圆形到似椭圆形状。随着堆积过程的延续，逐步发展为主要是沿主坡度角方向延伸，渐变成长条状，在后期沿两侧方向的扩展不大。

4.4.2 尼拉姑沟泥石流的堆积过程

尼拉姑沟位于云南省小江流域的东川市区东部，历史上多次发生泥石流爆发事件^[55]。本研究以尼拉姑沟为实例进行研究，该泥石流沟的基本情况在后面几章中介绍，这里根据堆积区的实际地貌条件（主要是地形等高线），模拟泥石流堆积动态过程。模拟范围取：长 $1500\text{ m} \times$ 宽 1000 m ，网格长度为 $75\text{ m} \times 50\text{ m}$ 。表 4.8 为模拟尼拉姑沟泥石流堆积时的参数，图 4.12 为模拟 50 年一遇（2% 频率，出山口最大流速： 7 m/s ）泥石流爆发的堆积动态过程（取速度模型为 F 分布，泥石流爆发的历时为 30 min ）。

表 4.8 尼拉姑沟泥石流数值模拟主要参数表

$\rho_m/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\rho_s/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	D/cm	a_1	β	$\sin\phi$
1.86	2.84	2.04	0.42	1.2	0.34

由图 4.12 可见，在泥石流爆发初期，沿地形较低洼处快速延伸堆积，堆积厚度在出山口附近增加，同时沿主坡角方向和两边侧向堆积，在泥石流爆发后的 7 min 左右，近山口的堆积区（扇）顶部厚度和宽度基本达到最大值，之后主要沿主坡角方向延伸堆积，发展逐渐减缓到最终停止。

5 泥石流灾害风险评估方法体系

自然灾害评估包括灾害发生前的灾害风险评估(或称预评估)、灾害发生过程中的灾害跟踪评估和灾害发生后的灾情评估(或称总结评估),各类评估具有各自的实际意义。对于泥石流灾害,其灾害发生过程十分短暂,一旦成灾,往往损失重大,因此,进行泥石流灾害发生前的灾害风险评估工作,具有更为重要的实际意义。它不仅为国家和地区经济发展、产业布局提供依据,也为布设防灾减灾工程提供效益分析成果和决策支持^[56,57]。

根据研究范围,又可以将自然灾害风险评估分为点评估、面评估和区域评估。泥石流灾害点评估是指对一条泥石流沟或相邻近、具有统一动力活动过程和破坏对象的几条泥石流沟或沟群进行评估。它是其他评估工作的基础,其特点是评估面积较小,致灾体(泥石流)和承灾体(或称受灾体,指破坏对象)清晰明确,评价精度高,采用的指标、模型以及得出的评价结果定量化程度较高。而面评估和区域评估是对一个流域、一个地区或是更大的自然、行政区域内的泥石流等灾害进行评估,其特点是面积大,致灾体的成灾条件复杂,致灾因素多样,承灾体类型多,分布广,特征复杂,许多因素具有较高程度的模糊性和不确定性,因此采用的指标多为相对指标,评价结果定量化程度较低。

当前,总的来说,涉足泥石流灾害风险评估的学者不多,尚没有形成系统的方法体系,本研究在总结相关工作方法的基础上,探索提出适合于泥石流灾害点评估的风险评估方法体系以及具体评估方法。

5.1 泥石流灾害风险评估的意义和主要任务

泥石流灾害风险评估是减轻灾害损失的重要非工程措施,其成果具有非常重要的应用价值^[58],主要体现在以下几个方面:

(1) 为区域经济发展中长远规划提供基础背景资料,为工农业生产布局提供依据。根据泥石流灾害风险评估分析结果,特别是区域性评价成果,可划分受泥石流灾害威胁的高度风险区、中度风险区、低度风险区和无风险区,在规划项目建设、产业布局、环境保护等方面,可充分考虑到受泥石流灾害威胁程度,合理规划,使经济建设和防灾减灾工作相协调,从而避免失误。

(2) 为评价重点建设工程的适宜性和基础设施布设提供依据。在有泥石流灾害威胁存在的山区(地区),泥石流灾害风险评估结果可为重点工程建设选址和方案优化提供经济效益分析依据,为城市生命线工程,公路、铁路、港口等交通设施建设与维护提供方案比选的经济分析依据。

(3) 为受泥石流灾害威胁地区制定应急预案、保障人身安全提供工作基础。根据泥石

流灾害评估对灾害风险的认识和评价,可指导制订受灾区的灾害躲避、抢险等应急预案,建立科学有效的预警系统,从而最大限度减轻灾害恐慌,保障人身安全和尽可能减少经济损失。

(4) 直接为科学而经济地组织实施防灾减灾工程服务。灾害风险评估的直接结果是预测不同条件下可能产生的灾害损失。根据评估结果,可充分论证防灾减灾工程的合理性、有效性,优化方案,从而做到科学减灾,经济有效地防灾。

(5) 为灾害保险及发生次生灾害的可能性及损失提供参考依据。通过评估,了解灾害的危险程度及危害性,可为灾害保险的风险分析及投保比的确定等提供直接依据。同时,也为分析发生与泥石流灾害相关的次生灾害的可能性及损失提供参考依据。

泥石流灾害风险评估任务主要包括以下几个方面:

(1) 科学地认识泥石流灾害形成条件。泥石流灾害主要表现为一种自然现象,但在人为因素影响下可加速或延缓发生、发展。要客观地、科学地调查和分析泥石流灾害的形成条件、运动机理以及发生发展趋势。

(2) 定量评价泥石流灾害发生的规模、强度和范围。根据有关理论,结合研究区的特定条件,选用或研究提出适当的评价方法和计算公式,如专家系统分析、数理统计分析、条件与机理分析、实验室模拟类比、数值模拟等方法,做到定量半定量地评价在不同激发条件下,泥石流灾害的发生范围(灾害风险区)、强度、规模等指标。

(3) 统计评定灾害风险区内的人口分布和资产价值及其对泥石流灾害的承灾能力。对于小范围的灾害风险评估(点评估),最精确的办法是逐一单项统计调查,包括人口数量、房屋等建筑、基础和城市公用设施、室内财产等的价值以及土地、农作物等的核算价值。实际工作中,由于很难做到逐一据实调查,可引用资产评估的有关方法,通过抽样调查、市场地价等办法来分析确定有关价值分布。各类资产的承灾能力不同,也应具体分析、评定。

(4) 确定泥石流灾害风险区的风险等级及受损程度,评价灾害风险损失。在不同激发条件下,可能造成的灾害损失不同,在灾害风险区内的不同地段,受灾程度也各有差别,应结合具体受损对象,分析计算确定灾害风险损失。

(5) 分析提出防灾减灾措施方案的决策论证意见。在对灾害辨识和损失估算的基础上,结合研究区的防灾减灾工程方案或应急预案,通过评价和效益分析对比,为管理决策提供优化的减灾防灾方案提出建议。

5.2 泥石流灾害的成灾特点及风险评估要素

为了有针对性地进行泥石流灾害风险评估,既要认识泥石流灾害的一般特点,分析成灾规律,也要针对具体泥石流沟进行详细的灾害形成背景和受灾体特征调查,确定泥石流灾害风险评估要素。

5.2.1 泥石流成灾特点

泥石流是山区常见的一种自然现象,是介于崩塌、滑坡等块体运动与挟沙水流运动之间的一系列连续流动现象(过程)。或称泥石流是含饱和或过饱和的高浓度碎屑物沿坡面和

沟床流动的流体。当泥石流达到一定规模,并在其活动区内给人类社会造成严重危害时,就构成了泥石流灾害。泥石流的发生需要具备三个基本条件,即丰富的松散固体物质,数量足够的水体和促使这两者迅速起动、混合、运动和停积的地貌条件;同时还要具备激发条件,如雨水泥石流需要暴雨或大暴雨激发,沟蚀泥石流要有足够大的暴雨径流才能起动,冰雪消融泥石流需要有连续数日的高温使冰雪强烈消融^[59,60]。按照泥石流的流体性质,可分为粘性泥石流和稀性泥石流两大类,本研究主要适合粘性泥石流,即泥石流的流体粘度大于 $0.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,泥石流中土体的体积浓度大于 50%,泥石流的密度大于 1.8 g/cm^3 。

泥石流灾害具有以下成灾特点^[61]:

(1) 突然性和多发性。泥石流灾害爆发过程一般都很短暂,大多数历时仅数十分钟,一般在 30 分钟左右,很少超过一个小时,具体到一条泥石流沟,其具有多发性,但间隔时间各地差异很大,有的可以是一年一次或多次,有的则是数年、数十年一次,甚至超过一百年才再发生一次。每一次的规模也有差异,在形成条件充分和强触发条件下,可产生超常年规模的泥石流灾害。

(2) 群发性和关联性。区域性的大暴雨,因暴雨可引起较大区域内山洪、滑坡、泥石流、洪水等一系列灾害,从而出现多灾丛生并形成灾害链。

(3) 地区性。泥石流灾害形成于具有致灾条件的山区,在泥石流沟的形成和流通区,以冲刷危害为主;在堆积区则主要表现为冲击、淤埋,具体到一个泥石流堆积扇区内,往往在堆积扇顶部的沟口地段,泥石流流速很快,冲击危害为主,辅以淤埋等危害,而在堆积扇中下游的扩散地带,随泥石流流速的不断减慢而逐渐表现为累积性淤积危害为主。

(4) 周期性。一般而言,暴雨既是泥石流形成的主导因素,又是激发条件。因此,降雨的周期性必然会影响到泥石流活动,往往在暴雨多而集中的年份,特别是多年一遇的强暴雨出现,往往发生较大规模和普遍性的泥石流灾害,从而使泥石流灾害因与暴雨的多年周期性密切相关而相应呈现周期性规律,这也是我们分析预测泥石流灾害规律性的重要依据。

(5) 社会性。体现在两个方面,一是由于人类不合理的社会经济活动,具有诱发和加剧泥石流灾害的作用,而人类加强环境保护,实施防护工程,可延缓甚至阻止泥石流灾害的发生;二是泥石流灾害造成的人员伤亡和经济损失及生态环境等的破坏,是随着人口的增加、社会经济发展而更趋严重和危害更为广泛。

鉴于泥石流运动具有突发性、局地性、短暂性和凶猛性等特点,其历时过程短暂,运动能量巨大,因而具有极强的破坏力,它不仅造成山区局地环境的破坏,还直接威胁山区的人民生命财产安全和经济建设,造成人员伤亡和重大经济损失,冲毁或淤埋房屋等建筑设施、铁路、公路、桥涵,破坏水利、电力、通讯、城镇管网设施和农田,甚至毁坏城镇、工矿区、风景旅游区 and 乡村聚落等。根据泥石流规模、性质、地形条件和受害对象不同,其危害形式多样^[30],主要表现为:

(1) 冲刷。在泥石流形成区和流通区,大量积存于坡面上和沟床中的泥沙被带走,使山坡土层减薄甚至剥光,成为荒坡,同时加剧水土流失;沟床冲刷使岸坡垮塌或形成滑坡,造成沿岸设施、建筑、交通及水利工程等受损毁。

(2) 淤埋。在泥石流堆积区,地形变缓,泥石流停止运动,大量石沙和泥质淤埋各种

目标，泥石流规模愈大，堆积物愈多，一般淤埋损失愈严重。

(3) 撞击。快速运动的泥石流，尤其是其中的巨石具有很大的动能，可撞毁桥梁、堤坝、房屋、车辆、电杆等与之遭遇的各种固定设施和活动目标。

(4) 漫流改道和超高淤埋。泥石流中的固体物质堵塞其流路，造成漫流改道，从而冲毁或淹没下游及沿岸的各种设施。在弯道处流动受阻时，泥石流具有巨大的超高或爬高能力，有时甚至能爬脊越岸撞毁淹埋各种目标。

5.2.2 泥石流灾害风险评估要素

主要包括以下几个方面：

1. 灾害背景要素

包括自然环境要素和社会经济要素两个方面。

自然环境要素主要有：

(1) 地形地貌和植被。地貌类型、海拔高程及地形高差、沟床坡降、坡度、形态、植被类型及覆盖率等。

(2) 地质构造。岩石类型、构造发育程度、松散堆积物发育程度、新构造活动强度、水土流失程度等。

(3) 水文气象。水文特征、流量变化、所属气候类型、年降雨量、暴雨频次及强度、一次最大降雨量等。

(4) 人类活动。人类活动类型、强度、对环境和岩上体稳定性影响程度等。

社会经济要素很多，主要有：人口数量、人口密度、城镇及主要工矿企业和居民点(村庄)等的分布、工程设施的分布、工农业产值、国民生产总值、防灾工程及减灾能力等。

2. 灾害活动要素

主要包括泥石流沟数量、性质、规模、沟长、流域面积及泥石流频次、流速、流量、堆积厚度、淤积范围面积和淤积量等。核心指标是不同频次下泥石流最大流速和堆积厚度值及其空间分布。

3. 承灾体要素

主要有以下几类：①人口；②房屋等建筑设施；③城市生命线工程；④交通和管线等基础设施；⑤室内财产、设备及特殊设施；⑥农作物及林木、草地、牲畜等；⑦土地、水等资源。

4. 破坏损失要素

包括人员伤亡程度、各类财富性资产和资源性资产的受损程度及损失价值、数量、强度等。

5. 防灾减灾效益分析要素

防灾减灾的措施类型、工程量、投资、防灾效益、投保比等。

5.3 泥石流灾害风险评估工作步骤

根据灾害风险评估的一般要求，它的内容包括灾害风险识别、风险估算和风险评价三

个方面。具体到泥石流灾害，首先是认识灾情和灾害风险，取得基本要素，总结以往的灾害事件；其次是统计分析，建立模型，分析推算可能产生新的泥石流灾害性质、规模及危害范围和程度；第三，结合防灾减灾规划及相关工程及非工程措施，进行风险损失估算及减灾效益评价，为决策者提供决策建议。实施泥石流灾害风险评估工作的具体步骤如下：

1. 调查收集统计评估要素信息

通过资料收集和实地调查，并开展必要的野外勘察勘测工作和室内实验，获取灾害风险评估所需的各类信息资料，并进行分类分析整理，统计建立便于使用的专项或综合信息卡、统计表和数据库。

2. 确定评估范围和评估方法

在对灾害可能造成的危害范围有一个基本判断之后，研究确定适当的评估方法，依据其要求，圈定灾害风险评估范围，并进行更详细的单元划分和采集单元信息。对于点评估而言，若采用条件分析、专家系统分析、数理统计分析、工程分析等方法，单元划分和要求各有差别；若采用数值模拟评价，则要求单元划分和信息采集更为严格、详细。

3. 危险性评价

它是灾害风险评估的基础工作，因为有灾害危险性存在，才谈得上灾害和灾情。危险性评价的方法很多，对泥石流灾害而言，成灾地区主要是泥石流堆积泛滥区，根据第一章的评述，理论性强、应用前景更广的应首推数值模拟，通过建立模型和数值法求解，可动态模拟泥石流灾害发生、发展过程和危害范围及程度，并据此划定泥石流灾害危险性等级及其分布，编绘出危险强度分区图或危险度等值线图，确定泥石流灾害在不同爆发频率条件下的成灾范围、规模、强度和相应危险水平。

4. 易损性评价

易损性是指直接受泥石流灾害危害或影响区域内的社会经济构成、分布及其承受灾害破坏能力，包括人口、社会、经济和环境等因素。在灾害评估时，主要取人口数量及密度在不同破坏程度下的伤害程度及资产和资源的价值在不同破坏程度下的残存价值来量化评价。易损性评价是灾害风险评估的核心内容，只有当在泥石流发生区内有人类活动或资产价值的存在，才称得上灾害，灾害评估才有意义。对点评估，主要通过调查统计和实验测试，分析各种承灾体的原值和在不同灾害破坏程度下的抗破坏能力，划分易损度等级，确定易损性水平。

5. 灾害破坏损失和防灾减灾工程效益评价

根据危险性评价和易损性评价结果，分析讨论不同危险程度和灾害风险概率条件下，对承灾体易损性的影响程度，即不同条件下的灾害风险损失，对比讨论为防止灾害发生设计的减灾工程措施及其造价，分析减灾效益，从而为科学有效地组织防灾减灾工作提供决策支持。

6 泥石流灾害危险性评价

危险性评价是泥石流灾害风险评估的重要基础工作。只有在充分认识泥石流灾害的形成条件、可能发生的概率以及成灾区域、规模和强度等泥石流灾害自然属性基础上,才能进行进一步的分析评价。以往对泥石流灾害危险性的评价多停留在定性分析和根据经验值进行分析评价,这对具体一次泥石流灾害而言,要进行风险评估显然是不够的,必须对泥石流灾害的区域差异性有定量的评价结果。数值模拟分析为泥石流灾害危险性评价开创了一条新的途径。

6.1 泥石流灾害危险性评价方法

泥石流灾害的危险性,是指灾害发生的可能性及其规模和强度,它是泥石流本身的固有特性,其主要取决于泥石流的成灾条件。危险性的定量表述为危险度。泥石流灾害的危险度是指遭受泥石流灾害的概率。对某一沟谷而言,是指该沟谷流域内所存在的一切人和物遭受泥石流损害的可能性大小。确定泥石流灾害危险度是泥石流危险性评价的中心内容和定量结果反映。泥石流灾害危险性评价的主要任务是确定泥石流灾害的活动程度和强度,评价泥石流的破坏能力。在对泥石流的发育形成条件、致灾因素进行调查、统计、分析的基础上,预测今后泥石流灾害发生的概率或频率、可能规模和危害范围以及在危害范围内的灾害活动程度和与之密切相关的破坏强度及其分布,主要特征参数是反映泥石流淤埋深度的堆积厚度值和反映冲击力大小的泥石流最大流速值。

泥石流危险性评价方法主要包括泥石流灾害发生概率的确定方法、危害范围及强度的确定方法、危险度值的确定方法。

6.1.1 发生概率的确定方法

泥石流灾害是一种突发性自然灾害,属于随机事件。在不同条件下,它的发生几率和成灾程度不同,灾害形成条件越充分,发生灾害的可能性越大,产生的规模和强度也越大。根据泥石流灾害具有多发性、周期性的特点,往往用泥石流灾害频率来定量表述灾害发生概率。泥石流灾害频率确定方法一般有:

1. 经验法

可根据对泥石流灾害的长期观测记录,分析不同时间尺度的灾害周期性变化规律,从而确定不同规模泥石流灾害事件的发生频率。如杜榕恒、康志成等根据云南东川蒋家沟泥石流活动记录,对1965以来的泥石流频次和强度进行分析研究,并据此研究提出了确定蒋家沟不同规模泥石流灾害发生概率的方法。

2. 条件分析法

根据泥石流形成的基础条件和激发条件来确定。首先是确定泥石流形成的基础条件的各要素达到产生泥石流灾害的临界条件，提出判定标志；在此基础上，分析激发条件，通过确定泥石流激发条件的关键因素——水，研究其来源——降雨，特别是暴雨的发生频率，从而推测泥石流灾害发生的概率及相应规模等级。

本文在确定泥石流灾害发生频率时，直接引用有关研究成果，不做具体研究。

6.1.2 泥石流危害范围及强度的确定方法

在确定泥石流发生概率后，不同概率（频率）下泥石流灾害范围和强度的确定是判定泥石流灾害风险损失的基础性和关键性工作，也是泥石流灾害风险评估的基础性工作。泥石流灾害范围和强度的确定方法总结如下：

1. 经验公式计算法

确定泥石流灾害危害范围和强度的主要宏观指标有泥石流最大流量值、最大流速值、一次冲淤总量等指标。这也是进行泥石流灾害防治工程设计的必备基础指标要素。几十年来，国内外学者做了大量的研究和实际调查工作，总结提出了适于不同地区、不同类型泥石流的多种计算公式，这些公式基本上是属于经验、半经验性的，吴积善、田连权、康志成等在《泥石流及其综合治理》一书中做了系统的分析总结。这些指标对具体泥石流沟不同地段的灾害危险性评价而言，由于比较笼统而往往难以满足精度要求。

2. 统计分析模型预测法

刘希林、唐川为了分析预测泥石流成灾范围和堆积形态，运用数理统计方法，做了专门的研究工作，他们根据云南小江流域 55 处泥石流沟的流域背景因子和堆积扇平面形态特征值，采用多元线性回归方法，分析得出泥石流堆积区最大危险范围预测模型：

$$S=0.6667LB-0.0833B^2\sin R/(1-\cos R)$$

$$L=0.8061+0.0015A+0.000033W$$

$$B=0.5452+0.0034D+0.00003/W$$

$$R=47.8296+1.3085D+8.8876H$$

式中：S——泥石流最大危险范围（km²）；

L——泥石流最大堆积长度（km）；

B——泥石流最大堆积宽度（km）；

R——泥石流堆积幅角；

A——流域面积（km²）；

W——松散固体物质储量（万 m³）；

D——主沟长度（km）；

H——流域最大相对高差（km）。

3. 实验室模拟法

针对不同泥石流沟的特点和不同目的研究的需要，国内外不少学者开展了大量的实验室模拟研究工作，在流速、流量、冲淤范围等有关泥石流运动特征参数以及流变参数等方面都取得了成果。刘希林、唐川专门设计了模拟泥石流堆积区危险范围模型。根据该模型实验结果，得出一次泥石流堆积危险范围的预测模型：

$$a=0.4935L^2$$

$$L=2.5748 (V \cdot G \cdot R_c / \ln R_c)^{1/3}$$

$$d=0.254 [V \cdot R_c / (G^2 \cdot \ln R_c)]^{1/3}$$

式中： a ——一次泥石流堆积危险范围 (m^2)；

L ——一次泥石流最大堆积长度 (m)；

d ——一次泥石流最大堆积厚度 (m)；

V ——一次泥石流松散物质最大补给量 (m^3)；

G ——堆积区坡度 ($^\circ$)；

R_c ——泥石流密度 (g/cm^3)。

以上几种方法中，第二、第三种方法虽然都是针对泥石流堆积区而提出的，但都是运用数理统计方法得出的平面形态判别指标，缺乏理论依据和通用性，并且不能确切评价堆积区内泥石流速度、堆积厚度分布的差异。本研究提出运用数值模拟方法来评价泥石流堆积区的范围及强度。具体方法是：

将泥石流视为在沟槽中运动的粘性流体，当到达地形较为开阔、坡度急剧减缓的山前堆积区，可视为二维扩散流，根据质量守恒原理和动量守恒原理，建立数学模型，运用数值方法来模拟泥石流在堆积区的运动，获得泥石流堆积范围及在堆积范围内的流速和堆积厚度值及其分布（具体模拟方法已在第二、三、四章论述），从而准确地反映堆积区内的灾害危险程度差异。

6.1.3 危险度值的确定

危险性评价的最终结果是以危险度值（或称破坏率）来表示。对泥石流灾害，在这方面的研究成果不多。刘希林等提出用专家系统分析法来确定泥石流灾害危险度值，并将危险度定义为泥石流对危害对象的损害程度，用 R_d 表示，取值范围为： $0 \leq R_d \leq 1$ 。他们根据“灰色系统理论”，通过对全国范围内 100 位泥石流专家学者的通讯调查，采用灰色统计方法，确定泥石流的主要危险因子，再根据各危险因子的贡献大小赋予相应权重值，提出危险度的计算公式：

$$R_d = 0.2353G_{L1} + 0.2353G_{L2} + 0.1176G_{S1} + 0.0882G_{S2} + 0.0735G_{S3} + 0.1029G_{S6} + 0.0147G_{S7} + 0.0588G_{S9} + 0.0441G_{S10} + 0.0294G_{S14}$$

式中： G_{L1} ——一次泥石流最大冲出量的赋值；

G_{L2} ——泥石流发生频率的赋值；

G_{S1} ——流域面积的赋值；

G_{S2} ——主沟长度的赋值；

G_{S3} ——流域最大相对高差的赋值；

G_{S6} ——流域切割密度的赋值；

G_{S7} ——主沟床弯曲系数的赋值；

G_{S9} ——泥沙补给段长度比的赋值；

G_{S14} ——24 小时最大降雨量的赋值；

G_{S14} ——流域内人口密度的赋值。

以上赋值根据危险因子实际取值的相应等级(小、中、大、极大)取 0, 0.3, 0.7 或 1。

该方法用于综合评判某一泥石流沟的危险程度,是一种经验性的判定方法,各指标的物理含义值得商榷,且不能用于确定泥石流堆积扇区危险度值的差异性分布。本文提出根据泥石流堆积区的数值模拟结果,由计算得出的泥石流最大流速和堆积厚度值在堆积区的分布,来分析判定在泥石流堆积区不同地段的危险程度。为了统一量化评价,本研究提出破坏损失率的概念和计算方法,它是在结合分析评价区不同受灾体的实际抗灾能力(易损性评价)后,确定流速和堆积厚度某一临界值,在超过临界值的地段赋破坏损失率值为 1,而在其他地区,按流速和堆积厚度的大小选用合适的递减形式,逐步由 1 减至 0 值。此方法在第七章具体讨论。

6.2 云南东川市尼拉姑沟泥石流灾害危险性评价

为了说明泥石流灾害风险评估方法的实用性,本研究选取云南小江流域的东川市尼拉姑沟作为应用实例,进行泥石流灾害风险评估。现对其危险性评价如下。

6.2.1 尼拉姑沟泥石流灾害概况

东川市地处滇东高原北部,属高山峡谷地貌区,山高谷深,地形切割强烈。气候属亚热带季风气候区,并且垂直气候分带明显,在海拔 1500 m 以下的河谷地区,年平均降雨量 697.7 mm,蒸发量达 2099.2 mm;在海拔 1500~3000 m,年平均降水量 865~950 mm,蒸发量 1706.6 mm。年内雨旱季分明,局地暴雨强盛,每年 5~10 月为雨季,占全年降雨总量的 88%,每年暴雨频次为 0.8~1.5 次,最大雨强达 123.6 mm/d,每小时达 63.4 mm,并且大暴雨多发生在夜间,占 70%。

尼拉姑沟位于东川市区东部,流域面积 4.06 km²。源头高程 2436 m,沟口高程 1240 m,高差 1196 m,主沟长度 4.62 km,平均坡降 17.86%,堆积区沟自东向西横穿市区,注入小江,堆积区坡度 6%~8%。

尼拉姑沟流域内基岩主要为古生界和元古宇的白云岩、灰岩、玄武岩、粉细砂岩和泥岩以及大量的第四系松散坡积、残积的粉质粘土、碎石土。由于该地区新构造活动强烈,地震频繁,基岩岩性破碎,强度很低,结构松散,加上广泛分布的第四系松散物,具有丰富的松散物质来源;具有陡峻的地貌条件;具有多暴雨、强蒸发的气候条件。所有这些都为泥石流的形成和发生提供了非常有利的条件,正因为如此,小江流域是我国乃至世界上泥石流爆发频率最高、分布最普遍、灾害也最为严重的地区。

尼拉姑沟在历史上多次发生灾害,大规模爆发的灾害事件一是距今 100 多年前的光绪年间,那次泥石流将当时的东川市中心街道冲毁,多处官庄民宅遭受毁坏,丧生数十人;二是 1961 年 6 月,泥石流冲进尼拉姑村和市区街道,市医院、市委机关、供销社、皮鞋厂、食品厂等多个单位及沿街居民受损害,造成 7 人死亡,淤埋农田 20 hm²,经济损失近 1000 万元。

尼拉姑沟由于位于市区东部,地势居高临下,直接威胁城市安全,且已多次带来惨痛

灾害教训，当地政府非常重视该泥石流沟灾害防治工作，在中央和云南省的支持下，已经实施了一些应急防治工作，但由于投资不足，防御标准较低，难以抵御大规模灾害的袭击。为此，1997 年，在国家有关部门支持下，同意立项全面开展该泥石流沟的综合治理工作，并已提出防治工程设计方案，本研究即结合该工程，对尼拉姑沟泥石流灾害风险作出评估，为合理经济有效地实施该项防治工程提供决策依据。

尼拉姑沟泥石流堆积区地貌特征见图 6.1。



图 6.1 尼拉姑沟泥石流堆积区地貌图 (航片)

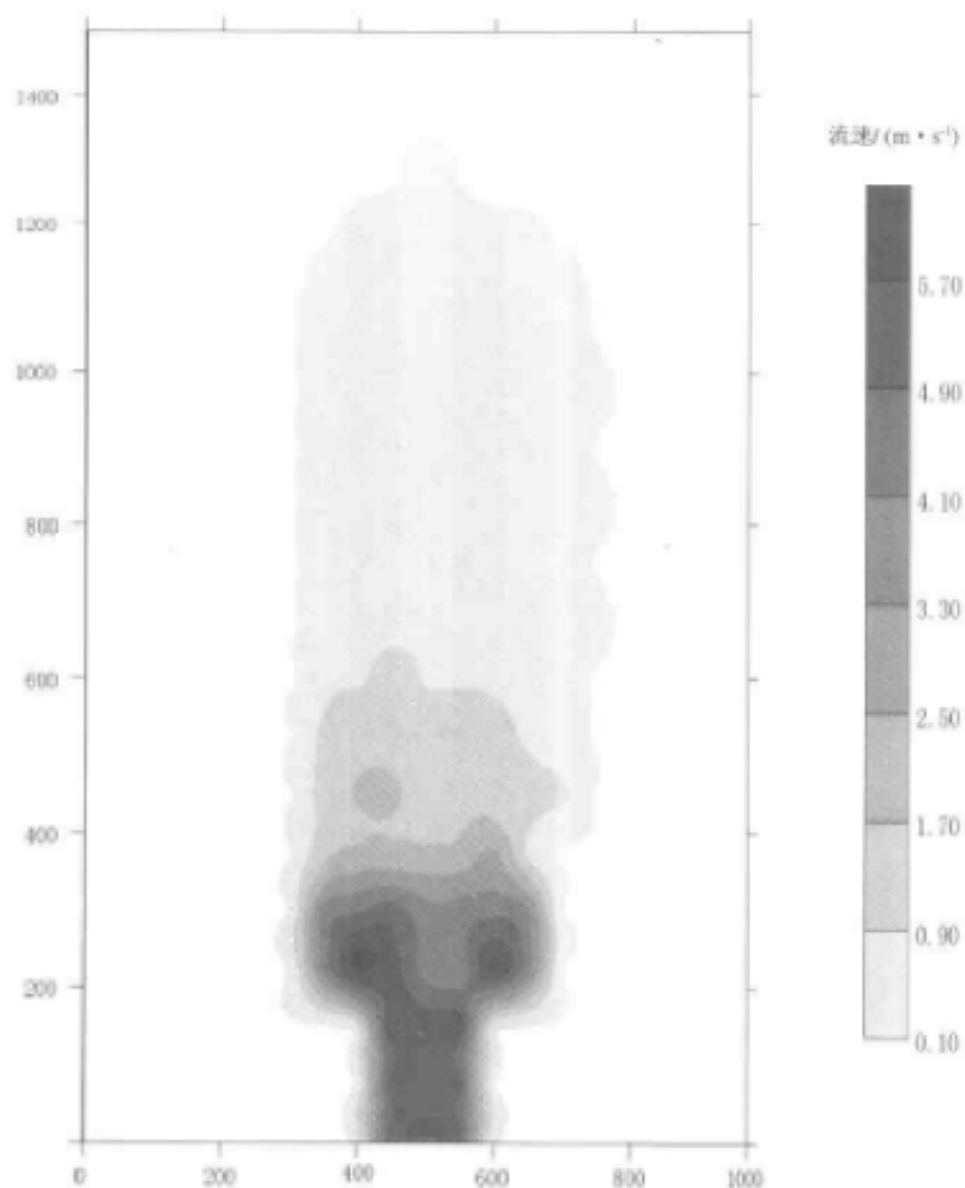


图 6-2 2%频率泥石流堆积最大速度分布图

标尺单位: m

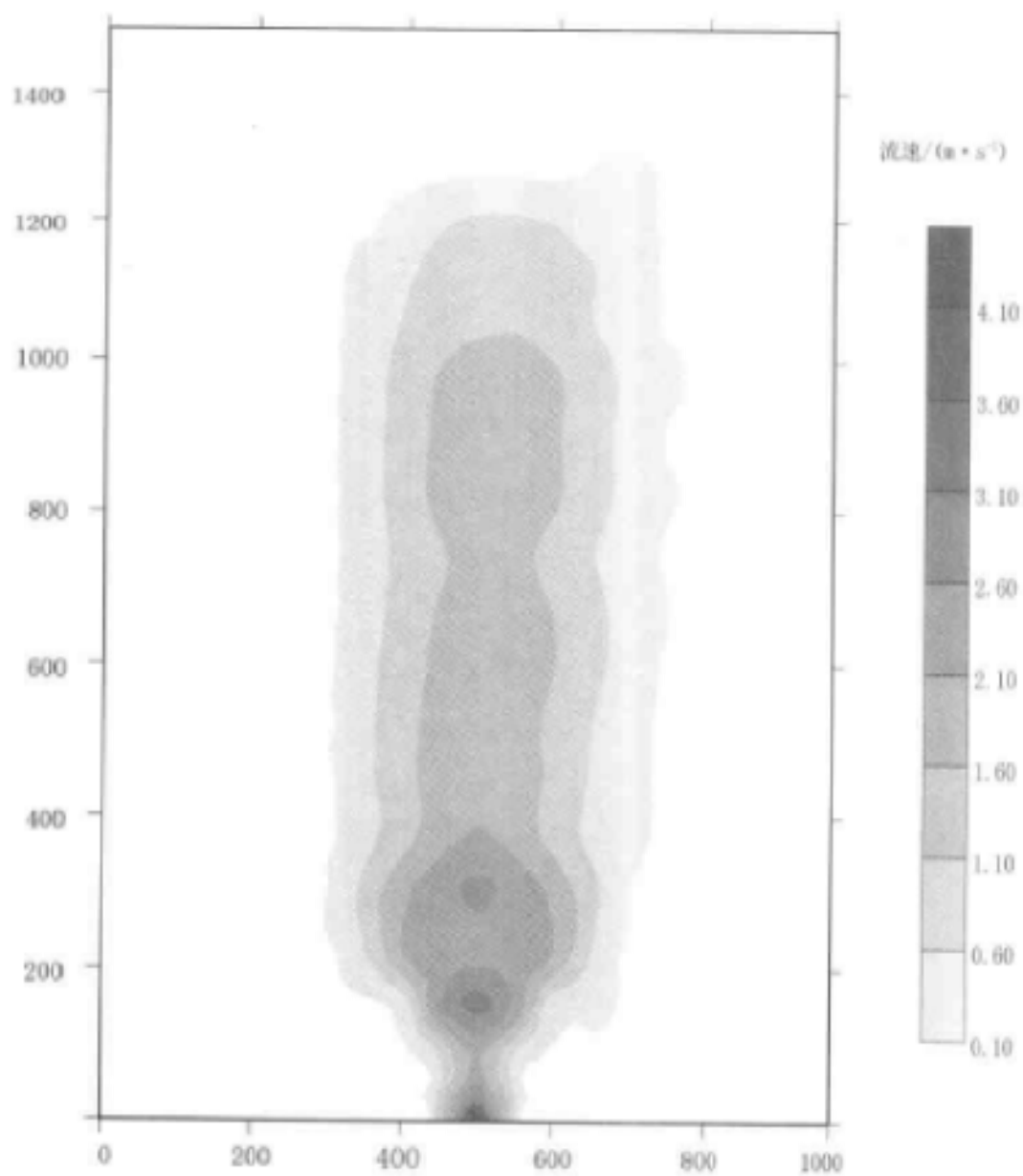


图 6.3 2%频率泥石流堆积最大厚度分布图
标尺单位: m

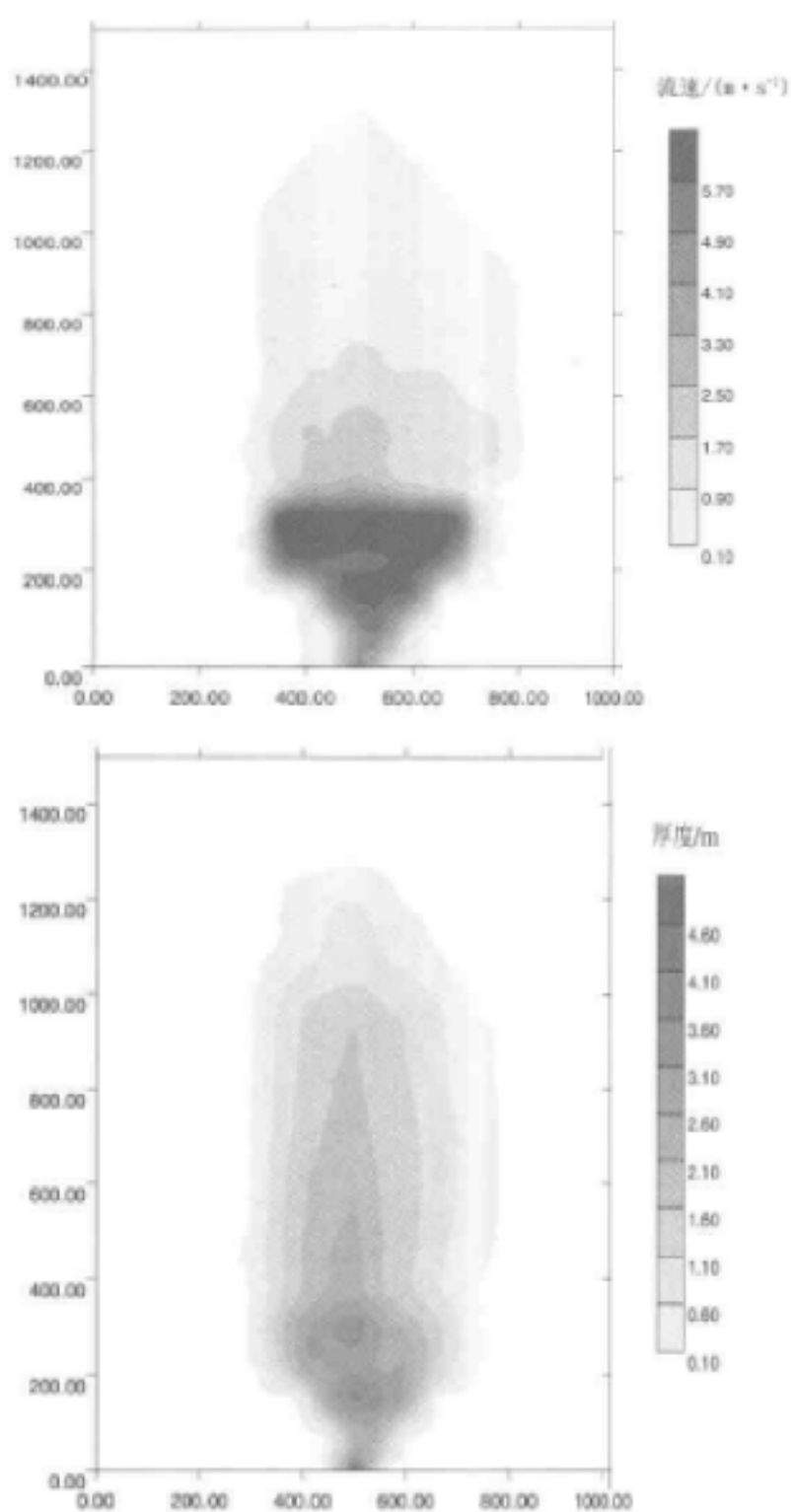


图 6-4 1%频率泥石流堆积最大速度和厚度分布图
标尺单位: m

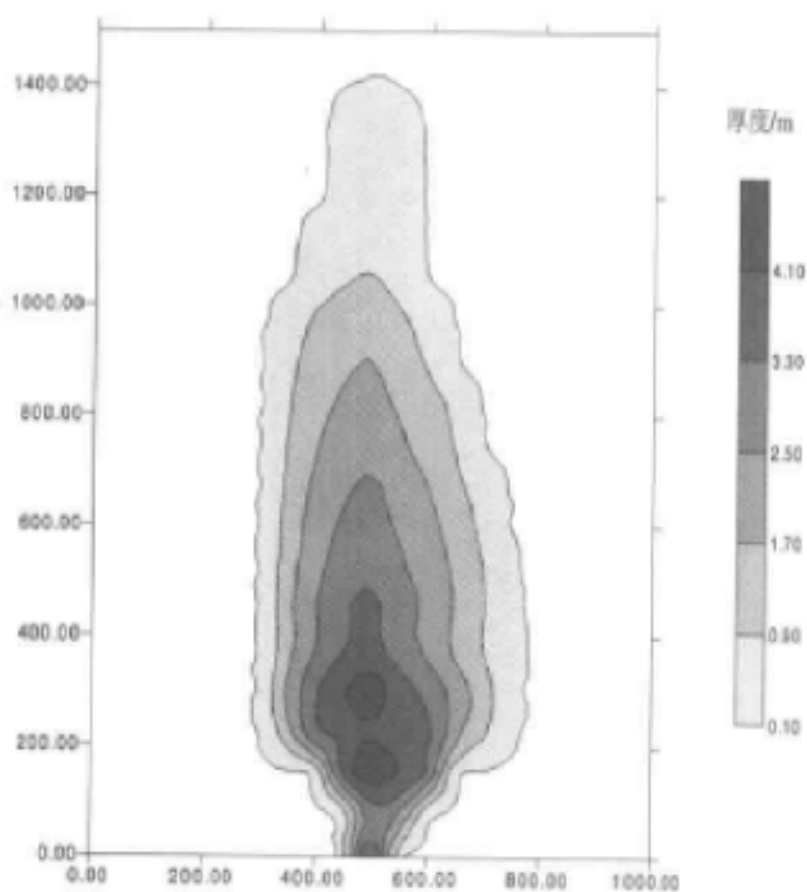
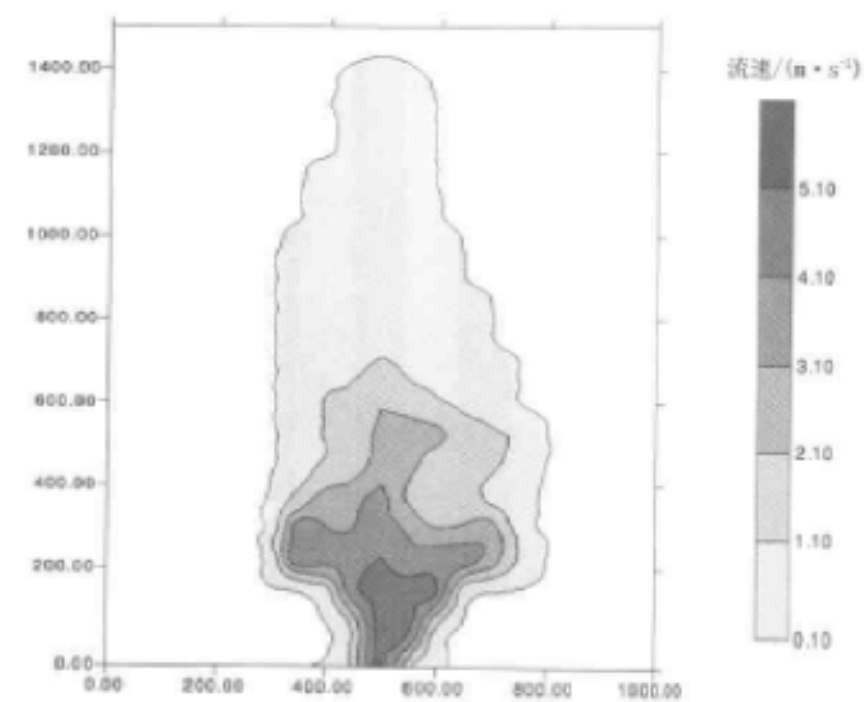


图 6.5 0.5%频率泥石流堆积最大速度和厚度分布图
标尺单位, m

6.2.2 尼拉姑沟泥石流灾害危险性评价

1. 发生概率和规模的确定

尼拉姑沟泥石流灾害的形成条件和泥石流灾害特征前人已做了大量的研究工作, 本文直接引用已有研究成果。

(1) 泥石流的性质。为粘性泥石流, 其密度 $R_c=1.86 \text{ t/m}^3$ 属于多年一遇的低频发泥石流。

(2) 泥石流规模。根据杜榕楦、康志成、陈循谦等的计算结果^[55], 最大流量值为:

在 50 年一遇频率 (2%) 下: $Q_{\max 1}=349.0 \text{ m}^3/\text{s}$

在 100 年一遇频率 (1%) 下: $Q_{\max 2}=395.8 \text{ m}^3/\text{s}$

在 200 年一遇频率 (0.5%) 下: $Q_{\max 3}=412.8 \text{ m}^3/\text{s}$

根据出山口的断面形态和据有关计算结果, 对应的最大流速值为:

在 2% 频率下 $V_{\max 1}=7.0 \text{ m/s}$

在 1% 频率下 $V_{\max 1}=7.61 \text{ m/s}$

在 0.5% 频率下 $V_{\max 1}=7.83 \text{ m/s}$

(3) 泥石流灾害发生过程。根据吴积善等的研究^[53], 一次泥石流爆发过程一般都较短暂, 呈 F 分布或卡方分布, 泥石流在堆积成灾过程中, 流量快速增至峰值后, 即开始降低, 降速初期较快而逐步减慢, 一般整个过程为 30 min 左右。本研究即假定尼拉姑沟泥石流灾害发生过程呈 F 分布, 取整个过程为 30 min。

2. 危险范围和强度的确定

根据第二章、第三章建立的数值模拟方法和第四章的数值模拟结果来分析评价尼拉姑沟泥石流堆积区的危险范围和程度, 即确定泥石流的最大流速和堆积厚度的分布。

(1) 将研究区按 $75\text{m} \times 50\text{m}$ 的网度划分为 441 个单元。

(2) 边界条件。根据实际地形确定各节点的高程值, 在泥石流出口, 根据不同频率泥石流灾害发生过程给定流速分布值。

(3) 模拟结果。2% 频率的泥石流堆积区最大流速分布见图 6.2, 最大堆积厚度分布见图 6.3; 1% 频率的泥石流堆积区最大流速和最大堆积厚度分布图见图 6.4; 0.5% 频率的泥石流堆积区最大流速和最大堆积厚度分布图见图 6.5。

3. 危险度值的确定

根据 6.1.3 的讨论, 本文以数值模拟结果确定的堆积区最大流速和最大堆积厚度值分布, 针对不同类型受灾体抵御泥石流灾害强度的差异, 用破坏损失率来综合确定在不同灾害强度下, 不同类型受灾体的危险度和易损度, 具体方法在第七章讨论。

7 泥石流灾害易损性评价

泥石流灾害对社会经济环境的危害广泛而深远，它不仅对人类生命和自然生态环境造成严重的危害，而且直接损害人类创造的物质财富和自然资源财富。为了科学地减灾防灾，以最少的投入获取最大的经济和社会效益，必须充分认识泥石流灾害的易损性特征，确定可能造成的危害，分析不同受灾体的承灾能力。

7.1 泥石流灾害受灾体类型

灾害是对人类社会经济而言的，即使是巨大规模和强度的灾害事件，如果对人类活动没有产生大的影响，也不能称之为大灾。因此，在分析泥石流的成灾条件后，分析评价受灾害威胁区（危险区）内的经济社会和人口特征，各类资产（包括财富性资产和资源性资产）价值分布及其承灾能力即易损性评价具有同样重要的意义。

易损性评价的目的是为破坏损失评价获取各方面要素参数。根据易损性的构成，易损性评价的内容主要包括：划分受灾体类型，调查统计各类受灾体数量及其分布，核算受灾体价值，分析各类受灾体在不同规模强度灾害条件下的破坏程度及价值损失率。

泥石流灾害对人类社会经济的危害，概括起来主要有以下四个方面^[62]：

（1）危害人类生命和身心健康，破坏人类正常生活，造成人员死亡、受伤、失踪以及心理损伤等。

（2）损毁人类劳动创造的物质财富，包括各类建筑工程设施、交通通讯管网等设施，各类设备、工具、物品、家庭财产等物资以及畜禽、农产品、林木等。

（3）破坏农业生产、工业生产、交通运输及其他产业活动，影响社会经济的正常发展。

（4）破坏人类生存与发展的资源和环境，主要包括土地资源及水资源、生物资源、生态环境等。

在以上四方面的危害中，人是最宝贵的社会财富，难以用价值来衡量，一般需单独评价；物质财富是灾害的直接损毁对象，是灾害损失的主要方面，它是灾害易损性评价的主要对象；对产业活动的影响是灾害的间接损失，拟不做讨论；资源破坏对泥石流灾害而言，主要是土地资源，可根据资源性资产评估的有关办法确定易损性，环境破坏目前尚难以量化评价。据此分析，可将受泥石流灾害直接威胁的各种受灾体划分为 17 类。详见表 7-1。

表 7.1 泥石流灾害受灾体类型及受害方式

序号	灾害体类型		主要受灾体	计量单位	主要受害方式
1	人		常住人口、流动人口， 城镇人口、农村人口	人	死亡、重伤、轻伤、 失踪、无家可归
2	禽畜和养殖品		牛、羊、马、猪、鸡、 鸭、鹅、兔、鱼等	头、只、 匹等	死亡、流失
3	农作物	粮食作物	小麦、水稻、玉米等	公顷、株	冲蚀、淤埋
		经济作物	棉花、烟草、甘蔗、水果		
		油料作物	大豆、花生、油菜籽等		
		其他作物	蔬菜、西瓜等		
4	林木	一般林木	用材林、防护林、经济林等	公顷、株	冲蚀、倒折、淤埋
		珍稀林木	专门保护的稀有、古树等		
5	草地	天然草地	草原、草场	公顷	冲蚀、淤埋
		人工草地	城镇绿地、苗圃		
6	耕地		农用地、园地、菜地等	公顷	冲蚀、淤埋
7	房屋	钢结构	饭店、商场、厂房等	平方米、间	变形、开裂、淤泥、掩埋
		钢混构架	住宅、饭店、办公楼、厂房等		
		砖结构	住宅、商用楼、厂房等		
		简易房屋	住宅、棚圈等		
8	生命线工程	供水系统	水厂、管线、泵站等	米、个、 座、处	变形、开裂、 淤埋、泄漏、 倾倒、折断等
		供电系统	电厂、线路、变电站等		
		供气系统	气厂、管线、储气站等		
		供热系统	厂(站)、管线、泵房等		
		通信系统	发射接收站、线路等		
9	水利工程设施		水库、大坝、水电站、堤防、 水闸、渠道、渡槽、机井等	座、米、 眼	开裂、变形、 垮塌、淤埋
10	铁路设施		路基、轨道、隧道、涵洞、 信号与防护设施	米、座	变形、悬空、 淤埋、失效等
11	公路和城市道路		路基、路面、涵洞、隧道、 防护工程等	米、座	开裂、变形、 冲蚀、淤埋
12	桥梁		正桥、引桥、防护工程等	座	开裂、变形、垮塌
13	港口和航道		航道、码头、航标等	米、座等	堵塞、冲蚀、失效
14	生产与生活构筑物		水塔、烟囱、高炉、贮器、 容器、井架等	座、个	开裂、变形、折 断、倒塌、淤埋等
15	机器设备、各类物资		机械设备、工业材料和产品 农用物资、商业物资等	台、件、辆、 米、吨等	流失、淤埋、 毁坏
16	室内个人财产		家用电器、生产、生活用品	座、处	流失、淤埋、损坏
17	其他		各类特殊设施、文物古迹、 特殊保护区等	座、处、 个	冲毁、淤埋、损坏

7.2 泥石流灾害受灾体价值核算

7.2.1 财富性资产价值核算基本方法

财富性资产主要指由人类劳动创造的各类财富，主要包括房屋、工矿企事业单位财富、公共和基础设施、个人财产等。其价值核算基本方法^[63,64]有：

1. 重置成本法

以现实条件下被评估资产全新状态的重置成本减去该项资产的实质性贬值、功能性贬值和经济性贬值，从而估算资产价值的方法。计算方法是：

$$\text{评估价值} = \text{重置成本} - \text{实质性贬值} - \text{功能性贬值} - \text{经济性贬值}$$

2. 现行市价法

通过市场调查，选择一个或几个与评估对象相同或类似的资产作为比较对象，分析比较对象的成交价格和交易条件，进行对比调整，从而估算出资产价值。计算方法是：

$$\text{评估价值} = \text{参照物现行市价} \pm \text{评价对象和参照物对比的差异金额}$$

3. 收益现值法

将评估对象剩余经济寿命期间每年（或月）的租期收益，用适当的折现率折现，累加得出基准日的现值，计算公式是：

$$\text{评估价值} = \sum_{t=1}^n \frac{P_t}{(1+r_t)^t}$$

式中： P_t ——第 t 期的预期收益额；

r_t ——未来第 t 期在数额上相当于本金化利率的折现率；

n ——剩余经济寿命期间的期数。

4. 账面净值调整法

对固定资产实行统一财会管理的单位和部门，以账面反映的固定资产净值为基础，按一定的系数进行调整，从而确定评价价值。

对于不同类型的资产，可根据具体条件选取适当的方法核算其价值。

7.2.2 资源性资产价值的核算

资源性资产是指特定主体所占有的并具有排他性的自然资源。在我国，长期以来，片面强调只有人类劳动创造的成果才有价值，忽视自然资源的价值属性而被无偿使用，因而普遍缺乏资源价值观念，只是在近些年来才逐渐得到重视，但还无统一的价值核算标准。对自然资源定价，实质上是对资源性资产在现实情况下有偿取得的价格估计或评定。对资源性资产补偿价格评估的一般途径是：

$$\text{资源性资产补偿价格} = \sum (\text{补偿价格和各构成要素} \times \text{该构成要素的计费标准}) \pm \text{参照比较调整额}$$

在实际应用时，一般采用以下两种简化方法：

(1) 费用核算法。按评估对象补偿价格的特定构成及计费标准来估价。

(2) 市场法。通过类似交易价格，考虑不可比因素并进行调整而得到评估价。

对泥石流灾害而言，其对自然资源的破坏主要是损毁土地，具体针对土地资源价值的核算方法，主要有以下几种：

(1) 基准地价法。根据土地不同的使用类别、区位及基础设施配套、土地开发情况分别评估、测算，从而确定土地资源价格。

(2) 市场比较法。在房地产市场已经形成，市场比较活跃的条件下，根据房地产交易实例，调整各差异因素，从而确定土地资源价格。

(3) 剩余计算法。基本思路是用被评估土地或类似土地的房地产整体出售价格扣除房屋建筑物的重估净值，其余额便是土地资源价格。

(4) 线路价格评估法。主要是针对商业用地，在临街繁华地段，土地利用程度越高、收益越大，其价格就越高；反之，离街道越远，土地利用程度越低，收益越少，其价格也就越低。据此，选用某一地块为标准单位，给定单价，再按其他地块距标准地块的远近给出深度系数，最后对各地块的价格求和，从而得到土地资源价格。

(5) 开发销售法。模拟土地按最优利用原则开发，按获取销售收入扣除开发成本、利润后的余额，即为土地资源价格。

7.3 受灾体受损程度的确定

不同受灾体在遭受泥石流灾害侵害后，其受损情况可有很大的差异，有的可以基本完好，仍具备原有功能和价值，有的则部分功能丧失，有的则可能完全毁坏。因此，必须针对不同受灾体类型，根据其遭受不同强度泥石流灾害的破坏表现，进行分类量化，确定各类受灾体灾害损失率。对于前述受灾体，可归纳为以下几种损害类型：

(1) 人员伤亡。突发的泥石流灾害，往往造成重大人员伤亡，受害方式一是快速的泥石流流动，人们来不及躲避而遭灾；二是房屋等建筑物垮塌而掩埋、砸伤或被泥石流淤埋。人员受灾程度的影响因素较多，在有预报或有预兆的情况下，人们可以快速躲避而避免伤亡。本研究对人员伤亡不做定量评价。

(2) 房屋等建筑物损毁。在泥石流流速大、冲击力强、堆积厚度大的强灾害区，房屋可造成毁灭性破坏，而随灾害强度的减弱可局部受损，按受损程度可分为四级：完全毁坏、严重损坏、中等损坏和轻度损坏。房屋的损毁程度是泥石流灾害易损性评价的主要内容。

(3) 公路、铁路、城市道路等交通设施和城市生命线工程、农田水利工程的损毁。应视具体地区的设施具体特点而定，对其破坏主要是冲蚀和淤埋，可根据各受灾体的损毁程度同样分为完全损坏、严重损坏、中等损坏和轻度损坏四级。

(4) 机械设备、物资和室内财产等损坏。往往与存放方式、地点密切相关，单独存放的物资、设备当遭受泥石流灾害的冲击、淤埋时而直接受到破坏；室内财产主要与相关建筑物受损程度直接相关。

(5) 农作物的损毁。在泥石流堆积区，主要是遭受淤埋，其次是冲蚀。一般在堆积厚度大于1 m的地区，农作物将完全损毁，并且土地一时难以恢复利用；在堆积区下游及边缘的漫流地带，农作物可遭受不同程度的损毁而不至于颗粒绝收，或能在较短时间内恢复生产。

(6) 土地资源的损毁。长期遭受泥石流灾害威胁的地区，土地资源价值会明显低于同类其他地区，特别是在危险度大的地段其价值基本丧失而无法利用。

为了详细地定量分析评价在泥石流堆积区内不同地段的危险程度和易损程度，本研究

提出运用数值模拟结果进行分析评价。具体方法是：对于某一强度（规模）泥石流灾害发生条件下，根据堆积区最大流速和堆积厚度分布的计算机模拟结果，即危险程度分布，通过分析评判不同类型受灾体对泥石流灾害的承灾能力，两者结合，综合确定不同类型受灾体在某一灾害强度条件下的破坏损失程度。用破坏损失率作为定量指标，并将其定义为：在某一强度泥石流灾害发生条件下，受灾体遭受破坏损失的程度，用 P 表示，取值范围为：

$$0 \leq P \leq 1$$

对于不同强度的泥石流灾害，破坏损失率不同。即使是同一强度的泥石流灾害，不同类型受灾体由于其抗灾能力不同，破坏损失率相应会有差异。

7.4 尼拉姑沟泥石流灾害易损性评价

7.4.1 受灾体价值评价

东川市城区是云南东川市的政治、经济、文化和商业中心，1997 年城区面积 9.1 km^2 ，人口 5.3 万人，固定资产 8.5 亿元，工业总产值 4.6 亿元，城近农村以农业为主，主产水稻、玉米、土豆和红薯等。全市人均收入 903 元，农村人均收入为 400 元。东川市是我国唯一列入国家“八七”扶贫攻坚计划的地级重点扶贫地区（市）。在尼拉姑沟泥石流堆积扇上，扇区中部散布尼拉姑村近 100 户人家，主要从事农业生产和到城区从事第三产业工作，扇区中下部为东川市主城区，分布近百家政权机关、事业单位和国有、集体及民营私有企业，居住了约 5000 名城区居民，还有部分外来流动人口。根据第六章危险性评价结果，在尼拉姑沟泥石流堆积扇危险区内，主要有以下类型的受灾体：①人口；②畜禽；③农作物；④土地资源；⑤房屋；⑥城市生命线工程；⑦水利工程设施；⑧城区道路；⑨生产设备和物资；⑩室内财产。为了便于分析评价，分为以下几类：①土地资源；②农作物；③房屋等建筑及室内财产；④城市生命线工程交通水利等基础设施；⑤人口。

现对各类受灾体价值评价（1997 年实际价值）如下（人口不再做具体评价）。

1. 土地资源

根据东川市计委提供的评价区航空遥感图像等资料，运用计算机图像处理技术和地理信息系统技术（GIS），将评价区的土地进行分类，根据遥感影像的灰度值，结合目视判译和实地调查，将评价区土地划分为五级：

A 级：城市中心区土地，房屋密度大于 50%，地形平坦，已经完全开发利用。

B 级：城市一般地区土地，房屋密度为 20%~50%，地形较平坦，已经基本开发利用。

C 级：城市周围地区土地及村庄内土地，房屋密度 < 20%。

D 级：耕地，为农业开发利用，地形较平坦。

E 级：坡荒地，地形坡度较大，大部分开发利用难度较大。

各级土地资源的价格核算，根据基准地价法，结合市场比较法，评定评价区各级土地的价格标准如下：A 级 300 元/m^2 、B 级 200 元/m^2 、C 级 100 元/m^2 、D 级 50 元/m^2 、E 级 20 元/m^2 。

根据以上评价结果，计算出土地资源价值分布见图 7.1。

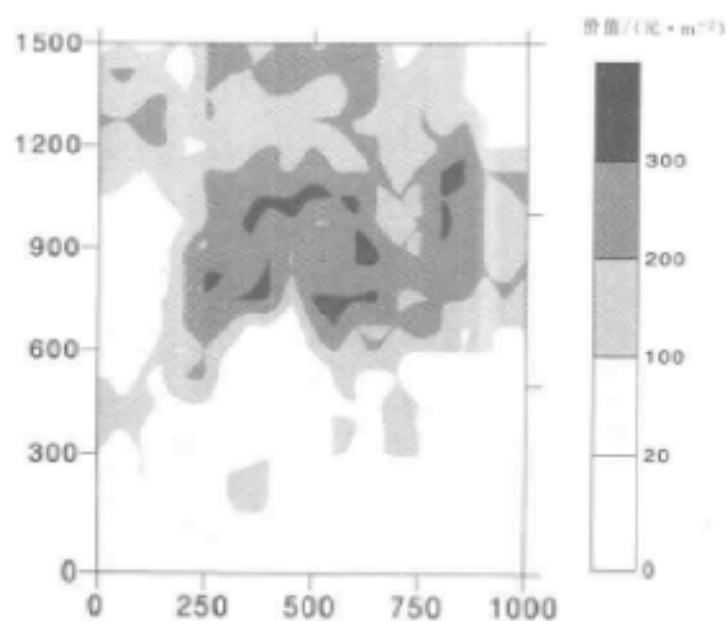


图 7.1 土地资源价值分布图
标尺单位: m

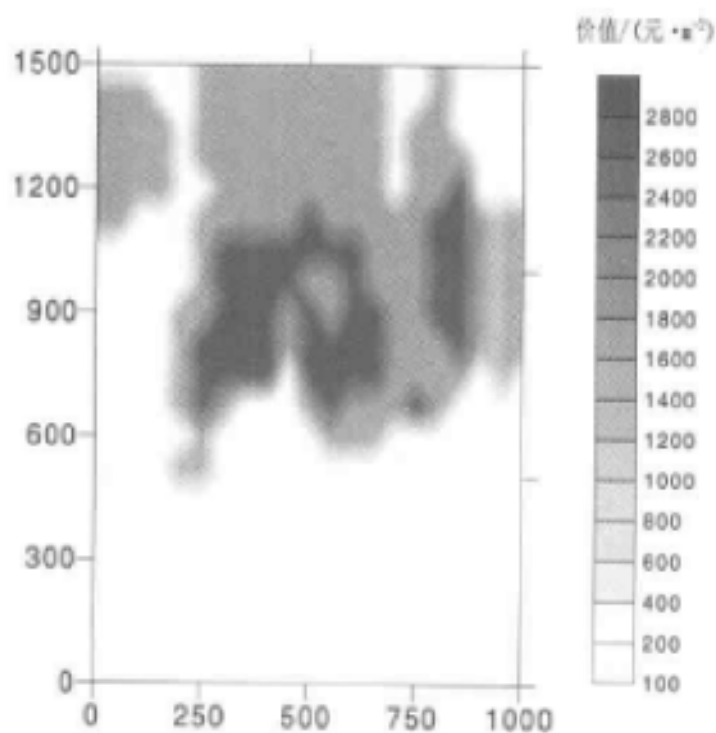


图 7.2 房屋、室内财产及基础设施等价值分布图
标尺单位: m

2. 农作物

农作物主要分布在D级和E级地的地段,农作物价值采用收益现值法计算,计算结果为: D级土地的农作物单位价值为15元/ m^2 , E级土地的农作物价值为5元/ m^2 。

3. 房屋等建筑及室内财产

房屋等建筑的价值评估比较复杂,本文根据东川市提供的实际调查统计资料和市场估价结果进行评定。由于室内财产难以统计计算,又因其破坏损失与建筑物损失呈正相关,为简便起见,取房屋等建筑价值的25%为室内财产价值。统计估价结果见图7.2。

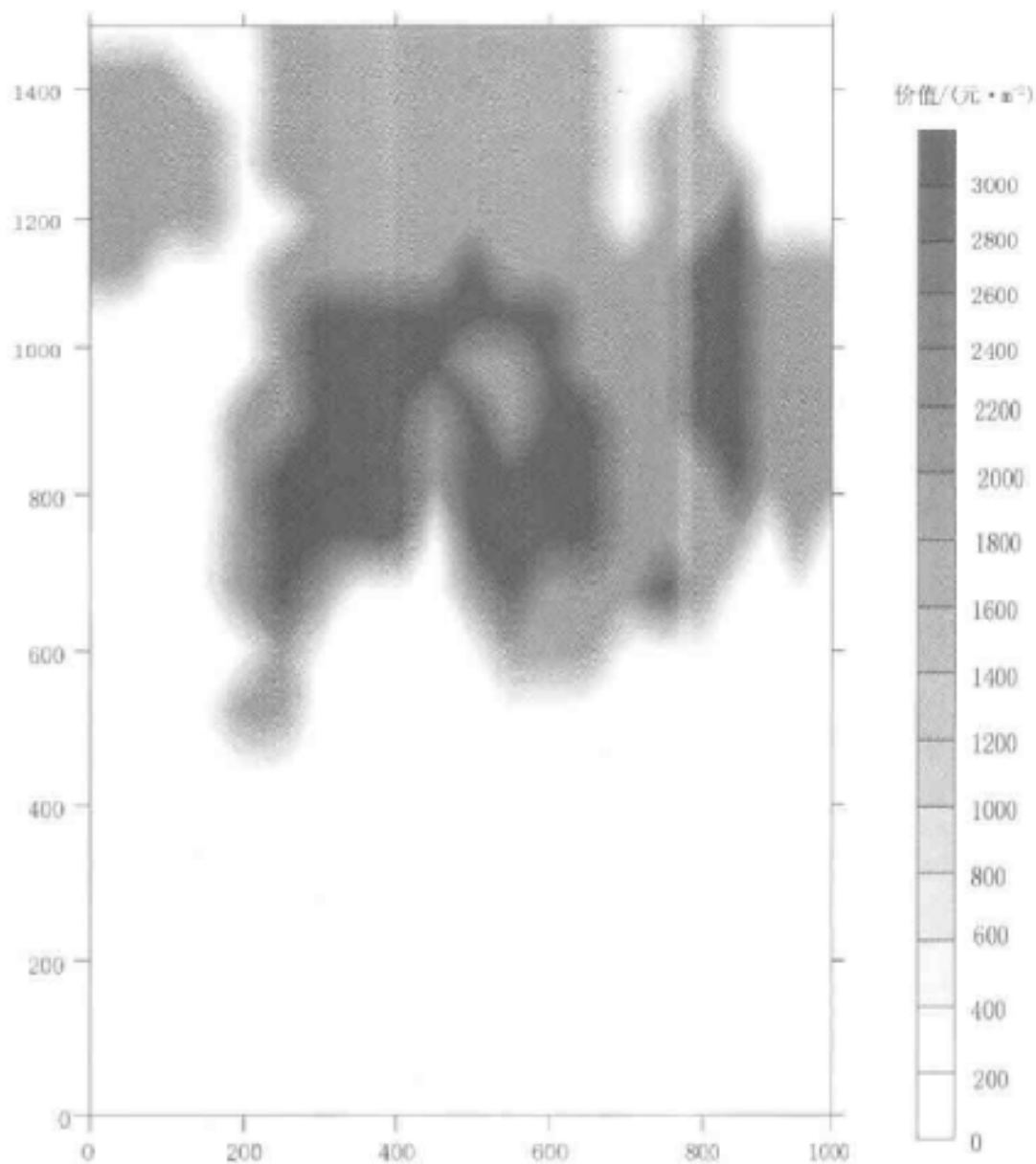


图 7.3 各类受灾体综合价值分布图

标尺单位: m

4. 城市生命线工程、交通水利等基础设施

它们的分布在评价区内很不均匀，据东川市有关同志介绍分析，其管网密度与土地用途关系密切，跟城市建筑密度呈正相关，根据价值估算，以上设施的价值密度在 A 级土地地区约 330 元/ m^2 ，在 B 级土地地区为 245 元/ m^2 ，C 级土地地区为 30 元/ m^2 ，D 级土地地区为 5 元/ m^2 ，E 级区为 0。

综合以上分类评价结果，得到尼拉姑沟泥石流灾害受灾体综合价值分布，见图 7.3。

7.4.2 受灾体受损程度的确定

尼拉姑沟泥石流堆积区内的各类受灾体，在遭受泥石流灾害的危害时，其受损程度根据本章第三节提出的运用数值模拟结果进行评价的方法确定，用破坏损失率来量化评价。破坏损失率的具体取值方法为：

1. 土地资源

根据对尼拉姑沟泥石流灾害危险性数值模拟得出的最大堆积厚度值的分布结果，考虑土地资源的承灾能力，取泥石流堆积厚度大于 2 m 时，视为完全损毁；小于 2 m 时，为简便起见，本文假定土地价值与堆积厚度减少值呈线性变化。据此计算出泥石流灾害对土地资源的破坏损失率分布值（图 7.4）。

2. 农作物和农田水利等基础设施

其破坏损失以堆积厚度为 1m 做为完全损毁（破坏损失率为 100%）的临界值，随堆积厚度值的减少破坏损失率依线性规律由 100% 减至 0%。据此计算出泥石流灾害对农作物和农田水利等基础设施的破坏损失率分布值（图 7.5）。

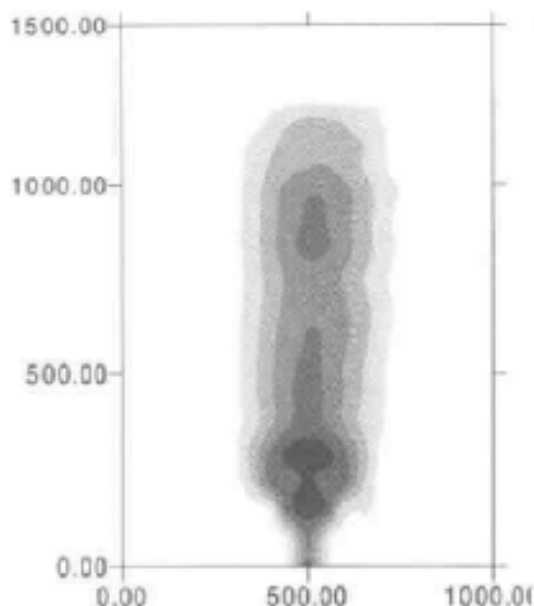


图 7.4 土地破坏损失率分布图
标尺单位：m

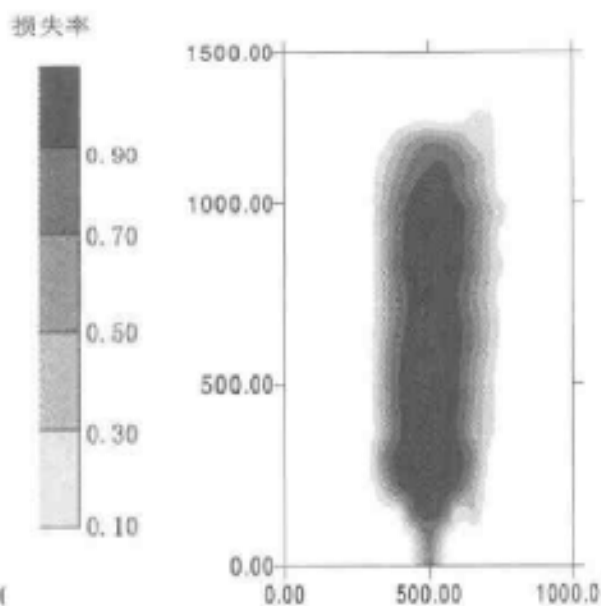


图 7.5 农作物破坏损失率分布图
标尺单位：m

3. 房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等

根据对尼拉姑沟泥石流灾害危险性数值模拟得出的最大流速和堆积厚度值的分布结果,结合评价区内房屋结构状况等,取泥石流最大流速大于 4 m/s 或堆积厚度值大于 3 m 为完全损毁的临界值,随流速和堆积厚度值的减少破坏损失率由 100% 降至 0%。据此计算出泥石流灾害对房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等的破坏损失率分布值(图 7.6)。

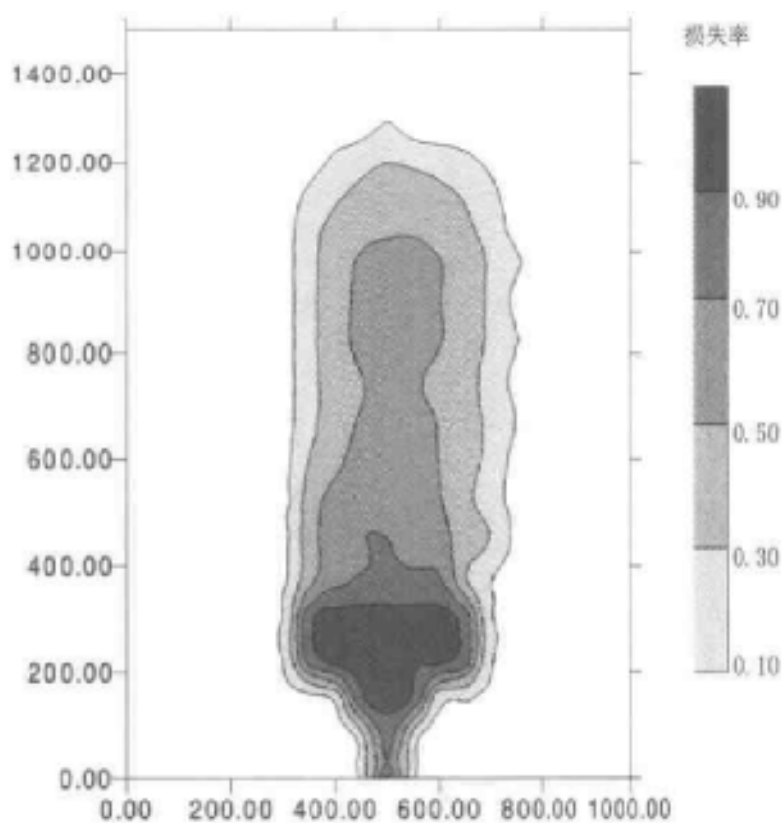


图 7.6 房屋等设施破坏损失率分布图

标尺单位: m

8 泥石流灾害破坏损失及防治工程效益评价

泥石流灾害破坏损失评价是指定量分析泥石流灾害经济损失程度的过程。它是在危险性评价和易损性评价的基础上进行的,即是在确定泥石流灾害发生概率、危险范围、危害强度和受灾体价值及损毁程度分析的基础上,进一步研究泥石流灾害损失构成,分析经济损失程度和损失分布。表征泥石流灾害经济损失的基本指标是用货币价值形式反映的灾害绝对损失额或损失强度(单位面积的损失额)。

泥石流灾害损失评价是泥石流灾害风险评估的主要结果,而防治工程效益评价则是这一结果的直接应用,防治工程效益评价是分析灾害防治工程的有效性 & 投资与可能产生的风险损失进行效益分析比较的过程,主要评价指标是投保比。

8.1 泥石流灾害破坏损失评价方法

确定泥石流灾害破坏损失的评价方法,罗元华、张梁、张业成等研究^[86]提出采用:

1. 趋势分析法

该方法以现状经济损失或历史灾害损失为基础,根据比拟分析和趋势预测,确定适当的调整系数,建立预测模型,评价灾害风险损失。

$$S_y = S(1 + A)^t \cdot (1 + B)^t \cdot b$$

式中: S_y ——预测灾害直接经济损失(万元);

S ——现状(历史)灾害直接经济损失(万元);

A ——危险性增衰系数;

B ——易损性增衰系数;

t ——预测年年距;

b ——价格调整系数。

2. 概率分析法

根据泥石流灾害历史活动规律及泥石流成灾基础条件和激发条件的充分程度,在进行危险性概率分析评价和相对应状态易损性评价并进行损毁程度分级的基础上,统计得出不同概率下灾害期望损失,计算公式为:

$$S_q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m G_{ij} \cdot J_{ij} \cdot K_i \cdot L_{ij} \quad (8.1)$$

式中: S_q ——灾害期望损失;

i ——受灾体类型;

- j ——受损毁程度等级；
- G_{ij} ——评价区（单元）第 i 类受灾体发生 j 级破坏的概率；
- J_{ij} —— i 类受灾体发生 j 级破坏下的价值损失率；
- K_i —— i 类受灾体的平均单价；
- L_{ij} —— i 类受灾体发生 j 级破坏的数量。

第一种方法是建立在有以往灾害事件的损失调查统计资料的基础之上的，第二种方法应用需要丰富的实际经验，这两种方法都是以经验资料为依据建立的统计预测模型，实际应用的随意性较大，缺乏理论依据。本文提出，对于泥石流灾害堆积区破坏损失，根据第六章、第七章提出的运用数值模拟结果评价方法，直接利用泥石流灾害破坏损失率及其在整个堆积区内的分布值；结合不同类型受灾体在相应地段的价值分布，计算得出不同类型受灾体的破坏损失。对不同类型受灾体的破坏损失求和，即得到各类受灾体的综合破坏损失。计算公式为：

$$S_m = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} \cdot M_{ij} \quad (8-2)$$

式中： S_m ——泥石流灾害风险损失（万元）；

P_{ij} ——第 i 个评价单元的第 j 类受灾体的破坏损失率；

M_{ij} ——第 i 个评价单元的第 j 类受灾体的经济价值（万元）；

n ——评价单元个数；

m ——受灾体类型个数。

8.2 尼拉姑沟泥石流堆积区灾害经济损失评价

根据第六章危险性评价和第七章易损性评价结果，以及上一节提出的经济损失计算方法，对尼拉姑沟泥石流堆积区灾害经济损失评价如下（以 1997 年实际价值计算，未考虑时间变化的影响）：

在发生 50 年一遇（2%）灾害条件下的经济损失：

1. 土地资源价值损失

根据第七章土地资源价值评价结果和泥石流灾害对土地资源的破坏损失率分布值。将评价区各单元价值乘以相应单元的破坏损失率，即得到土地资源价值损失分布，见图 8.1，评价区总的土地资源价值损失为 3142 万元。

2. 农作物和农田水利等基础设施价值损失

根据第七章对农作物价值和农田水利设施价值评价结果和泥石流灾害对农作物和农田水利等基础设施等的破坏损失率分布值，将评价区各单元价值乘以相应单元的破坏损失率，即得到农作物等价值损失分布，见图 8.2，评价区总的价值损失为 82 万元。

3. 房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等价值损失

根据第七章的房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等价值评价结果和泥石流灾害对房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等的破坏损失率分布值，将评价区各单元价值乘以

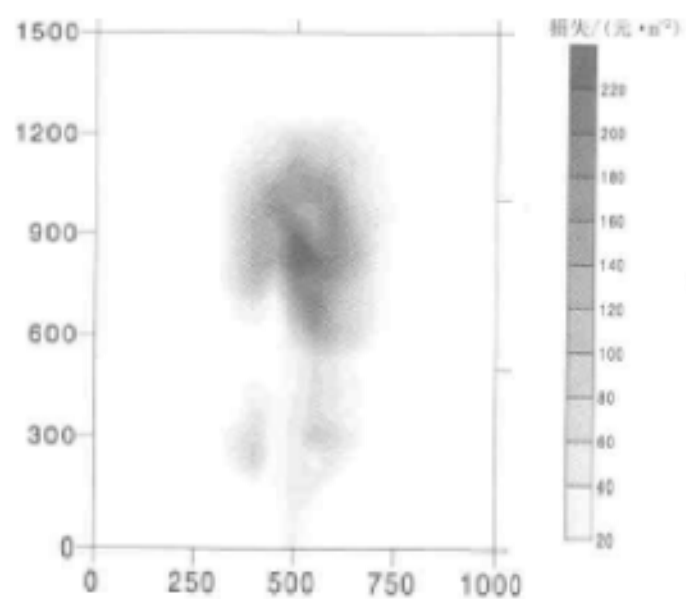


图 8-1 2%频率泥石流灾害的土地资源价值损失分布图
标尺单位: m

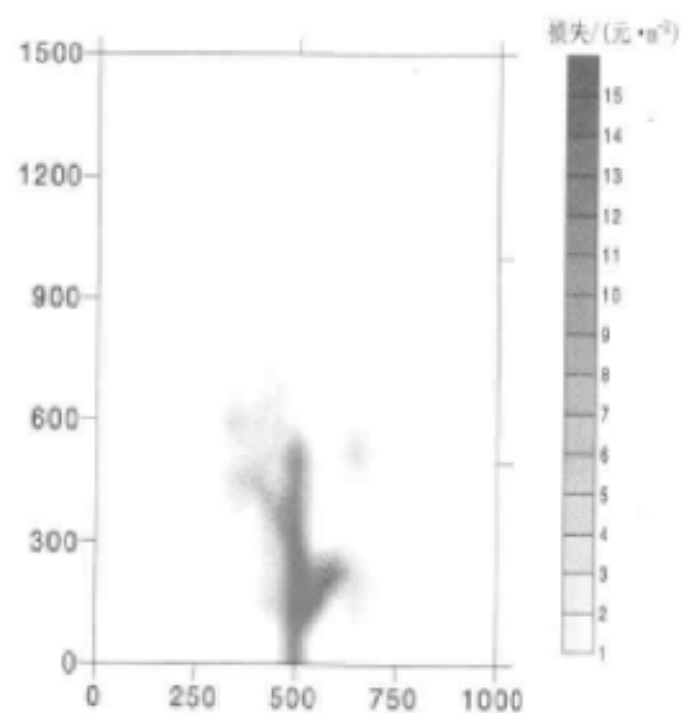


图 8-2 2%频率泥石流灾害的农作物价值损失分布图
标尺单位: m

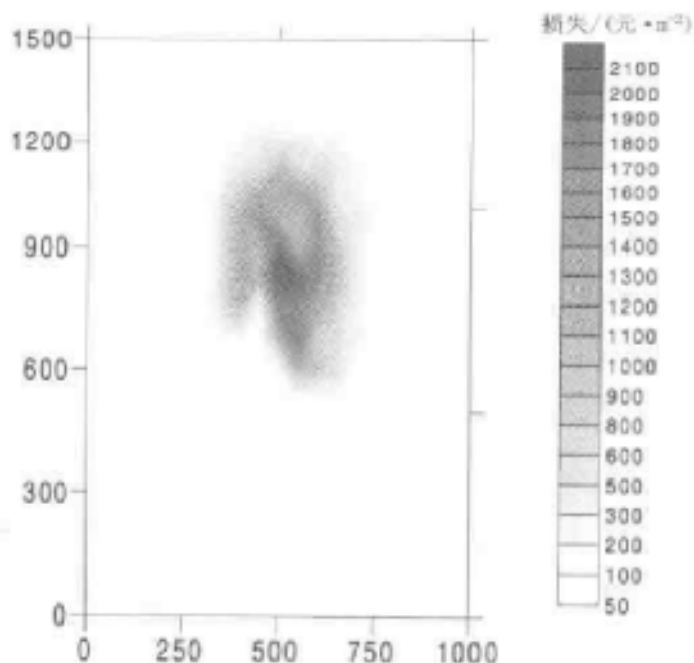


图 8.3 2%频率泥石流灾害的房屋、室内财产及基础设施价值损失分布图
标尺单位: m

相应单元的破坏损失率,即得到房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等的价值损失分布,见图 8.3,评价区总的价值损失为 18892 万元。

4. 综合经济损失

综合以上分类评价结果,得到尼拉姑沟在发生 50 年一遇(2%频率)泥石流灾害下的综合损失价值分布,见图 8.4,统计得到评价区总的综合价值损失为 22116 万元。

同样,可评价得出在 100 年一遇条件下(1%)和在 200 年一遇条件下(0.5%)泥石流灾害的分类损失和综合损失。综合损失分布图分别见图 8.5 和图 8.6。1%频率下的土地资源价值损失为 3021 万元,农作物和农田水利等基础设施价值损失为 111 万元,房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等价值损失为 19691 万元,综合经济损失价值为 22823 万元。0.5%频率下的土地资源价值损失为 4424 万元,农作物和农田水利等基础设施价值损失为 138 万元,房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等价值损失为 19158 万元,综合经济损失价值为 23720 万元。

在各类破坏损失中,主要是房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等价值的损失,它们占总损失的 80%以上;其次是土地资源价值损失,占 11%~19%;农作物等的价值损失所占的比例很小,不足 1%。说明在建筑密度较高的城区,单位面积经济价值高,一旦发生泥石流灾害,损失更为巨大,这些地区应是泥石流灾害防治的重中之重。

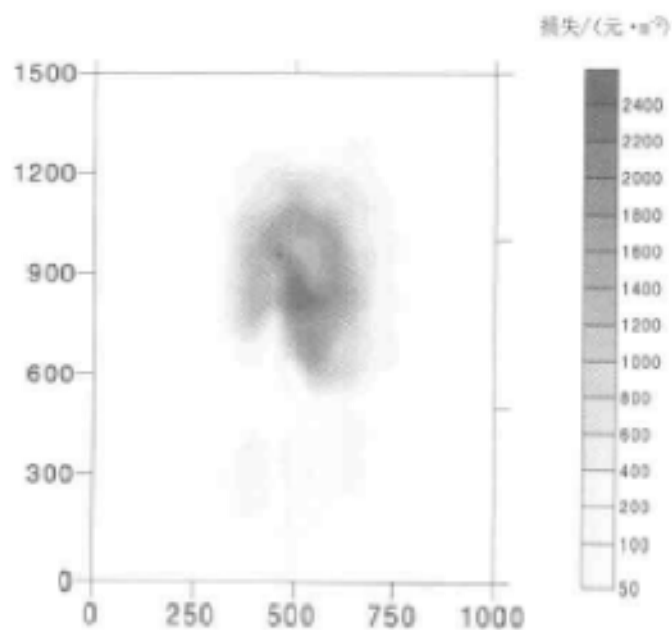


图 8.4 2%频率泥石流灾害的各类受灾体综合价值损失分布图
标尺单位: m

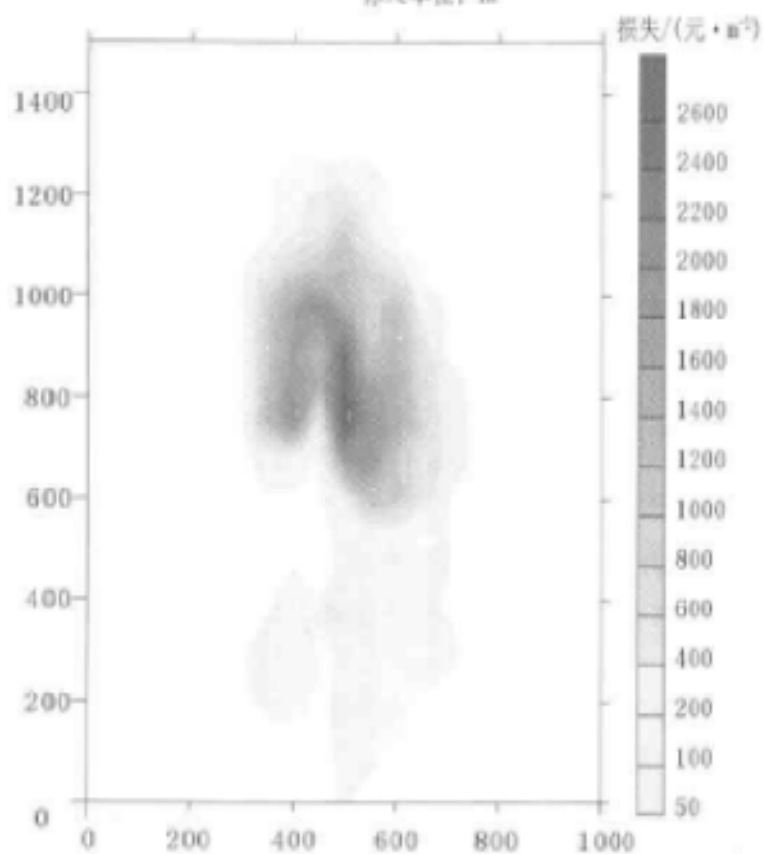


图 8.5 1%频率下各类受灾体综合价值损失分布图
标尺单位: m

8.3 防治工程效益评价方法

泥石流灾害防治工程是以一定的防御标准为前提的，防御标准过低，所设计的防治工程措施不能有效地抵御较大规模泥石流灾害的袭击而达不到应有的防灾减灾效果；而防御标准过高，无疑增大防治工程造价，不一定经济合理，所以应以投保比效果最好为基本原则^[45]。为了评价防治工程效益，应对泥石流防治工程措施及其造价有一个基本的了解。治理泥石流灾害一般采取以下工程措施^{[12][29][53]}：

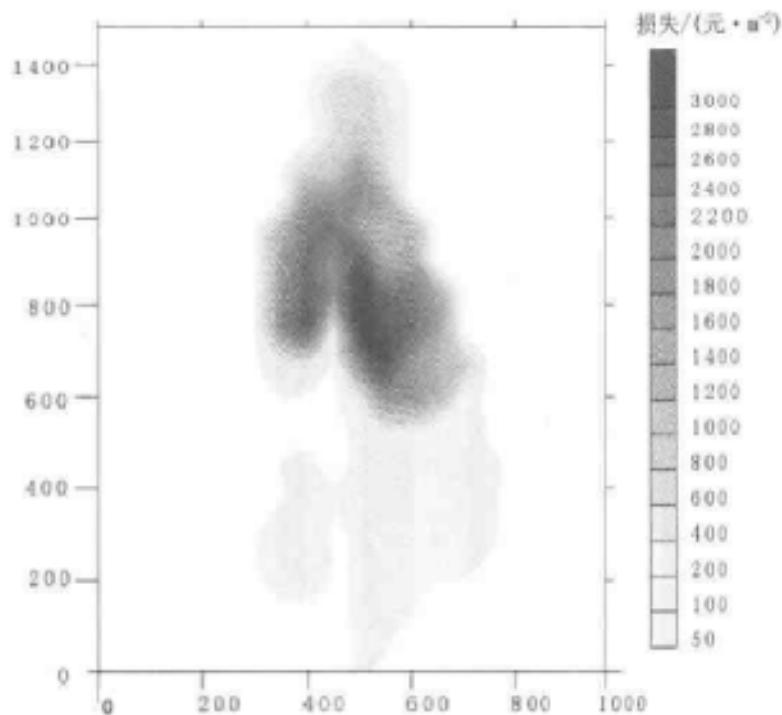


图 8.6 0.5%频率下各类受灾体综合价值损失分布图
标尺单位：m

- (1) 拦挡工程。修建谷坊、拦砂坝、格栅坝等，蓄水（或排水）拦砂，减小泥石流流速、密度、规模，抬高局部沟段侵蚀基准，护床固坡，降低泥石流冲刷破坏能力，减轻沟床侵蚀。
- (2) 排导工程。修建导流堤、急流槽、束流堤等，引水输砂，规范泥石流路径，防止漫流，削弱泥石流冲击破坏能力。
- (3) 停淤工程。根据泥石流堆积地区地形条件，修建停淤场，将泥石流引入预定场所减速停淤，防止漫流。
- (4) 沟道整治工程。采用水泥砂浆砌石、石笼等方法保护泥石流沟坡，防止岸坡坍塌、滑移；在沟底进行铺砌或修建肋板稳固沟底，减少沟底冲刷。

(5) 防护工程与错避工程。对泥石流地区的铁路、公路、桥梁、隧道、房屋等工程设施,进行防护或错避,抵御或避开泥石流的危害。防护工程包括修建护坡、挡墙、顺坝、丁坝等。错避工程主要有两类:一是跨越式错避即修建桥梁,使工程设施凌架于泥石流沟上空,免受泥石流破坏;二是穿过式错避即是将工程设施置于泥石流沟地下,避开泥石流破坏。

(6) 躲避搬迁。对于威胁严重,难以防护的工程建筑,选址搬迁,避免灾害破坏。

(7) 植树造林,封山育林,保持水土,减少侵蚀,控制松散物质的积聚,从而从根本上防止泥石流灾害的发生。

针对不同泥石流沟,具体工程措施有所差异,要结合具体情况,合理布设。工程方案确定后,即可依据有关工程单价定额,计算出相应工程造价。

泥石流灾害防治工程效益一般采用投入产出法计算,计算方法为:

(1) 纯收益法:

$$F_x - F_y - F_c$$

(2) 相对收益法:

$$f_x = \frac{F_y}{F_c}$$

式中: F_x ——灾害防治工程在有效期内获得的防治效益(万元);

f_x ——灾害防治工程在有效期内获得的相对效益(或称投保比);

F_y ——防治工程在有效期内获得的各种收益(万元);

F_c ——防治工程的成本投入(万元)。

8.4 尼拉姑沟泥石流灾害防治工程效益评价

8.4.1 尼拉姑沟泥石流灾害防治主要工程措施

为了有效地防治尼拉姑沟泥石流灾害,云南省东川市泥石流防治研究所于1997年7月提出了尼拉姑沟泥石流灾害综合治理可行性研究报告,设计了具体防治方案。该方案以控制50年一遇(2%)泥石流灾害为设计标准,采用稳坡、固床、排导等工程措施,结合生物措施,综合治理。除对已经修建的防护工程维修加固外,新设计的工程量主要有:①修建谷坊坝27座;②修建排导槽513 m;③修建护岸堤560 m;④修建挡土墙70 m;⑤封山育林,植树造林面积3.0 km²。

以上工程共计投资约410万元。若提高防灾设计标准,据推算,防治工程如按控制1%频率泥石流灾害设计,工程约需投资450万元;如按控制0.5%频率泥石流灾害设计,工程约需投资500万元。

8.4.2 尼拉姑沟泥石流灾害防治效益评价及有关对策建议

根据前述的灾害经济损失评价结果,尼拉姑沟泥石流灾害防治工程按控制发生50年一遇(2%频率)灾害设计,相应的防灾效益(投保比)为:

$$f_{x1} = F_y / F_c = 53.9$$

若按控制发生 100 年一遇（1%频率）灾害设计，相应的防灾效益（投保比）为：

$$f_{x2} = 50.7$$

若按控制发生 200 年一遇（0.5%频率）灾害设计，相应的防灾效益（投保比）为：

$$f_{x3} = 47.4$$

由上可见，尼拉姑沟泥石流灾害防治工程的减灾效益是显著的，尤其是按控制发生 50 年一遇（2%频率）灾害设计的防灾工程，效益最佳。在实施防灾工程时，根据本研究成果，提出如下建议：

（1）尼拉姑沟泥石流堆积区中下部是主城区，一旦发生灾害，其造成的损失非常严重。根据本研究的评估结果，在发生 50 年一遇（2%）灾害条件下，可能造成的经济损失达 22116 万元；在发生 100 年一遇（1%）和 200 年一遇（0.5%）灾害条件下，可能造成的经济损失分别达到 22823 万元和 23720 万元。必须予以高度重视，防范灾害的发生。

（2）尼拉姑沟泥石流在冲出山口后，最危险是出山口的主流线附近，即是尼拉姑村附近地段，泥石流来势凶猛，流速快，冲击力强，堆积厚度大，在防治工程布设和实施时要充分注意这一特点。

（3）近期应加强泥石流灾害监测和预报工作，在工程没有完成以前，要注意防范大灾，根据泥石流的堆积规律和范围加强设防和预警。城区改造和建设要与泥石流灾害防治工程相协调，提高抵御灾害的能力。

（4）消除泥石流灾害的根本措施是保持水土，控制泥石的启动，单纯的工程措施只能在一定时限内抵御一定规模的泥石流灾害。因此，建议在实施工程措施的同时，切实加强植树造林，涵养水土，从而从根本上消除泥石流灾害。

9 结 论

泥石流堆积的数值模拟是泥石流研究的前沿领域,其成果可为高精度小范围泥石流灾害风险评估提供翔实而又必需的多项评价要素。它不仅是灾害危险性评价的基本成果,也是确定灾害易损程度的基本依据,并可据此直接用于计算泥石流灾害损失强度。因此,数值模拟是泥石流灾害风险评估的关键性工作。在此工作成果基础上的灾害风险评估,理论依据更为充分,评价精度大为提高,具有重要的实际意义和广阔的应用前景。通过研究,主要获得以下成果。

(1) 泥石流在冲出沟口后的堆积区,可近似地描述为二维扩散流动。对于粘性泥石流,可用堆积区表面高程随时间的变化量来近似描述泥石流在堆积过程中的堆积作用影响,用运动修正系数来表征泥石流的特殊运动特性,运动阻力项主要考虑重力、动水压力和沟床的剪切阻力(包括屈服应力)的联合作用,从而根据质量守恒原理和动量守恒原理推导出泥石流连续性方程和运动方程。联立连续性方程和运动方程组,即得出描述泥石流堆积过程的数学模型。

(2) 泥石流堆积数学模型目前还没有确切的解析解。研究采用数值法求解,运用算子分裂法建立数学模型的差分格式,以C++语言设计,开放式编制计算机程序,人机对话方式设置参数,整个计算机程序具有通用性、可扩展性和易维护性。

(3) 为了验证数值模拟结果的正确性,作者根据刘希林、唐川的泥石流堆积模型实验资料,对不同密度、不同坡度和不同补给量的实验结果和计算机数值模拟结果进行分析对比表明,无论是泥石流堆积形态变化趋势,还是堆积厚度变化特征,都具有很好的-致性,平均拟合率达到90%左右。经与云南怒江芭蕉河1989年10月20日的泥石流堆积实际观测资料对比,同样,数值模拟结果和实际堆积特征基本一致。表明本研究建立的数学模型是合适的,相应的数值计算方法是正确的,数值模拟方法结果具有实用价值。

(4) 泥石流堆积数值模拟结果表明,泥石流的堆积形态变化主要受堆积区坡度、泥石流流体密度和补给量大小的影响,而与泥石流速度特征和运动修正系数变化的影响不大。当堆积区坡度较小时,泥石流主要在出山口堆积,堆积厚度沿流向急剧减小;随着堆积区坡度增加,泥石流堆积长度不断加大,沿流向的堆积厚度变化逐渐减缓。在一定坡度条件下,随着泥石流密度的减小,泥石流堆积形态由近圆形向椭圆形到长条形变化,堆积长度不断增大。同一性质的泥石流,一次补给量(规模)越大,泥石流堆积长度越大,堆积面积相应增大,但堆积宽度一般变化不大。

(5) 运用数值模拟方法,根据具体泥石流沟在出山口后的初始条件和边界条件(包括泥石流在出山口的运动特征、性质和流量流速过程及堆积区地形变化等),可模拟泥石流堆积的动态过程,展现其流速、堆积厚度在堆积区的时空展布特征,从而为泥石流灾害风险

评估提供基本参数,为进一步分析研究提供依据。

(6) 泥石流灾害风险评估是减轻泥石流灾害损失的重要非工程措施,开展这方面的研究具有重要实际意义。提出了开展泥石流灾害风险评估方法步骤和评价指标体系,结合云南东川市尼拉姑沟泥石流堆积灾害实例,以数值模拟结果为依据,研究提出了系统的泥石流灾害风险评估体系(针对具体泥石流沟的点评估),即在对泥石流成灾条件和受灾体分布进行调查统计分析的基础上,以危险性评价为基础,以易损性评价为核心,以灾害损失和防灾减灾效益评价为结果,分析评估并为有关决策提出建议。

(7) 泥石流灾害危险性评价的主要任务是确定泥石流灾害的活动程度和强度并评价泥石流的破坏能力。危险性评价包括泥石流发生概率的确定、危险范围和强度的确定以及危险度值的确定。本研究总结论述了有关方法,并以尼拉姑沟为实例,应用数值模拟成果,利用 GIS 技术,分析和展示了泥石流灾害在堆积区的危险性特征。

(8) 泥石流灾害对社会经济环境的危害广泛而深远。本文根据危害对象特征概括为对人类自身的危害、对人类物质财富的危害、对人类生产经营活动的危害和对自然资源环境的破坏四个方面。将受泥石流灾害直接威胁的受灾体划分为 17 类。总结了财富性资产和资源性资产的有关计算方法,分析了受灾体受损程度和破坏损失的评价方法。提出了破坏损失率的概念和根据数值模拟结果计算破坏损失率的方法。

(9) 以尼拉姑沟泥石流灾害为实例,利用遥感资料,运用 GIS 评价技术方法,分析评价了研究区的经济价值分布;根据爆发不同频率(规模)泥石流灾害条件下数值模拟结果,在进行危险性评价的基础上,计算了相应危险范围内的破坏损失率和破坏损失。根据破坏损失评价结果,结合已经设计的尼拉姑沟泥石流灾害防治工程及其造价,对防治工程效益进行了分析评价,为经济有效地实施该项灾害防治工程提出了相关的对策建议。

综上所述,本文的研究在泥石流堆积数值模拟的成果和应用上是初步的,尤其是结合用于灾害风险评估之中,只是一个开端,在针对不同实际条件进行数值模拟的参数确定、各类受灾体综合价值的评定及动态变化、风险评估与防灾工程布设相结合以及人员伤亡风险评估方法等多方面都尚需做进一步的研究,并期望取得成果。

附录

东川市深沟泥石流堆积动态模拟 及工程有效性评价实例

1. 泥石流活动特点

深沟是流经东川市区且对东川市人民生命财产威胁严重的另一条泥石流沟。深沟发源于小江右岸最高峰——大牯牛寨山，源头高程 4017 m，由东向西流入小江，入江口高程 1160 m，高差 2857 m。主沟长约 9.6 km，沟道平均纵坡 16.7%，流域面积 29.29 km²。有常年流水，枯水流量为 0.48 m³/s。

深沟流域形态呈勾状，上游补给区汇水面积占总面积 2/3 以上，其中最宽处约 7 km，山峰耸立，地势陡峭，多为灰岩等基岩出露，可耕地面积不多，人迹稀少，仅有少数几个高山村寨。由于高山区平均气温低于河谷区 15℃ 以上，加上山体基岩裸露，仅部分坡地有稀疏草被，树林极少，不利于水土涵养，降雨径流量大，易于松散物质的积聚，为泥石流的爆发提供丰富的物质来源。

在海拔 1300~1700 m 之间的流通区，沟道两岸岸坡较陡，左岸坡度 49°，右岸坡度 45°，沟底平均宽 45 m，沟道侵蚀发育，断面呈“U”形，在强暴雨条件下，有利于泥石流的流通。

在海拔 1300 m 以下，深沟进入巨大的山前洪积扇地区，为泥石流的堆积区，同时也是东川市区，地势变得较为平坦，在标高 1200 m 左右，沟道由北东流向西南转为由东向西流进小江。堆积区是深沟泥石流灾害的主要成灾地区。

深沟是一条老泥石流沟，从堆积物剖面特征分析，历史上是粘性泥石流和稀性泥石流交替活动的沟谷，到了近期，逐渐演变成稀性泥石流为主。

深沟泥石流的性质：为较典型的稀性泥石流，其密度 $\rho_c = 1.52 \text{ t/m}^3$ ，属于多年一遇的低频发泥石流。

泥石流规模：根据杜榕桓、康志成、陈循谦等的计算结果，最大流量值为：

在 50 年一遇频率（2%）下： $Q_{\max 1} = 672.2 \text{ m}^3/\text{s}$

在 100 年一遇频率（1%）下： $Q_{\max 2} = 791.2 \text{ m}^3/\text{s}$

在 200 年一遇频率（0.5%）下： $Q_{\max 3} = 815.1 \text{ m}^3/\text{s}$

根据出山口的断面形态和据有关计算结果，对应的最大流速值为：

在 2% 频率下 $v_{\max} = 6.0 \text{ m/s}$

在 1% 频率下 $v_{\max} = 6.8 \text{ m/s}$

在 0.5% 频率下 $v_{\max} = 7.2 \text{ m/s}$

泥石流灾害发生过程：根据吴积善等的研究，一次泥石流爆发过程一般都较短暂，呈 F 分布或卞方分布，泥石流在成灾过程中，流量快速增至峰值后，即开始降低，降速初期较快而逐步减慢，一般整个过程为 30 min 左右。本研究即假定深沟泥石流灾害发生过程呈 F 分布，取整个过程为 30 min。

2. 泥石流堆积动态模拟

根据深沟堆积区的实际地貌条件（主要是地形等高线），选取高程为 1260 m 处的沟口为堆积区入口，据实际地形确定各节点的高程值。

模拟区范围取：长 1500 m×宽 1000 m，网格长度为 100 m×75 m，实际地貌详见图 1，简化的地形图见图 2。表 1 为模拟深沟泥石流堆积时的参数，图 3 为模拟 50 年一遇（2%频率，出山口最大流速为 6 m/s）泥石流爆发的堆积动态过程（取速度模型为 F 分布，泥石流爆发的历时为 30 min）。

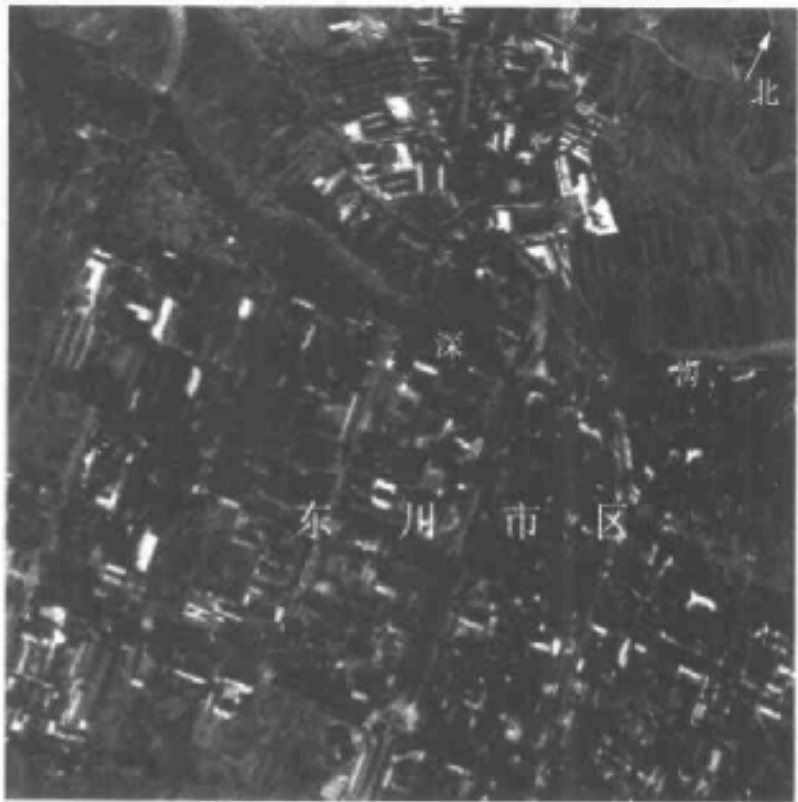


图 1 研究区地貌图（航空遥感图像）

表 1 深沟泥石流数值模拟主要参数表

$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	$\rho_s/(g \cdot cm^{-3})$	D/cm	a_1	β	\sin/ϕ
1.52	2.8	2.04	0.42	1.1	0.34

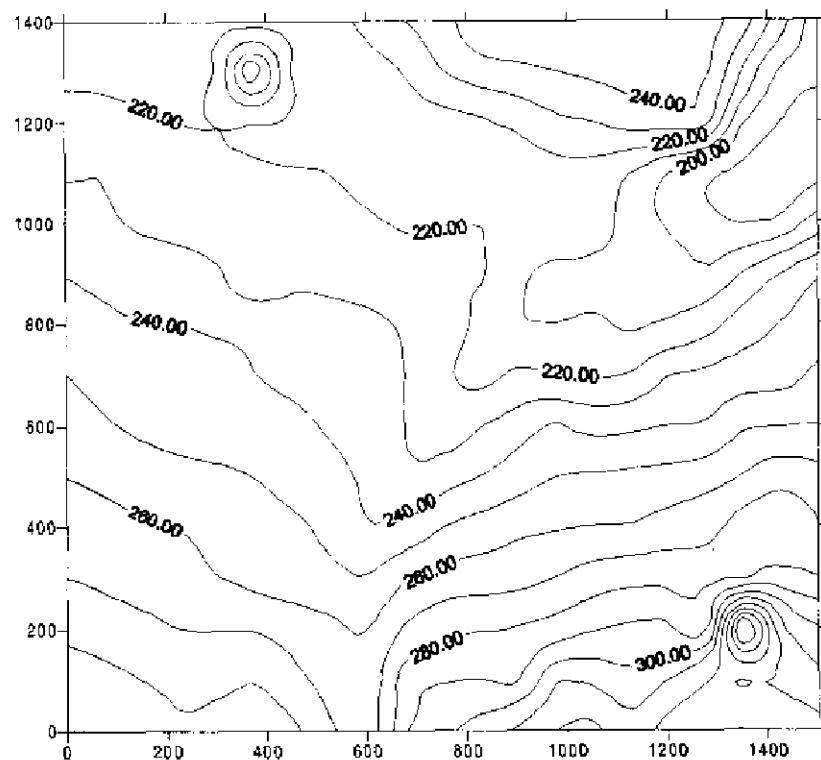
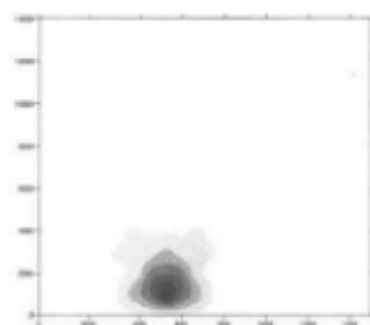


图 2 研究区地形简图 (单位: mm)

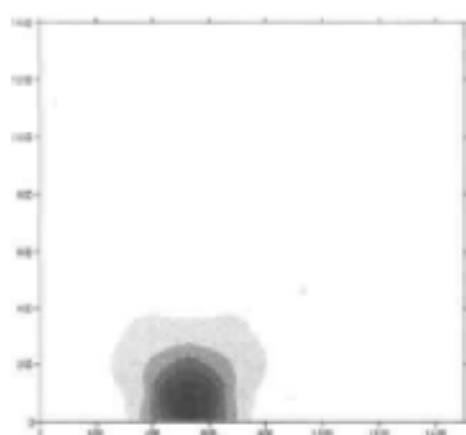
由图 3 可知, 在泥石流爆发初期, 沿地形较低洼处快速延伸堆积, 堆积厚度在出山口附近增加, 同时沿主坡角方向和两边侧向堆积, 在泥石流爆发后的 6 min 左右, 近山口的堆积区 (扇) 顶部厚度和宽度基本达到最大值, 之后主要沿主坡角方向延伸堆积, 发展逐渐减缓到最终停止。



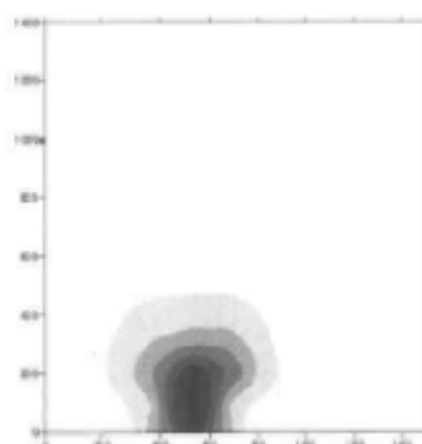
A $t=3$ min



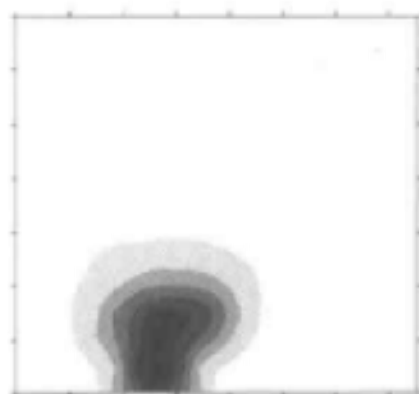
B $t=6$ min



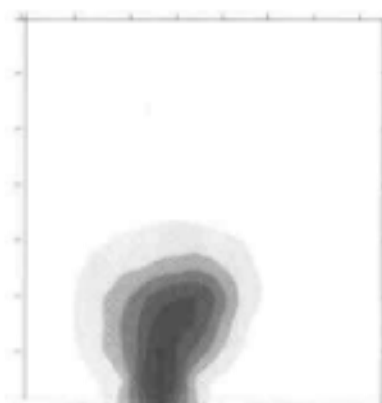
C $t=9$ min



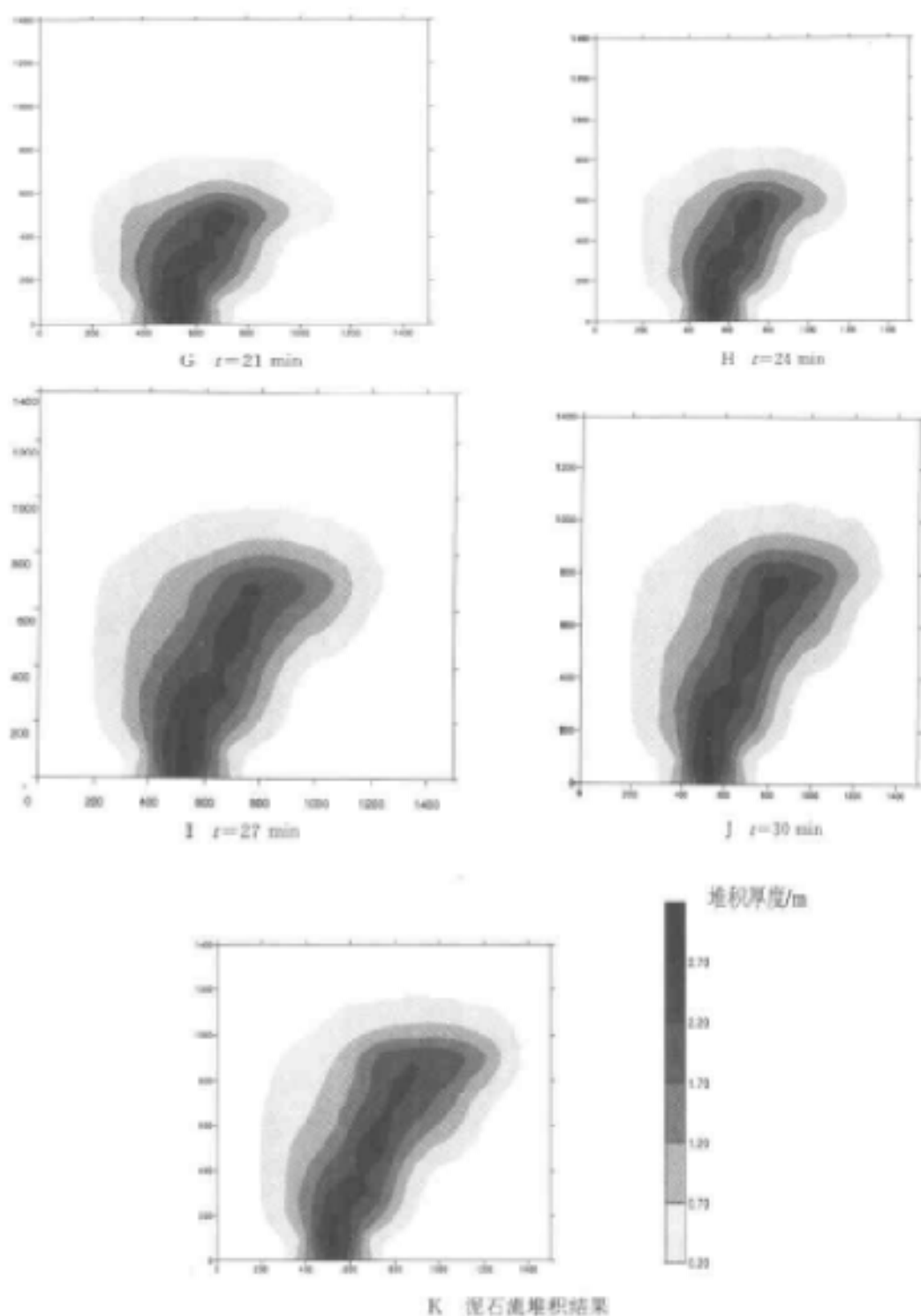
D $t=12$ min



E $t=15$ min



F $t=18$ min



K 泥石流堆积结果

图3 深沟2%频率的泥石流爆发堆积过程平面图

标尺单位: m

3. 受灾体价值评价

深沟泥石流堆积扇是东川市的主城区之一，在堆积区分布百余家政权机关、事业单位和国有、集体及民营私有企业，居住了1万余名城區居民，还有部分外来流动人口。在深沟泥石流堆积扇危险区内，主要有以下类型的受灾体：①土地资源；②农作物；③房屋等建筑及室内财产；④城市生命线工程交通水利等基础设施；⑤人口。

现对各类受灾体价值评价（1997年实际价值）如下（人口不做具体评价）。

（1）土地资源

根据东川市计委提供的评价区航空遥感图像等资料，运用计算机图像处理技术和地理信息系统技术（GIS），将评价区的土地进行分类，根据遥感影像的灰度值，结合目视判译和实地调查，将评价区土地划分为五级：

A级：城市中心区土地，房屋密度大于50%，地形平坦、已经完全开发利用。

B级：城市一般地区土地，房屋密度为20%~50%，地形较平坦，已经基本开发利用。

C级：城市周围地区土地及村庄内土地，房屋密度<20%。

D级：耕地，为农业开发利用，地形较平坦。

E级：坡荒地：地形坡度较大，大部分开发利用难度较大。

各级土地资源的价格核算，根据基准地价法，结合市场比较法，评定评价区各级土地的价格标准如下：A级300元/m²，B级200元/m²，C级100元/m²，D级50元/m²，E级20元/m²。

（2）农作物

农作物主要分布在D级和E级地的地段，农作物价值采用收益现值法计算，计算结果为，D级土地的农作物单位价值为15元/m²，E级土地的农作物价值为5元/m²。

（3）房屋等建筑及室内财产

房屋等建筑的价值评估比较复杂，本文根据东川市提供的实际调查统计资料和市场估价结果进行评定。由于室内财产难以统计计算，又因其破坏损失与建筑物损失呈正相关，为简便起见，取房屋等建筑价值的25%为室内财产价值。

（4）城市生命线工程、交通水利等基础设施

它们的分布在评价区内很不均匀，据东川市有关同志介绍分析，其管网密度与土地用途关系密切，跟城市建筑密度呈正相关，根据价值估算，以上设施的价值密度在A级土地区约330元/m²，在B级土地地区为245元/m²，C级土地地区为30元/m²，D级土地地区为5元/m²，E级区为0。

根据以上分析统计，计算出模拟区受灾体综合价值分布见图4。

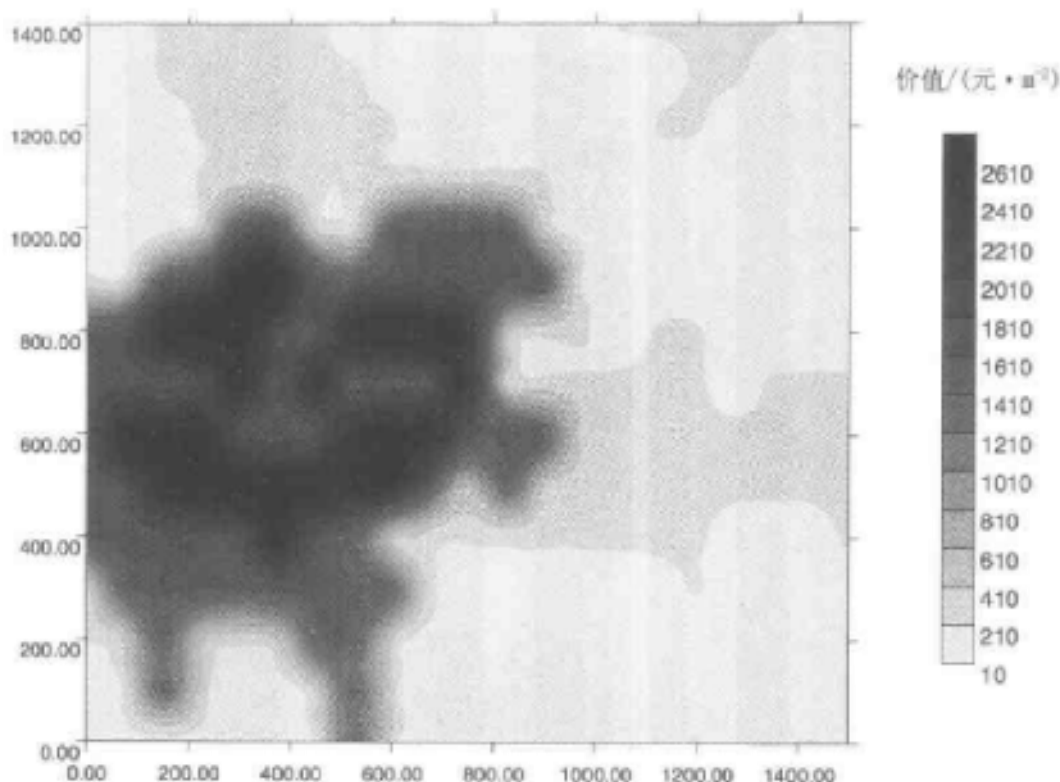


图4 模拟区受灾体综合价值分布图
标尺单位: m

4. 受灾体受损程度的确定

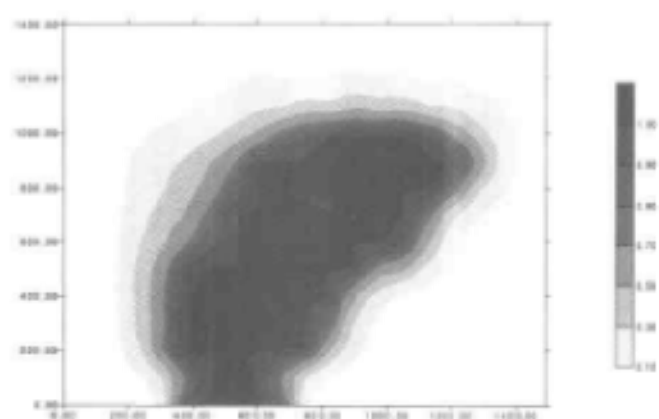
深沟泥石流堆积区内的各类受灾体,在遭受泥石流灾害的危害时,其受损程度根据数值模拟结果进行分析评价,用破坏损失率表示。

破坏损失率的具体取值方法为:

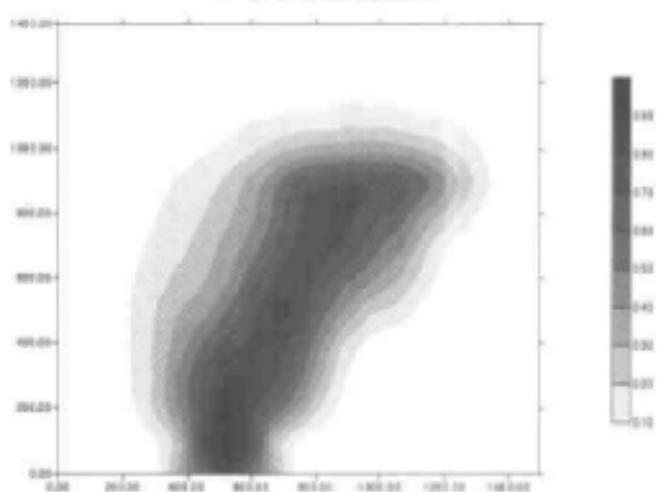
(1) 土地资源。取泥石流堆积厚度大于 3 m 时,视为完全损毁;小于 3 m 时,为简便起见,本文假定土地价值与堆积厚度减少值呈线性变化。据此计算出泥石流灾害对土地资源的破坏损失率分布值。

(2) 农作物和农田水利等基础设施。其破坏损失以堆积厚度为 1 m 做为完全损毁(破坏损失率为 100%)的临界值,随堆积厚度值的减少破坏损失率依线性规律由 100% 减至 0。据此计算出泥石流灾害对农作物和农田水利等基础设施的破坏损失率分布值。

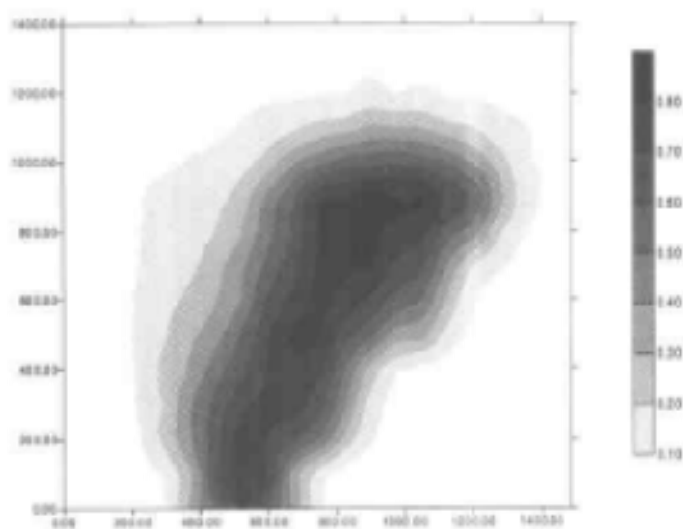
(3) 房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等。取泥石流流量大流速大于 5 m/s 或堆积厚度值大于 4 m 为完全损毁的临界值,随流速和堆积厚度值的减少破坏损失率由 100% 降至 0。据此计算出泥石流灾害对房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等的破坏损失率分布值。



A 农作物破坏损失率

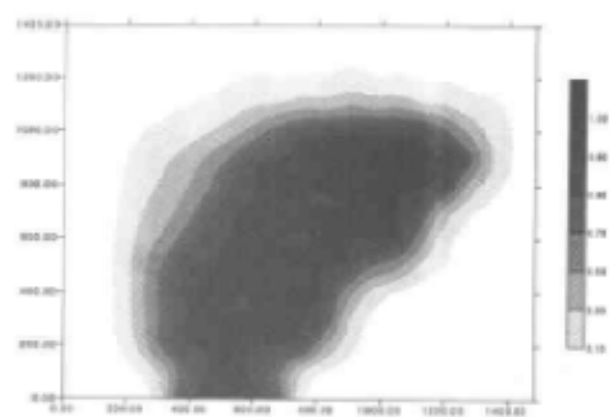


B 土地资源破坏损失率

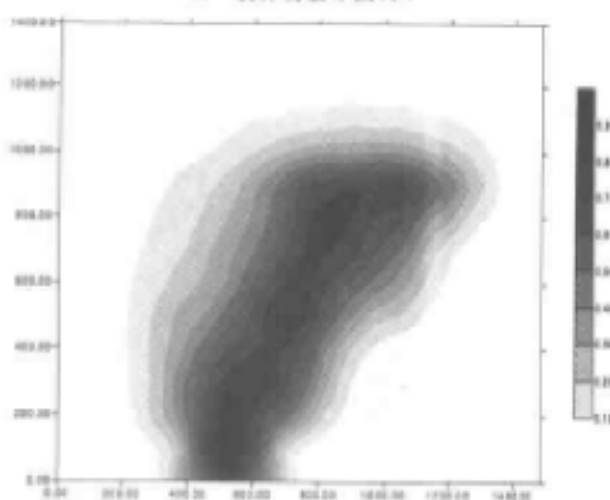


C 房屋、基础设施等破坏损失率

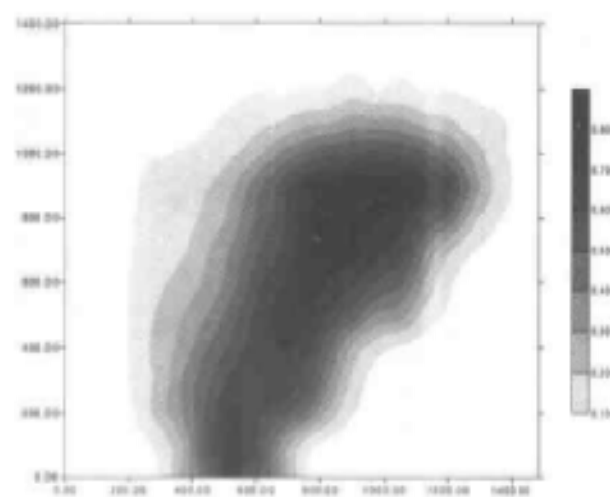
图 5 2%频率深沟泥石流堆积危险强度
标尺单位: m



A 农作物破坏损失率

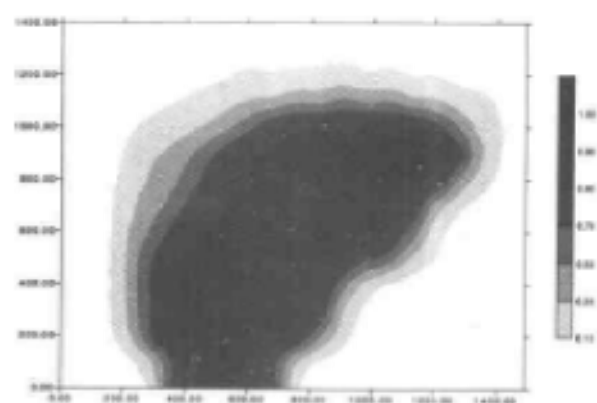


B 土地资源破坏损失率

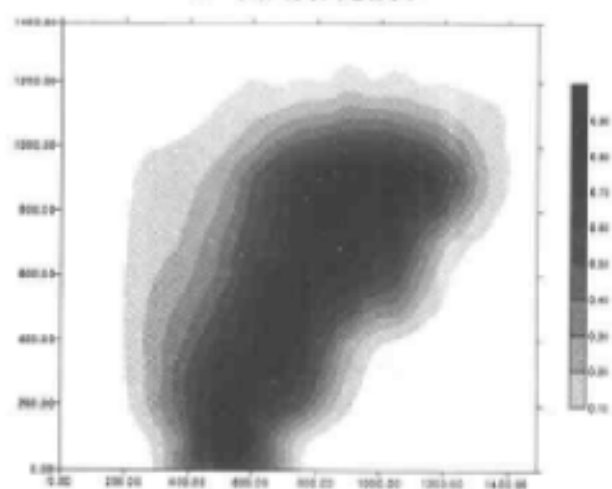


C 房屋、基础设施等破坏损失率

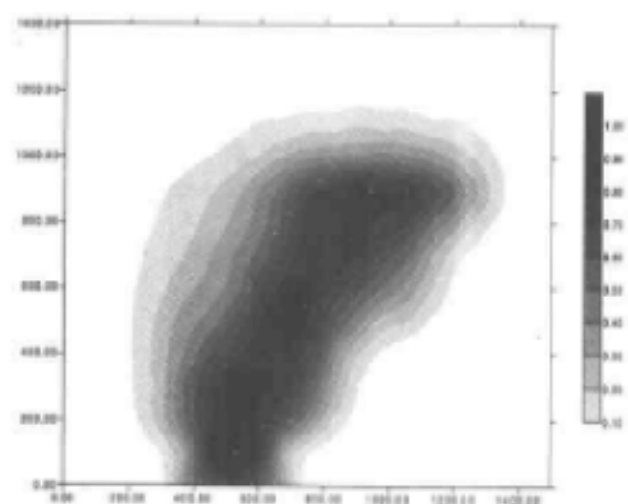
图 6 1%频率深沟泥石流堆积危险强度
标尺单位: m



A 农作物破坏损失率



B 土地资源破坏损失率



C 房屋、基础设施等破坏损失率

图7 0.5%频率深沟泥石流堆积危险强度
标尺单位: m

在不同频率条件下，泥石流爆发的规模不同，产生危害的大小不同，其破坏损失率亦不相同。运用数值模拟方法，分别模拟深沟在 50 年一遇（2% 频率）、100 年一遇（1% 频率）、200 年一遇（0.5% 频率）条件下破坏损失率及其在空间上的分布。详见图 5、图 6 和图 7。

5. 灾害经济损失评价

对于深沟泥石流灾害堆积区破坏损失，根据数值模拟结果评价方法，直接利用泥石流灾害破坏损失率及其在整个堆积区内的分布值。计算公式为：

$$S_m = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} \cdot M_{ij}$$

式中：\$S_m\$——泥石流灾害风险损失（万元）；

\$P_{ij}\$——第 \$i\$ 个评价单元的第 \$j\$ 类受灾体的破坏损失率；

\$M_{ij}\$——第 \$i\$ 个评价单元的第 \$j\$ 类受灾体的经济价值（万元）；

\$n\$——评价单元个数；

\$m\$——受灾体类型个数。

根据上述方法的计算结果，对深沟泥石流堆积区灾害经济损失评价如下（以 1997 年实际价值计算，未考虑时间变化的影响）：

在发生 50 年一遇（2%）灾害条件下的经济损失：

（1）土地资源价值损失。根据破坏损失率分布，将评价区各单元土地资源价值乘以相应单元的破坏损失率，即得到土地资源价值损失分布，总的土地资源价值损失为 6079 万元，详见图 8。

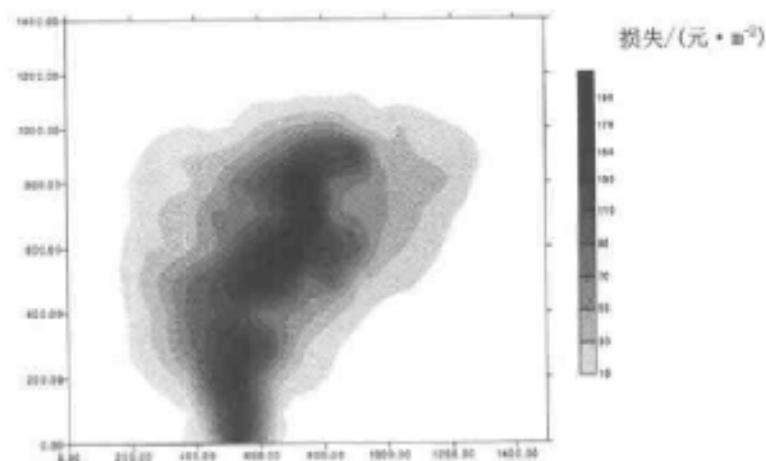


图 8 2% 频率泥石流灾害土地资源价值损失分布图

标尺单位：m

（2）农作物和农田水利等基础设施价值损失。根据破坏损失率分布，将评价区各单元农

作物和农田水利等基础设施价值乘以相应单元的破坏损失率，即得到农作物等价值损失分布，总的价值损失为 241 万元。

(3) 房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等价值损失。根据破坏损失率分布，将评价区各单元的房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等价值乘以相应单元的破坏损失率，即得到房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等的价值损失分布，总的价值损失为 39677 万元，详见图 9。

(4) 综合经济损失。综合以上分类评价结果，得到深沟在发生 50 年一遇（2%频率）泥石流灾害下的综合损失价值分布，见图 10，统计得到评价区总的综合价值损失为 45997 万元。

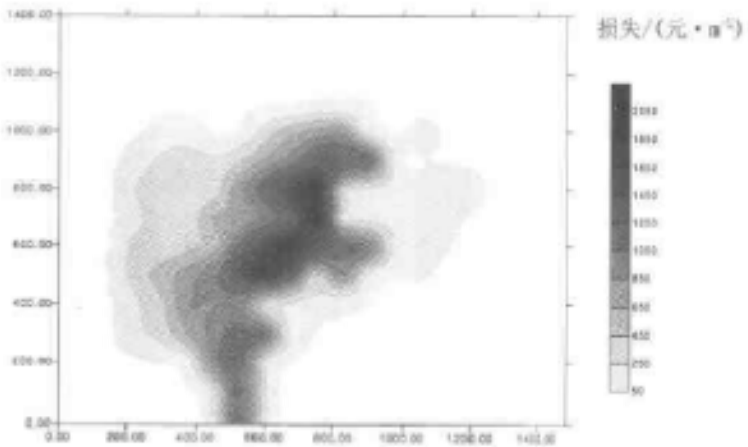


图 9 2%频率泥石流灾害房屋、基础设施等价值损失分布图
标尺单位：m

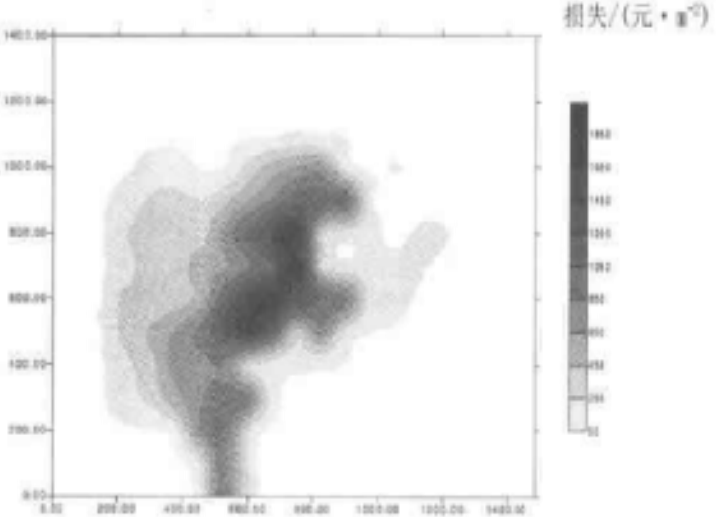


图 10 2%频率泥石流灾害综合损失分布图
标尺单位：m

同样，可评价得出在 100 年一遇条件下（1%）和在 200 年一遇条件下（0.5%）泥石流灾害的分类损失和综合损失。综合损失分布图分别见图 11 和图 12。1% 频率下的土地资源价值损失为 6671 万元，农作物和农田水利等基础设施价值损失为 253 万元，房屋等建筑

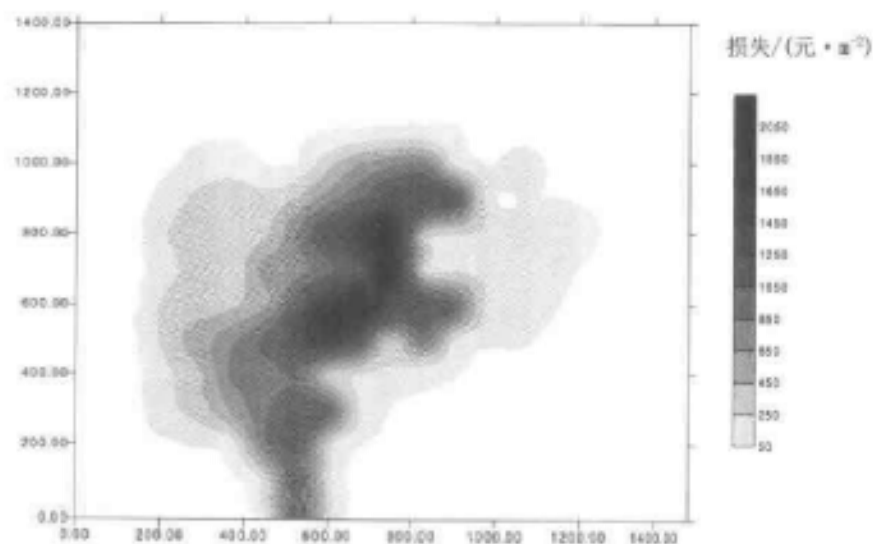


图 11 1% 频率泥石流灾害综合损失分布图
标尺单位：m

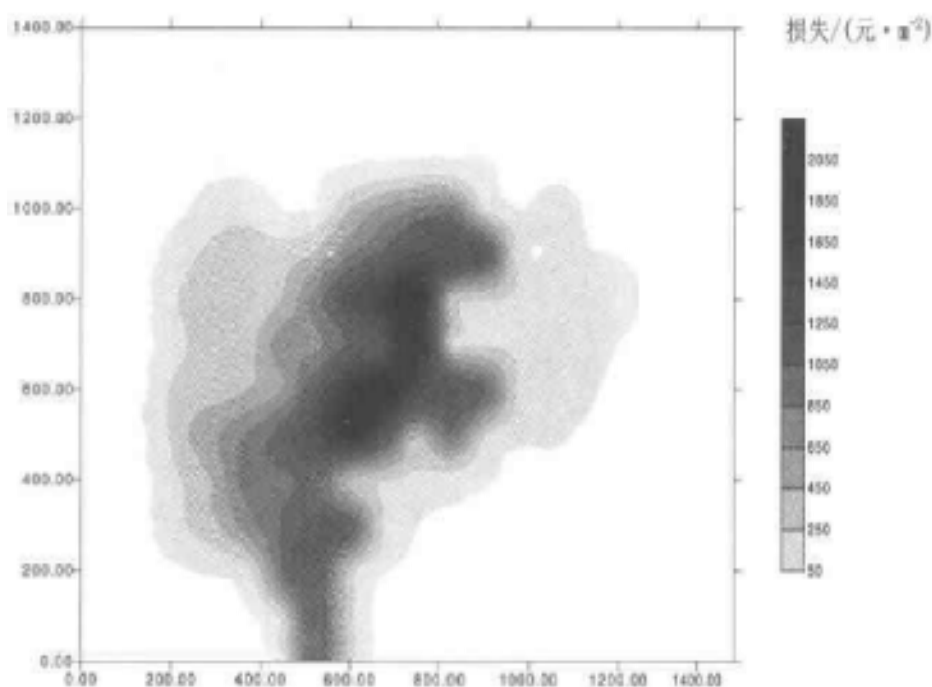


图 12 0.5% 频率泥石流灾害综合损失分布图
标尺单位：m

及室内财产、城市基础设施等价值损失为 42399 万元, 综合经济损失价值为 49323 万元。0.5% 频率下的土地资源价值损失为 7239 万元, 农作物和农田水利等基础设施价值损失为 264 万元, 房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等价值损失为 44893 万元, 综合经济损失价值为 52397 万元。

在各类破坏损失中, 主要是房屋等建筑及室内财产、城市基础设施等价值的损失, 它们占总损失的 85% 以上; 其次是土地资源价值损失, 占 14% 左右; 农作物等的价值损失所占的比例很小, 不足 1%。说明在建筑密度较高的城区, 单位面积经济价值高, 一旦发生泥石流灾害, 损失更为巨大, 这些地区应是泥石流灾害防治的重中之重。

6. 灾害防治效益评价及有关对策建议

为了有效地防治深沟泥石流灾害, 云南省东川市泥石流防治研究所于 1997 年 7 月提出了深沟泥石流灾害综合治理可行性研究报告, 设计了具体防治方案。该方案以控制 50 年一遇 (2%) 泥石流灾害为设计标准, 采用稳坡、固床、排导等工程措施, 结合生物措施, 综合治理。除对已经修建的防护工程维修加固外, 新设计的工程量主要包括: ①修建谷坊坝 27 座, 固床坝 20 道, 拦挡坝 3 座; ②修建排导槽 1000 m, 防渗水渠 2800 m; ③修建护岸、护坡堤 890 m; ④修建挡土墙 70 m; ⑤封山育林、植树造林、退耕还林面积 20 km²。

以上工程, 并考虑以往的工程, 共计需投资约 950 万元。若提高防灾设计标准, 据推算, 防治工程如按控制 1% 频率泥石流灾害设计, 工程约需投资 1050 万元; 如按控制 0.5% 频率泥石流灾害设计, 工程约需投资 1150 万元。

根据前述的灾害经济损失评价结果, 深沟泥石流灾害防治工程按控制发生 50 年一遇 (2% 频率) 灾害设计, 相应的防灾效益 (投保比) 为: $f_{x_1} = F_y/F_c = 48.4$

若按控制发生 100 年一遇 (1% 频率) 灾害设计, 相应的防灾效益 (投保比) 为: $f_{x_2} = 47.0$

若按控制发生 200 年一遇 (0.5% 频率) 灾害设计, 相应的防灾效益 (投保比) 为: $f_{x_3} = 45.6$

由上可见, 深沟泥石流灾害防治工程的减灾效益是显著的, 投保比都在 1:45 以上, 并以控制发生 50 年一遇 (2% 频率) 灾害设计的防灾工程效益最佳。结合东川市的经济发展现状, 以控制 50 年一遇 (2% 频率) 泥石流灾害进行防治工程设计是现实可行的, 减灾效益是非常显著的。在实施防灾工程时, 根据本研究成果, 提出如下建议:

(1) 深沟的成灾区位于主城区, 一旦发生灾害造成的损失极为巨大。灾害规模越大, 可能造成的灾害损失越大, 2% 频率的灾害损失可能达到 4.6 亿元, 1% 频率的灾害损失则可能达到 4.9 亿元, 0.5% 频率灾害的可能损失更是达到 5.2 亿元, 必须予以高度重视, 防范灾害的发生。

(2) 深沟泥石流是一条稀性泥石流沟。泥石流沟流域面积大, 泥石流爆发频率低, 但一旦成灾, 其来势凶猛, 流速快, 冲击力强, 堆积厚度大, 要立足于抗大灾, 尽早实施防治工程。

(3) 根据泥石流堆积动态过程特征，结合泥石流堆积区的社会经济分布实际情况，在主沟附近的街区，受害最大，危险性最高，必须加强防范，为减灾防灾工作的重中之重。在城市建设改造时应与泥石流灾害防治工程相协调，提高抵御灾害的能力。

(4) 消除泥石流灾害的根本措施是保持水土，控制泥石的启动，单纯的工程措施只能在一定时限内抵御一定规模的泥石流灾害。因此，建议在实施工程措施的同时，切实加强植树造林，涵养水土，从而从根本上消除泥石流灾害。

后 记

泥石流灾害是我国的主要自然灾害之一。为了有效地减灾防灾，我国从1994年开始列支专项资金，用于泥石流等地质灾害的重点防治工作。如何保证用好国家有限的资金，提高决策的科学性，以较少的资金投入获得最大的减灾效益，是一项重要工作。作者认为，以往的工作偏重于研究分析泥石流灾害的自然属性及合理制定科学有效的防治方案方面，而对所制定的防治方案，是否最优化，达到的减灾效益是否最佳，往往缺乏科学的技术经济评价，即缺少泥石流灾害风险评估意见，本书旨在对这方面的工作进行初步的尝试。

本书的主要内容是第一作者在导师陈崇希教授指导下的博士学位论文。有关研究成果的取得凝聚了指导、帮助、关心、支持作者学习研究和工作的所有老师、专家及同仁们的心血、劳动和厚爱。在此，作者要真诚地特别感谢中国地质大学林敏教授、张人权教授、徐恒利教授、陈植华副教授、靳孟贵副教授、陈爱光教授等，中国科学院地质研究所王思敬院士、伍法权研究员，国家地震局地质研究所马宗晋院士、高庆华研究员，中国科学院成都山地灾害与环境研究所吴积善研究员、杜榕桓研究员、唐邦兴研究员、乔建平研究员、刘希林研究员、崔鹏研究员、章书成研究员等，云南省地理研究所唐川研究员，国土资源部地质环境司柳源博士，中国水文地质工程地质勘察院胡海涛院士、段永侯研究员、殷跃平博士、周平根博士、谢章中博士等，清华大学邵颂东博士，中国地质矿产经济研究院张梁研究员，中国地质科学院562地质队张业成高级工程师等，在有关研究思路、技术方法和研究成果资料等方面给予的支持、指导和帮助；感谢云南省计委国土办詹文安主任、袁万钟高级工程师等，东川市计委王思荣主任、郭天熊副主任等和东川市泥石流防治研究所的专家提供了研究所需的实际调查资料；感谢中国矿业大学计算中心杨峰讲师、王洪岭硕士、刘波博士，北京国土资源遥感公司王尧博士、王梅硕士、吴小英工程师等，为本研究做了大量的实际工作。

愿本书的出版能为我国泥石流灾害的科学防治和减轻自然灾害事业有所贡献，对从事地质灾害防灾减灾事业的科研、生产、教学人员和有关专业的学生具有参考价值。

主要参考文献

- [1] 国家科委等全国重大自然灾害综合研究组. 中国重大自然灾害及减灾对策. 北京: 科学出版社, 1994
- [2] 段永侯, 罗元华, 柳源等. 中国地质灾害. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993
- [3] 孙广忠, 王昂生, 张丕远. 中国自然灾害. 北京: 学术书刊出版社, 1990
- [4] 杜一. 灾害与灾害经济. 北京: 中国城市经济社会出版社, 1988
- [5] 中国灾害防御协会, 国家地震局震害防御司. 中国减灾重大问题研究. 北京: 地震出版社, 1992
- [6] 国家科委等自然灾害综合研究组. 中国减灾社会化的探索与推动. 北京: 海洋出版社, 1996
- [7] W. J. Petak A. A. Atkission 著. 向立云, 程晓陶等译. 自然灾害风险评价与减灾政策. 北京: 地震出版社, 1993
- [8] 马宗晋, 李国锋. 自然灾害评估、灾度和对策. 全国减轻自然灾害研讨会论文集 (1990). 北京: 中国科学技术出版社, 1990
- [9] 赵阿兴, 马宗晋. 自然灾害损失评估指标体系的研究. 自然灾害学报, 1993 2 (3): 1~7
- [10] Tamotsu. Takahashi. Debris Flow, Published for International Association for Hydraulic Research by A. A Balkema. Rotterdam Brookfield. 1991
- [11] 杜榕桓. 泥石流观测与研究. 北京: 科学出版社, 1996
- [12] 吴积善, 王成华, 程尊兰等. 中国山地灾害防治工程. 四川科学技术出版社, 1997
- [13] 中国水土保持学会, 云南省地理研究所, 云南省计委国土办等. 首届全国泥石流滑坡防治学术会议论文集. 昆明: 云南科技出版社, 1993
- [14] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价. 北京: 科学出版社, 1995
- [15] 足立胜治, 德山久仁夫, 中筋章人等. 土石流发生危险度の判定にフやて, 新砂防. 1977 30 (3): 7~16
- [16] 池谷浩, 米尺谷, 诚悦. 土石流危险区域の設定に関する研究 (第二报). 土木技术资料. 1979 21 (9): 46~50
- [17] 高桥堡. 土石流の堆积危险范围の予測. 第十七回自然灾害科学总合シンポジウム. 1980. 133~148
- [18] 水山高久, 渡边正幸, 上原信司. 土石流の堆积形状. 第十七回自然灾害科学总合シンポジウム. 1980. 169~172
- [19] Takahashi T., Estimation of potential debris flows and their hazardous zones, Soft countermeasures for a disaster, JOURNAL OF NATURAL DISASTER SCIENCE. 1981 (3): 57~89
- [20] 高桥堡, 中川一, 佐藤宏章. 扇状地における图砂泛滥灾害危险度の评价. 京都大学防災研究所年报. 31 (B-2). 1988. 655~676
- [21] 石川芳治, 水山高久, 井户清尾. 堆积扇上泥石流堆积泛滥机理. 泥石流及洪水灾害防御国际学术讨论会文集 (成都). A (泥石流). 1991. 27~31
- [22] 唐川. 泥石流堆积扇研究综述. 首届全国泥石流滑坡防治学术会议论文集. 昆明: 云南科技出版社, 1993. 6~11
- [23] Olivier Latchin, Example of hazard assessment and land-use planning in Switzerland for snow avalanches, floods and landslides, Swiss national hydrological and geological survey, Bern, 1998
- [24] Hungr O., Morgan C. G., Vandine F. D., etc., Debris flow defenses in British Columbia, GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA REVIEWS IN ENGINEERING GEOLOGY, 1987 (7). 201~222
- [25] 谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判. 泥石流防治理论与实践. 成都: 西南交通大学出版社, 1991. 45~71
- [26] 刘希林. 泥石流危险度判定的研究. 灾害学. 1988 3 (3): 10~15
- [27] 唐川, 刘希林, 朱静. 泥石流堆积泛滥区危险度的评价与应用. 自然灾害学报. 1993 2 (4): 79~84
- [28] CHENG-LUN SHIEH, CHYAN-DENG JAN and YUAN-FAN TSAI, A Numerical Simulation of Debris Flow and Its Application, Natural Hazards 1996 (13): 39~54
- [29] 周必凡, 李德基, 罗德富等. 泥石流防治指南. 北京: 科学出版社, 1991
- [30] 李德基. 泥石流减灾理论与实践. 北京: 科学出版社, 1997
- [31] 王光谦, 倪晋仁, 张红武. 稳定粘性泥石流运动机理研究. 泥石流及洪水灾害防御国际学术讨论会文集 (成都).

- A (泥石流). 1991. 71~76
- [32] 王致清. 粘粒流体动力学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1992
- [33] Hajime Nakagawa & Tamotsu Takahashi, Estimation of debris flow hydrograph and hazard area, Proc. First Intl. Conf. On Debris Flow Hazards Mitigation, New York, The American Society of Civil Engineers, 1997. 64~73
- [34] Dominique Laigle, A two-dimensional model for the study of debris flow spreading on a torrent debris fan, Proc. First Intl. Conf. On Debris Flow Hazards Mitigation New York, The American Society of Civil Engineers, 1997, 123~132
- [35] 唐川等. 泥石流堆积危险度分区评价的数值模拟研究. 灾害学, 1994 9 (4): 7~12
- [36] 詹钱登等. 泥性土石流演算模式之研究. 台湾: 八十三年度农业工程研讨会论文, 1994 (12): 125~135
- [37] 唐川等. 泥石流堆积泛滥过程的数值模拟及危险范围预测模型研究. 水土保持学报, 1994 8 (1): 45~50
- [38] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学. 北京: 科学出版社, 1983
- [39] Takahashi T. High velocity flow in steep erodible channels. Proc. Of 22 nd Congress of IAHR, Lausanne, 1987, 42~53
- [40] 詹钱登. 土石流危险度之评估与预测. 台湾: 中华水土保持学报, 1994 25 (2): 95~102
- [41] Chyan-Deng Jan Hsieh Wen Shen. Review dynamic modeling of debris flows. Lecture notes in earth sciences, 1997. 64. 93~116
- [42] 詹钱登, 陈晋琪等. 运动波模式应用于二维土石流演算之研究. 台湾: 中华水土保持学报, 1994 27 (2): 119~126
- [43] 江头进治. 土石流的停止. 堆积のメカニズム (1). 砂防学会志, 新砂防, 第 46 卷第 1 号 (通卷 186 号), 1993. 45~56
- [44] 江头进治. 土石流的停止. 堆积のメカニズム (2). 砂防学会志, 新砂防, 第 46 卷第 2 号 (通卷 187 号), 1993. 51~57
- [45] 陈崇希, 王仲华. 地下水流动问题数值方法. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990
- [46] 何少岑, 林秉南. 破开算法在二维潮流计算中的应用. 海洋学报, 6 (2), 1984
- [47] 陈材侃. 计算流体力学. 重庆: 重庆出版社, 1991
- [48] 徐士良. C 常用算法程序集. 清华大学出版社, 1996
- [49] 傅祖芸, 赵海娜, 丁岩等译. C 语言数值算法程序大全. 北京: 电子工业出版社, 1995
- [50] 周建平. 平面二维泥沙数学模型研究及其应用. 水利学报, 1993
- [51] 胡俭. 精通 Visual C++ for Windows 95/NT. 北京: 电子工业出版社, 1997
- [52] 吕丽民, 陈庆章, 金建勋等. C 及 C++ 程序设计. 北京: 人民邮电出版社, 1995
- [53] 吴积善, 田连权, 康志成等. 泥石流及其综合防治. 北京: 科学出版社, 1993
- [54] 袁万钟. 从怒江州六库镇芭蕉河泥石流看城市建设与发展. 云南滑坡泥石流防治研究 (第三卷), 1990
- [55] 杜榕桓, 康志成, 陈循谦等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987
- [56] 冯永志. 泥石流灾害评估. 泥石流 (4). 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 北京: 科学出版社, 1995. 112~119
- [57] Luo Yuan-hua, Duan Yong-hou, Liu Yuan, etc. Assessment of Mountainous Hazards in China, Natural Disaster Reduction in China, 1 (2), 1995
- [58] 甘肃省灾害防御协会等. 企业减灾对策研究-全国企业减轻地震及其他灾害研讨会文集. 兰州: 兰州大学出版社, 1996
- [59] 田连权, 吴积善, 康志成等. 泥石流侵蚀搬运与堆积. 成都: 成都地图出版社, 1993
- [60] 吴积善, 康志成, 田连权等. 云南蒋家沟泥石流观测研究. 北京: 科学出版社, 1990
- [61] 罗元华. 论自然灾害的基本属性与减灾基本原则. 中国地质灾害与防治学报, 1997 8 (1)
- [62] 高庆华, 张业成等. 自然灾害灾情统计标准化研究. 北京: 海洋出版社, 1997
- [63] 傅继军, 于晓楠, 徐兴恩等. 中国资产评估实用大全. 北京: 经济管理出版社, 1995
- [64] 国家计委, 建设部. 建设项目经济评价方法与参数. 北京: 中国计划出版社, 1995
- [65] 吕景胜, 高庆华. 灾害管理. 北京: 地震出版社, 1992
- [66] 罗元华, 张梁, 张业成. 地质灾害风险评估方法. 北京: 地质出版社, 1998