



目 录

前 言

第一章 泥石流危险度	(1)
第一节 泥石流危险度概述.....	(1)
第二节 泥石流危险因子分析.....	(5)
第三节 泥石流危险度判定方法	(15)
第四节 泥石流危险度判定应用	(19)
第二章 泥石流堆积模型实验	(27)
第一节 实验材料和方法	(27)
第二节 实验结果和讨论	(28)
第三章 泥石流危险范围	(40)
第一节 泥石流危险范围概述	(40)
第二节 泥石流堆积扇地形特征	(42)
第三节 一次泥石流危险范围预测模型	(44)
第四节 泥石流最大危险范围预测模型	(49)
第五节 泥石流堆积区危险度	(57)
第四章 泥石流危险区划	(62)
第一节 泥石流危险区划概述	(62)
第二节 泥石流危险区划理论和方法	(62)
第三节 泥石流危险区划的应用	(71)
第五章 泥石流危险性评价	(79)
第一节 应用实例	(79)
第二节 技术要点	(85)
参考文献	(90)



第一章 泥石流危险度

第一节 泥石流危险度概述

1. 泥石流危险度定义

危险(Risk, Danger)是指有遭到损害的可能^[1]。危险的定性表达即危险性,危险的定量表达即危险度。危险度(Risk degree, Danger degree)即危险程度的简称,是指有遭到损害的可能性大小。那么,泥石流危险度(Debris flow risk degree)即指有遭到泥石流损害的可能性大小。可能性大小(Probability)即概率,因此泥石流危险度是一个概率概念。最小概率为0%,最大概率为100%,因此危险度只能在 $[0,1]$ 闭区间内取值。对某一沟谷来说,它是指在该沟谷流域内所存在的一切人和物有遭到泥石流损害的可能性大小,其中一切人和物指各种生命、财产和自然资源,包括人、动物(家禽、牲畜、野生动物)、公私财产(家私、房屋、公共交通、通讯设施等)和自然资源(土地、森林、水域等);对某一山坡来说,它是指该山坡范围内所存在的一切人和物有遭到泥石流损害的可能性大小;对某一河谷来说,它是指该河谷流域内所存在的一切人和物有遭到泥石流损害的可能性大小(图1-1)。总之,泥石流危险度有它特定的范围,若无具体说明,可将其理解为沟谷泥石流危险度的简称。

与危险度容易混淆的另一概念是危害度,危害即损害^[1]。危害度(Injured degree)即损害的程度。那么,泥石流危害度(Injured degree by debris flow)即为遭受泥石流损害的程度。显然这样的定义还不确切,因为危害度只能针对危害对象而言,某些文献称危害对象为受灾体或承灾体^[2,3]。因此,泥石流危害度可定义为泥石流对危害对象的损害程度。

泥石流危险度也有所指的对象,那就是“一切人和物”,但它是一个笼统的、泛指的对象概念;而危害度的对象却是具体的、特指的确定事物。泥石流危害度也是一个定量概念,但目前尚未完全定量化,多用极强烈、强烈、中等和微弱,或者极严重、严重、一般和轻微等进行描述^[4]。

泥石流危险度和危害度是两个不同的概念,就象地震震级和地震烈度是两个不同的概念一样。泥石流危险度是泥石流本身所固有的特性,它与具体危害对象和防灾抗灾工程无关。位于荒山野岭或冰天雪地中的泥石流沟,即使在它们特定的范围内不存在任何有价值的危害对象,它们的危险度也依然存在。相反,泥石流危害度是泥石流对危害对象的损害程度,它不仅与防灾抗灾工程有关,而且与泥石流危险度和危害对象的重要性和易损性(Vulnerability)有关。某些文献称易损性为易灾性^[5]。对同一危害对象来说,例如同样两栋房屋,位于危险度不同的两条泥石流沟,泥石流发生后,遭受损害的程度就不同,且危险度越大,损害程度越大,危害度也越大;但对不同危害对象来说,即使泥石流危险度相同,其危害度也可大不一样。例如一座年产值1亿元的矿山和一座年产值1万元的矿山,

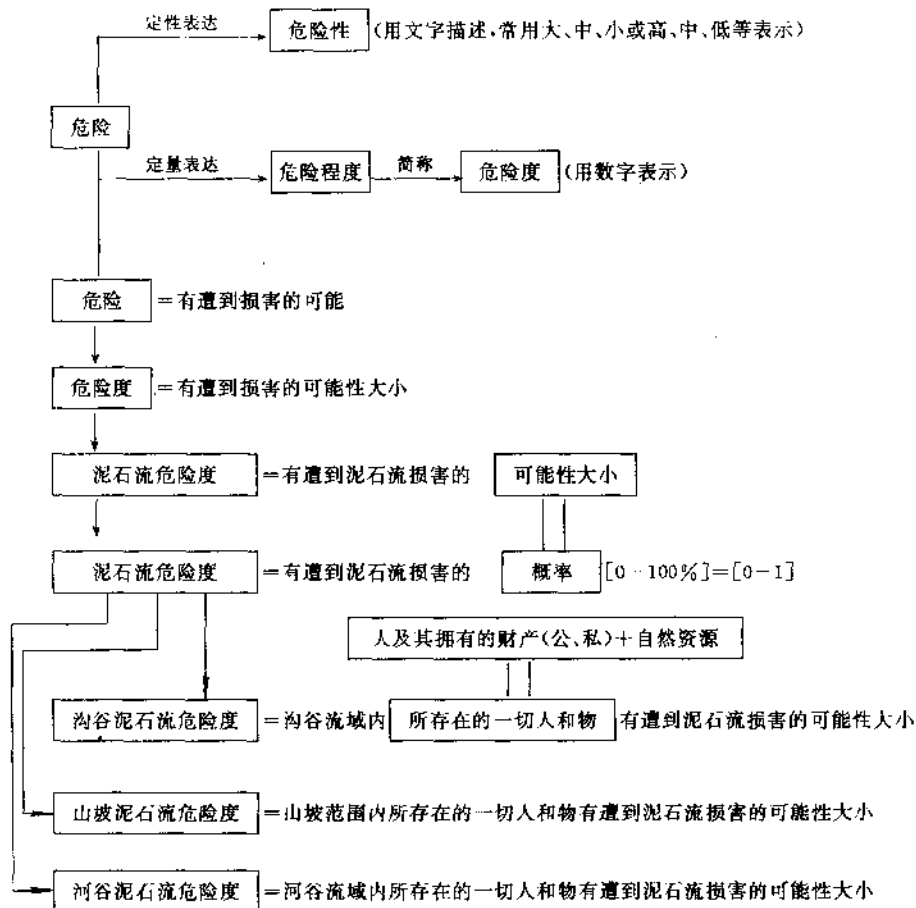


图 1-1 泥石流危险度定义框图

它们本身的重要性不同,虽位于危险度相同的泥石流沟,但泥石流发生后,前者的危害度大,后者的危害度小。又例如两座桥梁,一为钢筋混凝土桥,一为木桥,在遭受危险度相同的泥石流袭击后,由于两者的易损性不同,前者损害小,危害度小,后者损害大,危害度也大。危害度还与危害对象是否建有防灾抗灾工程以及该工程的标准有关。例如,两个相同的危害对象位于危险度相同的泥石流沟中,一个建有高标准的泥石流防护工程,另一个没有防护工程,泥石流发生后,前者的危害度小,后者的危害度就大。防灾抗灾工程的防灾抗灾能力,有人用抗力(Catastrophe prevented ability, Disaster resistant capacity)来表示^[6]。

泥石流危险度是泥石流本身具有的一种特性,主要用于灾前评估,即灾害评价。泥石流危害度是泥石流发生后危害对象具有的一种特性,主要用于灾后评估,即灾情评价。由于灾情评价涉及自然、社会和经济等各个方面,且相互关系比较复杂,因此目前关于泥石流危害度的研究尚在探索之中。

还有风险度一词,它由风险评价(Risk assessment)衍生而来。风险度即风险评价的-



种度量。风险评价作为一种对不确定事物定量评价的方法,在国外早已流行,并广泛应用于资本投资、财产保险、股市、房地产和工、农、商、贸等各行各业。自然灾害中的风险评价,若以美国 W. J. Petak 和 A. A. Atkisson 所著的《自然灾害风险评价与减灾政策》一书为代表^[7],也已有了十多年的历史。近年来,我国在这方面的研究方兴未艾,一系列文献丰富和充实了这一领域的内容。例如论城市灾害风险^[8,9]、洪水风险^[10-13]、泥石流风险^[14-16]、科技风险^[17]、计算机事故风险^[18],以及风险管理等^[19],可见风险的含义相当广泛,风险评价可应用于任何不确定事件。泥石流领域中如何正确引用和使用“风险度”一词,有必要仔细斟酌和认真推敲。

此外,有人提出灾害势的概念^[6],灾害势是指灾害的致灾因子强度或其所具能量的某种度量。其本质与危险度相同。一些学者提出灾度(Calamity degree, Disaster degree)的概念,大体有三种定义:第一种认为灾度是灾害本身造成的社会损失的度量标准^[20],这里社会损失一是指人口的直接死亡数,二是指折算的经济损失数;第二种认为灾度是灾害本身致使防灾工程产生的破坏程度^[6],这里的防灾工程泛指所有的危害对象;第三种认为灾度是自然灾害使受灾地区已有社会财富遭受损失的相对严重程度^[21]。后来有人在此基础上提出综合灾度的概念^[22],即指各种灾害的综合破坏程度。究其本质,灾度与危害度相同,可认为是危害度的代名词。灾度概念提出后,引起了学术界的广泛讨论^[23,24],目前灾度(危害度)的分类、等级、损失量计算及其定量表达等一系列问题尚在进一步探讨之中。

还有人提出灾损度和灾损率的概念。防灾工程的灾害经济损失程度,简称灾损度^[6,25]。定义一:灾损度是指该防灾工程遭受某一灾度的灾害时,其单位价值所遭受损失的大小;定义二:灾损度系指某防灾工程遭受某一灾害势的灾害时所产生的经济损失的多少。两种定义由同一作者在相隔不到一年时间内提出。灾损率是对自然灾害损失相对量的度量,它是反映自然灾害损失占灾区经济生活和社会生产总量的比率^[26]。由上可见,无论灾损度或灾损率,目前这些概念还均不够成熟。

危险度和危害度是灾害评价和灾情评价的主要内容,也是灾前评估和灾后评估的主要方法。灾害科学工作者若能在统一术语的基础上开展科学研究和减灾工作,无疑将加快灾害科学理论体系的建立和完善,推动灾害科学研究的进步和发展,为中国和国际减灾十年活动作出更大的贡献。

2. 泥石流危险度研究现状

危险性评价是目前国内外灾害科学研究的热点之一,也是灾害预测预报和减灾防灾工作中的重要内容。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设有专题“沿海城市的灾害危险性评价”。1996年6月将在德国召开的第八届国际防灾大会设有专题“灾害的危险性和不确定性评价”。国际上对泥石流危险性评价非常重视,有关危险度的研究也相对较早。1977年日本足立胜治等开展了泥石流发生危险度的判定研究(Study on Judgment of Outbreakability of Debris Flow)^[27],主要从地貌条件、泥石流形态和降雨三方面判定泥石流发生率。其中每个方面分若干要素,每个要素又分若干等级,每个等级给出相应的判别得分,然后统计计算泥石流发生和不发生的可能性大小,即泥石流发生危险度。这一研究在概念上和-content上有别于本书的泥石流危险度,但在方法学上却给了本书作者有益的启示。1990年日本久保田哲也等再次开展了泥石流发生危险度



的判定研究(Development of a Method for Forecasting the Short-term Rainfall at Any Point and a Diagram for Judgment of Occurrence Probability of Debris Flow in the Basin)^[28],主要从短历时降雨的有效降雨量和降雨强度来研究泥石流发生的可能性。

1988年日本高桥保等开展了扇形地上泥石流危险度的评价研究(Sediment Hazard Risk Assessment on a Debris Fan Area)^[29],主要探讨建筑物的损害与泥石流堆积厚度的关系。该研究与泥石流危害度的关系比较密切。

Risk一词在西方国家灾害科技文献中经常使用,但正如意大利 A. Carrara 等所说的那样^[30],Risk一词目前尚无明确定义,一些学者用来表示由于斜坡破坏而可能造成的生命和财产的损失,但 A. Carrara 等却定义滑坡对建筑物的危险度为:

$$R_L = H_L \times A_L/A_s \times A_d/A_s \times D_L$$

式中 R_L 为滑坡危险度; H_L 为某一斜坡内滑坡发生的可能性; A_L/A_s 为该斜坡内不稳定区的比率; A_d/A_s 为该斜坡内建筑物面积的比率; D_L 为由于滑坡影响而可能对建筑物造成的损失(损害程度)。

瑞典 M. T. Eldeen 所作的灾害危险度分析,包括灾害类型的辨别和灾害规模的估计,并将它们用危险区图(Risk Zone Map)来表示^[31]。他以洪水危险度分析为例,根据危险度等级,将洪水易发区分为4个不同的危险区,每个区又分1—5个亚区。这里虽然使用了Risk一词,但主要是指洪水危险范围。

美国 D. Alexander 认为,Risk的概念主要是指人类环境中的某一部分遭受未来灾害袭击而造成损失的可能性(The concept of risk principally involves the likelihood of loss sustained by elements in the human landscape which are threatened by future hazard impacts)^[32]。由于语言表达和文化背景的差异,各国学者对Risk的理解有所不同,因此在使用上也有所不同。就目前而言,尚无法对Risk的确切含义取得国际国内的广泛共识。

我国与泥石流危险度有关的研究最早见于1986年谭炳炎泥石流的严重程度的综合评判^[33]。这一问题的提出,主要有两个目的:①怎样判别一条自然沟是洪水沟还是泥石流沟;②如果是泥石流沟,其活动的严重程度根据哪些条件来评判,即试图解决泥石流调查勘测中的错判、漏判和轻判问题。这一论题后来有了进一步发展,以同一作者为主完成的“泥石流沟的判别方法和数量化综合评判”的科研成果已在铁路部门推广和应用^[34],但有关泥石流流域活动性和稳定性以及泥石流沟判别的研究仍在深入、简化和完善之中。1986年艾南山等提出用流域面积——高程曲线及其积分来判别泥石流的活动性^[35];1989年岳天祥等用超熵来评判泥石流流域的稳定性^[36];1992年蒋忠信在此基础上提出了以沟谷纵剖面形态指数 N 表达的超熵数学式来评价泥石流的活动性^[37];1994年蒋忠信又提出了我国西南地区暴雨泥石流沟的简易判别法^[38]。以上这些研究,与泥石流危险度评价密切相关,但它们之间又有着本质的区别。

1987年罗云撰文介绍国外安全科学中对人类作业条件(劳动环境)的危险性评价方法,它对后来泥石流危险度研究有较大影响^[39]。该方法采用“打分”的办法,指定自变量以分数,然后根据总的危险分数来评价劳动环境的危险性,并将危险性定义为:

$$\text{危险性} = L \times E \times C$$

式中 L 为发生灾害的可能性; E 为人类暴露于这种灾害环境的频率; C 为灾害一旦发生,可能造成的后果。前两项可视为危险频率,后一项相当于危险的严重度。



该方法将危险程度分为“极其危险、高度危险、显著危险、可能危险和稍有危险”五个等级。这些观点后来部分地被本书引用,它们对泥石流危险度的研究具有积极作用。

有关文献^[40]认为,中国泥石流危险度的研究始于1988年,以本书第一作者所著的“泥石流危险度判定的研究”一文^[41]为标志。该文首次使用了“泥石流危险度”一词,提出了判定泥石流危险度的8项指标和定量方法,并将泥石流危险度定义为“泥石流对环境的威胁和危害程度,它包括两个方面的涵义:一是潜在的威胁;二是直接的危害”。限于当时的认识,这一定义虽然未能将危险度和危害度加以区分,但其判定危险度的定量方法和基本原理仍为以后的研究工作奠定了基础,并多次被有关文献所引用^[42,43]。其间类似的研究还有天山阿拉沟泥石流危险度的划分^[44],巴东信陵镇泥石流的危险度判别等^[45]。五年后的1993年,本书作者完成了国家自然科学基金项目“泥石流危险度和危险范围的研究”后,重新提出了泥石流危险度的定义和泥石流危险度多因子综合定量判定模式及其计算公式^[46-48],使这一泥石流领域中的专门研究有了新的进展并逐渐趋于成熟。以下三节是关于泥石流危险因子、危险度判定模式及其应用实践方面的最新科研成果。

第二节 泥石流危险因子分析

1. 泥石流主要危险因子分析

泥石流危险度是由泥石流危险因子综合判定的,危险因子有主次之分,在危险度判定中起主导作用的因子即主要危险因子,在危险度判定中起辅助作用的因子即次要危险因子。主要危险因子只有一个或几个,次要危险因子可有若干。如何从影响泥石流危险度的众多因子中筛选出作用最大的主要危险因子,是危险度判定中必不可少的工作之一。我们通过对全国范围内近100位泥石流专家学者的通信调查,采用80年代邓聚龙教授创立的被誉为未来学基础的“灰色系统理论”中的灰色统计方法,成功地解决了泥石流主要危险因子的确定这一关键问题。

主要危险因子一是从泥石流潜在规模考虑,因为潜在规模越大,遭受泥石流损害的可能性就越大;二是从泥石流发生频率考虑,因为发生频率越高,遭受泥石流损害的可能性也越大,特别是对于某些非常重要或非常脆弱的危害对象来说,这一点尤为重要。

(1) 专家通信调查表的设计和收发情况

“泥石流主要危险因子”专家通信调查表共设计7个项目,列出了6个供专家评判的候选因子,它们是:一次泥石流(可能)最大冲出量,历次泥石流堆积总量,泥石流最大容重,泥石流最大漂砾粒径,泥石流最大流量,泥石流最大流速。最后留有“您认为需要补充的主要危险因子”一栏让专家填写。调查表请专家根据候选因子在危险度判定中的作用和对危险度的影响程度,作出“大、中、小”三者之一的定性判断。

调查表设计的基本思路是从泥石流本身所具有的潜在破坏力(潜在规模)着手的。泥石流是灾害的产生者,许多文献称其为致灾因子^[2,3,49],危害对象是受害者,两者有着密切的关系,但它们是一种主动和被动、前因和后果的特殊关系。因此,主要危险因子主要是从表示泥石流潜在破坏力(潜在规模)的因子中选择的。如果一条泥石流沟正在发生泥石流,它的破坏力当然决定于它的冲击力、坡头高度和宽度及其持续时间等,但对于一条今后可



能发生泥石流的沟谷的危险度作出预测,则只能根据已有的泥石流流域特征、堆积特征,或能够由野外考察得到的泥石流特征值(容重、流量、流速等)作为主要危险因子的候选者。

调查表共印制 100 份,分发范围:中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所 25 份(其中 3 份因故未能发出),所外科研单位 25 份(其中 1 份因故原件退回),高等院校 25 份,生产部门 25 份。实际发出 96 份。一月余后共收回调查表 83 份,它们来自四川、甘肃、北京、云南、陕西、辽宁、吉林、江西、广东和江苏等 10 个省市,其中以中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所、中国科学院兰州冰川冻土研究所、兰州大学和北京大学为主,共计 41 个单位,参加调查的专家情况详见表 1-1。

表 1-1 参加调查的专家情况

职 称	研究员、教授、 教授级高级工程师	副研究员、副教授、 高级工程师	助理研究员、 讲师、工程师
人 数	21	45	17
占总人数的百分比(%)	25.30	54.22	20.48
类 别	科研单位	高等院校	生产部门
人 数	36	19	28
占总人数的百分比(%)	43.37	22.89	33.73
单 位	外单位专家	本单位专家	本项目成员
人 数	62	21	回避,未参加
占总人数的百分比(%)	74.70	25.30	回避,未参加

(2) 专家通信调查结果

专家通信调查结果见表 1-2。

表 1-2 泥石流主要危险因子专家通信调查结果

候选因子	一次泥石流 (可能)最大冲出量	历次泥石流 堆积总量	泥石流 最大容重	泥石流最大 漂砾粒径	泥石流 最大流量	泥石流 最大流速	合计
评判为“大”者	67	10	9	15	57	48	206
评判为“中”者	13	33	28	33	22	26	155
评判为“小”者	1	33	40	32	3	6	115
没有评判者	2	7	5	3	2	3	22

从表 1-2 可以看出,在评判为“大”的候选因子当中,以一次泥石流(可能)最大冲出量得票最多,为 67 票,占 32.52%;其次为泥石流最大流量和流速,分别为 57 和 48 票,各占



27.67%和23.30%。在评判为“中”的候选因子当中,以历次泥石流堆积总量和泥石流最大漂砾粒径得票最多,均为33票,各占21.29%;其次为泥石流最大容重和流速,分别为28和26票,各占18.06%和16.77%。在评判为“小”的候选因子当中,以泥石流最大容重得票最多,为40票,占34.78%;其次为历次泥石流堆积总量和泥石流最大漂砾粒径,分别为33和32票,各占23.70%和27.83%。

由此可见:①专家意见没有绝对的集中,每项候选因子都有大、中、小三种不同的评判意见,有的专家对某些因子未予评判,认为它们与危险度无直接关系;②评判“一次泥石流(可能)最大冲出量”为“大”和“泥石流最大容重”为“小”的专家较多,它们可能分属作用较大和较小的因子,其它候选因子属于哪类,尚不得而知;③专家意见相对分散,同时我们对统计结果的分辨率要求较高,采用常规的平均值方法已不能准确地表达调查结果,因此需要寻找新的表达专家对候选因子总体意见的统计方法。

为了准确定量地解析上述调查结果,我们采用灰色系统理论中的灰色统计方法^[30]。在寄回的83份调查表中,44位专家附有文字注记或书面说明,其中38位在补充栏内共补充了24项有关因子,它们可归纳为如下三类:①关于泥石流本身特征的约占60%,其中以发生频率为主,约占30%,其次为冲击力、龙头高度、堵塞情况、泥石流类型和流体性质以及持续时间等;②关于泥石流形成条件的约占15%,主要有沟床纵坡、降雨强度和沟内崩滑体面积比例及体积等;③关于泥石流与危害对象相互关系的约占10%,主要有堆积区与居民区或与道路、工厂和农田等的相对位置和距离以及堆积区的地形条件等;④关于泥石流危害对象的约占15%,主要有危害对象的重要性、危害区的人口密度、危害对象对灾害的承受力等。在第一类补充的有关因子中,如前所述,泥石流发生频率已列为主要危险因子之一。堵塞情况可由泥石流最大流量反映,泥石流类型和流体性质可由最大容重反映,其它如冲击力、龙头高度和持续时间等未列为候选因子的理由前面已有叙述。另外第三类补充的有关因子将在下一步确定泥石流次要危险因子中加以考虑和筛选。

(3) 专家通信调查结果灰色统计分析

一个已给出白化函数 $f(x)$ 的灰数,将其某一具体值 x_i ,通过白化函数找出白化系数 $f(x_i)[0 \leq f(x_i) \leq 1]$,再乘以该值 x_i ,即 $f(x_i) \cdot x_i$,称为该灰数的一个白化函数生成值。以灰数的白化函数生成值为基础,将一些具体数据按某些灰数所描述的类型进行归纳整理,称为灰色统计。

记I, II, III, ...为决策群体(在此指每位专家);

记1^a, 2^a, 3^a, ...为决策方案(在此指6个候选因子);

记1, 2, 3, ...为决策灰类(在此指候选因子在危险度判定中的作用大小,即大、中、小三类)。

记 d_{ij} 为第 i 个决策群体对第 j 个决策方案所提出的白化决策值,则 d_{ij} 可表示如下:



$$d_{ij} = \begin{bmatrix} 1^{\#} & 2^{\#} & 3^{\#} & \cdots \\ d_{11} & d_{12} & d_{13} & \cdots & \text{I} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & \cdots & \text{II} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & \cdots & \text{III} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \end{bmatrix}$$

灰色统计的目的是将 d_{ij} 按灰类作白化函数生成,以明确 I, II, III, ... 各个决策群体所提出的白化决策值从整体上看属于哪个灰类,灰色统计按以下五步进行:

第一步 给出白化决策值 d_{ij} 。

第二步 确定决策灰类的白化函数,一般用图表示。

第三步 求决策系数 n_{jk}

$$n_{jk} = \sum_{i=1}^{N_d} f_k(d_{ij}) N_i \quad (1-1)$$

式中 N_i 为第 i 个决策群体中的决策人数; $k=1, 2, 3, \dots, N_{aj}$ (决策灰类数); $j=1^{\#}, 2^{\#}, 3^{\#}, \dots, N_n$ (决策方案数); $i=1, \text{II}, \text{III}, \dots, N_c$ (决策群体数)。

第四步 计算决策权 r_{jk} , 即第 j 个因子属于第 k 个灰类的决策权:

$$r_{jk} = \frac{n_{jk}}{n_j} \quad (1-2)$$

式中 n_j 为第 j 个因子的决策系数之和, 即

$$n_j = \sum_{k=1}^{N_{aj}} n_{jk} \quad (1-3)$$

第五步 构造决策权行向量 r_j :

$$r_j = [r_{j1}, r_{j2}, r_{j3}, \dots, r_{jN_n}]$$

r_j 表示第 j 个决策方案在不同决策灰类下的决策权。若 r_j 中第 k^* 个决策权 r_{jk^*} 最大, 则第 j 个决策方案属于第 k^* 个决策灰类。

具体操作步骤如下:

首先列出每位专家对候选因子的评判结果, 即得 d_{ij} (为使各候选因子具有可比性, 其中 10 份有空缺项的调查表未用于统计), 限于篇幅, 书中 d_{ij} 从略, 然后确定决策灰类和白化函数。决策灰类已经给出, 即每个候选因子在危险度判定中的作用是大、中、还是小, 白化函数 $f(x)$ 见图 1-1 (用 1 表示大, 0.5 表示中, 0 表示小)。

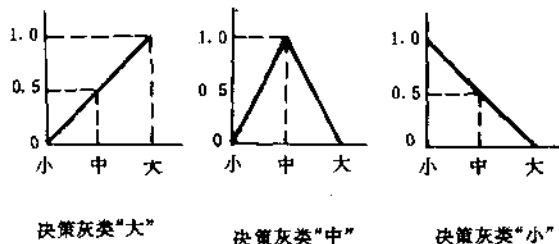


图 1-2 不同决策灰类的白化函数



由式(1-1)和式(1-3)分别计算决策系数 n_j 和各因子决策系数之和 n_j , 决策群体的人数为 1 人, 即 73 份调查表中无完全相同意见者, 那么 $N_1 = N_2 = \dots = N_{73} = 1$, 计算结果见表 1-3。

表 1-3 决策系数之和 n_j

候选因子	一次泥石流(可能)最大冲出量	历次泥石流堆积总量	泥石流最大容重	泥石流最大漂砾粒径	泥石流最大流量	泥石流最大流速
灰类“大”	59.5	24	20	27	55	50
灰类“中”	11	28	26	24	20	22
灰类“小”	6.5	42	46	39	11	16
n_j	77	94	92	90	86	88

根据式(1-2)计算决策权, 构造决策权行向量 r_j , 见表 1-4。

表 1-4 决策权行向量 r_j

候选因子	决策灰类	大(L)	中(M)	小(S)
1 [#] 一次泥石流(可能)最大冲出量	r_1	[0.78]	0.14	0.08]
2 [#] 历次泥石流堆积总量	r_2	[0.26]	0.28	0.46]
3 [#] 泥石流最大容重	r_3	[0.22]	0.28	0.50]
4 [#] 泥石流最大漂砾粒径	r_4	[0.30]	0.27	0.48]
5 [#] 泥石流最大流量	r_5	[0.64]	0.23	0.13]
6 [#] 泥石流最大流速	r_6	[0.57]	0.25	0.18]

由表 1-4 可知, $r_{1L} = 0.78 > r_{1M} > r_{1S}$, 所以专家对 1[#] 候选因子总的评判意见是属于在危险度判定中作用较大的因子。同样 $r_{2S} = 0.46 > r_{2M} > r_{2L}$, $r_{3S} = 0.50 > r_{3M} > r_{3L}$, $r_{4S} = 0.43 > r_{4L} > r_{4M}$, 所以 2[#]、3[#] 和 4[#] 候选因子均属于作用较小的因子; $r_{5L} = 0.64 > r_{5M} > r_{5S}$, $r_{6L} = 0.57 > r_{6M} > r_{6S}$, 所以 5[#] 和 6[#] 候选因子也属于作用较大的因子。

专家对 1[#]、5[#] 和 6[#] 候选因子认为都应属于作用较大的危险因子, 究竟谁为最大, 由决策权确定。因为 $r_{1L} = 0.78 > r_{5L} = 0.64 > r_{6L} = 0.57$, 所以 1[#] 候选因子作用最大, 其次为 5[#], 再次为 6[#]。同理, $r_{3S} = 0.50 > r_{2S} = 0.46 > r_{4S} = 0.43$, 所以在同属作用较小的三者当中, 以 3[#] 候选因子作用最小, 2[#] 次之, 4[#] 再次之。将各候选因子按作用大小排列成序, 我们得到: 一次泥石流(可能)最大冲出量 > 泥石流最大流量 > 泥石流最大流速 > 泥石流最大漂砾粒径 > 历次泥石流堆积总量 > 泥石流最大容重。

通过以上分析, 一次泥石流(可能)最大冲出量是我们最后确定的用于泥石流危险度判定的主要危险因子之一。另一主要危险因子为泥石流发生频率, 这与得票最多的专家补充的主要危险因子相一致。专家通讯调查和灰色统计分析为泥石流危险度的定量判定提供了坚实的立论基础。



2. 泥石流次要危险因子分析

泥石流是山区的一种突发性自然灾害,也是地表一种复杂的自然地理过程。影响泥石流发生、发展、运动和堆积及其强度、能量和破坏力的环境背景因子非常之多,累计起来已达 70 多种^[47]。在已有的有关研究中,因子选择各有不同。谭炳炎在评判泥石流沟严重程度时选择了 15 项地貌、河沟和地质因子^[33];姚令侃在分析降雨泥石流形成要素时选择了 11 项环境背景因子^[51];杨庆溪等在进行泥石流形成因素的主成分分析时选择了 11 项因子^[52];本书第一作者在泥石流危险度判定的初步研究中选择了 8 项危险因子^[41];日本足立胜治等在判定泥石流发生危险度时共选择了 19 项环境背景因子^[27]。泥石流危险度的综合判定,所选因子既要考虑它们的科学性和正确性,又要考虑它们的全面性和代表性,还要考虑它们的简便性和实用性。所选因子能否量化,也是我们需要考虑的一项重要因素。根据这些原则,我们将所有 70 多种有关的因子全部列出,然后按以下步骤进行次要危险因子的初选:

- (1) 先凭作者经验,将作用不大的因子删去;
- (2) 在所剩因子当中,将不能量化的因子删去;
- (3) 个别虽能量化但难以获取的因子也一并删去。

这样共获得 14 项次要危险因子的候选因子,它们是:

- (1) 地形条件中包括:流域面积、主沟长度、流域最大相对高差、主沟床平均比降、形成区山坡平均坡度、流域切割密度和主沟床弯曲系数;
- (2) 地质条件中包括:松散固体物质储量和泥砂补给段长度比;
- (3) 水文气象条件中包括:24 小时最大降雨量和年平均降雨量;
- (4) 森林植被条件中包括:植被覆盖率;
- (5) 人类活动条件中包括:垦殖指数和流域内人口密度。

我们通过野外考察和室内工作,共获取了云南省 37 条泥石流沟的基础数据 592 个(表 1-5),它们是确定泥石流次要危险因子的基础资料。

灰色系统理论中的关联度分析是确定主次因子之间关系密切程度的一种新方法^[50],通过关联度分析,可以优选并确定出哪些因子是重要的和应该保留的,哪些因子是不重要的和可以删去的。关联度分析是对一个发展变化系统的状态和趋势的量化比较,同回归分析相比,它对样本多少和类型无特殊要求,且计算量小,量化结果可靠^[53]。关联度分析的实质是对数列进行几何关系的比较。例如有 x_i, x_j, x_k, x_l 四对时间序列,点绘成图后即四条相应的曲线,若曲线 x_i 与 x_j 最为接近,则认为 x_i 与 x_j 的关联度最大,记为 R_{ij} 。若曲线 x_i 与 x_l 相差最远,则认为 x_i 与 x_l 的关联度最小,记为 R_{il} 。将关联度按大小排列,便有关联序:

$$R_{ij} > R_{ik} > R_{il}$$

关联度是由关联系数演变而来的,记 x_i 与 x_j 的关联系数为 $\xi_{ij}(tl)$, tl 表示 x_i 与 x_j 比较其关联性时的采样点。记同一时刻 tl , x_i 与 x_j 的绝对差值为:

$$|x_i(tl) - x_j(tl)| = \Delta_{ij}(tl) \quad l = 1, 2, \dots, N \quad (1-4)$$

记各时刻最小绝对差值为:



$$\Delta_{\min} = \min_j \min_l |x_i(tl) - x_j(tl)| \quad (1-5)$$

记各时刻最大绝对差值为:

$$\Delta_{\max} = \max_j \max_l |x_i(tl) - x_j(tl)| \quad (1-6)$$

定义关联系数 $\xi_{ij}(tl)$ 为:

$$\xi_{ij}(tl) = \frac{\Delta_{\min} + k\Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(tl) + k\Delta_{\max}} \quad l = 1, 2, \dots, N; \quad k = [0, 1] \quad (1-7)$$

则有关联度:

$$R_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \xi_{ij}(tl) \quad (1-8)$$

式中 N 为样本数, k 为分辨系数, k 值只影响关联系数的大小, 不影响关联序, 一般在 0~1 之间选取。

关联度的计算可用手算和电算。手算先根据式(1-4)、(1-5)、(1-6)和(1-7)计算出关联系数 $\xi_{ij}(tl)$, 列成关联度分析表, 然后根据式(1-8)计算关联度。我们利用已有的关联度分析程序^[54], 采用均值化处理表 1-5 中的基础数据, 取分辨系数 $k=0.5$, 由计算机计算出第一主要危险因子——一次泥石流(可能)最大冲出量 L_1 和第二主要危险因子——泥石流发生频率 L_2 与 14 项候选的次要危险因子之间的关联度如表 1-6。

由表 1-6 可以看出, 14 项候选的次要危险因子与 L_1 的关联度均较高, 平均为 0.8609, 给定关联度 0.85 作为取舍次要危险因子的阈值, 则淘汰 S_4, S_8, S_{12} 和 S_{13} ; 与 L_2 的关联度稍低, 平均为 0.8374, 给定关联度 0.83 作为阈值, 则淘汰 S_8 和 S_{12} 。考虑到 S_3 与 S_5 作用相同, S_{10} 与 S_{11} 作用相同, 且 S_9 比 S_5 重要, S_{10} 比 S_{11} 重要, 为避免因子选择重复, 故再删去 S_5 和 S_{11} 。综合上述筛选结果, 最后优选出流域面积 S_1 、主沟长度 S_2 、流域最大相对高差 S_3 、流域切割密度 S_6 、主沟床弯曲系数 S_7 、泥砂补给段长度比 S_9 、24 小时最大降雨量 S_{10} 和流域内人口密度 S_{14} 等共 8 项因子作为泥石流危险度判定的次要危险因子。

3. 泥石流危险因子与危险度

一次泥石流(可能)最大冲出量 O. Hungr 等认为, 泥石流堆积量是泥石流沟严重程度综合指标之一^[55]。P. A. Johnson 等也将一次泥石流冲出量和整个雨季的泥石流冲出量作为泥石流流域规划的两个重要参数^[56]。事实上, 冲出物方量越大, 遭到泥石流损害的可能性就越大, 因此它是影响泥石流危险度最直接的指标之一, 属主要危险因子。

泥石流发生频率 对某些非常重要或非常脆弱的危害对象来说, 泥石流规模不大时, 对其造成的损害可能较轻; 但若泥石流频率很高, 对其造成的累积损害仍然可能很大; 如果规模很大且频率很高, 那么遭到泥石流损害的可能性就更大。因此它也是影响泥石流危险度最直接的指标之一, 属主要危险因子。

流域面积 反映流域的产沙和汇流状况。一般来说, 流域面积与流域产沙量成正比关系, 产沙量的多少影响到流域内松散固体物质的储量, 松散固体物质储量又影响到一次泥石流(可能)最大冲出量, 因此它与泥石流危险度关系密切, 对危险度判定有较大影响。

主沟长度 决定着泥石流的流程和沿途接纳松散固体物质的多少, 泥石流流程越



表 1-5 云南省 37 条泥

编号	沟名	地名	一次泥石流 (可能)最大 冲量 L_1 ($\times 10^4 \text{m}^3$)	泥石流发生 频率 L_2 (次/100 年)	流域面积 S_1 (km^2)	主沟长度 S_2 (km)	流域最大 相对高差 S_3 (km)	主沟平均 比降 S_4
1	大箐沟	南涧县城	3.2	30	2.91	2.60	0.45	0.17
2	观音寺沟	南涧县城	0.4	20	0.15	1.13	0.23	0.18
3	大鱼坝沟	宁蒗县	2.5	25	4.10	3.70	0.77	0.21
4	芭蕉河	怒江州六库	8.2	13	4.10	3.80	1.67	0.14
5	水磨房沟	德钦县城	9.0	15	36.75	10.80	2.05	0.19
6	直溪河	德钦县城	8.0	30	5.90	4.25	0.56	0.13
7	小箐河	保山市后山	1.2	30	0.54	1.90	0.37	0.20
8	北老埂河	保山市后山	2.5	20	2.00	4.86	0.62	0.13
9	山脚村河	保山市后山	2.4	25	2.14	4.07	0.62	0.15
10	化工厂河	保山市后山	3.2	25	4.23	5.08	0.67	0.13
11	白纸房沟	保山市后山	5.1	35	6.13	6.85	0.72	0.11
12	黄纸房沟	保山市后山	2.5	35	3.02	5.60	0.61	0.11
13	仁寿河	保山市后山	4.6	30	5.50	5.86	0.59	0.10
14	五郎庙河	保山市后山	1.7	35	2.70	2.70	0.36	0.13
15	黄龙山河	保山市后山	6.5	15	7.77	5.61	0.61	0.11
16	王官屯河	保山市后山	1.6	20	1.93	2.19	0.32	0.15
17	美翁箐	漾濞县	8.0	260	12.02	7.40	1.08	0.15
18	板山河	永胜县	28.0	50	39.80	16.20	1.40	0.09
19	大箐沟	金源县	19.0	90	18.22	7.50	1.67	0.22
20	花沟	金源县	9.0	90	8.50	10.20	1.17	1.12
21	老丁沟	金源县	23.0	100	24.79	7.40	1.71	0.23
22	沙湾大沟	金源县	21.0	150	17.97	8.60	1.68	0.20
23	蒋家沟	东川市	195.1	1500	47.10	12.00	2.19	0.14
24	大桥河	东川市	105.0	450	53.10	18.35	2.92	0.16
25	石羊沟	东川市	7.8	20	10.61	4.61	1.66	0.25
26	达德沟	东川市	10.0	30	14.10	8.00	1.94	0.21
27	黑水河	东川市	1.8	80	4.20	2.10	1.19	0.27
28	大白泥沟	东川市	82.0	1200	18.05	11.80	1.66	0.11
29	小白泥沟	东川市	60.0	1000	12.49	6.00	1.67	0.18
30	深沟	东川市	9.0	50	28.32	9.05	2.80	0.17
31	小海河	东川市	10.0	70	28.71	11.60	2.60	0.15
32	黑沙沟	东川市	5.0	50	3.28	2.30	1.13	0.23
33	达朵沟	东川市	12.0	50	58.07	13.75	2.19	0.16
34	因民沟	东川市	26.0	2	16.80	6.90	1.32	0.10
35	银厂沟	巧家县	22.0	70	102.80	14.00	2.25	0.15
36	水碾河	巧家县	14.0	70	83.70	14.00	1.83	0.13
37	白泥沟	巧家县	24.0	35	5.26	4.10	1.20	0.29



石流沟的基础数据

形成区 山坡平 均坡度 $S_5(^{\circ})$	流域切 割密度 S_6 (km/km ²)	主沟床 弯曲系 数 S_7	松散固 体物质 储量 $S_3(\times 10^4\text{m}^3)$	泥砂补 给段长 度比 S_8	24 小时 最大降 雨量 $S_{10}(\text{mm})$	年平均 降雨量 $S_{11}(\text{mm})$	植 被 覆盖率 $S_{12}(\%)$	垦殖指 数 S_{13} (%)	流域内 人口密 度 S_{14} (人/km ²)
55	8.5	1.25	520	0.30	69.2	729.2	25	18	215
45	8.2	1.14	65	0.29	69.2	729.2	20	25	266
48	5.8	1.11	250	0.42	85.0	925.0	65	9	43
50	6.6	1.33	150	0.25	82.0	1011.0	35	15	195
45	6.8	1.23	140	0.30	79.0	763.0	20	6	38
48	8.5	1.33	1 400	0.52	75.0	763.0	22	8	40
35	3.5	1.22	61	0.45	109.4	965.4	31	12	98
35	5.2	1.18	106	0.37	109.4	965.4	35	16	75
30	8.8	1.15	218	0.51	109.4	965.4	39	9	109
30	5.3	1.14	95	0.33	109.4	965.4	47	16	80
32	5.5	1.25	134	0.32	109.4	965.4	48	19	65
35	4.5	1.28	66	0.30	109.4	965.4	29	12	60
40	6.5	1.05	181	0.62	109.4	965.4	29	10	85
38	5.9	1.11	81	0.58	109.4	965.4	31	9	90
35	4.3	1.18	114	0.35	109.4	965.4	39	9	60
35	4.2	1.14	72	0.32	109.4	965.4	42	9	65
43	14.5	1.47	468	0.61	80.0	1 210.0	19	16	187
38	9.8	1.28	7 970	0.72	109.0	1 240.0	19	16	190
42	10.2	1.23	3 400	0.39	86.7	1 080.0	21	21	167
36	15.1	1.28	1 700	0.48	86.7	1 080.0	23	12	154
45	12.8	1.28	16 000	0.54	86.7	1 080.0	19	19	187
30	17.6	1.45	14 000	0.73	86.7	1 080.0	12	26	209
45	23.8	1.45	75 000	0.80	102.0	1 200.0	8	20	260
48	21.2	1.28	15 000	0.62	97.0	790.0	20	18	210
50	12.8	1.12	1 505	0.40	100.4	1 100.0	32	24	290
46	17.8	1.10	8 140	0.35	100.4	903.6	11	28	310
42	12.3	1.11	1 998	0.42	100.4	903.6	10	21	318
45	22.8	1.39	16 000	0.72	100.4	820.0	8	12	0
44	20.5	1.33	14 000	0.70	100.4	820.0	8	6	0
49	15.6	1.22	7 000	0.45	100.4	1 081.0	23	7	260
50	15.3	1.23	5 000	0.56	98.0	1 081.0	14	13	216
38	22.0	1.28	849	0.78	98.0	1 081.0	14	28	276
46	11.2	1.33	3 811	0.40	102.0	908.0	14	3	55
46	19.2	1.25	6 000	0.70	118.0	1 200.0	60	11	420
48	20.0	1.18	1 300	0.60	92.0	820.0	12	32	270
46	21.0	1.33	10 000	0.70	92.0	820.0	10	26	280
28	3.2	1.18	618	0.24	109.9	801.4	12	24	340



表 1-6 次要危险因子的关联度分析

与第一主要危险因子 L_1 的关联度	在关联度阈值 0.85 下的检验结果	与第二主要危险因子 L_2 的关联度	在关联度阈值 0.83 下的检验结果	平均关联度
$S_1=0.8910$	密 切	$S_1=0.8595$	密 切	$S_1=0.8753$
$S_2=0.8781$	密 切	$S_2=0.8504$	密 切	$S_2=0.8643$
$S_3=0.8765$	密 切	$S_3=0.8487$	密 切	$S_3=0.8626$
$S_4=0.8480$	不 密 切	$S_4=0.8305$	密 切	$S_4=0.8393$
$S_5=0.8559$	密 切	$S_5=0.8314$	密 切	$S_5=0.8437$
$S_6=0.8788$	密 切	$S_6=0.8550$	密 切	$S_6=0.8669$
$S_7=0.8579$	密 切	$S_7=0.8347$	密 切	$S_7=0.8413$
$S_8=0.8434$	不 密 切	$S_8=0.8248$	不 密 切	$S_8=0.8341$
$S_9=0.8730$	密 切	$S_9=0.8464$	密 切	$S_9=0.8597$
$S_{10}=0.8567$	密 切	$S_{10}=0.8305$	密 切	$S_{10}=0.8436$
$S_{11}=0.8585$	密 切	$S_{11}=0.8318$	密 切	$S_{11}=0.8452$
$S_{12}=0.8332$	不 密 切	$S_{12}=0.8152$	不 密 切	$S_{12}=0.8242$
$S_{13}=0.8497$	不 密 切	$S_{13}=0.8303$	密 切	$S_{13}=0.8400$
$S_{14}=0.8520$	密 切	$S_{14}=0.8338$	密 切	$S_{14}=0.8429$

远,表明其能量和破坏力越大,因此它与泥石流危险度关系密切,对危险度判定有较大影响。

流域最大相对高差 流域内最高点海拔高度与最低点海拔高度之差即为流域最大相对高差。它反映流域的势能和泥石流携带固体物质的能力。一般来说,流域相对高差越大,山坡稳定性越差,崩塌和滑坡等不良地质现象越发育,汇流的速度也越快,发生泥石流的动力条件就越充分,因此它与泥石流危险度关系密切,对危险度判定有较大影响。

流域切割密度 综合反映流域地质构造、岩性、岩石风化程度以及产沙和汇流状况。一般来说,流域切割密度越大,支沟侵蚀越发育,固体和液体径流越大,泥石流潜在破坏力就越大,因此它与泥石流危险度关系密切,对危险度判定有较大影响。

主沟床弯曲系数 主沟床实际长度与其直线长度之比即为主沟床弯曲系数。它反映沟道泄流的难易状况,可影响沟道堵塞系数,从而间接影响泥石流流量和规模,因此它与泥石流危险度关系较为密切,对危险度判定有一定影响。

泥砂补给段长度比 指泥砂沿途补给累计长度与主沟长度之比。它综合反映泥砂补给的范围和补给量。比值越大,表明泥砂补给的条件越好,因此它与泥石流危险度关系较为密切,对危险度判定有一定影响。

24 小时最大降雨量 水是泥石流流体的组成部分,也是泥石流发生的激发条件,它间接地反映了泥石流的潜在动能,因此与泥石流危险度关系较为密切,对危险度判定有



一定影响。

流域内人口密度 人类活动与泥石流关系比较密切。人类活动主要以切坡修路、开矿弃渣、砍伐森林、过度放牧等不良行为来加速泥石流的形成和发展。人口密度是人类活动强度的代表性因子,因此它与泥石流危险度关系较为密切,对危险度判定有一定影响。

第三节 泥石流危险度判定方法

1. 泥石流危险因子权重和等级

曾尝试的方法之一是直接用各危险因子的关联度(主要危险因子的关联度为1)作为危险因子的权重。由于关联度大小受许多因素的影响,它不仅因分辨系数、母序列和无量纲化方法的不同而不同,而且因样本数的多少和参考点的位置变化而变化,因此关联度的绝对值不能直接作为权重。但由关联度大小排列而成的关联序,即关联度相对值的表现形式却不因分辨系数、无量纲化方法和参考点的变化而变化,只要有确定的母序列和子序列,样本数等于或大于5个,则母序列和子序列之间的关联序就始终保持不变^①。根据关联度的这一特性和选定的各危险因子的平均关联度,排出它们的关联序为:一次泥石流(可能)最大冲出量 L_1 > 泥石流发生频率 L_2 > 流域面积 S_1 > 流域切割密度 S_6 > 主沟长度 S_2 > 流域最大相对高差 S_3 > 泥砂补给段长度比 S_9 > 24 小时最大降雨量 S_{10} > 流域内人口密度 S_{14} > 主沟床弯曲系数 S_7 。

从平均关联度最小的次要危险因子开始,给定其起始权数为一个基本单位 10^n (n 可为任何整数,在此取 $n=0$),以此基本单位为公差,依次呈等差级数向关联度增大的方向递增次要危险因子的权数。为突出主要危险因子与次要危险因子从量变到质变的区别,主要危险因子的权数以最大的次要危险因子的权数为基数,以2为公比,呈等比级数继续递增。则各危险因子的权数和权重见表1-7,10个危险因子的权重之和等于1,其中2个主要危险因子的权重占47.06%,8个次要危险因子的权重占52.94%。

表 1-7 危险因子的权数和权重

危险因子	S_7	S_{14}	S_{10}	S_9	S_3	S_2	S_6	S_1	L_1	L_2
权 数	1	2	3	4	5	6	7	8	16	16
权 重	0.0147	0.0294	0.0441	0.0588	0.0735	0.0882	0.1029	0.1176	0.2353	0.2353

各危险因子的取值范围变幅很大,如不进行规范化处理,则不能制定出统一的危险因子等级和危险度标准。危险因子等级一般用极大(极高)、大(高)、中、小(低)、极小(极低)等来定性描述。考虑到极大和极小所占比例较少这一事实,根据两头少中间多这一特点,我们采用对称不等分间隔的四级分割法来划分泥石流危险因子的等级,并初步赋予各等级如下定值:极大(极高)为1,大(高)为0.7,中为0.3,小(低)为0^[46-48]。

① 刘希林,灰色关联度分析中若干理论问题的探讨,1992。



(1) 一次泥石流(可能)最大冲出量

参照原苏联 C. M. 弗莱施曼对泥石流活动规模的划分: 9.0×10^5 小型泥石流冲出物最多 $1.0 \times 10^4 \text{m}^3$, 中型泥石流冲出物 $2.0 \times 10^4 - 1.0 \times 10^5 \text{m}^3$, 大型泥石流冲出物 $1.0 \times 10^5 - 9.0 \times 10^5 \text{m}^3$, 灾害性泥石流冲出物至少 $1.0 \times 10^6 \text{m}^3$ [57]。对一次泥石流(可能)最大冲出量作如下分级:

等级描述	小	中	大	极大
实际取值	≤ 1	1—10	10—100	≥ 100
赋 值	0	0.3	0.7	1

(2) 泥石流发生频率

原苏联及欧洲和北美等地, 泥石流发生频率不是太高。C. M. 弗莱施曼对泥石流活跃度作了如下划分: 2—3 年发生一次为活跃度强的泥石流沟, 3—5 年发生一次为活跃度中等的泥石流沟, 5—10 年发生一次为活跃度弱的泥石流沟 [57]。我国及日本等地, 泥石流活动比较频繁, 年年发生泥石流的沟谷并不少见, 云南东川蒋家沟几乎每年都有泥石流发生, 1968 年曾最多发生 28 次。结合我国实际情况, 取每年发生一次为极高, 取 10 年发生一次为低, 对泥石流发生频率作如下分级:

等级描述	低	中	高	极高
实际取值	≤ 10	10—50	50—100	≥ 100
赋 值	0	0.3	0.7	1

(3) 流域面积

根据我国西南(西北)地区大量(857 条)典型泥石流沟的统计, 流域面积小于 0.5km^2 的约占 20.8%, $0.5 - 10 \text{km}^2$ 的约占 58.6%, $10 - 35 \text{km}^2$ 的约占 15.3%, 大于 35km^2 的仅占 5.3%。泥石流流域面积作如下分级:

等级描述	小	中	大	极大
实际取值	≤ 0.5	0.5—10	10—35	≥ 35
赋 值	0	0.3	0.7	1

(4) 主沟长度

根据我国西南(西北)地区大量典型泥石流沟的统计, 主沟长度绝大多数介于 1—20km 之间, 其中沟长小于 1km 的约占 8.1%, 2—5km 的约占 68.1%, 6—10km 的约占 15.6%, 大于 10km 的约占 8.1%。泥石流主沟长度作如下分级:



等级描述	短	中	长	极长
实际取值	≤ 1	1—5	5—10	≥ 10
赋 值	0	0.3	0.7	1

(5) 流域最大相对高差

我国西南山区沟谷泥石流流域最大相对高差(即流域内最高点海拔高度与最低点海拔高度之差)一般在1 000m左右,最大可达3 000m以上,最小也在500m左右。泥石流主要分布在我国三大阶梯地形的山区。参照我国山地类型的划分:相对高差大于1 000m为极高山,小于200m为丘陵,200—1 000m之间又按绝对高度的不同分为高、中、低山。泥石流流域最大相对高差作如下分级:

等级描述	小	中	大	极大
实际取值	≤ 0.2	0.2—0.5	0.5—1.0	≥ 1.0
赋 值	0	0.3	0.7	1

(6) 流域切割密度

我国西南地区大量(680条)典型泥石流沟的统计分析表明,流域切割密度一般在0.3—30km/km²之间,其中小于5km/km²的占14.3%,5—10km/km²的占33.3%,10—20km/km²的占31.05%,大于20km/km²的占21.4%。泥石流流域切割密度作如下分级:

等级描述	小	中	大	极大
实际取值	≤ 5	5—10	10—20	≥ 20
赋 值	0	0.3	0.7	1

(7) 主沟床弯曲系数

主沟床实际长度与其直线长度之比即为主沟床弯曲系数。从弯曲系数的定义可知其取值必大于或等于1。我国西南地区大量典型泥石流沟的统计分析表明,主沟床弯曲系数最大约为1.50,最小接近于1,其中小于1.10的占4.8%,1.10—1.25的占40.5%,1.25—1.40的占45.2%,大于1.40的占9.5%。泥石流主沟床弯曲系数作如下分级:

等级描述	小	中	大	极大
实际取值	≤ 1.10	1.10—1.25	1.25—1.40	≥ 1.40
赋 值	0	0.3	0.7	1

(8) 泥砂补给段长度比

有研究认为,如从泥砂补给段长度比单一因子考虑,小于0.1者为非泥石流沟,0.1—



0.3 者为轻度泥石流沟, 0.3—0.6 者为中度泥石流沟, 大于 0.6 者为严重的泥石流沟^[33]。

我们直接参照引用这一标准, 对泥石流流域内泥砂补给段长度比作如下分级:

等级描述	小	中	大	极大
实际取值	≤ 0.1	0.1—0.3	0.3—0.6	≥ 0.6
赋 值	0	0.3	0.7	1

(9) 24 小时最大降雨量

24 小时最大降雨量在以短历时为主的暴雨泥石流地区, 在很大程度上能代表一场暴雨过程, 用 24 小时暴雨预报泥石流, 同样也能获得较为满意的效果。暴雨泥石流发生的雨量条件, 一是需要一定量的前期降雨, 二是需要某一瞬时的高强度降雨。24 小时最大降雨量同时满足这两个条件, 它既反映了时段降雨量, 又包含了瞬时降雨量。参照我国气象部门对降雨类型的划分, 24 小时降雨量小于 25mm 为中雨, 25—50mm 为大雨, 50—100mm 为暴雨, 100mm 以上为大暴雨, 对泥石流流域内 24 小时最大降雨量作如下分级:

等级描述	小	中	大	极大
实际取值	≤ 25	25—50	50—100	≥ 100
赋 值	0	0.3	0.7	1

(10) 流域内人口密度

泥石流流域内的人口密度变化较大, 我国西南地区大量典型泥石流沟的统计分析表明, 人口密度主要变动在 0—500 人/km² 之间, 其中小于 50 人/km² 的为 8.1%, 50—150 人/km² 和 150—250 人/km² 的均为 32.4%, 大于 250 人/km² 的为 27.0%。泥石流流域内人口密度作如下分级:

等级描述	小	中	大	极大
实际取值	≤ 50	50—150	150—250	≥ 250
赋 值	0	0.3	0.7	1

2. 泥石流危险度的判定方法

各泥石流危险因子的赋值与其权重的乘积之和即为泥石流危险度, 记为 R_d , 且有 $0 \leq R_d \leq 1$ 。同时记 10 项危险因子的赋值分别为 $G_{L_1}, G_{L_2}, G_{S_1}, G_{S_2}, G_{S_3}, G_{S_6}, G_{S_7}, G_{S_9}, G_{S_{10}}, G_{S_{14}}$, 各赋值等于 0, 0.3, 0.7 或 1 四个常数之一。各危险因子的权重为已知(表 1-7), 则有泥石流危险度的计算公式为:

$$R_d = 0.2353G_{L_1} + 0.2353G_{L_2} + 0.1176G_{S_1} + 0.0882G_{S_2} + 0.0735G_{S_3} \\ + 0.1029G_{S_6} + 0.0147G_{S_7} + 0.0588G_{S_9} + 0.0441G_{S_{10}} + 0.0294G_{S_{14}} \quad (1-9)$$

式中 R_d 为泥石流危险度 ($0 \leq R_d \leq 1$); G_{L_1} 为一次泥石流(可能)最大冲出量的赋值; G_{L_2} 为



泥石流发生频率的赋值; G_{S_1} 为流域面积的赋值; G_{S_2} 为主沟长度的赋值; G_{S_3} 为流域最大相对高差的赋值; G_{S_4} 为流域切割密度的赋值; G_{S_5} 为主沟床弯曲系数的赋值; G_{S_6} 为泥砂补给段长度比的赋值; $G_{S_{10}}$ 为24小时最大降雨量的赋值; $G_{S_{14}}$ 为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取0,0.3,0.7或1之一,详见表1-8。

表 1-8 泥石流危险因子等级及其赋值表

危险因子等级	小	中	大	极大	单位
一次泥石流(可能)最大冲出量 L_1 赋 值 G_{L_1}	≤ 1 0	1—10 0.3	10—100 0.7	≥ 100 1	10^4m^3
泥石流发生频率 L_2 赋 值 G_{L_2}	≤ 10 0	10—50 0.3	50—100 0.7	≥ 100 1	%
流域面积 S_1 赋 值 G_{S_1}	≤ 0.5 0	0.5—10 0.3	10—35 0.7	≥ 35 1	km^2
主沟长度 S_2 赋 值 G_{S_2}	≤ 1 0	1—5 0.3	5—10 0.7	≥ 10 1	km
流域最大相对高差 S_3 赋 值 G_{S_3}	≤ 0.2 0	0.2—0.5 0.3	0.5—1.0 0.7	≥ 1.0 1	km
流域切割密度 S_4 赋 值 G_{S_4}	≤ 5 0	5—10 0.3	10—20 0.7	≥ 20 1	km/km^2
主沟床弯曲系数 S_5 赋 值 G_{S_5}	≤ 1.10 0	1.10—1.25 0.3	1.25—1.40 0.7	≥ 1.40 1	
泥砂补给段长度比 S_6 赋 值 G_{S_6}	≤ 0.1 0	0.1—0.3 0.3	0.3—0.6 0.7	≥ 0.6 1	
24小时最大降雨量 S_{10} 赋 值 $G_{S_{10}}$	≤ 25 0	25—50 0.3	50—100 0.7	≥ 100 1	mm
流域内人口密度 S_{14} 赋 值 $G_{S_{14}}$	≤ 50 0	50—150 0.3	150—250 0.7	≥ 250 1	人/ km^2

第四节 泥石流危险度判定应用

1. 基础资料

L_1 ——一次泥石流(可能)最大冲出量 对曾有泥石流活动记载的沟谷,以文献记载中最大一次泥石流冲出方量为准,对历史上未曾发生过泥石流,现阶段也未发生泥石流的沟谷,取 $L_1=0$ 。对虽有泥石流活动历史,但无文献记载的沟谷,可由有关专业人员根据泥石流堆积特征、泥位泥痕、崩滑坍体的面积和体积以及松散固体物质储量等,凭经验给出估计值。若有困难,也可由下式间接求算^①。

$$L_1 = -2 + 0.26S_1 + 0.41S_6 + 0.0021S_8 \quad (1-10)$$

① 宋 静,泥石流沟判释与危险度综合评价研究,1993。



复相关系数 $r=0.97$ 。式中 L_1 为一次泥石流(可能)最大冲出量(10^4m^3); S_1 为流域面积(km^2); S_6 为流域切割密度(km/km^2); S_8 为流域内松散固体物质储量(10^4m^3)。

L_2 ——泥石流发生频率 对曾有泥石流活动记载的沟谷,以文献记载为准,对历史上未曾发生过泥石流,现阶段也未发生泥石流的沟谷,取 $L_2=0$ 。对虽有泥石流活动历史,但无文献记载的沟谷,可由有关专业人员通过实地调查和访问获得。计算发生频率的年限可由调查访问到的最早一次泥石流发生年代起,至调查访问的当年止,按平均 100 年发生多少次进行换算。若有困难,也可由下式间接求算。

$$L_2 = -80.6596 - 2.8302S_1 + 12.138S_6 + 0.0209S_8 \quad (1-11)$$

复相关系数 $r=0.882$ 。式中 L_2 为泥石流发生频率(%),其它符号同式(1-10)。

S_1 ——流域面积 指分水岭包围下的汇水面积,不包括泥石流堆积扇部分。可从地形图上用求积仪或透明厘米纸计数量算。对于较小流域,可以野外实地圈定丈量。单位为 km^2 。

S_2 ——主沟长度 可从地形图上量算或在野外实地丈量。单位为 km^2 。

S_3 ——流域最大相对高差 可从地形图上量算或在野外用海拔高度表测算。单位为 km 。

S_6 ——流域切割密度 可从地形图结合航空像片量算或在野外实地测量。单位为 km/km^2 。

S_7 ——主沟床弯曲系数 可从地形图上量算。

S_9 ——泥砂补给段长度比 指泥砂沿途补给累计长度与主沟长度之比。可由航空像片结合地形图判读或在野外实地调查获取。

S_{10} ——24 小时最大降雨量 先查有无实测雨量记录,再查有无历史文献记载,若无,则通过水文手册由 24 小时最大降雨量 \bar{H}_{24} 等值线图采用内插法求得。单位为 mm 。

S_{14} ——流域内人口密度 通过实地调查访问获得,也可通过村民组、村公所和乡、区政府统计部门获取。单位为人/ km^2 。

2. 泥石流危险度计算

(1) 危险度计算步骤和实例

第一步 获取各危险因子的实际取值。

第二步 查表 1-8 确定各危险因子等级及其赋值。

第三步 由式(1-9)计算泥石流危险度。

现以云南省东川市老干沟为例。已知老干沟各泥石流危险因子为: $L_1=9$, $L_2=800$, $S_1=7.17$, $S_2=5.52$, $S_3=1.01$, $S_6=27$, $S_7=1.25$, $S_9=0.8$, $S_{10}=98$, $S_{14}=0$ 。查表 1-8 可得: $G_{L_1}=0.3$, $G_{L_2}=1$, $G_{S_1}=0.3$, $G_{S_2}=0.7$, $G_{S_3}=1$, $G_{S_6}=1$, $G_{S_7}=0.7$, $G_{S_9}=1$, $G_{S_{10}}=0.7$, $G_{S_{14}}=0$ 。代入式(1-9),得老干沟泥石流危险度为:

$$\begin{aligned} R_d &= 0.2353 \times 0.3 + 0.2353 \times 1 + 0.1176 \times 0.3 + 0.0882 \times 0.7 \\ &\quad + 0.0735 \times 1 + 0.1029 \times 1 + 0.0147 \times 0.7 + 0.0588 \times 1 \\ &\quad + 0.0441 \times 0.7 + 0.0294 \times 0 \\ &= 0.6793 \end{aligned}$$



判定结果表明,老干沟泥石流危险度比较高。

当一次泥石流(可能)最大冲出量未知时,可用式(1-10)间接求出,然后再计算泥石流危险度。现以云南省东川市尖山沟为例。已知尖山沟各泥石流危险因子为: $L_2=40$, $S_1=173.81$, $S_2=34.5$, $S_3=2.82$, $S_5=10.2$, $S_7=1.43$, $S_9=0.32$, $S_{10}=102$, $S_{14}=71$,并且已知其松散固体物质储量 $S_8=20080 \times 10^4 \text{m}^3$,先由式(1-10)计算 L_1 :

$$L_1 = -2 + 0.26 \times 173.81 + 0.41 \times 10.2 + 0.0021 \times 20080 = 89.5$$

查表 1-8 可得各泥石流危险因子赋值,再由式(1-9)计算出尖山沟泥石流危险度 $R_d=0.6954$ 。判定结果表明,尖山沟泥石流危险度也较高,且比老干沟还略高一些。

当一次泥石流(可能)最大冲出量和泥石流发生频率均为未知时,可用式(1-10)和(1-11)分别间接求出,然后再计算泥石流危险度。现以云南省东川市太平村沟为例。已知太平村沟各泥石流危险因子为: $S_1=17.16$, $S_2=5.76$, $S_3=1.77$, $S_6=13.8$, $S_7=1.18$, $S_9=0.78$, $S_{10}=102$, $S_{14}=0$,并且已知 $S_8=4600 \times 10^4 \text{m}^3$,由式(1-10)计算出 $L_1=17.8$,再由式(1-11)计算 L_2 :

$$L_2 = 80.6596 - 2.8302 \times 17.16 + 12.138 \times 13.8 + 0.0209 \times 4600 = 134$$

查表 1-8 可得各泥石流危险因子赋值,再由式(1-9)计算出太平村沟泥石流危险度 $R_d=0.7969$ 。判定结果表明,太平村沟泥石流危险度是很高的。

(2) 危险度判定结果和检验

任何新的方法是否适用,必须通过实践检验,并在实践中加以改进和完善,使之成熟后再推广应用。基于这一思想,我们选择云南东川地区 12 条典型泥石流沟作为检验对象。泥石流危险度判定结果及其检验见表 1-9。

从表 1-9 可以看出,用作检验的 12 条泥石流沟中有 10 条判定结果可靠,2 条偏低,总的泥石流危险度判定结果具有 83.33% 的可靠度。

表 1-9 云南东川地区典型泥石流沟危险度判定结果及其检验

编号	沟名	泥石流危险度	典型灾害、危害现状及活动趋势	判定结果
1	蒋家沟	$R_d=0.9998$	1919—1968 年间泥石流曾 7 次堵断小江,累计堵江时间达 245 天。1965—1985 年共发生泥石流 251 次,被称为东川泥石流之王。中国科学院泥石流观测站建于该沟,是目前世界上唯一能长期观测到泥石流的野外台站	可靠
2	大桥河	$R_d=0.9733$	1890—1930 年间泥石流共冲埋 5 个村庄,总计 320 户。1919—1933 年泥石流发生最盛,一年可达十几次。前锋龙头最高可达 7m,最大流量达 $2\,000 \text{m}^3/\text{s}$ 。1976—1985 年综合治理后,泥石流危害已大为减轻	可靠
3	石羊沟	$R_d=0.5145$	为一近期十分活跃的粘性泥石流沟,小规模泥石流一年可多次发生,大规模泥石流在大暴雨激发下极易发生,且直接威胁东川市南部。市城建局于 1972 年在沟内修建了两座拦沙坝和 3 500m 长的排导槽,对泥石流的进一步发展有所控制	可靠



续表 1-9

编号	沟名	泥石流危险度	典型灾害、危害现状及活动趋势	判定结果
4	达德沟	$R_d=0.5453$	近年来发生过三次大规模泥石流:第一次发生于1981年6月30日,泥石流冲毁渡槽、铁路桥台和路轨,造成直接经济损失50万元;第二次发生于1983年6月22日,灾害最大,经济损失210万元;第三次发生于1984年5月28日,造成经济损失100万元。泥石流最大流量达 $1140\text{m}^3/\text{s}$,前锋龙头高达10m,现正处在发展旺盛期	偏低
5	黑水河	$R_d=0.5616$	为一稀性泥石流沟,1983年6月22日和1984年7月28日发生过中等规模的泥石流,累计经济损失210万元。现泥石流活动趋势有所减弱	可靠
6	大白泥沟	$R_d=0.8601$	1902—1980年间泥石流曾7次堵断小江,致使隧道开裂变形,严重缩短铁路使用期。泥石流最大堆积厚度达6m,最大流量达 $2000\text{m}^3/\text{s}$,目前仍处于强盛期	可靠
7	小白泥沟	$R_d=0.8336$	泥石流堵江频率和危害性与大白泥沟相似,最长一次堵江时间达24小时。1977年以后泥石流活动有所减弱,但一旦沟床刷深,斜坡复活,泥石流又将随之处于强烈活动期	可靠
8	深沟	$R_d=0.5498$	为一老泥石流沟,下游穿越东川市北部,长约2km,对市区构成直接威胁。最近一次泥石流发生在1983年,为一次规模中等的稀性泥石流,但在暴雨和地震的激发下,暴发大规模粘性泥石流的可能性仍然存在	可靠
9	小海河	$R_d=0.6484$	为一老泥石流沟,历史上曾多次暴发过大规模粘性泥石流。从30年代至80年代初,泥石流活动减弱,但1983年又重新复活,发生过一次规模较大的泥石流。流域内有6个乡、955户、5099人,耕地面积5688亩,因此泥石流的潜在危害性仍较大	可靠
10	黑沙沟	$R_d=0.5087$	泥石流活动始于50年代,1958年和1962年发生过两次较大规模的灾害性泥石流。60—70年代为间歇期。80年代后,又重新复活,现正处于发展旺盛期	偏低
11	达朵沟	$R_d=0.6910$	为一间歇性泥石流沟,大规模的粘性泥石流约10年为一周期,间歇期间,多为小规模稀性泥石流。由于达朵平台有村民3025人,耕地和稻田2224亩,是达朵沟最富裕的地方,因此对其泥石流危害性也不能低估	可靠
12	因民沟	$R_d=0.5910$	1984年5月27日,因民沟铜矿发生了一次灾害性泥石流,死121人,伤34人,直接经济损失达1100万元。泥石流最大流量为 $400\text{m}^3/\text{s}$,搬运的最大漂粒直径为5.5m。该沟历史上未曾发生过泥石流,是一条间歇期长、频率低的泥石流沟	可靠



在本书作者的前期研究中,泥石流危险度的计算公式如下^[46-48]:

$$\begin{aligned} R_d = & 0.1429G_{L_1} + 0.1429G_{L_2} + 0.1299G_{S_1} + 0.1039G_{S_2} \\ & + 0.0909G_{S_3} + 0.0519G_{S_4} + 0.1169G_{S_5} + 0.013G_{S_7} \\ & + 0.0779G_{S_9} + 0.039G_{S_{10}} + 0.0649G_{S_{11}} + 0.026G_{S_{14}} \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中 G_{S_5} 为形成区山坡平均坡度的赋值; $G_{S_{11}}$ 为年平均降雨量的赋值; 其它符号同式(1-9)。

本书定稿时提出的泥石流危险度计算公式[式(1-9)]相对于式(1-12)作了如下改进:

①将原来的 10 项次要危险因子减少为现在的 8 项,删去了 2 项意义重复的次要危险因子,使其均成为独立变量。这样减少了计算量,增强了简便性和可操作性。

②调整了主要和次要危险因子的权重。主要危险因子的总权重由原来的 28.58% 增加到现在的 47.06%; 次要危险因子的总权重由原来的 71.42% 减少到现在的 52.94%。实践证明,这样的权重分配更趋合理。

③由于上述两项改进措施,泥石流危险度判定结果的可靠度提高,由原来的 66.67% 提高到现在的 83.33%,取得了比较满意的结果。

尽管如此,社会和公众对泥石流灾害预测预报的期望很高,特别是对规模大、危害重和影响广的泥石流,更希望对其预测预报的可靠度(准确率)越高越好。因此,还必须对泥石流危险度判定作进一步改进和完善,以期再次提高判定精度。

根据应用实践的反馈信息和有关专家的评议意见,为了提高危险因子取值变化的灵敏度,我们对泥石流危险因子等级及其赋值再作适当修改和调整(表 1-10)。

修订后的泥石流危险因子等级及其赋值(表 1-10)具有如下特点:

①为避免赋值跳动变化过大而产生误差,将原来危险因子等级的四级分割改为现在的六级分割,提高了危险因子取值变化的灵敏度。

②调整了部分危险因子取值的上下限,其中 L_1 和 S_9 的取值域未变, $L_2, S_1, S_2, S_3, S_6, S_7, S_{10}$ 和 S_{14} 的取值域拓宽,这样处理更符合实际。

③明确了各等级间的取值界限,用()表示该等级内不包含该数值,避免了危险因子取值界限的模糊而导致的危险度取值的不确定性。

④实践证明,采用改进后的泥石流危险度计算公式[式(1-9)]和修订后的泥石流危险因子等级及其赋值(表 1-10),可使泥石流危险度判定结果的可靠度(准确率)再次提高,达到 90% 左右。

(3) 危险度判定应用实践

根据式(1-9)和表 1-10,计算出云南省部分泥石流沟危险度(见表 1-11)。

在应用实践中参考泥石流危险度作为泥石流防治规划和工程设计的科学依据时,建议对 R_d 在 0.60—0.85 之间的沟谷予以高度重视和特别关注。因为社会和公众对这类沟谷的泥石流危险意识不强,心理准备较差。但大量实例表明,这类沟谷具有很高的泥石流潜在致灾能力,一旦泥石流发生,往往会造成意想不到的严重后果和重大灾难。例如震惊中外的 1981 年四川省甘洛县利子依达沟泥石流灾害和 1984 年云南省东川市因民沟泥石流灾害均为如此。而对 $R \geq 0.85$ 的泥石流沟,必然泥石流冲出方量较大、发生频率较高,



人们亲眼目睹其强烈活动和严重危害的机会较多,因此危险意识较强,心理准备充分,泥石流造成突发性重大灾难的可能性反而较小。对于 R_d 在 0.60—0.35 的沟谷,泥石流造成严重危害的可能性不大,但也不可掉以轻心。对 $R_d \leq 0.35$ 的沟谷,由于泥石流本身的强度、频度和潜在破坏力等致灾条件有限,造成危害的可能性较小,一般无重大灾难。泥石流危险度与泥石流活动特点和防治对策见表 1-12 和 1-13。

在泥石流危险度判定的应用实践中,一些人总希望给出一个危险度阈值,低于这一阈值,则判其为非泥石流沟。事实上,泥石流沟和非泥石流沟本无绝对界限可言。对山区某一沟谷来说,不能因它过去未发生泥石流,现在也未发生泥石流,就断定它将来永远也不会发生泥石流而定为非泥石流沟。因此人为地设定一个危险度阈值来判别泥石流沟与非泥石流沟是没有必要的,我们不能说没有发生过泥石流的沟谷就没有泥石流危险度。按照我们的观点,无论山区一条沟谷过去是否发生过泥石流和现在是否还发生泥石流,它都具有一定的泥石流危险度,只不过其危险度有大有小而已,即它都具有发生泥石流并有遭到泥石流损害的可能性,只不过其可能性有大有小而已。

表 1-10 泥石流危险因子等级及其赋值新表(1994 年修订)

I_1 G_{I_1}	≤ 1 0	(1)—5 0.2	(5)—10 0.4	(10)—50 0.6	(50)—(100) 0.8	≥ 100 1	$\times 10^4 m^3$
I_2 G_{I_2}	≤ 5 0	(5)—10 0.2	(10)—20 0.4	(20)—50 0.6	(50)—(100) 0.8	≥ 100 1	%
S_1 G_{S_1}	≥ 50 或 ≤ 0.5 0	(0.5)—2 0.2	(2)—5 0.4	(5)—10 0.6	(10)—30 0.8	(30)—(50) 1	km ²
S_2 G_{S_2}	≤ 0.5 0	(0.5)—1 0.2	(1)—2 0.4	(2)—5 0.6	(5)—(10) 0.8	≥ 10 1	km
S_3 G_{S_3}	≤ 0.2 0	(0.2)—0.5 0.2	(0.5)—0.7 0.4	(0.7)—1.0 0.6	(1.0)—(1.5) ~ 0.8	≥ 1.5 1	km
S_6 G_{S_6}	≤ 2 0	(2)—5 0.2	(5)—10 0.4	(10)—15 0.6	(15)—(20) 0.8	≥ 20 1	km/km ²
S_7 G_{S_7}	≤ 1.1 0	(1.1)—1.2 0.2	(1.2)—1.3 0.4	(1.3)—1.4 0.6	(1.4)—(1.5) 0.8	≥ 1.5 1	
S_9 G_{S_9}	≤ 0.1 0	(0.1)—0.2 0.2	(0.2)—0.3 0.4	(0.3)—0.4 0.6	(0.4)—(0.6) 0.8	≥ 0.6 1	
S_{10} $G_{S_{10}}$	≤ 50 0	(50)—75 0.2	(75)—100 0.4	(100)—125 0.6	(125)—(150) 0.8	≥ 150 1	mm
S_{14} $G_{S_{14}}$	≤ 20 0	(20)—50 0.2	(50)—100 0.4	(100)—150 0.6	(150)—(200) 0.8	≥ 200 1	人/km ²

注:()表示不包含括号中的数值。



表 1-11 云南省部分泥石流沟危险度判定结果

编号	沟名	G_{L_1}	G_{L_2}	G_{S_1}	G_{S_2}	G_{S_3}	G_{S_4}	G_{S_5}	G_{S_6}	G_{S_7}	G_{S_8}	G_{S_9}	$G_{S_{10}}$	$G_{S_{11}}$	R_d
1	大箐沟	0.2	0.6	0.4	0.5	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2	1				0.4117
2	观音寺沟	0	0.4	0	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	1				0.2499
3	大鱼坝沟	0.2	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.2	0.8	0.4	0.2				0.4470
4	芭蕉河	0.4	0.4	0.4	0.6	1	0.4	0.6	0.4	0.4	0.8				0.4764
5	水磨房沟	0.4	0.4	1	1	1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2				0.5616
6	直溪河	0.4	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.6	0.8	0.2	0.2				0.4999
7	小箐河	0.2	0.6	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4	0.8	0.6	0.4				0.3735
8	北老埂河	0.2	0.4	0.4	0.6	0.4	0.4	0.2	0.6	0.6	0.4				0.3881
9	山脚村河	0.2	0.6	0.4	0.6	0.4	0.6	0.2	0.8	0.6	0.6				0.4734
10	化工厂河	0.2	0.6	0.4	0.8	0.4	0.4	0.2	0.6	0.6	0.4				0.4528
11	白纸房沟	0.4	0.6	0.6	0.8	0.6	0.4	0.4	0.6	0.6	0.4				0.5411
12	黄纸房沟	0.2	0.6	0.4	0.8	0.4	0.2	0.4	0.4	0.6	0.4				0.4234
13	仁寿河	0.2	0.6	0.6	0.8	0.4	0.6	0	1	0.6	0.4				0.5175
14	五郎庙河	0.2	0.6	0.4	0.6	0.2	0.4	0.2	0.8	0.6	0.4				0.4323
15	黄龙山河	0.4	0.4	0.6	0.8	0.4	0.2	0.2	0.6	0.6	0.4				0.4558
16	上官屯河	0.2	0.4	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	0.6	0.6	0.4				0.3293
17	关翁箐	0.4	1	0.8	0.8	0.8	0.6	0.8	1	0.4	0.8				0.7263
18	板山河	0.6	0.6	1	1	0.8	0.4	0.4	1	0.6	0.8				0.7028
19	大箐沟	0.6	0.8	0.8	0.8	1	0.6	0.4	0.6	0.4	0.8				0.7116
20	花沟	0.4	0.8	0.6	1	0.8	0.6	0.4	0.8	0.4	0.8				0.6657
21	老干沟	0.6	1	0.8	0.8	1	0.6	0.4	0.8	0.4	0.8				0.7704
22	沙湾大沟	0.6	1	0.4	0.6	1	0.8	0.8	1	0.4	1				0.7499

注：表中编号同表 1-5。

表 1-12 泥石流危险度与泥石流活动特点

泥石流危险度	危险性评价	泥石流活动特点	灾情预测
≥ 0.85	极度危险	各危险因子取值极大,组合极佳,一触即发,能够发生巨大规模和特高频率的泥石流	可造成重大灾难和严重危害
0.60 ~ 0.85	高度危险	各危险因子取值较大,个别危险因子取值甚高,组合亦佳,处境严峻,潜在破坏力大,能够发生大规模和高频率的泥石流	可造成重大灾难和严重危害
0.35 ~ 0.60	中度危险	个别危险因子取值较大,组合尚可,能够间歇性发生中等规模的泥石流,较易由工程治理所控制	较少造成重大灾难和严重危害
≤ 0.35	轻度危险	各危险因子取值较小,组合欠佳,能够发生小规模、低频率的泥石流或山洪	一般不会造成重大灾难和严重危害



表 1-13 泥石流危险度与泥石流防治对策

泥石流危险度	危险性评价	防治原则	防治对策	工程设计标准
≥ 0.85	极度危险	防为主, 治为辅	尽量绕避, 不能绕避者建立预警避难系统; 必要时采取生物和土建工程综合治理, 将可能的灾害损失减少到最低程度	100 年一遇
0.60—0.85	高度危险	防、治并重	加强预测预报和预警避难“软”措施, 同时施以生物和土建工程综合治理“硬”措施; 确保危害对象安全无恙	50 年一遇
0.35—0.60	中度危险	治为主, 防为辅	实施生物和土建工程综合治理即可抑制泥石流的发生发展; 必要时可建立预警避难系统, 避免一切不必要的灾害损失	20 年一遇
≤ 0.35	轻度危险	防为主, 治为辅	加强水土保持, 保护生态环境, 搞好群策群防; 必要时辅以一定的工程治理	10 年一遇



第二章 泥石流堆积模型实验

模型实验是进行泥石流科学研究的重要手段之一,国外许多国家都非常重视这一工作。日本京都大学防灾研究所和建设省土木研究所等单位在这方面做过许多有益的工作,他们研究泥石流堆积机理,计算机模拟泥石流堆积过程^[58-60]。荷兰乌得勒支大学 H. Van Steijn 通过室内小型泥石流模型实验,研究泥石流堆积物的物理特性,得出了不同堆积物的颗粒定向以及泥石流温度和水分含量与剪切强度的相互关系^[61]。瑞士联邦地球科学局 M. Zimmermann 通过室内小型泥石流模型实验,研究泥石流堆积扇的形成过程和堆积形状,得出了堆积过程主要由泥石流本身物质特性和后续泥石流补给过程所控制的结论^[62]。美国华盛顿大学 X. K. Whipple 采用简单的水力学模型预测泥石流堆积扇上的径流量和堆积量^[63]。此外,美国联邦地质调查局新近建成了大型泥石流模型实验槽,用于检验已有的数学模型,发展用于解释和预测泥石流行为的新模型,改进用于减轻泥石流破坏的工程技术^[64]。意大利也广泛开展了以服务于防治工程为目的的相似模型实验。

国内近年来在泥石流模型实验方面也有长足进展。王兆印等通过在铺满卵石的陡槽中施放不同浓度、不同流量的泥浆或清水,研究泥石流的形成条件和运动规律^[65]。崔鹏从沟床坡度、细粒物质含量和水分饱和度三方面着手,采用小型模拟实验装置,探讨泥石流的起动条件^[66]。孟河清通过对大秦铁路化石沟泥石流的模型实验,探讨泥石流对铁路桥渡的影响和应采取的防护措施^[67]。周必凡等利用中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所泥石流动力学模拟实验厅的试验装置,通过对云南东川蒋家沟粘性泥石流运动参量之间相互关系的分析,建立了泥石流表面流速的计算公式^[68]。所有这些工作,丰富了泥石流沉积动力学的研究内容,推动了泥石流学科的向前发展,但专门设计用于泥石流(堆积扇)危险范围的模型实验还不多见。

第一节 实验材料和方法

泥石流小型堆积模型实验在云南东川蒋家沟泥石流观测研究站现场进行。1991年9月1日蒋家沟发生泥石流,4日取下游沟床残留泥样(样品I)作为实验材料。6日晚10时至12时该沟又发生泥石流,次日晨取沟床新鲜残留泥样(样品II)作为实验材料。

取样时将粒径大于20mm的卵石剔除。实验所用的样品均为粘性泥石流,中值粒径分别为0.8mm(样品I)和1.7mm(样品II)。样品粒度分析结果见表2-1。

小型堆积模型实验装置由三部分组成:①泥石流补给箱,为一内边长46.2cm的立方体,底边面积2134.44cm²,最大容积98611cm³,可装载泥石流流体约200kg(以泥石流容重2g/cm³计),底部开有一直径5cm的供给孔,由闸板开关控制泥石流的补给,供给箱由一固定架支撑;②泥石流流通槽,为一内宽15.8cm,内高18cm,有效流动长度150cm的矩形



槽,流通槽由一活动架支撑,活动架可前后移动而调整流通槽坡度,坡度调整范围为 10° — 34° ;③泥石流堆积板,为一宽150cm、长200cm的平板,平板以10cm为间隔,标有300个方格,以测定泥石流堆积面积,沿堆积板中轴线每间隔20cm钉入一有效长10cm的铁钉11颗,以测定泥石流堆积厚度,后改用20cm刻度钢尺逐点量测。堆积板直接放置于实验场地,坡度可任意调节,堆积板与流通槽以斜口方式平整相接。为保持泥石流流出补给箱后具有一定能量但又不过多飞溅而损失补给量,流通槽与补给孔互不接触,相距10—30cm。

表 2-1 模型实验所用泥石流体的粒度分析

粒径(mm)	<0.005	0.005—0.05	0.05—0.5	0.5—2	>2	容重(g/cm ³)
样品 I (%)	15.4	11.0	20.2	18.9	34.5	2.03
样品 II (%)	11.8	10.3	11.5	20.5	45.9	2.12

因粘性泥石流有明显的铺床现象,故在每次实验开始时都补给相同容重的泥石流体让其完成自然铺床过程(这部分泥石流体不计入补给量),以避免因流通槽粘附泥石流体而影响补给量。模型实验共分5项:实验1——泥石流补给总量与堆积范围的关系(连续堆积);实验2——一次泥石流补给量与堆积范围的关系(不连续堆积);实验3——泥石流堆积区坡度与堆积范围的关系;实验4——泥石流流通区坡度与堆积范围的关系;实验5——泥石流容重与堆积范围的关系。

第二节 实验结果和讨论

1. 泥石流补给总量与堆积范围的关系

实验目的是探讨泥石流堆积扇的发展过程和在原堆积扇上泥石流补给总量与最大堆积长度、最大堆积宽度、最大堆积厚度和堆积面积之间的关系。实验所用泥石流体为样品Ⅱ,加水稀释后容重为 1.82g/cm^3 ,采用的控制参数为流通区坡度 15° ,堆积区坡度 5° 。实验共设计10个回次,泥石流补给总量由 $2\,600\text{cm}^3$ 逐渐增大至 $26\,000\text{cm}^3$ 。每次堆积过程完全终止后,测量最大堆积长度、最大堆积宽度和0至10号位的堆积厚度,描下堆积平面图,再进行第二回次的实验。实验结果见表2-2和图2-1。

实验结果表明,泥石流最大堆积长度与泥石流补给总量有下列关系:

$$L = 12.8092V_c^{0.2525} \quad (2-1)$$

相关系数 $r=0.9696$ 。式中 L 为泥石流最大堆积长度(m); V_c 为泥石流补给总量(m^3)。本式适用范围:泥石流容重 1.82g/cm^3 ,堆积区坡度 5° 。

泥石流最大堆积宽度与泥石流补给总量有下列关系:

$$B = 4.4423V_c^{0.3199} \quad (2-2)$$

相关系数 $r=0.9914$ 。式中 B 为泥石流最大堆积宽度(m); V_c 和本式适用范围同式(2-1)。

泥石流最大堆积厚度与泥石流补给总量有下列关系:

$$T = 0.7067 + 0.0001V_c \quad (2-3)$$

相关系数 $r=0.9977$ 。式中 T 为泥石流最大堆积厚度(m); V_c 和本式适用范围同式(2-1)。

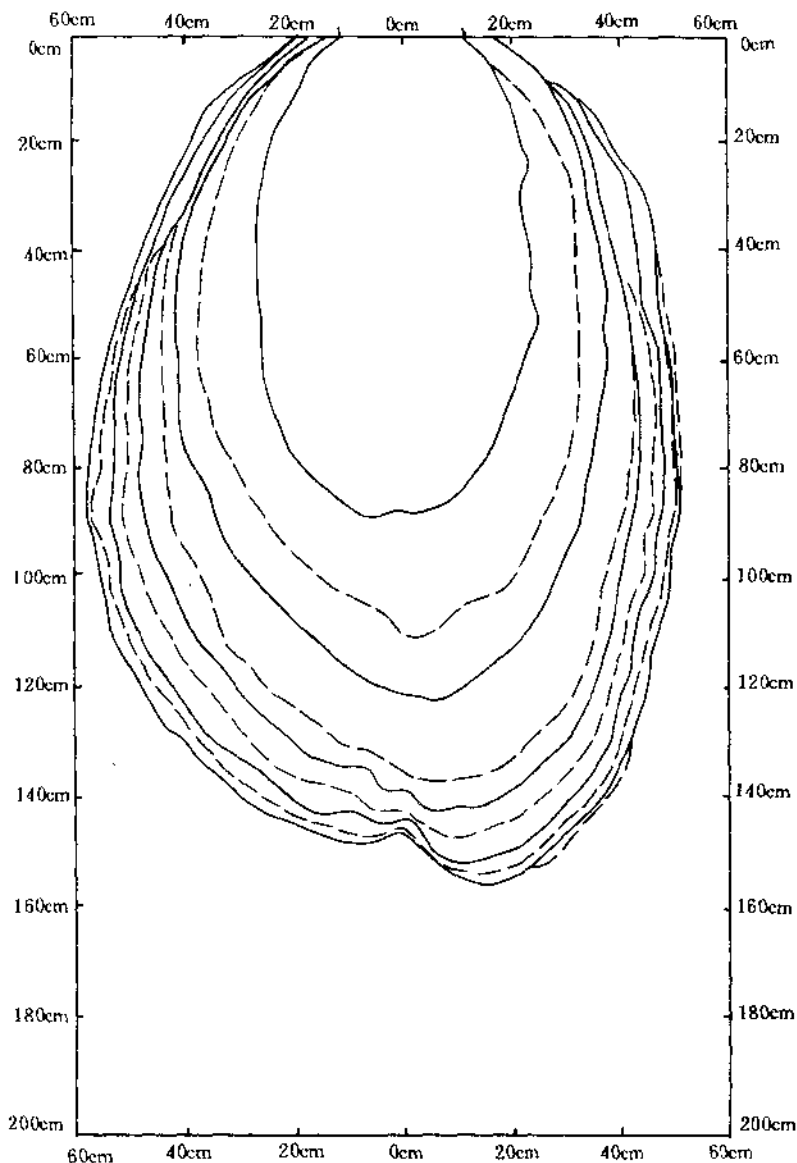


图 2-1 泥石流堆积扇的发展过程(连续堆积)

泥石流堆积面积与泥石流补给总量有下列关系：

$$S = 38.5149V_c^{0.5834} \quad (2-4)$$

相关系数 $r=0.9912$ 。式中 S 为泥石流堆积面积(m^2)； V_c 和本式适用范围同式(2-1)。

以上分析表明,泥石流最大堆积长度、最大堆积宽度和堆积面积与泥石流补给总量呈非线性幂函数关系,即 L 、 B 和 S 开始时随 V_c 的增加而很快增大,到一定程度后速度变慢,最后趋于稳定,此时增加的 V_c 不足以扩散到扇的四周而仅用于增加扇的厚度。幂函数提示自变量和因变量之间存在复杂的成生关系,即两者有机理上的联系。泥石流最大堆积宽度与泥石流补给总量呈线性直线函数关系,但斜率很小,即 T 随 V_c 的增加而缓慢增



大。线性函数表明自变量和因变量之间为简单的几何关系,较少有机理上的联系。

表 2-2 泥石流补给总量与堆积范围的模型实验资料(实验 1)

实验回次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
补给总量 $V_0(\text{cm}^3)$	2 600	5 200	7 800	10 400	13 000	15 600	18 200	20 800	23 400	26 000
最大堆积长度 $L(\text{cm})$	90	110	122	138	143	148	152	153	154	155
最大堆积宽度 $B(\text{cm})$	52	71	80	89	93	98	103	107	109	110
堆积厚度 (cm)	0 号位	1.1	1.3	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8
	1 号位	1.0	1.3	1.4	1.6	1.8	1.8	2.2	2.3	2.7
	2 号位	0.9	1.3	1.6	2.0	2.2	2.4	2.4	3.0	3.3
	3 号位	0.6	1.1	1.5	1.8	2.2	2.5	2.8	3.2	3.8
	4 号位	0.0	0.5	0.8	1.0	1.3	1.6	1.8	1.9	2.6
	5 号位		0.0	0.4	0.6	0.9	1.2	1.1	1.5	1.8
	6 号位			0.0	0.0	0.4	0.6	0.6	0.9	1.0
	7 号位					0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
最大堆积厚度 $T(\text{cm})$	1.1	1.3	1.6	2.0	2.2	2.5	2.8	3.2	3.6	3.8
堆积面积 $S(\text{cm}^2)$	3 520	5 690	7 330	9 280	10 120	11 120	12 150	12 720	12 780	13 280

2. 一次泥石流补给量与堆积范围的关系

实验目的是探讨单个泥石流堆积扇的形成过程和一次泥石流补给量与最大堆积长度、最大堆积宽度、最大堆积厚度和堆积面积之间的关系。实验所用泥石流体为样品 I, 容重为 $2.12\text{g}/\text{cm}^3$ 。采用的控制参数为流通区坡度 15° , 堆积区坡度 5° 。实验共设计 11 个回次, 泥石流补给量变化于 $2\,680\sim 16\,080\text{cm}^3$ 之间。每次实验完成后用水冲掉堆积物, 在堆积板保持与上次实验基本相同的光洁度和干湿度的条件下, 改变泥石流补给量, 再进行下一次实验。实验结果见表 2-3。

实验结果表明, 一次泥石流最大堆积长度与一次泥石流补给量有下列关系:

$$l = 50.3727 + 0.0059V \quad (2-5)$$

相关系数 $r=0.9743$ 。式中 l 为一次泥石流最大堆积长度(m); V 为一次泥石流补给量(m^3)。本式适用范围: 泥石流容重 $2.12\text{g}/\text{cm}^3$, 堆积区坡度 5° 。

一次泥石流最大堆积宽度与一次泥石流补给量有下列关系:

$$b = 39.9091 + 0.0035V \quad (2-6)$$

相关系数 $r=0.9799$ 。式中 b 为一次泥石流最大堆积宽度(m); V 和本式适用范围同式(2-5)。

一次泥石流堆积面积与一次泥石流补给量有下列关系:

$$a = 682.4091 + 0.5925V \quad (2-7)$$

相关系数 $r=0.9852$ 。式中 a 为一次泥石流堆积面积(m^2); V 和本式适用范围同式(2-5)。

一次泥石流最大堆积厚度与一次泥石流补给量为随机关系, 表明两者无必然联系。式(2-5)、(2-6)和(2-7)表明一次泥石流最大堆积长度、最大堆积宽度和堆积面积与一次泥



泥石流补给量呈线性直线函数关系,即 l 、 b 和 a 均随 V 的增加而匀速增大。在一次泥石流补给量不断增大的情况下,泥石流堆积扇持续向四周扩展,堆积面积的增大是堆积长度和堆积宽度共同增大的结果。

表 2-3 一次泥石流补给量与堆积范围的模型实验资料(实验 2)

实验回次		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
一次补给量 $V(\text{cm}^3)$		2 680	4 020	5 360	6 700	8 040	9 380	10 720	12 060	13 400	14 740	16 080
最大堆积长度 $l(\text{cm})$		61	74	82	89	94	113	123	128	126	126	145
最大堆积宽度 $b(\text{cm})$		43	54	58	68	70	74	78	83	88	87	93
堆 积 厚 度 (cm)	0号位	1.9	2.0	2.1	2.4	2.3	2.1	1.9	1.8	2.4	2.6	2.0
	1号位	1.5	1.8	1.9	2.2	2.2	2.0	1.8	1.9	2.3	2.5	1.9
	2号位	1.3	1.5	1.7	1.9	2.2	2.0	1.7	1.9	2.0	2.4	1.9
	3号位	0.6	1.2	1.1	1.7	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	2.4	2.4
	4号位	0.0	0.0	0.4	0.9	1.6	1.9	2.1	2.0	1.9	2.2	2.4
	5号位			0.0	0.0	0.0	1.0	1.5	1.7	1.4	1.5	1.9
	6号位						0.0	0.5	0.8	0.5	0.8	1.6
	7号位							0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
	8号位											0.0
最大堆积厚度 $d(\text{cm})$		1.9	2.0	2.1	2.4	2.3	2.0	2.1	2.0	2.4	2.6	2.4
堆积面积 $a(\text{cm}^2)$		2 421	3 325	3 645	4 535	5 150	6 305	7 160	8 020	8 679	8 365	11 045

3. 泥石流堆积区坡度与堆积范围的关系

实验目的是探讨堆积区坡度对堆积范围的影响。实验所用泥石流流体为样品 1,容重为 $2.03\text{g}/\text{cm}^3$ 。采用的控制参数为每次定量补给泥石流流体 $6\,318\text{cm}^3$,流通区坡度 15° 。实验共设计 11 个回次,堆积区坡度从 0° 开始,每次增加 1° ,最大至 10° 。实验结果见表 2-4。

实验结果表明,一次泥石流最大堆积长度与堆积区坡度有下列关系:

$$l = 53.5455 + 6.8909G \quad (2-8)$$

相关系数 $r=0.9920$ 。式中 G 为泥石流堆积区坡度($^\circ$); l 同式(2-5)。本式适用范围:泥石流容重 $2.03\text{g}/\text{cm}^3$,一次泥石流补给量为 $6\,318\text{cm}^3$ 。

一次泥石流最大堆积宽度与堆积区坡度有下列关系:

$$b = 81.8636 - 2.5545G \quad (2-9)$$

相关系数 $r=-0.3104$ 。式中 b 同式(2-6); G 和本式适用范围同式(2-8)。

一次泥石流最大堆积厚度与堆积区坡度有下列关系:

$$d = 4.0500 - 0.2336G \quad (2-10)$$

相关系数 $r=-0.9212$ 。式中 d 为一次泥石流最大堆积厚度(m); G 和本式适用范围同式(2-8)。

一次泥石流堆积面积与堆积区坡度有下列关系:

$$a = 3743.0455 + 214.7000G \quad (2-11)$$

相关系数 $r=0.9470$ 。式中 a 同式(2-7); G 和本式使用范围同式(2-8)。



表 2-4 泥石流堆积区坡度与堆积范围的模型实验资料(实验 3)

实验回次		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
堆积区坡度 $G(^{\circ})$		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
最大堆积长度 $l(\text{cm})$		50	60	70	78	81	85	96	106	105	113	124
最大堆积宽度 $b(\text{cm})$		92	76	79	69	71	70	55	60	63	60	65
堆积厚度 (cm)	0号位	4.5	4.0	2.9	3.6	3.1	2.7	2.4	2.1	2.3	2.2	1.9
	1号位	2.8	2.8	2.3	2.9	2.7	2.4	2.2	1.8	2.1	2.2	1.8
	2号位	0.5	0.9	1.4	2.3	2.0	1.8	1.7	1.3	1.8	2.0	1.8
	3号位	0.0	0.2	0.2	0.8	1.2	1.1	1.5	1.1	1.4	1.8	1.3
	4号位		0.0	0.0	0.0	0.6	0.3	1.0	0.9	1.0	1.8	1.0
	5号位						0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.5
	6号位									0.0	0.0	0.0
	7号位											
最大堆积厚度 $d(\text{cm})$		4.5	4.0	2.9	3.6	3.1	2.7	2.4	2.1	2.3	2.2	1.9
堆积面积 $a(\text{cm}^2)$		3 763	3 756	4 458	4 422	4 692	4 618	5 224	4 990	5 399	5 335	6 325

式(2-8)和(2-11)表明一次泥石流最大堆积长度和堆积面积与堆积区坡度呈线性直线正相关,即 l 和 a 随 G 的增大而匀速增大。式(2-9)和(2-10)表明一次泥石流最大堆积宽度和最大堆积厚度与堆积区坡度呈线性直线负相关,即 b 和 d 随 G 的增加而匀速减小。随着堆积区坡度的增大,泥石流从开始堆积到最后停积的时间加长,从而导致堆积过程延长,即泥石流在堆积区的流程加长,因此堆积面积也相应增大。但在泥石流补给量不变的条件下,堆积面积的增大是通过减小堆积厚度和增大堆积长度的方式实现的。

4. 泥石流流通区坡度与堆积范围的关系

实验目的是探讨泥石流流通区坡度对堆积范围的影响。实验所用泥石流流体为样品Ⅰ。实验分两组:第一组(实验 4A)的控制参数为每次定量补给泥石流流体 $7\ 700\text{cm}^3$,泥石流流容重 $1.85\text{g}/\text{cm}^3$;第二组(实验 4B)的控制参数为每次定量供给泥石流流体 $8\ 850\text{cm}^3$,泥石流流容重 $2.12\text{g}/\text{cm}^3$,堆积区坡度均为 5° 。实验各设计 13 个回次,流通区坡度从 10° 开始,每次增加 2° ,最大至 34° 。实验结果见图 2-2 和 2-3。

实验结果表明,无论是稀性泥石流还是粘性泥石流,其最大堆积长度、最大堆积宽度、最大堆积厚度和堆积面积与流通区坡度均关系不大,即随着流通区坡度的增大,在给定的泥石流补给量条件下,最大堆积长度、最大堆积宽度、最大堆积厚度和堆积面积始终保持某一恒定值。两组实验均证明流通区坡度对泥石流堆积范围无多大影响。

5. 泥石流容重与堆积范围的关系

实验目的是为了探讨泥石流容重对堆积范围的影响。实验所用泥石流流体为样品Ⅰ。采用的控制参数为每次定量补给泥石流流体 $7\ 700\text{cm}^3$,流通区坡度 15° ,堆积区坡度 5° ,实验共设计 10 个回次,泥石流容重变化于 $2.20\text{—}1.62\text{g}/\text{cm}^3$,实验结果见表 2-5。

实验结果表明,一次泥石流最大堆积长度与容重有下列关系:

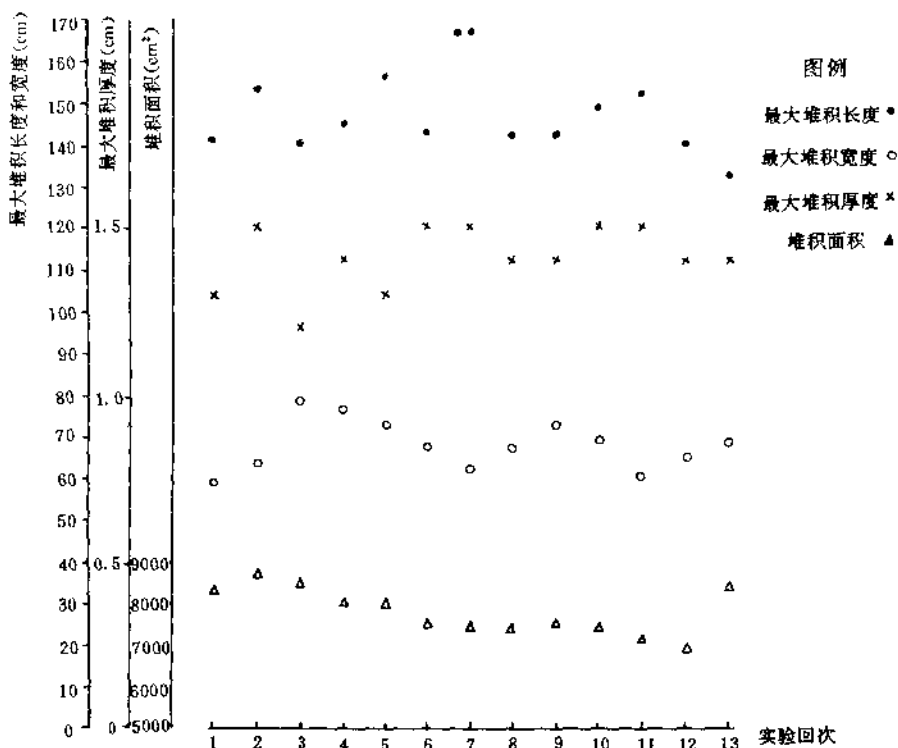


图 2-2 泥石流流通区坡度与堆积范围的散点图(实验 4A, $r_c = 1.85 \text{g/cm}^3$)

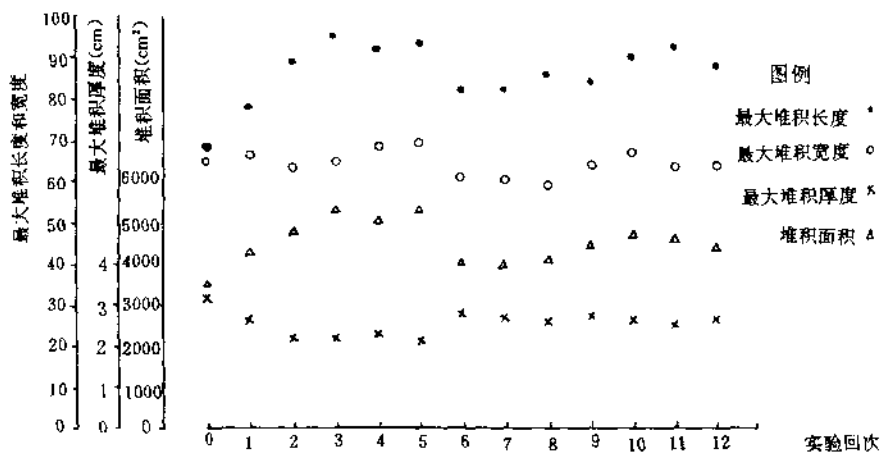


图 2-3 泥石流流通区坡度与堆积范围的散点图(实验 4B, $r_c = 2.128 \text{g/cm}^3$)

$$l = 2304.2322r_c^{-4.7664} \quad (2-12)$$

相关系数 $r = -0.9852$ 。式中 r_c 为泥石流容重 (g/cm^3); l 同式 (2-6)。本式适用范围: 堆积区坡度 5° , 一次泥石流补给量 7700cm^3 。

一次泥石流最大堆积厚度与泥石流容重有下列关系:



表 2-5 泥石流容重与堆积范围的模型实验资料(实验 5)

实验回次		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
泥石流容重 r_c (g/cm ³)		2.20	2.07	2.00	1.92	1.84	1.79	1.76	1.72	1.66	1.62
最大堆积长度 l (cm)		47	74	90	110	132	149	172	158	185	230
最大堆积宽度 b (cm)		57	72	70	63	59	64	64	65	61	65
堆 积 厚 度 (cm)	0号位	4.5	4.0	2.5	1.9	1.7	1.9	2.0	1.8	2.3	1.9
	1号位	3.5	3.7	2.4	1.8	1.4	1.4	1.1	1.3	1.2	0.8
	2号位	1.0	2.2	2.3	1.8	1.4	1.3	1.0	1.3	1.2	0.6
	3号位	0.0	1.7	2.0	1.7	1.6	1.3	1.2	1.5	1.3	0.7
	4号位		0.0	0.8	1.6	1.5	1.5	1.3	1.2	1.3	0.6
	5号位			0.0	1.0	1.0	1.4	0.9	1.1	1.0	0.6
	6号位				0.0	1.0	1.4	1.1	1.0	0.9	0.7
	7号位					0.0	0.9	1.0	0.8	0.9	0.6
	8号位						0.0	0.4	0.0	0.9	0.7
	9号位							0.0		0.3	0.5
10号位									0.0	0.0	
最大堆积厚度 d (cm)		4.5	4.0	2.5	1.9	1.7	1.9	2.0	1.8	2.3	1.9
堆积面积 a (cm ²)		2 038	4 052	5 002	5 620	6 142	6 530	8 435	7 517	9 116	12 337

$$d = -5.4920 + 4.2745r_c \quad (2-13)$$

相关系数 $r=0.8127$ 。式中 d 同式(2-10); r_c 和本式适用范围同式(2-12)。

一次泥石流堆积面积与泥石流容重有下列关系:

$$a = 116693.8509 r_c^{-4.8102} \quad (2-14)$$

相关系数 $r=-0.9586$ 。式中 a 同式(2-7); r_c 和本式适用范围同式(2-12)。

一次泥石流最大堆积宽度与泥石流容重为随机关系,表明两者无必然联系。式(2-12)和(2-14)表明一次泥石流最大堆积长度和堆积面积与泥石流容重呈负相关的非线性幂函数关系。即 l 和 a 开始时随着 r_c 的增加而很快减小,到一定程度后减小速度变慢,最后趋于稳定,此时 r_c 已接近自然界的极大值。式(2-13)表明一次泥石流最大堆积厚度与泥石流容重呈线性直线函数关系,即 d 随 r_c 的增加而匀速增大。随着泥石流容重的不断减小,泥石流堆积面积不断增大,但在泥石流补给量不变的条件下,堆积面积的增大是通过堆积厚度减小和堆积长度增大的方式实现的。

6. 泥石流堆积形态的模型实验

(1) 堆积区坡度对粘性泥石流堆积形态的影响

实验所用泥石流流体为样品 I,容重 2.03g/cm^3 。控制参数为:每次定量补给泥石流流体 $6\,318\text{cm}^3$,流通区坡度固定于 15° 。实验共设计 11 个回次,堆积区坡度从 0° 开始,每次增加 1° 至最大 10° 。每次堆积过程完全终止后,测量最大堆积长度、最大堆积宽度和 0-10 号位



的堆积厚度,描下堆积平面图,完成一个回次的实验。用水冲掉堆积物,在堆积板保持与上次实验基本相同的光洁度和干湿度的条件下,调整堆积板坡度,再进行第二回次的实验。模型实验结果见表 2-6。

表 2-6 堆积区坡度对粘性泥石流堆积形态的影响

实验回次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
堆积区坡度 $\alpha(^{\circ})$	0	1	2	3	4	5	5	7	8	9	10
最大堆积长度 $l(\text{cm})$	50	60	70	78	81	85	86	106	105	113	124
最大堆积宽度 $b(\text{cm})$	92	76	75	69	71	70	55	60	63	60	55
l/b 值	0.54	0.79	0.89	1.13	1.14	1.21	1.75	1.77	1.67	1.88	1.91
堆积体表面坡度 $(^{\circ})$	5.1	3.8	2.4	2.6	2.2	1.8	1.4	1.1	1.3	1.1	0.9

选择第 1,4,7,9,11 回次的粘性泥石流堆积形态,叠加于同一坐标上,从中能大致和定性地了解粘性泥石流堆积形态的三种主要图型:半圆形 \rightarrow 圆形(准圆形) \rightarrow 椭圆形及其转换形式和变化趋势(图 2-4)。

实验结果表明,堆积区坡度为 0° 时,粘性泥石流堆积形态为半圆形;堆积区坡度小于或等于 5° 时,粘性泥石流堆积形态为圆形或准圆形;堆积区坡度大于 5° 时,粘性泥石流堆积形态为椭圆形。为进一步分析形态特征,采用最大堆积长度 l 与最大堆积宽度 b 之比值这一定量指标,清楚地显示了堆积区坡度与粘性泥石流堆积形态的相互关系及其变化规律。

(2) 泥石流容重对泥石流堆积形态的影响

实验所用泥石流流体为样品 I。控制参数为:每次定量补给泥石流流体 7700cm^3 ,流通区坡度固定于 15° ,堆积区坡度固定于 5° ,容重变化于 $2.20 \sim 1.62\text{g}/\text{cm}^3$ 之间。每次堆积过程完全终止后,测量最大堆积长度,最大堆积宽度和 0—10 号位的堆积厚度,描下堆积平面图,完成一个回次的实验。用水冲掉堆积物,在堆积板保持与上次实验基本相同的光洁度和干湿度的条件下,加水稀释泥石流容重,再进行第二回次的实验。模型实验结果见表 2-7。

表 2-7 泥石流容重对泥石流堆积形态的影响

实验回次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
泥石流容重 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.26	2.07	2.00	1.92	1.84	1.79	1.76	1.72	1.66	1.62
最大堆积长度 $l(\text{cm})$	47	74	90	110	132	149	172	158	185	230
最大堆积宽度 $b(\text{cm})$	57	72	70	63	59	64	64	65	61	65
l/b 值	0.82	1.03	1.29	1.75	2.24	2.33	2.69	2.43	3.03	3.54
堆积体表面坡度 $(^{\circ})$	5.5	3.1	1.6	1.0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5

选择第 1,3,5,7,10 回次的泥石流堆积形态,叠加在同一坐标上,从中能大致和定性

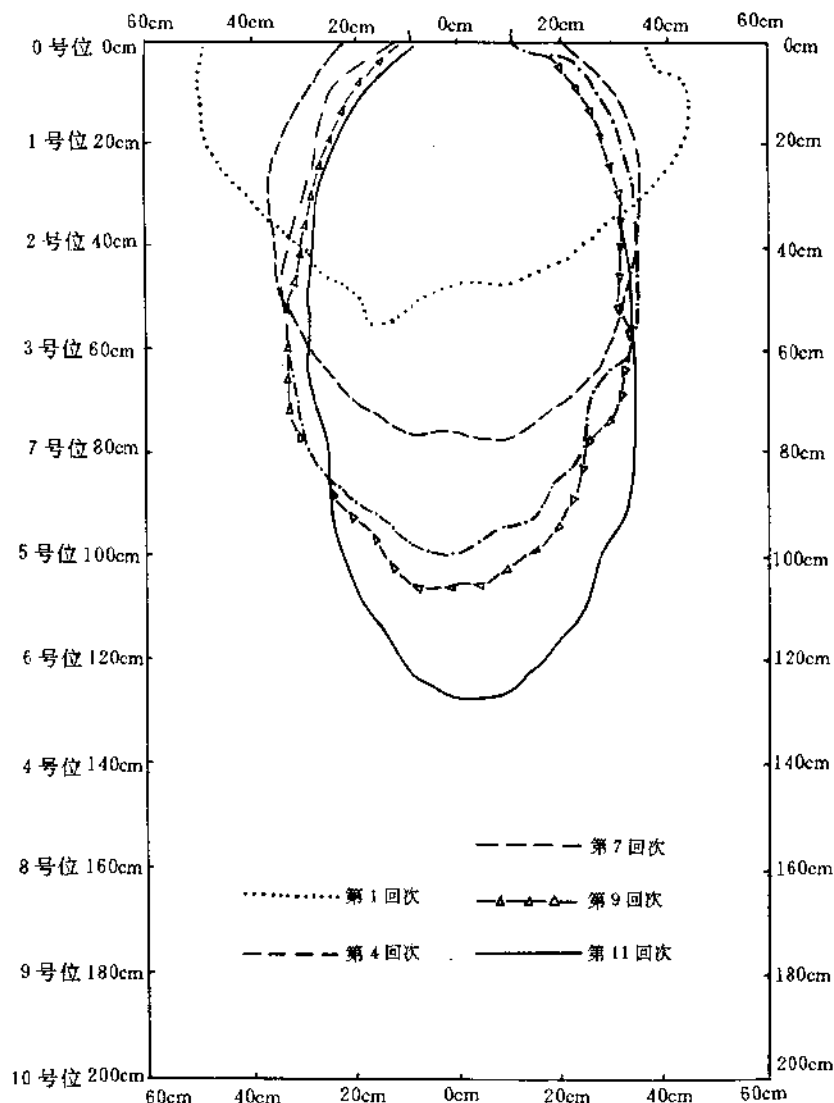


图 2-4 堆积区坡度对粘性泥石流堆积形态的影响

地了解泥石流堆积形态的三种主要图型：圆形(准圆形)→椭圆形→长条形(长方形)及其转换形式和变化趋势(图 2-5)。

实验结果表明,泥石流容重小于 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ 时,泥石流堆积形态为长方形;泥石流容重为 $1.8\text{--}2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 时,泥石流堆积形态为椭圆形;泥石流容重大于 $2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 时,泥石流堆积形态为圆形或准圆形。 l/b 值可进一步定量分析泥石流容重与泥石流堆积形态的关系及其变化规律。

(3) 泥石流堆积纵剖面形态

根据表 2-4 的实验资料,点绘前 10 个实验回次的泥石流堆积纵剖面(图 2-6)。该图直

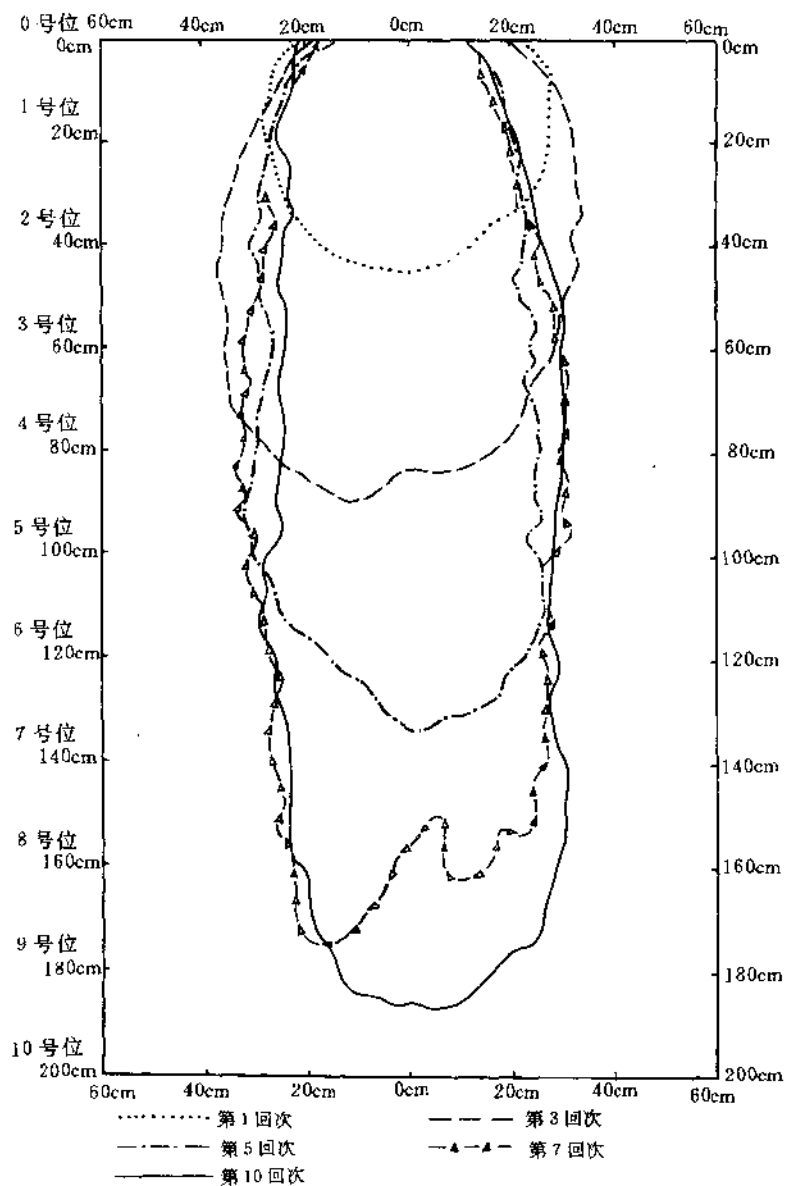


图 2-5 泥石流容重对泥石流堆积形态的影响

观地显示出堆积区坡度对粘性泥石流堆积纵剖面的影响。

由图 2-6 分析得出：①粘性泥石流的最大堆积厚度和堆积体表面坡度随堆积区坡度的增大而减小；②粘性泥石流的最大堆积长度随堆积区坡度的增大而增大；③当堆积区坡度小于或等于 5° 时，粘性泥石流堆积坡型基本上为“上凸下凹的简单复式坡”或“直线坡”；当堆积区坡度大于 5° 时，粘性泥石流堆积坡型基本上为“上凸中凹下凸的复杂复式坡”。

根据表 2-5 的实验资料，点绘 10 个实验回次的泥石流堆积纵剖面(图 2-7)。该图直观

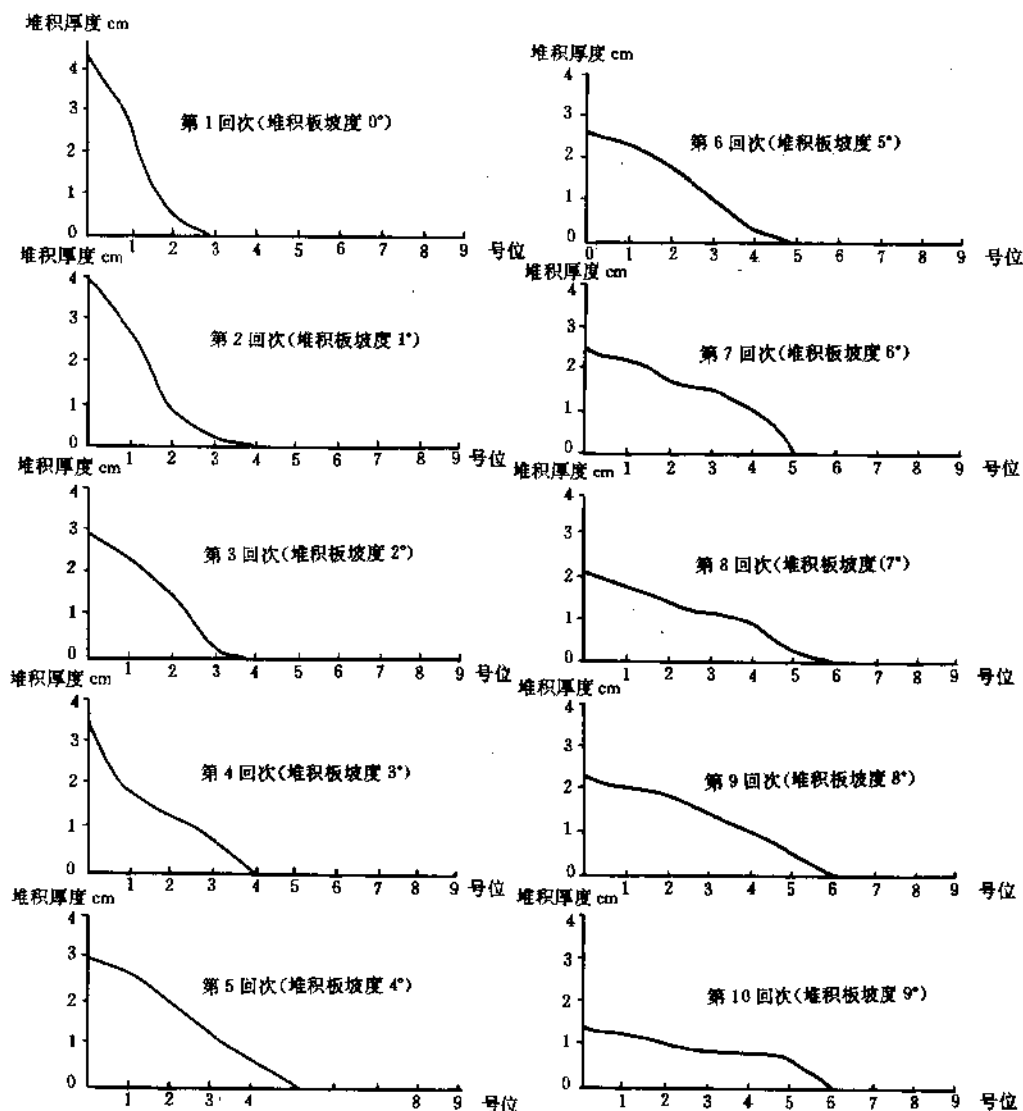


图 2-6 堆积区坡度对粘性泥石流堆积纵剖面的影响($r_s = 2.03\text{g/cm}^3$)

地显示出泥石流容重对泥石流堆积纵剖面的影响。

由图 2-7 分析得出：①泥石流的最大堆积厚度和堆积体表面坡度随泥石流容重的减小而减小；②泥石流的最大堆积长度随泥石流容重的减小而增大；③随着泥石流容重由大变小时，泥石流堆积坡型由“直线坡”和“凸形坡”向“上凹下凸的简单复式坡”和“上凹中直下凸的复杂复式坡”转变。当泥石流容重大于或等于 1.8g/cm^3 时，基本上为单一的“直线坡”和“凸形坡”；当泥石流容重小于 1.8g/cm^3 时，均为“上凹下凸的简单复式坡”或“上凹中直下凸的复杂复式坡”。

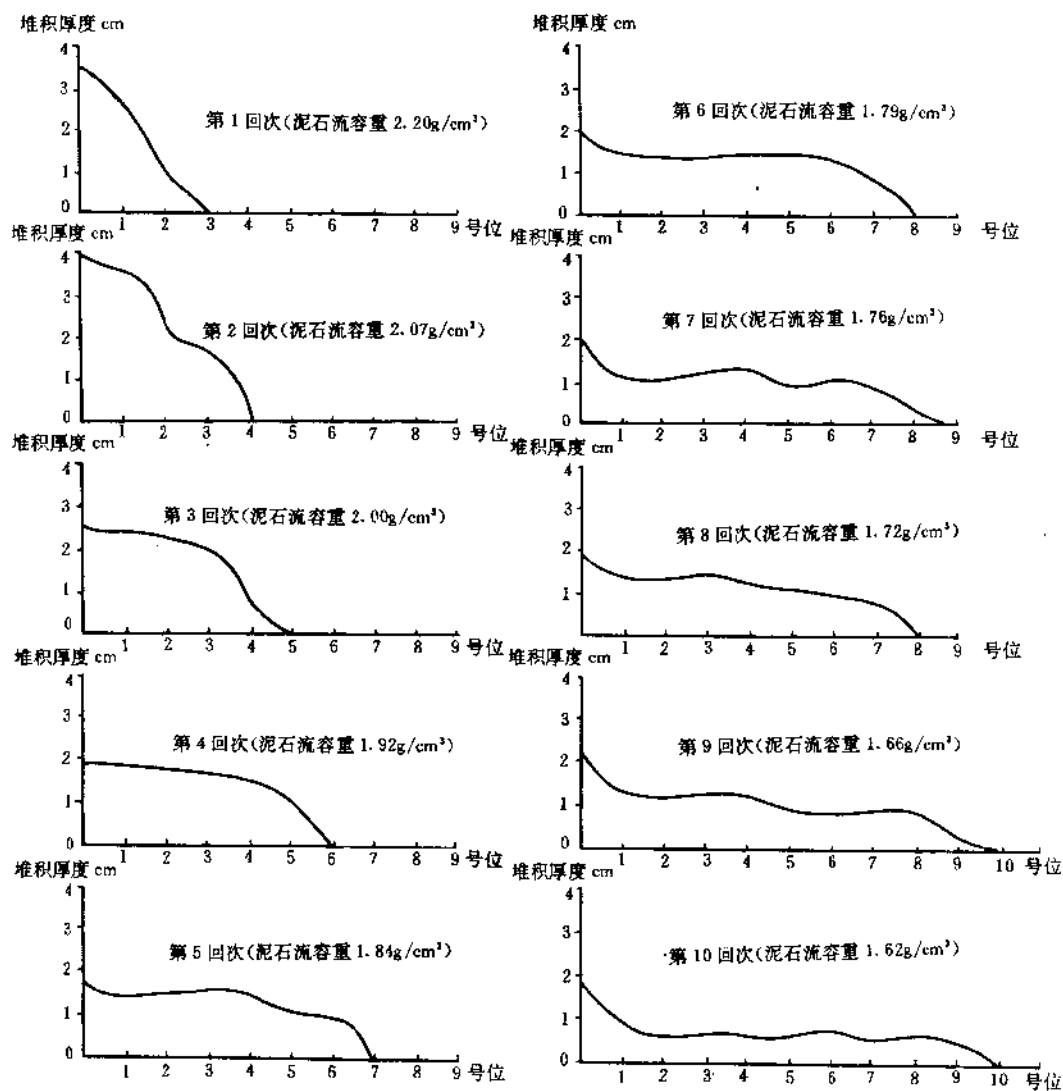


图 2-7 泥石流容重对泥石流堆积纵剖面的影响(堆积区坡度为 5°)



第三章 泥石流危险范围

第一节 泥石流危险范围概述

1. 泥石流危险范围定义

危险是指有遭到损害的可能。危险范围是指有可能遭到损害的区域。那么,泥石流危险范围则是指有可能遭到泥石流损害的区域。泥石流危险范围有广义和狭义之分。广义的危险范围指泥石流全流域,包括泥石流形成区、流通区和堆积区。狭义的危险范围仅指泥石流堆积区,即堆积扇部分。由于堆积扇较为平坦开阔的地形,多成为山区人类活动最频繁、工农业生产最集中和村寨城镇最密集的场所,同时也是我国山区扇形地开发利用的主要对象。泥石流堆积扇不仅是泥石流与人类社会生存发展相互斗争的焦点,也是泥石流具有最后“杀伤”作用的地带,因此泥石流堆积扇是山区人类社会最为关注的区域,也是本书泥石流危险范围的研究重点所在。泥石流危险范围的定义见框图(图 3-1)。若无特别说明,泥石流危险范围可认为是狭义的危险范围。

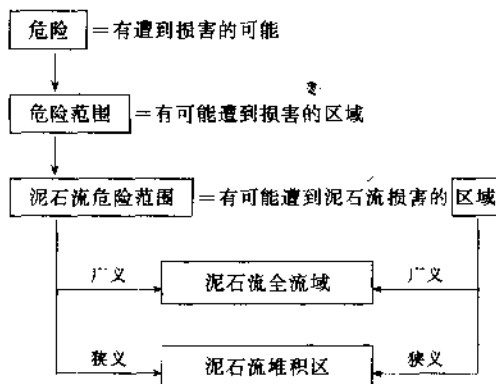


图 3-1 泥石流危险范围定义框图

狭义的泥石流危险范围即泥石流可能堆积的区域。区域是一个明确的空间概念,因此泥石流危险范围在空间上也是明确的,它可以由若干线条圈画出其周围界限,从而计算出该区域的面积。

与泥石流危险范围相对应的另一概念是泥石流危害范围。显然,前者是指有可能遭到泥石流损害的区域,带有预测性质;后者是指实际遭到泥石流损害的区域,具有实测性质。



2. 泥石流危险范围研究现状

泥石流危险范围的预测也即泥石流灾害的空间预测,是泥石流预测预报研究中的一项重要内容。泥石流危险范围的确定,对山区铁路公路选线、桥梁涵洞选址、水力水电工程定位、城镇村寨设置布局以及泥石流预警避难路线的选择和综合防治规划的制定等都具有极为重要的实际意义和科学价值。相对于泥石流灾害的时间预测来说,空间预测会容易一些,预测的准确率也高一些,但这同样有个预测尺度问题,预测尺度越小,难度就越大,准确率就越低。泥石流危险范围的确定并非想象的那样简单和一目了然,对于泥石流这种突发性山地灾害来说,其复杂多变的流路,反复无常的特性,大大增加了确定其堆积泛滥区域的困难。可以说,泥石流危险范围的预测仍是目前泥石流研究中的薄弱环节和难点所在,特别是对于一条泥石流沟和一次泥石流这样小尺度的空间预测来说更是如此。自80年代以来,国内外泥石流学者一直在这一领域努力探索,取得了一批可喜的成果,但由于泥石流本身和堆积下垫面的不确定因素很多,这一领域的研究尚需继续深入,并在实践中臻于完善。

日本是国际上较早也较多地涉及到泥石流危险范围预测的国家之一。池谷浩等1979年就初步开展了这一工作^[69],他根据流域面积推算泥石流冲出量,根据冲出量再推算泥石流堆积长度和堆积宽度,率先从统计学角度探讨了这一问题。高桥保和水山高久等1980年开展了泥石流堆积过程和堆积范围的模型实验^[70,71],开始从水力学角度探讨这一问题。五年后,水山高久等又通过改进的模型实验,在先进的计算机设备支持下,采用连续流基础方程式建立了泥石流(主要是水石流)危险范围预测的数学模型^[38]。两年后高桥保等又对上述模型作了修正,他们将泥石流分为泥流型和石砾型两类,再运用连续流基础方程式分别建立了两种不同类型的泥石流危险范围预测模型^[72]。该模型与水力学实验结果吻合较好,但与实际验证差距较大,且不适用于粘性泥石流。随着这一研究的进一步深入,石川芳治等用模型实验模拟堆积区具有沟槽和隆起等微地貌时,泥石流堆积范围应如何修正以及泥石流流体中细粒物质对泥石流堆积扩散的影响等^[60]。尽管这些探索刚刚起步,但意义深远,是今后努力的方向。与此同时,统计学在这一领域的应用仍在发展。山下佑一等提出了用流域面积和堆积区坡度双因子预测泥石流危险范围的方法^[73],得出了一些有益的结果。

欧美国家也比较重视泥石流危险范围的研究。奥地利很早就进行了泥石流危险范围的预测工作,并引用交通信号中红、黄、绿三色的特定含义,将泥石流危险区分为三类:红区——泥石流危险区;黄区——泥石流潜在危险区;绿区——无泥石流危险区。欧洲许多国家,包括瑞士、德国和意大利等至今仍沿用这一方法^[74],但该方法并未以某一理论作基础,区域界限的确定带有很大的人为性。加拿大O. Hungr等虽然认为泥石流危险范围的确定应以相应的理论作基础,但却认为目前尚未有这样合适的理论。因此,他们强调感性认识,即凭经验通过实地勘测,现场确定泥石流危险范围^[75]。但这项工作只有由经验丰富的泥石流专家才能完成,且工作量大,耗时长,费用高,不便于大规模作业。因此,我们认为只有从感性认识上升到理性认识,在感性认识的基础上建立某种相关理论作依托,才是圆满解决这一问题的正确途径。

我国较早与泥石流危险范围研究有关的工作主要是配合泥石流地区的公路选线而开



展的^[76]。当时为预测泥石流堆积扇发展趋势可能对公路营运带来的影响,也开展过有关泥石流堆积的模型实验。近年来,这一领域的研究有了进一步发展。本书作者首先提出了用流域面积单因子预测泥石流危险范围的简易方法,并进行了初期的泥石流堆积模型实验^[77-79]。继而在国家自然科学基金和云南省应用基础研究基金的资助下,这一领域的研究有了较大进展,现已取得了一系列研究成果。例如通过泥石流流域背景因素的多因子统计分析,建立了泥石流危险范围预测的统计模型^[80,81];采用泥石流新鲜泥样,进行现场堆积模型实验,探讨了影响泥石流堆积过程的各种因素及其相互关系^[82],建立了泥石流危险范围预测的实验模型^[83,84]。随着研究的不断深入,又开展了泥石流危险范围内危险度的评价研究^[85,86],进一步丰富了泥石流危险范围的研究内容。以下四节就是关于我国西南山区泥石流危险范围预测这一专门研究的最新成果。

第二节 泥石流堆积扇地形特征

泥石流危险范围与泥石流堆积扇密切相关,在某种程度上,可以说泥石流堆积扇的范围即泥石流的危险范围。因此有关泥石流堆积扇的地形特征,有必要在泥石流危险范围预测模型建立之前作简要论述。

泥石流(特别是粘性泥石流)形成的独特的扇形地貌,引起了广大泥石流研究者和地貌工作者的浓厚兴趣。唐川提出了典型泥石流扇形地模式,分析了扇形地空间展布规律和扇群组合关系^[87,88]。曾思伟等探讨了粘性泥石流堆积扇平面形态和纵剖面形态的数学表达式^[89]。田连权以云南省东川市蒋家沟为例,论述了粘性泥石流的堆积地貌^[90]。本书第一作者探讨了泥石流堆积扇扩展与主河床平面形态的关系,论述了堆积扇发展过程在泥石流沟谷地貌演变中的作用和堆积扇在泥石流地貌标志中的意义^[91-94]。国外对泥石流堆积扇的研究也非常重视,特别是日本、美国、加拿大和原苏联比较突出。他们研究泥石流堆积扇地貌学、沉积学和形成学的各个方面,并在室内模拟泥石流堆积过程,探讨泥石流堆积机理^[95-97]。所有这些工作,不仅丰富了泥石流动力堆积过程的研究内容,同时也奠定了泥石流堆积扇地形特征的研究基础。

1. 泥石流堆积扇形态特征

大量野外考察和实地勘测形成了目前泥石流堆积扇立体形态较为统一的定性描述:横剖面为上凸形,纵剖面多为上凸形^[97,98];平面形态在堆积扇发展初期多呈准圆形或椭圆形^[99],发育中期以不对称形式扩展,通常沿主河下游一侧延伸较快,两侧长度之比可达1:2,甚至更大,发育晚期多为比较典型的扇形地,粘性泥石流可形成大扇套小扇的串珠状多级扇体,稀性泥石流堆积扇若无构造运动的差异抬升,一般不会出现串珠状现象。

泥石流堆积扇前缘如遇主河,则多为陡坎。扇体中上部坡度稍陡,纵坡通常大于10°;下部和侧缘坡度平缓,一般只有几度。例如云南省东川市小白泥沟泥石流堆积扇中上部纵坡为15°—20°,下游侧缘坡度为6°。堆积扇规模大小不等,例如云南省东川市蒋家沟下游左侧某山坡型泥石流堆积扇最大长度23m,最大宽度27m,扇面面积仅310m²,而云南省东川市大白泥沟泥石流堆积扇最大长度达1.4km,最大宽度达1.6km,扇面面积达1.4km²。



为定量描述泥石流堆积扇的形态特征,我们通过 1:38 000—1:42 000 大比例尺航空像片判读和 1:50 000 地形图量算,得到云南东川小江流域 55 处泥石流堆积扇形态的特征值(表 3-1)。表中堆积扇最大厚度由下列两种方式间接获取,当 $L \cdot \sin \alpha < h_1 - h_2$ 时,取 $T = L \cdot \sin \alpha$;当 $L \cdot \sin \alpha > h_1 - h_2$ 时,取 $T = h_1 - h_2$ 。其中 T 为最大堆积厚度(m), L 为最大堆积长度(m), α 为平均纵坡($^{\circ}$), h_1 为扇顶海拔高程(m), h_2 为扇前缘海拔高程(m)。最大堆积长度和最大堆积宽度将在后面的表 3-5 中列出。

表 3-1 云南东川小江流域泥石流堆积扇形态特征

编号	沟名	最大堆积厚度 T (m)	堆积幅角 R ($^{\circ}$)	平均纵坡 α ($^{\circ}$)	编号	沟名	最大堆积厚度 T (m)	堆积幅角 R ($^{\circ}$)	平均纵坡 α ($^{\circ}$)
1	茨菇田沟	26	50	3	29	川坝干沟	12	40	2
2	陆登沟	52	60	4	30	菜园沟	77	55	4
3	大田坝沟	87	45	5	31	铜厂箐沟	70	75	4
4	牛坪子沟	73	45	6	32	汪家箐沟	84	45	6
5	幸福村沟	90	45	5	33	老鹰岩沟	39	35	5
6	豆腐村沟	70	45	5	34	荣家箐沟	84	40	4
7	大树脚沟	131	45	5	35	老干沟	47	45	6
8	大坪子沟	39	40	5	36	太白泥沟	56	55	2
9	上老林沟	52	100	6	37	洗马沟	24	40	7
10	乐家坪子沟	87	40	5	38	达德沟	42	50	4
11	排子地沟	60	45	8	39	黑水河	174	45	5
12	补味沟	96	40	5	40	小白泥沟	79	70	3
13	太平村沟	35	100	2	41	大山沟	12	80	2
14	新店房沟	20	60	8	42	小白泥南沟	56	45	4
15	老村沟	52	40	4	43	小石洞沟	42	45	4
16	台口沟	84	40	4	44	安乐沟	73	50	7
17	尖山沟	112	40	2	45	红沙沟	94	60	9
18	新田坝沟	24	45	5	46	桃家小河	66	25	1
19	稀屎沟	113	40	5	47	芭蕉箐沟	35	50	5
20	达朵沟	144	35	3	48	许家小河	35	60	2
21	蒋家沟	293	45	4	49	保保沟	70	70	4
22	新塘沟	30	70	7	50	黑沙沟	55	70	7
23	小新村沟	32	65	3	51	里里落沟	75	60	4
24	红卫村沟	12	60	2	52	窝子田沟	105	70	4
25	龙树村沟	140	60	4	53	岩脚沟	44	50	5
26	小水井沟	130	50	6	54	小坡头南沟	31	65	5
27	浪田坝沟	12	50	4	55	坡头沟	49	60	7
28	马店沟	61	70	7					



由表 3-1 分析得出,堆积扇最大厚度极小值为 12m(红卫村沟、浪田坝沟、田坝干沟),最大厚度极大值为 293m(蒋家沟),最大厚度平均值为 69m;堆积幅角为 25° — 100° ,其中以 40° — 70° 为主,占总数的 87.29%,并特别集中于 40° — 45° ,占总数的 41.82%;堆积扇平均纵坡为 1° — 9° ,其中以 2° — 7° 为主,占总数的 92.72%,并特别集中于 4° — 5° ,占总数的 52.72%。

2. 泥石流堆积扇物质组成

泥石流堆积作用是现代最为快速的动力地貌作用之一。因此,泥石流堆积扇的物质组成除表层因后期雨水冲刷和水流粗化而使粘土物质略有减少外,其它则基本上与泥石流流体保持一致。例如蒋家沟泥石流堆积扇的平均粒度为(重量百分比):粘土 5%,砂粒 20%,砾石 75%;其泥石流流体的平均粒度为:粘土 7.8%,砂粒 22.6%,砾石 69.6%^[100],两者非常接近。根据本书第一作者的统计分析,在粘性泥石流流体中,巨砾(粒径 $>1\text{m}$)含量为 2—5%,砾石(粒径 2mm—1m)含量为 40—70%,砂粒(粒径 0.005—2mm)含量为 30—50%,粘土(粒径 $<0.005\text{mm}$)含量为 2—7%,四者的比值大致为 1:15:12:1.5^[101]。

泥石流堆积扇中砾石倾角多为 15° — 35° ,在扇顶和主流线附近砾石倾角较大,可达 25° — 45° ;在扇缘砾石倾角较小,一般为 15° — 30° 。沿主流线方向有 27—46%的砾石产状倾向上游,其它砾石的倾向比较分散,相对集中于另外某一、二个方向^[102,103]。

第三节 一次泥石流危险范围预测模型

1. 预测模型的建立

第二章泥石流堆积模型实验结果表明,泥石流危险范围与流通区坡度的关系不密切,一次泥石流堆积面积 a 和最大堆积长度 l 均与一次松散固体物质(可能)最大补给量 V (第二章中称为一次泥石流补给量)和堆积区坡度 G 呈正比关系,与泥石流 r_c 呈倒数关系,即与 r_c 的自然对数呈反比关系;一次泥石流最大堆积宽度 b 与 V 呈正比关系,与 G 呈反比关系;一次泥石流最大堆积厚度 d 与 G 呈反比关系,与 R 呈正比关系。由此可得一次泥石流危险范围的预测模型具有下列基本形式:

$$\begin{cases} a = m_1 \cdot V \cdot G / \ln r_c \\ l = m_2 \cdot V \cdot G / \ln r_c \\ b = m_3 \cdot V / G \\ d = m_4 \cdot r_c / G \end{cases} \quad (3-1)$$

式中 m_1, m_2, m_3, m_4 为待定参数。给定 l 和 r_c 为基本量(这里 G 不定为基本量,是因为堆积区坡度即堆积区纵比降,可用小数表示而成为无量纲的量)。通过量纲分析,则有 $m_1 = r_c / l, m_2 = r_c / l^2, m_3 = 1 / l^2, m_4 = l / r_c$ 。代入方程组(3-1),则有

$$\begin{cases} a = K_1 (V \cdot G \cdot r_c / \ln r_c)^{2/3} \\ l = K_2 (V \cdot G \cdot r_c / \ln r_c)^{1/2} \\ b = K_3 [V \cdot (\ln r_c)^2 / G^5 \cdot r_c^2]^{1/3} \\ d = K_4 [V \cdot r_c / (G^2 \cdot \ln r_c)]^{1/3} \end{cases} \quad (3-2)$$



式中 K_1, K_2, K_3 和 K_4 为修正系数, 可由模型实验反推求出。泥石流堆积模型实验资料综合表 3-2。

表 3-2 一次泥石流危险范围模型实验综合资料

编号	一次泥石流 补给量 $V(\text{cm}^3)$	堆积区坡 度 $G(^{\circ})$	泥石流容 重 $r_c(\text{g}/\text{cm}^3)$	最大堆积长 度 $l(\text{cm})$	最大堆积 宽度 $b(\text{cm})$	最大堆积厚 度 $d(\text{cm})$	堆积面积 $a(\text{cm}^2)$
1	2 680	5	2.12	61	43	1.9	2 421
2	4 020	5	2.12	74	54	2.0	3 325
3	5 360	5	2.12	82	58	2.1	3 645
4	6 700	5	2.12	89	68	2.4	4 535
5	8 040	5	2.12	94	70	2.3	5 150
6	9 380	5	2.12	113	74	2.1	6 305
7	10 720	5	2.12	123	78	2.1	7 160
8	12 060	5	2.12	128	83	2.0	8 020
9	13 400	5	2.12	126	88	2.4	8 670
10	14 740	5	2.12	126	87	2.6	8 365
11	16 080	5	2.12	145	93	2.4	11 045
12	6 318	1	2.03	60	76	4.0	3 756
13	6 318	2	2.03	70	79	2.9	4 458
14	6 318	3	2.03	78	69	3.6	4 422
15	6 318	4	2.03	81	71	3.1	4 692
16	6 318	5	2.03	85	70	2.7	4 618
17	6 318	6	2.03	96	55	2.4	5 224
18	6 318	7	2.03	106	60	2.1	4 990
19	6 318	8	2.03	105	63	2.3	5 399
20	6 318	9	2.03	113	60	2.2	5 335
21	6 318	10	2.03	124	65	1.9	6 325
22	7 700	5	2.20	47	57	4.5	2 038
23	7 700	5	2.07	74	72	4.0	4 052
24	7 700	5	2.00	90	70	2.5	5 002
25	7 700	5	1.92	110	63	1.9	5 620
26	7 700	5	1.84	132	59	1.7	6 142
27	7 700	5	1.79	149	64	1.9	5 630
28	7 700	5	1.76	172	64	2.0	8 435
29	7 700	5	1.72	158	65	1.8	7 517
30	7 700	5	1.66	185	61	2.3	9 116
31	7 700	5	1.62	230	65	1.9	12 337



采用平均值法,由表 3-2 反推出 $K_1 = 3.272$, $K_2 = 2.5748$, $K_3 = 112.3967$, $K_4 = 0.254$,代入方程组(3-2),则有

$$\begin{cases} a = 3.272(V \cdot G \cdot r_c / \ln r_c)^{2/3} \\ l = 2.5748(V \cdot G \cdot r_c / \ln r_c)^{1/3} \\ b = 112.3967[V \cdot (\ln r_c)^2 / G^5 \cdot r_c^2]^{1/3} \\ d = 0.254[V \cdot r_c / (G^2 \cdot \ln r_c)]^{1/3} \end{cases} \quad (3-3)$$

方程组(3-3)的自检验误差见表 3-3。

表 3-3 方程组(3-3)的自检验误差

编号	a 计算值	a 相对误差(%)	l 计算值	l 相对误差(%)	b 计算值	b 相对误差(%)	d 计算值	d 相对误差(%)
1	2 080.16	-14.08	64.92	6.43	53.39	24.16	1.70	-10.53
2	2 725.78	-18.02	74.32	0.43	61.12	13.19	1.95	-2.50
3	3 302.04	-9.41	81.80	-0.24	67.27	15.98	2.15	2.38
4	3 831.67	-15.51	88.11	-1.00	72.46	6.56	2.31	-3.75
5	4 326.89	-15.98	93.63	-0.39	77.00	10.00	2.46	6.96
6	4 795.21	-23.95	98.57	-12.77	81.07	9.46	2.59	23.33
7	5 241.66	-26.79	103.06	-16.21	84.76	8.67	2.71	29.05
8	5 669.83	-29.30	107.18	-16.27	88.15	6.20	2.82	41.00
9	6 082.42	-29.85	111.01	-11.90	91.30	3.75	2.92	21.67
10	6 481.42	-22.52	114.60	-9.05	94.24	8.32	3.01	15.77
11	6 868.52	-37.81	117.97	-18.64	97.02	4.32	3.10	29.17
12	2 256.80	-39.91	67.62	12.70	1 029.55	1 254.67	6.67	66.75
13	3 582.45	-19.64	85.20	21.71	324.29	310.49	4.20	44.83
14	4 694.34	6.16	97.53	25.04	164.99	139.12	3.21	-10.83
15	5 686.79	21.20	107.34	32.52	102.15	43.87	2.65	-14.52
16	6 598.93	42.90	115.63	36.04	70.42	0.60	2.28	-15.56
17	7 451.80	42.65	122.88	28.00	51.97	-5.50	2.02	-15.83
18	8 258.33	65.50	129.35	22.03	40.19	-33.02	1.82	-13.33
19	9 027.21	67.20	135.24	28.80	32.18	-48.92	1.67	-27.39
20	9 764.62	83.03	140.66	24.48	26.44	-55.93	1.54	-30.00
21	10 475.15	65.62	145.69	17.49	22.18	-65.88	1.44	-24.21
22	7 394.07	262.81	122.40	160.43	76.60	34.39	2.41	-46.44
23	7 490.76	84.87	123.20	66.49	75.61	5.01	2.43	-39.25
24	7 561.19	51.16	123.77	37.52	74.90	7.00	2.44	-2.40
25	7 662.05	36.34	124.60	13.27	73.91	17.32	2.46	29.47
26	7 790.35	26.84	125.64	-4.82	72.70	23.22	2.48	45.88
27	7 887.99	40.11	126.42	-15.15	71.80	12.19	2.49	31.05
28	7 954.31	-5.70	126.95	-26.31	71.20	11.25	2.50	25.00
29	8 053.17	7.13	127.74	-19.15	70.33	8.20	2.52	40.00
30	8 227.94	-9.74	129.12	-30.21	68.83	12.84	2.55	10.87
31	8 365.85	-32.19	130.19	-43.40	67.70	4.15	2.57	35.26

注:表中编号同表 3-2。



误差分析表明, a 的平均相对误差为 17.84%, l 的平均相对误差为 9.5%, b 的平均相对误差为 57.6%, d 的平均相对误差为 7.8%。 l 和 d 的相对误差较小, 基本能够满足目前泥石流统计分析的要求; a 的相对误差较大, 但尚可接受; b 的相对误差很大, 不宜采用。从方程组(3-3)中的前两项可以推导出:

$$a = 0.4935l^2 \quad (3-4)$$

式(3-4)也说明, a 的误差偏大可能是由于 l 误差重复累积造成的。将式(3-4)取代方程组(3-3)中的第一项, 去掉不能采用的第三项, 则有

$$\begin{cases} a = 0.4935l^2 \\ l = 2.5748(V \cdot G \cdot r_c / \ln r_c)^{1/3} \\ d = 0.254[V \cdot r_c / (G^2 \cdot \ln r_c)]^{1/3} \end{cases} \quad (3-5)$$

方程组(3-5)即为一次泥石流危险范围的预测模型。式中 a 为一次泥石流危险范围(m^2); l 为一次泥石流最大堆积长度(m); d 为一次泥石流最大堆积厚度(m); V 为一次松散固体物质(可能)最大补给量(m^3); G 为堆积区坡度($^\circ$); r_c 为泥石流(可能)最大容重(g/cm^3)。当 $r_c=1$ (水的比重)和 $G=0$ (堆积区水平)时, 预测模型(3-5)无意义, 即不能使用。

作者在前期研究中, 提出了一次泥石流危险范围预测模型的另一种形式^[83, 84]:

$$\begin{cases} a = 38.41(V \cdot G \cdot r_c / \ln r_c)^{2/3} \\ l = 8.71(V \cdot G \cdot r_c / \ln r_c)^{1/3} \\ d = 0.017[V \cdot r_c / (G^2 \cdot \ln r_c)]^{1/3} \end{cases} \quad (3-6)$$

式中 G 为堆积区纵比降, 用小数表示; 其它符号同方程组(3-5)。方程组(3-6)的自检验误差为: a 的平均相对误差为 9.69%, l 的平均相对误差为 8.34%, d 的平均相对误差为 7%。总的看来, 方程组(3-6)的误差比方程组(3-5)的还略小一些。方程组(3-6)可简化为:

$$\begin{cases} a = 0.5063l^2 \\ l = 8.71(V \cdot G \cdot r_c / \ln r_c)^{1/3} \\ d = 0.017[V \cdot r_c / (G^2 \cdot \ln r_c)]^{1/3} \end{cases} \quad (3-7)$$

式中符号同方程组(3-6)。

方程组(3-5)和(3-7)均为一次泥石流危险范围的预测模型。当 G 用度表示时, 可用方程组(3-5)进行预测; 当 G 用小数表示时, 可用方程组(3-7)进行预测。两者结果有一定偏差, 但属于允许误差范围, 且都能满足目前对一次泥石流危险范围预测的精度要求。

2. 预测模型的应用

预测时可用手算和电算, 手算时用代入法解方程组(3-5)或(3-7)即可得出一次泥石流危险范围。若计算的泥石流沟较多, 可采用如下简单的 BASIC 语言电算程序进行计算[针对方程组(3-7)设计]:

```
10 INPUT "V=";V
20 INPUT "G=";G
30 INPUT "R=";R
40 A=38.41 * V ^ (2/3) * G ^ (2/3) * R ^ (2/3)/(LOG(R)) ^ (2/3)
50 L=8.71 * V ^ (1/3) * G ^ (1/3) * R ^ (1/3)/(LOG(R)) ^ (1/3)
```



```

70  D=.017 * V ^ (1/3) * R ^ (1/3) / G ^ (2/3) / (LOG(R)) ^ (1/3)
75  LPRINT "a=";a,
80  LPRINT "l=";l,
100 LPRINT "d=";d
120 END

```

当用键盘依次输入 V 、 G 、 R [R 在此为泥石流(可能)最大容重 r_c] 的值后,计算机自动打印出 a 、 l 和 d 的值,从而完成一次泥石流危险范围的预测工作。

根据第二章泥石流堆积模型实验结果,一次泥石流危险范围平面形态用下列准则判定:粘性泥石流和过渡性泥石流($r_c \geq 1.8 \text{g/cm}^3$)的堆积形态取决于堆积区坡度,当堆积区坡度小于或等于 5° (≤ 0.0875) 时为圆形(准圆形);当堆积区坡度大于 5° (> 0.0875) 时为椭圆形。稀性泥石流($r_c < 1.8 \text{g/cm}^3$)的堆积形态与堆积区坡度关系不大,基本上始终保持长方形(长条形)。由此可作出一次泥石流危险范围的平面预测图。

应用实例如下。

实例一——云南东川大桥河。当依次输入大桥河一次松散固体物质(可能)最大补给量 $V = 1\,050\,000 \text{m}^3$,堆积区纵比降 $G = 0.0402$ (2.3°) 和泥石流(可能)最大容重 $r_c = 2.17 \text{g/cm}^3$ 后,计算机依次打印出 $a = 92\,218.38 \text{m}^2$, $l = 342.75 \text{m}$, $d = 20.82 \text{m}$ 。根据一次泥石流危险范围平面形态判定准则,大桥河泥石流为粘性泥石流,堆积区坡度 2.3° ,故其危险范围平面形态应为圆形。已知圆面积 a ,可求出圆半径 $r = \sqrt{a/\pi} = 171.37 \text{m}$,由此可作出大桥河一次泥石流危险范围平面预测图(图 3-2a)。

实例二——云南东川黑沙沟。已知 $V = 50\,000 \text{m}^3$, $G = 0.1228$ (7°), $r_c = 2.1 \text{g/cm}^3$ (粘性泥石流),由预测模型(3-7)计算出 $a = 25\,798.59 \text{m}^2$, $l = 225.73 \text{m}$ 。根据一次泥石流危险范围平面形态判定准则,危险范围应为椭圆形。已知椭圆面积 a 和长轴 l ,可求出短轴 $b = a/\pi l = 36.4 \text{m}$,由此可作出黑沙沟一次泥石流危险范围平面预测图(图 3-2b)。

实例三——甘肃天水吕二沟。已知 $V = 5\,000 \text{m}^3$, $G = 0.0175$ (1°), $r_c = 1.78 \text{g/cm}^3$ (稀性泥石流),由预测模型(3-7)计算出 $a = 1\,574.27 \text{m}^2$, $l = 55.76 \text{m}$ 。根据一次泥石流危险范围平面形态判定准则,危险范围应为长方形。已知长方形面积 a 和长边 l ,可求出短边 $b = a/l = 28.23 \text{m}$,由此可作出吕二沟一次泥石流危险范围平面预测图(图 3-2c)。

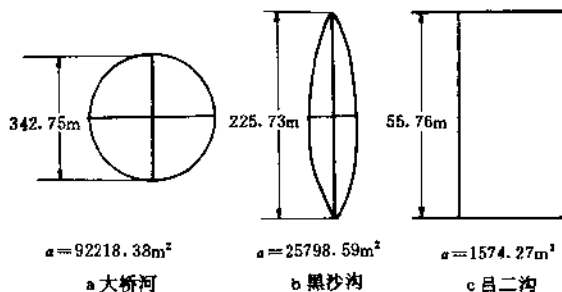


图 3-2 一次泥石流危险范围的三种平面形态示意图

作为本模型的推广应用,根据云南东川地区和甘肃武都地区的有关资料,我们选择其



中 10 处重点泥石流沟进行了一次泥石流危险范围的预测工作。预测结果见表 3-4。它可为该地区泥石流防治规划的制定提供重要参数和科学依据。

表 3-4 云南东川和甘肃武都地区重点泥石流沟一次泥石流危险范围预测结果

编号	沟名	地名	$V(\text{cm}^3)$	$G(\text{小数})$	$r_c(\text{g/cm}^3)$	堆积面积 a (m^2)	最大堆积 长度 $l(\text{m})$	最大堆积 厚度 $d(\text{m})$	危险范围 平面形态
1	达德沟	云南东川	100 000	0.070	2.18	27 904.11	234.76	6.55	圆形
2	黑水河	云南东川	18 000	0.087	1.80	10 922.97	146.88	3.30	长方形
3	大白泥沟	云南东川	820 000	0.035	2.20	71 361.10	375.43	20.94	圆形
4	小白泥沟	云南东川	600 000	0.052	2.20	75 447.30	386.03	14.49	圆形
5	黑沙沟	云南东川	50 000	0.123	2.10	25 798.59	225.73	3.58	椭圆形
6	老干沟	云南东川	230 000	0.105	1.81	87 501.31	365.13	6.79	椭圆形
7	蒋家沟	云南东川	1 951 000	0.070	2.37	199 776.00	628.16	17.51	圆形
8	柳弯沟	甘肃武都	19 800	0.105	2.14	12 467.34	156.92	2.92	椭圆形
9	火烧沟	甘肃武都	105 000	0.100	2.20	37 710.28	272.91	5.07	椭圆形
10	吕二沟	甘肃天水	5 000	0.017	1.78	1 574.27	55.76	6.40	长方形

第四节 泥石流最大危险范围预测模型

1. 泥石流堆积扇平面形态的概化模式

典型的泥石流堆积扇通常划分出三个堆积带^[87]：①无扩散带，位于堆积扇顶部，外型呈狭窄舌状，又称扇根；②建设带，堆积扇主体，范围广，是泥石流堆积的主要部位；③扩散带，位于堆积扇前部，宽度大，是泥石流细粒物质扩散沉积的区域(图 3-3)。扩散带外围是漫流区，主要为稀性泥石流和洪水。

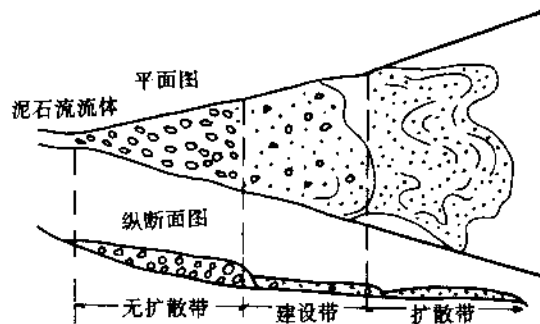


图 3-3 典型泥石流堆积扇堆积模式

通过对云南东川小江流域 1:38 000~1:42 000 航空像片和 1:50 000 地形图的判读解译,整个小江流域 107 处沟谷型泥石流中,有发育成熟、形态完整的堆积扇共计 64 处。通过对这些堆积扇的形态分析,根据典型堆积扇的堆积模式,概括出如下三种堆积扇



的平面形态类型(图 3-4)。

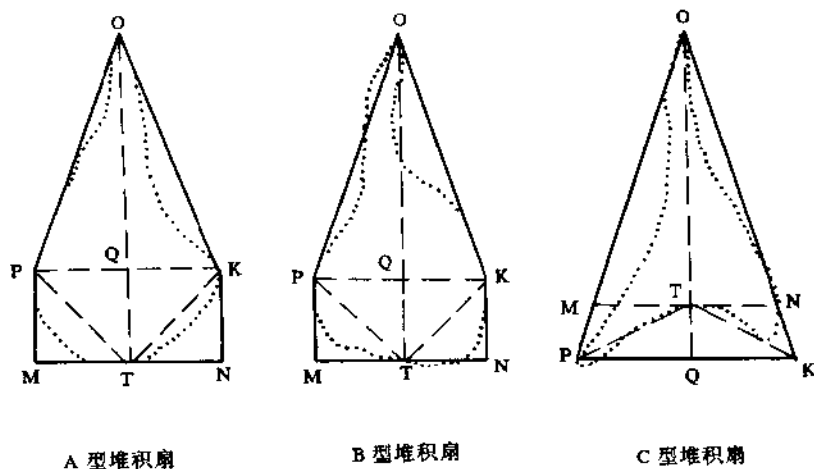


图 3-4 泥石流堆积扇平面形态的三种概化模式

堆积扇的前缘很少为一标准的圆弧,当泥石流的堆积环境为山前平原和山间盆地,或虽为河床,但河流的输沙能力较小或堆积扇处于河流弯道的凸岸部位时,堆积扇能够充分发展,扇前缘向前凸出,超出“扇形”的弧度标准,此时的堆积地形,称为“舌形地”更为确切(图 3-4A)。

当堆积扇与主河直接相遇,且主河的输沙能力较强或堆积扇处于河流弯道的凹岸部位时,河流的侵蚀作用使扇前缘不能充分发展而表现为不规则地平行于主河道(图 3-4B),在河流强烈侵蚀时,甚至向内凹进而成为反弧状(图 3-4C)。

无论堆积扇形态怎样,总能以扇根为顶点,将堆积扇限制在一定的幅角内,然后将垂直于角平分线上的最大堆积宽度作为“建设带”的前端,这样构成一个等腰三角形。再以角平分线上的最大堆积长度减去“无扩散带”和“建设带”的长度作为“扩散带”的长度,同时将“建设带”的最大宽度作为“扩散带”的宽度,这样构成一个矩形,矩形和等腰三角形的结合基本上控制了堆积扇的整个范围(图 3-4)。

根据堆积扇平面形态的概化模式可以推导出堆积扇面积的计算公式。由图 3-4 已知堆积幅角 $\angle KOP = R$, 最大堆积长度 $OT = L$, 最大堆积宽度 $KP = B$, 则有 $\triangle KOP$ 的面积为:

$$S_{\triangle KOP} = B^2 \operatorname{ctg}(R/2) / 4 \quad (3-8)$$

$\square KPMN$ 的面积为:

$$S_{\square KPMN} = L \cdot B - (1/2)B^2 \operatorname{ctg}(R/2) \quad (3-9)$$

大量统计结果表明,“扩散带”的面积小于 $S_{\square KPMN}$ 但大于 $S_{\triangle KOP}$, 故取经验值 $(2/3)S_{\square KPMN}$ 作为“扩散带”的面积,取 $S_{\triangle KOP}$ 作为“无扩散带”和“建设带”的面积,则整个堆积扇的面积为:

$$\begin{aligned} S &= S_{\triangle KOP} + (2/3)S_{\square KPMN} \\ &= (2/3)L \cdot B - (1/12)B^2 \operatorname{ctg}(R/2) \end{aligned}$$



$$= 0.6667L \cdot B = 0.0833B^2 \cdot \sin R / (1 - \cos R) \quad (3-10)$$

式(3-10)即为堆积扇面积的计算公式,也即泥石流最大危险范围。该式通用于A、B、C三种泥石流堆积模式,当 $L > OQ$ 时(OQ 为等腰三角形的高),表现为A型堆积扇;当 $L = OQ$ 时,表现为B型堆积扇;当 $L < OQ$ 时,表现为C型堆积扇。

2. 泥石流最大危险范围的预测模型

由流域背景因子预测泥石流最大危险范围,最初是从单因子开始的^[78,79]。根据云南东川地区和甘肃武都地区共15条泥石流沟的统计资料,进行一元幂函数回归分析,建立了简单的泥石流最大危险范围的单因子预测模型:

$$S = 0.0606A^{0.8327} \quad (3-11)$$

式中 S 为泥石流最大危险范围(km^2); A 为泥石流沟的流域面积(km^2)。式(3-11)在野外资料缺少和条件有限,但又急需概略估算和圈出泥石流最大危险范围时,可作为一种临时的应急措施,虽然快速简便,但误差较大,预测的泥石流最大危险范围有80%以上小于实际堆积范围,这恰恰又是此类灾害预测所不能容许的,因此式(3-11)没有得到很好的应用。

从综合的角度考虑,泥石流堆积扇平面形态包括五个要素:最大堆积长度、最大堆积宽度、堆积幅角、堆积面积和堆积类型(即图3-4中的A、B、C三类)。泥石流流域背景因子主要指流域面积、流域最大相对高差、主沟长度。这三个指标可从地形图上量算,所取数据具有可靠性和可比性,是预测泥石流最大危险范围的理想的流域背景因子。与之有关的因子还有松散固体物质储量、岩石类型及其风化程度和森林植被覆盖率等。松散固体物质储量与堆积扇平面形态有一定关系,而且能够满足定量化的要求,并且代表地质因子这一大类,不可忽略。岩石类型及其风化程度主要影响到岩石的破碎程度和松散固体物质储量,且这一指标不便于量化,故暂不予考虑。森林植被覆盖率可以获取,但近年来的研究表明,它对泥石流发育的影响基本上是中性的^[100],森林植被的破坏不是形成泥石流的心要条件,它无论是对泥石流的发生发展还是衰退消亡,影响都是有限的,它不能决定泥石流发生与否和所发生的规模大小,故在此不予考虑。

通过大比例尺航空像片判读和地形图量算,得到了云南东川小江流域55处泥石流沟的流域背景因子和堆积扇平面形态特征值(表3-5),这是进行泥石流最大危险范围统计分析的基础资料。

为了反映泥石流流域背景因子对泥石流最大危险范围的影响,首先运用周纪芑的逐步多元线性回归计算程序^[105]。根据表3-5中的18组数据在IBM PC/XT计算机上运算后,得到泥石流最大堆积长度与流域背景因子之间的关系为:

$$L = 0.8061 + 0.0015A + 0.000033W \quad (3-12)$$

复相关系数 $r = 0.8463$ 。 $F_A = 14.3698 > F_{0.01}(1,16) = 6.23$, $F_W = 11.1051 > F_{0.01}(1,16) = 6.23$, $F = 18.9336 > F_{0.01}(4,13) = 5.21$ 。 F 检验表明,在 $\alpha = 0.01$ 水平下, A 和 W 对 L 均有显著影响,式(3-12)是显著的。

式(3-12)表明,泥石流最大堆积长度 L 与流域面积 A 和松散固体物质储量 W 为正相关,即泥石流最大堆积长度随着流域面积和松散固体物质储量的增大而增大。这与实际情况相符合,也与第一章中泥石流危险度与流域面积为正相关的结论相一致(因为危险



表 3-5 云南东川小江流域泥石流流域背景因子与堆积扇形态特征值

编号	流域面积 $A(\text{km}^2)$	主沟长度 $D(\text{km})$	流域最大相 对高差 $H(\text{km})$	松散固体物质 储量 $W(\times 10^4 \text{m}^3)$	最大堆积 长度 $L(\text{km})$	最大堆积 宽度 $B(\text{km})$	堆积幅角 $R(^{\circ})$
1	1.03	1.70	0.85		0.50	0.60	50
2	3.01	2.50	1.07		0.75	0.80	60
3	4.31	3.20	1.18		1.00	0.80	45
4	3.28	3.70	1.17		0.70	0.75	45
5	4.65	3.60	1.09	1 604	1.00	1.50	45
6	2.37	3.10	1.08	1 997	0.80	0.35	45
7	13.23	9.00	1.31		1.50	0.80	45
8	5.06	2.80	1.30		0.45	0.40	40
9	1.04	1.50	1.06		0.50	0.90	100
10	16.02	7.50	1.23		1.00	0.85	40
11	1.82	2.30	1.19		0.45	0.45	45
12	14.10	7.50	1.41		1.10	0.80	40
13	17.16	5.76	1.77	4 600	1.00	1.60	100
14	1.87	2.30	1.10		0.20	0.25	60
15	10.82	7.00	1.65		0.75	1.00	40
16	29.87	9.00	1.85		1.20	0.70	40
17	173.81	34.50	2.82	20 080	3.20	2.50	40
18	3.52	3.20	1.07		0.70	0.85	45
19	3.85	2.40	1.10		1.30	1.20	40
20	58.07	13.75	2.19	3 811	2.50	1.20	35
21	47.10	12.00	2.19	75 000	4.20	3.20	45
22	0.75	0.85	0.86		0.30	0.32	70
23	7.18	4.50	1.51		1.20	2.00	65
24	93.20	18.00	3.02		2.00	2.00	60
25	8.88	5.00	1.08		2.20	3.00	60
26	7.25	3.00	1.08		1.50	2.10	50
27	6.37	2.00	1.25		0.50	0.40	50
28	0.45	0.70	0.46		0.50	0.70	70
29	3.25	2.00	0.66	2 241	0.75	0.60	40
30	9.58	3.50	1.72		1.10	1.15	55
31	7.88	3.80	1.12	3 412	1.00	1.00	75
32	3.38	3.50	1.09		0.80	0.75	45
33	1.16	1.40	0.87		0.45	0.30	35
34	4.15	3.30	1.10		1.20	0.55	40
35	7.17	5.52	1.01	1 360	0.45	0.40	45



续表 3-5

编号	流域面积 $A(\text{km}^2)$	主沟长度 $D(\text{km})$	流域最大相 对高差 $H(\text{km})$	松散固体物质 储量 $W(\times 10^4 \text{m}^3)$	最大堆积 长度 $L(\text{km})$	最大堆积 宽度 $B(\text{km})$	堆积幅角 $R(^{\circ})$
36	18.05	11.80	1.66	16 000	1.40	1.60	55
37	2.83	1.50	0.74		0.20	0.20	40
38	14.10	8.00	1.94	8 140	0.60	0.45	50
39	4.20	2.10	1.19	1 998	2.00	1.00	45
40	12.49	6.00	1.67	14 000	1.50	1.40	70
41	0.78	0.80	0.81		0.35	0.42	80
42	3.62	2.50	1.21		0.80	0.60	45
43	4.75	2.30	1.90	347	0.60	0.30	45
44	1.32	1.50	0.81		0.60	0.40	50
45	1.85	1.50	0.97	137	0.60	0.50	60
46	74.42	15.00	1.98	4 271	3.80	0.70	25
47	2.24	1.50	1.18		0.40	0.35	50
48	9.83	5.50	1.60	1 283	1.00	0.65	60
49	7.25	4.20	1.61		1.00	0.90	70
50	3.28	2.30	1.13	849	0.45	0.55	70
51	6.13	6.00	1.70		1.50	1.30	60
52	14.75	7.50	1.73		1.50	1.60	70
53	5.23	3.50	1.15		0.50	0.45	50
54	11.27	5.50	1.68		0.35	0.45	65
55	0.56	0.70	0.58		0.40	0.35	60

注:表中编号同表 3-1。

范围越大,遭受泥石流损害的可能性越大,危险度也越大)。

泥石流最大堆积宽度与流域背景因子之间的关系为:

$$B = 0.5452 + 0.0034D + 0.000031W \quad (3-13)$$

复相关系数 $r=0.877$ 。 $F_D=6.477 > F_{0.01}(1,16)=6.23$, $F_W=26.6242 > F_{0.01}(1,16)=6.23$, $F=24.9822 > F_{0.01}(4,13)=5.21$ 。 F 检验表明,在 $\alpha=0.01$ 水平下, D 和 W 对 B 均有显著影响,式(3-13)是显著的。

式(3-13)表明,泥石流最大堆积宽度 B 与主沟长度 D 和松散固体物质储量 W 为正相关,即泥石流最大堆积宽度随着主沟长度和松散固体物质储量的增大而增大。这与实际情况相符合,也与第一章中泥石流危险度与主沟长度为正相关的结论相一致(因为危险度与危险范围为正变关系)。

根据作者的前期研究^[40],泥石流堆积幅角与流域背景因子之间的关系为:

$$R = 47.8296 - 1.3085D + 8.8876H \quad (3-14)$$

复相关系数 $r=0.2867$ 。 $F=2.3292 > F_{0.25}(4,51)=1.39$ 。 F 检验表明,在 $\alpha=0.25$ 水平下,式(3-14)是显著的。



式(3-14)表明,泥石流堆积幅角 R 与主沟长度 D 为负相关,即泥石流堆积幅角随着主沟长度的增大而减小,反之亦然。这与实际情况相符合。如前所述,主沟长度越大,泥石流流程越远,因此堆积幅角越小,即堆积形状更狭长。同时,这与前面所述的泥石流危险范围与主沟长度为正相关的结论也不矛盾,因为根据式(3-14)、(3-13)、(3-10)即可推论出:堆积幅角越小 \rightarrow 主沟长度越大 \rightarrow 最大堆积宽度越大 \rightarrow 堆积面积越大 \rightarrow 泥石流危险范围越大的同样结论。

式(3-14)还表明,泥石流堆积幅角 R 与流域最大相对高差 H 为正相关,即泥石流堆积幅角随着流域最大相对高差的增大而增大,反之亦然。这表明流域势能大小很可能是泥石流横向扩展强弱的一个主要因素。这与第一章中泥石流危险度与流域最大相对高差为正相关的结论也相一致(因为危险度与危险范围为正变关系)。

结合式(3-10)、(3-12)、(3-13)、(3-14)可得:

$$\begin{cases} S = 0.6667L \cdot B - 0.0833B^2 \cdot \sin R / (1 - \cos R) \\ L = 0.8061 + 0.0015A + 0.000033W \\ B = 0.5452 + 0.0034D + 0.000031W \\ R = 47.8296 - 1.3085D + 8.8876H \end{cases} \quad (3-15)$$

方程组(3-15)即为泥石流最大危险范围的预测模型。式中 S 为泥石流最大危险范围(km^2); L 为泥石流最大堆积长度(km); B 为泥石流最大堆积宽度(km); R 为泥石流堆积幅角($^\circ$); A 为流域面积(km^2); W 为松散固体物质储量(10^4m^3); D 为主沟长度(km); H 为流域最大相对高差(km)。

方程组(3-15)的自检验误差见表 3-6。误差分析表明, L 的平均相对误差为 15.62%, B 的平均相对误差为 22.12%, R 的平均相对误差为 10.62%;基本能够满足目前泥石流统计分析的精度要求。

作者在前期研究中,提出了泥石流最大危险范围的如下预测模型^[80]:

$$\begin{cases} S = 0.6667L \cdot B - 0.0833B^2 \cdot \sin R / (1 - \cos R) \\ L = 0.7523 + 0.005A + 0.0607D + 0.1261H - 0.0192G \\ B = 0.2331 - 0.0091A + 0.0983D + 0.196H + 0.0048G \\ R = 47.8296 - 1.3085D + 8.8876H \end{cases} \quad (3-16)$$

式中 G 为主沟平均纵坡($^\circ$);其它符号同方程组(3-15)。本书定稿时提出的泥石流最大危险范围预测模型[方程组(3-15)]相对于上述前期模型作了如下改进:

(1) 增加了松散固体物质储量这一不宜忽略的地质因子,删去了与主沟长度和流域最大相对高差有重复意义的主沟平均纵坡这一地形因子。

(2) 将原来的多元回归建模改为现在的逐步回归建模,由逐步回归分析自动优选环境背景因子,简化了模型计算,提高了模型精度。其数学表达式的物理意义与实际情况完全吻合,效果更为理想。

(3) 由于上述两项改进措施,泥石流最大危险范围预测的误差减小,精度提高。最大堆积长度的平均相对误差由原来的 28.56%减小到现在的 15.62%,最大堆积宽度的平均相对误差由原来的 31.42%减小到现在的 22.12%,取得了比较满意的结果(堆积幅角计算公式未变,故其平均相对误差保持不变,仍为 10.62%)。



表 3-6 方程组(3-15)的自检验误差

编号	L 回归值	L 相对误差(%)	B 回归值	B 相对误差(%)	R 回归值	R 相对误差(%)
5	0.9293	-7.07	0.7165	-52.23	52.8	17.33
6	0.9074	13.43	0.7119	103.40	53.4	18.67
13	1.2179	21.79	0.8826	-44.84	56.0	44.00
17	4.1133	28.54	2.3339	-6.64	27.7	-30.75
20	1.8166	-27.34	1.1276	-6.03	49.3	40.86
21	3.9697	-5.48	3.2834	2.61	51.6	14.67
29	0.9287	23.83	0.6824	13.73	51.1	27.75
31	1.0376	3.76	0.7795	-22.05	52.8	-29.60
35	0.9598	113.29	0.7737	93.43	49.6	10.22
36	1.6031	14.51	1.4411	-9.93	47.1	-14.36
38	1.2866	114.43	1.0683	137.40	54.6	9.20
39	0.9354	53.24	0.6782	-32.18	54.9	-21.57
40	1.4531	-3.13	1.1832	-15.49	55.7	23.78
43	0.8899	48.32	0.6336	111.20	54.8	-21.71
45	0.8388	39.80	0.6000	20.00	61.7	37.11
46	2.0811	-45.23	1.1841	69.16	54.6	9.17
48	0.9979	-0.21	0.7707	18.57	45.8	83.20
50	0.8838	1.08	0.6492	18.04	54.9	-8.50

注：(1) 表中编号同表 3-1。

(2) 表中数据为计算机打印结果，与方程组(3-15)的计算结果略有偏差，计算机自动保留 11 位小数进行运算，精确度更高。

3. 泥石流最大危险范围预测模型的应用

预测时可用手算和电算。手算时用代入法解方程组(3-15)即可得出泥石流最大危险范围。若计算的泥石流沟较多，可采用如下简单的 BASIC 语言计算程序进行计算。

```

10 INPUT "A=";A
20 INPUT "D=";D
30 INPUT "H=";H
40 INPUT "W=";W
50 S=.6667*L*B-.0833*B^2*SIN(R*3.14/180)/(1-cos(R*3.14/180))
60 L=.8061+.0015*A+.000033*W
70 B=.5452+.0034*D+.000031*W

```



```

80  R=47.8296-1.3085 * D+8.8876 * H
90  LPRINT"S=";S,
100 LPRINT"L=";L,
110 LPRINT"B=";B,
120 LPRINT"R=";R
130  END

```

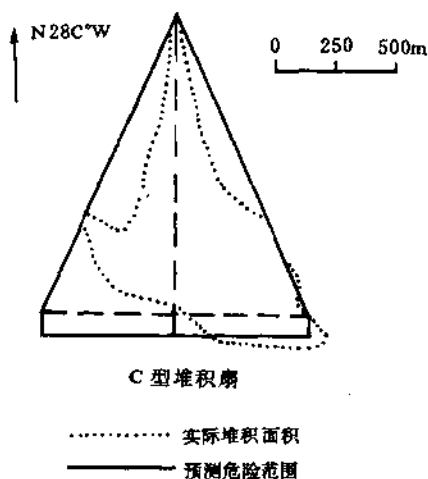


图 3-5 云南东川小江流域补味沟泥石流最大危险范围平面预测图

当用键盘依次输入 A, D, H, W 的值后, 计算机自动打印出 S, L, B, R 的值, 从而完成泥石流最大危险范围的预测工作。

现以云南东川小江流域补味沟作一应用实例。当依次输入补味沟流域面积 $A = 14.1 \text{ km}^2$, 主沟长度 $D = 7.5 \text{ km}$, 流域最大相对高差 $H = 1.41 \text{ km}$, 松散固体物质储量 $W = 147 \times 10^4 \text{ m}^3$, 计算机依次打印出 $S = 0.7141$, $L = 1.3124$, $B = 1.0264$, $R = 50.5$ 。由此可作出补味沟泥石流最大危险范围平面预测图(图 3-5)。

从实践上升到理论再回到实践, 是科学研究的必由之路。尽管泥石流最大危险范围的预测模型经过了数学检验和自检验误差分析, 但它的实践检验仍是很有必要的。根据航空像片判读得到的云南东川小江流域 18 处

泥石流堆积扇面积资料, 泥石流最大危险范围预测及其检验结果见表 3-7。

由表 3-7 可知, 预测值 I 的平均正相对误差为 106.4%, 平均负相对误差为 -37.92%, 相对误差绝对值平均为 68.01%; 预测值 II 的平均正相对误差为 75.88%, 平均负相对误差为 -31.99%, 相对误差绝对值平均为 56.38%。显然, 预测值 II 的误差比预测值 I 的误差减小了 11.63%。

表 3-6 的误差分析和表 3-7 的检验结果表明, 泥石流最大危险范围改进后的预测模型[方程组(3-15)]明显优于改进前的预测模型[方程组(3-16)]。改进模型预测出的泥石流最大危险范围(最大堆积面积)、最大堆积长度和最大堆积宽度, 其精度分别提高了 11.63%、12.94% 和 9.3%。堆积幅角仍维持原有的精度未变。

改进后的预测模型的平均相对误差为 27.94%。也就是说, 从统计规律来看, 使用该模型进行泥石流最大危险范围的预测, 其总的结果将偏大 27.94%。虽然从安全保险的角度出发, 预测值宜可取其大而不可取其小。但是, 这也说明该模型仍可作进一步改进。初步分析表明, 预测结果偏大的原因可能有以下两个方面: 一是堆积扇平面形态的概化模式增大了危险范围。今后拟用“等腰三角形+半圆形”的组合, 这是否更接近实际, 尚有待于进一步探索; 二是松散固体物质储量通常是由现场估算或航空像片判读的, 估计过大往往导致了危险范围的增大。今后改进的方向是尽可能采用物探、钻孔或陆地测量的方式获取这一实际值, 但在有限的财力和物力之下, 要做到这一点是相当困难的。



表 3-7 云南东川小江流域泥石流最大危险范围预测及其检验

编号	沟名	堆积扇面积 (km ²)	前期模型 方程组(3-16) S 预测值 I (km ²)	预测值 I 的相对误差 (%)	改进模型 方程组(3-15) S 预测值 II (km ²)	预测值 II 的相对误差 (%)
5	幸福村沟	0.85	0.36	57.55	0.3578	-57.91
6	豆腐村沟	0.45	0.30	-33.33	0.3467	-22.95
13	太平村沟	0.78	0.66	-15.38	0.5946	23.77
17	尖山沟	2.66	4.95	86.09	4.5600	71.43
20	达朵沟	2.60	1.65	-36.54	1.1349	-56.35
21	蒋家沟	5.74	1.47	-74.45	6.8322	19.03
29	田坝干沟	0.40	0.21	-47.50	0.3414	-14.66
31	铜厂箐沟	0.56	0.42	-25.00	0.4373	-21.92
35	老干沟	0.18	0.61	238.89	0.3872	115.10
36	大白泥沟	1.40	0.89	-36.43	1.1433	-18.33
38	达德沟	0.53	0.90	69.81	0.7322	38.15
39	黑水河	0.18	0.28	55.56	0.3492	93.99
40	小白泥沟	0.60	0.69	15.00	0.9255	54.26
43	小石洞沟	0.13	0.38	192.31	0.3114	139.54
45	红沙沟	0.19	0.11	-42.11	0.2853	50.17
46	桃家小河	1.24	1.78	43.55	1.4161	14.20
48	许家小河	0.66	0.63	-4.55	0.3956	-40.06
50	黑沙沟	0.12	0.30	150.00	0.3155	162.93

注:(1)表中编号同表 3-1。

(2)计算 S 时所用的 L, B, R 为表 3-6 中的回归值。

第五节 泥石流堆积区危险性

受地形条件限制,我国山区许多城镇、厂矿、村寨和农田都位于泥石流堆积扇上,铁路、公路也常由此经过,堆积区内的人们总希望预先知道自己所处的场所是否安全,以及遭到泥石流袭击的可能性有多大,即堆积区的危险程度如何。因此,泥石流堆积区的危险度分区亦是泥石流危险性评价的重要内容,并已成为泥石流减灾工作中重要的非工程措施之一。

随着当今电子计算机的发展,数值模拟逐渐取代传统的模拟技术,并成为探索自然界客观规律和定量评价自然现象的一种重要手段。数值模拟在溃坝洪水^[106]、河道泥沙运动^[107]、二维潮流^[108,109],以及地下水运动和水资源定量分析等方面已得到广泛应用,其发展趋势已超出作为一种计算机手段的原有范畴,而逐渐成为模拟再现自然现象发生、发展的重要方法。同样,也为研究泥石流运动和堆积等问题开辟了新的途径^[85,86,110],它和计算机结合可解决许多过去难以解决的问题。通过数值模拟,可近似地再现泥石流运动和堆积的全过程;可定量评价泥石流有关动力学、运动学要素和防治工程参数;此外,还能很好地



反映泥石流随时间的演进过程,分析出泥石流到达不同位置的传播时间、上涨与回落过程。由此可见,计算机数值模拟在泥石流研究领域有着广阔的应用前景和特别的优越性。

1. 数学模型及其数值解

(1) 数学模型的建立

先根据有限元流体的质量守恒原理推导流体分别沿 X, Y 方向的连续流方程;再根据动量守恒原理,推导二维流体的动量方程,并建立描述泥石流的二维非恒定流方程组,即圣维南方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial X} + \frac{\partial N}{\partial Y} = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial(MU)}{\partial X} + \beta \frac{\partial(MV)}{\partial Y} = -gh \frac{\partial H}{\partial X} - \frac{F_x}{\sigma_f} \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial(NU)}{\partial X} + \beta \frac{\partial(NV)}{\partial Y} = -gh \frac{\partial H}{\partial Y} - \frac{F_y}{\sigma_f} \end{cases} \quad (3-17)$$

其中阻力项采用高桥保表达式:

$$F_x = (\sigma - \rho)ghC_d \cos\theta_x \tan\alpha + k \frac{D}{d} \sqrt{U^2 + V^2} \cdot U \quad (3-18)$$

$$F_y = (\sigma - \rho)ghC_d \cos\theta_y \tan\alpha + k \frac{D}{d} \sqrt{U^2 + V^2} \cdot V \quad (3-19)$$

式中, U 为 X 方向的流速, V 为 Y 方向的流速, h 为泥深, M 为 X 方向的流量, N 为 Y 方向的流量, β 为运动修正系数, g 为重力加速度, H 为泥石流表面标高, F_x 和 F_y 为摩擦阻力, σ_f 为泥石流容重, σ 和 ρ 分别为泥石流和水的比重, C_d 为流体中泥石流体积比, θ_x 和 θ_y 为沿 X 和 Y 方向的堆积区坡度, $\tan\alpha$ 为动摩擦系数, k 为泥石流阻力系数, D 为堆积层隆起高度, d 为颗粒平均粒径。

(2) 数值解的方法

描述泥石流二维非恒定流的方程为一双曲线方程组,目前常用的数值解的方法为有限差分法和有限单元法。考虑到有限差分法计算速度快,比较直观、简明和易懂,且在数学理论上也比较成熟,故我们采用此法进行泥石流二维非恒定流模型的数值解。有限差分法的基本思路是:用泥石流堆积区有限个离散点的集合代替连续的堆积区,在这些离散点上用差商近似地代替微商,将微分方程及其定解条件化为以未知函数在离散点上的近似值作为未知量的代数方程(差分方程),然后求解差分方程,从而得到微分方程的解在离散点上的近似值。用差分法求解泥石流平面运动的控制方程组的过程大体如下:

第一步 剖分堆积区,确定离散点。将所研究的堆积区分割成矩形网格系统,研究区的边界可用最接近它的格线近似表示。对区域进行剖分并确定离散点后,再进行时间、空间离散化,组成时空网格。有限差分法求解泥石流非恒定流动问题,就是求算时空网格上的各离散点处的泥深和流速问题,或是求算不同时间层各空间离散点的泥深和流速问题。

第二步 建立和求解差分方程组。最简单而又有效的一种格式是时间步为前差分、空间步为中心差分的显式格式。输入初始数据,并根据网格大小选定时间步长,计算机逐格



求解方程组,算出不同时刻的泥石流运动要素。将各时间的泥石流运动状态联系起来,即可得到堆积区的泥石流流速分布图和泥深分布图。

(3) 计算条件控制

初始条件:在计算域内,泥石流冲出沟口的流速值 U 和泥深 h 可根据历史上泥石流发生情况或推算出某频率值进行确定,可设为常数,垂直于堆积扇中轴线的法向流速 V 的初始状态设为零。

边界条件:在平面二维流动情况下,任意扩散堆积边界有两类:一类是半封闭边界(流动边界的一侧或两侧有阻挡物);另一类是开敞性边界(流动边界无任何阻挡物)。

水文条件:对注入计算域的一条或 n 条泥石流沟的水文参数根据历史资料或推算,进行组合分析,确定某一频率情况下各沟的入流情况。

时间、空间步长:计算时采用 $\Delta T \leq \frac{\Delta X(\text{或 } \Delta Y)}{\sqrt{U^2 + V^2}}$ 进行控制,式中 $\sqrt{U^2 + V^2}$ 为最大流速模,即根据网格大小选定时间步长 ΔT ,空间步长 ΔX 、 ΔY 。

2. 堆积区危险度分区及其检验

(1) 分区指标和特征

指标选择和量化是划分泥石流堆积区危险度的基础,指标选择和量化是否合理,直接关系到危险度分区成功与否。泥石流在堆积区对建筑物的强大破坏力关键在于其冲击力和泥深这两个动力参数,前者的量值与流速的平方成正比,因此我们选用流速和泥深作为堆积区危险度分区的定量指标,同时与定性指标相结合,将泥石流堆积区划分为4个亚区。

I. 极度危险区:位于泥石流沟口以外的主流区,即扇形地“无扩散带”和“建设带”的中心部位,流速大于 4m/s ,泥深大于 2m ,泥石流来势凶猛,人们往往来不及躲避,可造成重大人员伤亡和财产损失,灾情特别严重。

II. 高度危险区:位于泥石流主流区附近的扇形地“建设带”,流速 $2\text{—}4\text{m/s}$,泥深 $1\text{—}2\text{m}$,建筑物破坏严重和有人人员伤亡,农田、交通设施毁坏,人们基本上丧失了生活和生产场所,灾情突出。

III. 中度危险区:位于泥石流堆积扇的扩散带,流速 $1\text{—}2\text{m/s}$,泥深 $0.5\text{—}1\text{m}$,建筑物局部破坏,一般无人员伤亡,农田危害较重,生活、生产区难以恢复,灾情显著。

IV. 轻度危险区:位于扩散带以外的漫流区,多为稀性泥石流和洪水,流速低于 1m/s ,泥深小于 0.5m ,建筑物基本无破坏,农田可被淤埋,生活、生产区尚可恢复,灾情相对较轻。

(2) 模型应用和检验

表 3-8 云南省怒江州芭蕉河 1989 年 10 月 20 日泥石流堆积区数值模拟计算参数取值表

$\sigma_f(\text{g/cm}^3)$	$\sigma(\text{g/cm}^3)$	$\rho(\text{g/cm}^3)$	C_d	$\tan\alpha$	k	$D(\text{cm})$	$d(\text{cm})$	θ_x	θ_y
2.05	2.6	1.6	0.6	0.65	0.1	20	10	0.14	0.07

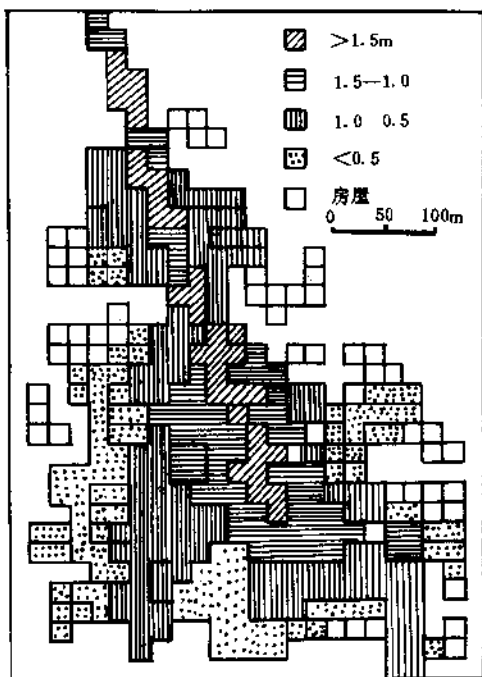


图 3-6 云南省怒江州芭蕉河 1989 年 10 月 20 日泥石流泥深分布图

云南省怒江州芭蕉河于 1989 年 10 月 20 日发生了一场重灾型泥石流,毁坏房屋 659 间,冲毁客车、货车 78 辆,造成城市水电中断、交通阻塞,经济损失达 900 万元。该沟流域面积 4.1km^2 ,主沟长 3.8km ,流域最大相对高差 1669m ,平均纵比降 35% ,堆积区坡度 4° 。据推算,泥石流冲出沟口时流速 4.08m/s ,流量 $55.8\text{m}^3/\text{s}$,泥深 2.8m 。

应用平面二维泥石流数学模型进行数值模拟,计算泥石流发生后的下游堆积区各离散点的泥石流上涨和回落过程以及泥深分布和流速分布。整个计算域划分成纵横 20m 等距矩形网格 420 个,时间步长 30 秒,其它计算参数见表 3-8。

泥石流最大泥深和最大流速分布的计算结果见图 3-6 和图 3-7。将上述两图叠加分析,按指标分类编制出泥石流堆积区危险度分区图 3-8。

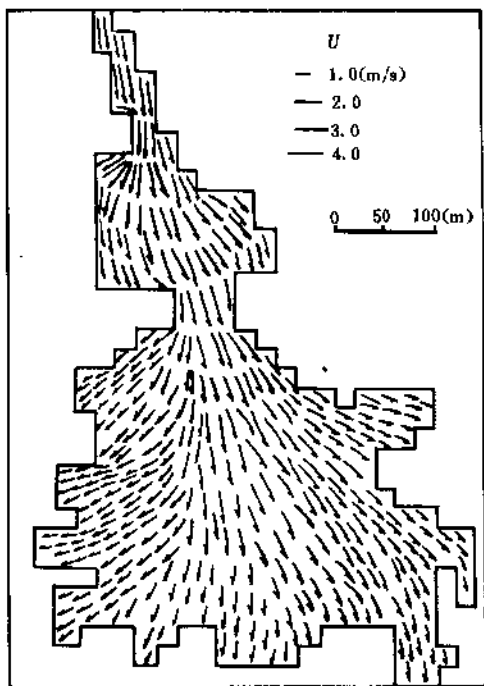


图 3-7 云南省怒江州芭蕉河 1989 年 10 月 20 日泥石流流速分布图

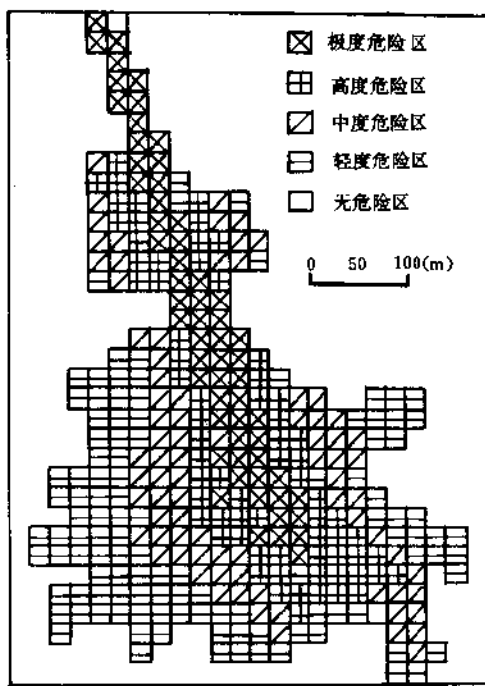


图 3-8 云南省怒江州芭蕉河 1989 年 10 月 20 日泥石流堆积区危险度分区图



根据数值模拟计算获得的芭蕉河泥石流堆积区危险度分区与我们灾后实地调查结果相比较,尽管芭蕉河下游堆积区地形、地物条件比较复杂,流速、流向和泥位变差比较剧烈,但采用该法的计算仍然显示了其特有的适应性,能较好地模拟泥石流堆积过程和泛滥范围及其严重程度。从本模型流场来看,计算域内各节点的流速值和泥位值的渐变过程都较合理,验证表明,流速和泥深的计算值与观测和调查到的泥痕值吻合较好,其计算域的堆积范围与实际范围差值为10—15%,泥深误差为8%,基本能够反映实际情况。实践证明,这一方法用于泥石流堆积区危险度分区是可行的。



第四章 泥石流危险区划

第一节 泥石流危险区划概述

泥石流危险区划是区划的一种专门类型,它是根据区域泥石流危险度划分出各区域泥石流危险等级的方法。泥石流危险区划图是泥石流危险区划的具体成果,它是目前用于区域泥石流危险性评价和区域泥石流预测预报的主要工具。

泥石流危险区划在国外即灾害制图。美国、加拿大、日本、德国和奥地利等国的大部分地区都已完成洪水(含泥石流)灾害的制图工作^[7,75,111],但灾害制图并不具体到该区域内的某条沟谷是否将发生泥石流的问题。尽管如此,灾害制图仍然在大尺度泥石流空间预测方面起着重要的作用,并已广泛应用于灾害保险、灾害预防和灾害救援等方面。

我国泥石流危险区划的研究起步较晚。有关文献^[40]认为,我国泥石流危险区划的工作最早始于1985年,其代表性成果为1991年出版的中国泥石流灾害分布与危害区划图^[112]。理论性成果的代表作为唐邦兴和本书第一作者所著的“中国泥石流危险区划的探讨”一文^[113]。在此期间,类似的图件还有四川省攀西地区泥石流滑坡分布与危险程度分区图^[114]等;类似的研究还有北京山区孙胡沟地区泥石流灾害预测区的划分和圈定^[115],辽宁省泥石流灾害的危险性分区^[116],长江上游泥石流危险度区划研究^[117]等。与此同时,有关这一论题的研究仍在继续深入和完善。首先是方法的提出^[118],通过引入区域泥石流危险度的概念进行泥石流危险区划,全面论述了危险区划的主要原则和定量指标;然后是方法的应用^[119],以云南省昭通地区为例,应用区域泥石流危险度计算方法,完成了该地区泥石流危险区划的工作;接着是方法的改进^[120,121],提出了用泥石流相对分布密度代替实际分布密度,以减少计算区域泥石流危险度获取资料的难度;最后上升到理论阶段^[122],对目前有关泥石流危险区划的两种方法作了对比并进行了综合论述。通过这一系列探索,本书提出的泥石流危险区划(危险度分区)的方法基本成形,已成一家之说,多次被有关部门和有关文献所引用^[42,123-125]。以下二节就是关于这一论题的具体成果。

第二节 泥石流危险区划理论和方法

第一章已对泥石流危险度的判定作了论述,那是指每条沟谷的泥石流危险度。扩展到某个区域,即某区域内泥石流危险度如何,也就是危险区划的问题。因此,最直接、最原始的方法是:计算出整个区域内每条沟谷的泥石流危险度,然后求出它们的平均值,以该平均值作为该区域的泥石流危险度,从而确定出该区域的泥石流危险等级。但事实上,这几乎是不可能的,泥石流沟广布于我国的崇山峻岭和千沟万壑,要判定出每条沟谷的泥石流危险度谈何容易。这就需要我们用间接而又科学的方法对区域泥石流危险度进行评价,并



进行较高层次的综合危险区划,这就是本章的主要内容。

1. 泥石流危险区划的主要原则

无论区划的类型如何,都必须遵循一定的原则,这是区划的指导思想和基本准则。泥石流危险区划也不例外,与其它区划相比,它们既有共性,又有个性。在进行泥石流危险区划时,我们主要考虑如下原则。

(1) 相似性原则

相似性原则,有的文献又称相对一致性原则^[126],这一原则可谓区划的通用原则。只有将相似的地区划归为一个区域,将不相似的地区划归为不同区域,才称为区划。对泥石流危险区划来说,在相似的区域内,影响泥石流发生发展的数量指标应该是相似的;在不相似的区域内,影响泥石流发生发展的数量指标应该是差异较大的。但相似不等于完全相同,所以相似性还受不同区划层次的影响。例如在较低层次的区划中,甲、乙两区是不相似的,不能划归为一个区域,但在较高层次的区划中,甲、乙两区则是相似的,可以划归为一个区域。也就是说,泥石流危险区划有基本单元大小的问题,也即危险区划图有比例尺大小的问题。

(2) 区域完整性原则

区域完整性原则,有的文献又称区域内部联系性原则^[127],也是很多区划予以考虑的一项原则。区域不外乎两大类:自然区域和行政区域。前者可分为地质、地貌、气候和流域水系等;后者可分为省、市、地、州和县等。泥石流是一种自然现象,但它又会对特定范围内所存在的一切人和物造成危害,因此泥石流又是一种社会事件。由于泥石流灾害的防治和救援工作必须依靠各级政府来完成,且我国现行的防灾、抗灾和救灾工作的组织实施原则都是以地方政府为主,按行政区域采取统一的组织指挥来完成的^[128]。从这种角度来看,考虑行政区域的完整性,即以行政区划为基础较好。事实上,这样不仅方便易行,而且能为各级政府作出决策提供依据。我们就是以行政区域为基本单元来进行泥石流危险区划的。

(3) 综合性原则

影响泥石流发生发展和危险程度的因子很多。为避免使用单一因子的局限性,贯彻综合性原则是十分必要的。考虑到区域泥石流危险度比较复杂,我们在进行泥石流危险区划时,从更广泛的背景因素中,通过对 18 个影响泥石流发生发展和危险程度的区域因子进行综合分析,确定出 8 个区域因子(定量指标)来综合判定区域泥石流危险度。

(4) 主导因子原则

在综合分析并选出用于泥石流危险区划的区域因子(定量指标)后,还需进一步抓住主要矛盾,确定主导因子。然后找出主次区域因子之间的关系,从而为确定各区域因子的权重分配提供理论依据。

2. 泥石流危险区划的定量指标

指标的选择和量化是危险区划的关键,指标选择和量化合理与否,直接关系到区划的



成功与否。我们从泥石流分布情况和影响泥石流形成条件的地质、地貌、水文气象、森林植被和人类活动五个方面着手,初选了18项候选指标(表4-1)。按照表4-1的要求,我们收集了云南省昭通地区10个县市(区域样本)18项候选指标的基础数据(表4-2),它们是选择泥石流危险区划定定量指标的基础资料。

表4-1 泥石流危险区划定定量指标候选表

主导因子	泥石流分布密度(y)			
地质指标	地貌指标	水文气象指标	森林植被指标	人类活动指标
岩石风化程度系数(x_1)	区域最大相对高差(x_5)	洪灾发生频率(x_8)	森林覆盖率(x_{12})	平均农业人口密度(x_{15})
平均地震烈度(x_2)	$\geq 25^\circ$ 坡地面积百分比(x_6)	月降雨量变差系数(x_9)	植被覆盖率(x_{14})	$\geq 25^\circ$ 坡耕地面积百分比(x_{16})
断裂带密度(x_3)	$\geq 15^\circ$ 坡地面积百分比(x_7)	年平均 $\geq 50\text{mm}$ 暴雨日数(x_{10})		年平均开荒面积(x_{17})
地震发生频率(x_4)		年平均 $\geq 25\text{mm}$ 大雨日数(x_{11})		
		年平均降雨量(x_{12})		

表4-2 云南省昭通地区10县市的基础资料

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
县市名	昭通市	鲁甸	巧家	盐津	大关	永善	绥江-水富	镇雄	彝良	威信
泥石流分布密度 y (条/ 10^2km^2)	21.65	9.42	25.03	5.91	5.80	25.63	11.17	14.33	7.13	7.18
岩石风化程度系数 x_1^*	1.86	1.99	2.02	1.85	2.01	1.96	1.70	1.89	1.92	1.82
平均地震烈度 x_2 (度)	6.57	6.05	7.15	6.60	8.46	7.30	6.23	5.67	7.68	5.50
断裂带密度 x_3 (km/ 10^3km^2)	49.76	74.72	120.17	72.42	86.10	46.58	47.69	60.44	55.10	87.22
地震发生频率 x_4 (%)	20.00	7.14	22.86	7.14	11.43	11.43	10.00	4.29	14.29	1.43
区域最大相对高差 x_5 (km)	1.30	1.83	2.84	0.87	2.30	1.70	1.75	1.78	1.78	1.42
$\geq 25^\circ$ 坡地面积百分比 x_6 (%)	22.09	30.94	56.00	53.87	55.67	52.38	46.07	35.53	39.50	41.40
$\geq 15^\circ$ 坡地面积百分比 x_7 (%)	51.15	63.02	82.02	87.77	87.45	81.26	79.84	70.54	71.86	83.79
洪灾发生频率 x_8 (%)	25.00	28.13	66.67	54.17	29.17	62.50	30.77	32.14	29.17	45.45
月降雨量变差系数 x_9	0.88	0.85	0.89	0.84	0.95	0.88	0.91	0.76	0.98	0.65
年平均 $\geq 50\text{mm}$ 暴雨日数 x_{10} (日)	0.50	1.10	1.41	3.29	1.86	1.00	2.92	1.25	1.20	1.35
年平均 $\geq 25\text{mm}$ 大雨日数 x_{11} (日)	4.43	8.43	8.21	9.97	7.55	4.57	6.88	6.94	6.53	7.20
年平均降雨量 x_{12} (mm)	730.7	915.7	792.5	1210.5	1000.5	646.2	959.3	915.0	777.1	1056.5
森林覆盖率 x_{13}^* (%)	11.16	26.46	25.77	7.95	10.31	8.18	7.45	14.77	17.06	7.99
植被覆盖率 x_{14}^* (%)	3.96	3.96	2.46	2.47	2.89	2.60	2.10	2.76	2.83	2.56
平均农业人口密度 x_{15} (人/ km^2)	218	166	130	132	111	116	147	233	132	184
$\geq 25^\circ$ 坡耕地面积百分比 x_{16} (%)	8.76	8.02	33.06	25.04	8.07	15.00	28.86	29.77	20.97	38.80
年平均开荒面积(km^2)	1.58	4.43	2.80	11.47	2.03	9.91	8.17	6.92	10.41	2.83

注: * 表示表中数值为该指标的倒数。



根据表 4-2 的基础数据,采用灰色系统理论中的关联度分析方法,运用袁开先的关联度分析程序^[29],在 PC-1500A 微型计算机上进行处理,计算结果见表 4-3。

表 4-3 泥石流危险区划定量指标的关联度分析

与主导因子 y 的关联度	在关联度阈值 0.7 下的检验结果	关联序	与主导因子 y 的关联度	在关联度阈值 0.7 下的检验结果	关联序
$y=1$	密切	1 y	$x_9=0.7445$	密切	10 x_{12}
$x_1=0.7621$	密切	2 x_8	$x_{10}=0.6690$	不密切	11 x_{16}
$x_2=0.6370$	不密切	3 x_1	$x_{11}=0.7128$	密切	12 x_7
$x_3=0.7384$	密切	4 x_9	$x_{12}=0.6696$	不密切	13 x_2
$x_4=0.4992$	不密切	5 x_3	$x_{13}=0.6266$	不密切	14 x_{13}
$x_5=0.5528$	不密切	6 x_{11}	$x_{14}=0.5033$	不密切	15 x_5
$x_6=0.6996$	密切	7 x_{16}	$x_{15}=0.5014$	不密切	16 x_{14}
$x_7=0.6669$	不密切	8 x_5	$x_{16}=0.7126$	密切	17 x_{15}
$x_8=0.7806$	密切	9 x_{17}	$x_{17}=0.6806$	不密切	18 x_4

由表 4-3 可以看出,在给定关联度阈值 0.7 的条件下,有 7 个候选的定量指标与主导因子关系密切。因此,最后选定泥石流分布密度 y 、洪灾发生频率 x_8 、岩石风化程度系数 x_1 、月降雨量变差系数 x_9 、断裂带密度 x_3 、年平均 $\geq 25\text{mm}$ 大雨日数 x_{11} 、 $\geq 25^\circ$ 坡耕地面积百分比 x_{16} 、 $\geq 25^\circ$ 坡地面积百分比 x_6 共 8 项区域因子作为泥石流危险区划的定量指标。其中水文气象方面占 3 个指标,居第一位;地质方面占 2 个指标,居第二位;地貌和人类活动方面各占 1 个指标,居第三位;森林植被方面的指标缺失,说明它们在泥石流危险区划中作用较小。

(1) 泥石流分布密度

泥石流沟的流域面积大多为 $0.5\sim 50\text{km}^2$,在小于 $1:500\,000$ 的地形图上一般都可将其作为“点”来处理。我们所指的泥石流分布密度意为点密度,即单位面积内泥石流沟的条数,用条/ 10^3km^2 来表示。泥石流分布密度不仅表明了区域泥石流的发育历史,而且表明了目前的严重情况,是泥石流危险区划的主要依据,属主导因子。

(2) 洪灾发生频率

假定在日降雨量 $\geq 50\text{mm}$ 或连续 3 日降雨量 \geq 年平均日降雨量的 24~40 倍(根据气象部门的经验具体确定)的条件下,该地区洪水灾害这一事件可能发生,那么在一定的统计期限内,洪水灾害发生的次数和可能发生洪水灾害的次数之比称为洪灾发生频率,用百分数表示。应该注意的是,洪灾(发生)频率和洪水频率是两个完全不同的概念。洪水频率通常是指某一洪水特征值(如洪峰流量等)出现的累积频率而言。即在多年时期内,该特征值等于或超过某定量的可能出现次数,也可折合成一年内可能出现的概率,用百分数表示,其倒数为重现期。例如洪水频率为 1%,则其重现期为百年一遇,即一百年内可能重复发生一次。



泥石流与洪水常相伴发生,广义地讲,泥石流是洪灾的特例。因此,洪灾发生频率这一指标能客观地反映一个地区泥石流发生的活跃度,它与主导因子有着很高的关联度,对泥石流危险区划有很大影响。

(3) 岩石风化程度系数

岩石风化程度系数即风化岩石单轴抗压强度除以新鲜岩石单轴抗压强度,通常记为 K_r ,用小数表示。泥石流的固体物质大多直接来源于风化破碎后的松散岩体,因此,岩石风化程度就能较好地反映一个地区泥石流形成的可能性大小,而 K_r 又与岩石出露的时代和类型有关,时代越久远,岩石越古老,风化越严重, K_r 值越小。半风化岩石 $K_r = 0.40 \sim 0.75$ 。由于同一地区不同岩石以及不同地区同种岩石都有着不同的风化程度系数,这就增加了区域平均 K_r 统一取值的困难。考虑到泥石流发生的地区大多为半风化岩石,根据地质资料以及 K_r 与岩石出露时代的关系,我们取新生代和中生代 $K_2 + M_2$ 岩石的平均 K_r 值为 0.60,古生代和元古代 $P_2 + P_1$ 岩石的平均 K_r 值为 0.50,然后分别量算出区域内两者的岩石面积,以面积百分比为权重,加权平均后求得区域的平均岩石风化程度系数。因为 K_r 值越小,岩石风化越深; K_r 值越大,岩石风化越浅,因此,为使这项指标能与主导因子成同步正变,作简单数学变换,取其倒数 $1/K_r$ 作为这项指标的定量值。这一指标与主导因子关系密切,对泥石流危险区划有很大影响。

(4) 月降雨量变差系数

泥石流主要发生在每年雨季的 5—9 月,这段时间大多集中了全年雨量的 80% 以上。雨量越集中,雨强就越大,因此,降雨量在年内各月的分配情况,即月降雨量变差系数,就成为反映一个地区泥石流发生可能性大小和危险程度的因子之一。变差系数通常记为 C_v ,用小数表示。 C_v 值由下式计算:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} / \bar{X} \quad (4-1)$$

式中 X_i 为各月的降雨量(mm); \bar{X} 为全年月平均降雨量(mm); $i=1, 2, \dots, 12$ (全年 12 个月); $n=12$ 。因 C_v 值有年际变化,故通常取 10 年以上的 C_v 平均值作为月降雨量变差系数这一定量指标。这一指标与主导因子关系密切,对泥石流危险区划有较大影响。

(5) 断裂带密度

断裂带虽有一定宽度,但在小于 1:200000 的地质图上已将其作“线”处理。我们所指的断裂带密度意为线密度,即单位面积内断裂带的总长度,用 $\text{km}/10^3\text{km}^2$ 表示。不言而喻,断裂带密度越大,该地区地层岩石越支离破碎,松散固体物质越容易产出,泥石流越容易形成,该地区泥石流灾害的危险性就越大。这一指标与主导因子关系密切,对泥石流危险区划有较大影响。

(6) 年平均 $\geq 25\text{mm}$ 大雨日数

以往通常只考虑 $\geq 50\text{mm}$ 的暴雨对泥石流形成的影响,虽然暴雨能激发泥石流,但泥



石流次数却常常多于暴雨次数,表现出与日降雨量 $\geq 25\text{mm}$ 的大雨雨量有着更加密切的关系(表 4-3)。这说明降雨与泥石流的关系不仅与雨量有关,而且与雨强有关。这一指标与主导因子关系密切,对泥石流危险区划有较大影响。

(7) $\geq 25^\circ$ 坡耕地面积百分比

$\geq 25^\circ$ 坡耕地面积除以耕地总面积即为该项指标,用百分数表示。根据《水土保持法》, $\geq 25^\circ$ 坡地已属不宜耕种地,一般都应退耕还林。陡坡耕种是人类活动对自然环境的直接破坏,这种掠夺式经营其结果势必加剧水土流失,有利于泥石流的形成。这一指标与主导因子关系密切,对泥石流危险区划有较大影响。

(8) $\geq 25^\circ$ 坡地面积百分比

$\geq 25^\circ$ 坡地面积除以国土总面积即为该项指标,用百分数表示。根据坡地分级标准: $< 15^\circ$ 为平缓地, $15^\circ-25^\circ$ 为缓坡, $25^\circ-35^\circ$ 为陡坡, $35^\circ-45^\circ$ 为峻陡坡, $> 45^\circ$ 为极陡坡。大量统计资料表明,泥石流大多发生在大于 25° 的陡坡地段,特别是泥石流形成区,两侧山坡坡度常高达 $50^\circ-60^\circ$ 。因此,这一指标与主导因子之间有着较 $\geq 15^\circ$ 坡地面积百分比更为密切的关系(表 4-3),对泥石流危险区划有较大影响。

3. 定量指标权重的确定

定量指标权重的确定,是决定区划效果的关键。以往通常凭经验主观估计,在很大程度上加入了人为因素。关联度分析既能够用于优选定量指标,又能够客观地给出各指标之间的主次关系和密切程度,也即给出各指标的权重大小,从而比较圆满地解决了这一问题。

由表 4-3 可得出各定量指标的关联序为:泥石流分布密度 $y >$ 洪灾发生频率 $x_8 >$ 岩石风化程度系数 $x_1 >$ 月降雨量变差系数 $x_9 >$ 断裂带密度 $x_3 >$ 年平均 $\geq 25\text{mm}$ 大雨日数 $x_{11} >$ $\geq 25^\circ$ 坡耕地面积百分比 $x_{12} >$ $\geq 25^\circ$ 坡地面积百分比 x_6 。

从关联度最小的定量指标开始,给定其起始权数为一个基本单位 10^n (n 可为任何整数,在此取 $n=0$),以此基本单位为公差,依次呈等差级数向关联度增大的方向递增定量指标的权数。为突出主导因子的质的区别,主导因子的权数以最大的定量指标的权数为基数,以 2 为公比,呈等比级数继续递增。则各定量指标的权数和权重见表 4-4,8 项定量指标的权重之和等于 1,其中主导因子的权重占 33.33%,其它 7 项定量指标的权重占 66.67%。

表 4-4 定量指标的权数和权重

定量指标	x_6	x_{12}	x_{11}	x_3	x_9	x_1	x_8	y
权数	1	2	3	4	5	6	7	14
权重	0.0238	0.0476	0.0714	0.0952	0.1191	0.1429	0.1667	0.3333



- 68 -



差变换后的数值; x'_{11} 为第*i*区域年平均 $\geq 25\text{mm}$ 大雨日数极差变换后的数值; x'_{16} 为第*i*区域 $\geq 25^\circ$ 坡耕地面积百分比极差变换后的数值。

泥石流分布密度是泥石流危险区划中最重要的指标,也是最难获取的指标。目前获取这一指标的主要方法是面上普查,最多辅以航空像片判读。如何寻找一种简便、快速而又科学的方法来减轻野外实地调查的辛劳,同时又能圆满完成泥石流危险区划工作,用泥石流相对分布密度代替泥石流分布密度,可以解决这一关键而棘手的问题。

从已知的容易获取的因子推求未知的难以获取的因子,是我们建立数学模型的主要目的。 $x_1, x_3, x_6, x_8, x_9, x_{11}, x_{16}$ 已属容易获取的因子, y 则属难以获取的因子,如果能找到 y 用 x 代替的数学表达式:

$$y = f(x_1, x_3, x_6, x_8, x_9, x_{11}, x_{16}) \quad (4-5)$$

那么问题就迎刃而解。但直接寻找 y 与 x 实际值之间的关系很复杂,难度也大得多。因此我们只能间接地寻找 y' 与 x' 相对值之间的关系。其结果对泥石流危险区划来说完全一样。考虑到 x' 与 y' 之间均为线性正变关系,因此我们可设定一个变量 E ,令

$$E = C_1 x'_1 + C_2 x'_3 + C_3 x'_6 + C_4 x'_8 + C_5 x'_9 + C_6 x'_{11} + C_7 x'_{16} \quad (4-6)$$

然后通过回归分析,求得 y' 与 E 之间的定量关系,也就找到了我们所需要的 y' 用 x' 代替的数学表达式。式中 $C_1 \sim C_7$ 为待定系数。

如前所述,我们知道各定量指标在泥石流危险区划中的作用是有大小之分的,并且根据关联度分析结果,已经排出其顺序为 $x_8 > x_1 > x_9 > x_3 > x_{11} > x_{16} > x_6$,并给定了各指标的权数为: $D_8=7, D_1=6, D_9=5, D_3=4, D_{11}=3, D_6=2, D_6=1$ 。据此,我们可将式(4-6)明确为:

$$\begin{aligned} E &= D_1 x'_1 + D_3 x'_3 + D_6 x'_6 + D_8 x'_8 + D_9 x'_9 + D_{11} x'_{11} + D_{16} x'_{16} \\ &= 6x'_1 + 4x'_3 + x'_6 + 7x'_8 + 5x'_9 + 3x'_{11} + 2x'_{16} \end{aligned} \quad (4-7)$$

根据四川省阿坝州10个县市泥石流危险区划8项指标的基础数据,经归一化处理后得表4-5。

表 4-5 泥石流相对分布密度建模用的基础数据

n	x'_1	x'_3	x'_6	x'_8	x'_9	x'_{11}	x'_{16}	E	y'
1	0.82	0.62	0.03	0.21	0.40	0.20	0.85	13.20	0.53
2	0.59	0.11	0.18	1.00	0.00	0.00	0.09	11.34	1.00
3	1.00	1.00	0.00	0.67	0.40	0.30	0.20	17.99	0.64
4	0.65	0.12	0.23	0.25	0.36	1.00	0.34	11.24	0.51
5	0.41	0.42	0.51	0.09	0.12	0.27	0.52	7.10	0.97
6	0.05	0.64	0.74	0.06	0.72	0.90	0.01	8.18	0.61
7	0.00	0.63	1.00	0.06	1.00	0.51	0.00	8.07	0.60
8	0.27	0.07	0.58	1.00	0.84	0.26	1.00	16.46	0.97
9	0.68	0.00	0.29	0.00	0.64	0.23	0.60	9.26	0.57
10	0.56	0.52	0.05	0.67	0.48	0.46	0.12	13.00	0.57



从散点图判断, y' 与 E 之间可能在线性关系 $y' = a + bE$ 和对数关系 $y' = a + b \log E$ 。通过线性回归分析和对数回归分析, 得到直线回归方程为:

$$y' = -1.5302 + 0.1970E \quad (4-8)$$

相关系数 $r = 0.6024$ 。在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下, $r < r_{\alpha} = 0.6319$, 回归方程不显著, 置信度不高, 不能成为我们所需要的数学表达式。

对数函数回归方程为:

$$y' = -1.6571 + 2.0135 \log E \quad (4-9)$$

相关系数 $r = 0.7596$ 。在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下, $r > r_{\alpha} = 0.6319$, 回归方程显著, 具有 95% 的置信度。将式(4-7)代入式(4-9), 得到

$$y' = -1.6571 + 2.0135 \log(6x'_{11} - 4x'_{13} + x'_{16} + 7x'_{18} + 5x'_{19} + 3x'_{111} + 2x'_{116}) \quad (4-10)$$

也即

$$y'_{11} = -1.6571 + 2.0135 \log(6x'_{11} + 4x'_{13} + x'_{16} + 7x'_{18} + 5x'_{19} + 3x'_{111} + 2x'_{116}) \quad (4-11)$$

式(4-11)即为我们所要建立的泥石流相对分布密度的数学表达式。式中符号同式(4-4)。

式(4-11)的自检验误差结果表明, 最大相对误差为 -170%, 最小相对误差为 9.8%, 平均相对误差为 -16.31%, 基本上能够满足目前泥石流统计分析的精度要求。

(3) 泥石流危险区划的具体步骤

第一步 收集需要参与泥石流危险区划的每个行政区域的 8 项定量指标。

第二步 将 8 项定量指标分别进行极差变换, 即归一化处理。

第三步 计算各区域的区域泥石流危险度。

第四步 根据“泥石流危险区划分级标准”(表 4-6), 确定出每个区域的泥石流危险等级。

表 4-6 泥石流危险区划分级标准

区域泥石流危险度	危险性评价	区域泥石流危险等级	区域泥石流危险度	危险性评价	区域泥石流危险等级
0.8334 ~ 1	极度危险	I 级危险区	(0.3333) ~ 0.4999	中度危险	IV 级危险区
(0.6666) ~ (0.8334)	高度危险	II 级危险区	(0.1666) ~ 0.3333	轻度危险	V 级危险区
(3.4999) ~ 0.6666	显著危险	III 级危险区	0 ~ 0.1666	无危险	无危险区

注: () 表示不包含括号中的数值。

第五步 根据相似性原则和区域完整性原则, 以原行政区域边界为界线, 将相同等级的区域连接成完整和连续的图形, 用线条、色调或符号将不同等级的区域区分开来, 即已完成泥石流危险区划工作。泥石流危险区划与泥石流防治对策见表 4-7。



表 4-7 泥石流危险区划与泥石流防治对策

区域泥石流危险度	区域泥石流危险等级	防治原则	防治对策	投资决策
0.8334 ~ 1	I 级危险区	可考虑放弃工程治理	以保护人身安全为首要任务,尽可能减少灾害损失	不宜投资区
(0.6666) ~ (0.8334)	II 级危险区	防为主,治为辅	区域内部分重点泥石流沟可实施生物和土建工程综合治理,其它泥石流沟以生物防治和临阵预报措施为宜	不宜投资建设国防工业、能源基地、交通干线和大型工矿企业
(0.4999) ~ 0.6666	III 级危险区	防、治并重	区域内主要泥石流沟需要综合治理,同时加强监测预报和预警避难措施,确保危害对象安全无恙	工矿企业、公共交通、通讯线路和其它公益设施应精选精建,同时配以适当的防护工程
(0.3333) ~ 0.4999	IV 级危险区	治为主,防为辅	实施生物和土建工程综合治理即可基本上抑制区域内泥石流灾害的发生,同时加强防治工程的检查监督和泥石流发展趋势的监测预报	可投资区,但对受泥石流严重威胁的重点项目和场所,应建有适当的防护工程
(0.1666) ~ 0.3333	V 级危险区	防为主,治为辅	加强水土保持,搞好群策群防,注意防止产生新的泥石流灾害	安全投资区
0 ~ 0.1666	无危险区	不需治理	继续维护良好的生态环境,保持人与自然的协调发展和良性循环	最佳投资区

注:()表示不包含括号中的数值。

第三节 泥石流危险区划的应用

1. 基础资料

y ——泥石流分布密度 在资金、人力和时间条件许可的情况下,应尽可能通过实地踏勘和面上普查摸清泥石流发育特征和分布规律,用实际分布密度来进行泥石流危险区划。为了减轻野外实地调查的辛劳,也可采用间接的方法,用泥石流相对分布密度代替实际分布密度,来计算区域泥石流危险度,从而达到泥石流危险区划的目的。泥石流相对分布密度的计算公式为式(4-11)。泥石流分布密度单位为条/ 10^3km^2 。

x_1 ——岩石风化程度系数的倒数,即 K_v 值的倒数 取新生代和中生代岩石的平均 K_v 值为 0.60,古生代和元古代岩石的平均 K_v 值为 0.50。从地质图上量算出两者的岩石面积,以面积百分比为权重,加权平均后求出该区域的平均 K_v 值。

x_3 ——断裂带密度 从 1:20 万、1:50 万或 1:100 万地质图上按区域分别量算



出活动性深大断裂带的总长度,再除以该区域的总面积。所得的断裂带密度可分别满足大、中、小比例尺泥石流危险区划的精度要求。单位为 $\text{km}/10^3\text{km}^2$ 。

x_6 —— $\geq 25^\circ$ 坡地面积百分比 可从各级政府统计部门或国土办公室和区划办公室等有关部门获取。单位为%。

x_8 ——洪灾发生频率 洪灾次数可根据气象部门汇编的天气(气象)灾害史料或水利部门汇编的洪水灾害调查成果,按照一定的时间尺度统计得出。可能出现的洪灾次数可从现有的地面气候资料中获取。单位为%。

x_9 ——月降雨量变差系数 记为 C_v ,且有 $0 \leq C_v \leq 1$,由式(4-1)计算。单位为小数。

x_{11} ——年平均 $\geq 25\text{mm}$ 大雨日数 可从气象部门汇编的地面气候资料中获取,资料年限尽可能在10年以上。单位为日。

x_{16} —— $\geq 25^\circ$ 坡耕地面积百分比 可从各级政府统计部门获取。单位为%。

2. 泥石流危险区划应用实践

(1) 四川省阿坝州泥石流危险区划

通过大量的调研工作,我们收集了四川省阿坝州10个县市泥石流危险区划8项定量指标的基础资料。先列出原始数据(表4-8),进行归一化处理后,再列出极差变换数据(表4-5),然后根据式(4-4)计算区域泥石流危险度(表4-8),最后根据表4-6的分级标准得出四川省阿坝州泥石流危险区划成果(图4-1)。

表 4-8 四川省阿坝州泥石流危险区划基础资料和区划结果

编号	县市名	y	x_1	x_3	x_6	x_8	x_9	x_{11}	x_{16}	R_i
1	汶川	24.76	1.85	95.38	32.69	23.08	0.78	1.28	31.72	0.4910
2	理县	42.02	1.80	18.94	41.90	57.14	0.68	0.93	4.56	0.6034
3	茂县	28.69	1.89	151.85	30.80	42.86	0.78	1.45	8.32	0.6417
4	黑水	23.92	1.79	20.34	44.54	25.00	0.77	2.68	13.49	0.4376
5	松潘	7.88	1.76	65.97	61.56	14.29	0.71	1.40	19.72	0.1924
6	马尔康	5.99	1.69	8.19	76.01	16.67	0.86	2.50	1.63	0.1981
7	壤塘	5.45	1.67	8.11	91.66	16.67	0.93	1.83	1.31	0.1922
8	金川	40.99	1.73	12.59	65.91	57.14	0.89	1.38	36.89	0.7153
9	小金	19.08	1.82	2.82	48.45	14.29	0.83	1.34	22.66	0.3998
10	南坪	19.13	1.82	79.70	33.89	42.86	0.80	1.73	5.62	0.4329

注:表中编号同表4-5。

全州13县,面积82667 km^2 ,现有泥石流沟1065条,州内没有属于极度危险的I级泥石流危险区。

Ⅱ级危险区(高度危险):仅金川一县,区域泥石流危险度为0.7153,面积5440 km^2 ,占全州面积的6.58%。区域内泥石流十分发育,现有泥石流沟223条,占全州总数的20.94%,泥石流分布密度为40.99条/ 10^3km^2 。曾分别于1926,1980—1988年共10次发生过群发性大规模泥石流。

Ⅲ级危险区(显著危险):仅茂县和理县两县,区域泥石流危险度分别为0.6417和

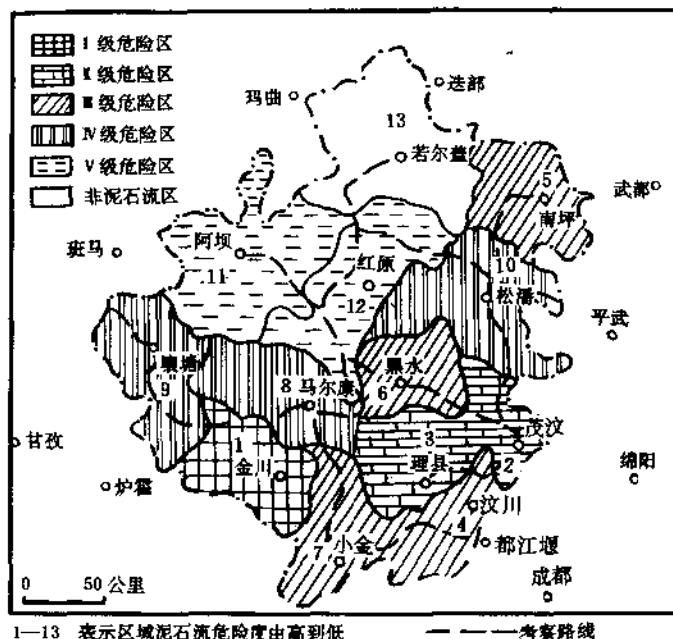


图 4-1 四川省阿坝州泥石流危险区划图

0.6034, 面积共计 8 224km², 占全州面积的 9.95%。区域内泥石流也很发育, 现有泥石流沟 294 条, 占全州总数的 27.61%, 泥石流分布密度为 30.75 条/10³km²。曾分别于 1949, 1955, 1975, 1979 和 1985 年共 5 次发生过群发性大規模的泥石流。

Ⅳ级危险区(中度危险): 包括汶川、黑水、南坪和小金四县, 区域泥石流危险度分别为 0.4910, 0.4376, 0.4329, 0.3998, 面积共计 19 164km², 占全州面积的 23.18%。区域内泥石流比较发育, 现有泥石流沟 408 条, 占全州总数的 38.31%, 泥石流分布密度为 21.31 条/10³km²。曾分别于 1927, 1934, 1940, 1958, 1963, 1974, 1982, 1984 和 1987 年共 9 次发生过群发性中等规模的泥石流。

Ⅴ级危险区(轻度危险): 包括马尔康、松潘和壤塘三县, 区域泥石流危险度分别为 0.1981, 0.1924, 0.1922, 面积共计 21 321km², 占全州面积的 25.79%。区域内泥石流较少发育, 现有泥石流沟 140 条, 占全州总数的 13.14%, 泥石流分布密度为 6.57 条/10³km²。曾分别于 1940, 1949, 1953, 1957, 1982, 1983 和 1987 年共 7 次发生过群发性中小规模的泥石流。

其它三县红原、阿坝和若尔盖主要为草原和沼泽地, 面积共计 28 518km², 占全州面积的 34.5%。泥石流不发育或极少有泥石流发育, 属无泥石流危险区。

(2) 云南省昭通地区泥石流危险区划

昭通位于云南省东北部, 属滇东北的山原区, 整个地势由西南向东北倾斜。气候类型多样, 干湿季分明为其显著特点。流域面积大于 200km² 的河流 17 条, 其中 13 条属金沙江水系。自 80 年代以来, 由于自然和人类不合理的生产活动等原因, 泥石流灾害日趋严



重,现已成为制约该地区经济发展的主要自然灾害之一。

昭通地区泥石流分布广泛,遍布全区 11 个县市。据不完全统计,现有泥石流沟 330 余条,平均分布密度 $14.7 \text{ 条}/10^3 \text{ km}^2$ 。其中规模较大和危害较重的主要泥石流沟 106 条,占总数的 32.1%。

本地区泥石流分布的显著特点是西南多而密、东北少而稀。西南包括巧家、鲁甸、永善、昭通市和彝良 5 县市,面积 $12\,424 \text{ km}^2$,泥石流沟 232 条,分布密度 $18.7 \text{ 条}/10^3 \text{ km}^2$ 。东北包括盐津、大关、绥江-水富、镇雄和威信 5 县市,面积 $10\,010 \text{ km}^2$,泥石流沟 98 条,分布密度 $6.8 \text{ 条}/10^3 \text{ km}^2$ 。

根据泥石流危险区划的方法和步骤,按县市分别统计用于区域泥石流危险度计算的 8 项定量指标(表 4-9),再分别对每项指标进行极差变换(表 4-10),查“泥石流危险区划分级标准”(表 4-6),得出云南省昭通地区泥石流危险区划成果(图 4-2)。

表 4-9 云南省昭通地区泥石流危险区划基础资料

编号	县市名	y	x_1	x_3	x_6	x_8	x_9	x_{11}	x_{16}
1	昭通市	21.65	1.86	49.76	22.09	25.00	0.88	4.43	8.76
2	鲁甸	9.42	1.99	74.72	30.94	28.13	0.85	8.43	8.02
3	巧家	25.03	2.02	120.17	56.00	66.67	0.89	8.21	33.06
4	盐津	5.91	1.85	72.42	53.87	54.17	0.84	9.97	25.04
5	大关	5.80	2.01	86.10	55.67	29.17	0.95	7.55	8.07
6	永善	25.63	1.96	46.58	52.38	62.50	0.88	4.57	15.00
7	绥江-水富	11.17	1.70	47.67	46.07	30.77	0.91	6.88	28.86
8	镇雄	14.33	1.89	60.44	35.53	32.14	0.76	6.94	29.77
9	彝良	7.13	1.92	55.10	39.50	29.17	0.98	6.53	20.97
10	威信	7.18	1.82	87.22	41.40	45.45	0.65	7.20	38.80

表 4-10 云南省昭通地区区域泥石流危险度计算结果

编号	县市名	y'	x'_1	x'_3	x'_6	x'_8	x'_9	x'_{11}	x'_{16}	R_i
1	昭通市	0.80	0.50	0.04	0.00	0.00	0.70	0.00	0.02	0.4262
2	鲁甸	0.18	0.91	0.38	0.26	0.08	0.61	0.72	0.00	0.3698
3	巧家	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	0.73	0.68	0.81	0.9260
4	盐津	0.01	0.47	0.35	0.94	0.70	0.58	1.00	0.55	0.4095
5	大关	0.00	0.97	0.54	0.99	0.10	0.91	0.56	0.00	0.3786
6	永善	1.00	0.81	0.00	0.89	0.90	0.70	0.03	0.23	0.7167
7	绥江-水富	0.27	0.00	0.02	0.71	0.14	0.79	0.44	0.63	0.2876
8	镇雄	0.43	0.59	0.19	0.40	0.17	0.33	0.45	0.71	0.3645
9	彝良	0.07	0.69	0.12	0.51	0.10	1.00	0.38	0.42	0.3284
10	威信	0.07	0.34	0.55	0.57	0.49	0.00	0.50	1.00	0.3028

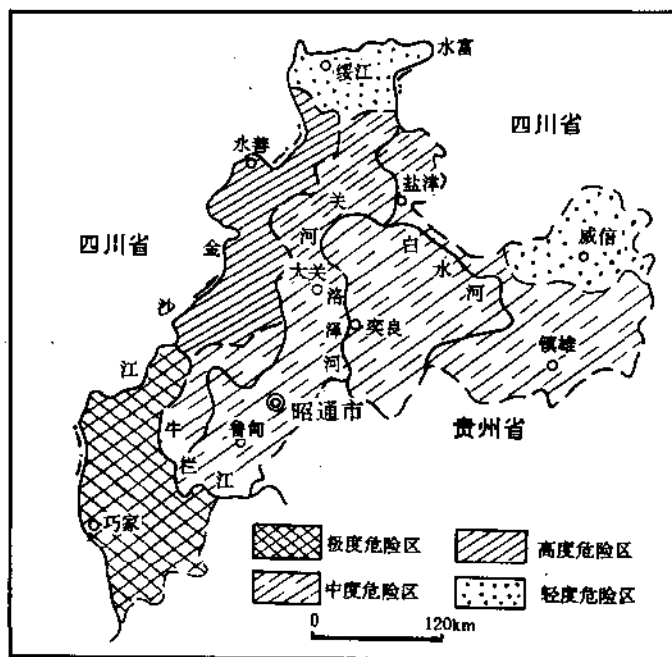


图 4-2 云南省昭通地区泥石流危险区划图

I 级危险区(极度危险):仅巧家一县,区域泥石流危险度 0.9260,面积 3 195.6km²,占全区面积的 14.24%。现有泥石流沟 80 条,占全区总数的 24.24%,泥石流分布密度 25.03 条/10³km²。区域内影响区域泥石流危险度的 8 项指标取值很高且组合极佳,非常有利于泥石流的发生、发展,在现有财力物力的情况下,短期内很难抑制或消除泥石流的形成条件。建议以防为主,尽量减少灾害损失,以保证人身安全。

II 级危险区(高度危险):仅永善一县,区域泥石流危险度 0.7167,面积 2 769.2km²,占全区面积的 12.34%。现有泥石流沟 71 条,占全区总数的 21.52%,泥石流分布密度 25.63 条/10³km²。区域内自然条件和人为因素大都有利于泥石流的形成和发展。建议对区域内关键泥石流沟进行治理。

III 级危险区(中度危险):包括昭通市、盐津、大关、鲁甸、镇雄、彝良 6 县市,区域泥石流危险度 0.4262~0.3284,面积共计 13 913.1km²,占全区面积的 62.02%。现有泥石流沟 156 条,占全区总数的 47.27%,泥石流分布密度 11.21 条/10³km²。区域内重点泥石流沟需要治理,同时应加强监测预报,注意发展动向。

IV 级危险区(轻度危险):仅威信和绥江-水富二个区域,区域泥石流危险度分别为 0.3028 和 0.2876,面积 2556.7km²,占全区面积的 11.40%。现有泥石流沟 23 条,占全区总数的 6.97%,泥石流分布密度 9 条/10³km²。建议加强水土保持工作,积极防止出现新的泥石流灾害。

(3) 云南省泥石流危险区划

通过大量的调研工作,我们收集了云南省 17 个地、州、市的 $x_1, x_3, x_6, x_8, x_9, x_{11}, x_{16}$



共七项定量指标。假定在未知泥石流分布密度 y 的情况下,来进行云南省以各地、州、市为基本单元的泥石流危险区划,则我们可运用已经建立的泥石流相对分布密度的数学表达式[式(4-11)]来求出 y' ,同样可以完成泥石流危险区划工作(图 4-3),计算结果见表 4-11 和表 4-12。

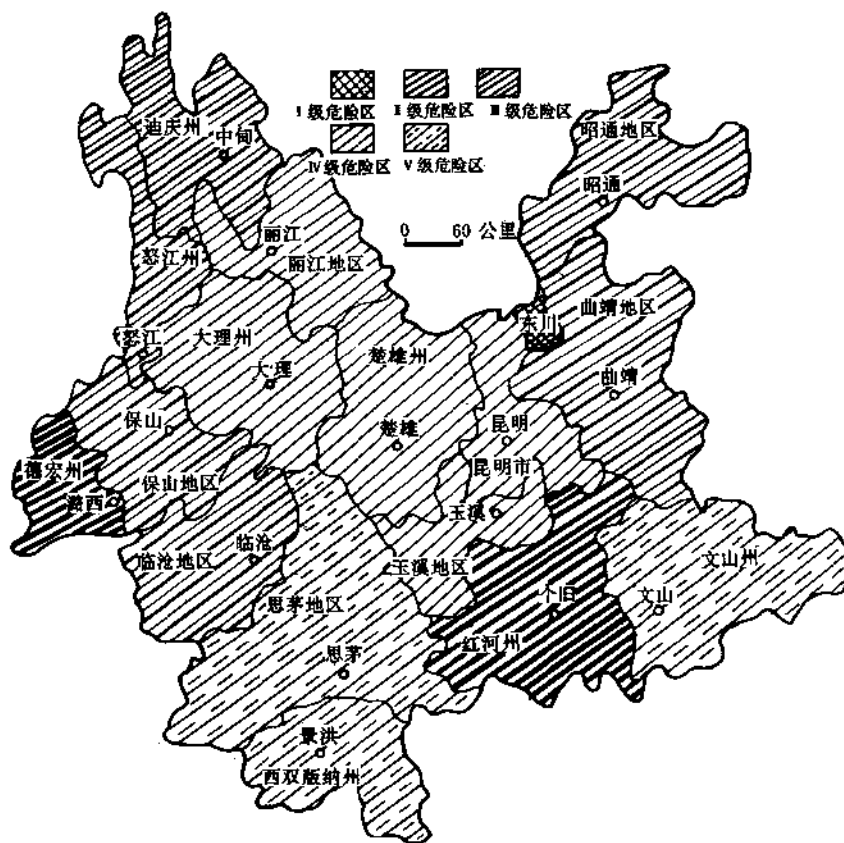


图 4-3 云南省泥石流危险区划图

全省 17 个地州市,共计面积 $394\,139\text{km}^2$ 。据统计,现有主要泥石流沟 1 786 条(山坡型泥石流未计在内),各州都不同程度地受到泥石流灾害的影响。

I 级危险区(极端危险):仅东川市,区域泥石流危险度 0.8743,面积 $1\,674\text{km}^2$,占全省面积的 0.42%。区域内泥石流十分发育,现有主要泥石流沟 107 处,占全省总数的 5.99%,泥石流分布密度为 $63.92\text{条}/10^3\text{km}^2$ 。可考虑放弃工程治理,着重于生物防治和临阵预报,尽可能减少灾害造成的直接损失。

II 级危险区(高度危险):包括德宏州和红河州,区域泥石流危险度分别为 0.7455 和 0.7119,面积 $44\,457\text{km}^2$,占全省面积的 11.28%。区域内主要泥石流沟 186 条,占全省总数的 10.41%,泥石流分布密度为 $4.18\text{条}/10^3\text{km}^2$ 。建议以防为主,以治为辅,关键泥石流沟可考虑工程治理,其它泥石流沟着重于生物防治和预警避难措施。



表 4-11 云南省泥石流危险区划基础资料

编号	地区	x_1	x_3	x_6	x_8	x_9	x_{11}	x_{16}
1	昆明市	1.84	194.77	0.18	0.11	0.91	8.80	0.11
2	东川市	2.00	362.90	0.60	0.60	0.85	7.40	0.40
3	昭通地区	1.89	70.54	0.41	0.40	0.86	7.07	0.23
4	曲靖地区	2.00	70.84	0.16	0.24	0.85	10.09	0.21
5	楚雄州	1.86	64.60	0.35	0.19	0.95	7.90	0.07
6	玉溪地区	1.84	348.87	0.35	0.22	0.72	7.71	0.17
7	红河州	1.90	180.38	0.42	0.46	0.92	12.72	0.38
8	文山州	1.86	83.75	0.43	0.20	0.70	11.08	0.09
9	思茅地区	1.68	99.65	0.40	0.35	0.67	17.06	0.16
10	西双版纳州	1.80	58.25	0.35	0.22	0.66	10.65	0.44
11	大理州	1.78	142.06	0.34	0.39	0.92	7.36	0.24
12	保山地区	1.93	120.31	0.42	0.40	0.86	11.97	0.40
13	德宏州	2.00	140.55	0.24	0.58	0.96	16.44	0.37
14	丽江地区	1.83	120.88	0.44	0.21	0.96	8.93	0.19
15	怒江州	1.84	22.95	0.80	0.69	0.51	11.04	0.88
16	迪庆州	1.90	127.25	0.65	0.47	0.76	4.43	0.91
17	临沧地区	1.92	118.62	0.38	0.22	0.87	10.58	0.42

表 4-12 云南省区域泥石流危险度计算结果

编号	地区	y'	x'_1	x'_3	x'_6	x'_8	x'_9	x'_{11}	x'_{16}	R_i
1	昆明市	0.41	0.50	0.51	0.02	0.00	0.89	0.35	0.04	0.3900
2	东川市	1.05	1.00	1.00	0.69	0.85	0.73	0.24	0.43	0.8743
3	昭通地区	0.61	0.66	0.14	0.43	0.50	0.78	0.21	0.18	0.5210
4	曲靖地区	0.63	1.00	0.16	0.00	0.21	0.76	0.45	0.21	0.5358
5	楚雄州	0.43	0.56	0.12	0.29	0.14	0.98	0.27	0.00	0.4010
6	玉溪地区	0.50	0.50	0.96	0.29	0.18	0.47	0.26	0.11	0.4462
7	红河州	0.86	0.69	0.46	0.41	0.60	0.91	0.66	0.37	0.7119
8	文山州	0.29	0.56	0.18	0.42	0.14	0.42	0.53	0.03	0.3164
9	思茅地区	0.28	0.00	0.23	0.36	0.41	0.36	1.00	0.10	0.3112
10	西双版纳州	0.19	0.38	0.10	0.29	0.18	0.33	0.49	0.44	0.2593
11	大理州	0.55	0.31	0.35	0.27	0.48	0.91	0.23	0.20	0.4817
12	保山地区	0.78	0.78	0.29	0.41	0.50	0.78	0.60	0.43	0.6484
13	德宏州	1.04	1.00	0.35	0.11	0.81	0.00	0.95	0.36	0.7455
14	丽江地区	0.51	0.47	0.29	0.43	0.16	0.00	0.36	0.14	0.3340
15	怒江州	0.68	0.50	0.00	1.00	1.00	0.00	0.52	0.97	0.5719
16	迪庆州	0.72	0.69	0.31	0.75	0.61	0.56	0.00	1.00	0.5752
17	临沧地区	0.62	0.75	0.28	0.34	0.18	0.80	0.49	0.42	0.5288



Ⅲ级危险区(显著危险):包括保山地区、迪庆州、怒江州、曲靖地区、临沧地区、昭通地区,区域泥石流危险度 0.6484—0.5210,面积 139 521km²,占全省面积的 35.40%。区域内主要泥石流沟 918 条,占全省总数为 51.40%,泥石流分布密度为 7 条/10³km²。建议加强监测预报,重点泥石流沟予以综合治理。

Ⅳ级危险区(中度危险):包括大理州、玉溪地区、楚雄州、昆明市、丽江地区,区域泥石流危险度 0.4817—0.3340。面积 111 163km²,占全省面积的 28.20%。区域内主要泥石流沟 529 条,占全省总数的 29.62%,泥石流分布密度为 5 条/10³km²。建议对重点泥石流沟予以综合治理,并密切监测其发展趋势。

Ⅴ级危险区(轻度危险):包括文山州、思茅地区、西双版纳州,区域泥石流危险度分别为 0.3164,0.3112,0.2593,面积 97 324km²,占全省面积的 24.69%。区域内主要泥石流沟 46 条,占全省总数的 2.58%,泥石流分布密度为 0.5 条/10³km²。建议加强区域内的水土保持,防止出现新的泥石流灾害。

应用泥石流相对分布密度直接进行泥石流危险区划,在云南全省以地州市为基本单元的实践中效果良好,区划结果与实际情况基本相符,可望进一步推广试用,将区域样本缩小(以县为基本单元),将工作做得更细。



第五章 泥石流危险性评价

第一节 应用实例

1. 四川省宁南县城史家沟泥石流危险性评价

史家沟为发源于宁南县城后山的一条泥石流支沟,海拔 2 600—2 800m。史家沟为宁南县主要河流黑水河的三级支流,该沟在县泥石流预警站处与吴家沟汇合后称羊圈沟,羊圈沟和县城后山的其它支沟汇入深沟,深沟向南注入黑水河。史家沟流域面积 1.64km^2 ,沟长 3.67km,主沟平均纵比降 31.4%。

(1) 泥石流灾害及其形成发展

1) 泥石流灾害

宁南县城座落在后山几条支沟的洪积和老泥石流堆积扇裙之上,泥石流这一自然营力早已存在,但有记载的泥石流灾害始于 1850 年。据《会理州志》卷十二记载,清道光三十年(1850 年)八月初七子时,披砂(现宁南县城)等处发生强烈地震,余震不断,地震期间发生暴雨山洪泥石流;羊圈沟(史家沟下游)洪水横流,冲毁街坊数十间,史称“水打坝”。清光绪二十年(1894 年)阴阳沟发生泥石流,冲老城街,毁南华宫、川主庙及部分民宅,人称“水打街子”。史家沟紧邻阴阳沟,也发生了山洪。1954 年雨季,羊圈沟(含史家沟)、阴阳沟、沈家沟同时发生山洪泥石流,县城东西两侧受灾较重,冲毁农田 420 亩,冲毁木桥一座和民房 26 间,损失达 50 余万元。

1985 年宁南后山泥石流第一期治理工程竣工后,当年 6 月县城一带降雨 359.2mm,占多年平均年降雨量的 37.1%,其中 $\geq 50\text{mm}$ 的暴雨也出现了 2 天。在此次暴雨过程激发下,阴阳沟内泥石流山洪来势最猛,但被大坝中途拦挡。羊圈沟(含史家沟)也发生了高含沙山洪,经排导槽泄洪畅通,未对两岸农田和城区造成危害。此后直到 1993 年后山各支沟未明显来泥石流,史家沟发生 2 次小型泥石流,但未成灾。根据泥石流发生特点和发生周期,史家沟属低频率泥石流沟。

2) 泥石流形成的固体物质条件

史家沟内可直接补给泥石流形成的松散固体物质储量以中游海拔 1 300—1 500m 的沟段内较为丰富,主要有三部分。

现代沟床堆积物:从沟口到海拔 1 500m 附近,长度约 400m。此段沟床新老泥石流堆积物较厚,两岸还残留一些老泥石流堆积堤,上部堆积体厚度达 5—6m,越往下方越薄,至山口处降至 1—2m,平均厚 3m,堆积体平均宽 10m,由此估算出此段沟床堆积体方量为 $1.2 \times 10^4 \text{m}^3$ 。海拔 1 500m 以上主沟床纵比降大,沟床内的堆积物少且较为稳定,堆积方量估算为 6 000—1 000 m^3 ,但一旦上游出现暴雨或大暴雨,仍有可能被山洪掀起形成泥石



流。

滑坡崩塌堆积物:史家沟中游有小型崩塌滑坡体4处,其中箐箕坝平台的前缘于1991年10月和1993年9月因连续大雨和暴雨两次向下滑动,并牵动山坡上的残坡积层形成泥石流。其它3处崩塌体很小,为谷坡表层剥离。崩滑体总方量估算约为 $3.6 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

山坡上的残坡积物:根据宁南县水土流失分布图,县城后山一带属中度—强度侵蚀区,侵蚀模数 $3\,750—6\,500 \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。随着后山封山育林,坡耕地减少,森林覆盖率不断增加,山坡的侵蚀模数还会降低。残坡积物主要为泥石流提供碎屑及细粒物质,并以“零存整取”的方式排入沟床,每年的泥砂方量约 $1\,000—2\,000 \text{m}^3$ 。

总之,史家沟内能直接提供给泥石流形成的松散固体物质储量不很大,总计约 $6 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

3) 泥石流发展趋势

对史家沟来说,地形和降雨条件相对较为稳定,而松散固体物的多寡却是个变量。如前所述,史家沟中游箐箕坝平台为一老滑坡体,其前缘正好属于史家沟中游,若有暴雨激发,滑坡复活,前缘向下滑动的可能性完全存在。因此,史家沟中游松散固体物质的主要来源没有减少的迹象,泥石流作为一种自然现象,不可能短期内消除。泥石流是否成灾有赖于防治效益能否长期保持。后山的泥石流工程和生物防治成效显著,1985年6月发生了泥石流和山洪但未能成灾即是最好的证明。史家沟山前的泥石流排导槽,全长 $1\,060 \text{m}$,直接伸入县城,根据设计能够保证泥石流和山洪的安全排泄。

今后防治工程重要的是养护问题,如经常疏浚清淤排导槽,维修堤坎,严禁往排导槽内倾倒土石、垃圾,严禁束窄过流断面等。若行政管理措施未跟上,维修经费不落实,无人管理、维修,泥石流也可能造成灾害。

(2) 泥石流危险性评价

1) 泥石流危险度

通过野外调查和室内工作,史家沟有关泥石流危险度的基础资料如下:

$$L_1 = 3.5 \times 10^4 \text{m}^3 \text{ [一次泥石流(可能)最大冲出量]}$$

$$L_2 = 13\% \text{ (泥石流发生频率)}$$

$$S_1 = 1.64 \text{km}^2 \text{ (流域面积)}$$

$$S_2 = 3.67 \text{km} \text{ (主沟长度)}$$

$$S_3 = 1.42 \text{km} \text{ (流域最大相对高差)}$$

$$S_6 = 3.0 \text{km}/\text{km}^2 \text{ (流域切割密度)}$$

$$S_7 = 1.27 \text{ (主沟床弯曲系数)}$$

$$S_9 = 0.25 \text{ (泥砂补给段长度比)}$$

$$S_{10} = 106.3 \text{mm} \text{ (24小时最大降雨量)}$$

$$S_{14} = 50 \text{人}/\text{km}^2 \text{ (流域内人口密度)}$$

查1994年修订的“泥石流危险因子等级及其赋值新表”(表1-10)后可得:

$$G_{L_1} = 0.2, G_{L_2} = 0.4, G_{S_1} = 0.2, G_{S_2} = 0.6, G_{S_3} = 0.8,$$



$$G_{S_6}=0.2, G_{S_7}=0.4, G_{S_8}=0.4, G_{S_{10}}=0.6, G_{S_{14}}=0.2。$$

根据泥石流危险度计算公式[式(1-9)],宁南县城史家沟泥石流危险度为:

$$R_d = 0.3587$$

由表 1-12 和表 1-13 可知,史家沟泥石流属轻度危险,各危险因子取值较小,组合欠佳,能够发生小规模低频率的泥石流,一般不会造成重大灾难和严重危害。防治对策主要以防为主,以治为辅。加强水土保持,保护生态环境,搞好群策群防,必要时按十年一遇标准辅以一定的工程治理。

2) 一次泥石流危险范围

通过野外考察,史家沟有关一次泥石流危险范围的基础资料如下:

$$V=5.2 \times 10^4 \text{m}^3 \text{ [一次松散固体物质(可能)最大补给量]}$$

$$r_c=2.24 \text{g/cm}^3 \text{ [泥石流(可能)最大容重]}$$

$$G=0.09 \text{ (堆积区纵比降)}$$

根据一次泥石流危险范围的预测模型[方程组(3-7)],宁南县城史家沟一次泥石流危险范围预测结果为:

$$a=21\,234.69 \text{m}^2 \text{ (一次泥石流危险范围)}$$

$$l=204.79 \text{m} \text{ (一次泥石流最大堆积长度)}$$

$$d=4.44 \text{m} \text{ (一次泥石流最大堆积厚度)}$$

根据一次泥石流危险范围平面形态的判定准则:当 $r_c \geq 1.8 \text{g/cm}^3$, $G > 0.875$ 时,危险范围为椭圆形。显然,史家沟一次泥石流危险范围为椭圆形。已知椭圆面积 a 和长轴 l ,可求出其短轴 $b=a/\pi l=33.02 \text{m}$ 。由此可作出史家沟一次泥石流危险范围平面预测图。

3) 泥石流最大危险范围

通过野外调查和室内工作,史家沟有关泥石流最大危险范围的基础资料如下:

$$A=1.64 \text{km}^2 \text{ (流域面积)}$$

$$W=6 \times 10^4 \text{m}^3 \text{ (松散固体物质储量)}$$

$$D=3.67 \text{km} \text{ (主沟长度)}$$

$$H=1.42 \text{km} \text{ (流域最大相对高差)}$$

根据泥石流最大危险范围的预测模型[方程组(3-15)],宁南县城史家沟泥石流最大危险范围预测结果为:

$$S=0.6413 \text{km}^2 \text{ (泥石流最大危险范围)}$$

$$L=0.8088 \text{km} \text{ (泥石流最大堆积长度)}$$

$$B=0.5579 \text{km} \text{ (泥石流最大堆积宽度)}$$

$$R=55.65^\circ \text{ (泥石流堆积幅角)}$$

据此可作出史家沟泥石流最大危险范围平面预测图。

2. 云南省巧家县城白泥沟泥石流危险性评价

白泥沟为云南省巧家县城东南 3km 处的一条泥石流沟。白泥沟发源于巧家县城东侧的后山,沟源处海拔 2 120m。白泥沟和黑泥沟在大沙坝下方汇合后称吊洞沟,向西南方向汇入金沙江,属金沙江的二级支流。白泥沟流域面积 5.26km^2 ,汇水区面积 4km^2 ,泥石流



形成区面积 0.4km^2 , 堆积区面积 0.86km^2 , 山口以上沟长 4.1km , 平均纵比降 29.3% 。

(1) 泥石流灾害及其形成发展

1) 泥石流灾害

白泥沟泥石流的形成年代较为久远, 现代泥石流仍很活跃。据《云南省志》记载, 清乾隆十八年(1753年)以前, 白泥沟下游一带称米粮坝, 还是巧家县城所在地, 有居民 200 余户, 良田 2 000 亩, 盛产稻谷, 当时的白泥沟为发生频率较低的老泥石流沟。清乾隆十八年七月, 白泥沟发生一场大型泥石流, 将县城冲毁, 县城被迫迁至现址, 自此白泥沟泥石流一发不可收拾, 发展成很活跃的现代泥石流沟。经二百余年来的淤积, 原来富饶的米粮坝被淤埋成面积达 0.86km^2 (合 1290 亩) 的大沙坝。淤积物以堆积扇顶部较厚, 往外缘渐薄, 厚度 $60\text{—}30\text{m}$, 堆积扇体积总量约 $2.58 \times 10^7\text{m}^3$, 平均年堆积量为 $1.1 \times 10^5\text{m}^3$ 。

大沙坝属巧家县莲塘乡, 每次发生泥石流还要侵害和蚕蚀大沙坝下游的耕地和农田。据县水土保持站调查, 1972—1985 年的 14 年间, 白泥沟泥石流共成灾 7 次, 共冲毁或淤埋农耕地 115.2 亩, 甘蔗损失 8.65 万公斤, 并冲毁河堤、引洪沟等。根据发生特点和周期, 白泥沟泥石流平均 2—3 年发生一次, 属于中高频率的泥石流沟。

现代, 白泥沟于 1985 年 6 月、1987 年 9 月、1989 年 10 月 16 日发生过三次泥石流, 其中以 1985 年 6 月的泥石流规模较大, 流量达 $300\text{m}^3/\text{s}$, 历时 1 小时多, 冲出泥砂石块近 $2 \times 10^5\text{m}^3$, 泥石流阵性明显, 容重达 $2.0\text{—}2.2\text{g}/\text{cm}^3$, 现在拱坝前尚存的 5 块直径达 $3\text{—}6\text{m}$ 的石灰岩大漂砾就是这场泥石流携带到堆积扇上的。从泥石流性质和物质组成来看, 粘粒和细颗粒物含量较多, 属典型粘性泥石流^[130]。

1993 年 9 月 27 日白泥沟又发生一次中等规模的泥石流, 根据白泥沟口降雨观测哨当日降雨资料分析, 此次泥石流属短历时高强度的暴雨激发形成。前期降雨很少, 9 月 26 日仅有 0.3mm , 27 日凌晨 1 时 50 分至上午 9 时, 全过程降雨量 61.5mm , 最大 1 小时降雨量(4 时 30 分—5 时 0 分)达 40.6mm , 最大 10 分钟降雨量(5 时—5 时 10 分)为 20.2mm , 泥石流在降雨过程峰值稍滞后的 5 时 40 分发生。泥石流性质为粘性, 堆积物以块石、碎屑、亚粘土及粘土为主, 混杂有许多泥球。此次泥石流将 0[#]坝淤满并翻坝冲垮了排导槽, 淤埋了下游 10 余亩稻田。据估算, 坝内堆积量为 $3.6 \times 10^5\text{m}^3$ 。

2) 泥石流形成的固体物质条件

白泥沟中游的谷坡稳定性很差, 松散土石体储量丰富, 主要集中在海拔 $920\text{—}1\,200\text{m}$ 之间的沟段内, 主要有以下三部分。

滑坡和崩塌体: 白泥沟内松散固体物质的重要来源为滑坡和谷坡崩塌, 其沟道左右两侧各有一个大型顺层滑坡, 滑坡体积约为 $5.0 \times 10^6\text{m}^3$, 滑坡每年下滑水平距离达 $10\text{—}20\text{m}$, 为泥石流提供大量的土石体。白泥沟在 3[#]坝以上分左右两支, 沟壁陡峻并有多处跌水, 在强暴雨激发下谷坡坍塌也为泥石流提供部分土石体。

山坡上的残坡积物: 白泥沟上游出露的岩石坚硬, 为厚层灰岩、玄武岩, 沟坡稳定, 土层瘠薄, 残坡积物为物理风化形成的大型块石。残坡积物主要分布在中游地带, 残坡积层较厚, 为红色粘土夹碎石、块石, 结构松散, 部分地段呈半胶结状态。

白泥沟沟口以上面积 4.4km^2 , 有松散的崩塌滑坡体、残坡积物总量 $5.37 \times 10^6\text{m}^3$ 。中游的松散土石体厚度平均达 $10\text{—}15\text{m}$, 其中以滑坡体处最厚。



现代沟床堆积物:因 1990 年在白泥沟口建成 0[#] 拱形拦砂坝,沟床堆积物分为坝上和坝下两部分。现坝上库容已淤满,土石体为 $7.6 \times 10^5 \text{m}^3$ 。今后若再发生泥石流,将会翻坝而下,对坝下造成强烈侵蚀。坝下堆积扇的两侧位置较高,经过治理已相对较稳定,能够重新启动并有可能成为山洪或泥石流的主要是坝下和排导槽内的土石体,堆积方量有 $5 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

3) 泥石流发展趋势

白泥沟是一条仍处在旺盛期的泥石流沟,谷坡很不稳定,沟内松散的土石体储量还很丰富,泥石流活动无减弱迹象。治理后的前 7 年,平均每隔一二年来一次泥石流,1990 年沟口修建了拦砂坝,1992 年 7 月 4 日砂坝降雨观测哨日降雨量为 63.6mm,中游杜家湾的日降雨量为 72.4mm,均达到暴雨量级,按常规要来泥石流但实际并未发生泥石流。1993 年砂坝的日降雨量为 61.5mm,又发生了中等规模的泥石流。所以我们认为,对白泥沟来说,在松散的土石体同样都很丰富的条件下,泥石流发生与否的决定因素是降雨强度。

总的来看,白泥沟的泥石流治理已取得了明显效果,下游大砂坝两侧的植物、农耕措施发挥了良好的生态与经济效益,拦砂坝内已阻拦大量泥石流上石体,灾害有所减轻。但是流域内泥石流形成的环境条件未变,中上游的森林、灌丛植被仍处在恢复中,覆盖率低,坡面和沟谷侵蚀量仍很大,一旦遭遇暴雨或大暴雨,泥石流作为一种突发性地貌过程将继续产生。

今后白泥沟内泥石流能否成灾和成灾的大小将决定于泥石流工程的质量与配套。如果拦砂坝、排导槽、排洪沟等工程质量好,运转正常,经常能维护检查,而且拦砂坝有稳定滑坡脚的功能,拦砂坝满库后整层为粘性泥石流堆积物,过流较为安全^[68],这样白泥沟的泥石流灾害将会逐渐减轻。如果工程质量差,特别是拦砂坝,坝基背水面会遭到泥石流大石块的打击和剧烈侵蚀,万一坝脚被蚀空,就有可能垮坝并造成更大规模的溃决型泥石流。

(2) 泥石流危险性评价

1) 泥石流危险度

通过野外调查和室内工作,白泥沟有关泥石流危险度的基础资料如下:

$L_1 = 24 \times 10^4 \text{m}^3$ [一次泥石流(可能)最大冲出量]

$L_2 = 35\%$ (泥石流发生频率)

$S_1 = 5.26 \text{km}^2$ (流域面积)

$S_2 = 4.1 \text{km}$ (主沟长度)

$S_3 = 1.2 \text{km}$ (流域最大相对高差)

$S_6 = 3.2 \text{km/km}^2$ (流域切割密度)

$S_7 = 1.18$ (主沟床弯曲系数)

$S_9 = 0.24$ (泥砂补给段长度比)

$S_{10} = 109.9 \text{mm}$ (24 小时最大降雨量)

$S_{14} = 340 \text{人/km}^2$ (流域内人口密度)

查 1994 年修订的“泥石流危险因子等级及其赋值新表”(表 1-10)后可得:



$$G_{L_1}=0.6, G_{L_2}=0.6, G_{S_1}=0.6, G_{S_2}=0.6, G_{S_3}=0.8,$$

$$G_{S_6}=0.2, G_{S_7}=0.2, G_{S_8}=0.4, G_{S_{10}}=0.6, G_{S_{14}}=1.$$

根据泥石流危险度计算公式[式(1-9)],巧家县城白泥沟泥石流危险度为:

$$R_d = 0.5675$$

由表 1-12 和表 1-13 可知,白泥沟泥石流属中度危险,个别因子取值较大,组合尚可,能够间歇性发生中等规模的泥石流,较易由工程治理所控制,较少造成重大灾难和严重危害。防治对策主要以治为主,以防为辅。实施生物和土建工程综合治理即可抑制泥石流的发生发展,必要时可建立预警避难系统,避免一切不必要的灾害损失。防治工程可按 20 年一遇标准设计。

2) 一次泥石流危险范围

通过野外考察,白泥沟有关一次泥石流危险范围的基础资料如下:

$$V=107.4 \times 10^3 \text{m}^3 \text{ [一次松散固体物质(可能)最大补给量]}$$

$$r_c=2.2 \text{g/cm}^3 \text{ [泥石流(可能)最大容重]}$$

$$G=0.085 \text{ (堆积区纵比降)}$$

根据一次泥石流危险范围的预测模型[方程组(3-7)],巧家县白泥沟一次泥石流危险范围预测结果为:

$$a=154343.88 \text{m}^2 \text{ (一次泥石流危险范围)}$$

$$l=552.13 \text{m} \text{ (一次泥石流最大堆积长度)}$$

$$d=12.68 \text{m} \text{ (一次泥石流最大堆积厚度)}$$

根据一次泥石流危险范围平面形态的判定准则:当 $r_c \geq 1.8 \text{g/cm}^3$, $G \leq 0.0875$ 时,危险范围为圆形(准圆形)。显然,白泥沟一次泥石流危险范围为圆形。已知圆面积 a ,可求出圆半径 $r = \sqrt{a/\pi} = 221.71 \text{m}$ 。由此可作出白泥沟一次泥石流危险范围平面预测图。

3) 泥石流最大危险范围

通过野外调查和室内工作,白泥沟有关泥石流最大危险范围的基础资料如下:

$$A=5.26 \text{km}^2 \text{ (流域面积)}$$

$$W=618 \times 10^4 \text{m}^3 \text{ (松散固体物质储量)}$$

$$D=4.1 \text{km} \text{ (主沟长度)}$$

$$H=1.2 \text{km} \text{ (流域最大相对高差)}$$

根据泥石流最大危险范围的预测模型[方程组(3-15)],巧家县城白泥沟泥石流最大危险范围预测结果为:

$$S=0.7485 \text{km}^2 \text{ (泥石流最大危险范围)}$$

$$L=0.8344 \text{km} \text{ (泥石流最大堆积长度)}$$

$$B=0.5783 \text{km} \text{ (泥石流最大堆积宽度)}$$

$$R=53.13^\circ \text{ (泥石流堆积幅角)}$$

据此可作出白泥沟泥石流最大危险范围平面预测图。



第二节 技术要点

1. 泥石流危险度

(1) 定义

泥石流危险度是指在沟谷流域内所存在的一切人和物有遭到泥石流损害的可能性大小,其中一切人和物指各种生命、财产和自然资源,包括人、动物(家禽、牲畜、野生动物)、公私财产(家私、房屋、公共交通、通讯设施等)和自然资源(土地、森林、水域等)。若无具体说明,泥石流危险度即沟谷泥石流危险度的简称。

(2) 计算公式

$$R_d = 0.2353G_{L_1} + 0.2353G_{L_2} + 0.1176G_{S_1} + 0.0882G_{S_2} + 0.0735G_{S_3} \\ + 0.1029G_{S_6} + 0.0147G_{S_7} + 0.0588G_{S_9} + 0.0441G_{S_{10}} + 0.0294G_{S_{14}}$$

式中 R_d 为泥石流危险度 ($0 \leq R_d \leq 1$); G_{L_1} 为一次泥石流(可能)最大冲出量的赋值; G_{L_2} 为泥石流发生频率的赋值; G_{S_1} 为流域面积的赋值; G_{S_2} 为主沟长度的赋值; G_{S_3} 为流域最大相对高差的赋值; G_{S_6} 为流域切割密度的赋值; G_{S_7} 为主沟床弯曲系数的赋值; G_{S_9} 为泥砂补给段长度比的赋值; $G_{S_{10}}$ 为 24 小时最大降雨量的赋值; $G_{S_{14}}$ 为流域内人口密度的赋值。

(3) 泥石流危险因子等级及其赋值

表 5-1 泥石流危险因子等级及其赋值表

L_1 G_{L_1}	≤ 1 0	(1)—5 0.2	(5)—10 0.4	(10)—50 0.6	(50)—(100) 0.8	≥ 100 1	$10^4 m^3$
L_2 G_{L_2}	≤ 5 0	(5)—10 0.2	(10)—20 0.4	(20)—50 0.6	(50)—(100) 0.8	≥ 100 1	%
S_1 G_{S_1}	≥ 50 或 ≤ 0.5 0	(0.5)—2 0.2	(2)—5 0.4	(5)—10 0.6	(10)—30 0.8	(30)—(50) 1	km^2
S_2 G_{S_2}	≤ 0.5 0	(0.5)—1 0.2	(1)—2 0.4	(2)—5 0.6	(5)—(10) 0.8	≥ 10 1	km
S_3 G_{S_3}	≤ 0.2 0	(0.2)—0.5 0.2	(0.5)—0.7 0.4	(0.7)—1.0 0.6	(1.0)—(1.5) 0.8	≥ 1.5 1	km
S_6 G_{S_6}	≤ 2 0	(2)—5 0.2	(5)—10 0.4	(10)—15 0.6	(15)—(20) 0.8	≥ 20 1	km/km^2
S_7 G_{S_7}	≤ 1.1 0	(1.1)—1.2 0.2	(1.2)—1.3 0.4	(1.3)—1.4 0.6	(1.4)—(1.5) 0.8	≥ 1.5 1	
S_9 G_{S_9}	≤ 0.1 0	(0.1)—0.2 0.2	(0.2)—0.3 0.4	(0.3)—0.4 0.6	(0.4)—(0.6) 0.8	≥ 0.6 1	
S_{10} $G_{S_{10}}$	≤ 50 0	(50)—75 0.2	(75)—100 0.4	(100)—125 0.6	(125)—(150) 0.8	≥ 150 1	mm
S_{14} $G_{S_{14}}$	≤ 20 0	(20)—50 0.2	(50)—100 0.4	(100)—150 0.6	(150)—(200) 0.8	≥ 200 1	人/ km^2

注: () 表示不包含括号中的数值。



(4) 应用范围、可靠度和特点

可应用于我国西南山区暴雨泥石流沟谷和有可能发生暴雨泥石流的沟谷。判定结果的可靠度(准确率)约 90%。判定结果具有绝对可比性。

(5) 我国西南山区沟谷暴雨泥石流危险度判定表(表 5-2)

表 5-2 我国西南山区沟谷暴雨泥石流危险度判定表

编号		沟名		沟口经纬度	N
沟口经度	E	所属县(市)		所属省(区)	
一次泥石流(可能)最大冲出量 L_1 :				10^4m^3	赋值 GL_1 :
泥石流发生频率 L_2 :				%	赋值 GL_2 :
流域面积 S_1 :				km^2	赋值 GS_1 :
主沟长度 S_2 :				km	赋值 GS_2 :
流域最大相对高差 S_3 :				km	赋值 GS_3 :
流域切割密度 S_4 :				km/km^2	赋值 GS_4 :
主沟床弯曲系数 S_5 :					赋值 GS_5 :
泥沙补给段长度比 S_6 :					赋值 GS_6 :
24 小时最大降雨量 S_{10} :				mm	赋值 GS_{10} :
流域内人口密度 S_{14} :				人/ km^2	赋值 GS_{14} :
泥石流危险度 $R_d =$					
填表人:			填表日期: 年 月 日		

填表说明:

①通过现场调查或文献检索,获取 L_1 ;未发生过泥石流的取 $L_1=0$;也可由下式间接求算:

$$L_1 = -2 + 0.26S_1 + 0.41S_4 + 0.0021S_8$$

式中 S_8 为流域内松散固体物质储量(10^4m^3);其它符号见判定表。

②通过现场调查或文献检索,获取 L_2 ;未发生过泥石流的取 $L_2=0$;也可由下式间接求算:

$$L_2 = -80.6596 - 2.8302S_1 + 12.138S_4 + 0.0209S_8$$

式中符号同上式。

③通过地形图量算或野外实地测量,获取 $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ 。

④通过实测记录、文献检索或水文手册,获取 S_{10} 。

⑤通过实地调查或村民组、村公所和乡、区、县政府统计部门,获取 S_{14} 。



2. 泥石流危险范围

(1) 定义

泥石流危险范围是指有可能遭到泥石流损害的区域。广义的泥石流危险范围包括泥石流形成区、流通区和堆积区;狭义的泥石流危险范围仅指泥石流堆积区。若无特别说明,泥石流危险范围即指狭义的泥石流危险范围。

(2) 一次泥石流危险范围

① 预测模型

$$\begin{cases} a = 0.4935l^2 \\ l = 2.5748(V \cdot G \cdot r_c / \ln r_c)^{1/3} \\ d = 0.254[V \cdot r_c / (G^2 \cdot \ln r_c)]^{1/3} \end{cases}$$

式中 a 为一次泥石流危险范围(m^2); l 为一次泥石流最大堆积长度(m); d 为一次泥石流最大堆积厚度(m); V 为一次泥石流松散固体物质(可能)最大补给量(m^3); G 为堆积区坡度($^\circ$); r_c 为泥石流(可能)最大容重(g/cm^3)。当 $r_c=1$ 和 $G=0$ 时,预测模型不能使用。

② 平面形态判定准则

当 $r_c \geq 1.8g/cm^3$, 且 $G \leq 5^\circ$ 时,危险范围平面形态为圆形(准圆形);

当 $r_c \geq 1.8g/cm^3$, 且 $G > 5^\circ$ 时,危险范围平面形态为椭圆形;

当 $r_c < 1.8g/cm^3$ 时,危险范围平面形态为长方形(长条形)。

③ 预测精度

a 的平均相对误差为 17.84%; l 的平均相对误差为 9.5%; d 的平均相对误差为 7.8%。

(3) 泥石流最大危险范围

① 预测模型

$$\begin{cases} S = 0.6667L \cdot B - 0.0833B^2 \cdot \sin R / (1 - \cos R) \\ L = 0.8061 + 0.0015A + 0.000033W \\ B = 0.5452 + 0.0034D + 0.000031W \\ R = 47.8296 - 1.3085D + 8.8876H \end{cases}$$

式中 S 为泥石流最大危险范围(km^2); L 为泥石流最大堆积长度(km); B 为泥石流最大堆积宽度(km); R 为泥石流堆积幅角($^\circ$); A 为流域面积(km^2); W 为松散固体物质储量(10^4m^3); D 为主沟长度(km); H 为流域最大相对高差(km)。

② 危险范围平面预测图

判断泥石流出沟口后正常情况下的可能流动方向,标一直线;

以该直线为 $\angle R$ 平分线,以沟口为 $\angle R$ 顶点,绘出 $\angle R$ 的两边;

在 $\angle R$ 平分线上取 L 为泥石流最大堆积长度,垂直于 $\angle R$ 平分线取 B 为泥石流最大堆积宽度;

以 L 为长, B 为宽作一矩形,这样构成的等腰三角形与矩形的结合即为泥石流最大危险范围平面预测图。



③预测精度

S 的平均相对误差为 27.94%; L 的平均相对误差为 15.62%; B 的平均相对误差为 22.12%; R 的平均相对误差为 10.62%。

(4) 我国西南山区沟谷暴雨泥石流危险范围预测表(表 5-3)

表 5-3 我国西南山区沟谷暴雨泥石流危险范围预测表

编号		沟名		沟口纬度	N
沟口经度	E	所属县(市)		所属省(区)	
一次松散固体物质(可能)最大补给量 V :		m^3		流域面积 A : km^2	
泥石流(可能)最大容重 r_c :		g/cm^3		松散固体物质储量 W : $10^4 m^3$	
堆积区坡度 G :		$^\circ$		主沟长度 D : km	
一次泥石流危险范围 a :		m^2		流域最大相对高差 H : km	
一次泥石流最大堆积长度 l :		m		泥石流最大危险范围 S : km^2	
一次泥石流最大堆积厚度 d :		m		泥石流最大堆积长度 L : km	
一次泥石流危险范围平面形态(在□内打√)				泥石流最大堆积宽度 B : km	
圆形□ 椭圆形□ 长方形□				泥石流堆积幅角 R : $^\circ$	
填表人:			填表日期: 年 月 日		

填表说明:

①通过现场考察和勘测,计算或估算,获取 V, r_c, G, W 。

②通过地形图量算或野外实地测量,获取 A, D, H 。

3. 泥石流危险区划

(1) 定义和特点

泥石流危险区划是根据区域泥石流危险度划分出各区域泥石流危险等级的方法。其特点是分区结果和危险等级具有相对意义而不具有绝对可比性。

(2) 泥石流危险区划定量指标

y : 泥石流分布密度(条/ $10^3 km^2$),实地考察或航空像片判读获取。

x_1 : 岩石风化程度系数的倒数,即 K_y 值的倒数,新生代和中生代岩石的 $K_y=0.6$,古生代和元古代岩石的 $K_y=0.5$,岩石出露面积为权重,从地质图上量算获取。

x_3 : 断裂带密度($km/10^3 km^2$),从地质图上量算获取。

x_5 : $\geq 25^\circ$ 坡地面积百分比(%),从各级政府统计部门或国土办公室和区划办公室获取。

x_8 : 洪灾发生频率(%),洪灾次数和可能出现的洪灾次数均可从气象部门和水利部门获取。

x_9 : 月降雨量变差系数(小数),即 C_v ,从气象部门获取历年各月降雨量,然后按下式计算 C_v 。



$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} / \bar{X}$$

式中 X_i 为各月降雨量(mm); \bar{X} 为全年月平均降雨量(mm); $i=1, 2, \dots, 12; n=12$ 。

x_{11} : 年平均 $\geq 25\text{mm}$ 大雨日数(日), 从气象部门获取。

x_{16} : $\geq 25^\circ$ 坡耕地面积百分比(%), 从各级政府统计部门获取。

(3) 区域泥石流危险度计算公式

$$R_i = 0.3333y'_i + 0.1429x'_{i1} + 0.0952x'_{i3} + 0.0238x'_{i6} \\ + 0.1667x'_{i8} + 0.1191x'_{i9} + 0.0714x'_{i11} + 0.0476x'_{i16}$$

式中 R_i 为第 i 区域的区域泥石流危险度($0 \leq R_i \leq 1$); y'_i 为第 i 区域泥石流分布密度极差变换后的数值; x'_{i1} 为第 i 区域岩石风化程度系数的倒数极差变换后的数值; x'_{i3} 为第 i 区域断裂带密度极差变换后的数据; x'_{i6} 为第 i 区域 $\geq 25^\circ$ 坡地面积百分比极差变换后的数值; x'_{i8} 为第 i 区域洪灾发生频率极差变换后的数值; x'_{i9} 为第 i 区域月降雨量变差系数极差变换后的数值; x'_{i11} 为第 i 区域年平均 $\geq 25\text{mm}$ 大雨日数极差变换后的数值; x'_{i16} 为第 i 区域 $\geq 25^\circ$ 坡耕地面积百分比极差变换后的数值。

y'_i 的间接求算公式为:

$$y'_i = -1.6571 + 2.0135 \log(6x'_{i1} + 4x'_{i3} + x'_{i6} + 7x'_{i8} + 5x'_{i9} + 3x'_{i11} + 2x'_{i16})$$

式中符号同上式。

极差变换公式为:

$$x'_{ij} = (x_{ij} - \min x_{ij}) / (\max x_{ij} - \min x_{ij})$$

式中 x'_{ij} 为极差变换后的数值; x_{ij} 为极差变换前的数值; $\min x_{ij}$ 为 x_{ij} 中的最小值; $\max x_{ij}$ 为 x_{ij} 中的最大值; i 为区域样本序号, $i=1, 2, \dots, m$; m 为区域样本数; j 为定量指标序号, $j=1, 3, 6, 8, 9, 11, 16$ 。

(4) 泥石流危险区划分级标准(表 5-4)

表 5-4 泥石流危险区划分级标准

区域泥石流危险度	危险性评价	区域泥石流危险等级
0.8334 ~ 1	极度危险	I 级危险区
(0.6666) ~ (0.8334)	高度危险	II 级危险区
(0.4999) ~ 0.6666	显著危险	III 级危险区
(0.3333) ~ 0.4999	中度危险	IV 级危险区
(0.1666) ~ 0.3333	轻度危险	V 级危险区
0 ~ 0.1666	无危险	无危险区

注: () 表示不包含括号中的数值。



参 考 文 献

- [1] 中国社会科学院语言研究所词典编辑室, 现代汉语词典, 商务印书馆, 1979, 1180。
- [2] 牛志仁, 关于灾害系统的若干问题, 灾害学, 5(3), 1990, 1-5。
- [3] 王 锋, 要重视承灾体的考察研究, 灾害学, 6(3), 1991, 86-88。
- [4] 陈光曦、王继康、王林海, 泥石流防治, 中国铁道出版社, 1983, 45-47。
- [5] 金晓冬、罗 云, 区域社会经济“易灾性”综合评价实践, 灾害学, 8(4), 1993, 1-5。
- [6] 刘 季、阎维明, 防灾工程动态投资决策方法初探, 自然灾害学报, 1(2), 1992, 21-33。
- [7] Petak, W. J., Atkisson, A. A. 著, 向立云、程晓陶等译, 自然灾害风险评价与减灾政策, 地震出版社, 1993, 1-263。
- [8] 黄崇福、史培军、张远明, 城市自然灾害风险评价的一级模型, 自然灾害学报, 3(1), 1994, 1-8。
- [9] 唐 越、方鸿琪, 城市地质灾害的风险模型, 中国地质灾害与防治学报, 3(4), 1992, 54-61。
- [10] 萧焕雄、陆采燕, 江河防洪系统年超标洪水风险率模型研究, 自然灾害学报, 2(1), 1993, 24-32。
- [11] 向立云, 洪水风险分析及近期防洪策略, 灾害学, 7(3), 1992, 79-83。
- [12] 刘树坤、沈振明, 利用洪水风险图指导洪泛区及城市建设, 灾害学, 6(4), 1991, 26-31。
- [13] 李小佩、刘树坤, 辽河中下游流域洪水风险分析, 中国减轻自然灾害研究·全国减轻自然灾害研讨会论文集(1990), 中国科学技术出版社, 1990, 91-102。
- [14] 游 勇, 泥石流风险率分析及应用, 首届全国泥石流滑坡防治学术会议论文集, 云南科技出版社, 1993, 30-34。
- [15] 姚令侃, 泥石流防治中的风险分析, 首届全国泥石流滑坡防治学术会议论文集, 云南科技出版社, 1993, 108-113。
- [16] 姚令侃, 计算机模拟在泥石流区选线风险分析中的作用, 中国地质灾害与防治学报, 4(4), 1993, 19-26。
- [17] 郑功成, 论科技风险与减灾, 灾害学, 8(3), 1993, 16-21。
- [18] 郑功成, 论计算机事故风险, 灾害学, 9(1), 1994, 31-33。
- [19] 林善辉, 自然灾害与风险管理, 灾害学, 6(22), 1991, 84-87。
- [20] 马宗晋、李闯锋, 自然灾害评估、灾度和对策, 中国减轻自然灾害研究·全国减轻自然灾害研讨会论文集(1990), 中国科学技术出版社, 1990, 11-19。
- [21] 孙振凯、毛国敏、邹其嘉, 自然灾害灾情划分指标研究, 灾害学, 9(2), 1994, 84-87。
- [22] 张 梁、张业成、张春山, 中国地质灾害综合灾度计算及分区, 中国地质灾害与防治学报, 4(1), 1993, 1-8。
- [23] 于庆东, 灾度等级判别方法的局限性及其改进, 自然灾害学报, 2(2), 1993, 8-10。
- [24] 高庆华, 关于建立自然灾害评估系统的总体构思, 灾害学, 6(3), 1991, 14-18。
- [25] 刘 季、阎维明, 关于防灾工程的投资决策问题, 灾害学, 8(1), 1993, 1-5。
- [26] 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, 2(3), 1993, 1-7。
- [27] 足立胜治、德山久仁夫、中筋章人、中山致一、二宫寿男、大八木俊治, 土石流发生危险度の判定にフやて, 新砂防, 30(3), 1977, 7-16。
- [28] 久保田哲也、正务章、板垣昭彦, 流域の任意地点における短時間降雨予測手法と土石流发生危险度判定图の開発, 新砂防, 42(6), 1990, 11-17。
- [29] 高桥保、中川一、佐藤宏章, 扇状地における土砂泛滥灾害危险度の评价, 京都大学防灾研究所年报, 31(B-2), 1988, 655-676。
- [30] Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Pasqui, V., Peichenbach, P., GIS Techniques and Statistical Models in Evaluating Landslide Hazard, EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS, 16, 1991, 427-445。
- [31] Eldeen, M. T., Predisaster Physical Planning: Integration of Disaster Risk Analysis into Physical Planning—A Case Study in Tunisia, DISASTERS, 4(2), 1980, 211-222。
- [32] Alexander, D., Natural Disasters: A Framework for Research and Teaching, DISASTERS, 15(3), 1991, 209-



226.

- [33] 谭炳炎, 泥石流沟严重程度的数量化综合评判, 水土保持通报, 6(1), 1986, 51—57。
- [34] 谭炳炎、靳 蕃、荆绍华, 泥石流沟的判别方法和数量化综合评判, 泥石流防治理论与实践, 西南交通大学出版社, 1991, 45—71。
- [35] 艾南山、张林源、符廷全, 泥石流活动性的一种判别方法, 铁道工程学报, (4), 1986, 56—59。
- [36] 岳天祥、艾南山、张英保, 论流域系统稳定性的判别指标——超熵, 水土保持学报, 3(2), 1989, 20—28。
- [37] 蒋忠信, 泥石流流域系统的超熵, 中国地质灾害与防治学报, 3(1), 1992, 33—40。
- [38] 蒋忠信, 西南山区暴雨泥石流沟简易判别方案, 自然灾害学报, 3(1), 1994, 75—83。
- [39] 罗 云, 灾害评价初探, 灾害学, 2(3), 1987, 10—14。
- [40] 唐晓春、唐邦兴, 我国灾害地貌及其防治研究中的几个问题, 自然灾害学报, 3(1), 1994, 70—74。
- [41] 刘希林, 泥石流危险度判定的研究, 灾害学, 3(3), 1988, 10—15。
- [42] 谢又予、伍永秋, 北京密云县泥石流危险区及沟谷危险度的初步研究, 首都圈自然灾害与减灾对策, 气象出版社, 1991, 166—170。
- [43] 苏经宇、周锡文、樊水荣, 泥石流危险等级评价的模糊数学方法, 自然灾害学报, 2(2), 1993, 83—90。
- [44] 杨发相、穆桂金、陈亚宁、乔 木、李卫红、韩 丹, 天山阿拉沟泥石流沟危险度的划分研究, 干旱区地理, 14(增刊), 1991, 90—98。
- [45] 徐瑞瑚、杨礼茂, 巴东信陵镇泥石流的危险度判别, 中国地质灾害与防治学报, 4(1), 1993, 69—73。
- [46] 刘希林、唐 川、张松林, 中国山区沟谷泥石流危险度的定量判定法, 灾害学, 8(2), 1993, 1—7。
- [47] 刘希林、张松林、唐 川, 沟谷泥石流危险度评价研究, 水土保持学报, 7(2), 1993, 20—25。
- [48] 刘希林、张松林、唐 川, 中国西南山区沟谷暴雨泥石流危险度判定的基本原理和方法, 云南地理环境研究, 5(2), 1993, 62—70。
- [49] 王静爱、史培军、朱 骊, 中国主要自然致灾因子的区域分异, 地理学报, 49(1), 1994, 18—25。
- [50] 邓聚龙, 灰色系统基本方法, 华中理工大学出版社, 1987, 73—81。
- [51] 姚令侃, 降雨泥石流形成要素的分析, 水土保持通报, 7(2), 1987, 34—40。
- [52] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 泥石流研究与防治, 四川科学技术出版社, 1989, 1—77。
- [53] 刘希林, 灰色模型和回归分析在泥石流预测中的应用——以蒋家沟泥石流年输沙量预测为例, 灾害学, 4(2), 1989, 26—30。
- [54] 张铭文、王学萌、聂宏声, 农村经济灰色系统分析模型、方法、应用, 学术期刊出版社, 1989, 234—235。
- [55] Hung, O., Moran, G. C., Quantitative Analysis of Debris Torrent Hazards for Design of Remedial Measures, CANADIAN GEOTECHNICAL JOURNAL, 21, 1984, 663—677。
- [56] Johnson, P. A., McCuen, R. H., Hromadka, T. V., Debris Basin Policy and Design, JOURNAL OF HYDROLOGY, 123, 1991, 83—95。
- [57] C. M. 弗莱施曼著, 姚德基译, 泥石流, 科学出版社, 1986, 84—99。
- [58] 水山高久、下东久巳, 土石流崩状地の地形と土石流の堆积泛滥, 新砂防, 37(5), 1985, 11—19。
- [59] 水山高久、北原一平、原义文, 土石流泛滥シミュレーションモデルによる土石流対策エの效果评价, 新砂防, 40(5), 1988, 14—21。
- [60] 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, A(泥石流), 1991, 27—31。
- [61] Steijn, V. H., Coutard, P. J., Laboratory Experiments with Small Debris Flows: Physical Properties Related to Sedimentary Characteristics, EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS, 14, 1989, 587—596。
- [62] Zimmermann, M., Formation of Debris Flow Cones: Results from Model Tests, JAPAN—U. S. WORKSHOP ON SNOW AVALANCHE, LANDSLIDE, DEBRIS FLOW PREDICTION AND CONTROL, Proc. JUWSLD-PC, 1991, 463—470。
- [63] Whipple, X. K., Predicting Debris-flow Runout and Deposition on Fans: the Importance of the Flow Hydrograph, EROSION, DEBRIS FLOWS AND ENVIRONMENT IN MOUNTAIN REGIONS (Proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992), IAHS Publ., 209, 1992, 337—345。
- [64] Iverson, M. R., Costa, E. J., Lahusen, G. R., Large-scale Debris-Flow Flume Becomes Operational in Oregon, USA, LANDSLIDE NEWS, 7, 1993, 29—30。
- [65] 王兆印、张新玉, 水流冲刷沉积物生成泥石流的条件及运动规律的试验研究, 地理学报, 44(3), 1989, 291—301。
- [66] 崔 曙, 泥石流起动条件及机理的试验研究, 科学通报, (21), 1991, 1650—1652。
- [67] 孟河清, 大秦铁路化石沟泥石流模型试验, 泥石流防治理论与实践, 西南交通大学出版社, 1991, 161—170。



- [68] 周必凡、李德基、罗德富、吕儒仁、杨庆溪, 泥石流防治指南, 科学出版社, 1991, 98—108。
- [69] 池谷浩、米尺谷、诚悦, 土石流危险区域的设定に関する研究(第二报), 土木技术资料, 21(9), 1979, 46—50。
- [70] 高桥保, 土石流的堆积危险范围的预测, 第17回自然灾害科学总合シンポジウム, 1980, 133—148。
- [71] 水山高久、渡边正幸、上原信司, 土石流的堆积形状, 第17回自然灾害科学总合シンポジウム, 1980, 169—172。
- [72] 高桥保、中川一、山路昭彦, 土石流泛滥危险范围的指定法に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 30(B—2), 1987, 611—625。
- [73] 山下佑一、石川芳治, 土石流的直击を受ける范围の设定, 新砂防, 44(2), 1991, 22—25。
- [74] 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, 云南科技出版社, 1993, 6—11。
- [75] Hung, O., Morgan, C. G., Vandine, F. D., Lister, R. D., Debris Flow Defenses in British Columbia, GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA REVIEWS IN ENGINEERING GEOLOGY, 7, 1987, 201—222。
- [76] 甘肃省交通科学研究所, 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 泥石流地区公路工程, 人民交通出版社, 1981, 1—194。
- [77] 唐川, 泥石流堆积特征与扇形地危险范围预测, 中国科学院成都山地灾害与环境研究所硕士学位论文, 1988, 1—46。
- [78] 刘希林, 泥石流堆积扇危险范围议, 灾害学, 5(3), 1990, 86—89。
- [79] 刘希林, 论泥石流堆积扇危险范围的确定方法, 中国减轻自然灾害研究·全国减轻自然灾害研讨会论文集(1990), 中国科学技术出版社, 1990, 588—591。
- [80] 刘希林、唐川、朱静、张松林, 泥石流危险范围的流域背景预测法, 自然灾害学报, 1(3), 1992, 56—67。
- [81] 刘希林、唐川, 泥石流堆积扇泛滥范围的流域背景预测模型, 中国减轻自然灾害研究·全国减轻自然灾害研讨会论文集(1992), 气象出版社, 1992, 408—413。
- [82] 刘希林、张松林、唐川、陈明, 泥石流危险范围模型实验, 地理研究, 12(2), 1993, 77—85。
- [83] 刘希林、唐川、陈明、张松林, 泥石流危险范围的模型实验预测法, 自然灾害学报, 2(3), 1993, 67—73。
- [84] 刘希林、唐川、陈明、张松林, 泥石流危险范围的实验研究, 首届全国泥石流滑坡防治学术会议论文集, 云南科技出版社, 1993, 25—29。
- [85] 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, 2(4), 1993, 79—84。
- [86] 唐川、周钊乾、刘希林, 泥石流二维非恒定流数值模拟及其在危险度评价中的应用, 首届全国泥石流滑坡防治学术会议论文集, 云南科技出版社, 1993, 47—52。
- [87] 唐川, 泥石流扇形地研究, 云南地质, 9(3), 1989, 179—184。
- [88] 唐川、朱静、段金凡、杜榕桓, 云南小江流域泥石流堆积扇研究, 山地研究, 9(3), 1991, 179—184。
- [89] 曾思伟、张又安, 粘性泥石流舌状沉积形态及其剖面特征, 中国第四纪冰川冰缘学术讨论会文集, 科学出版社, 1985, 101—106。
- [90] 田连权, 滇东北蒋家沟粘性泥石流堆积地貌, 山地研究, 9(3), 1991, 185—192。
- [91] 刘希林, 试论泥石流动力作用对河床地貌的影响, 第二届全国泥石流学术会议论文集, 科学出版社, 1991, 281—289。
- [92] 刘希林, 试论泥石流动力作用与沟谷地貌演变的关系, 地理科学, 8(4), 1988, 389—391。
- [93] 刘希林, 泥石流地貌标志的初步探讨, 灾害学, 2(4), 1987, 27—32。
- [94] Liu Xilin, A Preliminary Study on Geomorphic Evidences of Debris Flow, INTERPRAEVENT 1992—BERN (Proceedings of the International Symposium), Tagungspublikation, 2, 1992, 257—271。
- [95] 高桥保, 土石流的停止、堆积机理关于研究(3)·土石流扇状地の二次侵食, 京都大学防災研究所年報, 25(B—2), 1982, 327—348。
- [96] Costa, E. J., Physical Geomorphology of Debris Flow: Developments and Applications of Geomorphology, Springer-Verlag Publishing House, 1984, 268—317。
- [97] Koebel, C. R., Johnson, A. R., Geomorphology and Sedimentology of Humid-temperate Alluvial Fans, Central Virginia, CANADIAN SOCIETY PETROLEUM GEOTOGISTS MEMORIS, 10, 1984, 109—122。
- [98] 赵尚学, 粘性泥石流的沉积地貌, 泥石流学术讨论会兰州会议文集, 四川科学技术出版社, 1986, 171—174。
- [99] 刘希林、唐川、张松林、陈明, 泥石流堆积扇地貌特征及其模型试验研究, 中国地质灾害与防治学报, 3(4), 1992, 32—40。
- [100] 陈翠德, 云南东川蒋家沟泥石流的形成与特征, 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第4号), 科学出版社, 1985, 48—57。
- [101] 刘希林, 泥石流的组成与性质, 潜科学杂志, 7(1), 1986, 25—26。
- [102] 王景荣, 白龙江流域徐家湾沟泥石流沉积, 泥石流学术讨论会兰州会议文集, 四川科学技术出版社, 1986, 158—



- 162。
- [103] 朱俊杰、陈怀录,甘肃若干地点泥石流沉积的砾向特征,泥石流学术讨论会兰州会议文集,四川科学技术出版社,1986,163—170。
- [104] 柳素清,川西山地森林生态系统破坏与泥石流关系的剖析,泥石流学术讨论会兰州会议文集,四川科学技术出版社,1986,94—97。
- [105] 周纪步,实用回归分析方法,上海科学技术出版社,1990,51—121。
- [106] 刘树坤、袁小勇,二维溃坝洪水模拟研究,中国科学院水利电力部水电科学研究院论文集(29),水利电力出版社,1989,89—97。
- [107] 周建军,平面二维泥沙数学模型研究及其应用,水利学报,(11),1993,10—19。
- [108] Takahashi, T., Processes of Deposition, Debris Flow, IAHR~AIRH MONOGRAPH SERIES, 1991,11—147。
- [109] 何少琴、林秉南,破开算子法在二维潮流计算中的应用,海洋学报,5(2),1986,260—267。
- [110] 唐川,泥石流堆积泛溢过程的数值模拟及其危险范围预测模型的研究,水土保持学报,8(1),1994,45—50。
- [111] Takahashi, T., Estimation of Potential Debris Flows and Their Hazardous Zones; Soil Countermeasures for a Disaster, JOURNAL OF NATURAL DISASTER SCIENCE,(3),1981,57—89。
- [112] 唐邦兴、柳素清、刘世建,中国泥石流灾害分布与危害区划图(1:6000000),成都地图出版社,1991。
- [113] 唐邦兴、刘希林、柳素清,中国泥石流危险区划的探讨,中国自然灾害灾情分析与减灾对策,湖北科学技术出版社,1992,314—321。
- [114] 谭万沛、王成华、左小荣、杨文,四川省攀西地区泥石流滑坡分布与危险程度分区图(1:3000000),成都地图出版社,1993。
- [115] 吴承芝,用多因子统计分析方法进行泥石流灾害预测的探讨,遥感地质,(3),1986,60—68。
- [116] 侯建军、韩嘉康、万波、郑双成、张文阁、钟以章,辽宁省泥石流灾害的发育规律及其危险性分区预测,地质灾害与防治(原名中国地质灾害与防治学报),1(4),1990,44—51。
- [117] 钟敦伦、谢洪、韦方强,长江上游泥石流危险度区划研究,山地研究,12(2),1994,65—70。
- [118] 刘希林,泥石流危险区划的探讨,灾害学,4(4),1989,3—9。
- [119] 刘希林,云南昭通地区泥石流灾害及其危险度评价,灾害学,6(4),1991,47—51。
- [120] 刘希林,泥石流相对分布密度的确定方法,水土保持学报,6(1),1992,57—62。
- [121] 刘希林,泥石流危险区划中相对分布密度的数学模型,灾害学,7(3),1992,8—13。
- [122] 刘希林,泥石流危险度分区的理论和方法,中国地质灾害与防治学报,4(3),1993,51—56。
- [123] 唐邦兴、柳素清,四川省阿坝藏族自治州泥石流及其防治研究,成都科技大学出版社,1993,74—84。
- [124] 张震宇、王文楷,自然灾害区划若干理论问题的探讨,自然灾害学报,2(2),1993,1—7。
- [125] 孙希华、仇家琪,天山阿拉沟地区泥石流沟危险程度分析,干旱区地理,14(增刊),1991,100—105。
- [126] 钟敦伦、韦方强、谢洪,长江上游泥石流危险度区划的原则与指标,山地研究,12(2),1994,78—83。
- [127] 毛政巨,山地气候区划的几个问题,山地研究,6(2),1988,100—103。
- [128] 尧绍裕、刘志林,中国的防灾抗灾救灾工作,灾害学,4(3),1989,36—40。
- [129] 袁开先,应用灰色系统理论进行多变量相关分析的例子及 BASIC 程序,工程勘察,(3),1987,33。
- [130] 胡发德、田连权,云南巧家县城郊泥石流概况,泥石流(3),中国科学技术出版社重庆分社,1986,46—51。