

分类号 _____

密 级 _____

U D C _____

编 号 _____

成都理工大学

学 位 论 文

题名和副题名 _____ 大渡河泸定——得妥段泥石流风险评价

_____ 与防治对策研究

作 者 姓 名 _____ 汪新芳

指导教师姓名及职称 _____ 唐 川 教授

申请学位级别 _____ 硕 士 _____ 专业名称 _____ 环境地质

论文提交日期 _____ 2008. 4 _____ 论文答辩日期 _____ 2008. 5

学位授予单位和日期 _____ 成 都 理 工 大 学 (2008 年 6 月)

答辩委员会主席 _____

评阅人 _____

2008 年 5 月

分类号_____

学校代码: 10616

UDC _____

密级_____ 学号: 200502202

成都理工大学硕士学位论文

大渡河泸定——得妥段泥石流风险评价 与防治对策研究

汪新芳

指导教师姓名及职称 唐 川 教授

申请学位级别 硕 士 专业名称 环境地质

论文提交日期 2008.4 论文答辩日期 2008.5

学位授予单位和日期 成 都 理 工 大 学 (2008 年 6 月)

答辩委员会主席 _____

评阅人 _____

2008 年 5 月

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得成都理工大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：

年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解成都理工大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权成都理工大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：

学位论文作者导师签名：

年 月 日

大渡河泸定——得妥段泥石流风险评价 与防治对策研究

作者简介：汪新芳，女，1981年02月出生，师从于成都理工大学唐川教授，2008年06月毕业于成都理工大学环境地质专业，获得工学硕士学位。

摘 要

我国幅员辽阔、地质环境条件复杂，几乎所有的自然灾害类型都有，是世界上灾害类型最多的国家之一。同时我国地形条件复杂，山地和高原占国土一半以上的面积，而且山地起伏大、地质构造复杂、岩层表层破碎，并且随着人类社会经济活动的不断增强，人类对自然资源的过度索取和对环境的持续破坏，使得泥石流等自然灾害越来越严重。近年来，随着西部大开发和山区经济的发展，泥石流灾害也随之增加。由于泥石流的泛生性和突发性以及现在对泥石流机理认识还不足，目前要完全控制和准确预报泥石流发生还有一定困难，因此泥石流风险评价就显得尤为重要。我国山区泥石流每年雨季给山区人民财产造成的直接与间接的经济损失数亿元，人员伤亡、基础设施被毁和安全事故时有发生，因而引起世人对泥石流灾害的普遍关注。

论文通过实地调查，分析大渡河泸定——得妥段内的17条典型泥石流发育的地质环境背景，包括气象水文、地形地貌、地层岩性、地质构造、地震等，在此基础上详细分析每条泥石流沟的发育类型和空间分布及特征，应用风险评价理论和刘希林、唐川提出的单沟泥石流风险评价方法，对每条泥石流进行危险性和易损性评价，结合危险性和易损性评价的结果并根据 $R_{\text{单}}=H_{\text{单}} \times V_{\text{单}}$ 即风险度等于危险度和易损度的乘积最终分别得到每条泥石流沟风险评价结果：17条泥石流其中9条泥石流处于高风险，其余8条泥石流处于中等风险。最后，在风险评价结果的基础上，分别从硬性防治与软性防治两方面，研究分析了每条泥石流沟的防治对策，包括土木工程措施、生物措施、避让搬迁措施、群策群防和预警预报措施、预警发布和应急指挥等风险管理措施，并且相应地对每条泥石流沟防治对策提出具体建议，从而达到为防灾减灾服务的目的，也为生活在泥石流危险区的居民和各级政府提供有关的灾害风险信息，为编制避险搬迁和灾害防治应急预案提供科学依据。

关键词： 泥石流 危险性评价 易损性评价 风险评价 防治对策

Risk Assessment of Debris Flows and Prevention Countermeasure Study for Section from Luding to Detuo of Dadu River

Introduction of Author: WangXinFang, female, was born in February of 1981, her tutor was Professor TangChuan. She graduated from Chengdu University of Technology in Environmental Geology major and was granted the Master Degree in June,2008.

Abstract

Our country has a vast territory and its geological environment condition is complicated. There are almost all types of natural disasters and it is the world's most types of disasters one of the countries. At the same time China's complex terrain conditions, the mountains and plateaus account for more than half the land area, but the undulating mountains, geological structure is complicated, broken rock surface, and as human activities continue to enhance the socio-economic, human and natural resources from over-the environment The continued destruction of natural disasters such as mud-rock flow makes more and more serious. In recent years as the development of people's societal and economic activity, people excessively exploit natural resources and the environment was destroyed continuously. These make debris flow and other natural disasters more and more seriously. As the debris flow is natural and the debris flow also inadequate understanding of the mechanism, to fully control and accurate forecasting landslides occurred there is still a certain difficulties, debris flow on the risk assessment it is particularly important. this causes economic losses of millions dollars by direct and indirect in the mountain area every rainy season. Casualties and the destruction of infrastructure and safety-related incidents have occurred. This has aroused the world concern about debris flow disasters general.

This paper analyzes and investigates 17 typical debris flows of geological environment background, including the meteorology and hydrology, the terrain and landform, the formation of lithology, the geologic structure, the earthquake and so on, for the section from Luding to Detuo of Dadu River. On the basis of detailed analyses each debris flow of growth type and spatial distribution, the paper application of the theory of risk assessment and selects Liu Xilin and Tang Chuan who proposed single-ditch landslides risk assessment methods. Carries on the hazard assessment and the vulnerability assessment for each debris flow. combined with hazard assessment and the vulnerability assessment result obtains each debris flow risk assessment result separately finally. Finally, in the risk assessment result's foundation, prevented and controlled two aspects from the rigid prevention and softness, the research analyzes

each debris flow prevention engineering measure, the ecology measure, moving measure and warning forecast、warning issued and emergency direction and so on. Based on which, put forward the proposal correspondingly to each debris flow prevention countermeasure, thus achieved the disaster prevention disaster reduction to result in the goal, also supplied the related disaster risk information and all levels of government to provide the relevant information for disaster risk for the life in the debris flow warning area's resident, For the preparation of hedge removal and disaster prevention contingency plans to provide a scientific basis.

Keywords: Debris Flows Hazard assessment Vulnerability assessment
Risk assessment Prevention measure

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
目 录.....	IV
第 1 章 引 言.....	1
1.1 选题依据.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 研究内容及技术路线.....	7
1.4 研究区概况及灾情概述.....	9
第 2 章 泥石流形成的地质环境条件.....	11
2.1 气象水文.....	11
2.1.1 气象.....	11
2.1.2 水文.....	13
2.1.3 洪水特性.....	14
2.2 地形地貌.....	15
2.3 地层岩性.....	17
2.4 地质构造.....	19
2.5 新构造活动.....	19
2.6 地震.....	20
第 3 章 泥石流发育类型和分布特征.....	22
3.1 泥石流发育类型.....	22
3.2 泥石流分布及分布特征.....	23
3.3 典型泥石流沟剖析——深家沟泥石流.....	26
3.3.1 流域及地形地貌概况.....	26
3.3.2 地质环境概况.....	27
3.3.3 深家沟泥石流成因分析.....	27
3.4 典型泥石流沟剖析——金华沟泥石流.....	28
3.4.1 流域及地形地貌概况.....	28
3.4.2 地质环境概况.....	29
3.4.3 金华沟泥石流成因分析.....	29
第 4 章 泥石流危险性评价.....	31

4.1 泥石流危险性评价.....	31
4.1.1 泥石流危险度评价方法的选择.....	32
4.1.2 泥石流危险度评价指标.....	32
4.2 评价因子数值的获取.....	34
4.2.1 评价因子转换值.....	34
4.3 泥石流危险性评价结果.....	35
第5章 泥石流易损性评价.....	39
5.1 泥石流易损性评价.....	39
5.1.1 泥石流易损度评价指标.....	39
5.1.2 泥石流易损度评价模型 ^[59]	40
5.1.2.1 物质易损度评价.....	40
5.1.2.2 经济易损度评价.....	41
5.1.2.3 环境易损度评价.....	41
5.1.2.4 社会易损度评价.....	42
5.1.3 泥石流易损度评价.....	42
5.2 泥石流易损性评价结果.....	43
第6章 泥石流风险评价.....	44
6.1 泥石流风险评价.....	44
6.2 泥石流风险评价方法及评价结果.....	44
第7章 泥石流防治对策研究.....	46
7.1 防治目的和原则.....	46
7.1.1 防治目的.....	46
7.1.2 防治原则.....	46
7.2 防治方法研究.....	47
7.2.1 土木工程措施.....	48
7.2.2 生物措施.....	49
7.2.3 风险管理措施.....	49
7.2.3.1 避让搬迁措施.....	50
7.2.3.2 群策群防和预警预报措施.....	50
7.2.3.3 完善预警发布和应急指挥措施.....	51
7.2.5.4 泥石流灾害宣传和技术培训措施.....	51
7.3 泥石流防治建议及典型泥石流防治对策研究.....	51
7.3.1 典型泥石流防治对策研究——深家沟泥石流防治对策研究.....	52
7.3.1.1 深家沟泥石流防治原则.....	53

7.3.1.2 深家沟泥石流防治对策	53
结 论.....	55
致 谢.....	57
参考文献.....	58

第1章 引言

1.1 选题依据

泥石流作为一种自然灾害在世界范围内已引起广泛的关注和重视,是山区常见的地质灾害之一,每年在世界各地都有大量的泥石流灾害事件发生,其中我国是世界上泥石流灾害最为严重的国家之一。泥石流可由暴雨、冰雪消融、火山暴发、地震及溃堤等引起,其暴发突然,来势凶猛,常以很高的流速携水、泥沙和巨石冲毁、淤埋民房、公路、铁路和电站等基础设施,造成重大的经济损失和大量人员伤亡。近几十年来,平均每年造成的直接经济损失达 10 多亿元,死亡人数近千人^[1-3],并且,随着人类社会经济活动的不断增强,特别是西部大开发战略的进一步实施,各种基础性工程的建设规模不断扩大,必将进一步加剧泥石流的形成与发生。因此,必须加强泥石流灾害的研究、评估、预测预报和减灾管理,组织实施经济有效的防治工程,从而尽可能防范泥石流灾害的发生和尽量减轻泥石流灾害的损失。

泥石流灾害同其它自然灾害一样,主要表现为自然现象,它的发生发展往往是不以人的意志为转移的。长期以来,人们从被动的抗争、经验性的抵御,到逐步运用科学理论和先进技术方法,尽可能合理地组织实施防灾减灾工作,已经积累了丰富的经验,但由于泥石流运动的客观复杂性和突发性,要做到科学有效的防灾还需要科学工作者孜孜不倦的努力和探索,以及不断地实践、深化和提高^[4]。

我国是世界上少数几个泥石流活动最强烈、灾害最严重的国家之一。全国 31 个省市自治区中,29 个省(区)发育有泥石流,经初步调查已编目的泥石流沟有 8500 多条,且多数与人类活动有关。据不完全统计,自 1949 年以来,我国因泥石流活动直接死亡已超过 6000 人,直接经济损失达 80 多亿元,并冲毁大量农田、房屋和交通线路、水利设施等。据统计,我国目前仍受泥石流威胁的县城、地区所在地及省会城市共 130 多座(其中包括兰州市、武都市、天水市、雅安市、西昌市、攀枝花市、华莹市、都匀市、东川市等),乡镇 400 多个,受泥石流威胁的矿山、水电站等数以百计。并且,随着人类社会经济活动的不断增强,人们对自然资源的过度索取和环境的持续破坏,使泥石流等自然灾害更趋严重。占国土面积 2/3 的山丘区普遍存在山洪及泥石流灾害,每年因泥石流灾害造成的经济损失就高达 36 亿元。随着中国山区经济的发展,山洪及泥石流灾害损失有加大的趋势,一次泥石流灾害往往造成少则几万至几十万元,多达几千万元,乃至上亿元的经济损失,已引起社会各界的高度关注。因此必须加强泥石流灾害的研究、评估、预测预报和减灾管理,组织实施经济有效的防治工程,从而尽可能的防范

泥石流灾害的发生和尽量减轻泥石流灾害损失,已成为山区建设、可持续发展的保证。由此可见,对泥石流的研究已成为我国山区社会、经济发展中急迫研究的课题^[5]。

为了科学合理地组织实施泥石流灾害减灾防灾工程,首要任务是对泥石流灾害发生的可能性、危险性、危害范围和程度、以及破坏损失等有一个基本的认识和评价,即泥石流灾害风险评价。只有在掌握可能造成的危害范围和灾害损失的基础上,才能做到有针对性、合理、经济有效地实施防灾减灾措施。

1.2 国内外研究现状

泥石流风险评价包括泥石流危险性评价和泥石流易损性评价两个方面,都是针对泥石流对受灾体灾难的预测。根据联合国人道主义事务部(UNDHA)于1991年和1992年两次正式公布了自然灾害风险的定义:“风险是在一定区域和给定时段内,由于某一自然灾害而引起的人们生命财产和经济活动的期望损失值^[5-6]”,其风险表达式为^[6-7]:

$$\text{风险度(Risk)} = \text{危险度(Hazard)} \times \text{易损度(Vulnerability)}$$

国外泥石流危险性的研究较早,泥石流危险性的研究不仅是目前国内外灾害科学研究的热点之一,也是灾害预测和防灾减灾工作的重要内容。早在19世纪后半期,俄国道路工程师B. И. 斯塔科特夫斯基在设计穿越主高加索山脉的格鲁吉亚军用公路时,就初步涉及到泥石流的成因和泥石流危险度的问题^[8],但由于此后几乎一百年的时间内,泥石流现象本身研究没有多大的进展,因而泥石流危险性的研究也没有多大的进展,仍沿袭过去的定性描述。直至20世纪30年代开始,整个泥石流危险性研究取得了较大的进展,其中日本方面的如:1977年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)^[9],其主要从地貌条件、泥石流形态和降雨等3个方面判定泥石流发生率;1988年高桥堡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)^[10],主要探讨建筑物的损害与泥石流堆积厚度的关系;1990年久保田哲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 Judgement of Occurrence Probability of Debris Flow in the Basin)^[11],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。此外奥地利、瑞士等欧洲国家对泥石流灾害危险性评价,较早提出了采用类似于交通信号中红、黄、绿三色的特定含义,划分泥石流危险区、潜在危险区和无危险区^[12];加拿大O. Hungr等认为泥石流危险范围的确定应以理论做基础,而目前还没有合适的理论,因此强调凭经验,通过实地勘测来确定泥石流灾害的危险范围^[13];瑞典的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，并用危险区图来表示；近年来，专门性的地质灾害风险评价研究也得到长足进展，特别是在泥石流等灾害危险性评价方面，更是蓬勃发展^[14]。例如 Jefferies 等 1996 年提出了用 Sayesian 方法进行风险概率的评价；Johnson 等于 2000 年在澳大利亚一项为城市发展规划服务的崩塌、滑坡、泥石流灾害预测中，把地质灾害危险性、易损性和风险评价作为一体，以 GIS 软件为技术平台，分别采用平面和三维评价系统。

国内泥石流危险性的研究起源于 20 世纪 80 年代。1982 年王礼先发表的“关于荒溪分类”一文首先对泥石流沟谷的危险度进行了划分^[15]，此后众多学者对这一问题进行了有益的探讨，其中 80 年代中期以谭炳炎提出的泥石流沟的严重程度判别因素量化分析法为典型代表^[16]；80 年代后期，随着一些数学方法的引用，泥石流沟谷危险度划分更加量化和客观，以刘希林提出的泥石流影响因素等级划分及因子得分判定法为这一时期的主要方法^[17]；90 年代以来，随着研究程度的深入，特别是在总结前人研究成果的基础上，将一些适用的数学模型应用到泥石流沟谷危险度的划分中，使得泥石流的沟谷危险度的研究发展到了能够精确定量、模型模式化操作的地步^[18]。具体评价方法上，总结近年国内外研究的相关成果，有以下几种：

1) 模糊综合评判法在泥石流危险性评价中的应用

模糊综合评判法是以模糊数学为手段，对多种属性的事物或其总体优劣可能受多种因素影响的事物作出一个能合理综合这些因素的总体评判。模糊综合评判法是由上世纪 80 年代汪培庄提出的，其最大特点是简单实用，现已广泛应用于国民经济和工农业生产的方方面面。

模糊数学理论应用于危险性评价中为研究和处理具有双重不确定性的事物提供了新的方法，并且已成功地应用在许多地质灾害分析评价中，其核心就是用参数间的模糊关系替代数学假设基础上求出的解析关系。模糊的二级综合评判法就是将全部参评因素集合 U 按某种属性分成几类^[19-20]，先对每一类作综合评判，然后分别对评判结果进行“类”之间的高层次的综合评判，也就是说，将各种因子作分类，作出参评因素的集合设为：

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$$

选取评价集为：

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}。$$

将因素 U 集合的各因素按不同属性划分为 N 个互不相交的子集 U_1, U_2, \dots, U_N ，即：

$$U=\{U_1, U_2, \dots, U_i\}$$

其中 $U_i=\{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{iki}, (i=1, 2, \dots, N), \text{且} \sum_{i=1}^N K_i \equiv n\}$ 。

根据 U_i 中各因素所起作用的大小确定比重集为 A_i :

$$A_i=\{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iki}\}(k=1, 2, \dots, N)$$

对 U_i 中的各因素评定出对评价集各等级的隶属度,构成 $k_{i \times n}$ 阶单因素评价矩阵 R_i , 进行初级评判得到:

$$A_i \cdot R_i=B_i=(b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in}), (i=1, 2, \dots, N)$$

(B_i 为 U_i 的单因素评判)因此, U 的总评判矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{N1} & b_{N2} & \dots & b_{Nn} \end{bmatrix}$$

则总的二级综合评判结果,即为 $B=A \cdot R$, 其中 $A=(A_1, A_2, \dots, A_N)$ 。

根据 B 的值,可以划分泥石流危险度,从而为当地泥石流的防治工作及其预测提供比较实际的理论依据。

2) 灰色关联分析法^[21]

泥石流的产生是多种环境因子共同作用的结果,在泥石流形成条件中,不同环境因子的作用方式和影响程度各不相同,其中有的因子是可以明确判断度量的,而多数因素则是不能完全确定,或是模糊不清的,这就形成了一个灰色系统。灰色关联分析的基本原理和方法是:首先用均值化方法把原始数据做无量纲化处理,得到均值化矩阵,然后计算主导因子序列与各关联因子序列相互比较的绝对差值,并找出最大绝对差值和最小绝对差值,最后计算出主导因子与关联因子间的关联度。其简要过程如下:

令 $X(i, j)$ 为灰色关联因子集, i 代表样本, N 代表样本总数($i=1, 2, \dots, N$), j 代表关联因子, M 代表关联因子总数($j=1, 2, \dots, M$), $N \geq M$ 。若把主导因子 $x(i, j)$ 作为对比序列,则关联度的计算步骤如下:

(1)用均值化的方法把原始数据做无量纲化处理,得出均值化矩阵 $Xl(i, j)$ 。

$$X_1(i, j) = X(i, j) / \bar{X}(j)$$

式中, $X_1(i, j)$ 为均值化数据; $X(i, j)$ 为原始数据; $\bar{X}(j)$ 为原始数据第 j 列 (j 个因子) 的平均值。

(2) 用公式 $\Delta(i, j) = |X_1(i, L) - X_1(i, j)|$ 进行求差序列计算。式中 $\Delta(i, j)$ 为主要因子与关联因子比较后的绝对差值。

(3) 计算最大绝对差值和最小绝对差值。

$$\Delta \max = \max \bullet \max \Delta(i, j)$$

$$\Delta \min = \min \bullet \min \Delta(i, j)$$

(4) 计算关联系数

$$\xi(i, j) = \frac{\Delta \min + K \bullet \max}{\Delta(i, j) + K \bullet \max}$$

式中, $\xi(i, j)$ 为关联系数; K 为经验系数, 一般取 $K=0.5$ 。

(5) 计算关联度

$$R(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi(i, j)$$

式中, $R(j)$ 为对比序列(主导因子)与其他各因子的关联度; j 为第 j 列因子。利用已概化的数据, 按上述基本方法步骤编成 Basic 语言程序, 分别选取泥石流规模、频率、点密度作为主导因子, 其他因子作为关联因子, 用微机进行计算, 分别求得主导因子和关联因子的关联度。从结果得知, 相对于三个不同主导因子的泥石流关联因子的关联度排序基本上一致^[22], 故取其平均值作为各潜在形成条件的关联度。同样方法, 以每个主导因子的三个关联度的平均值作为主导因子的关联度, 然后分别求得历史条件和潜在条件各关联因子的关联度之和, 再分别用历史条件和潜在条件各关联因子的关联度与之相除就得到相应各关联因子的权重值。

(6) 建立泥石流危险性评价的数学模型。泥石流活动的危险性程度, 可用危险性指数来表示, 危险性指数越高, 表示泥石流活动的危险性就越大。危险性指数的含义是用各关联因子的概化数据与其权值乘积之和分别求得各小流域的历史灾害强度和潜在灾害强度, 再用历史灾害强度和潜在灾害强度分别与其对应的权值相乘后求和就得到各个小流域的危险性指数^[23]。危险性指数可由下式计算求得:

$$W_Z = R_1 \bullet L_D + R_2 \bullet Q_D$$

$$L_D = \sum_{i=1}^2 R(j) \bullet X(i, j)$$

$$Q_D = \sum_{i=3}^M R(j) \bullet X(i, j)$$

式中, W_Z 为泥石流危险性指数; L_D 为泥石流历史活动强度; Q_D 为泥石流潜在活动强度; R_1 为历史灾害活动条件的权值; R_2 为潜在灾害活动条件的权值; M 为小流域总数; $X(i, j)$ 为概化后的数据; $R(j)$ 为各关联因子的权值。

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方法^[24],通过关联度分析,可以确定出哪些因子是重要的,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定量化比较,计算量小,量化结果可靠^[25]。

3) GIS 技术在危险性评价中的应用^[26]

泥石流暴发涉及泥石流形成与发展以及下垫面状况,单一的数学分析方法均涉及大量的空间数据,因此这是一项十分艰巨和耗时的工作。近年来,随着 GIS 技术的飞速发展及其在灾害研究中应用的深化,处理泥石流、滑坡等灾害空间数据变得较为容易^[27]。Walsh^[28]等应用 GIS 对泥石流形态特征进行了可视化,Wadge^[29]等应用 GIS 技术进行了地貌灾害危险性和人口易损性的评价。目前利用 GIS 技术对滑坡进行危险性分析的涉及较多^[30-36],而利用 GIS 技术进行区域性泥石流暴发危险性分析尚不多^[37-39],是个具有广阔研究空间的课题。在目前已经有的研究成果中,研究人员用到 GIS 中的 Arcinfo 软件来进行危险性分析评价,以 Arcinfo 为平台,将研究区的地形图数据以及所选其它因子数据通过 Arcin 建立 tin 模型,并将 tin 转换为相应的多边形矢量数据。将所得各数据通过变换转换为具有统一比例尺、统一投影、统一分辨率、统一行列数的栅格阵列,每一栅格就是一分析单元。采用统一的地理坐标,统一的转换方法后,不同栅格数据相对实际位置具有良好的空间重合性。可以满足栅格单元空间逻辑代数运算,也满足评价预测和查询的要求。由于泥石流危险性评价各指标间的量纲不统一,没有可比性,因此还要对各类指标进行无量纲化和分级。在 Arcinfo 平台上,利用 grid 模块的 reclass 函数,对处理后的数据进行重分类。通过分析各类指标对泥石流影响程度,赋予它们不同的权重。最后将各种因子在统一的空间框架中,通过空间叠加分析运算,属性项合并,就可得到所研究区域的泥石流危险性评价图或区划图。

通过对已有的研究工作的分析发现,运用 GIS 技术对泥石流危险性进行评价,可以大大降低工作量,同时可以提高评价的精度和实用性。可以预计,在将来的评价研究工作中,GIS 技术将被更广泛的应用。

4) 刘希林、唐川等人推荐的方法^[40-41]

刘希林、唐川等学者在总结前人研究的方法上,提出了一套的评价单沟泥石流危险性方法:

选定单沟泥石流危险性评价中所需的因子,包括泥石流规模、泥石流发生频率、流域面积、主沟长度、流域相对高差、流域切割密度、不稳定沟床比例、主沟床坡度、松散固体物质储量、24 小时最大降雨量、植被覆盖率、人口密度等。通过邓聚龙教授提出的灰色关联度模型,根据所给出的判别条件:关联度大于 0.85 为相关关系好,在 0.85~0.50 之间为相关关系中等,小于 0.50 为相关关系差。从而选定评价所需的主要因子和次要因子。在此基础上分别按一定规则赋予泥石流规模和发生频率以及环境因子的不同权重(表 1-1),再求和,最后得到单沟泥石流危险度评价多因子综合评价模型。评价模型公式为:

$$H_{\text{单}} = 0.29M + 0.29F + 0.14S_1 + 0.09S_2 + 0.06S_3 + 0.11S_6 + 0.03S_9$$

式中, M 、 F 、 S_1 、 S_2 、 S_6 、 S_9 分别为 m 、 f 、 s_1 、 s_2 、 s_6 、 s_9 的转换函数值。

表 1-1 单沟泥石流危险度评价因子权重系数

	m	f	s_1	s_2	s_3	s_6	s_9
权重数	10	10	5	2	3	4	1
权重系数	0.29	0.29	0.14	0.06	0.09	0.11	0.03

由于泥石流本身具有多因素性、复杂性,因此对泥石流危险性的评价方法还有很多,如汪明武从泥石流发育、分布和演化特征等指标来建立泥石流危险等级划分的人工神经网络模型,应用神经网络法对泥石流进行危险度评价和区划;以泥石流沟水系和堆积物的分维值来划分泥石流的危险度,把分形理论引入泥石流危险度的评价;采用效果测度的分析方法研究泥石流危险度的分类,提供了一种普适性强、易于操作的信息数据处理方法,定量地计算出泥石流的危险度值。

泥石流易损性方面的研究,不论是国外还是国内,都相对比较薄弱和滞后。随着减灾研究的进一步深入,人们开始意识到灾害的易损性分析对于指导风险区的减灾防灾的重要作用^[42-46]。国外学者从不同的角度提出了多种关于易损性的定义,1992 年联合国公布的易损性的定义为:潜在损害现象可能造成的损失程度^[47];国内唐川等人将易损性定义为:在给定的自然、社会和经济空间内,由于突发的自然灾害过程而可能导致的潜在损失^[48-50];刘希林等针对泥石流灾害的特点提出泥石流易损性是:在一定区域和给定时段内,由于泥石流灾害而可能导致的该区域内所存在的一切人、财、物的潜在最大损失^[51]。在易损度评价方法上刘希林也提出了相应的评价模型,也是现在用的比较多的评价方法之一。

1.3 研究内容及技术路线

论文通过实地调查,分析大渡河泸定——得妥段内的 17 条典型泥石流沟发育的地质环境背景和空间分布及特征,获取泥石流危险度评价指标因子,选取刘希林、唐川教授提供的评价模型对每条泥石流的危险性和易损性进行评价,结合危险性和易损性评价结果对每条泥石流沟进行风险性评价,最后,根据风险评价

的成果，对泥石流防治对策进行研究。这一较为全面的研究思路大大拓展了研究区泥石流研究的深入程度和系统性，研究成果更趋客观合理，以期为泸定县地质灾害的防灾减灾和防治工作提供更为科学合理的依据，确保地方经济、社会 and 环境的可持续发展，从而达到防灾减灾目的，也为生活在泥石流危险区的居民提供有关灾害风险信息。

论文的研究内容包括以下几个方面：

(1) 研究段内泥石流形成的地质环境条件、泥石流发育的类型及空间分布特征；

(2) 总结国内外泥石流危险性评价方法和易损性评价方法，并根据

$$\text{风险度 (Risk)} = \text{危险度 (Hazard)} \times \text{易损度 (Vulnerability)}$$
 得到 17 条泥石流沟风险评价结果；

(3) 基于 MAPGIS 软件平台，完成段内 17 条泥石流沟风险评价图；

(4) 在风险性评价结果的基础上，分别从硬性防治和软性防治研究泥石流的防治对策，包括土木工程措施、生物措施、避让搬迁措施、群策群防措施和预警预报、预警发布和应急指挥等风险管理措施，在此基础上，对每条泥石流沟防治对策相应提出具体建议。

其技术路线如下：

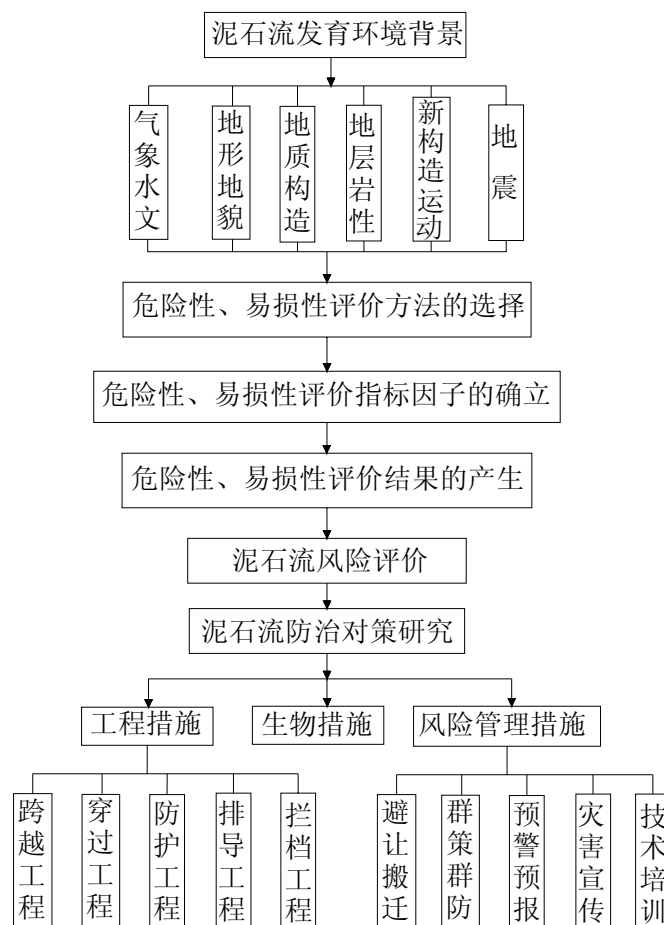


图 1-1 技术路线图

1.4 研究区概况及灾情概述

研究区位于四川省西部、甘孜藏族自治州东南部，地理位置在北纬 $29^{\circ}28'$ ~ $30^{\circ}06'$ ，东经 $101^{\circ}49'$ ~ $102^{\circ}27'$ 之间，地处青藏高原向四川盆地的过渡带中，大渡河由北向南纵贯全县，位于大渡河中游，界于邛崃山脉与横断山脉大雪山支脉之间。东与天全、荥经县交界，南与汉源、石棉县接壤，西、西北与康定县相邻。大渡河以西是雪峰山南段主峰贡嘎山（海拔 7556m）、以东为二郎山（海拔 3176m），贡嘎山到大渡河谷（海拔 1000~1400m）相对高差 6400m，是罕见的高山峡谷区，川藏公路从县城穿越而过，是进藏出川的必经之地，东出 285km 可达省会成都，西行 49km 即可到达州府康定，南距成昆铁路乌斯河站 220km，是甘孜州的“东大门”，其交通为之见图 1-1。特别是改革开放以来发展迅速，实现了乡乡通公路，主要矿山、厂、林区有专用公路，中小型水电站星罗棋布，网络通讯已经开通，为城乡人民生活 and 矿业开发提供了便利条件。也是甘孜州国土面积最小、人口文化程度相对较高、人口最稠密、经济发展较快的山区多民族聚居县。

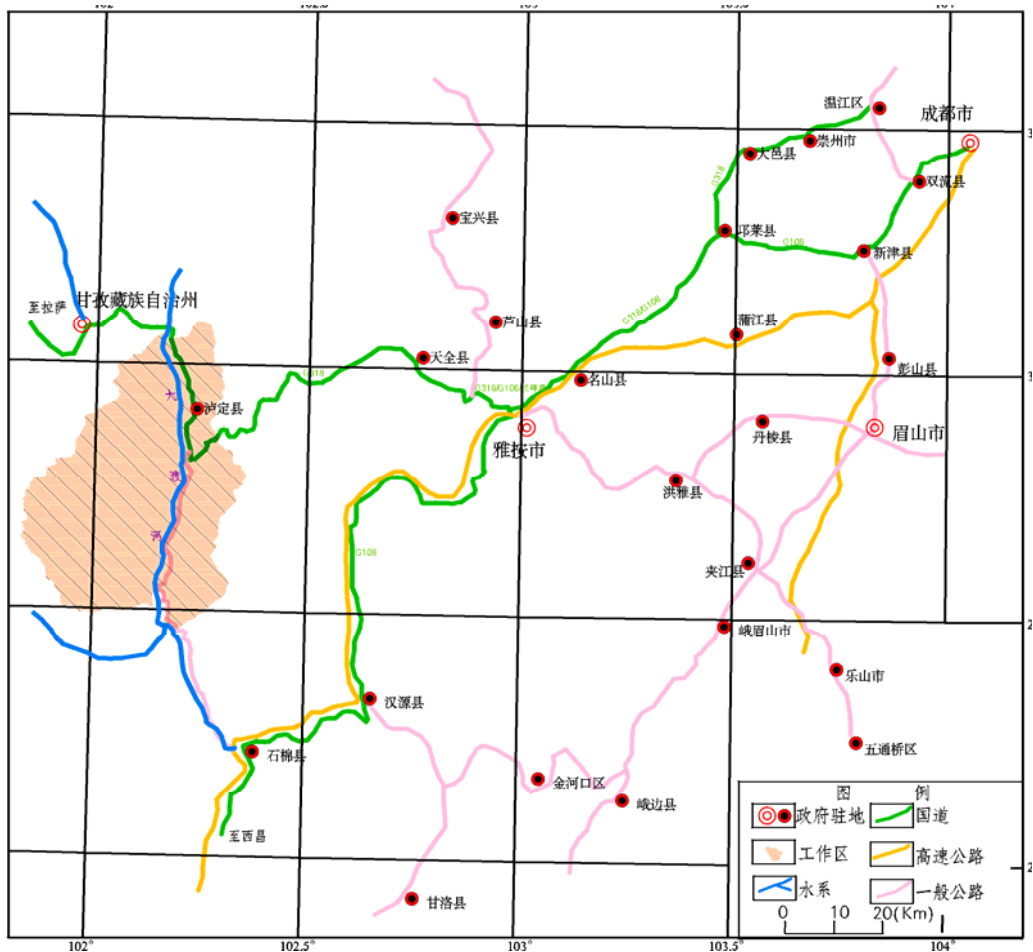


图 1-2 研究区交通位置图

论文选取的 17 条典型泥石流^[52]，都发育在大渡河两岸，自北向南从泸定县城泸桥镇——得妥乡区间，其中包括：泸桥镇的深家沟、木厂沟、羊圈沟、田坝乡的磨河沟；泸桥镇的干沟、黄坭沟、挖脚沟；杵坭乡的三叉沟、田家沟、麻沙坡沟、羊儿沟、金华沟、扯索沟；德威乡的磨子沟、涨水沟、落石沟；加郡乡的加郡沟，进行风险评价和防治对策研究。这些沟在历史上多次暴发泥石流事件，近期 2005 年 6 月 30 日集中发生一次较大规模的泥石流，在当年共造成 4 人死亡，5 人失踪，230 人受伤，10516 人受灾，牲畜死亡 382 头，冲毁公路 36km、桥梁 10 座、堤防 10km、引水渠道 26km，5000 人出现饮水困难，冲毁耕地 1208 亩，损坏房屋 4325 间，倒塌房屋 784 间，造成直接经济损失约 5190 万元^[53]。

第2章 泥石流形成的地质环境条件

2.1 气象水文

2.1.1 气象

研究区地处四川盆地到青藏高原过渡带上,受东南、西南季风和青藏高原冷空气双重影响,气候垂直差异明显,大渡河谷及其支流河谷,海拔1800m以下地区属热带季风气候,为有名的干热河谷区。贡嘎山区属大陆性季风高原型气候,从谷地到山脊具有从山地亚热带到极高山永久冰雪带的完整气候垂直带谱。泸定气候为“冬无严寒,夏无酷暑”,冬季干燥温暖,夏季温凉湿润,年平均无霜期约279天,日照时数1323.6小时。大渡河谷地区,地处二郎上背风坡,空气干燥,降水偏少,年平均相对湿度66%。

据泸定县气象站(其中台站海拔高度:1321.2m)资料统计,多年平均气温15.4℃,极端最高气温36.4℃(1961年6月18日),极端最低气温-5.0℃(1967年1月6日),多年平均年蒸发量1526.9mm(20cm蒸发皿),多年平均相对湿度66%,多年平均年降水量642.9mm,历年最大日降水量72.3mm。泸定县气象站气象要素统计见(表2-1),及各要素的折线图(图2-1,2-2,2-3,2-4)。

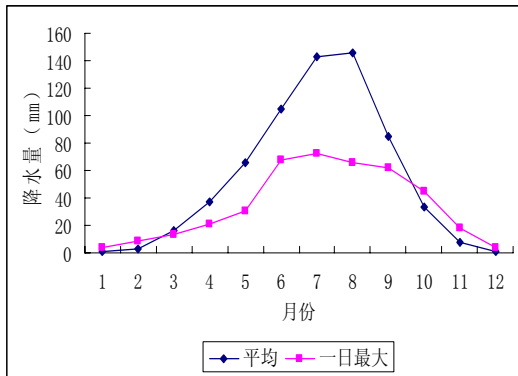


图 2-1 泸定县气象站历年月降水量统计图

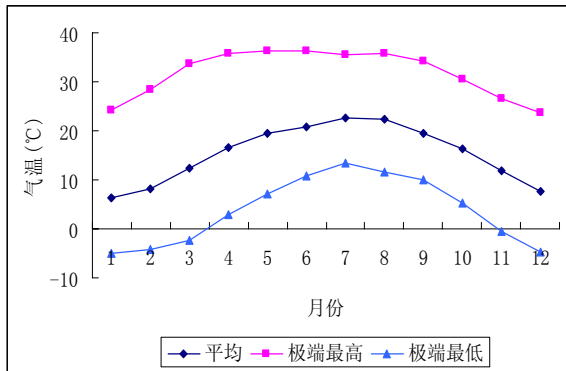


图 2-2 泸定县气象站历年月气温统计图

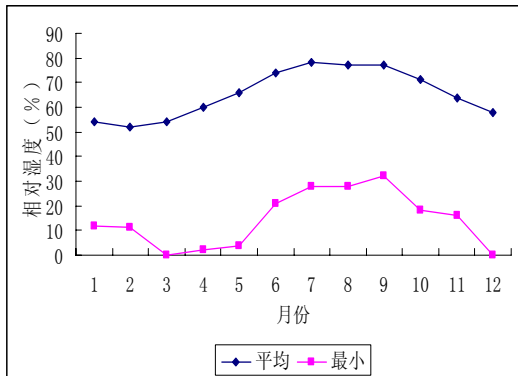


图 2-3 泸定县气象站历年月相对湿度统计图

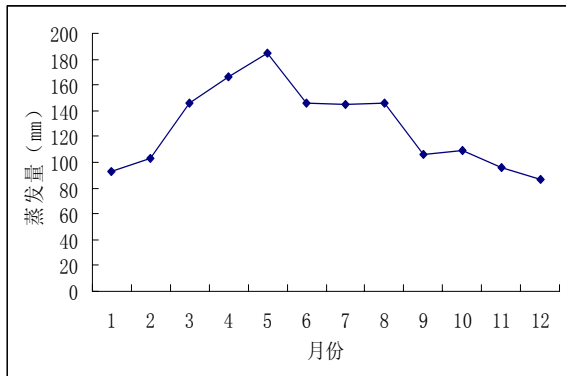


图 2-4 泸定县气象站历年月蒸发量统计图

表 2-1 泸定县气象站历年年、月气象特征值统计表

项 目	月 份 特征值	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	全 年
降水量 (mm)	平 均	0.9	3.2	15.9	36.8	65.6	105.1	143	145.7	85.1	33.3	7.9	0.6	642.9
	一日最大	4.2	8.8	13.3	20.7	30.2	67.6	72.3	65.9	61.8	45	17.7	3.6	72.3
	$0 \leq P < 0.5$ 日数	3	5	8	10	10	8	7	8	7	9	7	3	85
	$0.5 \leq P < 5$ 日数	0	1	5	7	9	9	9	8	8	6	3	0	65
	$5 \leq P < 10$ 日数	0	0	0	1	3	4	4	3	3	1	0	0	19
	$10 \leq P < 30$ 日数	0	0	0	0	1	3	4	4	2	0	0	0	14
	$P \geq 30$ 日数	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
气 温 ($^{\circ}\text{C}$)	平 均	6.4	8.2	12.4	16.6	19.5	20.9	22.7	22.4	19.6	16.3	11.8	7.7	15.4
	极端最高	24.1	28.4	33.6	35.7	36.3	36.4	35.5	35.7	34.1	30.6	26.6	23.6	36.4
	极端最低	-5	-4.3	-2.4	2.8	7.1	10.8	13.3	11.7	10	5.3	-0.6	-4.8	-5
	$T > 5.0$ 日数	20	21	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	347
	$5.0 \geq T > 0$ 日数	11	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
	$0 \geq T > -5$ 日数	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
相对湿度 (%)	平 均	54	52	54	60	66	74	78	77	77	71	64	58	66
	最 小	12	11	0	2	4	21	28	28	32	18	16	0	0
蒸发量(mm)	平 均	92.4	103	146.4	166.7	184.4	146.2	144.9	145.8	106	108.9	95.7	86.5	1527

备注:分级降水、分级气温依据 1961-2002 年资料;其它依据 1961-1990 年资料统计

2.1.2 水文

研究区境内大渡河是唯一地表水系，北起冷竹关入境，流经烹坝至得妥乡，纵贯全县，总长 82km，落差 332.1m。根据泸定站 1952 年 5 月-2003 年 4 月实测大渡河径流资料统计，多年平均流量为 $891\text{m}^3/\text{s}$ ，年径流深为 476.7mm，年径流模数为 $15.1\text{L}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。径流变化与降水变化相一致，年内变化大，而年际变化小。径流集中在丰水期，5-10 月约占全年径流的 81.1%，枯水期为 11 月-翌年 4 月占年径流的 18.9%，最枯期 1-3 月占年径流的 6.7%。最丰、最枯年平均流量分别为 $1180\text{m}^3/\text{s}$ 和 $566\text{m}^3/\text{s}$ ，两者之比为 2.08，分别为多年平均流量的 1.32 倍和 0.64 倍。泸定站多年年、月平均流量见表 2-2。

表 2-2 泸定水文站多年年、月平均流量统计表

时段 项目	月 份												年	丰水期	枯期
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	(5~4)	(5~10)	(11~4)
多年平均流量 单位： m^3/s	10	670	950	430	00	1160	720	356	258	227	240	366	891	1430	340
径流百分比	7.7	15.4	18.6	13.6	14.7	11.0	5.4	3.4	2.5	2.0	2.3	3.4	100	81.1	18.9

另外大渡河两岸有 48 条支流汇入，其中流域面积大于 100km^2 的有四条，分别是磨西河、湾东河、磨河与木角河，其特征见表 2-3。

表 2-3 河流要素统计表

名称	长度 (m)	流域面积 (km^2)	平均流量 (m^3/s)	天然落差 (m)
磨西河	43	923	23.62	3000
湾东河	42	165	4.72	3000
磨河	32	113.75	1.71	2000
木角河	30	105.75	1.72	2000

研究区所在的泸定县境内东部高山有古冰川遗址，部分地区有现代冰川。西部大雪山脉主脊线海拔多在 5000m 以上，终年积雪。贡嘎山东坡及部分北坡有冰川 26 条，面积 145.34km^2 。海螺沟冰川最长 14.7km，冰舌延伸至海拔 2850m 的森林中，冰层厚 300m，垂直高 2000m，宽 0.5-11km。全县共有冰川面积 145.56km^2 。

研究区内地下水资源丰富，类型较为齐全，因受地层、岩石、构造和地形地貌的影响，地下水在地区上表现出较大的差异性。区内地下水类型主要为基岩裂隙水和第四系松散堆积层孔隙潜水。

基岩裂隙水主要赋存于大渡河两岸风化卸荷裂隙介质中，由于河谷深切，河床纵坡较大，两岸谷坡较陡，地下水排泄条件较好，其水位埋藏较深。基岩裂隙水受岩性及构造控制，其埋藏、补给、运移、排泄条件复杂，含水裂隙（带）之

间水力联系较差，主要受大气降水下渗和河水及地下水侧向补给，总体上以地表水或泉的形式由两岸向河谷、向下游排泄。

孔隙潜水赋存于第四系松散堆积层中，由于覆盖层结构的不均匀性，故出现短时承压现象。由于这些堆积体面积狭小，厚度不大，地下水赋存条件差，泉规模一般较小。主要为大气降雨入渗，然后以泉水形式集中排出。

2.1.3 洪水特性

大渡河洪水主要由降水形成。因受高程、地形及地理位置的影响，上游大多数地区基本未出现过暴雨。由于集水面积大、流域形状狭长、支流多沿干流对称发育、汇流不集中、加之植被较好以及地表有利于下渗和滞流等原因，形成的洪水具有量大、峰不高，缓涨缓落，历时较长的特点，最大涨率每小时仅 $100\text{m}^3/\text{s}$ 左右。过程多呈复峰型且涨落缓慢，大中洪水一次历时一般 5~11 天。若遇大面积和长历时降雨可形成特大洪水，洪水历时会更长。

大渡河流域主汛期为 6~9 月，年最大流量多出现在 6、7 月份，以 7 月份出现的机会最多，约占 50% 左右，8 月份出现年最大流量的机会较少，约占 10% 左右，9 月份又相对较多，约占 20% 左右。

据泸定水文站 1952~2003 年年最大洪峰流量系列统计，年最大洪水一般发生在 6~9 月，出现在 7 月份的机率最多，占总频次的 51.9% 左右。年最大洪峰最早发生在 6 月 16 日(1971 年)，流量为 $3720\text{m}^3/\text{s}$ ，最晚发生在 9 月 21 日(1974 年)，流量为 $3540\text{m}^3/\text{s}$ 。年最大洪峰系列最大值为 $5800\text{m}^3/\text{s}$ (1992 年 6 月 29 日)，年最大洪峰系列最小值为 $2090\text{m}^3/\text{s}$ (2002 年 6 月 24 日)。该水文站年最大流量在各月发生次数见表 2-4。

表 2-4 大渡河泸定测站年最大流量各月发生频次统计表

站名	项目	6月	7月	8月	9月	10月	共计	统计年限(年)
泸定	次数	10	27	4	11		52	1952-2003
	(%)	19.2	51.9	7.7	21.2		100	

泸定县属于典型的高山峡谷地形，地形地貌非常复杂，地质灾害发育频繁，特别是进入汛期后，大量的降雨过程，极易诱发泥石流、滑坡等地质灾害。2004 年发生的地质灾害相对较少，并且几乎都是发生在 5~9 月的主汛期，据统计，去年共发生以泥石流为主的地质灾害 9 起，经济损失严重，但没有造成人员伤亡。2005 年降雨过程集中，雨水较往年多，全县范围内共发生了 3 起大规模的群发性山洪泥石流、滑坡灾害，10 余起小型山洪泥石流，其中以“6.30”群发性山洪泥石流灾害为最，产生泥石流近 30 万立方米，造成该县杵坭乡、田坝乡、德威乡 13 个村、10516 人受灾，4 人死亡、5 人失踪，230 人受伤（重伤 6 人）；

倒塌房屋 312 间, 337 间受到不同程度损坏, 无家可归 177 人; 冲毁医院 1 座; 毁环耕地 1292.7 亩, 受灾 5001.5 亩, 成灾 4205.3 亩, 绝收面积 863.7 亩, 损失粮食 123.14 万公斤。其他农村基础设施损失也十分惨重, 灾害共造成直接经济损失 6019.98 万元, 间接损失无法估算。“8.11”泥石流造成磨西上千名游客被困, 电站被冲毁, 省道 211 线得妥段上百米路基被毁。

2.2 地形地貌

研究区属川西地槽区, 地处青藏高原向四川盆地的过渡地带, 境内山高坡陡, 河谷幽深, 峰峦重叠, 沟壑交错, 地势起伏大, 西高东低, 新构造运动强烈, 形成典型的高山峡谷地貌, 图 2-5。大渡河由北向南将全县分割为东西两部分, 沿河两岸支沟发达, 与大渡河呈正交分布, 在其交汇处多形成洪积扇或洪积锥地貌, 河谷或沟谷均呈“V”型, 谷缘到谷底的相对高差较大, 一般在 2000m~3000m, 最高达 6500m。研究区内地貌类型按成因可以分为阶地、河谷扇形地、台地和山地。阶地主要是在大渡河流域河流迅速下切形成的, 如泸桥沙坝等; 河谷扇形地多形成于山溪注入大渡河的河曲处, 因其土质肥沃多为县内的重要耕地, 如城区、沈村等; 台地是由于强烈冰川、溪流剥蚀切割形成的, 如沈村堡子、泸桥海子坪等台地; 山地多为中山、高山和极高山, 多分布于贡嘎山东坡和部分北坡的磨西、新兴乡等大雪山脊一带。

本区东靠邛崃山, 西依大雪山, 山势展布与主要构造线走向基本一致。东部邛崃山一带海拔一般 3000m~4500m, 夹金山山峰高达 4930m; 西部大雪山海拔一般 4500m~5500m, 贡嘎山主峰高达 7556m, 泸定之西华山海拔 6076m。区域内第三纪末期以来的夷平面可大致划分为三级: 一级夷平面高程 4400m~4600m, 为准平原被破坏后剧烈抬升形成的准平原化夷平面, 即高原期夷平面; 二级夷平面高程 4100m~4200m, 属剥蚀面, 三级夷平面(二郎山期)高程 3500m~3600m, 属剥蚀面未能充分发展, 呈残留肩状平台分布。

区内大渡河河段为深切曲流河谷地貌, 河谷下部呈明显“V”形峡谷, 中上部具就“U”形宽谷特点。两岸海拔 3600m 以上, 特别是 4200m 以上的高山区常见冰斗、刃脊、角峰、冰川槽谷(悬谷)等冰蚀地貌遗迹及高山“海子”(古冰川、冰斗、冰湖的残余), 表明第四纪以来有过山谷冰川活动。大渡河及其支流河谷狭窄, 水流湍急, 河谷形态以“V”型为主, “U”型相间, 两岸谷坡阶地分布零星, 可见规模不等的 I-VI 阶地, 其中 I、II 级阶地保存较好, III级以上阶地仅局部残存。I 级阶地为堆积阶地, II 级为堆积或基座阶地, III-VI 级阶地为基座阶地。阶地的发育与分布总体反映出第四纪以来本区强烈上升隆起, 河流急剧下切侵蚀以及冰川作用强烈的特点。各级阶地发育特征见表 2-5。

表 2-5 泸定大渡河段阶地特征表

级别	类型	拔河高度(m)	组成物质	形态特征	时代	典型分布位置
I	堆积	5-12	砂卵砾石及中细砂层	平台状, 厚一般 5-10m, 局部 15m 左右, 较平缓, 规模较大。	Q ₄ ¹	较普遍
II	堆积或基座	15-30	砂卵砾石及块碎(卵)石层	平台状, 厚一般 5-7m, 局部 15m 左右, 较平缓, 规模较大。	Q ₃ ³	较普遍
III	基座	50-60	黄色砂砾石及粗砂层	平台状, 厚度一般 10-30m, 规模较大。	Q ₃ ²	上田坝、沈村
IV	基座	130-150	含漂(块)砂砾石层	小平台状, 厚 25-50m。	Q ₃ ¹	上田坝一带
V	基座	300-440	泥砾及粗砂、岩块组成混合堆积	完整性差, 厚度一般 10—40m	Q ₂ ²	上田坝——海子坪、甘谷地
VI	基座	600-700	下部为砾石及砂砾石; 上部为半胶结亚粘土、粘土及亚砂土	分布范围小, 完整性差, 厚度局部 70m	Q ₂ ¹	海子坪、五里沟左岸山顶、喇嘛寺

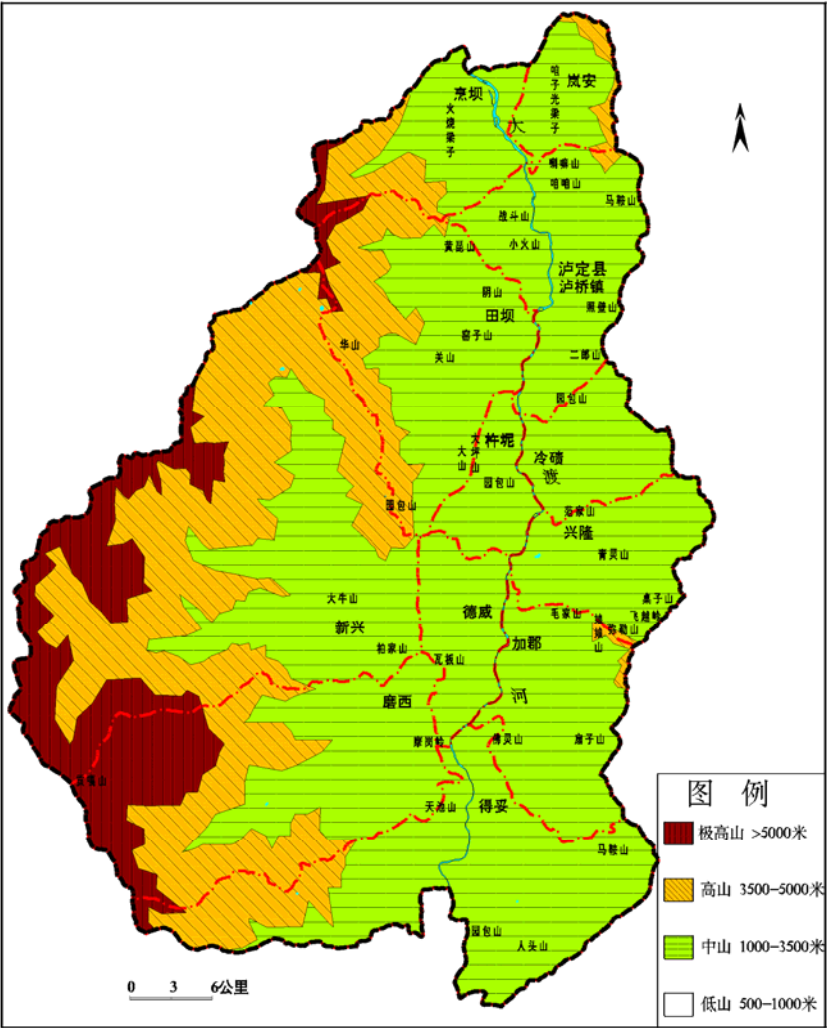


图 2-5 泸定县地貌分区图

2.3 地层岩性

研究区内地层除寒武系缺失外，从前震旦系到第四系均有不同程度的发育。大致以龙门山-小金河断裂为界，可分为西北部地槽变质岩区和东南部地台沉积岩、岩浆岩区，以及介于两区之间的西北区，地层分布情况见表 2-6。

西北部地槽区出露地层为一套巨厚堆积的前震旦系——三叠系变质火山岩系和变质碳酸盐建造及类大理石建造。而东南部地台区，则以晋宁-澄江期岩浆岩和一套发育不全的元古界-中生界的碳酸盐岩及陆相碎屑岩为特征。西相区是指川滇古隆起北段东侧之早期南北向狭长断陷带的五大寺、昌须、昌昌以及岚安等地，为一套发育极不完全的古、中生界浅海相泥砂岩-碳酸岩及内陆沼湖碎屑岩建造，且含石膏及煤线，总厚度 1415m。

区内岩浆岩出露较广，主体以晋宁-澄江期侵入岩为主，喷出岩次之。晋宁-澄江期侵入岩广泛分布于南北向构造带的大渡河两岸和二郎山一带，岩性以斜长花岗岩、花岗岩、闪长岩为主（俗称“康定杂岩”）。喷出岩零星分布于川滇古隆起北端的康定县金汤-孔玉等地，属前震旦系盐井群，以变质凝灰岩、变质流纹岩为主。

第四系各种不同成因类型的松散堆积层沿河谷及谷坡分布，冲洪积广泛分布于沟口、河床及两岸阶地，残积、崩坡积、冰川、冰水堆积主要分布于山顶平台及缓坡地带。

表 2-6 区域地层简表

界	系	统	群(组)	代号	厚度 (m)	岩 性 描 述
新 生 界	第四系	全新统	冲积层	a _{lQ4}	9-10	上为亚砂土，下为砾石层。为近代河流冲积层。
		上更新统 中下统	冲积层	a _{lQ3}		上为亚粘土，其下为河床相砾石层。洪积层 p _{lQ3} 厚 10-25 米，曲沥砂砾石。
			冰水沉积层	f _{glQ2}		上为亚粘土，下为泥砾石。
				f _{glQ1}	11	由亚粘土及砾石组成之泥砾层。
	下第三系	渐新统	芦山组	E _{3l}	550-691	棕红色泥岩夹钙质粉砂岩。
		古始新统	名山组	E _{1-2mn}	413-691	暗棕红色泥岩夹杂色泥质，钙质粉砂岩，灰色页岩。
中 生 界	白垩系	上统	灌口组	K _{2g}	465-841	棕红、砖红色泥、钙质粉砂岩，细砂岩，砂泥岩夹角砾状泥灰岩。
			夹关组	K _{2j}	421-696	棕红色，中一厚层钙质砂岩夹泥岩、粉砂岩，中有斜层理冲迹构造，底为厚层块状砾岩。
		下统	天马山组	K _{1t}	341-331	紫红、棕红色钙质岩屑砂岩、细砂岩、泥岩、砾岩。

		上统	蓬莱镇组	J _{3p}	225-733	紫红，细一中粒钙质岩屑砂岩，泥质粉砂岩夹泥岩，棕红色钙质泥岩，底部有厚 2-3 米含砾砂岩。			
中生界	侏罗系	中统	遂宁组	J _{2sn}	80-295	棕红色泥岩夹薄层砂岩，紫红色钙质泥岩夹粉砂岩，泥质砂岩。			
			沙溪庙组	J _{2s}	1132	浅绿灰色钙质细砂岩，粉砂岩，紫红色泥岩相间，其斜层理，底部有砂岩夹细砾岩透镜体。			
		下统	自流井群	J _{1-2zl}	145	紫红色泥岩，杂色厚层钙质岩屑砂岩及钙，砂质泥岩，下部浅灰色薄层泥质粉砂岩，厚层石英砂岩。			
	三叠系	上统	须家河上组	T _{3x2}	581-734	灰，深灰色泥岩，砂质泥岩，泥质粉砂岩夹页岩，煤层，底部为粗粒岩屑砂岩。			
			须家河下组	T _{3x1}	1021	薄一中厚层砂质泥岩，粉砂岩，页岩，有煤数层。			
		中统	雷口波组						
		下统	嘉陵江组	T _{2j}	187-380	紫红，灰色薄一中厚层白云岩，泥质白云岩夹灰岩，白云质角砂岩。			
			飞仙关组	T _{1j}	83-298	浅灰，灰色白云岩，白云质泥灰岩夹灰岩，白云质角砾岩，底有紫红色泥砂岩。			
				T _{1f}	62-216	暗紫红色薄层钙质粉砂岩，夹砂页岩，紫灰，绿灰色白云岩，鲕状灰岩。			
	古生界	二叠系	上统	长兴组	P _{2c}	P _{2s}	90	40	石灰岩夹粉砂岩。 凝灰质砂岩，泥岩夹灰岩。
龙潭组				P _{2l}	P _{2β}	48	244	玄武晶屑凝灰岩，铝铁岩等。 暗灰色杏仁状玄武岩。	
下统			茅口组			P _{1m}	103-370	深灰色中厚层状石灰岩夹生物碎屑灰岩，白云岩等。	
			栖霞组			P _{1q}	25-127	灰白色白云质灰岩，灰质白云岩；中厚层灰岩，生物碎屑灰岩。	
			梁山组			P _{1l}	6-20	黑色炭质页岩，泥质粉砂岩，底有砾岩。	
泥盆系			上统				D ₃	86	深灰、灰白色中厚层结晶白云质灰岩，下有含铁砂泥岩，产赤铁矿。
		中统	观务山组			D _{2g}	212	浅灰色白云岩，泥质白云岩夹灰岩。	
			养马坝组			D _{2y}	582	石灰岩夹页岩，泥质灰岩等。	
		下统	甘溪组			D _{1g}	141-427	灰色泥质粉砂岩夹泥灰岩，灰岩。	
			平驿铺组			D _{1p}	122-769	灰黑、灰色泥页岩，中-厚层石英砂岩，夹粉砂岩，灰岩等。	
志留系		上统				S ₃	10	薄-厚层状白云岩，页岩等。	
		中统	罗惹坪组			S _{2l}	267	砂质页岩，夹泥岩，白云岩。	
		下统	龙马溪组			S _{1l}	36	页岩夹泥灰岩；炭质页岩。	
		奥陶系	上统	五峰组			O _{3w}	0-3	炭质页岩，粉砂质页岩。
临湘组				O _{3l}	2-10	灰、浅灰色网格状泥质日岩，白云岩。			
中统			宝塔组			O _{2b}	8-25	浅灰、灰白色中厚层龟裂纹白云岩。	
			巧家组			O _{1-2q}	18-115	浅灰、灰白色薄-厚层石英砂岩，粉砂岩夹白云岩，含磷矿层。	
			下						

		统	红石崖组	O_{1h}	385	紫红色含砾砂岩、细砂岩夹页岩。
元 古 界	震旦系	上统	灯影组	Z_{bdn}	0-720	灰白、白色葡萄状白云岩，底部有几厘米含砾砂岩。
		下统	苏雄组	Z_{as}	152	紫灰色流纹岩夹基性火山岩。
	前震旦系		黄水河组	P_{thn2+3}	500	炭质石英岩夹石墨片岩及大理岩，与苏雄组接触关系不明。
			中上部岩组 下部岩组	P_{thn}	795	灰绿色酸性火山角砾凝灰岩，由粗至细韵律重复，与上断层接触。

2.4 地质构造

研究区位于川滇南北向构造带北段与北东向龙门山断裂带、北西向鲜水河断裂带交接复合部位，在大地构造部位上处于扬子准地台之二级构造单元康滇地轴北段，其西北面与松潘甘孜地槽褶皱系为邻，东面及东北面分别与四川台拗和龙门山台缘断裂带相连。本区自早元古代以来，经历了晋宁运动、澄江运动、海西运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动等多期次构造运动，先后形成了各种不同方向、不同大小、不同规模 and 不同形成机制的构造系统。川滇南北向构造带、北东向龙门山构造带、北西向构造带和金汤弧形构造带构成了本区最基本的地质构造框架，主要断裂的特征见（表 2-7）。

表 2-7 区域主要断裂特征表

断裂构造归属	断裂名称	断裂产状			破碎带宽度(m)	上盘位移方向	断裂形成机制	断裂类型	断裂成型期
		走向	倾向	倾角					
川滇南北向断裂带	泸定断裂	SN—NNE	W—NWW	陡	500—1000	E→W		韧性叠加脆性	澄江期
	红锋断裂	SN	W	缓—陡	>6	W→E	逆冲推覆	脆韧性	印支期
	龙衣寨断裂	SN	W	缓—陡	1—5	W→E		脆韧性	
	昌昌断裂	SN	E	中等—陡	>35	E→W		脆性	
	瓜达沟断裂	SN	E	中等—陡	>14	E→W		脆性	
NW 向构造	鲜水河断裂	NW	SW	陡		SW→NE	逆冲推覆	脆性	燕山期
NE 向构造	龙门山构造带	NE	NW	中等—陡		NW→SE	逆冲推覆	脆性	印支期
金汤弧形构造带	贝母山断裂（捧达断裂）	NW—EW—NE	NE—N—NW	陡	10	N→S	逆冲推覆	脆韧性	印支期—燕山期

2.5 新构造活动

在漫长的地质历史时期中，各构造带它们所经受的历次构造运动的作用和影响程度有很大差异。喜山运动伴随青藏高原的强烈隆起和向 SEE 方向的水平推

挤，加剧了区内各断裂带及其被分割的断块的新活动性，主要表现在：

1) 大面积间歇性急速抬升。喜山运动第一幕之后，大致中新世时期，区域范围内仍经剥蚀夷平形成统一的剥夷准平原。上新世以来，伴随青藏高原的大规模强烈隆起，导致区内剥夷准平原大面积间歇急速抬升和进一步解体，自西北而东南总的抬升幅度达 3500~1500m 不等。

2) 断块之间的不均一性活动。区内 SN 向、NW 向和 NE 向等断裂构造发育，它们将区域范围内分割成若干断块，并形成“Y”字形区域构造框架。喜山运动以来各断块迅速抬升，但其抬升的强度和幅度各异。总的趋势是西北部强东南部弱，区域地貌明显表现为阶梯式下降的特点，显示出鲜明的分区性。形成西部强烈隆起区，中部隆起区和东部弱升区的现代地质地貌格局。

3) 断块边界断裂活动的差异性。区内各主干断裂及边界断裂的新构造活动迹象在地貌、地壳形变、地震活动、断裂位错和水热活动等方面均有不同程度的反映，并表现出差异性的特点。这种差异性主要表现在断裂活动的强度、幅度和活动形式及活动时限等方面。资料表明，区内断裂以北西向鲜水河断裂、磨西断裂的活动性为最强，活动性质为左旋走滑型，属全新世活动断裂；北东向龙门山断裂带（南西段）活动性次之，活动形式为挤压逆冲型，最新活动时代为晚更新世；南北向大渡河断裂带的活动相对较弱，以挤压为主兼弱的左旋走滑性质，主要活动时期为中更新世中期至晚更新世。

4) 区域现今应力场基本上继承了喜山运动晚期构造应力场的总体特征。根据工作区外围 24 次中强地震震源机制解，大多数错动节理面倾角均较大，有 75% 的节理面倾角大于或等于 65° ，有 $1/3$ 的节理面倾角近于直立 ($\geq 80^{\circ}$)；主压应力轴的优势方位为 NW-NWW 向，主张应力轴的优势方向为 NE-NEE 向，多数主压应力轴和主张应力轴的仰角小于或等于 15° 。综合区域断裂活动性质、现代地壳应力测量和震源机制解，表明工作区及其外围地区，处于以水平运动为主的现代构造应力场中，主压应力轴优势方向 NW-NWW 向。

2.6 地震

研究区地处青藏高原地震区的鲜水河地震带、安宁河地震带及龙门山地震带交汇部位，其中，鲜水河地震带地震活动最强烈，对本区的波及和影响较大，其它两个地震带的影响相对较弱（见表 2-8）。根据地震资料统计：研究区外围 300km 范围内自公元 1216 年以来，共记载 7.0~7.9 级地震 7 次；6.0~6.9 级地震 21 次；5.0~5.9 级地震 71 次。近场区 25~50km 范围内记载到 7.0~ $7\frac{3}{4}$ 级地震 2 次；6 级地震 2 次； $5\frac{1}{2}$ 级地震 1 次。表明研究区外围及近场区范围内的地震活动水平是较高的。

表 2-8 泸定县周围历史强震特征

序号	发震时间	震中位置 北纬(度)东经(度)		参考地点	震级	场址至 震中距 离 (km)	宏观 影响 烈度	计算 烈度	影响 烈度
1	1536.3.29	28.1°	102.2°		$7\frac{1}{2}$	202	*	5.8	6
2	1725.8.1	30.0°	101.9°	四川康定	7	33	VIII—		VIII—
3	1748.8.30	30.4°	101.6°	四川康定西北	$6\frac{1}{2}$	81	*	5.6	6
4	1786.6.1	29.9°	102.0°	四川康定、泸 定磨西间	$7\frac{3}{4}$	22	VIII		VIII
5	1786.6.2	29.9°	102.0°	四川康定南	6	22	*	6.3	6
6	1893.8.29	30.6°	101.5°	道孚、乾宁间	7	103	<VII	6.0	6
7	1932.3.7	30.1°	101.8°	道孚、炉霍间	6	46	*	5.6	6
8	1941.6.12	30.1°	102.5°	四川康定金汤	6	33	*	5.9	6
9	1948.5.25	29.5°	100.5°		7.3	173	*	5.6	6
10	1952.6.26	30.1°	102.2°	四川康定东	$5\frac{3}{4}$	20	*	6.1	6
11	1955.4.14	30.0°	101.9°	康定折多塘	$7\frac{1}{2}$	33	VII		VII

第3章 泥石流发育类型和分布特征

3.1 泥石流发育类型

泥石流的发育跟其所在的地质、地貌等条件有关，根据不同的分类方法，可以将泥石流发育分不同类型：

1) 按沟谷地貌特征分类

此种分类方法将泥石流分为两类：沟谷型泥石流和坡面型泥石流。其中沟谷型泥石流的流域为长条形，形成区不明显，两侧谷坡为泥石流物质的主要供给区，另外流通区很长，堆积区有时明显有时不明显，主要根据汇入的主河是淤积的还是下切侵蚀的，如果是淤积的则有明显的堆积区，如是下切侵蚀的，则无堆积区；坡面型泥石流主要发育在山坡上的，是在各种不良地质作用下产生的小型泥石流沟，没有明显的汇水区，只是山坡上发育的小型冲沟和切沟。

2) 按水源条件分类

按水源条件可将泥石流分暴雨型泥石流、冰雪融水型泥石流和水体溃决型泥石流。暴雨型泥石流是指在强降雨作用下，土体下滑失稳从而形成泥石流，此类泥石流是所有泥石流中分布最广的；冰雪融水型泥石流主要发源在高寒冷山区，由于冰雪的消融激发形成的泥石流，在我国西藏地区常发生此类泥石流；水体溃决型泥石流主要是由于水库、堰塞湖、冰湖及滑坡崩塌形成的临时性湖泊溃决而引起的泥石流。

3) 按土源条件的分类

按土源条件可分为水石流、泥流和泥石流。水石流主要发育在风化不严重的火山岩、灰岩、花岗岩等山区，其特点是粗颗粒占绝大部分，特别是粒径大于2mm以上的砾石和块石占总量的90%以上，仅有少量的沙和粉沙，黏粒含量极少；泥流主要发育在第三、第四系地区，尤其在我国西北地区，主要以此种类型的泥石流为主；泥石流介于以上两种泥石流之间，在我国西南山区常见这种泥石流。

4) 按发生频率分类

按发生频率可分为高频率泥石流、中频率泥石流和低频率泥石流。高频率泥石流是指一年暴发多次或几年暴发一次的泥石流，例如云南东川的蒋家沟、甘肃的火烧沟等；中频率泥石流是指十几年至几十年暴发一次的泥石流，这类泥石流在我国和日本分布也较为普遍；低频率泥石流是指百年以上到几百年才发生一次的泥石流，这类泥石流多发生在山区，平常不引人注意，所以一旦发生，造成的损失是巨大的。

除以上较为常见的泥石流发育类型分类方法以外，在泥石流研究领域中还按泥石流发展历史分类的，此种分类方法将泥石流分为现代泥石流、老泥石流和

古泥石流；按形成泥石流的力源分为土力类泥石流和水力类泥石流；按泥石流运动流态分为紊流型泥石流、层流型泥石流和蠕流型泥石流等；按照发生的规模大小分为小型泥石流、中型泥石流和大型泥石流等。

综上，根据泥石流发育类型不同的分类方法，本研究 17 条泥石流可分为：1) 按沟谷地貌特征发育分沟谷型泥石流 16 条，坡面型泥石流 1 条；2) 按水源条件发育分 17 条泥石流都为暴雨型泥石流；3) 按土源条件的发育分有 13 条沟为泥石流，4 条沟为水石流，具体见表 3-1。

3.2 泥石流分布及分布特征

根据野外实地调查情况，所选取的 17 条泥石流沟，其分布特征可从孕育其发生、发展和演化的环境方面进行分析，主要体现在泥石流分布的地貌特征、地质特征、水文特征、植被与人类活动特征等，其在地图上分布见图 3-1。

泥石流分布的地貌特征，主要体现为泥石流分布的区域地貌特征和流域地貌特征两个方面。区内山高坡陡，沟谷发育，沟床陡峭、狭窄，泥石流的物源区、流通区、堆积区十分清晰。物源区面积较大，多属高山和山地地貌；流通区往往长达数公里，地貌从山地过渡到河谷；堆积区一般位于支流与大渡河交汇处，少数坡面泥石流堆积区则属山地地貌。泥石流三区所处的地貌及地貌过渡带增加了泥石流运动的动能，同时也增加了泥石流运动和演化的复杂性。

泥石流分布的地质特征，主要体现在泥石流分布与地层、岩性和构造之间的关系。据资料分析，区内共分布有 11 套不同地质年代（系）的地层，主要以砂岩、泥岩、页岩为主，其中泥石流沟主要分布在花岗岩和二叠系砂岩区。区内构造复杂，断层发育，泥石流分布与构造有密切的联系。根据泥石流所处位置与各类构造的关系，分别进行了统计，结果是，分布在构造复合部位的泥石流居首位，分布在断层及邻近区域的泥石流居第二位，分布在褶皱轴部的泥石流居第三位，受构造影响较小的区域泥石流分布最少。

水既是泥石流组成的物质，又是泥石流形成的水动力条件，其中暴雨洪水、冰雪融水、溃决水和地下水往往又是泥石流形成的激发因素。泸定县处于半高山及高山地区的气候恶劣，寒冻风化作用强裂，岩体易破碎，区内大小河流、溪沟分布状如叶脉，细小支沟冲刷和侵蚀沟侧及沟底，为泥石流提供“V”字型流通渠道，沿大渡河谷呈亚热带气候，雨量充沛，降水丰沛，日照少，空气湿润，年平均相对湿度 80%左右，年平均降雨量为 1080mm。境内干湿气候分明，5~9 月属湿性气候期，10~4 月属干性气候期。河流冲刷侵蚀作用较强烈，降雨丰沛而且集中，但降雨量极不均衡，冬天少雨，而夏季多雨，并且是地震易发区，这些都为地质灾害的发育的提供了前提条件，特别是沿着大渡河两岸泥石流灾害最为突出流通区、堆积区十分清晰。

林、人工林和灌丛、草被等，充分反映了人类经济活动的痕迹。泥石流分布与人类经济活动的关系具有二重性，即人类可以通过不合理的经济活动对环境造成破坏，使环境朝着有利于泥石流形成的方向发展，导致泥石流分布范围和分布密度增大；但人类也可以通过合理的经济活动改善环境，使环境朝着不利于泥石流形成的方向发展，导致泥石流活动的削弱甚至导致某些泥石流的消亡，从而使泥石流的分布范围和密度减小。根据以上分析，得到研究区泥石流特征及表 3-1：

表 3-1 研究区泥石流分布及特征及威胁对象统计表

编号	灾害名称	地理位置	沟槽断面形状	泥石流类型	规模	致灾因素	威胁对象 ^[51]
NSL01	深家沟泥石流	泸桥镇泸桥村营盘组	V 型	泥石流	中	暴雨	泸定县城区
NSL02	木厂沟泥石流	泸桥镇泸桥村营盘组	V 型	泥石流	中	暴雨	泸定县城区
NSL03	羊圈沟泥石流	泸桥镇泸桥村营盘组	V 型	泥石流	中	暴雨	泸定县城区
NSL04	磨河沟泥石流	田坝乡磨河村	U 型	水石流	大	暴雨	49 户 209 人
NSL05	干沟泥石流	泸桥镇大坝村二组	V 型	泥石流	小	暴雨	3 户 15 人及 318 国道
NSL06	黄坭沟泥石流	泸桥镇大坝村二组	V 型	泥石流	小	暴雨	4 户 20 人及 318 国道
NSL07	挖脚沟泥石流	泸桥镇挖脚村	V 型	泥石流	中	暴雨	23 户 89 人及 318 国道
NSL08	三叉沟泥石流	杵坨乡杵坨村三组	U 型	泥石流	大	暴雨	10 户 45 人
NSL09	田家沟泥石流	杵坨乡杵坨村三组	U 型	水石流	大	暴雨	23 户 81 人及乡政府
NSL10	麻沙坡沟泥石流	杵坨乡杵坨村三组	V 型	泥石流	中	暴雨	14 户 56 人及乡政府
NSL11	羊儿沟泥石流	杵坨乡杵坨村三组	V 型	泥石流	大	暴雨	5 户 20 人
NSL12	金华沟泥石流	杵坨乡杵坨村一组	U 型	泥石流	巨	暴雨	10 户 40 人
NSL13	扯索沟泥石流	杵坨乡联合村一组	U 型	泥石流	巨	暴雨	6 户 27 人
NSL14	磨子沟泥石流	德威乡磨子沟	U 型	水石流	巨	暴雨	9 户 33 人
NSL15	涨水沟泥石流	德威乡咱威村咱威组	U 型	水石流	大	暴雨	15 户 40 人
NSL16	落石沟泥石流	德威乡咱威村二里坝组	V 型	泥石流	中	暴雨	6 户 19 人
NSL17	加郡沟泥石流	加郡乡一村二组	U 型	泥石流	大	暴雨	2 户 19 人及 211 省道

表 3-1 和图 3-1 表明，所选的 17 条典型泥石流都沿着大渡河两岸自北向南分布，主要集中在泸桥镇、田坝乡、杵坨乡、德威乡和加郡乡等。按泥石流的规模分，主要以大、中型为主（表 3-2）；泥石流沟槽断面形状分，以“U”型和“V”型为主，其中“U”型沟有 8 条，“V”型沟有 9 条；按泥石流物质组成分，泥石流沟 13 条，其余 4 条为水石流沟；所有泥石流主沟纵坡大多在 50—300% 之间，形成灾害的泥石流以暴雨沟谷型泥石流为主，坡面泥石流次之，泥石流沟谷普遍较长，泥石流三个区都较明显，形成区一般都呈瓢形或漏斗形围谷，岩石风化严重，松散物储量丰富，物质来源主要是第四系的松散堆积物、较硬的花岗岩、闪长岩等，有些地方的物质来源除了自然之外，废弃的矿山留下的碎石则成为其

物质来源的主要形式，物源区补给段长度比占到 60%左右；流通区多为深切峡谷，一般较短而直，呈线型，坡度较陡，都在 50° 左右；堆积区位于沟口出口处，纵坡比较平缓，地形开阔，沟口扇形大部分比较完整，沟口扇形发展趋势以下切为主，堆积扇堆积大小不一的堆积物，最大粒径达 4m，其它粒径分选性较好，主要威胁沿河道路行车安全和沟口附近的居民生命财产安全。

表 3-2 泥石流规模划分标准及统计表

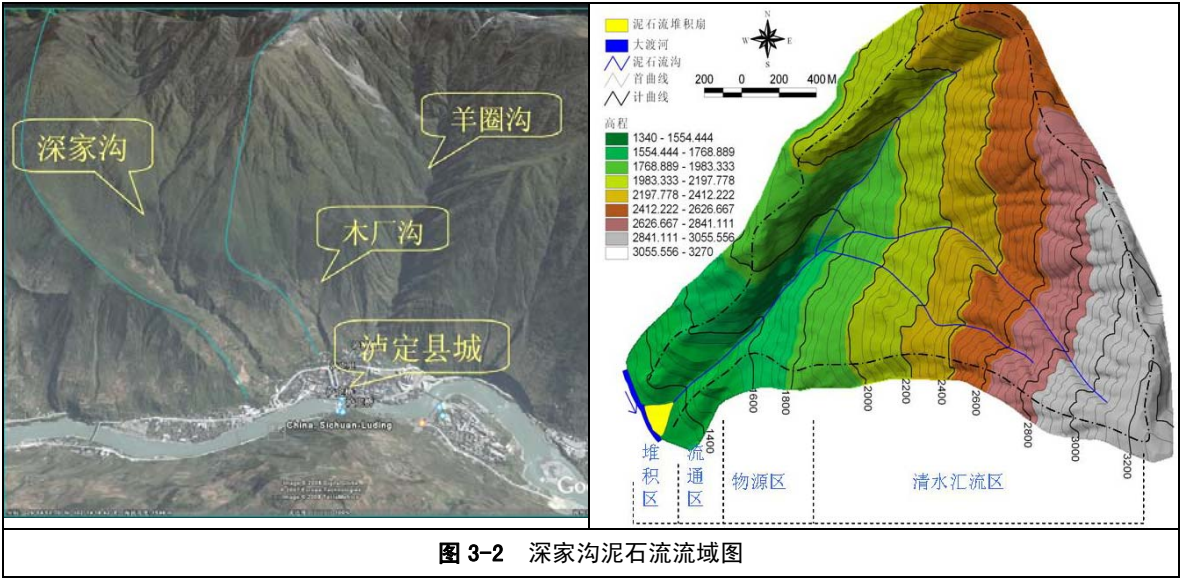
灾 种	级别指标	巨型	大型	中型	小型	合计
泥石流	体积 (10 ⁴ m ³)	>50	50-20	20-2	<2	
	数量 (处)	5	15	15	2	37
	所占比例 (%)	13. 51	40. 54	40. 54	5. 40	100

3.3 典型泥石流沟剖析——深家沟泥石流

3.3.1 流域及地形地貌概况

深家沟位于泸定县城区（图 3-2），大渡河左岸，系大渡河流域一支沟，2006 年 7 月 14 日零晨 1 时 19 分，暴发了一场泥石流，历时 4 个小时左右，由于爆发突然，历时较长，并且紧挨泸定县城区，给当地的经济带来了较严重的损失。

该泥石流沟流域面积约 3. 86km²，其中清水区约 1. 72km²，物源区约 1. 60K²，流通区约 0. 1km²，堆积区约 0. 08km²。主沟长约 1. 79km，最高海拔 3281m，最低海拔高 1300m，相对高差达 1981m，主沟为“V”型谷，沟床宽 3~20m，两岸山坡较陡，左岸坡度 40°~60°，右岸坡度稍缓，为 20°~45°。该沟与木厂沟和羊圈沟相邻，沟上游分有三条支沟，分别为太阳沟、老鹰石沟和曹家沟，其中以老鹰石沟汇流面积最大，是目前深家沟的主要汇流区。



3.3.2 地质环境概况

沟内出露地层以泥盆系、震旦系及第四系为主。岩性以白云岩、灰岩、千枚岩、砂岩及花岗岩为主，且地层倾角较大，在 40° – 60° 之间。区内地层遭受了多次的构造运动、解理裂隙较发育，这些都为泥石流的发育提供了很好的物质来源。

3.3.3 深家沟泥石流成因分析

1) 短时强降水

深家沟地处四川盆地到青藏高原过渡带上，受东南、西南季风和青藏高原冷空气双重影响，气候垂直差异明显，冬季干燥温暖，夏季温凉湿润，年平均无霜期 279 天，日照时数 1323.6 小时。据泸定县气象站（其中台站海拔高度：1321.2m）资料统计，多年平均气温 15.4°C ，极端最高气温 36.4°C （1961 年 6 月 18 日），极端最低气温 -5.0°C （1967 年 1 月 6 日），多年平均年蒸发量 1526.9mm（20cm 蒸发皿），多年平均相对湿度 66%，多年平均年降水量 642.9mm，历年最大日降水量 72.3mm。

可以说降水是深家沟泥石流发生的主要动力因素。由于受山区地形的影响，降水量的垂直分布特别明显，导致深家沟上游和下游降水量的差别很大。如 2006 年 7 月 14 日深家沟泥石流暴发时县城气象局所观测到当天 24h 最大降雨量为 22.80mm，而前 4 天的降水（7 月 10~13 日）总量只有 17.40mm。但据山上居民的描述，降雨强度远超过下游（县城）气象局所测得的数据。因此，气象局所测得的数据只能反映下游的降水特征，而不能反映泥石流形成区的降水特征。因此短时、强降水是引发该沟泥石流暴发的主要原因之一。

2) 丰富的物源

深家沟泥石流固体物质的补给方式主要以沟道补给为主，固体物质主要来源于沟道松散堆积物和沟道两边的坡面松散物质。根据野外实地调查，沟道两侧山坡上不存在明显或潜在滑坡体，松散物体物质主要集中分布在长约 890m 的物源区，且集中分布在右岸，共有 14 处松散物堆积体，物质组成以碎石土为主，各堆积体的方量 $64\text{m}^3 \sim 1680\text{m}^3$ 不等，总储量约 5400m^3 。

3) 有利的地形地貌

陡峭的地形条件有利于崩塌和滑坡的产生，并在雨水作用或河流的侵蚀下为泥石流的发生提供固体物质来源。深家沟河床比降约 400‰，沟道两边山坡陡峭，平均坡度约 35° ，有利于坡面松散物质的堆积。同时，上游沟道较宽，为坡面松散物质在沟道内的堆积提供了场地，因此，深家沟的上游段是泥石流的物源区。清水区高差较大，高差达 1271m，巨大的高差让地表径流具有了巨大的势能，当径流进入沟道时便对沿沟两岸的松散堆积体进行强烈冲刷，并将固体物质带走。

3.4 典型泥石流沟剖析——金华沟泥石流

3.4.1 流域及地形地貌概况

金华沟泥石流（图 3-3、3-4），位于杵坭乡金华村，大渡河右岸，地理位置是北纬 $29^{\circ} 47' 40''$ ，东经 $102^{\circ} 12' 41.6''$ ，属高山沟谷型泥石流。金华沟于 1955 年前曾发生过泥石流，由于年代久远，其灾害损失无法统计。近期 2005 年 6 月 30 号上午 7 点发生了 3 次泥石流，持续近 45 分钟，最大龙头高度可达 5m，大量的物质倾泻至大渡河，造成大渡河瞬间断流，死亡人数 6 名，大牲畜 8 头，5 户民房全毁，2 户房屋半毁，15 亩农田全毁，8 亩半毁，小桥涵 1 处，道路约 0.3km，水渠 2km，图 3-5、3-6。

该沟主沟长约 4420m，流域面积约 3.1km^2 ，最大高程约 2950m，最低高程约 1250m，相对高差 1700m，泥石流沟上部呈“V”型，下部呈“U”型，泥石流形成区平均坡度 $23^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ，流通区平均坡度 8° ，沟床在堆积区平均坡度 6° 另有三处高 10m~20m 的跌水陡坎。山坡坡脚 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。



3.4.2 地质环境概况

该泥石流沟发育于元古代石英闪长岩、混合质花岗岩、角砾状几条带状花岗岩、钾长花岗岩中，主沟中上部有两条断层切沟穿过。形成区的地形坡度 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ，覆盖层厚度总体不大，一般在 1m~4m 之间，主要表现为残破碎形成的碎、块石土，土体结构松散，由于基岩面坡度较大，受强降雨影响时，极易垮塌。下伏基岩风化强烈，总体破碎。该泥石流的流通区与形成区联系较为紧密，大部分地段既是流通区，亦是形成区。沟道总体顺畅，沟床上部陡峭地段为基岩，沟谷形态呈 2m~6m；下部距沟口约 150m，平缓地段为圆砾、卵石，沟谷形态呈“U”型，谷宽 10m~5m。总体来看，沟岸坡度一般在 $30^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 之间，由第四系残坡积物与元古石英闪长岩、混合质花岗岩、角砾状及条带状花岗岩、钾长花岗岩组成。基岩风化作用强烈，岩体破碎，呈块状，易形成碎、块石掉落，上覆土层为崩坡积碎石土，厚 1m~5m，结构松散，碎石占 30%~40% 左右，其余为粉土、粘土。虽然该泥石流沟沟侧的覆盖层厚度不大，且植被茂盛，但由于其下伏基岩面陡峭，在强降雨情况下，土体容易发生垮塌现象，从而堵塞沟床，为泥石流的形成提供较丰富的物源。目前，流通区内未见淤塞现象，仅在沟口宽缓开阔段有孤石停留。堆积区受地形的影响，呈不规则的扇形，长约 327m，宽 150m，堆积物厚度 3m~6m，最厚处可达 8m 之上。堆积区总体积近 $20 \times 104 \text{m}^3$ 。物质成分为石英闪长岩、花岗岩、钾长花岗岩碎块石，局部有块直径达 6m 的孤石。从扇顶但扇缘，颗粒粒径逐步变小。

根据现场调查该泥石流沟内未见淤塞情况，沟内亦无较大规模的垮塌现象，但应当注意的是由于该沟汇水面积约 2.6km^2 ，加之坡体陡峭，汇水迅速，基岩破碎，覆盖层结构松散且稳定性较差，在持续性强降雨的作用下，再度诱发泥石流的可能性仍然存在，这将威胁到金华村村民的生命财产安全，同时还威胁到道路、桥梁、输电线路及旁山水渠。

3.4.3 金华沟泥石流成因分析

1) 丰富的物源

泥石流的形成必须具备三个基本条件：丰富的物源、有利的地形和足够的水源条件。每一次泥石流的形成，只有具备一定的松散碎屑物质，才能形成泥石流。在地质条件上，决定松散固体物质来源的主要因子有岩性、构造、新构造运动、地震、火山运动、外地表的风化作用、各种重力地质作用、流水侵蚀搬运作用等，这些相互关联、错综复杂的地质条件组合，决定参与泥石流活动的松散碎屑物质数量多少。

金华沟主要发育有元古代石英闪长岩、混合质花岗岩、角砾状几条带状花岗岩、钾长花岗岩等，两条断层从该沟切割而过，使得该区岩石破碎，基岩风化作

用强烈,通过野外实地调查,沟道两侧山坡上存在明显或潜在滑坡体和松散堆积体,总储量约 $40 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

2) 短时强降水

泥石流的形成还要有充足的水源,其发生的水源主要来源有大气降水,其次为地下水和冰雪融水。一方面水体是泥石流物质的组成部分,另一方面在泥石流汇流过程中水又是泥石流运动的动力条件。我国处于典型的季风气候区,雨量充沛,降水集中,多暴雨和特大暴雨,其中短时强暴雨对泥石流的激发起着重要作用。在日本,激发泥石流的 1 小时雨强一般都在 30mm 以上,10 分钟雨强在 7—9mm;在我国川西地区激发泥石流的 1 小时雨强也在 30mm 左右,10 分钟雨强在 10mm 以上。

根据野外实际采访,金华沟泥石流暴发正处在西南多雨季节,强大的短时降雨加上之前已经持续几天的下雨,引发金华沟泥石流的发生。

3) 有利的地形条件

有利的地形地貌是泥石流形成的三个基本条件之一,主要为泥石流提供动能。在地形条件中,对泥石流的形成产生直接影响的有沟谷相对高差、沟的坡度及流域形状和沟谷形态。沟谷相对高差对泥石流的形成起关键作用,因为相对高差可提供泥石流的势能,相对高差大,提供的势能就大,形成泥石流的动力就大,这也是泥石流常发生在山区的一个重要原因。据统计,如果一条沟要发生泥石流,其相对高差至少要在 300m 以上,才可能发生泥石流。川西、滇北、陇南等地的泥石沟,其海拔相对高差一般在 1000~2000m,如川西甘洛县利子达沟相对高差达 2630m。山坡坡度的大小直接影响对泥石流的活动,凡是泥石流发育的山地,山坡坡度都较陡,据资料统计表明,在我国西部山区,高山、中山发育的泥石流沟,其山坡坡度平均在 $28^\circ \sim 50^\circ$,东部低山在 $25^\circ \sim 45^\circ$ 。坡度越大,地表汇流时间越小,洪水峰值大而历时短,极有利于泥石流的形成,另一方面,坡度越大,地表坡面的松散物质的移动可能性就越强,越有利于泥石流的形成。流域的形状和沟谷形态对雨水和暴雨径流汇集有明显影响,泥石流沟谷流域的形状主要有叶形、雨状形、树枝形和长条形等,在以上各种形状中,最有利于形成泥石流的形态为圆形或似圆形。

其金华沟的地貌正好符合上述特点,其主沟长 4420m,相对高差 1700m,泥石流形成区平均坡度 $23^\circ \sim 50^\circ$,流通区平均坡度 8° ,沟岸坡度一般在 $30^\circ \sim 70^\circ$ 之间,沟床在堆积区平均坡度 6° 还有三处高 0m~20m 的跌水陡坎。这些都为泥石流的形成提供了强有利的动力条件。

第4章 泥石流危险性评价

4.1 泥石流危险性评价

泥石流危险性评价是泥石流灾情评估、预测、防灾救灾决策的基础，不仅反映泥石流的活跃程度，还可反映泥石流对人和物的可能破坏能力。

危险性是指遭受损害的可能性大小，是一个概率概念，定量表达即为危险度，危险度(Risk degree)是危险程度的简称，泥石流危险度(Debris flow risk degree)指河谷流域内一切人和物有遭到泥石流损害的可能性大小，与泥石流本身的规模和泥石流发生的可能性大小有关，在[0, 1]上取值。

根据泥石流的研究范围不同或服务对象的不同，可将泥石流危险性评价分为点评价、面评价或区域性评价^[53]。泥石流灾害点评价是指对具有相同活动条件和特征的相对独立的泥石流沟或相邻近、具有统一动力活动过程和破坏对象的几条泥石流沟进行评价，其评价的范围一般不超过几十平方公里，行政区范围一般也不超过几个乡(镇)或一个县，它是其他评价工作的基础，其特点是评价面积较小，致灾体(泥石流)和承灾体(或称受灾体，指破坏对象)清晰明确，评价精度高，采用的指标、模型以及得出的评价结果定量化程度较高；面评价或区域评价是对一个具有相对统一的自然流域、一个地区或是更大的区域内的泥石流沟进行评价，评价面积一般从几十平方公里到几千平方公里，行政范围一般为一个县(市)或几个县，其特点是致灾体的成灾条件复杂，致灾因素多样，承灾体类型多，分布广，特征复杂，许多因素具有较高程度的模糊性和不确定性，因此采用的指标多为相对指标，评价结果定量化程度较低。

综上所述，将点评价、面评价或区域评价的基本特点总结如表(4-1)。

表 4-1 泥石流危险性评价范围及其特征

评价类型	评价对象	评价面积	评价范围	评价意义	评价手段	评价精度
点评价	相对独立的泥石流沟	一般不超过几十平方公里	不超过几个乡(镇)或一个县	为抗灾、救灾和实施防治工程提供依据	专门调查统计和必要的观测、试验	比较精确量化
面评价或区域评价	一个地区或是更大的区域内的泥石流	几十平方公里到几千平方公里	一个县(市)或几个县	为布署防治工程和地区规划提供依据	专门调查统计	一般量化

本文根据该 17 条泥石流沟发育的地质环境背景条件、流域和空间发育分布特征，威胁对象的分布特征，在危险性评价上主要以点评价为主。

4.1.1 泥石流危险度评价方法的选择

通过对国内外用的较多的 4 种泥石流危险度评价方法的比较,得出这些评价方法的基本原理都是依据泥石流分布、形成条件和影响因素等,选择一定的评价指标,再经过一定的数学方法处理,根据各自提出的评价模型,得到不同数值,按不同数值区间确定危险等级。本文研究采用中科院成都山地灾害与环境研究所刘希林教授及导师唐川教授等学者提出的评价方法对该流域内的 17 条单沟泥石流进行危险性评价。

4.1.2 泥石流危险度评价指标

泥石流危险性评价是灾情评价的基础,其主要内容是评价泥石流的活动程度,反映泥石流灾害的破坏能力。泥石流危险性评价主要分为历史灾害强度的评价和潜在灾害强度的评价。历史灾害强度主要包括历史灾害的规模、密度和频率;潜在灾害强度受地质条件、地形地貌条件、气候植被条件、人为条件等的制约。对于历史灾害可以通过统计比较容易地获取这些数据,对于潜在灾害则需要通过一系列分析过程才能获取这些数据,因此是危险性评价研究的主要内容。

影响泥石流发育的因子很多,有:地形地貌、地质构造、气象水文条件、植被、人类活动条件、历史灾害规模、历史灾害频次等。论文通过研究前人对泥石流危险性评价的成果并结合实际工作经验,提出针对本文泥石流危险度评价所需的指标因子。并根据影响泥石流形成的重要性把指标因子中划分为主要因子和次要因子。其中主要因子是决定泥石流发生的内在因子;次要因子是影响泥石流发生的外部环境因子,其选取的方法是:选取与单沟泥石流危险度有关的 14 个候选因子(表 4-2),采用邓聚龙提出的双系列关联度分析方法,即分别将 14 个候选因子与泥石流规模和发生频率进行关联度分析,再根据每个候选因子与泥石流规模和发生频率得出的两个关联度的平均值来确定是否与主要因子关系密切,从而决定次要环境因子^[41]。

表 4-2 14 个候选环境因子与泥石流规模和发生频率的关联度^[41]

候选因子	符号	与规模 M 的关联度 R_m	与发生频率 F 的关联度 R_f	平均关联度 $R = (R_m + R_f) / 2$	相关程度
流域面积	S_1	0.89	0.86	0.88	好
主沟长度	S_2	0.88	0.85	0.86	好
流域相对高差	S_3	0.88	0.85	0.86	好
主沟床坡度	S_4	0.85	0.83	0.84	中等
形成区山坡平均坡度	S_5	0.86	0.83	0.84	中等
流域切割密度	S_6	0.89	0.86	0.87	好
主沟床弯曲系数	S_7	0.86	0.83	0.84	中等
松散固体物质储量	S_8	0.84	0.82	0.83	中等
不稳定沟床比例	S_9	0.87	0.85	0.86	好
24 小时最大降雨量	S_{10}	0.86	0.83	0.84	中等

年平均降雨量	S_{11}	0.86	0.83	0.84	中等
植被覆盖率	S_{12}	0.93	0.82	0.82	中等
垦殖指数	S_{13}	0.85	0.83	0.84	中等
人口密度	S_{14}	0.85	0.83	0.84	中等

泥石流规模 m 用一次泥石流冲出物堆积方量来表示, 单位 $10^4 m^3$ 。泥石流规模越大, 遭到泥石流损害的可能性就越大。泥石流规模是影响泥石流危险度的最直接指标之一, 属主要因子;

泥石流发生频率 f 用历史上泥石流发生次数除以统计年数来表示, 单位次/100 年。对泥石流危害对象来说, 当泥石流规模不大时, 对其造成的损害可能较轻, 但若泥石流发生频率很高, 对其造成的累积损害仍然可能很大; 当泥石流规模很大且发生频率很高时, 那么遭到泥石流损害的可能性就很大。泥石流发生频率也是影响泥石流危险度最直接的指标之一, 属主要因子;

流域面积 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, 单位 km^2 。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相关, 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泥石流冲出方量, 因此其与泥石流规模和发生频率关系密切, 为危险度评价有显著影响。

主沟长度 s_2 主沟沟头到沟口的平面投影长度, 单位 km 。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能力, 泥石流流程越远, 其动能和破坏力越大, 因此它与泥石流规模和发生频率关系密切, 对危险度评价有显著影响。

流域相对高差 s_3 流域内最高点与最低点之差, 单位 km , 流域相对高差反映流域的势能和泥石流潜在动能。一般来说, 流域相对高差越大, 山坡稳定性越差, 崩塌、滑坡等块体运动越发育, 水流的汇流速度也越快, 发挥泥石流的动力条件就越充分, 因此与泥石流的规模和发生频率关系密切, 对泥石流危险度评价有显著影响。

流域切割密度 s_6 用流域内切沟和冲沟的总长度除以流域面积来表示, 单位 km^{-1} 。一般来说, 流域切割密度越大, 沟道侵蚀越发育, 固体和液体径流可能越大, 泥石流潜在破坏力就越大, 因此它与泥石流规模和发生频率关系密切, 为泥石流危险度评价有显著影响。

不稳定沟床比例 s_9 用不稳定沟床长度除以主沟长度来表示。不稳定沟床比例反映泥砂补给的范围和可能补给量的大小。比值越大, 表明泥砂补给条件越有利于泥石流形成, 因此与泥石流规模和发生频率关系密切, 对泥石流危险度评价有显著影响。

因此得到主要内在因子为泥石流规模和泥石流发生频率; 次要环境因子包括泥石流流域面积、主沟长度、流域相对高差、流域切割密度、不稳定沟床比例。

4.2 评价因子数值的获取

所得的危险度评价主要内在因子和次要环境因子共有 7 个：泥石流规模、泥石流发生频率、流域面积、主沟长度、流域相对高差、流域切割密度、不稳定沟床比例。其中泥石流规模根据野外实际调查获得，泥石流发生频率参考历史文献记载获得，流域面积、主沟长度、流域相对高差主要通过该区域的地形图获得，流域切割密度、不稳定沟床比例也是通过野外实地测量获得，得到实际基础数据见表（4-3）。

表 4-3 大渡河——得妥段 17 条泥石流沟基础数据表

编号	灾害名称	泥石流规模 $m(10^4 m^3)$	泥石流发生频率 $f(\text{次}/100)$	流域面积 $s_1(km^2)$	主沟长度 $s_2(km)$	流域相对高差 $s_3(km)$	流域切割密度 $s_6(km^{-1})$	不稳沟床比例 s_9
NSL01	深家沟泥石流	4.48	3.74	3.86	3.51	1.98	4.4	49.2
NSL02	木厂沟泥石流	2.94	3.60	2.13	3.18	1.94	3.6	45.6
NSL03	羊圈沟泥石流	4.76	3.90	10.55	4.88	2.19	3.2	45
NSL04	磨河沟泥石流	5.05	3.53	120.96	10	3.04	1.6	36.6
NSL05	干沟泥石流	2.94	3.06	4.63	4.23	1.80	2	28.2
NSL06	黄坭沟泥石流	3.13	2.72	7.20	7.23	2.12	2.4	21
NSL07	挖脚沟泥石流	3.74	2.72	4.63	3.74	1.56	2.4	21
NSL08	三叉沟泥石流	3.53	3.53	1.94	2.55	1.48	3	48
NSL09	田家沟泥石流	5.70	3.67	0.48	2.45	1.64	4	50.4
NSL10	麻沙坡沟泥石流	4.10	3.46	1.45	2.75	1.80	2.4	36
NSL11	羊儿沟泥石流	3.32	3.60	1.61	3.18	2.10	1.6	43.2
NSL12	金华沟泥石流	6.82	4.06	3.48	3.07	2.12	2.6	45.6
NSL13	扯索沟泥石流	4.90	3.74	18.38	6.45	1.88	3.2	42
NSL14	磨子沟泥石流	6.62	2.94	34.81	8.56	2.26	2.4	40.2
NSL15	涨水沟泥石流	3.97	2.83	1.61	2.45	1.62	2	40.8
NSL16	落石沟泥石流	3.42	2.61	1.61	2.65	1.68	2.8	33
NSL17	加郡沟泥石流	4.76	2.94	55.42	10	2.28	3.2	45.6

4.2.1 评价因子转换值

为使评价结果具有可操作性，根据（表 4-4）提供的方法将各因子基础值作相应的转换。

表 4-4 单沟泥石流危险度评价因子转换函数

转换值（0~1）	Z 转换函数（ $m, f, s_1, s_2, s_3, s_6, s_9$ 为实际值）
M	$M = 0$ 当 $m \leq 1$ 时 $M = \log m / 3$ 当 $1 < m \leq 1000$ 时 $M = 1$ 当 $m > 1000$ 时
F	$F = 0$ 当 $f \leq 1$ 时

	$F = \log f / 2 \quad \text{当 } 1 < f \leq 100 \text{ 时}$ $F = 1 \quad \text{当 } f > 100 \text{ 时}$
S_1	$S_1 = 0.2458s_1^{0.3495} \quad \text{当 } 0 \leq s_1 \leq 50 \text{ 时}$ $S_1 = 1 \quad \text{当 } s_1 > 50 \text{ 时}$
S_2	$S_2 = 0.2903s_2^{0.5372} \quad \text{当 } 0 \leq s_2 \leq 10 \text{ 时}$ $S_2 = 1 \quad \text{当 } s_2 > 10 \text{ 时}$
S_3	$S_3 = 2s_3 / 3 \quad \text{当 } 0 \leq s_3 \leq 1.5 \text{ 时}$ $S_3 = 1 \quad \text{当 } s_3 > 1.5 \text{ 时}$
S_6	$S_6 = 0.05s_6 \quad \text{当 } 0 \leq s_6 \leq 20 \text{ 时}$ $S_6 = 1 \quad \text{当 } s_6 > 20 \text{ 时}$
S_9	$S_9 = s_9 / 60 \quad \text{当 } 0 \leq s_9 \leq 60 \text{ 时}$ $S_9 = 1 \quad \text{当 } s_9 > 60 \text{ 时}$

得到每条条泥石流沟基础数据的转换值，见表（4-5）。

表 4-5 大渡河——得妥段 17 条泥石流沟基础数据转换值

编号	灾害名称	泥石流规模 M	泥石流发生频率 F	流域面积 S_1	主沟长度 S_2	流域相对高差 S_3	流域切割密度 S_6	不稳沟床比例 S_9
NSL01	深家沟泥石流	0.5	0.66	0.39	0.57	1	0.22	0.82
NSL02	木厂沟泥石流	0.36	0.64	0.32	0.54	1	0.18	0.76
NSL03	羊圈沟泥石流	0.52	0.68	1	0.68	1	0.16	0.75
NSL04	磨河沟泥石流	0.54	0.63	0.93	1	1	0.08	0.66
NSL05	干沟泥石流	0.36	0.56	0.42	0.63	1	0.1	0.48
NSL06	黄坭沟泥石流	0.38	0.5	0.49	0.84	1	0.06	0.5
NSL07	挖脚沟泥石流	0.44	0.5	0.42	0.59	1	0.12	0.35
NSL08	三叉沟泥石流	0.42	0.63	0.31	0.48	1	0.15	0.8
NSL09	田家沟泥石流	0.58	0.65	0.19	0.47	1	0.2	0.84
NSL10	麻沙坡沟泥石流	0.47	0.62	0.28	0.5	1	0.12	0.6
NSL11	羊儿沟泥石流	0.4	0.64	0.29	0.54	1	0.08	0.72
NSL12	金华沟泥石流	0.64	0.7	0.38	0.53	1	0.13	0.76
NSL13	扯索沟泥石流	0.53	0.66	0.68	0.79	1	0.16	0.7
NSL14	磨子沟泥石流	0.63	0.54	0.85	0.92	1	0.12	0.67
NSL15	涨水沟泥石流	0.46	0.52	0.29	0.47	1	0.1	0.68
NSL16	落石沟泥石流	0.41	0.48	0.29	0.49	1	0.14	0.55
NSL17	加郡沟泥石流	0.52	0.54	1	1	1	0.16	0.76

4.3 泥石流危险性评价结果

根据已得到的泥石流沟基础数据转换值（表 4-5），代入最新单沟泥石流危

险度计算公式:

$$H_{\text{单}} = 0.29M + 0.29F + 0.14S_1 + 0.09S_2 + 0.06S_3 + 0.11S_6 + 0.03S_9$$

式中, M 、 F 、 S_1 、 S_2 、 S_6 、 S_9 分别为 m 、 f 、 s_1 、 s_2 、 s_6 、 s_9 的转换函数获取。
得到该 17 条泥石流沟危险度评价结果, 表 4-6:

表 4-6 大渡河——得妥段 17 条泥石流沟危险度评价结果表

编 号	灾害名称	泥石流 规模 M	泥石流发 生频率 F	流域面 积 S_1	主沟长 度 S_2	流域相对 高差 S_3	流域切 割密度 S_6	不稳沟床 比例 S_9	$H_{\text{单}}$
NSL01	深家沟泥石流	0.5	0.66	0.39	0.57	1	0.22	0.82	0.55
NSL02	木厂沟泥石流	0.36	0.64	0.32	0.54	1	0.18	0.76	0.49
NSL03	羊圈沟泥石流	0.52	0.68	0.56	0.68	1	0.16	0.75	0.65
NSL04	磨河沟泥石流	0.54	0.63	1	1	1	0.08	0.66	0.65
NSL05	干沟泥石流	0.36	0.56	0.42	0.63	1	0.1	0.48	0.47
NSL06	黄坭沟泥石流	0.38	0.5	0.49	0.84	1	0.06	0.5	0.48
NSL07	挖脚沟泥石流	0.44	0.5	0.42	0.59	1	0.12	0.35	0.47
NSL08	三叉沟泥石流	0.42	0.63	0.31	0.48	1	0.15	0.8	0.49
NSL09	田家沟泥石流	0.58	0.65	0.19	0.47	1	0.2	0.84	0.53
NSL10	麻沙坡沟泥石流	0.47	0.62	0.28	0.5	1	0.12	0.6	0.49
NSL11	羊儿沟泥石流	0.4	0.64	0.29	0.54	1	0.08	0.72	0.48
NSL12	金华沟泥石流	0.64	0.7	0.38	0.53	1	0.13	0.76	0.59
NSL13	扯索沟泥石流	0.53	0.66	0.68	0.79	1	0.16	0.7	0.61
NSL14	磨子沟泥石流	0.63	0.54	0.85	0.92	1	0.12	0.67	0.63
NSL15	涨水沟泥石流	0.46	0.52	0.29	0.47	1	0.1	0.68	0.46
NSL16	落石沟泥石流	0.41	0.48	0.29	0.49	1	0.14	0.55	0.43
NSL17	加郡沟泥石流	0.52	0.54	1	1	1	0.16	0.76	0.64

将所得的危险度评价结果对照单沟泥石流危险度分级标准(表 4-7), 可定性得到该 17 条泥石流沟危险性评价结果, 表 4-8。

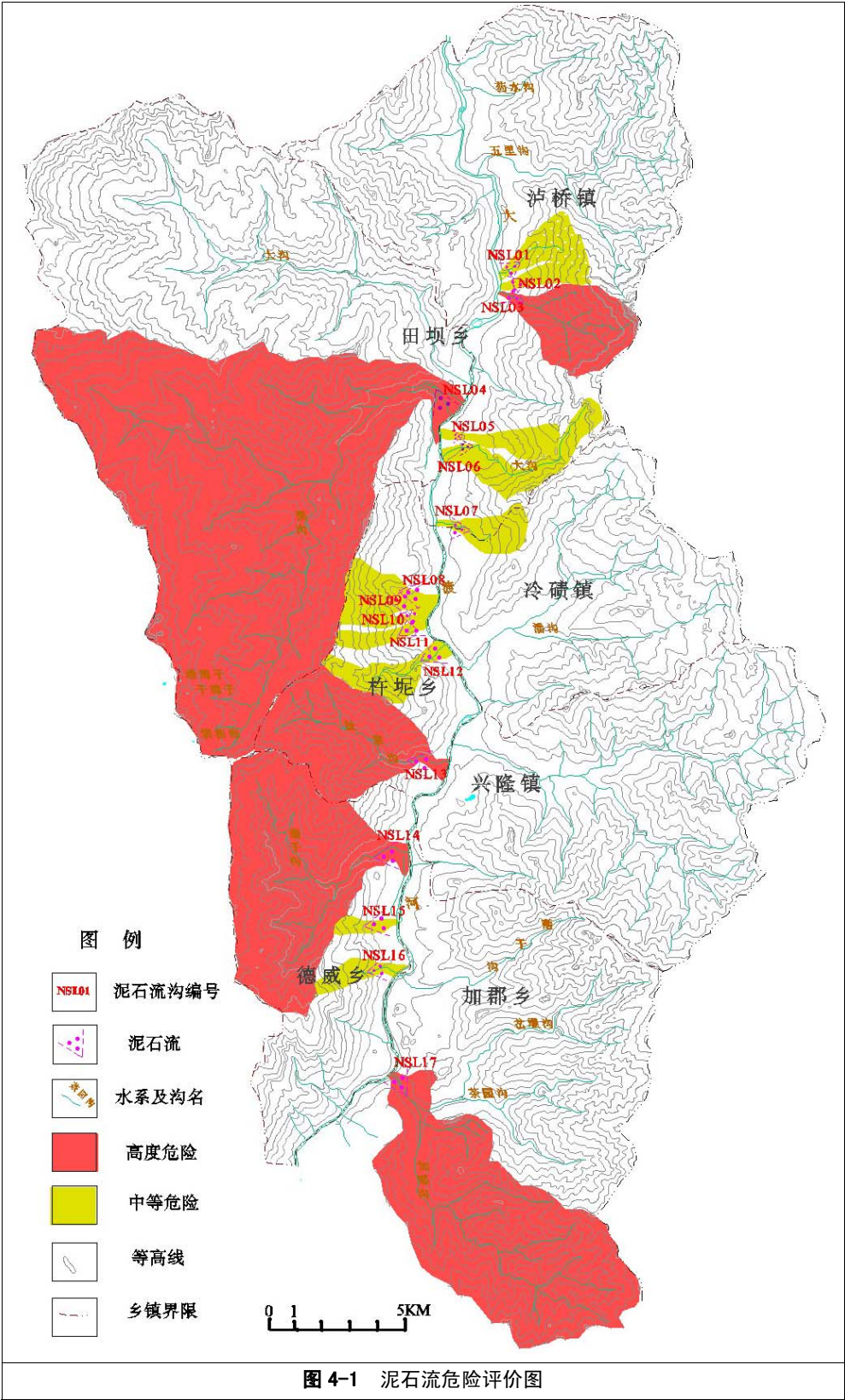
表 4-7 单沟泥石流危险度分级标准

单沟泥石 流危险度	危险度分级	单沟泥石 流危险度	危险度分级	单沟泥石 流危险度	危险度分级
0.0~0.2	极低危险	0.4~0.6	中度危险	0.8~1.0	极高危险
0.2~0.4	低度危险	0.6~0.8	高度危险		

表 4-8 大渡河——得妥段 17 条泥石流沟危险性评价结果

沟名	深家沟	木厂沟	羊圈沟	磨河沟	干沟	黄坭沟	挖脚沟	三叉沟	
H _单	0.55	0.49	0.65	0.65	0.47	0.48	0.47	0.49	
危险性评价	中度危险	中度危险	高度危险	高度危险	中度危险	中度危险	中度危险	中度危险	
沟名	田家沟	麻沙坡沟	羊圈沟	金华沟	扯索沟	磨子沟	涨水沟	落石沟	加郡沟
H _单	0.53	0.49	0.48	0.59	0.61	0.63	0.46	0.43	0.64
危险性评价	中度危险	中度危险	中度危险	中度危险	高度危险	高度危险	中度危险	中度危险	高度危险

表 4-7 表明：17 条泥石流沟有 5 条处于高度危险，其余 12 条泥石流沟处于中度危险，其危险性评价图见图 4-1。



第5章 泥石流易损性评价

5.1 泥石流易损性评价

易损性评价是泥石流风险评价的重要一环。易损性是承灾体属性的表现,是灾害作用的下垫面。没有易损性,也就没有灾难^[54]。易损性的定量表达即易损度,易损度是易损程度的简称。泥石流易损度是指在一定区域和给定时段内,由于泥石流灾害而可能导致的该区域内所存在的一切人、财、物的潜在最大损失^[41]。因此泥石流易损性评价是一个涉及到社会、经济 and 环境的复杂系统。

5.1.1 泥石流易损度评价指标

根据上述泥石流易损度的定义,可以看出影响易损度的因素众多,主要是承灾体名目繁多,如建筑资产、室内财产、土地价值、工农业总产值、生命线工程、交通设施和人口等^[54-56]。罗元华等先后列出了75种和103种承灾体名目^[57-58]。但是一个区域内所存在的人和物千千万万,数不胜数。因此,只有采取分类办法加以归类,找出承灾体中有代表性并对易损度影响最大的主要因子,才是解决这一问题的正确途径。根据刘希林提出的分类方法将易损度分成四类,作为泥石流易损度评价指标^[41]。

1) 物质易损度(Physical Vulnerability) 为有形资产,主要指建筑物和基础设施。建筑物主要包括住宅公寓、宾馆饭店、商厦办公楼、实验室、体育馆、车站、码头、医院、营房、厂房和仓库等。基础设施主要包括交通设施(公路、铁路、航道和桥梁)和生命线工程(供水、排水和供气管道,输电和通信线路)。

2) 经济易损度(Economic Vulnerability) 主要指经济收入(人均收入和总收入)、个人财产(耐用消费品拥有量总值和生产性固定资产原值、城乡居民储蓄存款余额)和国内生产总值(人均国民生产总值、工农业总产值)。

3) 环境易损度(Enviromental Vulnerability) 主要指自然资源,包括水、气和土地资源。森林资源已包括在经济易损度中的农业总产值中,故而在环境易损度中不予重复考虑。对泥石流灾害来说,土地资源是环境易损度中的主要承灾体,可作为代表环境易损度的主要指标。土地资源又包括居民点、工矿和交通用地,耕地、园地和林地,牧草地和水域,未利用土地、荒地和难用地。

4) 社会易损度(Social Vulnerability) 主要指人口及其结构(人口密度、人口自然增长率、人口年龄、教育程度和财富状况)。从人的个体来看,性别对易损度确有一些影响。如妇女由于生理和心理上的原因,在遭受自然灾害时比男子更容易受到伤害。即便如此,从人的群体来看,性别对易损度的影响很小。我国人口统

计资料表明, 1992年我国男女性别比为104127:100, 差异很小。发达国家中男女比例更为接近。因此本研究中没有将性别作为影响易损度的评价因子。

5.1.2 泥石流易损度评价模型^[59]

刘希林教授将泥石流易损度评价分单沟泥石流易损度评价和区域泥石流易损度评价两种。其中单沟泥石流易损度评价着重考虑单沟流域内一切人、财、物的潜在最大损失; 区域泥石流易损度评价着重于区域的宏观整体特征和地域分异规律, 在指标的选择上更考虑指标的区域代表性。本文通过综合研究大渡河泸定——得妥段17条泥石流沟的特征, 选择以上两种方法之一——单沟泥石流易损度评价模型作为本次泥石流易损度评价的模型。

对单沟泥石流易损度评价而言, 有广义和狭义之分。广义的单沟泥石流易损度评价范围包括沟谷全流域并含堆积扇部分; 狭义的单沟泥石流易损度评价范围主要指泥石流出口以后可能堆积泛滥的危险范围。在单沟泥石流易损度评价中, 全部采用现场调查承灾体的类型、数量和分布并估算承灾体的价值是件极其艰巨的工作, 费时费力且获取资料的成本很高, 难以达到易损度快速评价的目的。因此, 尽可能利用现有的统计资料并采用某些简化的假定来评价易损度是可以接受的。单沟泥石流易损度评价因子分述如下:

5.1.2.1 物质易损度评价

单沟泥石流易损度评价中的物质易损度指标:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (5-1)$$

式中: I 为物质易损度指标(万元); I_1 为建筑资产(万元); I_2 为交通设施资产(万元); I_3 为生命线工程资产(万元)。

建筑资产可由两种方法估算。方法一: 建筑总面积 \times 平均造价。建筑物面积可从县统计部门或乡、村统计资料中获取; 平均造价可按300~2000元/ m^2 计算(根据当地情况取经验值)。方法二: 每户平均拥有的建筑资产 \times 总户数。每户平均拥有的建筑资产可按3~20万元/户计算(根据当地情况取经验值)。相当于每户平均拥有建筑面积100 m^2 (包括公共设施建筑面积), 造价为300~2000元/ m^2 。第二种方法在澳大利亚悉尼市洪水灾害保险计算房屋损失值时曾广泛使用^[31]。总户数可从地方统计资料中获取。如果泥石流危害交通和管线, 可按评价范围内的实际长度估算它们的工程投资, 工程造价可咨询有关的铁路和交通部门, 标准铁路平均造价一般为1500万元/km。如果泥石流危害航道, 可按恢复通航所需要的费用计算, 具体操作时可咨询有关航运部门或从当地实地调查获取。

5.1.2.2 经济易损度评价

单沟泥石流流易损度评价中的经济易损度指标:

$$E = (E_1 + E_2 + E_3) \times N \quad (5-2)$$

式中: E 为经济易损度指标(万元); E_1 为人均年收入(万元/年); E_2 为人均储蓄存款余额(万元/人); E_3 为人均拥有的固定资产(万元/人); N 为总人口数。

经济易损度评价指标的资料均可从统计年鉴中直接获取或经过简单换算后获取。人均年收入和人均储蓄存款余额有城镇人口和农村人口之分。人均拥有的固定资产在城镇指耐用消费品拥有量总值, 据此可按市场价格换算成价值; 在农村指生产性固定资产, 包括畜产品畜、大中型铁木农具、农林牧渔业机械、工业机械、运输机械、生产用房和其他。

5.1.2.3 环境易损度评价

单沟泥石流流易损度评价中的环境易损度指标:

$$L_{\text{单}} = \sum_{i=1}^4 B_i \cdot A_i \cdot 100 \quad (5-3)$$

式中: $L_{\text{单}}$ 为环境易损度指标中的土地资源价值(万元); B_i 为各类土地资源基价(元/ m^2) (表1); A_i 为各类土地资源的面积(km^2)。 i 为土地类型, $i = 1, 2, 3, 4$ 。土地利用类型资料可从当地国土部门或实地调查获取, 见表5-1。

表 5-1 我国西南地区土地资源基价估算表

土地利用类型	等级	土地资源基价(元/ m^2)
居民点、工矿用地、交通用地	高度适宜	$B_1=300$
耕地、园地、林地	中等适宜	$B_2=200$
牧草地、水域	勉强适宜	$B_3=100$
未利用土地	目前不适宜	$B_4=50$
荒地、难用地	永久不适宜	$B_5=0$

单沟泥石流流易损度评价中的财产指标:

$$V_{1\text{单}} = I + E + L_{\text{单}} \quad (5-4)$$

$$F_{v1\text{单}} = 1 / \{ [1 + \exp[-1.25(\log V_{1\text{单}} - 2)]] \} \quad (5-5)$$

式中: $V_{1\text{单}}$ 为财产指标(万元); I 为物质易损度指标(万元); E 为经济易损度指标(万元); $L_{\text{单}}$ 为土地资源易损度指标(万元), $F_{v1\text{单}}$ 为统计拟合经验值。

5.1.2.4 社会易损度评价

社会易损度主要指人口及其结构，单沟泥石流易损度评价中的人口指标：

$$V_{2\text{单}} = (1/3)(a + b + r) \times D \quad (5-6)$$

$$F_{v2\text{单}} = 1 - \exp(0.0035V_{2\text{单}}) \quad (5-7)$$

式中： $V_{2\text{单}}$ 为人口指标(人/ km^2)； a 为65岁(含)以上老人和15岁以下少年儿童的比例； b 为只接受过初等教育(小学)及以下人口的比例； r 为人口自然增长率(‰)； D 为人口密度(人/ km^2)， $F_{v2\text{单}}$ 为统计拟合经验值。人口指标可从人口统计年鉴或人口普查资料中获取，人口密度即单位面积的人口数量。可能最大的生命损失，首先与人口数量和人口密度有关，泥石流易发区内人口密度越大，人口数量越多，遭受泥石流灾害时，人员伤亡的可能性就越大，也即易损度就越大；同时也与人口质量有关，65岁及以上老人和15岁以下少年儿童所占比例越高，该人群的灾害反应能力和抗灾自救能力相对来说就越差，人员伤亡的可能性就越大，也即易损度就越大。

结合上面(5-1)、(5-2)……(5-7)公式，得到单沟泥石流易损度评价模型：(I)

$$\begin{aligned} V_{\text{单}} &= \sqrt{(F_{v1\text{单}} + F_{v2\text{单}})/2} \\ F_{v1\text{单}} &= 1/\{[1 + \exp[-1.25(\log V_{1\text{单}} - 2)]]\} \\ F_{v2\text{单}} &= 1 - \exp(0.0035V_{2\text{单}}) \\ V_{1\text{单}} &= I + E + L_{\text{单}} \\ V_{2\text{单}} &= (1/3)(a + b + r) \times D \\ I &= I_1 + I_2 + I_3 \\ E &= (E_1 + E_2 + E_3) \times N \\ L_{\text{单}} &= \sum_{i=1}^4 B_i \cdot A_i \cdot 100 \end{aligned} \quad (I)$$

5.1.3 泥石流易损度评价

通过参考泸定县年鉴及相关的资料，得到泥石流易损度评价因子所需的数据，见表5-2，代入公式(I)，得出大渡河——得妥段17条泥石流沟的易损度评价结果。

表 5-2 泥石流易损度取值及其评价

编号	灾害名称	I	E	L _单	V _{1单}	F _{V1单}	V _{2单}	F _{V2单}	V _单	易损度评价
NSL01	深家沟泥石流	500	1500	463.2	2463.2	0.85	8.44	0.26	0.74	高度易损
NSL02	木厂沟泥石流	100	300	144	544	0.71	8.44	0.26	0.70	高度易损
NSL03	羊圈沟泥石流	400	1200	1329.6	2929.6	0.86	8.44	0.26	0.75	高度易损
NSL04	磨河沟泥石流	220	354.15	5460	6034.15	0.90	8.44	0.26	0.76	高度易损
NSL05	干沟泥石流	40	25.42	543.6	609.02	0.73	8.44	0.26	0.70	高度易损
NSL06	黄坨沟泥石流	40	33.89	859.2	933.09	0.77	8.44	0.26	0.72	高度易损
NSL07	挖脚沟泥石流	90	150.81	561.6	802.41	0.75	8.44	0.26	0.71	高度易损
NSL08	三叉沟泥石流	40	76.25	236.4	352.65	0.67	8.44	0.26	0.68	高度易损
NSL09	田家沟泥石流	80	137.25	420	637.25	0.73	8.44	0.26	0.70	高度易损
NSL10	麻沙坡沟泥石流	60	94.89	172.8	327.69	0.66	8.44	0.26	0.68	高度易损
NSL11	羊儿沟泥石流	28	33.89	276	337.89	0.66	8.44	0.26	0.68	高度易损
NSL12	金华沟泥石流	40	67.78	426	533.78	0.71	8.44	0.26	0.70	高度易损
NSL13	扯索沟泥石流	30	45.75	2395.2	2470.95	0.85	8.44	0.26	0.74	高度易损
NSL14	磨子沟泥石流	46	55.92	4275.6	4377.52	0.88	8.44	0.26	0.75	高度易损
NSL15	涨水沟泥石流	60	67.78	180	307.78	0.65	8.44	0.26	0.67	高度易损
NSL16	落石沟泥石流	30	32.20	200.4	262.6	0.63	8.44	0.26	0.67	高度易损
NSL17	加郡沟泥石流	30	32.20	15912	15974.2	0.94	8.44	0.26	0.77	高度易损

5.2 泥石流易损性评价结果

易损度是标量，根据得到的各泥石流沟易损度的数值，结合表（5-3）单沟泥石流易损度分级标准，可分别得到每条泥石流沟在定性上的分级，即此17条泥石流沟在易损性评价上都属于高度易损，表5-2。

表 5-3 单沟泥石流易损度分级标准及实际意义

单沟泥石流易损度	易损度分级	承灾体特征	灾情预测
0.0~0.2	极低易损	承灾体类型单一，数量很少，主要以土地资源承灾体为主	以毁坏农田、土地为主、人员伤亡极少
0.2~0.4	低度易损	承灾体类型较少，数量不多，人口密度不大，主要以土地、房屋、村寨承灾体为主	以毁坏农田为主、村寨和房屋为主，人员伤亡较少
0.4~0.6	中度易损	承灾体有多种类型，切数量较多，人口密度中等，除土地资源外，还可能涉及到城镇、交通设施承灾体	以综合损失为主，有一定的人员伤亡
0.6~0.8	高度易损	承灾体多样，数量较多，人口密度较大，经济较发达，物质财富积累多	以综合损失为主，包括城镇、交通、工矿和土地资源等，人员伤亡较大

第 6 章 泥石流风险评价

6.1 泥石流风险评价

泥石流风险是指在一定区域和时段内,由于泥石流灾害而引起的人们生命财产和经济活动的期望损失值^[61]。期望损失值可以理解为含有概率的损失预测值。概率信息主要通过危险度来反映,损失信息主要基于对易损度的分析^[62]

6.2 泥石流风险评价方法及评价结果

泥石流风险评价结合了泥石流危险度和泥石流易损度,根据联合国人道主义事务部(UNDHA)给的定量表达式:即

$$R_{\text{单}} = H_{\text{单}} * V_{\text{单}} \quad 6-1$$

式中, $R_{\text{单}}$ 表示单沟泥石流风险度, $H_{\text{单}}$ 表示单沟泥石流危险度, $V_{\text{单}}$ 表示单沟泥石流易损度。

分别将第四章和第五章得到的泥石流危险度和易损度的数值代入公式 6-1,得到每条泥石流的风险度的数值,表(6-1):

表 6-1 泥石流风险度数值及风险性评价结果表

沟名	深家沟	木厂沟	羊圈沟	磨河沟	干 沟	黄坭沟	挖脚沟	三叉沟
$H_{\text{单}}$	0.55	0.49	0.65	0.65	0.47	0.48	0.47	0.49
$V_{\text{单}}$	0.74	0.70	0.75	0.76	0.70	0.72	0.71	0.68
$R_{\text{单}}$	0.40	0.34	0.48	0.49	0.32	0.34	0.33	0.33
风险评价	高风险	中等风险	高风险	高风险	中等风险	中等风险	中等风险	中等风险

沟名	田家沟	麻沙坡沟	羊圈沟	金华沟	扯索沟	磨子沟	涨水沟	落石沟	加郡沟
$H_{\text{单}}$	0.53	0.49	0.48	0.59	0.61	0.63	0.46	0.43	0.64
$V_{\text{单}}$	0.70	0.68	0.75	0.70	0.74	0.75	0.67	0.67	0.77
$R_{\text{单}}$	0.37	0.33	0.36	0.41	0.45	0.47	0.31	0.29	0.49
风险评价	高风险	中等风险	高风险	高风险	高风险	高风险	中等风险	中等风险	高风险

根据刘希林提出的泥石流风险度五级分级标准,即:

- 0.00< $R_{\text{单}}$ ≤0.04

0.04< $R_{\text{单}}$ ≤0.16

0.16< $R_{\text{单}}$ ≤0.36

0.36< $R_{\text{单}}$ ≤0.64

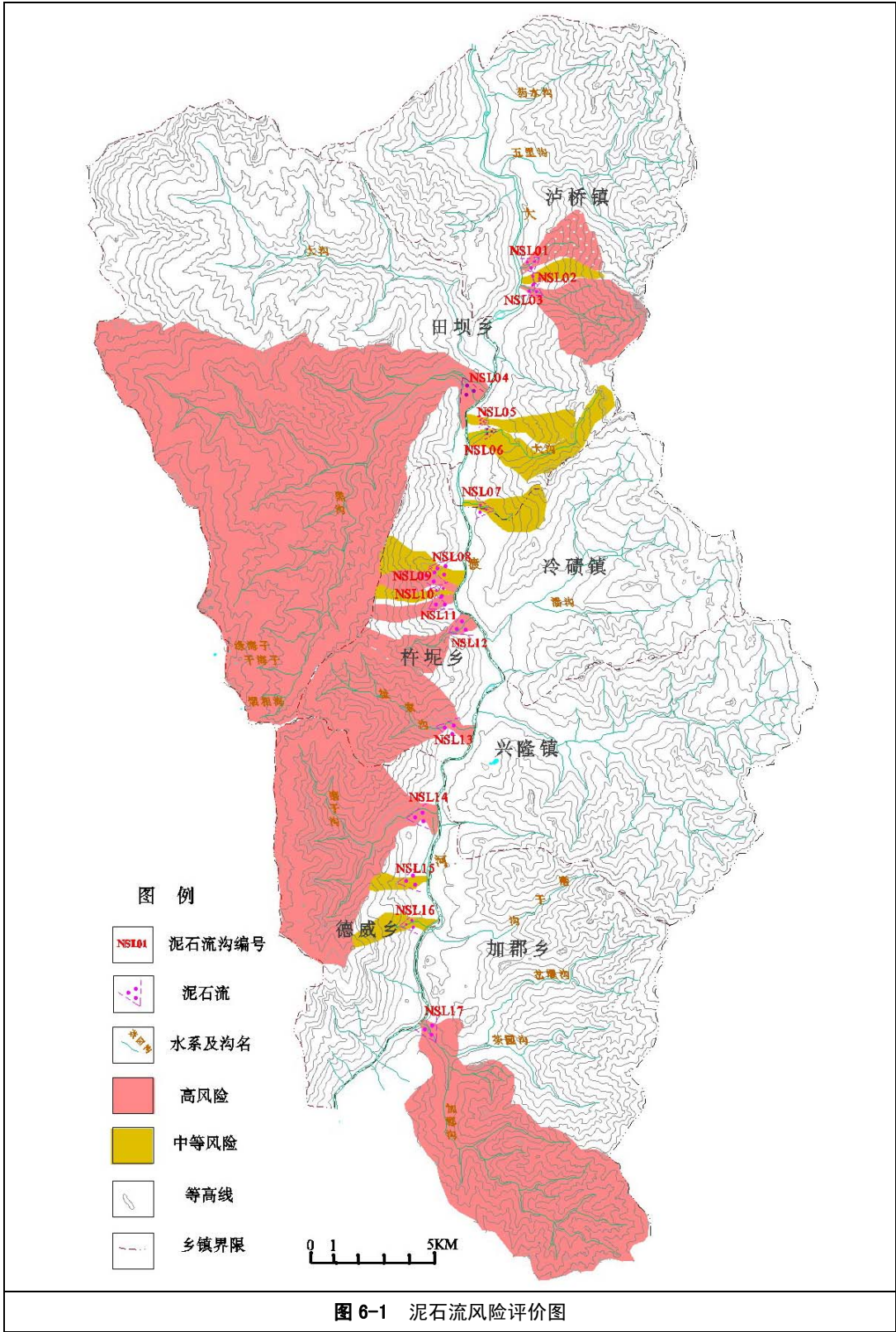
0.64< $R_{\text{单}}$ ≤1.00
- 极低风险(区)

低风险(区)

中等风险(区)

高风险(区)

极高风险(区)



相应得到此 17 条泥石流沟的风险评价结果(表 6-1),在此基础上基于 MAPGIS 软件平台作出泥石流风险评价图(图 6-1),即属于高风险有 9 条泥石流沟,分别是深家沟、羊圈沟、磨河沟、高风险等泥石流沟。其余 8 条泥石流沟属于中等风险,分别是木厂沟、干沟、黄坭沟、挖脚沟、三叉沟等泥石流沟。

第 7 章 泥石流防治对策研究

7.1 防治目的和原则

7.1.1 防治目的

泥石流的发生、发展及危害不仅与特定的地质环境有关，也与人类不合理的活动有关。大渡河泸定——得妥段 17 条泥石流沟泥石流防治是根据泥石流的形成条件、基本性质、风险性和治理需要，从全局的角度，选择切实可行的工程措施、生物措施和风险管理措施来对其防治。在方法上可通过对泥石流流域移民、避险搬迁、生物建设、生物和工程等综合防治措施对泥石流逐步治理，减少泥石流造成的人员伤亡，财产损失，发挥泥石流防治的综合效益、经济效益和生态效益，使被治理的流域恢复新的良性生态平衡、改善生态环境。

7.1.2 防治原则

泥石流治理的一般原则是①以避为主，以治为辅，防、避、治相结合；②以生物生态治理为主，以工程措施为辅，生物与工程相结合；③防一般，避要害，治重点，科学管理、减灾兴利五个层次；④全面规划，统筹兼顾，融防灾、减灾、抗灾、救灾与国民经济建设和国土整治为一体，达到四个效益的统一；⑤从大环境着眼，小流域着手，从上游到下游，从局部到整体，治坡和治沟相结合的思路；工程防御体系，绕避体系，生物防御体系，风险管理体系相结合的防治对策^[60]。

根据泸定县地质灾害特点和减灾能力，建议大渡河泸定——得妥段泥石流防治应遵循以下原则：

1) 全面规划、重点突出。

根据泥石流的发生条件、活动规律及危害状况，进行全面综合地制定泥石流防治规划，对现处于高风险的泥石流沟进行重点防治，对其它处于中等风险的泥石流沟则次重点防治，并且做到和风险管理相结合。另外防治规划还应打破部门和地域间的界限，统筹兼顾，远近期结合，重点突出，抓住主要因素，实行灾害治理。

2) 搬迁避让与治理相结合的原则

泸定县的地质地貌条件使得境内地质灾害点分布多、分布面广、发生频率高、危害范围大、潜在损失严重。因此，要达到减轻泥石流灾害的损失的目的，必须坚持以防为主，避让和治理相结合，通过群测群防网络建设，提高公众的防灾和自救意识。在目前技术经济条件允许下，对那些治理投入太大的泥石流要以避让为主。对城镇和居民聚居的地区、交通线上危害程度大的重要泥石流必须采取避

让和工程措施加以综合治理。

3) 按客观规律办事，因地制宜，讲求实效的原则

为了科学、合理地开展大渡河泸定——得妥段内泥石流防治规划，要求对泥石流易发、多发区进行典型研究，在典型泥石流点发育规律的指导下，各防治区按成因进行相应的调整，有针对性的整治，做到因地制宜、因害设防、对症下药，保证所投入的人财、物力发挥最大的防灾效益。

4) 各级政府对泥石流防治实行辖区负责的原则

负责泥石流等地质灾害防治的县、乡镇政府组织领导，要切实做到指导全县有组织、有计划、有目的地开展泥石流等地质灾害防治工作。要将泥石流等地质灾害的防治工作要纳入政府议事日程和国民经济发展规划，根据当地的人、财、物力进行合理统筹安排，使防治工作落实到位。对那些威胁、危害城镇、重大工程设施和人民生命财产安全的重大隐患点要优先安排进行重点防治。对危害农业、毁坏森林和土地资源的地质灾害也要积极采取水保、坡改梯、造林等综合措施进行防治。

5) 坚持谁诱发谁治理，谁受威胁谁出资的原则

对那些由于人为活动而诱发的泥石流等地质灾害，要坚持谁诱发谁治理的原则，对于自然因素诱发的泥石流等地质灾害，坚持谁受威胁谁出资的原则。按照统一防治规划，明确治理主体，多渠道筹集治理资金，加大投入力度。大力开展群测群防群治，加快地质灾害的防治进度。地质灾害的防治与人民群众的切身利益密切相关，要大力宣传动员当地人民群众积极参与泥石流等地质灾害的防治工作和防治工程，形成县—乡—群众一体的防治体系，才能收到较大的组会、生态和经济效益。

7.2 防治方法研究

泥石流的防治方法主要包括以控制泥石流形成与活动为主的硬性措施和采取强有力的行政管理和社会管理手段为主的软性措施，如图 7-1。但是防治泥石流的发生、发展、减轻其所造成的人员损失和经济损失，是一项长期任务，应调动所在区内的各方面的力量，全面规划，根据不同流域、不同类型和危害程度的大小，区别轻重缓急，确保重点，分步实施。从自然地质环境的保护入手，结合国家开展的生态环境保护计划，宏观上作好该段的防治规划，最大可能的避免和减少危害。

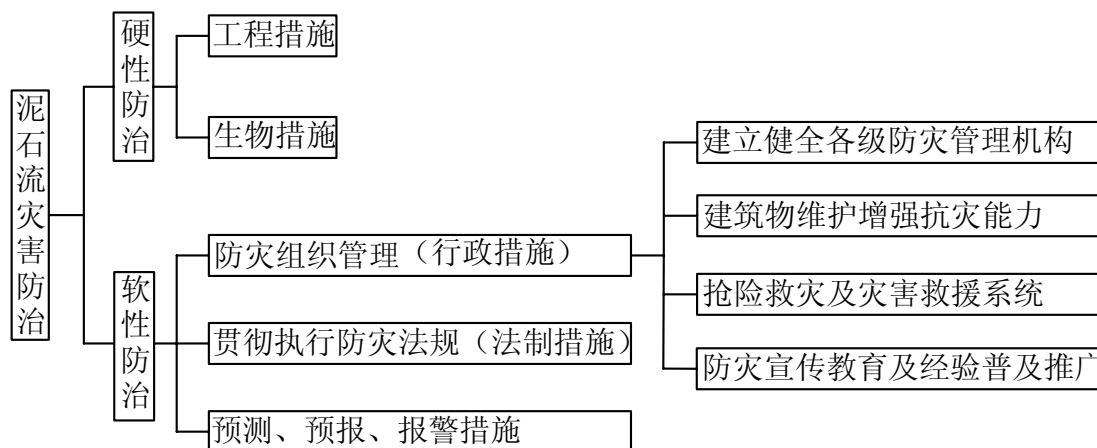


图 7-1 泥石流灾害防治措施图（据沈长寿等）

根据大渡河泸定——得妥段特殊的地理环境和泥石流发育特殊的地质地貌特点，本文有针对性的提出如下防治对策。

7.2.1 土木工程措施

泥石流防治的土木工程措施是在泥石流的形成区、流通区和堆积区内，相应采取蓄水和引水工程、拦挡和支护工程，排导和引渡工程、停淤及改土护坡工程等、以控制泥石流的发生和危害。泥石流防治的工程措施通常适用于泥石流规模大，暴发频率低，松散固体物质补给及水动力条件相对集中，保护对象重要，要求防治标准高、见效快、等情况。具体包括以下：

1) 跨越工程。跨越工程是指修建桥梁等，从泥石流上方跨越，让泥石流在其下方排泄。桥涵跨越是通过泥石流地区的主要工程形式。

2) 穿过工程。穿过工程是指修建隧道、明洞等，从泥石流下方穿过，泥石流在其上方排泄。这是通过泥石流地区的又一种主要工程形式。

3) 防护工程。防护工程是指对泥石流地区的桥梁、隧道、路基，泥石流集中的山区变迁型河流的沿河线路或其他重要工程设施作一定的防护，用以抵御或消除泥石流对主体建筑物的冲刷、冲击、侧蚀和淤埋等危害。防护工程主要有护坡、挡墙等。

4) 排导工程。排导工程的作用是改变泥石流流势，增大桥梁等建筑物的泄洪能力，使泥石流按设计意图顺利排泄。泥石流排导工程包括导流堤、急流槽和束流堤 3 种类型。导流堤的作用，主要是在于改变泥石流的流向，同时也改变流速。急流槽的作用，主要是改变流速，也改变流向，常用的有“U”型槽和“V”型槽。束流堤作用，主要是改变流向，防止漫流。导流堤和急流槽组合成排导槽，以改善泥石流在堆积扇上的流势和流向，让泥石流循着指定的道路排泄，不让其淤积。导流堤和束流堤组合成束导堤，可以防止泥石流漫流改道为害。对于导流堤的布置，堤尾方向与大河流向应力求成锐角相交。泥石流与大河汇流，洪水互相搏击，动能

会有很大损失,交角越小,动能损失越小,越容易将泥石流带走,一般地说,交角宜小于 45° 。

5) 拦挡工程。拦挡工程是用以控制组成泥石流的固体物质和雨洪径流,削弱泥石流的流量、下泄总量和能量,减少泥石流对下游建设工程的冲刷、撞击和淤积等危害的工程设施。拦挡工程包括拦挡坝、停淤场、支挡工程、截洪工程4类。前3类起拦碴、滞流、固坡作用,控制泥石流的固体物质供给,截洪工程的作用在于控制雨洪径流。

因此根据大渡河泸定——得妥段的泥石流的形成特征,土木工程综合治理措施主要包括以下3个方面:

1) 稳。主要是在泥石流形成区植树造林,在支、毛、冲沟中修建谷场,其目的在于增加地表植被、涵养水分、减缓暴雨径流对坡面的冲刷,增强坡体稳定性,抑制冲沟发展。

2) 拦。主要是在沟谷中修建拦挡坝,用以拦截泥石流下泄的固体物质,防止沟床继续下切,抬高局部侵蚀基准面,加快淤积速度,以稳住山坡坡脚,减缓沟床纵坡降,抑制泥石流的进一步发展。

3) 排。主要是在沟谷下游修建排导槽,防止泥石流对下游居民区、道路和农田的危害。

7.2.2 生物措施

泥石流防治的生物措施主要包括恢复植被,一般采用乔、灌、草等植物进行科学造林,充分发挥其滞留降水、保持水土和调节径流等功能,从而达到预防和阻止泥石流发生和减小泥石流规模和减轻泥石流危害程度的作用,生物措施一般要在泥石流全流域尤其是泥石流上游实行,与泥石流工程措施相比较,生物措施不仅应用范围广、投资少、风险小,能促进生态平衡,改善自然环境条件,而且具有生产效益和防治作用时间长的特点,如果说工程措施是治理泥石流发生的“标”的话,那生物措施是治理泥石流发生的“本”。但是生物措施要显现效果,则需要比较长的时间,所以一般在泥石流防治上,还应与土木工程措施相结合,这样既治“标”又治“本”。

因此要达这一目的,建议对泥石流沟开展天然林保护、植树造林,退耕还林,恢复斜坡中下部地带的森林植被,利用植物根系的固土作用,改善斜坡土地条件,尤应重视对深根性树木的种植,维护边坡的自然稳定性。具体措施可采取营造水土保持林、护岸固坡林、护坡草灌等。

7.2.3 风险管理措施

风险管理是通过计划、组织、协调、控制等过程,综合、合理地运用各种科

学方法来实现目标的过程。风险管理的目的是降低风险或转移风险^[63], 目标是以最小的经济成本获得最大的安全保障效益, 即以最少的费用支出达到最大限度地分散、转移、消除风险, 从而实现保障人们的生命财产、经济和社会稳定的基本目标。风险无处不在, 但是有一部分风险是可以接受的, 即可接受风险, 另一部分风险是不可以接受的, 即不可接受风险。针对不可接受风险, 就要求积极的采取对策, 进行防灾减灾。基于此, 本文对研究区内 17 条泥石流沟提出一些针对性强、理论和实际相结合、操作性强的风险管理措施, 以期降低泥石流的易损度, 最终降低泥石流的风险性, 包括如下方面:

7.2.3.1 避让搬迁措施

根据已经得到的该 17 条泥石流沟风险性评价结果, 在充分征求地方政府和农户意见的基础上, 选择生活在高风险沟段的居民先搬, 其次是生活在中等风险沟段的居民再搬。搬迁地点的选择必须由专业技术人员经过现场调查选取, 总的原则应遵循: 1) 安全, 防止二次搬迁; 2) 就近, 方便居民生产生活。这是降低泥石流风险度最稳妥的办法。

7.2.3.2 群策群防和预警预报措施

该措施是整个风险管理的核心部分。泥石流的有其突发性的一面, 但在其形成发展有一定的过程, 只要细心观测就能掌握其发生发展的规律, 在险情出现时就能及时发出预警预报, 减轻灾害带来的损失, 因此必须健全该段泥石流的群测群防体系和预警预报体系(图 7-2)。群测群防是一项政策性、技术性较强的工作, 必须由政府牵头, 设立专业部门, 其他部门积极配合, 对此, 针对此 17 条泥石流沟的群策群防, 建议设立一个由中心站(县级)、指导站(乡镇级)和群测群防监测点(村级)三级机构组成的预警系统, 各级分别落实责任人和监测人, 并建立相应的预警预报制度, 保证群测群防有序高效的开展工作。

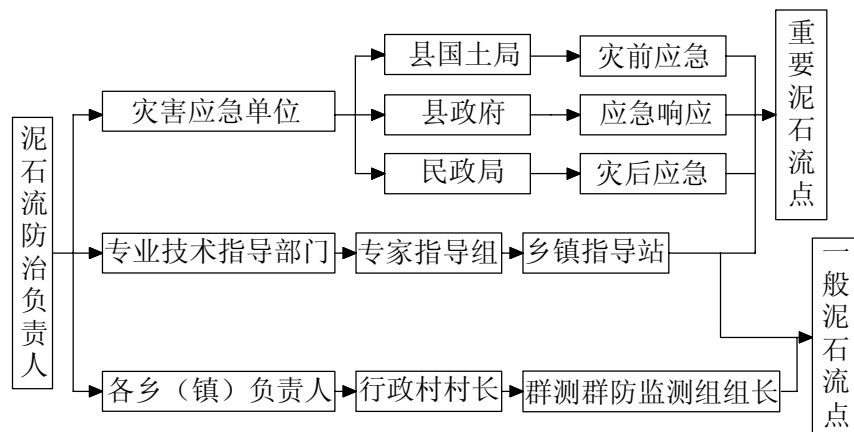


图 7-2 泥石流群测群防监测网络图

7.2.3.3 完善预警发布和应急指挥措施

泥石流灾害预警发布是泥石流应急处理中的重要环节,在预警结果被政府部门采纳并确定后,要立即对外发布,通过各种途径和办法让处在危险区的群众充分了解灾害可能导致的后果和需要采取的应对防范措施,而不至于在泥石流灾害突然发生时造成不必要的死亡和损失。

另外在泥石流发生时,就应该立即成立应急指挥部门,政府应在社会动员、资源分配、抗灾救灾等方面综合协调各相关部门包括国土部门、交通部门、建设部门、规划部门、医疗部门等通力合作,就如何抗灾救灾、如何撤离、安置、救助灾民充分发挥各个部门在人员、技术和经验等方面的优势,尽量减轻灾害对人民造成的损失。

7.2.3.4 泥石流灾害宣传和技术培训措施

加强国家、国土资源部、四川省有关地质环境保护的相关法规《地质灾害防治管理办法》、《建设用地审查报批管理办法》、《四川省地质环境管理条例》、《水土保持法》、《森林法》、《国土法》等的普法宣传,政府部门在专业队伍的配合下开展辨灾识灾的小册子宣传、招贴画、录像广播等多媒体形式的宣传,使当地群众认识泥石流灾害的危害性及防治常识,依法行政强化地质环境的监督管理。为防患于未然,达到免受地质灾害威胁和危害的目的,工程建设规划应尽可能避开地质灾害易发区和重要地质灾害隐患点危险区,无法避开时必须采取工程防范措施。另外当地政府应加强泥石流技术的培训,通过对县、乡、村群测群防管理人员、监督人员,监测预警点人员及乡、村级专职监测人员等进行技术培训,使他们掌握泥石流的成因、特征、活动演变规律及危害,泥石流发生先兆的判断标志等,掌握简易监测预报方法、泥石流巡查方法,监测预警点的运行操作等基本知识和技能,以指导当地群众性对泥石流的监测和防灾工作的开展。

除以上几种风险管理对策外,对易遭受灾害的个人和家庭还可以通过家庭保险的方式来规避风险,以此寻求风险的共同分担者,在国外很多国家已经采取这种办法。

7.3 泥石流防治建议及典型泥石流防治对策研究

综合上述泥石流防治对策的研究,根据该段 17 条泥石流沟所处的地理位置和风险评价结果,建议针对不同区段泥石流采取的不同的防治对策,即对评价结果是高风险的泥石流,直接威胁对象是城镇的居民和主要公路的,则建议主要以治为主,防为辅,采用土木工程、生物工程和监测预警相结合的防治对策,如威胁泸定县城的深家沟泥石流、木厂沟泥石流、羊圈沟泥石流、泸桥镇大坝村干沟

泥石流等；对评价结果是中等风险的泥石流，威胁对象较少，流域面积大，在目前情况下治理难度大的泥石流则建议以防为主，治为辅，如田坝乡磨河沟泥石流、杵坨乡三叉沟等，采用生物工程、群策群防和避让搬迁相结合，表 7-1。

表 7-1 研究区泥石流沟防治措施建议表

编号	灾害名称	地理位置	风险性	主要防治措施	威胁对象 ^[51]
NSL01	深家沟泥石流	泸桥镇泸桥村营盘组	高风险	土木工程、生物工程、 监测预警	泸定县城区
NSL02	木厂沟泥石流	泸桥镇泸桥村营盘组	中等 风险	土木工程、生物工程、 监测预警	泸定县城区
NSL03	羊圈沟泥石流	泸桥镇泸桥村营盘组	高风险	土木工程、生物工程、 监测预警	泸定县城区
NSL04	磨河沟泥石流	田坝乡磨河村	高风险	生物工程、监测预警、 避让搬迁	49 户 209 人
NSL05	干沟泥石流	泸桥镇大坝村二组	中等 风险	土木工程、生物工程、 监测预警	3 户 15 人及 318 国道
NSL06	黄坨沟泥石流	泸桥镇大坝村二组	中等 风险	土木工程、生物工程、 监测预警	4 户 20 人及 318 国道
NSL07	挖脚沟泥石流	泸桥镇挖脚村	中等 风险	土木工程、生物工程、 监测预警	23 户 89 人及 318 国道
NSL08	三叉沟泥石流	杵坨乡杵坨村三组	中等 风险	生物工程、监测预警、 避让搬迁、群策群防	10 户 45 人
NSL09	田家沟泥石流	杵坨乡杵坨村三组	高风险	土木工程、生物工程、 监测预警、群策群防	23 户 81 人及 乡政府所在地
NSL10	麻沙坡沟泥石流	杵坨乡杵坨村三组	中等 风险	生物工程、监测预警、 群策群防	14 户 56 人及 乡政府所在地
NSL11	羊儿沟泥石流	杵坨乡杵坨村三组	高风险	生物工程、避让搬迁、 监测预警	5 户 20 人
NSL12	金华沟泥石流	杵坨乡杵坨村一组	高风险	生物工程、避让搬迁、 监测预警	10 户 40 人
NSL13	扯索沟泥石流	杵坨乡联合村一组	高风险	土木工程、生物工程、 监测预警	6 户 27 人
NSL14	磨子沟泥石流	德威乡磨子沟	高风险	生物工程、避让搬迁、 监测预警、群策群防	9 户 33 人
NSL15	涨水沟泥石流	德威乡咱威村咱威组	中等 风险	生物工程、避让搬迁、 监测预警	15 户 40 人
NSL16	落石沟泥石流	德威乡咱威村二里坝 组	中等 风险	生物工程、避让搬迁、 监测预警	6 户 19 人
NSL17	加郡沟泥石流	加郡乡一村二组	高风险	生物工程、避让搬迁、 监测预警、群策群防	2 户 19 人及 211 省道

7.3.1 典型泥石流防治对策研究——深家沟泥石流防治对策研究

泥石流的发生、发展及危害不仅与特定的地质环境有关，也与人类不合理的

经济活动关系十分密切。泥石流防治是根据泥石流的发生条件、基本性质、发展趋势和治理需要,从全局的角度采取切实可行的、相互关联的工程措施、预警预报措施及有效的行政管理措施等,对泥石流流域或区域统一规划,治坡、治沟相结合,并根据国家及地方的经济实力按轻重缓急次序安排实施,其目的是控制泥石流发生和发展,减轻或消除对被保护对象的危害,使被治理流域恢复或建立起新的良性生态平衡,改善环境。

论文第三章已详细描述了深家沟泥石流的流域概况并详细剖析了深家沟泥石流形成的成因,基于深家沟泥石流所处地理位置的特殊性——紧挨泸定县城,并根据深家沟泥石流风险评价结果——高风险,因此本着“以人为本”的精神,提出对该沟进行治理。

7.3.1.1 深家沟泥石流防治原则

根据深家沟泥石流的具体情况和当地经济、社会、生态建设的需要,同时考虑财力和物力,以及被保护对象的重要性,防治工程设计遵循总的原则是:坚持以泥石流等地质灾害防治和生态环境恢复重建为中心,开展全面规划,综合治理,突出重点,采用土木工程措施和生物工程措施相互配合、发挥整体效益。土木工程采用稳、拦、排措施,控制和减轻泥石流灾害;生物工程主要采取退耕还林,恢复生态植被。

7.3.1.2 深家沟泥石流防治措施

根据深家沟泥石流流域概况及保护对象的重要性,在深家沟泥石流防治对策上,主要以土木工程为主,生物工程等其它风险管理措施为辅。并且在设计上按照 50 年一遇暴雨标准进行设计,按照 100 年一遇暴雨标准进行校核,表 7-2。

表 7-2 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,不能绕避则建立预警避难系统;必要时采取生物和土木综合治理,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,同时施行生物和土建工程综合治理,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发生发展;必要时可建立预警避难系统,避免不必要的灾害损失	20 年一遇
≤ 0.35	轻度危险	防为主、治	加强水土保持、保护生态环境,搞好群策	10 年一

		为辅	群防；必要时辅以一定的工程治理	遇
--	--	----	-----------------	---

建议在深家沟泥石流的形成区（中上游）主要以“稳”为主，以稳固泥石流沟上游边坡、提高沟床上游基准侵蚀面，控制和减少泥石流固体物源；在泥石流的流通区（中游）主要以“拦”为主，把泥石流固体物质拦挡在泥石流流通区内，控制泥石流规模，改变泥石流流体性质，减少进入排导槽的松散固体物质，从而有利于下游的排导效果；在泥石流淤积区（下游）主要以排导和清淤为主，以利于泥石流（稀性）顺畅排入大渡河。

因此在中上游主要修建 2 座拦挡坝，选型方面主要从一次泥石流总量和拟设坝的库容量考虑。另外在不同沟段修建 3 座谷坊，进一步保护拦挡坝、控制泥石流规模及稳固沟内的固体物质，在下游，主要修建排导槽，对泥石流排导槽的设计，要求通过洪峰流量时不发生淤积，也不出现冲刷，让泥石流循指定的沟道排泄，进入大渡河，总的工程布置平面示意图 7-3。

另外还应辅以监测预警和群策群防等和土木工程相结合的防治对策，预防深家沟泥石流的再次暴发，给人民生命财产带来损失。

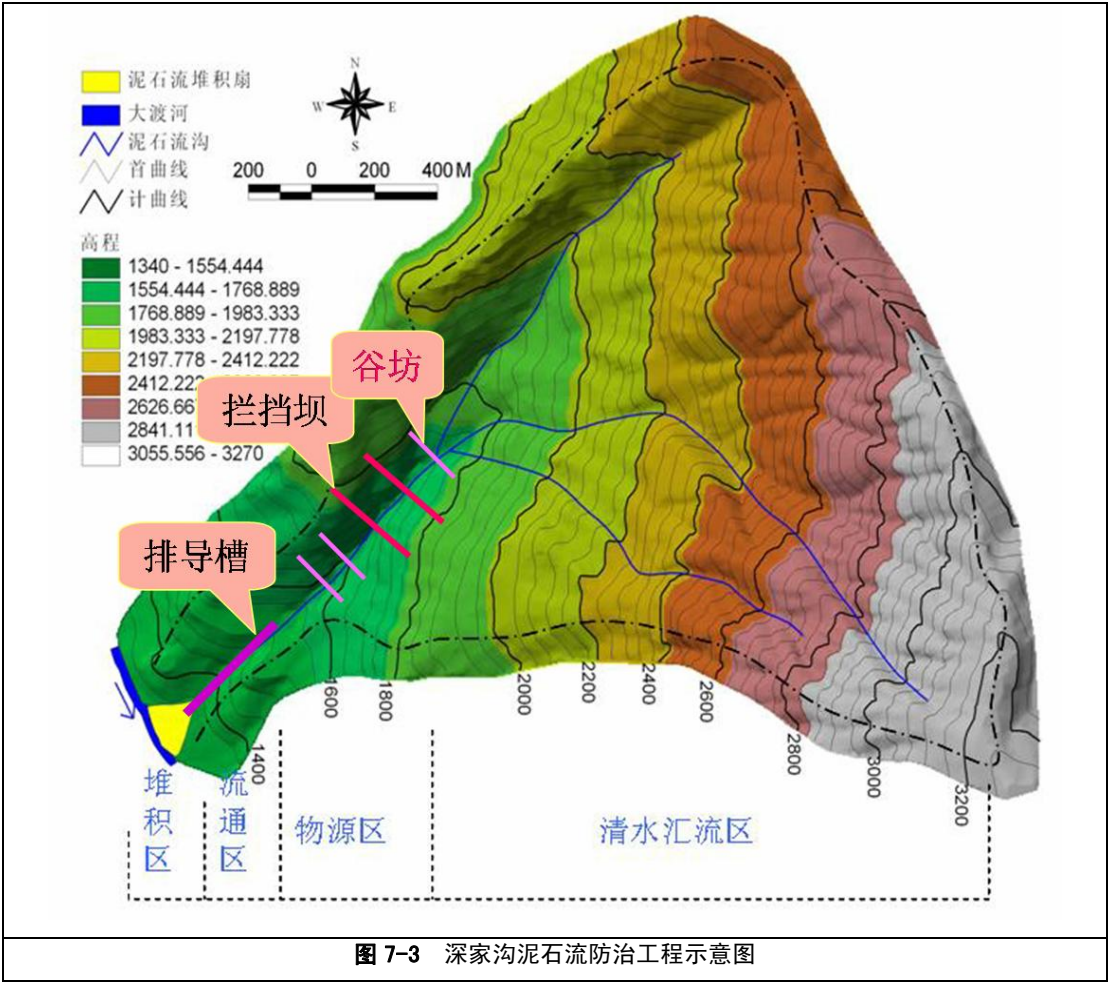


图 7-3 深家沟泥石流防治工程示意图

结 论

本文是依托于四川省国土资源厅《泸定县地质灾害调查与区划》项目进行的部分研究,论文对大渡河泸定——得妥段 17 条泥石流沟的灾害风险评价和防治对策进行探讨,在评价方法和防治对策上进行了一些有益的探索。

本文是在对泸定县历史资料和野外实地调查的基础上,学习借鉴国内外已有的成果和研究方法上,结合泸定县地质灾害的发育环境包括地形地貌、地质构造、地层岩性、水文气象及地震、危害特征及社会经济条件建立泥石流危险评价和易损评价的指标,运用单沟泥石流风险评价方法对每条泥石流沟进行评价,得到以下几点结论:

1)大渡河泸定——得妥段发育的泥石流具有川西山区泥石流沟的一般特点:①形成区、流通区和堆积区都比较明显;②处于几大断裂带交汇部位,山体破碎,块体运动频繁,山坡上松散物质储量大;③地势起伏大,地形高差悬殊,山坡坡度都在 35° 左右,沟床比降大;④大气降水多以暴雨或连续的中——大雨的形式出现,河谷都属于下凹型河谷,植被发育差。

2)论文对研究区流域地质环境概况、泥石流灾害类型、分布及影响因素等进行了分析研究,在查阅大量文献资料的基础上,结合前人工作经验建立了泥石流危险性和易损性评价指标,以便能真实反映该地泥石流灾害的实际情况。

3)根据泥石流风险评公式 $R_{\text{单}}=H_{\text{单}}\times V_{\text{单}}$ 即风险度等于危险度和易损度的乘积,得到处于高风险泥石流 9 条,中等风险的 8 条。并且基于 MAPGIS 软件平台根据该段泥石流风险评价结果作出了泥石流风险评价图。

4)从所评价的结果来看,并结合这些泥石流沟所处的地理位置,认为必须加强对这些沟的防灾减灾规划,特别是影响泸定县城的 3 条泥石流,在经济及技术可行的情况下,应尽快采取治理措施,从被动防灾到主动减灾,对评价结果是高风险的泥石流,直接威胁对象是城镇的居民和主要公路的,则建议主要以治为主,防为辅,采用土木工程、生物工程和监测预警相结合的防治对策,如威胁泸定县城的深家沟泥石流、木厂沟泥石流、羊圈沟泥石流,威胁少数农户和国道 318 的泸桥镇大坝村干沟泥石流等;对评价结果是中等风险的泥石流,威胁对象较少,流域面积大,在目前情况下治理难度大的泥石流则建议以防为主,治为辅,如田坝乡磨河沟泥石流、杵坭乡三叉沟等,采用生物工程、群策群防和避让搬迁相结合。

5)其它泥石流在当前情况下无法治理的泥石流沟,主要采取其它风险管理措施,做好群策群防,监测预警及完善泥石流预警发布和应急指挥机制,另外尽快让处在泥石流沟危险的区域的居民尽快搬离,从而减少对当地居民造成的生命财产损失。

6)要做好泥石流灾害的应急组织等风险管理措施,即:灾前准备、应急响应

和灾后应急。灾前应急主要强调泥石流的监测、预警、预报、普及公众防灾意识及公众环境保护意识等；应急响应主要进行救灾、灾情评估、信息发布、群众疏散等；灾后应急主要安置灾民、现场恢复、灾后重建等。

7) 选择典型性泥石流——深家沟泥石流为典型为例，证明对于评价结果是高风险的泥石流，只要防治对策合理，在人为的作用下，是可以尽可能防范泥石流发生且对人民生命财产产生危害的。

致 谢

与理工的邂逅已是七年有余，在这里有幸得到了很多老师、同学和朋友的关心、支持和帮助，使我不断的学习和成长，在毕业之际，向你们表示衷心的感谢！

首先感谢恩师唐川先生在研究生阶段给予学生学业上细致的指导和生活上悉心的关心，恩师严谨的治学态度、精湛的学术造诣和崇高的思想品德，使学生深受教益并将铭记终生。同时也感谢师母朱静老师对学生无微不至的关心！

感谢黄润秋教授、许强教授、许模教授、李天斌教授、陈礼仪教授、巨能攀教授、李晓教授等曾经谆谆教导过我的老师多年来给予我的指导和帮助。

感谢韩才义老师、尹学兰老师、李海华老师、方燕老师等对学生的关心和帮助！

感谢一同学习的师兄弟姐妹杨永红博士后、胡子文博士、刘清华博士、铁永波博士、凌昊平硕士、沈娜硕士、苏小琴硕士、李为乐硕士、杨江波硕士、熊德清硕士、汪月鹃硕士、梁京涛硕士、林富财硕士、曹屹东硕士、邵虹波硕士、杨泰平硕士、易静硕士等等，感谢他们多年来的帮助和照顾。

感谢岩土工程、地质工程、环境地质专业所有同学们，尤其要感谢郑光同学陪伴我度过了快乐而充实的三年学习时光，这段愉快而充实的学习时光是我一生回忆中的亮点！

感谢三年来关心和支持我的朋友：李瑾硕士、张勇博士、陈娟硕士、尚琴硕士、石昱祯硕士、王希宝硕士、孙维兵硕士等其他给予我无私帮助的朋友。

我要特别感谢父母及家人多年来的养育和关怀。他们无私奉献、勤俭、正直、热情和默默承受的优良品质陪伴我逐渐成长，并以他们自己特有的方式默默地爱着我，让我深切地体会了爱的含义。今后我要好好努力，尽心工作，以回报父母的恩情。在此，仅以此文献给他们，愿父母身体健康、幸福永远。

最后向所有关心、帮助、理解和支持我的亲人和朋友表示最衷心的感谢并致以最美好的祝愿。

参考文献

- [1] 国家科委等全国重大自然灾害综合研究组, 中国重大自然灾害及减灾对策, 科学出版 1994。
- [2] 段永侯罗元华柳源等, 中国地质灾害, 中国建筑工业出版社, 1993.
- [3] 孙广忠王昂生张丕远, 中国自然灾害, 学术书刊出版社, 1990.
- [4] 中国灾害防御协会国家地震局震害防御司, 中国减灾重大问题研究, 地震出版社, 1992.
- [5] 丹巴县邓山沟泥石流成因及发展演化规律研究, 成都理工大学学位论文, 2005.
- [6] Unite Nations, Department of Humanitarian Affairs. Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management, DNA/93/36, Geneva, 1992.
- [7] Unite Nations, Department of Humanitarian Affairs. Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options—A Manual for Policy Makers and Planners [M]. New York: Unite Nations, 1991, 1-1
- [8] C.M.弗莱施曼(苏)著, 姚德基译. 泥石流. 北京: 科学出版社, 1986. 29-35.
- [9] 足立胜治, 德山九仁夫, 中筋章人等. 土石流发生危险度の判定にフヤて[J]. 新砂防, 1977, 30(3): 7-16.
- [10] 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[J]. 京都大学防灾研究所年报, 1988, 31(B-2): 655-676.
- [11] 久保田哲也, 正务章, 板垣昭彦. 流域の任意地点における短时间降雨预测手法と土石流发生危险度判定图の開発[J]. 新砂防, 1990, 42(6): 11-17.
- [12] 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.
- [13] Olivier Lateltin, Example of hazard assessment and land-use planning in Switzerland for snow avalanches, floods and landslides, Swiss national hydrological and geological survey, Bern, 1998.
- [14] Hungr O., Morgan C.G., Vandine F.D., etc., Debris flow defenses in British Columbia, GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA REVIEWS IN ENGINEERING GEOLOGY, 7, 1987, 201-222.
- [15] 王礼先. 关于荒溪分类. 北京林学院学报, 1992.
- [16] 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, 1986. 6 (1): 51-57.
- [17] 刘希林. 泥石流危险度判定的研究. 灾害学, 1988. 3 (3): 10-15.
- [18] 魏永明, 谢又予, 伍永秋. 关联度分析法和模糊综合评判法在泥石流沟谷危险度划分中的应用. 自然灾害学报, 1998. 7 (2): 109-117.
- [19] 张跃, 宿芬, 邹寿平. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992. [13].
- [20] 唐川, 周钜乾, 朱静, 等. 云南崩塌滑坡危险度分区的模糊综合分析法[J]. 水土保持学报, 1994, 8 (4) : 48- 54.
- [21] 魏永明等, 关联度分析法和模糊综合评判法在泥石流沟谷危险度划分中的应用, 自然灾害学报, 1998. 7(2).
- [22] Gao Kechang, Probability Forecast of Regional Landslide Based on Weather Forecast, Wuhan University Journal of Natural Sciences, Volume 11, Number 4, 2006.
- [23] Yuan Lifeng, Debris Flow Hazard Assessment Based on Support Vector Machine, Wuhan

- University Journal of Natural Sciences, Volume 11, Number 4,2006.
- [24] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1987. 73-81.
- [25] 刘希林. 灰色模型和回归分析在泥石流预测中的应用——以蒋家沟泥石流流年输沙量预测为例[J]. 灾害学, 1989, 4(2) 26-30.
- [26] 侯兰功, 催鹏. 单沟泥石流灾害危险性评价研究. 水土保持研究, 2004. 6(11-2).
- [27] Dikau R, Cavallin A, Jager S. Databases and GIS for landslide research in Europe[J]. Geomorphology, 1996, 15(3-4):227-239.
- [28] Walsh S J, D R Bulter. Morphometric and multispectral image analysis of debris flows for natural hazard assessment[J]. Geocarto International, 1997, 12(1):59-70.
- [29] Wadge G, A P Wislocki, E J Pearson. Spatial analysis in GIS for natural hazard assessment[A]. M F, Goodchild, B O, Park S, L T Steyaert. Environmental Modelling with GIS[M]. Oxford: Oxford University Press, 1993. 332-338.
- [30] Gupta R P, Joshi B. Landslides hazard zoning using the GIS approach: A case study from the Ramganga Catchment Himalayas[J]. Engineering Geology, 1990, 28: 119-131.
- [31] Mejia-Navarro M, Wohl E E, Oakes S D. Geologic hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado [J]. Geomorphology, 1994, 10(1) 331-354.
- [32] Van Westen C J, Rengers N, Terlien M T J, et al. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS based hazard zonation[J]. Geologische Rundschau, 1997, 86(4) 1-14.
- [33] Terlien M T J, Van Westen C J, Van Aalschoten W J. Deterministic modeling in GIS based landslide hazard assessment[A]. (A Carrara F Guzzetti) Geographic Information System in Assessing Natural Hazards[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. 57-78.
- [34] Binaghi E L, Luzi P, Madella F, Pergalani, et al. Slope instability zonation: A comparison between a certainty factor and fuzzy Dempster-Shafer approaches[J]. Natural Hazards, 1998, 17: 77-97.
- [35] Dhakal A S, Amada A, Aly M. Landslide hazard mapping and its evaluation using GIS: An investigation of sampling schemes for a grid cell based quantitative method[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1999, 66(8):981-989.
- [36] Dhakal A S. Landslide hazard mapping and the application of GIS in the Kulehani watershed Nepal[J]. Mountain Research and Development, 1999, 19(1) 3-16.
- [37] 赵士鹏, 周成虎, 谢又予, 等. 泥石流危险性评价的GIS与专家系统集成方法研究[J]. 环境遥感, 1996, 11(3):212-218.
- [38] 闫满存. GIS支持的澜沧江下游区泥石流爆发危险性评价[J]. 地理科学, 2001, 21(4):335-338.
- [39] 许信旺. 地理信息系统支持下泥石流危险度评估研究[J]. 安庆师范学院学报(自然科学版), 1997, 3(1):19-21.
- [40] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价[M]. 北京: 科技出版社, 1995, 35~61.
- [41] 刘希林, 莫多闻. 泥石流风险评价[M]. 成都: 四川科技出版社, 2002, 18~26.
- [42] 金晓东, 罗云. 区域社会经济“易灾性”综合评价实践[J]. 灾害学, 1994, 8(1): 32—37.
- [43] 万庆. 洪水灾害系统分析与评估[M]. 北京: 科学出版社. 1999. 74—148.
- [44] 姜彤, 许朋柱, 许刚. 中国山地自然灾害易损性分析[EA]. 山地资源开发与持续发展

- [c]. 成都: 成都科技大学出版社, 1997. 102-109.
- [45] Thouret, J. C. Urban hazards and risks; consequences of earth quakes and volcanic eruptions: an introduction[J]. *GeoJournal*, 1999, 49(2). 131—135.
- [46] Clarke, C. , Munasinghe, M. Economic aspects of disasters and sustainable development: an introduction. In: Munasinghe, M. , Clarke. C. (Eds.), *Disaster Prevention for Sustainable Development, Economy and Policy Issues*[M]. IDNDR and the World Bank, Washington, 1995. 1—10.
- [47] United Nations. Department of Humanitarian Affairs. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management[M]. *DNAP93P36*, Geneva . 1992.
- [48] Panizza M. *Environmental Geomorphology*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1996. 1—268.
- [49] United Nations. Department of Humanitarian Affairs. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management[M]. *DNAP93P36*, Geneva . 1992.
- [50] 唐川, 张军, 周春花等. 城市泥石流易损性评价. *灾害学*, 2005, 20 (2) .
- [51] 刘希林, 莫多闻, 王小丹. 区域泥石流易损性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2001, 12(2): 1—12.
- [52] 唐川、汪新芳、苏小琴等. 四川省泸定县地质灾害调查与区划报告, 2006 (8) .
- [53] 汪新芳等. 大渡河泸定—得妥段泥石流风险评价. *水土保持研究*, 2007 (12) . 96~99;
- [54] Mejia-Navarro M., Wohl E.E. and Oaks S.D. Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado[J]. *Geomorphology*, 1994, 10: 331-354
- [55] 杜兴信, 李博. 陕西关中地区城市灾害评价[J]. *灾害学*, 1994, 9 (3): 46-52.
- [56] 张业成, 郑学信. 云南省东川市泥石流灾害灾情评估[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1995, 6 (2): 67-76.
- [57] 罗元华, 陈崇希. 泥石流堆积数值模拟及泥石流灾害风险评估方法[M]. 北京: 地质出版社, 2000, 1-82.
- [58] 罗元华, 张梁, 张业成. 地质灾害风险评估方法[M]. 北京: 地质出版社, 1998, 1-116.
- [59] 张梁, 张业成, 罗元华, 等. 地质灾害灾情评估理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [60] 刘希林, 莫多闻. 泥石流易损度评价, *地理研究*, 2002 (9) 21-5.
- [61] 刘希林, 莫多闻. 泥石流风险评价[M]. 成都, 乌鲁木齐: 四川科学技术出版社 / 新疆科技卫生出版社(K). 2003.
- [62] 刘希林、苏鹏程. 四川省泥石流风险评价, *灾害学*, 2004 (6) 19-2.
- [63] 刘希林, 莫多闻. 泥石流风险管理和土地规划, *干旱区地理*, 2002 (6) 2

