

泥石流

预报的原理与方法

韦方强 高克昌 江玉红 张少杰
等著



科学出版社

泥石流预报的原理与方法

韦方强 高克昌 江玉红 张少杰 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较系统地论述了泥石流预报研究的现状和存在的问题,梳理了泥石流预报的类型和减灾需求,介绍了不同类型泥石流预报的理论基础。根据泥石流预报气象基础和现有的技术条件,建立了不同时空尺度的泥石流预报技术体系,并针对该技术体系介绍了气象数据的获取与分析。在此基础上,重点介绍了基于泥石流成因的预报方法和应用,探索了基于泥石流形成机理的预报途径和方法,并将其应用到泥石流减灾实践,取得了良好的预报效果,为泥石流预报的研究和应用探明了可行的途径和方向。

本书兼有泥石流预报理论探索和应用实践,既可以作为从事地质灾害研究的大专院校和科研单位研究人员的重要参考文献,也可以作为从事地质灾害减灾技术应用的工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

泥石流预报的原理与方法/韦方强等著. —北京:科学出版社,2015.6
ISBN 978-7-03-045043-2

I. ①泥… II. ①韦… III. ①泥石流-监测预报 IV. ①P642.23

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第132667号

责任编辑:许 健 陈姣姣/责任校对:钟 洋
责任印制:谭宏宇/封面设计:殷 靓

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

上海叶大印务发展有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本:720×1000 B5

2015年6月第一次印刷 印张:13 1/2 插页:4

字数:272 000

定价:158.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

泥石流作为一种自然灾害,近十多年来不断触痛人们的神经。从1999年委内瑞拉造成3万~5万人死亡的阿维拉山区特大泥石流,到2005年危地马拉造成1400人死亡的印第安村落泥石流和2006年菲律宾造成1700人死亡的莱特省泥石流,再到2010年我国造成1765人死亡的舟曲泥石流,一次又一次地撕开泥石流给世界戳下的伤口。人类已经跨入21世纪,既可“九天揽月,五洋捉鳖”,也可撩开火星的面纱,更可将环球的信息通过一个个小小的APP玩弄于手掌之间。然而,为什么一粒粒的“泥丸”却一次又一次地击痛世界的心?“乌蒙磅礴走泥丸”是诗人的豪情,还是对自然的敬畏,我们不得而知,但我们几乎可以确认的是“泥丸”虽小,却已触动了诗人的心。为了让泥石流不再触动世界的神经,许多国家的政府、学者、工程师已投入大量的人力物力对泥石流进行研究,试图认识这种自然现象,揭示其内在的规律,预测其频繁的活动,阻拦其迅猛的运动,一次次血的教训告诉我们,我们的研究还在路上。

泥石流预报是减轻灾害的最经济最有效的途径之一,如果能对每一次的灾害进行有效的预报,甚至临灾前10min的预警,也许可以挽救那些被泥石流吞噬的鲜活的生命。为此,人们开始从大量的泥石流灾害事件中进行统计分析,寻找泥石流与降水间的各种联系,试图确定泥石流发生的临界条件,据此对泥石流进行预报。于是,国内外出现了大量的基于泥石流灾害事件统计分析的泥石流预报预警模型,其核心是确定引发泥石流灾害的临界降水条件。这些模型虽然具有明显的地域性,但却是具有一定操作性的预报方法,在泥石流减灾中也发挥了一定的作用。这种方法的漏报率和误报率较高,为了平衡误报率和漏报率,不得不对临界条件进行必要的修正。尽管如此,该方法预报结果的可靠性仍然处于较低水平,在泥石流减灾中发挥的作用也就受到了局限。

为了解决这一问题,提高泥石流预报的可靠性,在中国气象局和中国科学院等的支持下,我们开始探索基于泥石流成因的预报方法,将泥石流的形成归纳为能量、物质和激发条件三大成因,并将能量和物质条件归并为下垫面条件,将激发条件归并为降水条件,将泥石流的形成构建成降水作用于下垫面的水土耦合过程,从而建立预报模型,对泥石流发生的概率进行评估。在研究过程中,我们发现这种泥石流预报方法虽然考虑了降水与下垫面的双重作用,但在缺乏泥石流形成机理的支撑下,仍然无法完全摆脱统计分析的束缚。虽然这种预报方法预报结

果的准确性有了显著提高,但仍然难以在泥石流减灾中发挥关键作用。究其原因,我们认为泥石流发生于大小不一的一个个流域(坡)内,而这种预报方法的预报单元为大小一致的网格单元,既不是一个流域也不是一个坡,无法对其进行理论分析,只能利用统计分析方法进行评估。同时,目前对泥石流形成机理的研究大多是对点、坡或局部沟道段尺度的力学分析,而泥石流的形成却是在流域尺度上的行为。要摆脱统计分析的束缚,必须解决这两大问题,实现基于泥石流形成机理的预报。于是,我们对这两大问题进行了重点研究,将泥石流的形成归纳成降水作用于流域内土体和流域内径流作用于失稳土体的两个水土耦合过程,并利用流域水文过程模拟将这两个水土耦合过程贯穿起来,初步探索出一条基于泥石流形成机理的预报方法。通过对这种新方法的试验和应用,发现其预报的准确性和可靠性超出了我们当初的预期,使预报的误报率大幅度下降。虽然这种方法仍处于初步的探索阶段,还需要在一定的假设条件下简化复杂的泥石流形成过程,并在分析泥石流最后的形成过程时不得不暂时将其作为一个黑箱问题进行处理,但是我们似乎已经看到了泥石流预报探索道路上的一束明光,使得探索的道路越来越清晰可见。

本书的研究和探索是集体研究的成果,参与本书研究工作的主要人员包括韦方强、高克昌、江玉红、张少杰、赵岩、熊俊楠、张京红、杨红娟、刘敦龙、张文江等。在研究过程中得到了崔鹏院士和钟敦伦研究员的指导与帮助,得到了国家气象中心、四川省气象台、浙江省气象台、福建省气象台、广东省气象台等部门和同仁的大力支持与帮助,在此一并致谢!

泥石流预报是一个世界性的难题,尚处于探索阶段,并且涉及众多学科知识,由于作者才疏学浅,书中难免存在疏漏之处,敬请读者谅解并不吝指正。

作 者

2015年4月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 泥石流分布及其危害	1
一、泥石流分布	1
二、泥石流危害	4
第二节 泥石流减灾措施	7
一、工程减灾措施	7
二、非工程减灾措施	9
第三节 泥石流预报的国内外研究现状	11
一、泥石流空间预测预报	12
二、泥石流时间预测预报	13
三、泥石流要素预报	18
四、典型泥石流预报系统简介	19
五、国内外主要的研究机构	22
第四节 主要研究内容与研究方法	23
参考文献	27
第二章 泥石流及其预报分类	30
第一节 泥石流分类	30
一、主要的泥石流分类方法	30
二、泥石流分类体系	31
第二节 泥石流预报分类	34
一、泥石流预报分类研究概况	35
二、泥石流预报分类的原则	35
三、泥石流预报分类的依据和分类结果	36
四、不同类型泥石流预报的研究现状和发展方向	38
第三节 我国的主要泥石流类型与泥石流预报需求	41
一、我国的主要泥石流类型	41
二、泥石流预报的基本需求	44
参考文献	46

第三章 泥石流预报的理论基础	49
第一节 泥石流形成机理	49
一、土动力模式启动机理.....	49
二、水动力模式启动机理.....	52
第二节 泥石流发生与降水间的统计规律	57
一、泥石流的发生与降水量间的关系.....	57
二、泥石流发生与降水强度和降水持续时间间的关系.....	58
三、泥石流发生与降水气候特征间的关系.....	59
第三节 泥石流成因及其分布规律	70
一、泥石流成因分析.....	70
二、泥石流空间分布规律.....	74
第四节 泥石流的流量与运动规律	87
一、泥石流流速计算.....	87
二、泥石流流量计算.....	88
参考文献	88
第四章 泥石流预报的气象基础及其技术体系	91
第一节 气象基础	91
一、泥石流预报的降水数据支持.....	91
二、降水监测和预报技术.....	92
第二节 泥石流预报的技术体系	93
一、不同降水预报(观测)的时空尺度.....	94
二、泥石流预报的时空尺度.....	95
三、泥石流预报的技术体系.....	96
四、泥石流预报结果的表述与发布.....	98
第三节 泥石流预报的降水数据获取与分析	99
一、前期降水量的获取.....	99
二、有效前期降水量的确定.....	100
三、预报降水的获取与分析.....	117
参考文献	121
第五章 泥石流成因预报模型和方法	124
第一节 泥石流成因预报模型的确定	124
第二节 可拓预报模型的基本原理	125
一、基本概念.....	125
二、物元分析的原理和方法.....	125

三、物元分析方法解决综合评判问题的一般步骤	126
第三节 泥石流可拓预报模型	128
一、区域泥石流预报单元	128
二、泥石流成因及其关键因素	129
三、泥石流预报等级	131
四、泥石流预报的物元和物元模型	131
第四节 泥石流可拓预报模型的实现与系统开发	134
一、泥石流可拓预报模型的实现方法	134
二、泥石流可拓预报应用系统设计	139
三、泥石流可拓预报应用系统的开发	146
第五节 泥石流可拓预报系统应用	158
一、东南地区泥石流预报应用	158
二、西南地区泥石流预报应用	160
三、广东省广州市泥石流预报应用	161
四、汶川地震灾区泥石流预报系统应用	162
参考文献	165
第六章 泥石流机理预报	166
第一节 泥石流机理预报的途径和瓶颈	166
一、泥石流机理预报的途径	166
二、泥石流机理预报的瓶颈	167
第二节 泥石流机理预报方法	176
一、泥石流预报单元的确定	177
二、预报降水下的水文过程模拟	177
三、预报降水作用下土体失稳量计算	179
四、地表径流量的计算	181
五、水土混合体容重的计算	182
六、泥石流发生概率评估与预警等级确定	182
第三节 泥石流预报方法的流域试验	182
一、数据准备	183
二、试验结果	184
第四节 泥石流预报方法的区域试验	188
一、汶川地震灾区内潜势泥石流的分布	188
二、试验结果	188
第五节 泥石流预报方法在四川省的应用	192

一、系统研发	192
二、系统应用准备	196
三、系统应用	201
参考文献	205
后记	207
彩图	

第一章 绪 论

泥石流是山区常见的自然灾害，广泛分布于世界各地山区。我国山区面积约占国土陆地面积的 2/3，是世界上泥石流分布最广泛、危害最严重的国家之一。随着社会经济的不断发展，特别是近 20 年来山区经济的快速发展，泥石流造成的损失越来越严重。为了减轻泥石流灾害，泥石流减灾工程技术不断得到发展，成为泥石流灾害减灾的重要手段，并应用到泥石流减灾实践中。然而，面对分布广泛、数量众多的泥石流灾害，目前尚不可能对泥石流流域进行逐一治理，泥石流预报成为泥石流减灾的又一重要手段，特别是在现有的经济和技术条件下，成了避免泥石流造成重大人员伤亡的重要手段。

第一节 泥石流分布及其危害

泥石流是一种自然现象，当它危害到人类生命、财产和资源安全时就成为自然灾害。这种自然现象的形成受到能量、物质和水源三大条件的制约，其分布也受这三大条件的影响。能量条件是决定是否有泥石流分布的关键因素，包括总能量条件和能量转化梯度条件。对于一个小流域而言，地形相对高差反映总能量条件，地形坡度反映能量转化条件，共同决定该流域是否具备泥石流形成的能量条件，是控制泥石流分布的关键因素。物质条件是泥石流形成的物质基础，但在自然界除极端的石漠化地区外，绝大部分山区都具备泥石流活动所需的基本物质条件，只是物质的丰富程度存在较大的差异。物质条件对控制泥石流分布不像能量条件那么重要，但对泥石流的活跃程度却有着十分重要的影响。水源条件是泥石流形成的激发条件，包括降水、冰川（雪）融水、溃决洪水和泉水等。由于我国大部分地区受季风气候影响，降水丰富且集中，除少数极干旱地区外，绝大部分地区的降水均可以满足激发泥石流的需要。

一、泥石流分布

泥石流分布几乎遍布全球的山区，我国是全球泥石流灾害最为严重的国家之一。据统计，全国有 8 万处泥石流分布，其中严重的有 8500 处，泥石流活动区面积达 430 万 km^2 （康志成等，2004）。目前作者收集到的泥石流流域近 1 万条

(图 1-1)，现根据这些资料对我国泥石流的分布情况作简单介绍。

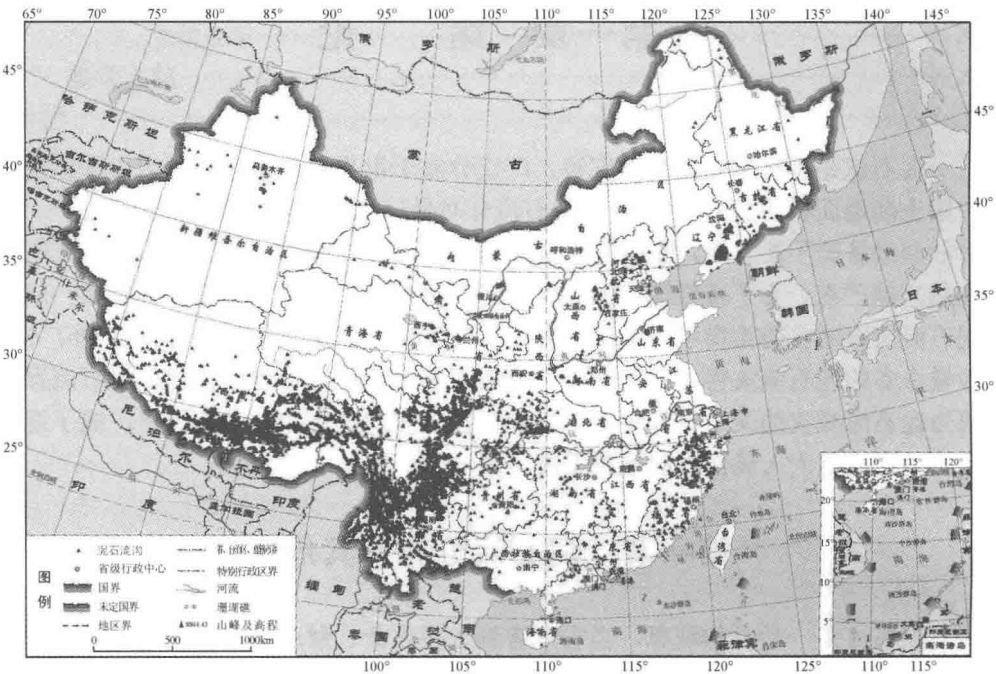


图 1-1 我国泥石流分布示意图（后附彩图）

(一) 在行政区的分布

泥石流分布极为广泛，我国除江苏省、上海市和澳门特别行政区外，其余各省（市、自治区）均有泥石流分布（图 1-1）。但是在各行政单元的分布极不均匀，整体上是西部山区多于东部山区，西南山区多于西北山区。其中泥石流灾害分布最为集中的是四川、云南、甘肃、陕西、西藏和重庆等，约占全国泥石流总量的 80%。

(二) 在地貌带的分布

由于能量条件是控制泥石流形成的关键因素，泥石流在地貌带的分布具有很强的规律性。受大的地貌格局的控制，我国内陆地区泥石流的分布形成三个大的条带（图 1-1）：一是青藏高原向云贵高原、四川盆地和黄土高原的过渡带，二是云贵高原、四川盆地和黄土高原向东部低山、丘陵和平原的过渡带，三是受太平洋板块俯冲作用影响形成的东部沿海山脉。这三个条带均是地形起伏变化较大的地带（图 1-2），

具备泥石流发育的良好能量条件。

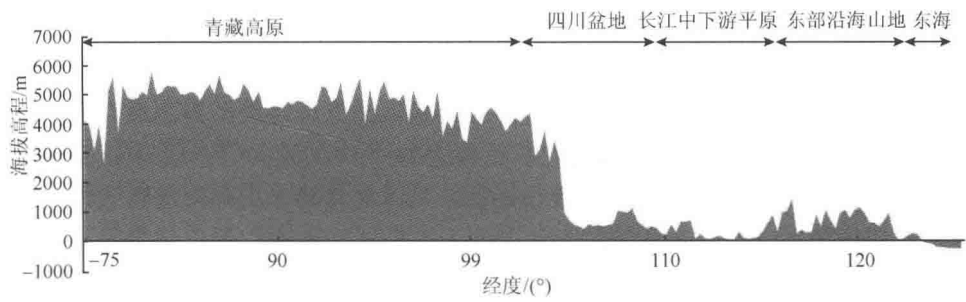


图 1-2 我国地貌的东西剖面示意图

1. 泥石流在大地貌单元过渡带集中分布

大地貌单元过渡带上往往地质构造活跃，地形高差起伏大，起伏的地形又往往造成降水增加，为泥石流的发育提供了良好的条件。我国地貌西高东低，呈阶梯状分布，由三大阶梯构成，这三大阶梯就存在两个过渡带，这两个过渡带均是泥石流发育的地带。其中，在第一阶梯向第二阶梯的过渡带上不仅具有较大的高差，同时具有较大的坡度，导致泥石流异常发育，密集分布，是我国泥石流的主要活动区；在第二阶梯向第三阶梯的过渡带上，由于地形高差变化比前一过渡带小，虽然仍是泥石流发育区，但无论是泥石流数量还是泥石流的活跃程度均比前一个过渡带要弱。我国发育许多盆地，因盆地周边山地向盆底平原或丘陵过渡的地带相对高差较大，坡度较陡，是泥石流密集发育的地区。其中最为典型的是四川盆地，盆周西部山地是我国泥石流最发育的地区之一。

2. 泥石流在河流切割强烈、相对高差大的地区集中分布

河流切割强烈的地区往往地壳隆升强烈，地质构造活跃，地形相对高差大，地势陡峻，具备泥石流发育的有利条件，泥石流往往在这些地区集中分布。我国西部地区河流切割强烈、相对高差大的地区主要有横断山地及其沿经向构造发育的西南诸河，以及雅砻江、安宁河、大渡河等河流，金沙江下游地区、岷江上游地区、嘉陵江上游、白龙江流域等。

(三) 在地质构造带的分布

断裂带皆为地质构造活跃的地带，新构造运动活动强烈，地震活动频繁，地震带多与大的断裂带重合。这些地带往往岩层破碎，山坡稳定性差，河流沿断裂带切割强烈，形成陡峻的地形，为泥石流的发育提供了十分优越的条件，是泥石流分布最为密集的地带。地震活动往往诱发大规模的泥石流，在地震后较长一段

时间内, 泥石流活动都处于活跃期。我国泥石流密集分布的地区几乎均分布在断裂带和地震带。例如, 金沙江下游的小江流域沿小江深大断裂带发育, 小江深大断裂带也是云南省主要的发震性活动断裂带之一。在断裂带和地震活动的作用下, 小江两岸泥石流异常发育。小江流域全长仅 138km, 两岸发育的泥石流沟则多达 140 条 (韦方强等, 2004a), 其中的蒋家沟泥石流更是为全世界之最, 平均每年暴发 15 场泥石流, 最多一年暴发泥石流高达 28 场 (吴积善等, 1990)。嘉陵江上游的白龙江流域密集分布的泥石流均处于白龙江复背斜、武都构造断裂带上。沿弧形断裂发育的大盈江是我国泥石流密集分布的又一地带, 因滑坡为泥石流提供了极为丰富的物质, 许多泥石流沟谷泥石流暴发频繁 (张信保和刘江, 1989)。通麦-然乌断裂带是迫隆藏布江段泥石流发育密集的地带, 发育众多大规模的滑坡和泥石流沟, 其中古乡沟、米堆沟和培龙沟等均是典型的冰川泥石流沟, 对川藏公路构成了严重的危害。

(四) 在气候带的分布

泥石流的分布虽然受地带性因素影响, 但主要受地形、地质和降水条件的控制, 因此, 也表现出一定的非地带性特征。由于我国绝大部分泥石流是由强降水诱发的, 一般在降水丰沛和暴雨多发的地区集中分布。例如, 长江上游的攀西地区、龙门山东部、四川盆地北部和东部及湖北西部山地等都是降水丰沛的地区, 年降水量一般超过 1200mm, 且降水强度大, 多为暴雨, 皆为长江上游泥石流集中分布的地区。再如, 滇西南地区受印度洋暖湿气流影响, 降水异常丰沛, 是云南泥石流分布最为密集的地区, 其中的大盈江流域地处亚热带, 为印度洋季风气候区, 降水充沛, 并随海拔的升高而增加, 区域内多年平均降水量为 1345mm (下拉线, 海拔 837m) 至 2023mm (新歧, 海拔 2000m)。丰沛的降水造成大盈江流域泥石流频发, 大盈江主河长 168km, 但发育泥石流沟 116 条 (张信保和刘江, 1989)。

二、泥石流危害

泥石流运动速度极快, 中国科学院东川泥石流观测研究站观测到的最快速度达到 18.18m/s (康志成等, 2007), 且具有突发性的特点。泥石流往往挟带大量泥土和石块, 甚至巨砾, 加之速度极快, 其冲击破坏能力巨大, 中国科学院东川泥石流观测研究站观测到的泥石流最大冲击力达 500t/m^2 (张军和熊刚, 1997)。因此, 泥石流对人类生命、财产和资源具有极大的破坏能力, 其破坏方式主要为冲击破坏、侵蚀破坏和淤埋破坏。

(一) 对城镇的破坏

山区城镇往往建设在河谷盆地，容易遭受泥石流危害和威胁。由于城镇人口密集，经济发达，一旦遭受泥石流危害，往往造成重大人员伤亡和财产损失。国内外山区城镇遭受泥石流毁灭的事件时有发生。例如，我国四川省南坪县（现更名为九寨沟县）县城所在地受三条泥石流沟的危害，200 多年前曾被泥石流毁灭，被迫迁于现址，1984 年现址又遭受泥石流袭击，造成 25 人死亡（唐邦兴和柳素清，1993）。在国外，1999 年委内瑞拉特大泥石流灾害导致多座城市被毁，造成 3 万~5 万人死亡（韦方强等，2000）。据不完全统计，仅新中国成立后的 60 多年间，我国县级以上城镇因泥石流致死的人数达 5800 多人（韦方强等，2002c）。据调查，目前我国受泥石流危害或威胁的县级以上城镇达 140 座（图 1-3），主要分布在甘肃省、四川省、云南省和西藏自治区。随着我国经济的迅速发展和山区城镇化进程的加快，我国山区城镇泥石流灾害问题将更加突出。

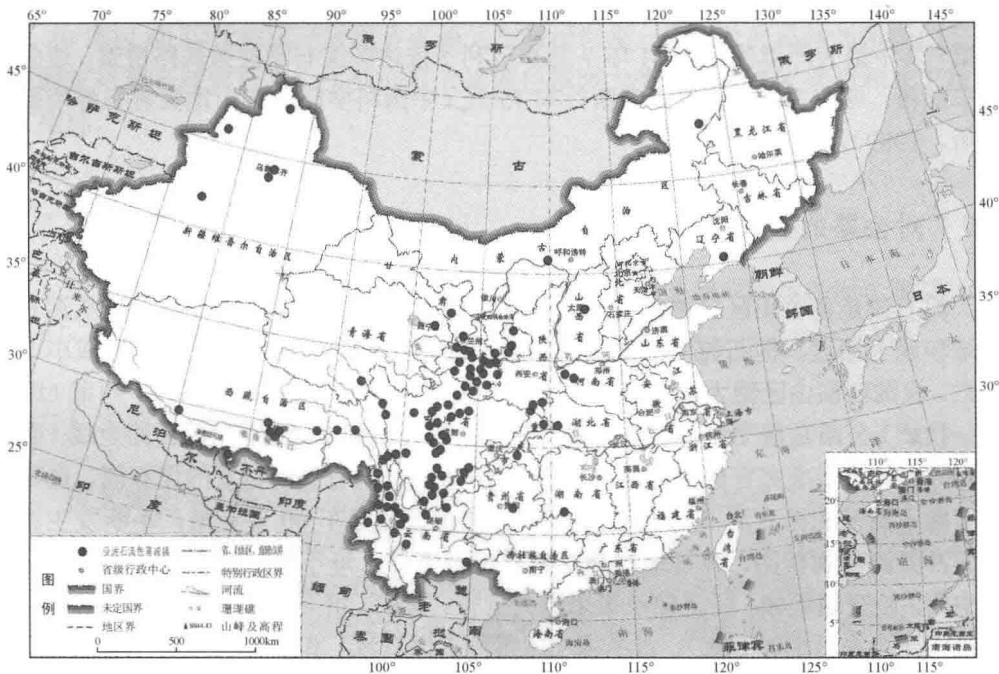


图 1-3 我国受泥石流危害的城镇分布图（后附彩图）

(二) 对村庄和农田的破坏

我国山区人多地少，人地矛盾极其突出，而泥石流堆积扇是山区相对平缓的土

地资源，常被开发为农田，甚至被用作建设村庄，泥石流一旦发生，往往给这些村庄和农田造成毁灭性的灾害，造成严重的人员伤亡和经济损失。例如，1979 年 11 月 2 日，四川省雅安干溪沟和陆王沟暴发泥石流灾害，破坏 17 个村庄，造成 164 人死亡，冲毁农田 56hm^2 （涂家政和郑尚堃，1989）。1974 年大盈江流域的梁河县滑坡和泥石流活动共造成 533hm^2 稻田被毁，占全县稻田面积的 7.1%（张信保和刘江，1989）。据不完全统计，仅四川省从 2000 年以来，每年发生灾害性滑坡和泥石流近 300 次，危害村庄 100 多个，造成大量农田被毁，复耕难度大。

（三）对铁路的破坏

大部分山区铁路都沿河谷建设，易遭受泥石流危害。我国西部山区的主要铁路干线均不同程度地受到泥石流的危害和威胁，给山区铁路运输造成了严重的危害。成昆（成都—昆明）铁路是其中受泥石流危害最为严重的铁路干线，仅四川境内段已查明的泥石流沟就多达 368 条，自 1970 年通车以来，几乎每年都会因泥石流灾害造成中断行车。泥石流曾多次冲毁或淤埋路基和车站、颠覆列车、冲毁桥梁，其中最为严重的是 1981 年 7 月 9 日利子依达沟泥石流冲毁铁路桥梁，造成列车颠覆，导致 360 人死亡，中断行车 15 天（中国科学院成都山地灾害与环境研究所，1989）。

（四）对公路的破坏

泥石流是危害山区公路的主要自然灾害类型之一。许多山区公路直接从泥石流堆积扇上通过，泥石流一旦发生，常造成公路路基冲毁或淤埋，甚至造成车毁人亡。我国西部山区绝大部分公路均不同程度地遭受泥石流危害。其中，川藏（成都—拉萨）公路是遭受泥石流危害最严重的公路干线，据调查，川藏公路全线（南线和北线）已造成灾害的泥石流沟就多达 1036 条，既有暴雨诱发的泥石流，也有冰雪融水诱发的泥石流（赵永国，1993）。川藏公路通车 60 多年来，不断发生泥石流冲毁路基和桥涵、掩埋道路和车辆等灾害事件，每年都因泥石流灾害造成交通中断，给交通运输、经济建设带来巨大危害。其中，培龙沟（冰雪融水泥石流）、米堆沟（溃决洪水泥石流）、古乡沟（冰雪融水泥石流）和加马其美沟（降水泥石流）的暴发频率最高，危害最为严重。

（五）对水电设施的破坏

山区河流蕴藏着丰富的水力资源，我国西部地区各河流干流及主要支流甚至

二级和三级支流都开发建设有水利水电工程,尤以西南地区河流为甚。其中,长江三峡、金沙江下游、雅砻江、岷江上游等的水电开发最为集中,仅金沙江下游规划建设的水电梯级开发项目的总装机容量就超过两个三峡工程的装机容量。然而,这些河段也是我国泥石流灾害最为严重的地区,大多数水利水电工程都不同程度地直接或间接遭受泥石流的危害。2004年7月8日滑坡和泥石流灾害将大盈江支流户撒河上的二级和三级电站引水坝以及厂区职工宿舍摧毁,造成重大损失。2005年8月11日四川海螺沟暴发大规模泥石流灾害,建立在磨子沟的所有小型水电站全部被冲毁,造成严重灾害(陈晓清等,2006)。据统计,云南省共有中小型水电站7万多座,目前已有4000多座遭受滑坡和泥石流灾害影响,平均每年经济损失约1500万元。

第二节 泥石流减灾措施

泥石流在我国不仅分布范围广,而且危害严重,泥石流减灾任务十分艰巨。从20世纪60年代我国开展泥石流研究与防治以来,逐步总结出较为系统的泥石流减灾措施与减灾技术。主要的减灾措施包括两大类:工程减灾措施和非工程减灾措施。

一、工程减灾措施

工程减灾措施是指采用工程技术措施控制泥石流的形成和运动而达到减灾的目的,主要包括土木工程减灾措施和生物工程减灾措施。

(一) 土木工程减灾措施

泥石流土木工程减灾措施投资高,但见效快,可以控制设计标准以内的泥石流灾害,在一定程度上减轻超过设计标准的泥石流灾害,从而达到减灾的目的。因此,泥石流土木工程减灾措施是城镇泥石流减灾的最重要手段。

城镇泥石流土木工程防治已有上百年的历史,甘肃的武都、四川的西昌和汉源等县早在200多年以前就修建排导槽或导流墙等工程,对泥石流进行了相应的防治。随着山区城镇规模、人口和经济的快速发展,以及对泥石流认识的不断深入和土木工程减灾技术的日益成熟,城镇泥石流已由在下游采取简易的排导措施,逐步发展成从上游到中游再到下游的稳、拦、排相结合的综合减灾系统(图1-4)。

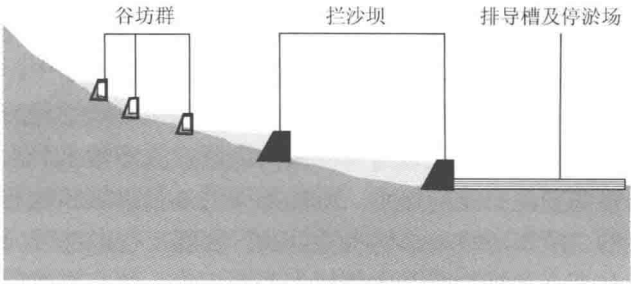


图 1-4 城镇泥石流土木工程减灾系统

“稳”即是在流域上游修建谷坊，以稳定沟床和坡脚，起到稳床固坡的作用，同时减缓上游的沟床比降，达到抑制泥石流形成的目的。谷坊一般以谷坊群的形式出现，形成一个相互保护的系统。

“拦”即是在流域中下游修建拦沙坝，拦蓄泥石流。拦沙坝是泥石流减灾工程中的控制性工程，拦沙坝一般设计成开孔坝，平时的洪水和较小颗粒的泥沙可以通过孔洞进入排导槽，一旦大规模泥石流暴发，拦沙坝拦截绝大部分粗颗粒物质，细颗粒物质可以进入排导槽，起到控制泥石流灾害的作用。

“排”即是在下游修建排导槽，排导槽起到束流排导的作用，将通过拦沙坝后不含粗大颗粒的变性泥石流排导到指定地带，起到泥石流减灾的作用。

除综合减灾措施以外，针对一些具体的保护对象，还发展了一些经济有效的工程措施。例如，为了保护铁路、公路和运输管线等线性工程，常采用渡槽或隧道等工程使泥石流从上部跨越线性工程或使线性工程从底部穿越泥石流危险区。

（二）生物工程减灾措施

生物工程减灾措施是泥石流减灾工程的辅助措施，虽不能直接控制泥石流灾害，但可以通过蓄水截流、调节洪峰削弱泥石流形成条件，并可以保持水土，减少水土流失，延长泥石流土木减灾工程的使用寿命。生物工程已成为泥石流工程减灾措施的重要手段。

生物工程减灾措施主要分为农业工程措施和林业工程措施。农业工程措施主要包括陡坡耕地退耕还林和坡改梯工程，大于 25°的陡坡地禁止耕种，全部退耕还林，以恢复地表植被；小于 25°的坡地尽量退耕还林，对于无法退耕还林的必须进行坡改梯工程改造，以减轻水土流失。林业工程措施主要包括：营造水源涵养林以蓄水截流调节洪峰；营造水流调节林以控制地表径流；营造固堤护岸防冲林以防止堤岸冲刷；种植薪炭林和经济林，解决山区生物能源问题，防止新的植被破坏（中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所，2000）。