



新世纪工程地质学丛书

余 斌 唐 川◎等著

泥石流动力特性 与活动规律研究



Dynamic Characteristics and
Activity Law of Debris Flow



科学出版社

新世纪工程地质学丛书

泥石流动力特性与活动规律研究

余 斌 唐 川 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要研究水力类泥石流的动力特性及活动规律。全书共七章,论述水力类泥石流的形成机理和预测模型、泥石流运动平均速度及计算方法、泥石流容重及计算方法、泥石流堆积厚度和屈服应力及计算方法、地震区泥石流活动特征与泥石流的危险性评价、水下泥石流及浊流的运动和沉积规律、重大泥石流事件调查实例等方面内容。其特点是以水力类泥石流的动力特性、活动规律的最新研究成果为基础,结合汶川地震影响区泥石流特点和重大泥石流事件等研究案例,内容全面,资料翔实。

本书可供从事泥石流研究,泥石流评估与防治研究的科技人员参考,亦可作为大专院校地学的教学重要教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

泥石流动力特性与活动规律研究 / 余斌,唐川等著. —北京:科学出版社, 2016.7

ISBN 978-7-03-049391-0

I. ①泥… II. ①余… III. ①泥石流-动力特性-研究 IV. ①P642.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 164454 号

责任编辑:杨 岭 刘 琳 / 责任校对:李 娟

责任印制:余少力 / 封面设计:墨创文化

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>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年8月第一次印刷 印张:17

字数:400千字

定价:128.00元

本书作者

余 斌	唐 川	刘清华	杨永红
李为乐	朱 静	章书成	王士革
谢 洪	马 煜	梁京涛	鲁 科
常 鸣	韩 林	丁 军	张健楠
苏永超	吴雨夫	李 丽	褚胜名
张惠惠			

前 言

泥石流是山区常见的地质灾害，每年在我国西部地区都会引起较多的人员伤亡和较大的财产损失，最为典型的例子是2010年8月7日发生在甘肃省南部舟曲县的泥石流，造成1744人死亡。在世界范围内，泥石流灾害也常常造成巨大的损失，如1999年12月16日在南美洲的委内瑞拉北部的群发泥石流事件，造成至少1.5万人死亡。泥石流造成的破坏有目共睹，对泥石流灾害的防治刻不容缓。

对泥石流灾害的防治首先需了解泥石流的各项特征和规律，但目前对泥石流的研究还不能很好地描述其主要特征和规律。对泥石流的研究工作主要集中在近50年。随着社会经济的发展、人口增长，泥石流灾害问题越来越严重，对泥石流的研究工作也越来越深入。近年来数值模拟、物理模拟和遥感技术为泥石流研究提供了非常好的手段，使泥石流的研究水平得到了很大的提高。2008年汶川地震后大量的泥石流暴发，又为泥石流的研究提供了一个新的平台。本书就是在这样的背景下，主要研究了泥石流的动力特征和活动规律，期望能为泥石流的防治提供更科学的依据。

本书共包括七章内容，分别是水力类泥石流形成机理研究、泥石流运动平均速度研究、泥石流容重计算方法研究、泥石流堆积厚度研究、地震区泥石流活动特征与危险性研究、水下泥石流特性研究、重大泥石流事件调查实例研究。各章节的作者如下，第1章：第1.1节：唐川、章书成，第1.2节：余斌、鲁科、韩林、褚胜名，第1.3节：李丽、余斌，第1.4节：张惠惠、余斌，第1.5节：张健楠、余斌，第1.6节：余斌；第2章：第2.1节和第2.2节：余斌；第3章：第3.1节和第3.2节：余斌；第4章：第4.1节：余斌，第4.2节：马煜、余斌；第5章：第5.1节：唐川、梁京涛，第5.2节：唐川，第5.3节：余斌、谢洪、王士革，第5.4节：刘清华、唐川、李丽，第5.5节：刘清华、唐川、常鸣；第6章：第6.1节、第6.2节、第6.4节和第6.5节：余斌，第6.3节：余斌、王士革、章书成；第7章：第7.1节：唐川、梁京涛，第7.2节：杨永红、唐川、朱静，第7.3节：余斌、杨永红、苏永超，第7.4节：唐川、李为乐、丁军，第7.5节：余斌、马煜、吴雨夫，第7.6节：余斌、马煜、张健楠。

本书得到了自然科学基金项目“非集中固体物质补给的低频率泥石流形成机理研究”(40871054)、“水力类泥石流起动机理与预报研究”(40772206)、“泥石流入湖的异重流运动模型研究”(40271003)的资助和支持，在此特别表示感谢！

作 者
2016年3月

目 录

第 1 章 水力类泥石流形成机理研究	1
1.1 水力类泥石流起动机理与预报研究进展与方向	1
1.1.1 国内外研究进展	1
1.1.2 研究方向	5
1.1.3 小结	6
1.2 泥石流形成区岩性的研究	6
1.2.1 调查区地质背景和研究方法	7
1.2.2 岩性坚固系数	8
1.2.3 岩石坚固系数的修正	13
1.2.4 泥石流暴发频率与流域岩性关系分析	14
1.2.5 小结	17
1.3 地形条件在水力类泥石流形成中的作用	18
1.3.1 研究区背景	18
1.3.2 影响泥石流形成的地形因子	22
1.3.3 小结	25
1.4 水力类泥石流起动的实验研究	25
1.4.1 实验设计和过程	25
1.4.2 实验结果	27
1.4.3 小结	31
1.5 堰塞湖溃决形成泥石流的实验研究	31
1.5.1 实验设计	32
1.5.2 实验过程及结果	33
1.5.3 小结	37
1.6 泥石流的形成与规模预测——以云南东川蒋家沟为例	37
1.6.1 泥石流发生的机理	39
1.6.2 东川蒋家沟泥石流的预报	42
1.6.3 东川蒋家沟泥石流的到达时间预报	43
1.6.4 东川蒋家沟泥石流的规模预报	44
1.6.5 小结	45
第 2 章 泥石流运动平均速度研究	47
2.1 黏性泥石流运动平均速度	47

2.1.1	现有的黏性泥石流平均速度公式存在的问题	47
2.1.2	泥石流中泥沙的不均匀性系数	48
2.1.3	黏性泥石流平均速度公式及验证	50
2.1.4	通用泥石流平均速度公式	52
2.1.5	小结	53
2.2	稀性泥石流运动平均速度	57
2.2.1	现有的稀性泥石流平均速度公式存在的问题	58
2.2.2	稀性泥石流的运动特征	59
2.2.3	稀性泥石流平均速度计算	62
2.2.4	速度计算公式的对比	63
2.2.5	小结	64
第3章	泥石流容重计算方法研究	65
3.1	黏性泥石流的容重	65
3.1.1	泥石流沉积物的特征和分类	65
3.1.2	泥石流的颗粒组成	66
3.1.3	泥石流容重的计算	71
3.1.4	小结	72
3.2	稀性泥石流的容重	74
3.2.1	稀性泥石流的沉积分选性	74
3.2.2	稀性泥石流的容重计算	77
3.2.3	过渡(亚黏性)泥石流容重的计算	78
3.2.4	小结	79
第4章	泥石流堆积厚度研究	81
4.1	泥石流堆积厚度	81
4.1.1	泥石流体屈服应力与泥沙体积浓度的关系	81
4.1.2	不同容重的泥石流淤积厚度计算	84
4.1.3	小结	85
4.2	泥石流的屈服应力	86
4.2.1	实验概述	87
4.2.2	实验结果	88
4.2.3	屈服应力的计算	91
4.2.4	验证	92
4.2.5	小结	93
第5章	地震区泥石流活动特征与危险性研究	95
5.1	汶川震区北川县城泥石流源地特征的遥感动态分析	95
5.1.1	研究区概况	95

5.1.2	数据处理与信息获取	97
5.1.3	研究方法	98
5.1.4	研究结果	98
5.1.5	解译结果的对比验证	100
5.1.6	小结	100
5.2	汶川震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测	101
5.2.1	汶川震区降雨滑坡、泥石流活动现状	101
5.2.2	历史典型实例剖析	102
5.2.3	汶川震区滑坡泥石流活动趋势预测	104
5.2.4	小结	107
5.3	汶川县典型泥石流沟在汶川地震后的活动趋势	108
5.3.1	汶川县典型泥石流沟地震前后的活动状况	109
5.3.2	地震对泥石流活动趋势的影响	111
5.3.3	小结	112
5.4	四川省都江堰市龙池地区泥石流危险性评价研究	114
5.4.1	研究方法	116
5.4.2	龙池地区泥石流危险性评价	118
5.4.3	小结	120
5.5	四川省汶川震区映秀地区泥石流危险性研究	121
5.5.1	研究方法	121
5.5.2	映秀地区泥石流危险性评价	123
5.5.3	小结	125
第 6 章	水下泥石流特性研究	127
6.1	水下泥石流的运动平均速度	127
6.1.1	实验装置和实验结果	127
6.1.2	水下泥石流阻力	130
6.1.3	水下泥石流流速	131
6.1.4	小结	133
6.2	水下泥石流的堆积特征	133
6.2.1	实验设施	133
6.2.2	潜入现象	134
6.2.3	沉积厚度	135
6.2.4	水上沉积	136
6.2.5	水下沉积	137
6.2.6	小结	138
6.3	湖泊泥石流	138
6.3.1	鹅掌河泥沙和泥石流	140
6.3.2	浊流在邛海的沉积	142

6.3.3 小结	146
6.4 浊流和泥石流的异重流初期潜入点实验研究	147
6.4.1 实验装置和实验结果	148
6.4.2 浊流和泥石流的异重流的初期 Fr 与流速关系	151
6.4.3 验证	154
6.4.4 小结	155
6.5 浊流形成水下沉积型河道的条件	156
6.5.1 Buckingham 原理	160
6.5.2 实验装置和过程	161
6.5.3 实验结果	169
6.5.4 相似性	174
6.5.5 小结	179
第7章 重大泥石流事件调查实例研究	183
7.1 汶川震区北川 9·24 暴雨泥石流特征研究	183
7.1.1 研究区	183
7.1.2 9·24 暴雨泥石流爆发的雨量临界条件	185
7.1.3 区域泥石流分布规律	186
7.1.4 泥石流形成特征分析	187
7.1.5 泥石流运动与堆积特征	187
7.1.6 小结	189
7.2 汶川震区康定县响水沟泥石流灾害调查研究	190
7.2.1 流域特征	192
7.2.2 成因分析	193
7.2.3 泥石流的静力学和动力学特征	195
7.2.4 小结	197
7.3 2010 年 8·7 甘肃舟曲特大泥石流灾害	198
7.3.1 舟曲县城泥石流流域基本特征及泥石流发生历史	198
7.3.2 舟曲 8·7 特大泥石流过程及成因	200
7.3.3 泥石流的静力学和动力学特征	202
7.3.4 舟曲县城后山泥石流的发展趋势	204
7.3.5 小结	205
7.4 汶川震区映秀镇 8·14 特大泥石流灾害调查研究	205
7.4.1 流域特征	206
7.4.2 成因分析	207
7.4.3 泥石流形成、运动和堆积特征	209
7.4.4 泥石流的静力学和动力学特征	212
7.4.5 汶川震区泥石流灾害减灾对策	213
7.4.6 小结	214

7.5	8·13 四川清平文家沟特大泥石流灾害	215
7.5.1	文家沟泥石流流域基本特征及泥石流发生历史	216
7.5.2	汶川地震后文家沟泥石流暴发过程及成因	218
7.5.3	文家沟泥石流的静力学和动力学特征	221
7.5.4	文家沟泥石流的发展趋势	223
7.5.5	小结	224
7.6	汶川地震后四川省都江堰市龙池镇群发泥石流灾害调查研究	225
7.6.1	龙溪河流域环境背景	226
7.6.2	8·13 龙池群发泥石流灾害	228
7.6.3	龙池群发泥石流的特征	229
7.6.4	龙池群发泥石流的发展趋势和防治建议	231
7.6.5	小结	233
参考文献		234
彩图		251

第1章 水力类泥石流形成机理研究

1.1 水力类泥石流起动机理与预报研究进展与方向

泥石流作为灾变性事件、是一种影响山区经济发展和威胁人民生命财产安全的重大自然灾害，它严重威胁到国民经济发展和社会的可持续发展。由于泥石流的成因复杂，量大面广，治理成本高，目前仍然无法进行全面控制(唐邦兴等，2000；费祥俊和舒安平，2004)。泥石流预测预报作为一项重要的减灾手段，受到减灾科技工作者和政府相关管理部门的广泛关注(崔鹏等，2000；吴树仁等，2004)。长期以来，人们都在采用多种理论和方法探索泥石流的形成成因及机理，从而为泥石流灾害预测预报和工程治理提供科学依据。

按照泥石流形成的动力条件，可以将泥石流划分为土力类泥石流和水力类泥石流(吴积善等，1990；Takahashi，1991；李德基等，1997)。前者是泥石流沿较陡的坡面运动，其中土体运动无需水体提供动力，而是靠其自重沿坡面的剪切分力发生和维持运动；而后者则是沿坡面运动，其中的土体在初始阶段是靠水体部分提供推移力发生和维持运动。水力类泥石流具有暴发频率低、间歇周期长的特点，特别是这类泥石流的流域缺少集中活动型滑坡、崩塌，水土流失较轻微，甚至植被良好，因此难于识别和预报，一旦暴发泥石流便可能酿成灾难性损失。例如，四川省喜德东沟和雅安陆王沟、干溪沟及云南东川因民黑水沟(吴积善等，1990；唐邦兴等，2000)，以及造成重大灾害的四川青川铁炉坪沟和金沙江支流美姑河泥石流都属于此类(唐川等，2006a)；在俄罗斯、日本、美国等国，此类泥石流也广泛分布(Johnson and Rodine，1984；弗莱施曼，1985；Sassa，1985；Cannon et al.，2001a)。因此，需要进一步加强水力类泥石流起动机理和预报研究，为预测预报和监测预警提供理论和方法上的支撑。对该类泥石流形成机理的研究一直是薄弱环节(崔鹏等，1990；Cui，1992)；相对而言，土力类泥石流起动研究方面已有不少研究成果(Sassa，1984；Fleming et al.，1989；Richard et al.，1997；冯自立等，2005；陈晓清等，2006b)，并在减灾预报中发挥了作用。由于水力类泥石流的复杂性，其理论和方法研究程度相对较低，因此本节概述水力类泥石流起动机理和预报研究的国内外发展情况，提出未来的研究方向和研究思路，为进一步认识该类泥石流起动的过程机制和预报提供重要参考。

1.1.1 国内外研究进展

水力类泥石流灾害在全球普遍分布，是日本、俄罗斯、欧洲、北美洲和中国等地区主要的泥石流类型之一，其研究得到重视，各国都从自身特有泥石流的形成条件出发，探讨了其起动机理，也提出了预报方法的构思，为水力类泥石流的进一步研究提供了重要基础条件。下面从三个方面概述当前该领域的国内外研究进展。

1.1.1.1 水力类泥石流起动的过程机制研究

费莱施曼在其《泥石流》一书中就提出水力类泥石流作为主要类型(姚德基和商向朝, 1980; 弗莱施曼, 1985), 并认为该类型泥石流起动机理是固体颗粒先遭受水体冲刷, 使固体颗粒与下垫面脱离, 然后又遭受水体片蚀作用而产生泥石流; 其起动的关键因子是暴雨地表径流或融水地表径流; 他还提出了固体颗粒在径流流速和流深影响下的固体颗粒起动的判别模式(弗莱施曼, 1985)。原苏联学者鲍亚尔斯基和彼罗卡(1974)提出泥石流的起动过程机制是先形成固体物质含量高的山地洪流, 再形成阵流, 在洪流与阵流共同作用下泥石流开始起动(姚德基等, 1980)。原苏联泥石流委员会主席维洛格拉多夫(1979)将水力类泥石流的起动归纳为侵蚀-搬运型泥石流, 这类泥石流的起动过程是由于强大水流将河床自保护层破坏, 在水侵蚀和搬运作用下起动形成沙水质泥石流(Span, 1986)。

日本许多泥石流学者已注意到水力类泥石流的起动问题(Takahashi, 1978, 1981, 1991; Sassa, 1985), 高桥保(Takahashi)将水力类泥石流作为三大类型之一, 认为泥石流起动是沟床堆积物在降雨所产生的表面流或地下水作用下的结果, 即水流冲刷沟床堆积物是泥石流起动的关键, 这种观点在日本具有代表性, 得到日本学者的一致认同。

水力类泥石流在美国亦分布广泛, 尤其是在科罗拉多州和亚利桑那州等地区分布数量多, 成灾严重(Cannon et al., 2001a; Godt and Coe, 2007), 如 1999 年 7 月 28 日在科罗拉多州中部的克利尔克里克谷地连续 6 小时 78mm 强降雨过程后, 480 条沟同时暴发泥石流灾害, 酿成严重的灾害, 其中由于洪流导致沟道松散堆积物起动而形成泥石流过程是主要类型之一(Godt and Coe, 2007)。美国联邦地质调查局将这类泥石流起动过程机制称为“消防水管效应”(fire hose)(White, 1981; Johnson and Rodine, 1984; Coe et al., 1997; Griffiths et al., 2004), 即将此类泥石流的起动过程描述为: 首先是由位于陡峻石质流域上游的暴雨产生沟道径流, 如同“消防水管”, 导致水流快速集中, 并强烈冲刷和侵蚀堆积有丰富松散固体物质的沟道, 最终沟道固体物质起动并形成泥石流的过程。

美国联邦地质调查局根据 1984~2003 年对大峡谷科罗拉多沟的 740 条泥石流沟调查的资料表明泥石流发生频率为 5.1 次/年, 其起动主要是由于降雨条件下形成地表径流过程(Griffiths et al., 2004)。

我国学者同样注意到这类泥石流现象及过程机制特征。崔鹏(1990)认为水力类泥石流起动机制是由于沟道固体颗粒在一定径流深度水流(清水或挟沙浑水)作用下, 当水流对固体颗粒的拖拽力或作用在松散堆积体中固体颗粒的剪切力大于抵抗力时, 泥石流便起动。这种过程机制适用于解释和分析山区河道石质沟床或非黏性质河床在水动力作用下起动形成水石流或稀性泥石流的情况(费祥俊和舒安平, 2004)。中国泥石流学者(陈光曦等, 1983; 康志成, 1988; 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 1989)常用“揭底作用”或“滚雪球”过程阐述水力类泥石流的过程机制, 即认为起动是沟道受到了强烈的地表径流或洪水冲刷侵蚀, 沟槽内的堆积物被掀动并遭受揭底, 流体携带的固体物质如同“滚雪球”一般快速增多, 使之在极短的时间内将沟谷中的堆积物一扫而光、席卷而去, 形成规模较大的以掀揭沟床物质为主要固体物质来源的水力类泥石流。

1.1.1.2 水力类泥石流起动机理与模型研究

在该领域具有代表性的成果是日本 Takahashi(1991)提出的水力类泥石流起动机理和模型,其运用了拜格诺颗粒流理论,即高浓度夹沙水流在运动过程中,固体颗粒彼此碰撞,由此两相体在滑移层间有动量交换,使流体中的固体颗粒呈分散体系,并且具有弥散应力。此外,他认为表面流对泥石流的起动有关键性作用。为此,高桥保在大量水槽模拟实验基础上,推导出了具有一定厚度的松散堆积层在水流作用下泥石流起动的数学模型。日本武居有恒(1981)提出的水力类泥石流起动模型是以长度无限的块地(沟床)堆积层能否稳定为条件,建立了在有表面流条件下,沟床堆积的剪应力与抗剪力关系模型,以作为判别泥石流起动的依据。

俄罗斯学者叶基阿扎罗夫从河床水力学观点出发,将水力类泥石流的起动机理解释为“膨胀”作用,在分析沟道堆积层静止颗粒剪应力、孔隙水压力基础上,经过室内试验验证后提出了泥石流起动机理(姚德基等,1980)。维诺格拉多夫(1986)通过人工泥石流试验,分析了泥石流的河床自保护层遭破坏的力学过程,建立了相应的起动机理数学表达式。

美国联邦地质调查局学者多是从地质学和地貌学理论出发,研究水力类泥石流的起动机理(Campbell, 1975; Costa and Jarrett, 1981; Iverson, 1997; Cannon et al., 2001b; Coe et al., 2002),通过大量现场调查和测量获得第一手数据,建立了针对不同类型的沟床堆积物的起动判别经验模型,其模型输入参数包括径流侵蚀能力、堆积物剪应力、地形坡度等若干控制因素(Iverson, 1997; Cannon et al., 2001a)。

针对水力类泥石流起动的水文过程特征,有些学者开始注意用水文学方法构建其起动的模型,Tongnacca 等(2000)在其建立的模型中考虑了径流特征参数和颗粒直径;Berti等(Berti et al., 1999; Berti and Simoni, 2005)概括野外观测和模型试验,考虑了水力类泥石流起动的地表水流量、地下水流量、下渗水流量在内的水文模型,并用极限平衡方法提出了沟床堆积物在水流作用下是否起动的“安全系数”。

泥石流起动的水文学模型早就经过验证和调整并应用到研究区(Berti et al., 1999; Berti and Simoni, 2005)。该模型被应用于11个没有资料的研究区,根据泥石流流域上游盆地地质特征和河道几何形态相似性来选择研究区,其中地形特征和地表物质的组成都具有较大的相似性。尽管由于流域面积大小存在着差异,但模型表明了在各个泥石流流域首先都要有相似的降水过程产生地表径流,然后再引发泥石流,这一结论要归结于两点:一是这一地区典型的短时降水过程;二是泥石流沟道的特征。

1.1.1.3 水力类泥石流的预报

利用降水特征进行泥石流的预报已取得了丰硕的成果,国外代表性成果有 Anderson 和 Sitar(1995)、Sitar 等(1992)、David-Novak 等(2004)、Caine(1980)、Wieczorek(1987)、Wilson 和 Wieczorek(1995)和 Takahash 等(1992, 1981)完成的研究。国内有一定代表性的成果有陈景武(1989)、谭万沛和王成华(1994)、魏永明和谢又予(1997)、陶云等(1997)的研究。

上述成果为深入研究水力类泥石流预报问题提供了重要的科学基础,但是由于水力

类泥石流的暴发频率低,有的基本为 50 年一遇或 100 年一遇,考虑到这类泥石流往往伴随着沟道径流或洪水过程,采用水文或水力学方法预报也是解决该问题的途径之一,其中临界雨量和始发径流量是水力类泥石流预报的关键指标。

弗莱施曼(1985)认为,水力类泥石流的预报应该采用众多的洪流动能指标作出;波可列波伊等以水文气象因素和地质土壤因素作为泥石流预报的度量特征值,提出了高加索地区泥石流时间预报的三个定量指标:最少径流量、土壤含水量和松散物质聚集量。

日本除了采用暴雨作为水力类泥石流预报和预警的指标外,也注重采用水文学方法进行水力类泥石流的预报,其技术方法主要立足于沟槽内洪水流量变化,通过现场观测和室内试验,确定洪水流量或水深临界值,并根据沟槽水深或历史洪水测量分析,建立泥石流预警预报模型(Takhashi, 1978; Sassa, 1985)。

美国联邦地质调查局从 2004 年 5 月至 2006 年 7 月对科罗拉多州中部的石英二长岩分布区的一条流域面积为 0.3km^2 的泥石流沟进行了 6 场泥石流过程的观测,认为泥石流起动的最少流量大约为 $0.15\text{m}^3/\text{s}$ 。

较为典型的实例是 Berti 和 Simoni(2005)对意大利阿尔卑斯东部白云岩地区的水力类泥石流进行的实验研究,认为在泥石流起动区,最小径流深度小于 10cm 便可以起动泥石流。通过大量的实验分析, Berti 和 Simoni 提出了三个不同的起动临界标准,可以作为一种预测手段来确定起动泥石流的最小降水量(降雨强度和历时)。

Berti 等(1999)应用数值模拟对泥石流形成汇水区的临界雨量进行了研究,该模型基于 1996~1999 年在 Acquabona 地区所收集到的一手资料(包括降水、孔隙水压力和观测录像),得出两个主要结论如下。

(1)在 Acquabona 地区,泥石流是由强烈的沟床侵蚀所引发,这种侵蚀则是由于流域的地表径流所引起。

(2)地表径流是由泥石流流域上游的凹地或石洼汇集雨水后所形成。这也是多洛米蒂山(Dolomites)地区所有泥石流流域的共同特点。

综上所述,目前国内外关于水力类泥石流的形成机理与预报研究的进展主要表现在以下几点。

(1)通过大量现场观测和模型实验,基本弄清了水力类泥石流起动的过程,并用“膨胀作用”“跃移作用”“消防水管效应”和“揭底作用”分析这类泥石流的起动机制问题。

(2)运用拜格诺颗粒流理论,建立了以日本高桥保的模型为代表的水力类泥石流的起动数学模型;并建立了以俄罗斯学者的模型为代表的沟床自保护层破坏导致泥石流起动的模型。

(3)在水力类泥石流的预报方面,除了采用降水指标外,也考虑了水文学方法,提出了以径流量或径流深度、沟床松散固体物质聚集量和土壤含水量等因子为定量指标的预报方法。

尽管国内外在水力类泥石流的起动机理与预报方面取得了一些进展,但是由于该类泥石流起动的复杂性、现场测试和模型实验困难,其模型要达到准确地预警预报仍然有一定的差距。意大利博罗尼亚大学泥石流学者 Berti 和 Simoni(2005)认为目前水力类泥石流的起动研究仍然是初步的、不完善的,现有的模型不能满足减灾预报的要求。针对最

有影响的高桥保模型,其理论是基于对各个颗粒的力平衡的分析,因此,该模型所采用的代表性参数只能描述起动的最初阶段,不能反映起动的整个连续过程;高桥保模型的另一不足是不能反映沟床和松散物质的颗粒大小,仅是定性描述,即失稳深度必须比代表性颗粒直径大(Berti and Simoni, 2005)。同样, Tognacca 等(2000)及 Armanini 和 Gregeretti(2000)提出的泥石流起动模型与固定颗粒分布概率有关。上述起动模型对于描述自然界中泥石流沟床的无分选性物质的起动不具代表性,这样的方法在实际应用中似乎是主观的,并非常依赖于所选样本的数据和测试技术。

1.1.2 研究方向

由于研究对象的复杂性和研究的难度,在研究中需要解决的主要问题,一是水力类泥石流起动的水文特征参数测定问题,特别是采用不同水深、不同流量、不同含沙量的流体在不同坡度下对不同类型堆积层的冲刷和揭底能力进行试验,并测试其主要参数的沿程、沿时变化;二是建立以水文学和泥沙运动学为基础的水力类泥石流起动模型;三是建立以临界雨量法和分布式水文模型为基础的水力类泥石流预报方法。因此,应重点开展以下五个方面的研究。

(1)水力类泥石流起动的基本条件研究。该研究立足于水力类泥石流原型调查和分析,通过对研究区调查,深入剖析水力类泥石流起动的地形条件、沟床及岸缘堆积物工程地质特性和水流侵蚀特征,并根据沟床堆积物特性和起动规律对水力类泥石流类型作进一步研究;重点研究内容包括水力类泥石流沟道地形条件调查与分析、沟床堆积层类型调查和物理力学特性试验研究、沟谷径流(洪水)的侵蚀和搬运特征调查及历史上水力类泥石流形成和运动过程调查和分析。

(2)水力类泥石流起动的过程机制研究。该内容的研究目的是弄清该类泥石流起动的水体与沟床松散堆积物质的相互作用特征和规律,并分析水力类泥石流起动的全过程和机制;其研究内容包括泥石流起动过程的试验与分析、泥石流起动中固体颗粒的膨胀作用机制与跃移作用机制研究、沟道含沙水流的冲刷作用与“揭底”作用机制分析。

(3)水力类泥石流起动的动力学机理研究。通过理论分析和模型实验,研究沟道中具有不同类型和物理力学特征的堆积物在地表径流、地下水径流和下渗作用等共同作用下的动力学过程和机理。因此,需要开展泥石流起动区堆积层抗剪应力与剪切应力定量分析、堆积层孔隙水压变化特征与物理力学模型研究和有径流条件下沟道堆积物稳定性计算模型构建。

(4)水力类泥石流起动的径流特征参数研究。该内容通过原型现场试验和室内模型试验,研究水力类泥石流起动的关键因子——径流特征参数(径流量、径流深、流速和含沙量)变化,并建立相应关系;分析泥石流起动的径流量(径流深)临界条件、径流速度临界条件和水流含沙量对水力类泥石流起动的影响。

(5)基于流域水文模型的水力类泥石流起动的预报研究。在对水力类泥石流起动多要素的原型调查、试验分析和理论研究的基础上,综合沟床堆积物类型与堆积量、孔压变化、含水量变化、沟道地形条件以及径流特征参数变化,建立以流域水文特征为主线的水力类泥石流起动的预报模型。

1.1.3 小结

水力类泥石流灾害在全球分布广泛,它要求流域内固体物质有一个相当长的积累过程,而且也需要相应频率的水文、水力条件,因此其暴发频率低、间歇周期长,难于识别和预报,一旦暴发泥石流便可能酿成灾难性损失。因此,该类泥石流的研究受到人们格外的重视。同时,水力类泥石流起动和预报也是国内外研究的薄弱环节。它需要从地质学和水文学角度进一步认识水力类泥石流的起动成因和过程,进一步分析其机制;通过对典型研究区的原型调查,进一步总结水力类泥石流起动的水文、地貌和地质条件,并对水力类泥石流进行类型划分,如单颗粒起动、层状起动和整体起动,重点研究常见的以沟床揭底为特征的整体起动类型;在此基础上提出以水文特征为主线的水力类泥石流的起动机理和模型,通过现场试验和室内试验,建立不同类型松散堆积层和不同纵坡条件下的泥石流起动与水文特征参数的关系模型,并提出水力类泥石流的起动水文参数临界条件,建立以临界流量法和分布式水文模型为理论依据的水力类泥石流的预报途径和方法。因此,上述的研究具有较强的创新性,已用于减灾实践中。

1.2 泥石流形成区岩性的研究

为减轻和避免泥石流造成的危害需要对泥石流的发生进行预测和预报,现在泥石流的预测预报方法基本上是在对以往发生的泥石流观测和调查基础上的经验方法(中国科学院兰州冰川冻土研究所和甘肃省交通科学研究所,1982;谭万沛,1989b;吴积善等,1990;徐道明和冯清华,1992;Copjean,1994;Arattano et al.,1997;Hirano,1997;Deganutti and Marchi,2000),对于发生频率很低的泥石流则无能为力,而低频率泥石流的暴发恰恰是造成人员伤亡和重大经济损失的主要因素(王士革和范晓岭,2006)。同高频率泥石流相比,低频率泥石流更具有潜在危害性,对低频率泥石流的研究就显得非常重要。目前对于低频率泥石流也有较多的研究,但非常深入的研究并不多见(谭万沛,1989a),主要原因是对低频率泥石流的研究存在一定的困难,其暴发周期长,难以识别,更不利于观测(中国科学院兰州冰川冻土研究所和甘肃省交通科学研究所,1982;徐道明和冯清华,1992),国内外学者对低频率泥石流的暴发原因、防治措施等的研究局限于近期发生的低频泥石流,主要调查其暴发原因、暴发周期等,从而提出该类泥石流的防御方法(王士革和范晓岭,2006),但是这些研究都存在很大的区域条件限制;对泥石流堆积物特征的研究则更少见,仅有的研究也只是对个别泥石流沟的粗化层堆积物特征所进行的研究(李磊等,2009)。

影响低频率泥石流发生的因素很多,但最主要的是降雨因素和固体物源因素。低频率泥石流沟的固体物源需要较长时间积累是造成泥石流暴发频率较低的主要原因,这类泥石流的形成机理是:长时间的固体物质积累在泥石流沟道内,遭遇强降雨形成的洪水冲刷起动沟道内的固体物质从而形成泥石流(王士革和范晓岭,2006)。目前对泥石流的研究在泥石流的固体物源方面已有的知识积累有:泥石流流域的岩性越坚固,固体物源主要由崩塌产生,固体物质颗粒粒径越大,积累时间较长,泥石流暴发频率越低;反之,泥石流流域的岩性越软弱,固体物源主要由滑坡产生,固体物质颗粒粒径越小,不需要

长时间的积累,泥石流暴发频率越高。但这只有定性的认识,还没有定量地给出泥石流流域的岩性和固体物质颗粒粒径与泥石流暴发频率的关系(张继等,2008; Wei et al., 2008)。本节主要研究的是物源因素对低频率泥石流的影响,没有考虑降雨、地形等其他因素对泥石流暴发频率的影响。作者通过对四川省西部地区17个泥石流流域的野外实地考察,研究流域岩性与泥石流暴发频率之间的关系。

1.2.1 调查区地质背景和研究方法

本节所调查的17个泥石流流域分布在四川省西部地区(图1.1)。该区位于青藏高原与四川盆地两大地貌单元的结合部位,区域性深大断裂发育,地质构造复杂,地震活跃,具有岩层破碎、地势起伏大、降水集中等特征,是我国泥石流极度活跃区域和重度危险区域。

现有的泥石流暴发频率分类较多,在泥石流研究领域中并没有统一的划分标准,本节参照《泥石流灾害防治工程勘查规范》(中华人民共和国国土资源部,2006)中对泥石流暴发频率的定义,将泥石流分为高频率泥石流(一年多次至5年暴发1次,不含5年)、中频率泥石流(5~20年暴发一次,不含20年)、低频率泥石流(20~50年暴发一次,不含50年),极低频率泥石流(50年以上暴发一次)。

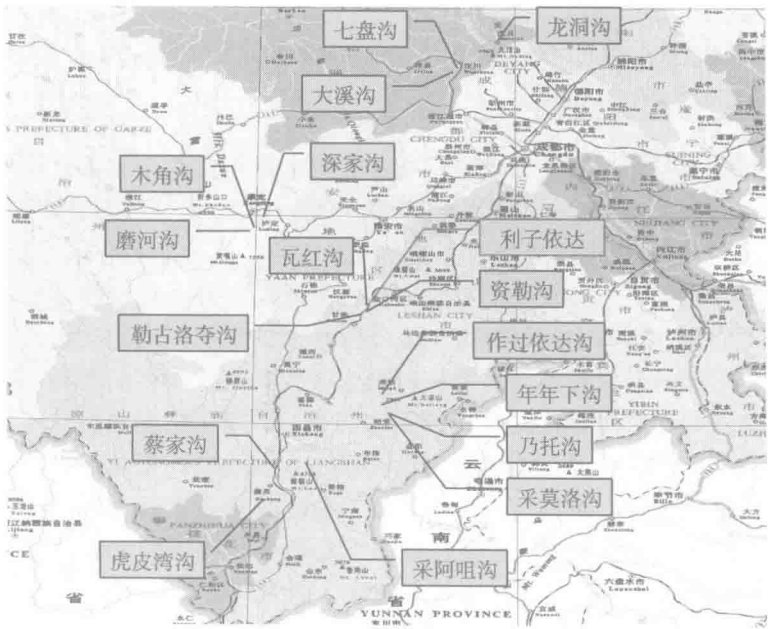


图 1.1 调查区内 17 条泥石流沟分布情况

本节研究围绕泥石流暴发频率和岩性两方面,调查泥石流流域的岩性和暴发频率。由于暴发频率与泥石流形成区沟床物质的岩性相关性较大,因此对形成区粗颗粒的岩性及其基本特征的调查是关键。本节研究的17个泥石流流域按暴发频率分布有:1个高频率泥石流流域、2个中频率泥石流流域、7个低频率泥石流流域、7个极低频率泥石流流域(表1.1)。