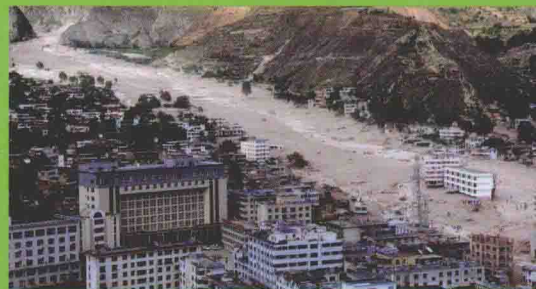




中国地质调查成果
CGS 2016-033

舟曲地质灾害 形成机理与预警判据研究

于国强 张茂省 黎志恒 著



科学出版社

舟曲地质灾害形成机理与预警判据研究

Study on Formation Mechanism and Warning Criterion
of Geological Hazards for Zhouqu

于国强 张茂省 黎志恒 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书详细论述了舟曲“8·8”泥石流成灾特征和发展趋势,地质灾害预警判据及危险性分区等问题,泥石流运动三维数值模型及其数值解法。全书共分为九章。主要包括地质环境条件,地质灾害特征和发展趋势,泥石流成灾特征和致灾因素及模式,泥石流三维数值模型的构建以及求解方法,区域地质灾害预警判据及模型研究,区域暴雨泥石流成灾阈值研究以及地质灾害危险性区划等内容的介绍。本书除了系统介绍国内外的最新进展外,还着重介绍了作者近年来的研究成果。

本书可供水文地质、工程地质、水文水资源等专业科研人员、工程技术人员和高等学校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

舟曲地质灾害形成机理与预警判据研究 / 于国强, 张茂省, 黎志恒著.
—北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-048622-6

I. ①舟… II. ①于… ②张… ③黎… III. ①地质灾害—研究—舟曲县
IV. ①P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 127148 号

责任编辑: 张井飞 韩 鹏 / 责任校对: 韩 杨

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 16 3/4

字数: 397 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

泥石流是一种在山区频发的地质灾害，其具有很强的破坏性，常常会对人们的生命和财产安全构成严重的威胁，也成为制约山区发展的重要因素。舟曲“8·8”特大泥石流损失惨重，世界震惊，是新中国成立以来造成人员伤亡和经济损失最大的一次泥石流灾害，再次敲响了区域暴雨型泥石流的警钟。如实地阐明舟曲泥石流、滑坡等地质灾害的成灾特征和致灾因素及模式，分析其发展趋势并提出风险减缓措施，在此基础上开展区域暴雨泥石流与高速远程滑坡的启动、形成运动机理研究，深化区域地质灾害预警判据与降雨特征成灾阈值研究，开展不同降雨特征条件下危险性区划，建立舟曲区域地质灾害预警模型，是山区地质灾害监测预警预报研究的基础，是减轻和防治地质灾害的难点和关键所在，也是防灾减灾的焦点之一，对指导今后灾后重建和监测预警具有十分重要的研究意义。

本研究首先以舟曲区域以及三眼峪、罗家峪、寨子沟为研究对象，总结、归纳并梳理以往研究成果，系统研究舟曲“8·8”特大山洪泥石流地质灾害的成灾模式、致灾因素，并提出舟曲地质灾害监测预警方案和风险减缓措施。

其次，通过有限差分数值模拟方法，分析三眼峪小流域位移场、应力场以及塑性区分布规律，阐明三眼峪重力侵蚀发生的空间分异特征及作用机理。采用有限元求解方法，开发三维连续介质模型程序，建立舟曲高速远程滑坡及泥石流的三维动态动力分析模型。开展泥石流和高速远程滑坡的临界启动研究，运动侵蚀行为及冲淤特征研究，灾害体动力过程研究，流变参数敏感性研究以及拦挡坝对泥石流、滑坡拦挡动力行为研究，系统揭示舟曲泥石流与高速远程滑坡形成机理。

最后，采用水文学分析方法，计算不同降雨频率下洪水特征值与降雨特征值，划分地质灾害不同预警级别，提出预警判据，计算不同预警级别下的降雨特征阈值，建立前期含水量在一般和干旱两种条件下，不同预警级别的降雨历时与降雨雨强函数关系曲线，阐明触发不同等级地质灾害的临界降雨特征。在此基础上，开展不同预警级别下区域地质灾害危险性区划研究，分析不同预警级别下，地形湿度指数空间分布、灾害点分布范围变化趋势及规律，稳定区、潜在不稳定区域与不稳定区域的区域面积比例与滑坡所占比例的迁移与转化规律，揭示区域地质灾害不同预警级别下危险性区划分布规律，建立舟曲区域地质灾害预警模型。同时针对舟曲已经布设的监测仪器，建立不同预警级别下，不同监测指标的预警阈值信息，以期为舟曲区域乃至高山峡谷区地质灾害危险性区划以及监测预警提供科学依据。

全书所有成果由中国地质调查局地质调查项目（121201011000150022）、国家自然科学基金（41302224）、中国博士后科学基金（2012T50797、2011M501445）、陕西省自然科学基金（2012JQ5001、2014KJXX-20）共同资助完成，在此特向国家自然科学基金委员会的有关领导致以衷心的感谢。

全书大纲由张茂省、于国强共同商定，然后由于国强执笔并负责修改、校对，张茂省

则对全书审阅并提出修改意见。同时感谢中国地质调查局西安地质调查中心主任李文渊研究员、总工徐学义研究员、副总工侯光才研究员、水环处处长徐友宁研究员、朱桦书记，在西安地质调查中心工作之际给我的热心指导。感谢 Chen Hong 博士、王根龙副教授、董英博士、王化齐博士、高海东博士、杨文朋博士，为本书出谋划策，在软件编程以及模块使用方面给予我大力支持；感谢孙萍萍、程秀娟、薛强、胡炜、丁辉、高波、张成航、徐继维在重点实验室工作中给予我的大力支持；同时感谢爱人张霞博士在生活中给予我无微不至的照顾。在此，向你们表示衷心的感谢，祝愿你们永远健康、快乐、幸福！

在野外调查、室内资料整理的工作工程中，始终得到甘肃省地质环境监测院黎志恒院长、赵成总工、余志山院长、贾贵义主任、李瑞冬主任、丛凯的大力配合与支持，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免出现疏漏之处，恳请读者批评指正。

作 者

2016 年 1 月于西安

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 研究背景及意义	1
第二节 研究区概况	3
第三节 国内外研究进展	6
第四节 研究目的	21
第五节 研究内容	21
第六节 研究思路	22
参考文献	22
第二章 地质环境条件	26
第一节 地形地貌	26
第二节 地层岩性	27
第三节 地质构造	29
第四节 岩土体工程地质类型	31
第五节 水文地质	32
第六节 人类活动	32
参考文献	34
第三章 地质灾害特征与发展趋势	35
第一节 地质灾害发育类型	35
第二节 地质灾害分布规律	38
第三节 地质灾害稳定性与易发性	42
第四节 地质灾害危害特征	44
第五节 地质灾害形成条件及影响因素	44
第六节 地质灾害发展趋势及危险性区划	48
第七节 重点城镇典型地质灾害特征	50
参考文献	51
第四章 泥石流成灾特征和致灾因素模式	52
第一节 泥石流成灾特征分析	52
第二节 泥石流致灾自然因素分析	55
第三节 泥石流致灾人为因素分析	70
第四节 泥石流致灾模式	76
参考文献	77

第五章 地质灾害成灾机理研究	78
第一节 基于 ArcGIS+DEM 的三眼峪小流域泥石流动力条件研究	78
第二节 泥石流和滑坡形成机理的数值模型研究思路	81
第三节 小流域地质灾害稳定性分析	83
第四节 三维动态数值模型构建	88
第五节 泥石流动力特征研究	93
参考文献	122
第六章 区域地质灾害预警判据及模型研究	124
第一节 地质灾害预警雨量临界阈值研究	126
第二节 区域地质灾害危险性区划研究	153
参考文献	179
第七章 地质灾害隐患点预警判据初析	181
第一节 监测预警研究程度	181
第二节 舟曲地质灾害监测预警总体思路和工作部署	190
第三节 舟曲地质灾害隐患点监测预警工作方案	199
第四节 泥石流、滑坡隐患点监测预警临界阈值研究	227
参考文献	229
第八章 地质灾害防治对策建议	230
第一节 关键技术研究	230
第二节 三眼峪泥石流灾害风险减缓对策	235
第三节 三眼峪治理工程效益分析	240
参考文献	254
第九章 结论与建议	256
第一节 结论	256
第二节 建议	258

第一章 绪 论

第一节 研究背景及意义

舟曲“8·8”特大泥石流灾害的发生,其人员死伤之多、危害程度之大、损失严重属历史罕见,再次敲响了区域暴雨型泥石流的警钟。区域内滑坡、泥石流类型众多,成灾机制复杂,危害严重,在历史上曾多次发生泥石流、滑坡等地质灾害,属于地质灾害重灾区。“8·8”特大泥石流发生后,虽然在三眼峪、罗家峪等沟道内修建了多道拦挡坝,但也提升了临空面,在一定程度上增加了泥石流与滑坡发生时的破坏程度。而至今仍有3/5的松散物堆积体物源留存于沟道之内,潜在危害很大,为地质灾害提供了大量的物源条件;陡峭的高山峡谷地形地貌为滑坡、泥石流提供了有利的地形条件。因此针对舟曲重灾区,开展高山峡谷区暴雨地质灾害形成机理研究、预警判据以及成灾阈值研究,对于完善山区地质灾害危险区划、建立预警预报模型,组织并实施经济有效合理的防治工程,以及灾后重建、防灾减灾具有十分重要的意义。

舟曲县地处秦岭褶皱西延地带,区内山高沟深,地形起伏强烈,软岩分布较广,褶皱断裂发育,岩体破碎,地震频发,暴雨频繁,地质灾害十分发育,是我国滑坡、泥石流强烈发育区之一。2010年8月8日凌晨,舟曲县城北部三眼峪沟和罗家峪沟同时暴发特大山洪泥石流,造成县城月圆村、椿场村两个村被毁,三眼村、北门村、罗家峪村、瓦场村部分被毁,泥石流阻断白龙江形成堰塞湖使城区1/3被淹,县城内供水、电力、交通、通信中断。特大灾情引起了党中央、国务院、中央军委及全国人民的高度关注。这次山洪泥石流特大灾害,是新中国成立以来破坏性最强、死亡人数最多、救灾难度最大的一次(图1-1)。据不完全统计,截至8月27日,此次特大山洪泥石流灾害涉及2个乡镇、13个行政村(重灾村6个),受灾人数达4496户、20227人,水毁农田1417亩^①,水毁房屋307户、5508间,其中农村民房235户,城镇职工及居民住房72户;进水房屋4189户、20945间,其中农村民房1503户,城镇民房2686户;机关单位办公楼水毁21栋,损坏车辆38辆。已造成1456人死亡,309人失踪,受伤住院72人。根据灾害排查及《舟曲县市地质灾害调查与区划》成果,县内共发育140处地质灾害隐患点,共威胁人口38681人,威胁财产30393.38万元。

泥石流和高速远程滑坡是自然界危害最为严重的自然灾害,它往往暴发突然,来势凶猛,破坏力强。近半个世纪以来,世界上许多多山国家,泥石流滑坡灾害频频发生,损失惨重,成为山区主要的自然灾害之一。由于我国的地质构造和自然地理环境复杂,泥

^① 1亩 $\approx 666.7\text{m}^2$ 。



(a)泥石流引起的溃坝



(b)泥石流引起的沟道堵塞



(d)泥石流沟道内巨石



(d)泥石流引发的崩塌

图 1-1 甘肃舟曲“8·8”特大山洪泥石流

石流与滑坡分布广泛、活动强烈、危害严重。随着山区经济日益发展，人类活动日趋频繁，尤其是不合理地开发，致使泥石流、滑坡灾害不断加剧，严重影响了山区的建设和经济发展。因此，掌握其基本特征，做到有效防范，已成为保障山区人民生命财产，增强山地环境自身造血功能，发展山区经济的一项重要任务。新中国成立以来，我国开始对暴雨泥石流、高速远程滑坡进行防灾减灾技术研究，但由于认识水平和经济条件的限制，20 世纪 90 年代以前，我国山区暴雨泥石流防治效果不佳。在此之后，随着山区经济建设的发展需要和暴雨泥石流以及高速远程滑坡研究的不断深入，泥石流、滑坡防灾减灾的重要方面——山区暴雨泥石流、滑坡成灾阈值研究以及启动、形成和堆积机理研究，越来越引起人们的重视。合理的数学方法构建和流变模型的选取是滑坡、泥石流形成机理研究的重要技术，合理的雨量阈值指标是保障滑坡、泥石流预警预报准确性的关键，对于揭示其时空分布特征及规律，研究运动机制、分析预测未来活动特点，建立有效的区域暴雨泥石流以及高速远程滑坡的预警、预报模型，以及指导防治工程设计等方面均具有重要意义。

第二节 研究区概况

一、研究区范围

结合舟曲灾后恢复重建总体规划,将白龙江流域峰迭—南峪段划分为专业监测示范区,面积为438km²。该区域内共发育地质灾害隐患点37处,主要威胁对象有舟曲县城、峰迭新区、南峪村等乡镇、村庄以及锁儿头电站、虎家崖电站、国道313线等重要基础设施。

二、地理位置

舟曲县位于甘肃南部,甘南藏族自治州东南部,东邻武都区,北接宕昌县,西南与迭部县、文县和四川省九寨沟县接壤。

三眼峪沟流域位于舟曲县城北侧,属白龙江一级支流,地理坐标为东经104°21'43"~104°24'49",北纬33°47'00"~33°50'49"(图1-2)。沟谷总体呈南北向展布,北高南低,东西宽0.34~4.6km,南北长约7.6km,流域面积为24.1km²,主沟长5.1km。舟曲县城及城关乡的10个自然村分别坐落于三眼峪沟洪积扇的中、前部和中后部。

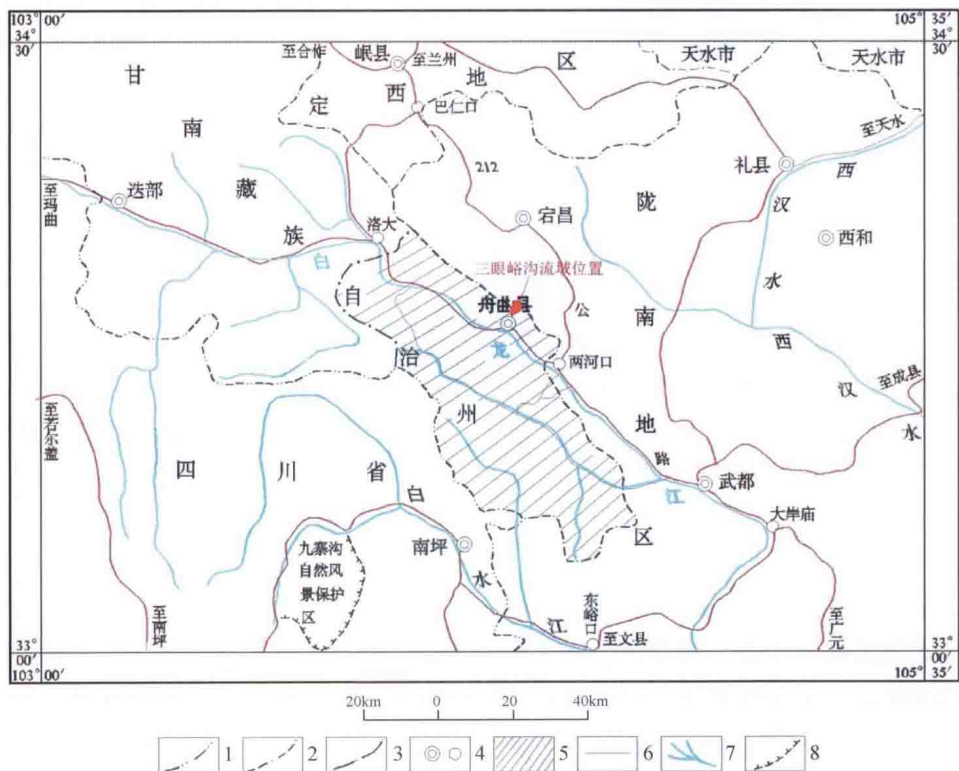


图 1-2 三眼峪沟地理位置图

三、气 象

舟曲县地处欧亚大陆腹地,属高山区,由于地形复杂,高低悬殊,气候有明显的垂直变化。海拔较低的河川地带,气候温和湿润,高山地带则较为寒冷,春季温暖回升快而稳,秋季温凉阴雨多。根据舟曲地面气象站多年气候观测资料统计,多年平均气温 13.0°C , 历年极端最高气温 35.2°C (发生在1974年7月23日); 极端最低气温 -10.2°C (发生在1975年12月14日)。历年最大积雪深度达 3.0cm , 最大冻土深度达 24.0cm 。

三眼峪流域内山高谷深,相对高差达 2488m , 流域内气候垂直变化明显,随海拔升高,沟谷气候由亚热带逐步转变为温带。据舟曲县气象站统计资料,区内多年平均降雨量为 435.8mm (图1-3), 年最大降雨量 579.1mm , 年最小降雨量 253mm , 日最大降雨量为 96.77mm , 1h 最大降雨量为 77.8mm (2010年8月7日, 23时), 多年平均气温 13.0°C , 多年平均蒸发量 2000mm , 无霜期 250 天。

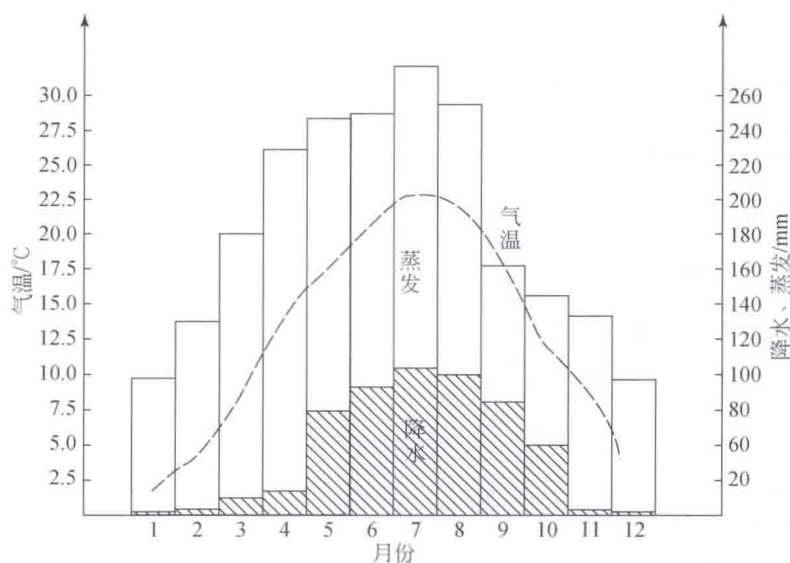


图 1-3 舟曲县气象要素图

四、水 文

白龙江属嘉陵江上游一级支流,夹于迭山山系和岷山山系之间。白龙江流域内山峦重叠,沟壑纵横,河谷下切甚深,河道曲折,川峡相间,水流湍急,是一个典型的高、中山峡谷区,流域面积 1330.20km^2 , 其干流年平均流量 3.68 亿 km^3 , 据舟曲县立节水文站资料:白龙江径流系数 0.499 , 最大洪水流量 $189\text{m}^3/\text{s}$, 最小枯水流量 $9.26\text{m}^3/\text{s}$ 。丰水期泥沙含量较高。

白龙江于舟曲县西北朶瓦山入境向东南方向径流,县境内干流总长 70.7km 。舟曲

县城建造在白龙江畔，位于白龙江中游。沿白龙江干流舟曲县城段，共有 6 条泥石流沟汇入，其中左岸 5 条，右岸 1 条，分别为：寨子沟、硝水沟、老鸭沟、三眼峪沟、罗家峪沟、河南沟。本次勘查的三眼峪主沟即大眼峪沟为常年流水沟，其流量为 $1.5\text{m}^3/\text{s}$ ，地表径流自陡石山山麓出露，经沟道流过县城汇入白龙江。由于水质好、流量稳定，在 1989 年 5 月舟曲县自上游修建截水设施及引水渠道，以作为县城生活用水及农业灌溉水。

五、植被、土壤

据史料记载，历史上该沟内林木茂盛，植被良好，使舟曲县主要木材区之一，后由于人为掠夺式砍伐，建筑采薪，挖坡种地，使植被覆盖面积不断减少，导致大面积山体裸露，崩塌、滑坡等地质灾害频发，泥石流规模也随之不断增大。据调查，三眼峪沟流域内植被自 1958 年开始锐减，现有林草地覆盖面积约 2.51 万亩，乔灌木大部分已缩减到海拔 2100m 以上的主沟沟头及中高山区，针叶林带分布在海拔 2600 ~ 3500m，针、阔叶混交林带分布在 2600m 以下。

六、社会经济概况

2008 年舟曲县实现生产总值 45663 万元，同比增长 12%；完成大口径财政收入 3600 万元，其中县本级财政收入完成 1467 万元，分别同比增长 43% 和 30%，均创历史最好水平；完成全社会固定资产投资 91446 万元，同比增长 48.1%；实现社会消费品零售总额 10620 万元，同比增长 23.6%；城镇居民可支配收入达到 7803 元，同比增长 12.2%；农民人均纯收入达到 1968 元，同比增长 33.1%，国民经济在大灾多难之年继续保持了平稳较快发展的良好态势。

2009 年舟曲县城关镇坚持以科学发展观为指导，在舟曲县委县政府的领导下以卓有成效的实际行动抓好各项重点工作，取得了可喜成绩。2009 年全镇积极推广高产蔬菜种植面积达 600 多亩。完成了 927 亩玉米全膜双垄沟栽培种植。完成了小麦、油菜的病虫害防治 2300 亩，冬播油菜种植 1100 亩，冬播地膜洋芋 226 亩以及夏粮的测产工作，为群众农业增收提供了保障。2009 年全镇粮食总产量达 2116t，油料产量达 110t。结合“农牧互补”战略和“一特四化”落实种植苜蓿 600 亩，大力引进良种畜牧养殖业，对优势产业进行资金支持和政策扶持。争取各种优惠政策，正确地引导农民促进劳动力合理流动，不断强化劳务培训，实现由体力型向技能型转变。2010 年，全镇创劳务收入 1800 万元。人均收入增加了 600 多元；加强退耕还林工作、开展牲畜防疫工作。

舟曲县城可利用面积 1.47km^2 ，城区人口近 5 万人，人口密度居甘肃省县级市之首。“8·8”泥石流对舟曲的社会经济情况产生了重大的影响，截至 2010 年 9 月 7 日，舟曲特大山洪泥石流灾害中遇难 1481 人，失踪 284 人，受伤住院 72 人。泥石流还毁坏了沟口的大部分建筑、农田、道路，造成了巨大的经济损失。

第三节 国内外研究进展

一、以往地质工作研究程度

自 20 世纪五六十年代以来, 科研院所、地勘单位先后在本区作过工程地质、水文地质、地质灾害勘查研究工作, 积累了较为丰富的基础性资料, 尤其是新一轮国土资源大调查启动以来所开展的《县(市)地质灾害调查与区划》成果, 是本次工作所依赖的基础(表 1-1)。

表 1-1 以往主要地质工作成果一览表

分类	工作时间	成果名称	比例尺	承担单位
区域地质	1967 ~ 1970 年	区域地质图及说明书(武都幅、文县幅、成县幅、香泉幅)	1 : 20 万	陕西省地矿局区域地质测量队
	1971 ~ 1974 年	甘肃省地质图及说明书	1 : 50 万	甘肃省地质局区测一队、二队、测绘队等
	1977 ~ 1979 年	甘肃省构造体系图及说明书	1 : 100 万	甘肃省地质局地质力学区域测量队
	1986 ~ 1987 年	西北地区环境地质图系之一“地质图及说明书”	1 : 200 万	地质矿产部兰州水文地质工程地质中心
水文地质	1983 年	甘肃省武都-天水地区区域水文地质普查报告	1 : 50 万	甘肃省地矿局第一水文地质工程地质队
	1993 年	武都幅综合水文地质图说明书	1 : 20 万	甘肃省地矿局第一水文地质工程地质队
地质灾害	1981 年	甘肃泥石流		中科院兰州冰川冻土研究所
	1991 年	甘肃省陇南滑坡、泥石流规划整治	1 : 50 万	中科院兰州冰川冻土研究所
	1989 ~ 1993 年	甘肃省东部地质灾害研究报告		甘肃省地矿局第一水文地质工程地质队
	1993 ~ 1996 年	甘肃省东部滑坡泥石流分布图及说明书	1 : 100 万	甘肃省地矿局环境地质研究所
	1998 年	甘肃省地质自然保护区区划报告		甘肃省地矿局环境水文地质工程地质总站
	2001 年	甘肃省武都县地质灾害调查与区划报告	1 : 10 万	甘肃省地质环境监测院
	2002 年	甘肃省文县地质灾害调查与区划报告	1 : 10 万	甘肃省地质环境监测院
	2003 年	甘肃省宕昌县地质灾害调查与区划报告	1 : 10 万	甘肃省地质环境监测院
	2003 年	甘肃省舟曲县地质灾害调查与区划报告	1 : 10 万	甘肃省地质环境监测院
	2004 年	甘肃省康县地质灾害调查与区划报告	1 : 10 万	甘肃省地质环境监测院
	2004 年	甘肃宕昌官鹅沟地质公园科学考察报告		甘肃省地矿局第二地质勘查院
	2008 年	兰成渝铁路(甘肃段)地质灾害评估	1 : 5 万	甘肃省地质环境监测院
	2008 年	汶川地震甘肃省灾区地质灾害应急排查总结报告	1 : 50 万	甘肃省地质环境监测院

续表

分类	工作时间	成果名称	比例尺	承担单位
地质 灾害	2009 年	甘肃省迭部县地质灾害调查与区划报告	1 : 10 万	甘肃省地质环境监测院
	2009 年	甘肃省文县地质灾害详细调查	1 : 5 万	甘肃省地质环境监测院
	2010 年	甘肃省宕昌县地质灾害详细调查	1 : 5 万	甘肃省地质环境监测院
	2010 年	甘肃省舟曲县特大山洪泥石流灾害应急排查报告	1 : 1 万	甘肃省地矿局

(一) 区域地质

20 世纪 60 年代以来,先后由地质部陕西省地质局区域地质测量队完成的调查区及周边地区 1 : 20 万区域地质图及说明书,甘肃省地质局地质力学区域测量队完成的 1 : 100 万甘肃省构造体系图及说明书,这些工作是本次工作的基础性地质资料。

(二) 水文地质工程地质

1. 水文地质

甘肃省地矿局第一水文地质工程地质队分别于 1983 年和 1998 年完成了甘肃省武都—天水地区区域水文地质普查报告 (1 : 50 万); 甘肃省陇南甘南地区区域水文地质调查报告 (1 : 10 万); 武都幅 (1 : 20 万) 综合水文地质图说明书; 为本次工作提供了一定的水文地质资料,但区内水文地质研究程度相对较低。

2. 工程地质

区域工程地质勘查工作仅有甘肃省地矿局环境水文地质工程地质总站于 1986 ~ 1988 年完成的甘肃省岩土工程地质类型图及说明书 (1 : 100 万) 及青海省地矿局第二水文地质工程地质大队、宁夏回族自治区地矿局环境水文总站于 1987 年完成的西北地区环境地质图系之四“地壳稳定性分区图及说明书”之八“工程地质图及说明书” (1 : 200 万), 对本工作具有一定的参考意义。另外, 区内河谷平原地段开展了许多的场地工程地质勘察工作, 积累了较多的资料, 可作为本次工作的基础资料。

(三) 环境地质与地质灾害

区内环境地质工作较多, 比较系统的是县 (市) 地质灾害调查与区划, 该项工作是以县域为单元, 通过走访每一个城镇及行政村, 重点调查崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害及其隐患的分布状况, 划出了地质灾害易发区, 建立了地质灾害信息系统, 健全了群专结合的监测网络, 有效地保护了人民的生命财产安全, 是调查区地质灾害防治工作的一次质的飞跃。

针对 5 · 12 地震灾害及 8 · 8 泥石流灾害, 分别对区内次生地质灾害进行了应急排查, 并进行了成果总结, 以上两项成果将作为本次调查最重要的基础资料。

另外,在实施建设用地地质灾害危险性评估以来,区内地质灾害多发区围绕工程建设用地开展了不同级别的地质灾害危险性评估工作,也可以作为本次工作的参考资料。

二、地质灾害预测模型、运动机理、临界阈值、危险性区划国内外研究进展

1. 暴雨型滑坡、泥石流预测模型研究

长期以来,不同学者在地质条件、地形地貌条件、滑坡泥石流形成过程方面开展了不同程度的研究。自1978年Takahashi首次应用Bagnold的颗粒流理论解释水石流的剪切机理以来,随着国际减灾活动的加强,泥石流、滑坡体流变特征的测试和应力本构关系的研究已经成为该研究领域的热点之一。国内外许多专家利用旋转式、锥盘式和直立式等多种结构的流变仪来研究泥石流、滑坡体的流变行为。诸多学者分别利用大型流变仪进行泥石流固液相结构流变特征的试验研究;美国圣海伦火山观测站实验人员在俄勒冈州的大型水槽,进行了泥石流、滑坡从形成、运动到堆积的流变模拟的试验研究;美国加州大学帕克分校的沈学文和加州地质调查局进行了动态循环水槽相结合的试验研究,运用大型流变仪和小型水槽相结合的试验研究均在泥石流流变特性的内在机理上取得了长足性的进展。王裕宜等(2009)通过泥石流源地角砾土渗透系数和入渗过程的研究,探求泥石流启动的降雨侵蚀,得到了一些经验性的预报模式,以蒋家沟松散固体物质和始发雨强进行了验证,并在试验基础上,探讨了黏性泥石流在低、高剪切速率区的应力本构关系;通过野外原型观测和浑浑界面沉降特征,提出了暴雨泥石流、滑坡暴发的雨强指标的差异,土力型和水力型泥石流、滑坡水力型泥石流水力强度指标和机理。崔鹏等(2003)根据蒋家沟实测降雨资料,结合泥石流观测,分析了泥石流形成的降雨组成和前期降雨对泥石流形成的影响。美国地质地貌学家Johnson认为,滑坡演变成泥石流是由滑体残余含水量造成的,并选用宾汉(Bingham)黏性流模型,首次建立了泥石流的运动方程;Sassa(1988)通过在高速环剪试验仪上的不排水加载试验,认为液化不仅可以发生在非常松散已充分饱水的沙中,在密实状态下的剪切带中也同样会发生剪缩,使不排水条件下的孔隙水压增加,从而导致滑坡、泥石流。Chen等(2004)等通过对土样的偏压固结不排水剪和偏压固结常应力排水剪试验,详细分析了火山岩坡残积土地区暴雨滑坡泥石流机理,认为暴雨滑坡泥石流为排水条件下的剪胀破坏及其后不排水或不完全排水条件下的应变软化、破坏扩展两个过程的复合机制;认为黄土地区暴雨泥石流的形成须有一定厚度的饱和土层和一定深度的地表径流。崔鹏等(2010)根据野外观测资料及室内模拟试验结果,对泥石流、滑坡启动机理及临界条件进行了系统研究,并建立了泥石流、滑坡启动的突变模型,对泥石流、滑坡启动的物理机制基于突变理论作出了解释。应用非饱和土强度理论对暴雨泥石流、滑坡的成因机理进行了研究,提出暴雨泥石流、滑坡的形成过程可以划分为两个阶段:第一个阶段与前期实效降雨量有关;第二个阶段与短历时强降雨有关。上述研究,主要强调斜坡破坏方式对于其破坏后运动形式的影响,而泥石流、滑坡有其独特的流体结构和运动特征,并且土体破坏后不一定形成泥石流、滑坡,虽然有些学者(Hungr, 1995)对于土体破坏后,在何种条件下以何种方式转化为泥石流、滑坡这一更为重要的过程进行了分析,

但在定性分析方面的研究较多，而在定量分析方面的研究较少。

为了减少和防止滑坡、泥石流地质灾害，预测灾害发生的条件，预测灾害面积所影响的范围，泥石流、滑坡等地质灾害的预测模型等到了长足的进步。20 世纪九十年代以来，随着计算机运算速度的迅速提高和微分方程求解新算法的提出，以及对灾害体运动过程更深入的了解，泥石流、滑坡运动预测模拟研究得到了迅速发展，已经成为泥石流滑坡研究的一项重要内容，并取得了一系列研究成果。根据以往的研究成果，可以将泥石流、滑坡预测方法分为三大种类：经验法、物理尺度模型法和动态模型法，其预测方法体系分类如图 1-4 所示。

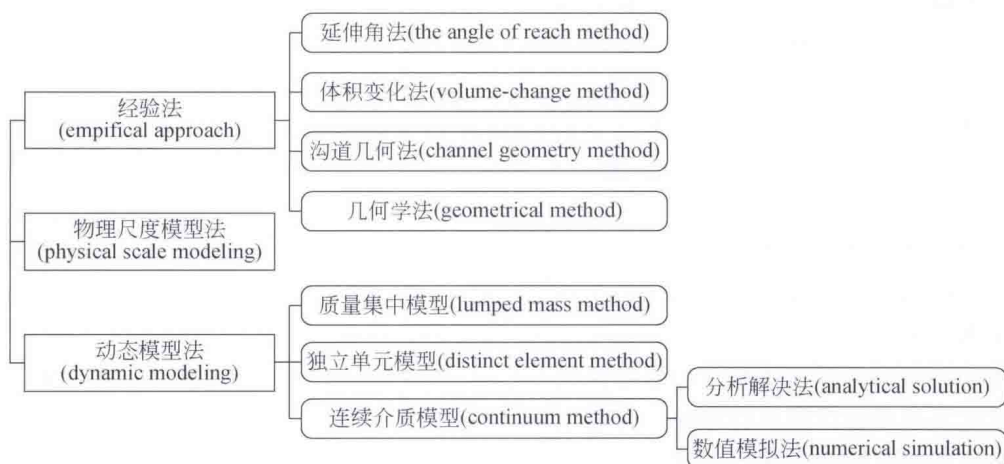


图 1-4 滑坡、泥石流预测方法体系

经验法是参照实际滑坡、泥石流数据并且依照合适的滑坡、泥石流分类方法而发展建立起来的。它包括延伸角法、体积变化法、沟道几何法和几何学法。延伸角法 (Corominas, 1996) 依靠简单的图示和回归方程建立了滑坡、泥石流的延伸角和其动态指数以及垂直距离的关系，同时也建立了水平距离和滑坡泥石流体积的关系。体积变化法 (Cannon, 1993; Fannin and Wise, 2001) 建立了平均体积变化模型，该模型依靠滑坡、泥石流运动痕迹的长度来划分滑坡体运动物质体积，从而预测滑坡、泥石流潜在的移动距离。沟道几何法 (Benda and Cundy, 1990) 用来预测在密闭的山区渠道中的运动距离和粗颗粒泥石流的沉积。几何学法 (Lucia, 1981) 是根据尾矿坝发生破坏，坝口泥石流发生和流出后质量守恒，来预测尾矿泥石流运动距离。总的来说，经验法提供了一种相对单一且实用的工具进行运动距离的分析，但并未考虑物体流变特性或者提供泥石流运动过程中关于动力参数的机理信息。此类方法的另一项瓶颈便是它需要依赖于足够的野外观测数据，来预测经验关系，并不能加以扩展，不能用于预测其他地区案例的移动距离。

物理尺度模型法方面，泥石流、滑坡试验研究可以在野外和室内展开。日本火烧岳 (Mt. Yakedake) (Takahashi, 1991) 和中国蒋家沟案例 (Wang et al., 1999) 中对滑坡、泥石流进行了系统的野外观测。然而，在野外进行直接观测十分困难，解释野外沉积物质时的不确定性也会限制野外调查的有效性。另外一种方法便是物理尺度模型法，物理尺度模型被认为是传统土力学的延伸。Chan 和 Chau (1999) 设计水槽用于实验室模拟发生在

1990年9月11日的香港滑坡 Tsing Shan 泥石流事件, 试验表明, 颗粒尺寸的分布在影响泥石流纵向长度方面起到了极其重要的作用。然而, 对于大规模灾害评价, 由于模型尺度效应或物理相似性不确定性, 试验结果应用于野外情况时受到限制。

动态模型法中的质量集中模型是由 Hutchinson (1986) 所提出的, 根据孔隙水压力的耗散确定滑动距离。Sassa (1988) 基于能量准则提出了改进的“雪橇”模型, 他假设在滑坡和泥石流的运动过程中, 所有的能量损失都是通过摩擦消散的, 能够反映出固有的内摩擦角和孔隙水压力组成的综合效应。质量集中模型由于其简洁具有一定的优势。但由于物体的形心和重心往往是不重合的, 这种方法并不能够考虑到失稳形态的复杂模式和滑坡物质的内部变形, 同时也不能识别基底高程和下坡条件 (如人工拦挡措施), 并且不能考虑到动力要素的改变和流体前端运动。

独立单元模型是一项研究在整体运动前提下, 颗粒状集合体力学数值技术。它将颗粒物集合体的相互作用看作平衡状态下的运输问题 (Cundall, 2001)。二维颗粒流程序 PARTI-2D 和 UDEC 已经对颗粒流问题进行数值模拟, 并成功用于分析香港滑坡案例。这些方法在很大程度上关注了粒子的微相互作用; 而对于泥石流、滑坡的研究而言, 更多的是需要关注其宏观行为, 如传播物质的流变本构关系、运动和沉积速度分布、灾害区和不稳定自由表面流动特征, 都应当定量化加以反映, 基于此, 独立单元模型具有一定的片面性, 而连续模型更具有普遍性。

连续介质模型基于质量、动量守恒的力学模型来描述泥石流动态运动过程, 能够使用不同流变公式来描述混合物特性, 与通用流变公式进行联合具有很强的灵活性, 这使得连续介质模型在重现泥石流运动过程和预测关键动力参数方面更具优势。连续介质模型也因此更加精细, 并且能够提供更多的针对灾害评价所需要的信息, 其中包括分析解决法和数值模拟法。分析解决法大多采用扰动法 (Jeyapalan et al., 1983; Iverson, 1986; Philip, 1991; Hunt, 1994; Huang and Garcia, 1997), 但不可避免地包括了理想化物理模型和相当多的对实际行为简化的假设。

数值模拟法是在欧拉和拉格朗日体系下组建的。许多代码通常是在欧拉体系下构建, 如准二维 FLDWAV flood routing 模型 (Jin and Fread, 1999)、Biviscous Marker and Cell (BVSMAC) 模型 (Dent and Lang, 1983)、二维 dam-pulse 模型 (Frenette et al., 1997)。O'Brien 等 (1993) 在二维洪水模型的基础上建立了适用于水流、泥流的 FLO-2D 准三维模型, 他将二维运动方程中的对流项和加速度项忽略, 简化为扩散波方程, 本构关系则组合了屈服应力、黏性应力、雷诺应力和分散应力, 应力与应变之间采用二次形式, 计算的结果模拟了滑坡、泥石流运动路线。我国学者也很注重这方面的研究, 谢正伦和詹钱登在模拟计算水石流时认为水石流所受的力主要来自流体的黏性、固粒间的摩擦和固粒间的碰撞, 因而采用了 Bagnold 的膨胀体模型, 并且他们提出用当时的降雨过程线估算泥石流流量过程线以确定计算需要的上游边界条件, 实际模拟的堆积范围和灾后实测的资料比较吻合。汪德灌和韩国其在计算安徽省金山尾矿溃坝问题时把偏应力的计算和微分方程的数值计算耦合, 由前一时刻的速度泥深计算下一时刻的速度泥深, 又由计算所得的速度和泥深计算偏应力, 再把偏应力代入差分方程计算速度和泥深。对于尾矿溃坝大量矿渣瞬时冲泻的短历时高速过程, 数值差分方案采用特征线方案。唐川 (2010) 应用二维 Navier-Stokes 方程的简化形式, 其中阻力项采用高桥堡公式, 在数值计算上首次采用隐式剖开算子法,