

# 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题

崔 鹏<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘 要:**本文首先简要回顾了山地灾害研究与防治方面的新进展:认识了山地灾害的空间分布规律,建立了山洪、泥石流、滑坡危险性评价方法;发展了滑坡稳定性分析的原理和计算方法,建立了泥石流流体应力本构关系、泥石流流速流量和冲击力计算公式、粘性泥石流起动模型,提出了山洪和泥石流规模放大效应;基于降雨和地面成灾环境要素耦合分析,发展了山地灾害气象预报方法;基于对灾害物理特性的认识,研发了一系列灾害监测预警仪器、数字流域平台与智能手机网络相结合的山洪预警系统;发展了灾害治理工程技术,形成了适合欠发达地区特点的灾害治理技术体系。在此基础上,分析了在灾害形成、运动、预测预报、防治技术和风险管理等方面还需要进一步深化研究的问题,提出山地灾害学科今后面临的任务。最后,针对国家减灾需求和学科发展目标,提出灾害对生态的响应机制、气候变化对山地灾害的影响与巨灾预测、水—土耦合的细观结构力学、灾害风险的理论与方法、基于灾害形成理论的机理预报模式、灾害防治技术规程的健全等未来应该关注的科学技术问题。

**关 键 词:**山地灾害;预测预报;灾害防治;风险管理;中国

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.02.001

中图分类号:P642

文献标识码:A

## 1 引言

中国是山地大国,包括高原和丘陵在内,约有山地面积666万km<sup>2</sup>,占国土总面积的69.4%,山区人口占全国总人口的1/3以上。山地特有的能量梯度使之成为泥石流、滑坡、崩塌、雪崩、土壤侵蚀、山洪等自然灾害的发育区。这些山地灾害,通过冲击、冲刷和淤积过程,摧毁城镇和乡村居民点,破坏道路、桥梁和工程设施,淤塞河道和水库,掩埋农田和森林,造成巨大的人员伤亡、财产损失和生态破坏,严重威胁山区人民生命财产与工程建设安全,制约山区资源开发与经济发展。灾害影响使得资源富集的山区成为“中国地形上的隆起区和经济上的低谷区”(陈国阶, 2004)。

在青藏高原隆升和季风气候的背景下,中国地质构造复杂,地形起伏大,降雨时空集中,上述灾害中的山洪、泥石流和滑坡(含崩塌)这3种突发性山地灾害<sup>①</sup>在中国山区分布广泛,暴发频繁,危害严

重。据国土资源部门统计,每年发生灾害数千至上万起,7400万人不同程度地受到山地灾害的危害和威胁,2001-2010年全国滑坡、泥石流等突发性灾害共造成9941人死亡和失踪(不含汶川地震期间由滑坡、崩塌和泥石流造成的约25000人遇难数据),平均每年约1000人(图1),年平均直接经济损失达数十亿元。其中仅2010年8月8日甘肃省舟曲山洪泥石流就造成1765人死亡和失踪,毁坏房屋4321间,22667人无家可归;2010年8月13日四川省绵竹市清平乡特大泥石流灾害造成12人死亡和失踪,500人被困,600余户房屋损毁。

此外,据民政部统计,2012年中国发生山洪灾害169起,受灾6686.15万人,死亡或失踪446人,直接经济损失685.086亿元;据《全国地质灾害通报》,2012年1-9月全国共发生中滑坡10738起、崩塌2015起、泥石流905起,造成348人死亡/失踪。2013年1月11日,云南省镇雄县果珠乡赵家沟村发生滑坡,造成46人遇难。

收稿日期:2014-01; 修订日期:2014-02。

基金项目:国家自然科学基金项目(41030742, 41140006)。

作者简介:崔鹏(1957-),研究员,博士生导师,主要从事山地灾害与水土保持研究, E-mail: pengcui@imde.ac.cn。

① 滑坡、崩塌和泥石流由国土资源部门负责管理,称为地质灾害;山洪以及由山洪引起的泥石流和滑坡,由水利部门管理,统称为山洪灾害。

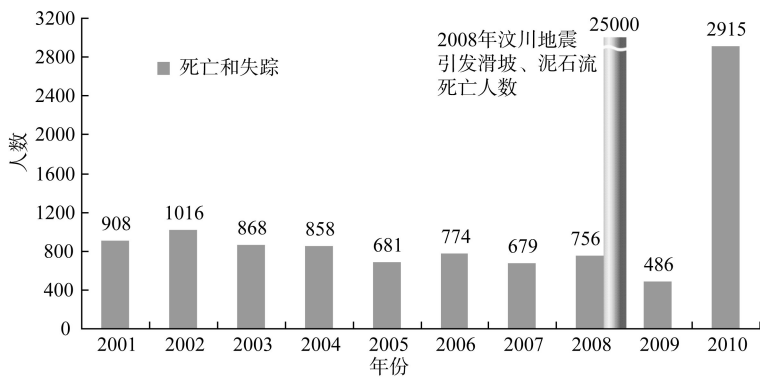


图1 2001-2010年中国山地灾害造成的死亡与失踪人数

Fig.1 Death toll and missing persons caused by mountain hazards in China during 2001-2010

1999年以来,以县(市)为单元的地质灾害调查查明,全国除上海外各省(自治区、直辖市)均存在滑坡、崩塌、泥石流灾害。截至2011年底,已记录编目的地质灾害隐患点超过24万处,直接威胁人口达1359万人。其中,四川、重庆、云南、贵州、福建、江西、广西、广东、陕西、湖南、山西、湖北、甘肃等省(区、市)最为严重,灾害隐患点累计超过全国总数的70%。

因此,减轻山地灾害是构建山区人与自然和谐共存格局,实现社会可持续发展的基本保障。中国政府十分重视山地灾害减灾工作,2006年以来,全国共成功避让地质灾害3600多起,避免人员伤亡20多万人,防灾减灾效果明显。同时,国家非常重视减灾科学研究,建立了较为丰富的灾害数据库,对山地灾害区域规律、形成机理、活动特征、成灾机制、监测预报、灾情评估、风险分析和减灾工程的理论基础和技术方法已有一定认识,对减灾起到了支撑作用。近年来,在以往减灾工作基础上,更加强调灾害风险管理,将管理的主体对象由自然灾害发展为自然和人为灾害,并更为关注人为灾害,强调对潜在灾害产生原因的认识,以便更好地预防、减缓和控制灾害,将造成的损失尽可能减少到最低(侯春梅等, 2003)。

2012年《国务院关于加强地质灾害防治工作的决定》颁布,《全国山洪防治规划》和《全国地质灾害防治“十二五”规划》先后得到国务院批准实施,极大地促进了山地灾害防治工程的实施,也为山地灾害研究提出了新的要求。为了进一步增强对山地灾害物理过程的认识,开发新的减灾技术,发展山地灾害学科,促进减灾工作,本文简要回顾了山地

灾害研究与防治方面的新进展,分析山地灾害学科今后面临的任务,初步提出未来应该关注的科学技术问题。

## 2 中国山地灾害研究有关进展

### 2.1 认识灾害区域规律,提出危险性分析与分区方法

通过对全国滑坡泥石流的普查和重点区域详查,已经查明了中国滑坡泥石流的区域分布,探明了中国泥石流的区域规律,提出山地灾害的分布具有沿断裂构造带密集分布,在地震活动带成群分布,在深切切割的高山峡谷地区带状间断分布,依照海拔高度发育不同类型的泥石流滑坡,沿交通干线成线状密集分布,并在高强度降雨覆盖区具有群发性等特点(崔鹏等, 2008)。

建立了中国山区山地灾害数据库,编制了六百万分之一中国滑坡分布与危险性分区图(刘新民等, 1991)、六百万分之一中国泥石流分布与危险性分区图(唐邦兴等, 1991),以及不同比例尺的滑坡、泥石流、山洪敏感性分区图(张平仓等, 2009; 钟敦伦等, 2010),为国家山地减灾和山地灾害研究提供了坚实的基础。进而建立了区域和单个灾点的泥石流危险度评价模型(刘希林等, 2003)和滑坡危险度评价方法(乔建平等, 2006)。利用泥石流运动数值模拟和GIS技术,建立了单沟泥石流危害范围确定和危险度分区模型,使得危险度分区具有明确的物理意义(Cui et al, 2011; Wei et al, 2008)。

### 2.2 揭示灾害形成机理和运动规律

基于长期观测和试验数据的支撑,在滑坡和泥

泥石流形成机理和运动规律方面取得了实质性进展。

陈祖堃基于滑坡形成力学分析,发展了滑坡稳定性分析的原理和计算方法(陈祖堃, 2003)。中国科学院东川泥石流观测研究站进行长期原型观测,探讨了泥石流的侵蚀、搬运与堆积过程,揭示了粘性泥石流体的流变特征和粘性泥石流流体应力本构关系,建立了泥石流流速、流量、冲击力计算公式,为泥石流运动动力学的理论研究作出了重要贡献(康志成等, 2004; 王裕宜等, 2001; 吴积善等, 1990)。

铁道科学研究所西南研究所和中国科学院成都山地灾害与环境研究所先后建成了大型泥石流动力学模拟装置,清华大学和中国水利科学研究院也先后开展水槽实验,通过大量实验,认识了泥石流运动机理,建立了泥石流运动方程(Wang et al, 1993, 1994, 2005; 周必凡, 1995)。在对大量泥石流流体进行粒度分析的基础上,发现了泥石流颗粒组成的幂律特征(李泳等, 2005)。通过模拟实验研究,建立了粘性泥石流临界起动条件的数学模型,揭示了泥石流起动的加速效应、分离效应和连接效应,分析了泥石流起动的突变学特征,初步构建了泥石流起动的理论框架(Cui, 1992)。

最近,通过野外原型勘测、原位实验和模型实验,揭示了坡面土体破坏的随机过程和强降雨作用下坡面土体破坏供给泥石流的规模激增效应,认识了沟道堵塞体级联溃决导致泥石流流量放大的机理,从坡面物质供给到沟道运动演进两个过程阐明了特大规模泥石流的形成机理(Cui et al, 2013; Zhou et al, 2013)。通过原型观测和数值模拟,进一步认识了山洪运动中的阻力特征,揭示了山洪形成与规模激增机理(Qin et al, 2012)。

### 2.3 建立灾害预报模型,研发灾害监测预警技术

以灾害成因分析和形成机理研究进展为基础,发展了泥石流预测预报的理论和方法,建立了多层次不同时空尺度的滑坡泥石流预测预报体系。

该预报体系包括3个层次:以数值天气预报模式和气象卫星为基础的大区域泥石流滑坡预报(刘传正, 2004),以多普勒气象雷达为基础的中小区域泥石流滑坡预报,以及以实时雨量遥测为基础的滑坡和泥石流定点预报;分别服务于省级、地市级和县级灾害预报(王礼先等, 2001; 韦方强等, 2004)。

在东川泥石流长期观测数据基础上,提出了暴雨泥石流规模预测理论与方法,预报模式的准确率达85%,预报提前时间达20多分钟,并进一步确定了前期雨量对泥石流形成的贡献(Cui et al, 2007; 吴积善等, 1990);开发的泥石流地声报警器和超声波泥位报警器的准确率达90%(吴积善等, 1990)。

中国近年来滑坡监测仪器的研制取得了广泛的进展,发展了地表形变、地下位移和地下水变化的监测仪器,并将其集成为滑坡监测系统,在三峡库区滑坡监测中发挥了作用(任松等, 2006)。在区域灾害监测、应急减灾和灾情评估方面,发展了卫星遥感和低空遥感灾害监测预警技术,在5.12汶川地震及其次生山地灾害减灾中发挥了巨大作用(郭华东, 2008; 杨武年等, 2005)。最近,研制了数字流域平台与智能手机网络相结合的山洪预警系统(李铁键, 2014)。

### 2.4 提出灾害治理模式,发展治理技术

在机理研究的同时,针对中国山区建设中的山地灾害问题,开展了大量灾害治理工作,研发了一系列适合欠发达地区的实用技术,形成了具有中国特色的灾害治理技术(唐邦兴等, 1980; 吴积善等, 1997)。

近年来,总结以往防治滑坡成功的经验和失败的教训,初步建立了滑坡防治技术体系,包括制定方案的总体思路和防治方案体系。研发了埋入式桩和微型群桩,提出了确定最大桩间距和最小桩厚度的抗滑桩优化设计技术、预应力锚固的成套技术、通过调整施工时序稳定边坡的方法等,特别是针对三峡库区大量滑坡灾害,总结了针对库岸滑坡、弃渣边坡和移民区滑坡的防治技术,制定了库区地质灾害防治技术标准《长江三峡工程库区滑坡防治工程设计与施工技术规程》,并加以推广<sup>②</sup>(王恭先, 2004; 殷跃平, 2004)。

以泥石流形成机理、运动规律和成灾机制为基础,建立了泥石流主动减灾的理论和技術,包括:防止泥石流发生的技术,调控泥石流运动的技术,预防泥石流危害的技术(唐邦兴等, 1994; 周必凡等, 1991)。针对城镇、道路(管线)、水电工程和风景名胜區泥石流防治的具体特点,建立了相应的减灾技术体系(Cui et al, 2003; 陈洪凯等, 2004; 蒋忠信等,

② 刘传正, 王恭先, 崔鹏. 2008. 地质灾害防治研究现状与展望. 见《中国地质学会学科发展进展研究报告》。



1999; 李德基, 1997; 罗德富等, 1995; 吴积善等, 1993)。

同时,改进了泥石流防治工程设计参数的计算方法,提高了工程设计的合理性。近年来,生态护坡技术得到快速发展,已经由原来注重绿化到现在注重乡土植物群落构建及其生态效益与护坡稳坡效果相结合的新目标。

### 3 减灾需求与山地灾害学科任务

《全国地质灾害防治“十二五”规划》提出的任务是,“到2020年我国全面建成地质灾害调查评价体系、监测预警体系、防治体系和应急体系,基本消除特大型地质灾害隐患点的威胁,使地质灾害造成的人员伤亡明显减少”。我们认为,要实现上述目标,在已经开展的灾害区域调查基础上,应进一步做好以下工作:加强山区城镇灾害监测预警和灾害治理,有效减轻人员伤亡和财产损失,提升山区城镇的减灾能力;加强水电、道路、管线、矿山等重大工程建设的减灾工作,针对工程安全需求,有针对性地发展减灾技术,制定相应的技术规范;加强科学普及,增强民众的减灾意识,建立和完善群专结合的灾害预防体系;开展灾害风险评价和风险制图,服务区域减灾和工程建设。

鉴于中国山地灾害易发区范围大(高易发区面积112.7万 $\text{km}^2$ ,中易发区面积377万 $\text{km}^2$ ),特别是灾害成因和动力过程的复杂性、成灾环境的多样性,基本消除特大型灾害隐患威胁和明显减少人员伤亡这一国家减灾目标是一项非常艰巨的任务。它有赖于进一步系统深入地认识灾害的成因和机理,发展基于机理和过程的减灾技术,发展适用于不同区域和灾种的减灾模式,形成较为系统的山地灾害理论与减灾技术体系。

通过多年山地灾害方面的理论研究和减灾实践,对灾害现象有了比较充分的认识,总结出活动规律,对区域规律的认识已经比较清晰。但对灾害成因的动力学过程的分析不够,特别是对水—土在微观层次的耦合机理还缺乏深入了解。对灾害形成的机理和运动规律已经作了具有一定深度的机理分析,建立了相应的模型;但由于现象的复杂性,这些模型多基于大量的假设与简化,与定量描述过

程还有一定的距离。

在灾害防治方面,山地灾害预测预报基本上是基于“雨—地”关系的模型,没有脱离统计预报的范畴,预报精度不高,进一步提高的空间较大。灾害防治工程设计参数确定方法具有一定的经验性,不同科技人员计算结果差异较大,需要不断总结经验,逐步完善;山地灾害风险分析和风险管理近期才得到重视,需要进一步加强这方面的工作,建立完善的灾害风险分析和风险管理理论和方法;尽管已经在泥石流滩地开发利用方面做了一定的探索(崔鹏等, 2008),但这方面的工作还只是刚刚起步,需要进一步加强灾害资源化利用技术的研发,充分利用灾害的资源属性。

今后山地灾害研究的任务是:充分利用案例多、素材丰富的研究资源,深入认识山地灾害发育条件、形成机理、运动规律和成灾机制,在新理论和新认识的基础上发展适合中国需求、具有中国特色的减灾技术体系,提出灾害资源化利用的技术方法,实现灾害的科学管理,有效减轻灾害和利用灾害资源,进一步提升中国山地灾害研究和防治水平。

### 4 未来应关注的科学问题

针对国家减灾需求和学科发展目标,初步提出以下几点未来应该关注的科学问题。

#### (1) 灾害对生态的响应机制

生态与灾害之间具有复杂的互馈作用,迄今尚鲜有这方面的深入研究。一般而言,植被可以在一定程度上调节灾害形成条件,起到抑制灾害形成的作用,流域内大范围的植被优化,可以改善山地灾害的形成条件和形成规模,有效降低灾害风险。但是,目前对植物措施调控灾害作用的认识还比较局限,缺少定量的功能评价方法和深入的机理分析。近期,应系统研究植被的防灾功能,提出科学配置植物措施和岩土措施的理论和技术。

#### (2) 气候变化对山地灾害的影响与巨灾预测

气候变化导致的气候系统紊乱和极端天气常态化趋势,增大了山地灾害发生的频度,特别是大规模灾害和群发性灾害暴发概率增大。研究气候变化引发的极端天气(如高强度降雨、干旱和高寒

地区的高温)出现特征,分析极端天气对不同地区、不同类型山地灾害形成的影响,建立定量关系预测未来巨灾,是今后山地灾害研究的前沿科学问题。

### (3) 基于水—土耦合的山地灾害动力学分析

山地灾害学科处于深化过程研究的时期,迫切需要在灾害研究中融入力学方法和思维,解决复杂介质运动和多过程耦合的问题,定量描述山地灾害水—土耦合的动力过程。例如,在形成机理方面,需要用微(细)观结构土力学来解释松散土体破坏的力学机理,滑坡快体运动向泥石流流体运动转化的动力过程,用分布式模型与随机理论研究泥石流汇流问题;在运动规律方面,需要科学认识与描述多相介质的运动,用多相流理论建立灾害运动模型。

### (4) 灾害风险的理论与方法

灾害风险包括风险判识、危险性分析、易损性分析、风险分析、风险防范、风险转移、风险管理等等。其中,风险判识或潜在风险识别是目前本学科的难点和前沿问题;风险管理也是中国的薄弱环节。伴随着高强度人类活动而出现的灾害危险区人口密度与经济密度的增加,加强灾害风险分析、风险评估和风险管理理论方法的研究,突破风险判识难点,提高灾害风险管理水平,建立健全灾害风险管理体制和机制,有效降低特大灾害所造成的风险(图2),是中国山地灾害减灾的重要课题。

### (5) 发展基于灾害形成理论的机理预报模式

目前的灾害预报方法一般多为基于降雨和灾害事件的统计关系建立的模型,改进型的模型考虑了灾害形成的地质地貌条件,仍然属于统计预报的范畴。这些统计模型的应用和精度均受到一定限制。建立基于形成机理的灾害预报模型,是提高灾害预报水平的出路,也是学科的前沿和难点。

### (6) 完善灾害防治技术

吸取山地灾害理论研究成果,改进灾害防治工程设计参数确定方法,发展灾害治理优化设计技术,不断完善灾害防治工程技术指南和技术规范,促进减灾工程的规范化和标准化,提高灾害治理技术水平。同时,利用灾害的资源属性,探索将灾害治理、区域脱贫和可持续发展有机结合的有效途径和技术模式。

## 5 结语

中国山地灾害分布广泛,活动频繁,危害严重,造成巨大的生命和财产损失,严重制约着山区资源开发与经济发展。国家非常重视山地灾害的研究与防治,通过多年的研究,认识了灾害的区域规律,提出了危险性分析与分区方法,揭示了灾害形成机理和运动规律,构建了灾害预测预报和监测预警技术,提出了灾害治理模式,发展了治理技术。这些成果的应用,已取得显著的减灾成效。

中国政府提出到2020年基本消除特大型灾害隐患威胁和明显减少人员伤亡的减灾目标。中国灾害成因和动力过程的复杂性与成灾环境的多样性,决定了这项任务的艰巨性。目前,对灾害成因的动力学过程分析不够,预报还需要突破统计预报的范畴,灾害防治工程设计仍具有一定的经验性,山地灾害风险分析和风险管理需要深化。

针对国家减灾需求和学科发展目标,未来应该关注如下科学问题的研究:灾害对生态的响应机制,气候变化对山地灾害的影响与巨灾预测,基于水—土耦合的山地灾害动力学,灾害风险的理论与方法,基于灾害形成理论的机理预报模式,发展灾害防治技术,完善减灾技术规程。

## 参考文献(References)

- 陈国阶. 2004. 中国山区发展报告. 北京: 商务印书馆. [Chen G J. 2004. Report on mountainous regional development in China. Beijing, China: Commercial Press.]
- 陈洪凯, 唐红梅, 马永泰, 等. 2004. 公路泥石流研究及治理. 北京: 人民交通出版社. [Chen H K, Tang H M, Ma Y T, et al. 2004. Research and control on debris flow along road. Beijing, China: China Communications Press.]

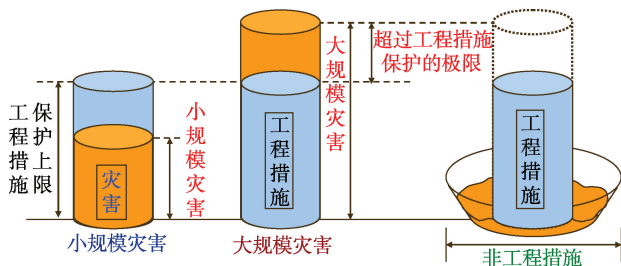


图2 利用非工程风险管理措施减轻特大灾害风险示意图<sup>③</sup>

Fig.2 Diagram of non-engineering risk management for reducing risk of mega mountain disasters

③ 该图由台湾水土保持专家吴辉龙先生提供。

- 陈祖煜. 2003. 土质边坡稳定分析. 北京: 中国水利水电出版社. [Chen Z Y. 2003. Analysis of stability on soil slope. Beijing, China: China WaterPower Press.]
- 崔鹏, 王道杰, 庄建琦. 2008. 泥石流扇形土地整治与利用. 中国水土保持科学, 6(增刊1): 6-11. [Cui P, Wang D J, Zhuang J Q. 2008. Soil improvement and utilization of debris flow fan. Science of Soil and Water Conservation, 6(Suppl. 1): 6-11]
- 崔鹏, 钟敦伦, 吴发启. 2008. 混合侵蚀//张洪江. 土壤侵蚀原理. 北京: 中国林业出版社: 148-188. [Cui P, Zhong D L, Wu F Q. 2008. Mixed erosion//Zhang H J. Principle of soil erosion. Beijing, China: China Forestry Publishing Press: 148-188.]
- 郭华东. 2008. 汶川地震灾害遥感图集. 北京: 科学出版社. [Guo H D. 2008. Remote sensing atlas of Wenchuan Earthquake Hazards. Beijing, China: Science Press.]
- 侯春梅, 张志强, 李明, 等. 2003. NASA 固体地球科学未来 25 年研究设想. 地球科学进展, 18(6): 987-996. [Hou C M, Zhang Z Q, Li M, et al. 2003. Solid earth science research vision of NASA in coming 25 years. Advance in Earth Sciences, 18(6): 987-996.]
- 蒋忠信, 姚令侃, 艾南山, 等. 1999. 铁路泥石流非线性研究与防治新技术. 成都: 四川科学技术出版社. [Jiang Z X, Yao L K, Ai N S, et al. 1999. Nonlinear research and new prevention technologies on debris flow along railway. Chengdu, China: Sichuan Science & Technology Press.]
- 康志成, 李焯芬, 马蔼乃, 等. 2004. 中国泥石流研究. 北京: 科学出版社. [Kang Z C, Li Z F, Ma A N, et al. 2004. Research on debris flow in China. Beijing, China: Science Press.]
- 李德基. 1997. 泥石流减灾理论与实践. 北京: 科学出版社. [Li D J. 1997. Theory and practice for disaster reduction of debris flow. Beijing, China: Science Press.]
- 李铁键. 2014. 基于智能手机互动的资料缺乏山区洪水预警系统. 四川大学学报, 接收待刊. [Li T J. 2014. Early warning system for flash flood based on mobile phone technique. Journal of Sichuan University, in press.]
- 李泳, 陈晓清, 胡凯衡, 等. 2005. 泥石流颗粒组成的分形特征. 地理学报, 60(3): 495-502. [Li Y, Chen X Q, Hu K H, et al. 2005. Fractality of grain composition of debris flows. Acta Geographica Sinica, 60(3): 495-502.]
- 刘传正. 2004. 区域滑坡泥石流灾害预警理论与方法研究. 水文地质工程地质, 31(4): 1-6. [Liu C Z. 2004. Study on the early warning methods of landslide and debris flows. Hydrogeology and Engineering Geology, 31(4): 1-6.]
- 刘希林, 莫多闻. 2003. 泥石流风险评价. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社. [Liu X L, Mo D W. 2003. Risk assessment on debris flow. Urumchi, China: Xinjiang Science & Health Press.]
- 刘新民, 李娜. 1991. 中国滑坡灾害分布图. 成都: 成都地图出版社. [Liu X M, Li N. 1991. Distribution map of landslide disasters in China. Chengdu, China: The Cartographic Publishing House of Chengdu.]
- 罗德富, 毛济周. 1995. 川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策. 北京: 科学出版社. [Luo D F, Mao J Z. 1995. Mountain hazards and preventive countermeasure on South Sichuan-Tibet Road(inside of the Tibet). Beijing, China: Science Press.]
- 乔建平, 朱阿兴, 吴彩燕, 等. 2006. 采用本底因子贡献率法的三峡库区滑坡危险度区划. 山地学报, 24(5): 569-573. [Qiao J P, Zhu A X, Wu C Y, et al. 2006. Bottom factors applied to the zoning study of the risk levels of landslides in Three Gorges Reservoir Area. Journal of Mountain Research, 24(5): 569-573.]
- 任松, 姜德义, 蒋再平, 等. 2006. 三峡库区地质灾害监测技术与展望. 中国安全科学学报, 16(1): 140-144. [Ren S, Jiang D Y, Jiang Z P, et al. 2006. Monitoring technology of geological disasters in Three Gorge Reservoir Area and it's prospect. China Safety Science Journal, 16(1): 140-144.]
- 唐邦兴, 杜荣桓, 康志成, 等. 1980. 我国泥石流研究. 地理学报, 35(3): 259-264. [Tang B X, Du R H, Kang Z C, et al. 1980. Research on debris flow in China. Acta Geographica Sinica, 35(3): 259-264.]
- 唐邦兴, 李宪文, 吴积善, 等. 1994. 山洪泥石流滑坡灾害及防治. 北京: 科学出版社. [Tang B X, Li X W, Wu J S, et al. 1994. Mountain torrent, debris flow, landslide and disaster mitigation technology. Beijing, China: Science Press.]
- 唐邦兴, 柳素清, 刘世建, 等. 1991. 中国泥石流分布及其灾害危险区划图. 成都: 成都地图出版社. [Tang B X, Liu S Q, Liu S J, et al. 1991. Distribution map of debris flow and its disaster dangerous regionalization in China. Chengdu, China: The Cartographic Publishing House of Chengdu.]
- 王恭先. 2004. 滑坡学与滑坡防治技术. 北京: 中国铁道出版社. [Wang G X. 2004. Landslide and landslide treatment technique. Beijing, China: China Railway Press.]
- 王礼先, 王志民. 2001. 山洪及泥石流灾害预报. 北京: 中国林业出版社. [Wang L X, Wang Z M. 2001. Disaster forecast for mountain torrent and debris flow. Beijing, China:



- China Forestry Publishing Press.]
- 王裕宜, 詹钱登, 严壁玉, 等. 2001. 泥石流流体结构和流变特性. 长沙: 湖南科学技术出版社. [Wang Y Y, Zhan Q D, Yan B Y, et al. 2001. Structure and rheological properties of debris-flow substance. Changsha, China: Hunan Science & Technology Press.]
- 韦方强, 崔鹏, 钟敦伦. 2004. 泥石流预报分类及其研究现状和发展方向. 自然灾害学报, 13(5): 10-15. [Wei F Q, Cui P, Zhong D L. 2004. Classification of debris flow forecast and its present status and development in research. Journal of Natural Disasters, 13(5): 10-15.]
- 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 1990. 云南蒋家沟泥石流观测研究. 北京: 科学出版社. [Wu J S, Kang Z C, Tian L Q, et al. 1990. Observation and research on debris flow in Jiangjia Ravine in Yunnan Province. Beijing, China: Science Press.]
- 吴积善, 田连权, 康志成, 等. 1993. 泥石流及其综合治理. 北京: 科学出版社. [Wu J S, Tian L Q, Kang Z C, et al. 1993. Debris flow and its comprehensive control. Beijing, China: Science Press.]
- 吴积善, 王成华, 程尊兰. 1997. 中国山地灾害防治工程. 成都: 四川科学技术出版社. [Wu J S, Wang C H, Cheng Z L. 1997. Mountain hazard control engineering in China. Chengdu, China: Sichuan Science & Technology Press.]
- 杨武年, 濮国梁, Cauneau F, 等. 2005. 长江三峡库区地质灾害遥感图像信息处理及其监测和评估. 地质学报, 79(3): 423-430. [Yang W N, Pu G L, Cauneau F, et al. 2005. Digital processing and information extraction of the SPOT, ERS-SAR, Radarsat and Landsat TM images for geological hazard in the Yangtze Three Gorges Project Region, China. Acta Geologica Sinica, 79(3): 423-430.]
- 殷跃平. 2004. 三峡库区重大地质灾害及防治研究进展. 岩土工程界, 7(8): 20-26. [Yin Y P. 2004. Serious geo-hazards and their prevention progress in the Three Gorges Reservoir Areas. Geotechnical Engineering World, 7(8): 20-26.]
- 张平仓, 赵健, 胡维忠, 等. 2009. 中国山洪灾害防治区划. 武汉: 长江出版社. [Zhang P C, Zhao J, Hu W Z, et al. 2009. Zonation of flash flood preventive treatment in China. Wuhan, China: Changjiang Press.]
- 钟敦伦, 谢洪, 韦方强, 等. 2010. 长江上游泥石流综合危险度区划. 上海: 上海科学技术出版社. [Zhong D L, Xie H, Wei F Q, et al. 2010. Integrated zonation of debris-flow hazardous grade in Upper Reachers of Yangtze River. Shanghai, China: Shanghai Science and Technology Press.]
- 周必凡. 1995. 粘性泥石流流力学模型与运动方程及验证. 中国科学: B辑, 25(2): 196-203. [Zhou B F. 1995. Research and verification on mechanical model and motion equation for viscous debris flow. Science in China: Series B, 25(2): 196-203.]
- 周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 1991. 泥石流防治指南. 北京: 科学出版社. [Zhou B F, Li D J, Luo D F, et al. 1991. Handbook for debris flow prevention. Beijing, China: Science Press.]
- Cui P. 1992. Studies on condition and mechanism of debris flow initiation by means of experiment. Chinese Science Bulletin, 37(9): 759-763.
- Cui P, Gordon G D, Zhou X H, et al. 2013. Scale amplification of natural debris flows caused by cascading landslide dam failures. Geomorphology, 182: 173-189.
- Cui P, Hu K H, Zhuang J Q, et al. 2011. Prediction of debris-flow danger area by combining hydrological and inundation simulation methods. Journal of Mountain Science, 8(1): 1-9.
- Cui P, Liu S Q, Tang B X, et al. 2003. Debris flow prevention pattern in national parks. Science in China: Series E, 46 (Suppl. 1): 1-11.
- Cui P, Zhu Y Y, Chen Y S, et al. 2007. Relationships between antecedent rainfall and debris flows in Jiangjia Ravine, China. 4th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Chengdu, China: September 10-13.
- Qin J, Zhong D Y, Wang G Q, et al. 2012. On characterization of the imbrication of armoured gravel surfaces. Geomorphology, 159-160: 116-124.
- Wang G Q, Ni J R. 1994. Dynamic equations for debris flow. Chinese Science Bulletin, 39(24): 2056-2062.
- Wang Z Y. 1993. A study on debris flow surges. Hydraulic Engineering'93: proceedings of the 1993 Conference. San Francisco, CA: July 25-30.
- Wang Z Y, Wang G Q, Liu C. 2005. Viscous and two-phase debris flows in southern China's Yunnan Plateau. Water International, 30(1): 14-23.
- Wei F Q, Hu K H, Cui P, et al. 2008. A decision support system for debris-flow hazard mitigation in towns based on numerical simulation: a case study at Dongchuan, Yunnan Province. International Journal of Risk Assessment and Management, 8(4): 373-383.
- Zhou G G D, Cui P, Chen H Y, et al. 2013. Experimental study on cascading landslide dam failures by upstream flows. Landslides, 10(5): 633-643.

## Progress and prospects in research on mountain hazards in China

CUI Peng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, CAS, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In this paper, first, the research progress on fundamental theories on mountain hazards and prevention techniques are briefly reviewed. In the current research, the distribution of mountain hazards has been recognized and the hazards assessment methods for mountain torrents, debris flow and landslides have been established, and the principles and calculations of landslide stability analysis have been developed. In addition, the stress-strain relation of debris flow slurry and the formulae of velocity, discharge and impact of debris flow have been established, and a model of viscous debris flow initiation has also been proposed. We also presented the magnitude amplification effects of mountain torrents and debris flows. Meanwhile, the methods to forecast mountain hazards have been developed by analyzing both rainfall and ground factors. Based on the understanding of the physical characteristics of mountain hazards, a number of monitoring instruments have been invented, and especially the early warning methods have been used in the underdeveloped regions. Furthermore, a systematic technology for coping with mountain hazards has been developed. The topics on the formation, development, forecasting and prevention, protection strategies and risk management of mountain hazards have been proposed for future research. Finally, aiming at the requirements of the reduction of disasters for the nation and the goals of the academic progresses, we propose the topics that are worthy of more attention in the future research, such as the response of mountain hazards to ecology, the effects of climate change on mountain hazards, the prediction of catastrophe, the mesomechanic behaviors of the soil affected by water, the theories and methods of hazard risk assessment, the hazard forecasting model based on the formation mechanisms and the improvement of prediction and recovery technology.

**Key words:** mountain hazards; forecasting and prediction; disaster prevention; risk management; China