

# 中国泥石流起动物理模拟试验研究进展

倪化勇<sup>1,2</sup>, 唐川<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081)

**摘要:** 为进一步提高泥石流起动物理模拟试验的科学性, 完善试验体系, 采用资料收集与分析方法, 总结了近年来中国泥石流起动物理模拟试验开展的现状, 从水流冲刷与泥石流起动试验以及人工降雨与泥石流起动试验两个方面论述了中国泥石流起动试验取得的主要进展和理论成果。在国内外泥石流起动物理模拟试验对照基础上, 提出中国泥石流起动物理模拟试验研究的建议: 提高水流浓度、降雨雨型与土体特征的相似率; 加强降雨或水流作用下土体物理力学特征变化与泥石流起动响应研究; 推动降雨与汇流共同作用下泥石流起动综合性物理模拟试验的开展。

**关键词:** 泥石流; 起动; 物理模拟试验; 水流冲刷; 人工降雨

**中图分类号:** P642.23; G353.11      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2014)04-0606-08

据近年统计资料表明, 中国泥石流活动区域面积达430万 km<sup>2</sup>, 泥石流已经成为中国山区发展中不可忽视的一大灾害<sup>[1]</sup>。由于中国绝大部分泥石流由降雨诱发, 降雨及其汇流冲刷触发的泥石流起动机理研究备受关注。自20世纪50年代开始, 中国许多专家学者先后通过单沟或区域泥石流调查评价、原型泥石流观测基地建设等工作致力于泥石流起动机理的研究。然而泥石流往往发生在偏远山区, 其形成过程和流体结构复杂, 暴发突然, 成灾迅速, 难以观测, 即使是从事泥石流灾害防治研究的专家或学者也少有目睹自然泥石流起动和运动过程的机会。因此, 起动试验的开展成为了当前泥石流起动机理研究的重要手段和核心内容之一。目前越来越多的专家学者在明确了泥石流的孕灾条件后, 通过物理模拟试验来揭示泥石流形成、发生、运动和堆积等一系列过程, 并取得了大量关于泥石流形成条件、起动机理、运动过程和成灾形式等方面的认识, 在一定程度上推动了中国泥石流的研究进展。同自然泥石流起动的复杂性相比, 泥石流起动物理模拟试验是一个复杂的系统工程, 包括试验目的、对象、内容、条件、手段、过程、观测和分析等诸多内容。本文通过资料收集, 分析概述了中国泥石流起动物理模拟试验研究的进展、取得的成果和存在的问题, 并通过国内外泥石流起动物理模拟试验的对照, 提出了中国泥石流起动试验开展需进一步考虑的因素和建议, 以期在今后中国泥石流起动试验的开展和泥石流起动机理的研究提供参考。

## 1 现状与进展

中国泥石流起动试验的开展始于20世纪60年代<sup>[1]</sup>, 包括室内试验和野外试验。纵观半个多世纪泥石流起动试验的开展, 试验装备和设施不断完善。20世纪60年代铁道部西南研究所建立大型室内模型实验室, 并结合成昆铁路泥石流防治研究进行了羲农河、黑沙河、三滩沟等泥石流模拟试验, 不仅为生产实践提供了科学依据, 也为今后室内试验奠定了基础; 20世纪80年代, 亚洲最大的泥石流动力模拟系统在中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所建成<sup>[2]</sup>, 为深入认识泥石流运动机制提供了条件。近年来, 国内多家科

收稿日期: 2013-11-25; 网络出版时间: 2014-05-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20140529.1803.015.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41102226); 科技基础性工作专项(2011FY110100-1)

作者简介: 倪化勇(1979—), 男, 山东临朐人, 副研究员, 博士研究生, 主要从事泥石流灾害预测预报、评价与灾害地貌研究。E-mail: nihuyong@126.com

研教育机构(如成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室)根据研究需要相继组建了泥石流模拟试验场地,配置了先进试验设施,为中国泥石流起动室内试验开展提供了良好平台。

另外,除上述大型模拟试验厅外,不少专家学者根据各自的试验目的,通过相似比原则,设计、制作了相应的试验装置并有针对性地开展了泥石流起动物理模拟试验。通过试验,对沟道松散物质补给型和滑坡转化型等自然泥石流以及弃渣型人为泥石流起动进行了物理模拟。根据中国泥石流起动物理模拟试验开展现状,按照起动试验开展过程中水源的提供方式,可分为两种类型:①水流冲刷与泥石流起动试验;②人工降雨与泥石流起动试验。

### 1.1 水流冲刷与泥石流起动试验

试验开展主要基于沟床堆积物遭受降雨所产生的沟道径流侵蚀、席卷、揭底、搬运而起动形成泥石流的机理,试验对象主要为水力类泥石流。目前常用试验方法一般是在试验槽中铺上一定厚度的砂石土,然后逐渐放水,砂石土饱和后在一定的自重作用下发生剪切,随之膨胀,并与一定厚度的表层水结合形成泥石流。现将中国学者近年来开展的代表性水流冲刷与泥石流起动试验及其模拟对象、试验场地、试验材料和试验内容汇总于表1。

表1 水流冲刷与泥石流起动代表性试验汇总  
Table 1 Representative experiments on runoff and debris flow initiation

模拟对象	试验场地及规模	试验土体	试验内容	文献
蒋家沟泥石流	玻璃槽(8.7 m×0.2 m×0.1 m)	卵石和配置泥浆的粘土	水流浓度、流量对泥石流起动影响	[3]
蒋家沟泥石流	不同覆盖土质坡(15 m×5 m)	四种类型荒坡地	坡地侵蚀与泥石流起动情况对比	[4]
矿渣型泥石流	斜坡径流小区(15 m×5 m)	煤渣、石渣两种土体	水流强度、土体类型与泥石流起动的关系	[4]
树正沟泥石流	玻璃槽(2 m×0.2 m×0.2 m)	粒径<3 cm的松散固体物质	坡度、水分和细颗粒对泥石流起动的影响	[5]
清水沟泥石流	直槽(1.7 m×0.15 m×0.16 m)	粒径<2 cm的松散固体物质	土体重量、坡度、细粒含量对泥石流起动影响	[6]
魏家沟泥石流	矩形槽(5 m×0.45 m×0.5 m)	粒径<10 cm准泥石流体	不同坡度条件下泥石流起动试验	[7]
矿渣型泥石流	直斜槽(2.45 m×0.45 m×0.5 m)	粒径<5 cm矿渣物料	颗粒级配、坡度和水量条件与泥石流起动响应	[8]

从当前普遍采用的试验手段和材料来看,除少数专家学者采用野外原型试验模拟泥石流起动外,多数水流冲刷与泥石流起动试验遵循相似性原理,采用室内物理模拟试验的方式开展,并且沿用了直斜式小型泥石流槽模拟沟床、用供水箱放水模拟水源的设计思路。模拟槽一般设计为矩形有机玻璃槽,长度从数米至十余米不等,宽度和深度一般不超过50 cm,槽底通过各种手段增加了糙率。采用供水箱放水冲刷模拟降雨条件下沟道洪流,通过流量计控制放水流量。试验土体涵盖了自然泥石流砾石土和人为泥石流矿渣等类型。但由于试验槽尺寸的限制,试验中大颗粒块石均被剔除,最大块度一般不超过10 cm。

从模拟对象和试验内容来看,以往开展的水流冲刷与泥石流起动试验涉及到了东川蒋家沟、武都清水沟、九寨沟树正沟、北川魏家沟等典型自然泥石流以及神府—东胜矿区、小秦岭金矿区典型矿渣型人为泥石流。试验通过孔隙水压力和含水量传感器、流量计、流速仪、数码采集系统等设备,重点研究了不同工况下水流冲刷泥石流起动条件和规律。通过上述试验的开展,中国学者在水流冲刷类泥石流形成条件和起动机理方面主要取得了以下成果:

(1) 通过试验研究了物源条件(物质组成、颗粒级配和含水状况)、水源条件(水流或泥浆的流量、浓度)、下垫面条件(底床坡度、糙率等)及这些条件的组合对泥石流起动的影响和控制作用,揭示了不同组合条件下水流冲刷试验中泥石流的起动条件和内部规律。Cui<sup>[5]</sup>认为底床坡度、颗粒级配和水分状况是水流冲刷与泥石流起动试验中考虑的3个基本因素,并以底床坡度、水分饱和度和细粒含量为主轴建立了三维空间曲面,用于表征泥石流的起动条件;解明曙等<sup>[6]</sup>发现细粒含量对准泥石流流体起动影响大,徐友宁等<sup>[7]</sup>开展的试验则表明当细颗粒含量达到28%时最有利于泥石流的起动;王兆印和张新玉<sup>[3]</sup>开展的试验反映出泥浆浓度对泥石流起动具有重要影响;另外,不同试验验证了底床纵坡度和泥石流起动条件之间的负相关关系,无论在自然砾石土泥石流起动还是人为矿渣泥石流起动都得到体现<sup>[7-8]</sup>。

(2) 通过试验探索了水流冲刷泥石流起动的临界判据, 为泥石流预警预报提供了参考。王兆印和张新玉<sup>[3]</sup>在试验过程中发现当水流冲刷沟床物质时, 形成泥石流的条件取决于液相提供的能量临界值; 另外, 在水流冲刷与泥石流起动试验开展过程中, 为数较多的学者采用起动需水量作为泥石流起动的临界判据, 并研究了起动需水量与试验条件的关系<sup>[6-7]</sup>。

(3) 水流冲刷与泥石流起动试验揭示了泥石流的物源补给方式、形成过程。依据王兆印和张新玉<sup>[3]</sup>的研究, 沟床质起动与泥石流的形成可划分为 6 个基本过程: 泥沙起动、推移质运动、推移质与悬移质运动、中性悬移质运动、流体紊动减弱以及层流流态, 研究结果表明了沟床揭底补给形成泥石流的过程; Zhuang 等<sup>[8]</sup>开展的水流冲刷试验则表明不同工况下泥石流起动和形成模式可能存在较大差异, 除了侵蚀揭底补给形成泥石流外, 侧蚀崩塌、堵塞、溃决等也参与了泥石流起动过程。

## 1.2 人工降雨与泥石流起动试验

降雨对泥石流的发生具有触发作用, 观测和统计资料表明, 泥石流的发生往往存在一个临界雨量阈值。Nel Caine 于 1980 年首次提出了浅层滑坡和泥石流的降雨强度——历时阈值(ID)<sup>[9]</sup>, 并不断得到发展<sup>[10-11]</sup>。近年来, 中国众多地质灾害学者研究了降雨对泥石流发生的贡献以及泥石流发生降雨条件, 并基于雨量、雨强等降雨指标建立了一系列预测预报模型<sup>[12-13]</sup>。这期间, 越来越多的专家和学者采用人工降雨方法开展泥石流起动试验(表 2), 模拟、研究了人工降雨条件下水土耦合作用过程和泥石流起动过程。

表 2 人工降雨与泥石流起动试验汇总

Table 2 Representative experiments on artificial rainfall and debris flow initiation

模拟对象	试验场地	试验土体	试验内容	文献
蒋家沟泥石流	角砾土斜坡	角砾土	坡面流和坍塌所需总降雨水量(雨强 6 mm/min)	[14]
蒋家沟泥石流	老滑坡堆积坡地	砾石土	坡度、降雨变化下滑坡转化形成泥石流过程	[15]
蒋家沟泥石流	弯房子和大凹子斜坡	砾石土	人工降雨条件下土体特征参数和坡体变化情况	[16]
蒋家沟泥石流	大凹子沟中游斜坡	老滑坡堆积土	坡面泥石流形成过程(雨强 1 mm/min)	[17]
蒋家沟泥石流	试验槽(0.6 m×0.6 m×2.4 m)	大凹子沟堆积物	粘粒含量对土体破坏和泥石流起动的影响	[18]
蒋家沟泥石流	土槽(0.9 m×0.45 m×0.35 m)	源区坡积土	雨强与松散土体斜坡破坏模式响应	[19]
蒋家沟泥石流	试验箱(1.5 m×0.25 m×0.4 m)	砂土	雨强对砂土泥石流启动过程的影响	[20]
蒋家沟泥石流	模型槽(1.5 m×0.25 m×0.4 m)	砂土	含水量不同砂土体向泥石流转化的宏观破坏状态	[21]
魏家沟泥石流	梯形槽(底宽 0.35 m、0.52 m)	源区松散土	不同坡度下泥石流产生的时间及降雨量	[22]
后窗子泥石流	松散土体斜坡	泥岩残坡积土	坡面泥石流形成过程(雨强 2.5 mm/min)	[23]

大量泥石流发生降雨条件的统计以及人工降雨与泥石流起动试验成果的结合, 在很大程度上推动了中国泥石流灾害预测预报问题的解决和防灾减灾实践的突破。从表 2 可以看出, 近年来人工降雨与泥石流起动试验成为了中国泥石流机理与预测研究的热点, 尤其是最近 10 多年来, 中国众多专家学者开展了大量人工降雨诱发泥石流起动试验, 包括了室内泥石流起动模拟试验和室外泥石流起动原型试验。相比室外泥石流起动原型试验相比, 室内泥石流起动模拟试验具有灵活、可控的特点, 近年来中国人工降雨与泥石流起动试验的开展以室内物理模拟试验为主。从试验装置来看, 现行人工降雨诱发泥石流起动试验的人工降雨装置, 一般包含发电机、潜水泵、喷水管、喷头、支架和管线等, 部分人工降雨采用消防车等设施, 在不同强度降雨下雨滴大小、冲击能量和降雨分布密度基本满足试验的误差要求<sup>[24]</sup>。对于室内物理模拟试验, 试验槽的制作同水流冲刷与泥石流起动试验槽相似, 但槽宽明显变大, 均在 40 cm 以上。而对于室外泥石流起动原型试验, 试验场面积差别较大, 从数平方米到数十平方米。试验土体以宽级配砾石土为主, 但部分试验研究了粘土、砂土起动形成泥石流的过程。在试验的过程中, 土体水势、含水量、孔隙水压力和温度等特征参数的变化都进行了实时监测<sup>[24]</sup>。应变控制式三轴仪(如 TSZ30-2.0)<sup>[17]</sup>、精密的基质吸力测量仪器(如 PF-Meter 测量仪)<sup>[20]</sup>、Bromhead 环剪仪<sup>[25]</sup>也被用于泥石流起动物理模拟试验的研究。

从模拟对象来看, 中国泥石流灾害专家和学者开展的人工降雨与泥石流起动试验模拟对象主要针对蒋家

沟泥石流<sup>[14-21]</sup>,同时也包括汶川震区魏家沟泥石流<sup>[22]</sup>和昆明—嵩高高速公路后窗子坡面泥石流<sup>[23]</sup>。试验区涉及到了汶川震区等泥石流灾害易发区以及公路等人类工程活动强烈区。试验目的和试验内容可概括为两个方面:①人工降雨条件下坡面松散物质起动或滑坡转化为泥石流的机理和过程;②人工降雨条件下雨强、雨型等降雨过程以及坡度等地形因素和初始含水量、粘粒含量等物源因素对泥石流起动的影响。在试验的过程中,不同降雨条件与土体特征参数、土体的破坏方式和泥石流起动过程之间的响应为主要观测和研究内容。取得的泥石流形成条件和起动物理方面的认识,主要包括以下两大方面:

(1) 试验揭示了坡面松散物质起动或滑坡转化形成泥石流的优越条件。土体方面,试验土体主要为宽级配砾石土,人工降雨条件下泥石流起动试验重点研究了粘粒含量对降雨型泥石流起动的影响。Chen等<sup>[18]</sup>通过试验发现,当粘粒含量从1.0%增加到7.5%时,孔隙水压力逐渐增大,粘粒含量为7.5%时,孔隙水压力上升最大,但当粘粒含量从7.5%到18.0%时,孔隙水压力逐渐减小,表明粘粒含量为7.5%的土体易于发生泥石流;高冰等<sup>[20]</sup>则通过试验从细颗粒在雨水作用下的运动和流失方面提出了细颗粒是导致堆积土体内部力学变化以及从短暂的流土状态转化为泥石流的主要因素;水源方面,人工降雨条件下泥石流起动试验重点研究了雨强、历时以及土体含水量与泥石流起动的关系。王裕宜等<sup>[14]</sup>通过试验发现土体含水量超过11.5%时,容易形成坡面流,陈晓清等<sup>[16]</sup>开展的试验表明土体遭受破坏时并不一定全部处于饱和状态,在非饱和状态下土体也可能破坏。水源条件的认识对泥石流预警预报将具有重要的参考价值;另外,近年来借助人工降雨与泥石流起动试验的开展,关于地形、降雨、物源补给等组合条件的规律也进一步显现。李驰等<sup>[22]</sup>在模拟北川魏家沟泥石流起动时发现相同雨强条件下,坡度越大,泥石流起动时间越短;相同坡度条件下,随雨强增加,泥石流起动所需总雨量减小,而当雨强逐渐减小时,泥石流起动时间越慢。

(2) 试验印证了人工降雨条件下坡面松散物质起动或滑坡转化为泥石流的机理和过程。陈晓清等<sup>[16]</sup>通过人工降雨试验发现蒋家沟砾石土滑坡转化为泥石流属于震动软化或液化机制,滑坡起动与泥石流形成是一个连续过程,土体破坏过程中表现出了泥石流的特征;Chen等<sup>[18]</sup>根据试验将土体失稳产生泥石流的过程分为5个过程:产生径流、土体开裂、土体开溜、土体溜滑和产生泥石流;胡明鉴和汪稔<sup>[15]</sup>通过试验发现泥石流形成主要包括表层松散体流失—溜滑、崩塌—崩塌、溜滑体前缘堆载—细沟侵蚀—崩塌牵引滑坡—自身重力和含沙水流混合形成泥石流等环节;何晓英等<sup>[23]</sup>根据后窗子坡面泥石流起动试验将泥石流形成、运动和堆积过程划分为5个阶段:吸水强度降低、蠕滑、局部滑动、快速流动和堆积。周健等<sup>[21]</sup>透过试验现象将泥石流起动概括为4个过程:浸润区形成、滑动面出现、土体拉裂和泥石流起动。中国台湾学者Huang和Yuin<sup>[26]</sup>通过室内人工降雨与浅层斜坡失稳物理模拟试验,研究了斜坡失稳与土体含水量和孔隙水压力变化响应以及斜坡渐进性破坏与碎屑流转化的过程。综合近年来开展的人工降雨条件下坡面松散物质起动与泥石流形成试验,越来越多的现象表明土力类泥石流形成多表现为降雨入渗与土体含水量增加、超渗产流、土体强度衰减破坏、崩滑土体失稳、泥石流形成的过程。但不同试验表明这些过程会随着不同雨强而表现出差异。高冰等<sup>[20]</sup>通过试验发现不同雨强下斜坡产生了不同的水土力学作用现象,当雨强较小时,堆积土体形成了以块体滑移为主的块体滑动性泥石流;在强降雨条件下,堆积土体形成以表面冲蚀为主的流滑性泥石流;尹洪江等<sup>[19]</sup>开展的试验则呈现出低雨强作用下,土体破坏以坡面侵蚀为主,中高雨强作用下,先后呈现出坡面、沟道侵蚀和大规模溜滑的规律。

## 2 展望与建议

为了进一步对照国内外泥石流起动物理模拟试验开展情况,本文收集、分析了近年来国外学者针对泥石流起动开展的典型物理模拟试验。从模拟对象来看,国外学者主要针对坡面泥石流<sup>[27-28]</sup>、滑坡转化形成泥石流<sup>[9-11,30-31]</sup>以及沟床沉积物起动形成泥石流<sup>[32-36]</sup>开展模拟试验。坡面泥石流起动试验通过岩土梁离心机模拟试验、环剪试验等手段分别研究了斜坡土体失稳与泥石流起动过程中渗流、表流的贡献作用<sup>[27]</sup>,土壤团聚体孔隙率和胀缩特性关系<sup>[28]</sup>以及土体细颗粒含量与孔隙水压力变化<sup>[29]</sup>;多数滑坡转化形成泥石流试验的

开展基于土体临界状态理论,部分试验表明滑坡向泥石流转化主要受松散土体孔隙压力的影响,然而稠密土体滑坡也被证实强降雨条件下存在向泥石流转化的可能<sup>[30-31]</sup>。沟床沉积物起动形成泥石流试验的开展主要通过水槽实现,分别研究了沟床堆积物粒度与侵蚀速率的关系<sup>[32]</sup>、表层覆盖(如燃烧灰)对流体密度、径流流量、携带能力的影响以及泥石流演化的关系<sup>[35]</sup>。综上所述可以看出,国外泥石流起动物理模拟试验的开展正朝着精细化、微观化、多因素关联化方向发展<sup>[37]</sup>。针对国内泥石流起动物理模拟试验的开展,建议如下:

### 2.1 泥石流起动物理模拟试验的相似性

相似性是试验科学与成功的重要前提。根据中国降雨型泥石流起动试验研究现状,目前泥石流模型试验研究还没有成熟的相似律<sup>[24]</sup>,今后中国降雨型泥石流起动试验开展应进一步考虑物理模拟试验中的相似性问题,包括与泥石流起动相对应的初始条件相似、边界条件相似、几何相似、材料相似、物理相似、运动相似等。目前中国降雨型泥石流起动试验开展考虑较多的是几何相似性,普遍采用缩尺结构从试验槽尺寸、试验土样配置等方面予以保障。然而,其他相似性有待于进一步考虑,如水流浓度的相似性、人工降雨类型与降雨过程的相似性、泥石流物源补给方式的相似性等。

### 2.2 水流浓度与泥石流起动过程的试验

以往水流冲刷与泥石流起动试验主要观测研究水流流量与泥石流起动的响应,水流一般为清水。然而,山区沟谷发生的水力类泥石流一般是在洪水或高含沙水流冲刷、铲刮沟床堆积物而形成泥石流。王兆印和张新玉<sup>[3]</sup>开展的水流冲刷沉积物生成泥石流及运动规律试验证明了这一点,沟床物质起动取决于单位时间内液相流相对流动提供的能量,这个能量与水流浓度有关;唐川和章书成<sup>[38]</sup>在分析床面堆积碎屑在水流作用下参加运动从而形成泥石流的条件时,研究了水流作用剪力与碎屑堆积层抗剪力的关系,水流作用剪力同样与液相重相关。因此,水流冲刷与泥石流起动试验应进一步加强不同水流浓度与泥石流起动响应的研究。

### 2.3 降雨类型、降雨过程与泥石流起动过程的试验

以往人工降雨与泥石流起动试验的开展,人工降雨绝大多数根据给定的降雨强度采用持续性、均匀性降雨的方式研究降雨对泥石流起动的影响。然而,山区泥石流的发生是一个天地耦合的过程,与降雨过程关系密切。崔鹏等<sup>[39]</sup>以蒋家沟泥石流形成为例,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贡献。部分学者虽然通过不同土壤含水率代表前期降雨过程对泥石流的影响<sup>[14]</sup>,但降雨过程本身极为复杂多变,其对下垫面泥石流土体的影响和触发作用更为复杂。为了进一步反映降雨对山区泥石流发生的影响和作用,中国人工降雨与泥石流起动试验的开展应全面采用雨型、雨量、雨强来表征对应的降雨过程,增强降雨型泥石流起动模拟试验的相似性,使得泥石流起动物理研究在水土耦合机制、土体结构参数动态化等方面向精细化方向或微观方向发展。

### 2.4 物源补给方式与泥石流起动过程的试验

以往开展的泥石流起动模拟试验,物源补给以单一方式为主。水流冲刷与泥石流起动试验中主要考虑揭底方式形成泥石流,人工降雨与泥石流起动试验中尤以滑坡转化形成泥石流研究较多。然而,山区松散物源补给泥石流的方式往往相互交叉。泥石流起动试验开展应进一步考虑降雨汇流或沟道洪流对沟道的侵蚀作用及其对岸坡、滑坡等稳定性的影响。因此,今后泥石流起动物理模拟试验应朝着人工降雨—流域汇流—物源补给(岸坡体崩滑、沟床质揭底)—泥石流起动—泥石流沟演化的综合性试验发展。

### 2.5 土体物理力学特征变化与泥石流起动过程的试验

土体失稳补给过程是泥石流形成与致灾的关键环节。在水土作用过程中,土体的物理力学特性发生着明显的变化,而在失稳过程中,这些物理力学特性往往相互关联并存在临界状态条件。土体的结构、粒度分布、孔隙度、含水率、孔隙水压力状态以及所处斜坡、沟床的坡度、雨水的入渗、土体内部渗流、地表和沟道径流的侵蚀都是影响土体物理力学特征变化和泥石流起动的重要因素。部分学者逐步开展了降雨条件下土体类型、斜坡坡度、土体侵蚀阻力与斜坡稳定性关系试验、土体偏应力试验、粘粒含量对泥石流起动影响试验、土壤湿度与压力和浅层滑坡失稳转化泥石流试验等,但进一步基于不同土体物理力学特征条件及其组合条件,开展泥石流起动物理模拟试验有利于对泥石流起动条件的深入认识。

### 3 结 语

(1) 物理模拟试验成为了深入认识泥石流形成条件和起动机理的重要手段之一。近年来中国主要开展的泥石流起动物理模拟试验可归结为两类,即水流冲刷与泥石流起动试验以及人工降雨与泥石流起动试验。水流冲刷与泥石流起动试验主要研究了物源条件(物质组成、颗粒级配和含水状况)、水源条件(水流或泥浆的流量、浓度)、下垫面条件(模拟槽的底床坡度、糙率等)及这些条件的组合对泥石流起动的影响和控制作用,揭示了不同组合条件下泥石流起动的临界条件、运动过程和内部规律;人工降雨与泥石流起动试验主要研究了人工降雨条件下雨强、雨型等降雨过程以及坡度等地形因素和初始含水量、粘粒含量等物源因素对泥石流起动的影响,揭示了人工降雨条件下坡面松散物质起动或滑坡转化为泥石流的机理和过程。泥石流起动物理模拟试验的开展对泥石流起动机理研究和防灾减灾实践起到了积极的参考作用。

(2) 泥石流起动物理模拟试验是一项非常复杂的课题,由于试验条件的限制和泥石流起动过程本身的复杂性,每一次试验过程所揭示的试验现象仅与特定的试验条件相对应,因此,泥石流起动试验的开展既具有特定性和不可重复性,也具有较大的局限性。在国内外泥石流起动物理模拟试验对照基础上,建议中国泥石流起动物理模拟试验的开展应进一步考虑水流浓度、降雨雨型、土体特征与物源补给方式等方面的相似率问题,加强降雨和汇流共同作用下土体物理力学特征变化、物源补给以及泥石流起动响应研究,使得泥石流起动物理模拟试验在水土耦合作用机制、土体结构参数动态化等方面向精细化和综合性方向发展。

**致谢:** 国土资源部成都地质矿产研究所徐伟工程师为本文撰写收集、提供资料,深表感谢。

#### 参考文献:

- [1] 康志成,李焯芬,马藹乃,等.中国泥石流研究[M].北京:科学出版社,2004,5-15.(KANG Zhicheng, LI Zhuofen, MA Aina, et al. Debris flow research in China[M]. Beijing: Science Press, 2004, 5-15. (in Chinese))
- [2] 崔鹏.我国泥石流防治进展[J].中国水土保持科学,2009,7(5):7-13.(CUI Peng. Advances in debris flow prevention in China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(5): 7-13. (in Chinese))
- [3] 王兆印,张新玉.水流冲刷沉积物生成泥石流的条件及运动规律的试验研究[J].地理学报,1989,44(3):291-301.(WANG Zhaoyin, ZHANG Xinyu. Experimental study of formation and laws of motion of debris flow[J]. Acta Geographica Sinica, 1989, 44(3): 291-301. (in Chinese))
- [4] 张丽萍,唐克丽,张平仓,等.泥石流源地松散体起动人降雨模拟及放水冲刷实验[J].山地学报,1999,17(1):45-49.(ZHANG Liping, TANG Keli, ZHANG Pingcang, et al. Experiments of artificial simulation rainfall and setting water initiating accumulated material in debris flow origin place[J]. Journal of Mountain Science, 1999, 17(1): 45-49. (in Chinese))
- [5] CUI Peng. Studies on condition and mechanism of debris flow by means of experiment[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(9): 759-763.
- [6] 解明曙,王玉杰,张洪江.沟道松散堆积物形成泥石流的水动力条件分析及其数学模型[J].北京林业大学学报,1993,15(4):1-11.(XIE Mingshu, WANG Yujie, ZHANG Hongjiang. The deposit analysis of water dynamic conditions to form debris flow and to set up mathematical model in debris flow valley[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1993, 15(4): 1-11. (in Chinese))
- [7] 徐友宁,曹琰波,张江华.基于人工模拟试验的小秦岭金矿区矿渣型泥石流起动研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1388-1395.(XU Youning, CAO Yanbo, ZHANG Jianghua. Research on starting of mine debris flow based on artificial simulation experiment in Xiaoqinling gold area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1388-1395. (in Chinese))
- [8] ZHUANG J, CUI P, PENG J, et al. Initiation process of debris flows on different slopes due to surface flow and trigger-specific strategies for mitigating post-earthquake in old Beichuan county, China[J]. Environmental Earth Science, 2013, 68(5): 1391-1403.
- [9] CAINE N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows[J]. Geografiska Annaler, 1980, 62: 23-27.
- [10] FAUSTO G, SILVIA P, MAURO R, et al. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update [J]. Landslides, 2008, 5: 3-17.

- [11] TSAI T L. The influence of rainstorm pattern on shallow landslide[J]. *Environmental Geology*, 2008, 53: 1563-1569.
- [12] 周伟, 唐川, 周春花. 汶川震区暴雨泥石流激发雨量特征[J]. *水科学进展*, 2012, 23(5): 650-655. (ZHOU Wei, TANG Chuan, ZHOU Chunhua. Critical rainfall characteristics for rainfall-induced debris flows in Wenchuan earthquake affected areas [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(5): 650-655. (in Chinese))
- [13] 周伟, 唐川. 汶川震区暴雨泥石流发生的降雨阈值[J]. *水科学进展*, 2013, 24(6): 1-9. (ZHOU Wei, TANG Chuan. Rainfall thresholds for debris flows in Wenchuan earthquake area [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(6): 1-9. (in Chinese))
- [14] 王裕宜, 邹仁元, 李昌志. 泥石流土体侵蚀与始发雨量的相关性研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(6): 34-38. (WANG Yuyi, ZOU Renyuan, LI Changzhi. Study on relationship between erosion of debris flows and critical rain quantity [J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(6): 34-38. (in Chinese))
- [15] 胡明鉴, 汪稔. 蒋家沟流域暴雨滑坡泥石流共生关系试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(5): 824-828. (HU Mingjian, WANG Ren. Testing study on the correlation among landslide, debris flow and rainfall in Jiangjia valley [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(5): 824-828. (in Chinese))
- [16] 陈晓清, 崔鹏, 冯自立, 等. 滑坡转化泥石流起动的人工降雨试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(1): 106-116. (CHEN Xiaqing, CUI Peng, FENG Zili, et al. Artificial rainfall experimental study on landslide translation to debris flow [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(1): 106-116. (in Chinese))
- [17] 吕立群, 陈宁生, 卢阳, 等. 基于人工降雨实验的坡面泥石流启动力学计算[J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(1): 52-59. (LYU Liqun, CHEN Ningsheng, LU Yang, et al. Mechanical model of slope debris flow initiation based on artificial rainfall experiment [J]. *Journal of Natural Disaster*, 2013, 22(1): 52-59. (in Chinese))
- [18] CHEN N S, ZHOU W, YANG G L, et al. The processes and mechanism of failure and debris flow initiation for gravel soil with different clay content [J]. *Geomorphology*, 2010, 121(3/4): 222-230.
- [19] 尹洪江, 王志兵, 胡明鉴. 降雨强度对松散堆积土斜坡破坏的模型试验研究[J]. *土工基础*, 2011, 25(3): 74-76. (YIN Hongjiang, WANG Zhibing, HU Mingjian. Influence of rainfall intensity on loose deposits slopes failure by model tests [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2011, 25(3): 74-76. (in Chinese))
- [20] 高冰, 周健, 张皎. 泥石流启动过程中水土作用机制的宏微观分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(12): 2567-2573. (GAO Bing, ZHOU Jian, ZHANG Jiao. Macro-meso analysis of water-soil interaction mechanism of debris flow starting process [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(12): 2567-2573. (in Chinese))
- [21] 周健, 高冰, 张皎, 等. 初始含水量对砂土泥石流启动影响作用分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(5): 1042-1048. (ZHOU Jian, GAO Bing, ZHANG Jiao, et al. Influence of initial water content on sandy debris flow starting process [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(5): 1042-1048. (in Chinese))
- [22] 李驰, 朱文会, 鲁晓兵, 等. 降雨作用下滑坡转化泥石流分析研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(增刊1): 499-505. (LI Chi, ZHU Wenhui, LU Xiaobing, et al. Study on landslide translating into debris flow under rainfall [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(suppl 1): 499-505. (in Chinese))
- [23] 何晓英, 陈洪凯, 刘虎队. 昆明—嵩明高速公路后窗子坡面泥石流形成机制试验研究[J]. *公路*, 2011, 56(7): 8-12. (HE Xiaoying, CHEN Hongkai, LIU Hudui. Experiment and study on formation mechanism of Houchuangzi slope debris flow along Kunming-Songming expressway [J]. *Highway*, 2011, 56(7): 8-12. (in Chinese))
- [24] 王协康, 方铎. 泥石流模型试验相似律分析[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2000, 32(3): 9-12. (WANG Xiekang, FANG Duo. Study on laws of debris flow model similarity [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2000, 32(3): 9-12. (in Chinese))
- [25] DAI F C, LEE C F, WANG S J. Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong [J]. *Engineering Geology*, 1999, 51: 279-290.
- [26] HUANG C C, YUIN S C. Experimental investigation of rainfall criteria for shallow slope failures [J]. *Geomorphology*, 2010, 120: 326-338.
- [27] MILNE F D, BROWN M J, KNAPPETT J A, et al. Centrifuge modelling of hillslope debris flow initiation [J]. *Catena*, 2012, 92: 162-171.
- [28] IVERSON N R, MANN J E, IVERSON R M. Effects of soil aggregates on debris-flow mobilization; Results from ring-shear experiments [J]. *Engineering Geology*, 2010, 114: 84-92.
- [29] GREGORETTI C. Experimental evidence from the triggering of debris flow along a granular slope [J]. *Phys Chem Earth (B)*,

- 2000, 25(4): 387-390.
- [30] MONTRASIO L, VALENTINO R. Experimental analysis and modelling of shallow landslides[J]. *Landslides*, 2007, 4: 291-296.
- [31] GABET E J, MUDD S M. The mobilization of debris flows from shallow landslides[J]. *Geomorphology*, 2006, 74: 207-218.
- [32] EGASHIRA S, HONDA N, ITOH T. Experimental study on the entrainment of bed material into debris flow[J]. *Phys Chem Earth (C)*, 2001, 26(9): 645-650.
- [33] BERTI M, GENEVOIS R, SIMONI A. Experimental evidences and numerical modeling of debris flows initiated by channel runoff [J]. *Landslides*, 2005, 2: 171-182.
- [34] BRAYSHAW D, HASSAN M A. Debris flow initiation and sediment recharge in gullies[J]. *Geomorphology*, 2009, 109: 122-131.
- [35] GABET E J, SETMBERG P. The effects of vegetative ash on infiltration capacity, sediment transport, and the generation of progressively bulked debris flows[J]. *Geomorphology*, 2008, 101: 666-673.
- [36] GIANNECCHINI R, NALDINI D, AVANZI G, et al. Modelling of the initiation of rainfall-induced debris flows in the Cardoso basin (Apuan Alps, Italy) [J]. *Quaternary International*, 2007, 171/172: 108-117.
- [37] CABALLERO L, SAROCCHI D, BORSELLI L, et al. Particle interaction inside debris flows: Evidence through experimental data and quantitative clast shape analysis[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2012, 231/232: 12-23.
- [38] 唐川, 章书成. 水力类泥石流启动机理与预报研究进展与方向[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(8): 787-793. (TANG Chuan, ZHANG Shucheng. Study progress and expectation for initiation mechanism and prediction of hydraulic-driven debris flows[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(8): 787-793. (in Chinese))
- [39] 崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献: 以蒋家沟泥石流形成为例[J]. *中国水土保持科学*, 2003, 1(1): 11-15. (CUI Peng, YANG Kun, CHEN Jie. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: Taking the Jiangjia gully as an example[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, 1(1): 11-15. (in Chinese))

## Advances in the physical simulation experiment on debris flow initiation in China \*

NI Huayong<sup>1,2</sup>, TANG Chuan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** As debris flows usually occur abruptly and rapidly in mountainous areas, it is difficult to observe their initiation and occurrence process. Therefore, the physical simulation experiment has been adopted as an important method to study debris flow initiation mechanism by more and more scientists. In recent years, many physical simulation experiments have been carried out and related phenomenon have played an important role both in mechanism research and in disaster mitigation. However, compared to the complex process of debris flow initiation and occurrence, there usually are some limits in the condition of physical simulation experiments. In this paper, based on data collection and analysis, advances in the physical simulation experiments including runoff type and artificial rainfall type were summarized in detail. And then by comparing the experimental study progress of both nationwide and worldwide, some factors that should be further taken into account in the physical simulation experiments on debris flow initiation were discussed. In the end of this paper, some related advices on future physical simulation experiments on debris flow initiation were put forward in the following aspects: To further improve the similarity of experimental condition, such as runoff density, rainfall type and soil characteristics, to further study the relation between debris flow initiation and the physical and dynamic variation of soil mass, and to further carry out some comprehensive experiments in which all the rainfall process, runoff process and material-supplying process are all involved.

**Key words:** debris flow; initiation; physical simulation experiment; runoff entrainment; artificial rainfall

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41102226).