

泥石流起动机理研究现状及趋势^{*}

贺 拿^{1,2}, 陈宁生¹, 曾 超^{1,2}

(1. 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所, 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 概述了国内外泥石流起动机理研究(实验研究及理论研究)的现状,在归纳总结前人研究成果的同时,分析其研究的不足,同时提出泥石流起动机理未来的研究方向。未来的研究应该以土力学及水力学、渗流力学等学科为基础,揭示泥石流土体的动态变化过程,从静态向动态、从单因素向多因素、从定性向定量方向转化,并结合土体的动态破坏过程及需水条件构建泥石流起动的模型。泥石流起动机理的研究不仅可以为泥石流的预测预报提供科学依据,同时也可以推动泥石流学科的发展。

关键词: 泥石流; 起动模型; 实验研究; 理论研究; 研究趋势

中图分类号: P642.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)01-0121-05

0 引言

泥石流是一种突发性的自然灾害,因给人民生活造成深重灾难而引起人们的广泛关注^[1-2]。泥石流起动机理研究是减轻泥石流灾害的关键所在。目前,泥石流的防灾减灾工作主要集中在预报方面(基于临界雨量),而认清泥石流起动机理是准确预报的前提。因此,泥石流起动机理的研究显得尤为重要。

泥石流起动研究是泥石流研究的核心,也是灾害防治的基础^[3]。经过国内外科研人员近半个世纪的努力,在理论及实验方面都取得了可喜的成果:根据调查研究摸清了我国泥石流总体的分布规律、发育特征;开展了与泥石流起动、运动过程及成灾规律等相关的研究,并建立了相应的模型。对产流、汇流、结构、流变、流态等当今研究的重点、热点和难点,进行了深入探索,取得了重要的进展,完善了泥石流的理论体系,在泥石流起动研究的基础上,建立了泥石流预测、预报模型^[1]。杜榕桓、吴积善、康志成等学者在中国泥石流形成机理方面进行了开创性研究工作,并在云南小江流域建立了东川泥石流观测研究站,积累了大量宝贵的观测资料^[4-6]。张洪江^[7]针对北京市密云县境内密云水库上游山洪泥石流发生特点,以系统科学为基本思想,将 bayes 判别分析法引入山区小流域山洪泥石流预报模型建立之中,为泥石流起动的研究提供了新的方法。

目前对泥石流起动机理方面的研究主要以野

外观测研究、实验研究及理论研究为主。野外观测研究多是现场考察,掌握不同流域的概况,结合实时监测仪器收集的数据分析泥石流起动的条件;实验研究包括室内试验和野外实验,野外实验主要是通过控制泥石流起动的各种条件(降雨、松散物质情况以及坡度等),重现泥石流起动的过程,同时借助各种技术手段(摄像机、孔压传感器、实时含水量传感器以及水势仪器等)获得各种不同的组合条件下泥石流的起动规律;室内实验主要是通过各种仪器(三轴仪、水槽装置等),获取泥石流土体的各特征参数及不同部位土体的结构变化特征。理论研究主要是集中在定性方面,近些年来在定量研究方面做了很多尝试,但由于泥石流起动受诸多因素的影响,在研究工作的开展过程中无法全面考虑各因素,野外原位实验开展的难度也较大,研究过程中又不可避免的进行各种假设,因此定量研究的成果相对较少。但是目前所取得的定量方面的成果在一定程度上揭示了泥石流起动的本质,也推进了泥石流起动机理的研究。

1 野外调查研究

随着国家对泥石流等灾害的重视,云南东川蒋家沟泥石流观测研究站、九寨沟泥石流综合研究站、泥石流动力学模拟实验室等相继建立,这些台站为国内外泥石流学者和专家提供了较好的科研条件和基地,有力地推动了泥石流学科的发展^[1]。

^{*} 收稿日期: 2012-07-16 修回日期: 2012-08-29

基金项目: 十二五国家科技支撑项目(2011BAK12B02)

作者简介: 贺拿(1984-),男,河南永城人,博士研究生,研究方向为山地灾害及其动力过程. E-mail: hn61886@163.com

通讯作者: 陈宁生(1965-),男,福建南安人,研究员,博士生导师,研究方向为山地灾害形成机理与防治.

E-mail: chennsh@imde.ac.cn

随着科技的进步,各种野外设备可以实时动态的收集各种数据(降雨量、水文条件等),收集的数据可以辅助科研人员结合野外观测更好的开展泥石流起动机理方面的研究工作。2008年5月12日汶川8级地震发生后,泥石流、崩塌、滑坡等山地灾害频发,通过野外调查及观测^[8-9]发现,地震导致大面积坡面岩土体松动,为泥石流的启动提供了丰富的物源。唐川等^[10]根据现场调查和航空图像解译,分析了红椿沟泥石流流域特征,特别是地震条件下的泥石流物源特征,讨论了泥石流启动过程和堆积过程。

野外调查的基础上,结合各种野外仪器及设备获取不同流域的资料及数据,对泥石流的启动进行分析,可以获得初步的结论,有助于将泥石流启动从现象推到本质、从外部因素向内部形成机理的推进。

2 实验研究

随着泥石流启动研究的深入,更多的研究者开始从观测现象转变到实验研究。王裕宜^[11]研究了泥石流启动与渗透系数的关系,并结合临界降雨量对泥石流起动机理进行了探讨;刘激雷^[12]研究了泥石流土体的抗剪强度指标值与含水量的关系,并尝试以极限平衡理论为基础,探讨泥石流起动机理;陈中学^[13]通过模型槽人工降雨试验,初步探讨了粘粒含量对泥石流启动的影响,从更深层次揭示了泥石流形成的内在机制;魏厚振^[14-15]以蒋家沟砾石土为土样,在不同的含水率以及不同的粗颗粒含量条件下通过直剪试验对比其强度特征,得出结论:不同的含水率砾石土的强度特征对泥石流启动具有重要意义。尹洪江^[16]通过模型试验研究松散斜坡土体在降雨作用下失稳形成泥石流的过程及特点。潘华利^[17]对泥石流沟道侵蚀的模式和影响因素进行了研究,建立了泥石流沟道侵蚀特征与泥石流运动特征参数之间的量化关系。陈宁生^[18]通过实验研究了泥石流源区砾石土体在地震作用下强度的衰减特征,并结合野外考察和理论计算,得出地震作用下泥石流源区砾石土强度降低是泥石流启动的主要原因。王志兵^[19]通过试验证实了颗粒运移对泥石流土体渗透性的影响,对泥石流的启动研究奠定了基础,为今后水土耦合作用下土体结构的变化,进而导致强度降低并最终失稳发生泥石流提供了较好的研究思路。

2.1 Takahashi 的实验研究

在高山地区,土壤侵蚀到一定程度后松散物质在径流作用下产生泥石流。Takahashi^[20]提出了此类泥石流的启动关键,通过试验发现泥石流启动是沟道中松散堆积物的剪应力大于阻力引起的,是沟床堆积物在降雨所产生的表面径流或地下径流作用的结果,并运用拜格诺的颗粒流理论,解

释了这类泥石流在启动过程中颗粒之间相互作用及流态化现象,即在启动时固体颗粒彼此碰撞,土体结构改变,空隙增大,水体进入,由此两相体滑移层间有动量交换,使流体中固体颗粒呈分散体系,并且具有弥散应力,使其具有流体状态特征;通过实验发现不同的松散物质特性、沟床比降、表面水流流速等对起动机理有重要影响。

Takahashi 运用颗粒流理论对此类泥石流启动过程中颗粒间的相互作用及流态化现象做了解释,但是计算两相流之间的动量交换时,需要对两相流之间的分界粒径进行界定,目前还没有统一的标准界定此粒径值,大多都是根据试验现象或经验来确定,这会造成计算结果的主观性及不确定性。此外固体颗粒可能会有聚结现象,在水分作用下聚集的土颗粒分离,如果依然按照拜格诺颗粒流计算会使实验结果与实际有较大偏差,不能客观、真实的反映泥石流起动机理。

2.2 崔鹏的实验研究

崔鹏^[21-23]通过小型模拟实验装置,以九寨沟内的树正沟为模拟原型,通过实验给出了泥石流启动的定义:即准泥流体在水分、自重和其它外力作用下,结构改变,强度降低,失稳下移的过程。通过对实验结果的分析认为底床坡度、水分状况和颗粒级配在泥石流的启动过程中起着决定作用。在实验中依据细颗粒含量将泥石流的起动机理分为“加速机理”“分离机理”和“连接机理”,与之相对应,分别形成加速启动、常速启动和缓慢启动。

该实验总结了泥石流启动的影响因素以及细颗粒在泥石流土体中的作用。如果能将该实验在相似的条件下去其它流域开展,不仅可以验证该实验的结果,同时可以完善该实验所得的结论。在分析细颗粒含量对泥石流启动的影响时,此实验仅停留在静态分析,如果能将颗粒运移对土体强度的影响考虑进去,在颗粒级配动态化的基础上揭示泥石流启动的本质,实验将更加完善。

2.3 Iverson 的实验研究

Iverson^[24-28]开展了泥石流启动实验,实验主要集中在影响泥石流启动的三个水力条件:土体内部径流、中强度及高强度降雨。通过实验得出不同的水力条件下泥石流的启动模式,认为土体内孔隙水压力的急剧增加及部分土体液化极大地促进了泥石流的启动;并通过一维无限边坡模型定量分析了孔隙水压力及土颗粒温度对土体从库仑破坏向土体液化的影响,泥石流土体中的流体主要是由水、淤泥质颗粒及粘粒组成,具有高度的粘性及不可压缩性,颗粒及粘性流体之间的摩擦、碰撞可以同时使土颗粒之间的动量进行转换,固体颗粒的动能及流体的压力有助于颗粒之间运动的传递,也促进了泥石流的启动。

该实验从孔隙水压力入手,将土体破坏与泥石流启动联系起来,并从土力学角度(有效应力与孔隙水压力的关系)解释泥石流启动的过程,同时

考虑粘性颗粒在孔隙水中的作用, 在当时极大的推动了泥石流起动的研究。但限于当时的实验条件并没有将粘性颗粒含量定量化, 也没有考虑土体级配的差异以及由此而对土体强度造成的影响。

2.4 胡明鉴等的实验研究

胡明鉴^[29-30]通过实验研究了蒋家沟流域坡面侵蚀特征及坡面松散砾石土的侵蚀过程, 得出流域的物质成分、结构构造和气候等因素是导致蒋家沟流域滑坡、泥石流灾害频繁发生的主要原因。试验^[31]从物质条件、结构条件、雨强、降雨量、降雨入渗以及土体力学性质改变等多个方面阐述降雨对滑坡、泥石流的诱发过程, 以土体结构为立足点, 探讨了降雨导致土体结构的变化, 由此导致土体粘聚力及内摩擦角的降低, 在持续的降雨条件下土体破坏发生泥石流, 该实验充分认识了土体结构的重要性。陈中学^[32]将泥石流起动的影响因素分为内因及外因。在室内对蒋家沟泥石流源区土体进行黏土矿物分析、颗粒分析、化学成分定量分析、分散度和 ESP 值测试、地下水分析, 初步探讨了蒋家沟泥石流形成的内在原因, 并得出泥石流土体的粘土矿物成分、粗颗粒及细颗粒含量之间的比例关系对泥石流的起动有重要影响。但是该结论仅在定性方面进行了描述, 粗、细颗粒比例的定量化关系以及由此对泥石流土体强度的影响没有进行深入研究。

3 理论研究

目前, 在泥石流起动理论研究方面取得了可喜的成果, 但并没有形成一套比较完善的体系。鲁晓兵^[33]对土体振动和冲刷进行受力分析, 研究了滑坡泥石流起动的条件。矫滨田^[34]通过试验研究了细颗粒运移对滑坡泥石流起动的影响, 总结了细颗粒在土体中的运移及聚集现象, 结合土体的渗流特性及孔隙水压力解释泥石流的起动, 这在很大程度上推动了泥石流起动的研究, 也为泥石流起动研究提供了一个新的思路, 并用试验验证了细颗粒与泥石流起动息息相关。陈晓清^[35]通过泥石流起动原型试验, 描述了暴雨泥石流的形成过程。庄建琦通过实验^[36]研究了不同坡度情况下的形成模式和机理, 并得出结论: 不同的坡度情况下, 泥石流的起动模式也不同。陈宁生^[37]通过研究发现, 粘粒含量对泥石流的起动有重要的影响。很多研究也得出同样的结论^[38-39]。

虽然这些研究都只是集中于泥石流起动诸多影响因素中的某一个或某几个方面, 但却为将来理论研究的工作打下了坚实的基础, 为完善泥石流起动理论的研究提供了较有价值的参考。

3.1 非饱和土力学理论

戚国庆^[40-41]根据非饱和土力学理论(公式 1), 对降雨型泥石流的起动机理进行了研究。

$$T = C' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b, \quad (1)$$

式中: C' 为 Mohr-Coulomb 破坏包线与剪应力轴的截距; σ_f 为破坏时在破坏面上的法向总应力; u_a 为破坏时在破坏面上的孔隙气压力; u_w 为破坏时在破坏面上的孔隙水压力; $(u_a - u_w)_f$ 为破坏时破坏面上的基质吸力; ϕ' 为与净法向应力状态变量 $(\sigma_f - u_a)_f$ 有关的内摩擦角; ϕ^b 为抗剪强度随基质吸力 $(u_a - u_w)_f$ 而增加的速率; $(u_a - u_w)_f \tan \phi^b$ 为基质吸力 $(u_a - u_w)_f$ 引起的抗剪强度。

依据非饱和土力学理论将降雨型泥石流的起动划分为两个阶段: ①非饱和固体松散物质由于含水量持续增加, 达到饱和状态, 基质吸力引起的抗剪强度丧失阶段; ②饱和的固体松散物质由于含水量持续增加, 水压力增大, 有效应力减小, 起动发生泥石流。研究发现降雨型泥石流的发生是前期待效降雨量和短历时雨强共同作用的结果。当前期待效降雨使固体松散物质达到饱和状态后, 就进入降雨型泥石流形成的第二阶段。此时, 饱和的松散物质起动与否的判别式^[42]为:

$$K = \frac{(\sigma - u_w) \tan \phi + AC}{T + G \sin \beta}, \quad (2)$$

式中: A 为固体松散物质与沟床的接触面积; G 为固体松散物质重量; T 为水流推力, 其值较小, 为次要影响因素; β 为沟床底坡坡度; K 为固体松散物质稳定性系数, 当 $K=1$ 时, 饱和固体松散物质处于极限状态; 当 $K>1$ 时, 饱和固体松散物质处于稳定状态, 不会发生泥石流; 当 $K<1$ 时, 饱和固体松散物质处于不稳定状态, 将会发生泥石流。

该研究通过非饱和土力学原理研究降雨型泥石流形成机理, 通过对可能形成泥石流的松散物质的非饱和物理力学性质的研究, 预先判断在降雨条件下, 会不会发生泥石流以及所需要的降雨条件和雨型, 从而为泥石流的准确预报提供更强有力的理论依据。

3.2 泥石流起动的水文——力学耦合模型

G Klubertanz^[43]通过小变形弹塑性理论探讨了固体松散物质转变为泥石流的过程, 研究了各不同因素对泥石流起动的影响, 通过研究发现坡度在土体转变为泥石流的过程中所起的作用最小, 与饱和度有关的土体的渗透性对泥石流的起动起着至关重要的作用, 提出泥石流起动模型应该解决的三个关键问题: 泥石流起动的位置、泥石流起动的时间及可能的起动量。同时强调在建立泥石流起动模型时尽量少进行假设, 而且要使泥石流起动的模型具有较好的灵活性。

美国科学家 Joseph E Gartner^[44]通过对火灾后的 53 个区域进行研究, 考虑地形、火灾影响的区域面积、土体特性、岩石类型、降雨量及降雨强度等, 并在这些数据的基础上, 通过回归分析, 建立泥石流起动的预报模型。也有研究人员^[45]基于 GIS 技术及流动模型建立泥石流风险分区仿真系统, 通过地形参数模拟泥石流的运动, 并获得泥石流运动过程中的相关参数, 此仿真系统将风险管理可视化, 为泥石流减灾提供了科学依据。

3.3 分布式坡面泥石流起动模型

泥石流起动量化模型是泥石流研究的目标, 由于泥石流起动的影响因素较多, 目前还没有建立一个普适的泥石流起动模型。张万顺^[46]借助于GIS技术对流域进行数字离散, 形成坡面带单元, 在坡面带单元上用土壤下渗理论和土壤动力学理论, 建立分布式泥石流模型。该模型又包括三个部分: 土壤下渗模型、泥石流起动模型和坡面泥石流演算。其中土壤下渗模型数学描述为如下:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (K(h) \frac{\partial h}{\partial z}) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (3)$$

式中: $C(h)$ 为比水容重, $C(h) = \frac{d\theta}{dh}$, $\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(h) \frac{\partial h}{\partial t}$, θ 为土层含水量; $K(h)$ 为垂向水力传导系数; h 为基质势; 对于坡面带单元土壤中垂向非饱和水运动方程, $K(h)$ 是 h 的函数, 此模型为非线性模型, h 、 θ 的值均不能直接求出, 必须使用迭代算法来推求。

该模型充分认识了泥石流起动各过程之间的联系, 但由于模型是非线性的, 部分数值的计算需要进行多次迭代, 这就给模型的应用造成很大的难度, 如何在不影响精度的条件下, 对模型进行简化有待进一步的研究。

目前泥石流起动机理的研究取得了一定的成果, 但是距离实际应用还有一定差距。研究准泥石流流体如何起动, 以及起动的主要因子(如颗粒级配、底床坡度、临界水量等)临界参数及其关系, 可促进泥石流起动学的理论发展, 同时可为泥石流预警提供基础数据。

4 研究趋势

泥石流起动的影响因素众多, 给泥石流起动机理的研究造成了很大的难度。由于泥石流暴发突然, 历时短暂, 给野外实时观测带来了巨大的挑战。此外, 泥石流多暴发在交通不便的山区, 野外实验难以开展。结合前人的研究成果及目前的研究情况, 泥石流起动机理的研究趋势应集中在以下几个方面。

4.1 泥石流起动过程水土耦合机制研究

降雨是泥石流起动的激发条件, 同时降雨也是土体强度及渗流特性改变的直接原因。以往的研究多是将土体的强度条件与降雨条件单独进行考虑, 大多数研究都集中在土体强度方面, 在土体极限强度的基础上结合降雨条件对泥石流的起动进行预测预报, 这种研究方法将泥石流起动的过程孤立起来, 虽然在一定程度上为泥石流起动的研究提供了方便, 但却很难建立准确的泥石流起动模型。只有以水土耦合作用为基础, 充分考虑降雨过程中土体强度、渗流特性的变化情况, 同时考虑土体强度特性变化过程中结构变化以及由此对水分的响应, 才能结合土体的破坏条件及不同区域的降雨条件构建泥石流起动模型。

4.2 泥石流起动过程土体结构参数动态化研究

由于泥石流土体一般级配较宽, 土体内部的连结较弱, 土体中的细颗粒在地表径流及内部径流作用下会随着水分的传输而发生迁移。细颗粒运移会导致土体各部位级配特征的变化, 而土体的级配特征又是影响土体强度的主要因素之一, 因此细颗粒运移会对土体的强度产生很大影响。此外, 细颗粒运移导致土体中有些部位细颗粒聚集, 改变了土体内部的孔隙结构及孔隙特征, 孔隙被堵塞后, 土体中的孔隙水压力难以释放, 使土体的有效应力降低, 土体在外部其它影响因素的作用下很容易破坏发生泥石流。细颗粒运移对土体结构造成的动态化影响不容忽视。因此, 泥石流起动的研究应从静态向土体结构参数动态化方向转变。

4.3 泥石流起动机理的多学科交叉、微观、量化研究

泥石流起动应在土力学的基础上, 结合水力学、水文学、渗流力学、土动力学及气象学等学科的知识, 将泥石流起动诸多因素有机的联系起来, 形成以点到线、以线到面的整体研究格局。

从宏观现象向微观机理方向转化也是泥石流起动机理研究的重点和方向, 虽然目前宏观与微观之间的桥梁仍然无法建立, 但随着科技的进步及理论研究的推进, 从宏观向微观转化也是泥石流起动机理研究的趋势。

泥石流起动影响因素的量化研究是提高泥石流预报精度的前提, 由于以前实验条件的限制, 很多科研工作都集中在定性方面, 但是随着研究的深入, 定性研究不能满足科研工作在精度及深度的需要, 泥石流起动机理的影响因素从定性到定量研究也是科学发展的趋势。

4.4 泥石流起动过程多因素综合作用研究

影响泥石流起动的因素较多, 虽然有些因素对泥石流起动的影响并不显著, 但与其它因素结合后可能会在很多程度上决定着泥石流的起动。构建泥石流起动模型时, 考虑的影响因素越多, 建模的难度越大, 但模型建立后普适性也更强, 因此泥石流起动的研究应该从单因素向多因素方向转化。

参考文献:

- [1] 唐邦兴, 周必凡, 吴积善, 等. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000.
- [2] 吴积善, 田连权, 康志成, 等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [3] 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.
- [4] 杜榕恒, 康志成, 陈循谦, 等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987: 57-71.
- [5] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 26-47.
- [6] 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.
- [7] 张洪江, 郑国强, 程金花, 等. 不同面积小流域山洪泥石流预报模型研究——以北京市密云县为例[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 65–69.
- [8] 陈晓清, 崔鹏, 赵万玉. 汶川地震区泥石流灾害工程防治机理的研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(3): 125–130.
- [9] 杨成林, 陈宁生, 李战鲁. 汶川地震次生泥石流形成模式与机理[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(3): 31–37.
- [10] 唐川, 李为乐, 丁军, 等. 汶川震区映秀镇“8.14”特大泥石流灾害调查[J]. 中国地质大学学报: 地球科学, 2011, 36(1): 172–180.
- [11] 王裕宜, 邹仁元, 刘岫峰. 泥石流起动与渗透系数的相关研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(4): 76–82.
- [12] 刘激雷, 朱平一, 张军. 泥石流源地土体抗剪强度指标值与含水量的关系[J]. 山地研究, 1998, 16(2): 99–102.
- [13] 陈中学, 汪稔, 胡明鉴, 等. 黏土颗粒含量对蒋家沟泥石流起动影响分析[J]. 2010, 31(7): 2197–2201.
- [14] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 48–57.
- [15] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同含水率直剪强度特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 221–224.
- [16] 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.
- [17] 潘华利, 欧国强, 柳金峰. 泥石流沟道侵蚀初探[J]. 灾害学, 2009, 24(1): 39–43.
- [18] 陈宁生, 崔鹏, 王晓颖, 等. 地震作用下泥石流源区砾石土体强度的衰减实验[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2743–2747.
- [19] 王志兵, 汪稔, 胡明鉴, 等. 颗粒运移对蒋家沟土体渗透性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2017–2024.
- [20] Takahashi T. Debris Flow, Monograph of IAHR [M]. AA Balkema: Rotterdam. (1991)
- [21] 崔鹏. 泥石流起动条件及机理的实验研究[J]. 科学通报, 1991(21): 1650–1652
- [22] 崔鹏. 泥石流起动的突发性特征[J]. 自然灾害学报, 1993, 2(1): 53–61.
- [23] 崔鹏, 柳素清, 唐邦兴, 等. 风景区的泥石流研究与防治[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 25–48.
- [24] R M Iverson, M E Reid, N R Iverson, et al. Acute Sensitivity of Landslide Rates to Initial Soil Porosity[J]. SCIENCE, 2000, 290(20): 513–516.
- [25] Mark E Reid, Richard G LaHusen and Richard M Iverson. DEBRIS-FLOW INITIATION EXPERIMENTS USING DIVERSE HYDROLOGIC TRIGGERS[R]. 1973.
- [26] Iverson R M. Regulation of landslide motion by dilatancy and pore pressure feedback [J]. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 2005, 110, F02015, doi: 10.1029/2004JF000268.
- [27] Iverson R M. DEBRIS-FLOW MOBILIZATION FROM LANDSLIDES[J]. Earth Planet. Sci., 1997, 25: 85–138.
- [28] Iverson R M. THE PHYSICS OF DEBRIS FLOWS[J]. REVIEWS OF GEOPHYSICS, 1997, 35(3): 245–296.
- [29] 胡明鉴, 汪稔, 孟庆山, 等. 坡面松散砾石土侵蚀过程及其特征研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1722–1726.
- [30] 胡明鉴, 汪稔, 张平仓. 蒋家沟流域坡面侵蚀特征实验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 645–648.
- [31] 胡明鉴, 汪稔, 张平仓. 斜坡稳定性及降雨条件下激发滑坡的试验研究——以蒋家沟流域滑坡堆积角砾土坡地为例[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 454–457.
- [32] 陈中学, 汪稔, 胡明鉴, 等. 云南东川蒋家沟泥石流形成成因初探[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3053–3070.
- [33] 鲁晓兵, 崔鹏. 泥石流起动分析[J]. 力学与实践, 2001, 23(6): 21–23.
- [34] 矫滨田, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 土体降雨滑坡中细颗粒运移及效应[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(7): 1014–1016.
- [35] 陈晓清, 崔鹏, 韦方强. 泥石流起动原型试验及预报方法探索[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4): 73–78.
- [36] 庄建琦, 崔鹏, 胡凯衡, 等. 沟道松散物质起动形成泥石流实验研究[J]. 2010, 42(5): 230–236.
- [37] N Sh Chen, W Zhou, Ch L Yang, et al. The processes and mechanism of failure and debris flow initiation for gravel soil with different clay content[J]. Geomorphology, 2010, 12(1): 222–230.
- [38] Chen N Sh, Peng Cui, Rui Chen, et al. The distribution and characteristics of debris flow along Sino-Nepal highway [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(1): 44–48.
- [39] Chen N Sh, Gao Y Ch, Li D F. Survey report on July 11, 2003 debris flow in Danba county, Sichuan province [J]. Journal of Mountain Research 2003, 21(5), 632.
- [40] Fredlund D G, Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Can. Geotech J., 1994, 31: 521–532.
- [41] 戚国庆, 黄润秋. 泥石流成因机理的非饱和土力学理论研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 12–15.
- [42] 白志勇. 泥石流松散物质起动条件的分析与计算[J]. 西南交通大学学报, 2001, 36(3): 318–321.
- [43] G Klubertanz, L Laloui, L Vulliet. Identification of mechanisms for landslide type initiation of debris flows[J], Engineering Geology, 2009, 109: 114–123.
- [44] Joseph E Gartner, Susan H Cannon, Paul M Santi, et al. Empirical models to predict the volumes of debris flows generated by recently burned basins in the western U. S [J]. Geomorphology, 2007, 96: 339–354.
- [45] Yang Fu kun, Guan Qun, Hu Kai heng, et al. Research and Application of Debris Flow Risk Zoning Simulation System Based On GIS and Flow Model[J]. Energy procedia, 2011, 13: 6636–6643.
- [46] 张万顺, 乔飞, 崔鹏, 等. 坡面泥石流起动模型研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 146–149.

Current Situation and Tendencies of Debris Flow Initiation Mechanism

He Na^{1,2}, Chen Ningsheng¹ and Zeng Chao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The current research situation of debris flow initiation mechanism (experimental study and theory research) is summarized. On the basis of induction and summarization on the previous achievements, shortcomings of the previous researches are analyzed and the future research directions of debris flow initiation mechanism are proposed. Founded on soil mechanics, hydraulics and porous flow mechanics, etc., the study in the future should reveal the dynamic process of debris flow from static to dynamic, from single factor to multi-factor, from qualitative research to quantitative research, and finally combining with the damage process and water condition to establish the initiation model of debris flow. Research on debris flow initiation mechanism can provide scientific basis for debris flow prediction, and promote the development of debris flow discipline at the same time.

Key words: debris flow; initiation model; experimental research; theory research; research trend