

**\*学科发展\***

# 泥 石 流 研 究

唐 邦 兴    章 书 成

(成都山地灾害与环境研究所)

**【摘要】** 本文概略地介绍了泥石流的研究背景、国内外研究梗概和主要动向,重点阐述了泥石流学科的基本理论问题,提出了泥石流形成学、物理学的基本内容并建议其作为今后的主要研究方向。

## 一、背景与意义

泥石流是我国山区常见的一种自然现象。它常发生在山区小流域,是一种饱含大量泥沙石块和巨砾的固液两相流体,呈粘性层流或稀性紊流等运动状态,是各种自然因素(地质、地貌、水文、气象、土壤、植被)和人为因素综合作用的结果。泥石流因其形成过程复杂、爆发突然、来势凶猛、历时短暂、破坏力大而成为山区经济建设的一大灾害。

我国山区面积广阔,又多处于季风气候区,加之断裂构造发育、地震频繁、地形陡峻,具备了泥石流形成的条件,使我国成为世界上泥石流最多的国家之一。

建国以来,随着山区经济建设的发展,人类盲目活动加剧,生态平衡不断遭到破坏,促使一些山区泥石流灾害日益严重,并给人们的生产和生活带来极大的危害,如:淤埋城镇、威胁村寨和人民生命财产的安全;冲毁道路和桥涵;破坏水电工程和通讯设施;淹没农田、堵塞江河、抬高河床、污染环境;危害自然保护区和风景名胜区。近十多年来,我国一些山区泥石流灾情严重,仅 1981 年四川、陕西和辽宁等省的 40 余县,共发生泥石流灾害达 3000 余处,造成直接经济损失 5 亿元以上,死亡千余人。1981—1989 年四川省泥石流、滑坡灾害造成的直接经济损失达 27.5 亿元,死亡 2600 人。

80 年代以来,国外泥石流灾害也很严重。如 1985 年哥伦比亚境内的火山泥石流,淤埋了阿梅罗镇,亡 24740 人,伤 5485 人,毁房 6580 间,受灾 17 万人,成为全世界最严重的泥石流灾难。

当前“国际减轻自然灾害十年”活动,为防治泥石流灾害创造了十分有利条件,我们要充分地利用这个大好时机,紧密结合减灾任务,发展泥石流学科,推动减灾活动的开展,为“国际减轻自然灾害十年”作出应有的贡献。

## 二、国内外研究现状

我国泥石流研究起步较晚。解放前,我国泥石流研究工作基本上处于空白状态。解放后,随着经济建设和科学事业的发展,泥石流科研工作得到了不断发展,在我国西部山区,建立了

一些泥石流防治点和定位观测站,初步查明了我国泥石流的分布、形成、运动 and 发展的基本规律,提出了一些符合我国山区泥石流防治的方法,从而为发展我国泥石流学科奠定了基础。

50 年代,针对我国公路、铁路修建中遇到的泥石流灾害,首先开展了道路沿线泥石流的调查和观测工作。

60 年代,我国山区建设迅速发展,泥石流灾害的影响更加突出。我国冶金、地质、水利、航运、矿山、城建、农林等部门和高等院校都相继开展了泥石流的调查研究,中国科学院和其它专业科研部门开辟了泥石流专题研究。在泥石流学科开创人施雅风教授带领下,率先开展了川藏公路(西藏境内)冰川泥石流研究和成昆铁路暴雨泥石流研究,解决了铁路、公路建设中的泥石流问题,培养了一大批科技人才,壮大了泥石流研究队伍。文革期间泥石流科研工作受到了“左”的思想干扰和破坏,但仍有部分科研人员坚持研究工作,并开展了以探索泥石流内部规律为主的定点观测试验和与生物相结合的泥石流防治工程的研究。70 年代末,中国科学院把泥石流列为学科发展的重点,1978 年将兰州冰川冻土研究所泥石流研究骨干调整集中于成都地理研究所(现改名为山地灾害与环境研究所),形成了我院泥石流研究的中心,也是全国最强的一支科研队伍,开展了青藏高原、横断山地、辽东南丘陵山地、成昆铁路、自然保护区、云南小江和大盈江等区域泥石流研究,建立了云南东川蒋家沟泥石流半自动观测试验站、九寨沟泥石流综合研究站、泥石流动力学模型实验室。1987 年东川蒋家沟泥石流观测试验站成为中国科学院对外开放站。1990 年泥石流动力学模型实验室通过院级鉴定,已成为我国泥石流研究最好的场所之一,为国内外泥石流学者和专家提供了较好的科研条件。站、室的建立和开放将有力地推动泥石流学科的发展。与此同时,在区域泥石流研究方面,深入探讨了第四纪以来地质发展、地貌演变、气候变化、冰川进退以及人类经济活动等诸因素对泥石流发生、发展的影响。另外对泥石流专用测试仪器研制和航空遥感技术以及对典型小流域泥石流灾害治理和预警等也都取得了显著的成绩,使我国泥石流研究跨入世界先进行列。1980 年以来,中国科学院还先后主持召开了第一届、第二届全国泥石流学术讨论会和全国泥石流防治经验交流会,出版了 10 多本泥石流专著和论文集,使我国泥石流研究令世人瞩目。

泥石流现象几乎在地球上所有的山区都可能发生,其中以新隆起山系最为活跃,它遍及世界 50 多个国家,其中 23 个国家较系统地开展泥石流及其防治研究工作,以日、美、苏和奥地利等国成绩显著,其它如英国、法国、德国、南斯拉夫、罗马尼亚、印度尼西亚、加拿大、澳大利亚和新西兰等国也作了许多泥石流科研工作。国外对泥石流的研究已有 100 多年的历史,20 世纪 70 年代又有显著进展,主要体现在:第一,进行了泥石流调查和编目统计,许多国家公布了全国泥石流沟条数,如 1978 年日本公布了全国泥石流沟 6.2 万条等;第二,日、美等国应用电子计算机技术于泥石流观测实验研究,提高了观测精度和研究水平;第三,日、美、苏等国深入研究粘性泥石流的形成机理、运动过程、流体结构和力学性质,建立了流型和计算公式;第四,80 年代以来,泥石流科技合作和学术交流十分活跃。在日本、美国、奥地利、中国和斐济等国,都曾举行过有关泥石流的专题学术讨论会,特别是在“国际减轻自然灾害 10 年”中,一些国际机构和政府部门组织召开了有关泥石流会议,如 1990 年国际地理联合会地貌委员会于南京召开了地学灾害及减灾对策讨论会等。中日、中美都签定了有关“减轻和防止泥沙灾害”、“泥石流运动机理”、“泥石流预警报”等研究合作项目,进一步扩大了学术交流,促进泥石流的学科发展。

### 三、泥石流学科内容和发展趋势

泥石流是一门新兴的边缘学科,它与地质学、地貌学、水文学、气象学、力学(流体力学、泥沙运动力学、工程力学等)、土质土力学、流变学等密切相关,其学科内容十分丰富,我们认为它主要可概括为泥石流形成学、泥石流物理学两大方面,现分述如下。

#### (一) 泥石流形成学

泥石流形成学是研究泥石流形成的各种条件和阐述泥石流发生发展规律并给予泥石流规模(即流量)以定量的表达。众所周知,形成泥石流除了坡度条件(提供泥石流作剪切运动的能量)比较稳定外,水份条件(如果来自降雨)可视为一个随机变量。最复杂的还是固体物质补给条件,它主要来自流域内的重力侵蚀(如滑坡、崩塌),而且集中于某一部位,其补给既有周期性又有随机性,而且它与水份结合而形成泥石流绝不是一个简单相加的过程。我们可以设想,当一定数量的固体物质在充分饱水失稳后而塌入沟床并与洪水遭遇,它以“泥库”溃决的形式而形成泥石流。这是一种最简单的泥石流汇流模型,而实际情况要复杂得多,关键还是泥石流固相部份的补给规律和它的定量表达。目前国内外对泥石流汇流理论的研究正在起步,有很多理论问题需要研究解决。汇流理论(包括模型)的最终解决才有可能有较准确和可靠的流量计算方法。这当然是泥石流学科的头等重要问题之一。当然,对一些特定条件下形成的泥石流,如湖库溃决泥石流等其汇流计算相对地要简单得多。

目前国内外有多种泥石流预报方法,但均是以降雨为控制条件的经验方法,即根据主降雨超过某一阈值时,即可发生泥石流而实现预报,当然,要推广这些方法是有困难的。我们认为泥石流预报的最终有效的实施取决于泥石流形成学的发展和成熟,这也是我们面临的艰巨任务。另外根据泥石流形成的各种条件(地质、地形、地貌、水文、气象等),对泥石流流域进行识别,并判别其危险度,可以预测泥石流发生与否。它与制图学相结合,制成各种泥石流分布、区划图,甚至可以具体到某一个小流域,可供生产部门宏观决策使用。

#### (二) 泥石流物理学

泥石流物理学的研究对象是泥石流体中从小到泥石流浆体中的某一粘粒至大到粒径数米或 10 数米的巨砾。泥石流浆体中的固相是由一个复杂的极宽级配的物质所组成,并且含有一定比例的粘粒成份和特有的结构形式。对其非牛顿流体特征,国内外研究者利用各种流变仪去测试其流变特征。尽管流变仪越做越大,样品中的颗粒越来越粗,但实验结果的规律性却越来越差,看来要真正解决泥石流流变特征问题还需另辟新径。早在 70 年代,美国约翰逊曾提出用水槽实验来反推泥石流的流变特征值,不过水槽实验也有一系列诸如实验测试技术等问题需要率先解决。

在泥石流运动力学研究中,我们常把泥石流分成两类,一类是粘性起主导作用的称为粘性泥石流;另一类是颗粒碰撞起主导作用的称为稀性泥石流。前者呈层流运动,后者是紊流运动。视粘性泥石流为粘塑性连续介质流体,采用应力应变分析方法,得出其宾汉(Bingham)特性,代入动能方程而去求解。而对稀性泥石流则根据拜格诺(Bagnold)的颗粒流理论,认

为流体中颗粒碰撞而产生的离散力是提供颗粒运动的能量。对这两类泥石流国内外均有研究。也有学者认为粘性泥石流中粘性力仅在泥石流起动时才有意义,而在运动中,与流体其它动量部分相比可以忽略不计。如果果真如此,那么可以用普通的流体力学方程来求解。我们认为,不论那类泥石流,作为一种流体,其根本问题还是流体结构问题,即流速分布和阻力规律问题。但是,由于问题的复杂性,首先是测试技术和实验方面的困难,目前还没有人得到实测的流速分布数据(尽管有很多理论推导)。流速阻力系数不仅与雷诺数(number of Regnold)有关,而且与赫德斯托姆数有关(number of Hedstrom),雷诺数与赫氏数均为泥石流流体的流变特征值刚性系数和屈服应力的函数,如果流变特征值是时间的函数的话(即流体具粘弹性特性时),问题就变得十分复杂了。流体结构的研究将导致可靠的泥石流流速计算方法出现,因此它也是泥石流学科中重大理论问题之一。预计随着测试技术(传感器是最重要的)的进步,实验方法的更新,这个难题不久将会有突破性的进展。

在泥石流沉积学领域中,我国研究者一开始就注意野外实际发生的泥石流事件,注意把沉积条件和特征与泥流动力学研究联系起来,不论是泥石流流体宏观的“反粒径”结构,还是个别颗粒上的微观擦痕,都是泥流动力学作用的结果。沉积实际上是速度为零的运动,而速度不为零的运动又给沉积留下种种证据和痕迹,这种动静相结合的研究形成了我国泥石流沉积学的独特风格。再者,我国现代冰川学者在研究西部地区冰川泥石流的各种特征后,大胆地对原来认为我国东部为古冰川沉积的论点提出质疑,在经过艰苦的研究和野外工作后,确认为是古泥石流沉积,这也是对泥石流沉积学的一大贡献。

泥石流是一个极大的力源和震动源,对其力学和声学特征的研究,不仅填补了泥石流学科的空白,而且有显著的生产意义。我所与我院力学所、声学所合作,充分发挥我院的综合优势,在国内率先开展了这方面研究,并取得了很好的成果。泥石流力源是复杂的,尤其含有众多石块,又具随机性。我们从实测资料出发,分析了泥石流冲击力特征,得到了流体和个别石块(往往是导致工程毁坏的原因)的计算公式。同时,在分析大量资料的基础上,我们得到泥石流地声信号是一个窄频带的确定信号,其单越频率约 50 赫兹,而大于背景噪声约 40 分贝。这为我们研制报警装置去监测泥石流发生提供了可能。在泥石流力学、声学研究中,为实现较高频率的采样并进行信号的时域和频域的实时处理的同时促进了测试技术和计算机技术在泥石流研究领域中的应用和发展。今后除继续进行更深入的观测、研究泥石流力学、声学机理外,还需重视工程建筑物在此类外力作用下的结构反应。

### (三) 泥石流数学模型

随着泥石流学科的发展,最终要完成从定性到定量的表达,因而其形成学和物理学的研究成果,都将以数学表达形式来阐述其物理和力学的机理,并建立起各类数学模型以供生产实践应用。为了求得实用、高效的解析方法,对泥石流数学模型的研究是十分必要的。

数学模型包括方程的建立和它的解析方法,在电子计算机技术迅速发展的今天,泥石流理论研究远远落后于数学分析方法及计算机应用。近年来,为了满足生产上的需要,美、日等国已有泥石流各类运动的数学模型。他们都是从圣维南(Saint-Venant)方程组出发,仅在阻力项中考虑了泥石流的非牛顿体特征。

我们认为,泥石流学科发展的标记将是各类数学模型的建立,诸如形成学中的汇流模型,



运动力学中的非定常二维运动模型等等,它们将揭示泥石流各项要素的时空分布规律和具体数值,不仅可以用于工程建筑物的设计之中,还可以作为建立量化的预警报系统的依据。因而,和理论研究同步,泥石流数学模型的研究将会有有一个较大的发展。

#### 四、泥石流防治

泥石流作为一门应用基础学科,其防治研究一开始就受到重视。随着学科的发展和理论研究工作逐步地深入,泥石流防治也将会更加合理可靠。既然泥石流是各种自然条件(也包括一些人为因素)综合作用的结果,其防治也将是采用综合性的治理措施,包括恢复流域内植被、保持水土;在中、下游修建拦挡坝、导流堤等工程建筑物;建立预警报系统以避免不可预见的灾害带来的人员伤亡;加强行政管理以保证各项措施的执行等等。

泥石流工程建筑物中,根据泥石流特点而设计成功的间隙坝、格栅坝、轻型金属(钢轨、钢丝绳)立体式格栅坝、重力式拱基坝等均广泛地用于防治中。它们的共同特点是能承受强大的泥石流流动荷作用,而且可以减缓沟床底坡,拓宽沟床,达到抑制泥石流发生、发展的目的。我所在川西、云南均有综合治理的试点工程。泥石流预警报工作同样也是建立在泥石流研究工作的基础上。近年来,国内外对各类警报器的研制十分重视,1985年,我所在国内率先研制成功非接触式泥石流地声、泥位报警装置,其中地声报警器经反复实验并改制后于1988年交付云南省东川市使用。