

泥石流研究进展与启示

Progress in the Study of Debris Flow

倪晋仁

(北京大学城市与环境学系, 博士后)

王光谦

(中国科学院力学研究所, 博士后)

提 要 就象任何其它边缘学科一样, 泥石流研究作为一种涉及众多学科知识的边缘学科, 它的进展从一开始便与相邻学科的发展密切相关。本文简要回顾了泥石流研究的历史及已取得的最新进展, 归纳了连接泥石流研究各方面进展的主要线索, 并提出了今后泥石流研究的方向。

一、泥石流与灾害

在自然灾害中, 较大的自然灾害往往因在短时间内造成人民生命财产的巨大损失而在社会上引起强烈的反响, 但其出现频度相对来说却是较低的。相反地, 另一些规模较小的自然灾害虽然每次造成的经济损失相对较小, 但却因发生频度较高而同样对社会和经济的发展有着深刻的影响。通常, 泥石流就是属于后一种发生频度较高的、突发性很强的山地自然灾害现象。泥石流通常是由水流、粘土及大小不一的石块组成的复杂的固液两相流, 在流动过程中呈现出许多奇特的景象。它可在瞬间释放出大量的前期逐渐积累的物质和巨大的能量, 因此具有巨大的破坏力。在泥石流所到之处, 常常有公路、铁路、桥梁等交通设施被破坏, 建筑物、良田被冲毁, 江河被堵塞。例如, 仅在四川省目前就有大小泥石流沟2 000余条, 1981~1988年近8年中, 山地灾害造成的直接经济损失就高达15.5亿元, 造成1 800余人死亡。又如, 仅东川市1954~1986年间, 因泥石流滑坡就造成163人死亡, 2 097公顷农田被毁; 东川铁路支线从1969~1989年的20年运营期间, 共发生泥石流565次, 中断行车1 136天, 累计损失达4 695万元。由此二例也可部分地看出泥石流这类发生频度较高的灾害现象每年给国家带来很大的直接和间接的损失。为了有效地对泥石流进行

防治, 就必须对其成因及其运动规律有深入了解, 这是泥石流研究的核心问题。

二、我国泥石流研究

泥石流是一种突发性的快速灾害地貌过程。根据其成因, 常见的泥石流主要有降雨泥石流、冰川泥石流、滑坡泥石流、地震泥石流及火山泥石流。我国泥石流多属于前三类, 火山泥石流在我国还较少见。相应地, 我国泥石流研究也侧重于前三类泥石流。这几类泥石流多发生于半干旱和半湿润山区及处于退缩阶段的高山冰川(特别是海洋性冰川)的边缘地区。

我国泥石流研究基本上是从50年代以后才开始有组织地进行。由于发展经济的需要, 许多部门不得不重视泥石流的危害, 其中首先面临泥石流挑战的便是交通部门。但是, 泥石流是一个与许多学科都紧密联系的边缘学科, 必须将地貌学、地质学、水文学、水文地质学、河流动力学、气象学及气候学等部门的科研人员组织起来协同研究才是解决泥石流这一复杂问题唯一可行的办法。在60年代, 中国科学院开展了多学科的泥石流综合研究并与大专院校相关专业人员合作对泥石流的类型、分布及其运动规律作了较为系统的考察, 基本明确了我国泥石流的分布格局与成因。

在综合考察的基础上, 为了对泥石流进行深

人了解,建立定位或半定位的观测站对泥石流的运动特性跟踪测量,获取第一手野外实测资料十分重要。作为我国泥石流研究的一个特点,专门设置的泥石流观测站是不可忽略的组成部分。目前,在云南省的蒋家沟、浑水沟、大小白泥沟、老干沟、大桥河、三滩沟等,甘肃省的火烧沟、天水元龙镇、兰州市大洪沟等,西藏的古乡沟、加马其沟等,四川的黑沙河沟等都建有定位或半定位的泥石流观测站。其中最具代表性的是中国科学院东川泥石流观测研究站(设在蒋家沟)。这一半自动化的永久性对外开放观测台站也是目前唯一能定点、定期观测到活泥石流的台站,该站所处的蒋家沟有“泥石流天然博物馆”的美誉。该站所测得的系列泥石流组成和类型,以及静力学、运动学及动力学特征资料为从多方面研究泥石流提供了可能,也为专家学者直接观测突发泥石流提供了宝贵的场所。鉴于泥石流研究的多学科综合性,开放站不仅吸引了国内从事地貌、地质、水利、环境、遥感、测量、力学、气象等方面的专家和学者进行客座研究,而且还吸引了日本、美国、苏联、德国、新西兰等许多国家各方面研究人员到观测站进行客座研究或合作研究,从而发挥了多学科交叉、综合的优势,使许多复杂的问题得以解决。

在注重原型观测的同时,有利于揭示泥石流某些特性的模拟试验也受到了充分重视。近年来,随着国内对高含沙水流研究水平的提高,由水利界与地学界的学者们共同努力,对泥石流的静力学特性(尤其是流变特性)作了大量的试验研究,取得了显著的成绩,在国际上展现了独具特色的风格。在泥石流动力学方面,60年代,我国铁道部科学研究院西南研究所就已开始了模型试验并对泥石流的运动机制及其防治措施作了系列研究。中国科学院成都山地灾害与环境研究所也已建成大规模的泥石流动力学模型实验大厅,为今后的基础研究提供了保证。值得指出的是,80年代由我国著名泥沙专家、已故的钱宁教授倡导的层移质研究中的许多成果,已被发现与某些类型的泥石流(尤其是水石流)运动有着类似的机理,并可能从更多的层次上对它们作进一步的统一分析。

作为一门新兴边缘学科,泥石流的理论研究是目前和今后的热点。泥石流的多学科综合性特点决定了理论研究的途径仍是由各相邻学科从不同角度进行综合研究,即,从气象、地质、地貌学的角度来研究泥石流的产生、分布、类型(组成)、汇流过程;通过建立各类泥石流的力学模式来研究泥石流的运动和动力特性及其搬运过程;通过力学和沉积学的基本原理来研究泥石流的堆积形态、堆积物结构及历史过程等。这些研究是合理制订防治措施和工程设计的基础。

近年来,我国学者在过去泥石流成因分类的基础上,进一步提出了综合考虑泥石流物质组成及运动特性的分类方法。这种分类方法极便于对泥石流建立数学模型。尤其是最近两年以来,我国学者成功地将力学领域的固液两相流理论和80年代日臻完善的颗粒流理论应用于泥石流运动机理研究,建立了泥石流结构两相流模型,在方法上取得了重大突破。这一模型不仅提供了适合描述泥石流运动的诸守恒方程,还可据此在一定条件下求得泥石流的速度分布、浓度分布、脉动速度分布、阻力特性、输移率、侵蚀率、堆积率,并模化非稳定泥石流的运动特征,如泥石流运动中的“龙身”及“龙头”形态以及泥石流波动的传播,揭示不同类型泥石流中大石块漂移的机理等。应用数学力学方法建立泥石流的基本方程并解释泥石流的各种现象是现代动力地貌过程研究中从定性描述转向定量分析的一个显著标志。

对地质地貌学家,历史上各次泥石流停止后的堆积物留下的遗迹可作为反演泥石流运动状态及其力学特征的有力证据。在国际上沉积学研究取得进展的同时,我国学者通过对泥石流沉积学的研究,也在第四纪地质方面取得了重要成果。泥石流对大石块的巨大搬运能力使得学者们对我国东部山区的古冰川遗迹提出了疑义。随着泥石流研究的发展,沉积学的内容也正在不断丰富。

从1980年起,除了在国内举行了多次全国性、部门性及地区性的学术会议外,我国还与一些国际组织协作召开了数次国际会议。其中仅1991年内由中国主办或参与的以泥石流为中心议题的国际会议就有三次:9月在中国和苏联召开的中日苏自然灾害国际现场学术讨论会,10月中旬在四川峨嵋召开的泥石流和洪水灾害防御国际学术讨论会和在北京召开的中国国际地质灾害学术讨论会。此外,在我国主办的其它有关国际会议上也常有泥石流议题。

三、国外泥石流研究

在还没有建立河流动力学这一学科时就早已开始了与洪水灾害作斗争的历史。同样,泥石流的防治也早于现代泥石流的研究。随着近代科学技术的迅猛发展,人们越来越意识到泥石流的有效防治在很大程度上依赖于对泥石流产生、运动及其沉积规律的认识水平。因此,在本世纪40年代以后的泥石流防治工作中,科学研究越来越受到重视,并已将泥石流运动规律的基础研究与泥石流的防治平行地展开。

早在1947年,饱受泥石流灾害的苏联就在苏联科学院成立了泥石流研究委员会,负责对泥石

流研究进行统筹和方法上的指导。从1949年、1950年及1952年该委员会举行的三次全苏泥石流会议的报道及论文来看,这时苏联对泥石流动态这类复杂问题的研究,无论从理论方面还是实验研究方面,取得的成果还不能完全满足泥石流防治对设计计算知识的要求。然而,由于该委员会已明确意识到,为了全面地阐明泥石流现象,“必须开展一种吸收地质学家、水文学家、地貌学家、土壤学家、地植物学家等各部门专家来参加的广泛的综合性调查”,所以致使苏联泥石流研究居世界领先地位。

与苏联形成明显对比的是人口稠密的日本。在这个拥挤的岛国内,居然有近2/3的山区有泥石流发生,泥石流沟谷达6万多条。这使得这个科技、经济“大国”不得不把泥石流防治放在砂防工作的首要位置。由于财力、物力及科技方面的优势,日本泥石流研究在较短的时间内取得了显著的成果,已具备通过实验模拟和理论计算为泥石流防治工程提供可靠依据的能力,创造性地设计了非常有效的防治泥石流的坝体结构,如格栅坝、缝隙坝等。尤其是以京都大学防灾研究所为代表的研究机构,成功地将拜格诺(Bagnold)1954年通过实验提出的颗粒流理论引入泥石流研究,引起了该领域研究的深刻变革,在世界范围内引起了很大的影响。目前,日本学者一方面利用他们先进的技术设施建立了许多泥石流的原型综合观测系统,另一方面在各研究机构与大专院校进行了一系列规模大小不一的模拟试验,与此同时全面展开了关于泥石流产生、搬运与堆积机理的理论研究。由于日本的泥石流多属于水石流类,因此在日本应用较成功的理论对于其它国家的泥石流常常并不适合。为了使其理论具有更广泛的适用范围,日本学者已开始到其它国家研究不同类型的泥石流,并在逐步修正、完善、提高他们的理论。

除了日本和苏联外,在不同程序上存在泥石流问题的国家还有美国、加拿大、英国、法国、德国、奥地利、澳大利亚和新西兰等。这些国家的泥石流研究与防治工作都各具特色,但总体说来比苏联和日本逊色。

作为当今世界泥石流研究的一个特点,在共同对付泥石流灾害方面,各国进行了频繁的学术交流和合作研究,互相提供情报,借鉴防治措施。例如,1967~1988年已连续在奥地利举行了6次国际山地灾害防治学术会议(每四年举行一次);1980~1989年已召开了四次国际河流泥沙学术讨论会(每三年一次),每次都涉及泥石流方面的问题。除此之外,近年来在日本、苏联、美国每年都有泥石流、滑坡方面的专门国际性会议或在大型国际会议(如世界地质大会、世界地理大会)

中列有泥石流议题。广泛的交流和合作,将使先进的研究成果与防治手段跨越国界,迅速为人类的减灾防灾服务。

四、几点启示

由于泥石流这一学科的特殊性,一方面将相邻学科的最新成果引入泥石流研究,使得人们对泥石流的特性认识有了突破性的进展;另一方面随着泥石流研究的不断深入,相邻学科的一些局限性亦不断地暴露出来,泥石流的研究反过来又丰富了相邻学科的内容。从泥石流研究中得到的启示很多,以下两点最为深刻。

1. 在过去的沉积学研究中,对沉积相问题的研究多侧重于形态及外部条件,而对沉积时的环境与动力特性关心较少。因此,在以往的研究中混杂岩几乎成了冰碛岩的代名词,即把混杂堆积物的成因均归纳为冰川成因。随着对泥石流及碎屑流的运动与沉积特性研究的深入,人们发现虽然许多古代混杂岩均可看作冰碛岩,然而并不是所有的混杂岩都是冰川成因的,它们完全可能有其它成因,如泥石流。正象格罗威尔(Growell)在1957年指出的那样,除非具有明显的冰成标志,否则就不能使用冰碛岩这个名称。鉴于混杂堆积物可能有多种成因,美国地质学家弗林特(Flint)提出用混杂堆积物和混杂岩来描述成因不明的堆积物。由于冰碛物与研究冰川形成的环境条件密切相关,所以上述简单认识带来的却是冰川学研究的重大变革。学者们必须返回头来重新研究混杂堆积物的内部结构,必须认真区别泥石流与冰川运动的异同。可以说,泥石流等相邻学科研究的平行发展,大大丰富了冰川学研究的内容。而若没有地学家涉足泥石流这类研究,上述进展几乎是很难出现的。

2. 前面已经提出,拜格诺著名的中性悬浮颗粒在同心圆筒中作剪切运动的试验奠定了当代颗粒流理论的基础。这一发表于1954年的杰出论文随后开创了一个新的学科分支——颗粒流力学。从泥石流理论的发展过程来看,真正令人感到兴奋的进展恰恰是水力学家将拜格诺理论引入水石流研究并获得初步成功之后取得的,这完全可以视为泥石流理论研究中的一次革命。

就在人们纷纷效仿日本学者的方法来分析自己国内的泥石流时,原有的兴奋情绪也在逐渐平静下来。经过细致的比较发现,由于泥石流类型不同,适合于描述日本泥石流的模式常常不适合于描述其他国家的泥石流。因此,适合于粘性泥石流的宾汉(Bingham)模式及企图概括更多复杂情况

(下转第24页)

泥石流

(云南东川蒋家沟永久性观测台站)



1. 泥石流沟源头地貌
2. 泥石流沉积层剖面

3. 泥石流爆发前的沟床
4. 铺厚床面上的阵性泥石流

泥石流

(云南东川蒋家沟永久性观测台站)



5. 泥石流龙头

6. 弯道处泥石流爬高现象

7. 翻滚的龙头

8. 泥石流碰壁后溅起泥块高达20米

邮发代号 2-872

有必然的理由可以向我们指明,只有哪一种考虑才是唯一合理的,而其它方向上的考虑必然是会导致失败的。科学探索的过程毕竟是一种“猜测—试错”的过程。在这种探索的过程中,思维必须活跃,同时训练我们进行严格的理性思考的本领。但某种广为流行的观念,却往往片面强调科学需要理性思考并把这种理性思考与“猜测—试错”对立起来。例如,我们常常在科普作品中,甚至在某些著名科学家的讲演中,看到这样的说法:勒味烈和亚当斯当年仅仅是根据了牛顿理论而预言了海王星的存在并计算出了它的轨道和质量。甚至说海王星存在的事实也是科学家笔头下算出来的。这些说法实在是过于简单化了,因而实质上是错误的。因为实际情况可以说恰恰与此相反,勒味烈要作出他的那种预言,实际上还是必须猜测在先。他首先得猜测,天王星的实测轨道与理论值不符,正是由于边界条件的假定上出了问题,然后运用反推的方法,假定有一颗未知的行星,它具有多大的质量,并且在什么轨道上运行,那么按这种经过修改的边界条件,所计算出来的理论值就会与实测值符合得很好了。这里又存在着一个严格的理性思考的过程。而勒味烈关于存在海王星的假定竟然获得了实际观测很好的确认。正是在这里,表现出了科学预言的伟大力量。但是,我们必须对科学预言的结构和检验的结构有一个清晰的理解,以免使科学发现成为一种神奇莫测、不可理解的事情。事实上,象勒味烈的这类预言始终是要以某种猜测性的假定为前提的,因而并不总是可靠的。例如,当他想以预言海王星的同样方式解释水星轨道与理论值的偏离,并预言有“火王星”存在时,并未获得任何成功。如同对于海王星的发现一样,我们也应以同样的态度来评价冥王星的发现。

以上关于科学理论的检验结构的逻辑分析还告诉我们,除了在一个理论体系内部包含着相互矛盾的命题(即理论本身不自洽),因而我们能从分析的意义判定它为假以外,对于任何一个科学理论,我们企图通过经验的检验,是既不可能证实,也不可能证伪它们的。所以,从严格的意义上说,我们把科学理论诉诸经验的检验,实际上并非为了判定其真假(尽管人们常常习惯地抱有这种未经认真审察的成见),而仅仅是为了对理论作出比较和评价,比较和评价理论的优劣,以便选择或创造出更优的理论。正是从这个意义上,科学理论的检验活动在科学进步的过程中起着无比巨大的作用。当科学理论的预言与实验观测的结果相矛盾时,我们尽管有可能从四个方面作不同的考虑,来解决理论与观测不一致的问题。但究竟何种方案才是更优的,这里仍然有一个比较和评价的问题。至于如何来评价科学理论的优劣,这里又会涉

及到许多进一步的逻辑的和方法论的问题。限于篇幅,本文中对此恕不赘述。

(责任编辑 孙立明)

(上接第30页)

下泥石流运动的粘塑性模式相继提出。但这类模式都不足以反映泥石流内部的微观运动特性和泥石流中大石块与泥浆间的相互作用。在这种状况下,固液两相流模式的引入似乎是必然的了。这里“两相流”中的“液相”已非河流动力学中的清澈水体,而被定义为“小于某临界粒径的细砂与水 and 粘土组成的不分离的浆体”;两相流中的“固相”则被定义为“大于某临界粒径的与浆体存在相互作用的固体颗粒”。两相流模式的引入不仅合理地考虑了“固相”与“液相”间的相互作用,可对不同类型的泥石流作统一考虑,更重要的是可直接应用近十年来颗粒流研究的最新成果。而后者由于从80年代引入“运动理论”(kinetic theory)同样导致了颗粒流理论的突破性进展。与拜格诺的初期理论相比,现代颗粒流理论具有明显的优点,甚至可以说颗粒流运动的许多方面用拜格诺的早期理论根本无法解释。正因为如此,合理的泥石流模型中应该采用的是颗粒流及两相流的最新成果,而不是早期粗糙的成果。对于从事应用研究的科学工作者来说,要想使应用研究处于领先地位,至少需要对相邻学科的最新研究成果进行紧密跟踪。

泥石流研究在各个阶段的进展表明,每次较大的进展都与先进的测试手段和研究方法的引入直接相关。先进的测试手段为获取泥石流运动的宏观和微观信息提供了可能;而先进的研究方法则导致了对泥石流进行理论描述的科学体系之创立。结合我国的实际情况,今后的泥石流研究似应在以下诸方面再作努力:

1. 利用我国泥石流分布广、种类多、频率高的特点,吸引更多发达国家的同行学者来原型观测站进行合作研究。这样一方面可以部分地弥补目前研究经费之不足,另一方面亦可利用他们的先进测量仪器获得关于泥石流运动特性的第一手资料。

2. 扩大对外交流,及时获取国际上泥石流研究的最新信息,使我国的同类研究与国际先进水平保持同一水平线上。

3. 注意到泥石流的多学科综合性,必须紧密跟踪相邻学科研究的最新成果,以提高泥石流应用研究的水平。

4. 发挥多学科综合的优势,在分散研究的基础上,开展对泥石流从产生、搬运到沉积的整体系统研究,以便制定泥石流防止、疏导及治理的一系列完整措施。

(责任编辑 蔡 今)