

论 泥 石 流 学

吴 积 善 田 连 权

(中国科学院东川泥石流观测研究站 成都 610041)

提 要 泥石流学具有明确的研究对象、完整的学科体系和系统的研究方法,完全可以作为一门独立的学科:泥石流是一种复杂的山地灾害现象,研究难度大,研究历史又短,故泥石流学理论体系的成熟还需有个发展过程。泥石流学是一门正在趋向完善的新兴边缘学科。

关键词 泥石流学 泥石流 山地灾害

泥石流现象早就存在。但泥石流作为一个独立研究对象的时间,在国外还不足 200 年,在国内仅 40 余年。20 世纪 50 年代随着山区经济的迅速发展,泥石流危害日益突出,好些国家相继开展野外定位观测和室内模型试验。近 30 年来测试技术的完善和减灾防灾的加强,使泥石流的理论体系和防治体系日趋完善,泥石流学的基本框架构成。现论述泥石流学的研究对象、学科体系、研究方法,以阐明泥石流学已大体成为一门独立的学科。

1 泥石流学的研究对象

一门独立的学科必须是研究对象明确。泥石流学的研究对象就是泥石流。

1.1 泥石流的定义

泥石流是脆弱山区一种常见的山地灾害现象。我国民间称泥石流暴发为“走蛟”、“龙扒”等,史书记载中叫“山洪”;近代有的称“流动的滑坡”^[1],有的叫“洪流”^[2,3]。

目前见到的国内外泥石流定义计 15 个。英国地质学会工程组的定义:泥石流是介于水流和滑坡之间的一系列过程,因而包括有重力作用下松散物质、水体和空气三者构成的块体运动^[2]。前苏联一学者的定义:泥石流乃是水体和松散碎屑岩石混合物构成的山地洪流,它包括有众多的自然现象,即自雨水洪流至土滑和滑坡^[2]。国内有的学者定义:“泥石流是发生在沟谷和坡地上的饱含小至粘土、大至巨砾的固液两相流,液相是水和细颗粒泥沙掺混而成的均质浆液,固相是较粗颗粒。”^[4]前两个定义较客观,但不完善。

笔者认为:泥石流是脆弱山区介于挟沙水流与滑坡体之间的土、水、气混合流。这个定义有三层涵义:1. 泥石流发生在脆弱山区;2. 泥石流介于挟沙水流与滑坡体之间,既不属于挟沙水流,也不属滑坡体;3. 泥石流是土(粘粒到巨砾)、水、气混合流,系三相流体,由于气体含量甚微,可略而不计,故一般视为二相流体。这一定义没有指明:泥石流是块体运动,或是洪流,因为稀性泥石流不属块体运动,而塑(高粘)性泥石流也不能视为洪流。

1.2 泥石流的判别指标

泥石流以三个基本属性(或判别指标),区别于挟沙水流、滑坡体和高含沙水流。

1.2.1 泥石流具有土体的结构性

这个结构性的特征指标就是起始静切力(抗剪强度) τ_0 ,或用屈服值 τ_B ,以此区别于挟沙水流。后者基本上没有土体颗粒构成的结构,即 τ_0 或 $\tau_B=0$ 。

1.2.2 泥石流具有水体的流动性

这个流动性的特征指标为流速梯度 du_c/dy (u_c 是离沟床底面深度 y 处的泥石流流速),以此区别于滑坡体。滑坡体与滑床之间有一破裂面,没有流速连续变化的梯度层,即不存在 du_c/dy 。当泥石流容重 γ_c (或 τ_0)超过某一定值时,底部可以出现滑动效应,但与沟床底面之间无截然的破裂面,仍有一薄薄的高流速梯度层。

1.2.3 泥石流发生的沟床比降 J 较陡

以这一特征指标区别泥石流与高含沙水流。两者之间的 J 临界值为1%, $J>1\%$ 者即泥石流。

1.3 泥石流的类型

泥石流分类众多。现据泥石流的基本属性,把其分为三类。

1.3.1 稀性泥石流

水体在泥石流中起主导作用。泥石流流体中土粒体积比浓度 $C_v=0.10-0.50$,泥石流容重 $\gamma_c=1.20-1.90\text{t/m}^3$;结构强度小, $\tau_0<2\text{Pa}$, $\tau_B<10\text{Pa}$;流动时结构遭破坏, τ_0 , $\tau_B\rightarrow 0$;流动性强,流速分布接近于挟沙水流; $J>1.0\%$ 。泥石流流体中, $d<0.02$ (或用 <0.05)mm(粒径)的粘性颗粒与水构成均匀浆液;较粗的土粒呈悬移质或推移质,静止时下沉至底,呈两相流。

1.3.2 粘性泥石流

水体和土体在泥石流中共同起重要作用,有时土体的作用更大些。 $C_v=0.50-0.78$, $\gamma_c=1.90-2.30\text{t/m}^3$;结构强度大, $\tau_0=2-20\text{Pa}$, $\tau_B=10-100\text{Pa}$;流动时结构部分遭破坏, τ_0 , τ_B 略减小;流动性较强,常呈阵性流,具有滑动效应,底部有一高流速梯度层; $J>4.5\%$; $d<2.00\text{mm}$ 的土粒与水构成粗粒浆体,土粒均呈悬着质;除个别大石块下沉外,粗粒在运动时与浆体等速前进,静止时不下沉,故除个别大石块外,可视为伪一相流。

1.3.3 塑(高粘)性泥石流

土体在泥石流中起主导作用。 $C_v>0.75$, $\gamma_c>2.30\text{t/m}^3$;结构十分紧密, $\tau_0>20\text{Pa}$, $\tau_B>100\text{Pa}$;流动时结构不易遭破坏,并处于动态平衡中, τ_0 , τ_B 减小甚微或不减小;流动性差,多呈无规律的阵性流,滑动效应极明显,底部有一薄薄的高流速梯度层,上部具流核(但有时滑动效应不清晰,呈蠕动流);所有的土粒均呈悬着质,与浆体等速前进,静止时不下沉,系伪一相流。

2 泥石流学的学科体系

兹从泥石流研究内容出发,来论述泥石流学科体系。

2.1 泥石流地理学

其主要是研究泥石流的环境背景、分布规律、区域特征、地貌形态和灾情评估等。

我国泥石流主要分布在第Ⅰ级(青藏高原)与第Ⅱ级地貌阶梯(高原、盆地)间,以及第

I级与第III级地貌阶梯(东部平原)间的两个过渡带上,因为其上大多环境背景脆弱。

泥石流区域特征明显,泥石流特性也有所差异。如我国的粘性泥石流集中在第一过渡带中软弱岩层出露区,粘性泥石流主要分布在黄土高原深切切割区,其他地区以稀性泥石流为主。融水(含冰川)泥石流主要分布在西部高山区,其他地区为雨水泥石流。

泥石流是最强烈的外营力之一,如云南东川蒋家沟,一次历时几小时的泥石流可形成二三级台地,二个以上的上叠式堆积扇;沟床刷深20m,也可淤高6m多。四川凉山黑沙河的一条二级支沟,因泥石流侵蚀使山坡后退,三年中流域面积增加一倍余。

日本泥石流造成的人员死难仅次于地震、洪水,我国西南亦如此,有的年份泥石流为各种自然灾害致死人数之首。正确评估泥石流灾情对防治泥石流具有重要意义。

2.2 泥石流结构学

其主要是研究泥石流体的组成、结构、流变性质和本构方程等。组成泥石流体的土体可从 $d < 0.001\text{mm}$ 的胶粒到长径超过20m的巨砾。 $d < 0.05\text{mm}$ 的细粒含量往往是一个定值(300—380kg/m³[5])。

泥石流体具有三种尺度的结构,即细粒($d < 0.002\text{mm}$)浆液的网格结构、粗粒($d < 2.00\text{mm}$)浆体的网粒结构和泥石流体的格架结构,其中网格结构是基础[6]。

泥石流体的流变性质是泥石流研究的一个热点。泥石流体可视为具有起始静切力的幂律体;稀性泥石流体系具有起始静切力的膨胀体,偏稀的粘性泥石流为宾汉体,偏粘的粘性泥石流体、塑性泥石流体均为具有起始静切力的似伪塑性体。根据不同的流变性质,可列出相应的本构方程。上述大多是据粗粒浆体的流变性质提出的。虽已有内外径间距306mm的巨型旋转式流变仪[7],但仍难以测得理想的泥石流体流变曲线。

2.3 泥石流形成学

泥石流形成学又可称泥石流发生学,主要研究泥石流的形成条件、形成机理、形成(含产流汇流)过程和流量计算等。泥石流形成条件包括自然条件和人为因素。40多年来我国西南等地泥石流沟成倍增加,主要是由人为因素造成的。

按形成机理,常把泥石流分为水力类和土力类。多数泥石流的形成常是两者兼有:稀性泥石流以前者为主,塑性泥石流属于后者,粘性泥石流两者兼有而以后者为主。

产流汇流过程是泥石流研究的难点、弱点、重点。只有探明了产流汇流过程,才能建立客观的、精度较高的泥石流流量计算公式。水力类泥石流流量,可借用挟沙水流流量计算公式经适当修正后来确定;土力类泥石流流量计算公式的建立,难度极大,现大多采用经过修正的清水流量计算公式和由统计分析建立的经验公式,故一般误差很大。

2.4 泥石流力学

2.4.1 泥石流静力学

其主要是研究泥石流体的静切力、静压力、浮托力、重力等。静切力往往由静摩擦力及联结力或凝聚力构成。不同的力作用在泥石流体土粒上的差别悬殊。如塑性泥石流体中作用在石块上的静切力,大于浮托力、重力,使石块不上升,又不下沉,而悬于其中;稀性泥石流体中静切力很小,作用在石块上的重力大于浮托力,石块均下沉至底;粘性泥石流体中静切力较大,除个别大石块下沉外,粗粒均悬于其中。

2.4.2 泥石流运动学

其主要是研究泥石流运动的状态、流速,以及流体中土粒的运动状况。泥石流的流态大多被分成紊流和层流:稀性泥石流为紊流,粘性泥石流多为层流。泥石流是介于挟沙水流与滑坡体之间的过渡性流,故可分为层动流、紊动流、滑动流和蠕动流。据泥石流的流动过程,分为连续流、阵性连续流和阵性流。

泥石流的流速与流量是泥石流两个最重要的物理量。目前有泥石流流速公式 20 个以上。90 年代来随着泥石流运动力学研究的深入,建立了一些稀性、粘性泥石流的理论流速公式^[8-12],但不少公式要付诸实用,尚需进一步完善。

泥石流中土粒的运动随流体性质的不同而异。泥石流运动过程中,稀性泥石流可呈现大石块相拥前进的龙头;粘性泥石流亦可出现大石块向龙头聚集;塑性泥石流或高粘性泥石流在蠕动前进时,可出现石块向表层集中和扁平面沿剪切面排列的现象。

2.4.3 泥石流动力学

其是泥石流力学研究的核心,要研究切应力、动压力、惯性力、阻力、拖曳力等,它们与泥石流运动之间的关系。这些力与沟床相互作用,出现各种动力现象,如冲击力、冲起高、弯道超高、碰撞、震动、磨蚀和冲刷等。实际上泥石流整个过程均是动力作用的结果。

20 多年来随泥石流现场观测和模型试验的开展、深入,对泥石流动力学研究也不断深化,建立了不少动力方程,提出了冲击力、冲起高、冲刷深等的计算公式,有些尚待完善。

2.5 泥石流沉积学

其主要是研究泥石流堆积物的组成、结构、构造、特性、沉积环境和沉积年代。泥石流堆积物的组成、结构与相应泥石流体的组成、结构的异同,由流体性质而定。通常塑性泥石流两者相同;粘性泥石流除个别大石块外两者基本相同;稀性泥石流两者明显不同,沉积物有分选性和层理, $d < 0.02\text{mm}$ 的粘粒含量微,堆积物无结构。粘性、塑性泥石流堆积后,水分逐渐蒸发,堆积物结构强度骤增,内摩擦角 φ 和凝聚力 C 均也剧增。

泥石流堆积物的构造(尤其显微构造)过去研究得很少。近年来有所进展,分析了各类泥石流堆积物的构造^[13],并用构造来分析沉积环境^[14]。粘性泥石流的某些构造与冰川堆积物的构造比较接近,因此正确判别泥石流堆积物,对分析第四纪环境有着重要意义。

2.6 泥石流防治学

其主要是研究泥石流的预测预报、防治规划、生物与土木工程设计和效益评估等。

近 20 年来美国、日本、意大利和我国等先后开展了沟道泥石流发展趋势预测、活跃度评价;制订了重点地区的危险度区划,并确定了制定危险度区划的原理、原则、指标和程序;以暴雨因子为主,结合前期降水和松散土体状况,开展了泥石流短期预报、临报,建立了预报、临报模式;利用超声波、地声和电子技术,研制了泥石流报警器。总之预测预报的理论和技術提高显著,效益日趋明显,但方法和技术尚待改进。

泥石流防治的基础——防治规划可分三类:保护、预防和治理。对具备泥石流形成基本条件、但生态环境良好区,应在制订发展经济规划的同时,继续保护好生态环境;对具有泥石流发生危险而未发生区,应制订预防泥石流发生的规划;对泥石流成灾区,应制订控制泥石流或减轻泥石流危害的治理规划。

经济、合理、高效是泥石流防治工程设计的基本原则。为此必须探明泥石流的形成规律、力学特性和成灾过程;确定泥石流的流量、流速、冲击力和冲刷深等基本参数;选择最佳的工程结构和断面尺寸。近40年来我国在泥石流拦沙坝的坝型和消能设备,导流堤的断面形式和防冲措施等方面均取得了成功的经验^[15]。

上述六个方面即为完整的泥石流学科体系,有些在理论上有待完善。

3 泥石流学的研究方法

若要揭示泥石流的各种特性,给予有效防治,必须采用多种系统的研究方法。

3.1 获取信息

占有资料、掌握信息是泥石流最基本的研究方法,但这最易被忽视。研究之始应博览文献资料,听取行家的观点、意见,掌握研究动态,制订起点高而又可行的研究计划。

3.2 调查勘测

这是一种传统的研究方法,通过考察、访问、实地测量、现场填图,钻探、物探和挖探等,以获取泥石流及其防治的第一手资料。近年来全球定位系统(GPS)和地质雷达的应用,为获得定位测量和地下工程地质资料提供了便捷、高效和高精度的研究方法。

3.3 现场观测

50年代来好些国家开展了现场观测,尤其在我国的观测项目之全、积累资料之多、连续观测年限之长,在国外罕见。现场观测项目包括降水,泥石流的形成、运动、堆积过程、冲击力、冲起高、弯道超高、震动、磨蚀、冲刷等动力作用,以及工程和生物治理的效益、工程的稳定性等。由于泥石流流速快、势头凶猛、并含大量石块,因此一般的流速仪、水尺、取样器均无法使用。80年代来研制了超声波泥位计、测速雷达、冲击力仪、地声测定义、录像监测装置、超重型取样装置等^[16]。这些仪器有的效果较好,有的误差较大,需改进。至于泥石流的垂线流速和垂线浓度分布,目前还没有合适的测定仪器。

3.4 模型试验

现场观测难度大、受限因素多,这可用模型试验来加以弥补。模型试验通常包括由人工降雨与变坡平台结合进行的泥石流形成试验,运用各种形式槽子进行泥石流的运动和输移试验;以及由槽子和各种变坡平台组合开展的堆积扇试验等。还有一种是把野外原型按比例缩小的模拟试验,多为治理服务。常规的水工试验仪器在泥石流模型试验中也难以借用,目前主要是录像装置(含图像处理)、超声波泥位计、测速浮标、探深测针和用各类传感器来测定拖曳力、冲击力、正压力、侧压力、切应力、浮托力等^[17],但仪器大多还在试用阶段,需改进。至于垂线的流速、浓度分布测定仪器和泥石流模型律问题,急待解决。

3.5 实验分析

这也是一种传统研究方法,包括:泥石流形成物、流体和堆积物的成分测定;泥石流流体和堆积物的微结构、微构造、颗粒形貌用偏光显微镜和扫描电镜测定;泥石流的流变参数和堆积物的工程地质特征值用流变仪、静切力仪和土工测试仪器测定;形成物和堆积物的形成年代用孢子花粉、¹⁴C和热释光等方法测定;近年来用¹³⁷Cs和²²⁶Ra来测定或分析泥石流的侵蚀速率和堆积速率^[18],以及土体物质的来源和来量^[19]。

3.6 数学模型

泥石流研究的数学模型是一种新崛起的研究方法。它借助计算机技术来建立泥石流的理论模型、计算公式或防治模式。目前不少国家已在运用此种方法,并得到某些进展,如我国开展了泥石流地区铁路定线方案的风险模拟系统研究^[20]。数学模型须建立在对泥石流现象本质认识深刻、勾画出的物理图形是客观的基础上,否则一切都是徒劳的。

上述六种研究方法能获得泥石流理论研究、防治实践所需的各种资料和数据。

前文所述的泥石流学的研究对象、泥石流学的学科体系、泥石流学的研究方法表明,泥石流学已完全具备作为一门独立学科的基本条件,并正在趋向完善、成熟。

参 考 文 献

- [1] Varnes D J. Slope movement types and processes. In: Schuster R L, Krizek R J eds. Landslides, Analysis and Control. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 176. Washington D C; National Academy of Sciences, 1978. 11—33.
- [2] 姚德基, 商向朝. 国外泥石流研究中的若干基本理论问题. 见: 中国科学院成都地理研究所. 泥石流论文集(1). 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1981. 142—150.
- [3] 中国科学院(中国自然地理)编辑委员会. 中国自然地理·地貌. 北京: 科学出版社, 1981. 301—312.
- [4] 钱宁, 王兆印. 泥石流运动机理的初步探讨. 地理学报, 1984, 39(1), 33—43.
- [5] Wang Yuyi, Xi Tei. The effect of hydraulic characteristics on motion of debris flow. The Inter. Sym. on River Sedi. New Delhi, India, 1995. 263—270.
- [6] 吴积善. 泥石流体的结构. 见: 中国科学院成都地理研究所. 泥石流论文集(1). 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1981. 58—65.
- [7] Major J J, Pierson T C. Debris flow rheology, experimental analysis of fine-grained slurries. *Journal of Water Resources Research*, 1992, 28(3): 841—857.
- [8] Takahashi T. Debris flow. Rotterdam, International Association for Hydraulic Research, 1991. 1—162.
- [9] 王光谦, 倪晋仁, 张军等. 泥石流的颗粒流模型. 山地研究, 1992, 10(1), 1—10.
- [10] 沈寿长. 泥石流运动的阻力和流速. 见: 沈寿长, 谭炳炎主编. 泥石流防治理论与实践. 成都: 西南交通大学出版社, 1991. 21—22.
- [11] 张道成, 华国祥. 水沙宾汉流体的阻力特性及流变参数. 见: 泥石流和洪水灾害防御国际学术讨论会暨第三次全国泥石流学术讨论会组织委员会编. 泥石流及洪水灾害防御国际学术讨论会论文集·A卷·泥石流. 1991. 32—36.
- [12] 周必凡. 粘性泥石流流体力学模型与运动方程及验证. 中国科学(B辑), 1995, 25(2), 196—203.
- [13] 田连权, 吴积善, 康志成等. 泥石流侵蚀搬运与堆积. 成都: 成都地图出版社, 1993. 185—205.
- [14] 唐永仪. 武都粘性泥石流沉积的浆体结构构造观测及其成因类型探讨. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 甘肃省交通科学研究所汇编. 泥石流学术讨论会兰州会议论文集. 成都: 四川科学技术出版社, 1986. 145—151.
- [15] 吴积善, 田连权, 康志成等. 泥石流及其综合治理. 北京: 科学出版社, 1993. 2—146.
- [16] 吴积善, 康志成, 田连权等主编. 云南蒋家沟泥石流观测研究. 北京: 科学出版社, 1990. 8—15.
- [17] 胡平华. 泥石流实验研究进展. 见: 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所. 泥石流(4). 北京: 科学出版社, 1995. 102—108.
- [18] Zhang Xinbao, Higgitt D L, Walling D E. Elementary assessment of the potential of using caesium-137 to measure rates of soil erosion on the Loess Plateau of China. *Hydrological Science Journal*, 1990, 35: 267—276.
- [19] 李少龙, 苏春江, 白立新等. 小流域泥沙来源的²²⁶Ra分析法. 山地研究, 1995, 13(3), 199—202.
- [20] 谭万沛, 王成华, 姚令侃等. 暴雨泥石流滑坡的区域预测与预报——以攀西地区为例. 成都: 四川科学技术出版社, 1994. 247—252.

ON THE DEBRIS FLOW SCIENCE

Wu Jishan Tian Lianquan

(Dongchuan Debris Flow Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences
Chengdu 610041)

Abstract

Debris flow is a mixture flow of water, soil and air between sediment-laden flow and landslide in mountainous regions. The indexes by which debris flow distinguishes sediment-laden flow, landslide and high sediment-laden flow are initial static shear stress with more than 0, big velocity gradient and large gully gradient.

Debris flow science have several branch subjects, including debris flow geography, debris flow structure, debris flow formation, debris flow mechanics, debris flow sedimentology, debris flow prevention and control. Thus debris flow science system is constituted by those branch subjects. Research methods of debris flow are: information system, investigation, field observation, model test, experimental analysis and mathematical model, etc. Therefore, debris flow research completely has the basic factor to be an independent discipline.

Debris flow is a kind of very complex mountain hazard phenomenon. Because it is difficult research, as well as studied time is shorter, the theory of debris flow science needs a developing period to be ripe. In other words, debris flow science is a new frontier science to intend to be perfect.

Key words debris flow science, debris flow, mountain hazard

关于召开山地资源开发与持续发展学术讨论会第二号通知

为继续开展山地资源开发和山区持续发展研究,并配合庆祝中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所建所 30 周年,经中国地理学会山地研究委员会牵头,由中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所和四川省地理学会,四川省国土经济研究会,西藏自治区国土研究所主办的山地资源开发与持续发展学术讨论会拟于 5 月中旬在成都召开。会后组织野外考察与编辑出版会议学术论文集。会议具体时间、地点、会议经费,以及其他事宜直接通知有关单位和个人。

中国地理学会山地研究委员会

1996-03-10