

# 泥石流及其运动方程

范 椿

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)



范椿, 1936年5月出生于江苏无锡 1957年毕业于北京大学数学力学系流体力学专业 现任中国科学院力学研究所副研究员, 中国力学学会、中国化学学会流变学专业委员会委员 曾任中国力学学会流体力学专业委员会多相流-非牛顿流-物理化学流专业组第一届组员, 中日国际流变学学术会议(1991, 北京) 秘书长 从事流变学研究工作, 主要科研方向为: 非牛顿流体力学、石油流变学、泥石流运动等, 在《ZAMP》《Journal of the Society of Rheology, Japan》《力学学报》《应用数学与力学》等刊物及国内外学术会议上发表论文40余篇 在《中国大百科全书·力学》《力学进展》等书刊发表综述评论、学科介绍性文章10篇

**摘要** 本文简单介绍了泥石流及其防治和研究简况 对于泥石流运动方程, 介绍了Bingham模型、日本高桥保的颗粒流膨胀体模型、美国Chen的塑性颗粒流膨胀体模型以及作者的非牛顿塑性膨胀体模型, 并介绍了美国MacArthur和Hamilton对泥石流运动的数值模拟 最后, 对泥石流运动研究进行了展望

**关键词** 泥石流, 泥石流运动方程, Bingham模型, 颗粒流膨胀体模型, 非牛顿塑性膨胀体模型

## 1 泥 石 流

目前关于泥石流的专著已有不少<sup>[1~4]</sup>, 本文参考文献只是列举少数著作 考虑到大多数力学工作者对于泥石流并不十分熟悉, 本节将做些一般性介绍

泥石流是一种过程, 通过这种过程混有少量水和空气的粒状固体会在缓坡上迅速流动 借助于这种自然过程, 大量的岩石风化产物夹杂着少量其他物体, 沿峡谷或经由冲积扇的表面和许多较缓的斜坡被搬运若干公里 一定数量的沙粒加进少量的水和空气就变成非常易流动的泥浆 泥石流多发生在山区, 它爆发突然, 很难预知其发生的准确时间; 其泥浆水位陡涨暴落, 来势凶猛且历时较短, 常常冲毁或淤埋铁路、公路、农田, 以及水利、国防、通讯和旅游点等工程设施, 甚至摧毁城镇和厂矿, 造成重大损失 泥石流灾害日益引起世界有关国家的关注, 已列入联合国“国际减轻自然灾害10年(1990-2000年)”项目的内容

泥石流过程可分为3个阶段, 或称3个时期:

(1) 山地河流流域的坡地上和河床内, 作为泥石流形成起源的物质, 主要由岩石风化作用和山地侵蚀作用、片蚀作用和线蚀作用产生, 这是一个较长的酝酿阶段;

(2) 片蚀物质或丧失了平衡的物质和山地汇水区的水混合成泥石流物质, 从高处沿山地河床向低处作快速运动阶段;

(3) 泥石流冲出物在山谷低处呈现为河床堆积扇或其他一些泥石流洪积形态的堆积阶段 泥石流发生需要具备3个基本条件和具备激发、触发或诱发条件之一。

3个基本条件是, 足够量的松散固体, 水体, 以及山坡坡度

强烈地震, 山坡稳定性差, 岩层破碎, 山崩、滑坡、崩塌、表层剥蚀等自然地质作用产生丰

富的松散土体 工厂矿山生产中的废渣、建设中的弃土处置不当,山坡遭破坏、森林被乱砍滥伐而加剧水土流失等,都会人为地产生大量固体物质

降雨、冰川积雪融水、地下水、泉水、冰湖和堵塞湖溃决,为泥石流提供了水体条件

泥石流一般发生在山坡上,其坡度一般不小于  $14^\circ$ 。坡度也与土体颗粒的粗细、极配、疏松程度、含水量等因素有关

激发、触发和诱发条件中最常见的是暴雨,其他条件,如:冰川积雪强烈消融、水库或冰湖溃决,地下水压力增大等水体突然增加;崩塌、滑坡、冰崩、雪崩等土体突然运动;强烈地震、大爆破等

## 2 泥石流的防治和研究工作

在 19 世纪初期,阿尔卑斯山区的一些国家,法国、奥地利、意大利和瑞士等国,为获取木材砍伐了大片森林,致使泥石流大量出现,成为阿尔卑斯山区河谷地带居民的祸害。于是法国(1860 年)、奥地利(1872 年)颁布森林保护法,建立泥石流防治管理部门。一方面对森林土壤采取改良措施,另一方面建造小型坡地、河床水利工程(含梯级渠道,挡坝群,导流堤等),进行综合治理。经过一个多世纪的治理,灾情大为减轻,自然生态平衡得以很大程度的恢复。世界范围内的泥石流研究重心也随之转移。

前苏联是泥石流灾害严重的国家,第二次世界大战后,随着苏联经济的恢复和发展,泥石流的研究和防治工作得到了前苏联政府的重视。1947 年前苏联科学院泥石流委员会成立,到 1974 年 10 月,泥石流委员会与有关主管部门和科研机构联合召开过 14 次全苏性泥石流现象及其防治研究问题会议。第 14 次会议的主持单位是前苏联水利及土壤改良部。1973 年前苏联国家科学技术委员会决定委托该部协调与实施前苏联泥石流防治措施。

前苏联在研究泥石流现象的物理性质、机械成分、平均密度、固相物质浓度和极限饱和度等基本特征及其量测方法<sup>[5]</sup>方面较为深入。对泥石流动力学问题,泥石流对建筑物的作用问题以及泥石流防治建筑物完善问题的研究也较深入。哈萨克斯坦小阿拉图河上的一道泥石流拦流坝为堆石坝,坝高 150 m,建于 1967~1970 年,加高于 1974~1976 年。此坝高及工程浩大是举世无双的。前苏联很重视实验研究,最早建立了大型泥石流试验槽。

日本是地震、火山、风暴等自然灾害严重的国家,日本政府于 1951 年在京都大学设立了防灾研究所,此后泥石流研究也有很大的进展。

我国也是泥石流灾害严重的国家之一,解放前仅个别地方进行过局部治理,泥石流防治工程的设计方法与防洪工程相同,易遭毁坏,无明显改进。解放后 50~60 年代为确保宝天、宝成等山区铁路和川藏公路、中尼公路的畅通,铁路和公路部门都进行了部门的防治。60~70 年代进行了区域性的泥石流综合治理,取得很大成效。由于泥石流是一种极其复杂的自然现象,在对泥石流形成机理的认识、泥石流各种物理参数计算、泥石流的防治工程等方面,仍然存在许多难以解决的问题,还偶然出现防治工程失败的事例。为此,一方面需要加强科学研究,一方面也需要在防治实践中总结经验,并将二者很好地结合起来。

## 3 泥石流运动方程

早期的泥石流研究都是地理学专家采用观察现象、野外测量、实验模拟、总结经验,以综合力学与实践

防治为主的方针。美国 A. M. 约翰逊著的《地质学中的物理过程》<sup>[31]</sup> (1970 年) 一书首先用力学方法系统地研究泥石流。他把水加到从天然泥石流沉积中取来的样品中, 然后再把这种重新组成的泥石流浆体倒实验槽中, 研究泥石流浆体在实验槽中流动时的流变特性和速度剖面。他采用 Bingham 模型与实验结果附合较好。从此 Bingham 模型在相当长的一段时期内在泥石流运动研究中占主导地位。本文作者曾根据泥石流在山坡斜面的长度  $L$  远大于泥石流横截面的特征长度  $H_0$ , 对连续方程、运动方程和 Bingham 模型的本构方程进行量级比较, 忽略  $H_0/L$  量级的量, 推导出二维定常泥石流的控制方程<sup>[6]</sup>

$$x = x_0 + \int_{v_0}^v \frac{[\rho Q^2 (v^3 - g \cos \theta Q)] / [v^2 (\rho g \sin \theta - 3\mu v^3 - 3\tau_y v Q / 2)]}{dv} \quad (1)$$

其中  $x$  是坐标轴, 取成沿斜面的方向, 与斜面垂直是  $y$  轴, 坐标原点在斜面上,  $g$  是重力, 斜面与水平面之夹角是  $\theta$ ,  $\rho$  是密度,  $v$  是横截面的平均速度 (只是  $x$  的函数),  $Q$  是流量,  $\mu$  是塑性粘度,  $\tau_y$  是屈服应力,  $v_0$  是  $x = x_0$  处的速度

对于等速流动的情况

$$Q = \frac{\rho g \sin \theta h^3}{3\mu} \left[ 1 - \frac{3\tau_y}{2\rho g \sin \theta h} + \frac{1}{2} \left( \frac{\tau_y}{\rho g \sin \theta h} \right)^3 \right] \quad (2)$$

其中  $h$  是流体高度

高桥保<sup>[7]</sup>通过对平均粒径为 0.15mm 的微粒所作的水槽实验, 首次在实验中测量了剖面垂直方向的速度分布。认为泥石流不是 Bingham 流体, 而是膨胀流体, 并把 Bagnold 的膨胀流理论应用到泥石流的研究中来

其剖面的垂直方向速度分布为

$$u = \frac{2}{3d} \left\{ \frac{g \sin \theta}{a_i \sin \theta} \left[ C_d + (1 - C_d) \frac{\rho_m}{\sigma} \right] \right\}^{1/2} \left[ \left( \frac{C_*}{C_d} \right)^{1/3} - 1 \right] [h^{3/2} - (h - y)^{3/2}] \quad (3)$$

泥石流鼻 (Snout) 和纵剖面形状为

$$h + h \ln \frac{|h - h|}{h} = \tan \theta (x - V t) \quad (4)$$

其中  $h$  是定常流动的深度, 即

$$h = \frac{U^2}{g \sin \theta} \left( \frac{d}{h} \right)^2 \frac{25 a_i \sin \alpha}{4 \left[ C_d + (1 - C_d) \frac{\rho}{\sigma} \right] \left[ \left( \frac{C_*}{C_d} \right)^{1/3} - 1 \right]^2}$$

其中  $d$  是颗粒直径,  $a_i$  是颗粒流中法向应力表达式中的系数,  $\alpha$  是颗粒的动摩擦角,  $\rho$ ,  $\rho_m$ ,  $\sigma$  分别是水、泥浆和颗粒的密度,  $C_d$  和  $C_*$  分别是泥石流中及固定床中颗粒的体积浓度,  $V$  是泥石流前锋的传播速度,  $t$  是时间,  $U$  是横截面的平均速度

高桥保还研究了泥石流的堆积机理

Chen<sup>[8]</sup>推广了高桥保的颗粒流膨胀体模型, 提出了广义粘塑性 (Generalized Viscoplastic) 模型。他认为理论模型应包括速率依赖 (rate-dependent) 和不依赖速率 (rate-independent) 二部分组成, 或者说包括二个主要流变性质, 法向应力和屈服应力。他还考虑了颗粒浓度在垂直方向变化的情况, 给出剖面垂直方向的速度微分方程为

$$\frac{du_*}{dz_*} = \Lambda \left[ (z_{0*} - z_*) z_*^{B/K} \right]^{1/\eta} \quad (5)$$

其中  $\Lambda$  是一个系数, 其定义如下

$$\Lambda = \left[ \frac{\beta \rho_b g h M^{B/K} \sin \theta}{A_1 (1 - \rho_w / \rho_b)^{B/K}} \right]^{1/\eta} \frac{h}{U}$$

其中  $u^*$  是无量纲速度  $u/U$ ,  $z^*$  是无量纲坐标  $y/h$ ;  $z_0^*$  是无量纲坐标  $y_0/h$ ,  $y_0$  以上为塞流 (plug);  $B$  是 Einstein 常数 (固体球为 2.5);  $1/K$  是堆积因子 (packing fraction);  $\eta$  是流动行为指数,  $\eta=1$  是宏观粘性区 (macro-viscous),  $\eta=2$  是颗粒惯性区 (grain-inertia);  $\beta$  是密度修正因子;  $\rho_b$  是沉积泥沙-水混合物在固壁底面的最大质量密度;  $M$  是弥散沉积微粒的迁移率;  $A_1$  是材料常数;  $\rho_w$  是泥沙水混合物中的流体密度

Chen<sup>[8]</sup>的理论速度剖面与高桥保的水槽实验数据<sup>[7]</sup>符合较好

作者根据高桥保的水槽实验<sup>[7]</sup>提出双层非牛顿流体的泥石流模型<sup>[9]</sup>。其上层采用非牛顿塑性膨胀流体模型, 下层采用 Bingham 流体模型。理论速度剖面与实验结果符合较好

高桥保的颗粒流膨胀体模型是泥石流运动中影响较大的一种模型, 其根据是高桥保等的沉积泥沙-水混合流动实验。但由于这种水沙流体的固体体积浓度比真实泥石流的要小, 所以不能完全反映泥石流流动现象的本质 (泥石流的固体特性)。在前苏联、中国、加拿大<sup>[10]</sup>等国家均进行过泥石流槽的实验研究。其中, 周必凡等<sup>[2]</sup>的实验流体容重为  $2.0 \text{ m/cm}^3$ , 实验流体的固体体积浓度为 0.58, 和真实泥石流的固体体积浓度相符。本文作者为了考虑泥石流的固体特性提出了一个一维泥石流运动的非牛顿流体模型<sup>[11]</sup>, 它有两个特点:

- (1) 泥石流体的本构方程采用非牛顿膨胀流体模型
- (2) 泥石流体与槽壁之间有滑移

根据严格的力学方法推导, 可得泥石流断面垂直方向的速度分布, 其无量纲形式为:

$$\frac{u - v_s}{U - v_s} = \frac{2n+1}{1+n} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{y}{H} \right)^{1+1/n} \right] \quad (6)$$

其中  $v_s$  是滑移速度,  $n$  是幂律指数 ( $n > 1$ ) 是膨胀流体

方程 (6) 的计算结果与加拿大 A. Mainali 和 N. Rajaratnam<sup>[10]</sup>的泥石流槽实验结果定性符合。泥石流体与槽壁间的滑移速度  $v_s$  估计为平均流速  $U$  的  $1/5 \sim 1/2$

泥石流运动的一个重要发展方向是数值模拟。美国 R. C. MacArthur 和 D. Hamilton<sup>[12]</sup>根据流体运动方程和连续方程

$$A \frac{\partial u}{\partial x} + uB \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial x} + UA \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$A \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial A}{\partial t} + g \frac{\partial Q}{\partial x} = g(j_0 - j_f) \quad (8)$$

其中  $x$  是沿沟床方向的距离;  $y$  是泥深;  $t$  是时间;  $B$  是顶宽;  $A$  是流体截面积;  $A \frac{\partial y}{\partial x}$  是水深固定时, 面积沿  $x$  方向的变化率;  $g$  是重力加速度;  $j_0$  是沟床底坡;  $j_f$  是极限剪切产生的阻力

泥石流在山坡沟床的流通区流动时, 可看成简单的一维问题, 可先用特征线方法将 (7)、(8) 的偏微分方程转换成相应的常微分方程组然后再用差分方法数值解。对于泥石流堆积区, 则必须将方程变换成二维问题, 一般采用有限元方法数值解

## 4 泥石流运动研究的展望

(1) 泥石流的物理模型最早是非牛顿流体的 Bingham 模型 70 年代日本高桥保提出颗粒流膨胀体模型 Chen 将其推广为塑性颗粒流膨胀体模型 作者提出非牛顿塑性膨胀体模型 最近刘大有提出多相流泥石流模型<sup>[13]</sup>。应该说对泥石流物理模型的研究尚处于深入研究, 还没有达到成熟的阶段

(2) 泥石流流动的数值模拟还处于初始阶段 对于方程 (7) 和 (8), 一方面只是采用了最简单的 Bingham 模型 另一方面对于一维问题还不能计算泥石流的龙头形状 类似的方程可用奇异摄动法计算出泥石流的龙头形状<sup>[15]</sup>。

(3) 瑞士、奥地利、日本、加拿大等国均将泥石流地区划分成从危险到安全 4 个等级, 并标明泥石流分布、类型、灾害程度、爆发频率等情况, 以实验泥石流防治的区域管理 中国国家自然科学基金委员会是中国国际减灾十年委员会成员, 它已将“区域自然灾害综合分析与理论以及灾害区域的研究”作为 1996 年国家自然科学基金申请指南中的鼓励研究领域 以数值模拟为核心实现泥石流区域管理是最近的研究发展方向<sup>[14]</sup>。对于某一具体的流域, 采用二维数学模型估算泥石流在堆积扇的发展, 以区划出危险区, 为居民点的设立提供安全保障

(4) 泥石流实验室中实验工作的重要性可从两方面说明 (a) 目前泥石流的物理模型进展缓慢, 步履艰难, 没有泥石流实验方面的进展, 物理模型不会有突破性的进展 (b) 目前美国以数值计算作为区域管理的核心, 而数值计算需要实验室内的模型实验的验证 加拿大 Rajaratnam 教授 1994 年在泥石流槽中的实验工作<sup>[10]</sup>表明了他们对实验研究的重视

可以预见, 今后泥石流运动研究的方向为: 物理模型; 数值模型; 实验研究 (基础研究) 和泥石流区域管理 (应用) 等 4 个方面

作者衷心感谢天津大学王振东教授对本文提出的宝贵意见

### 参 考 文 献

- 1 吴积善, 田连权, 康志成, 张有富, 刘江 泥石流及其综合治理 北京: 科学出版社, 1993
- 2 周必凡, 李德基, 罗德富, 吕儒仁, 杨庆溪 泥石流防治指南 北京: 科学出版社, 1991
- 3 A. M. 约翰逊著 张之立, 李兴才译 地质学中的物理过程 北京: 科学出版社, 1983
- 4 C. M. 弗莱施曼著 姚德基译 泥石流 北京: 科学出版社, 1986
- 5 B. C. 斯捷潘诺夫著 孟河清译 泥石流与泥石流体的基本特征及其量测方法 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1986
- 6 范椿 一维定常泥石流的数学模型 力学与实践, 1994, 16 (1): 50~ 52
- 7 Takahashi T. *J of Hydr, ASCE*, 1978, 104 (HY8): 1153~ 1169; 1980, 106 (HY3): 381~ 396
- 8 Chen C.L. *J of Hydr Engrg, ASCE*, 1988, 144 (3): 237~ 258; 259~ 282
- 9 Fan Chun (范椿). Proceedings of The Sixth Asian Congress of Fluid Mechanics Singapore, 1995. 1179~ 1182
- 10 Mainali A, Rajaratnam N. *J of Hydr Engrg, ASCE*, 1994, 120 (1): 104~ 123
- 11 范椿, 王培光 一维泥石流运动的非牛顿流体模型 中国造船, 1995 年增刊 (第四届全国工业与环境流体力学会议论文集, 江苏, 无锡, 1995. 357~ 361
- 12 MacArthur R C 和 Hamilton D. 第 2 届全国泥石流学术会议论文集 北京: 科学出版社, 1986
- 13 刘大有, 范椿 二相流、非牛顿流和泥石流 第四届全国多相流非牛顿流物理化学流学术会议论文集 西安, 1993. 12~ 20
- 14 章书成, 唐邦兴 泥石流研究的新动向 首届全国泥石流滑坡防治学术会议论文集 昆明 云南科学出版社, 1993. 1~ 5
- 15 Hunt B. *J of Hydr Engrg, ASCE*, 1994, 120 (12): 1350~ 1363

(本文于 1996 年 3 月 12 日收到)