

水石流的性质及形成机理

祁 龙

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

1981年8月,陕南特大暴雨期间,在宝成铁路北段的秦岭至草凉驿之间,普遍发生了水石流灾害。该段线路长30公里,约有水石流10多处,其中作了调查的有9处,是我国水石流的主要分布区之一。它为我们研究和认识水石流提供了有利条件。本文主要对水石流的运动规律及形成机理作一初步分析。

一、水石流的一些特征

在泥石流分类中,经常提到水石流,它是不同于泥石流和泥流的另一种类型。

1、水动力要素。水石流为典型的水动力类泥石流。它形成的必要条件是稀遇的洪水,暴发水石流的频率远比典型的泥石流为低。据调查,1981年该区发生水石流的洪水频率约为百年一遇,总降水量达363.8—400.3毫米。而在典型的泥石流沟谷中,每年都要暴发泥石流,甚至要发生几十次。我国西北的西部山区,总降水量只要达50毫米,就会形成泥石流。

水石流中的固体物质主要来自沟床和岸壁。在高强度水流的冲蚀作用下,沟槽形态瞬时发生巨变,沟床一次下切数米,展宽数十米,大量的沟槽物质被卷入水流,从而形成水石流。

2、固体物质来源及其组成。水石流主要发育在花岗岩、石英岩等质地粗糙,岩性较坚硬的石质山区。流域内山青水秀,树木茂密,沟谷内连续分布有洪积成因的新老堆积物,厚度一般在10米左右。沟槽发育在洪积层上。从侵蚀剖面可以看到,洪积物主要以大石块为主,大石块中间
~~~~~  
域,寄希望于河流水砂自动调节,而改变其河相形态的可能性是很小的。于是人们拟采用人工措施降低地方基准,以期溯源侵蚀,减少淤积,降低河底标高,这也可以说是徒劳的。至今在我国以及西方许多地质地貌学家,甚至水利学家还在引证这一概念,但用于水流作用并不适宜。这个概念是诺埃和马尔热里(De la Noe et Margerie, 1888)在干的砂流上实验的结果,是岩屑锥上沟槽发育的模式,尽管曾得到彭克等地貌学家的支持,然而早被E. B. 桑采尔和B. 拉赫京等水文学家所更正。他们的大量研究结果表明,水流对河底的冲刷,是在整个河床中都发生,而不是仅仅从侵蚀基准面向上游加深,人为地降低地方基准,疏浚局部堵塞,以开发水上交通,兴利除害的工作,已在我国白龙江、小江和金沙江等泥石流区的河道上,以及长江和黄河等非泥石流区的河道上均有不少,但效果不显著或适得其反。例如,长江南京河段,在1949年汛期后,采用疏浚心滩,导流趋中的治理,水下挖沙1,132万立方米,工程完成不久,疏浚区大量回淤,出现更大的心滩,工程失败。(参考文献略)

填充有碎石和砂，粉砂、粘土物质极少，石块多呈浑圆状。因此可以认为，沟谷中有丰富的洪积物是形成水石流的物质条件。如果沟谷中的堆积物不是水流成因的，而是坡积、残积和古泥石流堆积，那么它们在稀遇的水流作用下，多形成稀性泥石流。

水石流颗粒组成的一个突出特征是颗粒非常粗大，漂石为固体物质的主要组成部分，含细颗粒少。水石流中大于2厘米的颗粒，占固体物质总量的74—83%，中值粒径为8—16厘米；泥石流中大于2厘米的颗粒仅占20—30%，中值粒径不超过2.5厘米。在小于2厘米的颗粒中，粉砂（ $<0.063$ ）以下细颗粒含量最高为26.9%，粘土含量最高为6.14%。如果按包括2厘米以上的全部固体颗粒计算，在大沟中此值分别为6.99%和1.60%。以上是就粉砂和粘土含量最高的样品而言。如果取4个样品的平均值，则分别为2.9%和1%，而泥石流中粉砂以下细颗粒含量达16—21%，粘土含量大于5%，二者之间的差别非常明显。

**3、流体性质。**水石流中细颗粒物质含量很少，从颗粒分析得到，小于0.5毫米的泥沙一般占总量的7%左右。这样，即使在浓度较高的水石流中（ $C_v = 0.5$ ），小于0.5毫米的颗粒和水组成的浑水体积浓度才为0.065。王兆印等同志用花园口淤泥和秦皇岛沙（ $d < 0.5$ 毫米）配制的混合液，在体积浓度大于0.08后才出现宾汉体的性质，并指出，宾汉体的形成决定于细颗粒（ $d < 0.01$ 毫米）的数量，而与粗颗粒的含量无关。据此，我们可以认为，水石流仍属于牛顿体的范畴，流体中不存在由屈服切应力 $\tau_B$ 支持的悬浮质。

**4、水石流的运动方式。**水石流为固、液两相剪切流，其液相为水和粉、粘土组成的浑水，固相则为粗于粉砂的颗粒。固相中又有推移质和悬移质之分。由于水石流属牛顿体，并在运动中处于急流状态，紊动十分强烈。因此，可以利用扩散理论中的悬浮指数 $\xi$ 来划分推移质和悬移质。

根据实验资料，当 $\xi = 5$ 时，可近似地认为相应粒径的泥沙颗粒的扩散量为零，即该粒径的泥沙已不能靠紊动的支持悬浮在水中。在实际应用中，只要考虑到泥沙的存在对 $k$ 和 $\beta$ 的影响，就可通过算式满意地得到最大悬移粒径 $d_0$ ，并以此把固相物质划分成悬移质和推移质两部分。

我们按上述方法对大沟和北星沟的资料进行了分析，当 $k$ 取0.3， $\beta$ 取0.5时，求得 $d_0$ 为2毫米。这与水石流漫过堤岸时，落淤在岸顶的泥沙粒径基本一致。

水石流中小于2毫米的颗粒在北星沟中占样品总量的79.5%，大沟中为57%。如果按包括大于2厘米的全部固体颗粒计算，在北星沟中为14.3%，大沟中为14.8%。在以后的分析中，悬移质含沙量可按全部固体物质的15%考虑。

从以上分析可以看出，水石流是以推移质为主的泥沙运动，绝大部分固体颗粒（85%以上）以滚动、滑动和跳跃的形式推移前进。它们的水下重量靠石块在运动中互相碰撞时产生的离散力支持，最后通过石块的传递直接压到床面上；而占总量15%的悬移质则靠水流的紊动支持，随水流一道漂浮前进。但在泥石流中，推移质占全部固体物质的一半或更多一些，不存在紊动支持的悬移质，细颗粒物质主要靠液相的屈服剪切力 $\tau_B$ 支持，称为悬浮质。因此，水石流中固体物质的运动方式不同于泥石流，这是它们之间的又一重要区别。

**5、水石流的阻力。**水石流中绝大部分固体物质为推移质，与悬移质不同，它在运动中需要水流提供大量的能量。并且，由于水流中细颗粒成分少，悬浮能力和推移能力都小于泥石流，因此，水石流中能量消散得非常迅速和剧烈，能坡很陡。

水石流沟的床面和岸壁极不平整，大石块突起，多跌水和弯道，水石流在运动中又不象泥石流那样的“铺床”过程来减阻。所以，水石流的阻力要高于泥石流。有人分析，泥石流的糙率系数 $n$ 一般在0.03—0.1之间。我们用洪痕调查资料，先用武汉水利水电学院、沙莫夫、岗恰洛夫等公式确定其平均流速，然后再用曼宁公式反求 $n$ 值，其结果一般在0.08—0.12之间。水石流沟

道的床面不平,突起高度在0.5米左右,流体紊动强烈,流态属粗糙紊流区,影响阻力的决定性因素是沟床的粗糙度、形态、能坡及水深,而水流的粘性影响很小,可以不考虑。

## 二、水石流的形成机理

水石流沟和河流一样,沟床在水流作用下不断变化。汛期沟内洪水流量增大,细颗粒物被冲走,床面不断粗化,经长期水流作用后,床面上形成由大石块组成的保护层。该层粒径一般大于20厘米,1米左右的大石块常突出床面,其间距在平缓处一般2米左右,在陡坡处几乎紧靠在一起。有些地段大石块整齐的排成一行,横切水流,上游拦截了大量的石块,形成跌坎地形,就象一座低坝。在稀遇的水流条件下,床面上的大石块一旦起动,床面铺石层遭到破坏,受它保护的下层物质也就一涌而起,使沟床猛烈地下切和宽展,沟槽物质大规模溃失而形成水石流。因此,水石流的形成条件也就是床面铺石层的破坏条件。

**1、起动拖曳力公式的适用性。**在散体均质颗粒起动拖曳力公式中,应用最广泛的要算希尔兹(Shields A.)曲线。希尔兹理论指出,水流在粗糙紊流状态下,起动拖曳力参数接近一个常数0.06。继希尔兹以后的实验资料说明,这个常数在0.04—0.06之间,0.06只能作为一个上限。

如前所述,在形成水石流时,沟床一次下切数米,大大小小的各级砂石都要起动,不存在一部分颗粒起动,另一部分颗粒不起动的粗化过程。

算式说明,在水石流这种各级泥沙全部起动的情况下,非均质颗粒的临界起动拖曳力,可用粒径相同的均质颗粒的起动拖曳力来表示。这样我们就可以用希尔兹公式来分析水石流的形成条件。

**2、起动拖曳力分析。**用希尔兹公式分析水石流的形成条件,尚需选择一个代表粒径,这样才能把非均质问题按均质来处理。从水槽实验资料来看,如果水流只能起动 $d_c$ 的颗粒,而床面上有一定数量的大于 $d_c$ 的粗化颗粒,同时还夹杂有许多粒径小于 $d_c$ 的非粗化颗粒的情况下,床面就能形成抗冲铺盖层,来抵抗水流的冲刷。这一实验结果说明,要使床面上不再产生粗化和形成抗冲铺盖层,而要象水石流形成时那样,各级泥沙全部起动,水流就必须能够起动床面上最大的颗粒。根据以上分析,在分析水石流的形成条件时,应选取床面最大石块的粒径 $d_{max}$ 作为代表粒径。

**3、水石流形成条件的讨论。**以上我们分析了形成水石流的临界条件,得到形成水石流的临界拖曳力 $\tau_c$ ,可采用希尔兹指标,即非均质混合物中最大颗粒的起动拖曳力与粒径为 $d_{max}$ 的均质颗粒的起动条件相当。这似乎是难以理解的,按照人们的想象,前者应低于后者,这是什么原因呢?可以从以下几方面来说明:

(1)不论是均质还是非均质颗粒的起动拖曳力实验,都采用球体材料,而水石流沟床上的石块形状各式各样,其中长条状、片状的石块很多,它们比球体难以起动;

(2)形成水石流前,洪水流量逐渐增大,床面不断粗化,在水石流形成之前,床面上只剩下十分粗大的石块,粒径比较均一,并与 $d_{max}$ 比较接近。这些大石块突出床面,决定了水流的绕流形式,阻挡水流运动,使流速降低,大量地消耗水流的动能;

(3)床面石块经水流多年的冲刷搬运,石块的位置不断调整,小石块多镶嵌在大石块中间,互相咬合。这种结构一方面使小石块受到大石块的荫蔽保护,另一方面增加了床面物质的密实程度和稳定性,使大石块不易起动;

(4)从实验资料来看,非均质颗粒的起动拖曳力有小于均质颗粒的,也有相等的,甚至也有大两倍的。这与实验中所采用的条件不同有关。但有一种迹象表明,颗粒越粗大,二者的起动

# 泥石流沉积砾石组构特征的探讨

赵 尚 学

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

## 一、前 言

沉积物中砾石的组构,指沉积物中砾石的空间定向,即砾石的结构和构造。所谓结构,主要取决于沉积物中砾石成份颗粒的粒度和粒态的分布规律;所谓构造,主要取决于这些颗粒定向排列的分布规律。在沉积物中,大部分砾石是由骨架和孔隙空间所构成的。骨架颗粒是由砾石级的物质,如卵石、中砾和巨砾组成,而孔隙空间是这些骨架组分之间的敞开空间。孔隙一般被砂或更小的颗粒以及外来的沉淀下来的胶结物所充填。

砾石的结构构造,随搬运介质即泥石流性质、速度和堆积地形等不同,停积后就会出现与其相适应的结构构造。在砾石层中,虽然有个别砾石的方位粗看无规律而杂乱无章,但通过一定数量砾石方位的统计,就会得出理想的结果,并显示出它一定的规律性和它相适应的关系。由于沉积物砾石层的类型和成因不同,它的构造特征及优选程度差别甚大,进行沉积物砾石组构分析,可以提供沉积过程中泥石流运动的方向和堆积成因,而且对研究泥石流沉积环境起主导作用,同时也是区分其它非泥石流沉积物的行之有效的方法。值得提出的是砾组分析的研究,近年来在我国已开始进行,而且有不少成果受到地学工作者的重视。我们经过野外观测,现对宝成线部分泥石流沟沉积物砾石的组构特征简述如下。

自然界无论哪一类沉积物,其砾石组构特征总是由砾石大小或粒度(即颗粒的长度、宽度和高度)、颗粒形态(即形状、球度、扁度和磨圆度),砾石表面微形态和颗粒方向(即砾石的空间定向)等四部分组成。因为它们之间有着不可分割的内在联系,缺一不可。

~~~~~  
拖曳力越接近;

(5) 从现有的理论公式来看,按耶格阿扎罗夫(Egiazaroff, L. V.)公式计算,该区形成水石流的临界条件为 f_0 。(相当于 τ_*)等于0.018。他本人曾建议采用 $f_0 \approx 0.025$,在这一标准下,发生水石流的洪水频率约为20%;如取 $f_0 = 0.018$,则发生水石流的频率更高,这与调查的情况出入很大。而高桥保公式给出的标准很高,按他的公式计算,该区发生水石流的床面临界坡度为 10° — 12.6° ,这一结果远大于实际沟床比降。北星沟中,在比降仅为0.044($\phi = 2.5^\circ$)的情况下,沟底切深1米,照样形成了水石流。如把按高桥保公式求得的临界沟床比降作为能坡代入希尔兹公式计算,则相应的 τ_* 值为0.121—0.186,要比希尔兹指标大2—3倍,也不符合该区水石流沟的实际情况。