

粘性泥石流的堆积地貌及沉积物的特征

田昭一 徐海鹏 曾思伟

(北京大学地理系) (甘肃省交通科学研究所)

粘性泥石流是发生在山区沟谷含大量固体物质、容重一般在1.8—2.3吨/立方米之间的特殊洪流。它常具有巨大的能量,在很短的时间内搬运着数十万至数百万立方米的土石泥浆体,迅猛地冲击沟床两岸,破坏桥涵,掩埋公路、铁路、村庄和田园,造成严重的自然灾害。由于粘性泥石流经常具有强大的侵蚀、搬运和堆积的能力,经常给山区的经济建设和人民带来危害,因而引起许多国家的重视。我国很多地学工作者和工程技术人员根据生产任务和工作的实际需要,近年来对粘性泥石流的形成、运动、分布和防治等问题进行了广泛深入的研究,并取得了许多可喜的科研成果。近年来,我们也对我国西北、华北和西南地区的一些现代泥石流进行了调查,发现这些地区现代泥石流广泛发育,并形成了一些特殊的堆积地貌,沉积物在许多松散的地层剖面中,还保存着较好的中更新世、晚更新世和全新世早期所堆积的泥石流沉积物。本文只对我们所观察到的一些粘性泥石流所形成的堆积地貌和沉积物的特征,进行初步分析。

一、粘性泥石流所形成的堆积地貌

粘性泥石流往往由于地形、水量和固体物质供给等条件的变化,不仅使它的流速变慢或流态的性质发生变化,都会使部分粘性泥石流停滞而形成不同的堆积地貌,而且这些堆积地貌的分布和它所处在地形部位关系特别密切。

度很差。布尔(Bull 1963)计算的加利福尼亚州西部弗雷斯诺地区50个泥石流样品,分选系数 $4.1-6.2\phi$ (平均 4.7ϕ),与该段粘性泥石流接近。天山博格达峰冰碛物分选系数 $3.97-4.28\phi$ (平均 4.1ϕ),西藏东南部南迦巴瓦地区冰碛物分选系数 $3.05-4.35$ (平均 3.87)。

由于泥石流存在着结构上的不同,所以分选系数有明显的变化。粘性泥石流的 δ_1 值最大,水石流和稀性泥石流的 δ_1 值较小,泥流的 δ_1 值最小。看来用这一参数判别泥石流类型是有效的。

3、偏度 S_k 。量度粒度频率分布的对称性,曲线两侧对称时 $S_k = 0$ 。细粒物质过剩时为负偏度,粗粒级含量增多为正偏态。自然界中沉积物的偏度值很少超过0.8。用这一参数能反映介质类型及搬运能力的强弱。除泥流之外,其余几种类型泥石流全部为正偏态,与泥石流沉积物以粗粒级为主相符。这也说明泥石流具有强大的搬运能力。

4、峰态 k_g 。代表曲线两头与中间分选性之间的比率,衡量沉积物粒度频率曲线峰型的宽窄程度。前人根据 k_g 大小值划分出峰型, k_g 值大于1.0为窄峰型, k_g 值小于1.0为宽峰型。该段几种类型的泥石流粒度频率曲线都属窄峰型。这与上述分析的泥石流沉积物粒径范围广泛,分布不集中,分选性很差是一致的。

（一）泥石流扇和泥石流锥

粘性泥石流是含水量较少的粘稠泥浆体，物质的内部结构较为紧密，整体性较好，所以不能象洪水那样在沟口迅速的向前扩散和变薄，而是常呈舌状体缓慢地向前流动，经过一段时间后才能停滞。这种舌状堆积体，在纵剖面上是前端较陡，若粘稠度越大，含的固体颗粒越粗，其前端的坡度越陡，后部是平缓的，其厚度除前端速度变小而较薄外，后部基本上是一样厚的；在横剖面上的两侧端部也是较陡的，中部较平坦。若粘性泥石流的粘稠度很大、流速又较小时，中部略有拱起；若流速很大，并有部分物质直接输入主河道而被河水带走或输入主沟道中，则中部呈为凹陷的沟槽。这种粘性泥石流堆积成的舌状体在总体上的宽度，是随着在沉积处流动距离的增加而逐渐展宽，随着地形愈开阔平缓，展宽得也愈宽，相反，地形的坡度越陡则往往愈窄，可呈条带状。而后继续流来的粘性泥石流出沟口之后，常不能完全迭加在原来的舌状体上。新堆积的舌状体，在沟口往往逐渐改变流向，偏在一侧，向纵坡的坡度较大、流程较短的地方延伸，其泥石流堆积体在形态上常呈不对称性的掌状体。这样经过多次的往复堆积，逐步形成粘性泥石流的扇形地。这种扇形地在武都地区的泥石流沟，其流域面积不到1平方公里，沟口的扇形地发育初期，扇面每年向外扩展可达10多米，一次泥石流的堆积厚度可达1—3米，扇面扩展和增高的速度是很快的。随着堆积范围的扩大，伸长和增高的速度就逐渐变慢，扇面的坡度也逐渐变缓。但发育进入衰退期时，扇面上的堆积物就逐渐转变为以水石流或洪水所搬运来的固体物质为主。

发生在山坡上的粘性泥石流，有时就直接堆积在坡脚下，其面积不大，坡度较陡，成为半锥形，我们称它为“泥石流锥”。它常是沿坡脚公路的主要工程病害。

（二）泥石流侧积堤

沟谷中发生粘性泥石流的流量，都要比该处的洪水流量大若干倍（一般都大1—5倍）。故泥石流沿原来变浅的沟槽奔腾时，部分物质泛滥溢出沟槽，因流速突然变慢而堆积在滩地上；而中间沿沟槽流动的粘性泥石流继续向下流动，最后在沟槽的两侧就成为长条形的堤状的堆积体。这种泥石流侧积堤的横剖面是向沟槽的坡度陡，向沟岸的坡度缓。这种现象在泥石流沟的下游宽的谷底处，特别是在沟口附近较宽阔的谷底内或扇形地中都较明显。在泥石流沟弯道附近，常常凸岸的一侧滩地上也分布着一条泥石流侧积堤。如在北京怀柔县的龙扒沟内和四川成昆铁路线上的利子依达沟口附近，都分布着长几十米、高出漫滩1—2米多的泥石流侧积堤。

（三）泥石流拥高堆积锥

在泥石流沟道的弯道转折处，正对沟槽的凹岸的斜坡上，保留着一堆厚度不大、面积较小而位置较高的粘性泥石流运动过程中残留下来的堆积物。将它分布位置的高度与沟道中同期的粘性泥石流堆积物分布位置的高度，在纵剖面按位相图连接在一起，明显的在凹岸斜坡处有“逆向升高”的特殊现象。这是粘性泥石流在迅速流动时，遇到弯道时在惯性力的作用下冲推而拥聚到迎泥石流的谷坡上（在谷坡的阻挡下，改变泥石流的流向而沿弯曲的沟道继续流动），并将部分粘性泥石流物质残留在谷坡上。这种粘性泥石流因在弯道冲推而拥聚在迎泥石流谷坡的高度处，与弯道中通过粘性泥石流流速和流量成正比，与弯道本身的曲率半径和横断面宽度成反比。例如，1982年北京密云县汗峪沟发生的粘性泥石流，在通过5米宽的沟槽弯道时，凹岸比凸岸坡上残留下来的粘性泥石流物质高8.3米。

（四）泥石流的心滩和漫滩

在泥石流沟的沟槽中，能见到粘性泥石流流动时的龙头，因流速迅速变慢而停滞在沟槽或漫滩上。它是含大量砾石、石块和漂砾的粘性泥石流堆积体。经过后期的流水切割，可能分布在二条浅的沟槽之间或沟槽的一侧，成为含有大量砾石、石块和漂砾的心滩或漫滩的堆积体。它们常分布在

泥石流沟的下游沟道纵坡由陡变缓的宽阔沟槽内。它们也常分布在两条泥石流沟的交汇处附近的宽沟槽内。它们的成因除前面所说是因为粘性泥石流的龙头在此停滞堆积而成的原因以外，还有可能是粘性泥石流在沟槽中流动时，突然得到大量洪水的补充变成水石流或洪流，并将部分粘性泥石流的固体物质（主要是石块和漂砾）残留下来，而被后期的流水侵蚀改造成为心滩或漫滩。上述现象，在北京的怀柔和密云山区、甘肃的武都和文县的泥石流沟都能见到。

（五）泥石流阶地

在泥石流沟的沟槽两侧，有时也能见到由粘性泥石流堆积物所组成的阶梯状地形。它往往分布在泥石流沟的中、下游。它的成因多数是该沟发生一次大的粘性泥石流在沟槽堆积大量粘性泥石流物质，后经流水不断的侵蚀切割而形成的阶梯状地形；也有的是该沟发生多次粘性泥石流，在原来沟槽和漫滩的基础上不断的加积，后经流水侵蚀切割而成的阶梯状地形。粘性泥石流物质所组成的泥石流阶地的形态特征，其阶梯面窄而平缓，阶梯的相对高度往往只有2—5米高，阶地不长、不连续。如甘肃武都的泥湾沟内就有一级宽4—6米、高2—3米、长400多米的粘性泥石流堆积物所组成的泥石流阶地。

二、粘性泥石流沉积物的特征

粘性泥石流沉积物特征的调查和研究，对识别老的泥石流和古的泥石流沉积物，研究泥石流的发育史和自然环境的变迁和指导防治泥石流的工程措施等方面，都有重要的理论和实际的意义。但这方面我们研究得还很不够，现仅谈点我们这几年在野外实际工作中的认识。

（一）粘性泥石流沉积物的结构

1、粒度的成分。粘性泥石流沉积物的颗粒粒径范围经常是分布很宽、大小相差悬殊。在野外的自然剖面中，呈为没有分选的“泥砾”结构，其中的砾石常被泥（粘粒和粉砂等细颗粒）所包裹，也有的砾石之间夹着泥。这样就构成了“泥包砾”和“砾夹泥”的现象。我们对数十个粘性泥石流沉积物颗粒机械成分采样、分析和统计结果表明，在不同地区、不同时期相差很大，就是在同一条泥石流沟内，不同时期发生的粘性泥石流的沉积物颗粒成分，也不完全类同。它们在颗粒机械成分所表现的频率曲线图上有“双峰”、“单峰”和“多峰”的类型。它们与来源地的颗粒机械成分的类型是类同的。这说明，泥石流沉积物颗粒成分的组成，主要是受形成泥石流源地的颗粒成分组成的影响。只有在粘性泥石流的“龙头”停息的地方，含的颗粒粒径较大而且多（有较多的大砾石和漂砾）。并不象有些学者所说的泥石流沉积物颗粒成分组成的频率曲线仅是“双峰”型的。因为在不同地区和时期，提供形成粘性泥石流的固体物质的颗粒成分组成，差别是很大的，“单峰”、“双峰”和“多峰”型的都有，只不过“双峰”型的较多。

2、颗粒的形态。粘性泥石流沉积物中的颗粒形态，一般磨圆度较差，砂和砾石的磨圆度多呈次棱角状，也含有次圆状和棱角状的砂和砾石，有的地方还含有磨圆度较好的砂和砾石。因为粘性泥石流本身一般流动距离较短，颗粒之间互相磨损有限，所以泥石流不易将有棱角的砂和砾石磨损呈圆或次圆状。粘性泥石流沉积物中含有磨圆较好的砂和砾石，都是因为提供形成粘性泥石流的固体物质颗粒本身原来磨圆度就较好。砾石和漂砾的表面常有明显的擦痕和碰击坑，断口粗糙不平。只有在沟床中停积的漂砾，经受多次的后期泥石流的磨蚀和冲击，才有明显的磨光面，面上清楚地保存着大量的泥石流擦痕和碰击坑。砂和砾石的形态还受岩性的影响，一般在花岗岩、灰岩区有较粗大的颗粒。如北京怀柔的碾盘洼沟有块状的花岗岩大漂砾，而在千枚岩、页岩和板岩区则颗粒的粒径较小而且扁平度较大，如甘肃武都的火烧沟和泥湾沟等。

3、砾石的排列。粘性泥石流沉积物中的砾石排列方向，并不是象某些学者所描述的那样，砾石的长轴和扁平面都是倾向上游，与泥石流的流向一致。我们观察和统计数条粘性泥石流沟中的砾石组构之后认为，粘性泥石流沉积物中含的砾石，排列方向是比较复杂的；在不同沉积的地貌部位上和不同的颗粒组成中，有不同的优势排列方向。在甘肃武都几条泥石流的沟道中，测得大的砾石和漂砾的长轴倾向上游方向的，也只占总数的50—70%，倾角大于30°可占到35%以上，与泥石流流向成斜交的占到60—80%。大砾石和漂砾的扁平面倾向上游方向的，也只有总数的60—80%，倾角大于30°的常达到35%以上，与泥石流流向成斜交的常在65—85%。而在沟口的扇形地上，大砾石和漂砾的长轴和扁平面的倾向和倾角变化很大，倾向上游的方向往往只占到40%左右，与泥石流流向成不同角度斜交的往往超过70%。在同样的地貌部位，粘性泥石流性质愈粘稠，含的砾石粒径愈小、愈少，厚度愈大，砾石的排列情况就愈复杂，其优势方向所占的百分数愈小。在某些很粘稠的泥石流沉积物的剖面上，很难用肉眼观察出小砾石总体的优势排列方向。在甘肃武都，我们测得粒径在2—25厘米范围内的砾石，扁平面倾向上游方向的只占总数的25—35%，倾角大小变化的范围大，与泥石流流向呈平行、斜交和垂直的都有。我们按30°作为一个区间统计，占优势排列方向的砾石数量常不到总数的35%。

（二）粘性泥石流的层理构造

粘性泥石流的沉积物，从总体来看，在剖面上是有层理的，横剖面经常是不连续的透镜体，纵剖面较为平直连续；从局部看，颗粒之间是大小混合，杂乱无章。

1、粘性泥石流沉积物的层理及划分。由于每次形成的粘性泥石流物质组成和规模等情况不完全相同，这些物质沉积之后，又经常被后期的水流所冲刷。故在泥石流沉积的剖面中可以划分出各层之间的界面，而且有的层理是较易划分出来的，也有些剖面中是由数层较薄的粘性泥石流沉积物所成。

2、粘性泥石流沉积物的层理厚度。粘性泥石流所形成沉积层的厚度，直接受泥石流的流量、粘稠度和颗粒粒径的影响。粘性泥石流的流量愈大、愈粘稠，含粗大的颗粒愈多，堆积的厚度就愈厚。在横断面上呈透镜状，两侧突然尖灭，倾角较大，而底部和表面常是微有起伏，总体上比较平缓；在纵断面上，凡是泥石流“龙头”停息的地方沉积物的厚度就较厚，颗粒也较大，而后向上游逐渐变薄，总体上比较平稳。我们所观察到的剖面中，粘性泥石流沉积物所形成的层理厚度最厚的单层没有超过6米，最薄单层的厚度也大于10厘米。它们都属于中、厚层的层理类型。统计武都地区的泥石流剖面中，其粘性泥石流所形成的层理，单层厚度在20厘米到2米之间的占80%以上，并且56%集中在25厘米至1米之间。

3、粘性泥石流沉积层的层理内部韵律。粘性泥石流形成层理的内部颗粒的分布情况是较复杂的，我们见到的有下列几种：

（1）递变层。在层理的剖面中，虽颗粒之间都是大小混杂的，但粗大的颗粒（砾石和石块）相对集聚在下部，向上剖面中含的大颗粒不但在数量上迅速减少，而且颗粒粒径也迅速的变小；相反，细小颗粒的含量从下向上逐渐增加，而且表面往往形成主要是由粉砂和粘土等组成的细泥层。这是沉积物中的一种递变现象，所以我们称它为泥石流的递变层。这显然是粘性泥石流堆积下来的颗粒大小互相混杂的浆体，在沉积后的很短一段时间内，经过重力的分异作用，粗大的砾石和石块因本身的自重大而逐渐下沉，细颗粒随着被挤压的浆体而悬浮向上移动所形成的。这种递变层理一般在厚层（大都在50厘米以上），内部的颗粒级配相差较大时表现明显。

（2）底泥层。在粘性泥石流堆积层的底部，常有一层厚几厘米至十几厘米、物质主要是粉砂、粘土夹有砂和较小的砾石所组成。底泥层的下部是随原始底部地形的起伏而起伏，因它含

粘土较多，故干涸后较紧实。底泥层的上部常和递变层的下部粗的砾石和漂砾直接接触，互相间没有明显的界面。底泥层可能是粘性泥石流在形成流动的最初阶段，有一个不断向前沿沟道铺床过程，使部分泥浆粘糊在沿途的沟床上，从而减少后来泥石流流动时沿途的阻力；当后来的粘性泥石流停滞在沟床上，原来铺床过程中粘铺在沟床上的泥浆就成为泥层。这种现象在武都的甘川公路413公里处是很明显的。

(3) 粗化层。由于泥石流发生在时间上有间歇性，粘性泥石流堆积层的表面，常经受以后长时期的雨水或流水的冲刷，将部分或全部细的颗粒侵蚀而随水流走，留下不能被搬运走的粗大颗粒，使表面变得粗糙不平。我们将粘性泥石流堆积层的这部分表层称为粗化层。

(4) 斑状层。当粘性泥石流比较粘稠，其中含的粗大颗粒粒径又比较小（小的砾石）而且少，它的沉积物所形成的层理剖面就变成以粘土、粉砂和细砂所组成的泥质中镶嵌着少数粗大颗粒，成为具有“斑晶”状的泥砾，而没有明显的重力分异作用所产生的递变现象。我们称这种粘性泥石流堆积层为斑状层，它的表层也有粗化层，底部也有底泥层。

(三) 粘性泥石流沉积中其它构造

粘性泥石流沉积物常见到下述构造：

1、石线构造。我们在粘性泥石流的沉积物中，常见大砾石、块石和漂砾数个或十几个排列成一条线，前后相依，互相迭加在一起，我们称这种特有的石头排列现象为石线构造。它主要是含有大颗粒（砾石、石块和漂砾）的粘性泥石流在流动过程中，若有一块大颗粒停滞下来以后，往往阻止后面的大颗粒继续流动，而连续的停滞在后面依次形成。

2、挤压构造。在粘性泥石流的剖面中，常见到下部大石块或漂砾的底部和周围大多数细小砾石的长轴和扁平面，都是因为受挤压使倾向与大石块或漂砾的岩面（包括底部和周围侧面）接近平行。我们称这样的砾石排列现象为挤压构造。它是粘性泥石流堆积物中的大石块或漂砾不断的下沉过程中挤压底部和周围的小砾石，使它们逐渐调整原来的排列方向，呈为与岩面平行的构造。这种现象在甘肃、北京和云南的一些泥石流沉积的剖面都能观察到。

3、环状构造。在粘性泥石流小型的舌形体前端，常有一些砾石沿舌前端和两侧形成若干个半环。砾石的倾角绝大多数是大于 45° ，有的几乎直立。我们称这种环状排列的砾石所组成的构造为环状构造。这种现象在云南东川的蒋家沟和甘肃武都的火烧沟的支沟处，都能见到。它常是粘性泥石流停滞后，还继续受后面来的粘性泥石流的推挤，不断地继续蠕动而形成的。

4、充填构造。在粘性泥石流沉积的剖面中，有时可以见到被后期侵蚀形成楔状、袋状、窝状或柱状等形态的凹槽中，充填着后期发生的泥石流或被流水所冲洗改造后的泥石流物质。我们称这种现象为泥石流的充填构造。在甘肃武都泉家沟内，看到粘性泥石流充填构造内砾石排列有一定的方向性，靠近边缘的砾石扁平面多平行于槽壁。这可能是砾石在堆积过程中不断经受中心的挤压而成，也可能有的就是流水在冲洗泥石流堆积物的过程中砾石不能被搬运而沿壁下滑形成的；或两者都兼而有之。

(四) 泥球

在粘性泥石流的堆积物中，能见到直径几厘米至几十厘米大的泥球。

据我们沿泥石流沟观察统计的结果，泥球的滚圆程度与它被搬运的距离成正比，其体积大小与它被泥石流搬运的距离成反比。泥球是整体性较好的大土块（黄土和红土等）和碎屑堆积物，被泥石流搬运过程中碰撞了边棱，又不断地粘附着一层石屑和泥浆体。所以大多数泥球都有很大的内核和几厘米厚的外壳两部分组成的。在武都的北峪河中，我们观察到全由小砾石镶嵌在核外壳上的泥球，没有粘土砂砾共同形成一层包裹的外壳。它可能不是在粘（下转第41页）

三、结果分析

1、离散度E值的分析。对于a轴的两组E值进行方差分析，得 $F = 30.3862 > F_{0.01} = 7.64$ ，表明两组数据差异特别显著；对于ab面两组E值进行方差分析，得 $F = 5.89 > F_{0.05} = 4.20$ ，表明两组数据差异显著。天山E值明显高于武都E值，且a轴更为明显，表明武都砾石组构数据离散程度更大。

2、其余几个参数的分析。我们画了二轴比图解，在a轴的两轴比图解上，若以直线 $C = 0.974$ 为界，则18个天山点除1个点外，其余17个点落在直线的右上方，（即 $C \geq 0.974$ ），而15个武都点除4个之外，其余11个落在直线左下方（即 $C < 0.974$ ）。而在ab面的两轴比图解上，若以直线 $C = 1$ 为界，则18个天山点除7个点外其余11个落在直线的右上方（即 $C > 1$ ），而15个武都点除了1个点之外，其余14个点落在直线左下方（即 $C < 1$ ）。类似的方法分析K值可知，天山略高于武都（但不如C值那样明显），这就表明了天山组构型式的极密程度和优选定向都高于武都。与E值结果相似，a轴资料区分效果较ab面更好。

3 庐山和马衙山古混杂堆积物计算结果。据收集到的资料，我们对庐山16个点和马衙山11个点进行了计算。

分析这些结果表明，庐山的E、K、C值，介于武都和天山之间，而马衙山较接近于天山。但目前这些参数及其组合还不足以区分古沉积物或混杂堆积的成因，需要进一步构造新的统计量，提取新的信息，这有待于继续的工作。

四、计算砾向组构的程序

程序使用说明。本程序是在VICTOR—9000机上通过的1—99行可为DATA语向，第一个数据必须是样品个数n，然后把倾向 θ_i 倾角 φ_i 成对来输入（程序清单略），输出结果为：

- 1、三个特征值和它们所对应的特征向量；
- 2、 S_1, S_2, S_3 的值；
- 3、参数 $l_n(S_1/S_2)$ 、 $l_n(S_2/S_3)$ 和K、C、E的值。

~~~~~  
(上接第34页)

性泥石流中形成的泥球，而是在洪水中形成的泥球，或水石流中形成的泥球。

#### (五) 砾石和漂砾的表面特征

粘性泥石流沉积物中，常含有大的砾石和漂砾，其表面常有磨光面、各种形状的大小擦痕和碰击坑。这是由于砾石和漂砾在泥石流搬运过程中以滚动、跳跃和滑动等方式在沟床上走走停停，表面上经常遭受碰击和摩擦，因而形成了磨光面、擦痕和碰击坑。我们在武都龙床沟的几块大漂砾表面，统计泥石流的擦痕类型有十多种，如弧形、钉子形、鼠尾形、锯齿形和藕节形等，长有20多厘米、宽有1厘米多的、深有0.6厘米。密度最大的一处，25平方厘米内有大小40多条擦痕，各种方向和形状的擦痕都展布在一个磨擦面上。总之，泥石流的擦痕的形状是多样的；在同一个磨擦面上，擦痕的长、宽和深互相可以相差很大。它们的断面是粗糙不平和不规则的，并且经常有不同形状和大小的碰击坑（其断面很粗糙），同时出现在有擦痕的磨擦面上。这些都说明，砾石和石块在泥石流中运动的速度是较快的，经常互相碰击，刻蚀的力量是不均一的。