

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

泥石流的宏观沉积构造与形成机理

刘耕年 崔之久 王晓晖
(北京大学)



根据云南东川、甘肃武都、辽宁阜新现代和古代泥石流沉积概括出 3 类不同泥石流,即稀性泥石流(水石流)、过渡型泥石流和粘性泥石流的宏观沉积构造特征。在云南东川和甘肃武都进行现代泥石流暴发和堆积过程实地观测的基础上,对上述 3 类泥石流沉积构造的形成机理作了探讨。初步建立用宏观构造现象组合识别泥石流类型的模式。

关键词 泥石流 沉积构造 形成机理

1 前言

泥石流沉积特征是其物质组成、流体类型和沉积过程的反映。国内研究现代泥石流的学者多采用粘度加流态对其进行分类。表 1 中列出几个代表性分类方案,他们实际上采用容重(单位体积流体浓度 T/m^3)值进行划分,同时认为流体的容重越大,泥石流的粘度也越大^[1]。流体力学研究表明稀性泥石流(non-cohesive debris flow)服从 Bagnold 颗粒流(granular flow)模式^[7-9];粘性泥石流(cohesive debris flow)服从固液结构两相粘塑性体(viscoplastic)模式^[10];过渡型泥石流,即亚粘性泥石流也服从颗粒流模式。稀性泥石流在有些文献中称水石流。有一类主要由粉砂和粘土组成的泥石流称为泥流(mud flow),它服从宾汉(Bingham)体模式,是典型的粘性流体^[1]。

表 1 泥石流的几种划分方案(单位:容重 T/m^3)

Table 1 Practically adopted types of debris flow (T/m^3)

类 型	张信宝 ^[2] 1981	王裕宜 ^[3] 1981	袁建模 ^[4] 1986	唐邦兴 ^[5] 1981	弗莱施曼 ^[6] 1986
挟沙水流	1.0—1.35	1.02—1.35	<1.3		
稀性泥石流	1.26—1.69	1.35—1.69	1.3—1.7	1.3—1.8	1.2—1.5
过渡型泥石流	1.50—1.94	1.69—1.94	1.7—2.0	1.8—2.0	
粘性泥石流	1.63—2.24	1.89—2.24	>2.0	2.0—2.2	1.4—1.9(有时大于 2)

笔者曾在云南东川、甘肃武都和北京山区现代泥石流发生区及辽宁阜新中生代煤系地层中古泥石流出露区进行野外调查,直接观测了现代泥石流暴发过程和沉积体特征,为研究其沉积构造形成机理提供了依据。

注:本文为中国科学院东川泥石流观测研究站基金资助项目,编号:1989-1。

本文 1993 年 6 月收到,7 月改回,张力编辑。

2 泥石流的宏观沉积构造

这里所谓泥石流的宏观沉积构造是指其组成成分(颗粒)在空间上的排列组合方式所显示的构造特征。

2.1 稀性泥石流沉积构造

稀性泥石流在进入扇地或坡降变小时,较粗大的碎屑首先沉积,浆体继续流动,在坡度更

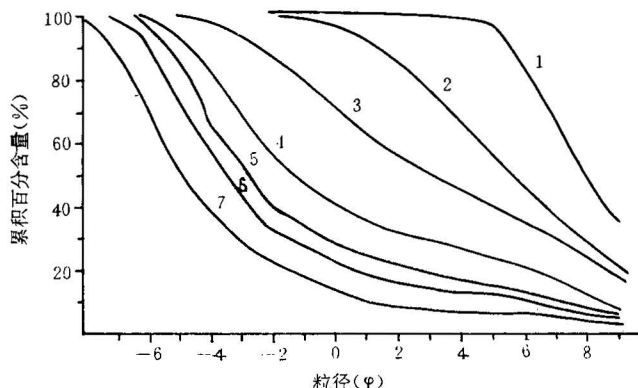


图1 云南东川蒋家沟泥石流粒度累计曲线(据吴积善^[1])

Fig. 1 Grain-size accumulative curve of debris flows at Jiangjiagou, Valley of Dongchuan, Yunnan Province (after Wu Jishan^[1])

1. 洪水; 2. 稀性泥石流; 3. 过渡型泥石流; 4-6. 粘性泥石流; 7. 源区样品

1. Flood; 2. non-cohesive debris flow; 3. intermediate debris flow;

4-6. cohesive debris flow; 7. source area samples

它是稀性泥石流的典型宏观构造,平面上呈垅岗状沿流向延伸,延伸距离几十米至数百米。纵向沿原始地面线状延伸,由上游到下游砾石大小略有减小,扁平砾石叠瓦状低角度向上游倾斜。底面为一冲刷面。横剖面呈透镜状,顶面和底面都起伏不平。

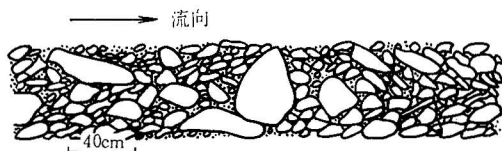


图2 稀性泥石流的叠瓦构造(东川)

Fig. 2 Imbricate structure of non-cohesive debris flow (Dongchuan)

粗大砾石常形成砾石支撑-叠置构造。这种沉积构造多见于扇形地交汇点以上附近,它们往往构成扇地沉积的筛积物,内部见叠瓦状构造。

缓处堆积或汇入主河道变成挟沙水流。首先堆积的粗大砾石呈垅条状沿流向延伸(图版 I-1)。中间部分的粗大砾石长轴多平行流向,两侧砾石的长轴与流向锐角相交。纵向延伸的砾石垅形成石线构造^[11],横向呈透镜状。强烈紊动和扰动的泥石流对底床产生侵蚀,常形成切割填充构造。停积下来的砾石常表现为叠瓦状构造,扁平面倾向上游。下游堆积细粒物质成片状表泥层,有时可见波状斜层理和平行层理。泥石流沉积的粒度组成主要反映其搬运力过程(图1)。

稀性泥石流常见的宏观沉积构造有:

石线构造(图版 I-2)

叠瓦构造 以扁平砾石为主的稀性泥石流堆积多见,扁平面倾向上游(图2)。它与河流相砾石的不同在于其砾石的分选差,磨圆差,定向性差。此外,具叠瓦构造的稀性泥石流沉积顶面和底面都起伏不平,有大砾石突出。

砾石支撑-叠置构造 稀性泥石流在扇地上随搬运力减小而卸荷,大量粗碎屑迅速沉积,细粒部分继续流动。首先沉积的

块状表泥层 系分异的细粒浆体沉积。平面上呈片状沉积在扇地交汇点以下。由于碎屑含量较高,沉积迅速,一般呈块状构造,有时显示正粒级构造。

2.2 过渡型泥石流沉积构造

过渡型泥石流堆积体平面呈指状或舌状,厚度向上游减薄。堆积体边缘由较粗大的砾石构成一陡峭的边坎。纵剖面砾石呈叠瓦状,扁平面向上游或向主流线方向倾斜,形成环状流线构造^[11]。横剖面扁平砾石构成向心状(向斜状)构造。泥石流在堆积过程中发生一定的流体分化,细粒的浆体向上和向外溢流,粗粒物质下沉。沉积物表现出递变层理(正粒级层)。外溢的细粒浆体堆积成块状泥沙层围绕主体沉积分布。边缘失去细粒浆体的部分成为一粗化的砾石堤,堤内为保持原始组分的流体——显示泥质填充的正粒级层。砾石组构特点见图 3。过渡型泥石流对底床不产生明显的冲刷,顶面平坦。粘度较大,有一定分选的过渡型泥石流常见下部反向粒级层(反向递变层理),上部正粒级层的组合构造,反-正粒级层理。

过渡型泥石流常见的宏观沉积构造有:

环状流线构造 泥石流体边缘的砾石在停积时受挤压剪切而成的定向构造,砾石最大扁平面环绕主流线倾斜(图 3)。另外还可见大小砾石差异运动形成的绕流构造。

反-正粒级层理 此乃过渡型泥石流剖面特征。上部的正粒级是重力分异的结果,下部的反粒级是层流剪切和颗粒碰撞剪切的结果。(图版 I—3)。

叠瓦-直立构造 较高容重的过渡型泥石流中含有大量扁平砾石,砾石扁平面的倾角由底向顶变大,在沉积层的顶部甚至直立。这是泥石流底部速度梯度较大对颗粒产生较强的剪切,到顶部剪切作用减弱,粗颗粒靠流体的结构力支撑。整个剖面显示正粒级层特点(图 4 B 层)。

过渡型泥石流粒度组成接近源区碎屑,但沉积时的弱分异又使二者不同(图 1,2)。

2.3 粘性泥石流沉积构造

粘性泥石流体中的水和碎屑结合成一定的结构作整体运动,内部无自由水,为结构两相流^[10](图版 I—4)。野外观测和实验表明随着泥石流的容重加大,粘度增高,粘性泥石流的流态由层流、塞流变为塑性滑动流^[1]。王裕宜等指出^①低浓度(容重 2.163 T/m^3)泥石流沉积由于应力衰减而出现麻点状表面,中浓度(容重 2.228 T/m^3)泥石流表面呈蜂窝状,高浓度(容重 2.299 T/m^3)泥石流表面呈环状。粘性泥石流沉积体的边缘陡峭($49^\circ-57^\circ$),平面呈叶状舌形,顶面平坦,底面不出现侵蚀现象,横剖面呈盾形。阵性流在扇形地上堆积时龙头部位由于阵性推挤而出现环形的表面沟和脊,内部的砾石定向排列,也可以出现环状流线构造(图 3)。泥石流沉积体中间厚,边缘薄;前端厚,尾端薄。部分粘性泥石流流动时底部存在明显的速度梯度

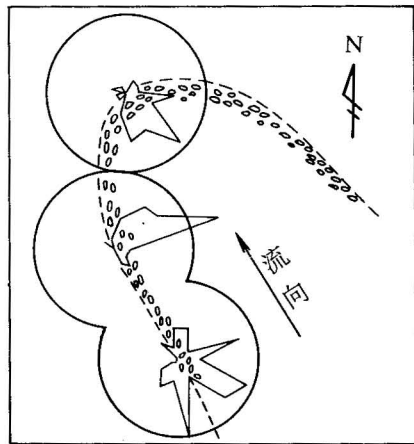


图 3 舌状泥石流沉积砾石倾向组构平面图(东川)

Fig. 3 Fabric of gravel dip in a tongue form debris flow (Dongchuan)

① 王裕宜等. 泥石流体的应力衰减和堆积形貌初探. 1990.

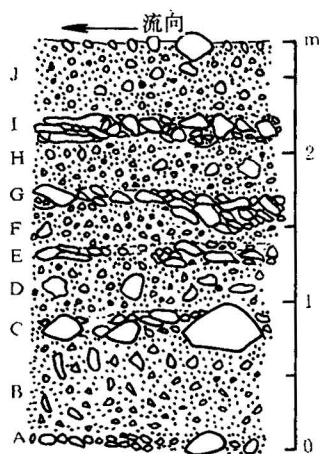


图4 泥石流的叠瓦-直立构造(东川)

Fig. 4 Imbricated-vertical structure of debris flow (Dongchuan)

A, C, E, G, I 为冲刷层;

A, C, E, G, I are scoured layers

层,使泥石流沉积出现底部及粒级层或底泥层^[11];而上部为无速度梯度的流核。上述二者组合起来形成粘性泥石流反粒级-混杂构造或底泥-混杂构造^[12]。

粘性泥石流常见的宏观沉积构造有:

环状流线构造 具平面特征,系阵性流推挤剪切的结果。

反向粒级层理 具剖面特征,是层流剪切的结果。扁平砾石倾角由底向顶增大,泥质基底支撑(图4中的D, F, H, J)。

反粒级-混杂构造 泥石流层下部为反粒级,上部为块状的混杂层,泥质基底支撑。底部的反粒级层可见平行层理或平缓的波状层理(图版1—5)。

混杂构造、底泥-混杂构造 见于粘性非常大的泥石流沉积中,无分选、磨圆和层理。有时在块状泥质(角)砾沉积的底部有一层底泥,显示出纹层沿非侵蚀性底床平缓延伸(图版1—6)。在东川蒋家沟现代泥石流发生区观测到的容量 $>2.20 \text{ T/m}^3$ 的高容重粘性泥石流,均显示混杂构造和底泥-混杂构造。

楔状尖灭体构造^[13] 系粘性泥石流剖面中侧向变化形式,无论垂直还是平行流体切剖面,泥石流层以突然楔形

尖灭的方式变化。它是结构性泥石流^[1]可以保持陡峭边缘的反映。

3 泥石流沉积构造形成机制探讨

3.1 泥石流的粒度组成和流体特征

泥石流沉积的粒度组成除主要反映源区的碎屑组成外,还和运移过程也有关系^[1,2,14]。稀性泥石流在沉积过程中粒度分异明显,粗大碎屑先沉积,细粒浆体在崩地下游沉积或汇入主河道变为挟沙水流。因此,稀性泥石流沉积的粒度组成不代表运动中泥石流体的整体级配,其粒度曲线更接近挟沙水流(图1曲线2)^[1]。过渡型泥石流在沉积过程中粒度组成发生有限的分异,其粒度累积曲线介于流水和源区碎屑之间(图1曲线3)。粘性泥石流做整体搬运,整体堆积,沉积物的粒度组成接近源区碎屑的级配(图1曲线4,5,6),粒度组成的频率曲线呈多峰(图5),反映源区碎屑特征。

泥石流流体的结构类型和结构强度与流体中粘土矿物的含量有关,也与流体的容重重有关^[1]。一般粘土矿物含量和容重高,流体的强度就大,悬浮搬运大砾石的能力也大。

3.2 泥石流中碎屑的运移机制

稀性泥石流的容重 $1.3—1.7 \text{ T/m}^3$ ^[1],流体模式为洪水-颗粒流。服从洪水模式的泥石流,其中含电解质的水和粘土构成浆体,粉砂、砂、砾石构成固相被搬运。由下向上碎屑的大小和含量都锐减。反映其流体特征的沉积构造有:石线构造、叠瓦构造、砾石支撑-叠置构造等。服从颗粒流模式的泥石流包括稀性和过渡型泥石流中粒土粉砂粒级碎屑含量少,水和粘土粉砂构不成具有一定结构力的浆体的流体^[7-9]。泥石流中碎屑受摩擦力、碰撞力和离散力的作用。颗粒

流的离散力使大颗粒向上分异,流体由下向上粒径变大,出现反粒级。有时顶部离散力变小,会出现正粒级。由此,稀性泥石流和过渡型泥石流服从颗粒流模式者,反映流体特征的沉积构造有:反粒级层、反-正粒级层、叠瓦-直立和环状流线构造。粘性泥石流的容重 $1.9-2.3\text{T/m}^3$,流体模式为结构两相流^[10]。流体中水和细碎屑组成具有一定结构的浆体,粗碎屑为固相。泥石流运动过程中浆体

和粗碎屑再结合成一定结构的流体做整体搬运^[1]。运动中的泥石流由下向上碎屑的大小和含量分异不明显,速度梯度变化大。其沉积体中反映流体特征的沉积构造有:反粒级-混杂构造、底泥-混杂构造、楔状尖灭体构造^[13]。

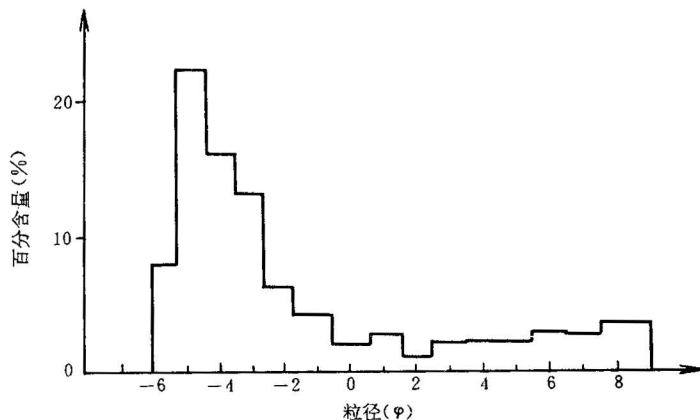


图5 云南东川蒋家沟粘性泥石流(容重 2.2T/m^3)粒度频率曲线

Fig. 5 Frequency curve of grain-size of cohesive debris flow in Jiangjiagou, Dongchuan, Yunnan Province

参 考 文 献

- 1 吴积善,康志成,田连权,章书成. 云南蒋家沟泥石流观测研究. 北京:科学出版社,1990.
- 2 张信宝,何淑芬. 云南盈江浑水沟泥石流流体组成的初步研究. 泥石流论文集(1). 重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1981. 67—73 页.
- 3 王裕宜. 云南盈江浑水沟粘性泥石流浆体理化特征. 见:泥石流论文集(1). 重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1981. 74—78 页.
- 4 袁建模,孙恩智. 泥石流堆积物的砾组分析. 见:泥石流(3). 重庆:科学技术出版社重庆分社,1986. 84—90 页.
- 5 唐邦兴. 西藏泥石流的特征. 见:泥石流论文集(1), 重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1981. 6—12 页.
- 6 弗莱施曼. 泥石流. 北京:科学出版社,1986. 83 页.
- 7 Bagnold R A. The flow of cohesionless grains in fluids; Royal Society London philosophical Transactions, A249, 1956, 235—297.
- 8 Middleton G V, Hampton M H. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In: Stanley and Swift eds. Marine sediment transport and environmental management. New York: Wiley and Sons, 1976. 197—218.
- 9 Lowe D R. Sediment gravity-flows — II, Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. Journal of Sedimentary Petrology, 1982, 52:279—297.
- 10 Wang, Ni, Zhang. Study on the mechanism of steady viscous debris flow. International conference on debris flow and flood protest. Serie A, Emei, Sicuan, 1991.
- 11 崔之久. 初探沟谷泥石流及其扇形地的沉积类型、宏观特征与形成机制. 沉积学报, 1986, 4(2): 69—79.
- 12 科林森 J D, 汤普森 D B 著. 沉积构造. 付泽明, 李惠生译. 北京:地质出版社, 1988. 17—32.
- 13 李思田. 断陷盆地分析与聚煤规律. 北京:地质出版社, 1988. 46—60 页.
- 14 里丁 H G 著. 沉积环境和相. 周明鉴等译. 北京:科学出版社, 1985. 20—80.

SEDIMENTARY MACROSTRUCTURES OF DEBRIS FLOWS AND THEIR FORMATION MECHANISM

Liu Gengnian, Cui Zhijiu and Wang Xiaohui

(*Department of Geography, Peking University, Beijing*)

Abstract

The discussion of sedimentary macrostructures of debris flows and their formation mechanism is based on the data of the process and deposition of the present and ancient debris-flows in Dongchuan of Yunnan, Wudu of Gansu and Fuxin of Liaoning. Non-cohesive debris flow with a density of $1.3-1.7 \text{ T/m}^3$ follows the hydraulic fluid or granular flow model. In the hydraulic fluid of flood, electrolytic water combines with clay to form pulp transporting solid debris. The sedimentary structures showing fluid processes are stone-line structure, imbricated structure, gravel supporting-superimposed structure. A part of non-cohesive debris flow and transitional debris flow (density $1.7-1.9 \text{ T/m}^3$) follow the granular flow model. Debris is subjected to the actions of friction, collision and dispersion, of which dispersion action forces coarse debris moving upward to form inverse graded load. The sedimentary structures showing granular flow include inverse graded bedding, inverse-normal graded bedding, imbricated-vertical structure, and circling linear structure. Cohesive debris flow with a density of $1.9-2.3 \text{ T/m}^3$ follows the structural two-phase flow (viscoplastic) model. The sedimentary structures showing the processes of cohesive debris flow are inverse graded-chaotic structure, bottom mud-chaotic structure, and out-wedging structure.

Key words: debris flow, sedimentary structure, formation mechanism

作者简介

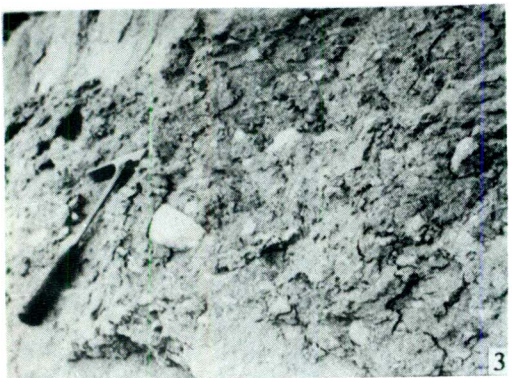
刘耕年,男,1962年生,北京大学城市与环境学系(原地理系)副教授。从事地貌、第四纪地质与沉积教学研究工作。通讯地址:北京大学城市与环境学系。邮码:100871。



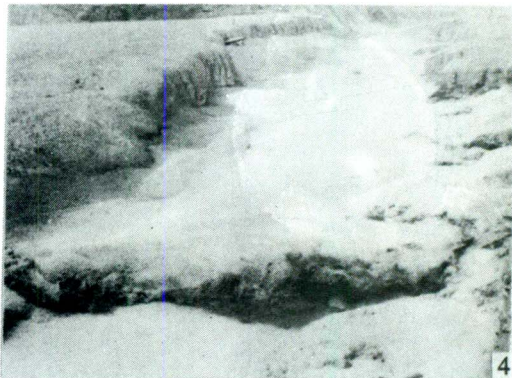
稀性泥石流沉积砾石垅(东川)



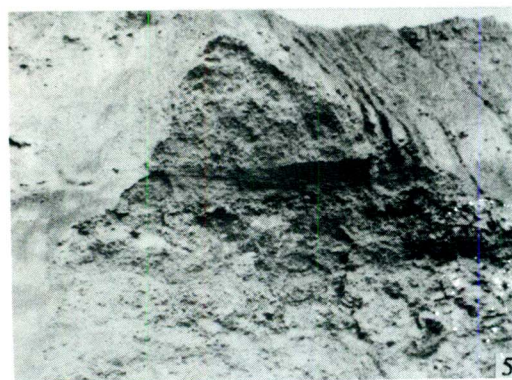
稀性泥石流石线构造(东川)



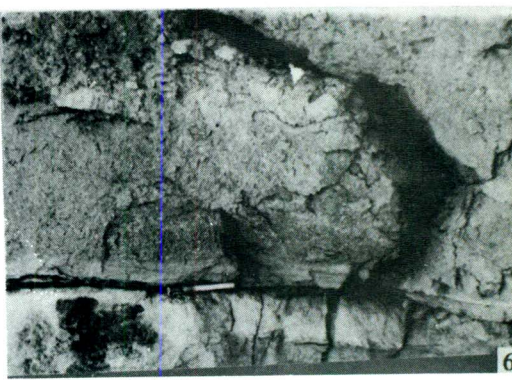
反-正粒级层理(阜新)



流动过程中的粘性泥石流(东川)



混杂构造和冲刷层(东川)



反粒级层和底泥层(阜新)