

引用格式: 渠敬凯, 杨为民, 申俊峰, 等, 2022. 甘肃岷县浑水沟泥包砾成因机制及其灾害意义 [J]. 地质力学学报, 28 (6): 1046–1058. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222828

Citation: QU J K, YANG W M, SHEN J F, et al., 2022. Genesis mechanism and disaster-causing significance of the mud-coated gravel in the Hunshui gully, Min County, Gansu Province [J]. Journal of Geomechanics, 28 (6): 1046–1058. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222828

甘肃岷县浑水沟泥包砾成因机制及其灾害意义

渠敬凯^{1,2,3}, 杨为民^{1,3,4}, 申俊峰², 万飞鹏^{1,2,3}, 邱占林⁵, 马思琦^{1,3,4}, 徐传成^{1,2}
QU Jingkai^{1,2,3}, YANG Weimin^{1,3,4}, SHEN Junfeng², WAN Feipeng^{1,2,3}, QIU Zhanlin⁵, MA Siqui^{1,3,4},
XU Chuancheng^{1,2}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
4. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081;
5. 龙岩学院, 福建 龙岩 364012

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*
3. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
4. *Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*
5. *Longyan University, Longyan 364012, Fujian, China*

Genesis mechanism and disaster-causing significance of the mud-coated gravel in the Hunshui gully, Min County, Gansu Province

Abstract: In August 2020, due to the continuous rainfall in southeast Gansu, especially the heavy rainfall processes, debris flows broke out in the Hunshui gully. The left bank of the Fangjiashan landslide was destabilized and sliding, seriously threatening the safety of the Chengdu–Lanzhou Railway at the mouth of the gully. Based on the field investigation results, remote sensing interpretation, and laboratory tests, we studied the mud-coated gravel's morphology, mineral composition, and accumulation characteristics, analyzed the geological environment and mechanism for its formation and discussed its disaster-causing significance. The results show that mud-coated gravels are distributed in the lower reaches of the circulation area and the accumulation area. It presents a spherical and multi-layered structure composed of quartz, calcite, clay minerals, etc. Its formation is mainly controlled by the clay minerals in the Quaternary loess and Paleogene mudstone in the basin. The slow-moving gullies, landslides, and collapses developed on the bank slope as well as appropriate hydrodynamic conditions, promoted the formation and autogenesis of the mud-coated gravel. The impact force of debris flow increases with the particle size of mud-coated gravel, and the critical velocity required for restarting a debris flow is smaller than that of block rock. Mud-coated gravel is the result of the joint action of the Paleogene mudstone and debris flow, and it can aggravate the debris flow hazard. Therefore, it is urgent to control the debris flows in the Hunshui gully to ensure the safe operation of the Chengdu–Lanzhou Railway.

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0902)

This research is financially supported by the Second Comprehensive Scientific Investigation and Research Project on the Qinghai-Tibet Plateau (Grant 2019QZKK0902)

第一作者简介: 渠敬凯 (1998—), 男, 在读硕士, 主要从事地质灾害、成因矿物学等方面研究. E-mail: qujingkai113@163.com

通讯作者: 杨为民 (1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害、工程地质、构造地质等方面科研. E-mail: snon_72@163.com

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-09-18; 责任编辑: 王婧

Keywords: mud-coated gravel; debris flow; clay mineral; formation mechanism; impact force; threshold velocity

摘 要: 2020 年 8 月，甘东南地区持续降雨且伴随多个强降雨过程，岷县梅川镇浑水沟暴发泥石流，左岸方家山滑坡失稳下滑，严重威胁沟口成兰铁路安全。基于野外调查、遥感解译和室内测试结果，分析泥包砾的形态结构、矿物组成以及堆积特征，研究泥包砾形成的地质环境和机制，探讨泥包砾的灾害意义。研究结果表明：泥包砾分布于浑水沟流通区下游及堆积区，呈球形且具多层结构，由石英、方解石、黏土矿物等组成，其形成主要受控于流域第四系黄土和古近系泥岩中的黏土矿物，而较缓的沟道、岸坡黄土滑坡和崩塌的发育以及适宜的水动力条件，促进了泥包砾的形成和自生加大；泥石流冲击力随着泥包砾粒径的增大而增大，再起动所需临界泥石流流速相较于块石较小；泥包砾是古近系泥岩与泥石流共同作用的结果，具有加剧泥石流危害的作用，因此亟需治理浑水沟泥石流以保证成兰铁路的安全运营。

关键词: 泥包砾；泥石流；黏土矿物；形成机制；冲击力；起动速度

中图分类号: P694；P642.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616（2022）06-1046-13

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222828

0 引言

甘肃省岷县构造上位于西秦岭构造带西延与南北向构造带交汇区域，地质灾害频发，是中国崩滑流地质灾害强发区之一，严重威胁岷县人民生命财产安全（丁晓莉和刘世梅，2006）。在第二次青藏高原东北缘泥石流野外科学考察时，发现了一种外形似球状的泥石流堆积物——泥包砾，该堆积物形成条件特殊，考察时仅在永靖县小金沟与岷县浑水沟沟道内发现其存在。在黏性泥石流流动过程中，因固液两相介质的不同，泥包砾在一定条件下发生自生加大的现象；随着砾径的加大，由于其动力学实质是非牛顿流体与牛顿流体的交互作用，使得泥石流的破坏力不断增强（何晓英，2014；杨红娟等，2016；刘晶晶等，2020）。

学者对泥包砾的研究最先开始于第四纪冰川沉积物，由于形成条件的不同，其形成机制存在争议。李祥碧和徐广标（1985）通过对潘集矿区泥包砾的研究，认为其是由冰川砾石之间长期互相挤压产生弹性与非弹性变形而形成。杨文远和李宏义（1988）、臧秀玲和林国友（2011）等通过对大连、沈阳泥包砾物质组成的研究，认为其为第四纪冰期具有泥石流特征的洪积物。李相博等（2014）和廖建波等（2017）通过对鄂尔多斯盆地湖盆中央地区延长组深水厚层块状砂岩中泥包砾形成与演变过程的研究，认为泥包砾是由三角洲前缘半固结软泥层中砂质、泥质或白云质团块在

碎屑流搬运过程中发生滚动附着泥质所形成。上述研究集中于第四纪以前的沉积地层中出现的泥包砾，而对全新世现代沉积中出现的泥包砾研究极少，特别是对泥石流堆积物中的泥包砾，仅田连权等（1994）在沟道粘性泥石流堆积地貌成因分类一文中提到泥石流中存在该种现象，但对其形成条件、成因机制、灾害意义等方面的研究仍处于空白。

泥包砾作为泥石流流体中的固体物质（砾石），提高了泥石流流体运动时的破坏力。以往的研究大都集中在流体中块石形状、大小等对泥石流破坏力的作用，如胡桂胜等（2011）通过对三眼峪沟泥石流堆积区及流通区的最大砾石冲击力的计算，发现冲击力大小随粗颗粒最大直径的增大而增大，但并未对这种球形泥包砾的破坏力进行研究；何晓英等（2016）通过泥石流冲击模拟实验验证了泥石流冲击能量随着颗粒粒径增大而增长。

以上对泥包砾形成机制的研究仅存在于沉积学中，因其形成条件的特殊性，工程地质领域对其少有研究。同时，目前对于泥石流危害的研究大多着重于泥石流中块石的冲击力，对泥包砾的危害并未进行细致探讨。文章在吸收已有研究成果的基础上，对浑水沟进行野外实地考察、遥感解译，对沟内不同粒径泥包砾取样并进行室内XDR矿物衍射实验，分析其形成环境及矿物成分的组成规律，总结出泥包砾的形成机制，探究了泥包砾在泥石流发育时所产生的危害，以期为该类型泥石流灾害的预防与治理提供科学依据。

1 地质环境背景

岷县大地构造上处于巴颜喀拉块体北侧，西秦岭构造带的西延（陈云长等，2013）。研究区内构造复杂、断裂发育，主要发育有临潭-宕昌断裂、岷县-茶埠断裂及其分支断裂，断裂总体上具有破碎带发育、活动性较强的特点（郑文俊等，2013）。地层自晚古生界泥盆系至新生界第四系均有出露，岩性以晚古生代的海陆交互相层的灰岩、砂岩、泥岩等为主，研究区浑水沟流域主要出露古近系及小部分泥盆系地层（图1）。泥盆系岩性主要以板岩、千枚岩为主；古近系岩性主要以砖红色、紫红色质地较疏松的砾岩、砂岩、粉砂岩为主，角度不整合于古生界之上；第四系黄土披覆于洮河流域河谷Ⅰ级阶地之上。

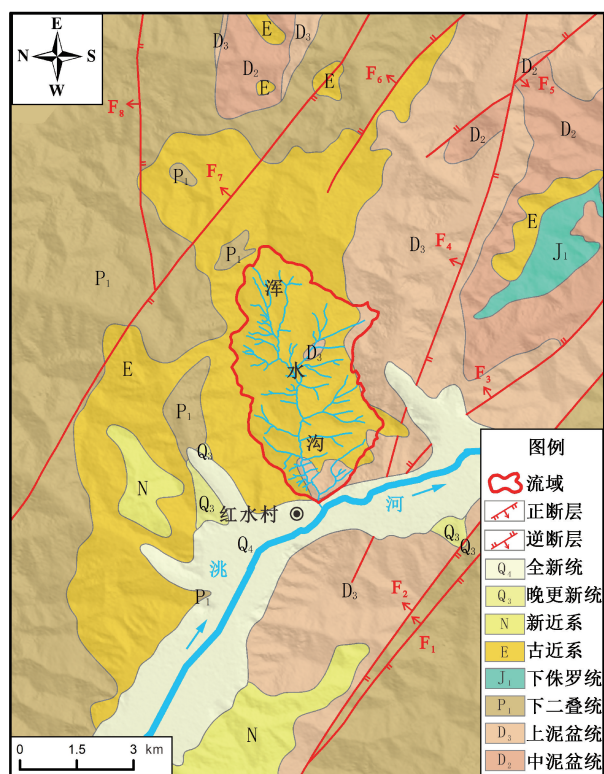


图1 浑水沟流域及周边地质略图

Fig.1 Geological sketch of the Hunshui gully basin and its surroundings

浑水沟流域周围分布有多个区域性断裂，如图1所示，研究区共有 F_1 — F_8 八条断裂构造，其中 F_2 为临潭-宕昌断裂， F_1 、 F_3 以及 F_4 为其分支断裂，控制研究区南部的地形地貌（张波等，2021）； F_7 为岷县-茶埠断裂， F_5 、 F_6 以及 F_8 为其

分支断裂，皆属于祁、吕、贺兰山字型构造体系，由于构造体系内部各部位所受应力的差异以及岩性的差异，形成茶埠-沟脑里-凤凰山帚状构造。两条断裂构造带历史上曾发生多次活动，如1879年徽县地震以及2013年漳县地震，对该区域的坡体稳定性产生较大影响，致使坡体产生运动，发生崩塌、滑坡等现象，为泥石流提供物源，同时也为泥包砾形成提供物质基础（何文贵等，2013）。

受新生代青藏高原东北缘造山运动的影响，岷县区域内构造变形活动强烈，地貌总体上属于褶皱山地（葛伟鹏，2013）；气候上属温带半湿润气候向高寒湿润气候的过渡区，太阳辐射较强，降水量较多，气候高寒阴湿，多灾害性天气。研究区浑水沟为洮河的一级支流，位于洮河的Ⅰ—Ⅲ级阶地之上，地貌类型属于侵蚀堆积河谷地貌，该地貌具有地势平缓、河谷阶地宽阔平坦等特点。

2 浑水沟泥石流概况

浑水沟位于岷县梅川镇红水村，为洮河左岸支沟、G212国道以及成兰铁路横跨沟口（图2）。浑水沟主沟长6.62 km，流域面积21.1 km²，沟谷形态呈“V”型谷，最低点高程为2335 m，最高点高程为2887 m，流域高差552 m，主沟平均纵坡降83.4‰，流向为261°，沟内植被覆盖率<30%，流域平面形态呈树叶状，大小支沟发育，数量较多，水系呈树枝状。虽然浑水沟主沟纵坡降较小，但沟谷岸坡高差较大，发育有大量滑坡，泥石流类型以黏性泥石流为主，目前为泥石流发育的形成期，属高频泥石流沟，具有突发性、瞬时性、破坏力强等特点。

浑水沟泥石流形成区部分地势相对陡峭，基岩裸露，支沟发育较多，有大量物源（滑坡、坡面流）；流通区范围较小，沟道狭窄，仅发育有少数坡面流；堆积区位于沟口，堆积扇因洮河水流冲刷而不发育。沟内无任何拦挡防护及排导措施，仅沟口处铁路桥墩下修建有排导槽，但被2020年8月23日泥石流所冲毁。在流通区下部，泥石流漫过公路，泥浆淤埋深度可达0.5 m左右，严重影响交通。泥石流威胁沟口堆积区红水村以及沟道内两滑坡体上方家山村和底堡池村千余人生命财产安全，潜在经济损失5000万元。



图 2 浑水沟泥石流流域崩滑流精细解译及泥包砾分布图

Fig. 2 Fine interpretation of the collapses, landslides and debris flows in the Hunshui gully basin, showing the distribution of the mud-coated gravels

3 浑水沟泥包砾特征

3.1 泥包砾分布堆积

浑水沟内泥包砾主要分布于沟内流通区下游及堆积区附近（图 2），上游沟道内及形成区皆无泥包砾出现。泥包砾分布具有以下特点：

（1）在流通区下游平坦处，泥包砾存在于泥浆中，分布广且数量多；在沟道中，泥包砾分布呈现出中间多两侧少的特点，并且沟道中部泥包砾的粒径大于两侧泥包砾的粒径，同时具有从流通区下游至堆积区粒径越来越大的特点。

（2）在堆积区，泥包砾分布特征与流通区的差异性分布不同。由于地形相较于流通区更为平坦，泥包砾均匀分布于堆积区内，极少数颗粒相对较大的泥包砾由于长时间被水浸泡已发生部分崩解，大多数泥包砾仍保持完整形态。

（3）泥包砾主要堆积于浑水沟下游至沟口一

带，即分布于泥石流沟流通区下游至堆积区。堆积区与主河交汇处可见泥包砾，至洮河后，因水动力较强消失殆尽。

3.2 泥包砾形态结构

泥包砾外形呈圆球形或似椭圆球形，磨圆度高。虽经过泥石流及流水的冲蚀作用，沟道内泥包砾形态仍较为完整（图 3a），且不均匀分布于泥浆中，部分泥包砾已淤埋于泥浆之中，呈现出半掩埋状态（图 3b）。部分泥包砾在运移过程中发生破碎现象，说明其在形成及运移过程中是不断滚动的，从破碎的泥包砾依稀可辨泥包砾是由砾石与块状黏土组成，同时砾石位于泥包砾内部，少量砾石依附于泥包砾表层。

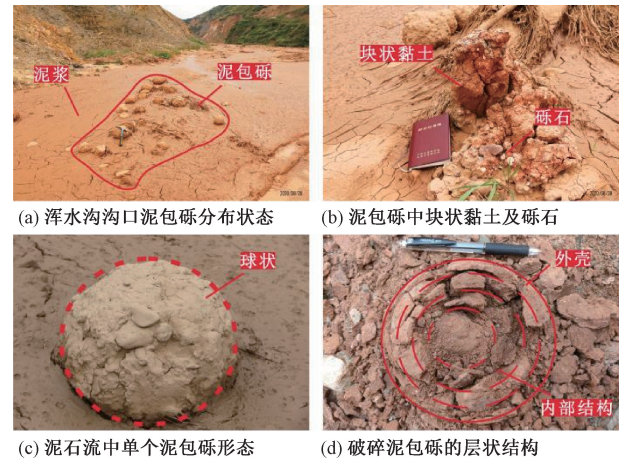


图 3 浑水沟泥包砾分布堆积及形态结构

Fig. 3 Distribution, accumulation and morphological structure of the mud-coated gravels in the Hunshui gully

泥包砾含水时呈红色或棕红色，干燥后颜色变浅，呈现出土黄色或红棕色（图 3c）。泥石流刚发生堆积时，泥包砾一般完整，但经过后期降雨湿化冲刷和晴天日晒，即经过几个干湿循环后，泥包砾很快崩解开裂。其砾径大小变化较大，经实地测量，粒径一般在 0.1~0.3 m 之间，但有部分泥包砾>0.5 m，泥包砾质地较为坚硬，由外至内硬度逐渐增大。采集样品后，将泥包砾切割成两半，可见浑水沟中的泥包砾大体具有 3~4 层结构（图 3d），常由较大的内核和几厘米不等的薄层泥质外壳包裹组成。内核为砾石与黏土粘合组成的结核，形状为球形或纺锤形，最大直径约 0.3 m，一般直径约 0.1~0.2 m；内部结核被由多层黏土组成的外壳呈同心环状包裹形成泥包砾。

3.3 泥包砾矿物特征及物质来源

由于浑水沟内泥包砾数量众多，为提高实验

结果的准确性，选取不同位置、不同粒径的泥包砾进行取样测试。实验选取浑水沟堆积区与流通区为典型取样点位置，挑选形态较完整的泥包砾进行分析，中部流通区泥包砾样品编号 1 和 3，堆积区泥包砾样品编号 2、4 和 5。样品 1 和 2 直径范围 0.2~0.3 m，样品 3、4 和 5 直径小于 0.2 m（图 4）。在实验前对泥包砾进行破碎取样，选取较大泥包砾样品 1 和 2 的外层、中层以及内层以及样品 3、4 和 5 的外层和内层进行 X 射线衍射分析。同时，为确定泥包砾组成的物质来源，实验还对沟道内崩滑体前缘与风化层物质取样进行了 X 射线衍射分析。

X 射线衍射分析（XRD）在中国石油勘探开发研究院实验室内完成。采用的仪器为 Smartlab-X 射线衍射仪，主要参数如下：工作电压 40 kV，工作电流 150 mA，发射狭缝 1°，散射狭缝 1°，接收狭缝 0.3 mm，扫描范围在 2.6°~45°之间，采数步宽 0.02°，扫描方式为连续，扫描速度为 2°/min

表 1 泥包砾、滑坡体前缘及风化层矿物成分及黏土矿物含量测试结果表

Table 1 Test results of the mineral composition and clay mineral content in the mud-coated gravel, in the front of the landslide mass and in the weathered layer

样品编号	矿物种类和含量/%				黏土矿物 总量/%	黏土矿物相对含量/%				混层比 S/%
	石英	钾长石	斜长石	方解石		伊蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石	
泥包砾 1（外）	61.8	3.2	3.0	12.2	19.8	53.1	34.0	6.7	6.2	50.3
泥包砾 1（中）	46.4	0.2	1.1	26.6	25.7	58.9	31.4	5.0	4.7	49.8
泥包砾 1（内）	18.5	0.7	1.6	41.7	37.5	67.2	24.8	3.1	4.9	45.1
泥包砾 2（外）	57.0	2.6	2.1	19.3	19.0	39.4	44.3	6.6	9.7	50.0
泥包砾 2（中）	45.9	0.8	1.1	29.1	23.1	51.8	35.1	6.7	6.4	44.6
泥包砾 2（内）	34.4	0.7	1.3	33.3	30.3	57.9	28.7	7.5	5.9	45.1
泥包砾 3（外）	37.6	19.2	11.8	12.5	14.8	41.8	40.1	8.0	10.1	45.3
泥包砾 3（内）	19.0	1.8	2.6	20.8	29.6	37.6	47.2	4.0	11.0	50.1
泥包砾 4（外）	43.2	12.4	2.2	19.7	20.0	31.5	53.3	6.9	8.3	50.4
泥包砾 4（内）	35.8	1.0	4.6	19.6	39.0	44.7	41.2	5.9	8.2	50.2
泥包砾 5（外）	49.1	4.7	4.7	16.3	25.2	46.6	38.1	8.3	7.0	44.8
泥包砾 5（内）	48.5	4.0	2.2	16.3	29.0	52.7	36.4	5.6	5.3	45.2
崩滑体前缘 1	35.5	1.3	2.3	28.1	32.8	52.3	35.7	3.5	8.5	35.5
崩滑体前缘 2	40.3	1.7	2.6	24.3	31.1	50.5	37.4	4.8	7.3	40.3
风化层 1	54.3	1.7	3.3	13.3	27.4	47.3	34.6	8.5	9.6	54.3
风化层 2	52.9	1.3	2.7	18.5	24.6	42.5	42.8	6.9	7.8	52.9

3.3.1 泥包砾矿物特征

由表 1 可知，泥包砾主要由石英、钾长石、斜长石、方解石以及黏土矿物组成，黏土矿物主要为伊蒙混层、伊利石、高岭石以及绿泥石。其中石英含量最大为外层 61.8%，最小处核部仅为 18.5%；钾长石含量最大为外层 19.2%，最小处核部仅为 0.2%；斜长石含量最大为外层 11.8%，最小处核部仅为 1.1%；方解石含量最大为核部 41.7%，最小处外层仅为 12.2%；黏土矿物含量最



图 4 取样点位置及泥包砾样品图

Fig. 4 Photos of the sampling locations and the mud-coated gravel samples

(2 θ)。扫描完成后，比较图谱中的 X 射线衍射线位置与强度以确定不同的矿物成分，再对主要衍射峰进行面积积分，厘定各种矿物相对百分含量，具体测试结果见表 1。

大为核部 39.0%，最小处外层仅为 14.8%。考虑到各矿物含量变化，这里采用加权平均法，以泥包砾外中内各矿物含量为权数，以泥包砾直径为权重，分析泥包砾各组成矿物及黏土矿物含量的变化特点（崔亮等，2011）。

由图 5 可知，泥包砾中石英含量最高，可达 42.0%左右，其次是黏土矿物、方解石以及少量的钾长石和斜长石。随着泥包砾粒径的不断增大，石英含量逐渐增多，由内核的 27.2%升高到外壳

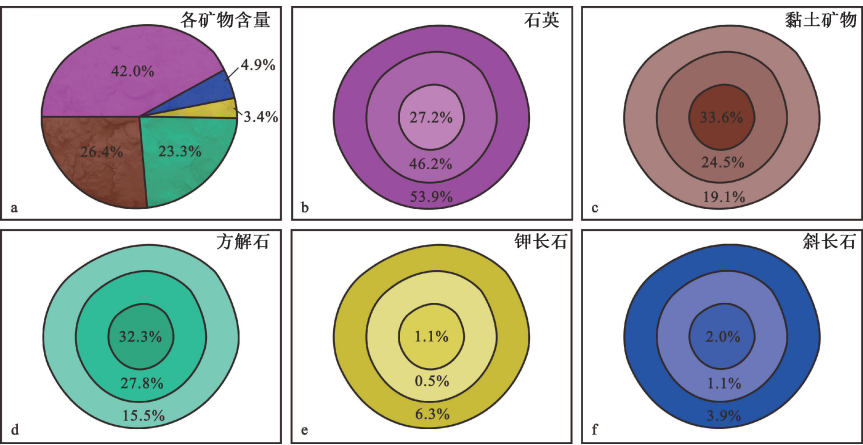


图 5 泥包砾结构分层中各类矿物含量百分比

Fig. 5 Content percentage of minerals in the structural layer of the mud-coated gravel

的 53.9%（图 5b），说明其在泥包砾形成后期较为关键，同时考虑到石英含量最多的因素，因此石英在泥包砾的形成与增大过程中起到骨架支撑作用。泥包砾中黏土矿物含量仅次于石英，由外至内黏土矿物含量不断增加，说明在泥包砾形成初期黏土矿物较强的吸水能力对泥包砾机制的形成起到了关键性的作用（图 5c）。泥包砾中方解石含量随着粒径的增加而降低，与石英含量变化恰恰相反，说明方解石在形成初期随黏土矿物一起主导着泥石流形态及结构的变化（图 5d）；随着泥包砾粒径的增加，虽然钾长石与斜长石含量在其中间部位略有波动，但总体仍为增高（图 5e、5f），加之二者在泥包砾中含量较低，因此对泥包砾的形成影响程度较小。

总体来说，泥包砾由内至外石英、钾长石以及斜长石含量逐渐增高，黏土矿物及方解石含量逐渐降低，同时考虑到矿物硬度因素（ $HM_{\text{石英}} > HM_{\text{长石}} > HM_{\text{方解石}}$ ），分析在泥包砾形成的初始阶段，黏土矿物与硬度相对较软易破碎的细粒方解石首先形成泥包砾基质，为泥包砾形成奠定了物质基础。而后随着泥石流的搬运作用，泥包砾粒径不断增大，但由于泥石流流量的不断增加，冲蚀及碰撞作用不断增强，黏土矿物颗粒较细、方解石硬度较低易破碎，因此二者不断被流水冲蚀而相对含量逐渐降低；而石英硬度较高、较稳定，因此石英含量相对增加，对泥包砾形态固定起到了决定性作用。

比较泥包砾各结构分层中黏土矿物组成及含量变化（图 6），发现其表现出类似于泥包砾矿物种类含量差异性的特点。黏土矿物主要有伊蒙混

层、伊利石、绿泥石以及高岭石。其中以伊蒙混层为主，含量为 48.8%；其次为伊利石，含量为 37.8%；绿泥石含量 7.3%；高岭石含量最少，仅为 6.3%（图 6a）。在矿物学中，泥包砾中的伊蒙混层与伊利石亲水性较强，绿泥石与高岭石相对较差。伊蒙混层与伊利石两种黏土矿物含量皆由内至外逐渐减少（图 6b、6c），说明两类矿物在泥包砾形成初期对于碎屑物质聚集起到了吸附、粘结的作用，但由于水动力冲蚀作用的影响，含量不断降低，泥包砾吸附物质的能力逐渐减弱，二者的共同作用决定了泥包砾粒径的大小；绿泥石及高岭石含量虽有变化，但在泥包砾中含量较低、变化不大，总体上也呈现出由内至外逐渐减少的特点（图 6d、6e），虽然绿泥石和高岭石亲水性较弱，仍在泥包砾形成过程中起到了吸附、粘结作用，但对于泥包砾粒径大小并未造成影响。

综上所述，从黏土矿物层面来说，其在泥包砾形成过程中发挥了吸附、粘结岸坡堆积物和泥石流流体中碎屑物的作用，对前期泥包砾的粒径增大具有积极作用。但随着粒径增大，泥包砾运动速率变小，水的冲蚀作用使得黏土矿物含量降低，吸附、粘结作用减弱，为泥包砾粒径定型奠定了基础。

3.3.2 泥包砾物质来源

泥包砾的物质组成为流域内崩滑体以及风化层内的物质，但二者在泥包砾形成、运移过程中所发挥的作用仍需进一步确认，因此文章对崩滑体、风化层以及泥包砾不同层间矿物种类及含量进行了对比分析。

从表 1 浑水沟崩滑体前缘与风化层矿物 X 射

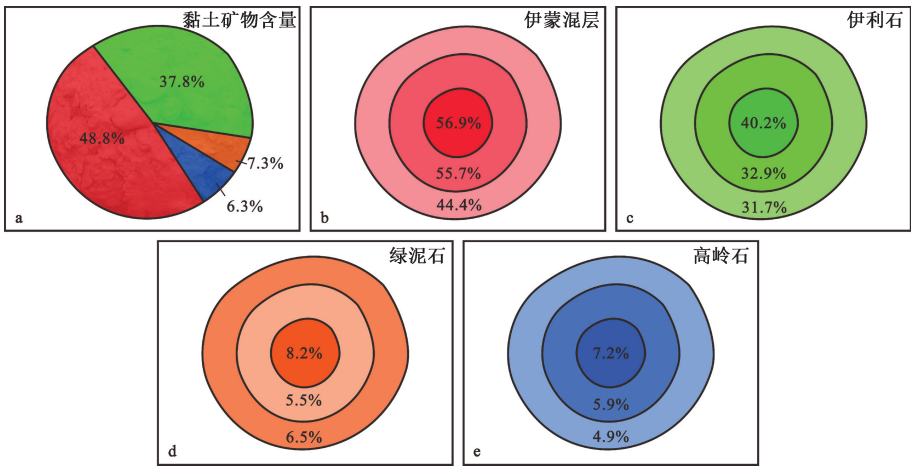


图 6 泥包砾结构分层中黏土矿物含量加权百分比

Fig. 6 Weighted percentage of the clay mineral contents in the structural stratification of mud-coated gravel

线衍射分析结果来看，崩滑体前缘及流通区风化层的矿物种类与泥包砾中、内、外层矿物种类相同，但各矿物含量却有所不同，崩滑体前缘内的石英含量在 35.5%~40.3%之间，小于风化层中的 52.9%~54.3%，但方解石与黏土矿物含量较高，两者约为 55.4%~60.9%，大于风化层中的 40.7%~43.1%。泥包砾不同层间矿物的加权分析结果显示（图 5），外层石英含量在 53.9%左右，方解石、黏土矿物两者含量在 34.6%左右；中层石英含量为 46.2%左右，方解石、黏土矿物两者含量在 52.3%左右；内层石英含量为 27.2%左右，方解石、黏土矿物两者含量在 65.9%左右。

以上对比表明，在泥包砾形成过程中崩滑体为泥包砾形成初期的物质基础，随着泥包砾的不断运移及发育，风化层逐渐取代崩滑体成为泥包砾外层的主要组成物质。

4 泥包砾成因机制

4.1 泥包砾形成的地质环境条件

4.1.1 岩性条件

浑水沟流域主要出露古近系，零星出露泥盆系，沟道内滑坡、崩塌广泛发育，不同地层内发育的灾害规模统计见表 2。研究区内孕灾地层主要为古近系，总面积达 3730 m²，流域内滑坡与 90.9%的崩塌发育于该地层中，其主要出露于形成区与大部分流通区；泥盆系地层灾害发育面积仅为 120 m²，流域内仅 9.1%的崩塌发育于该地层中，其主要出露于部分流通区与整个堆积区。

表 2 浑水沟不同地层灾害发育面积及占比

Table 2 Proportion of landslide and collapse areas in different strata of the Hunshui gully

灾害类型	灾害总面积/m ²	古近系 (E)		泥盆系 (D)	
		发育面积/m ²	占比/%	发育面积/m ²	占比/%
滑坡	2530	2530	100	0	0
崩塌	1320	1200	90.9	120	9.1

古近系砂砾岩在差异性风化作用下，坡体产生凌空面，降雨后重力势能增加，使得厚层黄土及砂岩以崩塌形式补给沟道。发育于古近系地层中的滑坡主要为方家山滑坡与底堡池滑坡，两者皆属硬土软岩类滑坡，呈块状滑动，形成对冲式滑坡，堵塞沟道，为泥石流及泥包砾提供了物源（胡乐等，2021）；同时，古近系地层上覆 5~6 m 的黄土层，在强降水条件下极易产生坡面流，也为浑水沟泥石流提供了物源。

泥盆系板岩的崩解指数与风化程度成正比例关系，风化程度越高崩解越强烈，因此在强风化条件下板岩崩解特性表现得极为明显；同时，研究区环境在旱季条件下极为干燥，风化剥蚀作用较强，而板岩在雨季强降雨条件下会产生强烈的崩解，从而诱发潜在滑坡、崩塌等地质灾害，增加泥石流的危害程度；在相同环境条件下，千枚岩更易发生崩解作用，为泥石流提供物源（李昌友等，2009）。

4.1.2 地形地貌条件

浑水沟流域地形起伏较小，总体坡度较缓（图 7a）。主沟 A-A' 纵剖面图显示，该沟坡度较缓，总体坡度在 3.5°左右，形成区坡度较陡，流通区及堆积区坡度较缓，主沟沟谷宽度较大，流

域呈狭长型, 为典型的河谷型泥石流沟, 并且泥包砾皆存在于堆积区内 (图 7b); 从形成区 B-B' 横剖面可以明显看出, 由于汇水面积较大, 水的侵蚀作用使得沟道两岸坡度较陡 ($\geq 45^\circ$), 沟道呈现出“V”字型 (图 7c); 流通区 C-C' 横剖面显示沟道总体呈现“U”字型, 但沟道两侧发育有

一组对冲式滑坡, 即底堡池滑坡与方家山滑坡, 两滑坡导致沟道底部呈现出“V”字型, 坡度 $>45^\circ$ (图 7d); 堆积区 D-D' 横剖面位于沟口处, 由于该位置岩层主要为泥盆系板岩及砂质板岩, 抗风化能力相对于泥岩、砂砾岩较强, 因此两岸山坡坡度较陡, 在 45° 左右, 呈现出宽“V”型 (图 7e)。

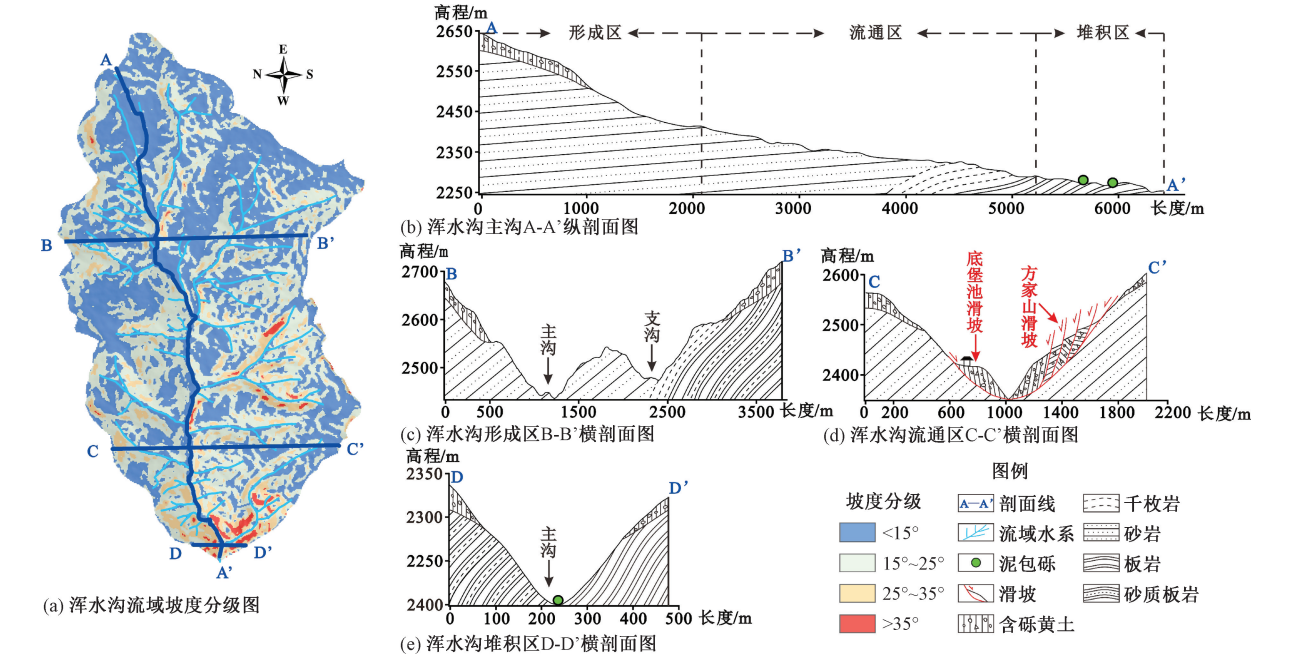


图 7 浑水沟流域坡度变化及沟道纵横剖面图
Fig. 7 Map of slope gradient and diagrams of the longitudinal and cross-sectional profiles of the Hunshui gully

整体而言, 浑水沟主沟沟道坡度较缓, 但由于其横向较宽, 使得汇水面积较大, 在强降水条件下, 雨水大量涌入到沟道内, 水的溯源侵蚀及坡面侵蚀作用促使沟道坡度进一步增大, 松散层物质不断被冲刷至沟道内; 加之形成区坡度较陡, 导致水的动力势能增加, 冲刷作用使得流通区两岸岸坡凌空面增大, 形成对冲式滑坡——底堡池滑坡与方家山滑坡, 为泥包砾形成提供了物源条件。同时, 由于流通区下游坡度较缓, 泥石流流速相对趋于稳定, 使得泥包砾体积进一步增大, 为泥包砾的形成创造了有利的地形条件。

4.2 水动力条件

根据浑水沟北部梅川镇下文斗气象站 2020 年 8 月 23 日数据显示 (图 8), 该地区当日降雨量可达 66.5 mm, 最大小时降雨量为 32.3 mm, 此次 6 h 降雨量远超岷县山洪泥石流灾害高危险的 10 mm 临界值 (周洪建等, 2014)。梅川镇区域降水量较大, 使得浑水沟内风化层内堆积物被雨水携带至沟内, 同时两岸岸坡岩层遇水软化失稳产

生崩塌与滑坡, 为泥石流形成提供了水动力条件。

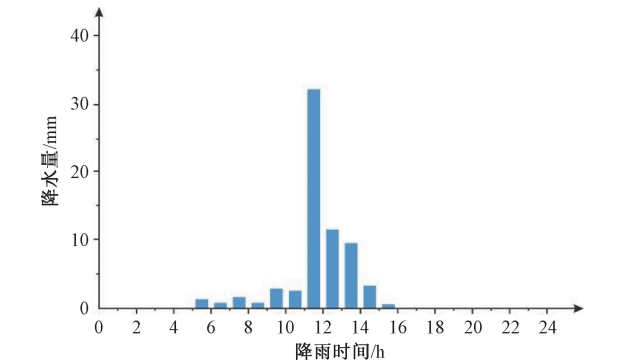


图 8 梅川镇下文斗观测站 2020 年 8 月 23 日 24 小时降水量变化
Fig. 8 24-hour precipitation change recorded by the Xiawendou observation station in Meichuan town on August 23, 2020

根据图 8 所示, 8 月 23 日上午 5 时至 11 时, 梅川镇降水量较小, 总量不足 10 mm, 不具备发生泥石流灾害的降雨条件, 但从 11 时至 12 时, 降雨量突增至 32.3 mm/h, 沟内泥石流暴发, 随后降雨量逐渐降低至 10 mm 以下, 泥石流规模变小, 水

动力条件减弱。根据实际调查,沟道内泥包砾出现时间为8月23日14时后,即泥石流大规模暴发之后,在泥石流暴发初期并未出现。通过以上降雨条件及泥包砾出现时间分析发现,14时之前,在泥石流暴发初期,泥石流流速及规模较大,水动力较强,泥包砾并未形成;14时左右,随着降雨量的减少,泥石流规模降低,水动力条件逐渐稳定,泥包砾开始逐渐形成,随着泥石流流动逐渐吸附沟道内物质自生加大。因此,泥包砾是泥石流后期水动力逐渐稳定条件下的产物。

4.3 泥包砾成因机制分析

基于上述分析,总结泥包砾形成过程如下。

(1) 泥石流形成阶段:12时,由于数小时的大规模降雨导致浑水沟暴发泥石流。形成区沟道

两侧岩性主要为厚层黄土以及古近系砂岩,坡度较陡,滑坡崩塌广泛发育,汇水面积大,大量崩滑体及风化层碎屑物质被降雨冲蚀运移至沟道中。泥石流中黄土、砂岩含量较高形成黏性泥石流,由于沟道纵比降较大,泥石流流速较大,大量碎屑物被快速运移至流通区(图9a)。

(2) 泥包砾核形成初始阶段:14时后,随着降雨量的降低,泥石流发育规模减小,水动力条件趋于稳定。在形成区下游及流通区上游,由于两岸岸坡较陡,岸坡侵蚀严重。古近系砂岩中发育的崩滑体前缘破碎成方解石为主的较小砾石,与吸附力较强的黏土矿物在泥石流运移过程中结合,组成了泥包砾最内层的核,为泥包砾的形成奠定了基础(图9b)。

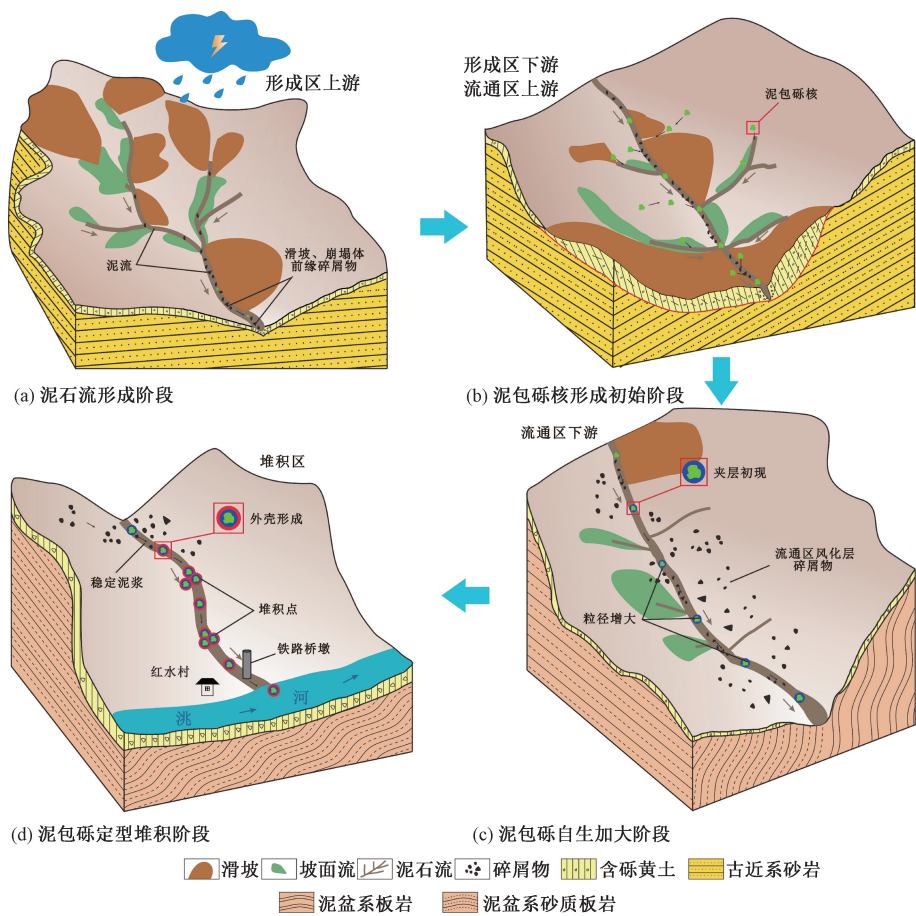


图9 浑水沟泥包砾形成演化图

Fig. 9 Evolution of the mud-coated gravel formation in the Hunshui gully

(3) 泥包砾自生加大阶段:泥包砾核被泥石流运移至流通区下游,该区段沟道纵比降较小,沟道较为宽缓,水动力条件较弱,泥包砾运移速度较低。泥包砾核在水动力作用下不断滚动,泥

石流中的泥质及砂质物质不断吸附于其表面,使得泥包砾粒径不断增大。同时,流通区内黏土矿物含量较低的风化层被冲蚀至沟道参与泥包砾自生增大的过程,因此泥包砾的吸附能力随着粒径

的增大而不断减小（图 9c）。

（4）泥包砾定型堆积阶段：泥包砾运移至堆积区上游时，泥石流流速进一步降低，粒径不断增大，加上风化层中黏土矿物含量减少，因此泥包砾渐渐失去吸附能力，形成石英含量较高的坚硬外壳。其形状及矿物含量也趋于稳定，粒径大小基本确定，随着水动力条件进一步减弱而运移至堆积区各处，部分泥包砾经泥石流搬运至洮河之中（图 9d）。

5 泥包砾的灾害意义

5.1 泥包砾危害方式

泥石流的危害主要表现为淤埋和冲击破坏，以冲击破坏最为显著。对构筑物的冲击破坏，常常是由泥石流中的大块石冲击所致。浑水沟泥石流流体中大量的泥包砾对成兰铁路桥墩不断产生冲击，损伤桥墩表面（图 10a、10b）。桥墩遭受泥石流冲击，在不同工况下受力方式不同（李培振等，2015；刘道川等，2019）。当泥石流流体中不含泥包砾时，泥石流可看作为均质流体，对桥墩的冲击力平行于沟道方向，桥墩迎水面边缘受力较为均衡（图 10c；王友彪，2019）；当泥石流流体中含有泥包砾时，泥石流流体变得极不均匀，同时桥墩迎水面边缘受力不均匀，导致桥墩受到来自泥石流流体的冲击以及泥包砾的撞击（图 10d；刘洋等，2020）。



图 10 浑水沟沟口处泥石流泥位、泥包砾堆积及成兰铁路桥墩受力分析

Fig. 10 Photos of the debris flow and mud-coated gravel accumulation at the mouth of the Hunshui gully and diagrams showing the force on the bridge pier of the Chengdu - Lanzhou Railway

5.2 泥包砾冲击力

通过以上分析发现块石冲击力的对沟口或流域内构筑物的安全威胁较大，因而其定量计算在泥石流防治工程设计中尤为重要。文章在以往研究的基础上，对水泥公路及桥墩在含有砾石的泥石流工况条件下的冲击力进行计算分析，以此分析泥包砾粒径对于浑水沟的影响（孙兴伟和刘云鹏，2018）。由于缺乏浑水沟泥石流发生时的第一手实测数据，文章采用 T/CAGHP 006—2018《泥石流灾害防治工程勘查规范（试行）》中的公式（1）和（2），计算黏性泥石流流体中大石块对桥墩的冲击力（邓虎等，2011；曾超等，2015；于献彬等，2017）：

$$V_s = \mu \sqrt{d_{\max}} \quad (1)$$

$$F = \gamma V_s \sin \alpha \sqrt{\frac{W}{C_1 + C_2}} \quad (2)$$

由公式（1）和（2）拟合可得：

$$F = d_{\max}^2 \gamma \mu \sin \alpha \sqrt{\frac{\pi \rho}{6(C_1 + C_2)}} \quad (3)$$

式中： F 为泥包砾冲击力，kN； $d_{\max}$ 为泥石流堆积物中最大石块的粒径，m； V_s 为泥石流中大石块的移动速度，m/s； γ 为动能折减系数，对圆形端属正面撞击，取值为 0.3； μ 为摩擦系数，取值范围为 $3.5 \leq \mu \leq 4.5$ ，取中值 4.0； α 为石块运动方向与受力面的夹角，取值为 90° ； W 为石块重量，kg； ρ 为泥包砾密度， kg/m^3 ，实测为 3898 kg/m^3 ； C_1 、 C_2 分别为巨石、桥墩的弹性变形系数，取 $C_1 + C_2 = 0.005$ 。

以泥石流中泥包砾对桥墩的冲击力计算方法为基础，得到不同粒径条件下泥包砾冲击力计算曲线（图 11）。由图 11 可知，在一定条件下，泥石流冲击力随泥包砾粒径的增加呈现出指数性增大，说明在泥石流中，随着泥包砾粒径不断增加，加之浑水沟内泥包砾数量较多，成兰铁路桥墩受到的破坏将会越来越严重。

5.3 泥包砾起动流速

自 2020 年 8 月 23 日暴雨以来，浑水沟沟道内仍堆积有大量泥包砾，若遇暴雨或极端降雨将会暴发泥石流，携带泥包砾下泄，对成兰铁路桥墩及公路再次产生撞击和冲刷，那么，判断泥包砾是否再次起动至关重要。泥石流中块石及泥包砾的起动速度可看成是不同扁平度卵石的起动速度，已有不少学者开展了卵石起动流速公式对比研究（张植堂和姚于丽，1989；罗羚源，2011；李江

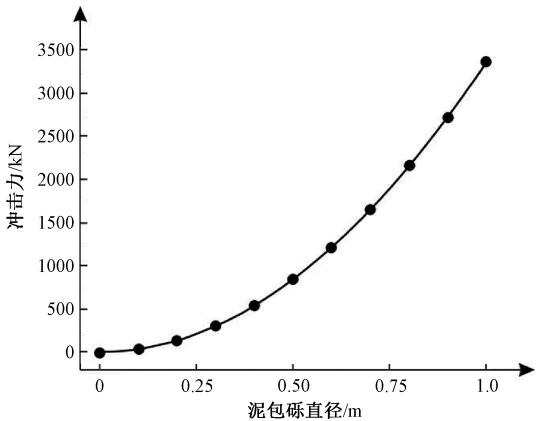


图 11 冲击压力随泥包砾直径变化关系图
Fig. 11 Variation of impact pressure with diameter of mud-coated gravel

峰, 2021)。因此, 探究泥包砾启动所需要的临界泥石流流速, 将对浑水沟泥石流灾害预防具有指导性意义 (何文社等, 2003)。将泥包砾看成卵石, 采用长江水院所得出的卵石启动临界泥石流流速计算公式 (4):

$$U_c = K\lambda^{\frac{1}{3}} \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} gD \left(\frac{1.6h}{D} \right)^{\frac{1}{6}}} \tag{4}$$

式中: U_c 为卵石启动流速, m/s; K 为综合启动系数, 取值 1.25; λ 为卵石扁平度, $\lambda \geq 1$; γ_s 为卵石的容重, t/m³; γ_w 为水的容重, t/m³; g 为重力加速度, m/s², 取值 9.8 m/s²; D 为卵石推移质的平均粒径, m; h 为水深, m。

分别计算不同粒径、不同扁平度的泥包砾启动速度变化 (图 12), 由图可见, 当卵石粒径不断

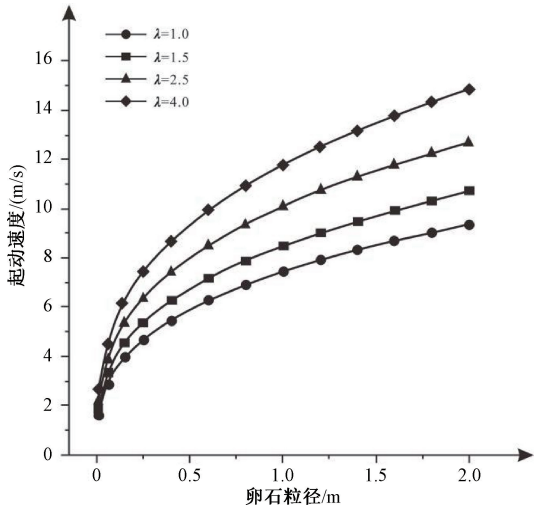


图 12 卵石启动流速随卵石粒径、磨圆度变化关系图
Fig. 12 Variation of pebble threshold velocity with pebble particle size and roundness

增加时, 磨圆度不同的卵石临界启动速度差距越来越大, 当 $\lambda = 1.0$ 时的临界启动速度仅为 $\lambda = 4.0$ 时的一半, 即卵石为球状泥包砾时, 再起启动速度最小。泥石流运移过程中, 在相同粒径的条件下, 泥包砾再起启动所需泥石流流速相较于大块石较小, 易被泥石流裹挟而发生滚动, 大大增加了浑水沟泥石流的破坏力, 加剧了泥石流对成兰铁路桥墩的侵蚀破坏。

6 结论

(1) 浑水沟泥包砾主要分布于冲沟流通区下游及堆积区附近, 呈土黄色或红棕色的圆球体或似椭圆球体, 具有多层结构, 主要由石英、方解石、黏土矿物等组成。泥包砾砾径越大, 石英含量越高, 而方解石、黏土矿物含量越低。

(2) 泥包砾形成的地质环境主要与地形、岩性以及水动力条件有关。浑水沟流域地层岩性以黄土及古近系砂砾岩为主, 黏土矿物含量高, 在水流作用下易形成泥包砾核; 而浑水沟形成区与流通区坡度较陡, 水动力作用较强, 泥包砾核被运移至坡度较缓的流通区下游及堆积区内, 流域中下游区段由于沟谷纵坡度较缓, 水动力条件减弱, 泥包砾在不断运移加大的过程中逐渐沉积。

(3) 基于泥包砾特征及其形成的地质环境, 浑水沟泥包砾的形成过程可分为四个阶段: 泥石流形成阶段、泥包砾核形成阶段、泥包砾自生加大阶段、泥包砾定型堆积阶段。其形成机制表现在: 在强降雨条件下, 形成区大量崩滑体及黄土被冲蚀至沟道形成黏性泥石流; 运移至形成区下游与流通区上游区段时黏性矿物富集形成泥包砾核, 与大量崩滑体中的物质结合自生加大; 后经泥石流运移至流通区下游, 两岸风化层物质与泥包砾核结合形成泥包砾外层; 随着外层黏土矿物含量的降低导致泥包砾吸附力逐渐减小而定型, 最后由于水动力条件的作用堆积于流通区下游及堆积区各处。

(4) 泥包砾在运动过程中的水动力学研究表明, 随着泥包砾砾径的增大, 其冲击力呈指数型增加。相比于固体碎屑粒径小的黏性泥石流, 含泥包砾的泥石流破坏作用更强。但由于泥包砾再起启动所需泥石流流速相对较小, 易被泥石流裹挟而发生滚动。因而, 泥包砾愈多、砾径愈大, 泥

石流对沟道中的成兰铁路桥墩冲刷、侵蚀甚至破坏作用愈强。

文章借助矿物学的研究手段和方法，开展了泥石流成因机理的研究。研究结果虽较好地解释了浑水沟泥石流中泥包砾的形成条件和成因机制，但仍未解决泥包砾形成的运动学特征、含泥包砾的泥石流的流体力学特性等问题。因此，需进一步开展泥包砾的运动学和动力学特征的研究，为此类泥石流的减灾防灾工作提供地质依据。

References

CHEN C Y, REN J W, MENG G J, et al. , 2013. Division, deformation and tectonic implication of active blocks in the eastern segment of Bayan Hlar block [J]. Chinese Journal of Geophysics, 56 (12): 4125-4141. (in Chinese with English abstract)

CUI L, LEI X F, ZHAO F H, et al. , 2011. Study on stability evaluation of surrounding rock based on weighted average method [J]. Coal Engineering (6): 77-78, 81. (in Chinese)

DENG H, CHEN N S, HU G S, et al. , 2011. Calculation of dynamics parameters of Sanyanyu gully in Zhouqu, Gansu [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 30 (4): 833-838. (in Chinese with English abstract)

DING X L, LIU S M, 2006. Distribution law and prevention measures of geological disasters in Minxian county [J]. Scientific & Technical Information of Gansu, 35 (5): 46-47. (in Chinese)

GE W P, 2013. Discussion on the relationship between regional landform and seismogenic structure of the Minxian-Zhangxian $M_{6.6}$ earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 35 (4): 840-847. (in Chinese with English abstract)

HE W G, ZHENG W J, WANG A G, et al. , 2013. New activities of Lintan-Dangchang fault and its relations to Minxian-Zhangxian $M_{6.6}$ earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 35 (4): 751-760. (in Chinese with English abstract)

HE W S, FANG D, LIU X N, et al. , 2003. Critical condition for starting motion of gravel [J]. Sichuan Water Power, 22 (1): 64-65, 69. (in Chinese with English abstract)

HE X Y, 2014. Experimental study on the shock characteristics of debris flow considering different slurry viscosity and gradation particles [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)

HE X Y, CHEN H K, TANG H M, 2016. Experimental study on the energy distribution characteristics of impacting signals of debris flow considering the slurry viscosity and particle collision [J]. Journal of Vibration and Shock, 35 (6): 64-69. (in Chinese with English abstract)

HU G S, CHEN N S, DENG M F, et al. , 2011. Analysis of the characteristics of impact force of massive stones of the Sanyanyu debris flow gully in Zhouqu, Gansu Province [J]. Earth and Environment, 39 (4): 478-484. (in Chinese with English abstract)

HU L, XIN P, WANG T, et al. , 2021. Centrifuge model tests on the near-horizontal slide of hard soil-soft rock landslides [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 73-82. (in Chinese with English abstract)

LI C Y, FU H L, CAI H L, et al. , 2009. Water character of flowering sheet stone [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 6

(1): 74-77. (in Chinese with English abstract)

LI J F, 2021. Comparative study on formulas of pebble starting velocity [J]. Yangtze River, 52 (11): 201-206, 218. (in Chinese with English abstract)

LI P Z, GAO Y, GUO M J, 2015. Research status and development trend of debris-flow impact Force [J]. Structural Engineers, 31 (1): 200-206. (in Chinese with English abstract)

LI X B, XU G B, 1985. Characteristics of sediments of quaternary period Glaice in Pan Ji coal Mine Area [J]. Journal of Huainan Institute of Mining (1): 1-11. (in Chinese with English abstract)

LI X B, LIU H Q, ZHANG Z Y, et al. , 2014. “Argillaceous parcel” Structure: A direct evidence of debris flow origin of deep-water massive sandstone of Yanchang Formation, Upper Triassic, the Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 32 (4): 611-622. (in Chinese with English abstract)

LIAO J B, LI X B, ZHAO H Z, et al. , 2017. Genetic mechanism of mud-coated intraclasts within deep-water massive sandstone in Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 41 (4): 46-53. (in Chinese with English abstract)

LIU D C, YOU Y, DU J, et al. , 2019. Spatio-temporal distribution of the impact force of debris flow [J]. Advanced Engineering Sciences, 51 (3): 17-25. (in Chinese with English abstract)

LIU J J, MA C, LI C Y, 2020. Fundamental problems and prospects in the study of deposition dynamics of viscous debris flow in the gully-river junction [J]. Journal of Geomechanics, 26 (4): 544-555. (in Chinese with English abstract)

LIU Y, YOU Y, WANG H F, et al. , 2020. Research status and discussion on granular flow impact force [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 40 (5): 714-723. (in Chinese with English abstract)

LUO L Y, 2011. Research on geometric shapes influencing on incipient motion of gravel [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)

SUN X W, LIU Y P, 2018. Debris flow characteristics and its impact force test in the engineering areas of Dagu and Jiexu hydropower stations in Tibet [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 16 (2): 167-172. (in Chinese with English abstract)

TIAN L Q, 1994. Genetic classification of accumulative landforms of channel viscous debris flow [J]. Mountain Research, 12 (1): 9-14. (in Chinese with English abstract)

WANG Y B, 2019. Debris flow impact forces on bridge piers [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)

YANG H J, WEI F Q, HU K H, et al. , 2016. Rheological parameters of debris flow slurries with different maximum grain sizes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 47 (7): 884-890. (in Chinese with English abstract)

YANG W Y, LI H Y, 1988. Environmental engineering geology in Nanganling area of Dalian [C] //Selected papers of the third national engineering geology conference (vol. 2). Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press. (in Chinese)

YU X B, CHEN X Q, WANG D Z, et al. , 2017. Study on the impact rule of viscous debris flow to check dams [J]. Yellow River, 39 (3): 37-44. (in Chinese with English abstract)

ZANG X L, LIN G Y, 2011. Discussion on nomenclature of soil layer in Shenyang area [J]. Science & Technology Information (5): 36. (in Chinese)

ZENG C, SU Z M, LEI Y, et al. , 2015. An experimental study of the

characteristics of impact forces between debris flow slurry and large-sized particles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 36 (7): 1923-1930, 1938. (in Chinese with English abstract)

ZHANG B, TIAN Q J, WANG A G, et al., 2021. Studies on new activity of Lintan-Dangchang Fault, West Qinling [J]. *Seismology and Geology*, 43 (1): 72-91. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z T, YAO Y L, 1989. Research on starting velocity of the bed gravel in upper Yangtze River [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute* (2): 1-10. (in Chinese with English abstract)

ZHENG W J, YUAN D Y, HE W G, et al., 2013. Geometric pattern and active tectonics in Southeastern Gansu province: Discussion on seismogenic mechanism of the MinxianZhangxian $M_s6.6$ earthquake on July 22, 2013 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56 (12): 4058-4071. (in Chinese with English abstract)

ZHOU H J, WANG X, YUAN Y, et al., 2014. Rapid-assessing methods of loss in extremely heavy rainfall disaster chain in semiarid region: a case study on a flash flood debris flow in Minxian county, Gansu province [J]. *Arid Zone Research*, 31 (3): 440-445. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈长云, 任金卫, 孟国杰, 等, 2013. 巴颜喀拉块体东部活动块体的划分、形变特征及构造意义 [J]. *地球物理学报*, 56 (12): 4125-4141.

崔亮, 雷学峰, 赵飞虎, 等, 2011. 基于加权平均法的围岩稳定性评价研究 [J]. *煤炭工程* (6): 77-78, 81.

邓虎, 陈宁生, 胡桂胜, 等, 2011. 甘肃舟曲三眼峪沟泥石流动力学特征参数计算 [J]. *重庆交通大学学报 (自然科学版)*, 30 (4): 833-838.

丁晓莉, 刘世梅, 2006. 岷县地质灾害分布规律及防治措施 [J]. *甘肃科技纵横*, 35 (5): 46-47.

葛伟鹏, 2013. 岷县漳县 6.6 级地震发震构造与区域地形地貌特征关系讨论 [J]. *地震工程学报*, 35 (4): 840-847.

何文贵, 郑文俊, 王爱国, 等, 2013. 临潭-宕昌断裂新活动特征与岷县漳县 $M_s6.6$ 地震关系研究 [J]. *地震工程学报*, 35 (4): 751-760.

何文社, 方铎, 刘兴安, 等, 2003. 砾卵石起动临界条件 [J]. *四川水力发电*, 22 (1): 64-65, 69.

何晓英, 2014. 浆体与级配颗粒组合条件下泥石流冲击特性实验研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学.

何晓英, 陈洪凯, 唐红梅, 2016. 泥石流浆体与固体颗粒冲击信号能量分布研究 [J]. *振动与冲击*, 35 (6): 64-69.

胡桂胜, 陈宁生, 邓明枫, 等, 2011. 甘肃舟曲三眼峪沟泥石流粗大颗粒冲击力特征分析 [J]. *地球与环境*, 39 (4): 478-484.

胡乐, 辛鹏, 王涛, 等, 2021. 硬土软岩滑坡近水平滑移的离心机模型试验研究 [J]. *地质力学学报*, 27 (1): 73-82.

李昌友, 傅鹤林, 蔡海良, 等, 2009. 风化板岩水理特性研究 [J]. *铁道科学与工程学报*, 6 (1): 74-77.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

李江峰, 2021. 卵石起动流速公式对比研究 [J]. *人民长江*, 52 (11): 201-206, 218.

李培振, 高宇, 郭沫君, 2015. 泥石流冲击力的研究现状 [J]. *结构工程师*, 31 (1): 200-206.

李祥碧, 徐广标, 1985. 潘集矿区第四纪冰川沉积物的特征 [J]. *淮南矿业学院学报* (1): 1-11.

李相博, 刘化清, 张忠义, 等, 2014. 深水块状砂岩碎屑流成因的直接证据: “泥包砾”结构: 以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组研究为例 [J]. *沉积学报*, 32 (4): 611-622.

廖建波, 李相博, 赵惠周, 等, 2017. 鄂尔多斯盆地延长组深水块状砂岩“泥包砾”结构成因机制 [J]. *中国石油大学学报 (自然科学版)*, 41 (4): 46-53.

刘道川, 游勇, 杜杰, 等, 2019. 泥石流冲击力的时空分布特征 [J]. *工程科学与技术*, 51 (3): 17-25.

刘晶晶, 马春, 李春雨, 2020. 粘性泥石流流入汇区河床堆积动力学研究的问题与展望 [J]. *地质力学学报*, 26 (4): 544-555.

刘洋, 游勇, 王海帆, 等, 2020. 颗粒流冲击力研究现状及讨论 [J]. *防灾减灾工程学报*, 40 (5): 714-723.

罗羚源, 2011. 卵砾石几何形状对起动的影响研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学.

孙兴伟, 刘云鹏, 2018. 大古与街需水电站工程区泥石流基本特征及冲击力试验研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 16 (2): 167-172.

田连权, 1994. 沟道粘性泥石流堆积地貌的成因分类 [J]. *山地研究*, 12 (1): 9-14.

王友彪, 2019. 泥石流对桥墩冲击力研究 [D]. 成都: 西南交通大学.

杨红娟, 韦方强, 胡凯衡, 等, 2016. 不同上限粒径泥石流浆体的流变参数变化规律 [J]. *水利学报*, 47 (7): 884-890.

杨文远, 李宏义, 1988. 大连南关岭地区环境工程地质问题 [C] //全国第三次工程地质大会论文选集 (下卷). 成都: 成都科技大学出版社.

于献彬, 陈晓清, 王道正, 等, 2017. 黏性泥石流浆体对拦砂坝冲击规律研究 [J]. *人民黄河*, 39 (3): 37-44.

臧秀玲, 林国友, 2011. 沈阳地区土层定名探讨 [J]. *科技信息* (5): 36.

曾超, 苏志满, 雷雨, 等, 2015. 泥石流浆体与大颗粒冲击力特征的试验研究 [J]. *岩土力学*, 36 (7): 1923-1930, 1938.

张波, 田勤俭, 王爱国, 等, 2021. 西秦岭临潭-宕昌断裂第四纪最新活动特征 [J]. *地震地质*, 43 (1): 72-91.

张植堂, 姚于丽, 1989. 长江上游河床卵石起动流速表达式的讨论 [J]. *长江科学院院报* (2): 1-10.

郑文俊, 袁道阳, 何文贵, 等, 2013. 甘肃东南地区构造活动与 2013 年岷县-漳县 $M_s6.6$ 级地震震害机制 [J]. *地球物理学报*, 56 (12): 4058-4071.

周洪建, 王曦, 袁艺, 等, 2014. 半干旱区极端强降雨灾害链损失快速评估方法: 以甘肃岷县“5·10”特大山洪泥石流灾害为例 [J]. *干旱区研究*, 31 (3): 440-445.

