

汶川震区滑坡堆积体壤中流产流规律研究

甘凤玲¹, 王涛², 何丙辉¹

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715;

2. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉 430071)

摘要:“5·12”汶川地震引发了大量的山体滑坡,在降雨径流的冲刷下,特造成更加严重的次生灾害。为研究震区滑坡堆积体的壤中流产流特征,采用室内人工降雨装置,对在不同降雨强度(1.0,1.5,2.0 mm/min)和土石比(1:1,1:2,1:4)条件下滑坡堆积体壤中流产流开展人工降雨—产流过程的试验。结果表明:(1)在不同土石比的条件下,壤中流总体趋势表现为在开始阶段增长极快,然后趋于稳定阶段直至降雨停止后,壤中流产流量迅速减小。(2)壤中流累计产流量和降雨时间为线性显著相关(R^2 为 0.946 5~0.999 6)。(3)随着降雨强度的增大,土石比 1:1 与土石比 1:2 的滑坡堆积体壤中流产流时间表现出的规律相反,而土石比 1:4 的滑坡堆积体表现却无规律可循。(4)在土石比为 1:4 的堆积体只有壤中流存在;土石比 1:1 的滑坡堆积体在雨强为 2.0 mm/min 时,壤中流时间略长于地表径流产流时间;其他情况下的地表产流时间长于壤中流产流时间,且壤中流产流时间均在 10 min 以内。

关键词: 汶川震区; 滑坡堆积体; 壤中流产流; 人工降雨

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0069-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.05.012

Characteristic of Interflow Production Processes on the Landslide Deposit in Wenchuan Earthquake Area

GAN Fengling¹, WANG Tao², HE Binghui¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715; 2. Central Southern

China Electric Power Design Institute Co., Ltd of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071)

Abstract: The Wenchuan earthquake led to a lot of landslide deposit. It was triggered more serious secondary geological disasters under the condition of rain washing out. In this article, the landslide deposit was chosen to be the research object in the Wenchuan earthquake area, an artificial rainfall device was used to conduct indoor rainfall-interflow production observation experiment at different rainfall intensities (1.0,1.5,2.0 mm/min) and soil-rock ratios(1:1,1:2,1:4). The results indicated that: (1) The interflow increase rapidly in the beginning, then stabilized gradually until the rainfall stopped under the different rock-ratio. (2) The interflow yield presented a significant positive correlation with the rainfall time ($R^2=0.946\ 5\sim0.999\ 6$). (3) Except for the soil-rock 1:4 of landslide deposit, the time of the interflow production process showed significantly different laws between the soil-rock 1:1 and 1:2 is opposite under the increase of rainfall intensity. (4) The soil-rock 1:4 of landslide deposit only produced interflow yield; Except for the time of interflow production was a little longer than the time of surface runoff when the soil-rock 1:1 of landslide deposit under the conditions of 2.0 mm/min rainfall intensity, the other's interflow production was shorter than the time of surface runoff within 10 min.

Keywords: Wenchuan earthquake area; landslide deposit; interflow; artificial rainfall

堆积体地质定义为第四纪形成的松散物质,从土壤侵蚀角度可将堆积体分为 2 类:一类由地质因素引起的堆积体,如崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害形成的堆积体;另一类由人类活动引起,如工程建设弃土弃

渣形成的堆积体。关于因地震而引发的堆积体研究,大多是通过遥感影像进行典型滑坡规律进行研究^[1-2],很少涉及不同土石比和降雨条件下堆积体壤中流产流过程特征的研究。

收稿日期:2016-08-15

资助项目:国家自然科学基金“汶川震区滑坡堆积体土壤侵蚀机理与过程模拟研究”项目(41271291)

第一作者:甘凤玲(1989—),女,博士研究生,主要从事城市水土保持研究。E-mail:359140315@qq.com

通信作者:何丙辉(1966—),男,教授,博导,主要从事土壤侵蚀与小流域综合治理研究。E-mail:hebinghui@yahoo.com.cn

壤中流是坡体总径流的重要组成部分之一,其对坡体的径流产生、土壤侵蚀和雨水再次分配都有重要的影响。鉴于此,国内外学者不仅对壤中流产流特征、环境效应、与地表径流关系及其发生机制均进行了相关试验研究,还对不同土壤区域的坡度、土层厚度、降雨强度等与壤中流特征之间关系进行定量描述^[3]。谢颂华等^[4]利用野外土壤水分渗透试验装置发现,红壤坡地壤中流产流随着土层的加深,产流过程有着明显的滞后和拖尾。丁文峰等^[5]采用人工模拟降雨方法在不同坡度和降雨强度下对紫色土坡面壤中流研究发现:在坡度相同时,壤中流随着雨强的减小而增大;雨强相同时,壤中流随着坡度的增大而增大。王小燕等^[6]研究发现在不同砾石覆盖下,壤中流系数与降雨强度呈负相关关系,并随着降雨强度的提高而降低。由此可知,尽管关于壤中流的研究不少,却对因地震所引发的堆积体壤中流的研究较少。此外,山体岩层在地震的冲击力作用下,迅速分离山体,形成大规模的崩塌滑坡灾害,这些滑坡堆积体大部分结果松散,碎石含量极多,在雨水的冲刷下,极易造成次生的水土流失和灾害。因此,对震区滑坡堆积体进行研究,在理论和实践中都有利于汶川震区的灾后治理。

鉴于此,根据汶川震区滑坡堆积体的现场勘测情况^[7],本文采用室内人工模拟降雨试验,探讨了滑坡堆积体壤中流在不同降雨强度和土石比条件下的产流规律,以便为震区水土保持做出合理的治理与规划。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于四川省汶川县的草坡河流域及国道 213 映秀—汶川沿线(102°51′—103°44′E, 30°45′—31°43′N),平均海拔高度 885.6~1 925.0 m,年平均降雨量为 1 190.9 mm。震区土壤类型主要为黄壤、山地灰化土、潮土类(即山地冲积土)等,原生植被破坏殆尽,现以杉木、柳杉等人造林为主。因地震灾害所引起的土壤侵蚀形式主要有剥离式滑坡、抛掷型滑坡和重力滑坡。全年平均侵蚀量为 1 957.79 t/(km²·a)左右,相比与震前侵蚀量有所增加,水土流失加剧^[8]。总体地势呈东南低西北高趋势,高差悬殊超过 2 000 m,典型的高山峡谷地貌,山体坡度主要为 25°~55°。震区内滑坡堆积体大小差异较大,高度不一,坡面碎石粒径变化大,坡面大部分裸露。不同滑坡堆积体碎石含量存在差异,碎石质量分数 55.43%~100%,均值为 83.84%,容重在 1.43~1.80 g/cm³之间,植被覆盖率平均值在 0%~50%之间^[9]。

1.2 采样滑坡堆积体特征

2013 年 11 月和 2014 年 5 月分别在汶川县草坡河沿岸、岷江两岸及 213 国道中选取的 5 个典型滑坡

堆积体,坡度均为 34°~45°,平均坡度为 37°。灌木盖度、植被总盖度和植被平均高度都较低自然恢复的植被类型主要为灌丛及灌草丛^[10]。滑坡堆积体表层土壤类型主要为山地褐色土和潮土类(即山地冲积土),每个堆积体的含土量各有不同,含土量平均值为 16.16%,采样点具体情况见表 1。

表 1 采样点基本信息

编号	地理 位置	高程/ m	坡度/ (°)	植被 状况/%	采样 方式
WC01	103°29′26″E,31°20′48″N	1199	34	0	分 4 层
WC02	103°27′36″E,31°17′21″N	1152	36	0	表层
WC03	103°25′47″E,31°15′15″N	1382	38	20~50	分 2 层
WC04	103°29′26″E,31°20′48″N	1199	34	0	分 2 层
WC05	103°29′28″E,31°21′50″N	1237	34	0~20	分 2 层

在坡面纵向位置每 2 m 处选取样点,并分层取样(0—10,10—20,20—30,30—40 cm),各处分别取样 2~3 kg,将其中直径>80 mm 块石和植被等杂质剔除,其他的装袋编号记录,分析其颗粒组成、含水率等物理性质。同时,在这 5 个典型滑坡堆积体中挑选最具有代表性的 WC01 号作为人工室内模拟降雨试验的滑坡堆积体试样,采取该堆积体土样共计 4 t 左右。土样分别过≥20~40,≥10~20,≥7~10,≥5~7,≥2~5,<2 mm 土筛,分离出各粒径的碎石和土粒,将≥10~60 mm 作为中碎石,≥2~10 mm 作为小碎石,按 1:1 质量比混合作为石质部分,将<2 mm 的粒径作为土质部分,装土时控制试样干密度约在 1.77 g/cm³,初始含水率质量分数 8.25%~12.60%,使试验土层结构与震区滑坡堆积体结构大致相同^[11]。

1.3 试验设计与观测

试验在西南大学资源环境学院后山的降雨大厅内开展,降雨器为诺顿(Norton)降雨模拟器,产生的雨滴速度和大小与自然降雨有很好的相似性,降雨喷头位置距地面 3 m,喷射水量为 37.85 L/min,喷射角度 80°,降雨雨滴均匀度大于 80%。试验采用自制钢制土槽,土槽尺寸长 100 cm,宽 60 cm,高为 25 cm,坡度可在 0°~45°范围进行调节,为收集壤中流,在土槽下部挡板打孔。

根据本试验目的要求,按以下要求设计堆积体参数及试验方法:

(1) 堆积体参数。本试验在野外调查结果中的震区堆积体休止角作为参考^[12],根据调查区域内的堆积体的实际情况,坡度集中在 30°~40°之间,本试验采用汶川震区大部分的滑坡堆积体的平均坡度作为参考,将坡度设计为 35°。同时,由于堆积体中的碎石粒径大多为 2~40 mm 之间,含石量均在 50%以上,因此将汶川滑坡堆积体按照质量比 1:1,1:2,1:4 进行均匀混合,然后将混合好的试验材料放置在自制土槽里进

行微调,确保堆积体干密度保证在 $1.73\sim 1.95\text{ g/cm}^3$ 之间,土壤含水量在 $0.3\%\sim 15\%$ 之间。本文根据汶川震区每年夏季暴雨发生频率为 $80\%\sim 87\%$ 和其最大日降雨量达 250 mm ,以从小到大的原则设计 3 个水平雨强: $1.0, 1.5, 2.0\text{ mm/min}$ 。试验设定为土石比和雨强 2 个处理,每处理设 3 个水平,总计 9 组模拟降雨试验,每组试验重复 3 次,共计 27 次降雨。

(2) 试验方法。试验土槽为自制的底部打孔钢槽,土槽长 1.0 m ,宽 0.6 m ,深 0.25 m 。土槽下部挡板打孔,以供壤中流排出,孔洞分 4 排,每排 10 个,孔径 5 mm ,并在土槽上部和中部分别设置 2 个集水槽,用于收集地表径流和壤中流。装土前,用粗纤维团将底部孔堵住,以防止土壤颗粒从土槽中漏出且不影响水流流动。将相应的碎石与细土($<2\text{ mm}$)自然均匀地混合装入土槽,每 5 cm 压实一次,然后用钢叉打毛,实际填装试样厚度为 24 cm 左右,实际干密度为 1.77 g/cm^3 。混合堆积体样填装完成后,用非侵蚀性水湿润土样,然后用塑料薄膜盖住,静置 24 h ,每次降雨前取细土($<2\text{ mm}$)测定试样含水率,细土含水率在 $8.25\%\sim 12.60\%$ 之间^[19-20]。

从地表径流产生开始,设计降雨历时为 90 min 。在地表径流前 10 min 内,每隔 1 min 进行接样;在 $10\sim 40\text{ min}$,每隔 3 min 进行接样;在 $40\sim 90\text{ min}$,每隔 5 min 进行接样。在壤中流开始前 10 min 内,每 1 min 内进行接样, $10\sim 25\text{ min}$ 内,每 3 min 内进行接样, $25\sim 100\text{ min}$ 内,每 5 min 内进行接样,在降雨停止后,继续接滑坡堆积体所产生的壤中流直至其不再产生为止。用量筒测定径流量,并将样品静置 24 h ,将上清液倒掉,然后将浑浊液完好无损倒入烧杯,并将其在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱内烘干 12 h ,测定其泥沙含量。

试验数据和图表采用 EXCEL 和 SPSS. 18 进行相关分析,对不同雨强和土石比的壤中流进行显著回归分析。

2 结果与分析

2.1 堆积体壤中流产流特征分析

不同降雨强度和土石比条件下的堆积体在不同时段下壤中流率的观测结果如图 1,壤中流开始时刻记为 0。壤中流强度随降雨时间的变化具有以下特征:壤中流产流变化规律为凸型(两头小中间大),壤中流产流在降雨开始阶段迅速增大随之达到稳定,在降雨结束后,壤中流迅速减小并持续了一段时间,这与地表产流明显不同。当滑坡堆积体土石比为 $1:1$ 时,在雨强 2.0 mm/min 和 1.5 mm/min 时壤中流变化趋势基本相同,即壤中流产流的高峰阶段持续时间短,在达到最大点后迅速减小;在雨强为 2.0 mm/min 时,壤中流在 5 min 后达到高峰值为 240 ml/

min ;在雨强为 1.5 mm/min 时,壤中流产流在 7 min 后达到高峰值 530 ml/min 。而在雨强为 1.0 mm/min 时,变化趋势有所不同,即当壤中流产流达到高峰到减小的阶段缓慢,持续了 50 min 左右,在 10 min 时达到高峰值 560 ml/min 。由此可知,随着降雨强度的变化,壤中流产流达到最大的时间和产流高峰值的规律为 $2.0\text{ mm/min} < 1.5\text{ mm/min} < 1.0\text{ mm/min}$ 。雨强越小,壤中流产流的高峰值越大,原因可能是当雨强较大时,雨滴对滑坡堆积体表面打击较大,极易使堆积体中的土壤孔隙堵塞,导致壤中流产流减小。在 80 min 后,滑坡堆积体壤中流在这 3 种雨强条件下的产流量均在 110 ml/min 左右。

当滑坡堆积体的土石比为 $1:2$,雨强为 2.0 mm/min 时,壤中流产流量基本稳定在 87.98 ml/min ,变化幅度较为平缓,在 92 min 降雨停止后,壤中流产流缓慢减小;雨强为 1.5 mm/min 时,壤中流产流在开始阶段迅速增大,其高峰值为 787.25 ml/min ;而雨强为 1.0 mm/min 时,壤中流产流高峰值为 545.22 ml/min ,其达到高峰值后产流稳定的时间比在雨强为 1.5 mm/min 时长。

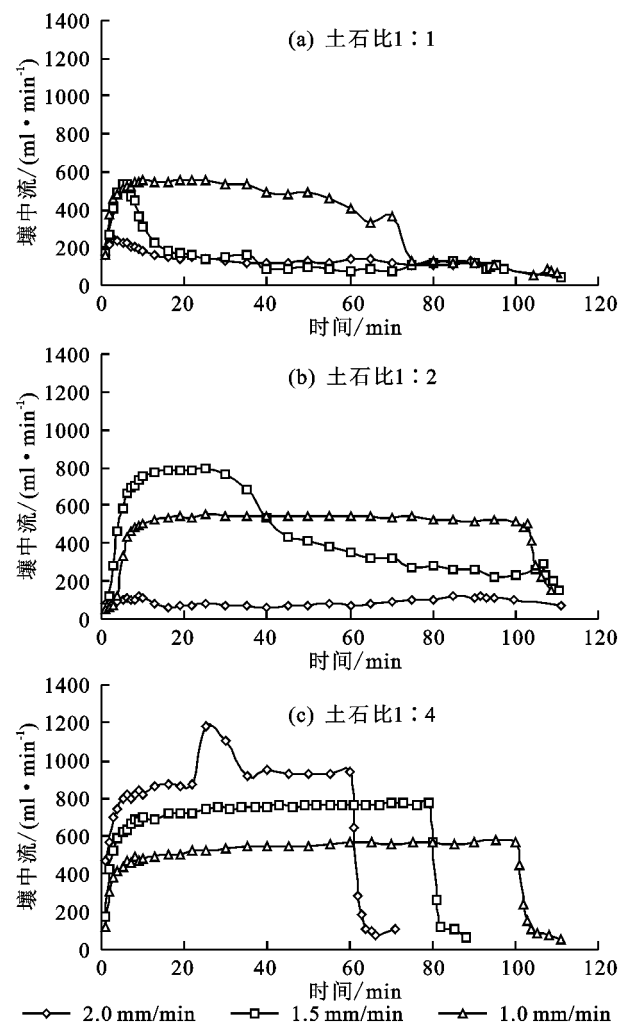


图 1 不同土石比的 35° 滑坡堆积体在不同雨强下壤中流变化过程曲线

当滑坡土石比为 1 : 4 时,在试验设计的雨强条件下,壤中流在开始阶段均增长极快,然后趋于稳定阶段直至降雨停止后,其产流量迅速减小。最大壤中流产流时间均在 10 min 左右,在雨强 2.0 mm/min 时,壤中流产流在 25 min 时突然增大。这可能是因为外界因素所引起的,壤中流产流的最大值随雨强增大而增大,表现为 1.0 mm/min<1.5 mm/min<2.0 mm/min。

有学者^[13]研究表明,在无碎石含量的土壤条件下,壤中流产流呈指数减小,在本试验研究中,壤中流产流减小并不明显,而是一个呈凸型的变化过程,这说明碎石含量存在增加了雨水截流和地表粗糙度,随着土石比的减小,即含石量较大时,滑坡堆积体的入渗能力加强,随着降雨时间的增长,坡面的细小沙粒均流入堆积体内部,造成堆积体表面的碎石覆盖逐渐增加,消耗了雨滴降落在堆积体中的大部分能量,且堆积体孔隙度较大,表土碎石间的雨水通过碎石极易渗入到土体中,堆积体坡面不易结皮形成地表径流,雨水大部分转为入渗和壤中流,所以随着土石比减小,其壤中流产流也随之增大。

由表 2 可知,当雨强为 1.0 mm/min 时,壤中流平均产流量随着堆积体的含石量的增多呈梯度递增,土石比为 1 : 1 的滑坡堆积体的壤中流平均产流为 405.20 ml/min,与土石比为 1 : 2 的平均产流 458.69 ml/min 相差 53.49 ml/min,而土石比 1 : 2 与土石比 1 : 4 的壤中流平均产流量 499.43 ml/min,相差 40.74 ml/min,即随着土石比的减小,滑坡堆积体土石比两者之间壤中流平均产流相差逐渐减小。可能是因为雨强较小(1.5 mm/min)的情况下,碎石含量的增大,堆积体孔隙也随之增大,壤中流的变化也随之增大,但增大趋势较为稳定。在雨强为 1.5 mm/min 时,土石比 1 : 1,1 : 2 和 1 : 4 的滑坡堆积体的壤中流平均产流分别为 218.80 ml/min<477.65 ml/min<698.14 ml/min,土石比 1 : 1 与 1 : 2 的滑坡堆积体壤中流平均产流相差为 258.85 ml/min,土石比 1 : 2 与 1 : 4 壤中流平均产流相差为 220.49 ml/min,其表现出来的规律与雨强为 1.0 mm/min 的滑坡堆积体相似。雨强为 2.0 mm/min 时,随着土石比的减小,壤中流平均产流表现出较复杂的规律,土石比为 1 : 1,1 : 2 和 1 : 4 的滑坡堆积体的壤中流平均产流分别为 156.65,87.98,851.65 ml/min,土石比为 1 : 2 时,滑坡堆积体壤中流平均产流下降明显。可能原因是雨强增大到一定值时,雨滴对滑坡堆积体坡面的打击能力变大,瞬间改变了堆积体坡面的碎石覆盖度,滑坡堆积体的物理性状随之改变,促使壤中流在不同土石比的堆积体中表现出不同的规律。说明雨强的大小对壤中流的影响存在一

个临界值,当超过这个值时,将会改变滑坡堆积体壤中流的产流规律。这与王小燕等^[14]学者对砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程进行研究发现,砾石覆盖提高了壤中流流速,促进了降雨转化为壤中流的份额的研究结果相一致。

表 2 土石比和雨强对滑坡堆积体壤中流产流量影响		
雨强/ (mm·min ⁻¹)	土石比	平均产流量/ (ml·min ⁻¹)
1.0	1 : 1	405.20±174.18
	1 : 2	458.69±156.39
	1 : 4	499.44±96.75
1.5	1 : 1	218.80±152.36
	1 : 2	477.65±234.05
	1 : 4	698.14±122.97
2.0	1 : 1	156.64±43.09
	1 : 2	87.98±18.75
	1 : 4	851.65±151.73

2.2 土石比对震区堆积体累积壤中流量的影响

在降雨开始阶段,滑坡堆积体并没有立即产生壤中流,其先进行入渗产流然后壤中流产流,堆积体的累积壤中流量是指在降雨过程中,雨水在堆积体中所形成壤中流的总量^[15]。坡度为 35°的滑坡堆积体在不同土石比与雨强条件下的累积壤中流与降雨历时关系如图 2。当滑坡堆积体土石比为 1 : 1 时:在雨强为 1.0 mm/min 时,累计壤中流产流开始阶段呈斜线迅速增长,在 65 min 左右后逐渐趋于平稳;在雨强为 1.5,2.0 mm/min 时,累计壤中流变化趋势相似,随着时间缓慢增长,即雨强越大,滑坡堆积体累计壤中流也随之增大。当土石比为 1 : 2 时:在雨强 2.0 mm/min 时,累计壤中流产流呈缓慢增长,均小于雨强 1.0,1.5 mm/min 的累计壤中流,而在壤中流开始阶段,雨强 1.0 mm/min 小于 1.5 mm/min,过了 80 min 后雨强 1.0 mm/min 的累计壤中流便逐渐大于雨强为 1.5 mm/min 的滑坡堆积体。在土石比为 1 : 4 时:在雨强 1.0,1.5,2.0 mm/min 时滑坡堆积体分别以 0.544 2,0.744 4,0.945 7 的斜率线性增长,且累计壤中流的流量大小表现为 1.0 mm/min<1.5 mm/min<2.0 mm/min。

在此降雨过程中,累计壤中流与土石比之间存在一定的相关性。为了得出滑坡堆积体累计壤中流与土石比的规律,现运用 SPSS 软件进行分析,结果表明:累计壤中流与时间的变化规律为线性关系(表 3),可用公式 $y=a \cdot t+b$ 表示,式中 y 为累计壤中流, t 为壤中流产流时间。回归方程的相关系数均在 0.9 以上,拟合度良好,显著性水平均为 0.000,显著性指标极高。

由滑坡堆积体累计壤中流产流的变化趋势可知,在不同土石比条件下,随着降雨强度增大,累计壤中

流表现出较复杂的规律。土石比 1 : 1 和 1 : 2 的滑坡堆积体累计壤中流在雨强为 1.0 mm/min 时最大,而土石比 1 : 4 的滑坡堆积体累计壤中流在雨强为 2.0 mm/min 时最大。这说明土石比对滑坡堆积体累计壤中流影响存在一个临界值,超出这个临界值时,雨水对堆积体坡面的打击能力较大,促使坡面细小土粒通过土壤孔隙迅速填充于堆积体底部,导致坡面碎石盖度增加,地表没有结皮,坡面的孔隙度更高,堆积体的水分运动基本是由降雨入渗和壤中流形成,坡面没有形成地表径流,进而堆积体累计壤中流随着降雨时间不断增大。

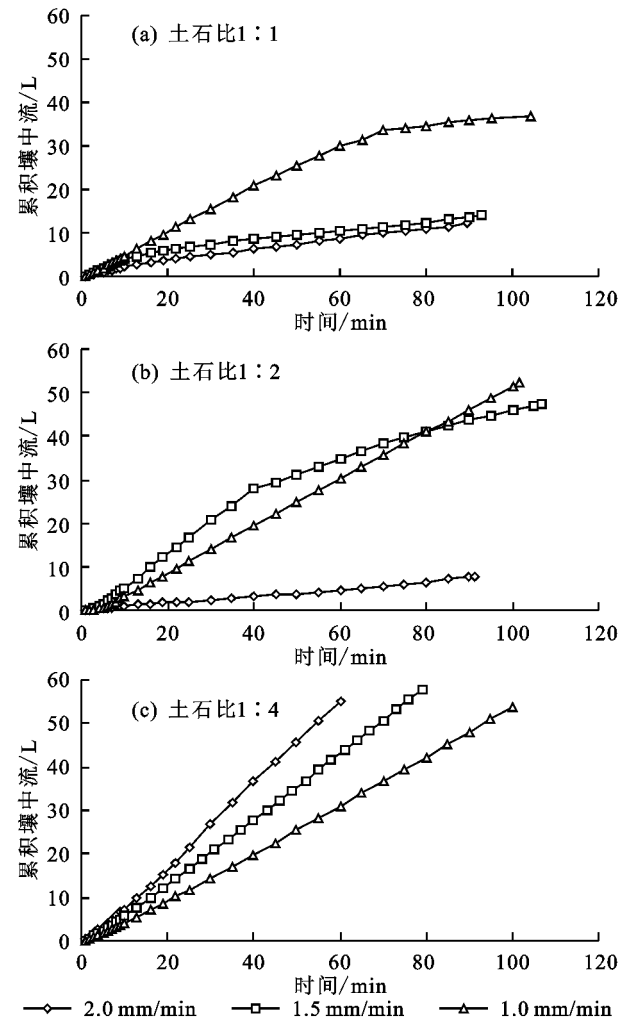


图2 滑坡堆积体累计壤中流产流过程

表3 累计壤中流随时间变化回归方程拟合表

土石比	降雨强度/ (mm · min ⁻¹)	回归 方程	相关 系数	显著性
1 : 1	2.0	y = 0.1328t + 0.6237	0.9944	0.000
	1.5	y = 0.4111t + 1.5536	0.9635	0.000
	1.0	y = 0.1366t + 2.0826	0.9465	0.000
	2.0	y = 0.0796t + 0.0189	0.9946	0.000
1 : 2	2.0	y = 0.4786t + 2.1711	0.9592	0.000
	1.5	y = 0.5332t - 1.9316	0.9995	0.000
	1.0	y = 0.9457t - 1.6846	0.9988	0.000
	2.0	y = 0.7444t - 1.6289	0.9996	0.000
1 : 4	1.5	y = 0.5442t - 1.3847	0.9994	0.000
	1.0			

2.3 土石比对震区堆积体壤中流产流时间的影响

壤中流产流时间离降雨开始时间有不同长短的滞后,且降雨时间对滑坡堆积体的壤中流产流有着很大的影响,短历时强降雨条件下,堆积体坡面发生超渗产流^[16]。土石比和降雨强度对壤中流产流时间有明显影响,由图3可知,土石比为 1 : 1 时,随着降雨强度的增大,壤中流产流时间也随之增长,具体表现为 3.2 min(1.0 mm/min) < 4.0 min(1.5 mm/min) < 5.5 min(2.0 mm/min);土石比为 1 : 2 时,随着降雨强度的增大,壤中流产流时间却随之减小,表现为 6.2 min(1.0 mm/min) > 3.3 min(1.5 mm/min) > 1.5 min(2.0 mm/min);土石比为 1 : 4 时,壤中流产流时间随着降雨强度的变化为 3.0 min(2.0 mm/min) > 2.3 min(1.0 mm/min) > 1.7 min(1.5 mm/min)。

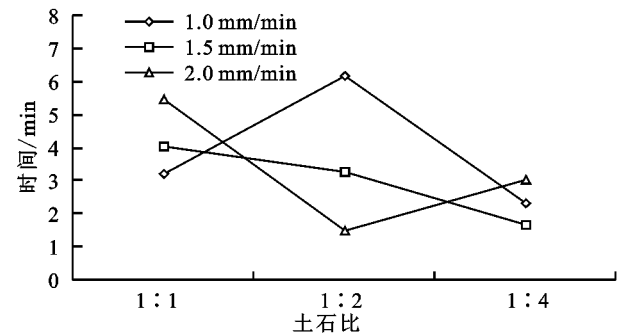


图3 滑坡堆积体壤中流产流时间与土石比、雨强关系

由此可知,在 3 种土石比条件下,壤中流产流时间与降雨强度之间的关系较为复杂,同一降雨强度下不同土石比的壤中流产流时间规律也不一致,土石比 1 : 1 与土石比 1 : 2 的滑坡堆积体壤中流产流时间随着降雨强度的增大表现出的规律恰好相反,而土石比 1 : 4 的滑坡堆积体表现却无规律可循,但其产流时间始终比土石比 1 : 1 的小。尹忠东等^[17]学者研究表明,壤中流历时主要受单一因素的影响,多种因素的交互作用影响较弱,且表层与底层的壤中流历时均不同,表层壤中流历时与降雨强度的相关性较强,而底层壤中流历时与降雨强度的相关性较差。该研究结论与本研究结论有所不同,这可能是由于本研究是以滑坡堆积体的石质为主,在降雨条件下,堆积体内部土石混合不均匀,空间差异性较大,同时随着壤中流产生过程中的细小颗粒极易将孔隙堵塞,促使堆积体土体结构不稳定,部分堆积体在雨水作用下出现塌陷的现象,造成壤中流运动路径复杂,进而致使壤中流产流时间没有明显差异。

2.4 坡面产流与壤中流产流时间对比分析

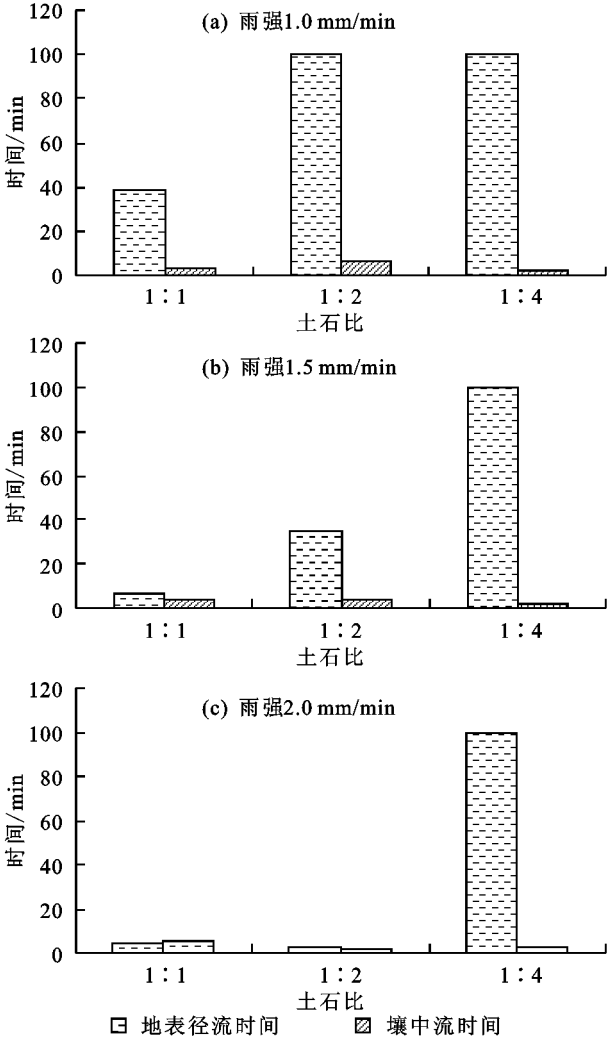
地表径流和壤中流两种径流为汶川震区滑坡堆积体坡面的总径流^[18-19],在总降雨过程中,两者比例随着雨强和土石比的不同而不同。汶川震区的滑坡堆积体大多为土石混合体,这些滑坡堆积体多由震前

地表土壤崩塌产生的碎石所组成,结构松散,孔隙较大,透水性较强,故震区滑坡堆积体坡面壤中流产生是由于堆积体表面碎石含量较多,水流移动较大,饱和导水率较大,当雨水进入到堆积体下层时,导水率下降迅速形成了临时不透水层。这和一般的岩土二元坡面结构的紫色土壤壤中流形成有着本质的不同^[20],紫色土的坡面土壤疏松,下层为不透水层页岩,壤中流形成为蓄满产流。滑坡堆积体的壤中流产流还伴有坡面产流的发生,壤中流产流时间问题比坡面产流时间复杂的多,在自然界中,由于壤中流流速较慢,前一场降雨引起的壤中流尚未结束,又有新的降雨产生,从而导致一个壤中流历时过程很长^[25]。现根据各种情况下滑坡堆积体坡面地表产流和壤中流产生情况,统计了在不同土石比和降雨强度下,坡度为 35°的滑坡堆积体地表与壤中流产流时间的比例。

由图 4 可知,壤中流在不同土石比和雨强条件下产流时间的比例呈现出如下变化规律:土石比为 1:4 的滑坡堆积体始终没有产生径流。在降雨强度为 1.0 mm/min 时,土石比为 1:1,1:2 和 1:4 的滑坡堆积体壤中流产流时间大小为 3.18,6.18,2.28 min,土石比 1:1 的滑坡堆积体地表径流时间为 38.88 min,是壤中流产流时间的 12.2 倍,而土石比 1:2 的滑坡堆积体没有产生地表径流;在降雨强度为 1.5 mm/min 时,土石比 1:1,1:2 和 1:4 的滑坡堆积体壤中流产流时间大小为 4.03,3.27,1.68 min,土石比 1:1 和 1:2 的滑坡堆积体地表径流时间为 6.37 min 和 34.43 min,是壤中流产流时间的 1.58 倍和 10.53 倍;在降雨强度为 2.0 mm/min 时,土石比 1:1,1:2 和 1:4 的滑坡堆积体壤中流产流时间分别为 5.46,1.48,3.0 min,土石比 1:1 和 1:2 的滑坡堆积体地表径流时间为 4.25,2.73 min,是壤中流产流时间的 0.78 倍和 1.84 倍。

这说明在降雨强度较小(1.0 mm/min)时,滑坡堆积体土石比存在一个临界值,当小于这个临界值时,滑坡堆积体地表径流随着土石比的减小,滑坡堆积体的土壤孔隙增大,持水能力减弱,湿层现象明显,堆积体含水量增大,并增大了下层堆积体水分向坡面的运输,则堆积体的壤中流产流和地表径流时间随之增加,当大于这个临界值时,堆积体的壤中流产流和地表径流时间随之减少;当降雨强度适中(为 1.5 mm/min)时,堆积体为蓄满产流,其壤中流产流时间随着土石比的减小而增大,地表径流时间却随之减小;当降雨强度较大(2.0 mm/min)时,此时雨滴动能急速增大,对坡面的击打能力增强,急剧改变了堆积体坡面土石比,加快了坡面砾石的覆盖度,故此时堆积体的壤中流和地表径流产流时间规律较难遵循一

定的规律。这说明,土石比是影响滑坡堆积体壤中流产流特征的重要因素^[21]。堆积体坡面砾石含量的多少可以有效的增加堆积体入渗,当土石比为 1:4 时,雨水均渗入堆积体内,坡面没有产生径流,径流总量仅来自壤中流,这说明当滑坡堆积体以石质为主时,堆积体入渗能力提高,阻碍了地表径流产生,同时促进了壤中流形成,对降雨的分配进行了有效的调控。



注:图中 100 min 表示无径流产生,理解为产生径流时间无限大。

图 4 地表径流时间与壤中流时间对比关系

3 结论与讨论

研究震区滑坡堆积体坡面壤中流产流规律对日后震区滑坡堆积体水土流失测算模型的建立、堆积体侵蚀机理的阐述等方面具有极其重要的指导意义。本文应用人工模拟降雨分析不同土石比和雨强条件下的滑坡堆积体壤中流产流的变化规律,研究结果表明:

(1)土石比和降雨强度均对震区堆积体壤中流产流能力的影响因素。随着降雨强度的变化,土石比为 1:1 的滑坡堆积体壤中流产流达到最大的时间和产流高峰值的规律均为 2.0 mm/min<1.5 mm/min<1.0 mm/min;土石比为 1:2 的滑坡堆积体壤中流产流达到最大的时间和产流高峰值的规律均为 2.0

$\text{mm}/\text{min} < 1.0 \text{ mm}/\text{min} < 1.5 \text{ mm}/\text{min}$;当滑坡土石比为1:4时,在设计的雨强条件下,均体现为在开始阶段增长极快,然后趋于稳定阶段直至降雨停止后,壤中流产流量迅速减小。汶川震区滑坡堆积体降雨强度和壤中流产流量显著相关($R^2 > 0.9$)。

(2)土石比和雨强均对滑坡堆积体壤中流产流时间产生影响。在3种土石比条件下,壤中流产流时间与降雨强度之间的关系较为复杂,同一降雨强度下不同土石比的壤中流产流时间规律也不一致,土石比1:1与土石比1:2的滑坡堆积体壤中流产流时间随着降雨强度的增大表现出的规律恰好相反,土石比1:4的滑坡堆积体表现却无规律可循,但其产流时间始终比土石比1:1的小。

(3)地表产流时间与壤中流产流时间存在明显差异。在土石比1:4的滑坡堆积体只有壤中流,而地表径流和壤中流同时存在情况下,除土石比为1:1的堆积体在雨强为 $2.0 \text{ mm}/\text{min}$ 时,壤中流时间略长于地表径流产流时间外,其他均是地表产流时间长于壤中流产流时间,且壤中流产流时间均在10 min以内,地表径流产流时间最短2.7 min,最长达38.9 min,两者时间最小达到1.5倍,最大12.2倍。

综上所述,由于滑坡堆积体大部分以蓄满产流为主,降雨强度直接影响滑坡堆积体的入渗量,进而影响堆积体水分的二次分布。本研究发现,滑坡堆积体壤中流径流量变化呈现两头小中间大的特点,产流开始阶段,径流量迅速增大,然后径流量达到稳定,在降雨结束后,壤中流迅速减小,并持续一段时间,这与地表径流明显不同。值得注意的是,有研究表明在纯土壤条件下,壤中流过程曲线呈现指数衰减,而在本研究几种条件下,壤中流过程曲线回落过程的指数衰减不明显,大部分都不存在此现象,这可能是因为碎石含量过大,堆积体表层土质较少,在降雨持续一段时间后,雨水在堆积体坡面只有少部分被径流冲刷侵蚀,大部分随着壤中流和入渗向下迁移,当碎石含量超过一个临界值时,坡面没有产流,雨水几乎为入渗和壤中流,这说明在防治震区滑坡堆积体水土流失措施时,对土石比的研究是十分有必要的。

参考文献:

- [1] 周伟,唐川,周春花. 汶川震区暴雨泥石流激发雨量特征[J]. 水科学进展,2012,23(5):650-655.
- [2] 唐川,李为乐,丁军,等. 汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查[J]. 中国地质大学学报:地球科学,2011,36(1):172-180.
- [3] DAVID W O. Hydrograph and chloride pollute graph analysis of Hobbs Brook reservoir basin in eastern Mas-

sachusetts[J]. Journal of Hydrology, 2013, 503(11): 123-134.

- [4] 谢颂华,涂安国,莫明浩,等. 自然降雨事件下红壤坡地壤中流产流过程特征分析[J]. 水科学进展,2015,26(4):526-534.
- [5] 丁文峰,张平仑,王一峰. 紫色土坡面壤中流形成与坡面侵蚀产沙关系试验研究[J]. 长江科学院院报,2008,25(3):14-17.
- [6] 王小燕,李朝霞,蔡崇法. 砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J]. 水科学进展,2012,23(1):38-45.
- [7] 庄建琦,崔鹏,葛永刚,等. “5.12”汶川地震崩塌滑坡分布特征及影响因子评价:以都江堰至汶川公路沿线为例[J]. 地质科技情报,2009,28(2):16-21.
- [8] 李天阳,何丙辉,雷廷武,等. 汶川震区滑坡堆积体土石混合坡面细沟水动力学特征室内试验[J]. 水利学报,2014,45(8):892-902.
- [9] Lin J, Huang Y, Wang M, et al. Assessing the sources of sediment transported in gully systems using a fingerprinting approach: An example from South-east China [J]. Catena, 2015, 129(6):9-17.
- [10] 谢洪,钟敦伦,矫震,等. 2008年汶川地震重灾区的泥石流流[J]. 山地学报,2009,27(4):501-509.
- [11] 余斌,马煜,吴雨夫. 汶川地震后四川省绵竹市清平乡文家沟泥石流灾害调查研究[J]. 工程地质学报,2010,18(6):827-836.
- [12] 李振林. 汶川震区滑坡堆积体物质组成与堆积体休止角关系模拟研究[D]. 重庆:西南大学,2013.
- [13] Jiang F S, Huang Y H, Wang M K, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in southeast China [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(5):1741-1752.
- [14] 王小燕,王天巍,蔡崇法,等. 含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J]. 水科学进展,2014,25(2):189-195.
- [15] 付智勇,李朝霞,蔡崇法,等. 不同起始条件下坡面薄层紫色土水分和壤中流响应[J]. 水利学报,2011,42(8):899-907.
- [16] 周明华,朱波,汪涛,等. 紫色土坡耕地磷素流失特征及施肥方式的影响[J]. 水利学报,2010,41(11):1374-1381.
- [17] 尹忠东,左长清,高国雄,等. 江西红壤缓坡地壤中流影响因素分析[J]. 西北林学院学报,2006,21(5):1-6,64.
- [18] 刘宏伟,余钟波,崔广柏. 湿润地区土壤水分对降雨的响应模式研究[J]. 水利学报,2009,40(7):822-829.
- [19] 徐佩,王玉宽,傅斌,等. 紫色土坡耕地壤中产流特征及分析[J]. 水土保持通报,2006,26(6):14-17.
- [20] Ma Y J, Li X Y. Water accumulation in soil by gravel and sand mulches: Influence of textural composition and thickness of mulch layers[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(5):432-437.
- [21] 张洪江,何凡,史玉虎,等. 长江三峡花岗岩坡面管流在壤中流中的作用[J]. 中国水土保持科学,2005,3(1):31-38.