

人工模拟降雨下汶川震区滑坡堆积体产沙规律

甘凤玲¹, 何丙辉^{1*}, 王 涛²

(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: 为明确震区滑坡堆积体坡面产沙的特点, 该文采用室内人工模拟降雨试验, 对不同土石比(质量比为 1:1、1:2、1:4)的滑坡堆积体侵蚀产沙规律进行研究。结果表明, 同一土石比不同降雨强度与同一雨强不同土石比条件下, 震区滑坡堆积体产沙随时间的变化形式, 为波动型和平缓型。土石比和雨强对滑坡堆积体径流含沙量有显著影响, 即当滑坡堆积体土石比为 1:1 时, 稳定产沙率随着雨强增大而增大, 即 2.80 g/min (1.0 mm/min) $< 7.76 \text{ g/min}$ (1.5 mm/min) $< 10.84 \text{ g/min}$ (2.0 mm/min); 在土石比为 1:2 雨强 1.0 mm/min 时没有产流产沙, 1.5 mm/min 雨强条件下的产沙率小于雨强 2.0 mm/min 的产沙率; 土石比为 1:4 的滑坡堆积体在整个试验过程中没有产流产沙。土石比与平均产沙率、累积产沙量的偏相关系数相比于雨强更大, 累积径流量和累积产沙量为极显著线性关系。研究为汶川震区滑坡堆积体的水土流失预测和治理提供理论依据。

关键词: 沙; 径流; 滑坡; 堆积体; 汶川震区; 人工降雨

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.023

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0158-07

甘凤玲, 何丙辉, 王 涛. 人工模拟降雨下汶川震区滑坡堆积体产沙规律[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 158—164.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.023 http://www.tcsae.org

Gan Fengling, He Binghui, Wang Tao. Sediment characteristic of landslide accumulation body in earthquake zone of Wenchuan under artificial rainfall simulation condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 158—164. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.023 http://www.tcsae.org

0 引 言

堆积体又名沉积物、沉积层或堆积物, 地质定义为第四纪形成的松散物质, 根据成因外力作用可划分为坡积物、冲积物、风积物、残积物等不同类型^[1-2]。从土壤侵蚀角度可以将堆积体分为 2 类: 一类由人类活动引起, 如工程建设弃土弃渣形成的堆积体; 另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。关于因地震而引发的滑坡堆积体的研究, 大多是利用 GIS 和遥感技术研究分析地质滑坡的分布规律和发育特征^[3], 对震区不同土石比滑坡堆积体坡面产流产沙特征研究较少。

汶川地震形成的滑坡堆积体大多为松散物质所构成, 在降雨和径流的作用下, 堆积体物质经搬运和侵蚀作用输送进入河水中, 造成极为严重的次生水土流失。Chang 等^[4]分析了滑坡形成堰塞体的稳定性因素, 评估了堰塞体的发展趋势和易蚀性。李振林^[5]对震区滑坡堆积体休止角进行了研究, 休止角均在 45° 左右。王雪松等^[3]研

究了工程堆积体坡面侵蚀水动力特征, 系统分析了水流功率、水流剪切力、过水断面单位能与坡面剥蚀率之间的关系, 表明水流功率是表示土壤分离过程的一个较好的水力参数。朱元骏等^[6]研究发现, 碎石含量的多少将会改变土壤的入渗和侵蚀产沙。国外学者^[7]也对含碎石土壤进行了相关研究, 表明碎石含量多的土壤极易形成集中流, 且碎石所处位置不同, 对土壤侵蚀产沙量也不同。综上, 尽管关于碎石含量对土壤的侵蚀产沙规律研究很多^[8-9], 但很少涉及碎石质量分数超过 50% 的堆积体侵蚀机理的研究。汶川地震触发了大量山体滑坡, 这些滑坡堆积体具有结构松散, 植被覆盖率极低, 碎石含量多等特点, 震区的滑坡堆积体物质已经不再是严格意义上的土壤。此外, 由于造成震区水土流失的因素较多, 究竟选取何种因素作为侵蚀过程指标尚没有统一结论, 需要进行相关试验研究来验证。故对因地震所造成的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。

综上, 本文采用室内人工模拟降雨试验, 根据汶川震区滑坡堆积体的实际情况, 主要分析了在不同雨强和土石比条件下堆积体的产流产沙规律, 以深刻认识滑坡侵蚀现状, 为震区水土保持制定合理规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于汶川县境内沿 213 国道及岷江两岸、草

收稿日期: 2015-10-13 修订日期: 2016-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(41271291)

作者简介: 甘凤玲, 女, 主要从事城市水土保持研究。重庆 西南大学资源环境学院, 400715。Email: 359140315@qq.com

*通信作者: 何丙辉, 男, 教授, 博导, 主要从事土壤侵蚀与小流域综合治理研究。重庆 西南大学资源环境学院, 400715。

Email: hebinghui@yahoo.com.cn

坡河沿岸(102°51′~103°44′E、30°45′~31°43′N)，区内所造成的山体崩塌滑坡侵蚀基本是由地震引发。该区气候垂直分带明显，以银杏乡苏坡店为界，苏坡店以北的绵虬、威州河谷地带，气候干燥，属于暖温带半干旱季风气候区，年均降水量约 526 mm，季节分配不均。苏坡店以南的映秀、漩口河谷地带，是川西多雨中心和暴雨地区之一，年均降水量达 1 285 mm，属山地亚热带湿润季风气候区。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^[9-11]，如图 1 所示。



图 1 滑坡堆积体分布图
Fig.1 Distribution of landslide accumulation body

1.2 土样采集及处理

2013 年 11 月和 2014 年 5 月分别在地形条件和理化性质基本相似的区域选定 5 个具有代表性的滑坡堆积体，进行样品采集，采样点具体情况详见表 1。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，共计 4 t。

表 1 采样点基本信息
Table 1 Basic information on sampling points

编号 Labels	地理位置 Geographic position	高程 Elevation/m	坡度 Slope/(°)	植被状况 Vegetation/%	采样方式 Sampling methods
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	-	-	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

先将土样自然风干，除去其中的枯枝、粒径>60 mm 石块等杂物，Miller 等^[12]把土壤中的碎石分为 6 个等级：2~5 (小碎石)、>5~20 (中碎石)、>20~76 (粗砂砾)、>76~250 (鹅卵石)、>250~600 (石块)、>600 mm (大石块)。故本文将不同粒径划分为 4 类：>60 mm 为大

碎石，60~10 mm 为中碎石，10~2 mm 为小碎石，<2 mm 为细土。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^[13]。

1.3 试验设计

根据对汶川震区滑坡堆积体实际勘测，震区滑坡堆积体大部分坡面坡度集中在 36°左右，故本试验设定坡度为 35°(震区实际堆积体的自然休止角)。同时，震区各坡位碎石粒径多在 2~40 mm，碎石质量分数均超过 50%。因此将震区堆积体土样和碎石按照质量比设为 1:1、1:2 和 1:4。根据汶川震区暴雨发生频率，设计 3 个水平雨强：1.0、1.5 和 2.0 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。

1.4 试验过程

选择人工降雨装置为美国农业部土壤侵蚀研究实验室的诺顿降雨模拟器^[14]，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 mm)自然均匀地混合装入土槽，每 5 cm 压实 1 次，然后用钢叉打毛，实际填装试样厚度为 24 cm 左右，实际干密度略为 1.77 g/cm³。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 mm)测定试样含水率，细土含水率在 8.25%~12.60% 之间。

为保证降雨的均匀度和强度达到试验要求，试验前先进行降雨强度的标定。设计降雨历时 90 min (以地表径流产生为开始时间)，实际降雨历时除个别外均>90 min。在试验过程中，及时收集地表径流。地表径流产生的前 10 min 内，每间隔 1 min 接样；径流产生的>10~40 min 内，每间隔 3 min 接样；径流产生的>40~90 min 内，每间隔 5 min 接样，降雨停止后继续接地表径流，直至地表径流不产生为止^[15]。

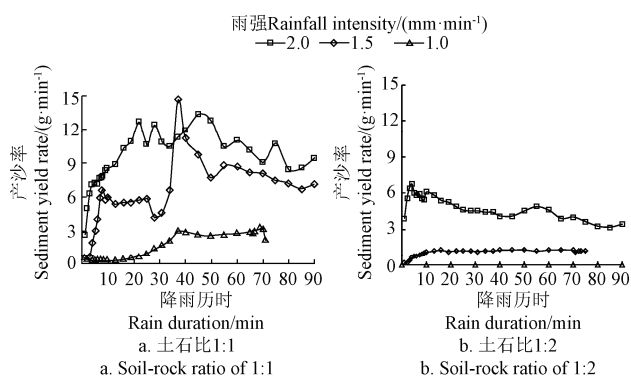
1.5 指标测定与计算

径流量：采用自制大量筒测定，L。
径流含沙量：将径流样品静置 24 h，倒掉上清液，将浑浊液无损转入烧杯，放烘箱 105 ℃烘干 12 h，称质量，泥沙总质量与径流量之比为径流泥沙含量，g/L。
产沙率：各时段所收集的泥沙的总干质量除以降雨历时，即单位时间内因侵蚀产生的泥沙量为产沙率，g/min。
累积产沙量：各时段所收集的泥沙的总干质量与产沙时间的乘积为累积产沙量，g。
试验所得到的数据采用 Excel2003 处理分析。

2 结果与分析

2.1 滑坡堆积体产沙率分析

滑坡堆积体在暴雨条件下所形成的径流极易对其造成猛烈冲刷,这是震区在暴雨季节含沙量增多的主要因素^[16]。不同土石比与雨强条件下滑坡堆积体的产沙过程如图 2 所示。堆积体坡面在试验雨强条件下的产沙过程反映了其侵蚀特征,体现出不确定性和复杂性,与一般的土壤裸露坡面有明显的不同^[20]。即在试验条件下,堆积体坡面有 2 种情况没有产流产沙:1) 当滑坡堆积体土石比为 1:4 时,在设定的降雨历时和雨强条件下,堆积体表面始终没能达到饱和,堆积体入渗能力大于 3 种雨强,所有雨水均渗入堆积体内;2) 土石比为 1:2 的滑坡堆积在雨强为 1.0 mm/min 时,由于雨强小于堆积体的入渗能力,降雨历时内,雨水同样渗入堆积体内。故本文在此不对这 2 种情况进行描述。



注: 土石比 1:4 在所有雨强下、及土石比 1:2 在雨强 1.0 mm·min⁻¹ 条件下没有产生径流, 故未在图中列出, 坡度为 35°, 下同。

Note: No runoff is produced for soil-rock ratio of 1:4 under all rain intensities conditions and for that of 1:2 at rain intensity of 1.0 mm·min⁻¹, thus they are not plotted in figure, slope is 35°, same below.

图 2 不同土石比的滑坡堆积体在不同雨强下产沙率变化

Fig.2 Sediment yield rate of landslide deposit with different soil-rock ratios under different rainfall intensities

图 2a 为土石比为 1:1 的滑坡堆积体在坡度为 35° 时产沙率变化规律图。由图可知, 产沙变化过程可以分为 3 个阶段: 1) 突变阶段: 随着雨强增大, 突变明显。在降雨初期, 堆积体坡面松散物质较多, 在雨水冲刷的作用下, 产沙量迅速增加; 2) 波动变化阶段: 雨强越大, 产沙量波动变化越剧烈。在雨水的冲刷下, 堆积体坡面侵蚀发育迅速, 坡面松散堆积物质不断被剥蚀, 坡面泥沙减少, 但在重力和雨水的作用下, 堆积体所形成的沟壁不断崩塌, 产沙量也随之增加, 所以产沙量呈波动增长趋势; 3) 稳定发展阶段: 雨水的冲刷能力达到稳定, 坡面侵蚀产沙达到稳定。随雨强 1.0、1.5 和 2.0 mm/min 变化, 土石比为 1:1 的滑坡堆积体稳定产沙率变化分别表现为: 2.80<7.76<10.84 g/min, 侵蚀产沙的高峰期多出现在降雨的 0~30 min 内。

土石比为 1:2 时滑坡堆积体产沙率变化与土石比 1:1 不同, 其侵蚀产沙过程可以分为 2 个阶段: 1) 降雨初期产沙率高度变化期; 2) 随后的产沙率稳定期。在雨强为 1.0 mm/min 时, 堆积体的入渗能力大于降雨强度, 雨水

均入渗进入滑坡堆积体内, 在设定时间内没有发生坡面产流产沙; 在雨强为 1.5 mm/min 时, 产沙率在开始 12 min 时快速增大后达到平稳, 稳定产沙率约为 1.22 g/min; 在雨强为 2.0 mm/min 时, 产沙率在前 7 min 时快速增大并达到顶峰后减少, 波动增加后逐渐趋向于平稳。这可能是因为随着碎石含量增大, 堆积体土壤孔隙度增大, 黏聚力减少, 土壤表层泥沙也随之减少, 在降雨的过程中, 堆积体泥沙一方面被地表径流冲刷, 一方面随着壤中流流失, 导致产沙率减小, 随着雨强增大, 其产沙率也随之增大。

大多数研究者认为雨强是影响侵蚀产沙的重要因素^[17-18]。通过对本试验中 2 种土石比的滑坡堆积体在 3 种不同雨强条件下产沙率变率分析可知, 土石比为 1:1 的堆积体在降雨过程由明显增高后明显降低, 说明这个土石比的堆积体在降雨初期堆积体侵蚀剧烈, 相比之下土石比为 1:2 的堆积体侵蚀却较小。造成这种现象的主要原因是滑坡堆积体中的碎石含量的作用, 土石比为 1:2 时, 堆积体内碎石含量较多, 消耗了雨滴降落在堆积体中的大部分能量, 且堆积体孔隙较大, 雨水极易入渗进入堆积体内, 则坡面径流对堆积体坡面土壤物质剥蚀需要更多的能量, 所以土石比 1:2 的侵蚀产沙相对于土石比 1:1 的较小。由此可知, 滑坡堆积体组成物质结构复杂多变和不同侵蚀作用力对比的变化, 造成了滑坡堆积体侵蚀产沙规律的复杂多变。

表 2 可知, 在滑坡堆积体土石比为 1:1 时, 在雨强为 1.0、1.5、2.0 mm/min 时, 平均产沙率变化为 1.51<6.09<9.40 g/min; 在滑坡堆积体土石比为 1:2 时, 在雨强为 1.0、1.5、2.0 mm/min 时, 平均产沙率为 0<1.04<4.83 g/min。说明在含石量较少的滑坡堆积体, 平均产沙率随着雨强增大而增大, 土石比为 1:1 时, 在雨强 1.0~1.5 mm/min 的平均产沙率增大趋势小于雨强 1.5~2.0 mm/min。可知当雨强增大到一定值时, 滑坡堆积体的平均产沙增加率有所减小; 而在土石比为 1:2 的滑坡堆积体, 在小雨强条件下时, 产沙率增加较为缓慢, 随着雨强的增大, 产沙增加率也随之迅速增大。运用 SPSS 软件对土石比、雨强和平均产沙率的关系进行偏相关分析可知, 平均产沙率与雨强仅呈显著相关 ($r=0.54$, $P<0.05$), 而土石比与平均产沙率呈极显著相关 ($r=0.86$, $P<0.01$), 这说明土石比是作为评定堆积体滑坡堆积体侵蚀产沙强度的关键指标。

表 2 土石比和雨强对滑坡堆积体平均产沙率影响

Table 2 Effect of soil-rock ratio and rainfall intensity on average sediment yield rate of landslide deposit

土石比 Soil-rock ratio	雨强 Rainfall intensity/(mm·min ⁻¹)	平均产沙率 Average sediment yield rate/(g·min ⁻¹)
1:1	1.0	1.51±1.16
	1.5	6.09±3.08
	2.0	9.40±2.44
1:2	1.5	1.04±0.32
	2.0	4.83±0.96

2.2 土石比对滑坡堆积体累积产沙量的影响

堆积体的累积产沙量是指在降雨过程中, 雨水对堆积体坡面泥沙剥蚀的总量^[19-20]。图 3 为坡度 35° 时滑坡堆积体在试验所设计的降雨强度下, 土石比对累积产沙量的影响规律图。当土石比为 1:1 时, 相对于雨强为 1.5 和 2.0 mm/min 下累积产沙量的变化趋势, 雨强为 1.0 mm/min 下的累积产沙量增长幅度最为缓慢。随着雨强增大, 累积产沙量也随之增大, 即 $1.0 < 1.5 < 2.0$ mm/min。土石比为 1:2 的滑坡堆积体除了在雨强为 1.0 mm/min 没有产沙产流外, 其累积产沙量增长趋势与土石比 1:1 基本一致, 但其累积产沙量总体较小。

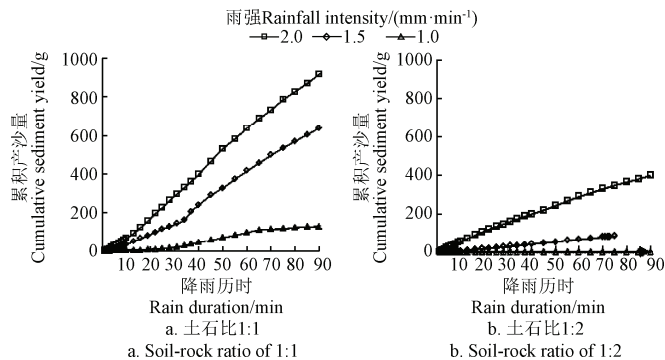


图 3 堆积体累积产沙量随降雨时间的变化

Fig.3 Change of accumulated sediment in landslide deposit with rain duration

由以上分析可知在同一土石比条件下, 累积产沙量随着雨强增大呈指数增长, 在降雨初期开始出现侵蚀现象, 在降雨前半段增长迅速, 之后增速逐渐缓慢。这表明雨强越大, 雨滴降落在堆积体坡面的终极速度越大, 对滑坡堆积体的稳定性破坏越大, 雨水的冲刷力也就越大, 对堆积体坡面剥蚀能力随之加强, 从而堆积体累积产沙量增大。而土石比对滑坡堆积体的影响较为复杂, 当土石比为 1:2 时在小雨强 (1.0 mm/min) 条件下, 由于降雨能力小于堆积体的入渗能力, 在试验所设计的降雨时间内, 堆积体表面始终处于非饱和状态, 雨水均落入堆积体内, 并没有对其造成侵蚀作用, 而随着雨强的增大, 降雨能力逐渐超过堆积体的入渗能力, 对坡面的侵蚀能力增大, 堆积体坡面逐渐达到饱和状态, 此时为蓄满产流。但总体而言, 碎石含量多的堆积体, 因为表层土质含量较小, 在降雨持续一段时间后, 堆积体的泥沙一方面被地表径流冲蚀, 另一方面随着降雨入渗和壤中流不断向下迁移, 进而累积产沙量较小。王小燕^[21]研究认为当土壤中的碎石质量比在 20%~30% 以下时, 土壤产沙能力随着碎石含量增加而减小的规律部分相一致。

2.3 滑坡堆积体径流含沙量分析

震区滑坡堆积体多为松散碎石颗粒, 结构体松散、植被覆盖率极低、抗冲性极差, 极易受到雨水的冲刷与破坏。雨水在运动过程中会剥蚀并携带泥沙, 这种含沙径流的物理和运动特性均和清水径流有显著区别, 径流含沙量是体现雨水对滑坡堆积体侵蚀破坏的指标之一^[22-23]。因此本文对径流含沙量进行了探讨。

图 4a 表明当滑坡堆积体土石比为 1:1 时: 在雨强为 1.0 mm/min 时, 水流含沙量最小变化幅度也较缓慢, 基本在 5.30 g/L 上下波动; 雨强为 1.5 mm/min 时, 水流含沙量在降雨初期 0~5 min 内较小, 之后迅速增加并达到峰值 14.12 g/L, 随后在 11.0~14.0 g/L 的范围内波动; 在雨强为 2.0 mm/min 时, 径流含沙量在降雨初期较大, 在 10 min 后其含沙量在 10.0~17.10 g/L 范围内上下波动, 最终呈现减小的趋势。在雨强 1.0、1.5 和 2.0 mm/min 时, 径流平均含沙量大小依次为: $5.30 < 12.00 < 14.24$ g/L。

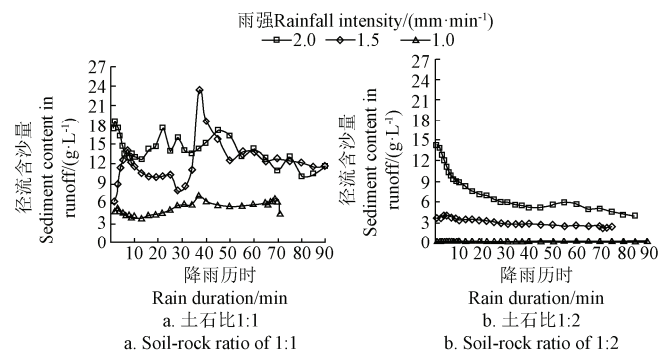


图 4 不同土石比的滑坡堆积体在不同雨强下径流含沙量

Fig.4 Sediment in runoff of landslide deposit under different soil-rock ratios and rainfall intensities

图 4b 表明, 当滑坡堆积体土石比为 1:2 时: 在雨强为 1.0 mm/min 时, 滑坡堆积体没有产流产沙; 在雨强为 1.5 mm/min 时, 滑坡堆积体径流含沙量较为稳定, 稳定含沙量在 2.40 g/L 左右; 在雨强为 2.0 mm/min 时, 径流含沙量在降雨初期呈大幅度减小, 最后趋向于稳定含沙量约为 4.82 g/L, 其径流含沙量变化的幅度较雨强为 1.5 mm/min 的大。径流平均含沙量随雨强变化大小依次为: $2.93 < 7.38$ g/L。且土石比为 1:1 在雨强为 1.0~1.5 mm/min 的径流平均含沙量增加幅度较土石比 1:2 的滑坡堆积体大, 而在雨强为 1.5~2.0 mm/min 时的径流平均含沙量增加幅度与之相一致。

综上所述, 堆积体坡面径流含沙量的变化过程具有以下特点: 1) 当土石比一定时, 随着雨强增大, 径流平均含沙量也随之增大。产生这样的原因是当雨强较小时, 堆积体团粒结构松散, 雨水入渗能力较强, 当雨强增大时, 堆积体坡面结皮, 持水能力减小, 水分逐渐达到饱和, 产流量逐渐增大, 挟沙能力增强, 则径流含沙量也随之增大; 2) 当雨强一定时, 随着碎石含量的增多, 即土石比减小时, 其径流含沙量减小。这可能是由于滑坡堆积体的泥沙颗粒组成的差异性所引起的, 土石比 1:1 的堆积体中的泥沙含量明显高于土石比 1:2 和 1:4 的滑坡堆积体, 且在填土的过程中, 由于土石比较大的堆积体孔隙度较大, 松散泥沙由重力作用均填入堆积体内, 坡面的松散泥沙含量相对较小, 裸露的碎石在堆积坡面也可形成保护层, 致使坡体下层不被侵蚀; 3) 降雨初期, 由于堆积体坡面存在大量的松散泥沙, 使径流含沙量最高, 然后迅速降低, 随着降雨的继续, 径流含沙量开始缓慢增加直至达到稳定。从动力学角度对其进行分析可知, 在降雨初期, 主要为径流对坡面表层松散泥沙的搬运作

用, 径流的动力作用尚未完全体现; 在降雨后期, 堆积体坡面径流逐渐稳定, 以克服堆积体内物质的阻力为主, 径流含沙主要来源于径流对堆积体的剥蚀与分散, 则径流与堆积体的动态过程形成了径流含沙量的变化过程。

本试验的径流含沙量在土石比 1:1 和 1:2 条件下随着雨强增加明显, 这与其他研究者^[24-26]的室内试验成果相一致, 认为雨强与碎石含量都是导致径流含沙量变化的原因。运用 SPSS 对雨强、土石比和平均含沙量的关系进行偏因素相关分析。在显著性水平为 0.05 和控制雨强的前提下, 从偏相关系数来看, 土石比与平均含沙量极显著相关 ($r=0.92, P=0.001$); 在控制土石比的条件下, 雨强与平均含沙量也存在一定的相关 ($r=0.70, P=0.052$)。土石比和雨强与平均含沙量均呈现一定的相关关系, 则土石比和雨强大小可以作为反映堆积体侵蚀特征中径流含沙量变化的指标之一, 径流含沙量随土石比的变化程度明显大于随雨强的变化程度。

2.4 堆积体坡面地表产流与产沙关系分析

地表径流是泥沙流失的动力因素之一, 地表径流冲刷能力和堆积体抗冲刷能力的相互作用过程是堆积体整个产沙的过程, 径流在整个降雨运动过程中可以看作雨水对堆积体坡面物质做功的过程, 雨强越大, 径流的冲刷能力越强, 能够被其搬运的泥沙物质也就越多, 侵蚀产沙也就越大^[27-28]。一些学者^[29-30]研究表明径流产沙量随产流量的变化而变化, 二者之间有着显著的线性关系。本试验滑坡堆积体坡面产流与产沙关系如图 5 所示。从图中可以看出, 滑坡堆积体累积产沙量明显随着累积径流量的增加而增加, 两者之间呈现一定的线性关系。采用式 (1) 对堆积体坡面产流量与产沙量进行回归分析

$$U=a \cdot Q+b. \quad (1)$$

式中 Q 为累积径流量, L ; U 为累积产沙量, g ; a 、 b 为系数。回归结果表明, 当土石比为 1:1 时, $R^2=0.996 \sim 0.999, P<0.001$; 当土石比为 1:2 时, $R^2=0.997 \sim 0.998, P<0.001$ 。说明土石比 1:1 和 1:2 下的产流量与产沙量线性关系极显著。方程拟合度约为 1.00, 回归方程显著, 表明滑坡堆积体坡面累积径流量与产沙量之间呈极显著的线性正相关关系, 这与张乐涛等^[31]在研究高速公路上典型工程堆积体陡坡在冲刷条件下侵蚀过程中, 累积产沙量与累积径流量之间呈线性关系结论相一致。

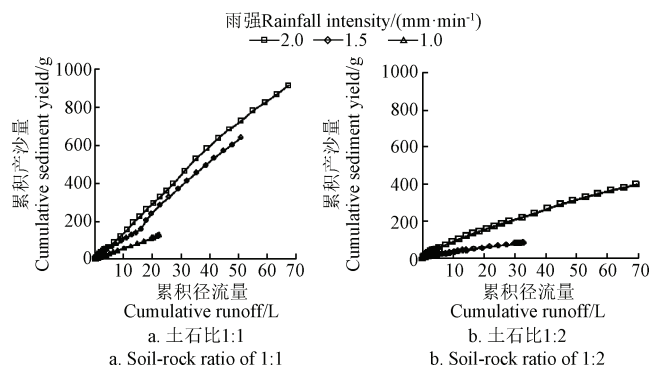


图 5 累积径流量与累积产沙量之间关系

Fig.5 Relationship between cumulative runoff and cumulative sediment

3 结论与讨论

研究震区滑坡堆积体坡面产沙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释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径流产沙和含沙的变化规律, 研究结果表明:

1) 土石比和雨强均为滑坡堆积体产沙能力的影响因素。土石比相比于雨强与平均产沙率的偏相关系数更大, 显著性水平更高。堆积体在土石比 1:2 和 1:4 之间存在 1 个临界值, 当超过这个土石比临界值时, 雨水将全部渗入堆积体内没有产流产沙。同样, 土石比 1:2 的滑坡堆积体在小雨强 (1.0 mm/min) 条件下也没有产沙产流。

2) 产沙率随着降雨侵蚀过程中呈现先增大后稳定的变化趋势, 且平均产沙率、稳定产沙率和累计产沙量随着雨强增大而增大, 即 $1.0 < 1.5 < 2.0$ mm/min。土石比 1:1 产沙量变化的波动性比土石比 1:2 的高, 其产沙过程主要表现为 3 个阶段: 产沙量突变、波动变化和稳定发展, 而土石比 1:2 的产沙规律表现较为平稳。

3) 土石比和雨强大小可以作为反映堆积体侵蚀特征中径流含沙量变化的指标。当堆积体土石比一定时, 随着雨强增大, 径流平均含沙量和累计含沙量随之增大; 当雨强一定时, 随着碎石含量的增多, 即土石比减小时, 径流平均含沙量和累计含沙量随之减小。

4) 滑坡堆积体累计产沙量明显随着累计径流量的增加而增加, 两者之间存在极显著的线性关系, 产沙量比产流量具有一定的滞后性。

综上所述, 对不同土石比的滑坡堆积体产沙规律的研究能够很好的表示震区滑坡堆积体侵蚀产沙过程, 这为后期汶川震区水土流失治理提供了科学依据; 试验过程中发现碎石含量超过 50% 的堆积体产沙规律与纯土体有着很大的区别, 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, 坡面泥沙一部分被径流冲刷侵蚀, 一部分随着壤中流和入渗不断向下迁移, 导致产沙减小, 当碎石含量即土石比超过一段值时, 堆积体坡面将没有产流产沙, 这说明在建立震区滑坡堆积体水土流失测算模型时, 对土石比的研究是十分有必要的。

[参 考 文 献]

- [1] Koi T, Hotta N, Ishigaki I, et al. Prolonged impact of earthquake-induced landslides on sediment yield mountain watershed: The Tanzawa region, Japan[J]. Geomorphology, 2008, 101: 692—702.
- [2] Poesen J. Surface sealing as influenced by slope angle and position of simulated stones in the top layer of loose sediments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11(1): 1—10.
- [3] 王雪松, 谢永生. 模拟降雨条件下锥状工程堆积体侵蚀水力特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 117—124. Wang Xuesong, Xie Yongsheng. Hydrodynamic characteristics of tapered spoilbank under simulated rainfall condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(1): 117—124. (in Chinese with English abstract)

- [4] Chang D S, Zhang L M. Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2010, 10(4): 933—946.
- [5] 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.
Li Zhenlin. The Wenchuan Earthquake Landslide Accumulation Substance Pile Repose Angle of Simulation on Relations[D]. Chongqing: Southwest university, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [6] 朱元骏, 邵明安. 不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 64—67.
Zhu Yuanjun, Shao Ming'an. Processes of rainfall infiltration and sediment yield in soils containing different rock fragment contents[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(2): 64—67. (in Chinese with English abstract)
- [7] Lang T E, Dawson K L, Martinelli M. Application of numerical transient fluid dynamics to snow avalanche flow, part development of computer program AVALNCH[J]. *Journal of Glaciology*, 1979, 22: 107—115.
- [8] Eisbacher G H. Cliff collapse and rock avalanches (sturzstroms) in the Mackenzie Mountains, northwestern Canada[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16: 309—334.
- [9] 孙虎, 唐克丽. 城镇建设中人为弃土降雨侵蚀实验研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(2): 29—35.
Sun Hu, Tang Keli. Study on erosion and sediment yield of man-dumped soil by field simulated rainfall in urban construction area[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(2): 29—35. (in Chinese with English abstract)
- [10] Foster G R, Meyer L D, Onstad C A. An erosion equation derived from basic erosion principles[J]. *Trans of ASAE*, 1977, 20(4): 678—682.
- [11] 王贞, 王文龙, 罗婷, 等. 非硬化路面侵蚀产沙规律野外模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 79—83.
Wang Zhen, Wang Wenlong, Luo Ting, et al. Field simulated experiment on soil erosion and sediment yield of unpaved roads[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(12): 79—83. (in Chinese with English abstract)
- [12] Miller F, Guthrie R. Classification and distribution of soils containing rock fragments in the United States[J]. 1984.
- [13] 潘成忠, 上官周平. 黄土区次降雨条件下林地径流和侵蚀产沙形成机制[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1597—1602.
Pan Chengzhong, Shanguan Zhouping. Generation mechanism of wood land runoff and sediment on loess plateau under hypo-rainfall[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1597—1602. (in Chinese with English abstract)
- [14] 和继军, 孙莉英, 李君兰, 等. 缓坡面细沟发育过程及水沙关系的室内试验研究[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(10): 138—144.
He Jijun, Sun Liying, Li Junlan, et al. Experimental study on rill evolution process and runoff-sediment relationship for gentle slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(10): 138—144. (in Chinese with English abstract)
- [15] 史银志, 雷晓云. 基于人工模拟降雨的土壤侵蚀特性试验研究[J]. *石河子大学学报*, 2008, 26(4): 487—490.
- Shi Yinshi, Lei Xiaoyun. Experimental study on the soil erosion of north brae in Yining based on artificial simulation of rainfall[J]. *Journal of Shihezi University*, 2008, 26(4): 487—490. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李广, 黄高宝. 模拟降雨与水土流失试验研究[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2008, 24(4): 443—445.
- Li Guang, Huang Gaobao. Experiment of simulated rainfall, water and soil erosion in loess upland area[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies In Agriculture*, 2008, 24(4): 443—445. (in Chinese with English abstract)
- [17] Huang C J, M Bradford, Laflen J M. Evaluation of the detachment -transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation[J]. *Journal of Soil Science Society of America*, 1996, 60(3): 734—739.
- [18] 张晴雯, 雷廷武, 潘英华, 等. 细沟侵蚀动力过程极限沟长试验研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(2): 32—35.
Zheng Jingwen, Lei Tingwu, Pan Yinghua, et al. Dynamic sediment yield of rill erosion[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2002, 18(2): 32—35. (in Chinese with English abstract)
- [19] Catherine B, Marcel S, Dirk R Z, et al. Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and rainfall intensity[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(12): 1456—1467.
- [20] 郑子成, 吴发启, 何淑勤, 等. 片蚀与细沟间侵蚀过程中地表微地形的变化[J]. *土壤学报*, 2011, 48(5): 931—937.
Zheng Zicheng, Wu Faqi, He Shuqin, et al. Change in surface micro-relief during the course of sheet erosion and inter-rill erosion[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(5): 931—937. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王小燕. 紫色土碎石分布及其对坡面土壤侵蚀的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
Wang Xiaoyan. Hydrological Response of Sloping Farmlands with Varied Rock Fragment Cover in the Purple-soil Area of China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张霞, 李鹏, 李占斌, 等. 黄土高原丘陵沟壑区临界地貌侵蚀产沙特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 129—136.
Zhang Xia, Li Peng, Li Zhanbin, et al. Characteristics of erosion and sediment yield under critical landform in hill-gully area of Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(4): 129—136. (in Chinese with English abstract)
- [23] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究[J]. *土壤学报*, 1998, 35(1): 95—103.
Zheng Fenli. Effects of land-use types on the vertical distribution of fractions of oxidizable organic carbon on the Loess Plateau, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1): 95—103. (in Chinese with English abstract)
- [24] Zhang Fawang, Song Yaxin, Zhao Hongmei, et al. Changes of precipitation infiltration recharge in the circumstances of coal mining subsidence in the Shen-Dong coal field, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(4): 993—1003.
- [25] Li Sheng, Lobb D A, Kachanoski R G, et al. Comparing the use of the traditional and repeated-sampling-approach of the ^{137}Cs technique in soil erosion estimation[J]. *Geoderma*, 2011, 160: 324—335.
- [26] 王辉, 王全九, 邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙特

- 性影响的模拟试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 65—68.
- Wang Hui, Wang Qianjiu, Shao Ming'an. Simulation experiment of effect of antecedent soil moisture content on characteristics of runoff and sediment from two soil sloping lands[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2008, 24(5): 65—68. (in Chinese with English abstract)
- [27] 周佩华, 张学栋, 唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟实验大厅降雨装置[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 27—31.
- Zhou Peihua, Zhang Xuedong, Tang Keli. Rainfall installation of simulated soil erosion experiment hall of the state key laboratory of soil erosion and dryland farming on loess plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000, 20(4): 27—31. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘柳松, 任红艳, 史学正, 等. 秸秆覆盖对不同初始含水率土壤产沙过程的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 108—112.
- Liu Liusong, Ren Hongyan, Shi Xuezheng, et al. Effect of straw mulching on sediment yielding process of soil with different initial water contents[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(1): 108—112. (in Chinese with English abstract)
- [29] Govers G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow: Erosion, transport, and deposition process[J]. Lahti Publ, 1990(189): 45—63.
- [30] 赵艳茹, 王瑄, 丘野, 等. 模拟降雨下土壤剥蚀率和水流含沙量的关系[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 97—100.
- Zhao Yanru, Wang Xuan, Qiu Ye, et al. Relationship of soil detachment rate and flow sediment load in simulate rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 97—100. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张乐涛, 高照良, 李永红, 等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 145—153.
- Zhang Letao, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope under simulated runoff conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 145—153. (in Chinese with English abstract)

Sediment characteristic of landslide accumulation body in earthquake zone of Wenchuan under artificial rainfall simulation condition

Gan Fengling¹, He Binghui^{1*}, Wang Tao²

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China; 2. Central Southern China Electric Power Design Institute Co. Ltd of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, China)

Abstract: Scientific management of soil and water loss on landslide deposits is meaningful and important in Wenchuan earthquake area. This study aimed to investigate the sediment characteristics of landslide accumulation body in earthquake zone of Wenchuan under artificial rainfall simulation condition. On the basis of field surveying, the soil-rock ratio was designed as 1:1, 1:2 and 1:4. The rainfall intensities of 1.0, 1.5 and 2.0 mm/min simulated the precipitation often occurring in Wenchuan landslide deposit. Under the combination of different rainfall intensity and soil-rock ratio, the sediment yield and sediment concentration in runoff were measured. The results showed that: 1) the soil-rock ratio and rainfall intensity were the influence factors of the sediment yield and the sediment concentration of landslide deposit. The correlation between mean sediment yield rate and soil-rock ratio was higher than that with rain intensities. Runoff was not found in the treatment of soil-rock ratio of 1:4 under all the conditions and in the soil-rock ratio of 1:2 under the rain intensity of 1.0 mm/min. It indicated that a critical value might be between the soil-rock ratio of 1:2 and 1:4. Above the critical value, rainfall infiltration was large and runoff could not be yielded; 2) The sediment rate presented a upward-to-stable trend during the erosion. The mean sediment yield rate, the values under the stable condition, and cumulative sediment amount increased with increasing rainfall intensity. The fluctuation of soil-rock ratio 1:1 was higher than that with soil-rock ratio of 1:2. The latter change was more stable; 3) Sediment in runoff increased with increasing soil-rock ratios and also with increasing rainfall intensity; and 4) Cumulative sediment amount increased with cumulative runoff but the sediment yield happened after the runoff. The sediment characteristic of landslide deposit with different soil-rock ratio under different rainfall intensity in earthquake zone was quite different. In the landslide deposit, gravels accounted for more than 50%. The sediment yield characteristic of the landslide deposit was different from that of the pure soils. With prolonged precipitation, the soil runoff happened first. After a while, the sediment yield rate became smaller. The sediment yield depended on the soil-rock ratio. If the ratio was above the critical value, runoff didn't occur. The result may lay the foundation for the establishment of process-based model of soil erosion caused by landslide accumulation body in earthquake zone, and provide a scientific guidance for comprehensive control of soil and water loss in the Wenchuan earthquake zone, China.

Keywords: sediments; runoff; landslides; deposits; Wenchuan earthquake; artificial rainfall