

延安地区降雨引发黄土泥流的试验研究

陈海霞, 王家鼎

(西北大学 地质学系 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: 在野外模拟降雨条件下, 研究了黄土粒度分布和微结构在降雨前后的变化及其对泥流启动的影响。结果表明, 采自径流沉积物的降雨后土样中的细黏粒、粗黏粒体积含量分别相对增加了 22% 和 18%, 而粗粉粒、微砂体积含量分别相对减少了 7.6% 和 3.3%。坡面残余土的粒度“粗化”, 降雨后土骨架连接松散, 这些由降雨引起的黄土的粒度和微结构变化说明降雨后黄土的抗剪强度和抗压能力将降低, 导致泥流启动的可能性增加。随着降雨入渗, 当沿坡面的黄土重力分力与抗剪强度间的平衡被打破, 黄土开始滑移并发展成泥流。有效防止坡面土粒度“粗化”是遏制水土流失的关键。

关键词: 降雨试验; 粒度; 微结构; 黄土泥流; 延安地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)02-0039-04

中图分类号: P694

Experimental Study on Loess Mudflow Induced by Rainfall in Yan'an Area

CHEN Hai-xia, WANG Jia-ding

(Department of Geology, State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: The changes of grain size distribution and microstructure of loess after rainfall were investigated in this study, as well as their effects on the initiation of mudflow. A simulated rainfall experiment was conducted in field for this purpose. We found that after rainfall, the volumetric percentages of fine and rough clay particles increase approximately 22% and 18%, and those of silt and fine sand decreased 7.6% and 3.3%, respectively, in the samples collected from the sediment deposits. Consequently, the grain size of residual loess on the slope coarsened and the connection of loess skeleton became loose after rainfall. Such changes of grain size and microstructure of loess induced by rainfall implies that both of the shear and pressure resistance of loess will decrease after rainfall. Thus, the probability of the mudflow initiation increases. Once the balance between the gravitational component of loess along the slope and the shear resistance is broken as the rainfall penetrates, the loess begins to slip and possibly develops into mudflow. Preventing the loess on the slope effectively from being coarsened is the key to mitigate water loss and soil erosion.

Keywords: rainfall experiment; grain size; microstructure; loess mudflow; Yan'an area

我国黄土高原地区气候干旱, 年降雨集中, 强烈的侵蚀使地面形成沟壑密布的地貌, 同时导致非常严重的水土流失。加之近年环境、气象因素的不利变化, 致使泥流等地质灾害频发, 严重威胁人民生命及财产安全。如 2001 年 7 月 26 日, 陕西延安地区黄陵县城附近的黄花沟受持续降雨影响, 大量坡面松散堆积物启动下滑, 从而暴发泥流, 造成 3 死 1 伤的惨剧, 直接经济损失逾 5 万元。两年后在高石崖砭暴发的泥流造成的直接经济损失近 50 万元。

为了防灾减灾, 泥流形成机理成为学者们关注的焦点。从土体力学入手, 目前研究普遍认为土体受降

雨影响, 含水率增大使抗剪强度下降, 导致泥流发生^[1-3]。研究发现黄土高速滑坡与饱和黄土在重力滑坡体蠕动作用下产生慢速状态改变和强度丧失、孔隙水压力产生、土体抗剪强度降低、完全液化等变化有关^[4]。在降雨侵蚀力研究方面, 有研究^[5]统计黄土高原沟道降雨产流、产沙的时间对应关系, 发现沙峰滞后洪峰居多; 洪峰出现时的含沙量较最大含沙量偏小 10%。针对黄土高原的非园沟流域建立次降雨侵蚀产沙的 BP 网络模型^[6], 为研究黄土高原流域次降雨土壤侵蚀规律提供了依据。根据月降雨量计算降雨侵蚀力模型^[7], 发现降雨侵蚀力从东南到西北呈梯度

收稿日期: 2012-03-03

修回日期: 2012-05-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“列车长历时振动引起高速铁路路基击实黄土振陷研究”(40972193); 高等学校博士点专项科研基金项目(20096101110016); 高等学校博士点重点科研基金项目(20116101130001)

作者简介: 陈海霞(1974—), 女(汉族), 新疆自治区奎屯市人, 博士, 讲师, 主要从事气体润滑及地质灾害防治研究。E-mail: rose-bluegarden@sohu.com。

递减趋势,时间主要集中在7—8月。考虑降雨因素,有研究认为激发准稳态斜坡发生滑坡的是前期雨量和滑坡发生的临界雨量^[8]。另有观点认为在干旱山区由径流引发的泥石流不需具有较高的先期含水率^[9],约1h的暴雨易触发泥石流。人工降雨试验中,监测黄土坡内雨水入渗^[10],发现前9日内积雨量对滑坡稳定性有关键性作用。研究表明黏土含量为5%~10%时发生土体失稳和泥石流所需的降雨历时最短^[11]。

然而,降雨对黄土粒度组成、微观结构的影响及该影响结果对泥流启动的作用尚不清楚。因此,有必要通过野外人工模拟降雨试验,结合实验室粒度分析和电镜扫描分析方法,探讨降雨前后黄土土样粒度组含量、微观结构的变化规律及其对泥流启动的影响。

1 降雨试验和测试方法

1.1 野外模拟降雨试验

野外模拟降雨试验场地选定在陕西安塞县王窑行政村脑畔山中的一条泥石流沟的斜坡上(沟口 $36^{\circ}52'N, 109^{\circ}06'E$),试验地坡度为 68° 。坡面地层自上至下依次为新黄土、碎石土和基岩(砂岩)。坡面上碎石土堆积形态杂乱无章,储备了大量松散的固体物质。沟道两侧杂草、灌木茂盛,深沟中分布着大量碎石,陡峭的沟壁上有基岩出露。

降雨试验主要装置包括自吸泵,喷射管,水表,流量计,数据采集器和微机。降雨试验场地面积为 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$,试验用水取自附近小型水库。场地周边用挡板围扎,防止径流渗漏。人工降雨喷头高度为 1.5 m ($\Phi=1.5\text{ mm}$),水向上喷射,自由落向地面,使模拟降雨的雨滴终点速度接近天然雨滴的速度。

降雨试验于2010年8月20日上午12:31开始,13:30结束。降雨试验用水总量为 1.31 m^3 ,降雨雨强为 82 mm/h 。模拟降雨初期,雨水渗入地下,地表变得湿润、潮湿,继而在低洼处出现蓄水。降雨试验开始约2min后,地表径流开始出现,径流中的泥沙含量逐渐增大。随着降雨的进行,小区出现细沟—沟蚀的侵蚀过程,有的蚀沟深达 20 cm 。产生的径流经集水桶定量收集并记录收集时间,以获得该时段的径流流量。

统计表明,此次降雨产生地表径流总量为 0.65 m^3 ;忽略雾化飘移、蒸发等损失量,则地面入渗量为 0.66 m^3 。本次降雨过程中对地表径流共收集、记录14次,试验数据表明,在整个降雨过程中,径流流量呈递增趋势;相应地,地面入渗量也呈现由大到小的变化趋势。

1.2 室内分析试验

为了解降雨对黄土的各粒径组含量、孔隙尺寸及数量、土骨架颗粒连接形式等影响,分别采集降雨试验前后黄土样品。降雨试验场地选定后,试验前土样从试验场地表层土采集;开始降雨试验后,经雨水与黄土充分作用,试验后土样从降雨试验场地下游出口处收集的地表径流中泥沙沉积物中采集。降雨试验前后土样各取1份,其中降雨试验后土样从含沙量最大(泥沙体积比约为10%)的1次地表径流样品的沉积物中采集。

1.2.1 粒度分析试验 采用大陆动力学国家重点实验室中的激光粒度分析仪(MS 2000, Ver. 2.00),按照标准实验程序进行实验操作,分析降雨试验前后黄土样品的粒度组成。

1.2.2 电镜扫描试验 采用环境扫描电子显微镜系统(FEI Quanta 400 FEG),观察黄土样品的孔隙变化、颗粒分布等情况。由于电镜扫描试验对象仅为固体物质,因此降雨试验后土样经自然风干后与试验前土样同时进行扫描试验。

2 结果与分析

2.1 粒度组成

降雨试验前后土样的粒度分析结果表明其粒径范围相同,均为 $0.35\sim 178\text{ }\mu\text{m}$,都包含了胶粒^[12]($d\leq 1\text{ }\mu\text{m}$)、细黏粒、粗黏粒、细粉粒、粗粉粒、微砂和砂粒($d>100\text{ }\mu\text{m}$)。

图1为降雨试验前后土样中各粒径组体积含量对比。由图1可以看出,土样中黏粒等细小颗粒少,粗粉粒和微砂居多,因此土的胶结力较低,同时连通性较好。降雨后易透水,土体力学性质不稳定,容易失稳。此次采集的土样不包含砾石等较大颗粒,假设砂与砾石等较大颗粒对泥流的影响作用是一致的,此处不对砂做分析研究。

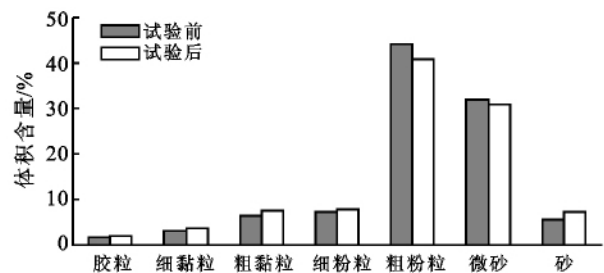


图1 降雨试验前后样品各粒径组体积含量

由图1可知,两组样品中主要成分都是粗粉粒和微砂;此外,经雨水作用后,各粒径组体积含量都发生了变化。具体表现为试验后样品中粗粉粒体积含量

相对减少了 7.6%，微砂则相对减少了 3.3%，而胶粒、细黏粒、粗黏粒、细粉粒和砂分别相对增加了 12%，22%，18%，8.4%和 33%。

降雨试验后土样中黏粒含量稍有升高，同时粗粉粒和微砂含量降低。表明小区坡面经历 1 h 的强降雨作用，坡面上松散土体中黏粒流失量较粗粉粒和微砂更多。坡面上土颗粒组分呈“粗化”状态，因而更有利于雨水入渗，进一步降低土的抗剪强度。而黏粒等细小颗粒与水流形成具有润滑作用的浆体，并沿程铺设润滑底层，降低原沟槽糙率。

若继续降雨，当达到某一临界值后，坡面土含水率达到饱和，土体液化，继而失稳、下滑，并沿润滑底层流动，形成泥流。由此可见，自然条件下的黄土坡面受自然降雨作用，粒度组成“粗化”成为雨水入渗、黄土液化、滑动、形成地质灾害等一系列演变过程的源头。因此，有效防止坡面土粒度“粗化”是遏制黄土高原土壤侵蚀、水土流失的关键。

表 1 显示了降雨试验前后黄土样品的粒径变化： D_{10} 和 D_{50} 减小而 D_{90} 增加，反映出粒度组分变化：细颗粒组分增多，粗颗粒组分减少。以体积和表面积为权重计算得到的平均直径均为 $43 \mu\text{m}$ ，反映出粗粉粒在黄土成分中作为主要组分的状况不受降雨试验影响。

表 1 降雨试验前后黄土样品的粒径变化 μm

土样	D_{10}	D_{50}	D_{90}	平均直径 (体积权重)	平均直径 (表面积权重)
降雨前	4.37	39.96	86.56	43.44	10.02
降雨后	3.55	38.97	92.17	43.87	8.99

图 2 为黄土样品颗粒粒径分布曲线在降雨试验前后发生的相对变化。由图 2 可知，两组样品的粒径分布曲线都呈单峰形态，试验前样品粒径分布曲线峰值为 6.6%，对应粒径为 $40 \mu\text{m}$ ；而试验后样品峰值

为 5.83%，峰顶则右移了 $15 \mu\text{m}$ ，对应粒径为 $55 \mu\text{m}$ 。试验前样品粒径分布曲线在峰左侧出现平台，而试验后样品的峰左侧曲线变化平缓。由图 2 可知，两组样品都以粗粉粒和微砂为主，但降雨降低了样品中含量最多的 $20 \sim 80 \mu\text{m}$ 粒径区间的颗粒体积含量，而其他粒径区间内体积含量则略有增加。可见，降雨后，土样各粒径组体积含量呈均匀化的趋势。

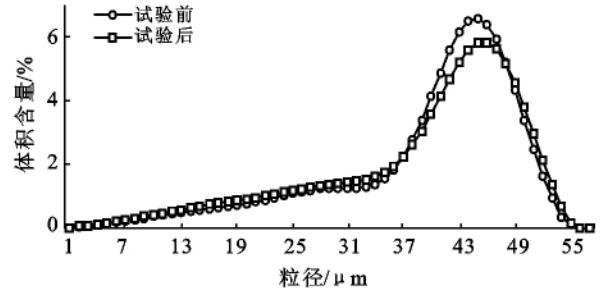


图 2 降雨前后黄土颗粒粒径分布曲线

2.2 土样微结构分析

为了解降雨试验前后黄土样品的孔隙数目和颗粒连接形式等发生的变化与黄土泥流启动机理间的联系，运用电镜扫描得到 5 组不同放大倍数 (130, 288, 500, 1 000, 2 000 倍) 的图片，以图 3—4 为代表说明。

图 3 和图 4 为试验前后土样在扫描电镜下放大 130 倍的影像。土样中黑斑区域为孔隙。降雨前样品中有明显的、尺寸较大的丰富的孔隙存在 (图 3)；而在试验后样品中 (图 4)，孔隙减小，结构趋于致密。可见雨水破坏了原有的黄土颗粒连接形式，颗粒重新排列、接触，较大尺寸的孔隙数目减少。

同时部分散落的碎屑填入孔隙中，致使黄土土体结构更加密实。此外，降雨过程中，细粒物质遇水形成的浆体包围在粗颗粒周围，使粗颗粒摩擦阻力减小，从而更易运动。

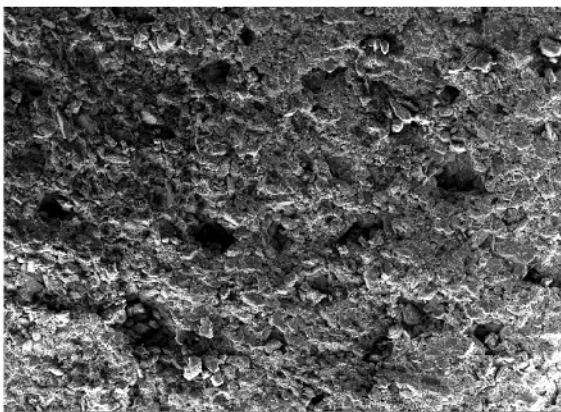


图 3 降雨试验前黄土样品电镜放大 130 倍的影像

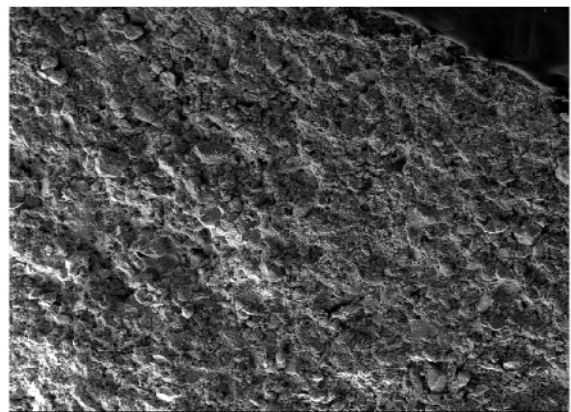


图 4 降雨试验后黄土样品电镜放大 130 倍的影像

由降雨试验试验前后土样放大 500 倍的影像分析可知(图略)。试验前土样中骨架颗粒相互穿插、接触面积大,呈镶嵌接触;试验后土样中大颗粒多被絮凝状物嵌埋,呈分散分布。试验前土壤中大颗粒周围分布一些细粒物质,骨架颗粒呈焊接状连接;试验后土壤中中细粒物质较试验前多,骨架颗粒被包埋在细粒物质中,呈嵌埋状连接。试验前土样骨架颗粒连接形式使土体具有较多的粒间孔隙,通透性强,同时遇水后稳定性能差;试验后土样细粒物质多,孔隙小,通透性弱。

2.3 土样粒度组成和微结构变化对引发泥流的影响

由试验分析可知,来自降雨试验小区黄土中粗粉粒、微砂含量远高于胶粒和黏粒含量,而且骨架颗粒为镶嵌接触,细粒物质少,粒间孔隙大。因此土体胶结能力弱,通透性强,遇水易垮塌。土体遇水后,较多的黏粒等细粒物质被水流带走形成浆体,坡面剩余土的粒度“粗化”,更利于雨水入渗,从而进一步降低土的抗剪强度。

土骨架颗粒间的接触方式遇水后发生改变,不再存在可传递压力的支撑结构。细粒物质散落在土骨架颗粒间的孔隙中,粒间孔隙变小。细粒物质遇水造浆包裹在粗颗粒周围,减小其运动阻力。

根据降雨试验前后土样分析结果,可将黄土泥流的发生过程概括为以粗粉粒、微砂为主的具有较多粒间孔隙的黄土松散地堆积在较陡的斜坡上,遇降雨后,其通透性使雨水很快地进入较大孔隙中,骨架颗粒随之塌落。

细粒物质遇水则成为有润滑作用的浆体流向下流,坡面残余土粒度“粗化”,有利于雨水入渗并使土的抗剪强度降低。随着降雨的进行,坡面土含水量增大,逐渐液化,在不断增大的重力沿斜坡方向的分力与抗剪强度的平衡被打破后发生失稳、滑落,与雨水混合形成含沙水流。含沙水流在适宜的降雨因素(前期雨量、雨强、历时等)、地形因素和固体物源的综合作用下,可引发泥流。

3 结论

(1) 有效防止坡面土粒度“粗化”是遏制水土流失的关键。由于坡面土中较多的黏粒被降雨带走,坡面剩余土的粒度组成“粗化”,因而利于雨水入渗,土的抗剪强度的降低态势加剧。

(2) 雨水破坏了原有的土骨架颗粒焊接状连接形式,形成更松散的连接;雨水使细粒物质遇水形成

的浆体包围在粗颗粒周围,使粗颗粒摩擦阻力减小,从而更易运动。

(3) 泥流发生过程可概括为:雨水带走较多黏粒形成浆体,减小沿途沟槽糙率;坡面土粒度“粗化”,入渗增强,土抗剪强度降低加剧;土骨架颗粒焊接连接形式遇水坍塌,压力传递的支撑结构被破坏,粗颗粒在周围浆体润滑作用下,运动阻力减小;伴随降雨的持续入渗,坡面土含水量不断增加,润湿土体重力沿坡面分力增长和土体抗剪强度下降导致的受力不平衡加剧。当土体受力平衡态被打破后,土体发生滑动,并与雨水掺混、沿程下泄,发展成泥流。

[参 考 文 献]

- [1] Chen Hongyu, Chen Ronghe, You Fanjie, et al. The inspection of the triggering mechanism for a hazardous mudflow in an urbanized territory[J]. *Environmental Geology*, 2004, 45(7): 899-906.
- [2] 陈晓清, 崔鹏, 韦方强. 泥石流起动原型试验及预报方法探索[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(4): 73-78.
- [3] 杨为民, 吴树仁, 张永双, 等. 降雨诱发坡面型泥石流形成机理[J]. *地学前缘*, 2007, 14(6): 197-204.
- [4] 王家鼎. 高速黄土滑坡的一种机理: 饱和黄土蠕动液化[J]. *地质论评*, 1992, 38(6): 532-538.
- [5] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原沟道降雨产流产沙过程变化的统计分析[J]. *水土保持通报*, 1996, 16(6): 12-18.
- [6] 侯建才, 李占斌, 李勉, 等. 流域次降雨侵蚀产沙的 BP 神经网络模拟[J]. *水土保持通报*, 2007, 27(3): 79-83.
- [7] 李静, 刘志红, 李锐. 黄土高原不同地貌类型区降雨侵蚀力时空特征研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(3): 124-127.
- [8] 胡明鉴, 张平仓, 汪稔. 降雨对滑坡的激发作用实验研究: 以蒋家沟流域滑坡堆积坡地为例[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(5): 116-118, 132.
- [9] Coe J A, Kinner D A, Godt J W. Initiation conditions for debris flows generated by runoff at Chalk Cliffs, Central Colorado[J]. *Geomorphology*, 2008, 96(3/4): 270-297.
- [10] Tu Xinbin, Kwong A K L, Dai Fuchu, et al. Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides[J]. *Engineering Geology*, 2009, 105(1/2): 134-150.
- [11] Chen Ningsheng, Zhou Wei, Yang Chenglin, et al. The processes and mechanism of failure and debris flow initiation for gravel soil with different clay content[J]. *Geomorphology*, 2010, 121(3/4): 222-230.
- [12] 颜斌. 洛川剖面黄土的结构性及其力学特征研究[D]. 陕西 西安: 长安大学, 2010.