

黄土和红壤坡面侵蚀差异及其与土壤性质的关系

金鑫^{1,2}, 翟婷^{1,2}, 汪蓬³, 宋颖¹, 汤珊珊¹, 郑添元^{1,2}, 谢泽龙^{1,2}

(1. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心,

广西 桂林 541004; 3. 湖北水总工程勘察设计院有限公司, 武汉 430070)

摘要: 为探究黄土和红壤侵蚀受雨强和坡度影响的差异及其与土壤性质的关系, 通过测定分析黄土和红壤的各种理化性质, 并分别对 2 种土壤在 2 个坡度(15°, 20°)、2 个雨强(60, 90 mm/h)条件下开展 4 场降雨。结果表明: (1) 与红壤相比, 黄土的土壤颗粒更细, 二者的毛管孔隙度、饱和含水量和田间持水量相差均在 3%~6% 以内, 干筛时各粒级团聚体相差不大, 但经湿筛破坏后二者团聚体差异较大, 红壤的相对机械破碎指数(RMI)小于黄土, 黄土有机质含量、阳离子交换量和络合态氧化物含量均高于红壤, 无定形氧化物和游离氧化物则低于红壤; (2) 同雨强、同坡度条件下, 黄土产流时间均短于红壤, 产流开始后, 红壤比黄土先达到稳定径流率, 不同雨强、坡度条件下, 红壤稳定径流率为 30~120 mL/s, 黄土为 100~220 mL/s, 且在相同坡度、雨强范围内, 红壤径流率变化层次分明, 黄土则交错复杂; (3) 红壤的产沙率和径流含沙率都较低, 且多在产流几分钟即出现产沙率最大值, 黄土产沙率则和径流率类似, 在产流前期快速增长, 10 min 之后开始波动变化, 再进入相对稳定产沙阶段, 产沙率和径流含沙率随雨强和坡度的变化复杂; (4) 不同土壤自身理化性质是影响坡面侵蚀的内在因素, 与黄土相比, 红壤的下渗能力更好, 土壤抵抗径流剪切和剥蚀的能力更强, 使得在同雨强、同坡度条件下红壤的侵蚀程度远低于黄土, 规律性也更显著。

关键词: 雨强; 坡度; 土壤性质; 侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0118-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.04.016

Difference of Slope Erosion Between Loess and Red Soil and Its Relationship with Soil Properties

JIN Xin^{1,2}, ZHAI Ting^{1,2}, WANG Peng³, SONG Ying¹,

TANG Shanshan¹, ZHENG Tianyuan^{1,2}, XIE Zelong^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and

Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 2. Collaborative Innovation

Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology,

Guilin, Guangxi 541004; 3. Hubei Shuizong Engineering Survey and Design Co., Ltd., Wuhan 430070)

Abstract: In order to explore the difference of loess and red soil erosion affected by rainfall intensity and slope and its relationship with soil properties, various physical and chemical properties of loess and red soil were measured and analyzed, and four rainfall events were carried out on the two soils under two slope gradients (15°, 20°) and two rainfall intensity (60, 90 mm/h). The results showed that: (1) Compared with red soil, soil particles of loess were finer, and the differences in capillary porosity, saturated water content and field water holding capacity between loess and red soil were within 3% to 6%. There was no significant difference in the aggregates of each size of dry sieving, but the difference between the aggregates of the two was large after the destruction of wet sieving. The relative mechanical fragmentation index (RMI) of red soil was lower than that of loess. The organic matter content, cation exchange capacity and complex oxide content of loess were all higher than that of red soil, while amorphous oxide and free oxide were lower than that of red soil. (2) Under the same rainfall intensity and slope conditions, the runoff generation time of loess was shorter

收稿日期: 2023-01-09

资助项目: 国家自然科学基金项目(51369009); 广西重点研发计划项目(桂科 AB21075007); 广西自然科学基金项目(2021GXNSFAA196055)

第一作者: 金鑫(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀机制研究。E-mail: jinxin1390@163.com

通信作者: 宋颖(1970—), 女, 硕士, 高级实验师, 主要从事水文物理规律研究。E-mail: 402355505@qq.com

than red soil, after the start of runoff, red soil reached a stable runoff rate before loess. Under different rain intensity and slope conditions, the stable runoff rate of red soil ranged from 30 to 120 mL/s, while that of loess was between 100 to 220 mL/s. And within this range of slope and rain intensity, the runoff rate of red soil varied in distinct layers, while that of loess was staggered and complex. (3) The sediment yield and runoff sand content rate of red soil were both low, and the maximum sediment yield rate usually occurred within a few minutes of runoff. The sand yield rate of loess was similar to the runoff rate, it increased rapidly in the early stage of runoff, and then began to fluctuate after 10 minutes. When it entered the stage of relatively stable sediment yield, the sand yield rate and runoff sediment rate changed complicated with rainfall intensity and slope. (4) Different physical and chemical properties of soil were the internal factors affecting slope erosion. Compared with loess, red soil had better infiltration capacity and stronger resistance to runoff shear and denudation. The erosion degree of red soil under the same rainfall intensity and slope condition was much lower than that of loess, and the regularity was more obvious.

Keywords: rain intensity; slope; soil properties; erosion

土壤侵蚀是引起土地退化的主要因素之一^[1],并可能造成其他环境问题^[2]。降雨强度和坡度作为影响侵蚀的2个常见外部因素,一直是土壤侵蚀研究的热点之一^[3]。对紫色土侵蚀过程的研究^[4-5]显示,坡度和降雨强度均为坡面侵蚀的主要影响因子,随着坡度和降雨强度的增加,径流率和产沙量也增加,且主要侵蚀因子也由坡度转变为雨强。对黄土坡面土壤侵蚀过程的研究^[6]则表明,雨强是坡面产流产沙的主要影响因素,径流率对坡度的变化敏感性不高,坡面产沙量随坡度的增加呈现先增加后减小的趋势,存在15°临界坡度。而对华南红壤侵蚀的研究^[7]发现,雨强和坡度共同影响坡面产沙过程,15°附近出现临界坡度,红壤侵蚀过程中雨强为主要影响因素。

上述雨强和坡度对不同土壤侵蚀影响存在一定差异的结果,表明土壤自身理化性质是影响侵蚀的重要内因。以往研究^[8]发现,0.01 mm以下的物理性黏粒含量越多,土壤结构稳定性越强;较大颗粒(>1 mm)的移动所需的动力较大,难流失,最易流失的是粗粉粒和细粉粒^[9];土壤有机质含量高,土壤间的孔隙比较多,通透性要好,水流在土壤中流动的阻力小,入渗速度快,使得土壤入渗增强^[10];土壤的总孔隙度是承载降水的主要蓄水库,土壤的总孔隙度决定暴雨降水量下渗和形成地表径流的比重,因而也间接地决定暴雨对土壤的侵蚀强度^[11];土壤非毛管孔隙由于孔径较大,在降雨时能快速暂时贮存降水,减缓地表径流,是影响土壤侵蚀的重要影响因子^[12];土壤团聚体稳定度可以用来评价土壤的抗蚀性能^[13];坡面土壤侵蚀量和径流强度与土壤团聚体稳定性存在显著负相关关系,且不同团聚体稳定性指标与二者相关程度存在差异,其中湿筛团聚体平均重量直径(MWD)和>0.25 mm水稳性团聚体含量(WSA_{0.25})与侵蚀量和径流强度相关程度最高^[14];土壤氧化物

中游离氧化物对团聚体的胶结能力最强^[15];氧化铁是主要胶结物质^[16];土壤阳离子交换量和土壤有机质存在显著的负相关关系,水蚀区土壤分离能力可用水流剪切力、粉粒、阳离子交换量和土壤有机质很好地模拟^[17]。

黄土高原和华南红壤区均是我国水土流失的严重区域,不同气候环境和成土母质使得2种土壤性质存在差异,进而影响侵蚀过程,但在以往研究中未能对2种土壤的理化性质和降雨侵蚀的关系作详细的分析。本文通过测定2种土壤不同的理化性质,以及其在15°,20°2个坡度和60,90 mm/h 2个雨强下坡面径流、侵蚀的变化情况,探究雨强、坡度2个外因对不同土壤侵蚀影响的差异及其与土壤自身理化性质的关系,以期深化土壤侵蚀研究提供参考。

1 试验设计与研究方法

1.1 试验设计

本试验在桂林理工大学降雨实验大厅进行。试验采用人工模拟坡面降雨,降雨装置由土槽与人工模拟降雨器2个部分组成,土槽为钢质,尺寸长×宽×高为4 m×1.2 m×0.8 m,土槽坡度可以自动调节,变化范围为0~30°,土槽尾部设有出水口,用来收集坡面径流;人工模拟降雨器为全自动不锈钢模拟降雨器,配有旋转下喷式喷头,为带压力垂直下喷式降雨,喷头距土槽的高度为6 m,雨滴的中值粒径及降雨动能与自然降雨条件较为接近^[18]。为研究不同雨强和坡度对2种土壤的径流、侵蚀的差异,综合考虑2种土壤所在区域的降水量和地形,试验设计在15°,20°2个坡度和60,90 mm/h 2个雨强下,两两组合分别进行4场降雨试验。

1.2 研究方法

试验用土分别是取自黄土高原具有代表性的陕

西榆林盆巴沟的黄土和中国南方广西桂林由第四纪红黏土母质发育而成的典型红壤。对采集回来的黄土及红壤首先在实验室内进行土壤性质的测定:通过沉降法测定土壤机械组成;采用环刀法测定土壤饱和含水量、土壤总孔隙度以及土壤毛管孔隙度;土壤团聚体含量则分别用干筛法与湿筛法测定;有机质含量采用重铬酸钾氧化—容量法^[19]测定;土壤氧化物均采用分光光度计测定^[20],其中游离氧化铁、氧化铝采用 DCB—试铁灵铁铝联合比色法^[21],非晶质(无定形)氧化铁、氧化铝采用草酸铵缓冲溶液提取—试铁灵铁铝联合比色法^[22],络合态铁、铝的分析采用焦磷酸钠提取法^[23];土壤阳离子交换量根据 pH 的不同选择乙酸铵法或乙酸钠—火焰光度法^[24]测定。

采集回来的土样风干后,过 1.2 cm 的筛去除土块和杂质,用于土槽填土。为保证试验土层的透水状况接近于天然坡面,先在土槽底部铺上 10 cm 细砂,并盖上透水纱布。在填土时,采用分层填土的方法,10 cm 为 1 层,边填土边压实。

正式开始降雨试验前 24 h 先进行预降雨,以保证各场次坡面含水率基本一致且拥有接近自然状

态下的土壤水分分布。降雨前,测定坡面土壤含水率,抗剪切力和土壤容重。降雨时,从降雨开始至有径流流出集流口的时间记为产流时间,径流产生后,用 1 000 mL 量筒根据实际产流及产沙情况每隔 1~4 min 在出水口采集样品,记录样品采集时间和体积,用精度为 0.01 g 的电子天平进行称重,并通过烘干法获得泥沙样品。降雨结束 24 h 后,再次测定坡面土壤含水率、抗剪切力和土壤容重。

试验于 2016 年 8 月 26 日至 2018 年 1 月 10 日进行,每个组合重复 2 次,取平均值进行计算和分析。重复试验的产流时间和产沙率相对误差均在 10% 以内。

2 结果与分析

2.1 不同土壤理化性质

由表 1 可知,红壤的机械组成以黏粒、粗粉粒和细砂粒占比较多,黄土则以粗粉粒、黏粒和细砂粒占比较为主,黄土的黏粒含量为 21.14%,低于红壤的黏粒含量 26.25%,但其物理性黏粒(<0.01 mm)含量为 49.13%,高于红壤的 45.02%。根据土壤质地划分,红壤为砂黏壤土,黄土为粉壤土。

表 1 不同土壤的机械组成

单位:%

土壤 种类	黏粒 (<0.002 mm)	粉粒			砂粒			砾石 (>2 mm)
		细粉粒 (0.002~0.005 mm)	中粉粒 (0.005~0.01 mm)	粗粉粒 (0.01~0.05 mm)	细砂粒 (0.05~0.25 mm)	中砂粒 (0.25~0.5 mm)	粗砂粒 (0.5~2 mm)	
黄土	21.14	14.77	13.22	30.33	20.54	0	0	0
红壤	26.25	8.67	10.10	24.82	24.80	5.31	0.05	0

由表 2 可知,2 种土壤的毛管孔隙度相差不大,但红壤非毛管孔隙度约为黄土的 2 倍,总孔隙度相差 5.88%。二者的饱和含水量和田间持水量分别相差 5.92% 和 3.59%,黄土稍低于红壤。

表 2 供试土壤孔隙度及含水量 单位:%

土壤 种类	总孔 隙度	毛管 孔隙度	非毛管 孔隙度	饱和含水量 (体积)	田间持水量 (体积)
黄土	45.85	41.44	4.41	45.84	36.93
红壤	51.73	42.96	8.77	51.73	40.52

由表 3、表 4 可知,红壤风干团聚体中,除 0.25~0.5 mm 外,各级风干团聚体含量随着粒级的增大均增加,其中>5 mm 的风干团聚体含量最多,为 34.25%。当土样经过湿筛后,土壤中不稳定团聚体被破坏分

解,>1 mm 的团聚体均减少,<1 mm 的团聚体均增加,而且>5 mm 的团聚体受到的破坏最多,含量从 34.25% 下降到 0.69%;<0.25 mm 的团聚体则增加最多,从 8.12% 到 37.15%。而黄土风干团聚体中,各级风干团聚体含量随粒级的增大呈现出先减小再逐渐增多的趋势,且与红壤一样,>5 mm 时的风干团聚体最多,并高达 51.18%。湿筛后,土壤中不稳定团聚体同样受到破坏分解,而且同红壤相比,破坏程度更大,除<0.25 mm 团聚体外,各级团聚体均显著减少,湿筛后<0.25 mm 的团聚体含量达到 97.06%。

黄土与红壤风干性团聚体差异有限,但水稳性团聚体差异很大。红壤湿筛平均重量直径是黄土的 2.5 倍,二者的相对机械破碎指数(RMI)分别为 0.90,0.71。

表 3 供试土壤团聚体的组成

单位:%

土壤 种类	<0.25 mm		0.25~0.5 mm		0.5~1 mm		1~2 mm		2~5 mm		>5 mm	
	干筛	湿筛	干筛	湿筛	干筛	湿筛	干筛	湿筛	干筛	湿筛	干筛	湿筛
黄土	26.26	97.06	1.69	0.40	5.10	0.74	6.20	0.22	9.57	0.96	51.18	0.62
红壤	8.12	37.15	6.16	11.90	15.46	30.97	17.01	13.51	19.00	5.78	34.25	0.69

由表 5 可知,试验用黄土的有机质含量与阳离子交换量均高于红壤,故其形成的络合态氧化物含量也要高

于红壤;无定形氧化物红壤含量高于黄土,且游离氧化物的含量也远多于黄土,Al 化物二者差距高达 10 倍。

2.2 不同土壤径流变化差异

2.2.1 开始产流时间变化差异 在不同雨强和坡度条件下,黄土产流时间均短于红壤,除 20°,90 mm/h 二者产流时间相差不大外,其余 3 个条件下红壤产流所需时间为黄土的 2~3 倍;黄土在 15°,90 mm/h 时产流最快,且其他 3 个条件下产流时间相差无几,为最短产流时间的 2 倍;红壤则在 20°,90 mm/h 时产

流最快,且基本遵循随雨强、坡度增大产流时间减小的规律(表 6)。

表 4 土壤团聚体稳定性

土壤种类	MWD _d /d	MWD _w /mm	RMI
黄土	3.10	0.32	0.90
红壤	2.79	0.81	0.71

注:MWD_d和 MWD_w为干筛与湿筛的平均重量直径;RMI 为相对机械破碎指数。

表 5 土壤各胶结物质含量

土壤种类	有机质/ (g·kg ⁻¹)	游离氧化物/(mg·kg ⁻¹)		无定形氧化物/(mg·kg ⁻¹)		络合态氧化物/(mg·kg ⁻¹)		阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹)
		Fe	Al	Fe	Al	Fe	Al	
黄土	21.3	1.180	0.919	0.225	0.001	7.063	5.770	16.3
红壤	18.0	3.129	9.400	1.255	0.012	6.468	4.970	12.5

表 6 开始产流时间

土壤种类	雨强/ (mm·h ⁻¹)	开始产流时间/(min:s)	
		15°	20°
黄土	60	06:47	06:12
	90	03:22	06:16
红壤	60	16:15	11:11
	90	10:11	07:30

2.2.2 径流率变化差异 由图 1 可知,产流 5 min 后,红壤径流率开始呈波动起伏状态,进入稳定径流阶段;同坡度,不同雨强条件下径流率差距明显,径流率随雨强增大而增加;同雨强,不同坡度条件下,径流率随坡度增大而增大,15°时径流率差距较小,20°时

径流率差距则明显加大。与红壤不同,产流 10 min 后,黄土径流率开始呈波动状态;不同坡度条件下,径流率随雨强变化规律不同,15°时径流率随雨强增大而增大,20°时随雨强增大径流率反而变小;不同雨强条件下,径流率随坡度变化也不相一致,60 mm/h 时,径流率随坡度增加而增加,90 mm/h 时,在增长阶段 15°的径流率大于 20°径流率,稳定阶段后,20°径流率又高于 15°的径流率。此外,达到稳定径流后,红壤径流率范围在 30~120 mL/s,而黄土则在 100~220 mL/s,不同土壤的径流率差距较大,且与红壤相比,黄土不同雨强和坡度之间的流率的差距也更小。

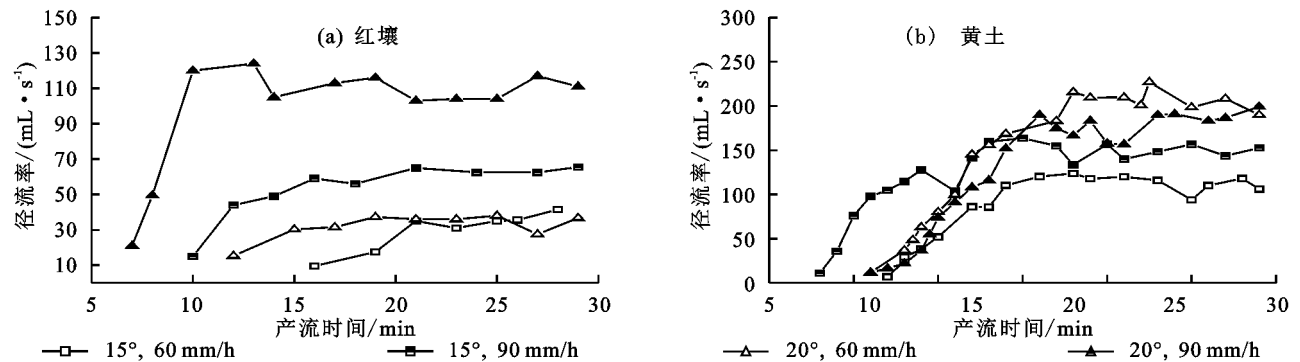


图 1 径流率变化

2.3 不同土壤侵蚀产生变化差异

2.3.1 不同土壤产沙率变化差异 由图 2 可知,红壤产沙率整体较低,且多在产流几分钟即出现产沙率最大值,20°,90 mm/h 在产流 2 min 后即达到最大产沙率 6.63 g/s,同雨强 15°条件下的最大产沙率也在产流 2 min 后出现,仅为 0.42 g/s,同坡度 60 mm/h 条件下产流 2 min 之后同样出现最大产沙率 1.54 g/s,只有在 15°,60 mm/h 时,产流 10 min 之后最大产沙率才出现,为 1.18 g/s;最大产沙率在 20°时随雨强增加而增加,15°时则又不存在这一趋势,而同雨强条件下,最大产沙率随坡度增加而增加。总体来看,红壤的产沙率随坡度和雨强变化规律不明显,产沙率大多小于 1 g/s。与红壤相比,黄土的产沙率则大得多,

且与径流率相似,产沙率在产流前期快速增长,10 min 之后开始波动变化,进入稳定产沙阶段。在产沙率增长阶段,15°,90 mm/h 条件下速度最快,其他 3 个条件下的增长态势相差不大,进入稳定产沙阶段以后,20°,90 mm/h 的产沙率最大,其他 3 个条件则表现为交错波动,坡度和雨强对产沙率的影响比较复杂,稳定产沙率范围在 60~120 g/s。

2.3.2 不同土壤径流含沙量变化差异 由图 3 可知,红壤径流含沙量整体较小,除 20°,90 雨强在产流 2 min 后出现最大径流含沙量超过 300 g/mL,随后快速下降,其余条件下径流含沙量多小于 50 g/mL;与产沙率相同,径流含沙量最大值也多在产流几分钟后即出现,随后在较低水平波动变化,15°,60 mm/h

时除外,径流含沙量在 10 min 以后出现最大值。由于产沙变化的复杂性,虽然径流随雨强和坡度增加而增加,径流含沙量受雨强和坡度影响变化依旧复杂。与红壤相比,黄土的径流含沙量较高,最小径流含沙量高于 50 g/mL,最大径流含沙量接近 700 g/mL,径流含沙量变化同样在产流 10 min 后进入波

动阶段;而在径流含沙量增长阶段,随雨强增加径流含沙量也越大,但随坡度增加,径流含沙量反而减小;波动阶段时,15°坡度时,雨强越大径流含沙量越小,20°雨强越大径流含沙量也越大,而 60 mm/h 时,坡度越小径流含沙量越大,90 mm/h 坡度大径流含沙量也大。

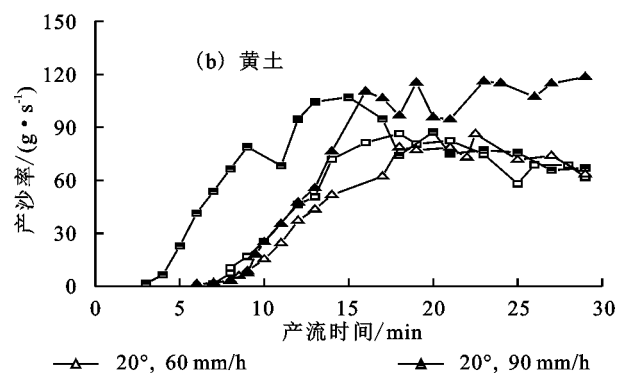
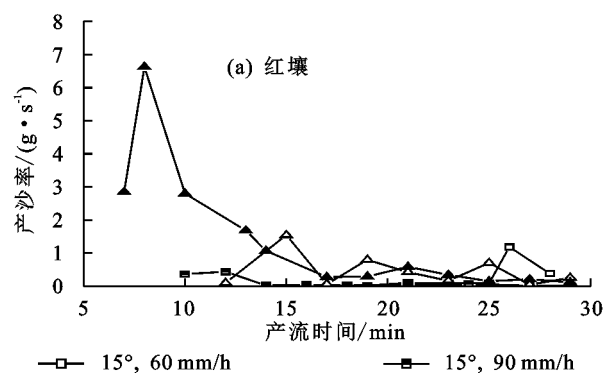


图 2 产沙率变化

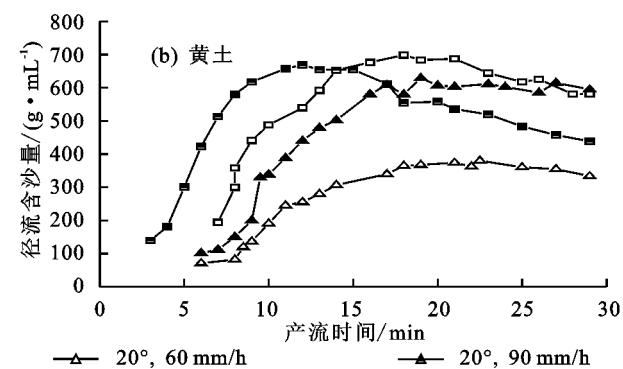
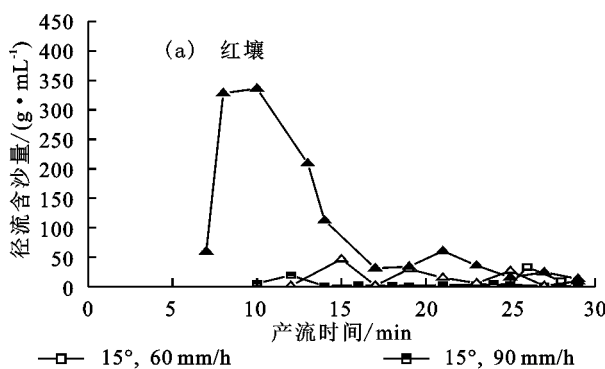


图 3 径流含沙量变化

2.4 土壤性质对径流产生的影响分析

同雨强、同坡度条件下,不同土壤坡面的径流、侵蚀过程大不相同,表明土壤自身理化性质是影响土壤侵蚀的重要内在因素。同雨强、坡度条件下,红壤产流时间均长于黄土产流时间,这主要是因为:从土壤粒径来看,红壤质地较粗,粉粒和砂粒含量更高(73.75%),最大粒径组为粗砂粒(0.5~2 mm),机械组成成分相对分散且含量悬殊,土壤结构更松散,透水性更强,因而土壤水分下渗能力更好;其次,红壤的总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度也都要高于黄土,而前人^[11-12]研究已发现,孔隙是土壤的蓄水库,能快速短暂地储存水分,进而影响下渗和产流。坡面开始产流后,黄土和红壤坡面产流率都在产流几分钟后初期快速增长,且由于产流之前入渗时间长,红壤初始产流时间距离达到稳定入渗率的间隔较短,因而比黄土先达到稳定径流阶段。不同雨强、坡度条件下红壤径流率的变化层次分明,黄土则在这 2 个坡度(15°,20°)、2 个雨强(60,90 mm/h)范围内径流率随时间变化呈现出交错复杂的现象。前人^[6,25]对黄土的研究认为,在 15°~25°范围存在侵蚀的临界坡度,

且临界坡度不是唯一值,而是随着降雨特性的不同而不同^[26]。因而推测可能这个范围内存在临界坡度,且随着雨强的变化临界坡度发生移动,雨强和坡度的交互作用使得黄土径流产沙表现为交错变化。

由于红壤黏粒含量较黄土高,细粉粒、粗粉粒含量均比黄土低,而陈明华等^[9]研究认为,土壤侵蚀中最易流失的是粗粉粒和细粉粒。有机质含量及阳离子交换量红壤也均低于黄土,土壤持水性能更差,且游离氧化物含量远高于黄土,湿筛后,红壤>0.25 mm 团聚体含量为 62.85%,而黄土仅为 2.94%,红壤水稳性团聚体更稳定,相对机械破碎指数小于黄土。闫峰陵等^[14]研究发现,抗蚀能力主要通过>0.25 mm 水稳性团聚体来体现,大量水稳性微团聚体的存在提高其抗蚀性。因而在同雨强、同坡度条件下,黄土的产沙率和径流含沙量均远高于红壤。此外,红壤坡面最大产沙率及径流含沙量大多出现在降雨前期,而黄土坡面最大产沙率及径流含沙量多出现在降雨中后期,胡霞等^[27]研究发现,黄土坡面在降雨前期土壤结皮快速发育,而红壤由于团聚性高,胶结性强,土壤结皮发育具有滞后性。随着降雨进行到后期,黄土

结皮被破坏,产沙率随径流率稳定变化,而红壤则由于土壤结皮的保护产沙率反而降低。

3 结论

(1)红壤土壤机械组成以黏粒、粗粉粒和细砂粒为主,黄土则以粗粉粒、黏粒和细砂粒为主,二者的毛管孔隙度、饱和含水量和田间持水量相差均在3%~6%以内,干筛时各粒级团聚体相差不大,但经湿筛破坏后二者团聚体差异很大,红壤的相对机械破碎指数(RMI)小于黄土,黄土有机质含量与阳离子交换量高于红壤,故其形成的络合态氧化物含量也更高,而无定形氧化物和游离氧化物则使红壤含量更高;

(2)同雨强、同坡度条件下,黄土产流时间均短于红壤,产流开始后,红壤比黄土先达到稳定径流率,不同雨强、坡度条件下,红壤稳定径流率范围在30~120 mL/s,而黄土则在100~220 mL/s,且在这个坡度、雨强范围内,红壤径流率变化层次分明,黄土则更复杂;

(3)红壤的产沙率和径流含沙率都较低,且多在产流几分钟即出现产沙率最大值,黄土产沙率则和径流率类似,在产流前期快速增长,10 min之后开始波动变化,进入稳定产沙阶段,产沙率和径流含沙率随雨强和坡度的变化复杂;

(4)不同土壤自身理化性质是影响坡面侵蚀的内在因素,与黄土相比,红壤的下渗能力更好,土壤抵抗径流剪切和剥蚀的能力更强,使得在同雨强、同坡度条件下红壤的侵蚀程度远低于黄土,规律性也更显著。

参考文献:

- [1] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.
- [2] Chen J, Xiao H B, Li Z W, et al. How effective are soil and water conservation measures (SWCMs) in reducing soil and water losses in the red soil hilly region of China? A meta-analysis of field plot data[J].Science of the Total Environment,2020,735:e139517.
- [3] Zhao Q H, Li D Q, Zhuo M N, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2015,29:609-621.
- [4] 车明轩,宫渊波,刘莲,等.人工模拟降雨条件下不同雨强、坡度对紫色土坡面产流的影响[J].水土保持通报,2016,36(4):164-168.
- [5] Khan M N, Gong Y B, Hu T X, et al. Effect of slope, rainfall intensity and mulch on erosion and infiltration under simulated rain on purple soil of south-western Sichuan province, China[J].Water,2016,8(11):e528.
- [6] 张梦,周玥.雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):85-90.
- [7] 梁志权,张思毅,卓慕宁,等.不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):1-6.
- [8] 范兴科,蒋定生,赵合理.黄土高原浅层原状土抗剪强度浅析[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(4):69-75.
- [9] 陈明华,黄炎和.土壤可蚀性因子的研究[J].水土保持学报,1995,9(1):19-24.
- [10] 李雪转,樊贵盛.土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(3):188-190.
- [11] 徐燕,龙健.贵州喀斯特山区土壤物理性质对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2005,19(1):157-159.
- [12] 张保华,徐佩,廖朝林,等.川中丘陵区人工林土壤结构性及对土壤侵蚀的影响[J].水土保持通报,2005,25(3):25-28.
- [13] 吴秉礼,石建忠,谢忙义,等.甘肃水土流失区防护效益森林覆盖率研究[J].生态学报,2003,23(6):1125-1137.
- [14] 闫峰陵,史志华,蔡崇法,等.红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响[J].土壤学报,2007,44(4):577-583.
- [15] 王洪娟,梁成华,杜立宇.设施蔬菜栽培对土壤团聚体组成及稳定性的影响[J].河南农业科学,2013,42(12):51-54.
- [16] 胡国成,章明奎.氧化铁对土粒强胶结作用的矿物学证据[J].土壤通报,2002,33(1):25-27.
- [17] 耿韧,张光辉,洪大林,等.我国水蚀区坡耕地土壤分离能力的空间分布与影响因素[J].水土保持学报,2020,34(3):156-161.
- [18] 金鑫,谢斯琴,宋颖,等.人工红壤坡面对超大雨强降雨的响应过程[J].水土保持学报,2017,31(5):19-24.
- [19] 李超群,刘立平,郭斌,等.土壤有机质的重铬酸钾氧化测定方法述评和应用[J].冶金工程,2017,4(4):251-259.
- [20] 曹运珠,韩啸.分光光度法测定土壤中有机物含量的研究与应用[J].平顶山学院学报,2013,28(5):71-74.
- [21] 马毅杰,陈家坊.我国红壤中氧化铁形态及其特性和功能[J].土壤,2017,30(1):1-6.
- [22] 阳洋,黄伟濠,卢瑛,等.土壤游离氧化铁高光谱特征与定量反演[J].华南农业大学学报,2020,41(1):91-99.
- [23] 赵友朋,孟苗婧,张金池,等.不同林地类型土壤团聚体稳定性与铁铝氧化物的关系[J].水土保持通报,2018,38(4):75-81.
- [24] 刘蓉,邓茂,李莹莹,等.不同酸碱度土壤阳离子交换量的测定研究[J].中国环境监测,2020,36(1):125-130.
- [25] 苏远逸,李鹏,任宗萍,等.坡度对黄土坡面产流产沙过程及水沙关系的影响[J].水土保持研究,2020,27(2):118-122.
- [26] 和继军,蔡强国,刘松波.次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J].应用生态学报,2012,23(5):1263-1268.
- [27] 胡霞,严平,李顺江,等.人工降雨条件下土壤结皮的形成以及与土壤溅蚀的关系[J].水土保持学报,2005,19(2):13-16.