

人工红壤坡面对超大雨强降雨的响应过程

金鑫^{1,2}, 谢斯琴^{1,2}, 宋颖¹, 王春振¹, 赵华荣¹, 李世东^{1,2}, 汪蓬^{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)

摘要: 为了研究人工红壤坡面对超大雨强降雨的响应过程, 利用人工模拟降雨系统和变坡土槽, 分别采用 140, 160, 190 mm/h 的雨强和 10°, 15°, 20°, 25° 的坡度, 对经过简单人工处理的红壤坡面在超大雨强降雨条件下的产流产沙响应过程进行了试验。结果表明: 经过简单人工处理的红壤坡面在 140~190 mm/h 超大雨强下的土壤侵蚀模数明显低于 50~120 mm/h 雨强下未进行相应处理的坡面, 细沟发育较为缓慢, 对坡面土壤的处理方式能够有效提高坡面的抗侵蚀能力。在同雨强下, 随着坡度的增加, 产流时间先延长后缩短, 在 20°~25° 存在产流的临界坡度。侵蚀模数在同雨强下随着坡度的增大呈先增大后减小的趋势, 且不同雨强的临界坡度不一致, 雨强为 140 mm/h 时侵蚀临界坡度为 15°~20°, 雨强为 160 mm/h 和 190 mm/h 时侵蚀临界坡度为 20°~25°。总体来看, 侵蚀过程受雨强的影响大于坡度的影响, 雨强为 140 mm/h 时, 不同坡度的侵蚀过程均较为平稳, 细沟发育微弱; 雨强为 160 mm/h 时, 侵蚀有所加强, 但侵蚀过程无明显规律; 雨强为 190 mm/h 时, 侵蚀主要发生在降雨的前 30 min, 且细沟发育相对较为剧烈, 30 min 之后趋于稳定。

关键词: 超大雨强; 人工红壤坡面; 侵蚀过程; 临界坡度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0019-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.004

Experimental Study on the Response of Artificial Red Soil Slope to the Large Rainfall Intensity

JIN Xin^{1,2}, XIE Siqin^{1,2}, SONG Ying¹, WANG Chunzhen¹,

ZHAO Huarong¹, LI Shidong^{1,2}, WANG Peng^{1,2}

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

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

Pollution Control and Water Security in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004)

Abstract: By using artificial rainfall simulation system and variable slope soil trough, the runoff and sediment yield responses of red soil slope under heavy rainfall were tested to study the response of artificial red soil slope to heavy rainfall. The rainfall intensities included 140, 160, and 190 mm/h, and the slope degrees included 10°, 15°, 20° and 25°. The experimental results showed that the erosion modulus in red soil slope with simple artificial treatment under super rain intensity of 140~190 mm/h was significantly lower than that in slopes without treatment under rain intensity of 50~120 mm/h, and the rill development process was slow. This indicated that soil treatment on slope could effectively improve the soil erosion resistance. Under the same rainfall intensity, the runoff yield time firstly delayed and then shortened with the increasing of slope degree, and the critical gradient of the runoff yield was between 20° and 25°. Under the same rainfall intensity, the erosion modulus firstly increased and then decreased with the increasing of slope degree, and the critical gradient was different under different rainfall intensity. The erosion critical gradient was 15°~20° when the rainfall intensity was 140 mm/h, and it was 20°~25° when the rainfall intensity was 160 mm/h and 190 mm/h. Overall, the erosion process was affected by the rainfall intensity more than the slope degree. The erosion processes of slopes with different slope degrees were relatively stable when the rainfall intensity

收稿日期: 2017-04-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(51369009); 广西自然科学基金项目(2016GXNSFAA380116); 广西矿冶与环境科学实验中心, 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(002401013001)

第一作者: 金鑫(1967—), 男(汉族), 北京人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文物理规律研究。E-mail: jinxin1390@163.com

通信作者: 宋颖(1970—), 女(汉族), 北京人, 高级实验师, 硕士, 主要从事水文过程研究。E-mail: 402355505@qq.com

was 140 mm/h, and the development of rill was weak. The erosion was strengthened when the rainfall was 160 mm/h, but there was not obvious tend in the erosion process. When the rainfall intensity was 190 mm/h, the erosion mainly occurred in the first 30 min of the rainfall, and the development of rill was relatively severe, and it tends to be stable after 30 min.

Keywords: large rainfall intensity; artificial red soil slope; erosion process; critical gradient

我国红壤土地资源丰富,总面积约为 211.2 万 km^2 ,占全国土地面积的 22%^[1],由于土地利用率高且降雨量大,红壤地区坡耕地的土壤侵蚀与退化情况严重,已成为仅次于黄土高原的水土流失严重地区。开展红壤坡面侵蚀的研究对于我国红壤地区水土保持具有重要意义。在土壤性质相同的条件下,雨强和坡度是坡面侵蚀最主要的影响因素,也是目前土壤侵蚀研究领域的研究重点之一。

Berger 等^[2]和 Morbidelli 等^[3]的研究表明,坡度的增大对侵蚀量及径流量均有促进作用,而有研究表明^[4],当坡度达到某些值时,坡度和土壤侵蚀之间的关系出现反转。张会茹等^[5]研究了不同降雨条件下坡度对红壤坡面产流和侵蚀过程的影响,得出的结论为坡面径流和坡面土壤侵蚀量都随雨强的增大而增大,但是随坡度的变化较为复杂,在不同的雨强下呈现出不同的趋势,在坡度 20°附近存在临界坡度,而候旭蕾^[6]研究得出的临界坡度在 15°左右。耿晓东等^[7]通过室内模拟降雨试验,研究了雨强和坡度对紫色土壤坡面侵蚀产沙过程的影响,结果表明在 25°附近存在坡面侵蚀的临界坡度,且雨强和坡度对侵蚀量的贡献率存在对比消长关系,在雨强和坡度都较小时,坡度对侵蚀过程起主导作用,当雨强较大或到达临界坡度后,雨强对侵蚀过程起主导作用。

从已有研究结果来看,由于研究所用的土壤性质存在差异以及土壤坡面处理方式的不同,除了在雨强越大侵蚀越强烈和存在侵蚀临界坡度方面结论较为一致外,在诸如临界坡度值,雨强和坡度对侵蚀的具体影响程度等方面存在较大的差异。因此,开展雨强及坡度对土壤侵蚀过程的影响研究仍是目前土壤侵蚀领域需要进一步探索的问题。Sun 等^[8]也提出应进一步开展坡度及坡长对侵蚀的影响,以解释以往研究结论不一致的问题。此外,大多数学者对于红壤裸坡坡面侵蚀研究所涉及的雨强主要集中于 50~120 mm/h^[4-6,9-10],对于超过 120 mm/h 雨强的极端降雨下的红壤坡面侵蚀过程研究极少。因此,本研究基于人工模拟降雨系统,设计了 140,160,190 mm/h 3 个极端雨强,并对坡面进行简单的人工处理,利用不同的雨强和坡度组合,对桂林地区红壤坡面侵蚀过程进行模拟研究,探究超大雨强降雨条件下经人工处理的红壤坡面的侵蚀响应过程,分析雨强和坡度对红壤坡

面侵蚀的影响以及简单人工处理的红壤坡面侵蚀情况,丰富红壤侵蚀研究成果。

1 材料与方法

1.1 试验材料

降雨系统采用全自动不锈钢模拟降雨器,该降雨装置配有旋转下喷式喷头,雨滴中值粒径、降雨动能与天然降雨较为接近。该设备采用扬程为 50 m 的潜水泵供水,降雨高度为 6 m,使得雨滴散落在坡面的速度接近自然雨滴终速,雨强为 10~200 mm/h,雨滴直径为 0.1~6 mm。

试验土槽的长宽深分别为 400 cm×120 cm×80 cm,土槽下设有油压装置可对土槽坡度进行调整,变化范围为 0°~30°。土槽尾端设有簸箕型集水口收集坡面径流,底部有集水口用以收集坡面下渗径流。试验用土为桂林市雁山镇红壤土,属于第四纪红黏土母质发育的红壤粉砂质黏土,铁铝氧化物富集,呈酸性,持水性较强,平均容重为 1.26 g/cm³,田间持水量为 47.8%,粒径组成为黏粒($d < 0.002$ mm)占 21.67%,粉粒($0.002 \text{ mm} < d < 0.02 \text{ mm}$)占 63.55%,砂粒($0.02 \text{ mm} < d < 2 \text{ mm}$)占 14.78%。

1.2 试验方法

本试验雨强分别为 140,160,190 mm/h,坡度为 10°,15°,20°,25°。每场降雨历时为 60 min,每个组合试验重复 2~3 次,若 2 次试验结果较为接近,则任取其中一场进行分析,若差异较大则进行第 3 次试验。试验从 2015 年 6 月开始,至 2016 年 6 月结束,共进行有效降雨 34 场次。

在填土时,为保证土槽透水性,先在土槽底部均匀铺 10 cm 细砂,盖上透水纱布,然后按 10 cm 进行分层填土。土壤经风干后剔除杂物,不过筛、不研磨,最大程度保持原状土特性。填土采用边填充、边压实的方法。在完成表层土壤填土后,先用小雨强进行前期降雨直至坡面开始积水,静置 12 h 以上,使土槽各部分土壤水分分布均匀,然后在土壤不泥泞并且含水率较高的情况下进行压实。

1.3 试验步骤

(1)把土槽坡度调至相应的试验坡度后进行降雨观测。在试验的过程中对雨强及均匀度进行观测,并以观测的雨强作为实测雨强。每组试验结束后重新处理坡面表层 10 cm 土壤,并用环刀取样测量容重,

控制其容重在 1.2~1.3 g/cm³。

(2)每次降雨试验前,用土壤水分仪测定土壤坡面 10,20,30,40,50,60 cm 土层含水量,得出不同深度的土壤含水量,控制其前期土壤含水量在一定的范围内,以保证前期降雨条件一致。

(3)从雨滴降落至坡面开始计时,以坡面水流出集水口的时间作为产流时间,用 1 000 mL 量筒在集水口进行泥沙样品采集,记录采样时间及时长,并对样品进行称重及体积测量。由于降雨前期产流产沙变化量较大,因此降雨前 30 min 每隔 2 min 采一次样,后 30 min 每隔 4 min 采一次样。用径流测量系统对产流过程进行观测,该系统以容量为 1 000 mL 的翻斗收集径流,并自动记录相应的采集时间,能详细监测整个产流过程。试验结束后对泥沙样品进行烘干称重,计算侵蚀产沙量。

2 结果与分析

2.1 雨强及坡度对产流时间的影响

坡面产流时间对于坡面径流过程、侵蚀过程的分析及径流量和侵蚀量的计算都十分重要,也是反映土壤表面对降雨响应的重要指标。在保证降雨前期土壤含水量接近的条件下,降雨条件、坡面地表形态、土

壤结构等因素对产流时间都有很大影响^[11]。

降雨开始后,坡面土壤到达田间持水量前的入渗率较大,这段时间的降雨几乎全部下渗,当土壤含水率达到或接近田间持水量时才开始产流。由表 1 可知,各雨强和坡度下,前期土壤含水率为 40.42%~43.50%,均值为 41.96%,差异较小,可认为土壤前期含水量基本一致。在同一坡度下,产流时间随雨强的增大均有所提前,而在同一雨强下,产流时间随坡度的变化规律主要表现为,从 10°~20°时产流时间逐渐延长,在 20°时达到最大值,然后在 25°时又缩短。坡度的升高导致土槽坡面承雨面积减小,单位时间内的承雨量减少,而土槽的土壤体积不变,土壤达到田间持水量的需水量基本相同,因此产流时间会延长。此外,随着坡度的增大,重力在顺坡方向上的分力增强,使得坡面流速加快,在一定程度上缩短了径流流至出口的时间。因此,这两个方面的共同作用使得产流时间随坡度的变化较为复杂。从研究结果来看,在 20°~25°应该存在某一因素使得产流时间缩短,在 20°~25°存在产流的临界坡度,在此坡度时的土壤入渗率或许存在转折,对此问题需在后续研究中进行进一步探索。

表 1 不同雨强和坡度下前期土壤含水率及产流时间

雨强/ (mm·h ⁻¹)	10°		15°		20°		25°	
	前期	产流	前期	产流	前期	产流	前期	产流
	含水率/%	时间/s	含水率/%	时间/s	含水率/%	时间/s	含水率/%	时间/s
140	41.59	40	42.47	57	41.00	132	42.43	48
160	41.68	34	41.94	36	42.71	115	43.50	46
190	42.35	25	42.38	35	40.86	72	42.40	47

2.2 雨强及坡度对径流的影响

由图 1 可知,在同一坡度下,总径流量随雨强的增大而增大,在 10°时其差值达到最大,190,160,140 mm/h 降雨条件下的总径流量差值分别为 31.34%和 45.81%,在 25°时差值最小,分别为 11.20%和 23.22%。雨强是影响坡面径流的主要因素,在降雨历时及坡度一定的条件下,坡面的土壤的入渗总量保持不变,径流量的大小主要受到雨强的影响,因此雨强越大,坡面径流量也就越大。

在同一雨强下,总径流量随坡度的增大而减小,雨强分别为 190,160,140 mm/h 时,10°和 25°坡度的总径流量的差值分别为 42.43%,27.48%,19.61%。分析其原因,是坡度对径流的影响主要通过影响坡面入渗及土槽承雨面积来实现的^[12],在降雨条件不变的情况下,随着坡度的增大,土槽坡面承雨量减小,总径流量减小。且雨强越大,坡度对总径流量的影响就越明显,这与坡面细沟的发育有关,坡面细沟发育较剧烈时坡面径流较为集中,流速也会加快^[13]。雨强越大,细沟的发育就越剧烈,细沟发育程度的不同导致了总径流量随坡度的变化规律存在差异。

2.3 雨强及坡度对侵蚀产沙的影响

2.3.1 侵蚀模数变化 侵蚀模数的大小反映了坡面侵蚀的强弱。以降雨过程中的总产沙量除以降雨时间以及不同坡度下相应的承雨面积,以消除承雨面积不同带来的影响。由图 2 可知,在相同的坡度下,随着雨强的增大,侵蚀模数明显增大。190 mm/h 雨强条件下的侵蚀模数远远大于其他 2 个雨强,在 10°~

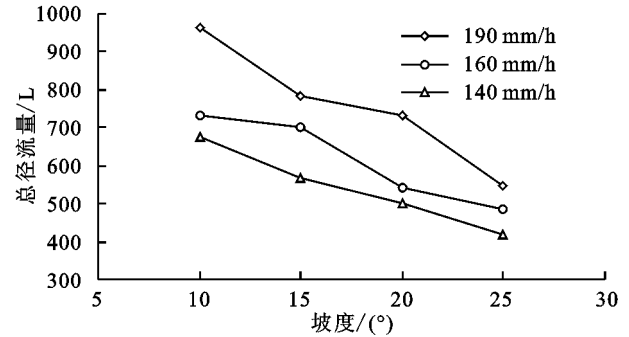


图 1 总径流量随雨强和坡度变化曲线

25°的坡度范围内,其侵蚀模数分别是 160 mm/h 雨强的 1.14,1.74,2.08,1.37 倍,是 140 mm/h 雨强的 1.55,3.18,6.02,8.41 倍。

在同一雨强条件下,侵蚀模数随坡度的变化情况呈现出先增加后减小的趋势。在雨强为 190 mm/h 和 160 mm/h 时,20°坡面的侵蚀模数最大;在雨强为 140 mm/h 时,15°坡面的侵蚀模数最大,说明在不同的雨强下存在不同的侵蚀临界坡度。根据研究结果,雨强为 190 mm/h 和 160 mm/h 时,临界坡度在 20°~25°,雨强为 140 mm/h 时在 15°~20°。

在不同的雨强条件下侵蚀模数随坡度的变化趋势也有所不同,在雨强为 190 mm/h,当坡度从 10°增加到 20°时,侵蚀模数呈急剧上升趋势,到 25°后又急剧下降。雨强为 160 mm/h 时也呈现出同样的趋势,但是上升和下降的趋势都较为平缓。雨强为 140 mm/h 时,15°坡面的侵蚀模数最大,在 20°和 25°时又下降,与其他 2 个雨强相比,其侵蚀模数上升和下降的趋势都更为平缓。说明随着雨强的增大,侵蚀模数随坡度的变化越来越明显。雨强较小时坡面细沟发育不明显,侵蚀主要以片蚀为主,坡度的变化对侵蚀模数的影响较小,而随着雨强的增大,细沟的发育和形态的变化加快,使得侵蚀模数呈现急剧变化的趋势,雨强对坡面侵蚀的影响占主导地位。

在不同的坡面处理方式及降雨条件下,侵蚀模数的大小会有很大的差异。表 2 是已有学者对红壤坡

面侵蚀研究的成果,与本研究条件下的红壤侵蚀模数进行对比分析。文献①~④为其他学者的红壤坡面侵蚀研究结果^[5-7,14],其研究方法都是利用室内人工模拟降雨系统及土槽进行试验,与本研究条件类似,⑤为本研究条件下的研究结果。其他研究者的填土方式为风干过筛后进行分层填土,或者风干后直接填土。而在本研究中,下层土壤的填土过程与其他学者一致,为风干后进行分层填土,但在表层土壤填土时,先将表层土壤湿润后再进行压实。

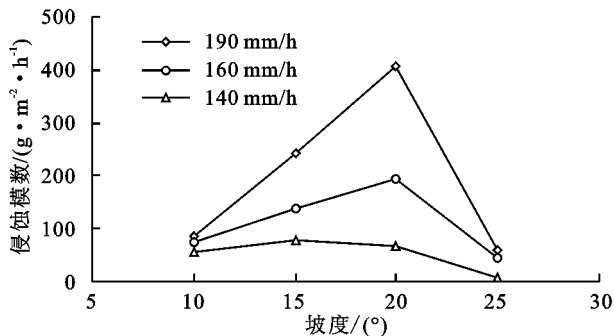


图 2 不同坡度及雨强下侵蚀模数变化

由表 2 可知,研究选择坡度为 5°~25°,其他研究的雨强范围主要为 50~120 mm/h,侵蚀模数为 8~6 400 g/(m²·h)。在本研究条件下,雨强为 140~190 mm/h,侵蚀模数为 7~407 g/(m²·h),远小于其他处理方式,说明在土壤含水率较高的情况下对土壤进行压实,可明显提高坡面土壤抗蚀能力,减少坡面侵蚀量。

表 2 不同研究条件下侵蚀模数比较

指标	文献①	文献②	文献③	文献④	本研究⑤
坡度范围/(°)	5~25	5~25	5~20	10	10~25
雨强/(mm·h ⁻¹)	50,57	55,70,85,100,120	120	60	140,160,190
侵蚀模数/(g·m ⁻² ·h ⁻¹)	400~6400	8~750	520~5400	128~861	7~407

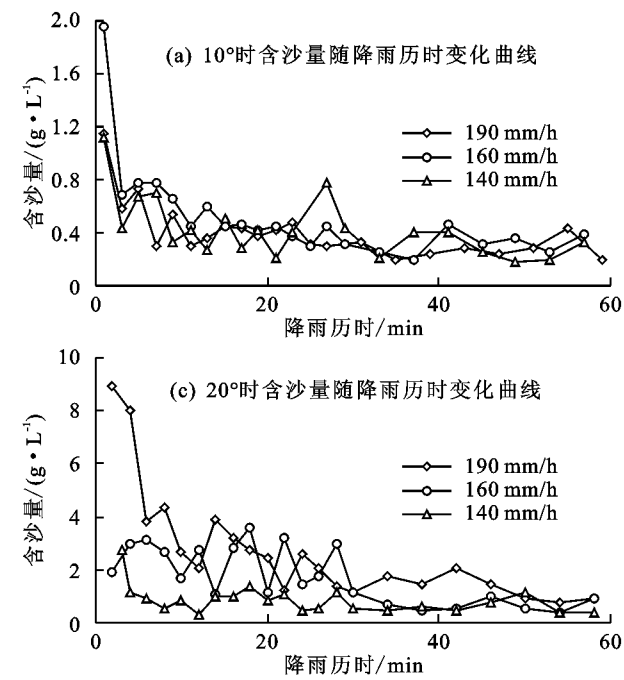
2.3.2 侵蚀过程 以泥沙样本的含沙量绘制不同雨强及坡度条件下含沙量随降雨历时变化曲线(图 3),分析不同条件下侵蚀产沙过程的变化规律,并分别统计 0~30 min 和 30~60 min 两个时段的变差系数(表 3),变差系数越大,则数据的变幅越大,表明时段内的细沟发育较强烈,反之亦然。

由图 3 可知,在同一坡度下,含沙量都随着雨强的增大而增大,主要原因是在降雨历时一定的条件下,雨强越大,雨滴的粒径就越大,对土壤的击溅分散作用也就越强,增加了径流的紊动性,使径流的侵蚀能力增强^[15]。含沙量在降雨初期较大,然后呈现减小的趋势,这是由于在降雨前期,雨滴对土壤颗粒的击溅作用较大,形成大量分散的泥沙颗粒,且坡面存在部分松散颗粒,在径流形成后便被径流带走,产沙量较大。随着降雨的进行,形成的薄层径流减弱了雨滴对坡面的打击作用,含沙量逐渐减小并趋于稳定。

但由于细沟的产生及发育,含沙量出现波动,这是因为雨强较大时,径流量也越大,径流在流动过程中对坡面的冲刷剥蚀能力以及挟沙能力增大,在降雨进行到一定时间出现细沟后,径流大量集中在细沟里,对泥沙既有冲刷搬运作用也存在沉积现象,降雨过程中细沟的形态的发展变化都较为剧烈,使得径流含沙量不断波动,这也反映出细沟发育对坡面侵蚀产沙有重要的影响。

由图 3 和表 3 可知,在不同的雨强和坡度下,含沙量随降雨历时的变化表现出不同的特征。雨强为 140 mm/h 时,在各坡度下的含沙量均较小,且在整个降雨过程中含沙量变化相对较为平稳,无明显细沟发育。在雨强为 160 mm/h,坡度为 25°时,含沙量较小且产沙过程较平稳,在坡度为 10°时,含沙量在前 30 min 波动较大,变差系数为 0.664,但是含沙量较小;在坡度为 15°时,整个降雨过程的含沙量波动均

较大,细沟发育贯穿于整个降雨过程;在坡度为 20°时,总侵蚀量最大,前 30 min 的含沙量均较大且波动较大,在 30 min 后含沙量逐渐减小并趋于稳定,表明在雨强为 160 mm/h 时,坡度对细沟的发育有不同的影响。雨强



为 190 mm/h 时,在各坡度下变差系数均表现出在降雨前 30 min 较大,在后 30 min 较小,其均值分别为 0.527 和 0.280,表明在该雨强下,细沟的形成和发育主要发生在前 30 min,30 min 后趋于稳定。

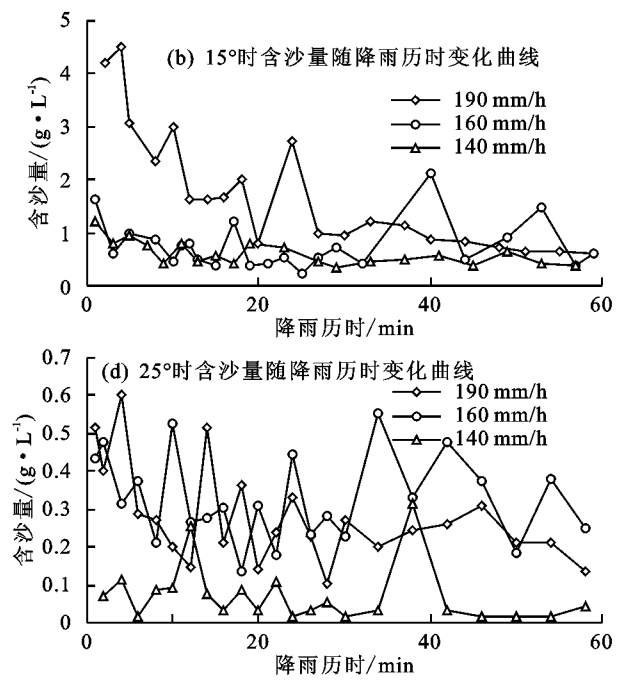


图 3 不同坡度及雨强下含沙量随降雨历时变化

表 3 不同雨强及坡度条件下各时间段的变差系数

雨强/ (mm·h ⁻¹)	坡度/(°)	时间/min	
		0~30	30~60
140	10	0.493	0.344
	15	0.379	0.211
	20	0.590	0.440
	25	0.242	0.157
160	10	0.664	0.292
	15	0.525	0.712
	20	0.430	0.352
	25	0.355	0.363
190	10	0.478	0.289
	15	0.490	0.267
	20	0.647	0.336
	25	0.493	0.226

3 讨论

在所有的雨强下,产流时间随坡度的增加呈先延长后缩短的趋势,产流时间在 20°时均最长。由于土壤孔隙可分为无效孔隙、毛管孔隙和通气孔隙,且其分布和方向均是无序的,有可能存在一个坡度使土壤孔隙可通过的水量达到最大值,在此坡度下的降雨下渗量最大,因此产流时间最长,可能存在产流的临界坡度。

在超大强度降雨条件下,用本研究的处理方法处理过的红壤坡面抗侵蚀性明显增强,在雨强较大的条件下,其侵蚀模数远远小于其他处理方式下的红壤坡面侵蚀模数,最大侵蚀模数能减小 50% 以上,原因是

红壤在湿润的情况下黏性较高,在此时进行压实可提高其致密程度,减少坡面散土,在表面形成结皮,提高了坡面的抗侵蚀能力。不同坡面处理方式之间的具体侵蚀差异还需要进行进一步的研究。

相同雨强下,随着坡度的增加,侵蚀模数呈先增大后减小的趋势,190 mm/h 和 160 mm/h 雨强下,坡度在 20°时侵蚀模数达到最大值,在 140 mm/h 雨强时 15°坡度的侵蚀模数达到最大值,显示出在不同的雨强下存在不同的侵蚀临界坡度。这是由于坡度和雨强对坡面侵蚀的贡献存在对比消长的关系,在坡度较小时,土槽坡面的承雨量较大,因此径流量大,但此时的流速较低,径流侵蚀力较小,且坡面稳定性较强,不易发生侵蚀;在坡度较大时,土槽承雨面积减小,径流量减小,但是径流流速增加,坡面土壤的不稳定性增强,坡面土壤发生下移的可能性增大,在不同的条件下起主导作用的因素不同,而且在不同的雨强下,雨滴对坡面的击溅能力以及径流对土壤的搬运能力都不同,可能导致不同的侵蚀临界坡度。

4 结论

(1)产流时间随着雨强的增大而提前,随坡度的增大呈现出先延长后缩短的趋势,在 20°时产流时间最长,表现出坡面产流时间也存在临界坡度的规律。

(2)在同一雨强下,总径流量随坡度的增大呈现出减小的趋势,这主要是受承雨面积减小的影响。

(3) 侵蚀模数随坡度的增加呈先增加后减小的趋势。雨强为 140 mm/h 时, 侵蚀模数在 15° 达到最大值, 雨强为 160 mm/h 和 190 mm/h 时, 侵蚀模数在 20° 达到最大值。研究结果反映了侵蚀临界坡度的存在, 且雨强不同其临界坡度也有所不同。在本研究条件下, 虽然雨强较大, 但侵蚀模数远远小于相似试验的侵蚀模数, 说明本研究对坡面表层土壤的处理方式可以有效的减少土壤侵蚀量, 提高坡面土壤的抗侵蚀能力。

(4) 雨强为 140 mm/h 时坡面侵蚀比较微弱, 细沟几乎未发育。雨强为 160 mm/h 时, 在 10° 和 25° 的侵蚀量较小, 细沟发育不明显; 在 15° 时细沟发育贯穿于整个降雨过程, 且后 30 min 的含沙量波动较为剧烈, 细沟发育也更剧烈; 在 20° 时细沟侵蚀主要发生在前 30 min, 该时段含沙量的波动也较大。雨强为 190 mm/h 时, 侵蚀主要发生在降雨的前 30 min, 细沟也主要在该阶段形成, 之后含沙量逐渐减小并趋于稳定。总体来看, 同坡度下雨强越大, 细沟发育越明显, 且发育时间越提前; 同雨强下坡度对侵蚀及细沟发育的影响有所不同; 雨强对侵蚀过程的影响比坡度的影响更为显著。

参考文献:

- [1] 杨伟. 典型红壤团聚体稳定性及其与坡面侵蚀的关系[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [2] Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, 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.
- [3] Morbidelli R, Saltalippi C, Flammini A, et al. Labora-

tory investigation on the role of slope on infiltration over grassy soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543(11): 542-547.

- [4] 刘松波, 庄春兰, 孟琳琳. 坡度对坡面侵蚀产沙响应的研究[J]. *中国水土保持*, 2009(3): 44-47.
- [5] 张会茹, 郑粉莉. 不同雨强下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 40-43.
- [6] 侯旭蕾. 雨强、坡度对红壤坡面水文过程的影响研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2013.
- [7] 耿晓东, 郑粉莉, 刘力. 降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J]. *泥沙研究*, 2010(6): 48-53.
- [8] Sun L Y, Fang H Y, Qi D L, et al. A review on rill erosion process and its influencing factors[J]. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(4): 389-402.
- [9] 刘俊体, 孙莉英, 张学培, 等. 两次降雨条件下不同土壤细沟侵蚀分析[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(4): 22-29.
- [10] 李桂芳, 郑粉莉, 卢嘉, 等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 147-154.
- [11] 秦伟, 左长清, 晏清洪, 等. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 124-132.
- [12] 陈俊杰, 孙莉英, 蔡崇法, 等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J]. *土壤学报*, 2013, 50(2): 281-288.
- [13] 包涵, 侯立柱, 刘江涛, 等. 室内模拟降雨条件下土壤水分入渗及再分布试验[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 70-75.
- [14] 付兴涛, 张丽萍. 坡长对红壤侵蚀影响人工降雨模拟研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23(3): 474-483.
- [15] 于晓杰, 魏勇明. 不同坡形坡面侵蚀产沙过程的影响研究[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(1): 97-100.
- [19] Bayat H, Neyshaburi M R, Mohammadi K, et al. Combination of artificial neural networks and fractal theory to predict soil water retention curve[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 92(1): 92-103.
- [20] 彭熙, 李安定, 李苇洁, 等. 不同植物篱模式下土壤物理变化及其减流减沙效应研究[J]. *土壤*, 2009, 41(1): 107-111.
- [21] 湛芸, 马云, 何丙辉. 植物篱对紫色土物理性质及养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 59-63.
- [22] 党宏忠, 党汉瑾, 李卫, 等. 黄土区两种植物篱不同部位土壤持水特征对比[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(3): 78-84.

(上接第 18 页)

- [15] 丁怀香, 宇万太. 土壤无机磷分级及生物有效性研究进展[J]. *土壤通报*, 2008, 39(3): 681-686.
- [16] 郭岳阳. 植物篱对红壤坡耕地的水土保持效应及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [17] 丁莎, 沈贤辉, 辛志坤, 等. 7 种草坪草的根系生长量及分形特征比较研究[J]. *草业与畜牧*, 2010(3): 19-22.
- [18] Chen W, Sun H, Zhang X, et al. Anomalous diffusion modeling by fractal and fractional derivatives[J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2010, 59(5): 1754-1758.