

雨滴打击与壤中流交互作用对横坡垄作坡面侵蚀过程的影响

安娟¹, 殷小琳², 李国会³, 吴希媛¹, 王立志¹

(1. 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学资源环境学院, 山东 临沂 276005;

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 3. 山东省水利科学研究院, 济南 250013)

摘要: 横坡垄作是被广泛采用的保护性耕作措施之一。垄沟低洼处的积水可诱发壤中流, 并可造成雨滴打击对土壤颗粒分离/搬运的增强与减弱作用并存。因此, 横坡垄作坡面雨滴打击与壤中流交互作用对土壤侵蚀过程的影响有别于传统坡面。基于人工模拟降雨试验, 对有/无雨滴打击作用(RI, WRI)自由入渗(FD)和壤中流(SP)2种试验处理下的产流、产沙过程进行了探究。结果表明:(1)径流量表现为SP+ WRI>SP+RI>FD+RI>FD+WRI。雨滴打击作用和壤中流对径流的贡献分别为-47.09%~54.37%和41.96%~85.62%。(2)侵蚀量表现为SP+RI>SP+WRI>FD+RI>FD+WRI。雨滴打击作用和壤中流对侵蚀量的贡献分别为12.92%~94.94%和25.83%~97.28%。(3)自由入渗试验处理下, 雨滴打击作用对产流过程影响不明显; 土壤饱和后, 雨滴打击作用和壤中流的存在均使产流、产沙过程波动幅度更大。(4)有/无雨滴打击作用, 自由入渗试验处理下的侵蚀量与产流率符合幂函数关系, 而壤中流试验处理下二者符合指数关系。研究结果有助于加深对横坡垄作坡面土壤侵蚀过程的认识, 为横坡垄作坡面水土流失综合治理提供理论支撑。

关键词: 雨滴打击; 壤中流; 侵蚀量; 横坡垄作

中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2021)01-0050-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.007

Interactive Influence of Raindrop Impact and Seepage on Soil Erosion Process Within Contour Ridge System

AN Juan¹, YIN Xiaolin², LI Guohui³, WU Xiyuan¹, Wang Lizhi¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276005; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048; 3. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013)

Abstract: Contour ridge system is an effectively agricultural practice used throughout the world. Due to microtopography, rainwater from side slopes flows into furrows and ponds in lower areas of furrows, and thus induces seepage to occur more readily. In addition, the ponding results in that raindrop impact enhances or weakens the capacity of soil detachment and transport. Therefore, the interactive influence of raindrop impact and seepage on soil erosion process is more complicated relative to traditional slope systems. Runoff and sediment yielding process were analyzed under two soil surface hydrological conditions (free drainage, FD and seepage, SP) and two soil surface conditions (with and without raindrop impact, RI and WRI) through simulated rainfalls. Results showed that: (1) Runoff ranked in the order of SP+WRI > SP+RI > FD+RI > FD+WRI. Raindrop impact and seepage contributed -47.09% ~ 54.37% and 41.96% ~ 85.62% to the runoff, respectively. (2) Soil loss decreased in the sequence of SP+RI, SP+WRI, FD+RI, and FD+WRI. Raindrop impact and seepage made contributions of 12.92% ~ 94.94% and 25.83% ~ 97.28% to soil loss, respectively. (3) Raindrop impact showed a slightly influence on runoff process under FD condition. However, raindrop impact and seepage induced the temporal variation of runoff rate and sediment concentration more fluctuated when soil was saturated. (4) With or without raindrop impact, a power function relation was found between runoff rate and soil loss under FD condition, while exponential function could describe their relation under SP condition. These findings were helpful to understand soil erosion process within contour ridge systems, and supply

收稿日期:2020-06-18

资助项目:国家自然科学基金项目(41977067)

第一作者:安娟(1982—),女,副教授,主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail:anjuan0715@126.com

通信作者:安娟(1982—),女,副教授,主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail:anjuan0715@126.com

guidance for soil and water comprehensive conservation for implementing contour ridge systems.

Keywords: raindrop impact; seepage; soil loss; contour ridge system

雨滴打击致使土壤颗粒发生剥离和搬运的过程,是坡面土壤水蚀过程的开始^[1]。同时,雨滴打击可通过增加坡面薄层水流的扰动而增强径流分散和搬运能力^[2-4]。以往研究^[5]认为,雨滴打击对坡面侵蚀量的贡献率可达78.3%以上,坡面侵蚀量的85%是通过增强坡面径流扰动作用而造成的^[6]。然而,雨滴打击对坡面侵蚀过程影响与近地表水文条件密切相关^[7-8]。壤中流一般是指发生于非均质土壤或层理土壤中相对不透水界面上的超渗径流,主要发生于坡脚处^[9]。壤中流的存在会改变降雨—径流耦合关系^[10],可导致土壤侵蚀机制由土壤颗粒分散受限转变为径流搬运受限^[11]。壤中流的形成可显著增加径流和侵蚀量^[12-13]。然而,以往针对雨滴打击、壤中流对坡面侵蚀过程的研究主要集中在平坡坡面,且未涉及二者交互作用。

横坡垄作是被广泛采用的保护性耕作措施之一^[14],但该措施下壤中流的发生有别于坡脚和不透水面处壤中流的形成机制。垄向坡度的存在,致使雨水在位置较低的垄沟内发生汇集,形成垄沟与垄面土壤的水势梯度。当垄面土壤水分饱和后,水势梯度差促使积聚雨水从垄面溢出,形成类似于入渗流(seepage)^[15]的壤中流。此外,积水可增加垄沟内雨水深度,这在一定程度上可保护径流层以下的土壤颗粒免于雨滴打击的破坏^[3];同时积水的发生可削减垄面径流层的深度,进而增强雨滴打击对径流的扰动。可见,横坡垄作措施下,雨滴打击与壤中流交互作用下的坡面侵蚀过程较传统耕作坡面(平坡、顺垄)更为复杂。因此,本文以横坡垄作坡面为研究对象,采用室内模拟降雨试验,设计2种地表条件(有/无纱网覆盖)和2种近地表土壤水文条件(自由入渗、壤中流)的试验处理,分析雨滴打击与壤中流共同作用下横垄坡面水蚀过程。研究结果有助于深入理解横坡垄作坡面土壤侵蚀机理,为横坡垄作措施的合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

基于野外调查与前期室内模拟降雨成果,本研究设计自由入渗(FD)和壤中流(SP)2种近地表土壤水文条件,且每个水文条件下包括无纱网(有雨滴打击作用,RI)和纱网覆盖(无雨滴打击作用, WRI)2种地表处理。纱网覆盖,即在试验土槽10 cm上方架设孔径约1 mm×1 mm尼龙纱网。基于色斑法测定有/无纱网覆盖试验处理下的雨滴直径,认为纱网覆盖能消除99.6%的雨滴动能^[16]。结合北方土石山

区长期降雨观测数据,设计降雨雨强为30,60,90 mm/h。依据花生、地瓜地横坡垄作种植结构,设置垄宽80 cm、垄高12 cm、垄向坡度6°和坡面坡度10°的横坡垄作系统。共设计24场降雨试验,即各试验处理重复2次。

1.2 试验材料

模拟降雨试验于2016年9月在山东省水土保持和环境保育重点实验室降雨大厅内进行。采用的降雨试验装置为安装Spraying system Veejet 80100扇形喷头的槽式模拟降雨系统,有效降雨面积为2.2 m×12.0 m。通过调节喷头经过喷水窗口的频率控制雨强(10~200 mm/h),降雨均匀度>89%。降雨高度16 m,可满足所有雨滴达到终点速度。采用可同时调节垄向与坡面坡度的钢槽(图1)模拟横坡垄作坡面,土槽长×宽×深为160 cm×160 cm×40 cm。通过调节螺旋(图1位置a),获取0~15°的垄向坡度。利用安装在支撑腿上的螺旋(图1位置b)调节范围为0~25°的坡面坡度。出口(图1位置g)处用于收集降雨过程中的径流泥沙样。

试验所用土壤为沂蒙山区丘陵地带广泛分布的褐土,土壤采自0—20 cm的耕作层。供试土壤颗粒组成(美国农业部土壤质地分级制)为:黏粒(<2 μm)质量含量为1.44%,粉粒(2~50 μm)含量为84.59%,砂粒(50~2 000 μm)含量为13.97%。土壤有机质含量为25.6 g/kg(重铬酸钾氧化—外加热法),pH为7.3(水浸提法,水土比2.5:1)。



注:a为垄向坡度调节螺旋;b为坡面坡度调节螺旋;c为供水管;d为垄沟内调节水位的排水管;f为上坡位置产流产沙收集口;g为垄面下坡位置产流产沙收集口;h为垄面最低处。

图1 试验土槽

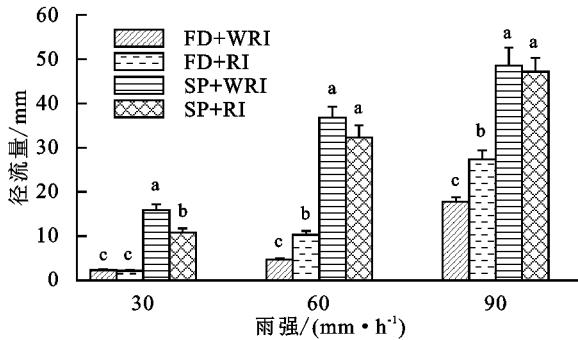
1.3 试验步骤

1.3.1 填装土槽 试验用土风干后,按照分层法填装土槽以保证填土的均匀性。土槽底部按照1.5 g/cm³的容重分层填装,每层5 cm,共填装20 cm的褐土以模拟犁底层。犁底层上以1.15 g/cm³的容重修建垄宽均为80 cm、垄高为12 cm的土垄2根,且保证上侧垄面在土槽平面上的投影为53.3 cm,下侧垄面为26.7 cm。土槽填装完毕,将尼龙纱网(1 mm×

1 mm) 覆盖在土槽之上(减弱雨滴打击对表层土壤的影响), 进行雨强 10 mm/h 的前期预降雨。此预降雨过程可保证下垫面前期含水量保持一致, 且可减小下垫面土壤颗粒空间分布的差异性。

1.3.2 壤中流水文条件的实现 预降雨 24 h 后, 利用 2 根塑料管(图 1 位置 c)向土槽垄沟内供水, 以此实现壤中流水文条件。基于前期试验成果, 供水流量确定为 3 L/min。此流量可达到土壤入渗需求, 且可满足垄沟内水面始终低于垄面最低点(图 1 位置 h)1 cm 的要求。为保证供水平缓, 2 根塑料管管壁上均钻有 8 个孔径均为 1 cm 的孔, 且用纱布包裹。为防止漫流发生, 将 2 根塑料管(图 1 位置 d)固定在土槽底部, 用于调节垄沟内水面。供水过程中, 随时量测垄沟内水面与垄面最低点的高度差, 以此调整塑料水管(图 1 位置 d)的高度。试验土槽出口水匀速流出, 即认为达到壤中流条件。满足壤中流水文条件后, 关闭水管(图 1 位置 d), 并立即停止向垄沟内供水。自由入渗试验处理下, 不向垄沟内供水。

1.3.3 模拟降雨过程 满足近地表土壤水文条件后, 按照设计的降雨雨强进行模拟降雨, 降雨时间设定为 45 min。降雨过程中, 收集样品的间隔为 2 min。降雨过程中随时观察坡面侵蚀形态变化, 细沟发生后每 30 s 收集 1 次径流泥沙样。降雨结束后, 将收集的径流泥沙样立即称重, 并在 105 °C 的干燥箱中干燥 24 h。



注: 图中不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著; FD+WRI 为自由入渗试验处理下无雨滴打击作用; FD+RI 为自由入渗试验处理下有雨滴打击作用; SP+WRI 为壤中流试验处理下无雨滴打击作用; SP+RI 为壤中流试验处理下有雨滴打击作用。下同。

图 2 有、无雨滴打击作用不同近地表土壤水文条件下的径流量和侵蚀量

雨滴打击对径流的影响与近地表土壤水文条件相关。由图 3 可知, 自由入渗试验处理下, 雨滴打击促进了径流的产生, 贡献率为 $-5.05\% \sim 54.37\%$ 。壤中流试验处理下, 雨滴打击抑制了径流的产生, 贡献率为 $-2.91\% \sim -47.09\%$ 。自由入渗试验处理下雨滴打击对径流的影响更明显。这可能是因为有雨滴打击作用壤中流试验处理下, 细沟以及横垄垮塌的发生导致一部分雨水转化为入渗。然而, 无论有/无雨滴打击作用, 壤中流的形成均增加了径流量。有雨滴打击作用下, 壤中流对径流量的贡献率为 $41.96\% \sim 79.87\%$, 而无雨滴打击作用下相应的贡献率为

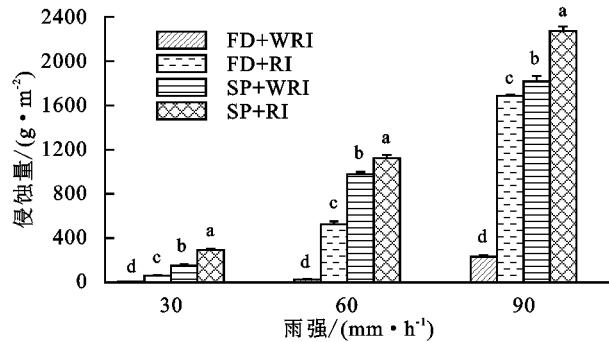
1.4 数据分析

有、无纱网覆盖间径流量和侵蚀量的差异可分别作为雨滴打击作用对坡面径流和侵蚀的贡献。相同地表条件下, 自由入渗与壤中流试验处理间径流量和侵蚀量的差异可分别作为壤中流对坡面径流和侵蚀的贡献。利用 SPSS 18.0 软件下的方差分析(ANOVA)对有/无雨滴打击作用下近地表土壤水文条件间的径流量、侵蚀量进行显著性检验。基于最小显著差法(LSD)开展多重比较, 并在 0.05 水平上达到显著。

2 结果与分析

2.1 雨滴打击与壤中流交互作用对横坡垄作坡面径流量和侵蚀量的影响

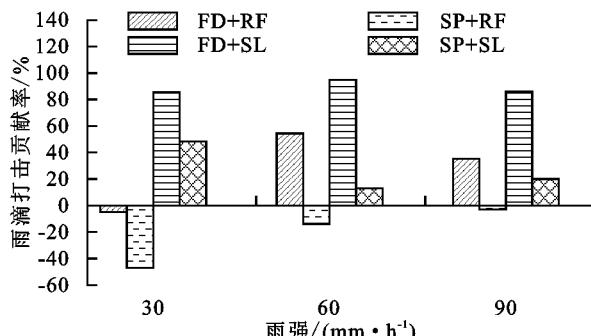
2.1.1 雨滴打击与壤中流交互作用对横坡垄作坡面径流量的影响 自由入渗试验处理下, 横垄坡面侵蚀形态以细沟间侵蚀为主, 但有雨滴打击作用下坡面出现跌坎。壤中流试验处理下, 随降雨发生坡面逐渐出现细沟, 甚至发生横垄垮塌, 且有雨滴打击作用下细沟发育程度更剧烈。可见, 雨滴打击与壤中流作用造成坡面侵蚀形态发生明显改变。自由入渗试验处理下的径流量为 $2.29 \sim 27.36$ mm, 而壤中流试验处理下的径流量则为 $10.83 \sim 48.51$ mm(图 2)。不同试验处理下的径流量表现为 $SP+WRI > SP+RI > FD+RI > FD+WRI$ 。表明雨滴打击与壤中流均对径流的发生具有重要作用, 但二者的作用程度不同。



63.43% \sim 85.62%。这是由于:(1) 壤中流形成过程中存在的壤中流力, 使土壤中部分水转化成为地表径流;(2) 壤中流试验处理下垄面土壤水分几乎达到饱和, 减少了水分下渗;(3) 壤中流水文条件基于供水实现, 虽然降雨过程关闭供水系统, 但仍存部分供水以壤中流的形式存在。以上结果说明, 壤中流对横坡垄作坡面径流量的影响较雨滴打击更明显。这与以往在平坡坡面开展的研究^[17]结果一致。

2.1.2 雨滴打击与壤中流交互作用对横坡垄作坡面侵蚀量的影响 与雨滴打击/壤中流对坡面径流量影响相比, 雨滴打击/壤中流对横坡坡面侵蚀量的作用

更为明显。自由入渗试验处理下侵蚀量为 $8.75\sim1685.91\text{ g/m}^2$,而壤中流试验处理下侵蚀量则为 $151.43\sim2273.23\text{ g/m}^2$ 。不同试验处理下的侵蚀量表现为 $\text{SP+RI}>\text{SP+WRI}>\text{FD+RI}>\text{FD+WRI}$ (图2)。可见,雨滴打击和壤中流均促进了侵蚀的发生。自由入渗试验处理下,雨滴打击对侵蚀量的贡献为 $85.74\%\sim94.94\%$,而壤中流试验处理下相应的贡献率为 $12.92\%\sim48.38\%$ (图3)。这是因为雨滴打击促进了消散与机械振荡作用对团聚体的破碎^[18],进而为径流搬运提供了丰富的物质来源,且雨滴打击通过增加径流流速、径流剪切力等可增强径流搬运能力^[4,19]。本研究表明,横垄坡面侵蚀过程中雨滴打击对土壤颗粒的分散和搬运具有重要作用,且进一步反映出雨滴侵蚀在横垄坡面侵蚀过程中占据主导



注:FD为自由入渗;SP为壤中流;RF为径流;SL为侵蚀量;RI为有雨滴打击作用;WRI为无雨滴打击作用。

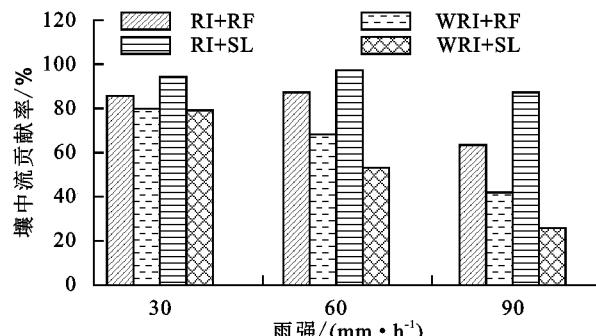
图3 雨滴打击作用和壤中流对径流量和侵蚀量的贡献

2.2 雨滴打击与壤中流交互作用对横坡垄作坡面产流产沙过程的影响

2.2.1 雨滴打击与壤中流交互作用对横坡垄作坡面产流过程的影响 有/无雨滴打击作用,自由入渗试验处理下,产流率随降雨进行均呈现逐渐增加后趋于平稳的趋势(图4)。这主要是因为漫流的发生,造成部分垄沟内汇集的雨水逐渐转化为地表径流。但是,降雨过程中雨滴打击作用下的产流率始终大于无雨滴打击作用。说明自由入渗试验处理下,雨滴打击作用虽增大了产流速率,但未改变产流过程。壤中流试验处理雨强 30 mm/h 下,有雨滴打击作用下产流率呈急剧增加到峰值后急剧降低最终趋于平稳趋势,而无雨滴打击作用下产流率呈现逐渐增加后平稳趋势。有/无雨滴打击作用雨强 $60,90\text{ mm/h}$ 下,产流率呈单峰或双峰动态变化,且无雨滴打击作用下产流率的峰值变化更为急剧。这是因为随细沟发生垄沟内的雨水逐渐进入沟道,且横垄垮塌发生后垄沟内的雨水倾斜而出,极大增加了径流流量,导致产流达到极值;后随细沟的不断发育,可致使径流再次达到极值。可见,壤中流试验处理下雨滴打击作用弱化了产流率的急剧变化过程。

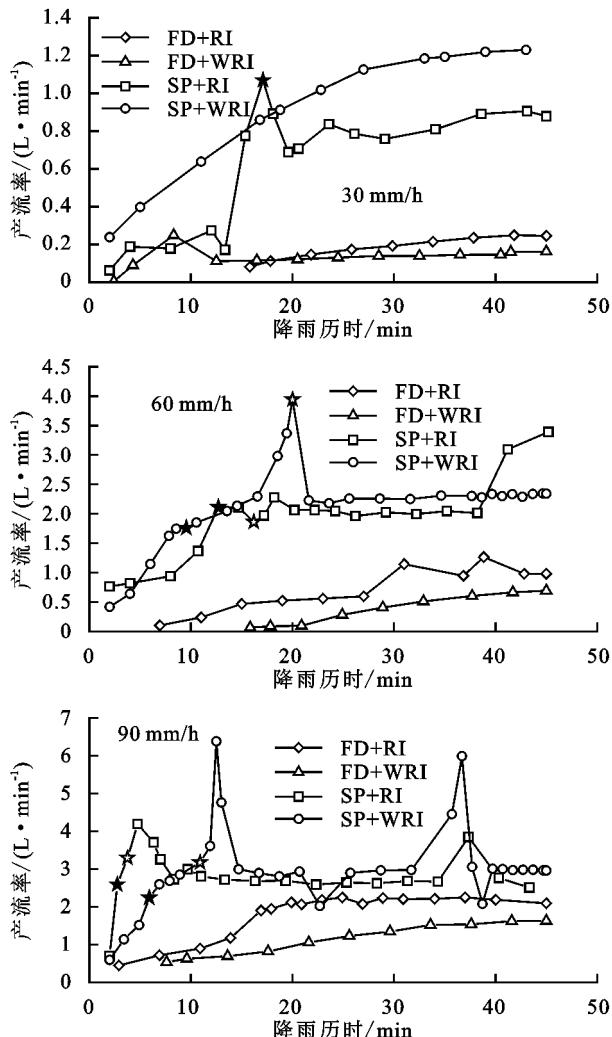
进一步分析发现,无论是否有雨滴打击作用,壤

作用。壤中流对侵蚀量的影响与地表条件有关。雨滴打击作用下,壤中流对侵蚀量的贡献为 $25.83\%\sim79.08\%$,而无雨滴打击作用下相应的贡献率为 $87.22\%\sim97.28\%$ 。这是因为:(1)壤中流的存在可大大削弱土壤颗粒间的黏结力和团聚体抗张强度,从而增强径流对土壤颗粒的分散能力^[9,20];(2)壤中流本身具有侵蚀力,可导致细颗粒通过粗颗粒之间的孔隙流失,从而致使土壤抗蚀性降低;(3)壤中流试验处理下漫流发生时间较自由入渗处理短暂,而漫流具有较高水头且剪切力较强,可剥蚀垄面土壤,进而导致横垄坡面侵蚀速率增大。消除雨滴打击后,壤中流的存在致使大部分降雨均转化为径流(图2),进而增强了径流搬运能力。以上研究结果说明,壤中流对侵蚀量的影响较雨滴打击作用更明显。



中流试验处理下的产流率波动变化明显有别于自由入渗试验处理下。降雨过程中壤中流试验处理下的产流率始终高于自由入渗试验处理下。说明壤中流的形成改变了产流过程,致使产流率变动幅度更大。
2.2.2 雨滴打击与壤中流交互作用对横坡垄作坡面产流产沙过程的影响 由图5可知,有/无雨滴打击作用,自由入渗试验处理下泥沙浓度随降雨历时呈现逐渐增加后略微降低最终达到稳定状态。有雨滴打击作用下的泥沙浓度始终高于无雨滴打击作用下。可见,自由入渗试验处理下侵蚀过程中土壤颗粒的分离过程受到限制。壤中流试验处理雨强 30 mm/h 下,有雨滴打击作用下泥沙浓度随降雨进行先不断增加后随横垄垮塌趋于平稳;无雨滴打击作用下,泥沙浓度在降雨过程中逐渐增加到极值后急剧降低并最终趋于平稳。壤中流试验处理,雨强 $60,90\text{ mm/h}$ 有雨滴打击作用下随细沟和横垄垮塌发生,泥沙浓度动态变化为单峰趋势,而无雨滴打击作用下则呈双峰变化。这是因为雨滴打击作用下,横坡垄作坡面细沟发育程度剧烈,3 min之内可发生横垄垮塌,进而使垄沟内沉积泥沙被径流大量搬运,从而使泥沙浓度达到峰值。无雨滴打击作用下,发育平缓的细沟逐渐诱发横垄垮塌发生,进而导致垄沟内剩余沉积泥沙随垄积聚雨水的倾斜而

被大量搬运,造成泥沙浓度再次达到峰值。说明横垄垮塌发生前,坡面侵蚀过程以径流搬运受限为主;横垄垮塌后,以土壤颗粒分离过程受限为主。



注:★细沟发生点;☆横垄垮塌发生点。下同。

图 4 有、无雨滴打击作用不同近地表土壤水文条件下的产流过程

进一步分析发现,壤中流试验处理下的泥沙浓度动态变化幅度高于自由入渗试验处理。雨强 30 mm/h 有/无雨滴打击作用下,降雨过程中壤中流试验处理下的泥沙浓度始终高于自由入渗试验处理。雨强 60, 90 mm/h 下,无雨滴打击作用壤中流试验处理的泥沙浓度高于自由入渗试验处理;雨滴打击作用下壤中流试验处理下泥沙浓度在横垄垮塌前后的几分钟明显大于自由入渗试验处理,但其他降雨时段内则表现为相反趋势。这是因为壤中流试验处理下,横垄垮塌的发生导致沉积在垄沟内的泥沙演变为“侵蚀源”,且垄沟内积聚的雨水倾斜而出极大增加了径流的搬运能力。此外,沉积泥沙的搬运和积聚雨水的流出导致细沟发育的加强(沟壁的崩塌和沟底的加深),从而进一步增大了泥沙浓度。但横垄垮塌发生后,侵蚀来源和径流的急剧减少导致壤中流试验处理下泥沙浓度急剧下降。以

上结果表明,自由入渗试验处理下雨滴打击作用未改变产沙过程。但土壤饱和后,雨滴打击作用和壤中流的存在均致使产沙过程变化更为急剧。

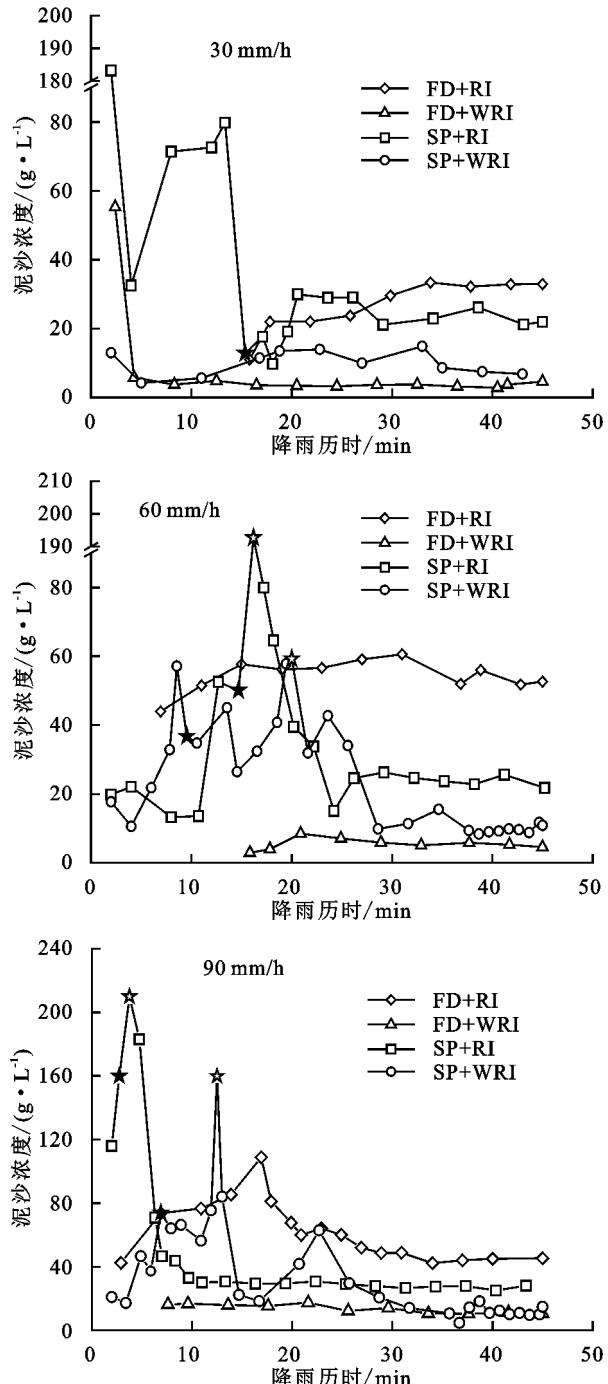


图 5 有、无雨滴打击作用不同近地表土壤水文条件下的产沙过程

2.3 雨滴打击与壤中流交互作用对水沙关系的影响

坡面水沙关系可反映出坡面土壤侵蚀输沙过程的作用机制。由图 6 可知,有/无雨滴打击作用下,侵蚀量均随产流率的增大而呈现逐渐增加的趋势。有雨滴打击作用下的侵蚀量增加幅度更大,尤其在自由入渗试验处理下。这主要是由于雨滴打击作用使土壤表面形成一层致密的结皮层,消减了下渗,进而增大了产流速率。消除雨滴打击后,坡面侵蚀泥沙来源

的减少,削减了径流搬运的物质来源。通过函数关系拟合发现,有、无雨滴打击作用,侵蚀量与产流率间的关系符合同一函数关系。自由入渗试验处理下,侵蚀量与产流率间隶属于幂函数关系;壤中流试验处理下,二者符合指数关系。可见,雨滴打击作用未改变水沙关系,但壤中流的存在改变了二者的关系。进一步分析发现,当产流率<90 mm/h时,侵蚀量随产流率的增加幅度表现为 $FD+RI > SP+RI > SP+WRI > FD+WRI$;产流率>90 mm/h时,则为 $SP+RI > SP+WRI > FD+RI > FD+WRI$ 。无雨滴打击作用壤中流试验处理下侵蚀量随产流率的增加幅度大于自由入渗试验处理下,但有雨滴作用下壤中流对水沙关系的影响与产流率大小有关。

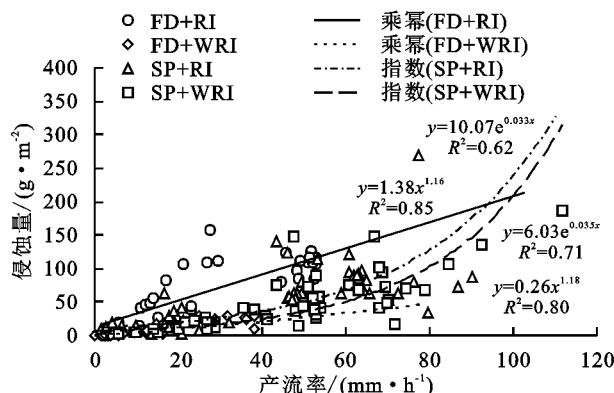


图6 有、无雨滴打击作用不同近地表土壤水文条件下的水沙关系

3 结论

(1) 径流量表现为 $SP+WRI > SP+RI > FD+RI > FD+WRI$ 。雨滴打击作用对径流的贡献率为47.09%~54.37%,而壤中流的贡献率为41.96%~85.62%。

(2) 侵蚀量表现为 $SP+RI > SP+WRI > FD+RI > FD+WRI$ 。雨滴打击对侵蚀量的贡献为12.92%~94.94%,壤中流的贡献为25.83%~97.28%。

(3) 自由入渗试验处理下,雨滴打击对产流过程影响不明显。土壤饱和后,雨滴打击作用和壤中流的存在均致使产沙过程更为急剧,这主要是细沟和横垄垮塌发育的加强所导致。

(4) 有/无雨滴打击作用,自由入渗试验处理下,侵蚀量与产流率之间符合幂函数关系,而壤中流试验处理下二者符合指数函数关系。产流率<90 mm/h时,侵蚀量随产流率的增加幅度表现为 $FD+RI > SP+RI > SP+WRI > FD+WRI$;产流率>90 mm/h时,则为 $SP+RI > SP+WRI > FD+RI > FD+WRI$ 。

雨滴打击作用和壤中流的存在均对横坡垄作坡面的产流产沙过程具有重要影响,且壤中流的作用体现的更为明显。可见,增加垄沟间距、加强排水、增大垄面高度,进而降低壤中流的发生是横坡垄作措施侵

蚀防控的重要举措。然而,降雨过程中壤中流量存在变异,这可明显影响土壤颗粒分离和径流的搬运能力。本研究仅研究了单一壤中流量对横坡垄作坡面侵蚀过程的影响。因此,探究不同梯度壤中流量对横坡垄作坡面产沙过程的影响应给予重视。

参考文献:

- [1] Ellison W D. Soil erosion study-part II: Soil detachment hazard by raindrop splash [J]. Agricultural Engineering, 1947, 28(5): 197-201.
- [2] Dunne T, Zhang W. Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff [J]. Water Resource Research, 1991, 27(9): 2271-2285.
- [3] Gao B, Walter M T, Steenhuis T S, et al. Investigating raindrop effects on the transport of sediment and non-sorbed chemicals from soil to surface runoff [J]. Journal of Hydrology, 2005, 308(1/4): 313-320.
- [4] An J, Zheng F L, Lu J, et al. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions [J]. Soil Science, 2012, 177(8): 517-526.
- [5] Lu J, Zheng F L, Li G F, et al. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China [J]. Soil & Tillage Research, 2016, 161: 79-85.
- [6] Guy B T, Dickinson W T, Rudra R P. The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1987, 30(5): 1378-1386.
- [7] An J, Zheng F L, Romkens M J M, et al. The role of soil surface water regimes and raindrop impact on hill-slope soil erosion and nutrient losses [J]. Natural Hazards, 2013, 67: 411-430.
- [8] Vaezi A R, Ahmadi M, Cerdà A. Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls [J]. Science of the Total Environment, 2017, 583: 382-392.
- [9] Gabbard D S, Huang C, Norton L D, et al. Landscape position, surface hydraulic gradients and erosion processes [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23: 83-93.
- [10] 李金中,裴铁,牛丽华,等.森林流域坡地壤中流模拟研究[J].林业科学,1999,35(4):2-8.
- [11] Zheng F L, Huang C, Darrell N L. Vertical hydraulic gradient and run-on water and sediment effects on erosion processes and sediment regimes [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 4-11.
- [12] Zheng F L, Huang C, Norton L D. Effects of near-surface hydraulic gradients on nitrate and phosphorus losses in surface runoff [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33: 2174-2182.

(下转第64页)

- [12] 汤珊珊,李占斌,任宗萍,等.覆沙坡面产流产沙过程试验研究[J].水土保持学报,2015,29(5):25-28.
- [13] Xu G C, Tang S S, Lu K X, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on sand-covered slopes in a region subject to wind-water erosion [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3):2523-2530.
- [14] 谢林好,白玉洁,张风宝,等.沙层厚度和粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响[J].土壤学报,2017,54(1):60-72.
- [15] 李占斌,李社新,任宗萍,等.冻融作用对坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):56-60.
- [16] 任宗萍,苏远逸,李鹏,等.覆沙坡面径流冲刷试验研究[J].水土保持学报,2018,32(3):29-35,41.
- [17] 张乐涛,高照良,田红卫.工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J].农业工程学报,2013,29(24):94-102.
- [18] Zhang L T, Gao Z L, Yang S W, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered landforms derived from expressway construction: A case study of typical steep spoil heap [J]. Catena, 2015, 128: 108-121.
- [19] 张光辉,刘宝元,张科利.坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J].土壤学报,2002,39(6):882-886.
- [20] 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.
- [21] Wang T, Li P, Liu Y, et al. Experimental investigation of freeze-thaw meltwater compound erosion and runoff energy consumption on loessal slopes [J]. Catena, 2020, 185:e104310.
- [22] 罩超,何超,郑粉莉,等.黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究[J].农业工程学报,2018,34(6):160-167.
- [23] 汤珊珊,李占斌,鲁克新,等.覆沙坡面水动力学参数与径流产沙的关系[J].农业工程学报,2017,33(20):136-143.
- [24] 苏远逸,李鹏,李占斌,等.坡面植被格局对坡沟系统能
量调控及水沙响应关系的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):32-39.
- [25] Dagesse D F. Freezing-induced bulk soil volume changes [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2010, 90(3): 389-401.
- [26] Sahin U, Anapali O. Short communication: The effect of freeze-thaw cycles on soil aggregate stability in different salinity and sodicity conditions [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2007, 5(3):431-434.
- [27] Cheng Y T, Li P, Xu G C, et al. The effect of soil water content and erodibility on losses of available nitrogen and phosphorus in simulated freeze-thaw conditions [J]. Catena, 2018, 166:21-33.
- [28] 王随继.黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估[J].水土保持通报,2004,24(6):1-5.
- [29] 王飞,范昊明,郭成久,等.我国两大冻融侵蚀区气候环境变化对比分析[J].生态环境,2008,17(1):173-177.
- [30] 张瑞芳,王瑄,范昊明,等.我国冻融区划分与分区侵蚀特征研究[J].中国水土保持科学,2009,7(2):24-28.
- [31] 张霞,李鹏,李占斌,等.不同植被格局下凸型坡径流流速时空变化及产沙研究[J].水土保持学报,2018,32(6):16-21.
- [32] 张洋,张辉,李占斌,等.不同降雨强度下黄土区冻土坡面产流产沙过程及水沙关系[J].农业工程学报,2018,34(11):136-142.
- [33] 汤珊珊,李鹏,任宗萍,等.模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究[J].土壤学报,2016,53(1):39-47.
- [34] Kimaro D N, Poesen J, Msanya B M, et al. Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Interrill and rill erosion [J]. Catena, 2008, 75:38-44.
- [35] Su Y Y, Li P, Ren Z P, et al. Slope erosion and hydraulics during thawing of the sand-covered Loess plateau [J]. Water, 2020, 12:e2461.

(上接第 55 页)

- [13] 杨超,苏正安,马菁,等.不同近地表水文条件下矿山弃土对土壤细沟可蚀性的影响:以攀枝花盐边县龙蟠矿山为例[J].水土保持学报,2016,30(6):67-72.
- [14] Quinton J N, Catt J A. The effects of minimal tillage and contour cultivation on surface runoff, soil loss and crop yield in the long-term Woburn Erosion Reference Experiment on sandy soil at Woburn, England [J]. Soil Use and Management, 2004, 20(3):343-349.
- [15] Huang C H, Laflen J M. Seepage and soil erosion for a clay loam soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60:408-416.
- [16] 郑粉莉,唐克丽,张成娥.降雨动能对坡耕地细沟侵蚀影响的研究[J].人民黄河,1995,17(7):22-24.
- [17] Liu G, Zheng F L, Lu J, et al. Interactive effects of raindrop impact and groundwater seepage on soil erosion [J]. Journal of Hydrology, 2019, 578:e124066.
- [18] Xiao H, Liu G, Zhang Q, et al. Quantifying contributions of slaking and mechanical breakdown of soil aggregates to splash erosion for different soils from the Loess Plateau of China [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 178:150-158.
- [19] Zhang X C, Wang Z L. Interrill soil erosion processes on steep slopes [J]. Journal of Hydrology, 2017, 48:652-664.
- [20] Munkholm L J, Kay B D. Effect of water regime on aggregate-tensile strength, rupture energy, and friability [J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(3):702-709.