

横坡垄作下土壤湿润速率对褐土坡面侵蚀特征的影响

安娟¹ 刘前进^{1,2} 吴希媛^{1,2}

(1. 临沂大学山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂 276005; 2. 临沂大学水土保持与环境保育研究所, 临沂 276005)

摘要: 不同土壤湿润速率和侵蚀类型下团聚体破碎存在较大差异,进而诱发坡面侵蚀特征变化。横坡垄作特有的侵蚀过程可能改变土壤湿润速率对坡面侵蚀特征的影响效应。以褐土横垄为研究对象,基于室内模拟降雨试验,研究5个土壤湿润速率下(10、20、30、60、90 mm/h)不同侵蚀阶段的产流产沙和团聚体迁移规律。结果表明,细沟间阶段径流量随土壤湿润速率的增大而增加,而细沟阶段不同土壤湿润速率间的径流量无显著差异。2个阶段内,侵蚀量均随土壤湿润速率的增大而增加,与土壤湿润速率10 mm/h相比,20、30、60、90 mm/h速率下的侵蚀量分别显著增加25.16%~115.51%、95.02%~144.34%、151.03%~164.49%、249.42%~398.91%。细沟间阶段,土壤湿润速率的变化仅改变了产沙过程,而细沟阶段产流产沙过程均随土壤湿润速率发生了改变。主要迁移粒级—微团聚体流失所增加的细沟间和细沟侵蚀阶段分别主要来自2~5 mm和0.25~0.5 mm团聚体的破碎,而相应控制这2个粒级破碎的关键土壤湿润速率分别为20 mm/h和10 mm/h。不同阶段下迁移团聚体平均重量直径由大到小依次为细沟阶段、湿润处理后、细沟间阶段。

关键词: 土壤湿润速率; 横坡垄作; 产流产沙; 团聚体迁移; 褐土

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0101-07

Effect of Soil Wetting Rate on Hillslope Erosion Characteristics of Cinnamon Soil under Contour Ridge Cultivation

An Juan¹ Liu Qianjin^{1,2} Wu Xiyuan^{1,2}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, Linyi University, Linyi 276005, China

2. Institute of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, Linyi University, Linyi 276005, China)

Abstract: The difference in collapse of soil aggregate among soil wetting rates and erosion types would induce variation of hillslope erosion processes. The unique erosion characteristic of a contour ridge system may change effect of soil wetting rate on erosion processes. Simulated rainfall experiment was conducted to evaluate the characteristic of runoff, sediment yielding, and soil aggregate transport under five soil wetting rates (10 mm/h, 20 mm/h, 30 mm/h, 60 mm/h and 90 mm/h) for cinnamon soil in a contour ridge system at different stages of erosion. The result showed that runoff was increased with the increase of soil wetting rate during inter-rill stage, but no significant difference was observed among soil wetting rates at rill stage. For sediment yield, it was enhanced gradually when soil wetting rate was increasingly shifted from 10 mm/h to 90 mm/h during both inter-rill and rill stages. Compared with 10 mm/h soil wetting rate, sediment yield from 20 mm/h, 30 mm/h, 60 mm/h and 90 mm/h were significantly increased by 25.16%~115.51%, 95.02%~144.34%, 151.03%~164.49% and 249.42%~398.91%, respectively. The variation of soil wetting rate only changed process of runoff yielding at inter-rill stage, while it altered runoff and sediment yielding processes at rill stage. The transport of micro-aggregate, which was the chief lost size, was mainly from breakdown of 2~5 mm and 0.25~0.5 mm at inter-rill and rill stages, and critical wetting rate thresholds of 20 mm/h and 10 mm/h controlled the collapse of

2~5 mm and 0.25~0.5 mm size, respectively. The mean weight diameter for the transport of soil aggregate at different stages from large to small was in order of rill stage, undergoing wetting stage and inter-rill stage.

Key words: soil wetting rate; contour ridge cultivation; runoff and sediment yielding; transport of soil aggregate; cinnamon soil

引言

土壤湿润速率决定了团聚体消散作用程度的强弱^[1-2]。土壤湿润速率越大,消散导致的团聚体破坏作用越大。研究发现,快速土壤湿润速率下水稳性团聚体的破碎程度是慢速下的2倍^[3]。团聚体破坏强度和破坏后的颗粒大小直接关系到土壤分离和径流的搬运能力^[4-5],进而影响坡面产流产沙过程,并引起团聚体迁移特征的变化。然而,土壤湿润速率对坡面侵蚀过程和团聚体迁移的影响与垄作方式和侵蚀类型密切相关^[6-7]。

横坡垄作能汇集雨水、增加入渗,成为被广泛采用的保护性耕作措施之一^[8]。但因垄向微坡度的存在,雨水会在位置较低的垄沟内汇集,进而发生漫流。漫流水流不断剥蚀垄面土体颗粒,导致细沟的生成,最终诱发横垄垮塌^[9]。在我国北方地区,横垄垄沟垮塌现象比较普遍^[10]。不同侵蚀类型下(面蚀和沟蚀)迁移团聚体的粒度分布存在明显差异^[11]。可见,横坡垄作系统不同侵蚀类型(细沟间和横垄垮塌)团聚体的迁移可能存在较大差异,坡面侵蚀特征也会有所不同。

目前关于不同土壤湿润速率下褐土坡面侵蚀特征的研究较少,尤其是横坡垄作措施下。因此,本文基于人工模拟降雨,分析横坡坡面5个土壤湿润速率下不同侵蚀阶段(细沟间和细沟侵蚀阶段)的产流产沙和团聚体迁移规律,阐明土壤湿润速率对褐土坡面侵蚀特征的影响。研究结果有助于深入理解褐土坡面侵蚀机理,并可为横坡垄作的合理应用提供理论指导。

表1 试验用土的基本理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties of soil used in experiment

参数	粉粒含量 (<0.002 mm)/ %	粘粒含量 ($0.002 \sim 0.05$ mm)/ %	砂粒含量 ($0.05 \sim 2$ mm)/ %	pH 值	有机质 质量比/ ($g \cdot kg^{-1}$)	干筛团聚体粒径质量分数/%				
						2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
数值	1.44	84.59	13.97	7.3	25.6	57.02	10.30	8.41	9.17	15.10

1.2 试验设计

依据快、中和慢速湿润,设计5个土壤湿润速率:10、20、30、60、90 mm/h。其中,快速湿润模拟的是突降暴雨或灌溉情形,干燥土壤在快速湿润条件下由于“气爆”而产生破坏;慢速湿润与野外连阴雨

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

降雨试验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。试验装置为安装 Veejet 80100 喷头的槽式模拟降雨系统。该系统通过调节喷头经过喷水窗口的频率控制降雨强度^[12],有效降雨面积为 $2.2 \text{ m} \times 12 \text{ m}$,降雨均匀度在 89% 以上。试验使用垄向与坡面坡度可同时调节的土槽(图1)。该土槽主体由通过铰链连接的2个分体土槽构成,每个分体土槽长 160 cm、宽 80 cm。通过调节螺旋1实现土槽外侧的上下移动,从而获取不同的垄向坡度,调节范围为 $0^\circ \sim 15^\circ$ 。坡面坡度通过安装在支撑腿上的螺旋2进行调节,范围为 $0^\circ \sim 25^\circ$ 。出口处4用于收集径流泥沙样。



图1 试验土槽

Fig.1 Experimental plot

1. 垄向坡度调节螺旋 2. 坡面坡度调节螺旋 3. 上坡位置产流产沙收集口 4. 垄面下坡位置产流产沙收集口

试验采用的土壤为鲁中南山地丘陵区腹地沂蒙山区丘陵地带广泛分布的褐土,取自玉米地的耕作层,基本理化性质如表1所示。

情况相似,土壤团聚体由毛管湿润等作用造成破坏。试验在坡面 1.6 m、坡度 10° 下的横坡垄作系统开展。基于野外实际调查进行垄作结构参数设计,其中垄向坡度为 6° ,垄高为 12 cm,垄宽为 80 cm。土壤湿润速率条件满足后,进行 60 mm/h 降雨强度的

次侵蚀性降雨,该降雨强度是参考当地气候数据和侵蚀性降雨标准选择设计的^[13]。

1.3 试验步骤

试验用土风干后未过筛,以保持原有的土壤结构。土槽底部按照 1.5 g/cm^3 的容重每 5 cm 一层填充褐土,装土厚度为 20 cm。为防止土层间出现分层现象,填充上层土之前用 1 cm 厚的木板抓毛下层土壤表面。之后,按照填土之前在土槽四壁勾画的垄作轮廓线,修建垄高为 12 cm,垄宽为 80 cm 的土垄 2 根,装土容重为 1.15 g/cm^3 。其中,垄上侧在土槽平面上的投影线长度约为下侧的 2 倍,即 80 cm 的垄宽,上侧垄面在土槽平面上的投影为 53.3 cm,下侧垄面则为 26.7 cm。

填充土槽完毕后,通过降雨机控制相应的降雨强度满足土壤湿润速率设计。湿润处理过程中,将尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的尼龙纱网覆盖在土槽上以消除雨滴打击力的影响。待土壤饱和后,沿坡面在 3 个不同位置采集土壤样品。然后,将填充土槽的坡面坡度调整为 10° ,并按照 60 mm/h 降雨强度进行人工降雨。待出口出现持续水流后,每隔 2 min 收集一次径流样。降雨过程中时刻观察坡面的变化,待细沟发生后,收集样品的间隔为 30 s。降雨结束后,收集的样品立即称量。将采集的土壤样和径流样湿筛过 5.0、2.0、1.0、0.5、0.25 mm 的土壤筛后,干燥称量得到每个粒级团聚体的质量。

2 结果与分析

2.1 细沟间侵蚀阶段不同土壤湿润速率下的产流产沙特征

模拟降雨开始几分钟后,随着垄面土壤水分的不断饱和,下坡垄面产生径流,坡面进入细沟间侵蚀阶段。该阶段内,随降雨进行到垄沟内汇集的雨水超过垄间蓄满能力后发生漫流(土壤湿润速率越大,发生漫流时间越短),诱发细沟间阶段侵蚀强度的加强。从表 2 看出,随土壤湿润速率的增加,坡面产流时间逐渐缩短,而径流量逐渐增大。这与以往在平坡系统上开展的研究结果一致^[14-15]。当土壤湿润速率从 30 mm/h 增加到 60 mm/h 时,产流变化幅度最大,产流时间减少 31%,相应的径流量增加 18.59%。此外,土壤湿润速率 20、30 mm/h 间的径流量无显著差异,说明 30 mm/h 是控制产流的关键土壤湿润速率。

土壤湿润速率对产沙的影响程度较产流更为明显。与土壤湿润速率 10 mm/h 相比,20、30、60、90 mm/h 下的侵蚀量分别增加 25.16%、95.02%、151.03%、398.91%。这可能是因为随湿润速率增加土

壤团聚体破碎程度的增大为径流提供了大量的可搬运物质,从而导致侵蚀量增大。进一步分析发现,当土壤湿润速率大于 20 mm/h 时侵蚀量显著增加,且当湿润速率从 60 mm/h 增加到 90 mm/h 时,其增幅最大,说明 20 mm/h 是控制侵蚀量的关键土壤湿润速率。

表 2 细沟间阶段不同土壤湿润速率下的径流量和侵蚀量

Tab. 2 Runoff and sediment yield at varied soil wetting rates during inter-rill stage

土壤湿润速率/ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	产流时间/ min	径流量/ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	侵蚀量/ ($\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)
10	8.77	10.44 ± 0.05^d	314.52 ± 9.74^e
20	8.53	11.05 ± 0.04^e	393.66 ± 5.78^e
30	7.00	11.35 ± 0.05^e	613.39 ± 57.08^b
60	4.83	13.46 ± 0.22^b	789.53 ± 47.60^b
90	4.00	14.83 ± 0.05^a	1569.16 ± 79.35^a

注:同列数值后不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。

随降雨进行,不同土壤湿润速率下的径流率均呈现逐渐增加的趋势(图 2),说明土壤湿润速率的改变未导致产流过程的变化。然而,以往研究认为径流率随降雨时间表现为急剧增加后趋于平稳的趋势^[16-17]。这是因为本试验是在横坡垄作系统下开展,降雨初期雨水不断在垄沟内汇集,径流的产生只来源于下坡垄面,一旦积聚的雨水超过垄沟蓄水量时垄顶较低处发生漫流,导致径流量急剧增加,说明垄作方式对坡面产流过程具有重要影响。然而,泥沙浓度随土壤湿润速率变化呈现不同的趋势,说明土壤湿润速率改变了产沙过程。土壤湿润速率 10、20 mm/h 下,泥沙浓度随降雨的进行逐渐增加后趋于平稳;30、60 mm/h 湿润速率下,泥沙浓度不断增加后逐渐减小;土壤湿润速率 90 mm/h 下,泥沙浓度逐渐降低到最小值后急剧增加,且该增加点的出现时间与径流急剧突变点一致。这可能是因为湿润速率 90 mm/h 下土壤结构遭到严重破坏,坡面粗糙度急剧减小,径流增大,而此时土壤结构的破坏又带来了大量的搬运物质所导致。

2.2 细沟侵蚀阶段不同土壤湿润速率下的产流产沙特征

随着坡面小细沟的不断贯通,坡面进入细沟侵蚀阶段,此时主要表现为沟的加长。随降雨进行,当细沟贯穿垄面,垄沟内汇集的雨水会以较高的流速泻出将进一步加剧细沟侵蚀(沟加深加宽),最终诱发横垄垮塌^[18],此时坡面进入细沟侵蚀强烈阶段。细沟侵蚀阶段,土壤湿润速率对侵蚀量的影响明显高于径流。这是因为土壤湿润速率间的侵蚀量差异明显,且随土壤湿润速率的增加侵蚀量不断增大,而

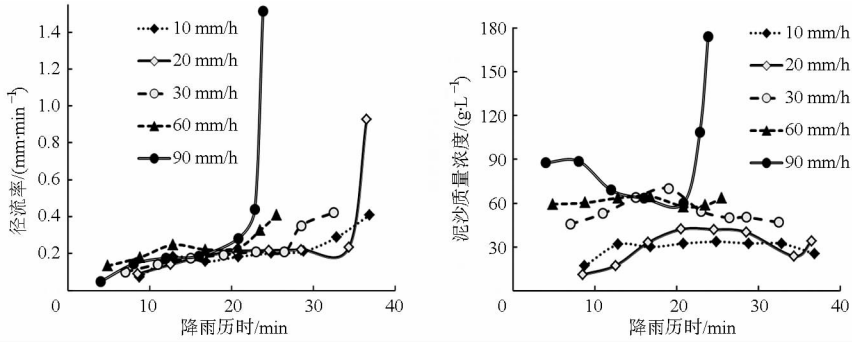


图2 细沟间侵蚀阶段不同土壤湿润速率的径流率、泥沙浓度动态变化

Fig.2 Temporal variation of runoff rate and sediment concentration at different soil wetting rates during inter-rill stage

不同土壤湿润速率间的径流强度无显著差异(图3)。与土壤湿润速率10 mm/h相比,20、30、60、90 mm/h下的侵蚀量分别显著增加115.51%、144.34%、164.49%、249.42%。这是因为随土壤湿润速率的增加,细沟发育增强。进一步分析发现,当土壤湿润速率从10 mm/h增加到20 mm/h,侵蚀量的增加幅度最大,而土壤湿润速率20 mm/h和

30 mm/h间的侵蚀量无显著性差异,表明10 mm/h是控制沟蚀强度的关键土壤湿润速率。当土壤湿润速率从60 mm/h过渡到90 mm/h时,侵蚀量进一步急剧增加。这是因为当土壤湿润速率大于60 mm/h时,沟蚀发育强度达到第二次飞跃,说明野外降雨60 mm/h时应加大水土保持措施治理,防止横垄垮塌进一步增强。

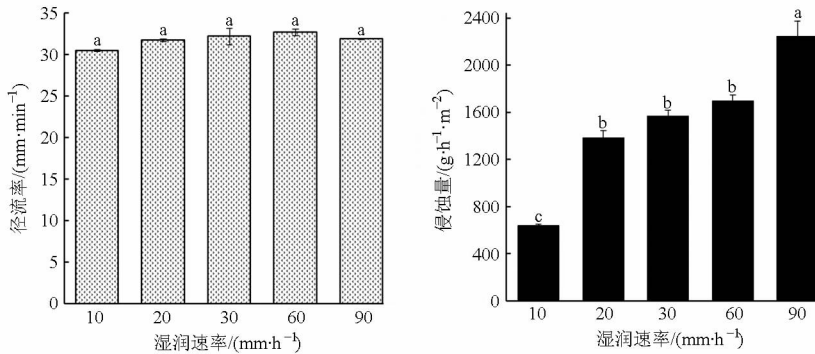


图3 细沟阶段不同土壤湿润速率下的径流强度和侵蚀量

Fig.3 Runoff and sediment yield at varied soil wetting rates during rill stage

不同土壤湿润速率下径流率和泥沙浓度随降雨进行均呈现不同的变化趋势(图4),说明土壤湿润速率的变化改变了产流和产沙过程。径流率随降雨时间的增加表现为波动变化,这主要是因为细沟发育变化幅度时强时弱,致使垄沟内汇集雨水的流出量不断变化,而当横垄垮塌后径流量急剧增大后迅速减小。10、20、30 mm/h土壤湿润速率下,泥沙浓度的动态变化相对较为平稳;60、90 mm/h土壤湿润

速率下,由于前期细沟发育较为强烈,导致泥沙浓度随降雨历时急剧增加,而当横垄垮塌后细沟发育强度减弱,致使泥沙浓度不断减小。

2.3 不同土壤湿润速率下团聚体的迁移

2.3.1 侵蚀过程中不同土壤湿润速率下团聚体粒级分布

不同粒级的团聚体对土壤湿润速率具有不同的破碎响应^[3,19],且不同土壤湿润速率下坡面侵蚀特

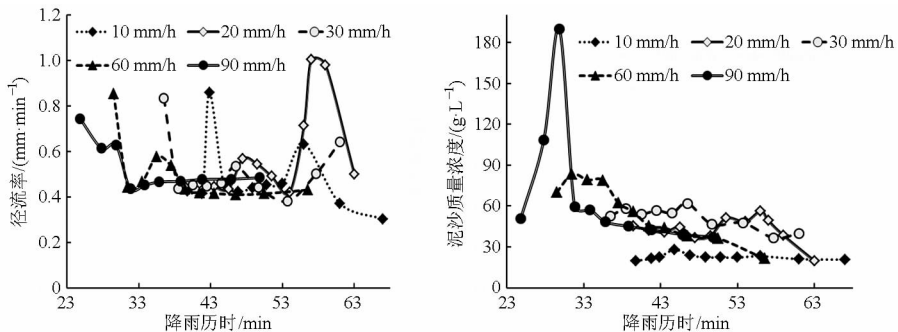


图4 细沟阶段不同土壤湿润速率下的径流率、泥沙浓度的动态变化

Fig.4 Temporal variation of runoff rate and sediment concentration at varied soil wetting rates during rill erosion process

征存在明显差异,这必将导致侵蚀过程中团聚体迁移粒级分布的变化。细沟间阶段团聚体的粒级越大流失比例越小,而细沟阶段随团聚体粒级的减小流失比例呈现“减小—增加—减小—增加”的趋势。细沟间和细沟阶段,小于 0.25 mm 粒级的流失量达到了总流失量的 57% 以上(表 3)。说明,微团聚体是主要的流失粒级,这与以往在平坡开展的试验结果一致^[20-21]。然而,未经湿润处理前,该粒级仅占团聚体总量的 15.10%(表 1)。说明,大团聚体中某些粒级的破碎导致了微团聚体流失的增加。但是,破碎团聚体的粒级大小和破碎度与侵蚀阶段有关。

细沟间侵蚀阶段,2~5 mm 粒级团聚体破碎最严重,其次为 1~2 mm。以往的研究也表明,土壤侵蚀倾向于破坏土壤水稳性大团聚体^[22-23]。因为这 2 个粒级的比例比未湿润处理前分别平均降低了 95.71% 和 61.53%。然而,0.5~1 mm 团聚体的比例较湿润前增加了 46.17%。说明,2~5 mm 和 1~2 mm 团聚体的破碎导致了 0.5~1 mm 和小于 0.25 mm 粒级流失的增加。不同土壤湿润速率下 2~5 mm 和 1~2 mm 团聚体流失比例的变化,表明 2 个粒级随土壤湿润速率呈现不同的破碎程度。当土壤湿润速率从 10 mm/h 增加到 20 mm/h,2~5 mm 和 1~2 mm 团聚体的流失比例分别减少了 61.41% 和 58.40%;当土壤湿润速率从 20 mm/h 过渡到 30 mm/h,2 个粒级的比例却分别增加了 29.23% 和 51.77%。说明 20 mm/h 是控制这 2 个粒级破碎的关键土壤湿润速率。

表 3 侵蚀过程中不同粒级团聚体的分布

Tab. 3 Size distribution of soil aggregate during different erosion stages

侵蚀阶段	土壤湿润速率/ (mm·h ⁻¹)	流失比例/%				
		2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
细沟间	10	4.44	6.98	15.61	11.22	61.74
	20	1.72	2.91	12.19	11.25	71.93
	30	2.22	4.41	11.96	12.51	68.91
	60	1.78	1.90	11.48	15.74	69.11
	90	2.06	3.62	10.23	9.83	74.26
细沟	10	8.16	7.62	15.73	9.66	58.82
	20	9.77	5.63	11.44	9.42	63.74
	30	8.99	8.17	13.55	11.86	57.43
	60	8.83	6.04	13.39	11.58	60.15
	90	2.50	3.90	7.83	7.60	78.17

细沟阶段,2~5 mm 和 1~2 mm 的流失比例较细沟间阶段分别平均增加了 255.10% 和 82.95%。这是因为在沟头下切、沟底冲刷和沟壁坍塌作用下

团聚体表现为整体迁移,导致大粒级团聚体破碎程度的降低和流失比例增加。但是,0.25~0.5 mm 团聚体的流失比例与细沟间侵蚀阶段相比减少了 16.90%,表明 0.25~0.5 mm 团聚体发生了一定程度的破碎,且 10 mm/h 是控制该粒级破碎的关键土壤湿润速率。这是因为当土壤湿润速率从 10 mm/h 增加到 20 mm/h,0.25~0.5 mm 团聚体的流失比例减少了 2.47%,而当土壤湿润速率从 20 mm/h 过渡到 30 mm/h,该粒级的流失比例增加了 25.92%。

2.3.2 侵蚀过程中迁移团聚体的特征指标

为更直观地反映团聚体迁移的综合特征,对团聚体的平均重量直径(MWD)做进一步分析。细沟间阶段的 MWD 均小于刚湿润处理后(未降雨前),减小率平均为 17.99%(图 5)。这是因为该阶段下大团聚体在雨滴打击作用下进一步被破碎,从而导致其 MWD 减小。由于细沟阶段沟的发育加强造成土壤团聚体发生整体迁移,尤其是横垄垮塌,因此该阶段的 MWD 较刚湿润处理后增大,平均增加 14.96%。以上结果表明,降雨过程中团聚体的迁移特征随侵蚀阶段发生了明显变化。

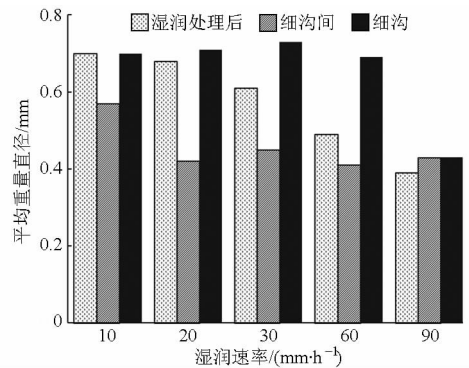


图 5 不同阶段下团聚体的平均重量直径

Fig. 5 Mean weight diameter of soil aggregate at different stages

不同阶段,MWD 随土壤湿润速率表现出不同的变化趋势。湿润处理后,MWD 随土壤湿润速率的增加呈现逐渐减小的趋势,表明团聚体尤其是大团聚体的破碎程度随土壤湿润速率的增大逐渐增强。与湿润前相比,土壤湿润速率 10、20、30、60、90 mm/h 下的 MWD 分别减少了 69.43%、70.30%、73.36%、78.60%、82.97%。正是由于湿润后团聚体破碎的不同导致细沟间阶段坡面形成结皮存在差异,从而致使雨滴打击对团聚体的破碎力度和径流搬运能力产生了不同,最终导致 MWD 随土壤湿润速率的增加呈现急剧减小后趋于平稳的趋势。其中,土壤湿润速率 10 mm/h 下的 MWD 较其他湿润处理平均增加了 25.0%,而其他湿润处理间 MWD 无明显差异,说明当土壤湿润速率大于 10 mm/h,团

聚体的迁移特征变动较小。然而以往研究结果表明平坡措施下 MWD 随土壤湿润速率的增加呈现逐渐减小的趋势^[14,24],说明垄作措施改变了土壤湿润速率对团聚体迁移的影响。

细沟阶段,随土壤湿润速率的增加,MWD 表现为逐渐增加(10~30 mm/h)后急剧减小的趋势(60~90 mm/h)。与土壤湿润速率 30 mm/h 下相比,60、90 mm/h 速率的 MWD 分别减小 5.48% 和 41.10%。这是因为细沟的发育强度随土壤湿润速率的增加而增强,导致径流搬运的大颗粒团聚体增多,但当沟蚀发育到一定程度致使沟道内股流流速加大,进而诱发大团聚体在迁移过程中发生剧烈的碰撞,被破碎为粒径较小的团聚体。

3 结论

(1)细沟间阶段,径流量和侵蚀量均随土壤湿润速率的增大而增加,但土壤湿润速率对产沙的影响较产流更为明显。与土壤湿润速率 10 mm/h 相比,20、30、60、90 mm/h 速率的侵蚀量分别增加

25.16%、95.02%、151.03%、398.91%。产沙过程随土壤湿润速率的变化而改变。

(2)细沟阶段,不同土壤湿润速率间的径流量无显著差异。90、60、30、20 mm/h 速率的侵蚀量较土壤湿润速率 10 mm/h 下分别增加 249.42%、164.49%、144.34%、115.51%。不同土壤湿润速率下的产流产沙过程均存在明显差异。

(3)细沟间和细沟阶段,小于 0.25 mm 流失量达到了总流量的 57% 以上。其流失量的增加,细沟间和细沟阶段分别主要来自于 2~5 mm 和 0.25~0.5 mm 粒级的破碎,相应控制其破碎的关键土壤湿润速率分别为 20 mm/h 和 10 mm/h。

(4)不同阶段 MWD 从大到小依次为细沟阶段、湿润处理后、细沟间阶段。细沟间阶段,土壤湿润速率 10 mm/h 下的 MWD 较其他湿润处理平均增加了 25.0%,而其他湿润处理间无明显差异。细沟阶段,随土壤湿润速率的增加,MWD 表现为逐渐增加(10~30 mm/h)后急剧减小的趋势(60~90 mm/h)。

参 考 文 献

- 1 LE BISSONNAIS Y, ARROUAYS D. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. application to humic loamy soils with various organic carbon contents [J]. *European Journal of Soil Science*, 1997, 48(1): 39-48.
- 2 FAN Y, LEI T, SHAINBERG I, et al. Wetting rate and rain depth effects on crust strength and micromorphology [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(6): 1604-1610.
- 3 KJAERGAARD C, DE JONGE L W, MOLDRUP P, et al. Water-dispersible colloids: effects of measurement method, clay content, initial soil matric potential, and wetting rate [J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(2): 403-412.
- 4 MARTÍNEZ-MENA M, DEEKS L K, WILLIAMS A G. An evaluation of a fragmentation fractal dimension technique to determine soil erodibility [J]. *Geoderma*, 1999, 90(1-2): 87-98.
- 5 MA R M, LI Z X, CAI C F, et al. The dynamic response of splash erosion to aggregate mechanical breakdown through rainfall simulation events in Ultisols (subtropical China) [J]. *CATENA*, 2014, 121: 279-287.
- 6 ABDOLLAHI L, SCHJONNING P, ELMHOLT S, et al. The effects of organic matter application and intensive tillage and traffic on soil structure formation and stability [J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 136: 28-37.
- 7 姜义亮, 郑粉莉, 王彬, 等. 东北黑土区片蚀和沟蚀对土壤团聚体流失的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7774-7781. JIANG Yiliang, ZHENG Fenli, WANG Bin, et al. The impact of sheet and gully erosion on soil aggregate losses in the black soil region of Northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7774-7781. (in Chinese)
- 8 LIU Q J, ZHANG H Y, AN J, et al. Soil erosion processes on row sideslopes within contour ridging systems [J]. *CATENA*, 2014, 115: 11-18.
- 9 FOSTER G R. Science documentation, revised universal soil loss equation version 2 [EB/OL], 2005. http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/64080530/RUSLE/RUSLE2_Science_Doc.pdf.
- 10 LIU X B, ZHANG S L, ZHANG X Y, et al. Soil erosion control practices in Northeast China: a mini-review [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 117: 44-48.
- 11 高燕. 黑土区不同侵蚀方式对土壤团聚体和泥沙颗粒流失的影响研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- 12 张光辉, 刘宝元, 李平康. 槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性 [J]. *水土保持通报*, 2007, 27(6): 56-60. ZHANG Guanghui, LIU Baoyuan, LI Pingkang. Principles and properties of artificial trough rainfall simulator [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(6): 56-60. (in Chinese)
- 13 于兴修, 李振炜, 刘前进, 等. 沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征 [J]. *环境科学*, 2012, 33(8): 2644-2651. YU Xingxiu, LI Zhenwei, LIU Qianjin, et al. Output characteristics of rainfall runoff phosphorus pollution from a typical small watershed in Yimeng mountainous area [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(8): 2644-2651. (in Chinese)
- 14 郭伟, 史志华, 陈利顶, 等. 不同湿润速率对三种红壤坡面侵蚀过程的影响 [J]. *土壤学报*, 2008, 45(1): 26-31. GUO Wei, SHI Zhihua, CHEN Lidong, et al. Effects of wetting rate on erosion processes on hillslopes of red soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 26-31. (in Chinese)
- 15 YAN F L, SHI Z H, CAI C F, et al. Wetting rate and clay content effects on interrill erosion in ultisols of southeastern China [J]. *Pedosphere*, 2010, 20(1): 129-136.

- 16 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 Quanjiu, 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 CSAE, 2008, 24(5): 65-68. (in Chinese)
- 17 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, 182.
LI Guifang, ZHENG Fenli, LU Jia, et al. Effects of rainfall and topography on soil erosion processes of black soil hillslope [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 147-154, 182. (in Chinese)
- 18 LIU Q J, AN J, WANG L Z, et al. Influence of ridge height, row grade, and field slope on soil erosion in contour ridging systems under seepage conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 147: 50-59.
- 19 ARJMAND SAJJADI S, MAHMOODABADI M. Aggregate breakdown and surface seal development influenced by rain intensity, slope gradient and soil particle size [J]. Solid Earth, 2015, 6(1): 311-321.
- 20 安娟, 卢嘉, 郑粉莉, 等. 不同地表条件下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 100-104.
AN Juan, LU Jia, ZHENG Fenli, et al. Soil aggregate transport during soil erosion process under different soil surface conditions on black soil slope farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 100-104. (in Chinese)
- 21 黄满湘, 章申, 晏维金. 农田暴雨径流侵蚀泥沙对氮磷的富集机理[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 306-310.
HUANG Manxiang, ZHANG Shen, YAN Weijin. Sediment enrichment mechanism of nitrogen and phosphorus under simulated rainfall conditions [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 306-310. (in Chinese)
- 22 樊红柱, 张建辉, 王勇, 等. 川北山区坡耕地侵蚀耕作对土壤团聚体碳的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 157-164.
FAN Hongzhu, ZHANG Jianhui, WANG Yong, et al. Tillage erosion impacts on soil aggregate associated carbon in mountainous region slope farmland of northern Sichuan [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 157-164. (in Chinese)
- 23 WAIRIU M, LAL R. Soil organic carbon in relation to cultivation and top soil removal on sloping lands of Kolombangara, Solomon Islands [J]. Soil and Tillage Research, 2003, 70: 19-27.
- 24 MAMEDOV A I, SHAINBERG I, LEVY G J. Wetting rate and sodicity effects on interrill erosion from semi-arid Israeli soils [J]. Soil and Tillage Research, 2002, 68: 121-132.

(上接第 138 页)

- 12 李精忠, 艾廷华, 柯舒. DEM 提取谷地线的有效汇水量阈值范围[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(10): 1244-1247.
LI Jingzhong, AI Tinghua, KE Shu. Effective flow accumulation threshold of extracting valley-line from grid-based digital elevation model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(10): 1244-1247. (in Chinese)
- 13 王映明. 湖北植被地理分布的规律性(上)[J]. 植物科学学报, 1995, 13(1): 47-54.
- 14 孙爱立, 余钟波, 杨传国, 等. 我国水系提取阈值影响因素分析[J]. 水利学报, 2013, 44(8): 901-908.
SUN Aili, YU Zhongbo, YANG Chuanguo, et al. Impact factors of contribution area threshold in extracting drainage network for rivers in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(8): 901-908. (in Chinese)
- 15 RUEDA Antonio, NOGUERA Jose M, MARTINEZ-CRUZ Carmen. A flooding algorithm for extracting drainage networks from unprocessed digital elevation models [J]. Computers and Geosciences, 2013, 59(10): 116-123.
- 16 WOLOCK David M, MCCABE Gregory J. Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL [J]. Water Resources Research, 1995, 31(5): 1315-1324.
- 17 PETTER Pilesjö, ABDULGHANI Hasan. A triangular form-based multiple flow algorithm to estimate overland flow distribution and accumulation on a digital elevation model [J]. Transactions in GIS, 2014, 18(1): 108-124.
- 18 ZHOU Qiming, PETTER Pilesjö, CHEN Yumin. Estimating surface flow paths on a digital elevation model using a triangular facet network [J]. Water Resources Research, 2011, 47(7): W07522.
- 19 秦承志, 李宝林, 朱阿兴, 等. 水流分配策略随下坡坡度变化的多流向算法[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 450-455.
QIN Chengzhi, LI Baolin, ZHU Axing, et al. Multiple flow direction algorithm with flow partition scheme based on downslope gradient [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 450-455. (in Chinese)
- 20 秦承志, 朱阿兴, 李宝林, 等. 基于栅格 DEM 的多流向算法述评[J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 91-98.
QIN Chengzhi, ZHU Axing, LI Baolin, et al. Review of multiple flow direction algorithms based on gridded digital elevation models [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(3): 91-98. (in Chinese)
- 21 邬伦, 汪大明, 张毅. 基于 DEM 的水流方向算法研究[J]. 中国图象图形学, 2006, 11(7): 998-1003.
WU Lun, WANG Daming, ZHANG Yi. Research on the algorithms of the flow direction determination in ditches extraction based on grid DEM [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(7): 998-1003. (in Chinese)
- 22 邢贞相, 闫丹丹, 刘美鑫, 等. 三江平原近 60 年降水量时空变异特征分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 337-344.
XING Zhenxiang, YAN Dandan, LIU Meixin, et al. Spatiotemporal variability analysis of annual precipitation in Sanjiang plain in recent sixty years [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 337-344. (in Chinese)