

细沟侵蚀过程与细沟水流水力学参数的关系研究

肖培青, 郑粉莉, 张成娥

(中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要: 利用供沙土槽和试验土槽的双土槽径流小区, 定量研究了在不同降雨强度下上方来水来沙对陡坡地细沟侵蚀产沙过程和细沟水流水力学参数的影响及其细沟水流水力学特征参数与细沟侵蚀产沙量的关系。结果表明: 坡面细沟侵蚀过程以侵蚀—搬运过程为主, 坡上方来沙不仅被径流全部搬运, 且上方来水在坡下方引起了另外的侵蚀产沙量, 其值随上方来水含沙量的减少和降雨强度的增加而增大。上方来水的汇入或降雨强度的增大可使细沟水流流态由层流转化为紊流。上方来水对细沟水流水力学参数(流速、水力半径、雷诺数、弗劳德数和阻力系数)有重要影响。定量分析了细沟水流水力学特征参数(流速、雷诺数和阻力系数)与上坡来水引起坡下方净侵蚀产沙量的关系, 建立了净侵蚀产沙量与细沟水流流速、雷诺数和阻力系数统计模型。

关键词: 上方来水来沙; 侵蚀—搬运; 细沟侵蚀; 细沟水流; 水力学参数

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2001) 01-0054-04

Research on Rill Erosion Process and Rill Flow Hydraulics Parameters

XIAO Pei-qing, ZHENG Fen-li, ZHANG Cheng-e

Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100

Abstract: A dual-box system, consisting of a 2-m-long feeder box and a 5-m long test box with 150 gradient was used to quantify effects of run-on water and sediment on rill erosion process at down-slope section and rill flow hydraulics parameters, as well as relationship of rill flow hydraulics parameters and sediment delivery by rill erosion. The results showed that detachment-transport was dominated in rill erosion processes, runoff from up-slope always caused additional sediment delivery in the rill box, the additional sediment delivery increased with a decrease of sediment concentration in runoff from the feeder box and an increase of rainfall intensity. Up-slope runoff discharging into rill channel at down-slope section or an increase of rainfall intensity resulted in that rill flow shifted from stratum flow into turbulent flow. Runoff from up-slope had an important effect on rill flow hydraulics parameters, such as rill flow velocity, Reynolds number and Daycy-weisbach coefficient. The relation between rill flow hydraulics parameters and additional sediment in rill channel caused by up-slope runoff was analyzed. And a statistic model among the additional sediment in rill channel and relative increment of rill flow velocity and Reynolds number, as well as relative decrement of rill flow Daycy-weisbach coefficient was established.

Key words: run-on water and sediment; erosion-transport; rill erosion; rill flow; hydraulics parameters

1 前言

细沟间侵蚀和细沟侵蚀是坡面土壤侵蚀过程的 2 种主要方式。坡面细沟侵蚀过程中, 细沟水流水力学参数及其变化对细沟侵蚀过程的影响是当前土壤侵蚀研究的热点和难点所在。已有的细沟水流水力学特性描述及其对细沟侵蚀过程的影响研究基本上都是集中在缓坡地^[1,2], 而对陡坡地细沟水流水力学特征及其对细沟侵蚀过程的影响研究甚少。目前已有的研究成果也仅仅是在实验条件下利用径流冲刷槽试验对细沟水流水力学特征进行描述, 进而研究细沟水流水力学参数与细沟侵蚀产沙量的关系^[3], 而没有考虑上方含沙水流汇集及其雨滴打击力对细沟水力学特性的影响及其水力学参数变化对细沟侵蚀过程的影响。本文利用供沙土槽和试验土槽的双土槽径流小区, 研究在不同降雨强度下和有上方含沙水流汇入时, 陡坡地细沟水流水力学参数变化及其

对细沟侵蚀过程的影响, 为建立具有物理概念坡面土壤侵蚀预报模型提供理论基础。

2 试验设计与研究方法

2.1 试验设计

试验模型由位于坡面下部的试验土槽和位于坡面上部的供沙土槽组成, 供沙土槽长 2 m、宽 2 m, 试验土槽长 5 m、宽 2 m, 两个土槽的地面坡度皆为 15°。试验土槽和供沙土槽通过连接装置进行连接, 使供沙土槽的含沙水流通过试验土槽顶端输入到试验土槽。连接装置由隔板、出水口、塑料软管和倒置的三角型集流槽组成。隔板为长 2 m、高 30 cm 的铁皮插入土中, 在隔板上切割出与小区坡面平行的出水孔, 孔口焊接钢管连接塑料软管; 倒置的三角型集流槽安装在隔板下方连接试验土槽和供沙土槽。在试验过程中, 当试验土槽和供沙土槽分开时, 供沙土槽的径流泥沙不进入试验土槽; 当试验土槽和供沙土槽连接时, 供沙土槽的含沙水流通过隔板上出水孔连接的塑料软管输入到倒置的三角型集流槽中, 经过集流槽消能后均匀流入试验土槽, 模拟自然坡面坡上方来水来沙对坡下部侵蚀过程的影响。为了研究上方来水来沙对细沟侵蚀过程的影响, 在 2 m 宽、5 m 长的试验土槽中, 用 PVC 板分隔成两个 20 cm 宽、5 m 长的细沟侵蚀槽, 并在两个细沟侵蚀槽中根据细沟发育初期的几何参数, 建造细沟初期发育模型。

试验所用降雨设备为侧喷式的人工降雨设备。降雨高度为 16 m, 可以满足所有的雨滴达到终点速度。土壤表面处理为翻耕裸露, 土壤含水量为 11.2% ~ 12.3%。试验所用 3 种降雨强度为 50, 90, 130 mm/h。在每一次降雨试验过程中, 对供沙土槽在保持径流量大致相同的条件下, 通过 0% (裸露), 50%, 75% 和 100% (全覆盖) 不同覆盖 (覆盖所用材料为塑料布) 形成不同浓度的含沙水流, 研究上方含沙水流对坡下方细沟侵蚀产沙过程的影响及其细沟水流水力学参数变化与细沟侵蚀产沙过程的关系 (表 1)。

表 1 试验设计

试验处理	降雨强度 (mm/h)	坡度 (°)	表面条件	土壤含水量 (%)	供沙土槽覆盖度 (%)	试验重复次数
1	50	15	翻耕裸露	11.18	0; 50; 75; 100	4
2	90	15	翻耕裸露	11.26	0; 50; 75; 100	4
3	130	15	翻耕裸露	12.30	0; 50; 75; 100	4

2.2 试验过程

试验用土为陕西省杨陵区接近 C 层的粘黄土母质, 填土时过 10 mm 筛。为了减少 PVC 板边界的影响, 在 PVC 板内侧刷一层硬质胶合剂, 并粘一层试验用土。填土前, 在细沟土槽中铺填 15 cm 厚的天然沙, 其上铺透水纱布, 以保持土层的透水状况良好。填土时分层称重填土并进行压实处理, 使土壤干容重维持到 1.20 g/cm³ 左右。试验前一天, 用 30 mm/h 的降雨强度进行大约 10 min 的前期降雨, 其目的是保证每次试验的前期土壤含水量基本一致和消除地表处理的差异性。

试验开始时, 供沙土槽和试验土槽分开, 供沙土槽为裸露状态。降雨试验过程中, 当坡面产流后, 采集每个土槽的初始产流量和径流量, 再同步分别采集每个土槽的 8 个径流样后, 将两个土槽连接, 使供沙土槽的含沙水流输入到试验土槽。相隔 3 ~ 5 min, 即试验土槽达到新的侵蚀平衡条件后, 每分钟采集试验土槽径流泥沙样一次, 采集 4 个径流样后, 再将 2 个土槽分开。同时, 相隔 3 ~ 5 min, 分别采集试验土槽和供沙土槽径流泥沙样各 2 个, 用于对比 2 个土槽连接前后的侵蚀产沙变化。至此, 供沙土槽一个覆盖度的径流泥沙样采集完毕。然后, 将供沙土槽进行不同比例的覆盖, 重复上述步骤, 采集径流泥沙样。试验完成后, 量得每一个径流泥沙样的体积, 用泥沙烘干法计算含沙量和侵蚀产沙量。每个试验处理重复 4 次。

在试验过程中, 对于供沙土槽每种覆盖度下, 用染色剂法每隔 2 ~ 3 min 分别测定有上方来水与无上方来水时细沟侵蚀槽上、中、下 3 个固定段面的水流流速; 在测定流速的同时, 用测尺和数字化照相机相结合测定细沟的宽度和深度。

3 结果与分析

3.1 上方来水来沙对细沟侵蚀产沙过程的影响

不同雨强下, 当供沙土槽和细沟土槽分开时, 供沙土槽和细沟土槽产流量之和 ($R_f + R_t$) 与 2 个土槽连接后细沟土槽的产流量 (R_{ft}) 基本相等, 表明在试验过程中, 坡面径流基本保持平衡状态。然而, 2 个土槽分开时, 供沙土槽和细沟土槽的侵蚀产沙量之和 ($S_f + S_t$) 总是小于 2 个土槽连接时细沟土槽的侵蚀产沙量 (S_{ft}), 表

明上方来水来沙不但被径流全部搬运,且上方来水在细沟土槽引起了另外的侵蚀产沙量 S (表 2),说明在试验条件下,坡面侵蚀过程以侵蚀—搬运为主^[4]。这与野外观测到的坡面细沟侵蚀槽没有出现沿程淤积相符合。

表 2 各次试验的径流量、产沙量和上方来水引起的侵蚀量

雨强 (mm/h)	供沙土槽				细沟侵蚀槽				上方来水引起的净侵蚀量 S ($Sf_t - Sf - St$) (g/min)
	覆盖度 (%)	径流量 R_f (L/min)	含沙量 C_f (kg/m ³)	产沙量 S_f (g/min)	无上方来水		有上方来水		
					径流量 R_t (L/min)	产沙量 S_t (g/min)	径流量 R_{ft} (L/min)	产沙量 S_{ft} (g/min)	
50	0	1.56	7.2	11.2	0.33	3.8	1.96	43.3	28.2
	50	1.98	5.3	10.5	0.47	11.8	2.15	56.8	34.6
	75	1.39	3.2	4.5	0.51	7.6	1.93	122.6	110.5
	100	2.01	1.8	3.6	0.54	9.0	2.29	239.3	226.7
90	0	6.58	10.6	69.6	1.10	63.0	7.76	739.9	607.2
	50	6.24	8.9	55.7	0.90	11.0	6.92	1335.6	1268.9
	75	6.84	5.2	35.8	1.02	16.8	7.12	1359.7	1307.1
	100	6.11	3.5	21.1	1.04	35.2	7.45	1608.4	1552.1
130	0	9.58	12.5	120.1	1.39	184.2	9.44	2315.6	2011.3
	50	7.58	11.0	83.1	1.50	98.4	8.97	2537.1	2355.4
	75	8.25	8.2	67.5	1.59	200.9	9.67	3078.1	2809.8
	100	6.54	5.4	35.3	2.12	306.5	8.48	4131.4	3789.6

从表 2 可以看出,坡上部来水在坡下方引起的净侵蚀产沙量 S 值的大小受上方来水量及其来水含沙量和降雨强度的影响。受泥沙搬运能力影响, S 值随上方来水含沙量的减少而增加。这是因为在一次试验过程中,一定的水流条件对应于一定的泥沙搬运能力。当供沙土槽供沙量减少时,水流必然在细沟侵蚀槽引起另外的侵蚀产沙量,因而随着供沙土槽来水含沙量的减少,其引起细沟侵蚀槽的侵蚀产沙量在增加。这一点在一定程度上支持了 Ellison 的清水对土壤具有最大侵蚀分离能力的观点^[5]。

表 2 还表明,上方来水引起细沟侵蚀槽的净侵蚀产沙量随上方来水径流量和降雨强度的增加而增加,因此,基于上方来水引起坡下方净侵蚀产沙量随上方径流量增加而增大的事实,采取层层拦蓄的水土保持措施对减少坡面土壤侵蚀有十分重要的作用。

3.2 不同含沙水流条件下细沟水力学参数的动态变化

借鉴河流水动力学的有关公式来计算细沟水流的水力学特征参数,表 3 表明了不同降雨强度下有上方来水与无上方来水的细沟水力学参数变化。上方含沙水流汇入坡下方后,使细沟水流的流速、水力半径、雷诺数和弗劳德数增大,而细沟水流的阻力系数减小。

表 3 各次试验细沟水力学参数的变化

雨强 (mm/h)	供沙土槽			细沟侵蚀土槽									
	覆盖度 (%)	含沙量 (kg/m ³)	R_f (L/min)	无上方来水				有上方来水					
				V (cm/s)	R (cm)	Re	Fr	f	V (cm/s)	R (cm)	Re	Fr	f
50	0	7.2	1.56	12.9	0.070	389	1.553	0.277	21.9	0.179	1700	1.653	0.244
	50	5.3	1.98	15.7	0.066	450	1.942	0.177	27.4	0.142	1683	2.319	0.124
	75	3.2	1.39	16.8	0.054	393	2.314	0.125	28.1	0.119	1448	2.605	0.099
	100	1.8	2.01	20.0	0.050	430	2.861	0.082	36.3	0.116	1820	3.400	0.058
	平均值			16.3	0.060	416	2.167	0.165	28.4	0.139	1663	2.494	0.131
90	0	10.6	6.58	24.9	0.106	1141	2.443	0.112	42.2	0.297	5415	2.471	0.109
	50	8.9	6.24	26.3	0.101	1149	2.645	0.096	46.4	0.257	5164	2.922	0.078
	75	5.2	6.84	27.5	0.079	941	3.130	0.068	49.1	0.221	4689	3.342	0.060
	100	3.5	6.11	29.6	0.069	889	3.591	0.052	53.6	0.176	4064	4.083	0.040
	平均值			27.1	0.089	1030	2.952	0.082	47.8	0.238	4833	3.204	0.072
130	0	12.5	9.58	28.6	0.151	1865	2.348	0.121	49.0	0.379	8024	2.540	0.104
	50	11.0	7.58	30.6	0.149	1971	2.531	0.104	52.8	0.312	7110	3.021	0.073
	75	8.2	8.25	32.1	0.113	1562	3.050	0.072	55.2	0.301	7174	3.215	0.065
	100	5.4	6.54	35.1	0.088	1337	3.784	0.047	58.5	0.202	5107	4.155	0.039
	平均值			31.6	0.125	1684	2.928	0.086	53.6	0.298	6854	3.233	0.070

注: R_f 为供沙土槽径流量; Re 为雷诺数; Fr 为弗劳德数; f 为 Darcy-Weisbach 阻力系数。

3.2.1 细沟水流流速 不同降雨强度下,上方含沙水流汇入细沟侵蚀槽后,导致细沟水流流速明显增大,与无上方来水相比,有上方来水时细沟水流平均流速增大 69.6% ~ 76.3%。

3.2.2 水力半径 上方含沙水流汇入细沟侵蚀槽后,使细沟水流的水力半径增加 1.3 ~ 1.7 倍。同时,降雨强度的增加,也使细沟水流的水力半径增大。当降雨强度由 50 mm/h 增加到 90, 130 mm/h 时,有、无上方来水时,细沟水流水力半径分别增加 71% ~ 114% 和 40% ~ 48%。

3.2.3 雷诺数 上方来水和降雨强度对细沟水流流态产生重要影响。在降雨强度为 50 mm/h 时, 无上方来水时雷诺数变化于 389 ~ 450, 小于 500, 细沟水流为层流状态; 当上方来水汇入细沟侵蚀槽后, 雷诺数迅速增大, 其值变化于 1 448 ~ 1 820, 细沟水流处于紊流状态, 表明上方来水的汇入可使原来处于层流状态的细沟水流演变为紊流状态。因而上方来水的汇入, 使坡下方细沟水流的紊动性显著增加, 从而使细沟侵蚀产沙量增大。当降雨强度由 50 mm/h 增加到 90, 130 mm/h 时, 有、无上方来水时, 细沟水流皆为紊流。因此, 降雨强度的增加也使坡面细沟水流由层流深化为紊流。在降雨强度和上方水流汇入的共同影响下, 细沟水流雷诺数迅速增大, 使水流侵蚀分散能力和搬运能力增大, 因而导致坡面侵蚀产沙量的迅速增大。

3.2.4 弗劳德数 有、无上方来水时细沟水流的弗劳德数都大于 1, 其流态已属于急流。正由于细沟水流的流态为急流状态, 因而细沟侵蚀的产沙量远较缓流流态的侵蚀产沙量大。上方来水的汇入, 使细沟水流的弗劳德数增加。与无上方来水相比, 上方来水使细沟水流的弗劳德数增加 8% ~ 15%。同时, 弗劳德数也随上方来水含沙量的减少呈增加趋势, 与细沟水流流速随上方来水含沙量减少而增加的趋势一致。表 3 还表明, 弗劳德数随降雨强度的增加而增加。当降雨强度由 50 mm/h 增到 90 mm/h 时, 在有上方来水汇入细沟侵蚀槽时, 弗劳德数增大 28%。

3.2.5 阻力系数 细沟水流沿细沟侵蚀槽流动时, 必然受到阻力的影响, 其阻力主要来自含沙水流中的沙粒本身对水流的阻碍作用、沟槽形态对水流的约束和细沟水流挟沙过程所造成的能量损失。细沟侵蚀槽接受上方来水后, 阻力系数明显减小, 且随上方来水含沙量的减少和降雨强度的增大而减少。同无上方来水相比, 在 3 种降雨强度下阻力系数平均减小 22.8% ~ 25.9%。降雨强度由 50 mm/h 增到 90 mm/h 时, 在有上方来水汇入细沟侵蚀槽时, 阻力系数减少 45%。由于上方来水的汇入使细沟水流流量增大, 所受阻力减少, 使坡下方的细沟侵蚀产沙量显著增大。

3.3 细沟水力学参数与上方来水引起坡下方净细沟侵蚀产沙量的关系

用有上方来水来沙与无上方来水来沙的各细沟水流水力学参数的差值与上方来水引起坡下方的净细沟侵蚀产沙量 (S) 进行相关分析, 发现各个水力学参数变化对净侵蚀产沙量的影响程度不同, 其中细沟水流流速、雷诺数和阻力系数的变化与净侵蚀产沙量的相关性较好。 S 与 $V_{增}$ 和 $R_{增}$ 均呈正相关, 相关方程为 $S = 0.0004V_{增}^{5.0054}$ ($R = 0.9624$) 和 $S = 4 \times 10^{-6}R_{增}^{2.3686}$ ($R = 0.8966$), 而 S 与 $f_{减}$ 呈负相关, $S = 3422.2e^{-87.56f}$ ($R = 0.7293$)。因此, 选取筛选后的细沟水流流速相对增量 $V_{增}$ 、雷诺数相对增量 $R_{增}$ 和细沟水流阻力系数相对减少量 $f_{减}$ 作为细沟水流水力学参数特征指标, 对其与净细沟侵蚀产沙量进行多元统计分析。其结果为: $S = 10^{-4.48}V_{增}^{3.7622}Re_{增}^{0.7121}f_{减}^{-0.0579}$ ($R = 0.9765, n = 12$), 对多元回归方程进行 F 检验, 回归方程高度显著 ($F = 54.87, F_{0.01} = 7.59$)。利用该回归方程可定量评价特定条件下细沟水流水力学参数变化对细沟侵蚀产沙量的影响。

4 结 语

利用供沙土槽和细沟土槽双土槽径流小区, 定量研究了在不同降雨强度下和有上方含沙水流汇入时, 陡坡地细沟侵蚀产沙过程和细沟水流水力学参数变化及其对细沟侵蚀过程的影响, 建立了细沟侵蚀产沙量与细沟水流水力学特征参数的统计模型。

(1) 在不同的降雨强度下, 上方来沙量不仅被径流全部搬运, 且上方来水在坡下方引起了另外的侵蚀产沙量。在试验条件下, 坡面细沟侵蚀过程以侵蚀-搬运过程占主导地位。

(2) 坡上方来水来沙对细沟水流水力学特征产生重要影响, 上方来水可使细沟水流流态由层流转化为紊流; 降雨强度的增大也是细沟水流流态由层流转化为紊流。

(3) 上方含沙水流汇入细沟侵蚀槽后, 使细沟水流流速、水力半径, 雷诺数和弗劳德数明显增大, 而细沟水流阻力系数相对减少, 导致坡下方的细沟侵蚀产沙量迅速增大。上方水流汇入细沟侵蚀槽后, 细沟水流流速、水力半径, 雷诺数和弗劳德数增大幅度和阻力系数减少幅度受上方来水量及其来水含沙量和降雨强度的影响。

(4) 细沟水流流速、雷诺数和阻力系数对细沟侵蚀产沙量产生重要影响, 且上方来水引起坡下方净细沟侵蚀产沙量与细沟水流流速增量、雷诺数增量和阻力系数减少量有很好的相关关系, 净侵蚀产沙量与流速和雷诺数相对增量呈正相关, 而与阻力系数相对减少量呈负相关。净侵蚀产沙量与细沟水流流速和雷诺数增量及阻力系数减少量的数学统计模型为 $S = 10^{-4.48}V_{增}^{3.7622}Re_{增}^{0.7121}f_{减}^{-0.0579}$ 。

由实测值和标准摆线值求取相对偏差可得: $\delta_l = + 29.3\%$, $\delta_D = - 29.4\%$, $\delta_H = 0$ 。

两类指标对鸭儿沟马坊水库以下沟道纵剖面侵蚀发育阶段的确定结果是一致的, 它处于基本均衡阶段, 但相对于标准摆线仍显下凹不足。从 $\delta_l = 29.3\% > 0$ 而 $\delta_D = - 29.4\% < 0$ 又可进一步判别, 此段沟道在沟口、沟头位置不变的情况下, 还将有一定程度的下蚀作用发生, 下蚀的最大深度约 48m。结合 1:10 000 地形图, 最大下切点将在沟道的孝村沟至纪庄沟段。

3 结 论

通过以上两类指标的判别, 鸭儿沟马坊水库以下沟道的纵剖面侵蚀发育, 1979 年以前已处于基本均衡阶段, 但它还具备一定的下切侵蚀潜力, 其最大下切深度可达 48m 左右。白占国在其《黄土高原(塬区)沟壑系统演变的研究》一文中认为“黄土塬区沟谷侵蚀高程曲线积分值 S 在 0.4~0.5 之间”, 其沟谷侵蚀发育“多处在均衡的壮年期”。这一结论与本文所得的鸭儿沟沟道纵剖面侵蚀处于基本均衡阶段是基本一致的, 这也从一个侧面反映了本次研究结论的正确性和可靠性。同时, 应用摆线相关度指标判别沟谷下蚀的发育阶段, 预测沟谷侵蚀的潜力, 方法的理论依据是充分的, 计算过程也要比高程积分曲线法简单得多, 这不能不说是本方法的一大优点。当然, 这种方法能否在实践中得以推广运用, 还有待生产实践的进一步考验。另外, 由于必须考虑地层的岩性条件和水流侵蚀力与岩性间的相互关系, 所以, 单纯使用这一方法还不能对沟谷纵剖面侵蚀稳定所需的最终时间作出准确的预测, 这是本方法的不足之处。

参考文献:

- [1] 钱宁, 等. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 349.
- [2] 陆中臣. 华北平原河流纵剖面[J]. 地理研究, 1986, (1): 16- 19.

上接第 57 页

参考文献:

- [1] Elliot W J, Lafren J M. A Process-based rill erosion model[J]. Trans. of ASAE, 1993, 36(1): 65- 72.
- [2] Gilley J E, Kincaid D C, Elliot W J. Sediment delivery on rill and interrill areas[J], J. of Hydraul, 1992, 140: 313- 341.
- [3] 张科利, 张竹梅. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究. 土壤学报, 2000, 37(1): 9- 15.
- [4] Huang C, Well L K, Norton L D. Sediment transport capacity and erosion process: concept and reality[J]. Earth Surf. Processes and Landforms, 1999, 24: 503- 516.
- [5] Ellison W D. Soil erosion studies[J]. Agric. Eng., 1947, 28: 145- 146.