

坡面降雨侵蚀和径流侵蚀研究*

郑粉莉

中国科学院
(水利部)水土保持研究所·陕西杨陵·712100

摘要 降雨侵蚀过程包括径流侵蚀作用和雨滴打击作用两个方面,传统的单径流小区降雨试验难以区分二者对坡面侵蚀的贡献。通过双土槽人工降雨试验,研究了降雨侵蚀和径流侵蚀的关系及二者对坡面侵蚀产沙的贡献。结果表明:在坡度和降雨强度一定时,坡上方来水量引起坡下方侵蚀产沙量随着上方来水量的增大而增大;在坡度一致和坡面径流量基本相同时,降雨侵蚀产沙量大于供水径流的侵蚀产沙量,降雨强度增大 1 倍时,坡面侵蚀产沙量增大约 50%;雨滴打击作用引起的侵蚀量占降雨侵蚀量 27.2% ~ 45.8%,雨滴打击作用对坡面侵蚀产沙量的贡献受降雨强度和侵蚀方式的影响。
中图分类号: S157.1

关键词: 降雨侵蚀 径流侵蚀 人工降雨试验 双土槽径流小区

A Study on Rainfall Erosion and Runoff Erosion

Zheng Fenli

(Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling District, Shaanxi Province, 712100, PRC)

Abstract Rainfall erosion process can be divided into 2 different aspects, runoff washing and raindrop impact, but their contribution to soil erosion can not be determined accurately under the condition of conventional rainfall simulation with single runoff plot. Relationships between rainfall erosion and runoff erosion and their contribution to soil erosion have been researched by using rainfall simulation with dual runoff plots. The research results show that under the same slope gradient and rainfall intensity, the sediment delivery in down-slope caused by runoff water from up-slope will increase with the increase of runoff water from up-slope. Under the condition of same slope steepness and runoff, sediment delivery caused by rainfall erosion is bigger than that caused by feeding runoff washing. Sediment delivery has increased by 50% when rainfall intensity increases 1 time. Sediment production caused by raindrop impact takes up 27.2% ~ 45.8% of total rainfall erosion, contribution from raindrop impact to sediment production is affected by rainfall intensity and erosion pattern.

Keywords: rainfall erosion; runoff erosion; rainfall simulation experiment; dual runoff plots

自从 50 a 前埃利森^[1~4]将土壤侵蚀过程分为降雨侵蚀、径流侵蚀和降雨搬运、径流搬运以来,许多土壤侵蚀专家、学者对降雨和径流在土壤侵蚀过程的作用进行了研究。美国福斯特和迈耶^[5]提出了细沟间侵蚀以降雨侵蚀为主,细沟侵蚀以径流侵蚀为主的结论,美国新一代水蚀预报模型(WEEP)就是基于此研究结果将侵蚀过程模型分为细沟间侵蚀和细沟侵蚀 2 个子模

型。随后,迈耶和福斯特^[6]又研究了降雨能量对细沟侵蚀的影响,结果表明消除雨滴打击能量后,细沟侵蚀量减少 1/2。在黄土高原的研究结果表明^[7],降雨侵蚀和径流侵蚀在细沟间侵蚀和细沟侵蚀中都有重要的作用,消除雨滴打击能量后,坡面细沟间侵蚀和细沟侵蚀同时减少,其中细沟间侵蚀量减少 33%~62%,细沟侵蚀量减少 38%~64%。尽管降雨侵蚀和径流侵蚀的研究取得了一定的进展,然而由于受研究条件的限制,在降雨过程中很难区分降雨侵蚀和径流侵蚀,同时雨滴打击又增加了坡面径流的侵蚀和搬运能力,使降雨侵蚀和径流侵蚀的研究更加困难,所有这些限制了降雨侵蚀和径流侵蚀的实验研究。美国国家土壤侵蚀研究实验室设计的双土槽径流小区实验装置^[8]为降雨侵蚀和径流侵蚀的研究提供了技术条件。为此,作者利用此装置对降雨侵蚀和径流侵蚀进行了研究,以期侵蚀预报模型的建立和水土保持措施的布设提供科学依据。

1 试验设计和研究方法

1.1 试验设计

用于试验的双土槽径流小区由试验土槽和供水土槽组成,试验土槽长 5 m,宽 1.2 m,供水土槽长 1.8 m,宽 1.2 m。试验土槽位于坡面下部,供水土槽位于坡面上部,二者通过连接装置进行连接使供沙土槽的径流输入到试验土槽中,模拟坡面径流对侵蚀产沙的影响。当 2 个土槽分开时,可以分别采集 2 个土槽的径流泥沙样。在试验过程中 2 个土槽可以很快地分开或连接而不需要关闭降雨设备。试验土槽的调节坡度为 0%~40%,次调节幅度为 5%,供水土槽可调节到任意坡度。此外,在试验土槽上端可通过放水装置模拟坡面薄层水流,研究在无雨滴打击情况下坡面径流对坡面侵蚀的影响。

试验设计共有 10 组,由试验土槽的 3 种降雨强度、两种坡度和不同供水强度组成(表 1)。试验所用的人工降雨设备为摆动下喷式人工降雨设备^[9],在 2 个土槽上方分别安装 2 组降雨装置,这 2 组降雨装置的降雨强度可分别控制,降雨强度可从 25 mm/h 调节到 200 mm/h。试验土槽的降雨高度为 2.8 m,供水土槽的降雨高度为 2.4 m。在降雨过程水压保持在 41.4 kPa。试验用土为印第安纳州的粉沙质土壤,其中沙质占 15%,粉沙质占 70%,粘粒占 15%。填土时不过筛、不研磨,保持土的自然结构状态,对大土块用手按自然节理分成 3~4 cm 的小土块,2 个土槽所填土层密度一致,填土深度为 25 cm。试验时的土壤含水量保持为田间持水量。

1.2 径流泥沙样的采集

试验开始时,用纤维布将供水土槽全部覆盖,其目的是通过消除雨滴打击力和径流对土壤表面的直接冲刷,形成分布较均匀的清水供给试验土槽。当 2 个土槽分开时,分别采集 2 个土槽的径流泥沙样各 8 个;然后将 2 个土槽连接,采集试验土槽(接受供沙土槽的来水)径流泥沙样 4 个;再将 2 个土槽分开,分别采集 2 个土槽径流泥沙样 2 个,用于监测试验过程中的侵蚀产沙量变化。

试验结束后,将径流泥沙样沉淀并倒掉清水后,放在 105℃ 的烘箱中烘干,用烘干泥沙重量计算含沙量和侵蚀产沙量。

1.3 产流量与产沙量的计算

当 2 个土槽分开时,每个土槽产流量和产沙量的计算分别取 2 个土槽连接前各自的后 4 个样和连接后各自 2 个样的平均值。当 2 个土槽连接时,其产流量和产沙量的计算为试验土槽 4 个样的平均值。试验结果见表 1 和表 2。

表1 人工降雨试验设计

处理	供水土槽			试验土槽			
	供水含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	供水强度/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	坡度/ %	降雨强度/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	降雨产流量/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	上端供水强度/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	总供水强度/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	4.3	7.0	10	100	10.0	-	7.0
2	2.4	2.6	10	100	10.0	-	2.4
3	4.7	-	10	50	5.3	-	5.3
4	-	-	10	-	-	6.0	6.0
5	4.2	-	10	100	10.0	-	-
6	-	-	10	-	-	10.2	10.2
7	4.7	5.3	10	50	2.3	-	5.3
8	5.0	5.3	10	25	2.6	2.6	7.8
9	5.0	5.3	5	50	5.3	-	5.3
10	4.8	5.3	5	25	2.6	2.6	7.8

表2 每次试验的产沙量

处理	供水土槽			试验土槽	
	供水含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	产沙量 S_u / ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	降雨强度/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	无来水时的产沙量 S_d / ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	接受来水时的产沙量 S_{ud} / ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	4.3	28.3	100	793.3	1468.3
2	2.4	6.7	100	810.0	1008.0
3	4.7	25.0	50	221.6	-
4	4.2	-	0	120.0	-
5	4.2	22.0	100	803.0	-
6	3.2	-	0	585	-
7	4.7	25.0	50	208.0	517.0
8	5.0	27.0	25	140.0	353.0
9	5.0	27.0	50	112.0	277.0
10	4.8	25.0	25	80.0	183.3

2 结果与讨论

2.1 在降雨强度相同而上方来水量不同时坡面侵蚀产沙量对比分析

从表3中的试验处理1和2的对比可以看出,在10%坡度和100mm/h降雨强度下,当试验土槽不接受上方来水时,两次试验的侵蚀产沙量基本相同,分别为793.3g/min和810g/min。而当试验土槽上端输入不同径流量时,坡面侵蚀产沙量也不相同,当从供水土槽输入径流量为7.0L/min时,试验土槽的侵蚀产沙量为1468.3g/min;当输入径流量为2.4L/min时,试验土槽的侵蚀产沙量为1008.3g/min,前者是后者的1.46倍。表明下方土槽侵蚀产沙量与上方土槽来水量具有密切关系。

为了确切表示上方来水对试验土槽侵蚀产沙量的影响程度,我们用单位上方来水引起的增沙量表示,即

$$A = S_{ud} - (S_d + S_u) / W_u$$

式中: A ——供水土槽单位来水引起试验土槽增加的产沙量(g/min); S_d ——试验土槽不接受上方来水时的侵蚀产沙量(g/min); S_u ——供水土槽的侵蚀产沙量(g/min); S_{ud} ——试验土槽接受上方来水时的产沙量(g/min); W_u ——上方来水量(L/min)。

在10%坡度和100mm/h降雨强度下,当上方来水量为17.0L/min时,上方来水引起的侵蚀产沙量为646.7g/min,单位上方来水量引起的侵蚀量为92.4g/L;当上方来水量为2.4

L/min 时, 上方来水引起的侵蚀产沙量为 191.3 g/min, 单位上方来水量引起的侵蚀量为 79.8 g/L。说明在坡度和降雨强度一定时, 单位上方来水引起的增沙量随着上方来水强度的增大有增大的趋势, 坡面上方来水量的增加使坡面侵蚀产沙量增大。由于上方来水造成的侵蚀属于坡面径流增加引起, 故控制上方来水量将显著减少坡面侵蚀产沙量。

表 3 降雨径流侵蚀和径流侵蚀的对比

试验处理	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ %	降雨径流量 (R _p)/ (L·min ⁻¹)	供水径流量 (R _w)/ (L·min ⁻¹)	总径流 (R _t)/ (L·min ⁻¹)	降雨径流 产沙量/ (g·min ⁻¹)	上方来水引 起产沙量/ (g·min ⁻¹)	雨滴打击引 起产沙量/ (g·min ⁻¹)
1	100	10	10.0	7.0	17.0	793.3	646.7	
2	100	10	10.0	2.6	12.4	810.0	191.3	
3	50	10	5.3	0	5.3	221.6	-	101.6
4	0	10	0	6.0	6.0	120.0	-	
5	100	10	10.0	0	10.0	803.0	-	218
6	0	10	0	10.2	10.2	585.5	-	
7	50	10	5.3	5.3	10.6	208	284	
8	25	10	2.6	7.8	10.0	140	186	
9	50	5	5.3	5.3	10.6	112.0	138	
10	25	5	2.6	7.8	10.4	80.0	78	

2.2 在径流量相同而降雨强度不同时的坡面侵蚀产沙量

试验过程观测表明: 在 5% 坡度和 25 mm/h, 50 mm/h 降雨强度及 10% 坡度和 25 mm/h, 50 mm/h 降雨强度的试验条件下, 试验土槽不发生细沟侵蚀, 即使在坡面上端输入薄层水流时, 坡面侵蚀方式仍为片蚀。当坡面为片蚀且产流量相同时, 坡面侵蚀产沙量随降雨强度的增大而增加。如表 3 中的试验处理 7 和 8, 坡度为 10% 的坡面上产流量基本相同(为 10.6 及 10.0 L/min), 降雨强度为 50 mm/h 时侵蚀产沙量为 517 g/min, 降雨强度为 25 mm/h 时侵蚀产沙量为 353.0 g/min, 前者是后者的 1.47 倍。试验处理 9 和 10, 坡度为 5% 的坡面上的产流量也基本相同(为 10.6 及 10.4 L/min), 而降雨强度为 50 mm/h 时的侵蚀产沙量为 277 g/min, 降雨强度为 25 mm/h 时的侵蚀产沙量为 183.3 g/min, 前者是后者的 1.51 倍。

在坡面径流量基本相同而降雨强度不同时, 坡面侵蚀产沙量增大的原因是降雨强度增加导致雨滴打击作用增强所引起的。当雨强增加 1 倍, 坡面侵蚀产沙量增大 47% ~ 51%。这与以往人工降雨试验研究得出的降雨强度增加 1 倍, 坡面侵蚀产沙量增加 4 倍的结论不同。其原因在于以往径流小区人工降雨试验, 在降雨强度增加的同时径流量也在增加, 侵蚀量的增加是雨滴打击作用增强和径流侵蚀增加共同作用的结果。因此双土槽小区试验可区分降雨侵蚀和径流侵蚀对坡面侵蚀产沙的贡献。

2.3 降雨侵蚀与径流侵蚀在坡面侵蚀中的作用

试验结果表明, 当试验土槽上方供水径流量略大于试验土槽降雨产流量时, 降雨引起侵蚀量明显大于供水径流引起的侵蚀量。如表 3 中试验处理 3 和 4, 降雨产流量为 5.3 L/min, 试验土槽的侵蚀产沙量为 221.6 g/min, 供水径流量为 6.0 L/min, 侵蚀产沙量为 120 g/min, 仅为降雨产流产生侵蚀量的 54.2%。试验处理 5 和 6 表明, 降雨产流量为 10 L/min, 降雨引起的侵蚀产沙量为 803 g/min, 供水径流量为 10.2 L/min, 侵蚀产沙量为 585 g/min, 占降雨径流侵蚀量的 72.9%。表明降雨的击溅作用增大了坡面径流的侵蚀和搬运泥沙的能力, 从而使坡面侵蚀量增加。因此, 增加地面覆盖, 消除雨滴的打击作用, 即可有效地防治土壤侵蚀。

由于供水径流侵蚀过程仅是径流对土壤的冲刷和搬运,而降雨侵蚀过程不仅包括降雨产流所形成的侵蚀作用,而且还包括雨滴打击引起的侵蚀量(包括雨滴对土壤的直接击溅作用和雨滴打击径流表面增加径流对土壤的分离和搬运作用)。因此,可以认为,在坡面径流量相同的侵蚀条件下,降雨侵蚀量由径流侵蚀量和雨滴打击引起的侵蚀量两部分构成。降雨侵蚀量与供水径流侵蚀量之差即是雨滴打击作用引起的侵蚀量。从试验处理3和4的对比中可知,在10%坡度和50 mm/h的降雨强度下,雨滴打击引起的侵蚀量为101.6 g/min,占降雨侵蚀量的45.8%;通过试验处理5和6的对比可以得出,在10%坡度和100 mm/h的降雨强度下,雨滴打击引起的侵蚀量为218 g/min,占降雨侵蚀量的27.2%。

对比试验处理3和5,可以看到降雨强度从50 mm/h增加为100 mm/h时,雨滴打击作用引起的侵蚀量占降雨径流侵蚀量的比例由45.8%降为27.2%。这是由于降雨强度的增大使坡面径流侵蚀作用增强的结果,特别是在100 mm/h的降雨强度下,坡面发生细沟侵蚀,坡面侵蚀方式以细沟侵蚀方式为主,导致雨滴打击引起的侵蚀量的比例下降。

3 结 论

(1) 传统的单径流小区降雨试验难以区分径流侵蚀作用和雨滴打击作用对坡面侵蚀的贡献,双土槽小区试验装置是研究降雨侵蚀和径流侵蚀的有效手段。

(2) 在坡度和降雨强度一定时,单位上方来水量引起的增沙量随着上方来水强度的增大有增大的趋势,坡面上方来水量的增加使坡面侵蚀产沙量增大,故控制上方来水量将显著减少坡面侵蚀产沙量。

(3) 在坡度一致和坡面径流量基本相同时,降雨侵蚀产沙量大于供水径流的侵蚀产沙量,降雨强度增大1倍而径流一致时,坡面侵蚀产沙量增大约50%,与以往降雨强度增大1倍径流强度也增大1倍、侵蚀产沙量增大4倍的结论有所不同;在降雨径流侵蚀过程中,雨滴打击作用引起的侵蚀产沙量占降雨侵蚀产沙量27.2%~45.8%,且雨滴打击作用对坡面侵蚀产沙量的贡献受降雨强度和侵蚀方式的影响。

参 考 文 献

- 1 Ellison W D. Soil erosion study- Part I: Agric. Eng. 1947a, 28: 145- 146
- 2 Ellison W D. Soil erosion study- Part II: Soil detachment hazard by raindrop splash. Agric. Eng. 1946b, 28: 197- 201
- 3 Ellison W D. Soil erosion study- Part V: Soil Transport in the splash process. Agric. Eng. 1947c, 28: 349 - 351, 353
- 4 Ellison W D, Ellison O T. Soil erosion study- Part VI: Soil detachment by surface flow. Agric. Eng. 1947d, 28: 403- 405, 408
- 5 Meyer L D, Wischmeier W H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Trans. ASAE, 1969, 12: 754- 758, 762
- 6 Meyer L D, Foster L D. Effect of rate and canopy on rill erosion. Trans. ASAE, 1975, 18(5)
- 7 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.人民黄河,1995,17(7)
- 8 Gabbard D S, Huang C, Norton L D, Steinhardt G C. Landscape position, surface hydraulic gradients and erosion processes. Earth Surf. Processes Landforms, 1998, 23: 83- 93
- 9 Foster G R, Eppert F P, Meyer L D. A programmable rainfall simulator for field plots. 1979, 45- 49. Agric. Rev. and Manuals ARM-W-10. USDA-ARS. Western Region. Oakland. CA