

黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究^{*}

郑粉莉

(中国科学院水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)
水利部

摘要

利用人工模拟降雨试验,通过在径流小区上覆盖纱网消除雨滴动能和增加雨滴降落高度来增加雨滴动能,并采用翻耕裸露作对照的试验处理,对黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀过程及其机理进行了研究。结果表明,坡面侵蚀产沙过程可明显的分为四个阶段,即溅蚀、细沟间侵蚀、细沟侵蚀和雨后径流侵蚀阶段。用纱网覆盖消除99.6%的雨滴动能后,细沟间侵蚀和细沟侵蚀分别减少35—61%和38—64%。文中对雨滴动能影响细沟间侵蚀和细沟侵蚀的机理进行了分析研究。

关键词 坡耕地, 细沟间侵蚀, 细沟侵蚀, 雨滴动能

黄土坡面土壤侵蚀发生发展过程包括细沟间侵蚀过程、细沟侵蚀过程和浅沟侵蚀过程,三者的发生发展及其在坡面侵蚀产沙中的作用是目前坡面侵蚀机制研究的核心内容,也是坡面侵蚀预报模型所考虑的关键所在。著名的美国新一代水蚀预报模型 WEPP 就是基于细沟间侵蚀和细沟侵蚀的过程而建立的。近十多年来,细沟间侵蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀的机制及其过程的研究,一直受到我国土壤侵蚀学者的广泛关注。本文利用人工模拟降雨试验,对坡面土壤侵蚀过程中的细沟间侵蚀过程和细沟侵蚀过程及其机理进行研究,以为建立我国的具有物理成因的坡面侵蚀预报模型提供理论依据。

1 试验方法和试验处理

人工降雨设备采用中国科学院水利部水土保持研究所研制的侧喷式单喷头的降雨装置^[1],降雨方式采用两个降雨器对喷。降雨器支架高5m,雨滴上喷1.5m,雨滴降落高度6.5m,使80%的雨滴达到终点降落高度。试验土槽采用人工填土,试验用土为武功粘黄土。土槽填土根据容重变化分为上层和下层,分别模拟坡耕地的耕层和犁底层。试验土槽面积 $5 \times 1.5\text{m}^2$,土层厚50cm。每次试验前翻耕土层20~25cm,每次降雨量控制在75~80mm,0~40cm土层的平均土壤含水量控制在13~15%,0~5cm土层的土壤含水量控制在6~10%。人工降雨试验设计包括两种雨强、4种坡度、两种雨滴降落高度、裸露地与尼龙纱网覆盖

^{*} 中国科学院“百人计划”项目、“黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室”基金和国家基金(49671051)资助。

收稿日期:1996-04-21; 收到修改稿日期:1997-04-11

(网孔 2mm × 2mm) 组合的 20 个处理(表 1)。人工降雨所采用的降雨强度为 1.45mm / min 和 2.40mm / min, 其雨滴动能分别相当于天然降雨强度为 0.65mm / min 和 1.12mm / min 所产生的雨滴动能^[2]。

在试验过程中, 观测其降雨过程、径流过程、产沙过程, 测定细沟内水流的流速、细沟间水流横向溢流到细沟内的水流流速、细沟间水流流速、坡面平均流速(用染色剂法); 并测量细沟发展过程(量尺法和摄影法)等。试验前后在试验土槽上、中、下部用特制小土钻测定土壤水分, 测定深度 40cm, 每隔 5cm 取一个土样, 并测定降雨前后土壤容重和土壤硬度的变化。

在土槽上方覆盖尼龙纱网(纱网距土槽土壤表面高度 10cm), 雨滴打击在纱网上, 破裂成许多小雨滴, 再以自由落体的形式降落在土壤表面。用色斑法^[3]观测了纱网上和纱网下的雨滴直径, 并计算了雨滴动能。其结果表明, 用纱网覆盖可消除雨滴动能的 99.6%^[4]。

表 1 人工降雨试验设计

Table 1 Design of simulated rainfall test

降雨强度 Rainfall intensity (mm/min)	雨滴降落高度 Height of raindrop falling (m)	坡度 Slope	试验次数 Test times (次)		
			翻耕裸露 Fallow	覆盖纱网 Net cover	
1.45	6.5	5°	2	1	
		10°	1	1	
		20°	2	1	
		25°	2	1	
	8.0	5°	2		
		20°	2		
		2.40	5°	2	1
			10°	1	1
20°	2		1		
25°	2		1		
8.0	5°	1			
	20°	1			

2 坡面侵蚀过程

2.1 坡面侵蚀产沙过程

不同雨强、不同坡度、不同雨滴降落高度的人工降雨试验结果表明, 黄土坡面侵蚀产沙过程及坡面径流含沙量变化过程具有明显的阶段性(图 1 和图 2)。

从图 1 可看出, 坡面侵蚀产沙过程可分为四个明显阶段: (1) 溅蚀阶段: 此时坡面的侵蚀方式主要是由雨滴击溅产生大量分散的土粒, 这些土粒在坡面刚刚形成的薄层水流的搬动下, 形成了坡面产沙的第一个高峰。此时产沙量的大小取决于雨滴打击力、地面坡度和土壤的抗侵蚀能力。(2) 细沟间侵蚀阶段: 由于雨滴对土壤表面的打击作用, 土壤表层受到力的冲击, 土壤表面形成较致密的很薄的临时结皮层, 同时, 土壤孔隙被封闭, 降水入渗能力降低, 形成坡面薄层水流, 此时坡面侵蚀主要是细沟间侵蚀。随着雨滴击溅分散颗粒的被搬运和临时结皮的形成, 一方面坡面上处于分散状态的土粒减少; 另一方面, 临

时性结皮的形成,使土壤抗侵蚀力相应增强。此外,坡面薄层水流的存在,使雨滴击溅的土粒减少。此阶段的侵蚀产沙主要是薄层水流对溅散土粒的输移和对土壤表面的层状剥蚀。因此,此阶段如果坡面不出现细沟侵蚀,坡面产沙量下降并趋于稳定。(3)细沟侵蚀为主阶段:由于临时性结皮的形成,使坡面的降雨入渗减少,径流量增大,径流冲刷力相应增强,面状水流逐步汇聚成线状水流,使水流侵蚀能力迅速增大,在坡面某处或多处形成细沟下切沟头,开始了细沟侵蚀的发生发展^[5],并形成产沙的第二个高峰。由于坡面土壤抗侵蚀力的空间差异及坡面微地形对径流侵蚀力的再分配作用,使细沟侵蚀发展过程出现差异。细沟

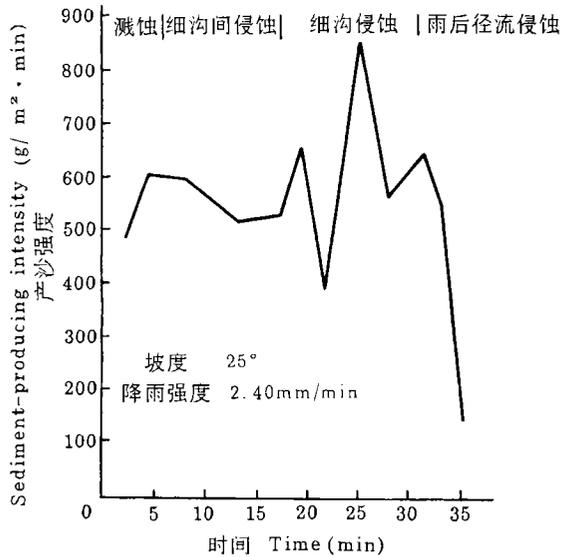


图1 坡面侵蚀产沙过程(坡度 25°,降雨强度 2.40mm/min)

Fig.1 Sediment-producing process of slope erosion (slope: 25°, rainfall intensity: 40mm/min)

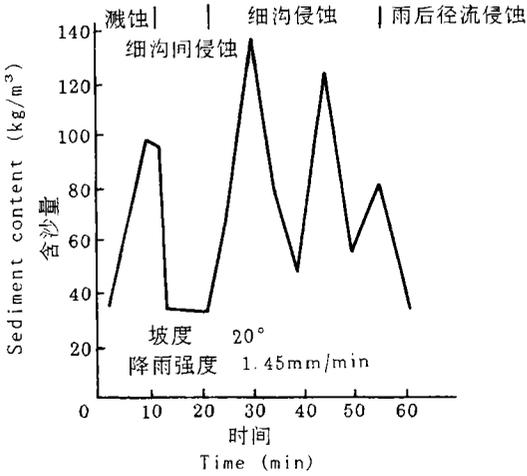


图2 坡面径流含沙量变化过程(坡度 20°,降雨强度 1.45mm/min)

Fig.2 Changes of sediment content of slope runoff (slope:20°; rainfall intensity:1.45mm/min)

侵蚀发展(细沟沟头溯源侵蚀快、沟底下切、沟壁崩塌)较快时,坡面产沙量和水流含沙量迅速增大;细沟侵蚀发展较慢或趋于稳定时,坡面产沙量和水流含沙量相应减少。因此,此时坡面侵蚀产沙量和水流含沙量的变化曲线呈波状起伏。(4)雨后径流侵蚀阶段:随着降雨的结束,坡面径流量很快减少以至消失,坡面侵蚀产沙量急剧下降以至趋于零。

图2表明了坡面径流含沙量的变化过程与坡面侵蚀产沙量变化过程类似,也具有明显的四个阶段,各阶段径流含沙量变化与坡面侵蚀产沙发展过程及其侵蚀产沙量密切相关。

2.2 细沟间侵蚀和细沟侵蚀的关系

细沟间侵蚀是坡面薄层水流搬运溅散土粒和对土壤表面进行层状剥蚀

的侵蚀过程,细沟侵蚀是集中的小股水流(线状水流)对土壤的冲刷过程。

细沟间侵蚀区的薄层水流属于层流,若没有雨滴击溅作用,其侵蚀能力极其微弱。在降雨过程中,细沟间侵蚀区的薄层水流趋向于集中并逐渐汇聚成线状水流;在水流分散的细沟间侵蚀区,被溅散的土粒倾向于被薄层水流搬运到水流相对集中区。因此,细沟间侵蚀区薄层水流的汇聚是坡面细沟侵蚀发生发展的动力条件。而在水流集中区,细沟侵蚀

的发生与否取决于坡面径流量是否大于发生细沟侵蚀的临界流量。只有在径流量大于发生细沟侵蚀的临界流量时,才有可能发生细沟侵蚀。

研究资料表明,细沟侵蚀主要是由径流水动力引起的,雨滴的击溅打击,增大了水流的紊动性,使水流的侵蚀能力增大,形成线状冲刷,导致细沟侵蚀形成,其侵蚀过程包括细沟沟头的溯源侵蚀过程、细沟的沟底下切过程和细沟沟壁的崩塌垮落过程。细沟的出现使细沟间侵蚀区和细沟侵蚀区之间存在横向比降,细沟间的薄层水流及其挟带的泥沙横向溢流到细沟内,通过细沟水流输送,缩短了细沟间侵蚀泥沙的搬运路径;另一方面,由于细沟的出现,细沟袭夺了坡面上的大部分水流,细沟内水流的流速增大,冲刷力和挟沙力增强,因而使坡面侵蚀产沙量迅速增大(表 2)。用覆盖纱网消除雨滴打击力后,径流水动力的增加受到抑制,使细沟侵蚀的发生受到影响,在较小雨强时,甚至不发生细沟侵蚀,在较大雨强时,发生细沟侵蚀的时间推迟。如在 1.45mm/min 雨强时,覆盖纱网处理下,不发生细沟侵蚀,细沟间侵蚀减少 35—61%;在 2.40mm/min 雨强时,覆盖纱网处理下,坡面上发生细沟侵蚀的时间较翻耕地上发生细沟侵蚀的时间滞后 3—5min。

表 2 有细沟与无细沟时坡面侵蚀产沙过程的比较(雨强为 1.45mm/min; 坡度为 10°)

Table 2 Comparison of sediment-producing process between slope erosion with and without producing rills (rainfall intensity: 1.45mm/min, slope: 10°)

有细沟 Rill		无细沟 No rill		减少(%) Reduction(%)
产流时间 Runoff-producing time (min:sec)	区间产沙量 Sediment (g)	产流时间 Runoff-producing time (min:sec)	区间产沙量 Sediment (g)	
10:20		11:20		
15:20	140.4	16:20	100.0	40.4
20:20	745.2	21:20	458.2	61.7
25:20	872.2	26:20	462.0	88.8
30:20	384.0	31:20	270.0	42.2
35:20	880.4	36:20	482.8	82.3
40:20	304.2	41:20	178.2	70.5

综上所述,在坡面土壤侵蚀的发生发展过程中,细沟间侵蚀区薄层水流的汇聚为细沟侵蚀的发生发展准备了水动力条件;细沟的形成和不断发展又袭夺了细沟间侵蚀区的薄层水流,细沟间侵蚀区的水流趋向于横向流动,并汇聚到细沟内,使细沟侵蚀得以不断增强,同时,细沟间侵蚀区的侵蚀泥沙也通过细沟水流输送。因此,细沟间侵蚀和细沟侵蚀通过水流溢流、袭夺与泥沙输移的关系被紧密地联系在一起,构成了坡面侵蚀产沙的全过程。降雨动能对坡面侵蚀过程中的溅蚀、细沟间侵蚀、细沟侵蚀均具有重要影响。

3 降雨动能对细沟间侵蚀和细沟侵蚀的影响及其机理

3.1 降雨动能对细沟间侵蚀和细沟侵蚀的影响

在坡面侵蚀过程中,由于降雨动能对侵蚀过程具有很大影响,因此,降雨动能的变化

必然影响坡面侵蚀产沙量的变化。

通过覆盖纱网消除雨滴动能的试验处理同翻耕裸露地处理相比,在降雨强度为 2.40mm/min 时,不同坡度的坡面上细沟间侵蚀量减少了 32.6—61.5%,细沟侵蚀量减少 37.9—63.9%(表 3)。

表 3 覆盖尼龙纱网与翻耕裸露处理细沟间侵蚀及细沟侵蚀的对比

Table 3 Comparison of interrill erosion and rill erosion between nylon net cover treatment and fallow treatment

雨强 Rain intensity (mm/min)	坡度 Slope	细沟间侵蚀量 Interrill erosion			细沟侵蚀量 Rill erosion		
		翻耕裸露 Fallow	覆盖纱网 Net cover	减少 Reduction	翻耕裸露 Fallow	覆盖纱网 Net cover	减少 Reduction
		(kg/m ²)	(kg/m ²)	(%)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(%)
2.40	5°	4.44	2.86	35.6	0.5	0.18	63.9
	10°	2.59	1.57	39.4	3.28	2.04	37.9
	20°	4.48	3.02	32.6	7.52	3.86	48.6
	25°	5.98	2.30	61.5	12.04	5.86	51.3

通过增加雨滴降落高度增加雨滴动能的人工降雨试验表明,在同样的降雨及坡度试验条件下,裸露地细沟间侵蚀量随雨滴降落高度的增加而增加,雨滴高度由 6.5m 增加到 8.0m,在降雨强度为 1.45mm/min 时,细沟间侵蚀量增加 17.6%,细沟侵蚀增加 34.9%,降雨动能平均每增加 1J/m²,侵蚀量增加 0.006—0.01kg/m²;而降雨强度为 2.40mm/min 时,则细沟间侵蚀和细沟侵蚀分别增加 35.5% 和 42.8%,平均每增加 1J/m²降雨动能,侵蚀量增加 0.015—0.020kg/m²(表 4)。

表 4 不同雨滴降落高度时细沟间侵蚀及细沟侵蚀的对比

Table 4 Comparison of interrill erosion and rill erosion among different raindrop falling heights

降雨强度 Rain intensity (mm/min)	雨滴降落高度 Raindrop falling heights (m)	雨滴动能 Raindrop kinetic energy (J/m ²)	雨滴动能增加值 Increase of raindrop kinetic energy (J/m ²)	细沟间侵蚀 Interrill erosion (kg/m ²)	增加 百分数 Increase (%)	细沟 侵蚀 Rill erosion (kg/m ²)	增加 百分数 Increase (%)
1.45	6.5	1421.2		2.054		1.651	
	8.0	1480.5	59.3	2.415	17.6	2.227	34.9
2.40	6.5	1819.4		5.241		5.519	
	8.0	1940.1	120.7	7.052	35.5	7.881	42.8

注:坡度为 20°。

上述事实表明,雨滴动能对坡面细沟间侵蚀和细沟侵蚀具有重要影响,通过增加雨滴降落高度,增加雨滴动能将显著增大坡面侵蚀量。同时表明,随着降雨强度的增大,单位雨滴动能所引起的侵蚀量也越大,突出说明雨滴动能在坡面侵蚀中的显著作用。因此,可以认为雨滴的打击力是细沟间侵蚀和细沟侵蚀的主要侵蚀动力。

3.2 降雨动能对坡面产沙量变化的影响

坡面侵蚀量是细沟间侵蚀量和细沟侵蚀量的总和,可用产沙强度表示(单位时间单位面积上的产沙量)。用纱网覆盖消除雨滴动能后,坡面上几乎不存在雨滴溅散的土粒,溅

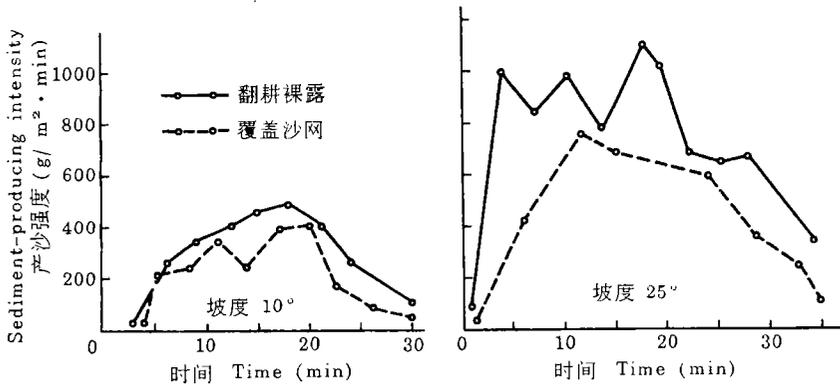


图3 翻耕裸露与覆盖尼龙纱网处理产沙强度的变化对比

Fig.3 Comparison of sediment-producing intensity between fallow treatment and nylon net cover treatment

蚀量接近于零;同时,由于坡面径流量减少,径流的冲刷力和挟沙力减弱,细沟间侵蚀量和细沟侵蚀量都明显降低;另一方面还由于消除了雨滴打击径流表面增加径流紊动性的能力,也使径流冲刷力和挟沙力降低。因而使坡面侵蚀产沙强度显著降低。从图3可看出,经纱网覆盖后,无论是10°还是25°的坡面,其产沙强度均显著降低。

3.3 降雨动能影响细沟间侵蚀和细沟侵蚀的机理分析

3.3.1 土壤入渗性能的变化

消除雨滴动能后,土壤表面的免遭雨滴打击破坏,土壤理化性状恶化的程度减弱,有利于降水入渗,减少坡面径流量,从而减少坡面侵蚀量。如在没有纱网覆盖的翻耕裸露地上,降雨后同降雨前相比,土壤容重增加29%,非毛管孔隙减少57.7%;而用纱网覆盖消除雨滴动能后,降雨后同降雨前相比,土壤容重只增加9%,非毛管孔隙也只减少18.7%,即消除雨滴动能可使雨后土壤容重的增加值减少20%,非毛管孔隙减少值减小39%。这表明消除雨滴动能使土壤理化性状遭受雨滴打击破坏的程序减弱,特别是土壤表面因雨滴打击造成的表面土壤封闭作用减弱,土壤表面

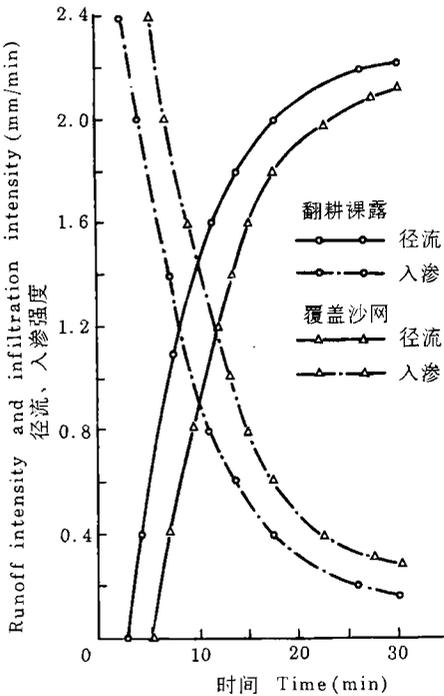


图4 覆盖尼龙纱网与翻耕裸露处理的径流、入渗过程比较

Fig.4 Comparison of runoff process and infiltration process between fallow treatment and nylon net cover treatment

难以形成结皮。因此,消除雨滴动能后的降水入渗强度和入渗深度均较不消除雨滴动能时的降水入渗强度和入渗深度增加。图4表明用纱网覆盖消除雨滴动能后,径流强度减少,而入渗强度增大;图5可以看出,在同样降雨试验条件下,纱网覆盖试验处理下的降水入渗深度达40cm,而翻耕裸露试验处理下的降水入渗深度为30cm。

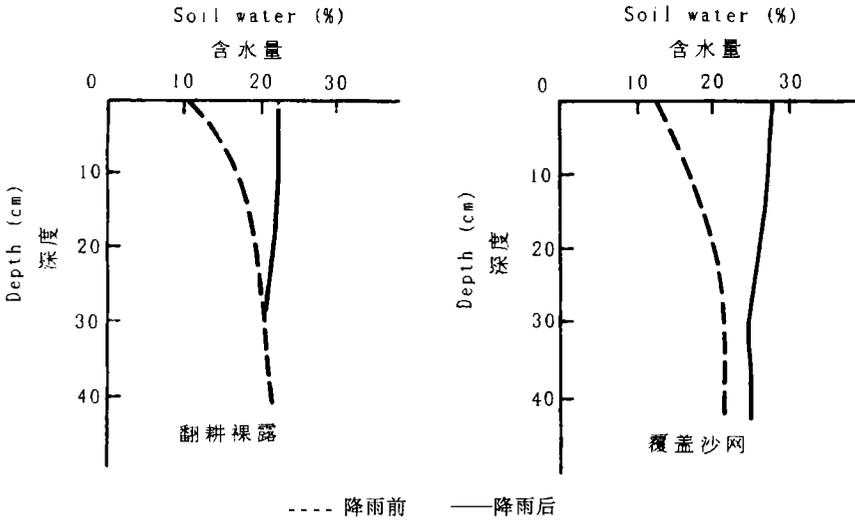


图 5 降雨前后翻耕裸露和覆盖尼龙纱网处理土壤水分的变化

Fig.5 Changes of soil water in the fallow treatment and nylon net cover treatment before and after raining

3.3.2 坡面产流特征的变化 消除雨滴动能后,坡面产流时间推迟。如在 10°坡面上,当雨强为 2.40mm / min 时,翻耕裸露地上发生径流的时间为 2 分 40 秒,而纱网覆盖处理后发生径流的时间为 5 分,后者较前者推迟 2 分 20 秒。另一方面,消除雨滴动能后,降雨入渗量增加,径流量减少。如在 25°坡面上,当雨强为 2.40mm / min 时,纱网覆盖处理的坡面径流量为 42mm,径流系数为 0.5;而没有纱网覆盖处理的翻耕裸露地的径流量为 60mm,径流系数为 0.7。同时,消除雨滴动能后,由于坡面不易形成结皮,土壤入渗量增大,其结果导致发生细沟侵蚀的临界流量增大,其发生的时间也滞后,对应的临界降雨量相应增大。同翻耕裸露地处理相比,在不同雨强和不同坡度上,发生细沟侵蚀的临界流量增大 77.5%,时间滞后 3—5 分,在 10°坡面上,当雨强为 2.40mm / min 时发生细沟侵蚀的临界降雨量由裸露处理时的 6.40mm 增大到 12.00mm。

3.3.3 坡面侵蚀能量的变化 坡面侵蚀能量包括降雨动能、坡面径流位能(坡面上水流

表 5 覆盖尼龙纱网和翻耕裸露处理径流位能的比较

Table 5 Comparison of runoff potential energy between nylon net cover treatment and fallow treatment

雨强 Rainfall intensity (mm/min)	坡度 Slope	径流位能Runoff potential energy (J/m ²)		
		翻耕裸露 Fallow	覆盖纱网 Net cover	减少 Reduction (%)
1.45	5°	97.74	54.25	44.5
	10°	185.36	107.22	42.2
	20°	425.78	224.14	47.4
	25°	491.28	274.77	44.1
2.40	5°	113.76	84.55	25.7
	10°	370.94	190.80	48.6
	20°	745.68	410.60	44.9
	25°	903.40	564.69	37.5

表 6 覆盖尼龙纱网与翻耕裸露处理的产流过程、平均流速和径流动能的对比

Table 6 Comparison of runoff-producing process, mean runoff velocity and runoff kinetic energy between nylon net cover treatment and fallow treatment

翻耕裸露				覆盖纱网			
Fallow				Net cover			
产流时间	区间径流	平均流速	径流动能	产流时间	区间径流	平均流速	径流动能
Runoff-producing time(min:sec)	Runoff (mm)	Mean runoff velocity (cm/min)	Runoff kinetic energy(J)	Runoff-producing time(min:sec)	Runoff (mm)	Mean runoff velocity (cm/min)	Runoff kinetic energy(J)
1:50				2:50			
4	4.5	16.5	0.50	5:50	2.2	10.5	0.1
7	5.1	19.0	0.75	8:30	2.2	10.5	0.1
10	5.1	19.0	0.75	11:30	3.7	15.0	0.34
13	5.4	20.0	0.88	15:30	5.0	16.0	0.48
16	5.5	20.0	0.90	17:30	4.4	16.5	0.49
19	6.3	21.0	1.14	21:30	4.5	17.0	0.43
22	6.7	21.5	1.27	24:30	4.5	17.0	0.53
25	6.8	21.5	1.27	26:30	4.5	17.0	0.53

注: 雨强为2.40mm/min, 坡度为25°。

相对试验槽出口高差的势能)和径流动能(径流在坡面流动过程中产生的冲刷动能)。试验表明,雨滴击溅作用除使土壤表面土粒分散外,雨滴打击水流表面增加水流的紊动性,将显著提高水流的侵蚀能力。用沙网覆盖后,雨滴动能几乎被完全消除,坡面径流位能和径流动能也由于入渗量的增加和径流量的减少而明显减少(表5和表6),必然导致坡面侵蚀量的减小。

4 结 论

1. 黄土坡面土壤侵蚀过程可明显分为溅蚀、细沟间侵蚀、细沟侵蚀和雨后径流侵蚀四个阶段,细沟间侵蚀和细沟侵蚀是坡面侵蚀过程的主体,二者通过水流溢流、袭夺与泥沙输移的关系被紧密地联系在一起。

2. 降雨动能对坡面侵蚀产沙量产生显著影响,用纱网覆盖消除99.6%的雨滴动能后,细沟间侵蚀和细沟侵蚀分别减少35—61%和38—64%。

3. 降雨动能对坡面侵蚀过程影响的机理为消除雨滴动能后,使得土壤表面结构被破坏的程度减轻,不易形成结皮,利于降水入渗,一方面导致坡面径流发生的时间推迟,发生细沟侵蚀的临界流量增大;另一方面,导致发生细沟侵蚀的时间推迟,使发生细沟侵蚀的临界降雨量相应增大;同时,由于坡面径流量减少,使坡面侵蚀能量减少,其结果将显著减少坡面侵蚀量。

参 考 文 献

1. 陈文亮. 组合侧喷式野外人工模拟降雨装置. 水土保持通报, 1984, 4(5):43—47
2. 郑粉莉, 唐克丽, 陈文亮. 细沟侵蚀过程的研究方法. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(17集). 西安:陕西科学技术出版社, 1993, 107—111
3. 窦葆璋. 雨滴的观测和计算方法. 水土保持通报, 1982, 2(1):44—47
4. 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):22—24
5. 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨. 水土保持学报, 1987, 1(1):36—48

STUDY ON INTERRILL EROSION AND RILL EROSION ON SLOPE FARMLAND OF LOESS AREA

Zheng Fen-li

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

Summary

Using simulated rainfall experiment, interrill erosion and rill erosion on slope farmland of loess area were researched through putting nylon net cover on runoff plots, to eliminate raindrop kinetic energy, increasing raindrop falling height to increase raindrop kinetic energy and turning up the soil as the contrast tests. The results showed that erosion and sediment can be divided into 4 stages, that is, raindrop splash, interrill erosion, rill erosion and runoff erosion after raining. After eliminating 99.6% of raindrop kinetic energy, interrill erosion and rill erosion were obviously reduced, interrill erosion was decreased by 35—61% and rill erosion was reduced by 35—64%. In addition, affecting mechanism of raindrop kinetic energy on interrill erosion and rill erosion was analyzed.

Key words Slope farmland, Interrill erosion, Rill erosion, Raindrop kinetic energy