

坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究

郑粉莉 唐克丽 周佩华

(中国科学院西北水土保持研究所)

摘 要

本文利用人工降雨试验和野外调查资料分析研究了黄土高原坡耕地细沟侵蚀发生发展的影响因素。其结果表明:降雨径流能量(尤其是径流能量)、土壤抗侵蚀性能、坡度、坡长、坡形、土地管理是影响细沟侵蚀的主要因素。作者认为防治坡耕地土壤侵蚀的关键是削弱降雨能量和提高土壤的抗侵蚀性能。

黄土高原的土壤侵蚀及黄河的泥沙淤积问题为世界所瞩目,人们不合理的坡面垦殖造成了坡耕地的严重水土流失,肥沃表土的流失成为坡耕地退化的重要原因。据唐克丽的研究:“在黄土丘陵沟壑区的杏子河流域,坡耕地的土壤侵蚀量占总侵蚀量的60%以上^[1]”。而细沟侵蚀是黄土高原坡耕地土壤侵蚀的主要方式之一,细沟侵蚀量占总侵蚀量的45.3%,占坡面侵蚀量的70%^[2]。所以,研究坡耕地土壤侵蚀规律及有效地防治坡耕地土壤侵蚀具有重要的意义。

一、试验区概况与研究方法

试验区选在陕北安塞县茶坊村,典型的梁峁丘陵沟壑区。区内沟壑纵横,梁峁起伏,相对高差100—300米,沟道密度5—6公里/公里²,大于25°的地面占67—74%^[3]。年降雨量平均为400—500mm,主要集中在7—9三个月,占年雨量的60%^[3]降雨形式以短历时暴雨为多,往往一次降雨可占全年雨量的30%,10分钟雨量可达23.4mm,60分钟雨量达42.9mm^[4]。土壤为黄绵土,其成土过程处于母质阶段,有机质含量小于1%,颗粒组成以粉粒级为主,占总颗粒的41.5—74.4%,土壤质地疏松而无结构,抗蚀抗冲能力差,抗冲强度指标只有6.4^[4]。所有这些不利条件导致了区内严重的土壤侵蚀,侵蚀模数一年可达1.52万吨/公里²在毁林毁草开荒的陡坡地上一年可达3—5万吨/公里²。

本文主要以当年降雨或一次降雨情况下所形成的细沟为研究对象。鉴于在天然降雨情况下资料的积累有一定的困难,因此,在野外调查的同时,还运用了人工降雨的试验方法。

(一) 野外调查 于1985年雨季,在研究区调查量测了坡度、坡长、坡形、土地利用方式和作物种类等不同因子的影响下坡耕地上的细沟侵蚀。同时还布设了荞麦地、不同集流能量的免耕麦茬地和秸秆覆盖地等不同的处理,并以麦茬地翻耕裸露休闲地作为对照^[5]。

(二) 人工降雨试验 1985年使用侧喷式单喷头的降雨设备进行了人工降雨试验^[6]。试验小区水平面积为7.5m²(1.5m×5m),坡度有5°、10°、20°、25°共14个小区,小区内填武功黄土母质(一部分是1985年所填,一部分是1972年所填),地面处理为翻耕裸露休闲。

在降雨量为75—80mm和土壤前期含水量为10—15%条件下进行了三种雨强、四种坡度、两种土

壤及两种雨滴降落高度的共 22 个处理 44 次试验。在降雨量基本相同的情况下,不同雨强每组试验历时 20—60 分钟,每隔 2—5 分钟观测降雨过程、径流过程和产沙量的变化过程等。

由于在试验条件下雨滴的降落高度偏小,雨滴还不到天然降雨的极限速度,故我们用色斑法收集了雨滴的大小和分布,求出了在上述不同雨强、坡度、雨滴降落高度上的雨滴动能^[7]

二、影响细沟侵蚀的因素分析

细沟侵蚀是在降雨径流侵蚀力大于土壤抗侵蚀力时形成和发展的。因此,影响细沟侵蚀的最直接因素是降雨径流侵蚀力和土壤抗侵蚀性能两个方面。其它如坡度、坡长、坡形和土地管理因子等主要是通过削弱或者加剧这两类因素而对细沟侵蚀产生影响的。

(一) 降雨径流因素

1. 降雨侵蚀力: 降雨动能是表示侵蚀力的最好指标。研究资料表明: 降雨动能对细沟侵蚀有较大的影响(表 1)。在同一坡度小区上,如增加雨滴降落高度(试验是从 6.5m 增至 8.0m)能增加降雨动能,细沟侵蚀量就随之而增大,且降雨动能的增加值越大,细沟侵蚀量也越大。假设降雨动能的增加值为 x (焦耳/米²)和细沟侵蚀量的增加值为 y (公斤/米²)的相关方程为:

$$y = -0.153 + 0.009x \quad (r = 0.954^{**}) \quad (1)$$

降雨动能对细沟侵蚀的影响一方面是由于雨滴打击土壤,破坏了土壤结构,进而影响水分的入渗而对细沟侵蚀产生影响。例如 20° 坡面上,降雨动能分别为 1421.2 和 1480.5 焦耳/米²时,土壤水分稳渗率分别为 0.68 和 0.59mm/分,后者较前者减少了 13.2%。另一方面雨滴打击在水流表面,增加了径流的紊动性,使径流的冲刷力和夹沙能力增强,细沟侵蚀量随之也增大。在上述雨滴动能下的细沟侵蚀量分别为 1.645 和 2.227 公斤/米²后者较前者增加了 35.4%,充分说明了降雨动能大,细沟侵蚀量也大。

野外调查的资料同样表明细沟侵蚀量是随降雨动能的增加而增加。细沟平均深为 R_{Hc} (cm) 降雨动能为 E_d (焦耳/米²),其相关方程为

$$R_{Hc} = 0.089 + 0.001E_d \quad (r = 0.928^{**}) \quad (2)$$

另外,调查资料还表明细沟平均深随 30 分钟最大雨强 (I_{30}) 的增加而增加。 I_{30} (mm/分) 与细沟平均深 R_{Hc} (cm) 的相关方程为

$$R_{Hc} = 0.026 + 2.208I_{30} \quad (\text{相关系数 } r = 0.994^{**}) \quad (3)$$

2. 径流侵蚀力: 径流侵蚀力是造成细沟侵蚀的直接动力,只有当径流量达到冲动土块形成滴水,进而演化为细沟下切沟头时才发生细沟侵蚀^[8]。细沟侵蚀形成后,随着相对流量(瞬时流量减去临界流量)的不断增加,细沟侵蚀量也不断增加。把径流量换算成径流位能(表 2)对径流位能 E_r (焦耳/米²)与细沟侵蚀量 G_R (公斤/米²)进行相关分析,得

$$G_R = -1.366 + 0.015E_r \quad (r = 0.984^{**}) \quad (4)$$

3. 降雨动能和径流位能的综合影响分析: 从以上分析可知,降雨动能、径流位能都与细沟侵蚀有密切的关系。为了进一步分析二者对细沟侵蚀的影响程度,用表 2 资料对降雨动能、径流位能与细沟侵蚀量进行二元回归分析,得

$$G_R = -2.632 + 1.44 \times 10^{-2}E_d + 7.487 \times 10^{-4}E_r \quad (r = 0.985^{**}) \quad (5)$$

表 1 降雨动能与细沟侵蚀量*

Table 1 Kinetic energy of rainfall and rill erosion amount

雨 强 (mm/分) Rainfall intensity (mm/min)	坡 度 (度) Slope degree (°)	雨滴降落高度 (米) Raindrop landing height (m)	降雨动能 (焦尔/米 ²) Rainfall kinetic energy (J/m ²)	细沟侵蚀量 (公斤/米 ²) Rill erosion erosion amount (kg/m ²)	对 照	
					降雨动能增加值 (焦尔/米 ²) Increased value of rainfall kinetic energy (J/m ²)	细沟侵蚀量(公斤/米 ²) Increased value of rill erosion amount (kg/m ²)
1.45**	5	8.0 6.5	1496.2 1454.8	0.149 0.036	41.4	0.113
	20	8.0 6.5	1480.5 1421.2	2.227 1.645	59.3	0.582
2.40**	5	8.0 6.5	1980.1 1883.6	1.197 0.497	96.5	0.699
	20	8.0 6.5	1940.5 1819.4	6.299 5.519	121.1	0.780
4.34**	5	8.0 6.5	2510.2 2553.6	2.544 1.043	156.6	1.511
	20	8.0 6.5	2446.6 2252.2	13.644 12.099	194.0	1.545

* 为人工降雨资料。

** 分别相当于天然雨强 0.65, 1.12, 3.34 mm/分。

表 2 径流位能、降雨动能与细沟侵蚀量*

Table 2 Runoff potential energy, rainfall kinetic energy and rill erosion amount

次 数 No.	径流位能**(焦耳/米 ²) Runoff potential energy (J/m ²)	降雨动能(焦耳/米 ²) Rainfall kinetic energy (J/m ²)	细沟侵蚀量(公斤/米 ²) Rill erosion amount (kg/m ²)
1	97.74	1454.82	0.036
2	113.76	1496.14	0.298
3	139.40	1922.82	0.927
4	145.00	2021.36	1.197
5	163.76	2235.98	1.597
6	185.36	2387.74	2.043
7	370.94	1421.24	3.996
8	423.56	1480.48	3.769
9	425.78	1496.14	3.805
10	453.78	1421.24	5.885
11	491.28	1407.38	6.627
12	694.62	1857.26	6.918
13	743.86	1980.96	7.993
14	745.68	1819.36	9.763
15	903.40	1829.94	12.246
16	1052.52	2139.60	13.764
17	1124.70	2139.60	16.803

* 人工降雨资料; ** 径流位能 $E_r = \frac{1}{2} mgh/2 = \frac{1}{4} Qgh$ (Q 为总洪水量, h 为小区高度)。

表 3 坡度与细沟侵蚀量*

Table 3 slope degrees and rill erosion amount

次 数 No.	坡度(度) Slope degrees (°)	径流发生时间(分, 秒) Occured time of runoff (min'sec'')	细沟侵入量(公斤/米 ²) Rill erosion amount (kg/m ²)	对 照 Control (%)
1	5	2'20"	0.498	100
2	10	2'20"	1.647	330.7
3	20	1'40"	7.519	1509.8
4	22**	1'15"	9.916	1991.2
5	25	1'05"	12.043	2418.3

* 人工降雨资料,雨强为 2.40 毫米/分; ** 径流小区填土不够,实测坡度为 22°。

式中, E_r 和 E_k 分别为径流位能和降雨动能 (焦耳/米²)

G_R 为细沟侵蚀量 (公斤/米²)。

根据对径流位能和降雨动能分别对细沟侵蚀量影响的方差分析结果为 $F = 225.66 \alpha - 0.01$ 呈高度显著。其中 $F_1 = 419.05$ $F_2 = 1.06$ 。这进一步说明径流位能对细沟侵蚀的影响远大于降雨动能对细沟侵蚀的影响。

(二) 土壤因素

土壤对细沟侵蚀的影响很复杂。这里仅以水稳性团粒含量不等的不同年份的黄土母质作比较。在 20° 坡面上通过降雨动能为 1421.2 和 1819.4 焦耳/米² 的人工降雨试验,

1972年所填的黄土母质的细沟侵蚀量较1985年所填的黄土母质分别减少了64.6%和62.3%。造成这种现象的原因是因1972年的黄土母质,由于10多年的撩荒和种植沙打旺在根系固结作用下,土壤有较好的水稳性团粒结构,这种土壤含 $>0.25\text{mm}$ 的水稳性团粒含量是1985年黄土母质的4倍。因为具有较好水稳性团粒结构的土壤,抗蚀抗冲能力较强,土壤不容易冲刷。如草地表土大于 0.25mm 的水稳性团粒含量为44.8%;农地表土的 $>0.25\text{mm}$ 的水稳性团粒结构含量只有6.8%。前者的抗冲性指标是后者的31.8—32.7倍。因此,与农地相比较,草地上一般很少出现细沟侵蚀。同时有较好团粒结构的土壤,因孔隙性状好,有利于水分入渗。在 20° 的坡面上,以降雨动能为 $1819\text{焦耳}/\text{m}^2$ 的人工降雨试验资料表明了1972年黄土母质的稳渗率为 $0.40\text{mm}/\text{分}$,而1985年黄土母质仅 $0.16\text{mm}/\text{分}$,前者是后者的2.5倍。由于入渗量的增加,径流量相应减少,径流侵蚀力也相应减弱,而使产沙量变小(图1),因此细沟侵蚀量亦减少。

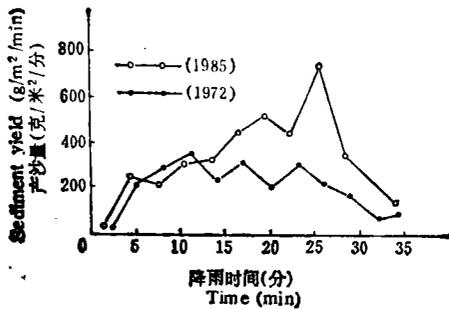


图1 不同土壤产沙量曲线

Fig. 1 The sediment yield curve of different soil

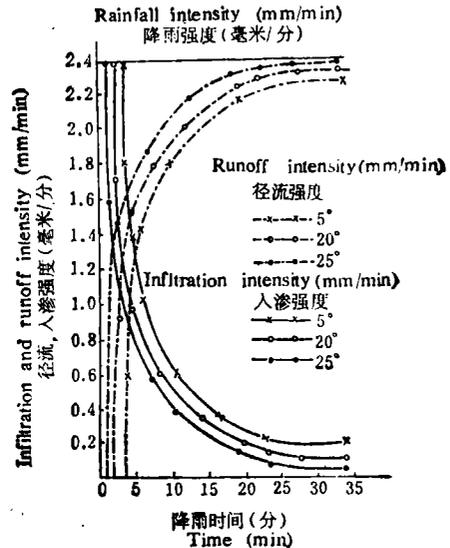


图2 不同坡度的入渗和径流强度曲线

Fig. 2 The infiltration and runoff intensity curve on different slopes

(三) 地形因素

1. 坡度: 坡度对细沟侵蚀产生极大的影响,在一定坡度范围内,随着坡度的增加,细沟侵蚀量也在增加(表3)用表3的细沟侵蚀量 G_R (公斤/米²)与坡度 J (度)进行相关分析,得

$$G_R = 0.018J^{2.01} \quad (\text{相关系数 } r = 0.998^{**}) \quad (6)$$

坡度对细沟侵蚀产生极大影响的原因是随坡度的增加产生径流的时间提前(表3),入渗强度降低,入渗量减少,而径流强度和径流量加大(图2);同时随着坡度的增加,径流位能加大,径流的冲刷力和夹沙能力增强,产沙量随之增加,因而使细沟平均深增加,细沟侵蚀量增大(图3、4)。

2. 坡长: 坡长对细沟侵蚀的影响是一个比较复杂的问题。在坡耕地上,由于耕作所引起地表起伏的不一,径流能量随坡长的变化及沿着坡长和坡度的变化等,使细沟侵蚀沿着坡长的变化缺乏规律性。在直形坡上(坡度为 26° ,而无横向变化),细沟侵蚀量一般随

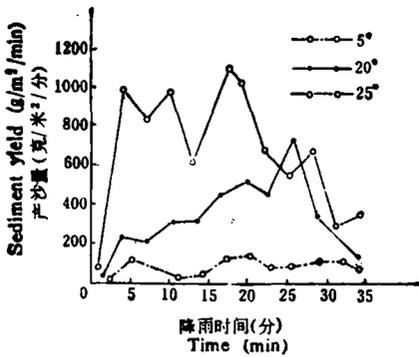


图 3 不同坡度的产沙量曲线

Fig. 3 The sediment yield curve on different slopes

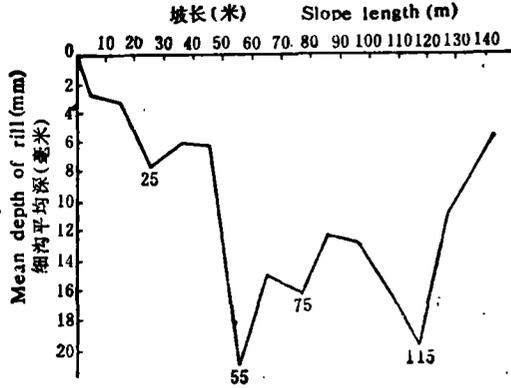


图 4 细沟侵蚀沿坡长的变化

Fig. 4 The mean depth chang of rill with slope length

着坡长的增加而增加,约到 25 米左右出现侵蚀剧烈地段,以后每隔 20—30 米出现侵蚀剧烈地段(图 4)。

在复合形的坡上,由于坡度亦随坡长有变化,因此,细沟侵蚀沿着坡长的变化并无规律性。

3. 坡度、坡长的综合影响分析: 从上述分析可知,坡度对细沟侵蚀产生极大影响,而坡长对细沟侵蚀的影响比较复杂。在直形坡上,细沟侵蚀量随波长的变化而呈波状起伏变化,为了说明二者对细沟侵蚀的影响,对坡度、坡长与细沟平均深度进行二元回归分析,其结果为

$$R_{Hc} = 2.08 \times 10^{-4} J^{2.310} D^{0.733} \quad (\text{相关系数 } r = 0.968^{**}) \quad (7)$$

式中 R_{Hc} 为细沟平均深 (mm), J 为坡度 (度),

D 为细沟出现后从上到下的距离 (m)

根据坡度和坡长分别对细沟侵蚀深度影响的方差分析,其结果为 $F = 82.611 \alpha = 0.01$ 呈高度显著。其中坡度对回归方程的贡献远大于坡长。所以坡度在黄土高原的地形因素中是影响细沟侵蚀的主要因子。这一论点正好与国外报道不同。L. D. 迈耶等人依据有限资料建议在以细沟侵蚀为主时,其累积坡长指数是 2^[8],而我们的坡长指数是 0.733,还不到 1; N. W. Wanlieu 等研究结果表明了细沟侵蚀量与坡度的 0.67 次方成正比^[9],而我们的坡度指数是 2.310,为其 3 倍多。这充分说明我国黄土高原坡耕地的细沟侵蚀有其特殊性。这个问题还有待进一步的深入研究。

4. 坡形: 坡形不但影响细沟侵蚀的分布状况,也影响细沟侵蚀的严重程度。野外调查资料表明: 在瓦背状地形的凹洼部分,细沟分布密集,侵蚀量大;在凸出部分,细沟分布稀疏,侵蚀量小,对于直形坡的细沟侵蚀量处于上述二者之间(表 4)。

对表 4 中的资料进行统计分析,得

$$\begin{aligned} y &= 0.1 + 1.3x \quad (r = 0.993^{**}) \\ z &= 1.4 + 0.5x \quad (r = 0.912^{**}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, x , y , z 依次是直形坡, 瓦背状地形的凹洼部分和凸出部分的细沟平均深 (mm)。

表 4 坡形与细沟平均侵蚀深*
Table 4 Slope shape and mean depth of rill

No.	凸凹坡形 Convex-concave shape				直形坡 Straight slope	
	凹洼部分 Concave		凸起部分 Convex		坡度(度) Slope degree (°)	细沟平均深 (毫米) Mean depth of rill (mm)
	坡度(度) Slope degree (°)	细沟平均深 (毫米) Mean depth of rill (mm)	坡度(度) Slope degree (°)	细沟平均深 (毫米) Mean depth of rill (mm)		
1	33.6	4.6	33.6	1.6	31.0	2.8
2	33.0	8.9	33.6	6.2		7.4
3	35.0	25.9	34.7	9.9		19.4
4	25.0	11.7	26.6	7.3	34.0	8.9
5	22.0	7.5	23.6	3.1		4.2
6	37.6	11.5	37.6	6.3		8.5
7	34.2	8.7	34.2	4.6	34.0	6.3
8	36.3	12.9	36.3	7.3		9.2
9	32.3	6.5	32.3	2.2		4.1

* 为野外调查资料,地面处理为翻耕裸露休闲地,降雨量 56mm, 30 分钟最大雨强为 0.85 毫米/分。

(四) 土地管理因素

坡耕地是人类活动的场所,对坡耕地的耕作管理措施合理与否,将对细沟侵蚀直接起着限制或加剧的作用,黄土高原 7—9 月是暴雨季节,这就为细沟侵蚀的发生发展提供了足够的侵蚀能量;而此时,恰蓬小麦收割完毕,地面裸露翻耕而没有任何水土保持措施而且又正值荞麦的播种或幼苗期,即使种植的其它秋季作物也由于中耕松土和覆盖度低,而为细沟侵蚀发生发展提供了有利条件。所有这些不合理的耕作管理措施导致了严重的细沟侵蚀。试验调查表明:翻耕麦茬休闲地上发生侵蚀的细沟平均深(3.02 cm)是免耕麦茬地(0.38cm)的 7.9 倍,是秸秆覆盖地(0.30cm)的 10.1 倍;种植荞麦地的细沟平均深(3.55cm)是免耕麦茬地的 9.3 倍,是秸秆覆盖地的 11.8 倍;洋山芋地的细沟平均深(1.89 cm)是免耕麦茬地的 5.0 倍,是秸秆覆盖地的 6.3 倍。因此,不合理的耕作管理措施是引起细沟侵蚀的重要原因。

通过以上分析,我们认为,基于黄土高原暴雨与坡耕地土壤侵蚀同期发生以及坡陡,地形复杂、土壤抗蚀抗冲性很弱的特点,应该对大面积的坡耕地实施有效的水土保持措施,以达到保护土壤和减少入黄河泥沙的目的。

参 考 文 献

- [1] 唐克丽等,1983: 杏子河流域坡耕地的水土流失及其防治。水土保持通报,第 5 期,43—48 页。
- [2] 朱显谟,1982: 黄土高原流水侵蚀的主要类型及有关因素。水土保持通报,第 1—3 期。
- [3] 唐克丽等,1984: 杏子河流域的土壤侵蚀方式及其分布规律。水土保持通报,第 5 期,10—19 页。
- [4] 中国科学院西北水土保持研究所主编,1986: 黄土高原杏子河流域自然资源与水土保持。陕西科学技术出版社。
- [5] 郑粉莉等,1987: 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,第 1 卷 1 期,36—48 页。
- [6] 周佩华等,1981: 降雨能量试验研究初报。水土保持通报,第 1 期,51—61 页。
- [7] 郑粉莉,1987: 模拟降雨中地面坡度对雨滴动能影响的研究。中国水土保持,第 11 期,38—39 页。

- [8] Meyer L. D. et al, 1975: Effect of rate and canopy on rill erosion. Trans. ASAE, 18(5): 905—911.
- [9] Vanliew N. W. and Saxton, K. E. 1983: Slope steepness and incorporated residue effect on rill erosion. Trans. ASAE, 26(6): 1736—1743.

STUDY ON FACTORS AFFECTING RILL EROSION ON CULTIVATED SLOPE LAND

Zheng fenli, Tang Keli and Zhou Peihua

(Northwest Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica)

Summary

Study on affecting factors of rill erosion formation and development was conducted by using simulated rainfall and field investigation.

The results have been shown that rainfall and runoff energy (especially runoff energy), soil erosion durability, slope degrees length, shape and land management are principal factors affecting rill erosion. For this reason, the authors consider that the key measures to control rill erosion is to reduce rainfall and runoff energy and to improve soil erosion durability.