

林地开垦人为加速侵蚀的人工降雨试验研究*

蔡 庆 唐克丽 陈文亮

(中国科学院水利部西北水土保持研究所·陕西杨陵·712100)

摘 要 子午岭稍林区基本上代表了现代生态环境下的自然侵蚀。在该区选择典型流域进行林地与开垦地的人工降雨试验,分析评价自然侵蚀和人为加速度的演变与生态环境的关系。本试验选用了两组地形,三组雨强和两组土地处理。研究表明,天然次生林地基本上不发生土壤侵蚀,降雨和地形因素对侵蚀的作用不明显;林地开垦后,土壤侵蚀急剧发展,并随雨强和坡度的增大而增强。自然植被的破坏是人为加速的重要原因,侵蚀速率为自然侵蚀的数百倍以上。

关键词 林地开垦 人为加速侵蚀 人工降雨试验 植被破坏

Study on Man-made Accelerated Erosion of Forest Land Being Reclaimed by Simulated Rainfall Experiment

Cai Qing Tang Keli Cheng Wentiang

(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica
and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi, 712100)

Abstract The Ziwuling forest area stands for natural erosion under present eco-environment. simulated rainfall experiments in forest land and reclaimed land of choosing typical watershed have been done. The results show that soil erosion in forest land does not basically occur, effect of factors of rainfall and topography on soil erosion is not obvious. After forest land is reclaimed, soil erosion rapidly develops. With increase of rainfall intensity and slope degree, soil erosion intensity increases. Natural vegetation destruction is a main cause of man-made accelerated erosion

Key words forest land being reclaimed man-made accelerated erosion simulated rainfall experiment vegetation destruction

1 试验研究方法和试验设计

这次人工降雨试验选择了两种地形部位,三种雨强和两种土地处理方式。两种地形部位一种在梁峁坡地上,坡度在 $17^{\circ}\sim 23^{\circ}$;一种在沟坡地上,坡度在 $28^{\circ}\sim 36^{\circ}$ 之间。人工降雨装置采用侧喷式组合装置,^[1]小区面积 $1.5\text{m}\times 5\text{m}$ 。

三种雨强分别是 1.38 、 2.05 和 $2.51\text{mm}/\text{min}$ 。

两种土地处理方式一种是保持林区植被原始状况;一种是将植被砍伐,去掉枯枝落叶,深翻

30cm, 去掉树根、草根, 成新开垦的裸露地。在梁峁坡林地上, 补充了一次去掉枯枝落叶层的试验, 共 17 次试验。

试验观测径流量, 泥沙量, 土壤水分含量, 容重, 地表径流流速等。各试验小区处理见表 1。

表 1 人工降雨试验各小区处理表

地形部位	处 理	坡 度 (°)	雨强(mm/min)		
			1.38	2.05	2.51
沟坡地	林 地	34	2	1	1
	开垦地	32	2	1	1
梁峁地	林 地	22	2	1	1
	开垦地	20	2	1	1
	去掉枯枝落叶	22	1		

注: 1. 林地天然次生林, 主要树种有辽东栎、榆树、杨树, 覆盖度 100%, 平均树高 3.3m, 枯枝落叶层厚 2~3cm, 半分解腐烂层厚 3.3cm

2. 1.2 代表某种处理和雨强下做了 1 次或者 2 次试验, 第 2 次试验是在第 1 次降雨之后又做了 1 次试验, 共 17 次试验

2 人工降雨试验结果分析

2.1 不同雨强下林地和开垦地对土壤侵蚀的影响

表 2 说明, 当降雨雨强为 1.38 和 2.05mm/min 时, 林地能全部拦蓄降雨, 无土壤侵蚀发生。当雨强为 2.51mm/min 时, 林地可减少径流 95.4%, 减少泥沙 99.87%。表 3 说明, 在雨强 1.38mm/min 时, 林地减少径流 86%~71%, 减少泥沙 99.81%。当雨强为 2.51mm/min 时, 可减少径流 90.59%, 减少泥沙 99.57%。林地的径流量和泥沙量不受坡度和雨强的影响, 均很轻微。

表 2 林地和开垦地(坡度 21°)径流泥沙量比较

雨 强 (mm/min)	1.38			2.05			2.51		
	降雨量(mm)			降雨量(mm)			降雨量(mm)		
	41.4			61.5			75.3		
处 理	林地	开垦地	林地减水减沙效益(%)	林地	开垦地	林地减水减沙效益(%)	林地	开垦地	林地减水减沙效益(%)
径流量(m³)	0	0.2596	100	0	0.3946	100	0.0237	0.514	95.4
泥沙量(kg)	0	3.05	100	0	16.83	100	0.050	37.46	99.87
侵蚀模数(t/km²)	0	406.67	100	0	2244	100	6.67	4994.67	99.87

注: 受野外条件影响, 每次降雨时实测雨强不等于设计雨强, 其变化幅度为: 1.38mm/min<6.5%、2.05mm/min<5.4%、2.51mm/min<2.0%, 以后情况雷同。

表 3 林地和开垦地(坡度 33°)径流泥沙量比较

雨 强 (mm/min)	1.38			2.05			2.51		
	降雨量(mm)			降雨量(mm)			降雨量(mm)		
	41.4			61.5			75.3		
处 理	林地	开垦地	林地减水减沙效益(%)	林地	开垦地	林地减水减沙效益(%)	林地	开垦地	林地减水减沙效益(%)
径流量(m³)	0.0353	0.2656	86.71	0.0973	0.4184	76.74	0.0495	0.526	90.59
泥沙量(kg)	0.29	15.0	98.07	0.07	36.20	99.81	0.37	85.88	99.57
侵蚀模数(t/km²)	38.67	2000	98.07	9.33	4826.67	99.81	49.33	11450.67	99.57

表 4 林地和开垦地径流系数比较

雨强 mm/min	1.38	2.05	2.51
降雨量 (mm)	41.4	61.5	75.3
林地 (21°)	0	0	0.04
开垦地 (21°)	0.84	0.86	0.91
林地 (33°)	0.11	0.21	0.09
开垦地 (33°)	0.86	0.91	0.93

表 1 说明,林地径流系数仅 0~0.21,而开垦地径流系数是 0.84~0.93。80%以上的降雨量能被林地就地拦蓄,从表中数值反映,林地不仅能充分拦蓄径流和防止土壤侵蚀发生,而且林地内部物质结构对截减降雨径流的形成影响很大。

试验结果表明,在降雨雨强 1.38~2.51mm/min,降雨量 41.4~75.3mm 时,林地可减少开垦地径流的 76%~100%,减少泥沙 98% 以上;林地径流占降雨量的 0%~21.1%,开垦地径流则占 83.6~93.1%。林地植被破坏,造成的土壤侵蚀如图 1。其原因是天然次生林具有阻挡降雨雨滴对地表土壤的直接打击,消减地表径流,就地拦蓄和防止土壤侵蚀的积极有效作用。只要林地不受人为破坏,就不会发生土壤侵蚀现象,植被一经破坏,则造成严重的水土流失(图 1)。

林地和开垦地因土地利用方式完全不同,降雨时,径流泥沙差别很大,尤其是开垦地促使细沟的形成。现以雨强 2.05mm/min,降雨 30min 为例加以说明。图 2 是径流泥沙累积过程线,林地(32°)降雨 10min 后开始产生径流并逐渐增大,但泥沙却很少,属清水径流。开垦地(30°)降雨 2min 又开始产生径流且流量大;5min 后小区下部开始形成细沟,细沟头向上发展速度很快,直到小区中部细沟向上发展的速度才缓慢下来;在 15min 内,中部形成 20cm 长的细沟雏形,宽 2cm,深 0.4cm,细沟在向上发展的同时,细沟边壁不断崩落扩张。在离小区底边 1.6m 内有 6 条细沟,中部 1.4m 内有 2 条土壤侵蚀现象(上图 33°,下图 21°)。

条细沟,经测算,其平均长、宽、深和侵蚀量如表 5。实测总侵蚀量 36.20kg,其中细沟侵蚀量 20.89kg,片蚀量 15.31kg;细沟侵蚀量和片蚀量分别占总侵蚀量的 57.7% 和 42.3%,细沟的平均宽、深比为 1.87:1。当坡度 22° 时,林地降雨 25min 无径流发生,但开垦地(坡度 19°)径流量却很大,仅比坡度 30° 的开垦地少 5.69%,泥沙却减少了 52.51%;小区内细沟有 6 条,下部 5 条,中部 1 条,具体数值如表 6。实测总侵蚀量为 16.83kg,细沟侵蚀量 2.283kg,片蚀量 13.947kg,细沟侵蚀量和片蚀量分别占总侵蚀量的 17.13% 和 82.87%,细沟的平均宽、深比 2.41:1。30° 的开垦地降雨后迅速形成细沟,容纳地表径流,使面流发展成股流,冲刷形成细沟槽,因而细沟侵蚀占到了整个侵蚀的一半以上,坡度 19° 的开垦地细沟形成缓慢,细沟侵蚀比坡度是 30° 的开垦地减少了 86.2%,片蚀仅减少了 8.85%,总侵蚀量减少了 53.5%。30° 坡度的细沟长、宽、深的比值分别是 19° 坡度细沟的 1.97、1.11、1.62 倍。细沟侵蚀密度由 41.3cm/m² 增加到 108.3cm/m²,是 19° 坡度的 2.62 倍,说明随着坡度的增加,总侵蚀量增加的原因在于细沟侵蚀量增加。因此,在 >25° 的陡坡耕地还林还草对防止侵蚀细沟,减少整个侵蚀有显著作用(表 6)。

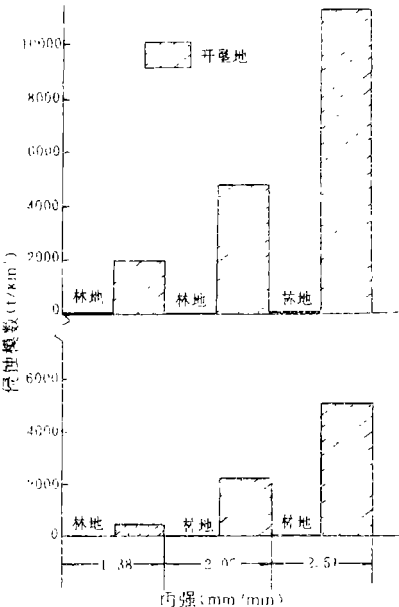


图 1 人为破坏植被造成的

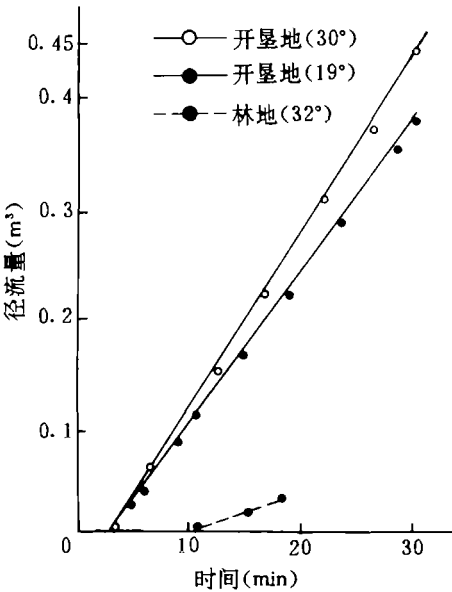


图 2—1 不同坡度径流量累积过程线

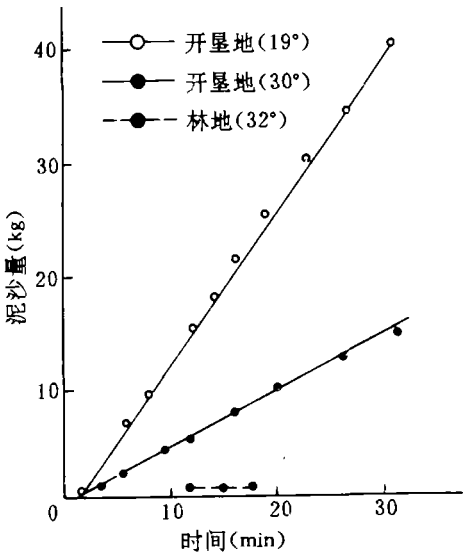


图 2—2 不同坡度下泥沙量累积过程线

表 5 开垦地(坡度 30°)一次降雨细沟、细沟侵蚀量量算结果

部 位	条数	长 (cm)	宽 (cm)	深 (cm)	细沟侵蚀量 (kg)	细沟总侵蚀量 (kg)	总侵蚀量 (kg)
中部(距顶部 2m)	1	153	3	2	0.833	20.890	36.20
	2	73	4.5	2	0.596		
下部(距 顶部 3.4m)	1	148	14	6	11.281		
	2	50	3	3.5	0.476		
	3	108	14	3.5	4.802		
	4	160	6	4	1.742		
	5	27	3	2	0.147		
	6	93	3	4	1.013		
平均长、宽、深比					30.07 : 1.87 : 1		

表 6 开垦地(坡度 19°)一次降雨细沟、细沟侵蚀量量算结果

部 位	条数	长 (cm)	宽 (cm)	深 (cm)	细沟侵蚀量 (kg)	细沟总侵蚀量 (kg)	总侵蚀量 (kg)
中部(距顶部 2.5m)	1	27.5	3.5	1.4	0.115	2.883	16.83
下部(距顶部 2.8m)	1	19	3.0	2.0	0.098		
	2	27	4.2	2.7	0.262		
	3	23	4.0	2.3	0.181		
	4	83	5.8	1.9	0.783		
	5	130	5.9	2.2	1.444		
平均长、宽、深比					24.76:2.11:1		

表 7 是在降雨雨强统一为 1.38mm/min 情况下,在同一个小区上分两次降雨试验。第一次降雨 30min 后,间断 15min,接着再降雨 21min。前 30min 细沟侵蚀量和片蚀量分别占总侵蚀量的 26.45%和 73.55%,后 21min 细沟侵蚀量和片蚀量则分别占 66.86%和 33.14%,细沟侵蚀所占比重上升,提高了 40.4%,占据了主导地位。从前后两次降雨试验的细沟长、宽、深比值变化发现,溯

表 7 开垦地两阶段降雨细沟、细沟侵蚀量量算结果

部 位	第一次 降雨时间 (min)	条 数	长 (cm)	宽 (cm)	深 (cm)	细沟侵蚀 总量 I _g (kg)	细沟侵蚀 总量 II _g (kg)	第二次 降雨时间 (min)	条 数	长 (cm)	宽 (cm)	深 (cm)	细沟 侵蚀量 II (kg)	细沟侵蚀 总量 II _g (kg)	侵蚀总量 IV (kg)	II - I _g (kg)	IV - II _g (kg)
下(距 顶部 30 cm)部		1	200	3.4	1.5	0.9717			1	237	5.0	3.0	3.196			2.279	
		2	73	7.0	3.0	1.378			2	82	8.0	2.5	1.474			0.096	
		3	90	3.5	2.0	0.566	3.697	21	3	120	4.0	3.0	1.295	7.691	20.57		3.724
上部		4	205	3.0	2.0	1.106			4	320	3.0	2.0	1.726			0.729	5.57
平均长、宽、深比						66.82;1.99;1							72.29;1.90;1			0.620	

表 8 不同土地利用土壤各发生层有机质和水稳性团聚体含量(%)

土 地 利 用	深 度(cm)	水稳性团聚体(mm)含量(%)					有机质(%)				
		>5.0	5.0~2.0	2.0~1.0	1.0~0.5	>0.25	>5.0	5.0~2.0	2.0~1.0	1.0~0.5	>0.25
林 地	2~8		6.86	17.46	19.04		5.92				
	8~28		7.28	10.21	10.78	1.68	0.88				14.56
	28~50		2.50	4.30	8.03	5.96	0.46				11.49
	80~95					1.23	0.56				11.48
	95以下						0.77				27.54
新开垦地	0~30		13.85	14.43	11.37	6.75	2.99				8.25
农地	0~17		7.4	6.2	9.8	4.7	1.67				8.5
	17~32		3.0	3.0	5.4	0.3	0.68				8.1
	32~60		0.8	0.8	2.3	0.5	0.49				7.6
	60~80		0.3	0.4	1.7		0.42				6.0

* 据田积堂资料

源侵蚀和下切侵蚀速度大于沟壁扩展速度。细沟侵蚀的发生和发展过程,也就是片蚀相对减弱过程。降雨初雨滴打击土粒,使土粒分散,经地表径流的挟带位移,下渗入堵孔隙,促使地表形成结皮,随之径流增大,发生片蚀为主。随着细沟的出现使分散的径流汇集形成股流,使表层径流流程缩短,就近汇入细沟。冲刷沟底和向两边侧蚀,形成崩塌,细沟进一步扩大,进而导致分散的地表径流汇集。其侵蚀过程:片蚀占主导地位→细沟的形成→分散径流的集中→细沟的发展→进一步集中径流→细沟侵蚀占据主导地位。

林地植被破坏,造成了强烈的土壤侵蚀,植被的作用防止了土壤侵蚀的发生。其作用是地表的枯枝落叶层、厚层腐殖质层和良好的林木下土壤结构,使无林土壤的松散性和分散性得到了改善,提高了土壤的总孔隙度,有利降雨径流的渗透,消减地表径流,达到防止水土流失的效果。

林下枯枝落叶层(平均厚度 2.6cm)和腐殖质层消除了降雨雨滴对地面土壤的直接击溅蚀作用,保护了土壤。

表 8 说明林地土壤各发生层有机质含量和各级水稳性团聚体含量高于农地(表层 > 2.0mm 除外)。农地是开垦 4 年的土壤,表层(30cm 以内),团粒含量下降了 46.5%,有机质下降了 65.1%,说明生物不仅有保水保土作用,且还有提高土壤有机质和团聚体含量的作用,植被破坏后,土壤的有机质和土壤团聚体含量明显下降。当年开垦地土壤中的有机质和团聚体含量同林地基本一致,但由于失去了地被物,土壤整体结构和根系的固土作用被破坏,增加了土壤的松散性和分散性,遇暴雨时,即产生水土流失。

图 3 和表 9 是降雨雨强 1.28mm/min,降雨时间在 28mm 以上,新开垦地、林地和林地去掉枯枝落叶三种处理的径流、入渗和土壤水分状况。林地和去掉枯枝落叶的林地都不产生径流,全部就地拦蓄,其入渗速度为 10.71mm/min 和 15.63mm/min;而开垦地径流强度达 1.08mm/min,入渗速度仅为 3.57mm/min。仅仅由于植被的存在,不仅保护了地面免受雨滴的打击和流水的冲刷,且由于厚层腐殖质的积累,水稳性团聚体含量的增加,土壤孔隙度的增加,为土壤渗透和蓄水保土提供了基础,也为消除地面径流创造了条件。去掉枯枝落叶的林地降雨入渗能力大于林地,减少了枯枝落叶本身对降雨的阻滞和吸水作用。据程积民^[1]在于岭地区的研究,辽东柞林下枯枝落叶层最大吸水量为 9.955m³/km²,相当容纳 10mm 降雨,占降雨量的 27.6%。按此数值计算,本试验时林地枯枝落叶层拦蓄水量相当于 10.7mm 的降雨。开垦后降雨入渗减小,径流增大的原因是雨滴直接打击土壤,助长了地表径流的形成和发展。

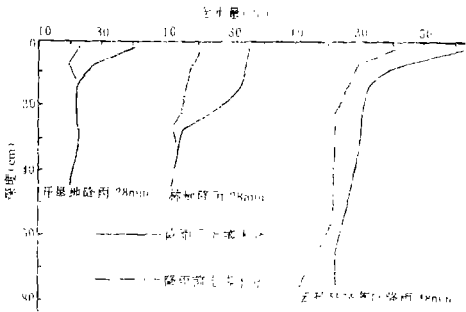


图 3 1.28mm/min 雨强下不同处理土壤水分变化

表 9 林地、开垦地、去掉枯枝落叶层径流、入渗情况

处 理	开 垦 地	林 地	去掉枯枝落叶层的林地
雨强(mm/min)	1.28		
降雨量(mm)	38.6	38.6	66.2
径流量(m ²)	6.2278	0	0
入渗深度(cm)	10	30	75
平均入渗速度(mm/min)	3.57	10.71	15.63

2.2 不同坡度下林地和开垦地对土壤侵蚀的影响

林地受植被保护,其坡度对土壤侵蚀影响意义不大。但植被一经破坏,坡度对土壤侵蚀强度的影响是相当显著的。图 4、图 5 是选择了一组雨强相同条件下,林地和开垦地受坡度影响土壤侵蚀情况。坡度为 33°的开垦地降雨过程中径流含沙量明显高于坡度为 23°的开垦地。降雨初期,这种差别更大,降雨的前 15min 内,前者含沙量是后者的 2.4 倍,15~30min 内则是 2.1 倍。降雨 5min 后,两种坡度各自的含沙量变化不大,分别为 110kg/m³ 和 60kg/m³;林地含沙量极小,从图中看出含沙量随时间变化呈指数相关显著,经分析得出回归方程为:

$Cs_{33^{\circ}} = 726.11^{-0.630}$ (相关系数 $r = -0.949\ 08$)

$Cs_{23^{\circ}} = 201.74t^{-0.400\ 5}$ (相关系数 $r = -0.856\ 80$)

式中 Cs ——含沙量(kg/m³)
 t ——降雨时间(min)

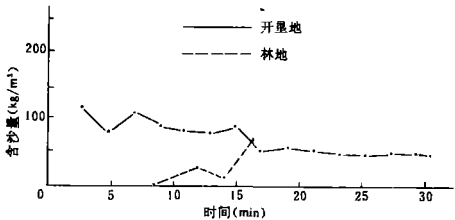


图 4 林地与开垦地含沙量随时间变化
(坡度 23°,雨强 2.51mm/min)

表 10 坡度对林地和开垦地土壤侵蚀的影响

土 地 利 用	林 地			开 垦 地		
雨 强(mm/min)	1.38	2.05	2.51	1.38	2.05	2.51
时 间(min)	30	30	30	30	30	30
坡度 21°时土壤侵蚀量 I(kg)	0	0	0.05	3.05	16.83	37.46
坡度 33°时土壤侵蚀量 II(kg)	0.29	0.07	0.37	15.00	36.30	85.88
II / I				4.92	2.15	2.29

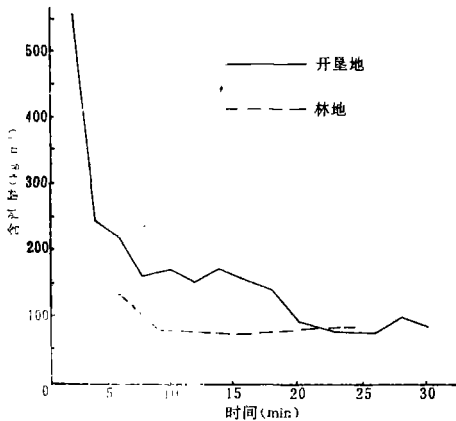


图 5 林地与开垦地含沙量随时间变化
(坡度 33°,雨强 2.51mm/min)

表 10 是三组雨强下坡度对土壤侵蚀的影响,当降雨雨强为 1.38、2.05 和 2.51mm/min 时,坡度是 33°的开垦地土壤侵蚀量分别是 21°开垦地的 4.92、2.15 和 2.29 倍;林地受植被保护,侵蚀量仅 0~0.37kg。坡度大,产流时间早,地表径流速度大,图 5 中坡度是 33°的开垦地比 23°的开垦地产流提前了 1min,流速是 23°开垦地的 1.32 倍。因而动能大,对地表土壤的冲刷能力强。33°的林地比 23°的林地产流提前了 2min,但对土壤侵蚀影响很小。说明地面为植被覆盖情况下,地形因素基本不起作用。因此,严禁陡坡开垦,使其还林还草。

2.3 降雨强度对开垦地土壤侵蚀过程的影响

土壤侵蚀强度受降雨能量大小决定,降雨强大,降雨能量大,土壤侵蚀就越严重。图 6 是在三种雨强下土壤侵蚀强度随时间的变化。当雨强为 2.51mm/min 时,降雨初侵蚀强度达 778g/(m²·min),随后减弱,由于细沟的形成和发展,侵蚀强度变化较大,但最终呈下降。降雨 30min 时侵蚀强度为 215g/(m²·min),下降了 72%,平均侵蚀强度为 385g/(m²·min)。雨强 2.05 和 3.8mm/min 时,侵蚀强

度变化幅度不大,雨强越小趋势稳定,平均侵蚀强度分别是 $186\text{ g/m}^2\cdot\text{min}$ 和 $63\text{ g/(m}^2\cdot\text{min)}$ 。分析图中 2.51 和 2.05mm/min 产沙过程线,侵蚀强度起伏变化周期在 12~18min,平均 15min。

三种雨强在降雨量基本相同下,随雨强增大,侵蚀量也增大(表 11)。当雨强增大 1.49 倍和 1.82 倍时,在坡度 20°时,新开垦地侵蚀强度增大 3.61 倍和 7.13 倍;在坡度 32°时,增大 1.78 倍和 4.44 倍。据此,暴雨强度对林地新开垦地影响很大。据陈文亮等人用一人工降雨装置试验,用回归计算得出的降雨动能与降雨强度的关系式 $E=21.928I^{0.438}$ 计算,三种雨强的降雨动能分别是 25.25、30.03、32.81J/m²·min,后两数值分别是前 25.25J/m²·min 的 1.19 和 1.30 倍,显然土壤侵蚀量远比降雨动能的增值要大得多。降雨动能大,对新垦林地土壤的机械破坏程度也越大,溅蚀强度大,增大径流的紊动性,使径流的挟沙能力增大。同时,雨强大,径流量相应的增大,径流冲刷地表强度增大,大大增强了土壤侵蚀的严重程度。

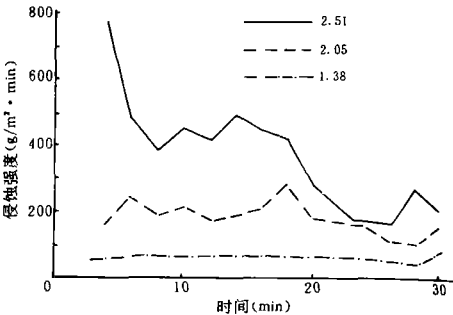


图 6 三种雨强下林地开垦产沙过程线

表 11 不同雨强下新开垦地土壤侵蚀情况

雨 强(mm/min)		1.38	2.05	2.51
坡度 20°	雨量(mm)	38.6	36.9	37.7
	泥沙量(kg)	2.67	9.65	19.03
坡度 32°	雨量(mm)	38.6	36.9	40.2
	泥沙量(kg)	13.77	24.54	61.13

以新开垦地与强度侵蚀黄土母质开垦地的人工降雨试验结果作对比(表 12),在雨强基本相同情况下,新开垦地侵蚀量减少了 53%,主要是土壤理化性状还保持林地土壤的原状,有机质含量、水稳性团粒结构含量及稳渗率还比较高,土壤的抗冲抗蚀性强,故侵蚀较轻微。黄土母质开垦裸露地侵蚀,基本上代表了水土流失严重区的侵蚀现状,侵蚀促使土壤性状恶化,后者又促使侵蚀加剧,两者呈恶性循环。

表 12 新开垦土地与黄土母质开垦地土壤侵蚀对比

项 目	坡 度 (°)	降雨量 (mm)	雨 强 (mm/min)	有机质含量 (%)	>0.25mm 团聚体含量 (%)	稳渗率 (mm/min)	侵蚀量 [kg/(m ² ·mm)]
新开垦林地裸露休闲	23	62.75	2.51	2.99	54.65	1.90	0.062
黄土母质开垦裸露休闲*	20	81.60	2.40	0.50	6.26	0.04	0.132

* 据郑粉莉资料

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, 1988(5)
[2]程积民. 子午岭森林植被控制水土流失的作用. 水土保持通报, 1987(5)