

* 黄土高原南部缓坡耕地降雨与侵蚀的关系

吴发启 赵晓光 刘秉正

唐克利

(西北林学院 陕西杨陵 712100) (中国科学院水利部水土保持研究所 陕西杨陵 712100)

摘 要 在前人工作的基础上,就缓坡耕地各降雨参数以及降雨最优组合参数与土壤侵蚀的关系进行了系统分析,除验证了一些基本规律外,还对降雨历时、降雨强度的分段研究进行了深入探讨。证实时段最大降雨量与土壤侵蚀呈指数函数关系。

关键词 降雨量 降雨历时 降雨强度 土壤侵蚀 黄土高原南部

Relation between Rainfall and Soil Erosion in the Gentle Slope Land in the South Part of Loess Plateau

Wu Faqi Zhao Xiaoguang Liu Bingzheng

(Northwestern College of Forestry Yangling Shaanxi 712100)

Tang Keli

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

Abstract The rainfall parameters and relation between the optimum parameter of rainfall and soil erosion were discussed. Some basic laws were certified. Different periods in duration and intensity of rainfall were studied. It was proved that the relation between maximum rainfall in different periods and soil erosion was exponential.

Key words rainfall duration of rainfall intensity of rainfall soil erosion the south part in loess plateau

降雨是引起土壤侵蚀的动力。1751 年,俄国科学家罗蒙诺索夫首次在他的论文中谈到暴雨对土壤的溅蚀作用^[1]。嗣后直到 1940 年 Laws, J. O 对自然降雨的特征进行了研究^[2], 1947 年 El-lison, W. D 对降雨的侵蚀机制作了分析^[3],才改变了人们对土壤侵蚀的认识,并促进了许多学者对雨滴直径、雨滴分布、雨滴下落的终点速度以及降雨能量的研究。Wischmeier, W. H Smith, D. D. (1959) 发现,在所研究的降雨因子中,降雨动能和 30 min 最大降雨强度的乘积(EI_{30})与野外小区上测量到土壤流失量关系密切^[4,5],并得到了 $E = 916 + 331lgI$ 的降雨能量计算公式。

黄土高原降雨特征的研究始于 50 年代,80 年代初刘尔铭、张汉雄等对此又作了进一步的分

析^[6, 7]。真正将降雨与土壤侵蚀视为相互作用的同一整体进行研究是周佩华等人^[8],王万忠等(1983)通过对黄土地区降雨特征与水土流失的关系分析后得出,黄土地区每年引起土壤流失的降雨平均次数为 6 次,占年降雨次数的 7%,占汛期降雨次数的 14%,每年引起土壤流失的降雨量平均为 140 mm,占年降雨的 24.6%,占汛期降雨量的 38.6%;造成黄土区土壤流失的主要原因是短历时、中雨量、高强度暴雨^[9],江忠善(1983)研究了黄土地区天然降雨的雨滴特征,对雨滴的降落速度提出了相应的计算方法^[10]。王万忠、刘秉正、江忠善等研究了区域降雨潜在侵蚀力 R 的特征与计算方法,并得出黄土地区 I_{30} 与土壤侵蚀关系密切^[11, 12, 13]。

本文旨在讨论黄土高原南部缓坡耕地降雨量(P)、降雨历时(T)、降雨强度(I)等与侵蚀的关系,为进行更大范围的比较分析提供参考。

1 资料来源及研究方法

(1) 定位试验,收集区内资料,延长系列,扩大分析样本。1986 年以来,在淳化县泥河沟流域设置了不同坡度、不同措施、不同坡长径流小区 20 余组,自记雨量计及普通雨量计各 1 台。自记雨量计记录雨强的变化过程,普通雨量计较核。收集彬县、黄龙、永寿、耀县及西峰部分径流小区试验资料及降水自记资料,从 1958 年到 1997 年共 598 组资料样本,其中夏休田样本占 62.5%,秋作物(主要是玉米、豆类)样本占 37.5%,小区特征及资料概况见表 1。

表 1 试验资料来源、数量及径流小区特征

站 名	小 区 数 量	坡 度	坡长/m	小区处理	观测年限	样本数
彬县	4	3°~15°	10~40	休闲、秋作	1958~1963	56
永寿	1	8.30		休闲、玉米、豆类	1960~1961	3
西峰	3	2.51~12.34	20	休闲、玉米、豆类	1964~1980	65
黄龙	1	11.24	19.2	秋作玉米	1965~1967	11
耀县	1	3°	20	休闲	1960	2
淳化	7	4°~15°	20~60	休闲、玉米、豆类	1986~1997	461

- (2) 对观测资料进行分析整理。
- (3) 运用数理统计方法探讨降雨各参数与土壤侵蚀的内在联系,找出数量特征。
- (4) 鉴于本区夏、秋作物轮作,分布交错,分析时未单独进行,视样本来自同一总体,这样能综合反映土壤侵蚀平均状况,使其呈正态分布规律。

2 降雨量

黄土高原南部属半湿润、半干旱大陆性气候,多年平均降水量 500~700 mm,降水呈由东南向西北递减的趋势。降水年内分配不均,多集中于 7、8、9 三个月,占年降水总量的 50% 以上,且多有暴雨产生流失。产流降雨最早出在 5 月中旬,最晚结束于 10 月下旬。年产流降雨量最大值 664.6 mm(1988 年淳化),最小值 26.5 mm(1963 年彬县)。

表 2 黄土高原南部侵蚀性降雨特征表

资料来源	资料年限	5~9 月平均雨	侵蚀性降雨平均值		
		量/mm	次数	雨量/mm	占同期雨量/%
彬县	1958~1961	295.45	4.0	149.15	50.5
永寿	1960~1961	281.60	3.0	145.15	51.6
西峰	1964~1980	295.90	5.0	193.60	65.4
黄龙	1965~1967	218.50	5.5	218.50	57.1
淳化	1987~1997	414.72	4.2	220.1	54.1

2.1 侵蚀性降雨量与汛期雨量的关系

以 598 场侵蚀性降雨(侵蚀模数 1.0 t/km²) 资料分析, 其特征如表 2。
由表 2 可知, 尽管降雨存在着地区差异, 但侵蚀性降雨十分相似, 降雨量在 150~220 mm 之间, 年平均发生 3~5 次, 占同期降水的 50%~60%, 即有一半以上的降雨要产生侵蚀。

2.2 不同量级侵蚀性降雨与土壤侵蚀关系

将侵蚀降雨按< 10 mm、10~20 mm、20~30 mm、30~40 mm、40~50 mm、50~60 mm 和> 60 mm 分级统计, 并计算土壤侵蚀出现率 N (%)、土壤侵蚀平均模数 M_s (t/km²) 和土壤侵蚀总量百分率 M_s (%)^[9], 结果见图 1。

从图 1 可知 N (%) 与雨量级的关系在 15 mm 以下呈正相关, 45~50 mm 出现次数小, 15~45 mm 出现次数最多, 占总次数的 50% 以上; M_s 在 45 mm 以下, 55 mm 以上呈正相关, 35~45 mm、55 mm 以上相关性更为显著, 在 45~55 mm 之间呈负相关; M_s (%) 在 55 mm 以上占的比值最大, 占流失总量的 60% 以上。

2.3 不同坡度、坡长条件下次降雨量与土壤侵蚀的关系

雨水降落到地面, 受坡度、坡长的影响而发生再分配, 因此, 其侵蚀作用也会出现强弱差异。对 3°、6°、8°、12°、15° 和 6°、20 m、6°、30 m、6°、40 m、6°、50 m 和 6°、60 m 各径流小区降雨与侵蚀的回归分析, 证实次降雨量与对应的土壤侵蚀模数呈幂函数关系, 通式为:

$$M_s = ap^b \tag{1}$$

式中: M_s ——侵蚀模数(t/km²); P ——降雨量(mm); a 、 b ——待定参数。分析结果见表 3。

表 3 不同坡度、坡长条件下次降雨量与土壤侵蚀模数关系

坡度/°	坡长/m	样本数	模型	相关指数	适应区间/mm, t·km ⁻²
3	20	27	$M_s = 0.127p^{1.544}$	0.627	4.8< p < 63.3 1< M _s < 200
6	20	41	$M_s = 0.029p^{2.49}$	0.746	5.1< p < 123 1< M _s < 3600
8	20	95	$M_s = 0.001p^{3.656}$	0.779	5.1< p < 110 1< M _s < 5600
12	20	72	$M_s = 0.232p^{2.156}$	0.755	4.9< p < 110 1< M _s < 5200
15	20	14	$M_s = 3.361p^{1.87}$	0.732	5.1< p < 30.4 1< M _s < 3200
6	30	21	$M_s = 1.157p^{1.524}$	0.920	5.1< p < 110 1< M _s < 1700
6	40	39	$M_s = 0.013p^{2.408}$	0.764	5.1< p < 123 1< M _s < 1800
6	50	13	$M_s = 0.079p^{2.191}$	0.971	5.1< p < 110 1< M _s < 2400
6	60	38	$M_s = 0.067p^{2.073}$	0.729	5.1< p < 123 1< M _s < 2200

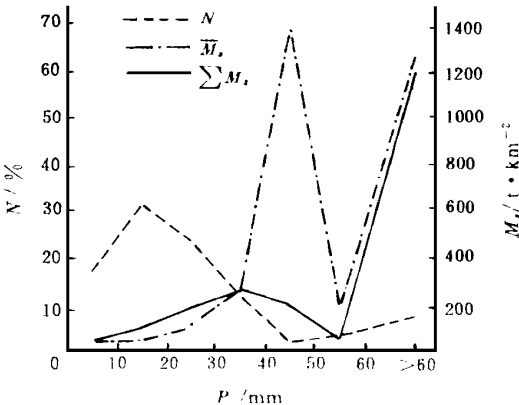


图 1 缓坡耕地雨量分级与土壤侵蚀的关系变化曲线

2. 4 不同侵蚀强度级中次降雨量与侵蚀的关系

将总样本按 < 100 t/km²、101 ~ 200 t/km²、201 ~ 500 t/km²、501 ~ 1 000 t/km²、1 001 ~ 2 000 t/km² 和 > 2 000 t/km² 分级统计, 并建立次降雨量与对应的侵蚀模数的关系, 结果见表 4。

表 4 不同侵蚀强度级中次降雨量与土壤侵蚀模数的关系

强度分级/ t · km ⁻²	样本数	模型	相关指数	适应区间/mm
< 100	456	$M_s = 12.171P^{0.22}$	0.470	4.8 < P < 123
101 ~ 200	28	$M_s = 120.766P^{0.026}$	0.959	5.1 < P < 123
201 ~ 500	41	$M_s = 277.55P^{0.052}$	0.923	5.3 < P < 123
501 ~ 1000	22	$M_s = 532.651P^{0.049}$	0.974	10 < P < 123
1001 ~ 2000	27	$M_s = 759.431P^{0.132}$	0.946	25 < P < 123
> 2000	23	$M_s = 782.179P^{0.323}$	0.891	25 < P < 110

从表 4 可知, 当侵蚀模数超过 100 t/km² 后, 降雨量与侵蚀的关系更为密切, 且呈幂函数规律, 符合通式(1)。

2. 5 时段最大降雨量(P_{max})与土壤侵蚀的关系

将降雨历时按 5, 10, 15, 20, 30, 45 和 60 min 进行分段, 在自记录上摘录相应时段的最大降雨量, 然后将其与土壤侵蚀模数进行回归。从回归结果看, 它们之间成指数函数关系, 通式为:

$$M_s = ae^{bP_t} \tag{2}$$

式中: M_s——侵蚀模数, t/km²; P_t——t 时段最大降雨量, mm; a、b 为待定参数。比较分析见表 5。

表 5 时段最大降雨量与侵蚀模数的关系

地点	坡度	坡长/m	样本数	相 关 指 数						
				P ₅	P ₁₀	P ₁₅	P ₂₀	P ₃₀	P ₄₅	P ₆₀
西峰	2.51	20	9	—	0.712	0.728	0.799	0.799	0.860	0.799
	8°	20	30	0.38	0.802	0.817	0.811	0.801	0.955	0.969
淳化	15°	20	14	0.257	0.435	0.981	0.519	0.403	0.742	0.722
	6°	20	25	0.320	0.980	0.984	0.984	0.983	0.988	0.987
	6°	60	25	0.349	0.949	0.965	0.966	0.967	0.967	0.967
平均				0.326	0.776	0.779	0.816	0.906	0.902	0.889

从表中可知 10 min 以上最大雨量基本与侵蚀模数成正相关, 特别是 30 min、40 min 关系更为密切。

2. 6 5 ~ 10 月累积降雨量与土壤侵蚀的关系

按不同坡度、坡长进行统计, 并建立关系见表 6。

表 6 5 ~ 10 月累积降雨量与土壤侵蚀模数的关系

坡度/°	坡长/m	样本数	模型	相关指数	适应区间/ mm, t · km ⁻²
3	20	9	$M_s = 0.001p^{2.777}$	0.565	30 < P < 122.3 30 < M _s < 1500
6	20	10	$M_s = 0.008p^{2.501}$	0.621	60 < P < 163.5 60 < M _s < 3700
8	20	11	$M_s = 0.579p^{1.64}$	0.664	30 < P < 300 2 < M _s < 5000
12	20	14	$M_s = 2.599p^{1.295}$	0.659	20 < P < 310 20 < M _s < 5300
6	40	9	$M_s = 508.691p^{0.041}$	0.561	30 < P < 300 20 < M _s < 1700
6	60	9	$M_s = 12138.494e^{-0.034P}$	0.839	60 < P < 130 60 < M _s < 2100

从表 6 可知, 不同坡度条件下, 累积降雨量与侵蚀模数也成幂函数关系, 且符合通式(1)。但随着坡长的增大, 其函数形式也发生了变化, 由幂函数变为指数函数, 这说明通式(1)的应用是具有一定的限定条件。

3 降雨历时与土壤侵蚀的关系

3.1 不同量级降雨历时与土壤侵蚀的关系

同降雨分级方法一样将总样本数 0.5 h、0.5 ~ 1 h、1 ~ 2 h、2 ~ 4 h、4 ~ 6 h、6 ~ 12h、12 ~ 18 h、18 ~ 24 h 和 > 24 h 分为 9 级, 并计算 3 个指标值, 结果见图 2。

从图 2 可知, 土壤侵蚀主要出现在 1.5 h 以下, 3 ~ 5 h 和 20 h 以上的时段内, 它分别占总次数的 34.11%、21.22% 和 5.12%; 平均土壤侵蚀模数在 0.75 ~ 1.5 h、3 ~ 5 h 和大于 9 h 各段基本与降雨历时成正相关; 土壤侵蚀总量在上述前两段可占整个总量的 65%。因此, 可以认为 1 ~ 5 h 的暴雨是引起缓坡耕地土壤侵蚀的主要降雨。

3.2 不同坡度、坡长条件下降雨历时与土壤侵蚀的关系

降雨历时与侵蚀的相关关系很差, 即就是在相同的坡度、坡长条件下, 散点图也很零乱, 但若分段研究还是可以找出一些规律。分析结果见表 7。

4 降雨强度与土壤侵蚀的关系

4.1 不同量级降雨强度与土壤侵蚀的关系

将总样本按 5 mm/h、5 ~ 10 mm/h、10 ~ 15 mm/h、15 ~ 20 mm/h、20 ~ 30 mm/h 和 > 30 mm/h 分级统计, 并计算三指标值, 结果见图 3。

从图 3 可以看出, 土壤侵蚀在 5 mm/h 以下出现次数最大, 占总次数的 53.8%, 其次是 7.5 ~ 12.5 mm/h 和大于 17.5mm/h 的量级; 土壤平均侵蚀模数在 7.5 ~ 12.5 mm/h 之间与降雨强度成正相关; 土壤侵蚀总量主要是由 20 mm/h 左右的降雨引起的, 可占总侵蚀量的 44.3%。

4.2 不同坡度、坡长条件下降雨强度与土壤侵蚀的关系

按 3.2 相同的方法进行研究, 其结果见表 8。

4.3 最大降雨强度 I_{\max} 与土壤侵蚀的关系

按 2.5 的方法, 求出各时段最大降雨强度, 并与侵蚀模数建立关系, 比较结果见表 9。从表 9 可知, 最大降雨强度与侵蚀模数的关系均为密切, 但 I_{30} 、 I_{45} 最优。

4.4 最优降雨组合参数的选择

将各时段最大降雨强度(I_{\max}) 与相应的次降雨量(P) 相乘, 并与侵蚀模数进行回归, 结果见表 10。

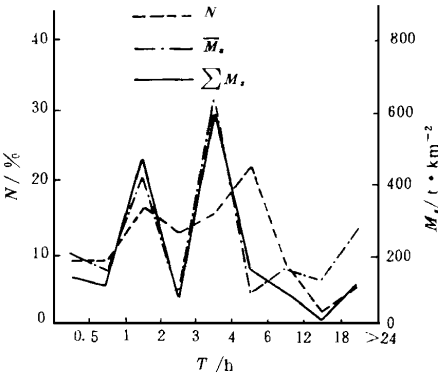


图 2 缓坡耕地降雨历时分级与土壤侵蚀的关系变化曲线

表 7 降雨历时与土壤侵蚀模数的关系

坡度	坡长/m	样本数	模 型	相关指数	适应区间/ (h, t · km ⁻²)
3 °	20	12	$M_s=51.733t^{2.537}$	0.917	$t < 2$ $10 < M_s < 350$
		14	$M_s=16.158t^2-111.267t-0.219$	0.546	$2 < t < 6$ $11 < M_s < 180$
		9	$M_s=0.45e^{0.306t}$	0.958	$6 < t < 20$ $1 < M_s < 180$
		6	$M_s=1.51t^2-74.043t+910.405$	0.892	$t > 20$ $1 < M_s < 90$
		10	$M_s=911.77t^3-209.593t^2-1237.39t+595.377$	0.751	$t < 2$ $5 < M_s < 1050$
6 °	20	7	$M_s=0.008t^{4.109}$	0.743	$2 < t < 6$ $1 < M_s < 100$
		13	$M_s=3.14e^{0.172t}$	0.739	$6 < t < 20$ $1 < M_s < 60$
		4	$M_s=4.367t^{1.148}$	0.829	$t > 20$ $1 < M_s < 3500$
8 °	20	20	$M_s=2936.472t^2-3951.678t+1348.053$	0.791	$t < 2$ $10 < M_s < 2300$
		11	$M_s=-9.463t^3+104.913t^2-366.876t+458.197$	0.721	$2 < t < 6$ $11 < M_s < 80$
		33	$M_s=1554e^{0.238t}$	0.686	$6 < t < 20$ $1 < M_s < 90$
		5	$M_s=20.821t^{1.069}$	0.771	$t > 20$ $15 < M_s < 2500$
12 °	20	19	$M_s=1286.924t^2-1000t+237.183$	0.787	$t < 2$ $2 < M_s < 1250$
		19	$M_s=112.126t^2-699.213t+1408.886$	0.557	$2 < t < 6$ $1 < M_s < 350$
		17	$M_s=1.699e^{0.349t}$	0.976	$6 < t < 20$ $1 < M_s < 1200$
		13	$M_s=216.001e^{-0.074t}$	0.522	$t > 20$ $1 < M_s < 700$
15 °	20	21	$M_s=1359.665e^{-0.12t}$	0.529	$3 < M_s < 3150$ $t < 2$
6 °	30	9	$M_s=3.254e^{4.325t}$	0.869	$1 < M_s < 1250$ $t > 2$
		8	$M_s=1.78t^{1.262}$	0.727	$1 < M_s < 35$ $t < 2$
6 °	40	8	$M_s=624.553t^{0.947}$	0.529	$1 < M_s < 1400$ $1 < t < 5$
		9	$M_s=0.611t^{5.085}$	0.842	$4 < M_s < 1700$ $t > 5$
		16	$M_s=0.434t^{2.329}$	0.655	$2 < M_s < 350$ $t < 2$
6 °	50	9	$M_s=38.771t^{0.841}$	0.83	$2 < M_s < 750$ $2 < t < 6$
		6	$M_s=3.066t^{1.392}$	0.697	$1 < M_s < 50$ $t > 6$
		6	$M_s=0.261t^{1.852}$	0.535	$1 < M_s < 80$ $t < 2$
6 °	60	11	$M_s=540.889t^{1.27}$	0.623	$3 < M_s < 1350$
		17	$M_s=12.092e^{9.844t}$	0.843	$1 < M_s < 2500$

表 8 降雨强度与土壤侵蚀模数的关系

坡度/ °	坡长/ m	样本数	模型	相关指数	适应区间/ (mm · h, t · km ⁻²)
3	20	12	$M_s= 4.383e^{0.618}$	0.689	$I \leq 6$ $1 < M_s < 175$
		12	$M_s= 6.481e^{0.0871}$	0.716	$6 < I < 23$ $1 < M_s < 55$
6	20	20	$M_s= 3.477e^{0.6231}$	0.812	$I \leq 6$ $1 < M_s < 100$
		11	$M_s= 2.112e^{0.2888}$	0.995	$6 < I < 30$ $1 < M_s < 3600$
		5	$M_s= 5.561I^{0.27}$	0.829	$I > 30$ $100 < M_s < 2500$
8	20	24	$M_s= 0.372e^{1.374I}$	0.787	$I \leq 6$ $1 < M_s < 400$
		14	$M_s= 0.075e^{0.344I}$	0.880	$6 < I \leq 30$ $1 < M_s < 450$
		6	$M_s= 2.35I^{1.463}$	0.730	$I > 30$ $40 < M_s < 3000$
12	20	50	$M_s= 0.059I^{2.191}$	0.830	$3 < I < 122.28$ $1 < M_s < 3600$
15	20	30	$M_s= 10.976I^{1.235}$	0.714	$0.3 < I < 122.28$ $1 < M_s < 5000$
6	40	39	$M_s= 14.66I^{1.041}$	0.685	$3 < I < 122.28$ $1 < M_s < 2500$
12	20	34	$M_s= 13.54e^{0.191I}$	0.887	$I \leq 30$ $1 < M_s < 2500$
		6	$M_s= 0.416I^{1.753}$	0.800	$I \leq 30$ $50 < M_s < 2200$

表 9 最大降雨强度与土壤侵蚀模数的关系

地点	坡度	坡长/ m	样本数	相 关 指 数						
				I_5	I_{10}	I_{15}	I_{20}	I_{30}	I_{45}	I_{60}
西峰	25°	20	9	0.416	0.713	0.740	0.811	0.773	0.841	0.783
淳化	8°	20	32	0.842	0.776	0.839	0.826	0.852	0.903	0.859
	15°	20	14	0.377	0.868	0.852	0.824	0.881	0.859	0.862
	6°	20	29	0.981	0.970	0.984	0.984	0.983	0.906	0.907
	6°	60	27	0.900	0.967	0.968	0.968	0.967	0.968	0.966
平均				0.700	0.859	0.877	0.877	0.891	0.890	0.873

表 10 降雨组合参数与土壤侵蚀模数的关系

地点	坡度	坡长/ m	样本数	相 关 指 数						
				PI_5	PI_{10}	PI_{15}	PI_{20}	PI_{30}	PI_{45}	PI_{60}
西峰	25°	20	9	0.728	0.794	0.807	0.79	0.788	0.788	0.791
淳化	8°	20	32	0.815	0.629	0.796	0.826	0.812	0.988	0.987
	15°	20	16	0.532	0.728	0.591	0.902	0.982	0.865	0.557
	6°	20	29	0.977	0.408	0.982	0.982	0.982	0.989	0.989
	6°	60	27	0.959	0.450	0.979	0.979	0.979	0.976	0.976
平均				0.802	0.602	0.831	0.896	0.909	0.901	0.860

从表 10 可以看出, PI_{30} 、 PI_{45} 与侵蚀模数的关系均密切, 但 PI_{30} 最优。

5 结 论

黄土高原南部缓坡耕地侵蚀性降雨累积雨量为 150 ~ 220 mm, 年平均发生 3 ~ 5 次, 占汛期降雨量的 50% ~ 60%。从平均状况看, 降雨量 15, 35, 45 和 55 mm, 降雨历时 0.75, 1.5, 2.5, 5, 9 和 21 h, 以及降雨强度 7.5, 12.5, 17.5, 25 mm/h 等点都是非常重要的临界点, 土壤侵蚀出现次

数, 平均侵蚀模数和侵蚀总量百分率在此均发生突变。

不同坡度、坡长、侵蚀强度级别上次降雨量, 5~10月累积降雨量都与土壤侵蚀模数及土壤侵蚀累积模数成幂函数关系, 通式为 $M_s = ap^b$ 。降雨历时、降雨强度与侵蚀的关系比降雨量来更为复杂, 但分段研究, 可找出其规律性。时段最大降雨量与侵蚀模数成指数函数关系, 通式为 $M_s = ae^{bP_i}$ 。时段最大降雨量 P_{30} 、 P_{45} , 最大降雨强度 I_{30} 、 I_{45} 以及组合指标 PI_{30} 、 PI_{45} 均与土壤侵蚀关系密切, 但 P_{30} 、 I_{30} 、 PI_{30} 关系最优。

参考文献

- 1 王礼先. 水土保持学. 北京: 中国林业出版社, 1995
- 2 Laws, J. O. Recent Studies in Raindrops and Erosion. Agric. Engng. 1940(21): 431 ~ 433
- 3 Ellison, W. D. Soil Detachment Hazard by Rainfall Splash. Agric. Engng. 1947(28): 197 ~ 201
- 4 Wischmeier, W. H. and D. D Smith. Rainfall Energy and Its Relation to Soil Loss. Trans. Am. Geophys. Union., 1985(39): 285 ~ 291
- 5 Wischmeier, W. H. A Rainfall Erosion Index for A Universal Soil Loess Equation. Proc Soil Sci. Soc. Am. 1959(23): 246 ~ 249
- 6 刘尔铭. 黄河中游降水特性初步分析. 水土保持通报, 1982(1)
- 7 张汉雄, 王万忠. 黄土高原的暴雨特性及分布规律. 水土保持通报, 1982(1)
- 8 周佩华. 降雨能量的试验研究初报. 水土保持通报, 1981(1)
- 9 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究. 水土保持通报, 1983(4)
- 10 江忠善, 宋文经, 李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究. 中国水土保持, 1983(3)
- 11 王万忠, 焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀产生与黄河输沙. 北京: 科学出版社, 1996
- 12 刘秉正. 渭北地区 R 的估算及分布. 西北林学院学报, 1993(2)
- 13 江忠善, 贾志伟, 刘志. 降雨和地形因素与坡地水土流失关系的研究. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1990(12)

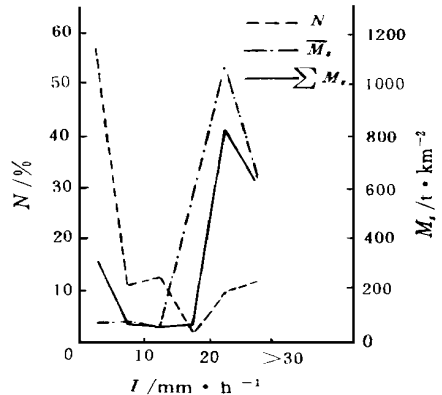


图3 缓坡耕地降雨强度分级与土壤侵蚀的关系变化曲线