

# 西吉县黄家二岔小流域 地表径流和土壤渗透性能的研究

孙保平 孙立达

(北京林业大学水保系, 北京)

## 摘 要

运用人工模拟降雨和径流小区试验方法, 研究了宁夏西吉县黄家二岔小流域的土壤渗透性能。结果表明, 影响土壤渗透性能的主要因子是土地利用方式、地面坡度、土壤含水率、土壤总孔隙度和雨强。据此, 提出了充分利用干旱地区有限降水资源的建议。

关键词: 土地利用 土壤入渗 人工模拟降雨

## 前 言

黄家二岔小流域位于宁夏西吉县西北部, 属于黄土地区, 流域面积  $5.7\text{km}^2$ , 位于中温带半湿润区向半干旱区过渡的地带, 自然条件恶劣, 经济文化落后。长期以来, 由于不合理地利用土地, 加剧了水土流失, 致使土壤的蓄水保肥能力极差。

自1983年以来, 该流域内实行生物措施、工程措施和农业技术措施相结合的综合性技术措施进行综合治理, 取得了良好的生态效益、经济效益和社会效益。林草覆被率从治理前的0.7%提高到60%, 新修水平梯田2504亩, 流域内农林牧生态环境条件得到尽快改善。

该流域成土母质以第四纪黄土为主, 覆盖厚度20~50m, 其下有第四纪红土分布。主要土类为浅黑垆土和侵蚀黑垆土, 坡面上由于不合理的耕作, 表层被蚀后形成分布较广的细黄土。土壤质地为轻壤、中壤, 颗粒组成含中沙(0.1~0.25mm) 1.0%~2.9%; 细沙(0.25~0.5mm) 15%~26%; 粗粉沙(0.05~0.01mm) 45%~46.6%; 中粉沙(0.01~0.005mm) 8.4%~10.5%; 细粉沙(0.005~0.001mm) 7.7%~10%; 粘粒( $<0.001$ ) 10%~17.9%。土壤有机质含量1.0%左右, 可溶性盐小于0.1%, pH值8.5左右。

本文是通过模拟降雨试验和测定土壤的各项物理指标, 对比分析该流域土地不同利用情况下的土壤渗透性能和抗蚀能力, 为评价小流域综合治理效益提供科学依据。

## 1 研究方法

1.1 模拟降雨试验仪器采用有压给水针头式人工降雨器, 有效承雨面积为  $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ , 降雨高度1.5m。

1.2 每次模拟降雨时测定其雨强, 然后根据降雨器的性能曲线, 求出平均雨滴速度和平均雨滴动能。

1.3 试验小区是根据流域内土地利用情况选取了32块, 每块小区进行二次相同降雨试验。

1.4 模拟降雨前需分别测定土层为0~5cm, 5~10cm, 10~20cm的土壤含水率, 并同时土壤剖面进行记载, 如质地、颜色、结构、紧实度、根系密度和深度等。

1.5 小区地形记载有: 坡向、坡度、坡位、植被或作物、利用方式等。

1.6 每块试验小区需测定土壤容重、总孔隙度、毛管和非毛管孔隙度等土壤物理指标。

1.7 每1min测定地表径流, 每5min测定土壤冲刷量, 模拟降雨为60~90min。

1.8 室内数据整理是利用统计方法, 分析和寻求相互间关系和规律性。

## 2 成果分析

### 2.1 降雨动能计算

(1) 自然降雨动能计算。当雨滴直径 $d < 1.9\text{mm}$ 时, 用修正的沙玉清公式计算,

$$V = 0.496 \times 10^{\sqrt{28.32 + 6.524 \log 0.1d - (\log 0.1d)^2 - 3.655}} \quad (1)$$

当雨滴直径 $d \geq 1.9\text{mm}$ 时, 用修正的牛顿公式计算,

$$V = (17.20 - 0.844d) \sqrt{0.1d} \quad (2)$$

$$\text{动能:} \quad E = \frac{1}{2}MV^2 \quad (3)$$

(2) 模拟降雨动能计算。人工降雨器雨滴下落是形成一定初速度的自由落体运动, 其能量可用下式计算:

$$E = \frac{1}{2}mV^2 + mgH = mg(h + H) \quad (4)$$

式中:  $H$ ——降雨仪高度;

$\frac{1}{2}mV^2$ 为针头上面水柱的能量。根据能量转换定律,  $\frac{1}{2}mV^2 = mgh$  ( $h$ 为稳压水头高)。

(3) 模拟降雨与自然降雨关系的确定。为了使模拟降雨取得较好效果, 根据降雨对土壤的作用原理, 即能量相等原则, 通过实测得到的32组降雨资料分析, 建立了模拟降雨与当地自然降雨雨强关系(如图1所示)。

2.2 霍顿下渗指数公式的建立。通过对西吉县15年降雨资料统计分析, 该地区降雨强度小于 $25\text{mm/h}$ 的雨量占总雨量93%。因此在模拟降雨时, 设计雨强为 $7.9\text{mm/min}$ (相当于自然降雨 $0.42\text{mm/min}$ )。根据各小区试验资料, 利用霍顿下渗指数公式, 建立了各种利用情况下的土壤渗透速度和时间关系方程。

$$f = f_0 + (f_i - f_0)e^{-kt} \quad (5)$$

式中:  $f$ ——土壤渗透速度 ( $\text{mm/min}$ );

$f_0$ ——稳定下渗率 ( $\text{mm/min}$ );

$f_i$ ——相应于土壤干燥时下渗率 ( $\text{mm/min}$ );

表1 渗透速度、透渗总量与时间关系方程

编号	利用方式		坡度 (°)	坡向	下渗方程	渗透速度(mm/min)		
						渗透总量(mm)		
						5min	30min	60min
1	落叶松、刺槐 和沙打旺混交林	带面	0	NE35°	$f = 0.94 + 1.81e^{-0.048t}$ $ft = 0.94t + 37.78(1 - e^{-0.048t})$	2.36	1.37	1.04
		隔坡	16		$f = 0.9 + 6.3e^{-0.035t}$ $ft = 0.9t + 180(1 - e^{-0.035t})$	12.76	57.03	92.06
2	刺槐林地 (荒山造林)	带面	0	SE20°	$f = 1.5 + 2.82e^{-0.055t}$ $ft = 1.5t + 51.27(1 - e^{-0.055t})$	6.00	3.10	1.67
		隔坡	20°30′		$f = 1.25 + 4.74e^{-0.107t}$ $ft = 1.25t + 44.39(1 - e^{-0.107t})$	33.4	144.01	211.95
3	刺槐林地 (退耕造林)	带面	0	SE20°	$f = 1.04 + 2.36e^{-0.097t}$ $ft = 1.04t + 24.33(1 - e^{-0.097t})$	2.49	1.17	1.05
		隔坡	20		$f = 1.71 + 6.21e^{-0.043t}$ $ft + 1.71t = 144.42(1 - e^{-0.043t})$	14.55	54.20	86.66
4	人工草地(苜蓿)		15	SE9°	$f = 0.99 + 6.46e^{-0.052t}$ $ft = 0.99t + 124.23(1 - e^{-0.052t})$	6.72	3.42	2.18
5	人工草地(沙打旺)		14°30′	S	$f = 0.98 + 6.5e^{-0.084t}$ $ft = 0.98t + 77.38(1 - e^{-0.084t})$	36.49	5.97	236.08
6	人工草地(红豆草)		10	NW47°	$f = 1.27 + 5.95e^{-0.095t}$ $ft = 1.27t + 62.63(1 - e^{-0.095t})$	5.97	2.35	1.28
7	人工草地(草木樨)		10	NW45°	$f = 0.84 + 8.81e^{-0.122t}$ $ft = 0.84t + 72.21(1 - e^{-0.122t})$	33.39	127.82	178.24
8	已翻耕草地		12	SE25°	$f = 1.2 + 6.21e^{-0.1t}$ $ft = 1.2t + 62.1(1 - e^{-0.1t})$	5.25	1.50	1.02
9	荒草坡(封育)		28°30′	SE34°	$f = 0.85 + 10.52e^{-0.081t}$ $ft = 0.85t + 129.88(1 - e^{-0.081t})$	31.44	100.55	135.68
10	耕地(梯田、台地)		0	S	$f = 0.9 + 6.98e^{-0.035t}$ $ft = 0.9t + 134.23(1 - e^{-0.035t})$	4.97	1.61	1.29
11	小麦地(坡耕地)		10°30′	NE30°	$f = 0.76 + 5.09e^{-0.333t}$ $ft = 0.76t + 15.28(1 - e^{-0.333t})$	30.03	97.11	138.62
12	豌豆地(坡耕地)		15	SE4°	$f = 0.75 + 3.63e^{-0.06t}$ $ft = 0.75t + 60.5(1 - e^{-0.06t})$	5.63	1.07	0.85
						37.17	95.55	122.56
						4.97	1.51	1.22
						30.43	95.01	133.95
						7.83	1.77	0.93
						47.50	143.95	179.87
						6.76	3.34	1.75
						35.23	133.02	182.30
						2.72	1.26	1.75
						21.19	68.08	120.88
						3.44	1.35	0.85
						19.43	73.0	103.85

$\beta$ ——与土壤物理性质有关的系数;

$t$ ——渗透时间 (min)。

与其相应的土壤下渗总量方程为:

$$f_t = f_{ct} + \left( \frac{f_t - f_{ct}}{\beta} \right) (1 - e^{-\beta t}) \quad (6)$$

根据表 1 和图 2 所列试验结果可看出, 5 min 时渗透速度林地比坡耕地平均增加 41%; 草地增加 77%; 梯田、台地增加 119%; 封育荒草坡增加 152%。60 min 渗透总量林地比坡耕地平均增加 31%; 人工草地增加 28%; 梯田台地增加 62%; 封育草坡增加 60%。这一结果充分表明该流域内由于综合治理各项措施的有效实施, 使得土壤渗透性能得到了很大改善。

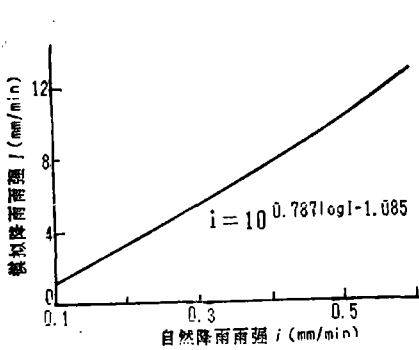


图1 模拟降雨与自然降雨雨强关系

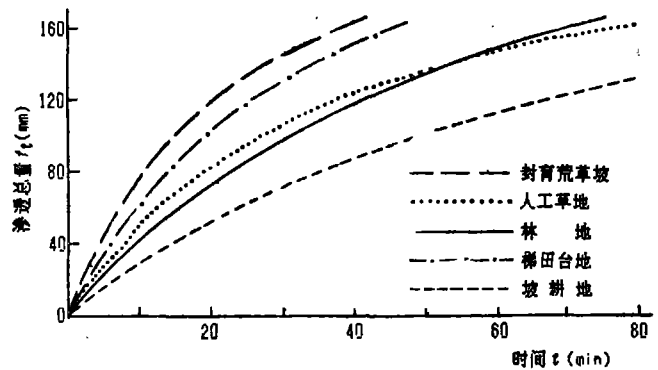


图2 渗透总量时间关系曲线

**2.3 土壤入渗与其影响因子关系的确定。** 根据在流域内不同地类上模拟降雨试验获得的32组资料分析, 建立了土壤入渗与其主要影响因子关系的回归方程:

$$Q = 506.16 + 10.24H + 3.55G - 61.88a - 1.29W + 39.75P + 28.02I \quad (7)$$

复相关系数:  $R = 0.846$

式中:  $Q$ ——单位时间内单位面积入渗量 ( $\text{ml}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ );

$H$ ——农耕地以 0、1 表示, 当利用现状为农地时  $H = 1$ , 非农地时  $H = 0$ ;

$G$ ——草地以 0、1 表示, 草地  $G = 1$ , 非草地  $G = 0$ ;

$a$ ——地面坡度 ( $^\circ$ );

$W$ ——土壤含水率 (%);

$P$ ——土壤总孔隙度 (%);

$I$ ——模拟降雨强度 ( $\text{mm}/\text{min}$ )。

考虑到林地内整地措施 (如反坡梯田等) 对土壤入渗的影响, 单独推求了林地土壤入渗回归方程:

$$Q_t = 4798.05 + 0.06I^{4.5} - 0.017a^{2.5} - 2508.18r(1 + W) \quad (8)$$

复相关系数:  $R = 0.891$

式中:  $r$ ——土壤容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); 其它符号意义同前。

**2.4 土地利用方式对土壤渗透量、径流量和冲刷量的影响。**为便于分析比较,将模拟降雨雨强控制在  $4.5\text{mm}/\text{min}$ , 试验小区坡度选择在  $15^\circ$  左右, 试验结果列于表 2。试验结果清楚表明在造林地内由于采取整地工程, 大部分径流被拦蓄在反坡梯田内, 冲刷量显著减少, 平均单位面积渗透量却最大。人工草地由于根系作用, 土壤物理性质发生变化, 其渗透量高于坡耕地。荒草坡由于采取封山措施, 自然植被恢复较好, 土壤残存有大量根系, 其渗透量比坡耕地增加 32%。

根据 1986 年 8 月一场平均雨强为  $0.25\text{mm}/\text{min}$  天然降雨时径流小区的观察结果 (见表 3) 可看出, 不同土地利用情况下的土壤渗透特征与模拟降雨测定结果反映的规律性

表2 不同土地利用方式渗透、径流和冲刷量变化表

利用类型	整地方式	坡 度 ( $^\circ$ )	渗透量 ( $\text{ml}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ )	径流量 ( $\text{ml}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ )	冲刷量 ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ )
乔灌木混交林	反坡梯田	14	3 835	665	3.56
刺槐林	反坡梯田	15	3 578	922	6.32
沙打旺		$14^\circ 30'$	2 384	2 116	16.42
紫花苜蓿		15	2 356	2 144	15.53
红豆草		$13^\circ 30'$	2 589	1 911	14.92
荒草坡		16	2 822	1 678	21.37
坡耕地		15	2 100	2 390	52.31

表3 自然降雨情况下径流小区测定结果

利用类型	整地方式	坡 度 ( $^\circ$ )	渗透量 ( $\text{ml}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ )	径流量 ( $\text{ml}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ )	冲刷量 ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ )
乔灌木混交林	反坡梯田	14	250	无	无
刺槐林	反坡梯田	15	250	无	无
荒山种草	水平条	20	250	无	无
沙打旺		$14^\circ 30'$	230.58	19.42	12.47
紫花苜蓿		15	236.42	13.58	8.05
红豆草		$13^\circ 30'$	237.72	12.28	12.48
荒坡(草被稀疏)		21	203.50	46.50	21.11
坡耕地(翻耕)		15	214.17	35.83	87.36

表4 双环法测定结果表

类 别	测定日期	稳渗时间	初渗速度 ( $\text{mm}/\text{min}$ )	稳渗速度 ( $\text{mm}/\text{min}$ )	达稳渗时 渗透总量 ( $\text{ml}$ )	渗透深度 ( $\text{cm}$ )
红豆草	8月	$42' 45''$	4.3	1.9	1 387	18.4
	3月	$40'$	2.2	0.8	626	8.3
草木樨	8月	$47' 10''$	3.0	0.8	2 099	27.8
	3月	$44'$	2.1	0.5	889	11.8
水平条 沙打旺	8月	$66'$	3.0	0.7	1 493	19.8
	3月	$57'$	1.3	0.5	849	11.3

是一致的。

2.5 植被在不同生长季节对土壤渗透性能的影响。表4、表5所列试验结果清楚

表5 人工降雨器测定结果表

类 别	测定日期	雨 强 (mm/min)	稳渗时间	渗透量 (ml)	径流量 (ml)	渗径比
红豆草	8月	4.53	48'30"	16281	3492	4.66
	3月	5.46	30'	3460	7280	0.47
草木樨	8月	5.38	47'10"	20164	3874	5.20
	3月	5.46	24'	6523	13500	0.48

地表明地面植被覆盖的作用,当草地在其生长旺盛季节,由于枝叶阻挡雨滴直接击溅土壤,保护了土壤结构,加之根系输导作用,使得水分易于下渗,径流量减少,与非生长季节(即地面无植被覆盖时)相比稳渗时间增加7%~15%,初渗速度平均增加86%,渗透深度增加125%,渗透量增加280%,径流量减少50%~70%。

2.6 土壤物理性质对渗透指标的影响。测定结果(见表6)表明:随着土壤容重

表6 土壤容重对渗透能力的影响测定表

草地类型	容 重 (g/cm <sup>3</sup> )	总孔隙度 (%)	渗 透 量 (ml/m <sup>2</sup> ·min <sup>-1</sup> )	径 流 量 (ml/m <sup>2</sup> ·min <sup>-1</sup> )
沙打旺	1.10	58.8	1556	2944
紫花苜蓿	1.08	59.4	2000	2500
红 豆 草	1.05	61.1	2556	1944

的减小和总孔隙度增加,土壤渗透量明显增大,而径流量变小。当土壤容重减小1%时,其渗透量平均增加14.3%。同时由表7可看出不同年龄同一草种、同一年龄不同草种其土壤的物理性质不同,与对照区相比有明显的变化。这说明了土地的合理利用能够

表7 各类草地土壤物理性质测定结果表

草 种	容重(g/cm <sup>3</sup> )	总孔隙度(%)	非毛管孔隙(%)	毛管孔隙(%)
1年生沙打旺	1.06	54.2	7.5	46.7
2年生沙打旺	1.08	58.8	8.1	55.1
1年生红豆草	1.26	48.15	6.8	41.4
2年生红豆草	1.05	61.1	6.0	54.7
8年生苜蓿	1.08	59.4	7.9	59.0
草木樨	1.12	56.6	5.9	51.7
对照区(荒地)	1.30	30.0	5.0	25.0

改善土壤物理性质,从而提高土壤的入渗能力,尤其是对于干旱地区增加林草覆被率将有利于提高天然降水的利用率。

2.7 土壤水分对渗透能力的影响。土壤入渗可分为3个阶段:(1)初渗阶段主

要受土壤内薄膜水的分子力和毛管水的毛管力作用。开始降雨时,湿土层很薄,干湿土含水量相差很大,形成土壤水势差,初期土壤越干燥,形成土水势越大,土壤初期入渗率也大;(2)随着水分下渗,土壤含水量增加,土壤水势逐渐减小,下渗速率减小,此时下渗是在重力和部分毛管力作用下进行;(3)毛管水逐渐饱和,毛管力消失,此时只有重力起作用,下渗速率趋于稳定。由此可见土壤水分只是影响初期土壤入渗,根据我们测定结果(表8)也证实了这点。土壤含水率增加,使土壤入渗初期5 min时下渗速率明显减小,而对土壤稳渗速率却影响不大。

表8 土壤水分与渗透能力关系测定结果

类 别	坡 度 (°)	土壤含水率 (%)	5min时下渗速率 (f5) (mm/min)	稳渗速率 (fc) (mm/min)
生长一般刺槐林	18	14.26	4.71	1.55
		21.95	3.64	1.50
生长良好刺槐林	18	10.55	7.37	1.00
		15.17	2.42	0.97

**2.8 坡度对土壤渗透能力的影响。**为了分析坡度对土壤渗透能力的影响,我们分别在人工模拟降雨和自然降雨情况下进行了观测试验(见表9和图3),结果表明人工降雨与自然降雨情况下平均渗透量、径流量随坡度的变化规律相同,即随着坡度增加土壤入渗量减小,同时从对农耕地和自然草坡两种不同土地利用类型的土壤入渗过程看,

表9 坡度与土壤渗透能力关系表

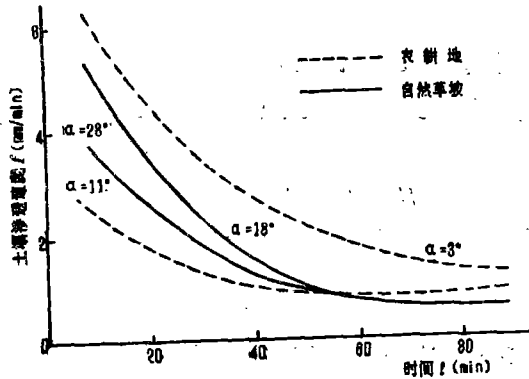
坡 度 (°)		5	8	11	14	17	20	23	备 注
人工降雨	渗透量 (ml/m <sup>2</sup> ·min <sup>-1</sup> )	2 105	1 919	1 744	1 549	1 362	1 177	991	设计雨强4.5mm/min; 土壤含水率8%; 总孔隙度45%。
	径流量 (ml/m <sup>2</sup> ·min <sup>-1</sup> )	2 395	2 581	2 756	2 952	3 138	3 323	3 509	
自然降雨	渗透量 (ml/m <sup>2</sup> ·min <sup>-1</sup> )	62.4	61.8	61.0	59.9	58.6	57.0	55.1	平均雨强 0.07mm/min; 其他条件同上。
	径流量 (ml/m <sup>2</sup> ·min <sup>-1</sup> )	7.6	8.2	9.0	10.1	11.4	13.0	14.9	

缓坡地的土壤渗透速度远高于陡坡地,平均地面坡度每减少1°,渗透量可增加3%左右。因此,在黄家二岔小流域综合治理中,采取必要的工程措施,大搞农田基本建设,改变小地形,减缓坡度,无疑是一种蓄水保墒,提高土地生产力的有效途径。

**2.9 雨强对土壤渗透能力的影响。**降雨强度是影响土壤渗透指标的主要因子之

表10 人工模拟降雨雨强与渗透关系

雨 强(mm/min)	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
渗透量(ml/m <sup>2</sup> ·min <sup>-1</sup> )	1 781	1 795	1 809	1 823	1 837	1 851	1 865
径流量(ml/m <sup>2</sup> ·min <sup>-1</sup> )	2 219	2 705	3 191	3 677	4 163	4 649	5 135
径渗比	1.25	1.51	1.76	2.02	2.27	2.51	2.75

图3 坡度不同时 $f-t$ 曲线

一。表10所列试验结果表明,随着降雨强度增加,平均渗透量和径流量的相应增大,但径流的增加速率大于渗透,径流与渗透的比值也随着雨强增加而增大,在遇有较大强度降雨时土壤本身的渗透能力将不能满足就地入渗的要求,而形成较大的地表径流。分析黄家二岔小流域降雨情况和土壤渗透能力,在坡面实施各项水土保持措施时,应将其拦蓄地表径流能力设计为所控面积土壤入渗能力的3倍较为合适,以利达到充分拦蓄径流增加土壤入渗目的。

### 3 结 论

通过上述分析,可得出以下几点结论:

3.1 影响黄家二岔小流域土壤渗透性能的主要因子是土地利用方式、地面坡度、土壤含水率、土壤总孔隙度和降雨强度。

3.2 根据在不同土地利用情况下测定结果表明土壤渗透能力大小排列是,封育荒草坡和梯田台地最高,人工草地和林地次之,坡耕地最差。

3.3 有植被覆盖的土壤比无植被覆盖的土壤稳渗时间增加7%~15%,初渗速度平均增加86%,渗透量增加280%,径流量减少50%~70%。

3.4 在干旱地区水土保持措施布设应以充分拦蓄地表径流、增加土壤入渗为基点,这样才能达到充分利用有限降水资源,提高土地生产力的目的。

### 参 考 文 献

- [1] 张学栋、姜述孟: 黄土降雨入渗过程中水分分布平衡点运动规律的研究,《水土保持通报》,1986年,第1期,第58~63页
- [2] 杨艳生: 地表径流与土壤渗透拟合方程,《水土保持通报》,1982年,第2期,第40~44页



## A Research For Soil Permeability and Surface Runoff in Huangjia-Ercha Small Watershed in Xiji County, Ningxia

*Sun Baoping     Sun Lida*

(Dept. of Soil Conservation, Beijing Forestry University)

### Abstract

The research for soil permeability and surface runoff in Huangjia-Ercha small watershed in Xiji county, Ningxia, was done by means of artificial precipitation and runoff-plot testing method, which showed that primary factors affecting soil permeability are land utilization, slope, soil moisture, total porosity of soil and rain intensity. Then a suggestion was made to fully use the limited precipitation in arid area.

**Key words,** Land utilization, Soil permeability, Artificial precipitation

---

(Abstract presented article from page 1 to 8)

## Research for Relationships Between Topographic Factors and Loss of Soil and Water on Sloping Land

*Jiang Zhongshan     Liu Zhi     Jia Zhiwei*

(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation  
Under Academia Sinica and Ministry of Water Conservancy)

### Abstract

The quantitative relationships between topographic factors and loss of soil and water on sloping land and the effects of rainfall factors on the above quantitative relationships were studied in this paper by five years data obtained from field experiment plots under natural rainfall. The results showed that the exponential changes of power-law relationships between loss of soil and water on sloping land and slope steepness and slope length are closely related to the maximum thirty-minute rainfall intensity under single rainfall, the power exponent of slope steepness and slope length of erosion is increases with the maximum thirty-minute rainfall intensity increasing. Then the statistical models of soil erosion reflecting the single rainfall and the mean year are established respectively.

**Key words,** Topographic factor, Loss of soil and water on sloping land, Mathematical model of soil erosion on the slope