

陡坡侵蚀产沙特点及含沙量过程计算模型研究

范荣生 王高英 李占斌

(陕西西安水资源科学研究所·西安市·710048)

提 要

该文分析了黄土丘陵区陡坡侵蚀产沙的特点,通过室内人工模拟降雨侵蚀试验和野外径流小区观测资料,对陡坡侵蚀产沙过程及降雨侵蚀产沙量进行了研究。并对溅蚀产沙量与影响因素作了回归分析,表明:室内试验溅蚀产沙量占总产沙量的22%~54%。同时根据试验研究与建模,提出了陡坡降雨径流侵蚀产沙的含沙量过程计算模型。经检验,结构合理,具有较好的实用价值。

关键词: 黄土丘陵区 侵蚀产沙 含沙量 计算模型

Calculative Model of Sediment Content and Features of Sediment-producing by Erosion in Steep Slope Land

Fan Rongsheng Wang Gaoying Li Zhanbing

(Institute of Water Resources of Xian City, Xian Shaanxi, 710048)

Abstract

The features of sediment-producing by erosion of steep slope land in loess hilly regions were analysed. The course of sediment-producing by erosion and sediment-producing amount by rainfall erosion have been studied by using the simulated experiments of artificial rainfall and the data of natural runoff plots. At the same time, the regression analysis have been carried out between sediment-producing amount by splash erosion and its influencing factors. The results show that the sediment-producing amount by splash erosion accounts for from 22 per cent to 54 per cent of the total sediment-producing amount in the simulated experiments. The calculative model for the sediment content course of sediment-producing by rainfall runoff erosion were developed based on the experimental researches and developing model. The test on this model shows that the model has a rational composition and a better applicative value.

Key words loess hilly regions sediment-producing by erosion sediment content calculative model

陕北黄土丘陵沟壑区,水土流失极为严重。根据国内诸多实测资料分析表明:黄土丘陵区梁峁坡下部及沟谷坡的陡坡地,是泥沙的主要产区。陡坡由于地表倾斜度大,不但利于坡面径流的形成,且也利于雨滴溅蚀、径流侵蚀和挟沙输送。如何探明陡坡上降雨径流侵蚀产沙量的变化规律及计算模拟,是当前流域产沙研究的重要课题之一。本文利用室内人工模拟降雨侵蚀试验及野外小区观测资料,对陡坡侵蚀产沙进行了分析研究。

一、陡坡侵蚀产沙的发生发展

陡坡面上的侵蚀营力,除了风蚀外,还有水力侵蚀和重力侵蚀,如雨滴溅蚀、径流侵蚀(包括面

蚀和沟蚀),洞穴侵蚀等。重力侵蚀由于其随机性而难以取得可靠的资料,因而对其观测和研究较少。本文只对雨滴溅蚀产沙和径流侵蚀进行研究。

(一)雨滴溅蚀产沙

降雨期间,雨滴具有动能,当降至地面时便转化为冲击力,该力不但使土壤表层变紧实,且能将部分土粒与总体分离。土粒溅起是因坡面土壤处于有一定孔隙的疏松状态,受雨滴打击时,形成雨穴,同时在雨穴边侧产生侧压力,使其周围土粒与水珠一起溅起,发生跃移,即所谓溅蚀。溅蚀反映在坡面出口处的水流挟沙,称为溅蚀产沙。

在整个降雨过程中,雨滴动能对表土的击溅作用是随时间而变化。溅蚀产沙可分为两个阶段:一是产流前,击溅作用使土粒沿坡面发生迁移、剥离及飞溅的土粒仍留在坡面上;另一是产流后,雨滴打击作用可分两部分:一部分使土粒与土体分离,另一部分是使坡面水层紊动强度加大,导致水层含沙浓度变大。因而被溅起的土粒通常为产流后的坡面径流起到一个供沙的作用。被坡面径流搬运到下游。在搬运过程中,随径流水深的增大,水流的含沙浓度将逐渐为水流的挟沙能力及水流的动能所左右。

从试验室内土槽上进行的人工降雨试验所观测到的含沙量过程来看(见图1),坡面径流刚开始时,流量很小,但含沙量过程开始时都有一个峰值

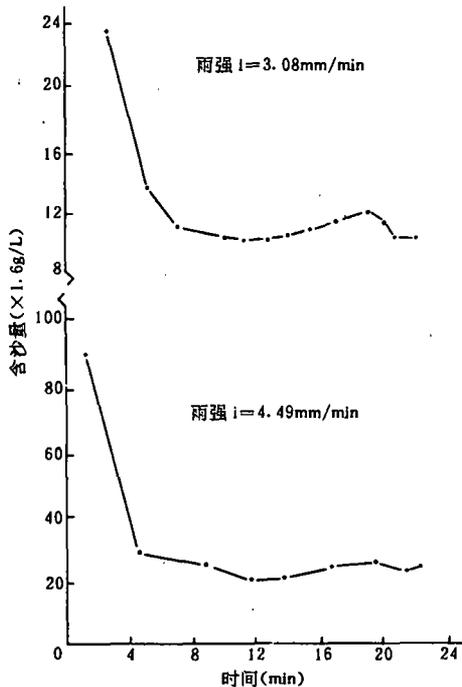


图1 含沙量过程

(指刚产流的1min左右的水流含沙量)。从泥沙动力学观点分析,极小的水流几乎不能挟带泥沙,但从雨滴击溅现象可知,坡面出口处的含沙量过程上起始峰值,明显是由产流前雨滴溅蚀造成,也是雨滴溅蚀作用为坡面径流供沙所造成水流含沙浓度的结果。这一现象,在陕北岔巴沟流域内段川1号、2号径流场的实测资料也表明:在洼地积水流动前,就已具有较高的含沙浓度^[1]。

溅蚀产沙量是整个降雨径流侵蚀产沙量的一部分。它的大小与降雨特征、水流特征及下垫面条件等诸因素有关。影响因素主要有:(1)雨强大小及随时间变化的形式,降雨历时;(2)地表土壤的物理化学性质(如土壤的机械组成、团粒结构、有机质等);(3)地表土壤在雨前的状态(如含水量、紧实度、结皮状况等);(4)坡面的几何特征(如坡度、坡长、凹凸程度及表面糙率);(5)地表植被覆盖情况;(6)坡面上滞蓄水深及产流面积大小。

(二)径流侵蚀产沙

在坡面上,当雨强超过土壤表层的入渗能力时,在土表面就会产生薄而细的涓涓水流,随降雨的继续,净雨量不断增大,坡面上的产流水深及产流面积也随之增大。在地形不平整的条件下,坡面径流易呈股流,引起细沟侵蚀发生。在陡坡上有时易发展成浅沟、切沟、冲沟等侵蚀以及重力侵蚀。根据水流条件,水流将输送一定量的泥沙,且其输沙量多少受水流输移能力的限制。

沟间地的侵蚀和细沟中的侵蚀是独立的,但细沟里的侵蚀在很大程度上依赖于沟间地的来水来沙。如果沟间地泥沙输入量大于细沟径流的输送能力,则将发生淤积。如果输入沙量小于细沟水

流的输送能力,并且径流侵蚀力大于细沟中土壤抗蚀力,就会导致细沟的发展。

影响径流侵蚀的主要因素有(1)雨强及其随时间变化的形式,降雨历时;(2)坡沟的几何形态;(3)坡沟土壤的可蚀性及可运性;(4)坡沟的水力粗度;(5)植被情况。

二、人工模拟降雨(定雨强)陡坡面侵蚀产沙试验

(一)试验系统

1. 模拟降雨装置。装置的技术指标:装置高于地面 12m,能模拟雨强 0.2~4.5mm/min,在 20m² 面积上的均匀度达 0.7 以上,雨滴动能基本上同天然降雨,其性能详见文献^[2]。降雨喷头采用喷洒式 X 型,通过改变喷头盖板的开度和管道水压,可喷洒出不同的雨强。降雨开始与结束,雨强大小及变化全部由计算机自动控制。

2. 下垫面布置。在降雨装置以下 10m 处,设有侵蚀土槽,槽体为浆砌砖墙,下铺钢模板,板上覆盖土体厚度 30cm,陡坡面净宽 1.5m,坡长随坡度改变而有所差异,最长为 6.08m。试验采用坡度分别为 27.4°、34.9°、40.0°三种。下垫面布置见图 2。

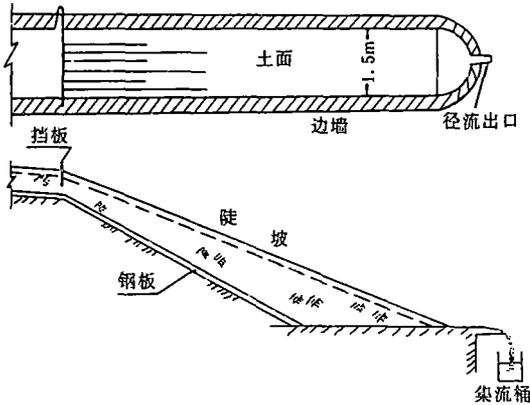


图 2 下垫面示意图

流量测定:采用容积法测定流量过程。

含沙量测定:用烧杯取水样及应用置换法求得含沙量。

(二)次降雨侵蚀产沙量试验结果及分析

1. 次降雨侵蚀产沙量。将裸土和有覆盖的两种坡面条件的各种组合试验结果列于表 1,雨强分别为 1.217、2.356、3.062mm/min 3 种,各次降雨历时均为 10min。从表 1 可见,坡度一定时,侵蚀产沙量随雨强增大而增加。在雨强 $i=1.217、2.356\text{mm/min}$ 时,侵蚀产沙量随坡度增大而减少;但当雨强为 3.062mm/min 时,侵蚀产沙量随坡度增大而增加。雨滴溅蚀产沙量占总产沙量的比例为 22%~54%。由此可见,陡坡面发生大强度暴雨时,侵蚀产沙量将会剧增。同时,雨滴溅蚀产沙将不可忽略。

2. 单位长投影面上溅蚀产沙量的回归分析。为了探讨溅蚀产沙量变化的规律,进行了单位长投影面上溅蚀产沙量 $M_{\text{喷}}$ 与影响因素的多元回归分析。

因本项试验的下垫面处理工作较繁重,很难实现土壤干容重及雨前土壤湿度在裸土和覆盖的两种坡面条件下的完全一致,但为了探讨其对雨滴溅蚀产沙的影响,本次试验作了很大努力,尽量

下垫面分裸土和有覆盖两种情况。覆盖采用铅丝网(孔为方形,孔长约 0.6cm)加窗纱(孔径约 0.2cm)的双层覆盖物,覆盖层距土表 2~5cm。既不影响坡面水流的流动,又可以保证降雨完全透过网孔落入地表。

3. 土壤干容重、含水率、流量、含沙量的测定。

土壤干容重及含水率的测定:采用环刀法取土样,土样烘干后,可量算出重量比含水率:

$$\zeta = \frac{m_{1+w} - m_1}{m_1}$$

及干容重: $\gamma_s = \frac{m_1}{V}$

式中: m_{1+w} 为湿土重; m_1 为干土重; V 为土样容积。

使之在两种坡面条件下有较小的误差,在回归分析内采用其平均值,见表2。

表1 陡坡降雨侵蚀产沙试验结果

雨强 (mm/min)	坡面条件	坡度(°)	坡长(m)	坡度(°)	坡长(m)	坡度(°)	坡长(m)
		27.4	6.08	34.9	5.16	40.0	4.57
		产沙量(kg)					
1.217	裸露面	5.827		3.978		3.450	
	覆盖面	3.093		1.814		2.035	
	差值	2.734		2.164		1.415	
	溅产沙量/总产沙量(%)	46.9		54.4		41.0	
2.356	裸露面	29.636		10.319		9.294	
	覆盖面	16.882		7.392		7.276	
	差值	12.754		2.927		2.018	
	溅产沙量/总产沙量(%)	43.0		28.4		21.7	
3.062	裸露面	48.715		54.899		64.419	
	覆盖面	31.083		28.691		29.949	
	差值	17.632		26.208		34.470	
	溅产沙量/总产沙量(%)	36.2		47.7		53.5	

注:差值为雨滴溅蚀产沙量。

表2 各组试验前土壤干容重、含水率

坡度(°)	雨强(mm/min)					
	1.217		2.356		3.062	
	r_s (g/cm ³)	ζ (%)	r_s (g/cm ³)	ζ (%)	r_s (g/cm ³)	ζ (%)
27.4°	1.465	22.56	1.488	21.67	1.530	18.79
34.9°	1.566	20.34	1.629	20.16	1.592	19.82
40.0°	1.576	20.48	1.560	21.05	1.546	20.69

从表2可知,各种组合的雨前土壤含水量变化不大,平均值 $\bar{\zeta}=20.62\%$,误差范围 $|\Delta\bar{\zeta}| \leq 1.94\%$,故在回归分析中不予考虑。在回归分析中考虑的因子有:降雨侵蚀力 EI 、坡度 J 、土壤干容重 γ_s 三个因子。其中降雨动能 E 的计算式^[2]为:

$$E = 24.21I^{0.21} \quad (\text{J/m}^2 \cdot \text{mm}) \quad (1)$$

回归结果为:

$$M_{\text{雨}} = 0.034(E \cdot I)^{2.28} J^{0.99} \gamma_s^{-11.61} \quad (2)$$

复相关系数 $R=0.83$

由此可见,溅蚀产沙量随降雨侵蚀力指标 $(E \cdot I)$ 的增大而增大;随坡度的加大而增大;随着土

壤紧实度的增加而减小。

3. 雨滴溅蚀产沙率过程的模型。裸土陡坡的 3 个坡度、3 个雨强的组合试验,为对比分析陡坡在定雨强作用下,降雨径流侵蚀的含沙量过程的分析提供了依据。图 3 是 3 个坡度的实测流量、含沙量过程。

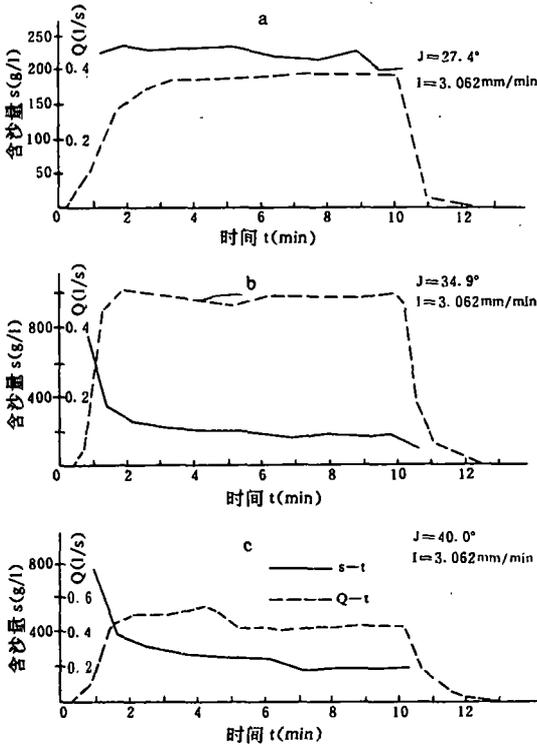


图 3 流量(Q)、含沙量(S)过程线

令水流侵蚀引起的含沙量过程为 $s'(t)$, 溅蚀产沙的含沙量过程为 $ds(t)$, 则降雨径流侵蚀产沙的总含沙量过程为

$$s(t) = s'(t) + ds(t) \quad (3)$$

关于 $s'(t)$, 可采用河流泥沙运动中维利卡诺夫公式来表示, 即

$$s' = k \left(\frac{V^3}{gh\omega} \right)^m \quad (4)$$

式中: V —水流速度; h —水深;
 ω —泥沙沉速; g —重力加速度;
 k —系数; m —指数。

对于坡面水流, 流速可用曼宁公式计算, 即:

$$V = \frac{1}{h} J^{1/2} h^{2/3} \quad (5)$$

假定泥沙沉速 ω 及糙率 n 为定值, 则可推导出:

$$S' = k' (J^{1.2} q^{0.6})^m \quad (6)$$

关于 $ds(t)$, 由于 ds 值随净雨时间增长而呈衰减曲线, 因而, 可用指数曲线或对数曲线方程去拟合:

$$ds = ae^{-bt} \quad (7)$$

$$\text{或 } ds = A - Btgt \quad (8)$$

式中: t_c 为净雨时间。

此两种曲线方程对九个组合试验资料拟合的结果, 由表 3 列出。

由表 3 可知, 对数型曲线的拟合, 其相关系数均较大。指数型曲线的拟合, 其相关系数均较低, 且有 4 组资料的相关系数小于 0.7。

对数型曲线两参数 A 及 B , 与影响因素之间的回归分析, 得

$$A = 3638.35 + 8.71(E \cdot I) + 14.21J - 2834.917, \quad (9)$$

$$B = 1320.15 + 2.93(E \cdot I) + 4.586J - 1013.287. \quad (10)$$

通过式(8)~(10), 可计算出 $ds(t)$ 。因而 $s'(t) = s(t) - ds(t)$ 。将 s' 与 $J^{1.2}q^{0.6}$ 的资料点绘相关图, 发现三个坡度的坡面在定雨强降雨下, 相关线呈现非线性曲线(表4)。根据式(3)、(6)、(8)的模型及表3、4的参数值, 计算结果见表5。

可见, (3)式的模型在定雨强条件下计算降雨径流中含沙量的变化过程是可取的。关键是式中各参数值的确定问题。

表3 各组试验资料得到的参数综合表

雨强 (mm/min)		1. 217		2. 356		3. 062	
坡度(°)	参数	指数 型	对数 型	指数 型	对数 型	指数 型	对数 型
27.4	A	25.83	60.595	284.88	447.80	314.69	396.89
	B	0.001	17.951	0.007	161.57	0.006	129.76
	R	0.64	0.80	0.98	0.92	0.76	0.90
34.9	A	32.05	52.721	29.34	68.437	150.12	443.12
	B	0.001	10.980	0.002	19.929	0.001	136.87
	R	0.78	0.87	0.60	0.69	0.65	0.71
40	A	41.51	84.243	24.97	43.876	304.03	736.06
	B	0.002	25.901	0.001	9.160	0.003	243.36
	R	0.35	0.87	0.67	0.69	0.87	0.92

注: ①表中 R 为曲线拟合时的相关系数, ②曲线方程中净雨历时 t_c 的单位取秒, 每次径流过程取沙样 10~11 个。

表4 回归计算结果

坡度(°)	样本容量	k'	m	相关系数
27.4	12	21381	3.23	0.932
34.9	12	1495	2.35	0.974
40.0	12	407	1.59	0.944

表5 计算与实测产沙量对比

雨强 (mm/min)	坡度 (°)	实测产沙 量(kg)	计算产沙 量(kg)	相对误差 (%)
1.217	27.4	5.827	5.082	12.8
	34.9	3.978	1.676	57.9
	40.0	3.450	2.909	15.7
2.356	27.4	29.636	32.540	9.8
	34.9	10.319	13.867	34.4
	40.0	9.294	18.857	103.0
3.062	27.4	48.715	48.377	0.7
	34.9	54.899	56.489	2.9
	40.0	64.419	64.581	1.3

三、黄土丘陵区天然径流场

含沙量过程的模拟

前面已对定雨强条件下, 坡面含沙量过程及产沙量进行了模拟。为验证此模型的应用性能, 今引用陕北团山沟径流场中3号和5号场1966年的二次降雨径流泥沙过程资料进行检验。由于天然径流场的资料是在变动雨强的侵蚀产沙情况下观测得到。因而, 如何计算变动雨强下的雨滴溅蚀产沙过程是个关键问题。

(一) 模拟方法

定雨强时, 溅蚀产沙采用 $ds(t) = ae^{-bt_c}$ 或 $ds(t) = A - Btgt_c$ 两种形式。虽然指数形式对 ds 的试验资料有些场次不合适, 但该形式能保证在整个产流过程中的非负性, 所以, 在变雨强中溅蚀产沙宜采用指数形式。变雨强时, 下一个雨强的溅蚀产沙效应, 必然会受到前边雨强的下渗和产流条件的影 响。为了解决这个问题, 我们把散粒噪声模型引用进来。散粒噪声模型的概念简述如下:

设在 τ 时刻, 发生单一的散粒噪声脉冲, 其高度为 \bar{y} , 随后以指数规律衰减, 见图4。这与本文定雨强时, ds 值变化趋势一致。

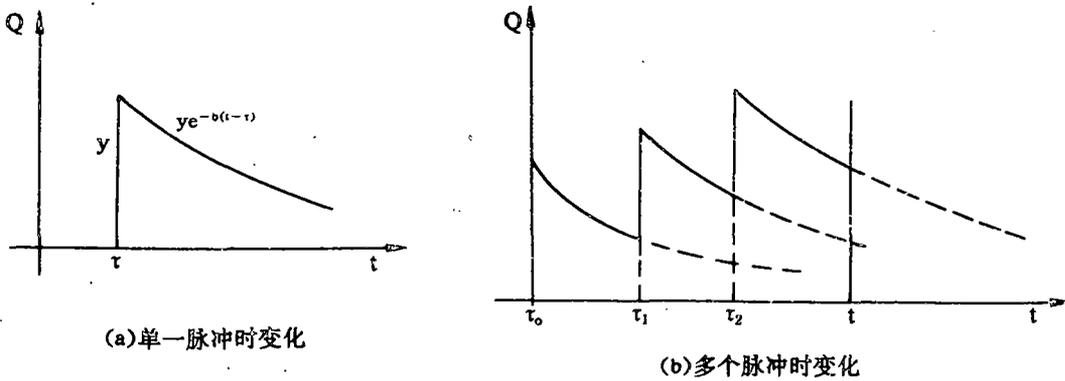


图4 散粒噪声模型示意图

对于发生多个脉冲(如3个脉冲),则某时刻的函数值可表示为:

$$Q(t) = y_0 e^{-b(t-\tau_0)} + y_1 e^{-b(t-\tau_1)} + y_2 e^{-b(t-\tau_2)} \quad (11)$$

式中: $Q(t)$ — t 时刻的函数值; y_i, y_2, y_3 —时刻 τ_0, τ_1, τ_2 的脉冲高度; b —参数,表示衰减特性。

若发生 N 个脉冲,则有

$$Q(t) = \sum_{i=0}^{N-1} y_i e^{-b(t-\tau_i)} \quad (12)$$

(12)式即散粒噪声模型。

笔者根据试验资料分析,得知产流后的雨强溅蚀产沙效应与前边雨强、产流历时有关。故令

$$y_i = \frac{k_1}{t^\beta} dI_i^\alpha \quad (13)$$

式中: dI —相邻两个时段雨强的增量,若增量为负值,则取零; t —产流历时; α, β —指数;

k_1 —系数,与地表植被、坡面形态、土壤性质等因素有关。

于是有:

$$ds(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{k_1}{t^\beta} dI_i^\alpha e^{-b(t-\tau_i)} \quad (14)$$

对水流侵蚀产沙效应采用 $s'(t)$:

$$s'(t) = k' J^{1.2} q^{0.6} = k_2 q^{0.6} \quad (15)$$

变雨强时,降雨径流侵蚀产沙的含沙量过程的计算模型为:

$$s(t) = k_2 q^{0.6} + \sum_{i=0}^{N-1} \frac{k_1}{t^\beta} dI_i^\alpha e^{-b(t-\tau_i)} \quad (16)$$

对于特定的径流场的含沙量过程计算,未知参数有 $k_1, k_2, \alpha, \beta, b$ 5个。

(二)模型应用

团山沟3号场位于左岸崩坡地段,汇水面积为40.0m×15.0m,坡度40.4%,地表种植马铃薯。5号场也位于左岸崩坡,汇水面积为20.0m×15.0m,坡度60.1%,地表种植马铃薯,两个场的土壤均为黄绵土,土壤干容重均为1.39g/cm³。1966年,该区雨水充沛,选用8月8日及8月28日二次降雨过程,应用(16)式进行计算,结果见表6及图5。

表6 (16)式中参数值变化

试验场	降雨时间 (年、月、日)	植被度 (%)	雨前土壤 含水量(%)	参 数					确定系数 $d\bar{y}$
				α	β	b	k_1	k_2	
3号场	19660808	20	12.3	2	1	1	550	340	0.87
	19660828	15	7.2	2	1	0.3	250	290	0.87
5号场	19660808	20	12.3	2	1	1	990	200	0.91
	19660828	15	7.2	2	1	0.3	50	550	0.68

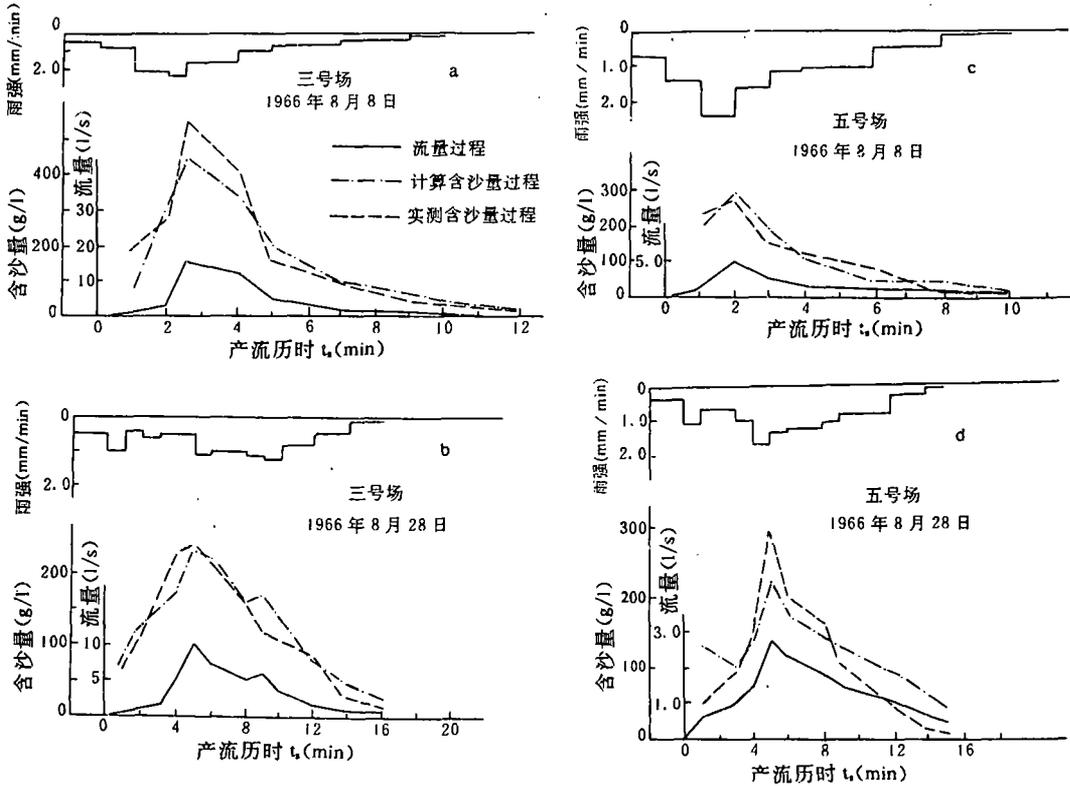


图5 计算与实测含沙量过程比较

表6中确定性系数是计算与实测含沙量过程拟合有效性的评判指标,其计算公式为

$$d\bar{y} = 1 - \frac{s_r^2}{\delta_y^2} = 1 - \frac{\sum (y_i - y)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (17)$$

式中: s_r^2 —预测误差的方差; δ_y^2 —预测要素值的方差; y 为计算值; y_i —实测值; \bar{y} —实测值的均值。

由表6及图5可见,四场降雨的计算与实测含沙量过程似合较好,确定性系数均在0.68以上。且 α, β 值变动不大, $\alpha=2, \beta=1$,这样有利于模型的应用。参数 k_1, k_2 ,及 b 值变动较大,因为这些参数受到诸多因素的影响,如坡面植被度、细沟发育及分布特征,坡度、土壤成分及含水量情况等。

由此可见, $S(t) = k_2 q^{0.6} + \sum_{i=0}^{N-1} \frac{k_1}{t} dI_i e^{-b(t-t_i)}$ 的模型,对变雨强时的降雨径流中含沙量过程的模拟

具有较好的适应性。

四、结 语

1. 雨滴溅蚀产沙与雨滴溅蚀是不同的概念,对于流域产沙计算而言,需要对雨滴溅蚀产沙问题进行研究。

2. 黄土丘陵沟壑区梁峁坡下部及沟谷坡的陡坡面,遇强暴雨时,水土流失会剧增。陡坡不但利于径流侵蚀和挟沙输送,而且也利于雨滴溅蚀产沙。根据室内实验,溅蚀产沙量占总产沙量的比例为22%~54%。

3. 对于流域坡面上降雨径流侵蚀产沙计算应同时计算雨滴溅蚀和水流侵蚀的产沙效应。散粒噪声模型能较好地反映时段雨强变化过程中雨滴溅蚀产沙的效应。本文提出的场次降雨径流侵蚀产沙的含沙量过程计算模型,结构合理,具有较好的实用价值。

参 考 文 献

- [1]钱宁主编. 高含沙水流运动. 北京:清华大学出版社,1989年
- [2]范荣生等. 用于降雨侵蚀的人工模拟降雨装置试验研究.《水土保持学报》,1991年,第2期
- [3]沈晋等. 黄土塬坡降雨产沙过程模拟. 第三届中日河工坝工会议论文集,1987年
- [4]蔡强国. 坡面侵蚀产沙模型的研究.《地理研究》,1988年,第2期
- [5]史景汉等. 黄丘一副区小流域暴雨洪水输沙过程预报模型.《中国水土保持》,1989年,第1期
- [6]汤立群等. 黄土丘陵区小流域产沙数学模型.《河海大学学报》,1990年,第2期