

文章编号:1000-4874(2004)06-0774-09

地表条件对坡面产流的影响^{*}

向华, 刘青泉, 李家春
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 本文将复杂地表条件对坡面流运动的影响概化为阻力的变化, 运用运动波理论和修正的 Green - Ampt 入渗模型, 建立了能够反映地表条件影响的坡面降雨入渗产流模型, 数值结果与实验符合较好, 运用该模型分析了植被、地形、坡长、坡度等地表条件对坡面产流过程的影响。

关键词: 坡面流; 阻力; 植被; 地形; 运动波模型; 入渗模型

中图分类号: TV139.1 **文献标识码:** A

Influences of slope surface conditions on the runoff generation

XIANG Hua, LIU Qing - quan, LI Jia - chun
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100080, China)

Abstract: In this paper, the influences of slope surface conditions, such as slope length, slope gradient, vegetation coverage, micro - topography, are analyzed in the estimation of resistance. The resistance is described by Darcy - Weisbach coefficient and divided into three parts: grain resistance, form resistance and wave resistance. Combing one - dimensional kinematic wave theory with revised Green Ampt infiltration model, a model of runoff generation has been established. The effectiveness of the model is validated by Lima's experimental data. From the results of numerical simulation, the functions of micro - topography and vegetation coverage are further discussed, and some other valuable conclusions are also obtained.

Key words: overland flow; resistance; vegetation; micro - topography; kinematic wave theory; Infiltration model

1 引言

土壤侵蚀给人类的生存和发展带来了一系列问题。土壤侵蚀使土壤中的有机物质减少, 肥力减退,

表面颗粒粗化, 并加剧了洪涝灾害, 多年来受到世界各国学者的重视。初期的土壤侵蚀研究, 主要以大量分析实验数据和野外观测资料为主, 多为局部区域的经验总结, 缺乏较好的物理基础, 外延性较差。

* 收稿日期: 2001-11-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(19832060, 10332050)和中国科学院知识创新方向项目(KJCX2-SW-L1-4)

作者简介: 向华(1976~), 男, 湖北省人, 硕士, 博士研究生。

随着研究的不断深入,对侵蚀过程物理机理的研究得到了较大发展,建立有较好物理基础的预报理论越来越受到重视。通常,由降雨引起的土壤水蚀过程包括了水流和土壤两方面因素的综合作用,探讨土壤侵蚀的机理,首先要研究降雨产流的动力学特点,其中对坡面产流过程的认识是研究土壤侵蚀的基础。

过去对坡面流的研究已有大量工作,包括野外观测、实验研究、理论探讨以及数值模拟^[1-3],但大多数是针对平整坡面进行的。而实际坡面往往比较复杂,坡面起伏不平,且有植物的根茎、土壤微团聚体、砾石和微地形突起,这些都会影响坡面流的流动状态,影响坡面产流过程和土壤侵蚀过程。由于坡面流只是一种特殊薄层的水流,很容易受到地表条件的干扰,影响坡面流的产生和流动过程,而过去对这一问题的研究相对比较缺乏,有待于进一步的细致研究。本文即针对这种复杂坡面,探讨复杂地表条件对坡面流阻力的影响,并结合运动波模型和 Green-Ampt 入渗模型,分析复杂地表条件对坡面产流过程的影响规律,从而合理评价植被等对土壤保持的作用。这将对坡面流的理论研究和水土保持实践都具有重要意义。

2 复杂坡面的阻力

坡面流阻力是坡面流研究中的重要问题之一,阻力直接影响到坡面流运动的各水动力学参数,如流速、流量以及剪应力等,因此坡面流阻力规律一直受到众多学者的关注。但由于对坡面流阻力规律仍缺乏非常细致的定量认识,长期以来,一直采用明渠水流阻力的概念和表达方法。实际应用中,主要采用 Darcy-Weisbach 公式和 Manning 公式。

对于较平整坡面,大多研究者认为坡面流阻力主要与土壤颗粒、水流雷诺数 R_e 、雨强等有关,因此许多研究者研究了坡面流阻力与土壤颗粒、水流雷诺数 R_e 、雨强的关系,得到许多经验及半经验关系^[4-6]。实际坡面经常表面起伏不平,且有植被覆盖,这些复杂条件对坡面流有很重要的影响,除了有一定的蓄水功能之外,最主要的影响是阻力的变化。因此,如暂不考虑其蓄水作用,可以将复杂地表对坡面产流和流动过程的影响概括反映在坡面流的阻力变化之中。

目前较一致的认识是,可以根据地表特征差异将坡面流阻力分为 4 个部分,或者说坡面流阻力主

要有 4 个来源:即颗粒阻力 f_k 、形态阻力 f_f 、波阻力 f_w 和降雨阻力 f_r 。颗粒阻力是指由高度小于 10 倍水流粘性底层厚度的土壤颗粒和微团聚体引起的阻力。这种阻力实际上就是水流的粘性阻力,即水流绕过这些伸入粘性底层以上的颗粒时耗散能量而造成的。形态阻力是指突入水流 10 倍粘性子层厚度以上的砾石、植物、微地形突起(直接影响到坡面平整与否),通过改变流动的横截面和流动方向,产生分离涡和二次流耗散能量而形成的阻力。当突出水面的植物茎秆扰动水面,水流从两个较大尺度粗糙源之间流过,或更大尺度的地表突起造成水流表面明显起伏、流速突变或流线分离时,由于自由水面的变形,或者说由于维持非均匀的水面,需要能量消耗,即产生波阻。降雨阻力是雨滴打击造成水流延迟产生的相应附加阻力。并且认为这些阻力是可以相互叠加的,即有:

$$f = f_k + f_f + f_w + f_r \quad (1)$$

一些研究者对降雨对坡面流阻力影响的研究结果表明^[7],降雨增加的阻力一般情况下较小,在层流缓坡时最大可以占到总阻力的 20%,总的说来是一个小的部分。对过渡态和湍流,这部分更小,当雷诺数 $Re > 2000$ 时,降雨的影响可以不计。因此,坡面流阻力主要由颗粒阻力、形态阻力和波阻力三部分组成,即 $f = F(f_k, f_f, f_w)$ 。

Abrahams 等人^[8]研究了半干旱砂砾覆盖坡面上的坡面流阻力。其野外实验发现阻力系数与 Re 的关系有直线也有曲线,与常规规律不一样。作者将此归因于坡面形态特征,可以将阻力分为颗粒阻力、形态阻力和波阻三部分。结合室内实验及 Hsieh^[9] 和 Flammer^[10] 的结论,作者认为 Froude 数 Fr 小于 0.5 时形态阻力占重要地位,而 $0.6 < Fr < 2$ 时,波阻力将占主要地位。根据实验数据给出了包括几种阻力的综合模型:

$$\log f = \log \left[3.19 R_e^{-0.45} + \frac{4.8 \sum A_i}{A_b} \right] + 2.80 C \quad (2)$$

式中,右边第一项表示颗粒阻力,形如半无穷长平板摩擦系数的 Blasius 解;右边第二项表示形态阻力,可以由圆柱绕流的阻力公式导出,其中 A_b 为试验坡面面积, A_i 为第 i 个粗糙单元的水下横截面积;右边

第三项表示波阻, C 为床面上粗糙源的覆盖率(%)。

将上式改写为:

$$f = e^{2.80C} \left(3.19R_c^{-0.45} + \frac{4.8 \sum A_i}{A_b} \right) = k(3.19R_c^{-0.45} + b) \quad (3)$$

其中, $k = e^{2.80C}$ 反映了波阻 ($k = 1 \sim 16.445$), $b = 4.8 \sum A_i / A_b$ 反映了形状阻力。

3 坡面降雨产流模型

3.1 坡面流运动模型

当降雨强度超过地表注蓄能力和土壤入渗率时,坡面开始出现积水,并在重力作用下顺坡面流动形成坡面薄层水流,即坡面开始产流。坡面流水深一般很小,坡面边界条件更是复杂多变,对坡面流的描述一直是一个较为困难的问题。目前多采用一维运动波方程组来描述坡面水流。Wolhiser 和 Liggett^[11] 曾经对坡面一维非恒定渐变流进行分析,一般当运动波数 $\bar{K} > 20$ ($\bar{K} = S_0 L / h_0 F_0^2$, 其中 S_0 为坡面坡度, L 为坡面流长度, h_0 为对应于坡面长 L 处的水深, F_0 为相应的 Froude 数) 和 $F_0 > 0.5$ 时,运动波模型可以很好地描述坡面流运动。对于大多数坡面流,基本上均可满足此条件。因此,我们采用运动波近似假定,即水流的重力作用与阻力达到平衡,则坡面流运动方程可以表述为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = q_*$$

$$S_f = S_0 \quad (4)$$

其中, x 为沿坡面向下的坐标, t 为时间(s), h 为水深(m), q 为单宽流量(m^2/s), S_f 为水流能坡, $S_0 = \sin\theta$ (θ 为坡面倾角), q_* 为侧向入流强度,即净雨量,可表示为

$$q_* = p \cos\theta - i \quad (5)$$

式中 p 为降雨强度(m/s), i 为土壤入渗率(m/s)。

根据运动波理论假设,可以借用明渠均匀流的阻力公式,引入 Darcy-Weisbach 阻力系数 f ,则有

$$S_f = f \frac{u^2}{8gh} = f \frac{q^2}{8gh^3} \quad (6)$$

式中 h 为坡面流水深, q 为单宽流量 $q = uh$ 。结合式(4)和(6),阻力系数采用式(3)形式,可得到

$$q = uh = h \sqrt{\frac{8ghS_f}{f}} = \frac{(8gS_f)^{1/2} h^{1/2}}{\sqrt{k(3.19(\frac{4q}{\gamma})^{-0.45} + b)}} \quad (7)$$

则可由方程式(4)、(5)和(7)对坡面流运动进行描述。

3.2 土壤入渗模型

土壤入渗过程采用改进的 Green-Ampt 入渗模型。经典的 Green-Ampt 模型是初始干燥的土壤在薄层积水情况下的垂直入渗问题。其基本假定是入渗过程中湿润区和未湿润区之间有明确的湿润锋面,由 Darcy 定律,得到计算方程:

$$i = \frac{dI}{dt} = K[1 + (\theta_s - \theta_i)S/I]$$

$$I = Kt - S(\theta_s - \theta_i) \ln(1 + \frac{I}{S(\theta_s - \theta_i)}) \quad (8)$$

其中, i 为土壤入渗率(m/s), I 为累积入渗量(m), K 为土壤饱和导水率(渗透系数)(m/s), θ_s 为饱和含水率,即孔隙率(%), θ_i 为土壤初始含水率(%), S 为土壤吸力(m)。

Mein & Larson 将其推广应用至降雨入渗的情况^[12]。设有稳定的雨强 p , 只有 p 大于土壤的入渗能力时,地表才能形成积水。而在降雨的初始阶段,全部降雨都渗入地下。设想当累积入渗量达到某一值时,即 $i = p$ 时开始积水,称此累积入渗量为 I_p 。由 Green-Ampt 模型入渗公式可以导出开始积水时的 I_p 值,

$$I_p = \frac{(\theta_s - \theta_i)S}{p/K - 1} \quad (9)$$

开始积水时间由 $t_p = I_p/p$ 给出。因此整个过程的入渗率可表示为

$$i = p \quad t \leq t_p$$

$$i = K[1 + (\theta_s - \theta_i)S/I] \quad t > t_p \quad (10)$$

式中 I 为积水开始后的累积入渗量。由于实际不是从 $t = 0$ 开始积水,须采用修正后的公式

$$K[t - (t_p - t_s)] = I - S((\theta_s - \theta_i) \ln \left[1 + \frac{I}{S(\theta_s - \theta_i)} \right]) \quad (11)$$

t_s 表示假设由 $t = 0$ 开始积水,到入渗量 $I = I_p$ (或 $i = p$) 时所需时间,可计算如下

$$Kt_s = I_p - S(\theta_s - \theta_i) \ln \left[1 + \frac{I_p}{S(\theta_s - \theta_i)} \right] \quad (12)$$

实际的降雨强度往往是不恒定的。在非恒定雨强发生的过程中,地表的积水状态可能会发生间歇性改变,Chu 将上述模型再作推广^[13],定义如下两个因子:

$$c_u = P(t_n) - R(t_{n-1}) - kSM / [p(t_n) - k]$$

$$c_p = P(t_n) - R(t_{n-1}) - I_c(t_n) \quad (13)$$

其中 $M = \theta_s - \theta_i$, $P(t_n)$ 代表 t_n 时刻降雨总量, $I_c(t_n)$ 代表 t_n 时刻计算的入渗总量。

可以证明,时段结束时积水与否与此两因子的正负等价。这样就可以由这两个因子使用表 1 来判断各时段结束时的积水情况,若 $p < K$ 时,地表始终无积水,不用此两因子判断。

表 1 积水情况

开始无积水	$C_u > 0$	时段结束有积水
	$C_u < 0$	时段结束无积水
开始有积水	$C_p > 0$	时段结束有积水
	$C_p < 0$	时段结束无积水

3.3 坡面降雨产流入渗模型

坡面流降雨产流过程由土壤入渗过程和坡面流

运动过程两部分组成,根据上文中的论述,综合土壤入渗模型和坡面流运动模型,我们可得到坡面降雨入渗产流模型:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = p \cos \theta - i \quad (14)$$

$$q = \frac{(8gS_0)^{1/2} h^{3/2}}{\sqrt{k(3.19(\frac{4q}{\gamma})^{-0.45} + b)}} \quad (15)$$

$$i = \begin{cases} p & t \leq t_p \\ K[1 + (\theta_s - \theta_i)S/I] & t > t_p \end{cases} \quad (16)$$

其中 I 用式 $K[t - (t_p - t_s)] = I - S(\theta_s - \theta_i) \ln \left[1 + \frac{I_p}{S(\theta_s - \theta_i)} \right]$ 计算, t_p, t_s 计算见前文。

对连续性方程(14)用一阶迎风格式离散化,

$$\frac{h_j^{n+1} - h_j^n}{\Delta t} + \frac{q_j^n - q_{j-1}^n}{\Delta x} = (Sr)_j^n \quad (17)$$

其中 $S_r = p \cos \theta - i$, 在(15)式中,令 $h = h_j$ 对非线性方程(15)迭代,可求解出 q_j 。

4 模型验证

由于没有合适的针对不同地表条件的实验数据,这里我们采用了 Lima(1992)^[14] 的试验数据,从产流量的角度对本模型模拟产流入渗过程进行了验证。Lima 的试验是在长 1m,宽 0.5m,坡度为 $S_0 = 0.1$ 的土质坡面上进行。原实验是在裸土,没有植被覆盖的情况下进行的。本文计算中所涉及到的土壤参数根据实测土壤参数与产流总量确定为: $K = 0.167 \times 10^{-6} \text{m/s}$, $\theta_s = 0.506$, $\theta_i = 0.0107$, $S = 0.02 \text{m}$ 。降雨强度为 0.03741mm/s 。计算和试验结果的对比如图 1 所示。结果表明,除开始和结束段外整个产流过程均符合较好,说明该模型能够较好地模拟坡面产流过程。

5 坡面地表条件对产流过程的影响

运用本文建立的降雨入渗产流模型进行数值模拟实验,主要探讨坡面的地表条件,如地表起伏程度、植被覆盖,以及坡长、坡度对坡面产流过程的影响。

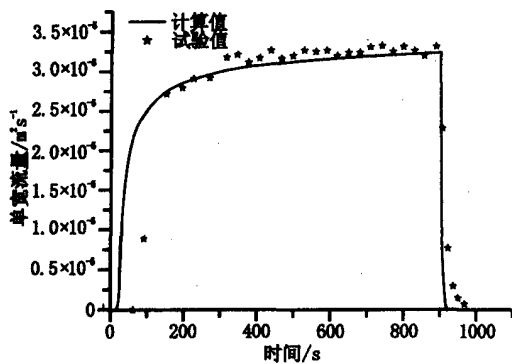


图1 计算结果与 Lima 实验的比较

响规律。模拟计算主要针对西部黄土高原地区,其土壤的有关参数主要根据当地的土壤实测资料和实验资料进行选取。具体参数为:土壤的饱和含水率 $\theta_s = 57\%$; 初始含水率 $\theta_i = 21\%$; 土壤吸力 $S = 0.06(\text{m})$; 土壤的渗透率系数比较复杂,根据一些水文率定结果 $K = 0.75(\text{m/s})$,但考虑到坡度对渗透率的影响,渗透率系数取为: $K(1 - \sin\theta)$,同时由于通常的渗透率测量值约为水文法率定值 3 倍,而水文法率定值仍较实际物理渗透系数大,故后文计算中,取土壤的渗透率系数为 $K(1 - \sin\theta)/6$ [15]。

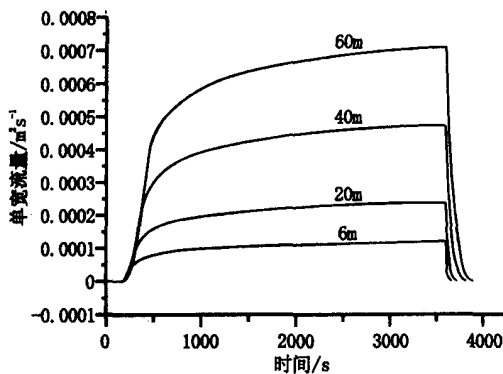


图2 坡长对产流过程的影响

5.1 坡长、坡度对坡面产流过程的影响

在均匀降雨的条件下,取坡长 6m、20m、40m、60m 四种坡长,考查坡长对产流的影响。如图 2 所示为坡底处产流过程的计算结果。表明坡长越长,坡角处的稳定产流量越大,且产流时间也要长一些,但对初始产流时间几乎没有影响。这也说明坡长的增大,主要是响应增大了坡面的承雨面积增大。而对产流过程没有明显影响。

在均匀降雨条件下,坡长不变,改变坡面的坡

度,取 $S_0 = 1^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 65^\circ$, 考察坡度对坡面产流的影响,模拟结果如图 3 所示。坡度的影响比较复杂,坡度越大,产流越快;产流结束的时间稍晚。对稳定阶段,基本上坡度越小,单宽流量越大,因为坡度减小承雨面积增大,相当于相同坡长上有效降雨强度增大。但坡度进一步减小,由于土壤入渗率变化较大,其作用超过了承雨面积增大的作用,单宽流量反而会随坡度的减小而减小。本文计算表明,坡度在 10 度左右,单宽流量有最大值。坡度增大,水深减小,主要是由于产流量的减少。出口处流速的最大值随坡度增加,呈先增后减的趋势。从图 3 可见,坡度—单宽流量曲线的 AB 段比较平稳,近似不变,而对应的水深随坡度增加下降很快,因为 $Q = uh$, 流速必然增加;类似地,坡度—水深曲线 CD 段近似认为不变,单宽流量减小,则出口流速要减小。所以,坡度—流速曲线必然是先增后减的上凸曲线 [16]。剪应力用 $\tau = \gamma h S_f$ 计算,水深和坡度共同决定了其变化趋势。还可以从图中看出临界坡度大约在 45° 左右。

5.2 植被覆盖和地表起伏对坡面产流过程的影响

在本文建立的产流模型中,坡面的植被覆盖和地表微地形起伏对坡面流的影响,集中反映在阻力的变化之中,即在式(3)和(15)中表现为 k, b 值的变化,不同的 k, b 值反映了不同程度的植被覆盖和地表微地形起伏。因此,本文按照表 2,通过选取不同的 k (这里 $k = e^{2.80C}$, C 为植被覆盖率%) 和 b 值,研究了坡面植被覆盖情况和地表微地形对坡面产流过程的影响规律。模拟计算中,土壤特征参数的选取仍为前文计算中选取的参数值,降雨过程取为均匀降雨,雨强为 $p = 1\text{mm}/\text{min} (= 1.67 \times 10^{-5} \text{m/s})$ 。

图 4 所示为 k 值固定,不同的 b 值条件下,坡面出口单宽流量、流速、水深和水流剪切应力 ($\tau = \gamma h S_f$) 随时间变化的模拟计算结果。即植被覆盖情况一定,微地貌发生变化对坡面产流过程和坡面流动力学因子的影响。结果表明, b 值的变化,即地面的微地形起伏对坡面产流过程,坡面流的单宽流量影响很小,但对坡面流的水动力学因子影响较大。 b 越大,产流稳定时的出口流速越小,产流时间也略有延长,但水深却随之增大,且由于水深的增大也增大了水流的剪切力。即地表面越不平整,对坡面流的阻力越大,形成的坡面流的流速越小,但水流对土壤的冲刷能力却越强。由此,我们也可以推断,坡面流对土壤的侵蚀能力随着地表起伏程度的加大而更强,相同的降雨和土壤条件下,不平整的坡面更容易遭受

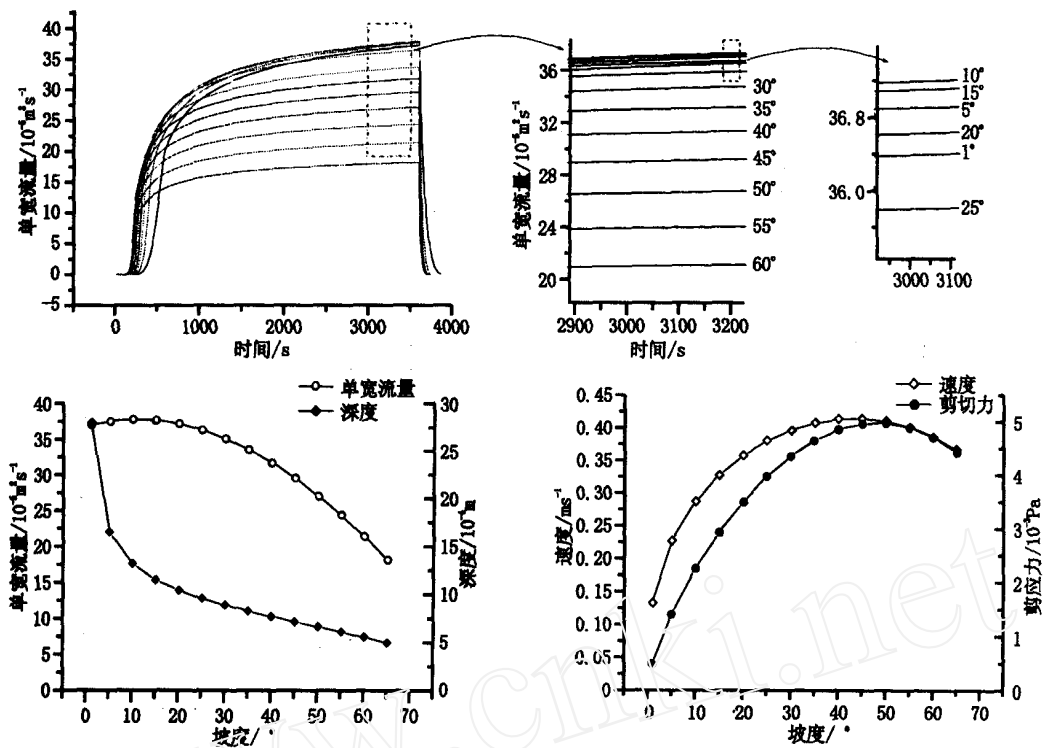


图3 坡度对坡面产流过程及坡面流水动力要素的影响

表2 各组模拟计算中k、b的不同取值

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C (%)	2	10.5	17.5	24	2	10.4	17.5	24	24	17.5
k	1.14	1.968	3.09	4.699	1.14	1.958	3.09	4.699	4.699	3.09
b	0	0	0	0	2.4	2.4	2.4	2.4	1.2	1.2

侵蚀。如果由于坡面的微地形起伏导致坡面流产生细沟流时,则导致的土壤侵蚀将更加严重。另外,图4的计算结果还表明,b值的变化与坡面流流速、水深及水流剪切力的变化并非线性关系,而是随着b值的增大,其增长对于坡面流水动力因子的影响将变弱。说明地形起伏缓或地面土石块小时,对流动的各水动力要素影响大;而当微地形起伏较大或地面土石块大到一定程度后,其影响程度将逐渐减弱。

保持坡面地形不变,分析坡面植被覆盖率对坡面产流的影响。图5和图6为均匀雨强下,保持b不变,不同k值,即不同植被覆盖情况下,坡面水力因子的变化。

其中图5为坡面比较平整,没有大的地形起伏和石块等障碍物,即形状阻力很小(取 $b=0$)时,不同的地面植被覆盖(不同k值)情况下,坡面流的单宽流量、出流速度、水深、水流剪切应力随时间的变化过程。结果表明,在不考虑植被覆盖对雨水的截流作用和对土壤入渗率影响的情况下,植被条件对坡面流的产流过程和单宽流量没有太大影响(4种情况下的产流过程线基本重合),只是产流时间随着植被覆盖率的增大略有延长。而植被覆盖条件对坡面流的水动力因子影响却很明显。一般随着植被覆盖率的增大,突出水面的根茎就越密集,对水流的阻力也就越大。导致坡面流在出口处的流速随之越小,而水深和水流

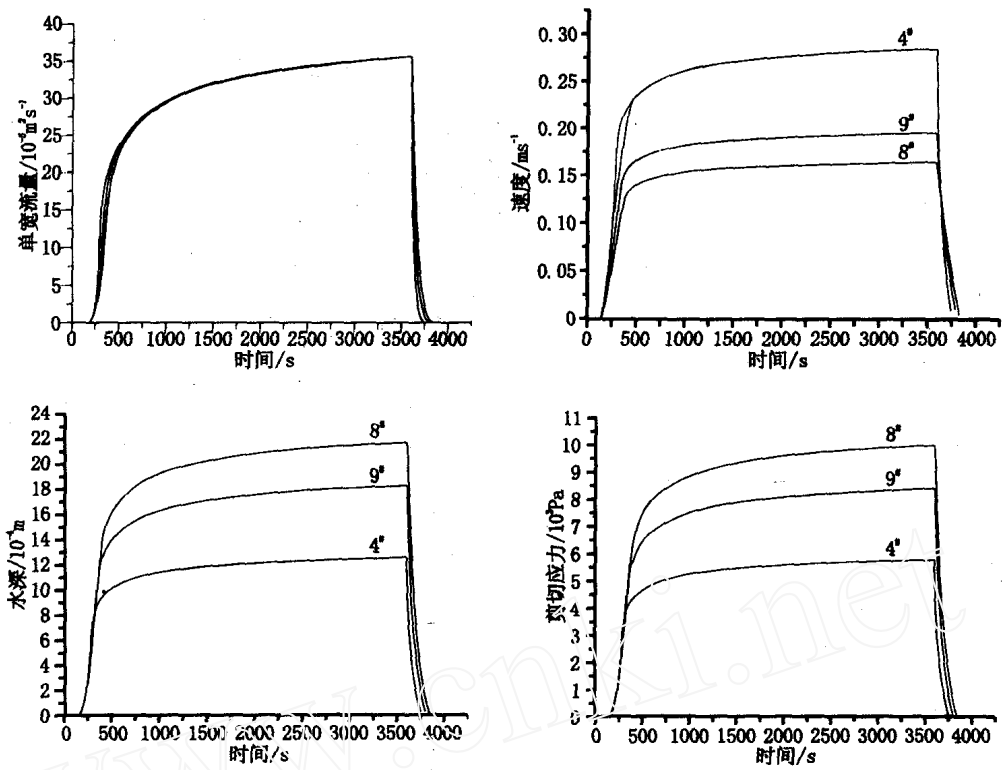


图4 微地形起伏变化(k 固定, b 变化)对坡面流的影响

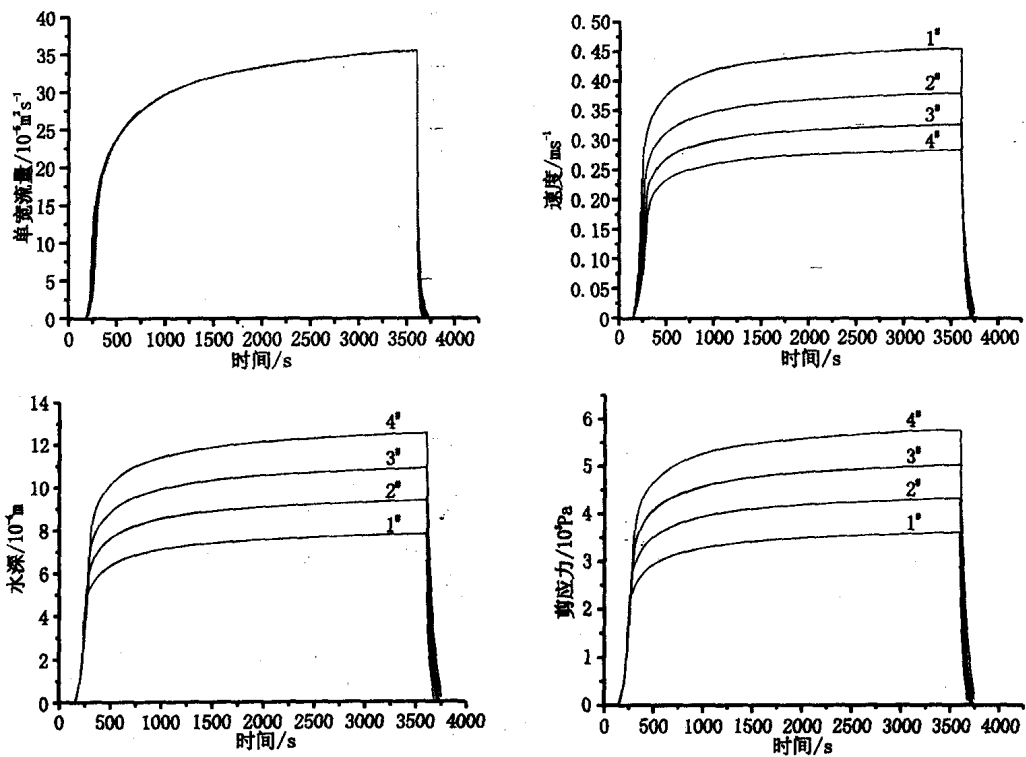


图5 形状阻力小时,植被覆盖率(k 值)对坡面流流速、剪切力、水深的影响

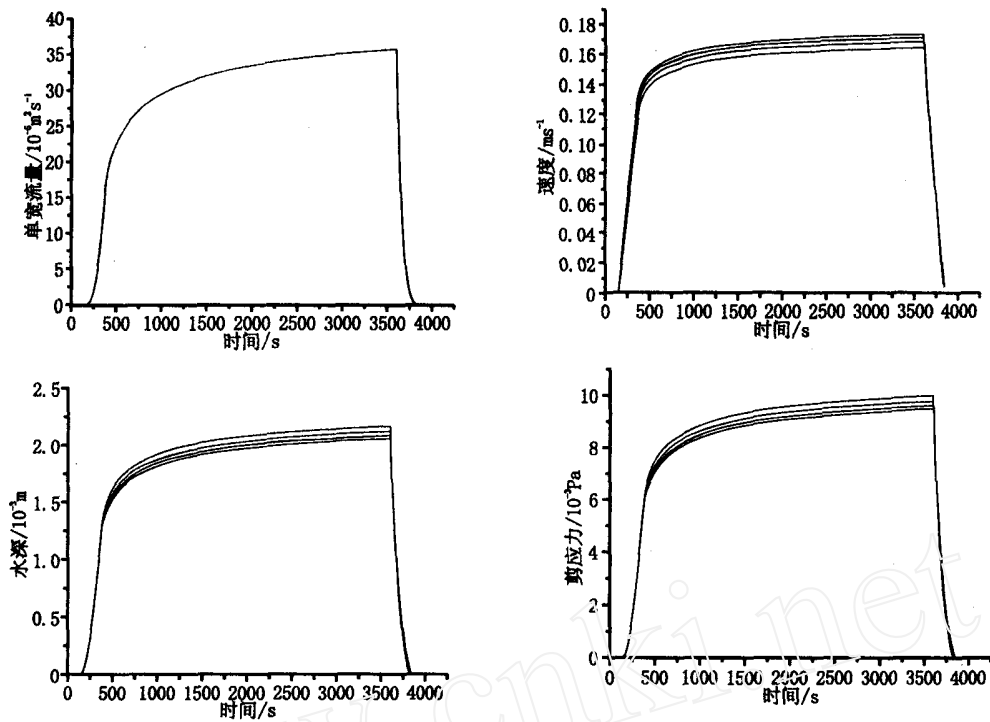


图6 形状阻力较小时,植被覆盖率(k 值)对坡面流流速、剪切力、水深的影响

剪切应力却随之相应增大。

图6为地面有微地形起伏或有石块等突起物,即形状阻力比较大时(取 $b = 2.4$,即表2中编号5-8)的情况。四种情况下的产流过程线基本重合。时间-流速图中平稳段的四条曲线的编号从上到下依次是5、6、7、8,时间-水深、时间-剪应力图中平稳段四条曲线的编号从上到下依次是8、7、6、5。其表现出的规律与前面的结果一致,即植被条件对坡面流的产流过程和单宽流量没有太大影响,但随着植被覆盖率的增大,坡面流在出口处的流速随之越小,而水深和水流剪切应力却随之相应增大。另外比较图5和图6结果,可以看出,图6中的四条曲线都很接近,区分不十分明显。说明当 b 比较大时,也就是说,当地面有微地形起伏或有石块等突起物时,植被覆盖情况对坡面流水动力要素的影响程度要减小。此时即使有密集的植物根茎,水面波的破碎和流动分离,对诸如流速、水深、剪应力等的影响也不十分明显。而在地面平整,没有微地形起伏时,这一点反而是很重要的。说明在坡面比较平直时,植物覆盖条件对坡面流的影响更大,随着坡面微地形起伏程度的加剧,植被覆盖条件对坡面流的影响程度将随之减弱。

模拟结果还表明了一个很有趣的规律,即增加坡

面植被覆盖率,只是增大了水流阻力,使坡面流速度降低,但并没有减小水流的冲蚀能力,反而增大了水流对土壤的冲蚀力(剪切应力)。说明植被对土壤的保护作用,主要是通过植被的网络根系,较程度地固定了土壤,大大提高了土壤的抗冲蚀能力而实现的,并非是由于植被对水流的阻碍作用,减小水流的冲蚀能力实现的。这就需要在分析植被对土壤的保护作用时,更多地应该细致地探讨植被的固土作用。

6 结论

本文将坡面上的植被覆盖和微地形起伏对坡面流的影响概括反映在对坡面流阻力的影响之中,将阻力分为表面粗糙阻力、形体阻力和波阻力三个部分,结合运动波模型和修正的Green-Ampt入渗模型,建立了能够反映坡面地表条件影响的坡面降雨入渗产流模型,模拟产流过程与Lima的实验结果符合较好。运用该模型较细致地考察了植被、微地形等地表条件对坡面产流的影响规律,主要得到以下认识:

(1) 坡长增大,坡面流单宽流量增大,且各水力因子都随之增大。坡度的影响较为复杂,坡度越小,

产流越慢,单宽流量越大,但在10度左右有减小。另外,坡度增大,水深减小,流速和剪应力呈先增后减的趋势,在45度左右有临界坡度存在。

(2) 地面微地形起伏对坡面产流过程、坡面流单宽流量影响很小,但对坡面流的水动力因子影响较大。表面微地形起伏越大,产流稳定时的出口流速越小,产流时间也略有延长,而水深和水流剪切力却随之增大。表明坡面流对土壤的侵蚀能力随着地表起伏程度的加大而更强,不平整的坡面更容易遭受侵蚀。但微地形起伏变化与坡面流流速、水深及水流剪切力的变化并非线性关系,地形起伏缓或地面石块小时,对流动的各水动力要素影响大;当微地形起伏较大或地面土石块大到一定程度后,其影响程度将逐渐减弱。

(3) 在不考虑植被覆盖对雨水截流作用和对土壤入渗率影响的情况下,植被条件对坡面流的产流过程和单宽流量没有太大影响,只是产流时间随植被覆盖率增大略有延长。而植被条件对坡面流的水动力因子影响却很明显,一般随着植被覆盖率的增大,坡面流出口流速随之减小,而水深和水流剪切应力却随之增大。且坡面地表越平整,这种影响更明显,随着地表起伏加剧,植被条件的影响程度将减弱。同时也说明,植被对土壤的保护作用,主要是提高了土壤的抗冲蚀能力,而并非是减小了水流的冲蚀能力。

参 考 文 献:

- [1] KIRKBY M J. Hillslope Hydrology, A Wiley-Interscience Publications[M]. John Wiley and Sons. 1978.
- [2] PARSONS A J & ABRAHAMS A D. Overland Flow—Hydraulics and Erosion Mechanics[M]. UCL Press, University College London, England. 1992.
- [3] 陈力,刘青泉,李家春. 坡面降雨入渗产流规律的数值模拟研究[J]. 泥沙研究,2001,(4): 61-67.
- [4] 吴普特,周佩华. 雨滴击溅对薄层水流水力摩阻系数的影响[J]. 水土保持学报,1994,8(2):39-42.
- [5] 姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究[J]. 泥沙研究,1996,(1):74-81.
- [6] LAWRENCE D S L. Hydraulic resistance in overland flow during partial and marginal surface inundation: experimental observations and modeling [J]. Water Resour. Res., 2000,36(8): 2381-2393.
- [7] SAVAT J. The hydraulics of sheet flow on a smooth surface and rough slope surfaces [J]. Earth Surface Processes and Landforms,1977,2:125-140.
- [8] ABRAHAMS A D, PARSONS A J and HIRSCH P J. Field and laboratory studies of resistance to interrill overland flow on semi-arid hillslopes, southern Arizona [M]. In: Overland Flow, A. J. Parsons & A. D. Abrahams (Eds). UCL Press, University College London, England. 1992. 1-23.
- [9] HSIEH T. Resistance of cylindrical piers in open-channel flow [J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1964,90(11): 61-73.
- [10] FLAMMER G H, TULLIS J P and MASON E S. Free surface, velocity gradient flow past hemisphere [J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1970, 96(1):485-502.
- [11] WOOLHISER D A and LIGGET J A. Unsteady one dimensional flow over a plane-The rising hydrograph [J]. Water Resour. Res., 1967,3(3): 753-771.
- [12] MEIN R G and LARSON C L. Modeling infiltration during a steady rain [J]. Water Resour. Res., 1973,9 (2): 384-394.
- [13] CHU S T. Infiltration during an unsteady rain [J]. Water Resour. Res., 1978,14(3): 461-466.
- [14] LIMA J L M P D. Model KINNIF for overland flow on pervious surface [M]. In Overland Flow, A. J. Parsons & A. D. Abrahams (Eds). UCL Press, University College London, England. 1992,69-88.
- [15] CHEN L, LIU Q Q and LI J C. Runoff generation characteristics in typical erosion regions on the loess plateau [J]. International Journal of Sediment Research,2001,16(4): 473-485.
- [16] 刘青泉,陈力,李家春. 坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J]. 应用数学和力学,2001,22(5):452-453.