

用非饱和土壤物理参数模拟坡面产流过程研究

张光辉¹, 蒋定生², 邵明安²

(1 北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875; 2 中科院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 采用人工模拟降雨方法, 在用蒸发法测定非饱和土壤物理参数基础上, 运用修正的 Green-Ampt 入渗模型, 结合退水曲线法和坡面运动波模型, 研究了 9 场不同雨强和不同历时模拟降雨的产流过程。结果表明模拟误差在 11.0 % ~ 30.7 % 间变化, 80 % 的模拟误差可控制在 18 % 以内, 说明用非饱和土壤物理参数可以进行一般精度要求的坡面径流过程模拟。

关键词: 非饱和土壤物理参数; 坡面产流; 过程模拟; 运动波模拟
中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A

黄土高原绝大部分地区属超渗产流, 即当降雨强度等于土壤入渗速率时, 地表开始积水, 满足地面填注后在重力作用顺坡流动, 形成坡面径流。由于降雨特性和下垫面状况的差异, 产流过程将会截然不同, 进一步引起土壤侵蚀强度的差异。坡面过程模拟对分析坡面侵蚀机理、建立土壤侵蚀物理模型具有重要意义, 如何准确模拟坡面产流过程是土壤侵蚀学科的主要研究任务之一, 近年来国内出现过多种坡面产流模型^[1~3], 但模型精度差异较大, 且难以在较大范围内推广应用, 本文以非饱和土壤物理参数为基础进行坡面产流过程模拟, 拟建立一种物理概念明确、推广性强的产流过程模拟方法。

1 试验方法

试验在中国科学院、水利部水土保持研究所安塞水土保持试验站进行, 人工模拟降雨由 4 个侧喷式降雨器同时提供, 用均匀分布的 9 个雨量筒对降雨均匀性进行了监测, 均匀系数为 0.94, 降雨器喷头离地面 4 m, 加上水流喷出高度, 降雨高度约 5.5 m, 基本满足野外人工降雨的高度要求。小区长 10 m、宽 2 m、坡度为 15°; 小区内装填砂壤土, 容重为 1.3 g/cm³。降雨强度分别为: 0.105 cm/min、0.143 cm/min、0.20 cm/min, 降雨历时为: 20 min、30 min、45 min、60 min, 共进行了 9 场模拟降雨(表

1)。试验开始前在小区表层取 2 个土样, 根据 Wind 蒸发法^[4]原理, 运用荷兰生产的 STAR-1 测定非饱和土壤物理参数, 其具体实验过程及操作规程见文献^[7], 实验结束后获得 Appia 数据文件, 用 Appia 软件^[8]分析获得非饱和土壤物理参数——饱和导水率 K_s 、残余含水量 θ_r 、饱和含水量 θ_s 、进气值的倒数 a 以及导水曲线形状系数 m 、 n 和 l 。同时用便携式 TDR 测定小区内任意 12 点 0 cm ~ 20 cm 土壤水分, 取平均值为土壤前期含水量。降雨开始后记录径流起始时间, 径流出现后每 3 分钟记录 1 次径流桶中径流量, 降雨停止后记录径流持续时间和径流量。

2 计算理论及过程

2.1 土壤入渗

土壤入渗用修正的 Green-Ampt 入渗模型^[9,10]描述, 根据该模型土壤入渗速率随着累积入渗量的增加而减小, 当入渗速率等于降雨强度时, 地表开始积水, 此时

$$I_p = [(\theta_s - \theta_r)S_f] / (R/K_s - 1) \quad (1)$$

则地表开始积水时 t_p 为

$$t_p = I_p / R \quad (2)$$

土壤入渗速率可表示为

$$\begin{cases} i = R & t \leq t_p \\ i = K_s[1 + (\theta_s - \theta_r)S_f / I(t)] & t > t_p \end{cases} \quad (3)$$

因地表积水时间 t_p 总是大于 0, 所以需对(3)式进行

收稿日期: 2000-04-14; 改回日期: 2000-06-19。
基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(49725103)和国家自然科学基金(40001014)资助。
作者简介: 张光辉(1956—), 男(汉族), 甘肃静宁人, 博士。现为北京师范大学资源与环境科学系博士后, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究工作, 已发表论文 20 余篇。

修正

$$K_s \cdot t_p' = I_p - S_f(\theta_s - \theta_i) \ln \left[1 + \frac{I_p}{S_f(\theta_s - \theta_i)} \right]$$

(4)

式(1)~(4)中 R 为降雨强度 (cm/min), i 为入渗速率 (cm/min), K_s 为饱和导水率 (cm/min), θ_s 为饱和含水量 (cm³/cm³), θ_r 为残余含水量 (cm³/cm³), θ_i 为土壤前期含水量 (cm³/cm³), S_f 为土壤吸力参数 (cm), I_p 为产流时累积入渗量 (cm), 和 t_p 产流时间

(min), t 为降雨时间, t_p' 表示由 $t=0$ 时开始产流, 到入渗量 $I(t)$ 等于 I_p 时所需的时间。计算过程分三步进行: 第一步用(1)式计算地表开始积水时的累积入渗量 $I(t_p)$, 第二步用(2)式计算径流起始时间 t_p , 第三步将已知参数代入(4)和(3)式, 用试算、迭代法计算 $t > t_p$ 时的累积入渗量 $I(t)$ 和入渗速率 i , 试算的时间步长为 0.5 min。参数 K_s 、 θ_s 可由 Appia 软件提供, 其它参数已知或可计算出, 但土壤吸力参数 S_f 则不易直接测定, 因而要用间接的方法确定。

表 1 模拟降雨基本参数表

Table 1 Basic parameters of simulated rainfall events

降雨次数	开始产流时间 t_p/s	前期含水利 $\theta_i/(cm^3/cm^3)$	降雨强度 $R/(cm/min)$	降雨历时 $Tt/minq$
1	35	0.205	0.143	30
2	51	0.174	0.143	45
3	38	0.217	0.143	60
4	28	0.187	0.200	20
5	61	0.186	0.200	30
6	58	0.115	0.200	40
7	44	0.227	0.105	30
8	53	0.234	0.105	45
9	25	0.211	0.105	60

2.2 S_f 的确定

本文作者曾根据 Neuman 的相关定义、利用 Brooks 和 Corey 条件下的 van Genuchten 导水模型^[10]以及 Bouwer 的建议^[11]和 Brooks & Corey 持水模型^[12], 推导出非饱和土壤物理参数与吸力参数 S_f 间的计算关系^[7], 其表达式为

$$S_f = \frac{1}{2\alpha[mn(1+2)+1]} \left[1 - \frac{(\theta_s - \theta_r)^{1-(1+2\frac{1}{mn})}}{\theta_i - \theta_r} \right]$$

(5)

式中 m 、 n 为无因子土壤导水曲线形状系数, α 为土壤进气值的倒数 (1/cm)。将用 Appia 软件分析的非饱和土壤物理参数, 代入(5)式即可计算出每场降雨的土壤吸力参数 S_f 。

2.3 退水曲线法推求曼宁系数 n

1992 年 Mohamoud 提出了推求曼宁系数的退水曲线法^[13], 基本原理是充分降雨后, 地表处于相对饱和状态, 此时如降雨停止, 则累积入渗量与累积径流量之比, 必然等于入渗速率与降雨停止时径流速率之比, 即

$$(D - Q_r)/Q_r = f_c/q_c$$

(6)

式中 D 为持水量 (m), Q_r 为累积退水径流深 (m), $D - Q_r$ 为累积退水入渗量 (m), f_c 为降雨停止时的土壤入渗速率 (m/s), q_c 为降雨停止时的单宽流量 (m²/s)。对上式进行变换得

$$D = f_c/q_c$$

(7)

将曼宁公式代入(7)式并进行转换得

$$n = \frac{S^{1/2} D^{5/3}}{q_c} = \frac{S^{1/2}}{q_c} \left[\frac{f_c}{q_c} + 1 \right]^{5/3} Q_r^{5/3}$$

(8)

式中 n 为曼宁系数, S 为坡度。通过观测的 Q_r 和 q_c 以及计算的 f_c 即可推求出曼宁系数 n 。

2.4 运动波方程及其理论解

研究表明在分析坡面产流时应用运动波模型是合理的^[2,3], 如采用曼宁公式则运动波模型可表示为^[3]

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \\ q = 1/n(S^{1/2}h^{5/3})^{-1} \end{cases}$$

(9)

式中 h 为水深, r 为净雨, t 为时间。径流达到稳定的时间 t_c 可表示为

$$t_c = \sqrt[\beta]{\frac{K}{L[r(t)]^{2/3}}}$$

(10)

式中 L 为坡长, $\beta=\sin(\theta)^{0.5}/n$, $k=1.66$ 。坡面产流过程可以分为涌水、平稳和退水三个阶段^[4], 各阶段的水深 h 单宽流量 q 可表示为

涌水阶段

$$h=r(t)t, q=r\beta kh^{k-1}t$$

(11)

平稳阶段

$$h=rt_c=(Lr/\beta)^{1/k}, q=r\beta kh^{k-1}t_c=mLr$$

(12)

退水阶段

$$h=-f_c+(Lr/\beta)^{1/k}, q=-\frac{kLrf_c}{(Lr/\beta)^{1/k}}(t-t_r)+kLr$$

(13)

式中 t_r 为降雨历时。

3 结果与讨论

产流过程模拟从非饱和土壤物理参数测定开

始, 将降雨前在小区内采集的 2 个土样, 在实验室用 SRAR-1 进行, 测定, 获得 Appia 数据文件, 然后利用 Appia 软件进行分析, 得到每次降雨时的非饱和土壤物理参数(表 2), 利用这些参数及表 1 中降雨基本参数, 应用(5)式计算出每场降雨的土壤吸力参数 S_f (表 2)。将 S_f 代入修正的 Green—Ampt 入渗模型, 利用迭代法推求出每场降雨的土壤入渗过程。根据推求的土壤入渗过程确定出降雨停止时的土壤入渗速率, 作为降雨停止时的土壤稳定入渗速率, 利用观测到的径流消退过程, 确定出累积退水径流深 Q_r 和降雨停止时的单宽流量 q_c , 利用(8)式确定出每场降雨时的曼宁系数(表 3)。每场降雨后都对小区进行修补, 因而 9 场降雨的曼宁系数变化幅度不大, 仅在 0.01~0.02 间变化。在确定曼宁系数以后, 可计算出每场降雨的计算参数 β , 再将产流后的土壤入渗速率进行平均, 与降雨强度相减, 获得有效降雨强度 r (表 4)。

表 2 各次模拟降雨非饱和土壤物理参数

Table 2 Unsaturated soil physical properties of each rainfall event

降雨次数	m	n	l	α (1/cm)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	K_s (cm/d)	S_f (cm)
1	0.492	3.081	-5.08	0.101	0.417	0.100	3.40	21
2	0.662	2.959	-1.26	0.005	0.419	0.100	10.50	34
3	0.452	3.652	-1.93	0.009	0.402	0.100	6.00	24
4	0.666	2.328	-1.23	0.007	0.410	0.100	12.37	28
5	0.562	3.257	-2.27	0.006	0.410	0.100	11.06	47
6	0.345	0.263	0.000	0.005	0.424	0.100	6.00	29
7	0.252	4.121	-1.06	0.008	0.396	0.100	6.00	25
8	0.445	3.124	0.500	0.008	0.412	0.100	6.00	42
9	0.458	2.894	0.500	0.007	0.414	0.100	6.00	52

表 3 退水曲线法推求的曼宁系数

Table 3 Manning's n predicted by Retention Curve Method

降雨次数	稳渗率 f_c (10 ⁻⁶ m/s)	雨停时单宽流量 q_c (10 ⁻⁴ m ² /s)	持水深度 D (10 ⁻⁴ m)	曼宁系数 n (s/m ^{1/3})
1	2.62	1.67	6.58	0.014
2	5.32	1.74	5.41	0.010
3	4.48	1.41	4.39	0.010
4	7.45	1.81	6.51	0.013
5	7.32	2.50	7.72	0.013
6	6.97	2.71	8.98	0.015
7	3.53	1.32	6.98	0.020
8	2.35	1.57	6.09	0.014
9	2.32	1.58	7.61	0.019

表4 运动波模型计算参数表
Table 4 Calculating parameters of kinematic wave model

降雨次数	有效降雨强度 r (mm/min)	β	径流稳定时间 t_c (min)	计算后损历时 t_b (min)	实测后损历时 t_b' (min)	相对误差 W (%)
1	0.881	36.34	7.90	2.61	0.58	11.4
2	0.728	50.87	6.23	1.01	0.85	30.7
3	0.969	50.87	5.92	1.24	1.17	11.3
4	1.060	39.13	6.19	0.98	2.07	26.8
5	1.120	39.13	6.54	1.03	1.67	11.0
6	1.100	33.91	7.19	1.17	1.90	13.8
7	0.535	25.44	11.40	1.78	2.07	12.9
8	0.704	36.34	8.24	2.55	2.83	15.4
9	0.728	26.77	9.86	3.19	1.75	17.4

完成上述运算后,需利用(10)计算径流达到稳定的时间 t_c ,再利用(11)、(12)式分别计算出每场降雨涌水阶段和平稳阶段的径流深和流量,对于消退阶段因时间很短,所以对每场降雨都进行了线性处

理,且每场降雨的消退时间都定为3 min。到此坡面产流过程模拟的整个运算过程均已完成,结果见图1~3,图中点为实测值,曲线为运动波预测值。

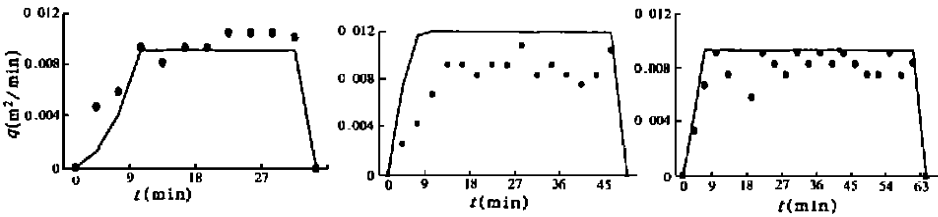


图1 坡面产流过程模拟($R=1.43\text{ mm/min}$, $T_r=30\text{min}, 45\text{min}, 60\text{min}$)
Fig. 1 Runoff simulation on slopeland($R=1.43\text{mm/min}$, $T_r=30\text{min}, 45\text{min}, 60\text{min}$)

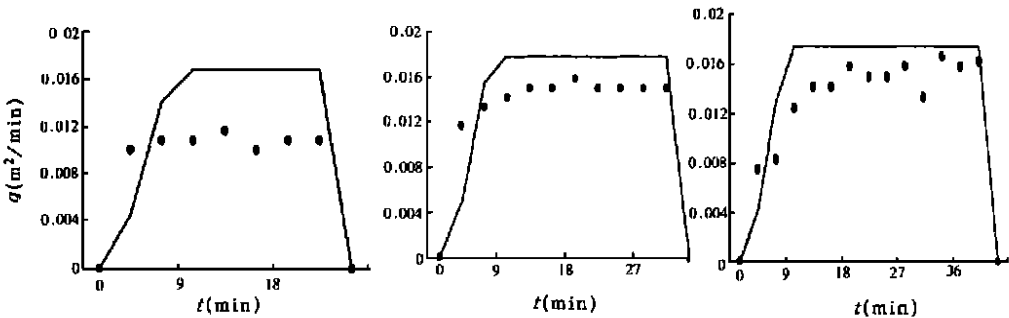


图2 坡面产流过程模拟($R=2.05\text{mm/min}$, $T_r=20\text{min}, 30\text{min}, 45\text{min}$)
Fig. 2 Runoff simulation on slopeland($R=2.00\text{mm/min}$, $T_r=20\text{min}, 30\text{min}, 45\text{min}$)

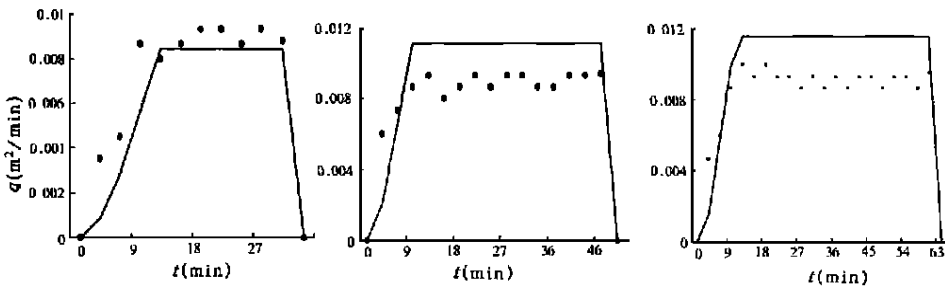


图3 坡面产流过程模拟($R=1.05\text{mm/min}$, $T_r=30\text{min}, 45\text{min}, 60\text{min}$)
Fig. 3 Runoff simulation on slopeland($R=1.05\text{mm/min}$, $T_r=30\text{min}, 45\text{min}, 60\text{min}$)

从图1~3可以看出,除第2场和第5场降雨的模拟精度比较差以外,其余7场模拟降雨的模拟精度都比较高。另外还可以看出9场降雨的模拟结果中,有6场的模拟结果较实测为大,表明利用该方法模拟坡面产流过程有偏大的趋势,但总体而言,大约80%的预测精度可控制在18%以内,从而说明利用非饱和和土壤物理参数,以修正的Green-Ampt入渗模型为基础,结合退水曲线法和坡面运动波模型,可以较为准确地模拟坡面产流过程,符合一般精度要求的生产实践。值得注意的是本研究是在理想的直型坡上进行,且无植被覆盖,情况比较简单,对于情况十分复杂的黄土高原或其他地区,如何利用本方法进行径流模拟,仍需大量试验结果的检验和完善。

参考文献:

- [1] 陈国祥, 谢树楠, 汤立群. 黄土高原地区流域侵蚀产沙模型研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996. 101~120.
- [2] 杨建营, 赵庭宁, 孙保平, 等. 运动波理论及其在黄土坡面径流过程模拟中的应用 [J]. 北京林业大学学报, 1993, 15(1): 1~15.
- [3] 沈冰, 王文焰. 植被影响下的黄土坡面漫流数学模型 [J]. 水土保持学报, 1993, 7(1): 23~28.
- [4] 张光辉, 梁一民. 模拟降雨条件下人工草地产流产沙过程研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 1(3): 43~47.
- [5] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1998. 188~203.
- [6] Wind, G. P. Capillary conductivity data estimated by a simple method [A]. In: P. E. Rijtema and H. Wessink. Water in the unsaturated zone. Proc. Wageningen Symp. Wageningen, The Netherlands [M]. IASH General Assembly/ UNESCO, Paris, 1968. 181~191.
- [7] 张光辉. 小流域土壤物理性状时空变异及坡面产流过程模拟 [D]. 中国科学院、水利部水土保持研究所博士论文, 1999.
- [8] 张光辉. 非饱和土壤物理特性数据处理软件 APPIA 的数理基础分析 [J]. 水土保持通报, 1999, 19(4): 25~28.
- [9] Mein, R. G. and C. L. Larson. Modeling infiltration during a steady rain [J]. Water Resource Research, 1973, 9(2): 384~394.
- [10] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. 121~123.
- [11] Van Genuchten, M. T., Leij, J. and J. Lund. Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils [R]. Proc. Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. Riverside, CA, Univ. of California, Riverside, 1989. 7784.
- [12] Bouwer, H. Infiltration of water into nonuniform soils [J]. Journal of the Irrig. Drainage Div., ASCE Proc., 1969, 75: 451~462.
- [13] Brooks, R. and A. Corey. Properties of porous media affecting fluid flow [J]. Journal of the Irrig. Drainage Div., ASCE Proc., 1966, 72: 61~88.
- [14] Mohamond, Y. Evaluating Manning's roughness coefficients for tilled soils [J]. Journal of Hydrol., 1992, 135: 143~156.

Runoff Processes Simulation on Land Based on Unsaturated Soil Physical Properties

ZHANG Guang-hui¹, JIANG Jing-sheng² and SHAO Ming-an²

(1. Department of Resource and Environment Science, Beijing Normal University, Beijing, 100875 China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi, 712100 China)

Abstract: Runoff processes simulation is very significant for soil erosion mechanism analyzing and erosion model building. In the past two decades, many runoff simulation model were built in China based on different conditions, however, they were difficult to apply widely. Therefore, building one new model is necessary. In order to find one easy and exact way to simulate runoff process on slope land, 9 simulated rainfall experiments were carried out on one plot with 10m length, 2m width and 15 degree at Ansai field station. Soil physical properties are the basic information to influence soil infiltration and runoff appearing. So soil physical properties were measured using 2 soil samples taking from plot for each rainfall event by means of STAR-1 and unsaturated soil parameters, which were analysed by Appia program, were obtained. Those parameters were used to calculate soil absorptive parameter S_f . And then, the modified Green & Ampt infiltration model, Retention Curve method and kinematic wave model were used to simulate runoff processes. The results indicate that using unsaturated soil physical properties to simulate runoff processes are available and the relative errors vary from 11.0 to 30.7%. However, more 80% simulated error are less than 18 percent and it demonstrates using unsaturated soil physical properties to predict runoff process is reasonable and should be used widely.

Key words: unsaturated soil physical properties; slope land runoff; process simulation; kinematic wave model