

自然降雨条件下不同生态措施坡地的 径流数值模拟

李新虎¹, 赵成义¹ 杨 洁²

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 江西省水土保持研究所, 江西 南昌 330029)

摘 要: 从动量定理和水量平衡原理出发, 以 Saint Venant 方程为基础推导出自然降雨条件下不同生态措施(即同时考虑变雨强、降雨动量和不同生态措施影响下的坡地径流过程) 坡地的径流基本方程。在考虑一般问题定解条件的基础上, 采用 Preissmann 隐式格式对模型进行数值求解。利用 3 个处理(裸地、百喜草覆盖和百喜草 + 果树覆盖)、5 组实测资料(不同雨型) 对模型进行了验证, 结果表明 3 个处理的计算值与实测值的平均相对误差分别为: 14.97%、13.59%、15.15%, 说明模型的计算结果是可靠的, 对于模拟预测自然降雨条件下不同生态措施坡地径流过程是可行的。

关键词: 生态措施; 自然降雨; 坡面径流; 数值模拟

中图分类号: P334

文献标识码: A

坡面径流是土壤水蚀过程的主要动力, 搞清产流的动力学特点是进一步研究侵蚀过程规律的基础。坡面流运动十分复杂, 目前主要采用运动波理论、扩散波或完整圣维南方程进行描述^[1-3]。陈力等^[4]采用运动波理论和两次改进后的 Green - Ampt 入渗模型建立了坡面降雨入渗产流的动力学模型, 并得到了实验资料的良好验证。戚隆溪和黄兴发^[5-6]利用水力学原理建立了坡面降雨径流的产流模型, 并用特征线法和差分法进行了求解, 取得了较好的效果。但上述两个模型均是在定雨强条件下, 不适用于自然降雨条件。吴长文推导出既适合于缓坡, 又适合于陡坡, 既适合于裸地, 又适合于有植被的坡地径流模型, 但其没有考虑降雨动量和风对坡面流运动的影响^[7], 并且也没有进行实例验证。张国华等^[8-9]推导出了变雨强下同时考虑降雨动量和风影响的坡面流基本方程, 但是没有考虑不同水土保持措施对径流的影响, 而且形式也较复杂。本文在前人的基础上推导可以模拟自然降雨条件下不同

生态措施坡地的坡面流方程, 并应用实测资料对模型进行验证。

1 模型建立

1.1 基本假定

1. 假设雨滴与水流接触瞬间重量不计;
2. 坡面径流是一维的, 即把坡面看作是无限宽的平整面, 在横向上各水力要素不变(降雨和入渗在宽度方向无空间变异);
3. 压强沿水深符合静水压强分布规律;
4. 水流为正坡明渠流而且不可压缩;
5. 降雨过程中不考虑风对雨滴的影响。

1.2 坡面径流运动方程

设微小单元体 dx 的质量(图 1) 为 $M = \rho h dx$ (其中 ρ 为水的密度, h 为水深) 则单元体的动量变化率为 $\frac{\partial}{\partial t}(\rho u h dx)$, 根据运动动力学的动量守恒及

收稿日期(Received date): 2011 - 07 - 18; 改回日期(Accepted): 2011 - 11 - 12。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(40830640)。[Supported by the National Nature Science Foundation of China (No. 40830640).]

作者简介(Biography): 李新虎, 男, 1981 年出生, 山东泰安人, 博士, 助理研究员, 主要从事生态水文方面的研究工作。[Li Xinhu, male, born in Taian, Shandong province in 1981, Ph. D, research assistant, work mainly on eco-hydrology.] E-mail: lixinhu@ms.xjb.ac.cn, Tel: 0991 - 7885451

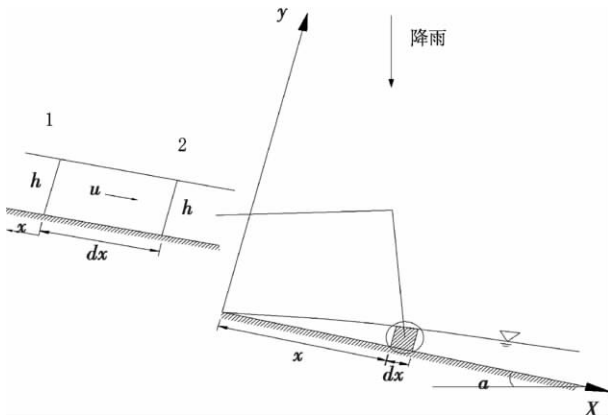


图1 坡地降雨径流

Fig. 1 Runoff generation on slope under rainfall

水量平衡原理出发可推导出坡面径流的动力学方程

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) - \frac{\sigma}{\rho h} - \frac{u q_e(x, t) \cos \alpha}{h} + \frac{i(x, t) v_m S_0 \cos \alpha}{h} \\ \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = q_e \cos \alpha \\ q_e = i(x, t) - C(t) - f(x, t) \end{cases} \quad (1)$$

$$v_m = \begin{cases} \sqrt{(1.544 \frac{v}{i^{0.23}})^2 + 6.048 g i^{0.23}} - 1.544 \frac{v}{i^{0.25}} & i \leq 2.13 \text{ mm/min} \\ \frac{i^{0.23}}{0.0448 + 0.0845 i^{0.23}} & 2.13 \text{ mm/min} \leq i \leq 43.46 \text{ mm/min} \end{cases}$$

式中 h 为水深; i 为雨强 (mm/min); g 为重力加速度 (m/s^2); v 为系数 (cm^2/s); q_e 为净输入; ρ 为水的密度; S_f 为阻力坡度; σ 为表面张力; v_m 为雨滴终速。

天然降雨的雨强 i 和坡面入渗率强度 f 都随着时间和空间的变化而变化, 这里假定 p 和 f 只沿着坡度方向和时间而变化, 林冠及林下植物和枯落物的截留强度 C 只随着时间的变化而变化。在一次降雨过程中若忽略蒸散发的影响 q_e 可表述为

$$q_e(x, t) = i(x, t) - C(t) - f(x, t) \quad (2)$$

对于截留强度 $C(t)$ 可表示为

$$C(t) = (C_m - C_0) \exp(-Wt) \quad (3)$$

式中 C_m 、 C_0 和 W 分别为植物截留容量、初始持水量和衰减指数。

对于入渗, 本文采用 Chu^[10] 改进后的 G-A 公式, 基本作法是将天然降雨过程按照强度分为若干时段, 使各时段雨强相对稳定, 对每个时段将地表状态分为 4 种情况用 Mein-Larson 方法计算: 1. 开始无积水, 结束无积水; 2. 开始无积水, 结束有积水; 3. 开始有积水, 结束有积水; 4. 开始有积水, 结束无积水。在每一个时段开始, 已知降雨总量与入渗总量,

剩余总量。根据两个因子判断时段结束时是否有积水。

雨滴终速采用姚文艺公式^[11], 该公式将雨滴终速和雨强联系起来, 形式也较为简单。一般地区观测往往都缺乏雨滴直径的观测资料, 而雨强则是一般的基础资料表较容易获得。

方程组 (1) 即为一般情况下坡面径流预测方程, 对于有植被覆盖较好的坡面, 其雨滴通过冠层阻挡, 才能进入土壤表面, 因此雨滴动能被植被冠层所削减, 其雨滴终速可近似为零。则方程简化为

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) - \frac{\sigma}{\rho h} - \frac{u q_e(x, t) \cos \alpha}{h} \\ \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = q_e \cos \alpha \\ q_e = i(x, t) - C(t) - f(x, t) \end{cases} \quad (4)$$

当考虑对象为裸露的坡面时有

$$C(t) = 0$$

$$\text{则方程 } q_e = i(x, t) - f(x, t) \quad (5)$$

上述两个方程组即为不同生态措施下的坡面径流方程。

1.3 模型的初始条件及边界条件

1.3.1 初始条件

开始降雨为起始时刻, 此刻坡面上无径流出现, 即方程组模型的初始条件为

$$\begin{cases} h(x, t) |_{t=0} = 0 \\ u(x, t) |_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (0 \leq x \leq L) \quad (6)$$

式中 L 为坡面长度。

1.3.2 边界条件

在坡面顶部没有径流, 故边界条件可写为

$$\begin{cases} h(x, t) |_{x=0} = 0 \\ u(x, t) |_{x=0} = 0 \end{cases} \quad (t > 0) \quad (7)$$

2 模型的数值求解

对于本文建立的地表产流预测模型中的偏微分方程, 难以求其解析解, 故采用数值求解的方法。方程组属于拟线性双曲型方程组, 几十年来这类方程的理论研究和数值方法研究都一直备受人们重视, 有两类基本的求解方法, 一是基于该方程的特征线形式的特征线法, 二是基于最初导出的偏微分方程的有限差分法。其中, 应用最多的是特征线法、特征差分法和 Preissmann 隐式格式差分法。特征线法和特征差分格式对稳定性要求较高, 一般要求时间步长取 $< 0.1 \text{ s}$, 而本研究是在自然降雨径流过程下进

行的,降雨时间长而且不连续,对于使用特征线法和特征差分法不合适,所以本文应用 Preissmann 隐式格式对模型进行求解。

Preissmann 关于因变量和其导数的差分格式为

$$\begin{cases} f(x,t) \approx \bar{f} = \frac{\theta}{2}(f_{j+1}^{k+1} + f_j^{k+1}) + \frac{1-\theta}{2}(f_{j+1}^k + f_j^k) \\ \frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{f_x}{\Delta x} = \theta \frac{f_{j+1}^{k+1} - f_j^{k+1}}{\Delta x} + (1-\theta) \frac{f_{j+1}^k - f_j^k}{\Delta x} \\ \frac{\partial f}{\partial t} \approx \frac{f_t}{\Delta t} = \frac{f_{j+1}^{k+1} + f_j^{k+1} - f_{j+1}^k - f_j^k}{2\Delta t} \end{cases} \quad (8)$$

式中 f 是变量 θ 是加权系数。

3 模型验证

3.1 研究区概况

试验地布设在江西水土保持生态科技园。该园地处江西省北部鄱阳湖水系的德安县城郊燕沟小流域,位于 $115^{\circ}42'38'' \sim 115^{\circ}43'06''\text{E}$ 、 $29^{\circ}16'37'' \sim 29^{\circ}17'40''\text{N}$;属亚热带季风气候区,具有气候温和、雨量充沛、光照充足、四季分明的特点;年平均降雨量 $1\,451.8\text{ mm}$,因受季风气候影响而在季节分配上极不均匀,形成明显的干季和湿季,7—9月高温少雨。

3.2 材料与方法

本研究设3个处理小区,裸地对照、百喜草覆盖和百喜草+果树覆盖(表1)。小区的投影尺寸为 $5\text{ m} \times 20\text{ m}$,坡度均为 12° ,在南方红壤地区这一坡度具有代表性。为阻止地表径流进出坡地,周边设置围埂,其埂高出地表 30 cm ,埋深 45 cm ,用混凝土砖块砌成。小区下面筑有矩形集水槽,承接坡地径流及泥沙,并引入径流池,径流池安装有 HJC1 型自计水位计,可以动态记录径流过程。土壤前期含水量用自制微型土钻取土(深度 5 cm , 30 cm , 60 cm , 90 cm) 烘干法测量。B 和 C 小区的植被截留利用水量平衡进行估算。

表1 试验处理

Table 1 Treatments in the experiment

处理	措施	特征
A	裸地	地表完全裸露
B	百喜草覆盖	小区种植百喜草,高度 $30 \sim 40\text{ cm}$ 覆盖度 100%
C	百喜草+果树覆盖	百喜草覆盖,种有柑橘树(多年生),植被覆盖度 100%

另外,按照气象观测手册,还设置了一个 $16\text{ m} \times 12\text{ m}$ 的气象观测站,站内安装了虹吸式自计雨量计、人工雨量计、蒸发皿、百叶箱、地表及地下温度计及全自动气象采集系统等必需的气象观测设备。

3.3 验证结果

本文计算中涉及到的实测土壤参数和根据实测土壤参数与降雨总量率定的参数为:衰减指数 W 、湿润区土壤导水率(近似为饱和土壤导水率) k 、湿润区土壤体积含水率 θ_s 、初始土壤含水率 θ_0 和湿润峰处的土壤吸力(负的土壤水势) S ,由于每个处理的水平投影面积不大(100 m^2),不考虑降雨和参数沿坡度方向的变化。所研究的坡度 θ 为 12° ;在有柑橘的措施经测定柑橘的高度平均为 1.5 m ,即 H 取 1.5 ,参数取值结果见表2。

处理 A 为裸露坡面用(1)式计算,对于处理 B 和处理 C,坡面植被郁闭,覆盖度 100% ,因此选用(4)式计算。

选用表3的5场降雨进行预测验证,这5场降雨为不同的降雨等级,包含小雨1场、中雨2场、大雨1场和暴雨1场。模拟预测结果见表4,图2。从表3可以看出3个处理的预测相对误差分别为: 14.97% 、 13.59% 、 15.15% 。图2为3个处理的5场降雨的产流过程预测,编号2008-07-10为2008-07-10的降雨,从图中可以看出预测值和实测值比较吻合,精度较高。因此,通过比较可以发现机理性模型不但精度高而且还可以预测模拟过程,可以实现更为细致精确的预测。

表2 径流预测的率定参数

Table 2 The parameters of prediction of runoff

处理	W	$k/(10^{-7} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	θ_s	S	H	n
A	-	5.12	0.506	0.08	-	0.02
B	0.011	6.61	0.625	0.18	-	0.05
C	0.011	6.75	0.638	0.19	1.5	0.24

表3 检验样本

Table 3 Samples of modeling verification

编号	降雨日期	降雨量/mm	雨强/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	等级
1	2008-07-10	54.40	20.02	暴雨
2	2008-07-22	4.30	2.02	小雨
3	2008-07-31	30.20	12.50	大雨
4	2008-08-03	13.40	5.74	中雨
5	2008-08-15	17.60	12.42	大雨

表4 径流预测误差

Table 4 The error of prediction of runoff

编号	降雨日期	处理 A 相对误差 / %	处理 B 相对误差 / %	处理 C 相对误差 / %
1	2008-07-10	18.70	4.45	18.71
2	2008-07-22	20.04	15.58	20.04
3	2008-07-31	12.01	16.72	12.90
4	2008-08-03	8.50	22.30	8.50
5	2008-08-15	15.58	8.90	15.58
平均		14.97	13.59	15.15

* 注: 误差 = |预测值 - 实测值| / 实测值

4 讨论

利用模型模拟的3个处理的预测相对误差分别为: 14.97%、13.59%、15.15%。3个处理的平均预测误差为14.57%。与戚隆溪和黄兴发^[5]的研究相比(预测平均误差4.42%)精度略低, 主要是因为戚隆溪和黄兴发的研究是在模拟降雨下进行, 径流小区的尺寸为: 长 $L=5\text{ m}$, 宽 $B=1.5\text{ m}$, 小区较小, 雨强为定雨强, 实验比较容易控制, 过程相对简单, 因此精度相对本研究较高。与张国华等^[8]的研究相

比, 结果比较接近。虽然张国华等的模型精度略高, 但是该研究的处理比较单一, 只考虑了裸露的坡面。本研究的模型在推导过程中没有考虑风向的影响。主要是因为通过实验结果的统计分析, 发现风向的变化所带来的动量变化对于产流的影响非常小, 忽略风向的变化对于模型的精度并无明显的影响, 并且忽略风向的变化可以减少计算量, 对于提高模型的效率是有帮助的, 因此本研究在推导过程中忽略了风向的影响, 模型的预测精度也是令人满意的。

5 结论

本文在前人研究成果基础上推导出同时考虑变雨强、降雨动量和不同生态措施影响下的坡地径流过程模型, 并应用 Preissmann 隐式格式对模型进行了数值求解。通过利用南方红壤坡地的径流小区试验数据对模型的精度和可靠性进行了验证, 取得了较满意的结果。模型是可以描述自然降雨条件下不同生态措施坡地的径流过程的。

本文中生态措施只考虑植被完全覆盖的情况(100%), 地表覆盖情况相对简单, 并且所选用雨型均为单场连续降雨, 对于更为复杂的生态措施情况有待于以后进行进一步的研究。

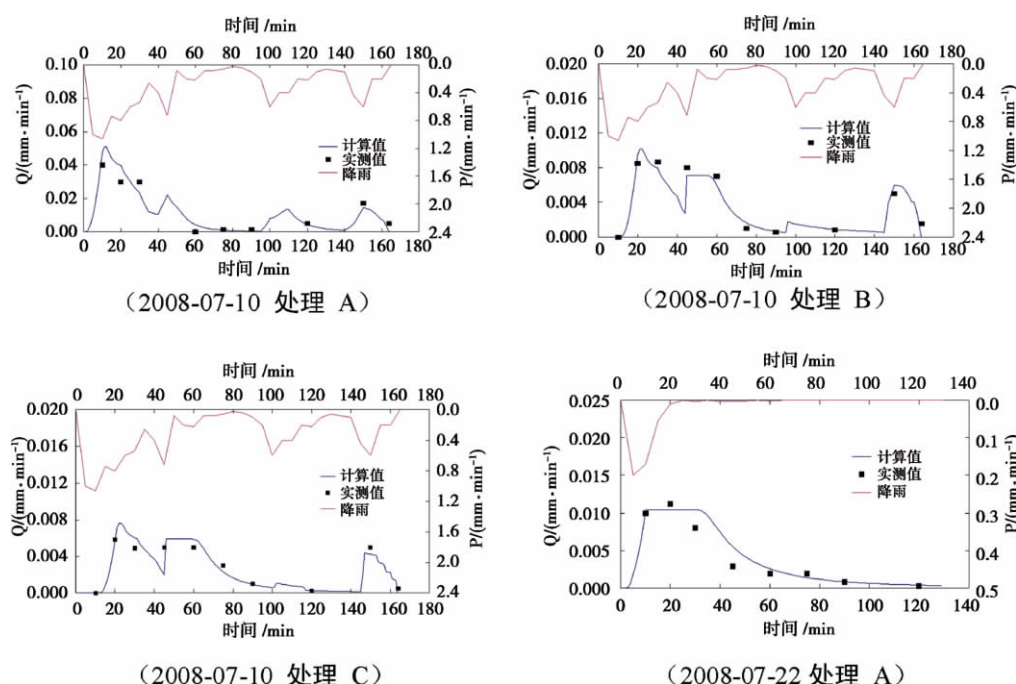


图2 径流过程预测图(后继)

Fig.2 The process of runoff generation

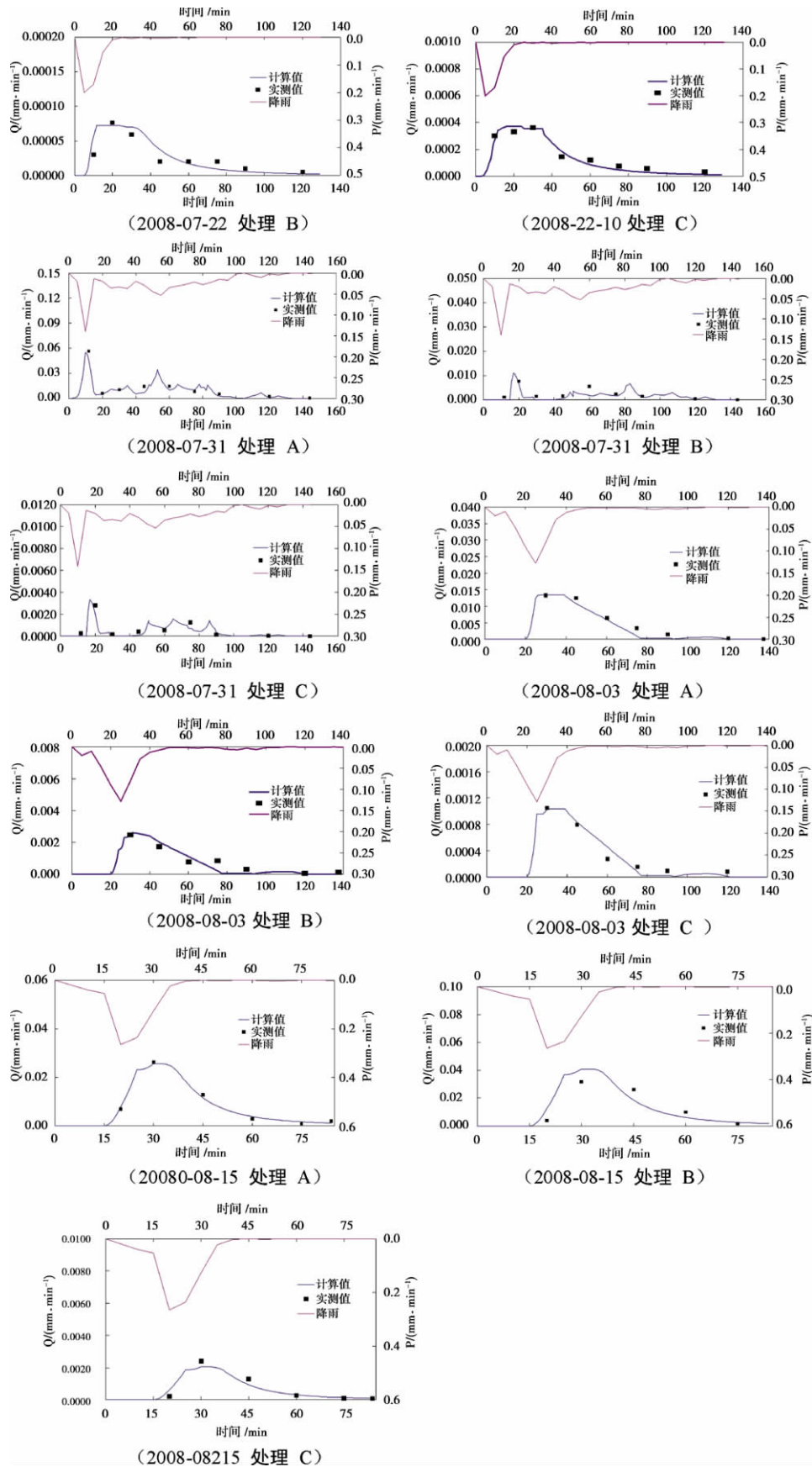


图2 径流过程预测图(续前)

Fig. 2 The process of runoff generation

参考文献 (References)

- [1] Tayfur G, Kavvas M L, Govindaraju R S, et al. Applicability of Saint Venant equations for two-dimensional overland flows over rough infiltration surfaces [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 119 (1): 51-63
- [2] Shen Bing. Finite element modeling of land surface hydrology [M]. Xian: Northwest Polytechnic University Press, 1996: 45-70 [沈冰. 地表水文有限元模拟 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1996: 45-70]
- [3] Vieira J H D. Conditions governing the use of approximations for the Saint Venant equations for shallow surface water flow [J]. Journal of Hydrology, 1983, 60: 43-58
- [4] Chen Li. Study on the runoff generation process on the slope with Numerical Method [J]. Journal of Sediment Research, 2001, 4: 61-66 [陈力. 坡面降雨产流规律的数值模拟 [J]. 泥沙研究, 2001, 4: 61-66]
- [5] Qi Longxing, Huang Xingfa. Simulation on slope runoff and soil erosion in a raining event [J]. Acta Mechanica Sinica, 1997, 29(3): 343-348 [戚隆兴, 黄兴法. 坡面降雨径流和土壤侵蚀的数值模拟 [J]. 力学学报, 1997, 29(3): 343-348]
- [6] Huang Xingfa. A numerical method for evaluating the slope land runoff by rain [J]. Journal of China Agricultural University, 1997, 2(2): 45-50 [黄兴法. 坡面降雨径流的一种数值模拟方法 [J]. 中国农业大学学报, 1997, 2(2): 45-50]
- [7] Wu Changwen, Wang Lixian. The basic equation of overland flow and its approximate analytical solution for a steep hillslope [J]. Journal of Nanchang College of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 1994, 4(S1): 142-149 [吴长文, 王礼先. 陡坡坡面流的基本方程及近似解析解 [J]. 南昌水专学报, 1994, 4(S1): 142-149]
- [8] Zhang Guohua, Zhang Zhanyu, Zuo Changqing, et al. Numerical simulation of runoff generation on slope under the condition of natural rainfall [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 668-672 [张国华, 张展羽, 左长清, 等. 坡地自然降雨入渗产流的数值模拟 [J]. 水利学报, 2007, 38(6): 668-672]
- [9] Zhang Zhanyu, Zhang Guohua, Zuo Changqing, et al. Hillslope soil erosion and runoff model for natural rainfall events [J]. Acta Mechanica Sinica, 2008, 24(3): 277-283
- [10] Chu S T. Infiltration during an unsteady rain [J]. Water Resource Research, 1978, 14(3): 461-466
- [11] Yao Wenyi, Tang Liquan. Process of sediment generation and its simulation [M]. Zhengzhou: Yellow River Hydraulic Engineering Press, 2001: 95-110 [姚文艺, 汤立群. 水力侵蚀产沙过程及模拟 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001: 95-110]

Numerical Simulation of Runoff Generation on Slope under Different Ecological Measures for Natural Rainfall

LI Xinhui¹ ZHAO Chenyi¹ YANG Jie²

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011 China)

(2. Soil and Water Conservation Research Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330000, China)

Abstract: Based on the principle of momentum theorem and water balance the basic equation for describing the runoff generated on a slope under the condition of natural rainfall with different rainfall intensities, rainfall momentum and influence of ecological measures taken into account is deduced. The equation can be numerically solved by applying the Preissmann format. The feasibility and precision of the model is verified by field experimental data. Results show that the mean relative errors of the prediction under 3 treatments are 14.97%, 13.59% and 15.15%. The model is quite high in accuracy and stability, and serves as useful tool in further research on prediction of runoff of nature rainfall on slopes under different ecological measures.

Key words: ecological measures; nature rainfall; runoff on slope; numerical simulation