

# 黄土区不同下垫面农田降雨入渗及产流关系的数值模拟

宋孝玉<sup>1,2</sup>, 康绍忠<sup>2,3</sup>, 沈冰<sup>1</sup>, 史文娟<sup>1</sup>, 胡笑涛<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程  
教育部重点实验室, 杨凌 712100; 3. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 在野外试验的基础上, 建立了二维农田降雨入渗及产流关系的数学模型, 并用中国科学院长武县王东沟农业生态站不同下垫面径流小区实测土壤含水率及产流资料对该模型进行验证。结果显示: 该模型对降雨过程中土壤入渗、产流以及雨后蒸发条件下土壤水分的模拟都有很高的精度, 可以用于黄土区降雨入渗及产流关系的模拟。

**关键词:** 黄土区; 农田; 入渗; 径流; 模拟

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)01-0001-05

## 0 引言

土壤侵蚀与干旱缺水同时存在于黄土高原沟壑区。该区 90% 的耕地实行旱作农业, 坡耕地面积占耕地总面积的 70%, 其土壤侵蚀占总侵蚀量的 50%~60%<sup>[1]</sup>。研究非饱和土壤水分运动的基本途径是数值模拟和实验<sup>[2]</sup>, 近年来数值模拟方法在农田水分运动研究中被广泛采用, 并逐步从实验室引向田间<sup>[3-6]</sup>。由于土壤水分运动是一个复杂的过程, 很多模拟研究的成果只能应用于某些特定的情况, 通用性差。在土壤水分运动方面, 多位学者先后作过很多工作, 有较大的参考价值<sup>[7-10]</sup>; 中国学者也用数学物理方法定量地研究土壤中水分、溶质和热量的运移问题<sup>[11-13]</sup>, 但是模拟黄土区农田降雨入渗及产流关系的文章并不多见, 而且模拟精度都在 20% 以内<sup>[14]</sup>。本文在野外试验的基础上, 建立了黄土区农田降雨入渗及产流关系的数值模拟, 这对于有效防治土壤侵蚀, 充分合理利用有限的雨水资源, 合理调整种植业结构都具有重要的现实意义。

## 1 试验区概况及试验研究方法

### 1.1 试验区概况

试验在中国科学院长武王东沟农业生态站径流小区进行。该生态站属于“中国生态系统研究网络”(CERN)设在黄土高原沟壑区的一个基本站。试区多年平均降雨量 584.1 mm, 农业生产主要依靠天然降雨, 实行旱作农业。试验小区位于陕西省长武县西 12 km 的陕甘分界处, 东经 107°40'30"~107°42'30", 北纬 35°12'~35°16', 试区面积 8.3 km<sup>2</sup>, 为典型的黄土高原沟壑地貌。试区塬面位于北部, 海拔高度 1215~1225 m。试区属暖温带半湿润大陆性季风气候, 降水集中在 7~

9 月, 占全年降水总量 55% 以上。热量供作物一年一熟有余, 目前复种指数 116%。当地主要土壤类型为粘黑垆土, 母质为中壤质马兰黄土, 非饱和层深厚, 地下水埋深 50~80 m, 农业生产全部依赖天然降水, 实行旱作农业, 主要种植作物有小麦、玉米、糜子等。

### 1.2 试验研究方法

根据试验条件, 选取径流场中 8 个径流小区, 面积有 5 m × 20 m 和 5 m × 50 m 两种, 坡度为 0°、30°、1°和 3°不等, 作物有小麦、玉米和糜子等, 小区土壤的粒度分析见文献<sup>[15]</sup>。7~9 月试验期间, 小麦已收割, 小区内主要是裸地、麦茬地、玉米或糜子, 玉米一般是在 4 月中旬播种, 9 月下旬成熟, 覆盖度 7 月份为 80%、8 月份为 90%、9 月份为 95%。本研究的野外试验完全在天然降雨条件下进行, 主要观测内容有: 用 TDR 测定各次降雨前、中、后各测点不同深度处土壤水分动态变化、久旱无雨的蒸发条件下土壤水分动态变化、雨后蒸发条件下土壤水分再分布等。降雨量和蒸发量来自测站气象园。

根据小区条件及波导棒和波导线的数量, 每个小区从坡顶到坡脚每隔 5 m 设一组测点, 每个测点处埋入 10、20、30、40、50、60 和 70 cm 波导线(波导线布设示意图见文献<sup>[16]</sup>), 测定含水率时按固定顺序沿坡从上到下逐个观测。土壤含水率的测定, 根据天气情况确定测量次数: 晴天时, 每天早上 8:00 时测定 1 次; 降雨前, 测定雨前土壤含水率; 降雨中, 测定雨中土壤含水率的变化情况(视雨量大小确定测量次数); 雨后, 测定土壤含水率的再分布, 雨刚停, 测量间隔时间较短(30 min 或 1 h), 以后逐渐延长测定时间, 直到恢复每天 1 次的测量。

## 2 农田降雨入渗及产流关系的数学模型

### 2.1 控制方程

降雨条件下坡地的水量转化可分为入渗过程和坡面漫流过程。在不考虑根系吸水, 入渗过程的控制方程可用土壤水分运动基本方程表示, 径流过程可通过水文学与水力学两种途径计算, 适合于坡面漫流过程计算的最佳方法是水力学方法, 应用最广泛的是运动波法。坡面漫流可用圣·维南方程组来描述<sup>[17]</sup>。则降雨条件下农田降雨入渗及产流关系的控制方程为:

收稿日期: 2004-01-25 修订日期: 2004-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50209016); 陕西省自然科学基金项目(2003D13); 陕西省教育厅省级重点实验室基金项目(04J515); 西安理工大学高学历人员科研启动基金项目

作者简介: 宋孝玉(1971-), 女, 陕西安康市人, 讲师, 博士, 主要从事农业水文学及水资源方面的研究。西安市金花南路 5 号 西安理工大学 748#, 710048, Email: songxy@xaut.edu.cn

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \left[ \frac{\partial K(\theta)}{\partial x} \cdot \sin \alpha + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \cdot \cos \alpha \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial V}{\partial x} = R_a(t) - f(x, t), \quad (2)$$

$$R_a(t) = f(x, t) \quad V = n_m^{-1} \sin \alpha h^{2/3} \quad (3)$$

$$h = 0, V = 0, R_a(t) = f(x, t) \quad (4)$$

式中  $h$ ——坡面水深, m;  $V$ ——坡面流速, m/s;  $\alpha$ ——坡度, ( $^\circ$ );  $R_a(t)$ ——坡面净承雨强度, m/s;  $f(x, t)$ ——坡面入渗强度, m/s;  $n_m$ ——坡面的有效糙率。

## 2.2 定解条件

### 2.2.1 初始条件

选坡长为  $L$ , 坡度为  $\alpha$  的坡地的求解域如图 1 所示。初始条件定义纵剖面含水率已知和坡面无水层, 即:

$$\theta(x, z, 0) = \theta_0(x, z) \quad (5)$$

$$h(x, 0) = 0, V(x, 0) = 0 \quad (6)$$

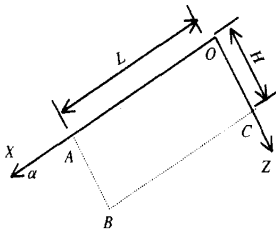


图 1 农田土壤水分求解域示意图

Fig 1 Derivation domain of soil moisture in farmland

### 2.2.2 边界条件

根据黄土区地下水位较深的特点, 不考虑地下水水位的影响。又由试验结果可知, 在 1 次降雨后深层土壤含水率基本保持不变, 因此定义  $Z$  方向的下边界条件为:

$$\theta(x, H, t) = \theta_0^H(x) \quad (7)$$

式中  $\theta_0^H$ ——初始时刻  $H$  深度处  $BC$  边界的含水率沿  $X$  的分布。

沿  $Z$  方向的上边界  $OA$  是一个动态的边界, 它根据坡面的径流状况而定, 即:

$$-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \cos \alpha = R_a(t), z = 0, x < L \quad (8)$$

$$\theta(x, 0, t) = \theta_0, L_0 \leq x \leq L \quad (9)$$

式中  $L_0$ ——退水水面线顶端距坡顶的距离, m。当坡面无积水时  $L_0 = L$ , 全坡面积水产流时  $L_0 = 0$ 。沿  $X$  方向的上边界  $OC$  在坡顶的分水岭处, 其水分通量为零, 即:

$$-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} + K(\theta) \sin \alpha = 0, x = 0 \quad (10)$$

对于  $X$  方向的下边界  $AB$  的边界条件, 根据已有室内模拟试验结果<sup>[18, 19]</sup> 和本文的野外现场试验结果, 在绝大多数情况下  $AB$  边界处是非饱和的, 最多也只有表层几毫米厚的土层非常接近饱和, 因此在本文的研究中将  $AB$  边界定为零通量边界, 即

$$-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} + K(\theta) \sin \alpha = 0, x = L \quad (11)$$

对于运动方程, 其上边界的位置也是动态的, 参考已有的研究结果<sup>[20, 21]</sup>, 将运动波方程的边界条件定为:

$$h(x, t) = 0, x = L_0, t > 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0, z = L, t > 0 \quad (13)$$

## 2.3 模型中主要参数的选取

### 2.3.1 有效糙率( $n_m$ ) 的确定

将坡地漫流过程作为 1 个系统, 根据曼宁公式, 由降雨过程和漫流过程反推出 1 次降雨过程的有效糙率值, 再分析各次降雨漫流有效糙率与影响因素的关系。按此思路, 本论文采用如下方法:

第一步, 对曼宁公式进行变形, 得到:

$$n_m = \frac{1}{q} h^{5/3} \sqrt{\sin \alpha B} \quad (14)$$

式中  $B$ ——坡面宽度, m; 其他符号意义同公式(3)。

第二步, 确定流量  $q_0$ 。其计算方法用下式进行, 即:

$$q = \frac{q_i + q_0}{2} \quad (15)$$

式中  $q_i$ ——产流后某一时段的实测平均流量, m/s;  $q_0$ ——整个产流过程的平均流量, m/s。

第三步, 计算各时段的有效糙率, 然后取平均值, 即:

$$\bar{n} = (n_1 + n_2 + \dots + n_i) / i \quad (16)$$

### 2.3.2 坡面实际入渗速率及入渗量的确定

#### 1) 坡面实际入渗速率的确定

坡面入渗过程受降雨特性与土壤渗透特性的共同制约, 天然降雨条件下的入渗不能保证充分供水。坡面上在降雨期间的实际入渗过程可表示为:

$$f(x, t) = \begin{cases} f_p(x, t) & R(t) < f_p(x, t) \\ R(t) & R(t) > f_p(x, t) \end{cases} \quad (17)$$

式中  $f_p(x, t)$ ——最大入渗率, m/s, 即入渗能力;  $f(x, t)$ ——在实际降雨强度  $R(t)$  条件下的实际入渗率, m/s;  $R(t)$ ——实际降雨强度, m/s。

#### 2) 坡面入渗量的确定

坡面入渗量的变化过程取决于坡面实际入渗速率的变化过程。坡面积水前入渗量受控于坡面承雨强度; 从坡脚开始积水到坡顶积水这一时间内, 入渗量受控于土壤的入渗性能, 加上从坡顶到坡脚的入渗能力相差不大, 因此整个坡面上入渗量的变化过程可描述为:

$$I_0 = \int_0^{t_{p1}} R(t) dt + \int_{t_{p1}}^{t_{p2}} f_p(x, t) dt \quad (18)$$

式中  $I_0$ ——累积入渗量, m;  $t_{p1}$ ——坡脚开始积水时间, s;  $t_{p2}$ ——坡顶开始积水时间, s; 其他符号意义同公式(17)。

### 2.3.3 坡面有效降雨强度的确定

在坡度为  $\alpha$  的坡面上, 由于地形的变化, 承受降水的面积比水平时小, 即坡面承雨强度比平地小, 其值等于在水平面上的降雨强度  $R$  与坡面承雨系数之乘积。由于本文小区坡度比较小, 故承雨系数可视为 1。在本文

的研究中主要考虑作物截流和坡面下渗的影响, 用公式表示为:

$$R_a(x, t) = \begin{cases} 0, R(t) < f(x, t) \\ R(t) - I_v - f(x, t), R(t) > f(x, t) \end{cases} \quad (19)$$

式中  $R_a(x, t)$  —— 有效降雨强度, m/s;  $R(t)$  —— 坡面实际降雨强度, m/s;  $I_v$  —— 植物降水截流强度, m/s;  $f(x, t)$  —— 坡面实际入渗强度, m/s。

植物对降水的截流作用与降雨强度、植物覆盖度有关, 以经验公式<sup>[22]</sup>表示如下:

$$I_v = \begin{cases} 0.55R(t) \cdot S_c [0.52 - 0.0085(I_r - 5.0)], \\ R(t) < 17 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \\ 1.85S_c, R(t) > 17 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \end{cases} \quad (20)$$

式中  $I_v$ 、 $R(t)$  —— 物理意义同公式(19);  $S_c$  —— 作物覆盖度, %。

### 2.3.4 上边界蒸发速率的确定

土壤蒸发和植被蒸腾是坡地水量转化和水平平衡的一个重要因素。在本文中, 视土壤蒸发和植被蒸腾作为一个从表面水分散失的整体, 把蒸发速率概化为:

$$E_s(x, t) = \begin{cases} E_p \text{ (第一阶段), } \theta < \theta_{\text{田}} \\ \frac{\theta - \theta_{\text{毛}}}{\theta_{\text{田}} - \theta_{\text{毛}}} E_p + E_0 \text{ (第二阶段), } \theta_{\text{毛}} < \theta < \theta_{\text{田}} \\ E_0 \text{ (第三阶段), } \theta < \theta_{\text{毛}} \end{cases} \quad (21)$$

式中  $E_s(x, t)$  —— 蒸发速率, m/s;  $E_p$  —— 潜在蒸散速率, m/s, 其值等于蒸发皿实测值乘以蒸发皿的折减系数;  $\theta_{\text{田}}$  —— 田间持水量, %, 由实测获得;  $\theta_{\text{毛}}$  —— 毛管断裂含水率, %, 等于田间持水量的 70%;  $E_0$  —— 第三阶段的蒸散速率, m/s, 由于  $E_0$  是一极小的值, 所以可忽略不计。

## 3 模型的应用

### 3.1 降雨入渗条件下土壤水分动态的模拟结果

利用该模型分别对不同下垫面条件下的 1996 年 7 月 27 日、1996 年 7 月 31 日、1997 年 7 月 28 日、1997 年 8 月 6 日降雨产流过程中 20 m 坡长小区的土壤水分动态进行了模拟, 见文献[16](因是野外试验, 有时降雨未必产流)。表 1 中列出了 1996 年 7 月 31 日和 1997 年 7 月 28 日土壤含水率的模拟结果, 模拟值与实测值的比较可以看出, 各深度平均含水率的误差范围在 0.75% ~ 7.58% 之间, 均小于 10%, 说明本文所提出的坡地水量转化模型模拟降雨产流条件下土壤水分变化具有较高的精度。

### 3.2 降雨产流量的模拟结果

对 1996 年、1997 年 4 次降雨, 共 8 个径流小区径流量进行模拟, 见文献[16], 将模拟所得的径流总量与实测径流总量进行比较列入表 2。从表中可以看出, 径流总量的模拟值与实测径流总量比较接近, 绝对误差最大为 0.20 mm, 最小为 0.02 mm, 相对误差(等于绝对误差除以实测值)变化范围为 1.06% ~ 8.14% 之间, 从而说明本模型的精度是相当可靠的。

表 1 降雨入渗条件下径流小区各层土壤含水率模拟值与实测值的比较

Table 1 Comparison of simulated and measured values of soil moisture of the runoff plots during rainfall and infiltration

| 降雨日期       | 小区名称 | 深度/cm | 模拟土壤含水率/ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | 实测土壤含水率/ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | 绝对误差/ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | 相对误差/% |
|------------|------|-------|---|---|--|--------|
| 1996-07-31 | 玉米地  | 10    | 0.2483                                      | 0.2573                                      | 0.0090                                   | 3.51   |
|            |      | 20    | 0.2643                                      | 0.2623                                      | 0.0020                                   | 0.75   |
|            |      | 30    | 0.2643                                      | 0.2570                                      | 0.0073                                   | 2.85   |
|            |      | 40    | 0.2643                                      | 0.2860                                      | 0.0217                                   | 7.58   |
|            |      | 50    | 0.2532                                      | 0.2653                                      | 0.0121                                   | 4.56   |
|            |      | 60    | 0.2263                                      | 0.2157                                      | 0.0106                                   | 4.91   |
| 1997-07-28 | 玉米地  | 10    | 0.0883                                      | 0.0843                                      | 0.0040                                   | 4.70   |
|            |      | 20    | 0.1072                                      | 0.1103                                      | 0.0031                                   | 2.84   |
|            |      | 30    | 0.1082                                      | 0.1063                                      | 0.0018                                   | 1.72   |
|            |      | 40    | 0.1064                                      | 0.1090                                      | 0.0026                                   | 2.42   |
|            |      | 50    | 0.1302                                      | 0.1333                                      | 0.0031                                   | 2.32   |
|            |      | 60    | 0.1230                                      | 0.1253                                      | 0.0023                                   | 1.86   |

表 2 径流小区坡面漫流模拟值与实测值比较

Table 2 Comparison of simulated and measured values of slope overflow of runoff plots

| 模拟日期       | 下垫面状况  | 降雨量/mm | 径流量模拟值/mm | 径流量实测值/mm | 绝对误差/mm | 相对误差/% |
|------------|--------|--------|-----------|-----------|---------|--------|
| 1996-07-27 | 1 裸地   | 23.7   | 6.68      | 6.59      | 0.09    | 1.37   |
|            | 3 裸地   |        | 6.52      | 6.59      | 0.07    | 1.06   |
| 1996-07-31 | 3 裸地   | 18.1   | 3.89      | 3.69      | 0.20    | 5.42   |
|            | 1 裸地   |        | 2.15      | 2.05      | 0.10    | 4.88   |
| 1997-07-28 | 30 麦茬地 | 19.4   | 0.41      | 0.39      | 0.02    | 5.13   |
|            | 3 玉米地  |        | 0.45      | 0.42      | 0.03    | 7.14   |
| 1997-08-06 | 3 玉米地  | 60.6   | 1.07      | 1.02      | 0.05    | 4.90   |
|            | 30 麦茬地 |        | 1.86      | 1.72      | 0.14    | 8.14   |

将 1996 年、1997 年 4 次降雨, 共 8 个径流小区产流过程及全坡面平均入渗速率、坡面承雨过程绘成图, 见文献[16]。图 2 列出了 2a 各 1 次降雨, 共 4 个径流小区的过程, 从图 2 可以看出, 坡面产流过程、坡面平均入渗速率与坡面承雨过程的变化基本一致, 产流过程比降雨过程要相对滞后一段时间, 最大产流出现时间要比最大降雨强度出现时间也相应错后一段时间; 各次产流出现的时间有先有后, 这一方面与降雨前土壤湿润状况关系紧密, 如 1996 年 7 月 27 日产流出现时间早, 而 1997 年 7 月 28 日产流出现时间要晚一些, 这是因为 1996 年 7 月 26 日也降大雨, 并且也有产流, 而 1997 年 7 月 28 日产流的前期未降雨产流, 故 1996 年 7 月 27 日产流最早; 另一方面, 从次降雨不同下垫面径流小区产流时间先后比较, 可以看出, 覆盖越好, 产流出现时间越晚, 如 1997 年 7 月 28 日 30 麦茬地产流时间要比 3 玉米地早 5 min, 这与影响产流量的因素分析结果完全一致; 再次, 由图 2 还可看出, 产流前坡面平均入渗速率等于坡面承雨强度, 而产流后按实际土壤入渗能力进行下渗。这与黄土高原地区降雨产流规律完全一致, 从而说明该模型对模拟黄土区不同下垫面农田降雨、入渗、产流规律具有较高的精度, 模拟结果是可靠的。

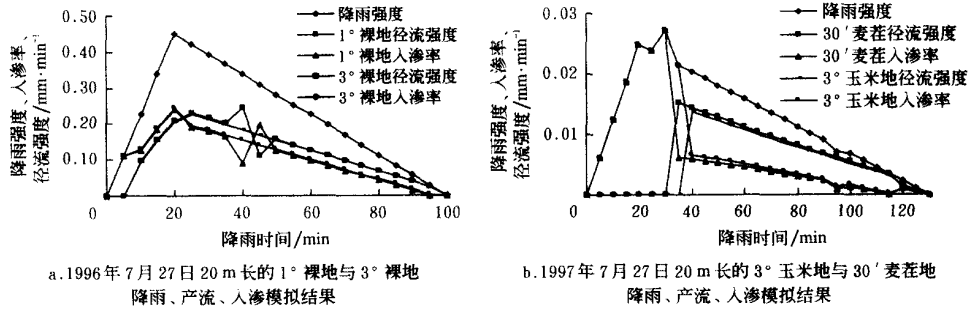


图2 径流小区降雨、入渗、产流过程的模拟结果

Fig 2 Simulated results of rainfall, infiltration and runoff processes of runoff plots

3.3 雨后蒸发条件下土壤含水率的模拟结果

3.3.1 雨后蒸发条件下土壤含水率的比较

对不同下垫面小区降雨产流后蒸发条件下的土壤含水率实测值与模拟值进行分析比较, 见文献[16], 表3列出了1996、1997两年各1次的结果。由表3可以看

表3 雨后蒸发条件下径流小区各层土壤含水率模拟值与实测值的比较

Table 3 Comparison of simulated and measured values of soil moisture of runoff plot during evaporating after rainfall

| 降雨日期       | 小区名称   | 深度/cm | 模拟土壤含水率 / $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | 实测土壤含水率 / $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | 绝对误差 / $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | 相对误差 /% |
|------------|--------|-------|--|--|---|---------|
| 1996-07-31 | 30 玉米地 | 10    | 0.2551                                       | 0.2483                                       | 0.0068                                    | 2.75    |
|            |        | 20    | 0.2662                                       | 0.2623                                       | 0.0039                                    | 1.49    |
|            |        | 30    | 0.2513                                       | 0.2570                                       | 0.0057                                    | 2.23    |
|            |        | 40    | 0.2651                                       | 0.2897                                       | 0.0246                                    | 8.49    |
|            |        | 50    | 0.2432                                       | 0.2673                                       | 0.0241                                    | 9.01    |
|            |        | 60    | 0.2118                                       | 0.2080                                       | 0.0038                                    | 1.81    |
| 1997-08-06 | 3° 玉米地 | 10    | 0.2433                                       | 0.2457                                       | 0.0024                                    | 0.98    |
|            |        | 20    | 0.2442                                       | 0.2500                                       | 0.0058                                    | 2.31    |
|            |        | 30    | 0.1826                                       | 0.1937                                       | 0.0111                                    | 5.73    |
|            |        | 40    | 0.1339                                       | 0.1323                                       | 0.0016                                    | 1.18    |
|            |        | 50    | 0.1315                                       | 0.1253                                       | 0.0062                                    | 4.92    |
|            |        | 60    | 0.1231                                       | 0.1210                                       | 0.0021                                    | 1.74    |

出, 模型所模拟的土壤含水率与实测土壤含水率比较接近, 绝对误差范围为0.0011~0.0246, 相对误差范围为0.98%~9.01%。从而说明模型对雨后蒸发条件下土壤含水率的模拟精度也较高。

3.3.2 雨后蒸发条件下剖面土壤含水率分布的动态模拟

为了反映雨后蒸发条件下剖面土壤含水率的动态过程, 将1996年7月28日20m长30玉米地的不同坡面位置处土壤含水率的动态过程和全坡面不同深度处土壤含水率模拟结果绘制成图, 见图3。由图3可以看出: 雨后土壤含水率比较高, 各深度变幅较大, 在蒸发条件下土壤含水率迅速减小, 变幅变缓, 从不同坡面位置来看, 坡顶和坡底变化更为迅速, 而坡中反映较慢, 这是因为坡顶在蒸发的同时, 水量还在向坡下运移, 坡底因含水率较高, 水分减小就更为迅速, 而坡中是连接坡顶和坡底的中界, 它的水分运动既不如坡顶迅速, 土壤含水率又不如坡底高, 故不如坡顶和坡底那样变化迅速。从全坡面平均土壤含水率变化过程来看, 雨后蒸发条件下全坡面土壤含水率随时间逐渐变小, 总的趋势是坡顶 > 坡中 > 坡底。这与实测蒸发条件下坡地土壤含水率的变化规律完全一致。

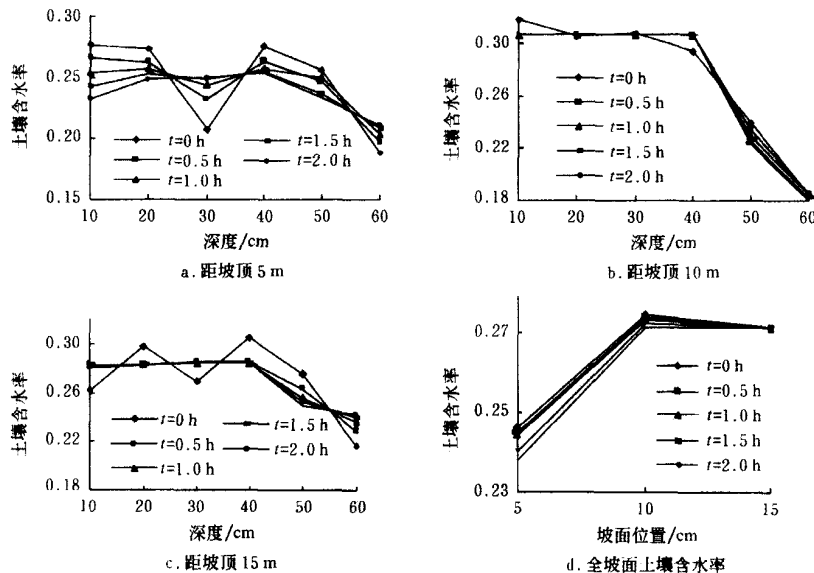


图3 雨后蒸发条件下土壤含水率分布的动态变化过程

Fig 3 Dynamic distribution of soil moisture of runoff plot during evaporating after rainfall

#### 4 结论与讨论

本文是在野外试验基础上建立的数学模型,对降雨时农田土壤水分动态、坡面入渗过程、径流过程和雨后蒸发条件下农田土壤水分动态变化的预测都具有较高的精度。

由于野外降雨产流资料较难获得,尤其是动态过程难度更大,观测时既要观察产流动态,又要监测水分动态,而且全是冒雨观测,2a 仅观测到了 4 次全过程降雨产流资料,因此资料的数量还是有些不足,能否向更大的区域以及更广的范围推广还有待进一步的试验检验。

##### [参 考 文 献]

- [1] 邵明安,上官周平,康绍忠,等. 坡地水分养分动力学研究的基本思路[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999.
- [2] 姚德良,邱克俭,冀伟,等. 在植物耗水条件下土壤水分动态的数值模拟[J]. 土壤学报, 1993, 30(1): 111- 115.
- [3] 康绍忠,刘晓明,熊运章. 土壤-植物-大气传体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [4] 吕军. 作物生长田间水分平衡的系统模拟[J]. 水利学报, 1998, (1): 45- 50.
- [5] 雷志栋,杨诗秀,谢传森. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1981, 121- 131.
- [6] 陈洪松,邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 513- 520.
- [7] Gardner W R. Dynamic aspects of water availability to plants[J]. Soil Sci, 1960, 89(2): 63- 73.
- [8] Hanks R J, Bowers S A. Numerical solution of the moisture flow equation for infiltration into layered soils[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1962, 26.
- [9] Molz F J, Irwin Remson. Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants[J]. Water Resources Research, 1970, 6(5): 1346- 1356.
- [10] Hillel D, Talpaz H, Van Keulen H. A macroscopic-scale model of water uptake by a nonuniform root system and of water and salt movement in the soil profile[J]. Soil Sci, 1976, 121(4): 242- 255.
- [11] 陈启生,戚隆溪. 有植被覆盖条件下土壤水盐运动规律的研究[J]. 水利学报, 1996, (1): 38- 46.
- [12] 沈荣开,任理,张瑜芳. 夏玉米麦秸全覆盖下土壤水热动态的田间试验和数值模拟[J]. 水利学报, 1997, (2): 14- 21.
- [13] 蔡树英,张瑜芳. 温度影响下土壤水分蒸发的数值分析[J]. 水利学报, 1991, (11): 1- 8.
- [14] 康绍忠,刘晓明,徐翀. 无地下水补给条件下玉米田水分微循环过程的动力学模式及其应用[J]. 水利学报, 1993, (5): 1- 9.
- [15] 宋孝玉,康绍忠,沈冰,等. 陕西长武王东沟径流小区土壤水分运动参数的测定[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(4): 179- 181.
- [16] 宋孝玉. 黄土沟壑区不同下垫面条件对农田降雨入渗及产流关系影响的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
- [17] 杨建英,赵廷宁,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- 11.
- [18] 沈冰. 黄土坡地产流实验与数学模拟的研究[D]. 西安: 陕西机械学院, 1988.
- [19] 沈冰,王文焰. 降雨条件下黄土坡地表层土壤水分运动实验与数值模拟的研究[J]. 水利学报, 1992, (6): 29- 35.
- [20] Zhang W, Cundy T W. Modeling of two dimensional overland flows[J]. Water Resour Res, 1989, 25(9): 2019- 2035.
- [21] Govindaraju R S, Jones S E, Kawas M L. On the diffusion wave modeling for overland flow, 1, Solution for steep slopes[J]. Water Resour Res, 1988, 25(5): 734- 744.
- [22] 刘昌明,王会肖. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

## Simulating the relationship between the infiltration and runoff of different underlying farmland in the loess region

Song Xiaoyu<sup>1,2</sup>, Kang Shaozhong<sup>3</sup>, Shen Bing<sup>1</sup>, Shi Wenjuan<sup>1</sup>, Hu Xiaotao<sup>2</sup>

(1. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Key lab of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 3. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** Based on the field experiment, the two-dimensional mathematical model of the relationship between the infiltration and runoff of farmland in the loess region was established. Furthermore, the model was verified with the data of soil moisture and runoff in the different underlying runoff plots at Changwu county, which is one of research stations of Chinese Ecosystem Research Network (CERN). The results showed that the model precision was higher for simulating the soil infiltration and runoff during the rainfall process and the soil moisture during the evaporation after rainfall. The model was used to simulate the relationship between the infiltration and runoff in the loess region.

**Key words:** loess region; farmland; infiltration; runoff; simulation

宋孝玉,康绍忠,沈冰,等. 黄土区不同下垫面农田降雨入渗及产流关系的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 1- 5.

Song Xiaoyu, Kang Shaozhong, Shen Bing, et al. Simulating the relationship between the infiltration and runoff of different underlying farmland in the loess region[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 1- 5 (in Chinese with English abstract)