

# 河沟流域水分入渗的数学模型

魏忠义, 王治国, 段喜明, 胡振华, 王春红

(山西农业大学水土保持规划设计研究所, 太谷 030801)

**摘要:** 采用现场实地人工模拟降雨试验, 并结合双环入渗测定以及天然降雨条件下的径流小区观测等手段, 对河沟流域各类型下垫面水分入渗规律及特征进行了较为深入系统地研究, 并对各入渗模型的优劣进行了分析、比较及评价。结果表明: 考斯加可夫(Kostiakov)公式以及霍顿(Horton)公式较符合河沟流域的实际入渗情况。

**关键词:** 黄土残塬区; 小流域; 入渗模型

**中图分类号:** S152.72

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2000)04-0032-04

## The Infiltration Model at Various Underlying Surfaces in Hegou Watershed

WEI Zhong-yi, WANG Zhi-guo, DUAN Xi-ming, HU Zhen-hua, WANG Chun-hong

(Shanxi Agricultural University, Taigu Shanxi 030801, PRC)

**Abstract:** Mainly based on the field simulated rainfall experiments, the infiltration law in Hegou watershed was systematically studied. The result showed that Horton infiltration model and Kostiakov infiltration model were suitable for the watershed.

**Key words:** loess plateau; small watershed; infiltration model

### 1 河沟流域基本情况

河沟流域位于山西省西部隰县境内, 属典型黄土残塬区, 是黄河一级支流昕水河流域子流域卫家峪流域的一级支沟, 流域面积  $8.9 \text{ km}^2$ 。流域内大部呈梁沟状地貌, 沟壑纵横, 主沟为河沟, 陡坡比例大, 大于  $25^\circ$  的陡坡占 55% 以上。

流域北高南低, 最高海拔高度  $1276 \text{ m}$ , 最低海拔高度  $981 \text{ m}$ , 主沟道纵比降  $0.082$ , 年侵蚀模数达  $5700 \sim 8000 \text{ t/km}^2$ , 最大可达  $15000 \text{ t/km}^2$ 。

河沟流域属半干旱气候, 年平均气温  $8.8^\circ\text{C}$ , 大于等于  $10^\circ\text{C}$  的积温  $3031.5^\circ\text{C}$ , 年辐射量  $5233.5 \text{ MJ/m}^2$ , 年均蒸发量为  $1832.6 \text{ mm}$ , 年均降水量  $510 \text{ mm}$ , 降水年内分配很不均匀, 7~9 三个月降水量占全年总降水量的 60% 以上, 大部分降水以暴雨形式出现, 其 10 年一遇日降水量为  $98 \text{ mm}$ ,  $10 \text{ min}$  暴雨强度为  $2.0 \text{ mm/min}$ 。

河沟流域黄土层深厚, 土壤母质多为第四纪马

兰黄土, 平均厚度  $10 \text{ m}$ , 土体呈灰黄色, 块状无层理, 土质疏松, 大孔隙较多, 质地均匀, 偏轻, 富含碳酸盐, 抗蚀性差; 其下部为离石黄土, 厚达  $50 \sim 80 \text{ m}$ , 抗蚀性较强, 在沟坡有出露; 再下为午城黄土及第三纪宝德红土, 厚达  $25 \text{ m}$  以上, 土体呈红黄色或红色, 含角料石, 在沟底有出露。旱塬土壤由马兰黄土发育而成, 为轻质黄绵土, 土层较厚, 容重约为  $1.2 \text{ g/cm}^3$ 。流域内有林地面积  $68.7 \text{ hm}^2$ , 森林覆盖率为 7.7%, 荒草坡覆盖度为 20%~30%, 植被覆盖率低。

### 2 试验装置及试验方法

#### 2.1 试验装置

试验地点的选取具有河沟流域各类型的代表性, 试验装置采用近年来在水分入渗研究方面较多应用的小型人工模拟降雨装置——针孔滴水式模拟降雨机。试验装置由供水桶、稳压桶、降雨头、支架、围板等组成, 降雨头下设置入渗试验小区, 由铁板围

\* 收稿日期: 2000-10-13

国家“九五”科技攻关项目黄土高原水土流失区农业综合发展技术研究第 6 专题——晋西残塬区高产型农业综合发展研究(96-004-05-06)的内容。

成,产流由出口流出,降雨头高度可以由支架高度调节,试验时“雨滴”由降雨头下一排排针孔滴出,落在其下方的小区内。降雨强度可由稳压桶水位形成的压力大小来调节,雨滴大小可由针孔大小来改变;雨滴动能可由降雨头高度来控制。

2.2 试验方法

- (1) 根据土地利用现状调查资料及实地查勘,选择各代表类型试验点。
- (2) 试验准备:设备安装调试,水源供应,小区处理,雨前含水量及容重取样。
- (3) 试验环境及情况记录。
- (4) 试验开始:记录雨强、时间、供水过程、积水时间、产流过程等相应观测数据。
- (5) 雨后含水量取样,量算总产流量,读记总供水量。
- (6) 室内称重处理含水量、容重及泥沙样品,含水率及容重是在烘箱内 105℃ 环境下烘干 12 h,用感量 0.01 g 天平称量。
- (7) 资料初步整理分析及试验设备、方法、步骤的改进。

3 水分入渗数学模型的选择及优选

3.1 入渗模型的选择

水分入渗方面的数学模型有许多种,包括理论的、经验的、半理论半经验的,其适用条件各异,如

Green-Ampt 方程, Philip 方程等理论方程, Kostakov 经验公式, Horton 公式, Smith 入渗方程等。按河沟流域的具体情况,从中选出概念较为明确可靠而常用的三种模型:

(1) 考氏(Kostiakov)公式:

$$f(t) = at^n$$

式中:  $f(t)$ ——入渗速率;  $t$ ——入渗时间;  $a, n$ ——由试验资料拟合的参数。

(2) 霍顿(Horton)公式:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

式中:  $f(t)$ ——入渗速率;  $t$ ——入渗时间;  $f_0$  和  $f_c$  分别为初渗率和稳渗率;  $k$ ——经验参数;  $e$ ——自然对数的底。

(3) 通用经验公式:

$$f(t) = a + bt^n$$

式中:  $f(t)$ ——入渗速率;  $t$ ——入渗时间;  $a, b$ ——经验参数。

3.2 三种模型的回归分析

选择河沟流域各类型下垫面试验中入渗过程数据较为完整可靠的场次共 30 场,其基本代表了河沟流域主要的下垫面类型的实际入渗情况。将实测数据对上述三种入渗模型进行回归分析,得到各模型回归参数,见表 1。

表 1 所选各类型各代表场次入渗试验在三种模型下的回归分析结果

序号	类型	考氏公式回归分析			霍顿公式回归分析				通用经验公式回归分析			
		-r	a	b	-r	f <sub>0</sub> -f <sub>c</sub>	f <sub>c</sub>	k	-r	a	b	n
1	玉米塬地	0.89	4.90	0.63	0.93	1.55	0.25	0.047	0.86	0.25	17.3	1.31
2	(苗期)	0.96	4.54	0.55	0.82	0.85		0.047	0.94	0.45	12.6	1.43
3	(苗期)	0.90	3.42	0.43	0.69	0.60	0.54	0.035	0.84	0.54	8.1	1.23
4	(抽穗期)	0.94	6.43	0.76	0.84	1.56	0.38	0.083	0.97	0.38	7.6	1.54
5	(抽穗期)	0.99	1.60	0.30	0.95	1.07	0.46	0.092	0.86	0.46	56.6	2.14
6	(抽穗期)	0.94	3.53	0.69	0.90	0.96	0.24	0.076	0.90	0.24	25.4	1.79
7	马铃薯塬地	0.92	4.48	0.58	0.89	1.34	0.42	0.062	0.86	0.42	8.9	1.21
8	马铃薯塬地	0.96	6.42	0.67	0.85	1.42	0.53	0.092	0.98	0.53	13.1	1.82
9	马铃薯塬地	0.93	4.53	0.67	0.87	1.32	0.35	0.070	0.97	0.35	6.6	1.35
10	黄豆塬地	0.94	7.61	0.67	0.82	1.88	0.49	0.061	0.88	0.49	14.0	1.38
11	黄豆塬地	0.97	5.83	0.75	0.95	1.86	0.22	0.064	0.95	0.22	11.4	1.34
12	黄豆塬地	0.95	5.21	0.61	0.90	1.77	0.47	0.066	0.96	0.47	8.4	1.22
13	休闲耕地	0.95	4.58	0.55	0.90	1.51	0.55	0.076	0.95	0.55	11.0	1.45
14	墓地	0.98	7.77	0.80	0.96	4.18	0.24	0.087	0.91	0.24	12.2	1.30
15	牧草地	0.98	3.67	0.51	0.95	2.44	0.43	0.094	0.84	0.43	12.9	1.47
16	荒草梁地	0.94	3.98	0.29	0.85	1.05	1.30	0.055	0.96	1.30	4.8	1.04
17	荒草梁地	0.98	2.66	0.27	0.92	1.35	0.84	0.064	0.85	0.84	4.6	1.15
18	荒草梁地	0.90	2.66	0.40	0.85	1.99	0.63	0.074	0.94	0.63	5.8	1.55
19	裸地	0.90	1.16	0.29	0.87	0.29	0.43	0.108	0.95	0.43	8.0	1.99
20	塬地	0.92	2.56	0.31	0.83	0.95	0.80	0.100	0.87	0.80	5.74	2.79
21	园地	0.97	1.70	0.33	0.92	0.55	0.45	0.052	0.94	0.45	7.80	1.34
22	坡耕地	0.99	2.62	0.41	0.92	8.20	0.55	0.164	0.87	0.55	2.78	4.65
23	荒草坡	0.88	1.41	0.27	0.87	0.38	0.56	0.150	0.93	0.56	8.20	1.86
24	沟底草坡	0.79	0.75	1.30	0.96	0.83	0.92	0.150	0.79	0.92	0.80	1.30
25	刺槐林地	0.91	1.57	0.22	0.94	0.81	0.60	0.187	0.91	0.60	15.7	2.21
26	河沟坝地	0.97	9.82	1.03	0.90	29.7	0.11	0.174	0.85	0.11	16.2	5.39
27	牧草 60%	0.88	2.05	0.26	0.95	1.59	0.77	0.140	0.97	0.77	9.12	4.12
28	牧草 30%	0.97	1.13	0.26	0.99	0.46	0.41	0.072	0.95	0.41	7.50	1.53
29	梯田小麦	0.95	2.83	0.40	0.96	1.98	0.62	0.059	0.92	0.62	10.7	1.49
30	硬化面	0.97	1.63	0.36	0.98	0.68	0.42	0.090	0.98	0.42	79.6	2.26

3.3 回归结果分析

(1)对考斯加可夫经验公式的回归分析结果显示,绝大多数代表场次的相关系数均在 0.90 以上,其中 1/3 超过 0.95,因而考斯加可夫公式对实测数据的拟合是很好,各类型参数  $a$  在该流域的变化基本在 1.1~2.8 之间; $n$  值反映了入渗速率随时间的递减情况,其范围基本在 0.3~0.7 之间。

(2)对霍顿公式的回归分析表明,其相关系数一半以上大于 0.95,其中 1/3 超过 0.95,因而霍顿公式对实测数据的拟合是很好,回归效果显著。这说

明霍顿公式适用于本流域。本流域的  $f_c$  值在 0.11~1.30 mm/min 之间,一般在 0.35~0.80 mm/min 范围内,这说明本流域地表水分入渗性能是中等偏高水平,  $f_c$  值最高的类型有较少扰动的天然荒草坡、较少扰动的林地、草地、休闲期较长的耕地、梯田; 塿面农耕地  $f_c$  值中等; 而长期遭人践踏的林、草地以及河沟尚未淤成的存在夹黏层的坝地  $f_c$  值较小。其  $k$  值反映了入渗曲线的斜率变化情况,  $k$  值越大,入渗速率减小越快,反之则越慢。

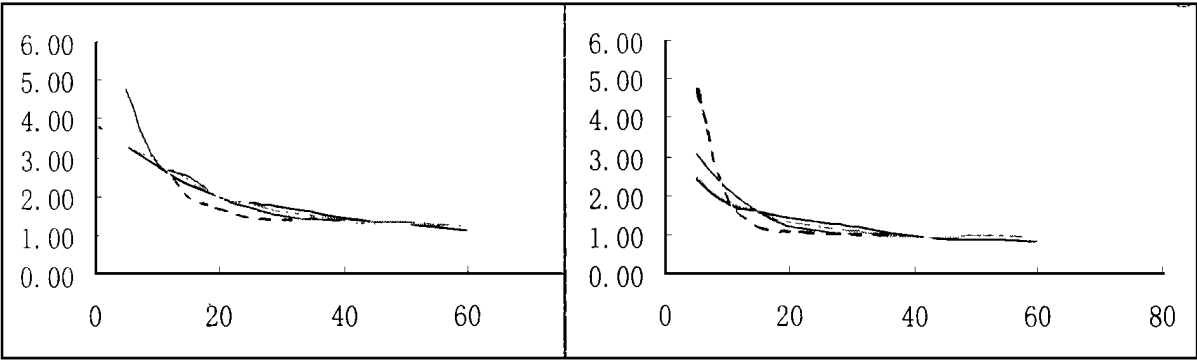


图 1 降雨条件下的三种模型入渗曲线

图 2 降雨条件下的三种模型实验数据的经验曲线

(3)对通用经验公式进行实测数据下的回归分析,其相关系数在 0.90~0.95 区间的占 1/3,稍差于前两种模型,特别是在初始入渗阶段,但后期拟和较好。公式中的参数  $a$  实际上相当于  $f_c$ ,但  $b, n$  值波动较大。

由 (3)、(4) 两式,  $t=0$  时,  $f(t)=f_0, F(t)=F(0)=0$ ;  $t \rightarrow \infty$  时,  $f(t)=f_c$ 。

从上述两式的形式及其相应曲线来看,霍顿公式较好地表达了入渗过程的三个阶段,适用于本流域的水分入渗。

4 三种水分入渗模型的比较分析

(3)通用经验公式的累积入渗量  $F(t)$ , 入渗强度  $f(t)$  与入渗时间在  $t$  时的关系如下:

4.1 三种入渗模型的数学分析

(1)考氏公式的累积入渗量  $F(t)$ 、入渗强度  $f(t)$  与入渗时间的关系在  $t>0, n>1$  时如下:

$$F(t) = \int_0^t f(u) du = at + \frac{b}{1-n} t^{1-n} \quad (5)$$

$$F(t) = \int_0^t f(u) du = \frac{a}{1-n} t^{1-n} \quad (1)$$
$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = at^{-n} \quad (2)$$

$F(t)$  线是递增曲线,  $f(t)$  线为递减曲线。其总体变化趋势符合实际情况,但在  $t=0$  点  $f(t) \rightarrow \infty$ , 而且  $t \rightarrow \infty$  时,  $f(t)=0$ , 即虽然  $f(t)$  随着时间增加将一直减小,这与实际情况不符,但从实用角度看,考氏模型适合本流域水分入渗情况。

$$f(t) = \frac{dF}{dt} = a + bt^{-n} \quad (6)$$

由实测资料的拟和结果,一般  $n>1$ , 从而 (5) 式发散,  $f(t)$  在初始段与实际情况不符,总体拟和情况也较前二者稍差。

(2)霍顿公式的累积入渗量  $F(t)$ , 入渗强度  $f(t)$  与入渗时间  $t$  在  $t>0, k>0$  时的关系如下:

4.2 三种模型的比较及评价

为了进一步比较所选三种模型对本流域下垫面入渗的适用性,绘制本模拟降雨试验条件下的三种模型的入渗曲线和实测数据的经验曲线,如图 1、图 2 所示。

结果表明: 在入渗过程的瞬变阶段(约 10 min 以内),考氏公式与实测点拟和最好; 在入渗渐变段

$$F(t) = \int_0^t f(du) = f_c t + \frac{f_0 - f_c}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (3)$$
$$f(t) = \frac{df(t)}{dt} = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \quad (4)$$

表 2 各模型在入渗各阶段的适用性评价表

	0~10min	10~45min	45min 以上
考氏公式	好	好	不好
霍顿公式	较好	好	好
通用公式	不好	不好	好

10~45 m in) 考氏公式和霍顿公式拟和度均高; 在稳定入渗阶段, 随着  $t$  的增大, 考氏公式与实测曲线的

差异将越来越大, 霍顿公式和通用公式在此阶段的拟和度较高 入渗各阶段各模型的适用性见表 2。

## 参考文献

- 1 康绍忠, 等 内蒙古敖包小流域土壤入渗分布规律研究[J] 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(6)
- 2 蒋定生, 等 黄土高原入渗速率研究[J] 土壤学报, 1986, (11)
- 3 余新晓, 等 人工降雨条件下的入渗试验研究[J] 水土保持学报, 1989, 5(4)
- 4 王治国, 等 坡耕地水蚀研究[J] 水土保持学报, 1995, 9(2)
- 5 Robert M. Dixon. Water Infiltration Control at the Soil Surface: Theory and Practice[J] Journal of Soil and Water Conservation, 1995(9~10).
- 6 Joseph Morin, et al. The Surface Infiltration Model[J] Journal of Soil and Water Conservation, 1995(9~10).

(上接第 28 页)

发展离不开政府部门的支持与保护, 应从粮食收购、信息服务、专业人才使用、咨询、农民素质培训、资金投入、干部提拔等方面切实作好生态农业建设的宏观调控工作, 为生态农业发展创造一个良好的经济、政治氛围。本规划应形成文本(法规条文), 经县人大审批通过, 在县人大监督下贯彻实施。要加强生态农业建设项目的组织管理, 主动争取项目资金, 提高项目资金利用效益。

### 6.3 进一步搞好生态农业建设的技术推广

以黄土高原国家农业综合发展隰县试区及其它农业科技示范项目为辐射源, 采取发放技术资料、现场观摩、开办农民技术培训班、建立技术推广风险基金与补贴机构机制等措施, 大力推进生态农业技术的推广工作, 逐步提高生态农业建设的科技含量, 促进生态农业建设水平再上新台阶。

### 6.4 重视基层干部与农民的生态农业意识和技术培训

搞好基层干部和广大农民的生态农业意识和技术培训, 提高其素质和业务能力, 是进一步搞好隰县生态农业建设的关键。为此, 应重视并下大力气抓好县、乡、村干部以及广大农民的生态意识和技术方面的培训工作, 可通过定期或不定期外聘教师进行专题讲座、在广播电视上设立专题栏目以及文艺作品、科技书目等途径扩大基层干部和农民群众的受培训面, 提高培训效果。

### 6.5 突出抓好农村社会化服务体系建设

隰县生态农业产业化程度低主要体现在农村社

会化服务体系尤其是市场信息与产品销售服务体系建设薄弱方面。因此, 应突出抓好以市场信息咨询和产品销售服务为中心的集技术指导、生产资料供应等产前、产中、产后服务于一体的农村社会化服务体系建设, 特别是以微机、电话为主的信息网络建设, 提高生态农业建设的产业化与市场化水平。

### 6.6 以股份合作制为纽带, 多方筹集资金, 提高资金利用效率

资金缺乏将成为隰县生态农业建设面临的困难之一。为此, 应积极采取股份合作的办法多渠道、多方面筹集生态农业建设所需资金, 提高资金的利用效率。

### 6.7 认真贯彻执行有关生态农业方面的法律法规和政策

为搞好生态农业建设, 国家制定了一系列法律法规和方针政策, 如《农业法》《土地管理法》《水土保持法》《森林法》等。应从隰县实际出发制定切实可行的具体实施办法, 确保这些法律法规与政策的贯彻落实, 为隰县生态农业建设保驾护航, 促进全县的生态农业发展。

### 6.8 建议上级部门对隰县生态农业建设继续给予大力支持

搞好隰县生态农业建设, 对昕水河流域及黄河中游水土流失防治、减少黄河泥沙输入均具有重要的示范作用与意义; 隰县经济落后, 资金投入能力又十分有限。因此, 建议上级部门对隰县生态农业建设从资金、政策等方面继续给予大力支持。