

基于一维圣维南运动方程的黑土区坡耕地径流模型研究

王贵作, 张忠学

(东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

摘 要: 在野外模拟降雨的基础上, 建立基于一维圣维南运动方程的黑土区坡耕地径流模型。分析结果表明, 该模型应用于小面积径流计算时精度很高, 但在进行野外坡面径流量的预测时, 不能忽略控制面积的大幅扩大对模型预测精度的影响。
关键词: 坡耕地; 人工降雨法; 黑土区; 径流; 模型
中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3409(2007)02-0231-02

Study on Slope Farmland Runoff Model in Blackland
Based on 1-D Saint-Venant Equation

WANG Guizuo, ZHANG Zhongxue

(School of Hydraulic and Construction Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: According to the observation data and outcomes of artificial rainfall, based on the overland flow formulas established slope farmland runoff model. The results show that the precision of the model is well, but the influence to the precision of the model in the prediction of field runoff can't be ignored.
Key words: slope farmland; simulated rainfall method; blackland; runoff; model

黑龙江省甘南县属黑土区, 解放初黑土层 50~ 60 cm, 可是, 现在坡耕地表层黑土层已经流失殆尽, 变成了瘠薄农田。水土流失逐渐成为制约该区农业可持续发展的瓶颈。因此, 采取有效措施遏制黑土区水土流失、保护有限的耕地资源意义重大。本实验采用模拟降雨的方法, 进行了降雨径流实验, 建立坡耕地径流模型, 为水土保持部门评价坡耕地水土流失及制定治理规划提供科学依据。

1 实验区概况及实验方法

1.1 实验区概况

试验区地处黑龙江省甘南县, 位于东经 122°54'6"~ 124°28'12"。该地属于温带半干旱季风气候, 四季冷暖干湿分明, 全年平均气温 2.6℃, 无霜期 150 d, 年平均活动积温

2 263.7℃, 全年日照时数 1 791 h, 生长季节日照时数 1 303.9 h, 多年平均降水量为 455.2 mm, 雨量集中于 7~ 9 月。试验地点在甘南县兴隆乡东兴村 20 号屯西坡耕地上。坡度平均 4.5~ 5.0°, 土壤物理性能如表 1。

1.2 实验方法

1.2.1 便携式模拟降雨器降雨径流实验

该降雨装置为有压给水针头式模拟降雨装置, 主要由给水器、降雨发生器、支架、渗入框等部分组成。降雨面积为 0.54 m×0.54 m= 0.29 m², 雨滴下落高度为 1.5 m, 且可以调节。降雨强度的大小是通过控制系统预先设置。降雨量的观测、径流和泥沙的收集均是按《水土保持技术规范》要求进行的; 土壤含水量和容重采用烘干法进行测定。降雨强度设计为 40 mm/h、60 mm/h、80 mm/h、100 mm/h、120 mm/h。

表 1 实验区土壤颗粒组成

编号	土层 /cm	颗粒分析/%				比重 GS	密度 ρ/ (g·cm ⁻³)	干密度 ρ _d / (g·cm ⁻³)	剪切试验	
		2~ 0.5	0.5~ 0.075	0.075~ 0.01	< 0.01				内聚力 C	内摩擦角 φ
1	0~ 10	4.1	2.66	1.39	1.17	2.66	1.39	1.17	18.9	30.7
2	10~ 20	4.5	2.65	1.41	1.14	2.65	1.41	1.14	38.0	18.4

1.2.2 立杆侧向单喷模拟降雨径流实验

立杆侧向单喷模拟降雨装置高 8 m, 采用有压侧向单喷工作方式, 基本达到雨滴终点速度。供试土壤为裸地, 小区面积 3 m×4 m= 12 m², 小区末端有集水槽, 收集径流。根据试验区降雨情况, 选择降雨强度为 40 mm/h 进行试验。每次降雨前, 测定土壤水分。记时用秒表, 径流开始后每 5

min 取样一次。

2 入渗方程及径流模型

2.1 入渗方程

通过对个入渗方程的比较研究(另文介绍)得到结论, Kostiaikov 入渗公式能很好的描述黑土区的土壤水分入渗过程。

* 收稿日期: 2006-05-09
基金项目: 国家 863 计划课题(2002AA2Z4251)资助
作者简介: 王贵作(1979-), 男, 在读硕士, 主要研究水土保持和节水农业方面内容; 通讯作者: 张忠学, 博士, 教授, 博士生导师。

选择黑土坡耕区不同降雨强度情况下入渗过程数据完整可靠的场次共 25 场。利用其实测数据确定入渗模型参数,得到模型的参数(见表 2):

表 2 Kost iakov 入渗公式基本参数表					
降雨强度/(mm·h ⁻¹)	120	100	80	60	40
<i>a</i>	1.383	1.216	1.163	1.118	0.722
<i>b</i>	0.286	0.258	0.220	0.214	0.141

Kost iakov 入渗公式为:

$$i(t)=at^{-b}$$

(1)

$$I(t)=\frac{a}{1-b}t^{(1-b)}$$

(2)

式中:*i(t)*——下渗能力(mm/min);*I(t)*——下渗量;*t*——历时;*a*、*b*——拟合参数。

*I(t)*是递增曲线,*i(t)*是递减曲线,其总体变化趋势符合实际情况,但在*t*=0时,*i(t)*→∞,→∞时,*i(t)*→0,这与实际入渗情况不符,但从实用角度考虑,在一定的入渗时间内,Kost iakov 入渗方程能反映黑土坡耕地土壤入渗的实际情况。Kost iakov 入渗方程计算的水分入渗过程及其与实测过程的相对误差见表 3。

2.2 径流模型

2.2.1 坡面产流理论分析

当坡面上降雨强度超过地面下渗能力(超产流),或地面以下土层含水量达到饱和时(饱和产流),就会滞蓄一定深度的水层,沿着地表运动,这就是坡面径流。

坡面流和壤中流、地下水流及河道水流一样,都是在能量守恒和质量守恒定律所支配下的水流运动,可用水流的动力方程和连续方程来进行描述。

设降雨强度为 *R(t)*,土壤的入渗率为 *I(t)*,那么一定坡度、坡宽和粗糙度的斜坡上的地表径流可用动力波方程描述为:

表 4 降雨径流过程实测值与计算值

时间/min	降雨强度/(mm·h ⁻¹)									
	120		100		80		60		40	
	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值
5	2.929	3.889	2.801	2.925	1.616	1.434	0.376	- 0.04	0.310	- 0.01
10	8.506	9.976	7.553	7.622	4.343	4.348	1.394	1.302	0.774	0.592
15	15.602	16.612	12.79	12.78	7.704	7.672	2.870	3.035	1.414	1.394
20	22.444	23.560	18.28	18.20	11.26	11.23	4.754	4.998	2.207	2.315
25	29.594	30.721	23.93	23.81	15.12	14.97	6.884	7.120	3.155	3.320
30	38.298	38.041	29.61	29.56	19.02	18.83	9.138	9.363	4.235	4.391
35	45.872	45.486	35.34	35.42	22.86	22.79	11.58	11.70	5.445	5.514
40	53.791	53.035	41.33	41.37	26.78	26.83	14.12	14.12	6.738	6.681
45	61.578	60.669	47.41	47.39	30.83	30.95	16.75	16.61	8.046	8.046

(注:文中入渗零时刻皆为产流起始时刻)

径流计算值与实测值相比较,相对误差绝对值小于 10%的占 87%;相对误差绝对值小于 5%的占 76%。其中绝对误差最大值为 1.47 mm/min。试验结果分析表明坡面产流一维圣维南运动方程在描述便携式模拟降雨器降雨径流过程时取得了良好的效果。

2.2.3 模型验证

2005 年 9 月中旬在径流场进行了立杆喷洒模拟降雨,模拟降雨强度为 40 mm/h,获得径流过程如表 5:

表 5 40 mm/h 立杆喷洒模拟降雨径流过程							
时间/min	5	10	15	20	25	30	35
实测累计径流深/mm	0.31	0.79	1.25	1.99	3.15	3.77	4.39
计算累计径流深/mm	0.310	0.774	1.414	2.207	3.155	4.235	5.445

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial x}=R(t)-I(t)$$

(3)

$$q=ah^m$$

(4)

式中:*h*——坡面水深,(mm);*t*——降雨时间,(min);*n*——曼宁糙率系数;*x*——坡长,(m);*q*——单宽径流量,(mm);*R(t)*——降雨量,(mm);*I(t)*——入渗量,(mm);*a*、*m*——无

量纲常数,在紊流条件下, $a=\frac{\sqrt{\sin\theta}}{n}$, $m=\frac{5}{3}$

表 3 水分入渗过程及其与实测过程的相对误差

雨强/ (mm·h ⁻¹)	时间 /min	实测值 /mm	考斯加科夫公式	
			计算值/mm	相对误差/%
120	15	14.40	13.388	- 7.03
	30	21.70	21.959	1.19
	45	28.42	29.331	3.21
100	15	12.21	12.219	0.07
	30	20.38	20.434	0.26
	45	27.59	27.606	0.06
80	15	12.30	12.327	0.22
	30	20.97	21.169	0.95
	45	29.16	29.044	- 0.40
60	15	12.13	11.964	- 1.37
	30	20.86	20.637	- 1.07
	45	28.24	28.388	0.52
40	15	8.59	8.610	0.23
	30	15.77	15.619	- 0.96
	45	21.97	21.969	0.00

2.2.2 产流过程

降雨径流过程实测值与计算值见表 4:

运用散水模拟降雨条件下建立的坡面产流一维圣维南运动方程,计算立杆侧向单喷模拟降雨条件下径流小区的产流量,并将计算结果与实测值进行比较,如表 5。

由表 5 可以看出,运用一维圣维南运动方程得出的计算值与实测值比较,在产流后的 25 min 内计算值与实测值十分接近,最大绝对误差为 0.22 mm/m,可以代表坡面径流量;产流 25 min 后误差增大,最大绝对误差为 1.06 mm/m²。

分析以上情况发现,坡面径流的入渗模型在计算中没有考虑因控制面积增大而可能发生的地面积水,出现有压入渗的情形。因而,虽然坡耕地径流模型比较准确地描述了小区控制面积下的径流过程,但在进行野外坡面径流量的预测时,不能忽略面积的大幅扩大对模型预测精度的影响。

(下转第 235 页)

59.83%, 值增加相对较小, 增加率(相对于相同层次裸地)从1.88%~27.95%。从不同植被类型的增加率来看, 呈现灌木林地> 桉树> 草地的规律。对同一植被类型、不同土层深度而言, C 值和 φ 值的增加量和增加率均呈现第一层> 第二层> 第三层的规律。

表 4 不同植被条件土壤剖面土体黏聚力增加值

土样层次	(相对于裸地)					
	草 地		灌木林地		桉 树	
	$\Delta C/\text{kPa}$	增加率/ %	$\Delta C/\text{kPa}$	增加率/ %	$\Delta C/\text{kPa}$	增加率/ %
第一层	7.9	28.01	16.9	59.93	10.1	35.82
第二层	6.4	15.35	14.5	34.77	8.6	20.62
第三层	3.2	6.24	8.2	15.98	4.3	8.38

4 结 论

本文通过对不同植被和不同层次的土样在不同含水量条件下的直剪试验, 研究了土层深度、植被类型与抗剪强度参考文献:

[1] 唐邦兴, 王成华, 崔鹏, 等. 大陆山地灾害与环境保育研究进展与展望[A]. 海峡两岸山地灾害环境保育研究[C]. 成都, 四川科学技术出版社, 1998. 29– 37.

[2] 刘红帅, 薄景山, 穆谷波, 等. 滑坡位移动态预测– 以中里滑坡为例[J]. 灾害学, 2002, 17(4), 38– 41.

[3] 王文俊. 三峡库区干流崩塌、滑坡的发育特征及危险性分析[J]. 灾害学, 2002, 17(4), 54– 59.

[4] 韩恒悦, 李昭淑, 常星源. 陕西佛坪、宁陕“ 6• 9 ” 山地灾害考察研究[J]. 灾害学, 2004, 19(2), 78– 82.

[5] 李铁军, 李晓华. 植被固坡机制研究[J]. 水土保持科技情报, 2004, (2): 1– 3.

[6] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. 4– 5.

[7] 刘天林, 脱军弟, 李秉强, 等. 新原调整公路雁门关隧道出口段滑坡勘察及治理[J]. 灾害学, 2002, 17(4): 46– 51.

[8] 郭小平, 朱金兆, 周心澄, 等. 植被护坡技术及其应用[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(4): 112– 116.

[9] 王治国, 张云龙, 刘徐师, 等. 林业生态工程学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000. 110– 111.

(上接第 232 页)

3 结 论

(1) Kostiakov 入渗公式在描述黑土区土壤水分入渗过程时, 取得了良好的模拟效果, 相对误差绝对值小于 10% 的占 87%; 相对误差绝对值小于 5% 的占 76%。试验表明 $K\alpha$ 参考文献:

[1] 张光辉. 国外坡面径流分离土壤过程水动力学研究进展[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 112– 115.

[2] 王全九, 王文焰, 张江辉. 根据畦田水流推进过程水力因素确定 Philip 入渗参数和田面平均糙率[J]. 水利学报, 2005, 1(1): 125– 129.

[3] 王治国, 肖娟, 魏忠义, 等. 黄土残源区人工降雨条件下坡耕地水蚀研究. III. 坡耕地小麦休闲期秸秆覆盖的防蚀效应[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2): 13– 17.

[4] 吴普特, 周佩华. 黄土坡面薄层水流侵蚀试验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(2): 40– 45.

[5] 孙景生, 康绍忠, 崔文军. 不同沟灌条件下土壤入渗参数的估算[J]. 灌溉排水学报, 2005, 4 (8): 46– 51.

[6] 王治国, 肖娟, 魏忠义, 等. 黄土残源区人工降雨条件下坡耕地水蚀研究. III. 坡耕地小麦休闲期秸秆覆盖的防蚀效应[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2): 13– 17.

[7] 吴普特, 周佩华. 黄土坡面薄层水流侵蚀试验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(2): 40– 45.

[8] 宋孝玉, 康绍忠, 史文娟, 等. 常武黄土沟壑区不同下垫面条件农田产流产沙规律及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 28– 30.

[9] 雷廷武, 邵明安, 李占斌. 土壤侵蚀预报模型及其在中国发展的考虑[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 162– 166.

[10] Brandsma R T, M A Fullen, T J Hocking. Soil conditioner effects on soil structure and erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 54(2): 485– 489.

[11] Aschmann S G, D P Anderson, R J, Croft et al. Using a watershed nutrient dynamics model, WEPP, to address watershed scale nutrient management challenges[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 54 (4): 630– 635.

[12] Guy B T, W T Dickinson, R P Rudra. The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of in Terrill flow [J]. Trans. ASAE, 1987, 30: 1378– 1385.

[13] Kostiakov, A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration[J]. Trans, com, int, soc, soil sci., 932, 6th. Moscow part A, 17– 21.

的关系, 得出主要结论如下:

- (1) 乔、灌、草 3 种植被类型较之裸地, 黏聚力 C 值和内摩擦角 φ 值均有增加, C 值增加的幅度相对较大, 而 φ 值增加的幅度相对较小, 乔、灌、草均有提高土壤抗剪强度的作用。
- (2) 从植被沿垂直剖面提高土壤的抗剪强度的程度来看, 表层植被提高的程度较大, 随着土层深度的增加, 抗剪强度提高的程度逐步减少。

表 5 不同植被条件土壤剖面土体内

土样层次	草 地		灌木林地		桉 树	
	$\Delta \varphi/\text{kPa}$	增加率/ %	$\Delta \varphi/\text{kPa}$	增加率/ %	$\Delta \varphi/\text{kPa}$	增加率/ %
	$\Delta \varphi/\text{kPa}$	增加率/ %	$\Delta \varphi/\text{kPa}$	增加率/ %	$\Delta \varphi/\text{kPa}$	增加率/ %
第一层	2.6	11.35	6.4	27.95	3.4	14.85
第二层	1.2	4.20	5.2	18.18	2.7	9.44
第三层	0.6	1.88	3.9	12.23	1.9	5.96

(3) 从植被类型来看, 灌木提高土壤抗剪强度的程度最大, 草地提高土壤的抗剪强度的程度最小。

stiaikov 入渗公式在该区有较好的适用性。

(2) 一维圣维南运动方程应用于小面积径流计算时精度很高, 但在进行野外坡面径流量的预测时, 不能忽略控制面积的大幅扩大对模型预测精度的影响。空间尺寸的变化对径流量的影响仍需进一步探讨。