

土壤侵蚀正态模型试验中产流畸变系数*

张 丽 萍^{1,3}

张 妙 仙^{2,3}

(1 南京大学海岸与海岛开发国家试点实验室, 南京 210093) (2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)
(3 中国科学院、水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

摘 要 根据入渗、产流原理, 分析了小流域土壤侵蚀正态模型试验中的产流与流域实际产流过程的差异, 首次提出了模型产流畸变的概念。并根据实地人工降雨试验所计算的人渗、产流过程线, 理论推导出不同比例尺正态模型畸变系数, 同时随着模型相似比例尺的减小, 产流畸变系数增大。产流畸变系数的提出, 提高了土壤侵蚀正态模型试验的实际应用价值, 也告诫人们用模型试验资料时, 必须进行模型与原型的转换, 否则会造成水土保持工程设计的浪费。

关键词 土壤侵蚀, 正态模型, 产流方式, 畸变系数

中图分类号 S157

土壤侵蚀正态模型试验是当今土壤侵蚀研究的先进手段, 它使土壤侵蚀研究由野外走向室内。在室内可通过严密的观测试验, 系统地研究流域土壤侵蚀的全过程, 是土壤侵蚀研究由经验向理论发展的一个重要途径。关于降雨相似、模型几何相似及土壤相似原理, 许多专家学者已做了大量研究工作。(目前采用的几何相似比一般为 1:100~1:400, 降雨相似比 1:1, 土壤相似比为 1:1^[1,2])。本文旨在通过对降雨径流形成及土壤入渗动态方程的推导, 分析原型产流方式与模型产流方式的异同, 首次引入模型产流畸变系数的概念, 并在此基础上提出了模型与原型径流转换函数。

1 模型畸变系数的引入

1.1 入渗和产流方程

降雨条件下流域产流方式一般可分为超渗产流与蓄满产流, 它与降雨强度及土壤入渗曲线有关(图 1)。当降雨强度小于或等于土壤入渗率时不产流, 并以降雨强度向下入渗; 当降雨强度大于入渗强度时, 则形成超渗产流; 当土壤最大蓄水量小于累积入渗量时, 则形成蓄满产流, 图中 t_1 为超渗产流初始点, t_2 为蓄满产流初始点。设降雨强度随时间的函数为 $r(t)$, 则 t 时刻的累积降雨量 p 为:

* 中国科学院水土保持研究所博士点基金, 及南京大学海岸与海岛开发国家试点实验室基金资助

收稿日期: 1999-06-30; 收到修改稿日期: 1999-12-15

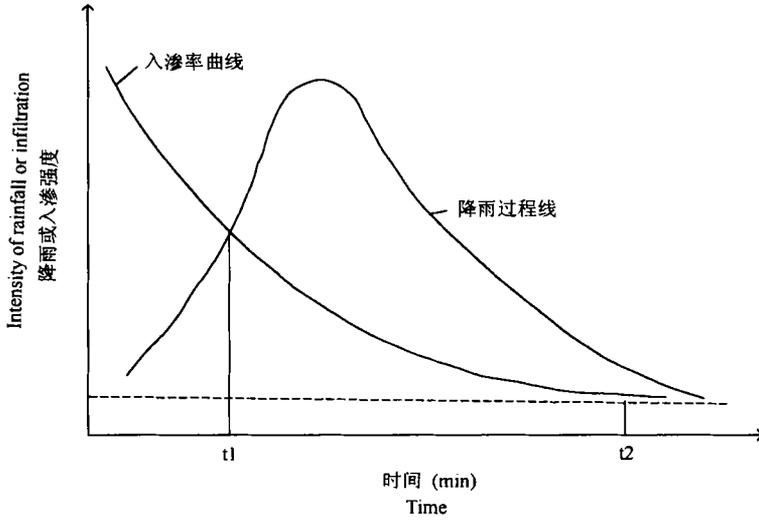


图1 入渗及产流示意图

Fig.1 A sketch map showing runoff formation and infiltration

$$p(t) = \int_0^t r(t) dt \quad (1)$$

入渗强度随时间的函数为 $i(t)$, 则 t 时刻的累积入渗 I 为:^[3]

$$\begin{cases} I(t) = \int_0^t r(t) dt & t \leq t_1 \\ I(t) = \int_0^{t_1} r(t) dt + \int_{t_1}^t i(t) dt & t_1 < t \leq t_2 \\ I(t) = \int_0^{t_1} r(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \equiv \text{cons.} & t > t_2 \end{cases} \quad (2)$$

累积径流深 R 为:

$$\begin{cases} R(t) = 0 & t \leq t_1 \\ R(t) = \int_{t_1}^t [r(t) - i(t)] dt & t_1 < t \leq t_2 \\ R(t) = \int_{t_1}^{t_2} [r(t) - i(t)] dt + \int_{t_2}^t r(t) dt & t > t_2 \end{cases} \quad (3)$$

由于土壤最大可能蓄水量 s 与土壤前期含水率 θ_0 、土壤的最大持水率 θ_w 及最大可能蓄水的土层厚度 D 有关。在流域平面内 D 是平面坐标 x, y 的函数即 $D(x, y)$, 则某一区域

ΔA 的可蓄水量为:

$$s = \iint_{\Delta A} (\theta_w - \theta_0) D(x, y) dx dy \quad (4)$$

为简化模型计算,设在 D 深度内及整个流域上 θ_w 和 θ_0 为常数,令 $\mu = \theta_w - \theta_0$, 则:

$$s = \mu \iint_{\Delta A} D(x, y) dx dy$$

$$\lim_{\Delta A \rightarrow 0} S = \mu D(x, y) \quad (5)$$

当 $I = S$ 时,为发生蓄满产流之临界;当 $i = r$ 时,为发生超渗产流之临界,解下列方程即可求得 t_1, t_2 。

$$\begin{cases} i(t) = r(t) \\ \int_0^{t_1} r(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt = \mu D(x, y) \end{cases} \quad t_2 > t_1 \quad (6)$$

设 r 为常数,降雨历时为 T ,由公式(2),(5)得土壤最大持水临界土层厚度 D_{\max} 为:

$$\mu D_{\max} = r t_1 + \int_{t_1}^T i(t) dt$$

$$D_{\max} = \frac{r}{\mu} t_1 + \frac{1}{\mu} \int_{t_1}^T i(t) dt \quad (7)$$

1.2 畸变系数

设实际土层厚度为 D ,模型几何相似比为 K ,则模型土层厚度为 KD 。当降雨强度 r 为常数,降雨历时为 T 时,则实际土层累积径流深 R_y 为:

$$R_y = Tr - t_1 r - \int_{t_1}^T i(t) dt \quad (8)$$

模型累积径流深 R_m 为:

$$R_m = Tr - t_1 r - \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad (9)$$

$$\because s = t_1 r + \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt$$

$$\therefore s = \mu DK$$

$$\begin{aligned} \therefore \mu DK &= t_1 r + \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \\ \therefore R_m &= Tr - \mu DK \end{aligned} \tag{10}$$

令 $\alpha = R_m / R_y$ 为产流畸变系数, 则土层厚度为 D 时

$$\begin{cases} \alpha = \frac{Tr - \mu DK}{Tr - t_1 r - \int_{t_1}^T i(t) dt} & DK < D_{\max} \\ \alpha = 1 & DK \geq D_{\max} \end{cases} \tag{11}$$

在面积为 A 的流域内产流畸变系数 α_{ws} 为:

$$\alpha_{ws} = \frac{1}{A} \iint_A \alpha dA \tag{12}$$

2 实例

2.1 原型沙黄土土壤入渗试验

张丽萍等在陕北黄土高原神木水蚀风蚀交错带生态环境整治技术及试验示范研究基地, 面积为 6.89km^2 的六道沟, 选择一坡度为 28° , 具有代表性土质的沙黄土地表裸露地段, 进行人工降雨模拟试验^[4]。径流小区为 $1.5\text{m} \times 5\text{m}$ 。经过六场降雨试验, 绘制出六条不同雨强同一雨量的入渗曲线。本文以其中一场降雨为例, 测试数据如表 1, 累积入渗曲线如图 2。

表1 沙黄土人工降雨试验测试要素表¹⁾

Table 1 The record of artificial simulation rainfall test on sand-loess slope

时间 (min)	0	3	4	7	10	13	16	19	22	25	27
Time											
累积降雨量 (mm)	0	6.00	8.00	14.00	20.00	26.00	32.00	38.00	44.00	50.00	50.00
累积径流深 (mm)	0	0	0.85	2.54	3.82	7.21	9.75	12.29	16.79	21.20	21.53
累积入渗量 (mm)	0	6.00	7.15	11.46	16.19	18.79	22.25	25.71	27.21	28.80	28.47
入渗率 (mm/min)	0	2.00	1.15	1.44	1.58	0.87	1.15	1.15	0.50	0.53	0.165

1) $\theta_0 = 9.15\%$ $\theta_w = 31.15\%$ $\mu = 22.00\%$, $T = 25\text{min}$, $t_1 = 3\text{min}$, $r = 2\text{mm/min}$, 降雨量 50mm

根据 Philip 入渗公式推得该场降雨累积入渗公式为:

$$\begin{cases} I(t) = 4.77t^{\frac{1}{2}} + 0.20t & t > t_1 \\ I(t) = 2.0t & t \leq t_1 \end{cases} \tag{13}$$

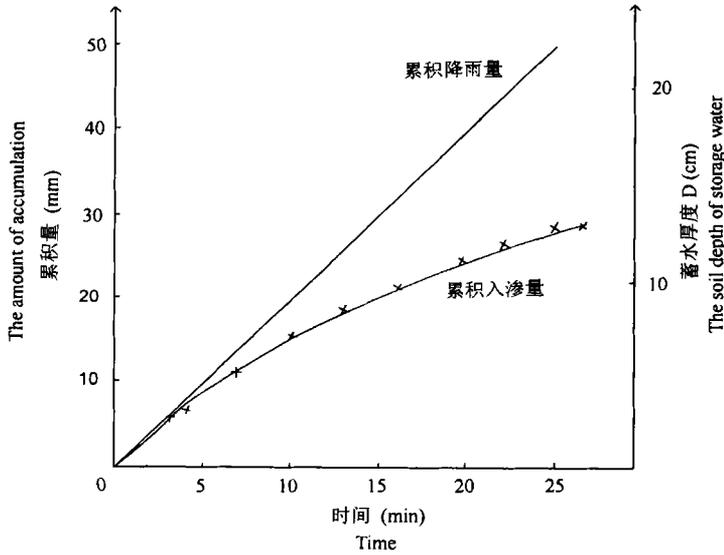


图2 累积降雨与入渗曲线

Fig.2 The diagram of curve on accumulation rainfall and infiltration

相应的人渗率为:

$$i(t) = 2.39t^{\frac{1}{2}} + 0.2 \quad (14)$$

降雨试验结束后,测得 60cm 埋深处土壤含水率与前期土壤含水率相同,13cm 埋深处土壤含水率为 31.15%,未达到饱和含水率,故均为超渗产流。

表2 神木县六道沟流域不同比例尺模型高度面积表

Table 2 The area of different height in normal mock-up of Liudao gully in different scale

高程 Elevation (m)	高差 Relative height(m)	1:100	1:200	1:300	1:400	累积面积 Accumulated area(%)	面积 Area (%)	高差中值 Relative average height
1274	175	1.75	0.0855	0.570	0.428	100	5.47	158
1240	141	1.41	0.705	0.470	0.353	94.53	10.9	136
1230	131	1.31	0.655	0.437	0.328	83.63	25.5	126
1220	121	1.21	0.605	0.4033	0.303	58.13	24.5	106
1200	101	1.01	0.505	0.337	0.253	33.63	4.58	96
1190	91	0.91	0.455	0.303	0.228	29.05	5.43	86
1180	81	0.81	0.405	0.270	0.203	23.62	3.75	76
1170	71	0.71	0.355	0.237	0.178	19.87	4.55	66
1160	61	0.61	0.305	0.203	0.153	14.99	4.37	56
1150	51	0.51	0.255	0.170	0.128	10.62	3.89	46
1140	41	0.41	0.205	0.137	0.103	6.73	2.37	36
1130	31	0.31	0.155	0.103	0.078	4.36	1.77	26
1120	21	0.21	0.105	0.070	0.053	2.59	1.64	16
1110	11	0.11	0.055	0.037	0.028	0.95	0.95	5.05
1099	0	0	0	0	0			

2.2 理论正态模型产流畸变

依据 1:10000 地形图对六道沟流域进行不同高程面积量算,并按不同比例尺缩小(表 2)。首先由表 1,根据公式(7)和(14)求得 $D_{\max} = 13.1\text{cm}$,然后从图(2)可查得表 2 中不同比例尺模型蓄满产流的面积百分比。又根据公式(11)、(12)和表 2 可求得六道沟流域各种比例尺不同土层厚度 D 的产流畸变系数 α 及流域畸变系数 α_{ws} (如表 3)。

表3 不同比例尺正态模型蓄满产流面积百分率及流域产流畸变系数

Table 3 The area percentage of runoff formation as soil fulling water and runoff formation distortion coefficient in normal mock-up of Liudao gully in different scale

比例尺 Scale	1:100	1:200	1:300	1:400
蓄满产流面积(%)	1.278	3.48	6.73	10.82
α_{ws}	1.0125	1.0666	1.102	1.198

由此可知,模型产流方式不同于原型产流方式,随着模型比例尺的缩小,发生蓄满产流的面积越来越大,模型的缩小导致产流方式不同程度的畸变。在降雨、土壤相似比为 1:1 的前提下,模型产流畸变主要是由于比例尺缩小,土壤蓄水层厚度分布不均的原因。

3 结论

利用模型试验研究土壤侵蚀,旨在反映原型的土壤侵蚀特征,产流汇流规律。根据上述推论,模型产流方式由原型的超渗产流畸变为蓄满产流与超渗产流并存,导致模型径流深的畸变,并非以几何相似比缩小,而是存在一个畸变系数。当用模型径流深 R_m 换算原型径流深 R_y 时,需用下式转换。

$$R_y = R_m / \alpha_{ws} \quad (15)$$

致谢 本工作是在中国科学院水利部水土保持研究所唐克丽研究员、康绍忠教授的精心指导下设计的,并且试验均由黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工降雨模拟装置完成。

参 考 文 献

1. 雷阿林,唐克丽. 土壤侵蚀模型试验中的降雨相似及其实现. 科学通报. 1995, 41(21): 2004~2006
2. 蒋定生,周清,范兴科等. 小流域水沙调控正态整体模型模拟实验. 水土保持学报. 1994, 8(2): 25~30
3. 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学. 北京:清华大学出版社. 1988. 50~170
4. 张丽萍,唐克丽,张平仓. 片沙覆盖的黄土丘陵区土壤水蚀过程研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 40~45

RESEARCH ON RUNOFF FORMATION DISTORTION COEFFICIENT IN SOIL EROSION EXPERIMENT OF A NORMAL MODEL OF SMALL DRAINAGE

Zhang Li-ping^{1,3}

(1 *State Pilot Laboratory of Coast and Island Exploitation, Nanjing University, Nanjing 210093*)

Zhang Miao-xian^{2,3}

(2 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(3 *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,
Yangling District, Shaanxi Province, 712100 PRC*)

Summary

In this paper, according to principle of runoff formation and infiltration, the difference of runoff formation between the prototype and the normal mock-up of small drainage was analyzed, and the conception of runoff formation distortion in soil erosion experiment of the mock-up of small drainage was put forward for the first time. Again on the basis of process curve of runoff formation and infiltration obtained by the test of artificial simulation rainfall on typical slope in Liudao gully drainage, the runoff formation distortion coefficient of the normal mock-up of small drainage in various scale was calculated theoretically. It improved applicable value of test of soil erosion with normal mock-up of small drainage. And it exhorted people to transform mock-up to prototype by multiplying runoff formation distortion coefficient and tested figures when tested data were applied. Otherwise, the wasting phenomenon of project design in soil and water conservation would be caused.

Key words Soil erosion, Normal mock-up, Runoff formation, Distortion coefficient