

# 基于侵蚀力学机制的流域土壤侵蚀模型研究

## ——以长江三峡库区王家桥流域为例\*

夏艳华<sup>1</sup>, 张平仓<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2. 长江水利委员会水土保持局, 武汉 430010)

摘要: 根据王家桥流域观测资料及人工降雨实验成果, 从侵蚀力学机制出发, 严格区分了坡面侵蚀与流域侵蚀两个不同的概念, 建立了坡面侵蚀模数和流域侵蚀模数。计算结果表明, 流域内坡面侵蚀只占流域侵蚀模数的 7.1% ~ 11.7%, 流域侵蚀物质主要来源于沟蚀、部分重力侵蚀。因此在王家桥流域如何开展水保工作是一个值得深思的问题。

关键词: 王家桥流域; 坡面侵蚀; 流域侵蚀; 侵蚀力学机制; 预报模型

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2003)01-0152-03

# Study on Watershed Soil Erosion Models Based on Erosion Mechanics Mechanism

## —— Taking Yangtze Rive Three Gorges Reservoir Area as an Example

XIA Yan-hua<sup>1</sup>, ZHANG Ping-cang<sup>2</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, CAS, Wuhan 430071;

2. Soil and Water Conservation Bureau of Yangtze Rive Conservancy Commission, Wuhan 430010)

**Abstract** According to observation data and the outcomes of artificial rainfall in Wangjiaqiao basin, based on erosion mechanics mechanism, two concepts of slope erosion and basin erosion are distinguished grimly and soil erosion models of slope and small watershed have been established. The calculative products of the models manifest that slope erosion is small and equated to 7.1% ~ 11.7% of watershed erosion. It suggests that the erosion matter of the small watershed mainly comes from channel erosion and gravitation erosion, instead of slope erosion. Therefore it is a considerable problem how to carry on works of soil and water conservation in Wangjiaqiao small watershed.

**Key words** Wangjiaqiao basin; slope erosion; watershed erosion; erosion mechanics mechanism; prediction model

### 1 前言

坡面土壤流失模型是将一个小流域看成有若干个坡面单元(或称地块)组成, 然后根据小区观测或室内模拟实验资料, 建立统计的或物理的模型, 以单个坡面为单元计算土壤流失量<sup>[1]</sup>。限于目前理论水平和实验观测技术, 我国现阶段仍以统计模型为主, 其大都建于小区观测或人工降雨实验, 并用之预测某流域侵蚀量。但此思路并不适于王家桥流域, 其缺陷在于没有从侵蚀力学机制上考虑坡面侵蚀和流域侵蚀的区别。本文在参考前人研究成果及前人在王家桥流域所做的人工降雨实验<sup>[3]</sup>基础上, 从侵蚀力学机制出发, 建立了适合王家桥流域计算坡面侵蚀和流域侵蚀模数的土壤侵蚀模型。

### 2 基于人工降雨的坡面土壤侵蚀模型

#### 2.1 人工降雨试验区的基本概况

9个试验小区设在三峡库区湖北秭归农特产局柑橘良种繁育站红石崖分场, 海拔 200 m, 坡向西南, 其中 4 个用于研究不同坡度水土流失, 坡度分别为 20°, 25°, 30°, 35°, 土壤为在紫色沙页岩残积物上发育的紫色土, 厚度为 50~70 cm, 其母岩为侏罗系蓬莱镇组。另 5 个(坡度 25°)用于观测不同植物活篱笆水沙效益, 植物包括香根草、马桑、黄荆和新银合欢。

#### 2.2 坡面土壤流失模型的建立

目前国内坡面统计模型多为多因子幂指数乘积模型, 如江忠善等<sup>[2]</sup>的黄土地区坡面侵蚀模型。为得到王家

\* 收稿日期: 2002-10-23

基金项目: 长江工程科研项目《长江三峡库区典型小流域时空特征及其防治措施配置模式》资助

作者简介: 夏艳华, 男, 生于 1974 年, 硕士研究生, 主要从事土壤力学与土壤侵蚀关系研究。

桥流域坡面侵蚀模型,以王家桥流域人工降雨资料<sup>[3]</sup>为基础,采用了多种求降雨侵蚀因子的方法<sup>[4]</sup>,并对之依照幂函数和指数两种模式进行统计。比较发现降雨因子用  $R = PI_{30}$  采用指数和幂函数混合形式线性拟合最优。根据资料<sup>[3]</sup>知三峡库区坡地土壤侵蚀临界角为  $24^{\circ} \sim 29^{\circ}$ 。考虑该因素后得到裸地坡面侵蚀模型为:

$$M_{Op} = 412.135(\sin^{5.151} S) \cdot (\cos^{30.321} S) \cdot e^{5.950E-04PI_{30}} S^{0.880} \quad r = 0.928 \quad (1)$$

式中:  $M_{Op}$ ——坡面侵蚀模数 ( $t/km^2$ );  $S$ ——坡度 ( $^{\circ}$ );  $P$ ——次降雨量 ( $mm$ );  $I_{30}$ ——次降雨最大 30 min 雨强 ( $mm/h$ )

考虑植被、水土保持措施及土壤特性的影响,坡面土壤侵蚀模型为:

$$M_p = M_{Op} K_r CZ \quad (2)$$

式中:  $M_p$ ——土壤侵蚀模数 ( $t/km^2$ );  $M_{Op}$  由式 (1) 确定;  $K_r$ ——土壤可蚀性比率系数,无量纲;  $C$ ——植被影响系数,无量纲;  $Z$ ——水土保持措施因子,无量纲

### 2.3 坡面土壤侵蚀模型的应用

本文以 1999 年和 1996 年的次降雨资料,依据模型计算了红石岩 # 试验小区 1~4 小区 1999 年和 1996 年的年侵蚀模数,并与实测结果<sup>[3]</sup>加以比较 (见表 1),表明模型是可行的

## 3 基于人工降雨所建立的坡面侵蚀模型的局限性及其原因

### 3.1 坡面侵蚀模型的局限性

依据模型 (2) 本文计算了 1989 年、1993 年和 1996 年 3 年流域坡面年侵蚀模数,并与实测值加以对比 (见表 2),发现计算结果只占实测值 7.1% ~ 11.7%。这表明模型 (2) 不能预测流域侵蚀模数。

表 1 坡面侵蚀模型的计算结果与径流小区观测结果的比较  $t/km^2$

小区号	1999 年			1996 年			土地利用
	实测侵蚀模数	模型计算侵蚀模数	误差 (%)	实测侵蚀模数	模型计算侵蚀模数	误差 (%)	
1	54.08	66.69	23	324.82	433.60	8	荒坡
2	105.45	81.44	-23	602.11	524.06	-5	荒坡
3	27.18	56.69		217.84	368.56	8	荒坡
4	41.68	24.36	-10	147.63	158.41	5	荒坡

### 3.2 坡面侵蚀与流域侵蚀的侵蚀力学机制

既然坡面侵蚀只占流域侵蚀的 7.1% ~ 11.7%,那么流域内侵蚀来源于何处? 为了说明问题,我们对王家桥的资料加以整理、分析 (表 3) 从表中可以得到如下几点认识:

表 2 模型计算的流域侵蚀模数与流域实测侵蚀模数的比较

年 份	1989	1993	1996
流域实测侵蚀模数 ( $t/km^2$ )	1276	442	1714
模型计算侵蚀模数 ( $t/km^2$ )	90.5822599	33.00551247	202.058368
计算值与实测值的百分比 (%)	7.1	7.5	11.7

(1) 侵蚀雨量越大,  $\lambda$  越小。如 1989 年侵蚀雨量 1023.7 mm, 3~4 小区  $\lambda$  分别为 6.7194, 16.865; 1999 年侵蚀雨量 327.4 mm, 仅为 1989 年的 31.98%, 而  $\lambda$  分别为 28.548, 161.69, 是 1989 年的 4.2 倍和 9.59 倍。(2) 一日降雨量越大,  $\lambda$  越小。如 1999 年一日降雨量 165.3 mm, 3~4 小区  $\lambda$  分别为 1.46683, 10.2002; 1996 年一日降雨量为 63.1 mm, 而  $\lambda$  分别为 28.548, 161.69, 是 1999 年的 19.4 倍和 15.85 倍。(3) 连续降雨时间越长,  $\lambda$  越小。(4) 雨强越大,  $\lambda$  越小

表 3 不同年份流域以及典型小区基本情况

年 份	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
流域侵蚀模数 ( $t/km^2$ )	1276	611	2487	276	422	287	206	1714	599
2 小区侵蚀模数 ( $t/km^2$ )					105.45	87.47	367.32	602.1	188.46
3 小区侵蚀模数 ( $t/km^2$ )	85.74	46.91	36.48	23.06	23.4	41.69	287.77	195.2	171
4 小区侵蚀模数 ( $t/km^2$ )	215.2	331.6	253.68	46.5	43.01	288.7	14.71	369.2	968.55
侵蚀雨量 (mm)	1023.7	628	677.5	508.8	577.5	572.3	245806.6	327.4	
一日最大降雨量 (mm)	151	144.9	165.3	94.1	125.8	125.8	53.8	72.5	63.1
最长连续降雨天数 (d)	10	6	6	10	10	7	7	9	8
降水量 (mm)	33.4	144.9	165.3	61.2	37.6	70.8	33.7	137.5	139
30min 降雨量 (mm)	19	43.9	25.2	34.4	19.4	35.8	19	13	25.1
小区侵蚀模数 2 小区					24.988	30.48	178.31	35.13	31.462
占流域侵蚀模数 3 小区	6.7194	7.678	1.4668	8.3551	5.545	14.53	139.69	11.39	28.548
数百分比 $\lambda$ (%) 4 小区	16.865	54.27	10.200	16.848	10.192	100.6	7.1408	21.54	161.69

究其原因在于坡面侵蚀与流域侵蚀力学机制不同。坡面侵蚀以细沟侵蚀为主<sup>[5]</sup>,人工降雨实验在历时较长、雨强较大时也是如此,因而模型 (2) 适用于坡面侵蚀;流域侵蚀包括片蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀、崩塌、滑坡、泥石流等<sup>[6]</sup>,模型 (2) 不适合。

沟蚀须具备 2 个条件<sup>[7]</sup>。一是股流;二是侵蚀沟。侵蚀沟的形成主要取决于股流冲刷力及土壤抵抗力。流域内侵蚀沟一旦形成,就不会在下一场降雨时自然消失,因此一旦流域内存在侵蚀沟,小雨强、缓坡也会产生沟

蚀。研究表明<sup>[8]</sup>,王家桥流域为蓄满产流,径流一旦产生就顺坡而下汇集股,又流域内本身存在许多沟壑,因此无论雨强大小只要径流形成就会产生沟蚀。泻溜、崩塌、滑坡、泥石流等属于重力侵蚀范畴,当土体自重大于维持其稳定的抗剪强度时重力侵蚀发生。研究还表明王家桥流域土壤具有良好渗透性能<sup>[8]</sup>,土体含水量直接受降雨量多寡的影响,而抗剪强度指标内摩擦角和粘聚力随含水量的增加迅速减小<sup>[9]</sup>,导致土体抗剪强度下降,此为发生重力侵蚀原因之一。原因之二是流水对边坡和沟道冲刷切割导致土体失稳。流水速度越大冲刷切割作用越剧烈。对某一流域来说,雨量、雨强愈大,冲刷切割作用越剧烈,重力侵蚀也随之加剧。原因之三是壤中流从土壤大孔隙中携带走细小颗粒,从而导致土体粘聚力降低。降雨因子是以上诸原因的决定性因素,模型中只对其加以考虑。

经以上分析不难理解上述 4 点认识。次降雨量、雨强越大,连续降雨时间越长,沟蚀、崩塌、滑坡、泥石流等发生的几率越大,强度越剧烈,且侵蚀量较之坡面侵蚀要大得多。

## 4 流域侵蚀模型的建立

### 4.1 坡面侵蚀与流域侵蚀的区别

上述表明流域侵蚀与坡面侵蚀完全不同,为此本文根据侵蚀机制作如下区分:坡面侵蚀模数:是指当坡面上只存在片蚀、细沟侵蚀且以细沟侵蚀为主时,一次降雨坡面侵蚀量与坡面面积的比值。流域侵蚀模数:本文指以地块为单位,流域侵蚀包括片蚀、细沟侵蚀、沟蚀、崩塌、滑坡、泥石流等,这些侵蚀方式除片蚀、细沟侵蚀外,不一定都发生在坡面上,但究其物质来源,其侵蚀物质最终来源于坡面,因此将侵蚀物质溯源于坡面之上是合乎逻辑的。流域侵蚀模数定义为坡面贡献于流域的侵蚀量与坡面面积的比值。

### 4.2 流域侵蚀模型的建立

从侵蚀力学机制来考虑,流域侵蚀模数由 2 部分组成:一部分来源于面蚀  $M_{OP}$ ;另一部分  $M_{OG}$  来源于沟蚀、崩塌、滑坡、泥石流等:

$$M_{OL} = M_{OP} + M_{OG} \quad (3)$$

$M_{OG}$  产生在时间和空间上具有较大的随机性,要从力学机理上作定量分析,目前还存在较大难度,但建立  $M_{OG}$  的统计模型是可能的。因为陡坡坡面发生沟蚀、崩塌、滑坡、泥石流等可能性较之缓坡大,也许某次降雨中缓坡发生了这些侵蚀中的一种或数种而陡坡没有,但这并不改变陡坡可能性大这一事实。

实测资料表明,流域侵蚀主要来源于次大暴雨(表 4 表 5),各年 3 次降雨侵蚀模数之和占全年 73.82%~88.69%,这表明流域内侵蚀主要来源于沟蚀及部分重力侵蚀。

分析表明侵蚀模数  $M_{OG}$  与降雨侵蚀因子  $R = PI^{30}$  相关性好,相关系数  $r = 0.905$  坡度因子借用坡面侵蚀模型表达式,得到  $M_{OG}$  的表达式:

$$M_{OG} = 0.976 e^{6.401E-04PI^{30}} S^{0.880} \quad r = 0.929 \quad (4)$$

考虑植被及不同土壤特性的影响,流域土壤侵蚀模型为:

$$M_L = M_{OP} K_r C Z + M_{OG} K_r C \quad (5)$$

式中:  $Z$ —梯田因子,从侵蚀力学机制角度考虑,  $M_{OG}$  不考虑梯田因子的作用。

### 4.3 流域侵蚀模数模型的检验

模型检验结果见表(6),结果说明模型是可行的。

## 5 结 语

通过对王家桥流域资料的整理,研究,从侵蚀力学机制出发,建立了坡面和流域侵蚀模数的土壤侵蚀模型

(1)无论是依据人工降雨实验成果还是径流小区观测成果所建立的模型都只能预测坡面侵蚀,而不能用于预测流域侵蚀,究其原因是由其侵蚀力学机制不同所决定的

(2)流域坡面侵蚀只占流域侵蚀的 7.1%~11.7%,流域侵蚀物质主要来源于沟蚀和部分重力侵蚀。

(3)由于流域水土流失规律的特殊性,如何进行水土保持工作是一个亟待解决的问题

下转第 17 页

表 4 各年最大 3 次暴雨的次降雨侵蚀模数

年份	降雨量 (mm)	最大 30min 雨强 (mm/h)	侵蚀模数 (t/km <sup>2</sup> )
1989	150.9545	29.4	835.0144
	122.614	23.22	85.492
	94.85786	12.6	49.8916
1993	128.6935	19.2	137.5371
	74.698	8.52	16.92418
	64.389	37.14	171.8098
1996	142.158	14.22	71.3024
	140.6874	19.32	141.9192
	101.1038	71.58	1306.925

表 5 3 次暴雨侵蚀模数之和与流域年侵蚀模数

年 份	1989	1993	1996
流域侵蚀模数 (t/km <sup>2</sup> )	1276	442	1714
3 次降雨之和 (t/km <sup>2</sup> )	970.398	326.271	1520.147
百分比 (%)	76.05	73.817	88.69

表 6 模型计算流域年侵蚀模数与实测年侵蚀模数比较

年 份	1989	1993	1996
模型计算值 (t/km <sup>2</sup> )	1279.093	406.7816	2245.954
实测值 (t/km <sup>2</sup> )	1276	442	1714
误差百分比 (%)	0.242367	-7.96796	31.03583

物量与其蒸腾量之间的关系,调查了这两种草本植物的生物量,结果表明:盆栽 2 年生芨芨草单株的生物量为 40.66 g,比长芒草高出 23.07%,其中地上部分为 15.09 g,比后者高出 24.92%。这说明芨芨草的生长要比长芒草快(两种牧草都为 2 年生),而且前者植株的个体和生物量也较大,因此它正常生长所需的蒸腾耗水量比后者要高,这就解释了为什么在 10 月 8 日~ 12 日期间芨芨草要大于长芒草的原因。那么为什么在 10 月 22~ 25 日期间前者要略小呢?这是因为在后一阶段,这两种植物全部进入休眠阶段,基本上没有蒸腾作用,它们的蒸散量全部由裸间土壤水分的蒸发而决定,由于芨芨草较后者形体高大,不仅有遮阴的作用,而且也对地面水分蒸发的水汽扩散也构成了一定程度的阻碍,因此表现出长芒草这一阶段的蒸散量略高一筹的局面。

### 3.4 牧草蒸散量与土壤含水量的关系

从图 1 可以明显发现,随着土壤含水量的减少,以上 3 种植物的蒸散量明显降低了。由此可以认为,同干旱半干旱地区绝大多数的植物一样,土壤水分含量是决定它们蒸散量大小的限制因子。为了找出二者之间的相关关系以便建立起相应的预测模型,应用 SPSS 统计软件进行了线性和多种曲线拟合,结果见表 1。由表 1 可知,方程①~⑥的确定系数( $r^2$ )都很高,而且经方差检验说明它们的回归关系显著,也就是说两个变量之间确实存在线性关系,以上所建方程全部成立。

## 4 结果与讨论

植物的蒸散量是由植物的蒸腾量和裸间土壤蒸发量共同决定的结果,从本质上看它是一个生理过程和物理过程的耦合系统,因此对它的研究是十分复杂的。由于植物的蒸散是植物水分收支平衡的主要组成部分,同时它又与生态系统的物质循环和能量流动紧密相关,因此对它的研究又是十分重要的。

本文利用盆栽试验,比较了宁夏南部地区 3 种常见的草本植物,得出了苜蓿蒸散量 > 芨芨草 > 长芒草的结论,然而由于研究是在人工控制条件下进行的,其观测数据如蒸散量和生物量与野外实地测定还有一定差异,因而不能作为这种草本植物蒸散的绝对量而只是参考值。尽管如此,本研究结果仍然具有科研价值和生产指导意义,尤其是近年来对于苜蓿草的盲目大面积推广已经在某些地区带来了不良的后果。因此,在生产实践中不要只考虑其产量高、草质好的优点,更应该从它的生物学特性出发,采取隔带种植等科学经营和管理的方法,从而达到牧草高产、优产和稳产的目的。

表 1 3 种草本植物蒸散量与土壤含水量回归模型

植物名	序号	回归模型	确定系数
苜蓿	①	$Y = 0.787141 + 0.209699X$	$r^2 = 0.85243$
	②	$Y = 1.798690e^{0.050654X}$	$r^2 = 0.88436$
芨芨草	③	$Y = -0.245071 + 0.217217X$	$r^2 = 0.85495$
	④	$Y = 3.449157 - 0.291649X + 0.016408X^2$	$r^2 = 0.89554$
长芒草	⑤	$Y = 1.080272 + 0.110493X$	$r^2 = 0.94720$
	⑥	$Y = 1.664379 + 0.026907X + 0.002687X^2$	$r^2 = 0.95106$

注:表中  $Y$  为日蒸散量; $X$  为土壤含水量。

### 参考文献:

- [1] 宋炳煜. 草原区不同植物群落蒸发蒸腾的研究 [J]. 植物生态学报, 1995(4): 319- 328.
- [2] 程积民. 黄土丘陵半干旱区几种牧草蒸腾作用的研究 [J]. 干旱区研究, 1989(2): 62- 65.
- [3] 杨文治, 邵明安, 等. 黄土高原土壤水分研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 程积民. 长芒草草地在封育条件下群落结构和生物量变化的研究 [J]. 草业科学, 1993(2): 48- 52.
- [5] 程积民. 优良水土保持植物——芨芨草 [J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 117.
- [6] 彭祥林, 贾恒义, 等. 黄土高原草地土壤生态 [M]. 西安: 世界图书出版公司, 1997.

上接第 15 页

### 参考文献:

- [1] 杨勤科, 李锐. 论矢量 GIS 的基本信息元及其应用 [J]. 水土保持学报, 1998(1): 66- 70.
- [2] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化的定量研究 [J]. 水土保持学报, 1996(1): 1- 9.
- [3] 王万忠, 等. 中国降雨侵蚀力  $R$  值的计算与分布 (1) [J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 5- 18.
- [4] 杨明义, 田均良. 坡面侵蚀过程定量研究的进展 [J]. 地球科学进展, 2000, 15(6).
- [5] 杜榕恒, 等. 长江三峡库区水土流失对生态与环境的影响 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [6] 关君蔚. 水土保持原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.