

# 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀能力的土壤力学模型<sup>①</sup>

王芝芳<sup>②</sup> 杨亚川 赵作善 邓健 廖植樨 刘军凤

(水利与土木工程学院) (基础科学部) (水利与土木工程学院) (基础科学部)

**摘要** 提出用渗水模数、径流模数和泥沙模数这3个指标来衡量土壤-草本植被根系复合体的抗水蚀能力。通过人工模拟降雨试验,分别建立了渗水模数、径流模数和泥沙模数与地面坡度、降雨强度、复合体渗透系数或抗水蚀强度之间的相关方程式,即土壤-草本植被根系复合体抗水蚀能力的土壤力学模型。

**关键词** 土壤-根系复合体; 抗水蚀强度; 渗水模数; 径流模数; 泥沙模数

**中图分类号** S157.1

## Study on Soil Mechanical Mechanism in Anti-Water Erosion Ability of Soil-Root Composite

Wang Zhifang<sup>1)</sup> Yang Yachuan<sup>1)</sup> Zhao Zuoshan<sup>2)</sup>

Deng Jian<sup>1)</sup> Liao Zhixi<sup>1)</sup> Liu Junfeng<sup>2)</sup>

(1 College of Water Conservancy and Civil Engineering, CAU

2 Department of Basic Sciences)

**Abstract** The modulus of infiltration (MOI), modulus of runoff (MOR) and modulus of sediment (MOS) are introduced as the index for evaluating the anti-water erosion ability of the soil-root composite (SRC). The relationship of MOI, MOR and MOS with the ground slope, rainfall intensity, seepage coefficient and anti-water erosion strength of SRC are found out through the rainfall simulation experiment, which provides the scientific basis for evaluating the soil-water conservation efficiency.

**Key words** soil-root composite; anti-water erosion strength; modulus of infiltration; modulus of runoff; modulus of sediment

近50年来,国内外水土保持工作者对土壤侵蚀的机理及规律的研究着重于土壤溅蚀、沟蚀的机理研究和降雨产流、产沙规律的研究,但将土壤与根系作为一个整体,采用应用力学方法研究抗水蚀能力的则较少。文献[1]提出了将土壤与根系视为一体(土壤-根系复合体)的新

收稿日期:1995-09-15

①国家自然科学基金资助项目

②王芝芳,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)58信箱,100083

思路,分析了草本植被根系增强土壤抗水蚀效能的机理,并提出了表征草本植被根系保持水土效能的一个重要力学指标——土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度。笔者以上述试验研究为基础,通过对不同坡度及覆盖不同生物量的土槽进行人工降雨试验,探讨表征复合体抗水蚀能力的主要指标,并阐明这些指标与复合体的渗透系数  $K$  或抗水蚀强度  $p_t$ 、降雨强度  $I$  及地面坡度  $\theta$  等因素之间的定量关系,从而建立相应的回归方程式即土壤力学模型。

## 1 试验设计

### 1.1 试验方案

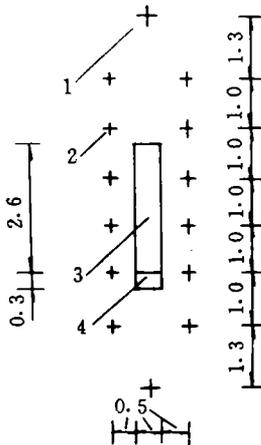
采用5个特制的土槽,模拟5种坡度进行人工降雨试验,测取不同工况下的土壤持水量、渗流水量、径流水量和泥沙量。由于影响这些物理量的主要因素有降雨强度  $I$ 、地面坡度  $\theta$ 、含根量  $m_r$ 、复合体的渗透系数  $K$ 、抗水蚀强度  $p_t$ 、土壤类型及植被状况等,因而采用正交试验法布置人工模拟降雨试验。3个因素及其5个水平见正交试验表(表1),试验工况见表2。

表1 正交试验因素与水平表

水 平	因 素		
	$I/\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	$m_r/\text{mgcm}^{-3}$	$\theta/(\circ)$
1	71.2	0	0
2	79.7	0.75	7.5
3	87.7	1.23	15.0
4	94.3	1.69	22.5
5	100.9	3.36	30.0

表2 人工降雨模拟试验工况

试 验 序 号	变 量 取 值		
	$m_r/\text{mgcm}^{-3}$	$I/\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	$\theta/(\circ)$
1	0	71.2	0
2	0	79.7	7.5
3	0	87.7	15.0
4	0	94.3	22.5
5	0	100.9	30.0
6	0.75	71.2	7.5
7	0.75	79.7	15.0
8	0.75	87.7	22.5
9	0.75	94.3	30.0
10	0.75	100.9	0
11	1.23	71.2	15.0
12	1.23	79.7	22.5
13	1.23	87.7	30.0
14	1.23	94.3	0
15	1.23	100.9	7.5
16	1.69	71.2	22.5
17	1.69	79.7	30.0
18	1.69	87.7	0
19	1.69	94.3	7.5
20	1.69	100.9	15.0
21	3.36	71.2	30.0
22	3.36	79.7	0
23	3.36	87.7	7.5
24	3.36	94.3	15.0
25	3.36	100.9	22.5



1. 降雨机; 2. 量雨筒; 3. 土槽; 4. 水箱

图1 降雨机布置图(单位为m)

### 1.2 试验装置

试验在原北京农业工程大学喷灌实验室外进行。试验装置由人工模拟降雨机与可模拟5种地面坡度的土槽组成。

人工模拟降雨装置由水泵、输水管、压力控制阀、压力表、竖直水管及喷头组成,试验时采用二机对喷,机中心距离为7.6 m,雨滴自由下落高度为6 m。降雨机中心设在土槽中心线的延长线上(见图1)。

试验土槽净宽0.5 m,高0.45 m,水平投影长度均为2.6 m,即受雨面积为1.3 m<sup>2</sup>,坡向东。土槽底层铺有厚度为10 cm的级配砾石,使土体排水通畅,并在土槽下端底部开有渗水出口,用短管引出槽外,用于采集渗水量。土槽下端设有专门收集径流的水箱。试验用土槽及布设如图2所示。



图2 试验土槽及布设图

### 1.3 试验条件

1)土壤 土槽内用土取自北京北部山区密云县石匣试验小区,土质为砾质轻壤土,其颗粒组成同文献[1]表2中试验地2。槽内土层厚24 cm,土壤干密度 $\rho_d=1.45 \text{ gcm}^{-3}$ 。

2)植被 槽内用人工播种法种植石匣试验小区有代表性的节节草。植物的生长密度用人工方法控制。

### 1.4 测试内容与方法

1)降雨强度 降雨历时1 h。每次降雨均在土槽两侧布置量雨筒(见图1),在静风条件下测取降雨强度。通过变换降雨机喷头的孔径及水压,得到5种降雨强度。

2)渗水量 由土槽下端底部引出的渗水管采集渗出水量,其累积值为实测渗流量。

3)径流量 在土槽下端处设有收集径流的水箱,采集在降雨过程中的地表径流,其累积值为实测径流量。

4)产沙量 将所采集的全部径流进行沉淀,取沉淀的泥沙进行烘干,其干质量为一次降雨的产沙量。

5)复合体含水量 用原样取土器取土,采用烘干法测定复合体的含水量。

6)复合体含根量  $m$  同文[1]。本试验采用5种含根量,其中含根量等于零的是裸地(CK),见

表4 土壤-草本植被根系复合体的含根量与相应的渗透系数  $K$  和抗水蚀强度  $\rho_t$

序号	$m/\text{mgcm}^{-3}$	$K/\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\rho_t/\text{kPa}$
1	0	3.0	0.60
2	0.75	9.0	2.04
3	1.23	10.0	2.96
4	1.69	12.5	3.76
5	3.36	18.0	7.88

说明:植被以节节草为主;表中为复合体处于饱和状态下的抗水蚀强度值。

表 4。

7) 复合体渗透系数  $K$  本试验中相应含根量的渗透系数见表 4。

8) 复合体的抗水蚀强度  $\rho_t$  同文[1], 在相应含根量下的复合体抗水蚀强度见表 4。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验结果

试验结果表明, 在土壤排水较通畅的条件下(即根系层下有透水层, 或根系层下土层很厚, 且其透水性较好等), 草本植被根系保持水土的效能主要表现在以下 3 个方面: 1) 渗水量增大, 其数值可占降雨量的 23%~49%; 2) 径流量减小, 在相同的降雨量、生物量及土壤等条件下, 根据水量平衡的原则, 降雨的渗水量增大, 则相应的径流量必然减小; 3) 泥沙量小, 在降雨强度为  $71.2 \sim 100.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 地面坡度为  $0^\circ \sim 30^\circ$  的情况下, 单位时间与单位土表面积的平均产沙量可减小到  $1.8 \sim 24.7 \text{ g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}$ , 其数值随生物量增多及坡度减缓而减小。

### 2.2 力学模型

根据上述试验结果, 笔者提出采用径流模数 ( $M/L(\text{m}^2\text{h})^{-1}$ )、渗水模数及泥沙模数作为表征草本植被根系增强土壤抗水蚀能力的主要指标。

#### 2.2.1 渗水模数和泥沙模数的物理意义

1) 渗水模数  $N/L(\text{m}^2\text{h})^{-1}$  由于降雨的入渗是从土表面开始的, 通过土表而下渗的降雨量, 一部分变为土壤持水量, 剩余部分即为土中的渗流量, 故将二者之和称为降雨渗水量。所谓渗水模数, 是指单位时间与单位土表面积上的平均降雨渗水量。

2) 泥沙模数  $W/\text{kg}(\text{m}^2\text{h})^{-1}$  指单位时间与单位土表面积的平均产沙量。

显然, 渗水模数  $N$  愈大, 径流模数  $M$  及泥沙模数  $W$  愈小, 根系增强土壤抗水蚀能力即保持水土的效能愈强。

#### 2.2.2 渗水模数 $N$ 与复合体渗透系数 $K$ 、降雨强度 $I$ 等因素的相关方程式

试验表明, 渗水模数  $N$  随复合体渗透系数  $K$  的增大而增大, 随地面坡度角  $\theta$  的增大而减小, 如图 3 所示。

土壤-草本植被根系复合体的渗透系数  $K$  愈大, 说明复合体透水性愈强。试验表明, 渗透系数随含根量增加而增大。这表明渗透系数  $K$  的数值大小, 反映了根系对土壤结构的改善即增强土壤透气透水性的能力与含根量的关系。

雨水在复合体中的渗透规律符合达西定律<sup>[2]</sup>, 即水的渗透速度  $v=Ki$ , 式中  $i$  为水力坡降, 可知渗透系数  $K$  增大, 则水的渗透速度也增大, 所以渗水模数随之增大。

地面坡度角  $\theta$  增大时, 相应的径流速度增大, 即径流沿程渗透减少; 同时, 坡度增大, 坡面水平投影面积即受雨面积减小, 复合体接纳降雨的能力随之降低, 于是入渗水量减小。

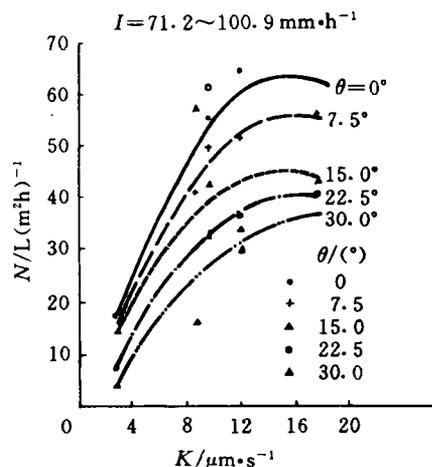


图 3 渗水模数  $N$  与渗透系数  $K$  和地面坡度角  $\theta$  的关系

渗水模数  $N$  的主要影响因素,除了复合体的渗透系数  $K$  和地面坡度  $b(=\tan\theta)$  以外,还有降雨强度  $I$ 。各因素对渗水模数的影响程度可用  $F$  值的大小来判别(表 5)。

表 5 渗流模数方差分析

变差来源	平方和	自由度	均方差	$F$ 值
$b$	0.001 296	4	0.000 324	8.165
$K$	0.004 981	4	0.001 245	31.376
$I$	0.000 998 8	4	0.000 249 7	6.293
误差	0.000 476 2	12	0.000 039 68	
总和	0.007 752	24		

由表 5 可知,渗透系数对渗水模数的影响最为显著,其次是坡度,再其次是降雨强度。

通过对试验数据进行数理分析,可得渗水模数  $N$  的回归方程式

$$N = 1.4K - 0.0036b + 0.3I - 151.2K^3 - 30.9I^3 \quad (1)$$

式中  $I$  和  $K$  的单位为  $m \cdot h^{-1}$ ,下同。

方程式的全相关系数  $r = 0.901$ 。

由于降雨渗水中一部分变成了土壤持水,另一部分为土中渗流,用以补给地下水;因此,渗水量的增大也是根系的一种保水效能。渗水量增大的原因,主要是根系的作用,根系一方面使土壤的透水性即复合体的渗透系数增大,接纳雨水的的能力增强;另一方面根与茎在其连接处形成微型拦土栅阻止土粒搬运,使土粒在根茎连接处沉积而形成许多微型滤水土体,这些滤水土体就像一个个微型土坝一样,分别在其所在位置拦住径流去向,使其流速减缓,地面滞水量增大,从而使径流沿程渗透水量增大。上述两方面,都与复合体渗透系数密切相关,因此可用方程(1)作为表征草本植被根系保水效能的土壤力学方程,它反映了降雨渗水量与含根量或生物量的变化关系,为评估草本植被根系的保水效能提供了具体指标。目前,我国北方很多地区地下水位逐年下降,给工农业生产造成了许多不利的影 响。方程(1)表明,根系较丰富的草本植物可以增大降雨渗水量,用以补充地下水;同时,降雨渗水量增大,相应的径流水量减小,从而也可减轻防洪负担。

2.2.3 径流模数  $M$  与复合体的渗透系数  $K$ 、降雨强度  $I$  等因素的相关方程式

根据水量平衡原则,降雨渗水量增大,则相应的径流水量必然减小,因此径流模数与渗水模数相反,随渗透系数增大而减小,随坡度增加而增大,如图 4 所示。

从上可知径流模数  $M$  也是复合体渗透系数、地面坡度、降雨强度的函数。通过方差分析,可确定  $K, b, I$  三因素对径流模数  $M$  的影响程度。由表 6 可见,复合体渗透系数对径流模数的影响最大,其次是降雨强度和地面坡度。

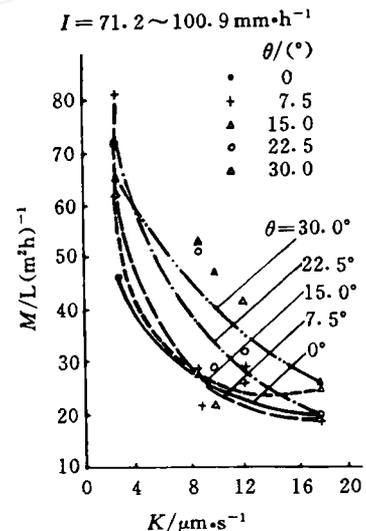


图 4 径流模数  $M$  与渗透系数  $K$  和地面坡度角  $\theta$  的关系

表6 径流模数方差分析

变差来源	平方和	自由度	均方差	F 值
<i>b</i>	0.000 656 85	4	0.000 164 2	2.496
<i>K</i>	0.005 748 5	4	0.001 437	21.850
<i>I</i>	0.000 722 75	4	0.000 180 7	2.747
误差	0.000 789 40	12	0.000 065 78	
总和	0.007 917 5	24		

对测试数据进行数理分析而建立的径流模数回归方程式为

$$M = 0.07 + 0.01b - 2.08K + 16.86K^2 + 1.03I^2 \quad (2)$$

方程式的全相关系数  $r = 0.905$ 。

#### 2.2.4 泥沙模数 $W$ 与复合体抗水蚀强度 $p_t$ 和降雨强度 $I$ 等因素的相关方程式

泥沙模数随抗水蚀强度  $p_t$  的增大而减小,随地面坡度的增大而增大,如图5所示。

抗水蚀强度增大,说明复合体抗水蚀能力增强。试验表明,抗水蚀强度  $p_t$  随含根量增大而增大,因此抗水蚀强度反映了草本植被根系增强土壤抗水蚀能力与含根量或生物量的变化关系。抗水蚀强度增大,相应的生物量增多,根茎连接处形成的微型滤水土体抵抗径流推移破坏的能力随之增强,或者说根茎连接处形成的微型滤水土体阻止土粒搬运的能力增强,所以,泥沙模数减小。

泥沙模数随坡度增大而增大,这是因为坡度增大则径流速度相应增加,即土粒搬运力增大,所以泥沙模数增加;但当抗水蚀强度增大到一定数值时,坡度变化对泥沙模数影响甚微。从图5中可见,不同坡度下的  $W$  都先后随  $p_t$  的增大而趋于零。这是由于抗水蚀强度增大到一定数值时,相应的生物量也增加到相当大,这时根茎连接处的微型滤水土体已具有足够的稳定安全系数和克服土粒搬运的能力,因此,即使降雨强度增大,坡度增大,径流夹带的土粒也难以运走,所以泥沙模数都趋于零。

通过方差分析(表7)可见,复合体抗水蚀强度对  $W$  的影响最大,地面坡度和降雨强度的影响程度较小。

将试验数据进行数理分析,可建立泥沙模数  $W$  的回归方程式

$$W = 0.68I + 0.77b - 2.03b^2 + 2.44b^3 + 0.17p_t^{-2} - 19.83 \quad (3)$$

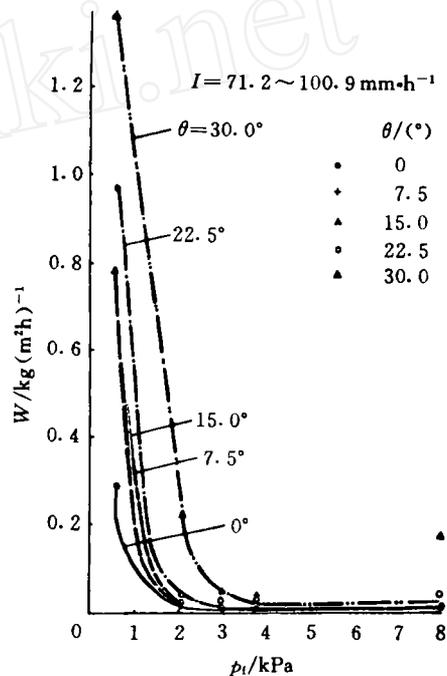


图5 泥沙模数  $W$  与抗水蚀强度  $p_t$  和地面坡度角  $\theta$  的关系

表 7 泥沙模数方差分析表

变差来源	平方和	自由度	均方差	F 值
$b$	0.057 678 769 8	4	0.014 419 692 45	2.71
$p_i$	0.848 788 056 5	4	0.210 719 701 4	39.604 7
$I$	0.035 217 743 6	4	0.008 044 359	1.512
误差	0.064 224 681	12	0.005 320 567 5	
总和	1	24		

式(1),(2)与(3)联立,即为土壤排水较通畅条件下抗水蚀能力的土壤力学方程式,它反映了复合体抗水蚀能力与含根量或生物量之间的定量关系,并概括了各主要因素对复合体抗水蚀能力的影响,计算简单,使用方便。它的建立为草本植被根系保持水土效能的评估提供了科学的指标。

### 3 结 论

1)提出用渗水模数、径流模数、泥沙模数这 3 个模数作为表征土壤-草本植被根系复合体抗水蚀能力的主要指标,并分别建立了这 3 个模数与复合体渗透系数或抗水蚀强度、地面坡度、降雨强度之间的相关方程式,即草本植被根系保持水土效能的土壤力学方程式。这组方程的建立为草本植被根系保持水土效能的评估及进一步研究提供了新途径。

2)试验研究表明,根系对土壤-根系复合体的保水固土效能起着重要作用,含根量的增加使渗水模数随之提高,使径流模数和泥沙模数随之下降,但含根量增大到某一限值时,复合体抗水蚀效能的变化很小,并趋于稳定。如何确定这一含根量的限值,还有待进一步深入研究。

### 参 考 文 献

- 1 杨亚川,莫永京,王芝芳,等.土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究.中国农业大学学报,1996,1(2):31~38
- 2 山西省水土保持科学研究所,中国科学院国家计划委员会地理研究所,加拿大多伦多大学地理系.晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究.北京:科学出版社,1992.24