

# 黄土坡面径流输沙过程试验研究

赵海滨<sup>1,2</sup>, 曹京京<sup>1,2</sup>, 姚文艺<sup>3</sup>, 申震洲<sup>3</sup>

(1. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475003;

2 小流域水利河南省高校工程技术研究中心, 河南 开封 475003; 3. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

**摘 要:** 为了建立合理的土壤侵蚀评价和预报模型, 基于泥沙运动理论, 通过室内径流冲刷模拟试验, 以黄土坡面为研究对象, 研究了坡面径流输沙过程, 推导了坡面径流输沙率理论公式。研究表明, 不同坡度、流量组合条件下, 坡面平均流速和不同时段的生产比随冲刷历时的变化具有相同的变化趋势; 坡度对流速和坡面产沙比的阶段性影响相反; 坡面侵蚀输沙变化规律受制于流量和坡度之间的相互对比情况, 坡度越陡, 坡面流达到侵蚀平衡时刻越早; 通过试验数据验证输沙率公式, 相关系数为  $R^2 = 0.799\ 3$ 。

**关键词:** 黄土坡面; 坡面流; 径流冲刷; 侵蚀平衡; 输沙过程

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2014)01-0090-05

## Experimental Study on Process of Sediment Transport and Overland Flow on the Loess Slope

ZHAO Hai-bin<sup>1,2</sup>, CAO Jing-jing<sup>1,2</sup>, YAO Wen-yi<sup>3</sup>, SHEN Zhen-zhou<sup>3</sup>

(1. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng, He'nan 475003, China;

2. He'nan Higher Education Engineering Research Center of Water Conservancy for Small Watershed,

Kaifeng, He'nan 475003, China; 3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** In order to establish mathematical model for assessing and predicting the development trend of soil erosion, based on the theory of sediment movement, the processes of sediment transport was studied by the scouring experiment on loess slope, and then the theoretical formula of sediment transport was derived. The results show that there is the same trend between average velocity and proportion of sediment yield with scouring time at different combinations of discharge and slope. The slope has an opposite influence on runoff velocity and sediment production in different durations. The rule of sediment transport is restricted to the interaction of flow and slope. The slope becomes steeper; the movement of erosion equilibrium comes much earlier. The formula of sediment transport is verified by experimental date, and then correlation coefficient is 0.799 3.

**Key words:** loess slop; overland flow; runoff scouring; erosion equilibrium; process of sediment transport

我国黄土高原地区是世界上水土流失最为严重的地区之一, 土壤侵蚀所造成的环境问题已经成为制约当地经济和社会发展的关键因素。为改善人类生存环境, 建设和谐社会, 防止土壤侵蚀, 控制水土流失已是当务之急, 为此必须对水土流失作出合理的评价和预报。近几十年来, 随着社会的需求以及人们对侵蚀机理研究的不断深入, 土壤侵蚀预报研究也由早期的因子相关分析发展到基于侵蚀物理发生过程, 过程预报模型已经成为目前研究土壤侵蚀问题最有效的

方法之一, 其中坡面径流输沙物理过程研究是预报模型研究的重要内容。坡面侵蚀产沙过程包含了分离土壤、泥沙输移和泥沙沉积 3 个子过程, 这 3 个过程相互影响、相互制约、相互联系。国内外众多学者对其进行了大量研究: 流速是影响坡面径流输沙过程重要的水动力学指标, 姚文艺<sup>[1]</sup>、Abrahams<sup>[2]</sup>、Yoon<sup>[3]</sup>、吴长文<sup>[4]</sup>、江忠善<sup>[5]</sup>、吴普特<sup>[6]</sup>等研究了坡面流阻力规律, 建立了坡面流速表达式, 为研究坡面径流输沙奠定了一定的基础; 张科利<sup>[7]</sup>、李占斌<sup>[8]</sup>、李

鹏<sup>[9]</sup>、雷廷武<sup>[10]</sup>、Nearing<sup>[11]</sup>、Gover<sup>[12]</sup> 等对坡面径流侵蚀产沙动力过程及泥沙输移特征开展了试验研究,从不同方面分析影响坡面径流输沙的因素。这些研究中关于坡面流水动力特性及泥沙输移特征的平均统计规律研究较多,而对其发生过程的研究还相对较少,因此进一步基于土壤侵蚀输沙过程出发,研究坡面径流输沙特性对于建立和评价土壤侵蚀预报模型具有十分重要的意义。本文利用室内放水冲刷模拟试验,分析研究坡面径流流速和侵蚀产沙量随冲刷历时的变化规律,推导坡面径流输沙率的理论公式,为建立合理的坡面侵蚀产沙模型提供参考。

## 1 试验装置及方案

### 1.1 试验装置

径流冲刷试验在黄河水利科学研究院“模型黄河”试验基地进行。试验装置由变坡土槽和供水系统组成。试验土槽长 5 m,宽 3 m,深 0.6 m,土槽底部为 5 mm 钢板。试验时用 PVC 隔板将土槽分成 3 个长 5 m,宽 1 m 相同大小的试验小区,在相同边界条件下进行 3 次重复试验,最后将试验结果进行相互比较以减少试验误差。土槽坡度用液压千斤顶调节,可调节坡度范围在 5°~45°之间。试验采用循环供水系统,用水泵从蓄水池内抽水至槽上方的恒压水箱,多余的水通过回流管道回到蓄水池内。恒压水箱流量可

通过阀门控制,调节范围在 0~15 L/min 之间。试验装置如图 1 所示。

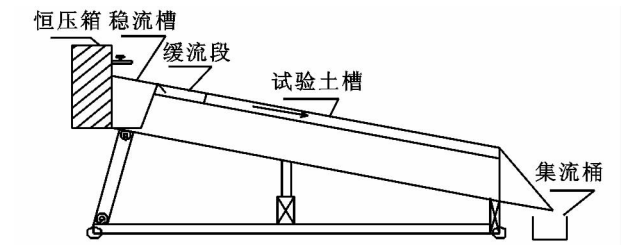


图 1 试验装置示意图

### 1.2 试验方案

本次试验采用 3 级坡度:10°,20°,30°,7 个流量:1.0,2.0,3.0,4.0,5.0,7.5,10 L/min。试验用土为采自郑州邙山附近的表层黄土,其颗粒组成如表 1 所示,土壤干容重控制在 1.3 g/cm<sup>3</sup> 左右。放水开始后记录产流时刻,同时在试验小区出口处用水桶接样,每 2 min 换一次桶,试验持续时间约为 40 min。沿水槽纵向将小区坡面分为 5 个断面,每部分面积为 1 m×1 m,用颜料示踪法测相临两断面间流速,每 2 min 沿坡面从上到下测 2~3 次,同时用钢尺测量各断面水流宽度和水深。试验中用 20 ml 的医用针管沿程每隔 1 m 取 1 次断面含沙量,根据坡面产流产沙的具体情况共取 4~10 次。每种工况试验基本上重复做 3 次,分析数据时选取其中比较接近的两场试验的平均值。

表 1 供试土样各级粒径组成

粒径/mm	>1.0	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001
比例/%	0	1.05	35.45	43.4	3.2	6.4	10.5

## 2 理论分析

坡面上的土粒之间具有粘聚力,径流要分离挟带土粒必须首先克服土粒之间的相互作用力,当坡面泥沙恰好开始运动时坡面流速为临界流速。由于坡面径流水深较浅、坡度陡,因此坡面流临界流速与河流有所不同。设坡面径流水深为  $h$ ;坡度为  $\theta$ ;土壤颗粒之间的粘聚力为  $N$ ;水流对沙粒的上举力为  $F_L$ ;拖曳力为  $F_D$ ;颗粒的粒径为  $d$ ;颗粒的水下浮重为  $W$ ,按颗粒转动平衡考虑,以  $O$  为转动中心,可写成动力平衡关系式如下:

$$K_1 d F_D + K_2 d F_L = K_3 d W \cos \theta + K_4 d N \tag{1}$$

其中,各力的具体表达式为:

$$F_D = C_D \alpha_1 d^2 \gamma \frac{u_b^2}{2g}$$

$$F_L = C_L \alpha_2 d^2 \gamma \frac{u_b^2}{2g}$$

$$W = \alpha_3 (\gamma_s - \gamma) d^3$$

式中: $C_D, C_L$ ——拖曳力系数和上举力系数; $u_b$ ——坡面流的代表流速; $\gamma_s, \gamma$ ——土壤颗粒和水容重; $K_1 d, K_2 d, K_3 d, K_4 d$ —— $F_D, F_L, W, N$  的相应力臂; $\alpha_1, \alpha_2$ ——泥沙的面积系数; $\alpha_3$ ——泥沙的体积系数。

将粘结力  $N$  分为两部分:一是由水对床面颗粒的下压力  $N_1$ ,二是颗粒之间的分子粘结力  $N_2$ ,其具体表达式为

$$N_1 = \varphi \gamma h \frac{\pi}{2} d \delta$$

$$N_2 = \varphi \frac{\pi}{2} d \xi$$

式中: $\varphi$ ——考虑起动条件下,与静力滑动相比,粘结力应有所减小的修正系数; $\delta$ ——与沙粒缝隙大小有关的特征厚度; $\xi$ ——粘结力参数,量纲为(M<sup>3</sup>/T<sup>2</sup>)。

由于粘结力被分为两部分,所以动力平衡方程改为:

$$K_1 d F_D + K_2 d F_L = K_3 d W \cos \theta + K_4 d N_1 + K_5 d N_2 \tag{2}$$

另外上述公式中的  $u_b$  为水流的瞬时流速,按照 宴国仁<sup>[13]</sup> 的处理方法流速近似的服从正态分布,取 出现概率为 2.28% 的少量运动状态作为临界起动状 态,求得瞬时作用流速与时均作用流速的关系式为:

$$u_b = \overline{u_b} + 2\sigma_{u_b} = \overline{u_b} + 2(0.37 \overline{u_b}) = 1.74 \overline{u_b} \quad (3)$$

将上述各式代入方程(2)得

$$\overline{u_b} = \overline{u_b} = \frac{1}{1.74} \left( \frac{2K_3 a_3}{K_1 C_D a_1 + K_2 C_L a_2} \right)^{1/2} \left[ \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d \cos \theta + \frac{K_4 \varphi}{K_3 a_3} \left( \frac{g h \delta + \xi_k}{d} \right)^{1/2} \right] \quad (4)$$

取  $C_D = 0.4, C_L = 0.1$ , 并将泥沙颗粒看成椭球体,取 其三轴与同体积球体直径之比分别为  $4/3, 3/3, 2/3$ , 据此,取  $a_1 = \frac{2\pi}{9}, a_2 = \frac{\pi}{3}, a_3 = \frac{\pi}{6}, K_1 = \frac{1}{3}, K_2 = \frac{1}{2},$

$$K_3 = K_4 = \frac{1}{2}, \varphi = \frac{1}{16}$$

将有关各值代入式(4)中得:

$$\overline{u_b} = 1.09 \left[ \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d \cos \theta + 0.19 \left( \frac{g h \delta + \xi_k}{d} \right)^{1/2} \right] \quad (5)$$

为将坡面作用流速转化为垂线平均流速,使用如 下的对数流速分布公式:

$$\frac{u}{U_*} = 5.75 \lg \left( \frac{30.2 y \chi}{K_s} \right) \quad (6)$$

式中:  $U_*$ ——摩阻流速;  $K_s$ ——床面糙度,取  $d$ ;  $\chi$ ——校正参变数。将流速  $u$  沿垂线积分,可求得垂 线平均流速为:

$$\frac{U}{U_*} = 5.75 \lg \left( 11 \frac{h}{K_s} \chi \right) \quad (7)$$

和上式对比,可得:

$$u = \frac{\lg(30.2 \frac{y}{K_s} \chi)}{\lg(11 \frac{h}{K_s} \chi)} \quad (8)$$

取作用点的特征高度  $y = K_s$ , 并设绕流为粗糙 区,  $\chi = 1$ , 求得:

$$u = \frac{1.48}{\lg(11 \frac{h}{K_s})} U \quad (9)$$

代入式(5),得:

$$U_c = 0.32 \lg \left( 11 \frac{h}{K_s} \right) \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d \cos \theta + 0.19 \left( \frac{g h \delta + \xi_k}{d} \right)^{1/2} \right) \quad (10)$$

式中,  $\delta$  取  $0.213 \times 10^{-4} \text{ cm}$ ;  $\xi_k$  取  $2.56 \text{ cm}^3/\text{s}^2$ 。

坡面侵蚀的强弱取决于水流强度和泥沙起动时 水流流速的对比情况,即和水流的有效功率成正比, 因此坡面径流输沙率可以用下式表示:

$$G_s = k \frac{\gamma_s}{(\gamma_s - \gamma)} g \tau (U - U_c) \quad (11)$$

式中:  $G_s$ ——坡面径流输沙率  $[\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m})]$ ;  $\tau$ ——水 流切应力  $(\text{N}/\text{m}^2)$ ;  $U$ ——水流流速  $(\text{m}/\text{s})$ ;  $g$ ——重 力加速度  $(\text{N}/\text{kg})$ ;  $U_c$ ——泥沙起动流速  $(\text{m}/\text{s})$ ;  $k$ —— 无量纲系数。

3 结果与分析

3.1 坡面流平均流速随时间的变化过程

流速是表征坡面流水动力特性的一个重要物理 量,对水流剥蚀土壤和携带泥沙的能力有重要影响, 是建立坡面侵蚀过程模型的基础。以往关于坡面流 流速变化规律的研究多以整个坡面为研究对象,所研 究的流速为整个坡面、整个试验过程的平均流速,且 多为定床、小坡度试验研究,无法反映出流速在不同 侵蚀形态下的持续变化过程。本试验研究了不同坡 度、流量组合下,不同时段坡面流平均流速随时间的 变化规律(图 2)。

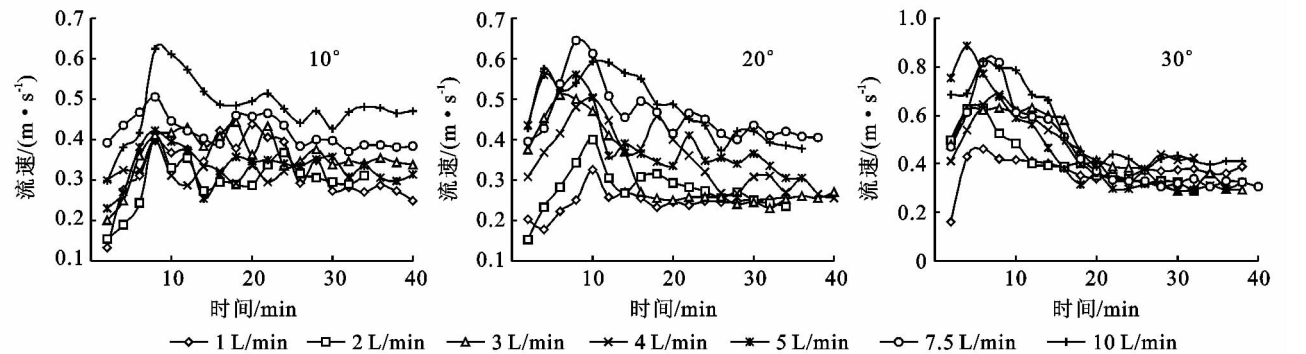


图 2 不同坡面平均流速随放水冲刷时间的变化过程

从图 2 可以发现:(1) 在不同坡度情况下,坡面 平均流速随时间的变化过程基本一致,可以划分为增 加、减小、波动平衡状态 3 个不同的阶段;(2) 坡面坡

度越大,坡面平均流速随时间的变化过程的阶段性越 明显;(3) 在同一坡度下,坡面平均流速并非随流量 的增加而线性增加,坡面平均流速随时间变化具有波

动性,存在着相互交叉的现象,这是由坡面在水流侵蚀作用下的形态发育具有一定的偶然性造成的,反映出坡面流水动力过程与坡面侵蚀形态发育过程相互作用的复杂性。

坡面流平均流速随时间的变化出现阶段性特征的原因在于:在坡面冲刷初期,水流以薄层漫流的方式沿坡面向下流动,在此过程中由于水流入渗导致流量损失,流速较低。随着下垫面土壤趋于饱和流量损失减小,流速逐渐升高。另外,土槽坡面在开始阶段比较平整无跌坎形成,床面相对光滑水流阻力较小,水流在重力和坡面阻力的作用下沿坡面加速流动,侵蚀方式以面蚀为主,含沙量很小,消耗能量较小,流速逐渐升到最高值。当流速发展到一定程度以后,坡面漫流开始汇聚以股流的形式向下流动,当水流侵蚀切应力超过土壤抗蚀能力时,就会在坡面上冲刷出一系列跌坎,跌坎的出现一方面使得坡面流流程增加,沿程阻力增大,另一方面跌坎导致集中消能增加了水流的局部水头损失,所以此时的流速开始出现下降的趋

势。随着跌坎的进一步发育,坡面上小跌坎逐渐贯通形成细沟,强烈的溯源侵蚀和沟壁坍塌使水流中的含沙量迅速增加,水流用于输送细沟中被侵蚀下来的泥沙所消耗的能量增加,流速进一步降低。到了水流冲刷的最后时段,细沟形态发育基本稳定,其沿坡面大多呈顺直状,沟宽发育基本停止,主要以水流下切侵蚀方式为主,这时侵蚀输沙基本达到平衡,水流阻力较为稳定,但偶然发生细沟沟壁坍塌会阻塞水流通道,从而导致水流流速呈现出波动平衡的特点。

### 3.2 坡面侵蚀量随时间的变化过程

在坡面径流侵蚀过程中,随着径流冲刷时间的持续,在坡面某处或多处会形成跌坎,随后跌坎逐渐发展贯通形成细沟,随着细沟侵蚀的发生和发展,径流侵蚀产沙量逐渐增加并在细沟发育最剧烈时(细沟沟头溯源侵蚀快、沟底下切较快时)增加速率最快,当细沟侵蚀形态趋于相对稳定时,坡面产沙量趋于波动平衡。根据坡面侵蚀发展过程中不同时段径流产沙量点绘出各时段产沙比例随时间的变化过程(图3)。

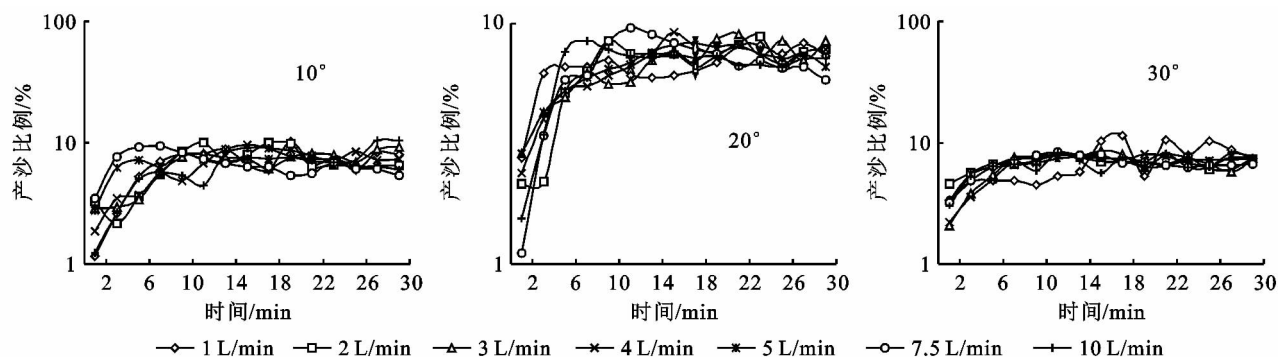


图3 坡面侵蚀过程中不同发展阶段侵蚀产沙分配

由图3可以发现:(1)不同坡度、流量组合条件下,坡面径流不同时间段的产沙分配比例随冲刷历时的变化趋势相同,即表现出先增加而后保持平衡的规律;(2)其变化过程与流速的变化过程总体保持一致,即坡面流速的强弱直接影响着坡面侵蚀产沙量的大小;(3)在试验条件下,坡度越缓,产沙变化过程阶段性越明显,与坡面流速的变化规律相反;(4)坡度越陡,坡面流达到侵蚀平衡的时刻越早。坡度为 $10^\circ$ 时图中曲线平衡的拐点约在 $7\sim 8\text{ min}$ , $20^\circ$ 为 $5\sim 6\text{ min}$ , $30^\circ$ 时没有出现明显的拐点;(5)在侵蚀发生初始时段,坡度越小,不同流量下的分布曲线越分散,坡度越大,曲线交叉现象越严重,说明在坡度较小的情况下,侵蚀强弱主要受流量控制,当坡度增大时变为受坡度控制。

坡面侵蚀输沙的过程是一个径流水动力与土壤抗蚀力相互作用的过程。当下垫面情况不变时,即土壤抗蚀性不变时,坡度和流量就是决定坡面侵蚀的主

要因素。之所以出现上述现象是因为:坡度越陡,水流沿坡面方向的加速度越大,因此在试验的初始时段流速增速较快,流速变化较为剧烈,流速的增加导致了水流侵蚀和挟沙能力的增强,侵蚀方式快速从面蚀变为细沟侵蚀,所以对比图2和图3( $30^\circ$ 条件下)可以看出,陡坡情况下,流速随时间的变化阶段性明显,而坡面产沙比的变化不明显。缓坡的情况则与之相反,从图2( $10^\circ$ 条件下)中可以看出由于流速的变化较为缓慢和均匀,所以图3( $10^\circ$ 条件下)中坡面产沙比例随冲刷历时变化的阶段性越凸显,侵蚀过程由面蚀逐渐转化为细沟侵蚀,分布曲线出现明显的拐点。

### 3.3 坡面径流输沙率公式的验证

通过上述试验分析可以看出,流速的大小直接影响坡面侵蚀输沙过程。前面理论部分通过对泥沙颗粒的受力分析得出了坡面径流泥沙起动流速公式和径流输沙率公式。利用试验数据对此方程的参数 $k$ 进行率定,公式(11)拟合结果如图4所示。

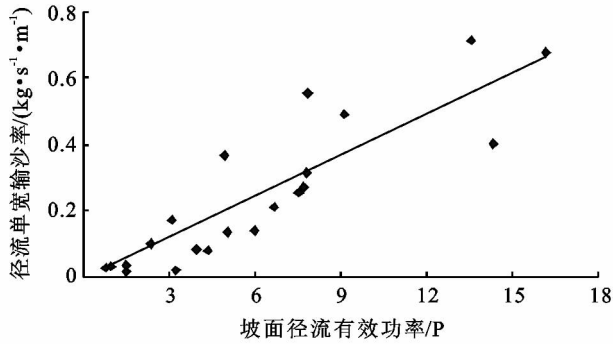


图4 坡面径流单宽输沙率与水流有效功率的关系

通过对试验数据的回归分析求得(11)式中 $k$ 的取值为0.251,因此本次试验条件下径流单宽输沙率公式可以表示为:

$$G_s = 0.251 \frac{\gamma}{(\gamma_s - \gamma)g} \tau (U - U_c) \quad (12)$$

式中: $U, U_c$ ——坡面径流流速和泥沙的起动流速(m/s); $\tau$ ——水流切应力(N/m<sup>2</sup>); $g$ ——重力加速度(N/kg); $G_s$ ——坡面径流单宽输沙率[kg/(s·m)],经过回归分析可得相关系数为0.7993。

## 4 结论

在前人研究的基础上,通过室内坡面径流冲刷试验对坡面径流输沙过程进行了研究,主要得到以下结论:

(1) 不同坡度、流量组合条件下,坡面平均流速和径流不同时段的产沙分配比例随冲刷历时的变化总体上具有同步性。

(2) 在试验条件下,坡度对流速的变化影响与对不同时段坡面产沙比例的影响相反,即坡度越陡,流速变化过程阶段性越明显,产沙比变化越平缓,反之亦然。

(3) 坡度越陡,坡面流达到侵蚀平衡的时刻越早,同时坡面侵蚀变化规律受制于流量和坡度之间的相互对比情况。

(上接第89页)

- [16] 李雪华,李晓兰,蒋德明,等.画眉草种子萌发对策及生态适应性[J].应用生态学报,2006,17(4):607-610.
- [17] 祝东立,贺学礼,石硕.小五台山15种蒿属植物种子形态及萌发特性研究[J].西北植物学报,2007,27(11):2328-2333.
- [18] 王宗灵,徐雨清,王刚.沙区有限降雨制约下一年生植物种子萌发与生存对策[J].兰州大学学报:自然科学版,1998,34(2):98-103.
- [19] 杜峰,梁宗锁,山仑,等.黄土丘陵区不同立地条件下猪毛蒿种内、种间竞争[J].植物生态学报,2006,30(4):601-609.
- [20] 祁燕蓉,何生虎,史光亮.苦豆子的研究进展[J].甘肃畜牧兽医,2008,38(6):36-38.
- [21] Rodriguez M V, Bertiller M B, Bisigato A. Are fine

(4) 建立了坡面径流输沙理论公式,试验数据的回归分析得相关系数为 $R^2 = 0.7993$ ,由于试验条件的限制,公式的普适性还需要进一步扩大。

## 参考文献:

- [1] 姚文艺.坡面流阻力规律试验研究[J].泥沙研究,1996(1):74-82.
- [2] Abrabams A D, LI G, Parsons A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope, Southern Arizona[J]. Earth Surface Processes and landforms 1996,21(1):35-47.
- [3] Yoon Y N, Wenzel H G. Mechanics of sheet flow under simulated rainfall[J]. Journal of the Hydraulics Division,1971,97(9):1367-1386.
- [4] 吴长文,王礼先.林地坡面的水动力学特性及其阻延地表径流的研究[J].水土保持学报,1995,9(6):32-38.
- [5] 江忠善,宋文经.坡面流速的试验研究[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(7):46-52.
- [6] 吴普特,周佩华.坡面薄层水流流动形态与侵蚀搬运方式的研究[J].水土保持学报,1992,6(1):16-24.
- [7] 张科利,秋吉康弘.坡面径流冲刷及泥沙输移特征的实验研究[J].地理研究,1998,17(2):163-170.
- [8] 李占斌,鲁克新.黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J].水土保持学报,2002,16(2):5-8.
- [9] 李鹏,李占斌,郑良勇.黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J].水科学进展,2006,(7):444-449.
- [10] 雷廷武,张晴雯.细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究[J].土壤学报,2007,39(4):476-482.
- [11] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology[J]. Trans. ASAE,1989,32(5):1587-1593.
- [12] Govers G, Rauws G. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds[J]. Earthsurf, processes Landforms,1986,11(5):515-524.
- [13] 窦国仁.再论泥沙起动流速[J].泥沙研究,1999,6(1):1-9.

roots of both shrubs and perennial grasses able to occupy the upper soil layer? A case study in the arid Patagonian Monte with non-seasonal precipitation[J]. Plant and Soil,2007,300(1/2):281-288.

- [22] 张晓红,王惠梅,徐炳成,等.黄土塬区3种豆科牧草对土壤水分的消耗利用研究[J].西北植物学报,2007,27(7):1428-1437.
- [23] Zhang Z S, Li X R, Wang T W, et al. Distribution and seasonal dynamics of roots in a revegetated stand of *Artemisia ordosica* Krachsh. In the Tengger Desert (North China)[J]. Arid Land Research and Management,2008,22(3):195-211.
- [24] 杨辉.苦豆子种群扩散的生物生态学基础[D].乌鲁木齐:新疆大学,2005:12-16.