

# 坡面降雨径流侵蚀输沙的不平衡特性研究

周凡凡<sup>1</sup>, 高建恩<sup>1,2,3</sup>, 王照润<sup>1</sup>, 王鹭<sup>1</sup>, 刘思璇<sup>1</sup>, 高哲<sup>4</sup>, 李兴华<sup>4</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;  
3.水利部水土保持生态工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 针对降雨和床面大糙度共同作用下坡面降雨径流侵蚀不平衡输沙特性研究薄弱的问题, 采用室内模拟降雨试验的方法, 研究不同降雨强度和坡长条件下的坡面降雨径流侵蚀输沙特性。结果表明: (1) 坡面为裸坡、坡度为 $10^\circ$ 条件下, 径流含沙量随坡长的增加呈增大趋势, 当坡长由1 m增加至8 m时, 同一雨强下径流含沙量增大3.28~7.15倍; 径流含沙量随雨强的增大而增加, 当雨强由40 mm/h增大至120 mm/h时, 同一坡长下径流含沙量增加1.41~2.97倍。(2) 分析降雨径流侵蚀条件下, 水动力学参数对坡面径流挟沙能力的影响发现, 水流挟沙能力与流速的3次方成正比, 与水力半径和沉速的乘积成反比, 得到降雨条件下的水流挟沙能力计算公式。(3) 研究坡面降雨径流侵蚀输沙的不平衡特性表明, 雨强与恢复饱和系数之间呈幂函数关系, 给出坡面不平衡输沙模型并进行验证, 表明该模型可以较好地模拟坡面降雨径流侵蚀输沙沿程变化。研究结果可为预测坡面径流侵蚀输沙沿程变化及完善坡面径流侵蚀机理提供参考。

**关键词:** 径流含沙量; 水流挟沙能力; 不平衡输沙; 坡长; 雨强

中图分类号: S157 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2021)06-0095-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.06.014

## Study on Unbalance Characteristics of Sediment Transport by Rainfall Runoff Erosion on Slope

ZHOU Fanfan<sup>1</sup>, GAO Jianen<sup>1,2,3</sup>, WANG Zhaorun<sup>1</sup>,  
WANG Lu<sup>1</sup>, LIU Sixuan<sup>1</sup>, GAO Zhe<sup>4</sup>, LI Xinghua<sup>4</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Research Center on Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 4. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** In view of the weak research on the unbalanced sediment transport characteristics of rainfall-runoff erosion under the combined action of rainfall and bed roughness, the variation characteristics of rainfall-runoff sediment transport under different rainfall intensities and slope lengths were studied by using the indoor simulated rainfall test. The results showed that: (1) Under the condition that the slope was a bare slope and the slope was  $10^\circ$ , when the slope length increased from 1 m to 8 m, the sediment concentrations of runoff increased by 3.28~7.15 times under the same rainfall intensity. The runoff sediment concentrations increased with the increase of rainfall intensities. When the rainfall intensities increased from 40 mm/h to 120 mm/h, the runoff sediment concentrations increased by 1.41~2.97 times under the same slope length. (2) According to the existing formula of sediment carrying capacity of river channel, after analyzing the influence of rainfall, slope, slope length and other factors on runoff sediment carrying capacity, and based on the rainfall test data and collected test data, the formula of sediment carrying capacity under rainfall condition was obtained, which could be applied to the calculation of sediment carrying capacity of overland flow under rainfall condition. (3) The influence of rainfall intensity on restoring saturation coefficient was discussed, and the unbalanced sediment transport model was proposed and verified. The verification results showed that the model had a good simulation effect on the variation of rainfall runoff sediment concentration

收稿日期: 2021-05-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(41877078, 41371276); 国家重点研发计划项目(2017YFC0504703); 中国科学院知识创新工程项目(A315021615); 陕西省科技统筹创新工程项目(2013KTDZ03-03-01); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2016ZDJC-20)

第一作者: 周凡凡(1994—), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: 1390970300@qq.com

通信作者: 高建恩(1962—), 男, 山西运城人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: gaojianen@126.com

along the slope. These results could provide reference for predicting the variation of sediment concentrations along the slope runoff and improving the erosion mechanism of thin layer runoff.

**Keywords:** runoff sediment concentration; sediment-carrying capacity of flow; unbalanced sediment transport; slope length; rain intensity

坡面降雨径流侵蚀输移是一个不平衡的过程。侵蚀、搬运和沉积贯穿于坡面侵蚀全过程,在特定侵蚀条件下存在着以侵蚀—搬运—沉积为主或侵蚀—搬运为主或侵蚀—沉积为主的不平衡输沙状况<sup>[1]</sup>。但现有的侵蚀输沙模型多针对坡面平均侵蚀量等进行计算模拟,无法反映坡面径流侵蚀输沙的不平衡特性,因此对坡面侵蚀、搬运、沉积的过程进行研究模拟,可补充完善坡面土壤侵蚀模型。

径流侵蚀输沙过程受雨强、坡长、坡度等环境因素的影响,在时间上呈现出非恒定性,在空间上呈现出不平衡性。很多学者采用室内外模拟的方法对此展开了研究。徐震等<sup>[2]</sup>研究发现,雨滴击溅并不总是增加坡面径流输沙的强度,当坡度较大时,随雨强的增加,其贡献由增强转为抑制;田均良等<sup>[3]</sup>通过元素示踪法对坡面侵蚀过程进行了研究,结果表明坡面侵蚀泥沙在小雨强、长历时降雨侵蚀过程中以沉积过程为主,而短历时、大雨强下的坡面以侵蚀产沙为主;王玲玲等<sup>[4]</sup>、汪晓勇等<sup>[5]</sup>研究结果表明,随坡长增加,坡面侵蚀呈现以侵蚀—搬运过程为主与以侵蚀—沉积过程为主交替变化的不平衡输沙现象,并指出坡面侵蚀存在侵蚀临界坡长;Liu<sup>[6]</sup>研究发现,长坡长条件下坡面侵蚀物质更容易发生沉积,从而导致侵蚀强度与坡长之间呈负相关关系;Kinnell<sup>[7]</sup>研究表明,当坡长不足 1 m 时有利于土壤侵蚀的发生。关于坡面径流输沙模型方面,高建恩<sup>[8]</sup>根据 Bagnold 水流功率理论提出一个小至细沙大到漂石的推移质输移公式;赵春红等<sup>[9]</sup>基于运动波方程和泥沙输移公式,给出了一种能够反映不同土地利用方式下坡面产流输沙时空变化的简化模型;范荣生等<sup>[10]</sup>根据试验研究和建模,提出了陡坡降雨侵蚀径流含沙量过程的计算模型;焦鹏等<sup>[11]</sup>通过室内模拟径流冲刷试验,建立了以坡面径流输沙能力为输出的广义回归神经网络(GRNN)模型。由此可见,坡面径流侵蚀不平衡输沙变化规律因研究目的、试验方法、观测手段等的不同导致研究成果之间存在一定的差异,而关于坡面径流侵蚀不平衡输沙模型更是甚少。

本研究采用人工模拟降雨试验的方法,通过设置不同坡长和雨强,分析坡长及雨强对坡面径流侵蚀不平衡输沙的影响,基于不平衡输沙方程修正了一种能够反映坡面薄层径流含沙量沿程变化过程的模型,并对不同降雨条件下坡面水流发生变异时的临界值进行预测分析,

以期为进一步完善土壤侵蚀机理提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与供试土壤

试验于 2020 年 10—12 月在中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行。试验用土为陕西延安羊圈沟的黄绵土,其粒径机械组成为:黏粒含量 14.34%(<0.002 mm)、粉粒含量 65.22%(0.05~0.002 mm)和砂粒含量 18.53%(1~0.05 mm)。

### 1.2 试验设备

试验采用下喷式降雨系统,降雨覆盖面积为 27 m×18 m,降雨高度为 18 m,降雨均匀度达 80%以上,可使所有雨滴在接触地面之前均能达到终点速度<sup>[12]</sup>。试验土槽为钢化玻璃土槽,土槽规格为长 8 m,宽 0.25 m,高 0.15 m。

### 1.3 试验设计与过程

每次试验前,按照试验设计用 PVC 板将土槽分隔成不同坡长(1~8 m)的试验小区。为保证各试验初始条件一致,控制土壤容重为 1.2 g/cm<sup>3</sup>,土壤初始含水率为 14%,试验坡度为 10°。试验设计包括 8 个坡长:1,2,3,4,5,6,7,8 m;5 种降雨强度:40,60,80,100,120 mm/h,为消除降雨量的影响,每次试验将降雨量控制在 50 mm。

试验之前将土壤自然风干,然后再过 10 mm 筛,筛去土中的石块和杂草。装土槽前在土槽底部铺 1 层医用纱布,增加土壤与土槽之间的粗糙度。为保证每次试验的初始条件基本一致,试验前采用 30 mm/h 的雨强对坡面进行预降雨,直至坡面产流为止,然后用塑料薄膜覆盖,静置 24 h 使得水分自由下渗以接近自然状态下的土壤水分分布状况。为确保降雨强度的准确性,每次试验开始前对雨强进行率定,当降雨均匀度达到 80%以上、试验雨强与设计雨强误差不超过 5%时开始正式降雨试验。当坡面产流后,0~5 min 内每 1 min 收集 1 次径流泥沙样品,5~20 min 以 3 min 为间隔收集 1 次,之后每隔 5 min 收集 1 次,并利用温度计测定水流的温度来计算水流黏滞系数。在收集径流泥沙样品的同时,采用染色剂法(KMnO<sub>4</sub>)测定坡面流速,间隔为 1 m,流速乘以修正系数 0.75 作为断面平均流速<sup>[13]</sup>。降雨试验结束后,测量每个径流泥沙样品的质量和体积,静置 12 h 后,倒掉上清液,放入烘箱烘干并称取得到泥沙质量。

### 1.4 数据处理

水流挟沙能力是判断挟沙水流是否发生冲刷、淤积或不冲不淤平衡输沙的重要衡量尺度,也是水流侵蚀、泥沙输移、沉积过程的主要控制性参数之一<sup>[14]</sup>。目前,坡面水流挟沙能力公式大多是通过天然河道实测资料或通过室内试验数据得到的一些经验公式,表达方式通常有 2 种:其一是输沙率形式,另外一种为含沙量形式。当以含沙量表达时,通常借鉴武汉水利电力学院公式<sup>[15]</sup>,具体公式为:

$$S_* = k \left( \frac{U^3}{gR\omega} \right)^m \quad (1)$$

式中: $S_*$  为径流含沙量浓度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $R$  为水力半径,在宽浅河道中,以平均水深  $h$  代替( $\text{m}$ ); $U$  为径流速度( $\text{m}/\text{s}$ ); $g$  为重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ ); $\omega$  为泥沙沉速( $\text{m}/\text{s}$ );公式中系数  $k$  和  $m$  不是常数,而是随  $U^3/gR\omega$  而改变的。

采用有效系数( $R^2$ )、纳什效率系数(NSE)和平均相对误差(RE)对模型模拟效果进行评价。有效系数( $R^2$ )和纳什效率系数(NSE)越接近 1,平均相对误差(RE)越接近 0,说明模型模拟效果越好<sup>[16]</sup>。

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(Y_i - \bar{Y}_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (2)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (3)$$

$$\text{RE} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - Y_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $O_i$  为试验观测值; $Y_i$  为模型预测值; $\bar{O}_i$  为试验观测值的平均值; $\bar{Y}_i$  为模型预测值的平均值; $n$  为样本个数。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨径流侵蚀沿程不平衡输沙特征

径流含沙量既可以用于表征坡面径流侵蚀受力情况,又可以量化分析坡面径流输沙过程<sup>[17]</sup>,因此本研究将径流含沙量作为定量刻画坡面降雨径流侵蚀输沙特征的指标。

降雨径流沿程不平衡输沙变化趋势曲线见图 1。在坡度为  $10^\circ$  和降雨强度为  $40 \text{ mm}/\text{h}$  时,径流含沙量随坡长的增加而明显增加,径流含沙量由  $1 \text{ m}$  时的  $8.97 \text{ kg}/\text{m}^3$  增加到坡长为  $8 \text{ m}$  时的  $38.43 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。降雨强度为  $60 \sim 120 \text{ mm}/\text{h}$ ,坡长  $< 4 \text{ m}$  时,径流含沙量随坡长的增加呈急剧增加趋势,在  $4 \text{ m}$  处达到峰值,其值分别为  $39.90, 51.17, 67.43, 119.01 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。一方面是随着坡长的增加,承雨面积增大,相应径流量增加,促使坡面下方的径流能量增大,导致坡面径流流速及剪切力进一步增大,冲刷作用增强,此时不仅能完全携带走坡上方被剥蚀的土壤,还在坡下方产

生了净侵蚀量<sup>[5]</sup>;另一方面,在试验过程中,观察到坡面下部有细沟出现,细沟侵蚀中径流的冲刷作用远大于降雨雨滴的击打作用。当坡长由  $4 \text{ m}$  增加至  $5 \text{ m}$  时, $60 \sim 120 \text{ mm}/\text{h}$  雨强下径流含沙量出现不同程度的减小,分别减小  $0.31, 7.19, 5.27, 38.08 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,这是因为径流含沙量增大时,水流需要大量的能量用于挟带搬运泥沙,导致用于自身流动和剥蚀土壤的能量减小,当径流含沙量达到某一值即径流能量不足于再搬运和挟带侵蚀泥沙时,坡面逐渐出现沉积现象<sup>[18]</sup>。坡长  $> 5 \text{ m}$  时,径流含沙量随坡长的增加幅度减小,这与汪晓勇等<sup>[5]</sup>、姚璟等<sup>[19]</sup> 研究结果相类似。La<sup>[20]</sup> 通过对  $10 \sim 60 \text{ m}$  坡长的坡耕地的天然降雨资料进行分析发现,径流含沙量随坡长的增加而增大;Bagarello 等<sup>[21]</sup> 利用野外小区天然降雨资料进行分析表明,径流含沙量与坡长呈正相关关系,以上二位学者所得结论与本试验所得结果存在差异,分析其原因一方面是本研究的坡长范围不同,其次与气候、降雨及土壤含水量方面也有着很大的关系,气候及降雨量的不同影响前期土壤含水量,因而对径流产生过程造成一定影响。

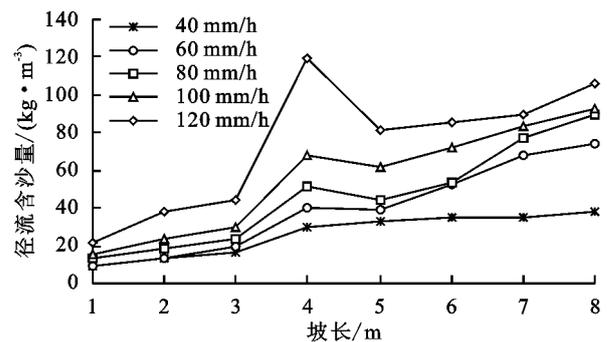


图 1 降雨径流沿程不平衡输沙变化趋势

### 2.2 雨强对坡面侵蚀不平衡输沙特性的影响

降雨强度是影响坡面侵蚀输沙的重要因素。由图 2 可以看出,同一坡长下径流含沙量随雨强的增大而增加,且坡长越长,径流含沙量随雨强增加的幅度越大。雨强由  $40 \text{ mm}/\text{h}$  增加至  $120 \text{ mm}/\text{h}$ ,坡长为  $1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 \text{ m}$  时所对应的径流含沙量的增量分别为  $12.61, 24.53, 27.22, 89.03, 47.72, 51.21, 54.96, 67.40 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,分别增大  $1.41, 1.81, 1.64, 2.97, 1.44, 1.48, 1.58, 1.75$  倍。降雨强度对径流含沙量的影响主要表现为随着降雨强度的增加,雨滴动能增大,雨滴打击地表作用越强,因此分散分离的松散土粒越多,供坡面水流搬运的物质越充足。此外,随降雨强度增大,雨滴打击地表使土层更加密实,且溅散的土粒堵塞土壤孔隙,形成临时性结皮,降低土壤入渗能力,增加地表径流,径流侵蚀能力增大<sup>[22]</sup>。各种效应叠加在一起,使得径流含沙量随雨强的增大呈现显著增大的规律,这与刘晓燕等<sup>[23]</sup>、霍云梅等<sup>[24]</sup> 研究结果相类似。

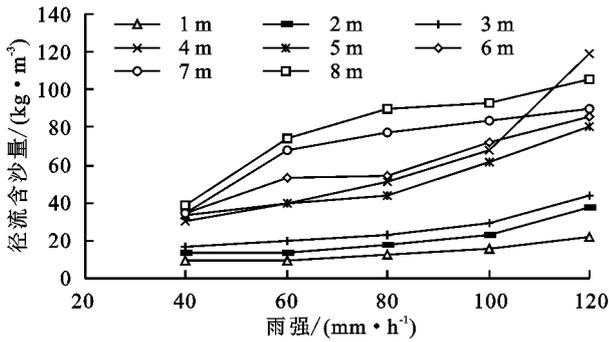


图 2 径流含沙量随雨强的变化趋势

2.3 坡面水流不平衡输沙模型

由室内试验结果可知,坡面呈现出明显的侵蚀—搬运—沉积的不平衡输沙特征。为了更好地反映坡面降雨径流侵蚀不平衡输沙沿程变化情况,本文基于不平衡输沙方程和运动波方程给出了坡面水流不平衡输沙模型。

2.3.1 不平衡输沙模型描述 当断面水流含沙量不等于其水流挟沙力,即处于非饱和和输沙状态时,这一现象可用不平衡输沙方程进行描述<sup>[25]</sup>:

$$\frac{\partial QS}{\partial x} = -\alpha\omega B(S - S_*) \quad (5)$$

对于不平衡输沙方程的离散,韩其为<sup>[26]</sup>将公式(5)简化为:

$$S = S_* + (S_0 - S_{0*})e^{-\frac{\alpha l}{L}} + (S_{0*} - S_*)\frac{l}{\alpha L}(1 - e^{-\frac{\alpha l}{L}}) \quad (6)$$

式中:Q 为流量(m<sup>3</sup>/s);S、S<sub>\*</sub> 分别为出口断面含沙量和挟沙力(kg/m<sup>3</sup>);S<sub>0</sub>、S<sub>0\*</sub> 分别为进口断面含沙量和挟沙力(kg/m<sup>3</sup>);L 为积分河段长度,在坡面流中指积分坡面长度(m); $l = \frac{q}{\omega}$  表示泥沙由水面落到河底的距离(m); $\omega$  为泥沙沉速(m/s),由于本研究中使用的泥沙为同一种土壤,泥沙性质一样,因此泥沙沉速为定值。泥沙沉速采用张瑞瑾公式,该公式对于层流区、紊流区和过渡区都适用;q 为泥沙恢复饱和系数,淤积时可取 0.25,冲刷时取 1.0<sup>[27]</sup>。

上述公式中坡面水流挟沙能力采用公式(1)进行计算,由公式(1)可以看出,水流挟沙能力与流速的高次方呈正相关,而流速与水力半径之间可能存在交互作用,进而导致水流挟沙能力与水力半径呈负相关。该公式在河道、明渠流中已经得到了一系列的应用,验证效果良好<sup>[28-29]</sup>。为了进一步验证该挟沙力公式是否适用降雨条件下坡面流情况,将本试验数据点绘在武汉水利电力学院挟沙力公式与实测资料的对比图上(图 3)。

由图 3 可知,本试验数据点群在代表水流挟沙力曲线的外包线附近,表明坡面水流处于冲刷状态,且没有达到饱和,故本研究中饱和坡面流的挟沙力可以近似采用公式(1)来进行计算。

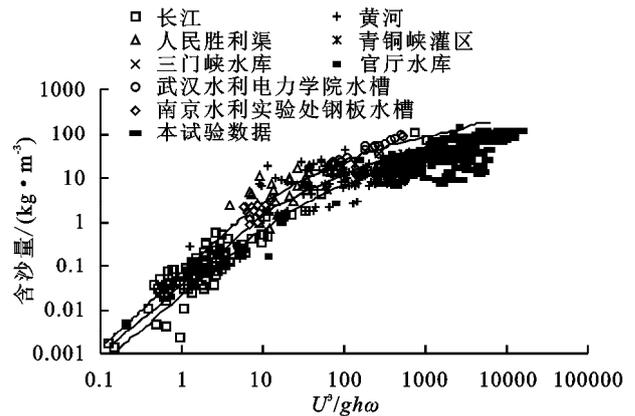


图 3 实测资料与已有资料对比

在公式(1)的实际应用中需要确定系数 k 和指数 m 共 2 个参数,在不同的工况下二者的取值不易确定,目前确定挟沙力公式中参数的方法分为 2 类<sup>[28]</sup>:一是通过不断调试系数和指数,使得计算的含沙量过程与实测值能较好地符合;二是通过大量实测挟沙力资料,直接率定出公式中的系数与指数。点绘 S<sub>\*</sub> 与 U<sup>3</sup>/ghω 关系曲线时尽可能采用坡面处于不冲不淤的平衡状态,亦即含沙量处于饱和状态的实测资料,但是在水流运动过程中平衡是相对的,不是绝对的,挟沙水流刚好处于饱和状态是很少出现的。大多数情况是挟沙水流从超饱和状态通过淤积的方式向饱和状态发展,只有当这样的过程结束以后,含沙量才会与相应于水流挟沙力的饱和含沙量相等。本文采取第 2 种方法,采用本试验过程中尽可能为不冲不淤实测含沙量数据点绘 S<sub>\*</sub> 与 U<sup>3</sup>/ghω 双对数坐标纸上(图 4),率定得到降雨条件下 k 和 m 的值分别为 0.36,0.60。

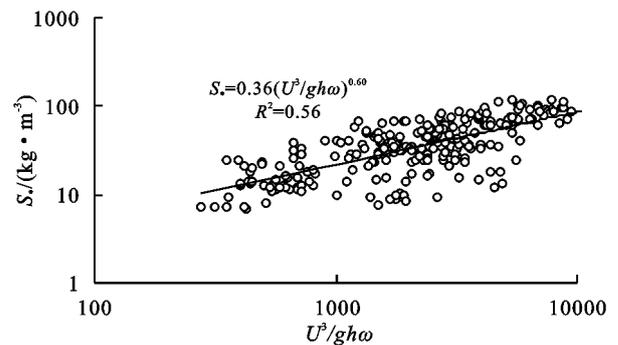


图 4 本试验 S<sub>\*</sub> 与 U<sup>3</sup>/ghω 关系曲线

公式(6)中各参数确定后,可对不同工况下坡面径流侵蚀输沙沿程变化过程进行预测:

① 根据运动波方程  $\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = i - f = r$ , 可得净

雨强 r;当坡面降雨达到平衡状态时,单宽流量可表示为  $q = rx$ ;q 为坡面流单宽流量(m<sup>2</sup>/s);x 为沿水流方向距坡顶距离(m);i 为降雨强度(mm/h);r 为净雨强(mm/h)。

② 根据  $q = bh^m$  计算得到水深 h,一般  $b = S^{0.5}/n$ ,  $m = 5/3$ ,n 为曼宁糙度系数;S 为坡降,  $S = \sin \beta$ , $\beta$

为坡面坡度,进一步得到坡面径流流速  $v$ 。

③将所得的水深  $h$ 、流速  $v$  等水力参数代入公式(1)、公式(6)中进行计算得到本断面含沙量,将该计算值当作下一个断面的进口含沙量,以此类推,即可得到不同工况条件下坡面降雨径流侵蚀输沙沿程变化过程。

2.3.2 模型的验证 为了检验模型的模拟效果,本研究利用 40~120 mm/h 降雨条件下试验数据进行不平衡输沙模型的验证,基于公式(6)计算得到的坡面径流沿程含沙量与实测含沙量数据对比见图 5,结果显示不同降雨条件下坡面径流含沙量计算值与实测值具有极显著线性拟合关系,模型有效系数  $R^2$  为 0.92,相对误差  $RE$  为 -9.83%,纳什效率系数  $NSE$  为 0.81,说明模型预测结果在可接受范围内。

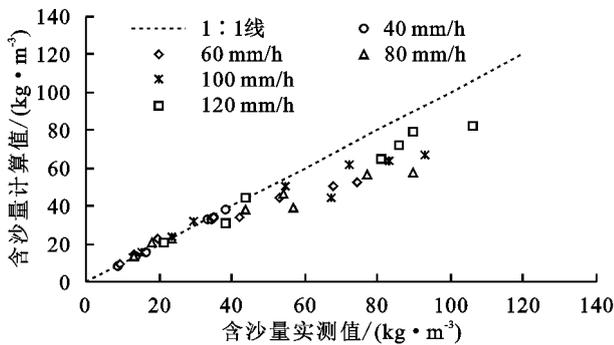


图 5 不同降雨条件下实测含沙量与计算含沙量对比

由图 5 还可看出,降雨强度越大时,计算值越偏离实测值,出现误差的原因可能是雨强越大,雨滴打击能力越强,对径流紊动性的影响越强,导致薄层水流的侵蚀输沙过程发生变化<sup>[30]</sup>,造成公式(6)中的  $\alpha$  可能不再适用无降雨情况下的经验取值,为此点绘了由实测状况下反算求得的  $\alpha$  值与雨强  $i$  的关系发现,两者呈幂函数关系,拟合系数  $R^2=0.55$ (图 6),其关系式为:

$$\alpha = 11.80i^{-0.68} \quad (7)$$

式中: $\alpha$  为恢复饱和系数; $i$  为降雨强度(mm/h)。将公式(7)中代入公式(6)中,则可得考虑降雨因素时的坡面不平衡输沙方程:

$$S = S_* + (S_0 - S_{0*}) e^{\frac{11.80i^{-0.68}L}{T}} + (S_{0*} - S_*) \frac{1}{11.80i^{-0.68}L} (1 - e^{\frac{11.80i^{-0.68}L}{T}}) \quad (8)$$

基于修正后的方程对 40~120 mm/h 条件下坡面径流侵蚀输沙过程进行了再次计算,结果显示采用修正后的方程计算的输沙量优于原有公式计算的输沙量,线性拟合系数  $R^2$  为 0.98,相对误差  $RE$  为 -7.88%,纳什效率系数  $NSE$  为 0.93,说明修正后不平衡输沙模型的预测结果优于修正前,且进一步提高了模型预测精度(图 7)。

2.3.3 模型的应用 在侵蚀水动力学领域,现有的研究多假定在降雨和床面大糙度共同作用下的薄层侵蚀径流是牛顿体,这与现实中出现的一些问题不完

全符合。如在野外,当坡面暴雨径流侵蚀过后,常能看到工程堆积体或侵蚀坡沟有舌状、鱼鳞状或泪痕状的不同尺度淤积体存在,其主要是因为暴雨径流变异为高浓度的非牛顿流体。赵春红等<sup>[31]</sup>通过室内放水冲刷试验就流体变异进行了研究,结果表明径流含沙量对水流型态的影响存在临界值,该临界值为 300 kg/m<sup>3</sup>,当径流含沙量超过该临界值时,水流型态从牛顿体变成了非牛顿体。由于室内种种因素的限制,导致无法模拟降雨条件下坡面高浓度的非牛顿流体,已有研究多借助不平衡输沙模型计算水流含沙量,从而判定坡面径流是否发生变异<sup>[26,32]</sup>。

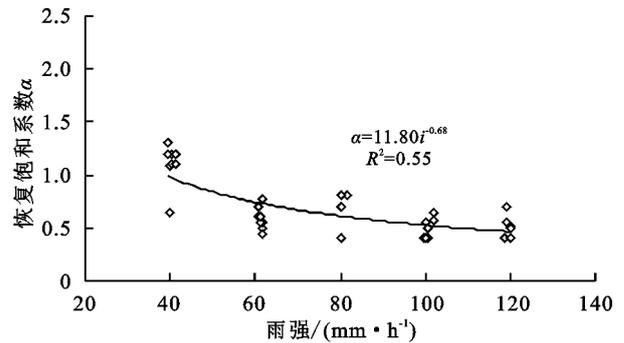


图 6 恢复饱和系数  $\alpha$  与雨强关系

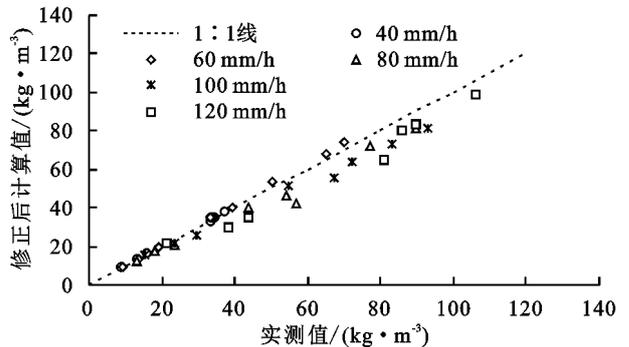


图 7 修正后含沙量计算值与实测值对比

本研究根据修正后的坡面水流不平衡输沙模型计算了不同降雨强度下坡面径流侵蚀输沙量,并以此作为依据给出了不同降雨强度下径流达到变异时的坡长,由图 8 可知,随着降雨强度的增大,坡面径流含沙量达到 300 kg/m<sup>3</sup>时的临界坡长逐渐减小,40~120 mm/h 雨强下径流含沙量达到 300 kg/m<sup>3</sup>的坡长分别为 89,75,69,46,26 m。

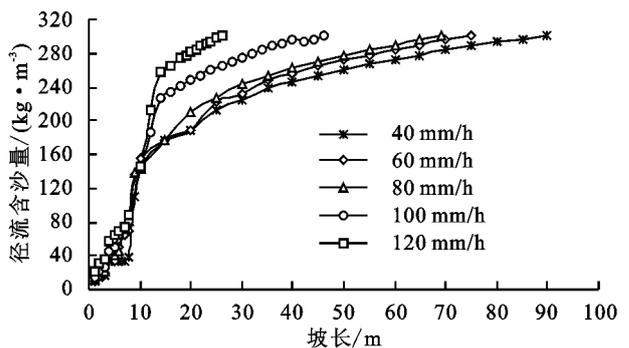


图 8 不同降雨条件下流体变异模拟结果

### 3 结论

(1)径流含沙量随坡长的增加呈增大趋势,当坡长由 1 m 增加至 8 m 时,40~120 mm/h 雨强下径流含沙量增大 3.28~7.15 倍;径流含沙量随雨强的增大而增加,当雨强由 40 mm/h 增大至 120 mm/h 时,1~8 m 坡长下径流含沙量增加 1.41~2.97 倍。

(2)分析了降雨径流侵蚀条件下,水动力学参数对坡面径流挟沙能力的影响发现,水流挟沙能力与流速的 3 次方成正比,与水力半径和沉速的乘积成反比,得到降雨条件下的水流挟沙能力计算公式。

(3)基于不平衡输沙方程和运动波方程给出一种可以反映坡面径流侵蚀不平衡输沙的模型并进行验证,模型有效系数  $R^2$  为 0.98,纳什效率系数 NSE 为 0.93,相对误差 RE 为 -7.88%,验证结果良好。并对 40~120 mm/h 雨强下坡面水流发生变异时(坡面径流含沙量达到 300 kg/m<sup>3</sup>)的坡长进行了预测,其值分别为 89,75,69,46,26 m。

#### 参考文献:

- [1] 郑粉莉,高学田.坡面汇流汇沙与侵蚀—搬运—沉积过程[J].土壤学报,2004,41(1):134-139.
- [2] 徐震,高建恩,赵春红,等.雨滴击溅对坡面径流输沙的影响[J].水土保持学报,2010,24(6):20-23.
- [3] 田均良,周佩华,刘普灵,等.土壤侵蚀 REE 示踪法研究初报[J].水土保持学报,1992,6(4):23-27.
- [4] 王玲玲,范东明,王文龙,等.水蚀风蚀交错区不同坡长坡面产流产沙过程[J].人民黄河,2016,38(3):72-75.
- [5] 汪晓勇,郑粉莉.黄土坡面坡长对侵蚀—搬运过程的影响研究[J].水土保持通报,2008,28(3):1-4.
- [6] Liu J. Combined effects of rainfall regime and plot length on runoff and soil loss in the Loess Plateau of China[C]//Agu Fall Meeting, AGU Fall Meeting Abstracts,2017.
- [7] Kinnell P. A review of the design and operation of runoff and soil loss plots[J].Catena,2016,145:257-265.
- [8] 高建恩.推移质输沙规律的再探讨[J].水利学报,1993(4):62-69.
- [9] 赵春红,高建恩,邵辉,等.不同土地利用方式坡面产流输沙过程模拟研究[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(2):38-46.
- [10] 范荣生,王高英,李占斌.陡坡侵蚀产沙特点及含沙量过程计算模型研究[J].水土保持通报,1993,13(4):6-14.
- [11] 焦鹏,姚文艺,严军,等.基于 GRNN 的坡面径流输沙能力模型的试验研究[J].中国水土保持科学,2012,10(1):25-31.
- [12] 郑粉莉,赵军.人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J].水土保持研究,2004,11(4):177-178.
- [13] 杨帅,高照良,李永红,等.工程堆积体坡面植物篱的控蚀效果及其机制研究[J].农业工程学报,2017,33(15):147-154.
- [14] 张建军.黄土坡面地表径流挟沙能力研究综述[J].泥沙研究,2007(4):77-81.
- [15] 张瑞瑾,谢鉴衡,王明甫,等.河流泥沙动力学[M].北京:水利电力出版社,1989:204-230.
- [16] 覃超,何超,郑粉莉,等.黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究[J].农业工程学报,2018,34(6):160-167.
- [17] 张锐波,张丽萍,付兴涛.坡面径流含沙量随雨强和坡长的动态过程[J].水土保持学报,2018,32(1):80-84.
- [18] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟发育过程中含沙量与水动力学参数的关系[J].水土保持学报,2013,27(5):1-6.
- [19] 姚璟,付兴涛.坡长对离石黄土坡面径流含沙量影响的模拟降雨研究[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(3):493-501.
- [20] Lal R. Soil degradative effects of slope length and tillage methods on alfisols in Western Nigeria. I. Runoff, erosion and crop response[J]. Land Degradation and Development,1997,8(3):201-219.
- [21] Bagarello V, Ferro V. Analysis of soil loss data from plots of differing length for the Sparacia experimental area, Sicily, Italy[J]. Biosystems Engineering,2010,105(3):411-422.
- [22] 刘俊娥,王占礼,袁殷,等.黄土坡面薄层流产流过程试验研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(5):223-227.
- [23] 刘晓燕,刘昌明,党素珍.黄土丘陵区雨强对水流含沙量的影响[J].地理学报,2019,74(9):1723-1732.
- [24] 霍云梅,毕华兴,朱永杰,等.模拟降雨条件下南方典型粘土坡面土壤侵蚀过程及其影响因素[J].水土保持学报,2015,29(4):23-26,84.
- [25] 杨国录,吴卫民.一维河流数值模拟算法的概述[J].泥沙研究,1995(4):34-41.
- [26] 韩其为.非均匀沙不平衡输沙的理论研究[J].水利水电技术,2007(1):14-23.
- [27] 张小帅,张耀哲.基于 MATLAB 的非均匀悬移质不平衡输沙计算[J].人民黄河,2014,36(11):26-29.
- [28] 周美蓉,夏军强,邓珊珊,等.低含沙量条件下张瑞瑾挟沙力公式中参数确定及其在荆江的应用[J].水利学报,2021,52(4):409-419.
- [29] 吴焱,陆秋荣,陈大可.长江口南汇东滩水域水流挟沙力计算公式比选[J].人民长江,2014,45(9):11-14.
- [30] 姜义亮,郑粉莉,王彬,等.东北黑土区片蚀和沟蚀对土壤团聚体流失的影响[J].生态学报,2013,33(24):7774-7781.
- [31] 赵春红,高建恩,王飞,等.含沙量对坡面流水动力学特性的影响研究[J].农业机械学报,2013,44(9):79-85.
- [32] 赵连军,吴国英,王嘉仪.不平衡输沙含沙量垂线分布理论研究展望[J].水力发电学报,2015,34(4):63-69.