

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.015

# 含沙量对坡面流水动力学特性的影响研究\*

赵春红<sup>1</sup> 高建恩<sup>1,2</sup> 王飞<sup>1</sup> 张通<sup>3</sup> 张梦杰<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 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. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 基于系列室内水槽冲刷试验, 定量研究了在 9° 坡度、不同流量条件下含沙量对坡面流水动力学参数的影响。结果表明: 随含沙量增加, 水流雷诺数  $Re$  减小, 水流紊动强度减弱。弗劳德数、水流流速及流速修正系数  $\alpha$  随含沙量增加先呈减小趋势, 当含沙量  $S > 300 \text{ kg/m}^3$  时, 各值均突然增大, 并随含沙量的进一步增加趋于稳定, 表明此时水流型态发生变化,  $\alpha$  均值为 0.554。含沙水流和清水水流能量损失比较标准不同, 得到的结论也不相同。当  $S < 300 \text{ kg/m}^3$  时, 以相同  $Re$  或相同单宽流量作为比较标准, 含沙水流阻力系数均大于清水对应值; 当  $S > 300 \text{ kg/m}^3$  时, 以相同的  $Re$  作为比较标准, 则含沙水流阻力系数小于清水对应值, 以相同的单宽流量作为比较标准, 则含沙水流阻力系数大于清水对应值。

**关键词:** 土壤侵蚀 含沙量 坡面流 水动力学特性

**中图分类号:** P333.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0079-07

## Effects of Sediment Load on Hydrodynamic Characteristics of Overland Flow

Zhao Chunhong<sup>1</sup> Gao Jianen<sup>1,2</sup> Wang Fei<sup>1</sup> Zhang Tong<sup>3</sup> Zhang Mengjie<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, China Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The potential effects of sediment load ( $S$ ) on hydrodynamic parameters of overland flow were investigated in a smooth plexi-glass flume under a wider range of sediment load and slope gradient of 9°. The results showed that Reynolds number ( $Re$ ) decreased as sediment load increased, implying a decrease in flow turbulence. Froude number, mean flow velocity and correction factor to flow velocity ( $\alpha$ ) first all decreased with sediment load increasing and then the values all suddenly increased and gradually become stable as sediment load further increased when  $S > 300 \text{ kg/m}^3$ . The mean  $\alpha$  was 0.554. For the difference between standard of energy dissipation in sediment-laden and clear-water overland flow, the conclusions were also different. When  $S < 300 \text{ kg/m}^3$ , the friction coefficient of sediment-laden flow was larger than that of clear water flow either with the same Reynolds number or unit flow rate as standard. While, when  $S > 300 \text{ kg/m}^3$ , the friction coefficient of sediment-laden flow was smaller than that of clear water flow with the same Reynolds number and larger with the same unit flow rate.

**Key words:** Soil erosion Sediment load Overland flow Hydrodynamic characteristics

### 引言

坡面流是造成土壤侵蚀的主要动力因素之一,

具有独特的水动力学特性<sup>[1]</sup>。研究坡面流特别是坡面含沙水流水动力特性对构建基于过程的土壤侵蚀机理模型具有重要作用。坡面水流挟带泥沙, 造

收稿日期: 2013-03-03 修回日期: 2013-03-26

\* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD31B05)和国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-002-003-002)

作者简介: 赵春红, 博士生, 主要从事土壤侵蚀与坡面流水动力学研究, E-mail: zhaochunhong1987@163.com

通讯作者: 高建恩, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用与保育研究, E-mail: gaojianen@126.com

成土壤侵蚀,泥沙的存在又会改变水流的物理性质和紊动结构,进而影响其能量损失、流速分布及水动力学特性等<sup>[2]</sup>。但目前对坡面流水动力学特性的研究多以清水为主,很少考虑含沙量的影响,这在一定程度上限制了土壤侵蚀过程模型的建立。特别是当水流中含沙量较大,粒径小于0.01 mm的颗粒占很大比例时,颗粒表面的物化性质起重要作用,这时的水流有可能已经超出牛顿流体的研究范畴,如果这个时候继续忽视泥沙对水流水动力学特性的影响,得到的结果与实际情况可能产生较大的偏离。因此,系统地研究坡面含沙水流特性特别是含沙量对坡面流水动力学参数的影响是非常必要的。

一些研究者已经发现含沙量对坡面流水动力学特性有重要的影响<sup>[3~9]</sup>,但这些研究者得出的结果差异较大,甚至出现完全相反的结论,且目前研究中试验用沙多以砂土为主,泥沙粒径比较大,颗粒之间的黏性作用较小,而对于黄土高原多数地区,泥沙粒径比较小,例如武功黄土,泥沙中值粒径大约为0.01 mm,水流挟沙以后,黏滞性大大增加,其水动力学特性也会发生较大变化,因此,本文以黄土高原典型黄土——武功黄土为研究对象,采用室内水槽冲刷试验,系统研究不同流量条件下含沙量对坡面流水动力学参数的影响,为完善坡面侵蚀机理和构建土壤侵蚀过程模型提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与测定方法

试验在中科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人工降雨大厅进行。试验水槽长8.0 m、宽0.5 m、高0.25 m,水槽长度可以满足水流在运动过程中达到完全稳定。为了准确研究含沙量对坡面流水动力学参数的影响,消除水槽周界糙度变化等因素引起的误差,水槽两壁及槽底均由有机玻璃组成。上方含沙水流通过浑水输送装置供应(图1),水箱内设搅拌机,可以保证水和泥沙充分混合。试验泥沙为黄土高原典型黄土——武功黄土,试验前将土壤自然风干并过5 mm筛,过筛后的土壤用激光粒度仪(Mastersizer 2000型,英国Malvern Instrument Ltd.)测定其机械组成,其中,砂粒质量分数6.58%,粉粒质量分数71.51%,粘粒质量分数21.91%,中值粒径0.012 mm。泥沙容重为2.6 g/cm<sup>3</sup>。试验坡度为9°。

试验过程分为2个阶段。第1阶段为清水试验阶段,主要研究清水条件下水流阻力系数与雷诺数 $Re$ 的关系等,以便与含沙水流进行比较。该阶段主要通过不断改变清水放水流量来实现。根据黄土高

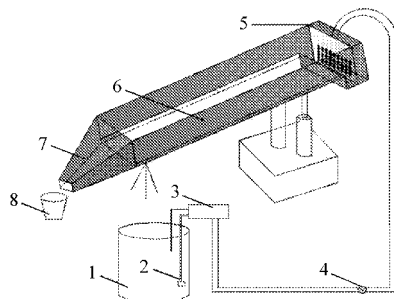


图1 含沙水流输送系统及试验装置

Fig. 1 Supply system and experimental device of silt-laden flow

1. 水箱(内设搅拌机) 2. 泥浆泵 3. 分流箱 4. 调节阀门
5. 稳流槽 6. 水槽 7. 集流槽 8. 接样桶

原发生侵蚀性降雨的范围,同时考虑试验设计流量下坡面薄层水流所涉及的不同水流型态,共进行18个流量,变化于 $2.6 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 之间,每个流量重复一次,共进行36组试验。第2阶段为含沙水流试验阶段。为方便与同等流量条件下清水水流水动力学参数进行对比分析,且保证2种水流量范围基本一致,含沙水流设计流量主要从清水中选取,共包括5个流量,分别为 $5 \times 10^{-4}$ 、 $7.5 \times 10^{-4}$ 、 $1.0 \times 10^{-3}$ 、 $1.25 \times 10^{-3}$ 、 $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据黄土高原坡面侵蚀产沙特征,设计含沙量(泥沙质量浓度)在 $0 \sim 400 \text{ kg}/\text{m}^3$ 之间变化,分别为30、60、90、120、150、180、200、250、300、350、400  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,为防止坡面发生沉积,设计含沙量均小于不同流量与坡度组合下水流的输沙能力,输沙能力按照张光辉等2009年给出的经验公式估算<sup>[10]</sup>,水流实际含沙量以水槽出口处取样测定的含沙量为准。每组试验仍重复一次,共进行110组。坡面流水动力学参数均按2次重复试验的平均取值。

每次试验开始前,首先人工率定放水流量,保证每次流量均在设计数值允许范围内。待坡面水流稳定后,开始测定水流流速及深度。流速采用染色示踪法测定,从坡顶自上而下依次设3~4 m、4~5 m、5~6 m、6~7 m、7~8 m共5个纵断面,沿纵断面的中心线进行,3次重复。水深采用重庆水文仪器厂生产的数显测针测定,测定精度为0.01 mm。测定位置选择在沿水槽从上至下3.5、4.5、5.5、6.5、7.5 m处,仍重复3次。15次测量数据的平均值作为流速、水深测量值。试验过程中,每3 min收集一次径流泥沙过程样,并利用温度计测定水流的温度来计算水流粘滞系数。试验结束后,量取浑水水样体积,并静止水样5 h,把水样上部的清水倒掉,剩下的沙样放入干燥箱干燥后称量,以水槽出口处实测含沙质量浓度为水流实际含沙量。试验历时为30 min。

### 1.2 数据分析

由于染色法测定的流速为坡面流表层最大流速  $v_s$ , 平均流速  $v$  与  $v_s$  之间一般满足

$$v = \alpha v_s \quad (1)$$

式中  $\alpha$ ——流速修正系数,  $0 < \alpha \leq 1$

由于含沙水流  $\alpha$  值不确定, 故本研究中平均流速采用流量法确定, 即

$$v = q/h \quad (2)$$

式中  $q$ ——单宽流量,  $m^2/s$

$h$ ——断面水深,  $m$

含沙水流雷诺数  $Re$  计算公式为

$$Re = \frac{vh}{v_m} \quad (3)$$

式中  $v_m$ ——浑水运动黏滞系数,  $m^2/s$

根据试验泥沙情况,  $v_m$  选用沙玉清公式计算<sup>[11]</sup>, 即

$$v_m = \frac{v}{1 - \frac{S_v}{2\sqrt{d_{50}}}} \quad (4)$$

其中  $v = 0.01775 / (1 + 0.0337t + 0.000221t^2)$

式中  $v$ ——清水运动黏滞系数,  $m^2/s$

$t$ ——水温,  $^{\circ}C$

$S_v$ ——含沙体积分数

$d_{50}$ ——泥沙中值粒径,  $mm$

弗劳德数  $Fr$  和阻力系数  $f$  计算公式分别为

$$Fr = v / \sqrt{gh} \quad (5)$$

$$f = \frac{8gRJ}{v^2} \quad (6)$$

式中  $g$ ——重力加速度,  $g = 9.8 m/s^2$

$R$ ——水力半径, 取  $R = h, m$

$J$ ——水流能坡, 采用坡面比降近似代替

考虑到水槽周界变化对水流阻力的影响, 采用文献[12]中水槽侧壁影响修正方法, 对所有试验资料进行了边壁校正。试验数据统计情况见表1。

## 2 结果与分析

### 2.1 含沙量对雷诺数和弗劳德数的影响

清水试验条件下, 当流量在  $2.6 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times$

表1 试验数据概况

Tab.1 Basic information of experiment data

试验情况	$h/mm$	$v/m \cdot s^{-1}$	$v_s/m \cdot s^{-1}$	$Re$	$Fr$	$f$
清水试验	2.097 ~ 4.254	0.248 ~ 0.708	0.475 ~ 1.015	434 ~ 2906	1.730 ~ 3.468	0.103 ~ 0.413
含沙水流试验	2.743 ~ 5.317	0.310 ~ 0.684	0.684 ~ 1.155	414 ~ 2887	1.728 ~ 3.293	0.115 ~ 0.416

$10^{-3} m^3/s$  之间变化时,  $Re$  在 434 ~ 2906 之间变化 (表1), 且随流量增加, 雷诺数呈增大趋势。含沙量对  $Re$  的影响主要表现为坡面流挟沙以后水流惯性力与黏滞力变化的对比关系。一般来说, 在流量相同条件下, 含沙量增加, 水流容重也增加, 水流的惯性力也随之增加。同时, 含沙量对水流粘滞性也有很大影响。Rescoe<sup>[13]</sup>、Einstein<sup>[14]</sup> 及钱宁<sup>[15]</sup>、沙玉清<sup>[11]</sup> 等均研究了不同颗粒粒径、不同含沙量条件下含沙水流的黏滞系数变化规律, 结果均表明随含沙量增加, 黏滞系数近似呈线性或指数形式增加, 因此, 随着含沙量增大, 水流的黏滞性也大大增加。由于本研究所用泥沙与沙玉清研究条件一致, 均为武功黄土, 因此本文中浑水黏滞系数的计算采用沙玉清公式, 如式(4)所示。图2显示了含沙量对  $Re$  的影响。由图可知, 含沙量越大,  $Re$  值越小, 表明含沙量的增加对水流粘滞力的影响较惯性力大。这与潘成忠等研究含沙量对草地水力特性及张光辉等研究粗颗粒泥沙含量对坡面流雷诺数的影响结果一致<sup>[8-9]</sup>, 表明即使下垫面或泥沙粒径发生变化, 随含沙量增加, 雷诺数均表现为减小的趋势。与相同流量清水相比, 含沙水流雷诺数平均减小约22%左右。流量不同, 含沙量对  $Re$  的影响也不相同。流量

越大, 雷诺数随含沙量增加而减小的幅度也越大。流量相同, 含沙量增加, 雷诺数减小, 表征水流紊动强度随含沙量增加而减小。当含沙量很大时, 坡面水流有可能从紊流向过渡流甚至层流发展。

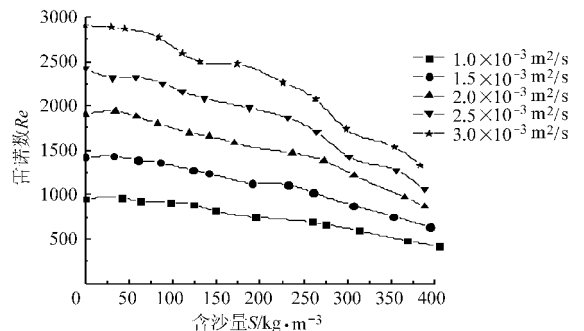


图2 不同单宽流量下雷诺数  $Re$  随含沙量的变化

Fig.2 Sediment load vs Reynolds number under different unit flow rates

试验条件下, 清水水流弗劳德数  $Fr$  在 1.73 ~ 3.47 之间变化, 含沙水流  $Fr$  在 1.73 ~ 3.29 之间变化, 根据明渠流态判别标准, 2种水流均属于急流范畴, 且对清水水流, 流量越大,  $Fr$  也越大。含沙量对  $Fr$  的影响存在一个临界含沙量, 约为  $300 kg/m^3$  (图3)。在流量相同的条件下, 当含沙量  $S$  小于  $300 kg/m^3$  时,  $Fr$  随含沙量增加而减小, 这说明含沙



量的增加对水流重力的影响要大于惯性力。与清水相比,含沙水流弗劳德数减小约为 19.47%;当含沙量  $S$  大于  $300 \text{ kg/m}^3$  时,  $Fr$  突然增大,并随含沙量的进一步增加,变化不明显,其值略小于清水  $Fr$  值,这主要因为此时水流流动型态发生质变,具有高含沙水流的特性,下面将对该现象进行详细的分析。流量不同,含沙量对  $Fr$  影响也略有不同,流量增加,含沙量影响也略增大。进一步分析发现,在含沙量基本相同的条件下,大流量条件下的  $Fr$  值大于小流量,表明流量增大对水流惯性力贡献占主导地位。通过显著性检验可知,含沙量和流量均对  $Fr$  值有极显著性影响,且流量的影响要大于含沙量。

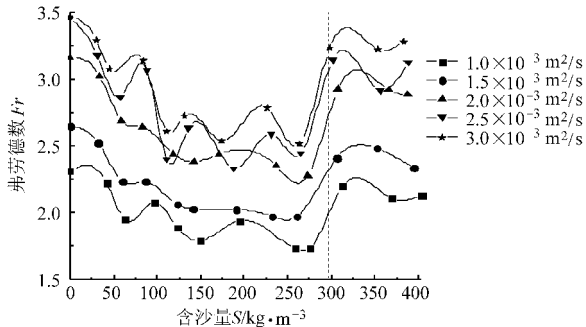


图3 不同单宽流量下弗劳德数  $Fr$  随含沙量的变化

Fig. 3 Sediment load vs Fround number under different unit flow rates

## 2.2 含沙量对坡面流流速的影响

坡面流的流速直接关系到坡面水蚀的土壤分离、泥沙输移和沉积过程<sup>[16]</sup>,是计算其他水动力学参数的基础。试验条件下,清水水流平均流速变化于  $0.25 \sim 0.71 \text{ m/s}$  之间,含沙水流平均流速变化于  $0.31 \sim 0.68 \text{ m/s}$  之间,与相同流量清水相比,含沙水流流速平均减小约为 11.90%。清水流量越大,水流流速也越大。图4显示了不同流量条件下水流平均流速随含沙量的变化。由图可知,随含沙量的增加,流速先呈减小趋势,当含沙量达到  $300 \text{ kg/m}^3$  时,流速突然增大,且随含沙量的继续增加,流速趋于稳定,表明含沙水流在此含沙量以上,流动型态发生了质变,但水流流速要略小于清水条件下的流速。随流量增加,含沙量变化对流速的影响并无明显差异。在含沙量基本相同的条件下,流量增加,水流流速显著增加。通过显著性检验可知,含沙量和流量均对水流流速有极显著性影响,流量的影响要大于含沙量。含沙量对坡面流平均流速的影响主要是其改变了坡面流流速分布。但由于坡面流水深太浅,流速分布很难测量,含沙条件下更为困难,一般可以通过研究表征流速分布情况的参数变化来间接反映含沙量对流速分布的影响。流速修正系数  $\alpha$  则是这样一个参数,它是指通过流量法计算的坡面流平均流

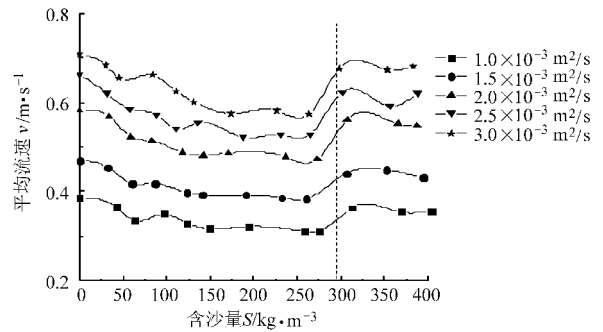


图4 不同流量下水流平均流速随含沙量的变化

Fig. 4 Sediment load vs mean flow velocity under different unit flow rates

速与利用染色法测定的水流表层最大流速的比值,一般来说,  $\alpha$  值越大,则流速梯度越小,流速分布越为均匀,反之则流速梯度越大,流速分布越不均匀。含沙量对坡面流流速修正系数  $\alpha$  有显著影响。表2统计了不同水流条件下  $\alpha$  的变化情况。由表可知,清水流速修正系数平均值为 0.638,这与张光辉等的研究结果  $\alpha = 0.659$  基本一致<sup>[17]</sup>。含沙水流修正系数为  $0.384 \sim 0.678$ ,平均值为 0.546,比清水  $\alpha$  值小 14.42%,表明坡面流中泥沙的存在使流速梯度变大。对表2进一步分析发现,浑水的流速修正系数标准差和变异系数均大于清水条件下的相应值,表明坡面含沙水流流速分布规律可能更加复杂。

图5显示了不同流量条件下含沙量对流速修正系数  $\alpha$  的影响。由图可知,含沙量对  $\alpha$  的影响与对  $Fr$  值及水流流速的影响一样,存在明显的转折点,即临界含沙量,约为  $300 \text{ kg/m}^3$ 。在流量相同的条件下,当含沙量  $S$  小于  $300 \text{ kg/m}^3$  时,  $\alpha$  随含沙量增加呈指数函数减小。造成这种现象的原因主要为:当水流中含沙量很少时,泥沙颗粒所占混合体的比例也较小,颗粒之间距离很大,颗粒之间的影响较少,水流仍保持二相含沙水流的特征,但泥沙颗粒的存在使水流动量传递的强度减弱,进而使接近水面的流速增大,接近床面的流速减小,流速梯度变陡<sup>[6]</sup>,流速分布也变得越不均匀,故含沙量越大,  $\alpha$  值越小。当含沙量  $S$  大于  $300 \text{ kg/m}^3$  时,  $\alpha$  值突然变大,且随含沙量增加其值变化不明显,小于清水  $\alpha$  值。这主要由于此时的水流流动型态发生变化,已具有高含沙水流的特征,水流中由于黏性颗粒的絮凝作用,泥沙和水不再发生分选,水流从牛顿体变成了非牛顿体,此时的水流具有伪一相流的特点,可以看成宾汉体,水流中出现河流动力学中的流核,水流作为一个整体向前运动<sup>[18]</sup>,主要表现为水流的流速梯度开始变小,流速分布逐渐均匀,进而使  $\alpha$  值增加并趋于稳定。流量不同,  $\alpha$  值也不相同。在含沙量基本相同的条件下,随流量增加,  $\alpha$  值也逐渐增大。这是

表2 不同水流条件下流速修正系数  $\alpha$  的统计特征

Tab.2 Statistical properties of correction factor  $\alpha$  under different flow conditions

水流条件	含沙量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\alpha$ 最大值	$\alpha$ 最小值	$\alpha$ 平均值	标准差	变异系数/%	组数 $n$
清水	0	0.698	0.522	0.638	0.054	8.5	36
浑水	0 ~ 300	0.678	0.384	0.534	0.075	14.0	80
	300 ~ 400	0.657	0.478	0.577	0.057	9.9	30
全部	0 ~ 400	0.698	0.384	0.554	0.077	13.9	146

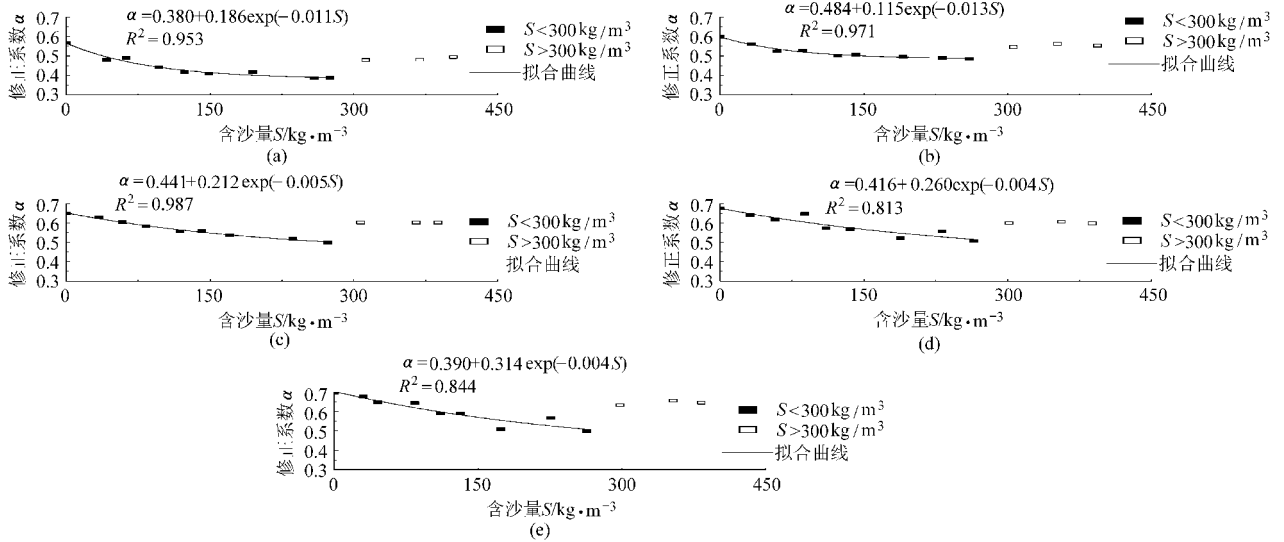


图5 不同流量条件下流速修正系数随含沙量的变化

Fig.5 Sediment load vs correction factor under different unit flow rates

(a)  $q = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (b)  $q = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (c)  $q = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (d)  $q = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (e)  $q = 3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

因为流量越大,水流紊动越强,流速梯度越小, $\alpha$  值越大。

### 2.3 含沙量对坡面流阻力的影响

坡面流阻力直接关系到坡面流速的计算及径流水位曲线的模拟,对发展基于过程的坡面产流汇流和土壤侵蚀预测模型至关重要。目前一些学者进行了相关试验,但得到的结果差异较大,甚至出现完全相反的结论<sup>[3-4,6,8]</sup>。造成这种现象的原因除了与试验条件、泥沙运动形式等因素有关外,还存在一个比较标准的问题,用同一雷诺数或是同一流速、水深(即同一单宽流量)作为比较标准,所得的结论可能有较大差异。

#### 2.3.1 同一雷诺数条件下

基于雷诺数  $Re$  研究水流阻力系数  $f$  是一种传统的阻力计算方法。图6显示了不同水流条件下阻力系数  $f$  与雷诺数  $Re$  的关系。由图可知,清水和浑水的阻力系数均远大于明渠层流区和光滑紊流区阻力预测公式  $f = 24/Re$  及  $f = 0.223/Re^{0.25}$  计算的数值,表明坡面流由于水深很小,受水流特征和地表特征影响要远大于明渠流,诸如光滑的有机玻璃这样的床面,对坡面流而言都是粗糙的,因此含沙量的影响更是不能忽视。清水和浑水阻力系数均随  $Re$  的增大呈减小趋势,两者可以用幂函数关系表示:

$f = 56.48/Re^{0.79}$  ( $R^2 = 0.956$ , 清水) 及  $f = 7.28/Re^{0.50}$  ( $R^2 = 0.362$ , 浑水)。从两者的决定系数  $R^2$  来看,清水阻力系数与雷诺数的相关性很好,而浑水阻力系数与雷诺数的相关性则较差,进一步表明浑水阻力系数除受雷诺数影响外,含沙量的影响也不可忽视。分析图6还发现,在相同雷诺数  $Re$  条件下,当含沙量  $S < 300 \text{ kg}/\text{m}^3$  时,浑水阻力系数大于清水对应值,而当含沙量  $S > 300 \text{ kg}/\text{m}^3$  时,浑水阻力系数小于清水对应值。

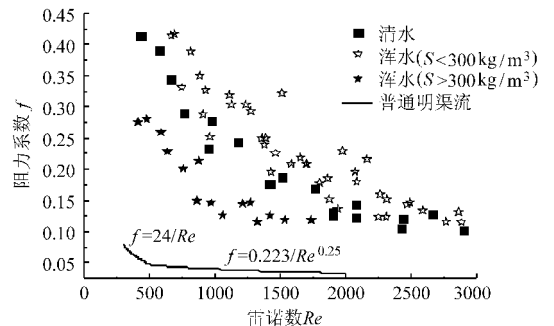


图6 不同水流条件下阻力系数  $f$  与  $Re$  的关系

Fig.6 Friction coefficient vs Reynolds number under different flow conditions

#### 2.3.2 同一单宽流量条件下

同一流量条件下,含沙量对水流阻力系数影响比较明显。与流速修正系数一样,含沙量对水流阻力系数的影响在  $300 \text{ kg}/\text{m}^3$  处也发生明显的变化。

当含沙量很少时( $S < 300 \text{ kg/m}^3$ ),统计分析表明,除单宽流量为  $2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  情况下,阻力系数与含沙量呈显著幂函数关系外,其余流量条件下,阻力系数随含沙量的增加均呈极显著的幂函数增大(图7),与清水相比,含沙水流阻力系数增加达 58.34%。 $S > 300 \text{ kg/m}^3$  时随含沙量进一步增大,阻力系数突然变小,并基本稳定在一个常数附近,但仍略大于清水的相应值。与清水相比,阻力增大约 19.46%。水流流动型态的变化是引起这种现象的主要原因。当含沙量小于  $300 \text{ kg/m}^3$  时,泥沙颗粒之间的距离很大,水流仍属于挟沙二相水流。水流携

带细颗粒泥沙以后,其有效粘度远大于清水的黏滞系数,水流黏性的增加,必然引起其内部能量消耗增加,从而使阻力系数增大。含沙量一旦超过  $300 \text{ kg/m}^3$ ,由于黏性颗粒的絮凝作用,颗粒与颗粒聚集到一起产生絮团,随含沙量的增大,絮团个数不断增多,当絮团个数达到一定程度时,絮团与絮团之间开始搭接,形成絮网,此时的水流具有伪一相流的性质,水流已经从牛顿体变为非牛顿体,水流以流核的形式整体向前运动,此时的水流流速会突然变大,水深减小,阻力系数相应减小,但由于水流的黏性较大,在相同流量条件下,其阻力损失仍大于清水水流。

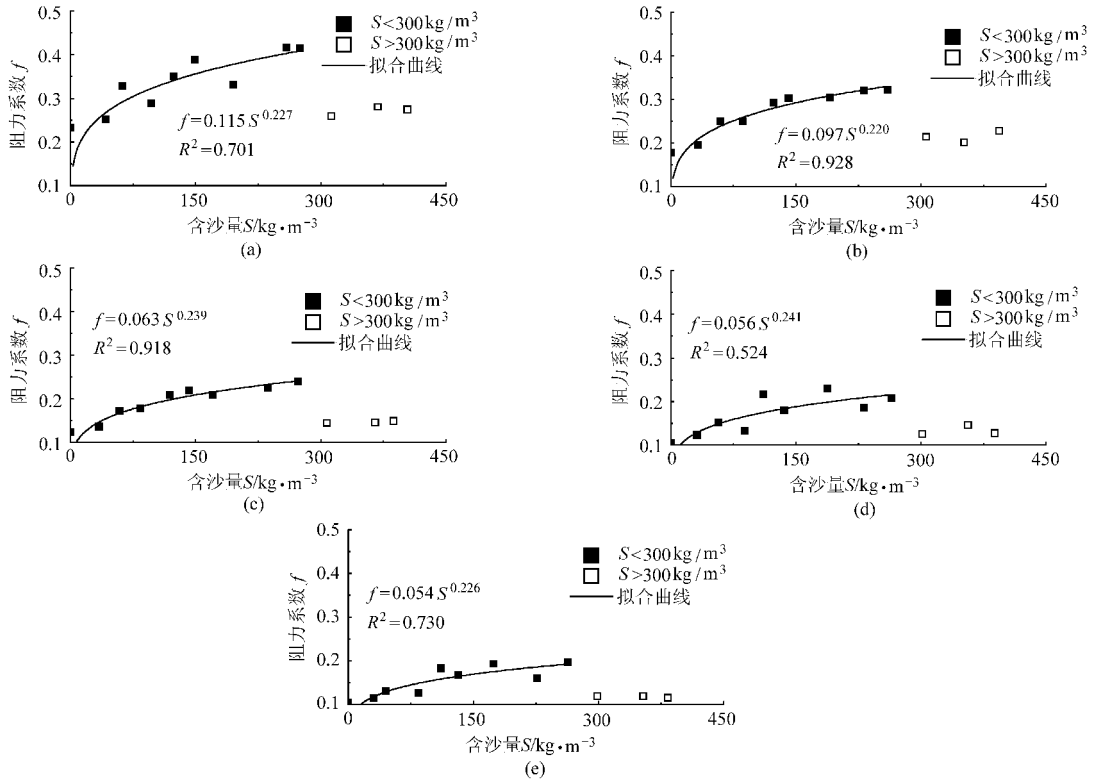


图7 不同流量条件下阻力系数 $f$ 随含沙量的变化

Fig. 7 Sediment load vs friction coefficient under different unit flow rates

(a)  $q = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (b)  $q = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (c)  $q = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (d)  $q = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (e)  $q = 3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

综上所述,在比较含沙水流和清水水流阻力损失时,比较标准不同,得到的结论也略有不同。以相同雷诺数作为比较标准,则当含沙量  $S < 300 \text{ kg/m}^3$  时,浑水阻力系数大于清水对应值,而当含沙量  $S > 300 \text{ kg/m}^3$  时,浑水阻力系数小于清水对应值;以相同的单宽流量作为比较的标准,则水流阻力系数随含沙量的增加而增大,含沙量超过  $300 \text{ kg/m}^3$  时,阻力突然减小并保持稳定,但其值仍大于清水阻力系数。流量不同,含沙水流阻力也不相同。随流量增大,水流阻力减小。

### 3 结论

(1) 不同流量条件下,水流雷诺数均随含沙量增加而减小,与清水相比,含沙水流雷诺数平均减小

约 22.00%。雷诺数减小,表征坡面薄层含沙水流紊动强度减弱。

(2) 不同流量条件下,当含沙量  $S < 300 \text{ kg/m}^3$  时, $Fr$ 、水流流速及流速修正系数均随含沙量增加而减少,与清水相比,其值分别减小 19.47%、14.09% 和 16.30%;当  $S > 300 \text{ kg/m}^3$  时, $Fr$ 、水流流速及流速修正系数突然增大,并随含沙量的进一步增加而趋于稳定,但其值仍略小于清水对应值,表明此时水流型态已发生变化。

(3) 在研究含沙量对坡面流阻力影响时,存在比较标准问题,比较标准不同,得到的结论也有较大差别。当含沙量  $S < 300 \text{ kg/m}^3$  时,无论以相同  $Re$  或相同单宽流量作为比较标准,含沙水流阻力系数均

大于清水对应值;当  $S > 300 \text{ kg/m}^3$  时,以相同的  $Re$  应值,以相同的单宽流量作为比较的标准,则含沙水作为比较的标准,则含沙水流阻力系数小于清水对 流阻力系数大于清水对应值。

## 参 考 文 献

- 1 罗榕婷,张光辉,曹颖. 坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J]. 地理科学进展,2009,28(4): 567~574.  
Luo Rongting, Zhang Guanghui, Cao Ying. Progress in the research of hydrodynamic characteristics of sediment-laden overland flow[J]. Progress in Geography, 2009, 28(4): 567~574. (in Chinese)
- 2 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社,1983.
- 3 Beuselinck L, Govers G, Steegen A, et al. Sediment transport by overland flow over an area of net deposition[J]. Hydrological Processes, 1999, 13(17): 2769~2782.
- 4 Guy B T, Rudra R P, Dickenson W T, et al. Empirical model for calculating sediment-transport capacity in shallow overland flows: model development[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(1): 105~115.
- 5 Guy B T, Dickinson W T, Rudra R P, et al. Hydraulics of sediment-laden sheetflow and the influence of simulated rainfall[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15(2): 101~118.
- 6 Abrahams A D, Li G. Effect of saltating sediment on flow resistance and bed roughness in overland flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(10): 953~960.
- 7 Zhang G H, Luo R T, Cao Y, et al. Impacts of sediment load on Manning coefficient in supercritical shallow flow on steep slopes [J]. Hydrological Processes, 2010, 24(26): 3909~3914.
- 8 Zhang G H, Shen R C, Luo R T, et al. Effects of sediment load on hydraulics of overland flow on steep slopes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(15): 1811~1819.
- 9 潘成忠,马岚,上官周平. 含沙量对草地坡面径流泥沙沉积和水力特性的影响[J]. 水科学进展,2008,19(6): 857~862.  
Pan Chengzhong, Ma Lan, Shanguan Zhouping. Influence of sediment concentration on deposition of silt and runoff hydraulics on grassland[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6):857~862. (in Chinese)
- 10 Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. Transport capacity estimation [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4): 1291~1297.
- 11 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京: 中国工业出版社,1965.
- 12 黄才安. 水流泥沙运动基本规律[M]. 北京: 海洋出版社,2004.
- 13 Rescoe R. The viscosity of suspensions of rigid spheres[J]. British Journal of Applied Physics, 1952, 3: 267~269.
- 14 清华大学水力学教研组. 水力学:下册[M]. 北京: 高等教育出版社,1980.
- 15 钱宁,马惠民. 浑水的粘性及流型[J]. 泥沙研究,1958,3(3): 52~77.  
Qian Ning, Ma Huimin. Viscosity and flow pattern of muddy water[J]. Journal of Sediment Research, 1958, 3(3): 52~57. (in Chinese)
- 16 董月群,雷廷武,张晴雯,等. 集中水流冲刷条件下浅沟径流流速特征研究[J]. 农业机械学报,2013,44(5): 96~100.  
Dong Yuequn, Lei Tingwu, Zhang Qingwen, et al. Ephemeral gully flow velocity under concentrated water flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 96~100. (in Chinese)
- 17 Zhang G H, Luo R T, Cao Y, et al. Correction factor to dye-measured flow velocity under varying water and sediment discharges [J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(1~2): 205~213.
- 18 张耀哲,王亚林,王文娥. 含沙量对U型渠道水流流速横向分布律的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(12): 134~139.  
Zhang Yaozhe, Wang Yalin, Wang Wen'e. Effects of sediment concentration on lateral distribution of water velocity in U-channel [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(12): 134~139. (in Chinese)

(上接第78页)

- 22 Abdalla M, Wattenbach M, Smith P, et al. Application of the DNDC model to predict emissions of  $\text{N}_2\text{O}$  from Irish agriculture [J]. Geoderma, 2009, 151(3~4): 327~337.
- 23 Xu R, Wang M, Wang Y. Using a modified DNDC model to estimate  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes from semi-arid grassland in China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(4): 615~620.
- 24 李虎,王立刚,邱建军. 基于DNDC模型的华北典型农田氮素损失分析及综合调控途径[J]. 中国生态农业学报,2012,20(4):414~421.  
Li Hu, Wang Ligang, Qiu Jianjun, et al. Nitrate loss simulated with DNDC model and control technologies in typical cropland of North China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 20(4): 414~421. (in Chinese)
- 25 Babu Y J, Li C, Frolking S, et al. Field validation of DNDC model for methane and nitrous oxide emissions from rice-based production systems of India[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 74(2):157~174.
- 26 谢军飞,李玉娥. DNDC模型对北京旱地农田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的模拟对比分析[J]. 农业环境科学学报,2004,23(4):691~695.  
Xie Junfei, Li Yu'e. Comparative analysis on measured and DNDC (DeNitrification - DeComposition) modeled  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from upland farm in Beijing[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(4): 691~695. (in Chinese)
- 27 Desjardins R L, Pattey E, Smith W N, et al. Multiscale estimates of  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from agricultural lands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(6):817~824.