

文章编号: 1008-2786-(2015)2-191-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000025

黄土坡面细沟水流分离能力

申楠^{1 2} 王占礼^{2 3*} 陈浩⁴

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 陕西 杨凌 712100;

3. 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 陕西 杨凌 712100;

4. 榆林市府谷县水务局 陕西 府谷 719400)

摘 要: 水流分离能力是土壤侵蚀研究的重点内容之一,阐明细沟水流分离能力变化规律可以深入认识细沟侵蚀过程,为建立细沟侵蚀过程模型奠定重要基础。采用细沟水槽试验方法对黄土坡面细沟水流分离能力进行研究,结果表明:不同流量下,细沟水流分离能力随坡度增加而增大,可用线性方程很好地描述;不同坡度下,细沟水流分离能力随流量的增加而增大,可用幂函数方程很好地描述;细沟水流分离能力因子模型为流量及坡度对细沟水流分离能力影响的二元幂函数方程,方程中流量对细沟水流分离能力的影响大于坡度的影响。

关键词: 黄土坡面; 细沟径流; 分离能力; 坡度; 流量

中图分类号: S157

文献标志码: A

土壤侵蚀使土壤退化和土地生产力下降,造成泥沙、干旱、洪涝等灾害发生,引起生态环境恶化,已经成为全球性的严重环境问题之一。我国由于特殊的自然地理和社会经济条件,侵蚀强度大,危害严重,使土壤侵蚀成为主要的环境问题,其中以黄土高原地区最为严重,该区不仅是我国也是世界上土壤侵蚀最为严重的地区。细沟侵蚀是黄土高原地区坡面极其重要的侵蚀方式之一,是黄土高原坡耕地表土和养分流失的重要原因及小流域泥沙的重要来源。坡面上出现细沟后,水流由面状漫流变为线状水流,坡面产沙增加几倍甚至几十倍^[1-3]。细沟侵蚀过程包括细沟径流引起土壤的分离、搬运和沉积 3 个子过程。土壤分离是这三大过程中的初始阶段,它是侵蚀泥沙的主要来源和泥沙产生的必然途

径^[4]。Owoputi 和 Stolte 将土壤的分离定义为在特定的地表条件下,土壤颗粒从土体中剥离的过程^[5]。径流分离能力是指特定水动力条件下清水分离土壤的最大速率,它表征了径流分离土壤的最大可能性^[6]。分离能力的大小直接控制着侵蚀的严重程度,坡面上侵蚀程度强的地方,土壤分离也较活跃^[7]。因此,水流分离能力是土壤侵蚀研究的重点内容之一。细沟水流的流量和坡度,是制约细沟水流分离能力大小的主要因子和通过试验手段能直接测量得到的水流基本特征参数。所以,通过实验模拟阐明细沟水流分离能力大小变化规律,对深入认识细沟侵蚀过程机理具有重要作用,并可为建立细沟侵蚀过程模型奠定重要基础,为坡面水土流失治理提供重要科学依据。

收稿日期(Received date): 2013-09-14; 修回日期(Accepted): 2014-02-20。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41171227 41471230); 中国科学院重点项目(KZZD-EW-04-03)。[The national Natural Science Foundation of China funded project (41171227 41471230); the Chinese Academy of Sciences funded major project (KZZD-EW-04-03).]

作者简介(Biography): 申楠(1988-),女(汉族),陕西省渭南市人,博士研究生,研究方向为土壤侵蚀。[Shen Nan (1988-), Ph.D. Weinan, Shaanxi province, master student, research direction: soil erosion.] E-mail: shennan@nwsuaf.edu.cn

* 通信作者(Corresponding author): 王占礼(1960-),男(汉族),陕西省榆林市人,博士,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀过程及预报模型研究。[Wang Zhanli (1960-), male, Yulin, Shaanxi province, Ph.D., professor, Ph.D. supervisor, mainly engaged in the research on processes and prediction model of soil erosion.] E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn

1 前人研究概况

在不同坡度与流量组合下,会产生不同的水流流速、水深、流态和阻力等等,而这些水力学特性又会直接影响水流的分离能力,所以,水流流量和坡度与水流分离能力具有密切相关性。1965年 Lyle 和 Smerdon 首次用水槽试验研究了土壤分离速率与径流剪切应力间的关系^[8]。Foster 和 Meyer 于 1972 年提出当水流剪切应力大于土壤的临界剪切应力时,土壤颗粒被剥蚀^[9]。1991 年 Nearing 首次用变坡水槽对土壤分离速率进行了研究,得出径流分离速率与坡度、水深和土壤中心粒径呈线性函数关系,三者中坡度对分离速率的影响最显著^[10]。分离速率随放水流量的增大而增大,但是各个放水流量下的增加趋势又不相一致^[11-12]。随放水流量增加,坡面流速迅速增大,导致水流切应力、单位水流功率、径流动能增大,进而水流对土壤颗粒的剥离能力增强,最终土壤侵蚀加剧^[13]。对于坡度或者流量与分离能力的单因子关系,一些学者得出了不同的结论。柳玉梅、张光辉等的研究显示:随着坡度的增大,土壤分离能力基本呈线性增加,随着流量的增大土壤分离能力呈幂函数形式增加,随着坡度的增大,流量对土壤分离能力的影响逐渐向线性逼近甚至完全呈线性关系^[14-16]。唐科明等利用变坡水槽,研究草地及休闲对照地土壤分离速率与坡度、流量等参数间的关系得出:随流量增加,休闲对照地土壤分离速率按指数关系增大;随坡度增加,按线性关系增大^[17]。Zhang et al. 利用变坡实验水槽,首次对黄土区农耕地非扰动土样的分离过程进行了研究得出:不同坡度条件下,土壤分离速率与流量间呈简单的线性关系^[18-19]。而土壤分离速率与坡度间的关系和流量的大小密切相关,当流量较小时,它们间呈幂函数关系,而当流量较大时,土壤分离速率与坡度间呈对数相关。细沟水流分离能力受流量和坡度两个因子的综合作用,而不是受任何一个单一因子的影响,所以将这两个因子与分离能力进行多因子分析更具有实际意义。对于流量和坡度两个因子与分离速率的关系,王瑄、Zhang et al. 认为土壤分离速率与流量和坡度间呈幂函数关系,土壤分离速率均随着流量和坡度的增大而增大,与坡度相比,流量对土壤分离速率的影响更显著,利用流量和坡度的幂函数可以准确地预测土壤分离速率^[20-22]。然而,杨春

霞、何小武等的多因子分析结果显示,土壤剥蚀率大小与流量及坡度呈线性相关^[23-24]。同时,薄层径流分离土壤存在临界流量,小于临界流量时,土壤分离将不发生;与土壤分离的水流功率模型相比,坡度-流量模型更具实用性和可操作性^[24]。

综上所述,由于研究者所采用的试验设计、方法、试验条件和土壤类型等方面的差异,取得的这些研究结论不尽相同,而且是否适合于黄土高原坡面细沟水流分离能力描述尚不清楚。流量与坡度是控制细沟水流分离能力变化的主要因子,能人为直接调控,使用上方便、实用、可操作性强。为此,本文采用细沟水槽试验方法,在不同坡度和流量组合条件下对黄土坡面细沟水流分离能力进行研究,分析细沟水流分离能力随坡度及流量的变化规律,建立基于流量坡度因子的黄土坡面细沟水流分离能力模型,以进一步深入认识黄土陡坡坡面细沟侵蚀过程,并为坡面细沟侵蚀过程模型开发提供重要子模型和奠定重要基础。

2 材料与方法

2.1 试验装置与试验土壤

试验设备主要分为三部分:水槽装置、土样室、供水调节装置(图1)。其中,水槽装置分为外槽和内槽。外槽为长400 cm、宽40 cm、高40 cm的钢制槽,主要对内槽起固定支撑作用;内槽由PVC板焊接嵌入外槽中,为长400 cm、宽10 cm、高10 cm的细沟水槽,其底部用油漆均匀黏结一层试验土壤,模拟与供试土壤表面相似的下垫面糙率。试验水槽整体焊接在可移动的支架上,支架末端有升降装置,通过手动调节,达到在 $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 坡度间调节的目的;土样室是内径规格为长10.5 cm、宽9.9 cm、高5 cm的有机玻璃底盒,厚度为3 mm,其大小刚好可嵌入到细沟水槽下端底部的一个矩形开口内,并且放好后有机玻璃底盒的顶部正好与水槽底部齐平,用玻璃胶对其与水槽四周边壁的缝隙进行密封处理。试验时将一个装有试验土壤的有机玻璃土样盒放入土样室中,土样盒外径刚好与底盒内径规格重合,即外径为长10.5 cm、宽9.9 cm、高5 cm,厚度为2 mm,底部开9个小孔用来使土壤吸水。供水调节装置主要包括溢流箱、流量计等,它们通过水管相连。溢流箱置于水槽顶部,它可调节流入水槽的水流,使其稳定、均匀,流量计调节供水流量。

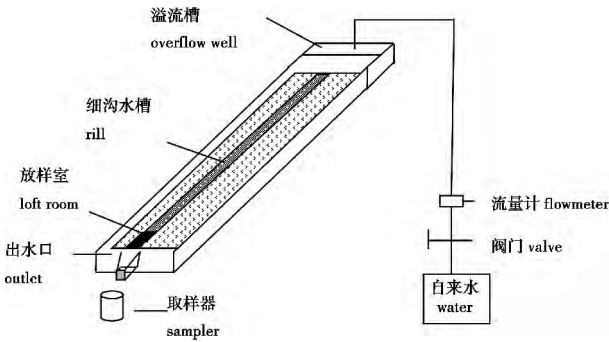


图 1 试验水槽
Fig. 1 Experimental flume

供试土壤类型为黄绵土,取自位于典型黄土丘陵沟壑区的陕西安塞,土壤机械组成见表 1,试验土壤前期含水量为 14%,容重为 1.2 g/cm³。试验前将土样按照设计容重及含水量分层均匀装入土样盒中,随后放入大的盛水铁皮盒内吸水饱和。试验开始前将该土样盒放入土样室中,使土样表面与水槽底部保持相同高度,并盖上滑盖,等待试验。

2.2 细沟水流分离能力测定

试验前将水槽坡度和流量计读数调节到试验设计流量和坡度,并人工再次率定流量,以保证试验流量的准确性。等水流流动稍许稳定后(部分坡度流量组合条件下还测定了水流流速与水深),迅速取掉土样盒上面的滑盖,同时按下秒表,使水流开始分离土壤,观测土样盒中分离深度,待土壤冲刷深度达到 1.5 cm 左右时^[25],迅速盖上滑盖,同时再按下秒表,记录下冲刷时间。试验完毕后,将土样盒中剩余的土壤烘干称重,最后得到冲刷后的土壤干土重,并由如下公式计算得到细沟水流分离能力(即清水分离土壤的速率)

$$Dc = \frac{W_w - W_d}{t \times A} \quad (1)$$

式中 Dc 为细沟水流分离能力 kg/(m²·s); W_w 为试验前土壤的干土重 kg; W_d 试验后土壤的干土重, kg; t 为水流冲刷时间 s; A 为土壤盒底的投影面积, m²。

试验设计坡度分别为: 10.51%、15.84%、21.26%、26.79%、32.49%、38.39% 6 个坡度; 流量为 1.11 × 10⁻³ m²/s、1.56 × 10⁻³ m²/s、2.0 × 10⁻³ m²/s、2.44 × 10⁻³ m²/s、2.89 × 10⁻³ m²/s、3.33 × 10⁻³ m²/s、3.78 × 10⁻³ m²/s 7 个流量。坡度和流量完全组合 42 场试验,每场试验均重复一次,共 84 场次。

3 结果与分析

3.1 细沟水流分离能力随坡度的变化

图 2 为各流量(换算为单宽流量)条件下细沟水流分离能力随坡度变化的关系曲线。由图 2 可以明显看出,各流量条件下,细沟水流分离能力的变化呈坡度的增函数变化特征,即坡度越大,分离能力越大。在同坡度下,较大流量的水流分离能力大于较小流量的水流分离能力,即流量越大,水流分离能力也越大。较小流量下(1.11 × 10⁻³ m²/s、1.56 × 10⁻³ m²/s、2.0 × 10⁻³ m²/s、2.44 × 10⁻³ m²/s) 水流分离能力随坡度增大的增加速率相对较小,而较大流量下(2.89 × 10⁻³ m²/s、3.33 × 10⁻³ m²/s、3.78 × 10⁻³ m²/s) 水流分离能力随坡度增大的增加速率则相对较大。分析图 2 还可以看到,当坡度在小坡度范围(10.51% ~ 15.84%) 变化时,分离能力随坡度增大而增加的速率较缓,且各流量下分离能力随坡度增大的增加速率基本一致,在坡度达到 15.84% 后,水流分离能力随坡度增大而增加的速率明显加快,大流量下(2.89 × 10⁻³ m²/s、3.33 × 10⁻³ m²/s、3.78 × 10⁻³ m²/s) 水流分离能力随坡度增大而增加的速率尤其明显,且大小流量下水流分离能力随坡度增大而增加的速率也基本分别一致。

将图 2 显示的细沟水流分离能力随坡度的变化特征进行统计分析,取得表 2 的分析结果。从表 2 可以看出,在不同流量水流作用下,细沟水流分离能力与坡度之间呈线性递增关系,其显著性水平为高度显著($P=0.01$)。

3.2 细沟水流分离能力随流量的变化

图 3 为各坡度条件下细沟水流分离能力随流量变化的关系曲线。由图 3 中的曲线可以明显看出,各坡度条件下,细沟水流分离能力的变化呈流量的

表 1 试验土壤机械组成
Table 1 Mechanical composition of experimental soil

粒径 particle size/mm	体积百分比 volume percent fraction/%
<0.001	6.85
0.001 ~ 0.002	1.85
0.002 ~ 0.005	2.88
0.005 ~ 0.01	3.84
0.01 ~ 0.05	48.00
0.05 ~ 0.25	36.58

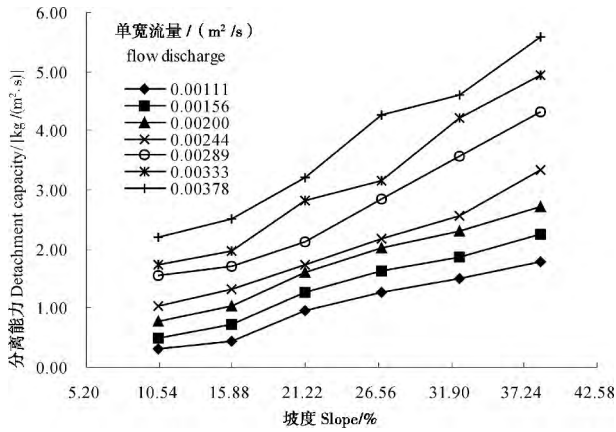


图2 不同流量下细沟水流分离能力随坡度的变化

Fig.2 Variation of soil detachment capacity by rill flow with slope under different flow discharges

表2 不同流量下细沟水流分离能力随坡度变化经验方程

Table 2 Empirical equations of variation of soil detachment capacity by rill flow with slope under different flow discharges

流量 Flow discharge/(m ² /s)	回归方程 Regression equation	R ²	P
0.001 11	$Dc = 0.0563s - 0.3174$	0.981 2	0.01
0.001 56	$Dc = 0.0643s - 0.1841$	0.987 5	0.01
0.002 00	$Dc = 0.0716s - 0.0003$	0.990 1	0.01
0.002 44	$Dc = 0.081s - 0.0585$	0.980 5	0.01
0.002 89	$Dc = 0.1041s - 0.1663$	0.967 1	0.01
0.003 33	$Dc = 0.1187s - 0.2646$	0.975 4	0.01
0.003 78	$Dc = 0.1246s - 0.7101$	0.980 1	0.01

式中: Dc 为细沟水流分离能力 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; s 为坡度, %; R^2 为决定系数; P 为显著性水平。

增函数变化特征,即流量越大,水流分离能力越大。同流量下,较大坡度的水流分离能力比较小坡度的大,即坡度越大,水流分离能力越大。由图3可知,当流量在小流量范围($1.11 \times 10^{-3} \sim 2.44 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)变化时,水流分离能力随着流量的增大增速较缓,在流量达到 $2.44 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 后,水流分离能力随流量的增大开始快速增大,大坡度条件下(达到15.84%后)分离能力随流量增大的增速尤其明显。

对图3中显示的细沟水流分离能力随流量变化的数据进行统计分析,取得表3的分析结果。从表3可以看出,在不同坡度条件下,细沟水流分离能力随流量的变化呈幂函数递增关系,其显著性水平为高度显著($P = 0.01$),且自变量流量的幂指数在0.9503~1.6425间。

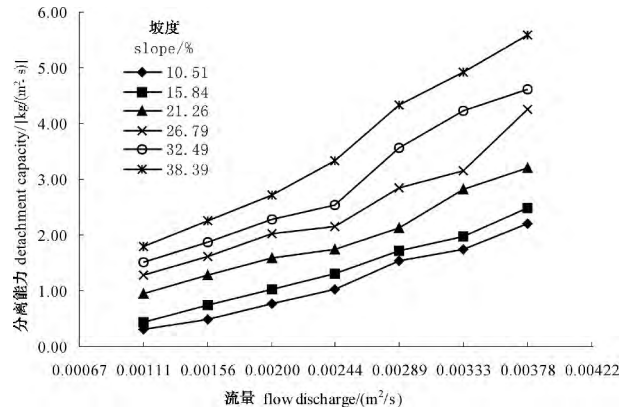


图3 不同坡度下细沟水流分离能力随流量的变化

Fig.3 Variation of soil detachment capacity by rill flow with flow discharge under different slopes

表3 不同坡度下细沟水流分离能力随流量变化经验方程

Table 3 Empirical equations of variation of soil detachment capacity by rill flow with flow discharge under different slopes

坡度 Slope/%	回归方程 Regression equation	R ²	P
10.51	$Dc = 20984q^{1.6425}$	0.995 4	0.01
15.84	$Dc = 5451.3q^{1.3827}$	0.998 1	0.01
21.26	$Dc = 679.03q^{0.9733}$	0.972 2	0.01
26.79	$Dc = 635.62q^{0.9229}$	0.955 4	0.01
32.49	$Dc = 891.57q^{0.9503}$	0.963 8	0.01
38.39	$Dc = 1142.8q^{0.9596}$	0.982 8	0.01

式中: q 为流量, m^2/s 。

坡度和流量是影响细沟水流分离能力的两个重要因子。能量是任何条件下侵蚀过程发生发展的动力本源。同一流量下,随着坡度的增大,细沟水流受到沿坡面向下重力的分力增大,使得水流具有更大的流速,在水流质量未变的情况下,通过流速增大的变化,使沿着坡面向下的水流动能增加;同时,随着坡度变陡,相同流量下,细沟水流的位置升高,在水流质量未变的情况下,通过水流高度增大的变化,使细沟水流具有的势能亦越大。另外,同一坡度下,随着流量的增大,水体单位时间流过坡面的质量增加,这样在相同坡度下,虽然水流的高度未变,但水流具有的势能增大了,由于流量增大时流速也有增大,使得水流在沿着坡面流动时转化成的动能亦增加,即同一坡度下,随着流量的增大水流的动能增加。由此可见,随着坡度的增加,相同流量下的细沟水流具有的总能量增大,随着流量的增加,相同坡度下的细沟水流具有的总能量也增大,这样水流克服土壤的抗侵蚀性,分离土壤的能力增强,即细沟水流分离能

力增大。此外,细沟水流沿坡面向下流动过程中还要克服水槽底部和侧壁的摩擦力做功而损耗一部分能量,所以,与大坡度下(达到15.84%后)相比,在小坡度范围内(10.51%~15.84%),由于细沟水流本身具有的总能量较小,克服水槽底部和侧壁的这些摩擦力做功而损耗一部分能量后剩余的能量进一步变小,所以当坡度在小坡度范围(10.51%~15.84%)变化时,水流分离能力随坡度增大虽然也增加但增速较缓。而随着坡度变陡,水流获得了更大的动能,加之更多的势能转化为动能,水流的总能量急剧增大,这样水流克服摩擦阻力做功损耗的能量占总能量的比例越来越小,而用于剥蚀土壤做功的能量却越来越大,因此细沟水流的分离能力在大坡度下(达到15.88%后)随坡度增大的增速也就明显地越来越快。类似的原因,也使得水流在小流量范围(0.001 11~0.002 44 m²/s)内,分离能力随流量增大的增速较缓,而当流量增大达到一定程度(超过0.002 44 m²/s)后,增加的速率快速增大。

综上可知,细沟水流分离能力随坡度及流量的增加皆呈增大的变化规律特征,与坡度间呈线性函数递增关系,与流量间呈幂函数递增关系。在小坡度(10.51%~15.84%)及小流量(1.11×10⁻³~2.44×10⁻³ m²/s)下,细沟水流分离能力随坡度及流量的增大而增加的速率较小,增速比较一致;在大坡度(15.84%~38.39%)及大流量(2.89×10⁻³ m²/s、3.33×10⁻³ m²/s、3.78×10⁻³ m²/s)下,细沟水流分离能力随坡度及流量的增大而增加的速率较大,但增速的一致性相对较差。

3.3 细沟水流分离能力因子模型

3.3.1 分离能力因子模型

从上述分析讨论可以看出,坡度及流量是影响细沟水流分离的主要因子,随着坡度或流量的增大,细沟水流分离能力均增大,且均呈极显著相关($R^2=0.9554\sim0.9981$, $P=0.01$)。但细沟水流分离能力并不是受坡度或水流流量的单一作用影响,而是受两者共同的综合影响。因此,有必要进一步分析流量及坡度共同作用对细沟水流分离能力的综合影响关系。

对细沟水流分离能力随坡度和流量变化的试验数据进行多元统计分析,取得不同坡度及流量下细沟水流分离能力因子模型为

$$D_c = 87.1181q^{1.1386}S^{0.9985} \quad (1)$$

($R^2=0.9554$, $F=418.1939 > F(2, 39)_{0.01}=5.20$)

从式(1)可以得出:细沟水流分离能力对坡度及流量因子的综合响应关系可用二元幂函数方程很好地描述($R^2=0.9554$),同时,通过相关分析对方程进行显著性检验表明:坡度及流量二因子与细沟水流分离能力呈极显著相关的($P<0.01$)关系。所以,方程式(1)可以用来计算细沟水流分离能力。式(1)还表明:流量的幂指数(1.138 6)比坡度的幂指数(0.998 5)大14.03%,说明在该试验条件下,细沟水流分离能力受流量的影响比坡度大。

将用式(1)计算得到的细沟水流分离能力的各模拟值,与不同坡度与流量组合下得到的细沟水流分离能力实测值点绘在直角坐标系中得图4。

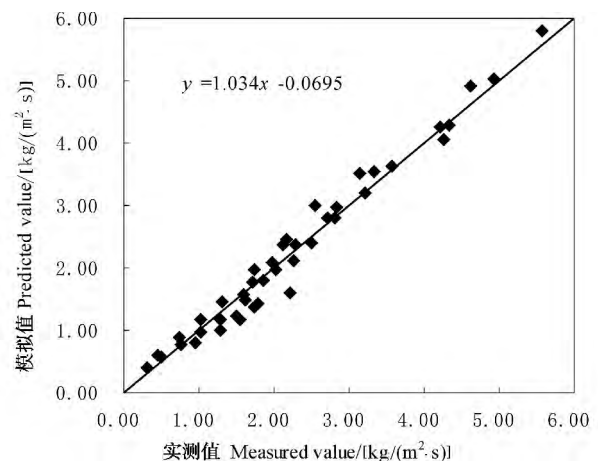


图4 水流分离能力实测值与预测值

Fig. 4 Measured vs. predicted soil detachment capacity by rill flow

图4表明:实测细沟水流分离能力与用式(1)模拟计算的水流分离能力很接近,数据点基本在1:1线附近。通过计算,细沟水流分离能力模拟值平均值是实测值平均值的1.003倍,线性回归斜率为1.034,可见,式(1)很好地拟合了试验条件下的细沟水流分离能力。进一步采用国际上通常使用的Nash模型有效系数对建立的模型式(1)的模拟效果进行检验。Nash模型有效系数计算公式为下面(2)式

$$NE = 1 - \frac{\sum (D_c - D'_c)^2}{\sum (D_c - \bar{D}_c)^2} \quad (2)$$

式中 NE 为有效系数,无量纲; D_c 为实测分离能力 kg/(m²·s); D'_c 为预测分离能力 kg/(m²·s); \bar{D}_c 为实测分离能力的平均值 kg/(m²·s)。

计算得到,表征细沟水流分离能力模拟值与实测值相关性的有效系数为0.971 1,表明该研究取得的细沟水流分离能力模型式(1)的模拟效果很好。

上述结果显示 在一定流量($1.11 \times 10^{-3} \sim 3.78 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)、坡度(10.51% ~ 38.39%) 范围内 采用式(1) 对黄土坡面细沟水流的分离能力模拟预测基本是准确的 水流分离土壤的能力可以用流量和坡度的二元幂函数方程来模拟计算。

3.3.2 分离能力因子模型讨论

现将具有国际水准的国内主要水流分离能力因子模型 Zhang et al. (2003)^[18]、Zhang et al. (2009)^[26] 与本试验模型进行对比分析。式(3)、(4) 分别为 Zhang et al. 在 2003 年与 2009 年研究得到的水流分离能力与坡度和流量关系的两个关系式

$$D_c = 130.41q^{0.89}S^{1.02} \quad (3)$$

$$D_c = 38407.19q^{1.60}S^{1.45} \quad (4)$$

对比发现 本实验得到的式(1) 与 Zhang et al. 的式(3)、(4) 均显示: 坡度和流量与细沟水流分离能力之间的关系可用二元幂函数方程来表达。主要差别在于关系式的系数与幂指数不相同。本试验条件下 式(1) 中的系数(87.118) 比 Zhang et al. (2003) 建立的原状土分离模型(3) 中的系数(130.41) 小 33.2% 比流量的幂指数(0.89) 大 21.8% 比坡度的幂指数(1.02) 小 2.1%; 比 Zhang et al. (2009) 建立的扰动土分离能力与流量、坡度关系式(4) 中的系数(38407.19) 小 99.8% 比流量的幂指数(1.60) 小 28.8% 比坡度的幂指数(1.45) 小 31.1%。

为了检验选择参与比较的两个模型在本试验条件下的适用性 现采用式(5)、(6)、(7)、(8) 和(2) 表达的相对误差(RE)、平均相对误差(EE)、相对误差绝对值平均值(RME)、决定性系数 R^2 、Nash 模型效率系数 NE 5 个模型误差评价指标进行分析和评价。各指标的计算公式为

$$RE = \frac{(Q_i - P_i)}{Q_i} \times 100 \quad (5)$$

$$EE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i - P_i}{Q_i} \right) \times 100\% \quad (6)$$

$$REN = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_i - P_i}{Q_i} \right| \times 100\% \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (8)$$

式中 Q_i 为实测值 P_i 为模拟值 \bar{O} 为实测值平均值 \bar{P} 为模拟值平均值 n 为数据样本量。

表 4 为选择的具有国际水准的国内主要水流分离能力模型与本试验研究条件下建立的黄土坡面细沟水流分离能力模型的误差评价指标计算结果对比。

从表 4 可以看出 采用选择的两个模型式(3)、(4) 模拟本试验条件下的水流分离能力并不理想, 而本试验条件下建立的模型模拟的分离能力值与实测值差异较小。造成这种结果的原因有以下几方面: 首先 本试验的流量坡度范围与 Zhang et al. 的不一样。本试验采用的单宽流量为 1.11、1.56、2.0、2.44、2.89、3.33、3.78 $\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$,坡度为 10.51%、15.84%、21.26%、26.79%、32.49%、38.39% 而 Zhang et al. (2003, 2009) 的单宽流量为 0.625、1.25 $\times 10^{-3}$ 、2.5 $\times 10^{-3}$ 、3.75 $\times 10^{-3}$ 、5.00 $\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$,坡度为 8.8%、17.6%、26.8%、36.4%、46.6%。二者流量坡度范围虽然有部分重叠,但是取值区间并没有完全重合,并且具体取值并不一样,可见流量、坡度区间范围对通过经验研究取得的结果来说具有重要影响,区间范围不同必然会有差异性的结果。其次 试验土壤不同。本试验所用土壤为取自陕西安塞的黄绵土,土壤容重为 1.2 g/cm^3 ,试验前期土壤质量含水量为 14% ,为扰动土。Zhang et al. 在模型式(3) 研究中试验土壤取自安塞试验场种植豆子的地表层原状土,土壤容重为 1.15 g/cm^3 ,为黄土区农耕地非扰动土壤。Zhang et al. 在模型式(4) 研究中试验土壤取自北京市密云水库石匣小流域的薄层干淋溶土,土壤容重为 1.2 g/cm^3 ,试验前土壤含水量 18% ,为扰动褐土。最后,试验设备不同。本实验模拟的是细沟水流的分离速率,水槽为细沟水槽,采用的细沟宽度是 10 cm ,而 zhang et al. 的水槽宽度分别为 0.35 cm 与 0.4 cm;

表 4 主要水流分离能力模型与本试验模型对比

Table 4 Contrast of the main soil detachment capacity models with the model

模型	研究者	RE/%	EE/%	RME/%	R^2	NE
$D_c = 130.41q^{0.89}S^{1.02}$ (3)	Zhang et al. (2003)	98 ~ 99	99.13	99.13	0.959 0	-3.086 4
$D_c = 38407.19q^{1.60}S^{1.45}$ (4)	Zhang et al. (2009)	77 ~ 92	85.84	85.84	0.958 9	-1.808 1
$D_c = 87.1181q^{1.1386}S^{0.9985}$ (1)	本试验	-35 ~ 28	-0.90	10.29	0.955 4	0.971 1

除此之外,模型式(3)、(4)在测定水流分离速率时均采用圆形土样盒,直径为10 cm、深为5 cm,而本试验采用的为矩形有机玻璃盒,长10.5 cm、宽9.9 cm、深5 cm。土样盒形状的不同,使水槽中能够被水流接触冲刷的土壤的面积与数量不同,造成分离速率的不同。

综上所述,由于试验研究的流量与坡度范围、土壤类型、试验设备,以及试验研究针对的对象等各方面的差异,国内外其他学者研究得到的坡面水流分离能力模型不能很好地适应于黄土坡面细沟水流分离能力的计算与模拟。本研究得到的细沟水流分离能力模型对在一定的条件下模拟黄土坡面细沟水流分离能力提供了有益的帮助。

4 结论

1. 细沟水流分离能力随坡度的变化:不同流量条件下,细沟水流分离能力随坡度的增加呈线性递增变化。在小坡度范围内(10.51%~15.84%),水流分离能力随坡度增大的增速较缓,且各流量下水流分离能力随坡度增大的增速率基本一致,在坡度超过15.84%后,水流分离能力随坡度增大的增速明显加快。

2. 细沟水流分离能力随流量的变化:不同坡度条件下,细沟水流分离能力随流量的增加呈幂函数递增变化趋势。在小流量范围内($1.11 \times 10^{-3} \sim 244 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$),水流分离能力随着流量的增大增速较缓,在流量达到 $2.44 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 后,水流分离能力随流量增大开始快速增大,大坡度条件下(达到15.84%后)分离能力随流量增大的增速尤其明显。

3. 细沟水流分离能力因子模型为细沟水流分离能力随流量及坡度变化的二元幂函数方程: $D_c = 87.1181q^{1.1386}S^{0.9985}$, ($R^2 = 0.9554$, $P = 0.01$, $NE = 0.9711$)。流量对细沟水流分离能力的影响比坡度大。

参考文献(References)

- [1] Tan Zhenxue, Wang Zhanli, Liu June, et al. Response of runoff-induced sediment discharge to hydrodynamic parameters of rill on loess hillslope[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(5): 1-6 [谭贞学, 王占礼, 刘俊娥, 等. 黄土坡面细沟径流输沙对水动力学参数的响应[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(5): 1-6]
- [2] Cai Qiangguo, Zhu Yuanda, Wang Shiyang. Research on processes and factors of rill erosion[J]. Advances In Water Science, 2004, 15(1): 11-18 [蔡强国, 朱远达, 王石英. 几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 11-18]
- [3] Li Zhanbin, Qin Baishun, Kang Wei, et al. Indoor experimental studies on hydrodynamic characteristics of runoff in rill erosion process steep slope[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 64-68 [李占斌, 秦百顺, 亢伟, 等. 陡坡面发育的细沟水动力学特性室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 64-68]
- [4] De Roo A P J, Wesseling C G, Ritsema C J. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins I: theory, input and output[J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8): 1107-1118
- [5] Owoputi L O, Stolte W J. Soil detachment in the physically based soil erosion process: a review[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(4): 1099-1110
- [6] Zhang Guanghui. Advances in study of runoff detachment processes based on hydraulics[J]. Advances In Water Science, 2001, 12(3): 395-402 [张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 395-402]
- [7] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A, et al. Hydraulics and erosion in eroding rills[J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 865-876
- [8] Lyle W M, Smerdon E T. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils[J]. Transactions of the ASAE, 1965, 8(3): 419-422
- [9] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow[J]. Trans of the ASAE, 1972, 15(1): 99-102
- [10] Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes[J]. Soil Science Society of American Journal, 1991, 55(2): 339-344
- [11] Ding Wenfeng. Relationships between soil detachment rate and runoff hydrodynamic indexes of purple soil slope and red soil slope[J]. Journal of Sediment Research, 2010, 4(6): 16-22 [丁文峰. 紫色土和红壤坡面径流分离速度与水动力学参数关系研究[J]. 泥沙研究, 2010, 4(6): 16-22]
- [12] Shen Zhenzhou, Yao Wenyi, Li Mian, et al. Influence factors of runoff energy consumption and denudation amount on loess slope[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(6): 9-13 [申震洲, 姚文艺, 李勉, 等. 黄土坡面径流能耗与土壤剥蚀率影响因子[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(6): 9-13]
- [13] Wu Shufang, Wu Pute, Song Weixiu, et al. Hydrodynamic process of soil detachment by surface runoff on Loess slope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(2): 223-228 [吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 223-228]
- [14] Liu Yumei, Zhang Guanghui, Li Lijuan, et al. Quantitative effects of hydro-dynamic parameters on soil detachment capacity of overland flow[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 96-99 [柳玉梅, 张光辉, 李丽娟, 等. 坡面流水动力学参数对土壤分离能力的定量影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 96-99]
- [15] Zhang Guanghui, Liu Baoyuan, Zhang Keli. Experimental simulation of hydraulic mechanism of soil detachment by surface runoff on sloped land[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(6): 882-886 [张光辉, 刘宝元, 张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学实验研究

- [J]. 土壤学报 2002 ,39(6):882-886]
- [16] Liu Yumei ,Zhang Guanghui ,Han Yanfeng. Study on the coupling relationship between soil detachment rate and sediment transport rate of overland flow [J]. Journal of soil and water Conservation 2008 , 22(3):24-28 [柳玉梅 ,张光辉 ,韩艳峰. 坡面流土壤分离速率与输沙率耦合关系研究[J]. 水土保持学报 2008 22(3):24-28]
- [17] Tang Keming , Zhang Guanghui , Ren Zongping , et al. Dynamic mechanism of soil detachment by shallow flow on slope [J]. Journal of soil and water Conservation ,2011 25(4) 46-49 [唐科明 ,张光辉 ,任宗萍 ,等. 坡面薄层水流分离土壤的动力学机理[J]. 水土保持学报 2011 25(4) 46-49]
- [18] Zhang G H , Liu B Y , Liu G B , et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow [J]. Soil Science Society of American Journal , 2003 67(3):713-719
- [19] Zhang Guanghui , Liu Baoyuan , He Xiaowu. Study on hydro-dynamic mechanism of natural soil detachment in loess region [J]. Journal of soil and water Conservation 2005 ,19(4):48-52 [张光辉 ,刘宝元 ,何小武. 黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究[J]. 水土保持学报 2005 ,19(4):48-52]
- [20] Wang Xuan ,Li Zhanbin ,Shang Baixiao ,et al. Indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and water erosion factor [J]. Transactions of the CSAE 2008 24(9):22-26 [王琯 ,李占斌 ,尚佰晓 ,等. 坡面土壤剥蚀率与水蚀因子关系室内模拟试验[J]. 农业工程学报 2008 24(9):22-26]
- [21] Wang Xuan , Li Zhanbin , Zheng Liangyong. An indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and shear stress [J]. Journal of Shenyang Agricultural University 2007 - 08 ,38(4):577-580 [王琯 ,李占斌 ,郑良勇. 土壤剥蚀率与水流剪切力关系室内模拟试验[J]. 沈阳农业大学学报 , 2007 - 08 ,38(4):577-58]
- [22] Zhang G H ,Liu B Y ,Nearing M A ,et al. Soil detachment by shallow flow [J]. Transactions of the ASAE 2002 45(2):351-357
- [23] Yang Chunxia ,Yao Wenyi ,Xiao Peiqing ,et al. Distribution of shear stress and the relationship between soil detachment rate and shear stress under experiments [J]. Science of Soil and Water Conservation 2010 8(6):53-57 [杨春霞 ,姚文艺 ,肖培青 ,等. 坡面径流剪切力分布及其与土壤剥蚀率关系的试验研究[J]. 中国水土保持科学 2010 8(6):53-57]
- [24] He Xiaowu , Zhang Guanghui ,Liu Baoyuan. Soil detachment by shallow flow on slopes [J]. Transactions of the CSAE 2003 ,19(6):52-55 [何小武 ,张光辉 ,刘宝元. 坡面薄层水流的土壤分离实验研究[J]. 农业工程学报 2003 ,19(6):52-55]
- [25] Zhang Guanghui. Experimental simulation on effects of scouring time on soil detachment rate [J]. Journal of Soil and Water Conservation 2002 ,16(2):1-4 [张光辉. 冲刷时间对土壤分离速率定量影响的实验模拟[J]. 水土保持学报 2002 ,16(2):1-4]
- [26] Zhang G H , Liu Y M , Han Y F , et al. Sediment Transport and Soil Detachment on Steep Slopes: II Sediment Feedback Relationship [J]. Soil Science Society of American Journal , 2009 ,73(4):1298-1304

Soil Detachment Capacity of Rill Flow on Loess Hillslope

SHEN Nan^{1 2} , WANG Zhanli^{2 3} , CHEN Hao⁴

(1. Institute of Soil and Water Conservation , Northwest A & F University , Yangling , Shaanxi 712100 , China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau , Northwest A & F University , Yangling , Shaanxi 712100 , China;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau , Institute of Soil and Water Conservation , Chinese Academy

of Sciences and Ministry of Water Resources , Yangling , Shaanxi 712100 , China; 4. Fugu County Water Authority , Shaanxi 719400 , China)

Abstract: Detachment capacity by flow is one of the most important contents of soil erosion research. Clarifying the variation regularity of rill flow detachment capacity can make us understand rill erosion process deeply , and make a good foundation for building rill erosion process model. Rill flow detachment capacity on loess hillslope was studied by the rill flume experiment in this paper. Based on analyzing the variation characteristics of soil detachment capacity by rill flow on loess hillslope , the factor model of soil detachment capacity by rill flow was established. Under different flow discharges , soil detachment capacity by rill flow increased with slope and they could be well described by linear functions. Under different slopes , soil detachment capacity by rill flow increased with flow discharge and they could be well described by power functions. The factor model of relationship between soil detachment capacity by rill flow and the flow discharges and slopes is a binary power function. Flow discharge has greater influence on soil detachment capacity by rill flow than slope.

Key words: Loess hillslope; rill flow; soil detachment capacity; slope; flow discharge