

坡沟侵蚀产沙关系的模拟试验研究*

丁文峰¹ 李 勉² 姚文艺² 张平仓¹

(1 长江科学院水土保持研究所,武汉 430010)

(2 黄河水利科学研究院,郑州 467000)

摘 要 黄土高原坡面从分水岭到坡脚,径流侵蚀产沙方式和产沙强度等特征表现出明显的垂直分带性。为了揭示造成这种垂直分带性特点的形成机理,本文设计了 4 m 长坡面(坡度为 20°)和 3 m 长沟坡(坡度为 50°)组成的坡沟系统试验土槽,采用四个不同流量(2.1 L min⁻¹、3.2 L min⁻¹、5.2 L min⁻¹、7.2 L min⁻¹)的放水冲刷试验,研究了坡面不同来水量、来水含沙量及来水动能对沟坡侵蚀产沙的影响,并建立了坡沟系统侵蚀产沙过程的数学模型。结果表明:坡面放水径流强度、坡面来水含沙量以及坡面来水单位水流功率均影响着沟坡部分侵蚀产沙量的大小。坡面放水径流强度与沟坡侵蚀产沙量之间呈幂函数关系;坡面来水含沙量和坡面来水单位水流功率与沟坡部分的侵蚀产沙量之间呈线性关系。根据单位水流功率的概念,计算得出试验条件下沟坡侵蚀产沙的临界单位水流功率值为 0.632。最后,根据改进的 Yalin 公式及沟坡侵蚀产沙的影响因素,分别建立了坡面和沟坡侵蚀产沙的数学模型,经计算后与实测值进行对比发现结果基本令人满意。

关键词 坡沟系统;侵蚀产沙;机理;模型

中图分类号 S157 **文献标识码** A

由于我国黄土高原下垫面条件和气候条件的特殊性,其侵蚀方式、特征及机理均与其他地区有所不同,从分水岭到坡脚,沟间地与沟谷地相间分布,径流侵蚀产沙方式、强度等特征也表现出明显的垂直分带性^[1~3]。因此,早在 20 世纪 50、60 年代,我国学者就针对这种特殊地貌类型及侵蚀形式,利用野外径流小区观测资料对坡沟侵蚀产沙关系问题进行了研究^[4],探讨了坡面和沟道的产沙比例及泥沙来源问题^[5,6]。但由于研究手段的单一性,坡沟侵蚀产沙比例及侵蚀产沙机制等一些基本理论问题未得到解决。因此,长期以来关于黄土高原的治理方略问题一直争论不休,没有定论。80、90 年代后,随着科技水平的不断进步,采用室内模拟试验研究坡沟侵蚀机理及侵蚀产沙比例问题等成为可能,郑粉莉^[7]、雷阿林^[8,9]、王文龙^[10]等分别就人为影响下坡沟侵蚀产沙关系的变化、黄土区土壤侵蚀链各垂直带水沙流时空分布特征等问题展开了研究,深化了坡沟系统水沙流侵蚀动力学特征方面的研究。但就目前来看,将坡沟连续体作为一个系统研究坡面含沙水流对沟坡侵蚀产沙的影响、沟坡系统侵蚀产沙

机理及模型等问题研究较少,且研究量化程度不够,即使有一定程度的量化,也大多为基于统计分析这一经验性方法,还没有从动力机制方面进行研究,使得结果难以外推到更大范围或其他地区。鉴于此,本文将通过室内模拟试验揭示坡沟侵蚀产沙关系,建立坡沟系统侵蚀产沙模型,以期为流域土壤侵蚀模型的建立提供依据。

1 材料与方法

试验采用两种不同的实体模型对坡沟侵蚀产沙关系及产沙模型进行研究。一种为坡面模型,一种为坡—沟系统模型。试验在两种模型上分别同时进行,这样就能保证控制条件基本一致,在结果分析时,将两种模型上的试验结果相比较,就能间接得出坡沟系统侵蚀产沙的一些基本规律。

根据以往的研究结果,土壤侵蚀严重的黄土丘陵沟壑区第一、第二副区坡面坡度大致在 20°左右,沟坡坡度大致在 40°~60°之间分布频率较大,为此,坡沟连续体和单纯坡面试验模型设计时坡面设计坡度选定

* 国家重点基础研究发展规范化项目(2007CB407203)、长江水利委员会长江科学院博士科研启动基金、国家自然科学基金项目、水利部黄河水利委员会黄河研究基金项目“基于气候地貌植被耦合的黄河中游侵蚀过程”(50239080)资助

作者简介:丁文峰(1975~),男,博士,高级工程师,主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。E-mail:wenfengding@163.com

收稿日期:2006-09-20;收到修改稿日期:2007-03-15

为 20°,沟坡设计坡度选定为 50°。模型净宽度设计为 2.0 m,中间用 PVC 板将其分隔为四个相同宽度的部分,同时开展试验,可以保证重复试验过程中的流量、土壤、地形等条件尽可能一致,从而减小人为引起的误差,影响试验结果。坡面部分水平投影长 3.76 m,沟坡部分水平投影长 1.93 m(见图 1)。

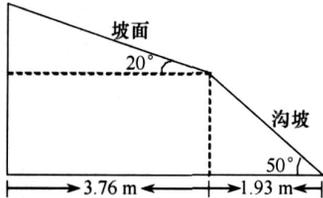


图 1 坡沟系统侵蚀产沙试验示意图
Fig. 1 The sketch map of the slope-gully system

试验采用放水冲刷法进行。试验用土的粒径组成如表 1 所示。在装填试验土之前,将野外运回的土样过 10 mm 孔径的筛后填入试验土槽,考虑到试验的需要,填土厚度保持在 40 cm 左右。试验开始前,为了消除土壤前期含水量不同给试验带来的影响,先在坡面上均匀地降一场小雨,并控制所有试验槽上接受的雨量基本相同。然后采用放水冲刷法进行试验,供水设备采用定水头装置供水,以保证在整个试验过程中供水量的稳定。试验开始后,待坡面完全产流后,记录试验土槽的产流时间,并开始采集土槽下端出口处的含沙量过程样,为了准确反映试验过程中的侵蚀产沙变化,采样间隔时间都确定为 1 min,并且采用全部收集的方式进行采样。在采样的同时,测量坡面上水流流速、水流宽度,其中流速的测定采用颜料示踪法,径流的宽度用薄钢尺测量。整个试验过程持续 20 min。试验流量按黄土高原不同降雨强度在野外标准径流小区上产生的单宽流量换算到试验土槽上的流量得到,分别为 2.1 L min⁻¹、3.2 L min⁻¹、5.2 L min⁻¹、7.2 L min⁻¹四级,约相当于 1.0 mm min⁻¹、1.6 mm min⁻¹、2.6 mm min⁻¹、3.6 mm min⁻¹的降雨强度在试验土槽上

表 1 试验土壤的粒径组成

Table 1 Particle composition of the soil tested

土壤粒径 Soil particle size (mm)	1~ 0.25	0.25~ 0.05	0.05~ 0.01	0.01~ 0.005	0.005~ 0.001	<0.001
百分比 Percentage (%)	1.20	35.80	42.80	2.40	6.80	11.00

产生的径流。为了保证试验的精度,每个试验流量连续重复 2 次。

2 结果与分析

2.1 坡面不同放水强度与沟坡侵蚀量的关系

研究表明,在黄土高原坡沟系统内,坡面径流一旦下沟将产生额外的净侵蚀量^[11]。坡面水下沟在沟坡(道)中的侵蚀作用称为“净产沙”能力,其定量指标用“净产沙增量”表示。净产沙增量主要受降雨侵蚀力和坡面上方汇集的径流对其造成的侵蚀两方面的影响。在放水冲刷法条件下,只要隔绝了坡面上方来水,则沟坡部分并不会发生侵蚀,因此,在这种条件下的隔绝坡面来水时的沟坡(道)产沙量就为 0,相应的净产沙增量就是坡面来水在沟坡部分的侵蚀量。即在放水冲刷法条件下,沟坡部分的侵蚀产沙量就可近似看作为该种条件下的净侵蚀产沙量。

根据对试验数据的分析,得出坡面放水径流量与沟坡侵蚀产沙量之间呈幂函数关系(如图 2 所示)。

其关系式可以表达为:

$$y = 1909.3x^{1.2613} \quad (R^2 = 0.8709) \quad (1)$$

即沟坡部分的侵蚀量随着坡面来水径流量的增大而增大,且式中的幂指数大于 1。表明当坡面来水量增加时,沟坡部分将产生更大的侵蚀量。因此,有效减少坡面来水量将是黄土高原地区减少沟坡侵蚀量的关键。

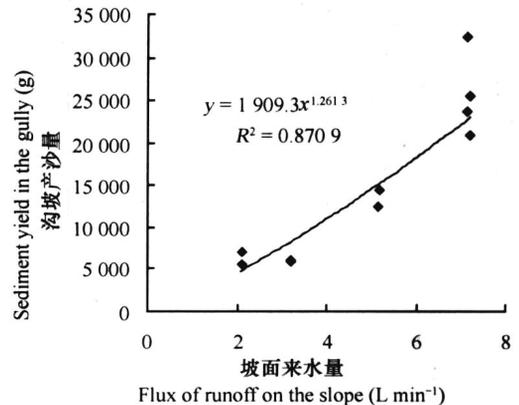


图 2 坡面来水径流量与沟坡侵蚀产沙量的关系

Fig. 2 Relationships between flux of runoff on the slope and sediment yield in the gully

2.2 坡面径流含沙量与沟坡侵蚀量的关系

根据试验数据,点绘了不同放水强度情况下坡面来水含沙量与沟坡部分侵蚀产沙量的关系(见图 3)。

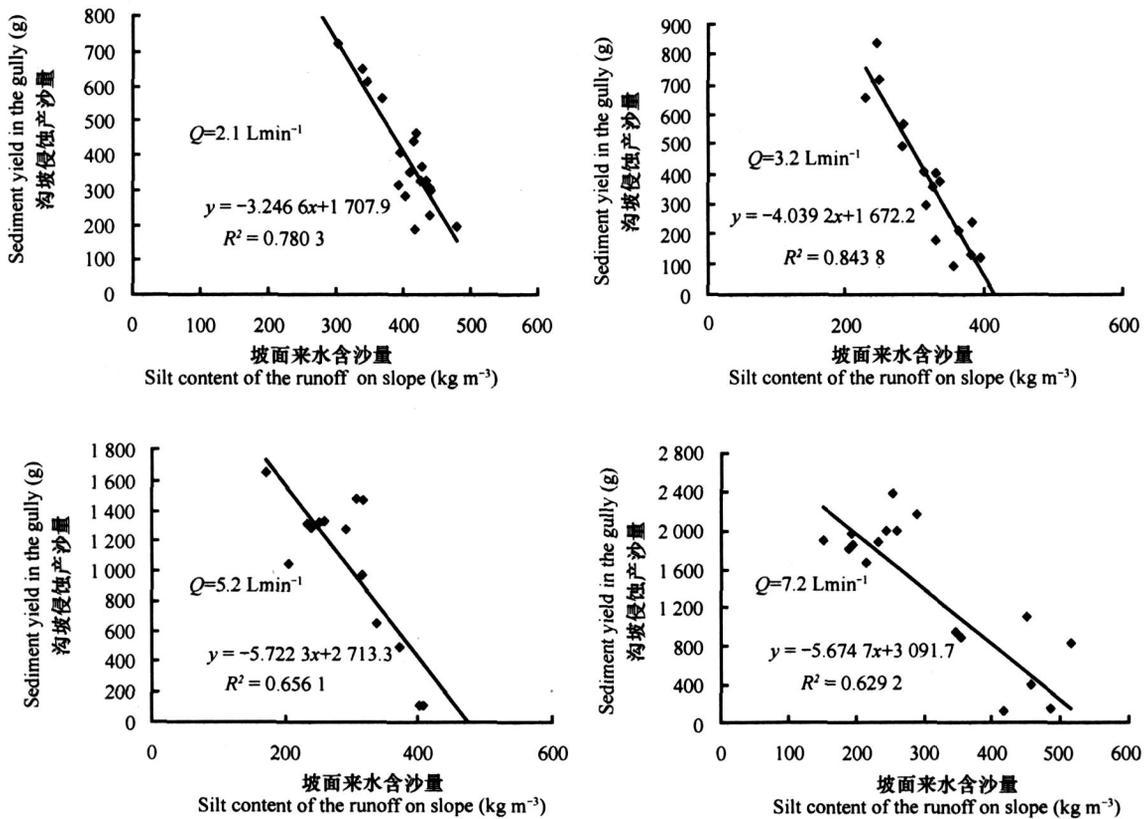


图3 坡面来水含沙量与沟坡侵蚀产沙量的关系

Fig. 3 Relationship between silt content in the slope and the sediment yield in the gully

从图中可以看出,在一次放水过程中,随坡面来水含沙量的不同,沟坡部分的侵蚀产沙量发生相应变化。根据泥沙分散与搬运相匹配的原理可知,坡面径流侵蚀分散率正比于径流输沙能力与径流泥沙含量的差。它们的差值越大,则坡面径流的侵蚀分散率也越大。而坡面径流输沙能力与坡度及放水流量有关,在本文中,坡面部分坡度为一定值,因此坡面径流输沙能力只与放水流量有关,只要试验中放水强度一定,则该条件下的径流输沙能力就确定了。因此,对于某一确定的放水强度条件下,决定坡面径流侵蚀分散率的变量只有径流泥沙含量,径流泥沙含量又与放水强度有关,对应于不同的放水强度,其坡面出口径流含沙量不同,从而导致沟坡部分侵蚀产沙量的不同。通过拟合,表明坡面来水含沙量与沟坡部分的侵蚀产沙量之间呈线性关系,其一般表达式为:

$$y = -bx + a \quad (2)$$

式中, y 为沟坡部分侵蚀产沙量(g), x 为坡面来水含沙量(kg m^{-3}), a 、 b 为系数。方程中 b 均为负值,且随放水流量的增大而增大,表明沟坡部分侵蚀产沙量随坡面来水含沙量的增大而减小,且其减小幅度随放水流量的增大而增大。分析产生这种现象的原因,主要是在相同条件下,随放水强度的增大,坡面径流输移能力也相应增大,当对应于相同的坡面来水含沙量情况时,径流的输移能力与坡面来水含沙量的差值就越大,因此产沙量就大。而当坡面来水含沙量都增大相同的量时,大放水强度情况下的输移能力与坡面来水含沙量的差值变化幅度较小,因此,其表现在图中就是 b 值较小流量时为大的现象。这与新一代水蚀预报模型(WEPP)中的分散率表达式是一致的。

2.3 坡面径流动能与沟坡部分侵蚀量的关系

根据杨志达^[12]对单位水流功率的定义,用试验所得数据,点绘了不同放水强度条件下的单位水流

功率和沟坡输沙率之间的关系(如图 4)。

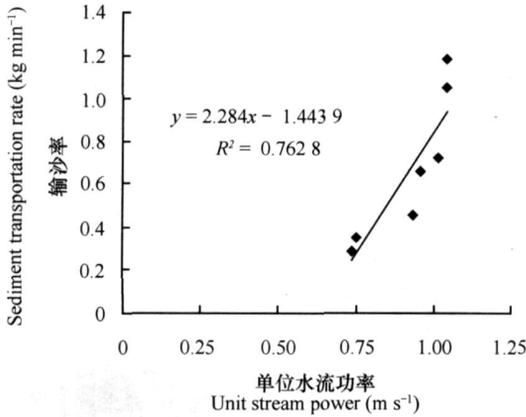


图 4 单位水流功率与输沙率之间的关系

Fig. 4 Relationship between unit stream power and sediment transportation rate

通过对图中的数据进行相关分析。从分析结果中可以看出,单位水流功率和输沙率之间呈线性相关。其间的关系方程为:

$$S = 2.284 P - 1.443 \quad (3)$$

即输沙率随单位水流功率的增大而增大,若再对上式进行分析,可知存在着某一临界单位水流功率值,当等于或小于此值时,输沙率为 0,大于此值才有输沙率的出现。将式(3)变换为:

$$S = 2.284 (P - 0.632) \quad (4)$$

从式(4)中可以看出,当 $P > 0.632$ 时,输沙率 $S > 0$,即 0.632 为试验条件下的临界单位水流功率值。其实,对于输沙率随单位水流功率的增大而增大的理解还可以从另外的分析中得到解释。根据以往大量研究,坡面流流速是流量和坡度的函数,即 $V = f(Q, S)$,可知单位水流功率也必然是流量和坡度的函数,即 $P = f(Q, S)$,由以往结论可知,在其他条件均一致的情况下,当流量和坡度越大时,输沙率也会随着增大。也即单位水流功率的增大必然引起径流输沙率的增大,与本节分析结论相一致。

2.4 坡-沟侵蚀产沙模型

2.4.1 坡面侵蚀产沙模型

大量研究表明^[13~16],坡面产沙量取决于坡面上径流的挟沙能力与供沙量之间的对比关系,此结论已成为 WEPP 等基于物理过程模型中的核心。即

$$D_r = (T_c - q_s) \quad (5)$$

式中, D_r 为系数; T_c 为细沟径流的挟沙能力 (kg m^{-3}), q_s 为细沟径流单宽输沙率 ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)^[17~19]。

假定坡面上端入口处的水流含沙量为 0,即坡面上方来水为清水时,可以对上式进行变换得:

$$q_s = T_c(1 - e^{-x}) \quad (6)$$

由式(6)可以看出,要确定坡段产沙量, T_c 、 q_s 为其中必不可少的参数,一旦这两个参数确定了,就可以利用上式求出在坡面任一位置处的侵蚀产沙量。Alonso 等^[20]曾将 9 个河流输沙能力公式用于计算坡面流的输移能力,通过验证分析,认为 Yalin 方程较适用于描述坡面浅层水流的输移能力。因此,本文建立的模型也采用 Yalin 公式的形式,其一般表达式为:

$$T_c = GY^{0.5} (Y - Y_c) d (gd(s - 1))^{0.5} s \quad (7)$$

$$G = \frac{0.635}{Y_c} \left[1 - \frac{\ln(1 + as)}{as} \right] \quad (8)$$

$$as = \frac{2.45}{S^{0.4}} Y_c^{0.5} \left(\frac{Y}{Y_c} - 1 \right) \quad (9)$$

式中, Y 为无量纲水流切应力, $Y = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gd}$; Y_c 为无量纲水流切应力, $Y_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gd}$, τ 为水流切应力, $\tau = gRS_0, \text{N m}^{-3}$; τ_c 为起动切应力, N m^{-3} ; ρ 为水流密度, kg m^{-3} ; ρ_s 为土壤颗粒密度, kg m^{-3} ; d 为颗粒粒径, mm ; g 为重力加速度, m s^{-2} ; R 为水力半径, m ; s 为 τ 与 τ_c 的比值; S_0 为坡面坡度, $S_0 = \sin \alpha$, α 为坡面坡角。

从上式中可以看出,方程中的未知数除起动切应力外,大都可以根据在试验中所测到的流速、水深等数据间接求得。对于起动切应力的研究,目前也有很多,陈力⁽¹⁾利用放水冲刷法对坡面径流起动切应力进行了研究,发现用窦国仁和张谨瑞等的公式计算所得结果与实际值较为吻合,且试验方法与本研究一致,可以借鉴。因此,本文对起动切应力的计算就采用陈力将窦国仁公式进一步改进后的形式⁽¹⁾,即:

$$c = k^2 \left(\frac{d}{d^*} \right)^{\frac{1}{3}} \left[3.6 \frac{\tau_c}{\rho g d \cos \alpha} + \left(\frac{\tau_c}{\rho g} \right)^{\frac{5}{2}} \left(\frac{\tau_c}{\rho g d \cos \alpha} + \frac{\tau_c}{\rho g} \right) \right] \quad (10)$$

式中, k 为对应于少量起动标准的无量纲参数,一般取 0.128; d 为粒径特征,

$$d = \begin{cases} 0.5 \text{ mm} & d < 0.5 \text{ mm} \\ d & 0.5 \text{ mm} < d < 10 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} & d > 10 \text{ mm} \end{cases}$$

d^* 为参考粒径, 10 mm; τ_c 为床面泥沙干容重,

(1) 陈力. 坡面水流和细沟侵蚀的动力学研究. 中国科学院博士学位论文, 2001

$N\text{ m}^{-3}$; ρ_s 为床面泥沙稳定干容重, $N\text{ m}^{-3}$; h 为水深, m ; τ_0 为粘聚力参数, 对于一般泥沙 $\tau_0 = 1.75\text{ cm}^3\text{ s}^{-2}$; δ 为薄膜水厚度参数, $\delta = 2.31 \times 10^{-5}\text{ cm}$ 。

式(6)中的参数 τ_0 , 陈力也采用放水冲刷法对其进行了研究, 得出了其经验统计方程, 因此, 本文就采用陈力建立的 τ_0 的统计模型, 其形式如下所示:

$$\tau_0 = R \cdot 15165.8 \left[\frac{c}{(s - c)gd} \right]^{0.148} \left(\frac{c}{\sqrt{gd}} \right)^{-1.022} S_0^{1.550} \quad (11)$$

这样, 将所有参数代入式(6)中便可以求出坡面上任一位置的侵蚀产沙量。

2.4.2 沟坡侵蚀模型 Yalin 公式仅仅解决了坡面的侵蚀产沙问题, 而对于沟坡部分的侵蚀产沙则无能为力。一方面是因为式(6)是在假设坡面上方来水含沙量为 0 的情况下所得到的, 而对于本文中所讨论的坡沟系统来说, 坡面上方来水含沙量并不为 0。另一方面, 在径流流出坡面部分进入沟坡时, 由于其坡度有所变化(由试验模型的设计内容可知坡面部分坡度为 20° , 沟坡部分坡度为 50°), 而迄今为止, 国内外对于陡坡上的侵蚀产沙模型的研究见于报道的还不多, 尽管有一些学者

曾尝试将现有模型应用于陡坡, 但与黄土丘陵沟壑区的复杂情况相比, 还相差很远。因此, 这种情况下方程就不能直接用于计算侵蚀产沙量。要解决沟坡部分的侵蚀产沙量, 在目前还不能用数学语言对其进行描述的情况下, 只能用一般的多元统计分析得到。而由前面的分析可知, 沟坡部分的侵蚀产沙量与坡面来水量、来水含沙量以及坡面来水的单位水流功率有关。因此, 本文就选取这几个与沟坡侵蚀量密切相关的因子进行回归分析, 根据本研究所进行的 8 组试验数据, 分析得到了它们之间的关系方程:

$$S = 179.473 \tau_0^{-0.477} Q^{1.171} P^{0.425} \quad (R = 0.947, n = 8) \quad (12)$$

式中, S 为沟坡侵蚀产沙量(g); τ_0 为坡面径流单位水流功率(m s^{-1}); Q 为坡面来水量(L min^{-1}); P 为坡面来水含沙量(kg m^{-3})。

对上述多元回归方程进行 F 检验表明, 结果在 0.01 水平上显著 ($F = 42.664, F_{0.01} = 9.78$)。

2.4.3 模型的精度检验 根据本文中所建立的模型(即式(6)和式(12)), 计算了坡沟系统在不同放水强度下的侵蚀产沙过程, 并将试验实测值和计算值进行了对比(如图 5 所示)。

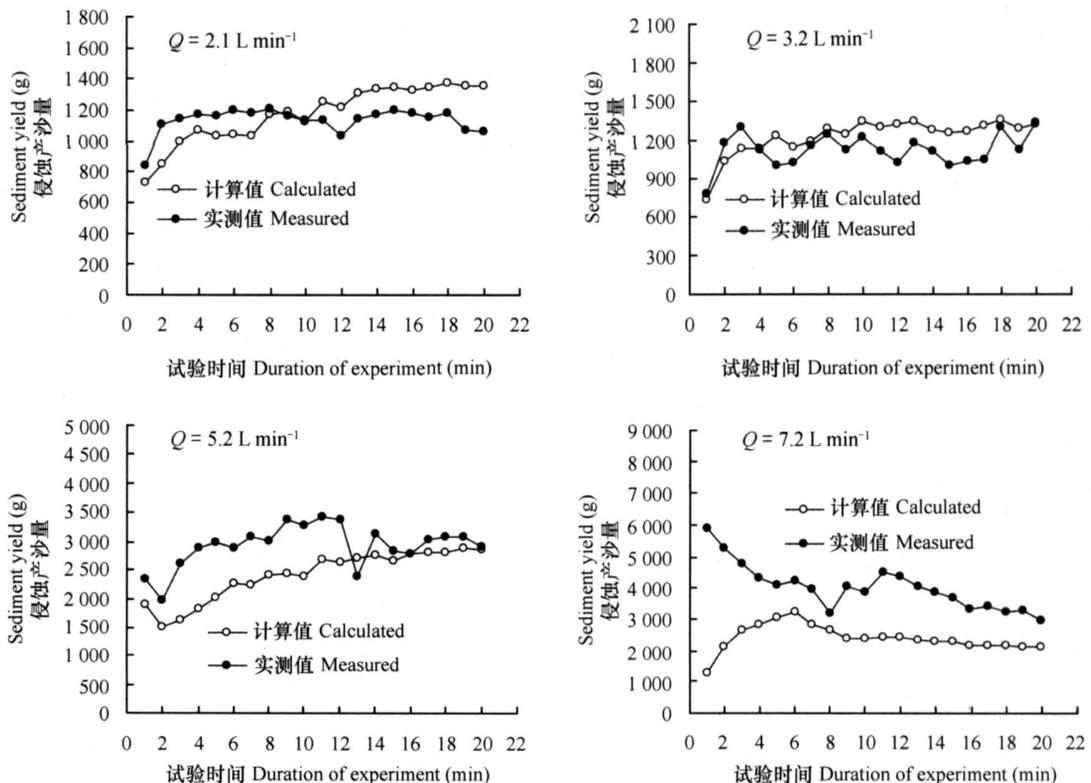


图 5 模型计算侵蚀产沙量与实测侵蚀产沙量过程

Fig. 5 Sediment yielding processes calculated and measured

根据文中所建立的模型计算的侵蚀产沙量与实测侵蚀产沙量,计算了各不同放水强度条件下的模型相对误差(见表2),从表中可见,模拟结果基本令人满意。

表2 模型计算侵蚀产沙量结果

Table 2 Sediment yields calculated using the model

放水强度 Runoff intensity (L min ⁻¹)	计算侵蚀产沙量 Calculated sediment yield from soil erosion (×10 ³ g)	实测侵蚀产沙量 Measured sediment yield from soil erosion (×10 ³ g)	相对误差 Relative error (%)
2.1	23.48	22.66	3.62
3.2	30.21	27.51	9.81
5.2	44.09	52.55	-16.11
7.2	57.91	75.87	-23.67

从计算与实测侵蚀产沙量过程图中还可以看出,对于放水强度较大的情况(如 $Q = 5.2 \text{ L min}^{-1}$ 和 $Q = 7.2 \text{ L min}^{-1}$)而言,模拟计算的结果普遍偏小,且放水强度越大,模拟值与实测值也相差较大,但随着试验的进行计算值与实测值越来越接近;对于放水强度较小的情况(如 $Q = 2.1 \text{ L min}^{-1}$ 和 $Q = 3.2 \text{ L min}^{-1}$),模拟计算值偏大者居多,且模拟结果与实测值也较吻合。分析出现这种现象的原因,主要是因为在小放水强度条件下,水流含沙量无论是在试验开始阶段还是后期,很少超过 400 kg m^{-3} ,而在大放水强度条件下,试验所测到的含沙量在试验的开始阶段大都超过 400 kg m^{-3} (如在放水强度为 7.2 L min^{-1} 时,第一分钟实测得到的径流含沙量甚至高达 649 kg m^{-3} ,即使在放水强度为 5.25 L min^{-1} 时,试验开始阶段的实测含沙量也有 510 kg m^{-3}),根据许炯心^[21]的研究,这一阶段的水流已属于高含沙水流的范畴。而根据以往我国学者对高含沙水流性质的研究可知,一旦径流进入高含沙水流的范围以后,浑水容重会显著地超过清水,因而在同样的水深与能坡之下,所产生的切应力要较清水条件下的切应力大得多。有研究表明^[19],当径流含沙量达到 600 kg m^{-3} 时,浑水的容重约为 1.37 t m^{-3} ,为清水容重的1.37倍。这就意味着在水深和坡面比降相同的条件下,高含沙水流的切应力较清水高37%,这样,在同样的水流条件下,高含沙坡面径流更容易满足坡面细沟侵蚀的临界切应力条件,从而使细沟更容易出现。且高含沙水流为固体-液体的两相紊流,即由水与小于 0.01 mm 的细颗粒形成的均质浆液,表现为液相;其中悬浮着较粗的颗粒,表现为固相。这

样由于浑水容重大,其中的粗颗粒所受到的浮力也大,沉速减小,使这些粗颗粒悬浮所需要的悬浮功也减小。由于悬浮功的减小,原来只能进行推移运动的粗泥沙会大量地转化为悬移质,从而大大减小水流有效势能的消耗,因而水流能耗便会显著减小,水流挟沙能力则会大大增强。另外,据万兆惠等^[19]的研究,饱和含沙量和水流强度之间存在着双值关系。即随着水流强度的增大,挟沙能力也增大,但当含沙量超过某一数值(大约为 $150 \sim 200 \text{ kg m}^{-3}$)时,水流强度反而开始减小,这意味着进入高含沙水流之后,随着含沙量的进一步增大,不但不要水流强度的增大,而且只要更弱的水流强度即可维持平衡输沙。因此,在高含沙水流条件下,要维持水流的平衡输沙状态,只有侵蚀更多的泥沙进入径流才有可能。在大放水强度条件下,在试验的开始阶段水流属于高含沙水流状态,水流的侵蚀能力与输移能力均较实际计算的大,因此计算值往往偏小,到了试验的后期,水流含沙量已较开始时小,不属于高含沙水流的范畴,因此计算值又与实测值渐渐接近。

3 结 论

通过不同量级的放水冲刷试验研究了坡沟系统侵蚀产沙关系,探讨了坡面上不同来水强度、来水含沙量及来水动能对沟坡侵蚀产沙的影响。结果表明:

1) 坡面放水径流量与沟坡侵蚀产沙量之间呈幂函数关系。表明当坡面来水量增加时,沟坡部分将产生更大的侵蚀量。

2) 坡面来水含沙量与沟坡部分的侵蚀产沙量之间呈反线性相关,即沟坡部分的侵蚀产沙量随坡面来水含沙量的增大而减小。

3) 坡面来水单位水流功率与沟坡部分的侵蚀产沙量之间呈线性关系。并分析得到了试验条件下的临界单位水流功率值为 0.632 。

4) 运用 Yalin 公式和多元回归法建立了坡沟系统侵蚀产沙过程的数学表达。该表达式主要由坡面部分的侵蚀产沙模型和沟坡部分的侵蚀产沙模型两部分构成,其一般形式为:

$$q_s = T_c(1 - e^{-x}) + 179.473^{-0.477} Q^{1.171} P^{0.425}$$

并用试验实测数据对上式进行了检验,发现当放水强度较小时,模拟结果是令人满意的,但在放水强度较大的情况下,由于坡面侵蚀量的增大,径流含沙量已属于高含沙水流的范畴,由于高含沙水流的侵蚀

特性与一般含沙水流不同,导致模拟计算结果与实测结果有所出入。因此本文所建立的模型只在一般含沙水流条件下较为适用,而在高含沙水流条件下适用性不强,还有待于进一步改进。另外,该模型的建立是在不考虑雨滴对径流的扰动以及沿程不增加径流量的情况下推导出的,只是一种简单情况下的坡沟侵蚀产沙模型,对于降雨条件下的适用情况还有待于以后进一步通过试验加以研究。

参考文献

- [1] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀分类. 土壤学报, 1956, 4(2): 99 ~ 105. Zhu X M. Soil erosion classification study in loess region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1956, 4(2): 99 ~ 105
- [2] 刘元保, 朱显谟. 黄土高原土壤侵蚀垂直分带性研究. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988(7): 5 ~ 8. Liu Y B, Zhu X M. Study on the soil erosion vertical distribution in Loess Plateau (In Chinese). Collected Papers of North-west Soil and Water Conservation Institute, Chinese Academy of Sciences, 1988(7): 5 ~ 8
- [3] 承继成. 关于坡地剥蚀过程的分带性. 1963年全国地貌学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 1964. Cheng J C. Study on the distribution of slope denudation process (In Chinese). Proceedings of the Physiognomy Proseminar in 1963. Beijing: Science Press, 1964
- [4] 蒋德麟, 赵诚信, 陈章霖. 黄河中游小流域径流泥沙来源初步分析. 地理学报, 1966, 32(1): 20 ~ 35. Jiang D L, Zhao C X, Chen Z L. Primary study on the sediment source on small basin in middle reaches of Yellow River (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 1966, 32(1): 20 ~ 35
- [5] 曾伯庆. 晋西黄土丘陵沟壑区水土流失规律及治理效益. 人民黄河, 1980(2): 20 ~ 25. Zeng B Q. Soil and water loss regular and harness benefit in hill-gully region Jingxi (In Chinese). Renmin Huanghe, 1980(2): 20 ~ 25
- [6] 焦菊英, 刘元宝, 唐克丽. 小流域沟间与沟谷地径流泥沙来量的探讨. 水土保持学报, 1992, 6(2): 24 ~ 28. Jiao J Y, Liu Y B, Tang K L. Discuss on the sediment source from intergully and gully area (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(2): 24 ~ 28
- [7] 郑粉莉, 唐克丽, 白红英. 林地开垦后坡沟侵蚀产沙关系的研究. 中国水土保持, 1994, 8: 19 ~ 20. Zheng F L, Tang K L, Bai H Y. Study on the sediment yielding relationship between the slope and the gully after the forestland reclamation (In Chinese). Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 1994, 8: 19 ~ 20
- [8] 雷阿林, 唐克丽. 坡沟系统土壤侵蚀研究回顾与展望. 水土保持通报, 1997, 17(3): 37 ~ 43. Lei A L, Tang K L. Retrospect and prospect for soil erosion studies of ridge—hill—gully slope system (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1997, 17(3): 37 ~ 43
- [9] 雷阿林, 唐克丽, 王文龙. 土壤侵蚀链概念的科学意义及其特征. 水土保持学报, 2000, 14(3): 79 ~ 83. Lei A L, Tang K L, Wang W L. Significant and character of conception of soil erosion chain (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(3): 79 ~ 83
- [10] 王文龙, 雷阿林, 李占斌, 等. 土壤侵蚀链内细沟浅沟切沟流动力机制研究. 水科学进展, 2003, 14(4): 471 ~ 475. Wang W L, Lei A L, Li Z B, et al. Study on dynamic mechanism of rills, shallow furrows and gully in the soil erosion chain (In Chinese). Advances in Water Science, 2003, 14(4): 471 ~ 475
- [11] 陈浩, 王开章. 黄河中游小流域坡沟侵蚀关系研究. 地理研究, 1999, 18(4): 363 ~ 372. Chen H, Wang K Z. Study on the slope-gully erosion in a small watershed in the middle reaches of Yellow River (In Chinese). Geographical Research, 1999, 18(4): 363 ~ 372
- [12] 杨志达著. 李文学, 姜乃迁, 张翠萍译. 泥沙输送理论与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. Yang Z D. ed. Li W X, Jiang N Q, Zhang C P. trans. Theory and Practice of Sediment Transportation (In Chinese). Beijing: China Water Conservancy and Electricity Press, 2000
- [13] Liu Y B, Nearing M A, Ascough J C, et al. The WEPP watershed model: Comparisons to measured data from small watershed. Transactions of the ASAE, 1996, 40(4): 945 ~ 952
- [14] Nearing M A, Forster G R, Lane L J, et al. A process-based erosion model for USDA-water erosion prediction project technology. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5): 1 587 ~ 1 593
- [15] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. Earth Surface Process and Landforms, 1999, 24: 677 ~ 686
- [16] Beaseley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for water planning. Transactions of the ASAE, 1980, 23: 938 ~ 944
- [17] Morgan R P C, Morgan D D V, Finney H J. A predictive model for the assessment of soil erosion risk. Journal of Agricultural Engineering Research, 1984, 30: 245 ~ 253
- [18] Huang C, Bradford J M, Laflen J M. Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60: 731 ~ 739
- [19] 张科利, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究. 土壤学报, 2000, 37(1): 9 ~ 15. Zhang K L, Tang K L. A study on hydraulic characteristics of flow for prediction of rill detachment capacity on loess slope (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(1): 9 ~ 15
- [20] 雷廷武, 张晴雯, 赵军, 等. 确定侵蚀细沟集中水流剥离速率的解析方法. 土壤学报, 2002, 39(6): 788 ~ 793. Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, et al. Analytic method for determination of detachment rate of concentrated flow in erosion rills (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(6): 788 ~ 793
- [21] 姚文艺, 汤立群著. 水力侵蚀产沙过程及模拟. 郑州: 黄河水利出版社, 2001. Yao W Y, Tang L Q. Water Erosion and Sediment Yielding Process and Simulation (In Chinese). Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2001
- [22] 许炯心. 黄土高原的高含沙水流侵蚀研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 27 ~ 45. Xu J X. Erosion and sediment yield of hyperconcentrated flows on Loess Plateau (In Chinese). Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(1): 27 ~ 45

[23] Zheng F L, Huang C H, Norton L D. Vertical hydraulic gradient and runoff water and sediment effects on erosion processes and sediment

regimes. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 64 (1): 4 ~ 11

SIMULATION OF SEDIMENT YIELDING IN RELATION TO SLOPE AND GULLY

Ding Wenfeng¹ Li Mian² Yao Wenyi² Zhang Pingcang¹

(1 *Soil and water conservation department of Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China*)

(2 *Institute of Hydraulic Research of Yellow River, Zhengzhou 467000, China*)

Abstract Runoff erosion formation and sediment yielding intensity on slopes of the Loess Plateau of China show apparent vertical zonation because of the complicated topography and the special climate conditions of the region. To reveal mechanism of the formation of runoff erosion and the characteristic of vertical zonation, an experiment was carried out with a simulated slope-gully system, which was composed of a 4-meter long slope (20°) and a 3-meter long gully slope (50°), and four different fluxes of runoff (2.1 L min⁻¹, 3.2 L min⁻¹, 5.2 L min⁻¹, and 7.2 L min⁻¹). Impacts of flux, silt content and impetus of the runoffs on sediment yield were explored. Based on the findings, a mathematical model was established for depicting sediment yielding process in the system. Results show that intensity, silt content and flowing power per unit volume of the runoff flowing down the upper slope were the major factors affecting sediment yield in the gully. Sediment yield in the gully was exponentially related to intensity of the runoff, and linearly to silt content and flowing power per unit volume of the runoff. Based on the concept of flowing power per unit volume, a value defined to be critical to sediment yielding in the gully was figured out to be 0.632. And based on the modified Yalin equation and factors affecting sediment yield, mathematical models were worked out for sediment yield on the slope and in the gully, respectively. Results of the calculation using the models were found to be satisfactorily comparable to the measured ones.

Key words Slope-gully system; Sediment yield; Mechanism; Model