

紫色土细沟剥蚀率对近地表水流作用的响应

顾小杰, 陈晓燕, 韩 珍, 李彦海, 陈仕奇

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 近地表水流的存在会加剧土壤侵蚀过程, 剥蚀率是土壤侵蚀预报模型的重要物理参数, 其对近地表水流的响应值得进一步研究。采用限定性细沟模拟冲刷试验, 探讨不同工况条件(3 个近地表水流饱和深度 5, 10, 15 cm; 3 个坡度 5°, 10°, 15°; 3 个流量 2, 4, 8 L/min)下紫色土细沟剥蚀特征。结果表明: 不同近地表水流饱和深度下细沟剥蚀率随沟长和含沙量分别呈指数和线性下降, 剥蚀能力在近地表水流饱和深度为 15 cm 时最大, 随着近地表水流饱和深度减小而减小; 多元非线性回归方程分析表明, 细沟剥蚀率与流量、坡度和近地表水流饱和深度均呈正相关关系, 其标准化系数分别为 1.14, 0.72, 0.36, 说明细沟剥蚀率在近地表水流存在的条件下对流量的敏感性大于坡度。研究结果为紫色土近地表水流作用下细沟侵蚀机理提供一定的理论依据。

关键词: 细沟剥蚀率; 沟长; 含沙量; 近地表水流; 细沟侵蚀; 紫色土

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)03-0016-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2021.03.003

Response of Rill Detachment Rate of Purple Soil to Subsurface Water Flow

GU Xiaojie, CHEN Xiaoyan, HAN Zhen, LI Yanhai, CHEN Shiqi

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716)

Abstract: The existence of subsurface water flow will aggravate the process of soil erosion. Soil detachment rate is an important physical parameter of the soil erosion prediction model, and the response of detachment rate to subsurface water flow is worthy to study in further. The characteristics of rill detachment of purple soil under different conditions (three subsurface water saturation depths of 5, 10 and 15 cm, three slope gradients of 5°, 10° and 15°, and three flow discharges of 2, 4 and 8 L/min) were studied by using limited rill simulation erosion test. The experimental results showed that the rill detachment rate decreased exponentially and linearly with the gully length and sediment concentration at different saturation depths of subsurface water, respectively. Detachment capacity reached its maximum value at subsurface water saturation depth of 15 cm and decreased with the decreasing of saturation depth of subsurface water. The multiple nonlinear regression equations showed the rill detachment rate was positively correlated with flow discharge, slope gradient and saturation depth of subsurface water, and the standardized coefficients were 1.14, 0.72 and 0.36, respectively, indicating that the rill detachment rate was more sensitive to flow discharge than slope gradient under the condition of subsurface water flow. The study provides some theoretical basis for the rill erosion mechsanism under the effect of subsurface water flow in purple soil.

Keywords: rill detachment rate; rill length; sediment concentration; subsurface water flow; rill erosion; purple soil

紫色土具有成土土层浅薄、孔隙度大、入渗能力强的特征^[1]。连续降雨过后, 水分沿着土壤孔隙、狭长裂隙及蚯蚓孔洞等通道入渗^[2], 当入渗水分到达渗透性差的近地表弱透水层后, 便会沿弱透水层沿坡面流动形成近地表水流^[3]。近地表水流的存在会减弱

土壤的胶结能力, 从而导致土壤抗侵蚀能力减弱, 加剧土壤侵蚀^[4]。

细沟剥蚀率作为土壤侵蚀过程模型的重要参数^[5]。已有研究^[6]发现, 在地表径流作用下, 细沟剥蚀率可以通过沟长的幂函数和含沙量的线性函数进

行预测;王瑄等^[7]通过可调坡度钢制冲刷槽进行室内模拟冲刷试验表明,坡度和流量的幂函数可以很好地预测细沟剥蚀率,且流量对细沟剥蚀率的影响明显大于坡度;李敏等^[8]通过室内模拟冲刷试验发现,细沟剥蚀率随着土壤含水量的增大而增大。已有研究^[9-10]表明,近地表水流会对土壤侵蚀产生显著影响。Simon等^[11]研究了近地表水流对土壤样品的影响表明,近地表水流向上出流的趋势使得土壤颗粒易被剥蚀。近地表水流存在时土壤团聚体稳定性下降,显著影响土壤抗蚀能力^[11-12]。Nouwakpo等^[13]研究发现,在近地表水流的作用下,临界剪切力降低0.2~1.0 Pa,土壤的可蚀性增加5.64倍。土壤可蚀性的增加使得土壤更易受到地表径流的剥蚀作用,Owoputi等^[14]研究发现,当研究土壤存在近地表水流时,土壤侵蚀量显著增加。目前,近地表水流作用下紫色土细沟剥蚀率的研究较少,因此,本文通过限定性细沟模拟冲刷试验,获取不同近地表水流饱和深度、坡度和流量条件下细沟剥蚀率与细沟沟长、含沙量关系曲线,阐述不同近地表水流饱和深度条件下细沟剥蚀率变化趋势,并建立细沟剥蚀率与近地表水流饱和深度、坡度和流量的定量化模型,为紫色土近地表水流作用下细沟侵蚀过程提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2018年8月1日至9月6日在中国农业大学水利与土木工程学院实验大厅进行。试验所用紫色土在2018年6月采于重庆紫色土坡耕地(29°48'N, 106°25'E),为沙溪庙组灰棕紫泥。该地区属于亚热带湿润气候,年均气温18.2℃,年均降水量1105 mm,降水分布不均匀,主要集中在夏季,占年降水量的70%^[10]。试验前晾晒供试土壤,碾碎后过10 mm筛,剔除其中的石块和植物根系等杂质。采用激光粒度仪测定土壤颗粒组成,黏粒含量13.00%,粉粒含量33.91%,砂粒含量53.09%,属于砂壤土^[9]。

1.2 试验装置

本试验所用土槽为可调节坡度(0~30°)的钢制土槽,长8 m,宽1.2 m,用钢板将土槽隔成9条限定性细沟(长8 m,宽0.1 m,深0.35 m)。在9条细沟外的一侧有1条20 cm宽的细沟,用来设置近地表水流供水装置,试验装置与Huang等^[15]的试验一致,近地表水流供水方式与李彦海等^[10]的试验一致,近地表水流饱和深度为近地表水流与弱透水层的距离,试验时控制近地表水流供水装置的水头高度为5,10,15 cm,则土壤近地表水流饱和时深度为5,10,15 cm,此时近地表水流距弱透水层的距离分别为5,10,15 cm。试验前,为了尽量减小钢板对侵蚀过程的边界效应,在钢板两侧均匀涂抹凡士林,然

后黏附试验土,以减少边界效应。在细沟底部填入5 cm厚的黏土,压实后的容重约1.5 g/cm³,该层即为弱透水层。弱透水层上填入20 cm试验土,容重为1.28 g/cm³。填土完毕后将近地表水流供水装置的供水管调到与试验设计的近地表水流饱和深度相对应的高度,以极小的水流开始供水,防止水流流速过大影响土壤结构。当近地表水流达到预期饱和深度后将土槽调至设计的坡度,将水流引入距出水口1 m处(依次进行2,3,4,5,6,7,8 m)的细沟。用预先校准好流量的蠕动泵将自来水泵入细沟上端的稳流槽,在水流入口的最初0.2 m处铺垫1块纱布,以避免细沟被水流直接冲刷和使出流均匀。待土槽内水流稳定后,接取5个径流含沙样本,对收集的样品称重。在105℃的烘箱中烘干后再次称重,确定含沙量。本试验共设计3个流量(2,4,8 L/min),3个坡度(5°,10°,15°),3个近地表水流饱和深度(5,10,15 cm),每组试验重复3次,共81场试验。

1.3 细沟剥蚀率的计算方法

含沙量计算公式为:

$$C = 1000 \times \frac{m_1}{\frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2}} \quad (1)$$

式中: C 为含沙量(kg/m³); m_1 为烘干后土样的质量(g); ρ_1 为烘干后土样的密度,取2.65 g/cm³; m_2 为水的质量(g); ρ_2 为水的密度,取1 g/cm³;1000用于单位g/cm³与kg/m³的转换。

细沟剥蚀率是径流单位时间内从单位面积上剥蚀的土壤量^[16-17]。在距水流出口处 x 时,泥沙含量为 c ;当细沟长度增加 Δx 、泥沙含量增加 Δc 后,细沟 $x+\Delta x$ 处的泥沙含量增加为 $c+\Delta c$,水流中泥沙量由 cQ 增加为 $(c+\Delta c)Q$,同时细沟宽度由 w 增加为 $w+\Delta w$, $x \sim x+\Delta x$ 的细沟段的表面积约为 $(w+w+\Delta w)\Delta x/2=\Delta x(w+w+\Delta w/2)$ 。计算出的细沟段 Δx 的剥蚀率为:

$$Dr = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{(c+\Delta c-c) \cdot Q}{\Delta x \cdot (w+\Delta w/2)} \right) \approx \frac{\Delta c}{\Delta x} \cdot q \quad (2)$$

式中: Dr 为 Δx 段的平均细沟剥蚀率(kg/(m²·s)); Δx 为细沟长度的增量(m); Q 为流量(m³/s); w 为细沟 x 处的宽度(m); Δw 为细沟宽度的增量(m); c 为细沟 x 处的含沙量(kg/m³); Δc 为泥沙含量的增量(kg/m³); q 为单宽流量(m²/s)。

细沟剥蚀率与细沟长度或含沙量存在一定的函数关系^[9],关系式为:

$$Dr = a e^{-bx} \quad (3)$$

或

$$Dr = d + fc \quad (4)$$

式中: a 为回归系数,表示 $x=0$ 时的剥蚀率即最大剥

蚀率($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); b 为回归系数,表示剥蚀率随细沟长度变化的衰减系数(m/s); d 为常数,表示 $c=0$ 时的剥蚀率($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); f 为比例系数,表示剥蚀率随含沙量变化的衰减系数($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); c 为径流含沙量(kg/m^3)。

1.4 数据处理与分析

本文散点拟合图采用 Origin 2017 软件完成,数据分析采用 SPSS 25.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同近地表水流饱和深度细沟剥蚀率沿沟长的变化特征

利用公式(3)拟合细沟剖蚀率与沟长,拟合曲线见图 1。拟合结果表明,在不同工况条件下,细沟剥蚀率随沟长呈指数下降趋势,与无近地表水流存在时的变化趋势一致,且剥蚀率的下降速率随着坡长的增

加而减小,这种变化趋势在陡坡和高流量下表现得更为显著。不同近地表水流饱和深度下,细沟剥蚀率大小的变化规律为 $5\text{ cm}<10\text{ cm}<15\text{ cm}$,这说明近地表水流离地表越近,细沟剥蚀率越大,细沟越易产生侵蚀。由图 1 可知,细沟剥蚀率在近地表水流饱和深度为 5,10 cm 时细沟剥蚀率变化不大,可能是因为近地表水流饱和深度在 5,10 cm 时土壤处于微饱和阶段,土壤可蚀性变化不大。细沟剥蚀率随沟长变化曲线的斜率在细沟初期最大,说明细沟剥蚀率在细沟起始入流处最大,这是由于在细沟起始入流处径流能量全部用于剥蚀土粒。随沟长增加,细沟剥蚀率逐渐减小,直至细沟特定长度处的细沟剥蚀率趋近于 0。细沟剥蚀率与沟长拟合曲线在 8 m 处仍有变化,说明此时细沟中水流还未达到输沙能力,即临界坡长 $>8\text{ m}$,临界坡度 $>15^\circ$ 。

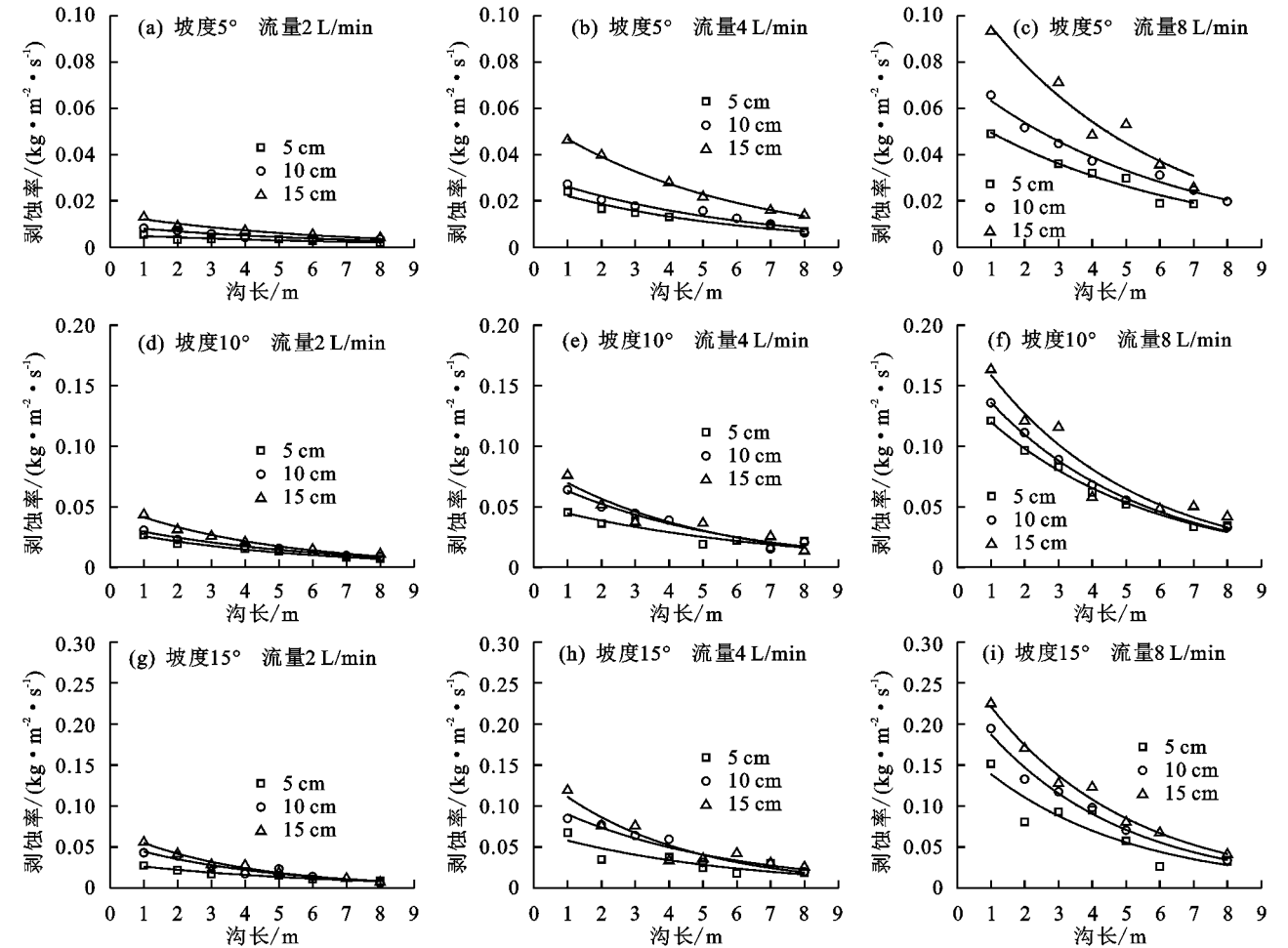


图 1 不同近地表水流饱和深度下细沟剥蚀率随细沟长度变化曲线

表 1 为拟合参数 a 和 b 。Prob $>F$ 值均小于 0.01,说明细沟剥蚀率与细沟长度呈极显著的指数相关。土壤剥蚀能力是清水剥蚀土壤的能力,即最大剥蚀率^[18],当 $b=0$ 时, $Dr=a$,即 a 为剥蚀能力。本研究中不同工况条件下紫色土的最大剥蚀率为 $0.005\sim0.281\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。拟合结果表明,回归系数 a 随近流量、坡度和丘地表水流

饱和深度的增大而增大。在一定的坡度和流量下,本研究中 a 值随近地表水流饱和和深度的增大而增大,说明近地表水流饱和深度与剥蚀率呈正相关。回归系数 b 一般随流量、坡度和近地表水流饱和深度增大而增大。在一定坡度和流量下, b 值一般随近地表水流饱和和深度的增大而增大,说明近地表水流饱和深度越大,细沟剥蚀率下降

速率越快,这可能是因为近地表水流饱和深度越大,地表径流与近地表水流的耦合作用越强。

表 1 不同近地表水流饱和深度紫色土细沟剥蚀率与坡长关系回归参数

坡度/ (°)	流量/ (L·min ⁻¹)	回归参数											
		<i>a</i>			<i>b</i>			Prob> <i>F</i>			<i>R</i> ²		
		5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm
5	2	0.005	0.009	0.014	0.124	0.153	0.170	1.030×10 ⁻³	1.133×10 ⁻⁴	5.695×10 ⁻⁴	0.658	0.889	0.942
	4	0.026	0.030	0.055	0.172	0.166	0.178	8.001×10 ⁻⁵	9.684×10 ⁻⁶	3.824×10 ⁻⁷	0.931	0.938	0.996
	8	0.058	0.074	0.115	0.158	0.162	0.189	2.625×10 ⁻⁵	3.443×10 ⁻⁰⁷	9.443×10 ⁻⁵	0.949	0.981	0.931
10	2	0.030	0.035	0.051	0.188	0.178	0.218	2.637×10 ⁻⁵	1.193×10 ⁻⁵	1.811×10 ⁻⁵	0.970	0.978	0.973
	4	0.051	0.076	0.086	0.144	0.187	0.208	5.651×10 ⁻⁵	4.658×10 ⁻⁵	4.828×10 ⁻⁴	0.842	0.955	0.885
	8	0.147	0.169	0.199	0.203	0.218	0.225	1.756×10 ⁻⁷	4.127×10 ⁻⁷	5.156×10 ⁻⁵	0.989	0.996	0.914
15	2	0.030	0.056	0.072	0.165	0.233	0.272	3.020×10 ⁻⁵	5.791×10 ⁻⁵	1.508×10 ⁻⁶	0.954	0.908	0.983
	4	0.069	0.109	0.137	0.178	0.198	0.252	9.034×10 ⁻⁴	1.779×10 ⁻⁴	4.133×10 ⁻⁵	0.687	0.908	0.872
	8	0.174	0.239	0.281	0.229	0.243	0.239	5.614×10 ⁻⁴	2.035×10 ⁻⁵	9.537×10 ⁻⁷	0.777	0.974	0.981

注:*a*、*b* 为公式(3)中的参数;Prob>*F* 为 *F* 检验值。

2.2 不同近地表水流饱和深度细沟剥蚀率随含沙量的变化特征

利用公式(4)拟合细沟剥蚀率与含沙量,拟合曲线见图 2。由图 2 可知,在不同工况条件下,细沟剥蚀率随含沙量呈线性下降趋势。近地表水流饱和深度越大,径流含沙量和细沟剥蚀率越大,说明随着近地表水流饱和深度的增大,径流的剥蚀能力越强。随着近地表水流饱和深度的增大,细沟剥蚀率随径流含沙量下降得越快。在小坡度小流量情况下,剥蚀率随含沙量变化曲线在近地表水流饱和深度为 5,10 cm 时相差不大,可能是在小坡度小流量情况下近地表水流饱和深度为 5,10 cm 时近地表水流与地表径流未能发生明显耦合作用。在大坡度大流量情况下,曲线在近地水流饱和深度为 5 cm 时与 10,15 cm 相差较大,说明在大坡度大流量条件下近地表水流饱和深度在 10 cm 时近地表水流与地表径流发生了耦合作用使剥蚀率变大。径流能量用于剥蚀土壤,搬运土壤,随着径流含沙量增加,更多的径流能量用于搬运土壤,导致用于剥蚀的能量减小,当剥蚀的土壤与沉积的土壤相当时,侵蚀达到动态平衡。当含沙量接近输沙能力对应的值时,细沟剥蚀率趋于 0,此时径流含沙量达到最大值。

表 2 为拟合参数 *d*、*f*。大多数 Prob>*F* 值小于 0.05,说明剥蚀率与含沙量呈显著线性相关。当径流含沙量为 0 时, $Dr=d$,此时为最大剥蚀率。本研究中 *d* 值在 0.005~0.266,随着流量、坡度和近地表水流饱和深度的增大而增大。在一定坡度和流量下,*d* 值随着近地表水流饱和深度的增大而增大。回归系数 *f* 表示拟合线的斜率,*f* 值一般随流量、坡度和近地表水流饱和深度的增大而增大。在一定坡度和流量下,*f* 值随着近地

表水流饱和深度的增大而增大。

2.3 流量、坡度及近地表水流饱和深度对剥蚀能力的影响

采用多元非线性回归分析,利用流量、坡度和近地表水流饱和深度的幂函数(公式(5))拟合细沟剥蚀能力,从而确定流量、坡度和近地表水流饱和深度对细沟剥蚀率的影响。

$$Dr=a_1 \cdot q^{a_2} \cdot S^{a_3} \cdot h^{a_4}$$

(5)

式中: Dr 为剥蚀能力,即最大剥蚀率(kg/(m²·s));*h* 为近地表水流饱和深度(m);*S* 为坡度的正弦值,无量纲;*q* 为单宽流量(m²/s),由于坡度与单宽流量的量级差别太大,因此在计算回归系数时将单宽流量的单位由 m²/s 换算为 L/(s·m)^[10]; *a*₁、*a*₂、*a*₃、*a*₄ 为回归系数。

将不同流量、坡度及近地表水流饱和深度下的剥蚀能力 *a* 代入公式(5)进行逐步回归,并将所得系数标准化后得到公式(6):

$$Dr=q^{1.14} \cdot S^{0.72} \cdot h^{0.36}$$

(6)

公式(6)的决定系数 *R*² 为 0.96, NSE 的值为 0.96,说明公式(6)可以有效地表示单宽流量、坡度以及近地表水流饱和深度对剥蚀能力的影响。公式(6)中流量、坡度和近地表水流饱和深度的标准化系数分别为 1.14,0.72,0.36,说明细沟剥蚀率与流量、坡度和近地表水流饱和深度呈正相关,且流量对细沟剥蚀率的影响最显著,其次是坡度,最后是近地表水流饱和深度。而在 Xiao 等^[19]的研究中,细沟剥蚀率对坡度的敏感性大于流量的敏感性,试验条件为 4 种流速 10, 15,20,25 L/min 和 4 种坡度 10°,15°,20°,25°,与本试验相比,其试验条件是在大坡度大流量条件下进行的,因此造成这种情况可能是坡度较小时,坡度对细沟剥蚀率的影响较小,但随着坡度增大,其影响会逐渐增大并

接近或超过流量。由表 1 可知,在坡度为 5°、流量为 2 L/min 时,当近地表水流饱和深度由 5 cm 增加到 10 cm 及由 10 cm 增加到 15 cm 时,剥蚀能力分别增加 80%,55%;在坡度为 15°、流量为 8 L/min 时,当近

地表水流饱和深度由 5 cm 增加到 10 cm 及由 10 cm 增加到 15 cm 时,剥蚀能力分别增加 37%,17%。这说明在缓坡、低流量条件下,剥蚀能力增加幅度大于其在陡坡条件下的增长幅度。

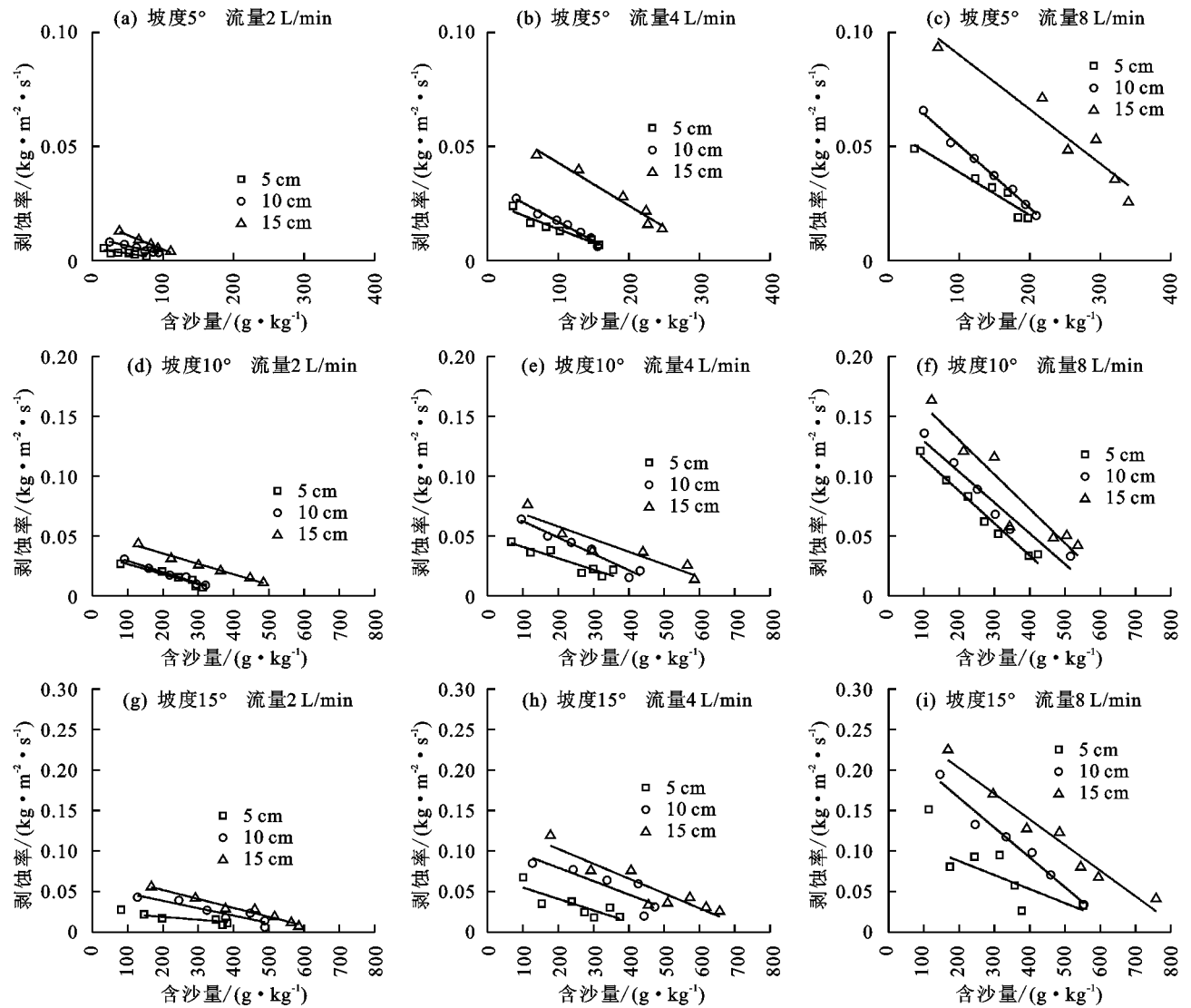


图 2 不同近地表水流饱和深度下细沟剥蚀率与含沙量的曲线

表 2 不同近地表水流饱和深度下紫色土细沟剥蚀率与含沙量关系回归参数

坡度/ (°)	流量/ (L·min ⁻¹)	回归参数											
		a			b			Prob>F			R ²		
		5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm
5	2	0.005	0.010	0.017	-4.522×10 ⁻⁵	-7.333×10 ⁻⁵	-1.250×10 ⁻⁴	3.409×10 ⁻²	3.065×10 ⁻⁴	4.519×10 ⁻⁴	0.643	0.964	0.986
	4	0.026	0.034	0.062	-1.209×10 ⁻⁴	-1.668×10 ⁻⁴	-1.873×10 ⁻⁴	1.750×10 ⁻³	2.245×10 ⁻⁵	5.612×10 ⁻⁴	0.916	0.975	0.952
	8	0.058	0.078	0.114	-1.882×10 ⁻⁴	-2.752×10 ⁻⁴	-2.384×10 ⁻⁴	1.940×10 ⁻³	9.777×10 ⁻⁷	2.990×10 ⁻³	0.911	0.993	0.890
10	2	0.035	0.038	0.053	-8.467×10 ⁻⁵	-9.365×10 ⁻⁵	-8.708×10 ⁻⁵	1.640×10 ⁻³	1.594×10 ⁻⁴	8.882×10 ⁻⁵	0.918	0.974	0.981
	4	0.050	0.076	0.079	-9.546×10 ⁻⁵	-1.365×10 ⁻⁴	-1.057×10 ⁻⁴	2.520×10 ⁻³	7.126×10 ⁻⁴	5.660×10 ⁻³	0.835	0.946	0.850
	8	0.142	0.155	0.188	-2.700×10 ⁻⁴	-2.573×10 ⁻⁴	-2.874×10 ⁻⁴	2.667×10 ⁻⁵	1.100×10 ⁻³	1.400×10 ⁻³	0.972	0.933	0.869
15	2	0.026	0.057	0.074	-3.484×10 ⁻⁵	-9.131×10 ⁻⁵	-1.100×10 ⁻⁴	8.982×10 ⁻²	2.500×10 ⁻³	3.350×10 ⁻⁵	0.743	0.835	0.970
	4	0.069	0.112	0.139	-1.413×10 ⁻⁴	-1.653×10 ⁻⁴	-1.830×10 ⁻⁴	2.102×10 ⁻²	2.498×10 ⁻²	1.070×10 ⁻³	0.625	0.692	0.828
	8	0.122	0.239	0.266	-1.730×10 ⁻⁴	-3.678×10 ⁻⁴	-3.165×10 ⁻⁴	9.041×10 ⁻²	2.820×10 ⁻⁴	1.159×10 ⁻⁴	0.441	0.966	0.951

注:d、f 为公式(4)中的参数;Prob>F 为 F 检验值。

3 讨论

3.1 近地表水流对细沟剥蚀率的影响

由公式(6)可知,近地表水流存在时,细沟剥蚀率与流量及坡度呈正相关。一方面,细沟水流作为剥蚀土壤颗粒的动力和输移剥蚀泥沙的载体,剥蚀率的大小取决于地表径流的能量,地表径流流量越大,能量越大,则径流能剥蚀搬运的土壤颗粒就越多;另一方面,坡度越大,地表径流沿坡面方向的重力势能就越大,其所能剥蚀土壤颗粒的能量就越大,则细沟剥蚀率越大;坡度越大,土体的下滑力变大,土壤颗粒更易受到水流剥蚀作用。在以往的研究^[17]中,剥蚀率对坡度的敏感性大于流量。依据公式(6)可知,本研究中细沟剥蚀率对流量的敏感性大于坡度。一方面可能是因为本试验设计的坡度为 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$,当坡度较小时坡度对细沟侵蚀的影响较小,但随着坡度增加,这种影响会逐渐增大^[10];另一方面,可能是因为在近地表水流存在的条件下,地表径流的入渗量减小,导致细沟水流量增加,细沟水流具有更高的能量用于剥蚀、搬运土壤颗粒^[20]。

3.2 不同近地表水流饱和深度对细沟剥蚀率的影响

黄钰涵等^[21]计算了不同水力条件下紫色土细沟剥蚀率,在流量和坡度相同的条件下,其所测得的细沟剥蚀率与本试验中近地表水流饱和深度为5 cm时的值相近,这说明当近地表水流饱和深度为5 cm时,近地表水流对细沟剥蚀率的影响不是很明显;当近地表水流饱和深度变大时,近地表水流的存在使细沟剥蚀率变大,可能是因为当近地表水流深度增大时,地表径流量能的增加使得土壤表层破断后地表径流与近地表水流接触产生交互作用使得细沟剥蚀率变大,这说明近地表水流饱和深度对细沟剥蚀率影响显著。由公式(6)可知,细沟剥蚀率与近地表水流饱和深度呈正相关。这是因为:(1)近地表水流影响土壤颗粒间胶结作用。近地表水流具有向上出流的趋势,导致土壤颗粒间黏结作用减弱^[13],加大土壤可蚀性。近地表水流的存在导致土壤水压力的升高,从而导致土壤抗剪强度的降低^[22],这使得地表径流更易克服土壤间的黏结力,使得土壤颗粒被剥离,为径流侵蚀土壤提供物质来源^[23]。(2)近地表水流影响入渗。近地表土壤含水量越大,土壤的入渗量越小,径流强度越大^[24]。不同近地表水流对入渗有一定影响,近地表水流饱和深度越大,土壤含水量越大,这使得入渗的水分减少,转化为径流的量就越多,径流的挟沙能力就增强^[25],因此径流能更多地剥蚀土壤颗粒。

限定性细沟冲刷试验可能会引起缩放效应,因为

限定性细沟冲刷试验会受到边界效应的影响,从而导致地表径流集中流动,自然条件下近地表水流与地表径流耦合作用下紫色土细沟剥蚀率的变化特征还有待进一步研究。

4 结论

本研究基于限定性细沟模拟冲刷试验,利用调节近地表水流饱和深度的水头控制装置,研究了在3个坡度和3个流量下,紫色土细沟侵蚀率随近地表水流饱和深度的变化规律。结果表明:

(1)随着细沟长度和含沙量的增大,细沟剥蚀率分别呈指数下降和线性下降趋势,细沟剥蚀率与近地表水流饱和深度呈正相关,近地表水流饱和深度增大能使细沟剥蚀率增大。

(2)建立流量、坡度和近地表水流饱和深度与细沟剥蚀率的多元非线性回归方程发现,本研究中流量、坡度和近地表水流饱和深度的标准化系数分别为1.14,0.72,0.36,近地表水流饱和深度与细沟剥蚀率呈正相关,且细沟剥蚀率对流量的敏感性大于坡度。

参考文献:

- [1] 冯小杰,郑子成,李廷轩,等.暴雨条件下紫色土区玉米季坡耕地氮素流失特征[J].中国农业科学,2018,51(4):738-749.
- [2] 王红兰,蒋舜媛,崔俊芳,等.紫色土坡耕地土壤大孔隙流的定量评价[J].农业工程学报,2017,33(22):167-174.
- [3] 徐勤学,王天巍,李朝霞,等.紫色土坡地壤中流特征[J].水科学进展,2010,21(2):229-234.
- [4] Nouwakpo S K, Huang C H. The role of subsurface hydrology in soil erosion and channel network development on a laboratory hillslope [J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(4): 1197-1211.
- [5] Nearing M A. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology [J]. Transactions of the ASABE, 1989, 32(5): 1587-1593.
- [6] 张晴雯,雷廷武,赵军.细沟股流剥蚀率与载沙量以及沟长的耦合关系[J].水土保持学报,2001,15(2):92-95.
- [7] 王瑄,李占斌,李雯,等.土壤剥蚀率与水流功率关系室内模拟实验[J].农业工程学报,2006,22(2):185-187.
- [8] 李敏,张含玉,刘前进.含水量、坡度和流量对土壤分离能力的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):35-40.
- [9] Han Z, Chen X Y, Li Y H, et al. Quantifying the rill-detachment process along a saturated soil slope [J]. Soil and Tillage Research, 2020, 204: 104726.
- [10] 李彦海,陈晓燕,韩珍,等.紫色土细沟水流输沙能力对近地表水流作用的响应[J].土壤学报,2020,57(3):1-10.
- [11] Simon A, Collison A J C. Pore-water pressure effects on the detachment of cohesive streambeds: Seepage

- forces and matric suction [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(13): 1421-1442.
- [12] 安娟, 陈新军, 宋红丽. 近地表水文条件对横坡垄作坡面褐土团聚体流失的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(6): 1411-1421.
- [13] Nouwakpo S K, Huang C H, Bowling L, et al. Impact of vertical hydraulic gradient on rill erodibility and critical shear stress [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(6): 1914-1921.
- [14] Owoputi L O, Stolte W J. The role of seepage in erodibility [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(1): 13-22.
- [15] Huang Y H, Chen X Y, Li F H, et al. Velocity of water flow along saturated loess slopes under erosion effects [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 561: 304-311.
- [16] Cochrane T A, Flanagan D C. Detachment in a simulated rill [J]. *Transactions of the ASABE*, 1996, 40(1): 111-119.
- [17] Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(2): 339-344.
- [18] Li Z W, Zhang G H, Geng R, et al. Land use impacts on soil detachment capacity by overland flow in the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2015, 124: 9-17.
- [19] Xiao H, Liu G, Liu P L, et al. Response of soil detachment rate to the hydraulic parameters of concentrated flow on steep loessial slopes on the Loess Plateau of China [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(14): 2613-2621.
- [20] Zheng F L, Huang C H, Norton L D. Effects of near-surface hydraulic gradients on nitrate and phosphorus losses in surface runoff [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(6): 2174-2182.
- [21] 黄钰涵, 陈晓燕, 罗帮林, 等. 基于土槽冲刷法的紫色土侵蚀细沟剥蚀率研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(3): 594-601.
- [22] Singh H V, Thompson A M. Effect of antecedent soil moisture content on soil critical shear stress in agricultural watersheds [J]. *Geoderma*, 2016, 262: 165-173.
- [23] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 植被影响下坡面侵蚀临界水流能量试验研究[J]. *水科学进展*, 2011, 22(2): 229-234.
- [24] 张玉斌, 郑粉莉. 近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(2): 5-10.
- [25] 任熠, 王先拓, 王玉宽, 等. 紫色土坡面细沟流的水力学特征试验研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 39-42, 46.
- (上接第 15 页)
- [18] Zhu G Y, Tang Z S, Shangguan Z P, et al. Factors affecting the spatial and temporal variations in soil erodibility of China [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2019, 124(3): 737-749.
- [19] 邓羽松, 李双喜, 丁树文, 等. 鄂东南崩岗不同层次土壤分形特征及抗蚀性研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(1): 63-70.
- [20] 吕文强, 党宏忠, 周泽福, 等. 北方带状植物篱土壤水分物理性质分异特征[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 86-91, 97.
- [21] 湛芸, 马云, 何丙辉. 植物篱对紫色土物理性质及养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 59-63.
- [22] 吕文星, 张洪江, 程金花, 等. 三峡库区植物篱对土壤理化性质及抗蚀性的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 69-73, 78.
- [23] 马云, 何丙辉, 何建林, 等. 植物篱对紫色土区坡地不同土层土壤物理性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 60-64, 70.
- [24] 陈蝶, 卫伟. 植物篱的生态效益研究进展[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 652-662.
- [25] 熊杏, 熊清华, 郭熙, 等. 南方典型丘陵区耕地土壤全氮、有机碳和碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1656-1668.