

黄绵土坡面细沟侵蚀剥蚀能力试验

厉晓峰¹, 黄钰涵², 孟书翰¹, 亓波¹, 杨佳慧¹, 张俊鹏¹, 雷廷武^{1,3}

(1.山东农业大学水利土木工程学院,山东 泰安 271018;2.广西大学林学院,
南宁 530004;3.中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要:为研究黄土坡面细沟侵蚀规律,探究水流剥蚀能力的室内测算方法,以黄绵土为研究对象,设置2,4,6,8 L/min 4个流量,5°,10°,15°,20° 4个坡度,土槽长度为12 m,进行室内径流冲刷试验,得到黄绵土坡面细沟侵蚀的临界沟长和输沙能力,基于二者之间的函数关系,推导出剥蚀能力的计算公式,以此研究不同试验条件下临界沟长、输沙能力和剥蚀能力的变化规律,并验证方法的准确性。结果表明:在设计水力工况条件下,黄绵土坡面细沟侵蚀的临界沟长的变化范围在5.33~11.12 m,且临界沟长随流量和坡度的增加而缩短;输沙能力随流量和坡度的增大而增大;剥蚀能力与流量之间存在明显的线性关系,与坡度之间存在较好的对数关系。试验方法与其他方法相比,操作便捷、结果吻合度高,能较好地确定黄土区细沟侵蚀的剥蚀能力。研究结果可进一步完善黄土坡面细沟侵蚀理论。

关键词:细沟侵蚀;临界沟长;剥蚀能力;输沙能力;冲刷试验

中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2023)01-0084-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.013

Laboratory Study of Detachment Capacity Under Rill Erosion on the Loess Slope

LI Xiaofeng¹, HUANG Yuhan², MENG Shuhan¹,

QI Bo¹, YANG Jiahui¹, ZHANG Junpeng¹, LEI Tingwu^{1,3}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018; 2. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 271018;
3. College of Water Resource & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083)

Abstract: In order to study the law of rill erosion on the loess slope, and explore the indoor calculation method for the detachment capacity of water flow, this paper took loess soil as the research object, four flow rates (2, 4, 6, 8 L/min), and four slope gradients (5°, 10°, 15° and 20°) were set up, and the length of soil trough was 12 m. The critical rill length and sediment transport capacity of loess soil slope were obtained. Based on the functional relationship between the above two factors, the calculation formula of detachment capacity was deduced. According to this, the change rules of critical ditch length, sediment transport capacity and detachment capacity under different test conditions were analyzed, and the accuracy of this test method was verified. The results showed that under the designed hydraulic conditions, the critical rill length of rill erosion on loess slope varied from 5.33 to 11.12 m, and the critical rill length decreased with the increase of flow rates and slopes, and the sediment transport capacity increased with the increase of flow rates and slopes. There was an obvious linear relationship between detachment capacity and flow rate, and a logarithmic relationship between detachment capacity and slope. Compared with other methods, this test method had the advantages of convenient operation and high coincidence of results, and could better determine the denudation ability of rill erosion in loess area. The research results can further improve the theory of rill erosion on the loess slope.

Keywords: rill erosion; critical ditch length; detachment capacity; sediment transport capacity; washout test

细沟侵蚀是黄土高原坡耕地土壤侵蚀急剧增大的重要阶段^[1-3],细沟侵蚀不仅危害农业生产,且由于地面松散导致地面塌陷,对生态环境造成不利影响。细沟剥蚀能力是指单位长度的细沟水流,在单位时间内剥蚀、运移土壤的能力^[4],是细沟水流对土壤剥蚀过程中的最大剥蚀率,能直接反映侵蚀的严重程度^[5]。因此准确测算细沟侵蚀水流的剥蚀能力就显得尤为重要,其研究结果可为黄土高原水土流失预测模型提供参考。

针对细沟侵蚀剥蚀能力,早在20世纪70年代,Foster等^[6]提出坡面水流剥蚀能力的计算公式,通过测量水流的剪切应力计算剥蚀能力。在此研究基础上,国外学者建立的WEPP模型^[7]将该公式进行修正,进一步揭示剥蚀能力与径流剪切力之间符合线性关系。但随着侵蚀过程中细沟不断发育,水流的剪切应力难以确定,且细沟宽度增加导致用此方法得出的剥蚀能力偏小。随后,国内外学者^[5,8-10]又开展大量研究,取得诸多具有参考价值的成果。相关研究表明,流量、坡度和近地表水流饱和深度是细沟剥蚀能力的主要驱动力,丁琳桥^[11]研究发现,坡面细沟侵蚀的剥蚀能力随着细沟形态的变化而不断变化;张晴雯等^[12]采用室内模拟试验验证WEPP中的水蚀模型,得出在稳定水流作用下,细沟入口处水流泥沙含量为零时的剥蚀率就是水流的剥蚀能力,坡度和流量对侵蚀量有着显著正效应;Xing等^[13]通过解析法,测量饱和与非饱和黄绵土细沟侵蚀过程中的最大剥蚀率来确定剥蚀能力,结果表明,其他条件相同时,非饱和黄绵土的剥蚀能力普遍高于饱和处理;周陈燕^[14]通过测量1m沟长处的泥沙含量来近似计算水流的剥蚀能力,结果表明,方法有效可行,水流的剥蚀能力随着流量和坡度的增加呈增大趋势。目前,多数对黄土区细沟侵蚀剥蚀率的研究试验过程较为复杂,针对剥蚀能力直接计算的方法研究较少,且黄土区细沟侵蚀相关的结论还不够完善。

为此,本研究通过设计室内冲刷试验,模拟不同流量和坡度条件下的坡面细沟侵蚀,试验测量黄绵土细沟侵蚀临界沟长和输沙能力,通过二者之间的函数关系进行数学推导,得到剥蚀能力的计算公式,并与前人的结果进行对比以验证此方法的准确性。该试验方法相较于前人^[13-14]研究:第1,得到一种新的确定黄绵土水流剥蚀能力的计算方法;第2,简化复杂的试验步骤,省时省力;第3,本研究实际测量黄绵土坡面侵蚀的临界沟长,区别于其他试验通过解析公式对临界沟长进行估算;其次采用12m长的土槽,在小坡度条件下也可以让径流达到输沙能力。同时通过试验,研究坡面细沟侵蚀各项指标对流量和坡度的响应特征,为黄土

高原水土流失治理提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验用土为黄绵土,取自陕西省延安市安塞区(36°51'30"N, 109°19'23"E)。填土容重参考取样点表层土壤容重,约为1.30 g/cm³,供试土壤颗粒组成为黏粒11.63%,粉粒64.57%,砂粒23.80%,根据国际土壤质地分类标准,为粉砂质壤土。

1.2 试验设计

试验于2021年9月16日至10月25日在山东农业大学岩土工程与土壤物理实验室进行。降雨后产生的集中水流对坡面冲刷形成细沟侵蚀,侵蚀主要受制细沟中的水流特性和土壤性质,受雨滴击打影响很小,故采用室内径流冲刷进行细沟侵蚀试验。对黄土高原地区进行农业活动调查发现,细沟侵蚀多发生在研究地区的坡耕地,在25°以下裸露耕地中侵蚀表现最明显,黄土高原多年平均降水量约为500 mm,且临界侵蚀雨强为0.5~0.6 mm/min^[15-16]。因此,试验设置2.4,6,8 L/min 4个流量;5°,10°,15°,20° 4种坡度;已有研究^[17]表明,在本试验条件下,细沟长度为8~12 m时水流普遍达到输沙能力,且相同试验条件,通过前人^[17-18]估算得出的黄绵土临界沟长多不超过13 m,为了便于实际测量临界沟长长度,并确保重复试验时水流普遍达到输沙能力,将坡长设置为12 m,每个水力工况条件下进行3次重复试验,共计48次试验。

1.2.1 试验土槽布设及装填 试验选用可调节坡度(0~25°)的钢制土槽,规格为长12 m,宽1.5 m,高0.5 m(图1)。野外发生的细沟侵蚀受地形、土地管理等因素影响,在侵蚀过程中,沟宽的不断发展影响水流的输沙能力和剥蚀能力,导致径流剪切应力等水力因素难以确定。为避免细沟发展的随机性,试验采用限定性细沟,通过钢板将土槽分隔成3条长12 m,宽0.1 m,高0.3 m的细沟。

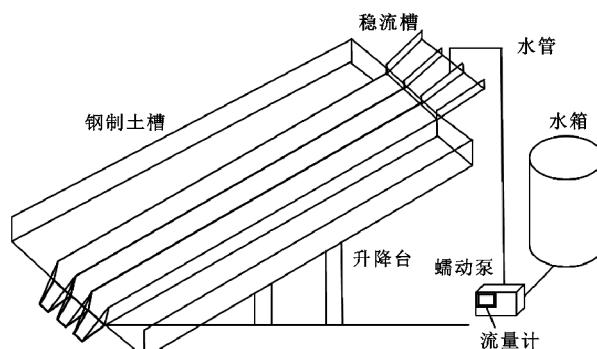


图1 试验装置示意

为防止土槽底部水流渗出,在底层铺设5 cm厚的黏土,不计容重,压实后既能密封土槽也可模拟耕地犁底层;为避免土壤中大颗粒土块的影响,将土壤

过 10 mm 筛后均匀填至土槽中, 填土过程中使土壤自然沉降, 以接近耕地原状土; 已有研究^[19]表明, 细沟发育深度多不超过耕层, 在 2~16 cm 范围居多, 故将供试土壤装填厚度控制在 20 cm。

1.2.2 含沙量测定 通过可调节水泵设定流量, 给定不同流量与坡度, 从细沟 12 m 处进行冲刷试验, 待水流含沙量稳定后, 在土槽出水口处接取 5 个泥沙样品, 每个处理共计 15 个样品, 用烘干法通过公式(1)测量样品含沙量, 取土壤颗粒密度大小为 2.65 g/cm³。

$$c = \frac{m_h - m}{(m_y - m_h) + (m_h - m)/2.65} \times 1000 \quad (1)$$

式中: c 为水流含沙量 (kg/cm³); m_h 为烘干后取样杯总重 (g); m 为取样杯的重量 (g); m_y 为烘干前取样杯总重 (g)。

1.2.3 临界沟长测定 细沟水流从入水口开始剥蚀、搬运泥沙, 当水流挟沙量达到一定沟长后不再明显增加时, 对应的沟长称为临界沟长。在每个处理下, 通过精度为 1 cm 的钢卷尺测量供试土壤从产生侵蚀到不再发生明显侵蚀的距离, 该距离的长度为临界沟长 X_c (m) 的实测值。

1.3 数据计算

1.3.1 输沙能力计算方法 水流的输沙能力计算公式^[4]为:

$$T_c = A \cdot q \quad (2)$$

式中: T_c 为水流输沙能力 [kg/(s · m)]; A 为水流最大含沙量 (kg/m³); q 为单宽流量 (m²/s)。本试验认为多次重复水流普遍达到输沙能力, 测得的水流含沙量 (c) 近似为最大含沙量 (A), 将公式(1)的计算结果带入, 可求得不同工况下水流的输沙能力。

1.3.2 输沙能力影响因素相关性分析 流量和坡度对输沙能力的影响因子可通过二元方程进行相关性分析。

$$T_c = a + b \cdot S + c \cdot Q \quad (3)$$

式中: a 、 b 和 c 为回归系数; S 为坡度 (°); Q 为流量 (L/min)。

1.3.3 剥蚀能力计算原理 细沟侵蚀中, 已知含沙量与细沟沟长有较好的指数关系^[4]:

$$c = A(1 - e^{-B \cdot x}) \quad (4)$$

式中: c 为水流含沙量 (kg/m³); e 为自然对数; B 为细沟侵蚀衰减系数 (1/m); x 为沟长 (m)。

当最大含沙量与含沙量的极限值相差很小, 取差值相差 $\leq 5\%$ 时, 认为此时的沟长即为临界沟长。可由公式(5)表示:

$$\frac{A - \lim_{x \rightarrow \infty} c}{\lim_{x \rightarrow \infty} c} \leq 5\% \quad (5)$$

将公式(4)带入公式(5)中得:

$$\frac{A - \lim_{x \rightarrow \infty} A(1 - e^{-B \cdot x_c})}{\lim_{x \rightarrow \infty} A(1 - e^{-B \cdot x_c})} \leq 0.05 \quad (6)$$

化简,

$$\lim_{x \rightarrow \infty} [(1 - e^{-B \cdot x_c})^{-1} - 1] \leq 0.05 \quad (7)$$

$$\ln(1 - e^{-B \cdot x_c}) \geq \ln 0.9524 \quad (8)$$

$$e^{-B \cdot x_c} \leq 0.0476 \quad (9)$$

取自然对数可得:

$$X_c \geq \frac{3.0445}{B} \quad (10)$$

为了方便计算, 使

$$B = \frac{3}{X_c} \quad (11)$$

式中: X_c 为临界沟长 (m)。通过实际测量的临界沟长求得衰减系数, 将计算结果带入公式(12), 可求得不同处理下的水流的剥蚀能力。

$$D_c = B \cdot T_c \quad [4] \quad (12)$$

式中: D_c 为细沟水流剥蚀能力 [kg/(s · m²)]。

2 结果与分析

2.1 不同流量和坡度下临界沟长的变化特征

由图 2 可知, 沟长随着流量的增大而减小。同一坡度下, 流量由 2 L/min 增加到 4 L/min 时, 沟长平均降低 17%; 流量由 4 L/min 增加到 6 L/min 时, 沟长平均降低 16%; 流量由 6 L/min 增加到 8 L/min 时, 沟长平均降低 12%, 结果表明, 在流量较小时对临界沟长的影响较大。临界沟长随坡度的变化与随流量规律相似, 随着坡度的增大而减小。同一流量条件下, 坡度由 5° 增加到 10° 及 10° 增加到 15° 时, 临界沟长平均分别降低 6% 和 4%; 而坡度由 15° 增加到 20° 时, 沟长平均降低 18%, 说明在大坡度时更易发生细沟侵蚀。同时, 图中临界沟长的变幅范围在 5.33~11.12 m, 整体上随坡度和流量的增大呈下降趋势。

2.2 不同流量和坡度对输沙能力的影响

表 1 为不同流量和坡度下输沙能力的具体数值, 试验坡度为 5° 时, 侵蚀产沙稳定后水流的输沙能力为 0.081~0.559 kg/(s · m); 试验坡度为 10° 时, 水流的输沙能力为 0.097~0.665 kg/(s · m); 而当试验坡度由 15° 增加至 20° 时, 各流量条件下的水流输沙能力不再随流量的增加而显著增加, 说明坡度在 20° 附近存在土壤侵蚀的临界转折点。输沙能力随流量和坡度的增大有不同程度的增加, 整体上均呈现增加趋势。

为了定量分析各因素的影响, 对流量和坡度通过二元方程 ($T_c = a + b \cdot S + c \cdot Q$) 线性回归, 得到的数据见表 2。由 t 检验发现, 系数 b 和 c 在置信水平为 0.05 时非常显著, 说明坡度和流量对细沟输沙能力影响显著, 且 t 的绝对值都大于 2.58, 说明结果分

析可靠。流量的回归系数为 0.103, 坡度的回归系数

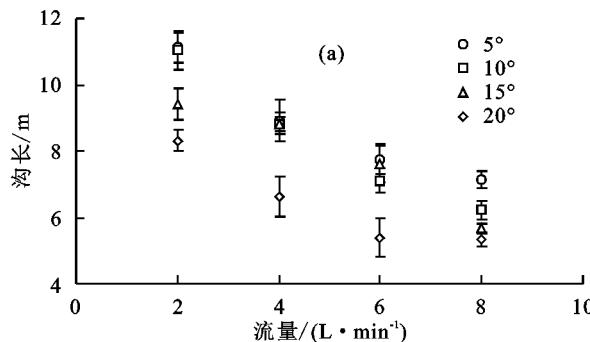


图 2 临界沟长随流量坡度变化特征

表 1 不同工况下水流输沙能力

坡度/°	流量/(L·min⁻¹)	输沙能力/(kg·s⁻¹·m⁻¹)
5	2	0.081d
	4	0.182c
	6	0.328b
	8	0.559a
	2	0.097d
10	4	0.265c
	6	0.409b
	8	0.665a
	2	0.213d
	4	0.446c
15	6	0.673b
	8	0.922a
	2	0.220d
	4	0.450c
	6	0.684b
20	8	0.951a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

表 2 流量和坡度对输沙能力影响的回归方程

回归系数	系数值	t	p
a	-0.334	-6.080	0.001
b	0.021	7.228	0.001
c	0.103	13.837	0.001

注:a 为常数;b 为坡度回归系数;c 为流量回归系数;t 为统计量值;p 为显著性水平系数。

2.3 剥蚀能力随流量和坡度的变化规律

2.3.1 剥蚀能力随流量的变化特征 由图 3 可知,随着流量的增大,坡度为 5° 时剥蚀能力由 $0.022 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 增至 $0.235 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$; 坡度为 10° 时剥蚀能力由 $0.026 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 增至 $0.320 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$; 坡度为 15° 时剥蚀能力由 $0.068 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 增大到 $0.489 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$; 坡度为 20° 时剥蚀能力由 $0.080 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 增大到 $0.535 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。说明不同坡度下,水流的剥蚀能力都随着流量的增大而增大,且流量一定时,大坡度水流的剥蚀能力明显大于小坡度。

为 0.021, 结果表明流量对输沙能力的影响更显著。

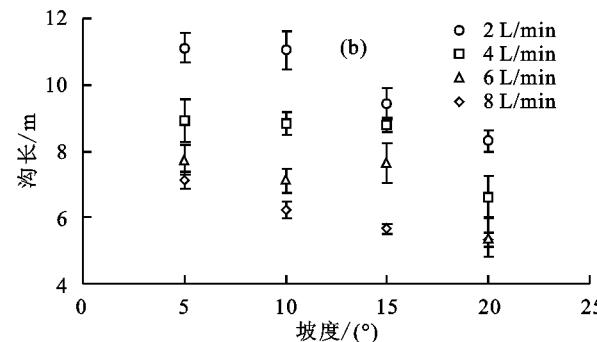


图 2 临界沟长随流量坡度变化特征

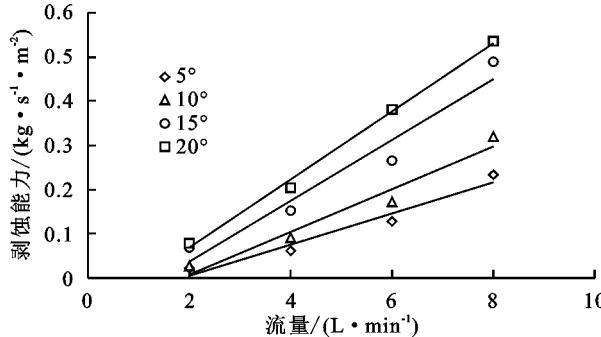


图 3 不同坡度下剥蚀能力随流量的变化

由表 3 可知,剥蚀能力与流量之间存在明显的正比例关系,从系数来看,坡度在 5°~10° 时,方程系数分别为 0.035 和 0.048,而坡度在 15°~20° 时,方程系数为 0.069 和 0.077,说明大坡度条件下,剥蚀能力随流量的增幅速率大于小坡度。

表 3 剥蚀能力随流量变化的拟合方程

坡度/°	回归方程	R ²	p
5	$D_c = 0.035Q - 0.065$	0.955	0.023
10	$D_c = 0.048Q - 0.089$	0.961	0.020
15	$D_c = 0.069Q - 0.101$	0.948	0.027
20	$D_c = 0.077Q - 0.086$	0.996	0.002

2.3.2 剥蚀能力随坡度的变化特征 由图 4 可知,坡度由 5° 逐渐增至 20° 时,在不同流量条件下剥蚀能力分别增加 21.4%~36.3%, 108.2%~210.6%, 127.9%~263.7%, 结果表明,坡度越大,黄绵土细沟水流剥蚀能力的增幅程度越大。

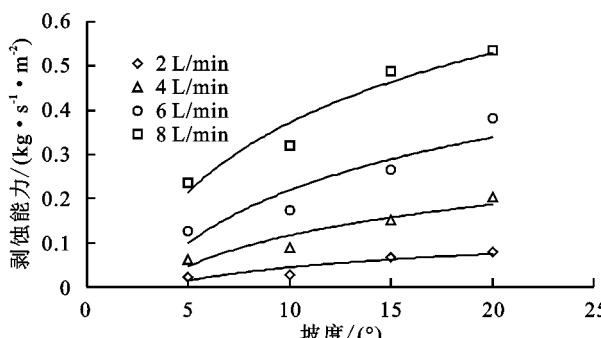


图 4 不同流量下剥蚀能力随坡度的变化

从方程系数(表 4)来看,流量越大,剥蚀能力随坡度的增幅速率越快。且由表 4 的拟合结果可知,在大流量和大坡度条件下,水流的剥蚀能力与流量和坡度的关系更显著。表 3 和表 4 拟合结果的相关系数 R^2 均在 0.8 以上,可以通过经验方程在野外粗略估算不同工况下的水流剥蚀能力,但在表 4 中,流量在 2, 4, 6 min/L 时拟合方程的 $p > 0.05$,结果表现为不显著,因此在此流量条件下的方程适用性有待进一步验证。

表 4 剥蚀能力随坡度变化的拟合方程

流量/ ($L \cdot min^{-1}$)	回归方程	R^2	p
2	$D_c = 0.044 \ln S - 0.057$	0.828	0.090
4	$D_c = 0.101 \ln S - 0.115$	0.898	0.053
6	$D_c = 0.173 \ln S - 0.179$	0.860	0.073
8	$D_c = 0.227 \ln S - 0.151$	0.937	0.032

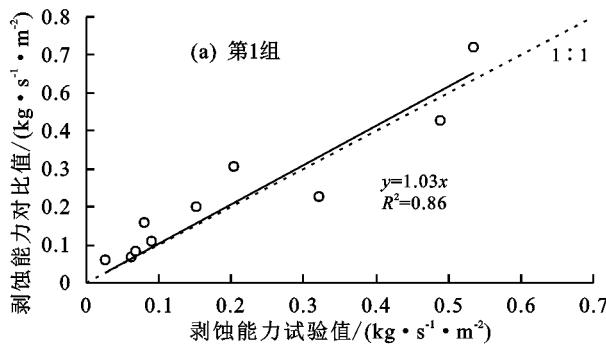


图 4(a) 第 1 组剥蚀能力试验结果

2.4 剥蚀能力试验结果验证

前人^[13-14]研究中使用的土壤与本研究相同,为了验证本试验的准确性,将本试验计算的剥蚀能力值与前人^[13-14]试验得到的剥蚀能力值进行对比,因前人试验条件中流量未设置 6 L/min,故只取相同试验条件下的数据进行对比分析。由图 5 可知,这 2 组剥蚀能力数据的 pearson 相关系数(r)为 0.93,决定系数(R^2)为 0.86,说明这 2 组数据有极显著的相关关系。拟合方程的系数为 1.03,说明前人^[13-14]试验与本试验所得同坡度流量下剥蚀能力数据比较接近,验证本试验所得数据的准确性。剥蚀能力的相关系数(r)分别为 0.97 和 0.99,拟合方程的系数分别为 1.24 和 0.67,决定系数(R^2)分别为 0.94 和 0.98,结果表明在饱和黄绵土和非饱和黄绵土中,该方法同样适用,能很好地测量两者的剥蚀能力。

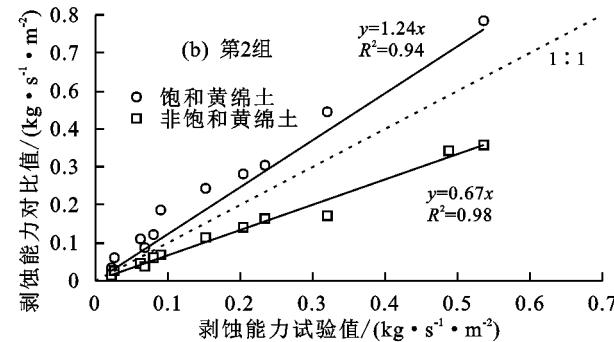


图 4(b) 第 2 组剥蚀能力试验结果

3 讨论

由临界沟长的测量结果(图 2)可知,在本试验设置的流量和坡度条件下,黄绵土坡面侵蚀临界沟长的长度在 5.33~11.12 m。雷廷武等^[4]在室内试验的基础上通过数学模型计算黄绵土坡面侵蚀坡度在 5°~25°、流量在 2~8 L/min 条件下的临界沟长发现,此条件下沟长的长度范围为 5.54~12.69 m; Xing 等^[13]通过解析法计算黄绵土的临界沟长,结果表明,在 5°~20° 的坡度和 2~8 L/min 的流量条件下,黄绵土的临界沟长范围为 4.97~13.05 m。本试验实际测量的临界沟长与前人^[4, 13]研究相比,试验工况相同时的临界沟长长度基本一致,说明实际测量临界沟长可行且准确性良好。其次,本试验研究表明,黄绵土的临界沟长随着流量和坡度的递增呈现递减的趋势,这是因为随着流量和坡度的增大,水流沿坡面的流速明显增大,且坡度增大使水流作用在土壤上的剪切力提高,导致大流量和大坡度条件下水流的对土壤侵蚀作用加剧,水流中泥沙含量更快达到饱和^[20-21],最终表现为坡度与流量越大,侵蚀过程的产沙量达到稳定时所需的沟长越短。结合不同工况下输沙能力的试验结果(表 1)不难发现,水流的输沙能力随着流量和坡

度的增大而增大,这是因为流量增大,大大增加水体所拥有的能量总和,使水流带走更多的土壤^[22],同时随着坡度增大,水流的一部分势能转化为冲刷土壤的动能,也提高水流搬运土壤的能力^[23],导致水流的输沙能力随之增大。用二元线性方程拟合(表 2)发现,流量对输沙能力的影响更显著,这与赵海滨等^[24]通过指数方程、高鹏宇等^[25]通过二元幂函数方程对黄绵土坡面侵蚀输沙能力进行拟合得出的结论相符,因此流量对输沙能力的影响大于坡度。

综合分析剥蚀能力对流量和坡度的响应关系(图 3 和图 4)可知,黄绵土水流的剥蚀能力与流量之间存在明显的线性正相关关系,随坡度呈对数增长,这表明流量和坡度对细沟侵蚀的贡献并不一致^[26],流量对细沟侵蚀的发展可能是单方向加剧,而随着坡度的增大,细沟侵蚀更趋向于多元方向发展,即坡度更有可能是细沟侵蚀的主导因素^[27]。同时由计算结果(图 3 和图 4)可知,流量和坡度越大,剥蚀能力的增幅速率越快,从剥蚀能力的计算公式来看,剥蚀能力与输沙能力呈正比,与临界沟长呈反比,随着流量和坡度的增大,输沙能力不断增大,而临界沟长不断减小,从而导致剥蚀能力增幅速率成倍增加。由剥蚀能

力经验方程拟合的结果(表3和表4)可知,拟合优度高,可以根据具体耕地地形和降雨程度,通过该方程在野外快速粗略估计细沟侵蚀的剥蚀能力,提前采取预防措施。综上可知,本试验结果与多数研究^[2,28-30]通过各类试验方法研究细沟侵蚀相关指标对流量和坡度的响应得出的结论一致,表明该试验方法在黄绵土细沟侵蚀研究中有一定的科学性。黄绵土坡面侵蚀水流的剥蚀能力测量值与前人^[13-14]研究对比(图5)的结果中显示,普通黄绵土试验结果的拟合直线接近1:1,说明2组数据的一致性很好,且相关系数(R^2)大于0.9,说明该试验方法得到的结果与前人^[14]研究结果有良好的对应关系,该试验方法测量水流的剥蚀能力有一定的准确性。从饱和与非饱和黄绵土的水流剥蚀能力对比(图5)分析得出,试验结果与前人^[13]研究在数值上存在差异,这主要是因为试验对黄绵土的处理不同,其次试验设备、试验设计及人为操作等多种因素综合作用的结果,导致各项指标的数值有所不同,但拟合结果均表明,通过本试验方法得出的实测值与前人^[13]试验得出的结果相关性很好,因此该方法同样适用测量不同含水率的黄绵土发生坡面侵蚀时水流的剥蚀能力。总之,3种方法都能较好地测算剥蚀能力,但本研究的试验方法更易操作,也省时省力,可以简化室内细沟侵蚀试验的试验步骤,应用于细沟侵蚀研究中。

4 结论

(1)流量在2~8 L/min,坡度在5°~20°时,黄绵土坡面细沟侵蚀的临界沟长的变化范围在5.33~11.12 m,其变化特征表现为随流量和坡度的增加均呈下降趋势。

(2)输沙能力随流量和坡度的增大而增大,但二者对输沙能力的贡献并不相同,线性方程的回归结果表明,流量对输沙能力的影响大于坡度。

(3)剥蚀能力可以通过临界沟长与输沙能力之间的函数关系计算,将计算结果进行拟合发现,剥蚀能力随流量的增大呈线性增加,随坡度的增加呈对数增加,且此规律在陡坡和大流量更明显;将所得数据与前人的试验进行对比,结果显示吻合度高,验证本文试验方法的准确性。

综合表明,本文提到的试验方法具有一定的科学性和合理性,可以为细沟侵蚀研究提供新思路,其相关指标研究可以为黄土高原地区的水土流失治理提供新的科学依据。

参考文献:

- [1] Liang Y, Jiao J Y, Tang B Z, et al. Response of runoff and soil erosion to erosive rainstorm events and vegetation restoration on abandoned slope farmland in the Loess Plateau region, China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 584:e124694.
- [2] 班小峰.细沟侵蚀过程及其影响因素研究进展[J].中国水土保持,2020(7):58-60.
- [3] 贾莲莲,刘雅丽,朱冰冰,等.不同草带空间分布对坡面细沟侵蚀调控机制[J].水土保持学报,2021,35(1):145-148,153.
- [4] 雷廷武,张晴雯,闫丽娟.细沟侵蚀物理模型[M].北京:科学出版社,2009:18.
- [5] 顾小杰,陈晓燕,韩珍,等.紫色土细沟剥蚀率对近地表水流作用的响应[J].水土保持学报,2021,35(3):16-22.
- [6] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow[J]. Transactions of the ASAE, 1972, 15(1):99-102.
- [7] Nearing M A, Foster G R, Lane L J. A process based soil erosion model for USDA water erosion prediction project technology[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32:1587-1593.
- [8] Wu B, Wang Z L, Zhang Q W, et al. Distinguishing transport-limited and detachment-limited processes of interrill erosion on steep slopes in the Chinese loessial region[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 177:88-96.
- [9] Debie E, Singh K N, Belay M. Effect of conservation structures on curbing rill erosion in micro-watersheds, northwest Ethiopia[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2019, 7(3):239-247.
- [10] 张鹏.藏东南高寒土坡面细沟侵蚀过程研究[D].拉萨:西藏大学,2020.
- [11] 丁琳桥.紫色土细沟侵蚀输沙能力研究[D].重庆:西南大学,2016.
- [12] 张晴雯,雷廷武,姚春梅,等. WEPP 细沟剥蚀率模型正确性的理论分析与实验验证[J].农业工程学报,2004, 20(1):35-39.
- [13] Xing H, Huang Y H, Chen X Y. Comparative study of soil erodibility and critical shear stress between loess and purple soils[J]. Journal of Hydrology, 2018, 558: 625-631.
- [14] 周陈燕.土壤细沟侵蚀输沙能力与剥蚀能力测量方法研究[D].北京:中国农业大学,2016.
- [15] 龙琪,韩剑桥,何育聪,等.黄土坡面细沟侵蚀强度的空间分布及分形态分异特征[J].水土保持学报,2022,36(1):1-7.
- [16] Cao R X, Jia X X, Huang L M, et al. Deep soil water storage varies with vegetation type and rainfall amount in the Loess Plateau of China[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1):e12346.
- [17] 赵宇,陈晓燕,米宏星,等.估算细沟含沙水流剥蚀率的改进方法[J].农业工程学报,2014,30(15):174-181.

- [9] Gong T X, Zhu Y J, Shao M A. Effect of embedded-rock fragments on slope soil erosion during rainfall events under simulated laboratory conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 811-817.
- [10] Lv J R, Luo H, Xie Y S. Effects of rock fragment content, size and cover on soil erosion dynamics of spoil heaps through multiple rainfall events [J]. *Catena*, 2019, 172: 179-189.
- [11] 刘正堂,戴全厚,杨智.喀斯特裸坡土壤侵蚀模拟研究[J].中国岩溶,2014,33(3):356-362.
- [12] Han Z, Wang X Y, Song D D, et al. Response of soil erosion and sediment sorting to the transport mechanism on a steep rocky slope[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(12): 2467-2478.
- [13] Dai Q H, Peng X D, Zhao L S, et al. Effects of underground pore fissures on soil erosion and sediment yield on karst slopes [J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(7): 1922-1932.
- [14] 宋兰,张玉启,何丙辉,等.喀斯特槽谷区岩石与坡面夹角对产流产沙过程的影响[J].水土保持学报,2022,36(3):9-15.
- [15] 覃自阳,甘凤玲,何丙辉.岩层倾向对喀斯特槽谷区地表/地下产流过程的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):68-75,80.
- [16] 王恒星,张建军,孙若修,等.晋西黄土区不同植被格局坡面产流产沙特征[J].北京林业大学学报,2021,43(3):85-95.
- [17] 高光耀,傅伯杰,吕一河,等.干旱半干旱区坡面植被格局的水土流失效应研究进展[J].生态学报,2013,33(1):12-22.
- [18] Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: A field rainfall simulation study [J]. *Geomorphology*, 2015, 250: 1-14.
- [19] 宋同清,彭晚霞,杜虎,等.中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J].生态学报,2014,34(18):5328-5341.
- [20] Liu D D, She D L. Can rock fragment cover maintain soil and water for saline-sodic soil slopes under coastal reclamation? [J]. *Catena*, 2017, 151: 213-224.
- [21] Wang D J, Shen Y X, Huang J, et al. Rock outcrops redistribute water to nearby soil patches in karst landscapes [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(9): 8610-8616.
- [22] Sohrt J, Ries F, Sauter M, et al. Significance of preferential flow at the rock soil interface in a semi-arid karst environment[J]. *Catena*, 2014, 123: 1-10.
- [23] 王济,蔡雄飞,雷丽,等.不同裸岩率下我国西南喀斯特山区土壤侵蚀的室内模拟[J].中国岩溶,2010,29(1):1-5.
- [24] Kheir R B, Abdallah C, Khawlie A. Assessing soil erosion in Mediterranean karst landscapes of Lebanon using remote sensing and GIS[J]. *Engineering Geology*, 2008, 99(3/4): 239-254.
- [25] Ekwue E I, Harrilal A. Effect of soil type, peat, slope, compaction effort and their interactions on infiltration, runoff and raindrop erosion of some Trinidadian soils[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 105(1): 112-118.
- [26] 曹梓豪,赵清贺,左宪禹,等.黄河下游河岸坡面产流产沙特征及其与汇流路径长度关系[J].土壤学报,2018,55(6):1389-1400.

(上接第 89 页)

- [18] 张光辉.对坡面径流挟沙力研究的几点认识[J].水科学进展,2018,29(2):151-158.
- [19] 吴淑芳,刘勃洋,雷琪,等.基于三维重建技术的坡面细沟侵蚀演变过程研究[J].农业工程学报,2019,35(9):114-120.
- [20] 张晴雯.细沟水蚀动力过程试验研究[D].陕西:杨凌:西北农林科技大学,2001.
- [21] 赵宇.黄土细沟侵蚀过程冲刷试验研究[D].重庆:西南大学,2015.
- [22] 喻武,任德智,张鹏,等.藏东南高寒土坡面细沟水流输沙能力变化特征[J].水土保持学报,2021,35(6):76-82.
- [23] 刘冉,余新晓,蔡强国,等.坡长对坡面侵蚀、搬运、沉积过程影响的研究进展[J].中国水土保持科学,2020,18(6):140-146.
- [24] 赵海滨,闫国新,姚文艺,等.黄土坡面径流输沙能力试验研究[J].水土保持学报,2009,23(6):41-44.
- [25] 高鹏宇,詹振芝,蒋芳市,等.坡度和流量对崩积体坡面细沟水流输沙能力的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):68-73.
- [26] 陶婷婷,陈晓燕,陈仕奇,等.饱和紫色土初始态和稳定态细沟水力学特征研究[J].土壤学报,2022,59(1):129-138.
- [27] 冯德乾.细沟水流与跌坑特征响应机制研究[D].陕西:杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [28] Huang Y H, Li F H, Wang W, et al. Rill erosion processes on a constantly saturated slope[J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(20): 3955-3965.
- [29] Gao X F, Li F H, Chen C, et al. Effects of thawed depth on the sediment transport capacity by melt water on partially thawed black soil slope[J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30(1): 84-93.
- [30] 盛贺伟,孙莉英,蔡强国.黄土坡面细沟发育形态对侵蚀特征的影响[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(4):679-688.