

黄绵土细沟水流输沙能力对地表冲刷流量的响应

孟书翰¹, 厉晓峰¹, 杨佳慧², 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. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 为明确黄绵土在径流冲刷下的细沟侵蚀特征和产流产沙规律, 通过细沟模拟, 设计 3 个流量 (2, 4, 8 L/min) 和 4 个坡度 (5°, 10°, 15°, 20°), 在变坡土槽中进行室内冲刷试验, 实测不同坡度和流量下黄绵土在坡面细沟发育过程中产生的最大径流含沙量, 并得到其相应的输沙能力 (A)。结果表明, 当坡度一定时, 输沙能力随流量增大呈线性增大, 且坡度越大增幅越明显; 当流量较小时, 输沙能力随坡度增加而缓慢增加, 当流量达到 8 L/min 时, 输沙能力随坡度增加的幅度更为明显, 但坡度上升到 15° 以后几乎不再变化, 说明流量对输沙能力的影响更为显著。含沙量 (c) 随沟长 (x) 的变化规律符合数学模型 $c = A(1 - e^{-Bx})$, 控制所有流量坡度组合在不同沟长 (1, 2 m) 条件下进行冲刷试验, 将冲刷测量得到的径流含沙量与各组合下的输沙能力 (A) 代入关系式, 利用待定系数法计算出不同试验条件下含沙量随沟长变化的衰减系数 (B)。研究结果可为黄绵土水土保持研究与实践提供理论基础与科学依据。

关键词: 黄绵土; 细沟侵蚀; 输沙能力; 坡长; 含沙量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)06-0063-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.009

Response of Sediment Transport Capacity of Rill Flow to Surface Scouring Discharge in Loess Soil

MENG Shuhan¹, LI Xiaofeng¹, YANG Jiahui², LEI Tingwu^{1,3}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018; 2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083)

Abstract: To define the rill erosion characteristics and the law of runoff and sediment yield of loess soil in the process of rill development under runoff scouring, rill simulation test was conducted in variable slope soil troughs, and three flows (2, 4 and 8 L/min) and four slope gradients (5°, 10°, 15° and 20°) were set up. The maximum runoff sediment concentrations during rill development on the loess soil slope under different slopes and flows were measured, then its corresponding sediment transport capacity (A) was obtained. The results showed that, when the slope was constant, the sediment transport capacity increased linearly with the increasing of the flow rate, and the steeper the slope was, the more obvious the increase was. When the flow rate was low, the sediment transport capacity increased slowly with the increasing of the slope gradient. When the flow rate reached 8 L/min, the sediment transport capacity increased faster with the increasing of slope gradient, but it hardly changed after the slope increased to 15°, indicating that flow rate had more significant effect on sediment transport capacity. The trend of sediment concentration (c) with length of rill (x) conformed to mathematical formula $c = A(1 - e^{-Bx})$. We run a simulation by scouring the slope surface of 1 m and 2 m under all combinations of different slopes and flow rates we had set up, and the sediment concentration of runoff measured by scouring and the sediment transport capacity (A) under each combination were substituted into the formula, and attenuation coefficient (B) of sediment concentration varying with the rill length under different test conditions was calculated by method of undetermined coefficient. The results could

收稿日期: 2022-04-17

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41230746)

第一作者: 孟书翰 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: msh694521750@163.com

通信作者: 雷廷武 (1958—), 男, 教授, 主要从事土壤侵蚀和旱地农业研究。E-mail: leitw@cau.edu.cn

provide theoretical and scientific basis for soil and water conservation research and practice in loess soil.

Keywords: loess soil; rill erosion; sediment transport capacity; slope length; sediment concentration

环境问题是国内外共同面对的核心问题,而土壤侵蚀是最重要的环境问题之一,若不加以治理将会破坏大量土壤资源。土壤侵蚀使富有养分的表层土壤大量流失,使土地生产力下降,作物种植面积与产量迅速下滑。我国黄土高原地区因其特殊的气候与地理特征导致生态环境相对脆弱,加之人们在其沟坡上过度开垦,细沟侵蚀逐渐严重,大规模的水土流失愈发频繁^[1-3]。因此,开展黄土高原地区细沟侵蚀研究对构建土壤侵蚀模型预报有重要意义^[4]。

细沟侵蚀是土壤与水界面的水流剪力分散和搬运土壤颗粒的水力过程^[5],为坡面侵蚀产沙作出重要贡献。侵蚀含沙量是衡量侵蚀能力的重要指标^[6],输沙能力是在一定条件下径流所能携带的最大侵蚀含沙量,与细沟侵蚀密切相关,决定土壤颗粒的剥蚀、搬运与沉积^[7]。早在 1985 年,Julien 等^[8]研究发现,径流坡度和径流流量对水流输沙能力有重要的影响关系;也有研究^[9]表明,输沙能力随着流量和坡度的增加而增加,但增加速度逐渐缓慢,并且当坡度达到 20°后将不再有明显变化。为了能够精准地预报侵蚀产沙量,Hessel 等^[10]在能量耗散的基础上提出了 4 种计算输沙能力的方法。径流含沙量在达到输沙能力之前会经历一个逐渐变大的过程,而这个过程遵循一定自然规律。水流的侵蚀在时空中是一个连续的过程,因此径流的侵蚀产沙量也随时间空间而动态变动。雷廷武等^[11]通过室内冲刷试验发现,在一定流量坡度下,水流含沙量随沟长的增加而增大,但并非无限增大,随着侵蚀过程的深入,含沙量增加幅度逐渐减缓,最后趋近于一个稳定值,不再随着侵蚀沟长的增加而变化,出现这种试验现象是因为随着径流中含沙量逐渐增加,径流输送泥沙所需的能量逐渐增大,而剥蚀土壤颗粒的能量逐渐减小,所以剥蚀率随着沟长增加而逐渐减小^[10],当径流含沙量达到输沙能力时,剥蚀率为 0,此时径流将不再侵蚀土壤,张晴雯等^[12]研究结果验证了这个结论,并且发现,含沙量达到最大值时需要的坡长随坡度的增加而变短,当坡度 < 5°时则需要超过 14 m 的沟长,因此小坡度下的径流最大含沙量则不易测。基于这种情况,Gao 等^[13]和周陈燕^[14]都通过采用额外加沙的特殊试验装置使水流含沙量迅速达到饱和而解决小坡度下输沙能力无法测得的问题,并且提高了测量结果的准确性。丁琳桥等^[15]用 3 种不同的方法计算发现,西南灰棕紫泥土的输沙能力随流量呈线性增加,随坡度呈对数增大;高晨烨等^[16]以黄土为研究对象分析坡面

水流输沙能力与坡度单宽流量间的耦合关系发现,输沙能力与坡度、单宽流量呈幂函数关系;张鹏等^[17]利用高寒土壤为研究对象发现,细沟水流剥蚀率随坡长呈幂指数递减,而喻武等^[18]进一步建立了高寒土坡面细沟水流输沙能力因子模型;高鹏宇等^[19]对崩岗崩积体土壤进行冲刷试验同样得到其输沙能力因子模型;Chen 等^[20]则研究发现,东北黑土坡耕地侵蚀产生的含沙量随坡长呈幂指数增加。

诸多学者通过对不同土壤类型的试验研究总结出土壤侵蚀过程中侵蚀产沙随沟长变化的规律并建立了两者间非线性数学模型,本试验旨在验证这个规律的同时为黄土高原黄绵土确定模型系数,以期为预测黄土高坡细沟侵蚀发育过程中的侵蚀产沙量提供数据依据。

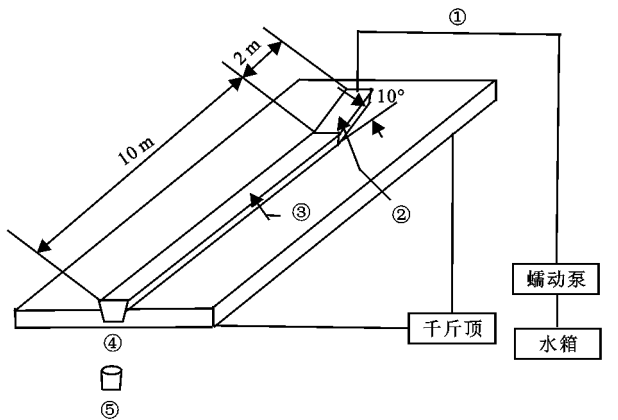
1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

试验于 2021 年 3 月在山东农业大学岩土工程与土壤物理实验室大厅内进行,试验设备包括变坡土槽、蠕动泵等。土槽由 3 个限定性细沟组成,细沟宽 10 cm,中间由 30 cm 高的钢板隔开,土槽放置在可调节坡度的平台,平台坡度可在 0~20°调节。输沙能力测量在总长为 12 m 的整段土槽中进行,其装置示意图见图 1。图 1 中:①为供水装置,供水由自来水管、水箱与蠕动泵完成,通过蠕动泵直接由水箱抽水向土槽提供水流冲刷,可通过调节蠕动泵频率来调节试验所需流量;②为供沙土槽,水流直接由此进入。供沙土槽长 2 m,且较于平台升高 10°,所以当水流冲刷该段土壤时会产生更大的水流含沙量;随后水流进入③补沙或沉降土槽,该段总长 10 m,其坡度与平台坡度一致,由于供沙段作用的影响,当含沙水流进入补沙或沉降段时水流中已携带较高的含沙量,此时含沙量可能高于平台坡度下确定的水流输沙能力,但也仍有可能低于水流输沙能力,如果含沙量低于水流输沙能力对应的饱和含沙量,那么水流将继续剥离土壤颗粒,直到含沙量对应值达到输沙能力,如果含沙量高于饱和含沙量,那么水流中过量的泥沙将会沉积,直到含沙量对应值降低至输沙能力,因此当水流到达④末端出水口时,水流的含沙量稳定趋于输沙能力,最后用⑤接样杯收集水流测得其输沙能力。

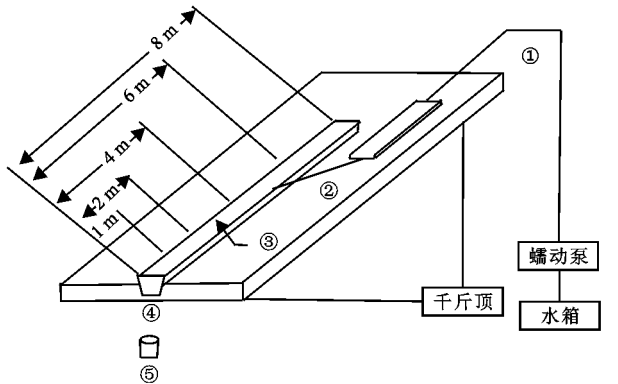
细沟侵蚀过程中不同沟长段输沙能力的测量只在与平台坡度相同的水平段土槽进行,其结构示意图 2。图 2 中:①为供水装置,此部分与上述输沙能力测量装置相同;②为导流板,冲刷前将其放置在试

验设计坡长(1,2,4,6,8 m)的位置,使供水水流通过导流板进入③土槽的冲刷段,目的是使水流均匀进入土槽,降低水流直接冲刷对土壤的扰动影响,最后同样当水流到达④出水口时,用⑤接样杯收集水流测量含沙量。



注:①为供水装置;②为供沙槽;③为补沙或沉降土槽;④为出水口;⑤为接样杯。

图 1 输沙能力测量装置结构示意图



注:(1)为供水装置;(2)导流板;(3)为土槽的冲刷段;(4)为出水口;(5)为接样杯。

图 2 不同沟长含沙量测量装置示意

供试土壤取自陕西省延安市安塞区的黄绵土,经检测分析其颗粒组成为黏粒(<0.005)11.63%,粉粒($0.05\sim0.005$)64.57%,砂粒(>0.05)23.80%。试验开始前将土壤进行风干破碎处理后过 10 mm 筛孔,目的是去除土中大块沙砾和草根等干扰。在土槽装入供试土壤之前,先在长度为 10 m 的输沙槽底部填入厚度为 5 cm 的黏土,边填边压实,容重控制在 $1.5\sim1.6\text{ g/cm}^3$,用以模拟耕作犁底层,然后再将供试土壤均匀填入土槽中,容重控制在 $1.2\sim1.3\text{ g/cm}^3$,填土厚度为 20 cm。为减少边壁影响,土槽底部土壤尽量压实,并使隔板处略有突起,使土壤表面呈“U”形。供沙段无需模拟耕作层,直接填入供试土壤 20 cm,不考虑边壁与容重。

1.2 试验设计与方法

本试验设计冲刷流量为 2,4,8 L/min,坡度为 5° , 10° , 15° , 20° 。细沟径流形成后沿坡面流动过程中同时发

生着土壤颗粒的剥蚀、泥沙的输运和泥沙的沉积过程^[7],当径流的含沙量小于该条件下的输沙能力时,径流将持续剥离土壤颗粒,而试验前无法确定水流含沙量达到输沙能力所需要的沟长,若直接在水平土槽中进行冲刷测量则可能发生因沟长过短而使出水口水流含沙量未达到输沙能力的情况,因此通过抬高顶端土槽使用陡坡供沙方法测量,既操作方便还可以保证水流进入水平土槽时携有较高的泥沙含量,所以为了更加准确测量每组工况下的径流最大含沙量,先在供沙槽处供水冲刷,使径流通过供沙槽流过整段土槽后在末端出水,待径流稳定后用取样杯在末端连续取样 5 个,为保证供沙充足,需及时在供沙段补充试验用土。

为了确定细沟侵蚀过程中水流含沙量随沟长变化的相关数学模型系数,在土槽末端向上取沟长为 1 m 处进行供水冲刷,每个坡度流量组合冲刷 1 次,待径流稳定后在末端连续取样 5 个,改变沟长为 2 m 进行相同试验,通过测量各种工况下一定沟长的侵蚀含沙量,利用待定系数法将结果代入数学模型即可求得模型系数。同样的方法取部分流量组合 10° 、2 L/min, 10° 、8 L/min, 15° 、4 L/min, 20° 、2 L/min, 20° 、8 L/min 测量沟长 4,6,8 m 时的径流含沙量,测得的含沙量将用于验证求得模型系数的准确性,当坡度为 5° 时含沙量达到最大值所需要的极限沟长均大于 12 m^[11],为了使验证的沟长点能够覆盖整个侵蚀沟长段,所以在 10° , 15° 和 20° 条件下均匀选择 5 个流量坡度组合的分布点来进行验证。每次试验设 3 个重复,3 条细沟分别进行冲刷视为同一工况下的 3 次重复,改变流量进行重复试验,再改变坡度进行相应试验。每次试验获得的样品称重后静置 12 h 以上,倒掉上清液后在烘箱 105°C 条件下烘 24 h 再称重。

1.3 计算原理

1.3.1 径流含沙量 含沙量是指水体单位体积中所含悬移质的泥沙重量,计算公式为:

$$c = \frac{m_{烘} - m_{杯}}{m_{样} - m_{烘} + \frac{m_{烘} - m_{杯}}{\rho}} \times 10^3 \quad (1)$$

式中: c 为含沙量 (kg/m^3); $m_{杯}$ 为接样杯质量 (g); $m_{样}$ 为接样后样品和杯子总质量 (g); $m_{烘}$ 为烘干后样品和杯子的总质量 (g); ρ 为土壤颗粒密度 (g/cm^3),数值取 2.63 g/cm^3 。

1.3.2 含沙量衰减系数 一定坡度流量下细沟侵蚀产沙量随着沟长的增加而增加,增加幅度越来越小,最后趋于稳定,数学模型为^[21]:

$$c = A(1 - e^{-Bx}) \quad (2)$$

式中: x 为细沟沟长 (m); A 为侵蚀中可产生的最大含沙量 (kg/m^3),是细沟水流达到其输沙能力时对应的含沙

量; B 为侵蚀产沙量随距离增加其增长幅度衰减系数 ($1/\text{m}$),其大小与坡度流量有关,用输沙能力测量方法,得到 A ,再通过冲刷任意沟长 x_i 得到含沙量 c_i ,二者代入式(2),可计算得到唯一确定的 B ,即:

$$B=-\frac{1}{x_i}\ln(1-\frac{c_i}{A})$$

(3)

1.3.3 输沙能力 水流的输沙能力可用含沙量达到饱和时细沟流携带的最大输沙量表示,与最大含沙量成一定比例,即:

$$T_c=Aq$$

(4)

式中: T_c 为输沙能力 ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$); q 为单宽流量 (m^2/s)。

2 结果与分析

2.1 最大含沙量与输沙能力

从表 1 可以看出,当流量为 2 L/min 时,黄绵土的输沙能力整体都比较低,虽然在 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 时增幅可以达到 57%,但是由于其本身数值较低,所以增加并不明显,而在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时,增加幅度分别只有 18% 和 23%。当流量为 4 L/min 时,坡度为 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 时,随坡度增加黄绵土输沙能力的增加幅度同样达到 58%,同流量坡度为 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时,随坡度增加分别只有 22% 和 12%。当流量为 8 L/min,坡度为 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 时,输沙能力随坡度增加的幅度达到 64%,同流量坡度为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 时,输沙能力随坡度增加幅度为 27%,坡

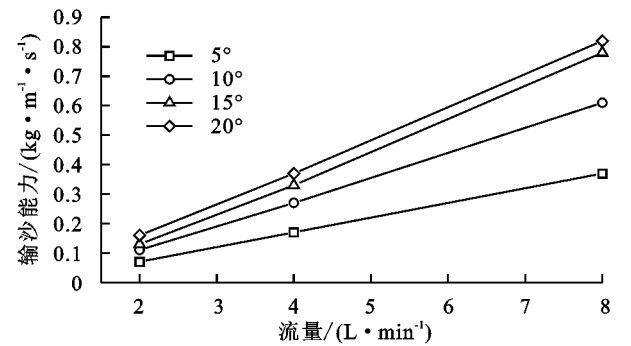


图 3 输沙能力随流量和坡度的变化关系

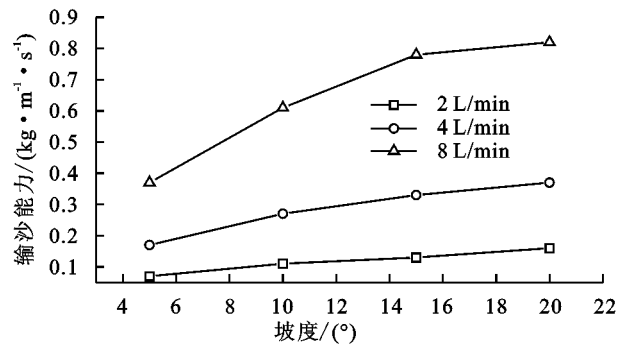
从图 3 可以看出,当坡度一定时,输沙能力随流量的增大而增大,且增加速度较快。输沙能力随流量几乎呈线性比例增加,坡度越大,直线斜率越大,说明坡度越大,输沙能力随流量增加速度越快,幅度越大,流量对输沙能力的影响越显著;而当流量一定时,输沙能力同样随着坡度的增加而增加,但增加的幅度是逐渐变缓的,且当流量为 2 L/min 或 4 L/min 时,其随坡度增加速度相对缓慢,幅度相对较小,当流量达到 8 L/min 时,其随坡度的增加的幅度和速度都明显增大,直到坡度增加到 15° 以后输沙能力几乎不再增加。由此可以看出,黄绵土发生细沟侵蚀时径流的输沙能力是同时随着流量和坡度的增大而增大的,但

度 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时输沙能力几乎不再变化。由此可以说,当流量一定时,坡度对输沙能力的影响集中在 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$,超过 15° 后输沙能力随坡度的增加幅度变化微小,因此推测 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 为黄绵土细沟侵蚀的临界坡度。而当坡度不变时,输沙能力随流量的增加几乎全都呈倍数增长,且增长幅度很大,超过 100%。

表 1 不同流量和坡度下侵蚀水流的输沙能力

坡度/(°)	流量/ (L·min ⁻¹)	单宽流量(q)/ (m ² ·s ⁻¹)	最大含沙量(A)/ (kg·m ⁻³)	输沙能力(T_c)/ (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
5	2	3.33×10^{-4}	220.56	0.07
	4	6.67×10^{-4}	252.35	0.17
	8	1.33×10^{-3}	287.24	0.37
10	2	3.33×10^{-4}	329.95	0.11
	4	6.67×10^{-4}	400.24	0.27
	8	1.33×10^{-3}	456.68	0.61
15	2	3.33×10^{-4}	397.52	0.13
	4	6.67×10^{-4}	489.74	0.33
	8	1.33×10^{-3}	588.89	0.78
20	2	3.33×10^{-4}	473.87	0.16
	4	6.67×10^{-4}	554.08	0.37
	8	1.33×10^{-3}	620.29	0.82

为了更直观地观察输沙能力随流量坡度的变化趋势,现分别以流量和坡度为横坐标,以测得黄绵土的输沙能力为纵坐标,绘制输沙能力随流量坡度变化的趋势图(图 3)。



流量影响作用大于坡度的影响作用。

为了更进一步对比流量和坡度对输沙能力的影响程度,现对其与输沙能力的关系进行回归分析:

$$T_c=a+bS+cQ$$

(5)

式中: S 为坡度($^{\circ}$); Q 为流量(L/min); a 、 b 、 c 为回归系数。

回归结果显示,系数 a 为 -0.268 , b 为 0.016 , c 为 0.088 , R^2 为 0.930 ,系数 c 远大于系数 b ,也从数值分析上说明,较坡度而言,流量对输沙能力的影响更为显著。

2.2 衰减系数(B)的计算

试验测得各组合工况下沟长分别取 1,2 m 时的径

流含沙量,将其与上述 2.1 测得的最大含沙量(A)代入公式(2),即可求得公式(2)中系数。沟长为 1 m 时求得系数为 B1,沟长为 2 m 时求得系数为 B2,结果见表 2。

表 2 不同流量和坡度下求得的衰减系数					
坡度/ (°)	流量/ (L·min ⁻¹)	1 m 段含沙量/ (kg·m ⁻³)	2 m 段含沙量/ (kg·m ⁻³)	B1/ m ⁻¹	B2/ m ⁻¹
5	2	40.48	63.38	0.203	0.169
	4	65.56	130.58	0.301	0.364
	8	103.98	173.58	0.449	0.464
10	2	85.24	131.07	0.299	0.253
	4	128.50	203.38	0.387	0.355
	8	159.61	277.19	0.430	0.467
15	2	102.57	213.58	0.298	0.385
	4	178.95	278.32	0.455	0.420
	8	243.71	381.25	0.534	0.521
20	2	150.25	228.95	0.381	0.330
	4	185.17	348.13	0.407	0.495
	8	270.09	400.82	0.572	0.519

注:表中 B1 为取沟长为 1 m 时求得的衰减系数;B2 为取沟长为 2 m 时求得的衰减系数。

现将 B1 与 B2 取平均值,拟作为衰减系数(B)的最终解,进而得到各工况下径流含沙量随坡长变化的函数关系式(表 3)。由表 3 中的数据可以看出,当坡度一定时,衰减系数(B)随流量的增加而增加,当流量一定时,衰减系数(B)同样也随着坡度的增加而增加,表示的物理意义为流量坡度越大,径流侵蚀含沙量随着沟长增加而增加的幅度衰减越快,这意味着达到最大含沙量需要的侵蚀距离越短。但当坡度达到 15°~20°时,衰减系数(B)变化微乎其微,说明侵蚀发生的极限沟长并不随着坡度增加无限减小。

表 3 不同流量和坡度下含沙量的计算公式		
坡度/(°)	流量/(L·min ⁻¹)	公式
5	2	$c = 220.56(1 - e^{-0.186x})$
	4	$c = 252.35(1 - e^{-0.333x})$
	8	$c = 287.24(1 - e^{-0.457x})$
10	2	$c = 329.95(1 - e^{-0.276x})$
	4	$c = 400.24(1 - e^{-0.371x})$
	8	$c = 456.68(1 - e^{-0.449x})$
15	2	$c = 397.52(1 - e^{-0.342x})$
	4	$c = 489.74(1 - e^{-0.438x})$
	8	$c = 588.89(1 - e^{-0.528x})$
20	2	$c = 473.87(1 - e^{-0.356x})$
	4	$c = 554.08(1 - e^{-0.451x})$
	8	$c = 620.29(1 - e^{-0.546x})$

2.3 衰减系数(B)的验证

根据表 3 的公式计算选择性流量坡度组合(10°、2 L/min,10°、8 L/min,15°、4 L/min,20°、2 L/min,20°、8 L/min)下不同沟长(1,2,4,6,8 m)径流含沙量,分别与试验得到的数据进行对比(图 4),试验值显示各种组合

下径流含沙量随沟长变大,而且变大速度由快到慢,最终趋于输沙能力所对应的最大含沙量,符合预期结果,且与理论计算值有较高的重合性。

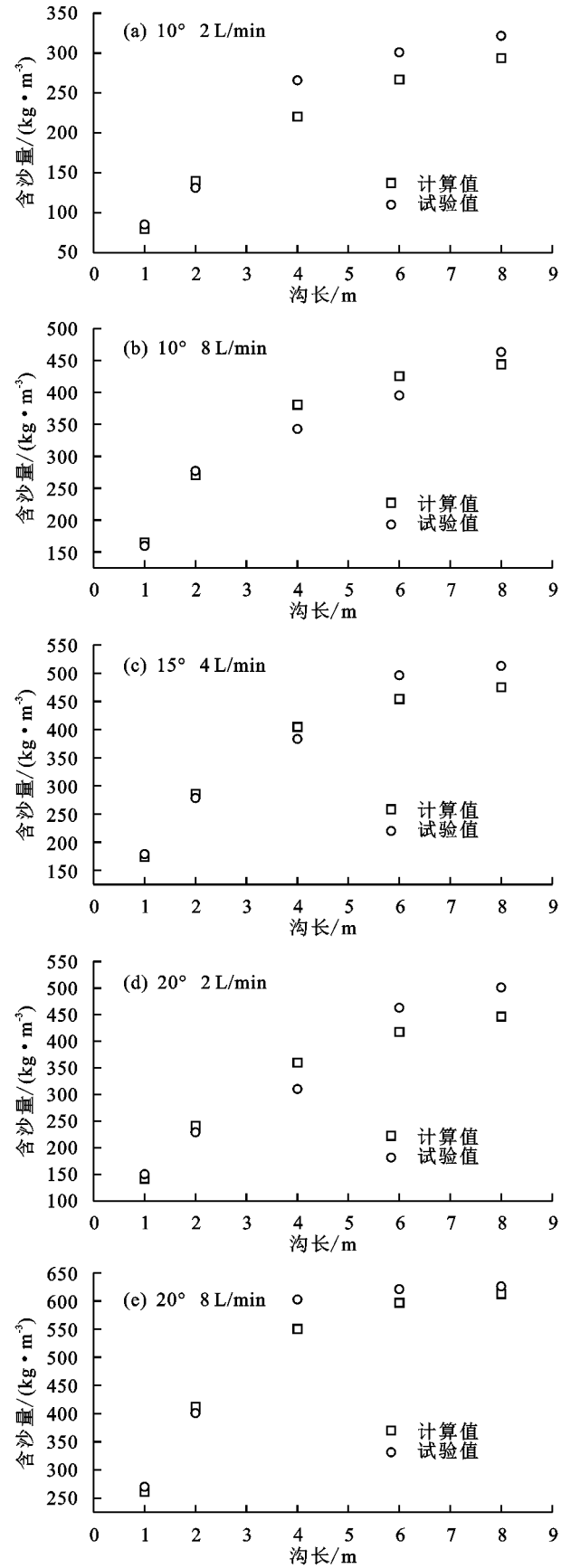


图 4 含沙量随坡长变化计算值与试验值对比

由图 4 可知,试验值与计算值基本吻合,但是为了进一步了解其具体误差,现以各段试验测量得到的含沙量值为 x 轴,以计算得到的含沙量值为 y 轴作图,观察直线拟合后的斜率。表 4 是对 5 个流量坡度组合的径流含沙量试验值和计算值进行线性回归的结果,如果试验值和计算值完全相同,则拟合的线性方程斜率应该为 1。从回归结果来看,各线性方程的斜率均接近 1,且 R^2 均高达 0.99,说明线性拟合效果较好。

表 4 各组试验值与计算值误差

坡度/ (°)	流量/ (L·min ⁻¹)	线性 拟合函数	R^2	误差/%
10	2	$y=0.8942x$	0.9963	10.58
	8	$y=1.0257x$	0.9961	2.57
15	4	$y=0.9597x$	0.9965	4.03
20	2	$y=0.9508x$	0.9894	4.92
	8	$y=0.9616x$	0.9987	3.84

研究^[14]表明,采用试验参数计算得到的含沙量与试验测量得到的含沙量误差基本都在 5% 以内,只有在 10°、2 L/min 组合时误差达到 10%,由于含沙量基数较大,即使 10% 的误差也是在可接受范围内的。所以总体来看,选择验证的各个水力条件下的试验值与计算值的误差均在可接受范围内,说明本试验计算得到的衰减系数(B)值具有较高的参考价值。

3 讨论

3.1 径流输沙能力

本研究设定多组流量坡度进行冲刷实测了各试验条件下的径流输沙能力,从数值结果来看,黄绵土发生细沟侵蚀时水流输沙能力的范围为 0.07~0.82 kg/(m·s),而这个结果与丁琳桥^[22]得到的黄绵土输沙能力相比明显要小。细沟侵蚀中水流对土壤颗粒的剥离过程以及水流中过量泥沙的沉积过程是具有随机性的动态平衡过程,因此水流的含沙量也呈现瞬时波动的情況^[23]。本试验采用供沙槽额外供沙的方法测量最大含沙量,所以在水流到达出口前含沙量便达到饱和,这种情况下水流出泥沙沉积现象,含沙量再次下降,因此有可能导致土槽末端出水口处收集到的径流含沙量偏低。另外,出现不同的主要原因分析为土壤处理的不同,丁琳桥^[22]在试验前用人工降雨的方式对土壤进行饱和处理,并使土壤含水量最终接近田间持水量,而本文试验中并未对风干土壤进行相关处理。Singh 等^[24]通过试验也发现,土壤含水量越大,侵蚀水流的含沙量和输沙能力也随之越大。分析原因,当土壤中含水量增大时,土壤颗粒间的孔隙水更饱满,在大量孔隙水的压力下土壤颗粒间的间隙变大,导致土壤团聚体结构发生改变,颗粒间的摩擦力减小,黏着力降低,因此土壤更易被剥蚀分

散^[25]。加之黄绵土土质较为疏松,遇水分散程度更加明显,所以表现为侵蚀径流输沙能力更大。韩珍等^[26]通过试验对比近饱与非饱和土壤的细沟水流输沙能力也发现,相同条件下近饱和土壤的水流输沙能力是非饱和土壤的 1.08~2.35 倍,也证实了这个结果。综上所述认为,本次试验测量结果在特定条件下具有一定的科学性,可以为自然状态下黄绵土发生细沟侵蚀所能产生的最大输沙量提供一定的数值参考基础。但侵蚀发生的实际过程中其影响因素更为复杂,本研究由于试验开展条件的限制只取了流量和坡度 2 个最基本的影响因子作为试验变量,因此得到的数据也有一定的局限性,仍需进一步考察更多水力因素进行野外试验才能得到更为精确、全面的数据。

结合本次试验的设计变量分析发现,径流的输沙能力是同时随着坡度和流量的增大而增大,究其原因,当流量增大时,径流水深随之增大,水流冲刷细沟沟壁也加深,因此加大沟壁上的土壤剥蚀^[27];另外,单位宽度坡面上的流量增大使得细沟水流的流速增大,细沟侵蚀的驱动力随之增大,意味着径流可以产生更大的能量来输送泥沙,因此导致产沙量增加,径流的输沙能力变大。同理,坡度增加也使水流流速增加,从能量角度分析,径流的位能增大,冲刷力更强,径流的输沙能力也随之增加;除此之外,坡度增加使径流剥蚀土壤的垂直分力增大的同时,还导致土壤颗粒本身受到的重力垂直向下分力增大,有利于分散土粒向下运动,降低土壤稳定性;而且坡度越大时,径流的入渗越少,在地表径流增多,导致径流的冲刷能力增强,加剧水土流失^[2]。进一步分析比较发现,输沙能力随流量增加而增加的幅度大于随坡度增加而增加的幅度,Zhang 等^[28]在对陡坡含沙水流的输沙能力进行研究时指出,输沙能力是流量与坡度的函数,同时流量的影响大于坡度的影响,此结论与本次试验的结果一致。本次研究探索总结了细沟水流输沙能力对坡度和流量变化的响应关系,研究结果表明,输沙能力对流量的响应较坡度更为敏感,通过与前人研究的对比推断在各固定侵蚀环境下都将遵循这个规律。

3.2 细沟侵蚀过程含沙量的变化规律

在得到了侵蚀过程中产生的最大含沙量基础上,通过部分坡度、流量组合条件下进行分段冲刷发现,在水流含沙量达到饱和以前随着坡长的增加逐渐增加,但增加的幅度越来越小,坡长达到 8 m 后几乎不再增加,且经过对比发现,此时含沙量接近最大含沙量,此结果与张晴雯等^[12]通过冲刷试验得到的规律相同。Foster 等^[29]提出的耦合概念模型认为,细沟侵蚀水流的剥蚀率与输沙能力和输沙量的差值呈正比,清水的剥蚀率最大,而含沙量等于输沙能力时剥

蚀率最小,侵蚀初段水流中的含沙量较低,剥蚀率较大,所以侵蚀速率更快,含沙量增加幅度更大,当含沙量逐渐增大,侵蚀速率也逐渐降低,直到含沙量达到输沙能力时含沙量不再增加,因此本试验的结果验证了这个规律。从能量角度来说,径流中的能量不仅用来剥蚀土壤,还用来输移泥沙,随着径流中含沙量的增加,需要用于输送泥沙消耗的能量增大,而径流所拥有的能量是固定不变的,所以反过来用来剥蚀土壤的能量降低,结果表现为剥蚀率减小^[30]。公式(2)为含沙量随坡长变化的计算公式,为了简便试验方法,各试验条件下用坡长为 1,2 m 时的含沙量计算得到 B 值平均值来代替整体的 B 值,结果来看,所得的 B 值与周陈燕^[14]计算得到的黄绵土 B 值契合度较高,大致都是随着流量与坡度的增加而增加的, B 代表的是侵蚀产沙量随坡长增加而增加的衰减系数,所以 B 值越大,说明含沙量增加的速度衰减越快,表现为侵蚀发生的极限沟长越短。此结论也验证了张晴雯等^[12]对黄绵土侵蚀极限沟长进行计算的结果。根据研究得到的 B 值可以大致描述黄绵土发生细沟侵蚀时侵蚀产沙量随时空的变化过程,并且能够精确计算各条件下某段沟长所产生的径流含沙量,掌握侵蚀过程中水流含沙量的动态规律对预估土壤流失量有着重要意义。

4 结论

(1)流量和坡度是影响黄绵土细沟产流产沙过程的重要因素。研究结果表明,流量一定时,输沙能力随坡度增大较缓慢增加;坡度一定时,输沙能力随流量增大较快速增加,因此输沙能力对流量的响应比坡度更加敏感。

(2)径流含沙量随着沟长的增加而增加,但增加速度逐渐缓慢,最后趋于最大含沙量,且随着坡度与流量的增加,趋于最大含沙量所需的沟长变短。这个规律验证了前人总结得出的含沙量随沟长变化的数学模型关系式,并进一步通过试验数据计算发现,各组合条件下利用沟长为 1,2 m 时的水流含沙量得到的模型衰减系数(B)具有较高的准确性,可以用来代替本组合条件下整体的 B 值,这为预报黄土高原水土流失土壤侵蚀量提供了一定的参考基础。

参考文献:

[1] 王国惠,韩克勇.黄土高原地区的政府治理、生态环境与经济高质量发展[J].税务与经济,2021,43(3):89-94.

[2] 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.

[3] Heathcote A J, Filstrup C T, Downing J A. Watershed sediment losses to lakes accelerating despite agricultural soil conservation efforts[J].PLoS One,2013,8(1):e53554.

[4] 赵龙山,侯瑞,吴发启.黄土坡面细沟侵蚀研究进展与展

望[J].中国水土保持,2017,38(9):47-51,67.

[5] 史培军,刘宝元,张科利,等.土壤侵蚀过程与模型研究[J].资源科学,1999,23(5):11-20.

[6] 吕刚,刘雅卓,陈鸿,等.褐土和棕壤坡耕地细沟侵蚀过程及侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2019,33(3):64-69.

[7] Lei T W, Hajhighi K, Bralts V F, et al. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model[J]. Water Resources Research,1998,34(11):3157-3168.

[8] Julien P Y, Simons D B. Sediment transport capacity of overland flow[J].Transactions of the ASAE,1985,28(3):755-762.

[9] 雷廷武,张晴雯,赵军,等.细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究[J].土壤学报,2002,55(4):476-482.

[10] Hessel R, Jetten V. Suitability of transport equations in modelling soil erosion for a small Loess Plateau catchment[J].Engineering Geology,2006,91(1):56-71.

[11] 雷廷武,张晴雯,赵军.陡坡细沟含沙水流剥蚀率的试验研究及其计算方法[J].农业工程学报,2001,17(3):24-27.

[12] 张晴雯,雷廷武,潘英华,等.细沟侵蚀动力过程极限沟长试验研究[J].农业工程学报,2002,18(2):32-35.

[13] 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.

[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] 丁琳桥,陈晓燕,赵宇,等.紫色土细沟侵蚀输沙能力研究[J].西南大学学报(自然科版),2016,38(12):102-107.

[16] 高晨烨,张宽地,杨明义.基于无量纲水流强度指标的坡面流输沙能力计算方法[J].农业工程学报,2018,34(17):134-142.

[17] 张鹏,姚甜甜,喻武,等.基于室内土槽冲刷法的高寒土细沟侵蚀剥蚀率研究[J].高原农业,2020,4(4):392-398,411.

[18] 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.

[19] 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.

[20] Chen C, Lei T W, Ban Y Y, et al. Effects of slope lengths on rill erosion under different hydrodynamic conditions in black soil sloping farmland of Northeast China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(5):155-162.

[21] Huang Y H, Chen X Y, Luo B L, et al. An experimental study of rill sediment delivery in purple soil, using the volume-replacement method[J].Peer J,2015,3:e1220.

[22] 丁琳桥.紫色土细沟侵蚀输沙能力研究[D].重庆:西南大学,2016.

[13] 何清,杨兴华,霍文,等.库姆塔格沙漠粒度分布特征及环境意义[J].中国沙漠,2009,29(1):18-22.

[14] 马倩,武胜利,刘永泉,等.艾比湖流域抛物线沙丘表层沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2014,34(3):650-657.

[15] 蔡东旭,李生字,刘耀中,等.台特玛湖干涸湖盆区植物风影沙丘的形态特征[J].干旱区地理,2017,40(5):1020-1028.

[16] 李志忠,武胜利,肖晨曦,等.新疆和田河流域灌丛沙堆风洞流场的实验研究(I)[J].中国沙漠,2007,27(1):9-14.

[17] 李志忠,武胜利,肖晨曦,等.新疆和田河流域灌丛沙堆风洞流场的实验研究(II)[J].中国沙漠,2007,27(1):15-19.

[18] 武胜利,李志忠,惠军,等.和田河流域灌(草)丛沙堆的形态特征与发育过程[J].地理研究,2008,27(2):314-322.

[19] 王翠,雷加强,李生字,等.新疆策勒绿洲—沙漠过渡带花花柴(*Kareliniacaspica*)沙堆的形态特征[J].中国沙漠,2013,33(4):981-989.

[20] 毛东雷,吴云霞,蔡富艳,等.新疆策勒绿洲—沙漠过渡带灌丛沙堆与回涡沙丘的粒度分布特性[J].泥沙研究,2019,44(2):48-54.

[21] 张萍,康经理,袁瑛,等.两类植物型沙丘上植物群落的异同及其对沙丘形态的响应[J].生态学报,2017,37(23):7920-7927.

[22] 高永,丁延龙,汪季,等.不同植物灌丛沙丘表面沉积物粒度变化及其固沙能力[J].农业工程学报,2017,33(22):135-142.

[23] 毛东雷,蔡富艳,方登先,等.新疆策勒绿洲—沙漠过渡带风沙运动沙尘物质粒径分形特征[J].土壤学报,2018,55(1):88-99.

[24] 杨佐涛.戈壁与绿洲内的风向风速关系:以新疆策勒县为例[J].中国沙漠,1990,10(3):36-42.

[25] 朱文煜.策勒绿洲—沙漠过渡带沙丘表层沙物质粒度特征研究[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2021.

[26] 穆桂金,贺俊霞,雷加强,等.再议绿洲—沙漠过渡带:以策勒绿洲—沙漠过渡带为例[J].干旱区地理,2013,36(2):195-202.

[27] 宋洁,春喜,白雪梅,等.中国沙漠粒度分析研究综述[J].中国沙漠,2016,36(3):597-603.

[28] 吴汪洋,张登山,田丽慧,等.青海湖克土沙地沙棘林的防风固沙机制与效益[J].干旱区地理,2014,37(4):777-785.

[29] 葛拥晓,吉力力·阿不都外力,马龙,等.新疆艾比湖干涸湖底沉积物粒径分布及其对风蚀的响应[J].干旱区研究,2014,31(4):636-642.

[30] 毛东雷,雷加强,薛杰,等.新疆策勒砾质戈壁沙拐枣(*Calligonum*)灌丛沙堆形态特征[J].干旱区资源与环境,2015,29(5):105-110.

(上接第 62 页)

[20] 韩庆功,彭守璋.黄土高原潜在自然植被空间格局及其生境适宜性[J].水土保持学报,2021,35(5):188-193,203.

[21] Jiang C, Zhang H Y, Tang Z P, et al. Evaluating the coupling effects of climate variability and vegetation restoration on ecosystems of the Loess Plateau, China [J].Land Use Policy,2017,69:134-148.

[22] Zhao J, Li J, Liu Q H, et al. Estimating fractional vegetation cover from leaf area index and clumping index based on the gap probability theory[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2020,90:e102112.

(上接第 69 页)

[23] Yalin M S, Ferreira Da Silva A M. Regime channels in cohesionless alluvium [J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(6): 725-742.

[24] 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.

[25] 邢行,陈晓燕,韩珍,等.饱和与非饱和黄绵土细沟径流水动力学特征及侵蚀阻力对比[J].水土保持学报,2018,32(3):92-97.

[26] 韩珍,陈晓燕,李彦海,等.近饱和与非饱和土壤细沟水流输沙能力的对比研究[J].山地学报,2020,38(6):841-850.

[27] 赵宇.黄土细沟侵蚀过程冲刷试验研究[D].重庆:西南大学,2015.

[28] 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 America Journal,2009,73(4):1298-1304.

[29] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow[J].Transactions of the ASAE,1972,15(1):99-102.

[30] 张晴雯,陈尚洪,刘定辉,等.农业措施对玉米季坡耕地水沙过程的调控效应[J].核农学报,2016,30(7):1395-1403.