

基于体积法对黄土细沟侵蚀沿程分布模拟的研究^{*}

赵 宇¹ 陈晓燕^{1,2†} 米宏星¹ 莫 斌¹

(西南大学资源环境学院/西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400716)

(黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室(中国科学院水利部水土保持研究所), 陕西杨凌 712100)

摘 要 通过土槽冲刷试验结合体积法估算不同流量(2、4、8 L min⁻¹)和坡度(5°、10°、15°、20°、25°)条件下, 细沟侵蚀体积及其分布规律, 进而研究黄土细沟侵蚀过程及坡度、流量对其的影响。结果表明: 细沟侵蚀过程不是沿其均一恒定的, 累积侵蚀泥沙量及含沙量均随着细沟的增长近似呈指数增加, 且这个趋势在陡坡和大流量下更为显著。坡度和流量的增大均能造成累积侵蚀泥沙量及含沙量的增加, 即导致细沟侵蚀程度加重, 但是流量对于侵蚀的影响权重远大于坡度。且实测的侵蚀泥沙总量及水流含沙量与体积法测得累积侵蚀泥沙量及含沙量的对比验证了本试验体积法估算细沟侵蚀总量及沿程分布规律的准确性及实用性, 其结果为细沟侵蚀动态过程研究及预测提供了理论依据。

关键词 细沟侵蚀; 累积侵蚀泥沙量; 含沙量; 侵蚀过程

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

细沟侵蚀是介于面蚀和沟蚀之间的一种侵蚀形式, 有着不同于二者的侵蚀特性。细沟侵蚀造成严重的水土流失和土壤退化, 尤其在黄土高原地区, 已经逐渐成为制约农业可持续发展的主要环境问题之一。因此如何准确地模拟细沟侵蚀过程及估算由其产生的土壤侵蚀量是当前细沟侵蚀研究的热点和难点所在^[1-5]。目前细沟侵蚀研究主要应用以下几种方法: 体积法, 研究细沟侵蚀分布最直观、简单的方法, 国外学者 Casali 等^[6]利用仪器测算细沟断面面积及不同断面间距进而推算细沟侵蚀体积, 在国内, 郑粉莉^[7]也采用填土法和容积法进行侵蚀量的估算, 但是此类方法精度受土壤颗粒内摩擦力、细沟形态影响较大, 且效率低、时耗大; 稀土元素示踪法, 能够更为细致地估计坡面不同部位的侵蚀过程和产沙情况, 也被广泛地用于细沟侵蚀动态过程的研究中^[8-10], 但是稀土元素安置、检测费时, 成本较高, 难以被广泛应用; 利用 3S 技术与各种土壤侵蚀预报模型(RUSLE, WEPP 等)相结合进行土壤侵蚀的预报也能估算土壤侵蚀量, 但是往往存在尺度转化和土壤异质性问题, 针对不同的土壤需

要进行参数的修正^[11-12]; 近年来, 三维激光扫描及 X 光射线光谱方法因其准确性较高, 试验周期短, 也被用于细沟侵蚀过程的研究^[13-14], 但是由于坡面细沟往往很细小且结构复杂, 限制了仪器的精度, 且仪器比较昂贵, 成本较高。总而言之, 每种方法均有各自的优缺点, 应用于不同的研究方向。目前侵蚀过程是细沟侵蚀研究的热点之一, Shi 等^[15]对天然细沟进行示踪实验, 结果表明细沟从坡脚开始产生, 随着来水量的增加细沟发生点逐渐向坡顶移动, 其中坡面中下部细沟侵蚀最为严重; 雷廷武等^[16-17]通过室内冲刷试验研究得出, 细沟水流净剥蚀率随坡度和流量的增大而增大, 随着坡长增大而减少; 水流输沙量随坡长增大逐渐趋于稳定, 直至达到水流的输沙能力。

鉴于侵蚀细沟结构的随机性及复杂性, 以往体积法所用回填材料, 如土壤、小麦等难以准确测量细沟体积及其分布, 本文在此基础上进行改进, 建立了一种清水回填方法来估算细沟侵蚀量并研究细沟侵蚀沿程分布规律, 希望该方法能提高试验的效率及精度。

^{*} 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(K318009902-1312)资助

[†] 通讯作者, E-mail: c400716@126.com

作者简介: 赵 宇(1990—), 男, 四川眉山人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀、小流域治理研究。E-mail: guangguang14@163.com

收稿日期: 2013-11-03; 收到修改稿日期: 2014-07-04

1 材料与方 法

1.1 试验条件

在以往的细沟侵蚀模拟研究中,由于侵蚀与沉积现象交替发生,细沟宽度常出现周期性变化。因此水流剥蚀、输沙能力、剪切力等也随细沟宽度不断变化,水流含沙量也变化不定,且大大低于恒定水流下的量值^[18]。因此为了克服细沟宽度变化带来的影响,本试验人为控制细沟宽度,在不考虑土壤团粒结构条件下,采用限定性细沟进行试验。本试验在中国科学院水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅进行,为了方便试验取样,选择可调节坡度,规格为 12 m × 3 m 的土槽,用 PVC 板将其隔离成 6 条规格 12 m × 0.1 m 的细沟,PVC 板固定在土槽中,细沟宽度限定为 0.1 m。试验土壤选用陕西安塞的黄绵土,土壤颗粒组成为砂粒含量 (>0.05 mm) 占 22.34%,粉粒含量 (0.005 ~ 0.05 mm) 占 61.35%,黏粒含量 (< 0.005 mm) 占 16.31%,其质地为粉质壤土。在试验前筛除大块草根、石块,自然风干,过 8 mm 筛。

土槽中填土分两层,下层厚度为 5 cm,填装杨凌当地墡土,边填装边压实,模拟犁底层,土壤容重控制为 1.5 g cm⁻³;上层为试验层,厚度为 20 cm,填入供试土壤,为保证填土均匀分 4 层填装,土壤容重控制为 1.15 ~ 1.2 g cm⁻³,用耙子处理试验表层土壤使其糙度接近自然条件下坡耕地表面,并在隔板上用防水笔标记初始土壤表面位置。为尽量减小 PVC 板边界效应对试验过程的影响,采取以下措施:在 PVC 板两侧粘上相同的黄绵土,使其糙度尽可能接近试验土层;使每条细沟中土壤在 PVC 板处略有突起,减少试验初始阶段隔板对水流导向的影

响。在试验前采取人工模拟降雨使土壤充分饱和,并静置 24 h,以保证相同的前期含水率,消除入渗及填土不均的影响。

1.2 试验设计

本试验研究着重细沟侵蚀稳定过程,为快速达到试验目的,采用稳定水流进行冲刷试验。坡度设计为 5 个水平:5°、10°、15°、20°、25°。清水入流量根据黄土高原区临界侵蚀雨强及坡耕地发生细沟侵蚀的临界流量^[19]进行换算,选择 3 个水平:2、4、8 L min⁻¹。采用水泵供水,在引入细沟前使水流通过一个稳流槽,使水流稳定并将流速控制在一定范围内。在细沟入口前 20 cm 铺设细纱布,进一步稳定水流并减少因水流的直接冲刷造成的额外侵蚀。

1.3 试验方法

在距细沟入口 0.5、1、2、3、4、5、6、7、8、10 和 12 m 处共设置 11 个采样点。每个点位配置一个采样人员,待细沟中水流稳定后,11 个采样人员同时取样,每次试验取三次样,取样后及时测量体积并烘干称重,用于确定径流含沙量。试验冲刷时间根据坡度与流量不同,控制在 4 ~ 10 min。在细沟出口处用采样桶采集含沙水样用以确定侵蚀泥沙总量。待冲刷结束以后,首先将土槽调至水平,将塑料薄膜反复多层缠绕在与细沟同宽的薄挡板上,确保防水。其次将挡板分别插入 11 个采样点处,插至犁底层,以防止水流在各沟段之间流动,将细沟分成 11 段(图 1)。最后将清水分段倒入细沟中,使水平面与侵蚀前土壤表面齐平。由于水的流动性和难压缩性,清水水体可以无空隙的填满整个细沟,并且由于土壤处于饱和状态,土壤空隙的影响也可排除,故统计每沟段倒入水的体积即可估算出侵蚀土壤的体积沿细沟的分布规律。每个坡度与流量水平进行 3 次重复。共计 45 场试验。

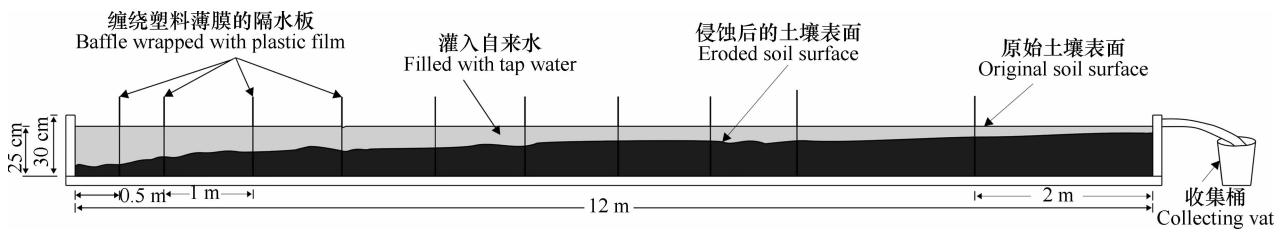


图 1 体积法示意图

Fig. 1 Sketch of the volumetric method used in this study

2 结果与讨论

2.1 累积侵蚀量与细沟长度、坡度和流量的关系

每个点位的累积侵蚀体积是将其之前的每个细沟段的侵蚀体积相加,将累积侵蚀体积与泥沙容重相乘即得到累积侵蚀量。由于坡度和流量不同,冲刷试验进行的时间也互不相同,从 4 min 至 10 min 不等。

为了消除试验持续时间的影响,将累积侵蚀量均标准化到 5 min,并点绘了累积侵蚀量与细沟长度的对应关系(图 2)。从试验结果得出累积侵蚀量随着细沟长度的增加而增加,根据累积侵蚀量随着细沟长度的变化关系,建立了两者的回归模型:

$$M = A \cdot (1 - e^{-Bx}) \quad (1)$$

式中, M 为累积侵蚀量(kg); x 为细沟长度(m); A 、 B 为回归系数。拟合结果见表 1。

表 1 累积侵蚀量与细沟沟长回归分析结果

Table 1 Regression analysis of cumulative amount of erosion and length of rills

坡度 Slope gradient(°)	流量 Flow rate(L min ⁻¹)	A	B	R^2	p
5	2	2.95	0.27	0.92	1.13×10^{-12}
	4	6.81	0.20	0.90	3.11×10^{-11}
	8	16.88	0.20	0.88	1.11×10^{-16}
10	2	3.29	0.28	0.95	8.36×10^{-11}
	4	7.02	0.42	0.95	2.09×10^{-13}
	8	27.84	0.31	0.95	2.28×10^{-11}
15	2	6.29	0.52	0.88	1.56×10^{-10}
	4	15.39	0.44	0.91	5.35×10^{-10}
	8	35.76	0.30	0.93	2.58×10^{-8}
20	2	7.15	0.73	0.88	3.30×10^{-12}
	4	19.56	0.44	0.95	2.00×10^{-10}
	8	46.21	0.29	0.98	1.17×10^{-9}
25	2	10.68	0.51	0.94	6.67×10^{-7}
	4	21.11	0.46	0.92	4.80×10^{-6}
	8	49.09	0.35	0.98	5.42×10^{-6}

根据表 1 可知式(1)决定系数(R^2)最小为 0.88,最大为 0.98, p 的值均远小于 0.01,表明两者呈极显著相关,说明该方程能很好地表达累积侵蚀量与细沟长度的关系。

由图 2 可知累积侵蚀量随着细沟沟长的增加近似地呈指数增长,从细沟入口开始出现侵蚀现象,在细沟前半段增长迅速,之后增速逐渐变缓,在细沟出口处趋近于 0,此时累积侵蚀量达到最大值。细沟侵蚀形态是细沟侵蚀造成的外在表征现象,故分析侵蚀形态可以得出细沟侵蚀的强度及其发生发育过程,细沟侵蚀强度变化规律与累积侵蚀量变化规律一致。从图 2 中可知,在细沟入口处侵蚀强度最大,并且从细沟入口到出口逐渐减小。此结果不同于在人工降雨条件下进行的细沟侵蚀模拟试验^[20-21],Elliot 等和 Yao 等研究得出细沟侵蚀发生

点不在细沟入口处而是距细沟入口有一定距离,并且细沟侵蚀强度随着沟长的增加而逐渐增大。

图 2 所表示的细沟侵蚀过程与以物理过程为基础的 WEPP 模型^[22]中描述细沟侵蚀过程一致,WEPP 模型中认为水流的剥蚀能力与水流含沙量呈反比关系。清水在细沟入口处被引入,根据 WEPP 模型此时水流具有最大的剥蚀能力,所以在入口处侵蚀现象最明显,水流含沙量增加迅速,累积侵蚀体积增长也最快。随着细沟沟长的增加,水流含沙量增加,此时径流能量的一部分被用于运输泥沙和克服沟床阻力,所以用于剥蚀的能量相应变少,侵蚀强度也变小。在细沟出口处,水流接近饱和,绝大部分径流能量用于泥沙运移,只有极少数的能量用于剥蚀作用,侵蚀强度极低,故后半段侵蚀体积接近于 0,累积侵蚀量增加缓慢。

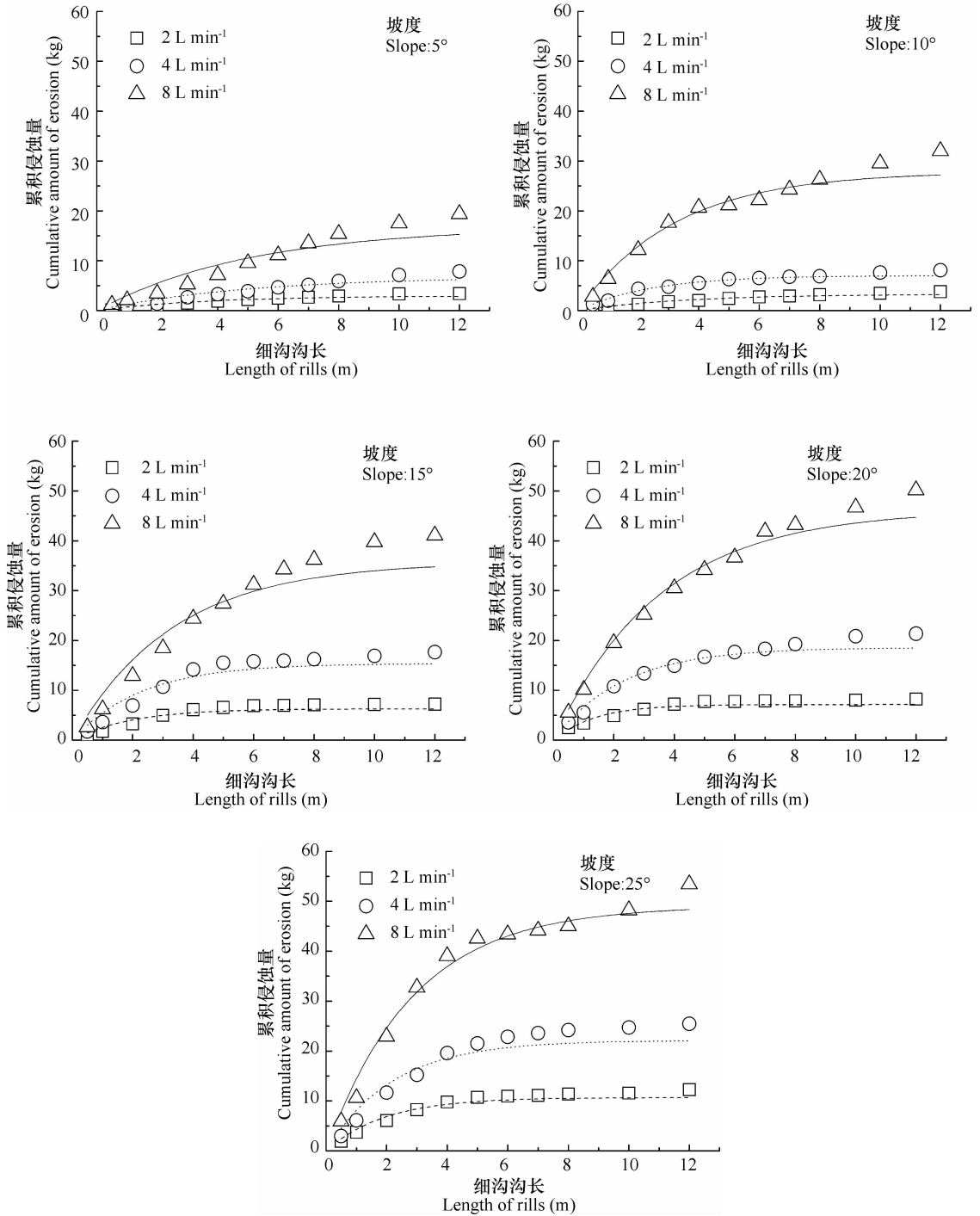


图 2 累积侵蚀量沿细沟分布规律

Fig. 2 Distribution of cumulative amount of erosion along eroding rills

从表 1 及图 2 中还可以得出随着坡度和流量的增加,累积侵蚀量也表现出明显的增加趋势,式(1)中 A 值从 2.95 迅速上升至 49.09,说明坡度和流量对于细沟侵蚀有着促进作用。陡坡和大流量下,水流的流速、剪切力等均上升,这势必造成更加剧烈的侵蚀。试验坡度自 20°增加至 25°,流量为 4 和 8 L min⁻¹时,累积侵蚀量的极大值分别从 19.56 和

46.21 增加至 21.11 和 49.09,并未明显改变,这说明本试验条件下,流量为 4 和 8 L min⁻¹时黄土细沟侵蚀的临界坡度为 20°~25°之间,该结果与前人的研究^[2,5]基本一致。

为了量化坡度和流量对于细沟侵蚀过程的影响,对统计结果进行多元回归分析和方差分析。累积侵蚀量的多元回归方程为:

$$M = -22.13 + 0.66S + 5.65Q \quad (2)$$

式中, M 为累积侵蚀量 (kg); S 为试验坡度 (%); Q 为入流流量 ($L \cdot min^{-1}$)。式(2)的决定系数 (R^2) 为 0.91, 多元回归分析结果证明坡度和流量对累积侵蚀量有较强的正效应, 但是流量较坡度对累积侵蚀量的影响更明显。

2.2 体积法测量累积侵蚀泥沙量的准确性

细沟不仅是细沟侵蚀的泥沙来源也是泥沙输送的通道^[23], 细沟侵蚀过程中产生的泥沙均通过细沟出口流失, 所以在细沟出口处接收含沙水样的泥沙量即为总侵蚀泥沙量。为了验证本试验所用体积法的准确性, 将收集桶接收的总侵蚀泥沙量与体积法所测得的累积侵蚀泥沙量进行比较, 结果详见图 3。

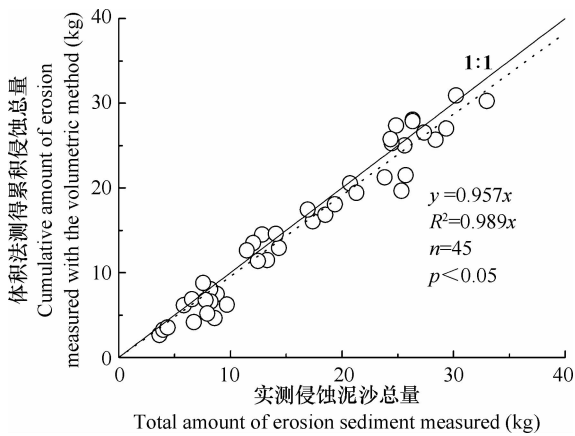


图 3 体积法测得累积侵蚀泥沙量与实测侵蚀泥沙总量的对比关系

Fig. 3 Comparison between cumulative amount of erosion sediment figured out with the volumetric method and collected total amount of erosion sediment

从图 3 可知两种方法得到的数据拟合程度很好, 决定系数 (R^2) 为 0.989, 相关系数为 0.918, 拟合直线斜率为 0.957, 接近于 1, 说明体积法测得数据略小于收集法, 可能是因为视线误差, 导致在回填过程中回填水平面略低于试验前所标记刻度。总体而言, 两种方法得到结果非常接近, 验证了本试验体积法测量累积侵蚀泥沙总量的准确性。

2.3 体积法测量侵蚀泥沙沿程分布规律的准确性

含沙量是指单位体积含沙水中携带泥沙的质量, 根据定义累积侵蚀量对水流体积的微分即为含沙量:

$$Sc_i = \frac{dM_i}{dV_i} = \frac{1\ 000 \cdot M_i}{Q \cdot t} \quad (3)$$

式中, Sc_i 为第 i 个细沟段中的泥沙含量 ($kg \cdot m^{-3}$); M_i 为第 i 个细沟段中的累积侵蚀泥沙质量 (kg); V_i 为第 i 个细沟段中单位时间内的含沙水流体积 (m^3); Q 为流量 ($L \cdot min^{-1}$); t 为每场试验的持续时间 (min)。

利用式(3)进行细沟水流含沙量的估算, 并建立了含沙量与细沟沟长的回归方程:

$$S_c = a(1 - e^{-bx}) \quad (4)$$

式中, S_c 为含沙量 ($kg \cdot m^{-3}$); x 为细沟沟长 (m); a 、 b 为回归系数。拟合结果见表 2。

从表 2 中可以看出回归结果的决定系数 (R^2) 均大于 0.95, F 检验也说明含沙量与沟长呈极显著相关。 a 值的变化趋势与式(1)中 A 值相似, 随着流量和坡度的增加, 先急速增加之后逐渐变慢并趋近于一个稳定值 a , a 值可认为是在某水力条件下含沙量所能达到的极大值即水流的输沙能力。坡度和流量越大, a 值也越大, 说明了坡度和流量对于含沙量具有正效应, 原因与累积侵蚀量相似不再赘述。表中 b 值可以看作是水流中含沙量从 0 达到极值的生长参量, 坡度越大, b 值越大, 含沙量增加的越快, 达到极值需要的沟长越短; 同样在同一坡度下, 流量越大这种趋势也越明显。含沙量随沟长的变化规律与前人^[24-25] 在较短细沟中所得结论类似, 即含沙量随细沟长度的增加近似地呈指数增加。

细沟侵蚀过程不是沿细沟均一恒定的, 水流含沙量也不是恒定的, 水流含沙量高相应累积侵蚀量大, 因此含沙量与累积侵蚀量沿程分布是一致的。为了进一步验证本试验得到的累积侵蚀量沿细沟分布的准确性, 本文采用体积法得到的含沙量与实测的水流含沙量沿程分布情况进行比较。

图 4 中 5 个坡度回归斜率分别为 0.87、0.93、0.94、1.01、1.02, 均接近 1, 且决定系数 (R^2) 均大于 0.99, 最小误差出现在坡度 20° , 为 1%; 最大误差出现在坡度 5° , 为 13%, 这在土壤侵蚀研究中是满足要求的, 说明两种方法所得的水流含沙量具有高度一致性, 因此验证了体积法所得累积侵蚀量沿细沟分布的准确性。而以往利用土壤、小麦等材料进行回填的体积方法, 不仅误差大, 通常在 20% ~ 40%^[7], 且回填材料成本相对于清水也较高, 试验后期清理也耗时费力, 效率较低。

表 2 侵蚀泥沙量与细沟沟长回归分析结果

Table 2 Regression analysis of amount of erosion sediment and length of rills

坡度 Slope gradient(°)	流量 Flow rate(L min ⁻¹)	a	b	R ²	p
5	2	440	0.13	0.95	6.35 × 10 ⁻⁴
	4	470	0.14	0.96	1.52 × 10 ⁻⁷
	8	520	0.15	0.95	2.31 × 10 ⁻⁶
10	2	630	0.30	0.97	5.96 × 10 ⁻¹⁰
	4	690	0.33	0.97	9.85 × 10 ⁻¹²
	8	720	0.36	0.98	4.65 × 10 ⁻¹¹
15	2	790	0.33	0.97	1.09 × 10 ⁻⁹
	4	830	0.36	0.97	9.34 × 10 ⁻¹⁰
	8	840	0.41	0.97	7.84 × 10 ⁻⁵
20	2	820	0.41	0.98	1.96 × 10 ⁻¹⁰
	4	860	0.48	0.99	1.22 × 10 ⁻⁸
	8	880	0.51	0.98	1.87 × 10 ⁻⁶
25	2	910	0.51	0.99	5.07 × 10 ⁻⁷
	4	910	0.47	0.98	3.26 × 10 ⁻⁶
	8	920	0.54	0.98	3.96 × 10 ⁻⁶

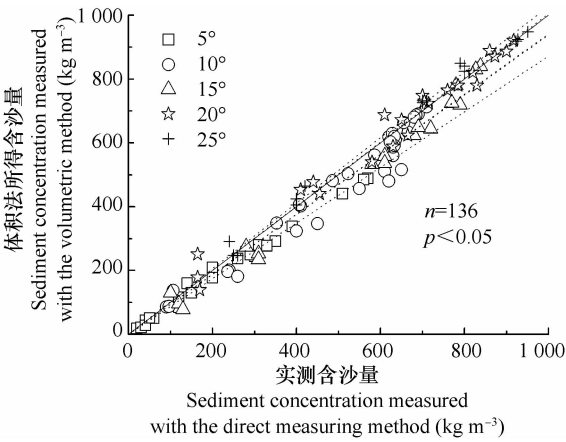


图 4 体积法与实测法测量含沙量的对比关系
 Fig. 4 Comparison between the volumetric method and the direct measuring method in sediment concentration measured

3 结 论

本试验采用清水回填,在误差范围内保证水的不渗漏,利用水的流动性和体积易测性来定量研究细沟侵蚀过程。试验结果表明:细沟累积侵蚀泥沙量及水流含沙量与细沟沟长的关系可以用指数函数较好的拟合,累积侵蚀量与含沙量随沟长的增加而增加,而增加幅度逐渐变缓,最终达到极值。累积侵蚀量和含沙量的变化趋势在陡坡和大流量下

更为明显,且两者极值随着坡度和流量的增大而增大。说明坡度和流量均是影响细沟侵蚀的重要因素,所以削减坡度和减小洪峰流量是控制坡面侵蚀产沙,提高水保效益的重要措施。此外,通过体积法测得累积侵蚀泥沙量与实测侵蚀泥沙总量的对比,验证了清水回填法测算侵蚀总量的准确性,通过体积法所得含沙量与实测含沙量对比,验证了清水回填法研究侵蚀泥沙沿程分布的准确性及适用性。体积法相比以往所用的土壤、稻谷等回填,准确性高,成本低,效率高,且能直观地得出细沟侵蚀过程。本研究可为补充完善土壤细沟侵蚀过程、估算细沟侵蚀含沙量及建立坡耕地细沟侵蚀预报模型提供依据。

参 考 文 献

[1] Neuendorf K K E, Jackson J A, Mehl J P. Glossary of geology. London: Springer London, Limited, 2005

[2] 邵学军,王远航,胡慧武. 坡面细沟流侵蚀临界条件研究. 水土保持学报, 2004, 18(2): 1—4. Shao X J, Wang Y H, Hu H W. Critical conditions for rill flow erosion on hillslopes (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(2): 1—4

[3] 刘俊体. 黄土坡面细沟侵蚀过程试验研究. 北京: 北京林业大学, 2013. Liu J T. Experimental study on rill erosion evolution process on loess slope (In Chinese). Beijing: Beijing Forestry University, 2013

- [4] 陈俊杰, 孙莉英, 蔡崇发, 等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素. 土壤学报, 2013, 50(2): 281—288. Chen J J, Sun L Y, Cai C F, et al. Rill erosion on different soil slopes and their affecting factors (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 281—288
- [5] Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, et al. A laboratory study of sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion. *Transactions of the ASAE*, 2001, 44(6): 1537—1542
- [6] Casali J, Loizu J, Campo M A, et al. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion. *Catena*, 2006, 67: 128—138
- [7] 郑粉莉. 细沟侵蚀量测算方法的探讨. 水土保持通报, 1989, 9(4): 41—45. Zheng F L. A research on method of measuring rill erosion amount (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1989, 9(4): 41—45
- [8] Zhang Q W, Lei T W, Zhao J. Estimation of the detachment rate in eroding rills in flume experiments using an REE tracing method. *Geoderma*, 2008, 147: 8—15
- [9] Olson K R, Gennadiyev A N, Zhidkin A P, et al. Use of magnetic tracer and radio-cesium methods to determine past cropland soil erosion amounts and rates. *Catena*, 2013, 104: 103—110
- [10] 张晴雯, 雷廷武, 赵军. 应用 REE 示踪法研究细沟流净剥蚀率. 土壤学报, 2005, 42(1): 163—166. Zhang Q W, Lei T W, Zhao J. Study of detachment rate in rills with the REE tracing method (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1): 163—166
- [11] 闫丽娟, 余新晓, 雷廷武, 等. 坡面流输沙能力与土壤可蚀性参数对细沟土壤侵蚀过程影响的有限元计算模型研究. 土壤学报, 2009, 46(2): 192—200. Yan L J, Yu X X, Lei T W, et al. Finite element model for calculating effects of slope flow sediment transport capacity and soil erodibility on rill erosion process (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 192—200
- [12] 龙天渝, 乔敦, 安强. 基于 GIS 和 RUSLE 的三峡库区土壤侵蚀量估算分析. 灌溉排水学报, 2012, 31(2): 33—37. Long T Y, Qiao D, An Q. Estimating soil erosion in three gorges reservoir area based on GIS and RUSLE (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(2): 33—37
- [13] 严冬春, 王一峰, 文安邦, 等. 紫色土坡耕地细沟发育的形态演变. 山地学报, 2011, 29(4): 469—473. Yan D C, Wang Y F, Wen A B, et al. Configuration evolution of rill development on purple slopeland (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(4): 469—473
- [14] Olson K R, Beavers A H, 樊振国. 估计土壤流失量的方法. 水土保持科技情报, 1989(2): 34—40. Olson K R, Beavers A H, Fan Z G. Methods to estimate soil loss (In Chinese). *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 1989(2): 34—40
- [15] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *Journal of Hydrology*, 2012, 454: 123—130
- [16] Lei T W, Zhang Q W, Yan L J, et al. A rational method for estimating erodibility and critical shear stress of an eroding rill. *Geoderma*, 2008, 144(3/4): 628—633
- [17] 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. 土壤学报, 2002, 39(4): 476—482. Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, et al. Laboratory study on sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(4): 476—482
- [18] 雷廷武, Nearing M A. 水流作用下疏松土壤材料中细沟的再生及其临界剪切力的实验研究. 农业工程学报, 2000, 16(1): 26—30. Lei T W, Nearing M A. Laboratory experiments of rill initiation and critical shear stress in loose soil material (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2000, 16(1): 26—30
- [19] 雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟. 细沟侵蚀物理模型. 北京: 科学出版社, 2009: 89—94. Lei T W, Zhang Q W, Yan L J. Physical model for rill erosion (In Chinese). Beijing: Sciences Press, 2009: 89—94
- [20] Elliot W J, Olivieri L J, Laflen J M, et al. Predicting soil erodibility from soil properties including classification, mineralogy, climate, and topography. Chicago Illinois: National Agricultural Library, 1990
- [21] Yao C, Lei T W, Elliot W J, et al. Critical conditions for rill initiation. *Transactions of the ASAE*, 2008, 51(1): 107—114
- [22] Nearing M A, Foster G R, Lane L J. A process based soil erosion model for USDA water erosion prediction project technology. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32: 1587—1593
- [23] 肖培青, 郑粉莉, 张成娥. 细沟侵蚀过程与细沟流体力学参数的关系研究. 水土保持学报, 2001, 15(1): 54—57. Xiao P Q, Zheng F L, Zhang C E. Research on rill erosion process and rill flow hydraulics parameters (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(1): 54—57
- [24] Mazhar A, Manuel S, Geert S, et al. A unit stream power based sediment transport function for overland flow. *Catena*, 2013, 101: 197—204
- [25] Li W J, Li D X, Wang X K. An approach to estimating sediment transport capacity of overland flow. *Science China (Technological Sciences)*, 2011, 54(10): 2649—2656

A VOLUMETRIC METHOD BASED STUDY ON DISTRIBUTION OF EROSION ALONG RILLS ON LOESS SLOPE

Zhao Yu¹ Chen Xiaoyan^{1,2†} Mi Hongxing¹ Mo Bin¹

(1 College of Resources and Environment/Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Region (Ministry of Education), Southwest University, Chongqing 400716, China)

(2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Rill erosion is a serious environmental problem threatening the agricultural production safety and sustainable societal development in the Loess Plateau, China. It is, therefore, very important and urgent to quantify dynamic process of the rill erosion. To that end, an indoor simulation experiment was carried out the scouring and backfilling method. Erosion process was analyzed through observing variation of the shape of rills and measuring volume of erosion along the rill segment by segment. Cumulative amount of erosion along the rills was worked out by refilling the separated rill segments with water to their original elevation. The sediment concentration was calculated by dividing the cumulative amount of erosion at each segment by the total volume of the water flow during the erosion period. A typical silty-loam soil was sampled from the Loess Plateau of China and used as experimental soil in this study. The soil contains 16.31% clay (< 0.005 mm), 61.35% silt (0.005 to 0.05 mm), and 22.34% sand (>0.05 mm). The soil was air-dried and then passed through an 8 mm sieve. In order to a complete continuous erosion process, an experimental trough, 3.0 wide and 12.0 m long, filled with loess, was used. In the trough six experimental rills, 0.1 m wide and 12 m long, were built to simulate well-developed rills. The trough was put at horizontal position for soil packing. At the bottom, the trough was densely packed with a 5 cm thick layer of local clay soil, made compact with a hammer to simulate the plow pan layer, 15 g cm⁻³ in bulk density. The upper 20 cm of the trough was packed with loess in layers, about 5 cm each, to make the soil even in bulk density, ranging approximately between 1 150 to 1 200 kg m⁻³. The soil surface was raked to make it as rough as natural condition. Cumulative volume of erosion of a rill was the sum of erosion volumes of the eleven rill segments (0 ~ 0.5 m, 0.5 ~ 1 m, 1 ~ 2 m, 2 ~ 3 m, 3 ~ 4 m, 4 ~ 5 m, 5 ~ 6 m, 6 ~ 7 m, 7 ~ 8 m, 8 ~ 10 m, 10 ~ 12 m) of a rill. Total amount of erosion sediment was measured volumetrically by a collecting vat at the outlet of each rill during the experiment. The experiment was designed to have five slope gradients, i. e. 5°, 10°, 15°, 20° and 25° for the trough, three flow rates, i. e. 2, 4 and 8 L min⁻¹ and three replicates. Results show that the process of rill erosion was not constant along a rill, with cumulative rill erosion and sediment concentration increasing exponentially and margin of the increase declining with rill length till the extreme in the end, which means that cumulative amount of erosion and sediment concentration increases rapidly at the initial segments of the rills, and the increase rate (the slope of the curve) attenuates gradually to approach zero along the rill. Flow rate and slope gradient were the two major factors affecting rill erosion, but the former seemed to have more influence than the latter. The comparison of the cumulative amount of erosion measured with the volumetric method with the result of direct measuring at the rill outlet validated the accuracy of the former, and the comparison of the sediment concentration measured with the water backfilling method with the result of direct measuring demonstrated that the former was quite accurate in and applicable to investigating distribution of erosion sediment along a rill. The findings of this study may serve as certain basis for consummating the research on soil rill erosion process, assessing sediment concentration from rill erosion and establishing a prediction model for farmland rill erosion.

Key words Rill erosion; Cumulative amount of erosion; Sediment concentration; Erosion process

(责任编辑:檀满枝)