

黄土坡面细沟发育过程及侵蚀产沙特征研究

刘俊体^{1,2}, 孙莉英², 张学培¹, 蔡强国², 陈俊杰²

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 研究细沟发育及其产沙特征对细沟侵蚀预报模型至关重要。采用室内纯净水模拟降雨试验的方法, 在不同坡度(10°, 15°, 20°, 25°)和不同雨强(1.5, 2.0 mm/min)条件下, 研究了细沟的发育过程, 并讨论分析各发育阶段产沙特征及其影响因素。结果表明, 根据坡面含沙量与细沟形态的变化特征, 细沟侵蚀过程可划分为面蚀、细沟雏形、细沟发育、细沟调整 4 个阶段; 各阶段的侵蚀量占坡面总侵蚀量的比例均不同, 其中细沟发育阶段最大, 约占总侵蚀量的 40%; 各阶段持续时间随着坡度的改变而改变; 雨强增大对细沟间与细沟流速有促进作用, 细沟流速为细沟间流速的 0.75~1.77 倍; 坡面侵蚀速率受雨强与坡度的影响很大, 在同一坡面上细沟流速与侵蚀速率的关系更紧密, 但二者的定量关系有待进一步探索。

关键词: 细沟发育; 产沙分布; 细沟流速; 侵蚀速率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0018-06

中图分类号: S157.1

A Study of Rill Evolution Process and Sediment Yield Characteristics on Loess Slope

LIU Jun-ti^{1,2}, SUN Li-ying², ZHANG Xue-pei¹, CAI Qiang-guo², CHEN Jun-jie³

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of

Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: A study of rill evolution process and sediment yield characteristics is important for rill erosion prediction model. At different slopes (10°, 15°, 20° and 25°) and different rainfall intensities (1.5 and 2.0 mm/min), the indoor simulated rainfall experiment with pure water was conducted to study the specific rill evolution process. The relationships between rill development stages and influencing factors were discussed. According to the characteristics of sediment concentration and rill form, the rill development process was classified as the four states of surface erosion, initial rill form, rill development and rill adjustment. Results showed that the proportions of sediment yield to the total erosion were different for different stages. The proportion for the rill development was the largest, about 40% of the total erosion. The duration for each stage changed with slope. Increase in rainfall intensity had a promotion role in rill and interrill flow velocities. Rill flow velocity was 0.75 ~ 1.77 times of interrill velocity. Rainfall intensity and slope had a great influence on erosion rate. The relationship between flow velocity and erosion rate was closer on the same slope, but the quantitative relationship should be explored further.

Keywords: rill evolution; sediment yield distribution; rill flow velocity; erosion rate

细沟侵蚀指坡面上形成细小沟道情况下, 径流对细沟沟壁、沟底、沟头土壤的分散、冲刷和搬运过程^[1]。细沟中的侵蚀过程不可避免地引起细沟沟床

的变化, 即发生形态的变化^[2], 其发生取决于坡面水流的水力学特性和坡面的土壤情况^[3]。Merritt^[4]依据室内试验资料将细沟发育分为片流、线性水流发

收稿日期: 2012-12-12

修回日期: 2013-01-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“坡面水蚀动力与细沟发育形态的相互作用机制及其影响因素”(41271304); 国家自然科学基金面上基金项目“细沟侵蚀发育过程及空间形态的三维数字模拟”(40971165), “东北典型黑土区坡耕地水土保持措施对地表径流及其侵蚀的调控和机理研究”(41001165)

作者简介: 刘俊体(1985—), 女(汉族), 河北省任丘县人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与土壤侵蚀等研究。E-mail: liujunti123@126.com。

通信作者: 蔡强国(1946—), 男(汉族), 湖北省武汉市人, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事土壤侵蚀、水土保持、流域侵蚀产沙模拟与 GIS 技术应用等方面的研究。E-mail: caiqg@igsnrr.ac.cn。

育、隐细沟和有沟头侵蚀的细沟4阶段,郑粉莉^[5]将坡面产沙过程分为溅蚀、细沟间侵蚀、细沟侵蚀为主、雨后径流侵蚀阶段4部分。一方面,细沟侵蚀的产沙过程都伴随着明显的形态变化,所以对坡面产沙的过程应做更为具体的分析研究;另一方面,由于试验条件与测量精度的影响,细沟间与细沟侵蚀之间并不能很清晰的分开来,因而需要进一步探索侵蚀的发生发展。随着微地貌观测技术水平的提高,有研究以紫色土为例,通过三维激光扫描技术与ArcGIS软件的结合,在间断降雨条件下,从坡面等高线偏离度与细沟沟头断面特征对细沟形态进行分析,认为跌坎的形成是细沟造床的关键^[6]。同时,以黄绵土^[7]为例,定义细沟的发育过程分为:小跌水—下切沟头—断续细沟—连续细沟—细沟沟网。然而,以上研究建立在间断降雨条件下,细沟发育每个阶段不一定能很完整的进行,不能看到细沟侵蚀在次降雨过程中的稳定阶段,所以,有必要在一个较充分的降雨过程中对细沟进行观察,从而对已有研究进行对比和补充。在对细沟发育过程中侵蚀方式进行分析的同时,影响细沟形态变化的因素亦是研究的重点。白俊清等^[8]研究,径流依据最小耗能原理,发生汇集形成股流,从而造成流路上水流跌坑的出现,也有研究者指出细沟的溯源侵蚀主要受沟头以上的来水控制,沟壁崩塌则与沟壁的坡度关系密切^[9]。由于细沟侵蚀定义本身的界定条件的模糊性和不规范性^[10],细沟侵蚀过程中各阶段的产沙规律与主要影响因素不明确。

本研究以不间断次降雨的产沙、细沟形态随时间变化特征为基础,详细分析细沟侵蚀的发育过程,对其进行不同阶段划分,根据各阶段不同的侵蚀规律,试探分析各阶段的主要影响因素,为提高黄土坡面细沟侵蚀预报精度提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本次试验在中国科学院水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工降雨大厅进行,使用规格10 m×1.5 m×0.5 m(长宽高)固定式可调坡钢制土槽。试验降雨方式为下喷式降雨,降雨高度18 m,降雨覆盖面积为27 m×18 m,试验用水为纯净水,与自来水相比,使用纯净水进行模拟降雨会加速和加剧坡面土壤侵蚀,同时消除水源本身的差异,适于与相关研究结论的对比,从而更有利于对坡面土壤侵蚀过程的研究,国际上这种方法已经广泛应用^[11-12]。试验取土地点为陕西省杨陵区农耕地土壤,曾种植小麦。杨凌当地土壤属于褐土中的塿土

(陕西省土壤普查办公室,1992)。其土壤颗粒机械组成如表1所示。

表1 试验土壤的颗粒机械组成 %

粒径/mm	<0.002	0.002~0.05	0.05~0.25	0.25~2
颗粒质量分数/%	26.06	64.47	4.25	5.22

1.2 试验设计

试验前将土样自然风干并过10 mm筛,以除去杂草和石块。装填试验土壤之前,先在试验槽底部填入10 cm厚的细沙,再在细沙上铺上透水的细纱布,以保持试验土层的透水状况接近于天然坡面。然后将试验用土均匀填入土槽中。装土时采用分层填土法,边填土边压实,每次装土5 cm,总共填土厚度为30 cm。装土时特别注意在隔板处尽量压实,以避免不必要的边壁效应。填土容重控制在1.1 g/cm³左右,使其和自然耕地表层土的容重相当。每次降雨前后,采用环刀法测定坡面土壤体积质量及含水率。根据中国科学院黄土高原综合考察队耕地坡度分级数据计算,黄土高原耕地坡度在7°~25°的坡面面积占耕地总面积的42.5%,试验中选择坡度为10°,15°,20°,25°。细沟侵蚀主要是由暴雨侵蚀产生,杨凌地区降雨主要集中在4—10月,占全年降雨的90.5%,而这一时期,中到大雨出现频率增加,同时也是暴雨的多发期^[13],试验中雨强定为1.5,2.0 mm/min这2种,为减少降雨量的影响,降雨历时分别为60和45 min。

1.3 试验测量

坡面产流后开始在出水口进行径流采样。采样间隔为1 min/次,泥沙采样容器为1 000 ml,含沙量测定用烘干法。坡面径流量采用自制大量桶测量1 min内的径流体积,加上泥沙样累计值,为总径流量。采用染色剂(KMnO₄)法分别在距坡顶1,3,5,7和9 m处依次测量水流速度,细沟出现后同时测量细沟流流速。染色剂测得的都是最大表面速度,而不是平均表层流速,雷霆武等^[14]将测量得到的流速乘以系数0.75来得到较为理想的水流平均流速,本试验中亦用此方法得到各处的平均水流速度。为减小试验误差,次降雨过程中流速测量由同一个人进行。在整个试验过程中采用高清晰摄像设备进行全程监测,以辅助人工记录与细沟形态演变分析。

2 结果与讨论

2.1 细沟发育过程中的形态演变及阶段划分

通过对降雨过程的数据分析与摄像监测材料的提取,4种坡度2种雨强的降雨试验过程中,坡面细

沟发育过程中形态演变出现了相似的发展过程。由于黄土坡面的产流方式以超渗产流为主^[15],降雨开始后,坡面产流极为迅速。细沟发育过程中,坡面经历了面蚀、细沟雏形、细沟发育和细沟调整 4 个阶段。

(1) 面蚀阶段。降雨开始后,雨滴打击坡面,溅起散状土粒,但这一现象被迅速出现的片流掩盖,如图 1a 所示。斑状片流最早出现于坡顶与中部,在降雨经过一段时间后,坡面顶部开始向下产流,坡面形成在横向分布均匀的坡面流。在缓坡面上可以明显看到由于雨滴击溅而出现的泥浆漩涡,而在陡坡面上坡面流成层状,不能明显看到雨滴击打坡面的痕迹。坡面中下部在坡面流的冲刷下出现明显零星的低凹处,它的出现破坏坡面流在横向的同步性,坡面流流

经之后形成形态不一的股流。坡面低凹的地方出现小跌水,由此引发跌坎的形成,跌坎的出现表明细沟侵蚀开始发育。此过程定义为面蚀阶段。

(2) 细沟雏形阶段。早期跌坎在横向出现,没有规律性,随机出现,在纵向上主要集中于坡面的中下部。因为跌坎的出现,其周围尤其上方明显地势偏低,坡面股流会因此而显现方向。股流出现的方向逐渐形成串状的跌坎见图 1b。已有研究用最小耗能原理解释此现象,随着降雨的继续进行,串状的跌坎发展到坡面中上部,就其发展方向可以看出细沟形态迹象。此时中下部最早出现的跌坎已经开始向上溯源侵蚀。以单处跌坎进行溯源侵蚀为标志,将此过程定义为细沟雏形阶段。

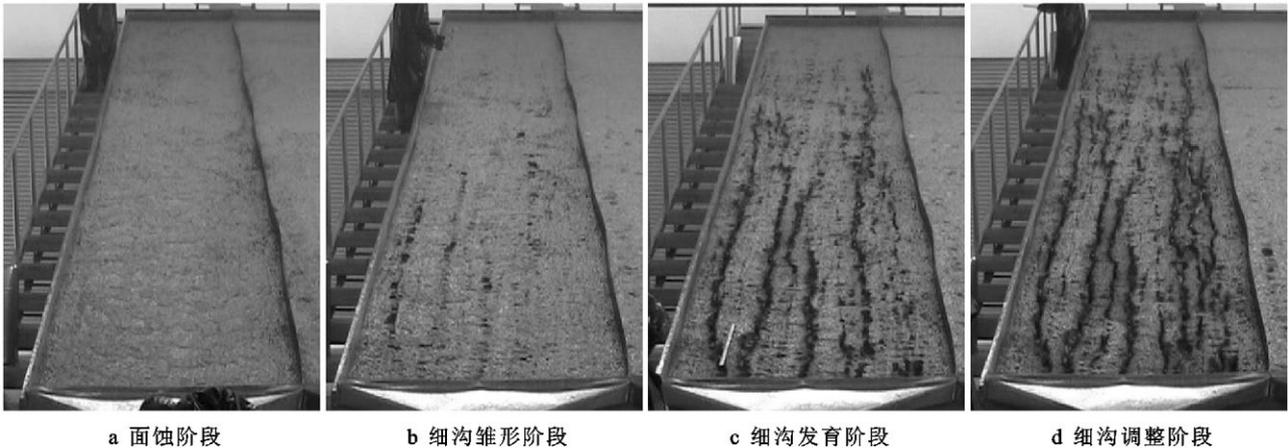


图 1 细沟发育过程中的形态演变

(3) 细沟发育阶段。跌坎溯源侵蚀迅速进行,展开细沟长度,形成断续的细沟。跌坎之间进行串通,使断续的细沟连接成为有一定长度规模的完整细沟(图 1c)。然而在此同时,细沟不但长度增加,还包含 3 种侵蚀现象:溯源侵蚀剧烈,一些坡面细沟已发育到距离坡顶 1 m 处;同时在细沟间的层状坡面流作用下,出现新的跌坎,但深度很小,并不断串通,在细沟间形成较小细沟;已经发育的细沟,由于细沟流对沟底冲刷使细沟深度加深。在此细沟发育过程中,侵蚀方式包括溯源侵蚀、下切侵蚀与细沟间的面蚀,将此过程定义为细沟发育阶段。

(4) 细沟调整阶段。在次降雨的后期,细沟发展到一个相当稳定的长度,看不到明显的溯源侵蚀见(图 1d)。一些研究^[16]指出集中流的形成与侵蚀的出现需要一定的坡面长度,这一长度随着坡度的改变而改变。坡面径流主要以细沟流的形式汇入出水口,在此过程中,细沟流对已经发育的细沟进行一些部位调整。细沟流主要对细沟底部与内壁进行冲刷,由于两

侧对细沟壁的淘蚀,细沟沿在重力作用下,稳定性变差而塌陷,尤其在 2 个跌坎之间发育而成的细沟沿更为脆弱;同时细沟间汇流面积很小,坡面降雨从横向两侧进入细沟,形成侧面跌水,即使跌水能量很小,但也会促进细沟的展宽发育。从监测资料中可以明显看到断断续续的小土块塌落。将此过程定义为细沟的调整阶段。

根据全程降雨中细沟形态变化得到对坡面细沟侵蚀的发育过程的解析,同时,降雨试验中获得的数据资料证明了这样分析的可行性(如图 2)。以 10 m 长,20°坡面在 1.5 mm/min 雨强下的含沙量变化为例。在开始 5 min 之内,含沙量存在一个极速下降的过程,这是因为降雨开始后坡面浮土很快随坡面流汇入出水口。接下来的十几分钟之内,含沙量有一个急剧上升的阶段,此阶段对应的为细沟雏形阶段,因为跌坎从无到陆续增多,含沙量出现一个增加速度较快的阶段。降雨进行到 1/3 时间时,坡面含沙量会在一个相当高的水平保持稳定的波动状态,此过程为细沟

发育阶段。因为侵蚀方式的多样性,所以出现波动,但以溯源侵蚀为主,侵蚀速率又有一定的稳定性。次降雨的最后一段历时中含沙量存在一个微下降并且波动幅度特别大的阶段,此阶段为细沟的调整的阶段,因为沟壁沟沿的塌落的随机性,含沙量波动大,但其侵蚀速率要比细沟发育阶段小。

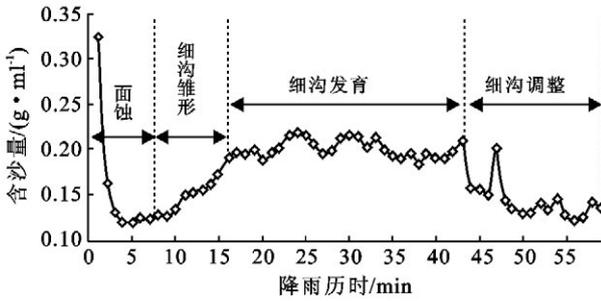


图 2 细沟发育过程中含沙量的变化特征

2.2 细沟发育过程中各阶段侵蚀量特征

根据细沟形态与含沙量的变化,将不同降雨条件下细沟侵蚀各阶段的持续时间及产沙情况进行统计,结果如表 2 所示。在长度 10 m 土槽中,随着降雨历时的进行,细沟发育的 4 个阶段在坡面侵蚀中都可以明显体现(10°坡面例外)。2 种雨强下随着坡度的增加面蚀阶段持续时间缩短,其产沙比例即在侵蚀过程

中的产沙贡献率亦呈现减小的趋势。例如 1.5 mm/min 雨强下,10°坡面上面蚀阶段持续 19 min,接近降雨历时 1/3,其产沙量占坡面产沙的 30%,然而 25°土槽中,在 3 min 之后坡面出现跌坎,产沙量不到 8%。在 2.0 mm/min 雨强下,各坡面面蚀阶段持续时间更短,25°土槽中坡面流稳定后便出现跌坎。已有研究表明,坡度增加产流提前^[17],因为坡面入渗率降低,入渗量减小,径流的侵蚀力随着坡度的增加而加大,所以跌坎出现时间随着坡度增加而缩短,坡面面蚀阶段持续时间缩短。

在细沟雏形阶段主要进行跌坎发育,坡面首先在中下部出现跌坎,因为跌坎周围地势偏低,坡面流逐渐变成有方向的坡面股流,最初跌坎的出现并无规律性,股流形成才是串状跌坎形成的主导原因。由串状跌坎完全可以看出细沟发育趋势,在 1.5 mm/min 雨强下此过程持续 12~18 min,在 2.0 mm/min 雨强下此过程持续时间为 9~14 min,可见雨强在此过程中起很重要的影响作用,同时坡度越大,跌坎发育越迅速。同坡度条件下大雨强同样加速跌坎发育速度,但过程中由于跌坎数量与大小无规律性,造成坡面产沙的比例随着坡度的变化规律不明显,比例范围在 17%~30%。

表 2 细沟侵蚀过程中各阶段中坡面侵蚀量

发育过程	坡度/ (°)	持续时间/min		侵蚀量/kg		贡献率/%	
		1.5 mm/min	2.0 mm/min	1.5 mm/min	2.0 mm/min	1.5 mm/min	2.0 mm/min
面 蚀	10	19	8	27.49	20.88	29.12	12.70
	15	15	2	10.65	18.34	35.42	5.72
	20	5	5	16.67	23.02	7.68	11.57
	25	3	2	17.29	28.19	7.35	8.01
细沟雏形	10	18	11	25.56	31.49	27.07	19.15
	15	13	9	5.19	61.94	17.26	19.31
	20	17	14	63.77	60.76	29.37	30.53
	25	12	10	43.13	71.81	18.33	20.40
细沟发育	10	23	16	41.37	61.96	43.82	37.68
	15	23	13	11.01	121.79	36.61	37.97
	20	21	15	93.00	74.47	42.82	37.42
	25	25	16	92.21	129.53	39.18	36.81
细沟调整	10	—	11	—	50.10	—	30.47
	15	9	21	3.22	118.72	10.71	37.01
	20	17	12	43.72	40.78	20.13	20.49
	25	20	16	82.69	122.39	35.14	34.78

注:“—”表示未出现。下同。

从表 2 可以明显看出,细沟侵蚀过程中,产沙比重最大的阶段为细沟发育阶段,其持续时间并不随坡度增加而明显减小。在 1.5 mm/min 雨强中,各坡度平均持续时间为 23 min,在 2.0 mm/min 雨强中各坡度平均持续时间为 15 min,占坡面产沙 40%左右,说

明细沟形成后,影响坡面侵蚀速率的主要因素应为土壤本身的性质。这是因为随着细沟的形成,改变了细沟小环境,例如坡度、坡长、细沟流等,细沟沟底比小于坡度本身,并且细沟发育的总长度并不等同于坡面长度,研究分析坡长与含沙量的相关性不大^[18]。此

外,此过程中细沟长度不断增加,细沟流随细沟空间的改变而改变,其影响也相应不稳定,所以细沟侵蚀以降雨强度与土壤本身抗侵蚀性的影响为主要因素。

在最后的细沟调整阶段中,细沟调整持续时间随着坡度的增大而延长,其产沙比例亦相当大。此阶段中,单条细沟长度不会明显增加,但坡面细沟的总长度因为细沟间的串通而延长,同时细沟的展宽加大细沟间合并的可能性。一些研究亦发现存在这样的发育阶段^[19],细沟发育达到一个基本稳定的阶段,坡面侵蚀量增加缓慢或基本保持稳定,但坡面含沙量因为细沟沿的坍塌而偶然波动。

2.3 细沟发育过程中各阶段侵蚀速率及坡面流速变化特征

细沟间流速与细沟流速分别取自各阶段测量值的平均坡面流速与平均细沟流速,坡面侵蚀速率为单位时间单位面积的坡面侵蚀量,结果如表 3 所示。在相同坡度条件下,无论是细沟间流速还是细沟流速,2.0 mm/min 雨强都要大于 1.5 mm/min 雨强的,同时各坡面的侵蚀速率也遵循同样的规律。研究中坡面平均细沟流速是细沟间流速的 2~4 倍^[20],原因是在

有细沟发育的坡段上,细沟间径流大部分汇入细沟内,沟内径流集中所以流速快,但细沟间水层厚度很小,因而流速很慢。本试验中因研究过程有些差别,二者大小在 0.75~1.77 倍,与郑粉莉^[5]的结果 2.06 倍接近。

面蚀阶段细沟间流速实际指的是坡面流速,其因雨强与坡度的不同,变化的规律存在差异。在 1.5 mm/min 雨强下,细沟间流速随坡度变化规律不明显,因为 10°坡面与 25°坡面上此阶段持续时间差距较大,坡面流速度值跳跃性大。在 2.0 mm/min 雨强下,细沟间流速随着坡度的增大存在一个转折点,在 20°时达到最大。降雨初始,坡面存有浮土的原因,此阶段坡面侵蚀速率随坡度变化规律并不明显,只能得到 25°坡面在任何雨强下坡面侵蚀速率都为最大。相对而言,细沟雏形阶段细沟间流速随着坡度增大到 20°时同样出现了一个转折坡度,但速度变化差异甚小,这说明跌坎的发生在各坡度上需要一定的坡面流速。此时并未形成连续的细沟,细沟流速多是测量跌坎处,或连续跌坎处的流速,所以因坡度的变化存在跳跃性,很不稳定,这一现象在 2.0 mm/min 雨强条件下尤为明显。

表 3 细沟发育过程中细沟、细沟间平均流速与坡面侵蚀速率

发育过程	坡度/ (°)	细沟间流速/(m·s ⁻¹)		细沟内流速/(m·s ⁻¹)		侵蚀速率/(kg·min ⁻¹ ·m ⁻²)	
		1.5 mm/min	2.0 mm/min	1.5 mm/min	2.0 mm/min	1.5 mm/min	2.0 mm/min
面 蚀	10	0.28	0.27	—	—	0.10	0.17
	15	0.24	0.29	—	—	0.05	0.61
	20	0.24	0.35	—	—	0.22	0.31
	25	0.28	0.27	—	—	0.38	0.94
细沟雏形	10	0.25	0.27	0.36	0.34	0.09	0.19
	15	0.26	0.31	0.28	0.35	0.05	0.46
	20	0.26	0.32	0.30	0.24	0.25	0.29
	25	0.23	0.29	0.27	0.24	0.24	0.48
细沟发育	10	0.24	0.23	0.32	0.35	0.12	0.26
	15	0.28	0.30	0.27	0.44	0.03	0.62
	20	0.22	0.25	0.27	0.27	0.30	0.33
	25	0.24	0.20	0.23	0.25	0.25	0.54
细沟调整	10	—	0.24	—	0.27	—	0.30
	15	0.25	0.22	0.24	0.39	0.02	0.38
	20	0.19	0.24	0.25	0.26	0.17	0.23
	25	0.19	0.18	0.22	0.23	0.28	0.51

在细沟发育阶段,各坡度条件下细沟间流速有所减小,各雨强下在 15°时达到最大细沟间流速,这是因为随着降雨历时的进行,陡坡细沟间面积相对较小,大部分坡面降雨很快汇入细沟,细沟间的水层很薄,坡面的粗糙度对其阻扰影响显著。然而细沟流速并没有随着坡度的增大而增大,在一定程度上反而减小,在 1.5mm/min 降雨中这种规律很明显。由 Giménez 等^[21]的研究结果可知,细沟侵蚀过程中坡面

沟床和细沟流水力条件之间相互影响,存在相互反馈的关系。此过程中,因坡度增加导致细沟流速增加的效应,同时被沟床对细沟流的阻碍作用抵消,并在一定程度上超越。

细沟调整的阶段中,细沟间流速与细沟流速在相同的坡度下,都要小于前面 3 个阶段的平均值,此时坡面细沟密度最大,细沟间面积被已形成的细沟网割破,汇流面积变小,通过对降雨过程中的坡面观察,几

乎看不到细沟间流。细沟间流速随着坡度的增大,减小的幅度也变大。因为细沟不断出现沟壁塌落而展宽,细沟流速也呈减小趋势。

由表3可以看出坡面侵蚀速率变化的多样性,为探究其中原因,将其与各因素进行相关分析,结果如表4所示。坡面侵蚀速率与坡度、雨强存在很明显的相关性,然细沟间流速与侵蚀速率之间相关系数甚低,这与前文细沟间流速变化的原因有关。为进一步讨论细沟流速与侵蚀速率,在控制坡度与雨强条件下,对细沟内流速与侵蚀速率进行偏相关分析,即在消除坡度与雨强的影响下,二者相关系数为0.683($\text{sig}=0.001$)。即在同一坡面上,细沟流速在很大程度上决定着坡面侵蚀速率,这一关系的确定有助于细沟侵蚀预报模型的完善。所以,细沟流速与坡面侵蚀速率的定量关系的研究作为下一步研究的重点。

表4 坡面侵蚀速率与各因素简单相关分析

项目	坡度	雨强	细沟间流速	细沟内流速
相关系数	0.450*	0.609**	0.116	0.191
sig 值	0.011	0.000	0.535	0.383

注:*表示0.05水平;**表示0.01水平。

3 结论

(1) 根据细沟形态监测与含沙量变化特征,细沟侵蚀的发育过程可分为面蚀、细沟雏形、细沟发育、细沟调整4个阶段,每个阶段含沙量有着不同的变化特征。

(2) 次降雨过程中随着坡度的增大,面蚀产沙比例成减小趋势,雨强的增大缩短了细沟雏形形成的时间,细沟发育阶段对坡面产沙的贡献最大,约占40%,同时在细沟调整阶段所侵蚀产沙的比例也不容忽视。

(3) 雨强的增大会同时加大细沟间与细沟流速,同时二者在各阶段都会出现一个转折坡度,随着降雨历时进行,速度转折坡度是变化的。坡面侵蚀速率与坡度、雨强都有很强的相关关系,然而在消除坡度与雨强的影响时,细沟流速与侵蚀速率的相关程度达0.683,在完善细沟侵蚀预报模型时,二者的定量关系有待进一步探索。

[参 考 文 献]

[1] FAO. Soil erosion by water: some measures for its control on cultivated lands [M]. FAO/ UNESCO, Rome, 1956:98-104.
 [2] 姚春梅,雷廷武,张晴雯,等. 细沟侵蚀动态过程模拟室内试验和模型验证研究[J]. 农业工程学报,2004,20(5):55-62.

[3] 李占斌,秦百顺,亢伟,等. 陡坡面发育的细沟水动力学特性室内试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(6):64-68.
 [4] Merritt E. The identification of four stages during micro-rill development [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1984,19:493-496.
 [5] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究[J]. 土壤学报,1998,35(1):95-103.
 [6] 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[J]. 山地学报,2011,29(4):469-473.
 [7] 霍云云,吴淑芳,冯浩,等. 基于三维激光扫描仪的坡面细沟侵蚀动态过程研究[J]. 中国水土保持科学,2011,9(2):32-37.
 [8] 白清俊,马树升. 细沟侵蚀过程中水流跌坑的发生机理探讨[J]. 水土保持学报,2001,15(6):62-65.
 [9] 韩鹏,倪晋仁,李天宏. 细沟发育过程中的溯源侵蚀与沟壁崩塌[J]. 应用基础与工程科学学报,2002,10(2):115-125.
 [10] 蔡强国,朱远达,王石英. 几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素[J]. 水科学进展,2004,15(1):12-18.
 [11] Igwe C A, Udegbunam O N. Soil properties influencing water-dispersible clay and silt in an Ultisol in Southern Nigeria[J]. International Agrophysics, 2008, 22(4):319-325.
 [12] Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, et al. Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and rainfall intensity [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010,35(12):1456-1467.
 [13] 吕玲,吴普特,赵西宁,等. 杨凌城区雨水资源利用潜力计算及其效益分析[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(5):225-229.
 [14] 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,2009:117-129.
 [15] 高军侠,刘作新,党宏斌. 黄土高原坡面模拟降雨超渗径流特征分析[J]. 土壤通报,2004,35(6):780-784.
 [16] Woldeamlak Bewket, Geert Sterk. Assessment of soil erosion in cultivated fields using a survey methodology for rills in the Chemoga watershed, Ethiopia[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003,97(2):81-93.
 [17] 郑粉莉,唐克丽,周佩华. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J]. 土壤学报,1989,26(2):109-116.
 [18] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等. 坡面水流速度与坡面含砂量的关系[J]. 农业工程学报,2011,27(3):73-78.
 [19] 郑良勇,李占斌,李鹏,等. 稀土元素示踪坡面次降雨条件下的侵蚀过程[J]. 农业工程学报,2010(3):87-91.
 [20] 刘和平,王秀颖,刘宝元. 人工模拟降雨下细沟与细沟间流速的沿程分布[J]. 地理研究,2011,30(9):1660-1669.
 [21] Giménez R, Govers G. Interaction between bed roughness and flow hydraulics in eroding rills[J]. Water Resources Research, 2001,37(3):791-799.