

## 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素\*

陈俊杰<sup>1,2</sup> 孙莉英<sup>1</sup> 刘俊体<sup>3</sup> 蔡崇法<sup>2</sup> 蔡强国<sup>1†</sup>

(1 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)

(2 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070)

(3 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

**摘要** 采用室内纯净水人工模拟降雨试验, 在坡度为 10°、15°、20°、25° 坡面, 土槽为 5 m、10 m 两种规格, 对两种土壤(壤土与黄绵土)分别进行雨强为 1.5 mm min<sup>-1</sup> 的降雨实验, 利用三维激光扫描仪对每一场降雨后的坡面进行监测, 分析不同坡度对细沟侵蚀的影响, 比较两种土壤坡面细沟侵蚀的差异, 以及其差异的影响因子。结果表明: 壤土土壤颗粒以粉粒与黏粒为主, 粉粒占总质量的 64.12%, 黏粒为 28.42%。黄绵土的土壤颗粒以粉粒为主占总质量的 67.95%, 黏粒与沙粒含量较少, 黏粒占 14.52%, 沙粒占 17.53%。在相同条件下, 壤土降雨过程中入渗缓慢, 产流时间、坡面流速均快于黄绵土, 跌坎出现时间也较早, 使其更容易产生细沟。壤土的径流量高于黄绵土, 在降雨过程中, 径流稳定时间较早。壤土侵蚀量高于黄绵土, 壤土产沙率呈增加趋势, 黄绵土含沙量变化不明显。从坡面细沟发育来看, 壤土坡面细沟成平行状分布, 黄绵土细沟为较宽树枝状。

**关键词** 土壤; 径流量; 侵蚀量; 细沟发育; 人工模拟降雨**中图分类号** S157. **文献标识码** A

细沟侵蚀是水流面蚀中侵蚀强度最剧烈的侵蚀方式, 它的发生往往标志着土壤侵蚀逐步向沟蚀发展。作为侵蚀的对象, 土壤同时具有可蚀性和抗蚀性。土壤的可蚀性是土壤对侵蚀的敏感性; 抗蚀性是土壤抵抗外力侵蚀的能力。二者的强弱对比状况则取决于土壤类型和土壤性质。土壤因子是坡面细沟侵蚀重要影响因素之一, 许多研究者对此进行过大量的探讨研究, 获得了各自的研究成果。大多数的观点均认为土壤的黏粒含量会影响土壤的黏聚力, 团聚性质好的土壤对雨滴击溅、径流剪切的抵抗力更强<sup>[1-3]</sup>, Kirkby<sup>[4]</sup> 研究表明, 87.5% 的侵蚀性土壤的黏粒含量在 9%~35% 之间, 75% 侵蚀性土壤的黏粒含量在 9%~30% 之间。当黏粒含量高于 30%~35% 时, 由于土粒的胶结力增大, 土壤抵抗雨滴击溅的能力增强。有研究认为土壤粗颗粒多, 孔隙率大, 连通性好, 对其中运动流体的阻力小, 因而土壤水分流量大, 相应的土壤入渗能力增强从而减少降雨径流量<sup>[5-6]</sup>。土壤有机质主要影响土壤的团聚体黏

聚度, 提高土壤的抗剪强度<sup>[7-9]</sup>, 土壤团聚体的稳定性表征了土壤颗粒之间的凝聚性。以上研究多从土壤本身的性质分析, 而较少考虑降雨、坡度、坡长等条件与土壤特性产生的交互作用对细沟发育形态的影响。本研究通过室内人工模拟降雨试验, 基于三维激光扫描技术, 比较两种土壤坡面细沟侵蚀发育的差异, 并从土壤内在特性与降雨、坡度、坡长等外部条件交互作用对细沟侵蚀特征的影响角度, 分析不同土壤细沟侵蚀发育的影响因素, 以期深入探讨土壤细沟侵蚀机理。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品

取陕北黄绵土和陕西省杨凌区当地土作为实验用土。杨凌当地土归属于褐土中的壤土(据陕西省土壤普查办公室, 1992)。壤土是在普通褐土表层以上形成一个人工堆垫的表层; 它是人为长期早耕熟化, 施入土粪或富含有机质的农家肥料而形成

\* 国家自然科学基金面上基金项目(40971165)、国家自然科学基金面上基金项目(41271304)资助

† 通讯作者: 蔡强国(1946—), 男, 湖北武汉人, 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@igsnr.ac.cn

作者简介: 陈俊杰(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事坡面土壤侵蚀等研究。E-mail: chenjunjie5566@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-04-15; 收到修改稿日期: 2012-09-26

的。黄绵土母质为黄土,通体质地均一,为砂质壤土。土样均为农耕地表层(0~20 cm)土壤。

实验用土试验前将土样自然风干并过 10 mm 筛,以除去杂草和石块。填土时,先在试验槽底部填入 10 cm 厚的细沙,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。然后再填入试验用土,将土均匀填入土槽中,土壤容重控制在  $1.1 \text{ g cm}^{-3}$  内,厚度约为 30 cm。装土时采用分层填土法,边填土边压实,每次装土 5 cm,控制土壤容重在设计范围之内。每次降雨前,采用环刀法测取坡面土壤表层容重及含水量。各场降雨试

验初始条件的统计结果显示,土壤平均含水量为 12.81%,土壤平标准差为 0.015;土壤平均干容重为  $1.09 \text{ g cm}^{-3}$ ,标准差为 0.043。因为标准差均小于 0.05,表明数据集中程度高,故可认为每场降雨试验的土壤初始条件达到一致。

土壤性质分析采用常规方法,即有机质采用重铬酸钾外加热法,土壤碳酸钙含量用中和滴定法,容重采用环刀法,机械组成采用激光粒度分析法,水稳定团聚体采用湿筛法,土壤饱和导水率采用环刀法,每组做 3 个平行进行对照,两种试验土壤样品的各种性质见表 1。

表 1 两种土壤基本性质

Table 1 Basic soil properties of the two soils tested

土壤类型 Types of land	机械组成 Mechanical composition			有机质 Organic matter ( $\text{g kg}^{-1}$ )	碳酸钙 $\text{CaCO}_3$ ( $\text{g kg}^{-1}$ )	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity( $\text{mm h}^{-1}$ )	>0.25 mm 水稳定团 聚体百分比 Percentage of water-stable aggregates (>0.25 mm)
	黏粒 Clay (%)	粉粒 Silt (%)	沙、砂粒 Sand (%)				
塬土 Lou soil	28.42	64.12	7.46	6.0	130.2	11.2	6.44
黄绵土 Cultivated loessial soil	14.52	67.95	17.53	1.8	97.8	6.3	4.25

## 1.2 人工模拟降雨实验

实验主要在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行,采用下喷式自动模拟降雨系统。降雨系统将水喷射至空中,受空气阻力作用把水流破碎形成不同大小的雨滴,其产生的雨滴有大有小,与天然降雨的雨滴比较相似<sup>[10]</sup>。降雨高度 18 m,能够保证所有雨滴均能达到终点速度。实验每场降雨的雨强  $I$  为  $1.5 \text{ mm min}^{-1}$ 、 $2.0 \text{ mm min}^{-1}$ ,为保证总降雨量相同,降雨时间分别为 60 min,45 min。试验采用纯净水作为模拟降雨水源,室温为  $10^\circ\text{C}$  时,测取试验用纯净水电导率为  $4.81 \mu\text{S cm}^{-1}$ 。国际上,采取纯净水作为水源来进行室内模拟降雨试验的方法已经被广泛应用<sup>[11-12]</sup>。根据 Shainberg 等<sup>[13]</sup>的试验结果可知,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,从而更有利于对坡面土壤侵蚀过程的观察及研究。

在降雨实验开始之前,通过反复率定,使其在试验要求雨强情况下降雨均匀度达到 90% 左右。供试土样风干过 10 mm 筛。实验所用土槽设计规格:宽 1 m、高 0.5 m、长 5 m 的移动式可调坡钢制土槽,另一种为宽 1.5 m、高 0.5 m、长 10 m 的固定式可调坡钢制土槽。最下层装填 10 cm 细沙并用纱布覆盖,以保证良好的透水性,其上依次装填 30 cm 的供试土样,每层装土深度 5 cm,使下垫面土壤条件

的变异性达到最小,坡度为  $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$ ,土槽下端设集流装置,用来收集径流泥沙样品。仔细观察并记录细沟侵蚀过程,产流时间、跌坑产生时间、沟壁坍塌的关键时刻等信息,降雨径流产生后每隔 1 min 取一次样,用烘干法含沙量。径流量则采用自制大量筒测量体积,加上泥沙样累计值,即为总径流量。用染色剂法测定坡面及细沟内水流的最大流速。

## 2 结果与讨论

### 2.1 两种土壤在不同条件下径流量的差异

如表 2 所示,在相同降雨强度、坡长、坡度条件下,塬土产流时间明显提前于黄绵土产流时间,但二者产流时间随坡度的增大没有出现明显的规律,这说明坡度对土壤本身特性的影响不显著;在同一坡度、坡长条件下,产流时间随降雨强度增大而提前,在 5 m 坡面,塬土在  $2.0 \text{ mm min}^{-1}$  雨强下产流时间比  $1.5 \text{ mm min}^{-1}$  雨强条件下提前 46 s,黄绵土坡面产流时间相差最大值为 110 s。在 10 m 坡面,两种雨强下塬土产流时间相差时间最大值只有 23 s,然而黄绵土产流时间最大相差值达到 107 s。这是因为增大雨强,单位时间、单位面积坡面承雨量增大,必然促进坡面产流,所以各个坡度产流时间整

体提前。但因为雨强增大产流时间提前的差值随着坡度的增大而减小,这种趋势壤土坡面尤为明显,这说明土壤自身特性影响坡面产流。壤土中黏粒和粉粒含量占了近 93%,其中黏粒比例达到了 28%,为黄绵土的 2 倍,使得壤土在降雨过程中入渗缓慢。研究表明黏粒含量从 6% 增加至 40.4% 时,稳定入渗速率从  $0.0169 \text{ cm min}^{-1}$  降低至  $0.0068 \text{ cm min}^{-1}$ ; 90 min

累积入渗量则从 3.66 cm 降低至 2.02 cm,稳定入渗速率、90 min 累积入渗量与黏粒及物理性黏粒含量分别呈幂函数负相关、指数负相关关系<sup>[14-15]</sup>。卜崇峰等<sup>[16]</sup>和程琴娟等<sup>[17]</sup>试验发现,土壤粒径越小,在降雨过程中,结皮越早,结皮降低径流的入渗。以上两种原因导致壤土坡面产流快于黄绵土,使其更早地受到径流冲刷,导致其坡面跌坎出现时间较早。

表 2 两种土壤降雨过程中坡面差异

Table 2 Differences between slopes of the two different soils during the rainfall event

雨强 Rainfall intensity ( $\text{mm min}^{-1}$ )	坡长 Slope length (m)	坡度 Slope ( $^{\circ}$ )	产流时间		跌坎出现时间		坡面平均流速	
			Runoff generation time (min, sec)		Drop-pit occurrence time (min)		Mean runoff velocity ( $\text{m s}^{-1}$ )	
			壤土 Lou soil	黄绵土 Cultivated loessial soil	壤土 Lou soil	黄绵土 Cultivated loessial soil	壤土 Lou soil	黄绵土 Cultivated loessial soil
1.5	5	10	1'48"	2'28"	14'	—	0.21	0.24
		15	1'52"	3'27"	7'	15'	0.18	0.32
		20	1'51"	1'40"	11'	12'	0.24	0.30
		25	1'25"	3'19"	6'	—	0.27	0.32
		10	1'32"	2'5"	10'	14'	0.26	0.30
	10	15	1'20"	3'8"	11'	11'	0.26	0.24
		20	1'22"	2'4"	8'	5'	0.25	0.36
		25	1'23"	3'17"	4'	14'	0.26	0.33
		10	1'2"	1'50"	9'	8'	0.21	0.25
		15	1'8"	1'17"	7'	15'	0.24	0.30
2.0	5	20	1'24"	1'36"	7'	14'	0.22	0.27
		25 *	1'13"	1'50"	6'	6'	0.20	0.15
	10	10	1'9"	1'22"	6'	5'	0.25	0.27
		15	1'5"	1'57"	5'	9'	0.31	0.29
		20	1'8"	1'39"	3'	7'	0.33	0.36
		25	1'10"	1'30"	5'	11'	0.28	0.29

黄土区地形破碎,坡长坡度都是影响土壤侵蚀的重要地形因子,而土壤因子本身是影响细沟侵蚀径流量,产沙量的内在条件。由图 1 可以看出两种土壤总径流量随坡度变化规律并不是很明显。5 m 坡长时,壤土为 408 ~ 434 L,黄绵土为 289 ~ 408 L; 10 m 坡长时,壤土为 1 045 ~ 1 262 L,黄绵土为 591 ~ 1 012 L。壤土土壤质地比较黏,黏粒和粉粒含量高,入渗较少,坡面降雨转化为径流的量要大于黄绵土。在坡长较长的情况下,承雨面积变大,入渗量增加,使得壤土与黄绵土径流量差异变大。

坡面产流是由降落至坡面的降雨强度大于土壤入渗的能力而形成的,那么坡面产流的变化则是降雨量和入渗量的各自变化而导致的。由图 2 可知,二者的产流强度变化趋势不同,5 m 壤土坡面

上,随着降雨历时的进行,坡面产流很快达到一个稳定波动的状态,产流率在  $1.45 \sim 1.82 \text{ mm min}^{-1}$ ,但是黄绵土坡面则出现一段急剧上升的过程,最终达到一个稳定波动的状态。10 m 坡面上,两种土壤同样出现以上的规律,同时因为坡长的增长,壤土产流随时间波动的幅度增加,黄绵土坡面上升趋势也加强。由于细沟的快速发育和在降雨过程中不断坍塌以及相邻细沟的袭夺、连通而导致流出坡面的径流量出现短时间内的减小,从而也导致径流量出现波动。总体来看,在各个坡度下,壤土从土壤饱和到坡面超渗产流,径流量均呈很平缓的态势发展直至最后断流。黄绵土在产流开始后,在降雨开始后的 10 min 内呈快速增大趋势,而后又缓慢增大,至降雨后期才达到稳定入渗状态和稳定产流。

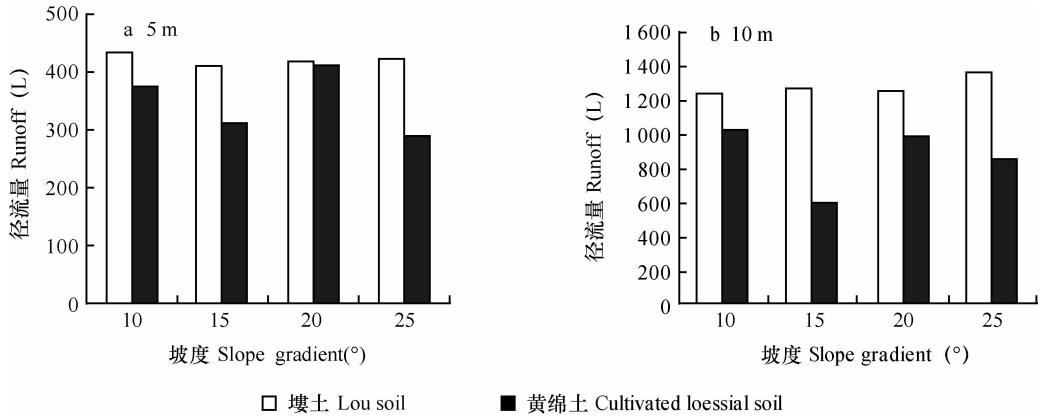


图1 两种土壤在不同坡度下径流量差异

Fig. 1 Runoff volumes on different slopes of two different soils

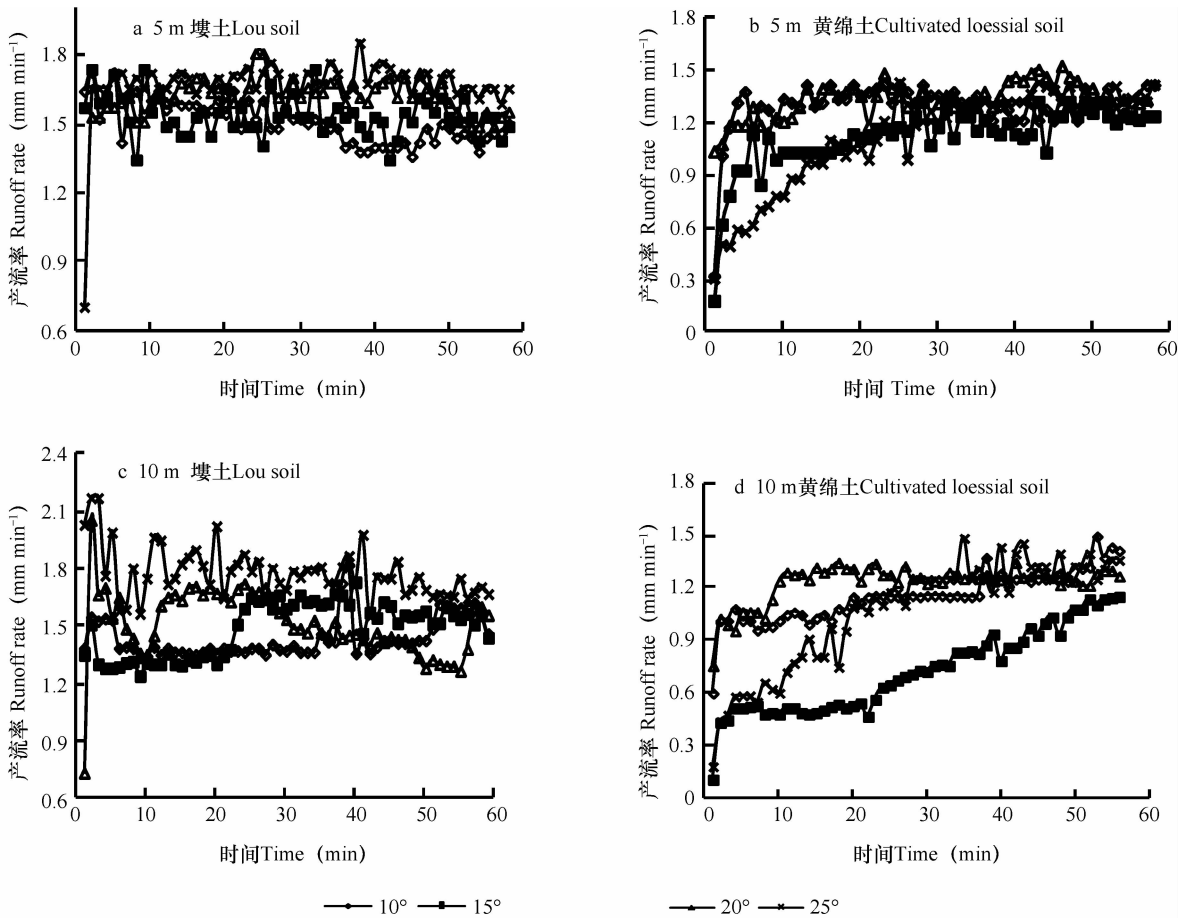


图2 两种土壤不同坡长下产流强度变化过程

Fig. 2 Variations of runoff yield strength on slopes different in soil and in length

## 2.2 两种土壤在不同条件下侵蚀量的差异

在同等坡度、雨强、坡长下, 壤土的侵蚀量高于黄绵土, 最大相差 20 倍, 如图 3 所示。

其主要原因就是土壤本身的特性所导致。由 2.1 可知, 壤土的径流量要高于黄绵土。细沟侵蚀

降雨径流条件研究中, 径流的冲刷作用远远大于降雨雨滴的击打作用, 坡面水蚀的主要侵蚀动力来自降雨及其产生的地表径流, 直接导致壤土侵蚀量较黄绵土大很多。径流量的差异弱化了土壤的其他影响因子的作用。

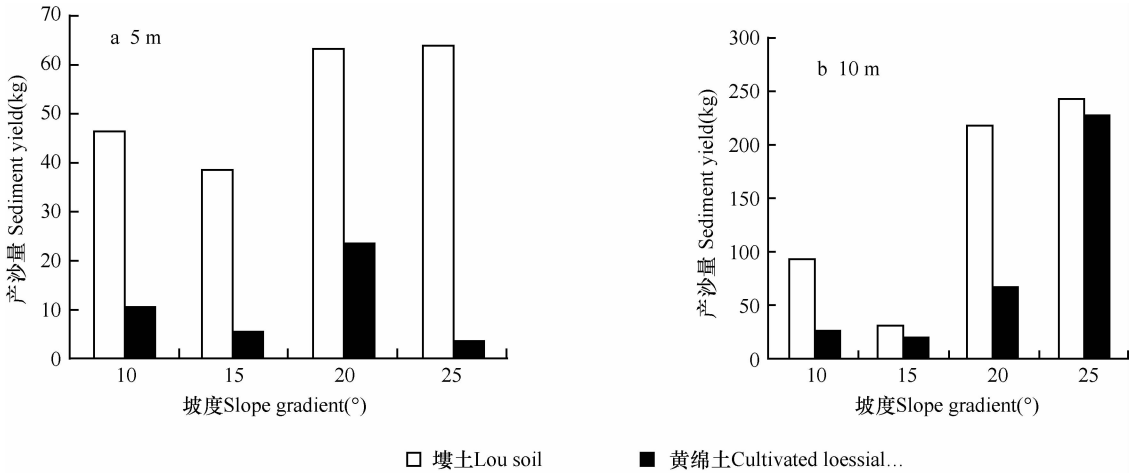


图3 两种土壤不同坡度下侵蚀量差异

Fig. 3 Sediment yields as affected by slope degree on the slopes of two different soils

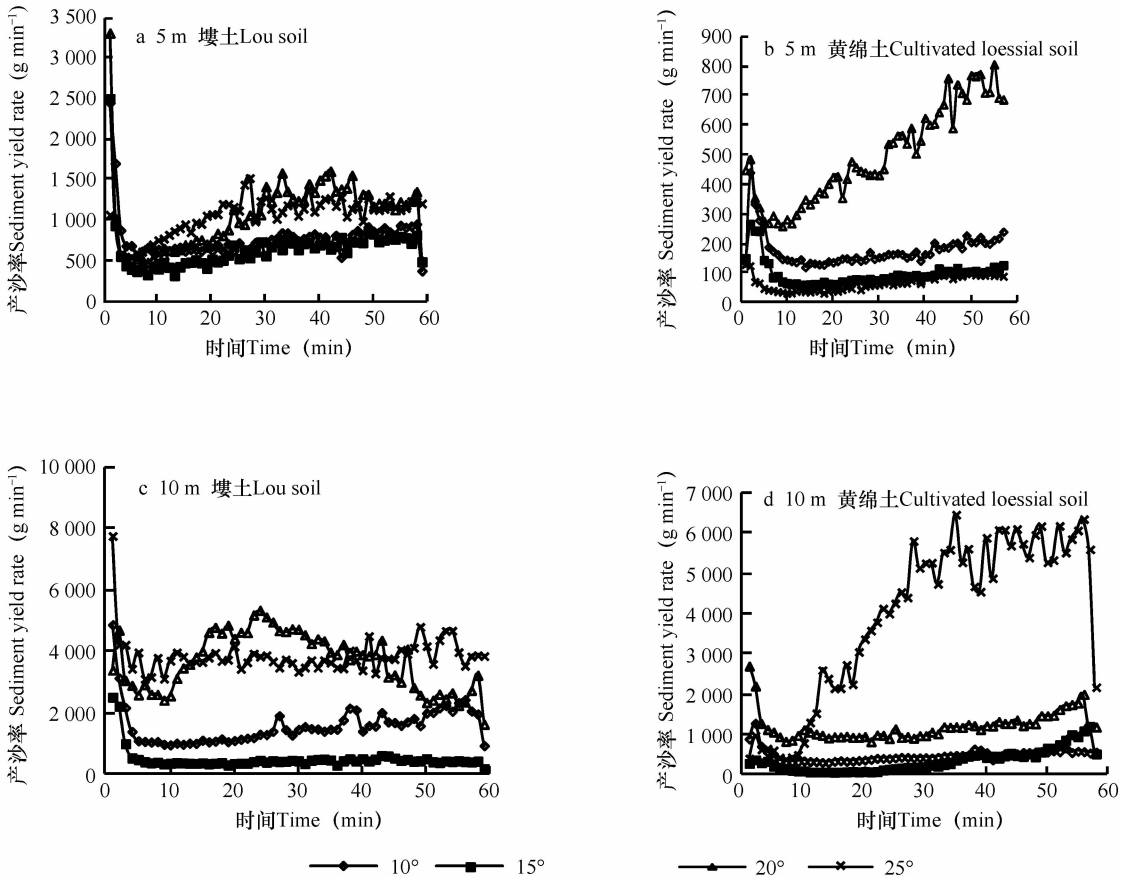


图4 两种土壤不同坡长下产沙强度变化过程

Fig. 4 Variations of the sediment yield rates of the slopes different in soil and in length

大多数研究者认为细沟侵蚀发生将导致侵蚀产沙速率急剧增加, 本研究发现见图4, 壤土在10°、15°下虽然发生了细沟侵蚀, 但降雨过程中径流产沙率先增长后达到保持平稳的状态, 并没有因为

细沟发育和发展出现急剧的变化, 平均产沙率分别为739 g min<sup>-1</sup>、615 g min<sup>-1</sup>。降雨初期以片蚀为主, 在5 min左右出现跌水并在降雨后半程有细沟锥形和沟头的溯源前进, 因此导致产沙率持续增

加,但增速不大,且未出现产沙峰值与降雨过程中坡面土壤没有发生大块的崩塌有关。在  $20^\circ$ 、 $25^\circ$  下,5 m 坡长,在 10 min 时候,最大产沙率是低坡度下的 2 倍;10 m 坡长,最大产沙率是低坡度下的 5 倍多。坡度的增加使得土壤颗粒受重力作用向下的分力增大,降低了土壤颗粒的稳定性。

黄绵土产沙率变化平稳,在相同坡度下坡面产沙率远远低于瘠土,只有在个别坡度下产沙率随着时间的推移逐渐增加。在降雨开始 10 min 出现细沟溯源侵蚀,产沙率急剧增大,以 10 m 槽、 $25^\circ$  为例,当发

生细沟侵蚀时,最大产沙率达到  $6.47 \text{ kg min}^{-1}$ ,增长斜率较大。这说明黄绵土的抗蚀性远大于瘠土,但一旦发生细沟侵蚀,黄绵土的坡面侵蚀强度会超越瘠土,在土壤自身因素的影响外,降雨与地形条件对黄绵土细沟侵蚀的影响较大。

### 2.3 两种土壤在不同条件下细沟形态发育的差异

降雨后对各个坡面细沟发育情况进行扫描,比较两种土壤在  $1.5 \text{ mm min}^{-1}$  雨强下坡面细沟发育差异情况。由图 5 可知,瘠土随着坡度的变陡,坡面细沟节点由少增多,细沟条数由少增多,从  $10^\circ$ 、 $15^\circ$

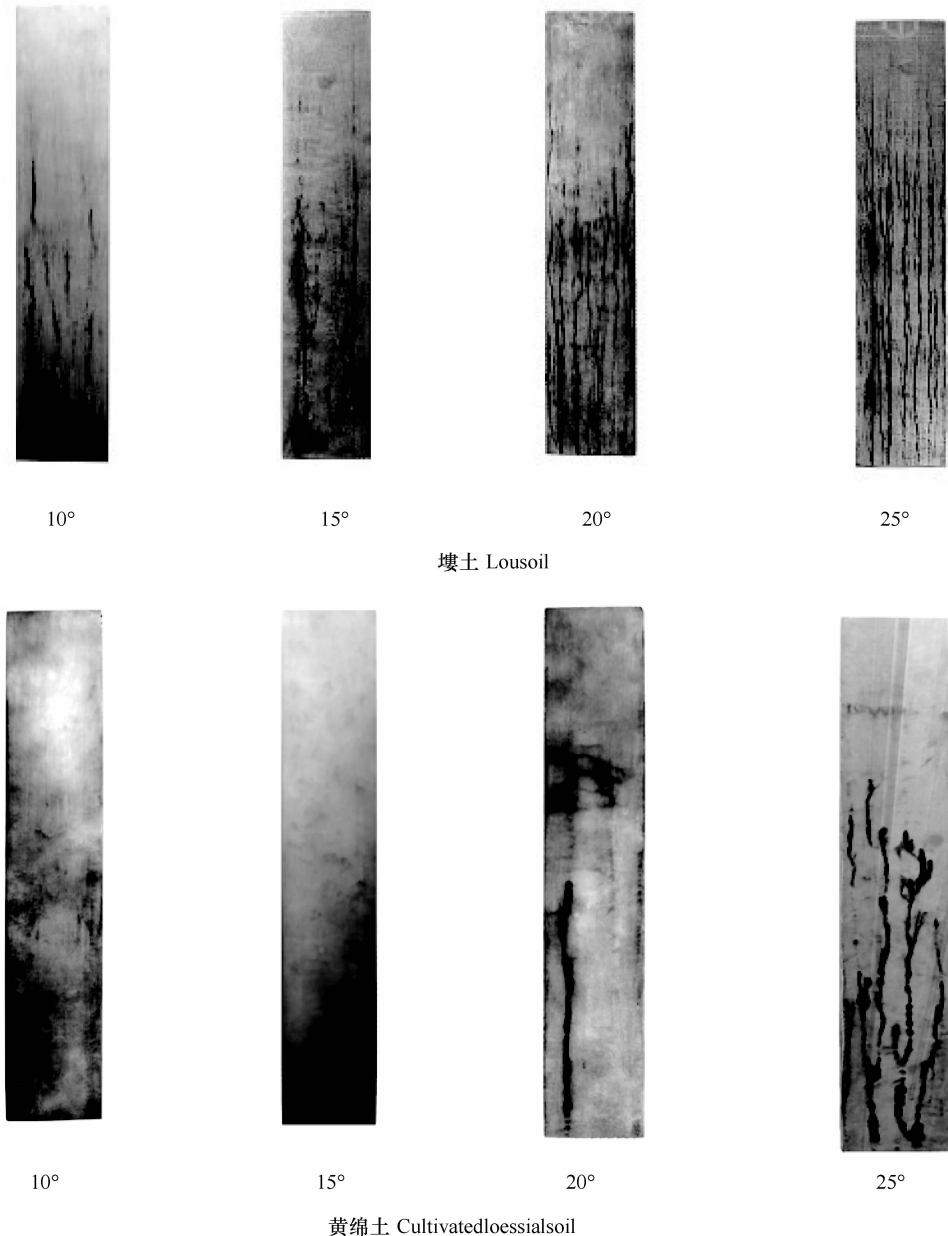


图 5 两种土壤细沟发育差异

Fig. 5 Rill development on slopes of two different soils

细沟发育来看,细沟只是在坡面部分发育。在坡面上抗侵蚀力较弱的地方开始,无论在低雨强或者高雨强下,细沟都是部分发育。从 $20^\circ$ 开始,细沟就已经发育到整个坡面,到 $25^\circ$ 坡时,部分细沟壁开始出现崩塌现象。这是因为随着坡度的增加,径流位能加大,径流的冲刷力和夹沙能力增强,同时,坡度的增加,土壤颗粒固有重力将更有利于分散土粒向下坡移动,又降低了土壤的稳定性,土壤抗蚀能力减弱。黄绵土在低坡度下,土壤表面没有明显的细沟发育,都是以片蚀为主,在 $20^\circ$ 坡度下,在坡面的中下部发生一条细沟。在 $25^\circ$ 坡度下,才能看到明显的细沟发育,但是其发育的形态与壤土 $25^\circ$ 坡面发育的形态完全不同,其表现为较宽的树枝状细沟,细沟的长度以及密度都不如壤土。这说明细沟形成后,影响坡面侵蚀速率的主要因素应为土壤本身的性质,壤土黏粒含量高,土壤之间黏结力和抵抗水流破坏的能力相对要强的多,但是又由于其入渗差,导致径流量比较大,坡面往往形成多条宽度和深度近似平行的细沟。黄绵土其颗粒较粗,坡面入渗能力较强,坡面薄层水流不足以挟带较大的土壤颗粒,所以很难发生细沟侵蚀,一旦发生侵蚀,其坡面形成的细沟宽度和深度往往比较大,密度却较小。

### 3 结 论

壤土黏粒与粉粒含量较高,入渗缓慢,产流较早,在相同条件下,坡面流速均快于黄绵土,跌坎出现时间也较早,使其更容易产生细沟。因为雨强增大产流时间提前的差值随着坡度的增大而减小,这种趋势壤土坡面尤为明显。壤土径流量要高于黄绵土,其稳定产流出现较早。黄绵土产流率在降雨开始后,出现持续升高的现象,在降雨后期才达到稳定产流。

壤土黏粒含量高、入渗差,导致径流量比较大,其土壤间粘结力较强,黄绵土其颗粒较粗,坡面入渗能力较强,坡面径流侵蚀能力较弱,在相同条件下,壤土侵蚀量要大于黄绵土,而黄绵土一旦发生侵蚀,侵蚀强度变剧烈。从细沟发育来看,壤土较黄绵土更容易产生细沟,坡面容易形成比较多近似平行的细沟,而黄绵土形成的细沟宽度和深度都高于壤土所形成的细沟。其坡面形成的细沟宽度和深度都较大。

### 参 考 文 献

[ 1 ] Fox D M, Le Bissonnais Y Q. The implications of spatial variability

ty in surface seal hydraulic resistance for infiltration in a mound and depression microtopography. *Catena*, 1998, 32(2): 101—114

- [ 2 ] 范兴科,蒋定生,赵合理.黄土高原浅层原状土抗剪强度浅析.水土保持学报,1997,3(4):69—75 Fan X K, Jiang D S, Zhao H L. Analysis on anti-shear strength of shallow original state soil in loess plateall (In Chinese). *Journal of Soil Water Conservation*, 1997, 3(4): 69—75
- [ 3 ] 陈明华,周伏建,黄炎和,等.土壤可蚀性因子的研究.水土保持研究,1995,9(1):19—24. Chen M H, Zhou F J, Huang Y H, et al. Study on the soil erodibility factor (In Chinese). *Research Soil and Water Conservation*, 1995, 9(1): 19—24
- [ 4 ] Kirkby M. Modelling the interactions between soil surface properties and water erosion. *Catena*, 2002, 46: 89—102
- [ 5 ] 李雪转,樊贵盛.土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究.农业工程学报,2006,22(3):188—190. Li X Z, Fan G S. Influence of organic matter content on infiltration capacity and parameter in field soils (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(3): 188—190
- [ 6 ] Barthes B R. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: Validation at several levels. *Catena*, 2002, 47, 133—139
- [ 7 ] Pefect E M, Chaughlin N B, Kay B D, et al. An improved equation for the soil water retention curve. *Water Resour Res*, 1996, 32: 281—287
- [ 8 ] Cerdan O, Le Bissonnais Y. Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. *Soil and Tillage Research*, 2003, 67(1): 99—108
- [ 9 ] 陈洪松,邵明安,王克林.土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响.农业工程学报,2006,22(1):44—47. Chen H S, Shao M A, Wang K L. Effects of initial water content on hillslope rainfall infiltration and soil water redistribution (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(1): 44—47
- [ 10 ] 张光辉,刘宝元,李平康.槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性.水土保持通报,2007,27(6):56—60. Zhang G H, Liu B Y, Li P K. Principles and properties of artificial trough rainfall simulator (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(6): 56—60
- [ 11 ] Igwe C A, Udegbunam O N. Soil properties influencing water-dispersible clay and silt in an Ultisol in southern Nigeria. *International Agrophysics*, 2008, 22(4): 319—325
- [ 12 ] Tishmack J K, Peterson J R, Flanagan D C. Use of coal combustion by-products to reduce soil erosion. *International Ash Utilization Symposium*, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, 2001: 63—73
- [ 13 ] Shainberg I, Warrington D, Lafflen J M. Soil dispersibility, rain properties and slope interaction in rill formation and erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(1): 278—283
- [ 14 ] 白丹,李占斌,洪小康,等.浑水入渗规律试验研究.水土保持学报,1999,5(1):59—62. Bai D, Li Z B, Hong X K, et al. Experimental research on infiltration capability of muddy water (In Chinese). *Journal of Soil Water Conservation*, 1999, 5(1):

59—62

- [15] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 不同黏粒含量土壤水分入渗能力模拟试验研究. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 71—77. Li Z, Wu P T, Feng H, et al. Effects of soil clay particle content on soil infiltration capacity by simulated experiments (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(3): 71—77
- [16] 卜崇峰, 蔡强国, 张兴昌, 等. 黄土结皮的发育机理与侵蚀效应研究. 土壤学报, 2009, 46(1): 16—23. Bu C F, Cai Q G, Zhang X C, et al. Mechanism and erosion effect of development of soil crust of loess (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(1): 16—23
- [17] 程琴娟, 蔡强国, 李家永. 表土结皮发育过程及其侵蚀响应研

究进展. 地理科学进展, 2005(4): 114—122. Cheng Q J, Cai Q G, Li J Y. Summarization on study of soil surface crust or sealing and its effects on erosion (In Chinese). Progress In Geography, 2005(4): 114—122

- [18] 赵西宁, 吴发启, 王万中. 黄土高原沟壑区坡耕地土壤入渗规律研究. 干旱区资源与环境, 2004, 18(4): 109—112. Zhao X N, Wu F Q, Wang W Z. Research on soil infiltration law of slope farmland in gully area of Loess Plateau (In Chinese). Journal of Arid Land Resources & Environment, 2004, 18(4): 109—112
- [19] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究. 土壤学报, 1998, 35(1): 95—101. Zheng F L. Study on interrill erosion and rill erosion on slope farmland of loess area (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1): 95—101

## RILL EROSIONS ON DIFFERENT SOIL SLOPES AND THEIR AFFECTING FACTORS

Chen Junjie<sup>12</sup> Sun Liying<sup>1</sup> Liu Junti<sup>3</sup> Cai Chongfa<sup>2</sup> Cai Qiangguo<sup>1†</sup>

(1 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(2 Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

(3 College of Soil And Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract** Indoor simulation of rainfall,  $1.5 \text{ mm min}^{-1}$  in intensity was conducted using deionized water on slopes of Lou soil and Cultivated loessial soil,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$  and  $25^\circ$  in slope degree, and 5 m and 10 m in slope length, separately. Changes in the slopes caused by each rainfall event were monitored with a 3D laser scanner and analyzed for impact of slope degree on rill erosion, differences between slopes of different soils in rill erosion and their affecting factors. Results show that as the Lou soil is dominated with silt and clay in texture with silt content being 64.12% and clay content 18.42%, and the Cultivated loessial soil composed mainly with silt (67.95%) and some clay (14.52%) and sand (17.53%), under the same conditions, rain water infiltration rate was lower, runoff generation earlier and runoff velocity higher in the former than in the latter, and as a result, erosion holes occurred earlier and rills formed more easily in the former. During the rainfall event, higher in volume, the runoff stabilized earlier in the former than in the latter. As the erosion rate was higher in the former, silt yield tended to increase, while it remained almost unchanged in the latter. Comparison between the slopes of two different soils in rill development shows that the rills on the Lou soil slopes were distributed in parallel, while those on of the Cultivated loessial soil slopes looked like wide tree branches.

**Key words** Soil, Runoff, Erosion, Rill development, Simulated rainfall

(责任编辑:汪叔生)