

褐土与棕壤坡耕地细沟侵蚀发生的阶段性水沙变化

吕刚^{1,2}, 贾晏泽¹, 刘雅卓³, 陈鸿³, 李海茹³, 李叶鑫¹, 汤家喜¹

(1.辽宁工程技术大学环境科学与工程学院,辽宁 阜新 123000;

2.辽宁工程技术大学水土保持生态修复研究院,辽宁 阜新 123000;3.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:为深入探究辽西低山丘陵区坡耕地土壤侵蚀机理,以该区的典型土壤类型褐土和棕壤为研究对象,采用室内人工降雨模拟试验,研究 3 种坡度(5°,10°,15°)和 3 种降雨强度(40,60,80 mm/h)下细沟侵蚀发生的阶段性水沙变化过程。结果表明:褐土与棕壤坡面侵蚀过程可划分为 3 个阶段,即细沟侵蚀之前阶段、跌坎发育阶段和细沟侵蚀快速发育阶段;细沟侵蚀之前的面蚀阶段,同一坡度条件下,褐土与棕壤随雨强的增加,坡面流速呈增大趋势,而在同一雨强条件下,坡度对流速的影响并无明显规律;细沟侵蚀阶段,当坡度一定条件下,褐土与棕壤细沟内、细沟间的流速随雨强的增加而增大,当雨强一定时,褐土与棕壤随坡度的增加细沟间流速增加;细沟侵蚀阶段流速表现为细沟内流速>坡面流速>细沟间流速;细沟侵蚀快速发育阶段 2 种土壤产生的径流量占总径流量的 80%以上,土壤侵蚀量占总侵蚀量均在 70%以上,且棕壤对总体侵蚀量的贡献更稳定,更易发生细沟侵蚀。整场降雨的侵蚀方式是面蚀向细沟侵蚀的转变,坡面一旦发生侵蚀,细沟侵蚀对坡面总侵蚀的贡献更大。

关键词:细沟侵蚀;面蚀;产流产沙;土壤侵蚀;辽西低山丘陵区

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)05-0042-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.006

Periodic Variation of Water and Sediment in Rill Erosion of Cinnamon Soil and Brown Soil Sloping Farmland

LÜ Gang^{1,2}, JIA Yanze¹, LIU Yazhuo³, CHEN Hong³, LI Hairu³, LI Yexin¹, TANG Jiayi¹

(1.College of Environmental Science & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000;

2.Institute of Soil and Water Conservation and Ecological Rehabilitation, Liaoning Technical University, Fuxin,

Liaoning 123000; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to further study soil erosion mechanism of sloping farmland in low mountain and hilly region of western Liaoning Province, we selected cinnamon soil and brown soil as research object, periodic variation of water and sediment in rill erosion was studied under three slopes (5°, 10° and 15°) and three rainfall intensities (40, 60 and 80 mm/h) by using artificial simulated rainfall system. The results showed that the erosion process of cinnamon soil and brown soil slope could be divided into three stages, which were the pre-rill erosion stage, the development of drop sill stage and the rapid development of rill erosion stage. At the surface erosion stage before rill erosion, the flow velocity of cinnamon soil and brown soil increased with the increasing of rainfall intensity under the same slope condition. However, the effect of slope on flow velocity was not obvious under the same rainfall intensity. At the rill erosion stage, the flow velocities of in and between rills of cinnamon soil and brown soil increased with the increasing of rainfall intensity under specific slope. The flow velocity between rills of cinnamon soil and brown soil increased with the increasing of slope gradient under specific rainfall intensity. At the rill erosion stage, the flow velocity followed the order of in rill > on slope > between rills. At the rapid development of rill erosion stage, the runoff of cinnamon soil and brown soil accounted for more than 80% of the total runoff, and the soil erosion accounted for more than 70% of the total erosion. The contribution of brown soil to total erosion was more stable, and rill erosion was more likely to occur. The erosion pattern of the whole rainfall was the transformation from surface erosion to rill erosion. Once slope surface erosion occurred, rill erosion contributed more to the total erosion.

收稿日期:2020-02-22

资助项目:国家自然科学基金项目(41501548)

第一作者:吕刚(1979-),男,吉林九台人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与土壤水文的的教学和研究。E-mail:lvgang2637@126.com

Keywords: rill erosion; surface erosion; runoff and sediment yield; soil erosion; low mountain and hilly region of western Liaoning Province

坡耕地是山区、丘陵区、漫岗区等区域的土地资源,同时也是该区水土流失的主要策源地,其造成的土壤侵蚀量占当地总侵蚀量的50%~60%,坡耕地土壤侵蚀一方面表现对坡面表层土壤的剥离搬运,造成可耕作的土壤大量流失;另一方面削弱土壤的生产潜能,进而造成土地退化^[1-2]。而细沟侵蚀是坡耕地土壤表土冲刷和养分流失的最主要原因,不同侵蚀阶段的演变使得降雨在坡面汇集产生的水流使其前后运动状态不同并发生转变,由之前呈面状且流动方向不稳定的运动状态转变成水流运动路径相对集中的运动状态^[3],运动状态的改变直接影响其流动速度,流速的变化可在一定程度上反映坡面侵蚀产沙的速率,对推进侵蚀过程的向前发展有重要贡献^[4]。不同类型土壤,其坡面的水沙变化可能存在着较大的差异。已有研究^[5]表明,黄绵土在降雨初期,雨滴的击打以及超渗产流所产生的薄层水流、股流相互作用,随着径流的汇集,径流侵蚀能力逐渐增强。壤土在形成细沟、初始产流时间等方面,皆早于黄绵土,且壤土产流后很快到达稳定径流^[6-9],黄潮土表面细沟数量较砂姜黑土少,但细沟的出现会使坡面发生溯源侵蚀和边壁崩塌现象,形成细沟的长度、深度都比砂姜黑土大,砂姜黑土的含沙量随时间变化呈下降趋势,黄潮土的含沙量没有明显上升下降趋势^[10]。黄土高原坡耕地上,细沟平均宽度随距分水岭距离增大而增加,细沟侵蚀强度也呈增长趋势,距分水岭某一距离后侵蚀能力减弱,细沟发育条数减少,细沟密度减少,细沟更多用于运输泥沙^[11]。

辽西低山丘陵区是辽宁省土壤侵蚀最严重的区域,已被列入国家级水土流失重点治理区。褐土和棕壤作为该地区坡耕地主要的土壤类型,其土壤侵蚀引发的土壤耕层变薄、肥力下降,作物产量低等一系列问题一直制约着当地农村经济的发展。细沟侵蚀作为该区坡耕地的主要土壤侵蚀方式,目前对细沟侵蚀发生的阶段性水沙变化研究相对较为薄弱^[12]。基于此,本文以辽西低山丘陵区的主要土壤类型褐土和棕壤为研究对象,采用室内人工模拟降雨系统分析不同坡度、不同降雨强度下细沟侵蚀发生的阶段性径流和泥沙变化,量化其对整个土壤侵蚀过程的贡献度,以期深入探究该区土壤侵蚀过程机理提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于辽宁西部农牧交错地带的生态脆弱区,由于地处内蒙古高原和辽河平原中间的坡降不稳定地段,因此该区域地形以低山丘陵为主。雨热同期

是研究区最明显的特征。年降水量的变化范围为300~500 mm,区域内由东向西,降雨量逐渐递减,自辽宁省有观察数据以来,干燥少雨的气候特征,导致该区域一直是传统的干旱易发生区^[13]。而久旱后的暴雨是导致土壤侵蚀发生的主要动力。坡耕地是该区水土流失的主要策源地,占该区总耕地面积40%以上,其中5°~15°坡耕地面积占总坡耕地面积的78.26%,15°~25°占21.56%^[14],褐土和棕壤是坡耕地的主要土壤类型,面积占55%,辽西低山丘陵区土壤侵蚀总面积占该区总面积41.6%,占全省土壤总侵蚀面积49.4%,土壤侵蚀十分严重。

2 研究方法

2.1 试验装置

采用室内人工模拟降雨系统和移动式坡度可调土槽进行试验,降雨高度为4 m,降雨均匀度多次调整,每次降雨均匀度保证在90%以上,土槽尺寸为长2 m,宽1 m,高1 m,其中装填试验土壤部分的土槽深度为0.5 m的移动式可调坡度钢制土槽,土槽底部共设有16个排水孔,排水孔孔径为4 cm。土槽前段按有出水口,用于收集试验过程中的瞬时径流泥沙量。试验参数详见文献^[12]。

2.2 试验设计

本次试验于2018年4月初进行野外取土,将降雨强度设定为40,60,80 mm/h,坡度设定为5°,10°,15°,试验土壤采用辽西低山丘陵区典型的耕作土壤褐土和棕壤,取土深度为表层土壤0—20 cm,同时土槽需填0~40 cm深的试验土样,为模拟原状土需取样测定土壤理化性质,取样深度分别为0—20,20—40 cm,通过控制土壤容重与土壤含水率来还原原状土。土壤干容重和土壤质量含水量采用烘干法,机械组成采用激光粒度仪测定,有机质为重铬酸钾加热法,每个指标重复3次。2种土壤的理化性质见表1^[12]。本研究详细的试验设计见文献^[12]。

2.3 测定指标

本次试验获取的指标主要包括坡面流速以及水沙含量。流速测量采用染色示踪法,染色剂采用红墨水,无毒且造价低,染色剂移动路径鲜明,满足试验要求。具体步骤为:1人负责在测量位置倒入染色剂,另1人用摄像设备记录染色剂通过坡面一段距离(0.5 m)、流过一条细沟及相邻细沟间一段距离所需要的时间。流速主要有:细沟发育前坡面径流流速,即坡面流流速;细沟形成后细沟内径流移动速度,即细沟内流速;相邻细沟间径流移动的速度,即细沟间

流速。由于坡上位流速较小,坡下位流速较大,因此坡面流速测量位置选择在坡中位,流速较有代表性。在细沟出现后进行流速测量时,为避免测量细沟间流速的染色剂流入细沟内,影响沟内流速测量,因此,先进行细沟内流速的测量,再测量细沟间流速。各流速

指标循环测量 3 次。形态指标主要是在每场降雨结束后,人工测量坡面细沟的长、宽、深,降雨结束后拍摄坡面形态,并做处理,便于直观明显的观察细沟分布。并将获取的数据用于计算细沟形态特征指标,为流速分析提供一定依据。

表 1 褐土与棕壤土壤理化性质

土壤类型	土壤层次	颗粒组成/%					干容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤质量 含水量/%	有机质/ %
		>0.25 mm	0.25~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.005 mm	<0.005 mm			
褐土	耕作层	3.60	38.30	31.50	2.10	24.50	1.39	11.97	1.07
	犁底层	1.30	9.94	56.70	4.20	27.84	1.46	15.28	0.64
棕壤	耕作层	2.17	36.00	35.73	3.60	22.50	1.26	15.49	1.04
	犁底层	4.20	37.92	44.75	4.32	8.90	1.53	17.06	1.36

细沟密度(D_s , m/m^2):指单位面积内细沟的总长度。

$$D_s = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{S} \quad (1)$$

式中: l_i 为坡面第*i*条细沟的沟长(m); S 为坡面面积(m^2)。

细沟平均沟深(H , cm):指坡面所有细沟深度的平均值。

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (2)$$

式中: h_i 为坡面中第*i*条细沟的沟深(cm)。

细沟平均沟宽(\bar{d} , cm):指细沟中每条细沟宽的平均值。

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (3)$$

式中: d_i 为坡面中第*i*条细沟的沟宽(cm)。

水沙指标本文主要分析径流量、含沙量等相关水沙指标。坡面开始产流后,在出水口处需要收集径流泥沙,用容积为 5 L 的小桶在出水口处每隔 2 min 取 1 次样,取样时长为 10 s 收集瞬时径流泥沙,将小桶去皮称重后,可获得接取的水沙质量,沉淀一段时间后倒去上清液,获取到的泥沙烘干后为瞬时泥沙样值,二者之差为瞬时径流量值,获取到的瞬时径流量和泥沙量根据相应的时间比例换算,可获得总的径流量与含沙量;根据重要时间点按比例换算可获得坡面各动态过程所占总体水沙比例关系。

3 结果与分析

3.1 面蚀阶段的坡面流速

在不同坡度和雨强条件下,褐土与棕壤在降雨初期坡面出现漫流状态时的坡面流速见图 1。同一坡度条件下,褐土与棕壤随雨强的增加,坡面流速呈增大趋势。而在同一雨强条件下,坡度对流速的影响并无明显规律。但受坡度和雨强影响,2 种土壤坡面流

速随坡度和雨强增加会呈小幅增加趋势,变化幅度均在 ± 0.2 m/s。在所有场次的模拟降雨中,坡面流速最小值出现在坡度为 5° 、雨强为 40 mm/h 的棕壤坡面,坡面流速为 0.192 m/s;最大值出现在坡度为 15° 、雨强为 80 mm/h 的褐土坡面,坡面流速为 0.241 m/s,推测是由于土槽在填土过程中坡面被人为填平,降雨开始至细沟侵蚀发生前,侵蚀方式以面蚀为主^[15],面蚀所产生的泥沙侵蚀量较少,加之坡面平缓,泥沙对坡面流的流动干扰作用较小,坡面流速大小主要受坡度和雨强影响,坡度愈大,重力势能愈大,雨强愈大,坡面流初始速度愈大,因此最小值与最大值出现在坡度和雨强相对应的最小值与最大值。褐土与棕壤坡面的平均流速为 0.214, 0.209 m/s,而陈俊杰等^[16]在研究黄土高原地区典型土壤塬土与黄绵土的坡面流速分别为 0.25, 0.29 m/s,与本试验存在差异,推测是由于塬土与黄绵土的土质较褐土与棕壤坡面更为疏松、绵软,且试验条件中降雨强度、坡长、坡度存在差异,设定的降雨强度为 1.5, 2 mm/min,与本试验单位统一后,降雨强度分别为 90, 120 mm/h,坡度变化范围在 $10^\circ \sim 25^\circ$,坡长分别为 5, 10 m,均大于本试验降雨强度,因此坡面流速较大。

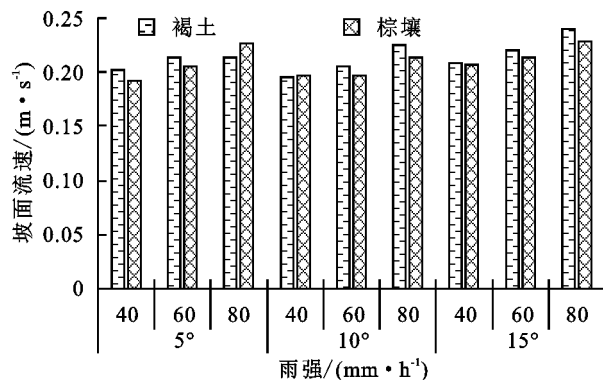


图 1 不同雨强和坡度下坡面流速

3.2 细沟侵蚀阶段流速

面蚀阶段坡面以漫流为主,而在细沟侵蚀发生后,其水流运动状态与河道径流运动规律相似,但细

沟流的水流深度较河道径流浅, 并且运动路径随坡面形态的变化而突然改变, 因此与河道径流运动规律虽然类似, 但也存在一定差异^[17]。细沟的出现, 坡面径流一部分汇入细沟内, 形成细沟流, 一部分在相邻的细沟与细沟之间的坡面流动。图 2 为细沟发育较为完整后测量的细沟内流速, 需说明坡度为 5° 条件下, 褐土在 40, 60 mm/h 条件下未形成细沟, 因此对应细沟流速指标未测量。在已形成细沟的坡面, 测量的细沟内流速均在 0.2 m/s 以上, 最小值与最大值均出现在褐土坡面, 对应的坡度和雨强分别为坡度 10°、雨强 60 mm/h 条件下数值为 0.214 m/s 以及坡度为 15°、雨强 80 mm/h 数值为 0.313 m/s。坡度和雨强对 2 种土壤细沟流的影响表现为: 当降雨强度一定时, 褐土与棕壤坡面随着坡度的增加, 细沟内流速均呈增加趋势, 坡度大, 细沟内水流势能转化为动能的能量也越大, 因此流速也变大。当坡度一定条件下, 绝大部分试验土壤细沟内流速随雨强的增加而增大。褐土的土壤颗粒 > 0.05 mm 的粒径所占比例为 41.9%, 棕壤的土壤颗粒 > 0.05 mm 的粒径所占比例为 38.17%, 表现为褐土的土壤颗粒表面粗糙度大于棕壤, 因此在较低坡度下褐土表面的大粒径土壤能够较棕壤土更好地阻碍径流流速, 当坡度与雨强逐渐增大, 大粒径土壤的自身重量更易于转化为动能, 协助径流的产生并提高径流的流速。

细沟侵蚀有别于其他侵蚀方式, 最显著的不同即随着侵蚀过程的持续, 不仅侵蚀产沙量相应提高, 坡面细沟形态的变化同样比较明显^[18]。细沟形态指标对流速的变化同样产生较大的影响, 二者存在相互反馈作用^[19]。形态指标中细沟密度随着细沟侵蚀的持续发生不断增大, 细沟无论在条数或者长度上均随侵蚀的进行不断增加, 同时细沟的宽度、深度也随着边

壁坍塌而不断变宽变深, 细沟的长、宽、深发生变化, 细沟流运动过程中横截面积不断随着细沟形态的变化而改变, 流动速度所受阻力也相应减小或增加, 并且细沟的割裂程度也会影响细沟流流动路径, 进而影响流速, 因此形态的改变会影响细沟内水流速度; 细沟内流速的变化同样也会导致细沟形态的改变, 流速的减小或增加使得水流冲刷细沟的能力变弱或增强, 进而影响细沟的长度及宽度, 流速会影响水流下切能力, 下切能力的变化会直接影响细沟的沟深, 因此, 形态指标与细沟流速关系较为密切。本试验中最能体现两者关系密切的是在坡度为 10° 的褐土、雨强为 60 mm/h 条件下, 细沟内流速小于 40, 80 mm/h 雨强条件, 说明在该坡度条件下, 雨强对细沟内流速的影响虽然起到一定作用, 但细沟形态对流速的变化发挥的作用更为显著。表 2 为褐土在坡度为 10° 条件下各雨强细沟形态指标, 发现坡度为 10° 时, 褐土 60 mm/h 雨强条件下细沟沟宽明显大于 40, 80 mm/h, 细沟沟宽对细沟流速的影响较大, 宽度的增加使得水流的能量较为分散, 进而使得细沟内流速削减^[20]; 同时 3 种雨强下细沟的沟深较浅且数值差距不大, 深度较浅的细沟内水流受到沟壁、沟底的摩擦影响, 流动阻力变大, 流速也会减小^[21], 因此表现出在 60 mm/h 雨强条件下, 流速小于 40, 80 mm/h 雨强条件。

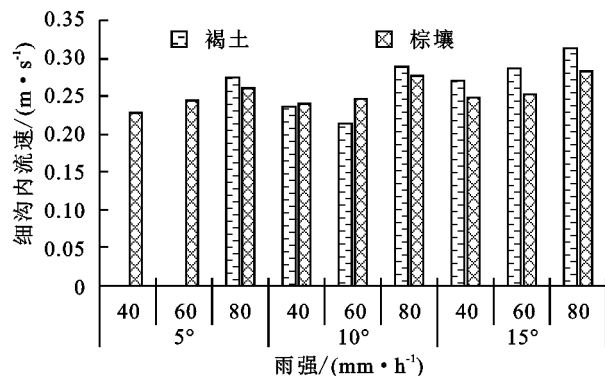


图 2 不同雨强和坡度下细沟内流速

表 2 2 种土壤细沟形态指标

坡度/ (°)	降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	褐土			棕壤		
		细沟密度/ (m · m ⁻²)	细沟 沟深/cm	细沟 沟宽/cm	细沟密度/ (m · m ⁻²)	细沟 沟深/cm	细沟 沟宽/cm
5	40	—	—	—	0.26	1.50	10.00
	60	—	—	—	2.22	3.50	7.00
	80	0.11	2.00	8.00	0.44	3.00	6.00
10	40	1.05	3.00	4.00	1.86	3.90	7.40
	60	1.87	3.50	8.00	2.52	6.00	11.75
	80	1.92	4.08	5.67	1.95	4.00	9.25
15	40	1.20	5.17	8.00	3.06	4.75	4.44
	60	1.02	3.25	6.50	0.62	6.50	24.00
	80	3.47	3.60	7.80	1.82	6.00	21.67

注: —表示未测得数据。

褐土与棕壤细沟间流速在试验设定的坡度和雨

强变化情况见图 3。褐土与棕壤的细沟间流速指标

均小于 0.2 m/s。除去褐土坡面未形成细沟的降雨场次,坡度和雨强对细沟间流速的影响表现为:当坡度一定时,随着雨强的增加,2 种土壤细沟间流速指标也随之增加,但在坡度为 5°条件下,棕壤细沟间流速在 60 mm/h 的雨强较其他雨强的流速稍小,参照表 2 中对应 5°坡度下棕壤在各雨强的细沟形态指标,60 mm/h 的细沟密度以及细沟沟深较其余 2 种雨强相比,数值最大,细沟密度大,说明细沟分布的条数较多。在试验过程中发现,相邻细沟间的宽度距离较短,导致细沟间水流的运动平台变短,使得水流不断向细沟内流入,不断汇入的水流增强了沟内水流的下切能力,导致细沟沟深较大,密度和沟深相互影响,因此出现流速并未随雨强增加而增加的趋势,说明在该坡度条件下,细沟形态指标对细沟间流速的影响较大。当雨强一定时,大部分试验土壤随坡度的增加细沟间流速增加,但褐土在雨强为 40 mm/h 条件下,坡度为 10°的流速大于坡度为 15°条件下的细沟间流速。坡度较缓的细沟间径流运动稳定性要大于坡度陡的坡面,水流汇入细沟内的量较少,同时坡度较缓条件下径流受到表层坡面的冲击力也会小于陡坡度,能量受到阻力消耗少,因此在该雨强形成细沟的条件下,缓坡度的细沟间流速要大于坡度较陡的条件。

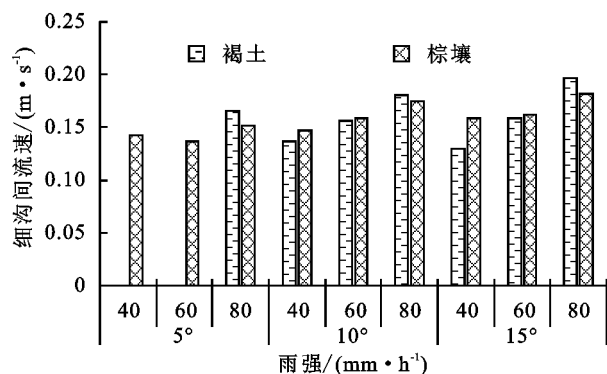


图 3 不同雨强和坡度下细沟间流速

3.3 面蚀与细沟侵蚀阶段流速

表 3 为各流速指标相互之间倍数关系,虽然褐土

在坡度为 10°、雨强为 60 mm/h 条件下,坡面流速为细沟间流速的 0.76 倍,但仅为个例,并不影响整体指标倍数关系,因此可忽略不计。坡面细沟侵蚀发生前后测定的坡面流速、细沟流速、细沟内流速三者大小关系表现为细沟内流速 > 坡面流速 > 细沟间流速。试验中发现,细沟间水流在向坡下运动过程中不断汇入邻近的细沟内,细沟内水流不断吸纳细沟间流入的水流,水流厚度不断增加,虽然与边壁、沟底接触,但能量损耗较少,并且路径相对集中,因此细沟内流速较大。能力的消耗是流速减小的重要因素^[22]。细沟间由于水流不断流入沟内,导致细沟间水流厚度变薄,随着降雨的持续进行,在细沟侵蚀过程中坡面形态不断变化,相邻细沟间坡面表层土壤也大量存在坑洼,坡面状态不稳定,这样一方面增大了薄层水流在移动过程中的阻力,同时表层的不均匀性也消耗了细沟间水流的能量,并且细沟内的变化也会反作用于相邻细沟间坡面,水流不断汇入细沟,增加了细沟流量,细沟内流量的增加会进一步加快对沟头、沟壁、沟底的侵蚀,同时流量的增大也会提高细沟流携带泥沙的能力,导致溯源侵蚀、沟壁坍塌持续发生,因此细沟的形态也会发生改变,进而影响水流运动路径,对细沟间流速造成影响,使得细沟间流速最小。在细沟未出现时,坡面流的运动状态较为稳定,受坡面地形的干扰少,因此坡面流能量不易消耗,同时由于坡面径流的分布较为均匀,能量在坡面径流的分布也较为平均,因此坡面流的流速介于二者之间。2 种土壤的细沟形态指标造成的褐土的沟内流速均值与沟间流速均值均大于棕壤的均值,因此褐土的沟内与坡面倍数比的平均值与沟内与沟间倍数比的平均值均大于棕壤的倍数比的平均值,但由于褐土耕作层的土壤颗粒 > 0.05 mm 的粒径所占比例大于棕壤所占比例,大粒径土壤占比影响土壤表面的粗糙度,褐土较棕壤更易于阻碍坡面径流流速的增加,因此褐土的坡面与沟间倍数比的平均值小于棕壤土的倍数比平均值。

表 3 各流速指标之间倍数

坡度/ (°)	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	褐土			棕壤		
		沟内/坡面	沟内/沟间	坡面/沟间	沟内/坡面	沟内/沟间	坡面/沟间
5	40	—	—	—	1.19	1.61	1.35
	60	—	—	—	1.19	1.79	1.51
	80	1.28	1.65	1.29	1.15	1.72	1.49
10	40	1.22	1.73	1.42	1.22	1.63	1.34
	60	1.37	1.04	0.76	1.27	1.55	1.23
	80	1.28	1.60	1.25	1.30	1.58	1.22
15	40	1.30	2.08	1.61	1.20	1.57	1.31
	60	1.30	1.82	1.40	1.18	1.56	1.31
	80	1.30	1.59	1.22	1.24	1.55	1.25

注: — 表示未形成细沟,因此不存在倍数关系。

3.4 不同土壤侵蚀阶段径流泥沙量对总体的贡献

本研究将褐土与棕壤坡面侵蚀过程划分为3个阶段,即细沟侵蚀之前阶段、跌坎发育阶段和细沟侵蚀快速发育阶段。根据实际观测坡面情况,所有降雨场次在形成细沟的前提下,沟道形态指标均处于细沟形态范围内,说明本试验在降雨末期,坡面仍为细沟侵蚀,未向下一侵蚀阶段发展。因此细沟快速发育所占总体的百分比为总体(100%)与前两者所占总体比例的差值。表4为3个阶段各自径流量与总径流量的百分比,可发现细沟侵蚀快速发育阶段所占比例最大,占总径流量的80%以上,对总径流量的贡献最大,沟道的形成,径流运动的横截面积越大,径流量通

过的量就越多。但在细沟发育初期也就是跌坎发育阶段,部分跌坎发育阶段产生的径流量对总体贡献小,最为明显的表现在棕壤在坡度为15°条件下,当雨强为60 mm/h径流量仅占总体的0.93%,当雨强为80 mm/h条件下数值为1.2%,由于部分坡度、雨强条件下,小跌坎发育成大跌坎所用时间较短,仅为30 s,在跌坎发育阶段,细沟发育初期,坡面形态对径流并未产生较大影响,大部分径流仍平稳流动,用时短,径流通过量较小。分析得出,随降雨历时延续,径流量在各对应阶段变化幅度不明显,虽然存在突变现象,但也是在细沟快速发育阶段,某阶段用时长,对总径流量的贡献就大,所占百分比就多。

表4 不同侵蚀阶段径流量与总径流量的关系

坡度/ (°)	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	褐土			棕壤		
		细沟侵蚀 之前/%	跌坎发育 阶段/%	细沟侵蚀快速 发育阶段/%	细沟侵蚀 之前/%	跌坎发育 阶段/%	细沟侵蚀快速 发育阶段/%
5	40	17.26	24.40	—	12.84	7.90	66.41
	60	11.23	7.21	—	7.20	3.64	89.16
	80	9.30	10.58	80.12	7.29	4.95	87.76
10	40	10.10	5.25	84.65	12.04	3.55	84.41
	60	4.84	8.37	86.79	8.05	7.92	84.03
	80	4.69	13.25	82.06	5.41	5.38	89.21
15	40	15.69	2.99	81.32	8.85	7.37	83.78
	60	8.20	1.83	89.97	5.81	0.93	93.26
	80	4.70	5.34	89.96	5.77	1.20	93.03

表5为不同侵蚀阶段产生的侵蚀量与总侵蚀量的比例关系情况,与径流量表现类型,总体侵蚀量所占比例最大的仍为细沟侵蚀快速发育阶段。褐土在形成细沟的条件下,快速发育阶段所占百分比介于76.17%~92.63%,跨度较大,而棕壤介于86.88%~95.98%,跨度较小,说明在细沟快速发育阶段棕壤对总体侵蚀量的贡献更稳定,这也在一定程度上说明棕壤更易发生细沟侵蚀,且侵蚀强度大。而褐土在细沟侵蚀之前,面蚀阶段

及向沟蚀发展阶段,部分坡面这一阶段侵蚀量约占总体的1/5,这一现象出现在雨强为40 mm/h的坡面上,雨强小致雨滴所携带的能量低,面蚀阶段发生侵蚀产沙所需能量比细沟侵蚀小得多,因此雨滴能量对面蚀阶段侵蚀产沙效果更明显,虽然部分坡面坡度大,但被剥离的泥沙量少,因此部分坡面最终未形成细沟(坡度为5°坡面),或在细沟侵蚀阶段产生的侵蚀量与其他坡面相比所占比例小(坡度为15°坡面)。

表5 不同侵蚀阶段产生的侵蚀量与总侵蚀量的关系

坡度/ (°)	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	褐土			棕壤		
		细沟侵蚀 之前/%	跌坎发育 阶段/%	细沟侵蚀快速 发育阶段/%	细沟侵蚀 之前/%	跌坎发育 阶段/%	细沟侵蚀快速 发育阶段/%
5	40	18.28	25.40	—	7.37	5.41	87.22
	60	10.90	7.73	—	5.32	2.88	91.80
	80	6.14	10.83	83.03	3.91	2.93	93.16
10	40	6.51	5.28	88.21	9.97	1.96	88.07
	60	8.03	8.01	83.96	2.39	7.81	89.80
	80	4.85	7.26	87.89	5.09	7.03	87.88
15	40	20.18	3.65	76.17	7.28	5.84	86.88
	60	9.41	2.21	88.38	4.75	0.78	94.47
	80	6.25	1.12	92.63	2.85	1.17	95.98

褐土坡面在细沟侵蚀发育初期阶段产生的侵蚀量占总体比例的平均值为7.94%,而棕壤为3.98%。

褐土的土壤颗粒>0.05 mm粒径所占比例大于棕壤的所占比例,大粒径土壤占比越大,土壤抗蚀能力越

弱^[23-24],且在细沟发育初期表现为棕壤产生的侵蚀量小于褐土。刘俊体等^[25]在对壤土与黄绵土的细沟侵蚀研究中发现,壤土在该阶段的侵蚀量占总体侵蚀量的 24.72%,而黄绵土占 48.80%,导致本次试验的 2 种土壤在细沟发育初期阶段对总体侵蚀量的贡献率与壤土、黄绵土之间存在差异的原因主要是不同土壤间机械组成存在差异。黄土高原地区的壤土与黄绵土分别为 9.47%,14.53%,与黄土高原地区相比,辽西地区表层土壤粒径大的颗粒所占比例较大,在细沟侵蚀发育初期,褐土与棕壤土壤粒径大,使得土壤抗侵蚀能力越弱,并且在不同区域中,持续地侵蚀使得褐土与棕壤和壤土、黄绵土相比更易较快地进入快速发育阶段,初期发育时间段短,导致侵蚀量较小,对总体贡献率不大。

4 结论

(1)坡度、雨强及坡面形态的改变对流速指标存在一定影响。流速指标中细沟流速最大,其次为面蚀阶段的坡面流速,细沟间流速最小。随雨强的增加坡面流速增大,坡度对坡面流速的影响规律不明显,但随着坡度雨强的增加,坡面流速均小幅度增长,坡面流速数值为 0.2 m/s 上下。

(2)细沟侵蚀发生后,造成的侵蚀量更大。在坡度为 10°褐土坡面,细沟流速变化受细沟形态影响较大,在坡度为 5°棕壤坡面,细沟间流速受细沟形态影响较大。其他试验条件下,细沟内与细沟间流速变化受坡度雨强影响较大。细沟侵蚀发生后,细沟内细沟间流速虽然大部分试验土壤随坡度雨强的影响变化较为规律,但不能忽视细沟形态变化对细沟流速指标的影响。

(3)总径流量与总侵蚀量随坡度雨强的增加而增大,且坡度较大时,褐土总径流量大于棕壤;棕壤总侵蚀量在任一坡度雨强条件下均大于褐土。细沟侵蚀快速发育阶段无论是径流量还是侵蚀量占总体的比例最大,部分坡面跌坎发育阶段占总径流量、总侵蚀量比例小。

参考文献:

[1] Karamesouti M, Detsis V, Kounalaki A. Land-use and land degradation processes affecting soil resources: Evidence from traditional Mediterranean cropland (Greece) [J]. *Catena*, 2015, 132: 45-55.

[2] López-Garrido R, Madejón E, León-Camacho M, et al. Reduced tillage as an alternative to no-tillage under Mediterranean conditions: A case study [J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 140: 40-47.

[3] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊.细沟发育与形态特征研究进展 [J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6818-6825.

[4] Zhang Q W, Lei T W, Huang X J. Quantifying the sediment transport capacity in eroding rills using a REE

tracing method [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(2): 597-601.

[5] 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]. *农业工程报*, 2019, 35(9): 114-120.

[6] 和继军,吕焯,宫辉力,等.细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究 [J]. *水利学报*, 2013, 44(4): 398-405.

[7] 吴淑芳,刘政鸿,霍云云,等.黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟 [J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 48-56.

[8] 和继军,宫辉力,李小娟,等.细沟形成对坡面产流产沙过程的影响 [J]. *水科学进展*, 2014, 25(1): 90-97.

[9] 肖海,刘刚,赵金凡,等.雨滴机械打击和消散作用对土壤团聚体的破坏特征 [J]. *土壤学报*, 2017, 54(4): 827-835.

[10] 王振龙,杜明成,姜翠玲,等.基于人工降雨试验的淮北地区产流产沙差异性研究 [J]. *水科学进展*, 2019, 30(4): 507-514.

[11] 王颢霖,焦菊英,唐柄哲,等.陕北子洲“7·26”暴雨后坡耕地细沟侵蚀及其影响因素分析 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(11): 122-130.

[12] 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.

[13] 葛岩,褚丽妹,张更元,等.辽西北地区旱情等级标准研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(8): 115-120.

[14] 刘立权,凡胜豪,宋国献,等.辽宁省坡耕地现状与防治对策 [J]. *中国水土保持*, 2015(4): 15-18.

[15] 张翔,高照良,袁雪红,等.工程堆积体坡面细沟流体力学参数特性研究 [J]. *泥沙研究*, 2016(4): 34-40.

[16] 陈俊杰,孙莉英,蔡崇法,等.不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素 [J]. *土壤学报*, 2013, 50(2): 281-288.

[17] 董旭,张宽地,杨明义,等.黄土坡面细沟流体力学特性 [J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(3): 45-51.

[18] Wang J G, Yu B, Yang W, et al. The abrasion of soil aggregate under different artificial rough beds in overland flow [J]. *Catena*, 2017, 155: 183-190.

[19] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面发育平稳的细沟流体力学特性 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(8): 1117-1124.

[20] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 110-117.

[21] 王友,王健,霍春平,等.基于 ANSYS CFX 的细沟水流切应力分析 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(9): 154-160.

[22] 张攀,姚文艺,魏鹤举,等.黄丘区坡面细沟流速分布特征试验研究 [J]. *水利学报*, 2017, 48(11): 1334-1340.

[23] 严方晨,焦菊英,曹斌挺,等.黄土丘陵沟壑区撂荒地不同演替阶段植物群落的土壤抗蚀性:以坊塌流域为例 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 64-72.

[24] 付玉,李光录,郑腾辉,等.雨滴击溅对耕作层土壤团聚体粒径分布的影响 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(3): 155-160.

[25] 刘俊体,孙莉英,张学培,等.2 次降雨条件下不同土壤细沟侵蚀分析 [J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(4): 22-29.