

褐土和棕壤坡耕地细沟侵蚀过程及侵蚀产沙特征

吕刚^{1,2}, 刘雅卓¹, 陈鸿³, 李海茹³, 傅昕阳¹, 汤家喜¹, 苏畅⁴

(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; 4. 辽宁省实验林场, 辽宁 清原 113311)

摘要: 为揭示辽西低山丘陵区主要土壤类型褐土、棕壤坡耕地细沟侵蚀产流产沙变化规律, 以期为该地区土壤侵蚀预测预报提供一定理论依据, 利用人工模拟降雨系统在坡度为 10° 和 15°、降雨强度为 40, 60, 80 mm/h 条件下分析褐土和棕壤 2 种土壤细沟侵蚀产沙过程, 结果表明: 褐土在坡度为 10° 和 15°, 径流量均随雨强的增加而增大, 在坡度为 15° 雨强为 80 mm/h 降雨过程中出现最大值, 而含沙量变化相反, 大体呈现出随着雨强的增加而降低的特征, 在坡度为 15° 时, 3 种降雨强度在降雨末期均集中在 0.05 g/mL; 棕壤在 10° 和 15° 径流量与含沙量变化无明显规律; 2 种土壤总体水沙关系表现出褐土总径流量大于棕壤, 而总侵蚀量表现为小于棕壤; 棕壤更易发生细沟侵蚀。

关键词: 土壤侵蚀; 褐土; 棕壤; 坡耕地; 辽西

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0064-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.010

Rill Erosion Process and Sediment Yield Characteristics in Cinnamon Soil and Brown Soil Slope Farmland

LÜ Gang^{1,2}, LIU Yazhuo¹, CHEN Hong³, LI Hairu³, FU Xinyang¹, TANG Jiayi¹, SU Chang⁴

(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; 4. Liaoning Experiment Forestry Centre, Qingyuan, Liaoning 113311)

Abstract: In order to reveal the variation regularity of runoff and sediment yield by rill erosion in the main soil types of cinnamon soil and brown soil sloping land in Western Liaoning, and to provide a theoretical basis for the prediction of soil erosion in this area, two soils were analyzed under the conditions with slope of 10° and 15° and rainfall intensities of 40, 60 and 80 mm/h by using artificial simulated rainfall system. The results showed that the runoff of cinnamon soil increased with the increase of rainfall intensities, and the maximum value appeared in the process of rainfall with rainfall intensity of 80 mm/h at the slope of 15°. On the contrary, the sediment content decreased with the increase of rainfall intensities. When the slope was 15°, the runoff of cinnamon soil decreased with the increase of rainfall intensities. At the end of rainfall, the three rainfall intensities were all concentrated at 0.05 g/mL; the runoff and sediment contents in brown soils at 10° and 15° had no obvious law; the relationship between the total runoff and sediment of the two soils showed that the total runoff of cinnamon soils was larger than that of brown soils, while the total erosion was smaller than the latter, indicating that brown soils were more prone to rill erosion.

Keywords: soil erosion; cinnamon soil; brown soil; slope farmland; Western Liaoning

土壤侵蚀是我国生态脆弱区所面临的最为严峻的生态考验, 亦是我国农牧交错地带核心的环境问题^[1]。坡耕地作为土壤侵蚀的主要策源地^[2], 郑粉莉^[3]在 1988 年就曾指出土壤侵蚀在坡耕地引起的危

害已经是全球关注的问题。细沟侵蚀是坡耕地较为常见且重要的一种土壤侵蚀的方式^[4], 一方面当细沟形成后, 表土会形成数量大分布不规则的水路网即细沟, 密布的细沟网络增强了径流的连通性能, 降低了

表层土壤蓄水及阻碍地表径流形成的能力^[5];另一方面,细沟的形成会促使土壤侵蚀进一步加剧,坡面细沟的形成提高了径流搬运泥沙的能力,并且以细沟侵蚀为开端,对坡面造成的土壤流失量呈突跃式增长。周佩华等^[6]提出细沟侵蚀的发生预示着土壤侵蚀方式的转变。

根据辽宁省第二次土地资源调查数据,辽西地区坡耕地面积占总耕地面积近40%^[7],由坡耕地造成的土壤侵蚀在该地区总土壤侵蚀中占有重要比例,加之细沟侵蚀是坡耕地主要的土壤侵蚀方式^[8],相关研究^[9]表明,降雨强度、坡度是影响细沟侵蚀的重要因素,降雨强度作为与降雨侵蚀力最为密切的指标对于引起水蚀特别是降雨侵蚀具有潜在的能力。郑粉莉等^[10]指出坡度对细沟侵蚀的产生具有极大的影响,后续大量研究^[11-12]也都证明降雨强度和坡度对细沟侵蚀具有重要的影响。与此同时,细沟侵蚀的研究大多集中在黄土区,对分布在辽西地区的褐土和棕壤坡面细沟侵蚀的研究处于相对薄弱阶段。基于此,本文采用室内人工模拟降雨试验分析褐土和棕壤坡耕地细沟侵蚀过程,揭示不同降雨强度、坡度下细沟侵蚀坡面产流产沙规律与特点,以期深入探究辽西地区坡耕地土壤侵蚀的发生发展机制提供理论依据。

1 研究区概况

研究区域位于辽西低山丘陵区,属农牧交错地带的生态脆弱区,是辽宁省水土流失最为严重的地区,该区域地形以山地丘陵为主,气候多风干旱,全年降水量400~600 mm,较省内其他地区偏少,年蒸发量为1600 mm,常出现久旱后暴雨的气候特点,植被稀疏。辽西地区总坡耕地为 $21.65 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占该区总耕地面积40%以上^[13]。根据第四次辽宁省土壤侵蚀遥感普查结果^[14]表明,辽西低山丘陵区总土壤侵蚀面积高达 $209.06 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占辽西地区总面积41.6%,占全省土壤总侵蚀面积49.4%。土壤类型以褐土、棕壤为主,由于土层厚度较薄且下层多为渗透性较差的岩层,导致土壤抗蚀能力降低。

2 研究方法

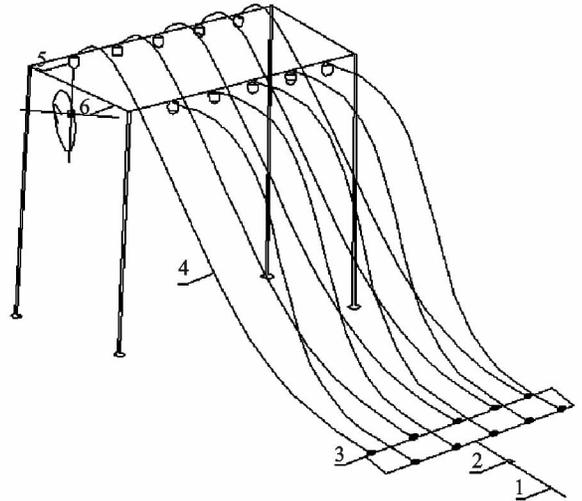
2.1 试验装置及试验土壤

本试验主要的试验装置为人工模拟降雨器及移动式坡度可调土槽。人工模拟降雨器为下喷式降雨系统,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,雨滴直径的大小采取色斑法,将色斑直径根据公式(1)换算成雨滴直径,换算结果表明模拟雨滴直径均在天然降雨0.1~6.5 mm范围内,本降雨器由于喷头压力,使得雨滴在降落初期已具备初速度,在具备初速度的下喷式喷头,当降

雨高度在2 m时,即可满足不同直径的雨滴获得2.0~2.9 m/s的终点速度,与天然降雨雨滴终速分布范围一致^[15],因此人工模拟降雨器可满足试验要求。土槽尺寸为2 m×1 m×0.5 m(长×宽×高),坡度可调,移动便捷。降雨器示意图1、土槽示意图2。

$$d = 0.356D^{0.712} \quad (1)$$

式中: d 为雨滴直径(mm); D 为色斑直径(mm)。



注:1为总进水管;2为总压力控制阀;3为单管压力控制阀;4为单喷头进水管;5为喷头;6为降雨器支架

图1 人工模拟降雨装置示意

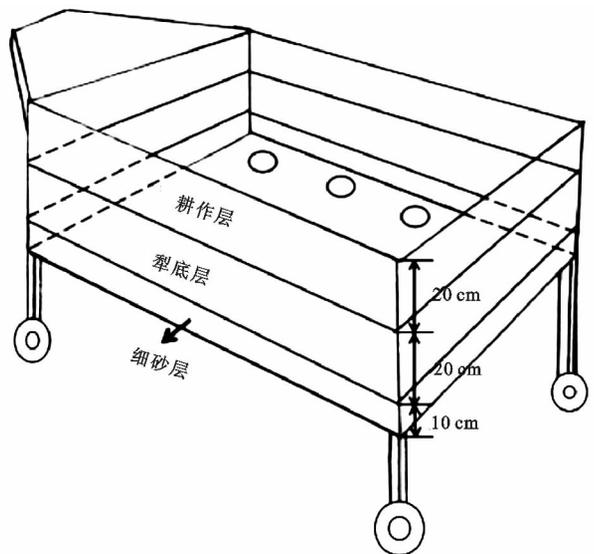


图2 试验土槽装置示意

试验采用辽西低山丘陵区典型的耕作土壤褐土和棕壤作为试验土壤,取土深度为表层土壤0~20 cm,测定土壤理化性质需取样深度分别为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。土壤容重和土壤含水量采用烘干法,机械组成采用湿筛法,有机质为重铬酸钾加热法,每个指标做3次重复。详见参考文献^[16]。土壤的理化性质见表1。

2.2 试验设计

试验前期准备工作完成后,于2018年4月初进行野外取土,试验用土采自阜新地区王府镇四天荒村

的褐土(42°1'44" N, 121°26'24" E)与大板各力格村的棕壤(41°55'50" N, 121°56'13" E),将野外取回的 2 种土样首先进行风干过 10 mm 筛。装填土槽过程中,试验土槽的底部铺设 10 cm 细砂,并用纱布将试验土壤隔开,便于水分的下渗,细沙层上总填土深度为 40 cm,每层 5 cm 装填供试土壤。根据原状土土壤容重及填土深度,计算每层需装填土量,褐土耕作层装土量控制在 556 kg,犁底层装土量为 584 kg,总填装试

验土样总量为 1 140 kg;棕壤耕作层装土量为 504 kg,犁底层装土量为 612 kg,棕壤总装土量为 1 116 kg。边壁及表面压实后,根据土壤含水量,计算出每层所需用水量,湿润土壤,褐土耕作层每层用水量控制在 16.5 kg,犁底层每层用水量控制在 22 kg,棕壤耕作层每层用水量控制在 19.5 kg,犁底层每层用水量控制在 26 kg,每层土壤装填后要将表面打毛,使土壤层之间结合充分。

表 1 褐土与棕壤表层土壤理化性质

土壤类型	土壤层次	颗粒组成/%					容重/ (g·cm ⁻³)	土壤含水量/%	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

细沟侵蚀通常是在降雨达到暴雨级别之后发生,根据试验地区多年降雨资料,结合辽宁省中小河流无资料地区设计暴雨洪水计算方法^[17],且辽西地区中度侵蚀瞬时降雨强度>30 mm/h,因此本次试验降雨强度设定为 40, 60, 80 mm/h,设计的降雨强度已达到暴雨级别降雨。由于辽西地区 5°~15°坡耕地面积占坡耕地总面积的 80.4%^[18],预试验发现 5°条件下部分坡面细沟侵蚀现象并不十分明显,因此,本试验坡度选取为 10°和 15°。由于预试验过程中观察在降雨历时为 31 min 时,坡面细沟已形成,为使细沟发育充分,每次试验控制降雨时间为 40 min,每场降雨试验重复 2 次,平均值后的数据用于分析。不同雨强条件下,保证下垫面一致,每次降雨结束后,将土铲出,在下次降雨试验前,根据耕作层、犁底层的容重、含水量进行重新填土,共进行 24 次试验。

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 取样时长为 10 s 收集瞬时径流泥沙,试验结束后,将小桶去皮称重接取的水沙质量,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,获取的数据用于分析水沙特点。

2.3 数据处理

获取的试验数据运用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 软件进行后期分析。

3 结果与分析

3.1 褐土和棕壤细沟发育过程对比

坡耕地表层土壤经过雨水的打击冲刷,由平整到细沟出现是一个动态的变化过程。本试验将细沟侵蚀的动态过程划分为产流时间、稳定出流时间、小跌坎出现时间、大跌坎出现时间、崩塌时间、细沟形成时间这 6 个

重要时间点来描述 2 种土壤细沟侵蚀的过程(表 2)。产流时间指坡面开始形成径流时记录下的时间,稳定出流时间指在出水口处稳定水流流出的时间,跌坎作为细沟侵蚀发生的重要时间点^[19],试验发现当坡面出现小跌坎时说明细沟侵蚀的初期发育已开始,当大跌坎出现时,表明初期发育成熟,开始向下一个过程坡面崩塌发展。

2 种土壤对比分析发现,在降雨初期,褐土出现坡面产流及稳定流出现的时间均提前于棕壤,以跌坎的出现作为细沟侵蚀的始端^[20],棕壤从小跌坎出现到细沟形成这一时间间隔小于褐土,在一定程度上可以说明棕壤更易形成细沟。但在坡度为 15°雨强为 80 mm/h 的条件下褐土的时间间隔小于棕壤,造成这一现象的原因可能是降雨时坡耕地表面形成的薄层水流虽然会对坡面造成一定的侵蚀作用^[21],但同时也会对坡面形成一定的保护作用,一定程度上能够阻碍雨滴对地表的直接打击,但当雨强超过一定值时,雨滴会穿透薄封闭层,打击地表,使得土壤侵蚀快速发生。

3.2 坡面细沟发育过程褐土和棕壤径流量对比分析

降雨—径流格局与侵蚀产沙过程间的关系是土壤侵蚀规律研究中的基本关系之一^[22]。坡面径流是造成坡耕地水土流失的原动力。由图 3 可知,褐土在降雨前期,由于细沟开始发育,坡面跌坎、崩塌的相继发生,使得径流量极具增加,而在坡度 15°雨强为 80 mm/h 条件下,由于降雨初期坡面迅速达到饱和,入渗能力减弱,坡面径流量变化较为稳定;同一坡度随着降雨强度的增加,径流量也相应变大,3 种降雨强度下的径流量变化较为规律。而棕壤径流量的变化稍显复杂,2 种坡度在降雨进行至 20 min 之后,由于坡面逐渐形成新的细沟,径流量变化幅度较大,特别是在坡度 15°棕壤,降雨强度为 60, 80 mm/h 的径流量较大,造

成这一原因是由于当坡度处于设定的最大值时,雨强的增大对坡面击打能力增强,造成坡面水沙运动更为活跃,水沙在坡面流的运移过程中相互携带与制约影响坡面径流量的变化,因此变化幅度范围较大。

结合表 2 和图 3 分析,表 2 中细沟形成时间不同,但图 3 显示的径流量变化幅度总体变化不明显。坡度雨强相对较大时,细沟形成时间较快,反之较慢。

表 2 细沟侵蚀过程重要时间点

土壤类型	坡度/ (°)	降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	产流 时间/s	稳定出流 时间/s	跌坎出现时间		崩塌 时间/s	细沟形成 时间/s
					小跌坎/s	大跌坎/s		
褐土	10	40	29	62	260	391	627	1870
		60	21	42	200	346	610	1168
		80	22	42	127	272	574	1060
	15	40	22	42	416	485	682	1546
		60	17	51	220	268	497	904
		80	15	55	113	133	150	265
棕壤	10	40	37	92	342	431	1003	1097
		60	34	78	244	452	787	842
		80	30	53	150	290	606	681
	15	40	31	67	269	460	684	1292
		60	27	58	188	217	246	730
		80	20	60	145	178	205	566

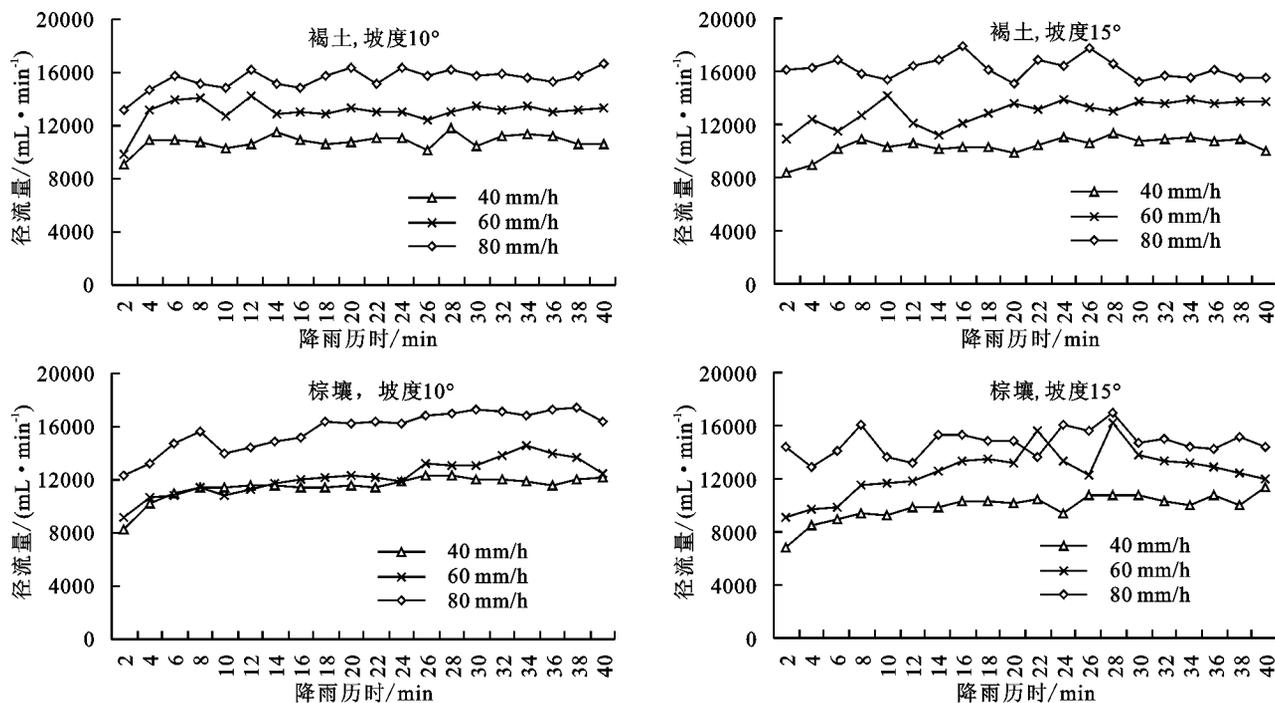


图 3 不同坡度及降雨强度径流量

3.3 坡面细沟发育过程褐土和棕壤含沙量对比分析

侵蚀产沙作为坡面土壤侵蚀过程中主要搬运物质,是衡量侵蚀能力的重要指标。由图 4 可知,随着降雨历时的延长,褐土含沙量大体呈现出减小的趋势,而棕壤变化较为复杂。褐土含沙量的最大值出现在坡面降雨的初期,随着降雨持续进行,含沙量持续

坡面入渗在任一设定的试验条件下,在初始阶段均快速达到饱和,因此稳定出流时间在不同坡度雨强基本相差不大,由于降雨的持续冲刷,坡面形成细沟且形态不断发育,细沟的形态发育使得细沟密度等形态指标在降雨过程中会发生小幅度地变化,一定程度上会影响相应时间段的径流量,但整体入渗量已饱和,因此径流量变化幅度总体不明显。

下降后又趋于平稳的变化,这一变化在坡度 15°较为明显,造成含沙量随降雨历时减小的原因是当降雨到一定程度时,雨滴对坡面表层土壤的冲击,使得松散的土粒分散且雨滴对坡面还存在压实作用,造成坡面产生结皮,同时坡面出现薄层水流,结皮与薄层水流的结合使得坡面土壤对雨强的抗击打能力增强,因而

径流携带泥沙的能力减弱,含沙量下降。棕壤含沙量变化复杂,在坡度为 10° 雨强为 40 mm/h 作用下在 12 min 左右径流含沙量开始增加, $1\ 097\text{ s}$ 出现细沟以后增加比较明显,实际上在大跌坎出现以后,随着跌坎的崩塌,径流含沙量呈现出逐渐增加的趋势,在 26 min 之后的径流含沙量超过了 80 mm/h 雨强下的含沙量,由此可见,小雨强在后期对棕壤的影响比大雨强的影响要大。 80 mm/h 雨强下的含沙量在 14 min 达到最大值后开始减小, 16 min 后的含沙量小于 60 mm/h 雨强含沙量,在 26 min 后小于 40 mm/h 雨强下的含沙量,这说明降雨强度对棕壤坡面含沙量的影响在降雨前期影响比较明显,在降雨后期大雨强对含沙量的影响不如降雨前期明显,而小雨强在降雨后期对含沙量的影响比较明显,可以假定在实地条件下,如果降雨强度小,降雨历时长,那么棕壤的土壤流失量就会增大。而棕壤在坡度为 15° 时,3 种降雨强度含沙量重叠部分较

多,说明此时雨强对含沙量的作用不明显。

在坡度和降雨条件相同的情况下,土壤颗粒组成在一定程度上会影响 2 种土壤的侵蚀产沙因而造成差异。由表 1 可知,耕作层 2 种土壤颗粒组成比例大体一致,而犁底层土壤颗粒组成存在一定差异,因此犁底层土壤颗粒组成会影响耕作层土壤抗侵蚀能力,进而影响侵蚀产沙特征。由于褐土 $<0.01\text{ mm}$ 粒径比例超过 30% ,而棕壤仅为 13% ,犁底层在降雨过程中会由干土层转变成湿土层, $<0.01\text{ mm}$ 粒径所占比例愈大,使得该土层抗分散能力增强^[23],因而褐土犁底层整体较为稳定,降雨对坡面的影响主要作用于耕作层;而棕壤粗颗粒所占比重较大,使得犁底层之间存在孔隙,犁底层不稳定,在降雨过程中,棕壤耕作层受雨水冲刷土层间结构发生变化,进而影响犁底层,而犁底层的不稳定变化同样作用于耕作层,因此褐土抗侵蚀性变化较为规律,而棕壤变化无明显规律。

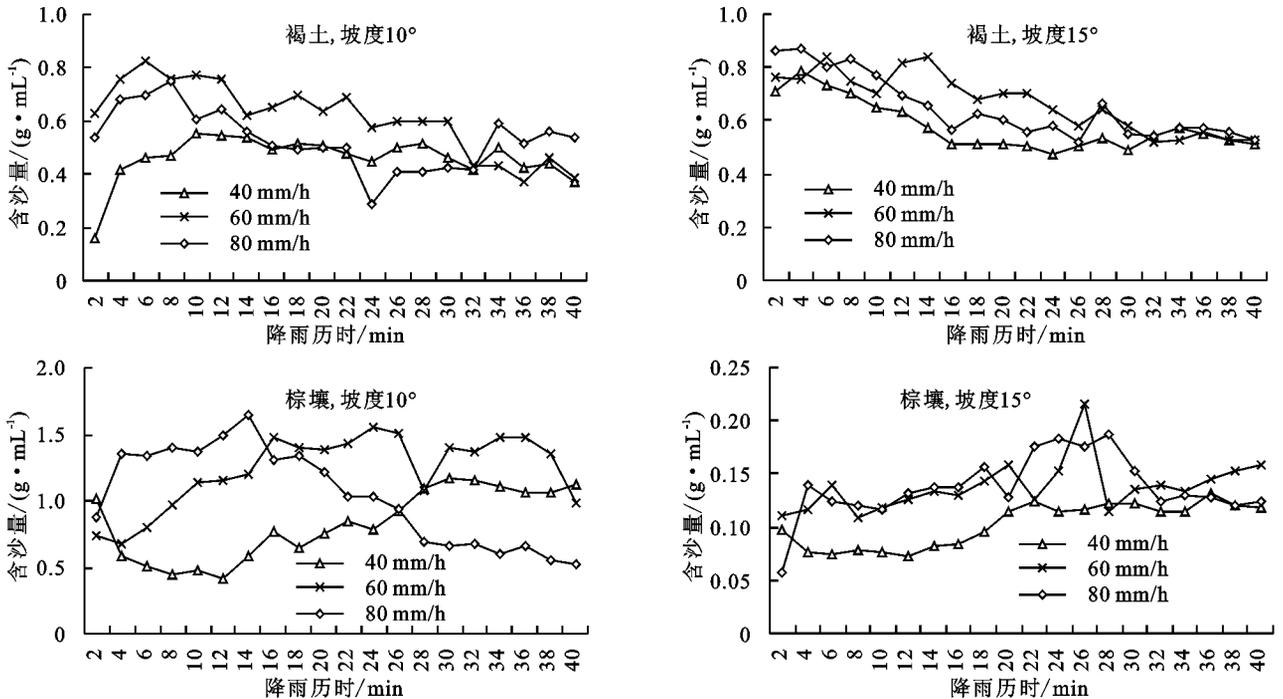


图 4 不同坡度和降雨强度下含沙量特点

3.4 坡面总径流量与总侵蚀量变化特征

由图 5 可知,褐土在任一坡度、雨强下的总径流量均比对应坡度、雨强下棕壤的总径流量大。由于褐土容重较棕壤大,土壤表层更易发生板结,因此褐土坡面更易形成径流。同时在 2 种坡度不同雨强条件下,褐土总径流量一直大于棕壤,产流时间的提前,预示着径流量相应的增大^[24],由于褐土产流时间提前于棕壤,因此在一定程度上会影响径流量。由图 6 可知,与总径流量恰好相反,褐土总侵蚀量在任一坡度、雨强下均小于对应坡度、雨强的棕壤。分析表明,棕壤更易形成细沟,细沟的形成以及沟头发育、边壁的崩塌均会影响坡面侵蚀量,因此,褐土总侵蚀量小于棕壤。

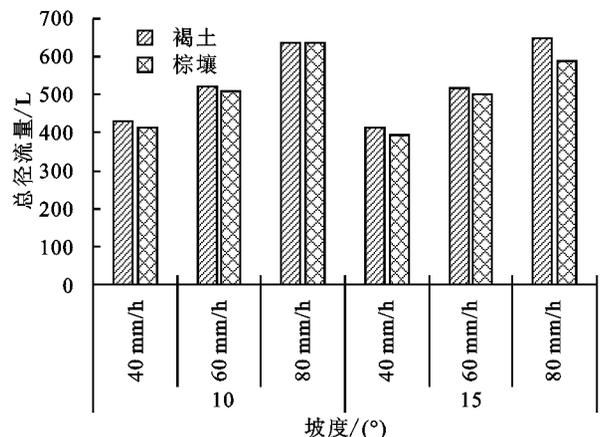


图 5 褐土和棕壤总径流量

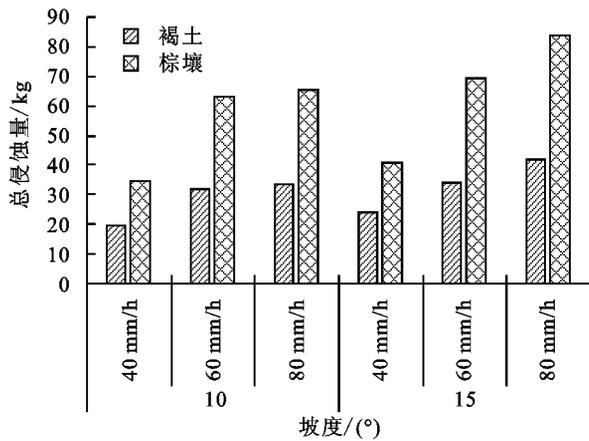


图6 褐土和棕壤总侵蚀量

4 结论

(1)从细沟侵蚀重要时间点可定性得出棕壤更易形成细沟。

(2)随着坡度雨强的增大,褐土径流量大体表现出增加的趋势,而含沙量相反,表现出减少的趋势;棕壤径流量含沙量规律不明显。

(3)同一坡度随着降雨强度的增大,褐土棕壤总径流量与总侵蚀量相应增大。在任一坡度雨强条件下,2种土壤总径流量表现出褐土大于棕壤,总侵蚀量表现出褐土小于棕壤。

参考文献:

[1] 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,1999,21(5):9-18.

[2] 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.

[3] 郑粉莉.黄土高原坡耕地的细沟侵蚀及其防治途径[J].中国科学院水土保持研究所集刊,1988(7):19-25.

[4] 覃超,何超,郑粉莉,等.黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究[J].农业工程学报,2018,34(6):160-167.

[5] 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(9):47-51.

[6] 周佩华,豆葆璋,孙清芳,等.降雨能量的试验研究初报[J].水土保持通报,1981,1(1):51-61.

[7] 李娜,纪冰祎,任媛媛.辽西坡耕地防蚀技术研究[J].水

土保持应用技术,2016(3):1-2.

[8] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等.细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展[J].地理科学进展,2010,29(11):1319-1325.

[9] 朱显谟.黄土高原的水蚀主要类型及其有关因素[J].水土保持通报,1982(3):40-44.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 郝好鑫,郭忠录,王先舟,等.降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程[J].农业工程学报,2017,33(8):134-140.

[13] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(22):159-166.

[14] 曹忠杰,蔡景平,何建明,等.辽宁省第四次土壤侵蚀遥感普查成果分析[J].水土保持应用技术,2007(5):21-22.

[15] 苏淑娜,田一梅,高波,等.人工模拟降雨装置的设计及其参数的率定[J].水土保持通报,2015,35(6):120-123.

[16] 胡慧蓉,田昆.土壤学实验指导教程[M].北京:中国林业出版社,2012.

[17] 王才,唐继业,段一贯,等.辽宁省中小河流(无资料地区)设计暴雨洪水计算方法[M].沈阳:辽宁省水文水资源勘测局,1998.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 王鹏飞,郑子成,张锡洲,等.玉米季横垄坡面细沟侵蚀特征及其影响因素[J].土壤学报,2016,53(4):869-880.

[21] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.坡面薄层水流水动力学特性试验[J].农业工程学报,2014,30(15):182-189.

[22] 张乐涛,李占斌,王杉杉.坡面径流类型对侵蚀产沙及水沙传递关系的影响[J].农业工程学报,2015,31(20):124-131.

[23] 夏青,何丙辉.土壤物理特性对水力侵蚀的影响[J].水土保持应用技术,2006(5):12-15.

[24] 程琴娟,蔡强国,廖义善.土壤表面特性与坡度对产流产沙的影响[J].水土保持学报,2007,21(2):9-11,15.