

模拟降雨条件下地表起伏对产流产沙的影响

李和谋, 梁心蓝, 赵小东, 金洪杰, 吴荣文, 陈宇曦

(四川农业大学水利水电学院, 四川 雅安 625014)

摘要: 揭示地表起伏形态对产流和产沙的影响及作用机理, 为蓄水保土、调节径流和控制径流提供参考依据。通过野外人工模拟降雨试验, 在 3 种降雨强度(60, 90, 120 mm/h)下, 分析了 5 种起伏的地表(单凸起、单凹陷、凹凸相间、凹凸相连、光滑)坡面的产流产沙情况。结果表明: (1) 在 3 种雨强下, 5 种地形的初始产流时间表现为: 光滑地表 < 单凸起地表 < 单凹陷地表 < 凹凸相间地表 < 凹凸相连地表, 且产流越早的地表其产流量和径流系数也越高; (2) 在 3 种雨强下, 5 种地表的次降雨产沙量和产沙强度由小到大依次为: 凹凸相连地表 < 凹凸相间地表 < 单凹陷地表 < 光滑地表 < 单凸起地表, 产沙强度越大的地表其产沙过程越不稳定; (3) 与光滑地表相比, 地表凸起会加剧土壤流失, 地表凹陷会减轻土壤流失, 且凸起和凹陷组合的地表其减轻土壤流失的效应更显著; (4) 降雨强度的增大会削弱不同地表起伏对产流产沙的影响。研究结论为地表起伏类型对坡面产流产沙有重要影响, 光滑地表最易产生径流, 凸起地表土壤流失最严重, 凹凸相连地表蓄水保土效益最好。

关键词: 凸起; 凹陷; 凹凸并存; 产流过程; 产沙过程

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0099-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.06.014

Effects of Surface Relief on Runoff and Sediment Yield Under Simulated Rainfall Experiments

LI Hemou, LIANG Xinlan, ZHAO Xiaodong, JIN Hongjie, WU Rongwen, CHEN Yuxi

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014)

Abstract: In order to study the effects of different surface relief forms on runoff and sediment yield during slope erosion process, five kinds of surface relief treatments (mounds, depressions, Intervals mound and depression, continuous mound and depression, smooth) were set up. The runoff and sediment yield of each treatment under three rainfall intensities (60 mm/h, 90 mm/h, 120 mm/h) by field artificial rainfall experiments were analyzed. The results showed that: (1) Under three rain intensities, the initial runoff time of the smooth surface was the shortest, while the continuous mound and depression surface was the longest. The initial runoff time of intervals mound and depression surface was close to continuous mound and depression surface, while mounds surface was just a little longer than the smooth one. The runoff time of depression surface was in the middle. The shorter the initial runoff time was, the bigger the runoff volume and runoff coefficient were. (2) Under the same rain intensity, the sediment volume and sediment yield intensity of different treatments ranked as: continuous mound and depression surface < intervals mound and depression surface < depressions surface < smooth surface < the mound surface. The greater the sediment yield intensity was, the more unstable the sediment yield process was. (3) Compared to the smooth surface, the mound aggravated soil loss, while the depression reduced soil loss. When mounds and depressions were combined, the reduction of soil loss was more significant. (4) Increasing rainfall intensities weakened the effect of different surface reliefs on runoff and sediment yield. The conclusion was that the different types of surface relief affected the runoff and sediment yield significantly. Runoff occurred most easily on smooth surface, and soil loss was most serious on mound surface, as well as the conservation of soil and water was best on continuous mound and depression surface.

Keywords: mound; depression; mound and depression; process of runoff; process of sediment production

收稿日期: 2019-04-23

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目“地表凸起与凹陷对产汇流及侵蚀的不同作用机制”(41601292); 四川省教育厅项目(15ZB0007); 四川农业大学社科研究专项重点项目(2018ZD01)

第一作者: 李和谋(1998—), 男, 本科生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 710714068@qq.com

通信作者: 梁心蓝(1983—), 女, 博士, 硕士生导师, 主要从事土壤水力侵蚀研究。E-mail: liangxinlan@sicau.edu.cn

地表微地形是小面积范围内、地表相对高程差距较小(通常在 5~25 cm)的土壤起伏状态^[1-3],可简单分为光滑、凸起和凹陷 3 种地形形态。微地形作为反映地表起伏程度和影响地表水文过程的一个重要因素,其空间分布差异通过影响土壤下渗^[4]、产流方式及汇流方式等来影响坡面径流^[5-7]。径流对地表土壤的冲刷作用使得土壤颗粒分离、转移和沉积,土壤分离速率随径流量的不同而变化。地表起伏主要由凸起和凹陷组成,凸起和凹陷由于其本身几何形态特征的差异,导致其对产流产沙的影响也不尽相同。凸起(如马铃薯花期的培土壅垄)可视为小的分水岭,凸起的大小、方向、角度等都将导致降雨的分隔和流向有所不同。凸起使束流造成迂曲,减小了径流流速和挟沙能力,从而对径流产生阻碍作用;另一方面,凸起的存在又能增加径流深和径流剪切力,从而对径流产生促进作用^[8-10]。有凹陷的地表(如鱼鳞坑),降雨一部分下渗,一部分充填凹陷形成填注量,另一部分形成地表径流;凹陷可视为小的湖泊,在径流形成过程中,坡面流和壤中流沿坡面注入凹陷,充填、滞蓄于地面凹陷^[9,11-13]。当降雨较小时,凹陷中的积水最终耗于下渗和蒸发,难以形成径流;当降雨强度较大时,凹陷蓄满以后有溢流出现,并沿坡面流动形成坡面径流^[14]。相较于凸起,凹陷会减小径流流动的阻力和径流剪切力,从而抑制径流的形成。因此,不同起伏的微地形对地表径流的影响方式不同。

土壤侵蚀过程与地表起伏密切相关。前人^[14-16]选取了地形起伏度、地表糙度、填注量等指标对微地形进行量化,并研究这些指标对径流和产沙的影响,结果表明地形起伏通过影响填注过程、入渗、产流时间、汇流路径等过程,从而影响坡面产流率和累积产沙量。Darboux 等^[17]曾对比了单凹陷和光滑坡面的填注量、初始产流时间、水通量和土壤颗粒通量等参数,发现凹陷通过蓄水和增加入渗延迟了径流的产生;径流稳定以后,与光滑坡面相比,纯凹陷坡面稍微增加了水通量,但并没有增加土壤颗粒通量。考虑到野外达到径流稳定状态并不普遍,且纯凹陷坡面增加水通量的作用也很微弱,所以他们认为地表的起伏在水土保持方面的作用仅限于延迟径流的产生,并不能减少水土的流失量。

由于 Darboux 等^[17]的试验采用单雨强,且只研究了纯凹陷地表,所以得出的结论可能是片面的。其后 Zhao 等^[10]研究了纯凹陷和纯凸起地表在 25, 50, 75, 100 mm/h 雨强下的径流和土壤的流失特征,发现与光滑坡面相比,凹陷和凸起坡面均能延迟径流的

产生;地表凸起会增加土壤流失,凹陷仅在产流达到稳定状态以前的一段时间会减少土壤流失,产流稳定以后凹陷地表的减沙效应也不显著。

前人的研究考虑到凸起和凹陷在径流和水土流失方面的差异,但忽略了当凸起和凹陷同时存在时的交互作用。为了找出凸起和凹陷单独分布与二者组合分布时对径流和水土流失的不同影响机制,本文将采用野外人工模拟降雨试验,探讨凸起与凹陷单独存在和不同组合形式下对土壤侵蚀的影响,揭示地表微地形对产流和汇流机制的影响本质,为蓄水保土、调节径流和控制径流提供借鉴和参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

本试验于 2018 年 5—10 月在四川省绵阳市观太镇段家桥村(31.46°N, 104.92°E)耕地上进行。径流泥沙样品的采集及分析工作同步进行,试验仪器为小型侧喷式野外模拟降雨器,且雨滴雾化良好。试验区土壤为四川盆地常见的紫色土,紫色土结构易恢复,毛管孔隙发育好,透水性强,养分含量高,经济效益好,是农业生产重要的土地资源。试验用地的土壤容重为 1.38 g/cm³,质地为中壤,砂砾含量 20%,粉粒含量 52%,黏粒含量 28%;土壤团聚度 7.8%,流限 45.7%,塑限 32.2%。试验区域去除地表植被并撂荒 1 年,设置 45 个规格为 2 m×1 m(长度×宽度)的试验小区,径流小区边界用铁皮密封,并高出地面 20 cm,入土深度 20 cm,以削减侧向入渗的影响。小区下端安放集流槽,以保证在降雨期间各时段的所有地面径流流入集流桶内。

1.2 试验设计与步骤

试验采用完全随机区组设计,共设 60, 90, 120 mm/h 3 种降雨强度。小区坡度为 5°。试验设置 5 种处理,按照地表起伏形态分为:(1)单凸起 M(mound),每个凸起底部直径为 10 cm,每 2 个凸起之间间距为 10 cm;(2)单凹陷 D(depression),每个凹陷底部直径为 10 cm,每 2 个凹陷之间间距为 10 cm;(3)凹凸相连 CMD(continuous mound and depression),凸起和凹陷底部直径均为 10 cm,且每个凸起(凹陷)均与凹陷(凸起)直接相连,无间距,形成连续起伏地表;(4)凹凸相间 IMD(intervals mound and depression),凸起和凹陷底部直径均为 10 cm,每个凸起(凹陷)与相邻凹陷(凸起)的间距为 10 cm;(5)对照组 CK,设置为平坦坡面,无地表起伏。在布设凸起或者凹陷时,严格以水平线为基准,每个凸起所用土样的总质量等于每个凹陷所缺失的土样的总

质量;且同时保证凸起与凹陷圆锥的底面半径、圆锥高度一致以确保每一个凸起与凹陷的体积、表面积、质量完全相同。每种处理均设 3 次重复。地表凹凸处理布设好之后,采用 20 mm/h 的降雨强度对各小区进行预降雨,至产流时结束预降雨,以保持下垫面前期土壤含水量一致。此外,小强度的预降雨会使布设凹凸处理时被分散破坏的土壤颗粒通过湿润得以固结,从而使凸起和凹陷在正式降雨过程中能保持良好的形态。为使水分自由下渗以接近自然状态下的土壤水分分布状况,预降雨结束后用塑料薄膜覆盖地表,24 h 后进行正式降雨。因此,每次降雨前各小区的土壤水分状况较为一致,0—25 cm 土层土壤前期含水量稳定在 19%左右。在 3 种不同雨强条件下,所有处理均承受 90 min 的连续降雨。记录产流时间,每隔 2 min 收集 1 次径流泥沙样。

2 结果与分析

2.1 不同地表起伏对坡面产流的影响

2.1.1 不同地表起伏对产流时间的影响 产流时间是坡面综合效应的反映,与降雨强度呈明显负相关^[18-20]。不同地表起伏的坡面初始产流时间存在显著差异。从表 1 可以看出,相同降雨强度下,CK 组产流时间最短,CMD 组产流时间最长,不同处理的产流时间规律表现为 CK 组<M 组<D 组<IMD 组<CMD 组。

表 1 不同雨强和地形的产流时间比较

雨强/ (mm·h ⁻¹)	产流时间/min				
	CK 组	D 组	M 组	CMD 组	IMD 组
60	11.62	15.81	14.90	35.23	17.63
90	7.08	8.50	7.53	21.95	9.87
120	4.35	4.58	4.50	14.38	5.83

与平整坡面相比,具备起伏度处理的地表其初始产流时间均有明显延迟,且 CMD 组延迟效果最显著。CK 组由于土壤表面光滑平坦,坡面几乎无法积蓄雨水和阻挡径流,径流更容易到达集流口,且地表面积最小,单位面积承雨量和雨水打击力最大,雨滴对坡面土壤的侵蚀最明显。M 组虽然一方面凸起的坡度会增大坡面流流速,加快径流的产生;但另一方面凸起的存在也会对径流产生阻挡作用,坡面流流经凸起时,流速会减小,产生的迂曲会延长坡面流的流程,雨滴需要更多时间才能到达集流口。且流速的减小和径流路径的延长都会增加入渗,从而进一步延缓产流时间。因此,在这 2 方面共同作用下,M 组产流时间稍大于 CK 组。与 M 组纯凸起的起伏状态不同,D 组若干凹陷的地表轮廓会大大增加地表对径流的拦蓄和填注。同时,地表蓄积的雨水在相对静止状态下必然会增加入渗时间和入渗量。因此,纯凹陷地表在降雨初的损耗远大于无凹陷地表,所以 D 组产

流时间大于 CK 组和 M 组。

IMD 和 CMD 这 2 组的地表均同时存在着凸起和凹陷,因此凸起和凹陷对产流时间的延缓作用叠加以后,在连续起伏地表条件下会进一步得到增强。例如,凸起阻挡径流以后,径流流速会显著减小,流速较小的径流在遇到凹陷时其入渗时间会大大延长,凹凸并存地表蓄满产流需要的时间就会大于纯凹陷地表。然而 IMD 组由于间隔分布的平整坡面的存在,会缓冲凸起和凹陷对径流的连续作用,缩短产流时间,且 IMD 组的凸起和凹陷分布密度远小于 CMD 组,所以 IMD 组的产流时间也远小于 CMD 组。

此外,从表 1 还可看出,雨强的增大会削弱地形对产流时间的影响,60 mm/h 雨强下地形对产流时间的影响最大,120 mm/h 雨强下地形对产流时间的影响最小。这与张会茹等^[21]在不同降雨强度下对红土壤的侵蚀影响结论一致,雨强越小,不同地形下初始产流时间差异越大,雨强越大,不同地形下初始产流时间差异越小。

2.1.2 不同地表起伏对产流过程的影响 3 种雨强下不同处理的产流过程线分别见图 1a~图 1c。在降雨强度相同时,各处理的产流过程均呈现出随降雨历时增加产流量缓慢而持续增长的规律,并在一定时间后达到一个相对稳定状态,直至降雨结束。随降雨历时的增加,各处理产流量之间的差异逐渐减小。

由图 1 可知,同种雨强下,各处理到达稳定产流状态的所需的时间从小到大依次为:M 组<CK 组<D 组<IMD 组<CMD 组。M 组率先到达稳定产流状态的原因是凸起的存在增加了地表面积,虽然单位面积承雨量减小,入渗率降低,但是整个坡面的雨水入渗量增加,土壤含水量增长最快。CK 组地表平整,径流更易形成和流动,坡面流流速高于 M 组,径流在坡面流动的时间短,耗于土壤的入渗量也较低,土壤含水量增加较慢,因此 CK 组到达稳定产流状态的时间大于 M 组。D 组地表凹陷蓄水存在的积水压力使雨水入渗到更深的土壤,入渗的增加必然延缓径流到达稳定状态所需的时间。CMD 组连续存在的凹凸起伏使得凸起对径流的阻碍延缓和凹陷对径流的拦截蓄积作用叠加,从而显著增加入渗,削弱径流,因此最晚达到稳定产流状态。而 IMD 组由于凸起和凹陷呈间隔分布,因此二者对径流的阻碍和削弱作用在间隔处的平整坡面部分被截断,平整坡面的存在使得径流可以间断地自由发育,不像 CMD 组连续不断地受到凸起和凹陷的影响。因此 IMD 组先于 CMD 组达到稳定产流状态。

当雨强逐渐增大时,各处理产流过程线之间的差距

在逐渐缩小。可见,随着雨强的增大,降雨强度对产流的作用占主导地位,削弱了地形对产流过程的影响。

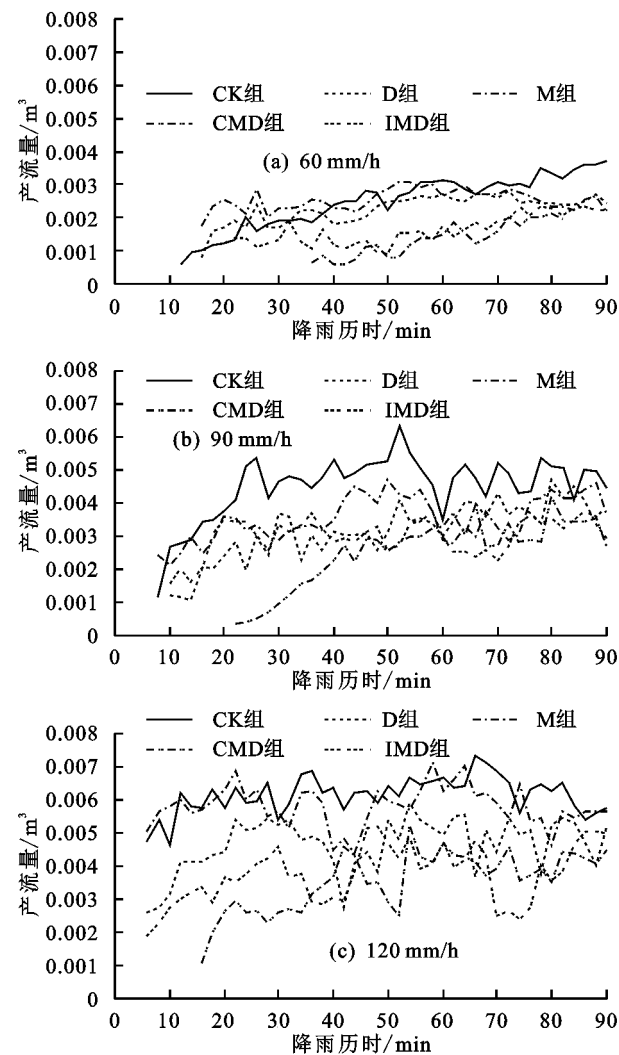


图1 不同雨强和地形的产流过程

2.1.3 总产流量及径流系数 同种雨强下,各处理的产流量和径流系数 α 均呈现出CK组>M组>D组>IMD组>CMD组的规律(表2)。且CMD的径流系数远小于其他4种处理。在60 mm/h雨强下,CK、M、D、IMD组的径流系数分别是CMD组的2.93,2.85,2.52,1.76倍;在90 mm/h雨强下,CK、M、D、IMD组的径流系数分别是CMD组的2.13,1.66,1.44,1.39倍;在120 mm/h雨强下,CK、M、D、IMD组的径流系数分别是CMD组的1.96,1.85,1.48,1.20倍。径流系数是说明小区内降水量转化为径流量的比例,能综合反映小区的地形起伏对降水—径流关系的影响。

CK组由于地形平整,地表对坡面流既无阻挡,又无拦蓄,径流损失较小,所以其产流量和径流系数均最大。M组的地表起伏造成束流的迂曲度和蜿蜒度增大,使径流流速减缓,从而在一定程度上增加了入渗,减小了径流量。因此M组径流量和径流系数

小于CK组。与M组的纯凸起不同,D组的纯凹陷均匀分布在坡面,大量拦截蓄积径流,降雨损失于填洼的量远大于CK组和M组。因此其产流量和径流系数小于M组。

表2 不同雨强和地形的总产流量和径流系数比较

雨强/ (mm·h ⁻¹)	处理组	总产 流量/m ³	径流 系数 α
60	CK	0.099	0.28
	D	0.085	0.24
	M	0.096	0.27
	IMD	0.059	0.17
	CMD	0.034	0.09
90	CK	0.190	0.35
	D	0.128	0.24
	M	0.148	0.27
	IMD	0.089	0.23
	CMD	0.124	0.16
120	CK	0.264	0.37
	D	0.200	0.28
	M	0.250	0.35
	IMD	0.135	0.22
	CMD	0.162	0.19

对CMD组而言,连续的凹凸起伏,使凹陷的蓄水、拦截径流、增加入渗作用和凸起的阻碍径流、延长径流路径等作用叠加,显著降低降水转化为径流的比例,成为各处理中产流量及径流系数最小的一组。而IMD组由于凸起和凹陷并不连续存在,中间间隔的平整坡面会削弱连续起伏地表对径流的拦蓄作用,因此,其产流量及径流系数介于CMD组和另3种单纯起伏坡面处理之间。

2.2 不同地表起伏对坡面产沙的影响

2.2.1 不同地表起伏对产沙过程的影响 60,90,120 mm/h雨强下,不同处理的产沙过程分别见图2a~图2c。

从图2可以看出,各处理在产沙过程中均有突变发生。产沙量的突增是由于土粒在径流长时间的冲刷和剪切力作用下发生的突然崩解,这种突发的土壤颗粒崩解必然导致1次产沙量峰值的出现。

60 mm/h雨强下,从产沙量的大小来讲,CK组和M组数值接近,且显著大于IMD和CMD组。D组在产流初期的产沙量接近CK组和M组,产流后期的产沙量又接近于IMD组和CMD组。

CK组从产流开始到第66 min共出现3次峰值较大的突增和4次峰值较小的突增,在66 min以后又有3次峰值较小的突增直至降雨结束。M组在降雨第58 min以前共有5次峰值不大的突增,在第58 min以后趋于稳定,仅在第74,86 min有2次微小的突增。D组在降雨的前30 min出现3次突增,之后便趋于稳定,直到第82 min又出现1次小的产沙量峰值。IMD组在产流46 min以前仅有2次峰值不大的突增,46 min后其产沙量也趋于稳定,且峰值显

著小于D组。CMD组从产流开始产沙量就比较稳定,直到降雨的第80,86 min开始出现微小的突增,且峰值为各处理中最小。

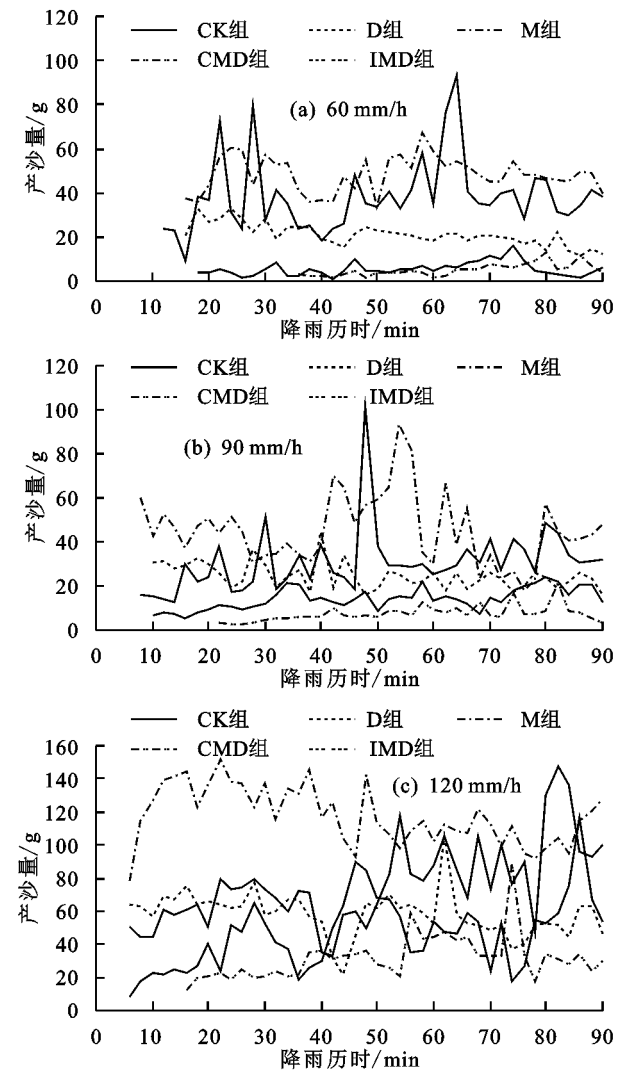


图2 不同雨强和地形产沙量的变化

从以上结果可知,在60 mm/h雨强下,地表起伏越剧烈,平整坡面所占面积越小,产沙量的突增次数越少,产沙量峰值越小,且产生突增的时间越延后。证明凸起和凹陷连续的存在的坡面其减沙效益最显著。CK组的产沙量过程变化最为剧烈。

90 mm/h雨强下,CK组、M组、D组、IMD组和CMD组的产沙量过程变化均较60 mm/h雨强下剧烈,表现在突增次数均有所增多,峰值均有所增大,且各处理在产沙量数值之间的差异减弱。

在120 mm/h雨强下,M组的产沙量在绝大部分时间都超越CK组,跃居第一。可见,在大雨强条件下,凸起较易被强大的雨滴打击力和径流冲刷、剪切力分散,形成大量的泥沙源,从而增大产沙量。

各雨强下均有CK组和M组的产沙过程变化最剧烈,D组次之,IMD组次之,CMD组的产沙过程最稳定。可见,地表的凹凸起伏越连续,其拦蓄泥沙的作用越强;无起伏的平坦地表几乎无拦蓄泥沙作用,

纯凸起的地表其拦蓄泥沙作用最弱。

2.2.2 次降雨产沙量及产沙强度 表3为各处理在3种雨强下的次降雨产沙量和产沙强度。由表3可知,相同雨强下不同处理的次降雨产沙量和产沙强度存在显著差异,产沙量和产沙强度均呈现出M组>CK组>D组>IMD组>CMD组的规律,且CMD组的产沙强度远小于其他4种处理。在60 mm/h雨强下,CK、M、D、IMD组的产沙强度分别是CMD组的10.95,5.69,13.10,1.41倍;在90 mm/h雨强下,CK、M、D、IMD组的产沙强度分别是CMD组的4.90,3.84,7.26,2.21倍;在120 mm/h雨强下,CK、M、D、IMD组的产沙强度分别是CMD组的2.72,2.07,4.20,1.65倍。

表3 不同雨强和地形的次降雨产沙量与产沙强度比较

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	处理组	次降雨 产沙量/kg	产沙强度/ (g·min ⁻¹ ·m ⁻²)
60	CK	0.77	4.27
	D	0.40	2.22
	M	0.92	5.11
	IMD	0.10	0.55
	CMD	0.07	0.39
90	CK	1.29	7.16
	D	1.01	5.60
	M	1.91	10.60
	IMD	0.58	3.23
	CMD	0.26	1.46
120	CK	3.29	18.26
	D	2.51	13.92
	M	5.07	28.15
	IMD	1.99	11.04
	CMD	1.21	6.71

从表3还可看出,各处理对产沙的影响与对产流的影响有所不同,尤其是M组。3种雨强下,M组的次降雨产沙量均最大:一是由于凸起的土壤颗粒相对位置较高,在雨滴打击力和径流剪切力的作用下,崩解后更容易在重力作用下向下运移,从而提供了丰富的泥沙源;二是凸起的存在使径流集中汇合在凸起间的地表,集中后的径流其单宽流量和流速均大幅度增加,显著增加径流的挟沙能力。此外,凸起的存在会对径流产生阻挡,使径流流速减小并发生转向径流的一部分动能被迫转化为压强势能。转向且压强势能增大的径流会加剧对凸起表面土壤颗粒的掏蚀,在超压力及横向剪切力的作用下,径流的挟沙能力反而会增加。因此,泥沙源的增加和挟沙能力的增大必然导致M组的次降雨产沙量大于其他各处理。而平整坡面缺乏这一机制,凹陷的存在又会拦蓄泥沙,所以其他4种处理的产沙量均小于M组。D组由于凹陷对泥沙的拦截和沉积作用会显著降低次降雨产沙量和产沙强度。

CMD组和IMD组叠加了凸起对坡面流的阻碍作用和凹陷对坡面流的拦蓄作用:第一,凸起增加了坡面流的阻力系数,阻力系数越大,水流克服阻力所消耗的

能量越多,则水流用于侵蚀和泥沙输移的能量越小,土壤侵蚀就越微弱^[22-23]。第二,流速小的坡面流在凹陷处的蓄积量会大于流速大的坡面流。凹凸相间的地形形成的径流相互削减,汇流作用减弱,从而使径流剥蚀土壤能力减小。第三,凸起和凹陷同时存在时,二者的相互作用大大降低了坡面流的流量,增加了土壤入渗,从而导致坡面的次降雨产沙量大幅减少。CMD 组连续的凹凸相间使二者的交互作用得到了更有效的发挥,因此其次降雨产沙量和产沙强度均低于 IMD 组。

3 结论

(1)在 3 种雨强下,与光滑地形相比,无论是凸起和凹陷单独存在还是凸起凹陷组合存在均会延迟地表初始产流时间,具体表现为 $T_{光滑} < T_{凸起} < T_{凹陷} < T_{凹凸相间} < T_{凹凸相连}$ 。地表凸起和凹陷均会抑制坡面产流,而二者并存的减流效果大于凸起或凹陷单独存在时的减流效果,其中凹凸相连地形的减流效果最明显。

(2)在 3 种雨强下,平整坡面和纯凸起坡面的产沙过程变化最剧烈,产沙量最大;纯凹陷坡面的产沙过程波动较明显,产沙量较大;凹凸相间坡面的产沙过程较为稳定,产沙量较小;而凹凸相连坡面的产沙过程最稳定,产沙量最小。

(3)与光滑地形相比,地表凸起会加剧土壤流失,地表凹陷会减轻土壤流失。然而这 2 种机制组合时呈现为减轻土壤流失,凸起的阻碍径流、延长径流路径的作用和凹陷的蓄水、拦截径流、增加入渗作用叠加,其减轻水土流失的作用会得到显著提升,从而大大减少了土壤侵蚀量。凸起和凹陷分布越密集,这种交互作用产生的减轻侵蚀的效果越强。

(4)雨强会削弱地形对产流产沙过程的影响,随雨强增大,各处理之间在产流产沙方面的差异会逐渐缩小。

参考文献:

[1] Zheng Z C, He S Q, Wu F Q. Changes of soil surface roughness under water erosion process[J].Hydrological Processes, 2014,28(12):3919-3929.

[2] 张青峰,王健,赵龙山,等.基于 M-DEM 黄土人工锄耕坡面微地形特征研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(9):149-153.

[3] 郑子成,秦凤,李廷轩.不同坡度下紫色土地表微地形变化及其对土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2015,31(8):168-175.

[4] Morbidelli R, Saltalippi C, Flammini A, et al. Infiltration on sloping surfaces: Laboratory experimental evidence and implications for infiltration modeling[J].Journal of Hydrology,2015,523:79-85.

[5] Rai R K, Upadhyay A, Singh V P. Effect of variable roughness on runoff[J].Journal of Hydrology,2010,382(1):115-127.

[6] Vermang J, Marco A, Da S, et al. Characterization of soil surface roughness effects on runoff and soil erosion rates under simulated rainfall[J].Soilence Society of America Journal,2010,79(3):903-916.

[7] 罗键,尹忠,郑子成,等.不同降雨条件下紫色土横垄坡面地表微地形变化特征[J].中国农业科学,2016,49(16):3162-3173.

[8] 梁心蓝.水蚀过程中地表糙度变化及侵蚀响应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.

[9] Fox D M, Le Bissonnais Y, Quétin P. The implications of spatial variability in surface seal hydraulic resistance for infiltration in a mound and depression microtopography[J].Catena,1998,32(2):101-114.

[10] Zhao L S, Huang C H, Wu F Q. Effect of microrelief on water erosion and their changes during rainfall[J].Earth Surface Processes and Landforms,2016,41(5):579-586.

[11] Fox D M, Le Bissonnais Y, Bruand A. The effect of ponding depth on infiltration in a crusted surface depression[J].Catena,1998,32(2):87-100.

[12] Darboux F, Davy P, Gascuel-Oudou C, et al. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments[J].Catena,2002,46(2):125-139.

[13] 郑子成,何淑勤,吴发启.降雨条件下地表糙度对片蚀的影响及其变化[J].农业工程学报,2010,26(增刊 1):139-145.

[14] 王林华,汪亚峰,王健,等.地表粗糙度对黄土坡面产流机制的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):120-128.

[15] 唐辉,李占斌,李鹏,等.模拟降雨下坡面微地形量化及其与产流产沙的关系[J].农业工程学报,2015,31(24):127-133.

[16] 郑子成,吴发启,何淑勤,等.地表糙度对径流和产沙影响的室内试验研究[J].农业工程学报,2007,23(10):19-24.

[17] Darboux F, Huang C. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers? [J].Soil Science Society of America Journal,2005,69(3):748.

[18] 吴发启,赵西宁,余雕.坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J].水土保持通报,2003,23(1):16-18.

[19] 张梦,李冬杰,周玥.雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):85-90.

[20] 张佳琪,王红,张瑞芳,等.雨强对片麻岩坡面径流养分流失规律的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):42-45.

[21] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.

[22] 李桂芳.典型黑土区坡面土壤侵蚀影响因素与动力学机理研究[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.

[23] 肖培青,郑粉莉,姚文艺.坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征研究[J].水科学进展,2009,20(2):236-240.