

坡耕地地表起伏对坡面漫流的影响

李志刚，梁心蓝，黄洪粮，李和谋，赵小东

(四川农业大学水利水电学院,四川 雅安 625014)

摘要：为揭示微尺度条件下地表起伏对坡面漫流的影响,通过野外人工模拟降雨试验,在相同降雨历时下,分析了 60,90,120 mm/h 雨强下单凸起、单凹陷 2 种单式起伏和凹凸相连、凹凸相间 2 种复式起伏以及对照组 5 种微地形对坡面漫流的影响。结果表明:(1)3 种雨强下,与光滑组相比,凸起、凹陷以及凹凸组合均会延迟地表初始产流时间,具体表现为对照组<凸起组<凹陷组<凹凸相间组<凹凸相连组的趋势;(2)凸起和凹陷的存在均会减小坡面漫流的平均流速,其中凹凸相连坡面平均流速最小;(3)3 种雨强下,5 种微地形的坡面漫流汇水形态共有 3 种(树枝状、平行状和羽毛状),其中对照组和凹凸相间组汇水形态均为树枝状;凸起组和凹陷组汇水形态均为羽毛状和树枝状,其中凸起组以羽毛状为主,凹陷组以树枝状为主;凹凸相连组汇水形态以平行状为主,兼有另外 2 种;(4)3 种雨强下,5 种微地形的汇流密度与径流频度呈现相同的变化规律,即光滑组和凸起组随着降雨强度增大其汇流密度与径流频度均先减小后增大,凹陷组及凹凸组合组均随雨强增大而增加,且 5 种微地形的汇流密度与径流频度在 90 mm/h 雨强下的差异性最小。该研究结果揭示了不同起伏类型对坡耕地坡面漫流的影响,有助于进一步深入研究土壤侵蚀机理。

关键词：凸起；凹陷；凹凸组合；产流过程；坡面漫流

中图分类号：S157.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2020)02-0071-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2020.02.011

Effect of Surface Land Fluctuation on Overland Flow in Sloping Farmland

LI Zhigang, LIANG Xinlan, HUANG Hongliang, LI Hemou, ZHAO Xiaodong

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

Abstract: In order to reveal the effect of surface land fluctuation on the overland flow under the micro-scale conditions, through the field artificial rainfall simulation experiment, the influence of five micro topography types on the overland flow were analyzed under 60, 90 and 120 mm/h rainfall intensity for 90 min. The five micro topography types were smooth, single mound, single depression, intervals mound and depression, continuous mound and depression. The results showed that: (1) Compared with the smooth group, the single mound, single depression and mixed fluctuation mode all delayed the initial flow generation time, and the time followed the order of smooth group<single mound group<single depression group<intervals mound and depression group<continuous mound and depression group. (2) The existence of mounds and depressions reduced the average flow velocity, among which the average flow velocity of continuous mound and depression group was the smallest. (3) Under the three kinds of rain intensity, there were three kinds of catchment form of overland flow on slope (branch shape, parallel shape and feathery shape) in five kinds of microtopography, among which catchment forms of the smooth group and the intervals mound and depression group were both branch, the catchment forms of the single mound group and the single depression group were feathery and branch, while it was mainly feathery shape in single mound group and branch in single depression group. The catchment forms of the continuous mound and depression group were mainly parallel shape. (4) Under the three kinds of rainfall intensity, the confluence density and runoff frequency showed the same change rule, which was the confluence density and runoff frequency of smooth group and single mound group decreased at first, and then increased with the increasing of rainfall intensity, meanwhile, the confluence density and runoff frequency of single depression group and combination of mound sand

收稿日期:2019-09-12
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:李志刚(1992—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:541191278@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

depressions groups increased with the increasing of rainfall intensity. The differences in the confluence density and the runoff frequency among the five microtopography were the smallest under the rainfall intensity of 90 mm/h. The results of this study revealed the influence of different surface fluctuation types on the overland flow of sloping farmland, which was helpful to further study the mechanism of soil erosion.

Keywords: mound; depression; combination of mound and depression; runoff generation process; overland flow on slope

微地形是指面积较小、地表相对高程变化不大、起伏程度不超过 5~25 cm 的地表起伏状况^[1-3]。坡耕地的土壤表面一般具有凸起、凹陷和光滑 3 种不同的起伏形态。这 3 种不同的地表起伏通过影响土壤下渗速率、分水线形态和走向进而影响产流机制和汇水过程。由于凸起和凹陷自身物理结构特征的差异,导致二者对产流和汇水过程的影响有所不同。凸起的微坡向和微坡度不同会导致净雨的流向和汇水路径产生差异;同时凸起的存在使坡面流产生迂曲,改变汇水的方向和路径,从而影响整个汇水过程。凹陷则会拦截净雨,增加下渗,在一定程度上阻断径流,延缓产流时间及汇水过程^[4-6]。由此可知,凸起的分流作用和凹陷的汇流作用对径流的产生及发育过程的影响完全不同。因此,明确凸起和凹陷对地表产流与汇水过程的不同作用,有利于进一步揭示地表起伏对径流及土壤侵蚀的作用机理。

微地形是土壤侵蚀和人类活动共同作用的结果^[7-8]。在土壤侵蚀过程中,微地形随着溅蚀、片蚀和沟蚀不同土壤侵蚀阶段的演化而发生变化。在溅蚀阶段,土壤颗粒在雨滴的击溅作用下发生分离、跃移,溅起的土壤颗粒发生位移,并在凹陷处沉积或重新分配到地表,形成较小凸起改变微地形^[9-10];随着降雨持续进行,地表径流一旦形成,侵蚀则以片蚀为主,此时薄层水流会剥蚀、搬运和堆积泥沙,降低凸起高程,增大凹陷处高程,从而改变地表微地形^[11];随着径流不断下切,土壤表面遭受破坏和运移作用形成细小沟道,此时以沟蚀为主,径流引起细沟不断下切与侧蚀,增大细沟深度与宽度,改变地表轮廓线的起伏度^[12-13]。此外,在叠加了人类耕作活动的影响之后,微地形在不同的土壤侵蚀阶段具有高度的动态性与随机性^[14]。

在探究地表起伏与坡面漫流关系的过程中,唐辉等^[14]研究了微坡度、地形起伏度、地表切割度、洼地蓄积量以及地表糙度 5 个地形因子对坡面产流产沙的影响,结果表明这 5 种地形因子之间具有显著的相关性,且各因子均与产流率和累积产沙量之间存在着良好的线性关系;贾腾斌^[15]采用 M—DEM 和高程条带法对地表的微地形特征进行提取和分析,得出降雨事件、坡度和耕作措施均对坡耕地地表起伏产生影响。其中耕作措施作为主要因子,直接影响地表起伏的

变化;降雨和坡度作为次要因子,通过影响产流及汇水过程间接引起微地形的变化。宋向阳^[16]研究了人工锄耕、人工掏挖、等高耕作以及直型坡 4 种耕作方式对坡面漫流的影响,提出微地形起伏较大的人工掏挖和人工锄耕等措施,其坡面汇水网络明显比对照组直型坡稀疏,说明地表凸起和凹陷能够显著影响坡面漫流过程。秦凤^[17]也选用人工锄耕、人工掏挖、等高耕作以及对照直型坡 4 种耕作措施,分析了变雨强降雨过程中径流路径的演变特征。研究表明各措施均呈现出坡度越大,坡面汇水网络的密集程度越强的规律。

前人对地形起伏与坡面漫流关系的研究一直建立在凸起和凹陷共存的基础上。然而,凸起的分流作用和凹陷的汇水作用有其单独的作用机制,二者对坡面漫流过程的影响不同;此外,二者共存时其交互作用会削弱彼此独立时对漫流过程不同趋势的影响。因此,将凸起和凹陷分开单独研究其对坡面漫流过程的影响则显得非常必要。

综上所述,本文基于人工模拟降雨和近景摄影测量技术,通过对比凹陷、凸起单独存在以及凹凸组合同时存在时分别对产流及汇水过程的影响,以期深入了解微地形对坡面产流及汇水过程的作用机制,进一步完善地表起伏对坡面漫流过程的影响原理,为进一步提高坡耕地蓄水保土效应提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

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)某一裸露耕地上进行。降雨设备为便携式侧喷野外模拟降雨器,降雨高度 6 m,两侧同时对喷以提高降雨均匀度($\geq 85\%$ 以上)。试验区域土壤为石灰性紫色土亚类黄红紫泥土属,土壤母质风化程度低,盐基含量高,含钙丰富,有机质含量低,土壤呈微碱性。土壤容重为 1.38 g/cm^3 ,有较好的透水性,其粒径组成为黏粒($<0.002 \text{ mm}$)28%,粉粒($0.002\sim0.05 \text{ mm}$)52%,沙粒($0.005\sim2 \text{ mm}$)20%。试验用地为撂荒 1 年以上的裸露耕地,共设置 45 个试验小区,小区尺寸为 $2 \text{ m}\times 1 \text{ m}$ 。用 40 cm 宽的铁皮分隔小区边界,铁皮高出地面 20 cm,埋深 20 cm。小区下方安置集流槽,用于收集降雨期间产流产沙试样。

1.2 试验设计与步骤

试验坡度设置为 5°,共设 60,90,120 mm/h 3 种降雨强度,采用完全随机区组设计。试验共布设 5 种微地形措施:(1)对照组 CK,设置为平坦坡面,无地表起伏;(2)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;(3)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;(4)凹凸相间 IMD(Intervals Mound and Depression),凸起和凹陷底部直径均为 10 cm,每一凸起(凹陷)与相邻凹陷(凸起)的间距为 10 cm;(5)凹凸相连 CMD (Continuous Mound and Depression),凸起/凹陷底部直径均为 10 cm(图 1)。每个处理重复 3 次,共计 45 场降雨。降雨历时 90

min,产流后每隔 2 min 收集 1 次径流泥沙样。

降雨前后分别采用近景摄影测量测定地表微地形,摄影器材为佳能 EOS—750D 单反相机(像素 1210 万)。本次试验布设小区的铁皮具有刻度,因此每次拍摄时,从小区上坡至下坡每间隔 10 cm 进行拍摄,拍摄高度采用三脚架进行控制,保证每次镜头离地垂直高度为 1.5 m。每个径流小区共拍摄 30 张照片(照片重合度 80%以上)。

试验数据采用 SPSS 22.0 和 Excel 软件进行数据统计分析,试验照片导入 Agisoft Photoscan 1.2.1 中,进行 3D 建模(3D 模型见图 2),然后配合地面控制点生成高程点云数据,再输出 DEM 模型,最后将 DEM 模型导入 ArcGIS 10.2 中提取坡面汇水路径。

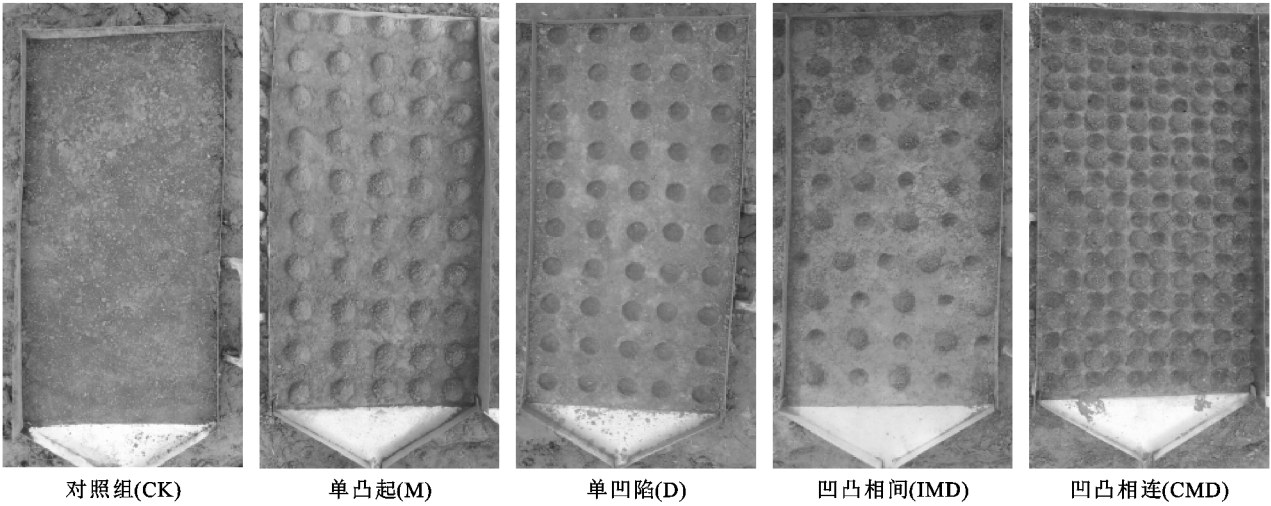


图 1 微地形措施布设

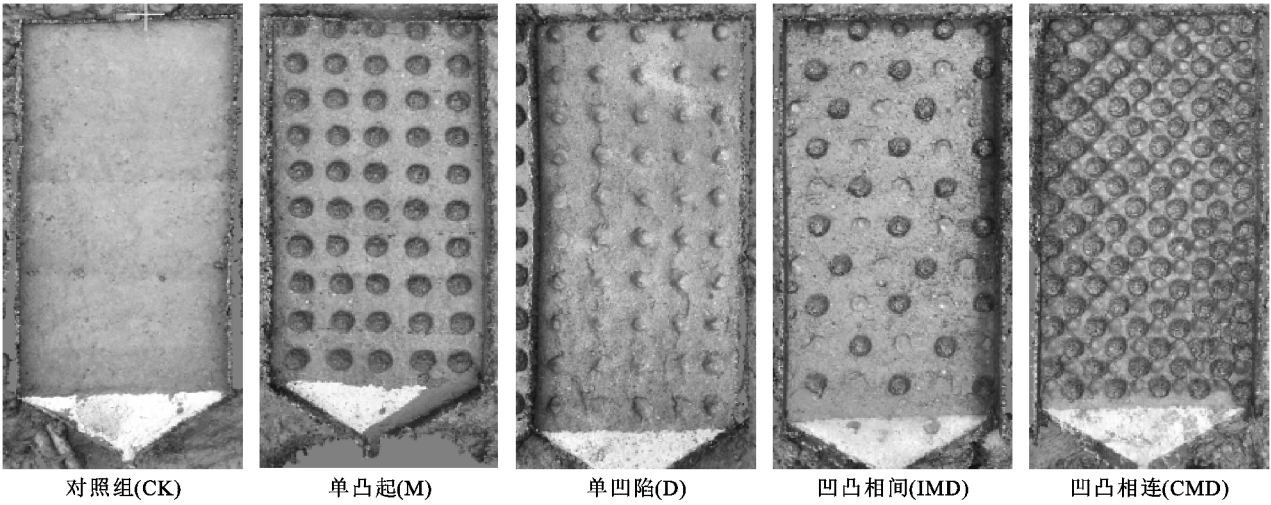


图 2 3D 模型

2 结果与分析

2.1 不同地表起伏对坡面初始产流时间的影响

在裸露耕地上,降雨初期雨水主要消耗于土壤入渗和填注^[18-21]。产流时间为坡面综合效应的反映,与地表起伏状况、土壤初始含水量以及雨强等有关^[22-23],因此不同地表起伏的坡面初始产流时间存

在显著差异。图 3 为 60,90,120 mm/h 雨强下,不同微地形措施的平均产流时间,可以明显看出,相同降雨强度下,CK 组产流时间最短,CMD 组产流时间最长,不同措施的产流时间表现为 CK 组<M 组<D 组<IMD 组<CMD 组。

CK 组由于表面比较光滑,降雨开始后,雨滴打

击使土壤表面形成细小坑洼,蓄积少量雨水,同时松软的表土层在雨滴的打击作用下逐渐变得密实,减少入渗,雨水到达坡面后损失量较小,径流更容易到达集流口;对 M 组而言,凸起的坡度会增加坡面流流速,但同时也对径流产生拦截作用。因此,在坡面流流经凸起时,流速减缓,同时坡面流会绕过凸起形成迂曲,延长坡面流到达集流口的路径;且流速的减小和路径的延长会增加入渗量,从而进一步增加产流时间,使 M 组的产流时间大于 CK 组;D 组与 M 组差异较大,D 组的凹陷大大增大对地表径流的拦蓄作用,增大入渗时间与入渗量,其产流时间显著大于 CK 组和 M 组。

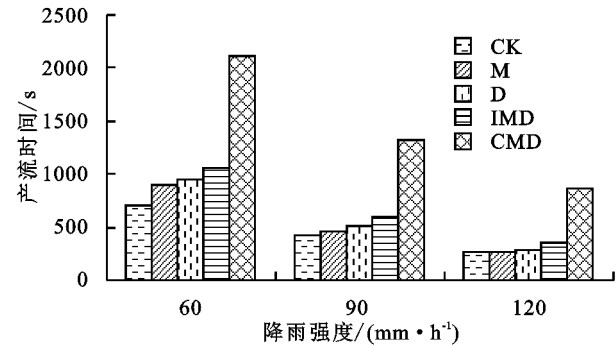


图 3 不同微地形措施平均产流时间

对于凸起和凹陷同时存在的 IMD 组和 CMD 组,因凸起和凹陷均对产流时间有延缓作用,所以在叠加以后,凹凸组合的初始产流时间均会进一步延长;但对 IMD 组而言,凸起和凹陷之间的间隔影响了二者延缓产流的叠加效应,因此,相较于 CMD 组的产流时间较短。

综上所述,相同降雨强度下,CK 组产流时间最短,这与 Vermang 等^[24]在研究随机地表糙度对径流和土壤侵蚀速率的影响中得出的结果一致:地表起伏越小,坡面产流时间越短,地表起伏越大,坡面产流时间越长。此外,从图 3 还可看出,雨强越大,初始产流时间越小,说明雨强的增大会削弱地表起伏对产流时间的影响,这与张会茹等^[25]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。

2.2 不同地表起伏对坡面平均流速的影响

流速是反映坡面径流的重要参数^[26]。坡面径流平均流速受径流量、坡面起伏和土壤干密度等影响^[27-29]。不同地表起伏的坡面平均流速存在差异。从图 4 可以看出,相同雨强下,CK 组坡面平均流速最大,CMD 组坡面平均流速最小,表现为与初始产流时间相反的规律,即:CK 组>M 组>D 组>IMD 组>CMD 组。

由于 CK 组地表光滑无起伏,坡面流在无障碍状

态下,可以自由流动,且坡面流势能用于克服阻力做的功最小,转化为坡面流动能最多,因此其流速最大。但 M 组的径流流经凸起时会受到其阻碍作用,坡面流克服阻力做的功增大,降低径流流速,最终使 M 组坡面平均流速小于 CK 组。D 组因凹陷存在,在一定程度上阻断了径流,使其坡面流速降低,增加径流流出小区的时间;同时凹陷的蓄积作用增大入渗量。因此,在凹陷作用下,D 组的坡面平均流速稍小于 CK 组与 M 组。

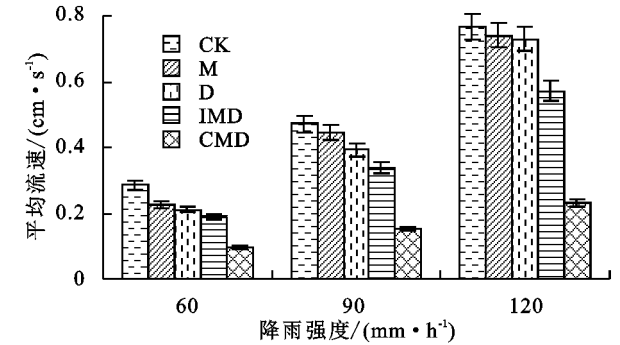


图 4 不同微地形措施平均流速

IMD 组和 CMD 组在凸起和凹陷对坡面径流流速的减弱作用叠加以后,在连续地表起伏条件下会进一步增强。因此,凸起凹陷组合的平均径流流速小于单式起伏组。IMD 组由于凸起与凹陷呈间隔布设,使 IMD 组有平整坡面存在。在平整坡面处,坡面流可以自由发育,流速会逐渐增加。而 CMD 组是凸起凹陷连续存在,没有供坡面流自由发育的平整坡面,因此,IMD 组坡面平均流速大于 CMD 组。

由图 4 还可看出,雨强越大,坡面平均流速越大,这与张琪琳等^[30]在不同雨强下对坡面产流平均流速的研究结果一致,即坡面平均流速随雨强的增大而增大。

综上,相同雨强下 CK 组坡面流平均流速最大,凹凸相连坡面平均流速最小,这与戎玉博等^[31]研究结果相似,即坡面糙度越大,坡面水流流态越缓,流速越小。

2.3 不同地表起伏对坡面汇水特征的影响

2.3.1 汇水形态 试验通过 ArcGIS 10.2 提取出的坡面汇水形状大致分为 3 种,即树枝状、羽毛状、平行状水系(图 5)。树枝状水系是支流较多,主、支流以及支流与支流间呈锐角相交,排列如树枝状的水系;羽毛状水系是支流短而密集,从主流两侧汇入与主流相交的水系;平行状水系具有大致平行的主流和支流^[32]。3 种汇水形态及占比见表 1。

CK 组和 IMD 组汇水形态均为树枝状,分别占比 100%;M 组汇水形态有 2 种分别为树枝状和羽毛状,分别占比 22.2%和 77.8%;D 组汇水形态有 2 种,分别为树枝状和羽毛状,分别占比 66.7%和 33.3%;CMD 组汇水形态有 3 种,为树枝状、羽毛状和平行

状,分别占比 11.1%,11.1%和 77.8%(表 1)。

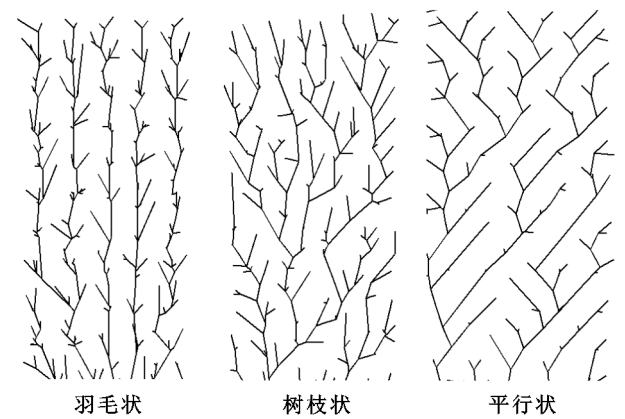


图 5 汇水形态

表 1 汇水形态及各形态占比

微地形 措施	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	形态			占比/%		
		A	B	C	树枝状	羽毛状	平行状
CK	60	树枝状	树枝状	树枝状	100	0	0
	90	树枝状	树枝状	树枝状			
	120	树枝状	树枝状	树枝状			
M	60	树枝状	羽毛状	羽毛状	22.2	77.8	0
	90	羽毛状	羽毛状	羽毛状			
	120	树枝状	羽毛状	羽毛状			
D	60	树枝状	树枝状	树枝状	66.7	33.3	0
	90	树枝状	羽毛状	羽毛状			
	120	羽毛状	树枝状	树枝状			
IMD	60	树枝状	树枝状	树枝状	100	0	0
	90	树枝状	树枝状	树枝状			
	120	树枝状	树枝状	树枝状			
CMD	60	平行状	平行状	平行状	11.1	11.1	77.8
	90	羽毛状	树枝状	平行状			
	120	平行状	平行状	平行状			

CK 组与 IMD 组在 3 种雨强下均为树枝状汇水形态,但其形成原因却不尽相同。CK 组汇水形态全为树枝状,其原因为 CK 组坡面较为平整,在产流初始阶段径流以较小的侵蚀能力带走坡面易侵蚀土壤颗粒,此时水流选择易流动的方向蜿蜒前行,并且在坡面形成弯曲、较浅的细小侵蚀流路。随着降雨的持续进行,在小区中下部位置可以观察到多个细小流路逐渐合并的现象,在合并过程中,流速加快,流量增加,细小侵蚀流路逐渐演变为数量较少、深度较大的“母沟”(“母沟”附近的“子沟”仍然存在),在降雨结束后发育为树枝状沟网;IMD 组虽有凸起分流作用和凹陷汇集作用,但凸起、凹陷排列较为稀疏,仍有平整坡面使得水流可以自由流动。随着降雨持续进行,在小区中下部可以观察到凸起处被削平,凹陷处被填埋,进而增加了平整坡面面积,因此,在降雨结束后形成与 CK 相同的树枝状沟网。

M 组因凸起对水流的发散作用,水流在流经凸起时选择易流动的两侧向下坡位流动。由图 1 可知,

相邻凸起之间的坡面较为平整,水流在受凸起分流作用影响后在平整处汇集(支流汇集同步性较强),使得平整处逐渐演变为深度较大、几何形态较直的“母沟”,降雨结束后发育为羽毛状沟网。

D 组因凹陷对水流的汇集作用,使得平整处的水流携带泥沙在流经凹陷处时被聚集。在较小流量时,凹陷处被水流携带的泥沙填满,增加平整坡面面积(小区下坡面最为突出),在降雨结束后,形成与 CK 组相同树枝状沟网;在较大流量时,凹陷处被水流贯通,形成深度大、几何形态直的“母沟”,降雨结束后发育为羽毛状沟网。

CMD 组与 IMD 组不同。由于 CMD 组凸起、凹陷布设紧密,没有平整坡面供水流自由发育,因此其水系形状受到小区布设影响最大,主要为平行状汇水形态。

2.3.2 不同起伏坡面汇流密度的变化特征 汇流密度从单位面积上的径流总长度来表征汇水网络结构特征的变化^[33](公式(1)),在相同条件下,汇流密度越大,表明坡面汇水网络路径越发达,径流分散程度越大^[15]。

$$D_d = \frac{\sum_{j=0}^n L_j}{A}$$

(1)

式中: D_d 为汇流密度(m^{-1}); L_j 为单个径流长度(m); A 为径流的控制面积(m^2)。

由图 6 可知,5 种措施在 3 种雨强下坡面汇流密度表现出不同的变化趋势。经计算,5 种措施在 60 mm/h 雨强下的汇流密度分别为:CK 组 3.87 m/m^2 , M 组 3.55 m/m^2 , D 组 2.91 m/m^2 , IMD 组 2.08 m/m^2 , CMD 组 1.82 m/m^2 。汇流密度表现为 CK 组最大, CMD 组最小。这主要是 CK 组坡面较为平整,径流可以自由发育形成较多低等级径流,随着降雨持续,低等级径流在小区中下部进行随机合并,形成长度较长的高等级径流(低等级径流仍然存在),使得 CK 组的径流总长度最大;同时 CK 组坡面面积最小,因此其坡面汇流密度最大。M 组的凸起增大了坡面平均高程,使相邻凸起间的平整坡面成为“低洼”,诱导平整坡面形成高等级径流,同时低等级径流在绕过凸起后立即合并到平整坡面的高等级径流中,形成高等径流路径较长,而低等级径流路径较短的汇水路径,使得 M 组径流总长度小于 CK 组;同时 M 组坡面面积大于 CK 组,因此其坡面汇流密度小于 CK 组。D 组汇流密度小于 CK 组,其原因与 M 组相反。D 组的凹陷降低了坡面平均高程,导致相邻凹陷之间的平整坡面成为“凸起”,诱导低等级径流在凹陷处汇集,阻断径流路径,减少径流长度,虽然其坡面表面积与 M 组相同,但其汇流密度均小于 M 组与 CK 组。IMD 组是凸起与凹陷相间分布,相邻凸起之间增加

了凹陷对低等级径流的阻断作用,因此其径流路径较短,径流数目较少,虽然其表面积与 M 组相同,但其汇流密度小于 M 组。CMD 组是凸起与凹陷相连排列,凹陷对径流的连续阻断作用,其径流总长度最小,同时其坡面表面积最大,CMD 组汇流密度最小。

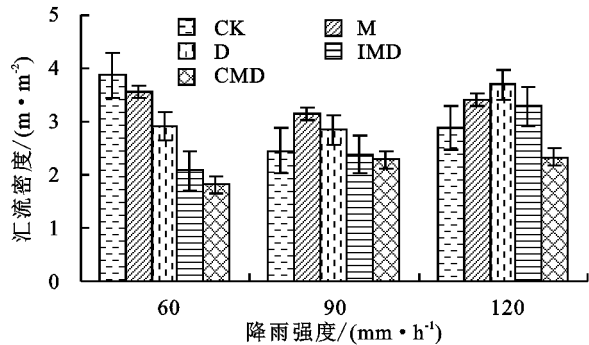


图 6 不同起伏下坡面汇流密度

5 种措施在 90 mm/h 雨强下的汇流密度分别为:CK 组 2.45 m/m², M 组 2.84 m/m², D 组 3.14 m/m², IMD 组 2.39 m/m², CMD 组 2.29 m/m²。可知在 90 mm/h 雨强下, M 组的汇流密度最大,凹凸组合的汇流密度最小。相比于 60 mm/h 雨强, CK 组汇流密度减小 40.8%,这可能是雨强增大,小区的受雨量增加,股流流速加快,其动能增加,使得合并的股流数目增加,缩短股流长度,因此,CK 组在 90 mm/h 雨强下汇流密度减小。M 组汇流密度为 3.14 m/m²,虽跃居第一,但相比于 60 mm/h 雨强仍减小 11.5%,这是因为雨强增大,雨滴击溅作用增强,使得凸起部分高程降低,坡面表面积减小,同时掉落的土块掩埋部分股流路径,使得汇流密度有所减小。D 组汇流密度基本保持不变,说明在 90 mm/h 雨强下,凹陷对股流的阻断作用仍然较强。对于凹凸组合而言其汇流密度有所增大,这主要是由于雨滴击溅和径流的剪切作用,使得凸起高程降低,凹陷处被掩埋,从而减小了坡面有效表面积。

5 种措施在 120 mm/h 雨强下的汇流密度分别为:CK 组 2.88 m/m², M 组 3.40 m/m², D 组 3.70 m/m², IMD 组 3.28 m/m², CMD 组 2.33 m/m²。可知在 120 mm/h 雨强下, D 组的汇流密度最大, CMD 的汇流密度最小,相比于 60 mm/h 雨强, CK 组汇流密度减小 25.67%,但相比于 90 mm/h 雨强,汇流密度有所增加。这是因为雨强增加到 120 mm/h 时,股流的流速进一步加快,能够搬运较大土壤颗粒,被大土壤颗粒阻断的径流路径减少, CK 组在 120 mm/h 雨强下汇流密度相比于 90 mm/h 雨强有所增加,但仍小于 60 mm/h 下的汇流密度。在 120 mm/h 雨强下, M 组的凸起进一步被削平,坡面地表面积进一步减小,同时股流搬运能力增强,被土块掩埋的径流路

径有所减小,相比于 90 mm/h 雨强,其汇流密度稍有增加。D 组的凹陷此时被径流贯通,增加径流路径长度,随着降雨进行,小区下坡面被径流冲刷得比较平整,使得径流能够自由发育,进而增加径流数目,因此,在 120 mm/h 雨强下, D 组的汇流密度最大。凹凸组合汇流密度比 90 mm/h 雨强有所增加,主要也是由于凸起高程降低,减小坡面地表面积,以及部分凹陷被贯通和填平增加了径流路径长度。

2.3.3 不同起伏坡面径流频度的变化特征 径流频度主要以单位面积上的径流总数目来表征汇水网络结构特征的变化^[33](公式(2)),在相同条件下,径流频度越大,表明坡面汇水网络路径越发达,径流分散程度越大^[15]。

$$C_f = \frac{\sum_{j=0}^n N_w}{A} \quad (2)$$

式中: C_f 为径流频度 (N/m^2); A 为径流的控制面积 (m^2); W 为汇流网络中最高级径流的级数。

从图 7 可以看出, 5 种措施在 60 mm/h 雨强下的径流频度分别为:CK 组 3.75 N/m^2 , M 组 2.83 N/m^2 , D 组 2.17 N/m^2 , IMD 组 2.00 N/m^2 , CMD 组 1.50 N/m^2 ,径流频度表现为 CK 组最大, CMD 组最小。这是因为 CK 组为平整坡面,股流能够自由发育形成较多汇水路径;同时 CK 组坡面面积最小,其径流频度最大。单式起伏组与 IMD 组也有平整坡面存在,但由于凸起或凹陷使得可供径流自由发育的平整坡面较少,使股流数目减少,同时凸起或凹陷增加坡面面积,使单式起伏组与 IMD 组径流频度均小于 CK 组; CMD 组没有平整坡面,股流很难发育形成汇水路径,同时 CMD 组坡面面积最大,因此其径流频度最小。

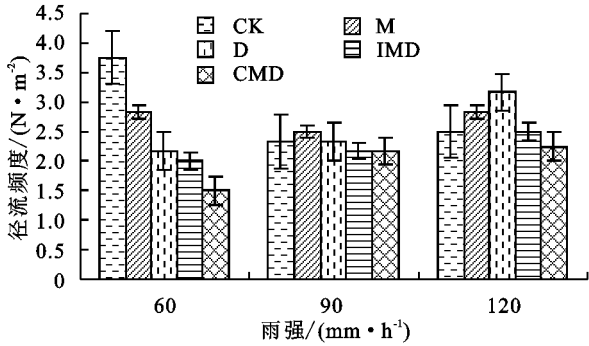


图 7 不同起伏下坡面径流频度

5 种措施在 90 mm/h 雨强下的径流频度分别为:CK 组 2.33 N/m^2 , M 组 2.33 N/m^2 , D 组 2.50 N/m^2 , IMD 组 2.17 N/m^2 , CMD 组 2.17 N/m^2 。径流频度表现为 D 组最大,复式起伏最小。随着雨强增大,股流流速增加,此时股流具有较大动能,能够冲破部分障碍相互汇集。对于 D 组而言,其流速较大,在经过凹陷对于股流的阻断作用后,还具有较大动能,

促使股流路径的形成;复式起伏有凸起与凹陷的共同作用,股流用于冲破障碍所需要的动能更多,只有少部分用于股流路径形成,因此,单式起伏的股流路径数目比复式起伏更多。但 5 种微地形地表之间的径流频度值差异性最小。

5 种措施在 120 mm/h 雨强下的径流频度分别为:CK 组 2.50 N/m²,M 组 2.83 N/m²,D 组 3.17 N/m²,IMD 组 2.50 N/m²,CMD 组 2.25 N/m²。径流频度表现为 D 组最大,CMD 组最小。随着雨强进一步增大,股流流速进一步增加,股流在冲破障碍后降低凸起高程,携带泥沙在凹陷处蓄积,增加凹陷处高程。由试验观察可知,单式起伏组在降雨结束后,小区中下部趋于平整。但 M 组的凸起能够提供更多泥沙,掩埋部分下坡面已经形成的股流路径,D 组的径流频度大于 M 组。CMD 组股流数目最少,可能是凸起与凹陷对股流的连续阻碍作用仍然较大。

综上,5 种措施的汇流密度与径流频度随雨强变化呈现相同的变化趋势,即光滑组和凸起组随着降雨强度增大,其汇流密度与径流频度呈现先减小后增大的变化规律;凹陷及凹凸组合的汇流密度与径流频度均随降雨强度的增大呈现增加趋势。

3 结 论

(1)与光滑组相比,在 3 种雨强下,凸起、凹陷以及凹凸组合均会延迟地表初始产流时间,且凸起与凹陷的叠加作用使凹凸组合的初始产流时间进一步延长,呈现为 $T_{CK} < T_M < T_D < T_{IMD} < T_{CMD}$ 的规律。

(2)与光滑组相比,凸起和凹陷的存在均会降低坡面平均流速;在 3 种雨强下,各措施的坡面平均流速均随雨强增大而增大,且凹凸相连坡面平均流速最小。

(3)光滑组和凹凸相间组水系形态均为树枝状;凸起和凹陷组水系形态均有 2 种,分别为树枝状和羽毛状,其中凸起组以羽毛状为主,凹陷组以树枝状为主;凹凸相连组水系形状有 3 种,以平行状为主,其余 2 种为辅。

(4)在 3 种雨强下,光滑组和凸起组随着降雨强度增大,其汇流密度呈现先减小后增大的变化规律;凹陷及凹凸组合的汇流密度均随降雨强度增大呈现增加趋势。

(5)在 3 种雨强下,各措施的径流频度在降雨强度为 60,120 mm/h 时差异性较大,在 90 mm/h 差异性最小。

参考文献:

[1] 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.

[2] 郑子成,秦风,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.

[3] 章慧.等高耕作微地形面积高程积分谱系研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.

[4] 庞延杰,丁文峰,李清溪,等.粗糙度对坡面侵蚀及泥沙分选性影响试验研究[J].人民长江,2017,48(17):28-33.

[5] 苏正安,熊东红,张建辉,等.紫色土坡耕地土壤侵蚀及其防止措施研究进展[J].中国水土保持,2018(2):42-47.

[6] 张利超,葛佩琳,李朝霞,等.降雨侵蚀过程中红壤坡耕地地表微地貌演变特征[J].水土保持研究,2018,25(6):15-21.

[7] 秦风,郑子成,何淑琴,等.降雨类型对地表微地形空间变化及产流、产沙的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):17-22.

[8] 夏积德,吴发启,张青峰,等.黄土区微地形降雨侵蚀量分形特征研究[J].人民黄河,2016,38(9):78-81.

[9] 周春梅,王宇,吕雷,等.雨滴溅蚀下压实黄土变形破坏规律研究[J].水文地质工程地质,2018,45(6):93-98.

[10] 贡力.黄土高原降雨雨滴动能的侵蚀计算[J].兰州交通大学学报(自然科学版),2005,24(4):43-45.

[11] 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.

[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] 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,2019,34(6):160-167.

[14] 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.

[15] 贾腾斌.地表糙度量化特征及其对坡面汇流路径的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2014.

[16] 宋向阳.地表糙度对坡面产汇流特征的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.

[17] 秦风.紫色土区地表微地形变化特征及其对土壤侵蚀的影响[D].成都:四川农业大学,2014.

[18] 车明轩,宫渊波,穆罕默德·纳伊姆·汉,等.人工模拟降雨条件下不同雨强、坡度对紫色土坡面产流的影响[J].水土保持通报,2016,36(4):164-168

[19] 李宜坪,郭慧莉,吴淑芳,等.黄土坡面水沙过程及水流阻力变化试验研究[J].泥沙研究,2017(5):36-43.

[20] 王林华,汪亚峰,王健,等.地表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.

[21] Wang L H, Dalabay N, Lu P, et al. Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall[J].Soil and Tillage Research,2017,166:147-156.

[22] 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.

[23] 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.

[7] Liu W C, Liu J Y, Kuang W H, et al. Examining the influence of the implementation of Major Function-oriented Zones on built-up area expansion in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(6): 643-660.

[8] 周启刚, 陈丹. 重庆山地都市区土地利用地形特征分异研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 86-91.

[9] 吴见, 王帅帅, 谭靖. 基于安徽省土地利用变化的地形梯度效应分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2): 239-248.

[10] Fu P, Weng Q H. A time series analysis of urbanization induced land use and land cover change and its impact on land surface temperature with Landsat imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 175(4): 205-214.

[11] 佟光臣, 林杰, 陈杭, 等. 1986—2013 年南京市土地利用/覆被景观格局时空变化及驱动力因素分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 240-245.

[12] Marwa W A, Paul E G, Jeffrey A H, et al. Land use/land cover change detection and prediction in the north-western coastal desert of Egypt using Markov-CA[J]. Applied Geography, 2015, 63: 101-112.

[13] Alvaro S, Germán B, Marina H, et al. Land use and land cover change impacts on the regional climate of non-Amazonian South America: A review[J]. Global and Planetary Change, 2015, 5(5): 103-119.

[14] Dong J W, Kuang W H, Liu J Y. Continuous land cover change monitoring in the remote sensing big data era[J]. Science China Earth Sciences, 2017, 60(12): 2223-2224.

[15] 袁益琴, 何国金, 江威, 等. 遥感视频卫星应用展望[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(3): 1-8.

[16] 任文伟. 土地利用/覆盖变化(LUCC)与水环境效应研究[J]. 世界科学, 2007(2): 31-32.

[17] 尹发能, 卢明珠. 湖北省夷陵区新农村建设调查与分析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(6): 3689-3692.

[18] 蔡道明, 李柏, 张平仓, 等. 基于 GIS 的三峡库区湖北段土壤侵蚀潜在危险度评价[J]. 水利水电技术, 2017, 48(9): 223-228.

[19] 祁翠翠. 三峡旅游背景下晓峰旅游市场开发研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2009.

[20] 高云飞, 李智广, 刘晓燕. 黄河流域水土流失遥感监测中土地利用现状分类体系构建[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 111-115.

[21] 李华, 吴翰, 薛梅, 等. 土地督察易混地物最大似然分类改进[J]. 遥感信息, 2018, 33(6): 132-138.

[22] 任斐鹏, 江源, 熊兴, 等. 东江流域近 20 年土地利用变化的时空差异特征分析[J]. 资源科学, 2011, 33(1): 143-152.

[23] 摆万奇, 赵士洞. 土地利用变化驱动力系统分析[J]. 资源科学, 2001, 23(3): 39-41.

[24] 李平, 李秀彬, 刘学军. 我国现阶段土地利用变化驱动力的宏观分析[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 129-138.

[25] 马尚云. 三峡工程库区百万移民的现状与未来[J]. 社会学研究, 1996(4): 25-34.

[26] 宜昌市夷陵地区地方编纂委员会著. 宜昌县志 1979—2001[M]. 北京: 方志出版社, 2011.

[27] 张洪江, 高中琪, 解明曙, 等. 三峡库区多功能防护林体系构成与布局的思考[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9(4): 479-486.

[28] 万永明. 宜昌市夷陵区退耕还林工程实施情况总结[J]. 现代农业科技, 2015(14): 185-186.

[29] 陈世林, 孙浩燕, 朱迎春. 2009—2018 年宜昌市夷陵区农业发展成效探讨[J]. 现代农业科技, 2018(21): 263.

(上接第 77 页)

[24] Vermang J, Norton L D, Huang C H, et al. Characterization of soil surface roughness effects on runoff and soil erosion rates under simulated rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(3): 903-916.

[25] 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.

[26] 张祖莲, 洪斌, 黄英, 等. 降雨作用下红土型坡面径流特征与土壤侵蚀的关系研究[J]. 山地学报, 2017, 35(4): 535-542.

[27] 柳晓娜, 樊登星, 余新晓, 等. 大粗糙单元对坡面流动力学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 43-50.

[28] 蒋利斌, 张会兰, 杨坪坪, 等. 降雨和坡面流共同作用下的坡面薄层水流动力学特性[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(8): 77-86.

[29] 李建明, 王一峰, 张长伟, 等. 三种土壤质地工程堆积体坡面流速及产沙特征[J]. 长江科学院院报, 2019, 1-9.

[30] 张琪琳, 王占礼, 张庆玮, 等. 雨强及坡度对黄土区草地坡面水流流速的影响[J]. 人民黄河, 2018, 40(4): 96-99.

[31] 戎玉博, 王森, 白玉洁, 等. 含砾石锥状工程堆积体侵蚀水动力学特性和细沟形态特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 134-141.

[32] 薛海, 孔纯胜, 熊秋晓, 等. 坡面沟蚀及其分形特性试验研究[J]. 人民黄河, 2008, 30(12): 90-92.

[33] 芮孝芳, 蒋成煜, 张金存. 流域水文模型的发展[J]. 水文, 2006, 26(3): 22-26.