

模拟降雨条件下坡度与地表糙度对径流产沙的影响

王 添,任宗萍,李 鹏,张 辉,苏远逸,支再兴,马田田,孙 倩
(西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地,西安 710048)

摘要: 通过室内模拟降雨试验,研究坡度与地表糙度对土壤侵蚀的影响。根据研究区坡耕地特点,试验共设计 5 个坡度,分别为 9°,12°,15°,20°,25°,设计雨强为 1.0 mm/min,降雨历时为 60 min。结果表明:(1)5 个坡度下坡面径流总量表现为先增大后减少,在 20°与 25°坡面表现出显著性差异,地表糙度变异率降幅为 12°>9°>25°>15°>20°;(2)次降雨产流量与坡度、糙度变异变率呈显著指数函数关系;(3)5 个坡度其坡面产沙量表现为先增大后减少,产沙量在坡面梯度为 3°的坡面之间以及 20°与 25°坡面间存在显著性差异,说明坡度对产沙量有显著影响;(4)次降雨产沙量与坡度、糙度变异变率呈极显著线性关系;(5)次降雨量、产沙量与坡度、糙度变异变率的回归关系均优于分别与坡度、糙度变异变率的回归关系。研究成果为揭示水蚀过程中坡度与地表糙度对侵蚀的作用机理提供了参考。

关键词: 黄土;坡度;地表糙度;侵蚀
中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2016)06-0001-06
DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.001

Effect of Slope Gradient and Surface Roughness on Runoff and Sediment Yield Under Simulated Rainfall

WANG Tian, REN Zongping, LI Peng, ZHANG Hui, SU Yuanyi, ZHI Zaixing, MA Tiantian, SUN Qian
(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: In order to reveal the effect of slope gradient and surface roughness on soil erosion on the Loess Plateau, indoor simulated rainfall experiments were conducted. The five slope gradients in the experimental design were 9°, 12°, 15°, 20° and 25°, the rainfall intensity was 1 mm/min, and the rainfall duration was 60 min. The results showed that: (1) The volume of overland runoff increased first and then decreased under all five slope gradients, with significant difference being found between the 20° and 25° slope; the drop rate of variation in surface roughness was in the order of 12°>9°>25°>15°>20°. (2) Volume of runoff was in significant exponential function relationships with slope gradient and surface roughness ($\ln M_w = -0.012S - 0.005\Delta R_w + 3.78$, $R^2 = 0.66$). (3) The yield of sediment increased first and then decreased under all five slope gradients. Sediment yield was significantly different at slope gradient of 3° slope and between the 20° and 25° slope gradient, indicating that slope gradient had a significant impact on sediment yield. (4) Yield of sediment was in significant linear relationships with slope gradient and surface roughness ($M_s = 0.014S - 0.008R_w + 1.173$, $R^2 = 0.82$). (5) The regression relationship between the yield of the secondary rainfall, sediment yield and the variation of the degree of variation in roughness and the slope gradient was superior to that of relationships built using the above-mentioned parameters singly. The results provided references for revealing the mechanism of the effects of slope gradient and surface roughness on soil erosion during the process of water erosion.

Keywords: Loess; slope gradient; surface roughness; erosion

坡度是影响坡面侵蚀过程的重要因子。何继军等^[1]发现在坡面上当坡度超过一定限度时泥沙输移量与坡度呈反比关系;陈晓安等^[2]研究坡度对片蚀的影响表明存在一个小于 31°的临界坡度;张会茹等^[3]发现在红壤坡面坡度对侵蚀产沙量的影响存在临界坡度,其值变化在 20°~25°之间。但是,对于侵蚀产

沙临界坡度的研究目前尚未有一致的结论,其与土壤质地、坡面地貌形态、植被等因素有关。贾莲莲等^[4]在研究坡度对地表糙度的影响发现,在其他条件一定时,坡度越大,地表糙度变化越大;郑子成等^[5]研究表明地表糙度对径流和产沙的影响与坡度密切相关。地表糙度是反映坡面地表形态和物理性状的指标之一,其影响着渗透速率、径流等地表水文过程,同时也受诸多因素的影响,如降雨强度、下垫面性质等^[6],因此,地表糙度对坡面水蚀过程并未形成一致的结论。总的来说,目前存在两种结论:地表糙度对坡面侵蚀存在加剧^[7]和消减^[8]作用。在以往研究地表糙度对坡面侵蚀过程的影响中仅提取单一的数值,难以反映坡面地表起伏程度的整体变化趋势。而变异系数是反映整体数据的离散程度,本研究通过糙度变异系数来表征坡面糙度的离散程度,进一步反映整个坡面地表起伏形态的变化程度。坡度与糙度对坡面水蚀过程相互影响,郑子成等^[9]研究不同坡度下紫色土地表微地形变化及对土壤侵蚀的影响表明,对地表径流与侵蚀产沙分别受坡面微地形和坡度的影响较强。

而现有黄土区坡度与糙度对侵蚀影响的研究中均是从单方面来分析,对坡度和糙度的共同作用对侵蚀过程影响的研究仍是一项空白。因此本文以黄土为研究对象,通过室内模拟降雨试验,采用三维激光扫描仪和 GIS 技术相结合的方法,探讨不同坡度和地表糙度对径流产沙的影响,以期为区域土壤侵蚀模型提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验将西安近郊用土作为供试土壤。经 Malvern 2000 泥沙颗粒分析仪测得粒径为 0.05~0.1 mm 的颗粒占 6.01%,0.002~0.05 mm 的颗粒占 92.87%,<0.002 mm 的颗粒占 1.12%,据美国农业部(USDA)的土壤分级标准确定该土壤为粉(砂)土。

1.2 试验方法

模拟降雨装置采用西安理工大学水资源研究所研制的针管式降雨装置。降雨器由供水管路、恒压水箱、针管式降雨装置和控制阀等组成水箱始终充满水以保证水压恒定水表用来控制流量控制阀使水流稳定,保证水流均匀^[10]。土样过 1 cm 筛后装入侵蚀槽内,所用侵蚀槽均为 90 cm×45 cm×15 cm,木槽底部布设有直径为 1 cm 的“梅花”型透水孔。在填土过程中土槽底部铺一层纱布,再装入 2 cm 厚的天然沙,以保证试验用土的透水性与自然坡面接近。然后将过 1 cm 孔筛的黄土分层填入 10 cm 厚的黄土,将

容重控制在 $(1.2\pm0.5)\text{g}/\text{cm}^3$ 左右,初始含水量控制在 $(15.0\pm1.0)\%$ 左右。根据黄土高原人为管理农耕地习惯,在相应的侵蚀槽内布设人工锄地措施,以模拟地表糙度。根据研究区坡耕地特点,试验共设计 5 个坡度,分别为 $9^\circ, 12^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$,根据研究区的暴雨情况,设计雨强为 $1.0\text{mm}/\text{min}$ 。

试验于 2015 年 4 月 10 日至 5 月 8 日在西北水资源与环境生态教育部重点实验室雨洪侵蚀大厅进行,每组试验重复 3 次,分析计算采用 3 次试验数据的平均值。试验开始前,用水准仪对坡面进行校正,采用雨强降雨空间分布法率定雨强,均匀度均在 85%以上开始降雨。坡面出水口开始产流后,每 3 min 收集 1 次浑水样,采用烘干法测得其产沙量,用浑水总体积减去泥沙体积得到径流量。

1.3 研究方法

1.3.1 数字高程模型 采用 Trimble 三维激光扫描仪分别测定降雨前后微地形,对采集的点云数据利用 Trimble Realworks 去噪、拼接并建立统一坐标后得到微地形的三维坐标值。基于 GIS 软件将地表点云数据转换为栅格数字高程模型。

1.3.2 地表糙度变异变率计算 地表糙度是反映地表起伏变化和侵蚀程度的指标,定义为地表面单元的曲面面积与其在水平面上的投影面积之比。计算公式为:

$$R = S_{\text{表面}} / S_{\text{投影}} \quad (1)$$

式中: R 为坡面地表糙度均值; $S_{\text{表面}}$ 为曲面面积(mm^2); $S_{\text{投影}}$ 为水平面积(mm^2)。

坡面糙度标准差为:

$$S_R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - R)^2} \quad (2)$$

式中: S_R 为坡面地表糙度标准差; N 为坡面栅格数; i 为第几个栅格。

坡面上糙度变异系数的计算公式为:

$$R_{cv} = S_R / R \quad (3)$$

式中: R_{cv} 为坡面地表糙度变异系数。

坡面上糙度变异变率的计算公式为:

$$\Delta R_{cv} = (R_{cv0} - R_{cv1}) / R_{cv0} \quad (4)$$

式中: ΔR_{cv} 为坡面地表糙度变异变率(%); R_{cv0} 和 R_{cv1} 分别为降雨前和降雨后坡面地表糙度变异系数(%)。

1.3.3 数据处理及分析方法 采用 ArcGIS 9.3 进行 DEM 建立与糙度因子提取,差异性分析及回归方程采用 SPSS 10.0 分析,图表制作采用 Origin 8.5。

2 结果与分析

2.1 坡度及糙度变异对径流的影响

由不同坡度下径流率随产流时间的变化(图 1)可知,5 个坡度下,径流率在降雨初期迅速增大,之后随着降雨历时的延长呈现缓慢增长后趋于稳定。 25°

时径流迅速增长期在 0~15 min,缓慢增长期在 15~30 min,稳定期在 30~60 min;20°,15°,12°和 9°径流迅速增长期在 0~18 min,缓慢增长期在 18~35 min,稳定期在 35~60 min,这是因为在产流前雨滴打击地表产生大量分散细小的土粒,产流后水流在向下迁移的过程中挟带的细小的土粒阻塞或填充土壤孔隙,径流率在降雨初期迅速增加,地表很快形成局部临时结皮,阻碍了土壤水分的入渗能力。当降雨强度一定时,黄土表土结皮在 15~30 min 期间表面强度不断增大,30 min 后表面结皮发育处于相对稳定时^[11],地表结皮强度变大,地表入渗能力大大降低,故径流量不断增大。因此在表土结皮的不稳定发育期,其径流量处于缓慢增长;结皮发育的稳定时期,径流处于相对稳定期。

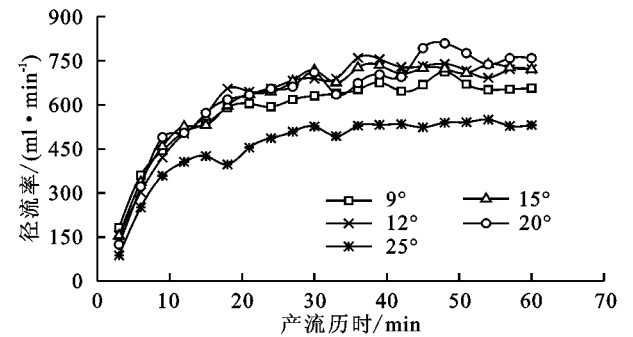


图1 不同坡度下径流率随产流时间的变化

由不同坡度对坡面产流量的影响(图 2)可知,5 个坡度下其坡面总径流量表现为先增大后减少的趋势,在坡面梯度为 3°的坡面之间(9°,12°和 15°)均没有显著性差异,坡面梯度为 5°的坡面仅在 20°与 25°坡面表现出显著性差异,15°与 20°坡面没有呈现显著性差异,由此可以看出径流量随坡度呈先增大后减小的趋势,存在临界坡度,临界坡度在 15°~25°之间。

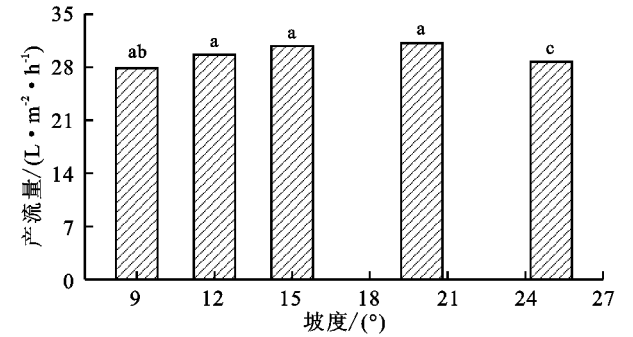


图2 不同坡度下坡面产流量的变化

从坡度角度分析,在降雨强度一定的条件下,坡面径流量主要由土壤入渗特性与承雨量决定。由于本试验的控制条件为坡度,其坡面土壤物理特性基本一致,且在降雨过程中土壤的入渗特性不因坡度的改变而改变,因此,由坡面上的净雨量与坡面入渗量和承雨面积决定^[12]。一方面,在入渗方程中,随着坡度的增加,水流在顺坡方向的分力增强,入渗时间缩短;

另一方面,在坡长及降雨倾角一定的情况下,随着坡度的增加,坡面受雨面积减小。因此,坡度对径流量变化的影响是由坡面承雨面积与水流入渗能力共同制约,一定坡度范围内,随着坡度的增加,坡面径流量与坡度成正比,超过一定坡度其径流量与坡度成反比,存在临界坡度。

从坡面微地形分析,由不同坡度下的坡面地表糙度变异变率为 12°>9°>25°>15°>20°(表 1)。地表糙度变异系数反映坡面地表糙度的离散程度,变异系数越大表明坡面地表糙度的变化越剧烈,其坡面起伏程度变化大。在降雨过程中坡面仅有片蚀和细沟间侵蚀发生,在两个阶段过程中既发生了堆积,也有侵蚀的发生^[13]。

表1 不同坡度下坡面降雨前后糙度变异变率

坡度/(°)	R_{cv0}	R_{cv1}	$\Delta R_{cv}/\%$	均值/%
9	0.23	0.11	54.47	55.80 ± 0.67
	0.21	0.09	56.43	
	0.17	0.07	56.51	
	0.20	0.08	56.53	
12	0.21	0.09	58.33	56.82 ± 0.80
	0.22	0.10	55.60	
	0.17	0.12	33.14	
	0.18	0.09	49.56	
15	0.11	0.07	39.64	40.78 ± 4.77
	0.15	0.09	39.97	
	0.20	0.15	26.96	
	0.19	0.13	31.87	
20	0.23	0.10	57.15	51.14 ± 3.00
	0.21	0.11	48.03	
	0.21	0.11	48.25	
	0.21	0.11	48.25	

在坡面产流前,受雨滴的打击,土表颗粒发生分散和迁移,削减了地表凸起处,填充了凹陷处,主要发生了堆积,加上雨滴的夯实作用,下渗能力减弱,地表开始产流。在坡度为 9°,12°和 25°坡面其糙度变异降幅较大,说明地表变得相对平整。3 个坡面受其坡度与承雨面积的影响,径流能量相对较弱,在糙度变异系数较小,地表径流分布相对均匀,没有形成股流,流速相对缓慢,单位时间内在坡面滞留的时间较长,增大了入渗量,故产流总量相对较小。

15°和 20°坡面糙度变异降幅依次减小,说明降雨后坡面地表糙度的离散程度较大,地表起伏相对较高。同样,在产流前地表糙度变异减小,随着降雨的继续,地表洼地逐渐蓄满,在坡度的叠加作用下,径流流速迅速增加,破坏凸起阻挡部分形成较为集中的流路,致使径流冲刷能力增强,坡面又形成新的破坏,径流量相对较大。

2.2 径流量与坡度及糙度变异的关系

点绘各坡度下次降雨产流量—坡度及产流量—

糙率变异变率的关系见图 3 和图 4, 并利用 SPSS 对二者进行回归分析, 结果表明, 次降雨产流量与坡度呈抛物线关系, 其关系式可表示为:

$$M_w = -0.0594S^2 + 1.7872S + 17.388, \\ N=15, R^2=0.55, P<0.01 \quad (5)$$

次降雨量与糙度变异变率呈抛物线关系, 其关系式可表示为:

$$M_w = 0.0259\Delta R_{cv}^2 - 2.409\Delta R_{cv} + 82.374, \\ N=15, R^2=0.31, P>0.05 \quad (6)$$

式中: M_w 为次降雨产流量(L); S 为坡度($^\circ$); ΔR_{cv} 为糙率变异变率(%).

由图 3 可知, 产流量随坡度的变化呈上升一下降的趋势, 由公式(5)得到极值为 15.04° , 与上面预测临界坡度在 $15^\circ \sim 25^\circ$ 之间相一致。由图 4 可以看出, 产流量随糙度变异变率的增加呈下降一上升的趋势, 由公式(6)得到极值为 46.51% 。结合图 3 与图 4 可知, 坡度与糙度变异变率对产流过程的变化具有不同的影响, 说明坡面产流过程是坡度与坡面微地形共同作用的结果, 因此进一步分析了坡度与糙度变异变率耦合作用下对产流量的影响。

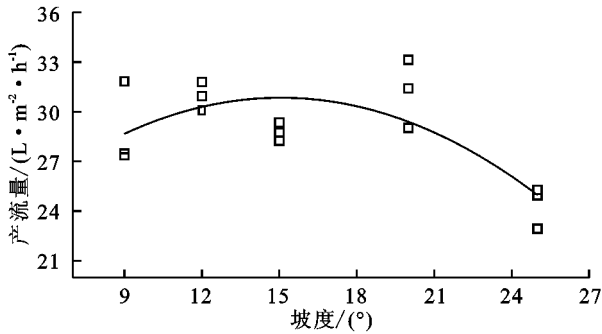


图 3 坡度与产流量的关系

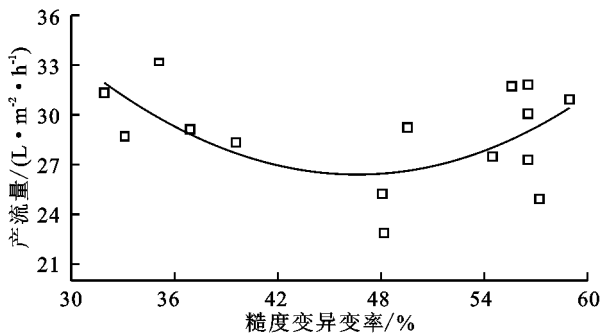


图 4 糙度变异变率与产流量的关系

通过回归分析产流量与坡度和糙度变异变率的关系发现, 在置信度 95% 时产流量与二者呈显著性指数函数关系, 关系式为:

$$\ln M_w = -0.012S - 0.005\Delta R_{cv} + 3.78, \\ N=15, R^2=0.66, P<0.05 \quad (7)$$

从公式(7)可以看出, 坡度和糙度的耦合作用对径流量的影响呈显著关系($P<0.05$), 这与单一从坡

度或糙度来分析与产流量的关系相比, 更加深入地揭示了下垫面变化对产流量的影响。

2.3 坡度与糙度变异对产沙的影响

由不同坡度下侵蚀率随产流时间的变化(图 5)可知, 5 个坡度下, 在产流初期侵蚀速率迅速增加, 随着降雨历时的进行呈缓慢增长, 稳定中有较小的波动。这是因为在降雨初始阶段, 坡面表层比较疏松, 在雨滴的击溅作用下土粒分散, 一部分土粒飞溅到坡面外, 另一部分发生迁移沉落到坡面上, 在坡面堆积松散的颗粒, 当坡面开始产流后这些松散的颗粒被薄层水流挟带搬运至出口, 此时侵蚀速率迅速上升, 随着降雨的进行在雨滴的打击和夯实作用下, 土壤临时结皮形成, 径流率增强, 径流对表土剥蚀能力及对土粒的搬运能力增强, 侵蚀率处于缓慢增长阶段。因此, 在结皮发育不稳定时期, 侵蚀率仍处于增长阶段, 结皮发育稳定, 坡面微地貌形态基本稳定时, 侵蚀率处于相对稳定状态。

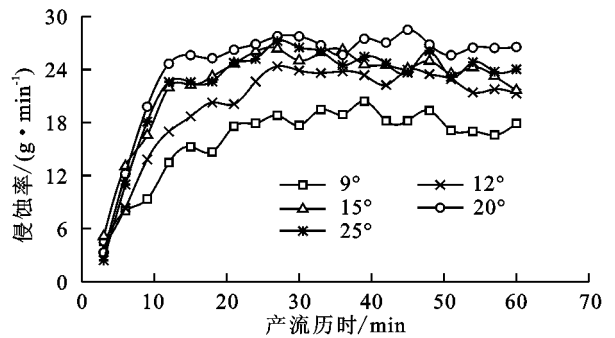


图 5 不同坡度下侵蚀率随产流时间的变化

由不同坡度对坡面产沙量的影响(图 6)可知, 5 个坡度其坡面产沙量表现为先增加后减少的趋势, 在坡面梯度为 3° 的坡面之间(9° , 12° 和 15°)均表现出显著性差异, 坡面梯度为 5° 的坡面仅在 20° 与 25° 坡面表现出显著性差异, 而 15° 与 20° 坡面未表现出显著性差异, 坡面侵蚀产沙量处于一个较稳定的状态。由此可以看出, 产沙量随坡度呈先增大后减小的趋势, 存在临界坡度, 本试验临界坡度在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 之间。且各坡面产沙量呈显著性差异, 说明坡度对侵蚀产沙存在显著作用。

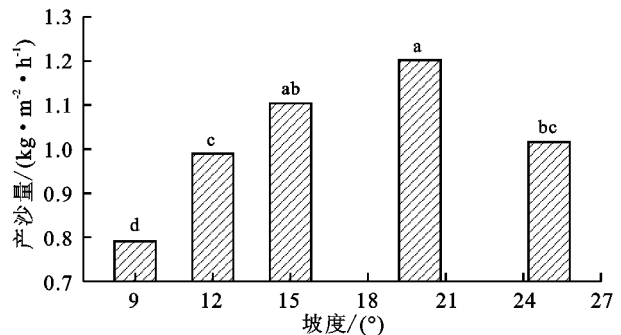


图 6 不同坡度对坡面产沙量的影响

从坡度角度分析,一方面从物质来源看,由于在整个侵蚀过程中,坡面以片蚀和细沟间侵蚀为主,雨滴的击溅作用是侵蚀泥沙物质的主要来源^[14]。当降雨侵蚀力一定时,溅蚀的总分散量与净搬运量均随坡度的增大而减小,临界坡度在 $21^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 之间^[15-16],故在坡度 $< 20^{\circ}$,随着坡度的增大,其坡面物质的补给也随着增大,坡度 $> 20^{\circ}$ 时随着坡度的增加物质补给呈减少趋势;另一方面,以片蚀与细沟间侵蚀为主导的侵蚀中,径流率对侵蚀产沙起主导作用^[2],由前面分析可以,随着坡度的增加径流量也呈先增大后减少的趋势,临界值也在 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 之间。但是,结合图 2 可以看出,径流量与产沙量存在不同步性。可能因为随着坡度的增加,土体在顺坡方向上的分力增大,其稳定性随之减弱,坡面表土的抗蚀能力减弱,所以可能在较小径流下,产生较大的产沙量。

从坡面微地形角度来分析,一方面从物质来源看,在同一坡度下,坡面糙度变异越大,其坡面起伏变化程度越大,土体的抗蚀性减弱。降雨前后坡面糙度变异率降幅表现为 $12^{\circ} > 9^{\circ} > 25^{\circ} > 15^{\circ} > 20^{\circ}$,说明在侵蚀过程中坡面的抗蚀性表现为 $12^{\circ} > 9^{\circ} > 25^{\circ} > 15^{\circ} > 20^{\circ}$;另一方面从径流来看,大的地表糙度变异,在降雨初期对地表径流形成阻滞作用,但是随着降雨的进行,一旦洼地蓄满,糙度变异大的坡面更加容易形成集中径流路,对地表的切割和拓宽作用更加显著^[5]。

2.4 产沙量与坡度及糙度变异的关系

点绘各坡度下次降雨产沙量—坡度及产沙量—糙率变异变率的关系见图 7 和图 8,并利用 SPSS 对二者进行回归分析。结果表明,各坡度下次降雨产沙量与坡度呈现显著的非线性二次关系,可表示为:

$$M_s = -0.0034S^2 + 0.1343S - 0.1437, \\ N=15, R^2=0.78, P<0.01 \quad (8)$$

次降雨产沙量与糙度变异变率呈非线性的二次关系,可表示为:

$$M_s = -0.001\Delta R_{cv}^2 + 0.0767\Delta R_{cv} - 0.3349, \\ N=15, R^2=0.56, P<0.01 \quad (9)$$

式中: M_s 为次降雨产沙量(kg); S 为坡度($^{\circ}$); ΔR_{cv} 为糙率变异变率(%)。

由图 7 可知,产流量随坡度的变化呈上升—下降的趋势,由公式(8)得到极值为 19.75° ,与预测临界坡度在 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 之间相一致。由图 8 可以看出,产沙量随着糙度变异变率的增加呈现下降的趋势,由公式(9)得到极值为 38.1% 。由图 7 和图 8 可以看出,坡度与糙度变异变率对产沙过程的变化呈不同的影响,说明坡面产沙过程是坡度与坡面微地形耦合的结果,

因此进一步分析了坡度与糙度变异变率耦合作用下对产沙量的影响。

通过回归分析产沙量与坡度和糙度变异变率的关系发现,在置信度 95% 时产沙量与二者呈显著线性关系,关系式为:

$$M_s = 0.014S - 0.008R_{cv} + 1.173, \\ N=15, R^2=0.82, P<0.01 \quad (10)$$

从公式(10)可以看出,坡度和糙度的耦合作用对产沙量的影响呈极显著关系($P<0.01$),这与单一从坡度或糙度来分析产沙量的关系相比,更加深入地揭示了下垫面变化对产沙量的影响。

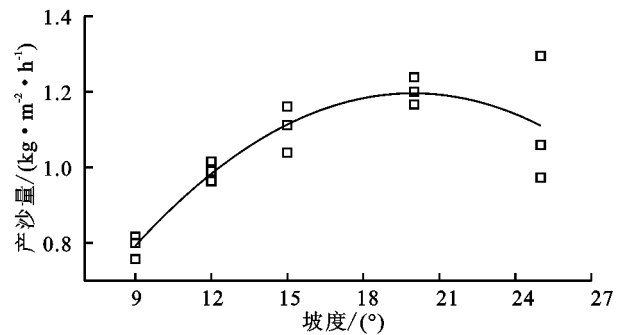


图7 坡度与产沙量的关系

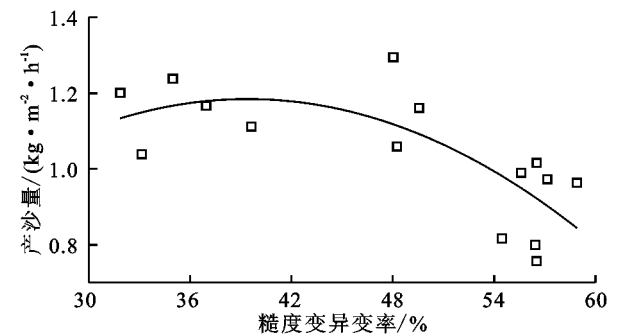


图8 糙度变异变率与产沙量的关系

3 讨论

由结果分析可知,产流量的极值在 15.04° ,产沙量的极值在 19.75° 。产沙与产流的极值没有表现出同步性,说明坡度不是影响产流与产沙的唯一因素。地表糙度能很好的地预测裸露地表产流量^[17],且在给定的相关参数下能够预测地表径流流速和流向^[18]。地表糙度通过均值来表征地表微地形的状态,但不同微地貌也可能具有同样的地表糙度,而变异系数可以表征坡面地形起伏的变异程度,反映坡面微地形变异的综合特性。通过回归分析径流量、产沙量与糙度变异变率的关系可知,二者均与糙度变异变率呈二次回归关系。对模拟方程求极值发现,存在临界糙度变异变率,这与郑子成等^[5]对地表糙度对产流、产沙室内试验研究得到临界糙度的结果相似。不同坡度下的产流量和产沙量表现为先增大后减少的趋势,而糙度变

异的降幅表现为: $12^{\circ} > 9^{\circ} > 25^{\circ} > 15^{\circ} > 20^{\circ}$ 。在大的糙度变异系数下,地表起伏程度变化较大,在水流的冲刷作用下,流路容易集中,因此产流量相对较大,且 20° 与 15° 下产流量大于其他坡度。而坡度在 25° 和 12° 时产沙量与产流量表现出不同步性,在一定程度上,大于临界坡度坡面的产流量会随着减小,且在片蚀及细沟间侵蚀阶段,产沙量主要与径流率有关,但是在坡度为 25° 和 12° 时,径流量表现为 $12^{\circ} > 25^{\circ}$,而产沙量表现为 $25^{\circ} > 12^{\circ}$,是因为在坡度的叠加作用下,土体的不稳定性随着坡度的增大而增大,在外力的作用下更容易发生侵蚀。由此可知,地表糙度对坡面径流量的影响较大,坡度对坡面产沙量的影响较为明显^[14]。坡度对坡面水沙的影响在一定程度上与其地表糙度存在一定关系,因此在考虑坡度对坡面水沙作用的过程时,可以考虑把地表糙度与坡度相结合,视为触发径流的边界条件。

4 结论

(1) 5 个坡度下其坡面总径流量表现为先增大后减少的现象。径流量在 20° 与 25° 坡面表现出显著性差异,临界坡度在 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 之间。坡面地表糙度变异降幅率为 $12^{\circ} > 9^{\circ} > 25^{\circ} > 15^{\circ} > 20^{\circ}$ 。

(2) 次降雨产流量与坡度、糙度变异变率均成二次回归关系,存在临界条件。次降雨产流量与坡度、糙度变异变率呈显著指数函数关系。

(3) 5 个坡度其坡面产沙量表现为先增大后减小的现象。产沙量在 20° 与 25° 坡面表现出显著性差异,而 15° 与 20° 坡面未表现出显著性差异,说明临界坡度在 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 之间。

(4) 次降雨产沙量与坡度、糙度变异变率均成二次回归关系,存在临界条件。次降雨产沙量与坡度、糙度变异变率呈极显著线性关系。

参考文献:

- [1] 和继军,蔡强国,刘松波. 次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(5):1263-1268.
- [2] 陈晓安,蔡强国,张利超,等. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J]. 山地学报,2010,28(4):415-421.
- [3] 张会茹,郑粉莉,耿晓东. 地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过

程的影响研究[J]. 水土保持研究,2009,16(4):52-54.

- [4] 贾莲莲,李占斌,李鹏,等. 降雨过程对地表糙度的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(5):30-33.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Zhao L S, Liang X L, Wu F Q. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(4): 400-409.
- [8] 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): 748-756.
- [9] 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.
- [10] 鲁克新,李占斌,张霞,等. 室内模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报,2011,25(2):6-9.
- [11] 刘瑞. 我国四类典型土壤的表土结皮发育特征及区域差异研究[D]. 武汉:华中农业大学,2009.
- [12] 刘青泉,陈力,李家春. 坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J]. 应用数学和力学,2001,22(5):449-457.
- [13] 郑子成,吴发启,何淑勤,等. 片蚀与细沟间侵蚀过程中地表微地形的变化[J]. 土壤学报,2011,48(5):931-937.
- [14] 吴普特,周佩华. 地表坡度与薄层水流侵蚀关系的研究[J]. 水土保持通报,1993,13(3):1-5.
- [15] 江忠善,刘志. 降雨因素和坡度对溅蚀影响的研究[J]. 水土保持学报,1989,3(2):29-35.
- [16] 吴普特,周佩华. 地表坡度对雨滴溅蚀的影响[J]. 水土保持通报,1991,11(3):8-13.
- [17] Idowu O J, Rickson R J, Godwin R J. Analysis of surface roughness in relation to soil loss and runoff at high rainfall intensities[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(12): 2339-2345.
- [18] Maske S P, Jain M K. Study on effect of surface roughness on overland flow from different geometric surfaces through numerical simulation[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(4): 2595-2616.