

径流量和坡度对复合坡薄层径流水力学特性的影响

吕 威, 武新英, 李法虎

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 为研究复合坡面径流运动过程及其水力学特性,通过实验室土槽模拟试验,测试了 7 个径流量(10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 L/(min · m))和 25 个坡度(5°~25°)组合(5 个直面坡、10 个凸型坡和 10 个凹型坡)条件下的径流流速,计算了径流深度、雷诺数和弗劳德数。结果显示,直面坡径流流速随流程增加而增大并趋于稳定,且随流量或坡度增大而增大。凸型坡下坡面的径流流速大于上坡面,而凹型坡下坡面的径流流速小于上坡面。径流深度的变化规律与流速相反。径流雷诺数沿流程为一常数,而径流弗劳德数则随之增大。径流雷诺数和弗劳德数随径流量增加而显著增大。坡度对雷诺数影响较小而对弗劳德数影响显著。试验条件下,径流雷诺数介于 200~800 之间,弗劳德数小于 2.5。当径流量小于 25 L/(min · m)时坡面径流属于层流状态,反之为紊流。凸型坡上坡面的径流为缓流而下坡面为急流,凹型坡径流大多数情况下属于急流状态。

关键词: 坡型; 径流流速; 径流深度; 水流运动型态; 水流流态

中图分类号: S157.1; TV121.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0011-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.05.002

Shallow Runoff Hydraulic Characteristics Affected by Runoff Rate and Slope Gradient of Composite Slope

LÜ Wei, WU Xinying, LI Fahu

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083)

Abstract: In order to study runoff movement process and its hydraulic characteristics on composite slopes, runoff velocity was measured for 7 runoff rates (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 L/(min · m)) and 25 combinations (5 uniform linear slopes, 10 concave slopes, and 10 convex slopes) of slope gradients (5°, 10°, 15°, 20° and 25°) by a series of simulated soil flume experiments in laboratory, and corresponding runoff depth, Reynolds number, and Froude number were calculated as well. Total experimental treatments were 175. Results indicated that runoff velocity on uniform linear slope increased with flow path and progressively tended to be steady, and it increased with the slope gradient or runoff rate. Runoff velocity on the downslope segment of convex slope was greater than that on the upslope segment, while the runoff velocity on the downslope of concave slope was smaller than that on the upslope segment. Runoff depth on uniform linear slope decreased with flow path and tended to be steady, and it increased with the runoff rate or decreased with slope gradient. Runoff depth on the downslope segment of convex slope was smaller than that on the upslope segment, but an opposite tendency existed for concave slope. The Reynolds number (Re) of runoff was a constant value along with flow path, and it increased significantly with the increase of runoff rate but was less affected by slope gradient and the combination of slope gradients. The Froude number (Fr) of runoff increased with flow path, and it increased significantly with the increase of slope gradient or runoff rate. Under experimental conditions, Re value was ranged between 200~800, and Fr value was smaller than 2.5. Runoff belonged to laminar flow when runoff rate was smaller than 25 L/(min · m), otherwise it was turbulent flow. The runoff on upslope segment of convex slope was subcritical flow while that on its downslope segment was torrent flow, and the runoff on concave slope usually belonged to torrent flow status in most cases.

Keywords: slope type; runoff velocity; runoff depth; water flow movement patterns; flow regime

收稿日期: 2016-04-13

资助项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20120008110024); 国家自然科学基金重点项目(41230746)

第一作者: 吕威(1987—), 男, 博士生, 主要从事水土保持研究。E-mail: lvwei19890314@126.com

通信作者: 李法虎(1963—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事农业水土工程和水土环境的研究。E-mail: lifahu@cau.edu.cn

土壤侵蚀的发生及其强度大小主要取决于坡面径流的水力学特性以及地表土壤状况^[1-2]。水流流态作为表征坡面径流水动力学特性的基本参数,是分析坡面流属性、径流冲刷及泥沙输移的基础^[3]。坡面径流流态与坡面状况密切相关^[4]。坡度以及坡型直接影响坡面径流流态和坡面细沟密度^[5],是影响降雨产流与土壤侵蚀的重要因素^[4,6]。潘成忠等^[7]的试验结果表明,坡面径流流速和弗劳德数随坡度的增加而增大。而张宽地等^[8]的试验结果显示,坡面薄层水流流态指数随着坡度的增大呈现先减小后增大之趋势,其坡度界限值约为 8.6°。吴淑芳等^[9]认为,坡面薄层水流流速和水深主要受径流量控制,且径流量大小直接影响径流流态。Shih 等^[10]认为,坡面径流流态沿流程而变化,在坡面中部呈层流状态而在下部为紊流状态。在复合坡上、下 2 个坡面的转折处,由于重力沿坡面分力的改变而影响地表径流流速^[11],从而导致坡面径流流态及其动能发生明显变化^[12]。Rieke-Zapp 等^[5]的试验结果显示,直面坡以及曲面凸形坡在坡脚处产生的泥沙沉积显著多于曲面凹形坡。因坡度突变而导致的径流流态的变化,可能是 LISEM (Limburg Soil Erosion Model)模型不能准确模拟黄土高原土壤侵蚀的主要原因^[12]。

目前有关坡面径流水力学特性的研究大都针对直面坡,且只考虑整个坡面径流的平均状况。对自然界中存在的主要坡型即由不同坡度的直面坡相互连接而形成的复合坡^[13],其坡面径流流态变化以及土壤侵蚀机理过程尚不清晰。现有的国内外土壤侵蚀模型一般都假设坡型为直面坡^[14],复杂地形条件下的土壤侵蚀机理模型仍未建立^[15]。基于此,本文以复合坡为研究对象,通过室内土槽模拟试验,研究不同坡面径流量和坡度对径流流速、径流深度和径流流态的影响,以期通过对复合坡径流水力学特性的深入理解,为进一步改善土壤侵蚀模型的预测预报精度奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2015 年 6 月—9 月在中国农业大学水利与土木工程学院人工降雨大厅进行,试验期间的平均室温为(27.2±1.6)℃。试验土槽的长、宽、高分别为 2.0,0.4,0.3 m。在土槽中间部位通过铰链分为上、下两部分,每段土槽长度均为 1.0 m,其坡度可在 0°~30°之间调控。土槽首部设置一深度为 0.4 m 的消力池,在土槽底部铺设一层粗砂布(36 目),然后将 5~7 mm 厚的试验土壤用胶水粘于砂布上部,这样既可使土槽底面的糙率接近于裸土表面,为试验提供与自然条件较为相似的下垫面条件,又可保证整个试

验过程中糙率的相对稳定性。

试验土壤取自北京市昌平区沙河镇井西村苗圃(40°9'N,116°15'E,海拔高度 45 m),土壤取样深度为 0—10 cm。试验土壤为粉质壤土,其粘粒(≤0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)和砂粒(0.02~2 mm)含量分别为 5.2%,49.6%和 45.2%。

1.2 试验设计

自然界的复杂土坡,总体可概化为由不同坡度的直面坡所组成的凸型坡和凹型坡 2 大类。试验土槽上、下两坡段的坡度分别设置为 5°,10°,15°,20°,25°。通过改变上、下两坡段的坡度组合,形成 5 个直面坡(5°,10°,15°,20°,25°)、10 个凸形坡(上坡坡度/下坡坡度分别为 5°/10°,5°/15°,5°/20°,5°/25°,10°/15°,10°/20°,10°/25°,15°/20°,15°/25°,20°/25°)和 10 个凹形坡(上坡坡度/下坡坡度分别为 25°/20°,25°/15°,25°/10°,25°/5°,20°/15°,20°/10°,20°/5°,15°/10°,15°/5°,10°/5°),共 25 个坡度组合。试验径流量分别采用 10,15,20,25,30,35,40 L/(min·m)。试验共 175 个处理,每个处理 3 次重复。

1.3 测定方法

试验采用马氏瓶控制水头,通过阀门开度控制径流量,采用电解质脉冲法测量坡面水流流速。试验水质为自来水。在距离进水口 20 cm 处安装 KCl 溶液电解质脉冲发生器。在距电解质脉冲发生器 10 cm 的上坡和距上、下坡转折处 30 cm 的下坡,每隔 10 cm 放置一组探针,整个坡面共设置 12 组探针。试验开始后,在径流稳定以后注入电解质溶液,同时开启数据采集器自动采集记录数据信号。信号采样频率为 10 点/s,每次采样时间为 50 s。在试验过程中,定时用温度计测定径流水样温度,以便修正坡面径流的雷诺数和弗劳德数。

1.4 参数计算与数据处理

1.4.1 径流流速 根据数据采集器采集的电导率数据及其相应时间,计算两组探针之间的平均流速:

$$v = \Delta l / (t_{i+1} - t_i) \quad (1)$$

式中: v 为径流流速(m/s); Δl 为相邻两个探针之间的距离(m); t_i 和 t_{i+1} 分别为电解质到达数据采集点 i 和 $i+1$ 处时所对应的时间(s)。

1.4.2 径流深度 由于坡面径流深度很小以及径流受下垫面粗糙状况等诸多因素的影响,因此很难准确测量径流深度。试验条件下坡面径流为恒定流,结合达西定律,通过计算求得坡面径流水深沿流程的变化情况。其计算公式为:

$$h = q / v \quad (2)$$

式中: h 为径流深度(m); q 为流经土槽的单宽流量($\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$); v 为径流流速(m/s)。

1.4.3 雷诺数和弗劳德数 雷诺数(Reynolds number, Re)是表征水流运动型态的参数,定义为径流惯性力与粘滞力的比值。当 $Re \leq 500$ 时明渠水流的运动型态为层流,而当 $Re > 500$ 时为紊流^[16]。雷诺数采用式(3)计算:

$$Re = vR/\mu \tag{3}$$

式中: Re 为雷诺数,无量纲; v 为径流流速(m/s); R 为水力半径(m), $R = A/\chi$,其中 A 为过流断面面积(m^2); χ 为湿周(m); μ 为水的运动粘滞系数(m^2/s), $\mu = \frac{0.01775}{1+0.0337T+0.000221T^2}$,其中 T 为水温($^{\circ}C$)。

弗劳德数(Froude number, Fr)定义为水流惯性力与重力之比。根据弗劳德数大小可以判断水流的流态,当 $Fr < 1$ 时为缓流, $Fr = 1$ 为临界流,而 $Fr > 1$ 时为急流。明渠水流的弗劳德数按式(4)计算:

$$Fr = v/(gh)^{0.5} \tag{4}$$

式中: Fr 为弗劳德数,无量纲; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; h 为径流深度(m); v 为径流流速(m/s)。

各处理平均值之间的差异显著性采用 SPSS 20.0 软件(SPSS Inc., Chicago, USA)进行单因素方差分析

(ANOVA)。当 ANOVA 的 F 值统计显著($P \leq 0.05$)时,采用 Tukey 检验法区分其平均值。

2 结果与分析

2.1 径流流速

2.1.1 径流量和坡度的影响 在坡面径流量为 10, 20, 30, 40 L/(min · m) 以及坡度为 5° , 15° , 25° 的直面坡上,径流流速沿流程的变化见图 1。在其它径流量和坡度条件下径流流速沿流程的变化趋势与此相似,为清晰起见未给出数据(下同),图中虚线是按照变化趋势而添加的连线(下同)。直面坡的径流流速随着流程的增加而增大,然后逐渐趋于其稳定值(图 1),并且径流量或坡度越大,坡面径流流速越大。这些结果与已有的结论一致^[17-18]。坡度或径流量越大,其径流流速趋于稳定所需的距离越长(图 1)。结果显示,稳定径流流速随径流量增加呈幂函数增大($v = aq^b, R^2 \geq 0.94^{***}$),随坡度则呈对数增大($v = A \ln S + B, R^2 \geq 0.83^{***}$),与张光辉等^[3]的结论相似。稳定径流流速与径流量幂函数关系以及与坡度对数函数关系中的常数项见表 1。

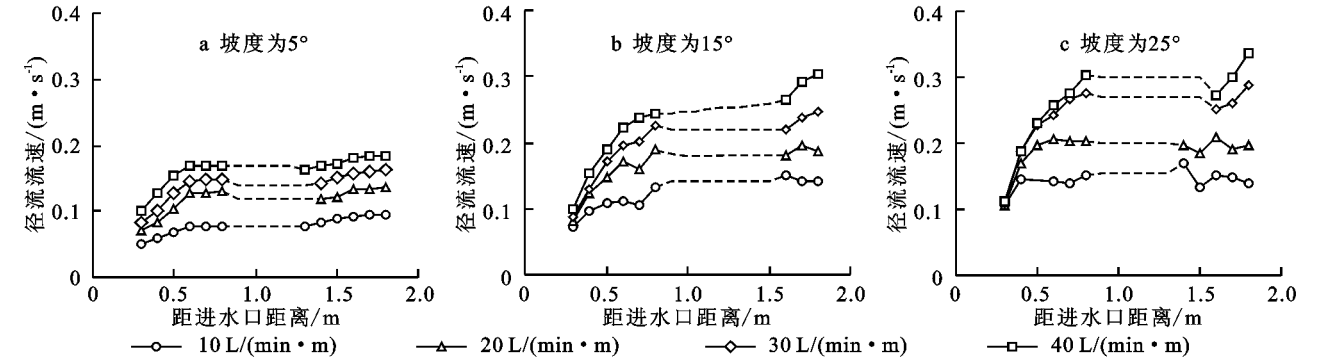


图 1 不同径流量和坡度条件下直面坡径流流速沿流程的变化

表 1 稳定流速 v (m/s)与径流量 q [L/(min · m)] 的幂函数关系以及与坡度 $S(^{\circ})$ 的对数函数关系

测定项目	坡度/ ($^{\circ}$)	函数关系	常数项		R^2
			$a(A)$	$b(B)$	
S	5	$v = aq^b$	0.0325	0.4604	0.9895***
	10		0.0225	0.6478	0.9952***
	15		0.0497	0.4531	0.9846***
	20		0.0502	0.4699	0.9887***
	25		0.0438	0.5294	0.9450***
q	10	$v = A \ln S + B$	0.0398	0.0224	0.8335***
	15		0.0489	0.0332	0.9260***
	20		0.0468	0.0553	0.9211***
	25		0.0735	0.0196	0.9830***
	30		0.0708	0.0406	0.9999***
	35		0.0665	0.0639	0.9651***
	40		0.0774	0.0565	0.9838***

2.1.2 坡型和坡度组合的影响 不同坡型和坡度组合对坡面径流流速的影响见图 2。对于凸型坡,其

上、下坡面的径流流速均随着流程的增加而增大,且下坡面的径流流速大于上坡面的流速。虽然凹型坡上、下坡面的径流流速也随着流程的增加而增大,但下坡面的径流流速明显小于上坡面,此系凹型坡转折处的下坡面突然变缓所致。上、下坡面的坡度相差越大,其径流流速的差异亦越大。径流量和坡度对凸型坡和凹型坡径流流速的影响与直面坡的相似,即径流量或坡度越大,其径流流速越大。

2.2 径流水深

2.2.1 径流量和坡度的影响 直面坡的径流深度沿流程增加逐渐减小直至趋于稳定(图 3)。坡面径流量越大,径流深度越大;而坡度越大,其径流深度越小(图 3)。统计分析结果显示,稳定径流深度随着径流量的增大呈线性增加($h = a'q + b', R^2 \geq 0.93^{***}$),但随坡度增加呈幂函数减小($h = A' S^{b'}, R^2 \geq 0.81^{***}$),各函数关系中的常数项见表 2。

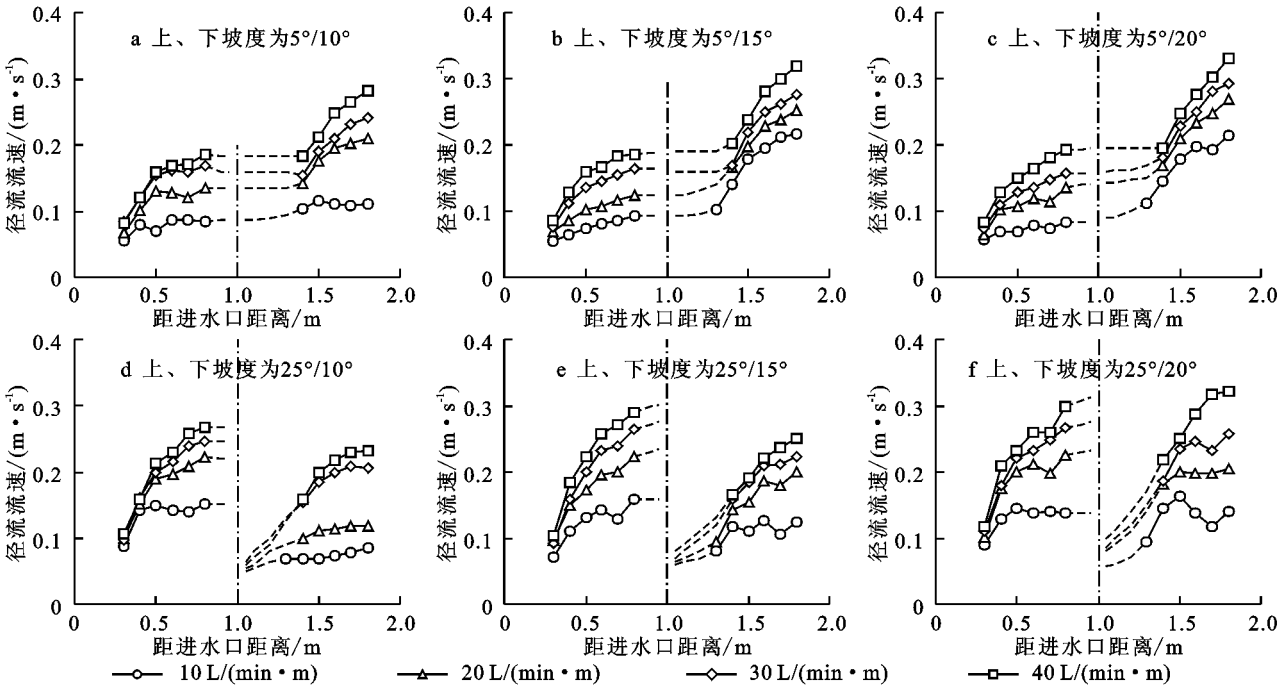


图 2 不同径流量以及上、下坡坡度组合的凸型坡(a,b,c)和凹型坡(d,e,f)条件下径流流速沿流程的变化

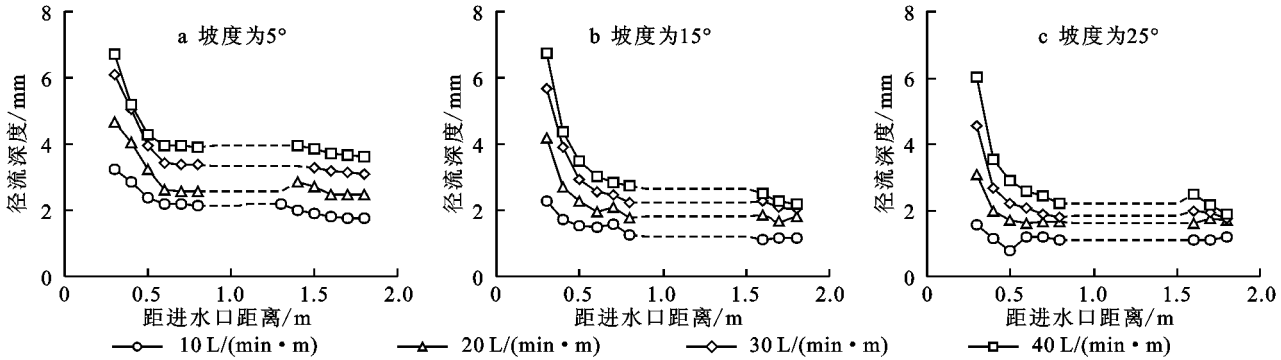


图 3 不同径流量和坡度条件下直面坡径流深度沿流程的变化

表 2 稳定径流深度 $h(\text{mm})$ 与径流量 $q/[\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m})]$ 的直线关系以及与坡度 $S(^{\circ})$ 的幂函数关系

测定项目	坡度/ ($^{\circ}$)	函数关系	常数项		R^2
			$a'(A')$	$b'(B')$	
S	5	$h=a'q+b'$	0.3261	1.4641	0.9938***
	10		0.1642	1.4441	0.9745***
	15		0.2092	1.0520	0.9391***
	20		0.1872	1.0282	0.9786***
	25		0.1889	0.9588	0.9331***
q	10	$h=A'S^{B'}$	1.7953	-0.297	0.8648***
	15		2.0740	-0.311	0.9858***
	20		2.4199	-0.262	0.9426***
	25		2.8109	-0.341	0.9927***
	30		3.0213	-0.304	0.9577***
	35		3.2054	-0.259	0.8064***
	40		3.4766	-0.322	0.9317***

2.2.2.2 坡型和坡度组合的影响 凸型坡和凹型坡上、下坡面的径流深度均随流程增加而减小并趋于稳定,但凹型坡径流深度在坡面转折处出现突变(图 4)。上、下坡面的坡度相差越大或径流量越大,其径流深度相差越大。由于凸型坡下坡面坡度大于上坡面,其坡面转折处水流通畅,因此下坡面径流深度小于上坡面;

而凹型坡的下坡面坡度小于上坡面坡度,水体在下坡段首部雍起,从而导致下坡面径流深度大于上坡面。

2.3 雷诺数

2.3.1 径流量和坡度的影响 直面坡的径流雷诺数沿流程的变化很小,几乎为一常数(图 5)。径流雷诺数随着径流量增加而显著增大但受坡度的影响较小,这与潘成忠和上官周平[7]的结论一致。试验条件下,径流雷诺数基本在 200~800 之间变化。当坡面径流量小于 25 L/(min·m) 时,雷诺数小于 500,表明此时水流处于层流状态;而当径流量大于此值时,雷诺数大于 500,水流由层流状态转为紊流状态。

2.3.2 坡型和坡度组合的影响 与直面坡相似,凸型坡和凹型坡的径流雷诺数随流程变化也基本保持常数(图 6)。虽然坡度变化对径流雷诺数的影响不明显,但凹型坡的径流雷诺数略小于凸型坡。不论凸型坡还是凹型坡,坡面径流量越大,雷诺数越大。整体而言,25 L/(min·m) 的单宽径流量仍可作为复合坡面径流运动型态判别的临界径流量,即小于此值时径流属于层流而大于此值时为紊流。

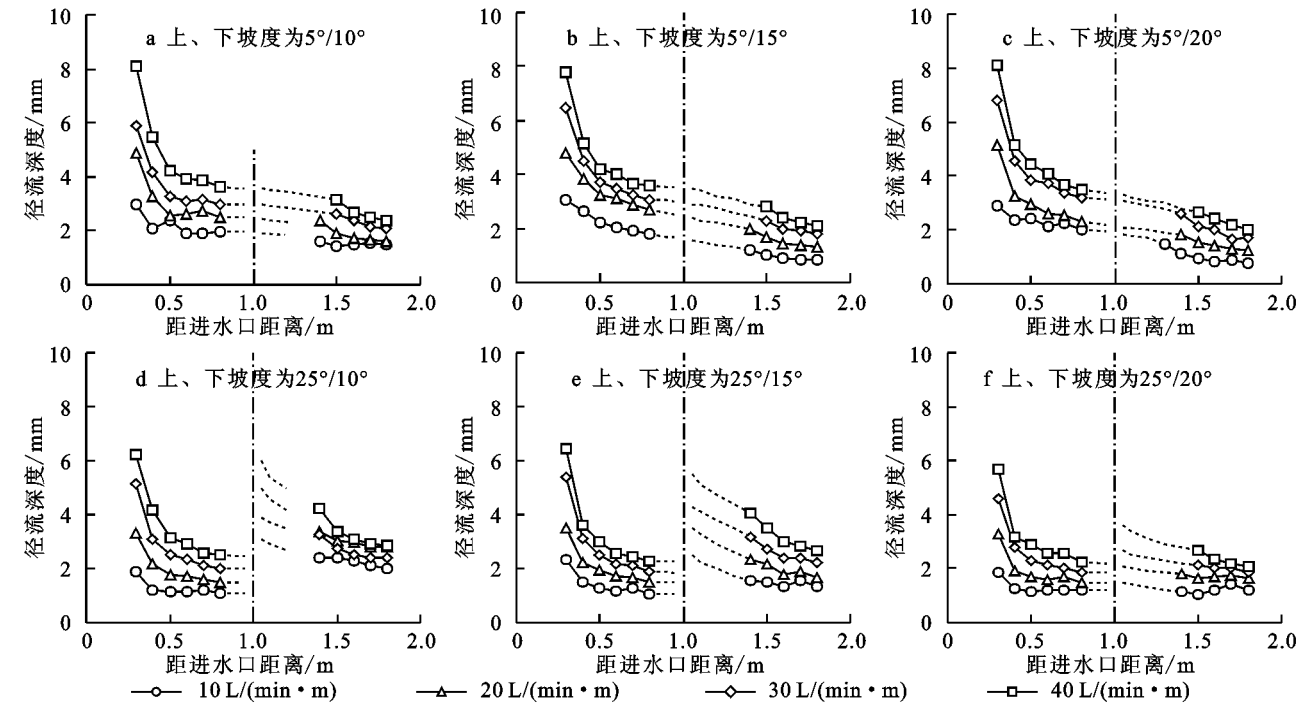


图4 不同径流量以及上、下坡坡度组合的凸型坡(a,b,c)和凹型坡(d,e,f)条件下径流深度沿流程的变化

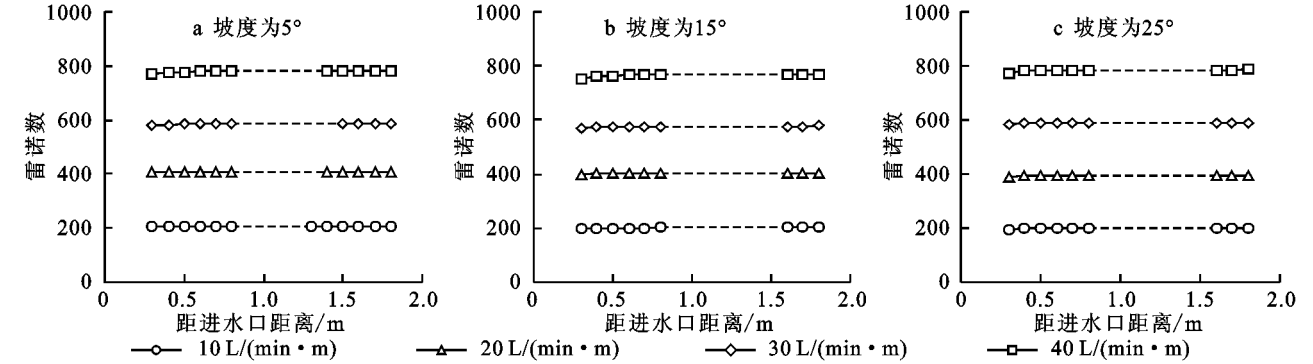


图5 不同径流量和坡度条件下直面坡径流雷诺数沿流程的变化

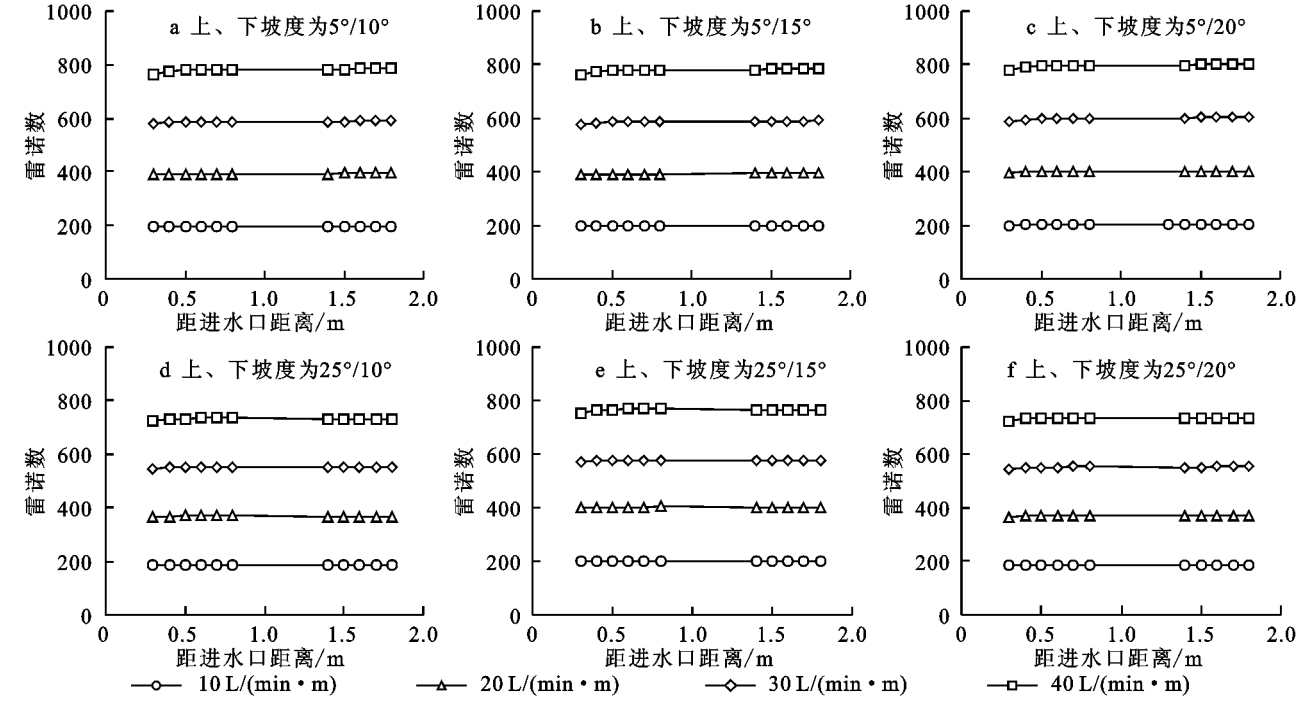


图6 不同径流量及上、下坡坡度组合的凸型坡(a,b,c)和凹型坡(d,e,f)条件下径流雷诺数沿流程的变化

根据雷诺数和矩形渠道水力半径的定义,可以推导出 $Re = \frac{1}{\mu} \frac{q}{1+2h/B}$, 其中 B 为试验土槽宽度(m)。对于给定的试验土槽, B 为一定值。由于径流深度 h 远小于土槽宽度 B , 可以认为 h/B 近似趋于零, 因此 $Re \propto q$, 即雷诺数 Re 可以近似看作单宽径流量 q 的单值函数, 因此 q 越大 Re 也相应的越大(图 5、图 6)。在试验条件下, 所有试验处理的沿流程平均雷诺数 Re 与单宽径流量 q 的拟合关系式为 $Re = 18.857q$ ($n=350, R^2=0.972^{***}$), 这与理论推导关系一致。坡面径流运动型态与径流动能密切相关, 其运动型态的转变改变了土壤侵蚀强度。相对于层流而言, 紊流条件下的坡面径流具有更大的水蚀能力和输沙能力^[19]。

2.4 弗劳德数

2.4.1 径流量和坡度的影响 不同径流量和坡度条件下直面坡径流弗劳德数沿流程的变化过程见图 7。弗劳德数随流程增加而增大, 坡度或径流量越大, 弗

劳德数越大, 但径流量对弗劳德数的影响并不显著。试验条件下, 坡度为 5° 时的径流弗劳德数在整个试验过程中均小于 1, 因此此时的坡面径流为缓流。随坡度增大, 弗劳德数沿流程以更快的速度增大, 因此更长坡段上的径流将处于急流状态。

2.4.2 坡型和坡度组合的影响 不同径流量和坡度组合条件下凸型坡和凹型坡径流弗劳德数沿流程的变化见图 8。凸型坡和凹型坡上、下坡面的径流弗劳德数均随流程增加而增大。凸型坡下坡面的径流弗劳德数大于上坡面; 而凹型坡的径流弗劳德数在上、下坡面转折处发生突变, 下坡面的径流弗劳德数小于上坡面。径流量和坡度对凸型坡和凹型坡径流弗劳德数的影响不显著。在试验条件下, 凸型坡上坡面的径流弗劳德数均小于 1 而下坡面则大于 1, 说明上坡面径流为缓流而下坡面为急流。除上、下坡面的起始部分以及径流量较小而导致径流弗劳德数小于 1 而属于缓流外, 试验条件下凹型坡的径流流态基本属于急流, 较大的上坡面坡度是导致这一特征的原因。

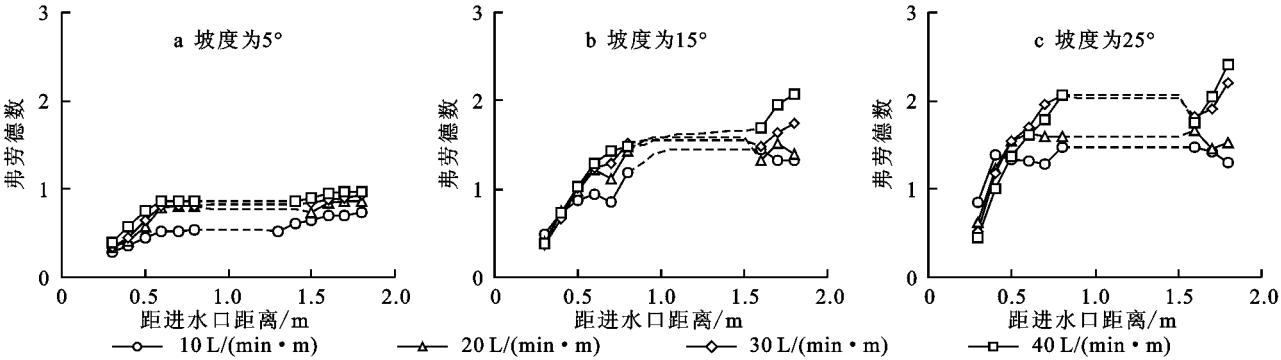


图 7 不同径流量和坡度条件下直面坡径流弗劳德数沿流程的变化

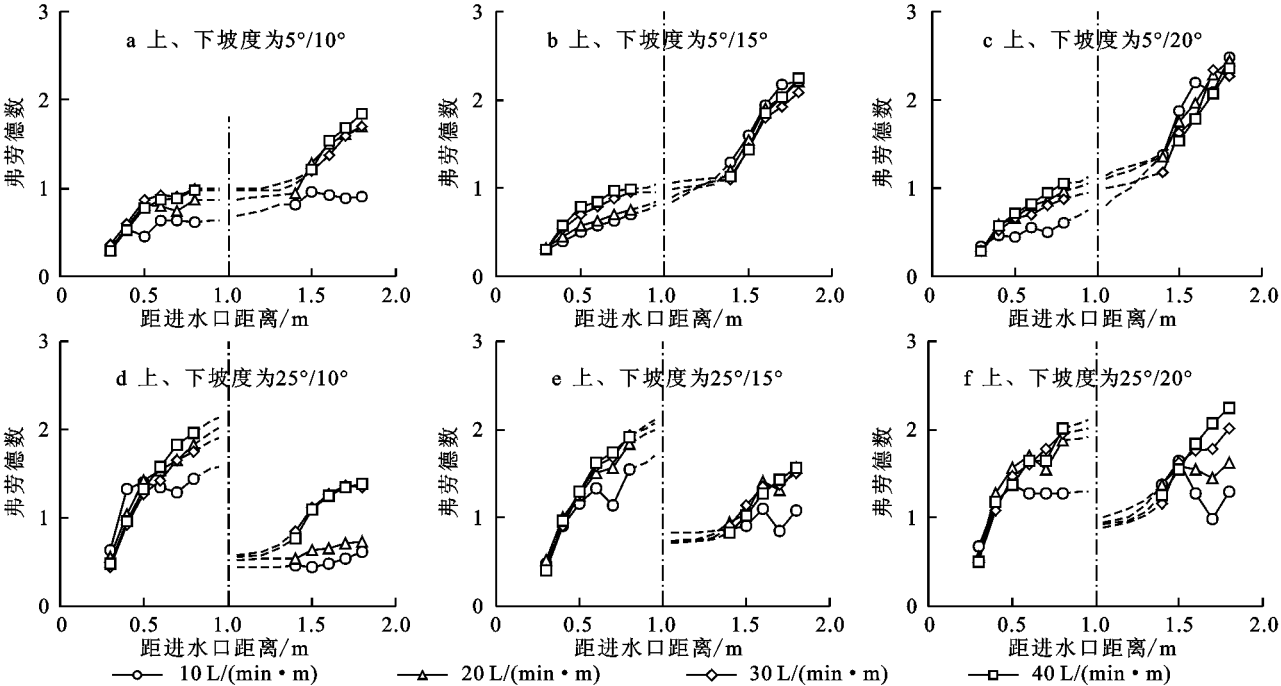


图 8 不同径流量及上、下坡坡度组合的凸型坡(a,b,c)和凹型坡(d,e,f)条件下径流弗劳德数沿流程的变化

根据曼宁公式 $v = \frac{1}{\xi} R^{1/3} j^{1/2}$ 和弗劳德数定义,对于矩形沟道可以推导出 $Fr = \frac{j^{1/2}}{\xi \sqrt{gh} (2/B + 1/h)^{2/3}}$, 式中: j 为水面坡降(无量纲); ξ 为沟道糙率。由于 $B \gg h$, 所以 $Fr \approx \frac{h^{1/6} j^{1/2}}{\xi \sqrt{g}}$, 即弗劳德数 Fr 与径流深度 h 的 $1/6$ 次方以及水面坡降 j 的 $1/2$ 次方成正比。对于恒定非均匀流, 稳定条件下的径流深度 h 和水面坡降 j 均与坡度或坡度组合相关, 从而导致 Fr 值也随坡度或坡度组合而变化。

3 结论

(1) 直面坡的径流流速随流程增加而增大并趋于稳定, 流速随流量或坡度增大而显著增大。凸型坡下坡面的径流流速大于上坡面, 而凹型坡下坡面的径流流速小于上坡面。

(2) 直面坡的径流深度沿流程逐渐减小直至趋于稳定, 径流深度随流量增加或坡度减小而增大。凸型坡下坡面径流深度小于上坡面, 而凹型坡下坡面径流深度大于上坡, 且径流量越大或上、下坡面的坡度相差越大, 其上、下坡面径流深度的差值亦越大。

(3) 雷诺数沿流程为一常数。雷诺数随径流量增加而显著增大, 坡度及坡度组合对其影响较小。凹型坡的径流雷诺数略小于凸型坡。试验条件下, $25 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m})$ 的单宽径流量可以作为判别径流运动型态的临界流量, 小于此值时的径流属于层流状态, 反之属于紊流状态。直面坡的径流弗劳德数随流程增加而增大, 径流量或坡度越大, 弗劳德数越大。凸型坡下坡面的径流弗劳德数大于上坡面, 而凹型坡下坡面的径流弗劳德数小于上坡面。试验条件下, 凸型坡上坡面的径流为缓流, 下坡面则为急流; 而凹型坡的径流流态大部分属于急流。

参考文献:

[1] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 159-165.
[2] 魏霞, 李勋贵, 李占斌, 等. 植被覆盖下黄土凸型复合坡面水流特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 147-154.
[3] 张光辉, 卫海燕, 刘宝元. 坡面流水动力学特性研究[J].

水土保持学报, 2001, 15(1): 58-61.
[4] 夏卫生, 雷廷武, 刘春平, 等. 降雨条件下坡面薄层水流速度特征[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 119-123.
[5] Rieke-Zapp D H, Nearing M A. Slope shape effects on erosion: A laboratory study[J]. Soil Science Society of America Journal Society, 2005, 69(5): 1463-1471.
[6] Assouline S, Ben-Hur M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing[J]. Catena, 2006, 66(3): 211-220.
[7] 潘成忠, 上官周平. 降雨和坡度对坡面流水动力学参数的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 6(6): 843-851.
[8] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 坡面薄层流水动力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 182-189.
[9] 吴淑芳, 吴普特, 原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 14-19.
[10] Shih H M, Yang C T. Estimating overland flow erosion capacity using unit stream power [J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(1): 46-62.
[11] 吴永, 何思明, 李新坡. 降雨作用下坡面侵蚀的水动力机理[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2440-2444.
[12] Hessel R, Jetten V, Liu B Y. Calibration of the LISEM model for a small Loess Plateau catchment[J]. Catena, 2003, 54(1/2): 235-254.
[13] 吕威, 李淑芹, 雷廷武, 等. 聚丙烯酰胺应用对黄土复合坡面降雨产流的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 71-79.
[14] Bulygina N S, Nearing M A, Stone J J, et al. DWEPP: a dynamic soil erosion model based on WEPP source terms [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32(7): 998-1012.
[15] 张光辉. 土壤侵蚀模型研究现状与展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 389-396.
[16] 赵昕, 张晓元, 赵明登, 等. 水力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 104-110.
[17] Ekwue E I, Harrilal A. Effect of soil type, peat, slope, compaction effort and their interactions on infiltration, runoff and raindrop erosion of some Trinidadian soils [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(1): 112-118.
[18] 刘和平, 王秀颖, 刘宝元. 人工模拟降雨下细沟与细沟间流速的沿程分布[J]. 地理研究, 2011, 30(9): 1660-1668.
[19] 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.