

不同坡度及植被覆盖度下的坡面流特性数值模拟

胡静¹, 覃光华¹, 王瑞滢¹, 王帅人¹, 肖鸿²

(1.四川大学水利水电学院, 成都 610042; 2.四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610042)

摘要: 为深入研究坡度与植被对坡面流水力学特性的影响, 以 Navier—Stokes 方程为基础, 建立了非淹没刚性植被坡面流模型, 并对该模型进行验证。运用该模型, 参考西南山区实际情况, 设置 6 个坡度、6 个单宽流量和 6 种覆盖度组合条件下共 216 种工况, 研究了坡面流的水力学特性。结果表明: 流速与坡度、流量及植被覆盖度之间呈指数变化, 相关系数为 0.987。相同流量下, 随着坡度的增加, 流速增速逐渐减小, 植被对坡面流的减缓作用逐渐减弱。阻力系数受到坡度、流量和植被覆盖的影响, 存在临界覆盖度, 低于临界覆盖度时, 阻力系数与流量呈现负相关, 高于临界覆盖度时, 阻力系数与流量的呈现正相关。且临界覆盖度受到坡度的影响, 坡度越大, 临界覆盖度越大。研究结果可为山区水土流失的预防以及山洪水沙耦合致灾机制的研究提供理论参考。

关键词: 植被; 坡面流; 数值模拟; 阻力系数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)03-0037-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2022.03.006

Numerical Simulation of Hydraulic Characteristics of Overland Flow Under Different Slope and Vegetation Coverage

HU Jing¹, QIN Guanghua¹, WANG Ruiying¹, WANG Shuairan¹, XIAO Hong²

(1.College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610042;

2.State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610042)

Abstract: In order to study the effect of slope and vegetation on the hydrodynamic characteristics of overland flow, a non-submerged rigid vegetation slope flow model based on the Navier-Stokes equation was established. The effectiveness of the model was tested by some experimental data. The calculated results were basically consistent with the experimental results. Based on the model and the actual situation of Southwest Mountain area, the hydraulic characteristics of overland flow were studied under 216 combined conditions of 6 slopes, 6 unit discharges, and 6 coverage degrees. The results showed that the relationship between flow velocity and slope, discharge and vegetation coverage is exponential, and the correlation is 0.987. Under the same flow, with the increase of slope, the growth rate of flow velocity decreased gradually, and the effect of vegetation on the slope flow slowed down gradually. The resistance coefficient was affected by slope, discharge, and vegetation cover, and there was a critical coverage. Below the critical coverage, the resistance coefficient was negatively correlated with discharge, and above the critical coverage, the resistance coefficient was positively correlated with discharge. The critical coverage was affected by the slope, the greater the slope, the greater the critical coverage. The results can provide theoretical reference for the prevention of soil and water loss and the study of the coupling mechanism of flood and sediment.

Keywords: vegetation; overland flow; numerical simulation; resistance coefficient

近年来,极端天气频繁,由极端降雨引发的山洪灾害使得山区人民的生命财产安全受到严重威胁。暴雨使得坡地受到侵蚀,产生大量泥沙,洪水与泥沙的耦合作用将显著增大山洪灾害的致灾风险^[1]。由

暴雨产生的坡面流是坡面土壤侵蚀的主要动力之一,坡度、雨强、植被覆盖度、下垫面粗糙度等多种因素对其水力学特性均产生影响^[2-4]。深入研究坡面的水流特性,对防治水土流失以及预防山区水沙耦合致灾具

有十分重要的意义。

目前,多数国内外学者^[5-10]采用室内放水或野外冲刷等试验方式对其进行研究。Miyata 等^[2]通过野外观测发现,相比裸坡,植被覆盖可以有效减缓径流,减少土壤侵蚀;刘文剑等^[9]通过定床水槽冲刷试验发现,流速与植被覆盖度呈负相关,阻力系数与植被覆盖度呈正相关;张光辉^[11]通过室内水槽试验发现,流速与阻力系数主要受流量控制,坡度对其影响不明显;但刘洋等^[12]通过分析植被覆盖度、坡度、流量和粗糙度对流速的影响发现,坡度对流速的贡献大于流量,植被覆盖度对流速的影响最小。由于坡面流水流形态复杂,各组试验条件、工况设置不一,所得结论也不尽相同,含植被坡面流的水力学特性还需进一步探讨。也有一些学者^[13-15]采用数值模拟的方法对含植被坡面流进行研究,但大部分仅通过改变底面糙率系数来模拟不同的植被覆盖情况,未考虑到植被在空间上对水流的影响。本文尝试利用数值模拟的手段,将坡面上的植被概化为刚性非淹没圆柱体,并把植被作用从底部摩擦项中剥离出来,以拖曳力和惯性力的形式引入到控制方程中,更为精确地模拟植被对坡面水流的作用。针对山区坡度较大且流量较大的情况,对不同覆盖度下坡面流的水力特性进行深入研究,为山洪水沙耦合致灾机制的研究提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 数值模型建立

1.1.1 控制方程 坡面流水深较浅,一般为几毫米甚至不足 1 mm,对于一般的韧性植物仅淹没其茎干,对此,本文对植被进行简化,将这些非淹没的韧性植物简化成为刚性、直立和非淹没的圆柱群。同时,不同于传统的将植被因子归入底部摩擦项,本文通过对控制方程进行空间平均,将植被的作用以拖曳力和惯性力的形式引入到动量方程中,从而更加准确地模拟植被对坡面流的影响。

在非淹没情况下,植物覆盖度(Φ)=1-空隙率(θ);空隙率计算公式为:

$$\theta = 1 - \frac{m\pi D^2}{4} \quad (1)$$

式中: m 为单位面积上的植物根数; D 为植物直径(mm)。

本文采用空间平均定理来建立植物区水流运动的控制方程,水深平均的植物区流体连续性方程为:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial x} (\theta P^\beta) + \frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial y} (\theta Q^\beta) = R - I \quad (2)$$

沿水深平均的 x 方向动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} P^\beta + \frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial x} (\theta \frac{P^\beta P^\beta}{H}) +$$

$$\frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial y} (\theta \frac{P^\beta Q^\beta}{H}) + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{\tau_{bx}^\beta}{\rho} + \frac{1}{\rho \theta} \frac{\partial}{\partial x} (\theta H T_{xx}^\beta) + \frac{1}{\rho \theta} \frac{\partial}{\partial y} (\theta H T_{xy}^\beta) - F_x \quad (3)$$

沿水深平均的 y 方向动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} Q^\beta + \frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial x} (\theta \frac{P^\beta Q^\beta}{H}) + \frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial y} (\theta \frac{Q^\beta Q^\beta}{H}) + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\frac{\tau_{by}^\beta}{\rho} + \frac{1}{\rho \theta} \frac{\partial}{\partial x} (\theta H T_{xy}^\beta) + \frac{1}{\rho \theta} \frac{\partial}{\partial y} (\theta H T_{yy}^\beta) - F_y \quad (4)$$

式中: t 为时间(s); x 、 y 为空间坐标; H 为水深(m); η 为自由面水位(m); θ 为空隙率; P^β 、 Q^β 为水深平均的单宽流量(m^2/s); R 为降雨源项(m/s); I 为渗流汇项(m/s); τ_{bx} 为沿河床表面的底部摩擦力($(kg \cdot m)/s^2$); T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 为沿水深平均的有效应力($(kg \cdot m)/s^2$); F_x 、 F_y 为植物作用力项($(kg \cdot m)/s^2$)。

对于底摩擦项,采用恒定均匀流条件下的曼宁公式进行计算:

$$\tau_{bx}^\beta = \frac{\rho g n^2}{H^{7/3}} P^\beta \sqrt{(P^\beta)^2 + (Q^\beta)^2}, \quad \tau_{by}^\beta = \frac{\rho g n^2}{H^{7/3}} Q^\beta \sqrt{(P^\beta)^2 + (Q^\beta)^2} \quad (5)$$

有效应力 T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 为:

$$T_{xx}^\beta = \frac{1}{H} \int_{-z_b}^{\eta} (\tau_{xx}^\beta - \rho (\bar{u}^\beta - U^\beta)^2 - \rho \bar{u}'' \bar{u}''^\beta - \rho \bar{u}' \bar{u}'^\beta) d\xi \quad (6)$$

$$T_{xy}^\beta = \frac{1}{H} \int_{-z_b}^{\eta} (\tau_{xy}^\beta - \rho (\bar{u}^\beta - U^\beta)(\bar{v}^\beta - V^\beta) - \rho \bar{u}'' \bar{v}''^\beta - \rho \bar{u}' \bar{v}'^\beta) d\xi \quad (7)$$

$$T_{yy}^\beta = \frac{1}{H} \int_{-z_b}^{\eta} (\tau_{yy}^\beta - \rho (\bar{v}^\beta - V^\beta)^2 - \rho \bar{v}'' \bar{v}''^\beta - \rho \bar{v}' \bar{v}'^\beta) d\xi \quad (8)$$

忽略垂向速度,以及水平方向速度沿垂向的变化,植物作用力为:

$$F_x = \int_{-z_b}^{\eta} (f_{Dx} + f_{Ix}) d\xi = \frac{1}{2} \frac{mDC_{Dx}}{\theta H} \sqrt{(P^\beta)^2 + (Q^\beta)^2} P^\beta + \frac{1-\theta}{\theta} C_{mx} \frac{\partial P^\beta}{\partial t} \quad (9)$$

$$F_y = \int_{-z_b}^{\eta} (f_{Dy} + f_{Iy}) d\xi = \frac{1}{2} \frac{mDC_{Dy}}{\theta H} \sqrt{(P^\beta)^2 + (Q^\beta)^2} Q^\beta + \frac{1-\theta}{\theta} C_{my} \frac{\partial Q^\beta}{\partial t} \quad (10)$$

1.1.2 边界条件 上下游的边界条件与水流状态有关。对于缓流,在上游边界给定流量,即 $P = P_0$, $Q = 0$,在下游边界给定水深,即 $H = H_0$,对于其他物理量,令其在入流出流边界上的梯度为 0,即 $\partial/\partial x = 0$ 。

对于急流,在上游边界给定流量,即 $P = P_0$, $Q = 0$,在上游边界给定水深,即 $H = H_0$,同样,对于其他物理量,令其在入流出流边界上的梯度为零,即 $\partial/\partial x = 0$ 。

对于水跃,是一个从急流到缓流的变化过程,上游边界给定流量和水深,下游边界给定水深。

在流体与固体的交界面上,当固体为固定的时候,流体运动应满足无滑移边界条件,即流体速度在交界面的法向和切向均为零。对于 $(\hat{k})^\beta - (\hat{\epsilon})^\beta$ 方程,同样需要在固体边界处给定边界条件。原则上,固体边界处的紊动能为零。但在实际计算中,通常情况下的网格尺寸不足以捕捉湍流边界层内的物理量变化。因此,本模型在边界层内给 $(\hat{k})^\beta - (\hat{\epsilon})^\beta$ 的固壁边界条件,而不是在边界上给定。

采用的壁面定律为:

$$\frac{u_\tau}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0} \quad \text{其中 } y_0 = \begin{cases} \frac{\nu}{Eu_*} & \text{水力光滑区} \\ \frac{k_s}{30} & \text{水力粗糙区} \end{cases} \quad (11)$$

式中: u_τ 为湍流边界层内的切向流速(m/s); u_* 为摩阻流速(m/s); k_s 为冯卡门常数,取值为0.41; y 为距离壁面的法向距离; E 为经验常数,取值为9.0。该壁面定律的适用范围为 $^{[16]}$: $30 < u_* y / \nu < 100$ 。

根据上述经验壁面定律,迭代求解得到摩阻流速,进一步可以得到 $(\hat{k})^\beta - (\hat{\epsilon})^\beta$ 方程的固壁边界条件:

$$\hat{k}^\beta = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}, \hat{\epsilon}^\beta = \frac{u_*^3}{\kappa y} \quad (12)$$

1.2 模型验证

模型验证算例取自 Zhao 等 $^{[17]}$ 的无人渗含植被坡面流试验。试验在长、宽、高分别为8,0.5,0.25 m的水槽中进行。该试验采用了3个粗糙的含植被坡面,试验中将直径分别为2,3.2,4 cm的PVC圆管作为植被茎干粘在粗糙坡面上,圆管表面的粗糙度约为0.015。3个粗糙面上的圆柱体数量均为135株/ m^2 ,对应的植被覆盖度分别为4%,11%,17%。坡面上的圆柱体交错排列,在平面上形成规则的三角形基团,以使水流均匀地流过植被。Zhao 等 $^{[17]}$ 在槽上端至下端设置了4个测量位置,分别为1.5,3.5,5.5,7.5 m,对于每个测量位置,分别在模拟植被茎干的前、后和两侧测量4个水流深度并取其平均值,选取1~2,3~4,5~6,7~8 m的4个纵向断面流速的平均值为平均流速。试验设置坡度为9°,流量分别为 0.5×10^{-3} , 0.75×10^{-3} , 1×10^{-3} , 1.25×10^{-3} , $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

数值模拟与 Zhao 等 $^{[17]}$ 模型试验设置一致。计算域长为8 m,宽0.5 m, x 方向空间步长 $\Delta x = 0.1 \text{ m}$, y 方向空间步长 $\Delta y = 0.08 \text{ m}$ 。时间步长 $\Delta t = 0.01 \text{ s}$,计算总时长为600 s,水流达到稳定状态。模型设置单位面积上植物根数为135,底床粗糙率 $n =$

0.03。紊流模块中,底部摩擦紊动贡献率系数(η_b)为0.6,植物作用力紊动贡献率系数(η_k)为0.3,拖曳力系数参数初设为: $\alpha_0 = 37$, $\alpha_1 = 0.57 + 4.3\varphi$ 。水深随流量变化的数值模拟结果与试验结果见图1,结果表明,数值模拟的结果与试验的结果误差在5%以内,建立的含植被坡面流数值模拟模型能够较好地模拟含植被情况下坡面流的水动力过程。

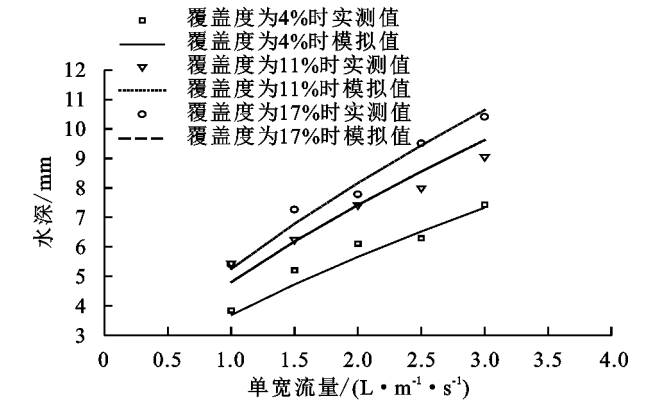


图 1 实测值与数值模拟结果对比

2 结果与分析

2.1 坡度与覆盖度对流速的影响

利用数值模拟分析不同坡度以及不同植被覆盖度下坡面流的变化特征。坡度的设置参考中国科学院成都分院土壤研究室的调查 $^{[18]}$,西南紫色土丘陵区绝大部分坡地的坡度在5°~25°,因此本次模拟的坡度设置为4°,8°,12°,16°,20°,24°,即底坡 J 依次为0.035,0.070,0.105,0.141,0.176,0.213。植被的设置考虑到坡面流水深较浅,对于刚性植被仅能淹没茎干,因此,本文中的覆盖度不同于一般意义上的植被覆盖度(即森林的投影面积占总土地面积之比),而是植被茎干的投影面积。根据杨博 $^{[19]}$ 对四川省植被覆盖度的调查研究,西南丘陵区总体的植被覆盖度较高,但部分地区由于人类活动的原因,也存在植被覆盖度较低的区域,因此,设置植被覆盖度(Φ)为0,1.507%,3.014%,4.522%,6.029%,7.536%。考虑到西南丘陵区坡耕地坡面的临界侵蚀雨强约为0.4 mm/min $^{[20]}$,设置主要单宽流量为2,4,6,8,10,12 L/(m·s)。由于坡面流水深较浅,可用水深近似代替水力半径。坡面初始曼宁系数(n)为0.03,侧壁给定无滑移边界条件。

2.1.1 坡度对流速的影响 当坡度=4°,由不同覆盖度下单宽流量每增加0.25 L/(m·s)时流速的增率(图2)可知,随着单宽流量和植被覆盖度的增加,流速的增加幅度逐渐减少,且流速的变化受单宽流量的影响更大,在其他坡度也观察到同样的规律。其原因可能在于随着流量增加,流速增加的同时阻力系数也增加,从而减小了流速的递增趋势,并且植被的存在

减缓了坡面流速的增加速度。

坡度对坡面出口断面的平均流速有一定影响。由图 3 可知,在植被覆盖度和单宽流量相同的情况下,水流势能、坡面出口断面的平均流速随着坡度的增加而增加,但是增加的幅度逐渐减小。相同流量下,坡度增加同样的度数,流速的增值逐渐减小,如在单宽流量为 0.25 L/(m·s),覆盖度 $\Phi=1.507\%$ 时,坡度每增加 4°,流速的增值从 0.031 m/s 减小至 0.014 m/s。当坡度超过 16°后,流速的变化速度明显减慢,坡度从 20°增加至 24°时,流速的增率仅为 7.37%。此外,低流量时,流速随坡度增幅不大,随着流量增加,

坡度对流速的影响更加明显。

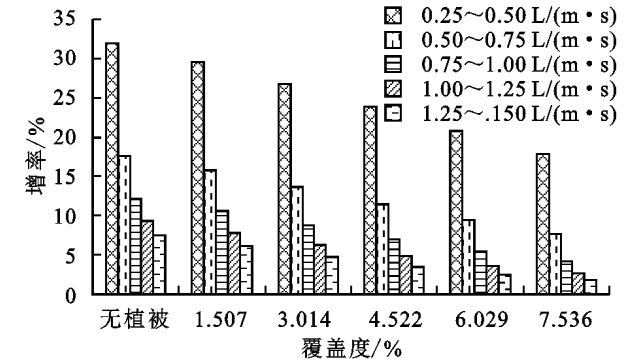


图 2 坡度为 4°时不同覆盖度下流速的增率

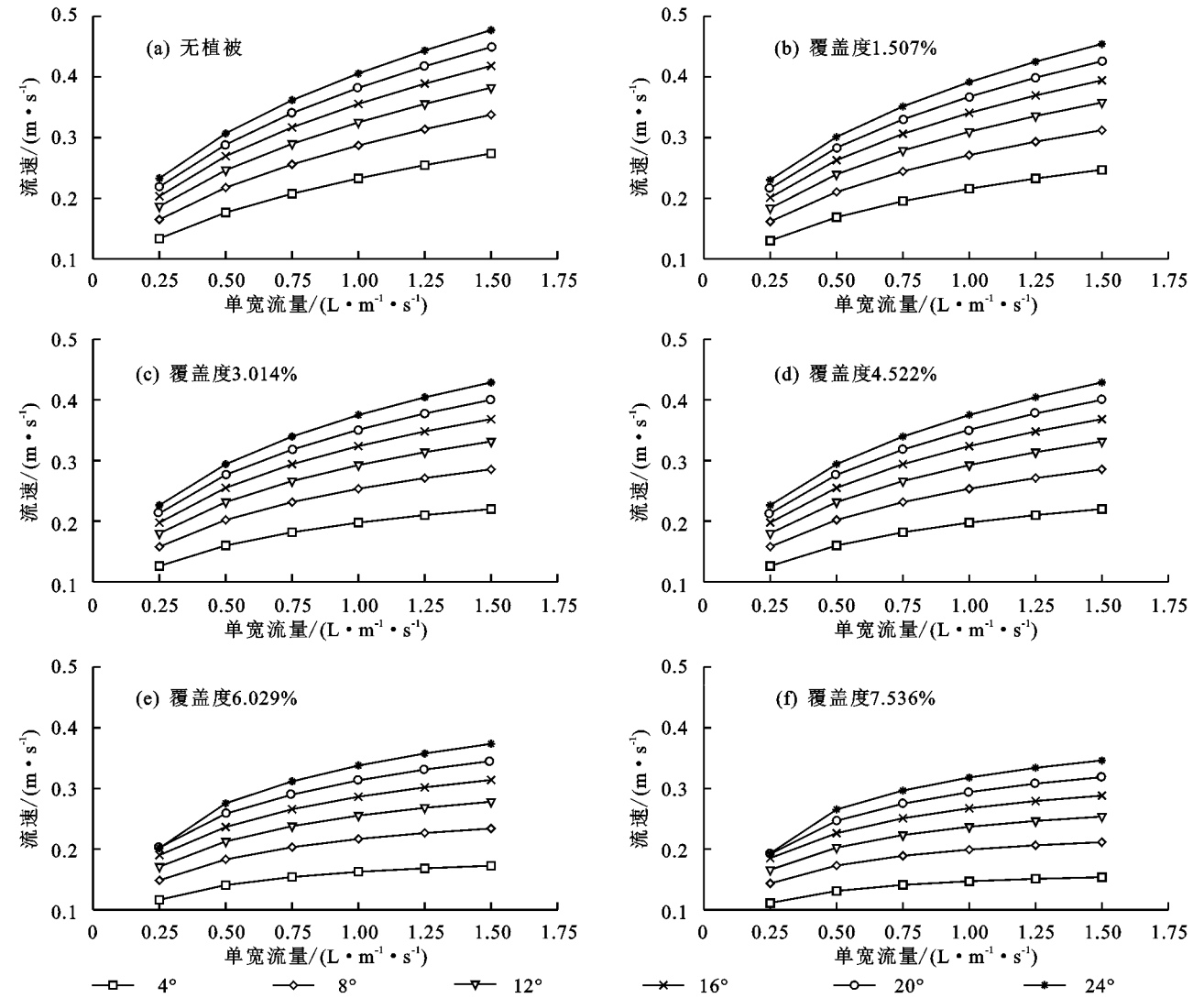


图 3 不同覆盖度下流速与单宽流量和坡度的关系

2.1.2 植被覆盖度对流速的影响 图 4 为不同坡度下,流速随覆盖度的变化趋势。植被覆盖对流速的影响在坡度较小时更明显,随着坡度增大,植被覆盖度对流速的影响逐渐减弱,且植被对坡面流速的减缓作用在高流量时更加明显。在坡度为 8°且植被覆盖度从 1.507%增加到 4.522%时,流量为 0.25 L/(m·s) 的情况下,流速的降低率为 5.06%,但流量为 1.5 L/(m·s) 时,流速的降低率达到 15.80%。这可能是由

于流量较大时,相应的流速也较大,水流流经植被阻挡处耗散的能量更多,受到的阻力也较大,流速的减缓速率更大。

通过非线性回归,得到流速与坡度、流量和覆盖度之间的关系式为:

$$u=5.608q^{0.336}J^{0.346}(1-Cr)^{3.730} \quad R^2=0.987$$

(13)

式中:q 为单宽流量(m²/s);J 为水力坡度;Cr 为植被覆

盖度(%)。决定性系数为 0.987,说明流速与坡度、流量、植被覆盖度的关系密切,且均为指数关系。

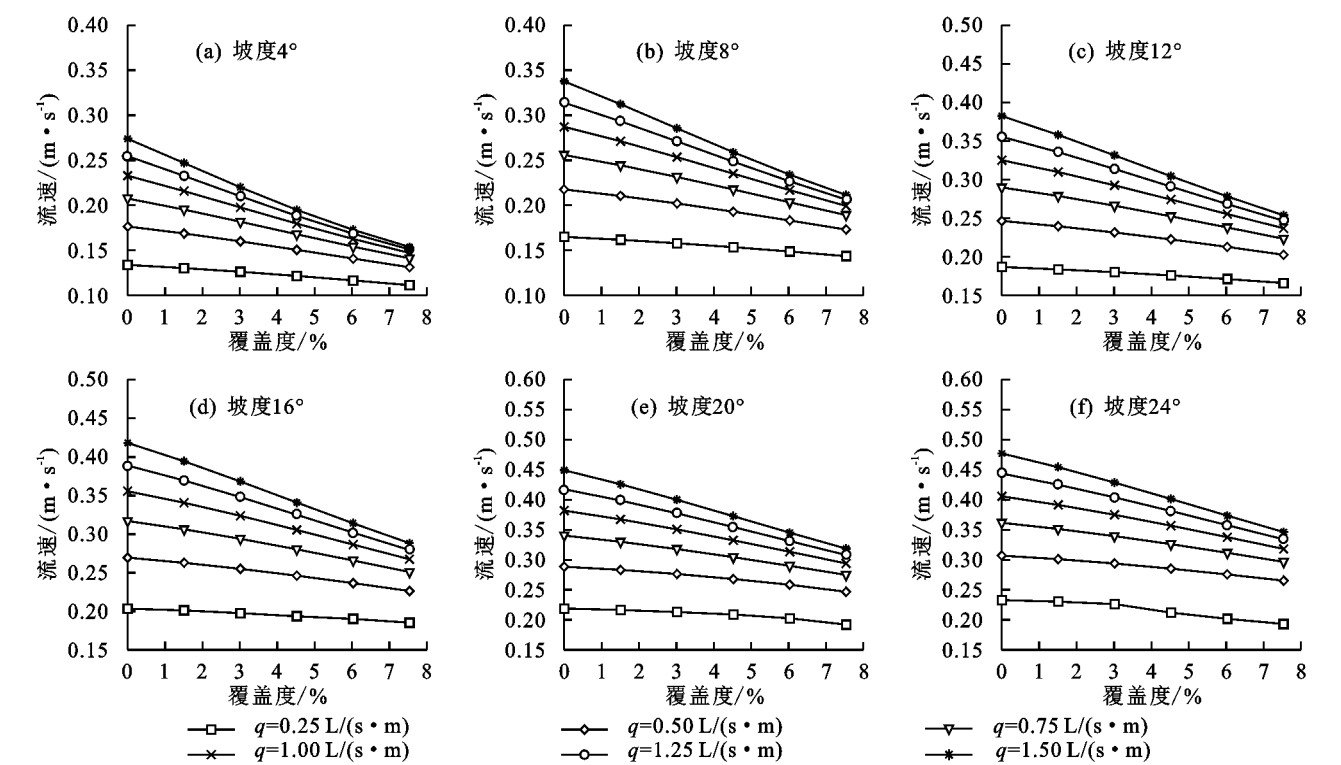


图4 不同坡度下流速随覆盖度的变化

2.2 坡度与覆盖度对阻力系数的影响

坡面流水流特性研究中,阻力一直是学者们关注的重点。由于坡面流水流态复杂,不同下垫面水流可能处于不同的流态^[21],目前关于含植被坡面流阻力的变化规律尚未有定论。本文主要针对植被覆盖条件下坡面薄层流的阻力系数进行研究。

2.2.1 坡度对阻力系数的影响 由图5可知,阻力系数随坡度的变化较为复杂,受到植被覆盖度的影响。在无植被时及植被覆盖度为1.507%时,阻力系数随着坡度的增大而增大,随着单宽流量的增大而减小,因为植被排列较为稀疏,产生的阻力较小,坡面流的阻力主要为底面摩擦力。随着植被覆盖度的增加,植被带来的附加阻力增加,阻力系数与坡度的关系发生改变。当植被覆盖度为3.014%和4.522%时,低流量情况下,阻力系数随坡度增加而增加;高流量情况下,坡度越大,阻力系数反而越小,且流量越大,阻力系数越大。当植被覆盖度>4.522%时,随着坡度的增加,阻力系数逐渐减小。

2.2.2 植被覆盖度对阻力系数的影响 由图6可知,坡度一致且单宽流量相同时,阻力系数随着下垫面植被覆盖度的增加而增加。当单宽流量为0.25 L/(m·s)时,阻力系数为0.57~1.21,当单宽流量为1.5 L/(m·s)时,阻力系数为0.40~1.26,即流量越大,阻力系数随覆盖度的变化范围越大。在同一坡度,植被覆盖度较低时,阻力系数随单宽流量的增加

逐渐减小,但是随着覆盖度的增加,阻力系数变为随单宽流量的增加而增加。也就是说,存在临界覆盖度使得阻力系数随流量的变化规律前后不同。在坡度低于8°时,临界覆盖度为3.014%;当坡度为12°~16°时,临界覆盖度为4.522%;当坡度为20°,24°时,临界覆盖度分别为6.028%,7.536%,坡度越大,临界覆盖度越大。在植被覆盖度低于临界覆盖度时,植被的阻水效益不明显。

3 讨论

本文依据 Navier-Stokes 方程,通过时间和空间平均,将植被的作用以拖曳力和惯性力的形式引入到动量方程,建立了非淹没刚性植被坡面流模型,并通过该模型探讨了不同坡度及不同植被覆盖度下坡面流的水力学特性。本研究表明,坡度和植被覆盖度都显著影响坡面流的流速,大流量下植被对流速的减缓作用更明显,分析原因是流量较大时,水流与植被之间的碰撞加剧,与坡面之间的阻力加大,流速下降也更快,这与唐科明等^[22]的研究结果一致。阻力系数随着坡度和覆盖度的增加而增加,且存在临界覆盖度,本研究中并未发现临界坡度,可能是由于模型未考虑下渗的影响,且坡度最大设置为24°,尚未到达临界坡度。本文构建的坡面流模型还存在一些不足,模型中坡面为不透水平面,并未考虑下渗对水流的影响。

响,与实际的土壤坡面有一定差别。且野外坡面流冲刷过程中,土壤被水流侵蚀,表面形成细沟,水流中也会含有一定的泥沙,这些因素也会对坡面流的流速

和阻力系数产生影响。针对这些问题,在接下来的研究中,考虑在模型中加入下渗模块,并设置土壤参数,模拟自然坡面下的水流过程。

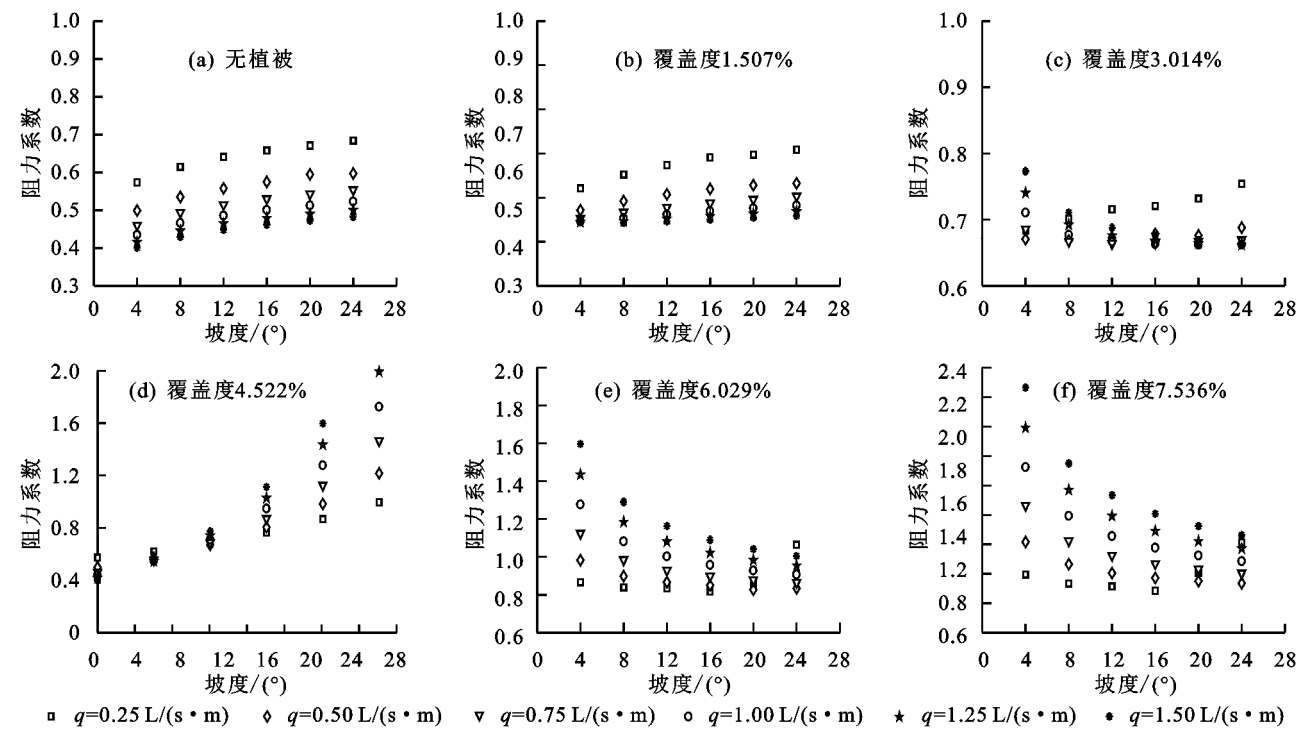


图 5 不同覆盖度下阻力系数随坡度和流量的变化

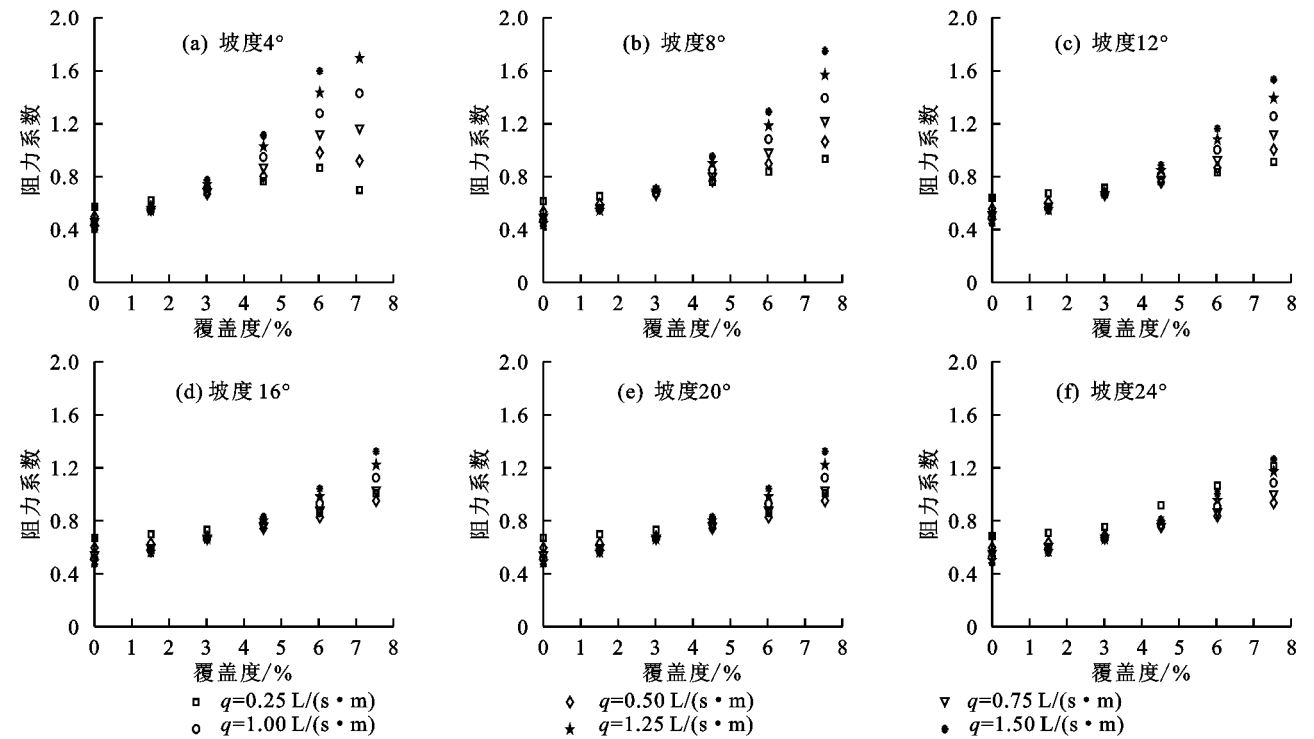


图 6 不同坡度下阻力系数随覆盖度和流量的变化

4 结论

(1)坡面流流速随坡度的增加而增大,随植被覆盖度的增加而减小。坡度对流速的影响在流量较大时更明显,植被对流速的减缓作用在缓坡更为明显。通过回归分析发现,流速与坡度、流量及植被覆盖度

之间呈指数变化,相关性为 0.987。

(2)阻力系数受坡度、流量和植被覆盖度的共同影响。存在临界覆盖度,坡度越大,临界覆盖度越大。低于临界覆盖度时,阻力系数随流量的增加而减小;高于临界覆盖度时,阻力系数随流量的增加而增加。

参考文献:

[1] 刘超,聂锐华,刘兴年,等.山区暴雨山洪水沙灾害预报预警关键技术研究构想与成果展望[J].工程科学与技术,2020,52(6):1-8.

[2] Miyata S, Kosugi K, Gomi T, et al. Effects of forest floor coverage on overland flow and soil erosion on hillslopes in Japanese cypress plantation forests [J]. Water Resources Research, 2009, 45(6): e149.

[3] 杨帆,张宽地,杨婕,等.不同覆盖度下坡面流植被阻力特性研究[J].农业机械学报,2016,47(11):157-162.

[4] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J].水科学进展,2014,25(6):825-834.

[5] 戴矜君,程金花,张洪江,等.植被覆盖下坡面流阻力变化规律[J].水土保持学报,2016,30(2):44-49.

[6] 施明新.地表粗糙度对坡面流水力特性的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.

[7] Wang X K, Yan X F, Zhou S F, et al. Longitudinal variations of hydraulic characteristics of overland flow with different roughness [J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(1): 66-74.

[8] 杨坪坪,张会兰,王云琦,等.植被覆盖度与空间格局对坡面流水动力学特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):26-33.

[9] 刘文剑,张会兰,王玉杰,等.模拟植被地表覆盖率和粗糙度对坡面流水动力特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):1-7.

[10] 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,2009,17(6):843-851.

[11] 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.

[12] 刘洋,孙保平,杨坪坪,等.模拟植被地表覆盖率与地表粗糙度对坡面流流速的影响[J].浙江农业学报,2017,29(3):498-505.

[13] Ghani U, Anjum N, Pasha G A, et al. Investigating the turbulent flow characteristics in an open channel with staggered vegetation patches [J]. River Research and Applications, 2019, 35(7): 966-978.

[14] Xia X L, Liang Q H, Ming X D, et al. An efficient and stable hydrodynamic model with novel source term discretization schemes for overland flow and flood simulations [J]. Water Resources Research, 2017, 53(5): 3730-3759.

[15] Ersoy M, Lakkis O, Townsend P. A Saint-venant model for overland flows with precipitation and recharge [J]. Mathematical and Computational Applications, 2021, 26(1): 1-27.

[16] Biglari B S T W. Numerical modeling of flow around bridge abutments in compound channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(2): 156-164.

[17] Zhao C H, Gao J E, Huang Y F, et al. Effects of vegetation stems on hydraulics of overland flow under varying water discharges [J]. Land Degradation and Development, 2015, 27(3): 748-757.

[18] 中国科学院成都分院土壤研究室.中国紫色土上篇[M].北京:科学出版社,1991.

[19] 杨博.四川省植被覆盖度变化及驱动力分析[D].成都:四川农业大学,2018.

[20] 吕甚悟,李君莲.降雨及土壤湿度对水土流失的影响[J].土壤学报,1992,29(1):94-103.

[21] 姚文艺.坡面流阻力规律试验研究[J].泥沙研究,1996(1):74-82.

[22] 唐科明,张光辉,曹颖.动床条件下植被盖度对坡面流水动力特性的影响[J].西北农林科技大学学报,2020,48(2):148-154.

(上接第 36 页)

[17] 严友进,戴全厚,伏文兵,等.喀斯特裸坡产流产沙过程试验研究[J].生态学报,2017,37(6):2067-2079.

[18] 脱登峰.黄土高原风水交错侵蚀对坡面产流产沙及土壤质量的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.

[19] 桑琦明,郑粉莉,王一菲,等.东北黑土区冻融、风力、水力交互作用对坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):87-95.

[20] 左小锋,郑粉莉,张加琮,等.典型薄层黑土区前期地表风蚀作用影响坡面水蚀的研究[J].土壤学报,2021,58(5):1145-1156.

[21] Tuo D F, Xu M X, Gao L Q, et al. Changed surface roughness by wind erosion accelerates water erosion [J]. Journal of Soil and Sediments, 2016, 16(1): 105-114.

[22] 脱登峰,许明祥,郑世清,等.黄土高原风蚀水蚀交错区侵蚀产沙过程及机理[J].应用生态学报,2012,23(12):3281-3287.

[23] 脱登峰,许明祥,马昕昕,等.风水交错侵蚀条件下侵蚀泥沙颗粒变化特征[J].应用生态学报,2014,25(2):381-386.