

地表覆盖对坡面流流速影响的模拟试验

曹 颖^{1,2}, 张光辉², 唐科明², 罗榕婷²

(1. 北京市地质研究所, 北京 100120; 2. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘 要: 植被覆盖对坡面流流速的影响, 会引起坡面输沙特征的改变, 但在陡坡条件下盖度与流速的响应关系尚不明确。针对目前国内外研究的不足, 本研究采用变坡实验水槽在较大坡度($5^{\circ} \sim 25^{\circ}$)、流量($0.25 \sim 2 \text{ L/s}$)和盖度($0\% \sim 25\%$)范围内, 系统研究了坡面流平均流速与盖度、坡度、流量之间的关系。结果表明: 坡面流流速在 $0.15 \sim 1.35 \text{ m/s}$ 内变化, 流速与盖度、坡度和流量关系密切。随着地表模拟盖度的增加, 水流克服覆盖物的阻碍作用而消耗的能量越多, 水流流速随之减小。随着坡度和流量的增加, 坡面流重力势能与水流动能增加, 因此流速随坡度和流量呈幂函数增加。通过统计回归发现, 盖度对流速的影响最大, 占 45% 左右, 坡度和流量次之。三个因子可以较好模拟陡坡、定床条件下水流流速($R^2 = 0.93$)。研究结果有助于认识陡坡地表覆盖下坡面流的水动力学特性, 为建立土壤侵蚀过程模型提供理论基础。

关键词: 坡面流; 流速; 模拟覆盖

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

在研究坡面汇流、土壤分离、泥沙输移以及沉积等过程中, 流速的确定是解决问题的关键, 因此对于坡面流速的研究具有一定的实际意义。关于坡面流流速的研究主要集中在测定方法^[1-3]和计算公式^[3-5]上。罗榕婷^[6]等对以上常用方法的优缺点作了简单分析和总结, 其中染色剂法应用比较广泛, 但是该方法测得的仅是坡面流表面流速, 需要修正后才能用来计算平均流速。20 世纪 30 年代开始, 国内外许多学者先后利用理论推导或实验研究等方法得出了许多有关坡面流流速的经验公式。江忠善^[5]等总结了 1980 年代以前一些有代表性的流速计算公式, 他认为坡面地表特征、坡度和流量(或水深)是决定流速大小的主要因素。通过对实验资料进行整理分析后得到: $V = kq^{0.5}J^{0.35}$, 其中 q 为单宽流量($\text{cm}^3/\text{s} \cdot \text{m}$), J 为坡面的坡度比值, V 为相应于 q 和 J 的坡面流速(cm/s), k 为系数(随坡面的表面特征而异, 裸地条件下为 2.0)。铁道部科学研究院

西南研究所^[7]根据野外大量试验, 对坡面汇流参数的定量分析最终得出: $v = kq^{\frac{1}{2}}S^{\frac{1}{3}}$ (S 为山坡平均坡度), 并给出了几种不同地表系数 k 值的变化范围, 总体来看地表越粗糙, k 值越小。Govers^[8]认为细沟流流速仅与流量关系密切, 而与细沟的坡度和土壤条件关系不大。Abrahams^[9]等为了检验 Govers 的观点, 将流量、坡度及床面糙率(如覆盖、微地形高度、中值粒径)与流速进行逐步回归分析, 研究发现流量对流速的影响最显著(47.3%), 床面糙率次之(36.5%), 影响最小的是坡度因子(6%)。由此可以看出, 坡度及地表特征直接或间接地通过床面阻力来影响流速, 而且二者的影响程度与流量相当。

目前国内多集中在流量和坡度对流速的定量影响研究上, 对坡面盖度对流速的定量关系研究不够深入系统。国外的研究成果虽然较为深入, 但仅限于缓坡(10° 以下)坡面流流速的计算, 而我国山地占国土面积的 $2/3$ 左右, 也是侵蚀产沙的主要源区,

收稿日期(Received date): 2011-08-25; 改回日期(Accepted): 2011-10-25。

基金项目(Foundation item): 地表过程与资源生态国家重点实验室自主研究课题(2008-ZZ-04), 北京师范大学自主科研基金项目(2009SD-6)。[Supported by the project of State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (2008-ZZ-04), and the project of Beijing Normal University (2009SD-6).]

作者简介(Biography): 曹颖(1983-), 女, 河北秦皇岛人, 博士, 主要从事土壤侵蚀及其环境影响研究。[Cao Ying (1983-), female, was born in Qinhuangdao, Hebei province, doctor degree, mainly engaged in research of soil erosion and its environmental effect.] E-mail: cy_998@163.com

能否借鉴国外的研究成果应用于我国陡坡地坡面流速研究需要进一步探讨。因此,针对国内外的研究不足之处,本研究在较大坡度、流量范围内采用变坡水槽冲刷法,通过模拟地表覆盖,研究盖度对坡面流流速的定量影响,为阐述坡面侵蚀的水动力学机理,建立陡坡土壤侵蚀预报模型提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设置

试验在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室房山试验基地进行,时间为2009-09-11。试验装置由变坡水槽、供水系统组成(图1)。变坡水槽长5 m、宽0.4 m、深0.27 m,底部为有机玻璃板,将实验用沙均匀粘于有机玻璃板上,使试验时水槽底部糙度保持稳定,并尽量与泥沙输移的自然条件保持一致。调节水槽一端高度,可使水槽坡度在 $0^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 范围内变化,升降端带有一深度为40 cm的进水池。供水系统由 0.32 m^3 沉沙池、 1.95 m^3 蓄水池、水泵、分流箱、阀门组及管道组成,通过调节阀门组来控制水流流量。水流通过水槽后,进入沉沙池,再返回蓄水池,如此循环,为试验过程提供稳定、持续的供水。

在以往的研究中,通常采用混凝土立方块^[10]、圆柱体^[11-12]、半球体^[13]、石子或砾石^[14]来模拟地表覆盖物。本研究采用圆柱形短管(PPR热水管,外径为25 mm)来模拟,通过短管横截面积占水槽床面面积的比例来控制盖度(Cr)。短管长120 mm,

保证每根短管都能突出水面。为了避免短管排列方式的影响,实验过程中将其随机摆放,垂直粘于床面。

1.2 水动力参数确定及计算

实验开始前,控制模拟盖度,调节水槽坡度和流量大小。待水流稳定后,在距水槽出水口2 m处滴入适量的高锰酸钾溶液,同时按下秒表计时,当染色剂的前锋到达终线时再次按下秒表。水流表面流速(V_b)即为测定区长度(2 m)除以时间,在固定的盖度-坡度-流量组合下,重复测定12次,去掉最大值、最小值后取平均值。染色剂法测定的流速需根据流态进行修正,本研究采用的修订值(α)分别为:0.67(层流),0.7(过渡流)和0.8(紊流)^[15]。

本实验设计5个坡度(S): $5^{\circ}, 10^{\circ}, 15^{\circ}, 20^{\circ}$ 和 25° ;5个流量(Q):0.25,0.5,1.0,1.5和 2.0 L/s ;6个盖度(Cr):0,5%,10%,15%,20%和25%,共进行了150组试验。

2 结果与分析

2.1 流速与盖度的关系

水流平均速度在 $0.15\sim 1.35\text{ m/s}$ 范围内变化,由图2可知,随着盖度的增加,流速呈幂函数减小: $V=0.3+0.55e^{-10Cr}$, $R^2=0.50$ 。水流流速随着床面模拟盖度增大而减小的试验结果,说明随着覆盖的增大水流克服阻力所消耗的能量越来越多。进

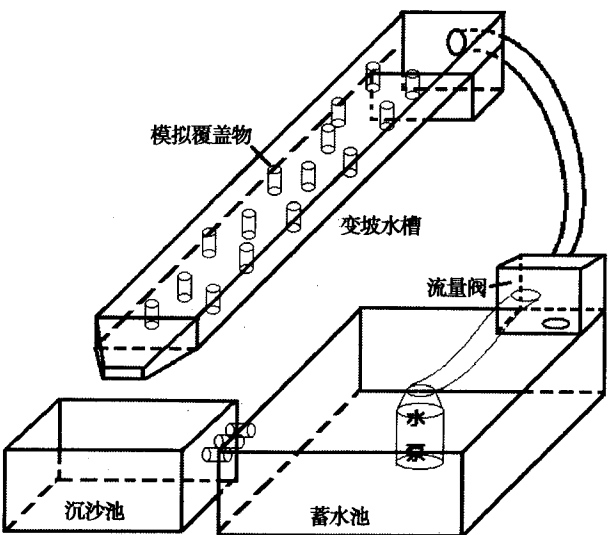


图1 试验水槽示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental flume

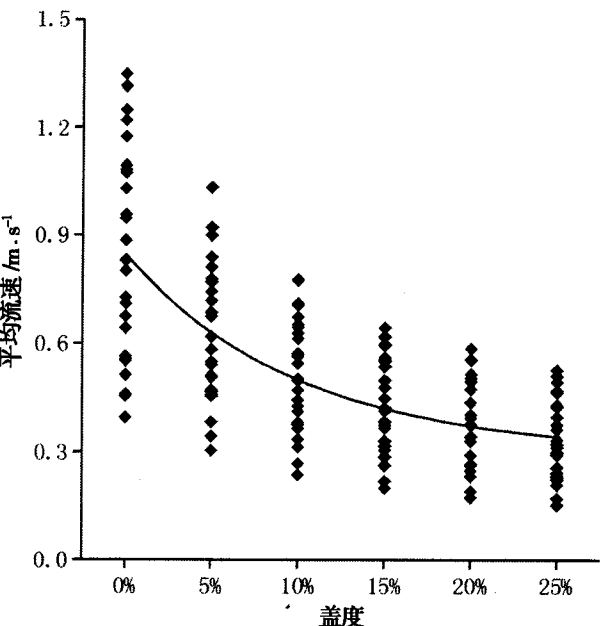


图2 水流平均流速与盖度的关系

Fig.2 Relationship between average velocity and coverage rate

一步分析表明,盖度对坡面流流速的影响与盖度的大小相关,当盖度较小时,不同流量和坡度下,水流流速相差较大;当盖度较大时,相差较小,说明模拟覆盖物的阻碍作用随着盖度的增大而逐渐减小。根据盖度对平均流速的影响,可以分析出盖度可能对输沙过程产生一定的影响。

2.2 不同流量下流速与盖度、坡度的关系

由图3可见,在流量不变的情况下,坡面流流速随着盖度和坡度的变化而变化。随着坡度增大,水流势能随之增大,因此对于同一盖度,流速随着坡度的增大而增大。流量较小且坡度超过15°后,不同盖度下流速相差较小。当流量较大时,不同坡度下平均流速间差距逐渐缩小,当盖度大于15%时表现更为明显。这说明在较大流量下,坡度对流速影响较小,而主要受到流量的影响。

2.3 不同坡度下流速与盖度、流量的关系

图4给出了典型坡度下平均流速与盖度和流量的关系,从图中可以发现,坡面流流速随着盖度和流量的变化而变化。在相同坡度和盖度条件下,流速随着流量的增大而增大。流量为0.25 L/s和0.5

L/s时,实验结果比较接近;在其余三个较大流量下(1.0 L/s, 1.5 L/s和2.0 L/s),流速大小及变化趋势比较相近。与小流量相比(0.25和0.5 L/s),当流量较大时($Q \geq 1.0$ L/s)流速随盖度增加而减小的趋势更为明显。

2.4 流速模拟

由以上分析可以看出,坡面流平均流速主要受到模拟覆盖物的盖度、坡度及流量的影响。通过对上述影响因子进行回归分析发现

$$V = 1.4 \times (1 - Cr)^{3.1} Q^{0.3} \sin \theta^{0.41} \quad (1)$$

其中,盖度对流速的解释方差占到44.8%,流量及坡度因子各占25%左右,该模型的的决定性系数达到0.93。图5给出了公式(1)模拟值与实测值的1:1线图,从图中可以发现,有部分数据偏离1:1线,而这些数据点大多是在无覆盖条件下的模拟值。

为了提高对坡面流流速的模拟精度,将150组实验数据,分为无覆盖和有覆盖两种情况分别研究。通过回归分析发现:

$$\text{当 } Cr = 0 \text{ 时, } V = 1.32 \times Q^{0.43} \sin \theta^{0.3} \quad (2)$$

$$\text{当 } Cr \neq 0 \text{ 时, } V = 1.3 \times (1 - Cr)^{2.6} Q^{0.3} \sin \theta^{0.43} \quad (3)$$

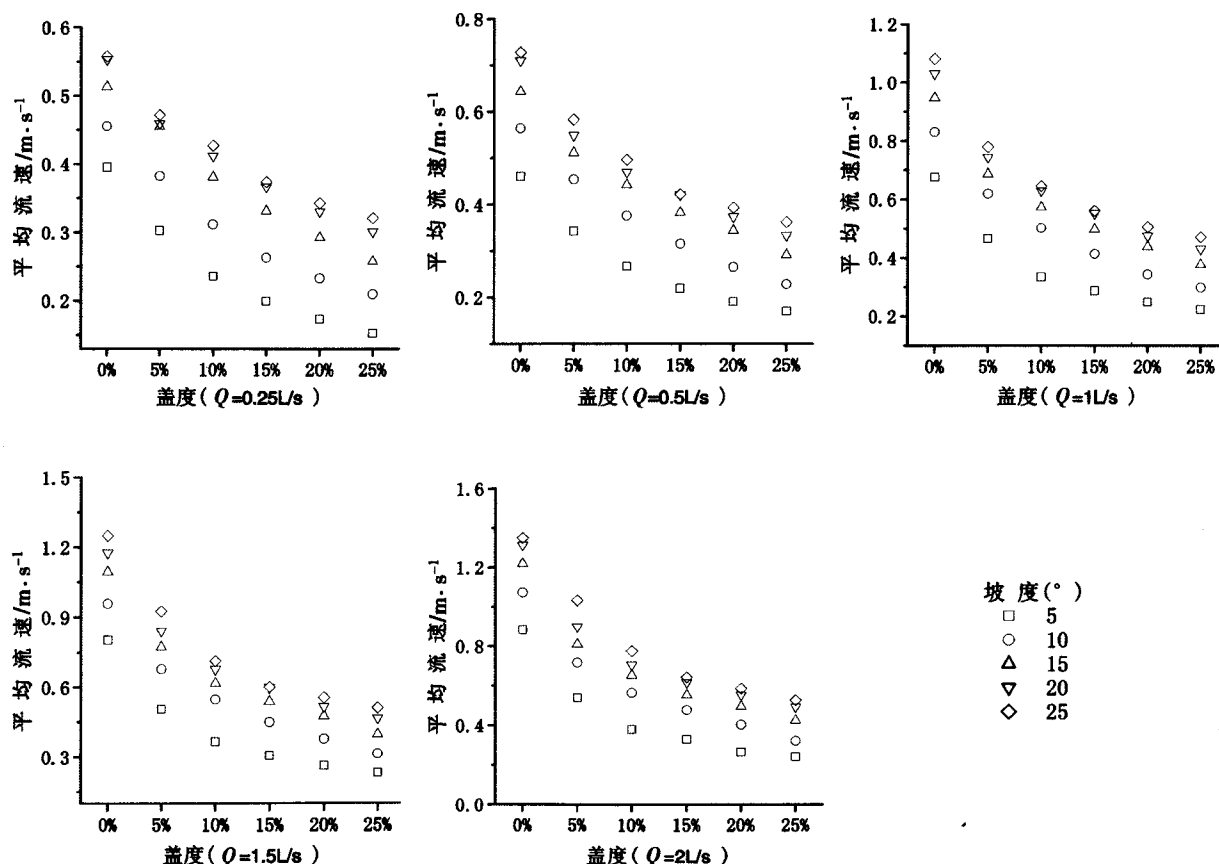


图3 不同流量下平均流速与盖度和坡度的关系

Fig. 3 Relationships between average velocity, coverage rate and slop under different discharge

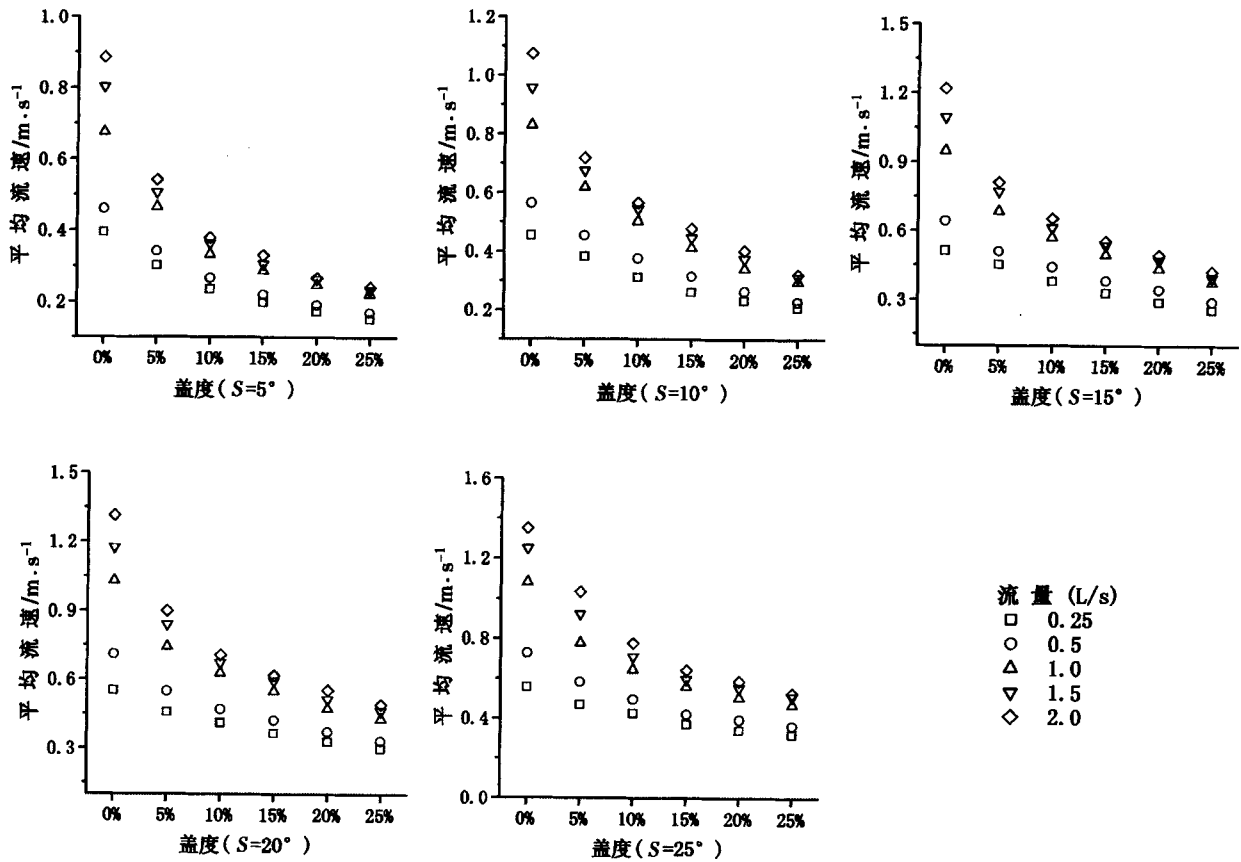


图4 不同坡度下平均流速与盖度和流量的关系

Fig. 4 Relationships between average velocity, coverage rate and discharge at different slope

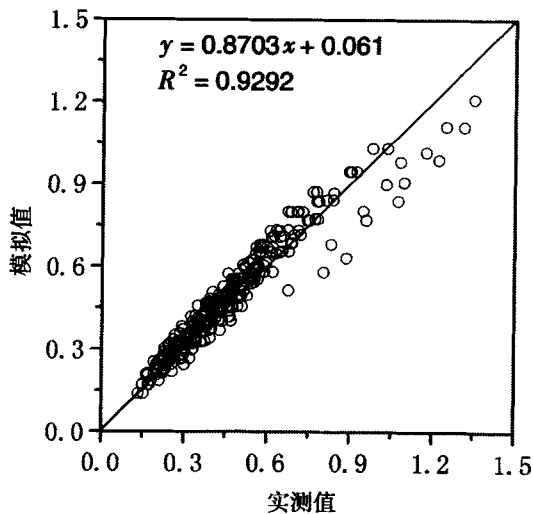


图5 坡面流平均流速模拟值与实测值的比较

Fig. 5 Comparison of predicted and measured values of average velocity

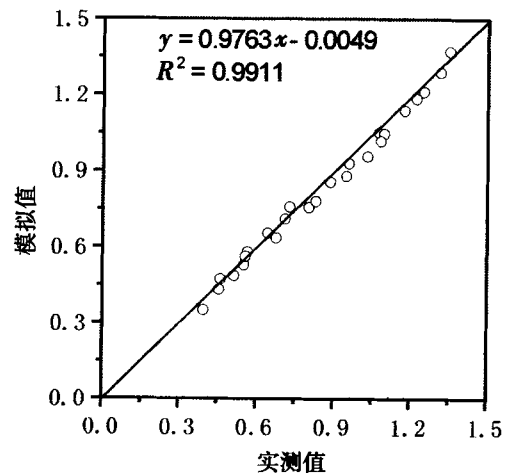


图6 无覆盖下坡面流平均流速模拟值与实测值的比较

Fig. 6 Comparison of predicted and measured values of average velocity of overland flow without coverage

图6、图7分别给出了在两种覆盖条件下坡面流流速模拟值与实测值的1:1线图,从图中可以看出公式(2)、(3)的模拟效果较好,决定性系数分别为0.99和0.97。在无覆盖条件下模拟结果与江忠

善^[5]总结的流速方程($V = 2q^\alpha J^\beta$)形式相同;当存在地表覆盖时,将盖度作为影响流速的主要预测变量进行模拟($V = k(1 - Cr)'q^\alpha J^\beta$,其中 k 为常数项系数, γ 、 α 和 β 为幂指数)。

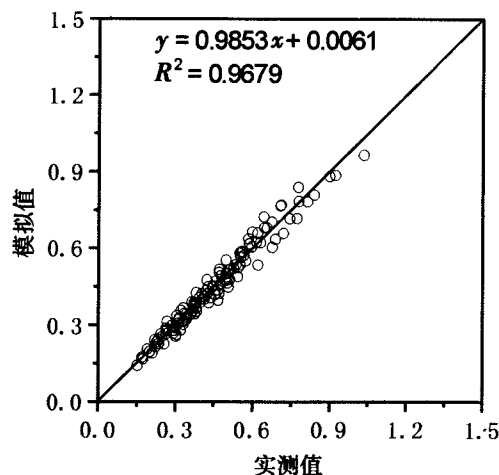


图7 模拟覆盖下坡面流平均流速模拟值与实测值的比较

Fig. 7 Comparison of predicted and measured values of average velocity of overland flow with coverage

3 结论与讨论

1. 坡面流流速与盖度呈负相关关系,与坡度及流量呈正相关关系。其中盖度对流速的影响最显著(44.8%),流量(25.2%)及坡度(25%)因子次之。而 Abrahams^[9] 等人认为流量对流速的影响最为显著,其次是床面糙率及坡度因子。造成研究结果存在差异的主要原因是二者在试验设置上的不同,Abrahams 等人的研究主要集中在缓坡、小流量,本研究在坡度(5°~25°)和水流流量(0.25~2 L/s)的研究范围相对较大。

2. 在无覆盖条件下,坡面流平均流速与流量和坡度关系密切,随着坡度和流量的增加呈幂函数增加。该结果与江忠善总结的坡面流流速计算公式的形式相同,但是流量及坡度因子的幂指数(和)及常数项与江忠善等人的相比略小。分析其原因主要有两种:其一是试验设置的床面特征不同,裸土表面比均匀沙铺设的床面粗糙度大,其二是本研究通过变坡水槽改变坡度和流量,变化范围较前人研究成果所适用的范围要广,尤其是陡坡地下坡面流平均流速的预测。

3. 在有覆盖条件下,坡面流与盖度关系密切,二者呈负相关关系,随着地表模拟覆盖物盖度的增加,即地表粗糙度增加,水流克服阻力所消耗的能量越多,流速呈减小趋势,这与前人的研究结果相同。流速是影响坡面侵蚀输沙的关键因素,因此流速与盖度、坡度、流量的关系,一定会影响到坡面输沙特征的变化规律。

本研究为分析复杂下垫面条件下坡面流的水动力学特征、阐述土壤侵蚀机理、建立陡坡土壤侵蚀过程模型提供了技术支撑。复杂的坡面流流速是土壤侵蚀计算中一个重要的问题,本试验仅模拟地表植被覆盖对流速的影响,需要进行不同地表类型的试验,全面的解决该问题。

参考文献 (References)

- [1] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11: 653 - 657
- [2] Luk S H, Merz W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow [J]. *Soil Technology*, 1992, 5: 289 - 301
- [3] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics I: velocity relationship [J]. *Transaction of the ASAE*, 1984, 27(3): 790 - 796
- [4] Zhang Guanghui. Study on hydraulic properties of shallow flow [J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(2): 159 - 165 [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]
- [5] Jiang Zhongshan, Song Wenjing. An experimental study on the velocity of slope flow [J]. *Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation Academia Sinica*, 1988, Volume 7: 46 - 52 [江忠善, 宋文经. 坡面流速的试验研究 [J]. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*, 1988, 7: 46 - 52]
- [6] Luo Rongting, Zhang Guanghui, Cao Ying. Progress in the research of hydrodynamic characteristics of sediment-laden overland flow [J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(4): 567 - 574 [罗榕婷, 张光辉, 曹颖. 坡面含沙水流动力学特性研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2009, 28(4): 567 - 574]
- [7] Research group of storm runoff in small drainage area. The calculation for discharge of flood peak during a rainstorm in small drainage area [M]. Beijing: Science Press, 1978: 32 - 35 [小流域暴雨径流研究组. 小流域暴雨洪峰流量计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1978: 32 - 35]
- [8] Govers G. Relationship between discharge, velocity, and flow area for rills eroding in loose, non-layered materials [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, 17: 515 - 528
- [9] Abrahams A D, Li G, Parsons A J. Rill hydraulics on a semiarid hill-slope, southern Arizona [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21: 35 - 47
- [10] Herbich J B, Shulits S. Large-scale roughness in open-channel flow [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1964, 90(6): 203 - 230
- [11] Hsieh T. Resistance of cylindrical piers in open-channel flow [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1964, 90(1): 161 - 173
- [12] Li G. Preliminary study of the interference of surface objects and rainfall in overland flow resistance [J]. *Catena*, 2009, 78: 154 - 158
- [13] Flammer G H, Tullis J P, Mason E S. Free surface, velocity gradient flow past hemisphere [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1970, 96(7): 1485 - 1502

- [14] Li G, Abrahams A D. Controls of sediment transport capacity in laminar interrill flow on stone-covered surfaces [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(1): 305–310
- [15] Horton R E, Leach H R, Van Vliet R. Laminar sheet flow [J]. *Transactions of the American Geophysical Union*, 1934, 15(2): 393–404

Experiment on the Effect of Simulated Surface Cover on the Overland Flow Velocity

CAO Ying^{1,2}, ZHANG Guanghui², TANG Keming², LUO Rongting²

(1. *Beijing Institute of Geology, Beijing 100120, China;*

2. *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: The effect of vegetation cover on overland flow velocity can cause changes of characteristics of sediment discharge, but the relationship between coverage changes and the velocity is still unclear under steep slope conditions. Aiming at the shortage of research at home and abroad, this study discussed the relationships between average velocity and coverage rate, slope and discharge systematically on overland flow. Flow velocity was simulated in an experimental flume with varying slope in a large scale of slope gradient ($5^{\circ} \sim 25^{\circ}$), flow discharge (0.25 ~ 2 L/s) and coverage rate (0% ~ 25%). The result indicated that average velocity of overland flow changes from 0.15 L/s to 1.35 L/s. It is closely related to the coverage rate, slope and discharge. With the simulated surface coverage increasing, the water flow consumed more energy to overcome the resistance, so the flow velocity decreased along. With the increasing of slope and discharge, gravitational potential energy and kinetic energy of overland flow increased, and the average velocity increased by power function. The statistical regression showed that the dominating influential factor to velocity is coverage rate (45% more or less), and then slope and discharge. Three factors could be used to simulate the velocity of overland flow ($R^2 = 0.93$). The research is helpful to have further understanding of the character of overland flow on steep slope with coverage by the way of dynamics, and provides theoretical basis of physical modeling of soil erosion.

Key words: overland flow; velocity; coverage rate

作者: 曹颖, 张光辉, 唐科明, 罗榕婷, CAO Ying, ZHANG Guanghui, TANG Keming, LUO Rongting
作者单位: 曹颖, CAO Ying(北京市地质研究所, 北京100120; 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京100875), 张光辉, 唐科明, 罗榕婷, ZHANG Guanghui, TANG Keming, LUO Rongting(北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京, 100875)
刊名: 山地学报 ISTIC PKU
英文刊名: Journal of Mountain Science
年, 卷(期): 2011, 29(6)

参考文献(15条)

1. Abrahams A D; Parsons A J; Luk S H [Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing](#) [外文期刊] 1986
2. Luk S H; Merz W [Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow](#) 1992
3. Foster G R; Huggins L F; Meyer L D [A laboratory study of rill hydraulics I: velocity relationship](#) 1984(03)
4. 张光辉 [坡面薄层流水动力学特性的实验研究](#) [期刊论文] - [水科学进展](#) 2002(02)
5. 江忠善; 宋文经 [坡面流速的试验研究](#) 1988
6. 罗榕婷; 张光辉; 曹颖 [坡面含沙水流动力学特性研究进展](#) [期刊论文] - [地理科学进展](#) 2009(04)
7. 小流域暴雨径流研究组 [小流域暴雨洪峰流量计算](#) 1978
8. Govers G [Relationship between discharge, velocity, and flow area for rills eroding in loose, non-layered materials](#) [外文期刊] 1992
9. Abrahams A D; Li G; Parsons A J [Rill hydraulics on a semiarid hillslope, southern Arizona](#) [外文期刊] 1996
10. Herbich J B; Shulits S [Large-scale roughness in open-channel flow](#) 1964(06)
11. Hsieh T [Resistance of cylindrical piers in open-channel flow](#) 1964(01)
12. Li G [Preliminary study of the interference of surface objects and rainfall in overland flow resistance](#) 2009
13. Flammer G H; Tullis J P; Mason E S [Free surface, velocity gradient flow past hemisphere](#) 1970(07)
14. Li G; Abrahams A D [Controls of sediment transport capacity in laminar interrill flow on stone-covered surfaces](#) [外文期刊] 1999(01)
15. Horton R E; Leach H R; Van Vliet R [Laminar sheet flow](#) 1934(02)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201106003.aspx