

不同示踪法测量砾石层中水流流速研究^{*}

陈丽燕 雷廷武 董月群 颜 燕
(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 采用室内试验,用平均粒径约2 cm的砾石,在长4 m、宽15 cm、高50 cm的水槽内堆积厚为5 cm的砾石层,在坡度为4°、8°、12°和流量为3、6、12 L/min条件下,距离电解质脉冲发生器0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 m处放置探针,测量电导率变化过程,计算水流的^{最大流速}、^{优势流速}和^{平均流速},并用染色剂示踪法对比砾石层中水流的^{最大测量流速}。结果表明,试验所用各工况,流量对流速的影响不显著,坡度增大,流速明显增大。试验条件下,水流的优势流速变化范围为0.031~0.070 m/s,优势流速与最大流速的比值稳定,在0.81~0.83之间。平均流速与优势流速的比值随坡长的增加逐渐增大,增长的速率逐渐减小并趋于稳定。平均流速与最大流速的比值在0.68~0.78之间,并随距离的增加稍有增大。

关键词: 砾石层 平均流速 优势流速 最大流速 电解质示踪法

中图分类号: S157.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0141-06

Estimating Velocity of Water Flow within Gravel Layer by Different Tracer Methods

Chen Liyan Lei Tingwu Dong Yuequn Yan Yan
(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Mountainous soils often contain large amounts of gravels which impact rainfall infiltration, runoff and soil erosion. The flow velocity within gravels is of great importance for research of soil erosion process in rocky mountainous areas. Dye tracer method was commonly used to measure the leading edge velocity. The gravels of about 2 cm in diameter were used to fill to a thickness of about 5 cm in a flume of 4 m long, 15 cm wide and 50 cm high. Five sensors were used to measure the electrolyte conductivity change process at 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 and 1.5 m from the solute injector under three flow rates of 3, 6 and 12 L/min and three slope gradients of 4°, 8° and 12°. The peak, mean and leading edge velocities were computed before comparisons were made with those measured by using dye tracer method. The results showed that under different conditions, flow velocity was not significantly affected by discharge rate, but notably affected by slope. With the increase in slope, flow velocity increased from 0.031 m/s to 0.070 m/s. The peak velocities were 0.81~0.83 times of the leading edge velocity, regardless of the effect of slope and flow rate. Mean velocities were about the same as the peak velocities, which were 0.68~0.78 times of the leading edge velocities and increased with distance increasing. The ratio of mean velocity and leading edge velocity can be also used to calculate the flow velocity within gravels measured by dye tracer method. The method should be useful to understand the hydrodynamics of water flow within gravel layers.

Key words: Gravel layer Mean velocity Peak velocity Leading edge velocity Electrolyte tracer method

收稿日期: 2014-06-10 修回日期: 2014-08-15
^{*} 国家自然科学基金资助项目(41230746)
作者简介: 陈丽燕, 博士生, 主要从事土壤侵蚀研究, E-mail: cly508@163.com
通讯作者: 雷廷武, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀和旱地农业研究, E-mail: leitingwu@cau.edu.cn

引言

石质山区土壤常含有大量砾石,土壤表面及土壤内部的砾石会对降雨入渗产生影响^[1-3],并影响地表径流、水动力参数和土壤侵蚀^[4]。土壤中的砾石一方面会限制水分入渗,另一方面更多的大孔隙通道会促进水分的入渗和再分布。砾石的类型、大小、含量及其在土层中的位置对水流速度的影响也不相同^[5-7]。大量研究表明,入渗率随砾石含量的增加而增大^[4,8]。土壤表面的砾石能降低雨滴对土壤表面的溅蚀,减少侵蚀产沙量^[9]。现有的土壤侵蚀过程模型^[10-13]都描述了土壤中砾石对土壤侵蚀的影响。Box 提出将砾石覆盖因子作为一个单独的因子放在土壤流失模型中^[3]。土壤的质地以及砾石在土壤中的位置不同,对径流和侵蚀以及产沙量的影响也不同^[2]。

地表砾石覆盖会引起径流流速、降雨入渗以及土壤侵蚀的变化。径流流速的大小引起水流挟沙能力的增强或减弱,从而导致土壤侵蚀量和泥沙输移量在时间和空间上重新分布。水流在砾石中的流动速度比在砾石表面速度慢得多,水流速度的减小使水流的挟沙能力降低,对砾石下的土壤起到保护作用。符素华等^[14]在室内人工降雨条件下,采用染色剂示踪法测量北京山区普通褐土上不同降雨强度、不同砾石覆盖度水流流速,结果表明水流流速和土壤侵蚀量随砾石覆盖度的增加呈指数递减;降雨强度对径流量和土壤侵蚀量的影响与砾石覆盖度的关系不明显。

薄层水流的^{最大流速、平均流速以及优势流速}的关系,主要通过校正系数来确定,但由于水流流态、坡度、泥沙含量等因素的影响,校正系数一直不能准确确定^[15-18]。目前关于砾石层中水流的3个流速之间的关系研究很少。因此,本文采用电解质示踪法测量电解质在砾石层内水流中的传输,通过不同测量断面水流电导率的变化,计算水流的优势流速和质心运动速度;同时采用染色剂示踪法测量砾石层内水流的^{最大流速},对砾石层内各测量断面的速度进行分析,并对3个流速之间的数量关系进行分析。

1 研究方法

1.1 电解质示踪法溶质迁移模型

在较短距离内,忽略土壤入渗作用和降雨产生的影响,可假定水流速度变化不大^[19-20],根据菲克定律和质量守恒定律,描述溶质在一维稳态流中的对流弥散方程为^[21]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) \tag{1}$$

式中 C ——水流中某测量断面的电解质浓度,kg/m³
 x ——沿坡长方向的坐标,m
 u ——水流流速,m/s t ——时间,s
 D_H ——电解质在水中的弥散系数,m²/s

当上边界条件假设为脉冲函数时,式(1)的边界条件和初始条件为

$$C(x,t) = \begin{cases} C_0 \delta(t) & (x=0) \\ 0 & (x=\infty) \\ 0 & (t=0) \end{cases} \tag{2}$$

式中 C_0 ——电解质初始浓度
 $\delta(t)$ ——脉冲函数

式(1)的解析解为

$$C(x,t) = C_0 \frac{x}{2t \sqrt{\pi D_H t}} \exp \left(-\frac{(x-ut)^2}{4D_H t} \right) \tag{3}$$

1.2 最大流速、优势流速和质心运动速度计算方法

电解质示踪法测量水流流速,根据计算流速所用的时间不同来定义最大流速、优势流速和质心运动速度。最大流速是以电解质前锋到达测量断面所用的时间计算得到的流速,优势流速是以电解质浓度峰值到达测量断面所用的时间计算得到的流速,质心运动速度是以电解质质心到达测量断面所用的时间计算得到的流速。3种流速都是以电解质的运动速度来示踪水流的流速。各流速的计算如图1所示。

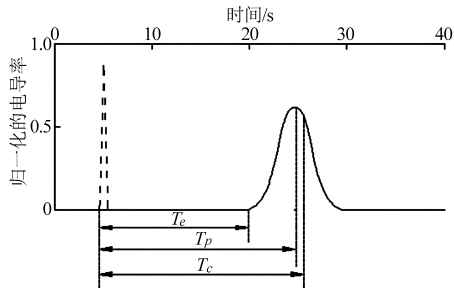


图1 测量断面电导率随时间的分布

Fig.1 Measured electronic conductivity as a function of time

1.2.1 最大流速的测量

采用染色剂示踪法测量水流的^{最大流速}

$$U_e = \frac{L_e}{T_e} \tag{4}$$

式中 U_e ——最大流速,m/s
 L_e ——染色剂注入点与测量断面之间的距离,m
 T_e ——染色剂由注入断面到达测量断面所用时间,s

1.2.2 优势流速

通过薄层水流流速测量仪测量不同工况下测量断面的电导率随时间变化的过程,由一对传感器对

应的 2 个探针测量得到的电导率达到最大值所对应的时间差及 2 个探针之间的距离,计算该断面的优势流速

$$U_p = \frac{L}{T_p} \tag{5}$$

式中 U_p ——优势流速, m/s
 L ——电解质溶液注入点到测量断面的距离, m
 T_p ——电导率峰值到达测量断面所用的时间, s

1.2.3 电解质质心运动速度

将坡面薄层水流中的电解质分布看成一个质点群,用运动学原理计算质心运动速度,即

$$U_c = \frac{L}{T_c} \tag{6}$$

式中 U_c ——电解质溶液的质心运动流速, m/s
 T_c ——电解质质心到达测量断面所用的时间, s
质心到达测量断面的时间

$$T_c = \frac{\sum_{i=1}^k C_i T_i}{\sum_{i=1}^k C_i} \tag{7}$$

式中 C_i ——测量断面的探针在时间 T_i 所测的电压

以第一个探针测量的质心通过时间为起点,由各点的时间差和距离计算电解质的质心运动速度。根据对流弥散理论,可以认为质心流速等于平均流速。夏卫生^[22]曾用公式推导得出,水流的平均流速和电解质脉冲的质心运动速度在理论上是相等的。

2 试验材料与仪器

2.1 均匀流速水槽及供水箱

用有机玻璃制作长 4 m、宽 14.7 cm、高 50 cm 的水槽,水槽前端 20 cm 处设置有机玻璃板,上面均匀布置大小为 5 cm 的孔,用来缓冲水流,保证水流稳定进入槽身,末端设有百叶窗,用于排水。水槽底部粘接粒径为 1 mm 的砂纸,模拟土壤下垫面。水槽一端可升降,用以调节水槽坡度。为模拟径流,水槽前端设有水流注入系统,恒压均匀输水系统控制水槽上方来水流量,供水系统为一个体积为 1.6 m³ 的恒压水箱,依据马氏瓶原理设计而成,流入水槽的流量通过板阀开启大小来控制。

2.2 薄层水流流速测量仪

薄层水流流速测量系统^[23]主要由电解质脉冲发生器、感应探针、数据采集管理器、操作控制计算机系统组成。

砾石在水槽内堆积厚度为 5 cm。距离入水口 20 cm 的距离段放置直径大小约 4 cm 的砾石,用于稳定水流流速,其余部分堆积粒径大小约 2 cm 的砾石。在距离入水口 1 m 处水槽内放置电解质脉冲发生器,使电解质溶液能滴入到砾石层内,分别在距离脉冲发生器下游 0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 m 处各固定一组探针,测定该断面的电导率。另外在脉冲发生器下游约 5 cm 处设置 1 组探针,用于测量电解质注入过程。

试验坡度为 4°、8°、12°,流量为 3、6、12 L/min,试验重复 3 次。

试验开始前,将饱和 KCl 溶液,装入电解质脉冲发生器,将探针与数据采集管理器上相应的接口连接,数据采集器与计算机连接。设置软件中的相关参数:采样频率 50 点/s;采样时间为 10 s,脉冲宽度 500 ms,脉冲高度 100 mm。每一工况下,待流量流速稳定后,点击“采集数据”按钮,测量不同断面的电导率;试验结束,计算机中形成 6 条完整的曲线,并得到电导率随时间变化的数据。

3 试验结果及分析

3.1 砾石层中水流优势流速

利用电解质示踪法测量得到水流流经各断面的电导率,根据优势流速的计算原理得到各测量断面的优势流速,为研究坡度和流量对水流速度的影响,对相同坡度、不同流量和相同流量、不同坡度的流速分别做图分析,结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,测量计算得到各个断面的优势流速比较稳定,流量对流速的影响并不明显,而坡度对流速的影响比较明显,随着坡度的增大,流速明显增大。坡度为 4°时水流流速约为 0.035 m/s,8°时增加到约 0.052 m/s,12°时为 0.065 m/s。

3.2 优势流速与最大流速的关系

不同坡度、流量下电解质示踪法测量得到不同位置的优势流速与染色剂示踪法测量得到的最大流速如表 1 所示。

从表 1 可以看出,染色剂示踪法得到的最大流速与电解质示踪法得到的优势流速随流量和坡度的变化规律基本相同,证明了优势流速的合理性。

将计算得到的各测量断面的优势流速与染色剂示踪法测量得到的最大流速进行比较,通过常数项为零的线性拟合,结果如图 3 所示。

从图 3 优势流速与最大流速的线性拟合系数可以看出,随着测量距离的增加,优势流速与最大流速的比值变化较小,稳定在 0.81~0.83 之间。在薄层水流中,优势流速和最大流速近似相等,砾石层中由于水流速度的减小,使水流中电解质峰值到达测量

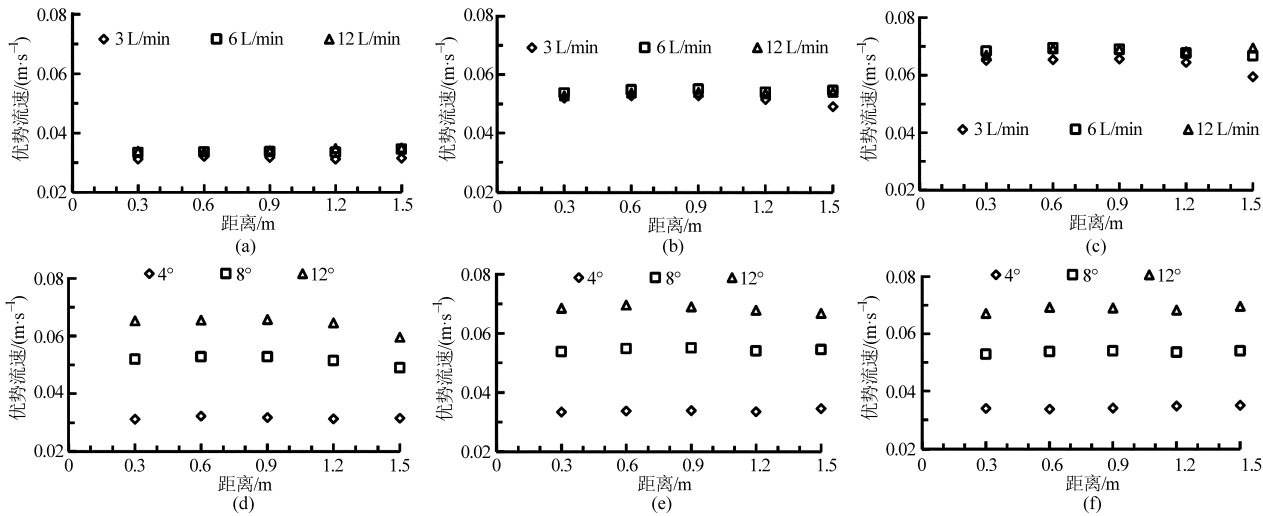


图 2 不同坡度与不同流量条件下各测量断面的流速变化

Fig. 2 Flow velocities at different distances under different flow rates and slope gradients

(a) 4° (b) 8° (c) 12° (d) 3 L/min (e) 6 L/min (f) 12 L/min

表 1 优势流速与最大流速

坡度 $S/$ ($^{\circ}$)		流量 $Q/$ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	距离/ m					染色剂示踪法 最大流速 m/s
			0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	
4		3	0.031	0.032	0.032	0.031	0.032	0.039
		6	0.033	0.034	0.034	0.035	0.035	0.042
		12	0.034	0.034	0.034	0.035	0.035	0.054
8		3	0.052	0.053	0.053	0.052	0.049	0.062
		6	0.054	0.055	0.055	0.054	0.055	0.062
		12	0.053	0.054	0.054	0.054	0.054	0.066
12		3	0.055	0.066	0.066	0.065	0.060	0.077
		6	0.069	0.070	0.069	0.068	0.067	0.080
		12	0.067	0.069	0.069	0.068	0.070	0.083

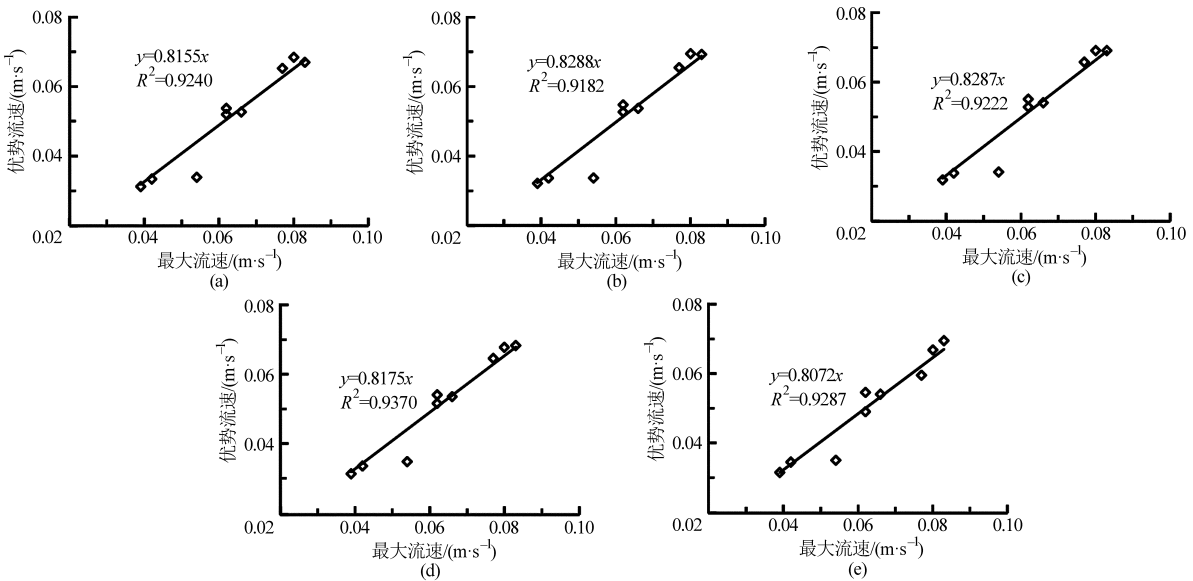


图 3 不同距离处优势流速与最大流速对比

Fig. 3 Comparison of peak velocities with leading edge velocities

(a) 0.3 m (b) 0.6 m (c) 0.9 m (d) 1.2 m (e) 1.5 m

断面所需的时间与示踪剂到达测量断面的时间相差较大,不能忽略,从而使优势流速与最大流速存在这样的比值关系。

3.3 平均流速与优势流速的关系

将计算得到的各断面的平均流速与优势流速进

行比较,通过常数项为零的线性拟合,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着测量距离的增加,平均流速与优势流速的比值逐渐增大,到 1.2 m 处趋于稳定,为 0.96,决定系数均大于 0.98,表明二者相关性较好。

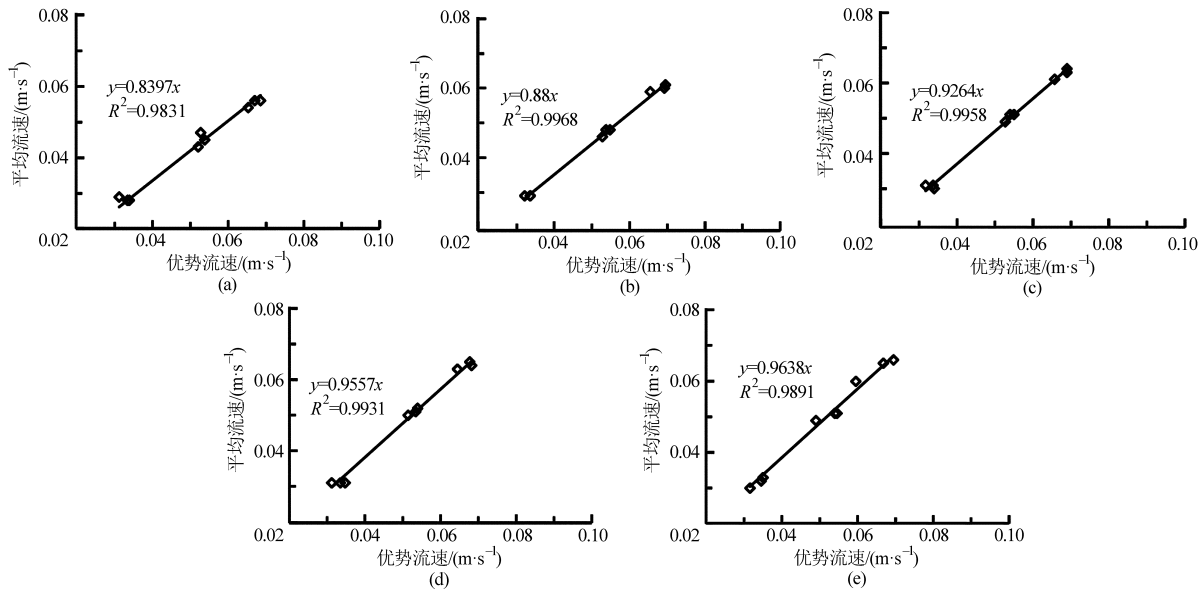


图 4 不同距离处平均流速与优势流速对比

Fig. 4 Comparison between mean velocity and peak velocity
(a) 0.3 m (b) 0.6 m (c) 0.9 m (d) 1.2 m (e) 1.5 m

3.4 平均流速与最大流速的关系

将不同工况下各断面的平均流速与最大流速进行比较,通过常数项为零的线性拟合,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,平均流速与最大流速的比值随距离的增大稍有增大,到 1.2 m 处达到稳定,为 0.78。在坡面薄层水流中,采用校正系数 α 表示平

均流速与最大流速的比值,并在采用 α 计算水流的平均流速。不同水流状态,采用不同 α 值,Abrahams 等的田间试验得到层流时 $\alpha=0.67$,过渡流 $\alpha=0.7$,紊流 $\alpha=0.8$ ^[24]。本试验得到的平均流速与最大流速的比值也可用于染色剂示踪法计算砾石层中水流流速。

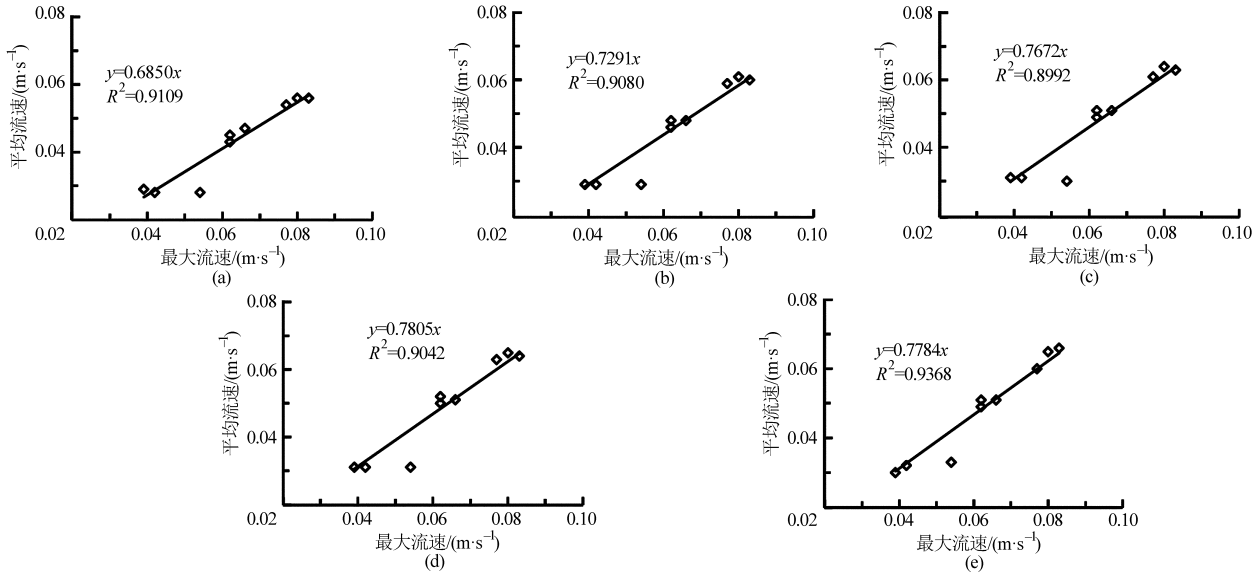


图 5 不同距离处平均流速与最大流速对比

Fig. 5 Comparison between mean velocity and leading edge velocity
(a) 0.3 m (b) 0.6 m (c) 0.9 m (d) 1.2 m (e) 1.5 m

4 结 束 语

砾石层内水流的优势流速在各测量断面都比较稳定,流量对流速的影响并不显著,而坡度对流速的影响比较显著,随着坡度的增大,流速明显增大。优势流速变化范围为 0.031 ~0.070 m/s。随着距离的

增加,优势流速与最大流速的比值稳定在 0.81 ~ 0.83 之间。平均流速与优势流速的比值逐渐增大,到 1.2 m 处趋于稳定,为 0.96。平均流速与最大流速的比值在 0.68 ~0.78 之间,并随距离的增大稍有增大,二者相关关系的决定系数均大于 0.9,相关性较好。

参 考 文 献

1 Poesen J, Ingelmo-Sanchez F, Mucher H. The hydrological response of soil surface to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15(7):653 – 671.

2 Poesen J, Ingelmo-Sanchez F. Run off and sediment yield from top soils with different porosity as affected by rock fragment cover and position[J]. CATENA,1992, 19(5):447 – 451.

3 Box J E. The effects of surface salty fragments on soil erosion by water[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(1): 111 – 146.

4 Grant W J, Struchtemeyer R A. Influence of the coarse fraction in two Maine potato soils on infiltration, run off and erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 1959, 23(5): 391 – 394.

5 Ismail M El Boushi, Stanley N Davis. Water-retention characteristic of coarse rock particles[J]. Journal of Hydrology,1969, 8(4):431 – 441.

6 Wilcox B P, Wood M K, Tromble J M. Factors influencing infiltrability of semiarid mountain slopes[J]. Journal of Range Management, 1988, 41(3):197 – 206.

7 Lavee H, Poesen J W A. Overland flow generation and continuity on stone-covered soil surfaces[J]. Hydrological Processes, 1991, 5(4):345 – 360.

8 Jung L. The influence of the stone cover on runoff and erosion on slate soils[J]. International Association Science Hydrology Publication, 1960,53:143 – 153.

9 Yair A, Lavee H. Runoff generative process and runoff yield from arid talus mantles[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1976, 1(3):235 – 247.

10 Flanagan D C, Nearing M A. USDA—water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation[R]. Indiana,USA:USDA-ARS,1995:6 – 19.

11 Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6):527 – 544.

12 De Roo A P J. The LISEM project: an introduction[J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8):1021 – 1025.

13 Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. RUSLE: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation[M]. Washing DC: USDA-ARS, 1997:158.

14 符素华,路炳军,叶芝茜. 地表砾石对降雨径流及土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2):15 – 18.
Fu Suhua, Lu Bingjun, Ye Zhihan. Effects of rock fragments on runoff and soil erosion[J]. Journal of Soil and Water Conversation,2010, 24(2):15 – 18. (in Chinese)

15 Dunkerly D L. Estimating the mean speed of laminar overland flow using injection uncertainty on rough surface[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26(4):363 – 374.

16 Oliver P, Norbert S, Raphael G, et al. An automated salt tracing gauge for flow velocity measurement[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2005, 30(7):833 – 844.

17 Myers T G. Modeling laminar sheet flow over rough surfaces[J]. Water Resource Research,2002,38(11):12-1 – 12-12.

18 夏卫生,雷廷武,赵军. 泥沙含量对盐液示踪法经验系数影响的研究[J]. 农业工程学报,2003,19(4):97 – 100.

19 Lei Tingwu, Xia Weisheng, Zhao Jun. Method for measuring velocity of shallow water flow for soil erosion with an electrolyte tracer[J]. Journal of Hydrology, 2005, 301(1 – 4):139 – 145.

20 夏卫生,雷廷武,赵军,等. 薄层水流流速测量系统的研究[J]. 水科学进展,2003,14(6):781 – 784.
Xia Weisheng, Lei Tingwu, Zhao Jun, et al. Velocity measuring system for sheet flow[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6):781 – 784. (in Chinese)

21 夏卫生,刘春平,雷廷武,等. 示踪法测量坡面水流速度理论缺陷分析[J]. 自然灾害学报,2007,16(1):50 – 54.
Xia Weisheng, Liu Chunping, Lei Tingwu, et al. Analysis of faults in theory for measuring flow velocity on slope with tracer method[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(1):50 – 54. (in Chinese)

22 夏卫生. 电解质示踪法测量坡面薄层恒定水流速度的研究及其初步应用[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2003.
Xia Weisheng. Study on velocity measurement of steady sheet flow with the electrolyte pulse method and its application[D]. Yangling: Northwest A&F University,2003. (in Chinese)

23 夏卫生,雷廷武,张晴雯,等. 坡面薄层水流中电解质脉冲迁移模型[J]. 水利学报,2003(11):90 – 95.
Xia Weisheng, Lei Tingwu, Zhang Qingwen, et al. Mathematical model for electrolyte pulse transport in shallow water flow on hilly slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003 (11):90 – 95. (in Chinese)

24 Abrahams A D, Parsons A J, Shiu – Hung Luk. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11(6): 653 – 657.