

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.018

集中水流冲刷条件下浅沟径流流速特征研究^{*}

董月群¹ 雷廷武¹ 张晴雯² 颜 燕¹ 刘芳芳¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081)

摘要: 在室内不同坡度和径流流量条件下,用电解质示踪法和染色剂示踪法进行浅沟径流流速测量的对比研究。用采自北京的粉壤土在室内试验模拟浅沟侵蚀,测量并计算浅沟径流流速。在坡度 5°、10°、20°,流量 64、128、256 L/min 条件下,进行浅沟水流流速的测定试验。测量结果表明,浅沟径流流速随坡长增加略有减小,随流量和坡度增大而增大。电解质示踪法测量得到的流速在 0.55 ~ 1.60 m/s 之间,而染色剂示踪法测量得到的流速为 0.71 ~ 1.45 m/s,染色剂示踪法测量得到的流速略小于电解质示踪法测量结果。考虑到浅沟水流对示踪剂稀释及紊流对水流的扰动造成的视觉影响,电解质示踪法测量的流速具有其合理性。

关键词: 浅沟侵蚀 径流 流速 电解质示踪法

中图分类号: S152.7; S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0096-05

Ephemeral Gully Flow Velocity under Concentrated Water Flow

Dong Yuequn¹ Lei Tingwu¹ Zhang Qingwen² Yan Yan¹ Liu Fangfang¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Institute of Agro-environment and Sustainable Development, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: A series of flume experiments with a silt loam taken from Beijing were conducted to measure water flow velocity with two methods, the electrolyte tracer method and dye tracer method. A solute injector, a data logger for control and data acquisition was used for flow velocity measurement. The experiment involved three slope gradients (5°, 10° and 20°), and three flow rates (64 L/min, 128 L/min and 256 L/min). The results showed that the velocity of ephemeral gully water flow tended to decrease with slope length. The velocity increased with flow rate and slope gradient. The velocity measured by the electrolyte tracer method under the given experimental condition ranged from 0.55 m/s to 1.60 m/s, as compared with 0.71 m/s to 1.45 m/s by the dye tracer method. The velocities measured by the two methods were compared under different slope gradients and flow rates. The velocities measured by the dye tracer tended to be lower than those measured by the electrolyte tracer method. Considering the strong dilution and disturb effects of high rate water flow and strong turbulence on dye tracer, visual detection of dye movement should have caused later detection of the dye movement in water flow. All these indicate that the measured velocity of ephemeral flow seems rational.

Key words: Ephemeral gully erosion Runoff Water flow velocity Electrolyte tracer method

引言

浅沟侵蚀是重要的土壤侵蚀类型之一^[1~4]。浅沟是集中径流冲刷得到的沟道,在常规的耕作中可

以消除,但是浅沟存在过的地方在耕作后比临近地块低洼,在后继降雨径流作用下又会在同一位置因侵蚀而重复出现。Poesen^[5]观测的集中水流区域形成的浅沟典型

收稿日期: 2012-06-18 修回日期: 2012-10-09
^{*} 黄河水利委员会治黄专项资助项目(黄水保[2007]19号)和中国农业大学研究生科技创新专项资助项目(KYCX2011086)
作者简介: 董月群,博士生,主要从事土壤侵蚀研究,E-mail: dongyuequn@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

线状地形为钻井、犁沟、岬、地的边缘、公路等。典型线性地形发育的沟道经常被归类为细沟,因为传统的对细沟的定义认为是农事耕作形成的微地貌致使细沟侵蚀^[6]。Poesen^[7]将横截面积 929 cm² 作为区分细沟和浅沟的条件。其他的区分方法认为浅沟的宽度不小于 0.3 m,深度不小于 0.6 m^[8],或者不小于 0.5 m^[9]。然而浅沟与切沟的区分没有文献给出确切的分界线。

目前对浅沟侵蚀发生发育条件、尺寸特征等研究较多^[10-11],对于浅沟侵蚀径流水力学参数特征的研究却比较少^[12-13]。

径流是产生坡面土壤侵蚀的动力来源,径流流速是土壤侵蚀模型的重要参数之一。精度较高、操作便捷的径流流速测量方法是土壤侵蚀机理模型研究的重点和难点问题。而目前对于浅沟径流流速的讨论很少^[13-16]。雷廷武等^[17-19]提出用电解质脉冲模型及其改进方法测量坡面薄层水流流速的方法。该方法从理论上能够在一定条件下准确预测水流流速。由此发展了相应的测量仪器系统。

本文采用电解质薄层水流流速测量仪器,使用电解质示踪的原理,通过不同流量、坡度条件下浅沟流速测量试验研究坡度、流量对浅沟径流流速的影响,浅沟径流流速沿坡长变化规律以及电解质示踪法与染色剂示踪法 2 种方法测量结果的对比。

1 材料与方法

1.1 试验材料和试验设计

试验在中国农业大学水利与土木工程学院人工降雨大厅进行。试验土槽长 8 m、宽 3 m,坡度可在 0°~30°调节。根据研究需要,用高 0.45 m 钢板在试验土槽上分隔出长 8 m、宽 1.5 m、高 0.45 m 2 个小土槽,每个土槽宽度为 0.75 m、长 8 m。选取径流流量为 64、128、256 L/min,坡度为 5°、10°、20°,试验设 3 个重复。供试土壤为粉壤土(粘粒质量分数 15.0%,粉粒质量分数 50.2%,沙粒质量分数 34.8%)。

1.2 试验方法

试验前先将土壤过 10 mm 孔筛,去除草根、石块等杂质,再分层均匀地装入土槽内压实,每层厚度为 5 cm,总装土厚度为 45 cm。装土容积密度控制在 1.60 g/cm³,与农地犁底层容积密度一致。试验土槽周边尽量压实,装土时注意各层间一定的糙度,并在装最后一层土时使土壤表面在隔板处略高于其他地表,以保证水流在坡面中间流动,尽可能避免边缘对水流的影响。

装土完成后,在坡面上预制浅沟锥形,横截面为

梯形,沟槽深为 10 cm。试验前使土壤充分饱和,并放置 24 h 以上再开始试验,从而保证均匀一致的土壤初始含水率及消除部分填装不均匀的影响。

采用自来水进行冲刷,并通过控制阀门开度来控制流量。试验前率定放水流量,试验冲刷持续时间为浅沟出口产生稳定流量后继续 5 min。试验设 3 个重复。在水管接触水槽内土壤的地方,用纱布衬垫,以减消水流对浅沟的局部扰动影响。

浅沟径流流速采用电解质脉冲法以及高锰酸钾示踪法来测量。在离浅沟上方距沟头 2 m 处放置 KCl 溶液自动注入装置,在距离电解质注入点 0.5 m 处放置第 1 组电导传感器,以后每隔 1 m 放置一组,放置总组数为 6 组。试验装置布置如图 1。当浅沟径流稳定后,开启注入装置注入 KCl 溶液,在注入溶液的同时,数据采集器开始记录探测到的电解质信号,采样频率为 50 点/s。同时,在浅沟的 1~2 m,3~4 m,5~6 m,7~8 m 之间用高锰酸钾溶液示踪人工测量径流流速。

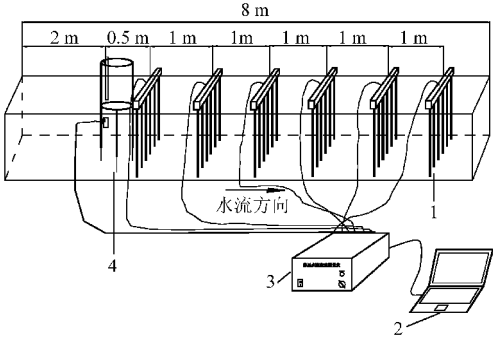


图 1 试验装置布置图

Fig. 1 Experimental equipment arrangement

- 1. 感应探针 2. 操作系统控制计算机系统 3. 数据采集管理器
- 4. 电解质脉冲发生器

1.3 数据处理

坡面水流不同于一般明渠流,其水较浅,一般只有几毫米到几厘米,称之为薄层水流^[20-21]。但是,因有明显的沟床,浅沟径流比较集中,水深更大,流速更猛,而与明渠流有较多的相似性^[4]。本文采用明渠流的概念和方法来表征浅沟径流的水力学特征,且因试验中水流已达到一定深度,所以采用染色剂示踪法相近的计算方法来计算流速,即在注入 KCl 溶液后,通过数据采集器测量得到的电导率变化图,确定电解质经过各探针的时间 $t_1 \sim t_6$,则两探针之间的平均流速计算公式为

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

(1)

其中 $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$)
式中 Δl ——相邻两个探针之间的距离, m
 Δt ——电解质通过相邻两探针的时间差, s

2 结果与分析

2.1 流量与坡度对浅沟径流流速的影响

测量得到的电导率变化归一化值如图 2 所示,仪器可以较好地记录电导率变化的过程。

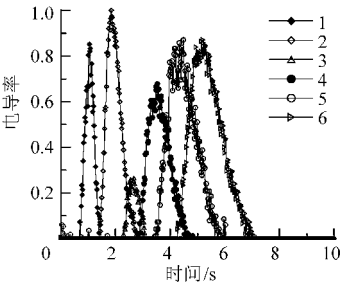


图 2 坡度 10°、流量 64 L/min 条件下各组电导率实测值
Fig. 2 Solute transport processes under 10° and 64 L/min flow rate

用 2 种方法测量得到的不同坡度、流量条件下浅沟径流流速如表 1 所示,电解质示踪法测量得到的流速在 0.55 ~ 1.60 m/s 之间。流量及冲刷历时、土壤类型、前期含水率、坡度和坡长等都会影响浅沟径流的运动。本研究土壤类型、冲刷历时等条件一致,且试验前对浅沟土壤进行饱和处理,并放置一段时间才开始试验,以尽量保持土壤前期含水率一致,因此主要影响浅沟径流流速的因素为径流流量和坡度。

表 1 不同坡度和流量条件下浅沟径流流速
Tab. 1 Flow velocity of ephemeral gully under different flow rates and slope gradients

坡度 <i>S</i> /(°)	流量 <i>F</i> /L·min ⁻¹	电解质示 踪法流速 <i>v_e</i> /m·s ⁻¹	染色剂示 踪法流速 <i>v_D</i> /m·s ⁻¹	相对 误差 /%
5	64	0.55	0.71	29
	128	0.70	0.54	23
	256	0.85	0.94	11
10	64	1.01	0.60	41
	128	1.25	0.78	38
	256	1.60	1.24	23
20	64	1.09	0.70	36
	128	1.52	1.18	22
	256	1.41	1.45	3

坡度是影响土壤侵蚀的主要因素之一,一方面坡度的增大提高了土壤的不稳定性,另一方面,坡度越大径流的重力顺坡分力就越大。径流流速随坡度增大而增大(图 3),且增大的幅度有减缓的趋势。256 L/min 流量下,20°浅沟径流流速略微小于 10°的,这是由于浅沟边界及侵蚀过程复杂多变,且坡度越大坡面越易形成跌坎,坡面径流能量一部分消耗在跌坎上^[22]。

径流流速随冲刷流量的增大而增大(图 4),且增大的幅度也有减缓的趋势。20°时,浅沟径流流速随冲刷流量增大至一定值,有稳定的趋势。

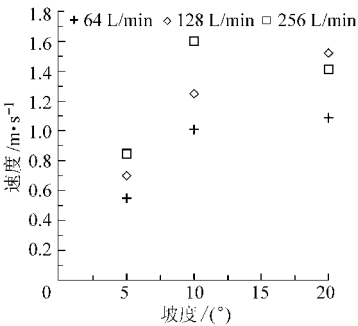


图 3 不同流量条件下浅沟径流流速随坡度的变化
Fig. 3 Flow velocities of ephemeral gully under different flow rates

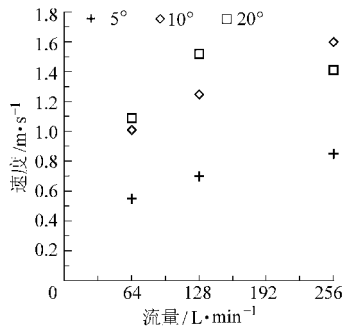


图 4 不同坡度条件下浅沟径流流速随流量的变化
Fig. 4 Flow velocities of ephemeral gully under different slope gradients

2.2 浅沟径流流速沿坡长分布

KCl 盐溶液滴入水流之后,电解质随浅沟径流运动有加速过程,因此第 1 组探针测得流速较其他浅沟位置的小,因此舍去该组探针数据。以 10°条件时为例,如图 5 所示,径流流速随坡长变化不显著。该结果与龚家国^[13]等得到的结果相吻合,龚家国认为受沟道跌坎影响,流速等水动力学参数沿坡长无显著变化。256 L/min 条件下浅沟径流流速随坡长波动变化,这是因为该条件下浅沟侵蚀剧烈,且沿坡长方向底部有泥沙淤积。

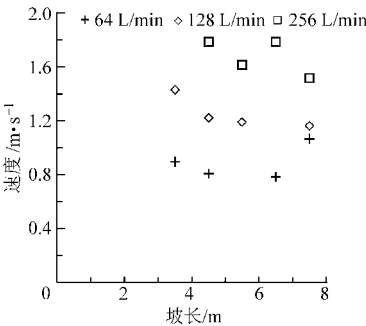


图 5 不同流量条件下浅沟径流流速随坡长的变化
Fig. 5 Flow velocities at different distances under different flow rates

2.3 电解质示踪法与染色剂示踪法测量结果对比

将传统的染色剂示踪法测量得到的流速与电解质示踪法测量得到的流速进行比较,结果如表 1 所示。通过线性拟合(图 6),得到拟合系数为 0.80,相对误差为 3%~41%。总体说来,浅沟流速测量过程中,电解质示踪法测量得到的流速比染色剂示踪法测量得到的流速大。若坡面径流中无泥沙或者径流量较小,由于染色剂(高锰酸钾)的扩散,则染色剂示踪法测量流速应该大于电解质示踪法所得流速。但由于浅沟径流量较大,且泥沙含量较高,一方面滴入水流的染色剂量比较小,而浅沟径流量大,强烈的弥散使染色剂严重稀释,从而导致观测染色剂前峰困难,另一方面高含沙径流颜色较深,与染色剂相近,影响对染色剂的观测,此外由于操作者反应的滞后,也导致染色剂示踪法测量浅沟径流流速

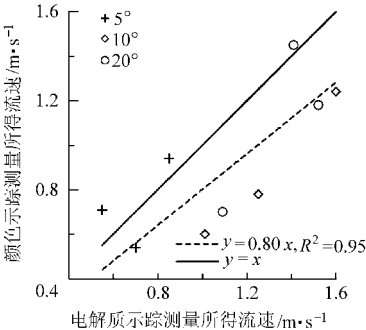


图 6 电解质示踪法测量的流速与染色剂示踪法测量的流速比较

Fig. 6 Comparison of velocities measured by electrolyte tracer with those by dye tracer

偏小。图 7 为两种方法测量得到的浅沟同坡段流速对比(10°条件下不同流量),64、128、256 L/min 3 种径流量的拟合系数分别为 0.63、0.73、0.75。流量越大,电解质示踪法测量得到的浅沟径流流速就越接近染色剂示踪法测量所得结果。结合图 6、7

可知,染色剂示踪法测量浅沟径流流速偏小,而电解质示踪法可以较好地测量径流量较大的浅沟径流流速。

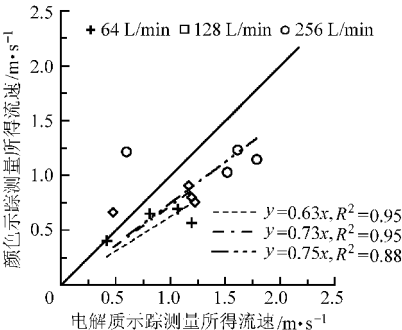


图 7 10°条件下电解质示踪法测量的流速与染色剂示踪法测量的流速比较

Fig. 7 Comparison of velocities measured by electrolyte tracer with those by dye tracer under 10° slope

3 结束语

采用电解质示踪法和染色剂示踪法,测量了坡度 5°、10°、20°,径流量 64、128、256 L/min 时的浅沟径流流速,研究了冲刷条件下浅沟径流流速特征,并对比了两种测量方法所得结果。

浅沟径流流速随坡长增加有减小趋势,随流量和坡度增大而增大。随着浅沟侵蚀的加剧,浅沟径流流速变小。电解质示踪法测量得到的流速在 0.55~1.60 m/s 之间,而染色剂示踪法测量得到的流速为 0.71~1.45 m/s。电解质示踪法测量所得浅沟坡面径流流速与染色剂示踪法测量所得结果相近。染色剂示踪法测量得到的流速略小于电解质示踪法测量结果。考虑到浅沟水流对示踪剂稀释造成的视觉影响,电解质示踪法测量的流速具有其合理性。电解质示踪法可以更好地测量浅沟径流流速。

参 考 文 献

1 Casali J, Loizu J, Campo M A, et al. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemral gully erosion[J]. CATENA, 2006, 67(2): 128~138.

2 Casali J, Bennett S J, Robinson K M. Processes of ephemeral gully erosion[J]. International Journal of Sediment Research, 2000, 15: 31~41.

3 Grissinger E H, Murphey C E. Ephemeralgully erosion in the loess uplands, goodwin creek watershed, Northern Mississippi, USA [C]//Final Proc. Int. Conf. River Sedimentation. Beijing, China, 1989: 51~58.

4 张科利,唐克丽,王斌科. 黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J]. 水土保持学报,1991, 5(2):8~13.
Zhang Keli, Tang Keli, Wang Binke. A study on characteristic value of shallow gully erosion genesis on slope farmland in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 5(2): 8~13. (in Chinese)

5 Poesen J. Gully typology and gully control measures in the European Loess Belt[C]//Wicherek S. Farm land erosion in temperate plains environment and hills. Amsterdam, 1993: 221~239.

6 Haan C T, Barfield B J, Hayes J C. Design hydrology and sedimentology for small catchments[M]. London: Academic Press, 1994: 239.

7 Poesen J,Nachtergaele J G, Verstraetena C, et al. Gully erosion and environmental change: importance and research needs[J].

- CATENA, 2003, 50(2~4): 91~133.
- 8 Brice J C. Erosion and deposition in the loess-mantled Great Plains, Medicine Creek drainage basin, Nebraska [C]. U. S. Geological Survey Professional Paper 352-H, 1966: 235~339.
- 9 Imeson A C, Kwaad F J P M. Gully types and gully prediction[J]. Geografisch Tijdschrift, 1980, 14(5): 430~441.
- 10 Vandaele K, Poesen J, Govers G, et al. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision[J]. Geomorphology, 1996, 16(2): 161~173.
- 11 王文龙,雷阿林,李占斌,等. 土壤侵蚀链内细沟浅沟切沟流动力机制研究[J]. 水科学进展,2003,14(4):471~475.
Wang Wenlong, Lei Alin, Li Zhanbin, et al. Study on dynamic mechanism of rills, shallow furrows and gully in the soil erosion chain[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(4): 471~475. (in Chinese)
- 12 龚家国,周祖昊,贾仰文,等. 黄土区浅沟侵蚀沟槽发育及其水流水力学基本特性模拟试验研究[J]. 水土保持学报, 2010,24(5):92~100.
Gong Jiaguo, Zhou Zuhao, Jia Yangwen, et al. Simulation experiment of ephemeral gully on basis hydraulics parameters of concentrated flow and erosion morphology in loess area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 92~100. (in Chinese)
- 13 Gong Jiaguo, Jia Yangwen, Zhou Zuhao, et al. An experimental study on dynamic processes of ephemeral gully erosion in loess landscapes[J]. Geomorphology, 2011, 125(1): 203~213.
- 14 仇宝云,刘超,汤方平,等. 探针测定大型水泵流量研究[J]. 农业机械学报,2004,35(4):66~69.
Qiu Baoyun, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Flowrate measurement of large pumps by probe system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4): 66~69. (in Chinese)
- 15 Dunkerley D L. Estimating the mean speed of laminar overland flow using dye injection uncertainty on rough surfaces[J]. Earth Surf Process Landforms, 2001, 26(4): 363~374.
- 16 Zhang Guanghui, Luo Rongting, Cao Ying, et al. Correction factor to dye-measured flow velocity under varying water and sediment discharges[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(1~2): 205~213.
- 17 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.
- 18 夏卫生. 电解质脉冲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)
- 19 Lei Tingwu, Chuo Ruiyuan, Zhao Jun, et al. An improved method for shallow water flow water flow velocity measurement with practical electrolyte inputs[J]. Journal of Hydrology, 2010, 390(1~2): 45~56.
- 20 刘青泉,李家春,陈力. 坡面流及土壤侵蚀动力学(I):坡面流[J]. 力学进展,2004,34(3):360~373.
Liu Qingquan, Liu Jiachun, Chen Li. Dynamics of overland flow and soil erosion(I)—overland flow[J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(3): 360~373. (in Chinese)
- 21 夏卫生,雷廷武,刘春平,等. 坡面薄层水流流速测量的比较研究[J]. 农业工程学报,2004,20(2):23~26.
Xia Weisheng, Lei Tingwu, Liu Chunping, et al. Comparative analysis of measurement of velocity of slope laminar flow[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 23~26. (in Chinese)
- 22 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.
Xia Weisheng, Lei Tingwu, Liu Chunping, et al. Flow characteristics of sheet flow on slope under the condition of raining[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 119~123. (in Chinese)

(上接第 73 页)

- 9 刘超,金燕. 双向流道泵装置内三维流动数值模拟[J]. 农业机械学报,2011,42(9):74~78.
Liu Chao, Jin Yan. Numerical simulation on three dimensional flow in two-way reversible pumping system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 74~78. (in Chinese)
- 10 罗永要,王正伟,梁权伟. 混流式水轮机转轮动载荷作用下的应力特征[J]. 清华大学学报:自然科学版,2005,45(2): 235~237.
Luo Yongyao, Wang Zhengwei, Liang Quanwei. Stress of Francis turbine runners under fluctuant work conditions[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(2): 235~237. (in Chinese)