

黄土坡面细沟水流佛汝德数试验研究^①

陆绍娟^{1,2}, 王占礼^{2,3*}, 申楠^{1,2}, 谭贞学⁴

(1 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 4 钦州市水土保持监测分站, 广西钦州 535000)

摘要:采用组合小区模拟降雨试验方法,对黄土坡面细沟水流水力特性佛汝德数(Fr)进行试验研究。结果表明:细沟水流流态判别指标 Fr 随径流历时的变化,在不同雨强及坡度下皆表现为减小趋势,皆可用指数方程描述;细沟水流平均 Fr 随雨强及坡度的增大而增大,可分别用幂函数方程和指数方程描述,随雨强、坡度的变化可用二元指数方程描述;在不同雨强及坡度下,一次降雨径流过程的细沟水流平均 Fr 变化于 6.309 ~ 7.336 之间,表明坡面细沟水流流态属于急流。

关键词:黄土坡面;细沟侵蚀;组合小区;水流流态

中图分类号: S157.1

细沟侵蚀是细沟水流对土壤的分离和搬运过程,表现为细沟沟壁扩张、沟底下切、沟头溯源侵蚀过程,其发生发展主要取决于坡面土壤条件和坡面水流的水力学特性。细沟水流流态是坡面细沟水流水力特性的重要参数之一,佛汝德数(Fr)是用以判别水流流态为急流、缓流还是临界流的一个水力学参数。有研究表明当坡面水流流态为急流时,可引起细沟侵蚀^[1-5]。因此,开展和加强坡面细沟水流 Fr 试验研究,将有助于从水动力学角度理解坡面细沟侵蚀过程与机理。

不同学者对坡面细沟水流流态进行了诸多研究,并取得了相应的研究进展。白清俊和沙际德^[6]的试验表明,坡面细沟股流有可能为缓流,也可能为急流。郑良勇等^[7]通过室内水槽冲刷试验指出,陡坡径流的流态属于急流,在不同的时间和坡面位置流态各不相同。丁文峰等^[8]认为坡面径流汇集成股流前后其流态均属于急流。张科利^[9]认为细沟流属于急流。李占斌等^[10]通过陡坡室内放水冲刷试验得出,坡面细沟侵蚀发生过程中的坡面流在整个试验过程都处于急流范围。徐天献^[11]对长江上游坡耕地细沟径流水动力学特征进行分析表明,细沟径流均处于急流范畴。任熠等^[12]的研究表明紫色土细沟流的 Fr 均大于 1,平均为 1.94,属于急流。王龙生等^[13]的室内人工模拟降

雨试验表明,坡面细沟间薄层水流以及细沟内水流流态皆为急流,且细沟内水流 Fr 值比细沟间的大。

综上所述,目前国内外学者的研究主要集中于对坡面细沟水流流态的判别,缺乏对细沟水流流态判别参数—— Fr 随影响因子变化的系统定量研究,而 Fr 的变化规律深刻影响着细沟侵蚀的发生演变特征。为此,本文采用组合小区模拟降雨试验方法,在不同降雨雨强及不同坡度条件下,对黄土坡面细沟水流 Fr 进行试验研究,以揭示黄土坡面细沟水流 Fr 随不同影响因素的变化规律特征,以及细沟水流流态特征,为阐明黄土坡面细沟侵蚀发生发展过程机理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置为自行设计加工的移动式变坡钢质组合小区(图 1),由 2 个小区组成(1, 2 号),小区规格均为:80 cm × 50 cm × 35 cm。1 号小区用于为 2 号小区中的细沟小区提供顶部汇流汇沙,置于 2 号小区上部;2 号小区紧接 1 号小区设置,装土时由两边向中间均匀倾斜 10°,中间为 10 cm 宽度的细沟小区,用于观测具有细沟间区的细沟中的总水沙过程,实现对黄土坡面一段细沟的水沙变化过程观测与模拟。1

基金项目:国家自然科学基金项目(41471230, 41171227, 40971172)和中国科学院重点项目(KZZD-EW-04-03)资助。

* 通讯作者(zwang@nwsuaf.edu.cn)

作者简介:陆绍娟(1990—),女,云南陆良人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。E-mail: shaojuanlu@gmail.com

和 2 号两个小区之间用钢质封闭导流槽连接。为保证汇入流不造成冲刷, 2 号小区在加工时长度进行了适当延长, 以使上端能有适当宽度的非土面水流缓冲带。

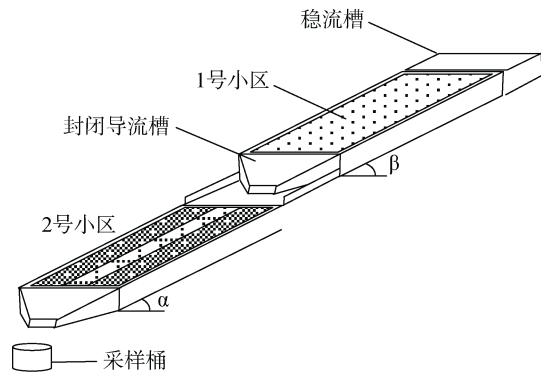


图 1 试验装置示意图
Fig. 1 Diagram of multi-plot structure

1.2 试验土壤装填

试验用土取自位于黄土高原腹地的陕西省安塞县(属典型黄土高原丘陵沟壑区), 土壤类型为黄绵土, 试验前期土壤含水量为 140 g/kg, 体积质量为 1.2 g/cm³。所有试验土壤自然风干并过 5 mm 筛, 除去杂草和石块。当自然风干土壤的重量含水量低于设计含水量时, 要往土壤加适量的水以便达到设计含水量。小区装土之前, 在底部铺 5 cm 的天然细沙, 铺上透水纱布, 保持土层的透水状况接近天然坡面。为保证装土的均匀性, 试验小区采用分层装土。填土时, 采用边填充边压实, 以减小边壁所造成的对入渗和产流产沙过程及坡面侵蚀微形态发育等方面的影响, 并使下垫面土壤条件的变异性达到最小, 保证试验土壤体积质量达到设计要求。填土后, 用刮板将表面刮平整。

1.3 试验设计与观测计算

试验在中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行。由于试验小区长度较短, 为保证足够的降雨产流汇流流量, 降雨产流开始时在 1 号小区上端同时进行 0.12 m³/h 的定流量放水, 其作用相当于增加小区的坡长, 使各场降雨试验的产流汇流流量统一提高同一等级(相当于注入稳定基流), 而降雨产流汇流与定流量放水叠加形成的流量, 其变化规律依然随降雨强度及坡度的改变而变化。试验设计坡度分别为 9°、12°、15°、18° 和 21°, 雨强为 2.0 mm/min 的试验 5 场; 雨强分别为 1.0、1.5、2.5、3.0 mm/min, 坡度为 15°的试验 4 场, 共进行 18 场试验(重复 1 次)。各场降雨在开始产流后统一降雨历时为 18.25 min。

为消除装土时表面留下的松土对水流的影响, 试验在产流 0.25 min 后开始第一次观测, 以后每隔 3 min 观测一次, 直到降雨停止。各坡度雨强组合条件下不同径流时刻细沟小区中的细沟水流流速用高锰酸钾染色法测量, 测流长度为整个细沟小区的长度, 即 80 cm, 进一步通过加权平均计算, 则可取得一场降雨径流过程的细沟水流平均流速。在此基础上计算出不同径流时刻细沟水流的 Fr , 计算公式为:

$$Fr = V / \sqrt{gh} \quad (1)$$

式中: Fr 为佛汝德数(无量纲); g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; V 为流速(m/s); h 为断面平均水深(m)。

2 结果与分析

2.1 不同降雨强度及坡度条件下基于 Fr 的细沟水流流态判别

Fr 是判别水流流态的重要指标, 它反映了水流惯性力与重力之比, 利用它可以判断缓流和急流。按清水明渠流的一般标准, $Fr < 1$ 时, 惯性力作用小于重力作用, 这时重力对水流起主导作用, 水流为缓流; $Fr > 1$ 时, 说明惯性力作用大于重力作用, 惯性力对水流起主导作用, 这时水流为急流; $Fr = 1$ 时, 说明惯性力作用与阻力作用相等, 水流为临界流。

表 1 是根据试验中实测的细沟水流的水力要素值计算所得的细沟水流平均 Fr , 结果表明: 在试验的坡度及雨强范围内, 一次降雨径流过程的细沟水流平均 Fr 都大于 1, 变化于 6.309 ~ 7.336 之间, 说明在试验条件下, 坡面细沟水流流态皆属于急流。这与潘成忠和上官周平^[14]的试验结果相似, 在试验的坡度及雨强范围内, 一次降雨过程中坡面水流佛汝德数 Fr 均大于 1, 坡面水流流态属于急流。

表 1 不同雨强及坡度条件下细沟水流平均 Fr
Table 1 Average Fr of rill flow under different rainfall intensities and different slope gradients

雨强(mm/min)	坡度(°)	场次 1	场次 2	平均 Fr
1.0	15	5.564	7.055	6.309
1.5	15	6.037	7.190	6.614
2.0	15	6.703	6.540	6.622
2.5	15	6.512	6.640	6.576
3.0	15	6.527	7.341	6.934
2.0	9	6.170	5.797	5.983
2.0	12	6.027	6.338	6.182
2.0	15	6.703	6.540	6.622
2.0	18	7.628	5.463	6.546
2.0	21	7.899	6.772	7.336

注: 坡度为 15°, 雨强为 2 mm/min 的试验共进行 2 次(包括重复)。

2.2 Fr 随径流过程的变化

根据试验实测资料,将不同雨强、不同坡度下的坡面径流 Fr 随径流历时的变化过程点绘在直角坐标系中,如图 2 所示。从图 2 可以看出,在不同雨强及不同坡度条件下,细沟径流 Fr 随径流历时的增长而不断减小,且减小趋势一致。这是因为细沟小区顶部汇入流、两侧细沟间汇入流及细沟承雨经入渗后产生的净雨共同形成的细沟径流,其流速变化过程为随径流历时的增长而减小。随细沟侵蚀过程的进行,细沟床面越来越向粗糙崎岖变化,床面实际坡度越来越向减小的趋势微小地改变,这些变化导致细沟径流的水深随径流过程的进行而增大。增大的水深与减少的流速共同作用,使细沟水流 Fr 随径流历时的增长而不断减小。同时,在不同雨强及不同坡度条件下,细沟径流过程中的水流 Fr 始终大于 1,表明细沟径流过程中的水流流态总是处于急流。

经对试验结果进行统计分析表明,不同雨强及不同坡度条件下,细沟径流 Fr 随径流过程的变化皆可用指数方程很好地描述,且相关性均很好,经验方程

与检验结果见表 2。

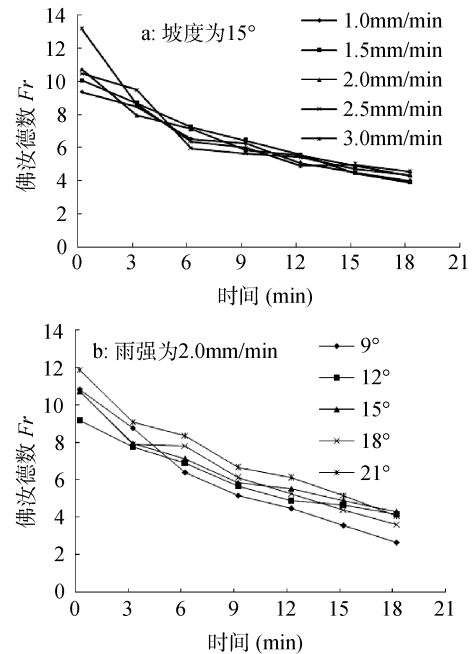


图 2 细沟水流 Fr 随径流历时的变化
Fig. 2 Variations of Fr of rill flow with time

表 2 不同雨强及不同坡度条件下 Fr 随径流过程变化的经验方程

Table 2 Experiential equations of Froude numbers (Fr) varying with time under different rainfall intensities and slope gradients

雨强(mm/min)	坡度(°)	回归方程	决定系数 R^2	显著性水平
1.0	15	$Fr = 9.4586e^{-0.0484t}$	0.9846	0.01
1.5	15	$Fr = 10.265e^{-0.0529t}$	0.9962	0.01
2.0	15	$Fr = 9.8009e^{-0.047t}$	0.9607	0.01
2.5	15	$Fr = 9.8372e^{-0.0491t}$	0.8891	0.01
3.0	15	$Fr = 10.687e^{-0.0542t}$	0.8539	0.01
2.0	9	$Fr = 10.859e^{-0.0754t}$	0.9929	0.01
2.0	12	$Fr = 8.9855e^{-0.0444t}$	0.9785	0.01
2.0	15	$Fr = 9.8009e^{-0.047t}$	0.9607	0.01
2.0	18	$Fr = 10.472e^{-0.0572t}$	0.9823	0.01
2.0	21	$Fr = 11.577e^{-0.0553t}$	0.9804	0.01

注: Fr 为佛汝德数; t 为时间, min。

2.3 降雨强度及坡度对佛汝德数 Fr 的影响

将坡度为 15° 时不同雨强下的坡面细沟水流平均 Fr 和雨强为 2.0 mm/min 时不同坡度下的坡面细沟水流平均 Fr 点绘在直角坐标系中,如图 3 所示。图 3 表明,不同雨强及不同坡度条件下,一次降雨径流过程的细沟水流平均 Fr 皆大于 1,表明不同雨强及不同坡度条件下,平均而言,细沟水流流态处于急流。

同时,由图 3 可知,在同坡度下,细沟水流平均 Fr 随雨强的增大而增大,在同雨强下,细沟水流平均 Fr 随坡度的增大也增大,可分别用幂函数方程和指数方程描述,且相关性均较好,相关方程及检验结果分别为式(2)和式(3):

$$Fr = 6.339I^{0.0668} \quad (R^2 = 0.7479, \text{Sig.} = 0.01) \quad (2)$$

$$Fr = 5.1668e^{0.0155S} \quad (R^2 = 0.8864, \text{Sig.} = 0.01) \quad (3)$$

式中: Fr 为细沟径流平均佛汝德数; I 为降雨强度 (mm/min); S 为坡度(°)。

Fr 的变化主要由流速与水深的变化决定。同坡度条件下,随雨强增大,由细沟小区顶部汇入流、两侧细沟间汇入流及细沟承雨经入渗后产生的净雨共同形成的细沟径流,其流速及水深皆增大。但是流速对 Fr 的增加作用大于水深对 Fr 的减小作用,最终导致了细沟水流平均 Fr 随降雨强度的增大而增大。而同雨强下,随着坡度增大,细沟径流流速增大,水深减小,所以细沟径流平均 Fr 随坡度的增大而增大。

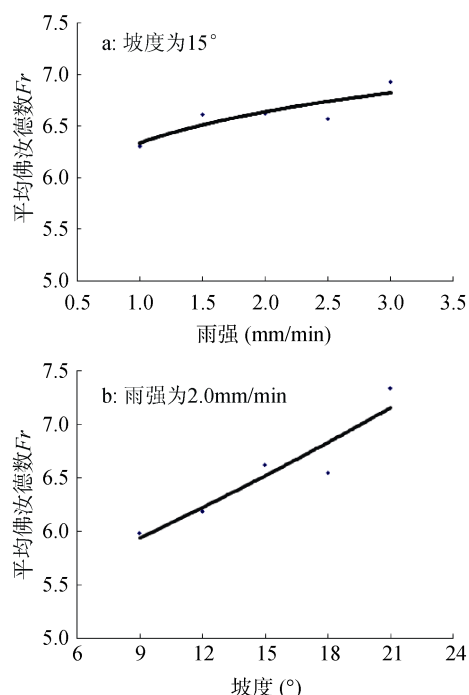


图3 雨强及坡度对细沟水流平均 Fr 的影响

Fig.3 The impacts of rainfall intensity and slope gradient on Fr

综合降雨强度及坡度对 Fr 的影响, 细沟水流平均 Fr 随降雨强度及坡度的变化可用二元指数方程描述, 且相关性较好, 经验方程与检验结果如式(4):

$$Fr = 4.83e^{0.037I + 0.015S} \quad (R^2 = 0.853, F(2,6) = 17.46 > F(2,6)_{0.01} = 10.92) \quad (4)$$

式中: Fr 为细沟水流平均佛汝德数; I 为降雨强度 (mm/min); S 为坡度(°)。

从式(4)可以看出, 细沟水流平均 Fr 与降雨强度及坡度之间的相关关系显著, 且降雨强度对细沟水流平均 Fr 的影响大于坡度对其的影响。

3 结论

1) 在不同雨强及不同坡度条件下, 一次降雨径流过程的细沟水流平均 Fr 变化于 6.309 ~ 7.336 之间, 表明坡面细沟水流流态皆属于急流。

2) 在不同雨强及不同坡度下, 细沟径流 Fr 随径流历时的增长而不断减小, 且减小趋势一致, 皆可用指数方程很好地描述。

3) 细沟水流平均 Fr 随雨强及坡度的增大均增大, 可分别用幂函数方程和指数方程描述; 细沟水流平均 Fr 随降雨强度、坡度的变化可用二元指数方程

描述, 降雨强度对细沟水流平均 Fr 的影响大于坡度对其的影响。

由于目前还没有建立较为成熟的坡面流理论体系, 因此对坡面细沟水流 Fr 的研究大都借鉴河流动力学的原理和方法, 并未考虑含沙水流和水流表面微波对水流流速的影响。此外, 受试验设备、量测技术的限制, 采用染色剂法获得的仅是平均流速, 不能精确反映断面的流速, 从而制约了坡面流水动力学特性的研究, 今后还需要继续加强这方面的试验研究。

参考文献:

- [1] Bryan RB, Poesen J. Laboratory of experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development[J]. Earth Surf. Pro. Land., 1989, 14: 211-231
- [2] Foster GR, Huggins LF, Meyer LD. A laboratory study of rill hydraulics: velocity relationships[J]. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 1984, 27: 790-796
- [3] Foster GR, Huggins LF, Meyer LD. A laboratory study of rill hydraulics: II. Shear stress relationships[J]. Trans. of ASAE, 1984, 27 (3): 797-804
- [4] Foster GR. Modeling soil erosion and sediment yield[A] // Lal R. Soil Erosion Research Methods[C]. Ankeny, Iowa: Soil and Water Conservation Society, 1988: 97-118
- [5] 张科利, 秋吉康宏. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 41-46
- [6] 白清俊, 沙际德. 黄土坡面细沟流流态的试验研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(S1): 26-32
- [7] 郑良勇, 李占斌, 李鹏. 黄土区陡坡径流水动力学特性试验研究[J]. 水利学报, 2004(5): 46-51
- [8] 丁文峰, 李占斌, 丁登山. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 72-75
- [9] 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特征的研究[J]. 泥沙研究, 1999(1): 56-61
- [10] 李占斌, 秦百顺, 亢伟, 李鹏, 李雯, 魏霞. 陡坡面发育的细沟水动力学特性室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 64-68
- [11] 徐天献. 长江上游坡耕地细沟径流水动力学特征研究[J]. 亚热带水土保持, 2013, 25(2): 1-6, 11
- [12] 任熠, 王先拓, 王玉宽, 傅斌, 王勇强. 紫色土坡面细沟流的水动力学特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 39-46
- [13] 王龙生, 蔡强国, 蔡崇法, 孙莉英. 黄土坡面细沟与细沟间水流水动力学特性研究[J]. 泥沙研究, 2013(6): 45-52
- [14] 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

Experimental Study of Rill Flow State on Loess Hillslope

LU Shao-juan^{1,2}, WANG Zhan-li^{2,3*}, SHEN Nan^{1,2}, TAN Zhen-xue⁴

(1 *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 2 *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 3 *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 4 *Qinzhou Sub-station of Soil and Water Conservation Monitoring, Qinzhou, Guangxi 535000, China*)

Abstract: The slope flow state in rill erosion process on loess hillslope were studied by a multi-plot experiments under simulated rainfall. The results showed that: 1) the rill flow Froude number(Fr), a judging index of flow state, decreased with rainfall intensity and slope. The exponential equation could describe the trend. 2) The average Fr of rill flow increased with increasing rainfall intensity or slope, which could be described by the power function equation and exponential equation respectively, while could be described by a dual exponential equation to both factors. 3) The average Fr varied between 6.309 and 7.336, indicating that rill flow was rapid.

Key words: Loess hillslope; Rill erosion; Multi-plot; Flow state