

黄土坡面细沟水流流型试验研究

陆绍娟^{1,2}, 王占礼^{1,2,3}, 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. 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流型进行了试验研究。结果表明: (1) 细沟水流流型判别指标雷诺数随径流历时的变化, 在不同雨强及不同坡度下皆表现为先增大随后转为较平稳的变化过程, 皆可用幂函数方程描述; (2) 细沟水流平均雷诺数分别随雨强及坡度增大而增大, 均可用对数方程很好地描述, 随雨强及坡度的变化可用二元幂函数方程描述; (3) 细沟水流在不同雨强下几乎一直处于层流状态, 两个最大雨强在产流开始 9 min 后变为过渡流, 而在不同坡度下也一直处于层流状态, 两个最大坡度在产流开始 15 min 后变为过渡流; (4) 在试验雨强及坡度条件下, 一次降雨径流过程的细沟水流平均雷诺数变化范围为 327~457, 表明细沟水流流型在试验条件下大致处于层流状态。细沟水流雷诺数随流量的变化呈显著的线性正相关关系。

关键词: 黄土坡面; 细沟; 水流流型; 雷诺数; 组合小区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0028-05

中图分类号: S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.007

Experimental Study of Rill Flow Pattern on Loess Hillslope

LU Shao-juan^{1,2}, WANG Zhan-li^{1,2,3}, 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, 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 flow patterns involved in rill erosion process on loess hillslope are studied by a multi-plot experiments under simulated rainfall with addition of steady in-flow through the tops of the plot. The results showed that: (1) The Reynolds number of rill flow, a judging index of flow pattern, changed under different rainfall intensities and slopes with a overall rise and finally a stabilized trend. A power function equation can be used to describe the two processes. (2) The average Reynolds number of slope rill flow increases with rainfall intensity and slope. Its relation to both rainfall intensity and slope can be described by a logarithmic equation; and to both of the two factors, by a dual power function equation. (3) The rill flow pattern is the laminar flow under different rainfall intensities and slopes. Only under the two of the largest rainfall intensities and slopes, rill flow may be in the transition region. (4) The average Reynolds number, a measure of fluid turbulence, varies between 327 and 457 and remains in the regime of normally considered laminar flow. The change of the Reynolds number, with the amount of the flow, is a significant positive linear correlation.

Keywords: loess hillslope; rill; flow pattern; Reynolds number; multi-plot

土壤侵蚀是危及人类生存与发展的重要环境问题之一, 在中国表现尤为突出^[1], 其中, 黄土高原更是土壤侵蚀最严重的地区。黄土区土质极其疏松, 降水集中, 每遇暴雨, 往往发生严重细沟侵蚀, 造成侵蚀强

度急剧增加。研究表明, 细沟侵蚀量占坡面侵蚀量的 70% 以上^[2]。细沟侵蚀在坡地侵蚀中具有极其重要地位, 是黄土区坡面严重土壤侵蚀的根源, 凡是侵蚀量大的地方, 细沟侵蚀必然都很活跃^[3-5]。

收稿日期: 2013-01-01

修回日期: 2013-02-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土坡面细沟侵蚀关键参数及其耦合关系试验研究”(41171227); 国家自然科学基金项目“黄土坡面细沟侵蚀动力学过程组合小区试验研究”(40971172); 中国科学院重点项目“近百年黄土高原侵蚀环境与水沙变化”(KZZD-EW-04-03)

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

通信作者: 王占礼(1960—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程及预报模型研究。E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn。

细沟侵蚀过程的发生发展取决于坡面水流的水力学特性和坡面土壤条件。细沟水流流型,也即水流流动型态,是细沟水流水力学重要特性之一。坡面细沟径流流型对细沟侵蚀过程具有重要影响,一般来说,紊流的紊动作用强,对床面土壤物质的分离、搬运能力较强,具有较大的侵蚀能力;层流则相反,其紊动作用弱,对床面土壤物质的分离、搬运能力较弱,具有较小的侵蚀能力。因此,通过对坡面细沟水流雷诺数的分析研究,判定细沟径流过程中的流型是层流还是紊流,对于理解和阐明坡面细沟侵蚀动力学过程与机理具有重要作用。

近年来,对坡面流雷诺数研究已取得一些进展。李占斌等^[6]通过土槽冲刷试验研究了细沟水流 Darcy—Weisbach 阻力系数与雷诺数间的关系。张科利等^[7]运用原形模拟径流冲刷实验取得了坡面侵蚀过程中水流雷诺数随流量变化的临界坡度。张科利^[8]还通过径流冲刷试验研究了细沟阻力系数大小与水流雷诺数的关系。肖培青等^[9-10]通过双土槽实验研究了上方来水和降雨强度对雷诺数的影响。丁文峰等^[11]研究了坡面流雷诺数随冲刷历时和流量的变化及阻力系数与雷诺数的关系。

目前,多数学者对坡面流雷诺数的研究主要集中于阻力系数与雷诺数的关系,并且大都是利用径流冲刷槽试验进行研究。本试验采用组合小区模拟降雨试验方法,研究黄土坡面细沟水流流型,以深入认识黄土坡面细沟水流水力学性质,促进黄土坡面细沟侵蚀动力学过程与机理的进一步阐明。

1 材料与方 法

1.1 试验装置与供试土壤

试验装置为自行设计加工的移动式变坡钢质组合小区,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,也由钢质材料组成,与两侧的细沟间区分开,细沟小区在试验过程中始终保持满宽出流,细沟宽度在实验过程始终不会发生变化,该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。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14%,容重为1.2 g/cm³。

1.2 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 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1次观测,以后每隔3 min观测1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。浑水温度用温度计法观测。通过在组合小区各出口进行与流速观测同步的计时计容取浑水样及烘干称重后计算获得取样含沙量,进一步计算出各时刻相应的细沟清水径流流量,再结合细沟水流流速计算出细沟水深。在观测得到细沟水流流速、水深及浑水温度的基础上,计算出不同径流时刻细沟水流的雷诺数,计算公式为:

$$Re = VR/v \quad (1)$$

式中: Re ——雷诺数(无量纲); V ——流速(m/s); R ——水力半径(m)[对本研究的矩形细沟断面, $R = hb/2h + b$,其中, b 为水宽(m), h 为水深(m)]; v ——水流运动黏滞性系数(m²/s)[$v = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2}$,其中, t 为水温(°C)]。

1.3 水流流型判别

对于细沟水流流型的判定,本研究采用的判别指标为:以 $Re < 500$ 为层流区, $500 < Re < 2000$ 为过渡区, $Re > 2000$ 为紊流区。

2 结果与分析

2.1 细沟水流雷诺数随径流过程的变化

2.1.1 不同降雨强度条件下雷诺数随径流过程的变化 将不同降雨强度条件下细沟水流雷诺数随径流

过程变化点绘成图 1。由图 1 可知,不同降雨强度条件下,细沟水流雷诺数随径流历时的增长而先不断增大随后转为较平稳的变化过程,产流后的 9 min 内,雷诺数逐渐增大,但增幅逐渐减小,9 min 以后处于较平稳状态。不同降雨强度下的细沟径流过程中,雷诺数大多数在 500 以下,只有两个最大雨强下的雷诺数在产流开始的 9 min 以后稍微超过 500,这些数据表明,不同降雨强度下的细沟径流过程中,细沟水流流态基本一直处于层流状态,只有两个最大雨强下的细沟径流流态在产流开始的 9 min 以后稍微变为过渡流。

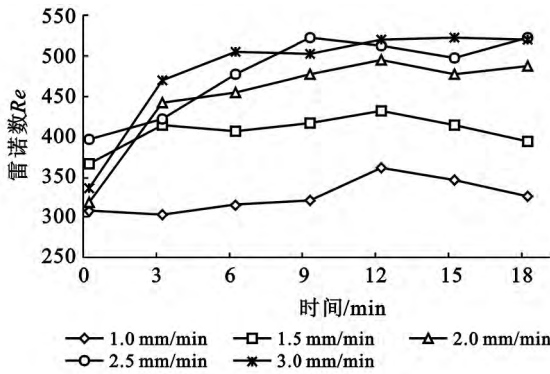


图 1 不同雨强下细沟水流雷诺数随径流过程变化

对试验结果进行统计分析得出,不同降雨强度条件下,细沟水流雷诺数随径流过程的变化总体可用幂函数方程描述,其经验方程及检验结果见表 1。

表 1 不同雨强条件下细沟水流雷诺数随径流过程变化的经验方程

降雨强度/ (mm · min ⁻¹)	坡度/ (°)	回归方程	决定 系数 R ²	显著性 水平
1.0	15	$y=311.85x^{0.0267}$	0.383 6	0.10
1.5	15	$y=388.31x^{0.0270}$	0.600 4	0.05
2.0	15	$y=376.22x^{0.1001}$	0.958 5	0.01
2.5	15	$y=425.35x^{0.0666}$	0.822 7	0.01
3.0	15	$y=400.10x^{0.1038}$	0.963 9	0.01

注:y 为雷诺数;x 为时间(min)。下同。

雷诺数的变化主要由流速与水力半径的变化决定。不同降雨强度下,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,虽然其流速变化过程随径流历时的增长而减小,但随细沟侵蚀过程的进行,细沟床面变得越来越粗糙崎岖,床面实际坡度越来越向减小的趋势微改变,细沟床面微地形这些变化导致细沟径流的水深及相应的水力半径随径流历时的增长而增大,在细沟水力半径的增大与流速的减少导致水流惯性力变化对雷诺数影响的变化过程中,细沟水力半径的变化在径流过程的前期起了更大的影响作用,控制了雷

诺数的变化过程,而在径流过程的后期,细沟水力半径与流速起了比较一致的增大与减小的作用,最终导致了细沟水流雷诺数随径流历时的增长先不断增大而随后转为较平稳的变化过程。

2.1.2 不同坡度条件下雷诺数随径流过程的变化

图 2 为不同坡度条件下细沟径流雷诺数随径流过程的变化。由图 2 可知,不同坡度条件下,细沟径流雷诺数随径流历时的增长而逐步增大,但增加幅度逐步减小,产流开始 15 min 以后变化趋于平稳,各坡度条件下,雷诺数变化趋势较一致。不同坡度下的细沟径流过程中,雷诺数大多数都在 500 以下,只有两个最大坡度下的雷诺数在产流开始的 15 min 以后稍微超过 500,这些数据表明,不同坡度下的细沟径流过程中,细沟水流流态基本一直处于层流状态,只有两个最大雨强下的细沟径流流态在产流开始的 15 min 以后稍微变为过渡流。

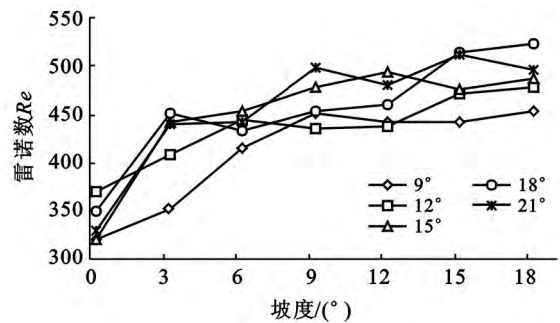


图 2 不同坡度下细沟水流雷诺数随径流过程的变化

表 2 为细沟径流雷诺数随径流过程变化的相关方程及检验结果。从表 2 可以看出,不同坡度条件下,细沟水流雷诺数随径流过程的变化可用幂函数方程描述,且各坡度条件下相关性皆很显著。

表 2 不同坡度条件下细沟水流雷诺数随径流过程变化的经验方程

降雨强度/ (mm · min ⁻¹)	坡度/ (°)	回归方程	决定 系数 R ²	显著性 水平
2.0	9	$y=351.26x^{0.0875}$	0.866 2	0.01
2.0	12	$y=395.43x^{0.0553}$	0.888 4	0.01
2.0	15	$y=376.22x^{0.1001}$	0.958 5	0.01
2.0	18	$y=390.45x^{0.0849}$	0.886 8	0.01
2.0	21	$y=380.71x^{0.1012}$	0.962 1	0.01

比较图 2 与图 1 可知,不同坡度下细沟水流雷诺数随径流过程的变化与不同雨强下细沟水流雷诺数随径流过程的变化总体具有相似性,都随径流历时的增长而先增大后转为平稳变化。其主要差异是,不同坡度下细沟水流雷诺数随径流过程的递增速率稍大于不同雨强下的递增速率,不同坡度下细沟水流雷诺数平稳变化过程历时比不同雨强条件下的平稳变化

过程历时长,各坡度下细沟水流雷诺数的差异小于各雨强下雷诺数的差异。

2.2 降雨强度对细沟水流雷诺数的影响

图 3 是同坡度条件下,一次降雨径流过程的细沟水流平均雷诺数随雨强的变化,式(2)是细沟水流平均雷诺数随雨强变化的经验方程及检验结果。图 3 表明,同坡度条件下,细沟水流平均雷诺数随降雨强度的增大而增大。式(2)表明,细沟水流平均雷诺数随雨强的变化可用对数方程很好地描述。

$$Re = 146.11 \ln I + 338.29 \quad (2)$$

$$(R^2 = 0.961, \text{sig.} = 0.01)$$

式中: Re ——细沟水流平均雷诺数(无量纲); I ——降雨强度(mm/min)。

图 3 显示,同坡度不同雨强条件下,一次降雨径流过程的细沟水流平均雷诺数皆小于 500,表明同坡度不同雨强条件下,平均而言,细沟水流流态处于层流状态。

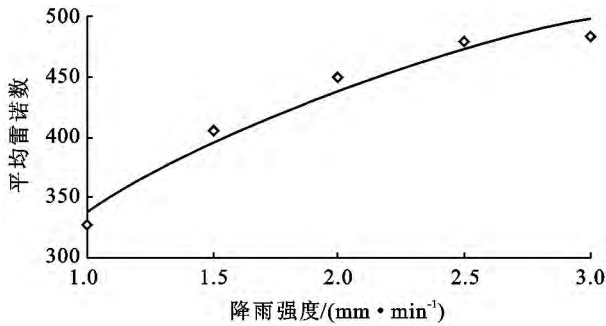


图 3 细沟水流平均雷诺数随雨强的变化

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,其水深及其相应的水力半径,流速皆增大,所以水流惯性力增大,细沟水流平均雷诺数随雨强的增大而增大。

2.3 坡度对细沟水流雷诺数的影响

图 4 是同雨强条件下,一次降雨径流过程的细沟水流平均雷诺数随坡度的变化。由图 4 可知,同雨强条件下,细沟径流平均雷诺数随坡度的增大而增大,经对试验结果进行统计分析得出,同雨强条件下,细沟径流平均雷诺数随坡度的变化可用对数方程很好地描述,相关方程及检验结果如下:

$$Re = 54.43 \ln S + 296.93 \quad (3)$$

$$(R^2 = 0.9212, \text{sig.} = 0.01)$$

式中: Re ——细沟径流平均雷诺数(无量纲); S ——坡度(°)。

由图 4 可以看出,同雨强不同坡度条件下,一次降雨径流过程的细沟水流平均雷诺数也皆小于 500,

表明同雨强不同坡度条件下,平均而言,细沟水流流态也处于层流状态。

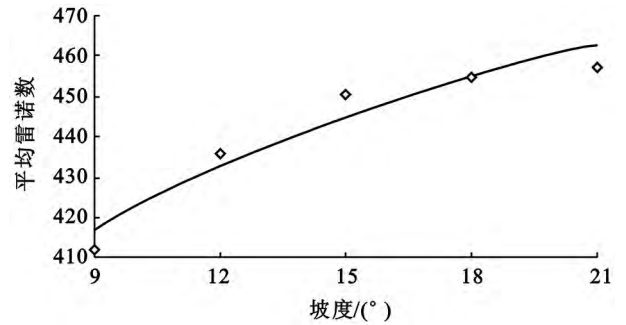


图 4 细沟水流平均雷诺数随坡度变化

降雨强度相同条件下,随着坡度增大,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,其流速增大,水深及相应的水力半径减小。在流速增大变化与水力半径减小变化导致水流惯性力变化对雷诺数的共同影响中,流速的增大作用起了相对大的作用,最终导致了细沟径流平均雷诺数随坡度的增大而增大。

2.4 降雨强度及坡度对细沟水流雷诺数的影响

对不同降雨强度及坡度条件下,一次降雨径流过程的细沟水流平均雷诺数变化试验结果进行统计分析得出,细沟水流平均雷诺数随降雨强度及坡度的变化可用二元幂函数方程描述,相关方程与检验结果如下:

$$Re = 246.55 I^{0.37} S^{0.12} \quad (4)$$

$$[R^2 = 0.94, F(2,6) = 47.5 > F(2,6)_{0.01} = 10.92]$$

式中: Re ——细沟水流平均雷诺数(无量纲); I ——降雨强度(mm/min); S ——坡度(°)。

由式(4)可知,细沟水流平均雷诺数与降雨强度及坡度之间的相关关系显著。降雨强度对细沟水流平均雷诺数的影响大于坡度的影响。

2.5 不同条件下基于雷诺数的细沟水流流型判别

对于水流流型的划分一般由临界雷诺数判别。当水流雷诺数 Re 小于下临界雷诺数 Re' 时,水流状态为层流;当雷诺数 Re 大于上临界雷诺数 Re'' 时,为紊流;当 $Re' < Re < Re''$ 时,为过渡流。明渠流下临界雷诺数 $Re' = 500$,通常是一个稳定值,而上临界雷诺数则是一个不稳定的数值,一般取 $Re'' = 2000$ 。辨别径流流型时以临界雷诺数作为标准:实际雷诺数大于上临界雷诺数时就是紊流,小于下临界雷诺数时一定是层流。本研究采用以 $Re < 500$ 为层流区, $500 < Re < 2000$ 为过渡区, $Re > 2000$ 为紊流区。

表 3 是根据试验中实测的细沟径流水力要素值经过计算得出的一次降雨径流过程的细沟水流平均

雷诺数 Re ,表明在不同雨强及坡度条件下,细沟水流平均雷诺数变化范围为 327~457,按照明渠水流流型的划分标准,试验条件下,平均而言,坡面细沟水流皆属于层流。

表 3 不同降雨强度及坡度条件下细沟水流平均雷诺数 Re

降雨强度/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	坡度/ ($^{\circ}$)	Re	降雨强度/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	坡度/ ($^{\circ}$)	Re
1.0	15	327	2.0	9	411
1.5	15	407	2.0	12	436
2.0	15	450	2.0	15	450
2.5	15	479	2.0	18	455
3.0	15	482	2.0	21	457

而细沟径流过程中水流流型的变化问题,以上研究表明,不同降雨强度下的细沟径流过程中,细沟水流流型基本一直处于层流状态,只有两个最大雨强下的细沟径流流型在产流开始的 9 min 以后稍微变为过渡流;不同坡度下的细沟径流过程中,细沟水流流型也基本一直处于层流状态,只有两个最大坡度下的细沟径流流型在产流开始的 15 min 以后稍微变为过渡流。

我们的研究取得细沟水流流型主要呈层流,可能的原因与我们的试验流量小有关。根据我们对黄土高原野外具有 60 m×15 m 尺度的大型农地径流小区 10 a 的观测资料进行统计,并按对黄土高原野外调查与统计取得的细沟密度与宽度资料进行计算,取得细沟流量在 0.05~74.09 L/min,变化范围很宽。我们的试验中细沟小区的流量为 1.571~3.230 L/min,属于很小的流量。

本研究试验条件下细沟水流雷诺数随细沟水流流量的变化,如式(5),表明细沟水流雷诺数随流量的变化呈显著的线性正相关关系。很显然,如果我们试验中细沟水流的流量不断再增大,则水流雷诺数也将不断增大。由前面的研究已知,在我们试验的这样小的细沟水流流量下,少部分雷诺数已经超过 500,水流流型已进入过渡流区,那么,如流量再继续不断增大,则水流流型将会呈现为过渡流、紊流。

$$Re = 168.87d + 10.93 \quad (R^2 = 0.9362) \quad (5)$$

式中: Re ——细沟水流雷诺数(无量纲); d ——细沟水流流量(L/min)。

事实上,我们的研究结果也与以往的研究结论取得了一致。徐天献^[12]在野外自然土壤条件下对宽度 5 cm 的细沟用 2 L/min 的流量进行放水试验,取得细沟水流雷诺数为 222.59~392.32,其中黄色石灰土 222.59,黄壤性土 264.03,酸性紫色土 254.11,中性紫色土 250.42,石灰性紫色土 392.32。但当流量

分别达到 4,6,8 和 10 L/min 时,细沟水流雷诺数分别达到 517.35~884.50,978.29~1 561.26,1 456.37~2 400.24。他的结论表明,细沟水流雷诺数随水流流量的增大而增大,在试验流量范围内,流量很小时,细沟水流呈层流流型,流量增大后则转变为过渡流,到最大流量时已接近紊流。肖培青等^[13]采用室内模拟降雨试验,在 20 cm 宽度细沟上流量为 1.56~2.01 L/min 时,取得细沟水流雷诺数为 389~450。但当流量为 6.11~6.58 L/min 时,细沟水流雷诺数则在 889~1 149。其结论表明细沟水流雷诺数随水流流量的增大而增大,在试验的细沟流量该范围内,随着细沟水流流量由小到大变化,细沟水流流型也由层流转变为过渡流。

3 结论

(1) 细沟水流雷诺数随径流历时的变化,在不同雨强及不同坡度下皆表现为先增大随后转为较平稳的变化过程,皆可用幂函数方程描述。

(2) 细沟水流平均雷诺数分别随雨强、坡度的增大而增大,皆可用对数方程很好地描述。细沟水流平均雷诺数随雨强及坡度的变化可用二元幂函数方程描述,降雨强度对细沟水流平均雷诺数的影响大于坡度的影响。

(3) 不同雨强下的细沟径流过程中,细沟水流流型一直处于层流状态,只是产流开始 9 min 以后在两个最大雨强下变为过渡流。不同坡度下的细沟径流过程中,细沟水流流型也一直处于层流状态,只是产流开始 15 min 以后在两个最大坡度下变为过渡流。同坡度不同雨强及同雨强不同坡度下,一次降雨径流过程的细沟水流平均雷诺数变化在 327~457,表明在此条件下,平均而言,细沟水流流型处于层流;细沟水流雷诺数随流量的变化呈显著的线性正相关关系,本文研究取得细沟水流流型主要呈层流,与我们的试验流量小有关。

截止目前,有关坡面流的水力学问题还没有一个理论体系,因此,研究细沟水流水力学特征时一般都是借鉴河流水力学理论与方法,采用有关公式计算水流的水力学特征。本试验研究中,细沟水流雷诺数是用明渠水力学公式计算得到,未考虑含沙量对水流运动粘滞性的影响,因此对细沟水流流型的判别仍存在一些局限性,今后还需要继续加强这方面的试验研究。本文只研究了限定宽度及小流量细沟水流的流型特征,今后需进一步开展在平整坡面上降雨产流后细沟自然地产生、发育演变过程中及具有更大流量下的细沟水流流型特征研究。

(下转第 38 页)

- [3] Deniz M. Environmental impacts of coal mining and coal utilization in the UK [J]. *Acta Montanistica Slovaca*, 2010, 2(15):134-144.
- [4] 李锐, 唐克丽. 神府—东胜矿区一、二期工程环境效应考察[J]. *水土保持研究*, 1994, 1(4):5-17.
- [5] Gilley J E, Gee G W, Bauer A. Runoff and erosion characteristics of surface-mined sites in Western North Dakota[J]. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 1977, 20(7):697-700.
- [6] 张胜利, 任京柱. 开矿对小流域水沙的影响研究[J]. *水土保持学报*, 1992, 6(2):76-79.
- [7] 王治国, 白中科, 赵景奎, 等. 黄土区大型露天矿排土场岩土侵蚀及其控制技术的研究[J]. *水土保持学报*, 1994, 8(2):10-17.
- [8] 白中科, 胡振华, 王治国. 露天矿排土场人为加速侵蚀及分类研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(1):34-40.
- [9] 王文龙, 王兆印, 李占斌, 等. 神府东胜煤田开发中扰动地面径流泥沙模拟研究[J]. *泥沙研究*, 2006, 4(2):60-64.
- [10] 罗婷, 王文龙, 王贞, 等. 神府东胜煤田开发建设中扰动地面产流产沙试验研究[J]. *西北林学院学报*, 2011, 26(4):59-63.
- [11] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(1):44-47.
- [12] 张玉斌, 郑粉莉. 近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(2):5-10.
- [13] 焦菊英, 王万忠, 郝小品. 黄土高原不同类型暴雨的降水侵蚀特征[J]. *干旱区资源与环境*, 1999, 13(1):34-42.
- [14] 张汉雄. 黄土高原的暴雨特性及其分布规律[J]. *地理学报*, 1983, 38(4):416-425.
- [15] 李森, 宋孝玉, 沈冰, 等. 黄土沟壑区不同植被对产流产沙的影响[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2006, 34(1):117-120.
- [16] Jordán A, Martínez-Zavala L. Soil loss and runoff rates on unpaved forest roads in Southern Spain after simulated rainfall [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(3/4):913-919.
- [17] Bagnold R. An approach to the sediment transport problem from general physics[R]. *Geological Survey Professional Paper (United States)*, 1966:422-437.

(上接第 32 页)

[参 考 文 献]

- [1] 郑粉莉, 江忠善, 高学田. 水蚀过程与预报模型[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 朱显谟. 黄土高原水流侵蚀的主要类型及有关因素[J]. *水土保持通报*, 1982, 2(3):40-44.
- [3] Ellison W D. Soil erosion studies [J]. *Agricultural Engineering*, 1947, 28(4):145-146.
- [4] Govers G, Rauws G. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds[J]. *Earth Surf., Processes Landforms*, 1986, 11:515-524.
- [5] Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55(2):339-344.
- [6] 李占斌, 鲁克新, 丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(2):5-7.
- [7] 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.
- [8] 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特性的研究[J]. *泥沙研究*, 1999(1):56-61.
- [9] 肖培青, 郑粉莉. 上方来水来沙对细沟侵蚀产沙过程的影响[J]. *水土保持通报*, 2001, 21(1):23-25.
- [10] 肖培青, 郑粉莉. 上方来水来沙对细沟水流水力学参数的影响[J]. *泥沙研究*, 2002(4):69-74.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 肖培青, 郑粉莉, 张成娥. 细沟侵蚀过程与细沟水流水力学参数的关系研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(1):54-57, 125.