

黄河中游多沙粗沙区坡面薄层水流水动力学特性

高素娟¹, 王占礼^{1,2}, 黄明斌^{1,2}, 张宽地³, 刘俊娥¹, 袁殷¹, 陈浩¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 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, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过人工模拟降雨试验对黄河中游多沙粗沙区沙黄土坡面薄层水流水动力学特性进行了试验研究,取得了以下结果:(1) 不同坡度不同降雨强度条件下,坡面薄层水流流速随降雨历时的增加而增大,可用对数方程很好地描述,薄层水流流速与雨强和坡度呈正相关关系;(2) 不同坡度不同降雨强度条件下,坡面薄层水流的平均水深随降雨强度的增加整体呈平稳增长趋势,其变化过程均可用幂函数方程描述,而平均水深与坡度呈负相关关系;(3) 不同坡度不同降雨强度条件下,坡面雷诺数随降雨历时的持续整体呈递增趋势,雨强对雷诺数的影响较坡度更为显著,薄层水流不属于传统意义上的层流,而是处于层流失稳状态;佛汝得数随降雨历时的变化范围基本上都大于1,且随着降雨历时的延长而稳步递增,坡度对佛汝得数的影响比雨强更为显著,试验中薄层水流基本处于急流状态;(4) 不同坡度不同降雨强度条件下,坡面流阻力系数随降雨历时的持续皆呈递减趋势。

关键词: 多沙粗沙区; 薄层水流; 水动力学特性; 降雨强度; 坡度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)04-0011-06

中图分类号: S157.1

Hydraulic Properties of Shallow Flow in Coarse Sediment Region of Yellow River Middle Reaches

GAO Sujuan¹, WANG Zhanli^{1,2}, HUANG Mingbin^{1,2}, ZHANG Kuanddi³, LIU Jun'e¹, YUAN Yin¹, CHEN Hao¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on simulated rainfall experiment, hydraulic properties of shallow flow in the coarse sediment region in the middle reaches of the Yellow River were studied. The following results were obtained: (1) Shallow flow velocity increased with rainfall process under different rainfall intensities and slope gradients and it can be described with logarithmic equation. Shallow flow velocity was positively related to rainfall intensity and slope gradient. (2) The averaged shallow flow depth increased steadily with rainfall intensity under different slope gradients and it can be described with power equation. The averaged shallow flow depth was negatively related to slope gradient. (3) Under different rainfall intensities and slope gradients, Reynolds number of shallow flow increased with rainfall process. The influence of rainfall intensity on Reynolds number was more significant than slope gradient. Shallow flow was not the traditional laminar flow but in the state of instability. Froude number increased steadily with rainfall process, with the number being above 1. The influence of slope gradient on Froude number is more important than rainfall intensity. Shallow flow in the experiment was in the state of supercritical flow. (4) The resistance coefficient of shallow flow decreased with rainfall process under different rainfall intensities and slope gradients.

Keywords: coarse sediment region; shallow flow; hydraulic property; rainfall intensity; slope gradient

收稿日期: 2009-11-03

修回日期: 2010-02-18

资助项目: 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); 国家973计划课题“不同类型区土壤侵蚀过程与机理”(2007CB407201); 中科院知识创新工程重要方向项目课题“多沙粗沙区土壤水蚀机理研究”(KZCX2-YW-442-04); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室自主研究课题“黄土高原近万年来土壤侵蚀发生演变与趋势预测”(10502 Z5 3)

作者简介: 高素娟(1983—),女(汉族),山东人临沂市人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。E-mail: gaosujuan100@163.com。

通信作者: 王占礼(1960—),男(汉族),陕西省佳县人,博士,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀过程及预报研究。E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn。

土壤侵蚀是当今世界普遍关注的重大环境问题, 尤其在我国西北地区, 土壤侵蚀已成为制约当地经济发展的瓶颈。地处我国黄河中游的黄土高原, 土质疏松, 植被稀少, 生态环境脆弱, 土壤侵蚀和风沙危害尤为严重, 是黄河泥沙的主要来源区, 也是我国水土流失最严重的地区之一^[1-3]。该地区平均土壤侵蚀模数达 $3\ 700\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ^[4-5], 土壤侵蚀面积达 $4.54 \times 10^5\ \text{km}^2$, 占总面积 ($6.43 \times 10^5\ \text{km}^2$) 的 70.64%^[6], 其中多沙粗沙区的产沙量又占整个中游产沙量的 60% 以上, 因此多沙粗沙区同时又是黄河流域水土保持、生态建设的重点地区。

众所周知, 水少沙多是造成黄河下游河道不断淤积升高、形成地上“悬河”, 是威胁黄河下游防洪安全的重要原因, 黄河下游淤积的泥沙中直径大于 0.05 mm 的粗泥沙主要来自于多沙粗沙区。早在 20 世纪 60 年代, 我国著名泥沙专家钱宁教授等研究得出, 黄河下游的淤积泥沙主要是粒径大于 0.05 mm 的粗泥沙, 如果在中游找到并集中治理粗泥沙产区, 下游河道的淤积才会得到减缓。为此, 黄河水利委员会从 1996 年开始, 组织开展了为期 5 a 的“黄河中游多沙粗沙区区域界定及产沙输沙规律研究”, 找到了位于黄河河口镇至龙门区间以及泾河、洛河、渭河中上游地区 $7.86 \times 10^4\ \text{km}^2$ 的黄河中游多沙粗沙区, 为确定控制黄河泥沙的重点区域提供了有力的技术支持^[7]。因此, 从减少入黄泥沙、减轻黄河下游防洪压力、改善当地生态条件等方面考虑, 多沙粗沙区的治理已成为黄河流域水土保持、生态建设的重点地区。研究该区的坡面水流水力学特性及侵蚀机理, 对于寻求有效治理措施、实现可持续发展具有重要的理论和现实意义。

1 研究区概况

黄河多沙粗沙区^[7]位于黄河河龙区间及泾河、洛河上游, 地理位置介于东经 $106^\circ 42' 38''$ — $111^\circ 59' 28''$, 北纬 $35^\circ 56' 44''$ — $40^\circ 20' 18''$, 面积 $7.86 \times 10^4\ \text{km}^2$ 。行政区涉及陕西、山西、甘肃、内蒙古、宁夏共 5 省区, 9 个地(盟、市)的 45 个县(旗、区)。区内流域面积在 $1\ 000\ \text{km}^2$ 以上的支流有 21 条。该区自然条件恶劣, 生态环境脆弱, 水土流失十分严重^[8]。气候类型为大陆性季风气候, 属半干旱气候区, 气温的季节变化非常明显; 区内年均降雨量小, 具有空间分布不均匀、年际变化大和年内集中的特点; 平均风力大, 经常发生沙尘暴、干旱等自然灾害; 植被稀少, 以灌丛草原为主, 林草覆盖率较低; 沟深坡陡、地形破碎, 地表组成物质以沙黄土为主, 极易发生土壤侵蚀, 水土流失

面广、强度大; 人口密度较高, 生存压力大, 许多地方人与自然矛盾尖锐。

2 材料与方法

采用室内人工模拟降雨试验对多沙粗沙区的沙黄土坡面土壤侵蚀动态变化过程进行了研究。试验在中科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降雨大厅内进行, 试验土样取自黄土高原腹地的陕西省神木县, 土壤类型为沙黄土, 其颗粒组成见表 1。试验坡面模型由长 1 m, 宽 0.5 m 的可升降钢槽装土而成, 坡度可调节。微型小区可以使坡面集中流侵蚀不会发生, 侵蚀形态限定在仅具溅蚀及薄层水流侵蚀共存的状态。试验所用降雨设备为侧喷式人工降雨设备, 模拟降雨强度变化范围为 30~200 mm/h, 降雨高度为 12 m, 可以使所有雨滴基本达到终点速度。

表 1 试验所用沙黄土的颗粒组成

| > 0.25 mm | 0.25~ 0.05 mm | 0.05~ 0.01 mm | 0.01~ 0.005 mm | 0.005~ 0.001 mm | < 0.001 mm |
|--------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|---------------|
| 0.3% | 64.9% | 22.0% | 1.8% | 3.2% | 5.8% |

试验前, 将所有试验土样自然风干并过 5 mm 筛, 去除杂草和石块。在装填土前, 先在土槽底部填 10 cm 厚天然细沙, 并铺上透水纱布, 以保持试验土层的透水状况接近天然坡面; 然后在沙层上分层填 20 cm 的试验用土, 容重控制在 $1.5\ \text{g}/\text{cm}^3$, 每次填装厚度为 5 cm。试验土槽分层填土时, 采用边填充边压实, 以减小边壁所造成的对入渗、产流、产沙过程及坡面侵蚀微形态发育等诸多方面的影响并使下垫面土壤条件的变异性达到最小, 且保证试验设计的土壤容重。装填结束后, 用事先制作好的具有微弧度度的刮板将表面刮成平整的微凹面, 并用环刀法测定坡面土壤容重, 以检验是否达到试验装填要求。试验前一天, 对试验土槽进行 30 mm/h 降雨强度的前期降雨, 降雨历时为坡面出现产流时为止。试验设计包括 5 个降雨强度: 1.00, 1.33, 1.67, 2.00, 2.33 mm/min; 以及 5 个坡度: 9° , 12° , 15° , 18° , 21° ; 采用雨强和坡度的完全组合实验, 共 25 场不同组合的降雨, 降雨历时为坡面出现明显细沟时即停止降雨, 然后对所有场次的降雨重复一次, 分析时取两次试验结果的平均值, 共进行了 50 场降雨。

在降雨过程中, 记录产流时间, 观测坡面土壤侵蚀过程, 开始产流后, 每 1 min 用小桶接 30 s 的径流泥沙样, 并同时用高锰酸钾染色剂示踪法在坡面中部测定坡面流流速, 所得结果再乘以 0.7 以转化为坡面

近似平均流速。根据流速与流量的相关关系, 计算薄层水流的水层厚度及水力半径。每次降雨结束后, 对降雨过程中所取径流样, 先澄清、除去清水, 烘干并称重, 记录侵蚀产沙量。

3 结果与分析

3.1 坡面薄层水流流速随径流过程的变化

流速是最基本的水力学参数, 也是坡面薄层水流最重要的水力学要素之一。薄层水流流速的变化直接关系着坡面床面形态的变化和泥沙输移动态变化过程。因此研究水流流速变化过程不仅能够揭示侵蚀机理, 而且对土壤侵蚀预报模型的建立奠定了基础。夏卫生等^[9]通过在室内不同坡度和降雨强度下用电解质脉冲法对坡面水流速度进行测量, 结果表明坡长对流速的影响不显著, 而降雨强度和坡度对流速的影响相当显著。本试验采用染色剂示踪法测定了不同时刻坡面流表面优势流速, 再乘以修正系数得到断面平均流速。以坡度 15° 为例, 将不同雨强条件下流速随降雨过程的动态变化见图 1; 以及雨强 1.67 mm/min , 不同坡度条件下流速随降雨过程的动态变化详见图 2。

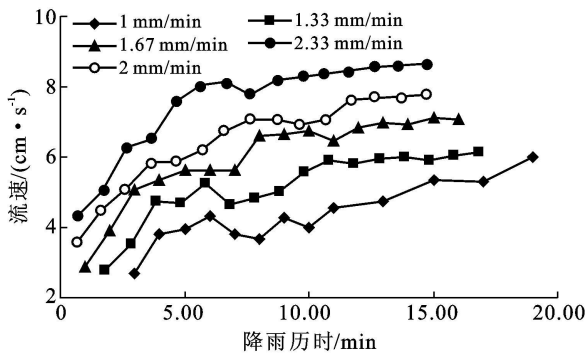


图 1 不同雨强条件下流速随降雨过程的动态变化

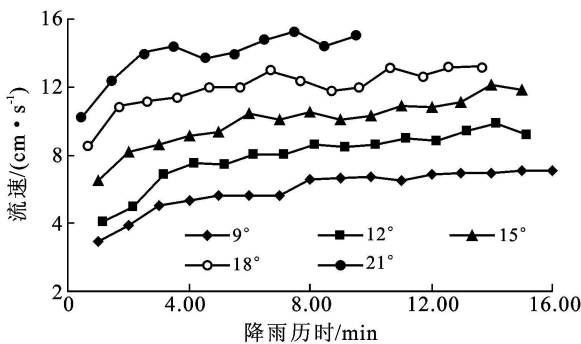


图 2 不同坡度条件下流速随降雨过程的动态变化

如图 1—2 所示, 不同坡度不同降雨强度条件下, 坡面薄层水流流速变化过程差异较小, 在径流过程初期, 薄层水流流速递增较快, 开始产流 5 min 以后递

增速率有所减缓, 最后基本趋于波动稳定, 但各雨强各坡度条件下的薄层水流流速变化差异较大, 基本规律为坡度相同的条件下, 降雨强度越大, 流速越大; 雨强相同的条件下, 坡度越大, 流速越大。从相关分析可以得出, 不同坡度不同降雨强度条件下, 坡面薄层水流流速随降雨过程的动态变化均可用对数方程描述, 且相关性显著。

薄层水流在运动型态上呈现滚波流, 降雨试验的产流初期, 坡面入渗逐步减小, 产流逐步增大, 因此水流流速在坡面上随降雨过程逐渐递增。随着试验的进行, 坡面入参与产流趋于稳定变化, 所以各降雨强度条件下水流流速也就趋于稳定且基本一致的变化。降雨强度增大, 使得雨滴动能增加, 侵蚀力增强, 地表径流量增大, 必然导致坡面流速增加; 而随着坡度的增大, 缩短了降雨产生的径流在坡面上停留的时间, 水流损失和入渗量减小, 所以坡面径流流速必然增大。

3.2 坡面薄层流平均水深变化

与流速一样, 水流深度也是坡面流最基本的水动力学特性之一。坡面水深的大小变化影响着坡面侵蚀过程以及水流动力学作用的强弱。阐明坡面水深变化特征对认识坡面侵蚀动力学过程、揭示坡面侵蚀机理具有重要作用。目前对水深及其雨强和坡度间关系的研究仍显薄弱, 而且都是在实验室条件下进行的。张科利^[10]通过径流冲刷试验, 对黄土坡面形成细沟的水力学特征进行了研究, 结果表明平均径流深与流量之间呈幂函数关系; 张光辉^[11]的研究结果也显示薄层水流水深主要受流量控制, 坡度的影响并不显著, 其关系可用流量与坡度的幂函数形式模拟。

本降雨试验条件下的水深是在试验坡面小区上, 通过同时测定坡面水流流量与流速后计算获得。试验条件下得出的水深是不同时刻沿程水流的平均深度, 并取算术平均值得到一场降雨过程的平均水深。将不同坡度条件下, 平均水深随降雨强度的变化见图 3。

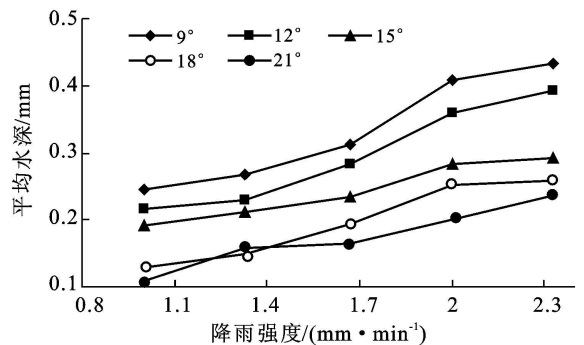


图 3 平均水深随不同雨强和坡度的变化

从图 3 可以看出, 各坡度条件下, 坡面薄层流的平均水深随降雨强度的变化规律表现为随降雨强度的增加整体呈平稳增长趋势, 变化较为平缓且波动性不大, 其变化过程均可用幂函数方程描述, 且相关性显著。而平均水深与坡度呈负相关关系, 即坡度越大, 平均水深反而越小。

同坡度不同降雨强度的条件下, 坡面产流平均流量和流速均增大, 但由于受到地表糙率的影响, 使得平均流速随雨强的增大幅度不及平均流量的增大幅度, 因此, 随着降雨强度的增加, 坡面流的平均水深也就必然增大; 相同雨强不同坡度条件下, 随着坡度的增加, 坡面产流在顺坡方向重力的分力增大, 流速加快, 降雨产生的径流在坡面上滞留汇水的时间相对减少, 故坡面平均水深就必然减小。

3.3 坡面薄层水流流态

水流流态是水体运动过程中的运动状态, 是表征坡面水流动力学特性的重要参数。明渠水力学中, 判断径流流态的判数主要采用雷诺数 Re 和弗汝德数 Fr 。坡面薄层水流流态对侵蚀过程具有重要影响, 一般来说, 坡面水流处于紊急流区, 则紊动作用强, 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; 而处于层缓流区则相反。因此, 通过坡面薄层水流雷诺数和弗汝德数的分析研究, 判断出坡面水流流态, 对于帮助理解和阐明坡面薄层水流侵蚀动力学过程与机理具有重要作用。

这方面已有大量学者进行了研究, 张光辉^[11]等在定床条件下研究了不同流量、不同坡度下的水流流态, 结果表明水流流态与水深密切相关, 坡度对水流流态的影响并不显著。因而得出, 坡面流流态主要受下垫面状况和流量或水深控制; 丁文峰^[12]等通过放水冲刷试验研究, 结果表明在试验的坡度和流量范围内, 坡面流的雷诺数随冲刷历时和流量的增大而表现为增大的趋势。

在明渠水流中, 判断水流流态的指标为雷诺数判数, 雷诺数是表征惯性力与黏滞力的比值。将坡度 15° , 不同雨强条件下雷诺数随降雨过程变化的试验数据绘成图 4, 以及雨强 1.67 mm/min 、不同坡度条件下雷诺数随降雨过程变化的试验数据绘成图 5, 以分析薄层流雷诺数的变化。

从图 4—5 可以看出, 不同雨强不同坡度条件下, 雷诺数在 $10 \sim 40$ 之间变化, 按明渠水流理论, 认为当雷诺数小于 500 时, 即为层流状态, 但在层流区, 水流质点不能混掺, 也无法产生涡体, 不能产生上举力, 但坡面水流侵蚀、输沙是不可否认的事实, 这就说明采用传统雷诺数的界定方法, 判定坡面水流的流态是值

得商榷的。其实, 从试验中可以发现, 薄层水流在水深小到一定程度后, 保持层流是不可能的, 水面往往会产生失稳, 进而形成滚波流, 滚波的产生和雨滴的击溅作用是薄层水流能产生侵蚀和输移泥沙的根本原因, 这也是水流混掺, 悬浮泥沙的重要原因。因此, 可以认为坡面薄层水流不属于传统意义上的层流, 而是处于层流失稳区。

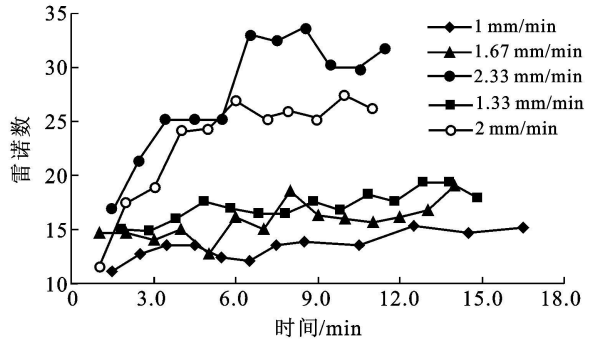


图 4 不同雨强条件下雷诺数随降雨过程的动态变化

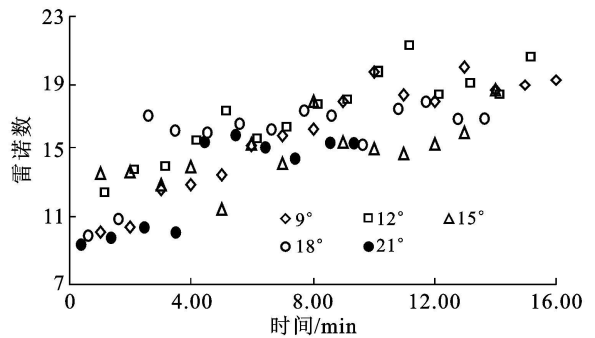


图 5 不同坡度条件下雷诺数随降雨过程的动态变化

从图 4—5 还可以得出, 不同雨强不同坡度条件下, 随着降雨历时的持续, 雷诺数整体呈递增趋势。同坡度不同雨强条件下, 尤其是两个大雨强条件下, 雷诺数随降雨历时的变化幅度明显, 波动性较大, 且各雨强之间的雷诺数相差较大, 随雨强递增, 雷诺数有明显增大的趋势; 而同雨强不同坡度条件下, 各坡度条件下的雷诺数相差不大, 雷诺数变化幅度较小, 这也就说明, 雨强对雷诺数的影响较大, 而坡度对雷诺数的影响并不显著。

Fr 表示的是过水断面上水流的动能和势能的对比关系, 若 Fr 大于 1, 表明径流的惯性力作用超过重力, 径流不断加速, 为急流; 反之为缓流; 如果 $Fr=1$, 水流为临界流。将坡度 15° , 不同雨强条件下佛汝得数随降雨过程变化的试验数据绘成图 6, 以及雨强 1.67 mm/min 、不同坡度条件下佛汝得数随降雨过程变化的试验数据绘成图 7, 分析薄层流佛汝得数的变化规律。

从图 6—7 中我们可以看到, 本试验中不同雨强不同坡度条件下, 佛汝得数随降雨历时的变化范围基本上都大于 1, 且随着降雨历时的延长而稳步递增, 仅在最小坡度 9° 的前 5 min 出现小于 1 的情况, 按明渠水流理论可以认为, 试验中薄层水流基本处于急流状态, 这也是坡面薄层水流侵蚀及输沙的又一重要原因。

从图 6 可以发现, 相同坡度不同雨强条件下, 佛汝得数随降雨历时的变化幅度较小, 波动性不大, 且各雨强条件下的数值相差不大, 这也说明雨强对佛汝德数的影响并不显著; 从图 7 也可以看到, 相同雨强不同坡度条件下, 佛汝得数随降雨历时的递增也呈现明显增大趋势, 但各坡度条件下的数值相差较大, 坡度越大, 佛汝得数越大, 这就表明, 坡度对佛汝得数的影响较为显著。通过分析, 不同雨强不同坡度条件下, 佛汝得数随降雨历时的动态变化基本上可用对数方程描述, 且相关性显著。

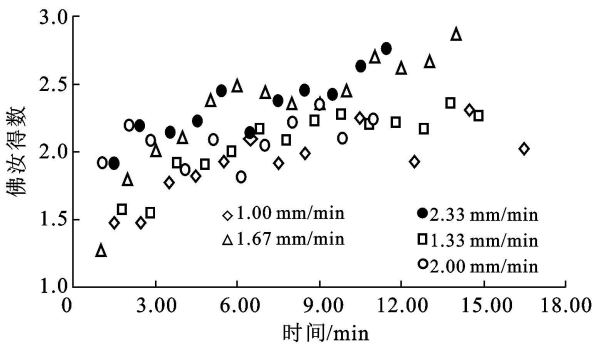


图 6 不同雨强条件下佛汝得数随降雨过程的动态变化

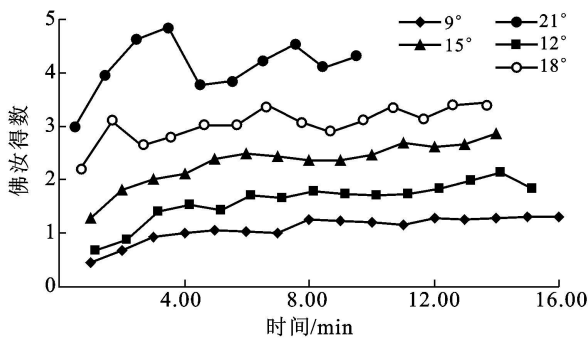


图 7 不同坡度条件下佛汝得数随降雨过程的动态变化

3.4 坡面流阻力规律

水流阻力是水流在沿床面流动过程中所受到的来自水土界面的摩擦阻滞作用和水流内部质点的紊动等所产生的阻碍水流运动的力的总称。坡面流阻力规律是反映坡面流特性的一个关键参数^[13]。

Darcy—Weisbach 阻力系数是普遍采用的反应水流阻力特征的水利参数, 它反映了下垫面对流动水

体的阻力大小, 在流量、坡度等水动力条件相同的情况下, 阻力系数越大, 水流克服阻力所消耗的能量越多, 则水流用于侵蚀和泥沙输移的能量越小, 土壤侵蚀就越微弱, 反之则土壤侵蚀越剧烈^[14]。因此, 阐明水流阻力系数变化特征对于认识坡面侵蚀动力过程具有重要意义。

将坡度 15°, 不同雨强条件下坡面流阻力系数随降雨过程变化的试验数据绘成图 8, 以及雨强 1.67 mm/min, 不同坡度条件下阻力系数随降雨过程变化的试验数据绘成图 9, 分析坡面流阻力规律。

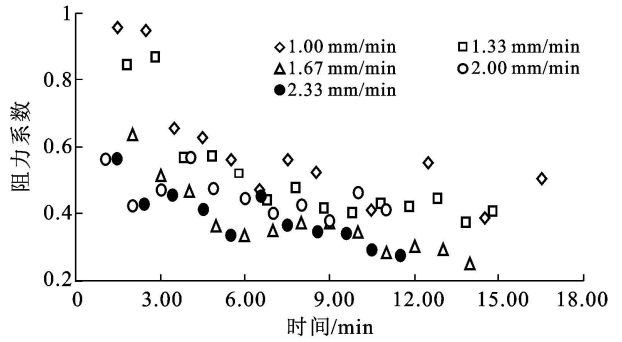


图 8 不同雨强条件下阻力系数随降雨过程的动态变化

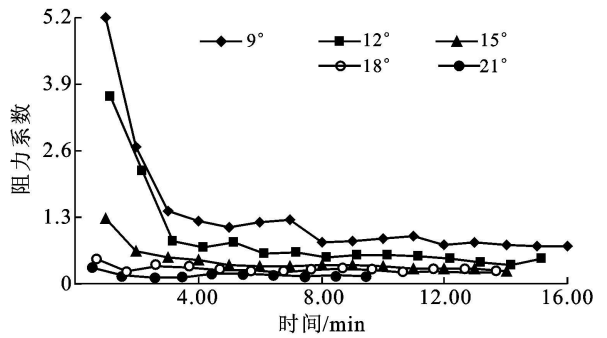


图 9 不同坡度条件下阻力系数随降雨过程的动态变化

从图 9 中可以看出, 不同坡度条件下坡面水流阻力系数随降雨历时的变化过程具有很大的相似性, 阻力系数随降雨过程呈现先递减后逐渐趋于平稳的趋势, 在产流的 1~4 min 内, 阻力系数显著递减, 产流 4 min 后, 各坡度条件下的阻力系数变化逐步趋于稳定且基本一致的变化, 且坡度越小, 阻力系数越大。通过分析可知, 其变化曲线可用幂函数方程很好的描述。从图 8 可以得到, 各雨强条件下阻力系数随降雨历时的延长而显著递减, 但是波动性较大, 小雨强条件下的阻力系数值略大于大雨强的阻力系数, 阻力系数随雨强的变化趋势并不显著。

在降雨产流过程的初期, 坡面水层厚度较小, 雨滴溅蚀产生的水流紊动性较大, 土粒之间的黏结力和摩擦力也比较大, 水流的阻力系数就比较大, 随着降

雨过程的进行,产流量增大,水流流速增大,径流产生的沿坡面的剪切力使土粒之间的黏结力破坏,水层厚度的增加削弱了雨滴溅蚀产生的水流紊动性,因而水流阻力系数相对减小,但侵蚀发展到一定程度,径流冲刷逐渐趋于稳定,流量和水深基本保持不变,所以水流阻力系数的变化也将趋于平缓。

4 结论

(1) 不同坡度不同降雨强度条件下,坡面薄层水流流速变化过程表现为随径流历时的增加而增大,在径流过程初期,薄层水流流速递增较快,开始产流 5 min 后递增速率有所减缓并基本趋于稳定;薄层水流流速随雨强、坡度变化的基本规律为:坡度相同的条件下,降雨强度越大,流速越大;雨强相同的条件下,坡度越大,流速越大;坡面流流速随降雨过程的变化可用对数函数描述。

(2) 不同坡度不同降雨强度条件下,坡面薄层流的平均水深随降雨强度的变化表现为随降雨强度的增加整体呈平稳增长趋势,其变化过程均可用幂函数方程描述,且相关性显著。而平均水深与坡度呈负相关关系,即坡度越大,平均水深越小。

(3) 不同坡度不同降雨强度条件下,随着降雨历时的持续,坡面流雷诺数整体呈递增趋势,雨强对雷诺数的影响较大,而坡度对雷诺数的影响并不显著。雷诺数的变化幅度在 10~40 之间,本研究认为坡面薄层水流不属于传统意义上的层流,而是处于层流失稳状态;不同雨强不同坡度条件下,佛汝得数随降雨历时的变化范围基本上均大于 1,且随着降雨历时的延长而稳步递增,坡度对佛汝得数的影响较雨强更为显著,试验中薄层水流基本处于急流状态。

(4) 相同雨强不同坡度条件下,坡面水流阻力系数随降雨过程的持续表现为先递减后逐渐趋于平稳的趋势,在产流的 1~4 min 之内,阻力系数显著递

减,产流 4 min 后,各坡度条件下的阻力系数变化逐步趋于稳定,且坡度越小,阻力系数越大;同坡度不同雨强条件下,阻力系数随降雨历时的延长而显著递减,波动性较大,小雨强条件下的阻力系数值略大于大雨强的,阻力系数随雨强的变化趋势并不显著。

[参 考 文 献]

- [1] 朱显谟. 黄土高原的形成与整治对策[J]. 水土保持通报, 1991, 11(1): 1-8.
- [2] 龚时旸. 黄河流域黄土高原土壤侵蚀的特点[J]. 中国水土保持, 1988(9): 8-10.
- [3] 黄秉维. 谈黄河中游水土保持问题[J]. 中国水土保持, 1988(1): 12-15.
- [4] 吴钦孝, 赵鸿雁. 黄土高原水土保持目标及对策[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 76-80.
- [5] 田卫堂, 胡维银, 李军, 等. 我国水土流失现状和防治对策分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 204-205.
- [6] 高照良, 张晓萍. 黄土高原地区淤地坝建设及其规划研究[M]. 北京: 中央文献出版社, 2007: 24-25.
- [7] 黄委会西峰水土保持科学试验站. 十一五国家科技支撑计划“黄河健康修复关键技术研究”[R]. 2008: 1-15.
- [8] 陈劲锋, 刘全友, 陆中臣, 等. 黄土高原多沙粗沙区侵蚀产沙的多维临界[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3278.
- [9] 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(11): 119-122.
- [10] 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特性研究[J]. 泥沙研究, 1999(1): 56-61.
- [11] 张光辉, 卫海燕, 刘宝元. 坡面流水动力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 58-61.
- [12] 丁文峰, 李占斌, 丁登山. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特性试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 72-75.
- [13] 王夙, 孙三祥, 胡清华. 国内坡面流研究现状[J]. 甘肃水利水电技术, 2004, 40(4): 332-336.
- [14] 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.