

DOI: 10.11766/trxb201710310307

急陡黄土坡面薄层水流水力学参数变化特征*

白玉洁¹ 张凤宝^{1, 2†} 杨明义^{1, 2} 李占斌^{2, 3} 张加琼^{1, 2}

(1 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室(西北农林科技大学水土保持研究所), 陕西杨凌 712100)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(3 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要 为探明降雨条件下黄土急陡坡坡面薄层水流水力学特性, 采用室内模拟降雨的方法, 研究了6个坡度(25°、30°、35°、40°、45°和50°)和3个雨强(1.0 mm min⁻¹、1.5 mm min⁻¹和2.0 mm min⁻¹)组合条件下坡面薄层水流水力学参数的变化规律。结果表明:(1)坡度相同时, 流速随雨强的增加而增大;雨强相同时, 坡度对薄层水流流速的影响存在临界效应(40°~45°), 小于临界坡度, 流速随坡度的增加而增大, 大于临界坡度, 流速随坡度增加而减小。(2)各坡度条件下, 坡面薄层水流的平均径流水深随降雨强度增加呈平稳增长趋势;相同雨强时, 径流深随坡度的增大而有减小趋势。(3)黄土急陡坡坡面雷诺数(Re)整体较小(远小于580), 试验条件下坡面薄层径流属于层流且水流处于层流中的失稳区;弗劳德数(Fr)大于0.8, 薄层水流属于急流。(4)阻力系数(*f*)随着降雨强度增加而增大, 随着坡度的增加而减小。(5)方差分析结果显示, 雨强、坡度及二者交互作用对急陡坡坡面薄层水流水力学参数均有显著影响(*p*<0.01), 但流速、弗劳德数和阻力系数的变化主要受坡度控制, 而径流深和雷诺数的变化主要受雨强控制。

关键词 模拟降雨; 急陡坡; 薄层水流; 水力学参数

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

土壤侵蚀过程是坡面水流和土壤两者相互作用的复杂物理过程, 坡面流水深极浅(一般只有几毫米甚至零点几毫米), 基本均匀覆盖坡面表面, 极易受到各种因素的影响, 运动规律及水力特性十分复杂^[1], 是造成土壤侵蚀的直接动力, 与坡面土壤侵蚀强度密切相关。因此深入理解坡面薄层水流水力学特征是研究土壤侵蚀规律的基础。

不同研究者根据自身的研究, 对坡面薄层水流给出不同定义, 诸如“扰动流”^[2]、“混合流区”^[3]、“伪层流”^[4-5]、“搅动层流”^[6]、“虚拟层流”^[7]等, 总之坡面薄层流与传统意义上的明渠流的层流和紊流存在一定的区别。目前,

国内外众多学者对坡面薄层水流进行了深入而细致的研究^[8-12], 取得了大量成果。但对坡面薄层水流流态归属、阻力规律等方面的研究成果存在着较多不同的意见, 吴普特和周佩华^[6]的研究表明坡面流为特殊、复杂的层流;张光辉^[13]通过冲刷试验对坡度为5°~25°的褐土坡面研究表明坡面薄层水流流态与水深有关, 存在决定层紊流临界水深, 水流阻力与坡度的关系受到坡面流单宽流量的影响;张宽地等^[14-15]的研究表明坡面薄层水流属于滚坡流区和过渡流区的范畴, 水流流型为临界流和急流, 坡面薄层水流阻力系数与降雨强度和地面坡度均呈负相关关系。很多学者就雨

* 国家自然科学基金项目(41571130082、41330858、41371283)和国家重点研发计划项目(2016YFC0402406)资助
Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41571130082, 41330858 and 41371283) and the National Key Research and Development Program of China (No.2016YFC0402406)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fbzhang@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 白玉洁(1990—), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: woshiby999@163.com

收稿日期: 2017-10-31; 收到修改稿日期: 2018-01-23; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-02-08

强和坡度对薄层水流流速和流深的影响进行了研究^[16-20]，赵小娥等^[16]的研究表明不同坡长处流速随坡度的变化存在明显差异，但随着雨强的增大，坡长对流速的影响逐渐减小；梁志权等^[17]认为相同雨强下流速随着坡度增大呈增大的趋势，而水深随坡度的变化规律因雨强的不同有所差异；郭忠录等^[19]的研究表明水深随着降雨强度的增加逐步增大。然而，目前坡面薄层水流的研究主要集中在坡度 $\leq 25^\circ$ 的坡面上，针对 $> 25^\circ$ 坡面薄层流体力学特征的研究较少。根据国际地理学会地貌调查与制图委员会对坡度的分级，坡度 $> 25^\circ$ 时属于急陡坡范畴^[21]。黄土高原地区地形复杂，坡陡沟深，加之近年来开发建设项目、治沟造地及梯田建设等形成了大量 $> 25^\circ$ 的急陡边坡，成为土壤侵蚀的潜在新源地，可能造成严重的土壤侵蚀。因此，亟需加强急陡坡面薄层水流水力学特性研究，为研究急陡坡面土壤侵蚀奠定基础。基于此，本文利用室内模拟降雨的动床试验，结合流体力学的相关理论，对黄土急陡坡面水力学特性进行深入研究，以期对比分析缓坡面与急陡坡面薄层水流水力学特征方面的差异，为深入揭示坡面薄层水流水力学特征及其与坡面土壤侵蚀的关系奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验方法

本研究采用室内人工模拟降雨试验的方法，试验于2016年7—10月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行。试验采用侧喷式人工模拟降雨系统，降雨器高度为16 m，可保证所有雨滴在降落时达到终点速度，降雨均匀度大于80%^[22]。试验土样取自黄土高原腹地的陕西安塞县一典型黄土斜坡，土壤类型为黄绵土，黄绵土质地均一，为粉砂质土壤，其黏粒14.5%，粉粒68%，砂粒17.5%。黄绵土是陕北黄土高原地区的一个主要土类，分布甚广，约占全区总土地面积的67.8%，占耕地面积80%左右，在农业生产上占有重要地位^[23]，因此选黄绵土为试验土壤具有一定的代表性。将试验土壤中的根系和石块等杂质除去，并过5 mm筛，通过阴干或洒水的方式控制土壤前期含水量为10%。

本试验所用钢制土槽长为3.3 m，宽为1 m，深为0.30 m，可调坡度为 $25^\circ \sim 50^\circ$ ，底部每隔10 cm间距打孔，孔径2 mm，以保证水分及时渗出。试验设计坡度为 25° 、 30° 、 35° 、 40° 、 45° 和 50° ，为了消除因坡度变化导致有效承雨面积变化对试验结果的影响，保持投影面积 2 m^2 （长2 m×宽1 m）不变，土槽后挡板设计为可移动式的，随坡度增加向后移动，坡长随坡度增加分别为2.21、2.31、2.44、2.61、2.83和3.11 m。在土槽装土前，土槽底部铺5 cm河道粗砂，以保证良好的透水性，粗砂上铺一层纱布，纱布上铺20 cm试验所用黄土，容重控制在 1.3 g cm^{-3} 左右，为准确控制容重，土壤按5 cm厚度分层填充，每两层之间进行打毛处理以便层与层之间的连续接触，表层保持光滑，将土槽四周压实以防止边坡效应发生。为了保证每场试验的初始条件基本一致，降低坡面含水率变异性对试验结果的影响，试验开始前一天，进行前期预降雨，雨强为 0.5 mm min^{-1} ，时间以坡面即将开始产流为准，使土壤处于饱和状态，然后放置12 h以上，使得坡面水分充分扩散，以达到前期含水量的一致。为保证降雨强度的均匀性和稳定性，试验前进行雨强率定，先用遮雨布盖住土槽，在土槽四周均匀布设4个雨量筒，测定3 min的降雨量，保证4个雨量筒的标准误差不大于10%，率定结果与设计雨强误差不超过5%，雨强达到要求后，快速揭开遮雨布并用精度为0.01s的秒表计时。水流呈层流状态流至出水口时视为产流开始，用精度为0.01 s的秒表记录产流时间，试验采取接全样的方式，产流后前3 min每1 min接一次径流泥沙样，之后每2 min接一次样，在接样时段内用高锰酸钾染色剂法测定坡面中部的流速，测距为1 m，代表全坡面平均流速。降雨结束后用精度为0.01 g的电子天平称全样重量，静置12 h以上，用虹吸法除去上层清水，然后用精度为0.01 g的电子天平称剩余水及泥沙的重量，再将泥沙搅拌均匀并取少量代表样称重烘干，测定其含水量，推算降雨过程的径流量和产沙量。试验设计雨强为 1.0 mm min^{-1} 、 1.5 mm min^{-1} 和 2.0 mm min^{-1} ，对所有试验重复一次，将两次试验数据用SPSS软件进行差异性分析，当两次试验数据不存在显著性差异时，对两次试验数据求均值作为本研究的最终结果（方差分析时除外）。

1.2 研究方法

目前针对薄层水流水力学参数计算大多学者采用明渠流水力学参数的计算方法^[24-25], 本研究中雷诺数和弗劳德数也采用明渠流的计算方法, 径流水深采取康洪亮等^[24]研究中使用的方法, 阻力系数采用Darcy-Weisbach阻力系数。

(1) 径流水深 (h): 测量时段内整个坡面的平均径流水深:

$$h = \frac{q}{V \cdot b \cdot t}$$

式中, h 为薄层径流水深, m; q 为测量时段 t (s)内径流量, m^3 ; V 为坡面水流速率, 为观测时段内水流表层速率乘以流速修正系数 k (层流, $k=0.67$; 过渡流, $k=0.70$; 紊流, $k=0.80$) 所得的值^[26], m s^{-1} ; b 为过水断面宽度, m。

(2) 雷诺数 (Re): 判断层流紊流的定量标准, 是无量纲参数, 反映了径流惯性力和黏滞力的比值:

$$Re = \frac{V \cdot R}{\nu}$$

式中, V 同上式; R 为水力半径, m; 薄层水流视为二元流, 水力半径近似等于断面平均水深 h ; ν 为含沙水流运动黏性系数, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, 采用沙玉清^[27]公式计算:

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\left(1 - \frac{s}{2 \sqrt{d_{50}}}\right)}$$

式中, 泥沙中值粒径 d_{50} 取0.095 mm; ν_0 为清水黏滞系数, 与水流温度有关; s 为体积含沙量, kg m^{-3} 。

(3) 弗劳德数 (Fr): 判别缓流急流的定量标准, 是无量纲参数, 反映了水流惯性力和重力之比:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$$

式中, g 为重力加速度, 取值为 9.8 m s^{-2} 。

(4) Darcy-Weisbach阻力系数 (f): 径流沿坡面向下运动过程中受到的来自水土界面的阻滞水流运动的力的总称:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2}$$

式中, J 为水力坡度, 用坡度的正切值近似代替, 即 $J=\tan\theta$, θ 为坡度。

2 结果与讨论

2.1 流速随径流过程的变化特征

本试验中所测的流速为坡面薄层水流表层流速, 断面平均流速是在坡面表层流速的基础上乘以修正系数得到的。将不同雨强下流速随径流过程的变化点绘成图1。

如图所示, 每场试验产流开始的前6 min流速增加较快, 6 min之后递增速率减缓, 流速处于准稳定状态。原因是降雨试验产流初期, 坡面入渗逐步减小, 产流逐步增大, 因此产流初期水流流速随降雨过程逐渐递增, 随着降雨的进行, 坡面入渗逐步减小最后趋于稳定, 所以各降雨条件下流速变化也趋于稳定, 因此流速先增加较快, 后处于准稳定的状态。降雨强度为 1.0 mm min^{-1} 时, 各坡度下平均流速变化规律为 $25^\circ < 30^\circ < 35^\circ < 40^\circ < 50^\circ < 45^\circ$, 最小和最大平均流速分别为 0.07 m s^{-1} 和 0.22 m s^{-1} ; 降雨强度为 1.5 mm min^{-1} 时, 各坡度下平均流速变化规律为 $30^\circ < 35^\circ < 25^\circ < 50^\circ < 40^\circ < 45^\circ$, 最小和最大平均流速分别为 0.09 m s^{-1} 和 0.22 m s^{-1} ; 降雨强度为 2.0 mm min^{-1} 时, 各坡度下平均流速变化规律为 $25^\circ < 30^\circ < 35^\circ < 50^\circ < 40^\circ < 45^\circ$, 最小和最大平均流速分别为 0.09 m s^{-1} 和 0.26 m s^{-1} 。总体表现为同坡度下流速随着雨强的增加而增大, 而同雨强下坡度对流速的影响较为复杂, 呈先增大后减小的趋势。此结果与赵小娥等^[16]、梁志权等^[17]、丁文峰等^[18]研究斜坡长一定的坡面流流速随坡度的增加而增大的规律略有不同。这主要由于径流流速受重力和坡面阻力的共同影响, 重力使得流速增加, 而坡面阻力消耗径流能量, 使得流速减小。本试验条件下, 为保证土槽投影面积的一定, 随着坡度的增加, 坡长逐渐增大, 坡度的增加使得重力沿坡面方向的分力加大, 而坡长的增大则使得坡面阻力消耗的能量增加, 当坡度小于 45° 时, 增加相同的坡度时, 坡长增加幅度较小, 此时重力分力增加作用占主导, 流速随之增大, 而当坡度大于 45° 时, 坡长随坡度的增长幅度较大, 坡面阻力对流速的抑制作用起主导作用, 此时流速随坡度的增加而减小。

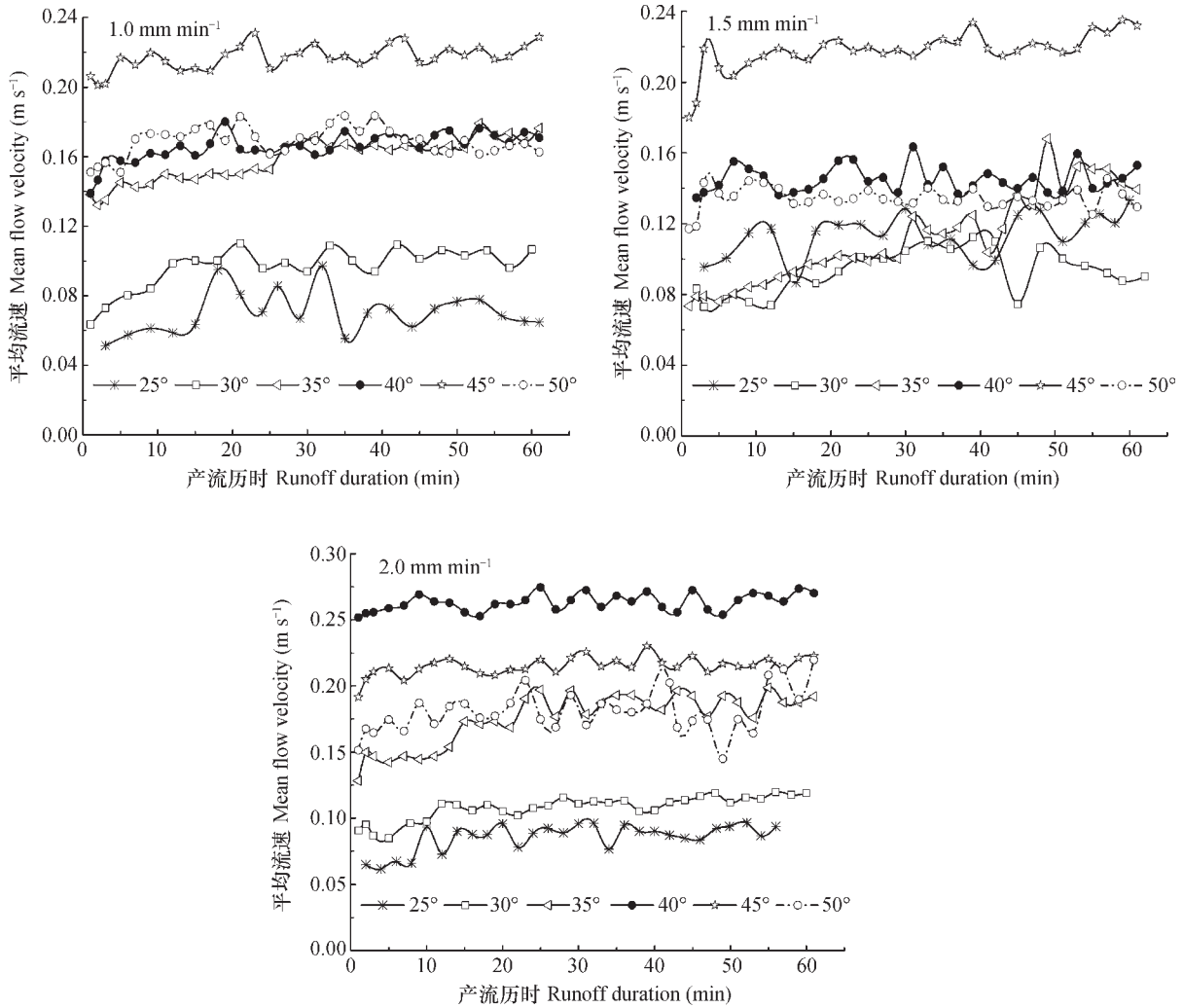


图1 流速随径流过程的动态变化

Fig. 1 Dynamics of runoff velocity with runoff process

而赵小娥等^[16]、梁志权等^[17]、丁文峰等^[18]研究坡长一定，坡度相对较小 ($\leq 25^\circ$)，流速仅受重力的影响，所以流速随坡度的增加而增大。方差分析结果显示，雨强、坡度及雨强与坡度的交互作用对断面平均流速均有极显著影响 ($p < 0.01$)。雨强、坡度、雨强与坡度的交互作用及不可控因素对断面平均流速的贡献分别为7.74%、71.70%、15.63%和4.93%，说明坡度控制坡面径流速度，雨强对坡面径流速度的影响较小。

2.2 坡面薄层流平均水深变化特征

在降雨过程中由于坡面流水深极浅，不易直测，所以本试验的径流水深是通过同时测量坡面水流流量与流速后计算所得。试验中得出的水深是不同时刻坡面水流的平均水深，并取算术平均值为该场次降雨的平均径流水深。将不同降雨条件下，平

均径流水深的变化点绘成图2。

由图2可知，各坡度条件下，坡面薄层流的平

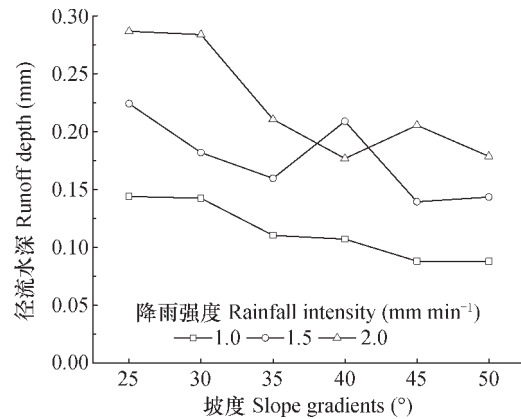


图2 平均径流水深随雨强和坡度的变化

Fig. 2 Variation of mean runoff depth with rainfall intensity and slope gradient

均径流水深随降雨强度增加基本呈平稳增加的趋势, 整体而言相同雨强下随着坡度的增大, 径流水深整体呈减小趋势, 这与很多 $\leq 25^\circ$ 坡度的坡面流平均径流水深变化的研究结果相似^[16-17, 28-29]。主要是因为随着雨强的增加, 坡面单位时间内径流量增大, 因此径流水深随之增大; 而坡度增大一方面会引起斜坡变长, 另一方面会导致流速增加, 在径流量基本相同的条件下径流水深必然减小。当降雨强度为 1.0 mm min^{-1} 时, 径流水深变化范围为 $0.09 \text{ mm} \sim 0.14 \text{ mm}$, 随着坡度的增加减小幅度为 38.90% , 变异系数为 22% ; 降雨强度为 1.5 mm min^{-1} 时, 径流水深变化范围为 $0.14 \text{ mm} \sim 0.22 \text{ mm}$, 随着坡度的增加减小幅度为 35.90% , 变异系数为 20% ; 降雨强度为 2.0 mm min^{-1} 时, 径流水深变化范围为 $0.18 \text{ mm} \sim 0.29 \text{ mm}$, 随着坡度的增加减小幅度为 37.70% , 变异系数为 22% , 各雨强下均属于中度变异, 说明坡度增加对于薄层径流水深的影响较小。方差分析结果显示, 雨强、坡度和雨强与坡度的交互作用对坡面薄层流平均径流水深均有极显著影响($p < 0.01$)。雨强、坡度、雨强与坡度的交互作用及其他不可控因子对径流水深的贡献分别为 43.67% 、 22.52% 、 19.23% 和 14.58% , 说明雨强对坡面薄层径流水深起主导作用, 而坡度对

其作用相对较小。

2.3 坡面流流态流型特征

按照明渠水流理论, 层流与紊流的转换可采用雷诺数(Re)来判定, 对于明渠水流而言, 当 $Re > 580$ 时, 层流不稳定, 这时液流内部稍受干扰, 容易产生旋涡, 使层流转换为紊流。表1为各场试验 Re 的变化范围和均值, 与流速随径流历时变化过程相似, 每场试验产流开始的前 6 min Re 增加较快, 6 min 之后递增速率减缓, Re 处于准稳定状态。由表1可以看出, Re 随降雨强度的增加显著增大, 2.0 mm min^{-1} 雨强时的 Re 为 1.0 mm min^{-1} 雨强的 2.31 倍 ~ 2.97 倍, 为 1.5 mm min^{-1} 雨强的 1.23 倍 ~ 2.33 倍; 随着坡度的增加, Re 相应增大, 但增幅较小, 规律也不太明显。这是因为由 Re 计算公式可知, Re 与流速和水深呈正相关关系, 随着坡度的增加, 坡面流速增大, 但由于受雨面积一定, 水深减小, 二者对 Re 的贡献相互抑制, 最终导致 Re 随坡度的变化不大。方差分析结果显示, 雨强、坡度及雨强与坡度的交互作用对 Re 均有极显著影响($p < 0.01$)。雨强、坡度、雨强与坡度的交互作用及其他不可控因子对 Re 的贡献分别为 76.79% 、 13.37% 、 2.38% 和 7.46% , 说明雨强对 Re 的影响较大, 坡度对 Re 的影响较小。

表1 坡面薄层水流雷诺数(已计入含沙量的影响)

Table 1 Reynolds number of shallow flow on slope (containing the influence of sediments)

降雨强度 Rainfall intensity (mm min^{-1})	25°		30°		35°		40°		45°		50°	
	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean
1.0	7~13	10.96	7~18	15.48	11~19	16.02	9~19	17.16	12~20	18.50	6~16	14.74
1.5	10~39	12.36	26~34	28.86	25~37	33.47	21~37	29.94	23~32	29.3	21~29	33.27
2.0	19~34	28.85	29~51	45.97	23~48	42.46	37~46	43.77	40~45	42.69	28~42	40.95

总体而言, 各降雨场次 Re 均较小, 远小于 580 , 由文中 Re 计算公式可知, 挟沙水流的 Re 相对于清水明渠流更小, 如按明渠判别方法应该属于层流区。由表2可以看出, 各试验场次黏性底层厚度 δ ($\delta = 11.6 \nu / u^*$ 来估算, u^* 为摩阻流速, $u^* = \sqrt{ghJ}$)在 $0.26 \text{ mm} \sim 0.48 \text{ mm}$ 之间, 黏深比 $\xi > 0.12$ 。根据张宽地等^[30]的研究, 当黏深比 ξ 在 0.12 左右时, 滚坡猝然消退, 故以此值为临界值, 将薄层水流分为层流失稳区(滚坡流区)和紊

流区, 因此试验中坡面水流处于层流失稳区(滚坡流区)。

流型是指坡面薄层水流是缓流还是急流, 本文采用弗劳德数(Fr)来判别水流能态。泥沙专家沙玉清^[27]在研究水流挟沙能力时发现, 当 $Fr < 0.8$ 时, 水流为缓流, 当 $Fr > 0.8$ 时, 水流为急流。表3为各场次试验 Fr 变化情况, 总体来看, 各场次试验的 Fr 均较大, 均超过了 0.8 , 因此, 可以判定坡面薄层水流均为急流。对数据进行偏相关分析发现降

表2 不同降雨强度和坡度下黏性底层厚度和黏深比

Table 2 Thickness of the clayey bottom layer and ratio of thickness and depth of the layer relative to rainfall intensity and slope gradient (mm)

降雨强度 Rainfall intensity (mm min ⁻¹)	黏性底层厚度Thickness of clayey bottom layer (δ)						黏深比Ratio of thickness and depth of the layer (ξ)					
	25°	30°	35°	40°	45°	50°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
1.0	0.43	0.39	0.49	0.44	0.46	0.43	3.19	2.79	4.63	3.23	5.30	5.17
1.5	0.38	0.40	0.40	0.31	0.37	0.34	1.70	2.25	2.55	1.53	2.64	2.38
2.0	0.31	0.31	0.28	0.35	0.30	0.31	1.38	1.09	1.35	2.01	1.47	1.74

雨强度与 Fr 的相关系数为 -0.24 ，坡度与 Fr 的相关系数为 0.62 ，显著性水平 p 均小于 0.01 。方差分析结果显示，雨强、坡度及雨强与坡度的交互作用对 Fr 均有极显著影响($p < 0.01$)。雨强、坡度、雨

强与坡度的交互作用及其他不可控因子对 Fr 的贡献分别为 4.61% 、 67.46% 、 22.51% 和 5.42% ，说明坡度对 Fr 起控制作用，雨强对 Fr 的影响较小。

表3 不同降雨强度和坡度下坡面薄层水流弗劳德数

Table 3 Froude number of the shallow flow on slopes relative to rainfall intensity and slope gradient

降雨强度 Rainfall intensity (mm min ⁻¹)	25°	30°	35°	40°	45°	50°
1.0	1.92	2.59	4.86	5.10	7.40	5.80
1.5	3.53	5.26	5.67	3.22	5.89	6.35
2.0	2.28	3.88	3.82	6.33	4.79	5.70

2.4 坡面流阻力规律

本试验研究的结果表明，当雨强为 1.0 mm min^{-1} 时，坡面Darcy-Weisbach阻力系数(f)变化范围为 $0.13 \sim 2.28$ ，当雨强为 1.5 mm min^{-1} 时，坡面 f 变化范围为 $0.14 \sim 3.14$ ，当雨强为 2.0 mm min^{-1} 时，坡面 f 变化范围为 $0.15 \sim 2.82$ 。方差分析结果显示，雨强、坡度及雨强与坡度的交互作用对 f 均有极显著影响($p < 0.01$)，雨强、坡度、雨强与坡度的交互作用及其他不可控因子对 f 的贡献分别为 4.31% 、 47.30% 、 22.43% 和 25.96% ，说明坡度对 f 的作用较大，雨强对 f 的作用较小。对数据进行偏相关分析发现降雨强度与 f 的相关系数为 0.22 ，坡度与 f 的相关系数为 -0.43 ，显著性水平 p 均小于 0.01 。这与坡度 $\leq 25^\circ$ 的一些研究结果不同，李鹏等^[20]、王俊杰等^[31]的研究认为 f 随着坡度的增加呈现先增加后减小的趋势。由 f 的计算公式可知， f 受到水深、坡度正切值、径流速度的直接影响，在本研究中，水深和径流速度受坡度和雨强的影响较为复杂，因此 f 与坡度和雨强有相关性，但

相关度不高，规律不明显。

3 结论

每场降雨流速总体表现为同一坡度下流速随雨强的增加而增大，同一雨强不同坡度条件下的薄层水流流速变化差异较大，坡度对流速的变化趋势存在阈值效应，坡度 $< 45^\circ$ 时流速随坡度的增加而增大，之后随之减小，坡度对断面平均流速的贡献最大，对流速的变化起主导作用；坡面薄层流的平均径流水深随降雨强度的增加呈平稳增长趋势，同一降雨强度下随着坡度的增大呈减小的变化趋势。雨强和坡度对坡面薄层流平均径流水深均有极显著影响，其中雨强对径流水深的贡献率最大，起主导作用； Re 随降雨强度的增加和坡度的增大均呈增大趋势。雨强对 Re 的变化起主导作用，而坡度对 Fr 的变化影响较大； f 随着降雨强度的增加而增大，随着坡度的增加而减小。

参考文献

- [1] 王凤, 孙三祥, 胡清华. 国内坡面流研究现状. 甘肃水利水电技术, 2004, 40 (4): 332—333
Wang S, Sun S X, Hu Q H. Research of shallow flow on slope surface (In Chinese). Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2004, 40 (4): 332—333
- [2] Emmett W W. Overland flow. New York: Hillslope Hydrology, 1978
- [3] Selby M J. Hillslope materials & processes. Oxford: Oxford University Press, 1993
- [4] 姚文艺. 坡面流速计算的研究. 中国水土保持, 1993 (3): 25—29
Yao W Y. Soil and water conservation in China (In Chinese). Soil and water conservation in China, 1993 (3): 25—29
- [5] 陈国祥, 姚文艺. 坡面流水力学. 河海科技进展, 1992, 12 (2): 7—13
Chen G X, Yao W Y. Hydraulic parameters of shallow flow on slope surface (In Chinese). Advances in Marine Science, 1992, 12 (2): 7—13
- [6] 吴普特, 周佩华. 坡面薄层水流流动型态与侵蚀搬运方式的研究. 水土保持学报, 1992, 6 (1): 19—24
Wu P T, Zhou P H. Research on the laminar flow type and erosion transportation manners on the slopes surface (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6 (1): 19—24
- [7] 敬向锋, 吕宏兴, 潘成忠, 等. 坡面薄层水流流态判定方法的初步探讨. 农业工程学报, 2007, 23 (5): 56—61
Jing X F, Lü H X, Pan C Z, et al. Preliminary study on flow pattern determinant method of shallow flow on slope surface (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23 (5): 56—61
- [8] Shen H W, Li R M. Rainfall effect on sheet flow over smooth surface. Journal of the Hydraulics Division, 1973 (99): 771—792
- [9] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: II. shear stress relationships. 1984, 27 (3): 797—804
- [10] Abrahams A D, Li G, Parsons A J. Rill Hydraulics on semi-arid hillslope, southern Arizona. Earth Surface Processes & Landforms, 1996, 21 (1): 35—47
- [11] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究. 土壤学报, 2010, 47 (2): 223—228
Wu S F, Wu P T, Song W X, et al. Hydrodynamic process of soil detachment by surface runoff on loess slope (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (2): 223—228
- [12] 张光辉, 刘宝元, 张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学实验研究. 土壤学报, 2002, 39 (6): 882—886
Zhang G H, Liu B Y, Zhang K L. Experimental simulation of hydraulic mechanism of soil detachment by surface runoff on slopeland (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39 (6): 882—886
- [13] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究. 水科学进展, 2002, 13 (2): 159—165
Zhang G H. Study on hydraulic properties of shallow flow (In Chinese). Advances in Water Science, 2002, 13 (2): 159—165
- [14] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 坡面薄层水流水力学特性试验. 农业工程学报, 2014, 30 (15): 182—189
Zhang K D, Wang G Q, Sun X M, et al. Experiment on hydraulic characteristics of shallow open channel flow on slope (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (15): 182—189
- [15] 张宽地, 王光谦, 吕宏兴, 等. 模拟降雨条件下坡面流水动力学特性研究. 水科学进展, 2012, 23 (2): 229—235
Zhang K D, Wang G Q, Lü H X, et al. Experimental study of shallow flow hydraulics on a hillslope under artificial rainfall conditions (In Chinese). Advances in Water Science, 2012, 23 (2): 229—235
- [16] 赵小娥, 魏琳, 曹叔尤, 等. 强降雨条件下坡面流的水动力学特性研究. 水土保持学报, 2009, 23 (6): 45—47
Zhao X E, Wei L, Cao S Y, et al. Study on characteristics of overland flow with higher rain intensity (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23 (6): 45—47
- [17] 梁志权, 卓慕宁, 郭太龙, 等. 不同雨强及坡度下坡面流的水动力特性. 生态环境学报, 2015, 24 (4): 638—642
Liang Z Q, Zhuo M N, Guo T L, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on hydrodynamic characteristics of overland flow (In Chinese). Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24 (4): 638—642
- [18] 丁文峰, 李亚龙, 王一峰, 等. 人工模拟降雨条件下紫色土坡面流水动力学参数特征. 水土保持学报, 2010, 24 (2): 66—69

- Ding W F, Li Y L, Wang Y F, et al. Study on runoff hydrodynamics of purple soil slope under the rainfall simulation experiment (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (2): 66—69
- [19] 郭忠录, 马美景, 蔡崇法, 等. 模拟降雨径流作用下红壤坡面侵蚀水动力学机制. *长江流域资源与环境*, 2017, 26 (1): 150—157
- Guo Z L, Ma M J, Cai C F, et al. Soil erosion and flow hydraulics on red soil slope under simulated rainfall/runoff (In Chinese). *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26 (1): 150—157
- [20] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土陡坡土壤侵蚀临界动力机制试验研究. *泥沙研究*, 2008 (1): 17—20
- Li P, Li Z B, Zheng L Y. Experimental study on dynamic mechanism of critical erosion on loess steep slopes (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2008 (1): 17—20
- [21] 刘元保, 唐克丽. 国内外坡度分级和王东沟试验区的坡度组成. *水土保持通报*, 1987, 8 (3): 59—65
- Liu Y B, Tang K L. On classification of slope steepness at home and abroad and its composition in Wangdong experiment area of Changwu County, Shaanxi Province (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1987, 8 (3): 59—65
- [22] 郑粉莉, 赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介. *水土保持研究*, 2004, 11 (4): 177—178
- Zheng F L, Zhao J. Introduction of the artificial rainfall simulation and rain markers (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11 (4): 177—178
- [23] 黄自立. 陕北地区黄绵土分类的研究. *土壤学报*, 1987, 24 (3): 266—271
- Huang Z L. Discussion of classification of yellow cultivated loessial soils in Shaanxi (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1987, 24 (3): 266—271
- [24] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 北方风沙区砾石对堆积体坡面径流及侵蚀特征的影响. *农业工程学报*, 2016, 32 (3): 125—134
- Kang H L, Wang W L, Xue Z D, et al. Effect of gravel on runoff and erosion characteristics on engineering accumulation slope in windy and sandy area, northern China (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (3): 125—134
- [25] 郑粉莉, 肖培青, 等. 黄土高原沟蚀演变过程与侵蚀产沙. 北京: 科学出版社, 2010
- Zheng F L, Xiao P Q, et al. Gully erosion and sediment yield on Loess Plateau (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010
- [26] Gang L I, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow. *Earth Surface and Processes Landforms*, 1996, 21 (6): 509—515
- [27] 沙玉清. 泥沙运动学引论. 北京: 中国工业出版社, 1965
- Sha Y Q. Introduction to sediment kinematics (In Chinese). Beijing: China Industrial Press, 1965
- [28] 吕宗强, 雷孝章, 张鹏飞. 人工降雨条件下坡面流试验分析. *水电能源科学*, 2010, 28 (5): 1—3
- Lü Z Q, Lei X Z, Zhang P F. Experimental analysis of hydrodynamic characteristics of overland flow under condition of artificial rainfall (In Chinese). *Water Resources and Power*, 2010, 28 (5): 1—3
- [29] 吴宏平, 王玉强, 张宽地, 等. 坡面薄层水流水力特性试验研究. *湖北农业科学*, 2013, 52 (22): 5455—5458
- Wu H P, Wang Y Q, Zhang K D, et al. Experimental studies on hydrodynamic properties of overland flow on slope (In Chinese). *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52 (22): 5455—5458
- [30] 张宽地, 王光谦, 吕宏兴, 等. 坡面浅层明流流态界定方法之商榷. *实验流体力学*, 2011, 25 (4): 67—73
- Zhang K D, Wang G Q, Lü H X, et al. Discussion on flow pattern determination method of shallow flow on slope surface (In Chinese). *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2011, 25 (4): 67—73
- [31] 王俊杰, 张宽地, 龚家国, 等. 降雨和坡度对坡面水流阻力规律影响研究. *灌溉排水学报*, 2016, 35 (5): 43—49
- Wang J J, Zhang K D, Gong J G, et al. Influence of rainfall and slope gradient on resistance law of overland flow (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35 (5): 43—49

Variation of Hydraulic Parameters of Shallow Flow on Steep Loess Slope

BAI Yujie¹ ZHANG Fengbao^{1, 2†} YANG Mingyi^{1, 2} LI Zhanbin^{2, 3} ZHANG Jiaqiong^{1, 2}

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract 【Objective】Hydraulic characteristics of shallow flow are essential to elucidating mechanisms of soil erosion and sediment yield on the slope. However, most of the studies in this aspect have been reported on slopes less than 25° in gradient. This paper is oriented to study hydraulic characteristics of steep loess slopes ($25^\circ \sim 50^\circ$), in an attempt to lay down a foundation for elucidating in-depth relationships of the hydraulic characteristics of shallow water flow on slopes with slope soil erosion. 【Method】An indoor experiment was carried out simulating rainfalls on steep loess slopes. The experiment was designed to have only one soil type (loessal soil), three rainfall intensity (1.0 mm min^{-1} , 1.5 mm min^{-1} and 2.0 mm min^{-1}) and six slope gradient (25° , 30° , 35° , 40° , 45° and 50°) with the aid of perforated metal flumes (3 m in length, 1 m in width and 0.30 m in depth). Runoff, sediment and flow velocity on the slopes were observed, relative to rainfall intensity and slope gradient. 【Result】Results show: (1) Flow velocity increased with rising rainfall intensity on slopes the same in gradient, and under the same rainfall intensity, the effect of slope gradient on flow velocity exhibited a critical point in gradient, that is, between 40° and 45° under the same rainfall intensity. On slopes with gradient lower than the critical point, flow velocity increased with rising slope gradient, whereas on slopes with gradient higher than the point, flow velocity decreased with rising slope gradient. (2) Mean runoff depth increased steadily with rising rainfall intensity on all slopes regardless of gradient; but decreased with rising slope gradient under rainfalls the same in intensity. (3) Reynolds numbers of steep loess slopes were on the whole relatively small, often far below 580. In this study shallow flows on slopes were of laminar flow in destabilized layers, while shallow flows with Froude number beyond 0.8 were of rush. And (4) Darcy-Weisbach resistance coefficient (f) was positively related to rainfall intensity and negatively to slope gradient. 【Conclusion】Rainfall intensity, slope gradient and interactions between these two factors all have significant effects on hydrodynamic parameters ($p < 0.01$) of shallow flow on steep slopes, but flow velocity, Froude number and Darcy-Weisbach resistance of the shallow flow varied mainly with slope gradient, while runoff depth and Reynolds number did mainly with rainfall intensity.

Key words Simulated rainfall; Steep slope; Shallow flow; Hydraulic parameters

(责任编辑: 檀满枝)