

# 黄土区草地坡面片流阻力系数试验研究

田娜玲<sup>1</sup>, 王占礼<sup>1,2</sup>, 张琪琳<sup>1</sup>, 王栋栋<sup>1</sup>, 张庆玮<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 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; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 阻力系数是坡面流水动力学参数之一, 是反映坡面流体力学特性的重要特征值。通过室内人工模拟降雨试验, 研究了不同雨强(0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm/min)和坡度(7°, 10°, 15°, 20°, 25°)下, 黄土区草地坡面片流阻力系数随雨强和坡度的变化特征。结果表明:(1)不同雨强和坡度下, 草地坡面片流阻力系数随降雨历时的变化均呈先波动减小, 后逐渐趋于稳定的趋势, 且变化过程均可用二次多项式进行描述, 相关性显著, 决定系数0.5以上。(2)草地坡面片流阻力系数随雨强的增加而逐渐增大, 可用指数方程描述, 决定系数0.8以上; 而片流阻力系数随坡度的增加而减小, 可用对数方程描述, 决定系数0.6以上。(3)草地坡面次降雨平均片流阻力系数对雨强及坡度的综合响应关系可用二元指数函数描述, 决定系数0.923, 且雨强对草地坡面片流平均阻力系数的影响大于坡度对阻力系数的影响。研究结果为草地坡面水流动力学特性及草地植被的阻流机制提供参考和理论基础, 对于深刻认识黄土区草地坡面侵蚀动力和生态建设具有重要意义。

**关键词:** 黄土区; 草地植被; 片流阻力系数; 雨强; 坡度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0007-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.002

## Experimental Study on Sheet Flow Resistance Coefficient of Grassland in Loess Area

TIAN Naling<sup>1</sup>, WANG Zhanli<sup>1,2</sup>, ZHANG Qilin<sup>1</sup>, WANG Dongdong<sup>1</sup>, ZHANG Qingwei<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The resistance coefficient is one of the hydrodynamic parameters of the slope surface and also is an important eigenvalue that reflects the hydraulic characteristics of the slope surface. In order to explore the variations of surface runoff resistance coefficient of grassland in loess region with different rainfall intensities (0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm/min) and slope gradients (7°, 10°, 15°, 20°, 25°), indoor artificial rainfall simulation was adopted in this study. The results showed that: (1) The sheet flow resistance coefficient of grassland slopes decrease firstly, and then gradually stabilized with the rainfall duration under different rainfall intensities and slope gradients. The relationship between resistance coefficient and rainfall duration could be described by a quadratic polynomial equation, and the correlation was significant, also the coefficient of determination was above 0.5. (2) The sheet flow resistance coefficient of grassland slope increased gradually with rainfall intensity, and the relationship could be described by an exponential equation with the coefficient of determination was above 0.8; while the sheet flow resistance coefficient of grassland slope decreased with the increase of slope gradient, and the relationship could be described by a logarithmic equation with the coefficient of determination was above 0.6. (3) The integrated response of the average flow resistance coefficient of the grassland slope could be described by a binary exponential function with the coefficient of determination was 0.923. Through comparative analysis, it was found that the influence of rainfall intensity to average sheet flow resistance coefficient was greater than that of slope gradient. This study provides a theoretical basis for the reference of grassland flow hydrodynamics and the flow control mechanism of grassland vegetation. It is of great significance for us to deeply understanding the erosion dynamics of grass

收稿日期: 2018-03-29

资助项目: 国家重点研究计划课题项目(2016YFC0402401, 2017YFD0800502); 国家自然科学基金项目(41471230, 41171227); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项经费项目(A314021403-C2)

第一作者: 田娜玲(1992—), 女, 宁夏吴忠人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀过程研究。E-mail: TNNtian@163.com

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

slope and ecological construction in the loess area.

**Keywords:** loess area; herbaceous vegetation; sheet flow resistance coefficient; rainfall intensity; slope gradient

坡面流是土壤侵蚀及产沙的主要动力因素<sup>[1]</sup>。坡面流阻力系数是坡面流动力学参数之一,它反映了下垫面对流动水体的阻力大小,阻力系数越大,说明水流克服坡面阻力所消耗的能量就越大,则用于坡面侵蚀和泥沙输移的能量就越小<sup>[2]</sup>。一般认为坡面流阻力主要包括颗粒阻力、形状阻力、波阻力和降雨阻力等<sup>[3]</sup>,它受坡面地形地貌特征、植被覆盖和类型、降雨强度和降雨历时、坡度以及水流流态等条件的影响。黄土高原自 1999 年开始实施大规模退耕还林还草工程以来,下垫面条件发生了显著改变,草被覆盖状况显著提高。因此,阐明黄土区草地坡面片流阻力系数变化特征,对揭示黄土区草地坡面径流水力学性质及草地坡面侵蚀动力学过程具有重要意义,并可为黄土高原草地植被坡面的水土流失治理提供科学依据。

近几年关于植被,特别是草地坡面片流阻力系数的研究取得了大量的成果<sup>[1-8]</sup>。目前,国内外学者对于裸坡和草地植被坡面片流阻力系数的研究主要通过室内或室外放水、模拟降雨等试验方法进行,研究<sup>[9-10]</sup>表明了坡面流阻力的影响因素、不同植被盖度下坡面流阻力系数特征<sup>[11]</sup>以及阻力计算公式<sup>[12-13]</sup>等。肖培清等<sup>[14]</sup>和王俊杰等<sup>[15]</sup>对不同被覆和降雨条件下坡面薄层水流阻力规律研究得出,阻力系数随雨强的增大而减小。而关于坡面流阻力与坡度的关系颇受争议,姚文艺等<sup>[1]</sup>认为阻力会随着坡度的增加而增大;潘成忠等<sup>[6]</sup>认为阻力系数随坡度的增加而减少;而王俊杰等<sup>[15]</sup>对降雨条件下和变坡试验水槽的坡面薄层水流阻力规律研究得出,阻力系数随着坡度的增加均呈先增加后减小的趋势。综上,关于坡面流阻力特性的研究成果很多,但研究结果存在很大差异,特别是雨强和坡度对草地坡面片流阻力系数的影响研究,还需要更多的试验观测来验证不同的研究结论。

本研究通过室内模拟降雨试验方法,对黄土区草地坡面片流阻力系数进行研究,分析阻力系数在不同雨强及坡度条件下的变化特征,阐明草地坡面阻力系数与雨强及坡度二因子的关系,从而实现对黄土区草地坡面水动力学特性研究,为深入认识草地坡面水蚀动力学特征及其侵蚀作用机理奠定基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地点与供试土壤

试验于 2016 年 7—10 月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。试验土壤于 2016 年 3 月取自位于黄土高原腹地的延安市安塞区(属于

典型黄土丘陵沟壑区),土壤类型为黄绵土,土壤黏粒含量为 8.7%,粉粒含量为 54.7%,砂粒含量为 36.6%。试验前将土壤进行自然风干并过 5 mm 筛,除去杂草和石块。试验设计的土壤含水量为 14%,试验土壤容重为 1.2 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

试验主要设备包括径流小区及模拟降雨器。试验所用降雨设备为侧喷式人工降雨设备,喷头安装高度 14.5 m,雨滴上喷高度 1.5 m,降雨高度为 16 m,降雨均匀度大于 80%,能够满足所有雨滴都能达到终点速度。径流小区为移动式变坡度钢质小区,可调坡度范围为 0~30°,小区尺寸为 140 cm×120 cm×25 cm,小区底部按 10 cm×10 cm 的间距开孔。试验小区装土之前,在底部铺设 5 cm 厚的天然细沙,用透水纱布覆盖,以保持土层的透水状况接近天然坡面。装填土壤厚度为 20 cm。为保证装土的均匀性,按设计容重分层(每层 5 cm)装填,每次试验均装填新土。填土时,采用边填充边压实,并在所有边界 0.5 cm 的范围都加以夯实,以减小由于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,并保证达到试验设计容重和含水量。填土后,用刮板将表面刮平整。

草地小区是在已建成的裸土小区上种草(2016 年 3 月),待草长出后对其进行 2 个月的管护(2016 年 4—6 月进行施肥、病虫害防治、浇水等),待草长势稳定后即可进行试验。试验选取草种为草地早熟禾(*Poa pratensis* L.),种草方式为条带状种植。试验所需草被盖度设计为 40%,植被盖度的确定采用 Image J 软件。每场降雨试验前使用数码相机对草地小区进行垂直拍照,然后使用 Image J 软件对照片进行分析后得到准确的植被盖度,如与设计覆盖度不一致,需对草冠进行适当修剪,以保证试验盖度与设计盖度一致。

试验设计雨强为 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm/min,坡度为 7°, 10°, 15°, 20°, 25°。采用雨强和坡度的完全组合,重复 1 次,共进行 50 场次草地小区人工模拟降雨试验。

### 1.3 取样及测试方法

每场试验降雨历时均为 40 min。开始产流后第 1, 3, 6 min 进行观测,以后每隔 3 min 观测 1 次,观测时间至降雨结束(最后 1 次观测时距小于 3 min),用小桶截取时段全部径流泥沙。用高锰酸钾染色法测定径流表层流速,用温度计测量浑水温度,小区出口的流量用小

桶接取时段全样后,用天平称取浑水样质量,然后澄清,撇掉清水,烘干称重后计算径流含沙量。

### 1.4 数据处理与分析

采用 Excel 和 SPSS 软件进行数据处理和统计分析。Darcy-Weisbach 阻力系数  $f$  计算公式为<sup>[12]</sup>:

$$f = \frac{8ghJ}{V^2} \quad (1)$$

式中: $f$  为 Darcy-Weisbach 阻力系数; $g$  为重力加速度( $m/s^2$ ); $h$  为水深( $m$ ); $J$  为水流能坡,采用坡面地形坡度  $\alpha$  的正弦值( $\sin \alpha$ ); $V$  为水流流速( $m/s$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 草地坡面片流阻力系数随降雨过程的变化

2.1.1 不同雨强下草地坡面片流阻力系数随降雨历时的变化 由图 1 可知,坡度  $15^\circ$  时,不同雨强下,草地坡面片流阻力系数随降雨历时的变化总体呈先波动减小,后逐渐趋于稳定的趋势。0.7 mm/min 雨强下,片流阻力系数在 15~25 min 波动减小,后又恢复平稳,可能由于试验过程中的误差导致;2.0, 2.5 mm/min 雨强下,片流阻力系数在产流后 15 min 内波动较大,均呈先增加后减小的变化,这主要是因为在大雨强下,产流前期雨滴对草地坡面的打击作用会通过溅散土壤颗粒以及扰动浅层水流而使阻力系数增大,但随着降雨历时的延长,坡面入渗减弱,水深增加,减弱了雨滴带来的阻碍作用,所以阻力系数又逐渐减小。各雨强下,阻力系数的大小整体在 0.114 上下波动,波动范围为 0.051~0.213。不同雨强下草地坡面片流阻力系数随降雨过程变化可用二次多项式进行描述(表 1),决定系数均在 0.5 以上。

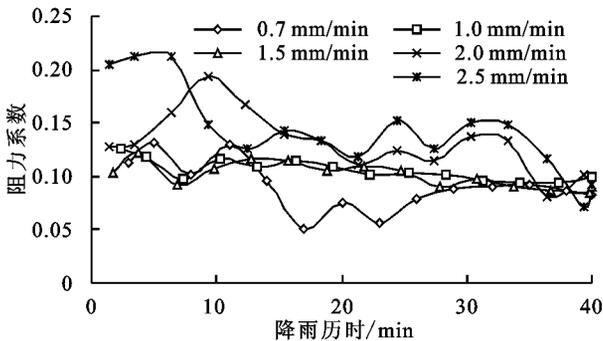


图 1 不同雨强下草地坡面片流阻力系数随降雨历时的变化

表 1 不同雨强下草地坡面片流阻力系数随降雨过程变化的统计方程

雨强/ ( $mm \cdot min^{-1}$ )	坡度/ ( $^\circ$ )	经验 方程	决定 系数	显著性
0.7		$f = 0.002t + 1.266t^{-1} - 2.682t^{-2} - 0.019$	0.575	0.05
1.0		$f = -0.001t - 0.089t^{-1} + 0.226t^{-2} + 0.124$	0.721	0.05
1.5	15	$f = -0.001t - 0.048t^{-1} + 0.025t^{-2} + 0.126$	0.588	0.05
2.0		$f = -0.003t - 0.314t^{-1} + 0.261t^{-2} + 0.220$	0.672	0.05
2.5		$f = -0.001t + 0.429t^{-1} - 0.454t^{-2} + 0.133$	0.731	0.05

注: $f$  为片流阻力系数; $t$  为降雨历时( $min$ )。下同。

2.1.2 不同坡度下草地坡面片流阻力系数随降雨历时的变化 由图 2 可知,1.5 mm/min 雨强时,不同坡度下,草地坡面片流阻力系数随降雨历时的变化整体呈先波动减小,后逐渐趋于稳定的趋势,且坡度越大,阻力系数随降雨历时减小的趋势越明显。各坡度下,阻力系数的大小整体波动范围为 0.033~0.192。不同坡度下草地坡面片流阻力系数随降雨过程变化可用二次多项式进行描述(表 2),决定系数均在 0.5 以上。

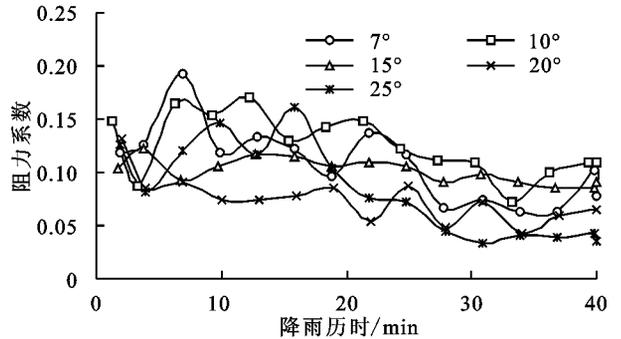


图 2 不同坡度下草地坡面片流阻力系数随降雨历时的变化

表 2 不同坡度下草地坡面片流阻力系数随降雨过程变化的统计方程

坡度/ ( $^\circ$ )	雨强/ ( $mm \cdot min^{-1}$ )	统计 方程	决定 系数	显著性
7		$f = -0.002t + 0.106t^{-1} - 0.295t^{-2} + 0.150$	0.578	0.05
10		$f = -0.003t - 0.591t^{-1} + 0.626t^{-2} + 0.237$	0.630	0.05
15	1.5	$f = -0.001t - 0.048t^{-1} + 0.025t^{-2} + 0.126$	0.588	0.05
20		$f = -0.001t - 0.051t^{-1} + 0.274t^{-2} + 0.088$	0.714	0.05
25		$f = -0.005t - 0.737t^{-1} + 1.005t^{-2} + 0.239$	0.783	0.05

### 2.2 草地坡面次降雨平均片流阻力系数对雨强的响应

由图 3 可知,不同坡度下,次降雨平均片流阻力系数随雨强的增加而增大,且不同坡度之间的变化趋势基本一致,在相对较小坡度下,次降雨平均片流阻力系数随雨强增加而增大的趋势更明显。同时,在 0.7, 1.0 mm/min 雨强下,次降雨平均片流阻力系数几乎不变,而在 1.5, 2.0, 2.5 mm/min 雨强下,次降雨平均片流阻力系数明显增大,说明相对较大的雨强对次降雨平均片流阻力系数影响更明显。对草地坡面次降雨平均片流阻力系数随雨强的变化进行统计分析。各坡度条件下,草地坡面次降雨片流阻力系数对雨强的响应关系可用指数方程描述,决定系数均在 0.8 以上,相关性显著(表 3)。

### 2.3 草地坡面次降雨平均片流阻力系数对坡度的响应

由图 4 可知,不同雨强下,次降雨平均片流阻力系数随坡度的增大整体呈减小趋势,且在 1.5, 2.0, 2.5 mm/min 3 个相对较大雨强下,减小趋势更为明显。对草地坡面次降雨平均片流阻力系数随坡度的变化进行统计分析。各雨强条件下,草地坡面次降雨

片流阻力系数对坡度的响应关系可用对数方程描述, 决定系数在 0.6 以上(表 4)。

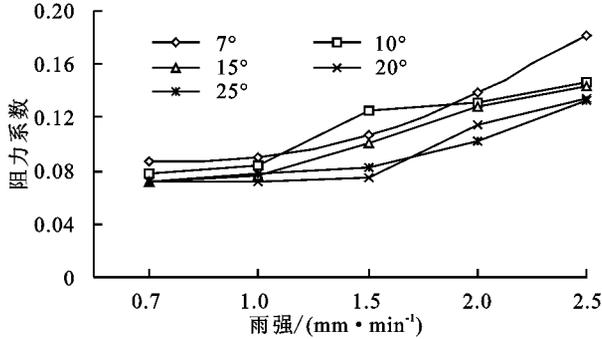


图 3 草地坡面次降雨平均片流阻力系数随雨强的变化

表 3 草地坡面次降雨片流阻力系数随雨强变化的经验方程

坡度/(°)	经验方程	决定系数	显著性
7	$f=0.063e^{0.417I}$	0.970	0.01
10	$f=0.062e^{0.367I}$	0.901	0.05
15	$f=0.053e^{0.417I}$	0.976	0.01
20	$f=0.050e^{0.378I}$	0.865	0.10
25	$f=0.055e^{0.323I}$	0.936	0.05

注:  $f$  为次降雨平均片流阻力系数;  $I$  为雨强(mm/min)。

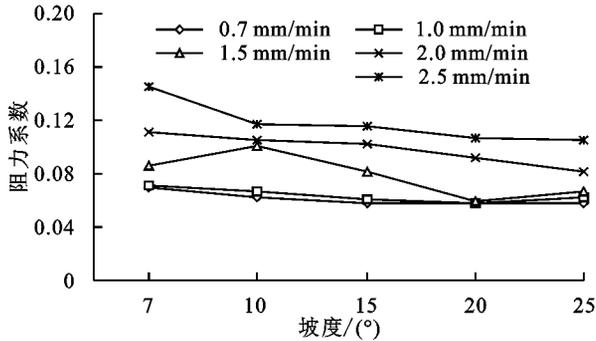


图 4 草地坡面次降雨平均片流阻力系数随坡度的变化

表 4 草地坡面次降雨片流阻力系数随坡度变化的经验方程

雨强/ (mm·min <sup>-1</sup> )	经验方程	决定系数	显著性
0.7	$f=-0.011\ln(S)+0.107$	0.821	0.10
1.0	$f=-0.012\ln(S)+0.111$	0.731	0.10
1.5	$f=-0.031\ln(S)+0.180$	0.618	0.10
2.0	$f=-0.027\ln(S)+0.195$	0.888	0.05
2.5	$f=-0.035\ln(S)+0.239$	0.813	0.10

注:  $f$  为次降雨平均片流阻力系数;  $S$  为坡度(°)。

#### 2.4 雨强及坡度对草地坡面片流阻力系数的综合影响

对不同雨强及坡度条件下次降雨片流过程中, 草地坡面平均片流阻力系数与雨强及坡度的关系进行二元回归, 相关方程为:

$$f=0.070e^{0.381I-0.015S}, R^2=0.923,$$

$$F(2,22)=131.535>F(2,22)_{0.01}=5.719 \quad (2)$$

式中:  $f$  为片流阻力系数;  $I$  为雨强(mm/min);  $S$  为坡度(°)。

由公式(2)可知, 草地坡面片流阻力系数对雨强和坡度的响应关系可用二元指数函数方程很好的描

述, 相关性显著, 说明草地坡面片流阻力系数与雨强和坡度的关系密切, 并且草地坡面平均片流阻力系数与雨强呈正相关关系, 与坡度呈负相关关系。比较自变量雨强及坡度的系数可知, 雨强对草地坡面平均片流阻力系数得影响要大于坡度对阻力系数得影响。说明雨强是径流发生的主要动力, 同时坡度是影响坡面阻力系数的重要因素。

### 3 讨论

阻力系数反映了坡面流在流动过程中所受的阻力大小, 阻力系数越大, 说明水流克服坡面阻力所消耗的能量就越大, 则用于坡面侵蚀和泥沙输移的能量就越小, 坡面侵蚀产沙就越少。在试验条件下, 不同坡度及不同雨强下, 草地坡面片流阻力系数随降雨历时均呈先波动减小, 后逐渐趋于稳定的趋势。主要原因可能为: (1) 草地植被具有分散水流和阻挡股流的作用, 随降雨历时的延长, 草地植被的这种作用由于径流深和流速的增大而减弱, 但这种减弱作用在径流稳定后不明显, 所以片流阻力系数随降雨历时呈先波动减小, 后逐渐趋于稳定的趋势; (2) 随着降雨历时的延长, 径流深逐渐增加, 流速亦增大, 在这个过程中流速占据主导, 但径流深和流速最终趋于稳定, 因此片流阻力系数越来越小, 后趋于稳定; (3) 产流前期, 径流水深小, 雨滴对坡面的打击作用较强, 使较大的土壤颗粒溅散为无数的小颗粒, 增加了坡面糙率, 而随着降雨历时的延长, 雨滴对坡面的击打和径流冲刷使溅散的土壤颗粒填充了土壤孔隙, 入渗减弱, 水深加深, 雨滴对坡面的打击作用也减弱, 加之径流对坡面的冲刷, 使得坡面糙率减小, 从而减小了阻力系数。梅欣佩<sup>[17]</sup>研究了雨滴打击强度对坡面薄层水流阻力的影响, 土槽试验结果也表明了阻力系数随雨滴打击强度的增加而降低; (4) 对试验过程进行观察发现, 随降雨历时的延长, 草地坡面出现了不均匀水深, 并在流路上出现微小陡坎, 使得局部流速增大, 坡面水流的阻力系数减小。肖培青等<sup>[14]</sup>研究也发现, 草被和灌木坡面阻力系数随降雨历时呈波动减小的趋势, 并且在降雨进行到后期时, 植被坡面沿程出现了不均匀水深, 在流路上也出现许多月牙形的微小陡坎。

在试验条件下, 草地坡面片流阻力系数随雨强增加而逐渐增大。主要原因可能为: (1) 当雨强逐渐增大, 水流流速和水深增大的同时, 坡面出现侵蚀跌坎, 增加了下垫面糙率, 从而增大了阻力系数。 (2) 雨滴对水流表层的打击, 破坏了水流表面平整, 引起深层水流的波状流动, 使流程相对加长, 形成附加阻力<sup>[1]</sup>, 越大的雨强会产生越大的附加阻力, 从而使阻力系数随雨强的增加而增大。陈国祥等<sup>[18]</sup>研究表明, 降雨可使浅层水流的阻力系数增大, 而且雨强并不是影响

水流阻力的独立因素,床面越光滑,降雨增加的阻力越大,并且当坡度大于某个值时,降雨的增阻作用相对较小。(3)草被坡面的地表结皮可以改善土壤的理化性质并增强土壤的黏结力<sup>[19]</sup>,因而在低雨强时,草被起到了明显的阻延径流作用,而在雨强较大时,根据试验过程观测中发现由于草被坡面地表结皮受到破坏、径流冲刷和跌坎等的出现,增大了坡面径流阻力。(4)由于草被对水流的分散及对上方袭来股流的阻挡,增加了坡面径流阻力和过水断面粗糙度,从而导致坡面流阻力系数增大<sup>[6]</sup>。此外,随着雨强的增大,雨滴对草被枝叶的击打作用越大,使枝叶与坡面接触,形成了更大的绕流作用,使得阻力系数变大。(5)降雨对水流阻力的影响大小与水流流态有关<sup>[1,5]</sup>,雨滴的打击会在水层中引起局部的掺混紊动,使雷诺应力增加,增大水力阻力。

草地坡面次降雨平均片流阻力系数随坡度增加而逐渐减小,这一结果与潘成忠等<sup>[16]</sup>对不同坡度草地含沙量水流的研究显示坡度与阻力系数呈负相关一致。阻力系数随坡度增加而减小主要因为坡度增大,流速也随之增大;此外径流对坡面的冲刷使得粗糙度下降,因此阻力系数减小。虽然国内外诸多学者对草地植被下坡面片流阻力系数进行了大量的研究,并取得了相应的成果,但是由于研究者的出发点、试验条件、测量方法以及草地植被溅蚀作用的复杂性等使研究结果不尽相同,未能达到统一的认识。因此,今后还有待结合更多试验观测,从理论上进一步揭示坡面草被的阻流机制。

## 4 结论

(1)不同雨强及坡度下,草地坡面片流阻力系数随降雨历时的变化均呈先波动减小,后逐渐趋于稳定。草地坡面片流阻力系数随降雨历时的变化均可用二次多项式进行描述,相关性显著,决定系数皆在0.5以上。

(2)不同坡度条件下,草地坡面次降雨平均片流阻力系数随雨强的增加而增大,可用指数方程描述,决定系数在0.8以上;不同雨强下,草地坡面次降雨平均片流阻力系数随坡度的增加而减小,可用对数方程描述,决定系数在0.6以上。

(3)草地坡面片流阻力系数对雨强及坡度的综合响应关系表现为二元指数函数相关关系,决定系数为0.923。且雨强对草地坡面平均片流阻力系数的影响要大于坡度对阻力系数的影响。

### 参考文献:

[1] 姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究[J]. 泥沙研究, 1996(1): 74-82.

[2] 潘成忠,上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 371-377.

[3] Abrahams A D, Parsons A J, Wainwright J. Resistance to overland flow on semiarid grassland and shrubland hillslopes, Walnut Gulch, southern Arizona[J]. Journal of Hydrology, 1994, 156(1/4): 431-446.

[4] 李占斌,鲁克新. 透水坡面降雨径流过程的运动波近似解析解[J]. 水利学报, 2003, 34(6): 8-13.

[5] 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.

[6] 李勉,姚文艺,陈江南. 草被覆盖下坡面—沟坡系统坡面流阻力变化特征试验研究[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 112-119.

[7] Fattet M, Fu Y, Ghestem M. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength[J]. Catena, 2011, 87: 60-69.

[8] Knapen A, Poesen J, De Baets S. Seasonal variations in soil erosion resistance during concentrated flow for a loess-derived soil under two contrasting tillage practices[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(2): 425-440.

[9] Lawrence D S L. Hydraulic resistance in overland flow during partial and marginal surface inundation: Experimental observations and modeling[J]. Water Resources Research, 2000, 36(8): 2381-2393.

[10] Lane S N. Roughness-time for a re-evaluation? [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2005, 30(2): 251-253.

[11] 王玲玲,姚文艺,申震洲. 草被覆盖度对坡面流体力学参数的影响及其减沙效应[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 80-83.

[12] 张宽地,王光谦,孙晓敏. 坡面薄层流水动力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 182-189.

[13] 敬向锋,吕宏兴,张宽地. 不同糙率坡面水力学特征的试验研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 33-38.

[14] 肖培青,姚文艺,李莉. 植被影响下坡面流阻力变化特征研究[J]. 泥沙研究, 2013(3): 1-5.

[15] 王俊杰,张宽地,龚家国. 降雨和坡度对坡面水流阻力规律影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(5): 43-49.

[16] 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.

[17] 梅欣佩. 降雨条件下坡面薄层流水动力学特性试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2004.

[18] 陈国祥,姚文艺. 降雨对浅层水流阻力的影响[J]. 水科学进展, 1996, 7(1): 42-46.

[19] 高丽倩,赵允格,秦宁强. 黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(8): 1316-1326.