

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.013.

朱艳, 王平, 马岚, 等. 植被组合方式对坡面流水动力特性的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 74-85.

Zhu Yan, Wang Ping, Ma Lan, et al. Effects of Vegetation Combinations on Hydrodynamic Characteristics of Overland Flow[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 74-85.

植被组合方式对坡面流水动力特性的影响

朱艳, 王平, 马岚, 胡杰

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的]明晰坡面流水动力特性响应不同植被组合方式的趋势特征以及不同植被组合覆盖坡面的阻力构成, 以期探究植被组合对坡面流的调控机制, 为合理布设坡面蓄水保土工程提供参考依据。[方法]通过室内水槽试验, 在不同植被组合方式(单一灌木、单一草被、灌草单行交替、灌草块状交替), 3 个坡度(1° , 5° , 9°), 5 种流量(20, 30, 40, 60, 80 L/min)条件下分析坡面流水动力参数对植被组合的响应规律、水流阻力变化规律和阻力构成。[结果]不同植被组合对坡面水深、平均流速、流型和阻力系数均有显著影响($p < 0.05$)。植被存在时水深壅高了 1.07~4.17 倍, 缓流效率为 2.35%~64.7%。各试验条件下水流集中分布在过渡流区, 不同植被组合覆盖坡面紊动强度表现为灌草组合 > 单一植被 > 裸坡。植被覆盖下的坡面阻力系数明显增加, 约为裸坡的 1.25~25.45 倍, 阻水缓流能力表现为单一灌木组 > 灌草交错组 > 单一草被组 > 裸坡。坡面阻力受植被组合方式和茎秆影响($p < 0.05$), 单一植被覆盖坡面阻力主要由颗粒阻力和植被阻力构成; 灌草交错覆盖坡面阻力不是各阻力简单线性叠加的结果, 坡面上各粗糙元间互相干扰会产生附加阻力, 且附加阻力随坡度增加出现削弱水流阻力现象, 但相同坡度条件下随流量增大呈增强水流阻力趋势。[结论]单一灌木组的阻水缓流效果最好, 灌草交错组的效果相似。

关键词: 坡面流; 植被组合; 阻力系数; 阻力构成

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0074-12

Effects of Vegetation Combinations on Hydrodynamic Characteristics of Overland Flow

Zhu Yan, Wang Ping, Ma Lan, Hu Jie

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Indoor flume experiments were conducted to clarify the response trend of overland flow dynamics to various vegetation combinations, to explore the composition of resistance covered by different vegetation combinations, and to explore the regulation mechanism of vegetation combination on overland flow, so as to provide reference basis for rational layout of slope water storage and soil conservation projects. [Methods] The research analyzed the response law, flow resistance variation, and resistance composition of overland flow hydrodynamic parameters under the conditions of different vegetation combinations (single shrub, single grass cover, single row alternation of shrub and grass, alternation of shrub and grass, and bare slope), 3 different slope gradients (1° , 5° , 9°) and 5 kinds of discharge (20, 30, 40, 60, 80 L/min). [Results] Vegetation had significant effects on water depth, average velocity, flow pattern, and resistance coefficient ($p < 0.05$). Compared to bare slope, water depth was 1.07~4.17 times higher with vegetation, and the velocity decreased 2.35%~64.7%. Besides, most experimental flow fell in the transition states. Turbulence intensity of different vegetation combinations followed the order: shrub-grass combination >

收稿日期: 2023-12-28

修回日期: 2024-01-30

资助项目: 国家自然科学基金“湿地表面流中物质弥散过渡过程机理研究”(52179056)

第一作者: 朱艳(1999—), 女, 江西赣州人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: zhuyan@bjfu.edu.cn

通信作者: 王平(1988—), 男, 湖北广水人, 博士, 教授, 主要从事生态与环境水力学、河流与湿地物质输运过程模拟、土壤侵蚀研究。E-mail: wangp@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

single vegetation > bare slope. Furthermore, the resistance coefficient under vegetation cover was 1.25~25.45 times larger than bare slope, and the effect of water blocking and velocity slowing followed the order: single shrub > shrub-grass combination > single grass cover > bare slope. Resistance was affected by vegetation combination and stem characteristics ($p < 0.05$). The flow resistance was mainly composed of particle resistance and vegetation resistance under single vegetation cover. However, the interference of rough elements produced additional resistance under shrub-grass combination cover, which weakened the flow resistance with an increase of slope gradient, but strengthened the flow resistance with an increase in discharge under the same slope condition. [Conclusion] The effect of single shrub group is the best, and the effect of interleaved shrub group is similar.

Keywords: overland flow; vegetation combination; resistance coefficient; resistance composition

水土流失容易引起土壤理化性质恶化、肥力下降,不仅会造成土地可持续生产力的损失和破坏、生态环境恶化和失衡,还有可能直接威胁到人类生命和财产安全,影响和制约社会经济的发展和进步^[1]。在大力建设发展生态文明的环境下,我国水土保持工作不断加强完善,其中植被措施一直备受重视^[2]。当坡面有植被覆盖时,坡面水流形态更加复杂,植被使得原有水流内部结构发生改变,增加水流阻力,减小水流强度,还能有效控制水土流失,从根本上改善生态环境^[3-4]。坡面流作为水土流失的主要动力^[5],研究植被覆盖下的坡面流特性有助于了解植被对水土流失的调控机制,在防治水土流失和设计水土保持措施时发挥积极作用。

目前已有大量植被对坡面流水动力特性影响研究,多集中在植被类型^[6-7]、植被覆盖度和茎秆直径^[8-9]、植被分布格局^[10-11]。研究表明草被覆盖的坡面其抗流能力优于灌丛^[12];植被茎秆直径及其离散程度不同,能够引发坡面水流流型和阻力变化,研究发现阻力系数随植被茎的综合直径和离散度的增大而增大^[13]。部分学者^[14-15]通过室内水槽试验及野外径流小区试验,发现行排列植株对水流的增阻效应优于随机排列。薛梦华等^[16]研究不同草被格局下的坡面水力特性,结果表明随机格局抗蚀能力最好。还有学者对比了不同植被空间分布格局和植被盖度下的水力特性,发现覆盖度对流速的影响较空间格局的大,随坡度增加覆盖度对坡面阻力的影响贡献逐渐增大^[10]。研究结果随试验条件不同而存在差异,如流态划分方面,在水流稳定时,Horton 等^[17]认为坡面流为层流与紊流的交互层;张宽地等^[18]通过试验发现坡面水流流态集中处于滚坡流区和过渡流区。关于植被阻力方面,胡静等^[19]研究表明存在临界植被覆盖度和临界坡度,使得阻力系数变化规律前后不同;孟铖铖^[20]和曹颖^[21]等研究表明植被阻力与弗劳德数呈幂函数关系,且受坡度和宽深比影响。在现实中,植被类型、生长环境和种植方式的差异,都会使得

植被分布不均匀,随着社会不断发展,人为活动对坡面环境的影响随之加强,坡面上植被存在组合分布现象。目前组合植被对坡面流水力特性影响研究仍然较少,有待量化研究^[22]。

本研究开展室内水槽试验,对不同植被组合覆盖下坡面流水动力学特性变化进行研究,观测分析不同植被组合覆盖对水流流速、流型流态及阻力特性的影响,以期探究植被组合对坡面流的调控机制,为合理布设坡面蓄水保土工程提供参考依据。

1 试验设计与方法

1.1 试验装置与材料

试验于 2023 年 5 月在北京林业大学鹫峰模拟人工降雨大厅中进行,试验装置设备包括供水系统、流量控制阀、稳流箱、平水设施和变坡试验水槽五部分(图 1)。试验水槽为单向水槽,长、宽、深分别为:6 m,0.5 m,0.3 m,供水系统供水,水流经稳流箱及平水设施,使进入试验段的水流稳定。本研究在水槽底部铺设 40 目的砂纸模拟粗糙地面;试验中最大水深为 0.023 4 m,因此本试验属于非淹没植被研究范畴,考虑水槽条件、供水系统容量等限制,模拟灌木的高度(h_{v1})选择 0.10 m,草被(h_{v2})选择 0.04 m,结合实际坡面上植被生长状况不一,设置两种灌木直径($d_1 = 16$ mm, $d_2 = 32$ mm)。试验采用 PVC 圆管模拟灌木、塑料仿真草模拟草被,植被在水槽中交错排列。

1.2 试验设计

根据自然界中常见的植被组合方式及植被生长状况,本试验设置植被组合设有单一草被(G)、单一灌木(S, $d_1 = 16$ mm,SS, $d_2 = 32$ mm)、灌草单行交错(P)、灌草块状交错(M)与裸坡(C)(图 2)形成对照,所有植被组合设置为相同覆盖度,选取 10%为本试验覆盖度,灌木盖度采用公式(1)进行计算;草被盖度使用相机拍照,再通过 CAD 软件对所得照片进行盖度分析;灌草交错植被盖度由灌木部分和草被部分相加所得。

无降雨时,坡面流阻力可视为由颗粒阻力、形态阻力两部分组成,当坡面上粗糙元间存在相互作用时可能会产生附加阻力,附加阻力 F_{ad} 根据公式(8)进行计算。影响坡面流水动力特性响应不同植被条件趋势特征的主要水流条件包括流量及坡度,边界条件包括水槽宽度、床面粗糙度、植被类型、覆盖度及其分布

等^[23]。对于坡度的影响,研究^[24]发现初始侵蚀地区的坡度一般小于 10° ,本试验坡度设置为 3 个缓坡: $1^\circ, 5^\circ, 9^\circ$; 对于流量的影响,引起土壤侵蚀存在一定的临界雨强,考虑到华北地区降雨强度及坡度的差异,依据自然界实际调查情况,结合试验条件,选取 20, 30, 40, 60, 80 L/min, 5 组流量作为本试验流量。

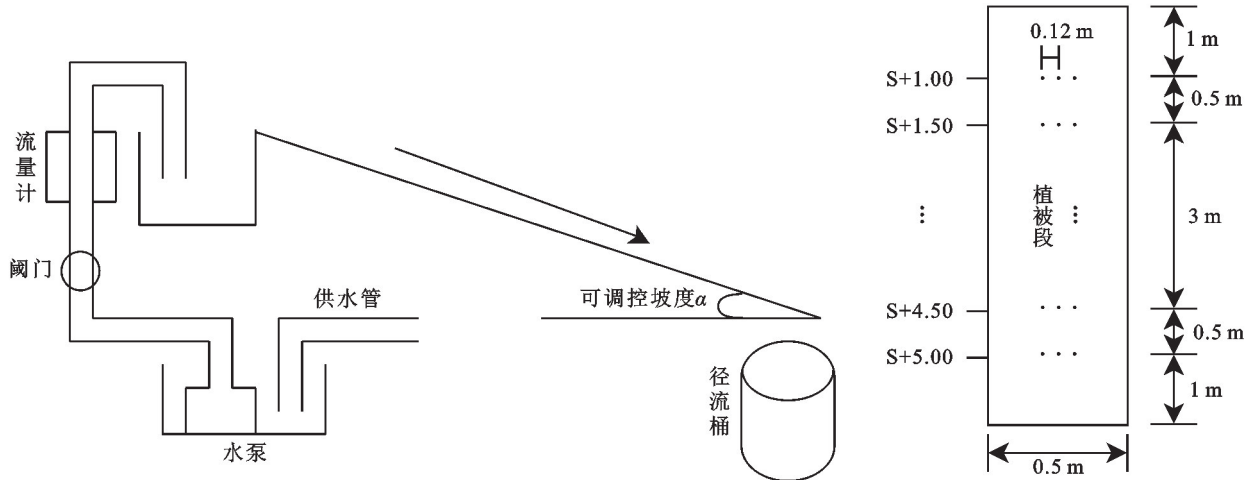


图 1 试验装置及测点布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup and measuring points

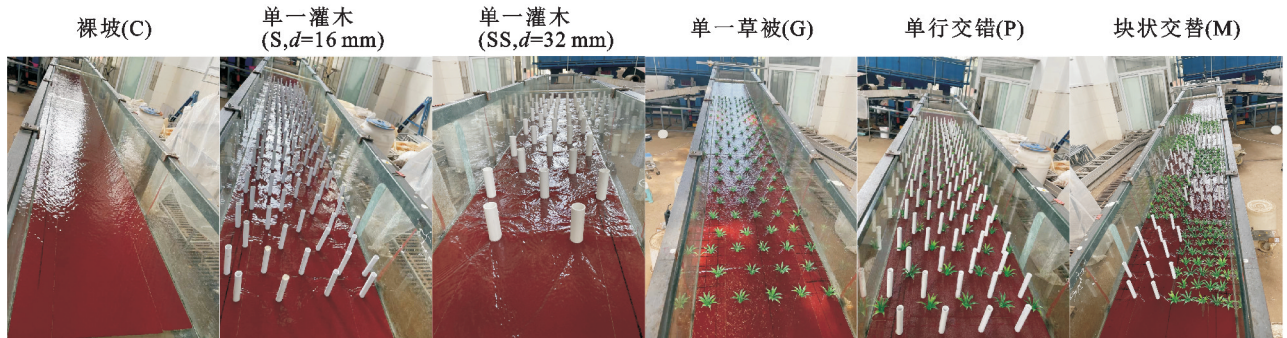


图 2 植被组合布设

Fig. 2 Vegetation combination layout diagram

1.3 试验方法

1.3.1 参数测量 水槽可分为入口稳流段(1.5 m)、植被区(3 m)、尾门段(1.5 m)。距水槽起始位置 1.5 m 处布设植被,沿水槽间隔 0.5 m 设纵向观测断面 9 个(图 1),自上而下分别为(S+1.00) m, (S+1.50) m, (S+2.00) m, (S+2.50) m, (S+3.00) m, (S+3.50) m, (S+4.00) m, (S+4.50) m, (S+5.00) m, 观测断面包括无植被段观测断面 2 个,植被铺设段观测断面 7 个。试验准备就绪,将水注入稳流箱,通过流量计控制流量达到设定值,稳流箱注满后通过稳流栅进入水槽床面开始试验,进行数据采集。试验采用电磁流量计控制并测定试验流量,在 5 组流量下流过模拟植被,试验开始前后均用容积法测定流量;使用水位测针(精度为 0.01 mm)测定试验水深,每个测量断面取 3 个测点,重复测量 3 次,取平均值作为该断面的水深值;试验开始前后使用温度计(精度为 0.10 °C)各

测量一次水温。

1.3.2 参数计算

(1) 灌木植被盖度(Cr):

$$Cr = \frac{N\pi d^2}{4bL} \quad (1)$$

式中: N 为灌木株数(株); d 为灌木直径(m); b 为水槽宽度(m); L 为植被区长度(m)。

(2) 断面平均流速通过连续性方程根据平均水深进行计算。计算公式为:

$$u = \frac{Q}{hb_e} \quad (2)$$

式中: u 为断面平均流速(m/s); Q 为放水流量(m^3/s); h 为实测水深(m); b_e 为有效径流宽度(m)。

(3) 缓流速率(V)^[16]。

$$V = (v_c - v_i) / v_c \quad (3)$$

式中: v_c 为裸坡时坡面流速(m/s); v_i 为植被覆盖坡

面流速(m/s)。V越大,则对流速的延缓效果越好。

(4) 流态指数在水流稳定时,假定坡面流为层流与紊流的交互层^[17],认为水深(h)与单宽流量(q)存在如下公式关系,

$$h = kq^m \quad (4)$$

式中: m 为与水流流态相关的参数,称为流态指数,反映了水流耗能形式, m 值越大水流主要以阻力做功, m 值越小水流将能量转化为流速能量,阻力做功次之; k 为综合指数,反映床面、坡度及水流黏滞性等作用力对水流的影响。

(5) 弗劳德数(Fr)在流体力学中表征流体惯性和重力相对大小的比值。根据 Fr 可以判别水流状态,当 $Fr < 1$ 时,水流为缓流;当 $Fr = 1$ 时,水流为临界流;当 $Fr > 1$ 时,水流为急流。计算公式为:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}} \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度(m/s^2)。

(6) 对于流体力学而言,黏性力、惯性力等是常见的控制流动型态的因素。可以通过雷诺数 Re ,即惯性力与黏性力之比的大小来区分流动形态。根据 Re 可以划分水流流动型态,当 $Re < 500$ 时,为层流区; $500 \leq Re < 5000$ 时,为过渡流区;当 $Re \geq 5000$ 时,为紊流区。计算公式为:

$$Re = \frac{uR}{\nu_m} \quad (6)$$

式中: R 为水力半径(m); ν_m 为水力黏性系数(m^2/s),采用

泊肃叶公式 $\nu_m = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.00022t^2}$; t 为水温($^{\circ}C$)。

(7) 水流阻力系数反映了下垫面对水流的阻力作用。本试验采用 Darcy-Weisbach 阻力系数 f 进行计算:

$$f = \frac{8gRJ}{u^2} \quad (7)$$

式中: J 为水力坡度, $J = \sin\theta$; θ 为水槽坡度。

(8) 无降雨时,坡面流阻力可视为由颗粒阻力、形态阻力两部分组成:

$$F_t = F_b + F_f + F_{ad} \quad (8)$$

式中: F_t 为坡面流总阻力; F_b 为由床面粗糙引起的颗粒阻力; F_f 为由地表障碍物产生的摩擦阻力; F_{ad} 为附加阻力,可能是由于颗粒和其他障碍物存在相互干扰作用产生的,当坡面阻力符合总和定律时, $F_{ad} = 0$ 。

(9) 不同植被组合覆盖下植被阻力计算:

$$F_{grass(G)} = f_G - F_b \quad (9)$$

$$F_{shurb(S)} = f_S - F_b \quad (10)$$

$$F_{shurb(SS)} = f_{SS} - F_b \quad (11)$$

$$F_{combination(P)} = f_P - F_{grass} - F_{shurb} - F_b - F_{ad} \quad (12)$$

$$F_{combination(M)} = f_M - F_{grass} - F_{shurb} - F_b - F_{ad} \quad (13)$$

式中: F_{grass} 为草被产生的阻力; F_{shurb} 为灌木产生的阻力; $F_{combination}$ 为灌草交替产生的阻力;单一植被覆盖下,由颗粒阻力和植被阻力相互作用产生的附加阻力较小,因此不计入总阻力中; $f_G, f_S, f_{SS}, f_P, f_M$ 分别为单一草被、小直径单一灌木、大直径单一灌木、灌草单行交错和灌草块状交错覆盖下的总阻力系数,均由公式(7)进行计算。

1.3.3 统计分析 所有统计分析均在 Origin 2023b, SPSS(23.0)环境下进行。通过 Pearson 相关系数相关矩阵分析水力参数与坡度、流量的相关性;采用非线性回归分析量化自变量和因变量之间的关系;利用 ANOVA 方差分析判断不同植被组合间水力特性是否有显著性差异。采用纳什效率系数进行水力模型的模拟效果检验。

Nash Sutcliffe Efficiency coefficient (NSE)纳什效率系数:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

式中: O_i 为实测值; P_i 为模拟值; \bar{O} 为实测值的平均值; n 为样本数。NSE 越接近 1,表明模型的模拟效果越好。

2 结果与分析

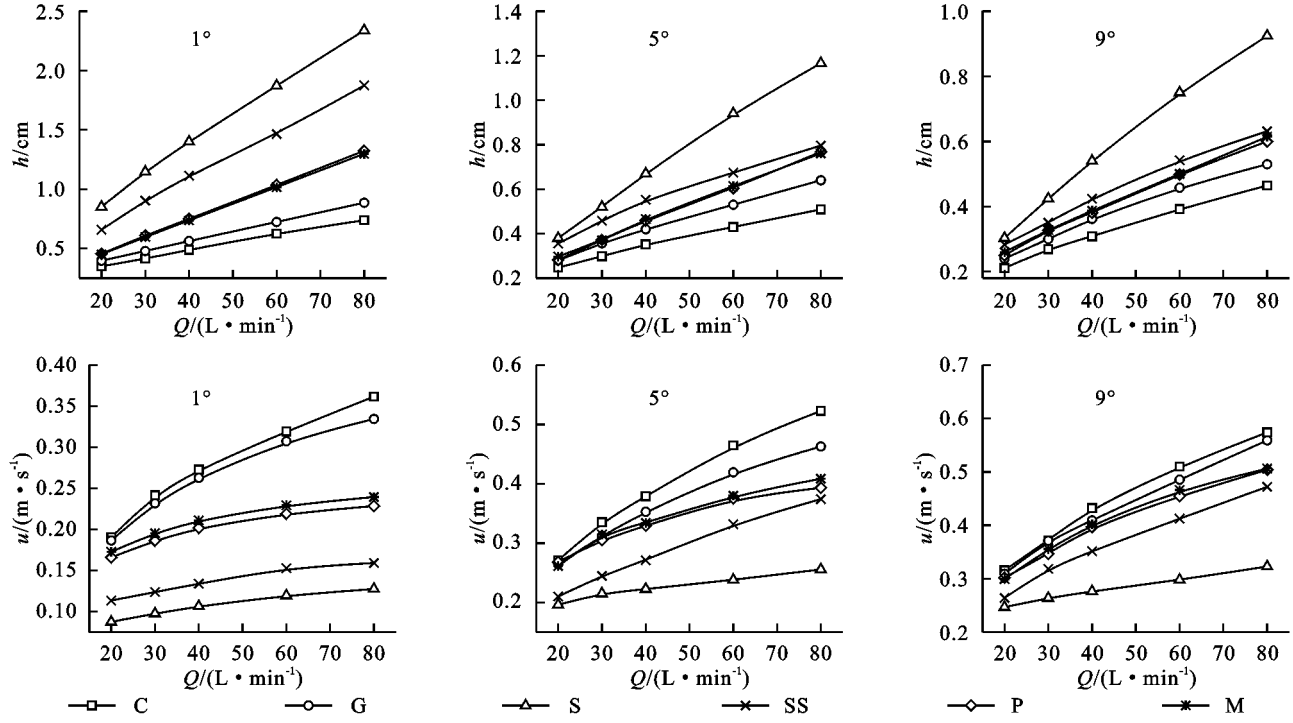
2.1 水深、流速变化规律

不同植被组合覆盖显著影响水深(h)和平均流速(u)的变化特征($p < 0.05$)。相较于裸坡而言,植被覆盖时 h 壅高了 1.14~3.17 倍, u 延缓了 2.35%~64.70%,说明植被的存在具有一定的阻水缓流作用。无论是否有植被覆盖,都出现了 h 随流量增大而增大,随坡度增加而减小, u 随坡度增加、流量增大而增大的现象;单一灌木组的水深较其他组合大,流速小,其中,单一小直径灌木组的水深最大,流速最小(图 3)。不同植被组合覆盖显著影响延缓流速率变化($p < 0.05$)。延缓流速率 V 的变化特征显示,植被组合对坡面流阻水缓流效应表现为 $S > SS > P > M > G > C$,整体随流量增大而增大,但随坡度增大而减小,其中单一草被组随坡度增加,缓流效率先增大再减小,当坡度为 9° 时,缓流效率变化规律呈现出随流量增大先增大再减小(图 4)。

流速和流量以及坡度的非线性回归结果表明(表 1),所有工况条件下,流速与流量和坡度之间均为幂函数关系。流量和坡度的指数特征表明,无植被存在和单

一草被覆盖时平均流速主要受流量变化影响;有植被覆盖后,坡度对平均流速变化影响增大,除 S 组仍主要受坡度影响,其他植被组合流量和坡度对流速的控制比基本保持一致。植被组合覆盖下流速与坡度和流

量的关系见表 1,剔除坡度影响后,决定系数下降了 0.526,说明坡度对流速变化具有重要影响。不同试验坡度流速与流量关系见表 2,随坡度增加流量对流速的控制增强,坡度对流速变化影响逐渐降低。



注: C 为裸坡; G 为单一草被; S 为单一灌木($d=16\text{ mm}$); SS 为单一灌木($d=32\text{ mm}$); P 为灌草单行交错; M 为灌草块状交错。

图 3 不同植被组合覆盖下水深、平均流速随流量变化

Fig. 3 Variation diagram of depth and velocity under different vegetation combinations

2.2 流型流态变化规律

流态判别包括两个重要参数,即雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 。依据明渠水流理论,坡面流介于层流及紊流之间,应视为一种特殊流态,可分为层流区、过渡区和紊流区。

2.2.1 流态分区、流态指数 由流态分区图(图 5)可知,各工况下水流流态均未达到紊流区,集中分布在过渡流区,在试验流量下,植被组合覆盖坡面水流流态趋向于缓流,远离急流流态。裸坡和 G 组覆盖坡面水流均为急流,其他植被组合随着坡度增大,水流由缓流流态转捩为急流,主要是坡度增加,流速增大,惯性力增强所致。不同植被组合下随着流量增加水流紊动性增强,水流流态更加接近紊流区。

流态指数 m 反映了单宽流量对流速的影响程度,表征坡面紊动强度。 m 随植被组合不同而显著变化($p<0.05$)。根据公式(3)对平均水深与单宽流量回归方程进行分析(表 3),结果表明,所有工况下无植被时 m 值最小,此时水流更多的是转化为动能做功;植被覆盖条件下的坡面 m 指数增大,植被交替组 m 值最大;S 和 SS 组覆盖下 m 值均大于 G 组,即灌木覆盖下水流紊动性较草被更强;除了 S 组的 m 指数随坡度增加而

增大,其他植被组合覆盖下流态指数 m 均随坡度增加而降低,降低趋势随坡度增加而减小,但坡度对流态指数 m 的影响并不显著($p>0.05$)。

2.2.2 雷诺数、弗劳德数 植被组合对雷诺数 Re 变化无显著影响($p>0.05$),但显著影响弗劳德数 Fr 变化特征($p<0.05$)。由图 6 可知,植被覆盖坡面 Re 均大于裸坡,主要受流量变化影响,且与流量呈较好线性递增关系;植被覆盖坡面 Fr 均小于裸坡,不同植被组合覆盖下 Fr 呈现出 $C>G>M>P>SS>S$,且随坡度和流量变化表现出不同变化规律。不同坡度条件下,C 与 G 覆盖坡面 Fr 随流量增大而增大、S 和 P 覆盖坡面 Fr 随流量增大而减小,随坡度增大,SS 和 M 覆盖坡面逐渐出现随流量增大 Fr 也增大的变化趋势。通过回归方程,分析了 Fr 与流量和坡度的相关关系, Fr 主要受植被组合和坡度变化影响,与流量无显著相关性关系。

2.3 阻力变化规律

水流阻力是指水流具有粘滞性产生的摩擦切力及床面形态对水流流动的阻滞作用。Darcy-Weisbach 阻力系数 f 越大,水流运动过程中克服阻力做功耗散的能量越多,则搬运泥沙颗粒的能量相应减小,即土壤侵蚀程度降低^[25]。

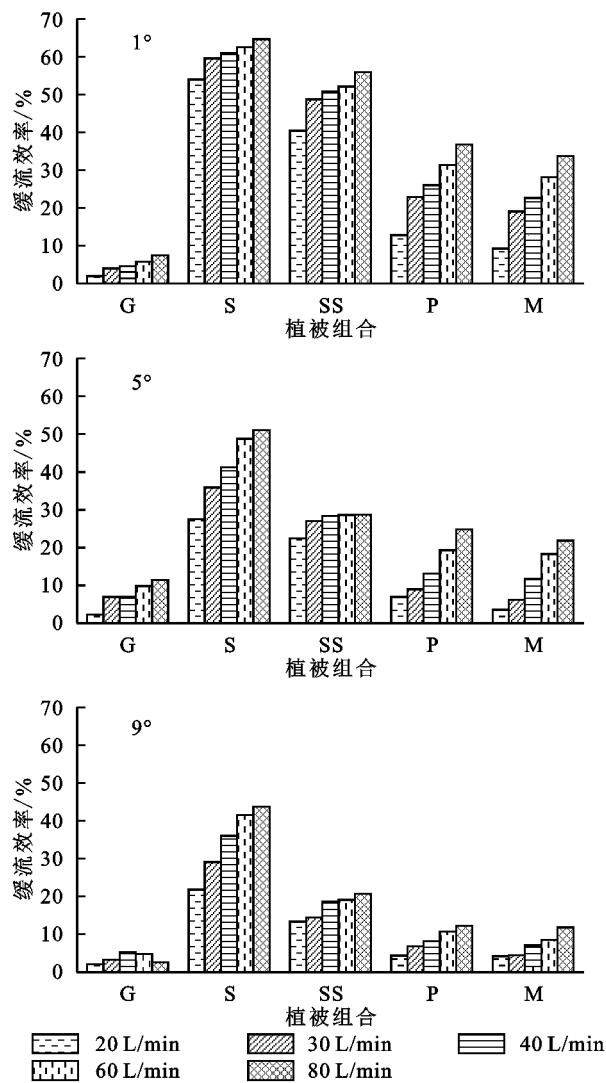


图 4 不同植被组合覆盖下缓流效率

Fig. 4 Slow flow efficiency under different vegetation combinations

表 1 流速与流量和坡度的相关关系

Table 1 Correlation between Velocity and discharge and slope

植被组合	表达式	R^2	NSE
C	$u = 0.1213 Q^{0.448} J^{0.211}$	0.996	0.997
G	$u = 0.1332 Q^{0.414} J^{0.218}$	0.992	0.992
S	$u = 0.3034 Q^{0.196} J^{0.430}$	0.995	0.996
SS	$u = 0.1837 Q^{0.405} J^{0.448}$	0.995	0.995
P	$u = 0.2206 Q^{0.319} J^{0.321}$	0.989	0.991
M	$u = 0.2078 Q^{0.331} J^{0.306}$	0.989	0.991
All	$u = 0.1918 Q^{0.342} J^{0.329}$	0.703	
All(剔除坡度)	$u = 0.082 Q^{0.335}$	0.177	

注: u 为流速; Q 为流量; J 为坡度。下表同。

表 2 不同试验坡度流速与流量的回归分析及系数变化

Table 2 Regression Analysis and coefficient of Velocity and discharge in different tslopes

坡度/(°)	回归方程	R^2
1	$u = 0.062 Q^{0.288}$	0.134
5	$u = 0.091 Q^{0.327}$	0.452
9	$u = 0.095 Q^{0.365}$	0.572

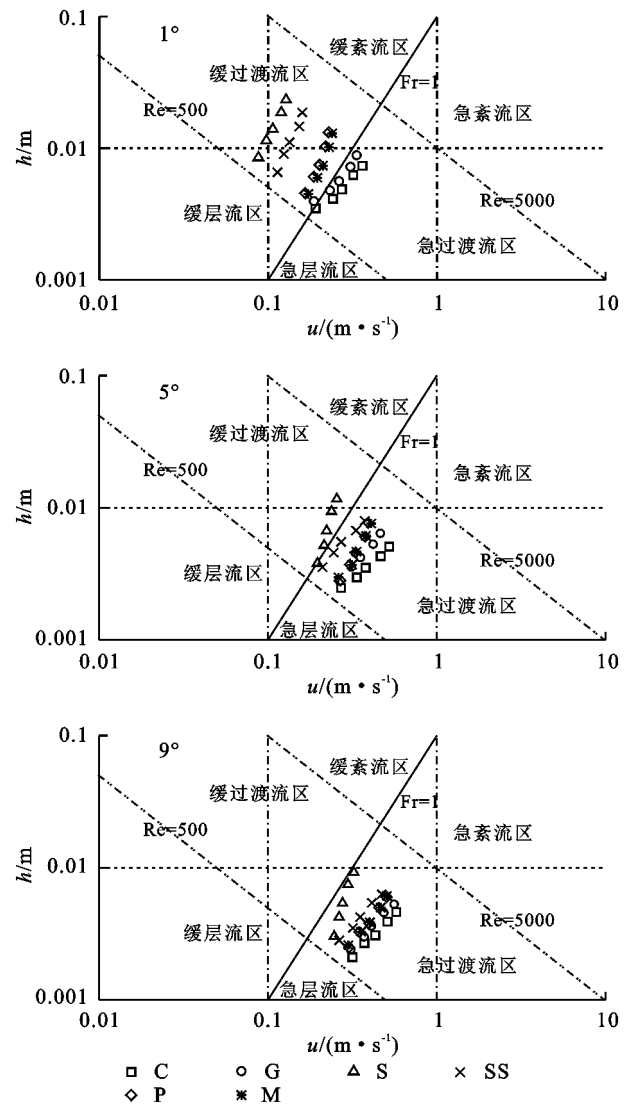


图 5 不同植被组合覆盖下流态分区

Fig. 5 Flow pattern zoning diagram under different vegetation combinations

表 3 不同工况下流态指数 m 的实测值Table 3 Measured value of m under different experimental conditions

试验坡度	植被组合					
$J = \sin\theta$	C	G	S	SS	P	M
0.0175	0.5631	0.6023	0.7286	0.7473	0.7866	0.7839
0.0872	0.5290	0.5960	0.8135	0.5987	0.7308	0.7012
0.1564	0.5168	0.5748	0.7963	0.5894	0.6313	0.6309

2.3.1 阻力系数 植被组合显著影响阻力系数 f 变化特征($p < 0.05$), 植被覆盖下的坡面阻力系数明显增加, 约为裸坡阻力系数的 1.25~25.45 倍, 说明植被对水流具有一定的阻滞作用(图 7)。不同植被组合覆盖坡面 f 表现为单一灌木组 > 灌草交错组 > 单一草被组 > 裸坡, 即灌木覆盖坡面时较其他植被组合具有更好的阻水缓流效应; 其中 P, M, SS 组覆盖坡面 f 变化规律随坡度及流量变化存在差异, 如 P 组

覆盖下,在 1° 和 5° 坡面上 f 随流量增大而增大,坡度增大至 9° 时, f 随流量增大而减小; M 组工况下表现出坡度为 1° 时, f 随流量增加而增加,而坡度为 9° 时,随流量增加 f 先减小再增大; SS 组在坡度为 1° 时随流量增大 f 也增大,坡度增加后 f 随流量增大而较

小。方差分析显示, S 与 SS 组 f 存在显著差异 ($p < 0.05$), 由此说明, 坡面流阻力系数还受植被茎秆直径影响; P 与 M 组 f 无显著差异 ($p > 0.05$), 即相同盖度下, 灌草交替组合所能提供的阻力效应相似, 不同灌草组合方式对阻力变化影响较小。

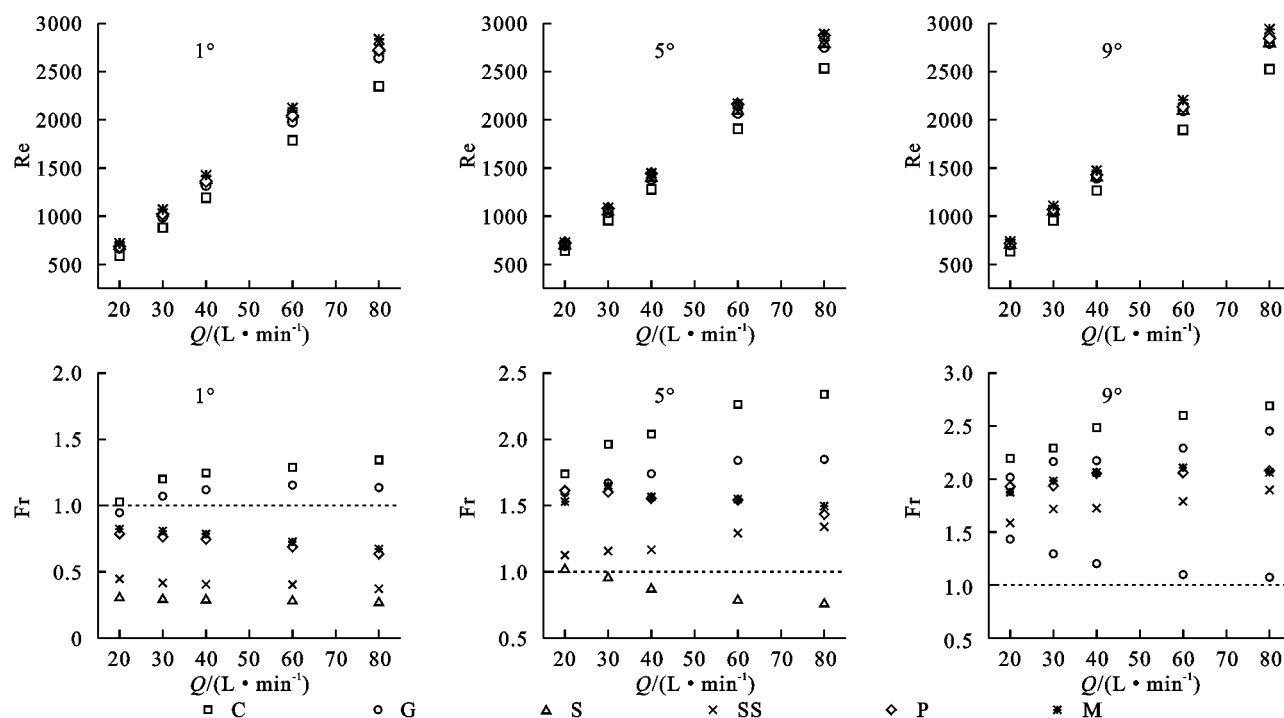


图 6 不同植被组合覆盖下雷诺数、弗劳德数变化

Fig. 6 Variation diagram of Reynolds number and Froude number under different vegetation combinations

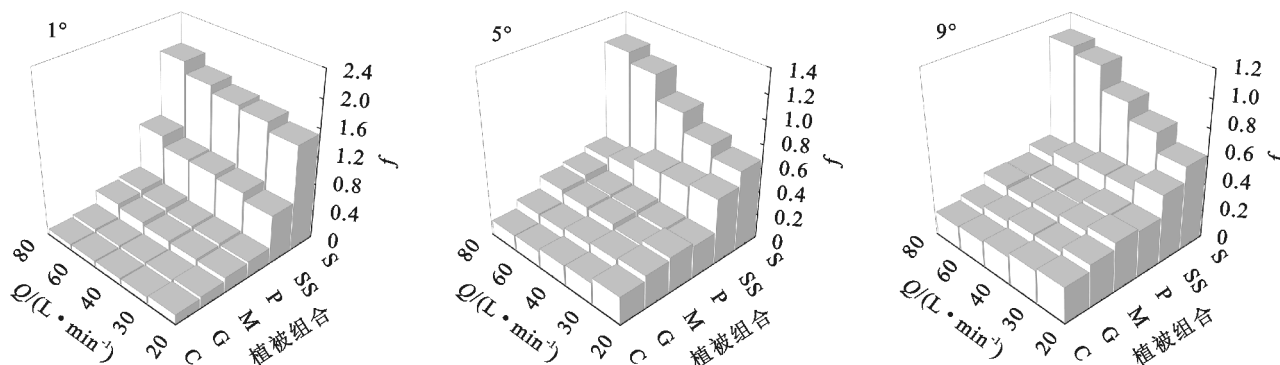


图 7 不同植被组合覆盖下阻力系数随流量变化

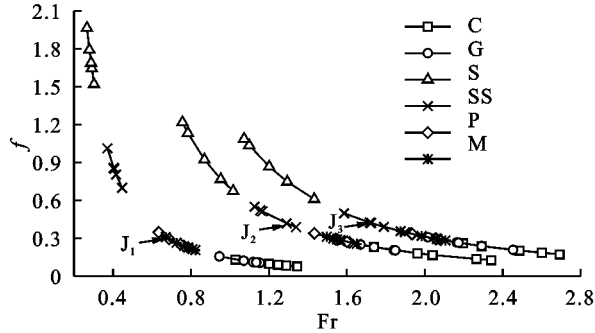
Fig. 7 Resistance change diagram under different vegetation combinations

由公式(2)和公式(4)可知阻力系数与弗劳德数呈幂函数关系,且受宽深比及坡度的影响。由图 8 可知,随弗劳德数增大,水流紊动性增强,植被对水流的作用逐渐减弱,阻力系数减小,且随着坡度增加,达到相同阻力系数时的弗劳德数更大,说明随坡度增大,阻力系数下降趋势逐渐变缓,各植被组合阻水缓流效应变差。

2.3.2 阻力构成 根据前面植被组合对水动力特性变化规律的影响,认为粗糙元间可能存在干扰作用,从而产生附加阻力。以 5° 为例,由图 9 可知,单一植被覆盖时,阻力主要由颗粒阻力和植被阻力构成,随流量增大

植被阻力占比逐渐增大;灌木组所提供的阻力较草被组的大,且小直径灌木所能提供的阻力比大直径组的更多;灌草交错组合覆盖时,阻力构成主要包括颗粒阻力、草被阻力、灌木阻力和附加阻力,且附加阻力有正有负(表 4—5);灌草交错组合覆盖坡面颗粒阻力占比最大,随流量增大,颗粒阻力占比逐渐减小,附加阻力逐渐增大,且附加阻力随流量增大由负作用逐渐变为正向作用;P 组覆盖坡面植被阻力主要由灌木提供,M 组覆盖主要由草被提供,且随流量增大,主要提供阻力的植被所提供的阻力呈增大趋势。当坡度

为 1° 时,各部分阻力占比变化规律(图10)与坡度为 5° 时相似,但附加阻力都为正数,即灌草交错布设时相互作用产生的干扰可以加强水流阻力;当坡度为 9° 时,各阻力构成占比(图11)与坡度为 5° 时类似。



注: J_1 为坡度为 1° 时工况; J_2 为坡度为 5° 时工况; J_3 为坡度为 9° 时工况。

图8 阻力系数与弗劳德数的变化关系

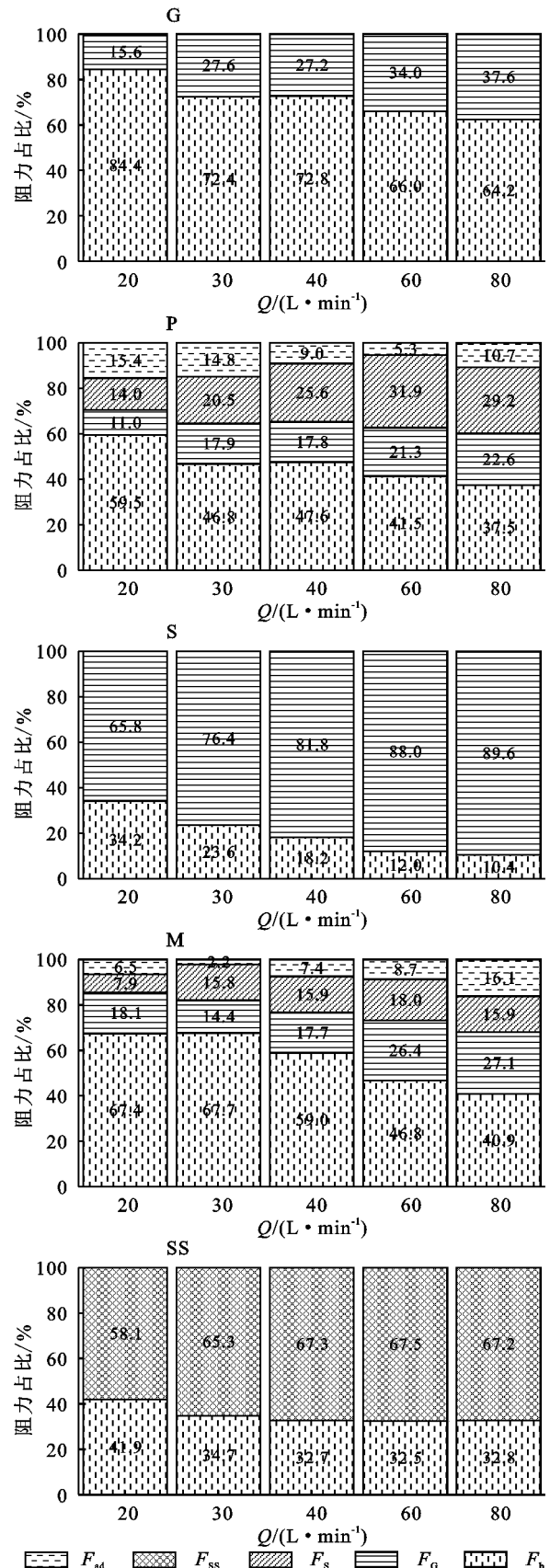
Fig. 8 Relationship between resistance coefficient and Froude number

3 讨论

植被组合显著影响水深和平均流速的变化特征,小直径单一灌木组缓流阻水效果最好,是由于相同盖度条件下,小直径灌木株数多,其迎水面积更大,所能提供的阻力更多;相较于小直径灌木组,大直径灌木圆柱绕流现象更加明显,圆柱两侧漩涡宽度更大,随着涡旋交替脱落,加强水体紊动强度^[8],且相邻两株植被间距更大,有效水流宽度更大,所能提供的阻力有限,即其阻水效应更差。

水深与坡度呈负相关关系,流速与坡度呈正相关关系,说明坡度的变化会影响水流势能,对流速和水深造成一定影响,且变化贡献与流量影响相当,结果与刘文剑^[7]、曹颖^[21]等研究相同。施明新等^[26]认为存在临界坡度划分坡度因子对流速变化影响大小,在本试验中当坡度在 6° 左右不存在临界坡度,可能是由于本试验为相同覆盖度的不同植被组合,覆盖植被的组合格局也会对临界坡度造成一定影响。

植被覆盖坡面水流流态趋向于缓流,但紊动强度增加,灌草交错覆盖坡面流态指数最大,是由于植被的存在具有一定的缓流作用,同时增大了水流与粗糙单元相互碰撞几率,水流结构发生改变,导致水流紊动性增强^[10]。不同植被组合覆盖坡面流随坡度变化流速增加较小,是由于流深增大,植被迎水面增加,对水流的拖曳力也增加,水流能量转化为阻力做功占主导地位,更少的转化为流速部分^[27],相同植被盖度下,坡度对流速影响贡献相同,即随坡度增加,紊动耗能加剧,水流流速增幅减小。



注: F_b 为颗粒阻力; F_G 为草被所提供的阻力; F_s 为灌木($d=16\text{ mm}$)所提供的阻力; F_{ss} 为灌木($d=32\text{ mm}$)所提供的阻力; F_{ad} 为附加阻力。

图9 不同植被组合覆盖下,坡度为 5° 时,各阻力构成
Fig. 9 Composition of resistance under different vegetation combinations when the slope is 5°

表 4 灌草单行交错植被覆盖下各阻力与总阻力的比值

Table 4 Ratio of resistance to total resistance under single-row staggered vegetation cover

坡度/ (°)	流量/ (L·min ⁻¹)	总阻力	颗粒阻力值比值/%		草被阻力值比值/%		灌木阻力值比值/%		附加阻力值比值/%	
1	20	0.2262	0.1320	58.35	0.0240	10.60	0.0514	22.70	0.0189	8.35
	30	0.2399	0.0969	40.40	0.0249	10.38	0.0822	34.28	0.0358	14.94
	40	0.2516	0.0898	35.69	0.0217	8.61	0.0819	32.57	0.0582	23.13
	60	0.2949	0.0840	28.49	0.0208	7.05	0.0806	27.33	0.1095	37.12
	80	0.3467	0.0772	22.26	0.0311	8.96	0.0822	23.72	0.1562	45.06
5	20	0.2677	0.2306	86.13	0.0425	15.89	0.0544	20.31	-0.0598	-22.34
	30	0.2720	0.1810	66.55	0.0690	25.38	0.0792	29.14	-0.0573	-21.07
	40	0.2890	0.1677	58.03	0.0627	21.69	0.0903	31.26	-0.0317	-10.98
	60	0.2933	0.1359	46.36	0.0699	23.83	0.1047	35.72	-0.0173	-5.90
	80	0.3394	0.1272	37.49	0.0768	22.63	0.0990	29.16	0.0364	10.71
9	20	0.3361	0.2594	77.18	0.0483	14.37	0.1071	31.87	-0.0787	-23.42
	30	0.3341	0.2382	71.30	0.0422	12.63	0.1007	30.13	-0.0470	-14.06
	40	0.2966	0.2025	68.26	0.0625	21.07	0.0653	22.02	-0.0337	-11.35
	60	0.2954	0.1851	62.65	0.0531	17.98	0.0670	22.68	-0.0098	-3.31
	80	0.2897	0.1728	59.65	0.0352	12.14	0.0706	24.37	0.0111	3.84

表 5 灌草块状交错植被覆盖下各阻力与总阻力的比值

Table 5 Ratio of resistance to total resistance under shrub-grass staggered vegetation cover

坡度/ (°)	流量/ (L·min ⁻¹)	总阻力	颗粒阻力值比值/%		草被阻力值比值/%		灌木阻力值比值/%		附加阻力值比值/%	
1	20	0.2064	0.1320	63.95	0.0289	14.00	0.0257	12.44	0.0198	9.61
	30	0.2136	0.0969	45.36	0.0437	20.45	0.0411	19.25	0.0319	14.94
	40	0.2265	0.0898	39.65	0.0591	26.08	0.0410	18.09	0.0366	16.18
	60	0.2644	0.0840	31.79	0.0684	25.87	0.0403	15.25	0.0716	27.09
	80	0.3097	0.0772	24.93	0.0852	27.51	0.0411	13.28	0.1062	34.28
5	20	0.2975	0.2306	77.51	0.0621	20.87	0.0272	9.14	-0.0224	-7.52
	30	0.2557	0.1810	70.77	0.0384	15.02	0.0422	16.49	-0.0058	-2.29
	40	0.2844	0.1677	58.97	0.0503	17.70	0.0452	15.89	0.0212	7.45
	60	0.2905	0.1359	46.80	0.0768	26.44	0.0524	18.03	0.0254	8.73
	80	0.3113	0.1272	40.88	0.0843	27.09	0.0495	15.90	0.0502	16.14
9	20	0.3558	0.2594	72.92	0.0689	19.35	0.0536	15.06	-0.0261	-7.32
	30	0.3182	0.2382	74.87	0.0614	19.31	0.0384	12.08	-0.0205	-6.45
	40	0.2942	0.2025	68.82	0.0567	19.26	0.0327	11.10	0.0024	0.81
	60	0.2822	0.1851	65.59	0.0600	21.28	0.0335	11.87	0.0035	1.25
	80	0.2939	0.1728	58.78	0.0627	21.32	0.0323	11.01	0.0261	8.90

阻力系数与流量及坡度无显著关系($p<0.05$),即阻力系数变化规律与流量及坡度相关性不强,是由于植被的存在,使得水流出现水跃现象及局部掺气现象加剧^[9],水流紊动加强,导致阻力系数变化随流量变化无显著相关关系。不同植被组合覆盖坡面阻力系数表现为单一灌木组>灌草交错组>单一草被组>裸坡,灌木组呈现出较好的阻水缓流能力,这与孟铨铨等^[20]在模拟不同植被类型及空间配置对坡面流阻力影响试验中发现草被覆盖的坡面增阻效果更好存在差异,原因可能是本试验模拟草被材料存在差异,也可能是胡静等^[19]认为存在临界覆盖度使得坡面流水力特性前后变化规律存在差异。

在本试验中各部分阻力贡献占比具有一定变化规律,受植被类型、植被茎秆直径、植被组合方式和坡度等共同影响^[28]。当坡面上存在多种植被时,坡面阻力不是颗粒阻力和形态阻力简单地线性叠加,坡面上粗糙单元间存在交互干扰,即存在附加阻力,试验结果与马岚等^[29]研究结果相同,且本试验中附加阻力随坡度增大出现减弱水流阻力作用,随流量增大又逐渐变为正向作用加强水流阻力,其原因可能是在低流量条件下,随坡度增大,水流与植被碰撞产生绕流,在植被两侧形成漩涡,加强了后续水流紊动,随流量增大,水流更急,水层更厚,两侧漩涡更快速地破碎替换,附加阻力逐渐转变为正向作用。

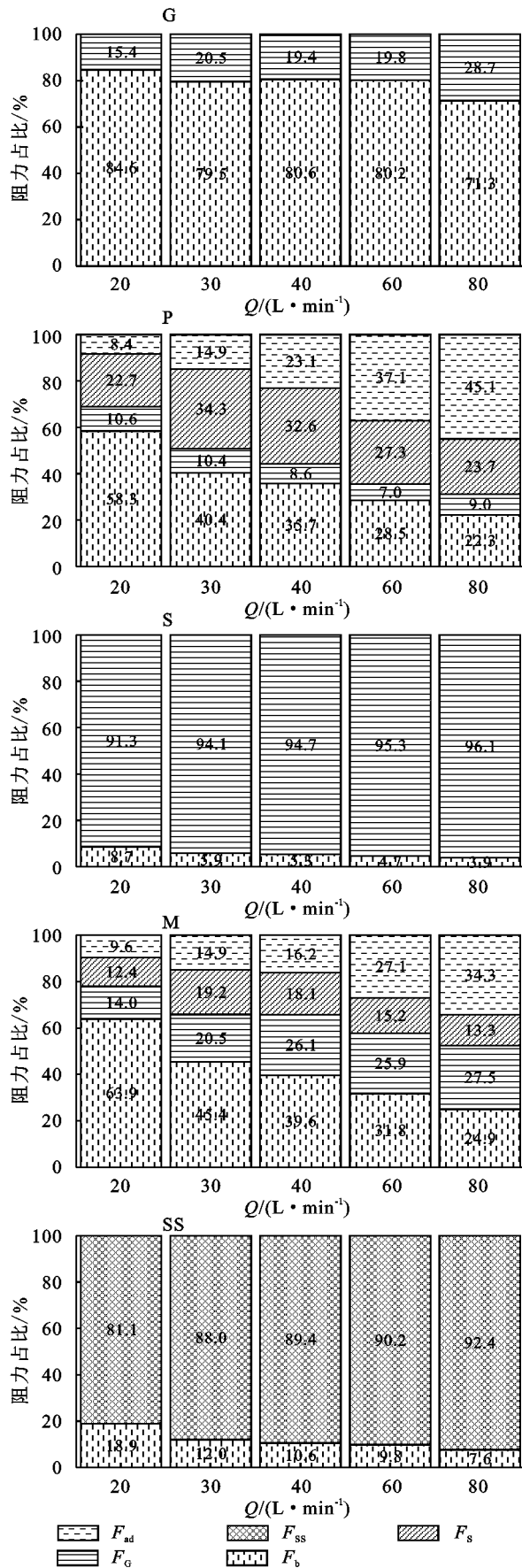


图 10 不同植被组合覆盖下,坡度为 1°时,各阻力构成
Fig. 10 Composition of resistance under different vegetation combinations when the slope is 1°

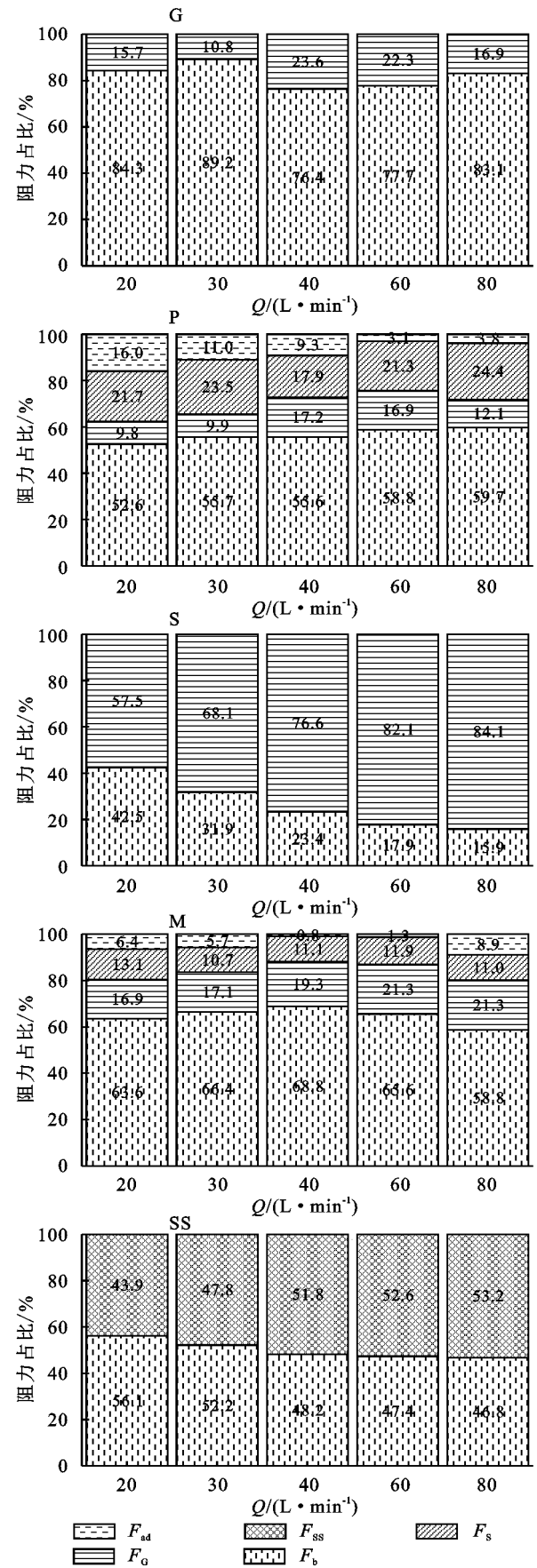


图 11 不同植被组合覆盖下,坡度为 9°时,各阻力构成
Fig. 11 Composition of resistance under different vegetation combinations when the slope is 9°

4 结论

(1) 植被组合覆盖对坡面水深、平均流速、流型和阻力系数均有显著影响。所有布设方式中,小直径($d=16\text{ mm}$)单一灌木组阻水缓流效果最好,灌草交错组合阻水效果相似。

(2) 不同植被组合水流集中分布在过渡流区,植被组合对雷诺数无显著影响,主要受流量变化影响;弗劳德数受植被组合和坡度共同影响。植被覆盖坡面水流紊动性增强,不同植被组合覆盖坡面紊动强度表现为灌草组合>单一植被>裸坡。

(3) 单一植被覆盖时,坡面阻力主要由颗粒阻力和植被阻力所构成;植被交错覆盖时,坡面阻力包括颗粒阻力、植被阻力及附加阻力,随流量和坡度增大颗粒阻力逐渐减小,主要植被所提供阻力逐渐增加,附加阻力逐渐增大,且附加阻力出现由负面作用转变为正向作用的变化规律。

参考文献(References):

- [1] Kinnell P I A. Modeling of the effect of flow depth on sediment discharged by rain-impacted flows from sheet and interrill erosion areas: A review[J]. Hydrological Processes, 2013,27(18):2567-2578.
- [2] 汪邦稳,夏小林,段剑.侵蚀地形对马尾松林下土壤特性的影响[J].土壤学报,2016,53(3):808-819.
Wang B W, Xia X L, Duan J. Effects of erosional landform on soil properties under *Pinus massoniana* forest [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016,53(3):808-819.
- [3] Ding W, Li M. Effects of grass coverage and distribution patterns on erosion and overland flow hydraulic characteristics[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(6):1-14.
- [4] Pan C, Ma L, Wainwright J, et al. Overland flow resistances on varying slope gradients and partitioning on grassed slopes under simulated rainfall[J]. Water Resources Research, 2016,52(4):2490-2512.
- [5] Vargas-Luna A, Crosato A, Uijttewaalt W S J. Effects of vegetation on flow and sediment transport: Comparative analyses and validation of predicting models[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015,40(2): 157-176.
- [6] 梁潇瑜,信忠保,夏晓平.植被类型对河岸带坡面流水动力特性的影响[J].水土保持研究,2023,30(1):113-119.
Liang X Y, Xin Z B, Xia X P. Influence of vegetation types on the hydrodynamic characteristics of overland flow on slopes in riparian zone[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(1):113-119.
- [7] 刘文剑,张会兰,王玉杰,等.模拟植被地表覆盖率和粗糙度对坡面流水动力特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):1-7.
Liu W J, Zhang H L, Wang Y J, et al. Effect of simulate vegetation coverage and surface roughness on hydrodynamics of overland flows[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(6):1-7.
- [8] Zhang J, Zhang S, Chen S, et al. Overland flow resistance law under sparse stem vegetation coverage [J]. Water, 2021,13(12):1657.
- [9] 杨帆,张宽地,杨明义,等.植物茎秆影响坡面径流水动力学特性研究[J].泥沙研究,2016(4):22-27.
Yang F, Zhang K, Yang M, et al. Experimental study on hydraulic characteristics of flow under vegetation stem[J]. Journal of Sediment Research, 2016(4):22-27.
- [10] 杨坪坪,张会兰,王云琦,等.植被覆盖度与空间格局对坡面流水动力学特性的影响[J].水土保持学报,2016, 30(2):26-33.
Yang P P, Zhang H L, Wang Y Q, et al. Effects of vegetation coverage and spatial distribution pattern on hydrodynamic characteristics of overland flow [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(2): 26-33.
- [11] 杨树云,张铁钢,张展,等.工程堆积体坡面不同植被格局的控蚀效果研究[J].水土保持学报,2022,36(4): 121-127.
Yang S Y, Zhang T G, Zhang Z, et al. Study on erosion control effect of different vegetation patterns on slope surface of engineering accumulation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(4):121-127.
- [12] Li C, Pan C. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hill-slope under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2018,558:90-103.
- [13] Zhang J, Zhang S, Wang C, et al. Influence of combined stem vegetation distribution and discretization on the hydraulic characteristics of overland flow[J]. Journal of Cleaner Production, 2022,376:134188.
- [14] 占顺.砾石覆盖对坡面流水动力学特性试验研究[D].武汉:华中农业大学,2015.
Zhan S. Effects of Rock Fragment Cover on Hydraulics by Overland Flow[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [15] 朱慧鑫,胡晓静,程金花,等.草被覆盖下坡面流土壤侵蚀水动力学特征[J].东北农业大学学报,2018,49(7): 48-57.

- Zhu H X, Hu X J, Cheng J H, et al. Hydrodynamic characteristics of soil erosion in overland flow under grass coverage[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018,49(7):48-57.
- [16] 薛梦华,马岚,刘京晶,等.不同草被格局下的坡面流体力学特性[J].水土保持学报,2021,35(3):23-29.
- Xue M H, Ma L, Liu J J, et al. Hydraulic characteristics of overland flow under different vegetation patterns [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35 (3):23-29.
- [17] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Geological Society of America Bulletin, 1945,56(3):275-370.
- [18] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.坡面薄层水流水动力学特性试验[J].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[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(15):182-189.
- [19] 胡静,覃光华,王瑞滢,等.不同坡度及植被覆盖度下的坡面流特性数值模拟[J].水土保持学报,2022,36(3):37-43.
- Hu J, Qin G H, Wang R Y, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of overland flow under different slope and vegetation coverage[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(3):37-43.
- [20] 孟铖铖,张会兰,杨坪坪.模拟植被类型及空间配置对坡面流水动力学特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):50-56,78.
- Meng C C, Zhang H L, Yang P P. Effects of simulated vegetation types and spatial patterns on hydrodynamics of overland flow[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(2):50-56,78.
- [21] 曹颖,张光辉,唐科明,等.地表模拟覆盖率对坡面流阻力的影响[J].水土保持学报,2010,24(4):86-89.
- Cao Y, Zhang G H, Tang K M, et al. Impact of simulated surface cover on resistance coefficient of overland flow [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(4):86-89.
- [22] 张升堂.生态植被的坡面流阻力研究进展及若干问题思考[J].水利规划与设计,2023(3):82-86.
- Zhang S T. Research progress and some problems of slope flow resistance of ecological vegetation[J]. Water Resources Planning and Design, 2023(3):82-86.
- [23] Zhao F, Li H, Li C, et al. Analyzing the influence of landscape pattern change on ecological water requirements in an arid/semiarid region of China[J]. Journal of Hydrology, 2019,578:124098.
- [24] Pang Z, Yu X, Zha T, et al. Environmental relationships with the interannual and seasonal variation of soil respiration in a cedar (*Platycladus orientalis*) plantation in northern China[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2012,42(5):934-942.
- [25] 高晨烨,张宽地,杨明义.基于无量纲水流强度指标的坡面流输沙能力计算方法[J].农业工程学报,2018,34(17):134-142.
- Gao C Y, Zhang K D, Yang M Y. Overland flow sediment transport capacity calculation method based on non-dimensional flow intensity index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(17):134-142.
- [26] 施明新,吴发启,田国成.地表糙率对坡面流流速影响的试验研究[J].水力发电学报,2015,34(6):117-124.
- Shi M X, Wu F Q, Tian G C. Experimental study on effect of surface roughness on overland flow velocity [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34 (6):117-124.
- [27] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J].水科学进展,2014,25(6):825-834.
- Zhang K D, Wang G Q, Sun X M, et al. Hydraulic characteristic of overland flow under different vegetation coverage[J]. Advances in Water Science, 2014,25 (6):825-834.
- [28] Pan C, Ma L, Wainwright J. Particle selectivity of sediment deposited over grass barriers and the effect of rainfall[J]. Water Resources Research, 2016,52(10):7963-7979.
- [29] Ma L, Pan C, Liu J. Overland flow resistance and its components for slope surfaces covered with gravel and grass[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2022,10(2):273-283.