

不同草被格局下的坡面流水力学特性

薛梦华¹, 马 岚¹, 刘京晶², 张金阁¹, 孙 旭¹, 王福星¹, 张旸璇¹

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.水利部海河水利委员会海河流域水土保持监测中心站,天津 300170)

摘要: 通过室内放水冲刷试验,研究不同草被格局(随机格局、草方格、带状、斑块状及光滑玻璃对照)下的坡面流水力学特性变化。试验在8种流量(0.15,0.30,0.45,0.60,0.75,0.90,1.05,1.20 L/s)和3种坡度(3°,6°,9°)下进行。结果表明:(1)与光滑玻璃面相比,草被覆盖坡面可以雍高水位1.02~1.38倍,减缓流速6.52%~36.73%;随着流量和坡度的增大,流速呈幂函数递增($R^2>0.95$)。(2)雷诺数与流量间存在显著的线性正相关关系($R^2>0.99$),与坡度和草被格局无明显相关关系;草被覆盖可以有效降低坡面弗劳德数。(3)随流量和坡度的增大,草被覆盖下的坡面流型态从层流—缓流或急流过渡到紊流—急流。(4)随着流量的增大,坡面流阻力系数呈幂函数递减($R^2>0.86$),坡度对坡面流阻力系数无显著影响($p>0.05$)。(5)不同草被格局雍高水位的作用为随机格局>斑块状>草方格>带状,对流速的减缓作用为随机格局>带状>斑块状>草方格,坡面弗劳德数为斑块状>带状>草方格>随机格局,抗蚀能力为随机格局>草方格>带状>斑块状。

关键词: 坡面流;放水冲刷;草被格局;水力学特性

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)03-0023-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.03.004

Hydraulic Characteristics of Overland Flow Under Different Vegetation Patterns

XUE Menghua¹, MA Lan¹, LIU Jingjing², ZHANG Jin'ge¹, SUN Xu¹, WANG Fuxing¹, ZHANG Yixuan¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Haihe Basin Soil and Water Conservation Monitoring Center, Haihe River Water Conservancy Commission, MWR, Tianjin 300170)

Abstract: In order to study the changes of the hydraulic characteristics of overland flow, a series of laboratory flume simulation experiments were conducted on smooth and vegetated beds under three slope gradients, eight flow discharges and four vegetation spatial patterns. The results showed that: (1) The water level of grass covered slope was 1.02 ~ 1.38 times that of smooth glass slope, and the flow velocity was 6.52% ~ 36.73% slower than that of glass covered slope. With the increase of flow discharge and slope gradients, the velocity increased with a power function ($R^2>0.95$). (2) There was a significant linear positive correlation between Reynolds number and discharge ($R^2>0.99$), but no significant correlation between Reynolds number and slope gradient and grass cover pattern. Grass cover effectively reduced Froude number on slope. (3) With the increase of discharges and slope gradients, the overland flow pattern of grass-covered slope changed from laminar—slow or rapid flow to turbulent—rapid flow. (4) With the increase of discharges, the overland flow resistance coefficient decreased with a power function ($R^2>0.86$). Slope gradient had no significant effect on resistance coefficient ($p>0.05$). (5) The effect of raising water level was random pattern>patch>grass square>belt. The effect of slowing down velocity was random pattern>belt>patch>grass square. Froude number on slope was patch>belt>grass square>random pattern. The ability to resist erosion was random pattern>grass square>belt>patch.

Keywords: overland flow; water flushing; grass pattern; hydrodynamics

水土流失是我国的主要环境问题之一,为保护生态环境、防治水土流失,我国积极采取措施应对,其中植被生态恢复是控制水土流失最有效的措施之一。

坡面植被的覆盖可以防止雨滴击溅,减少径流冲刷,根系可直接固持土体,枯落物及其形成的物质可以改变地表径流的条件和性质,减小流速,促进下渗水分

收稿日期:2020-12-15

资助项目:国家自然科学基金项目(51779004,42077059)

第一作者:薛梦华(1997—),女,山西运城人,在读硕士研究生,主要从事坡面水文研究。E-mail:menghuaxue123@163.com

通信作者:马岚(1981—),女,陕西汉中,博士,副教授,硕士生导师,主要从事坡面水文与水土保持研究。E-mail:mlpcz@sina.com

的增加,从而减少水土流失^[1]。近年来国内外学者对植被覆盖下的坡面流水力学特性研究较多,且研究多集中在植被类型^[2-3]、植被覆盖度^[4-5]、植被枯枝落叶层等^[6-8]方面,但植被格局对坡面流水力学特性的影响目前尚不明确。

为了有效防治水土流失,不仅要选择合适的植物物种及其搭配,植被的空间布局设计也很重要^[9]。在缓坡条件下,植被格局对坡面流阻力的影响远大于植被覆盖度^[10],其对坡面的减蚀减沙作用也很明显^[11-13]。由于植被格局的多样性、试验条件和计算方法等的差异,不同学者的研究结果多样^[14-15],且坡面流水深较浅,极易受坡度、流量、地表状况、下垫面等因素的影响^[16],至今尚无明确定论。

自然界植被多以随机布设为主,而人工种植的草被多以草方格为主,在黄土高原等生态系统严重破坏的地区,植被多以随机的斑块布局为主,在生态系统破坏较轻的地区,植被布局以带状为主^[9]。基于此,本文采用室内模拟冲刷试验,系统研究草被格局在不同的坡度和流量下对坡面流水力学特性的影响,以期 为坡面植被的建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

本文采用室内定床冲刷装置进行人工模拟试验,装置由供水系统、流量控制系统、稳流箱、平水设施、试验水槽 5 部分组成,试验采用长 2.3 m,宽 0.6 m,深 0.15 m 的自制水槽,坡度可调范围为 0~15°。水槽有效长度为 2.1 m,将水槽坡面从上到下均匀地划分成 3 个坡段,每段长 0.7 m。在每个坡段中间断面横向均匀的取 3 个测量点,相邻两点间距 0.15 m,整个坡面共 9 个测量点(图 1)。鉴于水流在冲刷土壤坡面过程中,不可避免地携带部分土壤而成为含沙水

流,从而使水力学特性发生改变,同时土壤坡面上经常会形成细沟,细沟存在以及土壤的质地、种类等均会对坡面流水力学特性造成一定的影响,因此,为消除土壤因素对试验结果的干扰,而单纯探讨植被格局对坡面流水力学特性的影响,本研究在水槽底部装有 6 mm 厚的光滑玻璃,所有处理均在光滑玻璃面进行。试验所用到的材料和仪器包括高度为 3 cm 的人工草、黏合剂、坡度规、水平尺、精度为 0.01 mm 的数显测针和精度为 0.1 ℃ 的温度计。

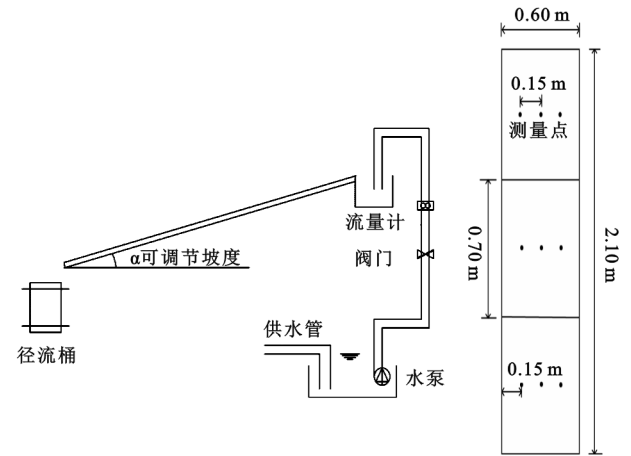


图 1 试验装置及点位布设示意

1.2 试验设计

本试验采用自然界常见的随机格局、草方格、带状格局、斑块状格局(图 2)与光滑玻璃面形成对照,所有草被格局均采用同一种覆盖度,通过实地调查以及覆盖度对坡面流阻力影响的研究结果^[17],选取 20% 为本试验覆盖度;坡度设置为 3 个缓坡坡度:3°,6°,9°;依据自然界实际调查情况,参考已有研究^[17]中的流量梯度,结合试验条件,设置 8 组流量,分别为 0.15,0.30,0.45,0.60,0.75,0.90,1.05,1.20 L/s。

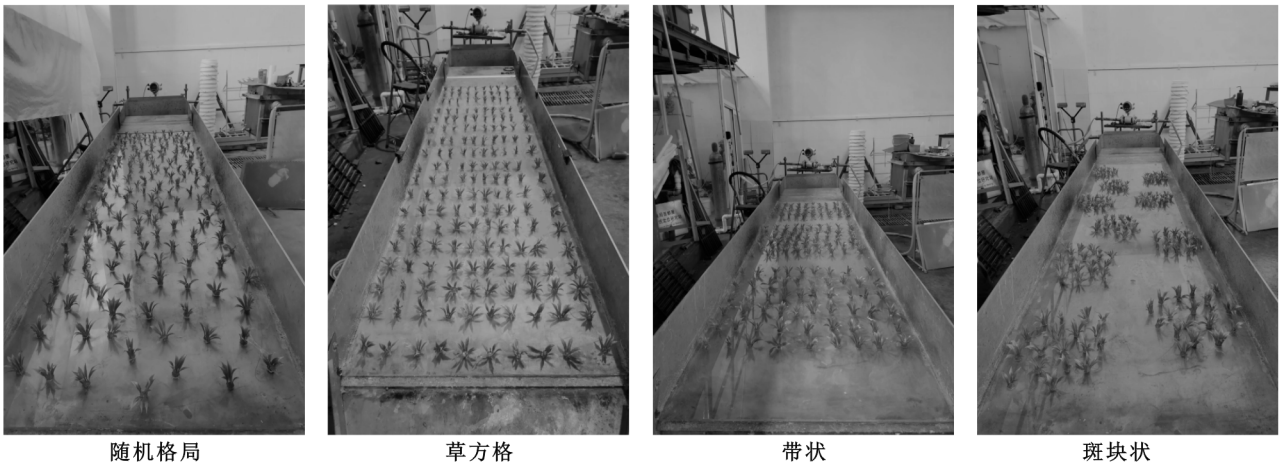


图 2 草被格局布设

1.3 试验步骤

试验于 2020 年 9 月 5 日至 10 月 19 日在北京林业大学鹫峰人工模拟降雨大厅进行,试验开始前调整

坡度,用坡度规测量以确保达到试验所需坡度,之后使用水平尺校正以保证水槽坡面平整,若有一方偏低,则使用人工千斤顶将坡面抬到同一高度;流量通

过电磁流量计确定,每次试验前将流量计调到试验所需流量,待出水稳定后,用数显测针分别测得水面高度与水底高度,相减得水深;用温度计测量水温,以计算水流黏滞系数。

1.4 参数计算

1.4.1 平均流速 流速是研究坡面流的重要参数,也是计算其他水力学参数的基础。采用连续性方程计算断面平均流速,计算公式为:

$$V = \frac{Q}{hb} \quad (1)$$

式中: V 为断面平均流速(m/s); Q 为放水流量(L/s); h 为实测断面水深(m); b 为有效过流宽度(m),由于本研究采用的人工草根茎较小,草被覆盖几乎不会导致过流宽度减小,因此本试验的有效过流宽度取水槽宽度0.6 m。

1.4.2 雷诺数和弗劳德数 雷诺数(Re)是判断水流流态的核心参数,以 $Re < 500$ 为层流, $500 \leq Re \leq 2000$ 为过渡流, $Re > 2000$ 为紊流,计算公式为:

$$Re = \frac{VR}{v} \quad (2)$$

$$v = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (3)$$

式中: R 为水力半径(m),薄层水流的水力半径近似等于断面水深 h ; v 为水流运动黏滞系数(m^2/s); t 为水温($^{\circ}C$)。

弗劳德数(Fr)反映了水流的惯性力和重力之比,当 $Fr = 1$ 时,水的重力等于惯性力,水流为临界流, $Fr < 1$ 水流为缓流, $Fr > 1$ 水流为急流,计算公式为:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度,取值 $9.8 m/s^2$ 。

1.4.3 阻力系数 Darcy-Weisbach阻力系数 f 反映了下垫面对流动水体的阻力大小,计算公式为:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (5)$$

式中: J 为水流能坡, $J = \sin \theta$, θ 为水槽坡度($^{\circ}$)。

2 结果与分析

2.1 不同草被格局下水深、流速变化

从图3可以看出,无论是否有草被覆盖,坡面流水深随流量的增大而增大,随坡度的增大而减小,草被覆盖坡面水深最高可达0.52 cm;平均流速随流量和坡度的增大而增大,光滑玻璃面的平均流速最高可达0.69 m/s;草被覆盖坡面水深均大于光滑玻璃面,流速均小于光滑玻璃面,这说明草被覆盖可以有效的雍高水位,减缓流速。

方差分析显示,草方格、带状、斑块状格局间水深、流速均无显著差异($p > 0.05$),与随机格局坡面对照差异明显($p < 0.05$),随机格局坡面的水深最大,流速最小,说明随机格局较其他格局而言有更好的雍高水位和减缓流速的作用,其原因可能是随机格局分布较不均匀,水流流经坡面时会有更多迂回的流动路径,能量耗散大,从而导致流速更大程度地降低,坡度和流量一定时,流速减缓必然会导致水深增加。不同

草被格局下的水位升高倍数计算公式为: $n = \frac{h_g}{h_0}$ 。式中:

n 为水位升高倍数; h_g 为草被坡面水深(m); h_0 为光滑玻璃面水深(m);不同草被格局下流速的延缓率计算公式为: $P = \frac{V_0 - V_g}{V_0} \times 100\%$ [18]。式中: V_0 为光滑玻璃面平均流速(m/s); V_g 为草被坡面平均流速(m/s)。 P 越大,表明对流速的延缓效果越好。各草被格局的雍高水位、减缓流速率见表1。从表1可以看出,雍高水位的作用为随机格局>斑块状>草方格>带状,对流速的减缓作用为随机格局>带状>斑块状>草方格。

2.2 不同草被格局下坡面流型态变化

从表2可以看出,各草被格局间坡面流雷诺数无显著差异,雷诺数随流量的增大呈线性增加趋势($R^2 > 0.99$);无论是否有草被覆盖,流量为0.15 L/s时,流态为层流,流量介于0.30~1.05 L/s时,为过渡流,流量为1.20 L/s时,流态为紊流。流量越大,水流紊动性越强,与坡度并无明显的相关关系。

从图4可以看出,弗劳德数随流量和坡度的增大整体呈增加趋势,草被覆盖坡面的弗劳德数均低于光滑玻璃面,说明草被存在可以有效降低坡面弗劳德数,这与杨坪坪等[19]的研究结果一致。不论坡度大小,光滑玻璃面流型均为急流;3°坡面流量为0.15 L/s时,草被覆盖坡面均为缓流,流量大于0.15 L/s时均为急流;6°坡面流量为0.15 L/s时,带状和斑块状布局流型变为急流;9°坡面流型均为急流,可见坡度和流量对弗劳德数均有显著影响($p < 0.05$),且坡度对弗劳德数的影响较大,坡度越大,水流流型越容易出现急流。

方差分析显示,随机格局与草方格坡面弗劳德数无显著差异($p > 0.05$),带状与斑块状格局坡面弗劳德数无显著差异($p > 0.05$),但前2种格局与后2种格局间的弗劳德数差异明显($p < 0.05$),坡面弗劳德数为斑块状>带状>草方格>随机格局。原因可能是随机格局与草方格坡面草被分布范围广,裸露坡面比较破碎,而带状与斑块状格局都为草被与裸地镶

嵌,裸露坡面分布集中,水流流经无草被覆盖坡段时

水流阻力小,紊动性较强。

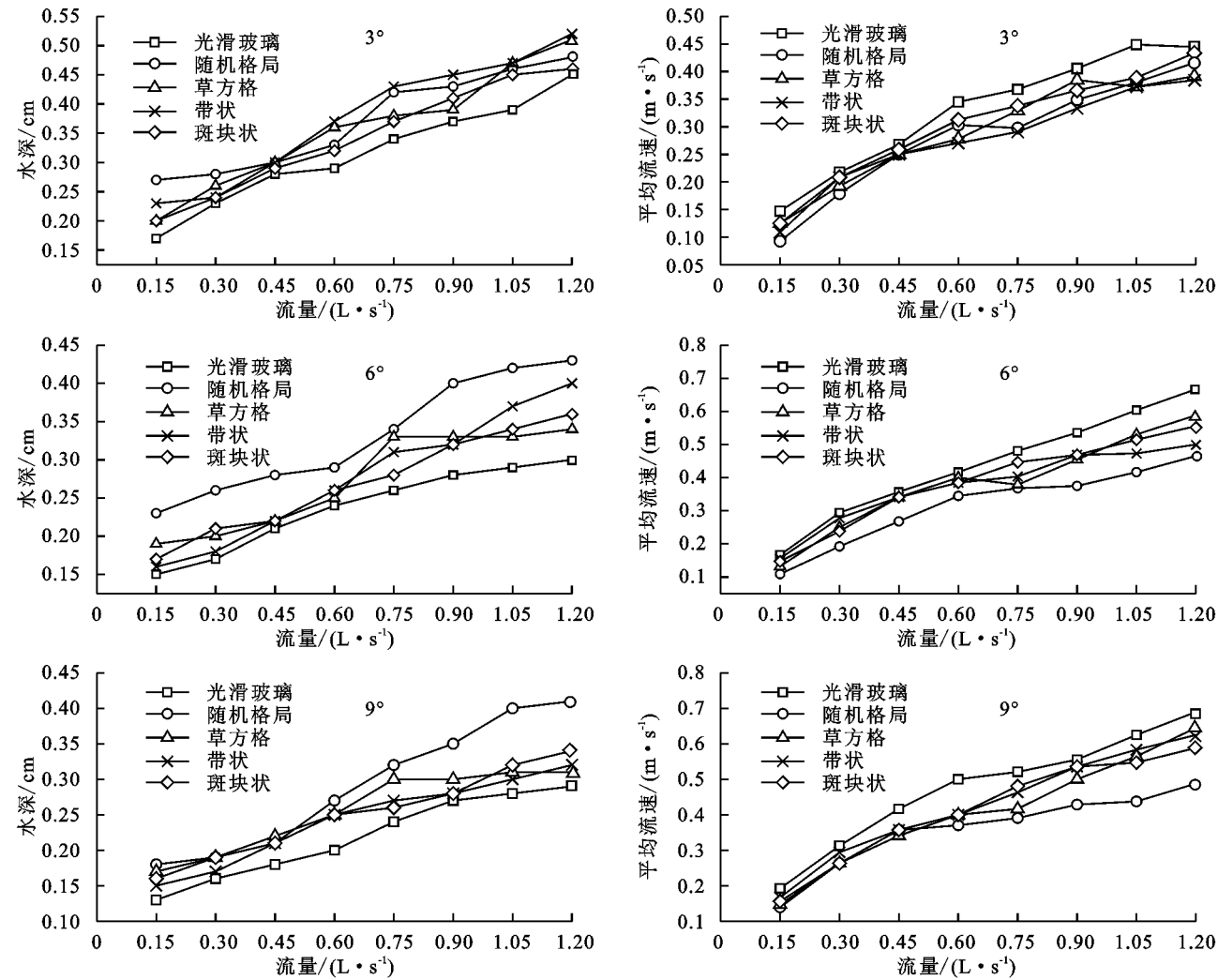


图 3 不同草被格局下水深、流速变化趋势

表 1 不同草被格局雍高水位、减缓流速率

指标	随机格局	草方格	带状	斑块状
水位升高倍数	1.07~1.38	1.13~1.31	1.15~1.16	1.02~1.23
流速延缓率/%	29.28~36.73	6.52~14.97	9.42~25.85	14.78~14.97

表 2 不同草被格局下坡面水流雷诺数

草被格局	坡度/(°)	0.15 L/s	0.30 L/s	0.45 L/s	0.60 L/s	0.75 L/s	0.90 L/s	1.05 L/s	1.20 L/s
光滑玻璃面	3	260.333	520.666	780.999	1041.332	1301.665	1561.998	1822.331	2082.664
	6	260.333	520.666	780.999	1041.332	1301.665	1561.998	1822.331	2082.664
	9	260.333	520.666	780.999	1041.332	1301.665	1561.998	1822.331	2082.664
随机格局	3	263.399	526.798	790.196	1053.595	1316.994	1580.393	1843.791	2107.190
	6	263.399	526.798	790.196	1053.595	1316.994	1580.393	1843.791	2107.190
	9	263.399	526.798	790.196	1053.595	1316.994	1580.393	1843.791	2107.190
草方格	3	260.333	520.666	780.999	1041.332	1301.665	1561.998	1822.331	2082.664
	6	260.333	520.666	780.999	1041.332	1301.665	1561.998	1822.331	2082.664
	9	260.333	520.666	780.999	1041.332	1301.665	1561.998	1822.331	2082.664
带状	3	260.333	520.666	780.999	1041.332	1301.665	1561.998	1822.331	2082.664
	6	260.333	520.666	780.999	1041.332	1301.665	1561.998	1822.331	2082.664
	9	260.333	520.666	780.999	1041.332	1301.665	1561.998	1822.331	2082.664
斑块状	3	260.333	520.666	780.999	1041.332	1301.665	1561.998	1822.331	2082.664
	6	260.333	520.666	780.999	1041.332	1301.665	1561.998	1822.331	2082.664
	9	260.333	520.666	780.999	1041.332	1301.665	1561.998	1822.331	2082.664

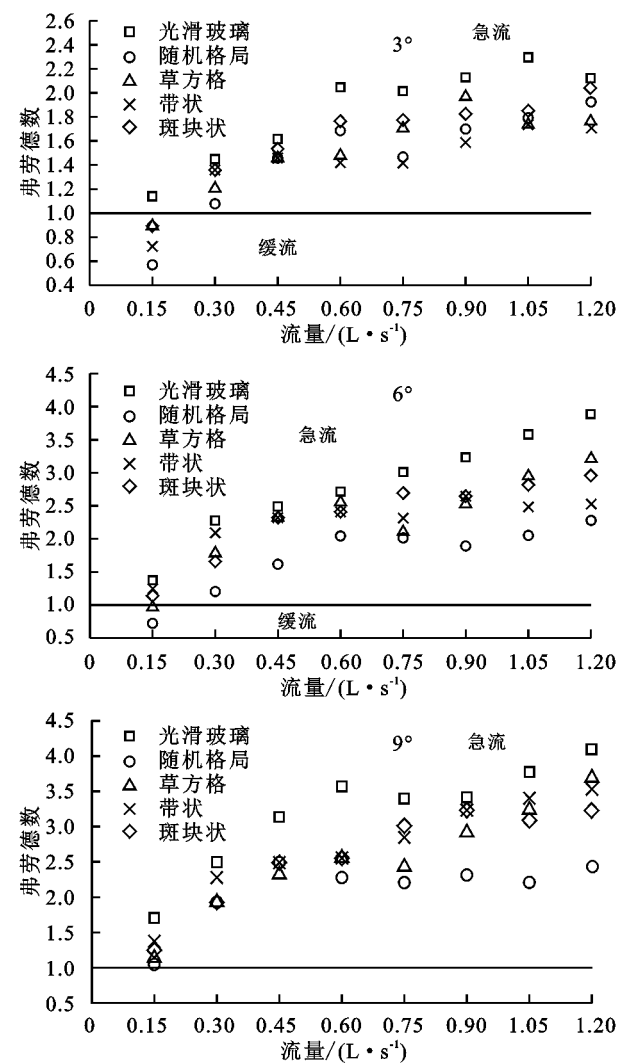


图 4 不同草被格局下弗劳德数变化趋势

2.3 不同草被格局下坡面流阻力系数变化

Darcy-Weisbach 阻力系数 f 反映了下垫面对流动水体的阻力大小,在流量、坡度等因素相同时, f 越大,水流克服阻力消耗的能量就越多,用于侵蚀和泥沙输移的能量就越少,土壤侵蚀越弱^[20]。本研究中不论是否有草被覆盖,坡面流阻力系数随流量的增加呈减小趋势;光滑玻璃面的坡面流阻力系数变化范围在 0.06~0.44,草被覆盖坡面的坡面流阻力系数变化范围在 0.08~1.60,草被覆盖坡面的阻力系数均大于光滑玻璃面(图 5),说明草被覆盖下坡面流克服阻力消耗的能量较光滑玻璃面大,其中随机格局的坡面流阻力系数最大,说明随机格局较其他格局而言有更好的抗蚀性。

方差分析结果显示,草方格和带状格局下的坡面流阻力系数无显著差异($p>0.05$),随机格局明显高于其他 3 种,斑块状格局最小(表 3),说明不同草被格局的抗蚀能力为随机格局>草方格>带状>斑块状;流量对坡面流阻力系数有显著影响($p<0.05$),坡度对坡面流阻力系数无显著影响($p>0.05$)。当流量

小于 0.3 L/s 时,不同草被格局下的坡面流阻力系数相差较大,流量大于 0.3 L/s 时,不同草被格局下的坡面流阻力系数差异逐渐减小,说明随着流量的增大,草被格局对坡面流阻力系数的影响逐渐减弱。

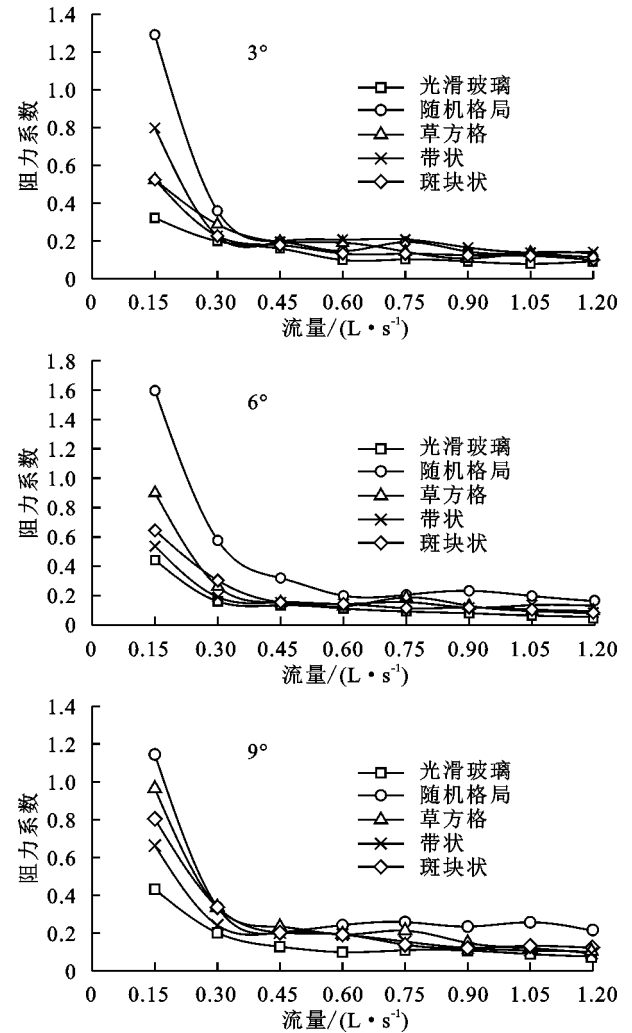


图 5 不同草被格局下坡面流阻力系数变化趋势

表 3 不同草被格局下坡面流阻力系数的基本描述统计量

植被格局	平均值	标准误差	95%置信区间	
			下限	上限
随机格局	0.331	0.023	0.286	0.376
草方格	0.285	0.023	0.240	0.330
带状	0.263	0.023	0.218	0.308
斑块状	0.258	0.023	0.213	0.303

3 讨论

对不同草被格局下的水深、流量和坡度进行相关分析发现,水深随流量和坡度的变化呈线性变化趋势($R^2>0.86$),与流量相比,坡度对水深的影响较大(表 4);传统水力学观点认为流速是流量和坡度的幂函数,采用公式 $V=kQ^mS^n$ ^[21] 对不同草被格局下的坡面流流速进行多元回归分析,得出流速、流量、坡度的定量表达式(表 5)。式中: V 为平均流速(m/s); k 为随坡面的表面特征而变化的系数; Q 为流量(L/s); S

为坡度的正弦值。本研究中 k 的变化范围为 $0.64\sim 1.18$,草被覆盖坡面 k 值均小于光滑玻璃面,这与余冰等^[22]的研究结果一致,随着坡面粗糙度的增加, k 呈减少趋势; m 、 n 的变化范围分别为 $0.54\sim 0.62$, $0.19\sim 0.38$,与江忠善等^[23]确定的 0.50 , 0.35 和余冰等^[22]的 $0.42\sim 0.59$, $0.21\sim 0.35$ 均较为接近;此外,本研究中 $m>n$,说明与坡度相比,流量对流速的影响较大。

表 4 水深—流量—坡度定量表达式

草被格局	表达式	R^2
光滑玻璃面	$h=0.229+0.185Q-0.963S$	0.91
随机格局	$h=0.258+0.227Q-0.800S$	0.96
草方格	$h=0.265+0.198Q-1.025S$	0.86
带状	$h=0.276+0.231Q-1.325S$	0.92
斑块状	$h=0.241+0.204Q-0.913S$	0.93

注: h 为坡面水深(cm); Q 为流量(L/s); S 为坡度的正弦值。

表 5 流速—流量—坡度定量表达式

草被格局	表达式	R^2
光滑玻璃面	$V=1.18Q^{0.57}S^{0.31}$	0.97
随机格局	$V=0.64Q^{0.55}S^{0.19}$	0.95
草方格	$V=0.97Q^{0.62}S^{0.30}$	0.96
带状	$V=1.12Q^{0.54}S^{0.38}$	0.98
斑块状	$V=0.91Q^{0.57}S^{0.27}$	0.98

注: V 为坡面平均流速(m/s); Q 为流量(L/s); S 为坡度的正弦值。

本研究中无草被覆盖坡面流型态包括层流—急流、过渡流—急流、紊流—急流,草被覆盖坡面流型态包括层流—缓流或急流、过渡流—急流、紊流—急流,而李勉等^[24]采用放水冲刷试验得出无草被覆盖坡面流型态为过渡流—缓流或急流,草被覆盖坡面流型态为层流—缓流、过渡流—缓流,其雷诺数和弗劳德数均小于本研究数值,原因可能是本研究试验均在光滑玻璃面进行,消除了土壤颗粒对坡面流的影响,水流阻力小,因而紊动剧烈。

不同流量下的坡面流阻力系数变化较大,分析结果表明,阻力系数随流量的增大呈幂函数减小($R^2>0.86$)(表 6)。总体来说,草被覆盖坡面幂指数的绝对值均大于同坡度下光滑玻璃面幂指数的绝对值,这说明草被覆盖坡面阻力系数随流量的变化较光滑玻璃面敏感,随着流量的增大,阻力系数递减得快。而张冠华等^[25]在动床条件下采用模拟降雨方法得出,与植被覆盖坡面相比,裸坡阻力系数随流量变化更加敏感。原因可能是本研究在光滑玻璃面进行放水冲刷,坡面只存在形态阻力,而张冠华等^[25]在动床条件下

进行人工降雨试验,坡面存在颗粒阻力、降雨阻力和形态阻力,此时的阻力系数是 3 种阻力的综合体现。

表 6 不同草被格局下坡面流阻力系数与流量关系表达式

草被格局	坡度/(°)	表达式	R^2
光滑玻璃面	3	$f=0.09Q^{-0.70}$	0.98
	6	$f=0.06Q^{-1.05}$	0.97
	9	$f=0.07Q^{-0.93}$	0.96
随机格局	3	$f=0.07Q^{-1.52}$	0.97
	6	$f=0.13Q^{-1.33}$	0.98
	9	$f=0.13Q^{-1.10}$	0.86
草方格	3	$f=0.12Q^{-0.77}$	0.97
	6	$f=0.07Q^{-1.36}$	0.95
	9	$f=0.10Q^{-1.18}$	0.97
带状	3	$f=0.11Q^{-1.02}$	0.88
	6	$f=0.10Q^{-0.87}$	0.87
	9	$f=0.10Q^{-0.99}$	0.95
斑块状	3	$f=0.09Q^{-0.88}$	0.96
	6	$f=0.09Q^{-1.06}$	0.98
	9	$f=0.10Q^{-1.09}$	0.98

注: f 为 Darcy-Weisbach 阻力系数; Q 为流量(L/s)。

4 结论

(1)草被格局对坡面水深、流速、流型和阻力系数均有显著影响。与其他格局相比,随机格局雍高水位和减缓流速的效果较好。水深与流量和坡度呈线性相关关系($R^2>0.86$),流速与流量和坡度呈幂函数关系($R^2>0.95$)。

(2)各草被格局下的坡面流雷诺数无显著差异,雷诺数与流量呈线性正相关关系,涵盖层流、过渡流、紊流 3 种。随机格局和草方格坡面弗劳德数差异不明显,但都低于带状和斑块状坡面,其中随机格局坡面水流紊动性较小。坡度较大时,水流流型均为急流。

(3)草被覆盖坡面的坡面流阻力系数变化范围在 $0.08\sim 1.60$,坡面流阻力最大是随机格局,最小是斑块状格局,各草被格局下阻力系数随流量的增大呈幂函数趋势减小($R^2>0.86$)。

(4)在进行植被建设的过程中,针对草被种植,随机布局是一种相对较好的选择。

参考文献:

[1] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等.植被与水土流失关系研究进展[J].生态学报,2006,26(9):3137-3143.
[2] 李少华,何丙辉,李天阳,等.生物埂不同植物类型下土壤分离水力学特性研究[J].中南林业科技大学学报,

- 2020,40(3):111-118.
- [3] Nicosia A, Di Stefano C, Pampalone V, et al. Testing a theoretical resistance law for overland flow under simulated rainfall with different types of vegetation [J]. *Catena*, 2020, 189: 1-8.
- [4] 唐科明, 张光辉, 曹颖. 动床条件下植被盖度对坡面流体力学特性的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(2): 148-154.
- [5] 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.
- [6] 孙佳美, 李瀚之, 赵阳, 等. 构树林下枯落物对坡面流体力学特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 102-105.
- [7] 李兆松, 王兵, 汪建芳, 等. 铁杆蒿与白羊草枯落物覆盖量对黄土坡面流水动力特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(17): 151-157.
- [8] 汪建芳, 王兵, 王忠禹, 等. 黄土高原典型植被枯落物坡面分布及持水特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 139-144.
- [9] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 12-22.
- [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体力学特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 26-33.
- [11] 张霞, 李鹏, 李占斌, 等. 不同植被格局下凸型坡径流流速时空变化及产沙研究[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 16-21.
- [12] Zhang S T, Zhang J Z, Liu Y C, et al. The effects of vegetation distribution pattern on overland flow [J]. *Water and Environment Journal*, 2018, 32(3): 392-403.
- [13] Zhao Q H, Zhang Y F, Xu S S, et al. Relationships between riparian vegetation pattern and the hydraulic characteristics of upslope runoff [J]. *Sustainability*, 2019, 11(10): 1-16.
- [14] 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.
- [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.
- [16] Ali M, Sterk G, Seeger M, et al. Effect of flow discharge and median grain size on mean flow velocity under overland flow [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 452/453: 150-160.
- [17] 刘京晶, 马岚, 黎俊佑, 等. 不同覆盖条件下坡面流体力学特征试验研究[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(8): 115-123.
- [18] Zhang G H, Liu G B, Wang G L, et al. Effects of patterned *Artemisia capillaris* on overland flow velocity under simulated rainfall [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(24): 3779-3787.
- [19] 杨坪坪, 张会兰, 王玉杰, 等. 刚性植被空间配置模式对坡面流体力学特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 90-95.
- [20] Ali M, Seeger M, Sterk G, et al. A unit stream power based sediment transport function for overland flow [J]. *Catena*, 2013, 101: 197-204.
- [21] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationships [J]. *Transactions of the ASAE*, 1984, 27(3): 790-796.
- [22] 余冰, 王军光, 蔡崇法, 等. 不同模拟糙度定床坡面集中水流水力学特性研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 50-54.
- [23] 江忠善, 宋文经. 坡面流速的试验研究[J]. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*, 1988, 7(1): 46-52.
- [24] 李勉, 姚文艺, 杨剑锋, 等. 草被覆盖对坡面流流态影响的人工模拟试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17(4): 513-523.
- [25] 张冠华, 刘国彬, 易亮. 植被格局对坡面流阻力影响的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 55-59, 109.