

坡面草被覆盖对侵蚀产沙影响的模拟试验

霍云霏¹, 朱冰冰²

(1.陕西学前师范学院 经济与管理学院, 西安 710100; 2.陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘要:为了探究坡面植被及其布设位置对坡面侵蚀动力过程的影响,通过室内放水冲刷试验,分析了不同植被覆盖度(0,30%,50%,70%,90%)和不同坡面覆盖位置(坡上、坡中和坡下)下的坡面产沙及其水动力学参数的变化。结果表明:植被覆盖度、径流动能、径流流速、弗汝德数、阻力系数、糙率系数、剪切力等与坡面侵蚀产沙量密切相关。随覆盖度的增加,径流流速、径流剪切力、单位水流功率和径流动能逐渐降低,曼宁糙率系数和阻力系数逐渐增加,产沙量呈直线下降。当覆盖度从 0 增长到 50%时,植被的减沙效益显著提高,当覆盖度增加到 70%时,植被保持水土的作用不随覆盖度的增加显著提高,不同坡面覆盖位置下坡面侵蚀产沙表现为植被位于坡面中下部的产沙量小于植被位于坡面上部的,可用包含植被覆盖度、单位水流功率和径流动能等参数建立的联合公式模拟预测坡面侵蚀产沙量。研究结果可为阐明植被减沙的临界盖度和合理位置以及黄土高原水土流失治理和黄河流域高质量发展提供参考。

关键词:坡面; 植被格局; 侵蚀产沙; 水动力学参数; 单位水流功率

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0014-07

Experimental Study on Impacts of Vegetation Patterns on Sediment Yield of Slope

HUO Yunpei¹, ZHU Bingbing²

(1.School of Economics and Management, Shaanxi Xueqian Normal University, Xi'an 710100, China; 2 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Understanding the changes of sediment yield and hydrodynamic parameters of slopes under different vegetation patterns is of great significance for revealing the hydrodynamic mechanism and establishing suitable vegetation parameters for indicating sediment processes. In this study, the variations of sediment yield and hydrodynamic parameters of slopes with different vegetation coverage (0, 30%, 50%, 70%, 90%) and positions (upslope, middle slope and downslope) of grasslands were analyzed by scouring test. The results show that, grass coverage, runoff kinetic energy, runoff velocity, Fr number, Darcy-Weisbach resistance coefficient, Manning's roughness coefficient and shear stress were closely related with sediment yield. With the increase of grass coverage, runoff velocity, shear stress, sediment yield, unit stream power and runoff kinetic energy decreased linearly, while Manning's roughness coefficient and Darcy-Weisbach resistance coefficient increased significantly. When the coverage reached to the range of 50%~70%, the increase of grass coverage couldn't stimulate high sediment yield reduction which meant the valid coverage was 50% and the threshold coverage was 70% in this study. With the increase of coverage, the impacts of grass position on the sediment yield show a general rule that the sediment yield on the slope with grass cover in middle and downslope is smaller than that in upslope. A simulation formula including coverage, unit stream power and runoff kinetic energy was established to predict sediment yield. The results can provide important theoretical basis for clarifying the threshold of grass coverage on sediment reduction and suitable position and implementing soil erosion countermeasures on the Loess Plateau, and for prompting high quality development of the Yellow River Basin.

Keywords: slope; vegetation pattern; sediment yield; hydrodynamic parameters; unit stream power

收稿日期:2021-06-17

修回日期:2021-09-02

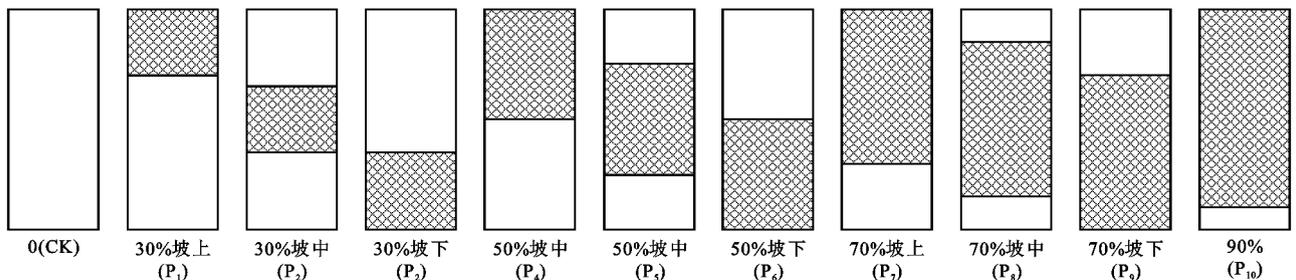
资助项目:国家自然科学基金(41601285);陕西省重点研发计划(2021ZDYF05-02)

第一作者:霍云霏(1980—),男,河南洛阳人,副教授,硕士,主要从事自然地理学与生态环境保护方面的研究工作。E-mail:huoyunpei@126.com

通信作者:朱冰冰(1980—),女,河南周口人,副教授,博士,主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究工作。E-mail:zbb1026@126.com

生物措施是水土保持的三大措施之一,植被具有削弱降雨侵蚀、减缓流速、增加入渗以及提高土壤抗蚀抗冲性的作用^[1-4],植被类型与配置模式、植被结构及其功能等亦对坡面及流域尺度水产产沙具有重要影响^[5-8]。研究表明,干旱半干旱地区植被在坡面上易形成斑块与裸地镶嵌或条带分布等典型格局^[9-10],进而影响地表径流的汇集和携沙能力,对水土流失产生显著影响^[11]。

黄土高原曾经是中国水土流失最为严重的区域^[12],自实施退耕还林(草)等工程以来,生态恢复效果显著。然而,大面积的植被建设引起区域蒸散耗水量急剧增加,水资源短缺态势加剧,黄河流域径流量锐减^[13]。因此,对水资源承载力已基本达到极限的黄土高原来说^[14],优化植被格局是未来生态建设的重点^[15]。研究不同植被格局影响下的侵蚀产沙过程对于控制黄土高原水土流失、改善生态环境具有重要意义。坡面是构成山地丘陵和破碎高原最重要的景观单元,坡面径流是坡面侵蚀发育的主要外营力^[16],对坡面径流水动力学特性的研究将有助于更加深入地认识坡面侵蚀产沙过程的本质。但由于该领域研究问题的复杂性,研究手段和测量技术的限制,对植被格局减沙效应的研究多限于经验统计分析,对其拦截水沙的过程以及从坡面水动力学特性及侵蚀动力过程分析植被泥沙调控机理的研究还不多。本研究通过对不同空间部位不同盖度的草被坡面进行放水冲刷试验,探讨坡面草被格局对坡面流体力特性和侵蚀产沙的影响,以期寻求坡面植被水蚀动力调控最佳指标。



注:阴影部分表示草被。

图1 草被布设格局示意图

表1 供试土样各级粒径组成

粒径/mm	>1.0	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001
百分比/%	0	1.05	35.45	43.4	3.2	6.4	10.5

1.2 参数计算

径流深是反映水力特征的重要因子。假定水流沿坡面均匀分布,采用式(1)计算径流深(h):

$$h = \frac{Q}{U \cdot B \cdot t} \quad (1)$$

1 试验设计

1.1 试验方案

本研究采用坡面放水冲刷试验,试验土槽宽 0.5 m,长 5 m,顶部 0~1 m 处为放水过渡区,其余 4 m 为试验坡面,坡度为 20°。试验前,土槽底部填 10 cm 的细沙,以保证试验土层的透水状况接近于自然坡面。同时在平坦地块培育试验用草(野牛草),待野牛草成熟后,带土 20 cm 移植到坡面相应位置。填土时采用分层填充的方式先全部填充 20 cm,将试验用草带土 20 cm 移植至相应的位置,其他部分继续填土使总厚度达 40 cm。每层填充前压实并打毛,控制土壤容重为 1.40 g/cm³。草被铺设采用上、中、下 3 种布设方式,在相应位置上铺设长 1.2 m, 2 m, 2.8 m 和 3.6 m 的草被,分别代表 30%, 50%, 70% 和 90% 的植被覆盖度(图 1)。试验用土粒径组成见表 1。根据黄土高原地区暴雨研究成果并参考其他学者的室内冲刷试验取值^[17],冲刷流量设定为 3.2 L/min 和 5.2 L/min,冲刷时长为 20 min。在试验开始前,率定好冲刷流量。坡面产流后,在水槽出口每分钟收集一次径流泥沙样品,测量径流量和烘干的泥沙重量。在距坡顶 1, 2, 3, 4 m 处设定 4 个断面,用染色剂法(KMnO₄)测定 4 个断面的流速,重复 3 次取平均值。在坡面上等间距测量 4 个断面的水流宽度,取平均值,即为坡面水流宽度。根据测定的流速、水流宽度等,计算径流深、阻力系数、糙率系数、单位水流功率和剪切力等水动力学参数。

Re 为水流惯性力与黏滞力的比值。Re 越大,说明水流惯性力越大,水流发生紊流的可能性也就越大。

$$Re = \frac{Uh}{\nu} \quad (2)$$

弗汝德数 Fr 反映了水流惯性力和重力之比,表示

了过水断面上水流的动能和势能的对比关系,是判别缓流和急流的依据。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;反之则为缓流。

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

坡面流阻力系数是坡面流水动力学基本参数之一,反映了下垫面对流动水体的阻力的大小,是反映流体宏观整体平均特性的一个重要参数。常用达西—韦伯(Darcy-Weisbach)阻力系数 f 来表示。

$$f = \frac{8gRJ}{U^2} \quad (4)$$

曼宁糙率系数 n 也可以表示径流所受的阻力,表示壁面粗糙对液流影响的一个综合性系数,综合反映了坡面粗糙、边界的整齐程度等的变化情况。

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}}}{U} \quad (5)$$

引起坡面侵蚀的侵蚀动力多采用径流剪切力 τ 指标,表达式为:

$$\tau = \gamma RJ \quad (6)$$

径流动能 F 计算公式为:

$$F = \frac{\gamma QV^2}{2g} \quad (7)$$

Yang 等^[18]分析了大量的有关数据后,推出单位水流功率的概念,即单位重量的水体势能随时间减少的变化率。

$$P = \frac{dy}{dx} = \frac{dx}{dt} \times \frac{dy}{dx} = V \cdot J \quad (8)$$

鲁克新等^[19]以次暴雨洪水的径流深和洪峰流量模数的乘积作为次暴雨侵蚀产沙的侵蚀动力指标即径流侵蚀功率,并应用于不同空间尺度坡面,发现径流侵蚀功率与侵蚀模数存在极显著的相关关系。径流侵蚀功率 PP 的计算公式为:

$$PP = \frac{A'}{\rho \times g \times A^2} \times F' \times V \quad (9)$$

式中: h 为断面平均水流深度(m); Q 为径流量(m^3); U 为断面平均流速(m/min); B 为径流宽度(m); t 为冲刷时间(min); Re 为径流雷诺数; ν 为水运动黏性系数,取 $7.0 \times 10^{-5} m^2/s$; Fr 为弗汝德数; g 为重力加速度($9.8 m/s^2$); f 为阻力系数; R 为水力半径(m); J 为水力能坡,采用地面地形坡度 α 的正弦值($\sin \alpha$); n 为曼宁糙率系数; τ 为径流剪切力(Pa); γ 为径流的容重,为 $9800 N/m^3$; F 为水流动能(J); V 为平均水流流速(m/s); P 为单位水流功率($N \cdot m/s$); PP 为径流侵蚀功率 [$m^4/(s \cdot km^2)$]; F' 为作用力(N); A' 为与洪峰流量对应的径流小区出口断面的过水面积(m^2); A 为坡面面积(km^2)。

2 结果与分析

2.1 坡面侵蚀产沙量变化特征

不同冲刷流量和植被覆盖位置下的坡面侵蚀产沙量见表 2。

表 2 各格局坡面侵蚀产沙量

冲刷流量/ ($L \cdot min^{-1}$)	坡面布设 格局	侵蚀 产沙量/kg	冲刷流量/ ($L \cdot min^{-1}$)	坡面布设 格局	侵蚀 产沙量/kg
3.2	CK	24.91	5.2	CK	49.78
3.2	P ₁	16.14	5.2	P ₁	31.60
3.2	P ₂	18.83	5.2	P ₂	34.63
3.2	P ₃	15.73	5.2	P ₃	33.01
3.2	P ₄	16.72	5.2	P ₄	28.65
3.2	P ₅	15.93	5.2	P ₅	16.33
3.2	P ₆	17.24	5.2	P ₆	19.83
3.2	P ₇	9.78	5.2	P ₇	13.85
3.2	P ₈	7.07	5.2	P ₈	12.61
3.2	P ₉	15.49	5.2	P ₉	11.90
3.2	P ₁₀	6.48	5.2	P ₁₀	5.31

草被格局对坡面侵蚀影响显著, y 与植被覆盖度 x 呈显著负相关($p < 0.01$) (图 2),产沙量随植被覆盖度的增大而减小,不同草被覆盖度下的减沙效益呈对数增加趋势(图 3)。当覆盖度达到 90% 时,坡面侵蚀产沙量仅 5~6 kg,不同冲刷流量下的减沙效益达到 70%~90%。图 3 中两条曲线的斜率可以说明不同覆盖度下减沙效益的变化幅度。曲线的斜率均随着覆盖度的增加而逐渐减小,这说明,当坡面上具有一定的植被后,每增加单位植被所带来的减沙效益会逐渐降低。在本试验中,当覆盖度达到 30% 以后,每增加 20% 的草被覆盖,其所产生的减沙效益增幅逐渐变小。当覆盖度增加到 70% 时,斜率达到最大,而后逐渐降低,这说明存在一个临界覆盖度,超过此临界覆盖度,即使再增加植被,其相对减沙效益也不会相应增加。本试验中,临界植被覆盖度为 50%~70%,当覆盖度从 0 增长到 50% 时,植被的减沙效益显著提高,当覆盖度增加到 70% 时,植被保持水土的作用几乎不随覆盖度的增加而显著提高。这与吴蕾等^[20]通过文献分析得出的结论基本一致。

此外,植被的水土流失调控效应也受降雨量和降雨强度的影响,大雨和暴雨时植被的减沙效益较高^[21]。本研究中,相同的覆盖度的植被在较大冲刷流量下表现出较好的减沙效果。图 4 显示,不同覆盖位置下的坡面侵蚀产沙量一般表现为草被位于中下部时产沙量小于草被位于上部,这是因为草被位于中下部时,兼具缓流拦沙和滞流消能的作用^[22],既能拦截植被上部裸坡产生的泥沙量,又能通过减缓径流

速削弱侵蚀动力。

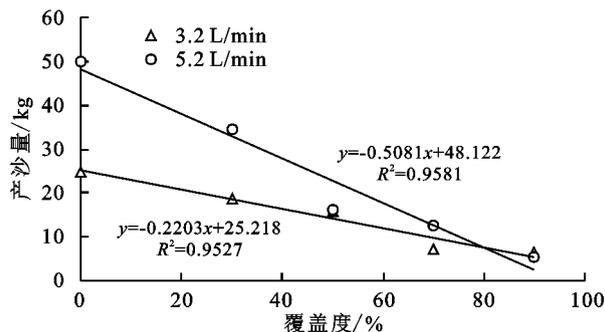


图 2 草被覆盖度对坡面产沙量的影响

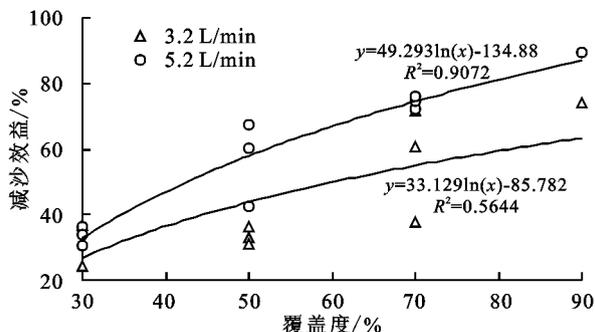


图 3 不同草被覆盖度下的减沙效益

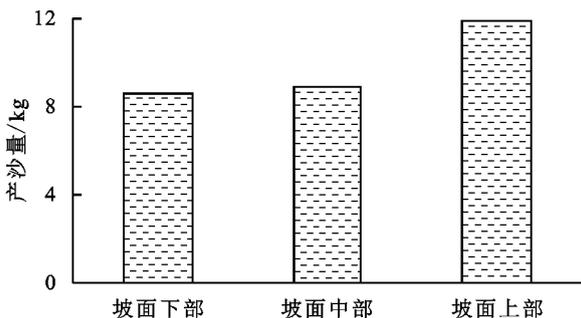


图 4 不同草被覆盖部位产沙量

2.2 坡面流动力学特征分析

2.2.1 坡面流流速 随着植被覆盖度的增加,平均径流流速呈直线下降趋势(图 5),植被覆盖度越大,径流流速越缓,相比于裸坡,不同覆盖下坡面径流流速分别降低 29.4%~82.4%(3.2 L/min)和 24.2%~79%(5.2 L/min)。在相同覆盖度情况下,冲刷流量越大,径流流速越快。3.2 L/min 冲刷流量下,不同覆盖度断面平均径流流速平均值为 6.29 cm/s~24.74 cm/s,相对于裸坡下降了 30.7%~82.4%,5.2 L/min 流量下径流流速平均值相对于裸坡下降了 16.7%~78.3%,可以看出流量大时,草被延缓流速的作用相对减弱(16.7% < 30.7%)。从图 5 两条直线差值随着植被覆盖度的增加而呈现微小增幅也说明,植被对于大流量下的径流流速控制是有限的,这与植被在小流量下拦截径流效果较为显著的结论基本一致^[23]。

图 6 为不同冲刷流量下 30%覆盖度植被位于坡面不同部位时断面流速及坡面平均流速变化。裸坡

下,流速沿断面逐渐增大,且流量越大,平均流速越大。草地坡面的径流流速明显减小,且有草断面的平均径流流速均小于无草断面,30%盖度时草地坡面径流平均流速比裸坡时少 40%~50%。对于不同部位植被的径流流速,小流量时植被位于坡面上部对径流流速的削减作用要强于植被位于坡面中部和下部,而对于大流量时,植被对径流流速的削减作用依次是:草下部>草中部>草上部。出现这种现象的主要原因是,冲刷流量较小(3.2 L/min)时,径流通过位于坡面上部植被的作用,在水流流速最慢的时候对径流进行了拦截,增加了入渗,减缓了流速,起到了较强的减流的作用。而当冲刷流量较大(5.2 L/min)时,径流量较大,植被形成的阻力有限,位于坡面上方的植被,仅能拦截坡顶流速较缓的径流,位于坡中部的植被不仅对坡上有拦截径流、减缓流速的作用,对坡下也有减缓流速、减小冲刷的作用,位于坡下部的植被,对全坡面的径流都有拦截和减缓流速的作用。潘成忠等^[24]的研究也表明草被植被对下部坡面径流流速的削减作用要强于上部坡面。

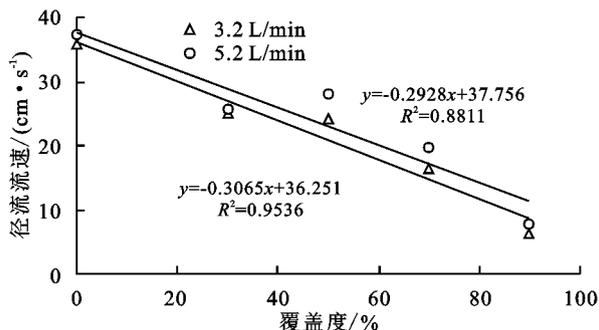


图 5 不同植被覆盖度下坡面流速变化

2.2.2 坡面流阻力系数 根据测量数据计算了不同草被覆盖度下的坡面径流的阻力系数 f 和曼宁糙率系数 n (表 3)。在试验的坡度和流量范围内,坡面径流阻力系数 f 和糙率系数 n 分别变化于 0.20~54.16, 0.004~0.076, 且草被覆盖的坡面的阻力系数 f 明显大于裸坡,不同盖度草地坡面的阻力系数和糙率系数分别是裸地坡面的 7~280 倍和 5~22 倍。阻力系数 f 和曼宁糙率系数 n 分别随覆盖度的增加呈指数递增,这主要是因为坡面流速随着草被盖度的增大而减小,在坡面流量、坡度基本相同条件下,水深与流速成反比,流速小则水深大,此时的坡面的阻力系数就大。从阻力系数 f 与覆盖度(x)的回归系数可以看出大流量时阻力系数 f 随覆盖度的增加幅度小于小流量的变幅,而且阻力系数 f 随流量的增加呈下降趋势,说明草被对坡面流的阻滞作用随着流量的增加呈下降趋势,再一次验证了在大流量条件下,植被减缓坡面径流流速的作用有限的结论。

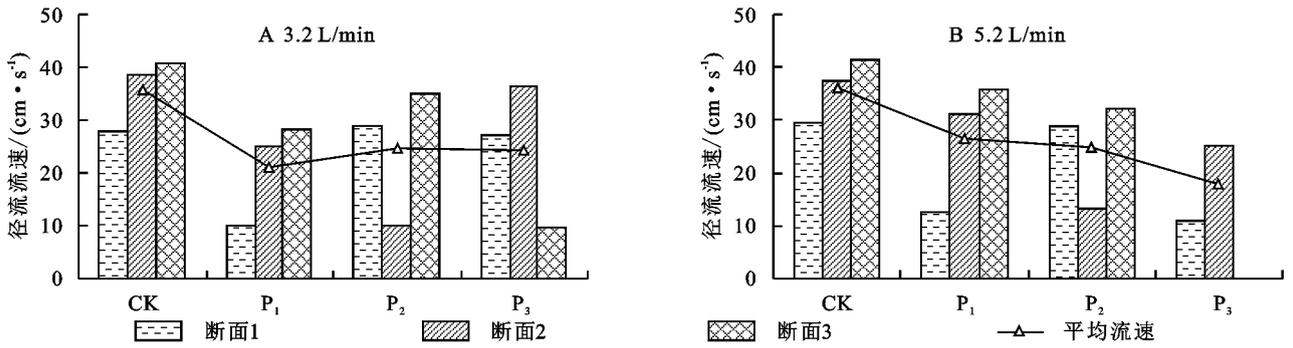


图 6 不同冲刷流量下 30% 植被盖度时流速对比

表 3 不同覆盖度下坡面流平均阻力系数 (f) 和糙率系数 (n)

参数	冲刷流量	覆盖度 $C/\%$					回归关系 (x 为覆盖度)
		0	30	50	70	90	
阻力系数 (f)	3.2 L/min	0.95	7.08	12.36	14.42	54.16	$f=1.3001e^{0.0407x}, R^2=0.9341$
	5.2 L/min	1.79	4.93	10.26	12.28	38.14	$f=1.8141e^{0.0320x}, R^2=0.9701$
糙率系数 (n)	3.2 L/min	0.008	0.024	0.032	0.038	0.076	$n=0.0093e^{0.02317x}, R^2=0.9494$
	5.2 L/min	0.012	0.021	0.030	0.037	0.068	$n=0.0122e^{0.0179x}, R^2=0.9790$

2.2.3 坡面径流剪切力 在试验的坡度范围内, 径流剪切力随着流量的增加而增大, 这是因为水流剪切力是径流水深的函数, 而径流水深又是单宽流量的函数, 所以, 水流剪切力随着流量的增加而增大。在相同的冲刷流量下, 水流剪切力随着植被覆盖度的增加

呈指数增大的趋势(表 4), 这是因为草被对径流的分散阻止作用, 增大了地表径流的阻力系数, 同时, 草被的拦截使不断顺坡来的坡面流改变原来的运动方向, 降低了径流流速, 有草坡段流宽增大, 无草坡段流宽减小, 径流深增大所致。

表 4 不同覆盖度下坡面平均径流剪切力 (τ)

冲刷流量	覆盖度 $C/\%$					回归关系 (x 为覆盖度)
	0	30	50	70	90	
3.2 L/min	9.55	18.75	21.33	25.85	25.13	$\tau=19.008e^{0.0058x}, R^2=0.8512$
5.2 L/min	18.53	21.98	26.43	32.16	28.81	$\tau=11.396e^{0.0107x}, R^2=0.8401$

2.2.4 单位水流功率和径流动能 单位水流功率 P 和径流动能 F 与植被覆盖度显著相关, 二者均随植被覆盖度的增加呈指数减小趋势, 这是因为 P 和 F 都是流速和径流深的函数^[25], 随着植被覆盖度的增加, 对径流

的阻滞作用逐渐增强, V 降低, P 和 F 明显减小; P 和 F 随着放水流量的增大而增加, 因为放水流量越大, 径流单宽流量越大, 水流流速就越大, 进而 P 和 F 越大, 但 P 和 F 与放水流量相关性并不显著(图 7—8)。

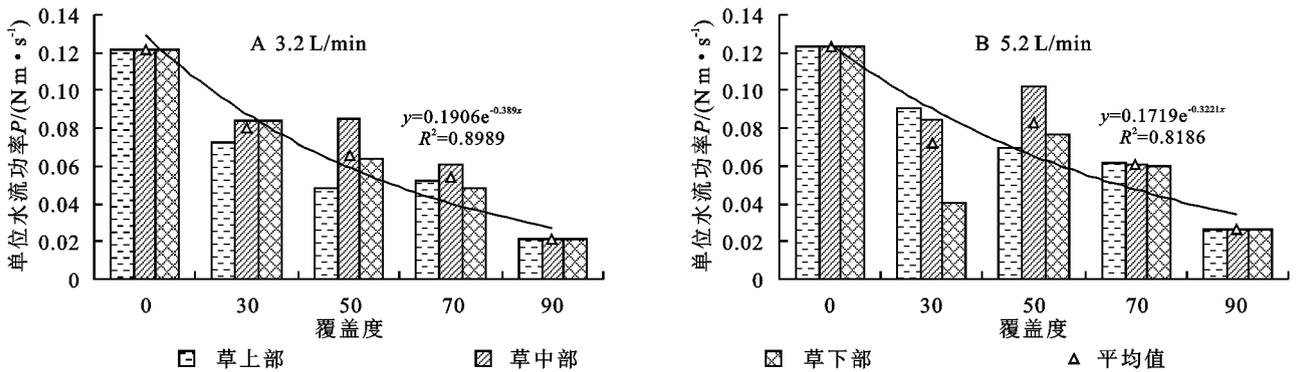


图 7 不同流量下坡面单位水流功率

2.2.5 坡面侵蚀产沙量与其影响因子关系分析 对侵蚀产沙量与各因子进行偏相关分析, 表 5 显示, 侵蚀产沙量受植被覆盖度的影响最大, 相关系数为 0.871; 在各坡面流动力学因子中, F 和 V 与坡面侵蚀产沙量最为相关, 相关系数分别达到 0.758, 0.744, 并

达到极显著水平; 其次是 Fr, n 和 τ, Re 影响最小, 关联度仅为 0.293。由于影响坡面侵蚀产沙量的众多因素又互相影响, 因此, 为了剔除因素之间的互相影响, 对相关性达显著水平的覆盖度, Fr, n, τ, F, V 和 P 等因素与侵蚀产沙量 y 进行逐步回归分析, 得到回归方程: $y =$

$6.150 \times F - 32.88 \times C - 361.989 \times P + 47.702$ 。式中: y 为侵蚀产沙量(kg); F 为径流动能(J); C 为植被覆盖度(%); P 为单位水流功率[(N·m)/s]。

上式表明,侵蚀产沙量与径流动能 F 呈正相关,与植被覆盖 C 和单位水流功率 P 呈负相关,植被覆盖、径流动能 F 和单位水流功率 P 共同决定坡面侵蚀产沙。从物理学角度讲,坡面径流侵蚀土壤的过程

是做功消耗能量的过程, F 和 P 均是能量的代表,是 V 和 J 综合作用的结果。不少研究把 P 作为预测坡面侵蚀产沙量的重要因子。Moor 和 Burch^[26] 发现当土壤颗粒为分散状时, P 能够相当精确地预测坡面流和细沟流的输沙率。单位水流功率理论综合反映了坡面下垫面的差异对水蚀过程的影响,可以用于计算坡面径流产沙量。

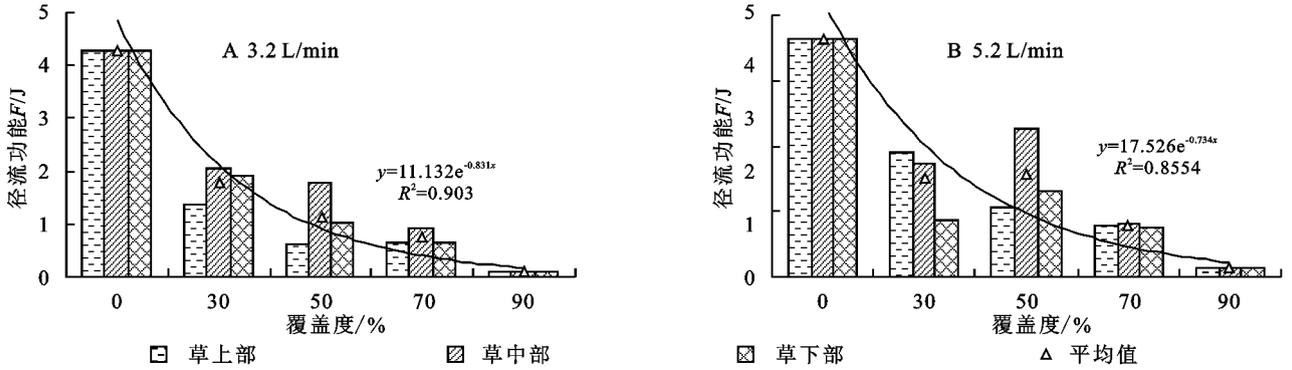


图 8 不同流量下坡面径流动能 F

表 5 侵蚀产沙量与各影响因素相关分析

参数	产沙量 y	覆盖度 C	雷诺数 Re	弗汝德数 Fr	阻力 系数 f	糙率 系数 n	径流 剪切力 τ	径流 动能 F	单位水流 功率 P	径流侵蚀 功率 PP	径流 流速 V
y	1.000	-0.871**	0.293	0.725**	-0.579**	-0.716**	-0.682**	0.758**	0.610**	0.053	0.744**
C		1.000	-0.365	-0.880**	0.747**	0.875**	0.807**	-0.831**	-0.810**	-0.173	-0.914**
Re			1.000	0.195	-0.672**	-0.571**	0.094	0.238	0.337	-0.308	0.416
Fr				1.000	-0.680**	-0.835**	-0.859**	0.889**	0.879**	0.224	0.949**
f					1.000	0.949**	0.539*	-0.593**	-0.743**	0.259	-0.820**
n						1.000	0.730**	-0.770**	-0.836**	0.135	-0.930**
τ							1.000	-0.773**	-0.726**	-0.139	-0.790**
F								1.000	0.916**	0.257	0.917**
P									1.000	0.168	0.950**
PP										1.000	0.109

注:**表示极显著相关;*表示显著相关。

3 结论

(1) 植被能够有效拦截泥沙,且对小流量径流拦截效果更为显著;不同坡面覆盖位置引起的侵蚀产沙表现为草被位于中下部时产沙量小于草被位于上部,是因为草被位于中下部时,兼具缓流拦沙和滞流消能的作用。

(2) V, τ, P 和 F 随植被覆盖度的增大而减小,阻力系数 f 随覆盖度的增大而增大,草被覆盖位置对坡面水力学参数的影响不存在显著差异。

(3) 坡面侵蚀产沙量与植被覆盖度, F, V, Fr, f, n, τ 等因子密切相关,坡面侵蚀产沙可以用植被覆盖度、单位水流功率和径流动能的联合公式表示。

参考文献:

[1] 朱显谟.黄土地区植被因素对于水土流失的影响[J].土壤学报,1960,2(8):110-121.

[2] 韦红波,李锐,杨勤科.我国植被水土保持功能研究进展[J].植物生态学报,2002,26(4):489-496.
 [3] 张光辉,梁一民.植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J].水土保持研究,1996,3(2):104-110.
 [4] 余新晓,毕华兴,朱金兆.黄土地区森林植被水土保持作用研究[J].植物生态学报,1997,21(5):433-440.
 [5] 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.
 [6] 张琪琳,王占礼,王栋栋,等.黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响研究进展[J].地球科学进展,2017,32(10):1093-1101.
 [7] 冯舒,赵文武,陈利顶,等.2010年来黄土高原景观生态研究进展[J].生态学报,2017,37(12):3957-3966.
 [8] 焦菊英,王志杰,魏艳红,等.延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析[J].农业工程学报,2017,33(13):159-167.
 [9] Boix C, Marinez M, Amau R, et al. Measuring soil ero-

- sion by field plots: Understanding the sources of variation[J]. *Earth Science Review*, 2006, 78(3/4): 267-285.
- [10] Boer M, Puigdefábregas J. Effects of spatially structured vegetation patterns on hillslope erosion in a semiarid Mediterranean environment: A simulation study[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(2): 149-167.
- [11] 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.
- [12] 党小虎, 吴彦斌, 刘国彬, 等. 生态建设 15 年黄土高原生态足迹时空变化[J]. *地理研究*, 2018, 37(4): 761-771.
- [13] 张宝庆, 邵蕊, 赵西宁, 等. 大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(3): 594-606.
- [14] 任宗萍, 李占斌, 李鹏, 等. 黄土高原植被建设应从扩大面积向提升质量转变[J]. *科技导报*, 2018, 36(14): 12-14.
- [15] 秦伟, 曹文洪, 郭乾坤, 等. 植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J]. *生态学报*, 2017, 37(14): 4905-4912.
- [16] 李鹏, 崔文斌, 郑良勇, 等. 草本植被覆盖结构对径流侵蚀动力的作用机制[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(1): 55-59.
- [17] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J]. *水土保持学报*, 1992, 6(3): 1-5.
- [18] Yang C. T. minimum unit stream power and fluvial hydraulics [J]. *Journal of the Hydraulics Division, Asae*, 1976(102): 919-934.
- [19] 鲁克新, 李占斌, 鞠花. 径流侵蚀功率理论在不同尺度坡面侵蚀产沙中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(4): 70-73.
- [20] 吴蕾, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 133-138.
- [21] 刘一帆. 半干旱区植被恢复的水土流失调控效应研究[M]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [22] 张霞, 李鹏, 李占斌, 等. 坡面草带分布对坡沟水土流失的防控作用及其优化配置[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(7): 122-128.
- [23] 陈倩, 傅瑜, 余冬立, 等. 坡面产流产沙过程对植被过滤带响应的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 104-109.
- [24] 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.
- [25] 苏远逸, 李鹏, 李占斌, 等. 坡面植被格局对坡沟系统能量调控及水沙响应关系的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 32-39.
- [26] Moor I P, Burch G I. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory[J]. *Water Resources Research*, 1986, 22(8): 1350-1360.
- (上接第 13 页)
- [26] 郑海金, 杨洁, 张洪江, 等. 南方红壤区农田道路强降雨侵蚀过程试验[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(9): 85-90, 98.
- [27] 赵光旭, 王全九, 张鹏宇, 等. 短坡坡长变化对坡地风沙土产流产沙及氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 13-18.
- [28] 郑子成, 林代杰, 李廷轩, 等. 不同耕作措施下成熟期玉米对径流及侵蚀产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 24-28.
- [29] 沈海鸣, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 162-170.
- [30] 赵龙山, 张青峰, 宋向阳, 等. 基于微尺度下 DEM 的黄土坡耕地地表坑洼特征研究[J]. *土壤学报*, 2012, 49(1): 179-183.
- [31] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(22): 6091-6101.
- [32] Liu Q J, Shi Z H, Yu X X, et al. Influence of microtopography, ridge geometry and rainfall intensity on soil erosion induced by contouring failure[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 136: 1-8.
- [33] 覃超, 何超, 郑粉莉, 等. 黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 160-167.
- [34] 任雨之, 郑江坤, 付滢, 等. 不同耕种模式下遂宁组紫色土坡耕地产流产沙特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 30-38.
- [35] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀. 坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(7): 870-875.