

不同植被格局下凸型坡径流流速时空变化及产沙研究

张霞¹, 李鹏¹, 李占斌^{1,2}, 于国强³, 李聪⁴

(1. 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048;

2. 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, 陕西 杨凌 712100;

3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054; 4. 河南黄河水文勘测设计院, 郑州 450004)

摘要: 以凸型坡为研究对象, 利用室内径流冲刷试验, 研究了不同植被配置下凸型坡水蚀动力的变化过程以及侵蚀产沙的差异。结果表明: 裸坡条件下径流流速呈现出极强的空间波动状态, 随水力断面与坡顶距离的逐渐增加表现出先减小后增大的空间变化态势, 导致侵蚀最为严重的部位出现在上坡上部和下坡上部。将草带布设于与坡顶距离 60%~80% 位置处对径流流速影响较大, 降幅为 22%, 蓄水效益和减沙效益分别为 12% 和 69%, 能够较好地发挥直接拦沙的水土保持功效。不同植被空间配置下的径流量和产沙量均表现出与径流流速相一致的空间变化特征, 随着草带距坡顶距离的逐渐增加, 径流量和产沙量呈现出先增加后减小的趋势, 植被通过调控水蚀动力过程实现了对径流和侵蚀产沙的调控。在此过程中, 植被的空间配置方式改变了径流流速时空变化特征, 从而对水蚀动力过程起到了很大程度的调控。研究结果有助于加深对植被、冲刷与水蚀动力过程之间耦合关系的理解。

关键词: 植被格局; 凸型坡; 径流冲刷; 水蚀动力

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)06-0016-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.003

Study on Temporal and Spatial Variation of Runoff Velocity and Sediment in the Convex Hillslope Under Different Vegetation Patterns

ZHANG Xia¹, LI Peng¹, LI Zhanbin^{1,2}, YU Guoqiang³, LI Cong⁴

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an

University of Technology, Xi'an 710048; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land

Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Xi'an Center of Geological Survey, China

Geological Survey, Xi'an 710054; 4. Henan Yellow River Hydrological Survey and Design Institute, Zhengzhou 450004)

Abstract: The convex hill slope was used as the object, using indoor runoff scouring experiments, the variation process of water erosion dynamics and variance of erosion sediment under different vegetation spatial configurations was studied. The results showed that the spatial variation of runoff velocity exhibited a fluctuating state, with first decreasing then increasing with distance between the hydraulic section and the slope top under bare-slope conditions. The most serious erosion was recorded on the upper part of the up slope and down slope. When the grass strip was planted at about 60%~80% of the up slope length, the impact on various runoff velocity was greater, and decreased by about 22%; by which water storage function is 12%, and sediment reduction function reach 69%. It could better exert soil and water conservation function by direct sediment interception and resulted in the lowest level of erosion in the experiment. The spatial variation trend of runoff and sediment was basically consistent with runoff velocity under different vegetation spatial configurations. With the increase of grass strip distance to the slope top, the runoff and sediment showed the first increasing then decreasing trend. The regulation effect of vegetation on erosion sediment transport was achieved through the regulation of the water erosion dynamic process. In the course of regulation, the vegetation spatial configuration

收稿日期: 2018-06-14

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于能量过程的沟道工程侵蚀阻控机理研究”(51779204), “黄土高原生态建设的生态—水文过程响应机理研究”(41330858); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402404, 2017YFC0504704)

第一作者: 张霞(1982—), 女, 内蒙古包头人, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhangxia20002000@163.com

通信作者: 于国强(1979—), 男, 内蒙古包头人, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: yuguoqiang23@163.com

altered spatiotemporal variation characteristics of runoff velocity, and thus played a significant effect on hydrological processes. The information of this study can be useful for better understanding the coupling relationship between vegetation, runoff scouring, and water erosion dynamics process.

Keywords: vegetation pattern; convex hill slope; runoff scouring; water erosion dynamics

由径流冲刷引起的土壤侵蚀在我国黄土高原地区尤为突出,也是全球性环境问题。我国黄土区是全球范围内黄土厚度最大和分布面积最广的区域,黄土地区千沟万壑,地形复杂破碎,植被覆盖差,土壤抗蚀能力差,人类活动等诸多因素造成植被破坏,导致流域侵蚀产沙极为严重^[1]。受降雨、地形、土壤、植被和人类活动等因素的综合影响,黄土高原地区土壤侵蚀严重,年土壤流失率达到了 5 000~10 000 t/km²^[2-3]。

近年来黄土高原水土保持政策的实施,在很大程度上改善了生态环境,但以往主要是在单坡面范围内开展植被减水减沙作用的研究^[4],对复合坡面植被减水减沙效益和作用研究较少。由于凸凹型坡坡型不同,降雨入渗后在坡面的土壤储水量不同^[5],导致土壤侵蚀特征的改变^[6]。坡面径流流速的时空特征是分析坡面侵蚀动力过程的基础^[6-7],研究复合坡面植被格局对挟沙水流动力特性以及侵蚀产沙特性的影响,对于分析植被格局对复合坡面的侵蚀机理具有重要意义。径流流速是研究水流特性中非常重要的参数,计算径流流速是分析径流冲刷和泥沙输移等的前提条件^[8]。由于坡面流属于薄层水流范畴,下垫面状况扰动、含沙量等变化都会对水流流速产生影响,这就使得径流流速的变化十分复杂。以往坡面径流流速方面的研究多是单一裸坡条件下的试验,涉及到草被覆盖及空间配置的较少,且径流流速多为整个坡面流段的平均特征,未能很好地反映径流流速在坡面的时空变化过程,而且当研究对象为复合坡且有一定盖度的草被时,问题会更加复杂^[4,9-11]。因此,开展植被格局对黄土高原凸型坡水蚀动力过程调控机理的研究具有重要的科学和现实意义。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

根据凸型坡地貌特征,对黄土高原丘陵沟壑区凸型坡进行了概化。凸型坡冲刷试验物理模型见图 1。凸型坡试验模型系统采用钢板制成。其中坡度 12°、长度为 8 m 的钢槽代表上坡;坡度 25°、长度为 5 m 的钢槽代表下坡。整个钢槽的水平投影面积为 11.55 m²。上坡与下坡的长度比为 1.6 : 1.0,代表研究区上坡与下坡的实际比值^[4,12-13]。如图 1 所示,冲刷试验钢槽宽度为 1 m,钢槽中间布设 PVC 板,将试验钢槽均分为两部

分,宽度均为 0.5 m,以进行重复试验;每次试验仅在钢槽一侧进行,重复试验在另一侧开展。

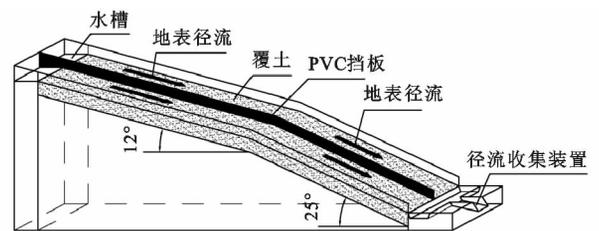


图 1 凸型坡冲刷试验概化模型

本研究以西安郊区黄土为试验用土壤,土壤颗粒尺寸为 0.05~0.1,0.002~0.05 mm 的颗粒分别占总量的 6.21%和 91.39%。根据美国农业部(USDA)的土壤分类标准,最终确定试验用土壤归类为粉质土。

为了保证试验用土的透水性接近于天然状态,试验开始前,在钢槽底部铺设厚度为 20 cm 的天然砂层,确保土壤中的水分均匀渗透。试验初始状态时,土壤容重控制在 1.3 g/m³,土壤含水量控制在 21%。随后,在砂层的上部放置 4 层 5 cm 的试验土壤层,留出 10 cm 空间用于覆盖草带。为防止草带在试验期间滑动,草带与裸露的斜坡部分齐平并紧密连接。选取野生马尼拉草(*Zoysiamatrella*)作为试验用草,该草适合于黄土区生长,草带尺寸为 2 m×1 m,根系深度为 20 cm。试验开始 2 周前,将草带移植到钢槽内自然生长。

1.2 试验方法

本试验于 2017 年 4—7 月进行,数据测试与分析于 2017 年 12 月完成。上方来水是影响凸型坡侵蚀和泥沙输移的一项重要因素。根据已有的研究成果和研究区上方来水的实际情况,本次试验最终采用 16 L/min 的流量作为冲刷流量,大致相当于黄土区大雨雨强 90 mm/h,用以研究植被格局对凸型坡的水动力过程的调控机理。冲刷试验在凸型坡模型中进行。

在试验控制条件下,根据对以往径流冲刷试验中径流与产沙过程线实际波动情况,产流经过 30 min 径流基本处于稳定状态,因此将径流历时定义为 30 min。每 1 min 用存储桶收集 1 次径流和泥沙样品,并对径流量进行测量。径流中的泥沙经过 24 h 静置后进行分离,随后将分离后的泥沙样品在 105 °C 高温下烘干 8 h,进行称重,获得每 1 min 的产沙量数据。然后对每 1 min 的数据进行汇总,求得径流总量和产沙总量。

考虑到黄土高原储水和干燥的实际情况,根据水土保持功能优化植被覆盖度研究成果,最终确定植被覆盖度为 25%^[12]。在冲刷试验阶段,考虑在凸型坡中布设 6 种植被配置(图 2):上坡上部(格局 F)、上坡中上部(格局 E)、上坡中部(格局 D)、上坡中下部(格局 C)、上坡下部(格局 B)和裸坡格局(格局 A)。

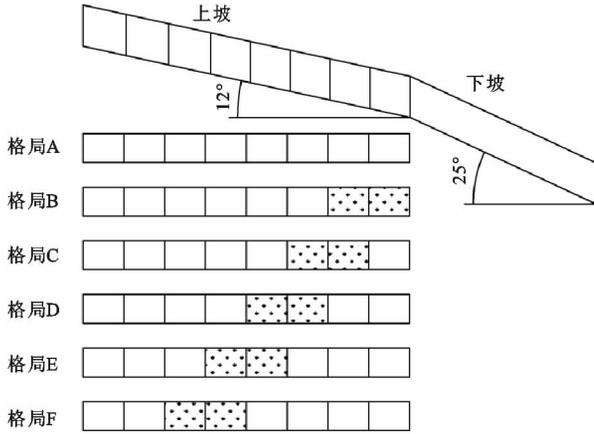


图 2 冲刷试验上坡植被布设位置示意

整个凸型坡被均分成 13 个坡段,每个坡段均为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。将距离坡顶 1 m 位置处的断面设定为第 1 水力断面,标记为 1-1;沿水流方向,各个水力断面间隔 1 m,其他水力断面分别标记为 2-2,3-3,...,最后至系统出口 13-13 水力断面。在坡顶部位分别布设 2 个引水槽(长 20 cm、宽 50 cm、深 50 cm),使上方来水先流经该水槽时进行一定的缓冲,使水流以进行流速为 0 进入凸型坡的缓流带。

其中水力断面 1-1 作为试验系统中的缓流断面,距离坡顶距离 1 m,首先用塑料薄膜铺设在下部,在其上方铺上有机玻璃,在有机玻璃与钢槽接触的两侧均匀涂抹玻璃胶进行密封,防止漏水。装填土时在对应的位置预留足够的空间,填土结束后将有机玻璃放置在该部位,采用水准仪进行校准,保证有机玻璃表面与下方土壤表面在一个水平面上,使径流经过缓

流带以后能从中间流经上坡。采用 KMnO_4 染料示踪法在不同横、纵断面多次测量取平均值,最终确定径流表面流速。随后,基于不同径流流动状态的流速修正系数(层流:0.67;过渡流:0.7;紊流:0.80)对径流表面流速进行修正,获取径流平均流速^[14]。

2 结果与分析

2.1 裸坡条件下径流平均流速的时空变化

径流平均流速的时空变化特征是分析植被格局对径流作用的一个重要指标^[15]。由图 3(a)可以看出,随着放水冲刷历时的延长,不同过水断面的径流平均流速值呈现先减小后增大的趋势,下坡范围内的径流平均流速值基本大于上坡。由图 3(b)可以看出,径流自缓流带流经至断面 1,由于缓流带阻力较小,径流较为集中,流速很大。之后,不同时刻的径流平均流速的空间变化存在一定的波动增加的趋势,并不是一直保持增加趋势,这是由于径流在坡面流动的过程中,土壤侵蚀和能量转化交替所致。4 次波峰分别出现在第 1,4,9,13 过水断面,3 次波谷分别出现在第 2,6,11 过水断面。这是由于径流平均流速和径流侵蚀力经过缓流带后,在坡顶第 1 坡段达到峰值,土壤侵蚀较为严重。径流在经过第 2 过水断面后,径流动能消耗较大,径流平均流速快速下降,达到上坡范围内最小值。在第 3-4 断面出现小波峰后,在随后的过程中,径流在上坡范围内基本处于稳定状态,波动较小。当径流进入第 9 过水断面(下坡第 1 过水断面)时,突然变陡的下坡赋予了水流较大的能量,导致径流平均流速突然快速增加至峰值,径流动能和径流挟沙力同样也达到峰值。直至径流经过第 11 过水断面,径流平均流速降为下坡范围内最小值。然后,径流经过系统出口,径流平均流速小幅增长。根据试验实际观测情况,在整个坡面范围内,侵蚀最为严重的部位发生在第 1,4,9,13 过水断面位置附近区域,基本与径流流速峰值部位相一致。

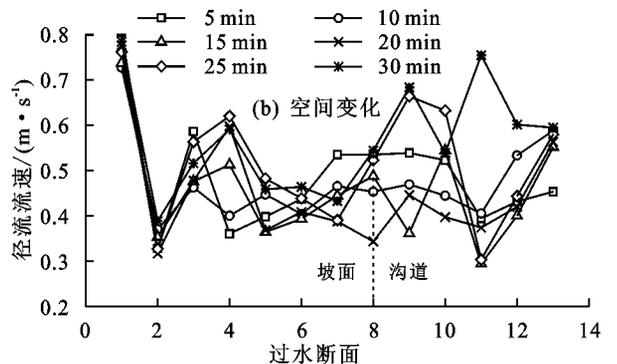
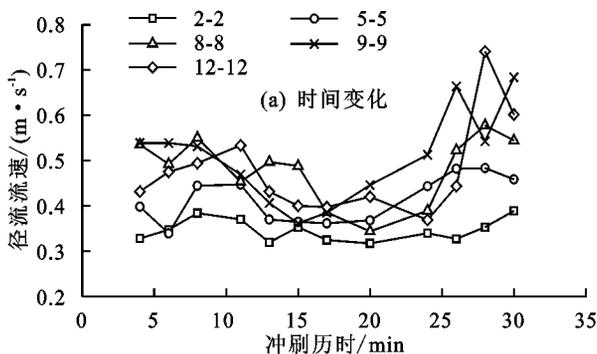


图 3 裸坡条件下径流平均流速时空变化

2.2 植被格局对径流平均流速的影响

当凸型坡种植植被后,径流遇到草带的阻隔后其平

均流速会发生一定程度的变化,不同植被格局对径流流速的作用也不尽相同。分别选取凸型坡第 9 和第 13 过

水断面径流平均流速作为观测对象,以分析上坡出口和整个凸形坡出口断面的径流流速变化情况;同时选取径流历时第 15 min 和第 25 min 时刻的径流流速,以观测径流达到稳定状态后径流流速的变化情况。

2.2.1 不同植被格局条件下径流平均流速的时间变化 图 4 为不同植被格局条件下试验过程中凸型坡第 9 和第 13 过水断面径流平均流速随冲刷历时的变化过程线。从图 4 可以看出,径流平均流速在整个冲刷阶段处于波动状态,并不随径流历时的延续速度会增大,这是由于坡面水流在流动的过程中一直

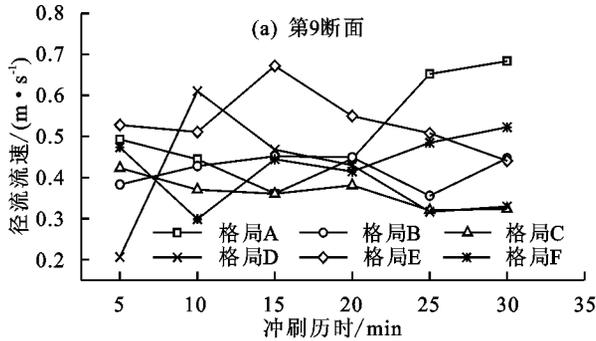
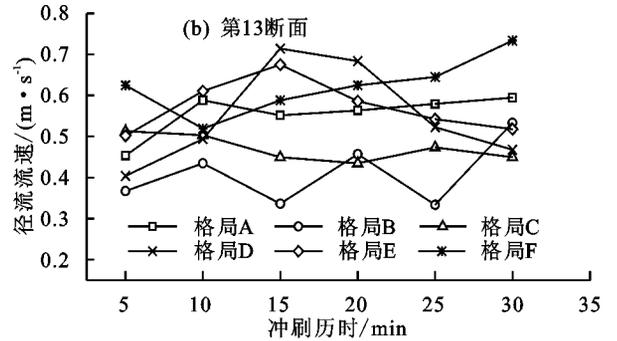


图 4 不同植被格局条件下不同断面径流平均流速时间变化



2.2.2 不同植被格局条件下径流平均流速的空间变化 图 5 为不同植被格局条件下试验过程中第 15 min 和第 25 min 时凸型坡不同过水断面位置处径流平均流速分布曲线。从图 5 可知,在 2 个时刻的不同植被格局条件下,径流平均流速均随着草带与坡顶距离的增加呈现出先快速降低然后逐渐增加的趋势。在上坡范围内,各个格局条件下径流流速基本呈波动下降趋势;当径流

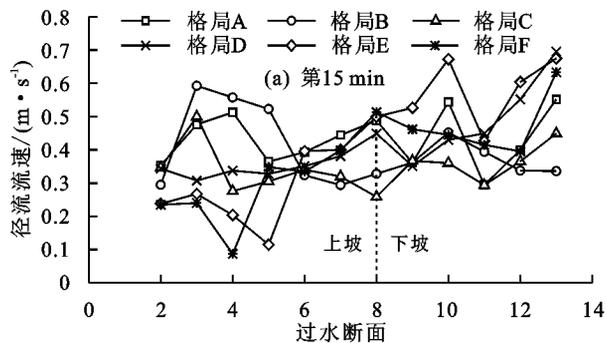
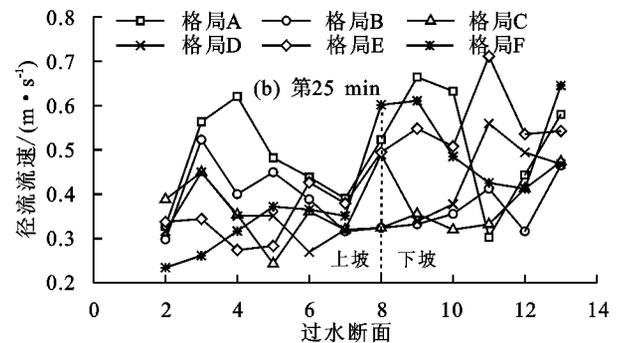


图 5 不同植被格局条件下不同时刻径流平均流速空间变化

进入下坡后,径流流速快速增加,在第 9 和第 10 过水断面位置处达到峰值,然后再次出现波动状态。裸坡条件下各个断面位置处的径流平均流速基本大于其他格局,仅有一些植被格局条件下(格局 E 和格局 F)的径流流速大于裸坡,说明一些布设位置合适的植被对径流起到了一定的延缓作用,而一些布设位置不合适的植被对径流流速起到了一定的加剧作用。

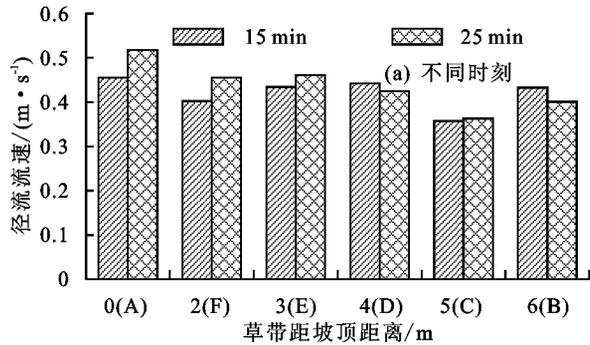


2.2.3 植被布设位置与径流平均流速的关系 图 6 展示了径流平均流速和草带布设位置与坡顶距离的关系。从图 6 可以看出,平均径流流速随着草带与坡顶距离的增加基本上呈现出先增加后减小的趋势。种植草带后,在下坡顶部即第 9 过水断面位置处的径流平均流速均有不同程度的降低,表明植被对径流具有一定的延缓作用,具有较好的水土保持效果。在凸型坡出口处(第 13 过水断面),除格局 B 和格局 C 以外,径流平均流速基本没有降低。当草带距坡顶 6 m

(格局 B)和 5 m(格局 C)时,径流平均流速均处于较低水平,即格局 B 和格局 C 均有很强的减缓流速效果,能够使径流流速降低 22%。综合以上分析,由于植被位置布设不尽合理,对径流产生了负面消极的影响,导致与裸坡相比,径流流速有所增加。

研究表明,在 25% 的低植被覆盖度条件下,与同等条件下裸坡相比,草带位于坡面中上部和上部的植被格局会产生更为严重的土壤侵蚀。这显然与常规所描述的植被的存在能够增加水分入渗、显著减少径流和

泥沙^[16]的现象相矛盾;但这一结论却与 Jin 等^[18]提出的低覆盖度会产生比裸坡更多的产沙量相类似。综合分析可知,这与整个系统径流加速范围内的水动力过程以



及水蚀过程有关。草带布设位置相对靠上,可以为径流提供足够的加速空间,当径流进入沟道,径流更为集中,径流流速较裸坡相比进一步增加。

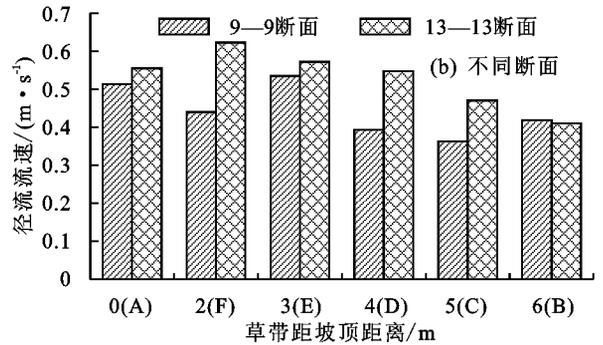


图 6 不同时刻不同断面条件下植被格局对径流平均流速的影响

2.3 不同植被格局条件下径流侵蚀输沙特征

本研究计算了不同格局条件下凸型坡放水冲刷试验的径流总量和侵蚀产沙总量。从图 7 可以看出,在放水冲刷试验情况下,凸型坡布设植被后的侵蚀产沙量和径流量均有不同程度的降低,说明植被起到了一定的蓄水减沙的水土保持功效。随着草带位置和坡顶距离的逐渐增加,径流量和产沙量基本呈现先增加后减小的趋势,仅在格局 D 条件下产沙量存在一定的波动。

减沙效益明显好于蓄水效益,最小值为 19.80%,峰值高达 69.02%。结果表明,相比蓄水减沙效益而言,草带具备更好的直接拦沙的水土保持功效,这与前期的研究^[19]结论一致。综合比较减沙效益数值,植被位于上坡底部能够发挥较好的直接拦沙的水土保持功效。同时值得注意的是,不同植被格局条件下的径流量和产沙量均表现出随着草带布设位置与坡顶距离的逐渐增加呈现先增加后减少的趋势,这与径流平均流速变化特征基本一致,说明植被对径流和侵蚀产沙的调控作用是通过水蚀动力过程的调控得以实现的。在植被对水蚀动力过程调控中,尽管各个植被格局条件下的径流量变化不大,即蓄水效益较小,植被减少径流的作用较弱;但植被的介入不同程度增加了径流阻力,减少了径流流速、径流剪切力以及径流功率,在一定程度上分散与消减了径流侵蚀能量,最终实现了对侵蚀产沙的调控作用。

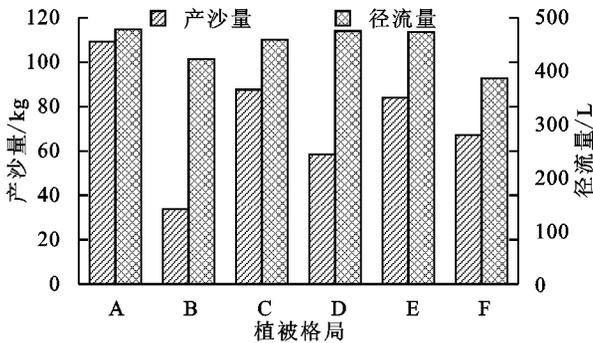


图 7 不同植被格局条件下径流产沙总量

为了进一步比较与分析不同格局调控径流、泥沙作用的强弱,本研究以裸坡条件(格局 A)为基础,计算了各个格局的蓄水效益和减沙效益。从表 1 可以看出,在放水冲刷试验条件下,各个格局下凸型坡径流量和泥沙量均有不同程度的降低,植被的布设起到了一定的蓄水减沙作用。就径流总量而言,不同格局条件下的蓄水效益大小依次为:上坡上部>上坡下部>上坡中下部>上坡中上部>上坡中部。就产沙总量而言,不同格局的减沙效益大小依次为:上坡下部>上坡中部>上坡上部>上坡中上部>上坡中下部。

总体来说,就植被蓄水效益而言,试验范围内的各个植被格局的蓄水效益均处于较低水平,说明植被对减少径流的作用均较弱;尤其是植被格局 C、D、E 条件下的蓄水效益还不足;相反各个植被的条件下的

表 1 不同植被格局条件下冲刷试验的

蓄水减沙效益计算结果 单位:%

指标	B	C	D	E	F
蓄水效益	11.71	3.95	0.51	0.94	19.07
减沙效益	69.02	19.80	46.48	23.14	38.53

注:蓄水效益是由格局 A 下径流量与格局 B、C、D、E、F 格局下径流量的差值与格局 A 下径流量相比求得;减沙效益是由格局 A 下产沙量与格局 B、C、D、E、F 格局下产沙量的差值与格局 A 下产沙量相比求得。

3 结论

(1)裸坡条件下,随着冲刷历时的逐渐增加,径流平均速度呈现出先减小后增加的态势;同时呈现出极强的空间波动状态。随着水力断面与坡顶距离的逐渐增加,呈现出先减小后增大的空间趋势,导致系统侵蚀最为严重的部位出现在上坡和下坡上部。上坡布设植被后,径流平均流速均随着草带与坡顶距离的增加呈现先增加后减小的趋势。当草带距坡顶 5~6

m 种植时,径流平均流速处于试验范围内最低水平,径流流速降低幅度可达 22%,减缓流速的效果最好,该位置附近布设草带能够最大限度削弱径流对土壤的分离和输移作用。

(2)将草带布设于坡顶距离 60%~80%位置处时,草带布设位置合理,对径流流速和产沙量的影响作用较大。此时径流量减少仅为 12%,产沙量减少 69%,达到峰值。说明植被布设于上坡底部位置时较为合理,调控作用最佳,能够有效降低凸型坡径流流速,减缓径流冲刷对表层土壤的分离能力,减少径流功率,并降低径流顺坡流动的潜在能量,从而最大程度的减少侵蚀产沙量,达到更好的水土保持功效。

(3)水沙关系的角度上,各个植被格局条件下的草带布设对减少径流的作用很弱,蓄水效益较差,草带更具有直接拦沙的水土保持功效;水蚀动力的角度上,不同植被条件下的径流量和产沙量均表现出随着草带位置距坡顶位置的逐渐增加,呈现出先增加后减少的趋势;与径流流速的变化特征基本一致,说明植被通过调控水蚀动力过程,实现了对径流和侵蚀产沙的调控作用。植被的空间配置方式改变了径流流速时空变化特征,从而实现了对水蚀动力过程较大程度的调控。

参考文献:

[1] 焦菊英,王万忠.人工草地在黄土高原水土保持中的减水减沙效益与有效盖度[J].草地学报,2001,9(3):176-181.

[2] Zhang X, Zhang L, Zhao J, et al. Responses of stream flow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China[J]. Water Resources Research, 2008, 44(7):2183-2188.

[3] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, et al. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2014, 116(5):51-59.

[4] 魏霞,李勋贵,李占斌,等.植被覆盖下黄土凸型复合坡面水流特征[J].农业工程学报,2014,30(22):147-154.

[5] 吕威,李淑芹,雷廷武,等.聚丙烯酰胺应用对黄土复合坡面降雨产流的影响[J].农业工程学报,2014,30(6):71-79.

[6] Rieke-Zapp D H, Nearing M A. Slope shape effects on erosion: A laboratory study[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(5):1463-1471.

[7] 罗榕婷,张光辉,曹颖.坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J].地理科学进展,2009,28(4):567-574.

[8] 张光辉,卫海燕,刘宝元.坡面流水动力学特性研究[J].水土保持学报,2001,15(1):58-61.

[9] Fu B J, Liu Y, Lü Y, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. Ecological Complexity, 2011, 8(4):284-293.

[10] Pan C Z, Shangguan Z P. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331(1):178-185.

[11] Pan C Z, Shangguan Z P. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall [J]. Catena, 2007, 70(3):350-355.

[12] Li M, Yao W Y, Ding W F, et al. Effect of grass coverage on sediment yield in the hillslope-gully side erosion system [J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(3):321-330.

[13] Benito E, Santiago J L, De Blas E, et al. Deforestation of water-repellent soils in Galicia (NW Spain): Effects on surface runoff and erosion under simulated rainfall[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(2):145-155.

[14] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J]. Progress in Physical Geography, 2005, 29(2):189-217.

[15] Li Grag, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow[J]. Earth surface Processes and Landforms, 1996, 21(6):509-515.

[16] Nadal-Romero E, Lasanta T, Regúés D, et al. Hydrological response and sediment production under different land cover in abandoned farmland fields in a Mediterranean mountain environment [J]. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 2011, 201(55):303-323.

[17] Zhang X, Li P, Li Z B, et al. Effects of precipitation and different distributions of grass strips on runoff and sediment in the loess convex hillslope [J]. Catena, 2018, 162:130-140.

[18] Jin K, Cornelis W M, Gabriels D, et al. Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses[J]. Catena, 2009, 78(1):81-86.

[19] Zhang X, Yu G Q, Li Z B, et al. Experimental study on slope runoff, erosion and sediment under different vegetation types[J]. Water Resources Management, 2014, 28(9):2415-2433.