

# 植被空间配置对凸型坡侵蚀及泥沙颗粒分选的影响

苏远逸<sup>1,2</sup>, 李鹏<sup>1,2</sup>, 任宗萍<sup>1,2</sup>, 李聪<sup>3</sup>, 杨殊桐<sup>1,2</sup>, 张建文<sup>1,2</sup>, 刘展<sup>1,2</sup>

(1.西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048;

2.西安理工大学旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室,西安 710048;3.河南黄河水文勘测设计院,郑州 450004)

**摘要:**针对黄土高原水土流失严重的问题,结合该地区缺水的现状,在有限的植被措施条件下,以凸型坡为研究对象,将草带布设在上坡面5种不同位置,利用室内放水冲刷试验对不同植被空间配置下坡面侵蚀过程和泥沙颗粒分选特征进行了研究,阐明了植被能够有效发挥水土保持功效的作用,并初步提出在低植被覆盖度下植被发挥水土保持功效的最优植被空间配置。结果表明:(1)不同植被空间配置的产流强度 $C_v$ 值为10.26%~15.50%,产流强度的波动程度较小,其中配置A的产流强度与配置B和配置F的产流强度表现为显著性差异( $p < 0.05$ ),不同植被空间配置的产沙强度 $C_v$ 值均在26.00%以上,配置A的产沙强度与其他配置的产沙强度均表现为显著性差异( $p < 0.05$ ),在坡面布设草带对产沙过程的影响大于对产流过程的影响;(2)在凸型坡的上坡面种植植被后,总产流产沙量与裸坡(配置A)相比均有不同程度的降低,其中配置F的减水效益达到19.65%,配置B的减水效益高达70%以上;(3)不同植被空间配置下泥沙颗粒平均重量直径(MWD)的平均值表现为配置A>配置F>配置D>配置E>配置C>本底物>配置B,MWD的平均值随着产流时间的延长逐渐稳定并接近于本底物,在有植被覆盖坡面的水力侵蚀条件下,侵蚀颗粒以细颗粒为主,粉粒含量较高,砂粒含量相对较小,并且植被布设位置距离坡顶越远更容易侵蚀0.002~0.05 mm的粉粒。研究结果有助于加深植被空间配置对坡面侵蚀产沙作用机理的理解。

**关键词:** 植被空间配置; 凸型坡; 放水冲刷; 颗粒分选

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2020)04-0145-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.04.022

## Effects of Vegetation Spatial Position on Convex Slope Erosion and Sediment Particle Size Fractionation

SU Yuanyi<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>1,2</sup>, REN Zongping<sup>1,2</sup>, LI Cong<sup>3</sup>,

YANG Shutong<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianwen<sup>1,2</sup>, LIU Zhan<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048;

2.Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 3.Henan Yellow River Hydrological Survey and Design Institute, Zhengzhou 450004)

**Abstract:** Aiming at the serious problem of soil erosion on the Loess Plateau, combined with the current situation of water shortage in the region, under the condition of limited vegetation measures, the convex slope was taken as the research object, and the grass belt was laid on 5 different positions on the upslope, and the indoor water discharge was used. The experiment studied the slope erosion process and sediment particle size fractionation characteristics under different vegetation spatial positions, and clarified that the vegetation can effectively exert the soil and water conservation effect, and primitively proposed the optimal position of soil and water conservation effects under low vegetation coverage. The results showed that: (1) The  $C_v$  value of the flow intensity of different vegetation spatial positions is between 10.26% and 15.50%, and the fluctuation of the runoff intensity is small. The runoff intensity of position A and the runoff of position B and position F were small. The intensity showed a significant difference ( $p < 0.05$ ), and the  $C_v$  value of the sediment yield in different vegetation spatial positions were above 26.00%. The sediment yield intensity of the position A showed significant difference with sediment yield of other positions ( $p < 0.05$ ).

**收稿日期:** 2019-11-26

**资助项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFC0402404); 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放基金项目(201805); 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); 陕西省创新人才推进计划项目科技(水土资源环境演变与调控)创新团队项目(2018TD-037)

**第一作者:** 苏远逸(1993—),男,陕西宝鸡人,博士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: suyuanyi666@163.com

**通信作者:** 任宗萍(1982—),女,山东潍坊人,博士,副教授,主要从事生态水文过程和土壤侵蚀研究。E-mail: renzongping@163.com

The effect of laying grass strips on the slope on the sediment production process was greater than the impact on the runoff process. (2) After planting vegetation on the upslope of the convex slope, the total runoff yield was reduced to a different extent compared with the bare slope (Position A), and the water reduction benefit of the position F was 19.65%. The sediment yield reduction benefit of position B was as high as 70% or more. (3) The average value of the average weight diameter (MWD) of sediment particles in different vegetation spatial position was: Position A>Position F>Position D>Position E>Position C>Substrate>Position B, the mean value of MWD gradually stabilized and approached the substrate with the prolongation of runoff generation time. Under the condition of hydraulic erosion with vegetation coverage, the erosion particles were mainly fine grains, the content of powder grains was higher, and the content of sand was relatively small. The farther the vegetation was from the top of the slope, the easier it was to erode 0.002~0.05 mm of powder. This study will help to deepen the understanding of the spatial distribution of vegetation on the mechanism of convex slope erosion and sediment production.

**Keywords:** vegetation spatial position; convex slope; water discharge; particle size fractionation

黄土高原地区千沟万壑、地形复杂,植被覆盖度较低,并且受人类活动影响大,导致该地区土壤侵蚀严重,平均每年的水土流失量达到 0.5~1 万 t/km<sup>2</sup>[1-4]。严重的水土流失不仅破坏了生态环境,还阻碍了社会的可持续发展[5-6]。凸型坡是沟间地的一段坡面,由于坡型不同,使降雨入渗后水分在坡面土壤的分布不同,最终导致凸形坡的侵蚀产沙特征不同于普通的黄土坡面。张震等[7]研究发现,凸形坡在冲刷条件下,裸坡的坡面流速空间波动剧烈,并且上坡面上部和下坡面的上部侵蚀较为严重。因此凸型坡侵蚀过程的发展是研究黄土区土壤侵蚀机理的核心问题,同时也是治理流域水土流失的关键问题[8-10]。

在土壤侵蚀的研究过程中,关于植被对侵蚀产沙调控作用的研究较多。众多研究[11-14]表明,在坡面上种植植被能够有效削弱径流侵蚀动力,提高土壤抗冲性,从而抑制水土流失。合理的植被空间配置可以有效改善土壤性状,抑制土壤粗化,减少土壤有机质的流失等[15-18]。同时也有研究[19]表明,不合理的植被空间配置将会导致更为严重的土壤侵蚀,因此在一定的植被覆盖度下,合理的空间配置是治理水土流失的关键。然而以上研究大部分都基于直型坡面,由于凸型坡侵蚀产沙的特殊性,需要加强研究凸型坡植被空间配置及其对侵蚀产沙、土壤性状等影响的研究。

由于侵蚀泥沙颗粒的粒径分布特征能够很好地反映侵蚀的变化过程,同时也能反映土壤的理化性状,因此泥沙粒径分选的研究成为土壤侵蚀过程研究的一个重要指标[20-21]。Slattery 等[22]研究发现,在侵蚀开始阶段,侵蚀泥沙颗粒中的黏粒和粉粒含量较高;随着侵蚀的继续,泥沙颗粒逐渐变粗,砂粒含量增加,最终趋于稳定;吴凤至等[23]定量研究了黄土坡面侵蚀过程中侵蚀泥沙颗粒分布特征,分析得出在细沟间侵蚀阶段粗颗粒减少,细颗粒增多,土壤质量下降。坡面侵蚀泥沙颗粒

的粒径分布特征受诸多因素的影响,例如土壤质地、降雨特性、径流类型、冻融作用和地形特征等[24-26]。在坡面微地形发生突变时,不同的植被空间配置如何影响坡面土壤侵蚀的水动力过程[27],进而影响径流对侵蚀泥沙颗粒的搬运能力,导致侵蚀泥沙颗粒的粒径分布特征发生改变需要进一步研究[9,28-31]。

因此本研究从凸型坡角度开展植被减蚀效应以及侵蚀泥沙颗粒分选过程研究,进一步加强黄土坡面侵蚀过程研究,优化植被的合理配置,维护黄土高原植被建设成果,为黄土坡面高质量建设提供重要的理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料与装置

本次以陕北黄土高原丘陵沟壑区的凸型坡作为研究对象,并以黄土作为试验用土。经 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测定得出土壤颗粒组成为黏粒 12.93%,粉粒 82.55%和砂粒 4.52%。根据美国农业部(USDA)的土壤分类标准,确定土壤质地为粉砂质壤土。

根据黄土高原凸型坡的地貌特征,对凸型坡进行概化,建立凸型坡概化物理模型(图 1),并结合实验室基础设施状况和试验设计原则,组成凸型坡概化模型试验系统[32]。物理模型分为上坡面和下坡面两部分,宽度 1 m,其中上坡面长 8 m,坡度为 12°,下坡面长 5 m,坡度为 25°,水平投影面积为 11.55 m<sup>2</sup>,上坡面与下坡面的长度比为 1.6:1.0,可以基本表征黄土高原丘陵沟区凸型坡的地貌特征[33-34]。凸型坡概化模型试验系统的土槽由钢板制成,土槽中间由 PVC 板隔开,分为左槽和右槽两部分,以此来重复试验。在凸型坡顶部放置 2 个长 0.5 m、宽 0.2 m、高 0.2 m 的水槽,控制水流在进入凸型坡流速相同。

### 1.2 试验设计与方法

以黄土高原地区的经济状况为基础,并结合当地

干旱缺水的情况和现有对植被蓄水保土效益的研究,最终设定放水冲刷试验的植被覆盖度为25%<sup>[35]</sup>。试验选取适合在黄土高原地区生长的野生马尼拉草(*Zoysiamatrella*)作为试验用草,草带尺寸为2 m×0.5 m(长×宽),根系深度为20 cm。在本研究中,将整个凸型坡被均分成13个断面,每个断面的尺寸均为1 m×0.5 m(长×宽),草带在凸型坡的空间配置见图2。配置A为裸坡,植被距坡顶6 m记为配置B,依次类推,植被距坡顶2 m记为配置F。

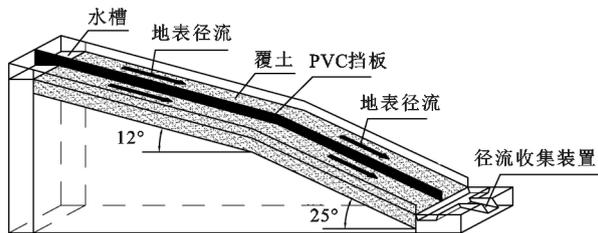


图1 凸型坡概化模型示意

在试验开始前,为保证试验土壤的透水性与自然状态相似,先在钢槽底部铺20 cm的天然砂层。试验用土分层装入,每层5 cm,共4层,夯实土壤,控制土壤容重在1.3 g/m<sup>3</sup>左右。在试验之前提前喷洒水预湿,控制初始土壤含水率在20%左右。填土时,根据试验设计的植被空间配置在对应位置预留10 cm空间,试验开始2周前将草带移植到该部位让其自然生长,并将连接处的空隙填土压实,防止草带滑动。

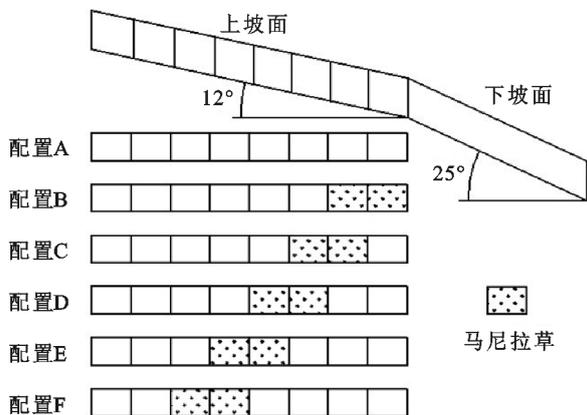


图2 冲刷试验坡面植被空间配置示意

本试验于2017年4—5月在西安理工大学雨洪侵蚀大厅进行,具体试验设计见表1。降雨资料显示黄土区大雨雨强约为90 mm/h,相当于16 L/min的放水流量。在率定好流量之后进行试验。当集流槽处开始产流后每1 min收集1次径流和泥沙样品,并对径流量进行测量。将收集好的浑水静置24 h后倒掉上层清液,分离出泥沙样品,并将泥沙样品放置在105℃的烘箱中,8 h后取出称重,得到每1 min的产沙量。同时,收集和保存烘干后的侵蚀泥沙,过2 mm的筛后采用Mastersizer 2000激光粒度分析仪对样品的粒径大小进行测定。该样品不做任何分散

处理,测得的资料表征泥沙的有效粒径分布<sup>[36]</sup>。每场试验在开始产流后持续30 min,每组试验做2次,最后采用2次试验的平均值。

表1 冲刷试验植被空间配置设计

植被空间配置	冲刷流量/(L·min <sup>-1</sup> )	植被距坡顶距离/m	植被覆盖率/%	径流历时/min
A	16	裸坡	0	30
B	16	6	25	30
C	16	5	25	30
D	16	4	25	30
E	16	3	25	30
F	16	2	25	30

### 1.3 数据处理与分析

侵蚀过程中的颗粒分选特征用平均重量直径(MWD)表示<sup>[37]</sup>,其计算公式为:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n x_i W_i}{100} \quad (1)$$

式中: $x_i$ 为第*i*级颗粒的平均值(mm); $W_i$ 为第*i*级颗粒的所占的体积分数(%);*i*分为7级,按照美国农业部分级标准进行分级,即<0.005,0.005~0.1,0.1~0.2,0.2~0.5,0.5~1,1~2,>2 mm。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡面侵蚀特征

2.1.1 产流特征 结合图3和表2可以看出,不同植被空间配置的产流强度均随产流时间的增加变化趋势大致相同,呈先增加后逐渐趋于稳定的趋势,不同植被空间配置产流强度的Cv值为10.26%~15.5%,产流强度的波动范围较小,说明在上坡面种植草带对坡面产流过程的影响较小;经ANOVA方差分析表明,配置A的产流强度与配置B和配置F的产流强度表现为显著性差异( $p < 0.05$ )。在0~5 min内,产流强度快速增长,波动剧烈,处于不稳定状态。随着试验的继续,土壤含水量的增加,土壤入渗率逐渐降低,5~10 min产流强度增加速度减小,在10~30 min,产流强度基本稳定。各植被空间配置时段1的产流量占总产流量的比例较小,为12.33%~13.63%。在上坡面布设植被后总产流量均有不同程度的降低,说明植被起到了一定的水土保持功效,其中配置F的减水效果最好,减水效益达到19.65%,这是由于配置F的草带位置相距坡顶距离较短,上方来水来沙量相对较少,且由于草带的存在,拦截了上方的来水来沙,使得上方来水量多用于下渗而形成的径流较少,因此配置F的总产流量较小。对于产流量峰值而言,在坡面种植草带后不同植被空间配置条件下的产流峰值较配置A均有不同程度的减小,产流峰值是配置A的0.86~0.96倍。

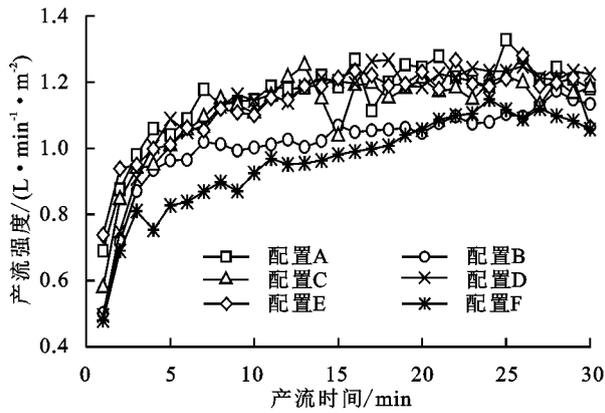


图 3 不同植被空间配置下产流过程及特征

表 2 不同植被空间配置下产流特征值

植被空间配置	波动范围/ ( $L \cdot \min^{-1} \cdot m^{-2}$ )	$Cv/\%$	均值/ ( $L \cdot \min^{-1} \cdot m^{-2}$ )	产流 峰值/L	减水 效益/ $\%$
A	0.69~1.33	11.06	1.16	17.27	—
B	0.50~1.17	12.88	1.02	15.26	12.13
C	0.58~1.25	12.37	1.11	16.24	3.79
D	0.49~1.27	14.48	1.14	16.47	1.79
E	0.74~1.28	10.26	1.13	16.65	1.95
F	0.48~1.15	15.50	0.96	14.93	19.65

2.1.2 产沙特征 结合图 4 和表 3 可以看出,产沙强度随着产流时间的增加变化过程波动较大, $Cv$  值为 26.51%~76.12%,在 0~5 min 不同植被空间配置的产沙强度较大,在 5~30 min 产沙强度减小,波动剧烈,经 ANOVA 方差分析表明,配置 A 的产沙强度与其他配置的产沙强度均表现为显著性差异( $p < 0.05$ ),说明在坡面布设草带对坡面产沙过程影响较大,不同植被空间配置对产沙过程的影响大于对产流过程的影响。在试验条件下,配置 B 的总产沙量最小,减沙效益高达 70.22%,表明在距坡顶 6 m 处布设草带具有较好的直接拦沙的水土保持功效。这是由于配置 B 的草带位置位于上坡面

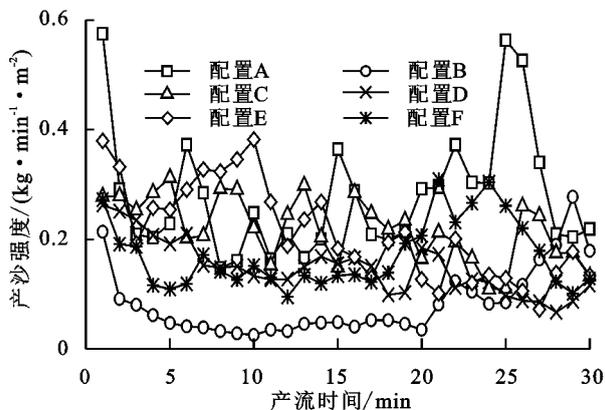
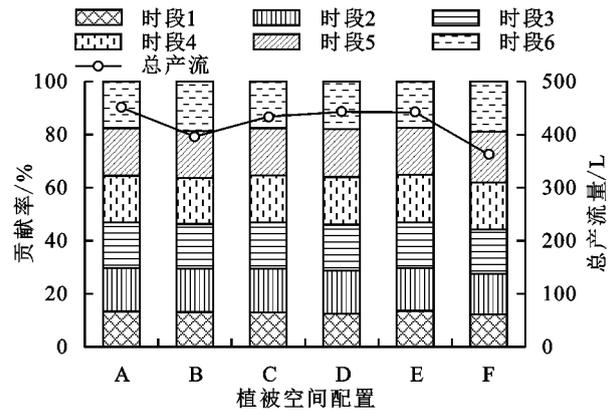


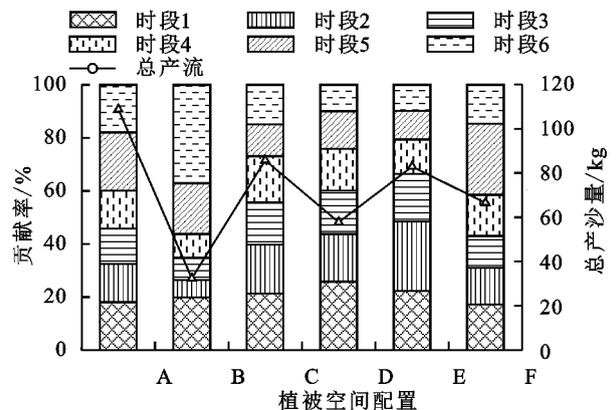
图 4 不同植被空间配置下产沙过程及特征

## 2.2 坡面侵蚀泥沙颗粒分选特征

2.2.1 侵蚀过程中泥沙颗粒平均重量直径(MWD)变化规律 从图 5 可以看出,在坡面开始产流后,配置 A 的 MWD 迅速增加,随后降低并保持稳定,在产流末期逐渐降低并接近于本底物的 MWD。配置 C、配置 D



与下坡面的交界处,上方来水来沙经过草带被大量拦蓄,且由于草带的存在增加坡面粗糙度,使得水流流速减缓,径流挟沙能力减弱,因此总产沙量明显减小。虽然在配置 B 条件下总产沙量最小,但是分析不同时间段的产沙量对总产沙量的贡献率可以看出,随着时间的延长,时段 5 和时段 6 的产沙贡献率分别达到 19.05% 和 37.16%,说明植被拦沙的效果随着产流时间的延长在逐渐减弱。不同植被空间配置的产沙峰值分别是配置 A 的 48.3% (配置 B), 54.28% (配置 C), 45.59% (配置 D), 62.43% (配置 E) 和 53.74% (配置 F), 相比削弱产流峰值而言,植被削弱产沙峰值的效果更好。



和配置 E 下 MWD 的变化规律较为相似,从产流开始至产流结束在本底物附近上下波动,并在产流末期趋于本底物。配置 B 的 MWD 在产流开始的 0~6 min 迅速减小,随后在 6~15 min 增大并接近本底物的 MWD,在 15~30 min 波动剧烈并呈增大趋势。配置 F 的

MWD 在 0~21 min 波动程度较小,在 21 min 之后 迅速增大后减小,到产流结束接近本底物的 MWD。

表 3 不同植被空间配置下产沙特征值

植被空间配置	波动范围/ (kg · min <sup>-1</sup> · m <sup>-2</sup> )	Cv/%	平均值/ (kg · min <sup>-1</sup> · m <sup>-2</sup> )	产沙 峰值/kg	减沙 效益/%
A	0.15~0.58	40.66	0.28	7.48	—
B	0.03~0.28	76.12	0.08	3.61	70.22
C	0.11~0.31	26.51	0.22	4.06	21.19
D	0.07~0.26	33.83	0.15	3.41	46.88
E	0.07~0.38	41.69	0.21	4.67	23.81
F	0.10~0.31	36.47	0.17	4.02	38.84

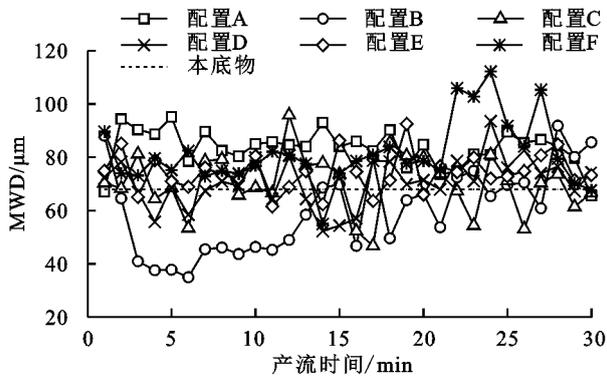


图 5 不同植被空间配置下坡面侵蚀泥沙颗粒平均重量直径 (WMD) 随时间的变化特征

为了进一步揭示泥沙颗粒 MWD 的变化规律,将本底物和不同植被空间配置下 MWD 的平均值、最大值和最小值进行统计并绘制成表(表 4)。MWD 的平均值表现为配置 A>配置 F>配置 D>配置 E>配置 C>本底物>配置 B。配置 A 的 MWD 平均值最大,为 83.49 μm,变化范围为 65.55~95.15 μm,配置 B 的 MWD 平均值最小,为 60.25 μm,变化范围为 34.92~91.85 μm。经 ANOVA 方差分析结果表明,配置 C、配置 D 和配置 E 的 MWD 之间没有显著性差异,配置 B 的 MWD 与其他配置的 MWD 均表现为显著性差异( $p < 0.05$ ),并且配置 B 的 MWD 显著小于本底物的 MWD( $p < 0.05$ )。

表 4 不同植被空间配置下 MWD 的统计特征

单位:μm

特征值	本底物	植被空间配置					
		A	B	C	D	E	F
平均值	67.92	83.49	60.25	70.24	74.31	73.72	81.23
最大值	—	95.15	91.85	95.85	92.53	77.37	112.22
最小值	—	65.55	34.92	46.78	61.56	70.51	54.99

2.2.2 不同粒级泥沙颗粒含量的变化规律 从图 6 可以看出,不同植被空间配置下黏粒含量极低,随着产流时间的延长并无明显变化规律(图 6a)。在坡面开始产流后,配置 A 粉粒的含量迅速减小,随后上下波动并保持相对稳定,在 25 min 后,粉粒含量有所增加。配置 C、配置 D 和配置 E 粉粒含量随时间的变化规律较为相似,从产流开始粉粒含量上下波动并保

持相对稳定直到试验结束。配置 B 粉粒的含量在 0~6 min 迅速增加,随后在 6~15 min 减小,在 15~30 min 波动剧烈并呈减小趋势。配置 F 粉粒的含量在 0~21 min 波动程度较小,在 21 min 之后迅速减小后增大(图 6b)。不同植被空间配置下砂粒含量随着时间的变化趋势与粉粒相反(图 6c)。

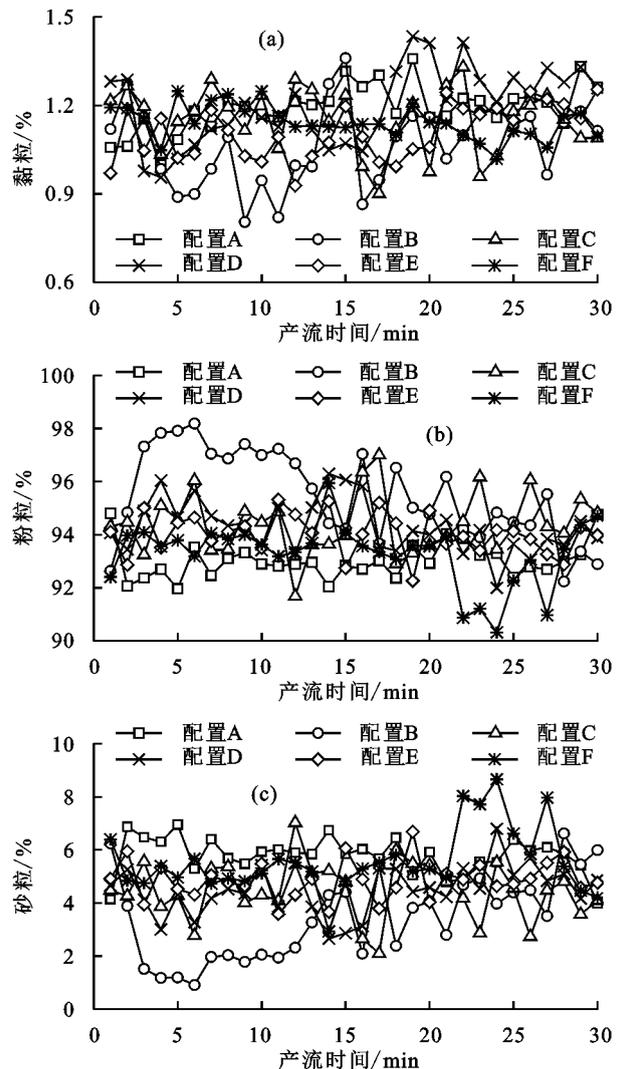


图 6 不同植被空间配置下各粒级泥沙有效粒径百分含量随时间的变化规律

由表 5 可以看出,不同植被空间配置下黏粒含量极少,占总量的 1.07%~1.20%。不同植被空间配置下粉粒含量较高,均达到 93%以上,其中配置 B 的粉

粒含量最大,达到 95.48%。对于砂粒含量而言,随着草带布设位置距坡顶距离不断增大,砂粒含量逐渐减小,这可能与坡面的水力条件有关。经 ANOVA 方差分析结果表明,在整个产流过程中,不同植被空间配置下黏粒含量均显著大于本底物黏粒的含量( $p < 0.05$ ),粉粒含量均显著小于本底物粉粒的含量( $p < 0.05$ ),并且配置 B 的粉粒和砂粒含量与其他配置均表现为显著性差异( $p < 0.05$ )。

表 5 不同植被空间配置下各粒级泥沙有效颗粒的平均百分含量 单位: %

颗粒组成	本底物	植被空间配置					
		A	B	C	D	E	F
黏粒	12.93	1.19	1.07	1.15	1.20	1.11	1.14
粉粒	82.55	93.02	95.48	94.38	94.29	94.03	93.30
砂粒	4.52	5.79	3.45	4.47	4.51	4.86	5.56

### 3 讨论

自 21 世纪以来,我国全面启动退耕还林还草工程,黄土高原地区原本裸露的黄土坡面在种植植被后使该地区的侵蚀状况发生改变,因此对于黄土区典型的凸型坡在种植植被前后土壤侵蚀差异的研究将为治理该地区水土流失提供可靠的理论依据。在本研究中,当坡面种植植被后,增加了径流阻力,减小了径流流速,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。试验范围内各植被空间配置条件下的减水作用均较弱,相反各个植被空间配置条件下的减沙效果明显好于减水效果,并且植被位于上坡面底部能够发挥较好的直接拦沙的水土保持功效。

Issa 等<sup>[38]</sup>研究认为,泥沙颗粒的变化主要受坡面径流作用的影响,径流是输移泥沙颗粒的主要因素之一。由于配置 A 的上坡面没有植被覆盖,导致在产流开始后坡面径流快速增大,坡面径流对粗颗粒的输移能力较强,造成侵蚀泥沙中砂粒含量较高(图 6c),因此坡面泥沙颗粒的 MWD 较大。当试验进行到一定阶段,坡面逐渐有细沟形成,此时侵蚀泥沙由细沟间侵蚀泥沙和细沟侵蚀泥沙组成<sup>[39]</sup>。由于细沟流的侵蚀动力更强,径流可以携带更多的细颗粒,因此在试验中后期侵蚀泥沙中细颗粒含量增加(图 6b),导致径流对侵蚀泥沙颗粒的分选性减弱<sup>[40]</sup>。在上坡面种植植被后,由于草带的存在增加坡面粗糙度,改变了坡面径流的水力学特性,使得径流流速减缓,坡面的径流侵蚀动力减小,径流对粗颗粒的搬运能力减弱,因此坡面泥沙颗粒相对于配置 A 的 MWD 较小。草带布设在上坡面的不同位置对泥沙颗粒分选的影响有所不同,总体来说,在有植被覆盖坡面的水力侵蚀条件下,侵蚀颗粒以细颗粒为主,粉粒含量较高,砂含量相对较小,并且植被布

设位置距离坡顶越远,更容易侵蚀 0.002~0.05 mm 的粉粒(表 5)。在不同植被空间配置条件下,随着试验的进行,坡面逐渐产生细沟并且不断发育,细沟侵蚀量占总侵蚀量的比重不断增大,导致侵蚀泥沙颗粒逐渐稳定并接近于本底物(图 5)。

### 4 结论

(1)在本试验条件下,不同植被空间配置的产流强度均随着产流时间的增加呈先增加后逐渐趋于稳定的趋势,产流强度的  $C_v$  值为 10.26%~15.50%,产流强度的波动程度较小,其中配置 A 的产流强度与配置 B 和配置 F 的产流强度表现为显著性差异( $p < 0.05$ )。不同植被空间配置的产沙强度随着产流时间的增加变化过程波动剧烈,配置 A 的产沙强度与其他配置的产沙强度均表现为显著性差异( $p < 0.05$ ), $C_v$  值均在 26%以上,在坡面布设草带对产沙过程的影响大于对产流过程的影响。

(2)在凸型坡的上坡面种植植被后,产流产沙峰值与裸坡(配置 A)相比均有不同程度的减小,并且总产流产沙量与裸坡(配置 A)相比均有不同程度的降低,说明在凸形坡的上坡面布设草带可以起到减水减沙的作用,其中配置 F 的减水效果最好,减水效益达到 19.65%,配置 B 的减沙效益最好,减沙效益高达 70%以上。

(3)不同植被空间配置下 MWD 的平均值表现为配置 A>配置 F>配置 D>配置 E>配置 C>本底物>配置 B,随着试验的进行,侵蚀泥沙颗粒逐渐稳定并接近于本底物。在有植被覆盖坡面的水力侵蚀条件下,侵蚀颗粒以细颗粒为主,粉粒含量较高,砂粒含量相对较小,并且植被布设位置距离坡顶越远,更容易侵蚀 0.002~0.05 mm 的粉粒。

#### 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 P, 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): 1-12.
- [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] 王旭东,张霞,王彦丽,等.不同耕作方式对黄土高原黑垆土有机碳库组成的影响[J].农业机械学报,2017,48 (11):229-237.
- [5] 王兵,刘国彬,张光辉,等.黄土丘陵区中尺度流域水土流失治理环境效应评估[J].农业机械学报,2012,43(7): 28-35.

- [6] 谢永生,李占斌,王继军,等.黄土高原水土流失治理模式的层次结构及其演变[J].水土保持学报,2011,25(3):211-214.
- [7] 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.
- [8] García-Ruiz J M, Lana-Renault N, Begueria S, et al. From plot to regional scales: Interactions of slope and catchment hydrological and geomorphic processes in the Spanish Pyrenees[J].*Geomorphology*,2010,120(3/4):248-257.
- [9] Fu B J, Liu Y, Lv Y H, 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] 魏霞,李占斌,李勋贵,等.黄土高原坡沟系统土壤侵蚀研究进展[J].中国水土保持科学,2012,10(1):108-113.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 张霞.黄土区地貌与植被格局的侵蚀动力过程试验研究[D].西安:西安理工大学,2018.
- [14] 李鹏,李占斌.植被保持水土有效性研究进展[J].水土保持研究,2002,9(1):76-80.
- [15] 吴卿,杨春霞,甄斌,等.草被覆盖度对黄土坡面径流产沙影响的试验研究[J].中国水土保持,2010(9):56-58.
- [16] 程圣东,李鹏,李聪,等.降雨—植被格局耦合作用对坡沟系统水沙特征影响[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(2):230-241.
- [17] 马勇勇,李占斌,任宗萍,等.草带布设位置对坡沟系统水文连通性的影响[J].农业工程学报,2018,34(8):170-176.
- [18] 贾莲莲.模拟降雨条件下黄土坡面侵蚀过程与调控试验研究[D].西安:西安理工大学,2010.
- [19] 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.
- [20] 张文辉,刘国彬.黄土高原植被生态恢复评价、问题与对策[J].林业科学,2007(1):102-106.
- [21] 张洋,张辉,李占斌,等.不同降雨强度下黄土区冻土坡面产流产沙过程及水沙关系[J].农业工程学报,2018,34(11):144-150.
- [22] Slattery M C, Burt T P. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow [J].*Earth Surface Processes and Landforms*,1997,22(8):705-719.
- [23] 吴凤至,史志华,岳本江,等.坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[J].土壤学报,2012,49(5):1235-1240.
- [24] 汤珊珊,李鹏,任宗萍,等.模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究[J].土壤学报,2016,53(1):39-47.
- [25] 李占斌,李社新,任宗萍,等.冻融作用对坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):56-60.
- [26] 朱高立,文博,李静,等.不同雨强和覆盖度条件下崩积体侵蚀泥沙颗粒特征[J].土壤学报,2016,53(6):1371-1379.
- [27] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响[J].土壤学报,2014,51(5):974-982.
- [28] 郑明国,蔡强国,王彩峰,等.黄土丘陵沟壑区坡面水土保持措施及植被对流域尺度水沙关系的影响[J].水利学报,2007,38(1):47-53.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 李聪.植被格局对坡沟系统侵蚀输沙过程调控作用试验研究[D].西安:西安理工大学,2015.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 韩鹏,李秀霞.黄河流域土壤侵蚀及植被水保效益研究[J].应用基础与工程科学学报,2008,16(2):181-190.
- [36] Wang L, Shi Z H, Wang J, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China[J].*Journal of Hydrology*,2014,512:168-176.
- [37] 汤珊珊,高海东,李占斌,等.坡面覆沙后侵蚀泥沙颗粒分选特性[J].农业工程学报,2017,33(2):133-138.
- [38] Issa O M, Bissonnais Y L, Planchon O, et al. Soil detachment and transport on field and laboratory-scale interrill areas: Erosion processes and the size-selectivity of eroded sediment [J].*Earth Surface Processes and Landforms*,2006,31(8):929-939.
- [39] Asadi H, Ghadiri H, Rose C W, et al. An investigation of flow-driven soil erosion processes at low stream-powers[J].*Journal of Hydrology*,2007,342(1/2):134-142.
- [40] Shi Z H, Yan F L, Li L, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China [J].*Catena*,2010,81(3):240-248.