

不同草带空间分布对坡面缓流效应调控机制

贾莲莲¹, 樊冰¹, 朱冰冰²

(1.黄河水利委员会黄河上中游管理局, 西安 710021; 2.陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710061)

摘 要:为了研究植被对坡面缓流效应的影响机制,研究选取坡面开展室内降雨试验,分析了植被调节下的径流、输沙变化特征,阐明了草带对径流流速的调控作用。结果表明:草带种植于 13 m 坡面的上坡下部 60% 位置,可以充分发挥出缓流效应,调控径流流速范围达到坡面 70% 的区域,流速降低 50%,控制了坡面流速的增加,有效抑制了流速的恢复;而且能够合理控制径流含沙量,进一步减缓径流侵蚀强度,水土流失治理效果达到试验范围内最优。随着草带位置的逐渐上移,坡面径流流速降低至最小后又逐渐增加。动力恢复空间具有临界现象,动力恢复距离超过坡面长度的 54%,径流流速增加明显,草带调控径流作用减弱,甚至加剧侵蚀;动力恢复距离小于坡面长度的 54%,径流流速降低显著,草带调控径流作用增强,侵蚀强度减弱。研究结果揭示了植被通过对流速的缓流效应来调控土壤侵蚀输沙过程,可为植物措施的水土保持规划提供参考依据。

关键词:草带空间分布; 径流流速; 缓流效应; 动力恢复空间

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)03-0371-06

Regulation Mechanism of Different Grass Spatial Distribution on the Runoff Retardation Effect on a Slope

JIA Lianlian¹, FAN Bing¹, ZHU Bingbing²

(1.Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Xi'an 710021, China; 2.School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to study the mechanisms of influence of vegetation on the runoff retardation effect of a slope, the regulating effect of a grass strip on runoff velocity was quantified after the characteristics of runoff and sediment yield under different spatial distribution conditions of vegetation were analyzed by means of the indoor simulated rainfall experiments on a selected slope. The results show that the grass strip planted at a place about 60% from the top of the slope can fully exert its runoff retardation effect, with runoff velocity regulating scope accounting for 70% of the whole slope, and runoff velocity decreasing by 50%; the grass strip controls the runoff velocity on the slope and effectively inhibits the recovery of runoff velocity; in addition, the grass strip can reasonably control the sediment content of runoff, further reducing the runoff erosion intensity, so the soil and water loss control effect is optimal in the experimental scope; the runoff velocity decreases to its minimum and then increases with the gradual decrease in the distance between the grass strip and the slope top. There is a critical phenomenon in the hydrodynamic recovery space of runoff. When the hydrodynamic recovery distance is more than 54% of the slope length, the increase in runoff velocity is evident, the regulating effect of grass strip on runoff velocity weakens and the grass strip even aggravates the erosion; when the hydrodynamic recovery distance was less than 54% of the slope length, the decrease in runoff velocity was significant, the regulating effect of grass strip on runoff velocity enhances and the erosion intensity weakens. These research results can reveal that vegetation regulates soil erosion and sediment transport processes by the runoff retardation effect, and can provide reference bases for planning of soil and water conservation based on the vegetation measures.

Keywords: grass spatial distribution; runoff velocity; runoff retardation effect; hydrodynamic recovery space

植被具有截留降水、增加入渗、减少径流流速,提高土壤抗蚀、抗冲性的功效。黄土高原地区,水资源十分匮乏,重建植被和恢复植被是保护和提升生态环境质量的有效措施之一^[1-3]。因此,深化植被调控侵蚀和输沙的认识,对于深刻揭示植被减沙减蚀机理,准确提出水土保持综合治理和措施优化配置^[2-3]具有重要的科学和现实意义。

在黄土高原地区,关于植被调控坡面侵蚀的研究取得了诸多成果^[1-6]。以往多是在裸坡坡面下开展径流流速变化特征的研究,而对植被调控流速的研究较少,且未能全面反映坡面各个部位的流速变化特征,仅用单一数值表征整个坡面水动力学特征的平均状况^[7-9]。但由于该问题的复杂性,受测试技术以及研究方法所限,植被调控坡面侵蚀以及水动力条件的研究仍处于初步研究阶段,对调控机制的定量研究较少^[10-13]。另外,在降雨条件下开展植被调控坡面侵蚀输沙过程取得了一定的进展,但缺少可靠的长期野外观测数据,导致对侵蚀过程的影响因素和因素间相互作用机制尚未定量化^[11],这导致植被调控坡面水蚀过程的作用机制很难摸清^[13]。学者们也开展了不同植被格局对坡面侵蚀动力作用机制等方面的研究,揭示了不同植被格局可以通过影响径流流速和含沙量来调控侵蚀动力机制,但未能阐明植被带在坡面不同位置所发挥的减速效益的差异,因此,迫切需要开展不同草带空间分布对坡面减速效益调控机制的研究。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于2017年4—7月进行,数据测试与分析于2018年4月完成。本研究使用1:1万地形图结合高分辨快鸟影像,选取陕北韭园沟典型坡面,确定崩边线位置,并分析梁峁坡和沟坡的地形特征,对其地貌进行概化,同时结合室内试验条件,建立了坡面物理试验模型,见图1。试验模型上坡长8 m、坡度12°,下坡长5 m、坡度25°,采用钢板制作试验系统模型。

试验用黄土取自西安市郊区丘陵台塬区。由于室内试验所用土壤为扰动土壤,经过筛分处理后,以减弱地区间黄土性质的差异。颗粒尺寸为0.002~0.05 mm和0.05~0.1 mm的颗粒分别占91.39%和6.21%,为粉质土。草带为马尼拉草(*Zoysiamatrella*),野生,种植密度约为40株/m³,该草高约为2~3 cm,长势较好。根据模型尺寸,将试验用草带处理为2 m×1 m,试验前数周,让其在模型内生长。

试验初期,20 cm厚的天然砂层铺设于钢槽底部,以确保水分在土壤中均匀渗透。黄土进行夯实确保容重

一致(约1.3 g/cm³)。试验前,采用相同的喷水时间和喷水量喷淋土壤,确保土壤初始含水量一致(约21%)。然后在沙层上放置20 cm厚土壤,并为草带预留10 cm空间,使草带与裸坡紧密连接防止滑动。

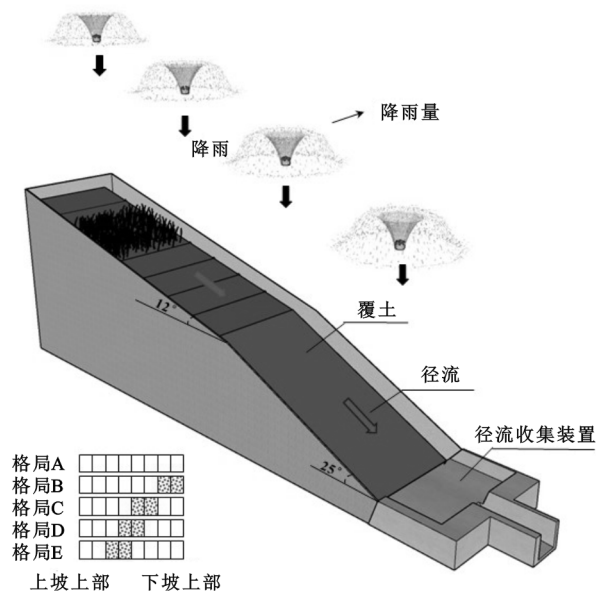


图1 坡面概化模型及坡面植被布设格局

模拟降雨采用向上式降雨装置,雨滴直径范围为0.4~3.0 mm,平均直径1.5 mm,雨滴大小与降雨均匀程度均与自然降雨接近^[13-16]。试验中上坡、下坡分别布设4个喷头,每个喷头降雨能够覆盖3~4 m²,雨强可调范围在0.5~2.0 mm/min。

1.2 试验方法

根据侵蚀性降雨的相关理论,试验雨强为1.5 mm/min^[10-11];根据径流达到稳定状态的时间,确定径流历时为30 min,每次试验降雨量约为45 mm。每次试验间隔24 h,每组降雨试验重复两次,试验结果取平均值,重复结果表明,产沙和径流均值未发生显著差异。试验过程中,径流泥沙样品收集频率1 min,测量径流量;水沙样品静置24 h后分离泥沙,高温烘干后称重。针对较为干旱环境和条件下的黄土高原地区植物实际生长情况^[17],选择25%较低覆盖度作为试验设计。研究共涉及5种草带格局(图1),均布设在坡面上坡位置:裸坡(格局A)、上坡下部(格局B)、上坡中下部(格局C)、上坡中上部(格局D)、上坡上部(格局E)。将坡面均分为13个1 m×1 m的坡段,采用染料示踪法测量各个水力断面(各个坡段出口位置)流速。

1.3 指标计算

1.3.1 雷诺数 雷诺数 R_e 为水流惯性力与粘滞力的比值。本试验以500为临界,过渡流状态 $R_e \approx 500$,紊流状态 $R_e > 500$,层流状态 $R_e < 500$ ^[12],计算

式为:

$$R_e=\frac{UR}{v}$$

(1)

式中: R 代表过水断面水力半径(m); U 代表平均流速(m/s); v 代表径流运动黏性系数, $v=0.01775/(1+0.033\ 7\ T+0.000\ 221\ T^2)$; T 代表水温($^{\circ}\text{C}$)。

由于试验过程中,坡面水流是薄层水流,此时水力半径 R 可以采用坡面平均水深 h ,用反算法计算:

$$h=\frac{q}{U}=\frac{Q}{Ubt}$$

(2)

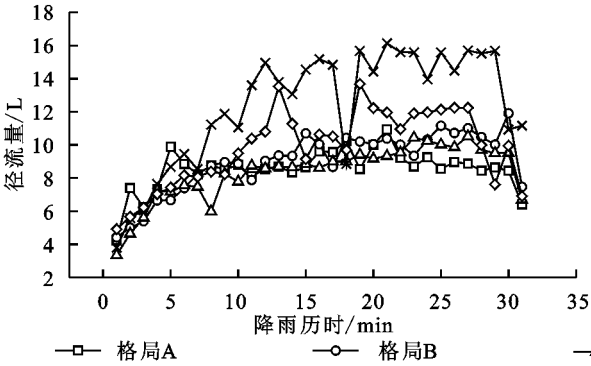
式中: t 代表时间(min); q 代表单宽流量[$\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{min})$]; Q 代表 t 时间内总径流量(m^3); b 代表过水断面宽度(m); U 代表平均流速(m/s)。

1.3.2 平均流速 径流流速是研究径流侵蚀的重要参数^[9]。坡面径流平均流速(V)计算式为:

$$V=\alpha U$$

(3)

式中: U 代表径流表面平均流速(m/s); α 代表修正



系数,与径流流态密切相关,层流、紊流和过渡流是0.67,0.80,0.70。

2 结果与分析

2.1 草带格局对径流侵蚀产沙过程的影响

由于第1次降雨和第2次降雨所呈现规律基本相似,在此仅列出第2次降雨试验数据进行分析。在第2次降雨中,每种草带格局的径流量在产流初期(0—10 min)急剧增长,其波动过程较剧烈(图2和表1)。径流产生10 min后,径流的波动趋于稳定,说明草带在一定程度上能够抑制径流波动,但效果不明显。另一方面,各种植被布设格局的产沙量均值差异显著($p<0.05$),一些格局变异系数 C_v 较高,表明某些格局草带可以减少侵蚀量,草带具有直接拦沙的功能,之前研究也印证了此点^[10-13]。格局D、E条件下,产沙量较大、产沙过程剧烈;格局C的产沙曲线为平稳,产沙量最低,表明该格局的草带可以有效拦截泥沙。

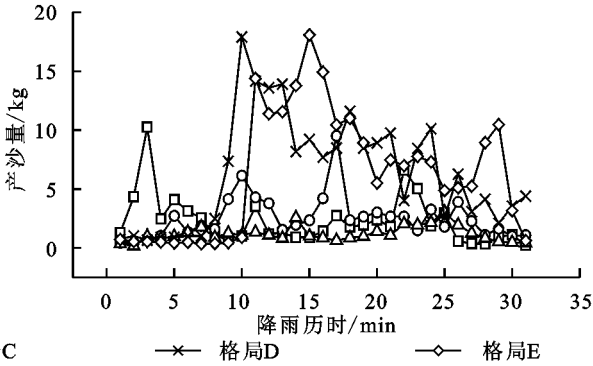


图2 第2次降雨不同草带格局条件下径流产沙变化

表1 第2次降雨条件下不同草带格局的径流产沙特征

参数	指标	格局 A	格局 B	格局 C	格局 D	格局 E
径流	稳定时刻/min	6	5	7	6	9
	稳定值/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	12.1	12.8	12.4	13.8	12.9
	变异系数	0.29	0.18	0.23	0.37	0.31
		0.04	0.05	0.05	0.04	0.18
产沙	波动范围/($\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.3~2.5	0.2~1.7	0.1~2.3	0.1~4.7	0.1~5.0
	均值/($\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$)	1.36	0.64	0.52	1.36	1.17
	变异系数	0.41	0.54	0.83	0.77	0.98

植被调控径流量和产沙量峰值强弱的效果与草带的布设格局密切相关,并且不同布设格局之间的产沙与径流存在显著差异。总的来说,将草带布设于坡面下部相比上部具有更好的削弱径流、产沙峰值的作用。当植被布设于上坡下部和 中下部(格局B、C),草带对泥沙具有更高的拦截效率。相反,将植被布设于上坡上部(格局D、E),草带以下存在较多的裸坡,产沙量和径流量较大。同时也发现,将植被种植于上坡最底部(格局B),减少侵蚀的作用达到最优,这与坡面的来水来沙条件有关,还与坡面变坡结构有关。

2.2 草带空间分布对径流流速的影响

径流被草带拦截后进入下坡,流速与草带布设格局密切相关。图3显示了径流流入下坡时(第9断面)的径流平均流速,与裸坡相比,草带铺设上坡中下部(格局C)时,径流流速减少46%,达到试验条件下最小值;此时草带减速效益达到最优,径流对下坡的侵蚀强度也达到试验的最低水平。相反,格局D、E条件下,径流进入下坡的流速均高于裸坡(图3),达到试验峰值,径流对下坡的侵蚀强度远远大于裸坡。

图4展示了2场降雨过程中,各个格局径流达到稳

定状态下(径流历时 15 min)时,下坡第 1 断面格局处径流流速沿程变化。可以看出,各格局条件下皆存在一个径流流速突然增加、且数值很大的区域,称之为动力恢复空间。裸坡时,水流汇集于上坡水力断面 4~5 时,径流开始加速,且流速很大,表明上坡存在着径流流速的动力恢复空间。随着水流继续向下运动,径流流速持续增加,当水流进入下坡后,由于坡度增大,径流更为集中,流速进一步增加。还可以看出,其他草带格局下,流速沿程变化趋势基本一致,在动力恢复空间内流速快速增加;第 2 次降雨过程中的流速大于第 1 次降雨,且下坡范围内的流速大于上坡。

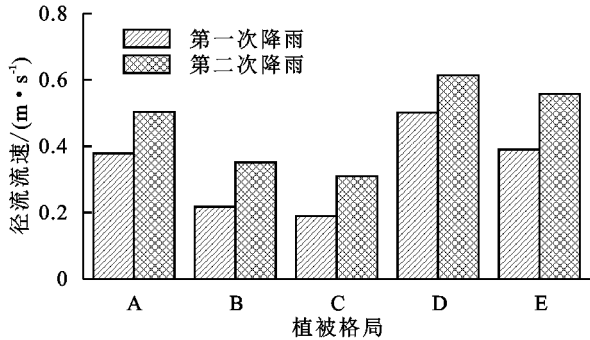


图 3 下坡第 1 断面径流流速

3 讨论

以格局 A 条件下沿程流速作为基准,其他格局各对应断面的流速与其相比,计算其他格局的减速效益,其计算式为:

$$R_{Vi} = \frac{(V_{Ai} - V_{xi})}{V_{Ai}} \times 100\%$$
 (4)

式中: R_{Vi} 代表不同植被下不同水力断面的减速效益(%); V_{Ai} 代表格局 A 下各个水力断面的径流流速(m/s); V_{xi} 代表其他格局不同水力断面的径流流速(m/s)。

由图 5,6 可以看出,2 次降雨过程中各个草带条件下的减速效益依次为:格局 E<格局 D<格局 B<格局 C。就格局 B,C 而言,草带位于上坡靠下的格局,正好位于裸坡条件下流速快速增加的部位(断面 4,5),因此有效抑制了流速在该空间中的恢复(图 5);此时草带发挥出缓流效果。2 次降雨中,格局 B,C 情况下 70% 的坡面减速效益值为正,均值可达 50% 以上,且草带格局 C 的减速效益明显优于格局 B (图 5)。

对于格局 D,E 而言,植被铺设于上坡靠上的部位,草带下方会有更多的裸坡与系统出口相连,为径流的动力恢复提供了更长的运动距离(图 6),使流速大于草带铺设于上坡中下部和下部时的情况。格局 D,E 的动力恢复空间增大,从下坡延伸至上坡,流速快速增长,径流侵蚀强度进一步增强。图 6 显示,格

局 D,E 的减速效益在 2 次降雨中基本为负且数值较大,说明流速在动力恢复空间内增加趋势更为明显(图 6)。

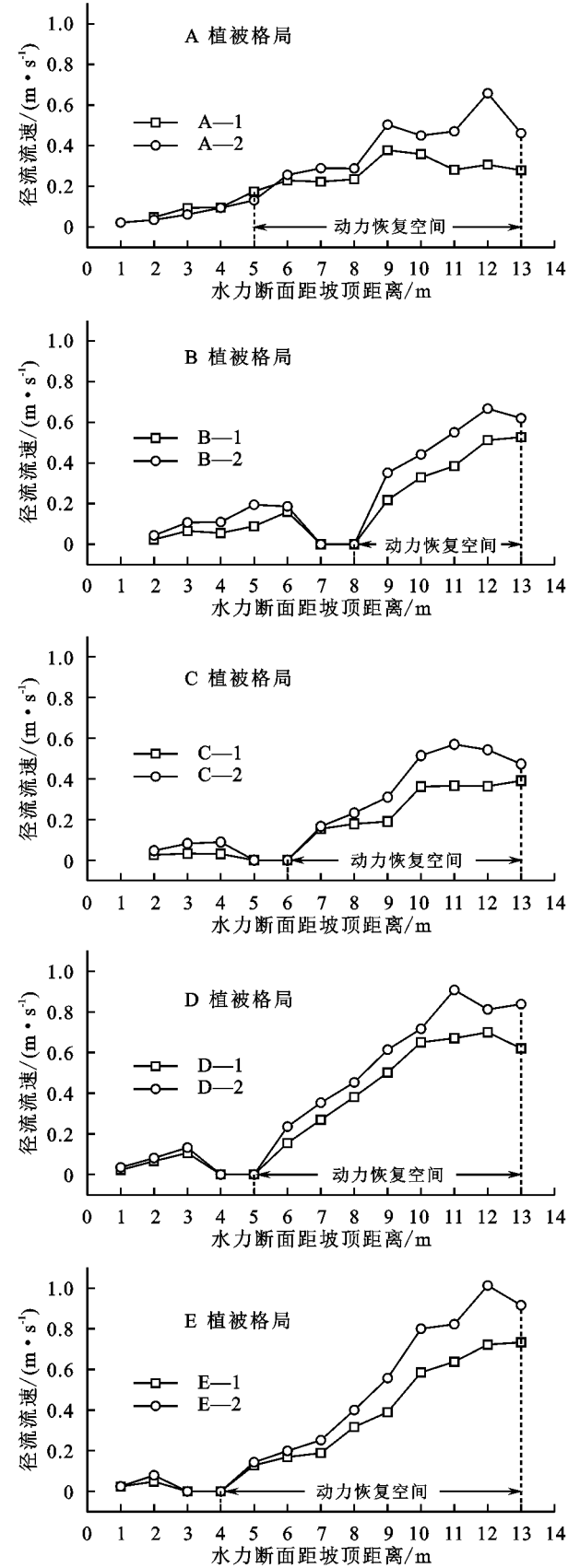


图 4 坡面径流流速变化

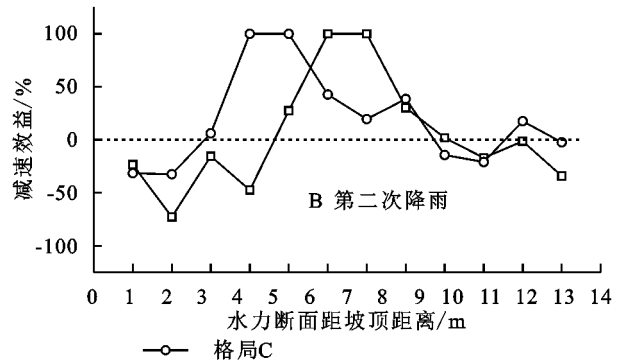
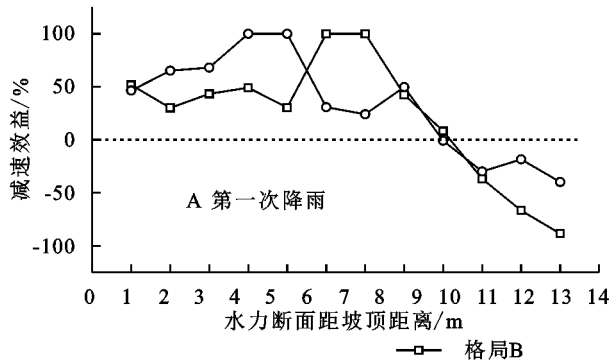


图 5 第 2 次降雨下草带格局 B 和格局 C 条件下的减速效益

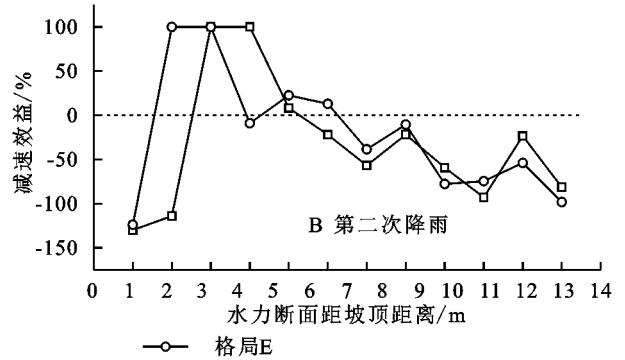
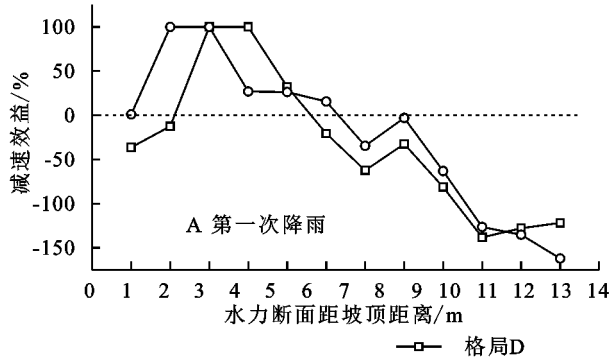


图 6 第 2 次降雨草带格局 D 和格局 E 条件下的减速效益

综合以上分析可知,上坡中上部和中部种植草带,植被减缓流速的范围和作用强度均较小,甚至产生负面效应,增加了径流侵蚀强度。植被带格局越靠近坡顶,径流流速的恢复格局也相应提前,动力恢复空间长度开始增大,导致径流流速和侵蚀强度快速增加。说明在低植被覆盖度条件下,植被种植于上坡靠上的部位会出现较裸坡更加强烈的侵蚀,这显然与常规所描述的现象相矛盾。这与 Jin^[18]提出的低覆盖度坡面在 65 mm/h 雨强时产生比裸坡更为严重的土壤侵蚀这一结论一致。究其原因,也许与影响坡面动力恢复的水蚀动力过程有关。植被种植格局靠上,可为动力恢复提供较大的范围,当径流流入下坡,水流更为集中,流速较裸坡显著增加。另外,由于草带的过滤使水流变清,导致径流携带泥沙能力增强;含沙量与径流携带泥沙能力之差会持续增加,产生了较大的径流剥蚀率^[19]。

草带布设于上坡中下部,调控径流流速的范围基本覆盖了整个坡面,径流流速得以减缓,径流侵蚀强度也得以大大降低。当草带布设于上坡边线附近(格局 B),径流从草带流出后,径流含沙量降低,水流更为集中,泥沙运移能力增加,径流对下坡的侵蚀强度增加。因此,将植被布设于上坡最底部时,与布设于坡面中下部相比,挟沙力和径流流速均有所增加,此时草带种植于此并未明显减弱侵蚀^[20]。

从图 3 看出,随着草带布设格局的逐渐上移,动力恢复空间逐渐增加,径流流速呈先减小后增加的趋势,格局 C 时流速最小,格局 D、E 时的流速反而超过裸坡时的情况。表明动力恢复空间达到一定长度时,流速会超过其他草带格局和裸坡的情况,因此动力恢复空间的长度存在临界值^[20]。根据试验实际情况,将 13 m 坡面出口至草带底部 7 m 的距离称为动力恢复空间的临界值,即为整个坡面长度的 54%。径流的加速长度低于该临界值时,在此区域内种植的植被可以有效抑制径流流速的恢复,降低径流流速和径流侵蚀强度。而在此区域以外布设植被(格局 D、E),则会增加更多的动力恢复空间,径流流速在此区域内快速增长,已经高于裸坡,达到试验范围内峰值。因此,动力恢复距离具有临界现象,动力恢复距离超过坡面长度的 54%,径流流速明显增加,草带调控径流作用较弱,甚至加剧侵蚀;动力恢复距离小于坡面长度的 54%,径流流速显著降低,草带调控径流作用增强,侵蚀强度减弱,这与之前的研究所获得的结论相似^[10]。以往结果表明,当草带位于下坡位时,其减沙效益远远高于上坡位和中坡位^[10]。但随着坡面径流进入沟坡和沟道后,由于上坡坡面径流含沙量减小,清水下沟反而使得进入沟坡的径流剥蚀力增大,沟坡部分侵蚀增强,即坡面径流通过沟坡时会引起侵蚀产沙量增加^[20],这些都与此次所得出的结论相互

印证。因此,研究不同梁峁坡植被空间分布对沟坡侵蚀的影响和调控有助于理解植被对土壤侵蚀输沙过程、水动力过程调控作用的理解。

4 结论

(1) 坡面全长 13 m,上坡长为 8 m,将草带种植于上坡下部 60%时能够充分发挥缓流效应,调控侵蚀范围很广,可以控制坡面 70%范围内的径流流速,降低流速 50%以上,有效地抑制了流速的恢复增长,对于减缓径流流速起到了积极作用,降低了径流侵蚀强度。

(2) 草带种植于坡面相对靠上的格局,如坡面中上部和中上部时,增加了草带以下的裸露区域,产生了更多的动力恢复空间,该空间从坡底一直延伸至上坡,流速快速增加,增加幅度达 1 倍左右,径流携运泥沙能力与含沙量与的差异持续增加,产生更为严重的径流剥蚀能力。

(3) 坡面长度的 54%为动力恢复空间临界值,在恢复空间范围内,植被调控流速的效果显著,可以有效抑制水动力参数的恢复和增长,降低径流侵蚀强度。超过恢复空间范围,草带调控流速作用减弱,甚至使径流流速加快,导致动力恢复空间内流速快速增加,径流侵蚀强度增大。

参考文献:

- [1] 唐克丽.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] Jiao L, An W, Li Z, et al. Regional variation in soil water and vegetation characteristics in the Chinese Loess Plateau[J]. Ecological Indicators, 2020,115:106399.
- [3] 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):133-138,144.
- [4] 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, 2020,189:104482.
- [5] Yuan S, Li Z, Li P, et al. Influence of check dams on flood and erosion dynamic processes of a small watershed in the loss plateau[J]. Water 2019, 11(4), 834, <https://doi.org/10.3390/w11040834>.
- [6] Ban Y, Lei T, Gao Y, et al. Effect of stone content on water flow velocity over Loess slope;non-frozen soil[J]. Journal of Hydrology, 2017,549:525-533.
- [7] Curran J C, Hession W C. Vegetative impacts on hydraulics and sediment processes across the fluvial system[J]. Journal of Hydrology, 2013,505:364-376.
- [8] Li G, Zheng F, Lu J, et al. Inflow rate impact on hillslope erosion processes and flow hydrodynamics[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016,80(3):711-719.
- [9] Pan C, Shangguan Z, Ma L. Assessing the dye - tracer correction factor for documenting the mean velocity of sheet flow over smooth and grassed surfaces[J]. Hydrological Processes, 2015,29(26):5369-5382.
- [10] 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.
- [11] Zhou J, Fu B, Gao G, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2016,137:1-11.
- [12] Pan C, Ma L. How the spatial distribution of grass contributes to controlling hillslope erosion[J]. Hydrological Processes, 2020,34(1):68-81.
- [13] 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.
- [14] García-Ruiz J M. The effects of land uses on soil erosion in Spain;a review[J]. Catena, 2010,81(1):1-11.
- [15] Romero M E N, Martínez T L, Regüés D, et al. Hydrological response and sediment production under different land cover in abandoned farmland fields in a mediterranean mountain environment[J]. Bage:Boletín De La Asociación De Geógrafos Españoles, 2011(55):303-323.
- [16] Best A C. The size distribution of raindrops[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1950,76(327):16-36.
- [17] Shi P, Zhang Y, Ren Z, et al. Land-use changes and check dams reducing runoff and sediment yield on the Loess Plateau of China[J]. Science of the Total Environment, 2019,664:984-994.
- [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] 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.
- [20] 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.