

植被毯措施对黑土农田浅沟侵蚀的防护效果研究

孙义秋¹, 关颖慧², 汪志荣¹, 吴海龙¹

(1.天津理工大学 环境科学与安全工程学院, 天津 300384; 2.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要:为了探究植被毯在植被恢复早期的浅沟侵蚀防护效果,并为黑土农田浅沟治理提供科学依据。以黑土耕作层土壤为研究对象,通过室内模拟汇流冲刷试验,定量分析了植被毯在不同汇流强度下对农田浅沟侵蚀产流产沙的影响。实验结果显示:在小于 30 L/min 汇流强度时,植被毯措施可减少 16.23% 的径流和 80% 以上的产沙。当汇流强度增大到 40 L/min 时,植被毯措施减沙效益由 82.19% 下降到 26.63%,而减流效益由 15.74% 减少到 1.63%,基本无减流效果。继续增加汇流强度达到 50 L/min 时,植被毯措施的减沙效果进一步下降,并最终失去防护作用。研究表明植被毯措施在一定汇流强度下能够有较好的减流减沙作用,且其减沙作用明显高于减流作用。因此,一定条件下,可以有效防治浅沟的进一步侵蚀,且对于改善草被前期生长及生态环境有一定帮助。

关键词:植被毯; 农田浅沟; 防护效果; 产流产沙

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)01-0008-06

Study on the Protective Effect of Vegetation Blanket on Ephemeral Gullies in Black Soil Farmland

SUN Yiqiu¹, GUAN Yinghui², WANG Zhirong¹, WU Hailong¹

(1.College of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to explore the protective effect of vegetation blanket on ephemeral gully erosion in the early stage of vegetation restoration, and to provide scientific basis for ephemeral gully control of black soil farmland, we took the typical black soil of Heilongjiang Province as the research sample, quantitatively analyzed the effect of vegetation blanket on runoff and sediment yield of farmland ephemeral gully erosion under different confluence intensities through the indoor simulated confluence erosion experiment. The experimental results show that the runoff and sediment yield can be reduced by 16.23% and 80%, respectively, when the confluence intensity of 30 L/min is less than that of vegetation blanket; when the confluence intensity reaches to 40 L/min, the sediment reduction benefit of vegetation blanket measures decreases from 82.19% to 26.63%, while the flow reduction benefit decreases from 15.74% to 1.63%, which basically has no flow reduction effect; when the confluence intensity continues to increase to 50 L/min the effect of vegetation blanket on sediment reduction decreased further and finally lost its protective effect. This study shows that the vegetation blanket measure can have a better effect on runoff and sediment reduction under a certain confluence intensity, and its sediment reduction effect is obviously higher than that of runoff reduction. Therefore, under certain conditions, vegetation blanket can effectively prevent the further erosion of ephemeral gully, and is helpful to improve the early growth of grass cover and ecological environment.

Keywords: vegetation blanket; field ephemeral gully; protective effect; runoff and sediment production

土壤侵蚀是土地退化的重要过程之一,它对生态系统保护、粮食安全供应、人类健康以及国家经济的

发展构成严重威胁^[1]。东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,粮食产量约占全国的 1/5,据调查黑

收稿日期: 2021-01-08

修回日期: 2021-02-09

资助项目: 国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项“黑土侵蚀防治机理与调控技术(2016YFE0202900)”;天津市自然科学基金重点项目“海绵城市微流域的水文过程实验研究(18JCZDJC39600)”

第一作者: 孙义秋(1993—),男,安徽省阜阳市人,硕士研究生,主要研究方向: 水土保持。E-mail: syqiuhanjing@163.com

通信作者: 吴海龙(1986—),男,重庆市巫山县人,博士研究生,主要研究方向: 水土保持与森林水文。E-mail: wuhailong@E-mail.tjut.edu.cn

土区侵蚀沟数量约 29 万多条,其中发展沟占侵蚀沟总数的 88.67%^[2]。浅沟作为细沟向冲沟发展的过渡形态,其既是沟道泥沙的搬运通道,也是整个汇水面积内泥沙输送的下坡通道。它的形成过程受径流冲刷和人类耕作的双重影响,虽然可通过耕作去除,但经过降雨冲刷后又会在相同地点重新生成^[3-5]。在农业用地上,浅沟侵蚀不仅决定了水土流失的严重程度^[1-6],同时也是土壤质量退化的直接因素^[7],因此,对农田浅沟的治理不仅有助于深入了解黑土区土壤侵蚀的规律,而且对于黑土资源的保护也具有重要意义。

浅沟侵蚀是由于浅沟间的降雨汇入沟道,导致水流的冲刷力增大,使得浅沟不断加深加宽,最终形成更加严重的侵蚀形态。东北黑土区多为漫川漫岗地形,耕地主要为横坡垄作与顺坡垄作两种方式^[8],且在同一地区两种垄作方式往往同时存在^[9]。在暴雨或连续性降雨的情况下,汇集的超渗径流在顺坡垄中顺着垄沟向坡下移动,并在横垄与顺垄交汇处滞留,当汇流流量达到一定的程度后,径流漫过垄台,形成较强冲刷能力的股流而不断侵蚀垄台,并最终冲断垄台形成浅沟,由于顺坡垄提供了天然的汇流通道,使得汇流强度大大增强,从而造成浅沟进一步侵蚀。吴桐嘉等^[10]通过降雨和汇流对浅沟侵蚀过程试验研究发现,浅沟侵蚀发生的主要方式为下切侵蚀和溯源侵蚀。植被覆盖被认为可以提高土壤的抗冲刷力,更好地防治土壤侵蚀^[11]。王文鑫等^[12]对草地浅沟进行冲刷试验得出,草被能够有效减少浅沟侵蚀产沙,减弱径流的有效切应力。然而,由于地形的原因径流集中汇集,形成冲刷力较强的股流,使得草被抵挡不住径流的冲击,时常会发生浅沟侵蚀^[13]。此外,在植草初期集中股流可能会将草种冲走,造成植被覆盖下降,影响浅沟中植被恢复的效果。

植被毯可以稳固种子,保护植物萌发生长阶段不受雨水冲刷,同时,在成熟期植物根系与植被毯、土壤形成更加牢固的复合体,能够增强其抗冲性^[14]。目前,关于植被毯减流减沙作用的研究,如岳恒陞等^[15]对植被毯护坡的产流特性研究,植被毯覆盖通过增加坡面局部湍流减缓径流流速,降低了径流对表土的冲刷。郭宇等^[16]研究与裸地相比,铺设植被毯措施产沙量减少 55.05%~85.18%,产流量减少 46.27%~73.9%。刘宏远等^[17]认为植被毯减蚀效益与减流效益较强,并在一定程度可改善土壤理化性质。以上研究大多集中在植被毯对边坡治理的研究上,而将植被毯应用于植被恢复早期的浅沟治理研究较少,同时植被毯在不同条件下的水土保持效益也必然存在差异。因此,本研究以东北黑土土壤为研究对象,在不同汇

流条件下,通过植被毯对农田浅沟产流产沙的影响,定量研究植被毯措施对田间横顺垄交汇处浅沟侵蚀的防蚀效果,以为农田浅沟治理提供科学参考。

1 试验材料与方法

1.1 材料与装置

试验土槽为 3 m(长)×2 m(宽)×0.45 m(深)的固定式液压可升降钢槽(图 1),其坡面坡度调节范围 0°~30°,为保证试验过程中良好的排水在试验土槽底部每隔 10 cm(长)和 10 cm(宽)设置直径为 5 mm 的排水孔。上方汇流装置由供水管、稳流槽和水箱组成,供水流量大小由供水管的阀门进行调节,试验水质为自来水。供试土壤采自黑龙江省克山县克山农场(125°08′—125°37′E,48°12′—48°23′N)坡耕地地表 0—20 cm 典型耕作黑土,其颗粒组成为:黏粒(<0.002 mm)含量为 6.57%,粉粒(0.002~0.05 mm)含量为 67.55%,砂粒(>0.05 mm)含量为 25.88%,有机质含量为 72.95 g/kg,pH(水浸提法,水土比 1:2.5)为 6.3。植被毯为北格润尼环境工程有限公司提供,由椰丝纤维和护网通过机械加工制成,毯重 334 g/m²,厚度约 3~5 mm,纵向断裂强度 2 kN/m,横向断裂强度 1.9 kN/m,椰丝毯网孔密集且大小合理,能够保证植物顺利穿过茁壮生长。

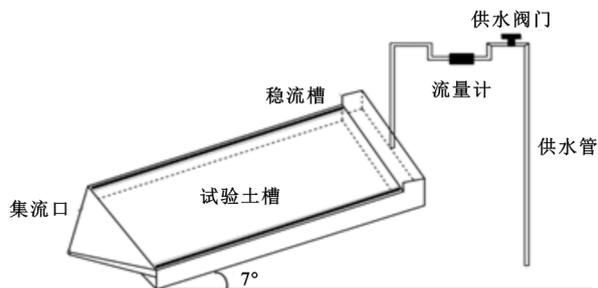


图 1 试验装置示意图

1.2 试验设计

本试验于 2020 年 7—10 月在天津理工大学环境科学与安全工程学院进行,根据野外坡耕地浅沟实际调查和相关文献资料,研究区域坡面坡度一般为 2°~7°,结合东北黑土区较高频次的瞬时雨强 0.71 mm/min^[18],以及参考胡刚等^[19]黑土区浅沟侵蚀发育特征,浅沟平均汇流面积 3.4 hm²,临界坡长为 210 m,汇流强度设计参考下式^[20]:

$$F_e = \frac{W_e}{W} \times R \times A \times \cos\sigma \times \alpha$$

式中: F_e 为放水流量(L/min); W_e 为模拟宽度,本研究设计 $W_e=1$ m, W 为实际沟间距,取值为 210~275 m; R 为降雨强度(mm/min); A 为浅沟汇流面积(m²); σ 为坡度; α 为径流系数,取值 0.3。因此本研究设计汇流

强度为 10, 30, 40, 50 L/min。根据野外调查和测量, 由于受微地形地貌的影响, 浅沟多具有与坡面坡度垂直的微坡度存在。因此, 试验设计坡面坡度 7°, 垂向微坡度 3°。同时, 在距土槽顶端 30 cm 处至槽子末端用刮板刮出设计的浅沟锥形模型, 浅沟宽 1 m, 两侧坡度 30°, 浅沟底部与两侧坡沟高差 7 cm, 沟底宽 80 cm, 浅沟锥形模型横断面近似为梯形(实际使用植被毯前要对沟底进行平整)。为保证浅沟锥形形态的一致, 在试验前均用相同的刮板处理。具体试验设计见表 1。

表 1 试验设计

汇流强度/ (L · min ⁻¹)	措施	坡度/(°)	试验重复
10	对照组	7	2
30			
40	植被毯		
50			

1.3 试验步骤

试验土壤采用过 1 cm 筛不研磨处理, 尽量保持土壤的原有结构, 保证试验土壤形状一致。填土时先将纱布铺在试验土槽底部, 并填入 5 cm 高细沙作为透水层。然后在沙层上铺一层纱布后填 15 cm 的黄土模拟犁底层和 20 cm 的黑土作为耕层。其中设计耕层容重为 1.15~1.20 g/cm³, 犁底层容重为 1.25 g/cm³。每次装填试验土槽前, 测定土壤含水量并结合容重值确定每层所需的土壤重量。为保证填土的均匀性, 每 5 cm 为 1 层。装上层土之前, 先用齿耙将土壤表面耙松 1 cm, 以免土壤分层。同时还要将试验土槽四周边界压实, 减少边界效应的影响。坡面铺平后, 用刮板距顶端 30 cm 处制作出浅沟模型, 之后盖上植被毯并完全覆盖整个浅沟, 铺设时用 U 型钉(钉长 5 cm, 弯钩为 2 cm)从浅沟底部上方向下方每隔 1 m 固定一个防止移位和保证植被毯和地面良好的接触, 同时, 植被毯两侧及上方埋于土内并夯实^[21], 见图 2。

为了保证每次试验的初始条件基本一致, 试验前一天进行 30 mm/h 的预降雨, 当土壤表面达到充分饱和即将产流时, 结束降雨并将土槽用塑料布盖好后, 放置 24 h 进行正式试验, 试验前期土壤含水率变化为 19.3%~20.5%。试验前后, 均对放水流量进行率定, 当汇水流量与设计流量的误差在 5% 以内时方可进行冲刷试验。试验开始后, 水流溢出至坡面开始计时, 在集流口有径流流出时, 记录产流时间。产流后 20 L 塑料桶每 2 min 取 1 次径流泥沙样, 每次取样时间为 20 s, 整个试验过程持续 45 min。取样的

同时采用染料示踪法测定浅沟径流流速以及径流温度, 试验结束后, 将接取的泥沙过程样按顺序全部称重, 静置澄清后倒出上清液转移泥沙至铝盒, 然后在 105℃ 的烘箱中烘干称重并计算泥沙质量。



图 2 植被毯布设图

1.4 计算方法与数据处理

1.4.1 减流效益及减沙效益 为比较直观地比较植被毯对浅沟的防护效果, 本文引入减流效益(B_l)和减沙效益(B_s), 植被毯覆盖的产流量与无覆盖裸坡的产流量比值为减流效益, 植被毯覆盖的产沙量与无覆盖裸坡的产沙量比值为减沙效益, 计算公式为:

$$B_l = \frac{Q_0 - Q_z}{Q_0}$$

$$B_s = \frac{S_0 - S_z}{S_z}$$

式中: Q_0 和 Q_z 分别为无覆盖裸坡和植被毯覆盖的产流量(g/m^2); S_0 和 S_z 分别为无覆盖裸坡和植被毯覆盖的产沙量(g/m^2)。

1.4.2 数据处理及分析 采用 Excel 2016 对数据进行处理, 采用 Origin 2017 进行绘图。

2 试验结果与分析

2.1 不同汇流强度对植被毯覆盖产流过程的影响

图 3A—D 分别是植被毯在 10, 30, 40, 50 L/min 汇流强度下坡面径流量随时间变化过程的曲线。图中可以看出, 不同汇流强度下, 产流率随时间的变化规律基本相同, 均呈现出先急剧增大后保持稳定的变化趋势, 这是由于试验开始阶段, 土壤表层含水率较低, 使得径流大量下渗, 但随着土壤水分的饱和, 径流率达到一定值后呈现为平稳的趋势。但各流量下植被毯覆盖产流率趋于稳定的时间有较大差异, 不同汇流强度处理的产流率在汇流开始前 10 min 内均能达到稳定, 表现为汇流强度越大, 达到稳定径流率的时间越短, 这与康宏亮等^[22]的研究放水流量与稳定径流率相关性极大一致。

从图中还可以看出,植被毯覆盖对浅沟产流量的影响有明显的不同,汇流强度为 10,30 L/min 时,植被毯的产流量明显小于裸坡,裸坡产流率是植被毯覆盖的 1.14 倍和 1.18 倍。当汇流强度增加到 40,50 L/min 时,相对于裸坡而言,植被毯对减少产流几乎没有影响。这表明小流量下(汇流强度小于 30 L/min),植被毯覆盖的浅沟保水性能优于无植被毯覆盖的对照组,这与刘宏远等^[17]对植被毯边坡防护效益研究进行的降雨试验发现植被毯能够储存水分,增加径流下渗以及可直接减少径流的结论相似。而在流量较大的情况下(汇流强度大于 40 L/min),植

被毯覆盖的减流性能下降。一方面是由于植被毯本身的吸水能力达到饱和,使之径流的拦截率下降^[23],同时植被毯下层与土壤表层形成的纤维—土壤综合体的低渗水性,当汇流强度大于入渗速率时,就会形成部分超渗流,从而造成浅沟的下渗量减少^[15,17]。另一方面通过观察浅沟沟底侵蚀形态,可能是浅沟径流的相对动能增加,侵蚀能力增强,植被毯下部形成许多较小细沟,这些细沟可为径流提供天然的通道,从而可以减少径流在浅沟内滞留的时间。因此,植被毯在一定范围汇流强度下,相对可以减少径流,当超过这个临界条件后,植被毯就会失去减流作用。

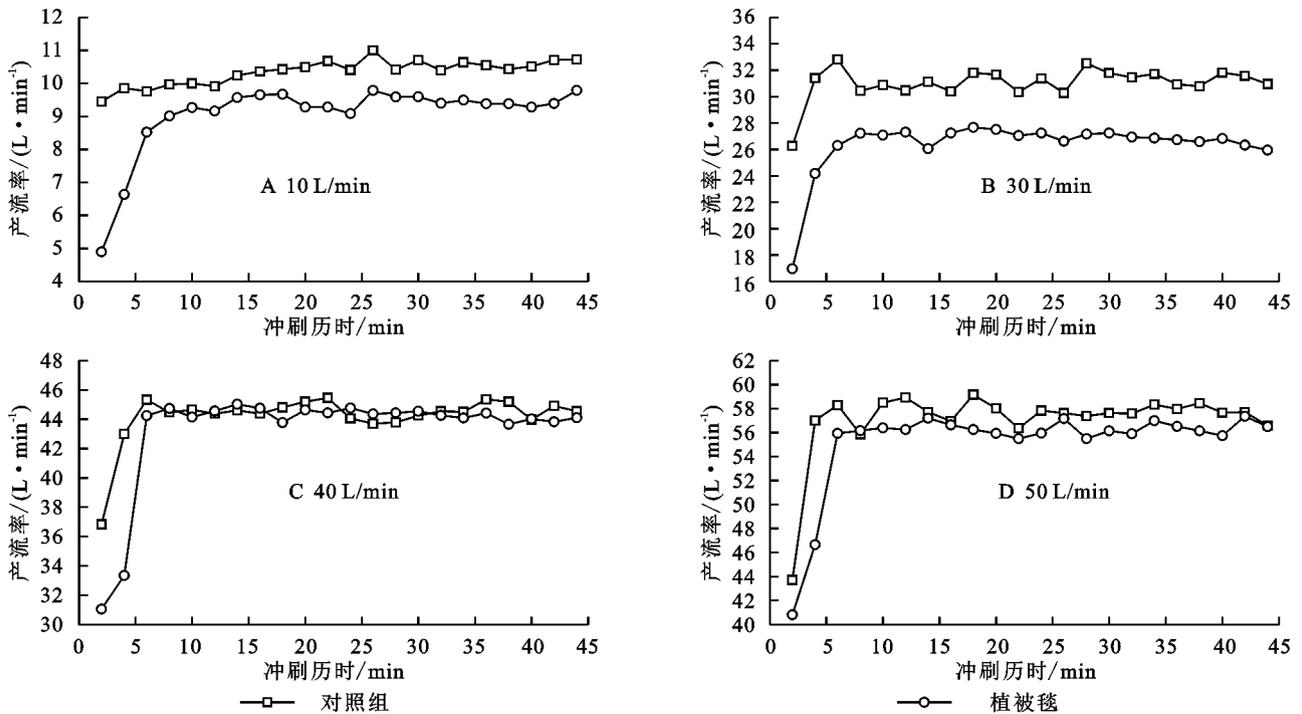


图 3 不同汇流强度下的浅沟径流变化过程

2.2 不同汇流强度对植被毯覆盖产沙过程的影响

图 4A—D 分别是植被毯在 10,30,40,50 L/min 汇水强度下的浅沟产沙量随时间变化过程的曲线。可以看出,在相同汇流强度下,植被毯措施覆盖的浅沟侵蚀量总体上呈逐渐下降并趋于稳定的过程,但汇流强度越大,水流的含沙量越大。另外,通过观察不同流量下侵蚀量的变化曲线发现,前 10 分钟的侵蚀量变化较大且随着流量的增加,曲线逐渐变陡,即汇流强度越大,其对产沙率的影响越大。一方面是因为流量的增加,使得坡面流相对动能增加,水流的挟沙能力增强。另一方面是由于随着冲刷的进行,土壤水分已充分饱和,土壤抗侵蚀能力很低,被剥离的土壤颗粒随集中水流全部搬运。

从植被毯措施的防蚀效果来看,在小于 30 L/min 汇流强度时,植被毯措施的平均产沙率很小,裸

坡对照组的产沙率分别是植被毯覆盖的 7.06 倍和 5.61 倍。当汇流强度为 40 L/min 时,植被毯覆盖侵蚀产沙率急剧增加了 432.1%,但与裸坡对照组相比,植被毯措施的产沙率减少了 26.63%。由此说明一定流量下,植被毯可以减小浅沟侵蚀的发生,随着汇流强度的增加,植被毯措施的产沙率越大,其防护效果越差,这与 Won 等^[24]认为植被毯覆盖在一定范围内可以减少侵蚀的发生甚至不发生的结论相似。但在防护效果达到一定程度后,这些措施将不再是制约坡面侵蚀的因素^[23]。植被毯措施在汇流强度增加到 50 L/min 后土壤侵蚀增大了 115.25%,与裸坡对照组产沙率相当甚至略高,失去了其防护浅沟的作用。这是因为一方面较大的水流在植被毯表面及内部形成了直接径流,径流量增加使得径流动能增大,超出了植被毯减蚀的能力,造成较为剧烈的侵蚀^[17],另一方

面植被毯布设时浅沟两侧埋入土壤中的植被毯对土壤的扰动,短时间内植被毯无法与土壤形成结合体使得在较大流量下增加了土壤侵蚀,但从长远看,并不影响植被毯在浅沟中的使用。综上所述,植被毯覆盖在汇流强度较小的情况下,可以增加浅沟沟底的

粗糙度,减小径流流速,从而减少浅沟的侵蚀^[25];而随着汇流强度的增大,植被毯防护效果逐渐降低,并在 50 L/min 流量时失去防护作用,此外,植被毯布设施工时,应尽量减少对浅沟两侧边坡的扰动,避免因人为施工而造成土壤侵蚀的增加。

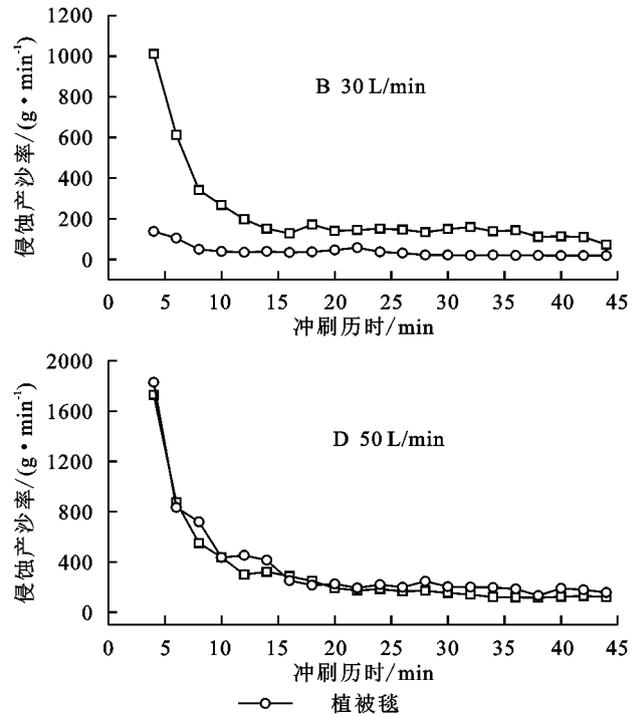
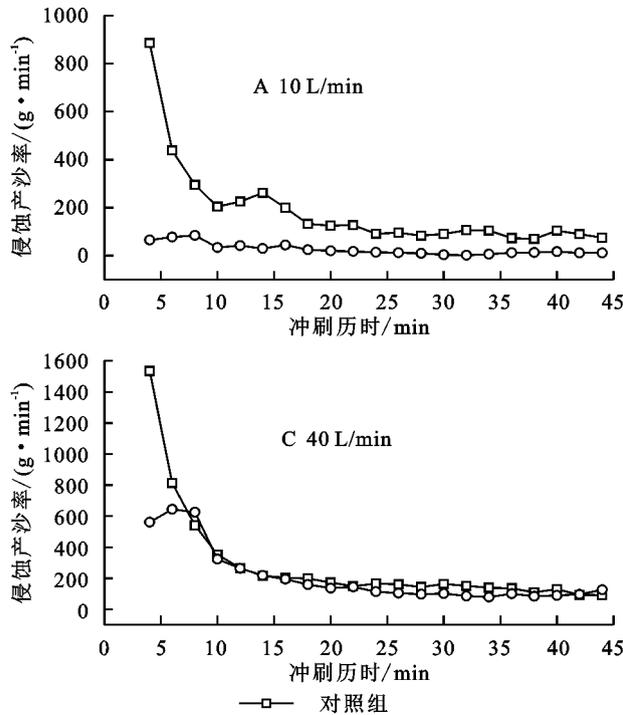


图 4 不同汇流强度下的浅沟产沙过程曲线

2.3 植被毯措施减流减沙效益分析

由表 2 可知,植被毯措施在不同汇流强度下的减流减沙效益差异较大,随着汇流强度的增加减流效益和减沙效益逐渐下降,汇流强度为 10 L/min 时,减流减沙效益最好,分别为 16.23% 和 85.83%,而减流减沙效益表现最差的为 50 L/min 的汇流强度,分别为 1.49% 和 -15.25%,因此,50 L/min 汇流强度下,植被毯措施对浅沟无法起到防护作用。从减沙效益来看,植被毯措施在汇流强度小于 30 L/min 下,减沙效益可以达到 80% 以上,但汇流强度高于 40 L/min 后,减沙效益急剧下降为 26.63%。表明植被毯措施在小流量下,对浅沟具有明显的减沙效果,而在汇流强度达到一定值后,其减沙效益急剧减小,甚至失去减沙作用。刘宏远等^[17]认为植被纤维毯可能会增大坡面侵蚀,其侵蚀结果与降雨强度,植被毯材料和质量等相关。从植被毯措施减流效益来看,随着汇流强度的增加植被毯措施的减流效益逐渐减小,其变化范围为 1.49%~16.23%,在汇流强度为 40 L/min 以上时,植被毯措施的浅沟径流量与裸坡对照组径流量相差无几,减流效益接近,这与张平等^[26]植被毯措施可有效减少径流的结果相反。这是因为在试验前

进行的预降雨使得植被毯基本吸水饱和,同时由于椰丝毯厚重致密,覆盖度较高,随着汇流时间的积累以及汇流强度的增加集中径流在其上形成直接径流^[17],使得浅沟的入渗量减少。因此,植被毯措施的减流效益与植被毯类型密切相关。

表 2 不同汇流强度下植被毯覆盖的减流减沙效益

汇流强度/ (L·min ⁻¹)	减流效益/%	减沙效益/%
10	16.23	85.83
30	15.74	82.19
40	1.63	26.63
50	1.49	-15.25

3 结论

(1) 植被毯措施对防护浅沟侵蚀有较好的减流减沙作用。在小于 30 L/min 汇流强度下,植被毯措施的减流效益分别为 16.23% 和 15.74%,减沙效益分别为 85.83% 和 82.19%。随着汇流强度的增加,植被毯措施的防护效益降低,并在 50 L/min 汇流强度下失去作用。

(2) 植被毯措施能够减少浅沟侵蚀,增加径流下

渗,但其减流效益明显低于减沙效益。在一定条件下,可以有效防治浅沟的进一步侵蚀,且对于改善草被前期生长改善生态环境有一定帮助。

(3) 植被毯布设时,应尽量减少对浅沟两侧边坡的扰动,避免因人为施工而造成土壤侵蚀的增加。另外,研究发现植被毯类型对于浅沟的产流过程有较大影响,今后应加强不同植被毯材料对浅沟防护效果的研究。

参考文献:

- [1] Ollobarren P, Capra A, Gelsomino A, et al. Effects of ephemeral gully erosion on soil degradation in a cultivated area in Sicily(Italy)[J]. *Catena*, 2016,145:334-345.
- [2] 白建宏,回莉君.东北黑土区侵蚀沟发展与危害初步调查[J].*中国水土保持*,2015(8):68-70.
- [3] 崔明,蔡强国,张永光,等.漫岗黑土区坡耕地中雨季浅沟发育机制[J].*农业工程学报*,2007,23(8):59-65.
- [4] 刘宝元,杨扬,陆绍娟.几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J].*中国水土保持科学*,2018,16(1):9-16.
- [5] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].*农业机械学报*,2016,47(8):48-59,116.
- [6] Taguas E V, Yuan Y, Bingner R L, et al. Modeling the contribution of ephemeral gully erosion under different soil managements:A case study in an olive orchard microcatchment using the AnnAGNPS model[J]. *Catena*, 2012,98:1-16.
- [7] Liu H, Zhang T, Liu B, et al. Effects of gully erosion and gully filling on soil depth and crop production in the black soil region, northeast China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013,68(6):1723-1732.
- [8] Xu X, Zheng F, Wilson G V, et al. Comparison of runoff and soil loss in different tillage systems in the Mollisol region of Northeast China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2018,177:1-11.
- [9] 沈昌蒲,龚振平,温锦涛.横坡垄与顺坡垄的水土流失对比研究[J].*水土保持通报*,2005,25(4):48-49,80-114.
- [10] 吴桐嘉,潘成忠,罗明杰,等.降雨和汇流条件下浅沟侵蚀过程试验研究[J].*水土保持通报*,2019,39(4):22-29.
- [11] Keesstra S, Pereira P, Novara A, et al. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 551/552:357-366.
- [12] 王文鑫,王文龙,康宏亮,等.黄土丘陵沟壑区自然恢复草被对浅沟侵蚀的影响[J].*应用生态学报*,2018,29(12):3891-3899.
- [13] 毕家骥.水土保持的生物措施[J].*宁夏农业科学通讯*,1963(4):34-37.
- [14] 马文宝,姬慧娟,宿以明,等.植被毯边坡防护特点及其研究应用[J].*中国水土保持*,2013(1):30-33.
- [15] 岳桓陞,杨建英,杨阳,等.不同降雨强度条件下植被毯护坡技术的产流特性[J].*中国水土保持科学*,2015,13(1):35-41.
- [16] 郭宇,王树森,马迎梅,等.植被毯对内蒙古清水河县黄土丘陵沟壑区黄土边坡产流产沙量的影响[J].*水土保持学报*,2019,33(6):61-71.
- [17] 刘宏远,刘亮,李秀军,等.植物纤维毯道路边坡防护技术综合效益评价[J].*水土保持学报*,2019,33(1):345-352.
- [18] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等.黑龙江省土壤流失方程的研究[J].*水土保持通报*,1992,12(4):1-9.
- [19] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等.东北漫岗黑土区浅沟侵蚀发育特征[J].*地理科学*,2009,29(4):545-549.
- [20] 龚家国,周祖昊,贾仰文,等.黄土区浅沟侵蚀沟槽发育及其水流水力学基本特性模拟试验研究[J].*水土保持学报*,2010,24(5):92-96,100.
- [21] 郭红艳,王百田.椰纤维制品在水土保持工程中的应用[J].*水土保持应用技术*,2007(1):34-37.
- [22] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.冲刷条件下黄土丘陵区浅沟侵蚀形态及产流产沙特征[J].*农业工程学报*,2016,32(20):161-170.
- [23] 郑雪慧,程金花,祁生林,等.永定河典型生态护岸措施下坡面产流产沙试验研究[J].*水土保持学报*,2020,34(5):14-19.
- [24] Won C H, Choi Y H, Shin M H, et al. Effects of rice straw mats on runoff and sediment discharge in a laboratory rainfall simulation [J]. *Geoderma*, 2012, 189/190:164-169.
- [25] Shao Q, Gu W, Dai Q Y, et al. Effectiveness of geotextile mulches for slope restoration in semi-arid northern China[J]. *Catena*, 2014,116:1-9.
- [26] 张平,王树森,马迎梅,等.黄土丘陵沟壑区不同草本植物生长期植物纤维毯对沟道边坡产流产沙的影响[J].*水土保持学报*,2020,34(5):49-55.