

农田浅沟中不同植物的水土保持效果和机理分析

王鑫雨¹, 张艳², 关颖慧², 孙义秋¹, 苏雨¹, 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:为探究不同植物在东北黑土地区农田浅沟中的水土保持效果,建立裸坡(LP)和种植有紫花苜蓿(V_1)和马蔺草(V_2) 2种植物的坡面浅沟模型,通过在浅沟内模拟上方汇水,进行不同植物覆盖下的浅沟坡面水力侵蚀试验,分析产流产沙特征及水动力学参数时空变化特征。结果表明:(1)相同流量下产流时间为裸坡<紫花苜蓿<马蔺草,产流时间延长,下渗量明显增大,紫花苜蓿(61%)的减沙效果显著优于马蔺草(29%),但紫花苜蓿(33%)减流效果弱于马蔺草(38%)。(2)相同流量下,紫花苜蓿的水力摩擦系数(f)(2.3)高于马蔺草(0.8),同时紫花苜蓿的平均流速(u)略低于马蔺草,弗劳德数(Fr)表现为紫花苜蓿<马蔺草,平均雷诺数(Re)表现为紫花苜蓿<马蔺草,整体表现为紊流。(3)通过拟合函数分析,3组处理下雷诺数与流速和摩擦系数呈正相关,但函数关系略有差别;弗劳德数与摩擦系数呈负相关,均符合对数函数变化规律。产流率和产沙率的降低归因于植被覆盖增大径流受到的摩擦力,同时提高径流入渗率,并且紫花苜蓿的减流减沙效果优于马蔺草;随着流量增大,马蔺草的减流减沙效益衰减速度大于紫花苜蓿,马蔺草防护临界流量在30~40 L/min,紫花苜蓿能够满足更高汇水流量下的水土保持需求。

关键词:水力侵蚀;入渗速度;水动力学机理;侵蚀产沙

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)01-0023-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.01.004

Soil and Water Conservation Effect and Mechanism Analysis of Different Plants in Ephemeral Gully of Farmland

WANG Xinyu¹, ZHANG Yan², GUAN Yinghui²,

SUN Yiqiu¹, SU Yu¹, WANG Zhirong¹, WU Hailong¹

(1.College of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology,

Tianjin 300384; 2.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: To investigate the effects of different plants on soil and water conservation in ephemeral gullies of agricultural fields in the black soil region of Northeast China, ephemeral gullies were modelled on bare slopes (LP) and slopes planted with both alfalfa (V_1) and *Iris ensata* Thunb (V_2). By simulating upper catchment, hydraulic erosion experiments were carried out on the slope surface of ephemeral gullies covered by different plants, and the characteristics of runoff and sediment yield as well as the spatial and temporal variation of hydrodynamic parameters were analyzed. The results showed that: (1) Under the same flow rate, the runoff generation time followed the order of LP < alfalfa < *I. ensata* Thunb, with significantly prolonged flow production and greater infiltration, sediment-reduction benefits of alfalfa (61%) was significantly better than that of *I. ensata* Thunb (29%), but the runoff reduction benefits of alfalfa (33%) was slightly weaker than that of *I. ensata* Thunb (38%). (2) Under the same flow rate, hydraulic friction coefficient (f) of alfalfa (2.3) was higher than that of *I. ensata* Thunb (0.8), while the average flow rate (u) of alfalfa was slightly lower than that of *I. ensata* Thunb, the Froude number (Fr) and the mean Reynolds number (Re) followed the order of alfalfa < *I. ensata* Thunb, and the overall flow was turbulent. (3) Analysis of the fitted functions showed that Reynolds number was positively correlated with flow rate and friction coefficient under the three sets of experiments, but the functional relationship was slightly different. Froude number was

收稿日期:2022-07-04

资助项目:国家自然科学基金项目(41907047);战略性国际科技创新合作重点专项(2016YFE0202900);天津市自然科学基金重点项目(18JCZDJ39600)

第一作者:王鑫雨(1997—),男,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:wang_graduates@stud.tjut.edu.cn

通信作者:吴海龙(1986—),男,博士,讲师,主要从事水土保持与森林水文研究。E-mail:wuhailong@email.tjut.edu.cn

negatively correlated with friction coefficient, all in line with the law of logarithmic function change. The results showed that the reduction of runoff and sediment yield was due to the increase of friction and infiltration rate of the vegetation cover, and alfalfa was more effective in reducing runoff and sediment than *I. ensata* Thunb. With the increasing flow rate, the runoff and sediment reduction benefits of *I. ensata* Thunb decayed more rapidly than those of alfalfa. The critical flow rate for protection of *I. ensata* Thunb was 30~40 L/min, and alfalfa could meet the soil and water conservation needs at higher catchment flow.

Keywords: hydraulic erosion; infiltration rate; hydrodynamic mechanism; erosion and sediment yield

水土流失作为土壤退化的原因之一,可导致土壤有机质流失和下游水体污染,也是我国东北地区严重的环境问题之一^[1-3]。水力侵蚀作为东北地区众多外营力中最主要的侵蚀类型^[4-6],在 2021 年的土壤侵蚀调查中占到总流失面积的 64%^[7]。水力侵蚀最终发展为沟蚀,而浅沟常以沟蚀的中间形态出现。浅沟在水流作用下既是产沙的来源,也是泥沙搬运和输送的通道^[8]。据调查^[9],我国黑土区内侵蚀沟数量众多,浅沟占其比重高达 88.7%,造成农业用地严重的水土流失以及土壤退化,因此对于农业用地中的浅沟治理显得尤为重要。

将植物应用于水土保持既可以减少对生态的破坏,也可以起到景观作用。相关研究^[10-11]表明,植被覆盖下的浅沟能够起到明显的阻流减沙和削峰作用,而且不同的植被类型也影响径流和泥沙的调节效率^[12],林地能够改善土壤结构,并且调节径流和泥沙能力更强。对于相同的植被类型,不同生长期的盖度和根茎生长情况也能够显著影响产沙^[13]。根系长度和根系表面积是提高土壤黏聚力的关键^[14],植物根系缠绕提高土壤抗蚀性,进而加大土壤团聚体分布的均质化,提高大团聚体的含量,增强土壤团聚体的稳定性^[15]。另外,植被的不同空间分布格局影响土壤入渗^[16]。根系发达的植物能够提高土壤孔隙度和平均孔隙半径,并且植物凋落物密度和根系质量密度与土壤入渗呈正相关,是影响黄土高原陡坡沟坡土壤入渗特性的主要因素^[17],苜蓿草地能够改变土壤的入渗性起到水土保持效果^[18]。不同的草带空间分布不仅能够调控侵蚀方式^[19],还可以调控坡面产沙来源^[20]。有研究^[21]表明,植被措施的产流产沙以及水动力学参数还受到覆盖度的影响,覆盖度增大,阻力系数和弗劳德数随之增大,流速和紊动性随之减小,植被覆盖度还影响水流路径长度,覆盖度越大,水流路径长度越小。在不同坡度下,草地减沙效益和阻力系数随坡度的增大而减小^[22-23]。

当前针对植被措施的产流产沙和水动力学等相关研究多见于黄土区,黑土农耕区目前对于植物措施下的水动力学机理和临界流量等相关研究较少。因为土壤性质不同,其侵蚀特点也有所差别。针对这些

问题,本试验通过人工修筑黑土农田浅沟模型,研究紫花苜蓿和马蔺草覆盖下的黑土农田浅沟内的水力侵蚀产流产沙特性及水动力学机理研究,评价 2 种植物的防护效果,揭示其侵蚀机理,以期为浅沟侵蚀相对应的水土保持工作和建立植物措施相关标准等工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与设备

试验在天津理工大学环境科学与安全工程学院西侧户外试验场地进行。试验所用土槽规格为长 3 m,宽 2 m,深 0.5 m,土槽顶部装备由水泵、水箱、供水管和稳流槽组成的供水系统,并配备电子流量计和阀门来控制进水流量(图 1)。水进入稳流槽后,通过一块薄板均匀流入土槽内的缓冲区。土槽底部配有液压装置,可以手动进行坡度调节,调节范围 0~30°。

试验所用土壤取自黑龙江省齐齐哈尔市克山农场坡耕地地表土壤(125°14'36.996"—125°23'30.732"E, 48°16'42.348"—48°18'20.988"N)。用滴定法测得有机质含量约为 72.95 g/kg,pH 为 6.3;根据国际制土壤质地分类标准用激光粒度仪分析试验用土的机械组成,砂粒含量 25.88%,粉粒含量 67.55%,黏粒含量 6.57%。

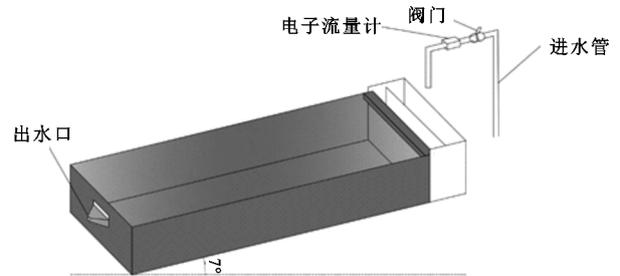


图 1 土槽示意

1.2 试验设计

根据相关资料^[24]和野外实地调查发现,研究区的农耕地多为长缓坡,坡度一般为 1°~7°,并且常见的高频次侵蚀性降雨强度为 0.17 mm/min。根据调查信息计算试验供水流量,参考计算公式^[25]为:

$$Q = \frac{W_d}{W_a} \times A \times RI \times \cos \beta \times \lambda \quad (1)$$

式中:Q 为上方来水流量(L/min); W_d 为设计宽度

(m); W_a 为实际间距(m); A 为汇流面积(m^2); RI 为降雨强度(mm/min); β 为试验坡度($^\circ$); λ 为径流系数。本试验设计坡度为 7° , λ 取 $0.3^{[8]}$ 。

根据计算结果设置上方来水流量分别为 10, 30, 40, 50 L/min。试验时间 45 min, 每 2 min 接取 1 次试验样品。对照组为不设任何措施的裸坡(LP), 试验组分别种植紫花苜蓿(V_1)和马蔺草(V_2), 共设置 12 组试验, 每组试验重复设置 2 次。

本试验分析流速(u)、雷诺数(Re)、水力摩擦系数(f)和弗劳德数(Fr)等 4 个水力学参数的变化规律, 计算公式为:

Re 为水流的惯性力与黏滞力之比, 是可用来判断流态的参数, 计算公式 $^{[26-27]}$ 为:

$$Re = \frac{uR}{\eta} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{1.775 \times 10^{-6}}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (3)$$

式中: u 为平均流速(m/s); η 为黏滞系数(m^2/s); R 为水力半径(m); t 为水温($^\circ C$)。本试验中流速修正系数取 $0.75^{[18]}$;对于薄层水流,水力半径约等于径流深度 $^{[23]}$ 。

水流流动时直接受到来自粗糙地表等的阻力, 常用 f 来表示。本试验选取 Darcy-Weisbach 公式来计算 f , 计算公式 $^{[28-29]}$ 为:

$$f = \frac{8RJg}{u^2} \quad (4)$$

式中: J 为水力坡度; g 为重力加速度, 取 $9.8 m/s^2$ 。本试验用坡度的正切值代替水力坡度 $^{[30]}$ 。

Fr 为惯性力和重力的比值, 是一个无量纲参数 $^{[4]}$, 计算公式为:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gR}} \quad (5)$$

引入减沙效益(D_S)和减流效益(D_R)来评价减流减沙效果, 计算公式为:

$$D_R = \frac{R_0 - R_V}{R_0} \quad (6)$$

$$D_S = \frac{S_0 - S_V}{S_0} \quad (7)$$

式中: R_0 为对照组的产流量(L); R_V 为试验组的产流量(L); S_0 为对照组的产沙量(g); S_V 为试验组的产沙量(g)。

1.3 试验过程

本试验于 2021 年 10—11 月进行, 试验所选植物为马蔺草和紫花苜蓿, 于 2021 年 5 月在温室内同时播种培育(播种密度 $50 g/m^2$) $^{[31]}$, 保证植物生长期相同。

试验前需要塑造浅沟模型(图 2)。填土时首先在土槽底部铺 1 层纱布, 再填进 5 cm 细沙作为透水层, 并用橡胶锤压实, 保证透水。再铺设 1 层纱布, 随后按照设计容重和土壤的实际含水率计算每层所需土壤重量, 按照每层 5 cm 分别铺设 15 cm 厚的黄土(犁底层, 容重 $1.25 g/cm^3$)和 20 cm 厚的黑土(耕作层, 容重 $1.2 g/cm^3$)。每铺完 1 层土需用刮板将表层土壤打松再进行下 1 层的铺设, 避免土壤出现分层, 并且尽量将四周与土槽接触的边界压实, 减少边界效应带来的影响。填土完毕后, 用刮板将坡面修整成两肩高中间低的“U”形浅沟, 并留出 30 cm 的缓冲区, 最后将植物带土 10 cm 按照 40% 左右的盖度均匀移植进土槽浅沟内 $^{[18]}$, 养护一段时间后进行试验。

试验的前 1 天需要进行预降雨($30 mm/h$), 当坡面土壤含水率达到最大并且出水口可以均匀产流时, 停止降雨, 并静置 24 h 以上, 确保每次试验开始时土壤含水率大致相同, 整个试验前的土壤含水率约在 $19.0\% \sim 21.4\%$ 。

试验时, 调整坡度并调节阀门控制流量, 流量校准后可以开始试验(误差控制在 5%)。将温度计置于稳流槽中, 试验结束后记录水温。水从稳流槽溢出时分别开始正计时(产流时间)和 45 min 倒计时(试验时间), 出水口产流时停止正计时记录产流时间。试验过程中每 2 min 接取 1 次泥沙样, 每次 20 s, 称重并记录后放置一旁, 沉淀 24 h 后将泥沙取出烘干并称重。另外, 沿坡面自上而下每 1 m 取 1 个断面作为测定水动力学参数的观测断面。用 $KMnO_4$ 染色剂法测量浅沟中径流的表层流速, 每个坡段测量 2 次作为此刻的平均表层流速。测量径流深时, 每个坡段随机选取 2 个点, 代表此时坡段的平均径流深, 径流宽运用单宽流量公式推导计算得出。

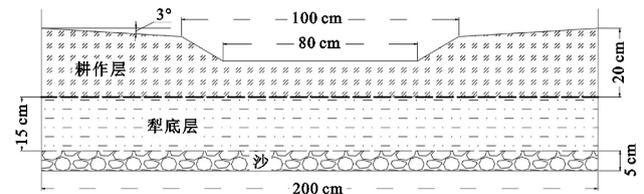


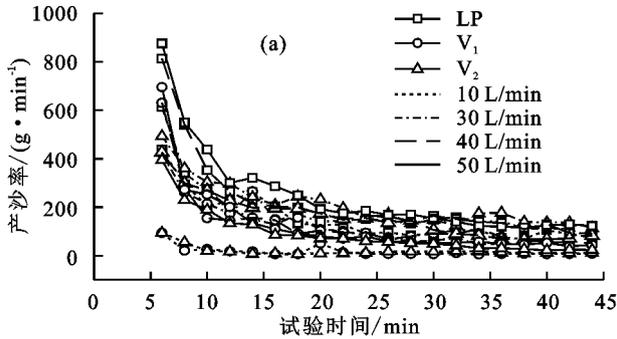
图 2 浅沟横截面

2 结果与分析

2.1 植被对产流产沙的影响

产沙产流数据能够直观反映 2 种植物的水土保持能力。从试验中能够观察到虽然不同试验条件下的产流时间存在着差异, 但相同流量下 3 组试验的产流时间均保持 $LP < V_1 < V_2$, 将试验中所得的产流产沙数据进行分析见图 3。

由图 3a 可知, V_1 和 V_2 的平均产沙量分别为 LP 的 0.43, 0.70 倍。各组试验在 15 min 左右达到稳定产沙率, 整组试验的产沙曲线总体上呈现初始较大而后迅速减小最后趋于平稳的特征, 累积产沙率与试验时间(表 1)呈对数关系^[18], 与流量呈正相关关系^[12]。在相同流量下, V_1 和 V_2 的瞬时产沙率均小于对照组, 起到较好的减沙作用。从图 3 还可发现, 随着流



量增大, 各试验组与对照组的稳定产沙率的差距逐渐缩小; 同一措施间径流的含沙量也随着流量增大而增高, 达到稳定值的曲线也逐渐变陡, 说明流量显著影响产沙率。图 3b 为各流量下的累积产沙量, 根据公式(7), 在 4 个流量下 V_1 的减沙效益变化在 42%~95%, 平均为 61%, V_2 的减沙效益变化在 10%~93%, 平均为 38%。

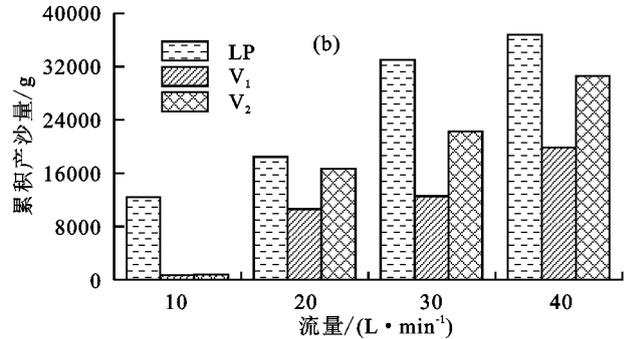


图 3 产沙变化特征

表 1 累积产沙和累积产流与时间的函数关系

指标	LP	V_1	V_2
累积产沙	$y = 8916.2e^{0.0291x}$ $R^2 = 0.926$	$y = 457.18x - 3930.5$ $R^2 = 0.974$	$y = 734.24x - 6271.4$ $R^2 = 0.997$
累积产流	$y = 39.762x^{1.0529}$ $R^2 = 0.997$	$y = 53.653x - 481.4$ $R^2 = 0.998$	$y = 53.405x - 445.09$ $R^2 = 0.996$

由图 4a 可知, V_1 和 V_2 的平均产流量分别为 LP 的 0.80, 0.82 倍。试验初期土壤含水率较低, 因此产流率较低; 但随着土壤含水率快速升高至饱和, 产流率也随即升高^[32]; 达到饱和时, 土壤的单位时间渗透量稳定^[33], 因此瞬时产流率也逐渐平稳, 累积产流率与试验时间呈幂函数变化规律, 与流量呈线性相关(表 1)。相同流量下, 3 组试验平均产流率为 LP >

$V_1 > V_2$, V_1 和 V_2 径流峰值流量到来的时间稍晚于 LP, 并且稳定时的产流率与汇流量之间存在一定差值, 这是因为植物的茎叶能够减缓径流拦截泥沙, 加大径流下渗量, 因此 V_1 和 V_2 的产流率低于 LP。由图 4b 3 组措施在不同流量下的累积径流量可知, 不同流量下 V_1 在 4 个流量下的减流效益在 12%~85%, 平均达 33%, V_2 的减流效益在 11%~73%, 平均达 29%。

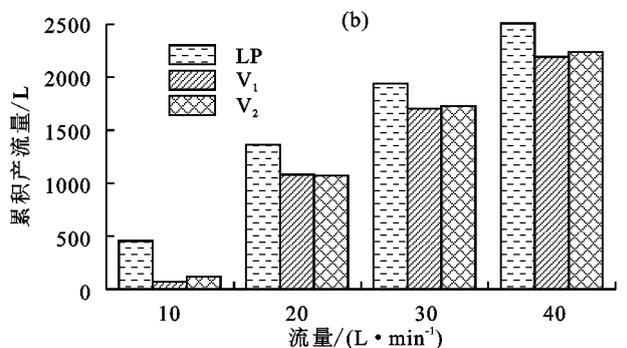
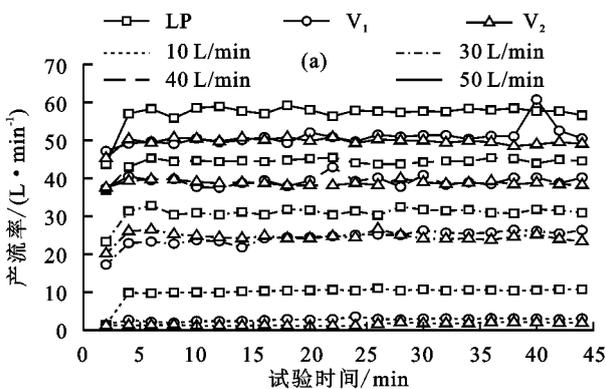


图 4 产流变化特征

2.2 植被对水动力学参数时空变化的影响

2.2.1 流速时空变化特征 流速是水动力学最基本的参数, 能够影响 Re 和 Fr 。由图 5a 可知, 不同流量下的流速存在较大差异, 但变化趋势基本相同, 均呈现初始流速较低, 逐渐上升直至稳定的变化特征。流量相同时 LP 流速最大, V_1 和 V_2 相对于 LP 的流速稳定时间略有延长。随着流量增大, 相同措施间的流速不断增大, 并且 V_2 流速逐渐高于 V_1 , 这与累积径流

量的变化特征相一致。

从空间上(图 5b)看, 坡面沿程共有 3 个观测断面。相同流量下, LP 的每个坡段流速大于 V_1 和 V_2 , 不同流量下 LP 的最大流速出现在坡面中上部分^[34], 第 3 坡段尾段流速则略有下降。而观察 V_1 和 V_2 , 流量 ≤ 30 L/min 时的最大流速出现在中上部, 当流量增大到 40, 50 L/min 时, 最高流速出现在第 3 坡段。植被措施空间上的流速特征从侧面说明, 大流量下植被措施基本接近失效。

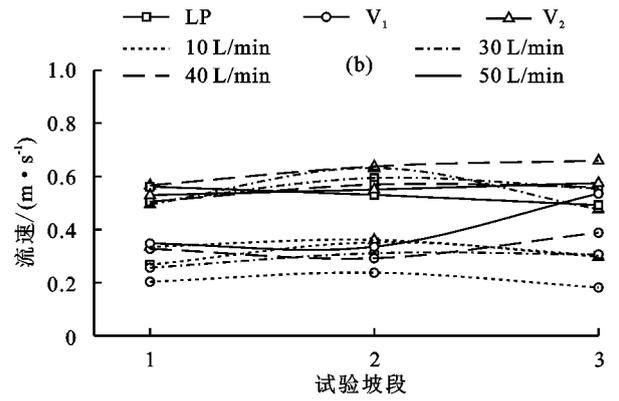
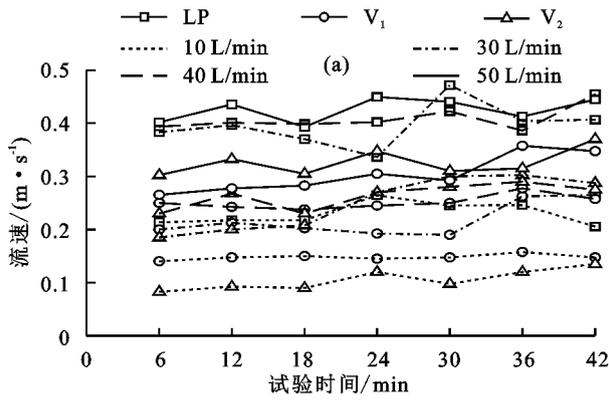


图 5 流速变化特征

2.2.2 *Re* 变化特征 *Re* 是水流惯性力和黏滞力的比值,可以用来量化流态,本试验取下临界 *Re* 为 500^[34-35] (*Re* < 500 时为层流, *Re* > 500 时为紊流)。不同试验条件间 *Re* 有明显的差距,变化范围在 779~6 483, *V*₁ 和 *V*₂ 的平均雷诺数分别为 LP 的 1.16, 1.14 倍,并且整组试验下坡面的平均 *Re* > 500,整体表现为紊流。

从空间上(图 6b)来看,3 组试验 *Re* 沿坡面呈现略有差异的变化规律,LP 情况下最大雷诺数出现在第 1 坡段和第 2 坡段,大致位于坡面中部偏上位置;但 *V*₁ 和 *V*₂ 情况下最大雷诺数出现在中部偏下位置,并且当流量提高到 40, 50 L/min 时, *Re* 沿坡面不断增加,说明大流量下的径流具有很强的侵蚀能力。将 *Re* 作为因变量与流速和流量分别进行拟合(表 2),可以发现,3 种措施下 *Re* 与流速呈正相关,LP 和 *V*₂ 条件下 2 个参数符合对数函数的变化曲线;3 个条件下 *Re* 与流量也呈正相关,并且均符合指数函数的变化规律;将 *Re* 与产流产沙数据拟合可以发现,对照组与试验组的拟合函数有所差别,但均呈正相关。

由图 6 可知,在相同流量条件下,3 组试验 *Re* 随着试验时间逐渐增大;当流量为 10 L/min 时, *V*₂ 初始 *Re* < 500,出现短暂的层流,此流量下的雷诺数 *V*₂ < *V*₁ < LP;随着流量增大, *V*₁ 和 *V*₂ 的雷诺数逐渐超过 LP,此时雷诺数变为 LP < *V*₁ < *V*₂。

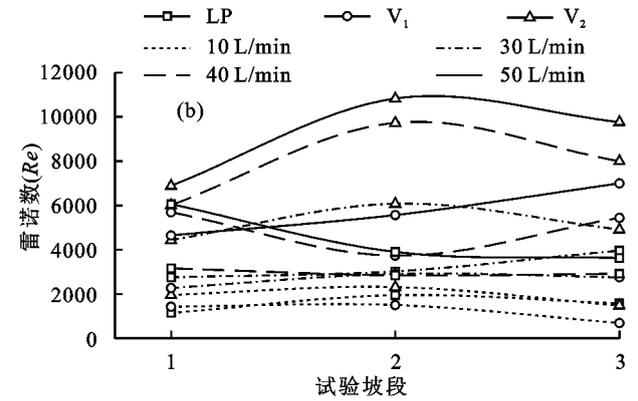
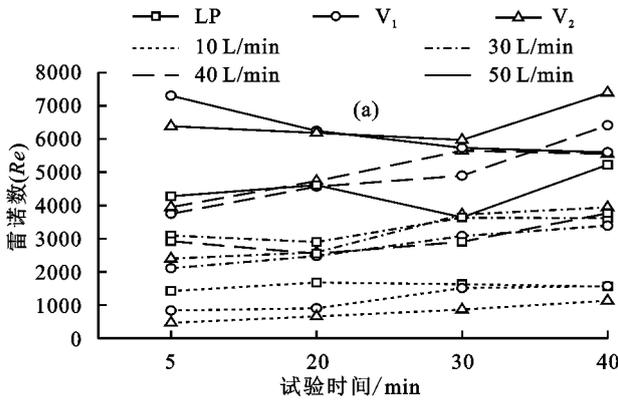


图 6 *Re* 变化趋势

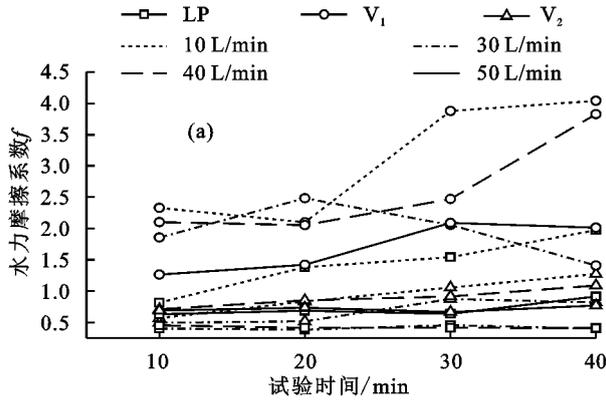
表 2 不同条件流速和流量与 *Re* 的函数关系

指标	LP	<i>V</i> ₁	<i>V</i> ₂
<i>Re</i> VS. 流速	$y=3006.6\ln x+6223.5$ $R^2=0.669$	$y=30056x-3236.7$ $R^2=0.844$	$y=7302.8\ln x+8963.7$ $R^2=0.663$
<i>Re</i> VS. 流量	$y=1290.4e^{0.0252x}$ $R^2=0.918$	$y=811.93e^{0.0418x}$ $R^2=0.956$	$y=512.2e^{0.0542x}$ $R^2=0.937$
<i>Re</i> VS. 产沙量	$y=8.9058x^{0.9854}$ $R^2=0.652$	$y=3.3833x-1835.5$ $R^2=0.907$	$y=5.0663x-1909.9$ $R^2=0.980$
<i>Re</i> VS. 产流量	$y=1863.3\ln x-13282$ $R^2=0.866$	$y=0.4052x-266.39$ $R^2=0.968$	$y=0.3719x-141.1$ $R^2=0.998$

2.2.3 *f* 时空变化特征 *f* 是影响流速的主要因素之一,水流一旦流入浅沟,即受到来自泥沙的阻力。*V*₁ 和 *V*₂ 的平均摩擦系数分别为 0.675 8~0.931 8, 1.696 5~3.086 6,平均为 LP 的 3.83, 1.34 倍,相比裸坡明显提高阻力。同措施间不同流量的摩擦系数呈现周期性的波动,但总体上呈现随着流量增大而减小的趋势^[35]。

由图 7a 可知,流量相同时,每组试验的摩擦系数均随着时间呈增大趋势,除 10 L/min 时 LP 摩擦系数略大于 *V*₂ 以外,其余流量下均为 LP < *V*₂ < *V*₁。流量越大, *V*₂ 和 LP 的摩擦系数差距越小,在 50 L/min 的流量下 *V*₂ 和 LP 的摩擦系数曲线大致重合,这与 *V*₂ 在 50 L/min 时的产沙特征和减沙效益相呼应,在大流量下基本失去防护效果。

由图 7b 可知,LP 不同流量下最大摩擦力均出现在第 1 坡段,最小摩擦力在第 2 坡段,在图像上是开口向上的抛物线; V_1 和 V_2 条件下,随着流量增加,最大摩擦力出现的位置越来越接近沟头位置,逐渐由第 3 坡段转移到第 1 坡段,并且 V_1 的最大摩擦力转移速度大于 V_2 。因此,在流速以及减沙效益 V_1 均好于 V_2 。前文提到摩擦力能够影响流速,因此和雷诺数



也必然存在一定关系。将试验过程中的数据进行函数拟合(LP: $y = 0.1733e^{0.0003x}$, $R^2 = 0.793$; V_1 : $y = 267.21x^{-0.582}$, $R^2 = 0.860$; V_2 : $y = 267.05x^{-0.592}$, $R^2 = 0.920$ 。式中: Re 为自变量, f 为因变量),可知 LP 条件下, Re 和 f 呈正相关,符合指数函数的变化规律; V_1 和 V_2 条件下, Re 和 f 呈负相关^[23],拟合结果符合负幂函数变化规律。

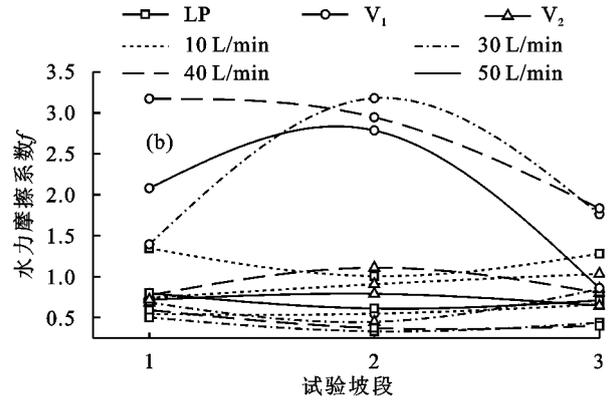
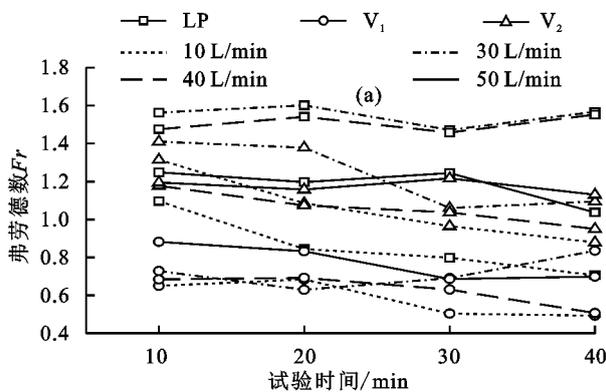


图 7 f 变化趋势

2.2.4 Fr 时空变化特征 Fr 可以用来量化判断水流流速的急缓程度,通常认为 $Fr < 1$ 为缓流, $Fr > 1$ 为急流^[36-37]。 V_1 和 V_2 的弗劳德数分别为 0.582 5~0.444 4, 1.059 4~1.236 2,平均分别为 LP 的 0.56, 0.93 倍。 $Fr < 1$ 的情况少于 6%,可以认为全部试验条件下径流均为急流。 Fr 与流量总体上呈正相关,流量越大, Fr 越大。

各试验条件下, Fr 均随试验时间逐渐减小(图 8a),并且相同流量下 V_1 的弗劳德数远小于 V_2 。随着流量逐渐增大, V_2 和 LP 的弗劳德数差距逐渐缩小,在 50 L/min 流量下,发生重合后高于 LP,说明此时径流在 V_2 内的惯性力和动能大于 LP 内的惯性力。



Fr 在沿程分布上表现出较大差异(图 8b)。LP 条件下,最大弗劳德数出现在中间坡段,按照离浅沟顶部的距离图像应呈开口向下的抛物线; V_1 和 V_2 条件下, Fr 的最大值出现在第 3 坡段, Fr 沿坡面递增,基本符合指数函数的变化规律。将试验中得到的 Fr 和 f 进行拟合(f 为自变量, Fr 为因变量),可以分析出 2 个参数间的相关变化趋势。3 个试验措施下的拟合结果(LP: $y = -0.563 \ln x + 1.0259$, $R^2 = 0.988$; V_1 : $y = -0.333 \ln x + 0.9418$, $R^2 = 0.990$; V_2 : $y = -0.567 \ln x + 0.9904$, $R^2 = 0.994$ 。式中: f 为自变量; Fr 为因变量)可知, Fr 随着 f 增大逐渐减小。为负对数函数关系。

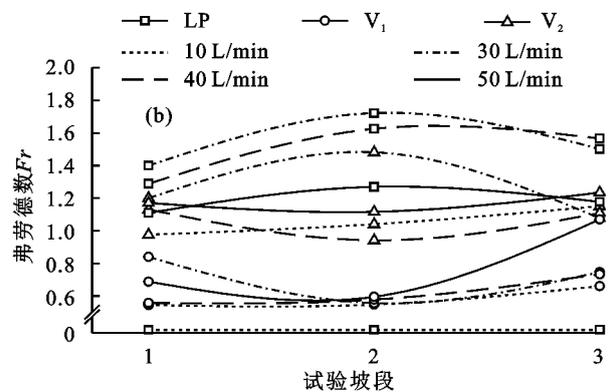


图 8 弗劳德数变化特征

3 讨论

3.1 植被措施提高减流减沙效益

坡面产流产沙受到流量和坡面形态变化的影响。综合来看,一方面由于植物茎叶的截流作用,使坡面径流分散变成大范围的片蚀, V_1 和 V_2 覆盖位置的地表形态变化较小,地表粗糙度增加降低径流能量,不易产生

细沟,加大径流下渗量^[38];另一方面,植物根系有固土和改善土壤理化性质的作用,在提高土壤入渗能力的同时降低径流剪切能力,已经分散的坡面径流难以破坏土壤团聚体,有效减小侵蚀产沙量。

本研究表明,相同流量下, V_1 的减沙效益优于 V_2 ,但随着流量增大,减沙效益均不断下降;当流量

增加到 40 L/min 时, V_2 的防护效果接近失效, 但 V_1 仍可以起到较好的防护效果。2 种植物在小流量下 (<30 L/min) 能够起到很好的减流作用, 流量提高到 40 L/min 时减流效益锐减到 10%, 基本可以认为失去减流效果。

3.2 植被措施显著影响水动力学参数

侵蚀初期, 进入浅沟的水流受到来自坡面松散泥沙的阻力消耗掉大部分动能, 随着侵蚀的发展产沙量逐渐减小并趋于稳定, 此时径流受到的阻力减小, 流速逐渐增大也趋于稳定。但因为植被覆盖下的浅沟内地表径流被不规则分布的植被根茎分散, 难以形成稳定的股流, 一方面造成侵蚀形态的转变, 破坏径流的稳定状态, 使得坡面径流 $Re > 500$, 呈现紊流的状态; 另一方面, 植被根系能够提高土壤抗剪强度和团聚体稳定性, 影响土壤孔隙度和持水率, 在多重原因的共同作用下 f 进一步增大, 同时也增大入渗速度和入渗量, 导致地表径流量减小, 流速难以提高。 Fr 表征径流受到的惯性力和重力的相对大小, 惯性力能够扰动水体, 使其脱离规律运动。结合径流在浅沟内受到摩擦力的情况, 与 V_2 和 LP 相比, 径流在 V_1 浅沟内抵消摩擦力所消耗的重力势能更多, 因此动能相对最少, 与流速和产沙特征相呼应。

试验中最大流速出现在浅沟中上部, 造成这种现象的原因: 首先径流需要经过较长的坡面转化动能, 但在剥离和搬运泥沙时消耗的能量大于所获得的能量, 使得流速又开始降低; 其次在第 3 坡段尾端出水口突然收窄, 对流速也产生一定影响。

4 结论

(1) 根据产沙量和产流量的结果显示, 相较于对照组的裸坡, V_1 的平均 D_S 和 D_R 分别达到 61% 和 33%, V_2 平均 D_S 和 D_R 达到 29% 和 38%, 苜蓿草地的径流入渗量高于马蔺草地。 V_1 的累积产沙与时间呈正对数关系, V_2 的累积产沙与时间呈正幂函数关系, V_1 和 V_2 的累积产流与时间呈正幂函数关系。

(2) V_1 和 V_2 各流量下平均流速分别减少 36% 和 36%, 平均 Fr 分别减少 47% 和 11%; 平均 Re 和 f 均高于 LP, 各流量下平均 Re 分别增加 22% 和 25%, 平均 f 分别增加 213% 和 118%。通过参数之间的拟合可以发现, LP 和 V_2 的 Re 与流速为正对数关系, V_1 的 Re 与流速为线性关系且正相关; LP 的 Re 与 f 呈正指数函数关系, V_1 和 V_2 的 Re 与 f 呈正幂函数关系; 3 个试验条件下的 Fr 与 f 均呈负对数关系。

(3) 马蔺草的临界流量介于 30~40 L/min, 苜蓿的减流减沙效果显著优于马蔺草, 并且能够适用于更高的流量。

参考文献:

- [1] 李小辉, 贾本有, 范子武, 等. 典型作物对水土流失影响的小区试验研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(2): 95-100.
- [2] Lizaga I, Quijano L, Gaspar L, et al. Linking land use changes to variation in soil properties in a mediterranean mountain agroecosystem[J]. Catena, 2019, 172: 516-527.
- [3] Panagos P, Standardi G, Borrelli P, et al. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the european union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models[J]. Land Degradation and Development, 2018, 29(3): 471-484.
- [4] 林俊秋, 杨大明, 方怒放, 等. 坡面细沟侵蚀过程中的水动力特性变化[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 1-7.
- [5] Liu X B, Zhang S L, Zhang X Y, et al. Soil erosion control practices in northeast china: A mini-review[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 117: 44-48.
- [6] Wang H, Yang S L, Wang Y D, et al. Rates and causes of black soil erosion in northeast china[J]. Catena, 2022, 214: e106250.
- [7] 中华人民共和国水利部. 2020 年中国水土保持公报[Z]. 中华人民共和国水利部公报, 2021(1): 22-35.
- [8] 孙义秋, 关颖慧, 汪志荣, 等. 植被毯措施对黑土农田浅沟侵蚀的防护效果研究[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 8-13.
- [9] 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.
- [10] Pan C Z, Ma L. How the spatial distribution of grass contributes to controlling hillslope erosion[J]. Hydrological Processes, 2020, 34(1): 68-81.
- [11] Tang C J, Liu Y, Li Z W, et al. Effectiveness of vegetation cover pattern on regulating soil erosion and runoff generation in red soil environment, southern china[J]. Ecological Indicators, 2021, 129: e107956.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 程洪, 赵建民, 颜涛, 等. 非饱和沙粒植草后抗剪强度与黏聚力增强试验研究[J]. 南昌工程学院学报, 2017, 36(6): 31-36, 104.
- [15] 马东方, 袁再健, 吴新亮, 等. 华南花岗岩侵蚀区不同植被类型坡面土壤有机碳分布和团聚体稳定性[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 137-144.
- [16] 赵炯昌, 潘岱立, 卫伟, 等. 植被格局对土壤入渗和水沙过程影响的模拟试验研究[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1373-1380.
- [17] Zhu P Z, Zhang G H, Wang H X, et al. Soil infiltra-

- tion properties affected by typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: e125535.
- [18] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]. *水利学报*, 2011, 42(2): 232-237.
- [19] 贾莲莲, 刘雅丽, 朱冰冰, 等. 不同草带空间分布对坡面细沟侵蚀调控机制[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 145-148, 153.
- [20] 于国强, 贾莲莲, 朱冰冰, 等. 不同坡位的植被缓冲带对坡面侵蚀产沙来源的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6): 9-13.
- [21] 王钰, 朱冰冰, 冯起. 草地坡面径流侵蚀动力特征模拟[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(6): 162-168.
- [22] 潘成忠, 上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力特性及其拦沙机理[J]. *水科学进展*, 2007, 18(4): 490-495.
- [23] 王俊杰, 张宽地, 龚家国, 等. 不同覆盖度条件坡面水流阻力规律[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 1-6.
- [24] 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, 18.
- [25] Gong J G, Jia Y W, Zhou Z H, et al. An experimental study on dynamic processes of ephemeral gully erosion in loess landscapes[J]. *Geomorphology*, 2011, 125(1): 203-213.
- [26] Guo T L, Wang Q J, Li D Q, et al. Sediment and solute transport on soil slope under simultaneous influence of rainfall impact and scouring flow[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(11): 1446-1454.
- [27] Guo M M, Chen Z X, Wang W L, et al. Spatiotemporal changes in flow hydraulic characteristics and soil loss during gully headcut erosion under controlled conditions[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25: 4473-4494.
- [28] Smith M W, Cox N J, Bracken L J. Applying flow resistance equations to overland flows[J]. *Progress in Physical Geography*, 2007, 31(4): 363-387.
- [29] Xu X M, Zheng F L, Wilson G. V. Flow hydraulics in an ephemeral gully system under different slope gradients, rainfall intensities and inflow conditions[J]. *Catena*, 2021, 203: e105359.
- [30] 田凯, 李小青, 鲁帆, 等. 坡面流侵蚀水动力学特性研究综述[J]. *中国水土保持*, 2010(4): 44-47, 68.
- [31] 杨庆楠, 徐金忠, 李志飞, 等. 典型黑土区陡坡植草水土流失防治效果研究[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(6): 117-123.
- [32] Bi Y, Zou H, Zhu C W. Dynamic monitoring of soil bulk density and infiltration rate during coal mining in sandy land with different vegetation[J]. *International Journal of Coal Science and Technology*, 2014, 1(2): 198-206.
- [33] 张炜, 郝巍巍, 闫文博, 等. 进水水力负荷对植被浅沟雨水径流控制效果的影响[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(8): 22-25.
- [34] 龚家国, 王文龙, 郭军权. 黄土丘陵沟壑区浅沟水流动力学参数试验研究[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(1): 93-100.
- [35] 车小力, 王文龙, 郭军权, 等. 上方来水来沙对浅沟侵蚀产沙及水动力参数的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(3): 26-31.
- [36] Sun J Q, Zhang N G, Shi M X, et al. The effects of tillage induced surface roughness, slope and discharge rate on soil detachment by concentrated flow: An experimental study[J]. *Hydrological Processes*, 2021, 35(6): e14261.
- [37] An J, Zheng F L, Han Y. Effects of rainstorm patterns on runoff and sediment yield processes[J]. *Soil Science*, 2014, 179(6): 293-303.
- [38] Yang J H, Liu H Q, Zhang J P, et al. Lab simulation of soil erosion on cultivated soil slopes with wheat straw incorporation[J]. *Catena*, 2022, 210: e105865.
- (上接第 16 页)
- [36] Rickson R J, Owens P N, Rickson R J, et al. Controlling sediment at source: An evaluation of erosion control geotextiles[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(5): 550-560.
- [37] Kinloch A J, Little M S G, Watts J F. The role of the interphase in the environmental failure of adhesive joints[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(18/19): 4543-4553.
- [38] Lau K Y, Zafrullah S N R M, Ismail I Z, et al. Effects of water on breakdown characteristics of polyethylene composites[J]. *Journal of Electrostatics*, 2018, 96: 119-127.
- [39] Giménez-Morera A, Sinoga J D R, Cerdà A. The impact of cotton geotextiles on soil and water losses from Mediterranean rainfed agricultural land[J]. *Land Degradation and Development*, 2010, 21(2): 210-217.
- [40] Shen E S, Liu G, Jia Y F, et al. Effects of raindrop impact on the resistance characteristics of sheet flow[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: e125767.
- [41] 杨春霞, 姚文艺, 肖培青, 等. 植被覆盖结构对坡面产流产沙的影响及调控机制分析[J]. *水利学报*, 2019, 50(9): 1078-1085.
- [42] Rickson R J. Controlling sediment at source: An evaluation of erosion control geotextiles[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(5): 550-560.