

苜蓿对坡面产流产沙及土壤水分的影响

李智勇¹, 张梦杰², 陈明玉¹, 杨析¹, 甘淼¹, 李同川^{1,3}

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.湖南省水利水电科学研究院,
长沙 410007; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:苜蓿在黄土高原生态恢复中发挥着重要作用,为进一步了解苜蓿对坡面产流产沙及土壤水分的影响,通过室内人工模拟降雨试验,研究了不同坡度(5°,10°和 15°)和不同苜蓿覆盖度(裸地、低覆盖度和高覆盖度)下的径流速率、产沙速率和土壤水分状况。结果表明:(1) 苜蓿可以显著($p<0.01$)降低坡面径流速率,在 15°坡面条件下,与裸地坡面(1.34 mm/min)相比,低和高苜蓿覆盖度坡面的平均径流速率分别降低了 43%和 78%,而坡度对径流速率没有显著影响($p>0.05$);(2) 苜蓿可以显著($p<0.01$)减少坡面产沙速率,在 15°坡面,裸地的平均产沙速率为 23.5 g/(m²·min),分别是低和高苜蓿覆盖度坡面的 8.6 倍和 13.7 倍,不同坡度下产沙速率差异明显;(3) 苜蓿降低坡面侵蚀产沙的能力强于减缓坡面径流的能力;(4) 降雨 24 h 后,在低和高苜蓿覆盖度下,不同坡度处理 0—90 cm 深度土壤储水量增量平均值分别为 15.9~21.3 mm 和 28.6~38.7 mm,而裸地坡面为 6.4 mm;并且随着覆盖度的增加,土壤水分入渗深度也逐渐增加。苜蓿覆盖可以减缓坡面径流、降低坡面产沙并提高土壤水分入渗量。

关键词:土壤侵蚀; 产流产沙; 模拟降雨; 苜蓿; 土壤储水量

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0054-07

Effects of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) on Runoff and Sediment Yield and Soil Moisture on Slope

LI Zhiyong¹, ZHANG Mengjie², CHEN Mingyu¹, YANG Xi¹, GAN Miao¹, LI Tongchuan^{1,3}

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Hunan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Changsha 410007, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:Alfalfa plays an important role in the ecological restoration of Loess Plateau. In this work, the runoff rate, sediment yield rate, and soil moisture conditions were measured under indoor simulated artificial rainfall with 80 mm/h of rainfall intensity 60-minute rainfall duration different slopes (5°, 15°, and 10°) and three kinds of alfalfa coverage (bare land, low coverage, and high coverage) to further understand the effects of alfalfa on these parameters. Results show that: (1) alfalfa can significantly reduce the runoff on slope ($p<0.01$); compared with that in bare slope (1.34 mm/min), the surface runoff on slope reduces by 43% and 78% under low and high alfalfa coverage, respectively; however, the difference was not significant ($p>0.05$); (2) alfalfa coverage can significantly reduce sediment yield on the slope surface ($p<0.01$); the average sediment yield rate on bare slope surface was 23.50 g/(m²·min) at the slope of 15°, which is 8.6 and 13.7 times of that on slopes with low and high alfalfa coverage, respectively; (3) the effects of alfalfa on reducing erosion and sediment yield are stronger than that on reducing runoff; (4) after 24 h of rainfall, the average increment of soil water storage in the 0—90 cm depth soil layer is 15.9~21.3 mm and 28.6~38.7 mm in slopes with low and high alfalfa coverage, respectively, and the increment of soil water storage in the bare slope is 6.4 mm; and with the increase of coverage, the infiltration depth of soil water also increases gradually. Therefore, alfalfa mulch can significantly reduce the runoff and the sediment yield and increase the soil water infiltration.

收稿日期:2020-09-14

修回日期:2020-11-01

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB40000000);西北农林科技大学人才专项资金资助项目(Z111022011)

第一作者:李智勇(1998—),男,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事土壤生态学研究。E-mail:lizhiyong_1998@163.com

通信作者:李同川(1988—),男,河南新乡人,副教授,博士,主要从事土壤生态学研究。E-mail:litongchuan_xinong@163.com

Keywords:soil erosion; runoff and sediment yield; simulated rainfall; alfalfa; soil water storage

黄土高原位于我国中北部,是世界上黄土覆盖面积最大的高原,也是生态环境最为脆弱的地区之一^[1-2]。黄土高原地区水土流失严重,限制了该地区的经济发展^[3-4]。为此,国家实施了一系列治理措施(如退耕还林还草工程),并取得了显著成效,黄土高原植被覆盖度由 1999 年的 31.6% 上升到 2013 年的 59.6%^[5],使黄土区生态环境得到较大程度的改善^[6]。植被在黄土高原水土流失治理过程中发挥着重要作用^[7-8],植被能通过拦截吸收雨水并增加水分入渗来减少径流量^[9-10],通过降低径流速度、降低雨滴打击动能来减少产沙量^[11-12],草地植被也能通过冠层直接拦截泥沙^[13]。

苜蓿具有高产、优质、耐寒、抗旱等特点,在世界范围内有着广泛的种植面积,被称为“牧草之王”^[8]。苜蓿根系发达、茎叶生长茂盛、植被覆盖度高^[14],并且适应西北地区干旱少雨、土壤贫瘠的环境^[15],具有一定的水土保持作用^[14,16],成为该地区退耕还草的首选草种^[17-18]。关于苜蓿的水土保持作用,国内外已有一些相关研究。肖培青等^[19]采用人工模拟降雨试验,分析了苜蓿坡面在不同降雨强度下的产流产沙过程和相关水动力学参数,结果表明苜蓿具有良好的水土保持作用,并且发现这种水土保持作用与土壤入渗特性有关。王升等^[9]通过对野外条件下不同苜蓿覆盖度(0%, 33.5%, 43.2% 和 68.8%)的黄土坡面产流产沙的研究,发现不同的覆盖度下苜蓿均能在一定程度上降低坡面径流量和产沙量。Wu 等^[10]研究发现,与裸地坡面相比,苜蓿覆盖提高了黄土坡面土壤入渗 1.77 倍,使径流速率和产沙速率分别降低了 28.3% 和 78.4%。上述这些研究从不同降雨强度、不同苜蓿覆盖度及水动力学等方面探讨了苜蓿的水土保持效益,并对产流产沙过程和水动力学原理进行了分析。目前国内也有许多类似的研究,但是将苜蓿覆盖条件下坡面产流产沙过程和剖面土壤水分变化相结合进行研究的报道并不多见。

本试验定量分析不同苜蓿覆盖度(低覆盖度和高覆盖度)、不同坡度(5°, 10°, 15°)下苜蓿坡面产流产沙过程和降雨前后不同深度土层土壤水分变化,进一步揭示苜蓿对坡面产流产沙及土壤水分的影响,为黄土高原退耕还林还草工程的实施和黄土区生态环境的保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 模拟降雨设备

模拟降雨试验在陕西省杨凌区土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行。采用侧喷模拟降雨系统^[20],该

降雨模拟系统可以通过调整喷嘴尺寸和水压设置降雨强度,降雨强度范围为 30~150 mm/h^[21],降雨高度 16 m。并且,该降雨模拟系统可以真实的模拟自然雨滴的大小、分布和最终速度^[22]。本试验采用的降雨强度为 80 mm/h,降雨持续时间为 60 min。

1.2 试验土槽

试验用土来源及处理:试验土壤采集地点为陕西省杨凌区西卜村(北纬 34°20′、东经 108°24′)。该地区年平均气温为 12.9℃,年平均降雨量为 637 mm,年平均蒸发量为 1400 mm,属于温带半湿润区^[22]。在该地区裸地 0—50 cm 土层采集土壤样品,采集后的土壤进行风干处理并过 2 mm 的筛子除去小石块和杂草,之后分析土壤样品土壤有机质(重铬酸钾氧化—外加热法)和土壤粒径(激光衍射法, Mastersizer 2000)。根据土壤有机质含量和粒径分布(表 1),试验土壤为黏壤土,分类为娄土。

表 1 试验土壤基本性质

黏粒/ %	粉粒/ %	砂粒/ %	有机质/ (g · kg ⁻¹)	容重/ (g · cm ⁻³)
10.7±0.9	24.6±2.5	64.7±4.3	4.9±0.23	1.34±0.03

试验土槽及土槽填充:试验用土槽(长 2 m、宽 0.5 m、深 1.0 m)采用钢板制成。土槽放置在带轮子的钢架上,并安装有液压启闭装置用来调节土槽的坡度,本试验共设置 3 种坡度(5°, 10° 和 15°)。在土槽底部设置 351 个孔(直径 0.5 mm),以便于排水。在罐内填土之前,先铺两层医用纱布,然后在罐底铺一层 5 cm 厚的砂作为过滤层,以保证空气和水的渗透性,同时防止泥土堵塞孔洞。土槽填装土壤前,测定试验土壤的含水量,以计算所需的土壤重量,土壤层以 10 cm 的增量填充,从而更准确地获得与田间相似的目标土壤容重(1.35 g/cm³)。填土高度 90 cm,填土总量 0.9 m³。每个土槽中安装 3 根 PR2 管(长 100 cm、直径 2.8 cm),采用 PR2-6 土壤剖面水分测定仪(Cambridge, UK, Delta-T Device Ltd)测定 10 cm, 20 cm, 30 cm, 50 cm 和 90 cm 深度处的土壤含水量。

土槽填充土壤后,种植苜蓿,行距约 15 cm(共 12 行),行距方向与槽宽方向一致。苜蓿种植后放置于室外自然生长,适时进行补水,确保苜蓿正常生长。一年以后对苜蓿进行不同刈割处理,将盖度分别控制为 60% 左右和 90% 左右(表 2)。刈割一周后进行模拟降雨。本试验设置 3 个低苜蓿覆盖处理(坡度 5°, 10° 和 15°), 3 个高苜蓿覆盖处理(坡度 5°, 10° 和 15°), 1 个裸地坡面空白处理(坡度 15°),共准备 7 个土槽。

表 2 不同坡度下苜蓿覆盖度

坡度/(°)	低苜蓿盖度/%	高苜蓿盖度/%
5	57.0	87.1
10	67.5	89.5
15	58.1	91.5

1.3 试验指标测定

模拟降雨及试验指标测定于 2019 年 8 月份开始进行。在模拟降雨前利用 PR2-6 探针测定土壤剖面土壤含水率。模拟降雨试验时,记录径流起始时间,产流开始后用 5 L 的塑料桶收集径流样本,每隔 2 min 收集一次样品,每个土槽总共采集 30 个样品,记录样品重量及体积。将采集的样品在 105℃ 下烘干并称重,用以计算土壤侵蚀率。模拟降雨后,用塑料薄膜覆盖土槽,以减少蒸发。降雨 24 h 后,用 PR2-6 探针测量土槽内 0—90 cm 剖面土壤含水量。

1.4 数据处理

土壤侵蚀速率和径流速率计算公式如下:

$$E_r=\frac{W}{A\times T}$$
$$R=\frac{D}{T}=\frac{V}{A\times T}\times10^3$$

式中: E_r 表示土壤侵蚀速率[$g/(m^2\cdot min)$]; W 表示沉积物干重(g); A 表示斜坡的投影面积(m^2); T 表示取样持续时间(min ,本试验为 2 min); R 表示径流速率(mm/min); D 表示径流深度(mm); V 表示每

个样品的径流量(m^3)。
土壤储水量(Soil water storage (SWS), mm) (0—90 cm)计算公式如下:
 $SSW=100(\theta_{10}+\theta_{20}+1.5\theta_{30}+3\theta_{50}+2.5\theta_{90})$
式中: θ_k 表示不同深度土层的土壤体积含水量(cm^3/cm^3); k 表示不同的土层深度(cm)。
使用 Excel 2019 进行相关数据的处理和分析,使用 Origin 2019 进行作图。

2 结果与分析

2.1 苜蓿对坡面径流的影响

降雨期间不同苜蓿覆盖度(低覆盖度,高覆盖度)、不同坡度(5°,10°和 15°)条件下苜蓿坡面和裸地坡面(15°)的径流速率见图 1。在坡度 15°坡面,裸地、苜蓿低覆盖度和苜蓿高覆盖度坡面的平均径流速率分别为 1.34 mm/min,0.77 mm/min,0.29 mm/min。在苜蓿低覆盖度条件下,坡度 5°,10°和 15°坡面的平均径流速率分别为 0.92 mm/min,0.76 mm/min,0.77 mm/min;苜蓿高覆盖度条件下,各坡度坡面(5°,10°和 15°)的平均径流速率分别为 0.32 mm/min,0.35 mm/min,0.29 mm/min。在坡度 5°,10°和 15°下苜蓿低覆盖度和苜蓿高覆盖度坡面的初始径流速率分别为 0.05~0.27 mm/min 和 0.02~0.05 mm/min,而裸地坡面(坡度 15°)为 1.17 mm/min。

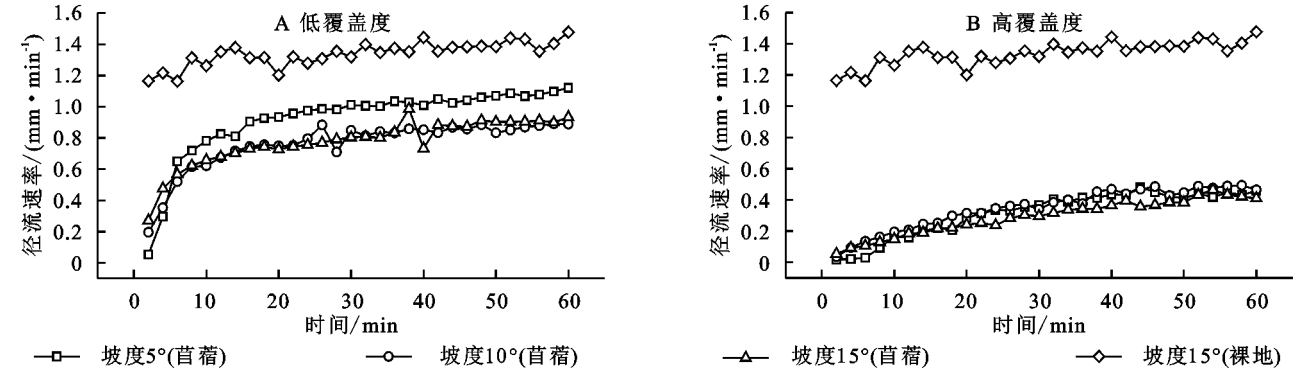


图 1 不同苜蓿覆盖度、不同坡度下各坡面径流速率

在低苜蓿覆盖度条件下,降雨初期(0—10 min)各坡度下苜蓿坡面径流速率均急剧上升;而在降雨中后期(10—60 min)各坡度下苜蓿坡面产流速率相对稳定且上升缓慢。这可能是因为坡面径流的形成与土壤入渗速率有关^[9-10],在低苜蓿覆盖度条件下,降雨初期土壤入渗能力较强,随着土壤含水量逐渐饱和,土壤入渗能力逐渐降低至稳定,坡面径流呈现出先急剧升高后逐渐稳定的趋势。在高苜蓿覆盖度下,整个降雨期间(0—60 min)径流速率没有出现急剧升高的情况,降雨初期(0—10 min)各坡度下苜蓿坡面径流速率缓慢升高,降雨中后期(10—60 min)稳定在

较低水平。对于裸地坡面(坡度 15°),在整个降雨期间(0—60 min)径流速率较高且相对稳定,只有在降雨开始时径流速率有小幅升高。
本试验中,不同苜蓿覆盖度下各坡面(15°)平均径流速率的大小顺序为裸地>低苜蓿覆盖度>高苜蓿覆盖度。与裸地坡面相比,低覆盖度和高覆盖度坡面的平均径流速率分别降低了 43%和 78%,说明苜蓿覆盖有明显减缓坡面径流的作用^[9-10],且苜蓿覆盖度高的情况下减缓径流的效果更明显^[11]。苜蓿能减缓坡面径流,主要是因为苜蓿的存在阻碍了水流向下流动,延长了降雨在坡面上停留的时间,增加了水分

入渗^[18];另外由于苜蓿根系在土壤中的密布缠绕,使土壤对水分的渗透能力增强^[11,23],水分入渗增加,坡面径流减小。随着苜蓿覆盖度的增加,提高了坡面地表粗糙度^[24],苜蓿对水流运动的阻碍增强,入渗增加,进而减小径流。

而在相同的苜蓿覆盖度(低或高)下,不同坡度(5°、10°和15°)坡面径流速率并没有显著($p>0.05$)差异。这可能是因为5°~15°坡度范围内坡度对径流的影响较小,苜蓿对径流的影响掩盖了坡度对径流的影响,植被的存在可在一定程度上削弱坡度对径流的影响^[11],张梦等^[25]研究也表明坡面径流量随坡度(0°~20°)的增加没有明显变化。值得注意的是,在低苜蓿覆盖度下坡度5°苜蓿坡面径流速率高于坡度10°和坡度15°,这可能是因为坡面苜蓿覆盖度不完全相同,低覆盖度下坡度5°坡面的苜蓿覆盖度略低与其他坡面(10°和15°)(表2),从而引起相同覆盖度下径流量较大^[7]。

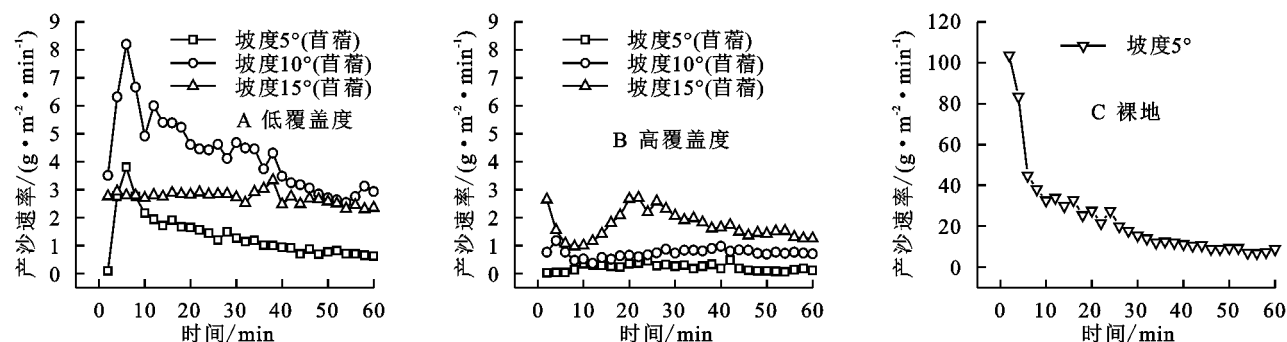


图2 不同苜蓿覆盖度、不同坡度下各坡面产沙速率

在低苜蓿覆盖度下,坡度5°和10°苜蓿坡面在降雨初期(0—10 min)产沙速率急剧升高后又急剧下降,在降雨中后期(10—60 min)产沙速率相对稳定且缓慢下降;而坡度15°苜蓿坡面在整个降雨过程中(0—60 min)产沙速率稳定在同一水平。这是因为低覆盖度下坡面上有松散分散的土壤颗粒,降雨初期产流后随径流冲刷下来,产沙速率急剧升高,松散分散的颗粒被冲刷后产沙速率逐渐稳定^[10]。在高苜蓿覆盖度下,坡度5°和10°苜蓿坡面在降雨期间(0—60 min)产沙速率稳定在同一水平;而坡度15°苜蓿坡面在降雨前期(0—20 min)产沙速率先下降后升高呈现“V型”变化,后缓慢下降至稳定。对于裸地坡面(坡度15°),降雨初期(0—10 min)产沙速率急剧下降,降雨中后期(10—60 min)产沙速率缓慢降低至稳定。

本试验中不同苜蓿覆盖度下各坡面(15°)平均产沙速率的大小顺序为裸地>低苜蓿覆盖度>高苜蓿覆盖度,随着坡面苜蓿覆盖度的增加苜蓿拦截泥沙的效果显著($p<0.01$)增强。一方面苜蓿覆盖度增加,使苜蓿减缓坡面径流速率的能力增强,径流对土壤冲

2.2 苜蓿对坡面产沙的影响

不同苜蓿覆盖度(低覆盖度,高覆盖度)、不同坡度(5°,10°和15°)下苜蓿坡面和裸地坡面(15°)的产沙速率见图2。在坡度15°条件下,裸地、低苜蓿覆盖度和高苜蓿覆盖度坡面的平均产沙速率分别为23.50 g/(m²·min),2.72 g/(m²·min)和1.71 g/(m²·min)。整个降雨期间(60 min),在低苜蓿覆盖度下,坡度5°,10°和15°坡面的平均产沙速率分别为1.73 g/(m²·min),4.27 g/(m²·min)和2.72 g/(m²·min);高苜蓿覆盖度下,各坡度(5°,10°和15°)坡面的平均产沙速率分别为0.21 g/(m²·min),0.73 g/(m²·min)和1.71 g/(m²·min)。坡度15°下,裸地坡面的平均产沙速率最高,分别是低苜蓿覆盖度和高苜蓿覆盖度坡面的8.6倍和13.7倍。在裸地坡面上雨滴直接打击地表土壤,对土壤破坏较大,且降雨后迅速产生径流,携带大量泥沙^[16],因此,裸地坡面的产沙速率显著($p<0.01$)大于苜蓿坡面。

刷作用减弱,携带泥沙减少^[10,16];另一方面苜蓿的存在可以减小雨滴最终速度,降低雨滴对土壤的直接打击动能,减少产沙量^[24]。此外,苜蓿种植一年后土壤表面会产生一定的生物结皮以及枯落物堆积,对土壤具有保护作用^[24]。高苜蓿覆盖度下会产生更多的生物结皮和枯落物,增强了对土壤的保护作用,侵蚀产沙量减少。

而在相同苜蓿覆盖度(低覆盖度或高覆盖度)下,不同坡度坡面产沙速率存在显著($p<0.01$)差异,低覆盖度下苜蓿坡面产沙速率:10°>15°>5°;高覆盖度下苜蓿坡面产沙速率:15°>10°>5°。在高苜蓿覆盖度下,随着坡度增加坡面产沙速率也逐渐增加,这和多数相关研究得出的结果一致^[25-26],即在一定坡度范围内坡度增加会使坡面产沙增加。土壤坡面侵蚀增加可能是因为坡度增加,坡面径流速率增加,径流侵蚀、携带泥沙能力增强^[21],引起侵蚀产沙增加;或者是因为坡度的增加,提高了土壤不稳定性,导致侵蚀产沙量上升^[26]。本试验中径流速率随坡度变化不大,因此,在高苜蓿覆盖度下,产沙速率随坡度的变化

可能是因为土壤受力的变化引起土壤稳定性降低,导致坡面侵蚀产沙增加。而在低苜蓿覆盖度下,坡度 10°坡面(覆盖度 67.5%)产沙速率高于坡度 15°(覆盖度 58.1%),这可能是因为覆盖度不同引起土壤表面生物结皮和枯落物数量不同(表 2),导致 10°坡面产沙速率大于 15°坡面产沙速率。

2.3 累计产流产沙量

不同处理的累计径流量和累计产沙量总体上随降雨时间逐渐增加(图 3)。裸地坡面(坡度 15°)累计径流量和累计产沙量均显著($p<0.01$)高于苜蓿坡面(低苜蓿覆盖度和高苜蓿覆盖度)。较裸地坡面(总径流量 77.62 L,总产沙量 1 361.80 g),低苜蓿覆盖度下,不同坡度(5°,10°,15°)坡面总径流量降低 29%~42%,总产沙量降低 81%~94%;在高苜蓿覆盖度下,不同坡度(5°,10°,15°)坡面总径流量和总产沙量分别降低 74%~78%

和 93%~99%。结果显示,在高苜蓿覆盖度下,坡面总径流量相比低苜蓿覆盖度有大幅度下降,而总产沙量相比低苜蓿覆盖度下降幅度较小。这可能是因为试验中采用刈割的方法控制苜蓿覆盖度,刈割只对苜蓿地上部分进行了处理,而苜蓿根系仍存在于土壤中。苜蓿由低覆盖度到高覆盖度,地上部分盖度增加,苜蓿对径流的减缓作用增强,总径流量大幅度下降^[18,24];而低或高苜蓿覆盖度坡面土壤中均有较多根系分布,由于根系对土壤的固定作用,土壤抗侵蚀能力整体较强^[9,11],总产沙量下降幅度较小。总体上看,不同苜蓿覆盖度下(低或高),苜蓿减少坡面产沙的作用(减少 81%~99%)均大于减缓坡面径流的作用(减少 21%~78%),减沙效益高于减流效益。有研究结果显示,与径流量相比,植被覆盖与产沙量的关系更密切^[11],并且草地植被具有直接拦截泥沙的作用^[27]。

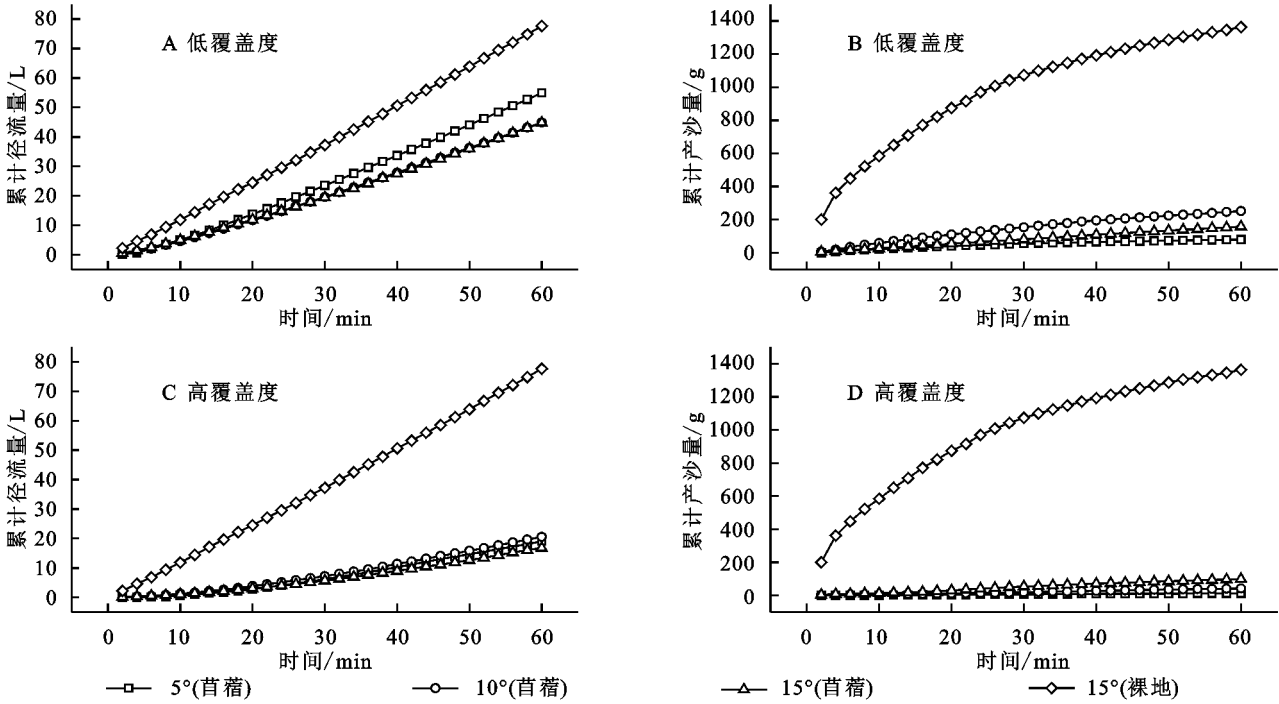


图 3 不同苜蓿覆盖度、不同坡度下各坡面累计径流量和累计产沙量

2.4 苜蓿对剖面土壤水分的影响

在 80 mm/h 降雨强度下(降雨持续 60 min),测定了雨前、雨后(24 h)不同苜蓿覆盖度(低覆盖度和高覆盖度)、不同坡度(5°,10°和 15°)坡面 0—90 cm 深度范围内土壤剖面水分,见图 4。

降雨 24 h 后,裸地坡面 0—20 cm 深度土层土壤含水量有小幅增加,而 20—90 cm 深度土层土壤含水量基本不变。这是因为在裸地坡面上没有植被覆盖,坡面径流速率较大,土壤水分入渗量少、入渗深度较浅,因此降雨只能影响土壤表层含水量,对深层的土壤水分几乎没有影响^[9,19]。低苜蓿覆盖度下,降雨 24 h 后,0—30

cm 深度土层土壤含水量有所提高;而高苜蓿覆盖度下,降雨 24 h 后,0—50 cm 深度土层土壤含水量明显增加。随着苜蓿覆盖度的增加,坡面地表粗糙度增加^[24],苜蓿对径流的阻碍作用增强,延长了径流在坡面的停留时间,水分能入渗到更深的土层^[16,18]。

在 15°坡面,低苜蓿覆盖度坡面 0—90 cm 深度土层内土壤储水量增量平均值为 20.5 mm,而高苜蓿覆盖度下为 36.5 mm,均显著($p<0.01$)高于裸地坡面(6.4 mm),低覆盖度和高覆盖度苜蓿坡面的土壤储水量增量分别是裸地坡面的 3.2 倍和 5.7 倍。在相同坡度下

(15°)随着苜蓿覆盖度的增加,径流量、产沙量均减小;而在相同坡度下(15°),不同苜蓿覆盖度坡面土壤储水量增量平均值的大小顺序为:高苜蓿覆盖度>低苜蓿覆盖度>裸地。与低苜蓿覆盖度坡面相比,高苜蓿覆盖度下5°,10°和15°坡面土壤储水量增量平均值分别增加了34%,143%和78%。苜蓿在降雨过程中能减缓坡面径

流,增加水分入渗,提高土壤储水量^[16],随着苜蓿覆盖度的增加,坡面土壤储水量呈现不断增大的趋势。原因有两方面,一方面是种植苜蓿使土壤水分入渗性能得到改善,增加了土壤储水量^[10];另一方面是苜蓿的存在减缓了坡面径流速率,使径流在坡面停留时间增加,增加了水分向土壤入渗,进而增加了土壤储水量^[15,18]。

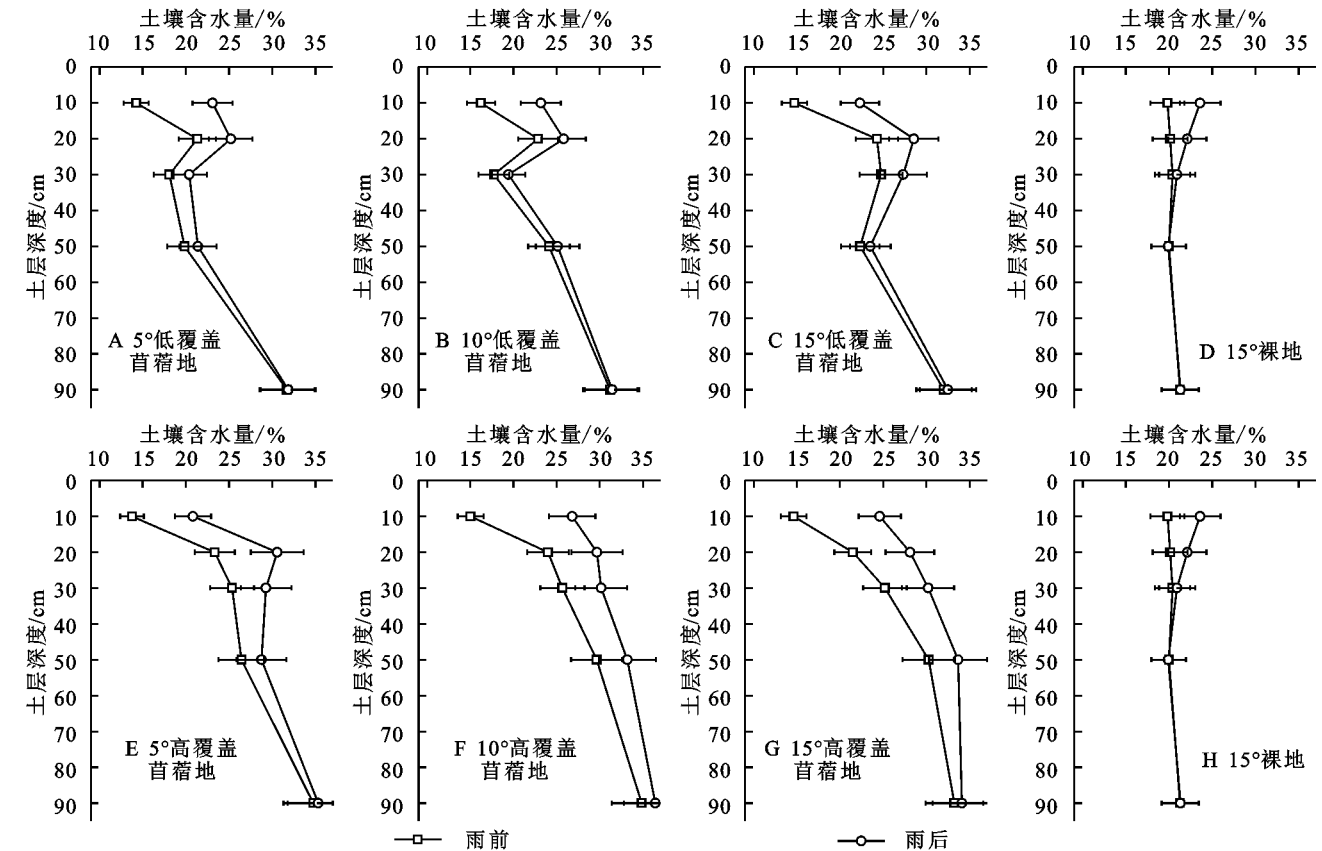


图4 雨前、雨后(24 h)不同苜蓿覆盖、不同坡度下坡面土壤含水量

在相同覆盖度条件下,不同坡度苜蓿坡面土壤储水量增量平均值的大小顺序为:5°>15°>10°(低苜蓿覆盖度);高苜蓿覆盖度则相反:10°>15°>5°。相同苜蓿覆盖度,不同坡度坡面的土壤储水量存在差异,但差异并不显著($p>0.05$)。这与试验中坡度对径流的影响类似^[11],坡度变化(5°~15°)对土壤储水量影响较小,植被(苜蓿)覆盖对水分入渗的影响掩盖了坡度对水分入渗的影响。

3 结论

苜蓿可以起到减少坡面径流和侵蚀产沙的作用,与裸地坡面相比,种植苜蓿可以显著($p<0.01$)降低坡面径流速率和产沙速率,不同苜蓿覆盖度降低坡面径流和侵蚀产沙作用大小顺序均为:高苜蓿覆盖度>低苜蓿覆盖度>裸地。在相同苜蓿覆盖度下,不同坡度坡面苜蓿拦截泥沙效果不同,低覆盖度下苜蓿拦截泥沙作用大小:5°>15°>10°;高覆盖度下苜蓿拦截泥

沙作用大小:5°>10°>15°。而坡度对苜蓿坡面径流速率无显著($p>0.05$)影响。相比之下,苜蓿减少坡面产沙的作用(减少81%~99%)大于减缓坡面径流的作用(减少21%~78%)。与低苜蓿覆盖度坡面相比,高苜蓿覆盖度下不同坡度(5°,10°和15°)坡面土壤储水量增量平均值(雨前、雨后)分别增加了34%,143%和78%。而相同覆盖度下,不同坡度坡面的0—90 cm土壤储水量差异不显著($p>0.05$)。

参考文献:

- [1] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J]. Journal of Hydrology, 2007,335(3/4):247-258.
- [2] Li T C, Shao M A, Jia Y H, et al. Small-scale observation on the effects of the burrowing activities of mole crickets on soil erosion and hydrologic processes[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018,261:

- 136-143.
- [3] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.
- [4] 王承书,杨晓楠,孙文义,等.极端暴雨条件下黄土丘陵沟壑区土壤蓄水能力和入渗规律[J].土壤学报,2020,57(2):296-306.
- [5] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing green and grain trade[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 739-741.
- [6] Liu Y X, Fu B J, Liu Y, et al. Vulnerability assessment of the global water erosion tendency: Vegetation greening can partly offset increasing rainfall stress[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(9):1061-1069.
- [7] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2010,47(3):401-407.
- [8] Wang Q, Li F C, Zhang D K, et al. Sediment control and fodder yield increase in alfalfa (*Medicago sativa* L.) production with tied-ridge-furrow rainwater harvesting on sloping land[J]. Field Crops Research, 2018, 225:55-63.
- [9] 王升,王全九,董文财,等.黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J].水土保持学报,2012,26(4):25-29.
- [10] Wu S F, Wu P T, Feng H, et al. Effects of alfalfa coverage on runoff, erosion and hydraulic characteristics of overland flow on loess slope plots[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2011, 5(1):76-83.
- [11] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报, 2017, 33(22):159-166.
- [12] Yao J J, Cheng J H, Zhou Z D, et al. Effects of herbaceous vegetation coverage and rainfall intensity on splash characteristics in northern China[J]. Catena, 2018, 167:411-421.
- [13] Zhao C H, Gao J E, Huang Y F, et al. The contribution of *Astragalus adsurgens* roots and canopy to water erosion control in the water-wind crisscrossed erosion region of the Loess Plateau, China[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(1):265-273.
- [14] Wang Y Z, You Z, Ren P H. Research progress on alfalfa (*Medicago sativa* L.) adaptability under drought stress [J]. Agricultural Science & Technology, 2017, 18(2): 219-222.
- [15] Zhang Q Y, Jia X X, Zhao C L, et al. Revegetation with artificial plants improves topsoil hydrological properties but intensifies deep-soil drying in northern Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(3):335-346.
- [16] 勃海锋.模拟降雨条件下人工苜蓿和柠条群落对产流、产沙的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [17] Chen L D, Huang Z L, Gong J, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China[J]. Catena, 2007, 70(2):200-208.
- [18] 王伦江,张兴昌.苜蓿影响砒砂岩陡坡侵蚀的水动力学机理研究[J].土壤学报,2020,57(2):284-295.
- [19] 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.
- [20] 郑粉莉,赵军.人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介 [J].水土保持研究,2004,11(4):177-178.
- [21] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155:429-436.
- [22] Li T C, Jia Y H, Shao M A, et al. *Camponotus japonicus* burrowing activities exacerbate soil erosion on bare slopes[J]. Geoderma, 2019, 348:158-167.
- [23] Vannoppen W, Vanmaercke M, De Baets S, et al. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 150:666-678.
- [24] 钱婧.模拟降雨条件下红壤坡面菜地侵蚀产沙及土壤养分流失特征研究[D].杭州:浙江大学,2015.
- [25] 张梦,李冬杰,周玥.雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):85-90.
- [26] 陈诚,郝志邦.模拟降雨下不同坡度土壤坡面产流产沙特征及磷和钾素流失研究[J].水土保持研究,2017,24(2):70-76,83.
- [27] 于国强,李占斌,李鹏,等.不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J].水科学进展,2010,21(5):593-599.