

北京北部褐土区2种典型植物措施减流减沙效应

王葆¹, 程金花¹, 王文凯², 马俊明¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京市延庆区水土保持工作站, 北京 102100)

摘要: 为了对比沙打旺和紫花苜蓿的减流减沙效果, 设置3种流量(1, 2, 3 m³/h), 5种植被覆盖度(100%, 75%, 50%, 25%和0), 利用潜水泵进行径流冲刷试验。结果表明: (1) 种植沙打旺和紫花苜蓿的坡面入渗系数大于对照组, 径流量及产沙量小于对照组, 说明沙打旺和紫花苜蓿均具有减流减沙效果。 (2) 沙打旺的减流减沙效果优于紫花苜蓿, 以流量为3 m³/h时为例, 种植紫花苜蓿、沙打旺的坡面入渗系数分别比对照组增加了5.8%和45.3%; 径流总量分别比对照组减少了3.7%和11.2%; 对照组产沙量分别是种植紫花苜蓿和沙打旺的坡面产沙量的6.40倍和9.19倍; 沙打旺组坡面入渗效果、减沙效益均优于紫花苜蓿组, 而紫花苜蓿组的径流量稳定值、径流总量优于沙打旺组。 (3) 植被的减流减沙效益存在临界现象, 50%~75%是本地区草本植物减沙效益的临界盖度。

关键词: 沙打旺; 紫花苜蓿; 流量; 植被覆盖度; 减流减沙效果

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0056-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.03.010

Effects of Two Typical Plant Measures on Runoff and Sediment Reduction in a Cinnamon Soil Region in Northern Beijing

WANG Bao¹, CHENG Jinhua¹, WANG Wenkai², MA Junming¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. Soil and Water Conservation workstation in Yanqing District of Beijing, Beijing 102100)

Abstract: In order to compare the effects of *Astragalus adsurgens* Pall. and *Medicago sativa* L. on reducing runoff and sediment, we set up three rates of flow (1 m³/h, 2 m³/h, and 3 m³/h), and five kinds of vegetation coverage (100%, 75%, 50%, 25%, and 0). The submersible pump was used to carry out the runoff scouring experiment. The results show that: (1) The permeability coefficient of the slopes on which *A. adsurgens* and *M. sativa* were planted was larger than that of the control group, but the runoff and sediment of the slopes on which *A. adsurgens* and *M. sativa* were planted was less than that of the control group, indicating that *A. adsurgens* and *M. sativa* having effects on runoff and sediment reduction. (2) The effects of *A. adsurgens* on runoff and sediment reduction were better than that of *M. sativa* in the northern mountain area of Beijing. For example, compared with the control group, when the flow rate was 3 m³/h, the permeability coefficient of the slopes on which *A. adsurgens* and *M. sativa* were planted was increased by 5.8% and 45.3%, respectively. Total runoff of the slopes on which *A. adsurgens* and *M. sativa* were planted was less than that of the control group, being decreased by 3.7% and 11.2%, respectively. Sediment yield of the control group was 6.40 and 9.19 times the size of that of the slopes on which *A. adsurgens* and *M. sativa* were planted. The effects of *A. adsurgens* on slope infiltration and sediment reduction were better than those of *M. sativa*. (3) There was a critical phenomenon in the effect of vegetation on sediment reduction. The critical coverage of herbaceous plants for sediment reduction in this region was 50%—75%.

Keywords: *Astragalus adsurgens* Pall.; *Medicago sativa* L.; the rate of flow; vegetation coverage; the effect of runoff and sediment reduction

种植草本植物是减少地表土壤侵蚀常见的水土保持生物措施。草本植物生长迅速,能够快速形成过滤带,减少有效降雨,降低雨滴动能和径流动能,降低土壤

侵蚀^[1-3],促进水分下渗,增加地表粗糙度、减缓径流流速、降低土壤侵蚀速率^[4]。近年来,部分学者在草本植物保持水土的作用方面开展了大量的研究工作。杨春

霞等^[5]利用放水冲刷试验研究坡面草被覆盖对坡面水动力学参数的影响。王升等^[6]在黄土高原地区研究不同覆盖度下坡面产流产沙规律,结果表明,随植被覆盖度的增加,产流产沙量均显著减少。大量研究表明,只有当植被覆盖度达到一定值,才具有减少土壤侵蚀的作用。植被覆盖度分为临界盖度和有效盖度。临界盖度是指当植被覆盖度超过这一盖度时,水土保持效果不明显^[7]。朱冰冰等^[8]模拟了黄土坡面产流产沙过程,确定了试验条件下的临界植被盖度。植物对土壤侵蚀具有控制作用的部分分为地上部分(冠层、枯落物、茎秆)和地下部分(根系)。郑粉莉等^[9]通过人工降雨模拟了黄土高原地区草本植物地上和地下部分的减流减沙效应,表明地下部分减流减沙效果更强。

目前,草本植物覆盖与土壤侵蚀的关系研究多集中在黄土高原地区,对北京山区草本植物水土保持效果的研究较少。北京地区分布面积最大的土壤类型为褐土,占全市土壤总面积的 64.95%。北京褐土土层较薄,土壤中腐殖质较少,结构性差,加上人为活动频繁,水土流失严重。因此,研究本地区草本覆盖的水土保持作用具有重要意义。已有研究表明,在北京山区,黑麦草最大减流减沙效益分别为 68.9%和 88.1%^[10]。种植狼尾草、野豌豆、黄花蒿的坡面入渗过程符合 Horton 入渗公式,三者减流减沙效益表现为狼尾草>野豌豆>黄花蒿^[11]。沙打旺和紫花苜蓿是北京北部山区常见的 2 种水土保持植物,具有生命力强,生长周期短的特点,能在短期内实现保持水土作用。本研究通过在野外径流小区进行放水冲刷试验,旨在对比分析两者的减流减沙效果,以期对北京北部褐土区水土流失治理和生态文明建设提供基础理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验在北京市延庆县上辛庄重点水土保持试验园区进行。试验区域海拔 500 m 左右,地理坐标为 116°3′11″—116°4′19″ E,40°26′19″—40°27′26″ N。研究区多年平均降雨量为 474.51 mm,年平均气温为 8.5℃,无霜期 150~160 d 左右,研究区土壤类型为耕作褐土,母质为洪积冲积母质。

1.2 试验设计

在样地两侧用铁板与外界隔开,防止与周围发生水分交换。试验区域面积为 2.8 m²(0.7 m×4 m),利用潜水泵(WQD25-10-2.2QG)为试验区域供流,使用 DN40 流量计保证流量恒定。试验流量设置为 1,2,3 m³/h。为了使水流均匀的分布在试验区域上方,试验采用挖坑溢流法。在试验区域上方挖长 0.7 m,宽 0.3 m,深 0.5 m 的坑,在坑的四周及底部贴塑料布以防止水分下渗。在试验区域下端设置集流桶,

在冲刷过程中,每 30 s 收集试验产生的径流样品(图 1)。每次试验的冲刷时间为 10 min,2 次试验间隔至少 1 d,使试验区域得到充分晾晒。试验草种为一年生沙打旺和紫花苜蓿,2015 年 4 月中旬采用条播播种。试验时间为 7—9 月,草本长势良好,初始覆盖度为 100%。试验过程中从试验区域上方向下依次剪除 1,2,3,4 m 植被,分别形成植被覆盖度为 75%,50%,25%和 0 的坡面。试验设计方案见表 1。

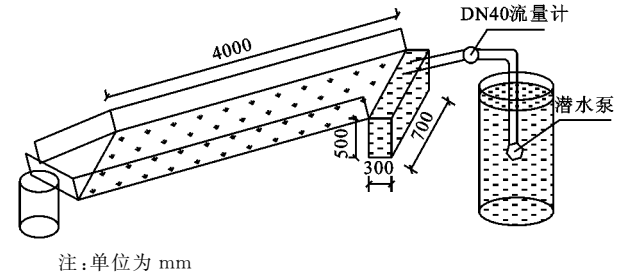


图 1 试验布置示意
表 1 试验布设因素

植被类型	植被盖度/%	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	坡度/(°)	冲刷时间/min
紫花苜蓿/ 沙打旺	100	1	15	10
		2		
		3		
	75	1	15	10
		2		
		3		
	50	1	15	10
		2		
		3		
对照组 (无植被覆盖)	25	1	15	10
		2		
		3		
	0	1	15	10
		2		
		3		
	0	1	15	10
		2		
		3		

1.3 试验数据测定及计算方法

(1)泥沙量。试验过程中,每 30 s 用水桶在梯形集水区下方取径流泥沙,采用烘干法计算泥沙量,桶平均重 0.492 kg。泥沙含量计算公式为:

$$m=\frac{(G'-g)\times(M-0.492)}{G-g}\tag{1}$$

式中: m 为泥沙量(kg); M 为桶泥沙湿重(kg); g 为空铝盒重(kg); G 为铝盒湿重(kg); G' 为烘干后铝盒重量(kg)。

(2)径流量。将泥沙过滤,记录径流体积。径流量计算公式为:

$$Q=\frac{V}{t}\tag{2}$$

式中: Q 为径流量(L); V 为径流体积(L); t 为取样时

间(min)。

(3)入渗系数。入渗系数计算公式为:

$$\alpha = \frac{P-V}{P} \quad (3)$$

式中: α 为入渗系数; P 为取样时间段内的输入水量(L); V 为径流体积(L)。由于蒸发量远小于输入水量和径流量,对测定结果影响微弱,本试验不予考虑蒸发。

(4)地上部分减沙率。地上部分减沙率计算公式为:

$$\lambda_u = \frac{m_{0i} - m_{ci}}{m_{0i}} \quad (4)$$

式中: λ_u 为地上部分减沙率; m_{0i} 为在流量为*i*的条件下($i=1,2,3$),全部减除地上部分后,覆盖度为0的坡面产沙量; m_{ci} 为在流量为*i*($i=1,2,3$),覆盖度为*c*条件下的坡面产沙量($c=100\%,75\%,50\%,25\%$)。

(5)地下部分减沙率。地下部分减沙率计算公式为:

$$\lambda_d = \frac{m_{bi} - m_{0i}}{m_{bi}} \quad (5)$$

式中: λ_d 地下部分减沙率; m_{bi} 为在流量为*i*的条件下($i=1,2,3$),对照组坡面产沙量。

(6)地上部分减沙效益。地上部分减沙效益计算公式为:

$$\delta = \frac{m_{0i} - m_{ci}}{m_{bi} - m_{ci}} \quad (6)$$

式中: δ 为地上部分减沙效益。

1.4 数据分析及制图

运用 SPSS 18.0 进行数据统计和单因素 ANOVA 方差分析,使用 Excel 处理数据和绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同植被覆盖对入渗系数的影响

种植紫花苜蓿和沙打旺的坡面,在剪除全部地上部分后,与对照组坡面的入渗系数随时间的变化过程如图 2 所示。3 种覆盖的坡面入渗系数随试验时间均逐渐降低并趋于稳定,这是由于试验前期土壤含水量较低,随放水过程土壤趋于饱和。

在流量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,入渗在试验开始约 7 min 后达到稳定,种植紫花苜蓿的坡面稳定入渗系数约为 0.48,种植沙打旺的坡面入渗系数稳定为 0.42~0.55,而对照组的坡面稳定入渗系数为 0.31~0.42;在流量为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,入渗在试验开始约 6.5 min 后达到稳定,种植紫花苜蓿的坡面稳定入渗系数约为 0.23,种植沙打旺的坡面入渗系数稳定在 0.32 左右,而对照组的坡面稳定入渗系数在 0.26 左右;在流量为 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,入渗在试验开始约 5 min 后即达到稳定,种植紫花苜蓿的坡面稳定入渗系数约为 0.18,种植沙打旺的坡面入渗系数稳定在 0.15 左右,而对照组的坡面稳定入渗系数在 0.11 左右。

由此可见,流量在 $1\sim3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,流量越大,坡面

达到稳定入渗的时间越早,稳定入渗系数越低。无植被坡面的入渗系数小于曾种植植被的坡面,说明植物根系能够有效增加入渗。这是由于植物根系的存在,能够粘结土壤单粒,分散密实的土体,使土壤疏松,孔隙度加大,从而提高土壤的渗透性^[12]。

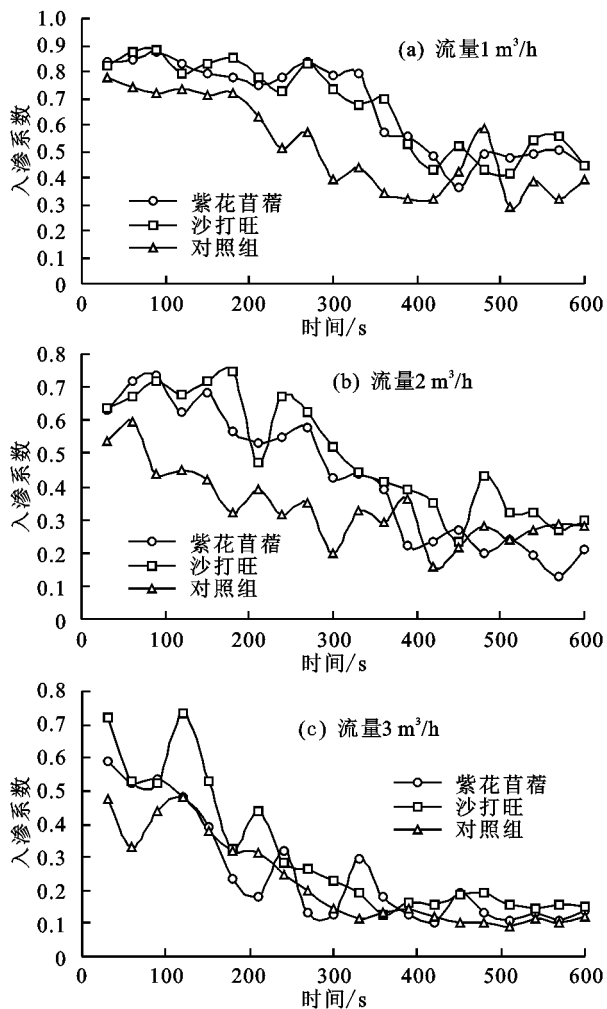


图 2 不同流量不同植被覆盖下入渗系数随时间的变化规律

由表 2 可知,不同流量 3 种覆盖的入渗系数差异显著,且始终表现为沙打旺组>紫花苜蓿组>对照组。在流量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,种植沙打旺和紫花苜蓿的坡面入渗系数两者之间差异不显著,但与对照组差异显著,分别比对照组增加 31.7%和 29.8%;在流量为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,种植沙打旺的坡面入渗系数与对照组差异显著,分别比对照组增加 39.8%,45.3%;而种植紫花苜蓿的坡面入渗系数与对照组差异不显著,仅比对照组增加 19.0%,5.8%。说明当流量较小($1 \text{ m}^3/\text{h}$)时,紫花苜蓿和沙打旺 2 种植被均能有效增加入渗,种植沙打旺的坡面入渗效果略优于种植紫花苜蓿的坡面;当流量较大($2 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $3 \text{ m}^3/\text{h}$)时,沙打旺能够有效增加入渗,但种植紫花苜蓿的坡面入渗效果不显著。

已有研究表明,在水分含量较低条件下,沙打旺根系密度大于紫花苜蓿^[13]。由于试验区域气候干旱,沙

打旺的根系密度比紫花苜蓿大,种植沙打旺的坡面土壤孔隙度大于种植紫花苜蓿的坡面,因此,在试验流量条件相同时,种植紫花苜蓿的坡面更早趋于饱和。

表 2 不同流量不同植被覆盖下的入渗系数

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	植被类型			单因素
	紫花苜蓿	沙打旺	对照组	方差分析
1	$0.67 \pm 0.18\text{a}$	$0.68 \pm 0.14\text{a}$	$0.51 \pm 0.17\text{b}$	0.000
2	$0.40 \pm 0.19\text{a}$	$0.47 \pm 0.15\text{b}$	$0.34 \pm 0.11\text{a}$	0.001
3	$0.24 \pm 0.15\text{a}$	$0.32 \pm 0.16\text{b}$	$0.22 \pm 0.14\text{a}$	0.000

注:同一行中不同字母代表显著性差异($p < 0.05$)。下同。

2.2 不同植被覆盖坡面径流过程对比

由图 3 可知,不同植被类型、不同覆盖度及不同流量条件下的坡面径流过程具有一定的相似性。坡面径流量随时间先呈现逐渐增大,然后趋于稳定,整体近于对数分布。在流量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,种植紫花苜蓿、沙打旺和对照组的坡面径流量稳定值分别为 $8 \sim 10, 6 \sim 8, 10 \sim 12 \text{ L}/\text{min}$;在流量为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,种植紫花苜蓿、沙打旺和对照组的坡面径流量稳定值分别为 $24 \sim 27, 18 \sim 25, 23 \sim 28 \text{ L}/\text{min}$;在流量为 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,

种植紫花苜蓿、沙打旺和对照组的坡面径流量稳定值分别为 $40 \sim 45, 38 \sim 42, 42 \sim 45 \text{ L}/\text{min}$;表明径流量的稳定值在不同植被类型及不同流量条件下呈现明显差异,且沙打旺组 $<$ 紫花苜蓿组 $<$ 对照组。

但同一植被相同流量条件下,不同覆盖度坡面径流量没有明显差异。这与朱冰冰等^[8]在宁夏固原黄土地区的研究不一致,朱冰冰等^[8]认为覆盖度对径流系数(产流量/降雨量)的影响存在临界值。这是由于在本试验中,改变植被覆盖度仅剪除了植被的地上部分,未拔除植被根系,如果拔除植被根系,会对土体造成严重的破坏,改变土体初始的容重、紧实度等,会增大泥沙量。植被根系能够显著增强土壤对于水流的渗透能力,削弱径流,涵养水源。而在本试验中,植被覆盖度设置是通过两种草本植物的地上部分(茎和叶)裁剪实现的,草本植物的茎对坡面径流的调控主要是延缓作用,而不是拦蓄作用。而剪去草本植物的地上部分后,地下部分无法对径流过程进行调控。因此,同种植被类型、不同覆盖度的坡面径流量差异不大。

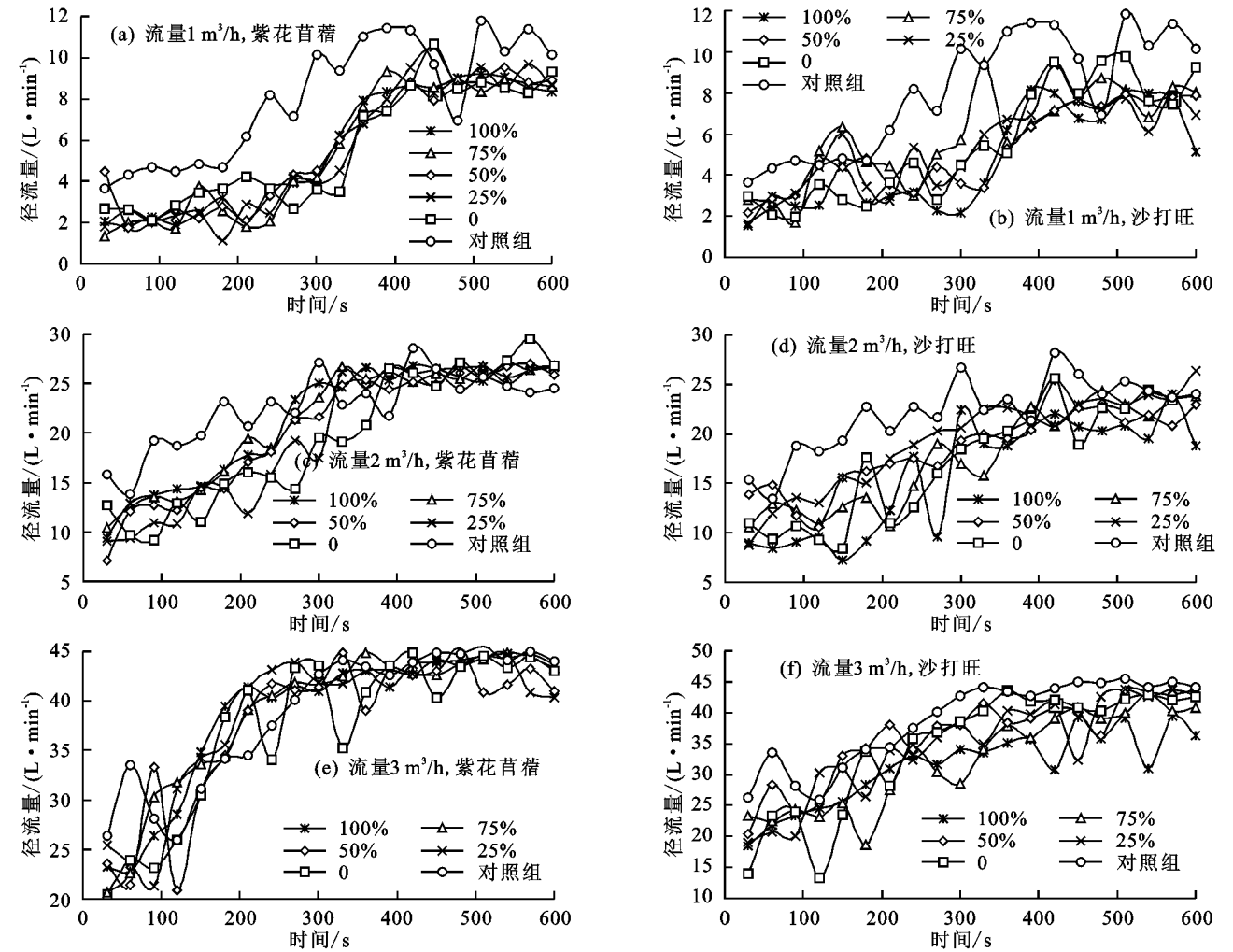


图 3 不同覆盖条件下坡面径流过程曲线

不同植被类型坡面径流总量具有明显差异。由表 3 可知,种植紫花苜蓿的坡面径流总量明显大于种

植沙打旺的坡面径流总量。在覆盖度为 0、流量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,种植紫花苜蓿、沙打旺的坡面径流总量分别比

对照组减少了 30.6% 和 31.4%; 流量为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 种植紫花苜蓿、沙打旺的坡面径流总量分别比对照组减少了 13.9% 和 24.1%; 流量为 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 种植紫花苜蓿、沙打旺的坡面径流总量分别比对照组减少了 3.7% 和 11.2%; 说明沙打旺具有更好的减流效果。

表 3 不同覆盖条件下坡面径流总量 单位: L

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	植被类型	径流总量				
		100%	75%	50%	25%	0
1	紫花苜蓿	55.50	54.53	56.03	55.19	56.12
	沙打旺	47.69	58.98	52.42	54.74	55.46
	对照组					80.88
2	紫花苜蓿	208.86	207.05	199.25	193.21	190.35
	沙打旺	159.40	176.15	185.53	193.03	167.73
	对照组					220.98
3	紫花苜蓿	388.13	386.88	376.55	385.00	374.08
	沙打旺	313.98	324.65	361.83	346.13	344.66
	对照组					388.25

2.3 不同植被覆盖坡面的土壤侵蚀

由图 4 可知, 不同植被类型、不同覆盖度及不同

流量条件下的坡面产沙过程具有一定的相似性。坡面产沙量随时间逐渐降低, 整体近于指数分布。同一植被类型, 相同流量条件下, 随着覆盖度的增大, 泥沙量呈下降趋势。这是因为植株茎秆具有拦截泥沙的作用。

由表 4 可知, 随植被覆盖度的降低, 紫花苜蓿和沙打旺地上部分减沙率均呈现下降趋势, 植被覆盖度由 75% 降为 50% 时, 减沙率大幅下降, 说明 50%~75% 是本地区草本植物减沙效益的临界盖度。当植被覆盖度小于 50% 时, 覆盖度的增加能够明显增大减沙率; 当植被覆盖度大于 75% 时, 覆盖度的增加对减沙率的影响减弱。韩鹏等^[14]在黄河流域的研究也发现植被的水土保持效益存在临界现象。在流量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 紫花苜蓿地上部分减沙率高于沙打旺; 在流量为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 沙打旺地上部分减沙率高于紫花苜蓿。在减沙效益方面, 紫花苜蓿地上部分明显大于沙打旺, 而地下部分则相反。

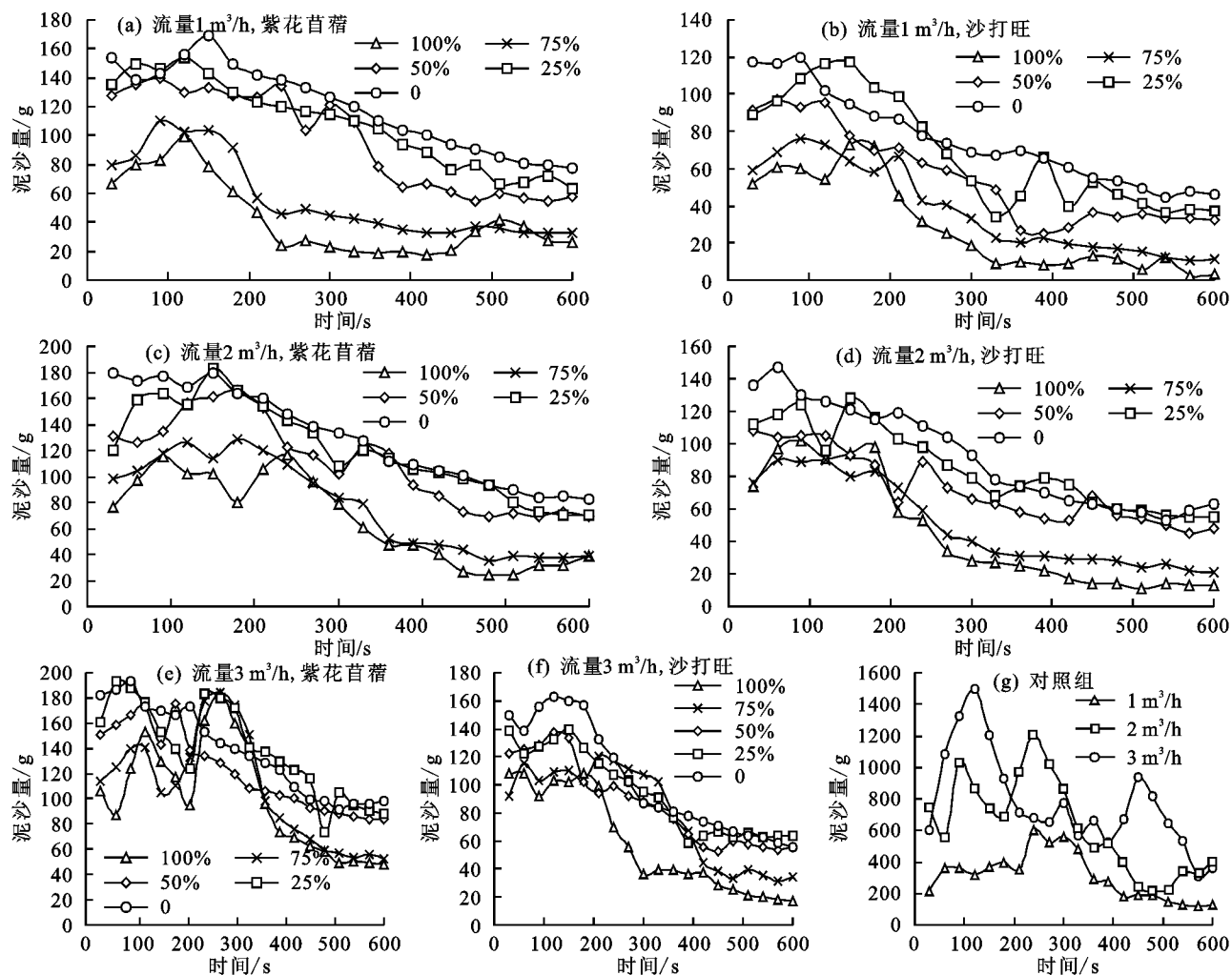


图 4 不同植被覆盖下坡面土壤侵蚀过程

由表 5 可知, 同种植被覆盖的坡面, 产沙量均随流量的增大而增大。相同流量条件下, 不同植被覆盖的坡面产沙量差异性显著, 表现为沙打旺组 < 紫花苜蓿组 <

对照组。在流量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 对照组产沙量分别是种植紫花苜蓿和沙打旺的坡面产沙量的 3.65 倍和 5.83 倍; 在流量为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 对照组产沙量分别是种植紫花

苜蓿和沙打旺的坡面产沙量的 5.81 倍和 8.53 倍;在流量为 3 m³/h 时,对照组产沙量分别是种植紫花苜蓿和沙打旺的坡面产沙量的 6.40 倍和 9.19 倍;说明流量在 1~3 m³/h 时,流量越大,2 种植被的固土效果明显,且沙打旺的固土效果优于紫花苜蓿。流量从 1 m³/h 到 2 m³/h,种植紫花苜蓿的坡面平均产沙量增加了 19.7%,种植沙

打旺的坡面平均产沙量增加了 30.1%;流量从 2 m³/h 到 3 m³/h,种植紫花苜蓿的坡面平均产沙量增加了 19.7%,种植沙打旺的坡面平均产沙量增加了 24.4%。因此,从与对照组的土壤侵蚀量对比来看,两种草本植物均能够有效抑制坡面土壤侵蚀过程。同一流量和植被覆盖度条件下,沙打旺的固土能力强于紫花苜蓿。

表 4 不同覆盖条件地上部分与地下部分减沙率及减沙效益

流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	植被类型	不同覆盖度地上部分减沙率/%				地下部分 减沙率/%	不同覆盖度地上部分减沙效益/%			
		100%	75%	50%	25%		100%	75%	50%	25%
1	紫花苜蓿	64.42	52.97	18.72	9.78	61.37	28.85	25.01	10.54	5.80
	沙打旺	61.72	50.10	26.52	8.79	75.68	16.55	13.87	7.85	2.75
2	紫花苜蓿	48.60	40.40	15.25	7.47	79.05	11.41	9.67	3.88	1.94
	沙打旺	51.34	46.09	21.79	7.51	85.15	8.22	7.44	3.66	1.29
3	紫花苜蓿	26.98	21.67	11.76	-0.50	82.24	5.51	4.47	2.48	-0.11
	沙打旺	43.55	22.47	15.69	8.59	86.71	6.25	3.33	2.35	1.30

表 5 不同植被覆盖下坡面土壤侵蚀特征

流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	植被类型	泥沙量/g		泥沙质量浓度/(g·L ⁻¹)	
		均值±标准差	单因素方差分析	均值±标准差	单因素方差分析
1	紫花苜蓿	84.59±41.81a	0	47.16±45.87a	0
	沙打旺	53.07±30.88b		26.87±26.86b	
	裸地	309.17±149.52c		75.43±38.62c	
2	紫花苜蓿	101.29±42.07a	0	12.04±8.72a	0
	沙打旺	69.04±33.47a		8.80±6.90a	
	裸地	588.90±321.72b		110.43±67.18b	
3	紫花苜蓿	121.24±40.71a	0	6.97±3.73a	0
	沙打旺	84.42±36.84b		5.84±4.23a	
	裸地	775.50±308.12c		43.59±26.18b	

3 结 论

(1)植被覆盖对控制坡面径流侵蚀具有重要意义。种植沙打旺和紫花苜蓿的坡面入渗系数大于裸坡,径流量及产沙量小于裸坡。

(2)紫花苜蓿和沙打旺 2 种植被均能增加入渗,但效果具有差异。流量为 1 m³/h 时,种植沙打旺的坡面入渗效果略优于种植紫花苜蓿的坡面;流量为 2 m³/h 和 3 m³/h 时,沙打旺能够有效增加入渗,但种植紫花苜蓿的坡面入渗效果不显著。在流量为 1~3 m³/h 范围内,随着流量的增大,沙打旺增加坡面入渗的效果增强。种植紫花苜蓿、沙打旺和对照组的坡面径流量稳定值、径流总量均具有明显差异,表现为沙打旺组<紫花苜蓿组<对照组。植株地上部分、地下部分均具有减沙作用。紫花苜蓿地上部分减沙效益明显大于沙打旺,而地下部分反之。整体减沙效益表现为沙打旺组>紫花苜蓿组。

(3)植被的水土保持效益存在临界现象。50%~75%是本地区草本植物减沙效益的临界盖度。

参考文献:

[1] Xiao P Q, Yao W Y, Roemkens M J M. Effects of grass and shrub cover on the critical unit stream power in overland flow[J]. International Journal of Sediment Research, 2011, 26(3): 387-394.

[2] 姚文艺,肖培青,申震洲,等.坡面产流过程及产沙临界对立地条件的响应关系[J].水利学报,2012,42(12): 1438-1444.

[3] 陈丽华,张艺,余新晓,等.北京山区典型森林植被林冠截留特征及模拟[J].应用基础与工程科学学报,2013, 21(3):423-431.

[4] 王慧子,徐得潜,陈慧,等.护坡植物减缓地表径流效果研究[J].中国水土保持,2013(9):46-48.

[5] 杨春霞,王丹,王玲玲,等.草被覆盖度对坡面流水动力学参数的影响分析[J].中国水土保持,2008(9):36-38.

[6] 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):23-27.

[7] 张晓艳,周正朝,党珍珍.草被地上部分水土保持作用研究进展[J].中国水土保持,2015(1):47-50,69.

[8] 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.

[9] 郑粉莉,白红英,安韶山.草被地上和地下部分拦蓄径流和减少泥沙的效益分析[J].水土保持研究,2005,12 (5):86-87,111.

[10] 孙佳美,余新晓,梁洪儒,等.模拟降雨条件下不同覆被减流减沙效益与侵蚀影响因子[J].水土保持通报, 2015,35(2):46-51.