

模拟降雨下草被坡面水沙调控效应及水分转化研究

宋亚倩¹, 赵西宁^{1,2}, 潘岱立³, 高晓东²

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:以黄土丘陵区四种多年生牧草(鸡脚草、白三叶、小冠花、百脉根)为研究对象,采用人工模拟降雨试验方法,定量研究不同草被措施不同生长阶段(5 月上旬、6 月上旬、7 月中旬和 8 月下旬)的坡面水沙调控效应及土壤水分转化特征。结果表明:在整个生长周期内,四种草被措施坡面产沙率和含沙量均表现为鸡脚草坡面<白三叶坡面<小冠花坡面<百脉根坡面<裸地坡面。随着生长时间延长,四种草被措施坡面减流效益、减沙效益、土壤稳定入渗速率和土壤平均含水量增量均呈现先增大后减小的趋势。其中,鸡脚草坡面和白三叶坡面在结实期达到最大,小冠花坡面和百脉根坡面在孕蕾期达到最大。在不同生长阶段,鸡脚草坡面和白三叶坡面减流效益、减沙效益、土壤稳定入渗速率和土壤平均含水量增量均大于小冠花坡面和百脉根坡面,其中以鸡脚草坡面最为显著。四种草被措施在不同生长阶段坡面减沙效益都远大于减流效益。黄土丘陵区坡面水土流失主要来自 7—9 月份频率较高的降雨所产生的坡面径流,鸡脚草和白三叶生长旺盛期与水土流失频发阶段吻合,使其调控坡面水沙能力得以充分体现。

关键词:模拟降雨;草被措施;生长阶段;水沙调控;土壤含水量增量

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0035-07

Effects of Grasses on Runoff and Sediment Reduction and Water Transformation on the Slope Under Simulated Rainfall

SONG Yaqian¹, ZHAO Xining^{1,2}, PAN Daili³, GAO Xiaodong²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Four kinds of perennial grasses (*Dactylis glomerata* L., *Trifolium repens* L., *Coronilla varia* L., *Lotus corniculatus* L.) growing in the hilly region of Loess Plateau were studied under the simulated rainfall. The runoff and sediment trapping effects and soil water transformation on sloping lands covered by grasses were detected at various growth periods. It was turned out that in the whole growth stages, the sediment ratio and sediment concentration all followed the order: *Dactylis glomerata* L. < *Trifolium repens* L. < *Coronilla varia* L. < *Lotus corniculatus* L. < bare land. As the growth duration extended, runoff and sediment reduction, soil water content increment and soil stable infiltration all showed a trend of first increase and then decrease. The slope with *Dactylis glomerata* L. and *Trifolium repens* L. reached their best performance in the fruited phase, *Coronilla varia* L. and *Lotus corniculatus* L. in the stage of pregnancy reached their best performance. At different growth stages, the slope covered by *Dactylis glomerata* L. and *Trifolium repens* L. kept higher runoff and sediment reduction benefits, the soil stability infiltration rate and the average soil water content increment than that covered by *Coronilla varia* L. and *Lotus corniculatus* L. especially *Dactylis glomerata* L.. All treatments obtained greater sediment reduction rate than runoff. The soil and water losses in loess hilly-gully region occur mainly from July to September due to the erosive rainfall events. The dynamics of annual runoff and sediment control in sloping lands covered by *Dactylis glomerata* L. and *Trifolium repens* L. matched well with that of soil and water losses, which may lead a better performance of *Dactylis glomerata* L. and *Trifolium repens* L. in the practice.

收稿日期:2016-01-07

修回日期:2016-03-07

资助项目:中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-306);陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTCL02-25);中央高校基础科研业务费(2452015056)

第一作者:宋亚倩(1989—),女,河南周口人,硕士研究生,研究方向为农业水土资源利用与保护。E-mail:songyaqian@aliyun.com

通信作者:赵西宁(1976—),男,陕西渭南人,博士,研究员,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail:xiningz@aliyun.com

Keywords: simulated rainfall; grass; growth stages; runoff and sediment trapping; soil water content increment

国家退耕还林(草)工程实施以来,草地控制水土流失和恢复生态作用被提高到和林地相同高度,大力发展草地建设是实现黄土丘陵区土地合理利用的一个重要环节^[1]。国内众多学者对坡面草被措施减水减沙效应及机理进行了研究^[2-8]。韩玉峰等^[2]以六种多年生牧草为对象,得出紫花苜蓿、沙打旺、鹰咀紫云英水土保持效益要高于红豆草、红三叶和小冠花;潘成忠等通过室内模拟降雨试验,研究了不同植被盖度黑麦草坡面与裸地坡面的产流产沙过程及坡面流体力学特性,与裸地坡面相比,黑麦草坡面含沙量、平均输沙率、径流量及坡面流速均有不同程度降低^[3];朱冰冰等通过野外人工模拟降雨试验,从径流侵蚀功率和降雨侵蚀力两个方面对比分析了草本植被对坡面侵蚀动力的调控效果,表明草本植被覆盖深刻影响降雨侵蚀动力,并最终对坡面侵蚀量产生较大影响^[4];在黄土高原水蚀风蚀区,赵春红等采用人工模拟降雨方法,对沙打旺草地调控绵沙土坡面侵蚀机理进行研究,表明覆盖度约为40%的牧草沙打旺能够有效控制坡面土壤侵蚀,减沙效益达70%以上,且牧草根系和冠层均能显著减小流速,增加阻力,根系减沙效益大于草冠^[5]。大量研究结果表明,不同草被措施均具有显著减流减沙效应,但是现有研究结果多以观测单次试验结果为主^[6-7],对草被措施不同生长阶段的水沙调控效应研究涉及较少^[8]。不同草被措施对坡面水沙调控能力不同,即使同一草被措施在整个生长周期的不同生长阶段由于冠层形态、叶面积指数和根系分布状况等不同,对坡面水沙调控和增加土壤水分入渗等作用也有所不同。

本试验以豆科牧草为主,并兼顾禾本科牧草,选择成活率高,生存能力强,生态与经济效益较好的四种人工牧草鸡脚草(*Dactylis glomerata* L.)、白三叶(*Trifolium repens* L.)、小冠花(*Coronilla varia* L.)、百脉根(*Lotus corniculatus* L.)为研究对象。采用人工模拟降雨试验方法,在分析其产流产沙特征基础上,探讨不同草被措施在不同生长阶段对坡面水沙的调控效应,揭示土壤水分入渗转化特征,以期在实践上为黄土丘陵区人工草地品种的适宜性选择和稳定发展提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验在陕西省杨凌区西北农林科技大学旱区节水农业研究院进行,使用的人工模拟降雨装置为一

套全自动电脑程序控制的针头式人工模拟降雨器^[9](图1A),降雨高度约为4 m,总降雨面积为 $6\text{ m} \times 3\text{ m} = 18\text{ m}^2$,分12个降雨小区($1\text{ m} \times 1.5\text{ m}$),通过中央控制台可控制任一降雨小区, 18 m^2 降雨板共计4 800个内径为0.45 mm医用针头组成,针头长度为32 mm,针头间距约为4 mm。该人工模拟降雨装置附有水质净化与软化装置,以降低针头堵塞概率,保证仪器设备较长时间正常运转和降雨参数准确可靠。此外,为防止雨滴位置固定带来不利影响,降雨器托架对角加装了一对低速电动机带动整个人工模拟降雨装置进行小距离(小于针头间距)往复运动,降雨强度范围为 $0.3 \sim 2.8\text{ mm/min}$,降雨均匀度大于85%。

试验土槽尺寸为:长 \times 宽 \times 高 $=2\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ (图1B),一端装有集流槽,用于坡面径流、泥沙收集。土槽坡度通过坡度调节装置调节,调节范围为 $0^\circ \sim 25^\circ$ 。供试土壤为黄绵土,来源于陕西省榆林市清涧县的坡耕地,土壤自然风干(土壤含水率约为3%),过直径8 mm筛,将植物根系、石块等杂物去除。装土时,先在槽底铺上一层纱布,使土壤水分能均匀下渗,按容重为 $1.35 \sim 1.40\text{ g/cm}^3$ 分7层(每层10 cm)填装,边填装边均匀压实,装土完成后,将土槽置于遮雨棚内。为了使播种前土壤水分条件一致,装土后每个土槽均灌水至饱和(土槽底部有水分溢出)。牧草品种为鸡脚草、白三叶、小冠花、百脉根四种多年生牧草,其中鸡脚草为禾本科牧草,其余为豆科牧草。播种时间为2014年5月,播种方式为撒播,播种密度为 0.1 kg/m^2 ,于出苗后2周左右,通过间苗、移栽,使四种草被在苗期盖度基本相同,草被生长过程中次灌水或降雨量相同。草被开始返青时间为2015年4月中旬,模拟降雨时间为2015年5月上旬、6月上旬、7月中旬、8月下旬。整个试验阶段,草被覆盖度较高,均在90%以上(除百脉根在试验末期),因此本试验用叶面积指数反映草被的形态指标。

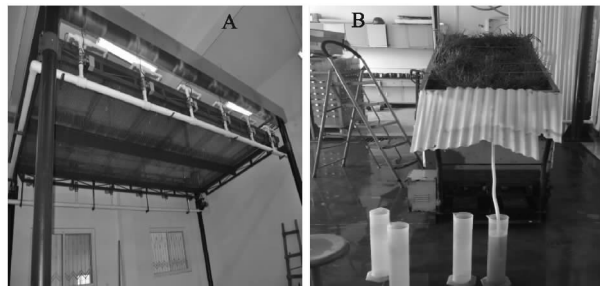


图1 人工模拟降雨试验装置和试验土槽

试验设计鸡脚草、白三叶、小冠花、百脉根和裸地土槽各3个,坡度选取黄土丘陵区退耕还林还草常见

坡度 15° , 选择出现频率较高的 1.50 mm/min 为模拟降雨试验雨强。每次降雨前进行土壤水分测量和草被叶面积指数、草被覆盖度的测定, 土壤水分测量采用中子仪(测定 $10\text{--}70 \text{ cm}$ 土层含水量)和土壤水分传感器 Hydra-Probe(测定 $0\text{--}10 \text{ cm}$ 土层含水量)相结合, 每次降雨前后分别测定土槽不同坡位(坡上、坡中、坡下)不同土层土壤水分含量, 并按照坡上、坡中和坡下三个水分数据平均值进行土壤水分入渗转化的分析。叶面积指数在每次降雨前采用(AccuPAR LP-80 Decagon Devices Inc, Pullman WA)测定, 草被覆盖度利用照相法测定^[10]。降雨历时 60 min , 坡面开始产流时记录坡面产流时间, 产流开始后每隔 4 min 收集一次径流, 用量筒测量径流体积后采用烘干称重法测定泥沙量。

1.2 分析方法

利用径流泥沙和土壤水分等测定数据分别计算坡面产流率、产沙率、减流效益、减沙效益、土壤水分入渗速率和土壤水分增量^[10-12], 计算方法如下:

$$V_d = \frac{r}{1000ct} \quad (1)$$

$$S_d = \frac{s}{ct} \quad (2)$$

$$E_R = \frac{(R_b - R_v)}{R_b} \quad (3)$$

$$E_S = \frac{(S_b - S_v)}{S_b} \quad (4)$$

$$i_d = \frac{i \cos \alpha - 10r}{ct} \quad (5)$$

$$\Delta q = \sum_{j=1}^m (\theta_{j1} - \theta_{j0}) \frac{h_j \gamma_j}{10} \quad (6)$$

式中: V_d 表示坡面产流率(mm/min); S_d 为坡面产沙率 $[\text{g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)]$; E_R 为坡面减流效益(%); E_S 为坡面减沙效益(%); i_d 为土壤入渗速率(mm/min), 试验过程中的蒸散、填洼和植物截留水量较小, 计算中忽略不计; Δq 为土壤储水增量(mm); R_b 为裸地坡面径流量(ml); R_v 表示不同草被措施坡面径流量(ml); S_b 为裸地坡面产沙量(g); S_v 为不同草被措施坡面产沙量(g); i 为降雨强度(mm/min); r 为草被坡面对应时间段 t 内的径流量(ml); s 为草被坡面对应时间段 t 内的产沙量(g); c 为坡面受雨面积(m^2); t 为降雨历时(min); α 为坡面坡度; θ_{j0} 和 θ_{j1} 分别为第 j 层土层降雨前后土壤平均含水量(%); h_j 为第 j 层土层厚度(cm); γ_j 为第 j 层土层干密度(g/cm^3)。

数据整理和分析在 Excel 2010 和 SPSS 16.0 中进行, 采用 LSD(least-significant difference)法比较分析显著性, 相关制图在 Origin 8.0 中完成。

2 结果与分析

2.1 坡面产流产沙特征

将不同草被措施不同生长阶段坡面产流产沙相关参数列成表 1, 可以看出, 草被措施均具有显著降低坡面产流产沙作用。相同生长阶段, 由于草被种类不同, 导致其叶面积指数有所差异, 产流率、产沙率及含沙量值也均不同。5 月上旬和 6 月上旬, 坡面产流率表现为鸡脚草坡面 $<$ 白三叶坡面 $<$ 百脉根坡面 $<$ 小冠花坡面 $<$ 裸地坡面; 7 月中旬和 8 月下旬, 坡面产流率则表现为鸡脚草坡面 $<$ 白三叶坡面 $<$ 小冠花坡面 $<$ 百脉根坡面 $<$ 裸地坡面。在草被整个生长周期内, 坡面产沙率和含沙量均表现为鸡脚草坡面 $<$ 白三叶坡面 $<$ 小冠花坡面 $<$ 百脉根坡面 $<$ 裸地坡面。随生长时间延长, 相同草被措施不同生长阶段坡面产流率、产沙率、含沙量呈先减少后增加趋势, 鸡脚草和白三叶在结实期最小, 小冠花和百脉根在孕蕾期最小。同种草被措施坡面产流率、产沙率及含沙量变化趋势与草被叶面积指数变化趋势相反, 叶面积指数大时, 坡面产流率、产沙率及含沙量小。

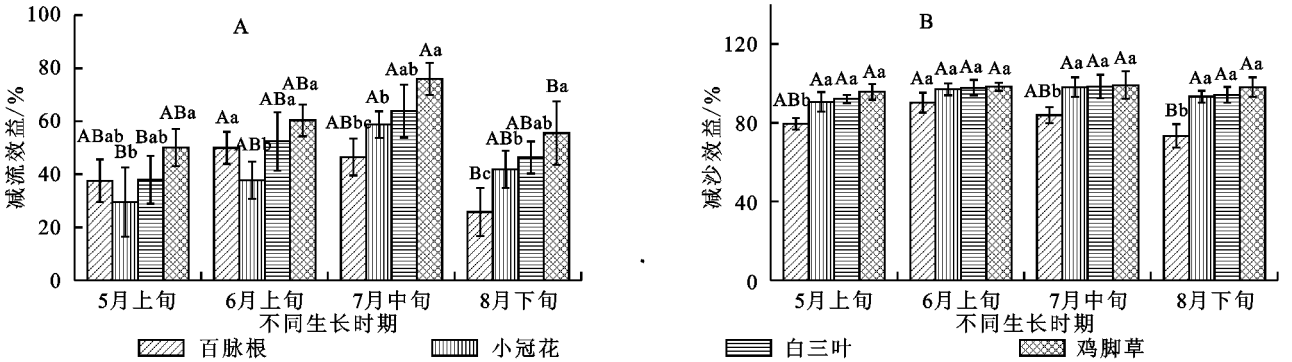
2.2 坡面减流效益和减沙效益

图 2A, 图 2B 分别反映不同草被措施不同生长阶段的坡面减流效益和减沙效益, 在整个生长周期内, 除百脉根以外, 其余三种草被在各生长阶段的减沙效益均大于 90%, 四种草被措施减沙效益远大于减流效益。不同草被措施同一生长阶段进行比较, 鸡脚草坡面减流效益和减沙效益在整个生长阶段最高, 分别在 50.1% 和 95.7% 以上, 白三叶次之, 百脉根除 5 月上旬(分枝期)和 6 月上旬(孕蕾期)减流效益大于小冠花外, 其他生长阶段减流效益和减沙效益均低于小冠花。同一草被措施不同生长阶段进行比较, 随草被生长时间延长, 四种草被措施减流效益和减沙效益均呈先增加后减小的趋势, 但达到最大减流减沙效益时间不同, 鸡脚草和白三叶在结实期达到最大, 减流效益和减沙效益分别为 76.0%, 99.1% 和 63.9%, 98.4%; 小冠花和百脉根在孕蕾期达到最大, 减流效益和减沙效益分别为 58.8%, 98.0% 和 50.0%, 90.2%。四种草被措施地上部分冠层和地下部分根系都在不断生长发育, 鸡脚草和白三叶叶面积指数在结实期达到最大, 小冠花和百脉根在孕蕾期达到最大, 之后四种草被叶片开始逐渐枯黄凋落, 叶面积指数下降, 根系逐渐老化, 拦截降雨能力受到限制, 土壤抗冲性能减弱。

表 1 四种草被措施坡面产流率、产沙率及含沙量指标

不同处理措施	不同生长阶段	生育期	叶面积指数	产流率/ (mm·min ⁻¹)	产沙率/ (g·m ⁻² ·min ⁻¹)	含沙量/ (kg·m ⁻³)
裸地	5月上旬	—	—	1.10±0.17Aa	30.65±6.13Aa	27.93±5.31Aa
	6月上旬	—	—	1.04±0.21Aa	26.08±4.96Aa	25.04±4.51Aa
	7月中旬	—	—	0.94±0.18Aa	29.04±6.10Aa	30.91±6.18Aa
	8月下旬	—	—	1.13±0.20Aa	32.45±7.14Aa	28.72±6.03Aa
百脉根	5月上旬	分枝期	2.13±0.11Aa	0.66±0.13ABbc	6.07±0.92Ab	9.24±1.29ABb
	6月上旬	孕蕾期	2.86±0.26Aa	0.53±0.08Bbc	2.89±0.40Bb	5.49±0.82Bb
	7月中旬	结实期	1.24±0.06ABb	0.56±0.10ABb	4.77±0.81ABb	8.48±1.52ABb
	8月下旬	枯黄期	0.68±0.03Bb	0.78±0.15Ab	7.88±1.42Ab	10.09±1.92Ab
小冠花	5月上旬	返青期	1.85±0.12Ba	0.74±0.13Ab	2.77±0.44Ac	3.74±0.56Ac
	6月上旬	分枝期	2.78±0.24ABa	0.65±0.12ABb	0.90±0.15Bc	1.37±0.23Bc
	7月中旬	孕蕾期	3.25±0.31Aa	0.43±0.07Bbc	0.58±0.12Bc	1.34±0.23Bc
	8月下旬	结实期	2.04±0.11Ba	0.61±0.13ABbc	1.98±0.38ABc	3.24±0.62Ac
白三叶	5月上旬	分枝期	2.05±0.12ABa	0.65±0.12Abc	2.34±0.47Ac	3.58±0.72Ac
	6月上旬	孕蕾期	3.16±0.03Aa	0.50±0.09ABbc	0.67±0.14Bc	1.33±0.23Bc
	7月中旬	结实期	2.47±0.21ABab	0.38±0.06Bc	0.46±0.10Bc	1.22±0.21Bc
	8月下旬	果实成熟期	1.33±0.07Bab	0.56±0.09ABbc	1.71±0.34ABc	3.03±0.58Ac
鸡脚草	5月上旬	分蘖期	2.51±0.18Aa	0.53±0.10Ac	1.27±0.24Ad	2.41±0.39Ac
	6月上旬	抽穗期	2.94±0.24Aa	0.42±0.08ABc	0.51±0.08ABc	1.22±0.23ABc
	7月中旬	结实期	3.36±0.30Aa	0.25±0.05Bc	0.27±0.04Bc	1.06±0.19Bc
	8月下旬	果实成熟期	2.72±0.22Aa	0.47±0.09ABc	0.58±0.11ABd	1.24±0.22ABd

注:数据为平均值±标准差,n=3;表中同一列数据标有不同大写字母表示同一草被不同生长阶段各指标间差异显著,标有不同小写字母表示同一生长阶段不同草被各指标间差异显著($p<0.05$)。



注:同一草被不同生长阶段标有不同大写字母表示各指标间的差异显著,同一生长阶段不同草被标有不同小写字母表示各指标间差异显著($p<0.05$),以下字母意义同上。

图 2 不同生长阶段不同草被措施坡面减流效益和减沙效益变化

2.3 土壤水分入渗速率与含水量增量

将不同草被措施不同生长阶段坡面土壤入渗速率随降雨时间动态变化数据列成图 3,从图中可以看出,有草被措施坡面土壤入渗速率明显高于裸地坡面。根据图 3 入渗过程曲线并通过 Horton 公式 $i_d = i_o + (i_c - i_o)e^{-kt}$ 拟合得到不同草被措施在不同生长阶段的土壤稳定入渗速率^[1],式中: i_d 为土壤入渗速率(mm/min); i_o 为土壤稳定入渗速率(mm/min); i_c 为土壤初始入渗速率(mm/min); k 为拟合参数; e 为自然对数底。5月上旬,鸡脚草坡面、白三叶坡面、

小冠花坡面、百脉根坡面和裸地坡面土壤稳定入渗速率分别为 0.82,0.72,0.60,0.71,0.27 mm/min;6月上旬,土壤稳定入渗速率分别为 0.90,0.89,0.71,0.82,0.33 mm/min;7月中旬土壤稳定入渗速率分别为 1.0,0.98,0.96,0.77,0.43 mm/min;8月下旬,土壤稳定入渗速率分别为 0.81,0.78,0.75,0.60,0.23 mm/min;可以看出,不同草被措施在相同生长阶段土壤稳定入渗速率仍具有一定趋势:在 5月上旬和 6月上旬,土壤稳定入渗速率表现出鸡脚草坡面>白三叶坡面>百脉根坡面>小冠花坡面>裸地坡面,

7 月中旬和 8 月下旬,表现出鸡脚草坡面>白三叶坡面>小冠花坡面>百脉根坡面>裸地坡面。四种草被坡面随着生长时间延长,土壤稳定入渗速率呈现先

增加后减小趋势,鸡脚草和白三叶坡面土壤稳定入渗速率在结实期达到最大,小冠花和百脉根坡面在孕蕾期达到最大。

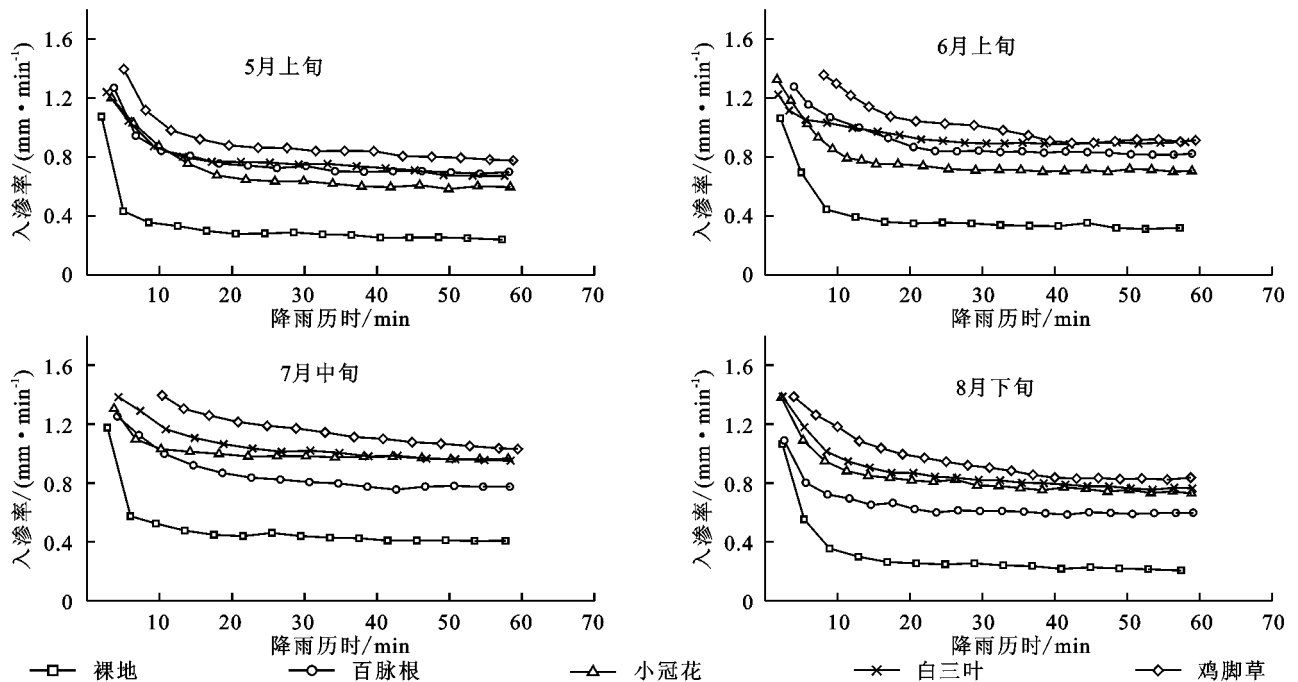


图 3 不同生长时期不同处理措施坡面土壤水分入渗速率

不同生长时期降雨后 0 h 草被坡面与裸地坡面土壤含水量增量沿剖面垂直分布状况见表 2,可以看出,不同草被坡面与裸地坡面相比较,土壤水分入渗深度和土壤含水量增量均有一定差异。降雨后不同草被坡面土壤入渗深度为 40~60 cm,裸地坡面仅为 30 cm。随着生长时间延长,草被坡面土壤水分入渗深度呈先增加后稳定趋势。5 月上旬和 6 月上旬,草被坡面土壤水分入渗深度分别为 40 cm 和 50 cm,7 月中旬和 8 月下旬,四种草被坡面土壤水分入渗深度均为 60 cm。不同草被措施在同一生长阶段,土壤水分入渗深度相同,平均土壤含水量增量变化与坡面土壤水分稳定入渗变化特征一致。5 月上旬和 6 月上旬,平均土壤含水量增量表现为鸡脚草坡面>白三叶坡面>百脉根坡面>小冠花坡面>裸地坡面;7 月中旬和 8 月下旬,表现为鸡脚草坡面>白三叶坡面>小冠花坡面>百脉根坡面>裸地坡面。

3 讨论

试验中四种草被措施在不同生长阶段,鸡脚草坡面减流效益和减沙效益均表现为最好。这是由于鸡脚草为簇生状叶片,生长速度快,具有很厚冠层,在整个生长周期内,叶面积指数均在 2.5 以上,可以较好拦蓄坡面径流,降低雨滴对土壤表面击溅侵蚀能力。其次是白三叶,虽然白三叶与小冠花均为匍匐生长,冠层结构和叶片形状相似,但是白三叶减流效益和减

沙效益高于小冠花,这可能与二者地下部分根系在土层中的分布以及每层土壤中根系密度关系密切。四种草被措施中,百脉根减沙效益在各个生长阶段都最差,原因是由于百脉根茎秆粗壮,直立生长,分枝在茎秆上,根部对土壤固结作用较小,土壤抗冲性能差导致。黄土丘陵区 7—9 月份降雨量占到全年降雨量的 60%~80%,且多为频率相当集中的大到暴雨,坡面径流泥沙也多在此时段产生,造成严重水土流失。如何控制和消除产生水土流失的坡面径流,实现“全部降水就地入渗拦蓄利用”是黄土丘陵区水土流失综合治理的关键^[13-15]。试验过程中,鸡脚草与白三叶在整个生长周期内减流效益和减沙效益均大于小冠花和百脉根,且生长旺盛期恰好与侵蚀性降雨频发阶段吻合,使坡面减流效益和减沙效益也能得以充分体现。

不同草被措施坡面平均土壤含水量增量和土壤水分入渗深度均显著大于裸地,这主要是由于草被冠层和根系对水流拦截和阻挡作用使坡面阻力系数变大,流速减慢,水分在坡面上滞留时间延长,不利于坡面径流形成与发展,使得更多降水入渗进入土壤^[16-17]。此外,地下部分根系提高了土壤中水稳性团聚体的数量,增强了土壤的渗透性,有利于土壤水分入渗^[18-19]。不同草被措施之间土壤水分入渗量也有一定的差异,鸡脚草根系分蘖较多,增加了水分入渗的非毛管孔隙通道,对土壤水分入渗有利。白三叶和小冠花较鸡脚草根系少且分布较深^[20],不利于土壤

水分入渗,入渗率小于鸡脚草。但是白三叶与小冠花相比,白三叶在表层土壤有大量的匍匐根,在土壤表面通过穿插、网络及固结将土壤粘结起来,改善了土壤的团粒结构和孔隙性,使其入渗能力大于小冠花。随生长时期延长,百脉根到枯黄期,根系逐渐老化,叶片大部分枯黄凋落,叶面积指数仅为 0.68,但深层土

壤含水量增量仍高于分枝期和孕蕾期,入渗深度仍达到 60 cm 土层,原因是由于百脉根根系较粗,根系不断生长的过程中在土壤中挤出通道,在其衰老或死亡后收缩留出孔隙。在土壤中产生较多孔隙,使地表径流能够顺着根土接触面和通道孔隙渗入土壤,有助于保持土壤的孔隙系统,使土壤水分入渗性能提高^[7]。

表 2 四种草被措施典型降雨后坡面土壤体积含水量增量 %

处理措施	土层深度/cm	5 月上旬	6 月上旬	7 月中旬	8 月下旬
裸地	0—10	16.7	19.0	19.1	15.4
	10—20	7.2	8.2	13.0	6.7
	20—30	1.3	1.6	2.0	1.1
	30—40	—	—	—	—
	40—50	—	—	—	—
	50—60	—	—	—	—
	平均	4.2±0.8Ac	4.8±0.9Ac	5.7±1.0Ac	3.9±0.6Ac
百脉根	0—10	18.6	22.1	20.5	15.2
	10—20	11.6	12.5	9.4	9.0
	20—30	8.9	6.4	6.2	4.5
	30—40	1.3	2.4	3.1	3.9
	40—50	—	1.0	2.1	2.1
	50—60	—	—	1.0	1.1
	平均	6.7±1.2ABab	7.4±1.5Aab	7.1±1.2ABb	6.0±1.0Bb
小冠花	0—10	16.1	21.0	25.2	21.1
	10—20	11.4	13.7	16.1	9.6
	20—30	7.9	5.6	5.2	4.5
	30—40	1.0	1.5	3.2	2.7
	40—50	—	0.5	1.9	1.8
	50—60	—	—	1.1	1.0
	平均	6.1±1.0Bab	7.0±1.3ABab	8.7±1.6Aab	6.8±1.1ABab
白三叶	0—10	18.7	26.2	26.6	22.5
	10—20	12.8	14.1	20.7	11.6
	20—30	8.9	2.5	7.2	4.1
	30—40	1.3	1.4	4.4	2.7
	40—50	—	0.8	3.2	1.7
	50—60	—	—	1.9	0.7
	平均	6.9±1.1Bab	7.5±1.4ABab	10.7±1.8Aa	7.2±1.2ABa
鸡脚草	0—10	23.0	25.2	26.7	22.8
	10—20	18.2	17.5	22.7	14.2
	20—30	6.8	10.7	8.9	6.7
	30—40	1.8	3.2	4.5	3.3
	40—50	—	0.6	3.2	2.0
	50—60	—	—	1.7	1.0
	平均	8.3±1.4Aa	9.5±1.7ABa	11.3±1.9Aa	8.3±1.3Ba

注:“—”表示土壤含水量没有增加或含水量增加量小于 0.5%。表中同一列数据标有不同大写字母表示同一草被不同生长阶段各指标间差异显著($p<0.05$),标有不同小写字母表示同一生长阶段不同草被各指标间差异显著($p<0.05$)。

黄土丘陵区大量研究表明,高生长量的人工牧草,根系发达,耗水量大,浅层土壤水分不能满足植物生长需要时,只用通过发达的根系耗用深层土壤水,一旦根系分布深度内的土壤水被大量耗用,形成土壤干层,植物势必衰亡^[21-23]。Huang Jun 等研究表明虽然白三叶生草坡面降雨后土壤水分增量大于裸地对照,但由于自身平均日耗水量值显著大于对照,使白三叶全园生

草平均土壤含水量显著低于裸地^[9]。因此,黄土丘陵区人工草被建设过程中,在重视不同草被措施在不同生长阶段水沙调控效应的同时,更应强调不同草被措施的土壤水分入渗、消耗、持续利用和水分供求的研究,才能从根本上有效缓解土壤干层和水土流失严重等问题。草被措施与坡面水沙关系复杂,从研究尺度考虑,可以分为斑块、坡面和流域/区域三个层次,本试

验采用人工模拟降雨手段,试验土槽尺度较小,主要考虑了斑块尺度草被措施在不同生长阶段的坡面水沙调控效应与土壤水分转化特征,由于试验条件限制,暂未考虑地下部分根系深度和密度及其空间分布等对坡面水沙的影响,对于不同草被措施在不同生长时期的耗水规律研究也尚未涉及,有待进一步深入。

4 结论

(1) 在试验条件下,不同草被措施不同生长阶段坡面产流产沙特征参数均表现出一定规律性。5月上旬和6月上旬,坡面产流率表现为鸡脚草坡面<白三叶坡面<百脉根坡面<小冠花坡面<裸地坡面;7月中旬和8月下旬,表现为鸡脚草坡面<白三叶坡面<小冠花坡面<百脉根坡面<裸地坡面。在整个生长周期,坡面产沙率和含沙量均表现为鸡脚草坡面<白三叶坡面<小冠花坡面<百脉根坡面<裸地坡面。

(2) 随生长时间延长,四种草被措施坡面减流效益和减沙效益呈先增加后减小的趋势。鸡脚草和白三叶在结实期减流效益和减沙效益达到最大,分别为76.0%,99.1%和63.9%,98.4%。小冠花和百脉根在孕蕾期达到最大,减流效益和减沙效益分别为58.8%,98.0%和50.0%,90.2%。不同草被措施在不同生长阶段坡面减沙效益都远大于减流效益。鸡脚草和白三叶的生长旺盛期与黄土高原水土流失频发阶段吻合,使其坡面减流效益和减沙效益也能得以充分体现。

(3) 在整个生长周期内,四种草被措施坡面土壤稳定入渗速率、土壤水分入渗深度和土壤平均含水量增量与裸地坡面差异显著,土壤稳定入渗速率和土壤平均含水量增量均呈先增大后减少的趋势,土壤水分入渗深度则呈先增加后稳定的趋势。鸡脚草坡面和白三叶坡面在不同生长阶段的土壤稳定入渗速率和土壤平均含水量增量均大于小冠花坡面和百脉根坡面。

参考文献

- [1] 山仑,徐炳成. 黄土高原半干旱地区建设稳定人工草地的探讨[J]. 草业学报,2009,18(2):1-2.
- [2] 韩玉峰,茅庭玉. 几种多年生豆科牧草的水土保持效益[J]. 草业科学,1993,10(2):6-10.
- [3] 潘成忠,上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. 水利学报,2005,36(3):371-377.
- [4] 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.
- [5] 赵春红,高建恩,徐震. 牧草调控绵沙土坡面侵蚀机理[J]. 应用生态学报,2013,24(1):113-121.
- [6] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等. 植被与水土流失关系研究进展[J]. 生态学报,2006,26(9):3137-3143.
- [7] 李勉,姚文艺,李占斌. 黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20(1):74-80.
- [8] 甘卓亭,叶佳,周旗,等. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J]. 生态学报,2010,30(9):2387-2396.
- [9] Huang J, Wang J, Zhao X, et al. Effects of permanent ground cover on soil moisture in jujube orchards under sloping ground: A simulation study[J]. Agricultural Water Management, 2014,138:68-77.
- [10] 黄俊,吴普特,赵西宁. 坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(10):29-37.
- [11] Zhao X, Huang J, Wu P, et al. The dynamic effects of pastures and crop on runoff and sediments reduction at loess slopes under simulated rainfall conditions[J]. Catena,2014,119:1-7.
- [12] 吴淑芳,吴普特,宋维秀,等. 坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究[J]. 水利学报,2010,41(7):870-875.
- [13] Zhao X, Wu P, Chen X, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hillslopes in the Loess Plateau of China[J]. Soil Research,2013,51(1):50-58.
- [14] 朱显谟. 重建土壤水库是黄土高原治本之道[J]. 中国科学院院刊,2006,21(4):320-324.
- [15] Zhao X, Chen X, Huang J, et al. Effects of vegetation cover of natural grassland on runoff and sediment yield in loess hilly region of China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2014,94(3):497-503.
- [16] 李勇,徐晓琴,朱显谟. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性机制初步研究[J]. 中国科学 B 辑:化学,1992,22(3):254-259.
- [17] 肖培青,姚文艺,李莉,等. 植被影响下坡面流阻力变化特征研究[J]. 泥沙研究,2013(3):1-5.
- [18] 王国梁,刘国彬. 黄土丘陵区长芒草群落对土壤水分入渗的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(3):227-231.
- [19] 李建兴,何丙辉,湛芸,等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(10):144-152.
- [20] 李会科,郑秋玲,赵政阳,等. 黄土高原果园种植牧草根系特征的研究[J]. 草业学报,2008,17(2):92-96.
- [21] 李军,陈兵,李小芳,等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报,2007,27(1):75-89.
- [22] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. 自然资源学报,2001,16(5):427-432.
- [23] Jun F, Yu G, Quanju W, et al. Mulching effects on water storage in soil and its depletion by alfalfa in the Loess Plateau of northwestern China[J]. Agricultural Water Management,2014,138:10-16.