

孙彭成, 高建恩, 王显文, 等. 柳枝稷植被过滤带拦污增效试验初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2):314-321.

SUN Peng-cheng, GAO Jian-en, WANG Xian-wen, et al. Effectiveness of switchgrass vegetative filter strip in intercepting pollutants and promoting plant biomass[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2):314-321.

柳枝稷植被过滤带拦污增效试验初步研究

孙彭成¹, 高建恩^{1,2,3*}, 王显文^{3,4}, 高哲⁵

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 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利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 4.新疆兵团勘测设计院(集团)有限责任公司, 乌鲁木齐 830002; 5.陕西化建工程有限责任公司, 陕西 杨凌 712100)

摘要:针对黄土高原严重水土流失引起面源污染与水资源紧缺的问题,在自主研发设计的坡地高效农业用水滤清系统基础上,通过6组不同雨强的模拟降雨试验,分析了不同雨强下坡地径流中污染物输出特征,研究了不同长度的柳枝稷植被过滤带对污染物的净化效果,并对植被过滤带柳枝稷的生产效益进行了评价。结果表明:坡面径流中泥沙和总磷含量随雨强的增加而增加,总氮含量随雨强的增加而减小,COD含量随雨强增加先减小后增加。3 m长和5 m长的柳枝稷植被过滤带都能显著削减径流中的泥沙和总磷含量,而两种长度的削减作用间无显著差异;5 m长过滤带还能显著削减径流中COD含量,整个过滤带对总氮的削减效果不明显。过滤带柳枝稷产量和品质均优于大田种植柳枝稷,过滤带内距径流入口越近柳枝稷干物质产量越高;过滤带柳枝稷单位面积干物产量提高29%,蛋白质产量增加53%,淀粉产量增加23%。滤清系统柳枝稷植被过滤带不但能有效拦截水沙和面源污染物,而且能够将所拦截污染物作为肥料吸收利用,高效利用水土资源,在黄土高原地区有广泛的应用前景。

关键词:模拟降雨;柳枝稷植被过滤带;净化径流;产量品质提升

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2016)02-0314-08 **doi:**10.11654/jaes.2016.02.015

Effectiveness of switchgrass vegetative filter strip in intercepting pollutants and promoting plant biomass

SUN Peng-cheng¹, GAO Jian-en^{1,2,3*}, WANG Xian-wen^{3,4}, GAO Zhe⁵

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest N&F University, Yangling 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China; 3.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest N&F University, Yangling 712100, China; 4.Surveying & Designing Institute(group) Co. Ltd., Xinjiang Production and Construction Crops, Urumchi, 830002, China; 5.Shaanxi Petroleum Chemical Engineering and Construction Co. Ltd., Yangling 712100, China)

Abstract: The serious soil and water erosion in the Loess Plateau has caused non-point source pollution and shortage of water resources. In this study, a series of simulated rainfall experiments with 6 rainfall intensities were conducted using the self-designed efficient agricultural water filter system. The pollutant outputs under different rainfall intensities were measured. The purification efficiencies and biomass production of the Switchgrass Vegetative Filter Strip (VFS) with different lengths were also evaluated. Results indicated that: 1) with increase in rainfall intensity, the concentrations of sediments and total phosphorus (TP) in overland flow increased, while total nitrogen (TN) concentrations decreased. COD decreased initially but increased thereafter; 2) Both 3 m- and 5 m-length VFS significantly reduced sediment and TP concentrations, with no significant differences between these two lengths. The COD reduction happened only in the 5 m-length VFS. However, neither of these two lengths of VFS reduced TN concentrations; 3) Yield and quality of switchgrass in the VFS were better than those of field-grown switchgrass. In the VFS, switchgrass closer to the runoff entrance yielded higher biomass. The dry matter yield, protein yield and starch yield of switchgrass were respectively 29%, 53%, and 23% higher in the VFS than in the fields. The present results indicated that switchgrass in VFS utilized soil and water resources efficiently and would have promising applications in the Loess Plateau area.

Keywords: simulated rainfall experiment; switchgrass Vegetative Filter Strip (VFS); purification effect; yield and quality promotion

收稿日期: 2015-08-05

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划(2011BAD31B05); 国家自然科学基金(41371276, 51309194); 陕西省科技统筹创新工程项目(2013KTDZ03-03-01); 中国科学院水利部水土保持研究所知识创新工程专项(水土保持工程, A315021304)

作者简介: 孙彭成(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: sunpech@163.com

* 通信作者: 高建恩 E-mail: gaojianen@126.com

黄土高原地区降雨径流引起剧烈的水土流失并纳入大量的泥沙和氮、磷等面源污染物,加剧水体的污染,使该地区的水资源更加紧缺,严重制约社会经济的可持续发展,引发了国家和社会的高度关注。植被过滤带是一种能沉降、过滤、稀释、下渗或吸收地表径流中污染物的植被区域系统^[1],可从过程上减少面源污染物进入水体^[2],从而显著减轻非点源污染,已在欧美国家得到广泛的应用,国内对此也做了大量的研究与探索。Giri 等^[3]研究表明柳枝稷能有效拦截径流中污染物,李怀恩等^[4]在黄土高原地区放水试验表明,乡土物种沙棘等营造的植被过滤带对径流中的污染物具有良好的过滤拦截效果。然而,目前国内关于植被过滤带实际应用方面却鲜有报道^[5]。申小波等^[6]通过模拟实验研究了不同宽度植被过滤带对污染物的拦截作用,高建恩、王显文等采用能源型牧草柳枝稷植被过滤带,基于径流调控理论与水土资源高效利用的理念,设计了一种坡地高效农业用水滤清系统(CN201410036089.7)^[7-9],可拦截净化降雨径流中的污染物并将过滤后的径流用于发展水土保持型高效农业。本文在该滤清系统的基础上,分析了不同雨强下坡地污染物输出特征,研究了不同宽度柳枝稷植被过滤带对污染物的拦截效果,初步探究了滤清系统的拦截作用对柳枝稷产量的提高和品质的提升,研究结果对滤清系统在黄土高原地区的进一步优化与应用推广具有重要的参考作用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

模拟降雨试验主要包括降雨系统、集流系统和柳枝稷植被过滤系统三个部分,试验系统的平面布设如图1。不同强度的模拟降雨降落于集流系统的裸露坡面,对其进行冲刷,自然形成含沙量高、污染物浓度大的受污水流,而后进入柳枝稷植被过滤带。

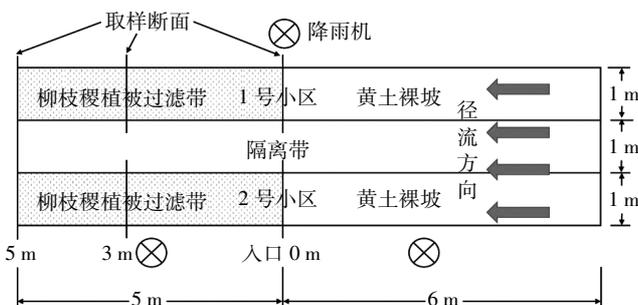


图1 试验系统平面布设示意图

Figure 1 Diagram of experimental system

1.1.1 降雨系统

人工模拟降雨通过降雨机实现,该降雨机高8 m,通过调节降雨机喷头中垫片的孔径大小来控制降雨雨强。在对垫片孔径大小与降雨强度之间的关系率定后,为装置选用的垫片孔径大小分别为6、8、9、10、11、12 mm,所对应的降雨强度分别为0.8、0.9、1.2、1.9、2.1、2.3 mm·min⁻¹。降雨组次随机安排,每次降雨试验前对雨强进行率定,保证降雨均匀度达到75%。各场降雨在第二次取样后停止,降雨历时在50~70 min之间。

1.1.2 集流系统

集流系统是长6 m、宽1 m,坡度为15°的裸露坡面。试验用土为取自安塞县马家沟流域的黄绵土,有机质含量0.54%,全氮含量0.04%,全磷含量0.14%。在试验前3 d将肥料喷施于风干黄土并充分搅拌,配制肥土。每吨干土施用78.12 g磷酸二氢钾和195.32 g尿素,模拟667 m²平均施用13.3 kg磷酸二氢钾和33.3 kg尿素。每次降雨前更换集流系统表层的肥土,换土厚度为20 cm,分层充填并控制填土密度在1.30 g·cm⁻²左右。

1.1.3 柳枝稷植被过滤系统

柳枝稷植被过滤系统长5 m、宽1 m,位于集流系统的下方。试验用柳枝稷播种于2013年5月,播种量为1.5 g·m⁻²。试验开始前,柳枝稷平均株高约23 cm,单位面积上柳枝稷茎秆密度为4300~4400株·m⁻²,盖度大于80%。

1.2 试验设计与方法

滤清试验系统设置在西北农林科技大学节水博览园内,具有两个平行的滤清系统作为重复。模拟降雨试验于2013年8—9月间进行,该实验每次降雨间隔时间一致,以保证试验系统内土壤含水量基本相同。植被过滤带内设置三个取样断面,分别位于入口(0 m)、距离入口3 m和5 m处。降雨开始,待出口处产流稳定后,采用注射器在各个断面第一次取样,首次取样30 min后进行第二次取样,各断面取4个径流样。在每次试验后,放水冲洗植被过滤带表层,尽量清除残留于过滤带内的污染物,以减轻对下次试验的影响。

水质样品于降雨试验取样当天进行测定,测定指标包括泥沙含量、总氮(TN)、总磷(TP)和化学需氧量(COD)。泥沙含量测定采用烘干法;总氮含量测定采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度计法;总磷含量采用硫酸钾氧化-钼酸铵分光光度计法;COD采用美

国HACH公司生产的DR2800便携式水质分析仪进行测定。

通过将过滤带内与普通大田2014年柳枝稷产量和品质进行比较,初步评价柳枝稷植被过滤带的生产效益。取样样地设置在节水博览园滤清系统和安塞县马家沟流域,分别对应过滤带柳枝稷和普通大田种植柳枝稷。两处柳枝稷品种、种植时间和土壤条件一致,均无施肥灌水等抚育措施,过滤带柳枝稷样地为图1所示的两个平行试验小区,并且在该年度未进行干扰性试验。测定指标包括株高、产量、植株蛋白质含量和淀粉含量。样方大小设置为1 m×1 m,过滤带柳枝稷进行分段取样,样方选定后各样方内选取10株测株高,而后刈割、烘干、测产。两处柳枝稷各取3个试样,对各试样分别测茎和叶中的蛋白质和淀粉含量,按比例计算全植株蛋白质和淀粉含量。柳枝稷植株蛋白质含量采用考马斯亮蓝法^[10],淀粉含量采用蒽酮比色法测定^[10]。

1.3 数据分析

采用SPSS18.0对数据进行方差分析、均值比较和拟合分析。采用Origin9.0软件绘制图表。

采用污染物质量浓度削减率^[11]定量评价柳枝稷植被过滤带对径流中污染物的净化效果,某一污染物

质量浓度削减率越大,表明柳枝稷植被过滤带对该污染物的拦截效果越好。污染物质量浓度削减率 R 的计算方法为:

$$R = \frac{(C_1 - C_2)}{C_1} \times 100\%$$

式中: R 为污染物质量浓度削减率,%; C_1 为入口处污染物的含量, $\text{g}(\text{mg}) \cdot \text{L}^{-1}$; C_2 为不同取样断面处(3、5 m)污染物的含量, $\text{g}(\text{mg}) \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同雨强坡地径流中污染物输出特征

雨滴打击力和径流冲刷力是造成土壤侵蚀和养分流失的主要动力^[12],雨强对坡面土壤和污染物流失有重要影响。当雨强增加时,一方面雨滴打击力增强,坡面上更多的土粒被溅散,为侵蚀提供了物质来源,同时,雨滴打击还能增强坡面薄层径流的紊动^[13],从而影响径流对泥沙和污染物的挟带能力;另一方面,坡面径流量增大,径流对坡面的冲刷能力也就越强,从而导致径流中泥沙含量随雨强的增加而增大。根据王显文^[8]、高建恩^[7]等对不同雨强径流中污染物输出特征的试验资料进行分析整理(图2),可以看出,径流中泥沙含量随雨强的增加而增加。当雨强从0.8 mm·

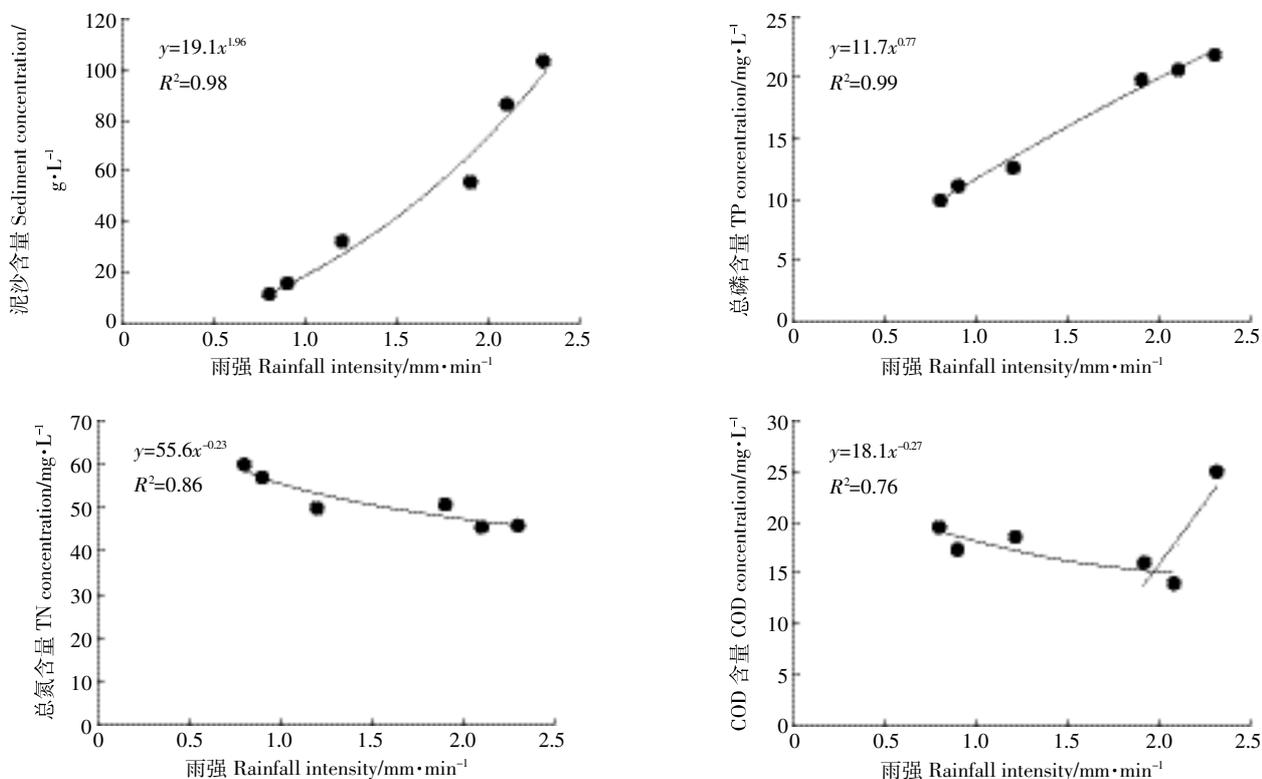


图2 不同雨强下径流中污染物含量

Figure 2 Concentrations of pollutants in overland runoff under different rainfall intensity

min^{-1} 增大 1.9 倍达到 $2.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 后,径流中泥沙含量从 $11.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 剧增到 $103.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,增加了 8.1 倍,泥沙含量随雨强增加的趋势可以较好地用幂函数描述 ($R^2=0.98, P<0.01$),与李浩宏等^[14]室内试验的结论一致。径流中的总磷含量随雨强增大也表现为增加的趋势,当雨强从 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大到 $2.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,径流中总磷的含量则从 $9.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加 1.2 倍达到 $21.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其随雨强增加的趋势也可以较好地用幂函数描述 ($R^2=0.99, P<0.01$)。径流中总氮含量随降雨强度的增加有减少的趋势,当雨强从 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大到 $2.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,径流中的总氮含量从 $60.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到 $46.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,减少 23.5%,径流中总氮含量随雨强的增加以幂函数的形式减小 ($R^2=0.86, P<0.01$)。径流中 COD 含量随雨强增加表现为先减小后增加的趋势,当雨强从 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大到 $2.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,径流中 COD 含量减少 28.7%,为 $13.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与总氮减少幅度相近,其减小趋势能用幂函数的形式描述 ($R^2=0.76$,拟合方程未计入雨强为 2.3 时的数值点),当雨强为 $2.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,径流中的 COD 含量则增加达到 $24.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

径流中污染物的含量并不能代表径流中污染物挟带量,污染物挟带量是污染物含量和径流量共同作用的结果,雨强增加时径流量会随之增加,从而影响径流中污染物挟带量。根据王占礼等^[15]试验得出的黄土坡面产流经验公式推算,本试验中,单位时间内坡面径流输出的泥沙、总磷、总氮和 COD 的输出

量都随雨强的增加而增加。这与目前的主流结论一致^[16]。不同污染物在径流中含量随雨强的增加其变化趋势不同,径流中泥沙和总磷含量均随雨强的增加而增加,与陈玲等^[17]研究结论一致。总氮和 COD 含量则随雨强的增加而略微减小,与傅涛等^[18-19]的研究结论相近。污染物在径流中输出特征随雨强的变化和污染物的迁移特征有关,泥沙和总磷在径流中以颗粒态的形式搬运,总氮和 COD 在径流中则主要以溶解态的形式搬运。坡面土壤侵蚀随雨强的增加而愈加剧烈,由此导致颗粒态的泥沙和总磷含量随雨强的增加而增加。溶解态物质在径流中含量随降雨历时和雨强的增加具有一定的稀释效应,从而引起径流中总氮和 COD 的输出含量随雨强的增加而减小。当雨强为 $2.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,径流中 COD 含量的增加可能与有机质在土壤颗粒中的分布有关。黄土中有机质多集中于团聚体中,团聚体在雨强较大时才能流失^[20-22]。因此在实验条件下,当雨强达到 $2.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,表土中团聚体流失,导致大雨强条件下径流中 COD 含量的增加。

2.2 不同长度植被过滤带对径流中不同污染物拦截效果的比较

植被过滤带可以有效地增加地表阻力,减小径流流速,降低径流的挟沙能力,增加泥沙的沉降,从而达到过滤拦截泥沙的效果^[23]。在对王显文^[8]试验资料整理的基础上,分析了不同长度柳枝稷植被过滤带对污染物的拦截效果,结果见表 1。从表 1 看出,柳枝稷植被过滤带能较好地削减径流中的泥沙含量。经 3 m 长

表 1 不同宽度植被过滤带作用后径流中污染物含量

Table 1 Concentrations of pollutants in runoff water after passing through different widths of VFS

污染物含量 Pollutant content	过滤带宽度 VFS width/m	雨强 Rainfall intensities/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$					
		0.8	0.9	1.2	1.9	2.1	2.3
泥沙含量 Sediment concentration/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	0	11.4±1.6a	15.8±2.6a	32.4±6.2a	55.4±5.2a	86.1±4.0a	103.1±21.7a
	3	1.6±0.1b	2.4±0.4b	1.9±0.5b	2.5±0.5b	2.2±0.4b	6.2±2.8b
	5	0.7±0.1c	0.5±0.0b	0.8±0.1b	0.6±0.1b	0.5±0.1b	1.4±0.2b
总磷含量 TP concentration/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0	9.9±0.7a	11.1±1.2a	12.6±1.6a	19.9±4.8a	20.7±1.2a	21.9±3.5a
	3	2.4±0.3b	2.0±0.3b	2.0±0.6b	3.9±1.9b	4.8±1.7b	5.0±1.1b
	5	1.1±0.2b	1.3±0.2b	0.9±0.1b	1.6±0.4b	1.4±0.4b	1.4±0.3b
总氮含量 TN concentration/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0	60.2±1.6a	57.0±0.8a	50.0±1.8a	50.8±3.7a	45.5±0.3a	46.0±2.3a
	3	59.8±1.3a	55.8±0.5a	48.0±0.9a	45.8±1.9a	45.0±0.2a	42.6±2.8a
	5	59.4±1.5a	54.2±1.2a	44.9±0.4a	44.9±2.8a	44.6±0.1b	39.7±5.5a
COD 含量 COD concentration/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0	19.5±0.7a	17.3±0.3a	18.5±0.5a	16.0±0.4a	13.9±0.5a	24.9±0.5a
	3	19.8±0.6a	8.4±1.1b	17.1±0.4a	14.9±0.3a	12.1±0.2b	19.9±0.2b
	5	13.5±0.4b	7.6±0.9b	15.7±0.4b	13.0±0.3b	11.1±0.3b	13.7±0.2c

注:同种污染物、同列数据后不同字母表示 5%水平显著差异。

Note: Different letters within a column for a pollutant indicate significant differences at 5% level.

柳枝稷植被过滤带作用后,径流中泥沙含量平均降低到 $1.6\sim 6.2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 泥沙质量浓度削减率达到 $85\%\sim 97\%$, 平均质量浓度削减率为 92% ; 经 5 m 长的柳枝稷植被过滤带作用后, 径流中的泥沙含量降低到 $0.5\sim 1.4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 泥沙质量浓度削减率达到 $94\%\sim 99\%$, 平均削减率为 97% 。 3 m 和 5 m 长植被过滤带均能显著削减径流中泥沙含量 ($P<0.05$)。在 3 m 长过滤带基础上, 多数雨强条件下, 5 m 长植被过滤带对泥沙含量的进一步削减效果不明显 ($P>0.05$), 仅当雨强较小 ($0.8\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) 时, 5 m 长植被过滤带才对泥沙含量有进一步的削减效果 ($P<0.05$)。

在降雨和径流的共同作用下, 表层土壤中的磷既能通过淋溶和解析作用进入径流, 也能随所附着的土粒进入径流, 分别构成径流中溶解态和颗粒态的磷^[24]。大量的研究表明^[25-26], 磷在径流中主要是通过泥沙等固态污染物吸附携带, 以颗粒态的形式流失, 因此径流中的磷含量与泥沙含量密切相关。从表 1 看出, 柳枝稷植被过滤带对径流中的总磷含量削减效果较好。经 3 m 宽柳枝稷植被过滤带作用后, 径流中总磷含量平均降低到 $2.0\sim 5.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总磷质量浓度削减率达到 $76\%\sim 84\%$, 平均削减率为 79% ; 经 5 m 长的柳枝稷植被过滤带作用后, 径流中的总磷含量降低到 $0.9\sim 1.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总磷质量浓度削减率达到 $87\%\sim 94\%$, 平均削减率为 91% 。方差分析表明, 3 m 和 5 m 长植被过滤带均能显著削减径流中总磷含量 ($P<0.05$)。试验条件下, 相对于 3 m 长过滤带, 5 m 长植被过滤带对总磷含量的进一步削减效果不明显 ($P>0.05$)。

坡面径流中的氮主要是以溶解态的形式存在, 当施用尿素等速效氮肥时, 氮素流失更加严重且更容易随径流流失^[27-29]。经 3 m 长的植被过滤带作用后, 径流中的总氮含量为 $42.6\sim 59.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 质量浓度削减率在 $0.54\%\sim 7.3\%$ 之间, 平均削减率为 4% ; 经 5 m 长的植被过滤带作用后, 径流中的总氮含量为 $39.7\sim 59.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 质量浓度削减率在 $1\%\sim 14\%$ 之间, 平均削减率为 6.3% 。植被过滤带对径流中总氮含量削减效果不明显, 伴随植被过滤带内土壤氮进入径流以及径流的入渗, 经植被过滤带作用后, 径流中总氮含量可能会增加, 从而造成对总氮质量浓度削减率为负值^[24]。方差分析表明, 3 m 和 5 m 长的植被过滤带对径流中总氮含量的削减效果均不明显 ($P>0.05$)。

坡面降雨径流不但将泥沙、氮、磷等带入水体, 还把土壤中的某些有机物质带入水体, 而土壤中天然有机质对径流中 COD 贡献很大^[30], 因而造成坡面径流

的高 COD 含量。坡面径流中, COD 主要以溶解态有机质的形式存在, 其流失规律与总氮流失相关^[31]。经 3 m 长的植被过滤带作用后, 径流中的 COD 含量减小到 $8.4\sim 19.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 质量浓度削减率在 $-1\%\sim 51\%$ 之间, 平均削减率为 17% ; 经 5 m 长的植被过滤带作用后, 径流中的 COD 含量为 $7.6\sim 15.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 质量浓度削减率在 $15\%\sim 56\%$ 之间, 平均削减率为 31% 。试验条件下, 5 m 宽的植被过滤带对径流中的 COD 含量具有显著的削减效果 ($P<0.05$), 部分雨强条件下, 3 m 长的植被过滤带也具有显著的削减效果 ($P<0.05$)。

不同长度柳枝稷植被过滤带对径流中不同的污染物含量削减效果不同。柳枝稷植被过滤带很大程度削减径流中泥沙含量和总磷含量, 可部分削减径流中 COD 含量, 而削减总氮的能力较差。这种结果与污染物在径流中搬运形式和植被过滤带对污染物拦截机理有关。过滤带一方面可以促进径流下渗, 另一方面又能通过自身阻挡作用, 增加地表阻力、降低径流流速, 增加沉积, 从而减少污染物的搬运量^[32]。径流中的泥沙经物理性拦截而沉积, 总磷多数也伴随泥沙而沉积, 因此植被过滤带对泥沙和总磷具有较高的削减效果; 总氮和 COD 在径流中多以溶解态形式搬运, 植被过滤带难以作用, 因此削减效果不明显。针对径流中的污染物种类不同, 所配置的柳枝稷植被过滤带的长度也应该有所不同。当径流中所需削减的污染物为泥沙和总磷时, 3 m 长的过滤带即可显著作用, 当所需削减的污染物为总氮和 COD 时, 过滤带的长度至少要达到 5 m 。因此, 需要通过进一步的研究, 以确定削减径流各类污染物所需过滤带的合理长度。

2.3 柳枝稷植被过滤带生产效益评价

植被过滤带不但能拦截沉降径流中的污染物, 减轻面源污染, 还能吸收利用所拦截物质中的营养成分, 促进过滤带内植被生长, 提升其产量与品质。柳枝稷作为一种优质牧草, 应具有较高的蛋白质含量和碳水化合物含量^[33], 两个小区内的过滤带柳枝稷与大田种植柳枝稷产量与品质的初步比较见表 2。过滤带柳枝稷蛋白质含量为 12.9% , 相较于大田种植柳枝稷显著提高 18% ($P<0.05$); 淀粉含量为 13.3% , 相较于大田种植柳枝稷降低 5% ($P>0.05$)。与普通种植柳枝稷相比, 过滤带柳枝稷干物质产量可达到 $16\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 显著提高 29% ($P<0.05$); 单位面积蛋白质和淀粉产量分别为 $2\ 128.5$ 、 $2\ 194.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 分别提高 53% 和 23% 。过滤带柳枝稷的品质和产量都优于大田

表2 不同种植条件柳枝稷生产力比较

Table 2 Yield of switchgrass under two growing conditions

种植方式 Growing method	干物质产量 Dry matter yield/kg·hm ⁻²	蛋白质含量 Protein content/%	淀粉含量 Starch content/%	蛋白质产量 Protein yield/kg·hm ⁻²	淀粉产量 Starch yield/ kg·hm ⁻²
过滤带柳枝稷	16 500±1118a	12.9±0.5a	13.3±0.3a	2 128.5	2 194.5
大田柳枝稷	12 750±206b	10.9±0.4b	14±1.4a	1 389.75	1785

注:同列数据不同字母表示 5%水平差异显著。

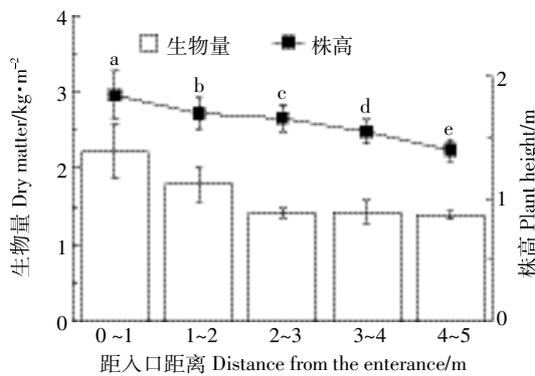
Note: Different letters within a column indicate significant differences at 5% level.

种植柳枝稷,其主要原因是植被过滤带能拦截利用径流及其中的氮、磷等面源污染物,相当于水肥条件的改善,从而提高了柳枝稷的产量与品质^[34]。

图3反映了距径流入口不同距离处过滤带柳枝稷的平均株高与产量。距离径流入口越近,柳枝稷的平均株高越高,单位面积干物质产量也越大。距径流入口4~5 m处柳枝稷的平均株高为1.45 m,距入口0~1、1~2、2~3、3~4 m处柳枝稷的平均株高则分别为1.85、1.70、1.66、1.55 m,分别相对增加28%、17%、14%、6%,不同距离处柳枝稷株高间差异显著($P < 0.05$)。距离径流入口2 m内的柳枝稷干物质产量明显高于3 m之外,3 m之外的平均干物质产量约为1.4 kg·m⁻²,距离径流入口0~1 m和1~2 m处的则分别为2.23、1.79 kg·m⁻²,分别提高57%和27%。因为距径流入口越近,柳枝稷所能拦截利用径流与营养物质越多,水肥条件越优,柳枝稷的长势也就越好。

3 结论

(1)坡面径流中泥沙和总磷含量随雨强的增加而增加,总氮含量随雨强的增加而减小,COD含量随雨强增加呈现出先减小后增加的趋势。



不同字母表示 5%水平差异显著

Different letters indicate significant differences at 5% level

图3 距径流入口不同距离处柳枝稷株高与产量

Figure 3 Yield and plant height of switchgrass in VFS at different distance from runoff entrance

(2)柳枝稷植被过滤带对泥沙和总磷削减效果较好,对COD具有一定的削减效果,对总氮的拦截效果不明显。3 m与5 m长植被过滤带均能显著削减径流中的泥沙和总磷含量,且两者的削减效果无显著差异。5 m长的过滤带还能显著削减径流中的COD含量。两种长度的过滤带对径流中总氮含量的削减效果都不明显。在配置植被过滤带时,应根据径流中污染物种类,合理选择所需过滤带带长。

(3)柳枝稷植被过滤带对径流中污染物的拦截利用能提升过滤带柳枝稷的干物质产量与品质。在过滤带内部,距离径流入口越近,柳枝稷长势越好,干物质产量越大。

参考文献:

- [1] Dickey E C, Vanderholm D H. Vegetative filter treatment of livestock feedlot runoff[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1981, 10(3):279-284.
- [2] 杨林章,施卫明,薛利红,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践:总体思路与“4R”治理技术[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1):1-8.
YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, XUE Li-hong, et al. Reduce-retain-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):1-8.
- [3] Giri S, Mukhtar S, Wittie R. Vegetative covers to control sediment and phosphorus (P) in runoff from dairy waste application fields[C]. Providence, Rhode Island, 2008.
- [4] 李怀恩,庞敏,杨寅群,等.植被过滤带对地表径流中悬浮固体净化效果的试验研究[J]. *水力发电学报*, 2009, 28(6):176-181.
LI Huai-en, PANG Min, YANG Yin-qun, et al. Experimental study of clarification for vegetative filter strips to sediment in surface runoff[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(6):176-181.
- [5] 王良民,王彦辉.植被过滤带的研究和应用进展[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(9):2074-2080.
WANG Liang-min, WANG Yan-hui. Research and application advances on vegetative filter strip[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9):2074-2080.
- [6] 申小波,陈传胜,张章,等.不同宽度模拟植被过滤带对农田径流、

- 泥沙以及氮磷的拦截效果[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 721-729.
- SHEN Xiao-bo, CHEN Chuan-sheng, ZHANG Zhang, et al. Interception of runoff, sediment, nitrogen and phosphorus by vegetative filter strips with different width in a simulated experiment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4): 721-729.
- [7] 高建恩, 王显文, 张星辰, 等. 一种坡地高效农业用水滤清系统的制备方法[P]. 中国陕西, 61, CN201410036089.7.2014-06-11.
- GAO Jian-en, WANG Xian-wen, ZHANG Xing-chen, et al. A method of high efficient slopedland agricultural water filtration system [P]. Shaanxi, China, 61, CN201410036089.7. 2014-06-11.
- [8] 王显文. 一种新型雨水滤清系统的初步设计与试验验证[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- WANG Xian-wen. Preliminary design and experimental verification of a late-model rainwater filtration system[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [9] 王显文, 高建恩, 张梦杰, 等. 雨水滤清净水系统的设计与试验验证[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 197-200.
- WANG Xian-wen, GAO Jian-en, ZHANG Meng-jie, et al. Design and experimental verification of rainwater filtration system[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(4): 197-200.
- [10] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨出版社, 2002.
- HAO Zai-bin, CANG Jing, XU Zhong. Plant physiology experiment technology[M]. Harbin: Harbin Press, 2002.
- [11] 邓娜, 李怀恩, 史冬庆. 径流流量对植被过滤带净化效果的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 124-129.
- DENG Na, LI Huai-en, SHI Dong-qing. Influence of inflow rate of runoff on purification effectiveness of vegetative filterstrip[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(4): 124-129.
- [12] 吴普特, 高建恩. 黄土高原水土保持新论[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- WU Pu-te, GAO Jian-en. New theory on soil and water conservation in Loess Plateau[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2006.
- [13] 徐震, 高建恩, 赵春红, 等. 雨滴击溅对坡面径流输沙的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 20-23.
- XU Zhen, GAO Jian-en, ZHAO Chun-hong, et al. Effects of raindrop impact on runoff and sediment transport of the slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6): 20-23.
- [14] 李浩宏, 王占礼, 申楠, 等. 黄土坡面片蚀水流含沙量变化过程试验研究[J]. 中国水土保持, 2015(3): 46-49.
- LI Hao-hong, WANG Zhan-li, SHEN Nan, et al. Experimental study on variation process of flow sediment concentration of sheet erosion of Loess slope surface[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2015(3): 46-49.
- [15] 王占礼, 黄新会, 张振国, 等. 黄土裸坡降雨产流过程试验研究[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 1-4.
- WANG Zhan-li, HUANG Xin-hui, ZHANG Zhen-guo, et al. Experimental study of runoff processes on bare Loess hillslope[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, 25(4): 1-4.
- [16] 林明, 丁晓雯, 卢博鑫. 降雨、地形对非点源污染产输影响机理综述[J]. 环境工程, 2015, 33(6): 19-23.
- LIN Ming, DING Xiao-wen, LU Bo-xin. Review of researchs on influence mechanism of rainfall, topography on the production and transportation of non-point source pollution[J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(6): 19-23.
- [17] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2151-2158.
- CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, et al. Characteristics of nutrient loss by runoff in sloping arable land of yellow brown under different rainfall intensities [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(6): 2151-2158.
- [18] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 等. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 71-74.
- FU Tao, NI Jiu-pai, WEI Chao-fu, et al. Research on the nutrient loss from purple soil under different rainfall intensities and slopes[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(1): 71-74.
- [19] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 等. 雨强对三峡库区黄色石灰土养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 33-35.
- FU Tao, NI Jiu-pai, WEI Chao-fu, et al. Research on nutrient loss from terra gialla soil in Three Gorges region under different rainfall intensity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2): 33-35.
- [20] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 412-418.
- DOU Sen, LI Kai, GUAN Song. A review on organic matter in soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 412-418.
- [21] 黄满洲, 周成虎, 章申, 等. 农田暴雨径流侵蚀泥沙流失及其对氮磷的富集[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 13-16.
- HUANG Man-xiang, ZHOU Cheng-hu, ZHANG Shen, et al. Sediment transport and enrichment mechanisms of nitrogen and phosphorus under simulated rainfall condition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(4): 13-16.
- [22] 曾全超, 李娅芸, 刘雷, 等. 黄土高原草地植被土壤团聚体特征与可蚀性分析[J]. 草地学报, 2014, 22(4): 743-749.
- ZENG Quan-chao, LI Ya-yun, LIU Lei, et al. Study on soil aggregate stability and soil erodibility in the grassland vegetation of the Loess Plateau region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(4): 743-749.
- [23] Zhao C, Gao J, Zhang M, et al. Sediment deposition and overland flow hydraulics in simulated vegetative filter strips under varying vegetation covers[J]. *Hydrological Processes*, 2015; DOI: 10. 1002/hyp. 10556.
- [24] 李怀恩, 邓娜, 杨寅群, 等. 植被过滤带对地表径流中污染物的净化效果[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 81-86.
- LI Huai-en, DENG Na, YANG Yin-qun, et al. Clarification efficiency of vegetative filter strips to several pollutants in surface runoff [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7): 81-86.
- [25] 陈玲, 宋林旭, 崔玉洁, 等. 模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 49-55.
- CHEN Ling, SONG Lin-xu, CUI Yu-jie, et al. Characteristics of phosphorus loss in sloping arable land of yellow-brown soil under artificial rainfall test[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 49-55.

- [26] Sharpley A, Chapra S C, wedepohl R, et al. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(1):437-451.
- [27] 郭新送, 宋付朋, 高 杨, 等. 模拟降雨下2种尿素的坡地氮素流失特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5):26-30.
GUO Xin-song, SONG Fu-peng, GAO Yang, et al. Nitrogen loess characteristics of two kinds of ureas under the simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5):26-30.
- [28] 张兴昌, 邵明安. 坡地土壤氮素与降雨、径流的相互作用机理及模型[J]. 地理科学进展, 2000, 19(2):128-135.
ZHANG Xing-chang, SHAO Ming-an. The interacting models and mechanisms of soil nitrogen with rainfall and runoff[J]. *Progress in Geography*, 2000, 19(2):128-135.
- [29] 李艳梅, 袁 霞, 张兴昌, 等. 黄绵土坡面土壤矿质氮素径流流失与入渗特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):246-251.
LI Yan-mei, YUAN Xia, ZHANG Xing-chang, et al. Mineral nitrogen loss by runoff and infiltration in the Loess soil slope[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):246-251.
- [30] 李家科, 李怀恩, 刘 健, 等. 基于暴雨径流过程监测的渭河非点源污染特征及负荷定量研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2):106-111.
LI Jia-ke, LI Huai-en, LIU Jian, et al. Characteristics of Non-point source pollution and load of Weihe River based on storm runoff monitoring data[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(2):106-111.
- [31] 宋玉梅, 周石池, 王 瑞, 等. 海南岛三大流域农业土壤源污染物流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11):2171-2177.
SONG Yu-mei, ZHOU Shi-chi, WANG Rui, et al. Characteristics of agricultural soil pollutant loss in three major rivers of Hainan, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11):2171-2177.
- [32] Barling R D, Moore I D. Role of buffer strips in management of waterway pollution: A review[J]. *Environmental Management*, 1994, 18(4):543-558.
- [33] 郑 凯, 顾洪如, 沈益新, 等. 牧草品质评价体系及品质育种的研究进展[J]. 草业科学, 2006, 23(5):57-61.
ZHENG Kai, GU Hong-ru, SHEN Yi-xin, et al. Evaluation system of forage quality and research advances in forage quality breeding[J]. *Pratacultural Science*, 2006, 23(5):57-61.
- [34] Greg J C, Bruce E A. Nitrogen fertilization and burning effects on rumen protein degradation and nutritive value of native grasses[J]. *Agronomy Journal*, 1981, 88(3):439-442.