

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

申小波^{1,2}, 陈传胜¹, 张章³, 孙晓涛¹, 肖波^{2*}

(1.中南林业科技大学林学院, 长沙 410000; 2.北京市农林科学院北京草业与环境研究发展中心, 北京 100097; 3.核工业二〇三研究所, 咸阳 712100)

摘要:化肥的大量使用在提高作物产量的同时,也导致了严重的环境污染。该研究通过在土槽上进行浑水冲刷试验,定量研究了模拟植被过滤带对径流、泥沙、总氮、以及总磷的拦截效果。结果表明,在进水流量($0.173 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$)和流速($0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)一定的条件下,模拟植被过滤带的宽度对污染物的拦截效果影响较大。当宽度分别为 1、2、3 m 时,模拟植被过滤带对径流的拦截率分别为 32%、51%、69%;对泥沙的拦截率分别为 78%、88%、92%;对总氮的拦截率分别为 65%、75%、84%;对总磷的拦截率分别为 80%、93%、95%。同时,3种宽度下的泥沙量、总氮量、总磷量均与径流量呈显著线性正相关关系(泥沙量: $r_1=0.69, r_2=0.84, r_3=0.63$;总氮量: $r_1=0.98, r_2=0.89, r_3=0.95$;总磷量: $r_1=0.62, r_2=0.47, r_3=0.41$),表明径流量在一定程度上决定了流经植被过滤带后出流的泥沙量、总氮量以及总磷量。研究证实,茎秆密集的草本植被过滤带能有效拦截径流、泥沙、总氮以及总磷,对农田水土流失和农业面源污染具有较好的防治效果。

关键词:植被过滤带;径流;泥沙;总氮;总磷;拦截率

中图分类号:S157.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)04-0721-09 doi:10.11654/jaes.2014.04.015

Interception of Runoff, Sediment, Nitrogen and Phosphorus by Vegetative Filter Strips with Different Width in a Simulated Experiment

SHEN Xiao-bo^{1,2}, CHEN Chuan-sheng¹, ZHANG Zhang³, SUN Xiao-tao¹, XIAO Bo^{2*}

(1.College of Forestry, Central South University of Forestry Technology, Changsha 410000, China; 2.Beijing Research and Development Center for Grass & Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3.No. 203 Research Institute in Nuclear Industry, Xianyang 712100, China)

Abstract: Enormous uses of mineral fertilizers greatly increase crop yields, but may cause water pollutions. Vegetative filter strips (VFS), which planted along streams or lakes to remove sediments and nutrients carried in runoff, have been regarded as one of the best management practices in reducing non-point source pollution in many countries. Interception effectiveness of pollutants by VFS is largely dependent on the width and type (grasses, shrubs, trees, or their mixtures) of VFS and pollutant forms (particle or soluble). A simulated experiment was conducted in this study to determine the interception effectiveness of runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus by artificial grass-like VFS with different widths (1 m, 2 m, and 3 m). The interception effectiveness of runoff and pollutants were greatly influenced by the width of VFS under the same conditions (water flow rate and speed were $0.173 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ and $0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively). The VFS with 1 m, 2 m, and 3 m width respectively reduced the outflow of runoff by 32%, 51%, and 69%, and the outflow of sediment by 78%, 88%, and 92%. Correspondingly, the outflow of total nitrogen was decreased by 65%, 75%, and 84%, and that of total phosphorus by 80%, 93%, and 95%, respectively. The total outflow of sediment, nitrogen, and phosphorus was significantly positively correlated with the outflow of runoff (amount of sediment: $r_1=0.69, r_2=0.84, r_3=0.63$; amount of total nitrogen: $r_1=0.98, r_2=0.89, r_3=0.95$; amount of total phosphorus: $r_1=0.62, r_2=0.47, r_3=0.41$, respectively). The results indicate that grass VFS are very effective in reducing runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus and controlling agricultural non-point source pollution.

Keywords: vegetative filter strips; runoff; sediment; total nitrogen; total phosphorus; interception effectiveness

收稿日期:2013-09-11

基金项目:北京市科技新星计划(2009B25);北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJ CX201103001);国家科技支撑计划(2012BAD14B00);国家自然科学基金(41001156)

作者简介:申小波(1988—),女,硕士,主要从事水土保持方面研究。E-mail:shenxiaobolm@163.com

*通信作者:肖波 E-mail:xiaoboxb@gmail.com

20世纪70年代以来,随着对工业废水和城市生活污水等点源污染的有效控制,面源污染在环境污染中所占的比例越来越大,其中农业面源污染尤甚。农业面源污染是指农业生产活动中,氮、磷、农药以及其他有机或无机污染物,在降水和径流冲刷作用下,通过农田地表径流和地下渗透,使大量污染物进入受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等)所引起的水体污染^[1]。我国农业面源污染的形势非常严峻,其中氮、磷是农业面源污染主要的污染物。世界银行报告指出,中国地表水中的氮、磷有50%以上来自于农业面源污染^[2],中国地下水有将近50%为农业面源污染所污染^[3],而且中国耕地面积也有近2000万 hm^2 受到农业面源污染的影响^[4]。因此,对氮、磷流失引起的农业面源污染进行防治,具有较为重要的科学和实践意义。

植被过滤带又称为植被缓冲带,是位于污染源和受纳水体之间的带状植被区域,它可以使地表径流中的污染物被沉降、过滤、稀释、下渗和吸收,从而达到去除污染物、改善水质的目的,是成本低廉且富有成效的一种生态工程措施^[5]。植被过滤带从15—16世纪开始在欧洲得到应用,1978年植被过滤带在美国被推荐为最佳管理措施^[6]。相关研究表明,植被过滤带可以通过物理、化学、生物等途径使地表径流以及径流中的泥沙、氮、磷等污染物减少,从而最大程度地降低农业面源污染^[7-8]。根据植物不同,植被过滤带可分为多种过滤带类型,包括草本过滤带、灌木过滤带、乔木过滤带以及两类以上植被构成的复合过滤带^[9]。其中,草本过滤带因容易管理和投资较少而应用最普遍,并且由于其生长迅速、茎秆粗壮、分蘖密集且耐污能力强,因此通常具有更强的径流和污染物拦截能力^[10-11]。一般认为,植被过滤带拦截污染物是通过多种作用协同实现的^[12],这些作用包括:①植物茎秆能有效滞缓径流流速,并过滤去除径流中泥沙等颗粒态污染物^[13];②植物能改善土壤结构,并通过其根系的穿插作用增加土壤渗透能力,从而增加入渗、减少径流^[14];③植物自身可直接吸收和利用部分污染物(氮、磷等),用于其生长^[15];④土壤可吸附大量可溶性污染物,从而防止可溶性污染物进入地下水体^[16];⑤土壤根际微生物可通过生物过程分解和降解部分污染物^[17]。

然而,目前关于植被过滤带的报道中,能有效控制污染物的最佳宽度争议较大^[18-19]。王建国等^[20]研究表明,狗牙根 [*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.] 缓冲带宽度分别为0.5、1、1.5、2 m时,对总氮的拦截率分别为8%、42%、56%、59%,对总磷的拦截率分别为20%、

77%、86%、89%。李世锋^[21]研究表明,7.1 m宽的柳枝稷 (*Panicum virgatum*) 缓冲带对地表径流中的泥沙、总氮、总磷的拦截率分别为95%、80%、78%。李怀恩等^[7,12]研究表明,10 m宽的草地缓冲带对地表径流中泥沙、颗粒态氮、颗粒态磷、总氮、总磷的拦截率分别为89%、90%、87%、70%、85%。不同文献报道中植被过滤带的功能和效果差异较大,这可能与不同研究区的气候特征、土壤类型、植物种类以及污染物性质等因素有关。

多数研究表明,草本植被过滤带的地上部分是其截留径流和泥沙的关键,即植物茎秆密度直接关系到其拦截径流和泥沙能力^[10-11,17]。因此,本实验借鉴“Kentucky model”试验^[22-23]设计的思路,采用锈蚀铁丝代替草本植物茎秆,模拟其在植被过滤带中的分布,侧重考虑其物理阻滞和机械过滤作用,旨在提高实验数据的可控性,从而更好地揭示植被过滤带的阻滞效应。本研究通过浑水冲刷试验,测定比较了不同宽度模拟植被过滤带入流和出流的径流、泥沙、总氮、总磷的浓度与总量,继而定量评价了不同宽度模拟植被过滤带对径流、泥沙以及氮、磷的拦截效果,其结论可为我国应用植被过滤带技术防治农田水土流失和农业面源污染提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置包括土槽和浑水冲刷装置两部分。其中,土槽为不锈钢可移动土槽,规格为3.0 m长 \times 0.5 m宽 \times 0.7 m高,且坡度在0~15°范围内可调,土槽底端设汇流口以收集出流。浑水冲刷装置由搅拌桶、供水桶以及水流扩散板三部分组成。搅拌桶和供水桶规格一致,高度为1.0 m、直径为0.7 m,桶内装有自动搅拌装置,以防止污染物沉降。有关实验装置的详细情况,可参见文献[24]。

1.2 试验设计

试验共设3种植被过滤带宽度(1、2、3 m),每种宽度重复3次,即共9个处理。与试验设计相对应,试验共装填9个相同规格的土槽,土槽底部设有若干小孔,以利于土壤水分向深层渗漏。装填土槽前,将一层薄纱布置于土槽底部,以防止土壤漏失。装填土壤为北京市昌平区小汤山镇耕地表层0~30 cm土壤(硬度为7.89 $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$,有机质含量为1.41%,全氮含量为0.86 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷含量为0.95 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),并过2 mm筛后分层装填,装填容重为1.3 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。装填完毕后,垂直

于土槽表面插入直径为3 mm 锈蚀铁丝(用浓度为18%的盐酸对铁丝浸泡12 h后,于阴暗潮湿处放置10 d),宽度分别为1、2、3 m,每行密度为200根(参照真实植被过滤带的平均茎秆密度^[24]),行距均为10 cm,总行数分别为10、20、30行。各处理设计冲刷流量均为 $0.173 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,冲刷时间30 min,即总流量为311.4 L。入流流速为 $0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,泥沙浓度为 $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,总氮浓度为 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总磷浓度为 $4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

冲刷试验前,测定土槽土壤初始含水率,然后将5.6 kg 泥沙(与土槽装填土壤相同)和38.38 g KNO_3 、4.63 g KH_2PO_4 加入搅拌桶中,并加入定量水搅拌均匀后,由水泵抽至供水桶中。供水桶位于土槽顶端的上方,搅拌均匀的浑水进入供水桶后,在流量控制下以 $0.173 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 的流量均匀分布到土槽坡面(坡度 10°)并向下流动。记录产流时间,自产流起浑水冲刷试验进行30 min。在土槽下端汇流口处,将每分钟的出流量按时间分别收集,即每个土槽收集的出流样品为30个。收集的样品经沉淀、过滤、分离后测定径流(量取体积)和泥沙(自然风干后称质量),其后从每个样品取250 mL 上清液用于测定其总氮、总磷。其中,水样中总氮采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度计法,总磷采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法^[25]。

1.3 数据分析

采用SPSS 17 统计分析软件对不同宽度下的径流、泥沙、总氮以及总磷进行重复测量方差分析,以评价不同宽度下模拟植被过滤带对径流、泥沙、总氮以及总磷拦截率的差异显著性。径流和随径流流出的泥沙、总氮以及总磷随时间的变化关系,采用OriginPro 8.6 绘图软件进行相关分析,并绘制图表。其中,使用拦截率评价模拟植被过滤带对径流、泥沙、总氮以及总磷的拦截效果,其计算公式为:径流拦截率=(入流量-出流径流量)/入流量 $\times 100\%$;泥沙拦截率=(入流浓度 \times 入流量-出流浓度 \times 出流径流量)/(入流浓度 \times 入流量) $\times 100\%$;总氮和总磷的拦截率计算公式同泥沙。

2 结果与分析

2.1 植被过滤带对径流的拦截效果

土壤初始含水率对植被过滤带拦截污染物的效果有一定影响,在土壤含水率较低时能拦截较多的地表径流^[26]。试验开始时,9个土槽的平均土壤含水率为 $(18.8\pm 4.1)\%$,约为其田间持水量的72%,表明土壤较为湿润,且3种处理的土壤初始含水率之间无显著差异($P>0.05$)。试验中各土槽出流均较为迅速,其初始

产流时间介于2.5~4.4 min,平均值为 (3.5 ± 0.9) min。

本实验3种处理的出流径流量随时间的变化如图1所示。图中显示,3种处理的出流径流量与时间变化呈显著的线性正相关关系。此外,对不同时间的径流量进行重复测量方差分析,结果显示不同处理间差异显著($F=116.34, P<0.01$),即3种不同宽度对径流量影响显著。

对不同时间的出流径流量进行比较,结果见表1。处理1中,第1、5、10、20、30 min 的径流拦截率分别为47.7%、42.9%、31.7%、17.7%、14.3%;处理2中,第1、5、10、20、30 min 的径流拦截率分别为65.1%、65.9%、49.1%、44.8%、27.3%;处理3中,第1、5、10、20、30 min 的径流拦截率分别为86.6%、76.7%、70.6%、57.3%、51.9%。3种处理的径流拦截率随时间变化情况见图1,图中显示,3种处理的径流拦截率与时间变化均呈显著的线性负相关关系。另外,植被过滤带宽度为1、2、3 m 时,对径流的拦截率平均达到了32%、51%、69%。由此可知,在一定条件下,随着宽度的增加,植被过滤带对径流的拦截率也相应提高。

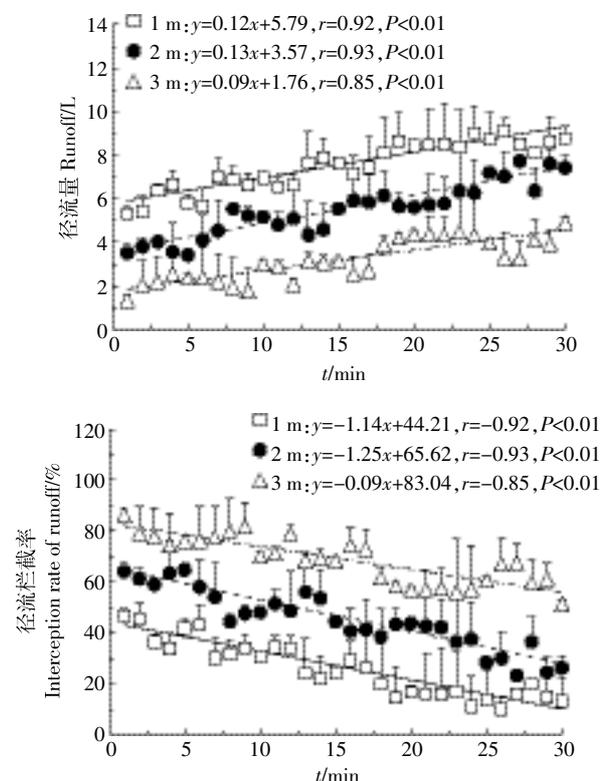


图1 3种宽度植被过滤带的径流量和径流拦截率随时间变化关系

Figure 1 Changes of runoff amounts and interception rates of three vegetative filter strips over time

表1 不同时间3种宽度植被过滤带的出流径流量比较(L)

Table 1 Runoff amounts(L) in three vegetative filter strips at different time

植被过滤带宽度 Width of VFS/m	第1 min 1st minute	第5 min 5th minute	第10 min 10th minute	第15 min 15th minute	第20 min 20th minute	第25 min 25th minute	第30 min 30th minute
1	5.43±0.20aA	5.92±0.23aA	7.09±0.03aA	7.75±0.17aA	8.55±0.19aA	8.84±1.09aA	8.90±0.43aA
2	3.62±0.26bA	3.54±0.13bB	5.29±0.09bB	5.66±0.06bB	5.73±0.09bB	7.32±0.10bB	7.55±0.40bB
3	1.38±0.24cB	2.41±0.17cB	3.05±0.18cC	3.23±0.07cC	4.43±0.12cC	4.03±0.18cC	4.99±0.11cC

注:同列数据不同小写字母表示不同处理在5%水平差异显著,不同大写字母表示在1%水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters and capital letters in the same column indicate significant differences between different widths at 5% and 1% probability level, respectively. The same as below.

2.2 植被过滤带对泥沙的拦截效果

出流泥沙浓度随时间的变化如图2所示。图2显示:处理1和处理2的出流泥沙浓度基本不随时间变化,即整个冲刷试验中泥沙浓度基本保持不变;但处理3的泥沙浓度随时间延长而逐渐降低,且二者呈显著的负相关关系($r_3=-0.59$)。尽管3种处理的出流泥沙浓度随时间延长或维持不变、或逐渐降低,但3种处理的出流泥沙量均随时间延长而逐渐增加,且与出流时间呈较好的线性正相关关系。另外,本研究对不同时间的出流泥沙量进行重复测量方差分析,结果显示不同处理间差异显著($F=207.16, P<0.01$),即3种不同宽度对泥沙量值影响显著。

对不同时间的出流泥沙量进行比较,结果见表2。处理1中,第1、5、10、20、30 min的泥沙拦截率分别为83.1%、81.3%、77.9%、76.8%、71.5%;处理2中,第1、5、10、20、30 min的泥沙拦截率分别为91.8%、90.3%、86.4%、88.4%、80.7%;处理3中,第1、5、10、20、30 min的泥沙拦截率分别为94.9%、92.3%、93.3%、91.1%、90.3%。3种处理的泥沙拦截率随时间变化情况见图2,图中显示,3种处理的泥沙拦截率与时间变化均呈显著的线性负相关关系。其原因可能有以下两方面:一方面,模拟过滤带密集的铁丝类似于植物茎秆,可以过滤去除径流中携带的大部分泥沙;另一方面,过滤带对泥沙的拦截主要是通过拦截径流实现的,试验中冲刷浑水刚进入土槽时,由于土壤具有较高的初始入渗速率,因此大量径流发生入渗、出流径流量较少,出流泥沙也相应较少;但随着入渗进行,土壤逐渐达到饱和,土壤入渗率显著降低,此时径流量会显著增加,进而泥沙量也随之显著增加,从而表现出泥沙拦截率随时间变化逐渐降低的趋势。另外,植被过滤带宽度为1、2、3 m时,过滤带对泥沙的拦截率平均达到了78%、88%、92%。由此可知,在一定条件下,随着宽度的增加,植被过滤带对泥沙的拦截率也相应提高。

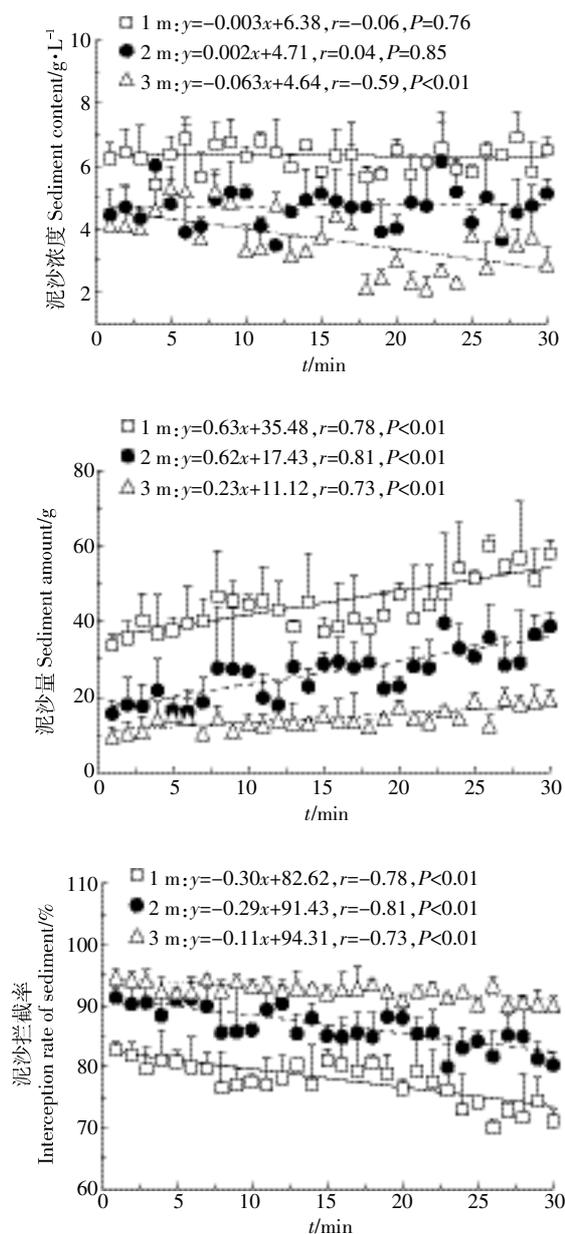


图2 3种宽度植被过滤带的泥沙浓度、泥沙量和泥沙拦截率随时间变化关系

Figure 2 Changes of contents, amounts, and interception percentages of sediment over time in three vegetative filter strips

表2 不同时间3种宽度植被过滤带的出流泥沙量比较(g)

Table 2 Sediment amounts(g) in outflow in three vegetative filter strips at different time

植被过滤带宽度 Width of VFS/m	第1 min 1st minute	第5 min 5th minute	第10 min 10th minute	第15 min 15th minute	第20 min 20th minute	第25 min 25th minute	第30 min 30th minute
1	34.4±2.3aA	38.3±2.9aA	45.3±1.6aA	38.0±3.2aA	47.7±2.4aA	52.1±1.2aA	58.6±2.8aA
2	16.4±2.7bAB	17.3±2.4bB	27.6±0.9bAB	29.5±2.3aAB	23.5±2.1bB	31.4±2.3bB	39.4±2.9bAB
3	9.9±2.1bB	15.3±1.6bB	13.3±2.3cB	15.4±2.0bB	17.8±1.4bB	19.4±1.9cB	19.5±2.5cB

2.3 植被过滤带对径流中总氮的拦截效果

总氮浓度和总氮量随时间的变化如图3所示。图中显示:3种处理的总氮出流浓度随着时间的延长基本保持不变;而总氮量则与时间的变化呈较好的线性正相关关系,即出流总氮量随时间延长而逐渐增加。

对不同时间随径流流出的总氮量进行重复测量方差分析,结果显示,不同处理间差异显著($F=115.09, P<0.01$),即3种不同宽度对总氮影响显著。

对不同时间的出流总氮量进行比较,结果见表3。处理1中,第1、5、10、20、30 min的总氮拦截率分别为73.0%、70.8%、65.1%、58.1%、56.3%;处理2中,第1、5、10、20、30 min的总氮拦截率分别为81.9%、82.8%、74.3%、71.8%、63.3%;处理3中,第1、5、10、20、30 min的总氮拦截率分别为92.9%、87.8%、84.8%、80.8%、76.1%。3种处理的总氮拦截率随时间变化情况见图3,图中显示,3种处理的总氮拦截率与时间变化均呈显著的线性负相关关系。另外,植被过滤带宽度为1、2、3 m时,对总氮的拦截率平均达到了65%、75%、84%。由此可知,在一定条件下,随着宽度的增加,植被过滤带对总氮的拦截率也相应提高。

2.4 植被过滤带对径流中总磷的拦截效果

图4为出流总磷浓度和总磷量随时间的变化关系。图中显示,出流总磷浓度与时间呈负相关关系,即出流总磷浓度随着时间的延长而逐渐降低,但变化不大。出流总磷量随着时间的变化中,处理1的出流总磷量随着时间的延长逐渐增加,且两者呈较好的线性正相关关系($r_1=0.68$);而处理2和处理3的出流总磷量随着时间的延长基本保持不变。即宽度为1 m时,出流总磷量随时间变化逐渐增加,且增幅明显;当宽度增加到一定程度时,出流总磷量随时间变化基本维持不变。对不同时间随径流流出的总磷进行重复测量方差分析,结果显示不同处理间差异显著($F=157.76, P<0.01$),即3种不同的宽度对总磷影响显著。

对不同时间的出水总磷量进行比较,结果见表4。处理1中,第1、5、10、20、30 min的总磷拦截率分别为90.9%、76.7%、83.6%、73.7%、77.4%;处理2中,

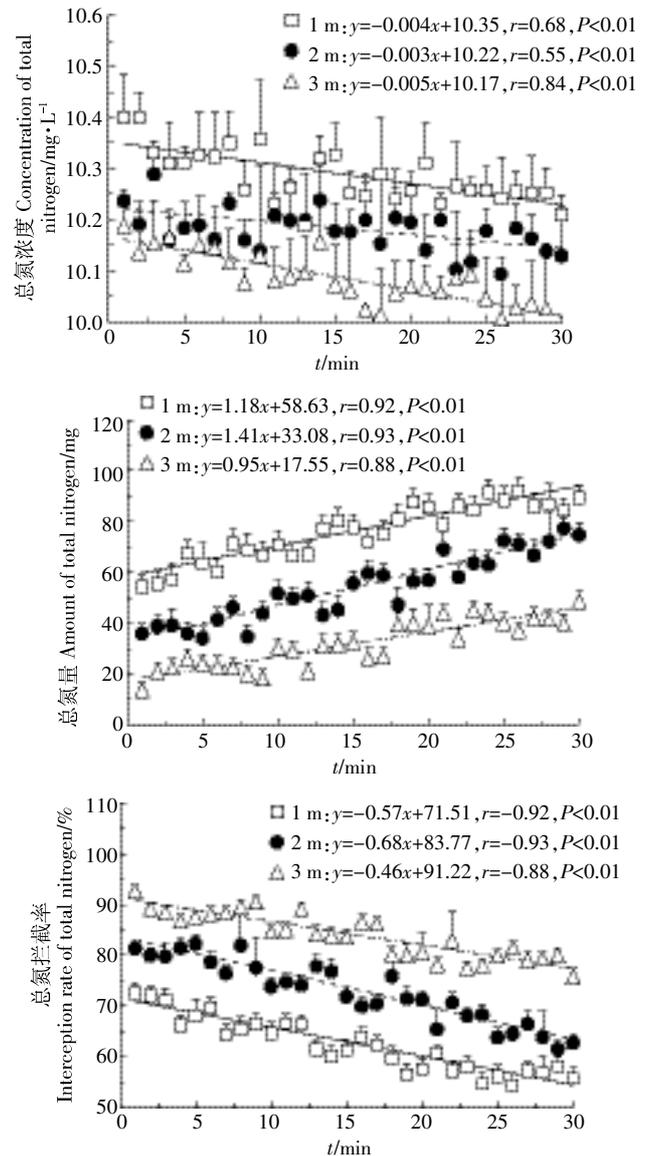


图3 3种宽度植被过滤带的总氮浓度、总氮量和总氮拦截率随时间变化

Figure 3 Changes of concentrations, amounts, and interception percentages of total nitrogen in three vegetative filter strips over time

第1、5、10、20、30 min的总磷拦截率分别为96.5%、93.5%、94.2%、92.0%、91.7%;处理3中,第1、5、10、20、30 min的总磷拦截率分别为97.3%、95.8%、93.3%、95.5%、95.6%。3种处理的总磷拦截率随时间

表3 不同时间3种宽度植被过滤带的出流总氮量比较(mg)

Table 3 Total nitrogen in outflow(mg) in three vegetative filter strips at different time

植被过滤带宽度 Width of VFS/m	第1 min 1st minute	第5 min 5th minute	第10 min 10th minute	第15 min 15th minute	第20 min 20th minute	第25 min 25th minute	第30 min 30th minute
1	55.46±3.99aA	60.11±6.71aA	71.95±4.49aA	78.67±4.36aA	86.59±4.12aA	89.46±4.24aA	90.31±4.00aA
2	37.03±3.06bB	35.18±3.89bB	52.76±3.86bB	56.75±3.85bB	58.04±3.40bB	73.53±4.02bB	75.81±3.67bA
3	14.15±3.05cC	24.69±3.28cB	30.91±3.02cC	33.08±3.57cC	39.24±8.33cC	40.80±3.32cC	49.15±3.60cB

变化情况见图4,图中显示,处理1的总磷拦截率随着时间的延长而逐渐降低,且两者呈较好的线性负相关关系($r_1=-0.68$);而处理2和处理3的总磷拦截率随着时间的延长而逐渐减低,但降幅较小。另外,植被过滤带宽度为1、2、3 m时,过滤带对总磷的拦截率平均达到了80%、93%、95%。由此可知,在一定条件下,随着过滤带宽度的增加,植被过滤带对总磷的拦截率也相应提高。

2.5 相关性分析

相关性分析结果如表5所示。表中可见,3种处理下的泥沙量与径流量之间有良好的相关性,其相关系数($r_1=0.69, r_2=0.84, r_3=0.63$)达到了极显著水平。与此相似,总氮量和总磷量与径流量同样有显著的相关关系,分别为:总氮 $r_1=0.98, r_2=0.89, r_3=0.95$;总磷 $r_1=0.62, r_2=0.47, r_3=0.41$ 。以上结果表明,泥沙量、总氮量以及总磷量均与径流量有显著的相关关系,即径流量在一定程度上决定了出流的泥沙量、总氮量以及总磷量。

3 讨论

关于宽度对植被过滤带拦截污染物效果影响的研究,目前还存在较大差异。苏天扬等^[27]研究表明,12 m宽的披碱草(*Elymus dahuricus* Turcz.)过滤带对地表径流中泥沙、总氮以及总磷的拦截率为73%、21%、33%;吉国强等^[28]研究表明,12 m宽的高羊茅(*Festuca arundinacea*)过滤带对地表径流中泥沙的拦截率为84%;Lee等^[29]研究表明,16.3 m宽的柳枝稷(*Panicum virgatum*)/林木复合过滤带对地表径流中泥沙、总氮以及总磷的拦截率为97%、94%、91%。本研究发现,当过滤带宽度分别为1、2、3 m时,模拟植被过滤带对径流的拦截率分别为32%、51%、69%,对泥沙的拦截率分别为78%、88%、92%,对总氮的拦截率分别为65%、75%、84%,对总磷的拦截率分别为80%、93%、95%。这与以上研究结果有一定差异,但与王建国等^[20]的研究结果差异不大。推其原因,这可能是由影响植被过滤带功能发挥的主要因素不同引起的。就本模拟试验来说,可能主要是由于植被过滤带的坡度

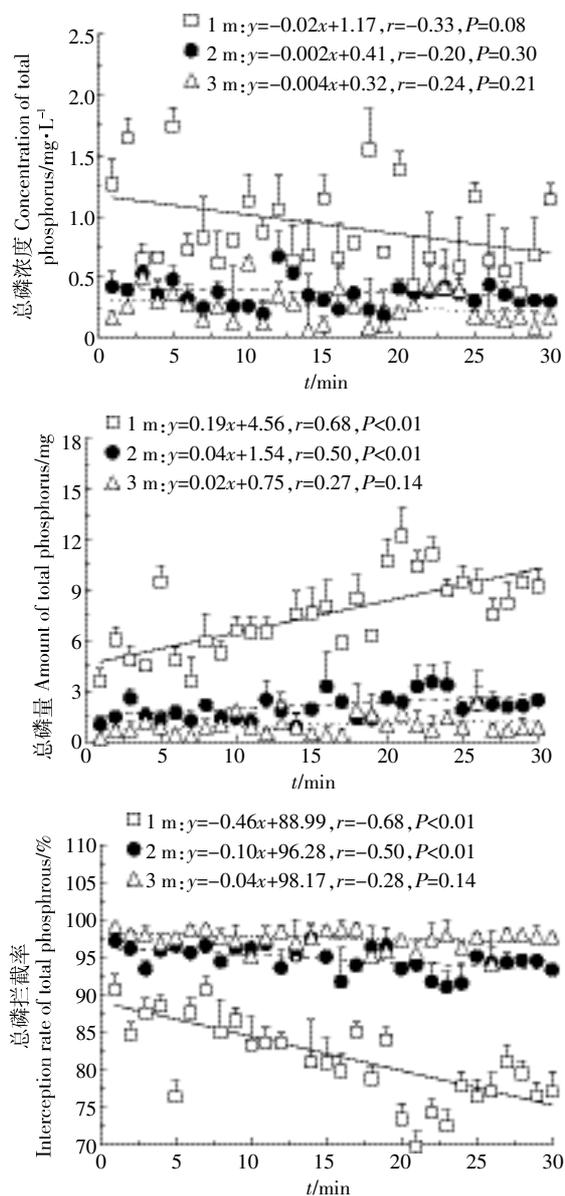


图4 3种宽度植被过滤带的总磷浓度、总磷量和总磷拦截率随时间变化

Figure 4 Changes of concentrations, amounts, and interception percentages of total phosphorus in outflow in three vegetative filter strips over time

和宽度因素以及试验过程中采用锈蚀铁丝代替草本植物茎秆引起的。本试验设置坡度为 10° ,坡面相对较陡,因此冲刷过程中径流与土壤接触时间较短,从

表4 不同时间3种宽度植被过滤带的出流总磷量比较(mg)

Table 4 Total phosphorus in outflow(mg) in three vegetative filter strips at different times

植被过滤带宽度 Width of VFS/m	第1 min 1st minute	第5 min 5th minute	第10 min 10th minute	第15 min 15th minute	第20 min 20th minute	第25 min 25th minute	第30 min 30th minute
1	3.74±0.62aA	9.67±0.78aA	6.79±0.66aA	7.81±1.27aA	10.90±1.13aA	9.67±0.82aA	9.36±0.97aA
2	1.42±0.42bB	1.84±0.30bB	1.57±0.09bB	2.06±0.20bB	2.50±0.26bB	2.38±0.28bB	2.62±0.21bB
3	0.30±0.06cC	0.92±0.03cC	1.95±0.03cB	0.53±0.14cC	1.04±0.08cB	0.85±0.10bB	0.89±0.01bB

表5 径流量、泥沙量、总氮量以及总磷量的相关性分析

Table 5 Correlationship between runoff, sediment, total nitrogen and total phosphorus

植被过滤带宽度 Width of VFS/m	因素 Factors	径流量 Runoff	泥沙量 Amount of sediment	总氮量 Amount of total nitrogen	总磷量 Amount of total phosphorus
1	径流量 Runoff	1.00	—	—	—
	泥沙量 Amount of sediment	0.69**	1.00	—	—
	总氮量 Amount of total nitrogen	0.98**	0.72*	1.00	—
	总磷量 Amount of total phosphorus	0.62**	0.46*	0.61**	1.00
2	径流量 Runoff	1.00	—	—	—
	泥沙量 Amount of sediment	0.84**	1.00	—	—
	总氮量 Amount of total nitrogen	0.89**	0.75**	1.00	—
	总磷量 Amount of total phosphorus	0.47**	0.53**	0.49**	1.00
3	径流量 Runoff	1.00	—	—	—
	泥沙量 Amount of sediment	0.63**	1.00	—	—
	总氮量 Amount of total nitrogen	0.95**	0.69**	1.00	—
	总磷量 Amount of total phosphorus	0.41*	0.37*	0.42*	1.00

注:* 相关系数在5%水平显著;** 相关系数在1%水平显著。相关系数临界值 $r_{0.05}=0.35$, $r_{0.01}=0.45$, $n=30$ 。

Note: * and ** indicate that correlation coefficients are significant at 5% and 1% probability level, respectively. $n=30$.

而导致入渗减少、产流加快。在坡度较小的情况下,冲刷水流与土壤和植被过滤带接触时间更长,因此入渗量更多、产流量更少、污染物拦截率更高,即在缓坡条件下植被过滤带拦截污染物的效果更好。本实验中植被过滤带的宽度设置为1、2、3 m,这与王建国等^[20]采用的0.5、1、1.5、2 m的宽度设置近似,而远小于苏天扬等^[27]、吉国强等^[28]、Lee等^[29]研究中12 m和16.3 m的宽度设置。由此可见,植被过滤带拦截污染物的效果不同可能是由于其宽度不同引起的,本研究结果也充分说明了这点。另外,多数相关研究表明,草本植被过滤带的地上部分是其截留径流和泥沙的关键,即植物茎秆密度直接关系到其拦截径流和泥沙能力^[10-11,17]。故本试验采用锈蚀铁丝代替草本植物,模拟其在植被过滤带中的分布,侧重考虑其物理阻滞和机械过滤作用,旨在提高实验数据的可控性,从而更好地揭示植被过滤带的阻滞效应。此外,本研究还发现植被过滤带拦截泥沙、总氮以及总磷的能力随过滤带宽度的增加而相应增强,其拦截率也相应提高。其中,3 m宽的植被过滤带对径流、泥沙、总氮以及总磷的拦截率最高分别可达86%、94%、92%、97%。

对于植被过滤带拦截污染物的机理,通常对径流而言,植被过滤带的存在降低了径流流速,改变了植被带内土壤孔隙状况以及增加了入渗率,从而实现降低径流流失的效果。对泥沙而言,植被带密集的铁丝(铁丝代替草本植物茎秆)类似于植物茎秆,可以过滤去除径流中携带的大部分泥沙,同时减缓径流流速,从而降低径流对泥沙的携带能力。植被过滤带对氮、磷流失的阻控主要与降低地表径流和泥沙相关,具体为以下两方面:(1)植被过滤带的存在,可以滞缓径流、截留泥沙,从而降低径流搬运土壤颗粒的能力,致使一部分颗粒态氮、磷被截留;(2)径流中可溶性氮、磷则随径流入渗到深层土壤中,从而降低了径流对可溶性氮、磷的转运能力。

4 结论

本研究通过浑水冲刷试验,定量研究了不同宽度模拟植被过滤带对径流、泥沙、总氮以及总磷的拦截效果,得出如下结论。(1)当宽度分别为1、2、3 m时,模拟植被过滤带对径流的拦截率分别为32%、51%、69%;对泥沙的拦截率分别为78%、88%、92%;对总氮

的拦截率分别为 65%、75%、84%;对总磷的拦截率分别为 80%、93%、95%。(2)在进水流量和流速一定的条件下,植被过滤带拦截泥沙、总氮以及总磷的能力随宽度的增加而相应增强,表明植被过滤带的宽度是影响其拦截去除污染物效果的关键因素。(3)3 m 宽的植被过滤带对径流、泥沙、总氮以及总磷的拦截率最高分别可达 86%、94%、92%、97%,表明在一定条件下,3 m 宽的植被过滤带即可拦截去除绝大部分污染物。

本研究证实,茎秆密集的草本植被过滤带能有效拦截径流、泥沙、总氮以及总磷,对农田水土流失和农业面源污染具有较好防治效果。

参考文献:

- [1] 张玉斌,郑粉莉,武敏.土壤侵蚀引起的农业非点源污染研究进展[J].水科学进展,2007,18(1):123-125.
ZHANG Yu-bin, ZHENG Fen-li, WU Min. Research progresses in agricultural non-point source pollution caused by soil erosion[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1):123-125.
- [2] 喻定芳,王庆海,肖波,等.北京地区等高草篱防治坡耕地水土及氮磷流失效果研究[J].水土保持学报,2010,24(6):11-12.
YU Ding-fang, WANG Qing-hai, XIAO Bo, et al. Effects of contour grass hedges on soil, water and N, P nutrients loss on sloping croplands in Beijing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6):11-12.
- [3] 李霞,陶梅,肖波,等.免耕和草篱措施对径流中典型农业面源污染物的去除效果[J].水土保持学报,2011,25(6):221-222.
LI Xia, TAO Mei, XIAO Bo, et al. Effects of grass hedges and no-tillage practice on the removing of typical agricultural non-point source pollutants from runoff[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6):221-222.
- [4] 程波,张泽,陈凌,等.太湖水体富营养化与流域农业面源污染的控制[J].农业环境科学学报,2005,24(增刊):122-124.
CHENG Bo, ZHANG Ze, CHEN Ling, et al. Eutrophication of Taihu lake and pollution from agricultural non-point sources in Taihu Lake basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl):122-124.
- [5] 张迎春,彭补拙.河岸带研究及其退化生态系统的恢复与重建[J].生态学报,2003,23(1):56-73.
ZHANG Jian-chun, PENG Bu-zhuo. Study on riparian zone and the restoration and rebuilding of its degraded ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1):56-73.
- [6] Dabney S M, Moore M T, Locke M A. Integrated management of in-field, edge-of-field, and after-field buffers[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, 42:15-24.
- [7] 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]. *Transaction of the CSAE*, 2010, 26(7):81-86.
- [8] 荣冰凌,孙宇飞,邓红兵,等.流域水环境管理保护线与控制线及其规划方法[J].生态学报,2009,29(2):924-930.
RONG Bing-ling, SUN Yu-fei, DENG Hong-bing, et al. On connotation and planning method of protection line and control line for water environmental management under watershed scale[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2):924-930.
- [9] 饶良懿,崔建国.河岸植被缓冲带生态水文功能研究进展[J].中国水土保持科学,2008,6(4):121-128.
RAO Liang-yi, CUI Jian-guo. Research advances on the eco-hydrological functions of riparian buffer[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(4):121-128.
- [10] Sabbagh G J, Fox G A, Kamanzi A, et al. Effectiveness of vegetative filter strips in reducing pesticide loading: quantifying pesticide trapping efficiency[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(2):762-771.
- [11] 聂军,廖育林,谢坚,等.自然降雨条件下香根草生物篱对菜地土壤地表径流和氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2009,23(1):13-18.
NIE Jun, LIAO Yu-lin, XIE Jian, et al. Impacts of biological hedgerow of vetiver on surface runoff and nitrogen loss in vegetable field under natural rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1):13-18.
- [12] 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.
- [13] 邓娜,李怀恩,史冬庆,等.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, et al. Influence of inflow rate of runoff on purification effectiveness of vegetative filter strips[J]. *Transaction of the CSAE*, 2012, 28(4):124-129.
- [14] 邓红兵,王青春,王庆礼,等.河岸植被缓冲带与河岸带管理[J].应用生态学报,2001,12(6):951-954.
DENG Hong-bing, WANG Qing-chun, WANG Qing-li, et al. On riparian forest buffers and riparian management[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6):951-954.
- [15] 顾笑迎,黄沈发,刘宝兴,等.东风港滨岸缓冲带对水生生物群落结构的影响[J].生态科学,2006,25(6):521-525.
GU Xiao-ying, HUANG Shen-fa, LIU Bao-xing, et al. The effect of riparian buffer zone on the aquatic community structure in Dongfenggang[J]. *Ecologic Science*, 2006, 25(6):521-525.
- [16] 黄沈发,吴建强,唐浩,等.滨岸缓冲带对面源污染物的净化效果研究[J].水科学进展,2008,19(5):722-728.
HUANG Shen-fa, WU Jian-qiang, TANG Hao, et al. Study of clarification for riparian-buffer to non-point pollution[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(5):722-728.
- [17] 丁光敏,林福兴,施悦忠,等.香根草草篱带促进侵蚀劣地生态自我修复初探[J].水土保持研究,2003,10(2):116-118.
DING Guang-min, LIN Fu-xing, SHI Yue-zhong, et al. Study on eroded land self-rehabilitation of ecologic system by the initial help of ve-

- tiver grass hedgerow[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(2):116-118.
- [18] 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 strips[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9):2074-2080.
- [19] 钱进, 王超, 王沛芳, 等. 河湖滨岸缓冲带净污机理及适宜宽度研究进展[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1):139-142.
- QIAN Jin, WANG Chao, WANG Pei-fang, et al. Research progresses in purification mechanism and fitting width of riparian buffer strips[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1):139-142.
- [20] 李伟, 王建国, 王岩, 等. 用于防控菜地排水中氮磷污染的缓冲带技术初探[J]. *土壤*, 2011, 43(4):565-569.
- LI Wei, WANG Jian-guo, WANG Yan, et al. Pre-test of buffer zones for preventing nitrogen and phosphorus pollution from vegetable drainage[J]. *Soils*, 2011, 43(4):565-569.
- [21] 李世锋. 关于河岸缓冲带拦截泥沙和养分效果的研究[J]. *水土保持通报*, 2003(6):41-43.
- LI Shi-feng. Study on the effects of the interception for nutrients and sediment in riparian buffer[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2003(6):41-43.
- [22] Deletic A. Modelling of water and sediment transport over grassed areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 248:168-182.
- [23] Deletic A. Sediment transport in urban runoff over grassed areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 301:108-122.
- [24] 肖波, 萨仁娜, 陶梅, 等. 草本植被过滤带对径流中泥沙和除草剂的去除效果[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(12):136-142.
- XIAO Bo, SA Ren-na, TAO Mei, et al. Removing effects of grass filter strips on sediment and herbicide from runoff in simulated experiment[J]. *Transaction of the CSAE*, 2013, 29(12):136-142.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000:125-135.
- LU Ru-kun. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:125-135.
- [26] 孙辉, 唐亚, 陈克明, 等. 等高固氮植物篱控制坡耕地地表径流的效果[J]. *水土保持通报*, 2001, 21(2):48-51.
- SUN Hui, TANG Ya, CHEN Ke-ming, et al. Effects of contour hedgerow intercropping on surface flow control of sloping cropland[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(2):48-51.
- [27] 苏天扬, 李林英, 姚延涛. 草灌乔结合的河岸缓冲带对面源污染物的净化效果研究[J]. *天津农业科学*, 2010, 16(6):82-84.
- SU Tian-yang, LI Lin-ying, YAO Yan-tao. Effects of different plant collocation method cushion belt on farmland runoff purification[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2010, 16(6):82-84.
- [28] 吉国强, 韩伟宏, 赵国斌. 不同缓冲带植物在滨岸缓冲带中的作用[J]. *山西农业科学*, 2011, 39(8):850-852.
- JI Guo-qiang, HAN Wei-hong, ZHAO Guo-bin. Effects of different plants in the riparian buffer zone[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2011, 39(8):850-852.
- [29] Lee K H, Isenhardt T M, Schultz R C. Sediment and nutrient removal in an established multi-species riparian buffer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 58(1):1-8.