

不同入流条件下草本缓冲带对污染物削减作用

付婧^{1,2}, 王云琦^{1,2}, 王玉杰^{1,2}, 王晨沣^{1,2}, 王淑慧^{1,2}, 王震^{1,2}

(1.北京林业大学水土保持学院,重庆三峡库区森林生态系统教育部野外科学观测研究站,北京 100083;

2.北京林业大学水土保持学院,重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站,北京 100083)

摘要:草本缓冲带能够有效拦截坡面径流中泥沙、总氮、总磷等污染物,是农业面源污染防治的主要措施之一。通过人工配水模拟地表径流,研究不同径流量对草本缓冲带截污能力的影响。结果表明:草本缓冲带对污染物都有一定的削减作用,草本缓冲带对泥沙削减效果最好,对总磷削减效果最差,白三叶对污染物的削减能力总体较黑麦草强。径流量对草本缓冲带总氮、总磷削减率影响较大,对泥沙削减率影响较小;当流量从 0.08 L/s 增加至 0.24 L/s 时,草本缓冲带对总氮、总磷削减率减少至 9% 和 6%,而泥沙削减率为 34%。随着放水冲刷时间增加,出流总氮、总磷、泥沙浓度不断降低并逐渐达到稳定,流量增大至 0.24 L/s 时,总氮、总磷浓度范围为 11.5~24.7, 1.6~2.3 mg/L,泥沙浓度在不同流量下无明显差异。草本缓冲带对总氮、总磷去除作用受流量影响较大,在大流量时缓冲带对总氮、总磷基本无去除作用,但缓冲带对泥沙去除作用受流量影响较小。

关键词:入流条件;农业面源污染物;草本缓冲带;削减率

中图分类号:X173

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)03-0129-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.020

Effect of Herbal Buffer on Pollutant Reduction Under Different Inflow Conditions

FU Jing^{1,2}, WANG Yunqi^{1,2}, WANG Yujie^{1,2}, WANG Chenfeng^{1,2}, WANG Shuhui^{1,2}, WANG Zhen^{1,2}

(1.Field Scientific Observation and Research Station of Forest Ecosystem in Chongqing Three Gorges

Reservoir Area, Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry

University, Beijing 100083;2.Jinyun National Positioning Observation and Research Station of Forest Ecosystem in

Three Gorges Reservoir Area, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Herbal buffer zone can effectively intercept pollutants such as sediment, total nitrogen, total phosphorus and other pollutants on slope, which is one of the main measures to prevent and control agricultural non-point source pollution. The surface runoff was simulated by artificial water distribution, and the effects of different runoff on interception capacity of herbaceous buffer zone were studied. The results showed that the herbal buffer had a certain reduction effect on pollutants. The herbal buffer had the best effect on sediment reduction and the worst effect on total phosphorus reduction. White clover had a stronger ability to reduce pollutants than ryegrass. Runoff had a greater impact on the reduction rate of total nitrogen and total phosphorus in herbal buffer zone, but a little impact on sediment reduction rate. When the flow rate increased from 0.08 L/s to 0.24 L/s, the reduction rate of total nitrogen and total phosphorus in herbal buffer zone decreased to 9% and 6%, while the sediment reduction rate was 34%. With the increasing of discharge scouring time, the concentration of total nitrogen, total phosphorus and sediment in the outflow decreased and gradually reached a stable level. When the flow rate increased to 0.24 L/s, the concentration range of total nitrogen and total phosphorus were 11.5~24.7 and 1.6~2.3 mg/L, respectively. There was no significant difference in sediment concentration under different flow rates. In this study, the removal of total nitrogen and total phosphorus by herbal buffer zone was greatly affected by the flow rate, and the buffer zone had no removal effect on total nitrogen and total phosphorus at large flow rate, but the removal of sediment by buffer zone was less affected by the flow.

Keywords: inflow conditions; agricultural non-point source pollutants; herb filter strips; reduction rate

收稿日期:2019-10-08

资助项目:国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFC0505303)

第一作者:付婧(1995—),女,硕士,主要从事农业面源污染研究。E-mail:fujing0413@qq.com

通信作者:王云琦(1979—),女,教授,主要从事森林水文、土壤侵蚀研究。E-mail:wangyunqi@bjfu.edu.cn

三峡库区是长江流域重要的水源保护区,但近年来,三峡库区日益突出的农业面源污染问题对库区水环境安全产生了威胁^[1]。农业面源污染是泥沙及其氮、磷等营养物质及其他有机或无机污染物随径流进入水体产生的水污染现象^[2],耕地中过量施用的化肥和农药是主要的污染源^[3]。研究证明植被缓冲带能够有效拦蓄地表径流、拦截去除污染物,减少污染物入河入库,从而提高水质。

植被缓冲带通过增加地表粗糙度改变微地形,从而促进径流下渗,减少水流挟沙能力,最后通过植被吸收转化从而实现其对污染物的拦截作用。植被缓冲带最早被美国农业部(USDA)推荐用于面源污染过程拦截的一项有效措施,之后被加拿大列入水土管理措施中,之后欧洲许多国家也开展了相关研究。缓冲带被用作水环境保护的措施,国内缓冲带研究起步较晚,相关研究^[4]主要关注缓冲带结构及功能方面。植被缓冲带发挥截污能力受到多种因素^[5]如:坡度、植被类型、缓冲带宽度、入流流量等的影响。已有研究^[6]表明,草本缓冲带具有密度大、地表覆盖高对径流阻滞作用明显等特点,所以相对灌草、乔木为主的缓冲带对污染物的削减效果更好;李怀恩等^[7]对缓冲带宽度进行研究,结果表明 10 m 缓冲带已经对氮、磷达到较好拦截;而胡威等^[8]认为 13.4 m(削减率 70%)缓冲带才是最佳宽度。

植被缓冲带通过拦截坡面径流发挥截污能力,流量是影响植被缓冲带净化效果的重要因素,在缓冲带研究模型中,流量被作为 VFSSMOD 模型中一项重要的初始影响条件输入^[9],但目前缓冲带截污能力影响因素的研究多集中于缓冲带宽度、坡度、植被配置、植被种类等,针对流量对缓冲带截污能力影响相关研究较少。对于长江流域地区,年降雨量较大,由暴雨径流产生的非点源污染备受关注,所以研究流量对植被过滤带净化效果的影响尤为重要。

本文研究区为长江中上游三峡库区重庆市缙云山自然保护区(106°22'E, 29°45'N),地貌主要为丘陵、山地,属于亚热带季风湿润气候,主要的土壤类型为黄壤。研究选取三峡库区常见的草本植物黑麦草(*Lolium perenne*)和白三叶(*Trifolium repens*),通过模拟径流冲刷,研究缓冲带对面源污染防治效果,为三峡库区缓冲带构建防治农业面源污染物提供一定的理论依据和基础。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

试验于 2018 年 5—9 月在北京市鹫峰北京林业大学人工模拟降雨大厅进行。试验装置包括土槽、冲刷装置和出流收集 3 个部分(图 1),其中土槽规格

(长×宽×高)为 5 m×2 m×0.6 m(土槽中间分隔为 2 个各 1 m 宽的细槽),设计坡度为 15°。土槽末端设有出水口(距水槽底部 0.5 m),底部有小孔。冲刷装置由浑水配置桶、水泵、流量阀、流量计及紊流槽等部分组成,浑水配置桶中有搅拌装置,紊流槽规格(长×宽×高)为 2 m×0.3 m×0.3 m。出流装置为 60 L 小桶。

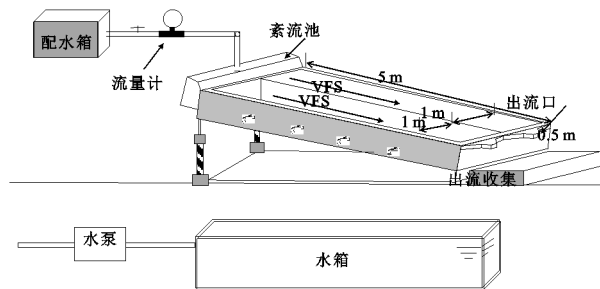


图 1 试验装置示意

1.1.1 试验土壤 试验土样为黄壤,取自缙云山耕地表层 0—20 cm,土壤颗粒组成^[10]>50 μm 占 13.7%, 2~50 μm 占 54.2%, <2 μm 的占 32%;其液限为 33.9%,塑限为 23.8%;土壤有机质含量为 31.8 g/kg,全氮含量为 0.58~1.57 g/kg,全磷含量为 0.11~0.23 g/kg,全钾含量为 0.01~0.37 g/kg,土壤容重为 1.02~1.22 g/cm³。

1.1.2 试验草本 供试植被是三峡库区常见的多年生冷季型草本黑麦草和白三叶。黑麦草是禾本科多年生植物,多作为牧草被广泛种植,在重庆地区广泛存在。白三叶为豆科草本,能够耐热、耐旱、耐寒,耐贫瘠,适应性较强,喜温暖气候,适合于我国大部分地区。

试验前通过种子撒播方式均匀播撒在土槽中,播种量参照草坪草正常播种量^[12],播种后将土槽放置于院子中,为草种正常生长提供光照。当黑麦草草皮进入分蘖期,地上部分高为 10 cm 时,黑麦草基本覆盖水槽,开始黑麦草缓冲带冲刷试验;当白三叶草皮长出匍匐茎,形成草层时,开始白三叶缓冲带冲刷试验。

1.2 试验设计

根据重庆缙云山径流小区监测降雨径流数据,对应中雨、大雨和暴雨 3 种降雨强度分别设计小(0.08 L/s)、中(0.16 L/s)、大(0.24 L/s) 3 种流量,每种流量重复 3 次,共 9 个处理。参考袁培栋等^[13]研究确定泥沙浓度为 3.5 g/L,参考姜世伟^[14]研究确定总氮浓度为 20 mg/L,总磷浓度为 4 mg/L,采用尿素、过磷酸钙和土壤颗粒人工配制污水。

在试验开始前,测定土槽中土壤含水量(表 1)。在冲刷过程中,记录初始产流时间(表 1),产流后 10 min 内每 2 min 取 1 次样,产流 10 min 后每 5 min 取 1 次样,对不同时段产生的径流泥沙量进行测量记录。试验结束后,取水样上清液,采用全自动化学分析仪测定水样中总氮、总磷浓度。

表 1 土壤含水量及产流时间

流量/ (L · s ⁻¹)	含水量/ %	产流时间/ min
0.08	35.70±1.5	2.16±0.12
0.16	36.55±2.0	1.52±0.40
0.24	38.90±0.7	0.63±0.63

注:表中数据为平均值±标准差。

1.3 数据分析

计算泥沙浓度公式为:

C=(A-B)×10⁶/V

(1)

式中:C 为水中污染物的浓度;A 为悬浮物+滤膜+称量瓶重量(g);B 为滤膜+称量瓶重量(g);V 为水样的体积(mL)。

计算污染物削减率公式为:

p=(p₁-p₂)/p₁×100%

(2)

式中:p 为削减率;p₁为污染物进水浓度(mg/L);p₂为污染物出水浓度(mg/L);

2 结果与分析

2.1 不同草本缓冲带对污染物削减效果

由图 2 可知,白三叶和黑麦草缓冲带对污染物都具有一定的削减能力,且都对泥沙削减效果最好,对总磷削减效果最差。白三叶和黑麦草对泥沙、总氮、总磷的削减率分别为 65%和 57%,49%和 39%,7%和 2%,白三叶对污染物削减效果较强烈于黑麦草。分析可知,白三叶的匍匐茎对地表起到了保护、增加粗糙度效果,能够有效增强对泥沙的削减效果,其根瘤的固氮作用能够加强氮的去除作用,但对总磷的削减效果不明显。

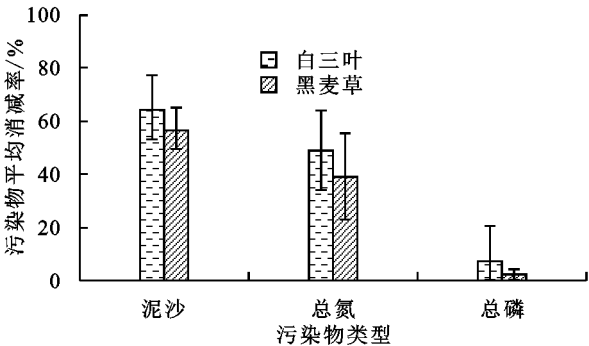


图 2 不同草本缓冲带对污染物的削减效果

2.2 不同流量下草本缓冲带对泥沙的削减效果

2.2.1 不同流量下草本缓冲带对泥沙削减率影响

由图 3 可知,在 0.08,0.16,0.24 L/s 流量下,泥沙削减率分别为 49%,56%,34%,随着流量的增加,缓冲带对泥沙削减率减小。本研究中泥沙削减率随流量增大有缓慢减少,但总体来说流量增大对缓冲带拦截泥沙能力影响较小。苗青等^[15]研究认为,0.9 m宽缓

冲带就能对泥沙等污染物有较好的去除效果;Choi 等^[16]研究认为,4.6 m 缓冲带对泥沙削减率为 53%~86%,已经达到较高的削减率。本研究中使用缓冲带为 5 m 草本缓冲带,流量增加对泥沙削减率有影响,但这种影响被缓冲带宽度影响弱化,使流量对泥沙削减率影响降低。

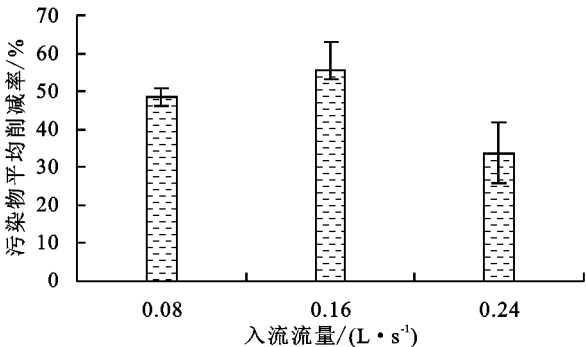


图 3 不同流量对缓冲带泥沙削减率影响

2.2.2 不同流量下草本缓冲带中泥沙浓度变化 由图 4 可知,在不同流量下通过缓冲带后泥沙浓度随时间的增加先降低后不再发生明显变化,缓冲带对泥沙的削减率与时间呈对数相关。径流中泥沙浓度在出流后 5 min 内迅速降低,后降低幅度减小,并在 15 min 后不再发生明显变化;当流量为 0.08,0.16,0.24 L/s 时,径流中泥沙浓度范围分别为 0.6~2.7,0.4~1.9,0.9~2.2 g/L,随着流量的增加,泥沙浓度范围增大,但整体差别不明显。

不同流量下缓冲带对径流中泥沙的削减率随时间呈对数相关,随时间增加,缓冲带对泥沙的削减率逐渐增加并趋于稳定(图 4b)。缓冲带对泥沙削减率在 0.08,0.16,0.24 L/s 流量下时分别达到 53%~86%,27%~81%,17%~61%,缓冲带削减率在出流后 5 min 内迅速增加,5 min 后削减率小幅增加并趋于稳定。

分析可知,缓冲带中草本植物的存在增加了地表粗糙度,对径流发生阻滞作用,所以能够降低径流流速,促进径流下渗,同时减少地表土壤侵蚀增加泥沙沉降,即缓冲带的拦截作用有效减少泥沙流失。本研究中,缓冲带中泥沙浓度先随时间延长先降低后保持较为稳定的范围内,分析可能是产流初期(产流后 5 min 内)缓冲带对泥沙拦截能力较强,泥沙浓度快速下降,削减率增加,随着产流时间增加,缓冲带拦截作用达到最大,缓冲带中泥沙大颗粒被拦截,剩余粒径较小的泥沙未被缓冲带拦截,泥沙浓度不再发生较大改变,缓冲带削减率维持于较为稳定范围。

2.3 不同流量下草本缓冲带对总氮的削减效果

2.3.1 不同流量下草本缓冲带对总氮削减率影响

不同流量下草本缓冲带对总氮削减率影响见图 5。在 0.08,0.16,0.24 L/s 流量下,总氮削减率分别为

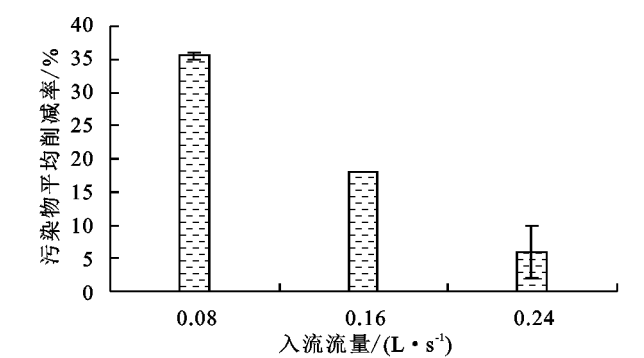
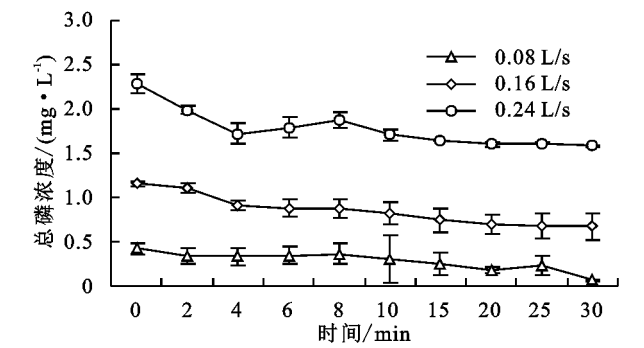


图 7 不同流量对缓冲带总磷削减率影响

2.4.2 不同流量下草本缓冲带中总磷浓度变化 由图 8 可知,在不同流量下通过缓冲带后总磷浓度随时间的增加在缓慢降低,缓冲带对总磷的削减率与时间呈对数相关。在不同流量下,缓冲带中总磷浓度整体随时间呈现缓慢下降趋势,当流量为 0.08,0.16,0.24 L/s 时,径流中总磷浓度范围分别为 0.1~0.4,0.7~1.2,1.6~



2.3 mg/L,随着流量的增加,缓冲带径流中总磷浓度范围增大,流量对总磷浓度影响较大,但是在同一流量时,总磷浓度变化不明显。

不同流量下缓冲带对径流中总磷的削减率随时间呈对数相关,随时间增加,缓冲带对总磷的削减率缓慢增加,但整体削减率较稳定。在 0.08,0.16,0.24 L/s 流量下缓冲带削减率分别达到 13%~84%,4%~42%,13%~31%,流量越大,缓冲带对总磷的削减率越低。

草本缓冲带对总磷有一定的拦截作用,但是缓冲带对总磷的拦截作用受流量影响较大,在同一入流条件下,缓冲带中总磷浓度随时间缓慢降低,但降低幅度较小;在不同流量下,总磷浓度整体变化较大,在 0.08,0.16,0.24 L/s 流量条件下总磷浓度范围不断增高。缓冲带对总磷削减率整体较总氮低,出流 5 min 后,总磷削减率增加缓慢至不再发生明显改变。

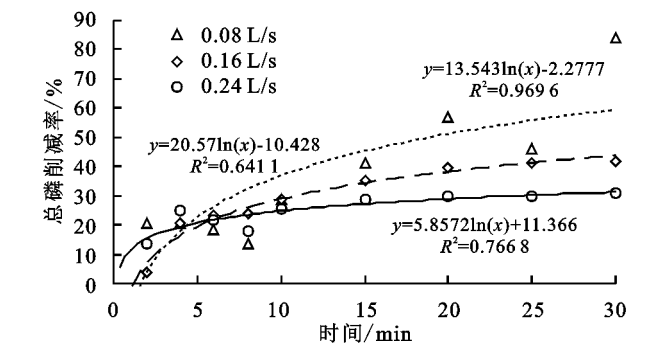


图 8 不同流量下总磷随时间变化

3 讨论

本研究通过模拟径流试验,对白三叶和黑麦草缓冲带进行了冲刷试验,分析不同径流量下草本缓冲带对泥沙、氮磷等污染物削减效果,2 种草本缓冲带截污能力差异。研究结果表明,草本缓冲带能够有效拦截地表径流中的泥沙及氮磷污染物,但是其截污能力受植物类型和径流量影响。

白三叶具匍匐茎能够增加地表覆盖度和粗糙度,降低径流对地表的冲刷,在减少地表水土流失的同时促进径流下渗,对比黑麦草,白三叶缓冲带对污染物的削减效果更佳。

随着径流量增加缓冲带削减率降低。缓冲带中草本的存在增加了对水流的阻力,增强了泥沙的沉降,使缓冲带对泥沙的削减效果显著高于其他类型污染物^[21],但径流量对缓冲带泥沙削减能力影响不大,泥沙颗粒大小是影响泥沙削减率的主要因素,Pan 等^[22]研究认为,直径>50 μm 的泥沙最先被缓冲带拦截,Deletic^[20]研究结果表明,缓冲带对直径<5.8 μm 的泥沙颗粒削减率低到可忽略不计。

缓冲带中氮、磷主要以溶解态和吸附态 2 种形式

随径流、泥沙流失^[19],所以缓冲带对径流拦蓄量、泥沙拦截量一定程度上影响了对氮、磷的拦截去除效果。Deng 等^[23]研究结果表明,缓冲带对径流中溶解态氮浓度影响较小,当径流进入缓冲带可能会溶解土壤中的氮造成径流氮含量增加,所以降低径流流速、促进径流下渗是减少溶解态氮的途径及方式之一。

当流量增加,流速和径流深增大,径流在缓冲带中停留时间缩短,缓冲带对径流拦截力下降,而短时间内植物根系及细小微生物还未能对污染物进行吸收转化,所以随径流流失的总氮、总磷增加,缓冲带对总氮、总磷削减率降低,流量对总氮、总磷削减率影响较大。

4 结论

(1)白三叶和黑麦草缓冲带对泥沙的削减效果均较好,分别为 65%和 57%;对总磷的削减效果较差,分别为 7%和 2%。白三叶对污染物削减效果较强于黑麦草。

(2)草本缓冲带对泥沙的削减能力受流量影响较小,当流量增加至 0.24 L/s 时,泥沙削减率为 34%;当流量为 0.24 L/s 时缓冲带中泥沙浓度范围 0.9~2.2 g/L,相对低、中流量下泥沙浓度范围有所增高,但是缓冲带中泥沙整体浓度在 3 种流量下无明显差异;

(3)草本缓冲带对总氮削减能力受流量影响较大,当流量增加至 0.24 L/s 时,总氮平均削减率低至 9%;在高流量下,缓冲带中总氮浓度变化范围为 11.5~24.7 mg/L;

(4)草本缓冲带对总磷削减能力受流量影响较大,当流量增加至 0.24 L/s 时,总磷平均削减率低至 6%;缓冲带中总磷浓度随时间延长逐渐降低,在高流量时,缓冲带中总磷浓度变化范围为 1.6~2.3 mg/L。

研究表明,随着流量的增加,缓冲带截污能力随流量增加而降低,但流量对缓冲带去除泥沙能力影响较小,对总氮、总磷去除效果影响较大。当流量较大时,流速和径流深增加,径流在缓冲带中停留的时间会相应缩短,植物在短时间内还不能对污染物发挥吸收转化作用,只能通过植物物理拦截来达到污染物去除目的,所以挑选抗冲刷能力较强、能快速降低径流流速、且地面覆盖度较高、能增强入渗的植物种也是增强缓冲带去除污染物的关键。

参考文献:

- [1] 倪九派.三峡库区农村面源污染解析[M].北京:科学出版社,2017:12-15.
- [2] 杨林章,吴永红.农业面源污染防控与水环境保护[J].中国科学院院刊,2018,33(2):168-176.
- [3] 杨彦兰,申丽娟,谢德体,等.基于输出系数模型的三峡库区(重庆段)农业面源污染负荷估算[J].西南大学学报(自然科学版),2015,37(3):112-119.
- [4] 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.
- [5] Liu X M, Zhang X Y, Zhang M H. Major factors influencing the efficacy of vegetated buffers on sediment trapping: A review and analysis[J].Journal of Environmental Quality,2008,37(5):1667-1674.
- [6] 苏天杨,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.
- [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.
- [8] 胡威,王毅力,储昭升.草皮缓冲带对洱海流域面源污染的削减效果[J].环境工程学报,2015,9(9):4138-4144.
- [9] Abu-Zreig. Factors affecting sediment trapping in vegetated filter strips: Simulation study using VFSMOD[J].Hydrological Processes,2001,15:1477-1488.
- [10] 王晨沣,王彬,王玉杰,等.不同土壤前期含水率和坡度下黄壤分离临界水动力特性[J].农业机械学报,2017,48(4):224-232.
- [11] Pan C Z, Ma L, Wainwright J, et al. Overland flow resistances on varying slope gradients and partitioning on grassed slopes under simulated rainfall [J]. Water Resources Research,2016,52:2490-2512.
- [12] 何聪,刘璐嘉,王苏胜.不同结构草皮缓冲带对农田径流氮磷去除效果研究[J].江西农业学报,2014,26(8):92-95.
- [13] 裴培栋,何丙辉,冯梦蝶.农地生态草沟调控氮磷及削减径流污染物效应[J].水土保持学报,2018,32(2):52-57.
- [14] 姜世伟.三峡库区典型小流域面源污染特征研究[D].重庆:重庆师范大学,2017.
- [15] 苗青,施春红,胡小贞,等.不同草皮构建的湖泊缓冲带对污染物的净化效果研究[J].环境污染与防治,2013,35(2):22-27.
- [16] Choi K S, Lee S G, Jang J R. Vegetative Filter Strip (VFS) applications for runoff and pollution management in the saemangeum area of Korea[J].Irrigation and Drainage,2016,65(2):168-174.
- [17] Bhattarai R, Kalita P K, Patel M K. Nutrient transport through a vegetative filter strip with subsurface drainage[J].Journal of Environmental Management,2009,90(5):1868-1876.
- [18] Dosskey M G, Vidon P, Gurwick N P, et al. The role of riparian vegetation in protecting and improving chemical water quality in streams[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 46(2):261-277.
- [19] Bortolozzo F R, Favaretto N, Dieckow J, et al. Water, sediment and nutrient retention in native vegetative filter strips of Southern Brazil[J].International Journal of Plant and Soil Science,2015,4(5):2320-2334.
- [20] Deletic A. Sediment transport in urban runoff over grassed areas[J].Journal of Hydrology,2005, 301:108-122.
- [21] Mankin K R, Ngandu D M, Barden C J, et al. Grass-shrub riparian buffer removal of sediment, phosphorus, and nitrogen from simulated runoff[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(5):1108-1116.
- [22] Pan C Z, Ma L, Wainwright J. Particle selectivity of sediment deposited over grass barriers and the effect of rainfall[J].Water Resources Research, 2016,52(10):7963-7979.
- [23] Deng N, Li H E, Shi D Q. Preliminary experimental study on effectiveness of vegetative filter strip to pollutants in surface runoff[J].Journal of Water Resource & Protection,2011,3(4):222-227.